日本船舶振興会昭和45年度補助事業　　研究資料 No. 123−3

第106研究部会

船舶の高度集中制御方式の研究

報　告　書

（その3 タービンプラント）

昭和46年3月

社団法人

日本造船研究協会

本報告書に記載されている研究成果は、第106研究部会による「船舶の高度集中制御方式の研究の実施に伴い完成された発明等およびノウ・ハウの取扱いに関する取決め」に基づき取扱われることになっておりますので、本報告書の内容の一部または全部の外部発表・転載等については、本会事務局にご連絡の上、本会の事前の承認が必要です。

はしがき

本報告書は日本船舶振興会の昭和４５年度補助事業「船舶の高度集中制御方式の研究」として日本造船研究協会第１０６研究部会タービンプラント分科会においてとりまとめたものである。

第１０６研究部会委員名簿（敬称略、順不同）

部会長	山下	勇	（三井造船）		
副部会長	八島	信男	（三井造船）		
委員	青山	三郎	（大阪商船三井船舶）	芥川	輝孝（日本船舶振興会）
	安積	健次郎	（電子航法研究所）	甘利	昌一（日本舶用機器開発協会）
	井伊	謙三	（川崎汽船）	伊吹	秀雄（大阪商船三井船舶）
	岡田	正三	（大阪商船三井船舶）	木下	共武（佐世保重工業）
	木堂	弘雄	（船舶技術研究所）	黒川	正典（日本郵船）
	佐藤	茂	（日立造船）	真田	良（日本船主協会）
	佐野	桂	（航海訓練所）	関矢	元弥（日本海事協会）
	高田	正夫	（日本船長協会）	高橋	百千（日本船舶機関士協会）
	竹沢	五十衛	（三菱重工業）	田坂	鋭一（運輸省）
	土屋	正雄	（電子機械工業会）	土井	正三（住友重機械工業）
	土井	由之	（昭和海運）	中尾	正光（ジャパンライン）
	名越	孳	（日本航海士会）	長谷川	鍵二（川崎重工業）
	埴田	清勝	（日本鋼管）	林	清（山下新日本汽船）
	丸尾	卓志	（日本船主協会）	元良	誠三（東京大学）
	矢野	鎮雄	（石川島播磨重工業）	山田	泰造（日本造船工業会）
	横田	利雄	（東京商船大学）	吉識	雅夫（日本学術振興会）

第１０６研究部会幹事会委員名簿（敬称略、順不同）

委員	浅野	修一	（日立造船）	荒瀬	晃二（三井造船）
	大川	喜伴	（住友重機工業）	大日方	得二（日本鋼管）
	唐沢	康人	（石川島播磨重工業）	佐々田	喜正（大阪商船三井船舶）
	菅沼	清	（川崎重工業）	高柳	武男（三井造船）
	堀之北	克明	（運輸省）	丸尾	卓志（日本郵船）
	本戸	幸雄	（佐世保重工業）	米原	令敏（三菱重工業）

タービンプラント分科会委員名簿（敬称略、五十音順）

分科会長	米原	令敏	（三菱重工業）		
委員	安藤	静雄	（山下新日本汽船）	石川	欣央（三菱電機）
	市川	博照	（日立製作所）	井上	宗一（石川島播磨重工業）
	上木原	義照	（ジャパンライン）	江嶋	陽一郎（住友重機械工業）
	岡野	幸夫	（三菱重工業）	菊池	嘉嗣（住友重機械工業）
	倉沢	二郎	（昭和海運）	黒須	誠二（船舶技術研究所）
	桑子	勇治	（北辰電機製作所）	小西	龍郎（日立造船）
	小林	淳人	（日本電気）	小林	慎治（富士電気製造）

佐 山 昭 彦（川崎汽船）　白 井 正 人（三井造船）
鈴 木 正（安立電気）　田 中 兵 衛（昭和海運）
田 丸 量 一（日立造船）　力 石 昭 次（東京計器）
土 居 政 吉（東京商船大学）　徳 重 登 彦（日本鋼管）
野 田 重 昭（佐世保重工業）　原 口 聡（三菱電機）
浜 田 績（日本郵船）　葉 山 真 治（東京大学）
樋 口 勝 彦（大阪商船三井船舶）　藤 井 勝（三菱重工業）
藤 尾 博 之（川崎重工業）　吉 川 守（神戸商船大学）
松 岡 久 光（三菱重工業）　村 松 仁（富士通）
森 川 卓（日本船主協会）　山 崎 富 雄（太平洋海運）
山 下 和 三（日本海事協会）

タービンプラント分科会第１小委員会委員名簿（敬称略、五十音順）

主　査　米 原 令 敏（三菱重工業）

委　員　市 川 博 昭（日立製作所）　大 伏 才 延（川崎重工業）
江 嶋 陽一郎（住友重機械工業）　大八木 泰 司（三菱重工業）
岡 野 幸 夫（三菱重工業）　音 成 卓 哉（日本鋼管）
金 井 弥之助（石川島播磨重工業）　黒 須 顕 二（船舶技術研究所）
小 西 龍 郎（日立造船）　小 林 慎 治（富士電機製造）
佐 川 隆 一（川崎重工業）　佐々木 正 美（日立造船）
白 井 正 人（三井造船）　鈴 木 尚 武（東京芝浦電気）
千 葉 正（三菱電機）　土 居 政 吉（東京商船大学）
中 原 祐 介（三菱重工業）　浜 田 績（日本郵船）
林 晃 弘（川崎重工業）　葉 山 真 治（東京大学）
原 口 聡（三菱電機）　藤 尾 博 之（川崎重工業）
吉 川 守（神戸商船大学）　松 延 寿 人（三菱重工業）
山 崎 富 雄（太平洋海運）　山 下 和 三（日本海事協会）
若 林 喬 之（日立造船）　渡 辺 幸 生（運 輸 省）

タービンプラント分科会第２小委員会委員名簿（敬称略、五十音順）

主　査　田 丸 量 一（日立造船）

委　員　新 井 健（東京計器）　大 伏 才 延（川崎重工業）
小 黒 英 男（船舶技術研究所）　音 成 卓 哉（日本鋼管）
金 井 弥之助（石川島播磨重工業）　菊 地 祐 嗣（住友重機械工業）
小 西 龍 郎（日立造船）　白 井 正 人（三井造船）
鈴 木 正（安立電気）　勢 力 良 美（日立造船）
対 馬 健（三菱重工業）　土 居 政 吉（東京商船大学）
中 西 雄（日立造船）　中 野 有 朋（石川島播磨重工業）
中 原 祐 介（三菱重工業）　浜 田 績（日本郵船）
吉 川 守（神戸商船大学）　山 崎 富 雄（太平洋海運）
渡 辺 幸 生（運 輸 省）

目　　次

(3.　タービンプラント)

まえがき …… 1

1.　タービンプラントの制御システムのプログラムシミュレーション …… 4

1.1　緒　　言 …… 4

1.2　研究目的 …… 4

1.3　実施プログラム …… 4

1.4　実施スケジュール …… 4

1.5　シミュレーションの方法 …… 4

1.5.1　シミュレーション構成 …… 4

1.5.2　試験条件 …… 4

1.5.3　実施内容 …… 7

1.5.4　プログラム概略フローチャート …… 8

1.5.5　プログラムコーディング …… 13

1.6　構成機器 …… 16

1.6.1　ディジタルコンピュータ …… 16

1.6.2　アナログコンピュータ …… 18

1.6.3　テストパネル …… 21

1.6.4　シミュレータパネル …… 21

1.6.5　その他の使用機器 …… 27

1.7　プログラム概要 …… 30

1.7.1　プログラム構成 …… 30

1.7.2　プログラム運用 …… 30

1.7.3　ディジタルおよびアナログの入出力 …… 34

1.7.4　検知結果とアラームアウトプット …… 34

1.8　アナログコンピュータによる熱系のシミュレーション …… 38

1.8.1　シミュレーションの数式モデル …… 38

1.8.2　数式モデルに関する検討 …… 39

1.8.3　ブロックダイアグラム …… 41

1.8.4　実船計測結果による数式モデルの検討 …… 48

1.9　シミュレーション結果 …… 55

1.9.1　データ …… 55

1.9.2　問題点とその検討 …… 68

1.10　結　　言 …… 71

2.　タービンプラントのコンピュータによる直接制御の研究 …… 73

2.1　火力プラント等の最上各種プラントおよび舶用プラントにおける直接制御採用の現状調査 …… 73

2.1.1　東電・横須賀火力7、8号機の電算機制御の概要 …… 73

2.1.2　DDCを中心とした火力プラントのコンピュータ制御に関する講演概要 …… 77

2.1.3　火力プラントの電算機制御（特にDDCに関して）に関する講演概要 …… 80

2.1.4 DDCを採用したスエーデン建造船Sea Scarabeiga号の試験結果 …… 83
2.2 タービンプラントで従来使用されていたアナログ制御を直接制御におきかえる場合の適切な適用範囲…… 84
2.2.1 プラントのコントロールシステム …… 84
2.2.2 アナログコントロールループの現状と制御改善の必要性 …… 99
2.2.3 直接制御の適用範囲 …… 99
2.3 計算機制御導入のための新しい制御論の展望 …… 110
2.3.1 概 論 …… 110
2.3.2 非線形性の積極的利用 …… 135
2.3.3 多変数制御系の構成 …… 169
2.3.4 適応制御系の構成 …… 183
2.3.5 学習制御 …… 199
2.4 タービンプラントに直接制御を導入する場合に解決しておくべき技術的問題点と解決のための具体的方策 …… 203
2.4.1 ソフトウェア関係 …… 203
2.4.2 ハードウェア関係 …… 207
2.4.3 船舶の特殊事情 …… 211
3. タービンプラント主要部の動特性の理論的ならびに実験的研究…… 213
3.1 まえがき …… 213
3.2 実船試験 …… 213
3.2.1 試験対象船ならびに対象機関 …… 213
3.2.2 試験実施期日 …… 214
3.2.3 試験項目 …… 214
3.2.4 試験方法 …… 214
3.2.5 試験時計測とその項目 …… 214
3.3 試験結果とその解析 …… 225
3.3.1 試験結果 …… 225
3.3.2 試験結果のフーリエ変換 …… 240
3.3.3 試験結果よりえた周波数伝達関数 …… 241
3.4 動特性の計算 …… 253
3.4.1 計算のための仮定 …… 253
3.4.2 基礎方程式 …… 254
3.4.3 方程式の無次元化と線形化 …… 256
3.4.4 周波数応答の計算 …… 259
3.5 ボイラのブロック線図と単容量計算について …… 263
3.5.1 ブロック線図 …… 263
3.5.2 ボイラ時定数ならびにドラム水位の単容量計算について …… 264
3.6 あとがき …… 265
付録 タービンプラント動特性実船試験結果周波数応答全記録 …… 267
4. センサーの実験的研究 …… 309

4.1 研究の目的 …… 309
4.2 研究経過 …… 309
4.3 正常音パターンの実積 …… 310
4.3.1 計測方法 …… 315
4.3.2 計測結果 …… 319
4.4 タービン内部異音検知の実船実験 …… 343
4.4.1 計測概要 …… 343
4.4.2 計測結果 …… 346
4.4.3 考　察 …… 346
4.5 タービン内部接触のシミュレート実験 …… 385
4.5.1 実験方法 …… 385
4.5.2 実験結果 …… 387
4.6 結　言 …… 391
5. タービン軸受焼損予防手段確立のための実験的研究 …… 393
5.1 研究の目的 …… 393
5.2 研究の概要 …… 393
5.3 実験の方法 …… 394
5.3.1 実験装置 …… 394
5.3.2 計測事項とその方法 …… 396
5.3.3 実験条件 …… 396
5.3.4 試験用軸受について …… 398
5.4 実験結果と考察 …… 403
5.4.1 応急手段の設定 …… 403
5.4.2 軸受メタル温度とその上昇率 …… 403
5.4.3 軸変位 …… 406
5.4.4 軸受台の振動加速度 …… 406
5.5 制御装置の作成 …… 421
5.6 制御装置の作動確認 …… 429
5.7 ま と め …… 429

ま　え　が　き

1. 研究内容の概要

昭和４４年度には、

(1) タービンプラントの仕様を想定し、そのプラントに電算機制御を採り入れた場合の具体的な制御システムのフローチャートの作成

(2) そのような電算機制御システムに必要な異常の予知に有効なセンサーの実験的研究

などを採り上げて研究が行なわれた。

昭和４５年度は、これに引き続いて

(1) 昭和４４年度に作成したフローチャートを基にした電算機制御プログラムのシミュレーションによる確認

(2) 昭和４４年度で検討したタービン内部の正常音の実船運転時の計測の継続

(3) 昭和４４年度で行なつたタービン軸受の焼損現象の解明と有効な予防処置についての実験的確認

を行なうことになり、この他に新たに

(4) タービンプラントにコンピュータによる直接制御を導入することについての研究

(5) タービンプラントの動特性の実船実験

を行なうこととした。

これらを効果的に行なうためにタービン・プラント分科会に第１小委員会、第２小委員会の２委員会を設け、それぞれつぎの研究項目を実施することとした。

第１小委員会

(1) タービンプラント制御システムのプログラムのシミュレーションの研究

(2) タービンプラントのコンピュータによる直接制御（ＤＤＣ）の研究

(3) タービンプラント主要部の動特性の理論的および実験的研究

第２小委員会

センサーの実験的研究

(1) 正常音パターンの集積

(2) タービン内部異常検知の実船実験

(3) タービン軸受焼損予防手段確立のための実験的研究

2. 研究成果の概要

第１小委員会

(1) タービンプラント制御システムのプログラムのシミュレーションの研究

昭和４４年度に作成したゼネラルフローチャートおよびディテイルド・フローチャートを基にコンピュータ制御プログラムをつぎの５種類のサブ・システムについて作成し、三菱電機中央研究所のハイブリッド・コンピュータ・システムを借用してシミュレーションを行ない、４４年度作成のフローチャートの問題点が明らかになつた。対象としたサブ・システムの種類はつぎのとおり。

主タービン異常振動検知サブプログラム

〃　　熱変形検知　　〃

〃　　車室ロータ間熱伸び差検知　〃

〃　　熱応力検知　　〃

主機減速サブプログラム

本研究は三菱重工・三菱電機が担当した。

(2) タービンプラントのコンピュータによる直接制御の研究

つぎの各種について調査研究を行なつた。

i) 火力プラントの直接制御適用の現状調査

ii) 直接制御を採用したスエーデンのタービンタンカーSea Sovereign号の実験結果の調査

iii) タービンプラントで従来使用されているアナログ制御を直接制御におきかえる場合の適切な適用範囲についての調査

iv) タービンプラントへ調節制御としての直接制御を導入する際に必要となる制御理論とそれの活用のための基礎調査

v) タービンプラントに直接制御を導入する場合に解決しておくべき技術的問題点と、その解決のための具体的方策

iii)、iv)、v)の調査は川崎重工が担当した。

(3) タービンプラント主要部の動特性の理論的および実験的研究

三菱重工建造の226,000トン型タービンタンカー高瀬丸の海上運転において、幅1.5分の矩形パルスを入力として用い、開ループ状態で、

主タービン操縦弁開度変化試験

燃焼量変化試験

給水量変化試験

デスーパヒータ制御弁開度変化試験

を行ない、タービンプラントの主要部の動特性を明らかにすることができた。

本研究の計測は三菱重工が、理論的解析は三菱重工および日立造船が担当した。

第2小委員会

(1) 主タービン内部の正常音の計測と解析

7隻のタービン船の海上運転時に主タービン内部の正常音の計測を行ない、種々の運転状態においてタービン内部の音響パターンはほぼ一定であることが確認された。

本研究の実測は三菱、石播、日本鋼管、日立造船がそれぞれ担当した。

(2) 主タービン内部の航海状態における音響計測

三菱長崎造船所建造のタンカー十和田丸のペルシャ→日本1往復の航海に乗船し、各種航海状態における正常音の変化する状況を計測、解析し、実際の航海状態における正常音の変化状態を把握した。本研究の実測は三菱重工が担当した。なお、この計測では異常が発生しなかつたので異常音パターンの把握はできなかつたが、日立造船の研究室内で回転する円板の周辺および側面に接触を与えた場合に発生する異常音を計測、分析し、実際のタービンロータに接触を生じた場合、その量がある値以上であれば正常音パターンと区別しうる異常音パターンの計測が可能であるとの見当がつけられた。

(3) タービン軸受焼損予防の実験的研究

44年度の研究に引き続き軸受焼損実験装置によつて各種テストを行ない、

メタル温度の絶対値

メタル温度上昇率

軸心の沈み量

のいずれかを検出し、応急処置を自動的に行なわせれば軸受の焼損に至らずに予防できることが確認された。

本研究は日立造船が担当した。

3. 研究経過

本年度は下表のとおりの委員会および小委員会が開催され作業が進められた。

開催日	会議名
45年 4月10日	第10回タービンプラント分科会
〃 4月27日	タービンプラント分科会第1小委員会（第1回）
〃 4月28日	〃 第2小委員会（第1回）
〃 5月26日	〃 第2小委員会（第2回）
〃 5月26日	〃 第1小委員会（第2回）
〃 7月 2日	〃 第1小委員会（第3回）
〃 8月11、12日	〃 第1小委員会（第4回）
〃 9月21日	第11回タービンプラント分科会
〃 9月29日	タービンプラント分科会第2小委員会（第3回）
〃 10月 8日	〃 第1小委員会（第5回）
〃 11月30日	〃 第1小委員会（第6回）
46年 2月 4日	〃 第2小委員会（第4回）
〃 2月 5日	〃 第1小委員会（第7回）
〃 2月24日	〃 第2小委員会（第5回）
〃 2月25日	〃 第1小委員会（第8回）
〃 3月16日	〃 第2小委員会（第6回）
〃 3月17日	第12回タービンプラント分科会

1. タービンプラント制御システムのプログラムシミュレーション

1.1 緒　言

タービンプラントの制御システムに関するディティルドフロチャートは昨年度の実作業の一つとして作成されたが、本年度はその内の一部をとりあげ、プログラムを作成し、実際にディジタルコンピュータを使用してシステムのシミュレーションを実施した。

1.2 研究目的

主機異常振動検知原因探究および予防プログラムをテーマとし、さらにその内から主要な5項目を選んでプログラミングを行ない、アナログコンピュータとディジタルコンピュータとを結合したハイブリッドコンピュータシステムを使用してシミュレーションを実施する。

プラントの数式モデルはアナログコンピュータで模擬し、実船計測の裏付けによる定数設定を行ない適切なプラントデータを得るよう努めた。

ただし、本作業ではプラントモデルの高精度の再現よりもディティルドフローチャートにもとづくプログラムの妥当性確認に主目的をおき、現フローチャートの問題点を挙げることに重きをおいた。

1.3 実施プログラム

本プログラムはつぎのサブプログラムをアプリケーションプログラムとしてもつている。

1) 主タービン異常振動検知サブプログラム
2) 〃　熱変形検知サブプログラム
3) 〃　車室ロータ間熱伸び差検知サブプログラム
4) 〃　熱応力検知サブプログラム
5) 主機減速制御サブプログラム

1)～4)プログラムで異常検知判定を行ない処置として5) のプログラムを実行させる。

1.4 実施スケジュール

第1.1表に示すスケジュールで作業をすゝめた。

1.5 シミュレーションの方法

1.5.1 シミュレーション構成

制御用ディジタルコンピュータとアナログコンピュータおよびその他シミュレーション関連機器は第1.1図に示す構成になつている。

1.5.2 試験条件

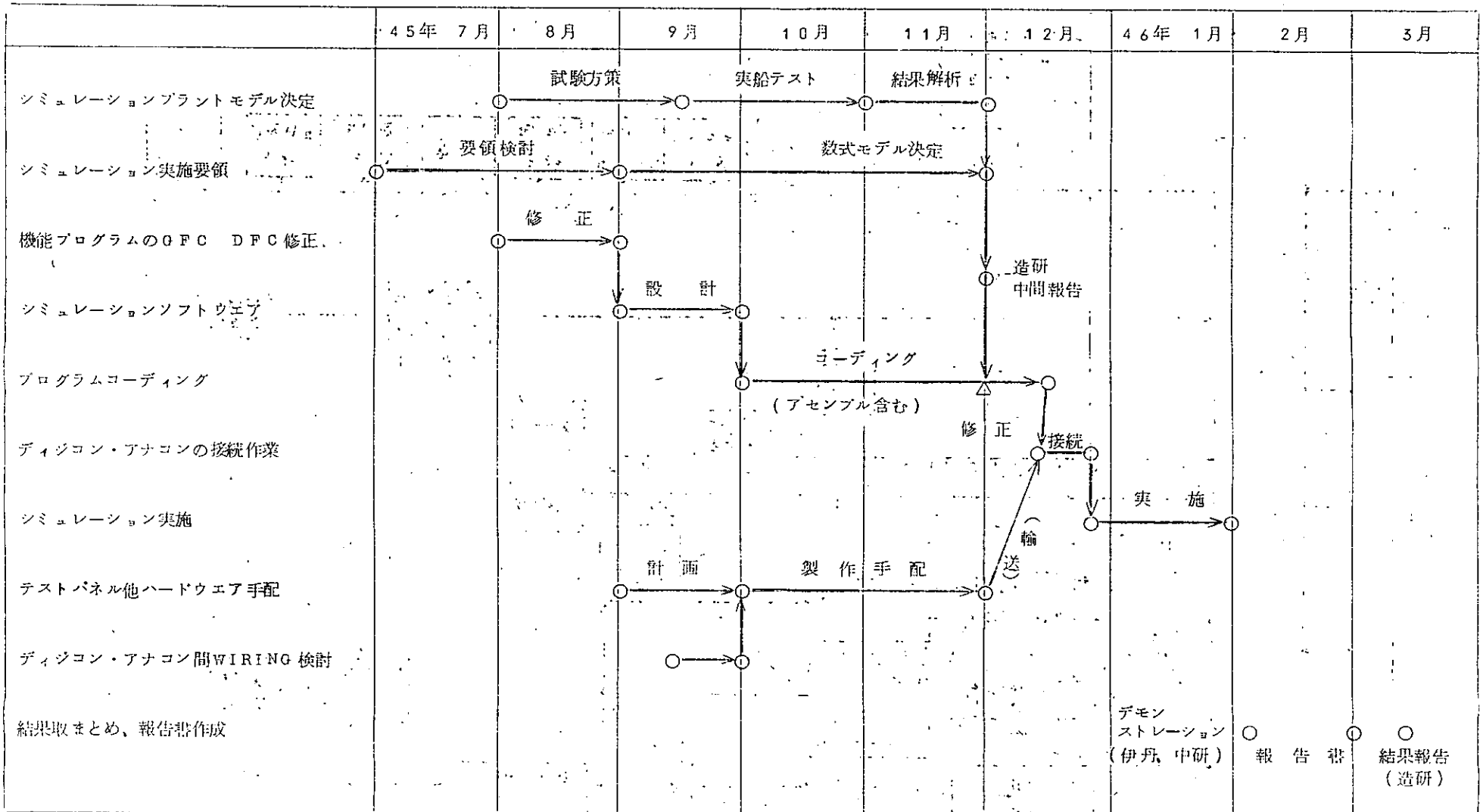
検知—判定—処置の機能のチエックを行なうためできるだけ閉ループでシミュレーションを実施するが、つぎの理由により一部のプログラムのプラントデータは開ループで設定する。

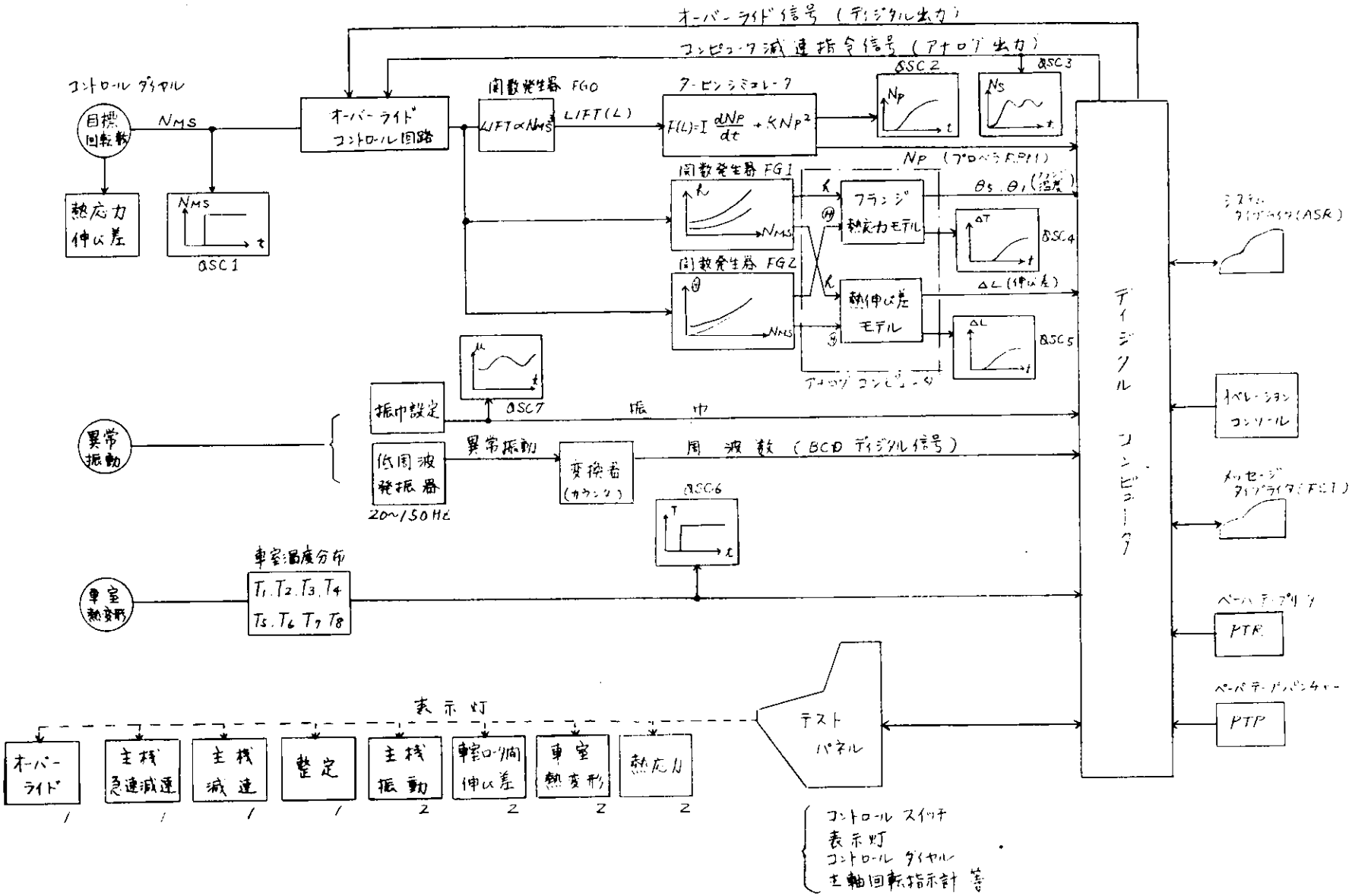
すなわち、手動でデータセットを行なう。

1) 異常振動はターニング不足、接触、熱的不安定ベアリングの不安定などにより起り、モデル化することが難しい。
2) 車室熱変形はドレンのたまり、暖機不足、設計上の問題などにより起り、モデル化することが困難である。

なお、熱応力、熱伸び差などのプログラムは数式モデルを高圧タービンについてのみ設定した。したがつて低圧タービンについてのシミュレーションは行なわなかつた。

第1.1表　シミュレーション実施スケジュール





第 1.1 図　シミュレーション構成

また、プロペラ回転数のコントロールも前進側のみについて行ない、後進側は省略した。

1.5.3 実施内容

実施内容詳細は昨年度作成のフローチャートを参照願いたいが、以下にその概略内容と実際にシミュレーションを行なつた方法につき述べる。

(1) 異常振動検知

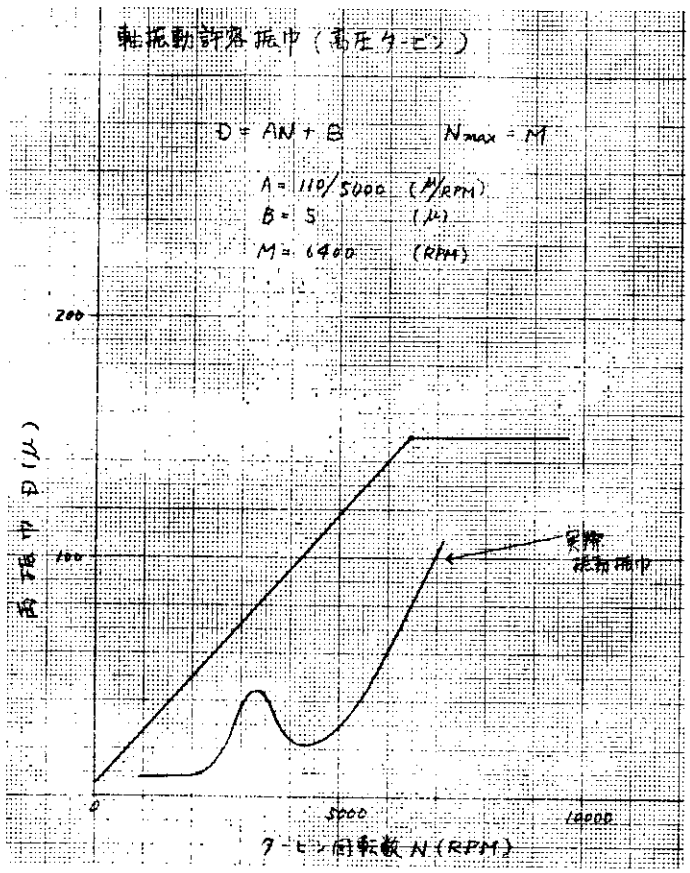
当初、録音テープに録音されているタービンの振動音を再生し、その振幅および周波数をチエックするように計画していたが、録音器を使用した場合、任意の異常状態の再現が難かしいこと、および連続的にパラメータを変化させることが不可能であることなどにより実際の振動音の波形がＳＩＮ曲線に近いということも考え合せて、周波数データは通常の低周波数発振器を用い、かつ変換器として汎用周波数カウンタを使用し、デイジタルコンピュータにＢＣＤ（２進化、１０進数）のデータをインプットするようにした。

振幅値は周波数データと切離して別に設けたポテンショメータによりアナログ信号（ＤＣ電圧）をインプットした。

プログラムは振動振幅値が許容値を越えていないかをチエックし、もし越えた場合はその程度を調べると同時に振動周波解析ルーチンで周波数とタービンロータ回転数およびプロペラ回転数と比較して、その判定結果をメッセージプリント、データプリントによりアウトプットする。

また、テストパネル上の異常検知表示灯を点灯する。

振動振幅許容値はタービン回転数により異り、運転中の許容値はそのつど第1.2図に示す関係でコンピュータ内部で算出する。



第 1.2 図

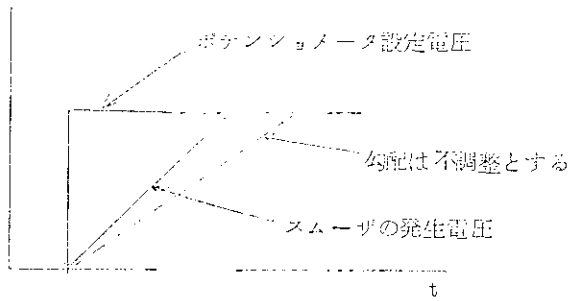
(2) 車室熱変形検知

主タービンの高圧、低圧タービン車室の上下、左右温度差を計算し温度差の絶対値または単位時間あたりの温度差のいずれかが、許容値以上になつたとき異常とみなし主タービン減速、整定のいずれかの指令信号をデイジコムよりアウトプットする。

絶対温度差（車室上下、左右）が３０℃以上、６０℃以下のとき、前進中ならば整定、整定中ならば減速の指令を出す。

また、６０℃以上なら減速を行なう。

車室の温度分布はポテンショメータを用いて電圧の形でデイジコムへアナログインプット（Ａ／Ｉ）する。



実際には各点の温度分布は相関関係をもつているはずであるが、８個のポテンショを同時に調整することが困難なので１点ずつ手動で変化させることとする。ただし、時間的変化も監視するので許容電圧

発生器（仮称Smoother）を1セット準備し、各点へ切換えて使用する。

(3) 車室、熱応力検知、車室ロータ間熱伸び差検知

主タービン回転数制御の目標回転数（N_{MS}）はコントロールダイヤルに接続されている電圧発生器（ポテンショメータ）により設定される。

コントロールダイヤルを操作するとN_{MS}に追従してリモートコントロール装置がタービンへインプットする蒸気量（操縦弁リフト）（L）を制御することとなり、タービンシミュレータより得られるプロペラ回転数（N_P）は徐々に上昇し設定されたN_{MS}に近付いてゆく。

一方、N_{MS}の設定により主蒸気温度（θ）および熱伝達係数（h）の値がファンクションゼネレータよりアナコムへインプットされ、アナコムでシミュレートしている熱応力および熱伸び差の数式モデルからフランジの温度分布計測予定点の温度（θ_1, θ_5）および伸び差（$\triangle$L）がデイジコムへ伝達される。

θ_1, θ_5, $\triangle$L, N_Pのアナログ入力に対してデイジコムは異常検知プログラムにより異常判断し、結果をD/O（オーバライド信号）およびA/O（減速指令信号）の形でアウトプットする。（回転数減速コントロールについては後述する。）

目標回転数N_{MS}はただちに制御指令信号として用いるので、いわゆるタイムスケジュールをもたせた主タービンのプログラムコントロールは今回は行なわない。したがつて、熱応力、熱伸び差の異常はコントロールダイヤルの操作速度（目標回転数の設定などの値まで一挙にもつてくるか）により検知されたりされなかつたりすることになる。

(4) 主タービン減速制御

正常状態では主タービンは遠隔制御のためのコントロールダイヤルからの指令信号により回転数制御される。

オーバーライドスイッチがONのとき、上述の各異常検知がなされると異常状態に応じて、整定、減速、急速減速の各指令をデイジコムがアウトプットする。デイジコムは回転数制御信号をコンピュータ出力に切換える接点信号（D/O）と制御信号（A/O）の両方をアウトプットする。

急速減速の場合はコントロールフラグセット時のプロペラ回転数の70%を指示し、回転数が30%低下してもフラグセットがそのままであれば、さらにその70%に低下させる。

減速の場合はプロペラ回転数の95%を指示し、各プログラムからコントロールがすべて消滅するまで、コンピュータにより回転数制御を行なう。

コンピュータ側御からダイヤルコントロールの切換えはリセットボタンを押し、ダイヤルをコンピュータ出力回転数へ一致させることにより行なう。

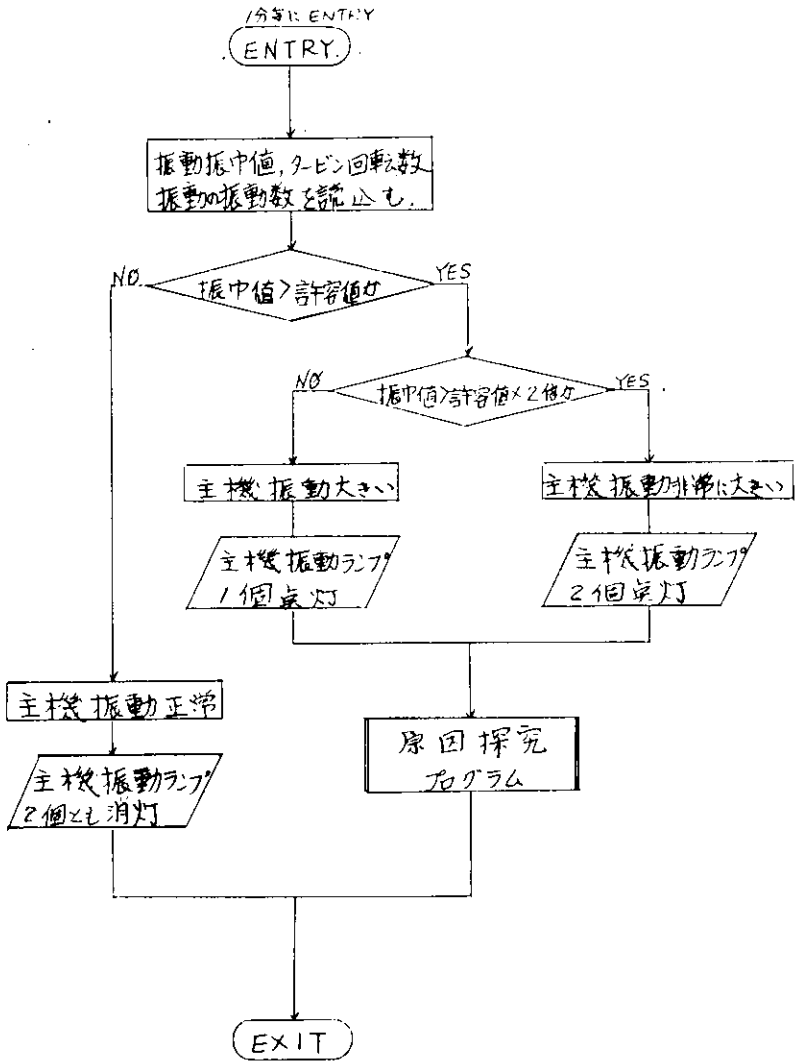
1.5.4 プログラム概略フローチャート

昨年度作成のゼネラルフローチャートおよびデイテイルドフローチャートはここでは記述を省略するが、以下にそれらを要約した概略フローチャートを添付する。

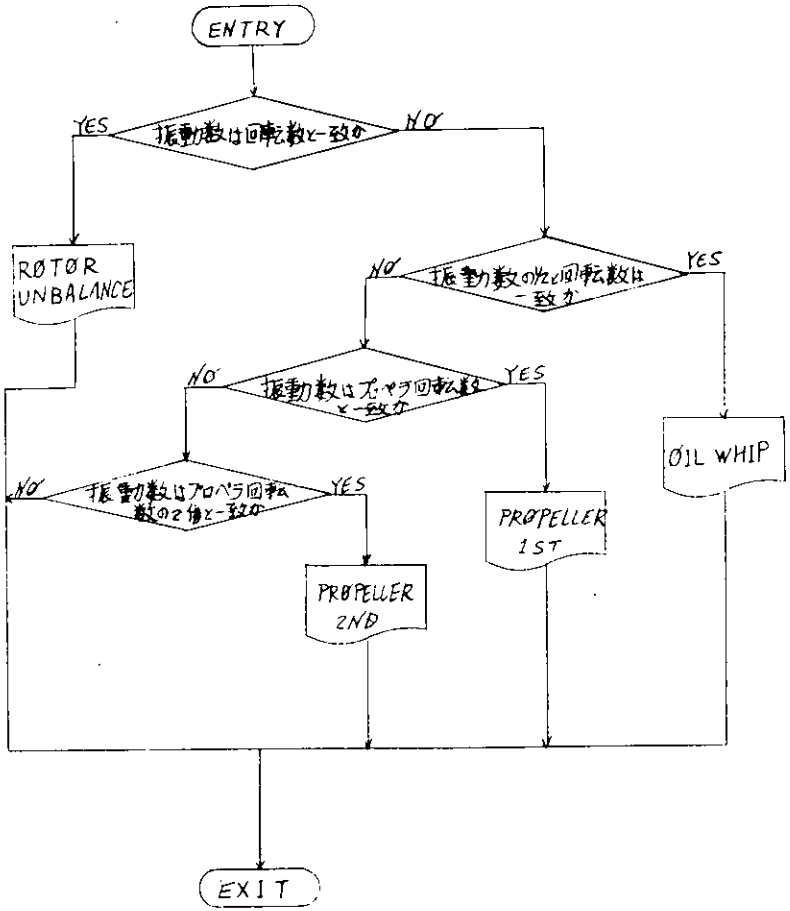
第1.2表　異常検知と主タービン減速指令

異常検知		表示ランプ・プリント	主タービン回転数制御			備考
			整定	減速	急速減速	
車室熱応力		フランジ各部温度差△T−$\theta_5-\theta_1$が許容値以上 単位時間当りの変化率が大きい場合	△Tが許容値以上または温度差変化率が一定以上で増速中のとき	△Tが許容値以上または温度差変化率が一定値以上で回転数が整定中のとき	なし	手動スイッチによりプログラムスタート プログラム周期は1 min
車室ロータ間熱伸び差		車室ロータ間のギャップが一定値以内になつたとき ギャップ縮少方向の傾向が大きいとき	伸び差絶対値が1 mm以下0.5 mm以上または1分間当りの伸び差の変化が0.3 mm以上0.6 mm以下で増速中のとき	同左の条件で回転数が整定中のとき 伸び差絶対値が0.5 mm以下変化0.6 mm／min以上のとき	なし	手動スイッチによりプログラムスタート プログラム周期は1 min
異常振動	振巾	許容値以上のとき		許容値以上2倍以下	許容値の2倍以上	プログラムのスキャン周期は5 sec 録音器セット手動スイッチによりプログラムスタート
	周波数	異常検知のとき	（振動解析結果はメッセージプリントする）			
車室熱変形		各車室の上下、左右温度差が許容値以上のとき 温度変化率が大きいとき	絶対温度差が30℃以上60℃以下で増速中のとき 温度差変化率が5℃以上10℃以下のとき	絶対温度差が30℃以上60℃以下で回転数が整定中のとき 絶対温度差が60℃以上のとき 温度差変化が10℃以上のとき	なし	手動スイッチによりプログラムスタート プログラム周期は1 min
備考		タイプライタにメッセージを出力し、テストパネル上の表示ランプを点灯する。	現状の回転数をそのまま維持する	そのときのプロペラ回転数の95％を指示する	そのときのプロペラ回転数の70％を指示し、回転が30％低下してもまた異常状態が復帰しなければさらにその70％を指示する	
			オーバライド・スイッチONによりプログラムスタート周期は5 sec、常時はコンピュータ内の回転数設定値はコントロールダイヤル設定値に同じ			

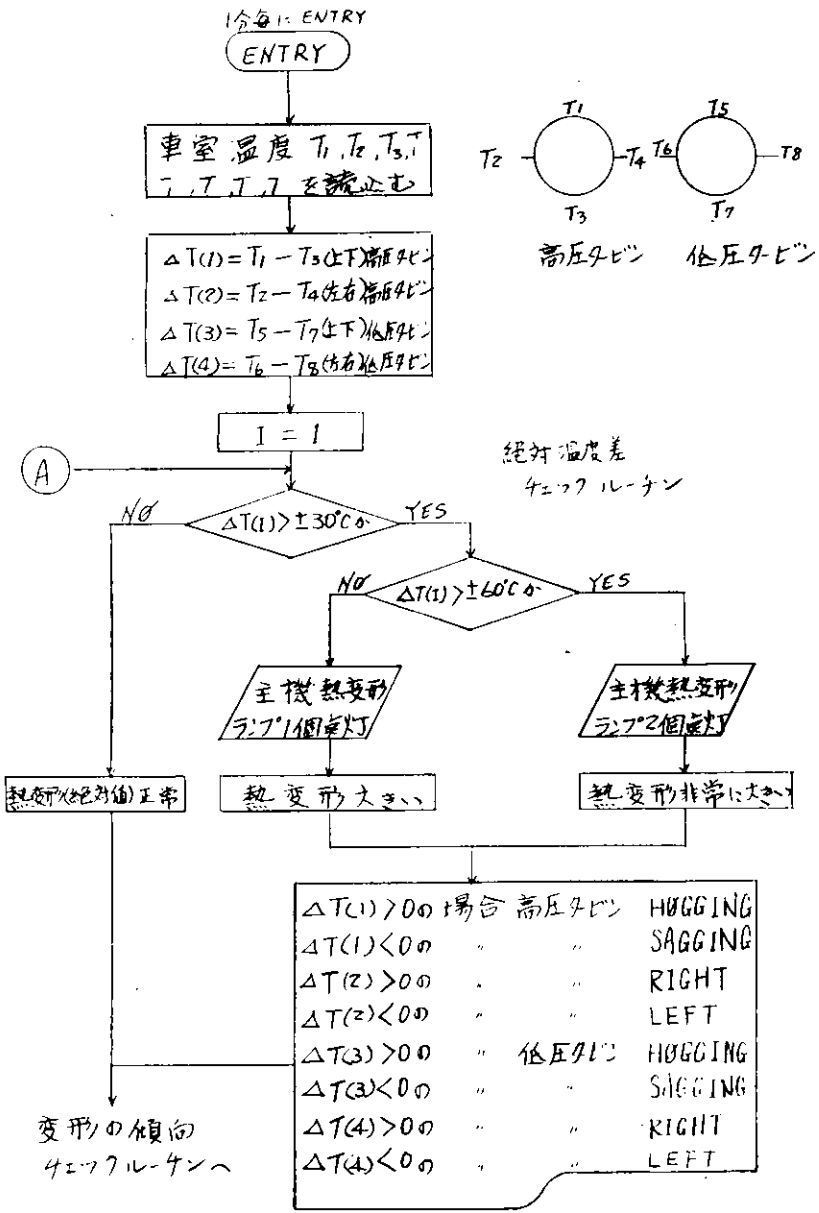
(1) 主機異常振動検知、原因探究および予防プログラム



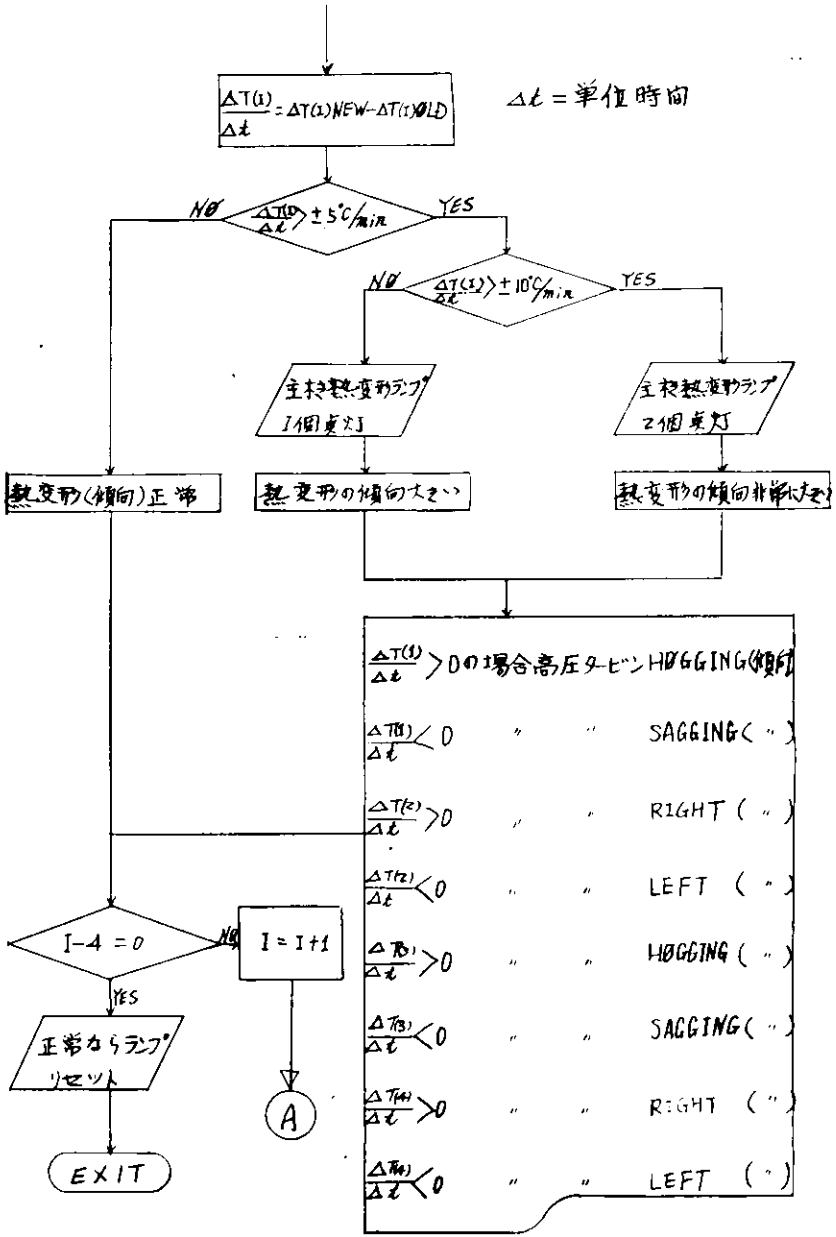
原因探究プログラム



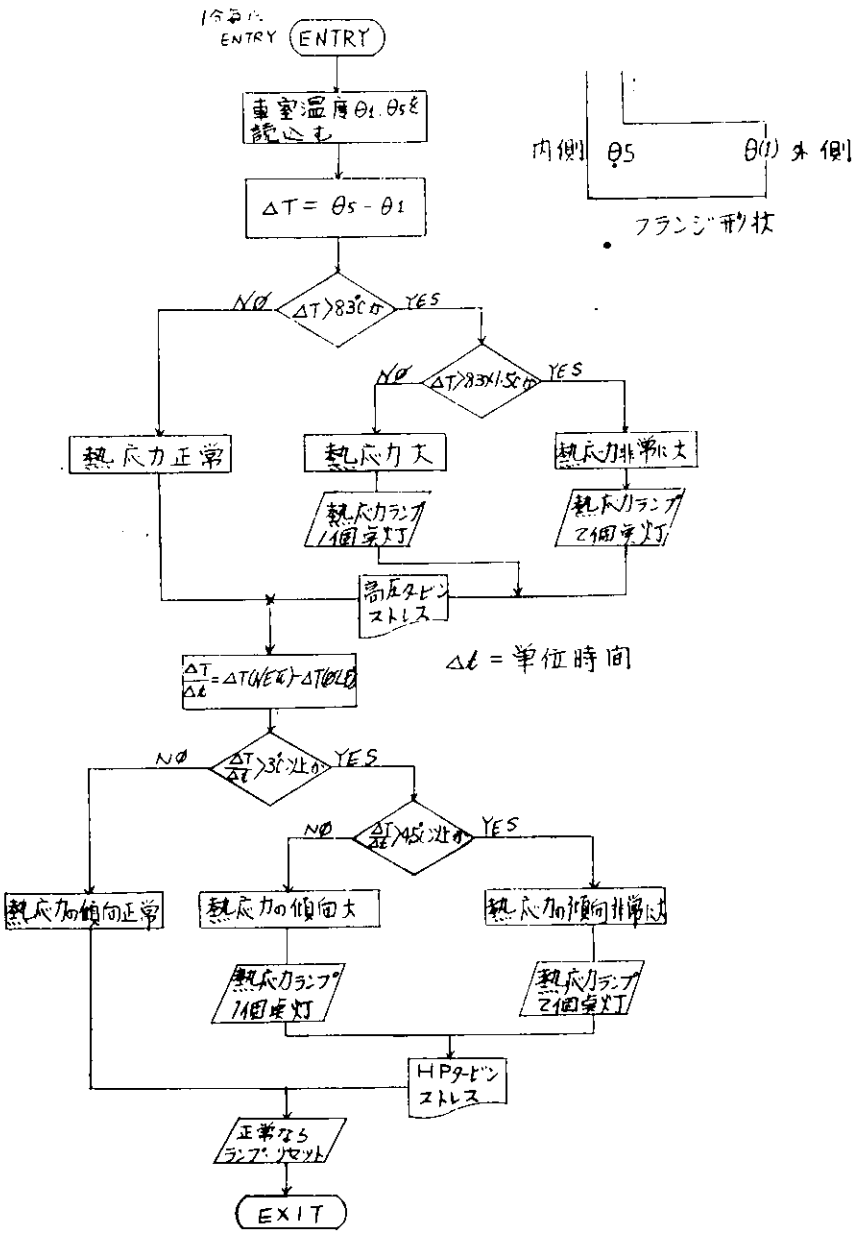
(2) 主タービン熱変形検知プログラム



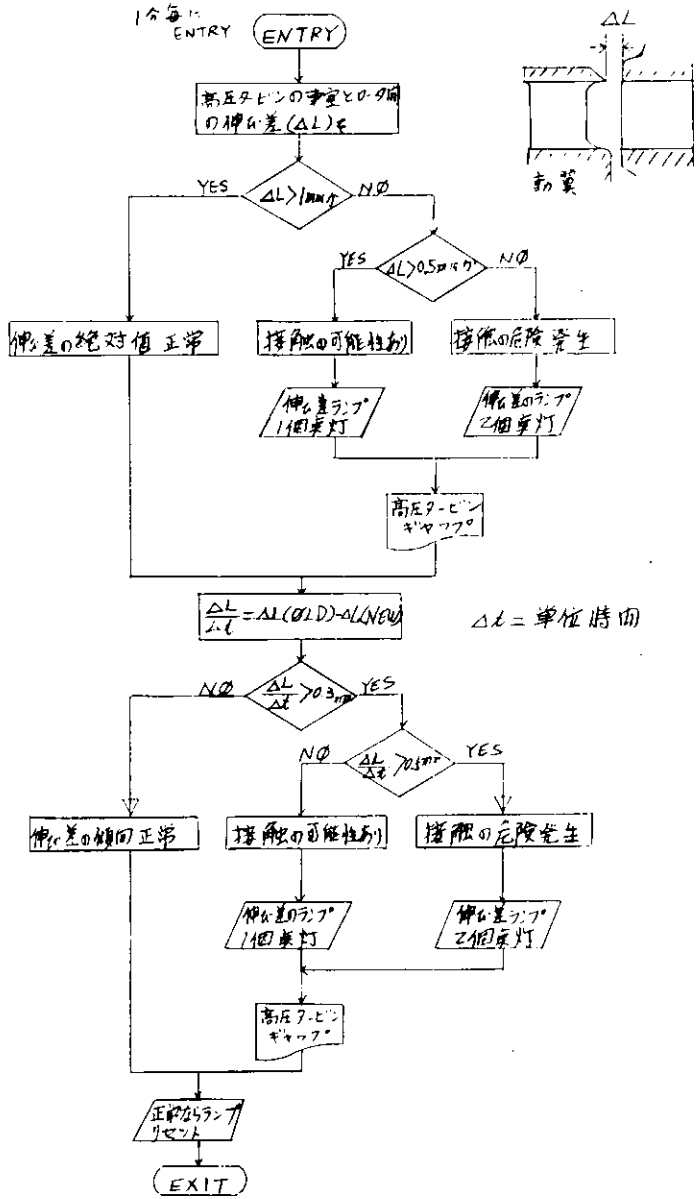
変形の傾向チェックルーチン



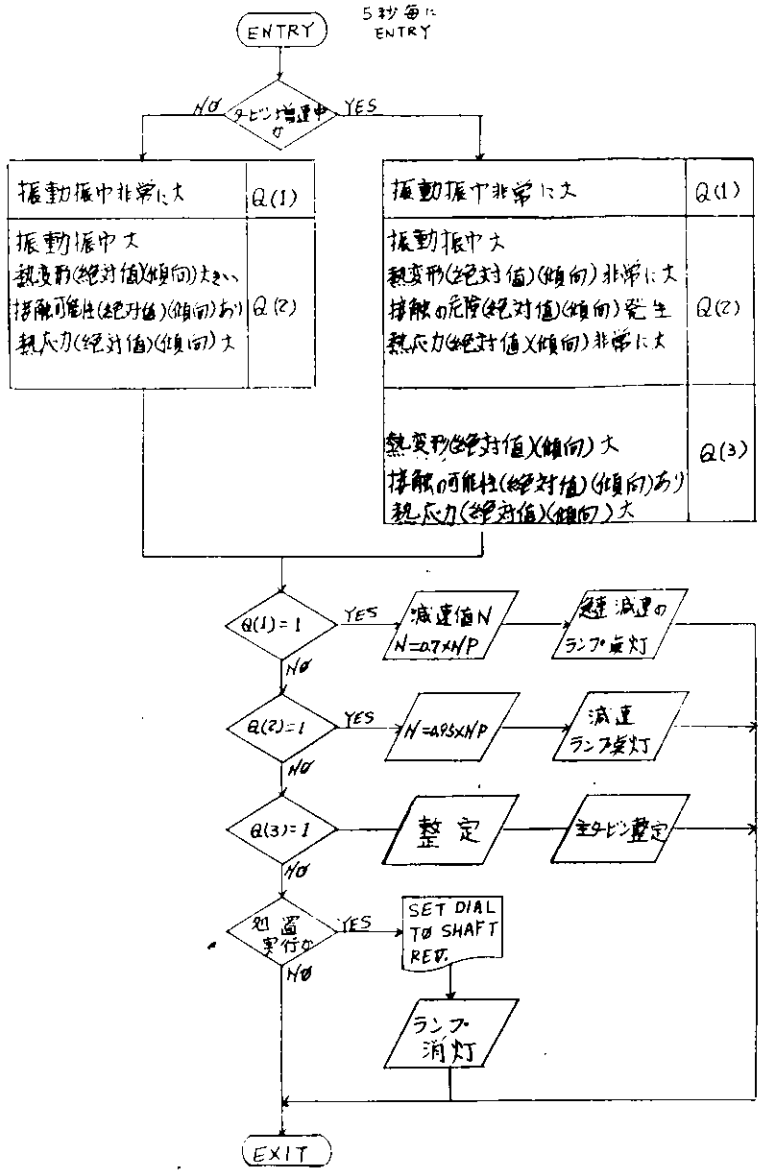
(3) 主タービン熱応力検知プログラム



(4) 主タービン車室ロータ間熱伸び差



(5) 主タービン減速制御プログラム



1.5.5 プログラムコーディング

フローチャートに基きプログラムをコーディングした結果はつぎにその一部をサンプルとして示す。

MELCOM350—5 命令語は第1.3表に示すとおりである。プログラム構成などについては1.7節に記述する。

```
                    SR106T TURBINE SIMULATION  PR1          PAGE  001

PB100000                        TTL    SR106T TURBINE SIMULATION  PR1
PB101000                *       SUBPROGRAM NO1
PB101050                *         THERMAL STRESS DETECTION
PB101100                *
PB101150                *
PB101200                *
PB102000                *       THERMAL STRESS DETECT SUBPROGAM
PB102100          3000          BEG    /3000
```

```
PB102150                        *       PR1  SUBROUTINE
PB102200  3000      302F  DAAR1A AC      DAAR11      DATA ARRANGEMENT 1
PB102250  3001      304E  TMPDCA AC      TMPDC1      TEMP DIFF CALCULATION
PB102300  3002      3057  ACCHKA AC      ACCHK1      ACCELERATION CHECK
PB102350  3003      3113  FLST1A AC      FLST11      FLAG SET 1
PB102400  3004      3138  FLST2A AC      FLST21      FLAG SET 2
PB102450  3005      317A  PLC1A  AC      PLC1        PRINT   LAMPS OUTPUT
PB102500  3006      3100  TDTCLA AC      TDTCL1      TEMP DIFF CHECK
PB102550  3007      315B  DAAR2A AC      DAAR21      DATA ARRANGEMENT 2

PB102600                        *
PB102750  3008      3B00  OCR1   AC      OCRA        OUTPUT CHECK ENTRY A
PB102800  3009      3B1D  OCR2A  AC      OCRB        OUTPUT CHECK ENTRY B
PB102850  300A      020A  DELAYD DC      DELAY1      TIME DELAY 1

PB102900                        *
PB103000            0011  COUNT1 EQU     /11         INDEX COUNTER
PB103050            0012  COUNT2 EQU     /12           DO
PB103100            0013  COUNT3 EQU     /13           DO
PB103150            020A  DELAY1 EQU     /20A        TIME DELAY
```



```
PB103200                        *
PB103250  300B        0006  OCNST1 DC      3.0B1
PB103300  300C  52 0 00             NOP
PB103350  300D        0001  OCRCK  DC      1

PB103400                        *
PB103450  300E        0001  DFLGLO DS      1
PB103500  300F        0001  DFLGL  DS      1

PB103550                        *
PB103600  3010        0208  D@UIT2 DC      @UIT2D
PB103650              0208  @UIT2D EQU     /208

PB103700                        *
PB103750                            EJE
```



```
PB104000                        *       MAIN ROUTINE
PB104050  3011  78 3 00                 BAL     (DAAR1A)    DATA ARRANGEMENT(1)
PB104100  3012  78 3 01                 BAL     (TMPDCA)    TEMP DIFFERENCE
PB104150  3013  78 3 02                 BAL     (ACCHKA)    ACCELERATION CHECK
PB104200  3014  78 3 06       ENTD0     BAL     (TDTCLA)    TEMP DIFF CHECK
PB104250  3015  70 0 F6                 L       XTMP1
PB104300  3016  24 0 F7                 S       XTMP2       TEMP DIFF FROM K(1)
PB104350  3017  5C 1 18                 BP      DFLST1
PB104400  3018  50 1 19                 BR      ENTD1
PB104450  3019  78 3 03       DFLST1    BAL     (FLST1A)    FLAG SET(1)
PB104500  301A  70 0 F8       ENTD1     L       XTMP3
PB104550  301B  24 1 0B                 S       DCNST1      TEMP DIFF RATIO CHECK
PB104600  301C  5C 1 1D                 BP      DFLST2
PB104650  301D  50 1 1E                 BR      ENTD2
PB104700  301E  78 3 04       DFLST2    BAL     (FLST2A)    FLAG SET(2)
PB104750  301F  52 0 00       ENTD2     NOP
PB104800                0000  CASE1     EQU     0
PB104850                0003            DLE     1-CASE1*3
PB105000  3020  70 0 CC       OCRIN     L       OCRBSY      OCR ROUTINE BUSY CHECK
PB105050  3021  5C 1 22                 BP      *+2
PB105100  3022  50 1 25                 BR      ENTOR1
PB105150  3023  78 3 0A                 BAL     (DELAYD)    TIME DELAY
PB105200  3024        0001              DC      1
PB105250  3025  50 1 1F                 BR      OCRIN
PB105300  3026  78 3 08       ENTOR1    BAL     (OCR1)      OUTPUT CHECK ENTRY A
PB105350  3027        300F              AC      DFLGL
PB105400  3028        300E              AC      DFLGLO
PB105450  3029        00D7              DC      EIGHT
PB105500  302A        00F2              DC      FX2
PB105550  302B  78 3 05                 BAL     (PLC1A)     PRINT   LAMPS OUTPUT
PB105600  302C  78 3 09                 BAL     (OCR2A)     OUTPUT CHECK ENTRY B
PB105650  302D  78 3 07                 BAL     (DAAR2A)    DATA ARRANGEMENT 2
PB105700  302E  78 3 10                 BAL     (D@UIT2)

PB105750                        *
PB105800                            EJE
```

第1.3表　MELCOM 350−5 命令表

シンボリック コード	マシン コード	内容	ステータスレジスタ (2)								時間(1)
			IL	CE	PE	EV	ZR	PV	OF	CR	(サイクル)
L	70	LOAD A-REGISTER	△	△	△	※	※	※	△	×	4
LR	74	LOAD IMMEDIATE	△	△	△	※	※	※	△	×	4
ST	7C	STORE A-REGISTER	△	△	△	※	※	※	△	×	4
LS	18	LOAD STATUS	※	※	※	※	※	※	※	※	3
STS	1C	STORE STATUS	△	△	△	△	△	△	△	△	3
A	20	ADD	△	△	△	※	※	※	※	※	4
S	24	SUBTRACT	△	△	△	※	※	※	※	※	4
N	28	LOGICAL AND	△	△	△	※	※	※	△	○	4
EO	2C	EXCLUSIVE OR	△	△	△	※	※	※	△	×	4
DCR	08	DECREMENT WITHOUT ECHO	△	△	△	※	※	※	※	※	3
DCE	0C	DECREMENT WITH ECHO	△	△	△	△	△	△	△	△	3
RB	10	RESET MOST SIGNIFICANT BIT	△	△	△	※	※	※	△	×	3
SB	14	SET MOST SIGNIFICANT BIT	△	△	△	※	×	×	△	×	3
SLL	30, 34	SHIFT LEFT LOGICAL	△	△	△	※	※	※	※	※	4
SRA	38, 3C	SHIFT RIGHT ARITHMETIC	△	△	△	※	※	※	△	※	4
BR	50	BRANCH	△	△	△	△	△	△	△	△	3
BC	54	BRANCH ON END ARROUND CARRY	△	△	△	△	△	△	△	△	3, 2 (3)
BO	58	BRANCH ON OVERFLOW	△	△	△	△	△	△	△	△	3, 2
BP	5C	BRANCH ON POSITIVE	△	△	△	△	△	△	△	△	3, 2
BZ	40	BRANCH ON ZERO	△	△	△	△	△	△	△	△	3, 2
BEV	44	BRANCH ON EVEN	△	△	△	△	△	△	△	△	3, 2
BSL	48	BRANCH AND SET LOCK-OUT	○	△	△	△	△	△	△	△	3
BRL	4C	BRANCH AND RESET LOCK-OUT	×	△	△	△	△	△	△	△	3
BAL	78	BRANCH AND LINK	△	△	△	△	△	△	△	△	5
RDD	60, 64	READ DIRECT	△	△	△	※	※	※	※	※	6
WRD	68, 6C	WRITE DIRECT	△	△	△	※	※	※	※	※	6
EWT	04	ENTER WAIT	△	△	△	△	△	△	△	△	5
NOP	5200	NO OPERATION	△	△	△	△	△	△	△	△	4

(注)(1)　1サイクルは2.5 μs，命令が間接モードの場合には上記の実行時間に1サイクル追加される。

(2)　ステータスレジスタのセット，クリヤー条件

○ …… セット

× …… クリヤー

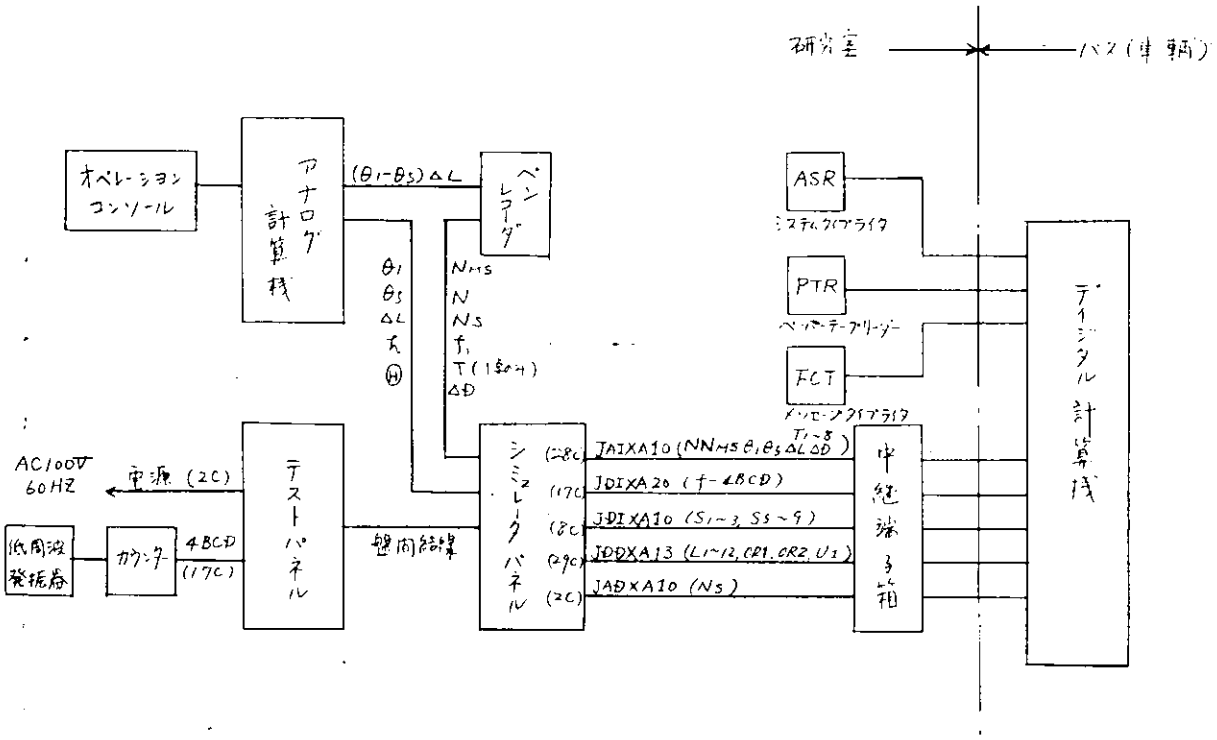
△ …… 不変

演算結果によりステータスに2つの結果を生じる場合（条件が満足されたらセットされ，満足されなければクリヤーされる場合など）には○×，○△等の表記法がとられている。

(3)　BRANCH 関係の命令は，BRANCH を生ずる場合は3サイクルで，BRANCH を生じない場合は2サイクルである。

1.6　構成機器

シミュレーションのシステム構成は第1.1図に示したが、その機器間系統図および機器配置図は第1.3図、第1.4図に示すとおりである。



第1.3図　機器間系統図

デイジタルコンピュータは屋外駐車場におかれたバスの内部に装備されており、その他のアナログコンピュータを始めとする各機器はすべて計算機室内部に設置した。

バスと計算機室の間は延べ約30mの常設ケーブルで接続されている。

以下に各構成機器について述べる。

1.6.1　デイジタルコンピュータ

(1)　コンピュータ形式

三菱制御用コンピュータ

MELCOM 350—5

(2)　CPU基本仕様

(a)　メモリの種類

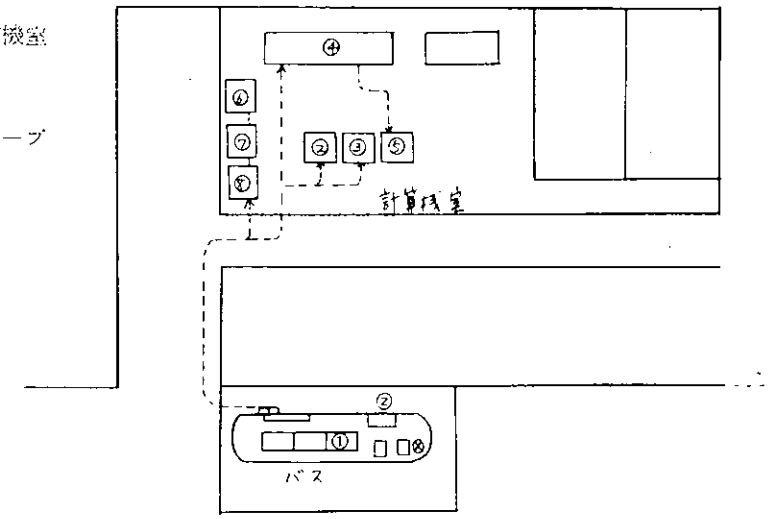
磁気フェライトコア

(b)　語長

16ビット＋パリティ

(c)　メモリ容量

16KW



1. デイジタルコンピュータ　MELCOM 350—5
2. システムタイプライタ　ASR—35
3. ペーパテープリーダ　（バス　計算機室各1）
   メッセージ、タイプライタ
4. アナログコンピュータ
5. オペレーション・コンソール
6. シミュレータパネル
7. テストパネル
8. 中継端子盤

第1.4図　機器配置図

(d) サイクルタイム

2.5 μs

(e) メモリ保護

あり

(g) ロジック

TTL IC

(h) 演 算

加算時間 10 μs

乗算時間 245 μs～2.110 μs (ソフトウエア)

2倍精度演算 ソフトウエア

浮動小数点演算 ソフトウエア

(i) 電 源

AC 110V±10V 50/60 ±1Hz

(j) 電源異常保護

あり

(k) 環境条件

温 度 25±15℃

湿 度 35～85%

(3) プロセス入出力装置

(a) 割込入力

接 点 8点

レベル 8点 (0～10V)

(b) デイジタル入力

接 点 160点 (10グループ)

レベル 90点 (6グループ) (0～10V)

パルス な し

(c) アナログ入力

a. 電 圧 0～±10V 42点 (分割抵抗により1/10し、1000mVレンジ)

0～ 12V 15点 (〃 〃)

0～ 24V 15点 (〃 2,000mVレンジ)

0～100mV 10点 (分割抵抗使用せず、100mVレンジ)

b. 電 流 1～ 5mA 10点 (20Ωの変換抵抗により、100mVレンジ)

2～10mA 20点 (10Ωの 〃 、 〃)

4～20mA 10点 (10Ωの 〃 、200mVレンジ)

c. 熱電対 CA:16点 (0～10mV)

PR:15点 (0～10mV)

補償入力1点 (0～10mV)

走査速度: 30/25(点/秒) (カードさしかえにより60/50Hz変更)

フルスケール: 10, 100, 200, 1,000, 2,000mV

(ただし 200%入力まで OK)

(d) デイジタル出力

マルチビットラッチ	９６点	（６グループ）	接点容量　１００ＶＡ
モーメンタリ	３２点	（２グループ）	〃　２５０ＶＡ　タイミング　１００ｍｓ
レベル	３２点	（　〃　）	ドライバー付（出力電圧　０～６Ｖ／負荷電流　２００ｍＶ以下）

(e) アナログ出力

電流出力	４点	４～２０ｍＡ（１０ビットＲＤ出力、負荷抵抗１ＫΩ以下）
電圧出力	８点	０～１０Ｖ（　〃　、負荷抵抗１ＫΩ以上）

(4) 周辺機器

(a) システムタイプライタ（ASR—35）

印字速度	１０字／秒、　７２字／行
リボン	１色（黒）
紙テープ読取速度	１０字／秒　（機械式）
紙テープさん孔速度	１０字／秒
使用テープ	８単位（幅２５.４㎜）

(b) ＦＣＴ（Fixed Carriage Typewriter）

印字速度	１５.５字／秒　平均
紙　幅	１５½吋
印字幅	１３吋（１０字／吋）
リボン	２色（黒赤）

(c) ＰＴＲ（Paper Tape Reader）

読取り速度	２００字／秒（光電式）
使用テープ	８単位（幅２５.４㎜）

(d) ＰＴＰ（Paper Tape Punch）

さん孔速度	３５字／秒
使用テープ	８単位（幅２５.４㎜）

1.6.2 アナログコンピュータ

(1) 装置の概要

本装置はMELCOM精密アナログコンピュータを基本としてトランジスタ素子をＩＣ素子におきかえ演算に必要な各要素の設定をすべて自動化し、これを演算制御盤および自動結線装置より指令できるようにしたものである。（APAC—1 Automatic Patching Analogue Computer）

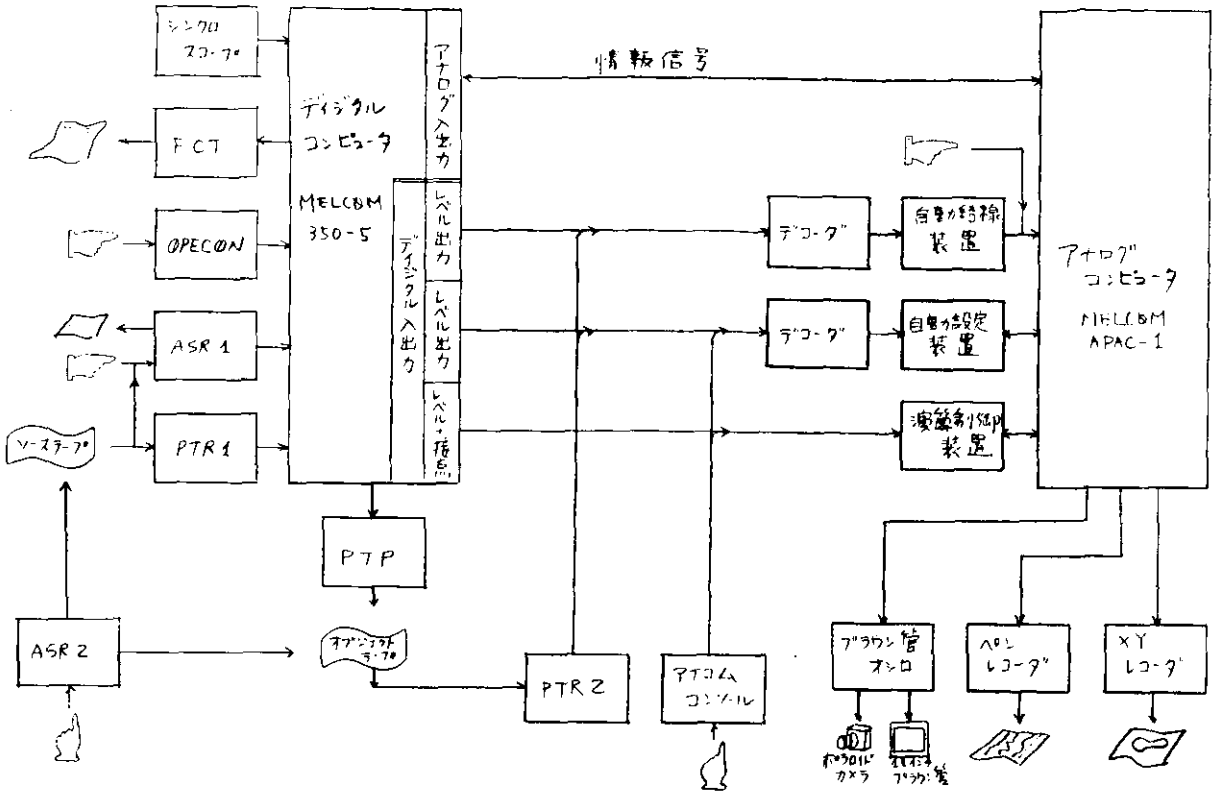
またデイジタル入出力装置を通じてデイジタルコンピュータに接続できる。本装置はコンピュータ本体、演算制御盤で構成されている。これらの装置相互およびデイジタルコンピュータ、自動結線装置との関係を第1.5図に示す。また本装置に含まれる各要素の構成概略を第1.4表に要素の内装点数を第1.5表に示す。

(2) 装置の基本機能

通常のアナログコンピュータに準じ次の各機能を実現できる演算および制御のための要素を有する。（カッコ内は相当する要素名）

(a) 加算積分（加算積分器）

(b) 加算　（加算係数器）



第1.5図　ハイブリッド計算機構成図

第1.4表　構　成　概　略

要素名		仕様
演算増幅器	加算積分器	1，1，10，10
	一次遅れ要素	1，1，1，SF
	加算係数器 I	1，1，1，1
	〃 II	1，1，1
ディジタルポテンショメータ		0.000より0.999まで演算可，×10又は×100も可
高速電圧比較器		
飽和不感帯要素		
関数乗除算要素		
関数発生器		
むだ時間発生器		パーデ4次近似方式
リレー		メークブレーク　（NO Latch型）
自動演算要素		積分器の分割制御、制御リレー選択、演算信号選択によるサンプルホールド
パッチベイ		
演算制御盤		出力選択・調整、電源制御（関数発生器設定）、ディジタルポテンショ設定、飽和不感帯要素設定、1次遅れ時定数設定、手動演算制御、繰返し演算制御、自動演算制御、電圧計、ディジタル電圧計（ブラウン管オシロ）
自動結線		自動結線装置と連動することを考えて、演算器配置を決定
その他		ディジタル入出力装置付加、 ハイブリッドシステム拡張可能，ディジコンによる演算制御可

第1.5表 内 装 点 数

要素名		点数	内蔵ポテンショ数	備考
1	演算増巾器 入力、帰還インピーダンス内蔵			
	内訳 加算積分器	18	18	
	内訳 一次おくれ要素	3		
	内訳 加算係数器 I	18	36	
	内訳 〃 II	18		
2	ディジタルポテンショメータ	36		
3	飽和要素	3 +(3)	6 +(6)	
4	不感帯要素	3	6	
5	電圧比較器	6	6	
6	計算用リレー	6		
7	関数乗除算要素	9		
8	関数発生器	(3)		
9	むだ時間発生器	6		
10	自動演算要素	一式		
11	演算制御盤	一式		
12	ディジタル電圧計	I		
13	ブラウン管オシロスコープ	(I)		
14	パッチベイ	一式		
15	電源	一式		
16	付属品	一式		

(c) 倍 数(ポテンショメータ)

(d) 乗除算(関数乗除算器)

(e) 飽和の模擬(飽和要素)

(f) 不感帯 〃 (不感帯要素)

(g) 一次おくれ要素の模擬(一次おくれ要素)

(h) むだ時間の模擬(むだ時間発生器)

(i) 比 較(コンパレータ)

(j) 回路の切換え(リレー)

(3) 方 式

(a) 計算方式

低速(ONE SHOT)およびくりかえし兼用

(b) 記録方式

計算結果は低速計算の場合、外記録装置(ペンレコーダ)に記録され、また電圧計およびディジタル電圧計により表示される。

くりかえし計算の場合、ブラウン管オシロスコープに表示される。計算結果はまたディジタルコンピュータを通してタイプライタその他の印字装置に印字記録することもできる。

(4) 演算定数設定装置

(a) 設定量

本装置の演算要素は手動および自動にて以下の量が設定できる。

a．加算積分器 ——→ 初期値

b．加算係数器Ⅱ ——→ 2入力の加算係数

c．ポテンショメータ ——→ 分圧比

d．飽和要素 ——→ 正負飽和レベル

e．不感帯要素 ——→ 正負不感レベル

f．コンパレータ ——→ 1入力係数

g．一次遅れ要素 ——→ 時定数

h．むだ時間発生要素 ——→ むだ時間

i．関数発生器 ——→ 接点と関数値．

(b) 操作法

手動設定はスイッチと8桁のマルチスイッチの操作にて定数設定可能である。

自動設定はディジタルコンピュータ（MELCOM 350—5）のディジタル出力および紙テープリーダ（ASR—35）の出力で定数設定可能である。

紙テープはASCIIのコードでさん孔されているものを使用する。

(5) 自動結線装置

当装置は演算器間の結線を基本的にはパッチボードを用いて行なう。

また演算器総数の½については リレー群を用いる自動結線装置によつても行なえる。

(a) 自動結線接続方式

演算器はその総数を3分割し、この単位をモジュールと称する。

本装置の自動結線は1モジュールについて可能である。モジュール内の演算器接続には3つのスイッチを用いて行なう3ステージ方式を採用している。

モジュール間接続、MELCOM 350—5⟷アナコム間接続およびレコーダ⟷アナコム間接続には1ステージ方式を採用している。

(b) リレー駆動方式

リレー駆動信号はMELCOM 350—5のレベル出力を用い、使用するレベル出力は29点である。駆動用スイッチはトランジスタスイッチを用いトランジスタ駆動にはディジタルICを用いている。

1.6.3 テストパネル

プロペラ回転数の目標値をセットするコントロールダイヤルをはじめとする計器、操作スイッチ、表示灯などを装備し、一般的に制御盤といわれるものに相当する。

(1) パネル外形

外形図（第1.6図）参照

(2) 取付部品

機器要目表（第1.6表）参照

(3) 盤面配置

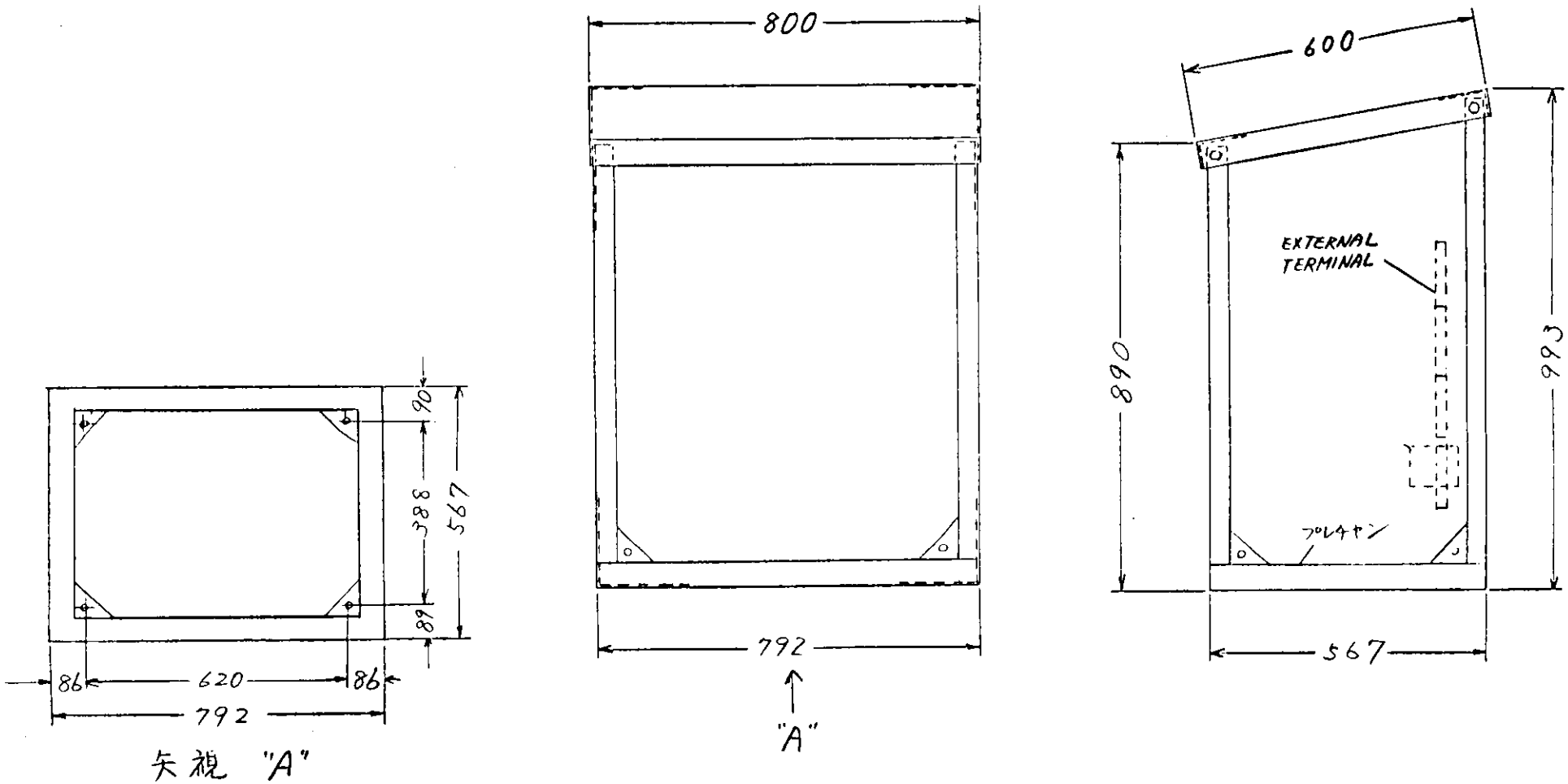
盤面配置図（第1.7図）参照

1.6.4 シミュレータパネル

操作部および表示部をまとめたテストパネルに対し、タービンシミュレータ、関数発生器などのハードウェアをまとめて収納したものである。

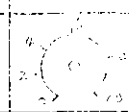
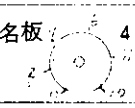
(1) パネル外形

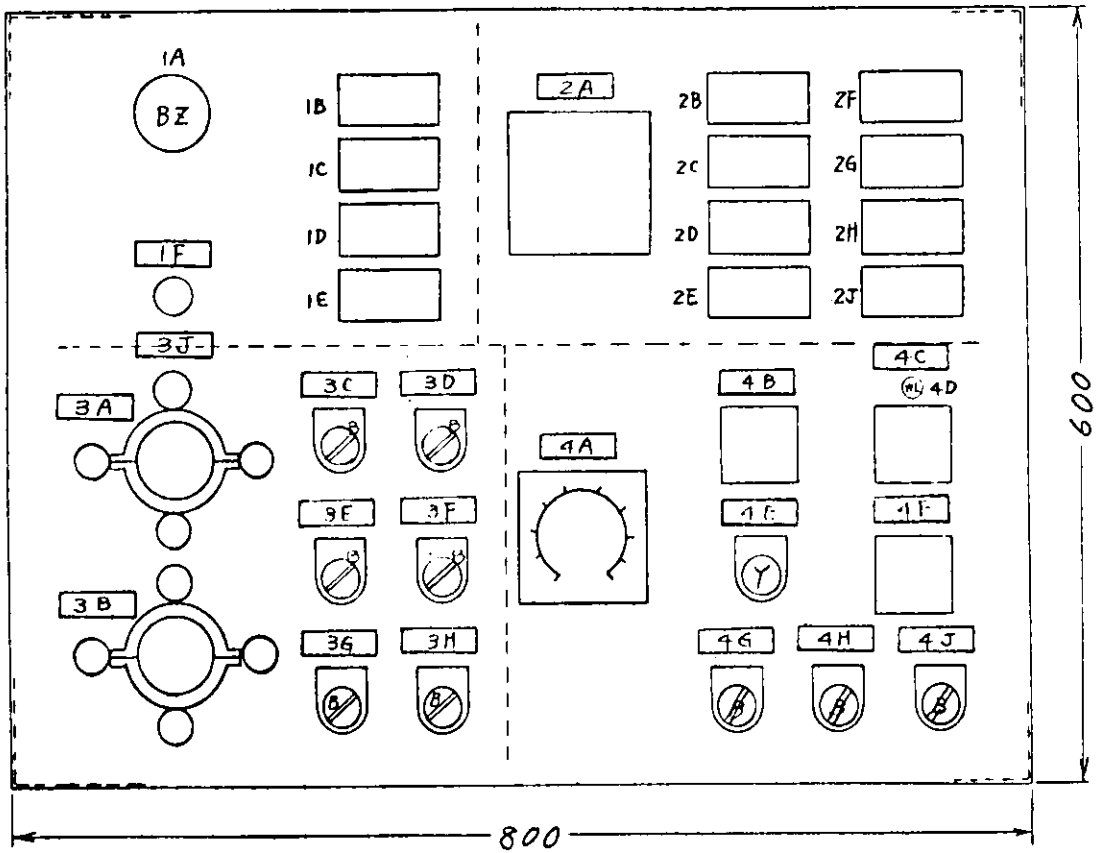
外形図（第1.8図）参照

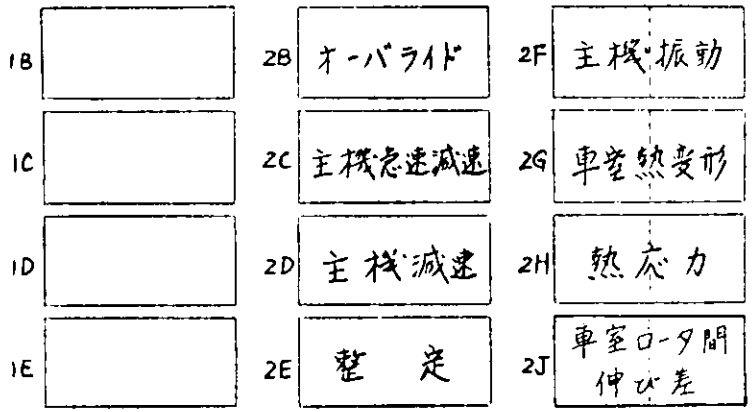


第1.6図　テストパネル外形図

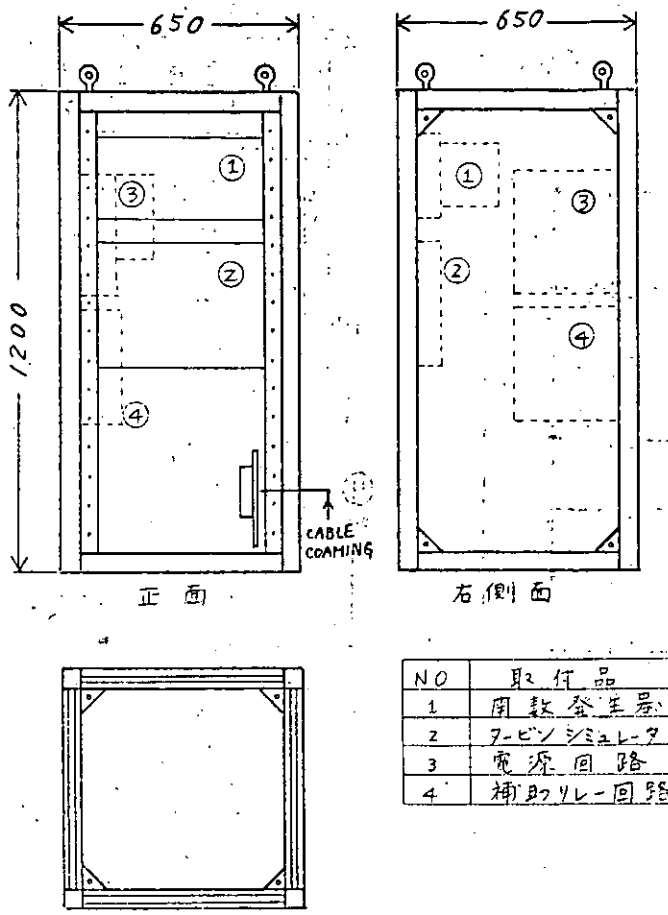
第1.6表　テストパネル概略要目表

LAY OUT NO.	NAME PLATE LETTERING	NAME PLATE SIZE	PARTS	REMARKS	SPEC NO.
1A			警報用ブザー　AC110V　1種F形		
1B	（予　　備）		角形表示灯　OM48H−300−W	レンズ刻印	
1C	〃		〃　〃	〃	
1D	〃		〃　〃	〃	
1E	〃		〃　〃	〃	
1F	振動振幅設定	63×20 2t	可変抵抗器　RVH4NATRX　202A		
2A	主軸回転計	63×20 2t	回転計　110口		
2B	オーバライド		角形表示灯　OM48H−300−R	レンズ刻印	
2C	主機急速減速		〃　〃	〃	
2D	主機減速		〃　〃	〃	
2E	整定		〃　〃	〃	
2F	主機振動		〃　OM48−200−R	〃	
2G	車室熱変形		〃　〃	〃	
2H	熱応力		〃　〃	〃	
2J	車室ロータ間伸び差		〃　〃	〃	
3A	HPタービン	63×20 2t	車室グラフイック（ポテンショ配置） RVH4NATRX 202A×4ケ	名板  4ケ	
3B	LPタービン	〃	〃	〃	
3C	1閉ループ	〃	切替スイッチ　OU−CB−2−1	OFF ON	
3D	2閉ループ	〃	〃　〃	〃	
3E	1号レコーダ	〃	〃　〃	〃	
3F	2号レコーダ	〃	〃　〃	（予備）〃	
3G	アラームカット	〃	〃　〃	STOP NOR	
3H			〃　〃	（予備）	
3J	熱変形設定	63×20 2t			
4A	コントロールダイヤル	〃	回転数設定器　WA−5W　1KΩ		
4B	オーバライド	〃	コントロールスイッチ　AK−AG−32B9	OFF ON	
4C	制御電源	〃	〃　〃	〃	
4D			丸形表示灯　KP−140B		
4E	オーバライドリセット	63×20 2t	押釦スイッチ　OU−G−GY−1	RESET	
4F	制御スタート	〃	コントロールスイッチ　AK−AG−32B9	OFF ON	
4G	熱応力	〃	押釦スイッチ　OU−CB−2−1	〃	
4H	伸び差	〃	〃　〃	〃	
4J	熱変形	〃	〃　〃	〃	





第1.7図　テストパネル盤面配置図



NO	取付品
1	関数発生器
2	タービンシミュレータ
3	電源回路
4	補助リレー回路

第1.8図 シミュレータ外形図

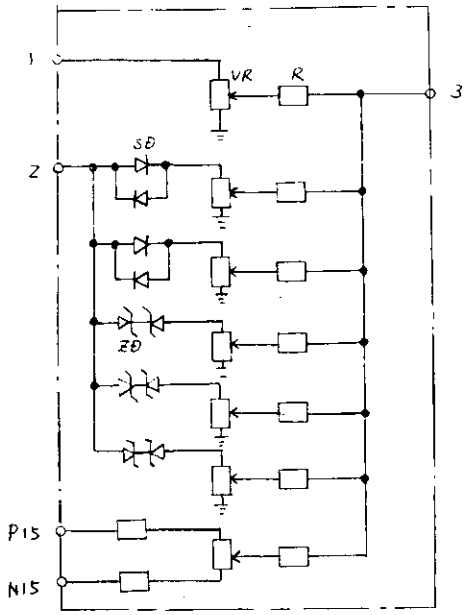
(2) パネル収納機器

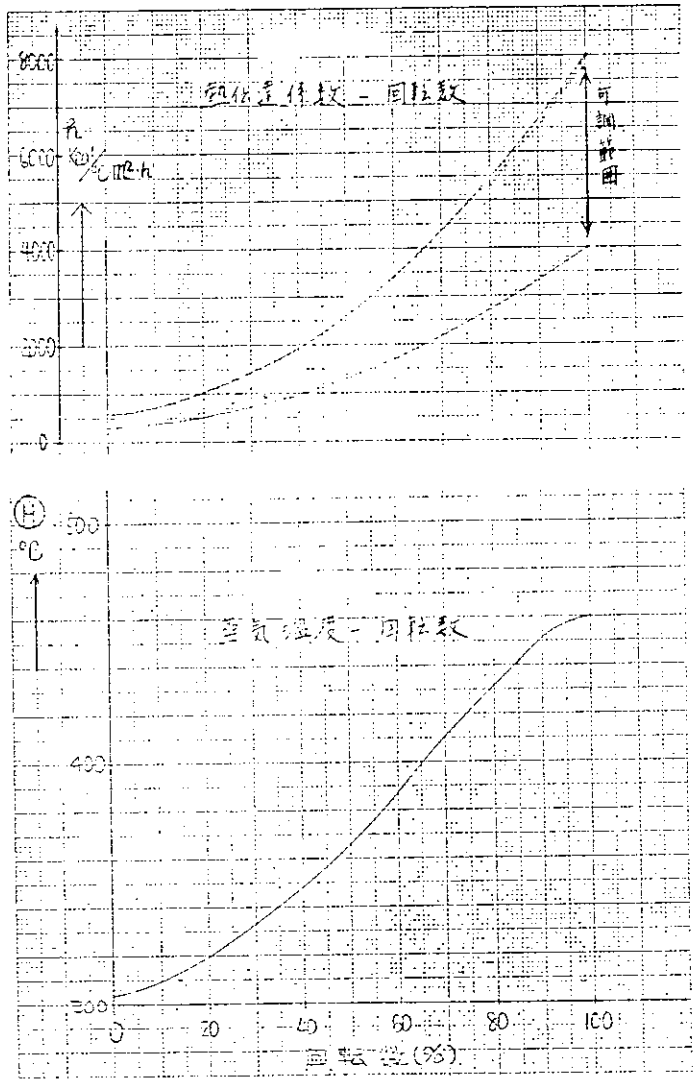
(a) 関数発生器

関数発生器（FG0～2）はゼナーダイオードと可変抵抗器で構成する簡単な回路のものを用いる。

FG	変数 n_0 の関数	相関関係
FG0	操縦弁リフト（L）	$n_0^3 \propto L$
FG1	熱伝達係数（h）	第1.9図（上部）の曲線による
FG2	蒸気温度（θ）	第1.9図（下部）の曲線による

ファンクッションゼネレータ基本回路





第1.9図

(b) タービンシミュレータ

操縦弁特性およびプロペラ軸系の運動方程式をシミュレートしたもので，実船に近いプロペラ回転数を出力として得ることができる。

a．数 式

$$I\frac{dN_P}{dt} = T_d - T_\ell$$

$$T_d = f(L)$$

$$T_\ell = KN_P^2$$

$$L = g(\ell)$$

$$f(L) = I\frac{dN_P}{dt} + KN_P^2$$

I ＝慣性モーメント

N_P ＝プロペラ回転数

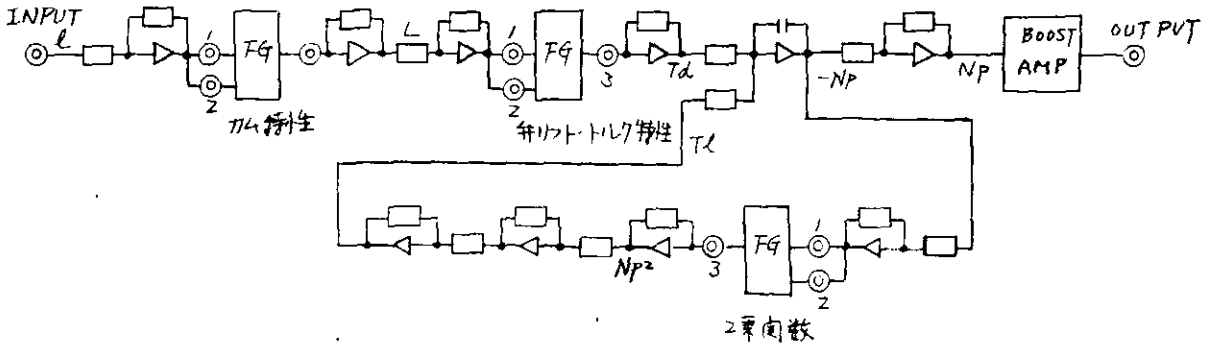
T_d ＝駆動トルク

T_ℓ ＝負荷トルク

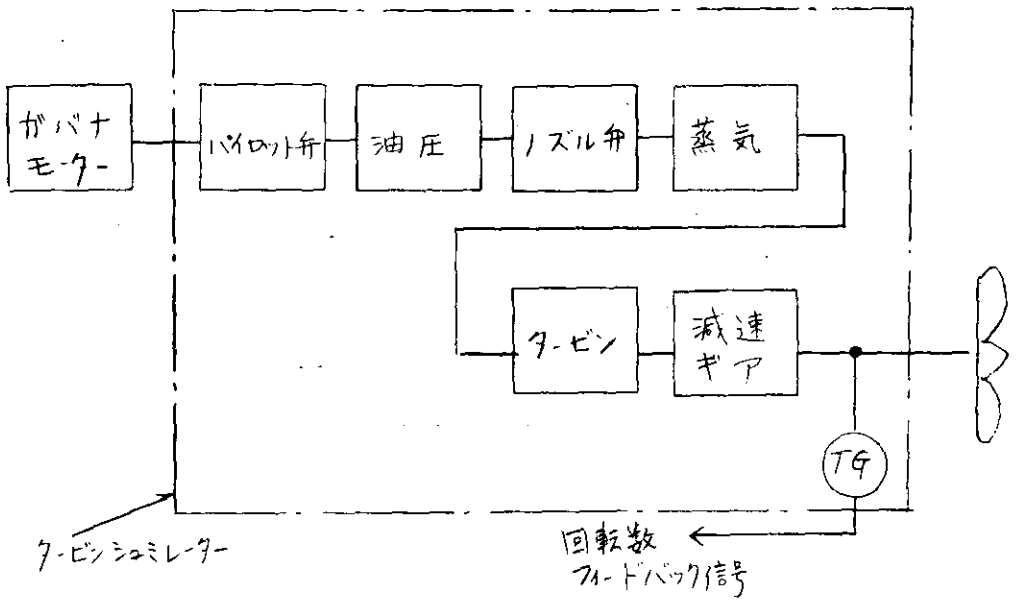
L ＝操縦弁リフト

ℓ ＝ガバナリフト

b．回路構成



c．ブロック図



(c) 漸変電圧発生器（スムーザー）

熱変形検知プログラムのインプットデータとして車室の温度を設定するポテンショメータがあるが、温度の時間的変化の微調整が手動では困難のため、本ユニットを用いて手動で一挙に設定した値に対して徐々に出力電圧を出して設定値に近付けていくようにした。時間特性は直線形であり増減両方に有効である。

(d) オーバライドコントロール回路

アラーム回路

主タービン減速制御を行なう際にコントロールダイヤルの指令信号からコンピュータの減速指令信号に切換える回路とオーバーライドリセットをコンピュータに要求する接点入力（D/I）の回路である。

（回路図（第1.10図）参照）

その他アラームブザーをならすための簡単なリレー回路などが一緒に組み込まれている。

(e) 電源部

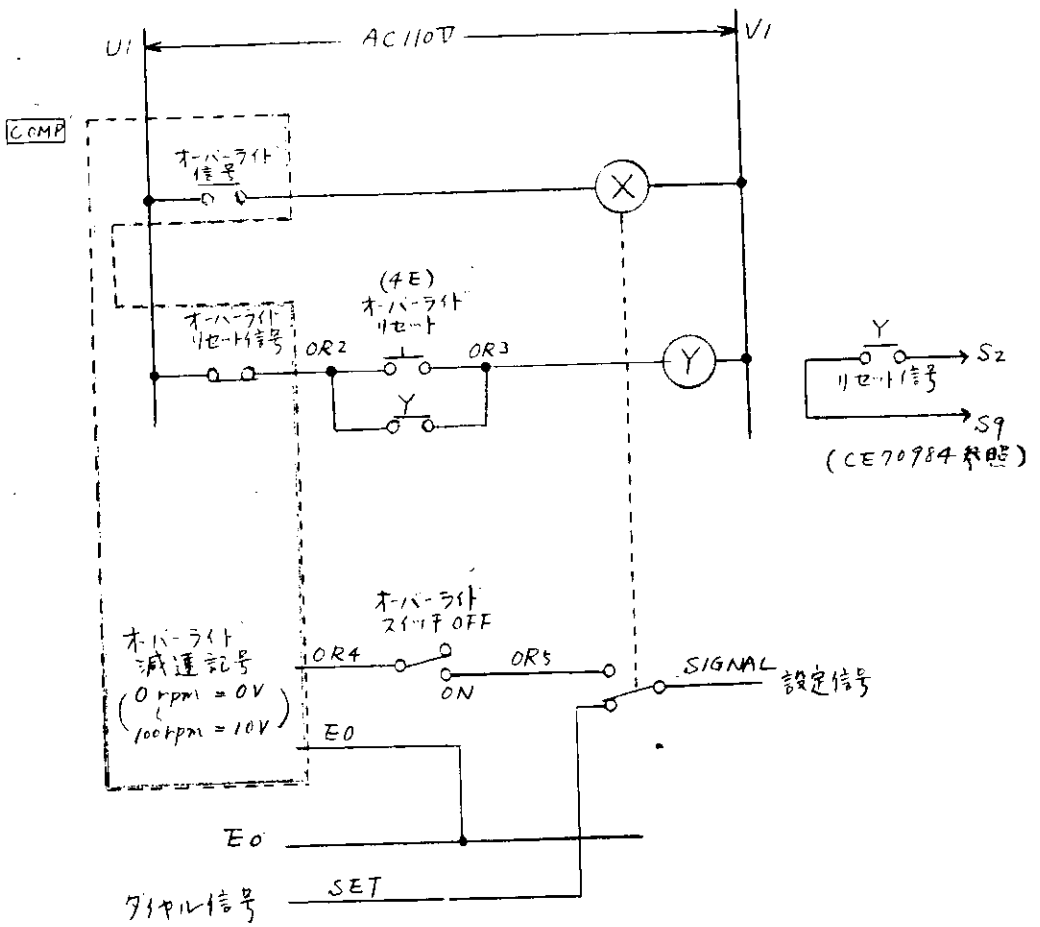
各種パラメータを設定するポテンショメータの電源（DC）、タービンシュレータ関数発生器などの電子回路のための電源（DC）などを含む。

1.6.5 その他の使用機器

異常振動検知のためのインプットデータのために下記の低周波発振器および周波数カウンタを使用した。

(1) 低周波発振器

松下　　VP－702B形



第1.10図　オーバライドコントロール回路図

周波数レンジ	20 Hz～200 KHz
負荷インピーダンス	10 KΩ
出力電圧	10 V

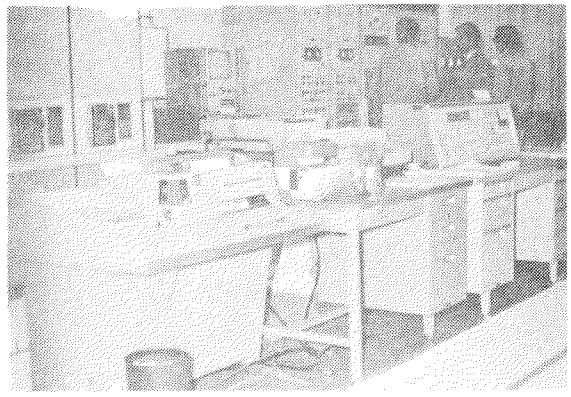
(2) 周波数カウンタ

タケダ理研	TR－5766形
入力レンジ	10 V～0.01 V
最大入力電圧	100 V
入力インピーダンス	1 MΩ
出　力	BCD　6桁（1－2－4－8各桁ごと）
出力電圧	"0"　＋2 V以下
	"1"　＋6 V以上

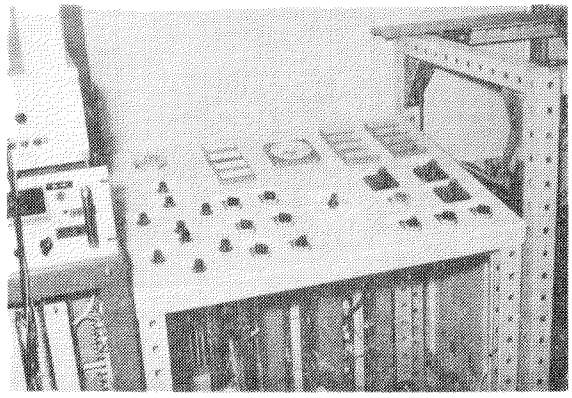
注）本作業の予算で製作したものはテストパネル、シミュレータパネルに限る。



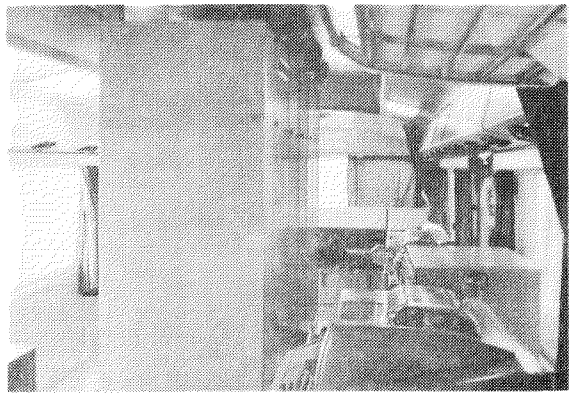
第1.11図　中継端子盤、テストパネル、シミュレータパネル（左より）



第1.12図　システムタイプライタ、PER、POTオペレーションコンソール（左より）



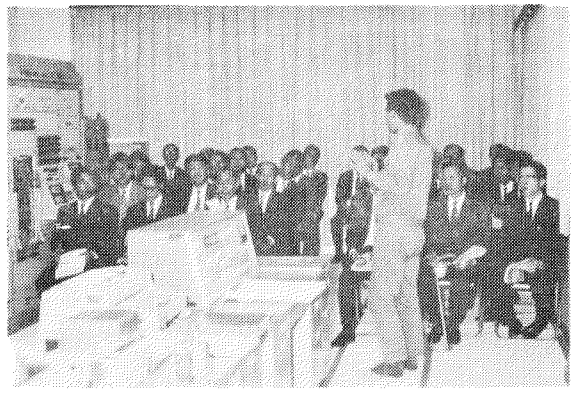
第1.13図　テストパネル



第1.14図　デジタルコンピュータ（バス車輌内）



第1.15図　シミュレーション用機器全景（デジタルコンピュータは車輌内にあるため除く）



第1.16図　シミュレーション公開説明会

1.7　プログラム概要

本作業で使用したコンピュータシステムはディジタルコンピュータが１６Ｋのコアマシンであつたのでフローチャートのドラムに関する部分のプログラムは削除した。

またキャラクタディスプレイ（ＣＲＴ）もメッセージタイプライタのプリントアウトに置きかえた。

プログラム構成にあたつては前掲の５個のアプリケーションプログラムに加えて、制御システムとしてまとめるための各種プログラムを付加して全体を組みたてた。

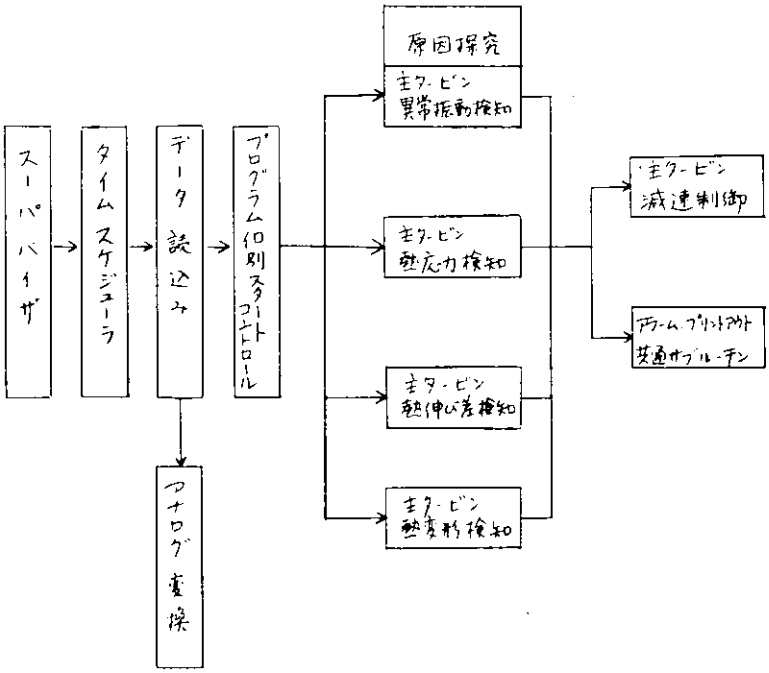
1.7.1　プログラム構成

本システムプログラム構成は第1.１７図に示すとおりであり、第1.7表にプログラムリストを示す。

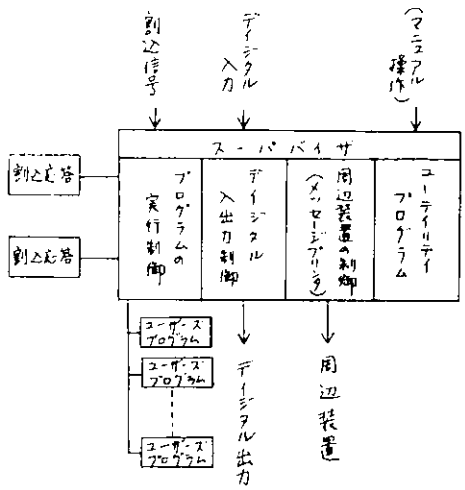
アプリケーションプログラムはすべて同一レベルにおいた。

スーパバイザとよばれるものは機能プログラムの実行および入出力機器の動作をコントロールし、割り込み信号の処理などを行ない、全システムを総括するプログラムであり、プログラムディバッグに便利な道具としてつくられたユーティリティプログラムや標準乗除算プログラムもスーパバイザの一部に組み入れている。

スーパバイザの概念は第1.１８図に示す。



第1.１７図　プログラム構成



第1.１８図　スーパバイザの概念

1.7.2　プログラム運用

第1.１７図のプログラム構成における各プログラムの運用については、概略つぎのような方法をとつた。

(1)　スーパバイザ内部にあるシンクロナイザよりアプリケーションプログラムの最短周期である5秒ごとにタイムスケジューラをコールする。

(2)　タイムスケジューラは制御スタートスイッチ（テストパネル）がＯＮになつていることを条件にまずデータ読込みプログラムを起動する。

データ読込みとアナログ入力に対するアナログ変換プログラムは直結している。

(3)　データ読込みが終るとただちに５秒ごとに起動されるアプリケーションプログラムが起動される。

５秒ごとに起動されるプログラムは

○異常振動検知プログラム

第1.7表　プログラムリスト

版	プログラム	語数	備考
1	スーパバイザ	3,000	機能プログラムの実行、入出力機器の動作をコントロールする。割込み信号の処理を行う。
2	タイムスケジューラ	125	スーパバイザの定時信号により各アプリケーションプログラムを起動する。各プログラムの周期を決定する。
3	データ読込み	610	アナログ入力、ディジタル入力の読み込み、データアレンジなど行う。
4	アナログ変換	140	アナログ入力読込値を工学単位に変換し、桁合わせを行う。
5	プログラムスタートコントロール	22	アプリケーションプログラムの個別スタートを決める。（外部操作スイッチあり）
6	共通サブルーチン	320	アウトプットチェック エラー比較、アラームアウト（ランプ、メッセージ） BCD TO BIN 変換など
7	熱応力検知	370	ディティルドフロチャートによる アプリケーションプログラム
8	熱伸び差検知	325	〃
9	異常振動検知	410	〃
10	熱変形検知	665	〃
11	主タービン減速制御	425	〃
12	共通定数、フラグデータバッファ	70	共通定数、ビットパターン、共通フラグ読込データバッファなど
	（語数合計）	6,482	

○主タービン減速制御プログラム

の2つである。

(4) アプリケーションプログラムはテストパネル上の各プログラムスタートスイッチが0Nになつていないと起動がかかつても実際にプログラムが実行されないようにした。そのためにプログラムスタート、スイッチのディジタル入力を確認し、もしディジタル入力がなければただちにプログラム停止の命令を与えるプログラムスタートコントロールプログラムを追設した。

これは、プログラムデバッグやプログラムごとの作動確認をやり易くするために設けたもので、実際に便利さを発揮した。

(5) タイムスケジューラでは5秒ごとのプログラム起動をしたあと、5（秒）×12＝60（秒）のカウントをしており、カウントアップすると60秒ごとに起動されるべきつぎのアプリケーションプログラムを起動する。

○熱変形検知プログラム

○熱応力　〃

○熱伸び差　〃

(6) アプリケーションプログラムはすべて同一レベルのプログラムテーブルに登録しており、起動をかけられた順序でプログラムは実行される。

第1.8表　アナログ入力

系統 名称	系統 番号	検出項目		割込みレベル&ライン№	監視 要(○)否(×)	監視 スキャニング間隔	入 検出端形式
DATA	BUF=/2500 1	主軸（プロペラ）回転数	NP	ATRNO 100	○	SEC 5	タービンシミュレータ
	2	高圧タービンフランジ温度	θ_1	101		SEC 60	アナログコンピュータ
	3	〃 〃	θ_5	102		〃	〃
	4	〃 熱伸び差	△L	103	○	〃	〃
	5	〃 振動振幅	b=△D	104	○	SEC 5	振動振巾設定器（ポテンショメータ）
	6	〃 車室温度 上部	T_1	105		SEC 60	車室温度設定器（ポテンショメータ）
	7	〃 〃 左部	T_2	106		〃	〃
	8	〃 〃 下部	T_3	107		〃	〃
	9	〃 〃 右部	T_4	108		〃	〃
	10	低圧タービン 〃 上部	T_5	109		〃	〃
	11	〃 〃 右部	T_6	10A		〃	〃
	12	〃 〃 下部	T_7	10B		〃	〃
	13	〃 〃 左部	T_8	10C		〃	〃
	14	指令回転数	N_{MS}	10D		SEC 5	コントロールダイヤル

第1.9表　ディジタル入出力，アナログ出力

	ディジタル入力 GR NO=03		ディジタル入力 GR NO=0D				ディジタル出力	
0	レコーダセット SW	DI－110	1			D.I－210	0	振動過大
1	オーバライド 〃	〃 －111	2	1桁		〃 －211	1	〃 大
2	熱変形スタート 〃	〃 －112	4			〃 －212	2	熱変形過大
3	伸び差 〃	〃 －113	8		周波数カウンタ出力（BCD）	〃 －213	3	〃 大
4	熱応力 〃	〃 －114	1			〃 －214	4	伸び差過大
5	制御スタート 〃	〃 －115	2	2桁		〃 －215	5	〃 大
6	オーバライドリセット	〃 －116	4			〃 －216	6	熱応力過大
7			8			〃 －217	7	〃 大
8			1			〃 －218	8	急速減速
9			2	3桁		〃 －219	9	減速
A			4			〃 －21A	A	整定
B			8			〃 －21B	B	オーバライド
C			1			〃 －21C	C	オーバライドリセット
D			2			〃 －21D	D	オーバライド（ランプ）
E			4	4桁		〃 －21E	E	
F			8			〃 －21F	F	

入力信号	読込範囲	精度(%)	常用範囲	検出端数	記録の要(○)否(×)	重要度	備考
アナログ 0～10V	0～100 RPM		0～ 90 RPM	1			前進側のみとする
〃	0～500℃		0～500℃	〃			
〃	〃		〃	〃			
〃	0～10.0㎜		0～ 3.0㎜	〃			
〃	0～500μ		0～300μ	〃			テストパネル手動設定
〃	0～500℃		0～500℃	〃			〃
〃	〃		〃	〃			〃
〃	〃		〃	〃			〃
〃	〃		〃	〃			〃
〃	〃		0～300℃	〃			〃
〃	〃		〃	〃			〃
〃	〃		〃	〃			〃
〃	〃		〃	〃			〃
〃	0～100 RPM		0～ 90 RPM	〃			前進側のみとする

GR NO=30	アナログ出力 GR NO=07
DO — 130	
〃 131	0～9ビットのディジタル出力により、アナログ値をセットする 0～10V 0～1,024分割
〃 132	
〃 133	
〃 134	
〃 135	
〃 136	
〃 137	
〃 138	
〃 139	
〃 13A	
〃 13B	
〃 13C	
〃 13D	

プログラムの末尾は休止命令（クイット）になつており、一つのプログラムが休止したらただちにつぎの順位のプログラムが実行されることになる。

(7) アラームアウトの内のメッセージプリントおよびデータプリントは専用のメッセージタイプライタによりアウトプットすることとした。

1.7.3 ディジタルおよびアナログの入出力

データまたは信号の入出力については第1.8表および第1.9表に記載のとおりである。

1.7.4 検知結果とアラームアウトプット

各アプリケーションプログラムの検知結果とアラームアウトの内容は第1.10～1.15表に示すような関係でアウトプットされる。

主タービン減速側御と各プログラムのフラグとの関係は前述のフローチャートに示すとおりである。

第1.10表 FLGL

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0

主機異常振動検知

メッセージ プリント		データ プリント	
フラグ	内 容	フラグ	内 容
1	ROTOR UNBALANCE	4	××××HP AMP=○○○μ FRQ=○○○Hz N=○○○R/M
2	OIL WHIP	6	時 刻 b(1) n(1) NP
3	PROPELLER 1ST	5	（LPタービンについては検知なし）
4	PROPELLER 2ND	7	

ビット	摘 要		フ ラ グ
0	ROTOR UNBALANCE	周波数解析	FLAGL (1)
1	OIL WHIP		FLAGL (2)
2	PROPELLER 異常 1ST		FLAGL (3)
3	PROPELLER 異常 2ND		FLAGL (4)
4	HPによる主機振動非常に大きい	振 幅	FLAGL (I)
5	LP 〃 〃		〃
6	HPによる主機振動大きい		FLAGL(I+2)
7	LP 〃 〃		〃

第1.11表　BFLGL

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0

主タービン熱変形検知(1)

メッセージ　プリント		データ　プリント	
フラグ	内　容	フラグ	内　容
1, 5 9, 13	HP HOGGING	同　左	×××× 時刻　DT1 = ○○○ ℃ △T(1) = T(1) − T(3)　N = ○○○ rpm NP　T = ○○○ ℃ ○○○ T(1) T(3) NEW　○○○ ℃ ○○○ T′(1) T′(3) OLD
2, 6 10, 14	HP RIGHT	〃	×××× 時刻　DT2 = ○○○ △T(2)　N = ○○○　T = ○○○ ○○○ ○○○ ○○○ T(2) T(4) T′(2) T′(4)
3, 7 11, 15	LP HOGGING	〃	××××　DT3 = ○○○ △T(3)　N = ○○○　T = ○○○ ○○○ ○○○ ○○○ T(5) T(7) T′(5) T′(7)
4, 8 12, 16	LP RIGHT	〃	××××　DT4 = ○○○ △T(4)　N = ○○○　T = ○○○ ○○○ ○○○ ○○○ T(6) T(8) T′(6) T′(8)

ビット	摘　要			フラグ
0	HP	HOGGING	大	FLAGL (1)
1	〃	RIGHT	大	〃 (2)
2	LP	HOGGING	大	〃 (3)
3	〃	RIGHT	大	〃 (4)
4	HP	HOGGING		〃 (5)
5	〃	RIGHT		〃 (6)
6	LP	HOGGING		〃 (7)
7	〃	RIGHT		〃 (8)
8	HP	HOGGING	大	〃 (9)
9	〃	RIGHT	大	〃 (10)
10	LP	HOGGING	大	〃 (11)
11	〃	RIGHT	大	〃 (12)
12	HP	HOGGING		〃 (13)
13	〃	RIGHT		〃 (14)
14	LP	HOGGING		〃 (15)
15	〃	RIGHT		〃 (16)

車室温度差

温度差傾向

第1.12表　BFLGM

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0

主タービン熱変形検知(2)

メッセージ　プリント		データ　プリント	
フラグ	内　　容	フラグ	内　　容
1, 5 9, 13	HP SAGGING	同　左	
2, 6 10, 14	HP LEFT	〃	データプリント内容は HP LP HOGGING 〃　〃　RIGHT　} と同一
3, 7 11, 15	LP SAGGING	〃	
4, 8 12, 16	LP LEFT	〃	

ビット	摘　　要			フ　ラ　グ
0	HP SAGGING	大	車室温度差	FLAGM (1)
1	〃 LEFT	大		〃 (2)
2	LP SAGGING	大		〃 (3)
3	〃 LEFT	大		〃 (4)
4	HP SAGGING			〃 (5)
5	〃 LEFT			〃 (6)
6	LP SAGGING			〃 (7)
7	〃 LEFT			〃 (8)
8	HP SAGGING	大	温度差傾向	〃 (9)
9	〃 LEFT	大		〃 (10)
10	LP SAGGING	大		〃 (11)
11	〃 LEFT	大		〃 (12)
12	HP SAGGING			〃 (13)
13	〃 LEFT			〃 (14)
14	LP SAGGING			〃 (15)
15	〃 LEFT			〃 (16)

第1.13表　DFLGL

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0

熱応力検知

メッセージ　プリント		データ　プリント	
フラグ	内　　容	フラグ	内　　容
1, 3 5, 7	HP TURBINE STRESS	同　左	××××　DT=○○○℃　N=○○○ r/m 時　刻　△T(1)　NP $=\theta_1-\theta_5$
2, 4 6, 8	（LP　検知なし）		

ビット	摘　　要		FLAGL
0	主タービン熱応力　大	フランジ温度差	FLAGL (1)
1	〃　　〃		〃 (2)
2	〃　熱応力非常に大		〃 (3)
3	〃　　〃		〃 (4)
4	〃　熱応力　大	温度差傾向	〃 (5)
5	〃　　〃		〃 (6)
6	〃　熱応力非常に大		〃 (7)
7	〃　　〃		〃 (8)

第1.14表　CFLGL

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0

車室ロータ間熱伸び差

メッセージ　プリント		データ　プリント	
フラグ	内　　容	フラグ	内　　容
1, 3 5, 7	HP TURBINE GAP	同　左	××××　L=○○○ ×10mm　N=○○○ r/m　DL=○○○ ×10mm L(1)　NP　△L
2, 4 6, 8	（LP検知なし）		$=L(1)-L'(1)$

ビット	摘　　要		フラグ
0	HP 伸び差　大	熱伸び差	FLAGL (1)
1	LP 〃　大		〃 (2)
2	HP 〃　有		〃 (3)
3	LP 〃　有		〃 (4)
4	HP 〃　大	熱伸び差傾向	〃 (5)
5	LP 〃　大		〃 (6)
6	HP 〃　有		〃 (7)
7	LP 〃　有		〃 (8)

第1.15表　IFLGL

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0

主タービン減速制御

メッセージ　プリント		データ　プリント	
フラグ	内　　容	フラグ	内　　容
1	QUICK SLOW DOWN	1	な　し
2	SLOW DOWN	2	〃
3	RAISE LOCK	3	〃
4	SET DIAL TO SHAFT REV	4	NS＝○○○ B/M

ビット	摘　　要	フ　ラ　グ
0	主タービン急速減速	FLAGL (1)
1	〃　減　速	〃　(2)
2	〃　整　定	〃　(3)
3	オーバライド　リセット	〃　(4)

1.8　アナログコンピュータによる熱系のシミュレーション

1.8.1　シミュレーションの数式モデル

一次元熱伝導系の問題は、適当な初期条件と境界条件の下で、（熱伝導率の一定の均一な物質では）つぎの熱伝導方程式を解くことにより、解析できる。

$$\frac{\partial \theta^*}{\partial t} = \alpha^2 \frac{\partial^2 \theta^*}{\partial x^2} \qquad \theta^* = \theta^*(x, t) \qquad \cdots\cdots (1.1)$$

境界以外の点において、Time Continuous, Space Discontinuous な差分をとつて考えると、

$$\frac{\partial \theta_i^*}{\partial t} = \frac{\alpha^2}{\Delta x^2}(\theta_{i+1}^* - 2\theta_i^* + \theta_{i-1}^*) \qquad \theta_i^* = \theta^*(i\Delta x, t) \qquad \cdots\cdots (1.2)$$

（1.2）式の、辺々のLaplace変換をとると、

$$\theta_i = \frac{\theta_{i+1} + \theta_{i-1}}{2(\beta_0 S + 1)} \qquad \cdots\cdots (1.3)$$

ここで、

$$\beta_0 = \frac{\Delta x^2}{2\alpha^2} \quad (hr)$$

$$\alpha^2 = \frac{K}{c\rho} \quad (m^2/hr)$$

K ；熱伝導率　(Kal/m・hr・℃)

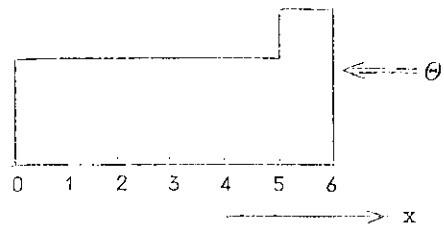
C ；比　　熱　(Kcal/Kg・℃)

ρ ；密　　度　(Kg/m³)

$\theta_i = \theta(S, i\Delta x)$

Δx ；空間刻み幅 (m)

分布系を6分割近似し、そのときの座標のとり方を右図のようにする。（フランジ断面を示す。）



境界条件は、つぎのように与える。（連続形式で記述）

1） x = 0　　で熱遮断

$$\left.\frac{\partial\theta}{\partial x}\right|_{x=0} = 0 \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1.4)$$

2） x = 6　　では、フランジ表面と外界との間に熱伝達がある。

$$K\left.\frac{\partial\theta}{\partial x}\right|_{x=6} + h\left(\theta-\Theta\right)\Big|_{x=6} = 0 \qquad \cdots\cdots \quad (1.5)$$

h；熱伝達係数（Kcal／m²・hr・℃）

（1.3）、（1.4）、（1.5）式より、フランジ熱系シミュレーションの数式モデルは、つぎのように与えられる。

$$\theta_6 = \frac{2\gamma\theta_5 + \Theta}{2\gamma + 1}$$

$$\theta_5 = (\theta_6 + \theta_4)\frac{1}{2(\beta_C S + 1)}$$

$$\theta_4 = (\theta_5 + \theta_3)\frac{1}{2(\beta_C S + 1)}$$

$$\theta_3 = (\theta_4 + \theta_2)\frac{1}{2(\beta_C S + 1)}$$

$$\theta_2 = (\theta_3 + \theta_1)\frac{1}{2(\beta_C S + 1)}$$

$$\theta_1 = (\theta_2 + \theta_0)\frac{1}{2(\beta_C S + 1)}$$

$$\theta_0 = \frac{\theta_1}{\beta_C S + 1} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1.6)$$

ただし、

$$\gamma = \frac{K}{2\Delta x \cdot h}$$

$$\Delta T = \theta_5 - \theta_1$$

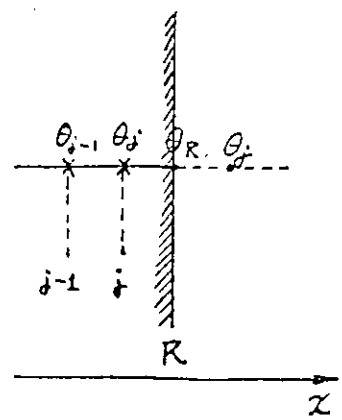
1.8.2　数式モデルに関する検討

(1)　境界における差分に関する考察

（1.2）式の差分近似そのものの精度については、後で考察することにして、本節では、x = 0、x = 6 での差分の取り方を述べる。

(a)　x = 0 における熱遮断の条件は、つぎのような空間差分を用いて書くことができる。

右図のように、境界Rに関して、θ_j の鏡像をおいて、空間差分を考えればよいから、



$$\frac{\partial\theta_R^*}{\partial\tau} = \frac{\alpha^2}{\Delta x^2}\left(\theta_j^* - 2\theta_R^* + \theta_j^*\right)$$

$$= \frac{2\alpha^2}{\Delta x^2}\left(\theta_j^* - \theta_R^*\right) \qquad \cdots\cdots\cdots \quad (1.7)$$

S－domain で表現すると、

$$\theta_0 = \frac{\theta_1}{\beta_C S + 1} \qquad \cdots\cdots (1.8)$$

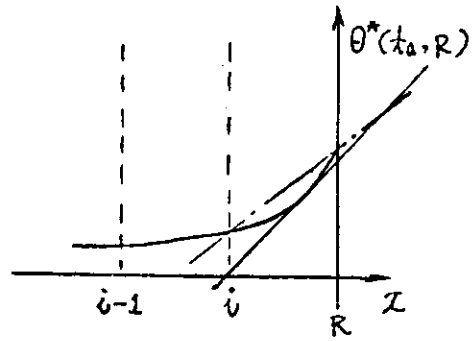
本シミュレーションでは、x＝6にのみ入力が加わるから、x＝0，1付近での温度勾配は、十分小さいことが期待できる。したがつて、(1.8)式は、かなりよい数式モデルと考えられる。

(b) x＝6における境界条件には、右図のような近似を施こす。

この境界付近での温度勾配は、一般に大きいから、本シミュレーションのような、あらい分割の場合、問題の生ずる部分である。

本シミュレーションの数式モデルでは、x＝Rでの温度勾配は、x＝iとRの温度勾配で近似してある。

したがつて、補正係数 K_C を用いて、つぎのように修正することが望ましい。



t=taにおけるモデル図

$$\theta_6 = \frac{2r^* \theta_5 + \Theta}{2r^* + 1} \qquad \cdots\cdots (1.9)$$

$$r^* = \frac{K_C K}{2\Delta x \cdot h}$$

ただし、一般に kc は可変である。

(2) 熱系の解析.(Analogue Computerによる)に及ぼす分割数の影響

(1.6)式では、6分割に対する数式モデルを与えてあるが、分割数の解に及ぼす影響を検討しておく必要がある。特に、

1) 熱系の温度勾配が大なる場合

2) 熱系の過渡的な振舞が大きい時

には、問題が生ずる。

第1.19図には、フランジシミュレーションにおける、実験結果を与えてある。

(3) スケール変換

(1.6)式で記述されるシステムは、一次遅れの連らなつた線形系であることから、入力Θの大きさを、適当に与えることにより、Magnitude に関する Scale変換は施こさなくてもよい。時間スケールは、以下のように変換する。

$$t = \lambda \tau \qquad \cdots\cdots (1.10)$$

このとき、数式モデル(1.6)式は、つぎのように置き換えればよい。

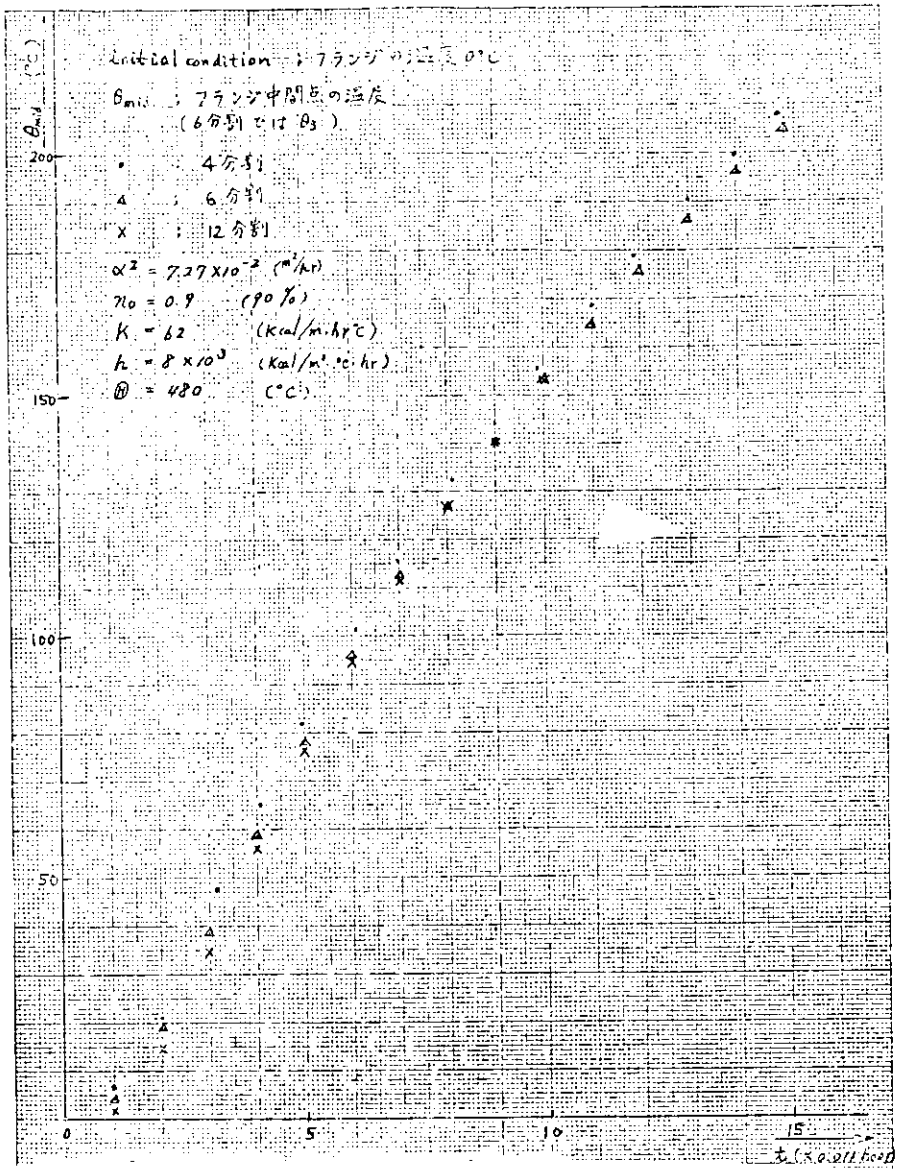
$$\beta_C \rightarrow \beta_S = \frac{\beta_C}{\lambda}$$

EX. 1

K	= 35	(Kcal/m・hr・℃)
ρ	= 7.860	(Kg/m³)
C	= 0.116	(Kcal/Kg・℃)
Δx	= 4×10^{-2}	(m)

EX. 2 実系シミュレート時、パラメータ

K	= 32.5	(Kcal/m・hr・℃)
ρ	= 7,800	(Kg/m³)
C	= 0.116	(Kcal/Kg・℃)
Δx	= 4×10^{-2}	(m)



第1.19図　分割数の熱伝導解に及ぼす影響

$$\alpha^2 = \frac{K}{C\rho} = 0.0384 \quad (m^2/hr) \qquad \alpha^2 = \frac{K}{C\rho} = 0.03592 \quad (m^2/hr)$$

$$\beta_C = 75.0 \quad (sec) \qquad \beta_C = 80.179 \quad (sec)$$

λ	β_S (sec)
1	75.0
10	7.50
20	3.75
40	1.88

λ	β_S (sec)
1	80.179
10	8.018
20	4.009
40	2.005

$$\gamma = 0.4375 \cdot \frac{1}{\lambda}$$

実験では　$\lambda = 20$

$$\gamma = 0.4063 \cdot \frac{1}{\lambda}$$

実験では　$\lambda = 20$

1.8.3　フロックダイアグラム

(1)　熱応力試験

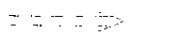
(1.6)式をブロック線図に組め。

ブロック線図は、2つの部分から成っている。実際のシミュレーションでは、h, θはvariableであるから、C_0, C_1 はvariableとなり、熱系本体と関数発生部に分けられる。

注 1. 本ブロック図には、レコーダ出力部分と、入力レベル調節用の配線は省略してある。

注 2. 関数発生部に、乗除算器を使用してあるため、シミュレーションの精度をあげるためのレベル変換部が必要であるが、この部分も省略してある。

注 3. 関数発生部と、熱系本体のシミュレーションの結合分は、



の印をもつて記入してある。

(2) 熱伸び差試験

$$\theta_m = \frac{\Theta}{\left(\frac{1}{\beta_0}S+1\right)\psi_R} \qquad \beta_0 = \frac{h \cdot S_0}{C \cdot \rho \cdot V_R} \quad (1/hr)$$

$1.5 < \psi_R < 2.5$

$C = 0.116$ Kcal/Kg・℃

$\rho = 7.860$ Kg/m³

$S_0 = 1.829$ m²

$V_R = 0.0539$ m³

$h = 10^3 \times h'$ Kcal/m²・℃・hr

このとき $\beta_0 = 20.94 \cdot h'$ (1/hr)

$$\theta_c = \frac{\Theta}{\left(\frac{1}{\beta_1}S+1\right)\psi_C} \qquad \beta_1 = \frac{h \cdot S_C}{C \cdot \rho \cdot V_C} \quad (1/hr)$$

$1.5 < \psi_C < 2.5$

$C = 0.116$ Kcal/Kg・℃

$\rho = 7.860$ Kg/m³

$S_C = 4.01$ m²

$V_C = 0.221$ m³

$h = 10^3 \times h'$ Kcal/m²・℃・hr

このとき $\beta_1 = 19.90 \cdot h'$ (1/hr)

$$\Delta L = \delta = (L_C \varepsilon_C \theta_C - L_R \varepsilon_R \theta_m) \times 10^3 \ mm$$

$L_C = 1.6$ m

$L_R = 1.56$ m

$\varepsilon_C = \varepsilon_R = 11.76 \times 10^{-6}$ 1/℃

このとき

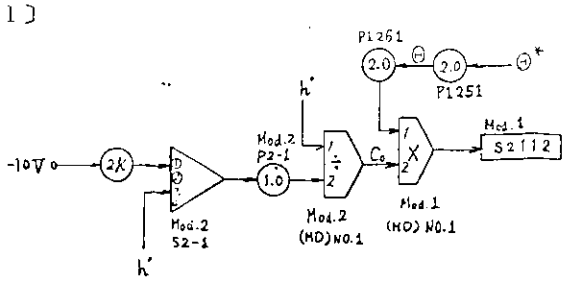
$$\Delta L = (0.188\theta_C - 0.184\theta_m) \times 10^{-1} \ mm$$

ΔLとscaleの比率

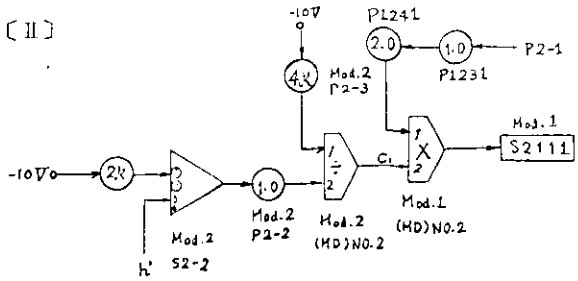
1 V → 100℃に対応させるとき

Ex. ΔL = 0.1 V は、1 mmに対応

〔I〕



〔II〕

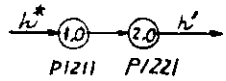


$$C_0 = \frac{1}{1+2\gamma} \qquad \gamma = k \cdot \frac{1}{h'}$$

$$h = h' \times 10^3 \qquad k = \frac{K}{2\Delta x \cdot 10^3}$$

$$C_1 = \frac{2\gamma}{1+2\gamma}$$

Θ^* ; function generator の出力



h* ; function generator の出力

第1.20図　関数発生部

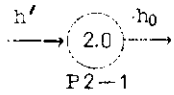
$$\frac{1}{\beta_0} = 0.0478 \cdot \frac{1}{h'} \times 3600 = 172.08 \cdot \frac{1}{h'} \quad \text{sec}$$

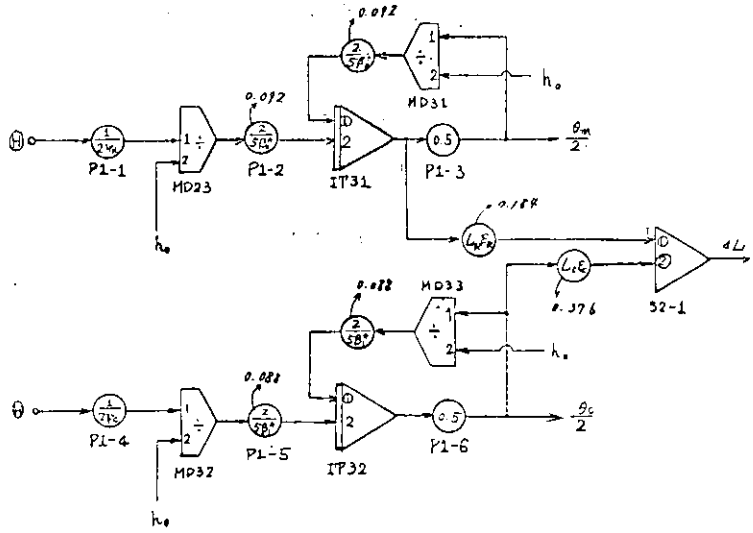
$$\frac{1}{\beta_1} = 0.0503 \cdot \frac{1}{h'} \times 3600 = 181.08 \cdot \frac{1}{h'} \quad \text{sec}$$

time scale　$t = 40\tau$　とすると、

$$\beta_0^* = \frac{1}{40\beta_0} = 4.302 \quad \text{sec}$$

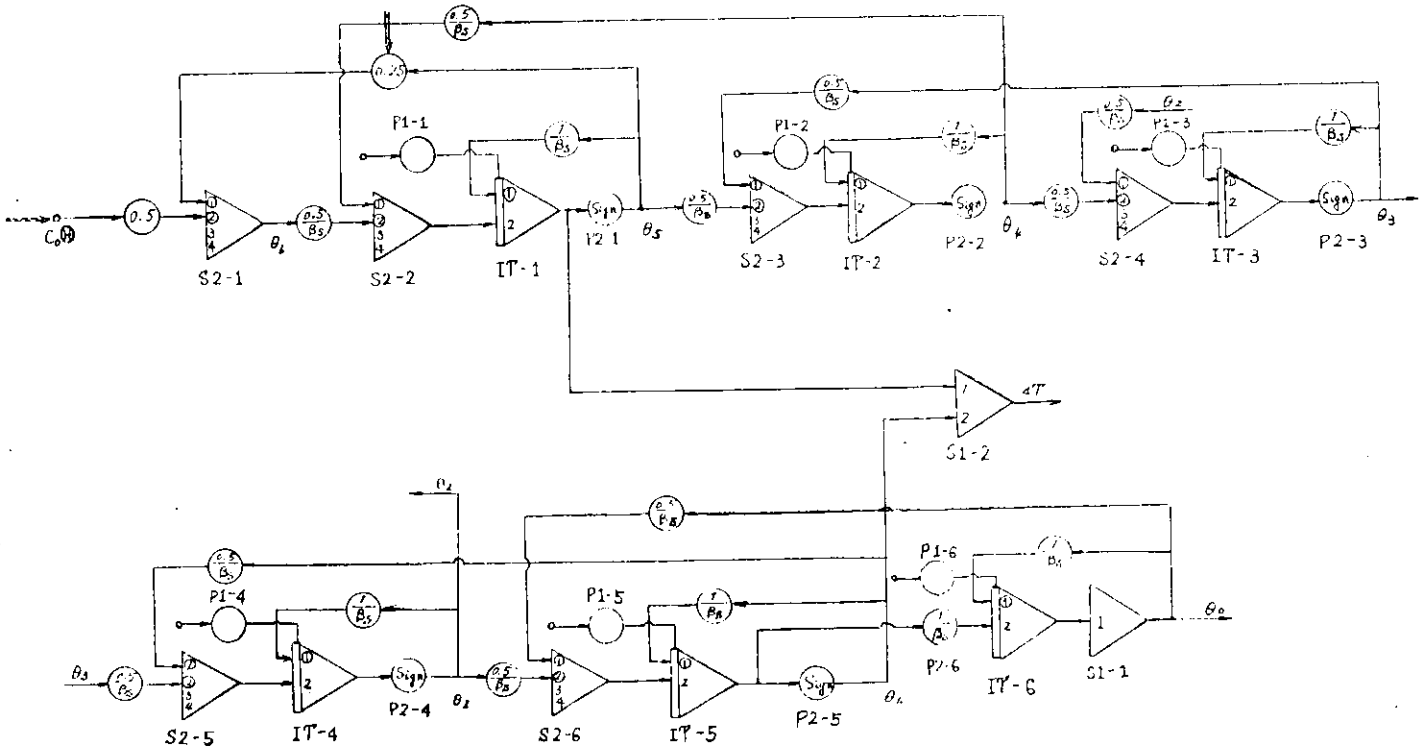
$$\beta_1^* = \frac{1}{40\beta_1} = 4.527 \quad \text{sec}$$





注）　Potentio set との対応で注、Module 3　ただし、MD23のみModule 2

第1.21図　伸び差試験用ブロック図



$$C_0 = \frac{1}{1+2\gamma} \qquad \beta_S = \frac{\beta_C}{\lambda}$$

$$C_1 = \frac{2\gamma}{1+2\gamma}$$

$$\gamma = \frac{K}{2\Delta x \cdot h}$$

β_C ； 実系の時定数

λ ； time scale factor

境界条件

θ_6 端 ； 熱輻射

θ_0 端 ； 熱遮断

注）ポテンショ＝セットとの対応では，Module 1.

⇒⇒⇒ ； C_0、C_1 を作るBLOCK DIAGRAM

○——— ；－10V定電圧電源

第1.22図 熱応力試験用ブロック図

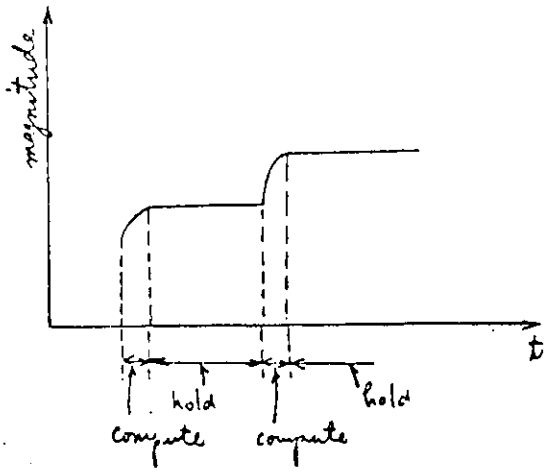
BLOCK DIAGRAM FOR HEAT CONDUCTION EQUATION

（熱系本体のシミュレーション部分）

(3) 演算とHoldの繰返しを行なうこと

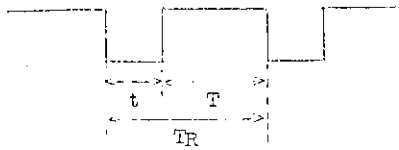
右図のように、演算とHoldを適当な比率で与えると、時間スケールを拡大したことに相当する。

一般に、Hold特性は、サークル特性に比べ、非常にすぐれているから、この手法は有効であつた。



アナコムによる結線

1) 所定のパルス発生回路を設定

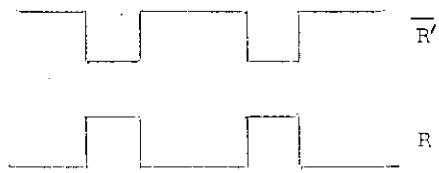


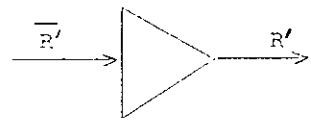
; $\overline{R'}$とする。

t ; Compute time
T ; Hold time

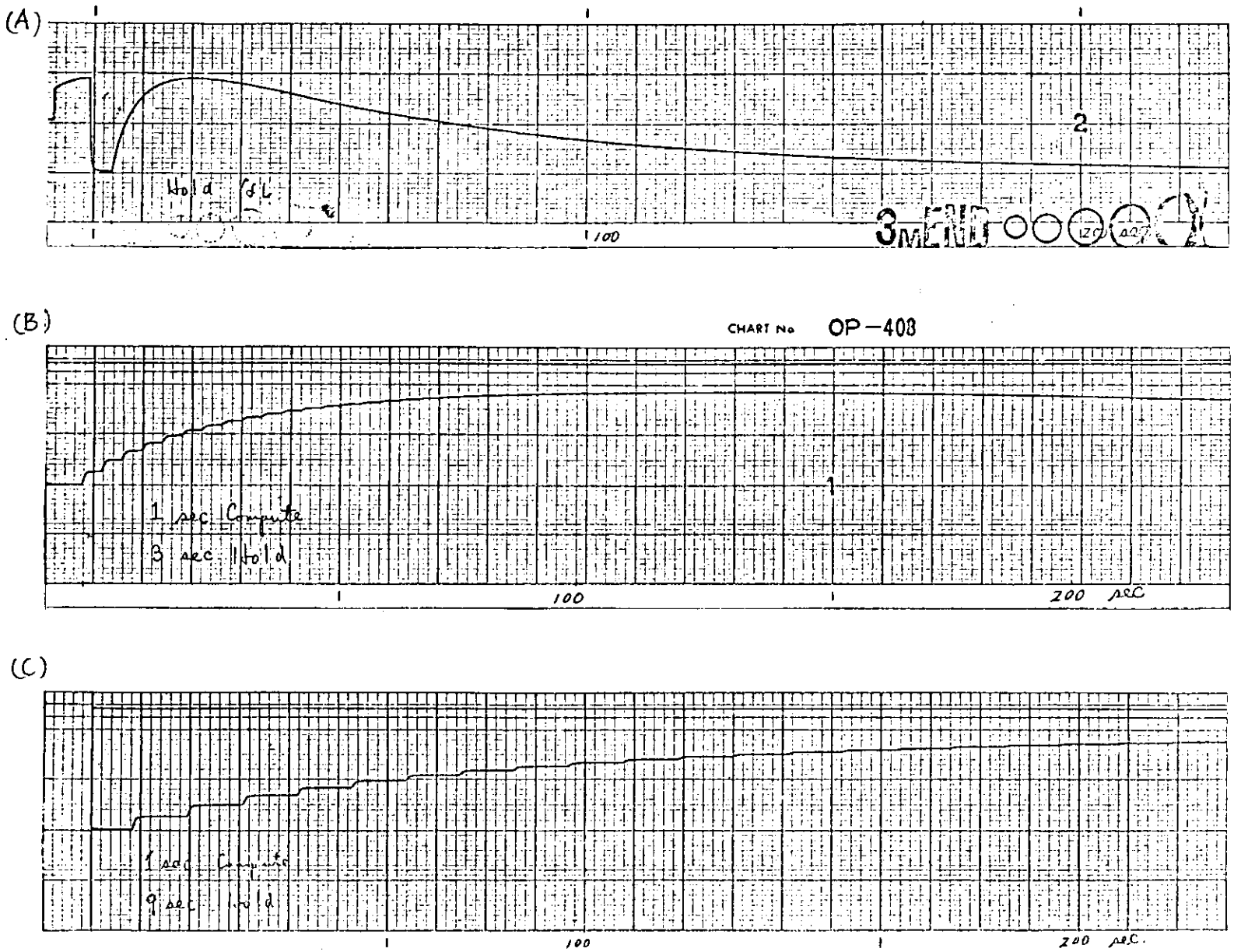
2) 積分器のCompute, Hold を、1) のパルスでコントロールする。

$\overline{R'}$ に対しR' パルスを作ると、





$\overline{R'}$ を Hold を制御するための信号
R' を Computeを制御するための信号
} として用いる。



第1.2.3図　アナコムによる解（熱応力モデル）

第1.16表　自動結線によるセット値

```
// POT SET -TEST
S2111    0.250E0    0.250E0
S2112    0.500E0    0.497E0
P2111    0.100E1    0.100E1
P2121    0.100E1    0.100E1
P2131    0.100E1    0.100E1
P2141    0.100E1    0.100E1
P2151    0.100E1    0.100E1
S2121    0.125E0    0.125E0
S2122    0.125E0    0.125E0
S2131    0.125E0    0.125E0
S2132    0.125E0    0.125E0
S2141    0.125E0    0.125E0
S2142    0.125E0    0.125E0
S2151    0.125E0    0.125E0
S2152    0.125E0    0.125E0
S2161    0.125E0    0.125E0
S2162    0.125E0    0.125E0
P2161    0.249E0    0.248E0
IT111    0.249E0    0.248E0
IT121    0.249E0    0.249E0
IT131    0.249E0    0.248E0
IT141    0.249E0    0.248E0
IT151    0.249E0    0.249E0
IT161    0.249E0    0.249E0
P1111    0.100E0    0.100E0
P1121    0.100E0    0.100E0
P1131    0.100E0    0.100E0
P1141    0.100E0    0.100E0
P1151    0.100E0    0.100E0
P1161    0.100E0    0.100E0
S2211    0.082E0    0.082E0
S2221    0.082E0    0.082E0
P2211    0.100E1    0.100E1
P2221    0.100E1    0.100E1
P2231    0.130E0    0.130E0
P1211    0.100E1    0.100E1
P1221    0.200E1    0.200E1
P1231    0.100E1    0.100E1
P1241    0.200E1    0.200E1
P1251    0.200E1    0.200E1
P1261    0.200E1    0.200E1
P2241    0.200E1    0.200E1
P2251    0.200E1    0.200E1
P1311    0.200E0    0.200E0
P1321    0.092E0    0.092E0
P1331    0.500E0    0.499E0
IT311    0.276E0    0.275E0
P1341    0.330E0    0.329E0
P1351    0.088E0    0.088E0
P1361    0.500E0    0.499E0
IT321    0.264E0    0.264E0
P2331    0.100E1    0.100E1
P2311    0.400E1    0.399E1
S2311    0.368E0    0.367E0
S2312    0.376E0    0.375E0
//END
```

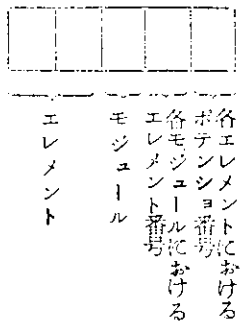
(1)　エレメント

S1，S2　　加算器

P1，P2　　ポテンショメータ

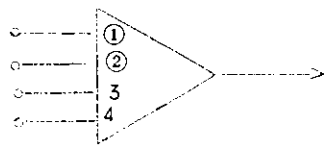
IT　　積分器

(2)　記述の説明



Ex 1.

S2112



○モジュール　1

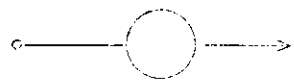
○エレメント　S2

○モジュール1には6コのS2があるがその1番目のエレメント

○ポテンショが2コあるがその第2番目

Ex 2.

P1241



○モジュール　2

○エレメント　P1

○モジュール2には6コのP1があるがその4番目のエレメント

○設定すべきポテンショはもちろん1コしかないから第1番目

1.8.4　実船計測結果による数式モデルの検討

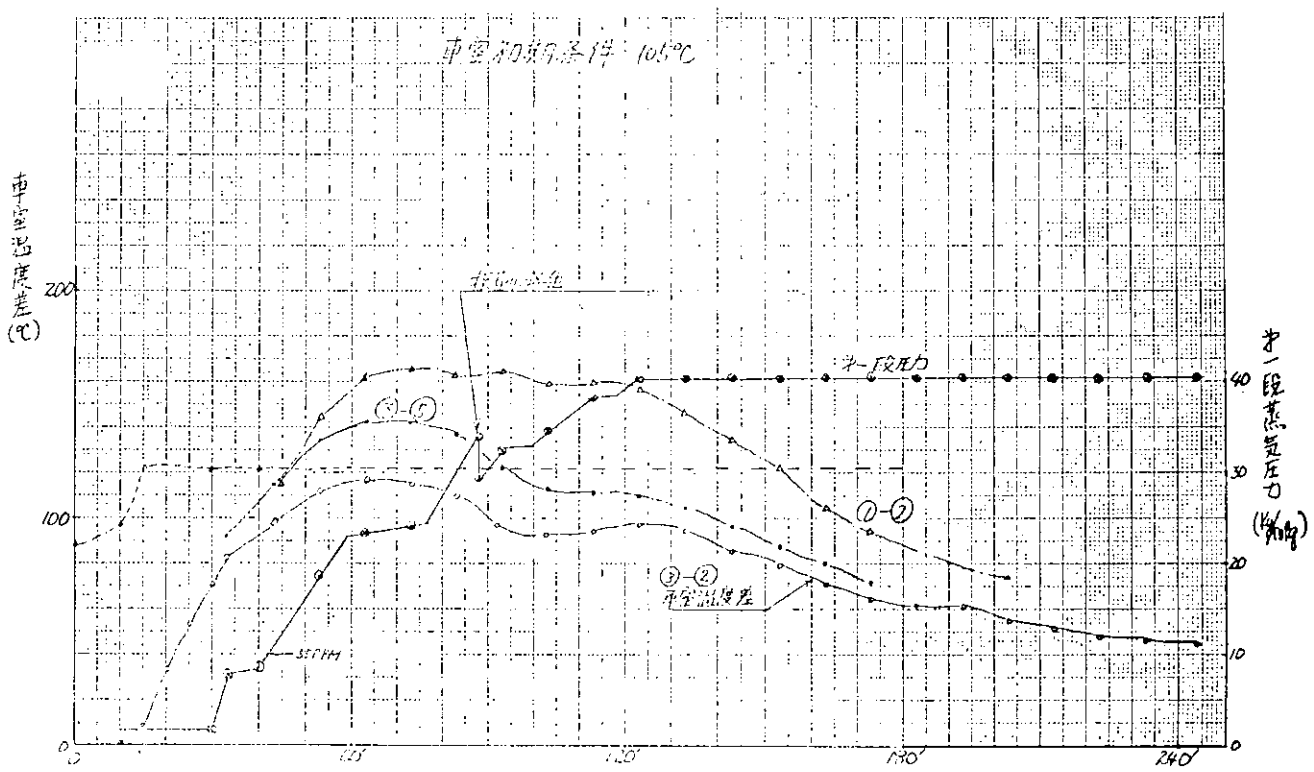
タービン数式モデルの精度を高めるために数回にわたつてタービン車室温度分布を計測したがその中でもつともモデルを作りやすい増速を行なつた例を第1.24図として添付する。

図中③—②は第1.27図のフランジ形状図に示すようにフランジ内側より65㎜離れた点の計測値を示す。

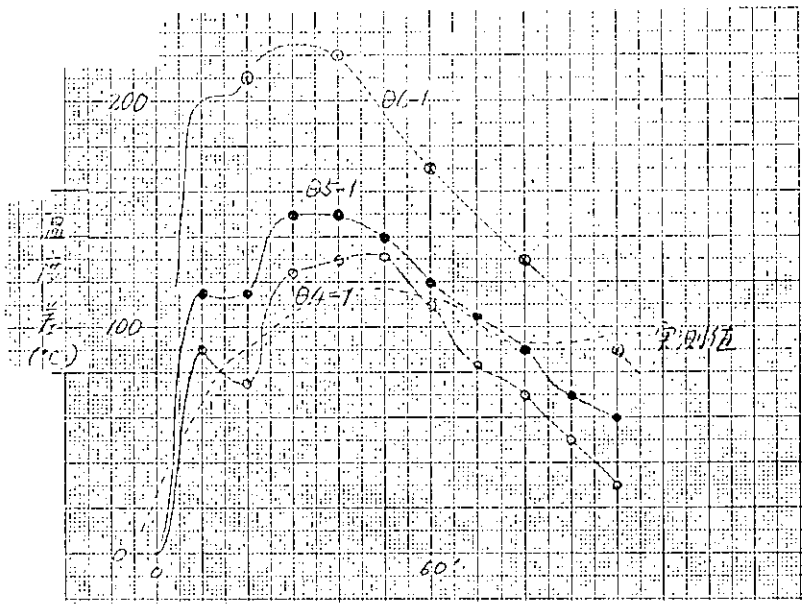
このデータは起動後80分にて振動が発生する等の事故を起したので増速率に関する限界値の目安とした。

(1)　モデル作成

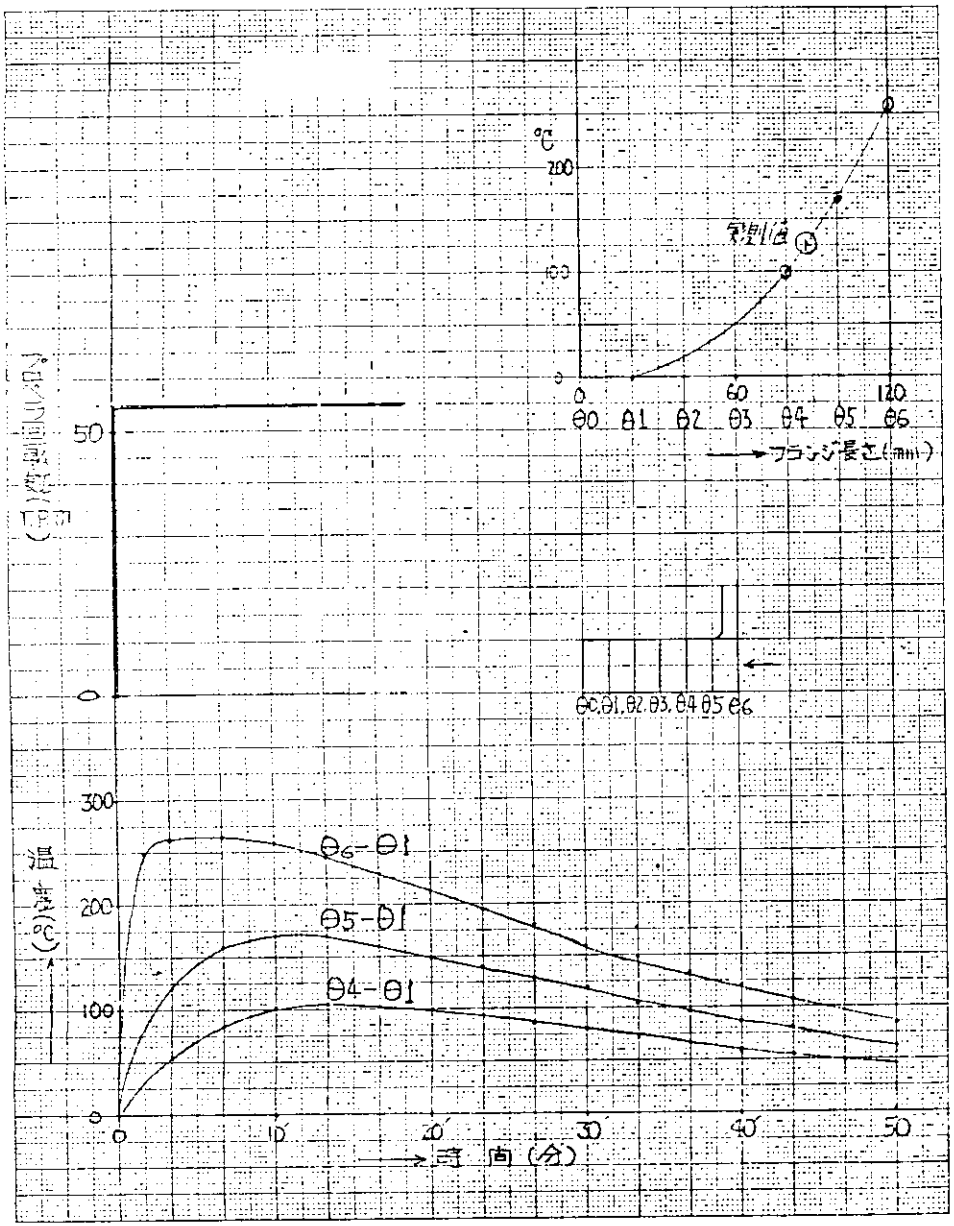
実測計測をもとにモデルを作成したが起動時の数十分間およびMAX. 温度差が実測値とできるだけ一致するように常数を選定した。特に計測点がフランジ内側より65㎜離れているため実測結果のピークより約45℃程度upした。



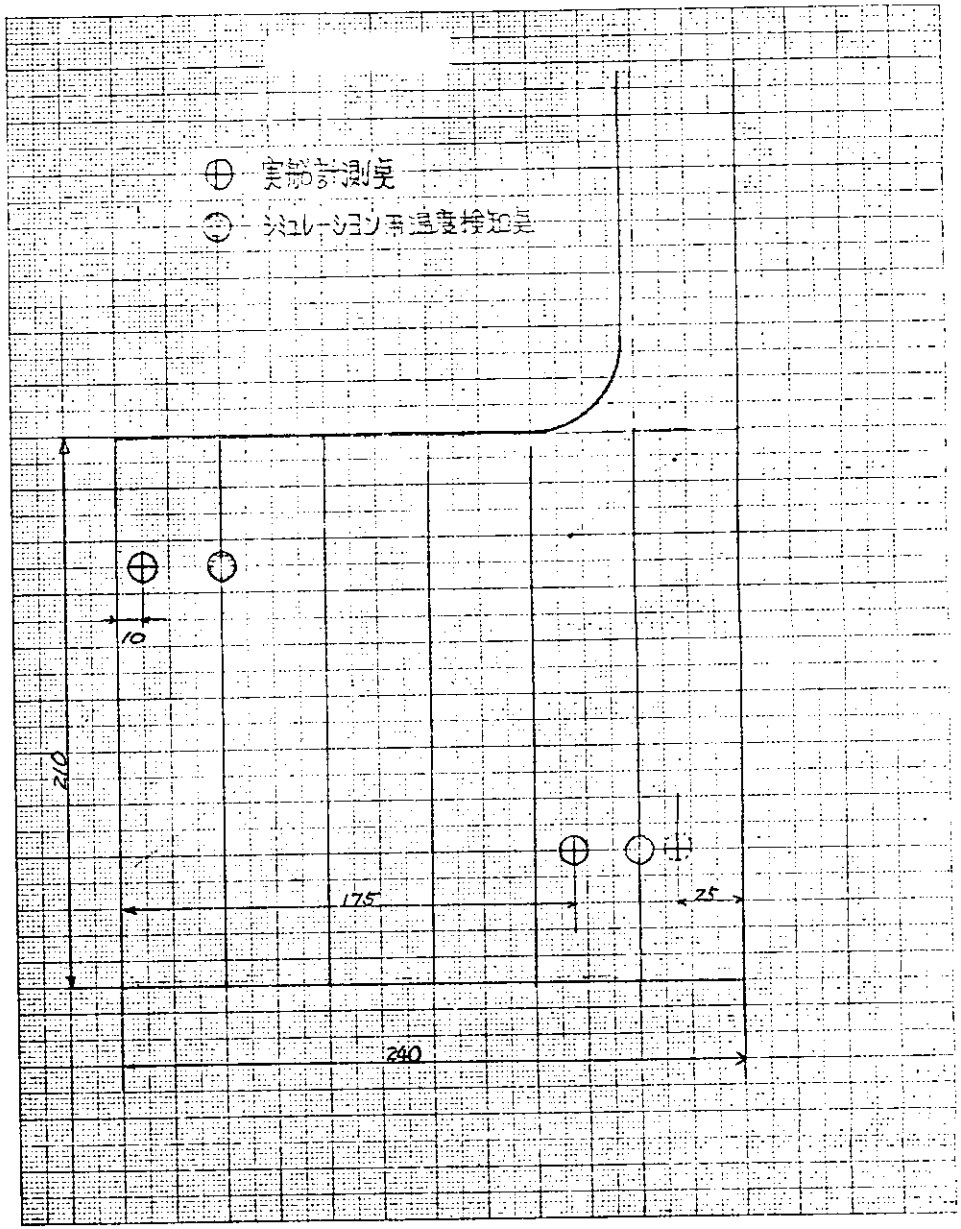
第1.24図　タービン車室温度分布



第1.25図　実測値とモデル計算値



第1.26図



第1.27図　フランジ形状

(2) 主タービン車室温度分布実船計測結果

(a) 計測タービン要目

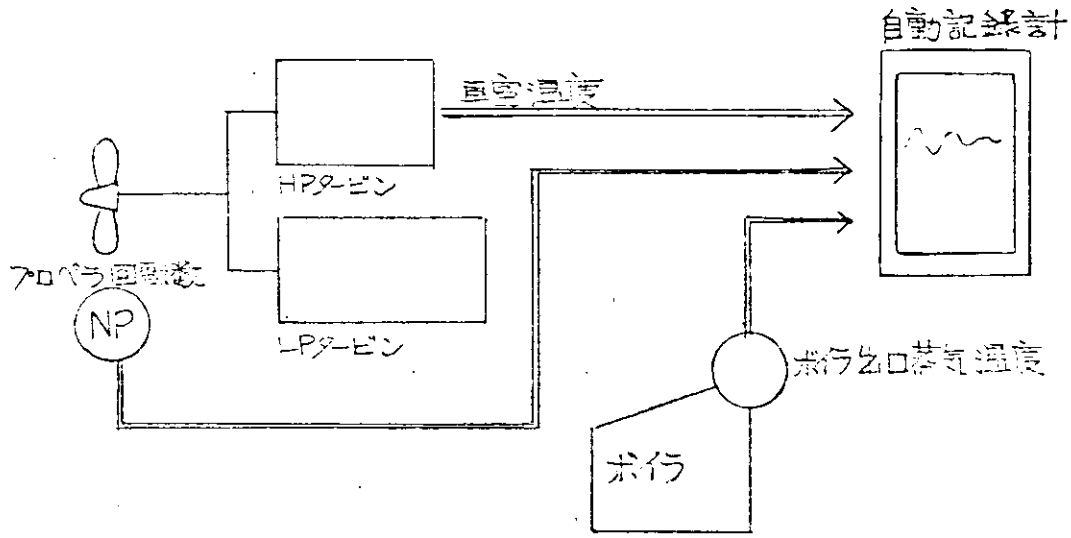
型　式　　MS－360

出　力　　34000PS　　NOR＝MCR

	HPタービン	LPタービン	プロペラ
段落数（段）	9	8	
最大出力回転数（R. P. M）	6,485	3,155	90
定格出力回転数（R. P. M）	6,485	3,155	90

(b) 日　時　　昭和45年10月29日

(c) 計測器構成



(d) 計測項目

点	項　目	センサー	点　数	備　考
1	HPタービン車室上部	熱電対	1	①
2	HPタービン・フランジ外側	〃	1	②
3	HPタービン・フランジ内側	〃	1	③
4	HPタービン車室下部	〃	1	④
5	HPタービン・フランジ外側	〃	1	⑤
6	ボイラ過熱器出口温度	〃	1	⑥
7	プロペラ回転数	タコ・ジエネ	1	⑦
8	HPタービン一段落圧力		1	⑧

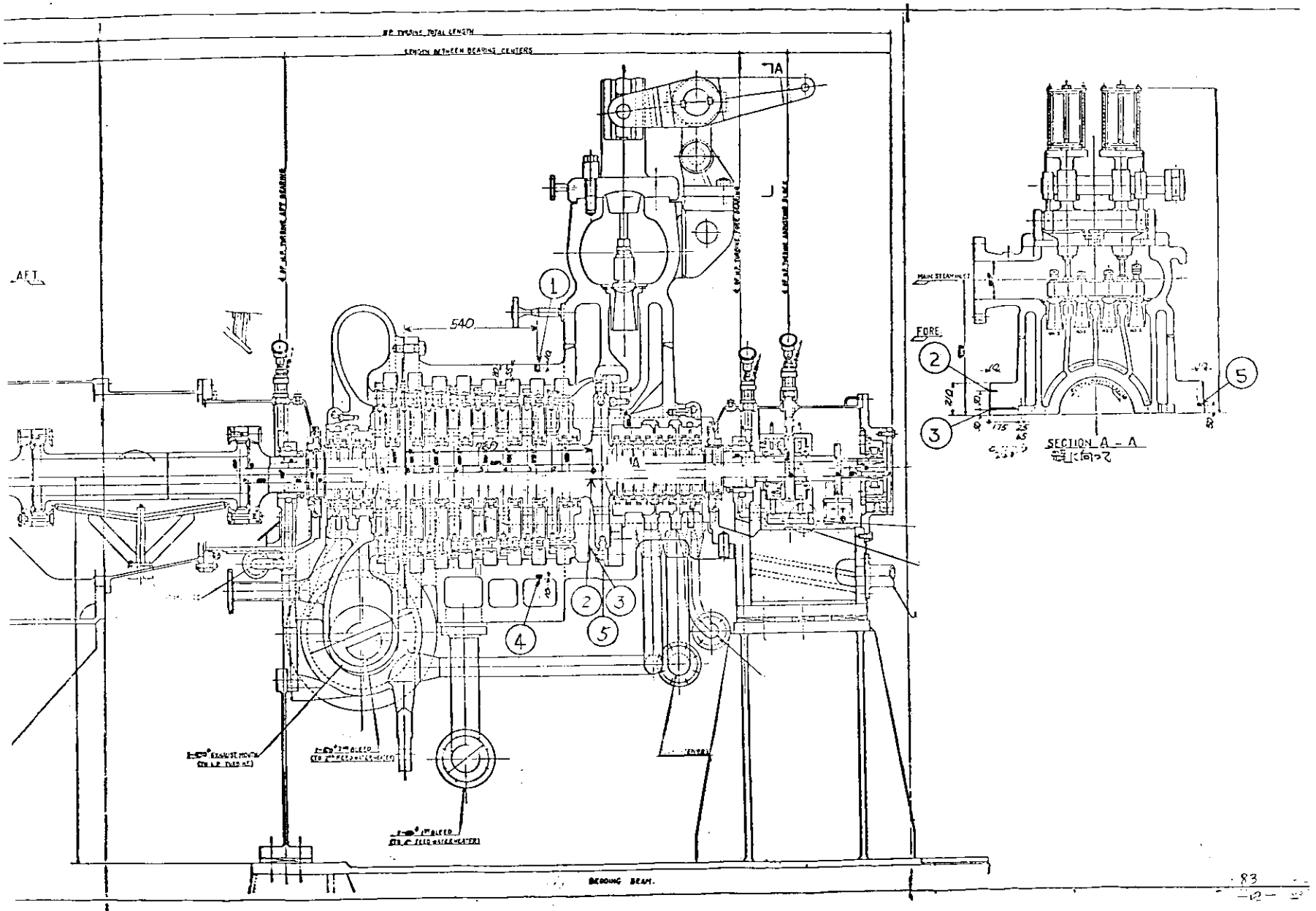
(e) 計測位置

車室温度計の計測位置を第1.28図に示す。

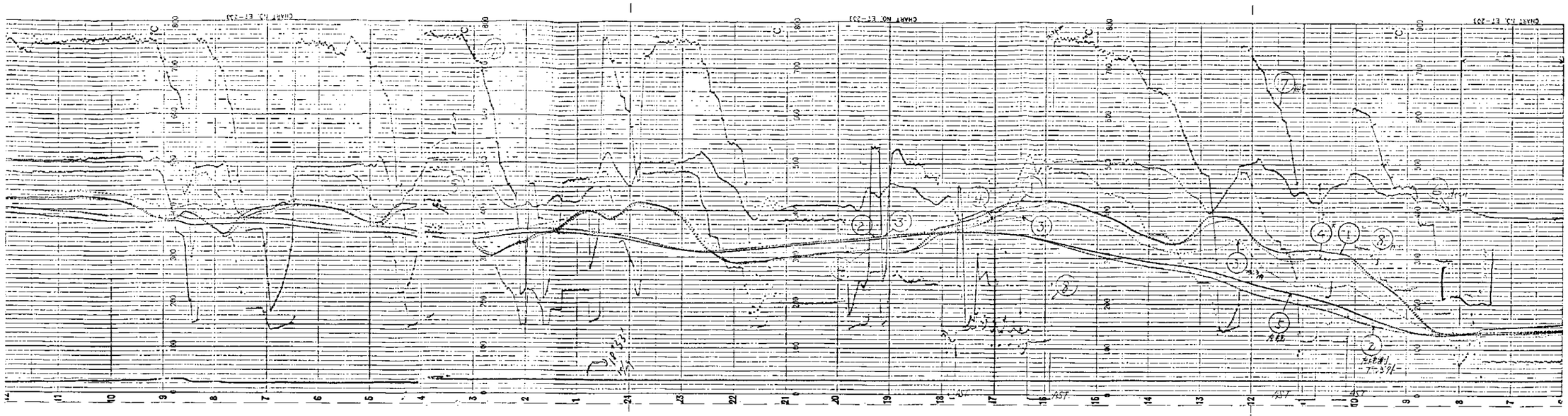
(f) 計測結果

計測結果を第1.29図（A、B）に示す。図中の①～⑧までの符号は前記(d)項に記載の符号と同一内容を示す。

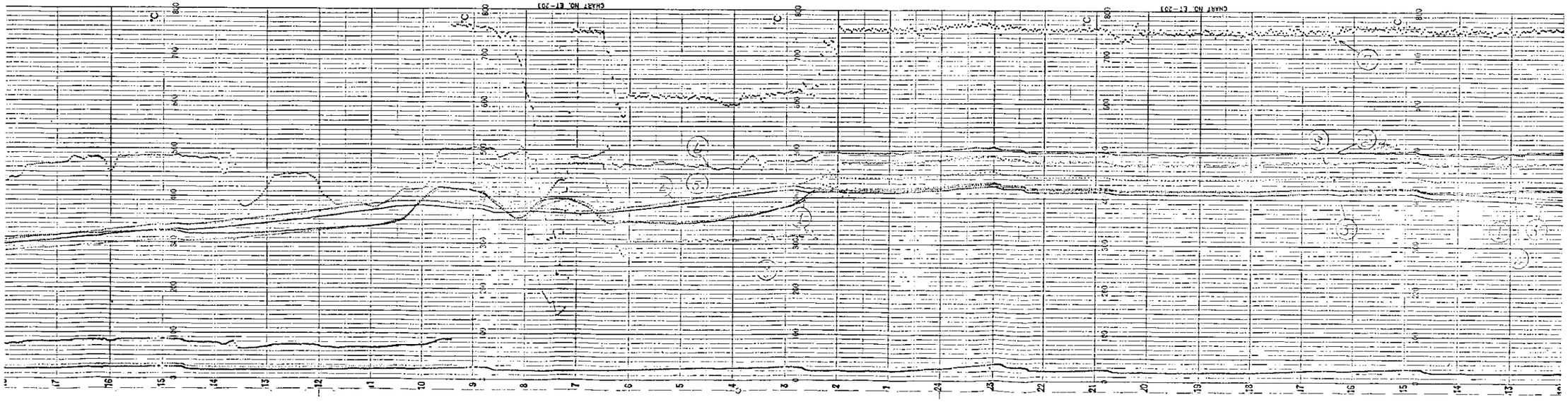
第1.30図はプロペラ回転数⑦、HPタービン一段落圧力⑧の回転数、圧力への換算表である。



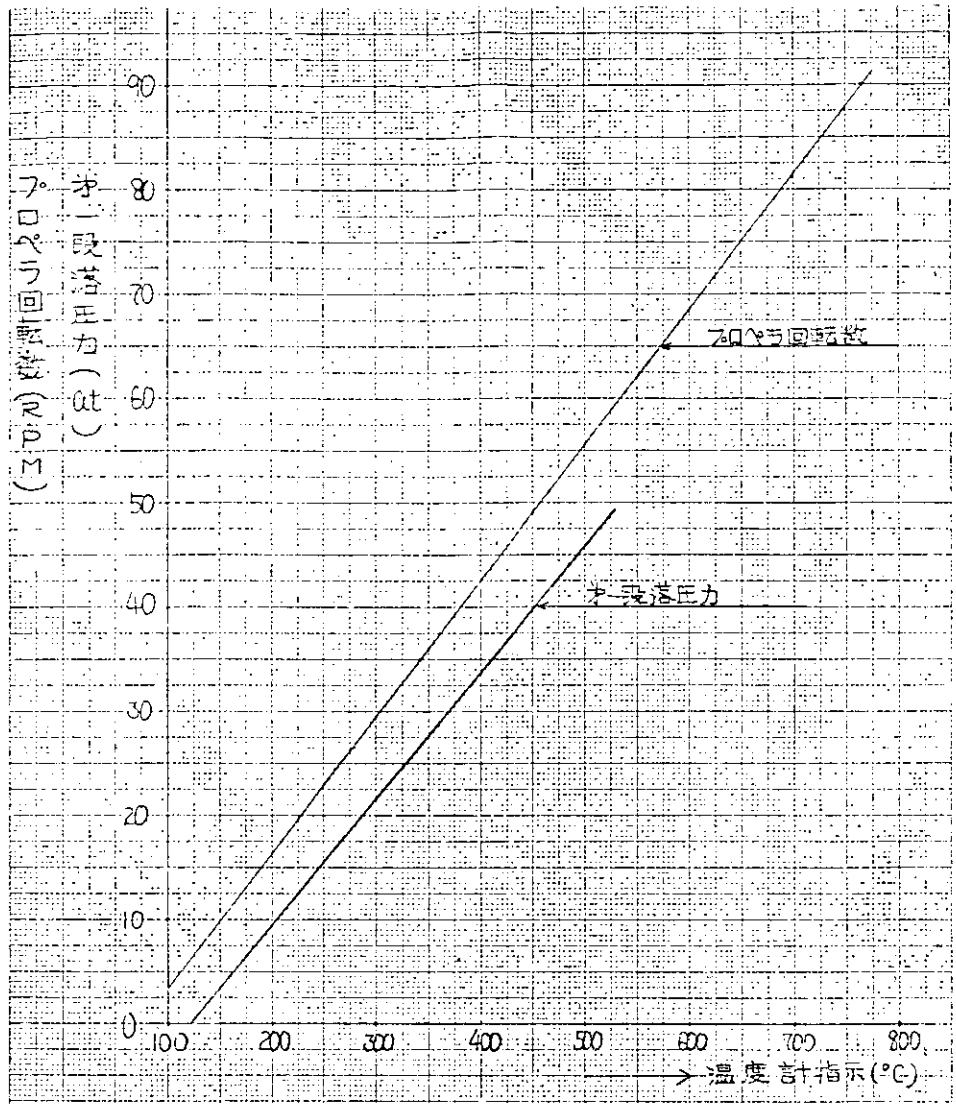
第 1. 2 8図　主タービン車室温度計測位置



第1.29図(A)　主タービン車室温度計測値



第1.29図(B)　主タービン車室温度計測値



第 1.3 0 図

1.9　シミュレーション結果

本作業では昨年度に作成したディティルドフローチャートにもとづきプログラムをコーディングし、実機を用いてシミュレーションを行ない、フローチャートの実用性を確認することに主眼をおいたことは前にも述べたが、一応のシステムに組みたててシミュレーションが可能な形にするためにはフローチャートに表現された以外のプログラムやシステム設計が必要であつたことは当然のことである。しかし、その際にシステム化についての注文をどこまで考慮すればよいか一考を要するところがあつたが、今回はトータルシステムの範囲を余り拡張せず、またディティルドフローチャートの原形もできるだけ残すこととしフローチャート上の問題があつても問題点として確認するにとどめた。

シミュレーション結果については昭和４６年２月５日タービンプラント分科会第７回第１小委員会においてデモンストレーションを実施し、概況が確認された。

以下に本作業の結果ないしは問題点について述べる。

1.9.1　デ　ー　タ

実験結果のオシログラフやメッセージプリントのリスト(第１１７表（Ａ～Ｇ）および第１３１図（Ａ～Ｅ）に代表的なものをあげておく。

第1.17表 (A)

#1－1

MAIN TURBINE VIBRATION TEST

		HPタービン	振幅(μ)	周波数(Hz)	プロペラ回転数(RPM)
13.38	HP	AMP=096	FRQ=085	N=050	
13.39	ROTOR UNBALANCE				
13.40	ROTOR UNBALANCE				
13.40	ROTOR UNBALANCE				周波数解析結果
13.40	ROTOR UNBALANCE				
13.40	OIL WHIP				
13.40	OIL WHIP				
13.40	HP	AMP=174	FRQ=024	N=050	
13.40	HP	AMP=174	FRQ=024	N=050	
13.40	HP	AMP=167	FRQ=024	N=050	
13.41	OIL WHIP				
13.41	OIL WHIP				
13.41	OIL WHIP				
13.41	OIL WHIP				
13.41	OIL WHIP				
13.42	OIL WHIP				
13.42	HP	AMP=125	FRQ=037	N=078	
13.42	HP	AMP=155	FRQ=036	N=090	
13.42	OIL WHIP				
13.42	OIL WHIP				
13.43	OIL WHIP				
13.43	OIL WHIP				
① 13.43	ROTOR UNBALANCE				
13.43	ROTOR UNBALANCE				
② 13.44	OIL WHIP				
13.44	OIL WHIP				

第1.17表 (B)

#1－2

MAIN TURBINE VIBRATION TEST

④ 13.46	HP	AMP=153	FRQ=023	N=090	OVERRIDE CONTROL START
⑤ 13.48	SLOW DOWN				
13.48	SLOW DOWN				
⑥ 13.48	SLOW DOWN				
13.48	SLOW DOWN				
⑦ 13.48	SLOW DOWN				
13.49	SLOW DOWN				
13.49	SLOW DOWN				
⑧ 13.49	HP	AMP=199	FRQ=023	N=057	
13.49	HP	AMP=199	FRQ=023	N=057	
⑨ 13.49	QUICK SLOW DOWN				

13.49 OIL WHIP

⑩ 13.49 SET DIAL TO SHAFT REV NS=040

⑪ 13.49 OIL WHIP

⑫ 13.49 QUICK SLOW DOWN

計算機セット値(RPM)

⑬ 13.49 SET DIAL TO SHAFT REV NS=040 DIAL CONTROL RESET

⑭ 13.50 HP AMP=059 FRQ=023 N=037

⑮ 13.52 HP AMP=156 FRQ=026 N=090

⑯ 13.53 SLOW DOWN

13.53 SLOW DOWN

⑰ 13.53 SLOW DOWN

13.53 SLOW DOWN

⑱ 13.53 SLOW DOWN

13.53 SLOW DOWN

13.53 SLOW DOWN

⑲ 13.53 HP AMP=208 FRQ=027 N=056

13.53 HP AMP=208 FRQ=027 N=056

⑳ 13.54 QUICK SLOW DOWN

㉑ 13.54 SET DIAL TO SHAFT REV NS=039

㉒ 13.54 QUICK SLOW DOWN

㉓ 13.54 SET DIAL TO SHAFT REV NS=039 DIAL CONTROL RESET

㉔ 13.54 HP AMP=113 FRQ=027 N=036

13.54 HP AMP=113 FRQ=027 N=036

㉕ 13.54 HP AMP=000 FRQ=027 N=036

第1.17表 (c)

#1－3

MAIN TURBINE THERMAL TRANSFORMATION TEST

14.08 HP HOGGING

プロペラ回転数(RPM)　　℃

		=T(1)−T(3)		T(1)	T(3)	T′(1)	T′(3)
	14.08	DT1=005	N=090	T=188	183	189	183
③	14.10	HP HOGGING		NEW	DATA	OLD	DATA
	14.10	DT1=029	N=090	T=212	183	189	183
④	14.11	HP HOGGING					
	14.11	DT1=029	N=054	T=212	183	212	183
⑤	14.12	HP RIGHT					
	14.12	DT2=073	N=049	T=260	187	208	187
	14.12	HP RIGHT					
	14.12	DT2=073	N=049	T=260	187	208	187
⑥	14.13	HP RIGHT					
	14.13	DT2=073	N=049	T=260	187	260	187
⑦	14.13	HP SAGGING					
	14.13	DT1=028	N=049	T=155	183	212	183
⑧	14.14	HP RIGHT					
	14.14	DT2=025	N=049	T=212	187	260	187
	14.14	HP SAGGING					

14.14 DT1=066 N=049 T=123 189 155 183

⑨ 14.15 HP HOGGING

14.15 DT1=006 N=049 T=194 188 123 189

14.15 HP SAGGING

14.15 DT1=006 N=049 T=194 188 123 189

14.15 HP SAGGING

14.15 DT1=006 N=049 T=194 188 123 189

⑩ 14.16 LP RIGHT

14.16 DT4=037 N=049 T=217 254 217 183

14.16 HP HOGGING

14.16 DT1=006 N=049 T=195 189 194 188

14.16 LP LEFT

14.16 DT4=037 N=049 T=217 254 217 183

14.16 LP LEFT

14.16 DT4=037 N=049 T=217 254 217 183

⑪ 14.17 LP LEFT

14.17 DT4=044 N=049 T=217 261 217 254

14.17 LP LEFT

14.17 DT4=044 N=049 T=217 261 217 254

⑫ 14.18 LP LEFT

14.18 DT4=044 N=049 T=217 261 217 261

⑬ 14.20 LP HOGGING

14.20 DT3=016 N=089 T=207 191 207 205

⑭ 14.21 LP HOGGING

14.21 DT3=000 N=089 T=207 207 207 191

⑮ 14.22 LP SAGGING

14.22 DT3=075 N=089 T=207 282 207 207

14.22 LP SAGGING

14.22 DT3=075 N=089 T=207 282 207 207

第1.17表 (D)

#1－4

MAIN TURBINE THERMAL TRANSFORMATION TEST

WITH SMOOTHER (TIME RATIO CONTROLLER)

⑰ 14.26 HP SAGGING

14.26 DT1=184 N=089 T=005 189 194 188

14.26 HP SAGGING

14.26 DT1=184 N=089 T=005 189 194 188

⑱ 14.27 HP SAGGING

14.27 DDT1=178 N=089 T=011 189 005 189

⑲ 14.34 HP SAGGING

14.34 DT1=027 N=089 T=162 189 084 189

⑳ 14.35 HP HOGGING

14.35 DT1=026 N=089 T=214 188 162 189

㉑ 14.36 HP HOGGING

14.36 DT1=062 N=089 T=250 188 214 188

㉒ 14.39 HP HOGGING

14.39 DT1=011 N=089 T=200 189 302 189

14.39 HP HOGGING

14.39 DT1=011 N=089 T=200 189 302 189

㉓ 14.40 HP SAGGING

14.40 DT1=056 N=089 T=132 188 200 189

14.40 HP SAGGING

14.40 DT1=056 N=089 T=132 188 200 189

㉔ 14.41 HP SAGGING

14.41 DT1=058 N=089 T=131 189 132 188

第1.17表 (6)

#1－5

MAIN TURBINE THERMAL STRESS TEST

① 15.20 HP TURBINE STRESS

15.20 DT=126 N=050

フランジ温度差 ($\theta_1-\theta_5$) (℃)

プロペラ回転数 (RPM)

15.20 HP TURBINE STRESS

15.20 DT=126 N=050

OVERRIDE CONTROL START

② 15.26 SLOW DOWN

15.26 SLOW DOWN

③ 15.27 HP TURBINE STRESS

15.27 DT=166 N=090

15.27 SLOW DOWN

15.27 SLOW DOWN

④ 15.28 HP TURBINE STRESS

15.28 DT=172 N=090

15.28 SLOW DOWN

15.28 SLOW DOWN

⑤ 15.29 SLOW DOWN

15.29 SLOW DOWN

15.30 SLOW DOWN

15.30 SLOW DOWN

15.31 SLOW DOWN

⑥ 15.32 SLOW DOWN

⑦ 15.33 SLOW DOWN

15.34 SLOW DOWN

⑧ 15.35 HP TURBINE STRESS

15.35 DT=225 N=002

⑨ 15.38 HP TURBINE STRESS

15.38 DT=101 N=091

15.38 HP TURBINE STRESS

15.38 DT=101 N=091

15.38 SLOW DOWN

15.38 SLOW DOWN

第1.17表 (F)

#1－6

MAIN TURBINE CASING-ROTOR GAP TEST

GAP(×10㎜)
GAP変化率 (×10㎜/min)

17.19 HP TURBINE GAP
17.19 L=013 N=051 DL=009
17.20 HP TURBINE GAP
17.20 L=007 N=051 DL=006
17.21 HP TURBINE GAP
17.21 L=002 N=051 DL=005
17.21 HP TURBINE GAP
17.21 L=002 N=051 DL=005
17.21 HP TURBINE GAP
17.21 L=002 N=051 DL=005
17.21 HP TURBINE GAP
17.21 L=002 N=051 DL=005
17.22 HP TURBINE GAP
17.22 L=022 N=051 DL=020
17.22 HP TURBINE GAP
17.22 L=022 N=051 DL=020
17.24 HP TURBINE GAP
17.24 L=014 N=090 DL=008
17.24 SLOW DOWN
17.24 SLOW DOWN
17.25 HP TURBINE GAP
17.25 L=014 N=071 DL=000
17.26 HP TURBINE GAP
17.26 L=008 N=068 DL=006
17.26 HP TURBINE GAP
17.26 L=008 N=068 DL=006
17.26 SLOW DOWN
17.27 HP TURBINE GAP
17.27 L=002 N=063 DL=006
17.27 HP TURBINE GAP
17.27 L=002 N=063 DL=006
17.27 SLOW DOWN
17.28 HP TURBINE GAP
17.28 L=000 N=054 DL=002
17.28 SLOW DOWN
17.28 QUICK SLOW DOWN
17.29 QUICK SLOW DOWN

OVERRIDE CONTROL START

第1.17表 (G)

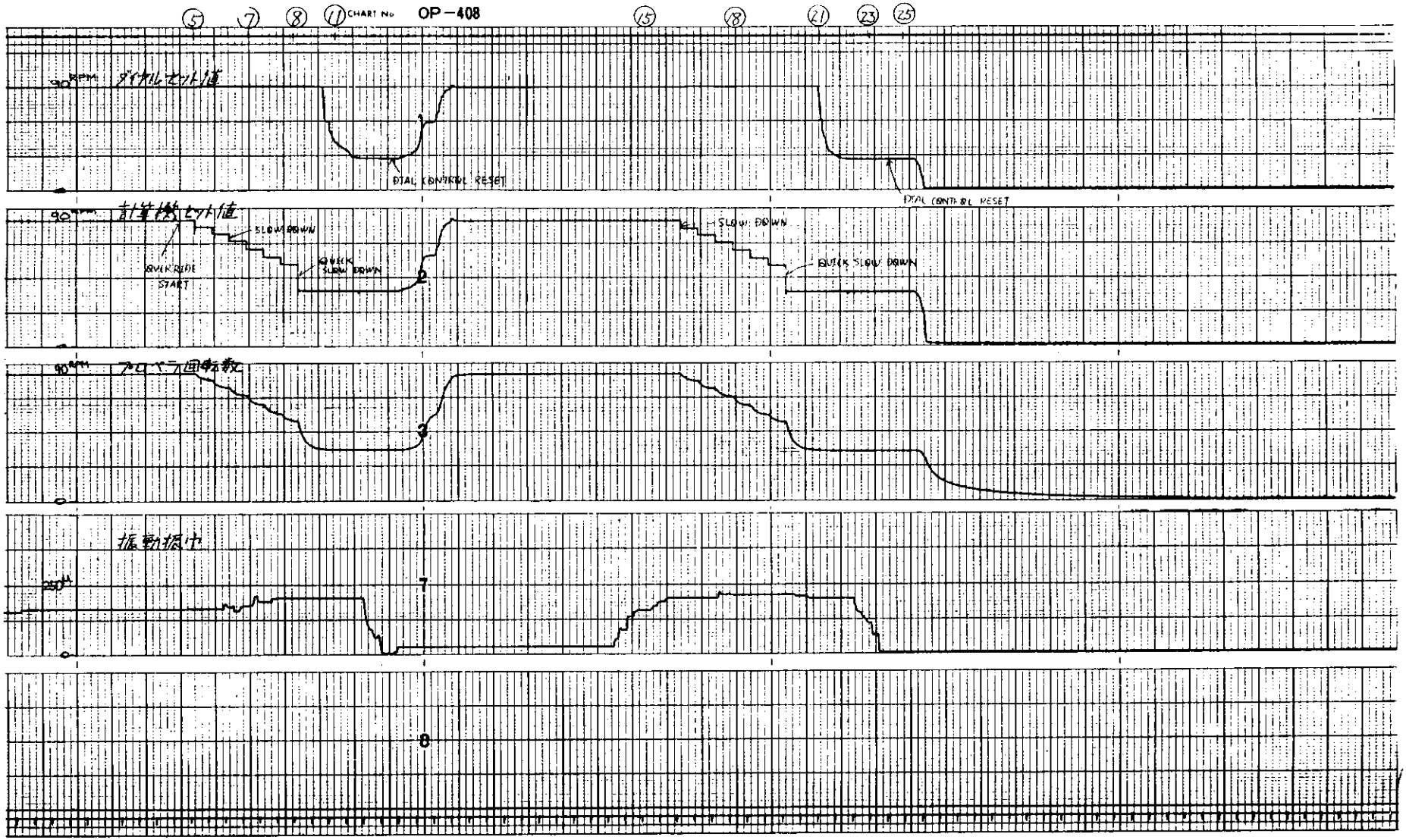
#1－7

MAIN TURBINE THERMAL STRESS & VIBRATION TEST

14.09 HP TURBINE STRESS
14.09 DT=009 N=029

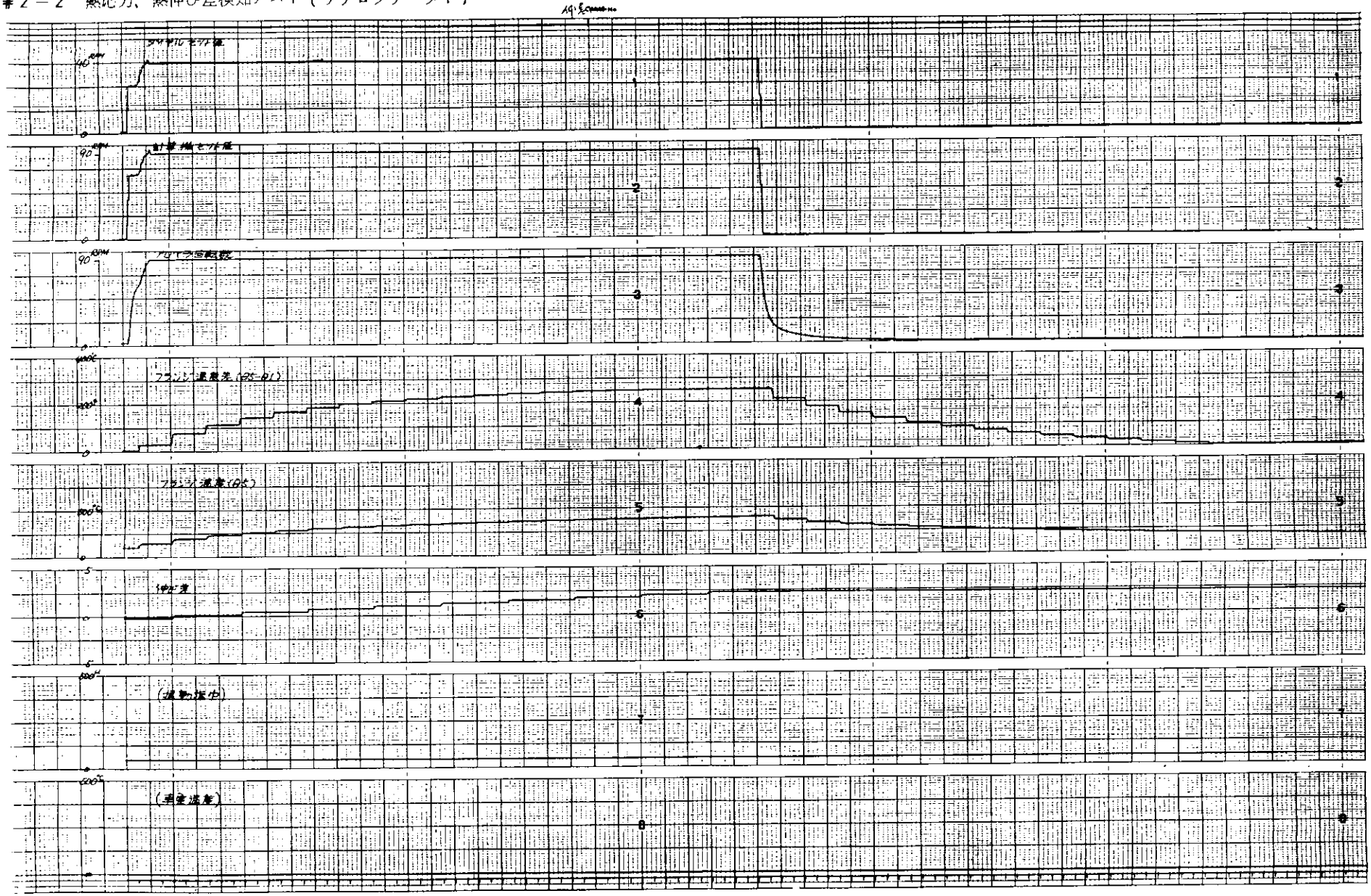
14.14 HP TURBINE STRESS
14.14 DT=071 N=029
14.15 HP TURBINE STRESS
14.15 DT=093 N=055
14.15 HP TURBINE STRESS
14.15 DT=093 N=055
14.17 HP TURBINE STRESS
14.17 DT=129 N=055
14.17 HP TURBINE STRESS
14.17 DT=129 N=055
14.20 HP TURBINE STRESS
14.20 DT=167 N=055
14.25 HP AMP=214 FRQ=086 N=090
14.25 SLOW DOWN
14.25 SLOW DOWN
14.25 SLOW DOWN
14.25 ROTOR UNBALANCE
14.25 SLOW DOWN
14.25 SLOW DOWN
14.26 ROTOR UNBALANCE
14.26 ROTOR UNBALANCE
14.26 SLOW DOWN
14.26 ROTOR UNBALANCE
14.26 HP AMP=215 FRQ=087 N=061
14.26 HP AMP=215 FRQ=087 N=061
14.27 HP AMP=004 FRQ=087 N=061
14.28 HP AMP=132 FRQ=086 N=061
14.28 HP AMP=000 FRQ=087 N=061
14.30 HP AMP=171 FRQ=086 N=091
14.30 SLOW DOWN
14.30 SLOW DOWN
14.30 SLOW DOWN
14.30 ROTOR UNBALANCE
14.30 SLOW DOWN
14.30 SLOW DOWN
14.30 SLOW DOWN
14.31 ROTOR UNBALANCE
14.31 SLOW DOWN
14.31 SLOW DOWN
14.31 SET DIAL TO SHAFT REV NS=054
14.31 HP AMP=192 FRQ=086 N=051
14.31 HP AMP=192 FRQ=086 N=051
14.31 SLOW DOWN
14.31 SET DIAL TO SHAFT REV NS=054

＃２－１　異常振動検知テスト



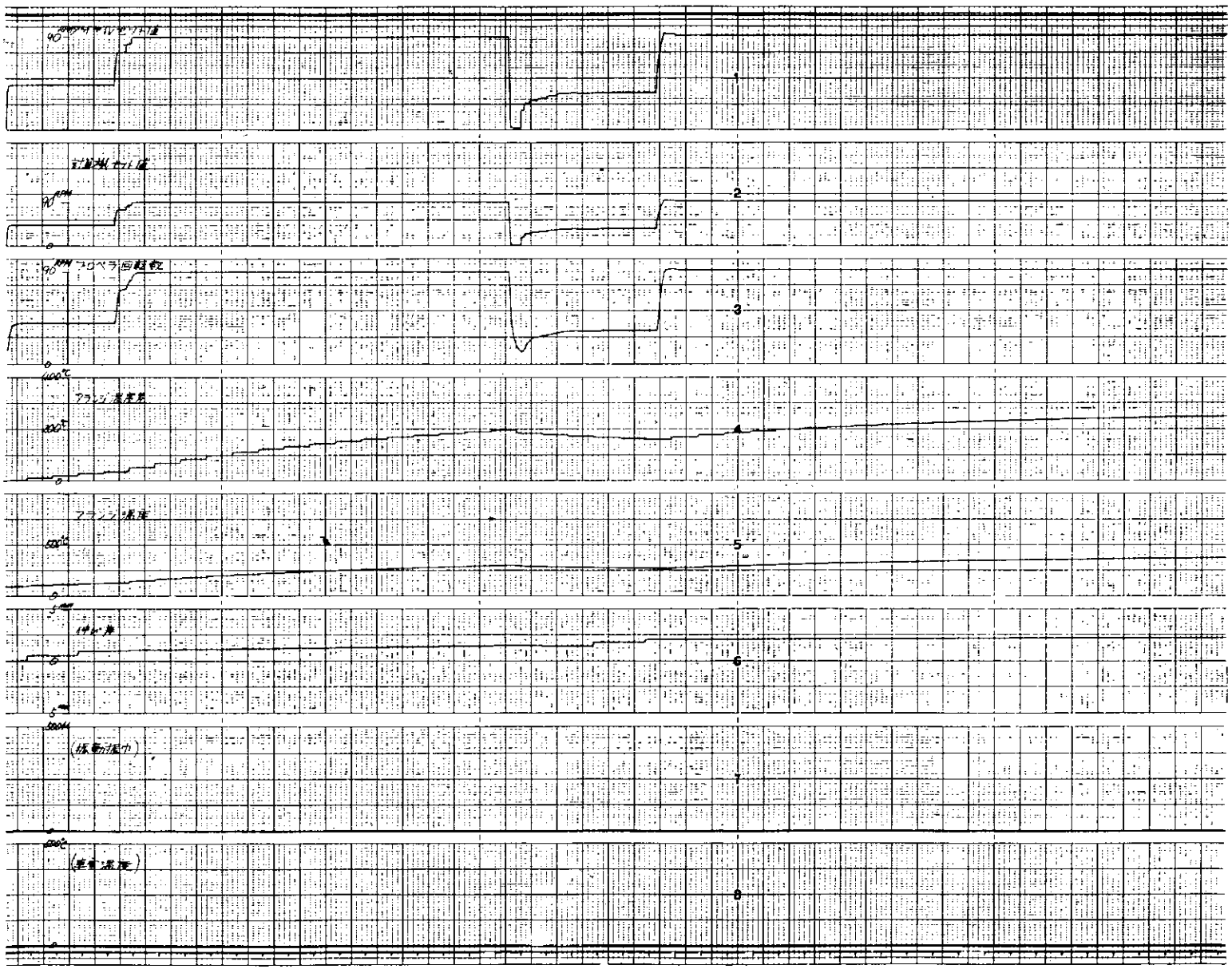
第 1. 3 1 図(A)

＃２－２　熱応力、熱伸び差検知テスト（アナログデータ１）



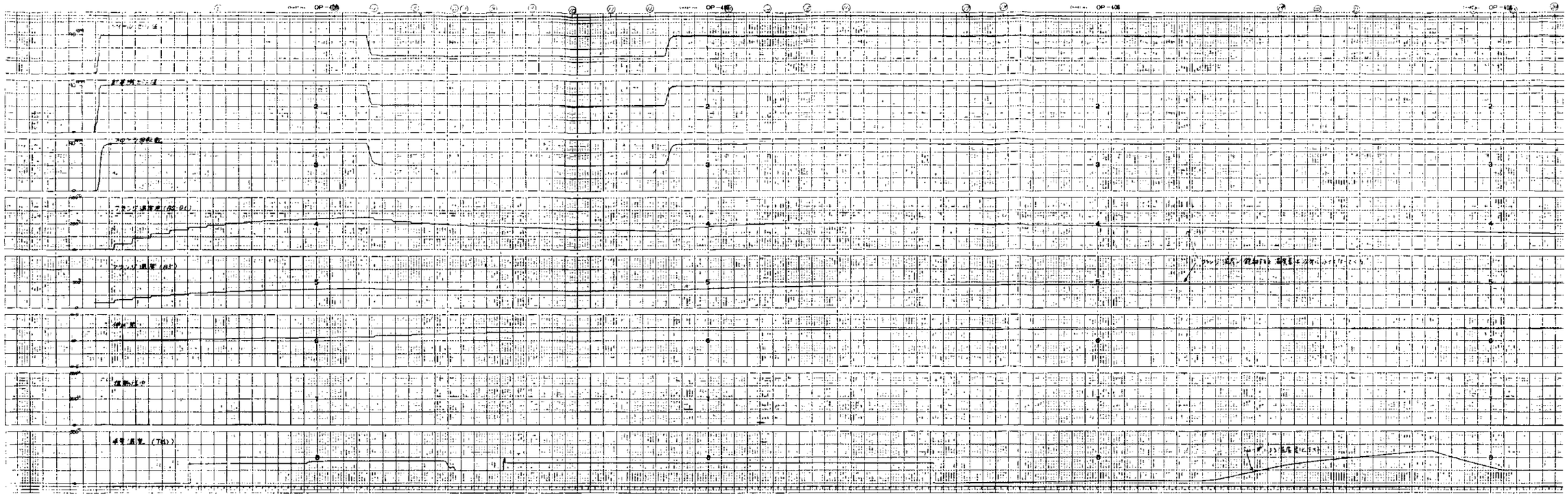
第 1. 3 1 図(B)

＃２－３　熱応力、熱伸び差検知テスト（アナログデータ２）



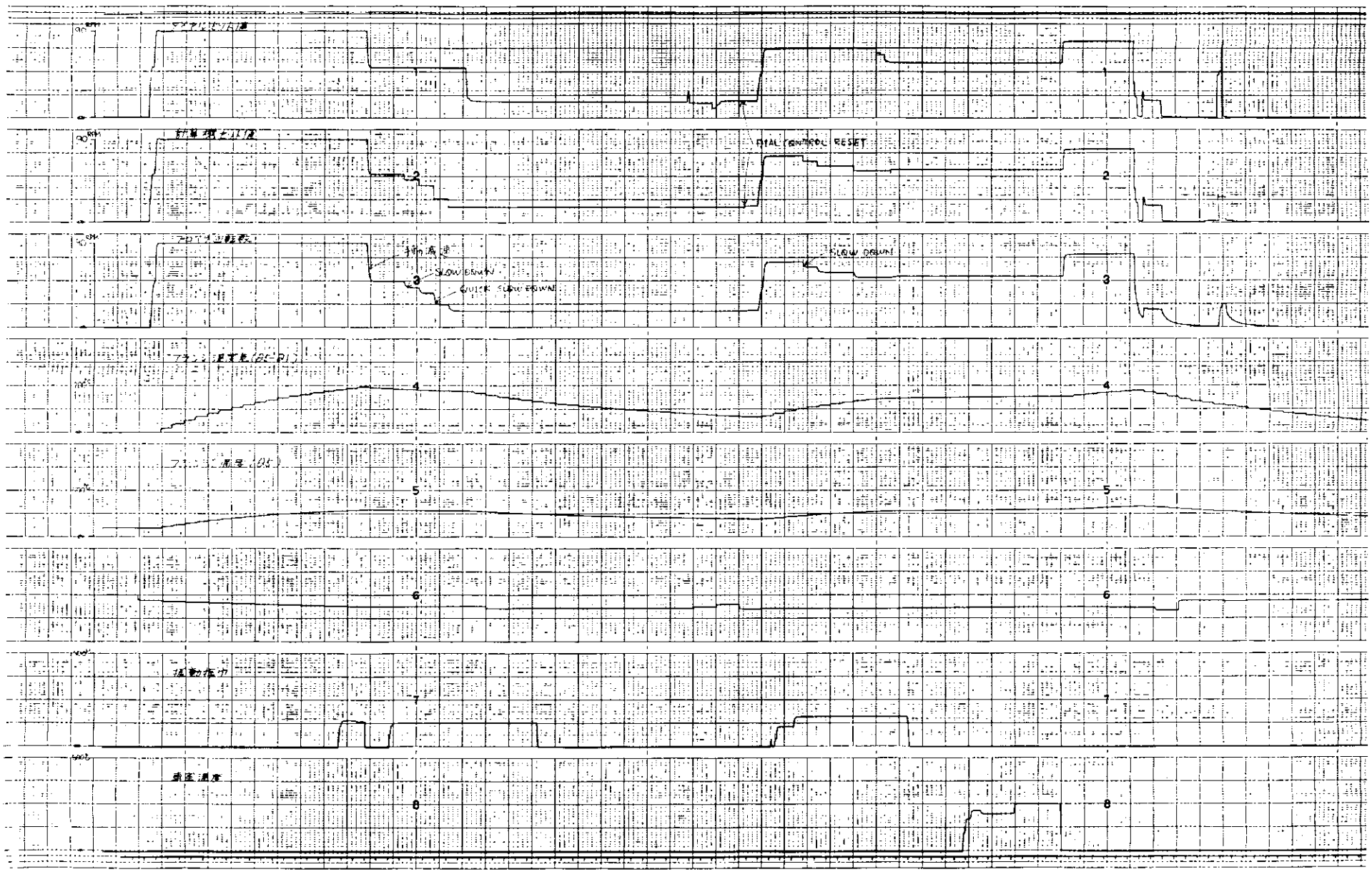
第1.3.1図(3)

＃２－４　熱変形、熱応力、熱伸び差検知テスト　（アナログデータ３）



第1.3.1図(D)

＃２－５　異常振動、熱応力検知テスト



第 1.3 1 図(2)

1.9.2 問題点とその検討

(1) シミュレーションに関する検討

(a) 熱応力および熱伸び差の数式モデルは簡略式を用い、特にフランジの温度については実測データにできるだけ近い結果が得られるより定数を決めたが実時間で長時間にわたる模擬は非常に難しく、データとして重要な意味をもつ温度の立ち上り部の勾配やピーク値の近似に重点をおいてモデルをセットした。

(b) 演算時間を適当に選べばアナログコンピュータの計算精度は十分高いことがディジタルコンピュータで別途計算した結果との比較によつて確かめられたが、非常に時定数の大きい今回の熱系のシミュレーションでの実時間による連続演算では減衰が大きくなり精度上やはり問題となつた。その減衰は数分間で１０％を越えるものであつた。（これはハードウェアの改造により今後は１～２％に押えられる予定である。）

(c) 連続演算による減衰は演算器の特性に起因するが前述のとおり、コンピュートーホールドの繰り返しにより比較的早い演算の引伸ばしを行なつて良い結果を得ることができた。

(d) 実時間で熱系のモデルを模擬しようとすると上記の問題点が生ずるが、目的を変えて計算精度に焦点をしぼりモデルの信頼性を高めることができれば、高速演算により実際のプラントの予測データを得ることができ、許容制御、最適制御を探索する予測制御の実現が可能なことが示唆される。

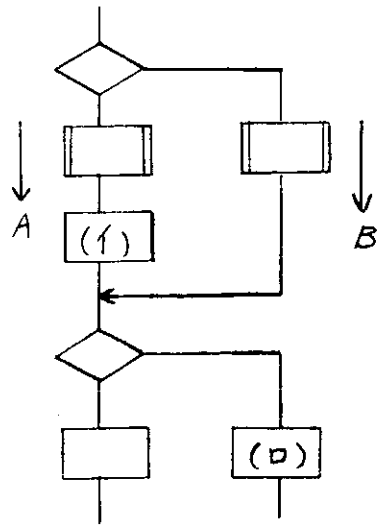
(e) ディジタルシミュレーションに関しては使用したコンピュータが補助メモリを持たないマシンであつたが、ドラムとの間の情報の転送処理は本プログラムの規模やコントロール周期では問題にならず十分にシミュレーションの目的を達したと考えられる。

(2) フローチャートに関する検討

(a) 異常検知の成否は読込んだデータの取扱いにかかつているがフローチャートの各部分であるデータにもとづく判断や処理を行なう場合、そのデータの根拠や確実性を十分チェックしておく必要がある。というのは、フローの特定のルートをパスしてきた場合に限り、本来データが確保されているはずのアドレスの中味はもぬけの殻またはとんでもないデータをつかまされるというケースがあるからである。

特にオリジナルデータから算出されるような二次データには留意する必要がある。最も簡単な例としてはつぎのようなものがある。

（例１）



ルートＡを経て(イ)のルーチンでセットしたデータにもとづき(ロ)のルーチンで処理をするというフローで、ルートＢを経由して(ロ)のルーチンへ入つて来た場合のデータセットの検討が洩れていた。

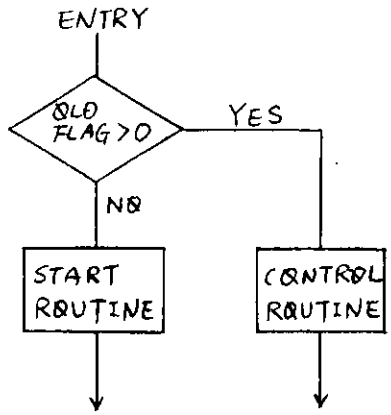
(b) 共通サブルーチンなどにおけるビジーフラグや制御に関連するコントロールフラグのプログラム起動時のイニシャライズには十分の検討をしておかないとプログラムの実行に支障を来たす。

プログラム作成の際には明らかにフラグをクリヤした状態でセットし、そのプログラムをコンピュータにロードしたあと最初のスタートの場合はセットしたとおりのフラグ内容でもつても、何度かプログラムが実行されたあ

とはいつ、いかなるときにもその条件が満されているとは限らない。

したがつてプログラムスタートの場合のイニシャライズは非常に重要である。

（例2）



プログラムスタートの際に必らずスタートルーチンを経由する必要があるにもかかわらず、その条件となる特定のフラグ（この場合はオールドフラグ）がリセットされていないとスタートルーチンを通らないことになる。

(c) 制御プログラムにおいてはシステム運用上の問題が終始つきまとう。したがつてフローチャート決定時に徹底したシステム運用のディスカッションが必要とされる。

すなわち操作や運転手順を十分に検討し、定形化しておく必要がある。

たとえば、なんらかの異常検知によりコンピュータ出力による回転数制御に切換わつた場合に、現在のプログラムではリセット押ボタンを押してダイヤルセット値をプロペラ回転数に合せるだけで、異常検知の状態がそのときどうであろうと自動的にダイヤルコントロールへリセットされてしまうが、安全操作上、これでよいか、またはより安全な手順をふむためにプログラムを補つてゆくか検討を要するところである。

(d) アラームメッセージなどの内容やコンピュータからの情報提供の仕方もフローチャートの作成時に綿密に計画しておかねばならない。フラグのビット内容が0→1になつたときは問題ないとして1→0の場合のメッセージ内容はどうするか、現象変化の内容によつて使いわけを明確にしなければならない。

たとえば、異常振動検知で" ROTOR UNBALANCE "発生に対して異常解消の場合には" ROTOR UNBALANCE RESET " としたほうがメッセージを見たとき、余計な不安感を運転員に与えないであろう。

(3) システム構成上の問題点

(a) アプリケーションプログラムの論理性は個々に妥当であつても周期の異るプログラムの間で相関関係があると新たな問題が生じる。

たとえば、熱応力の異常検知は60秒ごとになされ、異常が認められればそのたびに主タービンコントロールフラグをセットしているのであるが、減速制御のコントロール周期が5秒ごとであり、かつ5秒ごとに減速プログラムの中でコントロールフラグがクリヤされるために減速制御が有効的に継続されない結果になつた。

したがつて種々の異常検知の結果を集約する形で主タービンコントロールフラグごときものをセットする場合、そのセットビットポジションやリセットの方法を異常の種別、処置方法、プログラム周期などを十分考慮して決める必要がある。

(b) 上に述べたコントロールフラグのセットやその保存の問題を別にしても異常検知のアプリケーションプログラムの特性に対応した制御プログラムの運用を行なう必要があり、それも今回フローチャートの上からみても検討不足であつたといえる。

すなわち、異常振動検知のように減速制御とプログラム周期が同じものはオシロデータ第1.31図(A)＃2－1をみても判るように減速制御は有効に行なわれ、かつ、この結果のとおりで妥当であると考えられるが、熱変形、熱応力などの現象の変化速度の比較的小さい。したがつて異常検知、周期の長いプログラムの診断結果にもとづく制御は異常振動と同じパターンで画一的に行なうと、必要以上に回転数を急速に低下させてしまい、プラント

運用上かえつて不都合であろう。

したがつて、減速制御はコントロール周期を振動条件に対しては5秒ごとに熱的条件に対しては60秒ごとにといつたように緩急の区別をつけて使いわける必要がある。

(c) アプリケーションプログラムのレベルは最終的には同一レベルとしたが、最初、主タービン減速制御プログラムを他のプログラムより優先順位の高レベルに登録しておいたところいくつかの問題が生じた。

まず起動されたプログラムが多く、かつ処理ルーチンが多忙になりラッシュ状態になつたとき優先順位の高いプログラムが先走る傾向になつたが、この場合、異常検知プログラムの診断結果にもとづいて振舞いを決めるプログラムをより高いレベルにおいたこと自体無意味であつたといえる。

(d) プログラムの多いシステムになるといずれ優先レベルの設定が必要であるが、その場合に今回のように一つの共通サブルーチンをレベルの異るプログラムが共同で利用しようとするとき（たとえばアラームメッセージプリントのごときサブルーチン）、しかもサブルーチンがビジーフラグをたてて利用の規制をしているときにはプログラム運用上の工夫が必要である。

すなわち、あるプログラムが共通サブルーチンにビジーフラグをたててとび込み、まだコンプリートにならないときに優先順位の高いレベルのプログラムが起動され、しかも同じ共通サブルーチンを利用しようとするとレベルの低いプログラムはビジーフラグをそのままにして実行中断してしまうが依然としてビジーフラグがたつている以上、高レベルのプログラムであつても、そのサブルーチンへエントリーできずにタイムディレイの状態でいつまでもプログラムの実行が停滞する。

この救い難い状態をなんらかの手段で解消してもさらに上述のケースでプログラムが待避するときに中途段階でのデータを、一たんセイヴして共通サブルーチンを明け渡さないと、あと再びそのサブルーチンで継続してプログラム実行しようとしても素性の知れないデータをかかえこむ結果になり、処理に混乱を来たす。

今回は(c)の理由もあつて、すべて同一レベルとしたために、なんら問題はなくなつたが、今後とも注意すべき事項である。

(4) システム信頼性に関する検討

(a) システム信頼性はハードウェアの信頼性をぬきにして論ずることはできないが、ここではソフトウェアに関連する点についてのみ言及したい。

異常診断フローチャートの論理性のチェックが行き届き、プログラム化が確実に行なわれたならばコンピュータの処理は非常に信頼性の高いものであることはいうまでもないことで、取扱りデータの量、診断パターンの数などについては、フローチャートの論理が明確であれば全く問題にならず、プログラムデバッグの際もトラブルは非常に少ないものであるということを実作業は常にわれわれに教えてくれる。

今回の作業においても他のプログラムに比べれば、ステップ数の多かつた熱変形検知プログラムのデバッグが最もスムーズに行なわれた。別の見方をすれば、フローチャートの信頼性がシステム信頼性に直結しており、フローチャート作成時点でのプラント特性の把握、処理の目的とそのための手段を可能な限り明確にするというシステム設計上の詰めの重要さを改めて痛感させられた。

(b) プログラム論理の追求とは別に、アナログデータの処理についても細心の注意を払わないと、折角、検出器の信頼性が確保されていたとしてもそれを生かしきれないことになる。

データの読み込み精度とアナログ変換の際の数値の有効桁数と丸め方のマッチング、バイナリイポイントの設定、数値比較の場合の桁合せなど、データの生死にかかわるポイントがいくつもある。

きわめて基本的な問題ではあるが、それらをきめこまかく検討してこそプログラム論理も真の意味をもつことになるし、システム信頼性を支えることが可能になることも再認識させられた。

1.10 結　言

シミュレーションを行なう意義としては、システム設計の妥当性確認とそのシステム改善およびプラント解析の推進などが挙げられるが、最初に本作業の目的を前者に重点をおきディティルドフローチャートのチエックを行なうと述べた。しかし、シミュレーションの全体的な評価は後者も含めてなされるべきであり、重要な課題として積極的に取り組む必要がある。

フローチャートを中心にコントロールシステムのアルゴリズムを究明するとともにプラント解析による確率論的なパラメータの査定を行なうことによつてバランスのとれたシステム設計を効率よく行なうことが可能になるがシミュレーションは、そのシステムパフォーマンスの詳細評価にはなくてはならぬ有効な手法であり、同時につぎのステップのシステム開発に有用なデータを提供してくれるものである。

したがつて信頼性の高い制御システムの開発ならびに確立のために今後とも、プラント側およびコンピュータ側関係者の協力のもとにこういつたシミュレーションを積極的に実施してゆくべきであろう。

2. タービンプラントのコンピュータによる直接制御の研究

2.1 火力プラント等の陸上各種プラントおよび舶用プラントにおける直接制御採用の現状調査

本小委員会では電算機制御プラントにおけるDDCの稼動状況、DDCの将来動向、DDC採用のメリット、DDC適用における問題点等について調査を行ない、その一貫として下記催しを行なつた。

1）東電・横須賀火力7、8号機（DDCプラント）の見学　（45年8月11日）

2）DDCを中心とした火力プラントの電算機制御に関する講演会　（45年8月11日）

（講師）　東電・横須賀火力、技術課　辛島徳彦氏

3）火力プラントの電算機制御（特にDDCに関して）に関する講演会　（45年8月12日）

（講師）　東芝・府中工場　河原春郎氏

また舶用プラントにおけるDDC採用の現状調査もあわせ行なつた。

2.1.1 東電・横須賀火力7、8号機の電算機制御の概要

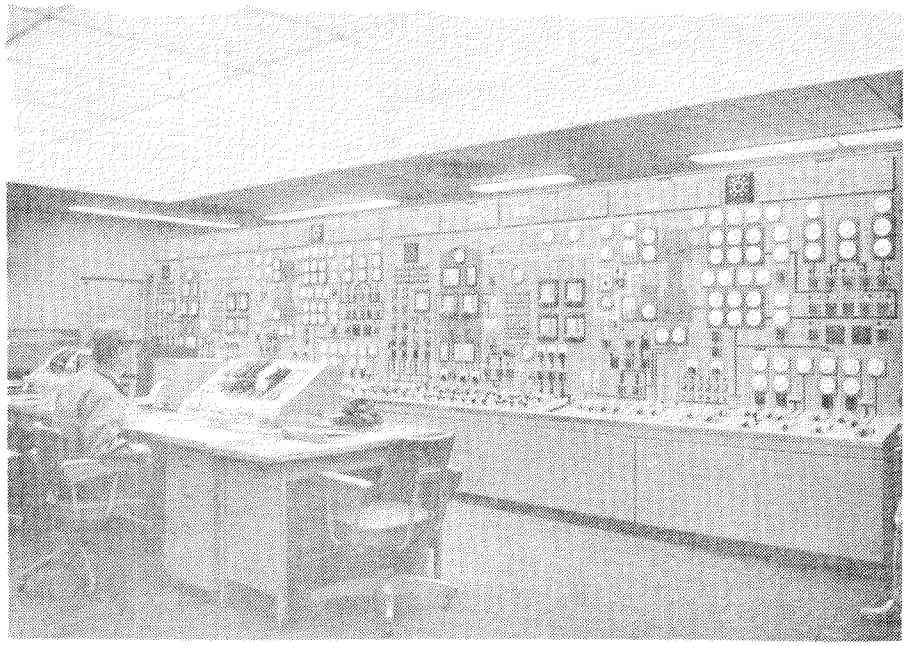
		7、8号機	
タービン	型式	2軸複式4流再熱型（東芝製）	
	定格出力	350,000KW（発電機端）	
	蒸気条件	169.0Kg/cm²g，566/566℃	
	排気条件	722mmHg vac	
	抽気段数	7段	
ボイラ	型式	屋外型IHI－FW自然循環分割圧力通風式ボイラ	
	蒸気圧力	197Kg/cm²g（最高使用）	
	〃	175.8Kg/cm²g（過熱器出口）	
	〃	30.4Kg/cm²g（再熱器出口）	
	蒸気温度	570℃（過熱器出口）	
	〃	568℃（再熱器出口）	
	蒸発量	1,130／1,060T/H（最大／経済）	
	型式	横置円筒回転界磁型（東芝製）	
	定格容量	224,000KVA×2	
	力率	85%	
	電圧	15,000V	
	冷却方式	水素冷却	
		7号機	8号機
電子計算機	形式	TOSBAC－7,000／60	左
	主記憶装置	磁気コア　32K語	磁気コア　32K語
	補助記憶装置	磁気ドラム　256K語	磁気ドラム　96K語
	演算速度	1.6μsec	左
	演算方式	2進法、浮動小数点	左
	プロセス入力点数	アナログ入力－510点 接点入力　－620点 パルス入力　－20点	アナログ入力－490点 接点入力　－113点 パルス入力　－21点 （7号バックアップ入力点数を含む）
適用項目（概要）		データ記録 アラーム 性能計算 評価 （MARC） タービン起動制御（TSC）（DDC） プラント起動―停止の自動化機能（DDC）	データ記録 アラーム 性能計算 評価 （MARC） タービン起動制御（TSC）（DDC）

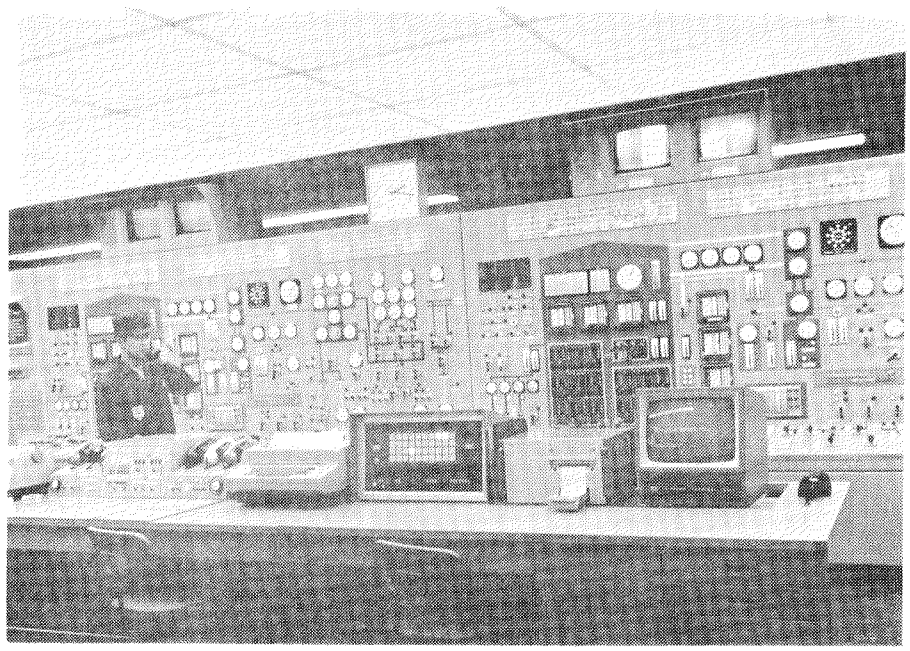
本電算機制御プラントシミュレータシステムは下図に示すとおり。

第2.1.1図　7、8号中央操作室オペレータ机

第2.1.2図　7、8号BTG盤および7号自動化盤

第2.1.3図　制御用電子計算機

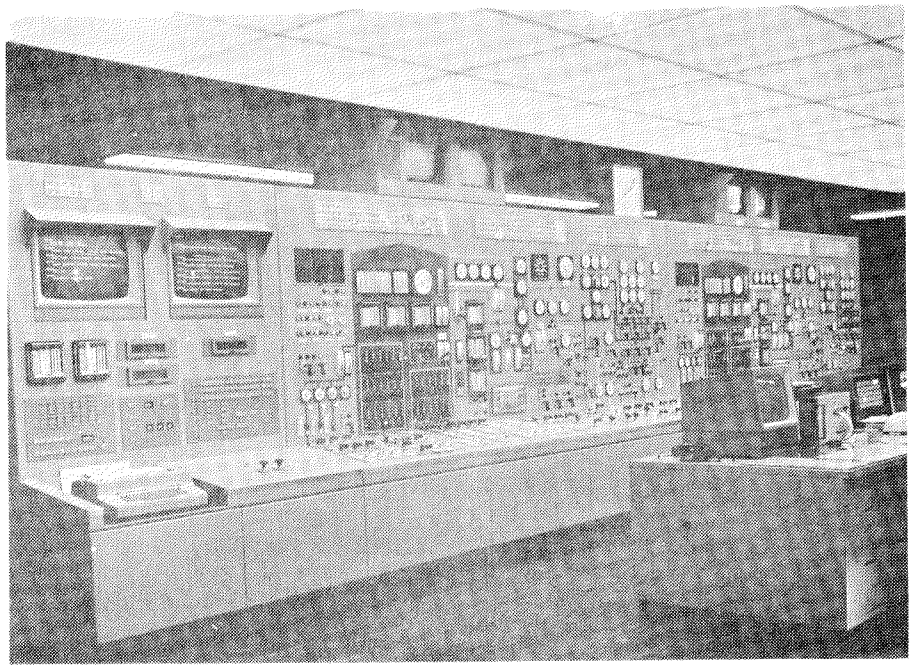




7、8号中央操作室オペレータ机

7、8号では電子計算機による全プラント自動起動、ESDシステムによるプラントコントロールや性能計算やプラントの状態監視を行なうが、オペレータ机には運転員にその計算機で処理した情報を知らせる装置がついている。写真は右から8号CRT（テレビ表示器）、アラームプリンタ、オペレータパネル、スペシャルタイプライタ、中央操作室指令台、給電用表示装置。

第2.1.1図

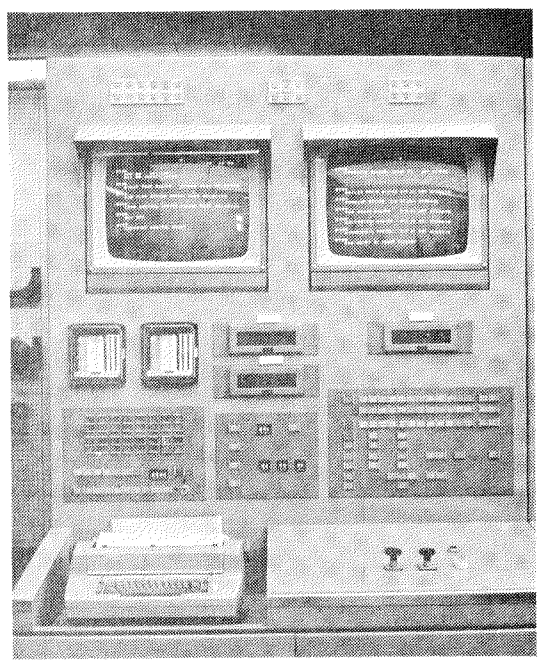


7、8号BTG盤および7号自動化盤

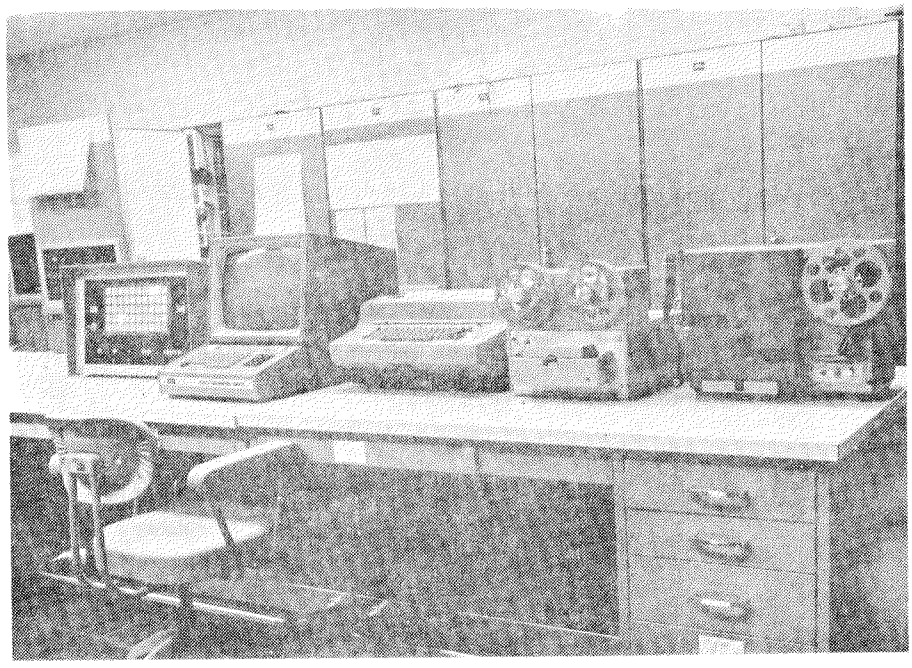
7、8号の制御装置には、最新の技術を導入した電子式のベレー721システム、自動バーナ装置、炉内監視テレビ装置等がある。また、これら電子式制御装置と電子計算機と組合せてボイラ、タービン、電気の自動起動停止の研究が進められている。向つて左端が自動化盤である。

7号自動化盤

電子計算機によるプラントの自動起動停止を行なう時、運転員と計算機の情報交換（マンーマシンコミニケーション）を行なう装置が設備されている。
上から、故障表示窓、23″CRT（左）状態表示、操作指示用、23″CRT（右）警報用、アナログトレンドレコーダ2台、デイジタルデスプレー3台、自動運転／手動運転切替コンソール、制御コンソール、起動スケジュール設定コンソール、プラント進行表示コンソール、スペシヤルタイプライタ。

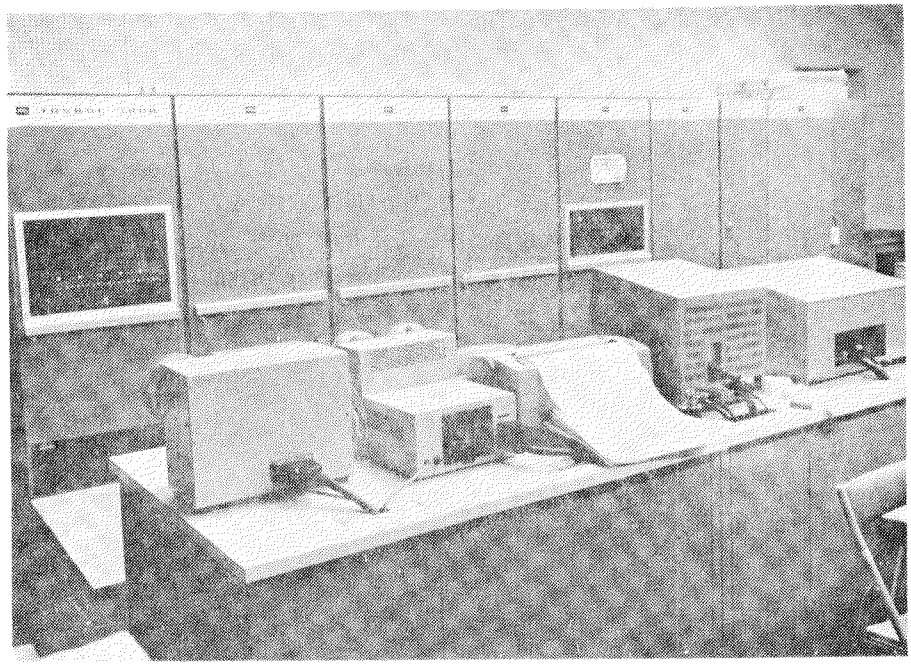


第2.1.2図



電子計算機

計算機制御の心臓部、電子計算機本体と手前エンジニアリング机に並んだその周辺機器に向つて左からＰＴＰ（紙テープパンチ）、ＰＴＲ（紙テープ読み取り器）デバック用タイプライタ、ＣＲＴおよびキーボードユニット、エンジニアコンソール。



第 2. 1. 5 図

2.1.2 DDCを中心とした火力プラントのコンピュータ制御に関する講演概要

（講師　東電　辛島氏）

(1) 概　要

東電・横須賀火力7号機は東電、石川島、東芝の3社の共同研究プロゼクトとしてコンピュータによるプラントの全自動化を試みているプラントである。

コンピュータとしては前述の TOSBAC 7000／60 が採用されており、プラントは44年9月末から営業運転に入り、それ以後コンピュータ制御によるプラントの起動 — 停止の自動運転の調整およびテストを続け、現在までに15～16回の起動が行なわれたが、そのうちの2回を除いてあとはすべてコンピュータによる DDC により行なわれている。

コンピュータによる停止は DDC プログラムの作成が遅れた結果、いまから自動停止の調整、テストにはいることになつている。

しかしながら、いままでの起動 DDC プログラムによるテスト研究でコンピュータでプラントの起動 — 停止を行なうという初期の目的は技術的な点についてはほぼ達成できたと考えられる。

(2) 東電における コンピュータ導入経過

昭和39年に横須賀3、4号機に GE－312 コンピュータを使用した GARDE システム（Gathes, Alarms, Records, Displays and Evaluates）を導入し、昭和42年五井5、6号、姉崎1号に MARC システム（Monitaring and Result Computer）と呼ばれる高度の監視システムを採用した。以来現在に至るまでこの MARC システムが新設ユニットの運転情報処理システムの中核を構成している。

また運転操作の面でもこの MARC システムを基礎に、シーケンスモニタや運転自動化を順次進めており、横浜火力および南横浜火力でタービン起動制御（TSC システム）を採用し本横須賀7号機の自動化に至つている。

本プラントでは上記の MARC システム、TSC システムの他に広い範囲でのプラント起動 — 停止操作を試験的にコンピュータによる DDC により自動化する試みがなされている。

(3) 火力発電所の自動化ステップ

一般に火力発電所の自動化の進む過程は次のように大きく4つの段階に分けて考えることができる。

(a) 基礎段階

a. BTG 盤などによる中央監視および制御の段階

（特にコンピュータは使用しない。）

(b) コンピュータによるモニタの段階

a. コンピュータによるスキャン、作表、警報機能をもつ。

b. 運転効率、性能のモニタ

c. シーケンス・モニタ

(c) コンピュータが直接制御を行なう段階

a. 起動 — 停止の自動操作化

b. 運転の最適制御化

(d) 全自動化の段階

a. 給電自動化との連係の段階

このようなコンピュータを中心とした進歩の流れと並行してアナログによる、またはシーケンスワイヤードロジックによる各種の自動制御装置の進歩もある。

(4) 東電・横須賀火力7号機の特長

7号機で計画された試験的自動化では、上記の第3段階のプラントの起動・停止の自動操作化を試みるのであ

り、その技術的背景には、大容量・高速コンピュータの発達とともに従来からの各種制御装置の進歩が基礎になつていることが見のがせない。

この代表的な装置としてプラント統括制御装置 APC（従来の ACC、STC、FWC も含んでいる）、自動バーナ制御装置（ABC）などがある。

一般的に火力プラントの起動 — 停止中はボイラの燃焼は不安定となりやすく、金属の応力や膨脹が安全限界に近ずき苛酷な運転状態となりやすい。7号機ではこのように複雑な操作を要する起動、通常停止、事故停止の各過程中（起動前と停止後の点検および準備操作を除いた）の主要操作を自動化の対象と考えてあり、つぎのような範囲の自動化が行なわれている。

(a) ボイラ関係

a. 給水系統

b. 風量系統

c. 燃料系統

d. 蒸気温度系統

e. ボイラドレン弁、ベント弁系統

(b) タービン関係

f. タービン本体系統

g. 潤滑油温度系統

h. タービンドレン弁系統

(c) 発電機および電力系統関係

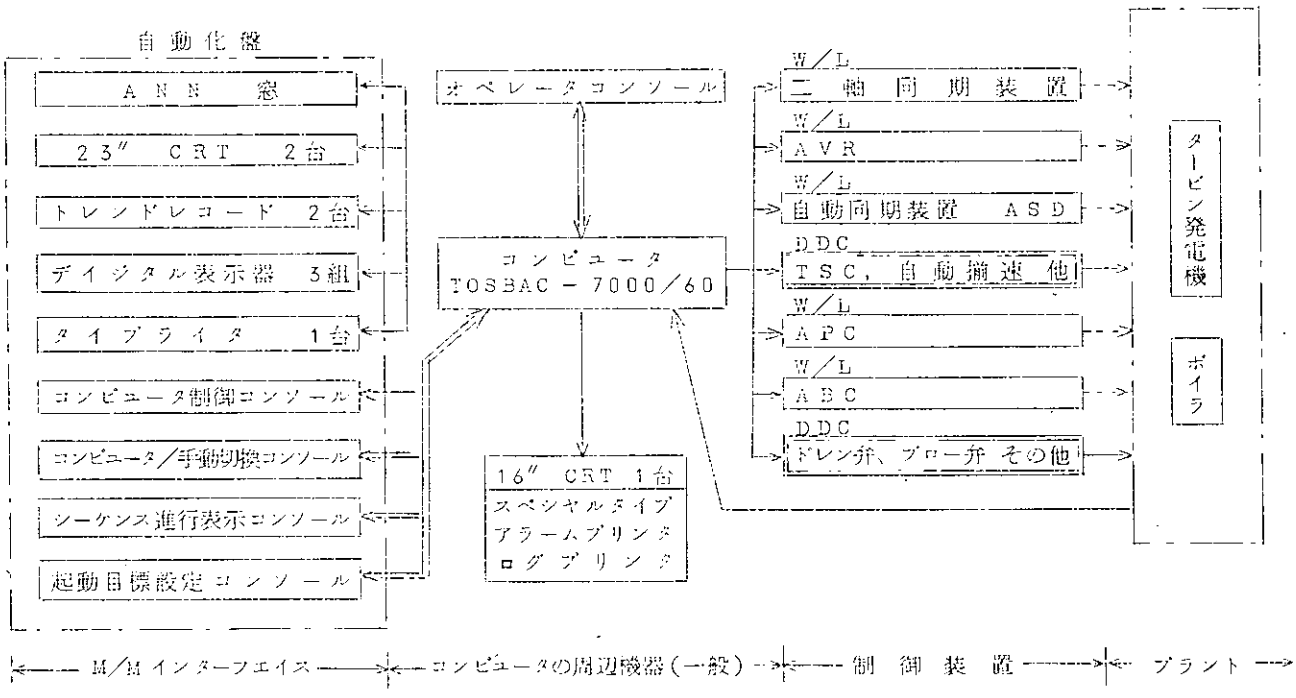
i. 励磁系統

j. 並列解列系統

k. 所内切換系統

l. 出力制御系統

なお7、8号機の自動制御装置のうちボイラの自動制御装置は電算機制御とのマッチングを考慮に入れて従来形式のペーレー空気式制御装置の代りにペーレー全電気式制御装置が採用されている。



第2.1.4図 7号機の自動化システム構成図

7号機の自動化システムの構成は第2.1.4図に示されるとおりであり、コンピュータによつて直接操作端を制御する直接ディジタル制御方式（DDC）と上に述べたような通常型制御装置（アナログ、ワイヤドロジックまたはシーケンス）を介して間接的に制御する方式（Set Point Control）とを対象となる機器および制御様式に応じて使い分けてある。

すなわち従来よりアナログ方式として実績も豊富でしかも連続式の制御のほうが望ましい系に対してはボイラ燃焼制御、給水制御、蒸気温度制御、電圧制御などの代表的なアナログ式自動制御装置がサブループとして用いられている。

新しく自動化の開発を要する非線形のサブループ、フイードバックを主体とする制御があまり適さないようなものにはDDCが向いており、代表的なものとしてタービンの昇速や弁切替時のタービン主弁（制御およびバイパス弁）の操作、ドレン弁、ベント弁、等の操作にDDCが適用されている。

SCCの場合は、仲介回路とコンピュータとの間にはタイミング、くせ等に異質なものがあるため、適切なCO－ORDINATIONが必要となる。たとえば仲介回路のアナログサブループは瞬間的であり、コンピュータ制御の動きもマクロ的には瞬間的であるがミクロ的に眺めればタイム・シヤリングである。したがつてミクロ的にみるとアナログサブループは瞬間的に働くがコンピュータは時間がかかる。すなわち仲介回路との間に非同期の瞬間が現われるのでこれをコンピュータ利用のソフトウエヤでカバーしておく必要がある。

仲介回路が多いとトラブルの原因となり信頼性が低下しコスト高になる可能性があるが、一般的に瞬時判断はワイヤドロジックがすぐれているという面でこれらをカバーし、またDDCの歴史が浅く目新しいこともあり、SCCのほうがより好まれているが将来システムが大規模化して行くと仲介回路がますます多くなり、DDCのほうにもメリットが出てくるものと思われる。

また、人間とコンピュータの間の情報交換を円滑にするためのマン・マシンコミュニケーション装置が従来に比べて充実されている。

(5) 自動化プログラムの基本的な考え方

(a) マン・シミュレーションプログラム

通常プラントの起動 — 停止時における操作項目は約６００程度である。従来の自動火力のプログラムではコンピュータの立場からプラント運転の外見上の過程を皮相的に把え運転操作要領書のプログラム化を行なつていたが、この場合、順序関係が固定化されプラントに異常が発生した場合には、それに対処して円滑な自動運転をすることができず、結局は運転員の手に任せてしまう例が多い。実用可能なプログラムを作るには、いかなる事態に対しても臨機応変の動作をする運転員の働きをできるだけ忠実に模擬することが必要で、この点から運転員が操作をどう考えているかを分析し、ベイシックパターンを取出し、これをプログラム化するいわゆる"マン・シミュレーションプログラム"の方式を採用している。

(b) プログラムの構成

従来の自動化プログラムは、いくつかのブレークポイント（人間の判断でつぎに進める点）で接続されたプログラムループの鎖状の構成をしていたが、7号機のプログラムでは小さな多数のサブプログラムの集合体からなり、これらの相互間は機能的な必然性によつて連結され、これをマスタープログラムによつて全体的にコントロールする構成になつている。

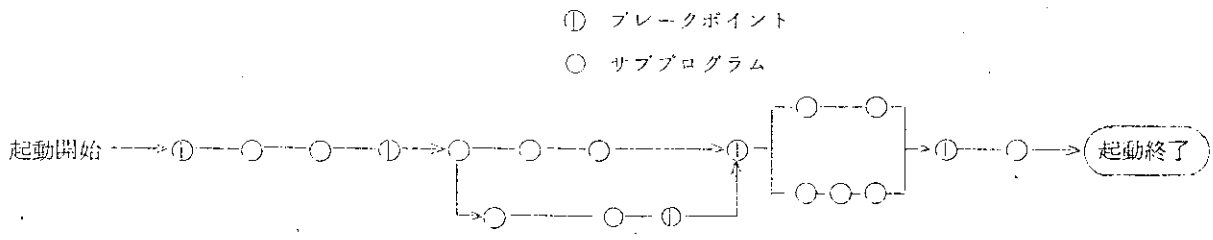
第2.1.5図にプログラム構成の比較を示す。

これらのサブプログラムは従来の人間による運転組織と同じく当直主任、操作員、巡視員おのおのに対応した機能を持つようになつている。

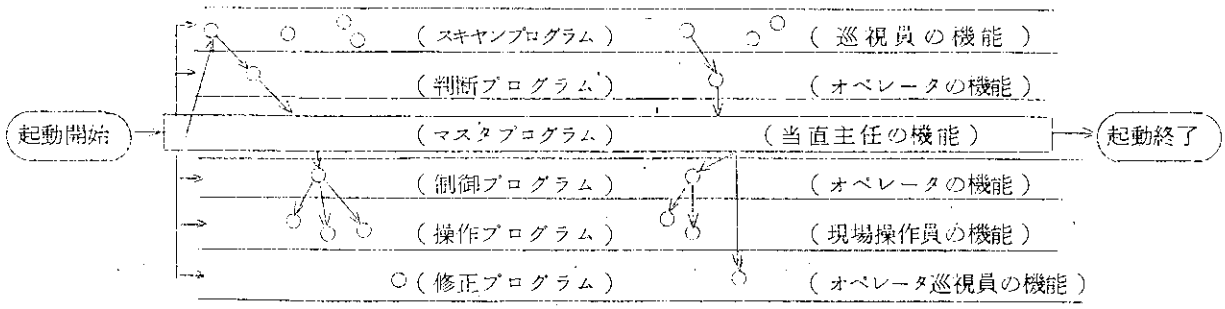
(c) 自動化機能のモザイク構造

前述のとおり、自動化の範囲を１２系統に分割してあり、自動化操作は各操作系統ごとに自動化範囲から出し入

"従来の自動化プログラム"



"7号機の自動化プログラム"



第2.1.5図　自動化プログラムの構成

れできるように計画され（自動化の縦割り）、しかもこれらが起動停止中のいかなる時点においても自由に行なえるように計画されている。したがつて自動化機能の部分的不調に対しても残りの機能をフルに生かして運転員との協同作業で安全かつ円滑に起動停止を進めることができる。

(6) おわりに

火力発電所に対するコンピュータ利用については、情報処理システムとしては一応完成した段階にあるが、自動化については現在のところ実用的で良質の自動化システムを開発する途中にあるが、このテーマに取り組むわれわれの心構えの上でコンピュータを従来の機器と同様の一つの機器として取扱うより、むしろ"いま一人の人間"として取扱うことに徹底することが肝要なことではなかろうかと痛感している。

2.1.3　火力プラントの電算機制御（特にDDCに関して）に関する講演概要

（講師　　東芝　河原氏）

(1) コンピュータ制御導入経過

日本で最初にコンピュータ制御を実施したのは東電・横浜と東北電・八戸とであり、その後ここ数年来コンピュータによるプラント起動・停止時の複雑な操作、制御の自動化が急速に普及しだしており、いままでに十数プラントでコンピュータ制御が行なわれている。

それ以前においてはコンピュータを制御に適用するのではなく、プラントのデータ処理、性能計算という面にコンピュータを適用した例が多く、これらはすでに完全に実用域に達している。

これ等の導入経過は諸外国においても似たようなもので、テスト的なコンピュータ制御の導入を行なつたのはアメリカが最も早かつたけれども、コンサルタントと実際のプログラミングを行なう組織が別々であるので、この面から種々の問題があり、コンピュータ制御の実用化がなかなかうまくいつていない。

わが国ではプラントメーカ、コンピュータメーカ、およびソフトウエアの作成機関が一体であつたことで、相互間のコミュニケーションがよく、アメリカよりうまく行き、幸いであつた。

(2) 各種ソフトウエアの特長

データ処理、性能計算用のソフトウエアは制御用ソフトウエアに比して歴史がかなり古く、すでに完成域にある。

今後はデータの量より質の向上が特に望まれ、また上位階層との関連で ON SITE DATA PROCESS と ON CENTRAL DATA PROCESS とを分類整理し、より系統的なデータ処理方法への発展がつぎのステップと考えられる。

つぎにコンピュータ制御のソフトウエアとしては T.O.P.（タイムオリエント方式）と E.O.P.（イベントオリエント方式）の2種類が考えられている。

コンピュータ制御においては、本来プラントの状態を的確に把握し、これを規定のスケジュールでプラントを運転させる総合判断機能が要求され、このために、プラント状態にプログラムを同期させる必要がある。

T.O.P. は常時一定の周期でプラントの状態の変化があるか、またその処理をどうするか等を調べて、処置する方式であるが E.O.P. ではプラント状態変化が起つたときのみ処理のための動作が行なわれる。

このために E.O.P. のほうがプラントとコンピュータのプログラムとの同期がとり易く、またコンピュータの利用度が高く（むだな処理を行なわないので）有利である。しかしながらプログラム相互間の情報の流れやタイミングの関連がむづかしく、プログラム体系は複雑となることはさけられない。しかしすべてのプログラムについて E.O.P. のほうがすぐれているのではなく、たとえばスキャンニング等は典型的な T.O.P. のほうが適しており、ケースバイケースで両者を組合せて最良のソフトウエアを作成することが必要である。DDC それ自体もミクロ的にみればサンプル値制御をしているので本質的には T.O.P. であるが、東電・横須賀7号機におけるがごとくソフトウエアの考え方に E.O.P. を最大限に採り入れた方式とすれば、マクロ的にみれば E.O.P. のプログラムとなる。

(3) DDC と SCC の使い分けおよび DDC の問題点

一般的に定常運転時に常に用いる制御はサブループ方式で構成し、これを SCC でまとめあげる例が多く、一方起動時など短時間内の制御で利用度が低い機能は、密度も高く、付加コストの安いコンピュータにもたせ、DDC 化するのが経済面では得策と考えられる。

しかし、現在コンピュータ制御、特に DDC の実績が十分に行きわたつていない点からも、DDC に心理的不安感を持つのも無理のないところで、当分はアナログサブループと DDC との機能分担に各種の方式が生まれるであろうが、実績の積み重ねにより、いずれは一定の方向へまとまつて行くものと思われる。

また DDC は各種パラメータを変えるのがきわめて簡単であるので、不確定要素の多いシステムあるいは複雑な計算要素を含むシステムには向くと考えられ、非線形制御、最適制御等に有利と考えられる。

DDC 適用における問題点としてはコンピュータ故障の際全システムがダウンすることがあげられるが、これについてはミニコン等の採用により、システムを分散化し、部分的な故障にとどめさせることも可能である。

DDC に使われるコンピュータについては、化学プラントなどで DDC が相当採用されている例をみても、基本的なハードウエアについてみると、一般のコンピュータと特に差はない。ただし、入出力部分の手動切換えを使い易くしたものは見受けられる。

(4) DDC の適用例（事業用火力の場合）

東電・横浜ではタービン発電機の昇速のみを DDC によつて行なつているが、いままでに DDC が適用された例としては下記のようなものがある。

タービン関係 ： タービンの昇速、減速

発電機関係 ： 電圧制御

ボイラ関係 ： 昇温制御

弁類の開閉制御

空気流量制御

バーナ本数制御

また今後 DDC の適用が予定されるものとしてはボイラの燃油温度制御、昇圧制御等がある。発電機の ALR およ

び AFC を DDC で行なつた例が海外にあるがあまり得策でないと考えている。

(5) 各電力会社の DDC に対する考え方

いままでのところ DDC についてはあまり実績がなく、また火力プラントの制御には特に安全性、信頼性を重視するところから、従来より使い慣れ、また十分に実績を有するアナログサブループに信頼を寄せるムードがあり、これとコンピュータを結びつけた SCC のほうが各電力会社におけるコンピュータ制御に使われている例が多い。

しかしながら東京電力、中部電力等は DDC の採用に積極的な姿勢を示しており、他社も次第にこれに追随することになると思われる。

(6) コンピュータのセンサーについて

センサーはコンピュータへのプロセス入力のための検出器であり、コンピュータ制御の場合、制御装置という考え方からもシステムの信頼度、性能のよしあしはこのセンサーの良否によつて決るといつても過言ではない。

ところが現在は不幸なことに、センサーの供給はコンピュータのメーカではなく主機供給者にまかされるケースがほとんどで、コンピュータシステムとしての品質、特性の管理が不可能に近く、これがシステムの機能に大きな影響を及ぼしている。

コンピュータによる自動化を行なえば必然的にプロセス入力も増え、センサー自身の信頼性との数による故障率の増大とによつてシステムとしての稼動率はコンピュータ本体よりもむしろセンサー類の故障の如何に左右される。

このようにセンサーは重要なものであり、プロセス入力はコンピュータ制御の基本である点からも、その特性を十分知つた上で、用途別に品質に対する仕様を規定し、これでも不十分な場合は複数入力を同一測定点に設置して 2 out of 3 などのテクニックを使つてソフトウエアによる自動故障検出を行なつたり、またセンサーからの入力信号のレンジオーバでの故障の判定、また零バイアスをかけた電流入力信号の零入力での故障判定等によりシステム信頼度の向上を図る必要がある。

(7) 信頼度に対する各種の工夫

さきにも述べたようにプロセス入力信号の信頼性を上げることが、システムの信頼性を向上させる一つの手段となるが、このほかにも信頼性を増す各種の工夫が考えられる。

従来の経験からコンピュータ本体が演算等の誤動作によつて誤信号を出すことはまずなく、一般的に I/O に関連したエラーが発生する例が多いので、これについては人間が操作するときの確認動作と同じように、コンピュータ制御の場合も I/O 関係の各種指令に対してアンサバックさせることによつて制御動作を確認して信頼性を上げることも考えられる。

また現在のコンピュータ制御システムは一般的に SINGLE-CPU 方式であるが、このために単一故障で全システムがダウンするという問題があり、これを救うためにハードウエアおよびソフトウエアの機能の故障が発見された場合には、それの代替機能を他の部分のハードウエアまたはバックアップ装置等で行なわせる等の工夫が必要で、MULTI 化、HIERARCHY 化、機能分散化等によつて等価的に信頼性を向上することも考えられる。

信頼性向上に対する最もよい目安（基準）として「単一要素の故障」による考慮で、システムを構成する各要素のどの単一要素が故障してもシステムとして異常がおこらない工夫がなされるのが好ましい。

(8) シミュレーションの手法を用いたコンピュータ制御システムの設計・試験

一般的にみてコンピュータ制御システムは広い意味でのシミュレーションまたはデバッグを行なわないと物にならない。ここでいうシミュレーションとは主としてプラントの状態、特性を模擬して、これとコンピュータシステムとを組合せ、設計、調整、試験を行なうもので、つぎのような3段階がある。

- 設計段階；主として DDC 系の解析などに用いられる手法でハイブリッド・コンピュータ等によりシミュレートする。
- 工場段階；工場段階において単独機能のシミュレートを行なうもので、シミュレータまたは一部実機を組合せコン

ピュータ制御機能を部分的に調整する。

プログラム・デバッグを含めて長くて6カ月程度

○現地段階：実機テストが目的でシステムシミュレーションを行なうものである。全ての制御プログラムを実時間で実行させつつ、プラントをシミュレータ（アナコンとか信号発生器）で模擬してその組合せ試験を行なうもので、これが完全であれば実機テストでもほとんど問題はでない。

さらに慎重を期す場合には、実機によりシミュレータで与えられた特性が得られるかどうか、実際のセンサーの作動テストも含めてシステムシミュレーションを行なう。

(9) あとがき

わが国においてもコンピュータ制御がようやくにして実用化の段階にはいろうとしているが、メーカ側からみた問題点としてソフトウエア作業の評価がユーザ側にあまり認められていないということがある。

わが国におけるユーザの常識としてソフトウエアに対してあまり金を払いたがらないという傾向がある。コンピュータ制御ではソフトウエアとハードウエアの必要経費は COMPARABLE またはそれ以上である（ハードは将来さらにコストダウンされ、人件費はコストアップの傾向にあるので今後さらに問題となる）。このような状態では、コンピュータ制御の健全なる発展はむづかしく、長い目でみるとユーザが結局損をすることにもなり兼ねないので、今後大いに認識をあらためてもらうようにメーカとしても努力を続けることが必要である。

2.1.4 DDCを採用したスエーデン建造船 Sea Sovereign 号の試験結果

スエーデンの Svensk Skeppsforskning(船舶研究財団）が Kockums 社建造の Salen 社向21万 DWT タンカー Sea Sovereign 号で行なつたコンピュータ・システムの研究は1年間の実船試験を終了した。近くその成果が発表されることになつているが、処女航の成績についての報告の一部を入手することができたので以下それを転載する。（なお、この研究の内容の概要については、日本造船研究協会・研究資料№106－5－2舶用コンピュータ・システム調査団報告書「海外における船舶の超自動化」47頁参照のこと）

「スエーデン船舶研究財団の報告（一部分）」

(1) 運航結果

(a) 一　般

本報告書の基になる処女航では、できるだけ広範囲のプログラムを、十分機能を発揮しうるように努力を集中した。したがつて operation characteristics の評価はわずかしかできなかつた。

以下の報告には、数値的な結果は一部を除きほとんどなされていない。

(b) 推進装置

計測値を解析して、以前からわかつていた transducer の問題が明らかになつてきた。100個以上の transducer が安全正確な機能を保つているということはむずかしい。明白に長所と言える点は、プログラムが transducer の故障を知らせ、故障の種類を表示するようになつていることである。もう一つの長所は print-out の形を乗船者の希望どおりに変えるのが簡単にできるということである。計算値を求めることができるというのも明らかに長所の一つである。

コンピュータの制御は、いままで使用された限りでは、在来の制御と同等であることがわかつた。研究の結果、ループの解析と設計を以前よりもつと注意してやらねばならないことが判つた。また、数値的検討は未済だが、動特性について良い知識が得られた。これは研究目的には含まれていなかつた副産物である。

コンピュータ制御の一つの長所は、おきうる不具合（malfunctioning）についての情報がエンジニアにタイプライタによつて印字された形で伝達されるので、正確な処置を迅速にとり易いということである。

精度の制御はまさに成功した。迅速かつ正確に働らいた。われわれの知る限りでは、従来こんなに良く制御されたことはなかつた。

2.2 タービンプラントで従来使用されていたアナログ制御を直接制御におきかえる場合の適切な適用範囲

2.2.1 プラントのコントロールシステム

従来タービンプラントに採用されているアナログコントロールシステムはヒートサイクル、各系統の仕様、ならびにコントロール装置そのものの方式の差などにより一概に規定し難いところであるが、ここでは直接制御適用の検討を進めるに当つて一応代表的なヒートサイクルを選定し、これに比較的一般に採用されているアナログコントロールシステムを結びつけて考えることとした。すなわちヒートサイクルは昭和44年度ソフトウエアの開発に際して選んだ非再熱再生サイクルとした。

第2.2.1図および第2.2.2図はそれだれ蒸気・復水・給水系統および燃料油系統のコントロールシステムダイヤグラムを示す。他の系統は比較的独立したコントロールループが多くお互いの関連が少ないので省略した。

後述の直接制御の適用範囲を論ずるにあたつてはこれらアナログコントロールループがどのような機能を受持つているか、とくにプラント全体の中でどのような相互関連をもつているかいま一度十分認識を深めておくことも必要と考えられる。さらにまたそれぞれのアナログコントロールループが制御の機能を十分発揮しているか、改善の余地がのこされていないかということについて現状を把握しておくことが必要である。後者については2.2.2項で論ずることにする。

本分科会第1小委員会ではまず各アナログループの機能ならびに特性を把握するために全アナログループすなわち、38ループについて第2.2.1表～第2.2.9表に例示するようなデータシートを作成した。これを分類すれば第2.2.10表のとおりである。

なお、これらデータシートでは外乱性質についての量的な把握はなされていないが、将来直接制御を具体的に計画する場合には実船計測が望まれるところである。ところで第2.2.10表に示されたコントロールループの機能、ならびに相互関連につきつぎに補足的に考察する。

(1) 主機遠隔操縦装置

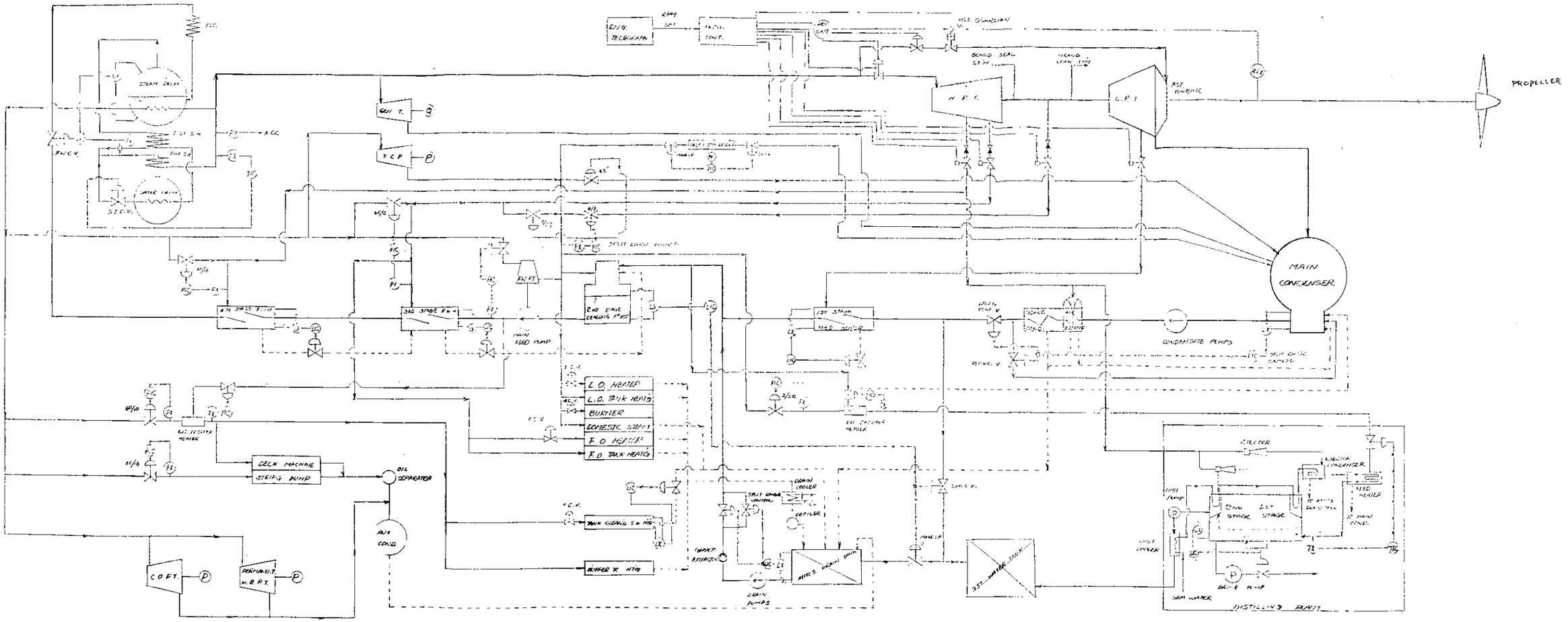
操船の本来の目的は船を所定の時間で目的地につけるためその間の外界条件、すなわち天候、海象、潮流、吃水、障害物、機関の状況などに即応して機関出力あるいはプロペラ回転数を制御することである。しかし従来はオペレータが自己の判断でプロペラの回転数または操縦弁開度（またはノズル弁開度）を設定し操縦装置はボイラの圧力、ドラムレベルの追従、タービンの熱負荷あるいは駆動軸系のトルク等を考慮して予め設定されたプログラムに従つて出力または回転数の増減速を行なつている。もちろん主機操縦装置にはインターロック装置（主蒸気圧低下、ドラム水位上昇など）および異常時の安全トリップ装置（L.O.圧力低下*、過速度*、主蒸気圧低下、ドラムレベル異常上昇、操縦油圧低下、プラックアウト、タービンの異常振動、ロータの軸方向変位、主復水器真空低下、ボイラのトリップなど）が設けられる。ただし、*印を付けたもの以外にはトリップ解除スイッチを設けてもよいことになつている。その他、タービンのオートスピニング装置、関連諸弁（後進中間弁、ノズル弁、抽気弁、ドレン弁）の自動開閉装置などが組込まれ通常操縦装置と相互に関連づけられている。さらにプロペラの回転数はスクープの切換えにもインターロックされている。

主機操縦装置をボイラの制御に対してフイードフオワード的にリンクすることが一部の外国メーカで行なわれているが、まだ国内では一般的ではない。

プロペラの回転数制御は通常は港内 Full までの回転数で十分であるが航海 Full までの全域にわたつて行なつている場合もある。

(2) 自動燃焼制御装置（A.C.C）

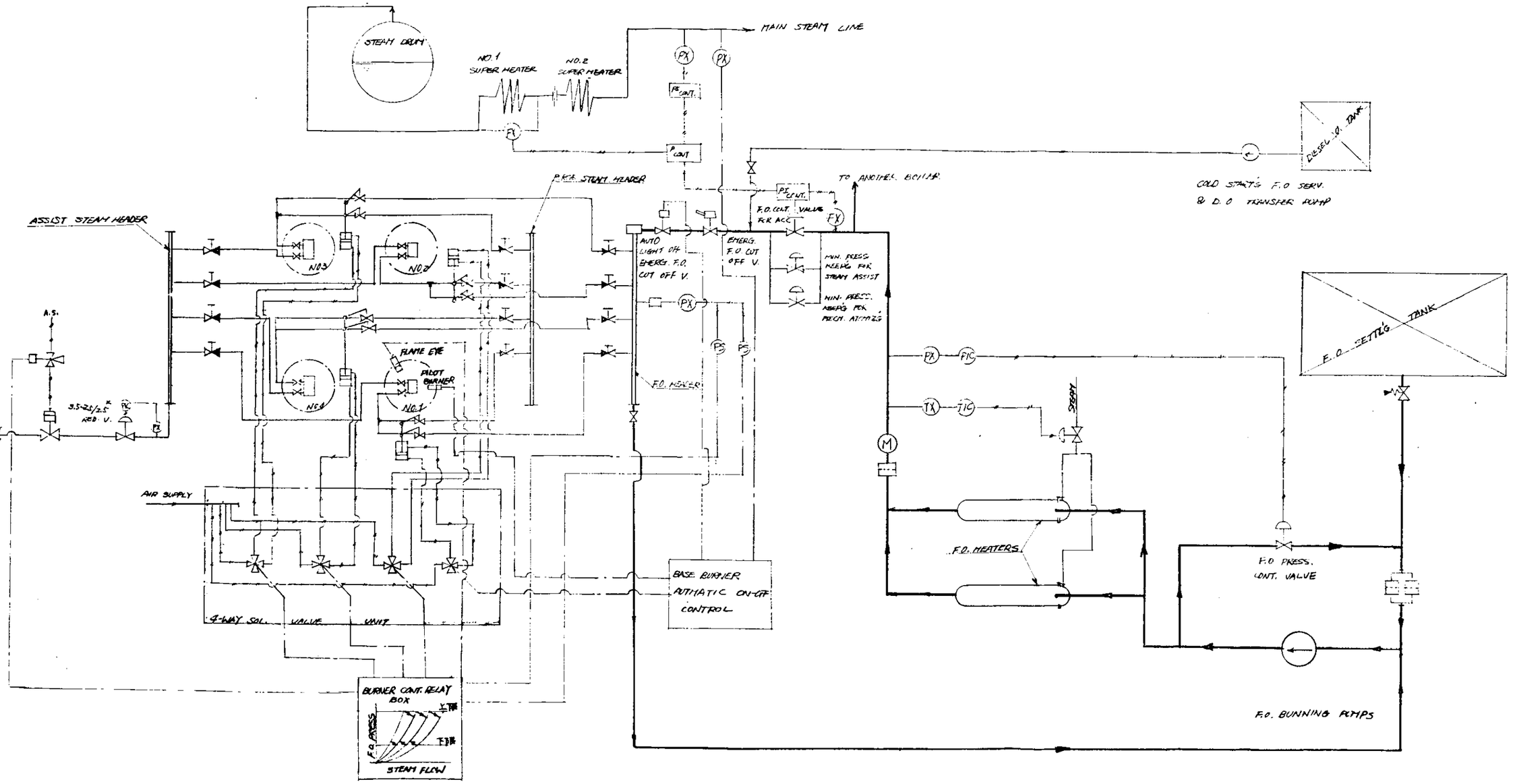
電気式のものもあるがここでは空気式を考え過熱器出口圧力を一定に制御する方式とした。過熱器出口圧力とドラム圧力のいずれを制御するのがよいかについては本第1小委員会で検討されたがドラム圧一定制御のほうが絶対的に優位であるという結論は出なかつた。



第2.2.1図　タービンプラントコントロールシステムダイヤグラム
（従来のアナログコントロールシステム）
蒸気・復水・給水系統

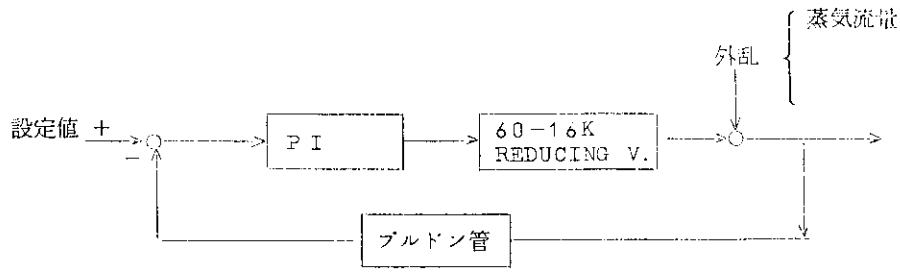
LEGEND

PX	圧力検出器	—M—	空気管
LX	レベル検出器	—— - ——	電線
TX	温度検出器	PS	圧力スイッチ
PIC	圧力制御器（指示計付）	REV.X	回転検出器
LIC	レベル制御器（指示計付）		
TIC	温度制御器（指示計付）		

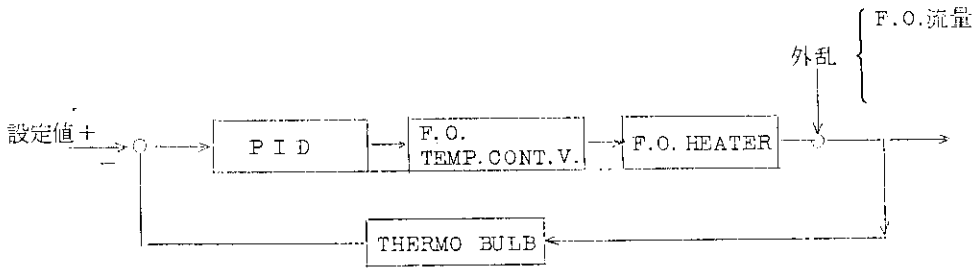


第2.2.2図　タービンプラントコントロールシステムダイヤグラム
（従来のアナログコントロールシステム）
燃料油系統

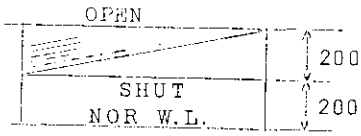
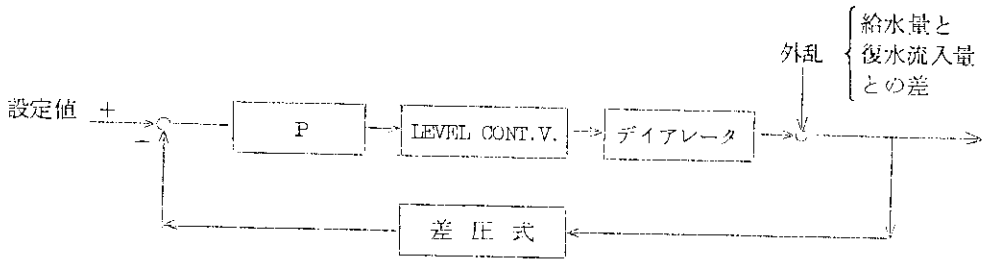
第2.2.1表　アナログ制御データシート（60－16K減圧弁）

項　　目	データ
制御種類	60－16K減圧弁　（4TH FEED HEATER MAKE UP LINE）
数　　量	1
操作対象（量）	蒸気量　（内部緩熱蒸気）
圧　　力	弁前　MAX. 65 Kg／cm²G、　弁後　16 Kg／cm²G
温　　度	350℃
流　　量	10,000 Kg／hr
制御対象（量）	蒸気圧力　（2次圧）
圧　　力	
温　　度	
流　　量	
制御ループ	
外乱に対する特性	
プロセスの性質	
制御量検出器種類	ブルドン管
検出範囲	0～30K
操作器種類	空気作動ダイアフラム式
入力信号	0.2～1.0 Kg／cm²G
入出力特性	パラボリック
操作速度	
制御器種類	PI　（指示計付）
入力信号	直　圧
出力信号	0.2～1.0 Kg／cm²G
比例帯	10～250 %
積分時間	20分～0.1分
微分時間	—
精　　度	1 %
自動・手動切換方法	—
記録計・指示計	

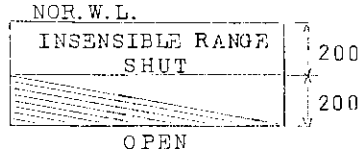
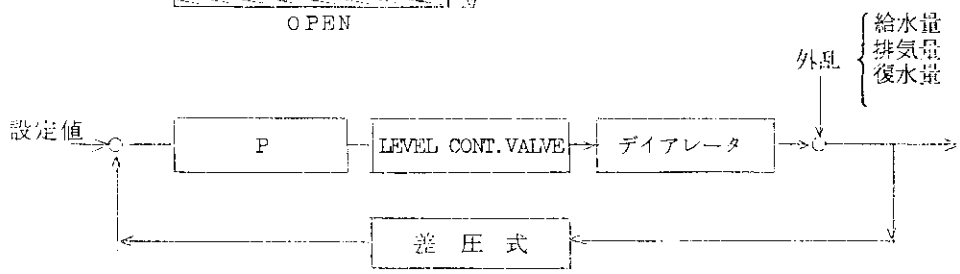
第2.2.2表　アナログ制御データシート（燃料油温度調整弁）

項　　目	データ
制御種類	燃料油温度調整弁　　口径　25φ
数　　量	1
操作対象（量）	加熱蒸気流量
圧　　力	8.5　（MAX. 10）　Kg／cm² G
温　　度	SAT　　℃
流　　量	750 Kg／hr
制御対象（量）	燃料油温度
圧　　力	35　（MAX. 39）　Kg／cm² G
温　　度	125 ± 5 ℃
流　　量	—
制御ループ	
外乱に対する特性	
プロセスの性質	
制御量検出器種類	水銀膨張式
検出範囲	0～150 ℃
操作器種類	空気作動式
入力信号	0.2～1.0 Kg／cm² G
入出力特性	100 %　比例
操作速度	10 秒　　リフト　13 mm
制御器種類	PID　（指示計付）
入力信号	直　温
出力信号	0.2～1.0 Kg／cm² G
比例帯	10～250 %
積分時間	20～0.1 分
微分時間	3秒～10分
精　　度	1 %
自動・手動切換方法	—
記録計・指示計	

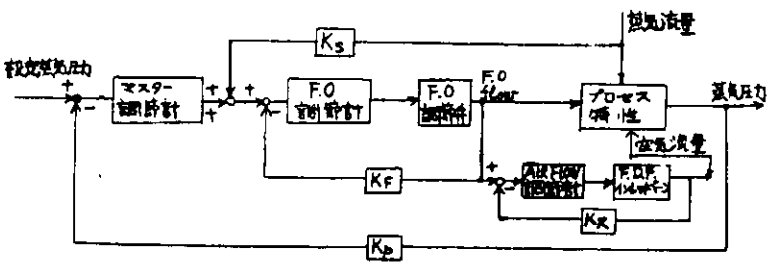
第2.2.3表　アナログ制御データシート（デイアレータ水位調整用スピル弁）

項　　目	データ
制御種類	デイアレータ水位調整用スピル弁　　50φ
数　　量	1
操作対象（量）	主復水ライン復水量
圧　　力	弁前　MAX. 8.5 Kg／cm² G、　弁後　1 Kg／cm² G
温　　度	100 ℃
流　　量	0 ～ MAX. 40,000 Kg／hr
制御対象（量）	デイアレータ水位
設　定　値	
制御ループ	
外乱に対する特性	
プロセスの性質	
制御量検出器種類	差圧式
検出範囲	—
操作器種類	空気作動ダイアフラム式
入力信号	0.2 ～ 1.0 Kg／cm² G
入出力特性	リニヤ
操作速度	0.2 ～ 0.3 分　・リフト　25 mm
	—
制御器種類	P
入力信号	差圧
出力信号	0.2 ～ 1.0 Kg／cm² G
比例帯	10 ～ 250 %
積分時間	—
微分時間	—
精度	1 %
自動・手動切換方法	—
記録計・指示計	

第2.2.4表　アナログ制御データシート（デイアレータ水位調整用補給弁）

項　　目	データ
制御種頃	デイアレータ水位調整用補給弁　　口径　65φ
数　　量	1
操作対象（量）	清水量
圧　　力	大気圧
温　　度	常温　MAX. 70℃
流　　量	MAX. 40,000Kg／hr
制御対象（量）	デイアレータ水位
設　定　値	
制御ループ	
外乱に対する特性	
プロセスの性質	
制御量検出器種類	差圧式
検出範囲	—
操作器種類	空気式ダイアフラム式
入力信号	0.2～1.0Kg／cm²G
入出力特性	リニヤ
操作速度	0.3分　リフト　30㎜
	—
制御器種類	P
入力信号	差圧
出力信号	0.2～1.0Kg／cm²G
比例帯	10～250％
積分時間	—
微分時間	—
精度	1％
自動・手動切換方法	—
記録計・指示計	

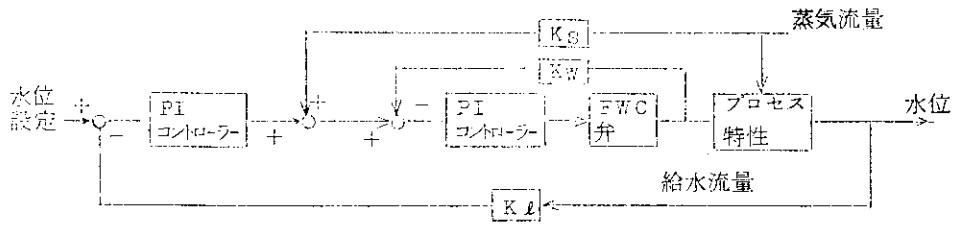
第2.2.5表　アナログ制御データシート（ボイラ　ACC－その１）

項　　目	データ
制御種類	ACC
数　　量	2　（マスタコントローラ1、F.O.コントローラ1）
操作対象（量）	F.O.流量
圧　　力	35 atg
温　　度	MAX. 90℃
流　　量	6 Ton／hr
制御対象（量）	主蒸気圧力
圧　　力	62 atg
温　　度	515℃
流　　量	100 Ton／hr
制御ループ	
外乱に対する特性	
プロセスの性質	
制御量検出器種類	力平衡式　　圧力変換器
検出範囲	0～80 atg.
操作器種類	空気作動ダイアフラム式
入力信号	0.2～1.0 atg
入出力特性	入力信号対バルブリフト　　線形特性
操作速度	全開←→全閉　　約3秒（リフト＝19㎜）　検出端から弁操作までの時間　約0.4 sec
精　　度	ヒステリシス　　フルスパンの約１％以内
制御器種類	ＰＩ動作　空気式調節計
入力信号	0.2～1.0 atg
出力信号	〃
比例帯	0～500％
積分時間	0.1～50 min
微分時間	／
精　　度	
自動・手動切換方法	手動マッチイング切換
記録計・指示計	有

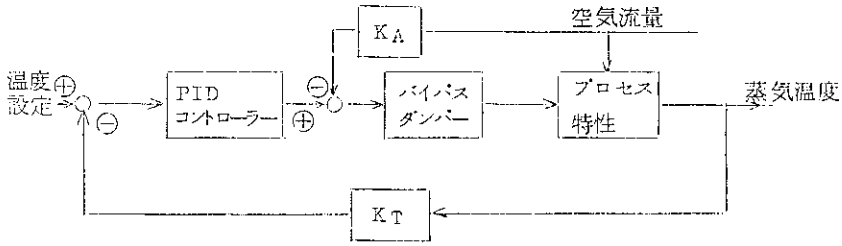
第2.2.6表　アナログ制御データシート（ボイラ　ACC－その2）

項　　目	データ
制御種類	ACC
数　　量	1　（Air Flow コントローラ）
操作対象（量）	空気流量
圧　　力	900 mmAq
温　　度	45℃
流　　量	1,800 Nm³/min
制御対象（量）	操作対象と同じ
圧　　力	〃
温　　度	〃
流　　量	〃
制御ループ	第2.2.5表添附図参照
外乱に対する特性	
プロセスの性質	
制御量検出器種類	力平衡式　差圧発信器
検出範囲	0～150 mmAq
操作器種類	エアシリンダ式　ドライブユニット
入力信号	0.2～1.0 atg
入出力特性	
操作速度	全開⟷全閉　10 sec（操作開度90°）　検出端からドライブユニット操作までの時間　約0.5 sec
精　　度	
制御器種類	PI動作　空気式調節計
入力信号	0.2～1.0 atg
出力信号	〃
比例帯	0～500 %
積分時間	0.1～50 min
微分時間	／
精　　度	
自動・手動切換方法	手動マッチイング切換
記録計・指示計	有

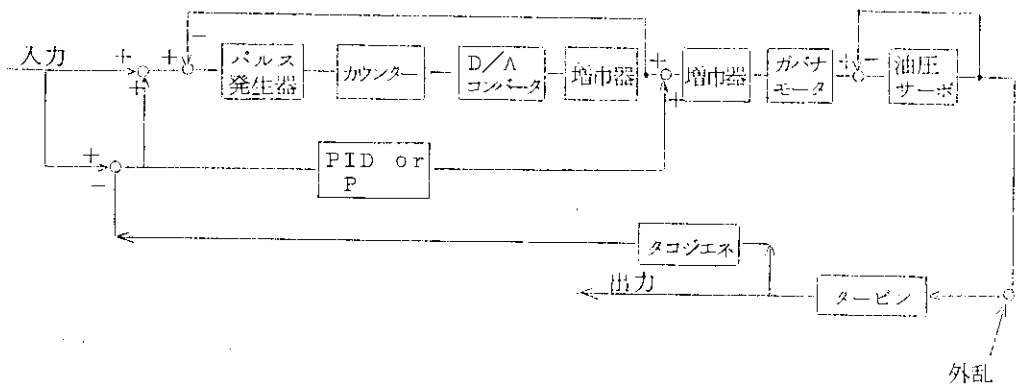
第2.2.7表　アナログ制御データシート（ボイラ　FWC）

項　　目	データ
制御種類	FWC
数　　量	2　（レベルコントローラ、マスタコントローラ　各1）
操作対象（量）	給水流量
圧　　力	75 atg
温　　度	138 ℃
流　　量	100 Ton／hr
制御対象（量）	ドラム水位
圧　　力	
温　　度	
流　　量	
制御ループ	
外乱に対する特性	蒸気流量外乱に対してレベルの逆応答特性　　有
プロセスの性質	
制御量検出器種類	力平衡式　差圧発信器
検出範囲	±200 mmAq
操作器種類	給水加減弁
入力信号	0.2～1.0 atg
入出力特性	入力信号対バルブリフト　：線形特性
操作速度	全開⇔全閉　約3秒（リフト 25.4 mm）　検出端から弁操作までの時間　約0.4 sec
精　　度	ヒステリシス　　約2 %
制御器種類	PI動作　空気式調節計
入力信号	0.2～1.0 atg
出力信号	〃
比例帯	0～500 %
積分時間	0.1～50 min
微分時間	／
精　　度	
自動・手動切換方法	手動マッチング切換
記録計・指示計	有

第2.2.8表　アナログ制御データシート（ボイラ　STC）

項　　目	データ
制御種類	蒸気温度制御
数　量	1
操作対象（量）	バイパスガス量
圧　力	MAX. 150㎜Aq
温　度	MAX. 500℃
流　量	
制御対象（量）	主蒸気温度
圧　力	62 atg
温　度	515℃
流　量	100 Ton／hr
制御ループ	
外乱に対する特性	
プロセスの性質	
制御量検出器種類	ガス圧力変換器
検出範囲	350～550℃
操作器種類	ダンパードライブユニット
入力信号	0.2～1.0 atg
入出力特性	非線形
操作速度	全開←→全閉　約10 sec（操作角度90°）　検出端からユニット操作までの時間　約0.5 sec
トルク	150 Kg・m
制御器種類	PID動作　空気式調節計
入力信号	0.2～1.0 atg
出力信号	〃
比例帯	0～500％
積分時間	0.1～50 min
微分時間	0.1～50 min
精度	／
自動・手動切換方法	手動マッチング切換
記録計・指示計	有

第2.2.9表　アナログ制御データシート（主機遠隔操縦装置）

項　　目	データ
制御種類	主機遠隔操縦装置　（電気油圧式）
数　　量	1 式
操作対象（量）	タービン流入蒸気量　（ノズル弁開度）
圧　　力	NOR　60 Kg／cm² G
温　　度	NOR　510 ℃
流　　量	NOR　約90,000 Kg／hr
制御対象（量）	プロペラ回転数
	—
	—
	—
制御ループ	
外乱に対する特性	
プロセスの性質	
制御量検出器種類	タコジエネレータ
検出範囲	0～150 RPM　（0～50 V）
操作器種類	油圧サーボ式
入力信号	
入出力特性	
操作速度	
制御器種類	PID or P
入力信号	
出力信号	10～50 mA
比例帯	
積分時間	
微分時間	
精度	
自動・手動切換方法	
記録計・指示計	

外乱：
- プロペラ
- Sea condition
- Ship speed
- Steam temp
- Steam press

第2.2.10表　アナログコントロールループ分類表

種　　類	操　作　対　象　（量）	ループ数
主機遠隔操縦装置	タービン流入蒸気量	1
A.C.C.	F.O.流量、空気量	1
S.T.C.	緩熱蒸気量（またはバイパスガス量）	1
F.W.C.	給　水　量	1
圧　力　制　御	蒸　気　量	15
	F.O.　量	1
	蒸　気　量	5
	潤滑油量	1
温　度　制　御	給水量（EXT. DESUPER HEATER）	1
	復水量（EVAP.用 EXT. DESUPE HEATER）	1
	清水量（A/G. DIESEL F.W. COOLER）	1
	補給水、スピル量	2
レ　ベ　ル　制　御	ブライン吐出量	2
	ドレン量	4
主復水再循環制御	復水流量	1
合　　計		38

A.C.C.によつて制御される燃料油圧力を検出してバーナの本数を自動的に加減する装置が第2.2.2図に示されている。ベースバーナは44年度に開発したプラントの起動シーケンスで考えられているように自動点火方式とし、残りのバーナは燃料油圧に応じて自動的に点火、消火ならびにパージ蒸気の遮断供給が行なわれる。

外乱としては蒸気流量、給水量の他、影響度は小さいけれども燃料油の粘度、燃焼空気温度などがあげられる。

(3)　過熱器蒸気温度制御装置（S.T.C.）

Attemperator 方式をとりあげたが、ガスのバイパス量を制御するダンパー方式のものもある。外乱としては蒸気流量、燃料油量、燃焼空気量の変化、過熱器チューブの乱れなどがある。

(4)　給水加減装置（F.W.C.）

ドラム水位、蒸気流量を検知する2エレメント式が多く採用されているが、さらに給水流量を加えた3エレメント式もある。外乱としては蒸発量、給水圧力の変動などがあり、Crash Astern, Crash Stop 時の過渡状態にはかなり苛酷な制御が要求される。F.W.C.に関連して給水ポンプには一般に一定吐出圧制御、一定差圧制御、あるいはドラムレベルによる直接制御などが採用されているが、F.W.C との間には密接な関係がある。

(5)　圧力制御

圧力制御には二次圧の一定制御、一次圧過高時の逃しなどの機能が含まれている。一部ループの外乱（蒸気量変化）のなかには主機、あるいはボイラの負荷変化に関係するもの、甲板部の蒸気需要の変化に関係するものがある。しかし、コントローラ相互の関連がなくとも独立したコントロールループとして概して良好な制御機能を発揮している。やや異なつた圧力制御として補助排気系統にみられるごとく1個のコントローラを用い、コントロールバンドを3分割して3.5 Kg/cm²G 逃がし弁、6/3 Kg/cm²G、中圧抽気系統からの Make-up 弁、さらに 10/2.7 Kg/cm²G 緩熱蒸気系統よりの Make-up 弁を働かせるようにした制御もある。

また比較的難かしい圧力制御として主機タービンパッキン蒸気圧力の制御および燃料油圧力の制御がある。前者は主機の負荷変化に応じて蒸気量が変化し、かつ制御圧力が約0.2 Kg/cm²G という低圧であること、後者は A.C.C.の

燃料油量制御により油量が大幅にしかも急速に変化するという特性がありそれぞれに制御の難かしさがある。

(6) 温度制御

圧力制御と同様、それぞれ独立したコントロールループとして機能を発揮しており、他のコントローラとの相互関連はない。外乱が主機あるいはボイラの負荷変化に関連するもの（たとえば主機潤滑油および燃料油温度制御）、あるいは海水温度に影響するもの（たとえば主補機潤滑油温度、造水装置の給水温度制御など）があげられるが、これらの外乱による温度変化は比較的緩慢であり、他のコントローラとリンクして制御を補佐することの必要性は見当たらない。

(7) レベル制御

各種加熱器およびドレンタンクのレベル制御はそれぞれ独立したコントロールループであるが、デイアレータレベル制御は復水系統、ドレン移送系統と密接な関連をもつている。すなわちデイアレータレベルが上昇すれば復水系統より蒸溜水タンクへスピルさせ、レベルが低下すれば、いつたん大気圧ドレンタンクへ補給され、ドレンタンクの水位制御を介してデイアレータへのドレン移送量が増す。

(8) 主復水再循環制御

主機、発電機などの負荷変化に応じて主復水量が変化したとき主復水器ホットウエルのレベルを保ち、さらにグランドコンデンサの冷却水量を確保しうるよう再循環量を制御している。一般には、つぎのような方式が採用されている。

1) ホットウエルレベルは復水ポンプのキャビテーションコントロールによることとし、グランドコンデンサ出口の復水温度を検知して再循環量を制御する。

2) 主機操縦弁の開度により再循環弁の開度を全開、半開、全閉の3段階に切換える。ホットウエルレベルは別個に流量調整をする。

3) ホットウエルレベルを検知しレベル低下で第2.2.1図に示すようにグランドコンデンサ出口側に設けられたレベル調整弁で流量が絞られるが、グランドコンデンサの必要冷却水量以下になれば再循環弁がレベル調整弁の開度と逆作動で開き常に最低流量を確保し、かつホットウエルレベルも所定値に保つ。

2.2.2 アナログコントロールループの現状と制御改善の必要性

2.2.1項でのべた各アナログコントロールループについて制御の現状がどうなつているか、制御改善の必要性はどうか、また、2.2.3項で直接制御の適用を論じる場合の参考とするためにそれぞれのコントロールループについて調整の難易、仮りに直接制御を採用する場合のアナログバックアップの必要性について検討した。その結果をとりまとめたのが第2.2.11表である。

この中でとくにボイラ関係の制御について、ドラムレベル、過熱器出口圧力、過熱器出口温度に着目し、各種の苛酷な操船状態に対して実績変動幅がどうなつているか、将来どの程度の改善が必要されるかにつき大略の見当をつけた。その結果をまとめたのが第2.2.12表である。

この表から判るとおり Crash Astern, Emergency Stop などの過渡状態でドラムレベル、過熱器出口圧力の実績変動幅は現在必ずしも満足できる状態ではなく若干の改善が期待される。また、第2.2.11表中デイアレータの水位調整装置については、つぎの点で問題が生じることがある。すなわち、ブラックアウトの場合、復水ポンプ、ドレン移送ポンプは停止し、電源復帰とともに再起動するが、その間主給水ポンプは運転を続けておりデイアレータのレベル低下に応じてドレンタンクへ補給されている。したがつて場合によつてはデイアレータのレベル調整機能に問題がでてくることがある。

2.2.3 直接制御の適用範囲

従来のアナログ制御を直接制御におきかえることの必要性、あるいはおきかえたほうがよいかどうかを判断するためつぎのような評価項目が考えられる。

第2.2.11表　タービンプラント、アナログコントロールの現状

番号	分類	アナログコントロール種類	制御対象（量）	操作対象（量）	制御動作	指示計有　無
1	圧力制御	主機遠隔操縦装置	プロペラ回転数	タービン流入蒸気量	PID or PI	○
2		ボイラ自動燃焼制御装置	主蒸気圧力	F.O.流量 空気流量	PI PI	○ ○
3		給水加減装置	給水流量	ボイラドラム水位	PI	○
4		過熱器蒸気温度制御装置	蒸気温度	蒸気温度	PID	○
5		$60^{K}-16^{K}$　減圧弁（Make-up用）	4段給水加熱器内圧力	内部緩熱蒸気流量	PI	○
6		〃　（ストリッパー用）	2次蒸気圧力	〃	PI	○
7		$60^{K}-10^{K}$　減圧弁（Make-up用）	3段給水加熱器内圧力	〃	PI	○
8		〃　（甲板補機用等）	2次蒸気圧力	〃	PI	○
9		$10^{K}-4^{K}$　減圧弁（L.O.加熱器用）	〃	〃	PI	○
10		$10^{K}-2.5^{K}$ 減圧弁（アシストスチーム用）	〃	〃	PI	○
11		$10^{K}-2.7^{K}$ 減圧弁（Make-up用）	デイアレータ器内圧力	〃	PI	○
12		$6^{K}-3^{K}$　減圧弁（Make-up用）	〃	中圧抽気量	PI	○
13		$3^{K}-0.35^{K}$ 減圧弁（Dist. plant用）	2次蒸気圧力	補助排気流量	PI	○
14		補助排気圧力調整弁	デイアレータ器内圧力	〃	PI	○
15		主タービン、パッキン蒸気圧力調整弁（供給）	M/T パッキン　蒸気溜圧力	パッキン蒸気供給量	PI	○
16		〃　（逃し）	〃	パッキン蒸気溜逃し蒸気量	PI	○
17		G/T パッキン蒸気圧力調整弁　（供給）	G/T 〃	パッキン蒸気供給量	PI	○
18		〃　（逃し）	G/T 〃	パッキン蒸気溜逃し蒸気量	PI	○
19		ボイラ燃料油圧力調整弁	燃料油圧力	燃料油流量	PI	○
20	温度制御	燃料油　温度調整弁	F.O. HEATER 出口温度	加熱蒸気流量	PID	○
21		主潤滑油　〃	L.O. COOLER 出口温度	潤滑油バイパス量	PID	○
22		G/D 冷却清水　〃	F.W. COOLER 出口温度	清水バイパス量	PI	○
23		油清浄機用潤滑油　〃	L.O. HEATER 出口温度	加熱蒸気流量	PI	○
24		外部緩熱器用　〃	外部緩熱器出口温度	給水量	PI	○
25		タンククリーニング海水加熱器用〃	加熱器出口海水温度	加熱蒸気流量	PID	○
26		造水装置給水　〃	給水温度	〃	PI	○
27		造水装置用外部緩熱蒸気　〃	外部緩熱器出口温度	スプレイ水	PI	○
28	レベル制御	デイアレータ水位調整用スピル弁	デイアレータレベル	主復水ラインスピル量	P	○
29		〃　メイキヤップ弁	〃	補給水量	P	○
30		第1段給水加熱器ドレン水位調整弁	加熱器ドレンレベル	加熱蒸気ドレン量	P	○
31		第3段　〃	〃	〃	P	○
32		第4段　〃	〃	〃	P	○
33		清水ドレン集合タンク水位調整弁	タンクレベル	清水ドレン吐出量	P	○
34		タンク・クリーニング 海水加熱器ドレン冷却器用水位調整弁	冷却器レベル	ドレン量	P	○
35		造水装置第2段蒸化器内ブライン水位調整弁	ブラインレベル	ブライン吐出量	P	○
36		主復水器再循環弁　（CASE A）	グランドコンデンサ 出口復水温度	復水量	PI	○
		（CASE B）		〃	ON OFF	○
		（CASE C）	主コンデンサホットウエルレベル MIN 復水流量		PI	○

○ 要、 × 不要、 △ 他に理由があれば要

制御の現状	制御改善の必要性	調整の難易	アナログバックアップの要否
RPM ガバナについては、とくに問題なし。	プラント特性、トルクリミットに応じた増減速プログラムの設定。	やや難	×
定常状態ではあまり問題なし。	全負荷範囲での制御性改善、空気比の調節。	難	○
蒸発量急変時、若干問題あり。	過渡状態での制御性改善。	やや難	○
負荷急変時オーバーシュートの可能性あり。	〃	〃	×
問題なし。	とくになし。	容易	○
〃	〃	〃	○
〃	〃	〃	○
〃	〃	〃	○
〃	〃	〃	○
〃	〃	〃	○
〃	〃	〃	○
〃	〃	〃	○
〃	〃	〃	○
〃	〃	〃	○
主機の負荷変動時圧力が不安定になることがある。	負荷変動に応じた制御性改善。	やや難	△
		〃	△
問題なし。	とくになし。	容易	×
		〃	×
負荷急変時圧力が不安定になることがある。	負荷変動に応じた制御性改善。	〃	○
問題なし。	とくになし。	容易	×
〃	〃	〃	×
〃	〃	〃	×
〃	〃	〃	×
負荷変動時やや問題あり。	負荷変動時に応じた制御性改善。	やや難	○
〃	〃	〃	×
問題なし。	とくになし。	容易	×
〃	〃	〃	×
Black out 時 SPILL 機能に問題のあることあり。	〃	〃	○
問題なし。	〃	〃	○
〃	〃	〃	○
〃	〃	〃	○
〃	〃	〃	○
〃	〃	〃	○
〃	〃	〃	○
〃	〃	〃	○
・復水ポンプはキャビテーションコントロール海水温度（復水温度）の影響あり。 ・操縦弁開度により全開、半開、全閉の切換、コントロール精度が悪い。	あらゆる状態での制御性改善。	やや難 容易	○ —
問題なし。	とくになし。	〃	○

第2.2.12表　タービンプラント、ボイラ制御改善目標

		ドラムレベル（MM）			
		実績変動巾	制御目標	目標設定根拠	実績変動巾
CRASH ASTERN FULL AH. →FULL ASTERN	A社	−160〜+100	−50〜+50	E社に同じ。	+ 8〜− 4
	B社	−130〜+140 −120〜+ 90	−120〜+60		+ 2.4〜− 3.6 +1.12〜− 8.4
	C社	−120〜+ 60	−75〜+50	ボイラの現構造考慮。過渡現象につきあまりSEVEREに制御する要なし。	+ 7〜− 5
	D社	−150〜+100	−50〜+50		+ 4〜− 5
	E社	−120〜+ 60	−40〜+30	LOW LEVEL TRIP, SHORT WATER, CARRY OVERの防止。収斂時間の短縮。	+ 7〜− 5
	分科会		−75〜+50		
EMERGENCY STOP FULL AH. →MANOEUV. V. SHUT	A社	CRASH ASTにほぼ同じ	−50〜+50	E社に同じ。	CRASH ASTにほぼ同じ
	B社	−120〜+ 40 −140〜+130	−120〜+20		+ 3.6〜− 8.4 + 2.4〜− 2.4
	C社	−120〜+ 20	−75〜+20	ボイラの現構造考慮。過渡現象につきあまりSEVEREに制御する要なし。	+ 7〜− 1
	D社	−150〜+ 50	−50〜+20		+ 4〜− 2
	E社	−120〜+ 20	−40〜+10	CRASH AST.に同じ。	+ 7〜− 1
	分科会		−75〜+50		
NORMAL RUNNING	A社	± 20	—	実績から問題なし。	± 0.5
	B社	± 10 ± 10	± 15		$\pm 0.5^{K}$（1.2%?） $\pm 0.5^{K}$
	C社	± 15	± 10		± 0.5
	D社	± 10	± 5		± 0.5
	E社	± 15	± 10	CARRY OVER, 給水変動の防止、プラント効率向上	± 0.5
	分科会		± 10		

SH出口圧力 (%)			SH出口温度 (C)	
制御目標	目標設定根拠	実績変動巾	制御目標	目標設定根拠
＋ 3～－ 2	E社に同じ。	＋ 5～－20	—	実績から問題なし。
± 2.5		—	＋ 5～成行	
＋ 3～－ 2		＋ 5～成行	＋ 5～成行	
＋2.5～－2.5		成 行	成 行	
＋ 3～－ 2	水面変動の軽減。 安全弁吹出防止。 設計圧力の低減。 収斂時間の短縮。	＋ 5～成行	＋ 5～成行	
＋ 3～－2.5				
＋ 3～－ 2	E社に同じ。	成 行	—	
± 2.5		—	成 行	
＋ 3～－0.3		成 行		
＋2.5～－1.0		成 行		
＋ 3～－0.3	CRASH AST.に同じ。	成 行		
＋ 3～				
—	実績から問題なし。	± 2	—	実績から問題なし。
± 0.5		± 3	± 2	
		± 3		
± 0.5	圧力計精度を考慮。 巾を小さくしてもプラント全体として余り得にならない。	± 2	± 2	
± 0.2		± 2～3	± 2	
± 0.2	プラント効率向上	± 2	± 2	
± 0.5				

◦バックアップシステムの必要性

◦制御性能改善の可能性

◦調整の難易

◦総合評価

つぎにそれぞれの項目につき考察する。

(1) バックアップシステムの必要性

直接制御におきかえたとしても、万一の電算機故障を考えるとバックアップシステムが必要となるが、操作端の手動操作によつてバックアップ可能の場合、また同一の制御機能をもつたバックアップシステムを必要とする場合がある。後者の場合は二重のシステムとなり在来のものに比し信頼度・安全度は増すがコスト高となる。バックアップの方式として電算機2台を用いる場合と在来のアナログコントローラによる場合の二通りが考えられる。しかし船用としての特殊環境すなわち乗組員は在来のコントローラに習熟しており、またもし洋上で電算機が故障して原因が不明確なとき、電算機によりバックアップをしたのでは多少不安がのこるかも知れない。そこで直接制御導入の当初はまずアナログバックアップの採用が予想されるので、ここではこれを前提として考えることとした。

第2.2.11表には各アナログコントロールループについてバックアップの要否を示している。

この要否をきめた背景について若干の補足説明をする。

◦主機遠隔操縦装置

プログラムおよびガバナ機能に対してのバックアップは設けなくとも操縦装置アクチエータを機関制御室から遠隔手動コントロールできれば主機の運転は可能と考えた。

◦A.C.C, F.W.C

制御の機能がダウンした場合、手動によるバックアップは非常に困難であり副次的事故を惹起するおそれがある。したがつてアナログバックアップを設けることとした。

◦S.T.C

調整弁のアクチエータおよび手動リモートコントロールの機能が確保されれば、コントローラに対するバックアップは設けずとも制御室からの遠隔コントロールで操作可能と判断した。

◦圧力制御

減圧弁、圧力調整弁はいずれもかなり早い応答が要求され、しかも乗組員の省力化という観点からもアナログバックアップは必要と考えられる。

パッキン蒸気圧力調整については発電機用は比較的負荷が安定しているのでアナログバックアップは不要としたが、主機用は負荷変化が大きいのでアナログバックアップが望ましい。しかし、供給弁、逃がし弁のリモートコントロールが可能であれば必ずしも絶対条件とはならない。

◦温度制御

外部緩熱器用を除けば加熱蒸気弁の手動調整によるバックアップで一応運転可能と判断した。

◦レベル制御

いずれもかなり早い応答が要求され、しかも制御の重要性を考えるとアナログバックアップは必要と判断した。

(2) 制御性能改善の余地

従来のアナログ制御をそのまま直接制御におきかえるとは、これら2つの制御方式間においてつぎの2つを含意するものと前提する。

1）各種変数（信号）の選定位置、結合、組合せなどは全く同一である。

2）制御アルゴリズムは全く同一である。（PID）

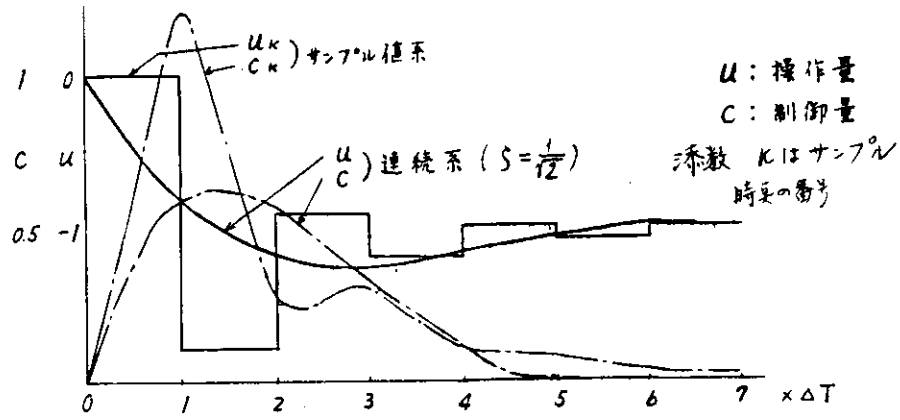
上のいずれかまたは両者をともに新しい角度で検討するということは別に論ずる「アドバンスドコントロール」に属するのでここには触れない。されば問題は、連続制御が0次ホールド（とする）をもつたサンプル値制御系に変つたことによつて起る問題と、アナログ制御に存在するハードウエア的実現可能性の限界が計算機適用時にどうなるかということである。

ここでは在来アナログ制御における標準的な制御アルゴリズムたるPID動作をサンプル値系におきかえたときのチューニングの面より考察する。

計算機制御系としてのサンプル値系について考えると新しく考慮すべきパラメータとしてサンプル周期が加えられる。これはノイズアリアスという「問題点」とも密接な関係をもつにいたる。またDDC用の計算機は動作の中断が許されないので他の電算機にくらべはるかに高い信頼度が要求されることはもちろんである。

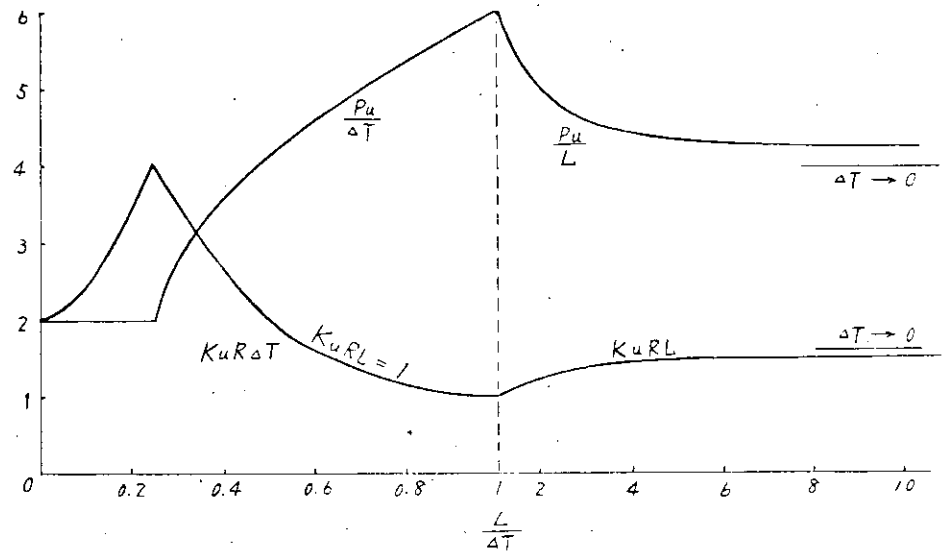
アナログ制御装置では制御アルゴリズムがハードウエアによつて実現され、したがつて制御アルゴリズムもPIDやオンオフのような簡単な形にしか実現し得ない。しかし計算機では機内の計算がアルゴリズムを基礎とし、これをソフトウエアとして書きこむことができる。したがつてアナログ制御装置とは比較にならぬ柔軟性をもつ。

たとえば、アドバンスドコントロールとまで行かなくてもIF文などによる論理的関係を容易にPIDアルゴリズムへ追加または割込むことが容易である。また、アナログ制御系では調節装置ゲインの上限が低すぎて限界感度法によるチューニングを行なう際、安定限界比例ゲインを実現できないことがあるが、DDCではそのようなことはまずあり得ない。しかも操作量の振幅をアルゴリズムで制限し、実際の制御弁などの行程を小振幅にとどめることなど容易である。なお、速度アルゴリズムを用いたときには、操作端がパルスモータ形式すなわち入力パルスの数だけ回転するモータでは、パルス数がサンプル値の変化分に等しいのでホールド回路およびDA変換器は不要であるなどの特長をもたせうる。さて本題にもどり、いまプラントの特性が積分時間1 secの純積分型で、これに直結フイードバックとPI制御則を適用したときを考える。アナログ制御系でのパラメータ調整目標として、比例ゲイン $k_c = 1$、積分時間 $T_i = 2$ sec に選び、減衰比を $\zeta = \frac{1}{\sqrt{2}}$ すなわち最適減衰であるように考慮する。これにサンプル周期 $\triangle T = 1.2$ sec および連続系と対応したパラメータ $K_P = k_c = 1$、$K_I = k_c \frac{\triangle T}{T_i} = 0.6$ にとる。（後出） 外乱応答を考えるとサンプル値系では $2\triangle T$ を1周期として振動する。しかも始めの $\triangle T$ 期間にわたつては操作量 u_k が $u_k = 0$ のまま動かないので、制御量が大きく上昇し、ホールドによる性能の劣化が甚しいことは次図より明らかである。



つぎに、ジーグラニコルズの限界感度法を適用するための特性定数、すなわちP動作での安定限界ゲイン K_u と周期 P_u を、サンプリング周期に対する影響としてとらえて見る。

106頁上図は、単位ステップ応答がむだ時間Lと最大傾斜Rなる制御対象へDDC比例制御則を印加したときの安定限界条件を示すもので、左半は $L < \triangle T$ の領域で $\triangle T$ を用いて無次元化し、右半は $L > \triangle T$ の領域でLで無次元化した。右端 $\triangle T \to 0$ は連続系での安定限界 $\frac{P_u}{T_i} = 4$、$K_u RL = \frac{\pi}{2}$ に対応する。ここから $\triangle T$ が0より相対的に増えてくると安定限界ゲインが下り $L/\triangle T = 1$ では $K_u RL = 1$ に低下する。



$0.25 \leq \frac{L}{\Delta T} \leq 1.0$ の間では $K_u R\Delta T$ と $P_u/\Delta T$ とを $K_u RL$、P_u/L に換算すれば $K_u RL$ は1のままを保ち、P_u/L は増しつづける。

$\frac{L}{\Delta T} = 0.25$ において $P_u/L = 8$、$K_u RL = 1$

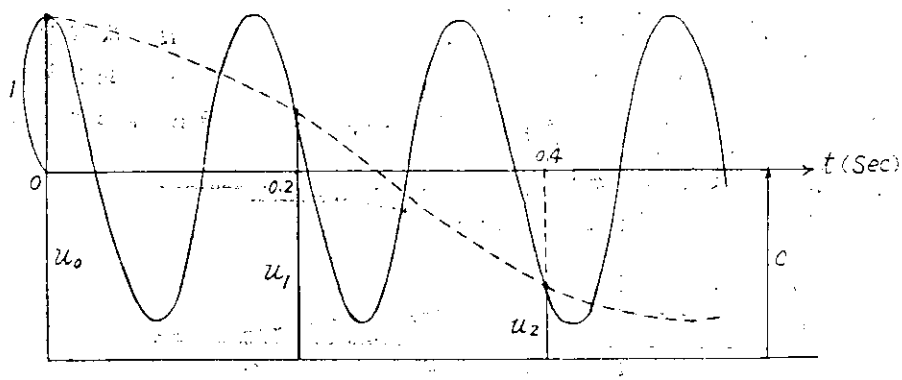
さらに ΔT を長くして行くと $L = 0$ にいたるまで $P_u/\Delta T = 2$ の一定値を保つ。すなわち、$0 \leq \frac{L}{\Delta T} < 0.25$ の間では $2\Delta T$ を周期とした3角波振動を呈する。

$L = 0$ の極限で制御対象は、純積分動作となるので、連続式でのP制御では理論上は制限ゲインを∞にしても発振が起らない。これに対し、サンプル式のPアルゴリズムでは $L = 0$ でもゲインが $K_u = \frac{2}{R \cdot \Delta T}$ のときに周期 $P_u = 2\Delta T$ の発振を起す。これはサンプル系がオンオフ切換式のような動作をするためである。

以上よりサンプル周期 ΔT が L に比べて短かく、$\Delta T \leq \frac{L}{3}$ ならば連続系と考えても大差ないが、$\Delta T > \frac{L}{3}$ となると、かなりの配慮を要する。

つぎに DDC ではアナログ制御なら問題にならないような高周波ノイズが、低周波のふらつきを起すことがある。これをノイズアリアスという。

これについて例をもつて説明すると、つぎのようである。



図の高周波（ノイズ）は、$C + \cos(12\pi t)$ すなわち、6 Hz のものであり、これを $\Delta T = 0.2$ sec でサンプルした値 u_0, u_1, u_2 は $C + \cos(2\pi t)$ すなわち、1 Hz のもののサンプル値と全く一致している。すなわち、6 Hz の振動を $\Delta T = 0.2$ sec でサンプルすると 1 Hz のアリアスが発生するということである。一般にこのアリアスの周波数（上例では 1 Hz）はサンプリング周波数（$\frac{1}{\Delta T} = 5$ Hz）の整数値（1倍）とノイズの周波数（6 Hz）との差に等しく、その振幅は元のノイズのそれ（すなわち1）に等しい。

ノイズアリアスを防ぐには、アナログまたはデイジタルの低域フイルタ（たとえば一次おくれ）を用いる必要がある。

以上比較的簡単でしかもよく出てくる一般的なプラントの特性に関し、DDC での PID アルゴリズムを適用したときを、在来のアナログ制御系を用いたときと対比して議論した。上述の簡単な例から推論されるように制御論的には、サンプリング周期とホールド効果が両者の差異に対し、決定的な働きをもつていることがわかる。そしてしかも安定限界のゲインは DDC のほうが必ずアナログ制御則よりも低くしかとれない。

（なお、サンプル値制御は、むだ時間のあるプラントに対し有用であるが、これについてはアドバンスドコントロールに属するものであり別途述べる。）

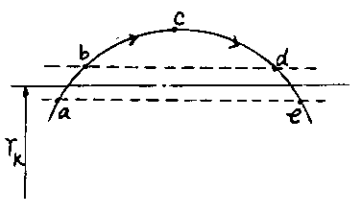
さらに信号に伴つたノイズ成分とサンプル周期とがある関係になると、ノイズアリアスなる低周波振動現象が発生しうるなどの欠点がある。逆に優点としては始めに挙げた論理制御との結合が容易になる。たとえば、

(a) 制御量の突変がしばしば予想されるような制御対象についてD動作による操作量の（ほとんど無意味な）急変の繰り返しを防ぐために1回あたりの差分的出力変化 $\triangle u_K$ に制御をつける。

(b) リセットワインドアップを防ぐため操作端が行程の一端に当つて飽和中に積分値を累積しないようなプログラムを書き加える。

(c) 積分動作はその位相おくれにより制御量のオーバシュートを生じ易い。これを抑制するために制御量が設定点から遠ざかりつつあるか、それとも接近しつつあるかによつて制御パラメータの大きさを変える。（下図）

以上は二次的な性能改善手段である。また、(c)は初歩的なアドバンスドコントロールの一つであると考えられる。



$\overrightarrow{bc}$ $\begin{cases} K_P(C_{K-1}-C_K)<0 \\ K_I(r_K-C_K)<0 \end{cases}$ } K_P 大とする。

$\overrightarrow{cd}$ $\begin{cases} K_P(C_{K-1}-C_K)>0 \\ K_I(r_K-C_K)<0 \end{cases}$ } K_P 小とする。

論理制御との結合は別として、制御論的に考える限り、単にアナログ PID 制御をおきかえるとする立場は、制御性能上の改善効果はまず見当らない。結局アドバンスドコントロール（SCC を含む）と称される制御アルゴリズムの採用によつて始めて計算機制御導入による制御（動）特性改善上の価値を見出すことができると考えている。

註 DDC、PID 制御アルゴリズム（速度アルゴリズム）はつぎのとおり。

$$\triangle u_K = u_K - u_{K-1} = k_C\left\{(C_{K-1}-C_K)+\frac{\triangle T}{T_I}(r_K-C_K)+\frac{T_d}{\triangle T}(2C_{K-1}-C_K-C_{K-2})\right\}$$

$$=K_P(C_{K-1}-C_K)+K_I(r_K-C_K)+K_D(2C_{K-1}-C_K-C_{K-2})$$

参　考　文　献

高橋安人　システムと制御　岩波書店　P.289～298

〃　ダイナミックシステム論　科学技術社　P.241～260

森　政弘　サンプル値制御の利点とその理論　日本機械学会第117回講演会　P. 39～ 57

(3) 調整の難易

ここでいう調整とは、コントロールアルゴリズムにおける各制御パラメータを、制御対象に適合させること、すなわちチューニング作業をいう。

そのためには制御対象の特性を認知（同定）することが先決である。この制御対象の特性の把握の可能性に際して考えられる問題点を分類すると、つぎの2つの側面から判定できる。

(a) 特性把握の可能な時点での分類

a. プラント設計時点で相当な精度で可能な場合

相当な精度とは実運転に入つた際、コントローラの構成は設計時のままでよく、また設定パラメータも調整範囲に入り、かつその範囲内で不安定状態から過度に安定な状態まで変え得て、少々の対象の特性変化や、制御方針の変化をしても十分に対応できる程度にありうること。なお、ここでコントローラの構成とは検出量、操作量の選定とその組合わせならびに制御アルゴリズムをいう。

b. プラント設計時点では上記のような精度が保証されない場合

この場合はコントローラの構成自体にも不確定な要因を残しているので、試運転後にさらに大幅な構成の変更が見込まれる。パラメータについては無論である。

(b) プラント静、動特性の時間的変化での分類

a. プラント特性は長期の運転中も試運転時の状態から大きく変化しなくて、一旦決定したコントローラ構成は無論、そのパラメータは二度と変ることは要しない場合。

b. 大きく変化するが、それは負荷や環境などのうち、可計測のパラメータの変化に関して変化し、しかもその関数関係がほぼ予め把握できており、かつこれは不変であるとき。

c. 大きく変化し、他のパラメータとの関連においてその関数関係把握は時々刻々可能であるが、不変とはいえないとき。

d. 大きく変化し、他のパラメータとの関連においても関数関係の把握は不能、またはそれに近いとき。

以上の2つの分類間の組合わせとして、つぎのものが考えられる。

側面＼困難さ	1	A 2 B	3	4
(a)	a.	b.	b.	b.
(b)	a.	b.	c.	d.

（右へ行くほどチューニングは困難）

｝上記2つの側面からの分類項目

A.C.

難さの1は定常系、2～4は非定常系と考えられる。

1については、ここに改めて説明するまでもない。

2のうちの加法性変化（負荷や環境の変化またはその影響が系の特性に和または差の形で働くとき）に対しては、フイードフオワード制御が有効である、2・A。2についての乗法性（系の特性に積の形で働くとき）、あるいはより複雑な非線形性変化時2・B、および3については適応制御、4については高度な適応制御、さらには学習制御の応用領域と考えられる。

2・B、3、4はアドバンスドコントロールに属するものであつて、別途考察する。

1、2・Aがここで考える領域になるが、それらの中でも最適制御的なものはやはりアドバンスドコントロールに入る。タービンプラントの各サブシステムのうち主要なものにこの分類を適用すると概ね右表のように考えられるであろう。これらはいずれもアドバンスドコントロールの対象としてとり上げるべきものであることがわかる。ゆえにPIDアルゴリズムをもつたDDCとして調整の容易さを指標として考える。計算機の果す役割を考えると、

サブシステム名	分　類
調　速　系	2・B
給水加減系	3
過（再）熱蒸気温度制御系	3～4
ボイラACC系	2・B～3

a. オフラインの対象プラントモデルを備えることにより必要とするコントロールパラメータの設定、すなわちコントローラの初期チューニングが容易となりうる。しかし、これは適応制御、即ち常時チューニングへの一階梯と考えられる。

b. (2)項で述べたごとく、DDCではパラメータのハードウエア的限界というものがほとんど問題とならず、K_u, P_u などが求めうるという点、したがつてより正確な（限界感度法等で）コントローラチューニングが可能であるという点が、DDCのメリットと考えることができるであろう。

c. (2)項に述べたごとく、在来のアナログ系に容易に論理制御を繰り入れることができるためアドバンスドコントロールとまでは行かなくとも、現場的な判断にもとづくにせよ、アナログ制御よりはより高度なアルゴリズムを形成することが容易に行なえる（柔軟性が大）ということもDDCの大きなメリットといえよう。

d. よりプリミティブな意味でDDCでは一般にアナログコントローラより調整が容易に（ソフトウエアで）行なえる。アナログ系ではシステム設計の変更は往々コストとロスタイムの著増を招く。

(4) 総合評価

以上、従来のアナログ制御を直接制御におきかえるときの判断要素となる各項目について論じたが、これらを要約すると単にアナログ制御をそのままの制御アルゴリズムによる直接制御におきかえただけでは制御性能改善の効果は期待できず、コントローラの初期チューニングが容易になること、パラメータのハードウエア的限界がなくフレキシブルであるという点のメリットなどが考えられるにすぎない。ただ簡単な論理制御の印加が若干の性能改善につながりうるが、これはアドバンスドコントロールに近くなつてくる。他方船用としての特殊性から特定ループに対してのバックアップが必要となり必然的にコストアップを招来することになる。したがつて、結局アドバンスドコントロールあるいはSCCなどの制御機能を保有した直接制御を導入することにより従来のアナログ制御では非常に困難であるか、あるいは達成できなかつた領域での制御性能改善を期待することによつて、はじめてその意義が見出される。

経済性の評価について従米国で１９６５年、ISA石油化学分科会のDDCガイドライン討論会でアナログ制御をおきかえる他に特殊な制御（アドバンスドコントロールあるいはSCC）やデータロギングも行なえる電算機を用いた直接制御を導入するとき５０ループ以上でアナログより安価であることが一つの目安となつている。しかし、石油化学工業のように製品プラントでない船用プラントでは一義的にコストのブレーキイブンポイントを見出すことは無理である。すなわち制御性能の改善度、信頼性、安全性の向上に対する量的評価が難かしい上に、電算機システム全体としてどのような機能をもたせるかによつて直接制御のための付加部分が異なつてくることが予想されるからである。

以上を総合するといまここで従来のアナログループについて単なるおきかえとして直接制御の適用範囲を明確に決定ずけることは将来の可能性の幅を縮めてしまうおそれがあるので、つぎに示すような範疇に区分し、上位区分Aから直接制御導入の優先順位をつける定性的な方向づけをすることにした。

第2.2.13表　直接制御導入の順位

区分	条件	対象
A	(1)バックアップは必要としない。 (2)他の目的のために得られた情報の活用可 (3)将来アドバンスドコントロール導入の可能性あり。 (4)内蔵シミュレータによる保守調整の可能性あり。	○主機遠隔操縦のプログラムコントロール（含インターロック、安全装置） ガバナコントロール ○STC
B	(1)バックアップは必要 (2) (3)　区分Aに同じ。 (4)	○ボイラACC ○ボイラFWC
C	(1)バックアップは必要あるいは設けた方がよい。 (2)現状やや問題があり、将来制御性の改善が期待される。 (3)保守調整が容易になる。	○主タービンパッキン蒸気圧力制御 ○燃料油圧力制御 ○外部減熱器温度制御 ○デイアレータの水位制御 ○主復水再循環制御
D	(1)バックアップは不要 (2)省力化、信頼性向上のうえから将来直接制御の対象として検討の余地あり。	○造水装置蒸溜水の温度コントロール ○ボイラ水質、給水水質の管理

区分	条件	対象
E	(1)バックアップが必要 (2)現在の制御性にとくに問題なし。 (3)将来 SCC 導入などにより関連がでてくれば直接制御を考える。	○各種減圧弁 ○各種圧力調整弁 ○各種温度調整弁 ○ドレンタンク水位調整弁 ○温水装置ブライン水位調整弁

2.3 計算機制御導入のための新しい制御論の展望

（DDC を導入することにより従来のタービンプラントで行なわれていなかつた新しい有効な制御を行ないうるものとしてなにがあるかについての研究）

2.3.1 概　論

(1) 新しい制御方式と制御用計算機との関連

(a) まえがき

本報告では予め設定された制御動作を行なうもの、すなわち計画制御（Preplanned Control）；標準運転手順、シーケンス制御、などではなく、DDC，SCC によつて代表されるような調節制御（Requlatory Control）について述べる。

さらにアドバンスドコントロールと通称される新しい制御方式の探索という観点に立ち、目標値維持を目的とした制御、および、より知能的な制御をその対象とする。

本報告においては、この観点に則し動特性の改善を目的としたオンラインリアルタイム計算機制御を行なうための背景となる理論を概論し、併せて概念的な舶用タービンプラントへの適合性につき通観する。

(b) 歴史的過程

１９５０年代末にはデイジタル計算機を、実時間要素として制御系に容易に導入できるようになつた。他方、制御技術者が取扱うべき制御問題として、プラントの状態が環境の変化により大きく変動する場合、系の入出力の数が多く、それらの間の干渉が無視できない場合、要求される制御の質が極度に高度な場合などが激増してきた。

このような難解な問題に対して、計算機は有力な武器となりうると思われた。しかし従来の制御理論は計算機を効果的に利用して問題を解決する方法を示さず、よつて単に PID コントローラの多くを計算機で肩代りさせるといつた程度のことしか考えられなかつた。しかし、まずプラントの状態の大きな変動を十分に把握することの現実面の困難さを解決するため、計算機のフレキシビリテイの利用を前提とした適応制御の考え方が１９６０年度初にはほぼ確立し、さらに１９６５年頃から電子計算機の効果的利用に直結した形の理論、すなわち計算機の高度の情報処理能力をフルに活用し、より高性能な制御を行なうことを可能にした現代制御論が発達してきたのである。

(c) 制御方式と計算機

以上のような諸理論を背景として従来のアナログ制御またはそれの単なるおきかえでなく、計算機を用いることによつて始めて行なうことのできる新しい制御方式の展開が可能となつた。

これらの展開を行なうに先立ち、これら理論の概念と内容を明確にしておくことが計算機利用のためにも不可欠である。これが本報告の主旨とするところである。

つぎに、調節制御系における制御用計算機の有する働きを再省するとおおむね以下のごとくである。

まず、制御系の在来の分類様態の個別ごとに考えてみる。

「フィードバック制御」において：

直接には測定できないプラント変数を制御する場合、いくつかの異なつた変数の測定値を組合せて計算し、間接的に測定することができて、これをフィードバック信号とする。

「フィードフォワード制御」において：

外乱がプラント変数にその影響を及ぼす前に、外乱情報を収集し、プラントへの影響を予測し、これを打ち消すべきプラント入力制御量を計算する。また、特にむだ時間や長い応答おくれを処理するときに、計算機の記憶能力は他の制御機器に比して著しい優点をもつている。

「多変数制御」において：

変数の多様性とその相互関係の複雑性を考慮に入れ、総括的に所要制御動作を打出す場合、これら変数間の計算を速やかに行なうことができて、在来の制御システムより、より高度なレベルでの制御を行なうことができる。各変数間の数学的関係が明らかになつているときにこれは可能であり、単一ループやカスケード系に比べて、はるかにフレキシビリテイのある制御が可能となる。

その代表的なものは多数のプラント変数（または、サブシステム）間の相互干渉を除く非干渉制御である。多変数制御系は他のすべての制御方式にも関連するのであるが、本報では上の問題にほぼ限定して論ずることとする。

「動的最適化制御」において：

比較的古くから用いられてきたサンプル値系の高度な活用、あるいはバンバン方式で行なわれる最適切換制御、ならびに特に現代制御理論における最大原理あるいはダイナミックプログラミングなどを用いた制御系では、情報処理の量や複雑さにおいて計算機の存在は絶対的である。

「適応制御系」において：

以上の諸方式では本質的にはプラントの変動に対応した処置はできなく、モデルは先験的不変として取扱うことになる。この面を補なう角度から考えられる当制御系では、少なくともなんらかの形でプラントの動特性を算定し、さらに、ときには入力信号の最良推定値をも求める必要があり、これらに対して計算機を利用する必要がある。

さらに、これら算定の結果を用い制御部に要求される必要な動作信号を決定するのであるが、この望ましい動作信号は制御系の機能の種類だけでなく、最終的な形での系の質を判定する定量的な基準にも関係するので、この判断装置（判断計算機）に系の評価基準が記憶される。これらのことは適応制御の項で述べる。

(d) プラントと計算機制御

以上を別の角度、すなわち計算機制御化されるプラントの様態によつて分類すると、

1）プラントのモデル（この場合はオフライン的モデル）が利用でき、その特性の変化や他の不確定要素を補正するのに負フィードバックで十分である場合。

2）基本的なモデルは利用できるが、適応制御を使用する必要があるほどプラント変動の幅が広いとき。

3）プラントのモデルがほとんどまたは全く未知であるため、発展的自動探索ないし自己組織制御系を取り入れる必要のあるとき。

以上について計算機の有する意義を展開するならば、それぞれの様態に対応して、

1）計算機に要求される情報処理機能としては最も簡単で、プラントへの制御入力はモデルに基づいて規定された固有の手順により、プラント入出力などの測定値から算定される。これは微分代数方程式の解、または論理演算により行なう。

これは在来のPID式フィードバック制御系やバンバン制御系の発展したものであり、動特性改善に関しては、最大原理やダイナミックプログラミングを頂点とする変分的方法により、主として非線形の積極的利用のための情報処理機能として計算機の有する意義がある。

また、フィードフォーワードや古典的な多変数プラントに対する非干渉制御系もこのカテゴリーに入る。

2），3）は後に述べる適応、学習制御に属す。

(c) 本文の展開内容

以上の所論により、以下の本報告本文においては計算機制御（調節制御）について、つぎのように分類し、個別記述をする。

これを主として、計算機制御化実施の際の階層的レベルにほぼ準じたものであつて、第1のものはプラント内各サブシステムごとに実施しうるもの、第2のものは複数個のサブシステムにわたつて実施する場合が多いと考えられるもの。第3、第4のものは制御系をオンライン的に自動設計（修正）する機能を有し、第2のものとは若干異なつた角度、たとえば第1、第2のものを正面的な制御への適用とみれば、第3、第4のものは側面的なものであると考えることができる。

記 述 の 分 類

1）非線形性の積極的利用による動特性の改善

2）多変数制御系の構成　〃

3）適応制御系の構成　〃

4）学習　〃　〃

参 考 文 献

1）Zeitbereichsentwurf von Abtastsystemen mit Begrenzungen mittels der linearen Programmierung ; G. SIFFLING ; Regelungstechniku, Prozess-Datenverarbeitung Heft 2.57, S.57～65

2）セイバス原著；プロセス工業における計算機制御 好学社 第2章

3）高橋安人；システムと制御 岩波

(2) 本報告作成の背景と記述限界（大目標に対する位置づけ）

(a) 背 景

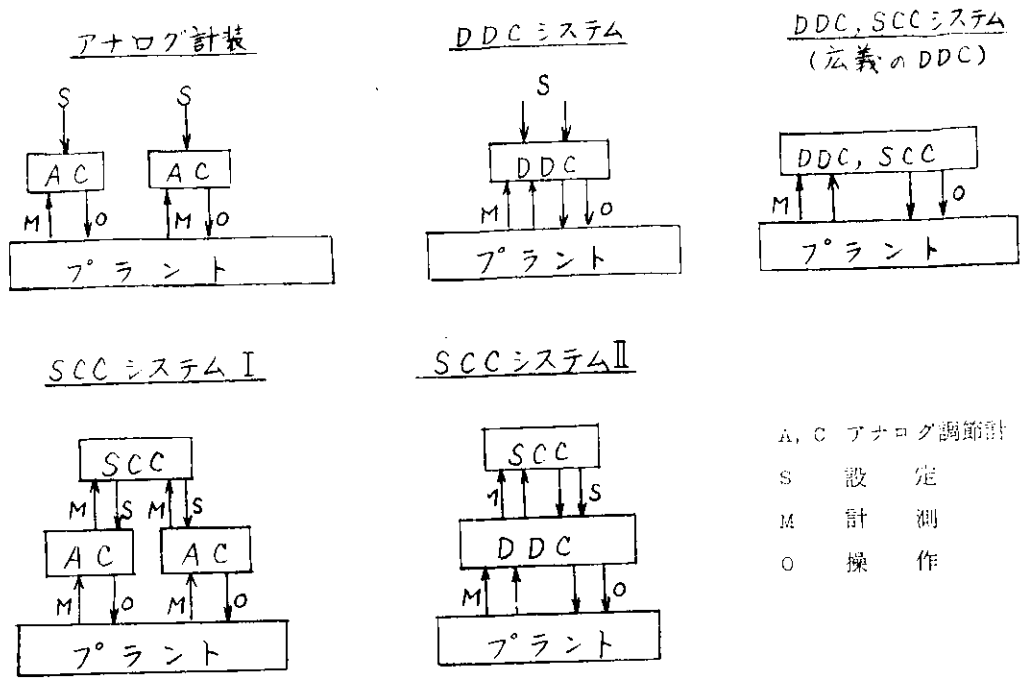
「タービンプラントにコンピュータによる直接制御（DDC）を採用する場合の適切な採用範囲は、なにかを明らかにし、また採用に際し予め解決しておくべき技術的問題点とその解決の方策を明らかにする」ことが本作業の大目標である。

SRI のJ. P. HORNOR によれば「直接制御とは、在来フイードバック制御を行なわれている系に、制御演算を行なうのにディジタル計算機を使用し、さらにプロセス機器（検出、操作部）と計算機を直接接続することによつて多数のアナログ機器を取り除くことが可能である。このようにしてプロセス変数を直接に計算機で制御する方法が直接制御であり、調節動作が時分割多重化されることも結果的に含まれる」としている。直接制御あるいはそれと関連した制御システムの階層的計装方式を考えると第2.3.1図のようになる。またこれらの混在した大システムも当然考えられるし、より高度な SCC システムも存在しうる。ゆえにDCC 化を広く考えると最低位レベルの横の拡がりと階層の高さを考慮すべきこととなる（第2.3.1図参照）。

以下にここで報告すべき内容を明確にするため背景を考慮してみる。

1）プロセスに対する計算機制御の用法上の2つの分類として、計画制御と調節制御があることはすでに述べたとおりであるが、上記直接制御の定義に従えば、若干の附ずいした論理制御機能を有する場合もあるにせよ、本作業の目標は調節制御にある。調節制御ではプロセス変数を目標値に維持するために計算機制御が適用される。この場合には従来と同一概念のいわゆる制御システムがそのまま利用される。

2）つぎに副目標においては、「従来のタービンプラントでは行なわれていなかつた新しい有効な制御を行ないう



第2.3.1図　プラントの制御計装化

るものとしてなにがあるか」の検討を行なうことになつている。

すなわち、これは明らかに前項の直接制御より、より高度な制御の可能性をも求めていることになるのであつて、いわゆるアドバンスドコントロール、スーパバイザリ制御（SCC）（DDCに対し1階層上位で、アナログ調節計またはDDC用制御計算機に設定入力を与える）についても考慮を払わねばならないことを意味している。直接制御の各ユニットサブ・システムに直接面している局部ループの制御における制御アルゴリズムはなにもPIDまたはその Modification に限つたものではなく、最適制御のほとんどは、このレベルでの計算機制御の新しい適用でありうる。しかし前記のごとく、より高度な階層的レベルを考えることによつて始めて可能な新しい計算機制御の適用途が見つかる場合がある。一般的にいつてこのレベルまで考慮することによつて計算機適用による調節制御の意義が始めて出てくるという考え方もある。

3）同副目標においては、トータルシステムの静特性の改善のための新しい制御方式を考察することも考えられるが、昭和43年度「タービンプラント最適制御の研究」において一応の結果が出ているので、ここではサブシステムあるいはトータルシステムの動特性の改善のための新しい制御方式を考察することとする。

4）以上に対比して他の副目標についてはつぎのように考慮する。

すなわち副目標(2)においては「従来のアナログ制御をそのまま直接制御におきかえるときの適切な適用範囲の研究」を、副目標(4)においては「直接制御導入時に予め解決しておくべき技術的問題点とその具体的解決策」をそれぞれ研究するわけであるが、これらは従来のアナログ制御システムに直接制御のみを適用する場合についてのみ検討するものとする。

5）上記の各検討を具体的あるいは定量的に行なうには、タービンプラントと性能改善の目標の明確な設定が不可欠であるが、これらの客観的定量的な設定はいまただちには困難であり、かつ作業量の面からも、ここでは既念的なタービンプラントに対する現時点で考えられる技術に照し、既念的探索的調査研究を実施するものとする。この段階では以後に述べる新しい制御方式が「動特性の改善」面で、在来のものに比し量的にどのくらいの改善ができるかを問題とするのは不能かつ尚早であるし、さらにまたこの改善が、プラントの総合評価に対してどの程度向上に寄与するかの議論は行なえない。

(3) 記述表界

以上の考察により、副目標(3)について次のような設定を行なう。これらはすでに2.3.1(1)において若干触れている。

a．動特性改善を目標とした計算機制御方式、すなわち本報告の記述分類

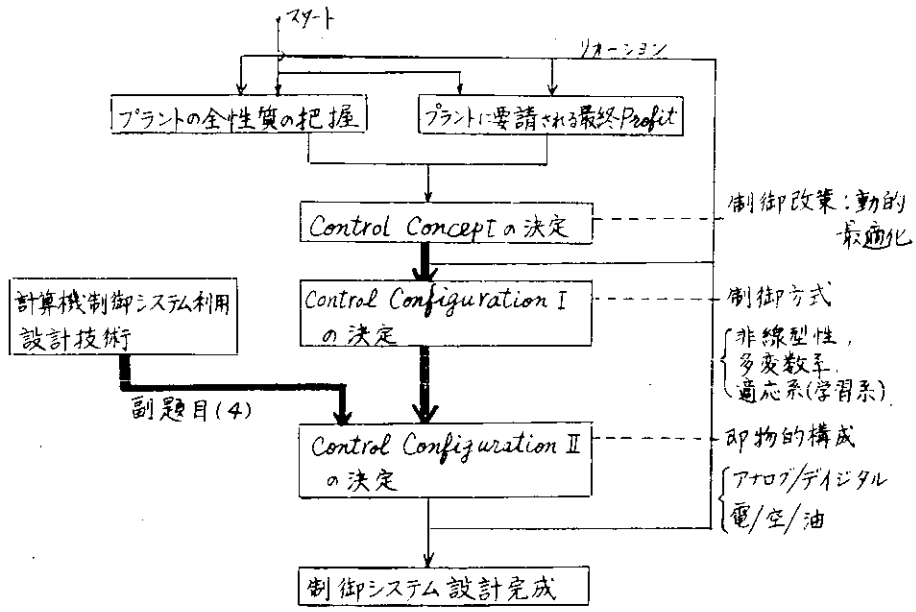
第2.3.1表

	制御方式	
	DDC	DDC＋SCC
非線形性の積極的利用による適応性の改善	（単一ループ） 構成：フィードバック、オープンカスケード、フィードフォワード 方法：最適制御（最大原理、DP） ポジキャスト、ネジキャスト 任意伝達関数による。	
多変数制御系の構成		古典的非干渉制御（スカラ論） 状態ベクトルフィードバックによる特性改善 分割制御 モード制御
適応制御系の構成		適応原理による（受動系） 同定対象〃（動特性同定型） 調整動作〃（パラメータ摂動修正型） 技術的手段〃（モデル規範型） 行動形体〃（試行的丘掃索型）
学習制御系の構成		ラーントロール テイラーの系 （例）

b．本報告作業の、システム設計過程上での位置づけ

一般に制御システムを設計するに当つてはつぎの階梯をたどる。本作業では副目標(3)については太線矢印部について実施するものとする。

また Control Config I．より上流については計算機制御技術とは直接関係ないことを付記しておく（第2.3.2図参照）。

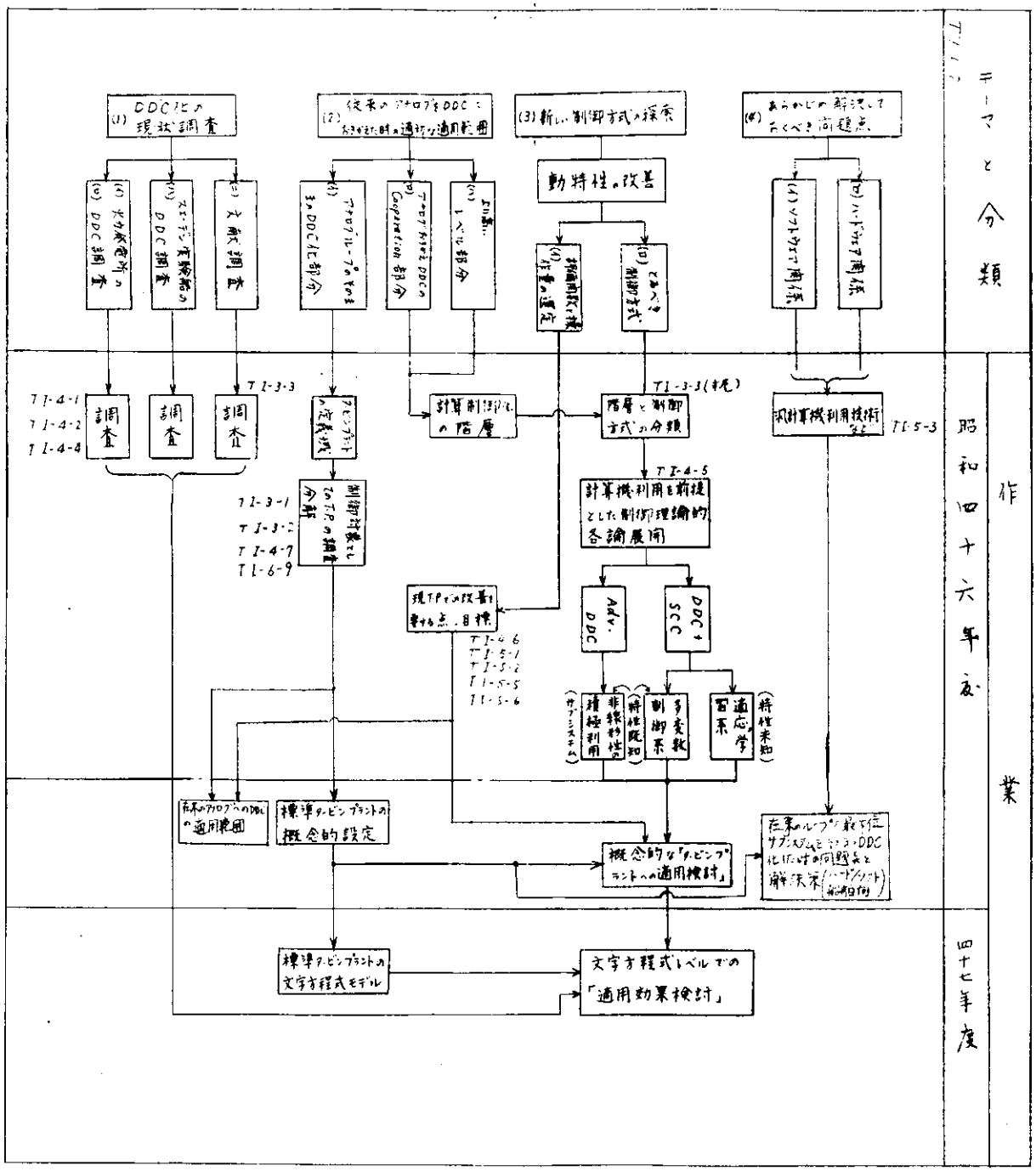


第2.3.2図　制御システム設計過程

c．本報告作業の全般的な流れ

以上に基づく大目標に対する作業フローは第2.3.2表のごとくである。

第2.3.2表



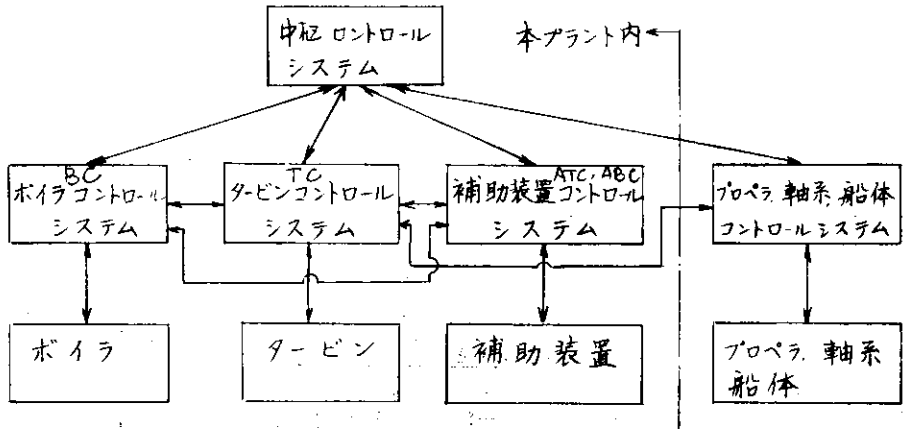
(3) タービンプラントの概念的設定

(a) 概　要

本項では在来のタービンプラントから想定される標準的なプラントを制御方式の適用という観点から設定する。

(b) 在来のアナログループ

在来の標準的なアナログループはすでに別項で述べられているが、タービンプラントとしての定義域を明確にすると第2.3.3図に示すごとくで、本プラントはボイラ、タービンおよびそれらに不可欠な補助装置と、それらを直接またはさらに中枢よりコントロールするコントロールシステムとを含むものとする。



第2.3.3図　タービンプラントの定義域

つぎにここに考察を行なうための前提を明確にしておく。

すなわち、「制御の対象となる単位プラント（最小単位のサブシステム）の構造（内容）、操作量、制御量は在来のまま用いるものとする」

以上によつて制御方式の適用というシステム制御的観点から単位プラントを分解すると、第2.3.4図に示すものとなる。

これらは考えている部分プラント（制御対象）を検査面で囲み、その検査面を通過して流入、流出する質量流れに着目し（信号流れではなく、これは比較的現実的な表現である）、各流れに伴う質量、ポテンシアルおよび検査面内のそれらについてを自変数、従属変数に区分する。将来これらを相互に物理的因果律に基づく関連式（微分、積分、代数各方程式）をもつて結びつけることとなるのであり、これがとりも直さずシステムのダイナミックモデルである。

本報告においては概念的なプラントというレベルに止めることとし、上記の各変数を、

自変数｛操作量／外乱　　従属変数｛制御量／中間変数

に分ける。他にプラントパラメータがある。

(c) 階層的分類

階層という語は多面的に解されうる。たとえばプラント性能に対し支配的な度合によるもの、安全性に対する支配度によるもの、構造上の由来によるもの、対象とするサブプラントの主、補によるもの、回路的に複雑なもの等々で、換言すれば考え方によつて一般にプラントのレベルと制御計装の階層は必ずしも上下順が同一でない。

ここでは本作業の趣旨に基づき、プラントとしての動特性改善を目的とした調節制御に関する3つの計算機制御化のレベル、すなわち適用する制御論に合せようとするものである。すなわち（第2.3.1表参照）

レベル1；各サブシステム（単一ループ）をDDCなど計算機を用い特に非線形制御の積極的利用によつて動特性の改善を図るレベル（基底制御系を正面的に制御する）。

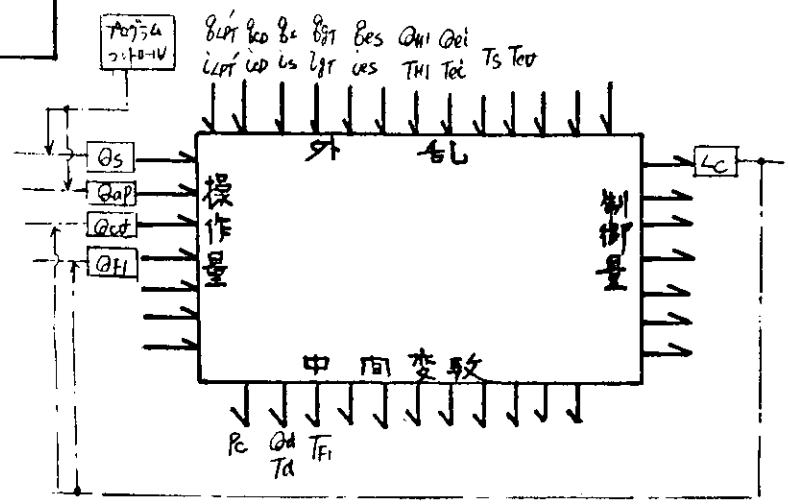
レベル2；サブシステム数ループを多変数制御を行なうことによりサブシステム個々にも、また全体的にも動特性を改善するレベル（複数個の基底制御系を正面的に制御する）。

以上はプラント特性が先験的に既知であり、不変であるとする前提で論じられることが主題となるものであり、したがつて使用されるプラントモデル作成はオフライン的な計算ですむ。他方プラントモデルが特に大幅かつパラメトリックに変化する場合に対しつぎのものがある。

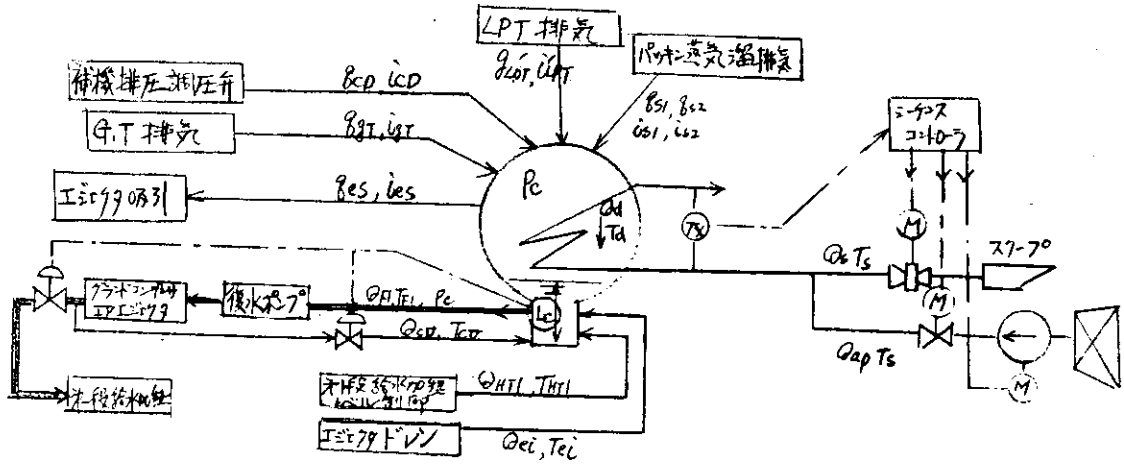
レベル3；この変化に適応して常に系を所望（たとえば最適）な動特性になるよう制御系を計算機によつて可変にする適応制御系による所望の動特性の維持を図るレベル（基底制御系に対する側面的な修正制御）。

主コンデンサ

第 2. 3. 4 図(A)



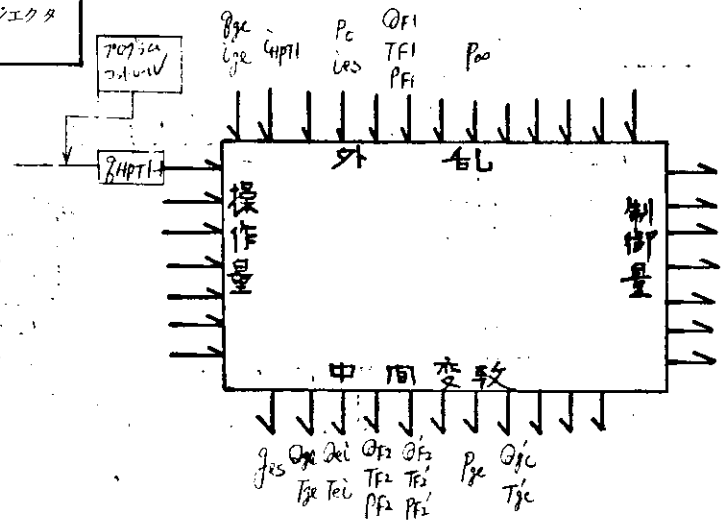
略　図



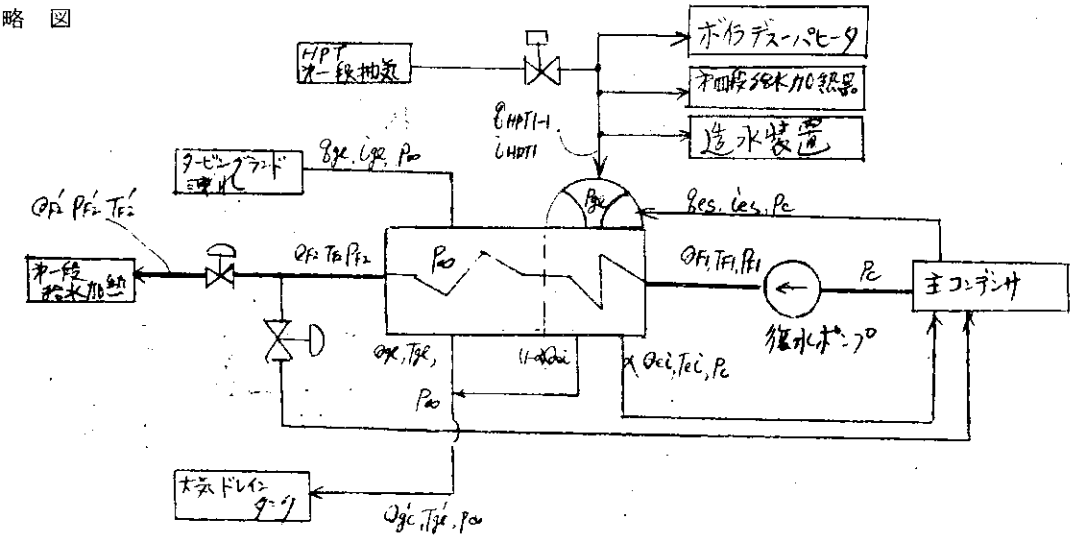
自変数（流入）		自変数（流出）		従属変数	
L.P.T. 排気	q'_{LPT}, i'_{LPT}	エジェクタ吸引	q_{es}, i_{es}	コンデンサ内圧力	P_C
脱気器調圧排気	q_{CD}, i_{CD}	復水ポンプ取出し	Q_{F1}	凝結水量	Q_d
G.T. 排気	q_{gT}, i_{gT}			コンデンサ内水温	T_{F1}
パッキン蒸気溜排気	$q_{S1,2}, i_{S1,2}$			凝結水温	T_d
第一段給水加熱器レベルコン	Q_{HT1}, T_{HT1}			コンデンサ水位	L_C
エジェクタ排気	Q_{e1}, T_{e1}				
再循環水	Q_{CV}, T_{CV}				
スクープ海水	Q_S, T_S				
補助ポンプ海水	Q_{aP}, T_S				

グランドコンデンサ・エアエジクタ

第 2. 3. 4 図(B)



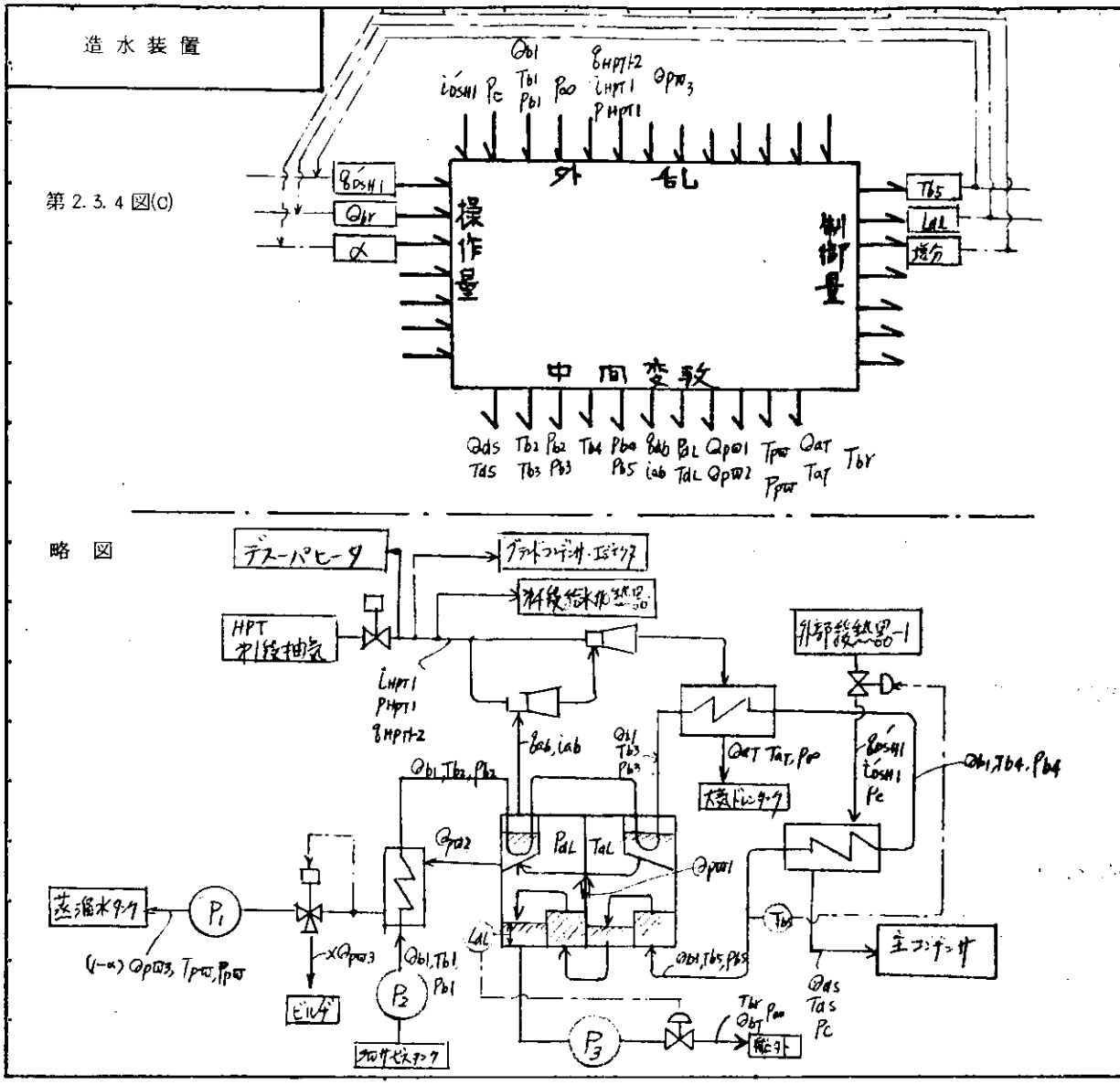
略　図



自変数（流入）		自変数（流出）		従属変数	
HPT 第一段抽気	q_{HPT1-1}, i_{HPT1}			主コンデンサ吸気	g_{es}
タービングランド洩れ蒸気	$q_{ge}, i_{ge}, P_{\infty}$			エアエジクタ入口圧力	P_{ge}
コンデンサ内空気	P_C, i_{es}			グランドコンデンサ出口給水	Q_{F2}, T_{F2}, P_{F2}
コンデンサポンプ出口給水	Q_{F1}, T_{F1}, P_{F1}			第一段給水加熱器入口給水	$Q'_{F2}, T'_{F2}, P'_{F2}$
				エアエジクタドレン	Q_{ei}, T_{ei}
				グランドコンデンサドレン	Q_{ge}, T_{ge}
				大気ドレンタンク	Q'_{gc}, T'_{gc}

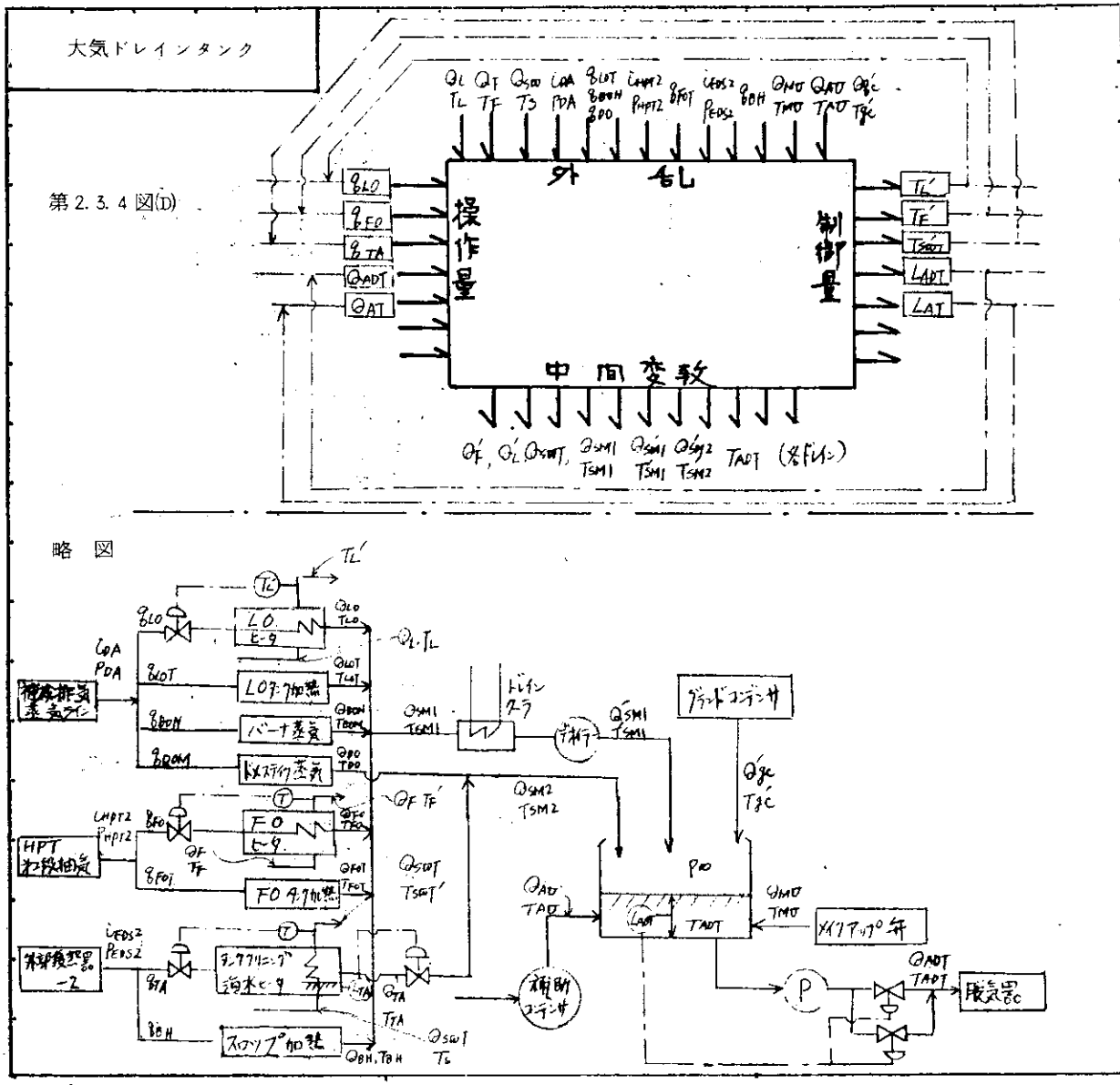
造 水 装 置

第 2. 3. 4 図(C)



自変数（流入）		自変数（流出）		従属変数	
海水ポンプ出口	Q_{b1}, T_{b1}, P_{b1}	駆塩水ポンプ放出水	Q_{br}, P_∞	プラント内部状態	P_{dL}, T_{dL}
エジェクタ駆動蒸気	q_{HPT1-2}, i_{HPT1}	ビルヂポンプ放出水	αQ_{PW3}	蒸溜水	Q_{PW1}
	P_{HPT1}	蒸溜タンク流入水	$(1-\alpha)Q_{PW3}$	〃	Q_{PW2}, 塩分濃度
外部緩熱器蒸気－1	q'_{DSH1}, i'_{DSH1}	塩水経路内状態	T_{b2}, P_{b2}	〃	T_{PW}, P_{PW}
	P_C		T_{b3}, P_{b3}	内部塩水	L_{d1}, T_{br}
			T_{b4}, P_{b4}	エジェクタ吸引蒸気	q_{ab}, i_{ab}
			T_{b5}, P_{b5}	大気ドレンタンク流入水	Q_{aT}, T_{aT}
				主コンデンサ流入水	Q_{ds}, T_{ds}

第 2. 3. 4 図(D)

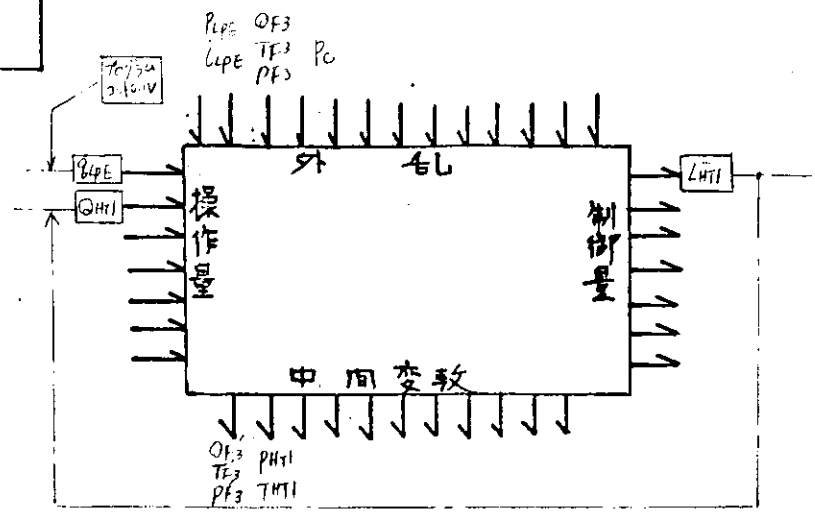


自変数（流入）		自変数（流出）		従属変数	
補助コンデンサ	Q_{AV}, T_{AV}	脱気器流入	Q_{ADT}	ドレインクーラ前後水	Q_{SM1}, T_{SM1}
グランドコンデンサ	Q'_{gc}, T'_{gc}	海水ヒータドレン	Q_{AT}	〃	Q'_{SM1}, T'_{SM1}
メイクアップ弁	Q_{MU}, T_{MU}	FO 出口	Q'_F, T'_F	合流ドレイン水	Q_{SM2}, T_{SM2}
FO 流量	Q_F, T_F	LO 出口	Q'_L, T'_L	ドレインタンク内水	L_{ADT}, T_{ADT}
LO 流量	Q_L, T_L	加熱海水出口	Q'_{SWT}, T'_{SWT}	タンククリーニング海水ヒータ	L_{AT}
海水	Q_{SWT}, T_S	バッファタンク加熱	q_{BH}, i_{EDS2}	LO ヒータ出口	Q_{LO}, T_{LO}
LO ヒータ	q_{LO},	タンククリーニング海水加熱	q_{TA}, P_{EDS2}	LO タンク加熱	Q_{LOT}, T_{LOT}
LO タンク加熱	q_{LOT}, i_{DA}			バーナ蒸気	Q_{BON}, T_{BON}
バーナ加熱	q_{BUN}, P_{DA}			ドメスティック蒸気	Q_{DO}, T_{DO}
ドメスティック蒸気	q_{DO},			FO ヒータ出口	Q_{FO}, T_{FO}
FO ヒータ	q_{FO}, i_{HPT2}			FO タンク加熱	Q_{FOT}, T_{FOT}
FO タンク加熱	q_{FOT}, P_{HPT2}			タンククリーニング海水加熱	T_{TA}
				バッファタンク加熱	Q_{BH}, T_{BH}

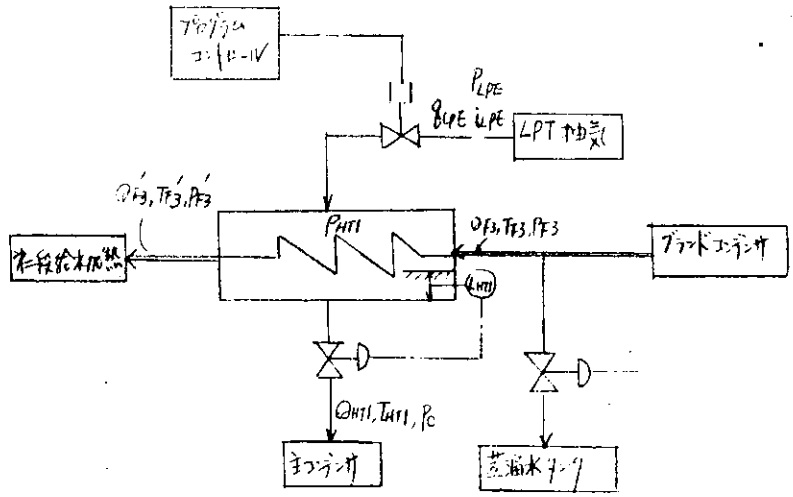
（各ドレイン）

第１段給水加熱器

第 2. 3. 4 図(E)



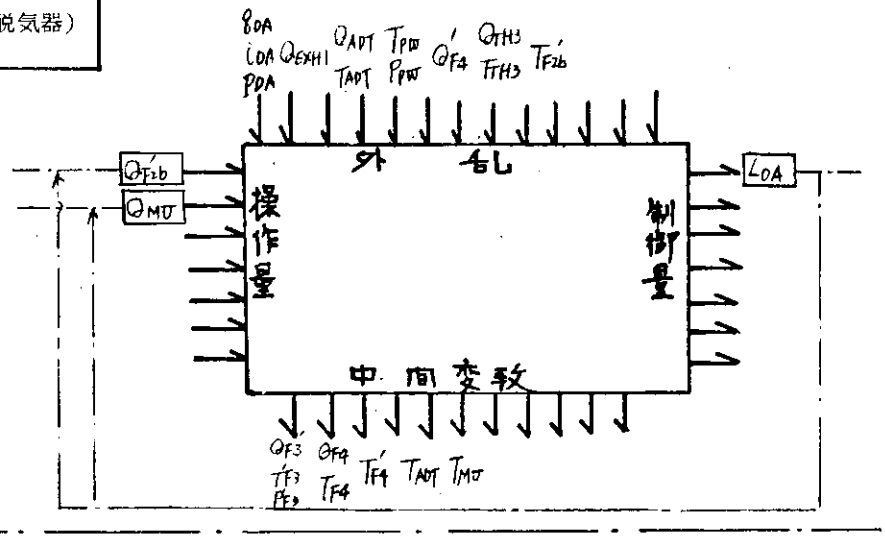
略　図



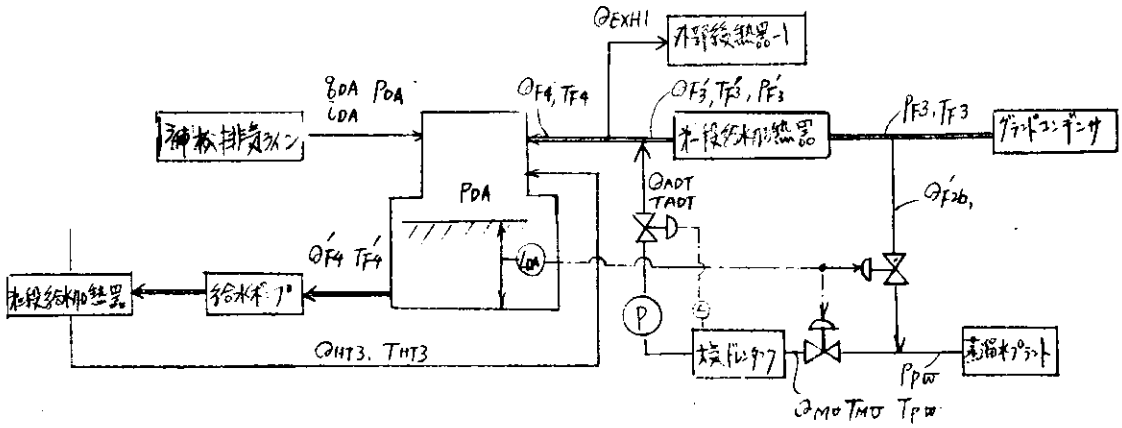
自変数（流入）		自変数（流出）		従属変数	
LPT抽気	q_{LPE}, i_{LPE}	主コンデンサ	Q_{HT1}, P_C	第一段給水加熱器内水位	L_{HT1}
	P_{LPE}			〃　圧力	P_{HT1}
グランドコンデンサ経由給水流入	Q_{F8}, T_{F8}, P_{F8}			〃　水温	T_{HT1}
				第二段給水加熱器	Q'_{F8}, T'_{F8}, P'_{F8}

第2段給水加熱器（脱気器）

第2.3.4図(F)



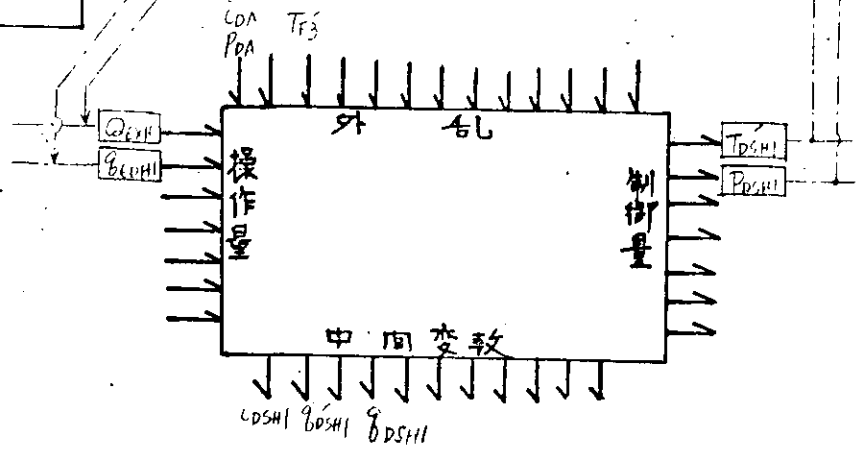
略　図



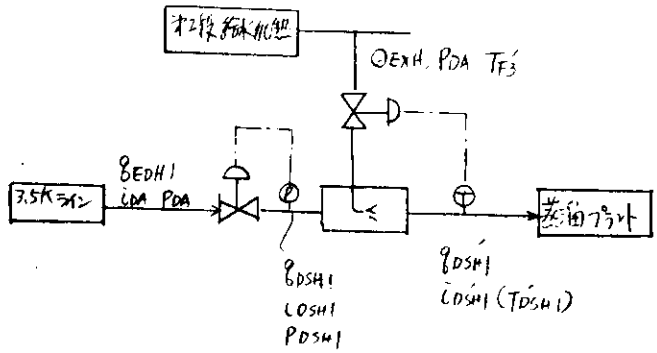
自変数（流入）		自変数（流出）		従属変数	
補機排気圧蒸気ライン	q_{DA}, i_{DA}, P_{DA}	スピル弁	Q'_{F2b}, P_{F3}, T_{F3}	第一段給水加熱器	Q'_{F3}, T'_{F3}, P'_{F3}
蒸溜水プラント	P_{PW}, T_{PW}	給水ポンプ	Q'_{F4}	〃	Q_{F4}, T_{F4}
第三段給水加熱器	Q_{HT3}, T_{HT3}	外部緩熱器	Q_{EXH1}	第二段給水加熱器	L_{DA}, T'_{F4}
大気ドレインタンク流出	Q_{ADT}, T_{ADT}			大気ドレンタンク	T_{ADT}, T_{MU}

外部緩熱器－1

第 2. 3. 4 図(G)



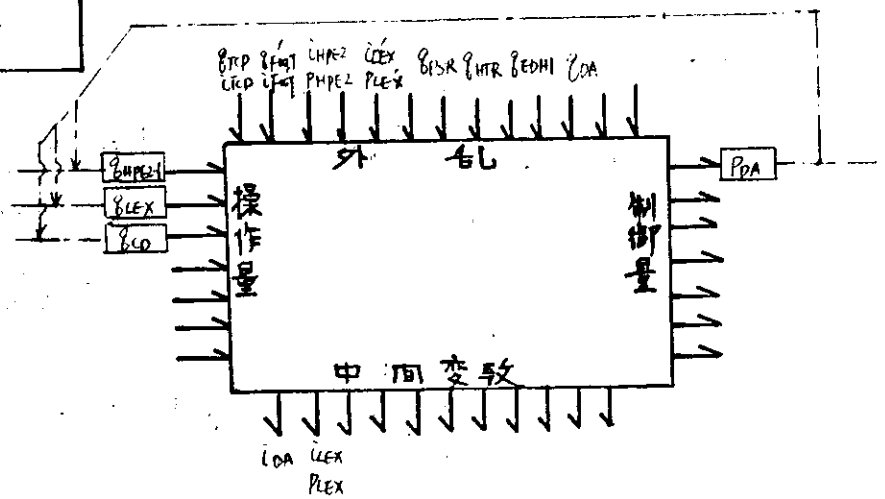
略　図



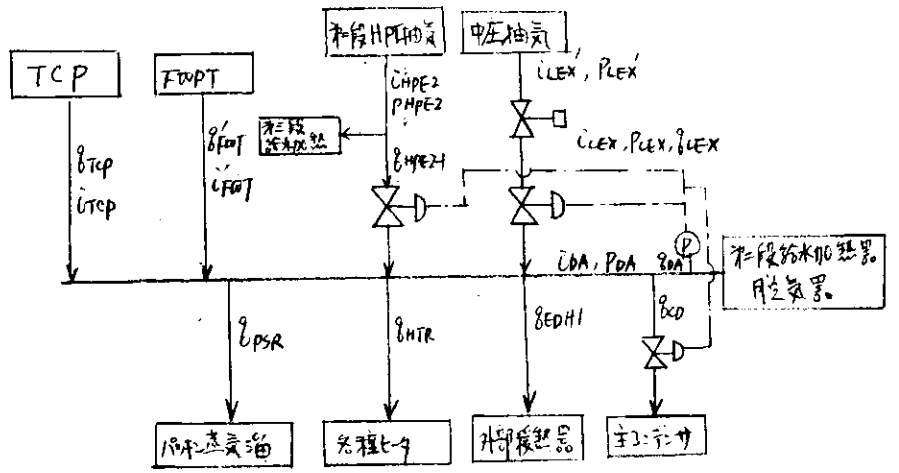
自変数（流入）		自変数（流出）		従属変数	
3.5 K 蒸気圧ライン	q_{EDH1}, i_{DA}	蒸留プラント	q_{DSH1}, i_{DSH1}	外部緩熱器入口蒸気	q_{DSH1}, i_{DSH1}
	P_{DA}				P_{DSH1}
第 2 段給水加熱器	Q_{EXH}, P_{DA}, T_{F8}				

3.5K 蒸気圧ライン

第 2.3.4 図(H)



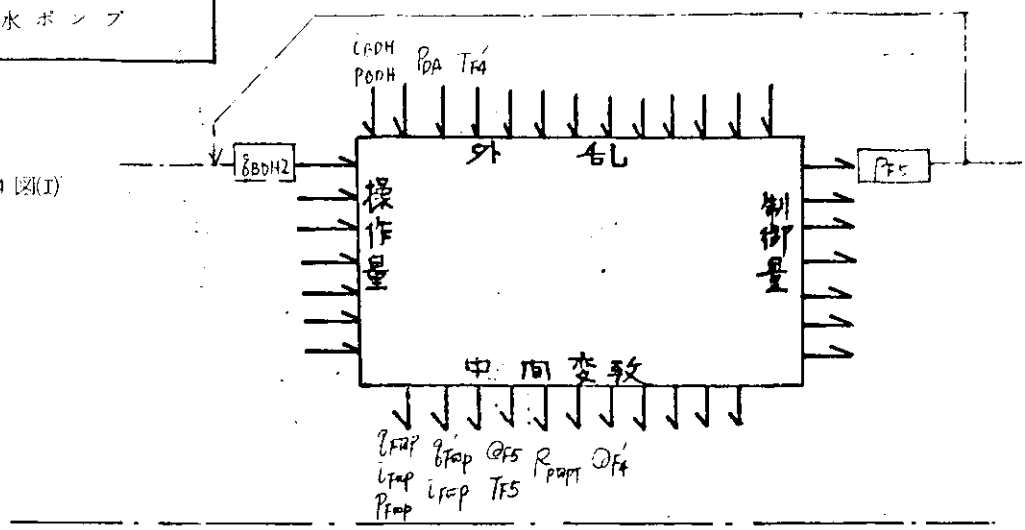
略　図



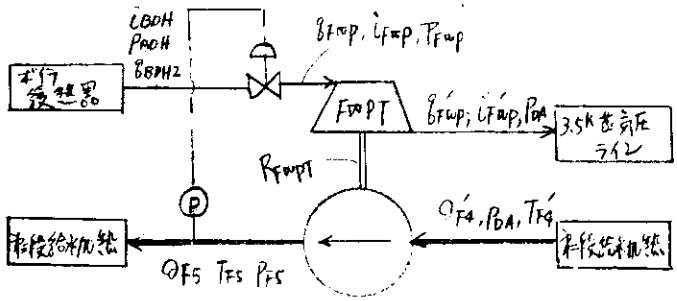
自変数（流入）		自変数（流出）		従属変数	
TCP	q_{TCP}, i_{TCP}	パッキン蒸気溜	q_{PSR}	3.5K 蒸気ライン	i_{DA}, P_{DA}
FWPT	q_{FWT}, i_{FWT}	各種ヒータ	q_{HTR}	中圧抽気制御弁前	i_{LEX}, P_{LEX}
第二段 HPT 抽気	q_{HPE2-1}, i_{HPE2}	外部緩熱器	q_{EDH1}		
	P_{HPE2}	主コンデンサ	q_{CD}		
中間抽気	q_{LEX}, i_{LEX}	脱気器	q_{DA}		
	P_{LEX}				

給 水 ポ ン プ

第 2. 3. 4 図(I)



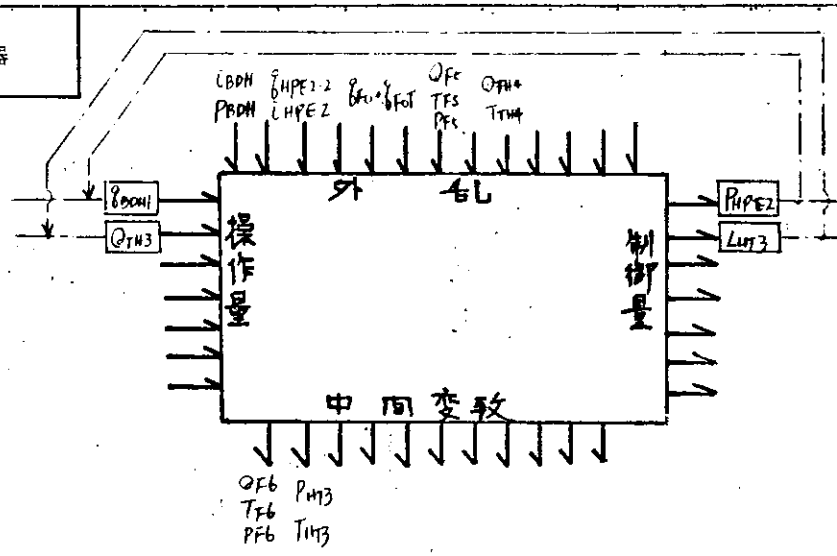
略 図



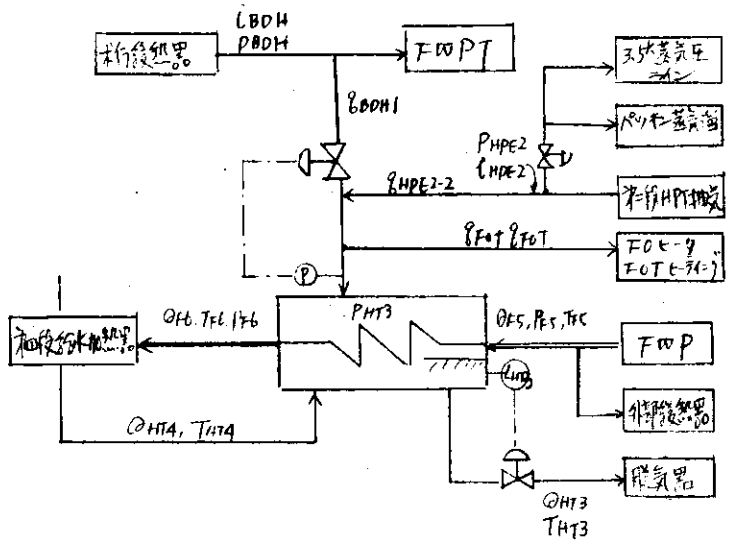
自変数（流入）		自変数（流出）		従属変数	
ボイラ緩熱器	i_{BDH}, P_{BDH}	FWP出口	P_{F5}	FWPT入口	q_{FWP}, i_{FWP}
	q_{BDH2}				P_{FWP}
FWP入口	P_{DA}, T'_{F4}			FWPT出口	q'_{FWP}, i'_{FWP}
				FWP出口	Q_{F5}, T_{F5}
				タービン回転数	R_{FWPT}
				FWP入口	Q'_{F4}

第 3 段給水加熱器

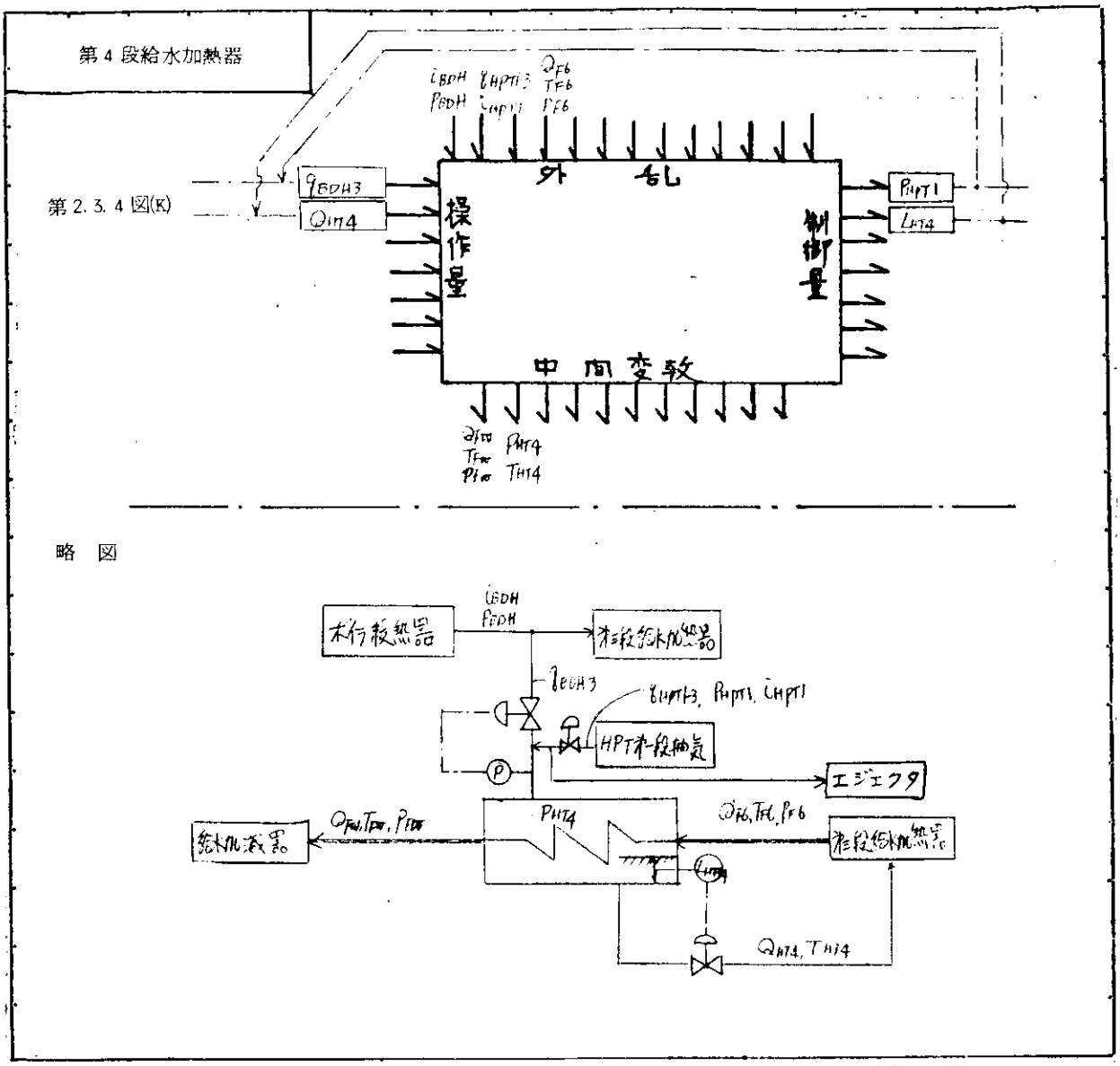
第 2. 3. 4 図(J)



略　図



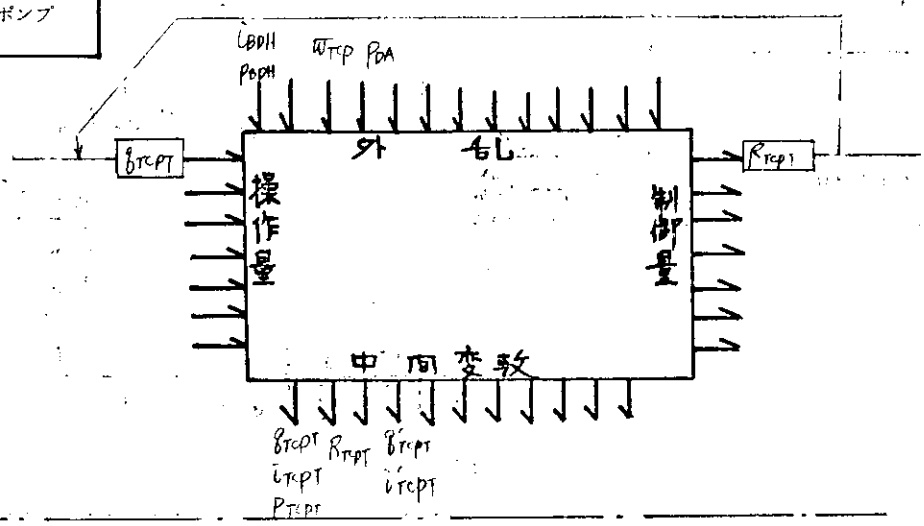
自変数（流入）		自変数（流出）		従属変数	
ボイラ緩熱器	i_{BDH}, P_{BDH}	FOヒータ、FOTヒーティング	q_{FOT}, q_{FOT}	第三段給水加熱器水位	L_{HT3}
	q_{BDH1}	脱気器	Q_{TH3}	〃　圧力	P_{HT3}
HPT第二段抽気	i_{HPE2}			〃　水温	T_{HT3}
	q_{HPE2-2}			HPT第二段抽気圧	P_{HPE2}
給水ポンプ	Q_{F5}, T_{F5}, P_{F5}			第四段給水加熱器	Q_{F6}, T_{F6}, P_{F6}
第四段給水加熱器ドレン	Q_{HT4}, T_{HT4}				



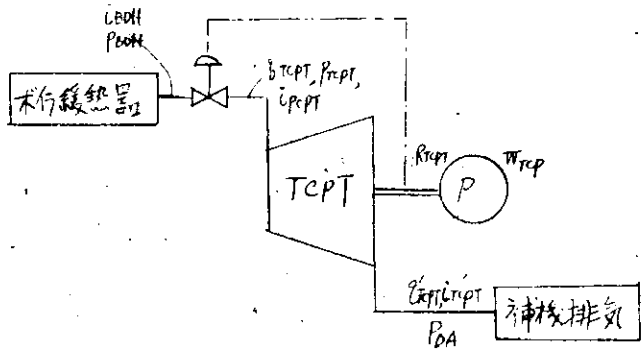
自変数（流入）		自変数（流出）		従属変数	
ボイラ緩熱器	q_{BDH3}, i_{BDH}	第三段給水加熱器	Q_{HT4}	第四段給水加熱器水位	L_{HT4}
	P_{BDH}			〃 圧力	P_{HT4}
HPT第一段抽気	q_{HPT1-8}			〃 水温	T_{HT4}
	i_{HPT1}			HPT第一段抽気圧	P_{HPT1}
第三段給水加熱器	Q_{F6}, T_{F6}, P_{F6}			給水加減器入口	Q_{FW}, P_{FW}, T_{FW}

タンククリーニングポンプ

第 2. 3. 4 図(L)



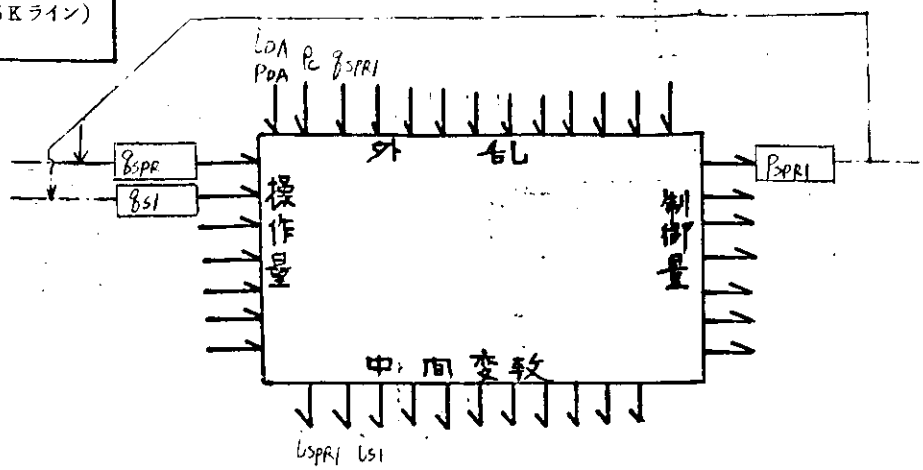
略　図



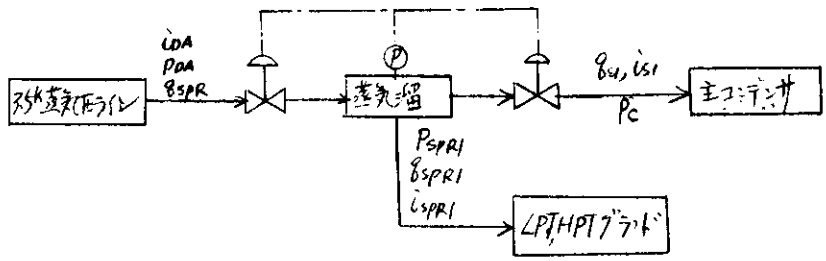
自変数（流入）		自変数（流出）		従属変数	
ボイラ緩熱器	i_{BDH}, P_{BDH}	ポンプ負荷	W_{TCP}	ＴＣＰタービン排出	q'_{TCPT}, i'_{TCPT}
		補機排気	P_{DA}	ポンプ回転数	R_{TCPT}
				ＴＣＰタービン入口	q_{TCPT}, i_{TCPT}
					P_{TCPT}

パッキン蒸気溜−1（3.5 K ライン）

第 2.3.4 図(M)

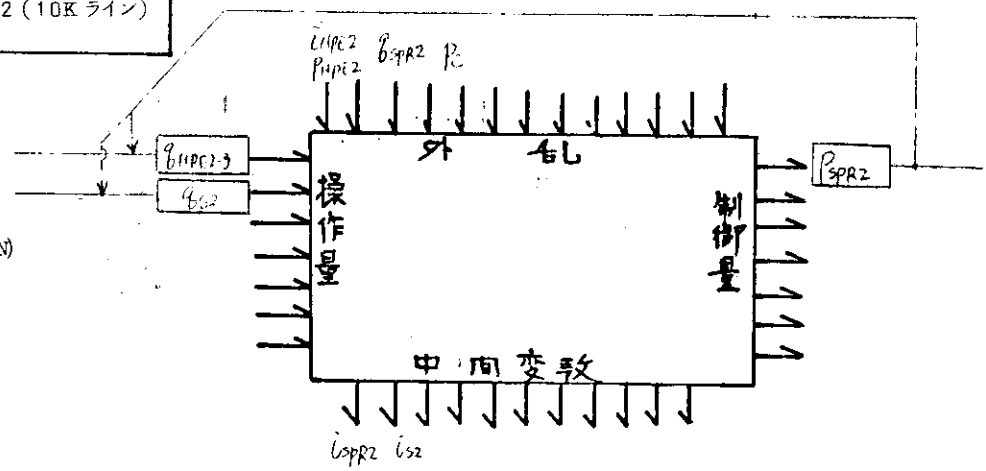


略　図



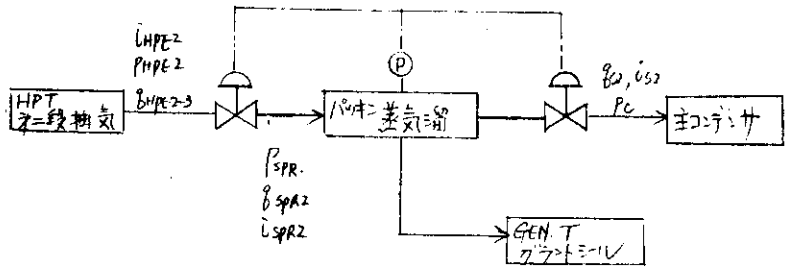
自変数（流入）		自変数（流出）		従属変数	
3.5 K 蒸気圧ライン	i_{DA}, P_{DA}, q_{SPR}	主コンデンサ	q_{S1}, P_C	蒸気溜内圧力	P_{SPR1}
				〃　エンタルピ	i_{SPR1}
		LPT, HPT グランドシール	q_{SPR1}	主コンデンサ	i_{S1}

パッキン蒸気溜－2（10K ライン）



第 2.3.4 図(N)

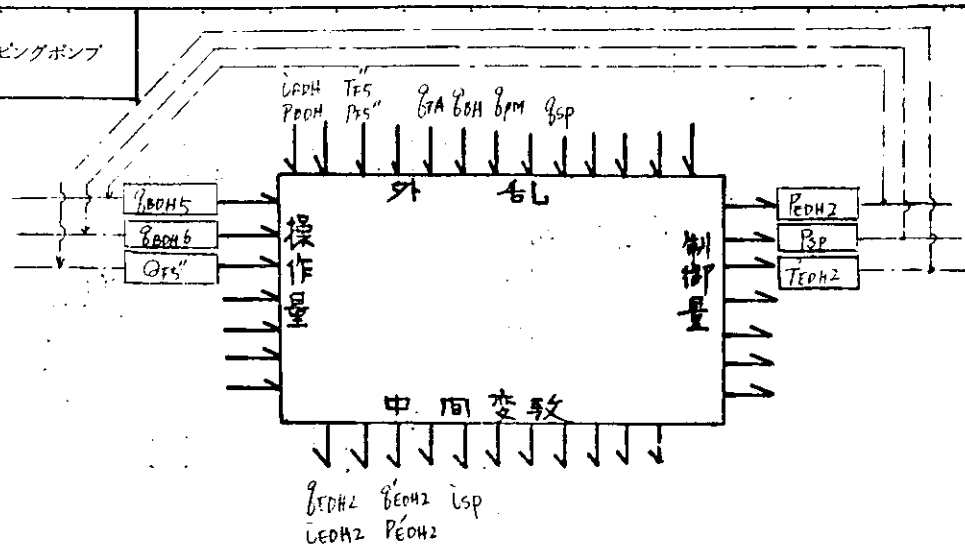
略　図



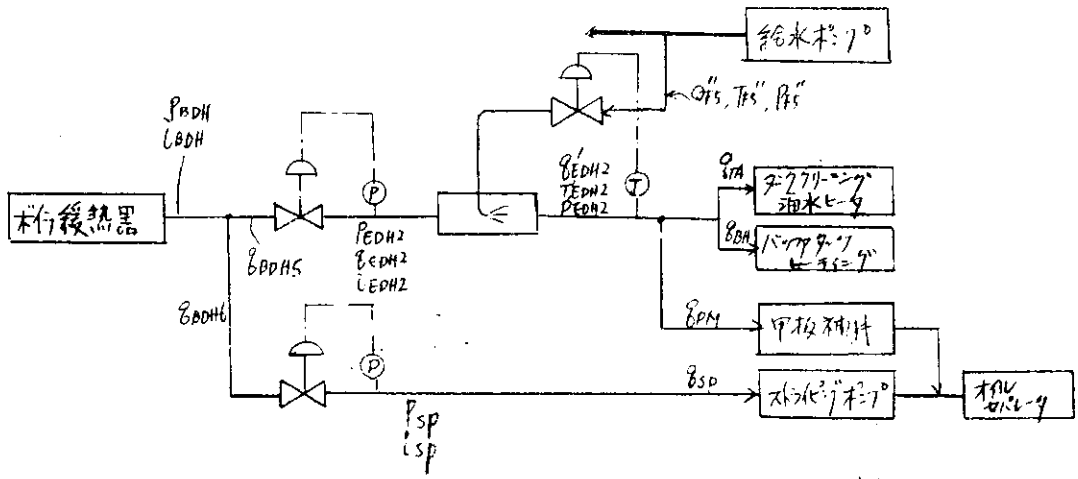
自変数（流入）		自変数（流出）		従属変数	
HPT第二段抽気	q_{HPE2-3}	主コンデンサ	q_{S2}, P_C	パッキン蒸気溜圧力	P_{SPR2}
	i_{HPE2}, P_{HPE2}	GEN, Tグランドシール	q_{SPR2}	〃　エンタルピ	i_{SPR2}
				主コンデンサ	i_{S2}

甲板補機・ストリッピングポンプ

第 2. 3. 4 図(0)



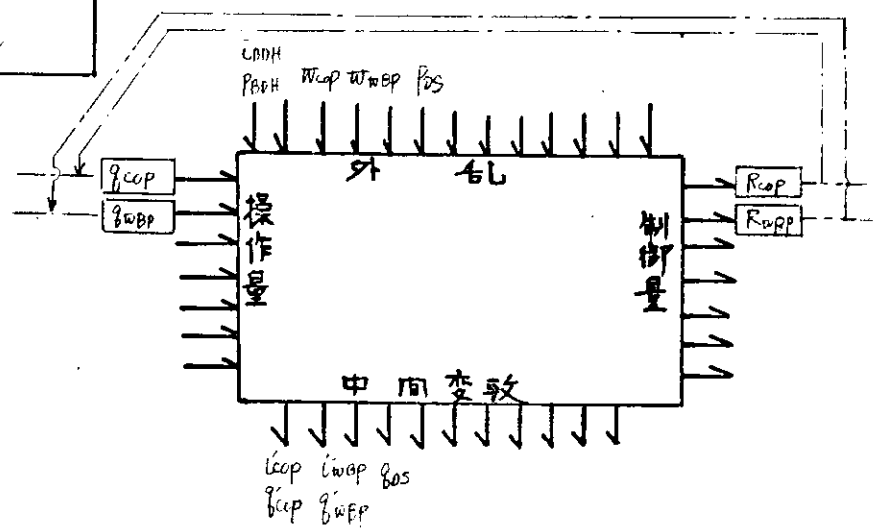
略　図



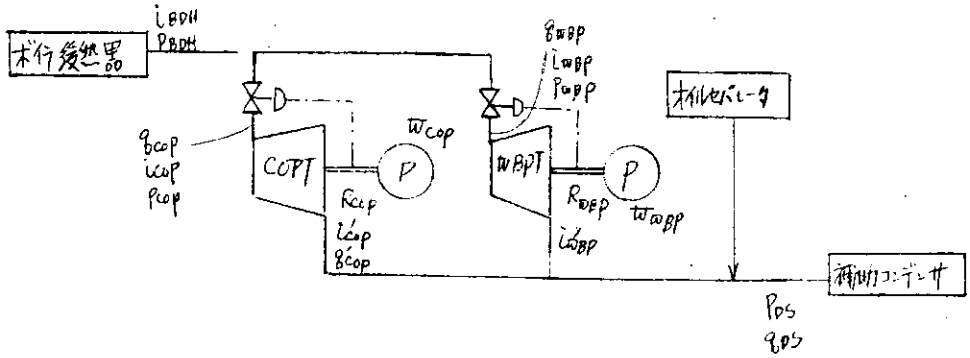
自変数（流入）		自変数（流出）		従属変数	
ボイラ緩熱器	i_{BDH}, P_{BDH}	タンククリーニング海水ヒータ	q_{TA}	外部緩熱器上流	q_{EDH2}, P_{EDH2}
外部緩熱器	q_{BDH5}	バッファタンクヒーティング	q_{BH}	〃　下流	i_{EDH2}
ストリッピングポンプ	q_{BDH6}	甲板補機	q_{PM}	〃　下流	q'_{EDH2}, P'_{EDH2}
給水ポンプ	Q''_{F5}, P''_{F5}, T''_{F5}				T'_{EDH2}
				ストライピングポンプ上流	i_{SP}, P_{SP}, q_{SP}

カーゴオイルポンプ
バラストポンプタービン

第 2.3.4 図(P)

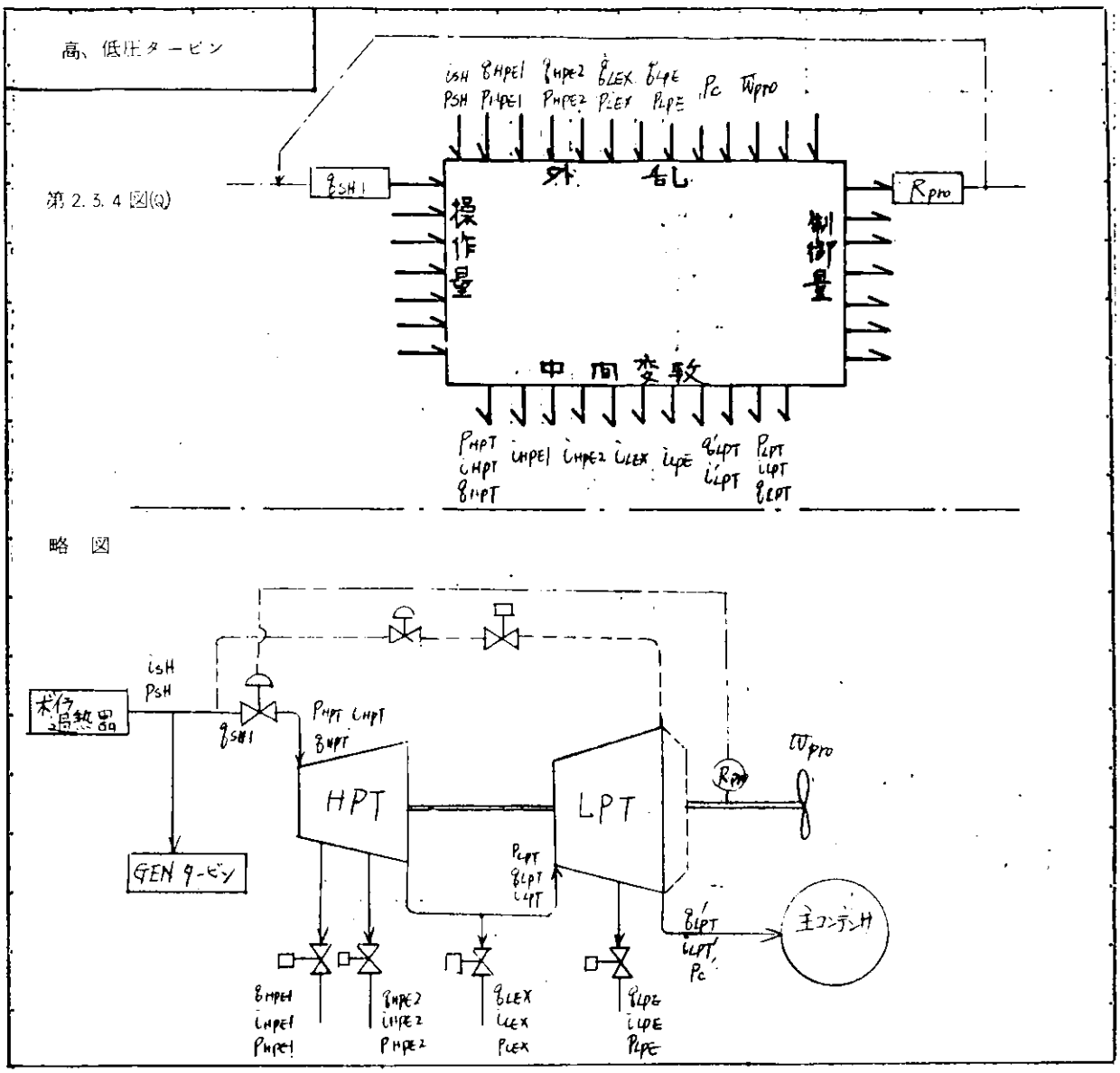


略　図



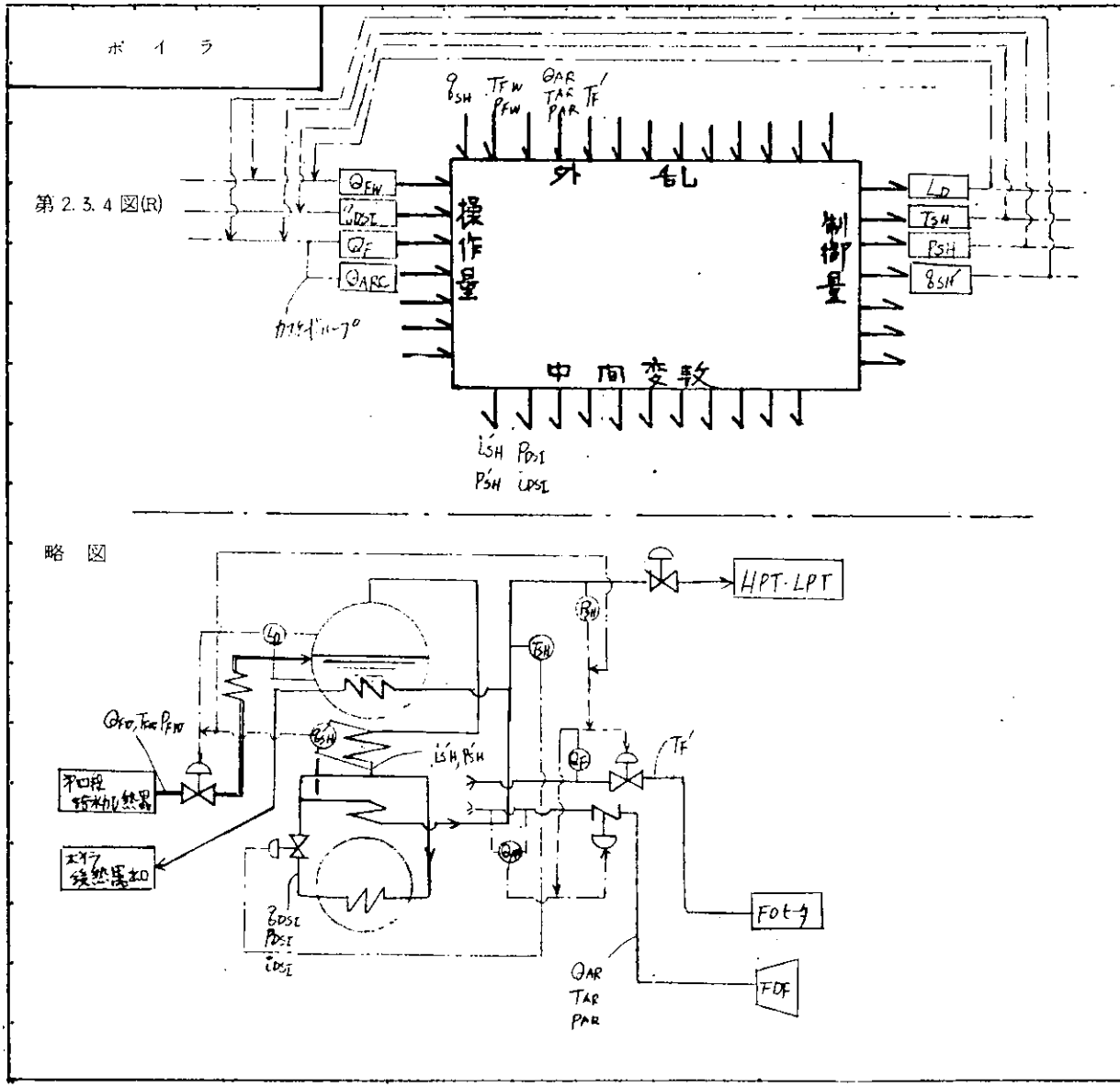
自変数（流入）		自変数（流出）		従属変数	
COPタービン	q_{COP}	COP負荷	W_{COP}	COPタービン	R_{COP}, i'_{COP}
WBPタービン	q_{WBP}	WBP負荷	W_{WBP}		q'_{COP}
ボイラ緩熱器	i_{BDH}, P_{BDH}	補助コンデンサ	P_{DS}	WBPタービン	R_{WBP}, i'_{WBP}
					q'_{WBP}
				補助コンデンサ	q_{DS}

第 2. 3. 4 図(Q)



自変数（流入）		自変数（流出）		従属変数	
ボイラ過熱器	i_{SH}, P_{SH}, q_{SH1}	高圧第一段抽気	q_{HPE1}, P_{HPE1}	HPT入口	P_{HPT}, q_{HPT}
推進器	W_{Pro}	高圧第二段抽気	q_{HPE2}, P_{HPE2}		i_{HPT}
		中間ライン抽気	q_{LEX}, P_{LEX}	LPT入口	P_{LPT}, q_{LPT}
		低圧抽気	q_{LPE}, P_{LPE}		i_{LPT}
		LPT排気	P_C	高圧第一段抽気	i_{HPE1}
				〃 第二段抽気	i_{HPE2}
				中圧抽気	i_{LEX}
				LPT排気	i'_{LPT}, q'_{LPT}
				推進軸	R_{Pro}

第 2. 3. 4 図(R)



自変数（流入）		自変数（流出）		従属変数	
第四段給水加熱器	Q_{FW}, T_{FW}, P_{FW}	過熱器出口蒸気	q_{SH}	過熱器出口蒸気	P_{SH}, T_{SH}
内部緩熱器出口蒸気	q_{DSI}			ドラム水位	L_D
燃料流量	Q_F, T'_F			第一段過熱器出口	$q'_{SH}, i'_{SH}, P'_{SH}$
空気流量(カスケード)	Q_{ARC}			内部緩熱器出口蒸気	P_{DSI}, i_{DSI}
〃 (カスケード以外)	Q_{AR}				
	P_{AR}, T_{AR}				

さて、適用する各制御論によつて、(b)項の全プラントの中で考慮すべき部分プラントおよびそれらの制御階層的配列は当然のことながら異なるし、また適用する制御論によつてこのような配列自体不要な場合もある。

したがつて本件に関しては各論の適用検討時に必要に応じ実施するものとし、ここには一般的論述は行なえない。

なお、参考までに対象とするサブプラントの主、補による階層的配列を第2.3.3表に示す。

第2.3.3表　サブプラントの主、補による階層的配列

	減圧、圧力調整	温度調整	レベルコントロール	流量コントロール	その他
レベルII	減圧弁（含圧力調整弁） AUX. EXH. MAKE UP V. AUX. EXH. SPILL V. PACKING STM V. F.O.	主機 L.O. PURIFIER L.O. EXT. DESUP. DESUP. FOR EVAP. BOILER F.O. AUX. D. GEN. F.W. ボイラSTC EVAP. FOW. TEMP	H.P. HTR. DR. DEAERATOR L.P. HEATER ATMOS. DR. R EVAP. BRINE LEVEL R CLEANG S.W. HTR	ボイラF.O.(For ACC) ボイラ燃焼空気（For ACC） ボイラ給水（For FWC）	復水再循環弁 AVR AUT. FREQ. CONT. M.T. DR. V. AST. GUARD 主機 RPH コンデンサスクープ切換

	ACC	FWC	主機タービン
レベルI	Steam P. コントローラ F.O. 流量指令 燃焼空気量指令	給水流量指令	RPMコントロール プログラム インタロック

(4)　タービンプラントの改善目標設定

(a)　概　　要

動特性改善を計算機制御によつて行なう場合、現状からの改善目標を設定し、それを計算機制御を手段として満足せしめうるか否かを検討することがつぎの作業となる。改善目標の設定に当つては、

1）制御量を従来のままで、その過渡状態の数値を改善する。

2）目標とする制御量そのものの選択をかえて、その過渡状態の数値を改善する。

の2つの方途が考えられるが、(3)項(b)の趣旨に従い1）をとる。

(b)　目標設定

改善を要すると考えられる目標点を機能的に整理したものと、数値的な目安となるものを以下の第2.3.4表および2.2項の第2.2.12表に示す。

概念的なプラントへの探索という角度からすると、特に後者はここでは余り意味をもたず、目標は方向的なものとして、「可及的動特性を改善する」としておくに留める。

動特性は一応安定性と過渡偏差が大きな因子であり、その点で第2.3.4表は本作業に示唆を与えるものである。また制御方式により改善目標の変りうる、すなわち改善目標自体が制御方式を決定づけてしまう場合（たとえば適応制御において）がある。

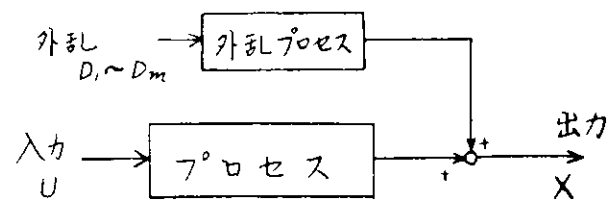
2.3.2　非線形性の積極的利用

(1)　概　　要

制御対象が第2.3.5図に示すごとく、1入力、1出力である場合の制御について述べる。

なお、このような1入力、1出力の制御対象の制御を単一ループ制御と定義する。

制御対象が第2.3.6図に示すごとく、多入力、多出



第2.3.5図

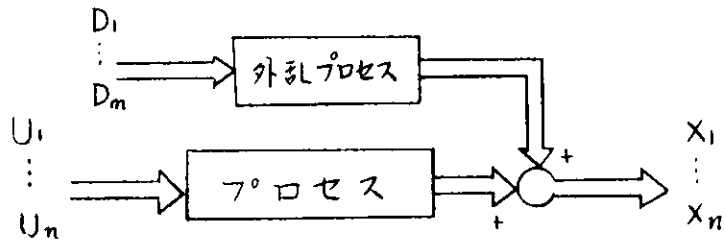
第2.3.4表　改善目標

（制御性と安定性と過渡偏差をともに合意する）

サブシステム名	結合プラントか単位プラントか	主制御量	主操作量	性能改善目標（在来プラントにおける）	在来主ループ制御アルゴリズム		第2.3.3図上の分類
調速機	単	プロペラ回転数	タービン流入蒸気量	プラント特性（負荷状態を含む）に応じた制御性とプログラムパターン	PID		TC
ボイラ A.C.C	結	主蒸気圧 空気比	燃料流量 空気流量	プラント特性（負荷状態を含む）に応じた制御性	PI		BC
給水加減装置	単	ドラム水位	給水量	過渡現象	〃		〃
過熱蒸気温度制御装置	〃	主蒸気温度		過渡偏差	PID		〃
主タービンパッキン蒸気圧調整器（供給、逃し）	〃	パッキン蒸気溜圧力	パッキン蒸気供給量	主機負荷変動時の制御性	PI		ATC
ボイラ燃料油圧力調整器	〃	燃料油圧	燃料油量	〃	〃		ABC
外部減熱器用温度調整器	〃	出口温度	給水量	〃	〃		〃
タンククリーニング海水加熱器用温度調整器	〃	出口海水温度	加熱蒸気量	〃	PID		AC
主復水器再循環弁	〃	出口復水温度	復水量	〃	PI		ATC

力の制御系においても、つぎのような場合、入力 U_i と出力 X_i との関係は等価的に第2.3.5図となる。

すなわち、制御変数 X_i について、入力 U_i と外乱 D_i との関係を伝達関数で表わすと（2.3.1）式である。ただし、各変数はS領域で表わす。



第2.3.6図

$$X_i = G_{i1}U_1 + \cdots + G_{ii}U_i + \cdots + G_{in}U_n + W_{i1}D_1 + \cdots + D_{ii}D_n \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.3.1)$$

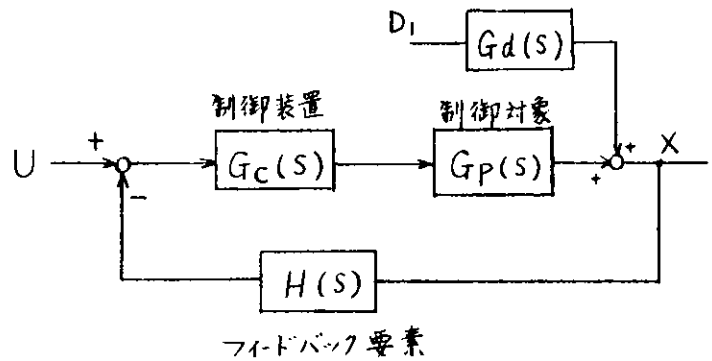
（2.3.1）式において、X_i が入力に対して主に U_i のみによって変化し、U_i 以外の U に対してはほとんど影響を受けない場合、すなわち（2.3.2）式で表わされる場合には、

$$X_i \fallingdotseq G_{ii}U_i + W_{i1}D_1 + \cdots\cdots D_{ii}D_n \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.3.2)$$

制御度数 X_i と U_i との関係は1入力、1出力と近似できて第2.3.5図に示す制御対象に対応し、制御としては、単一ループ制御を考えればよい。

単一ループ制御は、制御系としては基本的制御である。この制御について論ずる。なお、多度数制御対象で1入力～1出力の制御対象に分割できないような制御については、2.3.3項の多変数制御系の項で示す。

従来第2.3.5図に示す制御対象に対して従来フィードバック制御系を第2.3.7図に示す制御系を構成し、制御装置としては、（2.3.3）式で示すPIあるいはPID制御装置として予めきめておき、



第2.3.7図

$$G_C = K_P\left(1 + \frac{1}{ST_I} + ST_D\right) \quad \cdots\cdots (2.3.3)$$

予めきめられた $G_P(S)$, $H(S)$, $G_d(S)$ に対して制御系として最も良い応答になるように、K_P, T_I, T_D を決定した。その規準量としては通常 Overshoot 量、位相余有、ゲイン余有等を用いて K_P, T_I, T_D を決定するが、その規準量は系が良い悪いの判定材料にはなつても、その値がこのプラントでの最終の意味で最適かどうかは別問題である。

このような制御装置での問題点として、つぎのようなものが挙げられる。

1）制御応答として真の最適応答をつかみにくい。

2）プロセスとして線形プロセスであるという前提のもとでの制御装置である。

1)、2)のような欠点をなくするため、アドバンスドコントロールを行なうのであるが、従来のアナログ式の制御装置では、構成するのが困難な場合が多かつたが、計算機の進出とともに、アドバンスドコントロールが可能となつた。

単一ループの制御としてつぎの項のように分類される。

(a) 制御構成

フイードバック制御

オープンループ制御

カスケード制御

フイードフオワード制御

(b) 制御方法

最適制御 { ポントリヤーギン最大原理法による最適制御 / ダイナミックプログラミング法による最適制御

ポジキヤスト、ネジキヤスト制御

任意伝達関数制御

従来フイードバック制御、オープンループ制御、カスケード制御は、制御構成としては行なわれているので、これらの説明は本報告の範囲ではないので省略する。

なお、単一ループは基本的制御であつて応用すれば、多入力、多出力の制御系に応用できる。ゆえに、各論する場合、単一入力、単一出力で述べないで、一般形式、多入力、多出力系で示しているものもある。

以上、本項に論ずる範囲はすべてではないが、ほとんどが非線形性の積極的利用に属すると考えられる。

(2) 各　論

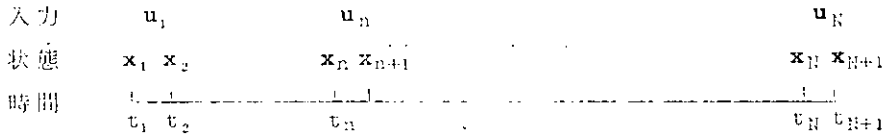
(a) ダイナミック・プログラミング（Dynamic Programing；D.P 動的計画法）

これは、R. Bellman らによつて開発された多段決定過程（Multi-stage Decision Process）の最適化手法である。多段決定過程とは初期の状態ベクトル $\mathbf{x}_1$ に $\mathbf{u}_1$ が加わつて $\mathbf{x}_2$ に、さらに $\mathbf{u}_2$ が加わつて $\mathbf{x}_3$ にと移動する。そして $\mathbf{x}_n$ に $\mathbf{u}_n$ が加わつて $\mathbf{x}_{n+1}$ と順次変化して行くものをいう。

配分問題、輸送問題、在庫管理等の最適問題に使用されるが、ここでは動的最適制御の問題に使用する方法を述べる。すなわち、連続的に変化する事象 $\mathbf{x}(t)$ を離散系におきかえて、多段決定過程にしてD.Pの手法を用いれば、通常の最適制御の問題を解決できる。

a. D.Pの基本概念

第2.3.8図に示すように時間 t については（$N+1$）個の離散的な t_1 …… t_{N+1} のみに注意する。



第2.3.8図

状態方程式　$\mathbf{x}_{n+1} = f(\mathbf{x}_n, \mathbf{u}_n, n)$ …… (2.3.4)

評価関数　$J = \sum_{n=1}^{N} L(\mathbf{x}_n, \mathbf{u}_n, n) + K(\mathbf{x}_{N+1})$ …… (2.3.5)

拘束条件　$\mathbf{x}_n \in X(n)$ …… (2.3.6)

$\mathbf{u}_n \in U(\mathbf{x}_n, n)$ …… (2.3.7)

初期条件 $\mathbf{x}_1$ が与えられる。終端条件 $\mathbf{x}_{N+1}$ は与えられることもあるが、ここでは自由端について検討する。

最適制御問題の設定をつぎのようにする。

「(2.3.4)式の状態方程式で表わされる制御対象について、拘束条件(2.3.6)、(2.3.7)式のもとで評価関数Jが最小となるように、制御入力 $\mathbf{u}_1 \cdots\cdots \mathbf{u}_N$ を求める。」

評価関数は各段ごとの評価関数 $L(\mathbf{x}_n, \mathbf{u}_n, n)$ の和という形をとつているが、だからといつて第n段の $L(\mathbf{x}_n, \mathbf{u}_n, n)$ のみを最小にすればよいということでなく、「全体的見通し」をもつて最適な入力 $\mathbf{u}_n^*$ を求めねばならない。(必らずしも $\mathbf{u}_n^*$ は $L(\mathbf{x}_n, \mathbf{u}_n, n)$ を最小とはしない。)

このような問題は「N段の多段決定過程」といわれ、各段での制御入力を選ぶことをその段での「決定」という。第1段、第2段 …… 第N段での決定を並べたものを「政策」と呼ぶ。全コスト(2.3.5)式を最小にする政策、$\mathbf{u}_1^*, \mathbf{u}_2^* \cdots\cdots \mathbf{u}_N^*$ を最適政策と呼ぶ。

この問題は、つぎの Bellman の最適性の原理を使用することによつて最適政策を求めることができる。

Bellman の最適性の原理

「多段決定過程の最適政策を $\mathbf{u}_1^* \cdots\cdots \mathbf{u}_N^*$ それによつて生じる状態の推移を $\mathbf{x}_1^*, \mathbf{x}_2^* \cdots\cdots \mathbf{x}_N^*, \mathbf{x}_{N+1}^*$ とすると、つぎの性質がある。任意のn($1 \leq n \leq N$)について第n段の状態 $\mathbf{x}_n^*$、決定 $\mathbf{u}_n^*$ がなんであつても、第n+1段以降の政策 $\mathbf{u}_{n+1}^* \cdots\cdots \mathbf{u}_N^*$ は $\mathbf{x}_n^*$ および $\mathbf{u}_n^*$ によつて定まる $\mathbf{x}_{n+1}^*$ を初期値とする(N−n)段の多段決定過程に対する最適政策となつている。」

この原理を使用し、前記の最適問題を解く。

第n段の状態 $\mathbf{x}_n$ が $\mathbf{x}$ という値をとるとき、残りの(N−n+1)段に最適政策を用いた場合の(N−n+1)段の最小コストのことを $V_{N-n+1}(\mathbf{x})$ と書くことにする。

$$V_{N-n+1}(\mathbf{x}) = \min_{\substack{\mathbf{u}_j \in U \\ j=n \cdots N}} \left\{ \sum_{j=n}^{N} L(\mathbf{x}_j, \mathbf{u}_j, j) \right\} \quad \cdots\cdots (2.3.8)$$

$$V_{N-n+1}(\mathbf{x}) = \min_{\mathbf{u}_n \in U} \left\{ L(\mathbf{x}, \mathbf{u}_n, n) + \min_{\substack{\mathbf{u}_j \in U \\ j=n+1 \cdots N}} \left[\sum_{j=n+1}^{N} L(\mathbf{x}_j, \mathbf{u}_j, j) \right] \right\} \quad \cdots\cdots (2.3.9)$$

(2.3.9)式の第2項は、$\mathbf{x}$ に $\mathbf{u}_n$ を作用させて生じる状態 $\mathbf{x}_{n+1}$ を初期値とする(N−n)段の多段決定過程の最適政策になつていなければならない。

$$\therefore V_{N-n+1}(\mathbf{x}) = \min_{\mathbf{u}_n \in U} \left\{ L(\mathbf{x}, \mathbf{u}_n, n) + V_{N-n}[\mathbf{x}_{n+1}] \right\} \quad \cdots\cdots (2.3.9')$$

$\mathbf{x}_{n+1}$ を(2.3.4)式を使い(2.3.9′)式に代入すると、

$$V_{N-n+1}(\mathbf{x}) = \min_{\mathbf{u}_n \in U} \left\{ L(\mathbf{x}, \mathbf{u}_n, n) + V_{N-n}[f(\mathbf{x}, \mathbf{u}_n, n)] \right\} \quad \cdots\cdots (2.3.10)$$

第n段における最適入力 $\mathbf{u}_n^*$ は（2.3.10）式の右辺を最小にする $\mathbf{u}_n^*$ である。

$$\mathbf{u}_n^*(\mathbf{x}) = \arg \min_{\mathbf{u}\in U} \{ L(\mathbf{x}, \mathbf{u}, n) + V_{N-n}[f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, n)] \} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.3.11)$$

（2.3.10）、（2.3.11）式がDPの基本式である。

（2.3.10）式はVについての漸化式である。V_{N-n+1} が与えられると V_{N-n} が求まるという漸化式であるので、初期条件 V_0 を与えねばならない。

N段の制御が全部すんで残りの段数が0となつた場合のコストは $K(\mathbf{x}_{N+1})$ である。

（2.3.5）式の最終項より、

$$V_0 = K(\mathbf{x}_{N+1}) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.3.12)$$

となる。

V_0，V_1 …… V_N と $\mathbf{u}_N^*$，$\mathbf{u}_{N-1}^*$ …… $\mathbf{u}_1^*$ と順次求める。

b. D.Pを使用した最適制御の実際の計算法

1例として状態変数 $\mathbf{x}$ が、1次元の場合について説明する。次元が大きくなつても同様な計算手法で行なうことができる。連続系でなく、離散系について説明する。また、入力も単一ループとして1入力の場合の計算とする。

システム方程式　$x_{n+1} = f(x_n, u_n, n)$ …… （2.3.13）

評価関数　$J = \sum_{n=1}^{n} L(x_n, u_n, n) + K(x_{n+1})$ …… （2.3.14）

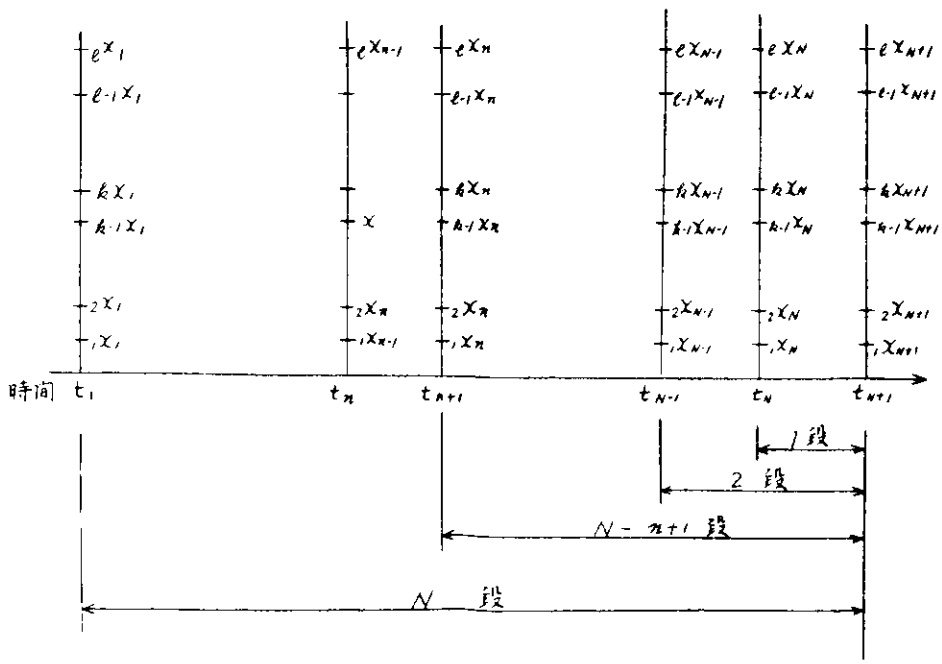
初期条件　x_1，終端自由 …… （2.3.15）

u，xの拘束条件　${}_1x \leqq x \leqq {}_\ell x$ …… （2.3.16）

時間　$t_1 \leqq t \leqq t_{N+1}$　$t_{N+1} - t_1 = T$　$T = \triangle T N$ …… （2.3.17）

（2.3.13）～（2.3.17）式のもとで、J＝最小とする最適制御入力を求める。

第2.3.9図に示すように、時間をN分割し、また各時点の状態xを ${}_1x$ から ${}_\ell x$ の範囲まで ℓ 分割する。



第2.3.9図

(i) 第1段階の計算

最終段よりの逆向き計算、すなわち第1段過程よりの逆向き計算による各点の最適入力計算

i. 第1段過程における初期条件 ${}_{k}x_{N}$ の各点の最適入力計算

(2.3.10)、(2.3.12)式より、

$$ {}_{k}V_{1} = \min_{{}_{k}U_{N}} \left\{ L({}_{k}x_{N}, {}_{k}U_{N}, N) + K({}_{j}x_{N+1}) \right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.3.18) $$

(2.3.13)式より、

$$ \left.\begin{aligned} {}_{j}x_{N+1} &= f({}_{k}x_{N}, {}_{k}U_{N}, N) \\ \text{ただし、} \\ j &= 1, 2 \cdots\cdots \ell \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.3.19) $$

(2.3.18)、(2.3.19)式より $j = 1 \cdots\cdots \ell$ の中で(2.3.18)式の右辺が最小となる ${}_{k}u_{N}^{*}$ を求める。

すなわち、${}_{k}u_{N}^{*}$ は、${}_{k}x_{N}$ 点より最終端(自由端)に変化させる入力で最適制御入力である。同様にして t_N 時の各点 ${}_{1}x_{N}$ ${}_{2}x_{N}$ …… ${}_{\ell}x_{N}$ 点について最適制御入力 ${}_{1}u_{N}^{*}$ …… ${}_{\ell}u_{N}^{*}$ および評価関数の最適値 ${}_{1}V_{1}^{*}$ ${}_{2}V_{1}^{*}$ …… ${}_{\ell}V_{N}^{*}$ を求める。そして表 t_N を求める。

表 t_N

${}_{1}x_{N}$	${}_{2}x_{N}$		${}_{k}x_{N}$		${}_{\ell-1}x_{N}$	${}_{\ell}x_{N}$
${}_{1}u_{N}^{*}$	${}_{2}u_{N}^{*}$		${}_{k}u_{N}^{*}$		${}_{\ell-1}u_{N}^{*}$	${}_{\ell}u_{N}^{*}$
${}_{1}V_{1}^{*}$	${}_{2}V_{1}^{*}$		${}_{k}V_{1}^{*}$		${}_{\ell-1}V_{1}^{*}$	${}_{\ell}V_{1}^{*}$

ii. 第2段過程における計算

t_{N-1} 時の初期条件 ${}_{k}x_{N-1}$ の各点における最適制御入力の計算をする。

(2.3.8)、(2.3.11)式より、

$$ {}_{k}V_{2} = \min_{{}_{k}u_{N-1}} \left\{ L({}_{k}x_{N-1}, {}_{k}u_{N-1}, N-1) + {}_{j}V_{1}^{*}({}_{j}\hat{x}_{N}, {}_{j}\hat{u}_{N}^{*}) \right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.3.20) $$

$$ {}_{j}\hat{x}_{N} = f({}_{k}x_{N-1}, {}_{k}u_{N-1}, N-1) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.3.21) $$

(∧印はxの状態が表中の ${}_{j}x_{N}$ 点と一致しない場合もあるので∧印をつけた。)

ただし、

$$ j = 1, \cdots\cdots 2, \ell $$

(2.3.20)、(2.3.21)式で、$j = 1, \cdots\cdots \ell$ の中で(2.3.20)式の右辺が最小となる ${}_{k}u_{N-1}^{*}$ を求める。

(ただし、(2.3.20)式の ${}_{j}V_{1}^{*}$ は表 t_N を用いて内挿することによつて求める。)

すなわち、${}_{k}u_{N-1}^{*}$ は ${}_{k}x_{N-1}$ 点より最終端(自由端)に変化させるための入力で評価関数を最小とする最適制御入力である。

ただし、動作期間は $[t_{N-1}, t_N]$ である。${}_{k}x_{N-1}$ に ${}_{k}u_{N-1}^{*}$ を動作させ(2.3.21)式できまる点 ${}_{j}\hat{x}_{N} = f({}_{k}x_{N-1}, {}_{k}u_{N-1}^{*}, N-1)$ に t_N 時に移動し、$t_n < t < t_{N-1}$ 時は表 t_N より求める入力である。ただし、${}_{j}\hat{x}_{N}$ が表 t_N の ${}_{j}x_{N}$ の値が同じになればよいが、同じでない場合は内挿して求める。

以上のようにして t_{N-1} 時の各点について最適制御入力、最適評価関数値について表 t_{N-1} を求める。

表 t_{n-1}

${}_1x_{N-1}$	${}_2x_{N-1}$		${}_{k-1}x_{N-1}$		${}_\ell x_{N-1}$
${}_1u^*_{N-1}$	${}_2u^*_{N-1}$		${}_{k-1}u^*_{N-1}$		${}_\ell u^*_{N-1}$
${}_1V^*_2$	${}_2V^*_2$		${}_{k-1}V^*_2$		${}_\ell V^*_2$

iii. 第2段過程と同様に逆向きに各時点の各x点における最適制御入力、最適評価関数値を求めて表 t_N、…… 表 t_{N-n} …… 表 t_1 を順次求める。

表 t_n

${}_1x_n$	${}_2x_n$		${}_kx_n$		${}_\ell x_n$
${}_1u^*_n$	${}_2u^*_n$		${}_ku^*_n$		${}_\ell u^*_n$
${}_1V^*_{N-n+1}$	${}_2V^*_{N-n+1}$		${}_kV^*_{N-n+1}$		${}_\ell V^*_{N-n+1}$

$n = 1$ …… N

以上の計算によつて各時点各点におけるすべての最適入力を求めた。

(ii) 第2段階の計算

(i)において逆向きに最適制御入力を求めた結果を用いて初期値が与えられたときの最適制御入力を求める。

たとえば、初期値 ${}_k\hat{x}_1$ が与えられた場合、表 t_1 すなわち t_1 時の最適制御入力表 t_1 を用いて期間〔t_1, t_2〕の最適制御入力を求める。${}_k\hat{x}_1$ が表 t_1 の初期値の一致しない場合は内挿して最適制御入力 ${}_k\hat{u}^*_1$ を求める。

表 t_1

${}_1x_1$	${}_2x_1$		${}_kx_1$		${}_\ell x_1$
${}_1u^*_1$	${}_2u^*_n$		${}_ku^*_1$		${}_\ell u^*_1$
${}_1V^*_n$	${}_2V^*_n$		${}_kV^*_n$		${}_\ell V^*_n$

${}_k\hat{u}^*_1$ により状態 ${}_k\hat{x}_1$ は、t_2 時には ${}_j\hat{x}_2 = f({}_k\hat{x}_1, {}_k\hat{u}^*_1, 1)$ に移動する。

つぎに t_2 時の最適制御入力は表 t_2 に用いて ${}_j\hat{u}^*_2$ を求める。

同様にして、順次表 t_n を用いて各時点の入力を求める。

以上によつて最適制御入力時系列

$$〔{}_k u^*_1, {}_j u^*_2 \cdots {}_p u^*_N〕 \quad \cdots\cdots (2.3.22)$$

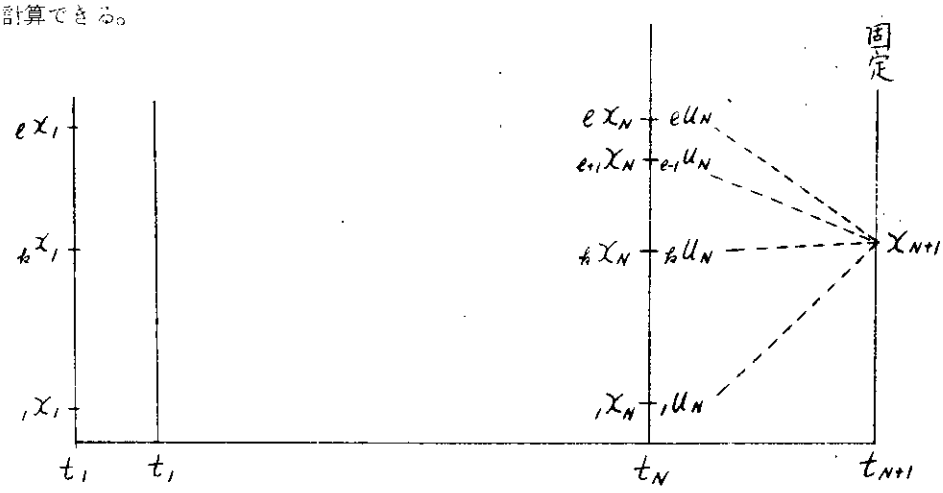
を求めて最適制御入力、すなわち最適政策が求まる。

以上のように第1段階の計算として最終段から順にさかのぼつて各段の各状態点に対して最適制御入力および最小評価値を求めて表を作り、第2段階として第1段階で作つた表を用いて内挿によつて実際の最適制御入力を求める第2段階とがある。

注意すべきことは第1段が終つたときには、指定された初期値ばかりでなく、制限範囲内のあらゆる点を初期点とする最適制御入力が求まつたことになる。

このことは、一見むだであるが、最適制御の場合、初期点は常に1点とは限らず、いろいろな点から出発する可能性があるし、制御途中での外乱による状態変化に移つても、その時点の最適制御入力も得られるので便利である。このことはD.Pの特長である。

以上の例では初期条件 x_1 終端自由について述べたが初期条件 x_1（固定）終端、x_{N+1}（固定）についても同様に計算できる。



第 2.3.10 図

t_N 時の各点における入力は最終端固定であるので、（2.3.13）式より一意的に決定される。しかもその間での評価関数値も一意的にきまる。すなわち、（2.3.14）式より、

$$_kV_1 = L(_kx_N, _ku_1, 1) + K(x_{N+1}) \quad \cdots\cdots (2.3.23)$$

$$k = 1 \cdots\cdots N$$

t_N 時を自由端とし、最終点評価値を $_kV_1$（k=1 …… N）とした最適問題と同じである。

c. D.P を用いて解析的に最適制御入力を求めることのできる例

実際的手法で説明したのは数値解析的に求めるものである。

しかし、解析的に解ける場合の1例をあげる。

線形システム　$x_{n+1} = A_n x_n + B_n u_n \quad \cdots\cdots (2.3.24)$

評価関数　$J = \frac{1}{2}\sum_{n=1}^{N}(x_n^T Q_n x_n + u_n^T R_n u_n) + \frac{1}{2} x_{N+1}^T F x_{N+1} \quad \cdots\cdots (2.3.25)$

ただし、Q_n, F は準正定、R_n は正定行列であり、u_n、x_n はとくに制限なし、x_{N+1} も自由という場合は、解析的に求めることができる。

終端　$V_0(x_{N+1}) = \frac{1}{2} x_{N+1}^T F x_{N+1} \quad \cdots\cdots (2.3.26)$

が成り立つ。これを漸化式（2.3.10）に代入、また（2.3.24）式を用いて、

$$V_1(x_n) = \min_{U_N}\left\{\frac{1}{2} x_n^T Q_N x_N + \frac{1}{2} u_n^T R_N u_N + \frac{1}{2}(A_N x_N + B_N x_N)^T F (A_N x_N + B_N x_N)\right\} \cdots (2.3.27)$$

いま u_N には制限がないから右辺の min を求めるには { } 内を u_N で微分して最小値を求める。

$$R_N u_N^* + B_N^T F B_N u_N^* + B_N^T F A_N x_N = 0 \quad \cdots\cdots (2.3.28)$$

したがつて、

$$u_N^* = -(R_N + B_N^T F B_N)^{-1} B_N^T F A_N x_N \quad \cdots\cdots (2.3.29)$$

$$I_1(x_N) = \frac{1}{2} x_N^T \left\{(Q_N + A_N^T F A_N) - A_N^T F B_N (R_N + B_N^T F B_N)^{-1} B_N^T F A_N\right\} x_N \quad \cdots\cdots (2.3.30)$$

が得られる。G_N を、

$$(R_N + B_N^T F B_N)^{-1} B_N^T F A_N \equiv G_N \quad \cdots\cdots (2.3.31)$$

と定義する。

$$u_N^* = -G_N x_N \quad \cdots\cdots (2.3.32)$$

$$I_1(x_N) = \frac{1}{2} x_N^T \{ Q_N + A_N^T F A_N) + A_N^T F B_N G_N \} x_N \quad \cdots\cdots (2.3.33)$$

ここで、

$$P_{N-1} = \{ (Q_N + A_N^T F A_N) + A_N^T F B_N G_N \} \quad \cdots\cdots (2.3.34)$$

とおくと、

$$I_1(x_N) = \frac{1}{2} x_N^T P_{N-1} x_N \quad \cdots\cdots (2.3.35)$$

u_{N-1}^* は（2.3.28）式を漸化式（2.3.10）式に代入し、（2.3.17）式を用いて求めるのである。

D.Pを用いた場合の問題点

問題点1.

Bellman らが「次元の呪い」と呼ぶものであり、状態変数次元 m が大きくなると、計算が困難となることである。

1）第1段階の計算で表 t_N をつくるには、表 t_{N-1} を使うので、少なくともそれをおぼえる記憶容量が必要である。

状態変数 $\mathbf{x}$ が m 次元で各変数を L_i 個に分割したとすると、

記憶容量は、

$$L_0 = \prod_{i=1}^{m} L_i \quad \cdots\cdots (2.3.36)$$

必要で、また各点の評価関数値および最適入力値も記憶する必要がある。ゆえに、表 t_n を記憶するには $3L_0$ の高速記憶容量が必要である。m＝3次元、$L_i = 100$ では $3L_0 = 3 \times 10^7$ の高速記憶容量が必要である。

2）第2段階での指定された初期値からの最適制御を求めるには内挿によつて求めるには表 t_1 …… t_N までの全表を記憶しておく必要がある。

ゆえに、少なくとも $3L_0 N_0$ の低速記憶容量が必要である。ゆえに、m＝3次元で $L_i = 100$ で、$N_0 = 50$ のとき記憶容量は $3 \times 5 \times 10^7$ 必要である。

3）計算時間が長くなる。1計算が 50 μsec とするとすれば、5×10^7 回の計算が必要、すなわち時間としては 2,500 sec 必要である。

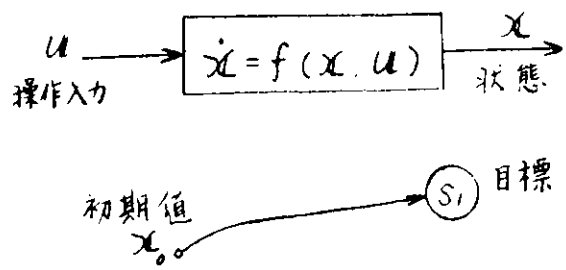
したがつて記憶容量および計算時間に問題があることがわかる。

問題点2.

量子化における誤差の問題および内挿を行なう場合の精度の問題等があげられる。

(b) Ponturyagin 最大原理（MP）による最適制御

Ponturyagin 最大原理は、前述のD.Pと同様に最適化の手法の一つである。第2.3.11図のブロック線図に示すように、入力 u を操作することによつて、状態 x を初期値 x_0 から目標 S_1 に移動させるとき、評価関数 J を最小にするような最適な入力 u に対する必要条件を与える基本原理である。



第2.3.11図

最大原理はD.Pと同様、制御対象が完全に Identification（同定）されている場合のプロ

グラム制御の基本原理を与えるものである。

つぎに問題となる制御対象、評価関数を（2.3.37）、（2.3.38）式で表わす。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad \cdots\cdots (2.3.37)$$

$\mathbf{x}$ ：状態変数　$n \times 1$ マトリックス

$\mathbf{u}$ ：操作入力変数　$m \times 1$ マトリックス、　$\mathbf{u} \in U$（許容入力）

$$J = \int_{t_0}^{t_1} L(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t))\, dt \quad \cdots\cdots (2.3.38)$$

t_0 ：初期時間

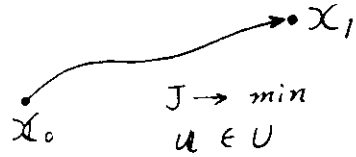
t_1 ：最初に目標に到達した時間

（2.3.37）、（2.3.38）式で表わされる系に対しての最適制御を考える。

最適問題は、つぎの2個の基本問題に分類できる。

基本問題 P_1（固定端、不定時間）

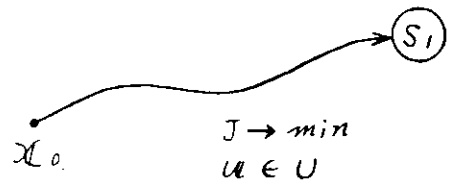
系の状態を $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$ より目標 $\mathbf{x}_1$ に移行し、同時に $J(\mathbf{u})$ を最小にする許容入力 $\mathbf{u} \in U$ を見い出せ。



第2.3.12図

基本問題 P_2（半固定端、不定時間）

系の状態を $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$ より目標集合 S_1 に移行し、$J(\mathbf{u})$ を最小にする $\mathbf{u} \in U$ を見い出せ。目標集合 S_1 というのは終端状態が1点だけに指定されずに、終端が集合で表わされることをいう。



第2.3.13図

基本問題 P_1，P_2 を挙げたが、この他の最適問題が考えられるが、変換すれば基本問題 P_1 か P_2 に変換される。

a. 自由端、固定時間問題 …… 基本問題 P_2 に変換

第2.3.5表

	変換前	変換後
制御対象	$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$	$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ $\dot{x}_{n+1} = 1$
評価関数	$\min J(\mathbf{u}) = \int_{t_0}^{t_1} L(\mathbf{x}, \mathbf{u})\, dt$, t_1 t_1 ＝ 固定	$\min J(\mathbf{u}) = \int_{t_0}^{T} L(\mathbf{x}, \mathbf{u})\, dt$ T ＝ 不定
初期条件	$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$	$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$ $x_{n+1}(t_0) = t_0$
終端条件	自由端	$\mathbf{x}$ 不定 $x_{n+1}(T) = t_1$ ＝ 固定　} 半固定

状態変数として x_{n+1} を追加し、状態空間として $n+1$ 次元にし、時間 t を $x_{n+1} = \int_{t_0}^{t} dt$ と変換すれば P_2 の基本問題となる。

b. 時変パラメータを含む場合 …… 基本問題 P_2 に変換

第2.3.6表

	変　換　前	変　換　後
制御対象	$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$	$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, x_{n+1})$ $\dot{x}_{n+1} = 1$
評価関数	$\min J(\mathbf{u}) = \int_{t_0}^{t_1} L(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)\,dt$ t_1 ＝不定	$\min J(\mathbf{u}) = \int_{t_0}^{t_1} L(\mathbf{x}, \mathbf{u}, x_{n+1})\,dt$ t_1 ＝不定
初期条件	$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$	$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$ $x_{n+1}(t_0) = t_0$
終端条件	$\mathbf{x}(t_1) = g(t_1)$ …… 動目標	$\mathbf{x} = g(x_{n+1})$ $x_{n+1} = t_1$ } n+1次元空間中 $\mathbf{x} = g(x_{n+1})$ 空間

状態変数として、x_{n+1} を追加し、状態空間を n＋1 次元にし、時間 t を $x_{n+1} = \int_{t_0}^{t} dt$ と変換すれば、終端は、x と x_{n+1} の n＋1 次元空間に、$\mathbf{x} = g(x_{n+1})$ で拘束される部分空間である。

c．固定時間制御 …… 基本問題 P_1 に変換

第2.3.7表

	変　換　前	変　換　後
制御対象	$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$	$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, x_{n+1})$ $\dot{x}_{n+1} = 1$
評価関数	$J(\mathbf{u}) = \int_{t_0}^{t_1} L(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)\,dt$ t_1 ＝固定	$J(\mathbf{u}) = \int_{t_0}^{T} L(\mathbf{x}, \mathbf{u}, x_{n+1})\,dt$ T ＝不定
初期条件	$\mathbf{x}_0(t_0) = \mathbf{x}_0$	$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$ $x_{n+1}(t_0) = t_0$
終端条件	$\mathbf{x}(t_1) = \mathbf{x}_1$	$\mathbf{x} = x_1$ …… 固定 $x_{n+1}(T) = t_1$ 固定 } 固定

状態変数として x_{n+1} を追加し、状態空間を n＋1 次元にし、時間 t を $x_{n+1} = \int_{t_0}^{t} dt$ と変換すれば、P_1 の基本問題に変換される。

d．最終値制御 …… 基本問題 P_2 に変換

第2.3.8表

	変　換　前	変　換　後
制御対象	$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u})$	$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u})$
評価関数	$\min J(\mathbf{u}) = K(\mathbf{x}(t_1))$ t_1 ＝固定	$\min J(\mathbf{u}) = K(\mathbf{x}(t_0)) + \int_{t_0}^{t_1} \left(\frac{d}{dt} K\right) dt$
初期条件	$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$	$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$
終端条件	$x(t_1)$ ＝自由	$\mathbf{x}(t_1)$ ＝自由

評価関数を $\min J(u) = K(x(t_0)) + \int_{t_0}^{t_1} \left(\frac{d}{dt} K\right) dt$ とすれば、基本問題 P_2 に変換される。

つぎに基本問題 P_1, P_2 に対する最大原理の定理を示す。

〔定理Ⅰ〕 基本問題 P_1 に対する最大原理

$u^*(t)$ を系の状態を x_0 より x_1 に移行する許容入力とし、$x^*(t)$ を対応する軌道とする。u^* が最適であるためには、次の条件を満たす非負の定数 $P_0^* \geq 0$ と関数 $P^*(t)$ が存在することが必要である。

a. Hamiltonian $H(x, u, P, P_0) = P_0 L(x, u) + \langle P, f(x, u) \rangle$ …… (2.3.39)

とする $x^*(t)$, $P^*(t)$ はつぎの正準方程式を満たす。符号 $\langle\ \rangle$ はベクトルの内積を示す。

$$\dot{x}^* = \frac{\partial H}{\partial P}\left[x^*(t), P^*(t), u^*(t), P_0^*\right] \quad \cdots\cdots (2.3.40)$$

$$\dot{P}^*(t) = \frac{\partial H}{\partial x}\left[x^*(t), P^*(t), u^*(t), P_0^*\right] \quad \cdots\cdots (2.3.41)$$

$$x^*(t_0) = x_0 \quad \cdots\cdots (2.3.42)$$

$$x^*(t_1) = x_1 \quad \cdots\cdots (2.3.43)$$

b. 各時刻 $t \in [t_0, t_1]$ において

$$\min_{u \in U} H\left[x^*(t), P^*(t), u, P_0^*\right] = H\left[x^*(t), P^*(t), u^*(t), P_0^*\right] \quad \cdots\cdots (2.3.44)$$

c. $$H\left[x^*(t), P^*(t), u^*(t), P_0^*\right] = 0 \quad \cdots\cdots (2.3.45)$$

〔定理Ⅱ〕 基本問題 P_2 に対する最大原理

a., b., c は全く同じ。

d. $P^*(t_1)$ は $x^*(t_1)$ において目標集合 S_1 に対し、横断性条件を満たす。

$$\langle P^*(t_1), x - x^*(t_1) \rangle = 0 \quad \cdots\cdots (2.3.46)$$

（ただし、x は目標集合 S_1 における接平面 $M(x^*(t_1))$ 上のすべての点）

$$M(x^*(t_1)) = \left\{ x \;;\; \left\langle \frac{\partial g_{i_1}}{\partial x}\Big|_{x^*}, x - x^*(t_1) \right\rangle = 0 \qquad i_1 = 1 \cdots n,\ k \right\} \quad \cdots\cdots \text{k次元平面}$$

$M(x^*(t_1))$ は $\left\langle \frac{\partial g_{i_2}}{\partial x}\Big|_{x^*}, x - x^*(t_1) \right\rangle$ を満足する接平面を表わす。 …… (2.3.47)

最大原理の定理Ⅰ, Ⅱに関する全体的な構造を示す。

未知パラメータの個数と、それを決定するための条件の個数を第2.3.9、2.3.10表に示す。

基本問題 P_1 に対して

第2.3.9表

未知パラメータ	個数	条件	個数
$\dot{x}_0(t) = \frac{\partial H}{\partial P_0}$	1	$x_0(t_0) = 0$	1
$\dot{x}(t) = \frac{\partial H}{\partial P}$	n	$x(t_0) = x_0$	n
$\dot{P}_0(x) = -\frac{\partial H}{\partial x_0} = 0$	1	$x(t_1) = x_1$	n
$\dot{P}(t) = -\frac{\partial H}{\partial x}$	n	$P_0 = 1$	1
t_1	1	$H[u^*(t)] = \min_{u \in U} H(u)$	m
u	m	$H[x^*(t)\ P^*(t), u^*(t)\ P_0^*] = 0$	1
未知パラメータ合計数	$2n+m+3$	条件合計数	$2n+m+3$

未知パラメータ数と条件個数とが等しくなり、$\mathbf{u}^*$が求まることがわかる。

基本問題 P_2 に対して

第2.3.10表

未知パラメータ	個数	条件	個数
$\dot{x}_0(t) = \dfrac{\partial H}{\partial P_0}$	1	$x_0(t_0) = 0$	1
$\dot{\mathbf{x}}(t) = \dfrac{\partial H}{\partial \mathbf{P}}$	n	$\mathbf{x}(t_0) = x_0$	n
		$x(t_1) \in S_i(g_i(x(t_1))) = 0$ $i = 1 \cdots n-k$	n−k
$P_0(\mathbf{x}) = -\dfrac{\partial H}{\partial x_0} = 0$	1	横断条件k次元平面$M(x^*(t_1))$に対するP(t)に対する垂直条件 即ち $< P(t_1), x - x(t_1) > = 0$	k
$\dot{\mathbf{P}}(t) = -\dfrac{\partial H}{\partial x}$	n		
		$P_0 = 1$	1
t_1	1	$H[u^*(t)] = \min_{u \in U} H(u)$	m
u	m	$H[x^*(t)\ P^*(t)\ u^*(t), P_0^*] = 0$	1
未知パラメータ合計数	$2n+m+3$	条件合計数	$2n+m+3$

未知パラメータ数と条件個数とが等しくなり、u^*が求まることがわかる。

注意すべきことは、基本問題 P_1, P_2 のどちらにおいても、$\mathbf{P}$の初期条件は最初与えられないものであり、結果として求まるものであるということである。

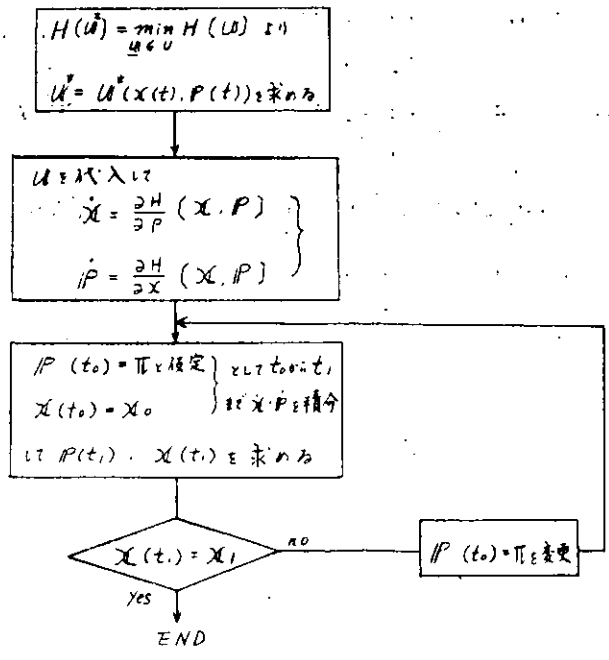
だから、解き方として、最初に$\mathbf{x}$の終端条件を与えないで、$\mathbf{P}$の初期条件を与えて最適入力u^*を求め、そのu^*によりxが目的とする終端条件にならない場合は元にかえり、$\mathbf{P}$の初期条件を変えてu^*を求めて、$\mathbf{x}$が目的とする終端条件になるまで繰り返して求める。いわゆる2点境界値問題となる。

この方法をつぎに説明する。

最大原理による最適制御入力の計算法

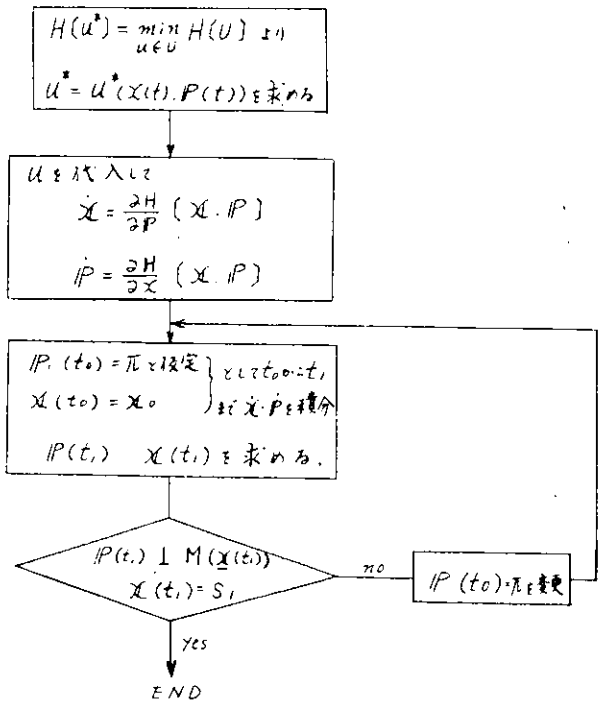
計算法として2点境界値問題であり、基本問題 P_1, P_2 に対する計算法をフローチャートで第2.3.14図に示す。

基本問題 P_1 の場合



第2.3.14図

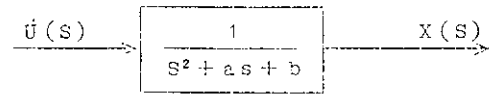
基本問題 P_2 に場合



第 2.3.15 図

つぎに、例題によつて説明する。

例題 1.



第 2.3.16 図

第 2.3.16 図に示す 2 次の伝達関数で表わされる制御対象

この制御対象を状態変数で表わすと、

$$\left.\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -a x_2 - b x_1 + u \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (2.3.48)$$

入力制御条件 $\quad |u| \leq M \quad \cdots\cdots (2.3.49)$

初期条件および終端条件

$$\left.\begin{aligned} x_1(t_0) &= x_{10} \qquad x_2(t_0) = x_{20} \\ x_1(t_f) &= 0 \qquad\quad x_2(t_f) = 0 \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (2.3.50)$$

この系において、$\mathbf{x}(t_0)$ より $\mathbf{x}_2(t_f)$ まで最短時間で持つて行くための最適制御入力と u^* を求めよという問題とする。

最短時間という評価関数であるので、評価関数としては (2.3.51)、(2.3.52) 式で表わされる。

$$\min J(u) = \int_{t_0}^{t_1} dt \quad \cdots\cdots (2.3.51)$$

$$L(\mathbf{x}, u) = 1 \quad \cdots\cdots (2.3.52)$$

Hamiltonian H は、(2.3.39) 式より (2.3.52) 式となる。

$$H = P_0 L(\mathbf{x}, u) + \langle P, f(\mathbf{x}, u) \rangle . \quad \cdots\cdots (2.3.39)$$

$$H = P_0 + P_1 x_2 + P_2(-a x_2 - b x_1 + u) \quad \cdots\cdots (2.3.53)$$

(2.3.41) 式より、すなわち、$\dot{x}_0 = \frac{\partial H}{\partial P_0}$, $\dot{x}_1 = \frac{\partial H}{\partial P_1}$, $\dot{x}_2 = \frac{\partial H}{\partial P_2}$ より、

$$\dot{x}_0 = 1 \quad \cdots\cdots (2.3.54)$$

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad \cdots\cdots (2.3.55)$$

$$\dot{x}_2 = -a x_2 - b x_1 + u \quad \cdots\cdots (2.3.56)$$

(2.3.42)式より、すなわち、$\dot{P}_0 = -\frac{\partial H}{\partial x_0}$, $\dot{P}_1 = -\frac{\partial H}{\partial x_1}$, $\dot{P}_2 = -\frac{\partial H}{\partial x_2}$ より、

$$\dot{P}_0 = 0 \quad \cdots\cdots (2.3.57)$$

$$\dot{P}_1 = b P_2 \quad \cdots\cdots (2.3.58)$$

$$\dot{P}_2 = -P_1 + a P_2 \quad \cdots\cdots (2.3.59)$$

x_0 の初期条件は、(2.3.60)式とおく。

$$x_0(t_0) = 0 \quad \cdots\cdots (2.3.60)$$

P_0 の初期条件は、(2.3.61)式とおく。

$$P_0(t_0) = 1 \quad \cdots\cdots (2.3.61)$$

(2.3.54)、(2.3.60)、(2.3.57)、(2.3.61)式より、x_0, P_0 は(2.3.62)、(2.3.63)式となる。

$$x_0(t_1) = t \quad \cdots\cdots (2.3.62)$$

$$P_0(t_1) = 1 = \text{const} \quad \cdots\cdots (2.3.63)$$

(2.3.44)式より、最適入力を求める。

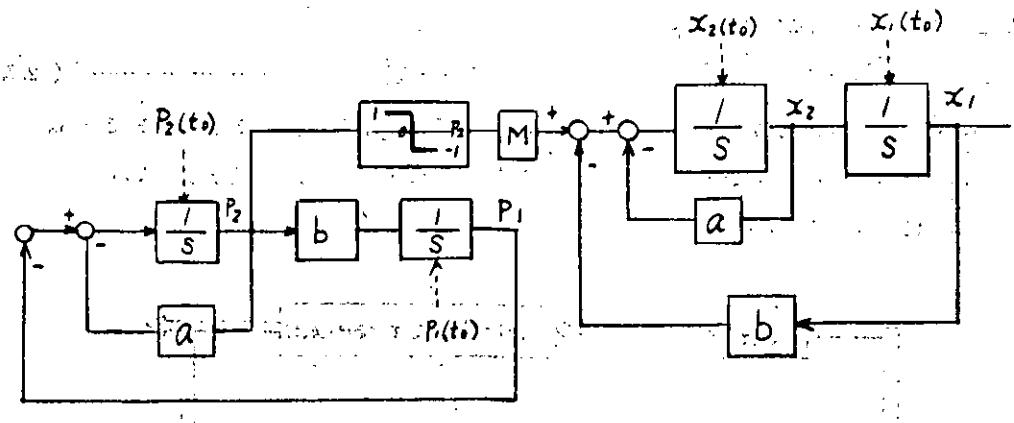
$$H[\mathbf{x}^*(t), \mathbf{P}^*(t), u^*(t), P_0^*] = \min H[\mathbf{x}^*(t)\ \mathbf{P}^*(t)\ u^*(t)\ P_0^*] \quad \cdots\cdots (2.3.44)$$

$$u^* = M \operatorname{sgn} P_2(t) = \begin{cases} P_2 > 0\ ; & u = -M \\ P_2 < 0\ ; & u = M \\ P_2 = 0\ , & u = 0 \end{cases} \quad \cdots\cdots (2.3.64)$$

(2.3.58)、(2.3.59)式の P_1, P_2 に初期条件を $P_1(t_0)$, $P_2(t_0)$ を与えて P_2 を解き、その結果と(2.3.63)、(2.3.55)、(2.3.56)式と(2.3.50)式の初期条件より x_1 と x_2 の最終値を求め、その値が(2.3.50)式の終端条件になれば、その補助関数 P_2 は最適で、そして(2.3.64)式で求まつた入力は最適制御入力でもある。

もし、x_1 と x_2 の最終値が(2.3.50)式の終端条件にあわなければ、try and error で初期値 $P_1(t_0)$, $P_2(t_0)$ を変えて求めねばならない。

この全体的な制御系の構成は第2.3.17図となる。



第2.3.17図

第2.3.17図に示す初期条件 $P_2(t_0)$, $P_1(t_0)$ は、2点境界値問題で try and error で求めねばならない。

例題2.

2次形式の評価関数を有する線形系の最適制御

制御対象　$\dot{x}(t) = A(t)\,\mathbf{x}(t) + B(t)\,\mathbf{u}(t)$ …… (2.3.65)

評価関数　2次形式

$$J(u) = \frac{1}{2}\langle \mathbf{x}(T), \mathbf{F}, x(T)\rangle + \frac{1}{2}\int_{t_0}^{T} [\langle \mathbf{x}(t), Q(t)\,\mathbf{x}(t)\rangle + \langle \mathbf{u}(t), B(t)\,\mathbf{u}(t)\rangle]\,dt$$
…… (2.3.66)

初期条件　$\mathbf{x}(t_0) = x_0$ …… (2.3.67)

終端条件　$\mathbf{x}(T)$ = 自由端 …… (2.3.68)

時　間　T = 固定 …… (2.3.69)

J = 最小にする u(t) を求めよ。

最大原理のハミルトニアンは、(2.3.70)式とおく。(ただし、$P_0 = 1$ とおく。)

$$H = \frac{1}{2}\langle \mathbf{x}(t), \underline{Q}(t), \mathbf{x}(t)\rangle + \frac{1}{2}\langle \mathbf{u}(t), \mathbf{R}(t), \mathbf{u}(t)\rangle + \langle \mathbf{A}(t)\,\mathbf{x}(t), \mathbf{P}(t)\rangle + \mathbf{B}(t)\,\mathbf{u}(t), \mathbf{P}(t)\rangle$$
…… (2.3.70)

a. $\dot{\mathbf{P}}(t) = -\dfrac{\partial H}{\partial x}$ …… (2.3.71)

b. $H[\mathbf{x}^*(t), \mathbf{P}^*(t), \mathbf{u}^*(t)] = \min H[\mathbf{x}^*(t), \mathbf{P}^*(t), \mathbf{u}]$ …… (2.3.72)

c. $H[x^*(t), P^*(t), u^*(t)] = 0$ …… (2.3.73)

$$\dot{\mathbf{P}}(t) = -Q(t)\,\mathbf{x}(t) - A'(t)\,P(t)$$ …… (2.3.74)

$$\mathbf{P}(T) = \frac{\partial}{2\,\partial x(T)}\langle \mathbf{x}(T), F, \mathbf{x}(T)\rangle = F\,\mathbf{x}(T).$$ …… (2.3.75)

min H なる条件より、

$$\frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} = 0 = R(t)\,\mathbf{u}(t) + B(t)\,\mathbf{P}(t)$$ …… (2.3.76)

$$\dot{\mathbf{P}}(t) = -Q(t)\,\mathbf{x}(t) - A'(t)\,\mathbf{P}(t)$$
$$= -Q(t)\,\mathbf{x}(t) - A'K(t)\,\mathbf{x}(t)$$ …… (2.3.77)

(2.3.65)、(2.3.76)、(2.3.77)式より、

$$[\dot{K}(t) + K(t)A(t) + K(t)B(t)R^{-1}(t)B'(t)K(t) + A'(t)K(t) + Q(t)]\,\mathbf{x}(t) = 0$$
$$t \in [t_0, T]$$ …… (2.3.78)

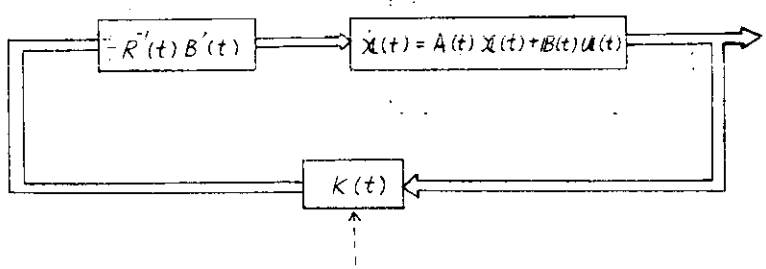
任意の x について成立つためには、

$$\dot{K} + K(t)A(t) + K(t)B(t)R^{-1}(t)B'(t)K(t) + A'(t)K(t) + Q(t) = 0$$ …… (2.3.79)

なる Riccati 微分方程式が成り立てばよい。ただし、境界条件は $K(T) = F$ である。

ゆえに、$K(t)$ の計算は最終値 $K(T) = F$ とした Riccati の方程式を解けばよい。

制御系の構成は、第2.3.18図となる。



最終値 $K(T) = F$ なる (2.3.79)式の Riccati の微分方程式を逆向きに解いて変化する。

第2.3.18図

図からわかるように、一種の最適 Feedback 制御である。

この解は証明は省略するが、必要かつ十分条件である。

これは、D.P からも求められる。

(e) Posicast Control と Negicast Control

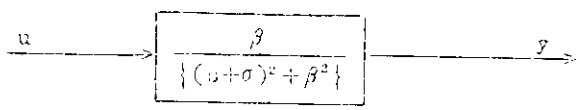
設定値の step 変化を変化することによつて応答を改善する方法である。

a. Posicast Control

たとえば第 2.3.19 図に示す 2 次の減衰振動系

$G(s) = \beta / \{(s+\sigma)^2 + \beta^2\}$ に対する応答は

(2.3.80) 式となる。



第 2.3.19 図

$$y(t) = k\left\{1 - e^{-\sigma t}\left(\frac{\sigma}{\beta}\sin\beta t + \cos\beta t\right)\right\},\quad k = \frac{\beta}{\beta^2+\sigma^2} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.3.80)$$

最大点 $\frac{dy}{dt} = 0$ なる時点 $\beta t = \pi$ であり、

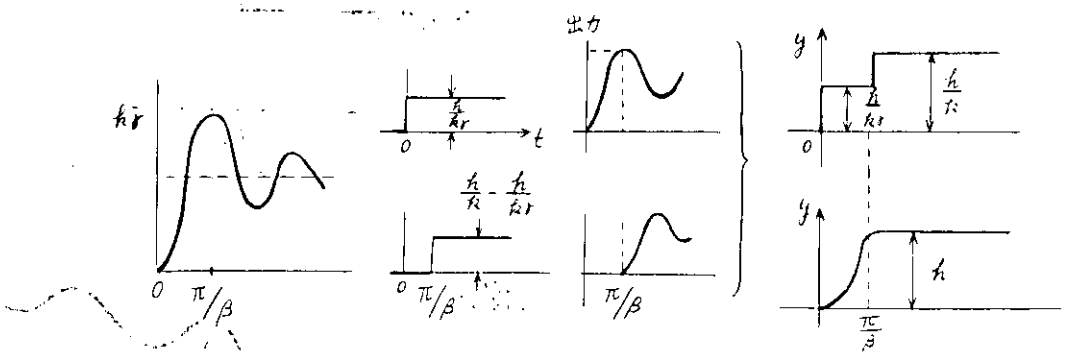
$$y_{max} = y_1(\pi/\beta) = k\gamma$$

$$\gamma = 1 + e^{-\frac{\sigma}{\beta}\pi} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.3.81)$$

$y(t)$ を h まで上げたい場合、$t=0$ に $u = \frac{h}{k\gamma}$ の step を入れて最大が h に達する瞬間に、

$$u_1 = \frac{h}{k} - \frac{h}{k\gamma}$$

の入力を加えて、入力として $u = \frac{h}{k\gamma}$ とすると有限整定応答が得られる。



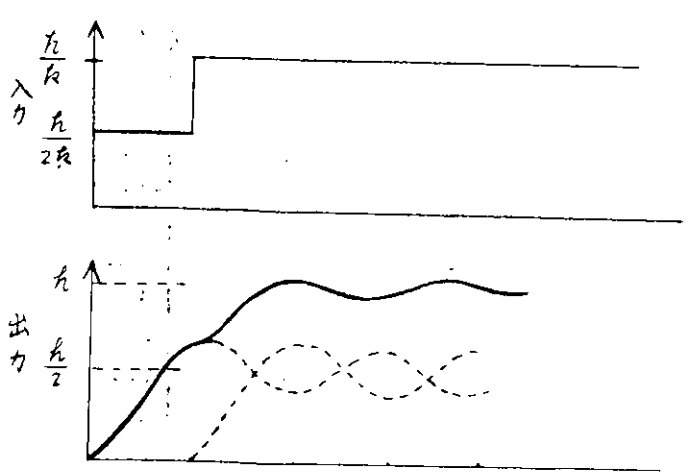
第 2.3.20 図

有限整定応答の場合を説明したが、有限整定応答ではないが、つぎのような Posicast Control を行なつても応答をよくすることができる。

すなわち、$\frac{h}{2k}$ の入力最初入れ、そして出力がピーク点に達したとき、さらに $\frac{h}{2k}$ の入力を重畳させて、入力を $\frac{h}{k}$ とする出力の Overshoot も少なくなり応答はよくなる。

なお、特性方程式 (2.3.82) 式であり、

$$S^{2n} + a_n + S^{2n-1} \cdots\cdots + a_1 S + a_0 = 0 \qquad \cdots\cdots \quad (2.3.82)$$



第 2.3.21 図

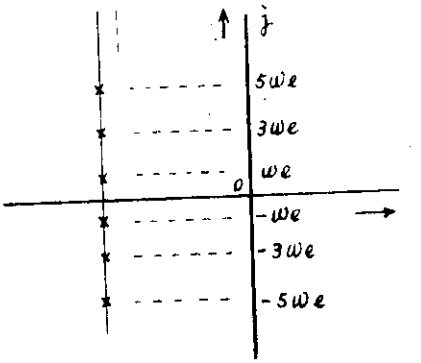
特性根が、

$$S_i = \sigma_0 \pm j k_i \omega_0 \quad \cdots\cdots (2.3.83)$$

$$i = 1 \cdots\cdots n$$

$$k_i = 2_i - 1$$

である制御系のとき、すなわち複素平面上で特性根が第2.3.22図のとき、Posicast Control で有限整定応答を行なうことができる。



第2.3.22図

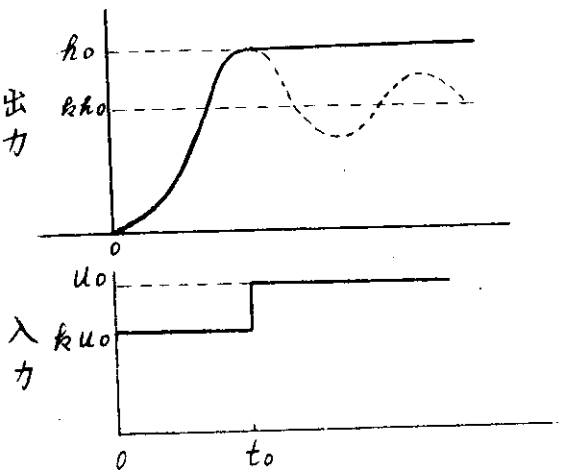
方法としては最初の入力として出力のピーク点が目標値となる入力 $k \cdot u_0$ を入れて、そのピーク時に、入力を整定値が目標値となる入力 u_0 にする方法である。

b. Negicast Control

Overshoot はないが、第2.3.24図に示すように、目標値に達しない前に、Peak 点が存在するような場合に応答をよくするために行なう方法である。

入力として Posicast と同じように、2段に入れるのであるが、最初の入力は最終入力より大きい入力を入れて、つぎに2段目には最終入力に減少させる。そして応答をよくする方法である。特に特性方程式（2.3.84）であり、

$$S^{2n-1} + a_{n-1} S^{2n-2} + \cdots\cdots + a_1 S + a_0 = 0 \quad \cdots\cdots (2.3.84)$$



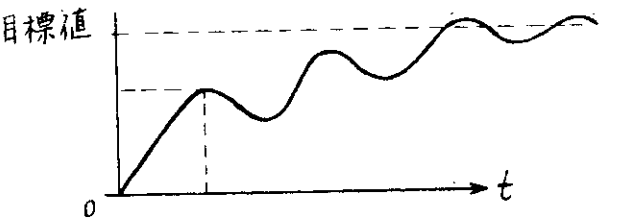
第2.3.23図

特性根が（2.3.85）式である制御系のとき、

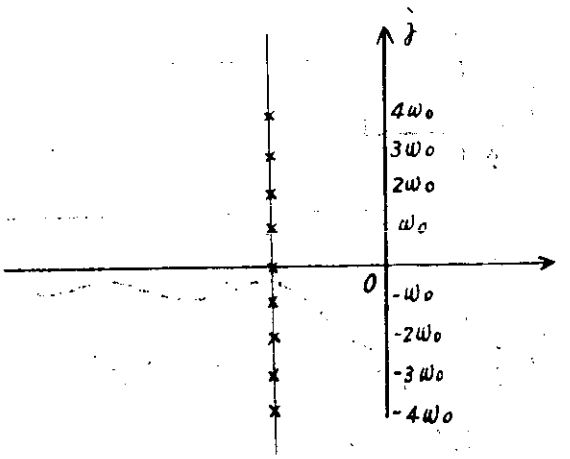
$$S_i = \sigma_0 \pm j k_i \omega_0 , \quad i = 0, 1 \cdots\cdots n \quad \cdots\cdots (2.3.85)$$

$$k_i = i$$

すなわち、複素平面上で根が第2.3.25図のようになるとき、有限整定応答を得ることができる。



第2.3.24図

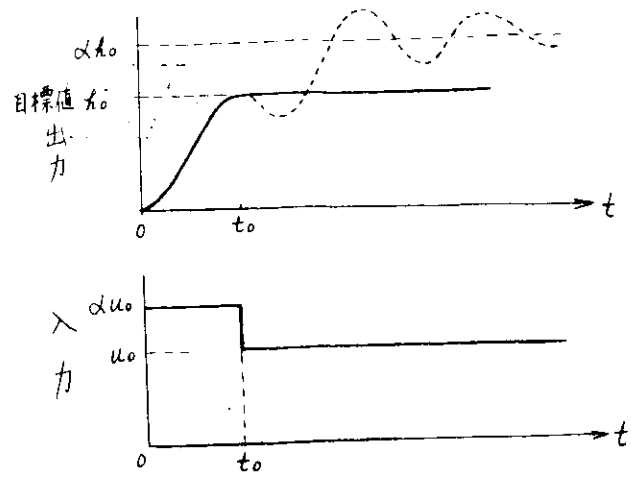


第2.3.25図

方法としては、最初の入力として出力のピーク点が目標値となる入力を入れて、ピーク時に入力を目標値となる入力にする方法である。

注）有限整定応答とは；

有限時間で系が整定する応答である。通常のプロセスの応答は無限整定応答である。たとえば、1次系 $\frac{1}{1+TS}$ の応答は、無限時間たたなければ整定しない。



第2.3.26図

(d) 任意伝達関数制御装置

従来のPID制御装置の動作をディジタル計算機で実行させるためには、3サンプリング周期分の入力偏差に演算をほどこして操作量を決定しているが、もつと以前の偏差信号を操作量の決定のために用いれば、制御特性をより向上させることができるであろうし、また過去に操作された操作量を新しい操作量の決定のために利用することによつても、やはり制御性を改善することが可能である。

すなわち、PID制御では利用しなかつた、より多くの情報に基いて偏差信号に対して任意の特性を持つ操作量を出すことのできる制御方式である。その制御方式の一例として任意伝達関数制御装置を用いる制御がある。

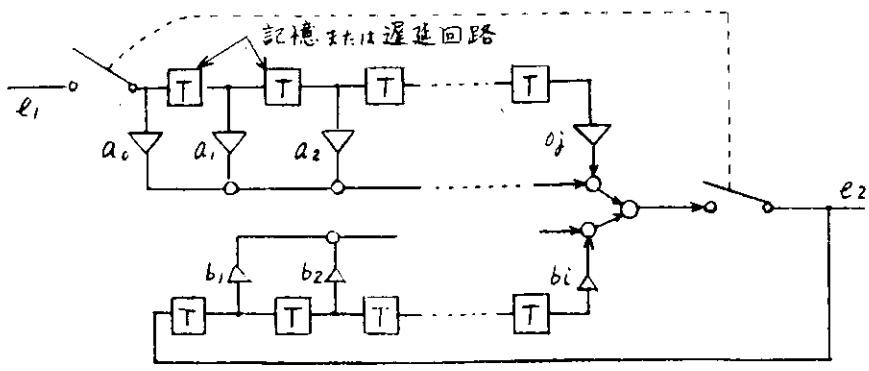
この制御装置のブロック線図は第2.3.27図であり、パルス伝達関数は（2.3.86）式であり、

$$C^*(z) = \frac{E_2^*(z)}{E_1^*(z)}$$

$$= \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \cdots\cdots + a_j z^{-j}}{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \cdots\cdots + b_k z^{-k}} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.3.86)$$

これを時間領域に変換すると（2.3.87）式である。

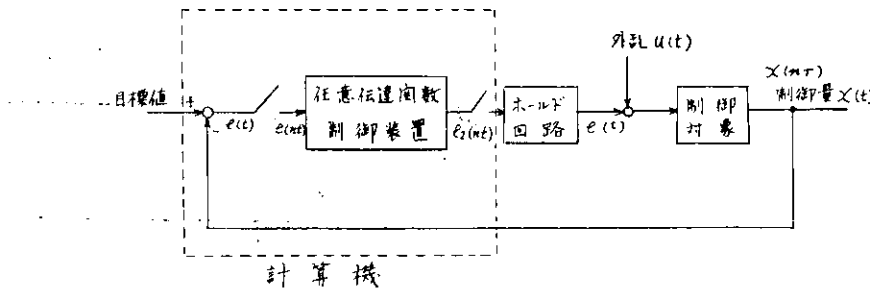
$$e_2^*[(nT)] = a_0 e_1^*[(nT)] + a_1 e_1^*[(n-1)T] + \cdots\cdots + a_j e_1^*[(n-j)T]$$
$$- b_1 e_2^*[(n-1)T] - b_2 e_2^*[(n-2)T] - \cdots\cdots - b_k e_2^*[(n-k)T] \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.3.87)$$



第2.3.27図

（2.3.87）式の制御式において a_j，b_1 を適当に組合せすることに、かなり任意の応答を得ることができる。任意伝達関数制御装置を使つた場合の制御系の構成は第2.3.28図である。

任意伝達関数制御装置は、アナログ制御装置で遅延回路を用いることによつて構成することができるが、ディジタルで行なえば簡単にソフト上で構成することができる。



第2.3.2 8図

この任意伝達関数制御装置を使用することによつて有限整定応答を実現できる。“〔むだ時間〕＋〔1次遅れ〕”もしくは“〔むだ時間〕＋積分”の特性で近似される場合にはどのようにしたらよいか検討されているので、その結果のみ示す。

a. “〔むだ時間〕＋〔1次遅れ〕”プロセス、すなわち伝達関数で $\frac{e^{-SL}}{1+TS}$ で表わされるプロセスの場合

(i) 目標値の step 変化に対して有限整定にするためには、

$$C'(z)=\frac{\frac{1-dz^{-1}}{1-d^{1-\delta}}}{1-\frac{d-d^{1-\delta}}{1-d^{1-\delta}}z^{-1}-z^{-(k+1)}+\frac{d-d^{1-\delta}}{1-d^{1-\delta}}z^{-(k+2)}} \quad \cdots\cdots (2.3.88)$$

ただし、$L=(k+\delta)\tau$ ，　$d=e^{-T/\tau}$

k：正の整数 ，　τ：サンプリング周期

$0 \leqq \delta < 1$

(ii) 外乱に対して、

$$C'(z)=\frac{\frac{1-d^{k+2}}{(1-d)^2}-\frac{2d-d^{k+2}-d^{k+3}}{(1-d)^2}z^{-1}+\frac{(d-d^{k+2})}{(1-d)^2}dz^{-2}}{1-\frac{1-d^{k+2}}{1-d}z^{-(k+1)}+\frac{d-d^{k+2}}{1-d}z^{-(k+2)}} \quad \cdots\cdots (2.3.89)$$

特に、$k=0$，$\delta=0$ の場合、すなわちプロセスが $\frac{1}{1+TS}$ の場合、目標値に対して有限整定にする場合、(2.3.89)式より、

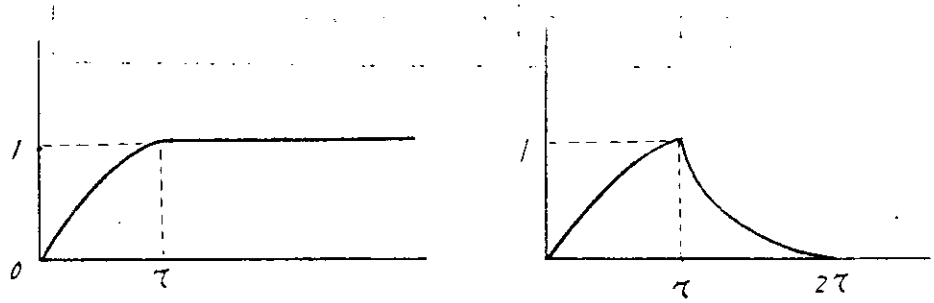
$$C'(z)=\frac{1}{1-d}\cdot\frac{z-d}{z-1} \quad \cdots\cdots (2.3.90)$$

この場合の応答は第2.3.29図(A)となる。

外乱に対しての有限整定にする場合(2.3.89)式より、

$$C'(z)=\frac{1}{1-d}\cdot\frac{(1+d)z-d}{z-1} \quad \cdots\cdots (2.3.91)$$

この場合の応答は第2.3.29図(B)となる。



(A) 目標値変化　　(B) 外 乱

第2.3.29図

b. "〔むだ時間〕＋〔積分性〕"プロセス、すなわち伝達関数 $\frac{e^{-LS}}{TS}$ の場合

(i) 目標値変化に対して有限整定条件

$$C'(z)=\frac{\frac{T(1-z^{-1})}{\tau(1-\delta)}}{1+\frac{\delta}{1-\delta}z^{-1}-z^{-(k+1)}-\frac{\delta}{1-\delta}z^{-(k+2)}} \quad \cdots\cdots (2.3.92)$$

(ii) 外乱の場合に対して有限整定条件

$$C'(z)=\frac{\frac{T}{\tau}\{(k+2)-(2k+3)z^{-1}+(k+1)z^{-2}}{1-(k+2)z^{-(k+1)}+(k+1)z^{-(k+2)}} \quad \cdots\cdots (2.3.93)$$

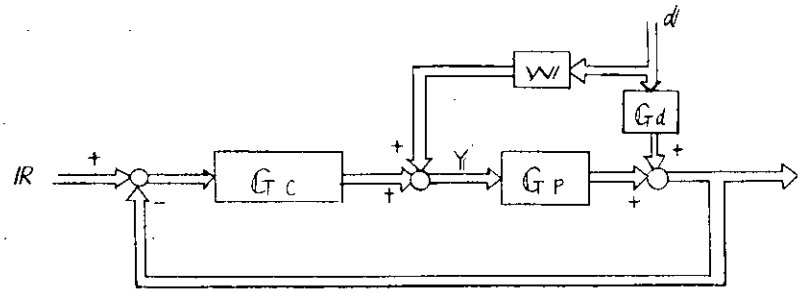
となる。

任意伝達関数装置のパルス伝達関数 $C'(z)$ で示される特性を計算機で構成すればよい。

(6) フィードフォワード制御

外乱の影響を打ち消すために、外乱を検出し、そして制御量に変化が現われる前に、外乱の影響を打ち消すように操作量を操作する方法である。

制御構成第2.3.30図に示す構成である。



R ：設定値ベクトル　　Y ：操作ベクトル
X ：制御変数ベクトル　　d ：外乱ベクトル
G_C ：主制御器マトリックス
W ：フィード・フォワード用制御器マトリックス
G_P ：Yに対するXの伝達関数マトリックス

第2.3.30図

プロセス特性

$$\mathbf{X}=G_P\mathbf{Y}+G_d\,\mathbf{d} \quad \cdots\cdots (2.3.94)$$

制御器特性

$$\mathbf{Y}=G_C(\mathbf{R}-\mathbf{X})+\mathbf{W}\mathbf{d} \quad \cdots\cdots (2.3.95)$$

(2.3.94)、(2.3.95)式より全閉ループの特性は(2.3.96)式となる。

$$\mathbf{X}=\frac{G_PG_C}{1+G_PG_C}\mathbf{R}+\frac{G_d+G_P\mathbf{W}}{1+G_PG_C}\mathbf{d} \quad \cdots\cdots (2.3.96)$$

(2.3.96)式において、

右辺の第1項が設定値変化に対する答、第2項が外乱に対する応答を示す。

第2項の外乱に対する応答を打ち消す方法をフィードフォワード制御という。

そのためには(2.3.97)式を満足するようにWの各要素を決定する。

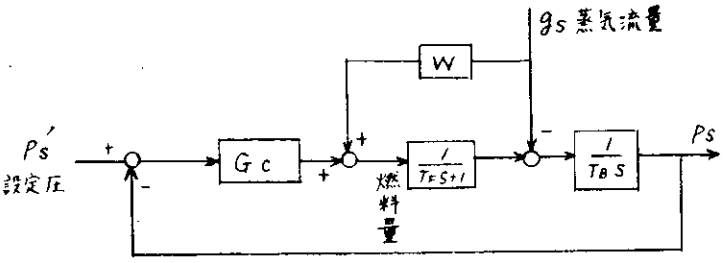
$$G_d+G_P\mathbf{W}=0$$

$$W = -G_p^{-1} G_c \quad \cdots\cdots (2.3.97)$$

(2.3.97)式は、系が複雑になればなるほど、複雑となるので従来のアナログ制御器では設計困難であるが、計算機で構成すれば簡単に構成できる。

なお、(2.3.97)式を完全に満足しなくても、近似的に満足すればよい。フィードフォワード制御の1例としてボイラのACCについて説明する。

ACCの制御系として第2.3.3 1図に示す制御系とする。



第2.3.3 1図

(第2.3.97)式より、系の閉ループの特性は(2.3.98)式となる。

$$P_S = \frac{\dfrac{G_C}{T_B S(T_F S+1)}}{1+G_C \dfrac{1}{T_B S(T_F S+1)}} P_S' + \frac{-\dfrac{1}{T_B S} + \dfrac{1}{T_B S(T_F S+1)} W}{1+G_C \dfrac{1}{T_B(T_F S+1)}} g_S \quad \cdots\cdots (2.3.98)$$

外乱 g_S に対して応答をなくするためには、第2項を零とすればよい。

すなわち、

$$W = T_F S + 1 \quad \cdots\cdots (2.3.99)$$

とすればよい。

フィードフォワード制御器として、P+Dとなるようにすればよい。

参　考　文　献

(a) Dynamic Programing

岡田隆夫　「ダイナミックプログラミングとその応用－Ⅰ」　制御工学　Vol.7　No.11　P.23～29　'63

岡田隆夫　「ダイナミックプログラミングとその応用－Ⅱ」　制御工学　Vol.7　No.12　P.25～31　'63

須田信英　「ダイナミックプログラミングと最適制御」　自動制御技術　自動制御協会12　P.31～55

林　重憲
岡田隆夫　「動的計画法による最適制御系の設計」　制御工学　Vol.7　No.9　P.9～16　'63

(b) Pontryargin 最大原理

Athans, Falb　「Optimal Control」　McGraw-Hill

中　谷訳
和　泉　Liang Tseng Fan著　「最大原理とその応用」　コロナ社　'68

(c) Posicast, Negicast Control

M.G.Nath, A.K.Cloudhury　「Posicast and Negicast Control Systems」
INT.J. Control Vol.9　No.5　P.509～533　'69

高橋安人　「システムと制御」　岩波書店　P.327～329

Googe Gorbatend　「Posicast Control by Delayed Gain」　Control
P.74～77　Feb '65

(d) 任意伝達関数装置

森 政弘 「サンプル値制御」 自動制御 Vol.4 No.3 P.28～38 '57

森 政弘 「ある計算機の過渡応答」 Vol.3 No.1 P.20～33 '56

(e) フィードフォワード制御

Chien 「The Noninteracting Controller for Steam Generating System」 Control Engineering 95／101 Oct.('58)

F.G. Shinskey 「Feed foward Control Applied」 ISA. Journal P.61～65 Nov.'63

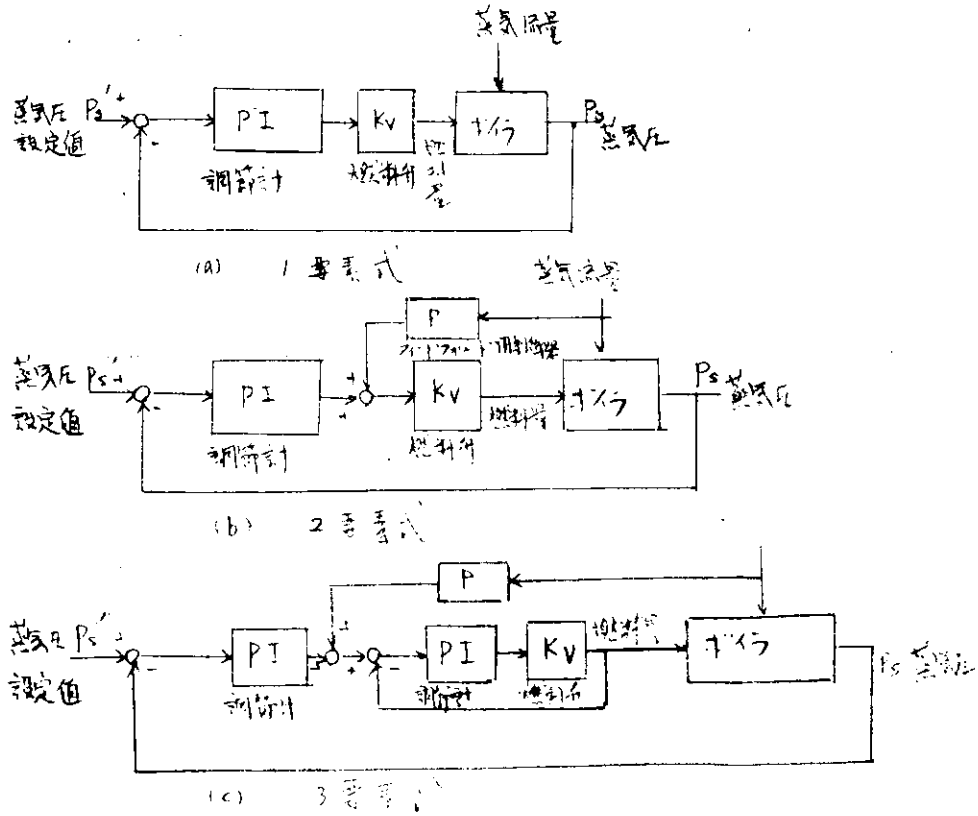
(3) 概念的なタービンプラントへの適用検討

(a) ボイラの燃焼制御系（A.C.C）の最大原理による最適制御

ボイラのA.C.Cの従来のアナログ制御系は、第2.3.3 2図に示すようにPI調節計で構成されている。計算機を利用したDDCを行なう場合、第2.3.3 2図のPI動作で構成した従来の制御系をそのまま置換して制御系を構成しても、制御性の向上は望めないことは明らかである。

現在、蒸気圧力変動に関しては、圧力変動を小さくするように制御性の向上を望まれている。このような制御性の向上を行なうためには、従来のPI動作の制御系でなく新しい制御系で制御性の向上をすることが望まれる。

新しい制御系の構成として、Pontryagin の最大原理（MP）を利用した最適制御を行なう場合の制御系に関して検討を行なう。



第2.3.3 2図

a. ボイラの蒸気圧力動特性の状態変数表示

ボイラの蒸気圧力応答の動特性をS領域で表わすと近似的に（2.3.100）式となる。

なお、給水流量、給水エンタルピの変化による影響は考慮しないで検討する。

$$p(S) = \frac{1}{T_B S (T_f S + 1)} q_f(S) - \frac{1}{T_S S} G_S(S) \quad \cdots\cdots (2.3.100)$$

$p(S)$ ；蒸気圧　　T_B ；ボイラ時定数

$q_f(S)$ ；燃料流量　　T_f ；（燃焼おくれ＋炉内時定数）の一次おくれに近似した時定数

$G_S(S)$ ；蒸気流量　　T_S ；蒸気流量外乱に対する積分時定数

（2.3.100）式を微分方程式で表わすと（2.3.101）式となる。

$$\frac{d^2 p}{dt^2} + \frac{1}{T_B T_f} \frac{dp}{dt} = q_f - \frac{T_B T_f}{T_S} \frac{dG_S}{dt} - \frac{T_B}{T_S} G_S \quad \cdots\cdots (2.3.101)$$

（2.3.101）式を（2.3.102）式のように変換して状態ベクトル式で表わすと、（2.3.103）式となる。

$$\left.\begin{aligned} x_1 &= p \\ x_2 &= \frac{1}{(1+T_f S) T_B} q_f \\ q_f &= u_1 \\ G_S &= u_2 \\ a_{22} &= \frac{1}{T_f}, \quad b_{11} = \frac{1}{T_f T_B}, \quad b_{22} = \frac{1}{T_S} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (2.3.102)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0, & 1 \\ 0, & -a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0, & b_{22} \\ b_{11}, & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad \cdots\cdots (2.3.103)$$

結局、蒸気圧力の最適制御の問題は、（2.3.103）式で表わされる制御対象の最適制御の問題となる。（2.3.103）式において注意しなければならないのは、主制御変数は、x_1 すなわち蒸気圧力で操作変数は u_1 すなわち燃料流量であり、u_2 は外乱変数であつて操作変数でないということである。

b. 最適制御の評価関数

2.3.2(2)(b)項で説明したように、最適制御を行なう際に評価関数として何をとるかが問題である。

評価関数に二次形式として制御変数の設定値 x_d と制御変数 x との誤差の二乗の積分をとつた場合、すなわち（2.3.104）式で表わす J_1 なる評価関数の場合と、

$$J_1 = \int_0^T \alpha (x_d - x_1)^2 dt \quad \cdots\cdots (2.3.104)$$

α ；評価係数

x_d ；蒸気圧力設定値 p'

x ；蒸気圧力 p

制御変数の設定値 x_d と制御変数 x との誤差の二乗と操作変数 u_1 すなわち燃料流量の二乗の和の積分、すなわち（2.3.105）式で表わす J_2 なる評価関数をとつた場合の最適制御について検討を行なう。

$$J_2 = \int_0^T \{ \alpha (x_d - x_1)^2 + \beta u_1^2 \} dt \quad \cdots\cdots (2.3.105)$$

u_1 ；燃料流量 q_f

α, β ；評価係数

後述するが J_1 なる評価関数の場合には u_1 の拘束条件下でのバタバタ動作となり、実施上あらつぽくて好ましくなく切換時刻の計算が面倒であるが、J_2 のように u_1^2 を J の中へ含めると、$|u|$ の大きい値は自ら抑制され結果的に飽和を考慮した最適制御になること、また u_1 をバタバタ動作でなく連続的変化で実施することができるという利点がある。

つぎに、J_1 と J_2 のおのおのについて制御系の検討を行なう。

c．最適制御第１案…… 評価関数 $J_1 = \int_0^T \alpha (x_d - x_1)^2 dt$、終端条件自由の場合

（2.3.103）式で表わされるプロセスにおいて、

初期条件および終端条件は（2.3.106）式で与えられており、

$$\left.\begin{aligned} &x_1(0) = x_{10}, \quad x_2(0) = x_{20} \\ &x_1(T) = \text{自由}, \quad x_1(T) = \text{自由} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (2.3.106)$$

操作変数の拘束条件は（2.3.107）式とする。また、終端到達時間Tは固定とした条件下での最適制御を行なう。

$$-M_1 \leqq u \leqq M_2 \quad \cdots\cdots (2.3.107)$$

この系における（2.3.39）式の Hamiltonian は、（2.3.108）式となる。

$$H = \alpha(x_d - x_1)^2 + p_1(x_2 + b_{22}u_2) + p_2(-a_{22}x_2 + b_{11}u_1) \quad \cdots\cdots (2.3.108)$$

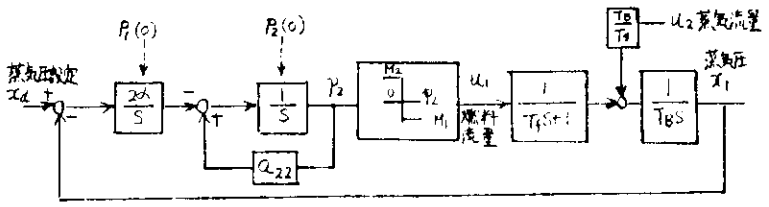
補助変数 p_1, p_2 の微分方程式は（2.3.41）式より（2.3.109）式となる。

$$\left.\begin{aligned} &\dot{p}_1 = -\frac{\partial H}{\partial x_1} \quad \text{より} \quad \dot{p}_1 = 2\alpha(x_d - x_1) \\ &\dot{p}_2 = -\frac{\partial H}{\partial x_2} \quad \text{より} \quad \dot{p}_2 = -p_1 + a_{22}p_2 \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (2.3.109)$$

Hを最小とする最適入力 u_1 はつぎのようである。

$$u_1 = \left\{\begin{aligned} &p_2 > 0 \ : \ u_1 = -M_1 \\ &p_2 < 0 \ : \ u_1 = M_2 \\ &p_2 = 0 \ : \ u_1 = 0 \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (2.3.110)$$

制御系ブロック線図は、第2.3.33図となる。



第2.3.33図

初期条件、$p_1(0)$, $p_2(0)$ は２点境界値問題によつて解かねばならない。なおxの終端は自由であるので p_1, p_2 の終端 $p_1(T) = p_2(T) = 0$ であればよい。ゆえに２点境界値問題としては、$x_1(0)$, $x_2(0)$, $p_1(T) = p_2(T) = 0$ が与えられたもので、式（2.3.109）、（2.3.110）、（2.3.103）を満足する $p_1(0)$, $p_2(0)$ を求める問題である。なお外乱 g_s の変化量は与えられていなければならない。すなわち、u_2, u_3 が与えられたという条件下での計算である。

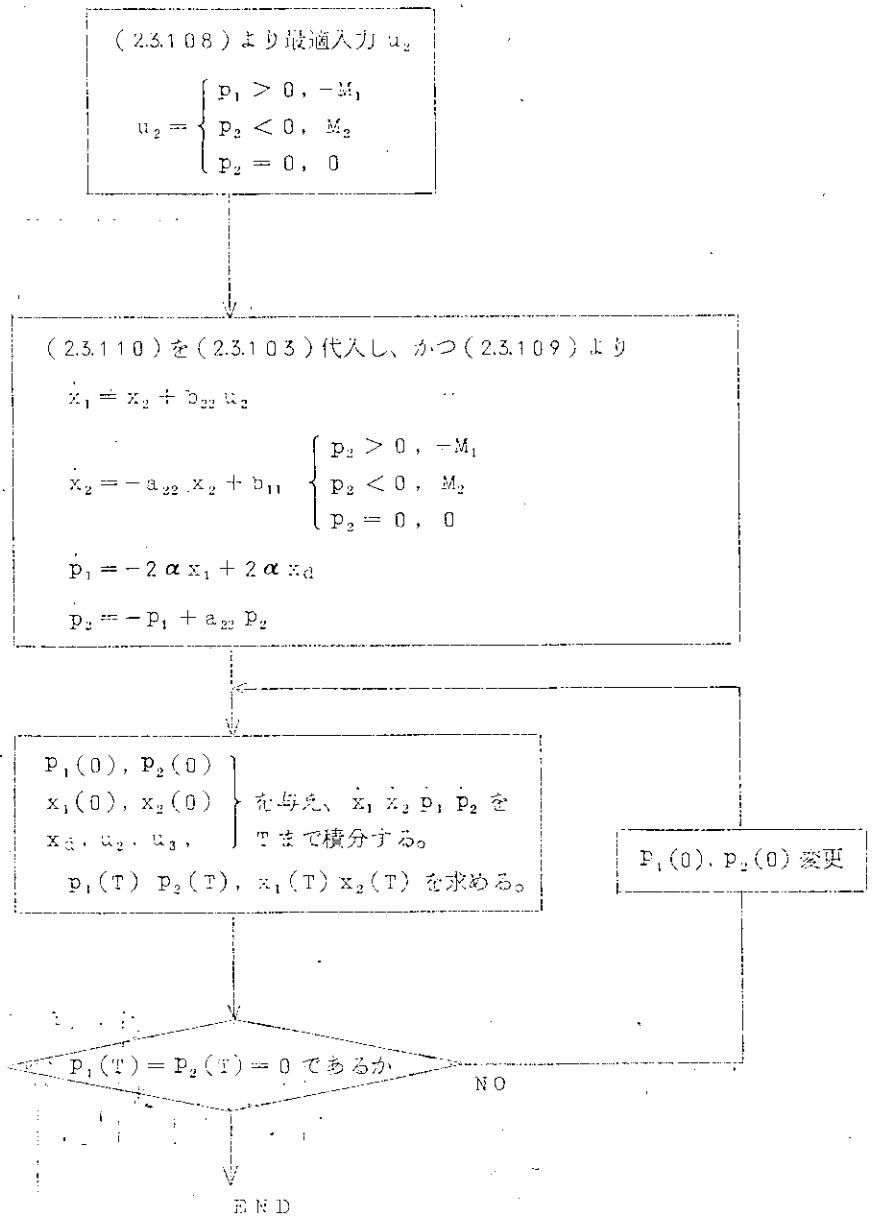
$p_1(0)$ と $p_2(0)$ の計算のフローチャートはつぎのようである。計算された結果の $p_1(0)$, $p_2(0)$ は、$x_1(0)$, $x_2(0)$, x_d, u_2 をパラメータとしてあらかじめ計算機のコアあるいは磁気テープに記憶させておく必要がある。

この制御系での問題点

1）燃料流量がバタバタ動作で不安定である。

2）x_d, u_2, u_3 があらかじめわかつていなければならない。

3）補助変数 p_1, p_2 は不安定である。すなわちブロック線図に示されるように補助関数系内だけで不安定である。



4）最終値 $x_1(T)$, $x_2(T)$ は自由であるため、希望する設定値 x_d と一致するとは限らない。すなわち設定圧力に対してオフセットを持つ状態となる。

問題点に対する対策

1）バタバタ動作に関しては評価関数 J_1 をとる場合には必然的なことで対策なし。

2）x_d, u_2 はアスターンモードを決定しておけばよい。そして最適制御はアスターンのときのみ使用すればよい。

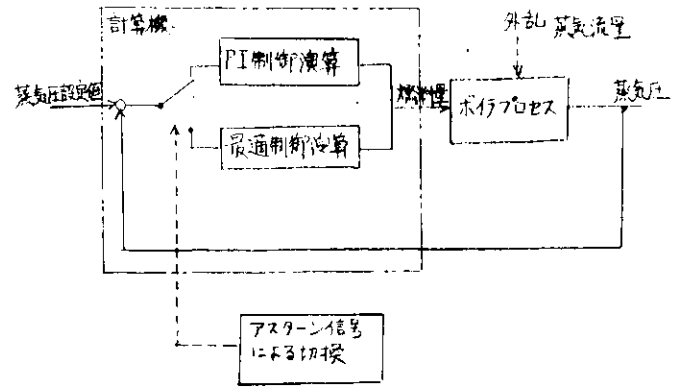
3）補助変数 p_1, p_2 は不安定であるので、時間 $t > T$ のときは $p_1(t) = p_2(t) = 0$ となるようにリセットしノイズがのらないようにすればよい。このことは、ディジタル計算機で行なうのでソフト上で簡単にできる。

4）最終値 $x_1(T)$, $x_2(T)$ が、希望設定値 x_d になるような時間Tおよび評価係数αを選択しなければならない。

$t = T$ の時点で、すべての初期条件に対して $x_1(T) = x_d$ となるようにすることが困難である。そこで、$x_1(T) = x_d$ とならなくても、最適制御を行なつた後に、PI制御系に切換えることによつてオフセットを消去するような制御系に構成すれば、オフセットの問題は解決できる。設計時のプラントパラメータが少し変わつた

り外乱モードが設計時より少し変わることによる最適入力操作の不適により多少最終値が予定するものより違つていても、PI制御系に、t＝T時点で切換えれば最終的にはオフセットをなくすることができる。

要するに、アスターンモードなどのきわられたモードの外乱に対して最適制御を行ない、最終値にオフセットが多少出てもPI制御系に切換えてオフセットをなくしようとすることである。



第2.3.3'4図

制御系の全体の構成は第2.3.3'4図に示す構成である。

d. 最適制御第2案…… 評価関数 $J_2=\int\{\alpha(x_d-x_1)^2+\beta u_1^2\}dt$ 終端条件自由の場合

(2.3.103)式で表わされるプロセスにおいて初期条件および終端条件は(2.3.111)式で与えられており、

$$\left.\begin{aligned} &x_1(0)=x_{10}, \quad x_2(0)=x_{20} \\ &x_1(T)=\text{自由}, \quad x_2(T)=\text{自由} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (2.3.111)$$

操作変数の拘束条件はなく自由であり、また終端到達時間Tは固定とした条件下での最適制御を行なう。

この系の(2.3.39)式のHamiltonianは、(2.3.112)式となる。

$$H=-\alpha(x_d-x_1)^2+\beta u^2+p_1(x_2+b_{22}u_2)+p_2(-a_{22}x_2+b_{11}u_1) \quad \cdots\cdots (2.3.112)$$

ただし、p_1, p_2 は補助変数

補助変数 p_1, p_2 の微分方程式は、(2.3.41)式より(2.3.113)となる。

$$\left.\begin{aligned} \dot{p}_1 &= 2\alpha(x_d-x_1) \\ \dot{p}_2 &= -p_1+a_{22}p_2 \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (2.3.113)$$

Hを最小とする最適入力は、(2.3.44)式より(2.3.114)式である。

$$\frac{\partial H}{\partial u_1}=0 \quad \cdots\cdots (2.3.114)$$

ゆえに、u_1 は(2.3.115)式となる。

$$u_1=-\frac{p_2}{2\beta} \quad \cdots\cdots (2.3.115)$$

補助変数 p_1, p_2 の境界条件は、x_1, x_2 の終端自由より(2.3.116)式となる。

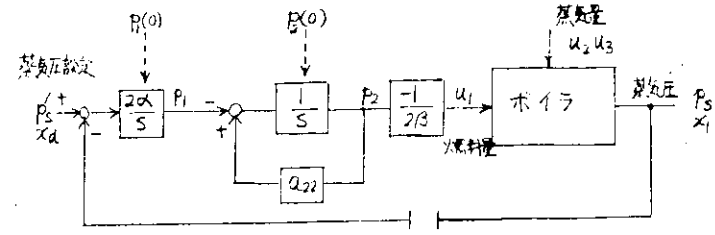
$$p_1(T)=p_2(T)=0 \quad \cdots\cdots (2.3.116)$$

初期条件 $p_1(0)$, $p_2(0)$ は u_2 が与えられ、$x_1(0)=x_{10}$, $x_2(0)=x_{20}$, $p_1(T)=p_2(T)=0$ で、(2.3.103)、(2.3.113)、(2.3.115)式なる二点境界値問題を解くことによつて求めねばならない。

補助変数 P_1, P_2 を使用した制御系は第2.3.3'5図となる。

第2.3.3'3図と第2.3.3'5図の比較より明らかなように J_2 のときは、燃料流量 u_1 がバタバタ動作でなく、連続的変化であり、実用の際便利である。

$p_1(0)$; $p_2(0)$ は、J_1 の場合と同様、$x_1(0)$, $x_2(0)$, x_d, u_2, u_3 をパラメ



第2.3.3'5図

ータにしてあらかじめ計算機のコアあるいは、磁気テープに記憶させておく必要がある。補助変数 p_1, p_2 を使用する場合、u_1 が連続系であるという以外 J_1 と同様の問題があるが、より簡単な制御構成として、J_2 の場合に、補助変数 p_1, p_2 を使用しないで状態変数 x_1, x_2 のフィードバックすなわち蒸気圧および蒸気圧の微分値のフィードバックによつて最適制御を行なうことをつぎに検討する。後述するが、この場合初期条件 $x_1(0)$, $x_2(0)$ に対して、$p_1(0)$, $p_2(0)$ を記憶しておく必要がなくなる。

(2.3.103)、(2.3.111)、(2.3.113)式より、

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{p}_1 \\ \dot{p}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0 & 1 & 0 & -0 \\ 0 & -a_{22} & 0 & -\frac{b_{11}}{2\beta} \\ -2\alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & b_{22} \\ 0 & 0 \\ 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_d \\ u_2 \end{pmatrix} \quad \cdots\cdots (2.3.117)$$

(2.3.117)式をベクトル式で表わすと(2.3.118)式である。

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{p}} \end{pmatrix} = \mathbf{D} \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{p} \end{pmatrix} + \mathbf{C} \begin{pmatrix} x_d \\ u_2 \end{pmatrix} \quad \cdots\cdots (2.3.118)$$

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2]', \quad \mathbf{p} = [p_1, p_2]',$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 0 & b_{22} \\ 0 & 0 \\ 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_d \\ u_2 \end{pmatrix}, \qquad \mathbf{D} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -a_{22} & 0 & -\frac{b_{11}}{2\beta} \\ -2\alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & a_{22} \end{pmatrix}$$

(2.3.118)式をラプラス変換する。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{X}(s) \\ \mathbf{p}(s) \end{pmatrix} = (s\mathbf{I}-\mathbf{D})^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{x}(0) \\ \mathbf{p}(0) \end{pmatrix} + (\mathbf{I}s-\mathbf{D})^{-1} \cdot \mathbf{C} \begin{pmatrix} \mathbf{x}_d(s) \\ u_2(s) \end{pmatrix} \quad \cdots\cdots (2.3.119)$$

ただし、I＝単位マトリックス

$(sI-D)^{-1}$ の各元素をラプラス逆変換(2.3.120)式と表わす。

$$L^{-1}(sI-D)^{-1} = \begin{pmatrix} \phi_{11}(t), \phi_{12}(t), \phi_{13}(t), \phi_{14}(t) \\ \phi_{21}(t), \phi_{22}(t), \phi_{23}(t), \phi_{24}(t) \\ \phi_{31}(t), \phi_{32}(t), \phi_{33}(t), \phi_{34}(t) \\ \phi_{41}(t), \phi_{42}(t), \phi_{43}(t), \phi_{44}(t) \end{pmatrix} = \Phi(t) \quad \cdots\cdots (2.3.120)$$

(2.3.119)式をラプラス逆変換すると(2.3.121)式となる。

$$\begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ p_1(t) \\ p_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_{11}(t), \phi_{12}(t), \phi_{13}(t), \phi_{14}(t) \\ \phi_{21}(t), \phi_{22}(t), \phi_{23}(t), \phi_{24}(t) \\ \phi_{31}(t), \phi_{32}(t), \phi_{33}(t), \phi_{34}(t) \\ \phi_{41}(t), \phi_{42}(t), \phi_{43}(t), \phi_{44}(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(0) \\ x_2(0) \\ p_1(0) \\ p_2(0) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2\alpha \int_0^t \phi_{13}(t-\tau) x_d(\tau) d\tau + b_{22} \int_0^t \phi_{11}(t-\tau) u_2(\tau) d\tau \\ 2\alpha \int_0^t \phi_{23}(t-\tau) x_d(\tau) d\tau + b_{22} \int_0^t \phi_{21}(t-\tau) u_2(\tau) d\tau \\ 2\alpha \int_0^t \phi_{33}(t-\tau) x_d(\tau) d\tau + b_{22} \int_0^t \phi_{31}(t-\tau) u_2(\tau) d\tau \\ 2\alpha \int_0^t \phi_{43}(t-\tau) x_d(\tau) d\tau + b_{22} \int_0^t \phi_{41}(t-\tau) u_2(\tau) d\tau \end{pmatrix} \cdots (2.3.121)$$

（2.3.121）式を（2.3.122）式に書き換える。

$$\begin{bmatrix}\mathbf{x}(t)\\ \mathbf{p}(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\Phi_{11}(t),\ \Phi_{12}(t)\\ \Phi_{21}(t),\ \Phi_{22}(t)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathbf{x}(0)\\ \mathbf{p}(0)\end{bmatrix}+\int_0^t\begin{bmatrix}S_{11}(t-\tau),\ S_{12}(t-\tau)\\ S_{21}(t-\tau),\ S_{22}(t-\tau)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_d\\ u_2\end{bmatrix}d\tau \quad \cdots\cdots \quad (2.3.122)$$

最終端 $x(t)$ を求めると、

$$\begin{bmatrix}\mathbf{x}(T)\\ \mathbf{p}(T)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\Phi_{11}(T),\ \Phi_{12}(T)\\ \Phi_{21}(T),\ \Phi_{22}(T)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x(0)\\ p(0)\end{bmatrix}+\int_0^T\begin{bmatrix}S_{11}(T-\tau),\ S_{12}(T-\tau)\\ S_{21}(T-\tau),\ S_{22}(T-\tau)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_d(\tau)\\ u_2(\tau)\end{bmatrix}d\tau \quad \cdots\cdots \quad (2.3.123)$$

終端 $x(T)$ が自由のとき、$p_1(T)=p_2(T)=0$ であるゆえに、（2.3.123）の下式より、

$\Phi_{22} \neq 0$ のとき、

$$\mathbf{p}(0)=-\Phi_{22}^{-1}(T)\,\Phi_{21}(T)\,x(0)-\Phi_{22}^{-1}(T)\int_0^T\left\{S_{21}(T-\tau)\,x_d(\tau)+S_{22}(T-\tau)\,u_2(\tau)\right\}d\tau \quad \cdots\cdots \quad (2.3.129)$$

ゆえに、初期条件 $p_1(0)$, $p_2(0)$ は J_1 の場合のように二点境界値問題として、try and error の計算を行なわなくても、解析的に（2.3.124）式で初期条件 $x(0)$ と設定値変化 $x_d(t)$ と外乱変化 $u_2(t)$, $u_3(t)$ がわかつていれば、一意的に決定できることがわかる。

（2.3.124）式を（2.3.122）式の $p(0)$ に代入

$$\begin{aligned}\mathbf{x}(t)=&\left\{\Phi_{11}(t)-\Phi_{12}(t)\,\Phi_{22}^{-1}(T)\,\Phi_{21}(T)\right\}x(0)-\Phi_{12}(t)\,\Phi_{22}^{-1}(T)\int_0^T\left\{S_{21}(T-\tau)\,x_d(\tau)+S_{22}(T-\tau)\,u_2(\tau)\right\}d\tau\\&+\int_0^t\left\{S_{11}(t-\tau)\,x_d(\tau)+S_{12}(t-\tau)\,u_2(\tau)\right\}d\tau \quad \cdots\cdots \quad (2.3.125)\\ p(t)=&\left\{\Phi_{21}(t)-\Phi_{22}(t)\,\Phi_{22}^{-1}(T)\,\Phi_{21}(T)\right\}x(0)-\Phi_{22}(t)\,\Phi_{22}^{-1}(T)\int_0^T\left\{S_{21}(T-\tau)\,x_d(\tau)+S_{22}(T-\tau)\,u_2(\tau)\right\}d\tau\\&+\int_0^t\left\{S_{21}(t-\tau)\,x_d(\tau)+S_{22}(t-\tau)\,u_2(\tau)\right\}d\tau \quad \cdots\cdots \quad (2.3.126)\end{aligned}$$

（2.3.125）、（2.3.126）式より、$x(0)$ を消去すると、

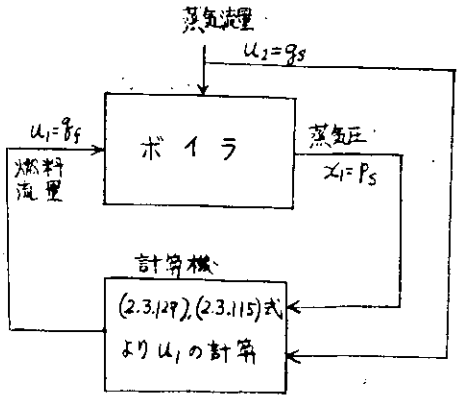
$\Phi_{11}(t)-\Phi_{22}^{-1}(T)\,\Phi_{21}(T)\,\Phi_{12}(t) \neq 0$ のとき、（2.3.127）式となる。

$$\begin{aligned}p(t)=&\frac{\Phi_{21}(t)-\Phi_{22}(t)\,\Phi_{22}^{-1}(T)\,\Phi_{21}(T)}{\Phi_{11}(t)-\Phi_{12}(t)\,\Phi_{22}^{-1}(T)\,\Phi_{21}(T)}\,x(t)\\&+\frac{\Phi_{21}(t)-\Phi_{22}(t)\,\Phi_{22}^{-1}(T)\,\Phi_{21}(T)}{\Phi_{11}(t)-\Phi_{12}(t)\,\Phi_{22}^{-1}(T)\,\Phi_{21}(T)}\Big[\Phi_{12}(t)\,\Phi_{22}^{-1}(T)\int_0^T\left\{S_{21}(T-\tau)\,x_d(\tau)+S_{22}(T-\tau)\,u_2(\tau)\right\}d\tau\\&+\int_0^t\left\{S_{11}(t-\tau)\,x_d(\tau)+S_{12}(t-\tau)\,u_2(\tau)\right\}d\tau\Big]\\&-\Phi_{22}(t)\,\Phi_{22}^{-1}(T)\int_0^T\left\{S_{21}(T-\tau)\,x_d(\tau)+S_{22}(T-\tau)\,u_2(\tau)\right\}d\tau\\&+\int_0^t\left\{S_{21}(t-\tau)\,x_d(\tau)+S_{22}(t-\tau)\,u_2(\tau)\right\}d\tau \quad \cdots\cdots \quad (2.3.127)\end{aligned}$$

（2.3.127）式より明らかなように、$p(t)$ は、$x_d(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$, $\mathbf{x}(t)$ より求められる。すなわち、初期条件 $p_1(0)$, $p_2(0)$, $x_1(0)$, $x_2(0)$ を必要としない。

ゆえに、二点境界値問題を解く必要がなく、状態変数 $\mathbf{x}(t)$ をフイードバックし、かつ u_2, u_3, x_d を検出して（2.3.127）式の演算をするように、計算機で p_2 を計算し（2.3.115）式を使い最適入力を求める。制御系のブロック線図は第2.3.36図となる。

（2.3.127）式の p_2 の計算の際に状態変数 $x_2=\dfrac{dp_S}{dt}$ ＝蒸



第2.3.36図

気圧力の微分値および $u_3 = \frac{d g_S}{dt}$ ＝蒸気流量の微分値は、p_S と g_S の検出値より計算機によつて演算して求める。

$$\left.\begin{aligned} x_2 &= x_1 - b_{22} u_2 \\ x_2 &= \frac{p(t) - p(t-\Delta\tau)}{\Delta\tau} - b_{22} g_S(t) \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (2.3.128)$$

Δt ：サンプル周期

また、決められた $x_d(t)$, $u_2(t)$ についてあらかじめ（2.3.129）式中、

$$\int_0^T \{ S_{21}(T-\tau)\, x_d(\tau) + S_{22}(T-\tau)\, u_2(\tau) \}\, d\tau \quad \cdots\cdots (2.3.129)$$

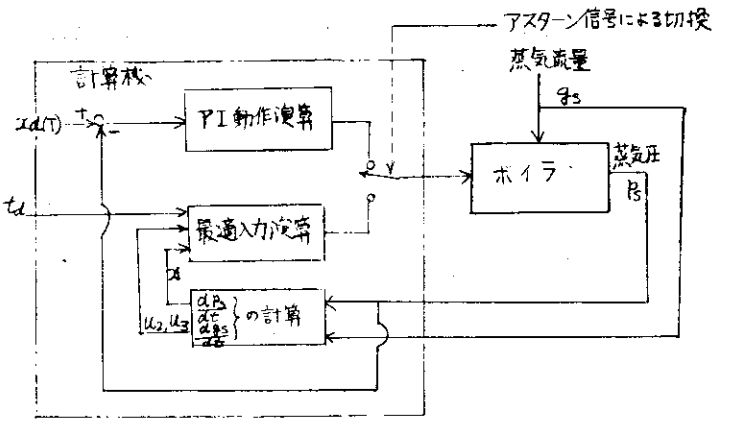
を計算して計算機に記憶しておく必要がある。

問題点および対策

1）$u_2(t)$, $x_d(t)$ すなわち、蒸気流量変化および蒸気圧設定値変化があらかじめ決められていなければならない。アスターン時のみにおいて最適制御を行なうようにして、またこの場合、アスターンモードを決定しておけば、$u_2(t)$, $x_d(t)$ は決められるから問題なし。

2）最終端 $x_1(T)$, $x_2(T)$ が自由であり、希望する設定値 $x_d(T)$ と一致するとは限らない。すなわち希望する設定値近くになるように時間 T および評価係数 α, β を選択しておかねばならない。

$t = T$ の時点で希望設定値 $x_d(T)$ に完全に一致する評価係数を選択することが困難な場合、J_1 の場合の第2.3.34図と同様に、$t = T$ 時点で従来の PI 動作の制御系に切換えればよい。すなわち第2.3.37図のような構成である。



第2.3.37図

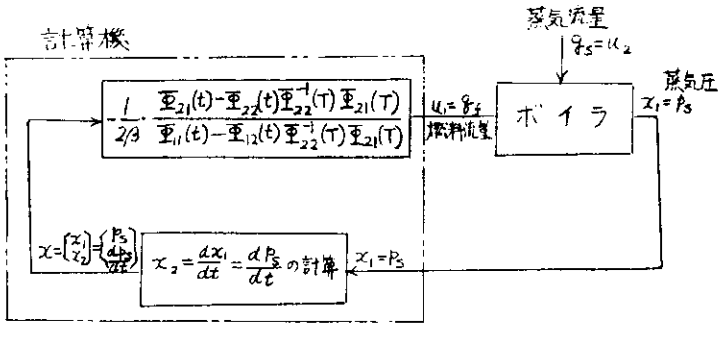
以上においては、外乱 u_2, 設定値 x_d の変化も考慮した場合であるが、$u_2 = x_d = 0$ の場合は比較的簡単な演算によつて $p(t)$ が決定できる。すなわち、（2.3.127）式より、

$$p(t) = \frac{\Phi_{21}(t) - \Phi_{22}^{-1}(T)\,\Phi_{21}(T)\,\Phi_{12}(t)}{\Phi_{11}(t) - \Phi_{22}^{-1}(T)\,\Phi_{21}(T)\,\Phi_{12}(t)}\, \mathbf{x}(t)$$

ゆえに、最適入力 u_1 は（2.3.130）式となる。

$$u_1 = -\frac{1}{2\beta} \frac{\Phi_{21}(t) - \Phi_{22}^{-1}(T)\,\Phi_{21}(T)\,\Phi_{12}(t)}{\Phi_{11}(t) - \Phi_{22}^{-1}(T)\,\Phi_{21}(T)\,\Phi_{12}(t)}\, \mathbf{x}(t) \quad \cdots\cdots (2.3.130)$$

この場合の制御系の構成は第2.3.38図となる。



第2.3.38図

d．最適制御第3案…… 評価関数 $J_2 = \int_0^T \{\alpha(x_d - x_1)^2 + \beta u_1^2\}\, dt$ 終端条件固定の場合

初期条件固定で、終端自由の場合について検討したが、つぎに評価関数は第2案と同じで（2.3.131）式で示すような

境界条件、すなわち初期条件固定、終端固定の場合の最適制御を検討する。ただし、他の入力条件、評価関数はこれまでと同じとする。ゆえに、基本式（2.3.103）、（2.3.113）、（2.3.115）は同じで、xの境界条件は（2.3.131）となる。

$$\left.\begin{aligned} x_1(0) &= x_{10}\,, \quad x_2(0) = x_{20} \\ x_1(T) &= x_{1T}\,, \quad x_2(T) = x_{2T} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (2.3.131)$$

p_1, p_2 の境界条件は、xの境界条件と（2.3.103）、（2.3.113）、（2.3.115）式より求めるのであるが、$x_1(0)\ x_2(0)$, $p_1(0)\ p_2(0)$, $x_1(T)\ x_2(T)$, $p_1(T)\ p_2(T)$ の関係は（2.3.123）式と同じで、かつ、$\mathbf{x}(t)$, $\mathbf{p}(t)$ は（2.3.122）式と同じである。すなわち、

$$\begin{pmatrix}\mathbf{x}(t)\\ \mathbf{p}(t)\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\Phi_{11}(t),\ \Phi_{12}(t)\\ \Phi_{21}(t),\ \Phi_{22}(t)\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x(0)\\ p(0)\end{pmatrix} + \int_0^t \begin{pmatrix}S_{11}(t-\tau),\ S_{12}(t-\tau)\\ S_{21}(t-\tau),\ S_{22}(t-\tau)\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x_d(\tau)\\ u_2(\tau)\end{pmatrix} d\tau \quad \cdots\cdots (2.3.122)$$

$$\begin{pmatrix}\mathbf{x}(T)\\ \mathbf{p}(T)\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\Phi_{11}(T),\ \Phi_{12}(T)\\ \Phi_{21}(T),\ \Phi_{22}(T)\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x(0)\\ p(0)\end{pmatrix} + \int_0^T \begin{pmatrix}S_{11}(T-\tau),\ S_{12}(T-\tau)\\ S_{21}(T-\tau),\ S_{22}(T-\tau)\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x_d(\tau)\\ u_2(\tau)\end{pmatrix} d\tau \quad \cdots\cdots (2.3.123)$$

（2.3.123）式より、 $\det \Phi_{12}^{-1} \neq 0$ ；

$$p(0) = \Phi_{12}^{-1}(T)\,x(T) - \Phi_{12}^{-1}(T)\,\Phi_{11}(t)\,x(0) - \Phi_{12}^{-1}(T)\int_0^T \left\{ S_{11}(T-\tau)\,x_d(\tau) + S_{12}(T-\tau)\,u_2(\tau)\right\} d\tau \quad \cdots\cdots (2.3.132)$$

（2.3.132）式を（2.3.123）式に代入

$$\begin{aligned}\mathbf{x}(t) = {} & \left\{\Phi_{11}(t) - \Phi_{12}(t)\,\Phi_{12}^{-1}(T)\,\Phi_1(T)\right\}\mathbf{x}(0) + \Phi_{12}^{-1}(t)\left[\Phi_{12}^{-1}(T)\,x(T) - \Phi_{12}^{-1}(T)\int_0^T \left\{ S_{11}(T-\tau)\,x_d(\tau) \right.\right. \\ & \left.\left. + S_{12}(T-\tau)\,u_2(\tau)\right\} d\tau\right] \\ & + \int_0^t \left\{ S_{11}(t-\tau)\,x_d(\tau) + S_{12}(t-\tau)\,u_2(\tau)\right\} d\tau \end{aligned} \quad \cdots\cdots (2.3.133)$$

$$\begin{aligned}p(t) = {} & \left\{\Phi_{21}(t) - \Phi_{22}(t)\,\Phi_{12}^{-1}(T)\,\Phi_{11}(T)\right\}\mathbf{x}(0) + \Phi_{22}(t)\left[\Phi_{12}^{-1}(T)\,x(T) - \Phi_{12}^{-1}(T)\int_0^T \left\{ S_{11}(T-\tau)\,x_d(\tau) \right.\right. \\ & \left.\left. + S_{12}(T-\tau)\,u_2(\tau)\right\} d\tau\right] \\ & + \int_0^t \left\{ S_{21}(t-\tau)\,x_d(\tau) + S_{22}(t-\tau)\,u_2(\tau)\,d\tau\right\} \end{aligned} \quad \cdots\cdots (2.3.134)$$

（2.3.134）式を（2.3.133）式に代入

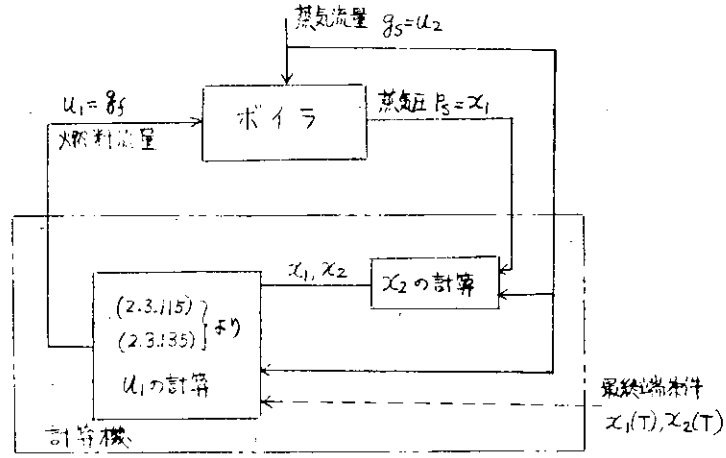
$\Phi_{11}(t) - \Phi_{12}(t)\,\Phi_{12}^{-1}(T)\,\Phi_{11}(T) \neq 0$ ；

$$\begin{aligned}p(t) = {} & \frac{\Phi_{21}(t) - \Phi_{22}(t)\,\Phi_{12}^{-1}(T)\,\Phi_{11}(T)}{\Phi_{11}(t) - \Phi_{12}(t)\,\Phi_{12}^{-1}(T)\,\Phi_{11}(T)}\,x(t) \\ & + \left\{ - \frac{\Phi_{21}(t) - \Phi_{22}(t)\,\Phi_{12}^{-1}(T)\,\Phi_{11}(T)}{\Phi_{11}(t) - \Phi_{12}(t)\,\Phi_{12}^{-1}(T)\,\Phi_{11}(T)}\,\Phi_{12}(t) + \Phi_{22}(t)\right\}\Phi_{12}^{-1}(T)\,\mathbf{x}(T) \\ & + \left\{ \frac{\Phi_{21}(t) - \Phi_{22}(t)\,\Phi_{12}^{-1}(T)\,\Phi_{11}(T)}{\Phi_{11}(t) - \Phi_{12}(t)\,\Phi_{12}^{-1}(T)\,\Phi_{11}(T)}\,\Phi_{12}(t) - \Phi_{22}(t)\right\}\Phi_{12}^{-1}(T)\int_0^T \left\{ S_{11}(T-\tau)\,x_d(\tau) \right. \\ & \left. + S_{12}(T-\tau)\,u_2(\tau)\right\} d\tau - \frac{\Phi_{21}(t) - \Phi_{22}(t)\,\Phi_{12}^{-1}(T)\,\Phi_{11}(t)}{\Phi_{11}(t) - \Phi_{12}(t)\,\Phi_{12}^{-1}(T)\,\Phi_{11}(t)}\int_0^t \left\{ S_{11}(t-\tau)\,x_d(\tau) \right. \\ & \left. + S_{12}(t-\tau)\,u_2(\tau)\right\} d\tau + \int_0^t \left\{ S_{21}(t-\tau)\,x_d(\tau) + S_{22}(t-\tau)\,u_2(\tau)\right\} d\tau \end{aligned} \quad \cdots\cdots (2.3.135)$$

最適入力 u_1 は、

$$u_1 = -\frac{p_2}{2\beta} \qquad \cdots\cdots (2.3.115)$$

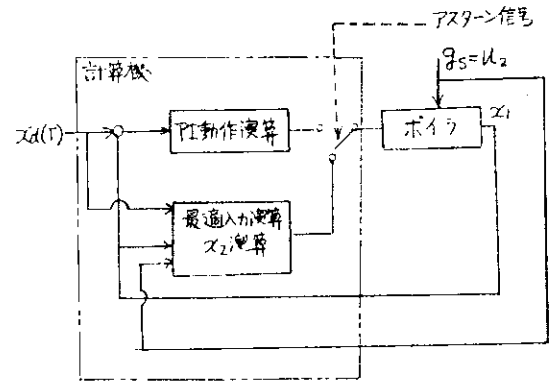
ゆえに、最適入力 u_1 は、（2.3.135）、（2.3.115）式より明らかなように、最終端条件 $x(T)$, $u_2(t)$ がわかつておれば、初期条件に関係なく最適入力を求めることができることがわかる。この場合の制御系の構成は第2.3.39図となる。



第2.3.39図

第2案の最適制御では最終端自由なる制御であるが、第3案の最適制御では最終値を考慮した制御系であり、実用に即していると思われる。ただし、外乱状態すなわちアスターンモードが最初きめていたものより変化すれば、最終値は希望値より異なつてくる。

また、プラントの特性が少し変化することによる最終値が希望値より異なつてくる場合が考えられる。そのときのためアスターンが終了すると $t=T$ 時に、従来の PI 動作の制御系に切換えれば最終的には希望値に追従することができる。この制御系の構成が第2.3.40図である。



第2.3.40図

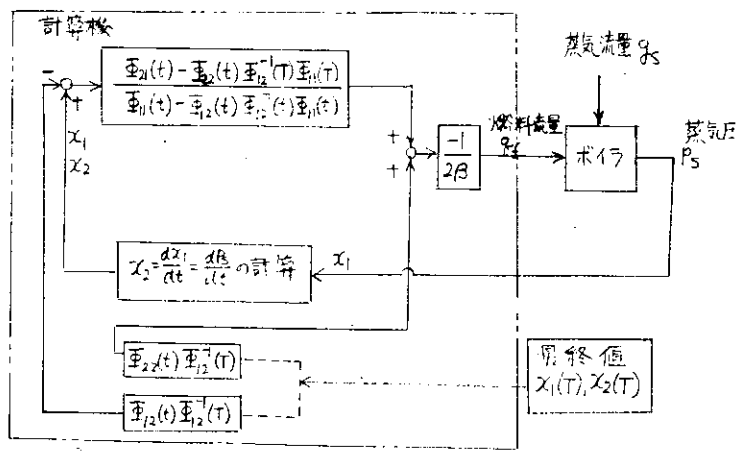
なお、（2.3.135）式中における x_2 は、（2.3.128）式によつて求めねばならない。

決められた $x_d(t)$, $u_2(t)$ について（2.3.135）式中

$$\int_0^T \left\{ S_{11}(T-\tau)\, x_d(\tau) + S_{12}(T-\tau)\, u_2(\tau) \right\} d\tau$$

はあらかじめ計算して記憶しておく必要がある。

$x_d(t)$, $u_2(t)$ に変化がない場合、すなわち $x_d(t)=0$, $u_2(t)=0$ の場合、比較的簡単となる。すなわち（2.3.135）式、（2.3.113）式より（2.3.136）式となる。



第2.3.41図

$$u_1 = -\frac{1}{2\beta}\left[\frac{\Phi_{21}(t)-\Phi_{22}(t)\Phi_{12}^{-1}(T)\Phi_{11}(T)}{\Phi_{11}(t)-\Phi_{12}(t)\Phi_{12}^{-1}(T)\Phi_{11}(T)}\left\{x(t)-\Phi_{12}(t)\Phi_{12}^{-1}(T)x(T)\right\}+\Phi_{22}(t)\Phi_{12}^{-1}(T)x(T)\right] \quad \cdots\cdots (2.3.136)$$

制御系の構成は第2.3.4.1図となる。

まとめ

蒸気圧力制御系（A.C.C）に最大原理を応用した最適制御系について検討を行なつた。検討したものはつぎの3つの最適制御系についてである。

		第1案	第2案	第3案
評価関数		$J_1=\int_0^T \alpha(p_s'-p_s)^2\,dt$	$J_2=\int_0^T\{\alpha(p_s'-p_s)^2+\beta q_f^2\}dt$	$J_2=\int_0^T\{\alpha(p_s'-p_s)^2+\beta q_f^2\}dt$
初期条件		固定端	固定端	固定端
終端条件		自由端	自由端	固定端
終端までの時間		T＝固定	T＝固定	T＝固定
外乱条件		指定	指定	指定
最適制御系を構成した場合	初期条件の考慮	必要	不必要	不必要
	操作変数の動作	バタバタ動作	連続	連続

実用性としては第3案が適切であり、しかも前述したように最適制御終了後はPI動作の制御系に切換えるとよいことがわかつた。

今後検討すべきことは、つぎのようなことである。

1）評価係数 α, β のとるべき値の検討

2）プロセスのパラメータ変化による影響（パラメータ感度）

3）時間Tの決定

4）外乱、モードの変化による影響

5）従来のPI動作による制御系との比較検討

等を検討する必要がある。

なお、フィードフォワードを考慮した最適制御も検討するとよいと考えられる。このような最適制御は給水制御系に応用できる。

(b) ボイラの燃焼制御系（A.C.C）における Posicast Control

蒸気圧設定値の変化に対して系の応答をよくする方法として2.3.2(1)(c)項において説明した Posicast Control を行なう場合について説明する。

ボイラの燃料流量変化に対する蒸気圧応答の近似的な伝達関数は（2.3.137）式となる。

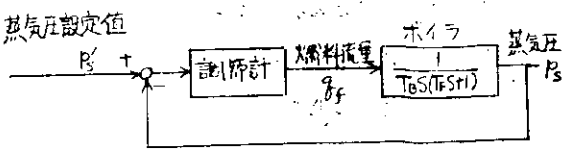
$$\frac{p_s}{q_f}=\frac{1}{T_B S(T_F S+1)} \quad \cdots\cdots (2.3.137)$$

p_s ; 蒸気圧　　q_f ; 燃料流量

T_F ; （燃焼おくれ＋炉内時定数）の1次近似

T_B ; ボイラ時定数

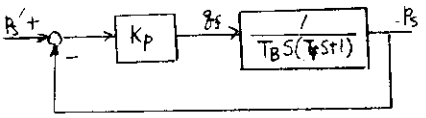
蒸気圧フィードバック制御系の構成は第2.3.4.2図である。



第2.3.4.2図

通常は調節計としてPI動作の調節計で行なわれてきたが、設定値の変化に対して応答をよくしようとするとオーバシュートが大きくなつたり、振動モードが出て来たりする。また、有限整定応答でない。

そこで設定値変化に対して圧力の応答をよくして、しかも有限整定応答を得る方法として Posicast Control を行なう。Posicast Control を行なうことができる簡単な制御系として、蒸気圧設定値に対する蒸気圧の応答の伝達関数が2次系になるように調節計の演算動作をP動作すなわちゲインのみとする。その場合の制御系は第2.3.4 3図に示すブロック線図となる。



第2.3.4 3図

閉ループ特性は(2.3.138)式となる。

$$p_S = \frac{K_p}{T_B T_F S^2 + T_B S + K_p} p_S' \qquad \cdots\cdots (2.3.138)$$

(2.3.138)式より明らかなように、蒸気圧力設定値に対して蒸気圧は整定状態において正しく整定する。これはボイラプロセス自体にある積分特性によるためである(しかし外乱に対してはオフセットが存在する)。

$$p_S = \frac{\frac{K_p}{T_B T_F}}{S^2 + \frac{1}{T_F} S + \frac{K_p}{T_B T_F}} p_S' \qquad \cdots\cdots (2.3.139)$$

$$w_n = \sqrt{\frac{K_p}{T_B T_F}}, \qquad \zeta = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{T_B}{T_F K_p}} \quad とおくと、$$

$$p_S = \frac{w_n^2}{S^2 + 2\zeta w_n S + w_n^2} p_S' \qquad \cdots\cdots (2.3.140)$$

$\zeta < 0.6$ にすると p_S' の変化に対してオーバシュートを持つた振動モードを持つた応答となる。すなわち、$\zeta < 0.6$ になる K_p にして応答を二次振動モードを持つた応答にして、Posicast Control する。方法は2.3.2(2)(c)項で説明したので省略する。

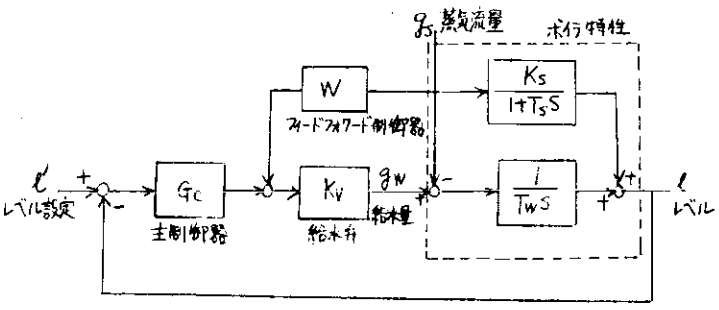
以上説明したように、調節計として演算も簡単な比例ゲインの調節計のみによつて制御系を構成できる点に利点があるが、外乱変化に対してはオフセットができるため、設定値変化のみのときしか使用できないという問題点はある。

(c) ボイラのフィードフォワード制御

2.3.2(2)e項において説明したフィードフォワード制御、すなわち外乱の影響を打ち消すために、外乱を検出しそして制御量に変化が現われる前に外乱の影響を打ち消すように操作量を操作する方法をボイラの制御系に適用する。

蒸気圧制御系について(2)e項について述べたのでここでは述べないで給水制御系について述べる。

給水制御系をブロック線図で示すと第2.3.4 4図である。ただし、ボイラ特性は近似的に表わした。



第2.3.4 4図

レベル応答の開ループ特性は(2.3.141)式となる。

$$\ell = \frac{1}{T_W S} g_W + \left(\frac{K_S}{1+T_S S} - \frac{1}{T_W S}\right) g_S \qquad \cdots\cdots (2.3.141)$$

外乱に対する応答は、逆応答があるので（2.3.141）式に示すように一次遅れ特性と積分特性で近似してこの逆応答特性を示した。

第2.3.44図の閉ループ特性は（2.3.142）式となる。

$$\ell_S = \frac{G_c K_v \frac{1}{T_w S}}{1 + G_c K_v \frac{1}{T_w S}} \ell' + \frac{\left(\frac{K_s}{1+T_s S} - \frac{1}{T_w S}\right) + K_v W \frac{1}{T_w S}}{1 + G_c K_v \frac{1}{T_w S}} g_s \quad \cdots\cdots (2.3.142)$$

蒸気流量外乱に対して影響をなくするためには、（2.3.142）式の第2項を零とするようにフィードフォワード制御器Wを決定する。

$$\left(\frac{K_s}{1+T_s S} - \frac{1}{T_w S}\right) + K_v W \frac{1}{T_w S} = 0 \quad \cdots\cdots (2.3.143)$$

$$W = -\frac{T_w S}{K_v}\left(\frac{K_s}{1+T_s S} - \frac{1}{T_w S}\right)$$

$$W = \frac{1+(T_s - K_s T_w) S}{K_v (1+T_s S)} \quad \cdots\cdots (2.3.144)$$

フィードフォワード制御器としては（2.3.144）式にすれば外乱による影響を打消すことができる。従来は三要素式の給水制御系においては、フィードフォワード制御器としては、P動作のみで行なう場合が多いが、（2.3.144）式のようにすれば制御性は向上される。

蒸気温度制御についても、フィードフォワード制御を使えばよい。

2.3.3 多変数制御系の構成

(1) 概　要

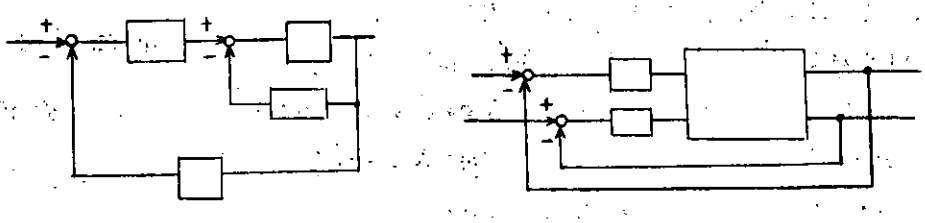
一つの制御対象（システム）において、入力、出力がともに1個の場合に対して、これらが複数個の場合には、1入力、1出力のシステムにはない新しい問題が惹起する。まず、この入、出力とも複数個のシステムを分類してみると下記のごとくなる。

まず、第2.3.45図に示すごとく、

⊙ フィードバックループを2個以上有するものを多ループ系（Multiloop System）

⊙ 操作量または制御量を2個以上含んでいるものを多値系　（Multipole System）

に分類すると、ここでは多値系を取り扱うことになる。



2重ループ系　　2　値　系

第2.3.45図

多値系はさらに第2.3.46図に示すごとく分類される。

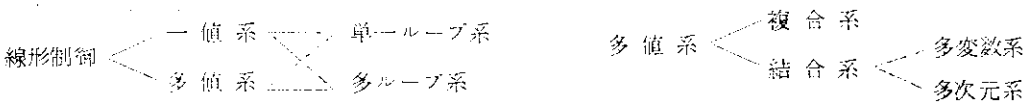
⊙ 複合系（Complex System）；　制御量は2個以上あるが、それぞれ元来独立に制御されているn個の1値系の単なる集合

⊙ 結合系（Coupled System）；　複数個の制御量と操作量の間に結合作用（相互干渉）が存在する系、すなわち、i番目の入力がj番目の出力に影響を与える系

さらに、この結合系はつぎのように分類できる。

⊙ 多次元系（Multidimension System）；結合系において操作量と制御量の数が等しい場合

⊙ 多変数系（Multivariable System）；結合系において操作量と制御量の数が一致しない場合
また、本来制御量の外に操作量の一部が制御量と見なされる系



第2.3.46図

一般に多変数系という場合には、多次元系も含み入、出力とも複数個であり、かつ前進形（入力側から出力側へ干渉を有する）、後退形（出力側から入力側への干渉を有する）のいずれの場合も存在して相互干渉を有することが多い。したがつて多変数系の構成に関しては上記干渉問題がまず主要事項であり、また、1入力1出力のシステムに共通の問題として動特性の改善、さらには安定問題は同様に多変数系においても制御系構成上重要な問題であるのは当然である。

多変数系における干渉問題に着目するときは、つぎの3項が主要検討事項となる。

1）部分的なまたは完全な相互非干渉の実現

2）特定の重要出力が数個の入力と全く無関係（invariant）になる系、つまり系の各所に入つてくるノイズ等の有害信号の影響を完全に取り除くこと。

3）特定の入力と出力の間に希望する関係を打ち立てること。

以上の各事項に対する新しい手法として電算機の利用、新しい制御理論の開発等が研究、実用化されつつあるのが現状である。

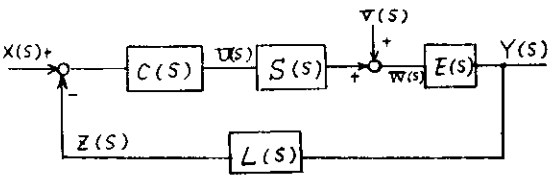
本項においては前述のごとく、線形（Linear）、定係数（Time invariant）な多変数系（Multi-variable System）の構成について記すが、これまでの発展の経過からまずスカラ制御論による入力非干渉について触れ、つぎにベクトル制御理論による動特性の改善および分割制御について触れる。

多変数制御系においては前述のごとく1入力、1出力の系と同様に安定問題等も十分に検討しなければならぬが、ここでは割愛する。

(2) スカラ制御論での検討－1

(a) 検討するシステムの表現

第2.3.47図に示す系を考える。X(s)は入力、Y(s)は出力、U(s)は調節器の出力、V(s)は外乱入力、W(s)は制御対象への入力、またC(s)は調節器の伝達関数、S(s)は調節器で駆動される操作端の伝達関数、E(s)はいま制御しようとする対象の伝達関数、L(s)は検出器の伝達関数で、いずれもラプラス領域で定義されている。



第2.3.47図

このシステムでの諸関係はつぎの4式で表わされる。

$$Y(s) = E(s)\,W(s) = E(s)\,[\,S(s)\,U(s) + V(s)\,] \quad \cdots\cdots (2.3.145)$$

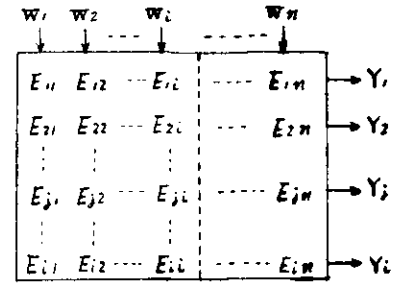
$$W(s) = S(s)\,U(s) + V(s) \quad \cdots\cdots (2.3.146)$$

$$V(s) = C(s)\,[\,X(s) - Z(s)\,] = C(s)\,[\,X(s) - L(s)\,Y(s)\,] \quad \cdots\cdots (2.3.147)$$

$$Y(s) = \frac{E(s)\,S(s)\,C(s)}{E(s)\,S(s)\,C(s)\,L(s)+1}\,X(s) + \frac{E(s)}{E(s)\,S(s)\,C(s)\,L(s)+1}\,V(s) \quad \cdots (2.3.148)$$

このとき対象システムE(s)を第2.3.48図に示す。W_iは対象への入力、Y_iは対象の出力である。また、E_{jk}は入力をW_k、出力をY_jとする伝達関数で、分子分母ともsの多項式である。いま、入力（X）をi個とすると、

$n > i$ であり、このままでは出力（Y）は生きてこない。このため additional な入力 $x(s)$ を W_μ（$\mu = i+1 \sim n$）に対して導入する。また、この $x(s)$ に対応する制御対象への入力 $W_\mu(s)$ の検出器経由後の出力を $R(s)$ とするとき、このとき次式が成立する。



第 2.3.48 図

$$\begin{pmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \\ \vdots \\ U_i(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1i} \\ C_{21} & C_{22} & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ C_{i1} & \cdots & \cdots & C_{ni} \end{pmatrix} \left\{ \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_i \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_i \end{pmatrix} \right\}$$

$$+ \begin{pmatrix} C'_{1\,i+1} & \cdots & C'_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ C'_{i\,i+1} & \cdots & C'_{nn} \end{pmatrix} \left\{ \begin{pmatrix} x_{i+1} \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R_{i+1} \\ \vdots \\ R_n \end{pmatrix} \right\}$$

一般式としては、$U_K(s) = \sum_{\nu=1}^{i} C_{K\nu}(X_i - Z_i) + \sum_{\mu=i+1}^{n} C'_{K\nu}(x_\mu - R_\mu)$ …… （2.3.149）

この（2.3.149）式の対応より **C** は調節器の $i \times n$ 行列、**X** は入力の i 元列ベクトル、**Z** はフィードバック出力の i 元列ベクトル、**C'** は調節器の $n \times n-\overline{i+1}$ 行列、**x** は additional 入力の $n-\overline{i+1}$ 元列ベクトル、**R** は **x** に対応するフィードバック量で $r-\overline{i+1}$ 元列ベクトルである。つぎに検出器の行列を **L** とし調節器の行列を **S** とすると、前述のごとく、$Z_\nu = L_{\nu\nu}(s)\, Y_\nu(s)$，$R_\mu = L_{\mu\mu}(s)\, W_\mu(s)$ であり、$W_k = S_{kk}(s)\, U_k(s) + V_k(s)$ より（$k = 1 \cdots\cdots n$）出力は次式となる。

$$Y_j(s) = \sum_{k=1}^{n} \left\{ \sum_{j=1}^{i} E_{jk}(s)\, S_{kk}(s)\, C_{k\nu}(s) \left[X_\nu(s) - L_{\nu\nu}(s)\, Y_\nu(s) \right] + \sum_{\mu=i+1}^{n} \sum_{jk}(s)\, S_{kk}(s)\, C'_{k\mu}(s) \left[x_\mu(s) - L_{\mu\mu}(s)\, W_\mu(s) \right] + E_{jk}(s)\, V_k(s) \right\}$$

…… （2.3.150）

また、

$$W_k(s) = \sum_{\nu=1}^{i} S_{kk}(s)\, C_{k\nu}(s) \left[X_\nu(s) - L_{\nu\nu}(s)\, Y_\nu(s) \right] + \sum_{\mu=i+1}^{n} S_{kk}(s)\, C'_{k\mu}(s) \left[x(s) - L_{\mu\mu}(s)\, W_\mu(s) \right] + V_k(s)$$

…… （2.3.151）

以上がこの系の一般的な表現である。

これを 5 入力、3 出力のシステムに対して示すと第 2.3.49 図、第 2.3.50 図となる。

(b) 非干渉制御の検討

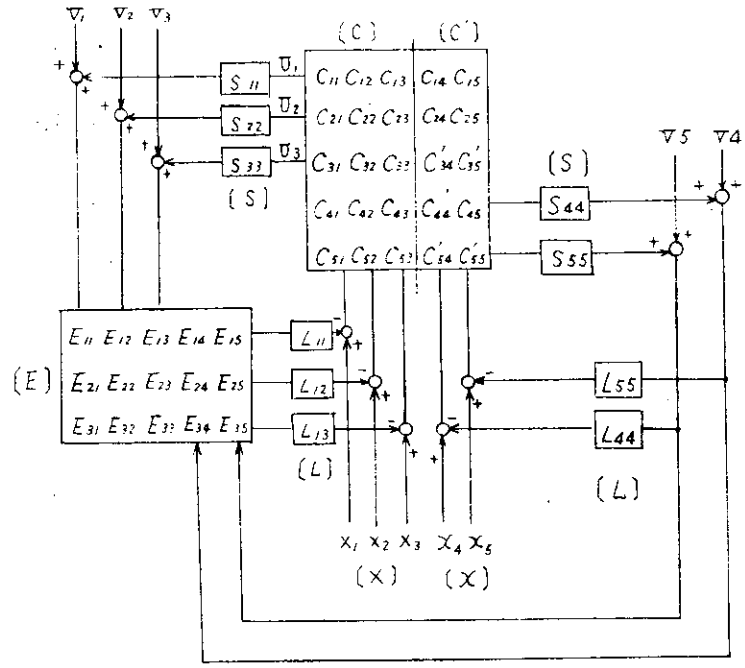
(a)項のシステムにおいて、たとえば入力の非干渉を実現する場合を考える。このとき全システムの構成要素中調節器を除いてその特性が決つているか、または大幅にはその特性を変更できないのが普通であり、調節器 $C_{k\nu}$，$C'_{k\mu}$ をいかに選定するかということになる。このとき $C_{k\nu}$ は X_j より Y_j へ、$C'_{k\mu}$ は x_j より Y_j への効果を表わす。すなわち第 2.3.50 図において調節器を含む左側行列を対角化すればよいことになる。

いま、$n = i \cdots\cdots i$ の中の一つを g として、この出力を Y_g とする。

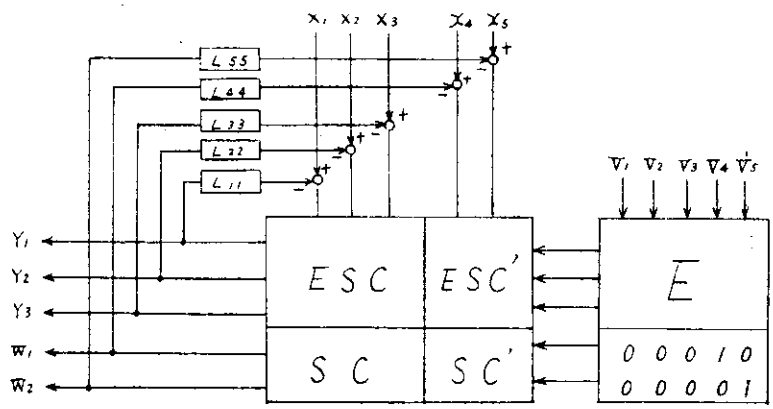
このとき、

$$Y_j(s) = \sum_{k=1}^{n} \left[\sum_{\substack{\nu=1 \\ \nu \neq g}}^{i} E_{jk} S_{kk} C_{k\nu} (X_\nu - L_{\nu\nu} Y_\nu) \right] + \sum_{\mu=i+1}^{n} \left[E_{jk} S_{kk} C'_{k\mu} (x_\mu - L_{\mu\mu} W_\mu) + E_{jk} V_k \right] + \sum_{k=1}^{n} E_{jk} S_{kk} C_{kg} (X_g - L_{gg} Y_g)$$

…… （2.3.152）



第2.3.49図



第2.3.50図

$$W_k(s)=\sum_{\nu=1}^{i}{}_{\nu\neq g} S_{kk}C_{k\nu}(X_\nu-X_{\nu\nu}Y_\nu)+\sum_{\mu=i+1}^{n} S_{kk}C'_{k\mu}(x_\mu-L_{\mu\mu}W_\mu)+V_k$$
$$+\sum_{k=1}^{n} S_{kk}C_{kg}(X_g-L_{gg}Y_g) \quad \cdots\cdots (2.3.153)$$

さて、X_g が Y_g を除いて Y_j，W_μ になんらの影響を与えないためには、(2.3.152)、(2.3.153)式の右辺の末項が $j\neq g$ のとき $(k<i)$ および $k>i$ のとき0であればよい。すなわち、

$$\left.\begin{array}{ll} 1)\ C_{kg}=0 & k>i \\ 2)\ \sum_{k=1}^{n} E_{jk}S_{kk}C_{kg}=0 & j\neq g \end{array}\right| \quad \cdots\cdots (2.3.154)$$

1）の条件より第2.3.149図のシステムにおいては、$i=3$，$n=5$ であるから、

$C_{41}=C_{42}=C_{43}=C_{51}=C_{53}=C_{54}=0$ が得られる。

2）の条件は書き直すと、

$$\sum_{k=1}^{i} E_{jk}S_{kk}C_{kg}=\sum_{k=1}^{i}\delta_{jg}E_{gk}S_{kk}C_{kg} \qquad g=1\sim i \quad \cdots\cdots (2.3.155)$$

$$\delta_{jg} = 0 \qquad j \neq g$$

$$\delta_{jg} = 1 \qquad j = g$$

であり、この式より一つの g に対して $i-1$ 個の線形代数方程式が $S_{kk}\,C_{kg}$ を未知数として得られ、$S_{kk}\,C_{kg}$ の比が求められる。その絶対値はいかにシステムを制御するかということから決められる。

いま、$|E^{*}_{je}|$ を E_{je} の余因子とし、正方行列 E^{*} の行列式を $|E^{*}|$ とおくと、行列式の公式より、

$$\left.\begin{aligned} \sum_{j=1}^{i} E_{jk}\,|E^{*}_{je}| &= 0 \qquad k \neq \ell \\ \sum_{j=1}^{i} E_{jk}\,|E^{*}_{je}| &= |E^{*}| \qquad k = \ell \end{aligned}\right\} \text{が成立する。}$$

（2.3.155）式の両辺に $|E^{*}_{je}|$ をかけて整理すると、

$$\sum_{k=1}^{i}\sum_{j=1}^{i} |E^{*}_{je}|\,\delta_{jg}\,E_{gk}\,S_{kk}\,C_{kg} = \sum_{k=1}^{i}\sum_{j=1}^{i} |E^{*}_{je}|\,E_{jk}\,S_{kk}\,C_{kg}$$

前記公式より、

$$S_{\ell\ell}\,C_{\ell g} = |E^{*}_{ge}| \sum_{k=1}^{i} E_{gk}\,S_{kk}\,C_{kg} \Big/ |E^{*}| \qquad \ell = 1 \cdots\cdots i$$

特に、

$$S_{gg}\,C_{gg} = |E^{*}_{gg}| \sum_{k=1}^{i} E_{gk}\,S_{kk}\,C_{kg} \Big/ |E^{*}| \qquad \cdots\cdots (2.3.156)$$

が得られる。すなわち、次式の関係が一般的に得られることになる。

$$\frac{S_{jj}\,C_{j\nu}}{S_{\nu\nu}\,C_{j\nu}} = \frac{|E^{*}_{jj}|}{|E^{*}_{\nu\nu}|} \qquad j,\nu = 1,2 \cdots\cdots i \qquad \cdots\cdots (2.3.157)$$

この関係より、SCの行列が対角化される。すなわち、$C_{kg} = 0$ $(k > i)$ と（2.3.157）式が非干渉の条件となる。これは必要十分条件でもある。

また、C′ matrix に対する条件も同様な手法で求め得る。結果のみを示せば、

$$\begin{cases} C'_{kr} = 0 & k,r = i+1 \cdots\cdots n \quad (k \neq r) \\ \dfrac{S_{jj}\,C'_{jr}}{S_{rr}\,C'_{rr}} = -\dfrac{1}{|E^{*}|}\displaystyle\sum_{o=1}^{i} |E^{*}_{oj}|\,E_{or} & j = 1 \cdots\cdots i \\ & r = i+1 \cdots\cdots n \end{cases} \qquad \cdots\cdots (2.3.158)$$

である。

以上スカラ制御論による非干渉制御の1例を示したが、このような設計法では入力に対する非干渉は実現できるが、状態変数論からみた場合に極零相殺が発生しており、外乱等により系が乱されると非可制御となっているため無制御の状態になる。したがって、系の初期値＝0の状態であっても十分に注意すべきである。

(3) スカラ制御論での考察－2

(a) 検討するシステムの表現

2.3.2(2)(a)、(b)項において一般的にシステムを表現し、そのシステムに対する非干渉制御について考察したが、一般のシステムを幾種の Canonical form に分類し、それぞれについて干渉の強さ、安定性または非干渉条件を検討する手法も提案されている。以下簡単に本方法の考え方を示す。

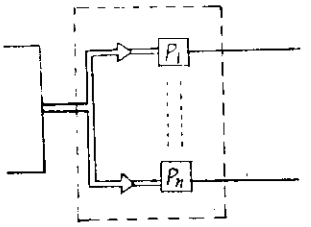
まず提案されている Canonical form はつぎの3種であり、一般に Canonical from にのらないシステムもこれらの Canonical の form variation として処理できる。

a. P－Canonical form

非線形関係も含めて一般的に状次式で表現されるようなシステムで、

$$y_j(t) = f_j\,[\,x_1(t) \cdots\cdots x_m(t)\,]$$

すべての出力は入力のみにより決定される。



線形である場合にはマトリクスにより $\mathbf{y} = \mathbf{P}\mathbf{X}$ と表現される。

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} y_1(t) \\ \vdots \\ y_n(t) \end{pmatrix} \qquad \mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_m(t) \end{pmatrix} \qquad \mathbf{P} = \begin{pmatrix} P_{11} \cdots\cdots P_{1m} \\ \vdots \\ P_{n1} \cdots\cdots P_{nm} \end{pmatrix}$$



である。

b. V-Canonical form

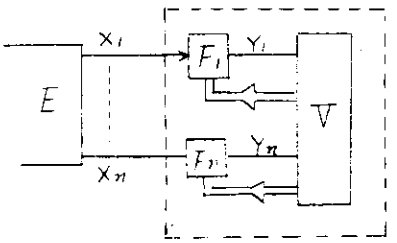
入力、出力数が等しい場合、それぞれの出力は一つの入力と他の出力によりきまるようなシステムで、一般的には次式で表現される。

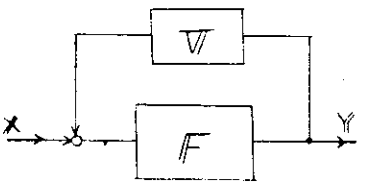
$$y_j(t) = f_j\,[\,x_j(t),\ y_1(t) \cdots\cdots y_n(t)\,]$$

一般的なブロック線図は下図であり、適当なサブシステム $F_1 \cdots\cdots F_n$ と、これに付随するサブシステム V_{jk} から成つている。この V-Canonical form は本来相互干渉を有するシステムであり、サブシステムの一つに変化を生ずると他のすべての要素に変化がおき、かつ出力も変化する。線形の場合には、マトリクスにより、$\mathbf{y} = \mathbf{F}\,[\,\mathbf{X} - \mathbf{V}\mathbf{y}\,]$ と表現される。

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} F_1 & 0 & 0 \cdots\cdots 0 \\ 0 & F_2 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 \cdots\cdots F_n \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} 0 & V_{12} \cdots\cdots V_{1n} \\ V_{21} & 0 \\ \vdots & \ddots \\ V_{n1} \cdots\cdots & V_{nn-1} \quad 0 \end{pmatrix}$$

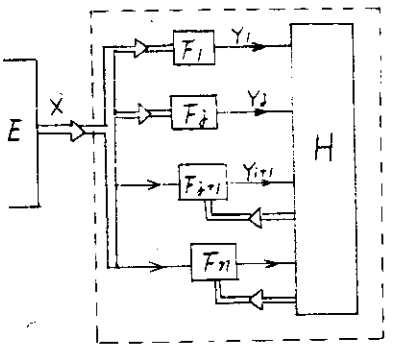




ブロックダイヤグラムでは右図となる。

c. H-Canonical form

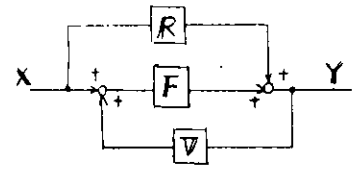
入力、出力数に差がある場合には V-Canonical form では完全にシステムを表現できない。この Canonical form の一部は本来相互干渉を有していない。



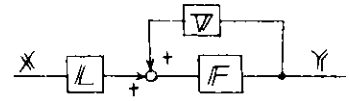
一般式は、

$$y_j(t) = f_j\,[\,x_1(t) \cdots\cdots x_{m-n+1}(t),\ y_j(t) \cdots\cdots y_n(t)\,]$$

線形の場合には、マトリクスにより、$\mathbf{y}=\mathbf{Rx}+\mathbf{F}[\mathbf{x}+\mathbf{Vy}]$ と表現される。



これはさらに、$\mathbf{y}=\mathbf{F}[\mathbf{Lx}+\mathbf{Vy}]$　$\mathbf{L}=\mathbf{F}^{-1}\mathbf{R}+\mathbf{I}$ と表現でき、右図のブロック線図となる。



以上3種の Canonical Form があるが、検討すべきシステムに適合してそれぞれを使用することになる。

(b) 非干渉制御の検討

2変数のシステムに対する P, V－Canonical Form に対する結果を示すと、次表になる。

	V－Form	P－Form	
Feed－Foward Controller	$S_{11}(F_1-1)+1=0$	$S_{11}P_{11}-S_{12}P_{21}=0$	S_{11} は前向き、
	$S_{12}(1-F_2)+V_{12}F_2=0$	$S_{22}P_{22}-S_{22}P_{12}=0$	
	$S_{22}(F_2-1)+1=0$		C_{11} は、フィードバック
	$S_{21}(1-F_1)+V_{21}F_1=0$		
Feed－back Controller	$V_{12}+C_{12}=0$	$P_{11}C_{11}+P_{12}C_{21}=0$	
	$V_{21}+C_{21}=0$	$P_{21}C_{12}+P_{22}C_{22}=0$	
		$P_{21}-P_{11}(P_{21}C_{11}+P_{22}C_{21})=0$	
		$P_{12}-P_{22}(P_{11}C_{12}+P_{12}C_{22})=0$	

この結果より、P－Form に対しては Feed Forward Controller による補償、V－Form に対しては Feedback Controller による補償が有効であることがわかる。すなわち、それぞれ2個の条件で満足できるが、その反対の補償では、それぞれ4個の条件が必要となっている。

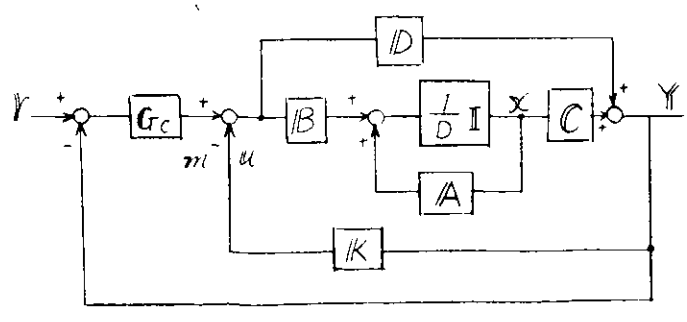
また、それぞれ2個の条件の中でも、V－Form に対する Feedback Controller の場合には2個の Controller で非干渉を満しており、他の Controller は残りのサブシステムの制御に用い得るが、P－Form に対する Feed Forward Controller の場合には、S_{11}, S_{22}の調整を行なうとき、S_{21}, S_{12}も再調整しないと非干渉は実現できない。

以下、一般的に非線形システムを含めて種々の検討結果が示されているが、あくまでスカラ制御論による伝達関数マトリクスを用いる方法であり、2.6.2(2)(a), (b)項に示したような注意が必要であるが、これらの Canonical Form を用いた検討はかなり詳細に検討されているので、対象とするシステムの如何によってはかなり有用な方法であると思われる。

(4) ベクトル制御論による検討

(a) 2次制御マトリクスを用いる方法

第2.5.5.1図に示すシステムを考える。$\mathbf{x}$ はn次の状態ベクトル、$\mathbf{u}$ はr次の入力ベクトル、$\mathbf{y}$ はm次の出力ベクトル、Aはn×nマトリクスで対象を示し、Bはn×rの操作マトリクス、Cはm×nの検出マトリクス、Dはr×mの操作量の出力マトリクスである。



第2.5.5.1図

この n次の線形定常な時の対象は、次式で

示される。

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \qquad \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \qquad \cdots\cdots (2.3.159)$$

このシステムに対して第2.3.51図に示すように2次制御マトリクス$\mathbf{K}$を有するカスケード制御を導入し、主制御マトリクス$\mathbf{G}_c$の出力を$\mathbf{m}$とすれば、外乱を無視するとき、$\mathbf{u} = \mathbf{m} - \mathbf{K}\mathbf{y}$となる。これを(2.3.159)式に代入すると、$\mathbf{D} = 0$とすれば、

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}\mathbf{C})\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{m} \qquad \cdots\cdots (2.3.160)$$

となる。すなわち、2次制御マトリクスの導入により対象マトリクス$\mathbf{A}$を好ましい特性を有するように変更し(一般に非干渉化と動特性改善が同時に実施できる)。この新しい$\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}\mathbf{C}$に対して$\mathbf{G}_c$(対角マトリクス)により入力$\mathbf{r}$と出力$\mathbf{Y}$の間の特性を1変数の場合と同様に求められればよいことになる。

また、外乱については検出可能なものについては前向きの制御マトリクスの導入により簡単に解決でき、第2.3.51図においては信号$\mathbf{m}$に検出後の信号を加算することになるが、これを用いなくとも特性の改善結果如何では外乱に対する応答も十分好ましい形にすることができる。

(b) 理想の場合($\mathbf{D} = 0$または$\mathbf{D} \neq 0$)

(a)項に示す方法において操作端および検出端の数がともにシステム次数nに等しく、さらに$\mathbf{B}$および$\mathbf{C}$の逆マトリクスが存在するようにできるときは(2.3.160)式の$\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}\mathbf{C} = \mathbf{A}_d$として$\mathbf{A}_d$を任意にきめ得る。

(ただし、$\mathbf{m} = 0$) このとき2次制御マトリクスは、

$\mathbf{K} = \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{A} - \mathbf{A}_d)\mathbf{C}^{-1}$ ..... (2.3.161) を解いて求められればよい。

また、$\mathbf{D} \neq 0$のときも同様な演算で $\mathbf{m} = 0$のとき、$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{y}$より、

$$\mathbf{u} = -(\mathbf{I} + \mathbf{K}\mathbf{D})^{-1}\mathbf{K}\mathbf{C}\mathbf{x}$$

$$\mathbf{A} - \mathbf{B}(\mathbf{I} + \mathbf{K}\mathbf{D})^{-1}\mathbf{K}\mathbf{C} = \mathbf{A}_d$$

$$\mathbf{B}^{-1}(\mathbf{A} - \mathbf{A}_d)^{-1}\mathbf{C}^{-1} = (\mathbf{I} + \mathbf{K}\mathbf{D})^{-1}\mathbf{K}$$

両辺に$\mathbf{I} + \mathbf{K}\mathbf{D}$をかければ、 $\mathbf{B}^{-1}(\mathbf{A} - \mathbf{A}_d)\mathbf{C}^{-1} = \mathbf{K} + \mathbf{K}\mathbf{D}\mathbf{B}^{-1}(\mathbf{A} - \mathbf{A}_d)\mathbf{C}^{-1}$

結局、

$$\mathbf{K} = \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{A} - \mathbf{A}_d)\mathbf{C}^{-1}\left\{\mathbf{I} + \mathbf{D}\mathbf{B}^{-1}(\mathbf{A} - \mathbf{A}_d)\mathbf{C}^{-1}\right\}^{-1} \qquad \cdots\cdots (2.3.162)$$

を計算すればよい。

(c) モード領域における検討

一般に$\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$がシステム次数nと同次数であるとは限らない。このためには対象のシステムのモードすなわち、システムの固有応答を求め、この内の主要のものに対しての制御$\mathbf{K}$を行ない、残りのモードに対しては制御$\mathbf{K}$をかける影響をうけずに放置されるような設計が必要となる。

まず、$\mathbf{B}^{-1}$, $\mathbf{C}^{-1}$が存在し、また各次数が等しい場合は、線形変換マトリクス$\mathbf{T}$を用いて、

$\mathbf{x} = \mathbf{T}\mathbf{x}^*$へ変換すると、

(2.3.159)式は、

$$\frac{d\mathbf{x}^*}{dt} = \mathbf{T}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{T}\mathbf{x}^* + \mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}\mathbf{u} = \Lambda\mathbf{x}^* + \mathbf{u}^* \qquad \Lambda = \mathbf{T}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{T}$$

$$\mathbf{u}^* = \mathbf{H}\mathbf{u}$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}$$

また、

$$\mathbf{u}^* = -\mathbf{K}^*\mathbf{x}^* = -\mathbf{K}^*\mathbf{F}^{-1}\mathbf{y} \qquad \mathbf{F} = \mathbf{C}\mathbf{T}$$

2次フィードバック$\mathbf{K}^*$を用いると、指定するΛ_dに対して、

$$\frac{d}{dt}\mathbf{x}' = (A - K')\mathbf{x}' = A_0\mathbf{x}' \quad \cdots\cdots (2.3.163)$$

ゆえに、$K' = A - A_0$ とおり、モード領域での2次制御マトリクスが求まる。

もとの状態空間での制御マトリクス は、

$$\mathbf{K} = -K\mathbf{y} \qquad K = H^{-1}K'F^{-1} = BIK'T^{-1}C^{-1} \quad \cdots\cdots (2.3.164)$$

さて、システムの次数nより少いqという次数に入力ベクトル、検出ベクトルともあるとき、Bは $n \times q$ マトリクス、Cも $n \times q$ マトリクス。したがつて前述のH，FともにB，Cに同形の矩形マトリクスになる。

このときHに関する $q \times q$ 正方マトリクス、Fに関する $q \times q$ 正方マトリクスのほかの元素が0のとき、

$$H = \begin{pmatrix} H_q \\ 0 \end{pmatrix}, \qquad F = (F_q \cdot 0) \quad \cdots\cdots (2.3.165)$$

となり、$|H_q| \neq 0 \quad |F_q| \neq 0$ のときはq個のモードがKにより制御され、残りの $n-q$ 個のモードは無制御になる。

つぎに、入力ベクトル次数がr、検出ベクトルの次数がmのときに、H，Fの正方マトリクス以外の要素が0でないとき、

$$n \times r \text{ マトリクス} \quad H = \begin{pmatrix} H_r \\ \triangle H_r \end{pmatrix}, \qquad m \times n \text{ マトリクス} \quad F = (F_m \ \triangle F_m) \quad \cdots (2.3.166)$$

とあき、$|H_r| \neq 0 \quad |F_r| \neq 0$ が成立すれば、

$$\mathbf{u}' = H\mathbf{u} = -HK\mathbf{y} = -HKF\mathbf{x}' = \begin{pmatrix} I_r \\ \triangle H \end{pmatrix} K' (I_m \ \triangle F)\mathbf{x}' \quad \cdots\cdots (2.3.167)$$

ただし、KおよびK'は $r \times m$ マトリクスで $K = H_r^{-1}K'F_m^{-1}$ で、また、I_r，I_m はともにr次、n次の単位マトリクスである。

このとき $m > r$ ならr個、$r > m$ ならm個のモード制御が可能であるが、残りの $\triangle H$，$\triangle F$ のため制御されるモードと制御されないモードの間に干渉がおこり、制御されるモードの固有値も指定されたとおりにはならない。

このようにH，Fが矩形マトリクスの場合には、近似逆マトリクスを用いて設計する方法もある。いずれにしても、以上の方法では $\triangle H_r$，$\triangle F_m$ が0になるようにB（操作部）、C（検出部）を設計することが望ましいこととなる。

(d) 出力ベクトルからフイードバックによる方法

状態ベクトルxの測定または出力ベクトルyから $\mathbf{x} = C^{-1}\mathbf{y}$ を用いてxの算定が可能であるときは、この状態ベクトルのフイードバックによりフイードバック制システムのすべての固有値を指定することができる。（(b)(c)〜(e)項との差異）

いま、スカラ入力をuとして、システムを $\frac{d}{dt}\mathbf{x} = A\mathbf{x} + \mathbf{b}u$ とし、uを状態ベクトルフイードバックにより、

$$u = K'\mathbf{x} \quad \cdots\cdots (2.3.168)$$

とするとき、 $\frac{d}{dt}\mathbf{x} = A_0\mathbf{x} \qquad A_0 = A - \mathbf{b}K'$ について、

A_0 の固有値をすべて指定して所要の制御マトリクス（n元の行ベクトルK'） をつぎのようにして求め得る。

$$K = (P, A'P \cdots\cdots (A')^{n-1}P) \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & \cdots \\ a_2 & \cdots & \\ \vdots & & \\ a_{n-1} & & \\ 1 & & \end{pmatrix} \quad \cdots\cdots (2.3.169)$$

$$\mathbf{P} = \left(\left[\mathbf{b},\ \mathbf{Ab} \cdots\cdots \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{b} \right] \right)^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \cdots\cdots (2.3.170)$$

（2.3.169）式における右項列ベクトルは下記両特性方程式の係数よりきまる。

$$\left| S\mathbf{I} - \mathbf{A} \right| = a_0 + a_1 S + \cdots\cdots + a_{n-1} S^{n-1} + S^n$$
$$\left| S\mathbf{I} - \mathbf{A}_c \right| = a_{0c} + a_{1c} S + \cdots\cdots + a_{(n-1)c} S^{n-1} + S^n \quad \cdots\cdots (2.3.171)$$

また（2.3.171）式の a_{0c}, a_{1c} …… $a_{(n-1)c}$ は、指定された各固有値 λ_1 …… λ_n から $(S-\lambda_1)(S-\lambda_2)\cdots\cdots(S-\lambda_n) = a_{0c} + a_{1c}S + \cdots\cdots + S_n$ として求めることになる。

一般にベクトル入力 $\mathbf{u}$ についてシステムが可制御なら任状態ベクトルフイードバックによりすべての固有値を指定どおりにすることができるが、電算機を用いる設計公式は、スカラ入力の場合しか求められていない。

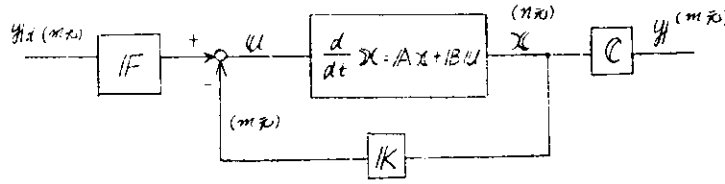
(6) 分割制御（Decoupling Control）の条件

以上の4)(a)～(d)項においては、出力ベクトル $\mathbf{y}$ または状態変数ベクトル $\mathbf{x}$ から状態ベクトルフイードバックによりシステムの固有値すなわち $\mathbf{A}$ マトリクスを任意に設計し、その後第2.3.51図に示す主制御マトリクス $\mathbf{G}_c$ により1変数と同様の制御を行なうように設計することを主眼にしてある。（$\mathbf{G}_c$ は対角行列）

しかし、この状態ベクトルフイードバックにより得られる効果は、外乱等が印加されたとき指定した固有値に基いて、速やかにそれを収束させることに有効であつても、必ずしも非干渉化まで実施できないことも起きてくる。

また、非干渉の考え方はスカラ制御論では(2)(a)および(b)項に記したように、伝達関数マトリクスに対してその制御のマトリクスをこの両者の積が対角マトリクスになるように決定することにあつたが、極零相殺等により可制御性、可観測性が失われることが多い。また、状態ベクトルフイードバックによつても、前述のように $\mathbf{G}_c$ を対角マトリクスと扱う方法では非干渉化できないことも発生する。このため、この状態変数ベクトルフイードバックを用いて非干渉制御を実施する手法として近年分割制御（非干渉制御と同義語）が研究され、一般的な非干渉化のための条件が求められており、以降に示す。

第2.3.52図に示す系において、この内の係数マトリクス $\mathbf{F}$, $\mathbf{K}$ を分割制御可能のようにきめる条件が求められている。



第2.3.52図

この条件はつぎのマトリクス $\mathbf{B}^*$ の逆マトリクスが存在すること、すなわち、

$|\mathbf{B}^*| \neq 0$ である。

$$\mathbf{B}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1' \mathbf{A}^{N_1} \mathbf{B} \\ \mathbf{C}_2' \mathbf{A}^{N_2} \mathbf{B} \\ \cdots\cdots\cdots \\ \cdots\cdots\cdots \\ \mathbf{C}_m' \mathbf{A}^{N_m} \mathbf{B} \end{bmatrix} \quad \cdots\cdots (2.3.172)$$

式中 $\mathbf{C}_1'$, $\mathbf{C}_2'$, $\mathbf{C}_3'$ …… $\mathbf{C}_m'$ は $m \times n$ マトリクス $\mathbf{C}$ のベクトル、また $N_1 \sim N_m$ は $0 \sim (n+1)$ の範囲内にある整数で、その選び方は、

N_1 に対しては、$\mathbf{C}_1' \mathbf{B} \neq 0$ なら $N_1 = 0$　$\mathbf{C}_1' \mathbf{B} = 0$ で $\mathbf{C}_1' \mathbf{A} \mathbf{B} \neq 0$ のとき $N_1 = 1$

一般に $N = 0$ から始めて最初に $\mathbf{C}_1' \mathbf{A}^{N_1} \mathbf{B} \neq 0$ となるような整数を N_1 とする。ただし、$N_1 = (n-1)$ としてもこのベクトルが0のときは $N_1 = (n-1)$ にとる。以下同様に N_2 …… N_m を求める。

つぎに第2.3.52図における $\mathbf{F}$ は、　$\mathbf{F} = (\mathbf{B}^*)^{-1}$

さらにKに関しては、つぎのn×mマトリクスのランク（rank）がすべてのiについて（i＝1，2……m）についてiであることが条件になる。

$$\mathrm{Rank}\begin{vmatrix} C_1'(A-BK)^{\alpha_1-1}B \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ C_1'(A-BK)^{\alpha_1}B \\ 0 \end{vmatrix} = 1 \qquad \cdots\cdots (2.3.173)$$

この方法によれば、一意に分割制御が実施できる必要十分条件が求められることになり、この条件を満足するように、まずB，CまたはKを決定すればよい。

(ｲ) 分割制御の考え方の一例

(ｲ)項に示した条件は分割制御が可能であるための必要十分条件であるが、この状態変数フィードバックと前向きに制御マトリクスによる分割制御の考え方について以下簡単に記す。

対象とするシステムは第2.3.52図に示すものと本質的に同じであり、第2.3.53図に示すように定義する。

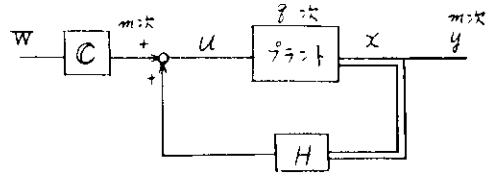
$\mathbf{x}$はq次の状態ベクトル

$\mathbf{x}'$はその内のm次をとったベクトル

αはq次のシステムマトリクス

βはq×mの入力マトリクス

$\mathbf{y}$はm次の出力ベクトル　とするとき、



第2.3.53図

$$\left.\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \alpha\mathbf{x} + \beta\mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{x}' \end{aligned}\right\} \qquad \cdots\cdots (2.3.174)$$

このシステムに対してつぎの状態ベクトルフィードバックおよび前向きの入力を加える。

$$\mathbf{u} = H\mathbf{x} + C\mathbf{W} \qquad \cdots\cdots (2.3.175)$$

（2.3.174），（2.3.175）より式を整理すれば、

$$\dot{\mathbf{x}} = (\alpha + \beta H)\mathbf{x} + \beta C\mathbf{W}$$

$$\mathbf{W} = \mathbf{x}'$$

$\alpha + \beta H = A$，　$\beta C = B$　とおけば、次式となる。

$$\dot{\mathbf{x}} = A\mathbf{x} + B\mathbf{W} \qquad \mathbf{y} = \mathbf{x}' \qquad \cdots\cdots (2.3.176)$$

前項までと同様に入、出力間の decoupling を考えるとシステムの伝達関数マトリクスを対角化することにより得られる。

いま、マトリクスA，B，α，β，C，Hをそれぞれm次の部分とq－m次の部分にわけると、

$$\left.\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}^1 - A^{11}\mathbf{x}^1 - A^{12}\mathbf{x}^2 &= B^{11}\mathbf{W} \\ \dot{\mathbf{x}}^2 - A^{21}\mathbf{x}^1 - A^{22}\mathbf{x}^2 &= B^{21}\mathbf{W} \end{aligned}\right\} \qquad \cdots\cdots (2.3.177)$$

ただし、$\begin{Bmatrix} \alpha^{11}+\beta^{11}H^{11} & \alpha^{12}+\beta^{11}H^{12} \\ \alpha^{21}+\beta^{21}H^{11} & \alpha^{22}+\beta^{22}H \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} A^{11} & A^{12} \\ A^{21} & A^{22} \end{Bmatrix}$

および　$\begin{Bmatrix} \beta^{11}\cdot C^{11} \\ \beta^{21}\cdot C^{11} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} B^{11} \\ B^{21} \end{Bmatrix}$ $\qquad \cdots\cdots (2.3.178)$

したがって、分割制御のための十分条件は（これが(3)(e)項の条件に比して易く、また必要条件が求められていない。）A^{12}が常に0であり、かつA^{11}，B^{11}が対角マトリクスであることである。

いま、β^{11}が正則であれば H，C について解くことができ、

$$\left.\begin{aligned} H^{12} &= -(\beta^{11})^{-1}\alpha^{12} \\ H^{11} &= (\beta^{11})^{-1}(A^{11}-\alpha^{11}) \\ C^{11} &= (\beta^{11})^{-1}B^{11} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (2.3.179)$$

（2.3.179）式より（2.3.178）式を用いて、

$$\left.\begin{aligned} A^{22} &= \alpha^{22}-(\beta^{21})(\beta^{11})^{-1}\alpha^{12} \\ A^{21} &= \alpha^{21}+(\beta^{21})(\beta^{11})^{-1}(A^{11}-\alpha^{11}) \\ B^{21} &= (\beta^{21})(\beta^{11})^{-1}B^{-1} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (2.3.180)$$

したがつて、分割されたシステムは、

$$\left.\begin{aligned} \dot{x}^1 &= A^{11}x^1+B^{11}W \\ \dot{x}^2 &= A^{21}x^1+A^{22}x^2+B^{21}W \\ y &= x^1 \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (2.3.181)$$

また、初期条件を0としたときのラプラス領域では、

$$\left.\begin{aligned} x^1(s) &= K^{11}(s)\,W(s) \\ x^2(s) &= K^{21}(s)\,W(s) \\ y(s) &= x^1(s) \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (2.3.182)$$

ただし、

$$\left.\begin{aligned} K^{11} &= (Is-A^{11})^{-1}B^{11} \\ K^{21} &= (Is-A^{22})^{-1}\{A^{21}+B^{21}(B^{11})^{-1}(Is-A^{11})\}\cdot(Is-A^{11})^{-1}B^{11} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (2.3.183)$$

さらに、（2.3.182）式を用いて、

$$K^{21}(s)=(Is-A^{22})^{-1}\{\alpha^{21}+\beta^{21}(\beta^{11})^{-1}+(Is-\alpha^{11})\}\cdot(Is-A^{11})^{-1}B^{11}$$

このような設計において $\det(I\lambda-A^{11})$ より求められる A^{11} の根が複素平面の左半面にあれば安定であり、これは A^{11} の決定に際して満足できるようにできるが、$\det(\lambda I-A^{22})$ に関しては設計により決定できないことになる。

つぎに、スカラ制御論で示した伝達関数マトリクスを求める方法との比較を示すと、（2.3.176）式のラプラス変換は、

$$\left.\begin{aligned} x^1(s) &= R_1^{-1}(\beta^{11}+\alpha^{12}(Is-\alpha^{22})^{-1}\beta^{21})\,u(s) \\ x^2(s) &= R_2^{-1}(\beta^{21}+\alpha^{21}(Is-\alpha^{11})^{-1}\beta^{11})\,u(s) \\ R_1 &= (Is-\alpha^{11}-\alpha^{12}(Is-\alpha^{22})^{-1}\alpha^{21}) \\ R_2 &= (Is-\alpha^{22}-\alpha^{21}(Is-\alpha^{11})^{-1}\alpha^{12}) \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (2.3.184)$$

であり、開ループの伝達関数は次式となる。

$$y(s) = P^{11}(s)\,u(s)$$

スカラ制御論では、この $P^{11}(s)$ とこれに対する補償要素（調節器）の両者の積が対角マトリクスになるようにきめることであつたが、P^{11} の列式は、

$$\det P^{11} = \frac{\det(\beta^{11})\det(Is-\alpha^{22}+\beta^{21}(\beta^{11})^{-1}\alpha^{12}}{\det(Is-\alpha)}$$

（2.3.180）式を用いて、

$$\det P^{11} = \frac{\det \beta^{11} \det(Is - A^{22})}{\det(Is - \alpha)}$$

すなわち、P^{11}の行列式の零点は $\det \beta^{11} \det(Is - A^{22}) = 0$ である。

したがって、調節器、マトリクスを含めた開ループ伝達関数マトリクスが $|P^{11}| = 0$ が複素右半面において零点を有するとき、この右半面に極を有さないことが必要である。これが発生すると不安定なモードが発生し、これは不可観測となる。

ベクトル制御論において状分割制御の結果、x^2 が不可観測となる。その不可観測モードは $\det(I\lambda - A^{22}) = 0$ にて決まる固有値から求められる。

x^1 に関する伝達関数マトリクスの determinant の分子のSに関する多項式、また入力に関するそれは状態変数フィードバックにおいても不変であり、したがってベクトル制御論による $\det|I\lambda - A^{22}|$ の計算がまず実施すべきであることがわかる。

つぎにベクトル制御論で $\det(\lambda I - A^{22})$ が右半面に零点を有するかまたは β^{11} が正則でないときは完全な非干渉制御は実施できないが、スカラ制御論では一部の制約をつけて開ループの調節器伝達関数マトリクスをきめることが提案されている。

また、右半面に極を有する場合はベクトル制御論で完全に決定できるが、スカラ制御論による方法は非常に複雑になり、右半面に極、零点を有する場合にもベクトル制御論は適用できる。

以上ベクトル制御論による分割制御の考え方につき記したが、2.3.2(2)(a), (b)項または2.3.3(4)(a), (b), (c), (d), (e), (f)項による方法は併用したほうが有用である。たとえば、ベクトル制御論による状態変数フィードバックでシステム特性の改善を実施し、また同時に入力非干渉を実施し、その後伝達関数マトリクスによるスカラ制御論で入力、出力非干渉を計算する等である。

(5) まとめと参考文献

以上スカラ制御論とベクトル制御論による多変数制御系の構成につきその思想を簡単に示したが、実際の系は非線形、変係数系（time-variant）でもあり、特にベクトル制御理論で記システム同定と密接な関係を持ってくる。

また、ここでは主として非干渉制御とそれを含めたシステム特性改善手法につき記したが、安定性、動特性等についても十分な検討が必要になる。一方、スカラ制御論による対角行列化手法も有用であり、対象とするシステムの如何によりその用い方を考慮すべきである。

本項では上記システムの安定性、動特性にはあまり触れなかったが、また Y 運を中心に発展した漸分法の応用である invariance 理論にも触れなかったが、これは特に可変係数のシステムに対しても有用であると思われる。

さらに多変数系の構成としては、たとえば最適化制御、適応制御等を多変数系のシステムとして取り扱う場合もあり、単に非干渉制御を実現し、1入力、1出力システムと同様の手法を使うことを前提としない種々の研究開発がなされている。

非干渉（Nonintoracting, Decoupling）を主体とした文献だけでも、スカラ制御論、ベクトル制御論とも無数の文献があるが、以下主要なものを列挙しておく。

参　考　文　献

1) Tsien　Engineering Cybernetics　Megraw-hill

2) 高橋安人　システムと制御　岩波

3) 〃　自動制御理論　共立

4) 〃　s-t領域における線形多変数制御系の設計　計測と制御 Vol. 7 No.5

5) Mesarovic'　The Control of Multivariable Systems　Tech. press of M.I.T

6) Morgan.	The Synthesis of Linear Multivariable Systems by State-Variable Feedback	IEEE trans on A.C. 1964. Oct.
7) Falb.	Decoupling in the Design and Synthesis of Multivariable Control Systems	IEEE trans on A.C. 1967. Dec.
8) Gilbert.	Controllability and Observability in Multivariable Control Systems	J.S.I.A.M. Control Ser. A. Vol.2 №1 1963
9) Wolovich.	On the Structure of Multivariable Systems	J.S.I.A.M. Control Vol.7 №3 1969
10) Falb.	On the Decoupling of Multivariable Systems	JACC 1967 Preprint. 1967

(6) 既念的なタービンプラントへの適用検討

多変数制御系ですでに述べたごとく多数のプラント変数間の相互干渉を除く非干渉制御、およびこれに伴うシステムの固有応答の改善が目標になる。

たとえば対象とするタービンプラント中の一つのサブシステムであるボイラを例にとれば、

操作量	燃料流量	Q_F	制御量	ドラム水位	L_D
	給水流量	Q_{FW}		過熱器出口圧力	P_{SH}
	減熱器流量	q_{SDI}		過熱器出口温度	T_{SH}
外乱	蒸気取出し量	q_{SH}	給水温度		T_{FW}
	空気温度	T_{AR}	〃 圧力		P_{FW}
	過剰率の変化	Q_{AR}	燃料温度		T_F

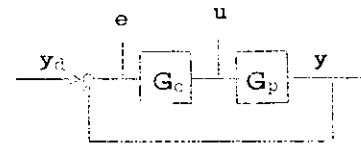
の主要なものの間にはそれぞれの間の transmittance を g_{ij} で表わせば、

$$\left.\begin{aligned} P_{SH} &= g_{11}Q_F + g_{12}Q_{FW} + g_{13}q_{SDI} + g_{14}q_{SH} + g_{15}Q_{AR} \\ T_{SH} &= g_{21}\ 〃 + g_{22}\ 〃 + g_{23}\ 〃 + g_{24}\ 〃 + g_{25}\ 〃 \\ L_D &= g_{31}\ 〃 + g_{32}\ 〃 + g_{33}\ 〃 + g_{34}\ 〃 + g_{35}\ 〃 \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.5.185)$$

の各式が成立する。

在来のアナログ調節計を用いた制御装置では(2.5.185)式の内の各 g_{ij} 中 g_{11}、g_{14}、g_{23}、g_{32}、g_{34} のみを零でないとし、他は零として扱い、かつこれを基にした操作量の決定も単に P.I.D を組み合わせているに過ぎない。

いま、これを前向きに非干渉として簡単に考察すると、



$$\left.\begin{aligned} &\text{プラントの伝達マトリクス} \quad G_p = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{pmatrix} \\ &\text{制御マトリクス} \quad G_c = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.5.186)$$

入力ベクトル $\quad {}^t\mathbf{y}_d = \{\ P_{SHO} \quad T_{SHO} \quad L_{DO}\ \}$

出力ベクトル $\quad {}^t\mathbf{y} = \{\ P_{SH} \quad T_{SH} \quad L_D\ \}$

操作ベクトル $\quad {}^t\mathbf{u} = \{\ Q_F \quad Q_{FW} \quad q_{SDI}\ \}$

としたとき、　$\mathbf{e}=\mathbf{y}_d-\mathbf{y}$，　$\mathbf{y}=\mathbf{G}_p\mathbf{u}$，　$\mathbf{u}=\mathbf{G}_c\mathbf{e}$　より、

$$\mathbf{y}=(\mathbf{I}+\mathbf{G}_p\mathbf{G}_c)^{-1}\mathbf{G}_p\mathbf{G}_c\mathbf{y}_d \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.3.187)$$

が成立し、結局 $\mathbf{G}_p\mathbf{G}_c$ が対角化されればよいことになる。（古典的非干渉論）

すなわち、

$$\mathbf{G}_p\mathbf{G}_c=\begin{vmatrix} g_{11}c_{11}+g_{12}c_{21}+g_{13}c_{31}, & \cdots\cdots, & \cdots\cdots, \\ g_{21}c_{11}+g_{22}c_{21}+g_{23}c_{31}, & \cdots\cdots, & \cdots\cdots, \\ \cdots\cdots, & \cdots\cdots, & \cdots\cdots, \end{vmatrix} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.3.187)$$

にて、非対角要素 $g_{21}c_{11}+g_{22}c_{21}+g_{23}c_{31}=0$，……，……，…… の計6個の式と対角要素に各独立ループとしたときの動特性をきめることで c_{ij} が決定される。

この検討の結果、c_{ij} は g_{lm} の関数であり g_{lm} の個々が求まらないと c_{ij} は決定できないことが明らかであり、また g_{lm} は一般にSに関する多項式の比であるため c_{ij} も単にP.I.Dでないこともわかる。

さらにこのシステムをベクトル制御論的に見れば、まず、

状態方程式　　$\dot{\mathbf{x}}=\mathbf{A}\mathbf{x}+\mathbf{B}\mathbf{u}$

出力方程式　　$\mathbf{y}=\mathbf{C}\mathbf{x}+\mathbf{D}\mathbf{u}$

において状態量$\mathbf{x}$、システムマトリクス$\mathbf{A}$をきめる必要があり、前述の g_{ij} が求まれば相変数を用いたマトリクス$\mathbf{A}$が少なくとも決定でき、さらに任意の$\mathbf{A}$に変換もできる。

このように$\mathbf{A}$マトリクスが決定できれば、たとえば2.3.3(4)(a)項に示す方法にて2次制御マトリクス$\mathbf{K}$を用いて新しい制御ベクトル $\mathbf{u}=\mathbf{m}-\mathbf{K}\mathbf{y}$ をきめると、$\dot{\mathbf{x}}=(\mathbf{A}-\mathbf{B}\mathbf{K}\mathbf{C})\mathbf{x}+\mathbf{B}\mathbf{m}$（mは主制御量マトリクスの出力ベクトル）において、$\mathbf{A}_d=\mathbf{A}-\mathbf{B}\mathbf{K}\mathbf{C}$ なる新しいシステムマトリクス$\mathbf{A}_d$を任意にきめることができる。（$\mathbf{K}=\mathbf{B}^{-1}(\mathbf{A}-\mathbf{A}_d)\mathbf{C}^{-1}$）

すなわちこの場合、各マトリクス、ベクトルの決定を単にアナリシスのみでなく、実測にて決定（システム同定）する必要があるが、システム同定に関する事項は本研究には含まない。したがって今後はこれまでの解析、または実験より得た g_{ij} を基にして検討することになる。

以上よりスカラ制御論、ベクトル制御論のいずれも g_{ij} の中身に立入らないと十分な検討ができないが、前述の簡単なスカラ制御論の非干渉実現においても c_{ij} の構成、およびその演算内容の複雑化を実施するには計算機なしでは実現不能であることは明らかで、いわんやベクトル制御論での分割制御をシステム同定も含めて実施するには絶対に必要になる。

今後の作業の方向として試問題のあるサブシステム、またはそれの上の階層に対して数値を入れて検討することとし、下記の各システム、すなわち、

1）ボイラ（ACC、STC、FWCの相互関連）

2）タービン（ボイラABCとの相互関連）

3）推進プラント（ボイラ、タービン、操縦弁）

を主要な対象とする。

2.3.4　適応制御系の構成

(1)　概　　要

(a)　適応制御とは（最適制御との関連）

制御は人間（生物）が生来的にもっている意図的行為であり、自然現象ではない。その意図的行為の指標とする行動パターンが最適制御である。そしてこの第1義的制御としての最適制御を制御ループ内に、制御行動の完成をねらうのが、適応制御という第2義的制御である。これはさらに、適応＝学習＝知能という見地を発展過程を生じるものであるが、現段階では適応制御がもやっと philosophical な段階が強いというところである。以

上のことをいま少しくわしく分析してみると、一般に自動制御の目的は次のように分類できるであろう。

1）系に特定の変換、伝達特性をもたせる。　（入力への追従、目標への接近）

2）1）の目的を乱すすべての加法性外乱の影響の除去　（外乱影響の抑圧）

3）変動する環境（パラメータ変動、負荷変動）のもとで、1），2）の機能を高度に維持　（環境の克服）

1）はまさしく制御の第1義的な目的で、制御工学の創成期からの主目標で、最適制御はその極限、2）も古くから外乱特性の改善という形で行なわれてきた。3）と2）とが異なるポイントは、2）が加法性信号外乱の影響を問題にしているのに対し、3）はシステムパラメータに変化を与え、系特性を変動させる形で起る環境変動の効果を抑圧することである。この目的に対するのが適応制御である。

適応制御系には、環境の変化を認知する機能 — identification — と、その結果を用いてそれに対応して系の動作が最適になる — optimization — ように、系の構造や動作などを変える機能 — adaptation — を積極的な形で備えねばならない。

一般に適応制御における identification は、系が動作状態のままでそれを大きく乱さないようにして行なわねばならないのが通常である。ところが操業状態では、系には各種のノイズが存在するので、そのため identification の結果が乱されないようなデータ処理が必要である。また逆にノイズを積極的に利用し、それによつて identification を行なうこともできる。

他方、optimization は、系の動作の良否を表す判定基準（評価指数または関数；PI）を設定し、これを最大（小）にすることによつて達成される。

つぎに adaptation の極限の例として、最も貧弱な情報の量、質のもとで、すなわち調整のための制御変数の存在と、PI の測定が可能であることの2つのみを前提として系が常に最適点近傍で運転されるように制御するのが最適化制御と呼ばれ、最も早く実用化された適応制御である。しかし、これは主に静特性の改善に用いられることを目的としているが、これは学習制御による動特性の改善につながりうると考えられる。

以上の所論により一応のしめくくりとしてつぎのことがいえる。

最適制御論では、制御目的1），2）に対し、評価の基準としての評価指数（または関数）を用い、これを最大（小）にするという操作を求めることに帰し、このための制御系を基底制御系という。他方適応制御論では、刻々変動する環境下で、どこまで目的3）を達成させうるか、つまりどこまで適応能力をもたせうるかの目安として、適応性の概念が考えられ、その基礎としてパラメータ感度の概念を重視することがある。

以上で明らかなように、適応制御の概念は大まかにいつて、「制御系が自己のおかれている環境条件 — 目標値、外乱の性質、系を構成するパラメータの状態など — をなんらかの方法で自動的に認知し、その認知された環境条件に最も適するよう制御方式を設計、修正し、あるいは決定して行くような制御系」といえる。

適応制御は自動制御のより高度な目的にかなつた制御方式であるという魅力により、制御理論の発達の当然の帰結として、また計算機の制御への実時間利用への可能性の向上と相まつて、研究者の注目するところとなつている。

(b)　適応制御系の構造と分類

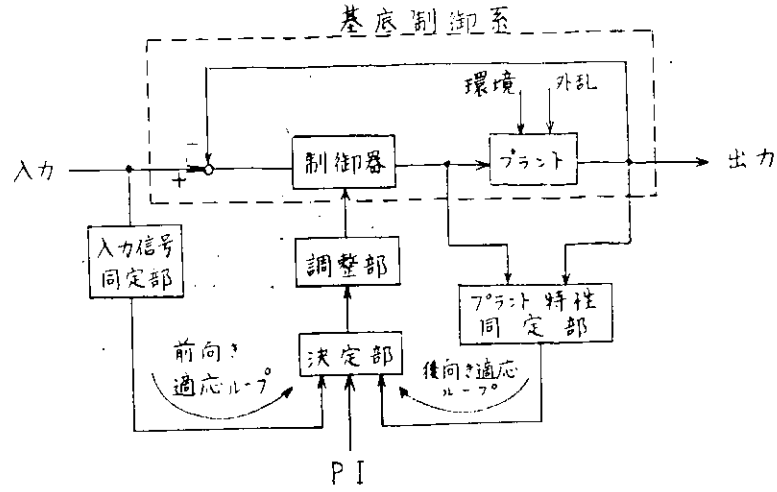
J.G. Truxal による適応系の機能は第2.3.5 4図のごとくで、主たるものは1）同定、2）決定、3）修正。これらをもつループを適応制御系といい、基底系の動作を支配する次元の高い制御ループである。

このような縦構造の（第2.3.5 4図の系の）階層構造性制御システムの制御動作はほとんどの場合非線形動作で、実際問題として、両ループは動作時間のスケールが十分離れていることが望ましい。

図のごとく積極的に入力信号特性、プラント特性を測り、PI と比べて意志決定をし、その結果に基づき修正動作の選択をするといつた人間的動因で進む過程を能動系（Activo Adaptivo Control S.）という。これに対し受動素子の組合せによつて適応ループが作られ適応系全体が受動系として働く場合を受動系（Passivo Adaptivo C.S.）と呼ぶ。

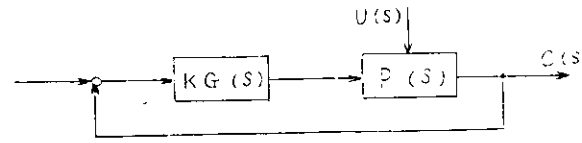
第2.3.5.5図の高ゲイン型適応系は後者の原型で、種々の改良型がある。

能動系で特性測定とそれに続く同定段が、再設計段と明確に分離構成されている。この再設計段階は制御設計理論たとえば最適制御論を用いて制御器の反復設計を行なう。受動系ではこの2段が明確に区別はされていないことが多い。



第2.3.5.4図

以上は適応原理による分類であるが、これを含め現在考えられている分類をつぎに簡単に記す。2.3.4(2)項にも述べるごとく、適応制御の体系がいまだ固定していないし、また将来もそうであろうと思われる。よってここに記す以外のものもありうるしこれらも多面性の一側面についてであるから、複数個の分類にまたがる適応系はいくらでもある。



第2.3.5.5図

適応原理による

1）受動系　　第2.3.5.5，5.8図

2）能動系　　第2.3.5.4，5.9，6.0図

同定対象による　　第2.3.5.4，6.0図

1）プラント動特性同定型：系パラメータ測定型、インパルス応答測定型

2）信号同定型：入力信号同定型、出力信号同定型、偏差信号同定型

調整因子による

1）パラメータ調整型　　第2.3.5.4図

2）制御信号算定型

調整動作の形態による

1）連続型：パラメータ連続修正型、パラメータ摂動修正型　　第2.3.6.6図

2）不連続型：離散的計算型、試行探索型

技術的手段による

1）高ループゲイン型　　第2.3.5.5，5.8図

2）標準型

3）モデル規範型（Model Reference Type）　　第2.3.5.6，5.9図

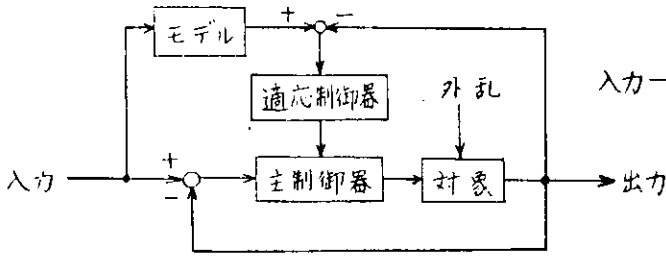
4）最適適応型　　第2.3.5.7図

行動形態による

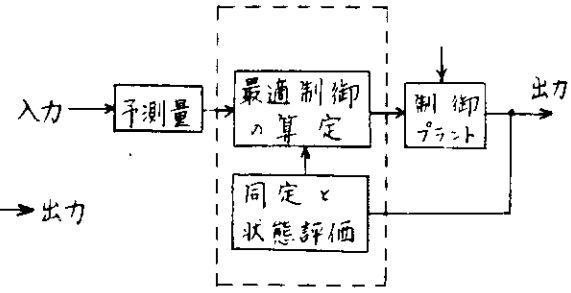
1）実時間的自動設計系（Real-time self-redesigning）

2）試行的山探索系（trial and error type hill climbing）　　第2.3.6.6図

1）は以上設計を実時間自動設計におきかえるもので、設計に必要な情報はすべて既知としているから問題の定式化、行動形態の選択、行動過程の起こし、行動の評価などすべて理論的に進めうる。



第2.3.56図　モデル規範型



第2.3.57図　最適適応制御系

2）は環境およびプラントの詳細な情報が未知の場合に、基底制御系に対する直接操作対策に基づき試行探索により登頂する。この方法は将来、より高次な発展が期待されるもので、特に詳しく述べると、システムをブラックボックスとし、パラメータ変動などのミクロな変動を把えないで、環境変動によつて起る外部的変化、すなわち観測可能な量間の操作を選定する。系の受ける外見的行動の変化のみに注目し、それを直接的に改善するための操作対策を探す。

exact な理論的設計でなく、試行的手段による方法論的繰返し設計、たとえば極値探索などである。

この線上に学習制御系や、自己構成系が登場する。これは情報の少ない poorly known system に対する広義の適応制御方式であるといえる。

このように適応制御と学習制御とは不可分な体系にある。よつてまた参考文献も2.3.5項学習制御巻末にまとめて記載する。

(2) 各　論

適応制御理論の体系化は非常に不十分かつ困難で、その理由は概ね下のようである。

1）概念が先に立つて理論構成があとになり、一方系は各個に開発された。

2）階層システムであるから非線形系となるのが殆んどの場合である。

3）環境変動に追従するのが目的であるから当然時変系である。

ゆえに、既述の分類からも想像されるように、理論はきわめて即物的である。以下に挙げる過去の発表例もきわめて非系統的である。

(a) 受動的適応系

フイードバックループで、ゲインの高い高ゲイン系は受動系の代表的なものである。ループゲインを大きくするほどパラメータ変動の影響を受けにくくなるが、反面不安定になり易い。設計のポイントは変動影響の抑制と安定性との妥協のとり方である。

したがつて、パラメータ感度が特に受動的適応系の設計には大きな影響を及ぼす。プラントの Identification が正確で、かつ不変型ならばそれをもとにして設計された基底制御系の最適状態はよく維持されるはずである。しかし、実際にはこの二つはともに満足し得ないので、適応制御での optimization の方法としては、いわゆる最適制御理論のそのままではなく、PI のパラメータ変動に対する感度をも考慮に入れることが必要で、この目的のための解析手段として感度解析法がある。

Tomovic′ の感度係数について略述すると、

系の方程式がパラメータ a_0 を含むとき、

$F(\ddot{x}, \dot{x}, x, t; a_0) = 0$　　；この解は　$x(t; a_0)$

a_0 が $\triangle a$ だけ変動すると、

$F(\ddot{x}, \dot{x}, x, t; a_0 + \triangle a) = 0$　；この解は　$x(t; a_0 + \triangle a)$

a_0 の変動に対する x の変化の割合をパラメータに対する感度または感度係数といい、

$$u(t\,;a_0)=\lim_{\triangle a\to 0}\frac{x(t,a_0+\triangle a)-x(t,a_0)}{\triangle a}=\frac{\partial x(t\,;a_0)}{\partial a_0}$$

$\frac{dF}{da_0}=0$ より、つぎの感度方程式をうる。

$$\frac{\partial F}{\partial \dot{x}}\ddot{u}+\frac{\partial F}{\partial \dot{x}}\dot{u}+\frac{\partial F}{\partial x}u=-\frac{\partial F}{\partial a_0}\quad;\ \ddot{u}=\frac{\partial \ddot{x}}{\partial a_0},\ \dot{u}=\frac{\partial \dot{x}}{\partial a_0}$$

u は $F=0$ と、これとを連立して求まる。

これより、出力変動 $\triangle x$ は、

$$\triangle x(t)\cong u(t\,;a_0)\cdot\triangle a \qquad \cdots\cdots (2.5.188)$$

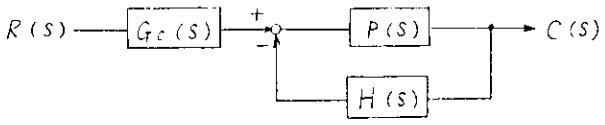
多パラメータ系でも同様に、どのパラメータがどれほど出力に影響を与えるか知ることができ、その結果を用いて、ある調整不能なパラメータの変動による出力変動を他の調整可能なパラメータにより補償することなどが可能となる。

つぎに、(2.5.188)式を逆に使い $\triangle x$ を測れば、これより $\triangle a$ を算出でき、パラメータ(すなわち系の)変化が推定できる。a_0、……、a_n なる多パラメータ系では、一つの $\triangle x(t)$ に対し、これを生ぜしめるパラメータ変動の組($\triangle a_0$、……、$\triangle a_n$)を知る必要があり、これには $n+1$ 回の試行が必要である。

このようにして、適応ループの設計が完成し(また、このループの動作を調べることにより)パラメータ変動に対する PI の変化割合 $\frac{\partial(PI)}{\partial a_0}$ などを知ることができ、これが Adaptation を行なうための1情報となる。

(例) I.M. Horowitz の系

元の全伝達特性 $T(s)=\frac{G_c P_0}{1+P_0 H}$ と、つぎに記す感度 S_P^T とを独立して設計することを考え、



第2.3.58図

なお、プラント特性が P_0 から $P=P_0+\triangle P$ に、全伝達特性が T_0 から $T=T_0+\triangle T$ に変るとすると、

$$S_P^T=\frac{\frac{\triangle T}{T}}{\frac{\triangle P}{P}}\cong\frac{P}{T}\frac{\partial T}{\partial P}=\frac{1}{1+G_c P_0}$$

ここに、$G_c(s)$、$H(s)$ は自由に選らべる二つの補償要素で、この系を2自由度系と呼ぶ。

$$\therefore G_c=\frac{T_0}{S_P^T P_0}$$

$$H=\frac{1}{S_P^T}-\frac{1}{P_0}$$

与えられた S_P^T に対して、$H(s)$ を選び、指定された T_0 に対して $G_c(s)$ を設計できる。

なお、$|P_0|$ を大きくすると、S_P^T は小さくなること、安定性が問題となることなど従前に述べたとおりである。

(b) モデル規範型

(例) Donalson の系

仮定
- 2次遅れ対象パラメータ a_1、a_0 の時間的変化の速さは、制御対象、モデルの時定数や、調節部のパラメータ h_1、h_0 より遅るかにおそい。
- 調節機構の動作は入力 $r(t)$ によつて生ずる PI の変化に比し十分遅い。
- 出力 $c(t)$ の1次および2次微分は測定できる。
- PI としては、$\varepsilon(t)=c(t)-y(t)$ に対し、$f(\varepsilon)=\frac{1}{2}(q_0\varepsilon+q_1\dot{\varepsilon}+q_2\dot{\varepsilon}^2)$ をとる。

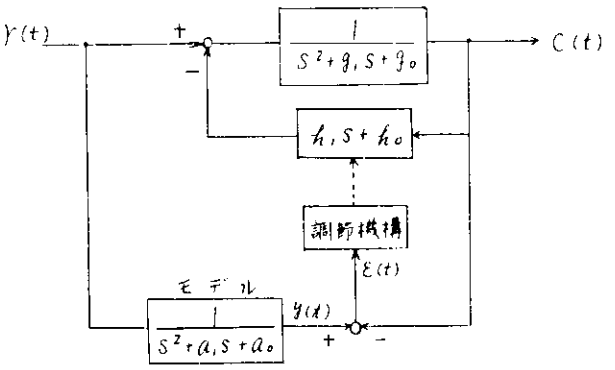
基底制御系の伝達特性は、

$$\frac{1}{s^2+(g_1+h_1)s+(g_0+h_0)}$$

$$=\frac{1}{s^2+\alpha_1 s+\alpha_0}$$

モデル規範型ゆえ目標は、$\alpha_1 \to a_1$, $\alpha_0 \to a_0$ である。

修正過程を最急降法によるとすると、α_1, α_0 の修正速度は、



第2.3.59図

$$\dot{\alpha}_1 = -k\frac{\partial f(\varepsilon)}{\partial \alpha_1} \fallingdotseq -k\frac{\partial f(\varepsilon)}{\partial a_1}$$

$$= -k\left(\frac{\partial(c-y)}{\partial a_1}q_0+\frac{\partial(\dot{c}-\dot{y})}{\partial a_1}q_1+\frac{\partial(\ddot{c}-\ddot{y})}{\partial a_1}q_2\right)(q_0\varepsilon+q_1\dot{\varepsilon}+q_2\ddot{\varepsilon})$$

$$\fallingdotseq k\left(\frac{\partial y}{\partial a_1}q_0+\frac{\partial \dot{y}}{\partial a_1}q_1+\frac{\partial \ddot{y}}{\partial a_1}q_2\right)(q_0\varepsilon+q_1\dot{\varepsilon}+q_2\ddot{\varepsilon})$$

ここで、$\dot{\alpha}_1 \cong \dot{h}_1$, $\frac{\partial y}{\partial a_1}=u_1$, $\frac{\partial \dot{y}}{\partial a_1}=\dot{u}_1$ などを用いると、

$$\dot{h}_1 = k(q_0\varepsilon+q_1\dot{\varepsilon}+q_2\ddot{\varepsilon})(u_1q_0+\dot{u}_1q_1+\ddot{u}_1q_2)$$

同様に、

$$\dot{h}_0 = k(q_0\varepsilon+q_1\dot{\varepsilon}+q_2\varepsilon)(u_0q_0+\dot{u}_0q_1+\ddot{u}_0q_2)$$

つぎにモデルの式

$\ddot{y}+a_1\dot{y}+a_0y=r$ を用いて、

$$\frac{\partial r}{\partial a_1}=0=\frac{\partial \ddot{y}}{\partial a_1}+\frac{\partial}{\partial a_1}(a_1\dot{y})+\frac{\partial}{\partial a_1}(a_0y)$$

$$=\ddot{u}_1+(\dot{y}+a_1\dot{u})+\left(\frac{\partial a_0}{\partial a_1}y+a_0u\right)$$

$$=\ddot{u}_1+a_1\dot{u}_1+a_0u_1+y$$

$$\therefore \ddot{u}_1+a_1\dot{u}_1+a_0u_1=-\dot{y}$$

同様に、

$$\ddot{u}_0+a_1\dot{u}_0+a_0u_0=-y$$

以上の関係より、y, $\dot{y}$ を与え、u_1, u_0 を求め、ε, $\dot{\varepsilon}$, $\ddot{\varepsilon}$ を測定して $\dot{h}_1$, $\dot{h}_0$ を求めることにより制御装置を修正することに帰着する。

調節パラメータを変えるのでなく、加法的に修正制御を行なう方法として Resnick のものが挙げられる。

(c) 動特性同定型

これの代表的なものとして Anderson 他の系について例示する。

（例） Anderson, Buland, Coopor の系

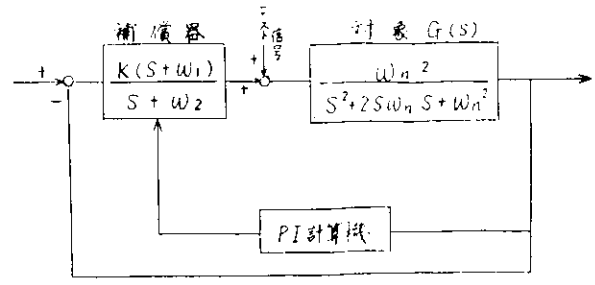
2次対象の特性変動を補償器の極（$-\omega_2$）と零点（$-\omega_1$）の位置を調節することによつて補償しようとする適応制御系である。

PI としてインパルス応答に関する量で、正なる部分の面積 A_+ と負なる部分の面積 A_- とでつぎを定義する。

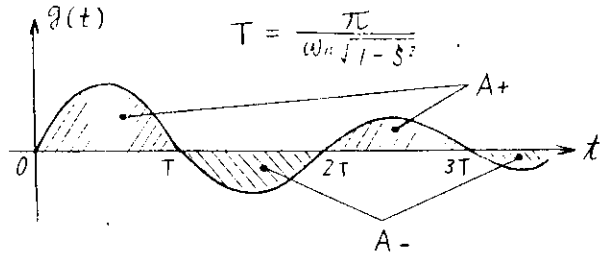
$PI = A_+ - kA_-$ （第2.3.61図）

G(s) のインパルス応答

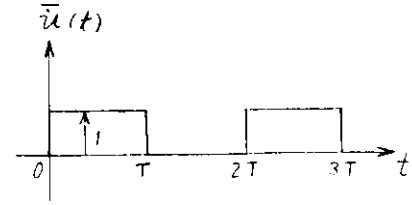
$$g(t) = \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}\, t)$$



第2.3.60図



第2.3.61図



第2.3.62図

K は系の希望の $\zeta = \zeta_d$ が得られたときの PI = 0 となるように選ばれる。

$$A_+ = \int_0^\infty g(t)\,\bar{u}(t)\,dt = \int_0^\infty f(t)\,dt = F(s)\,|_{s=0} = F(0)$$

$$\because \begin{cases} F(s) = L\,g(t)\,\bar{u}(t) = L\,f(t) \\ \bar{u}(t) = u(t) - u(t-T) + u(t-2T) - \\ v(s) = L\{\bar{u}(t)\} = \frac{1}{\zeta} - \frac{1}{\zeta}e^{-sT} + \frac{1}{\zeta}e^{-2sT} - \cdots\cdots \end{cases}$$

$$= \frac{1}{\zeta(1+e^{-sT})}$$

ゆえに複素合成積分により

$$A_+ = F(s)\,|_{s=0} = \left[\frac{1}{2\pi j}\int_{c-j\infty}^{c+j\infty} G(\zeta-\omega)\,v(\omega)\,d\omega\right]_{\zeta=0}$$

$$= \frac{1}{2\pi j}\int_{c-j\infty}^{c+j\infty} G(-\omega)\,v(\omega)\,d\omega = -2R_0[k_{p_1}]$$

k_{p_1} は、$w = (\zeta\omega + j\omega\sqrt{1-\zeta^2})_{\omega=\omega_1}$ なる点における被積分関数の Residues であり、

$$k_{p_1} = \frac{-j e^{-j\varphi}}{2\sqrt{1-\zeta^2}\,\{1-\exp(-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2})\}}$$

ここで、

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right) = \sin^{-1}\sqrt{1-\zeta^2}$$

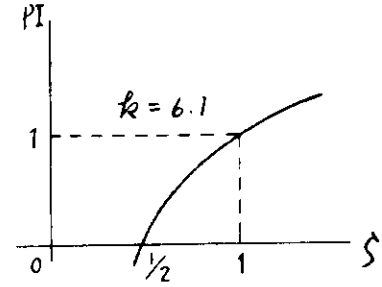
$$\therefore A_+ = \frac{1}{1-\exp(-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2})}$$

同様に、

$$A_- = -\frac{\exp(-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2})}{1-\exp(-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2})}$$

PI の計算機の出力を誤差信号として用い、これに基づいて希望の減衰率が得られるよう補償器のパラメータを自動調節できる。すなわち、

$$PI = \frac{1 - k \exp\left(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)}{1 - \exp\left(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)}$$



第 2.3.6 3 図

$k = 6.1$ のときの ζ と PI との関係は $\zeta = 0.5$ を境として PI の符号が変る。k を変えることによつて任意の ζ において $PI = 0$ にすることができる。

この PI を用いて補償器のパラメータを自動調節する。

インパルス応答から PI を決めるために系の入力端に雑音を加え、入力雑音と系の出力との相互相関を算定する。すなわち、

線形システムの出力が インパルス応答 $g(t)$ なるプラントにテスト信号 $m(t)$ を印加すると、

$$c(\tau) = \int_{-\infty}^{\tau} m(\tau)\, g(\tau - \tau)\, d\tau$$

積分の上限を ∞ にまで拡張すると（これはどのような物理系でも $t < 0$ のとき $g(t) = 0$ だからである。）変数を $t - \tau = x$ に変換すると、

$$c(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x)\, m(t - x)\, dx$$

他方、$m(t)$ と $c(t)$ との相互相関関数は、

$$\phi_{mc}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} m(t-\tau)\, c(t)\, dt$$

$$= \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} m(t-\tau)\, dt \int_{-\infty}^{\infty} g(x)\, m(t-x)\, dx$$

積分の順序を入れかえて、

$$\phi_{mc}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x)\, dx \left\{ \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} m(t-x)\, m(t-\tau)\, dt \right\}$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} g(x)\, \phi_{mm}(\tau - x)\, dx$$

これは入力 $\phi_{mm}(\tau)$ に対し出力が $\phi_{mc}(\tau)$ なる形であることを示す。

$m(t)$ が白色雑音だと、そのパワスペクトル密度が K（定数）で、

$$\phi_{mm}(\tau) = K\delta(\tau) \qquad \delta(\tau) \text{ ; 単位インパレス}$$

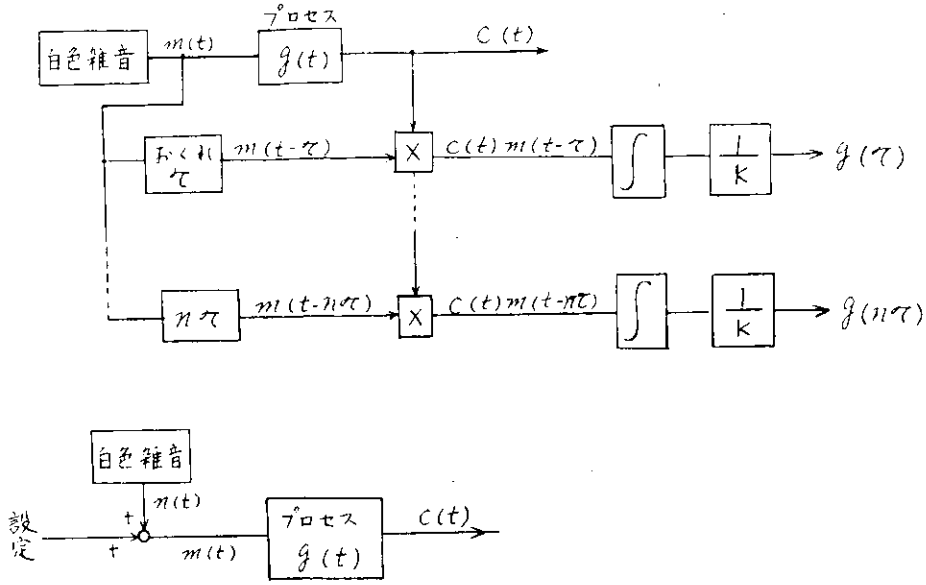
$$\therefore \phi_{mc}(\tau) = Kg(\tau) \qquad (\because dt = dx)$$

すなわち、白色雑音入力時にプロセスの相互相関関数は、

$g(\tau)\Big\}_{\tau=\tau}$ に比例する。

τ を変えれば任意 t での $g(\tau)$ の値を求めうる。

次図の積分時間は ∞ であるが、実際には有限であるのは止むをえない。この積分時間は精度を十分にとる程には永く、系のパラメータが著しく変化しない程度には短かくせねばならない。このため周期的雑音、さらには離散時間型の 2 値雑音を実用的には用いることが多い。詳細は略す。



第 2.3.6 4図

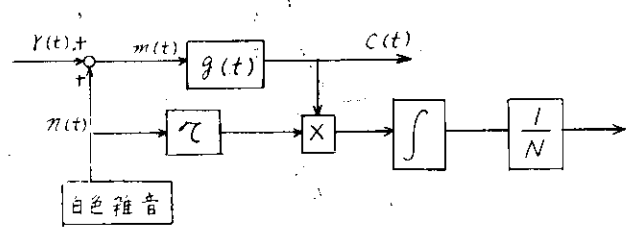
適応制御に用いるときは、

$$m(t) = n(t) + r(t)$$

$$c(t) = c_r(t) + c_n(t)$$

$$c_r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} r(x)\, g(t-x)\, dx$$

$$c_n(t) = \int_{-\infty}^{T} n(x)\, g(t-x)\, dx$$



第 2.3.6 5図

$$\phi_{nc}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} n(t-\tau)\, c(t)\, dt$$

$$= \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} n(t-\tau)\, c_r(t)\, dt + \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} n(t-\tau)\, c_n(t)\, dt$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} g(x)\, \phi_{nr}(\tau-x)\, dx + \int_{-\infty}^{\infty} g(x)\, \phi_{nn}(\tau-x)\, dx$$

$r(t)$ と $n(t)$ とには相関がないので、すべての τ に対して $\phi_{nr}(\tau) = 0$ ゆえ

$$\phi_{nc}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x)\, \phi_{nn}(\tau-x)\, dx = Ng(\tau)$$

ただし、$\phi_{nn}(\tau) = N\delta(\tau)$　　N ：定数

1チャンネル分についての図は第 2.3.6 5図のごとくである。

なお、上式より $g(t)$ を $r(t)$ とは独立に測定できる。

(d) 試行的な探索系

対象の複雑さはすべて評価関数の中に含ませてしまうので同定の必要はなく、複雑なプラントに適する。しかし、評価関数のパラメータが増してくると系の応答速度や安定度が劣化する傾向にある。系内に存在する信号を用いて評価関数を直接計算する。

評価関数 PI の最小値を求め、　$c_d(t)$ ：望ましの出力 ，$c(t)$ ：実際の出力 ，$m(t)$ ：操作量 ，

$\lambda(t) \geq 0$ ：独立なパラメータ

$PI\{c(\mu),\ m(\sigma)\ ;\ \mu\} = \int_{\mu}^{\mu+\tau} F\{\lambda(\sigma),\ c_d(\sigma) - c(\sigma),\ m(\sigma)\}\, d\sigma$

ただし、 $\mu \leq \sigma \leq \mu + \tau$ ； μ, $\lambda(\sigma)$, $c_d(\sigma)$ を指定したとする。

$$\Pi = \min_{m(\sigma)} \{ PI[c(\mu), m(\sigma) ; \mu] \}$$

そのときの所要操作は、

$$m(\sigma) = F_\sigma [c(\mu)]$$

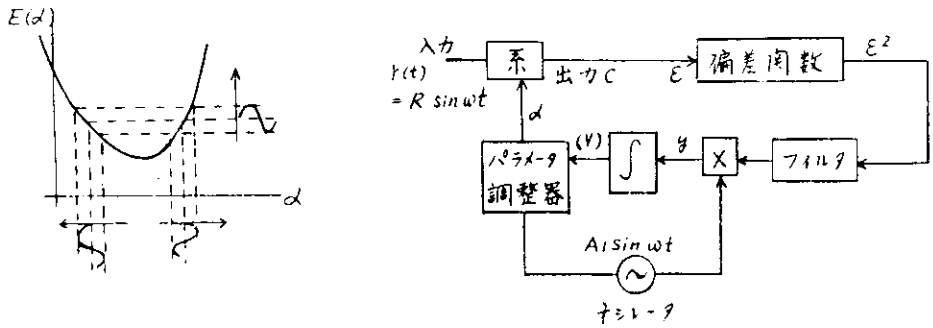
ゆえに、Πは $c(\mu)$ と μ のみの関数となる。

(e) パラメータ摂動型

系の応答と最適な応答との間の偏差を最小にするように、系のパラメータαを調整する方法で、その調整方向を求めるために調整すべきパラメータを正弦波で撹乱し、偏差信号の中に現われるその撹乱成分の位相を求め、パラメータを調整する。

撹乱する正弦波の周波数は偏差スペクトル中の周波数と系のパラメータが外乱を受ける低い周波数あるいは信号の統計的性質の変化の周波数との中間にとる。

第2.3.66図の左図に出力側の位相が極値の前後で180°変わることを示す。



第2.3.66図

(V)部で仮に回路を切つて、αの最初の値を α_0 とし、小振幅 $\triangle\alpha$ の撹乱を与えると、

$$\alpha = \alpha_0 + \triangle\alpha \sin \omega t$$

この撹乱のないとき(無変調時)の偏差を $\varepsilon_0(t)$ とすると、m_1 を変調度(小)として、

$$\varepsilon(t) = [1 + m_1 \triangle\alpha \sin \omega t] \varepsilon_0(t)$$

入力 $r(t) = R \sin \omega t$ とすると、

$$\varepsilon_0 = k_0 R \sin(\omega t + \phi_0)$$

$\phi_0 = 0$ とする。

以上の他、プラント動特性の同定をより厳密に行ない、また適応制御量を実現するにあたつて計算機をもつと広く利用する方法としてつぎのものがあげられる。

(f) R.E. Kalman の同定法

同定については、Anderson 他の方法と全く同じものを、デイジタル計算機による離散値計算で行ない、しかも所要記憶容量を少くなるように工夫してある。

ゼロ次ホールドサンプル値系では出力 $c(t)$ を求める合成積分は、kをサンプル時点とすると、操作 $m(t) = m_\ell$, $\ell T < t < (\ell+1) T$ ゆえ、

$$C_k = \sum_{\ell=-\infty}^{\ell=k} g_{k-\ell} m_\ell$$

パルス伝達関数 $G(z)$ を考えて、

$$G(z)=\frac{C(z)}{M(z)}=\frac{a_0+a_1z^{-1}+\cdots\cdots+a_nz^{-n}}{1+b_1z^{-1}+\cdots\cdots+b_nz^{-n}}=g_0+g_1z^{-1}+g_2z^{-2}+\cdots\cdots g_nz^{-n}+\cdots\cdots$$

$$\therefore C_k=a_1m_{k-1}+a_2m_{k-2}+\cdots\cdots+a_nm_{k-n}-b_1c_{k-1}-b_2c_{k-2}-\cdots\cdots-b_nc_{k-n}$$

ここに a_0 はおくれ系である限り0であるとしてよい。

n は（大きい方がよいが）、$G(z)$ の実現の次数に等しい。

上式の $a_1\cdots\cdots$、a_n、　$b_1\cdots\cdots$、b_n　を決定するに当り、第N番目のサンプル時点での測定データよりの採用出力値を $C_k^*(N)$ と書くとき、

$\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N}\left[C_k-C_k^*(N)\right]^2W_k$　を最小にするような a(N)、b(N) の組を選ぶ。

W_k はデータ採取時刻に関する重みである。

(3)　概念的なタービンプラントへの適用検討

(a)　適応制御適用の条件

既述の適応制御の内容およびその分類から適応制御対象として具備すべき条件をタービンプラント向きに分類するとつぎのとおりである。すなわちプラントパラメータの変動が大きいことを必要条件として、

(イ)　負荷状態などの信号的外乱に伴って起る場合；この場合外乱とパラメータの関数的関係はほぼ正確に判っていて、パラメータの変化は間接的に知りうるが、パラメータ自体は加法的変化ではない。（外乱は加法性と見られることが多い）

(ロ)　経時的または不確定的に変化する場合；プラントの同定によつて（間接的にのみ）、パラメータの変化が判明する場合

以上を Truxal の構造（第2.3.5 4図）によればつぎのごとくに分類される。

(イ)は入力信号同定型

(ロ)はプラント特性同定型

以上はいずれも外部原因による適応制御系上の分類であり、どれを適応制御すべきかのとりあげるべき制御対象を考慮する過程では、他の分類すなわち制御する側に立つた分類は考慮できない。すなわち対象が決つてからどういう制御方式をとるかがきまる。ここでは、その前の対象の選定をいつているのである。

(b)　タービンプラントの適応制御を対象とした分類；適応制御系はそれ自体階層的制御システム構造となつている。すなわち、

(イ)　基底制御系

(ロ)　適応制御系

前者は在来のアナログループに対応するもので、これはまた階層的に構成されていることが多い。

一般に熱プロセスは十分な解析はもちろん、状態（パラメータや数式構造）の確定性の保証がきわめて困難であることが多い。

ゆえに技術面では、タービンプラントというのは適応制御の適用に向いているということができる。現象論的には、

1）燃焼熱発生過程

2）伝熱過程（伝熱係数、伝熱おくれ、調管路など）

3）蒸気発生過程（流動過程を伴う）

4）流動過程（伝熱過程を伴う場合が多い）

5）混合過程

などすべてについていえる。

(a)の条件を満たすタービンプラントのサブシステムとしては、(a)の(イ)、(ロ)に対応してつぎのようなものがまず考えられる。ただし Control Config. Ⅱ の実現性については問わない。

(イ)；(i)　ボイラ蒸発部における動特性パラメータの負荷率による変化に対処するための適応制御システム

(ii)　速度型負荷を駆動する蒸気タービン系における、タービンおよび負荷の非線形性に対処するための適応制御システム

(ロ)；(i)　ボイラ炉内特性の不確定変化に対処するための適応制御システム

(イ)、(ロ)；(i)　パーコレーション部たとえばボイラ過熱器や節炭器の伝熱特性の不確定変化ならびに、負荷率（ビストンフロー量）による位相おくれ変化に対処するための適応制御システム

(c)　適用例の略説

(イ)；(i)での圧力応答部についておよび(ii)について、およびタービンプラントと直接関係はないが、或種の熱交換について既発表例を紹介する。

(イ)、(ロ)；については適応制御を行なうべきと判断されるにいたる１例を説明する。

(d)　適用例または適用とすべき対象

適応制御をボイラタービンプラントまたは類似のプラントに、動特性改善を目的として用いた例は余り実施例を見ない。

以下に掲げるのは簡単な１入出力系での入力信号同定型の３例である。実地への応用に際してはこのような簡単なものから入つて行くのが自然であろう。

a．ボイラ用ブロワタービン系の調速系（文献７）

これは USA の Naval Boiler Laboratory で軍艦用のブロワ駆動用タービンの速度制御系用に開発し実機テストも終つた。

多くの舶用ボイラでは Forced Draft 型で、なかでも最近は補機タービン直結のブロワ駆動が多い。この場合、タービンへの蒸気量によつて系を操作するが、回転部の慣性が広範囲な設定回転数においての負荷変動に対するシステム応答の緩慢さの主原因となつている。すなわち、

問題は、長時定数のシステムループ（あるいはサブループ）の制御器パラメータを最適にし、動的応答を改善することにある。

通常の制御器はおおむね線形要素であり、ブロワ系は非線形であるので、動作負荷の広域にわたつて最適と言いい難い状態にある。

(i)　ブロワの非線形性

回転部慣性方程式は線形であつて次式で表わされる。

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J}\left(T_a - T_r \right)$$

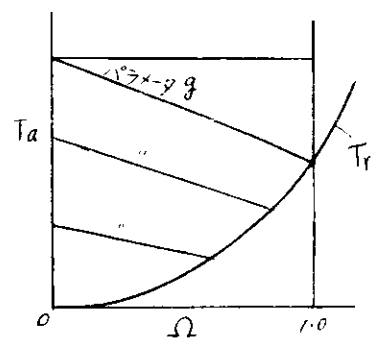
ω：角速度、　J：慣性モーメント、T_a：駆動トルク、

T_r：ブロワによる負荷トルク

T_a は、タービンへの蒸気量 G_s と回転速度の関数であり、その代表的な特性は第2.3.67図に示すごときものである。これを下のように表わす。

$$\Omega = \frac{\omega}{\omega_{max}}$$

$$S = \frac{G_s}{G_{s\,max}}$$



第2.3.67図

T_{max} は、$g=1$ のときの停止トルク

m は定数 ： トルクの次元をもつ。

$$T_a = g(T_{max} - m\Omega)$$

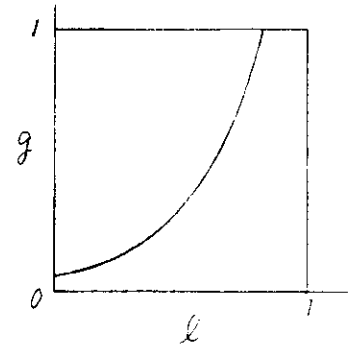
タービンへの供給蒸気量は入口蒸気条件一定とすると、弁開度と流量係数によつてきまる。開度と無次元蒸気量の関係は第2.3.6 8図のごとくで、

$$\ell = \frac{L}{L_{max}}$$

L_{max} は弁の全行程量

$G_S = F(L)$

なる関係で示しておく。（Vポート）



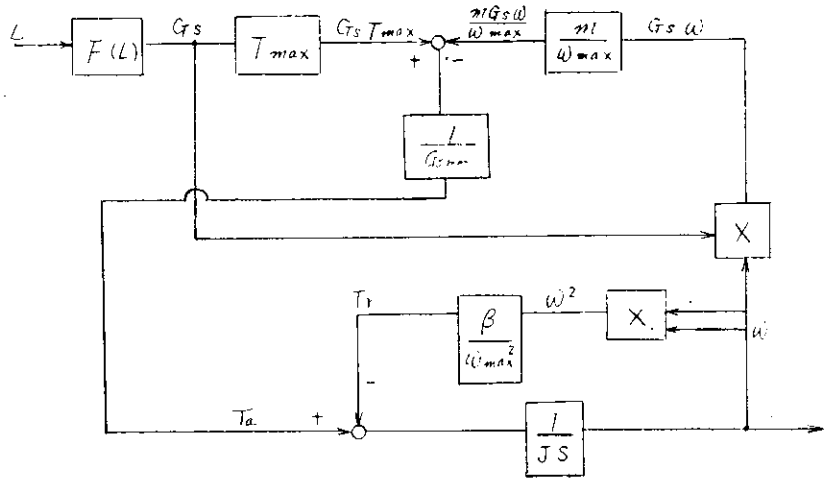
第2.3.6 8図

負荷トルクはブロワ系の抵抗で直接表わされ、第2.3.6 7図の放物線である。

$$T_r = \beta\Omega^2$$

β は定数と考える。上の T_a，T_r は静特性の固定の結果と考えることができる。ここで関数 $F(L)$，T_a の変数の積、T_r の変数のべきが非線形を示し、適応化の対象となる。

以上のプラントの非線形モデルは第2.3.6 9図のごとくである。



第2.3.6 9図

閉ループ系での制御政策としてつぎを考える。

定常偏差ゼロ、開ループゲイン余有9dB、位相余有45deg とする。これが（改善）目標である。

通常の制御系では、P＋I調調節計に回転数フイードバックを用いているが、本適応系では基底制御系としては基本的に同じものを用い、比例ゲインと積分時間を最適になるように適応操作する。摂動線形化法で各負荷レベルでの制御器設計を行なう。すなわち、マヌバリングと等価な外乱に対する過渡応答をコントロールパラメータを変えて、アナコンにて計算した結果からつぎの関係直線を得ることができる。ただし、上述の制御政策の下で。（第2.3.7 3図）

$$\gamma = \frac{\bar{\gamma}}{\Omega}$$

$\bar{\gamma}$ ： $\Omega=1$ の時の γ、　　γ ： 比例ゲイン

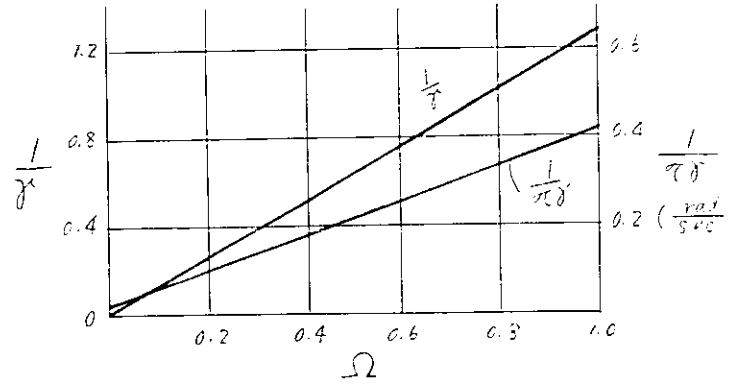
$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_m}\frac{1}{\Omega}$$

$$\left(\theta = \gamma\varepsilon + \frac{1}{\tau}\int \varepsilon\,dt\right)$$

ゆえに可変パラメータＰ＋Ｉ制御器の出力は、εを制御偏差とすると、

$$\theta = \frac{\bar{\gamma}}{\Omega}\varepsilon + \frac{1}{\tau_0}\int \varepsilon\,dt + \frac{1}{\tau_m \Omega}\int \varepsilon\,dt$$

右辺第１、３項のΩが適応ループによつて制御されるコントロールパラメータの存在を示す。



第2.3.7 0図

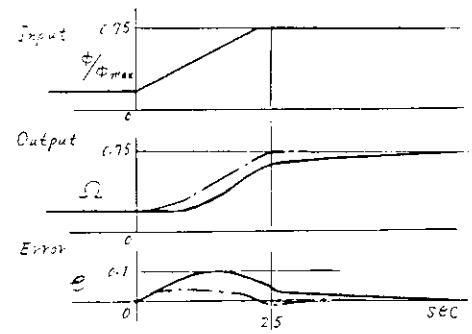
すなわち、入力同定適応系での同定対象となる入力は$\omega(\Omega)$である。

この調速系の動特性を評価するため、速度設定部（本来はここへA.C.Cよりの信号が入る）へランプ入力を印加し固定制御パラメータ系（$g = 0.3$で最適に設定した）と、適応系とを調速系（空気量制御系内のマイナシステム）のみについての比較検討をした。空気量制御系全体、さらにはA.C.C系については触れていない。

第2.3.7 1図の実線は在来の固定Ｐ＋Ｉ制御器、鎖線は適応Ｐ＋Ｉ制御器によるシミュレーション結果で、適応ループでは制御偏差の絶対値面積が前者の$^1/_5$程度に減つていることがわかる。

実際のプラントでは空気式Ｐ＋Ｉコントローラに、ゲインと積分時間をサーボ駆動した適応制御装置を用いてシミュレーションとほとんど同じ結果を得ている。

また、この系は主機タービンに固定ピッチプロペラを適用したときと相似となる。

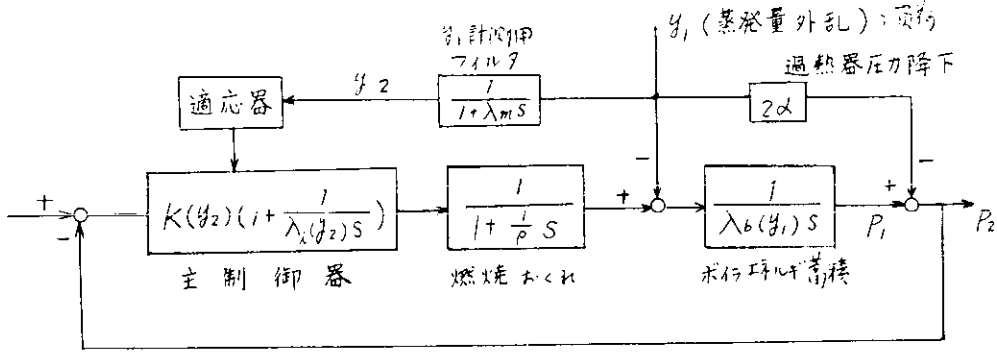


第2.3.7 1図

b．ドラムボイラ圧力応答―負荷関係（文献８）

ドラムボイラで大幅な負荷の大きさに適応した応答を示す制御を目的とし、Ｐ＋Ｉ型主燃焼制御器のゲインと積分時間を蒸気流量外乱を適当なフイルタで処理した信号で入力適応的に自動可変としたものである。

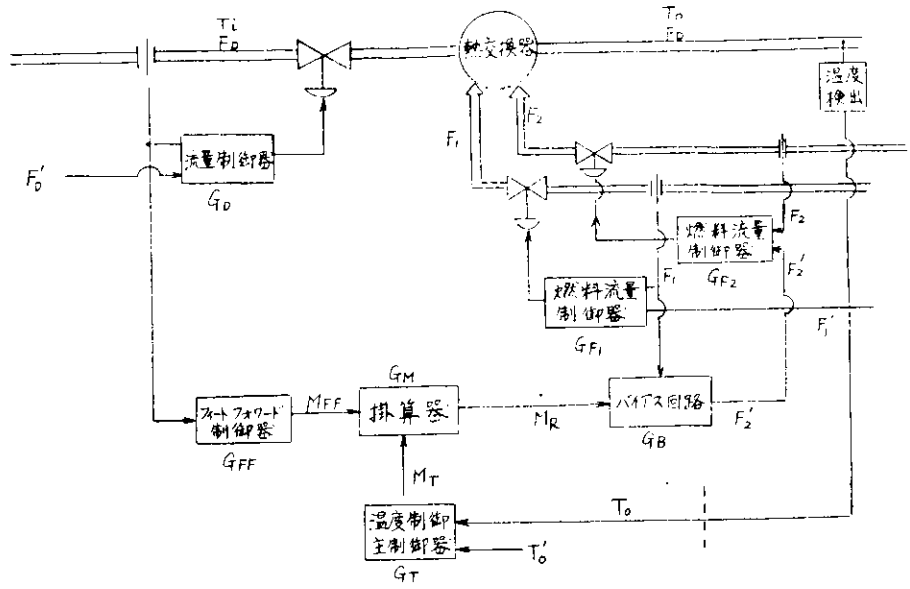
図中λ_bのy_1による変化に適応するようにＰ＋Ｉ調節器パラメータＫ、λ_1を変える。この系のブロック図を第2.3.7 2図に示す。



第2.3.7 2図

c．独立した二つの燃料源を有する熱交換器

使用対象はわからないが実機（ＤＤＣ）で成功した例である。



第2.3.7 3図

第2.3.7 3図は熱交換器の2次側出口温度制御の信号的構成を示す。

プロセスの特性は、

制御量 ： 熱交換器2次側出口温度 T_0

操作量 ： 燃料量 F_2

外乱量 ：
- 2次側流量 F_D（流量制御器 G_D の設定値 F_D' で随意決定される。）：主負荷
- 2次側入口温度 T_i（ここではこの影響は論じない。）
- 燃料量 F_1（燃料流量制御 G_{F_1} の設定値 F_1' で随意決定される。）

本制御系の目的は出口蒸気温度 T_0 に対してつぎを実現することである。

1）外乱 F_1 の影響を打消す通常のフィードフォワード制御

2）外乱 F_D（負荷）の大小如何にかかわらず制御ゲインを一定とする入力信号同定型適応制御

いま、熱交換器の簡単なモデルを考えて、その結果として第2.3.7 3図の制御系の構成が適正であることを示す。この図より判るように3階層（G_{F_2} ループ；G_M、G_B ループ、G_T ループ）構造の制御ループとなっている。

熱交換器の静的数学モデルはつぎのようである。

2次側流体受熱量 Q_0

$$Q_0 = F_D k_D (T_0 - T_i) \quad \cdots\cdots (2.3.189)$$

k_D，流体比熱

燃料より2次側への伝熱量

$$Q_1 = k_1 F_1 + k_2 F_2 \quad \cdots\cdots (2.3.190)$$

定常状態において $Q_0 = Q_1$ である。

$$\therefore F_1 = \frac{1}{k_1} [F_D k_D (T_0 - T_i) - k_2 F_2] \quad \cdots\cdots (2.3.191)$$

燃料量 F_2 の変化に対する温度 T_0 の変化のゲインを求めると（2.3.193）式である。

$$\frac{\partial T_0}{\partial F_2} = \frac{k_2}{k_D F_D} = K' \frac{1}{F_D} \quad \cdots\cdots (2.3.192)$$

すなわち、$\frac{\partial T_0}{\partial F_2}$ は、F_D によつて変化することがわかる。

2次側流量 F_D が変化しても温度制御系が最適な状態で運転されるためには、温度制御の主制御ループゲインを一定にしなければならない。その方法の1例として第2.3.73図に示すように、フイードフオワード制御器および掛算器を使用することによつて行なうことができる。

温度制御の主制御器はＰＩＤ制御器で、特性は（2.3.193）式である。

$$G_T = \frac{M_T}{T_0' - T_0} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I S} + T_D S \right) \quad \cdots\cdots (2.3.193)$$

フイードフオワード特性は、

$$G_{FF} = \frac{M_{FF}}{F_D} = K_F \left(\frac{1 + T_2 S}{1 + T_1 S} \right) \quad \cdots\cdots (2.3.194)$$

掛算器 G_M の特性は、

$$M_R = M_{FF} \cdot M_T \quad \cdots\cdots (2.3.195)$$

バイアス回路は、外乱 F_1 に対する温度への影響を打消す回路で特性は（2.3.196）式である。

$$F_2' = K_1 M_R - K_2 F_1 \quad \cdots\cdots (2.3.196)$$

（2.3.195）、（2.3.196）式より、

$$F_2' = K_1 M_{FF} M_T - K_2 F_1 \quad \cdots\cdots (2.3.197)$$

（2.3.197）式に（2.3.193）、（2.3.194）式を代入

$$F_2' = K_1 M_{FF} G_T (T_0' - T_0) - K_2 F_1$$

$$= K_1 K_F K_P \left(1 + \frac{1}{T_I S} + T_D S \right) \left(\frac{T_2 S + 1}{T_1 S + 1} \right) F_D (T_0' - T_0) - K_2 F_1 \quad \cdots\cdots (2.3.198)$$

$(T_0' - T_0)$ の変化に対する F_2' の変化の静的ゲインは（2.3.199）式とする。

$$\frac{\partial F_2'}{\partial (T_0' - T_0)} = K_1 K_F K_P F_D \quad \cdots\cdots (2.3.199)$$

F_2' に対する T_0 の変化のゲインは（2.3.192）式より静的には、$F_2' = F_2$

$$\frac{\partial T_0}{\partial F_2'} = K' \frac{1}{F_D} \quad \cdots\cdots (2.3.200)$$

温度制御系のループゲイン K_0 は（2.3.199）、（2.3.200）式より、

$$K_0 = \frac{\partial F_2'}{\partial (T_0' - T_0)} \cdot \frac{\partial T_0}{\partial F_2'} = K' \cdot K_1 \cdot K_F \cdot K_P \quad \cdots\cdots (2.3.201)$$

（2.3.201）式よりわかるように、ループゲイン K_0 は、外乱 F_D に関係なく一定である。

以上のことでわかるように外乱として2次側流体の流量変化によるループゲイン K_0 が変化しないような制御系を構成することがわかる。

なお、フイードフオワード制御として、比例ゲイン K_F だけでなく、$K_F \frac{1 + T_2 S}{1 + T_1 S}$ としたのは動的な特性を改善するためである。

d．過熱器温度応答に対するプラントパラメータの影響（文献10）

過熱器出口温度偏差 θ_S ℃は、

$$\theta_S = F_1(s)\,\theta_1 + F_2(s) \left(\frac{1}{1 + T_{S1} S} r_S - q_S \right)$$

ここに、θ_i 出入口温度偏差 ℃

r_0 は対流伝熱面伝熱量無次元偏差

q_s は蒸気流量　〃　〃　〃

なお、

$$F_1 = \exp\left\{-L_s S - \frac{a_s T_{s1} S}{1 + T_{s1} S}\right\}$$

$$F_2 = \frac{1 - F_1}{a_1 a_s T_{s1} S} \cdot \frac{1 + T_{s1} S}{1 + a_2 T_{s1} S} \quad k$$

$$T_{s1} \fallingdotseq \alpha_s^{-1}$$

$$a_s T_{s1} \fallingdotseq G_{ss}^{-1}$$

$$L_s = \frac{L_s'}{W_s}$$

k，a_1，a_2 はプラントで不変と考えられるパラメータであり、他方変動すると考えられるパラメータは、α_s ：熱伝達率、G_{ss} ：伝熱量、W_s ：管内流速（L_s' は管長、L_s は通過時間）の3個である。このうち、G_{ss}，W_s は(a)(イ)の信号的外乱であり、α_s は(b)経時的または不確定的に変化するものである。

参　考　文　献

1）自動制御技術12　1970　日本自動制御協会

2）自動制御入門　増淵正美　オーム社

3）適応制御の基礎概念　横木義一・砂原義文　制御工学 Vol.5，№1　日本自動制御協会

4）適応制御の最近の動向　近藤文治　計測と制御 Vol.5，№1　計測自動制御学会

5）適応制御系　ミシュキン・ブラウン原著　コロナ社

6）学習制御および学習制御機械　北川敏男編　共立出版

7）A Practical Approach to Adaptive Control
J.W. BANHAM JR., W.L. SMITH ; Control Engineering, May 1966

8）適応多重制御系に関する一考察　吉江充　第11回自動制御連合講演会前刷　講演№183

9）Modelling and Programming for Direct Digital Control
G.V. WOODLEY ; ISA Journal, March 1966

10）貫流ボイラの負荷変動限度を支配する要因について　竹内充・福本弘　日本機械学会誌　69巻　569号

2.3.5　学習制御

(1)　概　　要

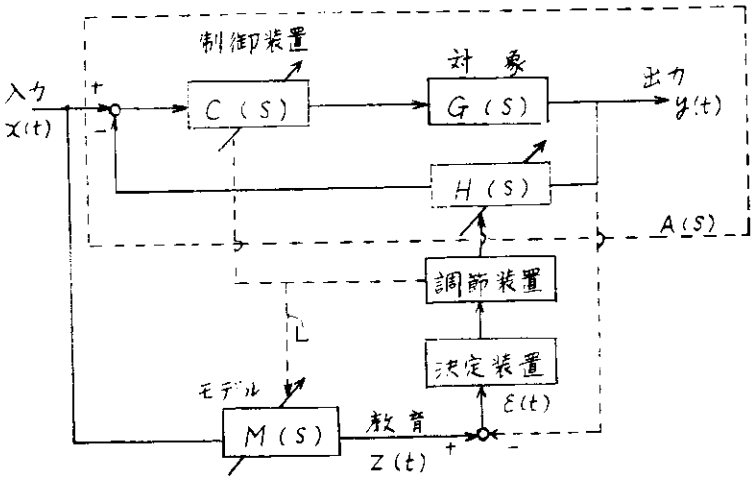
適応制御における試行的適応過程の経験をたくわえ、これをうまく活用することができれば、試行探索時間は短縮し、最終的には直接的に最適状態を作り出せるであろう。すなわち、ある段階での経験は次段階での対策に重要な資料を与える。さらに、試行経験の内容や量を考慮し、可能な限りの予想や連想をまじえた洞察を行なった後、行動を起すなど学習内容を高めて行く。また他からより巧妙な制御理論について示唆のあった場合に再び学習操作を行なって新しいレベルに到達することなどをすべて包含している。

行動結果の記憶はほとんどなく、仮に記憶したとしてもこれを活用し洞察を行ない、つぎの行動への積極的な可能性の変化を生じることは、適応系では存在しない。すなわち、適応系においては全く同型の変化がプラントに起るとそのつど全く同形の過程をたどるという画一性があるに対し、学習系では経験をその都度に応じてたんだん改善され

た制御過程をたどるようになる。

学習制御装置の特長は、学習が進むとともに、そのパラメータのみならず構造、組織が変わつて行き、行動が改善されることにある。

このように学習とは経験によつて合目的的に行動を変容改善することであり、経験には自系内のそれと、他系のものを含む。また、教育とは学習効果を向上させるための内外からの働きかけの過程をいう。教育と学習は対の関係がある。



第2.3.7 4図

教育には外部からのものと、システム自体の自発的試行によつて進められるものとがあり、後者において次第に組織変えされて行くシステムを、自己構成（または組織）系という。もちろん外部からの教育のものより高級である。後者について附言すると、適応制御系に内蔵されるモデルは教育系としての役割りをもつている。第2.3.7 4図において、教育モデルM(s)は、A(s) のモデルで、Lのないのが固定モデル、Lのあるのが改変モデルである。固定モデルは初めに十分検討された状態に固定されている。改変モデルは制御系の探索行動からの経験により修正される。

すなわち、ε(t)＝Z(t)－y(t) を0にするよう、C(s)，H(s) のパラメータを調節（改変）し、不完全モデルから出発して系自体の経験により改変できるような自由度をもつている。図ではε(t)の制御経験により、M(s) パラメータを修正する。

以上より明らかなように学習の本質は、つぎの3つに分割される。

- 系行動の把握と記憶
- 行動経験の活用と意志決定
- 外部行動の改善

また、学習過程を客観的に眺める立場として、つぎの二つがある。

1）マクロ的（外見的立場）

学習対象に対し、外部からの試行的に刺激を与えて、その結果として対象がある外部行動を起したとき、この外部刺激が反復、類似性あるいは一定の統計的性質をもつとき、系の行動が次第に改善されるならば、学習する系ということができる。このとき行動改善の目標となるべき行動目標や行動基準が必要で、また改善のきめ手としての行動評価基準も必要である。

そして系の改善の操作アルゴリズムこそ学習過程の実体である。

2）ミクロ的（内部的立場）

学習者の外部的行動（操作アルゴリズム）をひきおこしている学習者の内部機能（内部アルゴリズム）を究明し、これを直接論理的にシミュレートするか、またはその主体としての内部構造を等価的にシミュレートする立場がある。教師付き、教師なし学習のいずれの場合においてもこのように内部の微細構造を分解、連合することによつて具体的な学習機械の設計が可能となる。

基底制御系と適応制御系との関連はすでに述べたが、後者に対し、その目標値、操作変数、制御則、パラメータなどの選定、さらに評価基準、評価方法などの妥当性を評価、指導する役目を果すのが学習ループである。全体構成は

第2.3.7.5図のごとき階層構造となつている。

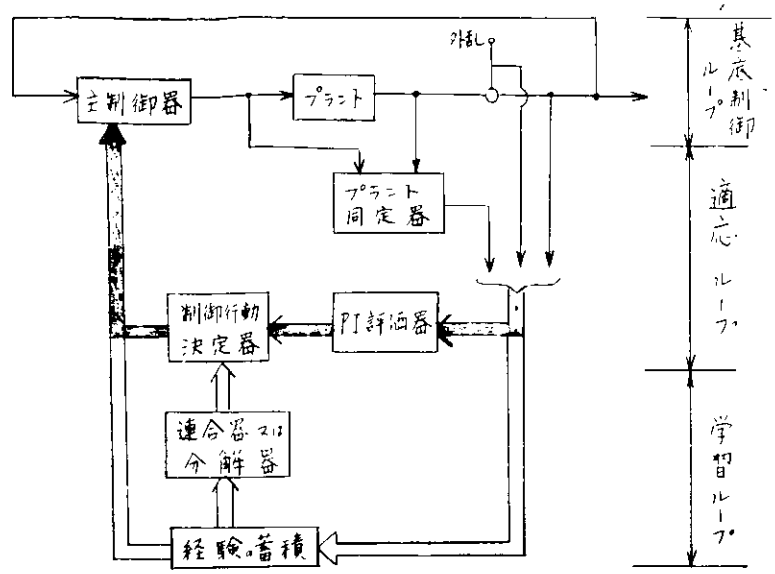
学習ループは学習の活動期においては経験の集積をするだけで行動の改善は行なわず、安定期に入ると改善の役目を果すことになる。

(2) 学習制御系の例

現在までに研究し発表されている系の若干を簡単に述べる。

(a) ラントール

名大中村研で開発中の Learing Control＝Learntrol について略述する。



第2.3.7.5図

経験を地図、度数表、順序表の3因子に要約し、これらの活用度および活用方法のいかんによつて外部に表れる学習行動が種々のモードをとるようになつている。

学習活動のモードはつぎのようである。

・先行経験を用いない逐次探索		○	○	○
・先行の同一経験を用いる跳躍探索			○	○
・先行の類似経験を用いる準跳躍				○
・忘却機能の導入				
・高次学習ループによる学習方法の改変				
・被教育機能による他系経験の受容				
記憶経験	地図	○	○	○
	度数表		○	○
	順序表			○

いまある外乱（負荷）状態で運転し、そのとき、その状況での評価関数 E_{i-1} が極大にあるとする。操作入力は x_n である。（第2.3.7.6図）

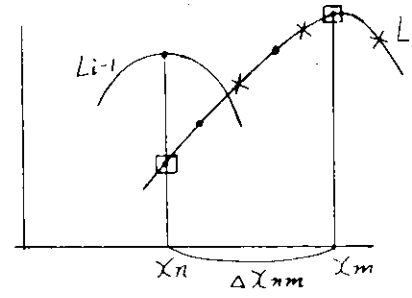
ここで負荷突変によつて評価関数が E_i に変化したとする。

（E_{i-1}，E_i など1次単峰性であるとする）。

学習制御装置は逐次探索によつて L_i の頂点に到達するのであるが、この操作入力変化を Δx_{nm} とする。

外乱を（n，m）にて要約し、これに対応する記憶器内の（n，m）番地に全探索行程 Δx_{nm} を記憶する。これが地図である。

さらに、度数表内の（n，m）番地には外乱の度数が順序記入される。



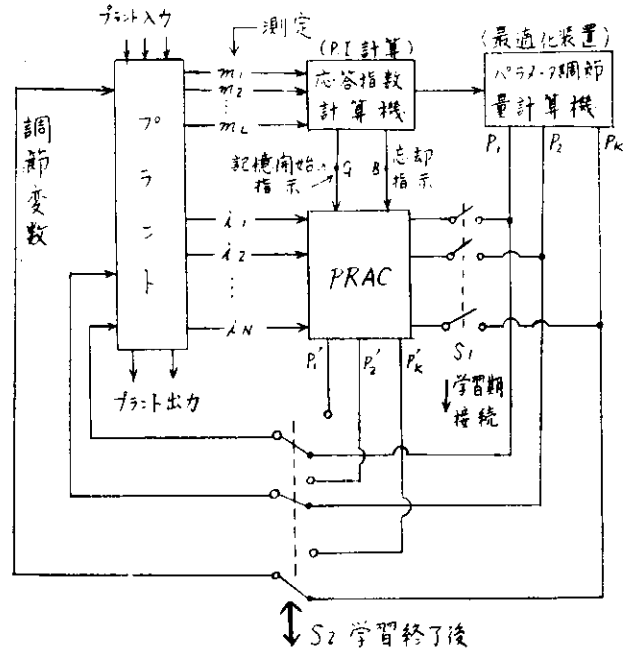
第2.3.7.6図

同一経験の回数が、ある値をこえると逐次探索を省略して一気に頂点に到達する。これが跳躍探索である。（□印）

さらに、順序表（一般には時刻表）を採用した時は、同一経験のみならず近傍の類似経験をも利用している。したがつて学習によつて外部に表れる探索行動は逐次探索から一気に跳躍探索に移るのでなく、その途中に準跳躍を行なうようになる。（×印）

（例） Taylor の系（ Pattern Rekognizing Adaptive Controller ; PRAC ）

第2.3.77図の系は炉内温度分布を制御するもので、動作評価関数は温度分布に関する複雑な量を指定する。外側のループは逐次的な試行によつて応答指数の最適点を求めるループであり、内側のループはこの逐次行動パターンを記憶して活用するものである。PRAC はプラントの状態 i_1 …… i_N を測定し、これから制御に直接関係のある情報を抽出、状態パターンを作る。つぎに、パラメータ調節量計算機によつて得られた調整変数の最適値 P_1 …… P_K と状態パターンとを対応させて記憶するとともに、PRAC の出力 P_1' …… P_K' が P_1 …… P_K に等しくなるよう学習する。このような結果が累積すると、プラントの新しい状態に対してその状態が過去に経験されたものであるならば、その状態パターンに対応した調整変数の最適値 P_1' …… P_K' をただちに求め、プラントを最適点に設定せんとするものである。この過程をいま少しくわしく述べる。



第2.3.77図

学習期においては外側ループの逐次探索が最適点に固着するごとに、パラメータ調節装置の出力 $\{P_i\}$ を PRAC の出力 $\{P_i'\}$ が等しくなるように PRAC の構成要素の係数値を改変しながら学習を進めて行く。もし等しいと認められれば、そのときの $\{P_i\}$ とプラントの測定状態 $\{i_j\}$ を1組にして経験として記憶する。

この過程を繰り返し行ない $\{P_i'\}$ と $\{P_i\}$ とが等しくなる確率がある値以上になつたときに学習は終了したとする。その後は内側の PRAC を含んだループによつてプラントの状態をパターン認識し、最適な調節パラメータ $\{P_i'\}$ をただちに指示する。G，B は経験の記憶開始や忘却を指示する信号である。学習期には外側ループが内側の PRAC を教育してモデルを構成するが、学習の終了後はそのモデルが直ちに所要の $\{P_i'\}$ を発生するのである。いいかえれば外側の試行的閉ループ適応制御系と内側の学習ループとがプラントに対し並列的関係になつている閉ループ学習制御系ということができる。

(3) ま と め

学習制御は元来心理学的なもので統一的な定義は存在せず、その末端的解釈はまちまちであるが、その本質的なものは2.3.5項の始めに述べたとおりである。動特性改善について考えれば、基底制御系の動特性を系の状況変化に応じて最適点にもつて行くのが適応系とあり、そのもつて行く過程を経験をもとにして可及的すみやかに行なうための制御系が学習制御系である。

なお、既述の趣旨により適応制御と併せ参考文献を記述しておく。

参 考 文 献

1） 自動制御技術12　1970　日本自動制御協会

2） 最適制御入門　増淵正美　オーム社

3） 適応制御の基礎概念　樋木義一・砂原義文　制御工学　Vol.5，No.1　日本自動制御協会

4） 適応制御の最近の動向　近藤文治　計測と制御　Vol.5，No.1　計測自動制御学会

5） 適応制御系　ミシュキン・ブラウン原著　コロナ社

6） 学習制御および学習制御機械　北川敏男編　共立出版社

2.4 タービンプラントに直接制御を導入する場合に解決しておくべき技術的問題点と解決のための具体的方策

2.4.1 ソフトウエア関係

(1) アプリケーション・プログラムのシステム設計上の問題点について

舶用のボイラ・タービン系に適したＤＤＣのシステム設計をするには、どのようにしたらよいかが一番の問題となるが、そのためには、下記(a)～(c)のごとき項目について、その仕様上の問題点を明確にしなければならない。

これは定時処理プログラムのフローチャートの作成および各種のテーブル構成を決定するのに、不可欠な要素だからである。

(a) 対象プロセスの決定

対象は舶用のタービンプラントであるが、その中でも、従来の実績のある、アナログサブループとの連絡をとこまで行なったＤＤＣを考えるのか？Ｂａｉｌｅｙ や Ｈａｇａｎ などのＡ.Ｃ.Ｃ の領域も計算機にまかせるか？

(b) 機　　能

- どういう制御機能をもたせるか？ＰＩＤのみのＬｏｗ Ｌｅｖｅｌ のものか？さらに、カスケード、フィード・フォワード、あるいは将来、非干渉制御や状態変数等も利用したＳＣＣ等のＡｄｖａｎｃｅｄ Ｃｏｎｔｒｏｌ やＭＰ（Ｍａｘｉｍｕｍ Ｐｒｉｎｃｉｐｌｅ）もできるようなシステムを考えるのかをはつきりさせる。

  また、制御室からの弁開度のプログラム制御とか、燃料油や蒸気の急急しや断などのシーケンス制御もどこまでを計算機がカバーするかをきめる。これは定時処理プログラムと、これらのシーケンスプログラムとのリンケージの方法を決めねばならないからである。

- オペレータコンソール（ＨＡＲＤ の項参照）は、マン・マシン・コミュニケーションを考慮して、オペレータの負担を軽減するようなものでありたいが、これの仕様はどうするか？

  ロギング点、警報点、ディスプレイ点等はどういうものを出すか？

(c) ループ数の決定

これは、上記の(a)、(b)より必然的に決まつてくるが、さらにサンプルタイムごとにグループ化してまとめる必要がある。

これらの他に、システムプログラムとプログラミング言語に関して下記のような問題がある。すなわち

(d) モニタシステムについて

アプリケーション・プログラムのＲＵＮＮＩＮＧ を管理するモニタシステムは、計算機メーカ提供のものを利用するか、それとも、もつとコンパクトなコア常駐のこのプラント専用のものを作るのか？

(e) 言語について

プログラミング言語については、コンパイラベースのものは、プログラミングおよびデバック性容易だが、ＷＯＲＤ 数を喰いすぎるし、ＷＯＲＤ 内のビット処理ができない。アセンブラベースのものは、マシンワードと一対一に対応しているので、あらゆるロジックの処理はできる。しかし、一般性がないので、プログラマ以外には分りにくいので、プログラムの変更、デバック時、計算機の変更によるソフトの入れ換え時には、作業能力は大幅に低くなる。

したがつて、コアスペースに余裕があるなら、コンパイラ言語も処理できるシステムプログラムを利用し、アセンブラベース、コンパイラベース混用のソースプログラムから、相対形式プログラム→実行形式プログラムの構築も、そのシステムプログラムの中の処理プログラムで行なえるようなシステムプログラムを使うと便利である。ただし、これは計算時間をあまり問題にしない場合で、計算時間に厳しい制約が加わるようなときには、コンパイラ言語で作つたプログラムでは処理しきれない。また、この場合には、システムプログラムもアセンブラベースのプログラムを処理できるものでなければならない。

(2) システム構成の1案

上記の各項目をふまえて、システム設計の例として下記のものがあげられる。

制御ループとしてはＰＩＤ型の演算を行なうもの（ＤＤＣループ）と、ロギングとか、ディスプレイ用に使うループ（ＮＯＮ　ＤＤＣループ）とに分ける。ＤＤＣおよびＮＯＮ　ＤＤＣループは、各ループにつき、そのパラメータやデータのストアエリアをテーブルの形でそろえる。

ＮＯＮ　ＤＤＣ用テーブルの内容例；－

- ○入力の種類（アナログ、パルス・・・等）
- ○入力の機器
- ○ＤＤＣ演算の有無
- ○その他の演算（入力演算、むだ時間等）の有無およびそのテーブルの指定
- ○入力値（ノルマライズされた）ストアアドレス

ＤＤＣテーブル；－

- ○出力の種類（アナログ、ディジタル・・・・）および出力機器
- ○出力値ストアアドレス
- ○ P_B、T_I、T_L、T_D、SP（注1）
- ○ AM、RL、　指定（注2）
- ○偏差　ストアアドレス

注1

- P_B ： 比例定数
- T_I ： 積分定数
- T_L ： 1次遅れの時定数
- T_D ： 進みの時定数
- SP ： 設定値

注2

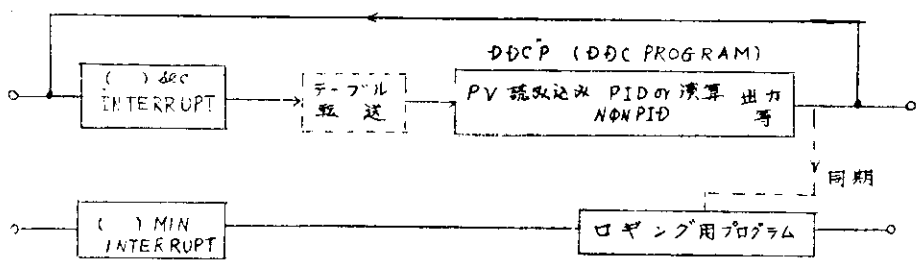
Auto、MANUAL
REMOTE、LOCAL　の略

各種の制御方式（フィード・フォワード、カスケード等）の指定の有無も、これらのテーブル内で行ない、さらに、それらの演算用のパラメータのテーブルのルックアップも、このテーブルで行なうようにすると多種の制御機能をもてるようになる。

これらのテーブル群は、システム・ジェネレーション（プログラムのオリジンを決めてコアにローディングするとき）のときに、コアに、ローディングし、ドラムやディスクパックの補助記憶装置を使う場合は、それらの外部メモリに格納する。使わない場合は、コア常駐となるため、テーブル転送の手続は不要となり、その分だけ処理時間が短かくなるが、その代りプログラムが走る領域が狭められ、高価なコアメモリを、定数データのストアエリアとしてだけのために占有されることになる。

これらのテーブルは、サンプルタイムの種類ごとにグループ化して一定の規則で配列させておくと、テーブル内の所定のループのテーブルの先頭アドレスを確実につかむことができる。

プログラムの起動は、最少のサンプルタイムに Set した時間で割込をかけるタイムオリエンティドの第2.4.1図のような形をとる。



第2.4.1図　定時処理プログラム

注）　テーブル転送は、テーブル類がコア、常駐の場合は、不要
ＰＶ；ＰＲＯＣＥＳＳ　ＶＡＬＵＥ

上記のＤＤＣプログラム内では、記入した項目の他に設定値の上下限チェック、線形化、ノルマライズ、フィルタリング、出力値の上下限チェック、スケール変換、出力種類判定等も必要に応じて行なう。

なお、これらの定時処理プログラムが走る前には、たとえば

ボイラ起動停止状態確認プログラム

補助発電機起動前状態確認プログラム

主要補機起動プログラム

等のシーケンスプログラムは、すでに起動されているとする。

シーケンスプログラムのうちで、主機起動プログラムは、定時処理プログラムの中からＳＥＴＳＥＴすることもできる。

第2.4.1図中、ＤＤＣＩで使う各ループのテーブルの先頭アドレスは、インデックスレジスタに入れておいて、ループが変るごとに、そのレジスタの内容をテーブルのＷＯＲＤ数だけ、加算するようにすれば、各ループごとの必要情報は、そのレジスタを基準にして取り出すことができる。

こうして、各サンプル時間のグループごとに、プロセスデータの読み込みを行ない ＰＩＤまたはＮＯＮ ＰＩＤ演算をし、その結果を出力の種類ごとに調整をして出す。ここで、設定値をセットする必要のあるループは、全ループＰＩＤ等の演算を行なう前に、その設定値セットルーチンを走らせる。

(3) 量子化のあらさとサンプリング周期の選定について

掲記の問題に関しては、現場のプロセスダイナミックスを考慮して、その制御性の面から、また、装備するＩ／Ｏ機器のハードウェアの使用上の限界から決めるべきで、一概に性決めにくい。

１例としては、アナログ入力信号については、１０ビットあるいは９ビットを０～８Ｖあるいは０～２０ｍＡ、０～５０ｍＡ等の電流に変換している。

この例では、検出端、発振器の最小感度を保つ条件（フルスケールの0.1％≒１０ビット）を満たしており、いままでのところ、それほど問題もおきていない。

サンプル周期に関しては、ＤＤＣのガイドラインで提出されている。

ＦＬＯＷ系　　１Ｓ
レベル系　　５Ｓ
温度系　２０Ｓ

が一応の目安となるがＣＲＡＳＨ ＳＴＯＰ、ＣＲＡＳＨ ＡＳＴＥＢＮ 時のように、負荷（蒸気流量）が急変すると、過熱器出口蒸とかドラム水位等は0.2秒くらいでサンプルしないと追いきれないというように最初に述べたごとくプロセスのダイナミックスがすべてかかわりを持っている。

そこで、システム設計をするという立場から見た場合とりあえず、基準のものを数種類におさえてしまい、その中での選択は任意にできるようにしておく、というのも一方法であろう。

たとえば、0.25sec、１sec、４secの３種類におさえると、制御ループのグループ化も、0.25秒のものは１個、１秒のものは４個、４秒のものは１６個と分けることができ、その中の各グループに現場のボイラ・タービン系の各ループを組み込めばよい。

(4) 演算のアルゴリズムについて



第2.4.2図　基本的ＰＩＤ演算

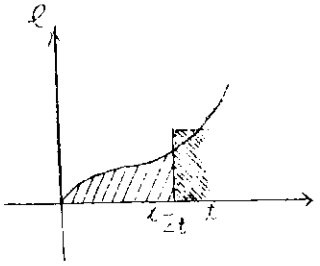
ＰＩＤの演算は、基本的には第2.4.2図のごとく偏差に対して、ＰＩＤ　ＡＣＴＩＯＮ　を施すと考えればよい。すなわち、時間領域で考えると、

$$y = e \cdot K + \frac{K}{T_I} \int_0^t e\,dt + K \cdot T_D \frac{de}{dt} \qquad \cdots\cdots (2.4.1)$$

（位置形）

これは、階差式にすると、

$$y_n = e_n \cdot K + \frac{K}{T_I} (SUM + e_n \Delta t) + K \cdot T_D \frac{e_n - e_{n-1}}{\Delta t} \qquad \cdots\cdots (2.4.2)$$



第2.4.3図

ここで、ＳＵＭは第2.4.3図の斜線部の面積で、

数式的には $\int_0^{t-\Delta t} e\,dt$ を示す。

積分項の精度を上げるには（2.4.2）式の～～～～の部分を

$\frac{e_n + e_{n+1}}{2}$ ・・ としたり、あるいは $\int_0^t e\,dt$ 全体をシンプソンの数値積分則を使つて（▨部）表わすこともできる。

なお、速度形の場合は（2.4.1）式を微分して、

$$v = \frac{dy}{dt} = K \frac{de}{dt} + \frac{K}{T_I} e + K \cdot T_D \frac{d^2 e}{dt^2} \qquad \cdots\cdots (2.4.3)$$

これは、階差式表示をすると、

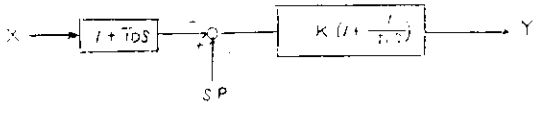
$$v_n = \frac{y_n - y_{n-1}}{\Delta t} \fallingdotseq K \cdot \frac{e_n - e_{n-1}}{\Delta t} + \frac{K}{T_I} e_n + K \cdot T_D \frac{e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}}{\Delta^2 t} \cdots (2.4.4)$$

ここで、Δtは微少量であるべき性質の値だが、実際問題としては、サンプリング時間を表わす。

ここで、第2.4.2図の方式をとる場合には、周波数領域ではK_1 T_I T_D の各係数が干渉し合うという問題が生ずることもあるので、Ｄアクションは、外へ出して（Ｐ＋Ｉ）と（Ｐ＋Ｄ）の直列形；

$$G(S) = K \left(1 + \frac{1}{T_I S}\right) (1 + T_D S) \qquad \cdots\cdots (2.4.5)$$

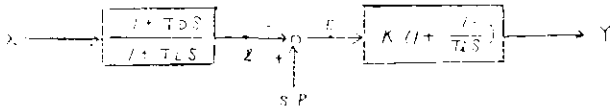
として表わす場合が多く、アナログ調節計も、このように回路を組んでいる例が多い。（1＋$T_D S$）項の抜いも、set pointの変動を ダイレクト に効かせないようにして、



第2.4.4図

第2.4.4図のように、組み込む例が多い。さらにフィードフォワードの補償を行なうときに便利なように、1次遅れ機構もかませる例もある。この場合には、フィードフォワードをしないときには、このLAG系によるローパスフィルタのアクション も行なうことができ、このようにフレキシブルな形とすべきである。

この場合のブロックダイヤグラムとしては第2.4.5図のようになる。



第2.4.5図

LEAD LAG 部は、時間領域では、

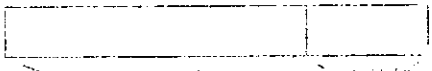
$$x + T_D \frac{dx}{dt} = z + T_L \frac{dz}{dt} \qquad \cdots\cdots (2.4.6)$$

これより $x_n + \frac{T_D}{\Delta t}(x_n - x_{n-1}) = z_n + \frac{T_L}{\Delta t}(z_n - z_{n-1})$ ……(2.4.7)

$$\therefore \quad z_n = \frac{1}{1+T_L} x_n + \frac{T_D}{1+T_L}(x_n - x_{n-1}) + \frac{T_L}{1+T_L} z_{n-1} \qquad \cdots\cdots (2.4.8)$$

$$\left(\text{ここで、} \quad T_D = \frac{T_D}{\Delta t} \text{、} \quad T_L = \frac{T_L}{\Delta t} \right) \qquad \cdots\cdots (2.4.9)$$

ここで、TD、TL 等のオペレータコンソールから自由に設定されるパラメータのWORD 構成をどうするかということも問題である。

一般的には、 TD、TL 等 ；  のようにする

（注 x_n、z_n は整数）

あるいは、これらのパラメータの設定は$\sqrt{2}$ 系列のものに固定し、

（たとえば、$\frac{1}{\sqrt{2}}$ 、 1、$\sqrt{2}$、2 ……という具合に）、この圧縮された値を記号化して、整数として扱う方法もある。

この場合には、パラメータセットの操作が簡便になるし、パラメータ切捨えによるドリフトが減少するという利点がある。

演算は、マルチプライ、デバイド、アット等の固定小数点型のアセンブラ言語の命令を使う。浮動型の演算では固定小数点型のデータを浮動小数点型のデータに変換する必要があり、しかもFLOATING DIVIDE FLOATING MULTIPLY等の浮動演算では、固定型演算の何倍もの計算時間を喰う。

なお、第2.4.5図のPIアクション部は（2.4.2）式の右辺第3項のない形となる。（位置形の場合）

速度形の場合も、（2.4.4）式の右辺第3項のない形となり、

$$\Delta y = y_n - y_{n-1} = K(e_n - e_{n-1}) + \frac{K}{T_I} \Delta t \cdot e_n \qquad \cdots\cdots (2.4.10)$$

となる。

2.4.2 ハードウェア関係

ハードウェアについては、CPU、I／O機器、CPUとI／O間のインタフェイス、オペレータコンソール等……があり、I／O機器一つをとってみても検出端、トランスミッタ、出力操作部、個々のセクションにつき、それぞれ設計製作、計装上の問題点があり、それらには、従来のアナログ方式での問題点がそのまま持ちこされるものが多い。この種の問題点の検討は、文献でも行なわれているので、ここでは、DDCのアプリケーションプログラムを作成するという立場から見た場合に、仕様上問題になると思われる点をピックアップし、それに対する対策をのべる。

(1)　I／O 装置の様式と計算機との結合という立場から

(a)　ＣＰＵ の機器構成をどうするか？

これは、ソフトウェア（アプリケーションプログラム＋システムプログラム（モニタ、ユーティリティ、リンケージエディタ等））の規模から、決めるべき問題であるが、必要ユニットとしては、ＣＰＵ、Ｉ／Ｏ タイプライタ、紙テープリーダ、紙テープパンチャ（ＣＲＴ ディスプレイ）等があればよい。

Ｉ／Ｏ タイプライタは、モニタにより管理され、 オペレータと計算機との対話に使うもので、コントロールメッセージのキーイン、タイプアウトが行なわれる。

紙テープリーダより、カードリーダのほうが、プログラム変更、修正時には役に立つが、コストとのかね合いで決めればよい。プログラムが安定してきて修正も、新プログラムの読み込みも必要でなくなつたら、両者とも取り払う、紙テープパンチャは、変更した新プログラムの打ち出し、最適化、統計処理用のためにデータの打ち出しに使える。

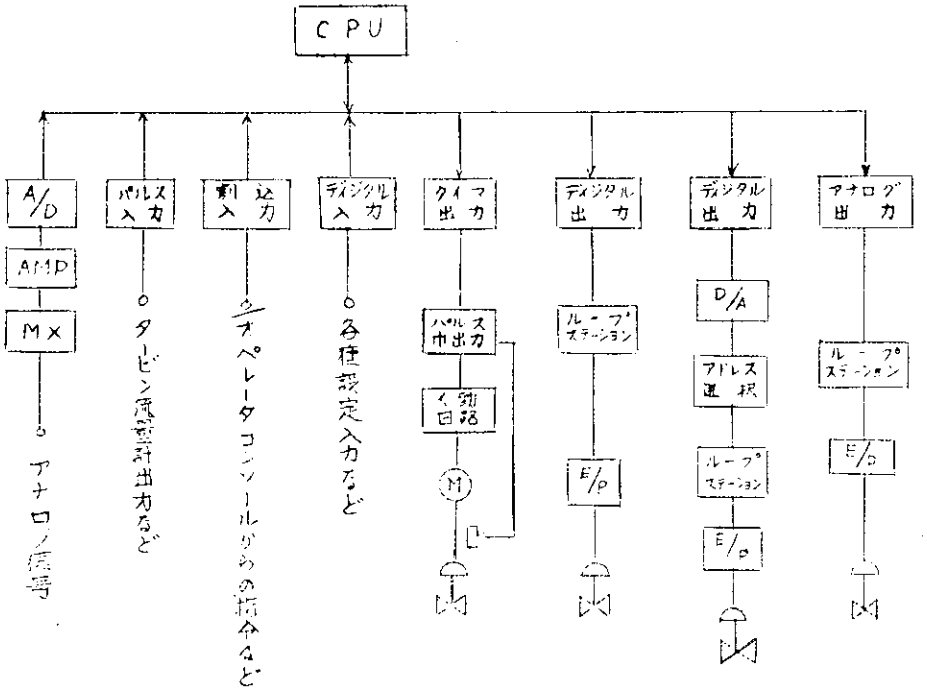
（ＣＲＴ）ディスプレイは、使い方によつては非常に役立つと思われるが、これを運用するためには、オペレーティングシステム、このディスプレイのハードを制御するサブルーチン、文字や図形を処理するときは、それらの処理プログラムの作成等で、これだけのソフトでも、かなりの規模になりメーカ、ユーザ両サイドで協力しないと良いものはできない。

この他、ドラム（またはディスクパック）はコンピュータメーカ提供のシステムプログラムを利用するときは、必要な場合が多く、ユーザ側でコンパクトなシステムプログラムを作るならば、コア常駐にして、ドラム（またはディスク）は、使わないでもすまされる。

(b)　Ｉ／Ｏ 関係の機器構成をどうするか？

Ｉ／Ｏ と ＣＰＵとのインタフェイスとしては、対象プラントの Ｉ／Ｏ の種類、規模に応じて、自由に実装可能な形式になつているものが望ましい。

ＤＤＣ システムに対して、標準的な構成としては第 2.4.6 図のような形が考えられている。



第 2.4.6 図

ここで出力部の駆動方式をどうするかが問題になるが、これについては、

1）位置形アナログ出力 ——→（電　空 / 電　油）10～50mA 変換 ——→（空気式 / 油圧式）操作部 ——→

2）速度形パルス幅出力 ——→ 電動操作部 ——→

3）　〃　　——→（電　空 / 電　油）変換 ——→（空気式 / 油圧式）操作部 ——→

1）の方式については、アドレス選択用と、操作部変位を示すディジタル出力形のデータをもらい、後者をD／A 変換して直流電圧に変え、さらに指定のアドレスのループステーションで直流電流に変換されて、操作部に伝わる（第2.4.7図参照）。

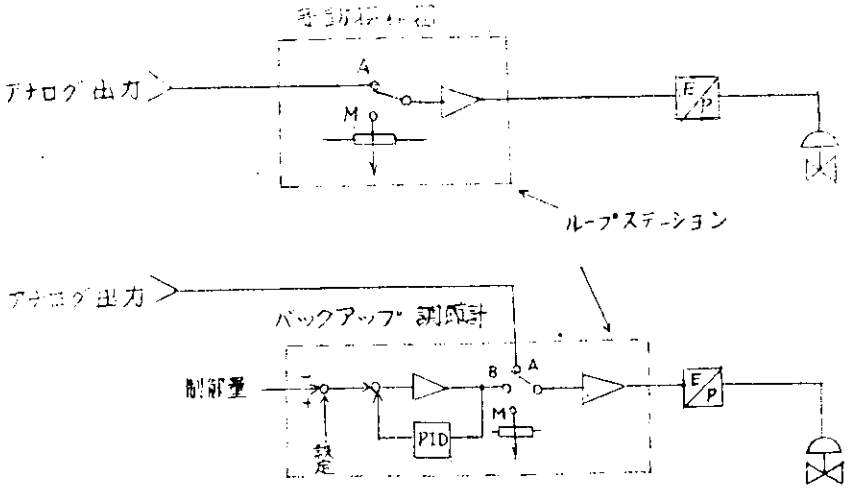
2）の方式については、バックアップ用の手動操作器出力は、同じく調節計を通ってリレーまたはサイリスタを使った駆動回路へ入りインダクタ形同期モータ等を動かす（第2.4.8図参照）。

3）については、パルス幅信号は、ミラー積分器により積分され、さらにバックアップ用調節計を経由して、電力出力の形に変わって、これが電空・油に変換され操作部に伝わる（第2.4.9図参照）。

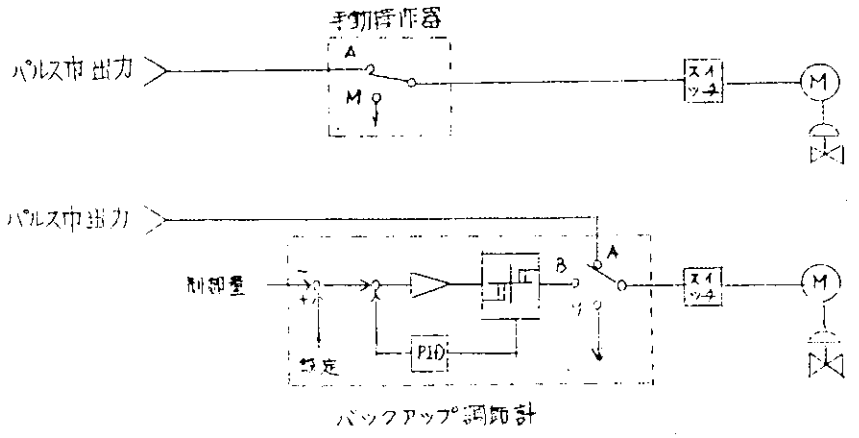
さらに、2）の場合、パルス幅の代りに、パルス数を使い、パルスモータを駆動するという方法もある。

インダクタモータあるいはパルスモータを使う場合には、弁やダンパのリンケージ部分が電動機の振動により、共振を起すことがあり、これについては機構を全体的に簡素化するような手が打たれている。

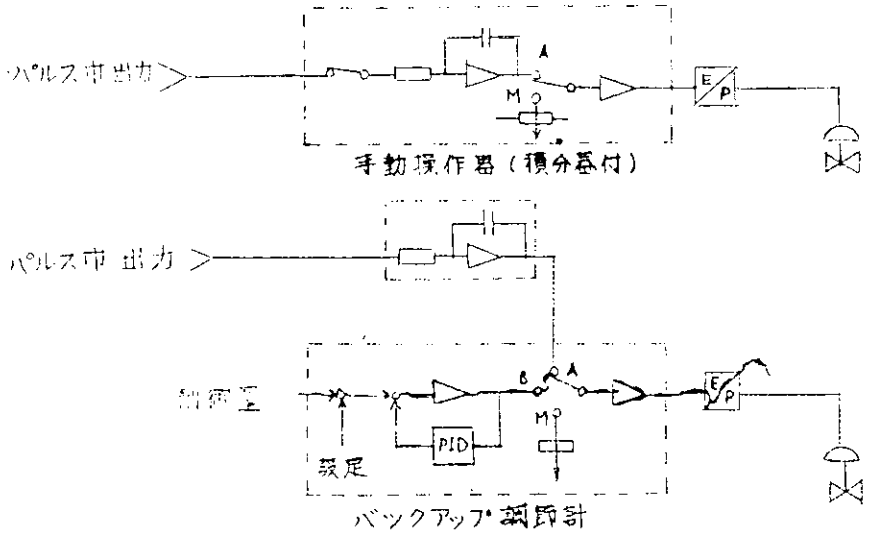
また、パルスモータを使う場合は弁、ダンパ等が全閉したときにモータの振動が起ることもあり、これについては、それらの全閉をリミットスイッチで検知して駆動部のスイッチを切ってしまうことも行なわれている。またパルスモータは、負荷トルクが大きいときは起動しない場合もあり、このため、軸受部の摩擦をできるだけ少なくするような配慮がなされている。



第2.4.7図　位置形アナログ出力方式



第2.4.8図　速度形パルス幅出力方式



第2.4.9図　速度形パルス幅出力方式

(c)　オペレータコンソールの仕様はどうするか？

オペレータコンソールは、DDCシステムの操作をより容易に行なうためにはどうしても必要で、そのための基本的な機能として、下記のような配慮をすべきであろう。

1）ループNOの指定により、そのループのPV（PROCESS VALUE）、SR（SET POINT）、OT（OUT PUT）、TD（DIFFERENTIAL TIME）、TL（LAG TIME）等のディスプレイ。

2）ループ内の各パラメータ（TD、TL、PB（PROPORTIONAL BAND）Ti（INTEGRAL TIME）……等）の変更およびAUTO⇄MANUALの切換など。

(2)　I／O機器の信頼性とバックアップシステムについて

検出端、トランスミッタ、インタフェイス、出力操作部の設計には、特に標準化部品の採用、あるいは、プラグイン方式の採用等により、回路の簡素化、互換性が図られている例が多い。

また、コンピュータシステム全体の信頼性を上げるためには、主要なI／O部は並列化するとか、CPU自体も2台使うとかの冗長系を採用していくことも考えられるが、コストの問題がすぐ効いてくるので、とりあえず、個々の制御ループのバックアップ方式はマニュアルで行ない、手動しにくいものは、バックアップ用の調節計に切換

えるような方式が考えられている。

また、入出力信号のHigh, Low チェックはループごとに行ないレベルをこえるものは、その前の値、あるいは安全サイドの値を出すということも、ソフトウェアで、処理するのが通常である。

2.4.3 船舶の特殊事情

出入港時には、タービンのプログラム、コントロールによる運動、あるいはCRASH STOP, CRASH ASTERN 等により、負荷変動が非常に大きく、しかも、ひんぱんに加わる。したがって、従来のA.C.C 系、給水調節関係、バーナコントロール関係等で考慮されている対策は、これらがDDC に移行しても定時処理プログラム、シーケンスプログラムの中で、そのまま生かして、さらによりよい方向にもっていく必要がある。たとえば、積分形の調節器でリミッタをかけていたようなループ形ソフトでも、積分形のアクションを施してハイローリミットをかける。また、主蒸気圧低下、ボイラ水面の規定レベルオーバー信号により、メインタービンのガバナーモータをインタロックして回転数上昇を抑える等のシーケンスプログラムも、ソフトで行なう。

また、最近の大型タンカーでは特にマニューバリング時と、停止時の負荷のレシオが大きいため、ボイラ制御性のレンジャビリティを上げる必要があり、そのため、A.C.C では、低負荷での空気過剰率を大きくするとか、使用幅の広いバーナの選択、あるいはバーナ本数制御等により、その対策が成されており、また、給水流量関係では最大流量時の弁差圧を上げて、最低負荷時の弁差圧との比を小さくするとか、あるいは、流量調節弁差圧一定制御をすることにより、対処している例があるが、これらのアクションも適宜、ソフトの中に生かしていく必要がある。

また、急激な負荷変動に対しては、追従性を上げれば良いので、サンプル時間を切換えて、より短かいものを選ぶ。

PID Constant も、あらかじめ設定してある最適なものを選定するようにする。

これらのアクションは、ループ数が少ないうちはオペレータコンソールから行なうこともできるが、オペレータの負担を軽減するためにはできるだけ、ソフトの中で処理するようにしたほうが好ましい。

負荷変動の少ないとき、たとえば、外洋をノルマル運行しているとき等は、サンプル時間はもっと短いものに切換え、PID パラメータも、それに対応したものを使うようにする。

上記のようなアクションをソフトで処理したいで、負荷変動の多い出入港時は全面的にアナログ調節計によるバックアップ方式に切換えてしまう方法も考えられる。

参　考　文　献

1) DDC システム　上田他　富士時報　VOL 43, No 6, '70

2) DDC シリーズ　その2、上田他　富士時報　VOL 41, No 12, '68

3) 計測の問題点　五十嵐　日本舶用機関学会誌　VOL 5, No 2, '70

4) SURVEY OF SOFTWARE FOR DDC
T.L. WILLMOTT, ISA TRANS, VOL 8, No 4, '69

5) THEORETICAL ASPECTS OF DDC
ROGER M. SAKKE (　〃　)

6) ボイラ自動化計画上の問題点　講演

7) ディジタルプロセス制御　山下他　(コロナ社)

3. タービンプラント主要部の動特性の理論的ならびに実験的研究

3.1 まえがき

本報告は、昭和45年10月に行なつた舶用タービンプラントのボイラを中心とした動特性試験の結果と、それにともなつて実施した理論計算の結果についてとりまとめたものである。

試験は、プラントの負荷レベル1/4、2/4、4/4（90%）NOR.において、可能なだけの制御系を手動として固定し、いわゆる開ループで実施した。

試験に当つては、試験入力以外の外乱が入らぬように極力留意したが、補助蒸気系統の圧力制御の結果あらわれた蒸気量の変化、給水流量のボイラ圧力の変化にもとづく変化等、プラントと現制御系とから不可避的に入る外乱とによつて、ボイラ単体の動特性を把握するよりは、プラントの中でのボイラの動特性を把握する結果となつている。

理論計算は、ボイラを水循環系と過熱器系とに分別し、さらにこれらをいくつかのブロックに分割して計算する方法によつた。試験の結果は、これを周波数応答に変換して整理したので、理論計算も周波数応答の計算を行なつた。ただし、計算の便のため圧力、温度、水位等の各変数をベクトルで表示し、計算は行列計算に帰着させた。

本方法で求めた結果は、圧力、水位等でかなり良い結果をえたが温度ではかなりくいちがいを生じた。

3.2 実船試験

3.2.1 試験対象船ならびに対象機関

動特性試験の対象船ならびに対象機関はつぎのとおりである。

(1) 対象船

日本郵船 高瀬丸

DWT 226,000オイルタンカー

三菱重工長崎造船所建造

(2) 対象機関

主　機：34,000PS×90RPM

三菱－MSタービン

主ボイラ：MCR 70 T/H（NoR. 53.5 T/H）

×61.5atg ×515℃ ×2缶

三菱－CE舶用ボイラ V2M－8W型

重油専焼、強圧通風型

以上主機、主ボイラとも三菱重工長崎造船所製

(3) 主ボイラの主要目

		MCR	NOR
蒸発量	Kg/H	70,000	53,500
過熱蒸気量	〃	51,500	49,500
緩熱蒸気量	〃	18,500	4,000
蒸気圧力（SH出口）	atg	61.5	61.5
〃（過熱器出口）	〃	60.2	61.4
蒸気温度（SH出口）	℃	515	515
燃料消費量	Kg/H	4,360	3,460
空気過剰率	%	15	10
燃焼用空気量	Kg/H	69,910	53,070

3.2.2 試験実施期日

開ループの動特性試験は昭和４５年１０月２１、２２日に海上運転を行なつて実施した。

3.2.3 試験項目

試験はつぎの各項目についてプラント負荷$^{1}/_{4}$NOR、$^{2}/_{4}$NOR、$^{4}/_{4}$NORの３負荷レベルで各レベル各項目とも、少なくとも同じ試験を３回実施した。

1) 主タービン操縦弁開度変化試験

2) 燃焼量変化試験

3) 給水流量変化試験（給水制御弁開度変化試験）

4) デスーパヒータ制御弁開度変化試験

3.2.4 試験方法

試験は、その結果をフーリエ変換し、周波数応答を求めることを目標として全項目にわたり、入力として巾1.5分の矩形パルスを用いた過渡応答法で行なつた。また、入力パルスは燃焼量変化試験以外は、すべて入力が増加するように加えた。

試験の条件、操作条件の詳細は第3.2.1表に示すとおりである。

(1) 主タービン操縦弁開度変化試験

主タービン操縦弁開度変化試験においては、主タービン回転数制御装置の回転数フイードバックを切離し、回転数設定に電圧パルスを加え、弁開度を所要の値だけ変化させることによつて試験を行なつた。

(2) 燃焼量変化試験

燃焼量の変化はボイラマスタセレクタ入力をマスタ制御器のローデイングより切離し、電空変換器を通して空気圧に変化したパルスをセレクタ入力に加えてあたえた。この場合第3.2.1表に示すように、燃料油流量制御系と空気流量制御系とは、自動としそれぞれの設定がマスタよりのパルスで駆動されるようにし、両流量は同時に入力パルスに追従して変化するようにした。

(3) 給水流量変化試験

給水量の変化は、給水セレクタ入力を給水制御器のローデイングより切り離し、電空変換器によつて空気圧に変換したパルスをセレクタ入力に加え、給水制御弁の開度を変化させた。給水流量は制御弁の開度と弁出入口の圧力差で決まるため、弁開度を上記の方法で変化させても弁出入口の圧力差、特にドラム蒸気圧力の変化によつて流量が変化し、結果として本試験は給水制御弁開度変化試験となつている。

(4) デスーパヒータ制御弁開度変化試験

デスーパヒータ制御弁の開度変化は、デスーパヒータセレクタ入力を制御器のローデイングより切り離し、空気圧パルスをセレクタ入力に加えてあたえた。

3.2.5 試験時計測とその項目

試験時、主要変量についてはオシログラフ計測を行ない、これら変量ならびに補助的な変量について、初期値および最終値の読み取り計測を行なつた。読み取り計測は、本船装備の指示計、データロガーによつて実施した。

オシロ計測の対象とした変量のうち、圧力、水位、主軸回転数、軸馬力などは、それぞれ本船装備の制御用ならびに計器用伝送器で、電気または空気圧に変換されたものを計測し温度は熱電対を、主タービン操縦弁開度は差動変圧器を特設して計測を行なつた。

これら試験時に計測を行なつたオシロ計測項目を第3.2.2表に、各試験毎の初期値および最終値の計測結果を第3.2.3表に示す。

第3.2.1表A　試験時操作条件ならびに運転条件

試験番号	試験名称	試験時操作条件		試験時運転条件											
		操作個所（試験信号挿入個所）	操作要領（方法、目標）	基底負荷(%)	セレクタステーション										
					主タービン操縦弁	ボイラマスタ	No.1ボイラ					No.2ボイラ				
							燃料油制御弁	FDFダンパ	給水制御弁	デスーパヒータ制御弁	バーナ制御	燃料油制御弁	FDFダンパ	給水制御弁	デスーパヒータ制御弁	バーナ制御
124	主タービン操縦弁開度変化	主タービン操縦弁（回転数制御器）	パルス巾1.5分 パルス高 +5%	50	* D	M	A	A	M	M	M	A	A	M	M	M
134				75												
144				100												
224	燃焼量変化	ボイラマスタセレクタ（ボイラマスタセレクタ入力）	パルス巾1.5分 パルス高 −5%	50	C	* D	A	A	M	M	M	A	A	M	M	M
234				75												
244				100												
324	給水流量変化	給水制御弁セレクタ（給水セレクタ入力）	パルス巾1.5分 パルス高 +5%	50	C	M	A	A	* D	M	M	A	A	M	M	M
334				75												
344				100												
724	デスーパヒータ制御弁開度変化	デスーパヒータ制御弁（デスーパヒータセレクタ入力）	パルス巾1.5分 パルス高+30%	50	C	M	A	A	M	* D	M	A	A	M	M	M
734				75												
744				100												

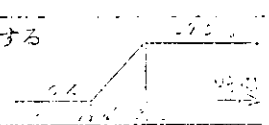
*：　セレクタはAUTOとし、セレクタ入力に加えた信号で操作した。

A：　AUTO

M：　HANDで固定

第3.2.1表B　試験実績ならびに特記事項

試験名称	試番	実施日時			基底負荷(%)	操作個所	操作量(%)	特記事項
		実施月日	実施時刻 開始	実施時刻 終了				
燃焼量変化試験	214－1	10/21	11°50′30″	12°15′30″	25	ボイラマスタセレクタ	－2	
	214－2		12°40′30″	13°10′30″			－5	
	214－3		13°25′25″	13°53′			－5	
給水流量変化試験	314－1	10/21	14°10′30″		25	給水側御弁セレクタ	＋5	応答が小さく14°15′30″で中止
	314－2		14°29′30″				＋14	水位の変化が大きすぎたので14°35′30″中止
	314－3		14°46′	15°00′			＋9	
	314－4		15°11′	15°20′			＋9	
	314－5		15°39′	15°55′			＋9	
デスーパヒータ制御弁開度変化試験	714－1	10/21	16°17′		25	デスーパヒータ制御弁セレクタ	＋25	操作空気圧バルブ閉のため制御弁が開かなかつた。
	714－2		17°00′	17°25′			＋25	
	714－3		17°37′	17°58′			＋30	
	714－4		18°08′	18°38′			＋37.5	
主タービン操縦弁開度変化試験	114－1	10/21	18°54′	19°16′	25	操縦弁リフト	＋6.5	
	114－2		19°25′	19°50′			＋6.5	
	114－3		20°00′	20°18′			＋6.5	
主タービン操縦弁開度変化試験	124－1	10/21	20°50′	21°02′	50	操縦弁リフト	＋6.5	
	124－2		21°31′	21°53′			＋6.5	
	124－3		22°04′	22°30′			＋6.5	
燃焼量変化試験	224－1	10/21	22°43′	23°10′	50	ボイラマスタセレクタ	－3	点1 給水操作22°55′
	224－2		23°29′	23°55′			－5	
	224－3		0°11′	0°35′			－5	点2 給水操作0°26′　0.5％操作でバランスした。

給水流量変化試験	321－1	10／22	0°49′	1°00′	50	給水制御弁セレクタ	＋11	1°00′ Ma1 水位高警報で給水操作　2％
	321－2		1°25′	1°35′			＋11	1°34′ Ma1 水位高警報で給水操作
	321－3		1°53′	2°08′			＋8	1°06′　同　上
	321－4		2°19′	2°35′			＋7.5	
デスーパヒータ制御弁開度変化試験	724－1	10／22	2°49′	3°13′	50	デスーパヒータ制御弁セレクタ	＋37.5	Ma2 水位高のため給水操作　2°57′
	724－2		3°26′	3°40′			＋37.5	
	724－3		3°53′	4°13′			＋37.5	操作信号に対する制御弁動作 
								4°45′ SH出口蒸気温度設定510℃（Ma1 Ma2共）
燃焼量変化試験	244－1	10／22	4°54′	5°10′	90	ボイラマスタセレクタ	－11	給水操作（Ma2 5°08′、Ma1 5°11′）
	244－2		5°22′				－3.5	入力が小さすぎたので中止
	244－3		5°45′	6°03′			－5	Ma1 水位変化なし　Ma2 給水操作　5°56′
	244－4		6°25′	6°45′			－5	
給水流量変化試験	344－1	10／22			90	給水制御弁セレクタ	＋9	
	344－2		7°22′				＋6	
	344－3		7°54′	8°12′			＋5	
	334－4						＋5	
主タービン操縦弁開度変化試験	144－1	10／22	9°05′	9°15′	90	操縦弁リフト	＋6.5	
	144－2						＋6.5	
	144－3						＋6.5	
	144－4						＋6.5	
デスーパヒータ制御弁開度変化試験	744－1	10／22	10°59′	11°09′	100	デスーパヒータ制御弁セレクタ	＋38	給水制御系　Ma1 Ⓜ　Ma2 Ⓐ Ma1 水位低により操作する。
	744－2		11°20′				＋31	
	744－3		11°50′	12°10′			＋31	

第3.2.2表　オシロ計測点詳細表

試験名称	試番	負荷 %	オシロ 1 主タービン操縦弁開度	2 主軸回転数	3 中間軸トルク	4 主蒸気圧力	5 No.1ボイラドラム圧力	6 No.2ボイラドラム圧力	7 給水制御弁前圧力	8 No.1ボイラ燃油ヘダ圧力	9 HPT第一段後圧力	10 第三抽気蒸気圧力	11 No.1ボイラ補助蒸気圧力	12 No.2ボイラ補助蒸気圧力	13 No.1ボイラ蒸気流量	14 No.2ボイラ蒸気流量
主タービン操縦弁開度変化試験	114－1	25	○	○	○	○	○	○			○		○	○		
	114－2		○	○	○	○	○	○			○		○	○		
	114－3		○	○	○	○	○	○			○		○	○		
	124－1	50	○	○	○	○	○	○			○		○	○		
	124－2		○	○	○	○	○	○			○		○	○		
	124－3		○	○	○	○	○	○			○		○	○		
	144－1	90	○	○	○	○	○	○			○		○	○		
	144－2		○	○	○	○	○	○			○		○	○		
	144－3				中			止								
	144－4		○	○	○	○	○	○			○		○	○		
燃焼量変化試験	214－1	25		○	○	○	○	○		○	○		○	○		
	214－2			○	○	○	○	○		○	○		○	○		
	214－3			○	○	○	○	○		○	○		○	○		
	224－1	50		○	○	○	○	○		○	○		○	○		
	224－2			○	○	○	○	○		○	○		○	○		
	224－3			○	○	○	○	○		○	○		○	○		
	244－1	90		○	○	○	○	○		○	○		○	○		
	244－2				中			止								
	244－3			○	○	○	○	○		○	○		○	○		
	244－4			○	○	○	○	○		○	○		○	○		
給水流量変化試験	314－1	25			中			止								
	314－2				中			止								
	314－3			○	○	○	○	○			○		○	○		
	314－4			○	○	○	○	○			○		○	○		
	314－5			○	○	○	○	○			○		○	○		
	324－1	50		○	○	○	○	○			○		○	○		
	324－2			○	○	○	○	○			○		○	○		
	324－3			○	○	○	○	○			○		○	○		
	324－4			○	○	○	○	○			○		○	○		
	344－1	90		○	○	○	○	○			○		○	○		
	344－2			○	○	○	○	○			○		○	○		
	344－3			○	○	○	○	○			○		○	○		
	344－4			○	○	○	○	○			○		○	○		
デスーパヒータ制御弁開度変化試験	714－1	25			中			止								
	714－2			○	○	○	○	○			○		○	○		
	714－3			○	○	○	○	○			○		○	○		
	714－4			○	○	○	○	○			○		○	○		
	724－1	50		○	○	○	○	○			○		○	○		
	724－2			○	○	○	○	○			○		○	○		
	724－3			○	○	○	○	○			○		○	○		
	744－1	100		○	○	○	○	○			○		○	○		
	744－2			○	○	○	○	○			○		○	○		
	744－3			○	○	○	○	○			○		○	○		
後進試験	844－1	100	○	○	○	○				○	○					
	844－2		○	○	○	○				○	○					

試験実施日　1970.10／21、22、27

計測点

15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
No.1ボイラ燃油流量	No.1ボイラ空気流量	No.1ボイラ給水流量	総給水流量	No.1ボイラSH蒸気温度	No.1ボイラDSH出口温度	No.1ボイラDSH入口温度	No.1ボイラECO出口給水温度	No.1ボイラECO入口給水温度	LPT排気温度	ローディングボイラマスクセレクタ	No.1ボイラ燃油制御弁開度	No.1ボイラFDFダンパ開度	No.1ボイラ給水制御弁開度	No.1ボイラDSH制御弁開度	No.1ボイラドラム水位	No.2ボイラドラム水位	デイアレータ水位	デイアレータ器内圧力	No.2BFP吸込圧力	アトモスドレンタンク水位	デイアレータ加熱蒸気圧力
		○		○	○	○	○	○	○						○	○	○		○		
		○		○	○	○	○	○	○						○	○	○		○	○

第3.2.3表A 動特性試験時読取り値（その1）

| 日付 | 試験番号 | 時刻 | メイン・タービン サーボモータリフト | メイン・タービン ガバナリフト | メイン・タービン 主蒸気圧力 | メイン・タービン 軸馬力 | メイン・タービン 主軸回転数 | 発電機 主 | 発電機 補助 | 圧力 高圧第一段 A | 圧力 高圧第一段 B | 圧力 高圧第一段 C | 圧力 主蒸気 | 圧力 ボイラ過熱蒸気 A No.1 | 圧力 ボイラ過熱蒸気 A No.2 | 圧力 ボイラ過熱蒸気 B No.1 | 圧力 ボイラ過熱蒸気 B No.2 | 圧力 ボイラ過熱蒸気 C No.1 | 圧力 ボイラ過熱蒸気 C No.2 | 圧力 蒸気ドラム A No.1 | 圧力 蒸気ドラム A No.2 | 圧力 蒸気ドラム B No.1 | 圧力 蒸気ドラム B No.2 | 圧力 緩熱蒸気 No.1 | 圧力 緩熱蒸気 No.2 | 圧力 給水 | 圧力 燃油 No.1 | 圧力 燃油 No.2 | 流量 主蒸気 | 流量 過熱蒸気 | 流量 給水 | 流量 燃油 No.1 | 流量 燃油 No.2 | 流量 空気 No.1 | 流量 空気 No.2 | 温度 過熱蒸気 B No.1 | 温度 過熱蒸気 B No.2 | 温度 過熱蒸気 C No.1 | 温度 過熱蒸気 C No.2 | 温度 緩熱蒸気 No.1 | 温度 緩熱蒸気 No.2 | 温度 節炭器出口給水 A No.1 | 温度 節炭器出口給水 A No.2 | 温度 節炭器出口給水 C No.1 | 温度 節炭器出口給水 C No.2 | 温度 給水 A | 温度 給水 C | 水位 ボイラ1 A No.1 | 水位 ボイラ1 A No.2 | 水位 蒸気ドラム B No.1 | 水位 蒸気ドラム B No.2 | 信号圧 SH温度制御 | 信号圧 燃油制御弁 No.1 | 信号圧 燃油制御弁 No.2 | 信号圧 主制御器 | |
|---|---|---

第3.2.3表B　動特性試験時読取り値（その2）

日付	試番	時刻	メイン・タービン サーボモータリフト	メイン・タービン ガバナリフト	メイン・タービン 主蒸気圧力	メイン・タービン 軸馬力	メイン・タービン 主軸回転数	発電機 主	発電機 補助	高圧第一段 A	高圧第一段 B	高圧第一段 C	主蒸気	圧力 ボイラ過熱蒸気 A No.1	ボイラ過熱蒸気 A No.2	ボイラ過熱蒸気 B No.1	ボイラ過熱蒸気 B No.2	ボイラ過熱蒸気 C No.1	ボイラ過熱蒸気 C No.2	ボイラム A No.1	ボイラム A No.2	ボイラム B No.1	ボイラム B No.2	緩熱蒸気 No.1	緩熱蒸気 No.2	給水	燃油 No.1	燃油 No.2	流量 主蒸気	過熱蒸気	給水	燃油 No.1	燃油 No.2	空気 No.1	空気 No.2	温度 過熱蒸気 B No.1	過熱蒸気 B No.2	過熱蒸気 C No.1	過熱蒸気 C No.2	緩熱蒸気 No.1	緩熱蒸気 No.2	節炭器出口給水 A No.1	節炭器出口給水 A No.2	節炭器出口給水 C No.1	節炭器出口給水 C No.2	給水 A	給水 C	水位 ボイラ A No.1	ボイラ A No.2	ボイラム B No.1	ボイラム B No.2	信号圧 SH温度制御	燃油制御弁 No.1	燃油制御弁 No.2	主制御器
	324-1	始 0°49′	22.5	22.5	58	19		517		22	21	20.7	58	61.5	61.5	60	60	62	61	63.5	63.5	64	63	58	59	83	20	21.5			41.55	2.25	2.40	50	52	490	502	489	502	285	285	225	225	225	226	196	196	5	25	0	40		42	42	48
		終 1°00′	22.5	22.5	54	17		511		20	19	19.1	54	57	57	55	55	57	57	59	59	59	59	54	54	82	19.5	20.5			43.8	2.22	2.35	47	50	490	497	490	495	280	282	226	225	221	224	197	196	170	30	170	30		41	40	45
	324-2	始 1°25′	22.5	22.5	58	18		518		22	20.5	20.7	58	61	61	60	60	62	61	63	63	63	63	58	59	82	20.5	23			41.55	2.40	2.52	50	55	490	501	492	502	286	286	225	226	226	225	196	197	-20	40	-10	40		40	41	46
		終 1°35′	22.5	22.5	56	18		515		21	20	19.9	56	59.5	59.5	57	57	60	59	62	62	62	61	56	56	82	20.5	21.5			43.5	2.28	2.45	46	53	498	501	496	500	283	283	224	226	222	224	197	196	155	-10	150	40		44	44	46
	324-3	始 1°53′	22.5	22.5	58	19		540		22	21	20.7	58	61.5	61	60	60	62	61	63.5	63	64	63	58	59	82	20.5	21.5			39.15	2.35	2.48	52	55	490	502	490	502	285	285	226	226	225	224	196	197	-10	-15	-10	30		41	42	45
		終 2°08′	22.5	22.5	56	17.5		506		21	20	19.6	56	59	59	57	57	59	58	61	61	62	60	55	56	82	20.5	21.5			44.7	2.28	2.40	50	52	497	495	493	493	282	282	225	226	221	224	197	196	140	30	150	30		44	42	46
	324-4	始 2°19′	22.5	22.5	58	19		550		22	20	20.7	58	61	61	60	60	62	61	63	63	64	64	58	59	82	20.5	21.5			40.35	2.28	2.40	50	55	490	502	489	503	286	285	226	225	229	227	196	196	-45	-20	-30	30		43	44	46
		終 2°35′	22.5	22.5	57	19		544		22	20	20.5	57	60.5	60.5	60	60	61	61	62.5	62.5	64	64	57	58	82	20.5	21.5			44.0	2.31	2.5	51	55	500	501	499	499	284	285	224	226	224	225	196	196	110	30	90	40		42	42	50
10	724-1	始 2°49′	22.5	22.5	58	19		556		22	20	20.6	58	61	61	60	60	62	61	63	63	63	64	58	59	82	20.5	22			42.1	2.30	2.45	50	55	492	503	492	502	284	285	224	226	224	225	196	196	25	-20	20	40		43	44	48
		終 3°13′	22.5	22.5	56	18		544		22	20	19.9	56	59	59	56	57	60	59	61.5	61.5	62	62	56	57	82	19	20			41.35	2.25	2.35	48	50	495	500	495	498	282	283	224	226	224	226	197	196	40	0	40	5		42	42	45
月	724-2	始 3°26′	22.5	22.5	58	18.5		557		22	21	20.6	58	61	61	60	60	62	61	63	63	64	63	58	59	82	20	21.5			41.7	2.32	2.45	50	54	497	501	496	500	284	284	225	226	224	225	196	196	20	20	20	10		44	42	46
		終 3°40′	22.5	22.5	59	20		525		22	21	21.2	59	61.5	61.5	61	61	63	63	64	64	65	65	59	60	82	19	21.5			38.1	2.40	2.60	50	52	495	507	493	503	285	287	225	227	227	226	196	196	-55	20	-150	30		42	42	46
22	724-3	始 3°53′	22.5	22.5	58	18.5		518		22	20	20.6	58	61	61	60	60	62	61	63	63	64	64	58	59	83	20	20.5			39.75	2.25	2.40	45	47	498	503	496	502	283	284	226	227	227	226	196	197	0	10	0	20		40	51	44
		終 4°13′	22.5	22.5	56	18		545		21	20	20.1	56	60	60	59	59	60	60	62	62	62	62	57	57.5	82	19	20			41.3	2.25	2.38	47	50	495	505	492	504	282	282	224	228	223	226	197	197	30	105	0	120		40	39	45
日	244-1	始 4°54′	33.5	47.5	58	31		586		38	38	37.6	58	60	60	60	60	61	61	64	64	64	65	57	58	82	17	17			55.86	3.05	3.20	85	90	502	510	502	508	274	276	233	233	237	239	205	207	20	20	7	7		45	45	63
		終 5°10′	33.5	48.0	56	30		580		37.5	37	36.7	56	60	60	58	58	59	59	63	63	63	62	57	57.5	82	17	17			53.7	3.05	3.20	85	93	515	515	512	516	277	279	238	243	234	240	208	207	150	30	145	130		46	44	63
	244-2	始 5°22′			中		止																																													
		終																																																			
	244-3	始 5°45′	33.5	47.5	58	30.5		608		39	38	38.3	58	61	61	60	60	62	62	65	65	65	65	58	60	81	17	18			57.0	3.10	3.30	85	100	510	510	507	507	278	280	237	238	239	240	208	209	20	25	5	15				65
		終 6°03′	33.5	47.5	57	31		582		39	38	37.8	57	61	61	60	60	61	61	65	65	65	65	58	58.5	81	17	18.5			53.6	3.1	3.3	87	98	511	511	510	511	277	280	238	241	237	239	209	208	10	100	0	120		47	45	65
	244-4	始 6°25′	33.5	48.0	57.5	31		566		39	38.5	38.3	57.5	61	61	60	60	62	62	65	65	65	65	59	60	82	17	18			56.1	3.05	3.3	89	96	510	508	508	504	278	280	237	238	237	243	209	210	20	20	20	-20		48	45	60
		終 6°45′	33.5	48.0	56	31		598		38.5	38	37.7	56	61	61	60	60	61	61	65	65	65	65	58	58.5	82	20.5	22			60.4	3.25	3.6	87	96	510	510	510	508	278	280	237	240	237	240	208	209	-50	25	-130	100		46	45	60
	244-1	始	33.5	48.0	57	31		613		38.5	38.5	38.4	57	61.5	61.5	60	60	62	62	65.5	65.5	65	65	59	60	82	17.5	18			55.2	3.1	3.35	88	100	508	508	507	507	278	281	237	239	238	239	209	209	0	30	-20	25		48	46	61
		終	33.5	48.0	57	30.5		606		39.0	38	37.9	57	61.5	61.5	60	60	61	61	65.5	65.5	65	65	59	60	82	17	18.5			50.4	3.15	3.35	90	100	515	508	514	507	276	280	236	238	234	237	209	207	110	30	150	30		48	46	60
	344-2	始 7°22′	33.5	48.0	58	31		566		39.5	38.5	38.5	58	61.5	61.5	60	60	62	62	65.5	65.5	65	65	59	60	82	17.5	18.5			54.4	3.1	3.3	88	96	510	506	509	507	277	281	238	239	238	239	209	209	-25	30	-10	30		48	45	61
		終	33.5	48.0	57	30.5		601		39	38	37.9	57	61	61	60	60	61	61	65	65	65	65	58.5	59	82	17	18.5			54.7	3.1	3.3	88	98	514	508	513	507	277	279	236	238	236	238	208	208	115	30	100	25		47	47	65
	344-3	始 7°54′	33.5	48.0	58	31		598		39	39	38.5	58	61.5	61.5	60	60	62	62	65	65	65	65	59	60	82	17	18.5			54.0	3.1	3.37	89	100	509	509	508	507	279	281	239	239	239	239	209	209	-30	30	0	30		47	46	65
		終 8°12′	33.5	48.0	57	31		604		39	38	37.9	57	61.5	61.5	60	60	61	61	65	65	65	65	58	59	82	19.5	20			57.8	3.12	3.2	87	95	510	509	510	507	277	280	236	238	236	238	208	208	150	30	140	20		47	47	65
	344-4	始	33.5	48.0	57.5	31		576		39.5	38.5	38.3	57.5	61.5	61.5	60	60	62	61	65	65	65	65	59	60	82	17	18			55.2	3.05	3.3	85	96	510	509	509	508	278	280	237	239	238	239	209	209	-25	25	-25	25		47	46	65
		終	33.5	48.0	56	29		593		38.5	38	37.3	56	60.5	60.5	58	60	60	60	64	64	64	64	57.5	58.5	82	17.5	19			52.6	3.05	3.3	85	98	510	508	509	506	277	280	236	238	236	238	208	208	50	30	30	25		47	45	60
	144-1	始 9°05′	31.5 34.0	43.5 50	57.5	28.5		548		35	34	34.3	57.5	61.5	61.5	60	60	62	61	65	65	65	65	59	60	82	14.5	16			50.2	2.85	3.1	78	86	508	508	507	507	277	280	234	235	235	236	205	206	25	25	20	25		45	42	60
		終 9°15′	31.5	43.5	57	28		544		35	34	34.2	57	61.5	61.5	60	60	61	61	64	64	65	65	58.5	59	82	15	16			51.3	2.85	3.05	77	85	505	511	506	512	279	279	236	235	236	234	205	205	-140	45	-120	40		43	41	60
	144-2	始	31.5 34.0	43.5 51	57.5	28.5		545		35.5	34.5	34.4	57.5	61.5	61.5	60	60	62	61	65	65	65	65	58	60	80	14.5	16			41.7	2.8	3.05	74	86	508	509	507	508	278	279	233	234	234	235	207	205	5	20	20	20		44	42	61
		終	31.5	43.5	54	27		540		33.8	33	32.4	54	59	59	60	60	59	58	62	62	62	62	56	56	82	14	15			46.0	2.8	3.05	77	88	508	510	508	510	276	277	229	233	228	230	203	202	140	105	120	140		43	41	58
	144-3	始			中		止																																											
		終																																																	
	144-4	始	31.5 34.0	43.5 51	57.5	28.5		550		33.5	34.5	34.4	57.5	61.5	61.5	60	60	62	61	65	65	65	65	58	60	82	14.5	15.5			42.3	2.8	3.0	72	85	510	509	508	508	278	279	234	236	235	236	205	206	15	0	0	0		44	42	60
		終	31.5	43.5	56.5	27		560		34	33.5	33.3	56.5	59	59	57	57	59	59	62	62	62	63	57	57	82	13.5	14			51.4	2.8	3.0	80	92	510	502	512	502	274	278	230	233	230	235	205	203	120	20	100	0		42	40	59
	744-1	始 10°59′	33.5	48.0	58	31.0				40	39.5		58	62	62	60	60			66	66	66	66	60	60	82	17	18			56.5	3.12	3.35	100	100	511	508			279	282	240	239			210		20	20	20	30		48	46	62
		終 11°09′	33.5	48.0	58	32.0		582		40	39.5	38.9	58	62	62	60	60	62	62	66	66	66	66	59	60	82	18	18.5			58.5	3.13	3.35	100	100	505	512	505	512	279	281	238	240	241	241	209	210	-170	20	-150	20		48	46	61
	744-2	始 11°20′	33.5	48.0	58	31.5		611		40	39.5	39.2	58	62	62	60	60	62	62	66	66	66	66	60	60	82	18	18.5			56.2	3.15	3.3	100	105	510	510	511	509	279	281	241	240	241	239	209	209	5	20	0	20		48	46	61
		終	33.5	48.0	57	31.0		604		39	38.5	38.4	57	61	61	60	60	61	61	66	65	65	65	58	60	82	18	20			53.4	3.25	3.5	95	100	509	511	508	511	279	281	238	239	238	239	208	209	15	10	10	20		48	45	60
	744-3	始 11°50′	33.5	48.0	58	31.5		576		40	39.5	39.1	58	62.5	62.5	60	60	63	62	66	66	65	66	59	60	82	18	19.2			57.0	3.2	3.4	100	105	512	510	512	508	280	282	239	240	239	240	209	209	15	20	10	20		49	47	62
		終 12°10′	33.5	48.0	58	31.0		580		40	39.5	38.8	58	62	62	60	60	62	62	66	65	65	65	59	60	82	18	18.5			57.0	3.15	3.35	98	108	510	510	509	509	280	282	239	239	239	239	209	209	20	20	10	20		49	46	61

3.3　試験結果とその解析

3.3.1　試験結果

試験の結果は3.2節にものべたように合計３６ch.の電磁オシログラフを用いて計測記録した。この記録は、きわめて長いものであり応答の解析などには、種々不便な点が考えられるため、これらオシログラムから各試験ごとに代表的な計測点について１０秒ごとにサンプリングを行ないかきなおしを行なつた。これらを第3.3.1～3.3.14図に示す。

また、これら１０秒ごとにサンプリングされた各データは、後にのべる周波数応答の計算にも使用した。

本結果より明らかなように、各試験とも試験ごとにその結果がかなりのバラツキをもつていることである。これは機関の運転状態を一様にすることがかなりむづかしいこと、試験後の整定を全自動で行なつても試験前に手動とすることによつて開始時の条件が多少異なつてくることによる。また、全試験を通していえることは、給水制御系がいわゆる2要素式であつたため、給水流量のフィードバックがなく制御弁一定としても、ボイラの圧力変化によつて流量が変化した。

このためドラム水位が変化して±１５０㎜の制限に達することが多く、圧力、温度などの十分な整定がえられないまま試験を終了したケースが多く、実船走行中の開ループ試験は、かなりむづかしいものであつた。したがつて一部の試験では、入力を加えてないボイラの給水制御を自動とし、あるいはこのボイラの給水流量を操作したケースも生じた。

(1)　主タービン操縦弁開度変化試験

上述したように圧力変化にもとづく給水流量の変化があり、これがボイラの圧力、水位に対して外乱となり、水位の応答が特に時間が経過したときに、外乱による影響を多くふくんでいる。圧力、水位を数式であらわし、その各係数を試験結果より定める方法もあるが、ここでは試験結果をそのまゝ周波数応答に変換することとした。

本試験で主タービンの油筒リフトは、パルス状に変化し1.5分後に元の位置に復帰しているが、圧力が元の位置に復帰していないのは補助蒸気量などの変化による外乱の影響である。

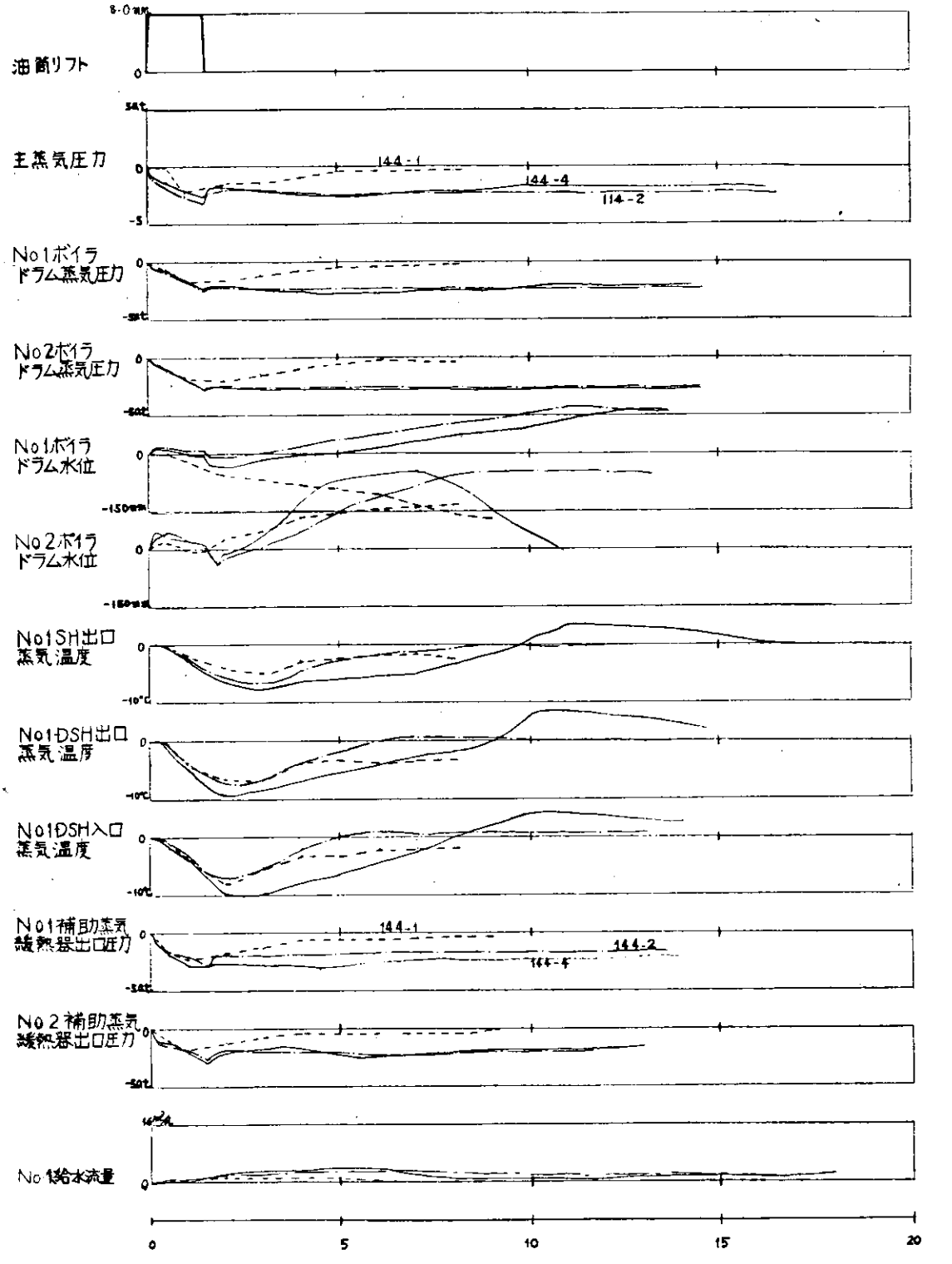
(2)　燃焼量変化試験においては、ドラム水位の応答をのぞいてほぼ良好な結果がえられている。特に試験番号２４４－3、4の各試験においては、№2ボイラの給水を操作することによつて水位の変化をおさえ試験を継続した。本試験においても給水流量変化にもとづくドラム水位の変化が大きい場合は、圧力、温度等への影響が大きく、ボイラ単体で考えられる応答とはかなり違つた結果となつている。

(3)　給水流量変化試験

給水流量の変化は、給水制御弁の開度の変化であたえた。このため給水流量のパルス状変化後、初期の流量に復帰させられない場合があり、さらに圧力変化にもとづく給水流量の変化のため、これが外乱となつて時間の経過とともにその効果が顕著となつている。試験番号３４４－１～４では、№2ボイラの給水制御を自動としたため、比較的良好な結果がえられている。

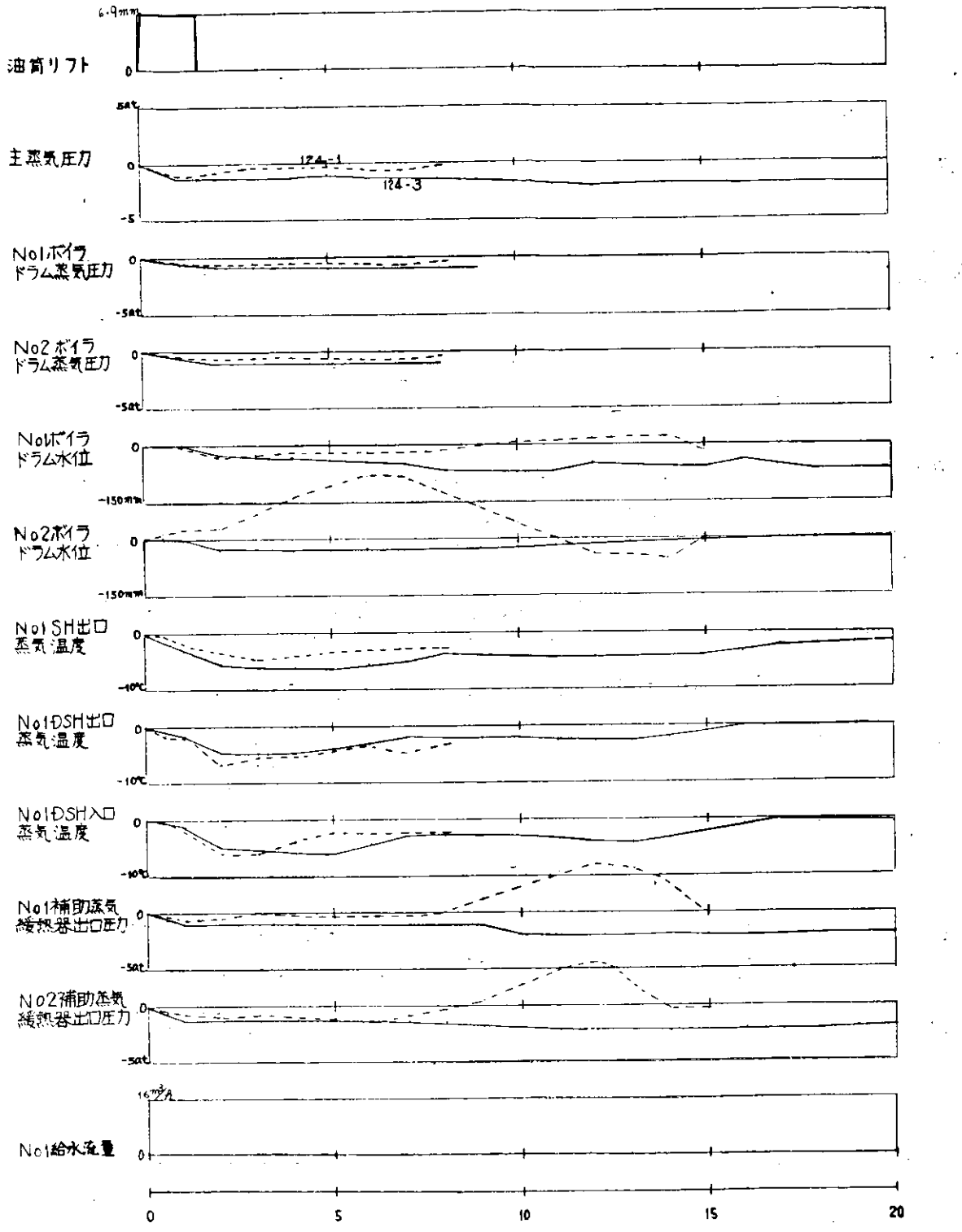
(4)　デスーパヒータ制御弁開度変化試験

デスーパヒータ制御弁の開度変化の試験では、すべて給水制御を自動とした。このためドラム水位の応答をのぞいて、比較的良好な結果がえられた。しかしながらこの試験でも、試験毎のバラツキがかなり見うけられる。



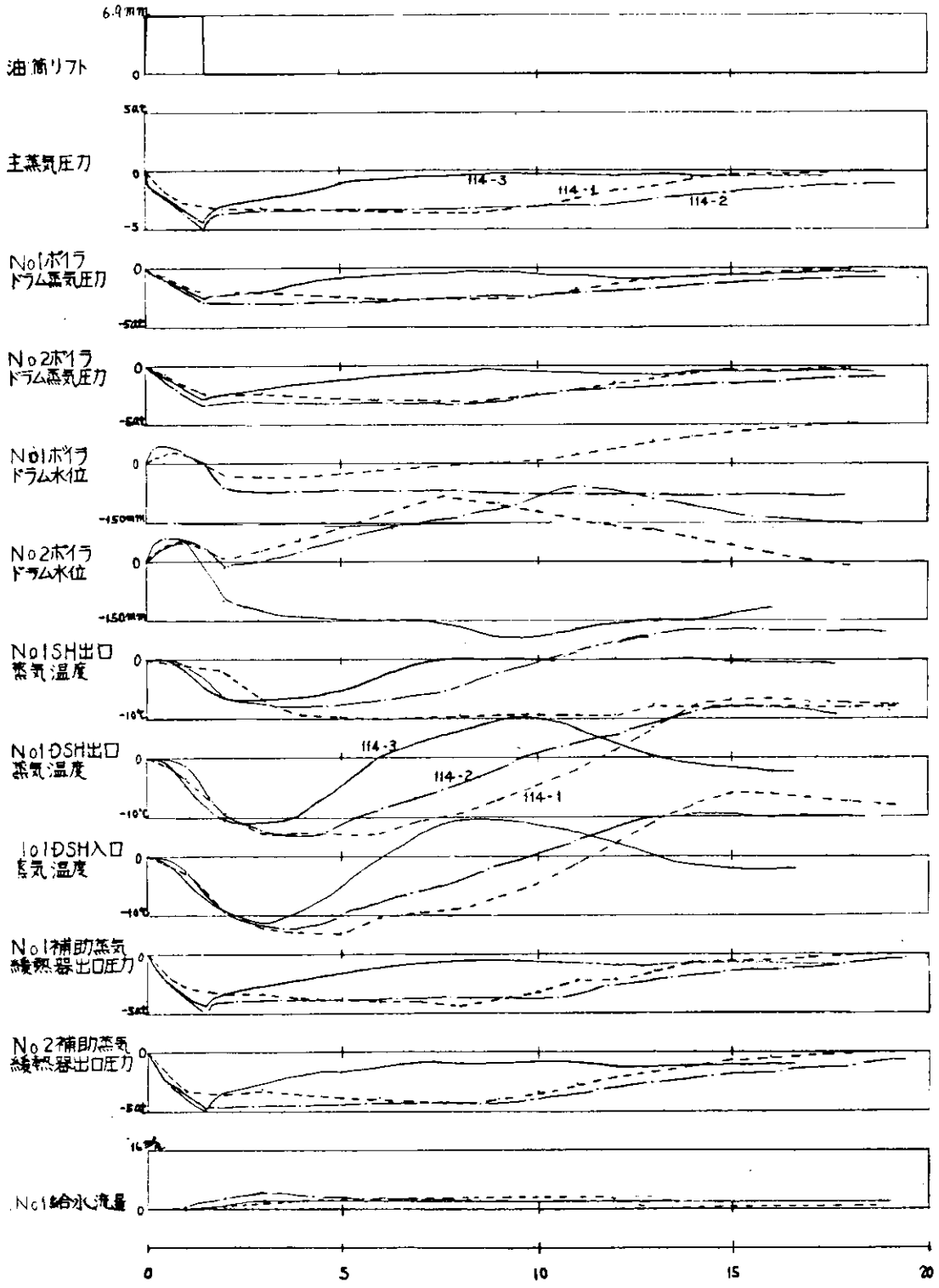
試験番号	144－1、2、4	基底負荷	30,600PS
試験名称	操縦弁開度変化試験	操作個所	主タービン操縦弁

第3.3.1図



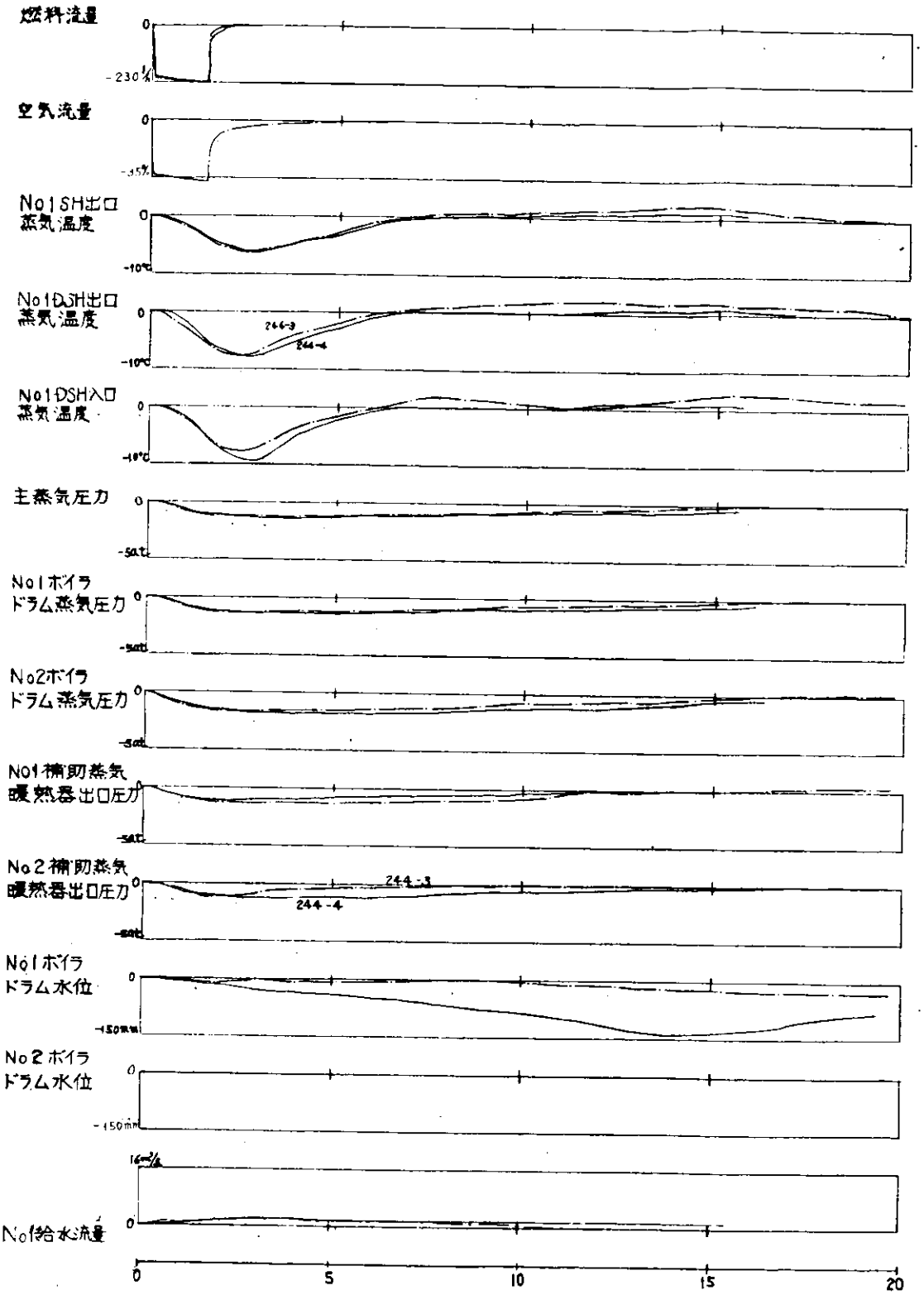
試験番号	124－1、3	基底負荷	17,000PS
試験名称	操縦弁開度変化試験	操作個所	主タービン操縦弁

第3.3.2図



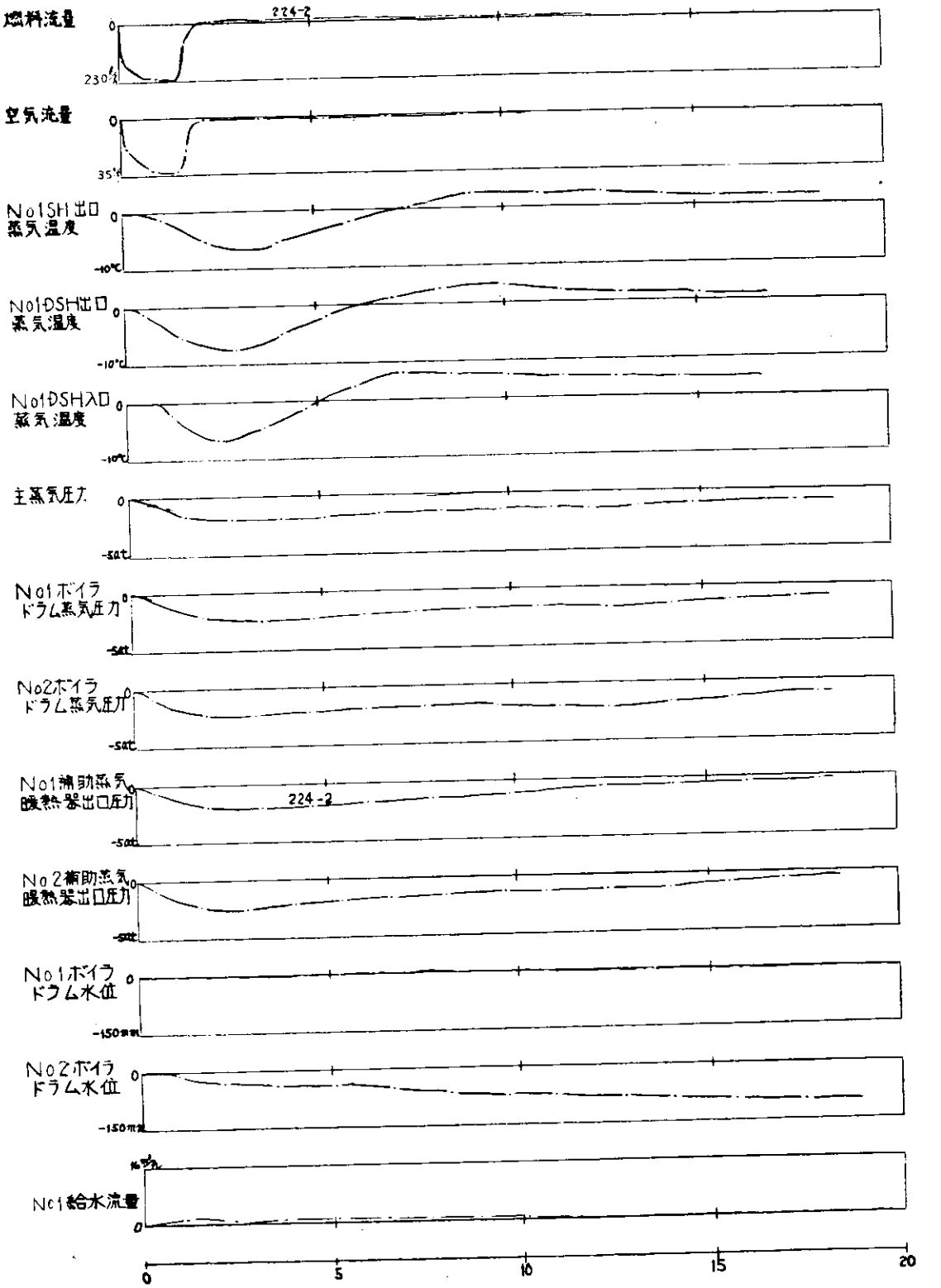
試験番号	114－1、2、3	基底負荷	12,000PS
試験名称	操縦弁開度変化試験	操作個所	主タービン操縦弁

第3.3.3図



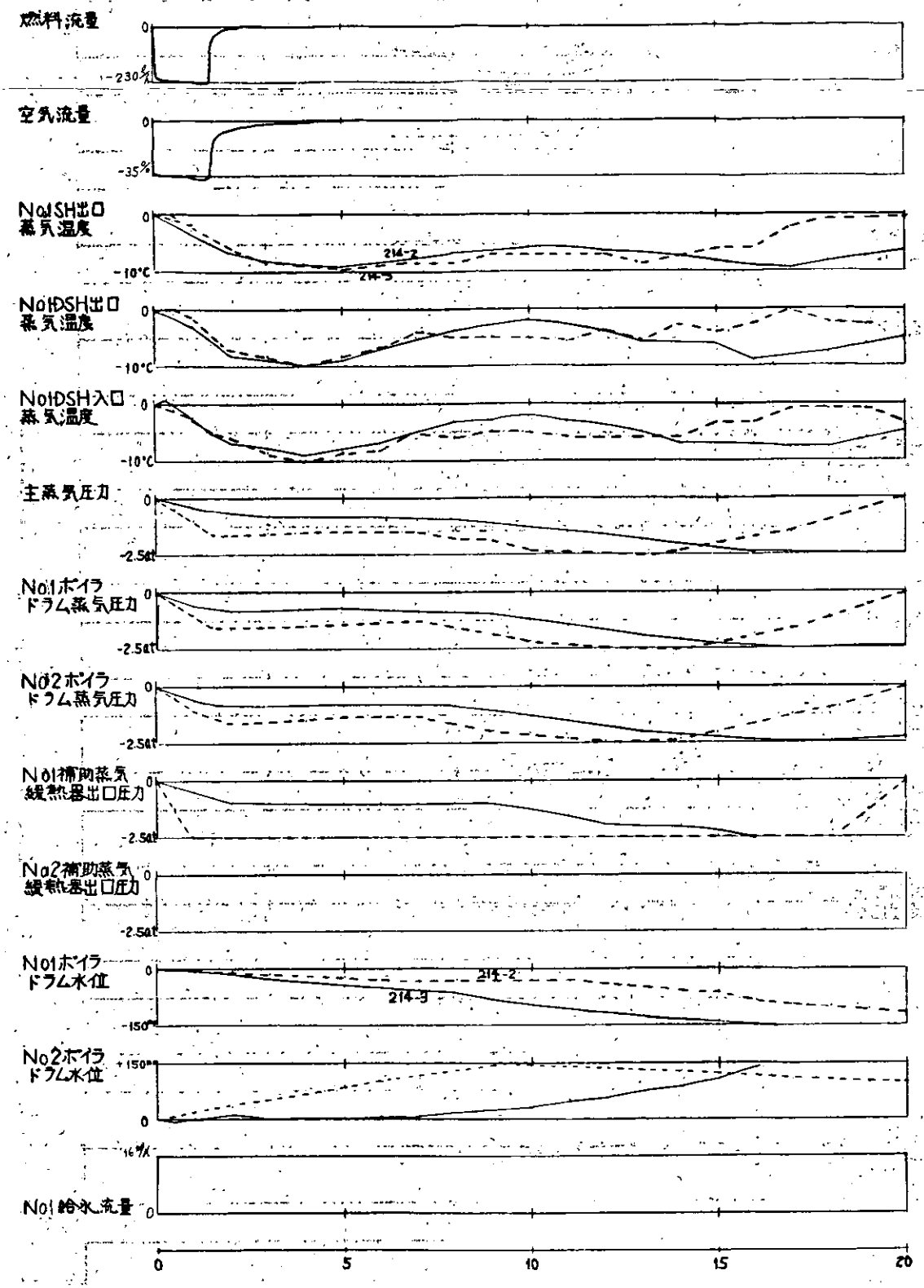
試験番号	244－3、4	基底負荷	30,400PS
試験名称	燃焼量変化試験	操作個所	ボイラマスタセレクタ

第 3.3.4 図



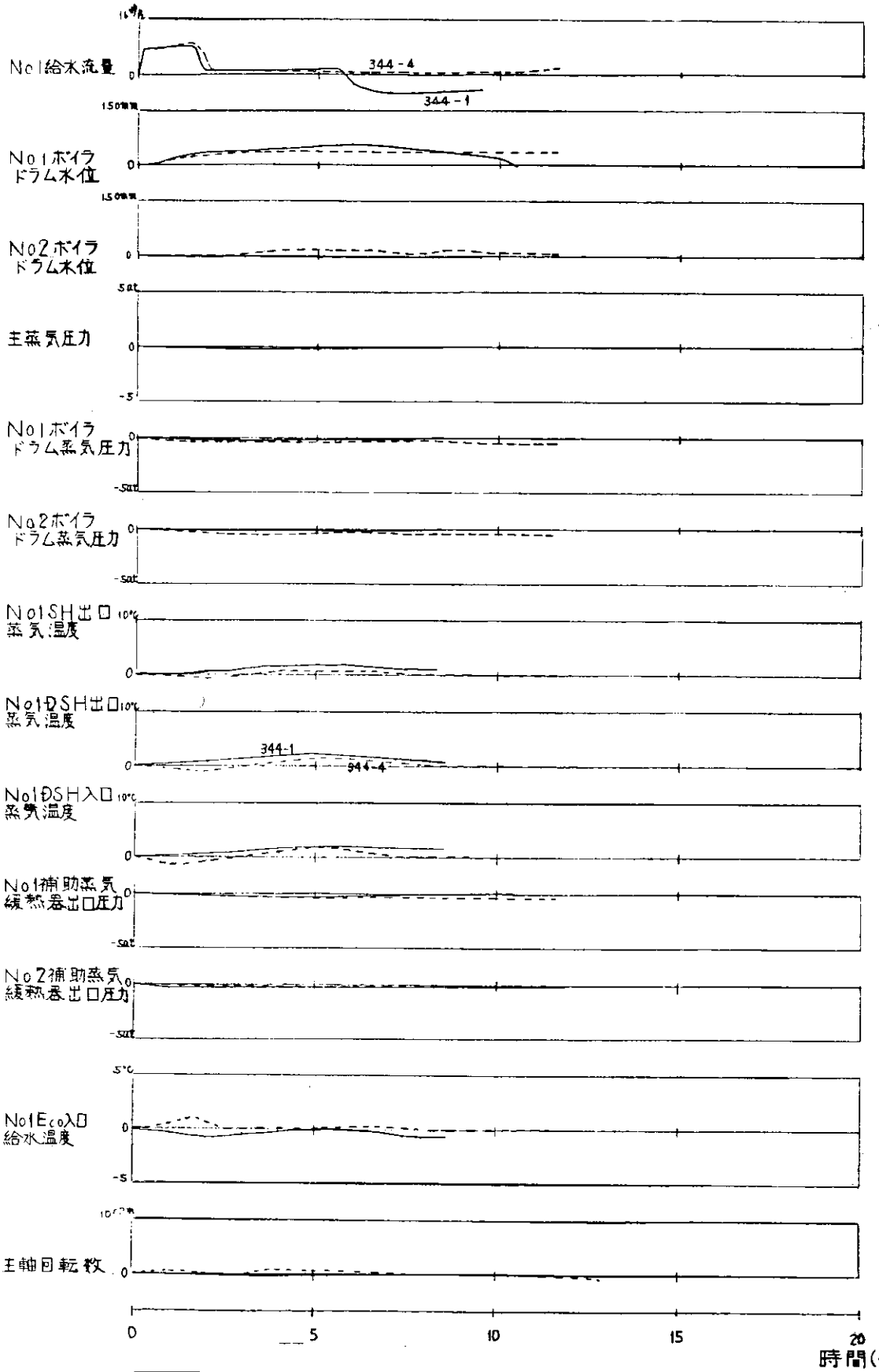
試験番号	224－2	基底負荷	17,000PS
試験名称	燃焼量変化試験	操作個所	ボイラマスタセレクタ

第3.3.5図



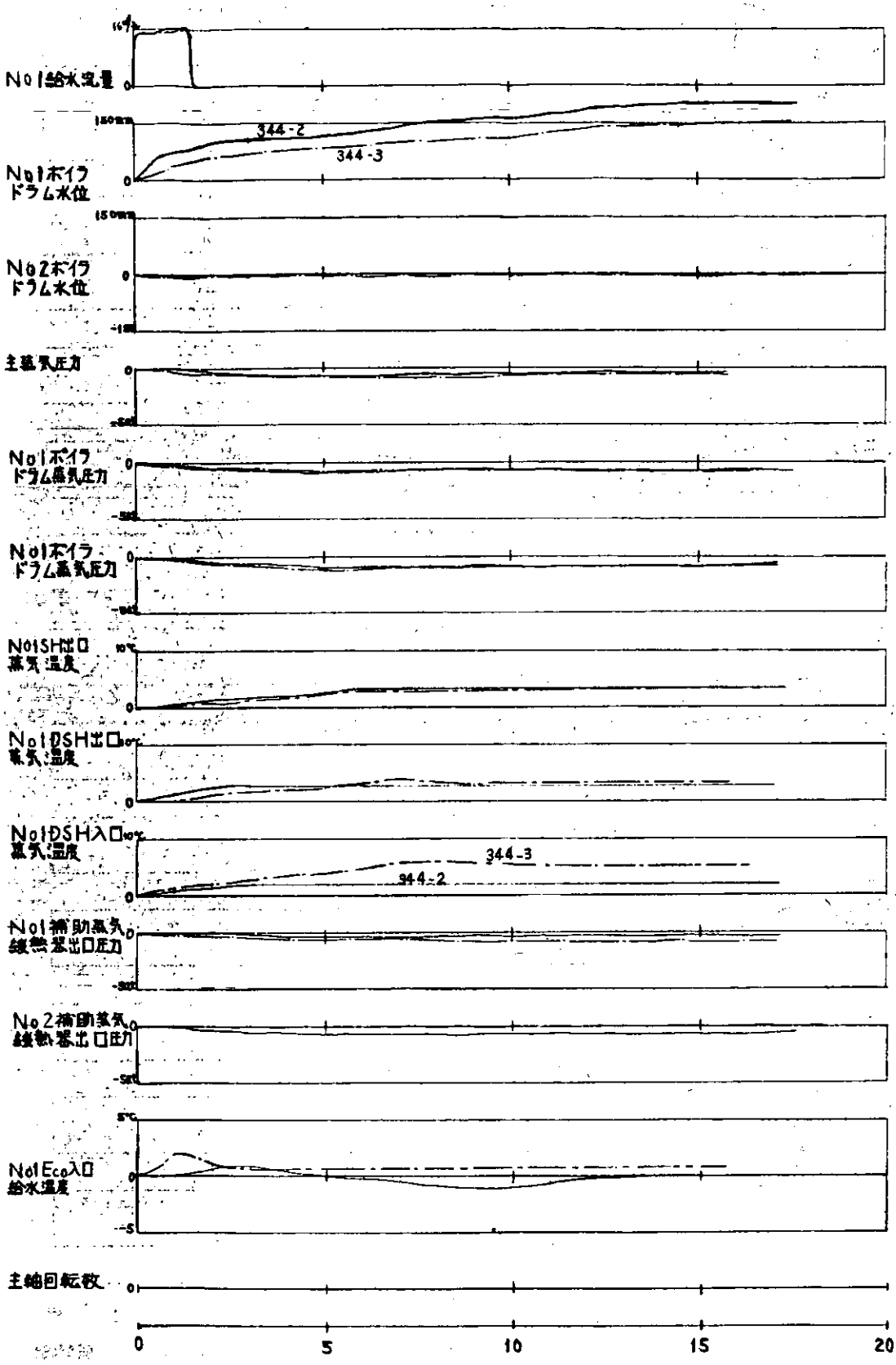
試験番号	214－2、3	基底負荷	12,000PS
試験名称	燃焼量変化試験	操作個所	ボイラマスタセレクタ

第3.3.6図



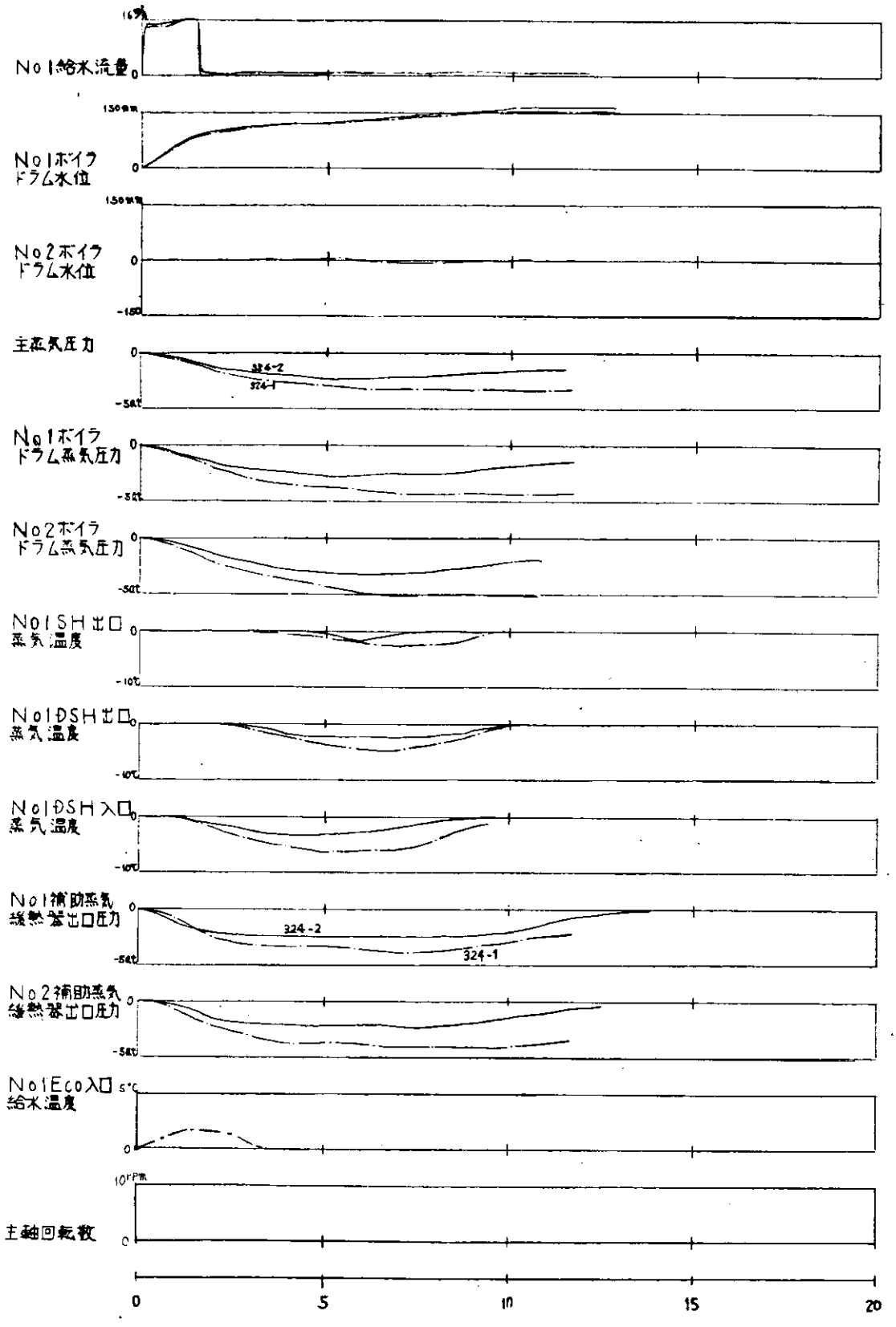
試験番号	344－1、4	基底負荷	30,400PS
試験名称	給水流量変化試験	操作個所	No.1給水制御弁セレクタ

第3.3.7図



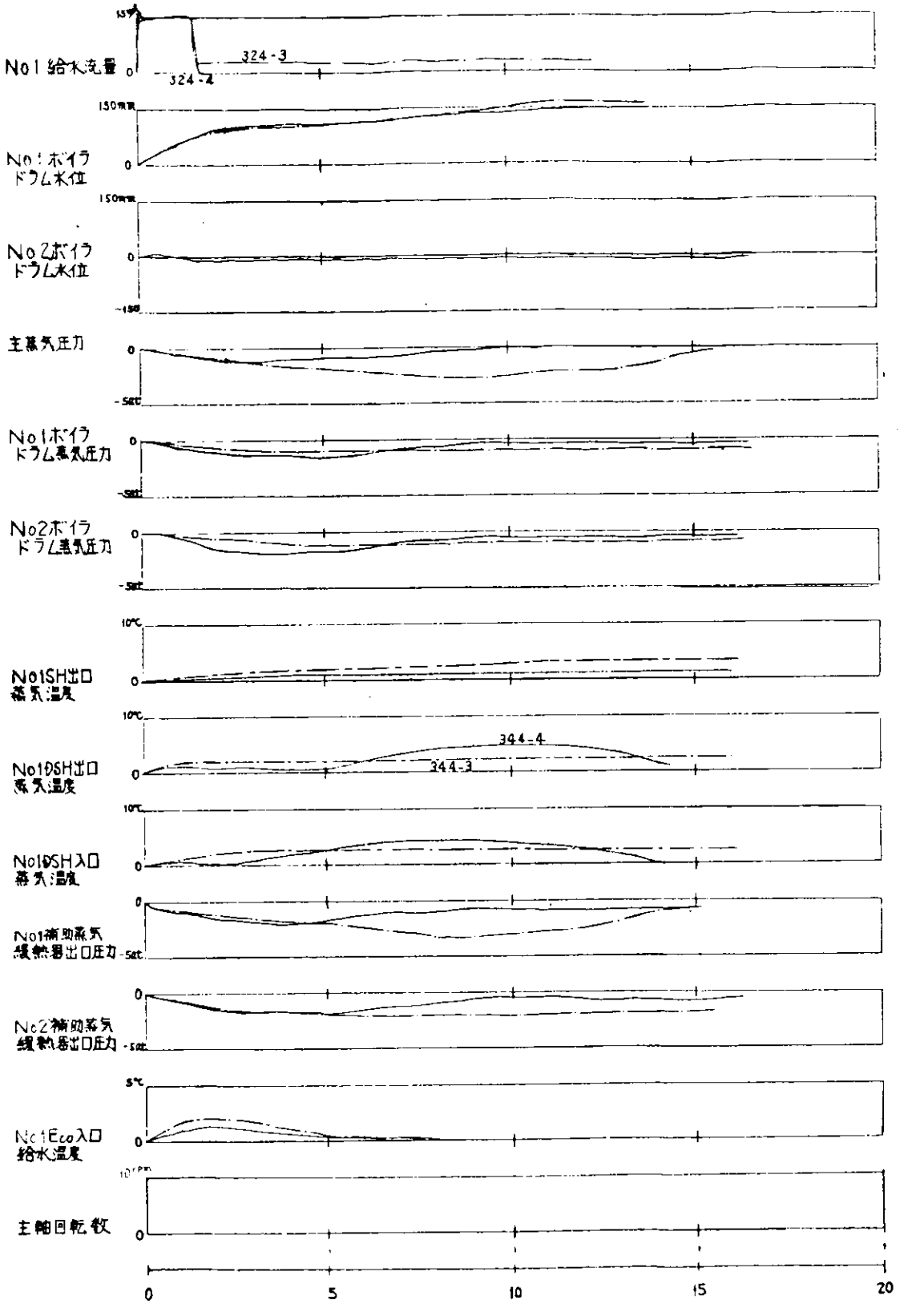
試験番号	344－2、3	基底負荷	30,400PS
試験名称	給水流量変化試験	操作個所	№1給水制御弁セレクタ

第3.3.8図



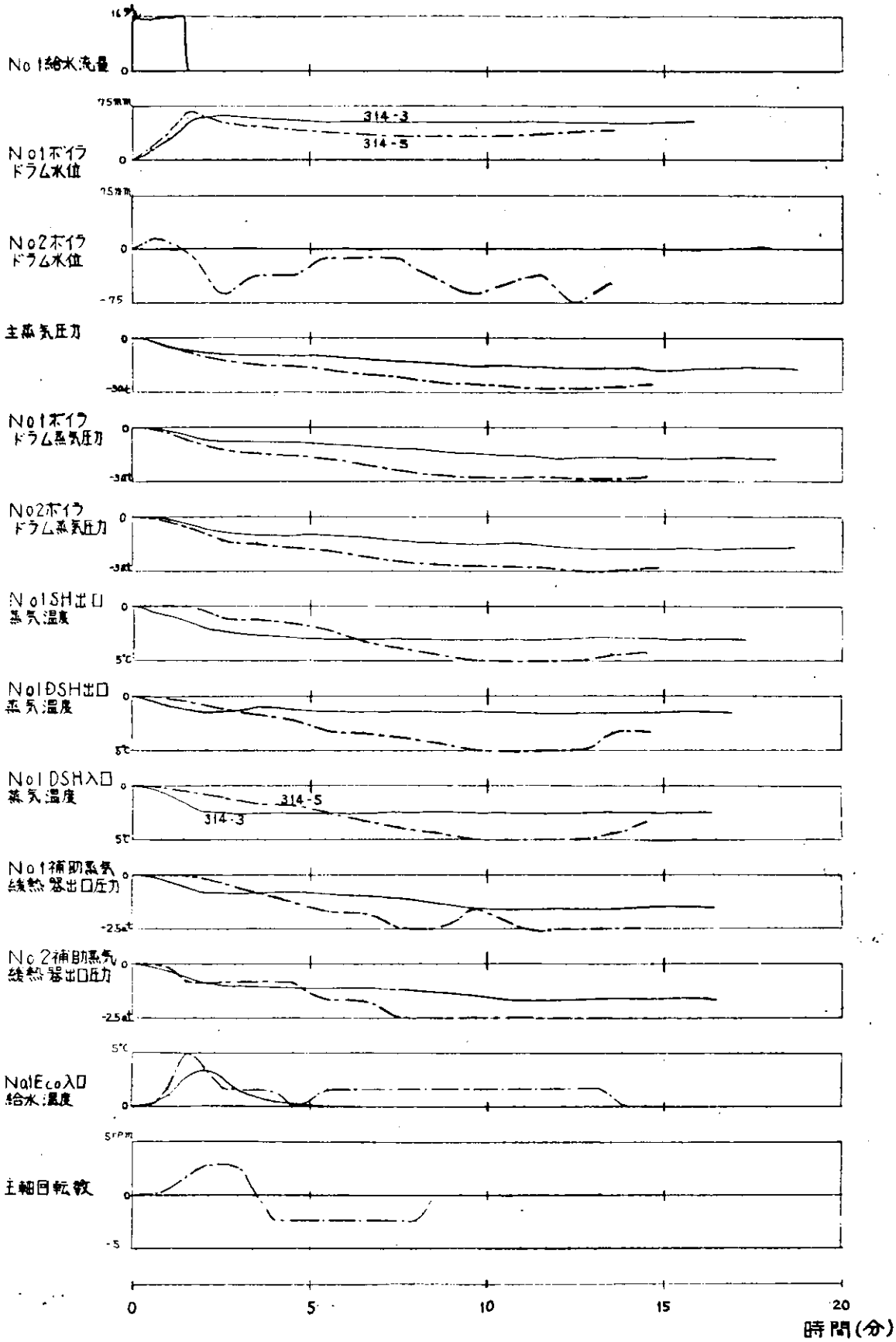
試験番号	324－1、2	基底負荷	17,000PS
試験名称	給水流量変化試験	操作個所	№1給水制御弁セレクタ

第3.3.9図



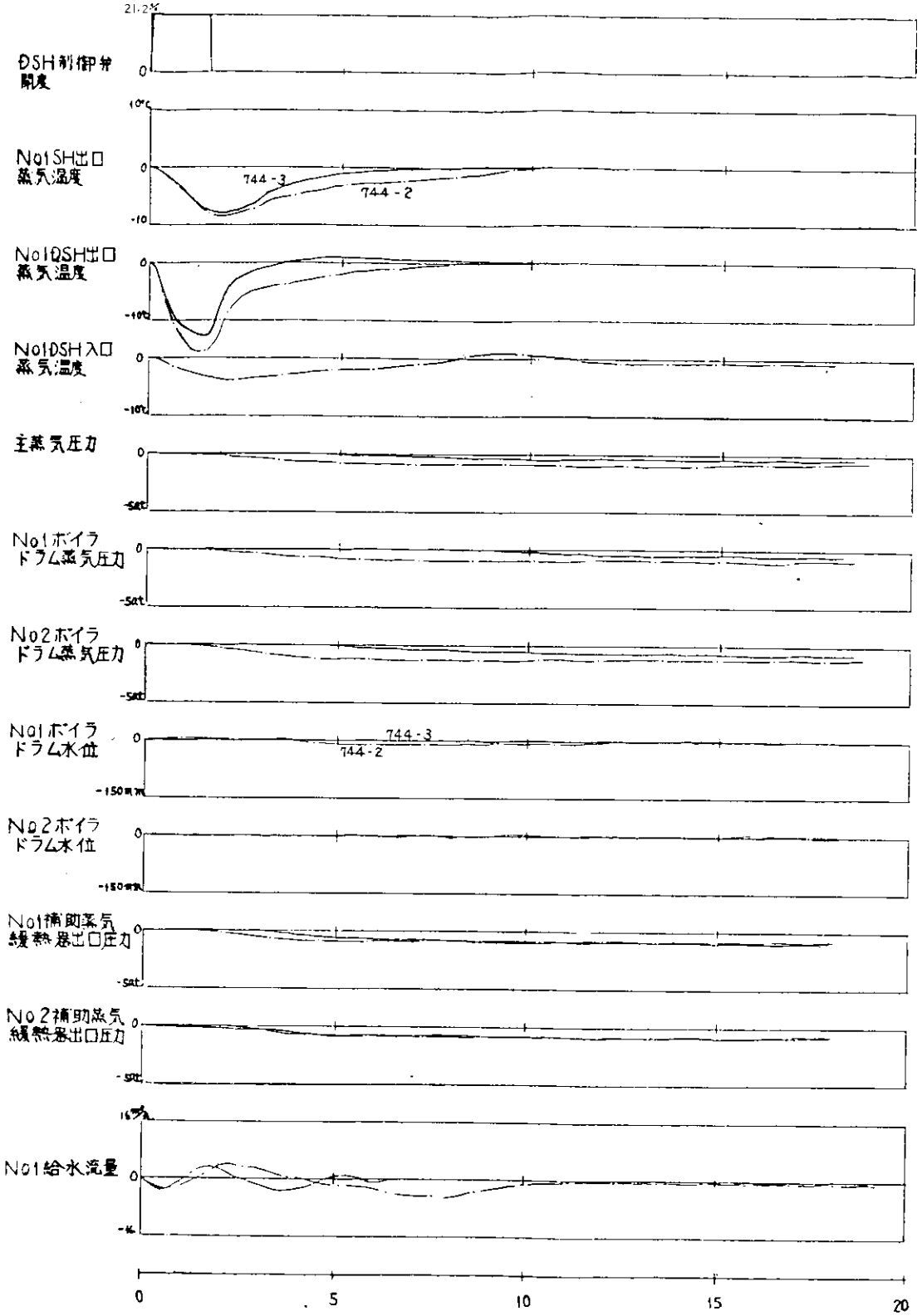
試験番号	324－3、4	基底負荷	17,000PS
試験名称	給水流量変化試験	操作個所	No1給水制御弁セレクタ

第3.3.10図



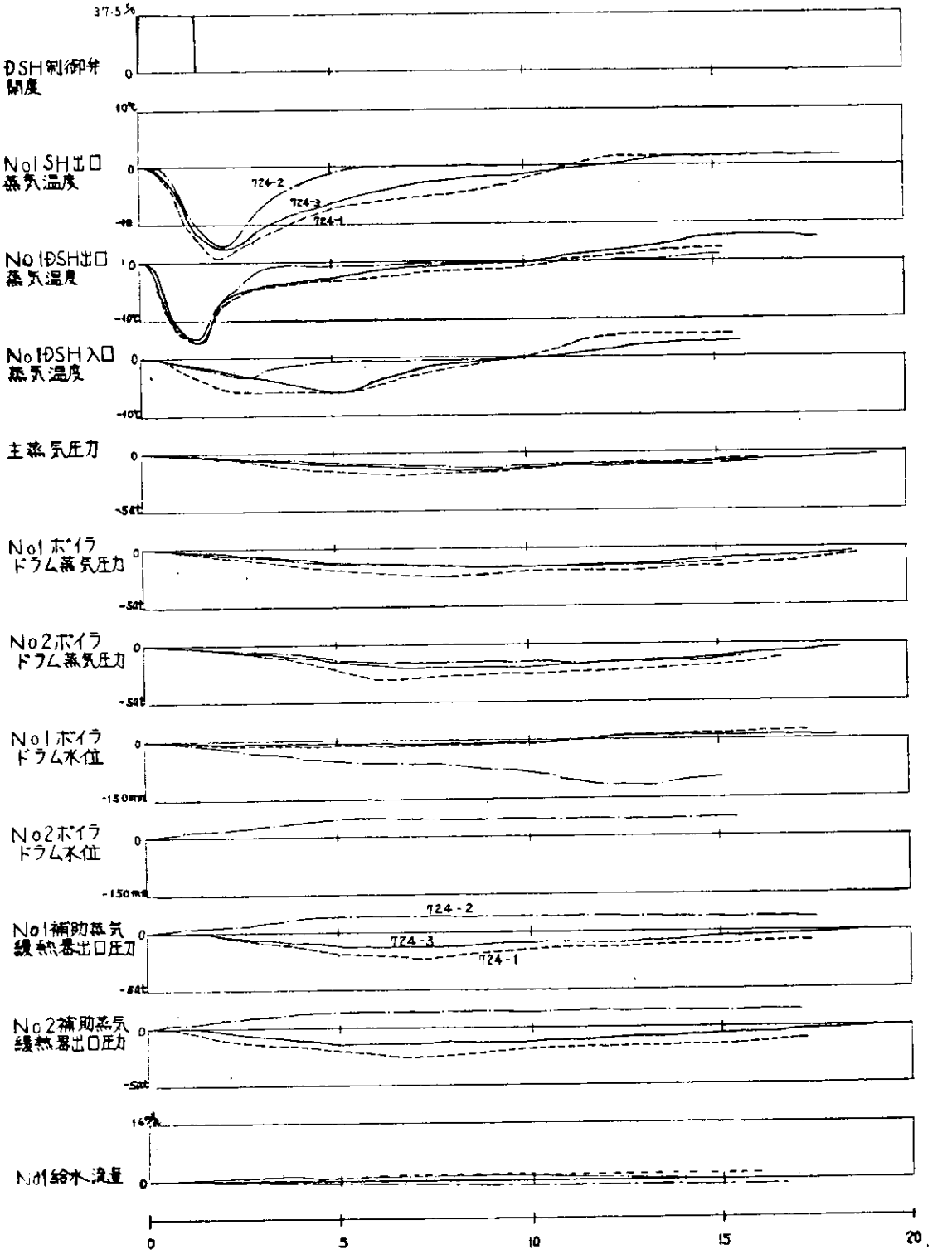
試験番号	314－3、4、5	基底負荷	12,000PS
試験名称	給水流量変化試験	操作個所	No1給水制御弁セレクタ

第3.3.11図



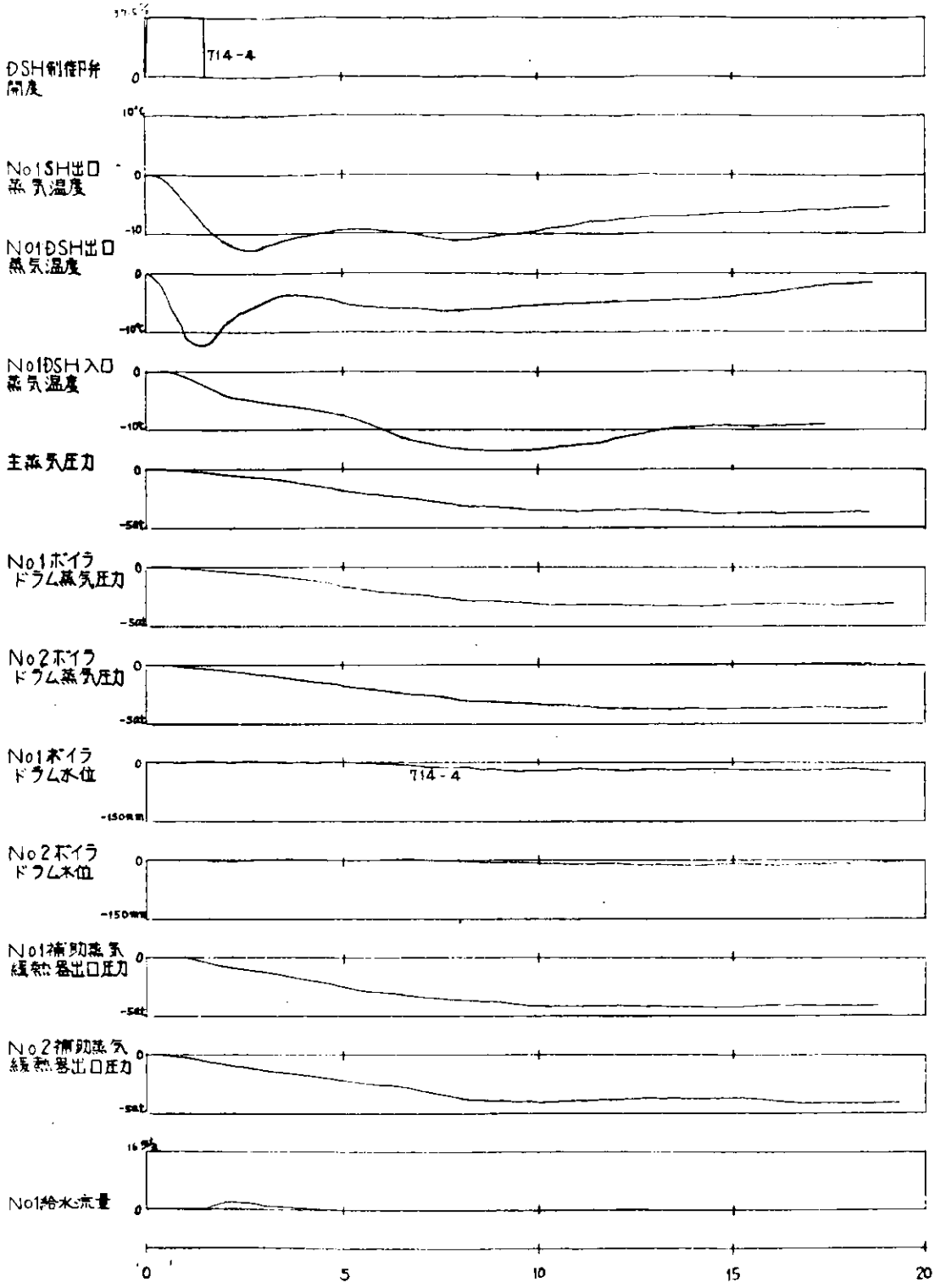
試験番号	744－1、2、3	基底負荷	34,000PS
試験名称	制御弁開度変化試験	操作個所	Control DSH制御弁

第3.3.12図



試験番号	724－1、2、3	基底負荷	17,000PS
試験名称	制御弁開度変化試験	操作個所	Control DSH制御弁

第3.3.13図



試験番号	714－4	基底負荷	12,000PS
試験名称	制御弁開度変化試験	操作個所	Control DSH制御弁

第3.3.14図

3.3.2　試験結果のフーリエ変換

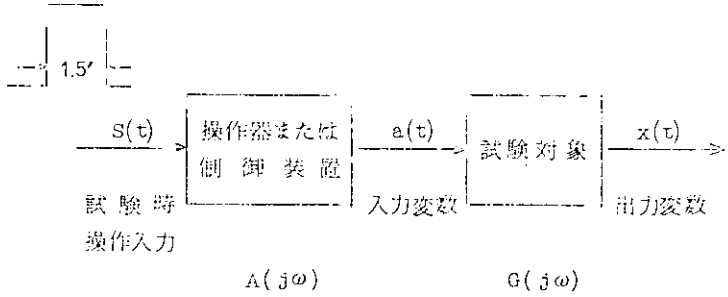
オシログラフによつて記録された試験結果の応答を各変数（入力もふくめて）ごとにフーリエ変換し、各変数の入力に対する周波数応答を求めた。フーリエ変換に当つては、前述したように各オシログラムを１０秒ごとにサンプリングしてえたデータを用いた。

したがつて求められる周波数応答は、サンプリング定理によれば、$\omega \fallingdotseq 20$ rad／min. 附近までは確からしいことになる。

フーリエ変換の計算はつぎのように行なつた。

通常入力として考える操縦弁、燃焼量、給水流量などは直接これらを変化させることはできず、なんらかの操作手段または制御装置を介して変化させるのが普通である。本試験においても前述したように、操縦弁開度変化試験においては主機遠隔制御装置を、燃焼量変化試験においては燃料ならびに空気流量制御系を、給水流量変化試験においては給水制御弁を用いて、それぞれの入力変数に変化をあたえた。したがつて目標とする入出力間の周波数応答は、操作入力と出力の間の伝達関数と操作入力と入力変数間の伝達関数の比として求められることとなる。

この様子を第3.3.15図と（3.3.1）式に示す。



第3.3.15図

第3.3.15図より

$$A(j\omega)\,G(j\omega) = F\{x(t)\} / F\{S(t)\}$$

$$A(j\omega) = F\{a(t)\} / F\{S(t)\}$$

$$\therefore G(j\omega) = \frac{F\{x(t)\}}{F\{S(t)\}} \cdot \frac{F\{S(t)\}}{F\{a(t)\}} \qquad \cdots\cdots\cdots\

f(t)をサンプリングされたデータからつぎのように内挿する。サンプリング時刻 t_i に対するf(t)の値を f_i とすると $t_i \leq t \leq t_{i+1}$ についてつぎであたえられる。

$$f(t) = \frac{f_i\, t_{i+1} - f_{i+1}\, t_i}{t_{i+1} - t_i} + \frac{f_{i+1} - f_i}{t_{i+1} - t_i}\, t \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.3.5)$$

$$t_i \leq t \leq t_{i+1}$$

(3.3.5)式を用いると(3.3.4)式はつぎであたえられる。

$$P(\omega) = \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^{N} \left\{ (f_i\, t_{i+1} - f_{i+1}\, t_i)\, Ic_1 + (f_{i+1} - f_i)\, Ic_2 \right\}$$

$$\cdots\cdots \quad (3.3.6)$$

$$Q(\omega) = \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^{N} \left\{ (f_i\, t_{i+1} - f_{i+1}\, t_i)\, Is_1 + (f_{i+1} - f_i)\, Ic_2 \right\}$$

ただし

$$Ic_1 = \frac{1}{\omega} (\sin \omega t_{i+1} - \sin \omega t_i)$$

$$Is_1 = -\frac{1}{\omega} (\cos \omega t_{i+1} - \cos \omega t_i)$$

$$Ic_2 = \frac{1}{\omega} \left[\left(t_{i+1} \sin \omega t_{i+1} + \frac{1}{\omega} \cos \omega t_{i+1} \right) - \left(t_i \sin \omega t_i + \frac{1}{\omega} \cos \omega t_i \right) \right]$$

$$Is_2 = \frac{1}{\omega} \left[\left(-t_{i+1} \cos \omega t_{i+1} + \frac{1}{\omega} \sin \omega t_{i+1} \right) - \left(-t_i \cos \omega t_i + \frac{1}{\omega} \sin \omega t_i \right) \right]$$

であり

$$\Delta t = t_{i+1} - t_i$$

$$N \Delta t = T$$

でTは十分大きな時間であり(3.3.4)式の積分は0からTまでで打切つている。

したがつて $|f(T)| \neq 0$ ならば、その分だけ $F(j\omega)$ における直流ゲイン $|F(0)|$ に誤差を生ずることとなる。

各試験、各変数ごとにオシログラフをサンプリングしたs(t)、a(t)、x(t)を(3.3.3)および(3.3.6)式を用いてフーリエ変換することができる。

3.3.3 試験結果よりえた周波数伝達関数

3.3.2項でのべた方法によつてえた主要変数(主蒸気圧力、ボイラドラム圧力、ドラム水位、SH出口蒸気温度、DSH出口蒸気温度)の周波数応答を第3.3.16～3.3.35図のボード線図で示す。

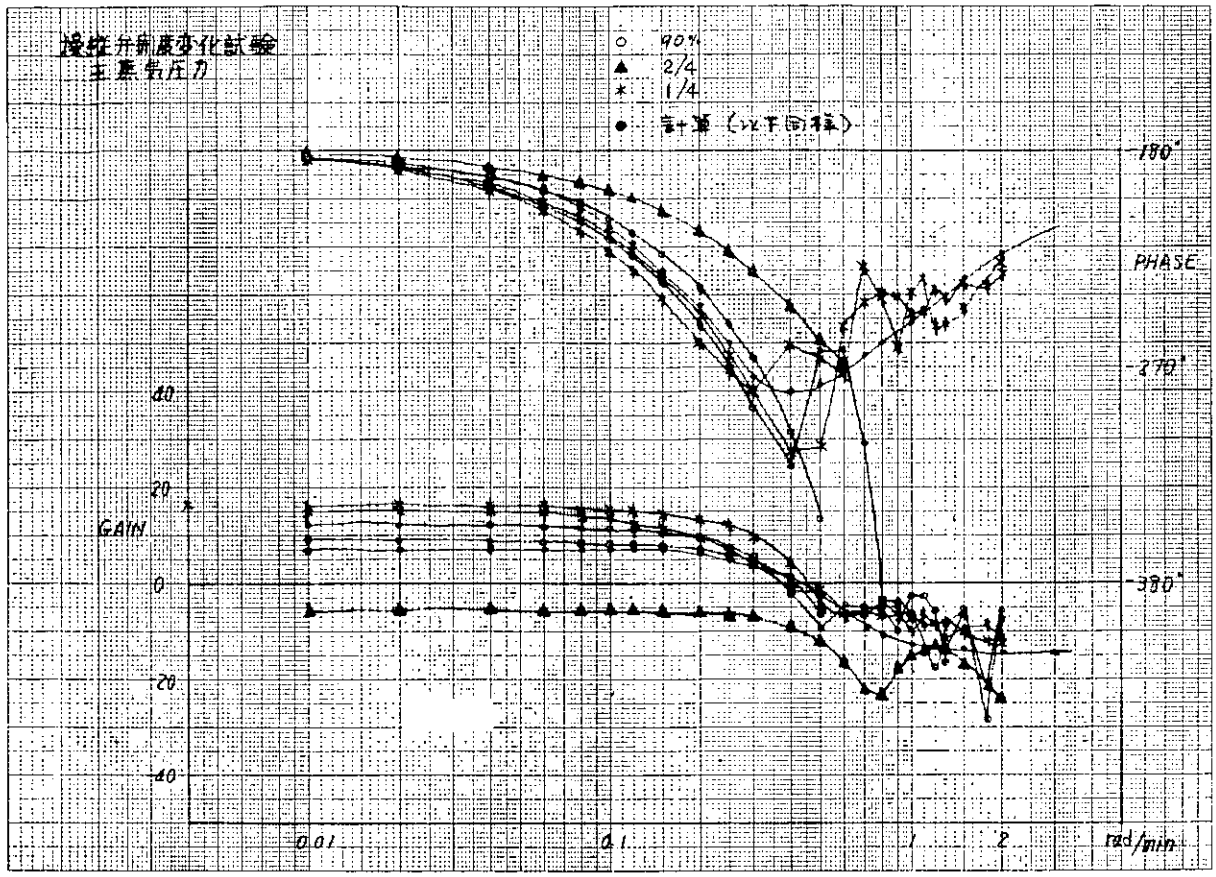
本図では、同種の試験で負荷レベルをかえた場合の結果を同じ図に示してある。本図においても、試験ごとのバラツキがかなりある。フーリエ変換の計算にあたつては、サンプリング時間Δt、計算の打ち切り時刻Tは3.3.2項でのべたようにすべて同じである。したがつて、ここにあらわれたバラツキは、試験そのものにあつたバラツキである。また、負荷レベルによるゲインならびに位相の違いがかなり見られる。これらの結果で90% MCR.と¼ MCR.の場合の応答は定性的に似ているものが多いが½MCR.の場合の応答がかなりくい違つているものが多い。これは負荷レベルによる違いよりも、むしろ½MCR.の場合の試験条件の設定に不具合があり、試験中に生ずる外乱の影響が大であつたためと考えられる。

なお、これら周波数応答は、各入力、出力とも全試験の初期値の平均値をもつて、その変化分を基準化したものについてもとめてある。

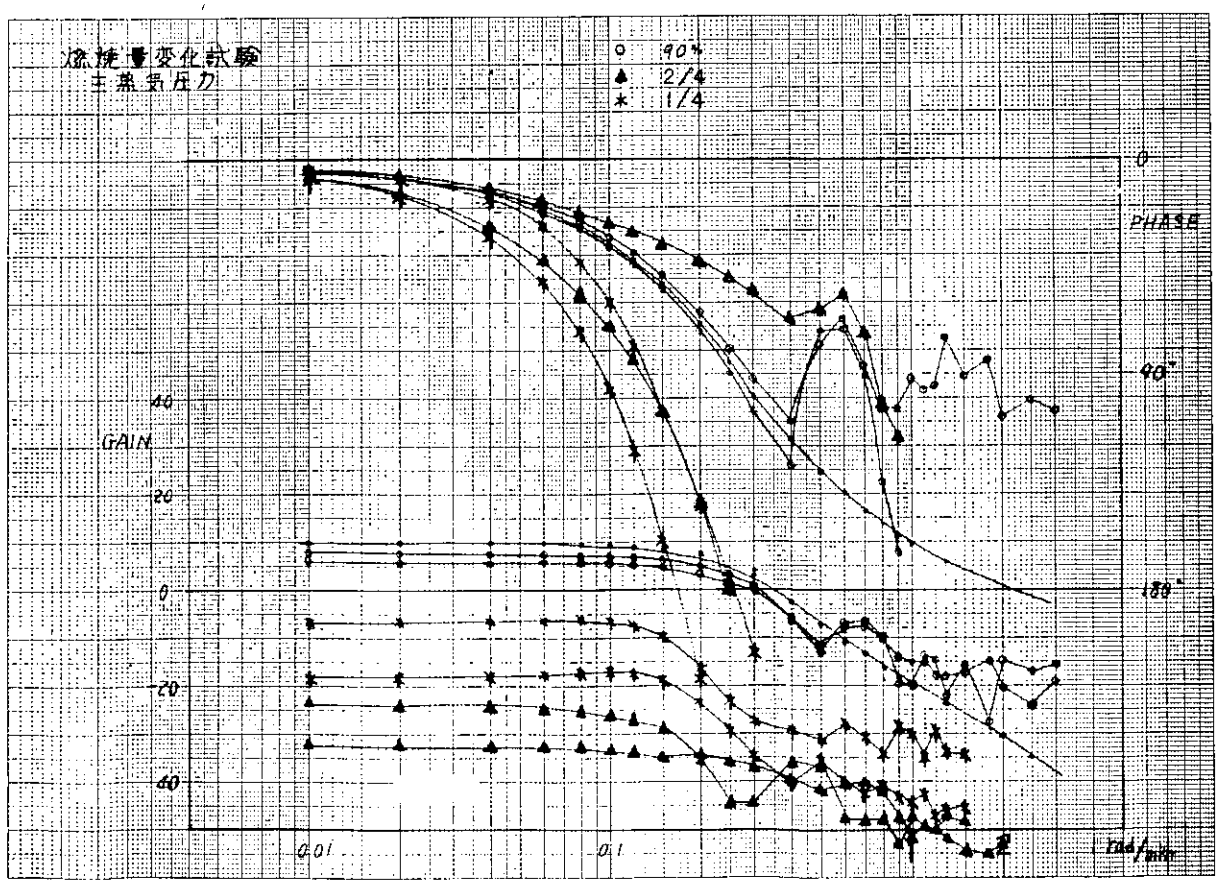
第3.3.1表にこれらの基準値を示す。

第3.3.1表　周波数応答の各変数基準値

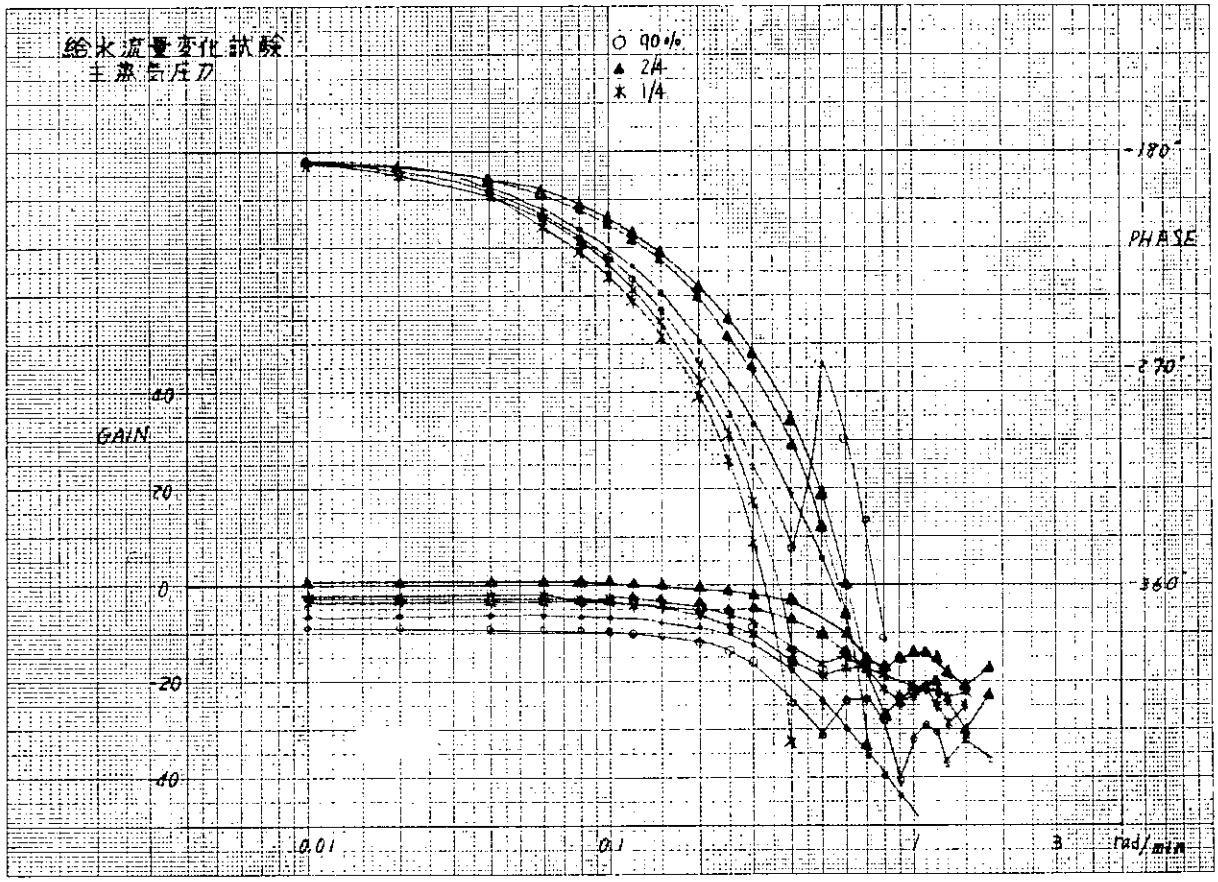
入出力区分	計測点＼試験番号		主タービン操縦弁開度変化試験		燃焼量変化試験		給水流量変化試験		DSH制御弁開度変化試験	
			144-2	144-4	244-3	244-4	344-3	344-4	744-2	744-3
入力変数	主タービン操縦弁開度	mm	28.5	28.5						
	No.1 ボイラ燃油流量	ℓ/h			3100	3050				
	No.1 給水流量	m³/h					54.0	55.2		
	No.1 DSH制御弁開度	%							18.75	18.75
出力変数	主蒸気圧力	at	57.5	57.5	58.0	57.5	58.0		58.0	58.0
	No.1 ボイラドラム蒸気圧力	at	65.0	65.0	65.0	65.0	65.0	65.0	66.0	66.0
	No.2 ボイラドラム蒸気圧力	at	65.0	65.0	65.0	65.0	65.0	65.0	66.0	66.0
	No.1 給水流量	m³/h	41.7	42.3	57.0	56.1			56.2	57.0
	No.1 SH出口蒸気温度	℃	508	510	510	510	509	510	510	512
	No.1 DSH出口蒸気温度	℃	508	510	510	510	509	510	510	512
	No.1 DSH入口蒸気温度	℃	508	510	510	510	509	510	510	512
	No.1 ECO.入口給水温度	℃	207	205	208	209	209	209	209	209
	No.1 補助蒸気緩熱器出口圧力	at	58	58	58	59	59	59	60	59
	No.2 補助蒸気緩熱器出口圧力	at	60	60	60	60	60	60	60	60
	No.1 ドラム水位	mm	300	300	300	300	300	300	300	300
	No.2 ドラム水位	mm	300	300	300	300	300	300	300	300
	主軸回転数	rpm	86.9	86.9	86.9	86.9	86.9	86.9	90	90
	No.1 燃油ヘッダ圧力	at			17	17				
	No.1 空気流量	%			85	89				
ボイラ基準負荷		%	90		90		90		100	



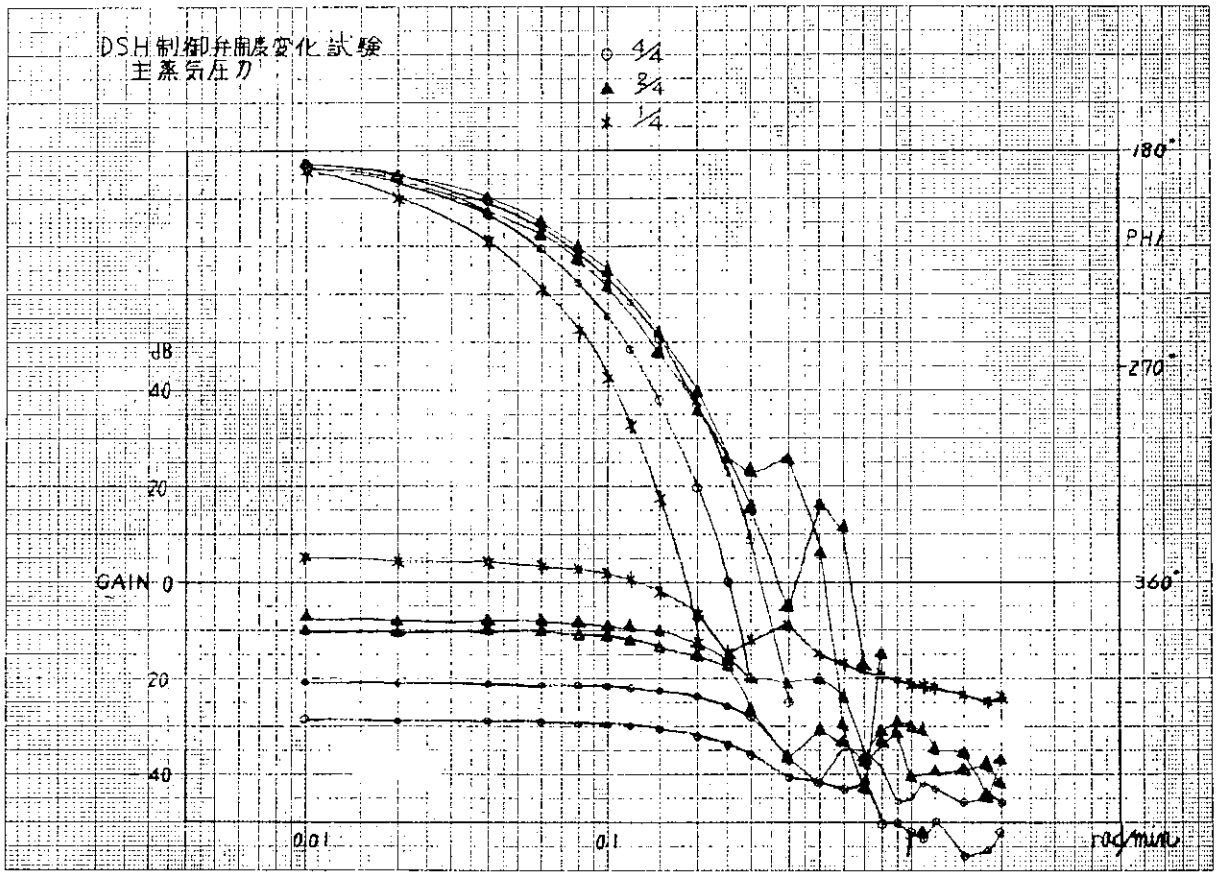
第3.3.16図



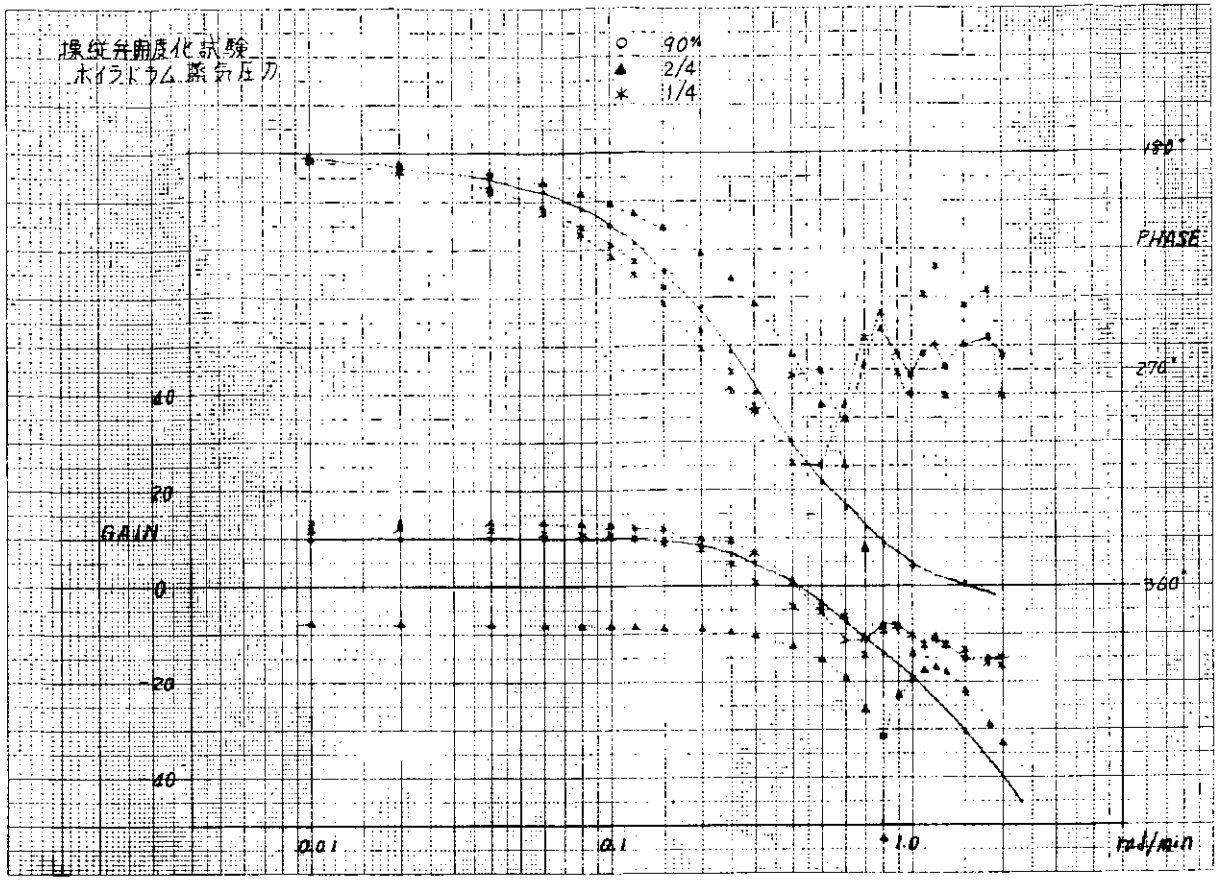
第3.3.17図



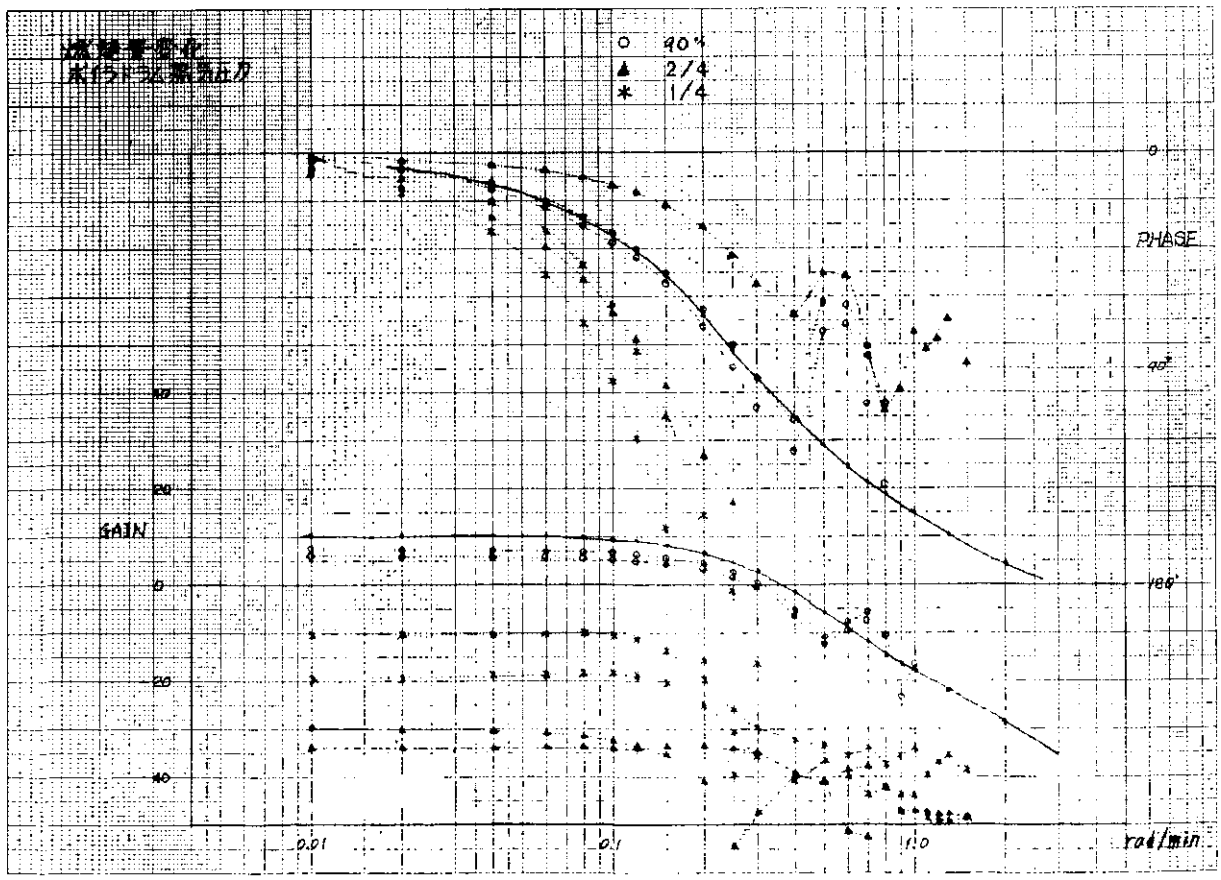
第 3.3.18 図



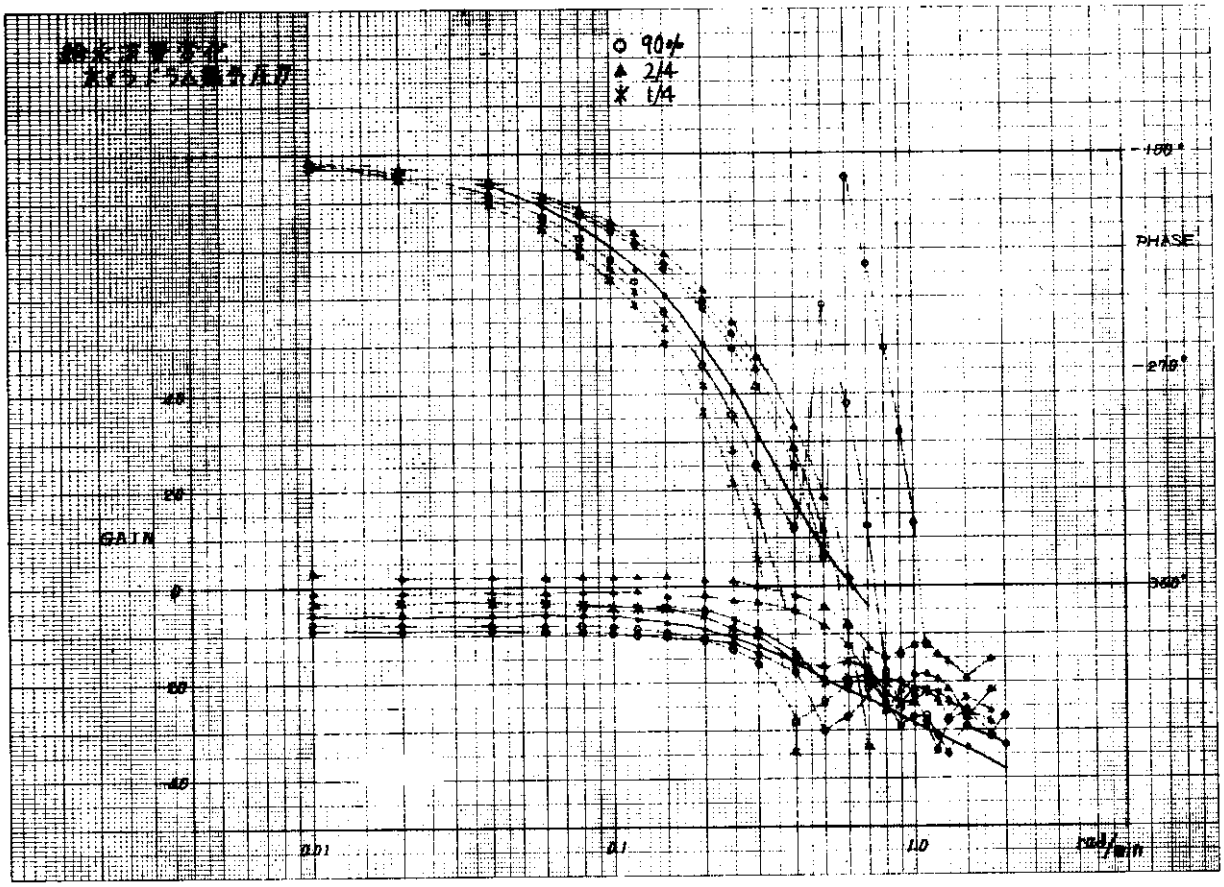
第 3.3.19 図



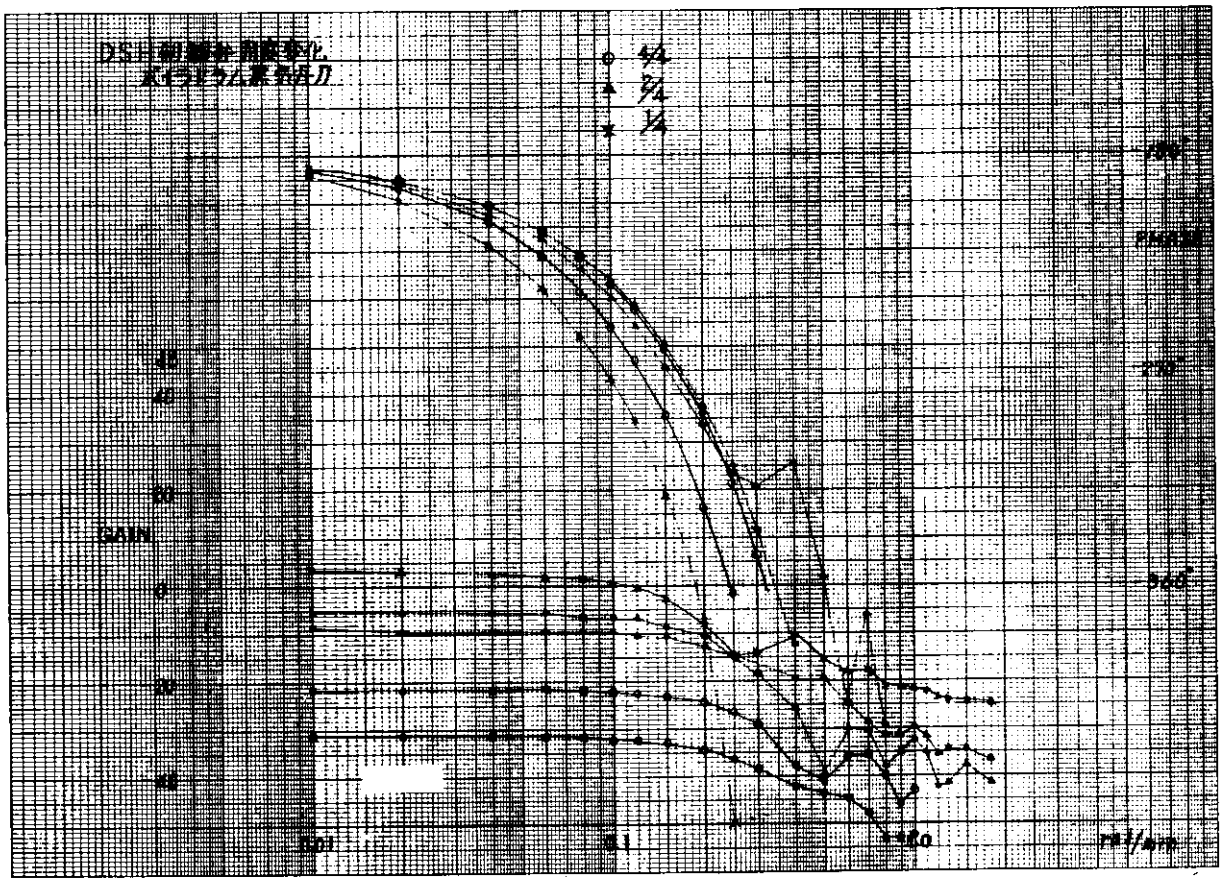
第 3.3.2 0 図



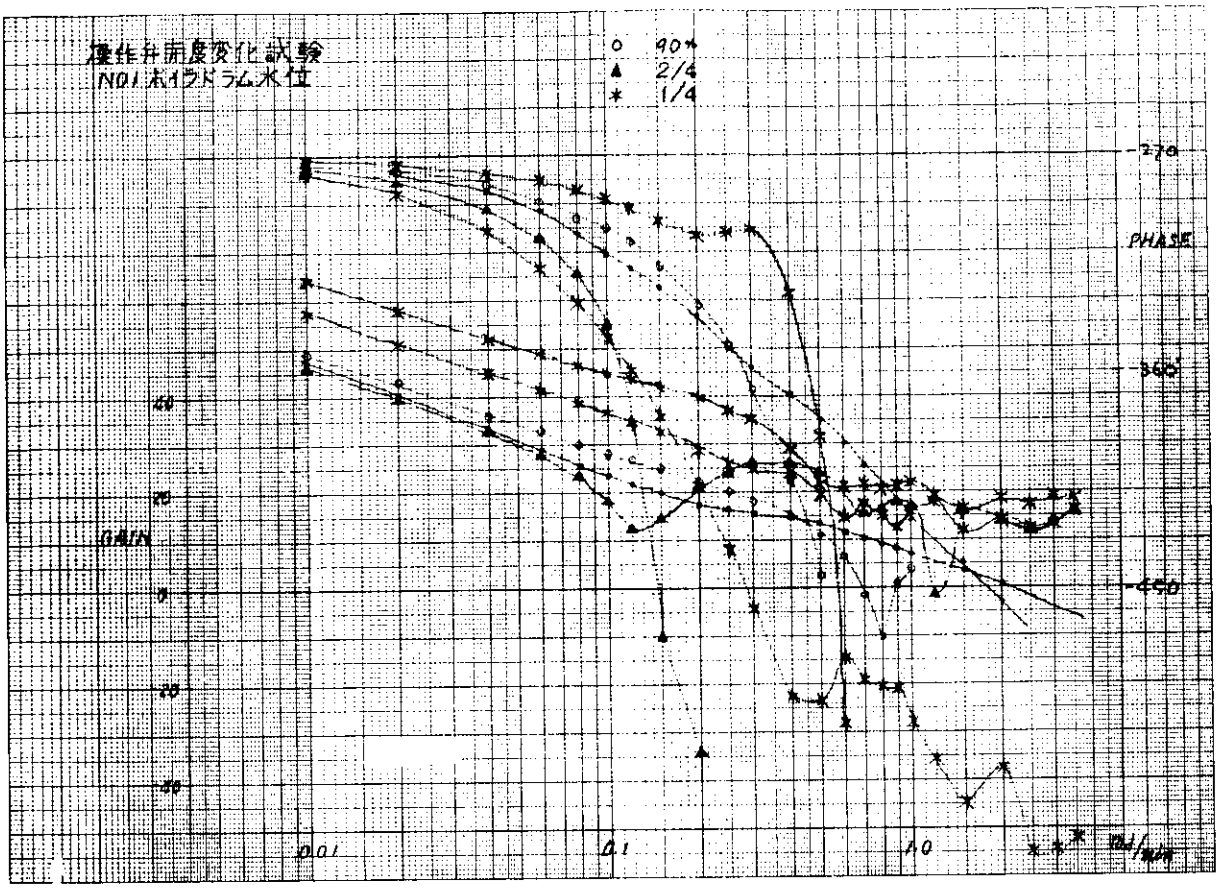
第 3.3.2 1 図



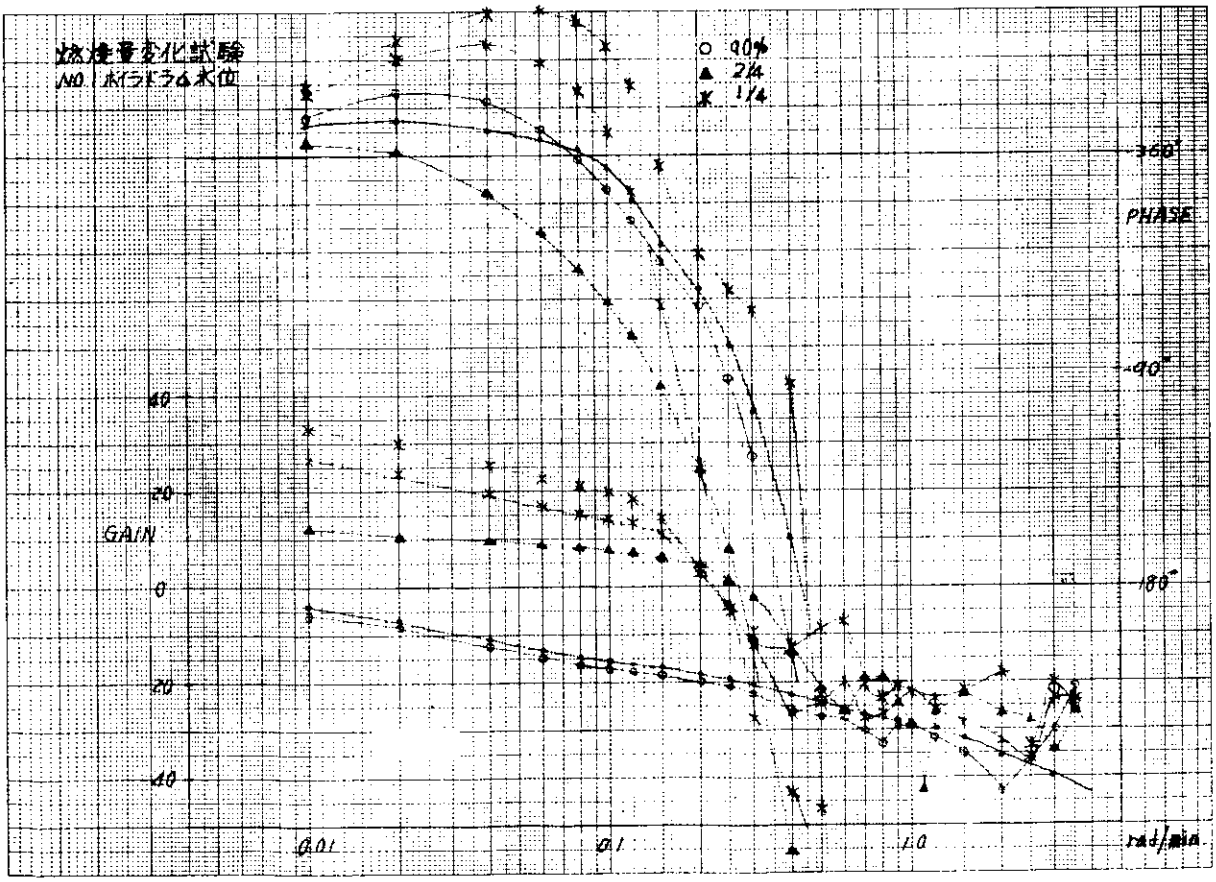
第 3. 3. 2 2 図



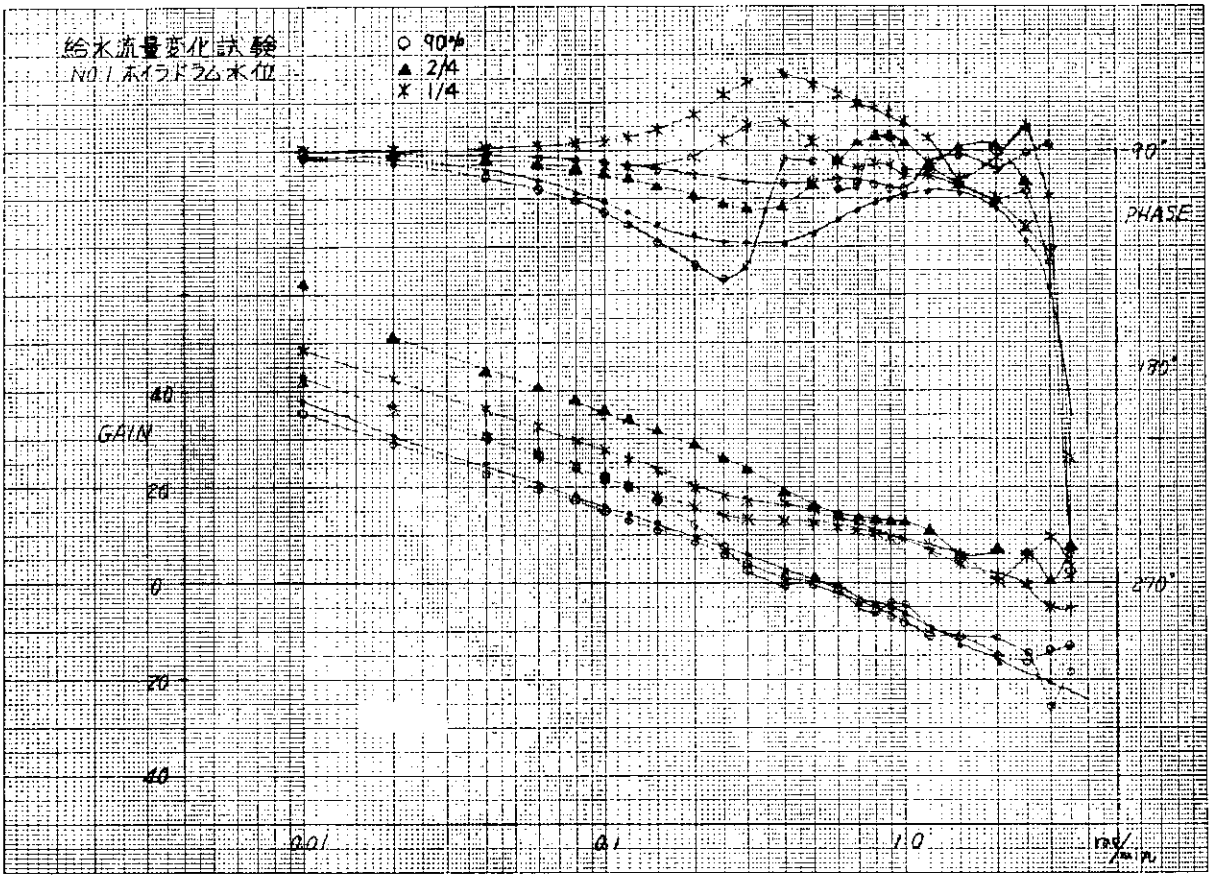
第 3. 3. 2 3 図



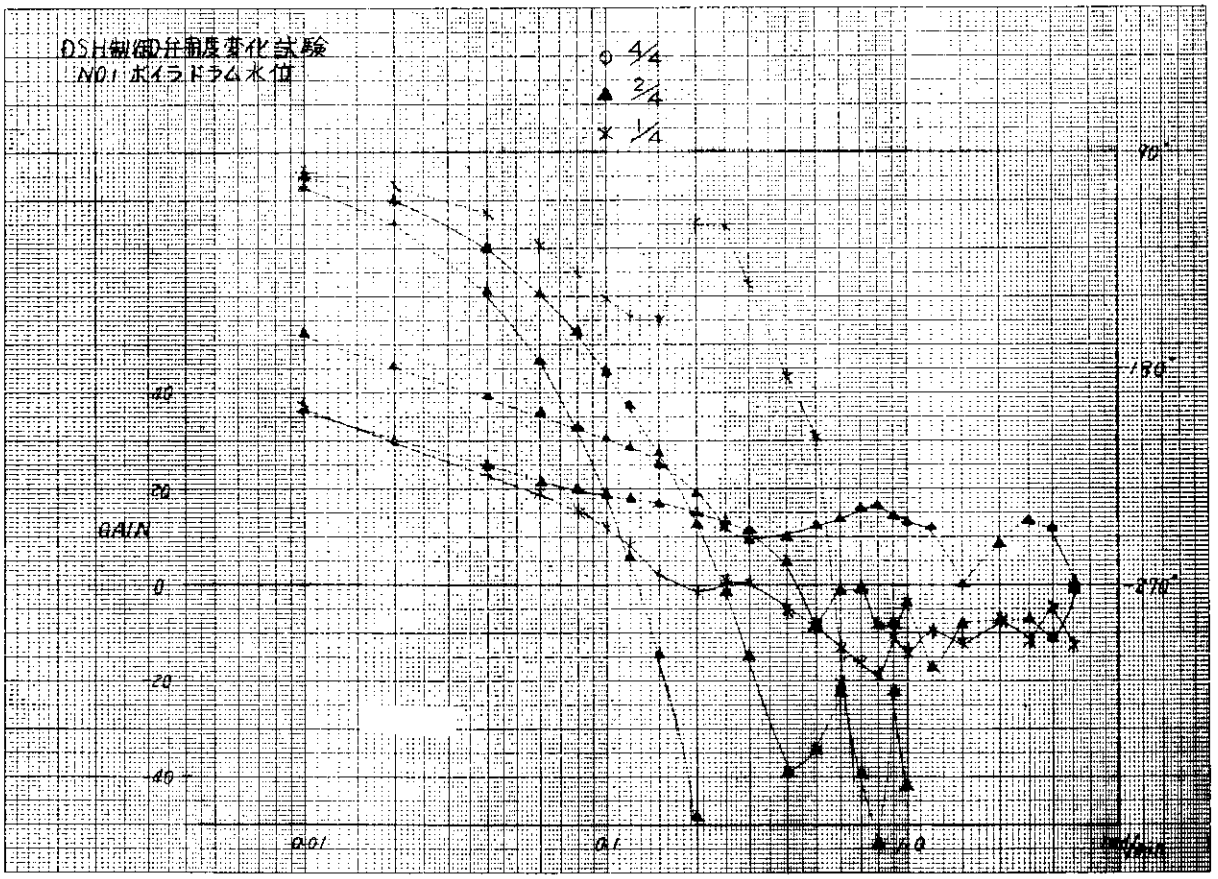
第 3. 3. 2 4 図



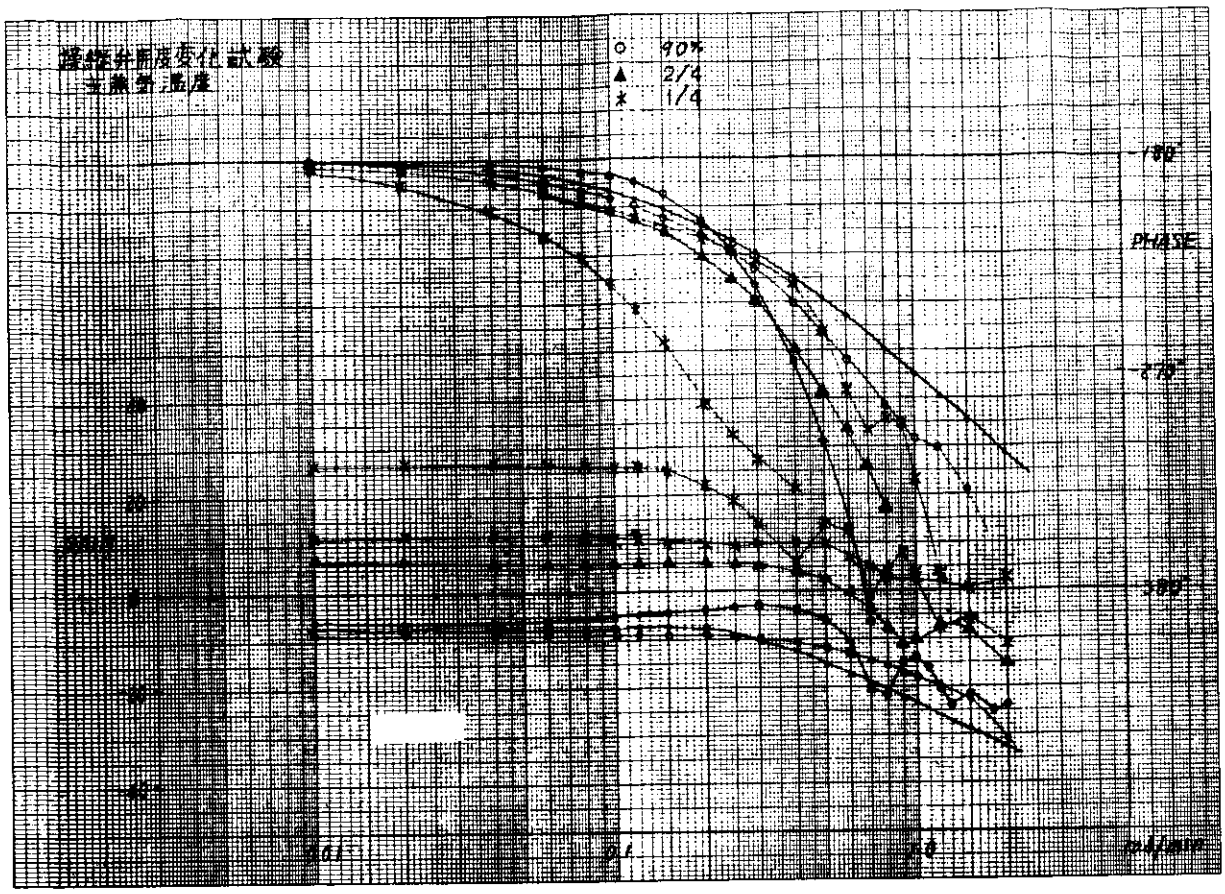
第 3. 3. 2 5 図



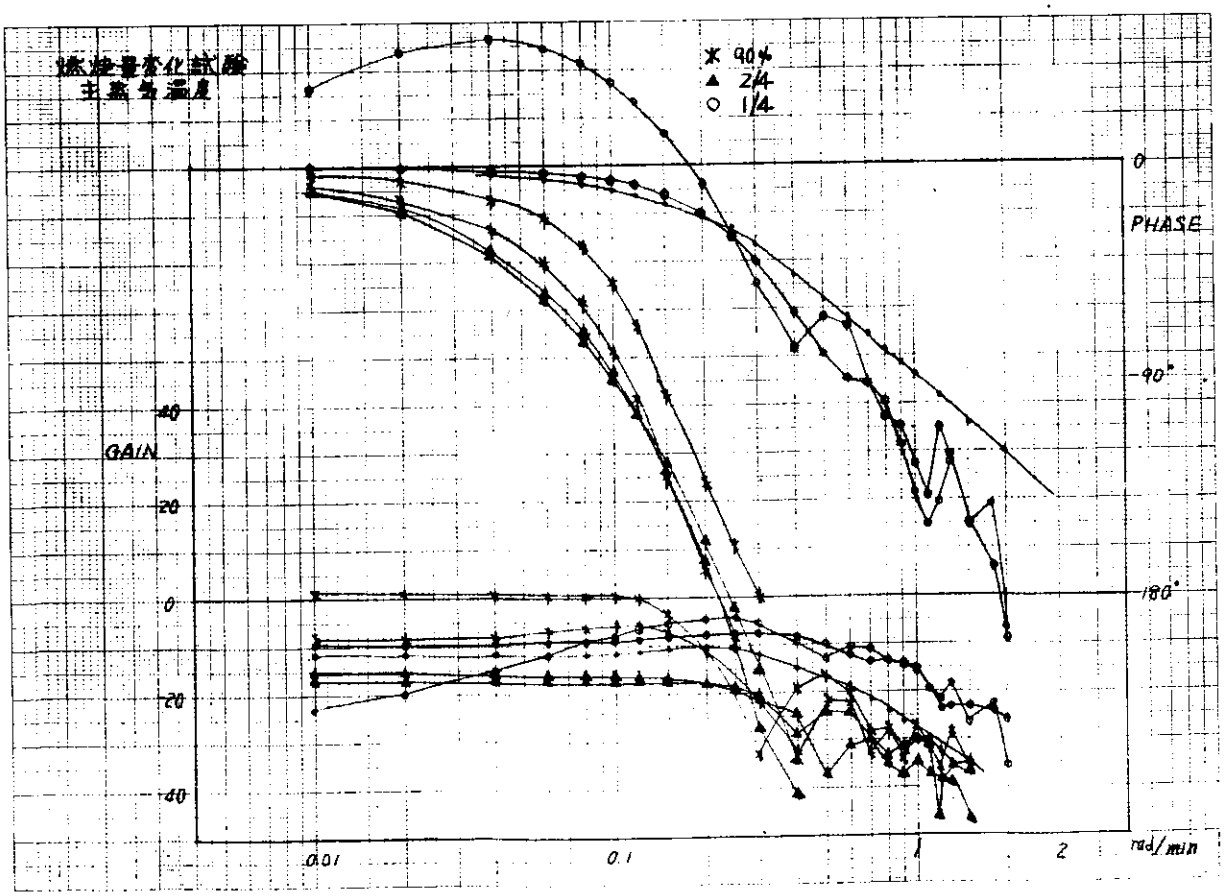
第 3.3.2 6 図



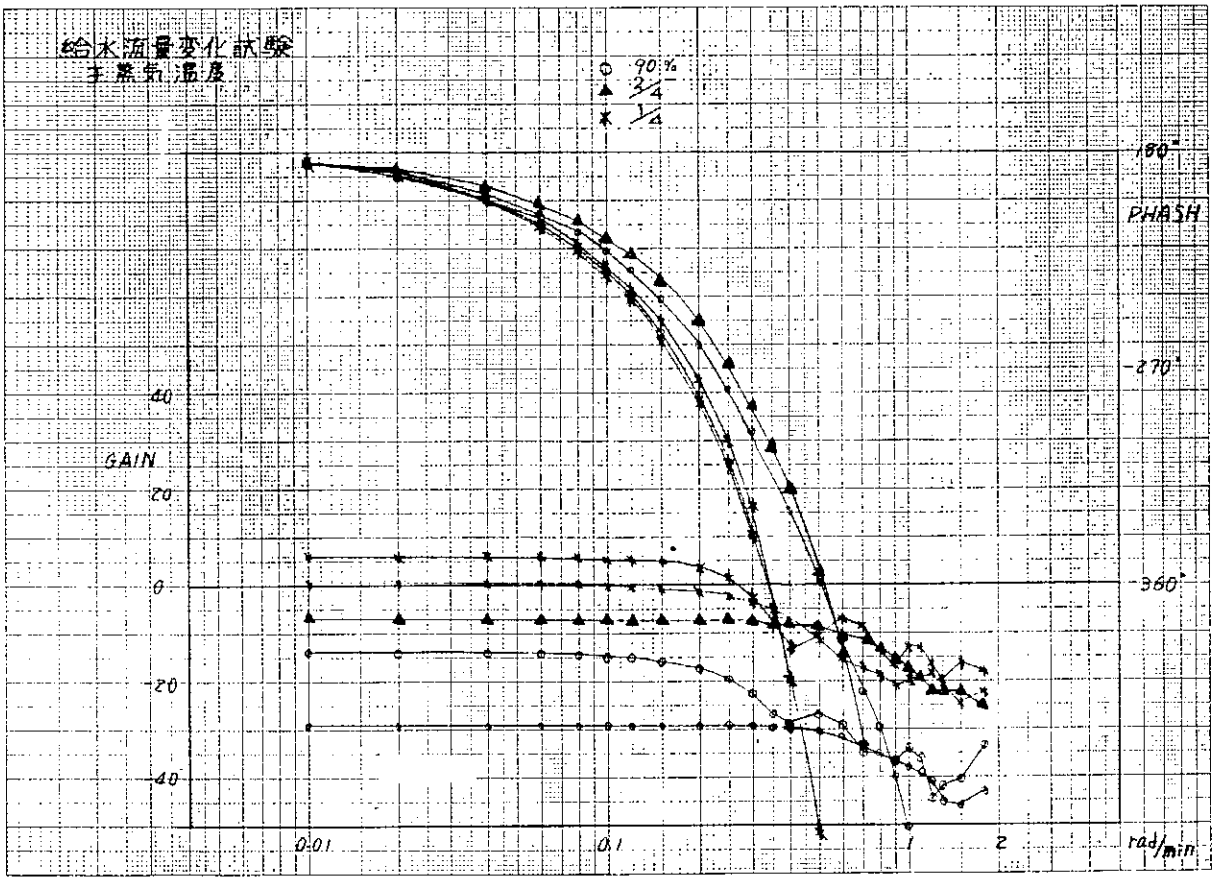
第 3.3.2 7 図



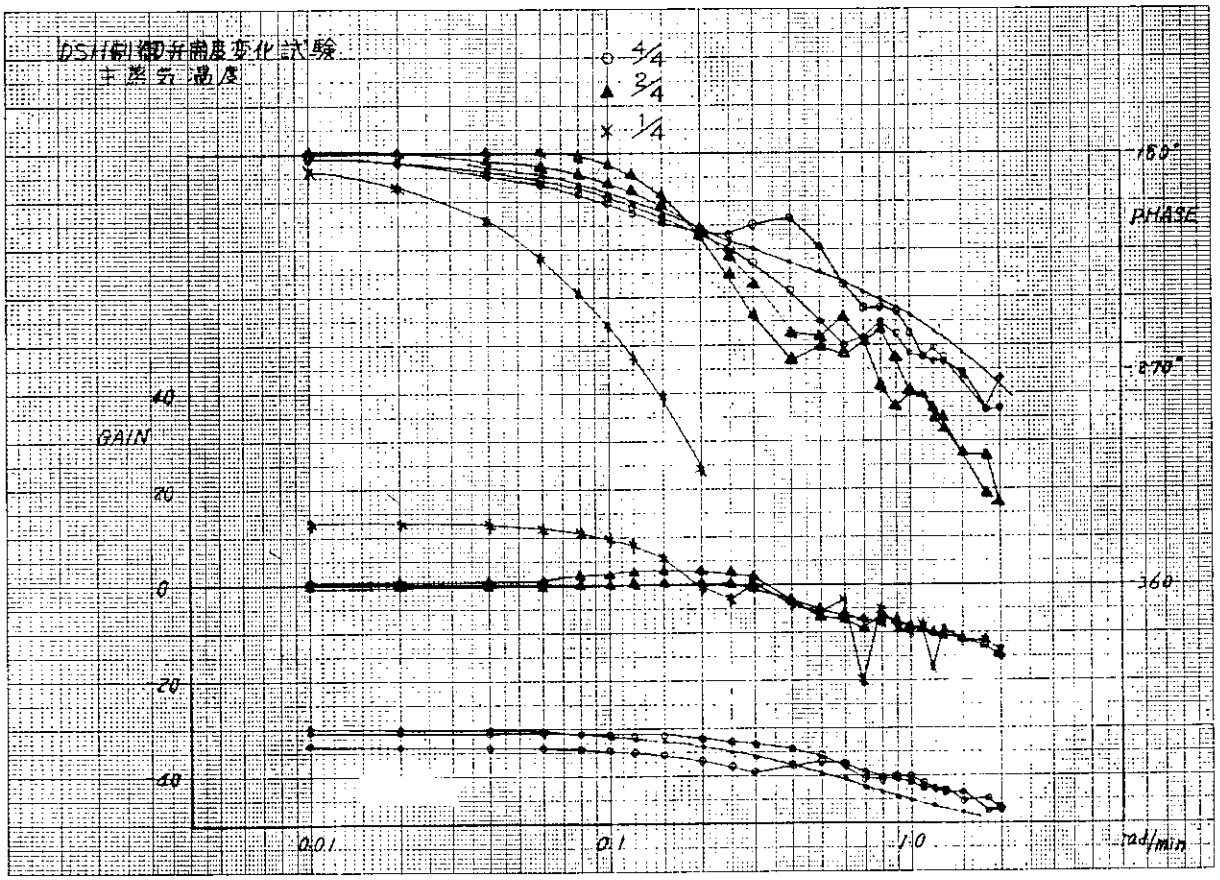
第3.3.28図



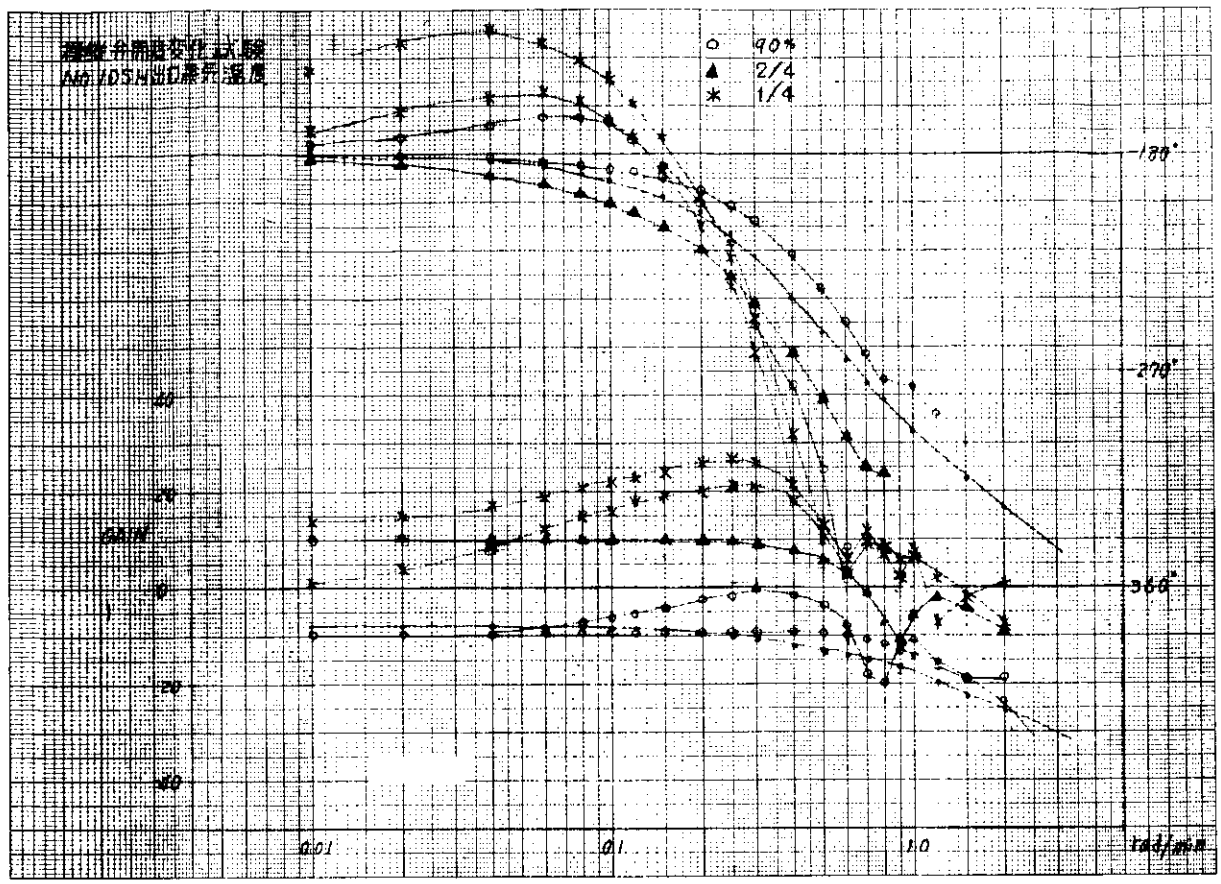
第3.3.29図



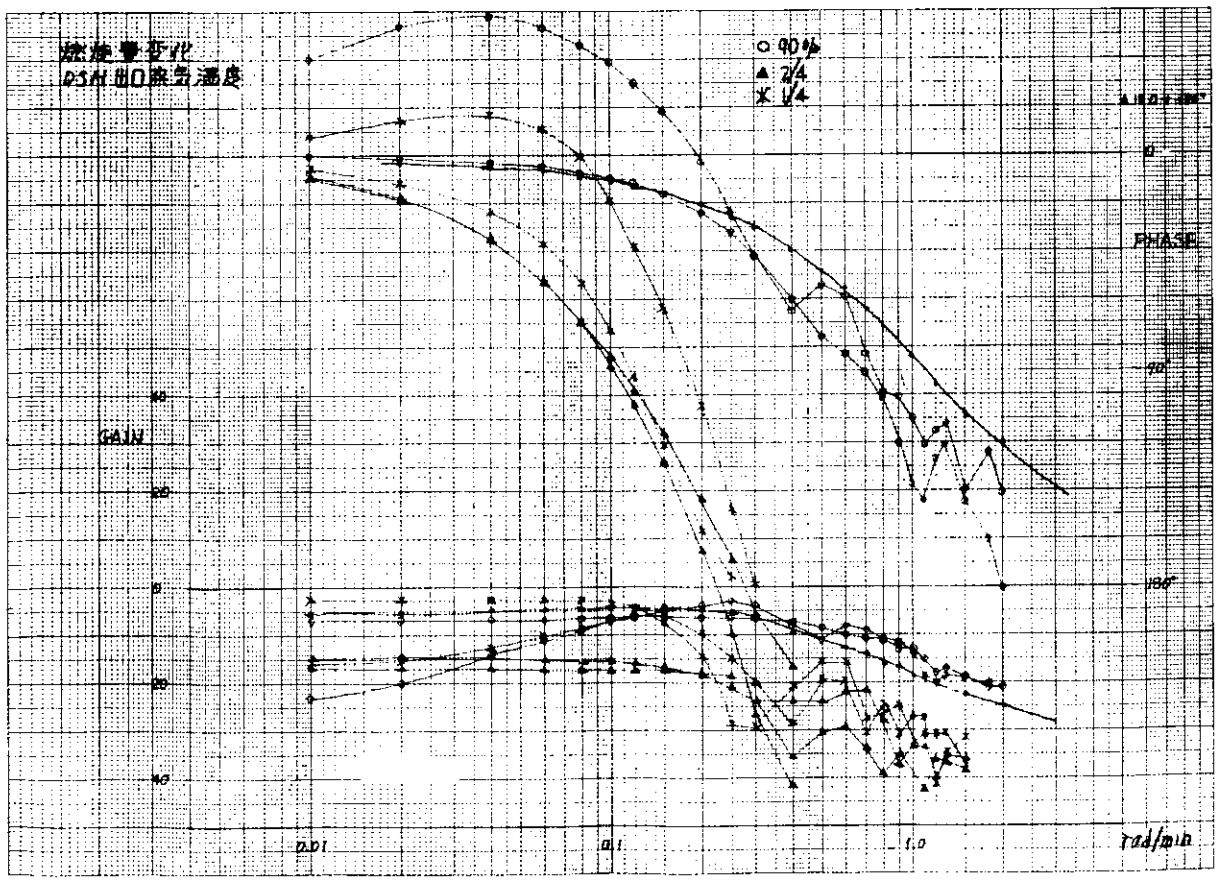
第 3. 3. 3 0 図



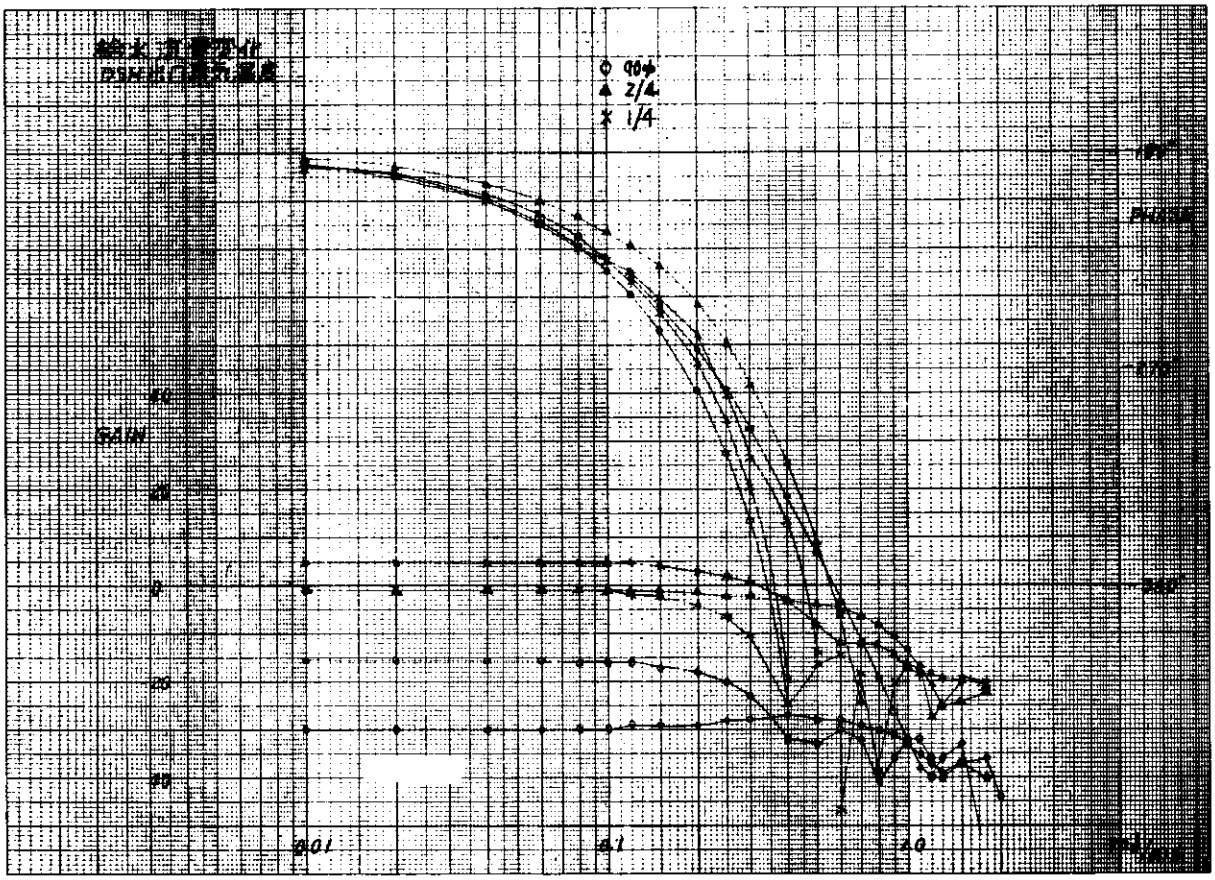
第 3. 3. 3 1 図



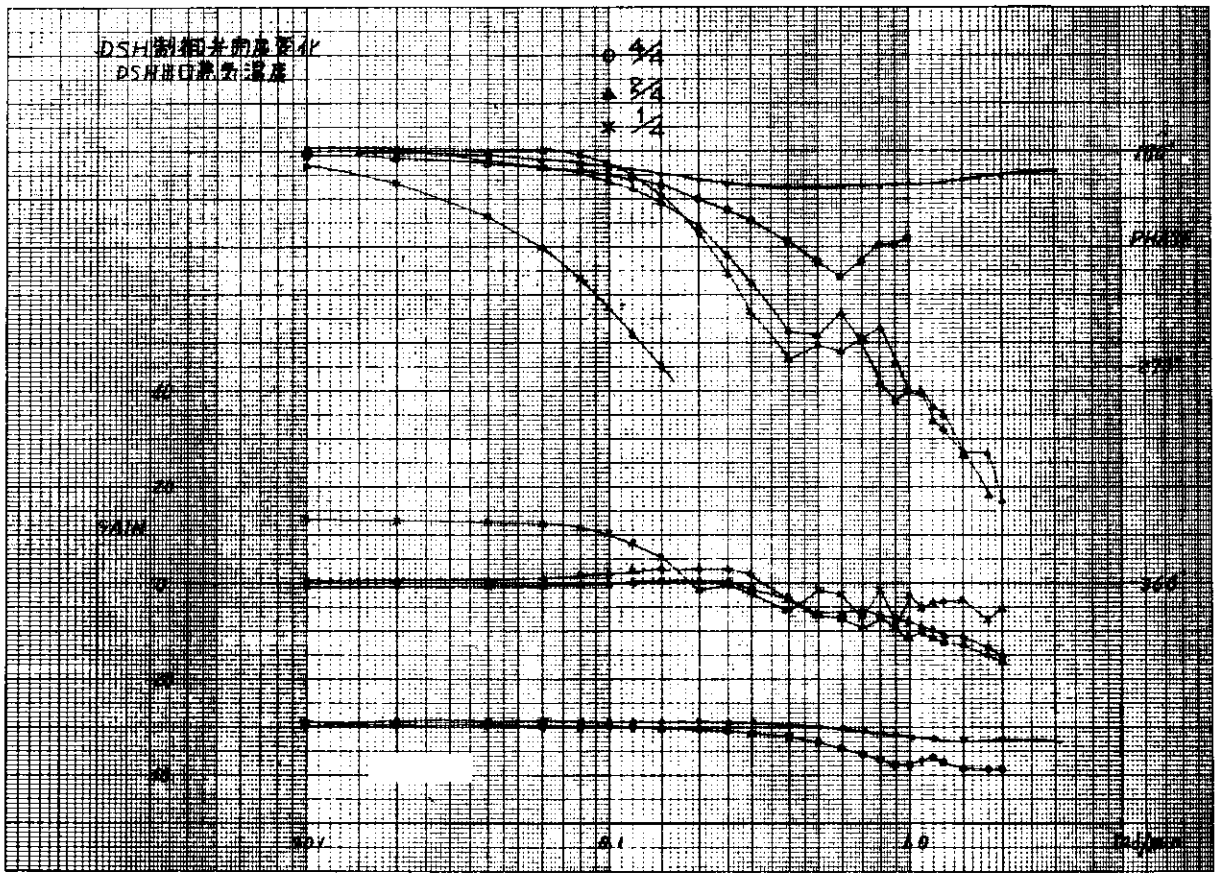
第 3. 3. 3 2 図



第 3. 3. 3 3 図



第3.3.3 4図

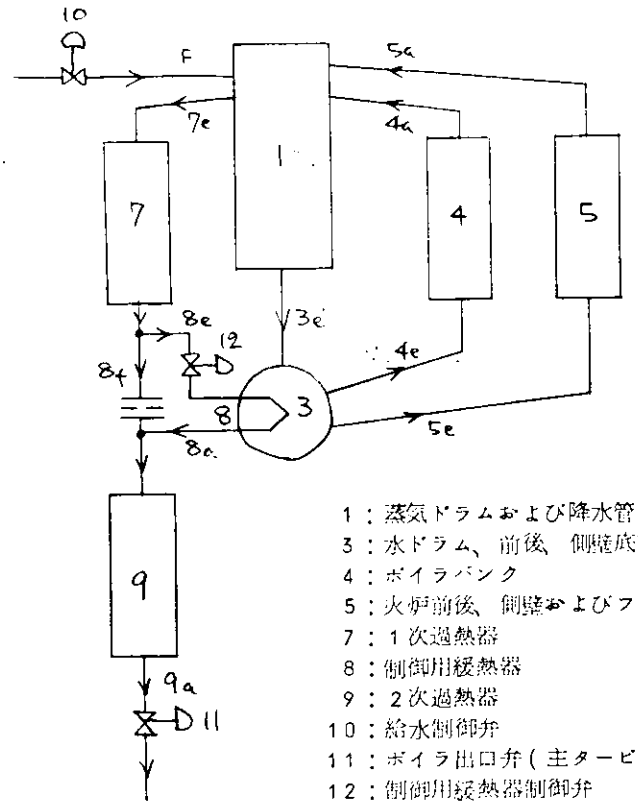


第3.3.3 5図

3.4　動特性の計算

3.4.1　計算のための仮定

動特性計算は、ボイラ全体を第3.4.1図のように分割して行なつた。



1：蒸気ドラムおよび降水管
3：水ドラム、前後、側壁底部ヘッダ
4：ボイラバンク
5：火炉前後、側壁およびフロントバンク
7：1次過熱器
8：制御用緩熱器
9：2次過熱器
10：給水制御弁
11：ボイラ出口弁（主タービン調速弁）
12：制御用緩熱器制御弁

第3.4.1図　動特性計算のためのボイラの分割

なお、節炭器は

1）水は非圧縮性であり圧力への影響はない。

2）節炭器の熱容量は大きく、出口温度の変化は小さい。

ものとして計算から除外した。また、分割した各セクションは集中定数系として取り扱う。

計算に当つての基本的な仮定は、ボイラのいかなる部分においても、またいかなる状態のもとにおいても熱力学的平衡がなりたつものとすることである。分割した各部では、それぞれ次の仮定を設ける。

(1)　水循環系（セクション1、3、4、5）に対する仮定

第3.4.1図のセクション1、3、4、5はボイラの水循環系である。これらの各セクションにおいてつぎの仮定を設ける。

1）各セクション内は、常に飽和状態にあり、水と蒸気の共存するセクションでは、これらは一様に混合しているものとする。

2）各セクションのメタル温度は、水の飽和温度と常に等しい。

3）各セクションの圧力損失は、それらの接続部分に集中されている。

4）燃焼ガスからの熱吸収は、火炉壁では輻射によつて、ボイラバンクでは対流によつて行なわれるものとする。輻射量はガス温度のみで決まるものとする。

5）セクション内における水および気水混合物の慣性は無視する。

(2)　過熱部に対する仮定

セクションの7、8、9は、ボイラの過熱部をなす。これらの各セクションにおいてはつぎの仮定を設ける。

1）各セクションの蒸気は理想気体と考える。

2）各セクションの伝熱は管の内外とも対流によるものとし、熱伝達係数は一定であるとする。

3）各セクションの圧力損失は、それらの接続部分に集中されている。

4）各セクションの蒸気の慣性は無視する。

なお、火炉および煙道は集中系とするが、これらの容量による時定数は、蒸気側に比較してきわめて小さいので無視し、熱吸収のみを考えることとする。

さらに、燃焼量は燃料と空気によつて火炉に放出される熱量と考えることにする。

(3) ボイラ出口および給水に対する仮定

ボイラには、主機および補助蒸気の系統がつながつており、主タービンの操縦弁ならびにタービン各段落は、通常チョークすることはないが、本計算では計算の簡素化のため、タービンは弁入口と復水器との間でチョークしており、ボイラ出口にはチョークした弁がつながつているものとする。

また、給水ポンプ吐出圧は、吐出圧力制御によつて常に一定に保たれているとして計算する。

3.4.2 基礎方程式

3.4.1項の仮定にもとづきボイラの各部でつぎの方程式が成立する。

同項(1)の仮定によつてセクション1、3、4、5では、気水混合物をあたかも単相の流体として取り扱うので、これは、7、8、9と形式上同じ方程式であらわすことができる。

(1) 物質収支の式

$$V_1\dot{\gamma}_1 = G_F + G_{4a} + G_{5a} - G_{3e} - G_{7e} \quad \cdots\cdots (3.4.1)$$

$$V_3\dot{\gamma}_3 = G_{3e} - G_{4e} - G_{5e} \quad \cdots\cdots (3.4.2)$$

$$V_4\dot{\gamma}_4 = G_{4e} - G_{4a} \quad \cdots\cdots (3.4.3)$$

$$V_5\dot{\gamma}_5 = G_{5e} - G_{5a} \quad \cdots\cdots (3.4.4)$$

$$V_7\dot{\gamma}_7 = G_{7e} - G_{8e} - G_{8f} \quad \cdots\cdots (3.4.5)$$

$$V_8\dot{\gamma}_8 = G_{8e} - G_{8a} \quad \cdots\cdots (3.4.6)$$

$$V_9\dot{\gamma}_9 = G_{9e} - G_{8f} - G_{9a} \quad \cdots\cdots (3.4.7)$$

(2) 蒸気および水のエネルギ収支の式

$$V_1(\gamma_1\dot{E}_1) + C_m W_{m1}\dot{T}_1 = G_F H_F + G_{4a} H_4 + G_{5a} H_5 - G_{3e} H_1' - G_{7e} H_1'' \quad \cdots\cdots (3.4.8)$$

$$V_3(\gamma_3\dot{E}_3) + C_m W_{m3}\dot{T}_3 = G_{3e} H_1' - G_{4e} H_3 - G_{5e} H_3 - F_{m3}\alpha_3^{ex}(T_3 - T_{m3}) \quad \cdots\cdots (3.4.9)$$

$$V_4(\gamma_4\dot{E}_4) + C_m W_{m4}\dot{T}_4 = G_{4e} H_3 - G_{4a} H_4 + F_{m4}\alpha_4^{ex}(T_{G6} - T_4) \quad \cdots\cdots (3.4.10)$$

$$V_5(\gamma_5\dot{E}_5) + C_m W_{m5}\dot{T}_5 = G_{5e} H_3 - G_{5a} H_5 + F_{m5}\alpha_{r5}^{ex} T_{Gf}^4 \quad \cdots\cdots (3.4.11)$$

$$V_7(\gamma_7\dot{E}_7) = G_{7e} H_1'' - G_{8e} H_7 - G_{8f} H_7 + F_{m7}\alpha_7(T_{m7} - T_7) \quad \cdots\cdots (3.4.12)$$

$$V_8(\gamma_8\dot{E}_8) = G_{8e} H_7 - G_{8a} H_8 + F_{m8}\alpha_8(T_{m8} - T_8) \quad \cdots\cdots (3.4.13)$$

$$V_9(\gamma_9\dot{E}_9) = G_{8f} H_7 + G_{8a} H_8 - G_{9a} H_9 + F_{m9}\alpha_9(T_{m9} - T_9) \quad \cdots\cdots (3.4.14)$$

(3) 管メタルのエネルギ収支の式

$$C_m W_{m7}\dot{T}_{m7} = F_{m7}\alpha_7^{ex}(T_{G5} - T_{m7}) - F_{m7}\alpha_7(T_{m7} - T_7) \quad \cdots\cdots (3.4.15)$$

$$C_m W_{m8}\dot{T}_{m8} = F_{m8}\alpha_8^{ex}(T_3 - T_{m8}) - F_{m8}\alpha_8(T_{m8} - T_8) \quad \cdots\cdots (3.4.16)$$

$$C_m W_{m9}\dot{T}_{m9} = F_{m9}\alpha_9^{ex}(T_{G5} - T_{m9}) - F_{m9}\alpha_9(T_{m9} - T_9) \quad \cdots\cdots (3.4.17)$$

(4) 燃焼ガスのエネルギ収支の式

$$\left.\begin{aligned} G_G &= \{\delta + L_{TH}(1+\varepsilon)\}\, G_{fa} \\ H_R &= \{\delta H_{fu} + L_{TH}(1+\varepsilon) H_{air}\} / \{\delta + L_{TH}(1+\varepsilon)\} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (3.4.18)$$

として、

$$G_G H_R - F_{m5}\alpha_{r5}^{0.8} T_{Gr}^{4} = G_G C_{PG} T_{Gr} \quad \cdots\cdots (3.4.19)$$

$$C_{PG} G_G (T_{Gr} - T_{Go}) = F_{m7}\alpha_7^{0.8}(T_{Go} - T_{m7}) + F_{m9}\alpha_9^{0.8}(T_{Go} - T_{m9}) \quad \cdots\cdots (3.4.20)$$

$$C_{PG} G_G (T_{Go} - T_{Gb}) = F_{m4}\alpha_4^{0.8}(T_{Gb} - T_4) \quad \cdots\cdots (3.4.21)$$

(5) 水および蒸気の流量の式

$$p_1 - p_3 = \lambda_2 \cdot \frac{L_2}{2D_2} \cdot \frac{G_{3a}^2}{g S_2^2 \gamma_1'} + \gamma' Z_2 \quad \cdots\cdots (3.4.22)$$

$$p_3 - p_4 = \lambda_{4a} \cdot \frac{G_{4a}^2}{2 g S_4^2 \gamma_3} \quad \cdots\cdots (3.4.23)$$

$$p_3 - p_5 = \lambda_{5a} \cdot \frac{G_{5a}^2}{2 g S_5^2 \gamma_3} \quad \cdots\cdots (3.4.24)$$

$$p_4 - p_1 = \left(1 + \lambda_4 \frac{L_4}{2D_4}\right) \frac{G_{4a}^2}{g S_4^2 \gamma_4} - \frac{G_{4a}^2}{g S_4^2 \gamma_3} + \gamma_4 Z_4 \quad \cdots\cdots (3.4.25)$$

$$p_5 - p_1 = \left(1 + \lambda_5 \frac{L_5}{2D_5}\right) \frac{G_{5a}^2}{g S_5^2 \gamma_5} - \frac{G_{5a}^2}{g S_5^2 \gamma_3} + \gamma_5 Z_5 \quad \cdots\cdots (3.4.26)$$

$$p_1 - p_7 = \lambda_7 \cdot \frac{L_7}{2D_7} \cdot \frac{G_{7a}^2}{g S_7^2 \bar{\gamma}_7} \quad \cdots\cdots (3.4.27)$$

$$\bar{\gamma}_7 = \frac{1}{2}(\gamma_1'' + \gamma_7) \quad \cdots\cdots (3.4.28)$$

$$p_7 - p_9 = \lambda_{8f} \cdot \frac{L_{8f}}{2D_{8e}} \cdot \frac{G_{8a}^2}{g S_{8e}^2 \gamma_7} \quad \cdots\cdots (3.4.29)$$

$$p_8 - p_9 = \lambda_8 \cdot \frac{L_8}{2D_8} \cdot \frac{G_{8a}^2}{g S_8^2 \gamma_8} \quad \cdots\cdots (3.4.30)$$

$$G_{9a} = F_{v9}\left(\frac{2}{m+1}\right)^{\frac{1}{m-1}} \sqrt{\frac{m-1}{m+1}} \cdot \frac{p_9}{\sqrt{T_9}} \quad \cdots\cdots (3.4.31)$$

$$G_{8a} = F_{v8}\sqrt{\gamma_7 (p_7 - p_8)} \quad \cdots\cdots (3.4.32)$$

$$G_p = C_v \sqrt{\gamma_w Z (p_2 - p_1)} \quad \cdots\cdots (3.4.33)$$

$$m = \frac{(1+\lambda_v)k}{1 + k\lambda_v} \quad \cdots\cdots (3.4.34)$$

(6) 状態方程式

(a) 気水混合物の状態方程式

気水混合物については3.4.1項の仮定と Clapeyron－Clausius の式より次式がもとめられる。

$$\gamma = \frac{A \frac{K}{K-1} \cdot p}{H - \left(H' - A \frac{K}{K-1} \cdot p \cdot \frac{1}{\gamma'}\right)} \quad \cdots\cdots (3.4.35)$$

$$\frac{K}{K-1} = \frac{T}{p} \cdot \frac{dp}{dT} \quad \cdots\cdots (3.4.36)$$

(b) 飽和水、飽和蒸気に対して、

$$\left.\begin{aligned} H'' &= \bar{A}_1 + \bar{B}_1 \cdot p \\ H' &= \bar{A}_2 + \bar{B}_2 \cdot p \\ \gamma'' &= \bar{A}_3 + \bar{B}_3 \cdot p \\ \gamma' &= \bar{A}_4 + \bar{B}_4 \cdot p \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (3.4.37)$$

$$T = \bar{A}_0 + \bar{B}_0 \cdot p \quad \cdots\cdots (3.4.38)$$

(c) 過熱蒸気に対して、

$$\left.\begin{aligned} \gamma &= A \frac{k}{k-1} p \cdot \frac{1}{H} \\ T &= C_p^{-1} H \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (3.4.39)$$

(7) ドラムレベルの式

第3.4.1図のセクション1において全容積に対する水の体積率を求めるとセクション内一様混合の仮定より次式が成立する。

ドラムの水面は、ドラム底部より計るものとしてこの体積率の関数として与えられる。この関数を正常時の水面近傍で直線で近似するとつぎのようになる。

$$\left.\begin{aligned} \beta_1 &= (\gamma_1 - \gamma_1'') / (\gamma_1' - \gamma_1'') \\ L_3 &= C_1 + C_2 \cdot \beta \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (3.4.40)$$

3.4.3 方程式の無次元化と線形化

3.4.2項で導いた各方程式を規準化し、平衡状態からの微小な変化を考えて線形化する。規準化のための規準量は第3.4.1表に示す各値を用いる。

第3.4.1表 規準化の規準量

	単位	規準値	備考
p_0	at_a	100.0	
γ_0	Kg/m^3	96.89	p_0, H_0の気水混合物のγ
H_0	Kcal/Kg	500.0	
T_0	°K	582.7	p_0の飽和温度
G_0	Kg/min	1,167.0	ボイラMCRの蒸気流量

(1) 状態方程式の規準化

規準値の間に(3.4.41)式の関係があるとしてk_0を求める。

$$\gamma_0 = A \frac{k_0}{k_0 - 1} p_0 \cdot \frac{1}{H_0} \quad \cdots\cdots (3.4.41)$$

(3.4.35)式は、

$$\Gamma = \frac{\bar{K}_0 \psi}{\theta - (a' + b'\psi)} \quad \cdots\cdots (3.4.42)$$

ただし、 $a' + b'\psi = \theta' - \bar{K}_0 \psi \cdot \frac{1}{\Gamma'}$ $\cdots\cdots (3.4.43)$

$$\bar{K}_0 = \frac{k_0 - 1}{k_0} \cdot \frac{K}{K - 1} \quad \cdots\cdots (3.4.44)$$

(3.4.3 7)、(3.4.3 8)式は、

$$\left.\begin{aligned} \theta'' &= a_1 + b_1\,\psi \\ \theta' &= a_2 + b_2\,\psi \\ \Gamma'' &= a_3 + b_3\,\psi \\ \Gamma' &= a_4 + b_4\,\psi \\ \Gamma' - \Gamma'' &= a_{43} + b_{43}\,\psi \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (3.4.45)$$

$$\tau = a_0 + b_0\,\psi \quad \cdots\cdots (3.4.46)$$

(3.4.3 9)式は、

$$\left.\begin{aligned} \Gamma &= \hat{K}\,\psi \cdot \frac{1}{\theta} \\ \tau &= K_T^{-1}\,\theta \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (3.4.47)$$

$$\left.\begin{aligned} \hat{K} &\equiv \frac{k}{k_0} \cdot \frac{k_0 - 1}{k - 1} \\ K_T &\equiv c_p^{-1} H_0 \cdot \frac{1}{T_0} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (3.4.48)$$

以上の各式を用いて、基礎方程式はつぎのように規準化される。

ただし、以下に用いる各係数は第3.4.2表のとおりである。また、規準化された各変数の微小変分を同じ記号を用いてあらわした。

$$\dot{q}_{11}^{*} = \phi_F + \phi_{4a} + \phi_{5a} - \phi_{3e} - \phi_{7e} \quad \cdots\cdots (3.4.49)$$

$$\dot{q}_{13}^{*} = \phi_{3e} - \phi_{4e} - \phi_{5e} \quad \cdots\cdots (3.4.50)$$

$$\dot{q}_{14}^{*} = \phi_{4e} - \phi_{4a} \quad \cdots\cdots (3.4.51)$$

$$\dot{q}_{15}^{*} = \phi_{5e} - \phi_{5a} \quad \cdots\cdots (3.4.52)$$

$$\dot{q}_{17}^{*} = \phi_{7e} - \phi_{8e} - \phi_{8f} \quad \cdots\cdots (3.4.53)$$

$$\dot{q}_{18}^{*} = \phi_{8e} - \phi_{8a} \quad \cdots\cdots (3.4.54)$$

$$\dot{q}_{19}^{*} = \phi_{8a} + \phi_{8f} - \phi_{8a} \quad \cdots\cdots (3.4.55)$$

$$\dot{q}_{21}^{*} = \theta_4^0\phi_{4a} + \theta_5^0\phi_{5a} - \theta_1'^0\phi_{3e} - \theta_1''^0\phi_{7e} + \phi_{4a}^0\theta_4 + \phi_{5a}^0\theta_5 - (\phi_{3e}^0 b_4 + \phi_{7e}^0 b_3)\psi_1 + \theta_F^0\phi_F \quad \cdots\cdots (3.4.56)$$

$$\dot{q}_{23}^{*} = \theta_1'^0\phi_{3e} - \theta_3^0\phi_{4e} - \theta_3^0\phi_{5e} - K_8^{ex}(b_0\psi_3 - \tau_{m8}) + \phi_{3e}^0 b_4\psi_1 - (\phi_{4e}^0 + \phi_{5e}^0)\theta_3 \quad \cdots\cdots (3.4.57)$$

$$\dot{q}_{24}^{*} = \theta_3^0\phi_{4e} - \theta_4^0\phi_{4a} + \phi_{4e}^0\theta_3 - \phi_{4a}^0\theta_4 + K_4^{ex}\tau_{Gb} - K_4^{ex} b_0\psi_4 \quad \cdots\cdots (3.4.58)$$

$$\dot{q}_{25}^{*} = \theta_3^0\phi_{5e} - \theta_5^0\phi_{5a} + \phi_{5e}^0\theta_3 - \phi_{5a}^0\theta_5 + A K_5^{ex}\tau_{Gf}^{00}\tau_{Gf} \quad \cdots\cdots (3.4.59)$$

$$\dot{q}_{27}^{*} = \theta_1''^0\phi_{7e} - \theta_7^0\phi_{8e} - \theta_7^0\phi_{8f} + \phi_{7e}^0 b_3\psi_1 \quad \cdots\cdots (3.4.60)$$

$$- K_T^{-1}(\phi_{8e}^0 + \phi_{8f}^0)\tau_7 + K_7(\tau_{m7} - \tau_7) \quad \cdots\cdots (3.4.61)$$

$$\dot{q}_{28}^{*} = \theta_7^0\phi_{8e} - \theta_8^0\phi_{4a} + K_T^{-1}\phi_{8e}^0\tau_7 - K_T^{-1}\phi_{8a}^0\tau_8 + K_8(\tau_{m8} - \tau_8) \quad \cdots\cdots (3.4.62)$$

$$\dot{q}_{29}^{*} = \theta_7^0\phi_{8a} + \theta_7^0\phi_{8f} - \theta_9^0\phi_{0a} - K_T^{-1}\phi_{8a}^0\tau_8 + K_T^{-1}\phi_{8f}^0\tau_7 - K_T^{-1}\phi_{9a}^0\tau_9 + K_9(\tau_{m9} - \tau_9) \quad \cdots\cdots (3.4.63)$$

$$\dot{q}_{37}^{*} = K_7^{ex}(\tau_{Gb} - \tau_{m7}) - K_7(\tau_{m7} - \tau_7) \quad \cdots\cdots (3.4.64)$$

$$\dot{q}_{38}^{*} = K_8^{ex}(b_0\psi_3 - \tau_{m8}) - K_8(\tau_{m8} - \tau_8) \quad \cdots\cdots (3.4.65)$$

$$\dot{q}_{39}^{*} = K_9^{ex}(\tau_{Gb} - \tau_{m9}) - K_9(\tau_{m9} - \tau_9) \quad \cdots\cdots (3.4.66)$$

$$\phi_G = \{\delta + L_{GH}(i+\varepsilon)\}\phi_{Gx}$$

$$(\mu_1\phi_G^0 + 4K_5^{ex}\tau_{G1}^{03})\tau_{G1} = (\theta_R^0 - \mu_1\tau_{G1}^0)\phi_G \quad \cdots\cdots (3.4.67)$$

$$(K_7^{ex} + K_9^{ex} + \mu_3\phi_G^0)\tau_{G3} - \mu_3\phi_G^0\tau_{G1} = K_7^{ex}\tau_{m1} + K_9^{ex}\tau_{m3} + (\mu_1\tau_{G1}^0 - \mu_3\tau_{G3}^0)\phi_G \quad \cdots\cdots (3.4.68)$$

$$(K_4^{ex} + \mu_5\phi_G^0)\tau_{G5} - \mu_5\phi_G^0\tau_{G3} = (\mu_3\tau_{G3}^0 - \mu_5\tau_{G5}^0)\phi_G + K_4^{ex}b_0\psi_4 \quad \cdots\cdots (3.4.69)$$

$$\phi_{3e} = \frac{\phi_{3e}^0}{2}\left(\frac{1 - A_{23}b_4}{\psi_{1,3}^0} + \frac{b_4}{a_4 + b_4\psi_1^0}\right)\psi_1 - \frac{\phi_{3e}^0}{2\psi_{1,3}^0}\psi_3 \quad \cdots\cdots (3.4.70)$$

$$\phi_{4e} = \frac{\phi_{4e}^0}{2(\psi_3^0 - \psi_4^0)}(\psi_3 - \psi_4) + \frac{\phi_{4e}^0}{2\dot{q}_{13}^{*0}}\dot{q}_{13} \quad \cdots\cdots (3.4.71)$$

$$\phi_{5e} = \frac{\phi_{5e}^0}{2(\psi_3^0 - \psi_5^0)}(\psi_3 - \psi_5) + \frac{\phi_{5e}^0}{2\dot{q}_{13}^{*0}}\dot{q}_{13} \quad \cdots\cdots (3.4.72)$$

$$\phi_{4a} = \frac{\phi_{4a}^0}{2\psi_{4,1}^0}\left\{\psi_4 - \psi_1 + \frac{i}{\lambda_{4e}}(\psi_3 - \psi_4) - \frac{z_{04}}{\bar{q}_{14}}\dot{q}_{14}\right\} + \frac{\phi_{4a}^0}{2\dot{q}_{14}^{*0}}\dot{q}_{14} \quad \cdots\cdots (3.4.73)$$

$$\phi_{5a} = \frac{\phi_{5a}^0}{2\psi_{5,1}^0}\left\{\psi_5 - \psi_1 + \frac{i}{\lambda_{5e}}(\psi_3 - \psi_5) - \frac{z_{05}}{\bar{q}_{15}}\dot{q}_{15}\right\} + \frac{\phi_{5a}^0}{2\dot{q}_{15}^{*0}}\dot{q}_{15} \quad \cdots\cdots (3.4.74)$$

$$\begin{cases} \psi_{1,3}^0 \equiv \psi_1^0 - \psi_3^0 - A_{23}(a_4 + b_4\psi_1^0) \quad \cdots\cdots (3.4.75) \\ \psi_{4,1}^0 \equiv \psi_4^0 - \psi_1^0 + \dfrac{i}{\lambda_{4e}}(\psi_3^0 - \psi_4^0) - z_{04}\dfrac{i}{\bar{q}_{14}}\dot{q}_{14}^{*0} \\ \psi_{5,1}^0 \equiv \psi_5^0 - \psi_1^0 + \dfrac{i}{\lambda_{5e}}(\psi_3 - \psi_5^0) - z_{05}\dfrac{i}{\bar{q}_{15}}\dot{q}_{15}^{*0} \end{cases}$$

$$\phi_{7e} = \frac{\phi_{7e}^0}{2(\psi_1^0 - \psi_7^0)}(\psi_1 - \psi_7) + \frac{\phi_{7e}^0}{2(\Gamma_1^{\prime\prime 0} + \Gamma_7^0)}b_3\cdot\psi_1 + \frac{\phi_{7e}^0}{2(\Gamma_1^{\prime\prime 0} + \Gamma_7^0)\bar{q}_{17}}\dot{q}_{17}^* \quad \cdots\cdots (3.4.76)$$

$$\phi_{8a} = \frac{\phi_{8a}^0}{2(\psi_8^0 - \psi_9^0)}(\psi_8 - \psi_9) + \frac{\phi_{8a}^0}{2\dot{q}_{18}^{*0}}\dot{q}_{18} \quad \cdots\cdots (3.4.77)$$

$$\phi_{8f} = \frac{\phi_{8f}^0}{2(\psi_7^0 - \psi_9^0)}(\psi_7 - \psi_9) + \frac{\phi_{8f}^0}{2\dot{q}_{17}^{*0}}\dot{q}_{17} \quad \cdots\cdots (3.4.78)$$

$$\phi_{9a} = \frac{\phi_{9a}^0}{z_{V9}^0}z_{V9} + \frac{\phi_{9a}^0}{\psi_9^0}\psi_9 - \frac{\phi_{9a}^0}{2\tau_9^0}\cdot\tau_9 \quad \cdots\cdots (3.4.79)$$

$$\phi_{8e} = \frac{\phi_{8e}^0}{z_{V8}^0}z_{V8} + \frac{\phi_{8e}^0}{2(\psi_7^0 - \psi_8^0)}(\psi_7 - \psi_8) + \frac{\phi_{8e}^0}{2\dot{q}_{17}^{*0}}\dot{q}_{17}^* \quad \cdots\cdots (3.4.80)$$

$$\phi_F = \frac{\phi_F^0}{Q^0}Q - \frac{\phi_F^0}{2(\psi_F^0 - \psi_1^0)}\psi_1 \quad \cdots\cdots (3.4.81)$$

$$A_d = \frac{c_2}{\bar{q}_{11}(a_{43} + b_{43}\psi_1^0)}\dot{q}_{11}^* + \frac{c_2 b_{43}\left(\dfrac{\dot{q}_{11}^{*0}}{\bar{q}_{11}} - a_3\right) - c_2 b_3 a_{43}}{(a_{43} + b_{43}\psi_1^0)^2}\psi_1 \quad \cdots\cdots (3.4.82)$$

$\dot{q}_{1,n}$, $\dot{q}_{2,n}$, $\dot{q}_{3,n}$ と ψ_n, θ_n, τ_n, $\tau_{m,n}$ との関係はつぎであたえられる。

$$\psi_n = \frac{\partial\psi_n}{2\dot{q}_{1,n}}\dot{q}_{1,n} + \frac{\partial\psi_n}{\partial\dot{q}_{2,n}}\dot{q}_{2,n} \quad \cdots\cdots (3.4.83)$$

$$\theta_n = \frac{\partial\theta_n}{\partial\dot{q}_{1,n}}\dot{q}_{1,n} + \frac{\partial\theta_n}{\partial\dot{q}_{2,n}}\dot{q}_{2,n} \quad \cdots\cdots (3.4.84)$$

$$
\left.
\begin{aligned}
\frac{\partial \psi_n}{\partial q_{1,n}^{*}} &\equiv \frac{(b_0 b' - a' b_0)\bar{q}_{3,n} - a'(\bar{K}_0 - \hat{K}_0)\bar{q}_{1,n} - b' q_{2,n}^{*0}}{\left\{ b_0 \bar{q}_{3,n} + (\bar{K}_0 - \hat{K}_0) q_{1,n} + b' q_{1,n}^{*0} \right\}^2} \\
\frac{\partial \psi_n}{\partial q_{2,n}^{*}} &\equiv \frac{1}{b_0 \bar{q}_{3,n} + (\bar{K}_0 - \hat{K}_0) q_{1,n} + b' q_{1,n}^{*0}} \\
\frac{\partial \theta_n}{\partial q_{1,n}^{*}} &\equiv \left(b' + \bar{K}_0 \frac{\bar{q}_{1,n}}{q_{1,n}^{*0}} \right) \frac{\partial \psi_n}{\partial q_{1,n}^{*}} - \bar{K}_0 \bar{q}_{1,n} \frac{\psi_n^0}{q_{1,n}^{*0 2}} \\
\frac{\partial \theta_n}{\partial q_{2,n}^{*}} &\equiv \left(b' + \bar{K}_0 \frac{\bar{q}_{1,n}}{q_{1,n}^{*0}} \right) \frac{\partial \psi_n}{\partial q_{2,n}^{*}}
\end{aligned}
\right\} \quad \cdots\cdots (3.4.85)
$$

ただし、 $n = 1, 3, 4, 5$

$$
\psi_n = \frac{\psi_n^0}{q_{2,n}^{*0}} q_{2,n}^{*} \quad \cdots\cdots (3.4.86)
$$

$$
\tau_n = -\frac{\theta_n^0}{q_{1,n}^{*0}} q_{1,n}^{*} + \frac{\theta_n^0}{q_{2,n}^{*0}} q_{2,n}^{*} \quad \cdots\cdots (3.4.87)
$$

$$
\tau_{m,n} = \frac{\tau_{m,n}^0}{q_{3,n}^{*0}} q_{3,n}^{*} \quad \cdots\cdots (3.4.88)
$$

ただし、 $n = 7, 8, 9$

以上における $\bar{q}_{1,n}$, $\bar{q}_{3,n}$ はつぎであたえられる。

$$
\left.
\begin{aligned}
\bar{q}_{1,n} &\equiv V_n \tau_0 / G_0 \\
\bar{q}_{3,n} &\equiv C_m W_{m7} T_0 / G_0 H_0
\end{aligned}
\right\} \quad \cdots\cdots (3.4.89)
$$

$n = 1, 3, 4, 5, 7, 8, 9$

$$
\left.
\begin{aligned}
K_n &\equiv F_{m,n} \alpha_n^0 T_0 / G_0 H_0 \\
K_n^{ex} &\equiv F_{m,n} \alpha_n^{ex0} T_0 / G_0 H_0
\end{aligned}
\right\} \quad \cdots\cdots (3.4.90)
$$

$n = 7, 8, 9$

$$
\left.
\begin{aligned}
\mu_r &\equiv C_{PG,r} T_0 / H_0 \\
\mu_s &\equiv C_{PG,s} T_0 / H_0 \\
\mu_b &\equiv C_{PG,b} T_0 / H_0
\end{aligned}
\right\} \quad \cdots\cdots (3.4.91)
$$

3.4.4 周波数応答の計算

3.4.3項で求めた線形化方程式より各入力に対する周波数応答を計算するには、これらの方程式を連立方程式として与えられたω（角周波数）ごとにとけばよい。そのためには、これら連立方程式をベクトル表示し、パラメータωをふくんだ行列計算に帰着させる方法が計算に便利である。

(1) 方程式のベクトル表示

3.4.3項の各方程式の変数について、つぎのベクトルを定める。

$$
\left.
\begin{aligned}
X &\equiv (q_{11}', q_{21}', q_{13}', q_{23}', q_{14}', q_{24}', q_{15}', q_{25}', q_{16}', q_{26}', q_{17}', q_{27}', q_{18}', q_{28}', q_{38}', q_{19}', q_{29}', q_{39}')' \\
\phi &\equiv (\phi_{30}, \phi_{40}, \phi_{50}, \phi_{60}, \phi_{70}, \phi_{80}, \phi_{90}, \phi_{10}, \phi_{20}, \phi_{30})' \\
\varphi &\equiv (\varphi_1, \theta_1, \varphi_3, \theta_3, \varphi_4, \theta_4, \varphi_5, \theta_5, \varphi_7, \tau_7, \tau_{m7}, \varphi_8, \tau_8, \tau_{m8}, \varphi_9, \tau_9, \tau_{m9})' \\
T_1 &\equiv (\tau_{11}, \tau_{21}, \tau_{31})' \\
U &\equiv (\Omega, \tau_{10}, \tau_{20}, \phi_{20})'
\end{aligned}
\right\} \quad \cdots\cdots (3.4.92)
$$

ただし、( )′はベクトルの転置をあらわす。

(3.4.9 2)式のベクトルを用いると3.4.3項の各方程式はつぎのようにあらわせる。

$$\left\{\begin{aligned}\dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{H}^{(1)}\phi + \mathbf{H}^{(2)}\dot{\phi} + \mathbf{H}^{(3)}T_G + \mathbf{H}^{(4)}\mathbf{U}\\ \dot{\phi} &= \mathbf{F}^{(1)}\phi + \mathbf{F}^{(2)}\mathbf{X}\\ \phi &= \mathbf{F}^{(3)}\mathbf{X}\end{aligned}\right. \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.4.93)$$

ただし、$\mathbf{H}^{(i)}$および$\mathbf{F}^{(i)}$の各行列は3.4.3項の各方程式の各変数に対する係数を(3.4.9 2)式のベクトルの要素の順序に従つて、対応する行と列にあてはめてえられる。

(3.4.9 3)式において、T_Gは(3.4.67)～(3.4.69)式によつてϕおよび$\mathbf{U}$の線形結合であたえられるから次式をうる。

$$T_G = \mathbf{F}^{(4)}\phi + \mathbf{F}^{(5)}\mathbf{U} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.4.94)$$

ここで、$\mathbf{F}^{(4)}$, $\mathbf{F}^{(5)}$の両行列は、T_G, ϕ, $\mathbf{U}$の各ベクトルの各要素に対応する行および列に(3.4.67)～(3.4.69)式の各係数をあてはめてえられるものである。

ボイラの代表的変数として第3.3.16～3.3.33図に周波数応答を示した各変数を出力ベクトルとして定義するとつぎのようになる。

$$\mathbf{Y} \equiv (\psi_1,\ \psi_9,\ T_8,\ T_9,\ M_2)' \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.4.95)$$

出力は、(3.4.93)式のϕと(3.4.82)式とよりつぎのようにあらわせる。

$$\left.\begin{aligned}&\mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X}\\ &\mathbf{C} \equiv \begin{array}{|c|}\hline \mathbf{F}^{(3)}\text{の第1行の各列の要素}\\ \hline \mathbf{F}^{(3)}\text{の第15行}\quad〃\\ \hline \mathbf{F}^{(3)}\text{の第13行}\quad〃\\ \hline \mathbf{F}^{(3)}\text{の第16行}\quad〃\\ \hline C^{11}\ \ C^{12}\ \ \cdots\ \ \mathbf{O}\ (1\times 15)\\ \hline \end{array}\\ &\qquad\qquad\qquad\qquad 17\text{列}\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.4.96)$$

ただし、

$$C^{11} \equiv \frac{C_2}{q_{11}(a_{43}+b_{43}\phi_1^0)} + C_2\frac{\partial\phi_1}{\partial q_{11}}\cdot\frac{b_{43}\left(\dfrac{q_{11}^{\cdot 0}}{q_{11}} - a_3\right) - b_3 a_{43}}{(a_{43}+b_{43}\phi_1^0)^2}$$

$$C^{12} \equiv C_2\frac{\partial\phi_1}{\partial q_{21}}\cdot\frac{b_{43}\left(\dfrac{q_{11}^{\cdot 0}}{q_{11}} - a_3\right) - b_3 a_{43}}{(a_{43}+b_{43}\phi_1^0)^2}$$

(3.4.93)～(3.4.96)式によつて、つぎのようにあらわすことができる。

$$\left.\begin{aligned}\dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U}\\ \mathbf{Y} &= \mathbf{C}\mathbf{X}\\ \mathbf{A} &\equiv \mathbf{H}^{(1)}(\mathbf{F}^{(1)}\mathbf{F}^{(3)} + \mathbf{F}^{(2)}) + \mathbf{H}^{(2)}\mathbf{F}^{(3)} + \mathbf{H}^{(3)}\mathbf{F}^{(4)}\mathbf{F}^{(3)}\\ \mathbf{B} &\equiv \mathbf{H}^{(3)}\mathbf{F}^{(5)} + \mathbf{H}^{(4)}\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.4.97)$$

ベクトル$\mathbf{X}$は3.4.3項における線形化に際して定常状態からの微小なる変化分のみを考えているから、その初期値はすべての要素について0である。

したがつて、(3.4.97)式をラプラス変換してつぎの式をうる。ただし、sはラプラス演算子。

$$\left.\begin{aligned} sX(s) &= AX(s) + BU(s) \\ Y(s) &= CX(s) \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (3.4.98)$$

(3.4.98)式よりIを17次元単位行列として、

$$\left.\begin{aligned} X(s) &= (sI-A)^{-1}BU(s) \\ Y(s) &= C(sI-A)^{-1}BU(s) \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (3.4.99)$$

(3.4.99)式において、$s = j\omega$ ($j=\sqrt{-1}$)として、

$$Y(j\omega) = C(j\omega I-A)^{-1}BU(j\omega) \quad \cdots\cdots (3.4.100)$$

以上より求めるべき周波数応答は、

$$C(j\omega I-A)^{-1}B \quad \cdots\cdots (3.4.101)$$

なる行列をパラメータωの各値に対して計算すれば各行、各列の値がもとめるべき変数の求めるべき入力に対する周波数応答となる。

(2) 周波数応答計算のためのデータと計算結果

(3.4.101)式によつて周波数応答を計算するための $4/4$ NOR時のデータを第3.4.2表に示す。またこの場合の計算結果を、第3.4.16～3.4.23図の試験結果よりえた周波数応答にあわせて示した。

ただし、計算において使用した無次元化の基準値は計算式を簡略化するために第3.4.1表の値を用いたが、これは第3.3.1表の試験結果よりフーリエ変換する場合の基準値と相異なつている。そこで計算結果を図示するにあたつては、この相異を計算に入れてゲインを換算した。

第3.4.2表A　計算に用いた90% NOR時のデータ（その1）

a_0	0.838	b_0	0.169
a'	0.413	b'	0.213
a_1	1.363	b_1	−0.053
a_2	0.424	b_2	0.255
a_3	−0.053	b_3	0.574
a_4	8.97	b_4	−1.86
a_{43}	9.00	b_{43}	−2.44

K_T	0.742
$\bar{K}_0$	0.404
$\hat{K}_0$	0.048
$\hat{K}$	0.507

n		$\bar{q}_{1,n}$	$\bar{q}_{3,n}$	$q^{*0}_{1,n}$	$q^{*0}_{2,n}$	$q^{*0}_{3,n}$
1	min.	0.718	2.699	3.054	4.873	—
3	〃	0.0703	0.509	0.518	0.795	—
4	〃	0.548	2.119	1.487	3.715	—
5	〃	0.193	1.060	0.535	1.746	—
7	〃	0.128	1.066	0.0273	0.0408	1.367
8	〃	0.0264	0.151	0.0059	0.0083	0.186
9	〃	0.0519	0.565	0.0061	0.0092	0.497

第3.4.2表B　計算に用いた90％ NOR.時のデータ（その2）

n		ψ_n^0	θ_n^0	τ_n^0	$\tau_{m,n}^0$	Γ_n^0
1	−	0.693	0.627			
3	−	0.696	0.600			
4	−	0.695	0.627			
5	−	0.695	0.663			
7	−	0.673	1.600	1.274	1.282	0.213
8	−	0.640	1.576	1.239	1.231	0.206
9	−	0.625	1.651	1.393	1.361	0.192

n		ϕ_{ne}^0	ϕ_{na}^0	z_{on}	λ_{en}	f_{vn}^0
1	−			(n=2) −0.000504	(n=2) 0.015	
3	−	18.76				
4	−	9.883	9.883	0.000504	0.023	
5	−	8.877	8.877	0.000504	0.019	
7	−	1.0			0.015	
8	−	0.9	0.9		0.015	1.20
9	−		1.0		0.015	1.85

n		χ_n	K_n^{ex}
1	−		
3	−		
4	−	26.212	316.26
5	−	15.643	30.51
7	−	7.193	0.167
8	−	0.0514	0.0504
9	−	1.500	0.0516

ϕ_F^0	1.0
ψ_F^0	0.830
θ_F^0	0.496
Ω^0	0.405

$\theta_1'^0$	0.600	θ_E^0	1.207	$\delta+L_{TH}(1+\varepsilon)$	17.03
$\theta_1''^0$	1.326	ϕ_G^0	1.06		
$\Gamma_1'^0$	7.676	τ_{Gf}^0	2.897	ϕ_{sf}^0	0.1
$\Gamma_1''^0$	0.365	τ_{Gs}^0	2.342		
C_2	1.867	μ_f	0.380		
A_{23}	−0.000504	μ_s	0.365		
		μ_b	0.342		

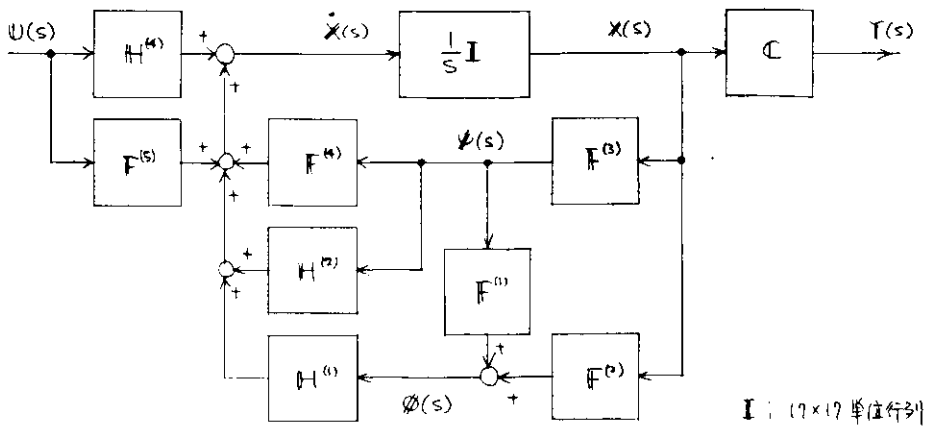
記号	単位	内容	記号	単位	内容
a		無次元係数	G	Kg／min	流量（水、蒸気）
b		無次元係数	G_G	〃	ガス流量
C_m	Kcal／CKg	メタル比熱	α	Kcal/m^2Cmin	熱伝達係数
Cp	〃	定圧比熱(水、蒸気、ガス)	α_r	Kcal/m^2°K⁴min	輻射伝熱係数
D	m	管内径	β		蒸気ドラム水体積率
E	Kcal/Kg	内部エネルギ	γ	Kg／m^3	比重量
F_m	m^2	伝熱面積	δ		燃料の発生ガス比率
F_v		弁流量係数	ε		空気過剰率
C_v		〃	θ		無次元エンタルピ
g	m／min²	重力の加速度	λ		摩擦係数
H	Kcal/Kg	エンタルピ	τ		無次元温度（水、蒸気）
K		無次元定数	τ_m		無次元メタル温度
k		〃	τ_G		無次元ガス温度
L_{TH}		理論空気比率	ϕ		無次元流量
L	m	管長	ψ		無次元圧力
L_d	m	ドラム水位	Γ		無次元比重量
p	Kg／cm^2	圧力	Λ_d		無次元ドラム水位
S	m^2	断面積			
t	min.	時間			
V	m^3	管内容積			
Z	m	有効高さ			

注）サフイックスの数字はセクション番号をaは出口、eは入口、fは DSH バイパスを示す。ただし、ガス温度はfで火炉、S：SHバンク、b：ボイラバンクを示す。また、スーパスクリプト0は定常の値を示す。

3.5 ボイラのブロック線図と単容量計算について

3.5.1 ブロック線図

ボイラの動特性をあらわすブロック線図は3.4.4項でもとめたベクトル方程式（3.4.93）式よりベクトル変数であらわすと容易にもとめられる。これを第3.5.1図に示す。



第3.5.1図　変数のベクトル表示によるボイラのブロック線図

3.5.2　ボイラ時定数ならびにドラム水位の単容量計算について

ボイラ時定数の概念は3.4.1項でのべた水循環系において、系全体の圧力が一様であるとしてえられる単容量系の圧力に関してえられるものである。

この場合、基本となる方程式は3.4.3項における（3.4.49）～（3.4.52）式および（3.4.56）～（3.4.59）式をそれぞれ加え合わせたつぎの式である。

$$\left.\begin{aligned}
&\dot{q}_1^{*} = \phi_F - \phi_{7e} \\
&\dot{q}_2^{*} = \theta_F^{0}\phi_F - \theta_1^{\prime\prime 0}\phi_{7e} - \phi_{7e}^{0} b_3 \psi_1 + \bar{\phi} \\
&\text{ただし、} \\
&q_1^{*} \equiv q_{11}^{*} + q_{13}^{*} + q_{14}^{*} + q_{15}^{*} \\
&q_2^{*} \equiv q_{21}^{*} + q_{23}^{*} + q_{24}^{*} + q_{25}^{*} \\
&\bar{\phi} \equiv 4K_5^{ex}\tau_{Gf}^{03}\tau_{Gf} + K_4^{ex}\tau_{Gb} - K_4^{ex} b_0 \psi_4
\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (3.5.1)$$

さらに（3.4.83）式より、

$$\psi_1 = \frac{\partial \psi_1}{\partial q_1^{*}} q_1^{*} + \frac{\partial \psi_1}{\partial q_2^{*}} q_2^{*} \quad \cdots\cdots (3.5.2)$$

（3.5.2）式より、

$$\dot{\psi}_1 = \frac{\partial \psi_1}{\partial q_1^{*}} \dot{q}_1^{*} + \frac{\partial \psi_1}{\partial q_2^{*}} \dot{q}_2^{*}$$

（3.5.1）式を代入して、

$$\dot{\psi}_1 = \left(\frac{\partial \psi_1}{\partial q_1^{*}} + \theta_F^{0} \frac{\partial \psi_1}{\partial q_2^{*}} \right) \phi_F - \left(\frac{\partial \psi_1}{\partial q_1^{*}} + \theta_1^{\prime\prime 0} \frac{\partial \psi_1}{\partial q_2^{*}} \right) \phi_{7e} - \phi_{7e}^{0} b_3 \frac{\partial \psi_1}{\partial q_2^{*}} \cdot \psi_1 + \frac{\partial \psi_1}{\partial q_2^{*}} \bar{\phi}$$

ここで、$\phi_F = \phi_{7e}$ とすると、

$$\dot{\psi}_1 = -\left(\theta_1^{\prime\prime 0} - \theta_F^{0} \right) \frac{\partial \psi_1}{\partial q_2^{*}} \phi_{7e} - \phi_{7e}^{0} b_3 \frac{\partial \psi_1}{\partial q_2^{*}} \psi_1 + \frac{\partial \psi_1}{\partial q_2^{*}} \bar{\phi} \quad \cdots\cdots (3.5.3)$$

通常単容量解析においてボイラ時定数とよんでいるものは、（3.5.3）式右辺第1項の係数の逆数、すなわちつぎである。

$$T_B \equiv 1 / \left(\theta_1^{\prime\prime 0} - \theta_F^{0} \right) \frac{\partial \psi_1}{\partial q_2^{*}} \quad \cdots\cdots (3.5.4)$$

ここで、ψ_1 の q_1^{*}, q_2^{*} に対する偏微分係数は、（3.4.83）式において、

$$\bar{q}_{1n} \equiv \bar{q}_{11} + \bar{q}_{13} + \bar{q}_{14} + \bar{q}_{15} = \bar{q}_1$$

$$\bar{q}_{3n} \equiv \bar{q}_{31} + \bar{q}_{33} + \bar{q}_{34} + \bar{q}_{35} = \bar{q}_3$$

としてえられるものである。

つぎにドラム水位の単容量計算についてのべる。

ドラム水位の単容量計算では、（3.5.1）の第1式と次式が基本の方程式である。すなわち、（3.4.82）式より、

$$\dot{A}_d = \frac{c_2}{\bar{q}_1 \left(a_{43} + b_{43}\psi_1^{0} \right)} \dot{q}_1^{*} + \frac{c_2 b_{43} \left(\frac{q_1^{*0}}{\bar{q}_1} - a_3 \right) - c_2 b_3 a_{43}}{\left(a_{43} + b_{43}\psi_1^{0} \right)^2} \dot{\psi}_1 \quad \cdots\cdots (3.5.5)$$

（3.5.1）の第1式および（3.5.3）式を代入して A_d が求められる。しかし、この方法では蒸気量変化時の逆応答が計算できないので、通常、蒸気量に対する水面下のボイドの静的関係をつけ加えるが、この関係はいわば静的解であ

り、解を求める方程式に解をつけ加えるということとなり不具合である。この逆応答は、水面下のボイドの動的変化を計算することによつて正確に求められるものであり、現状では3.4.3項のような方法によるのがよい。

3.6 あとがき

以上、試験と計算の結果についてのべたが、試験そのもののバラツキなど、結果の整理上検討さるべき問題も残されている。しかしいずれにしても舶用プラントでは、試験中の条件を一定とする上でかなり困難な面があり、試験の方法そのものについても今後再検討を要すると考える。

計算はベクトル変数表示による行列計算で行ない、ブロック線図もベクトル変数によるものを示したが、これは、将来ボイラ、プラント等の最適制御等を検討する上で、このほうが便利と考えたからである。

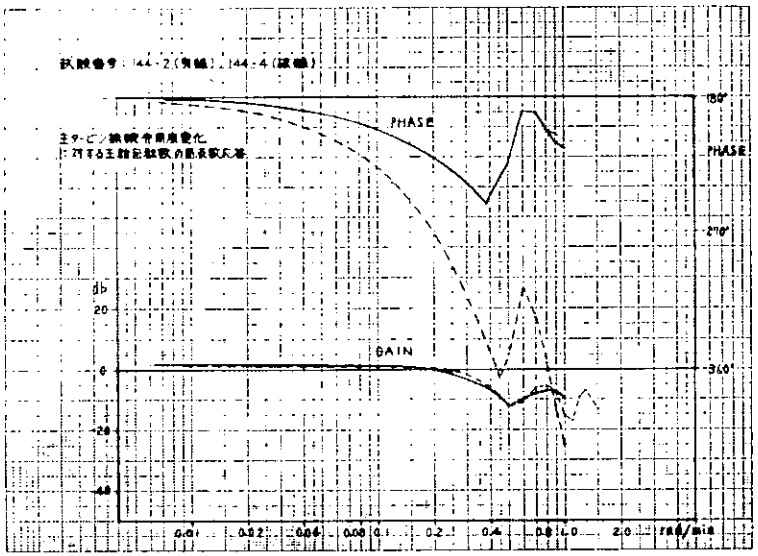
計算はすべて集中定数系としたが、蒸気温度の計算のためには過熱器を分布系と考えた方がよいものと考える。

いずれにしても舶用ボイラの動特性は、未把握の部分がかなりあり、プラントの制御の性能向上のためにも、今後さらに研究が必要と考える。

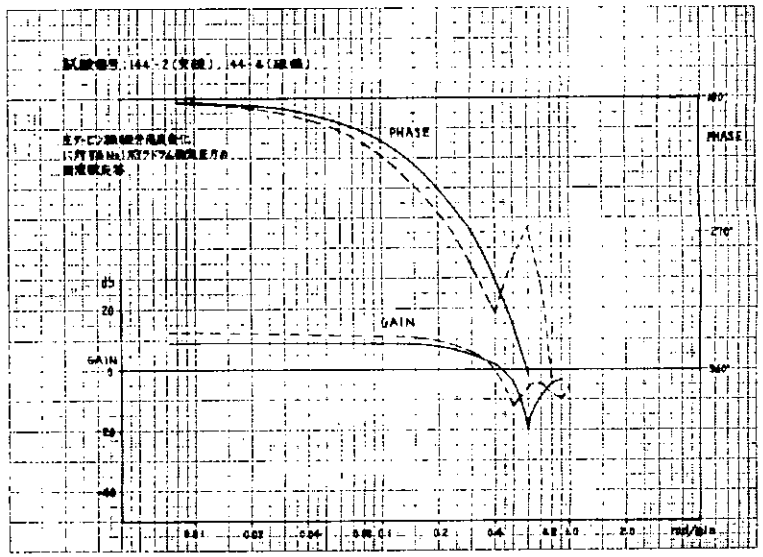
付録　タービンプラント動特性実船試験結果
周波数応答全記録

付表1　各試験に対する各変数の周波数応答整理図一覧

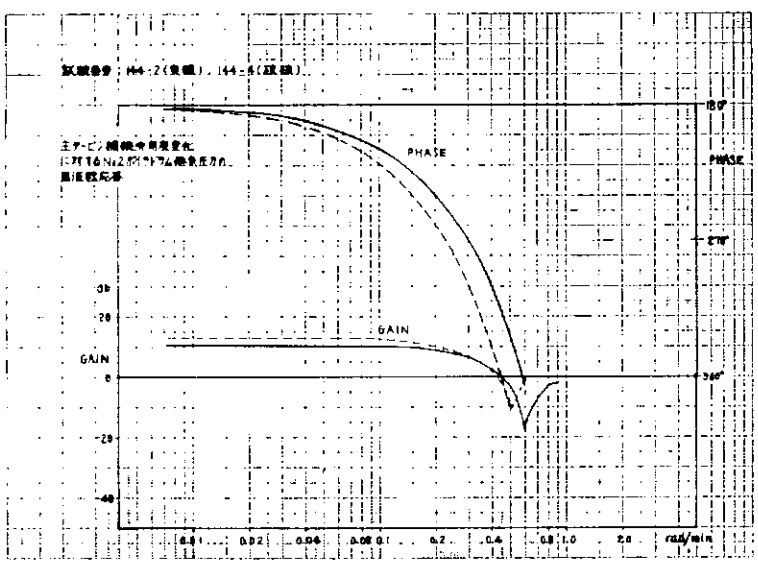
試験番号	試験名称	ボイラ基準負荷	操作個所	整理図番一覧																備考
				主軸回転数	圧力						温度				流量		レベル			
					主蒸気	No.1 ボイラドラム蒸気	No.2 〃	No.1 補助蒸気緩熱器出口	No.2 〃	No.1 燃油ヘッダ	No.1 SH出口蒸気	No.1 DSH出口蒸気	No.1 DSH入口蒸気	No.1 ECO.入口給水	No.1 給水	No.1 空気	No.1 ドラム	No.2 ドラム		
144-2,4	主タービン操縦弁開度変化試験	90%	主タービン操縦弁	1		2	3	4	5		6	7	8	9	10		11	12		
124-1		2/4			13	14	15	16	17		18	19	20	21	22		23	24		
114-1,2,3		1/4		25	26	27	28	29	30		31	32	33	34	35		36	37		
244-3,4	燃焼量変化試験	90%	ボイラマスタ	38		39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51		
224-1,3		2/4		52	53	54	55	56	57	58	59	60	61		62	63	64	65		
214-2,3		1/4		66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80		
344-3,4	給水流量変化試験	90%	給水制御弁	81	82	83	84	85	86		87	88	89					90		
324-1,2		2/4		91	92	93	94	95	96		97	98	99	100	101		102	103		
314-4,5		1/4		104	105	106	107	108	109		110	111	112	3	114		115	116		
744-2,3	DSH制御弁開度変化試験	4/4	DSH制御弁	117	118	119	120	121	122			123	124		125		126	127		
724-1,2,3		2/4		128	129	130	131	132	133		134	135	136	137	138		139	140		
714-4		1/4		141	142	143	144	145	146		147	148	149	150	151		152	153		



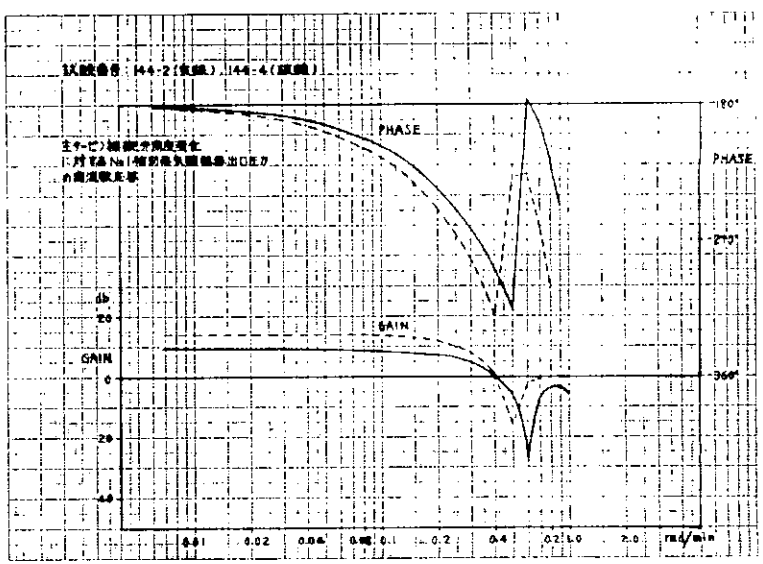
付図　1



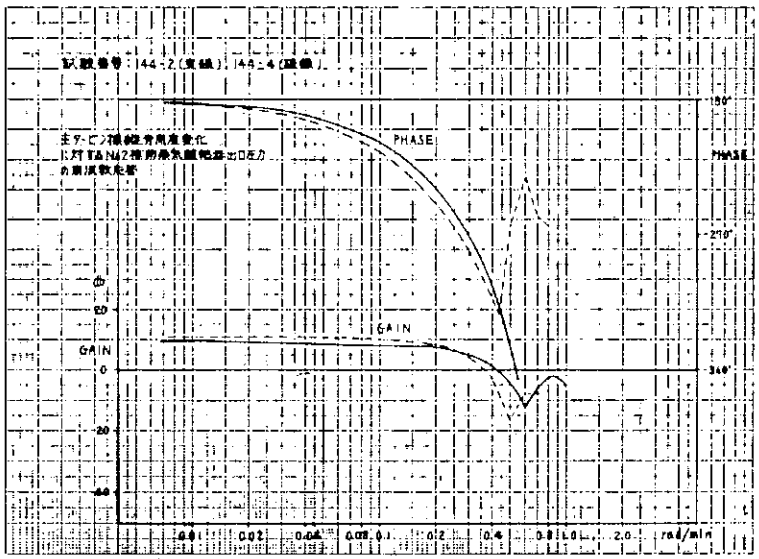
付図　2



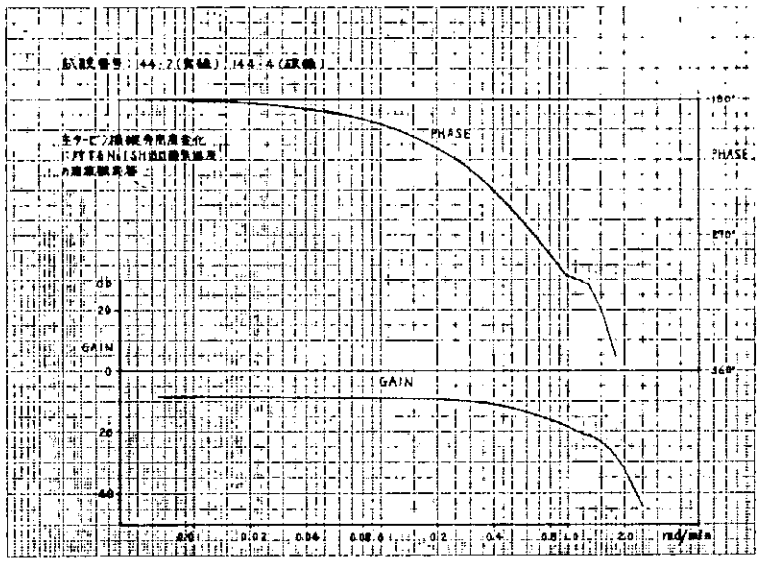
付図　3



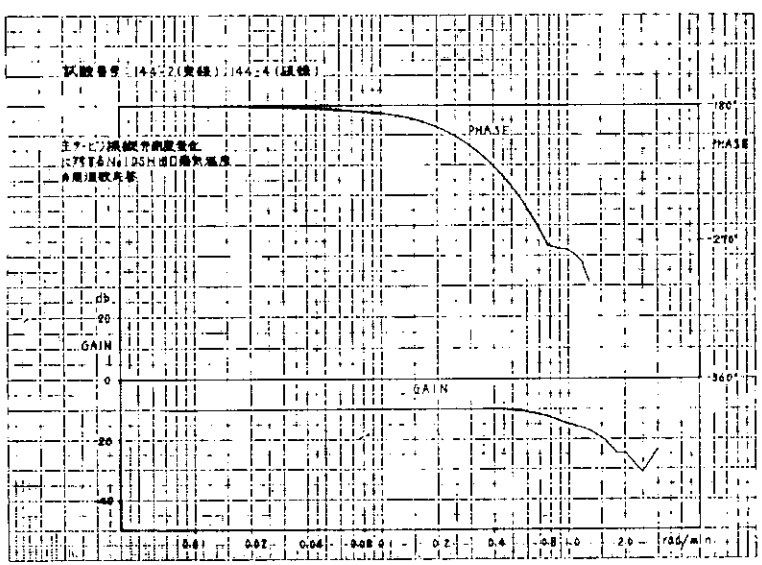
付図　4



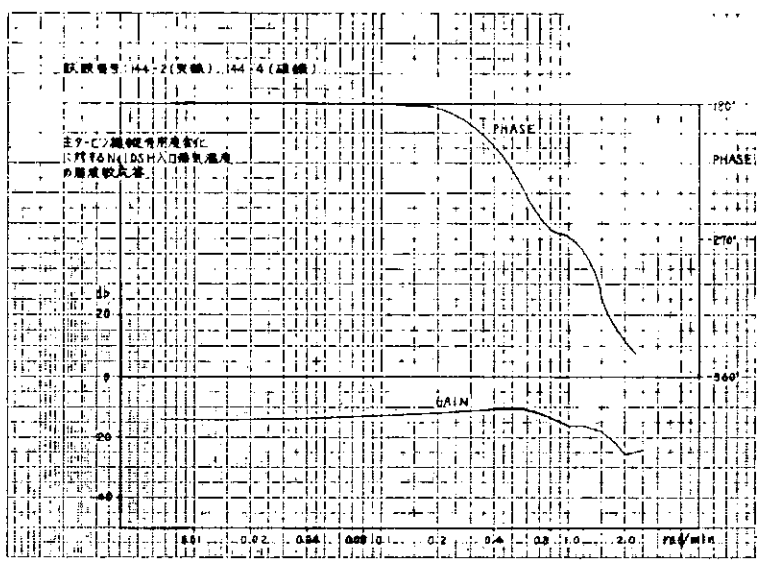
付図　5



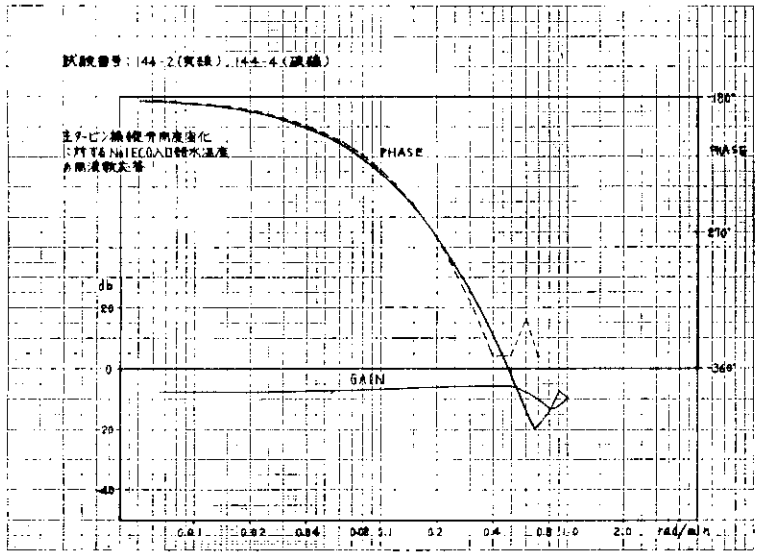
付図　6



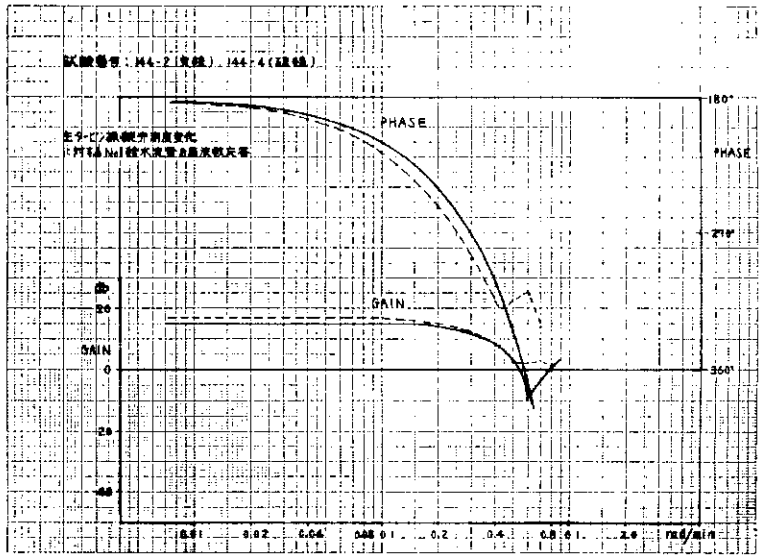
付図　7



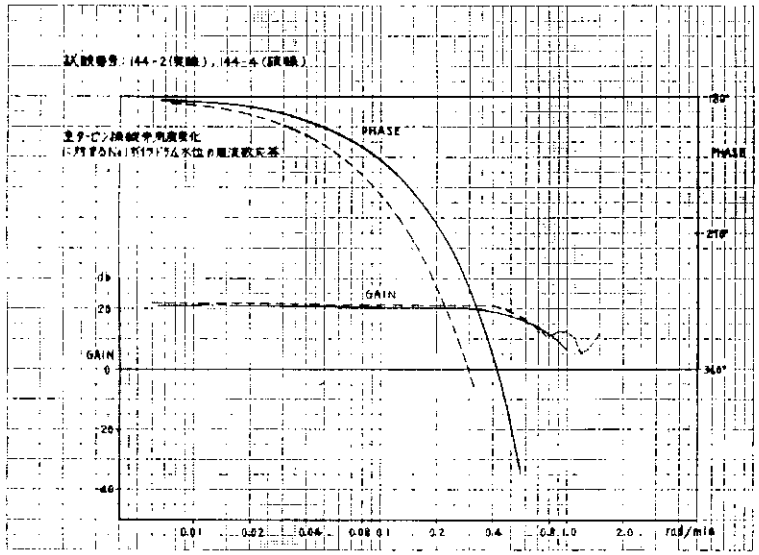
付図　8



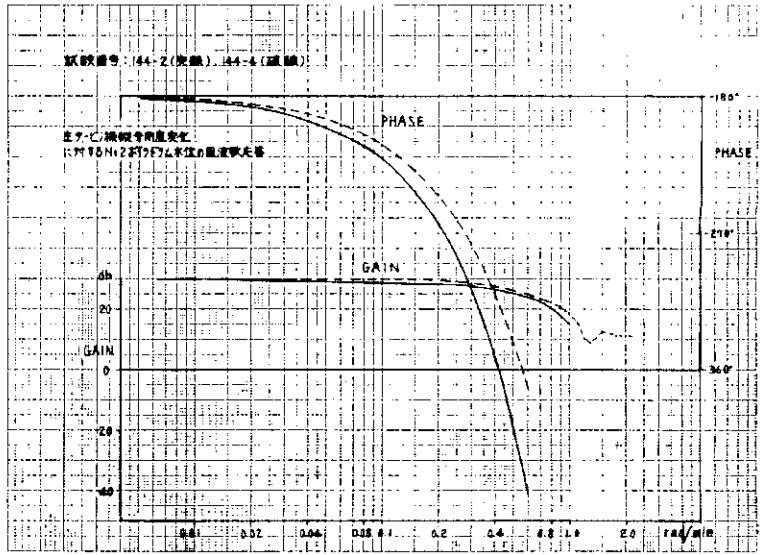
付図　9



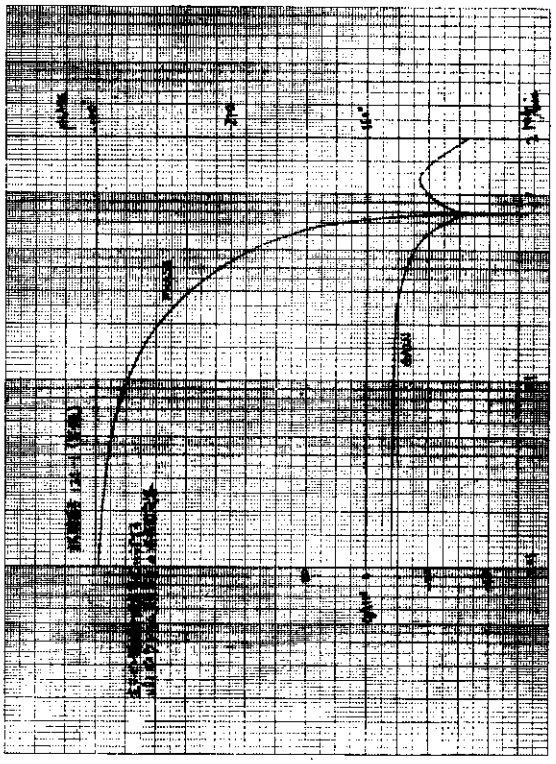
付図　10



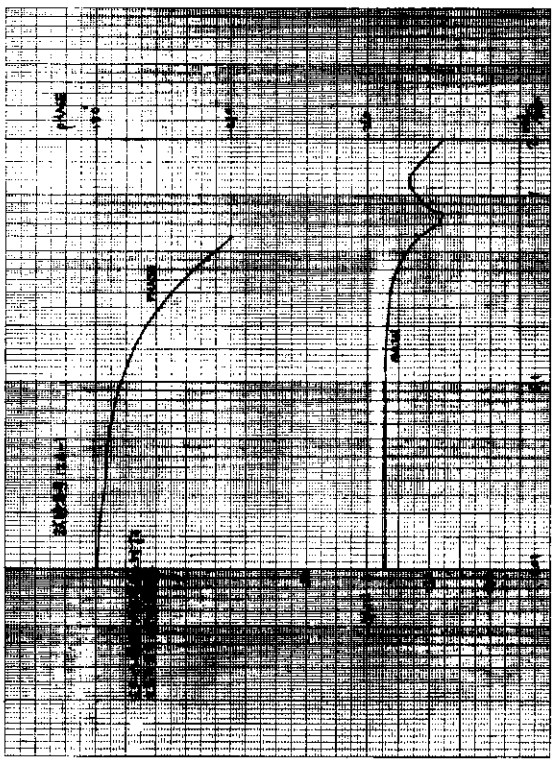
付図　11



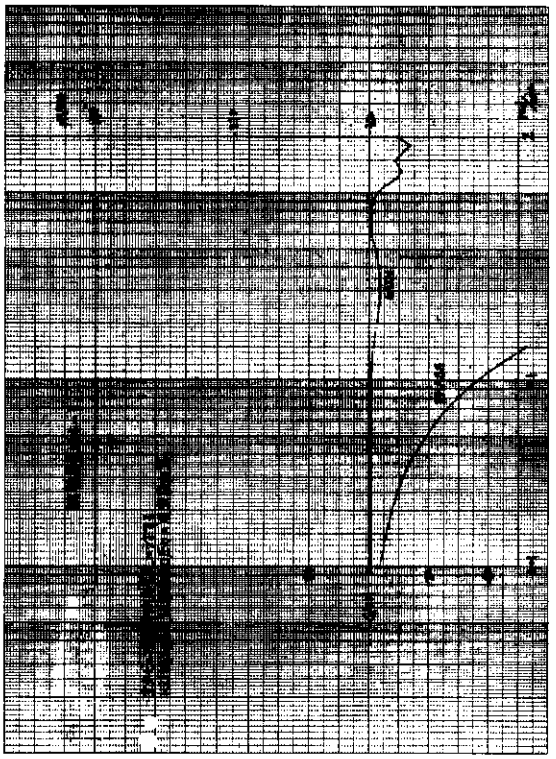
付図　12



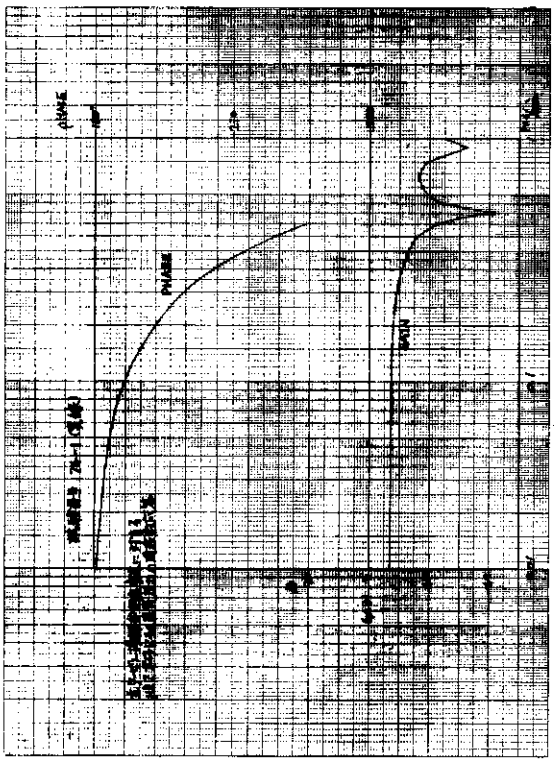
付図 14



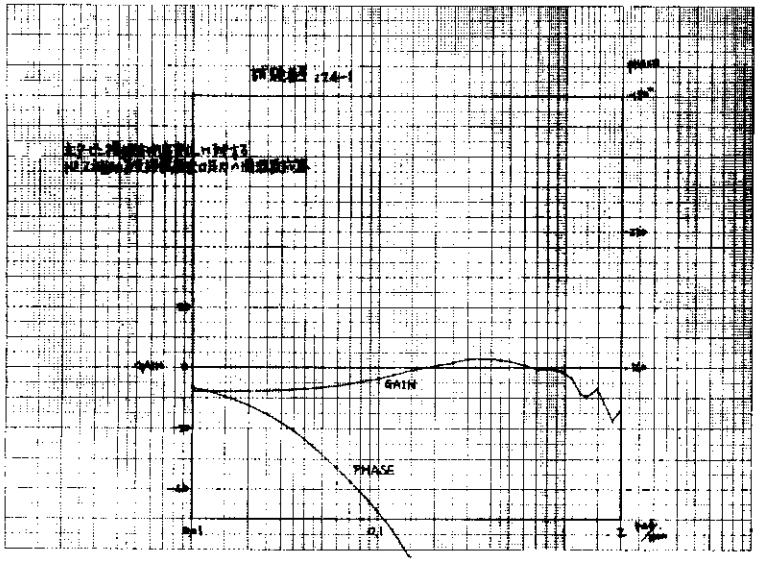
付図 13



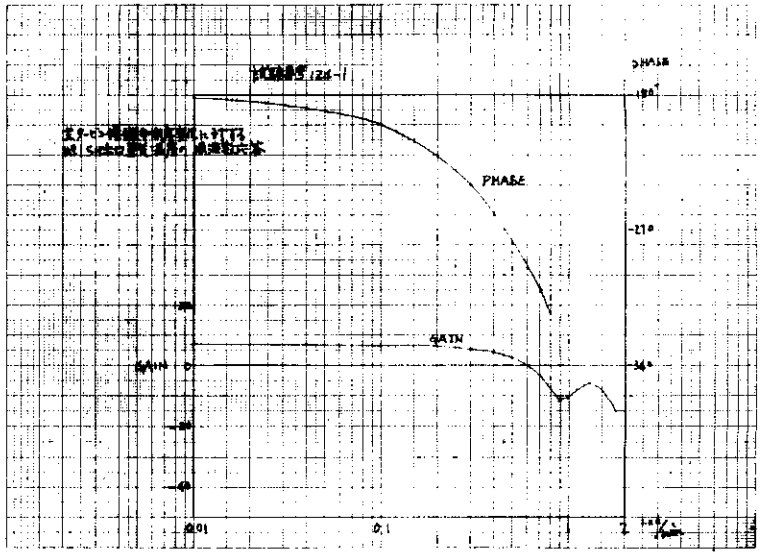
付図 16



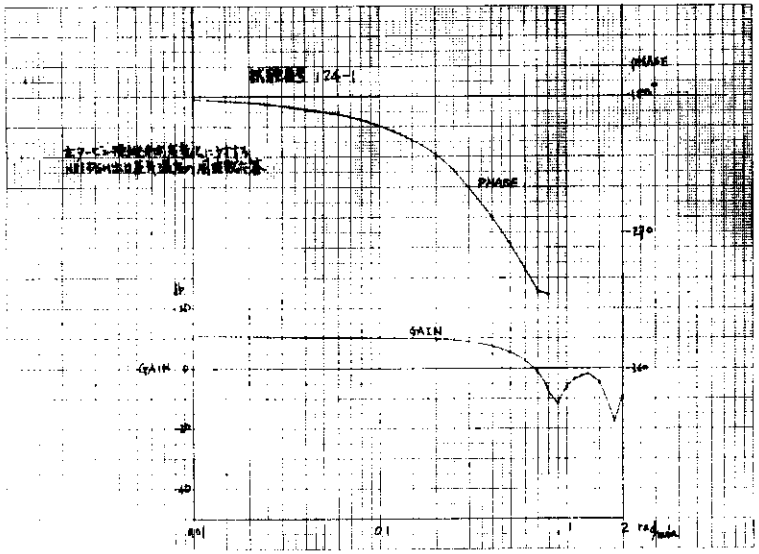
付図 15



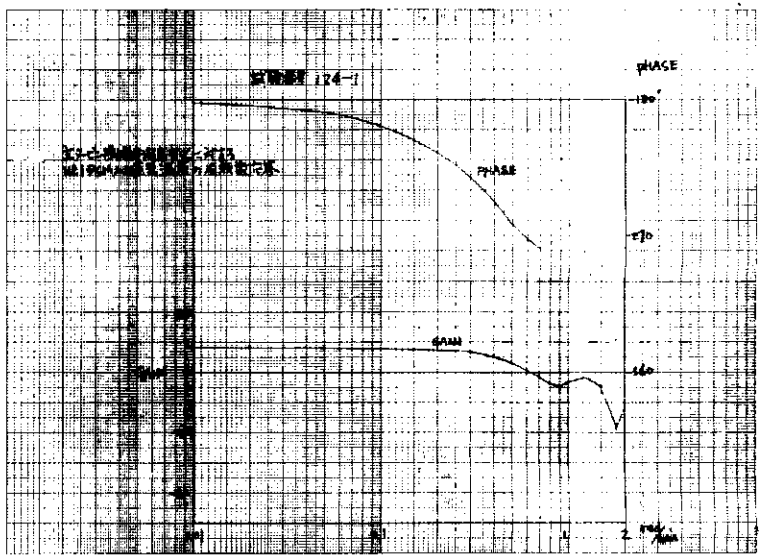
付図　17



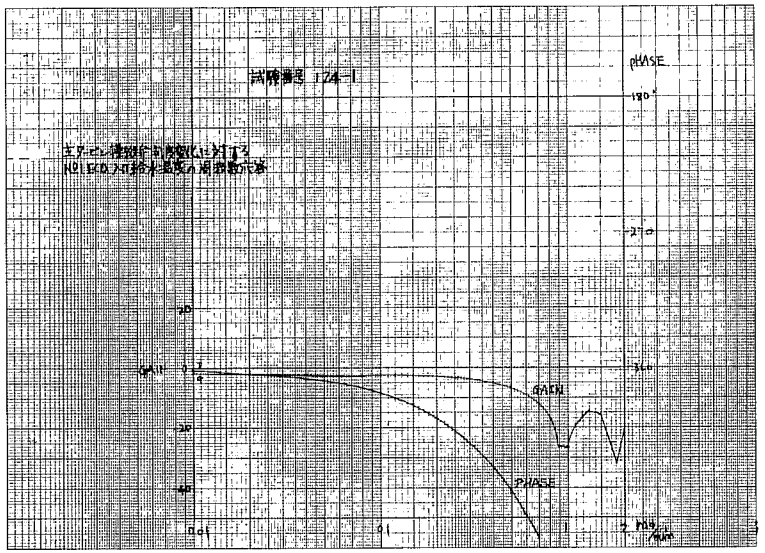
付図　18



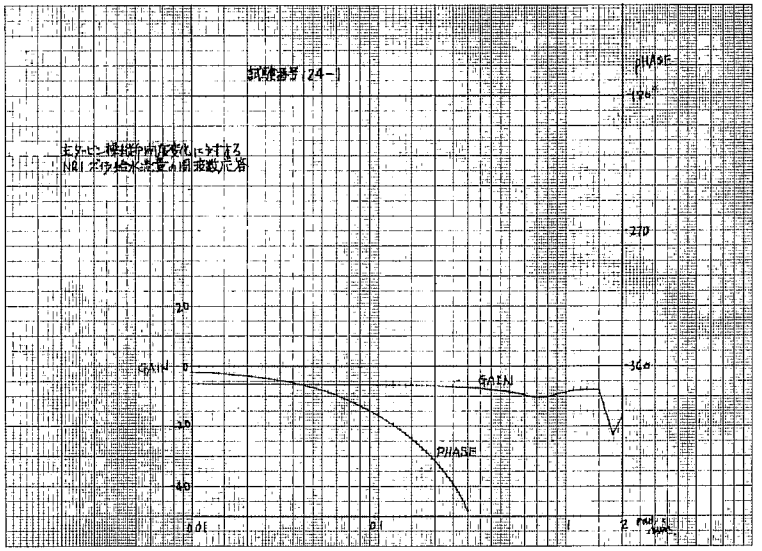
付図　19



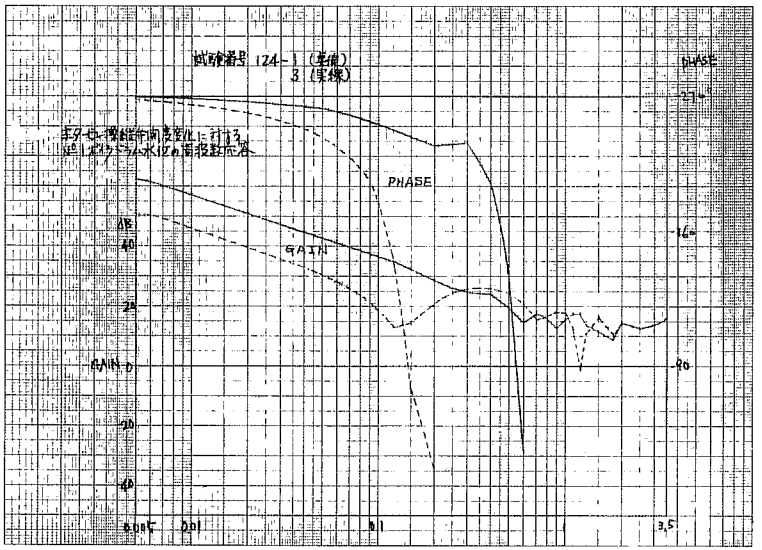
付図　20



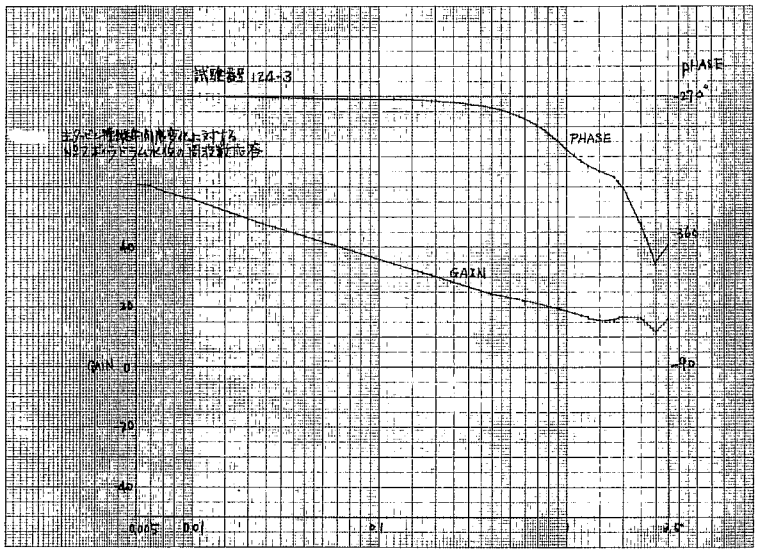
付図　２１



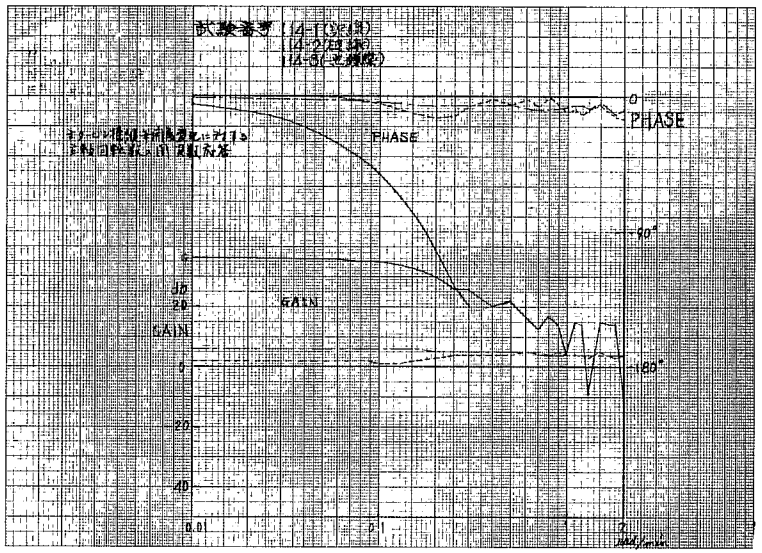
付図　２２



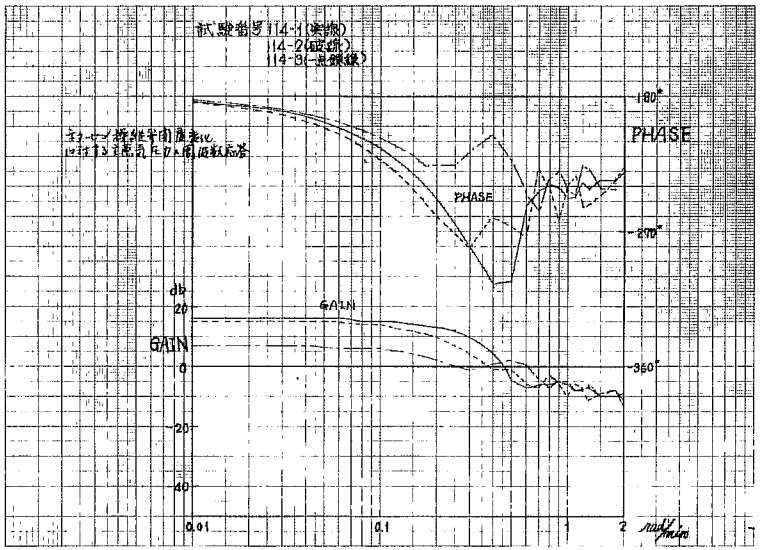
付図　２３



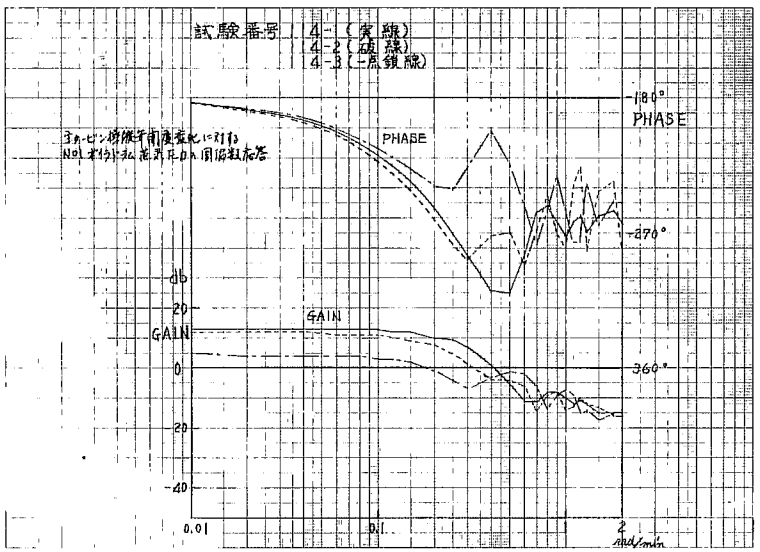
付図　２４



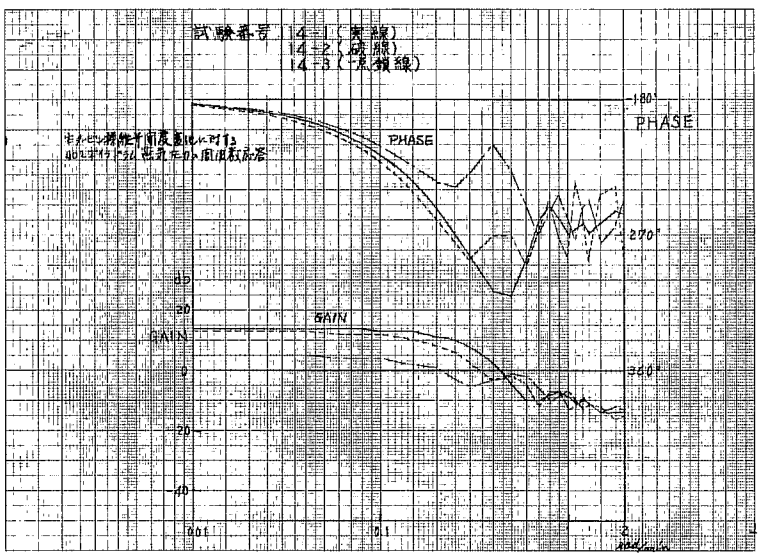
付図　25



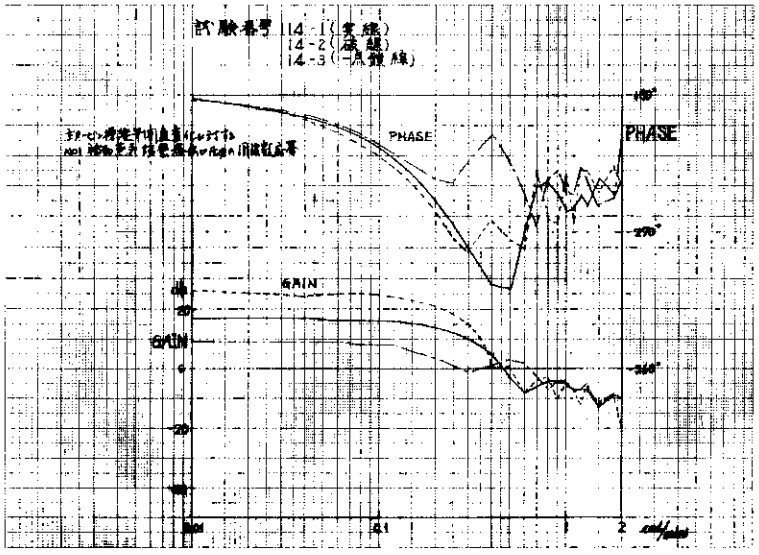
付図　26



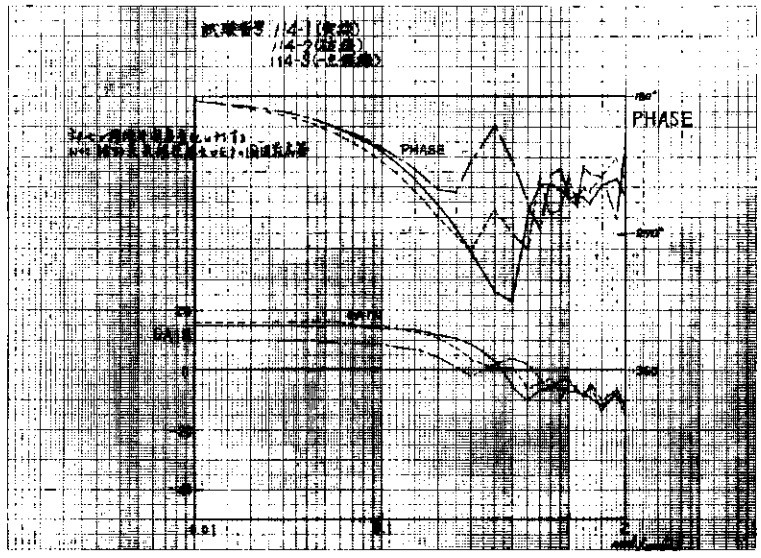
付図　27



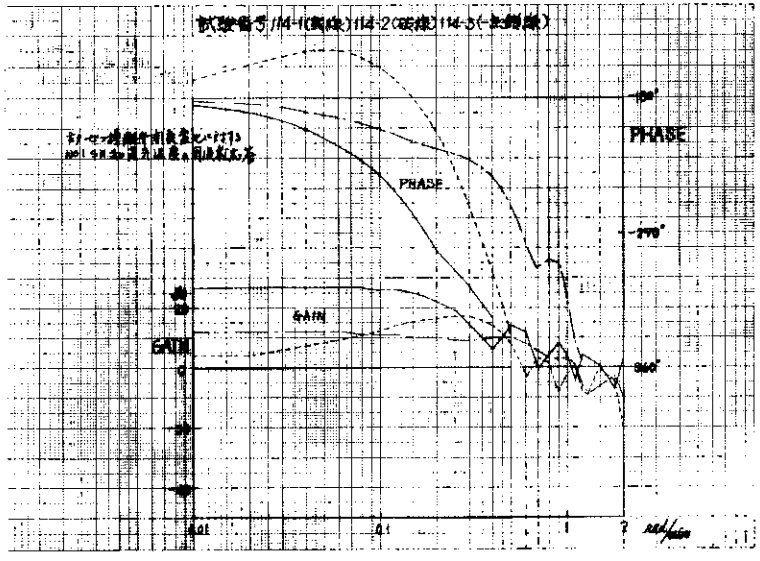
付図　28



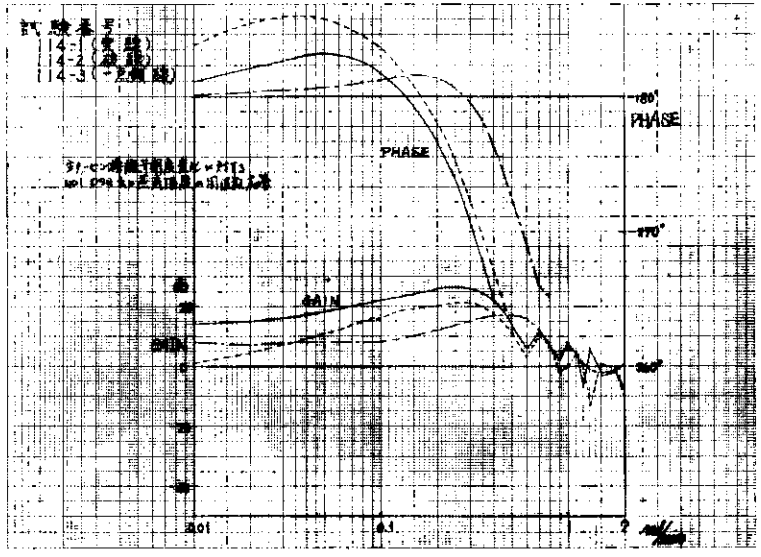
付図　29



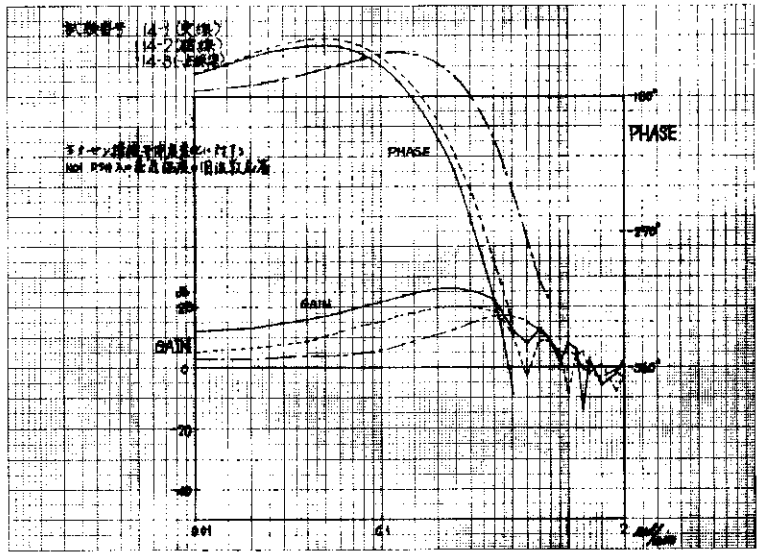
付図　30



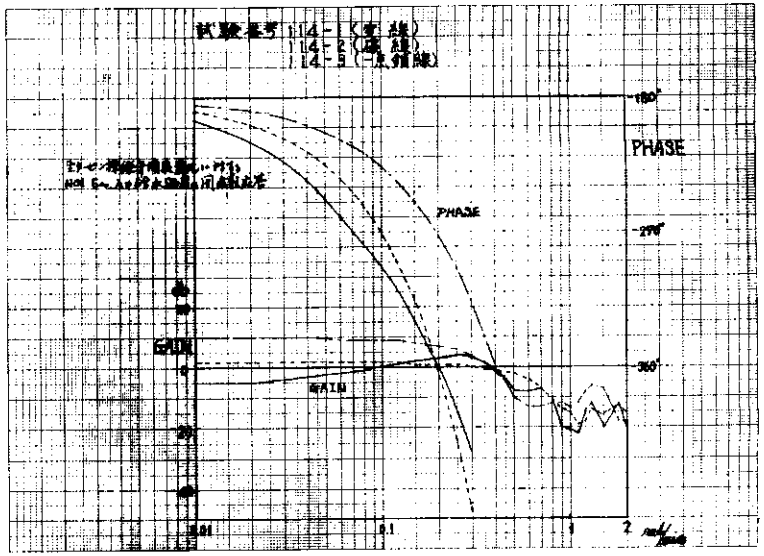
付図　31



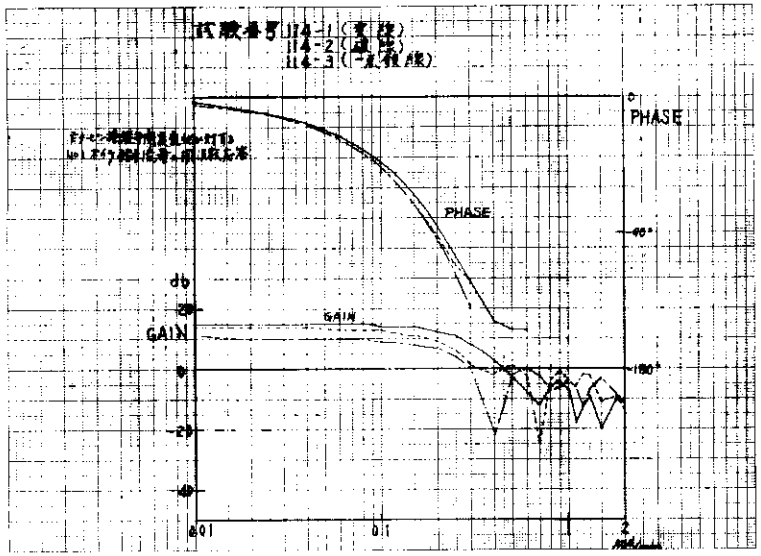
付図　32



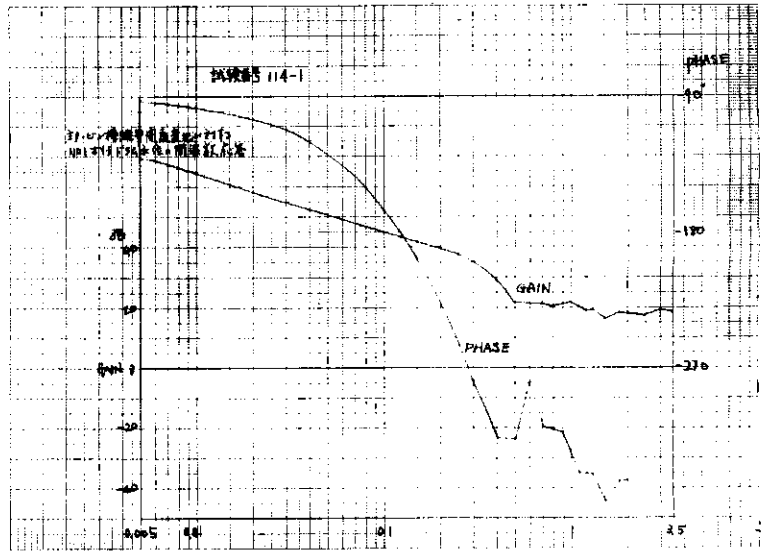
付図　33



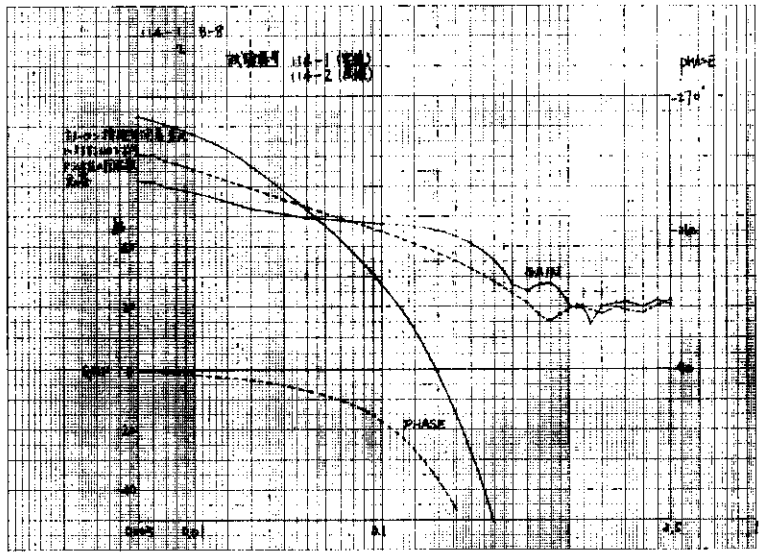
付図　34



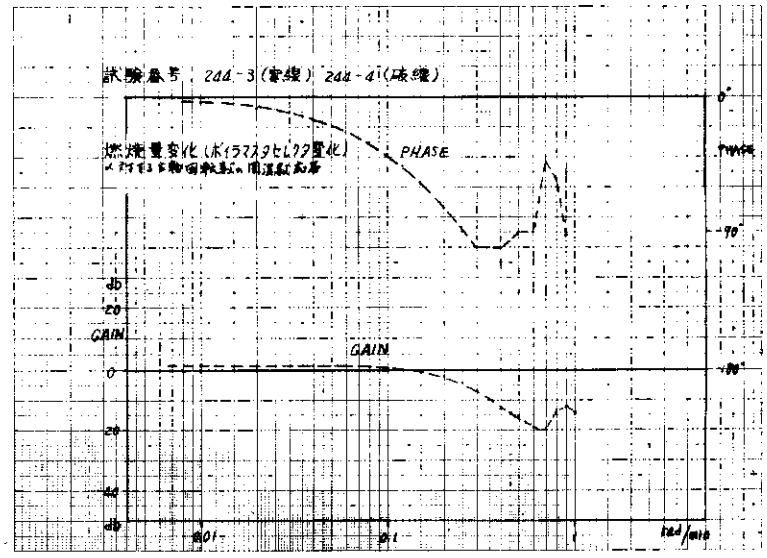
付図　35



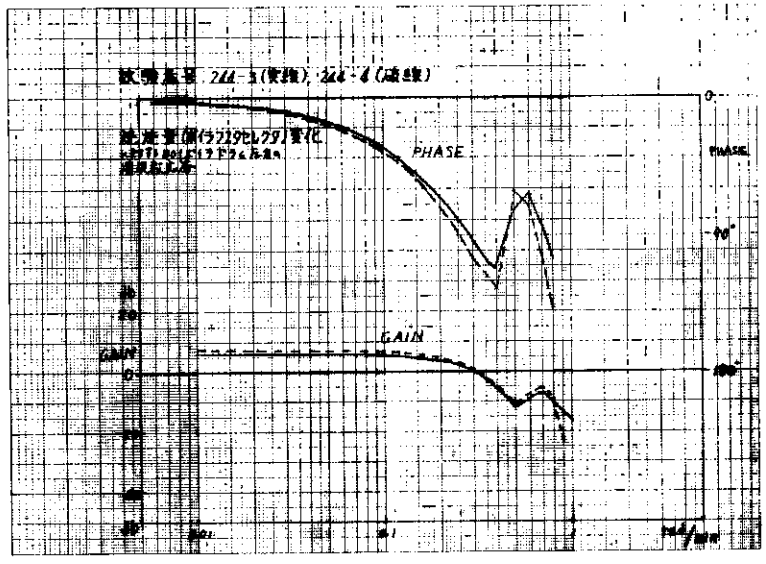
付図　36



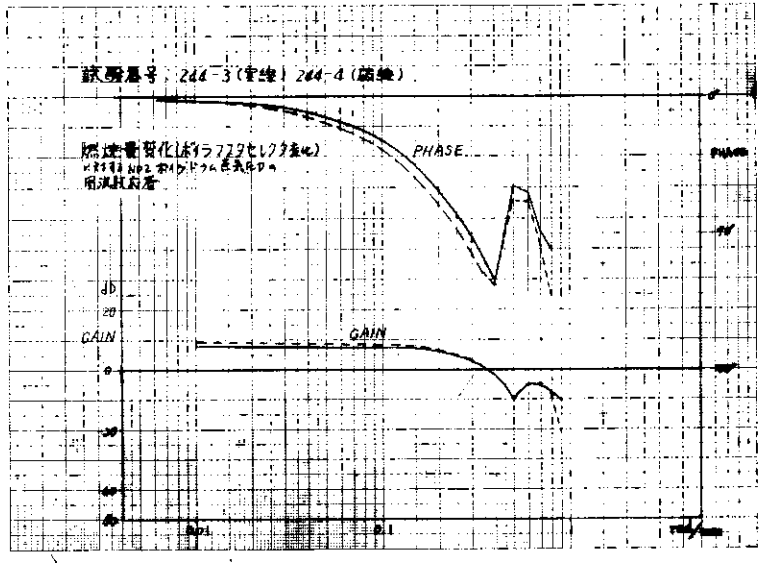
付図　37



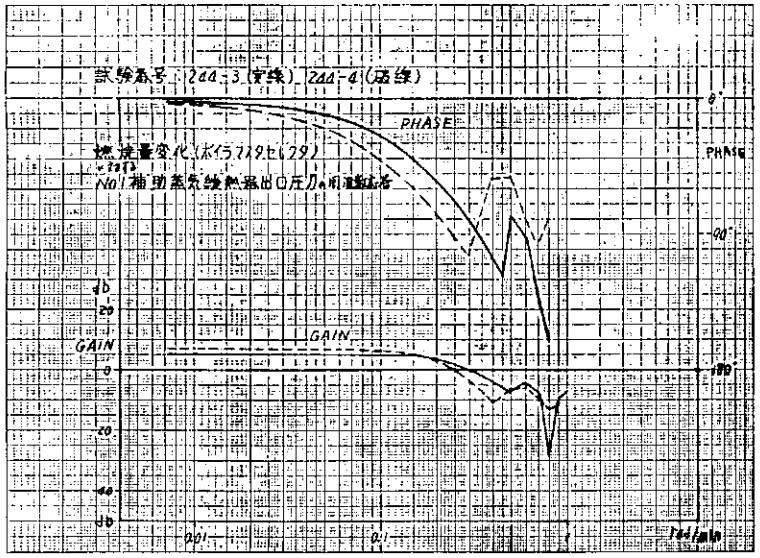
付図　38



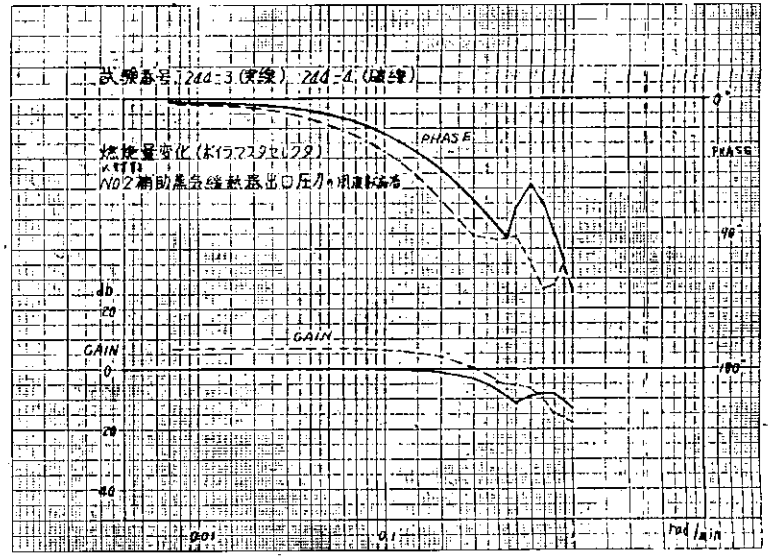
付図　39



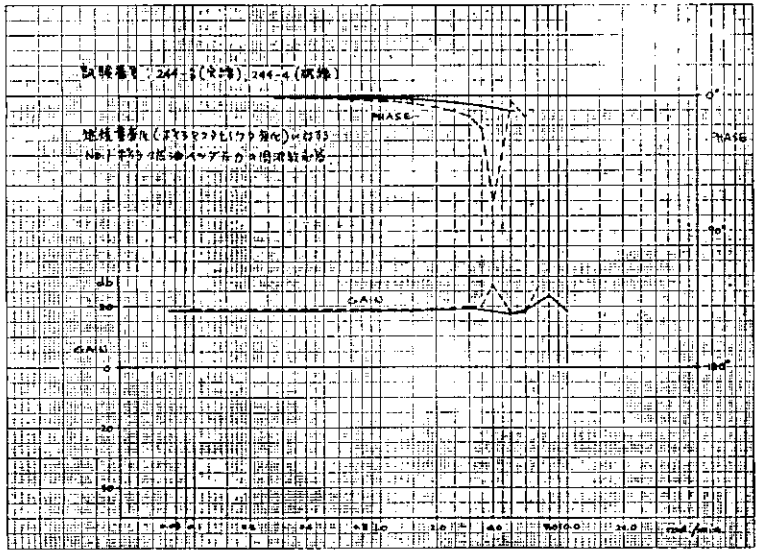
付図　40



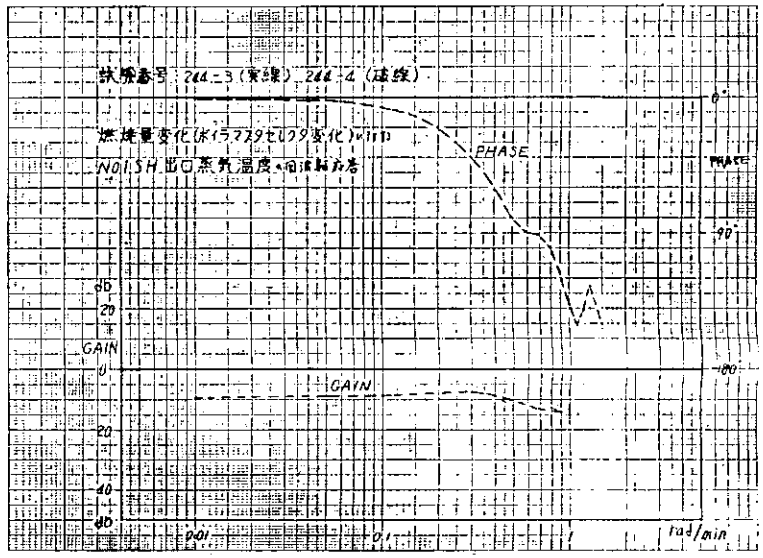
付図　41



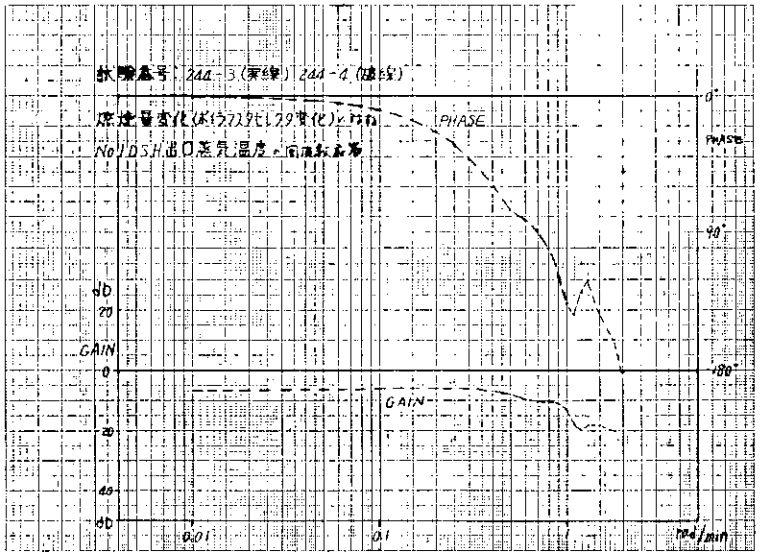
付図　42



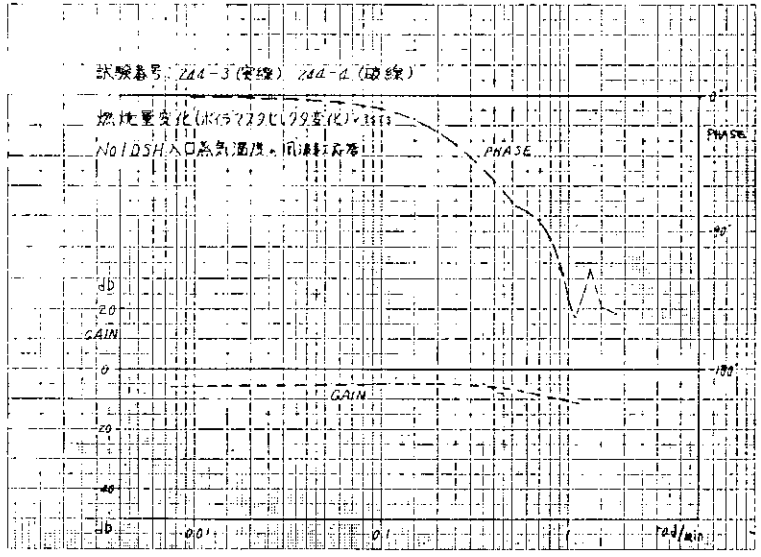
付図　43



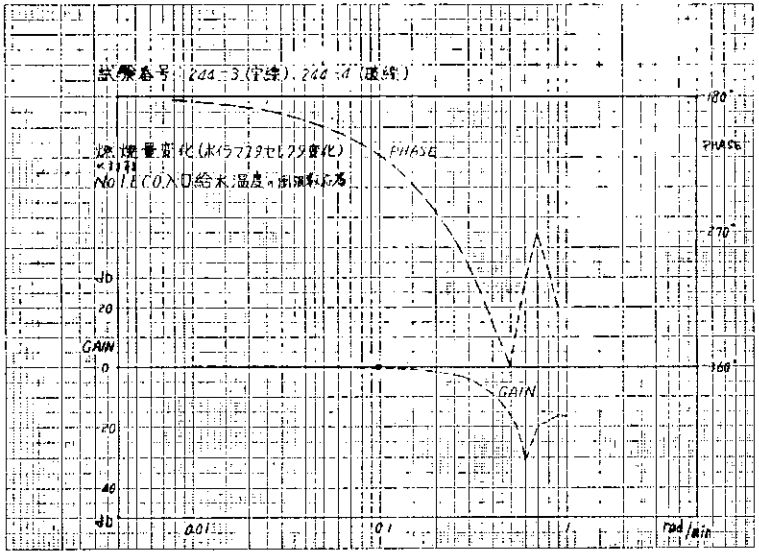
付図　44



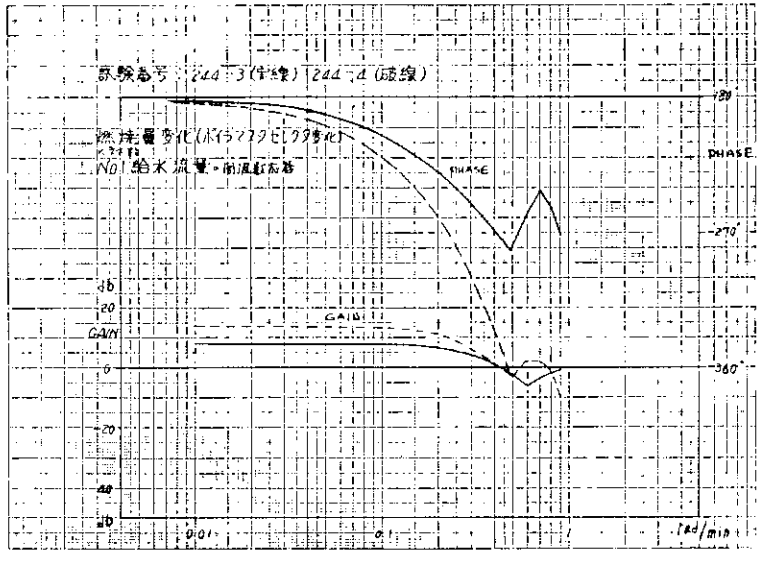
付図　45



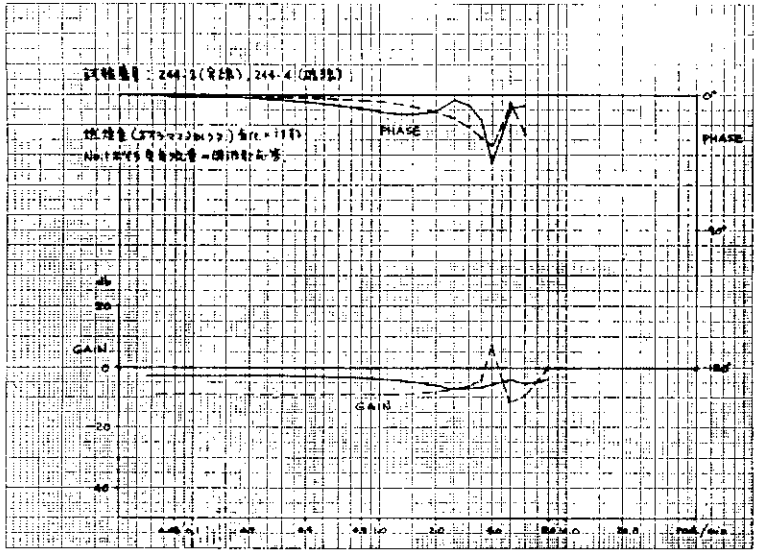
付図　46



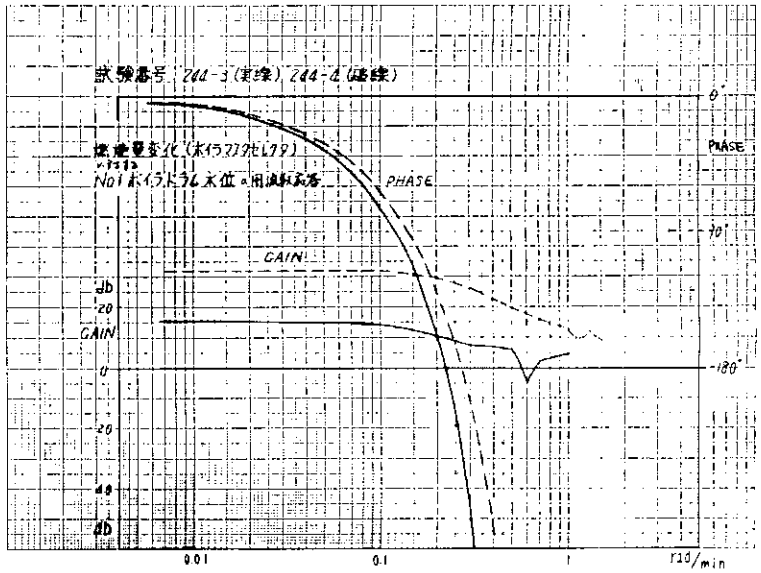
付図　47



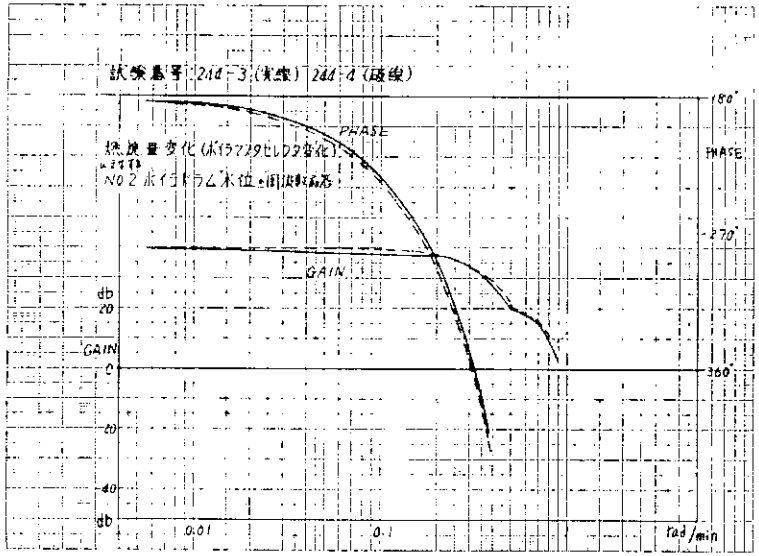
付図　48



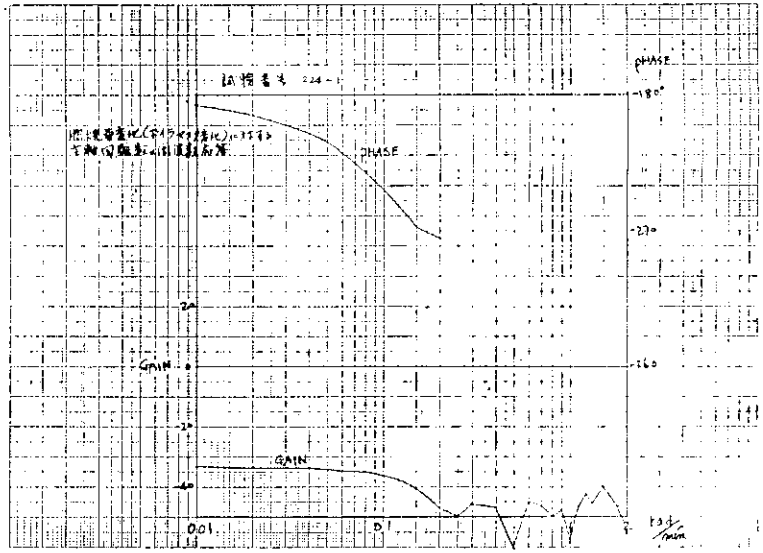
付図　49



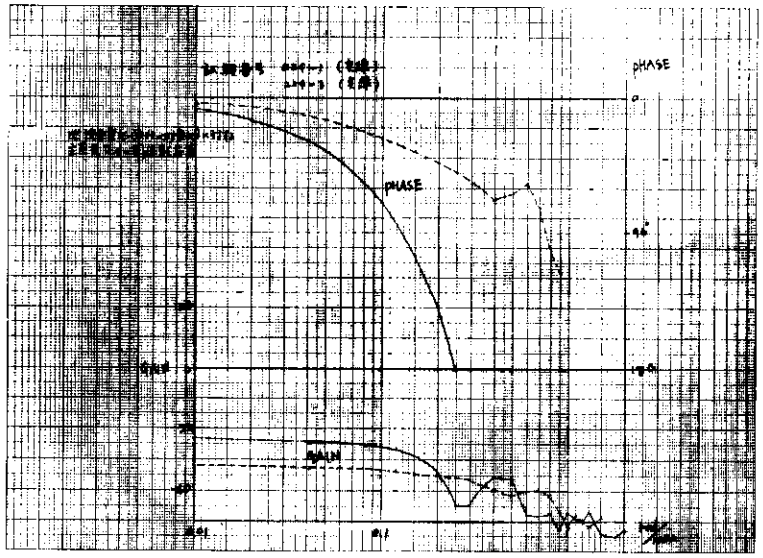
付図　50



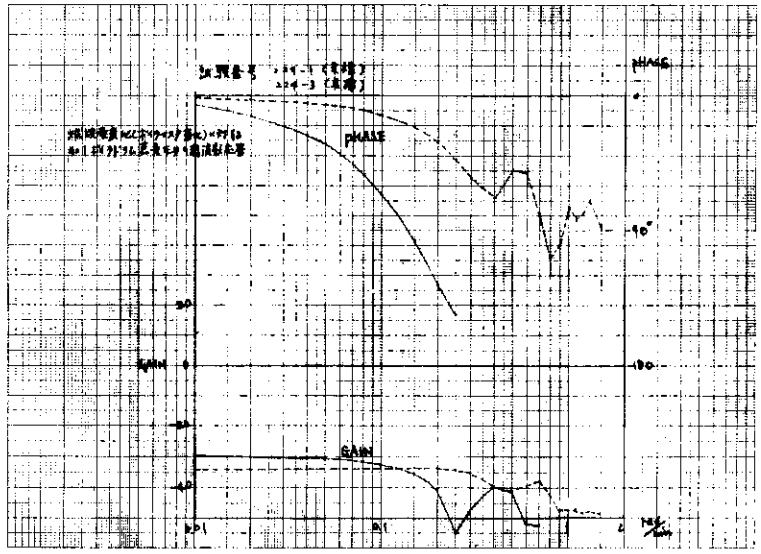
付図　51



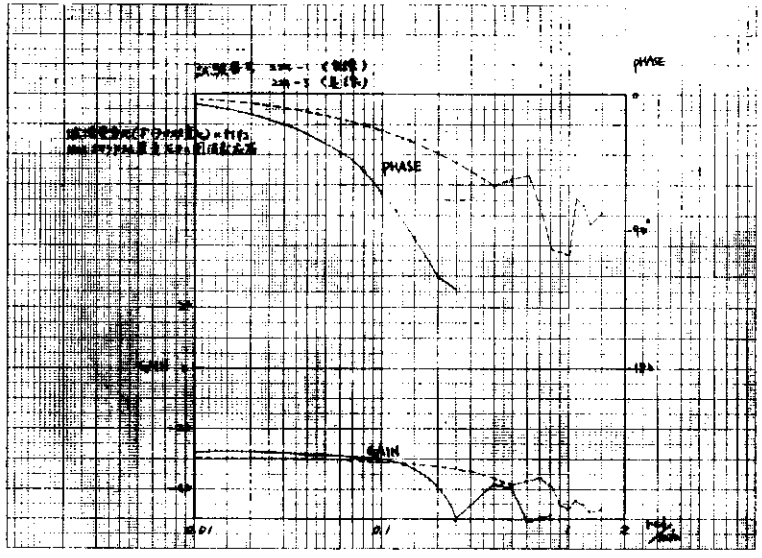
付図　52



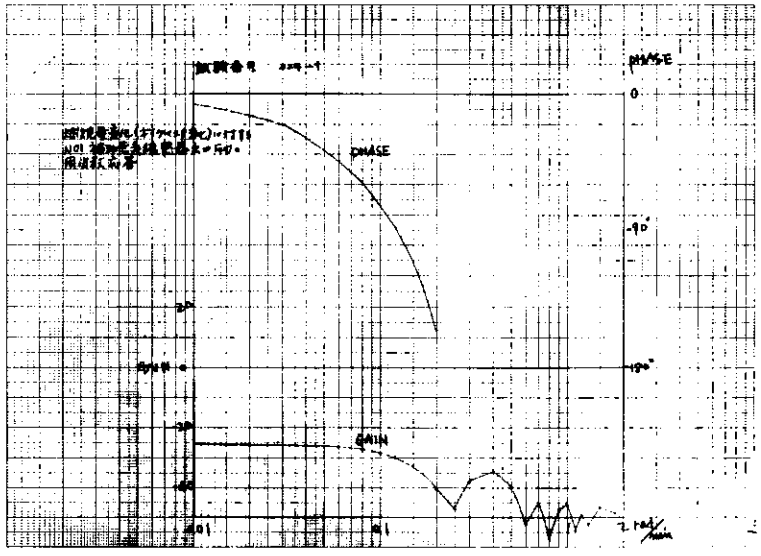
付図　53



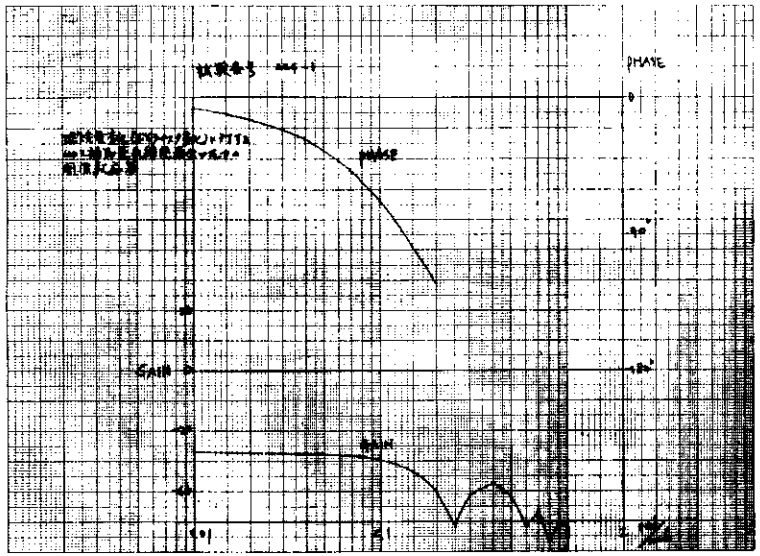
付図　54



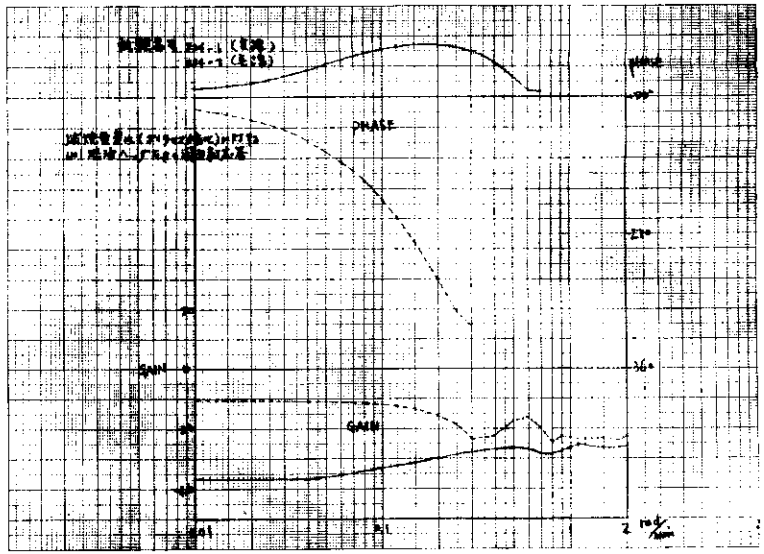
付図　55



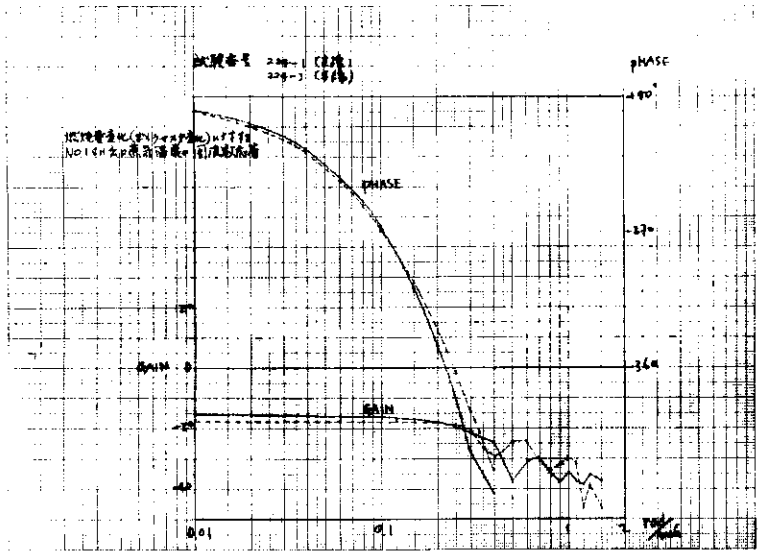
付図　56



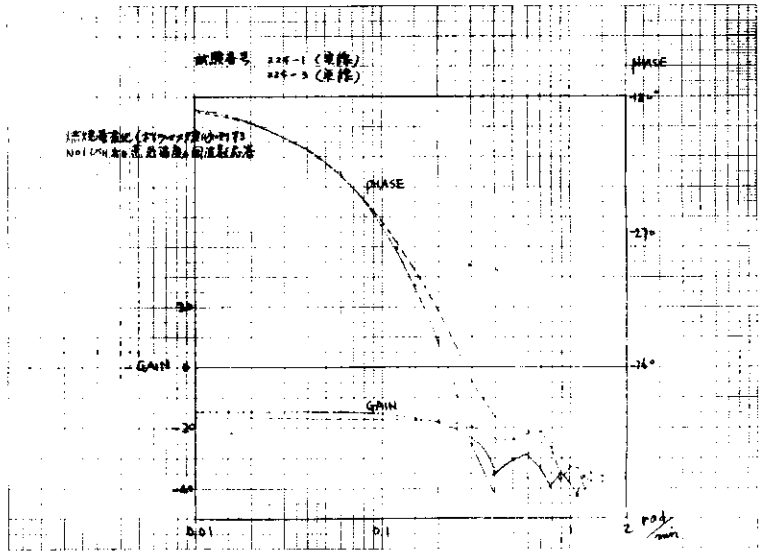
付図　57



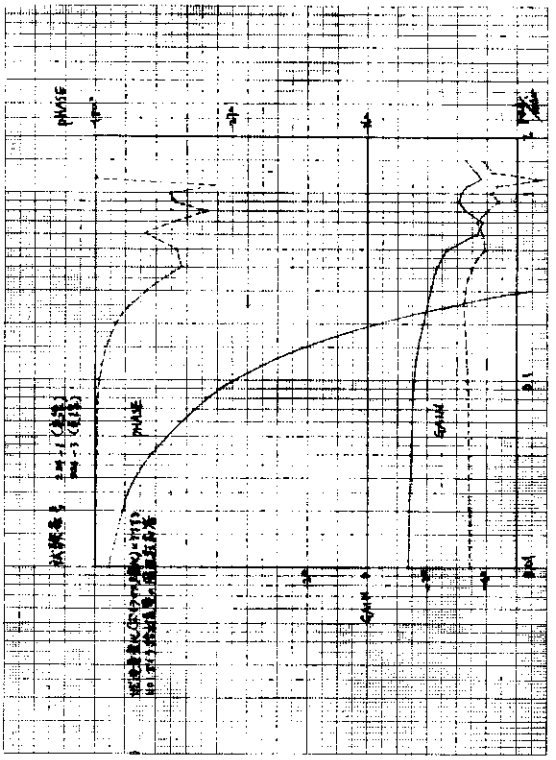
付図　58



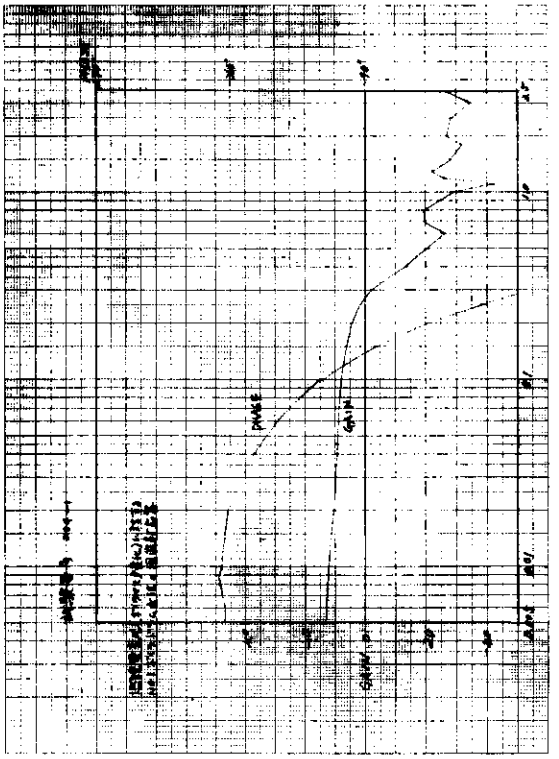
付図　59



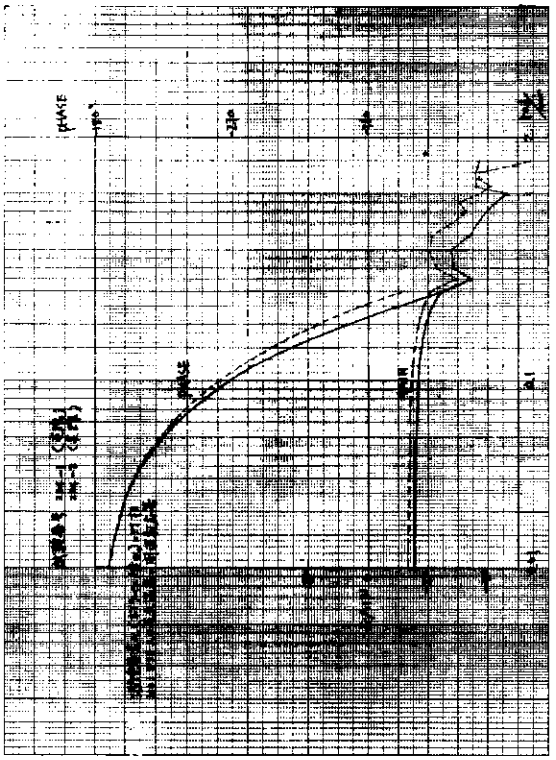
付図　60



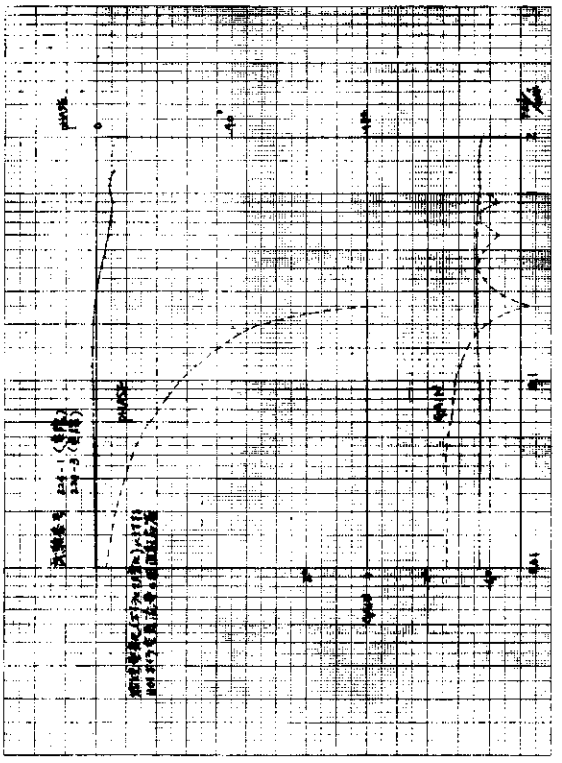
付図 62



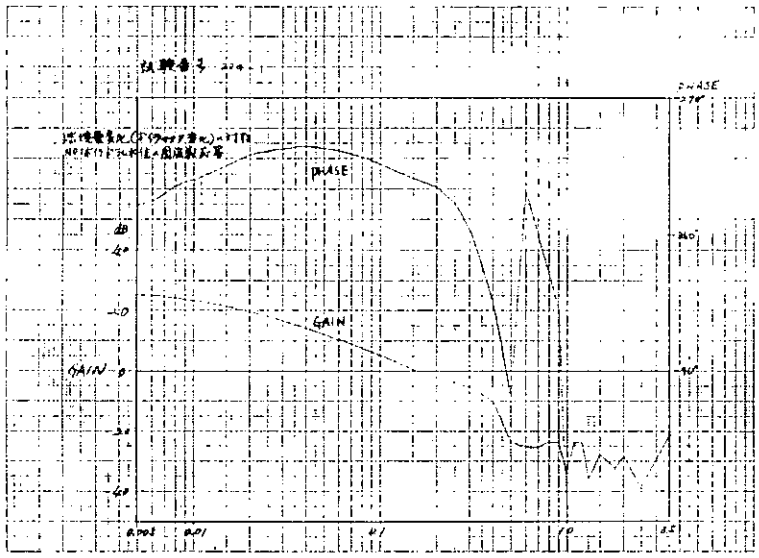
付図 64



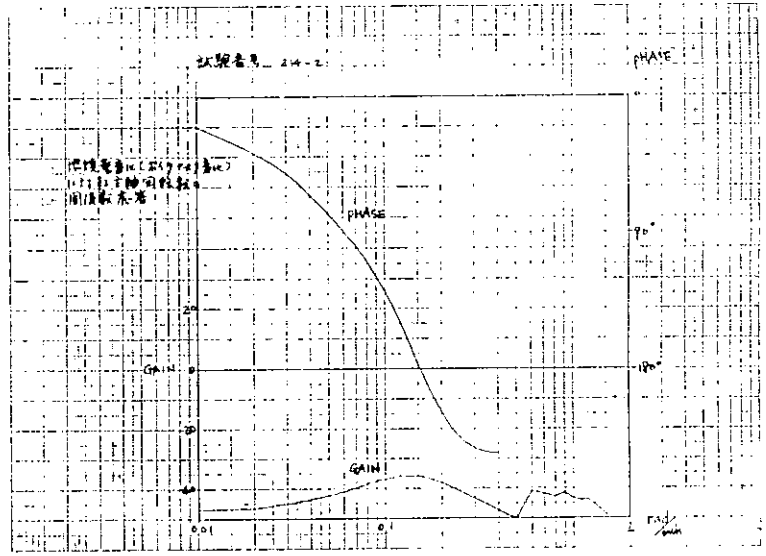
付図 61



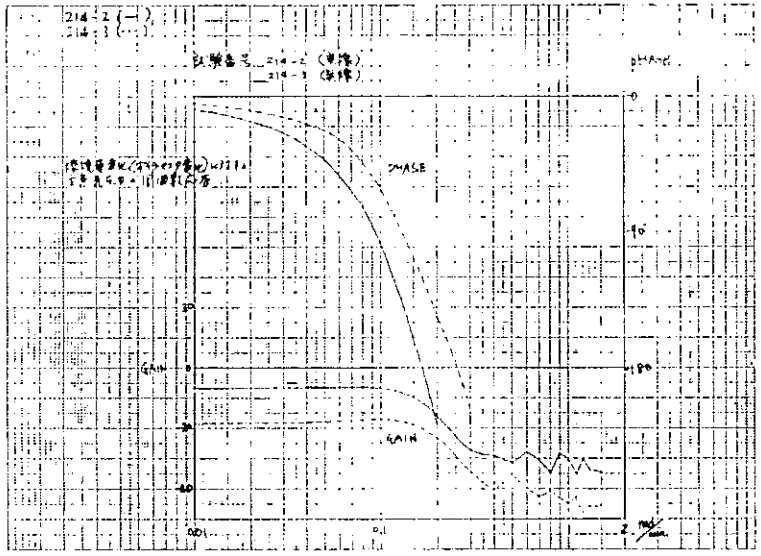
付図 63



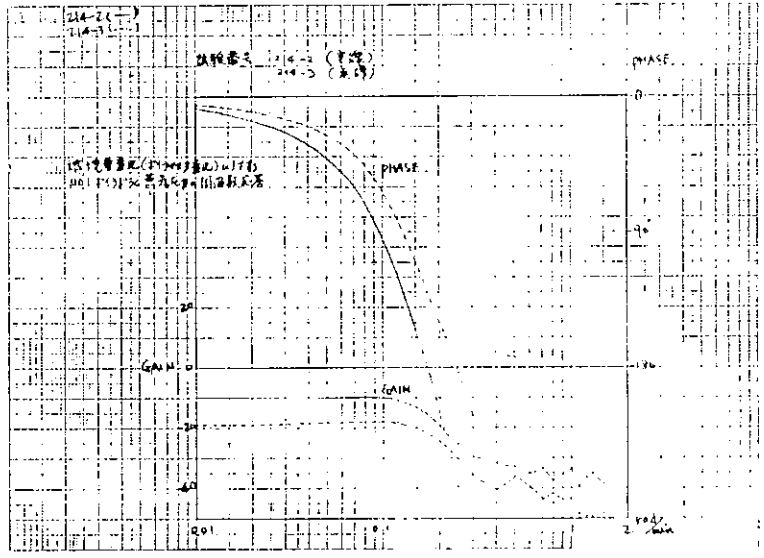
付図　65



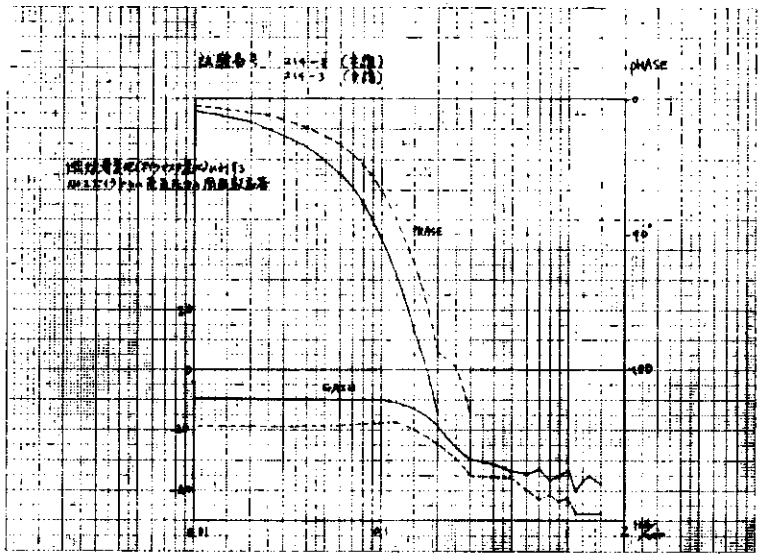
付図　66



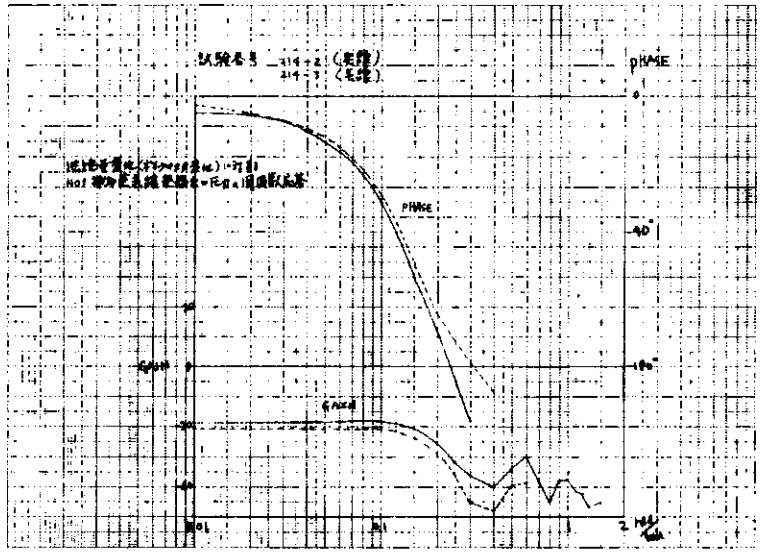
付図　67



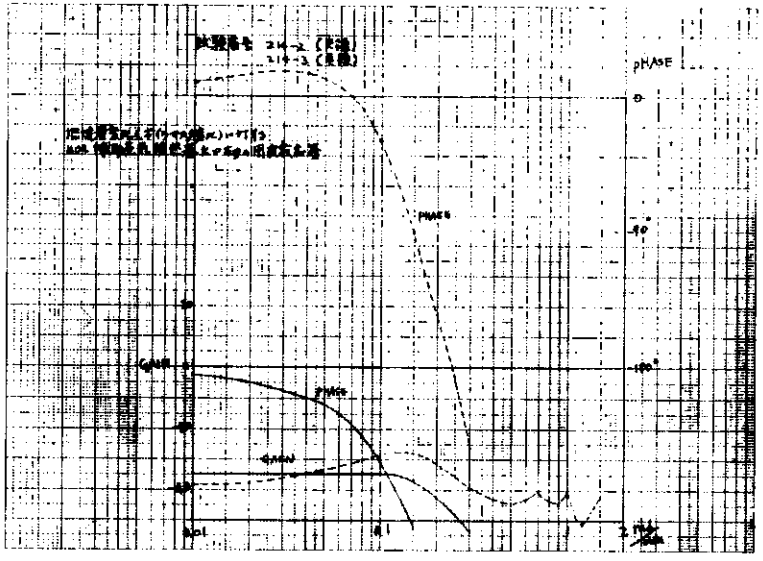
付図　68



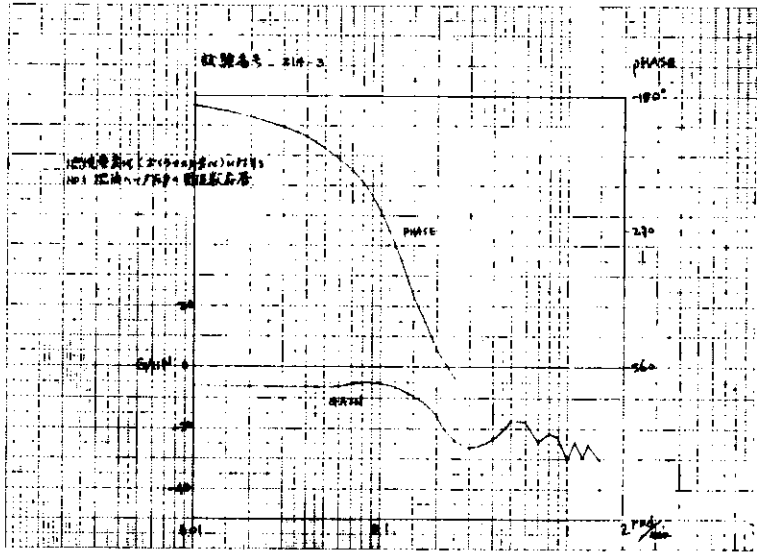
付図　69



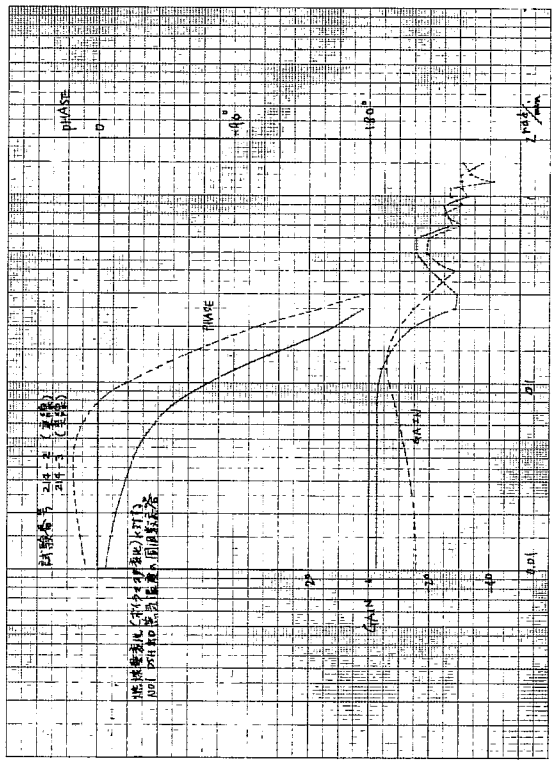
付図　70



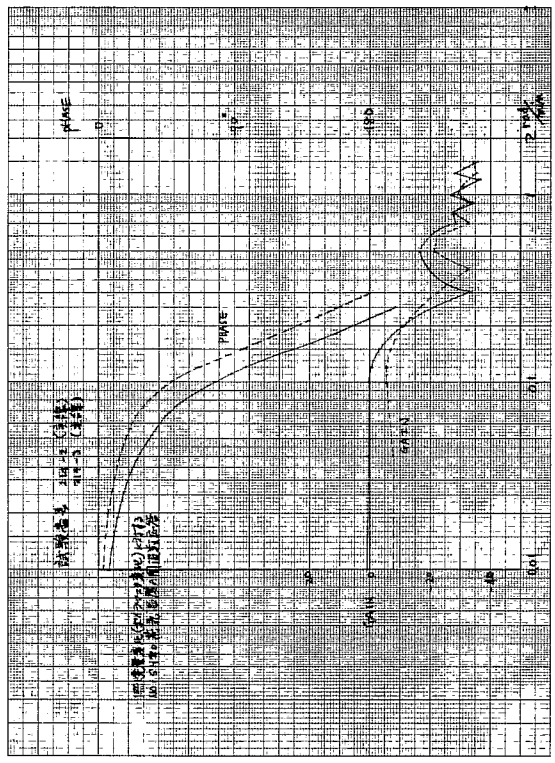
付図　71



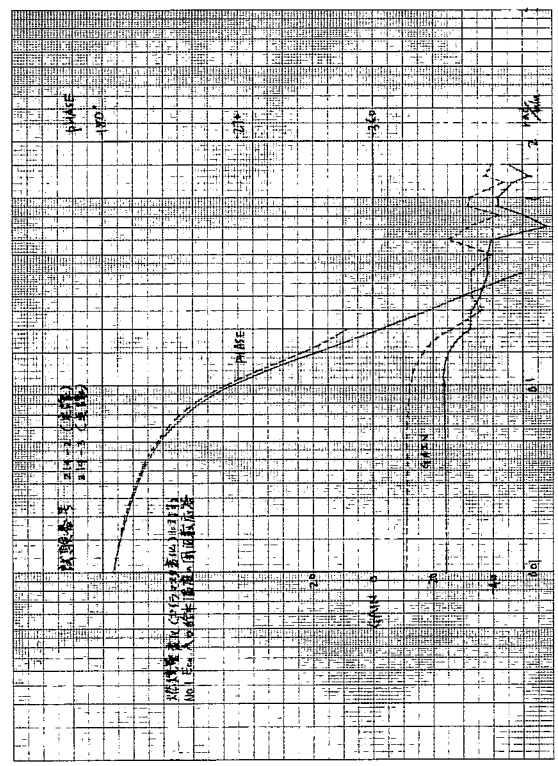
付図　72



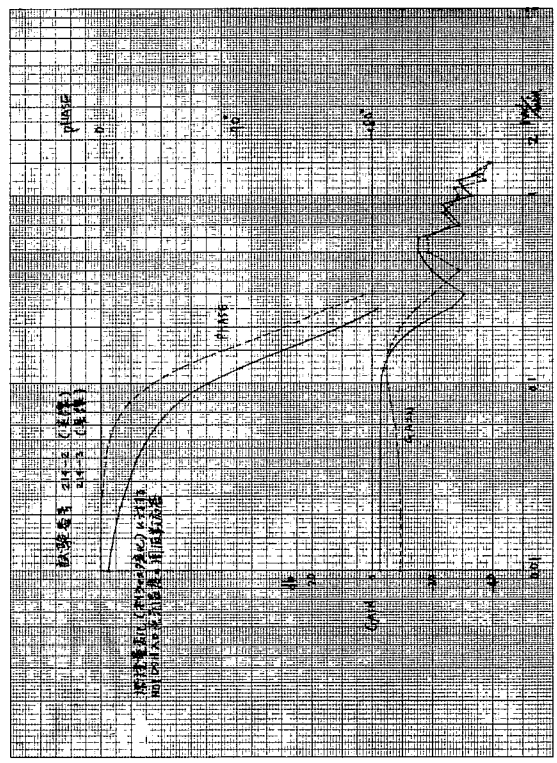
付図 74



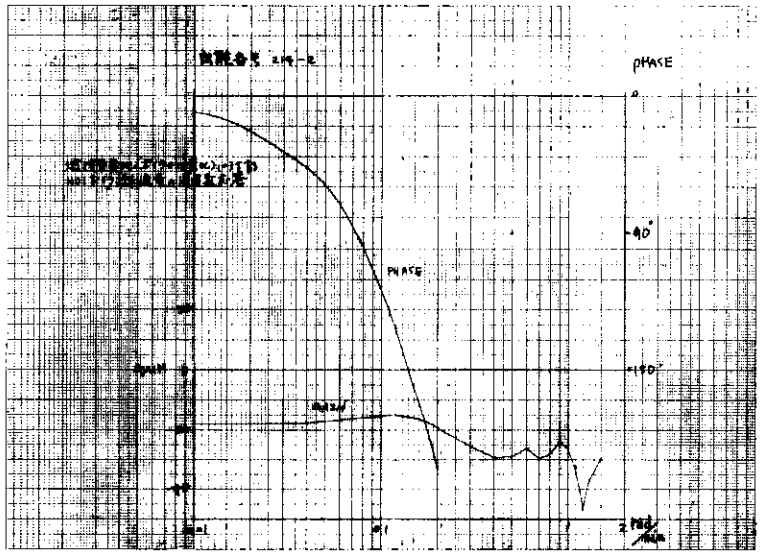
付図 73



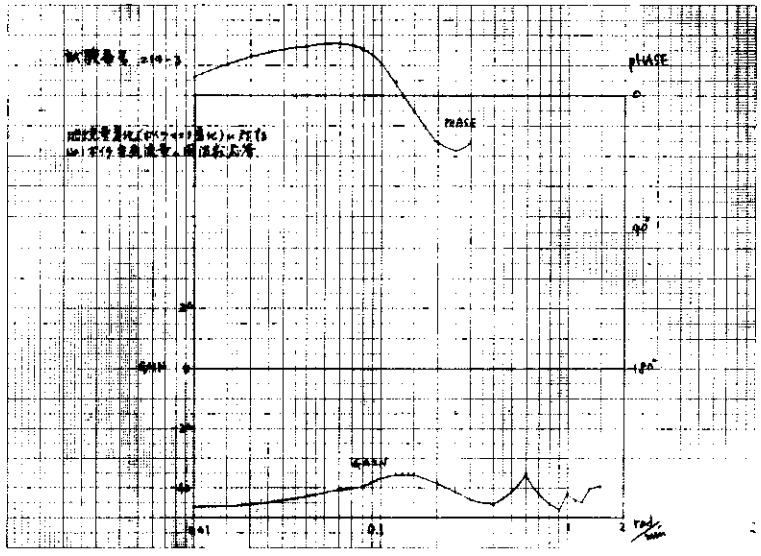
付図 76



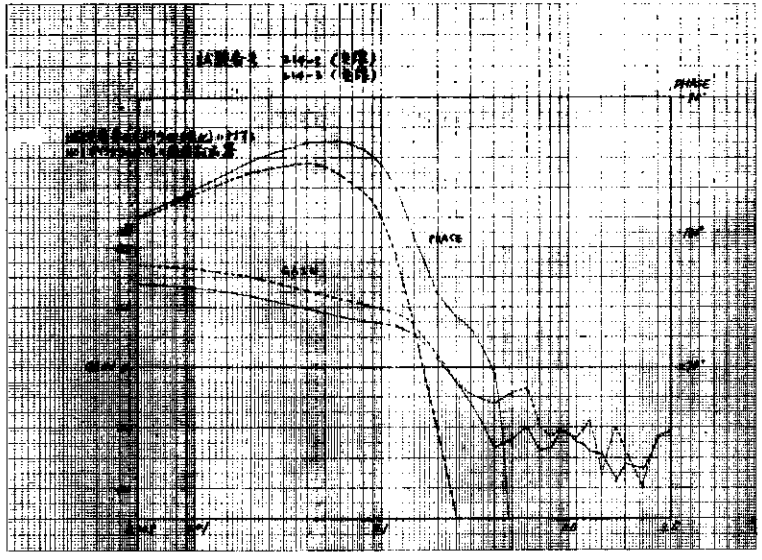
付図 75



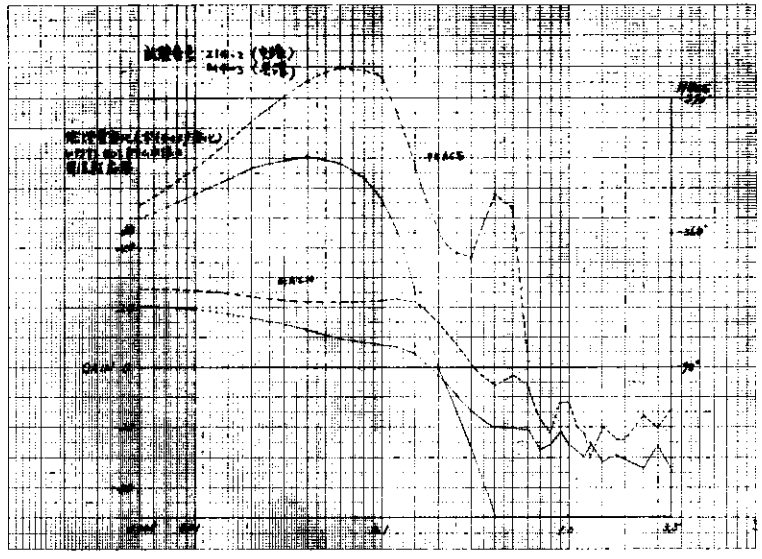
付図　77



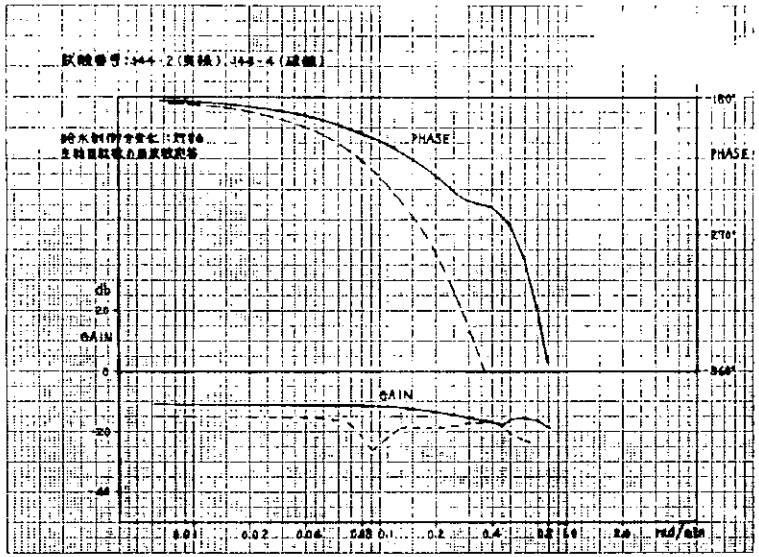
付図　78



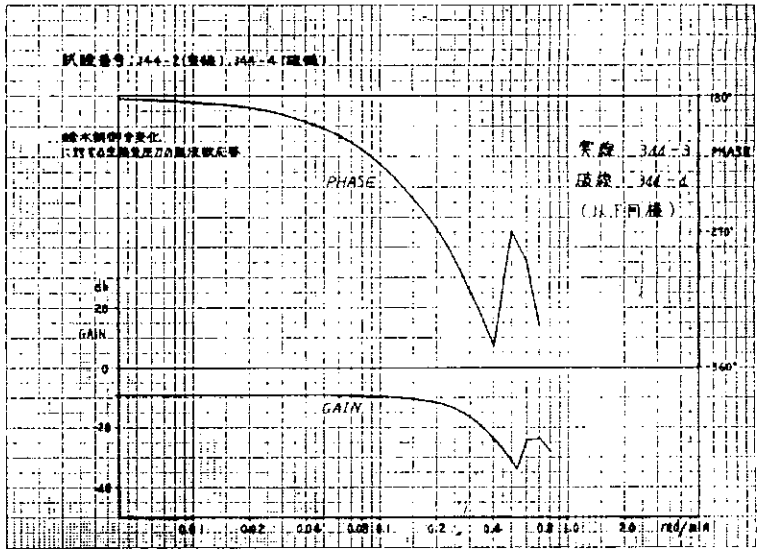
付図　79



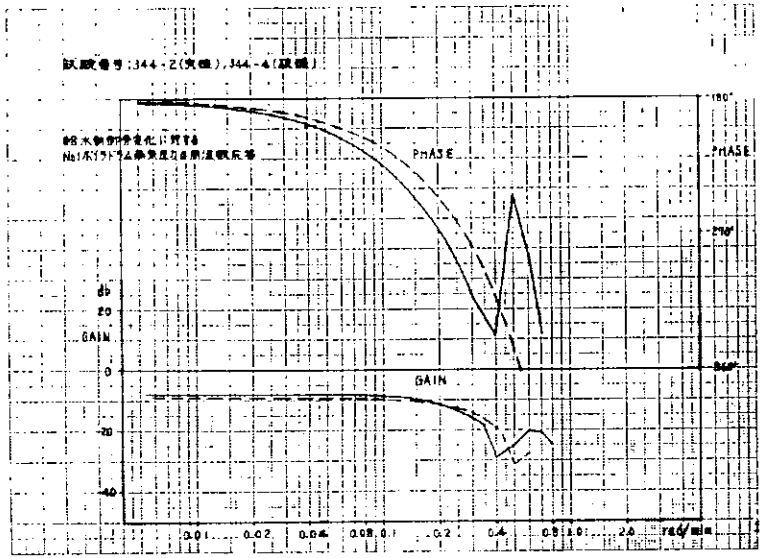
付図　80



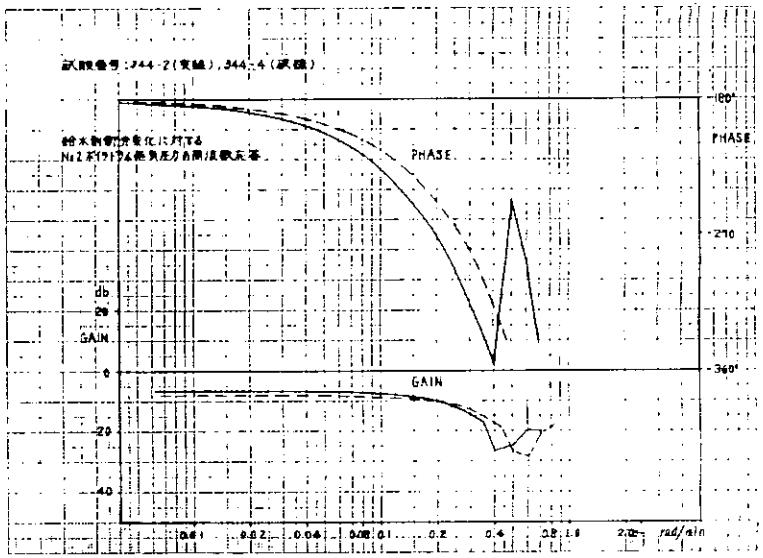
付図　８１



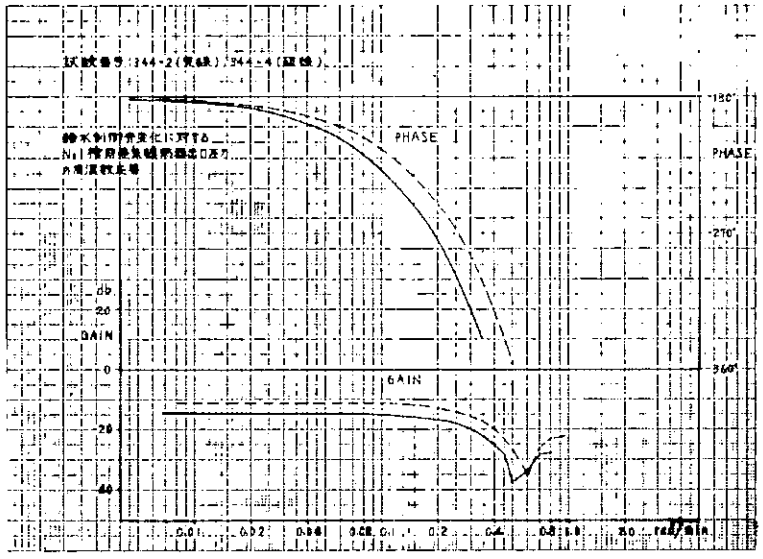
付図　８２



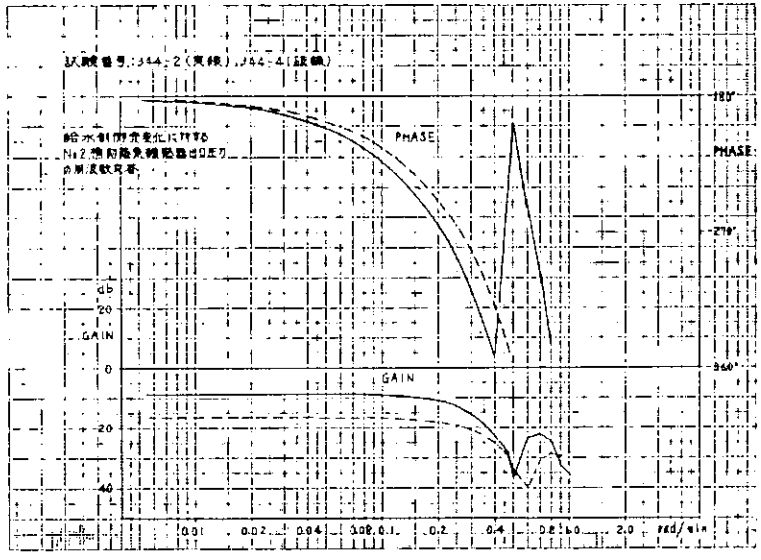
付図　８３



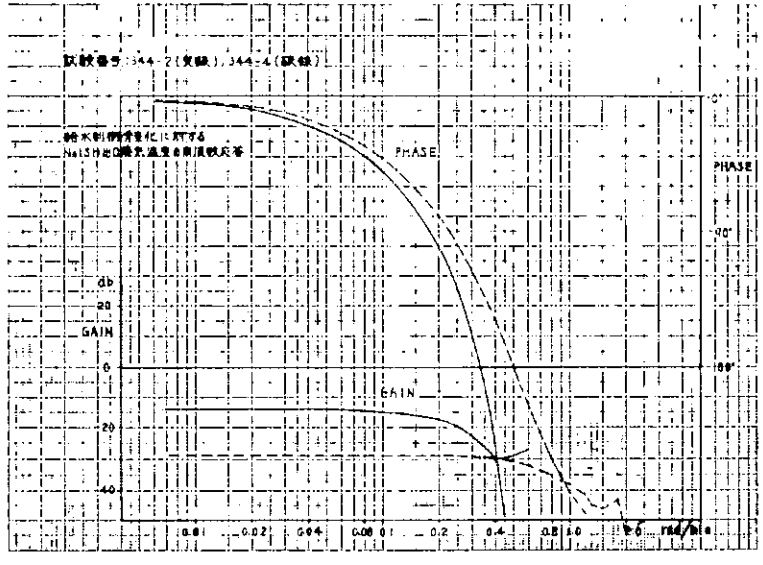
付図　８４



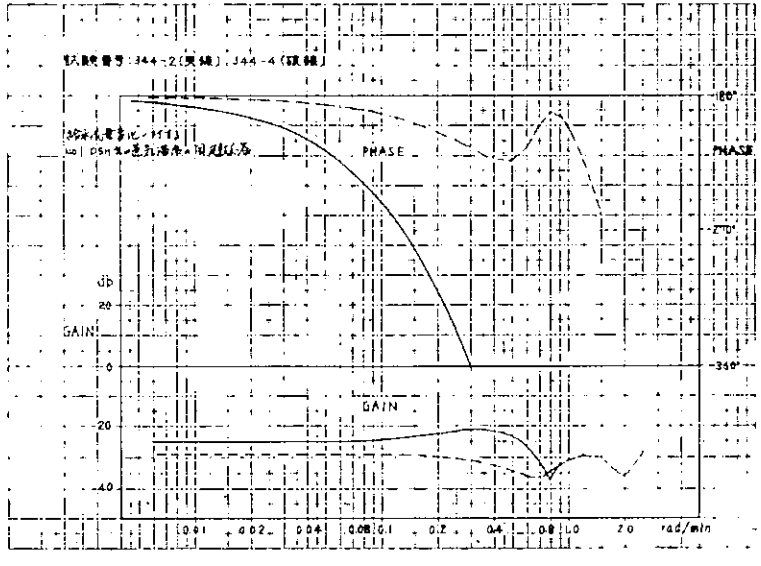
付図　85



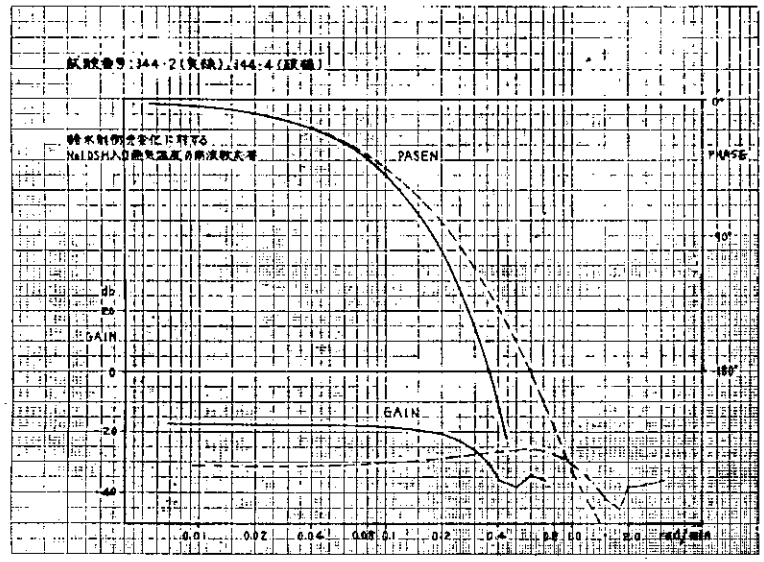
付図　86



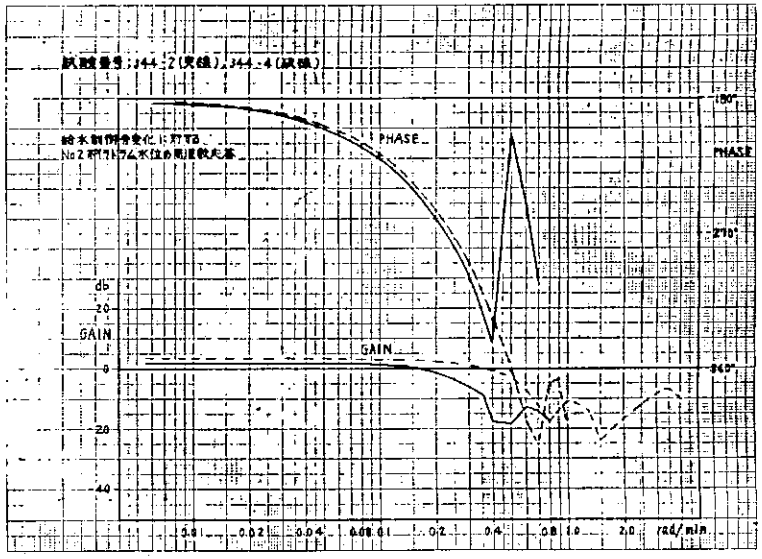
付図　87



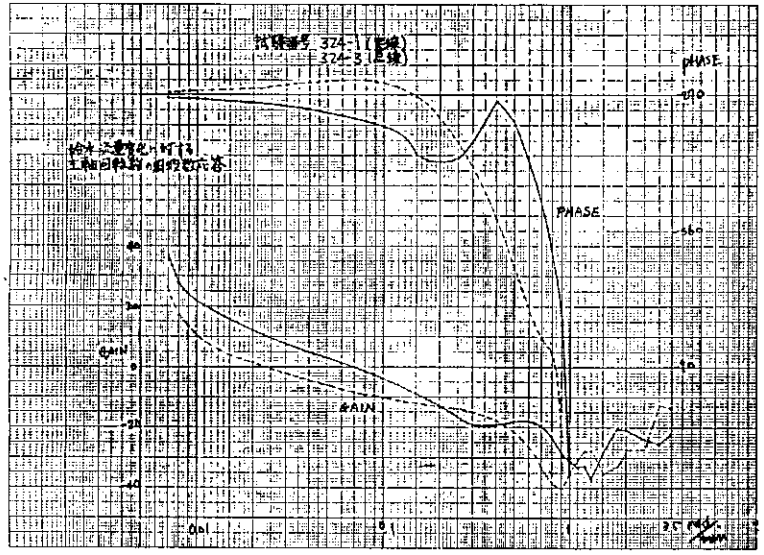
付図　88



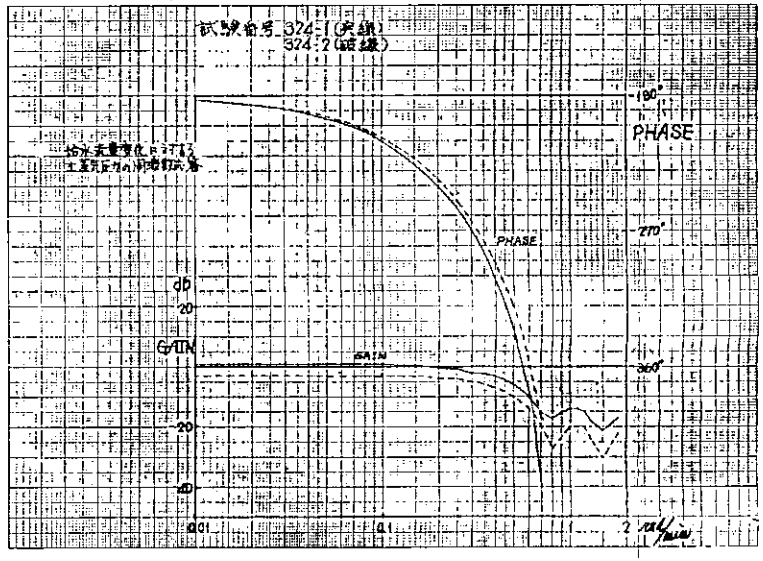
付図　89



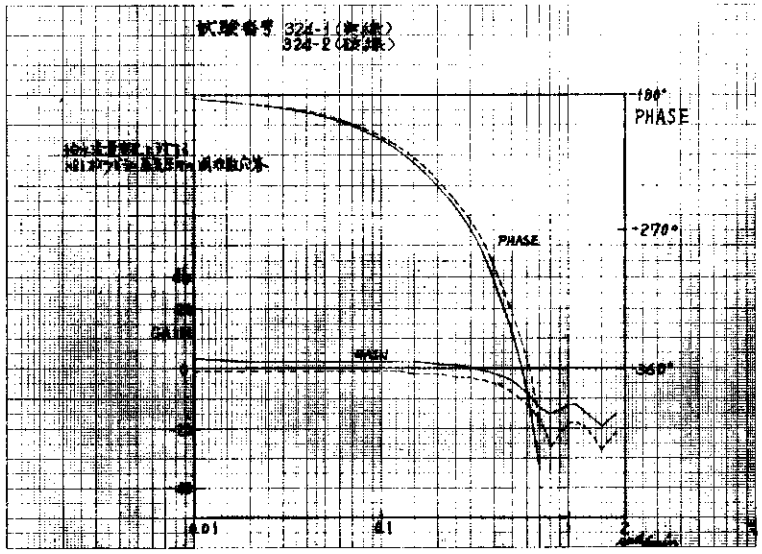
付図　90



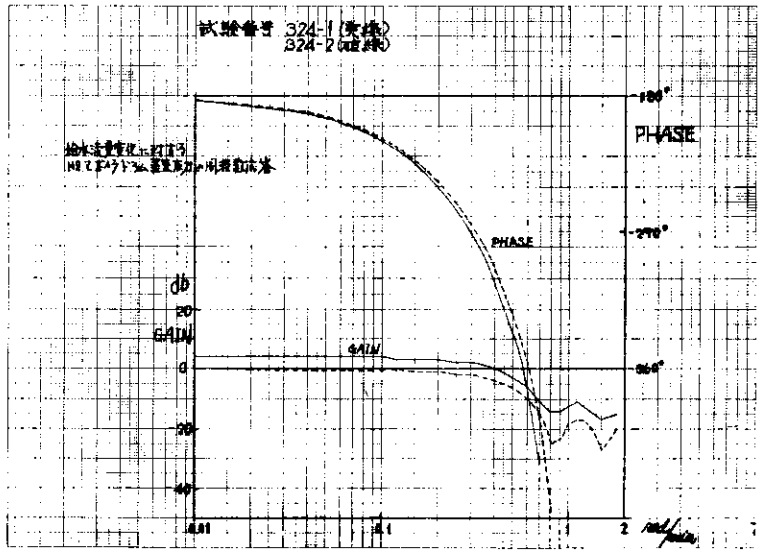
付図　91



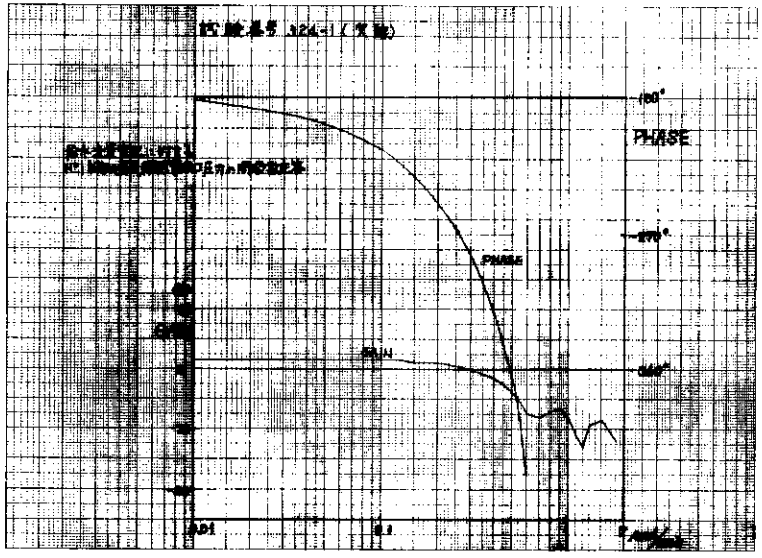
付図　92



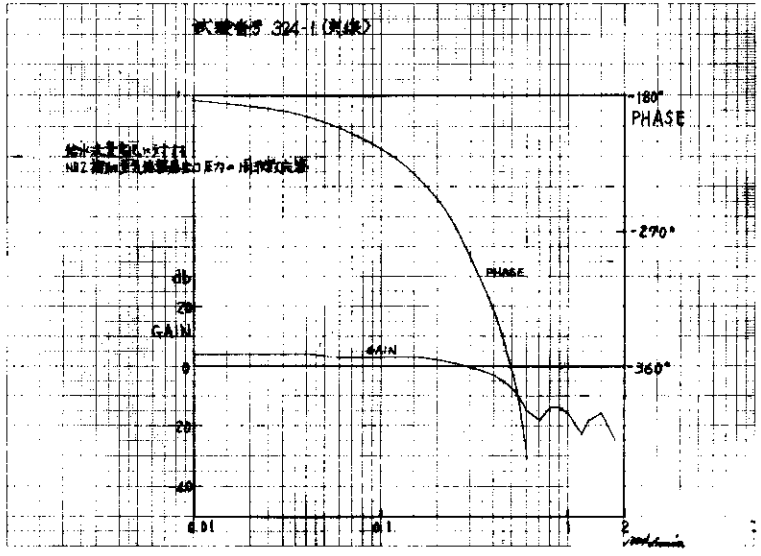
付図　93



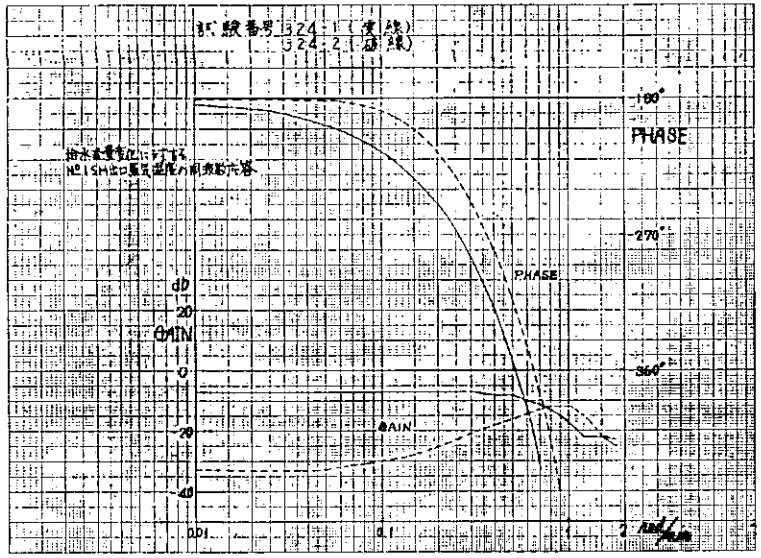
付図　94



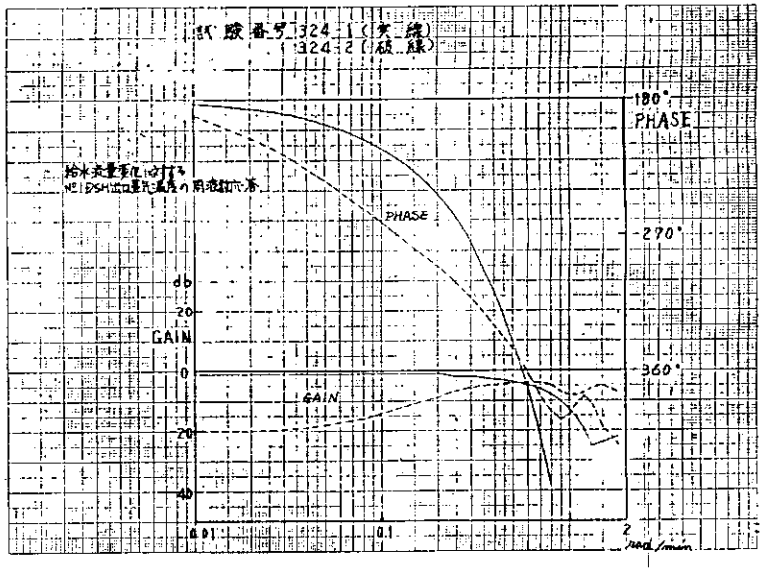
付図　95



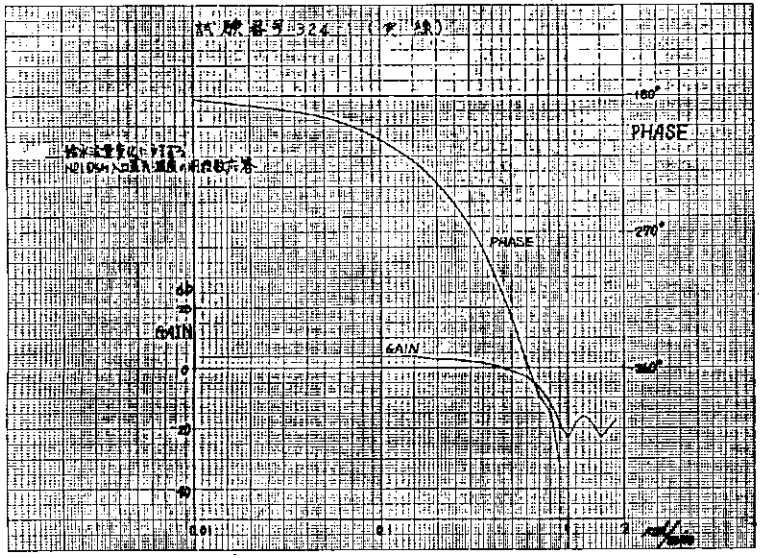
付図　96



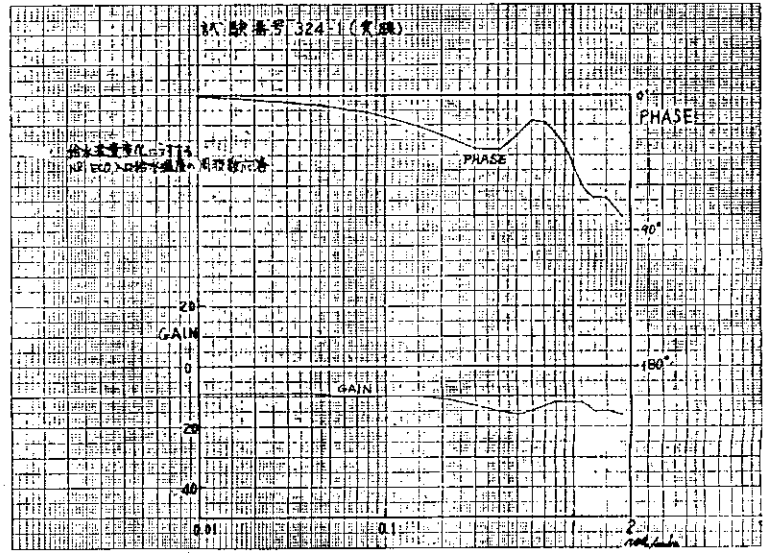
付図　97



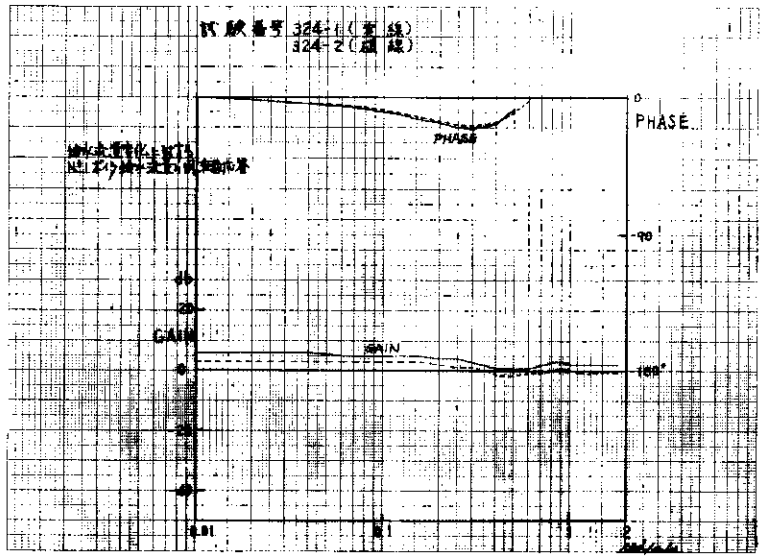
付図　98



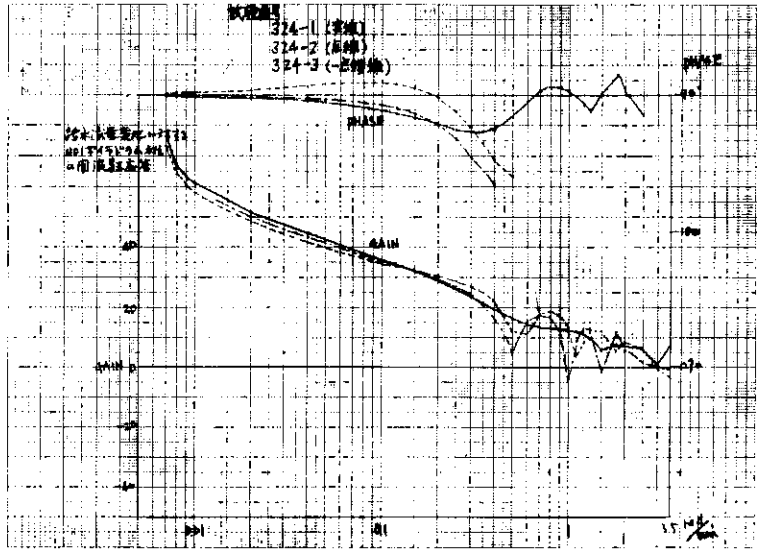
付図　99



付図　100



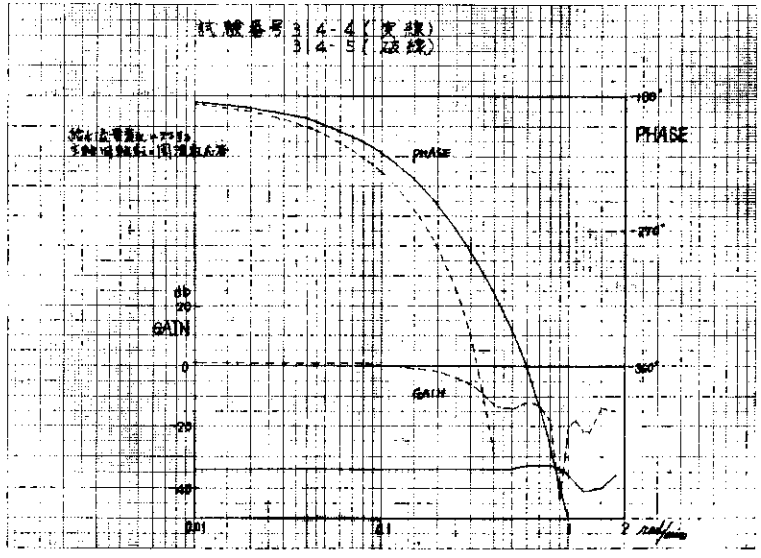
付図　101



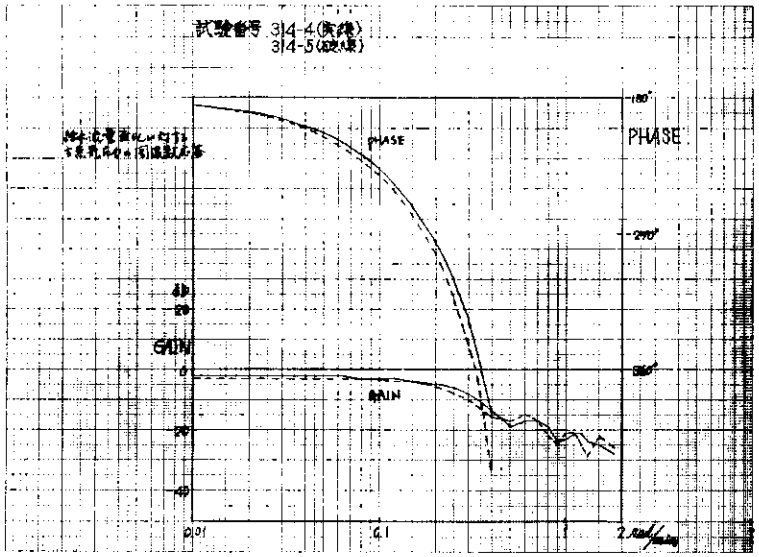
付図　102



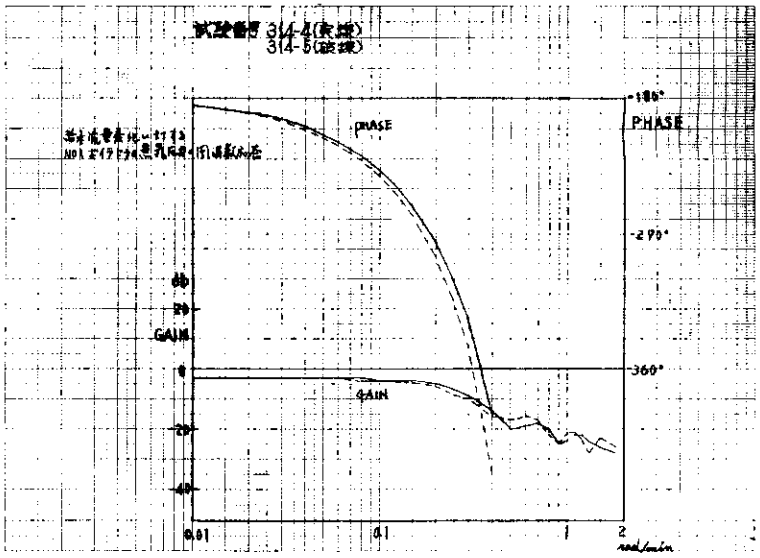
付図　103



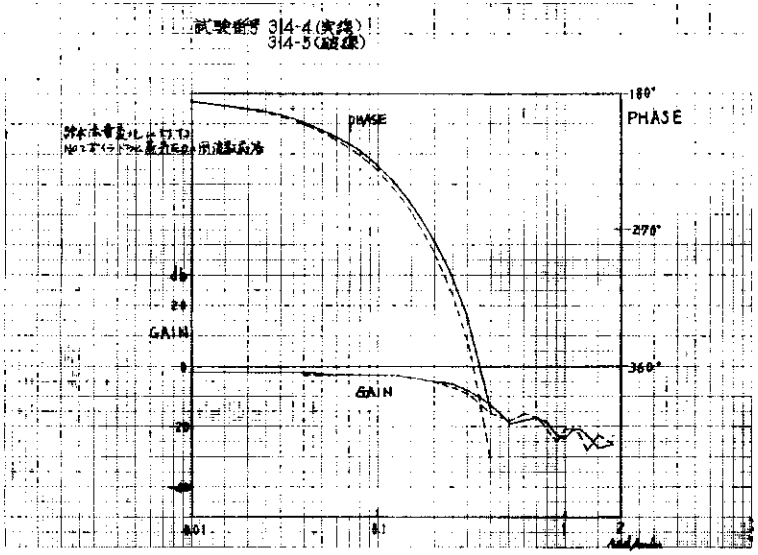
付図　104



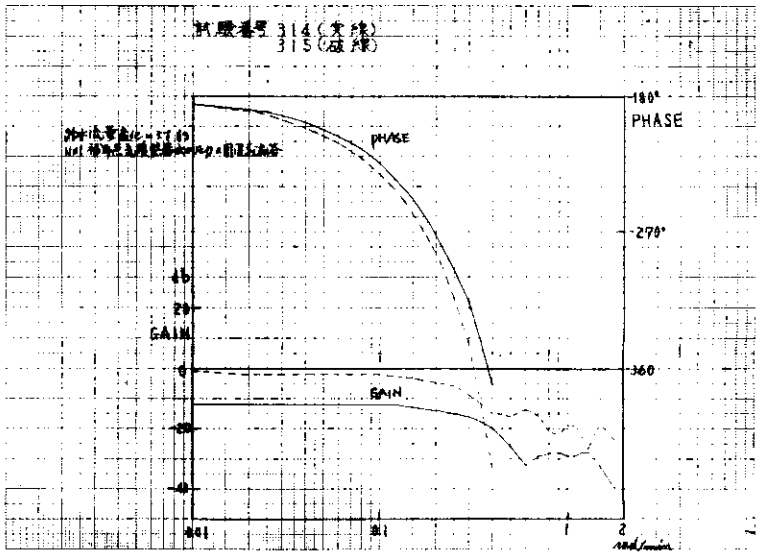
付図　105



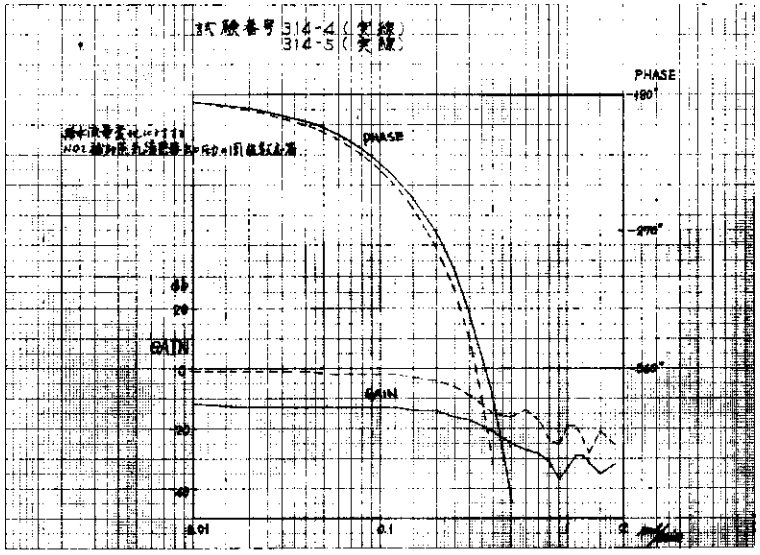
付図　106



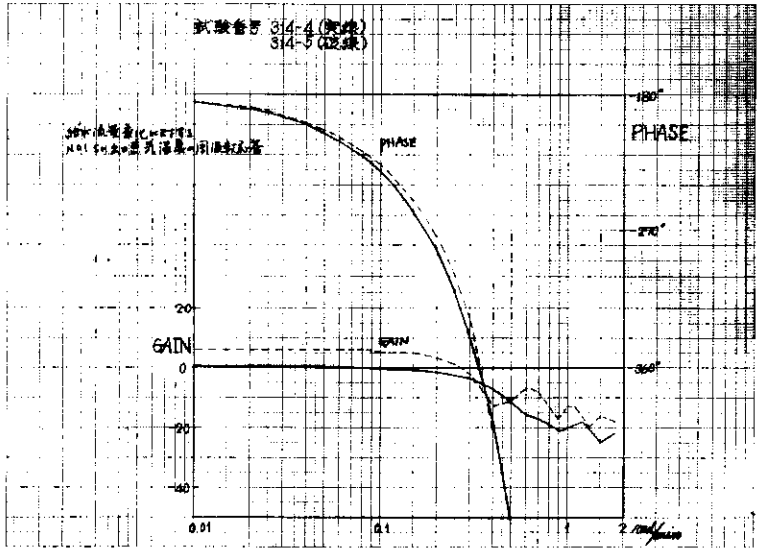
付図　107



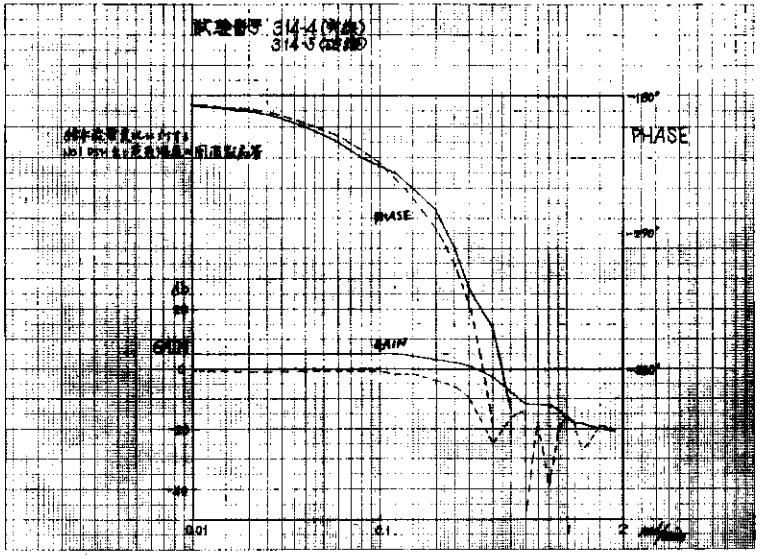
付図　108



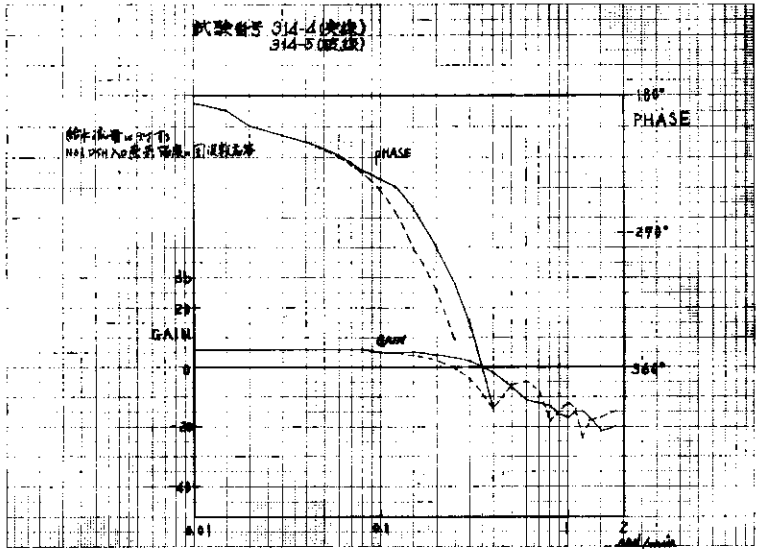
付図　109



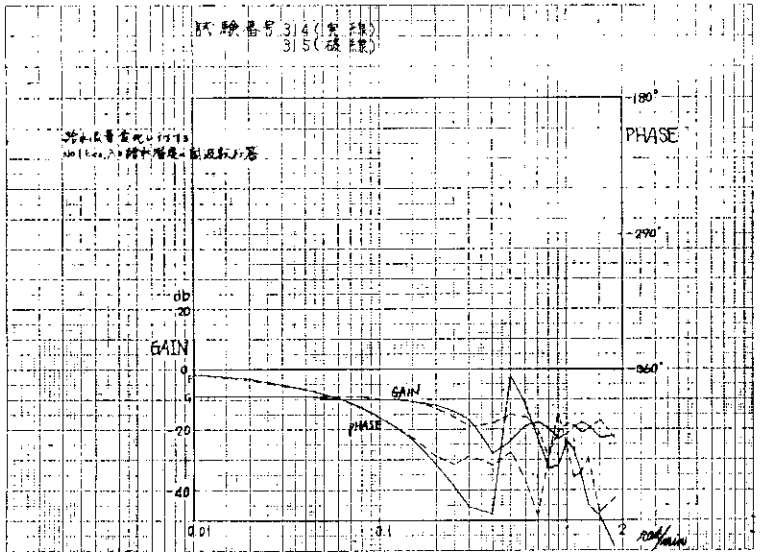
付図　110



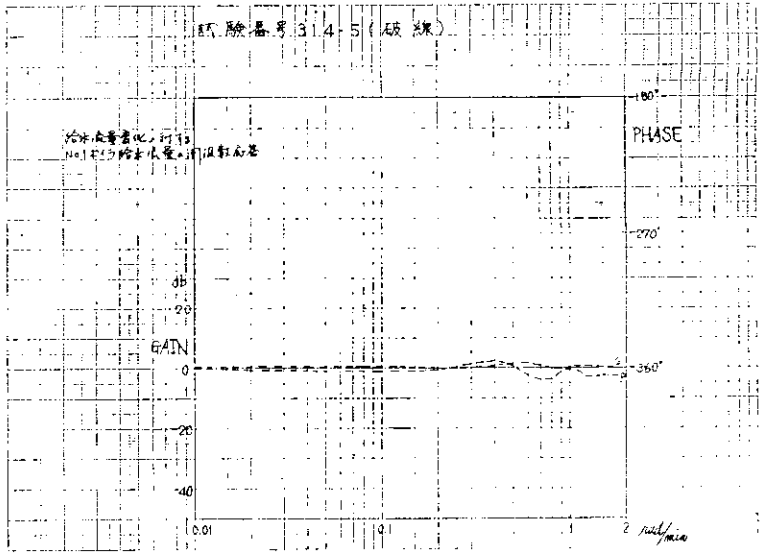
付図　111



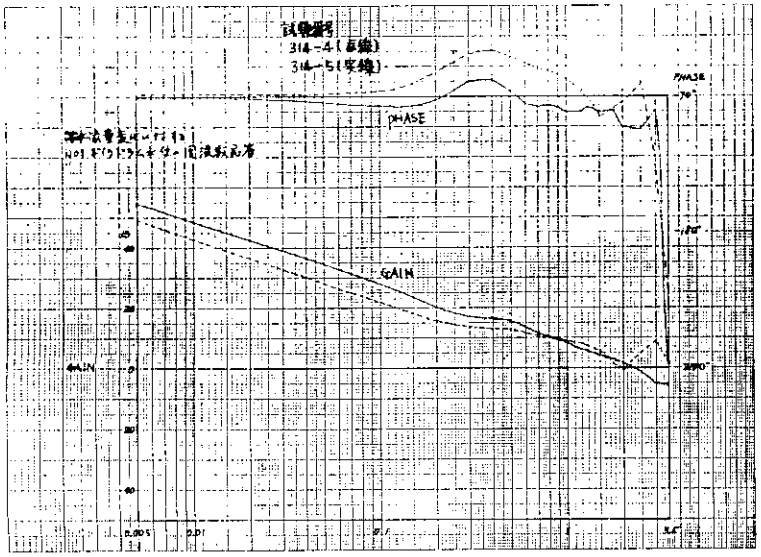
付図　112



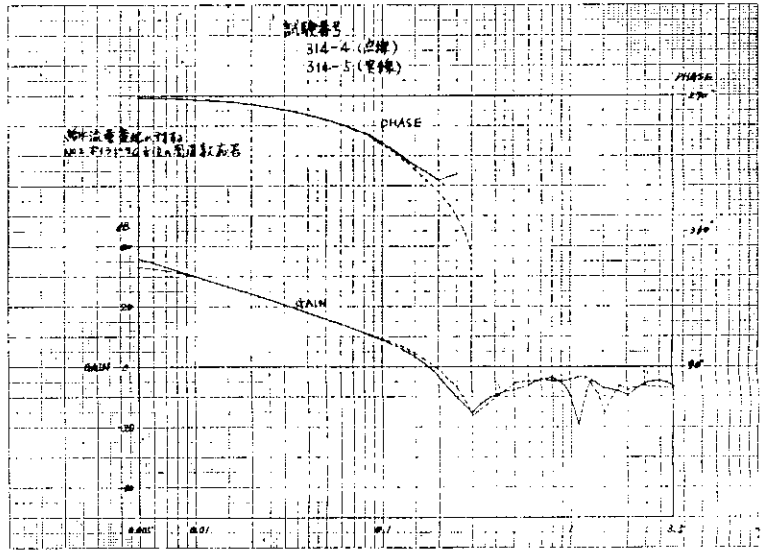
付図　113



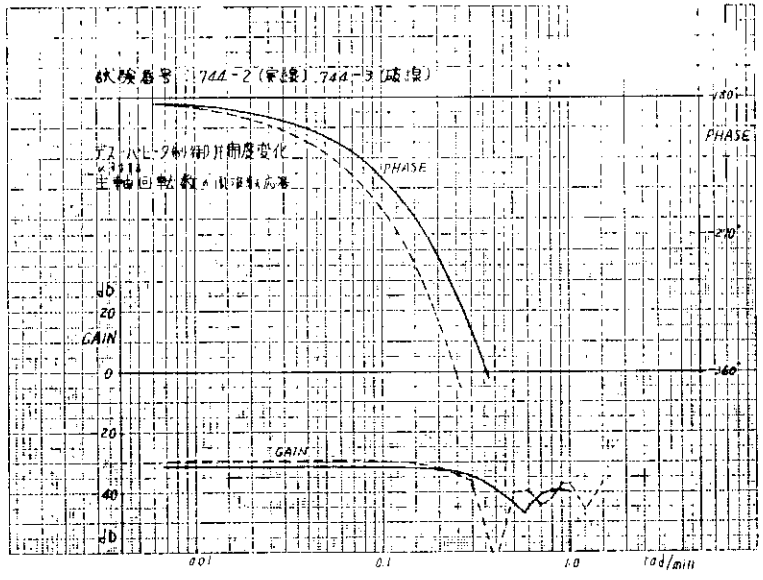
付図　114



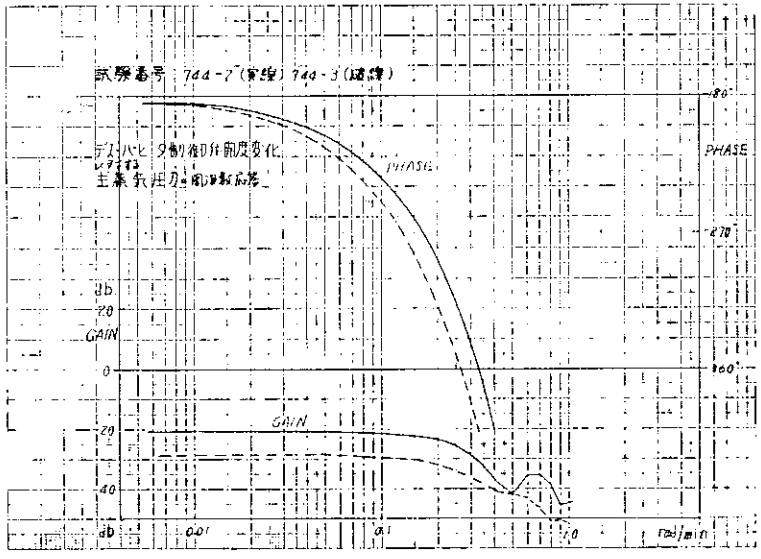
付図　115



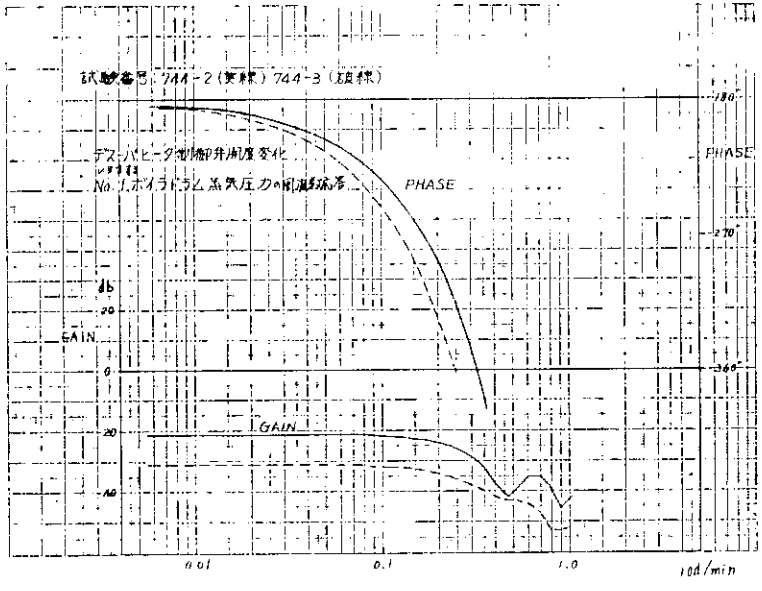
付図　116



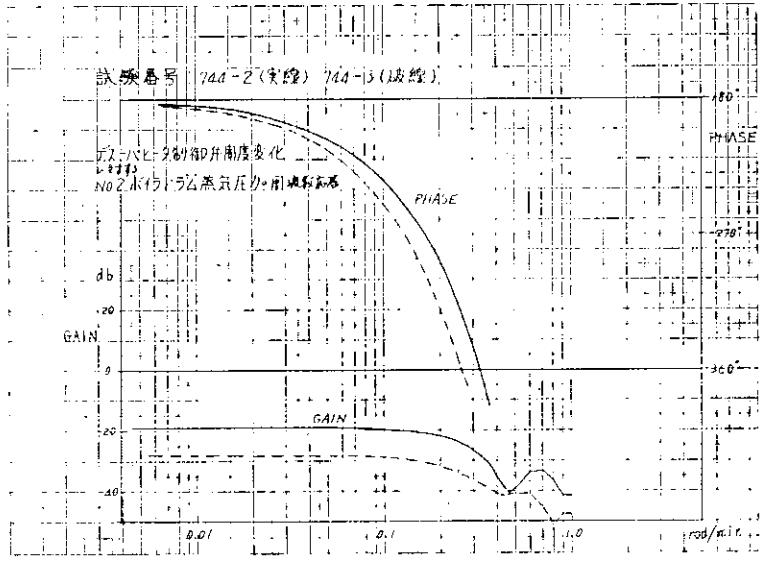
付図　117



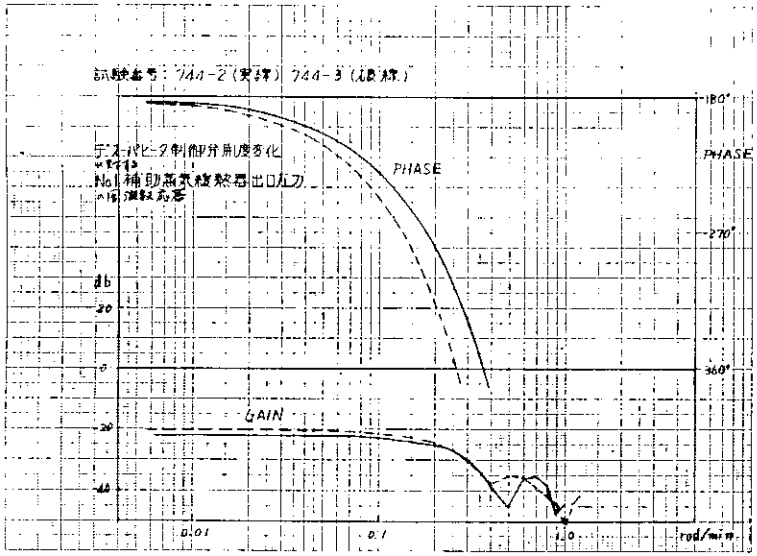
付図　118



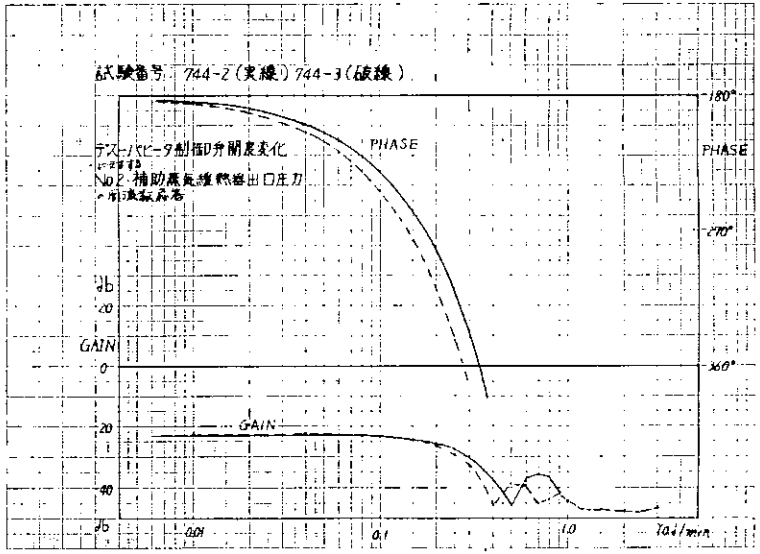
付図　119



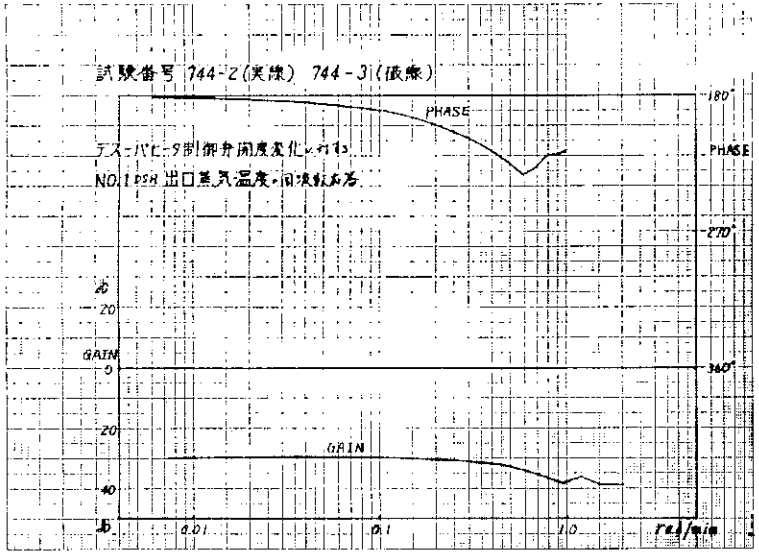
付図　120



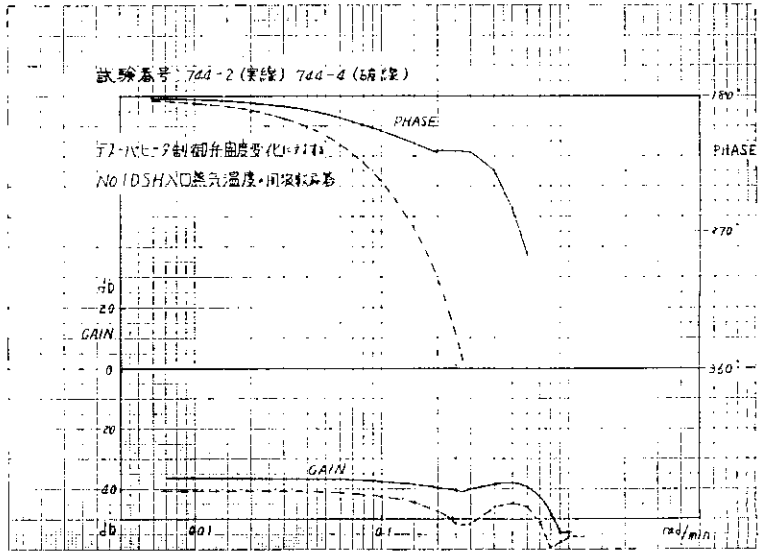
付図　121



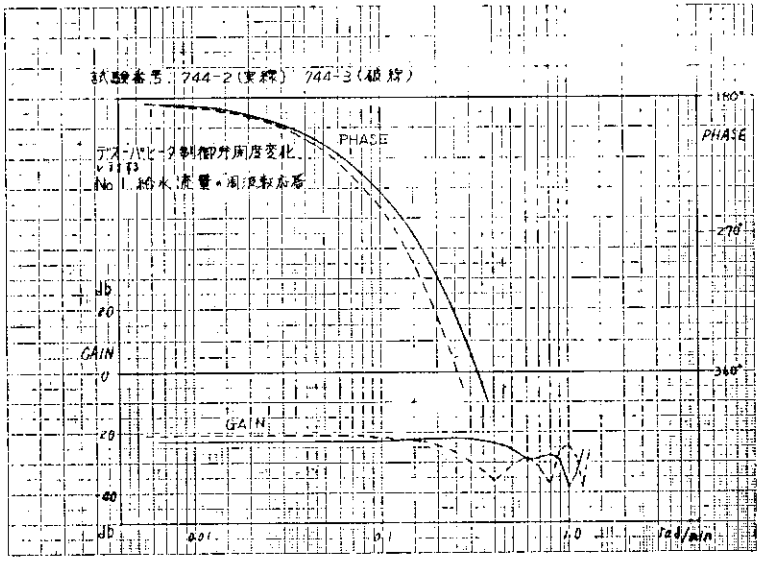
付図　122



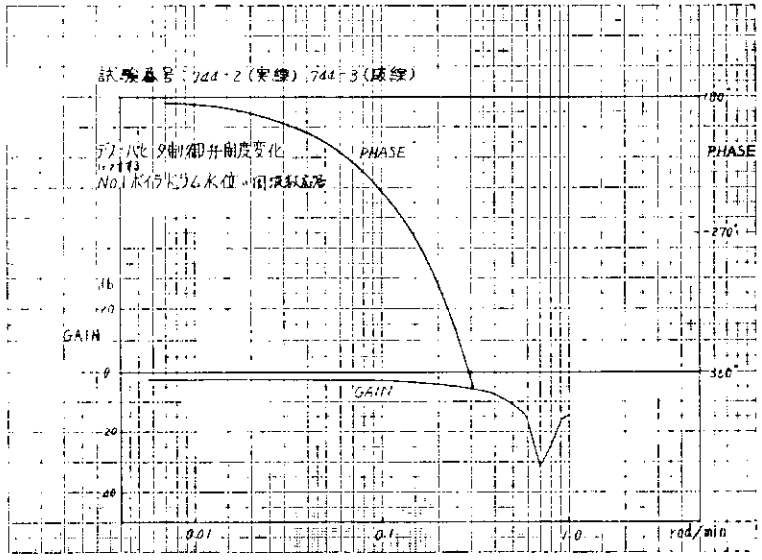
付図　123



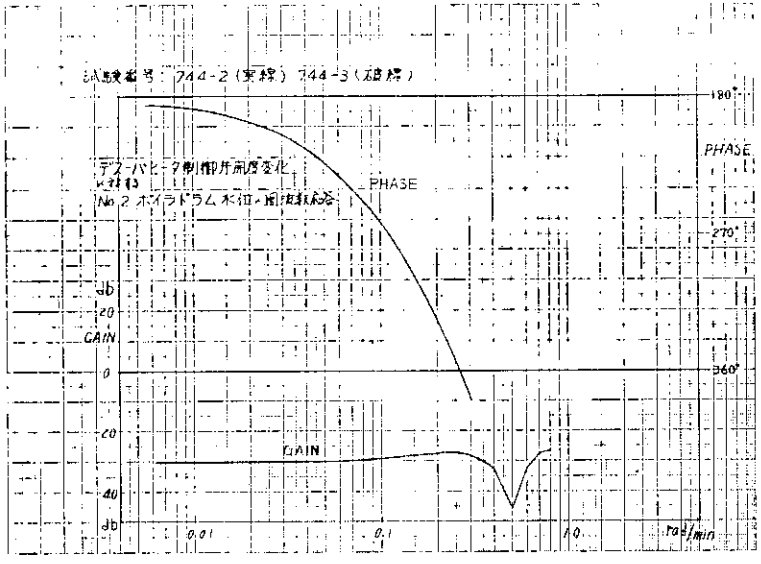
付図　124



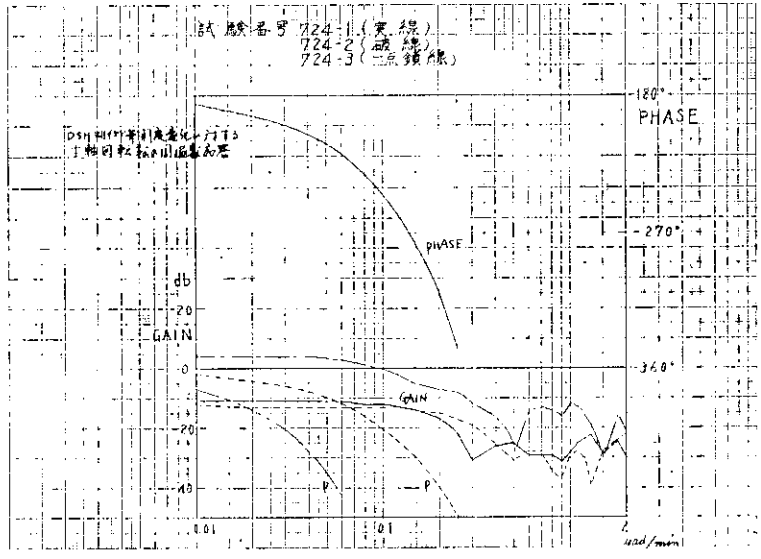
付図　125



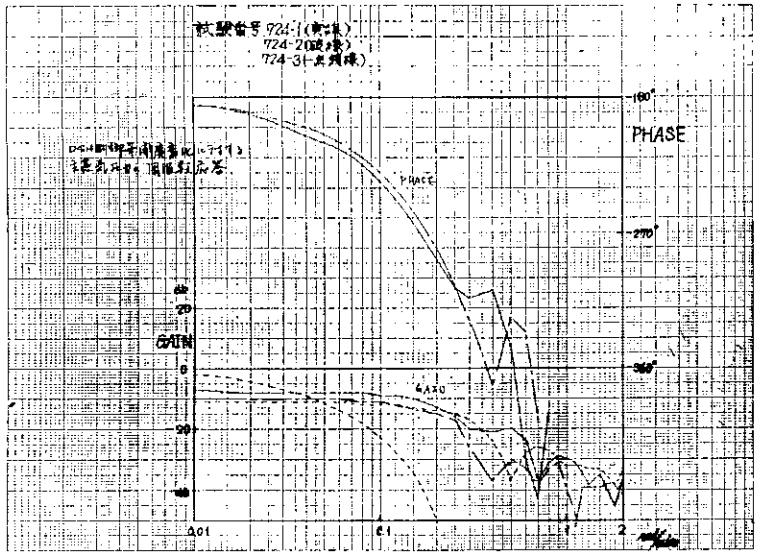
付図　126



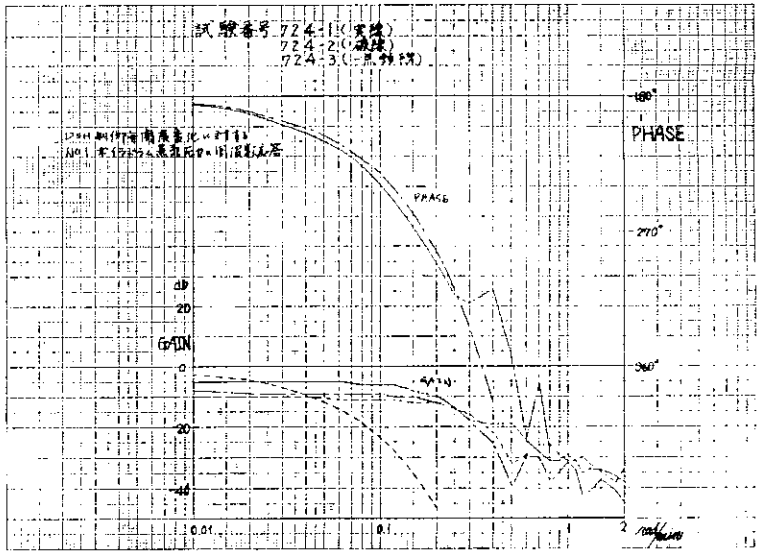
付図　127



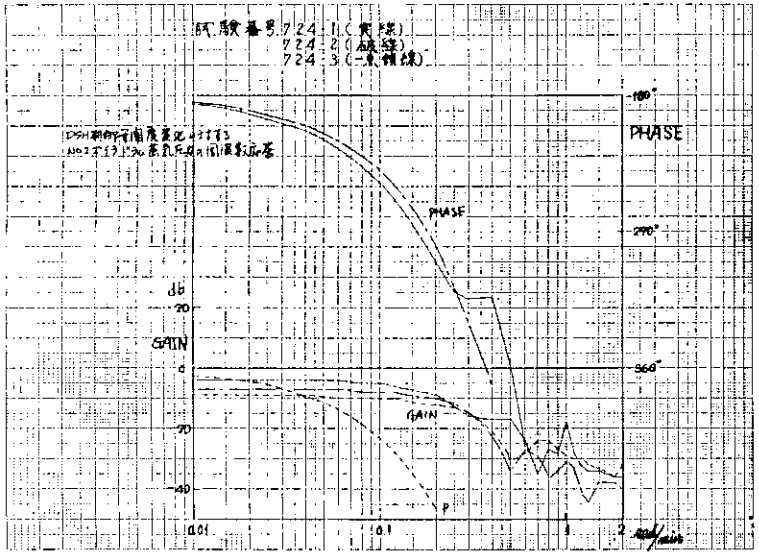
付図　128



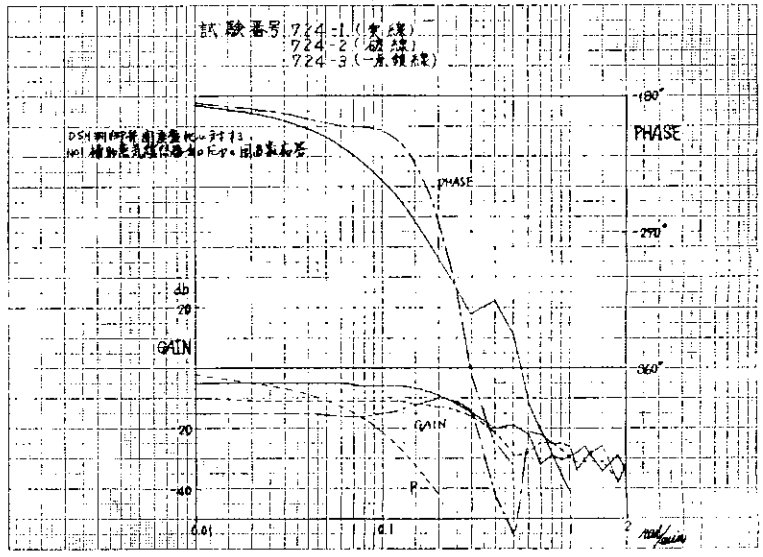
付図　129



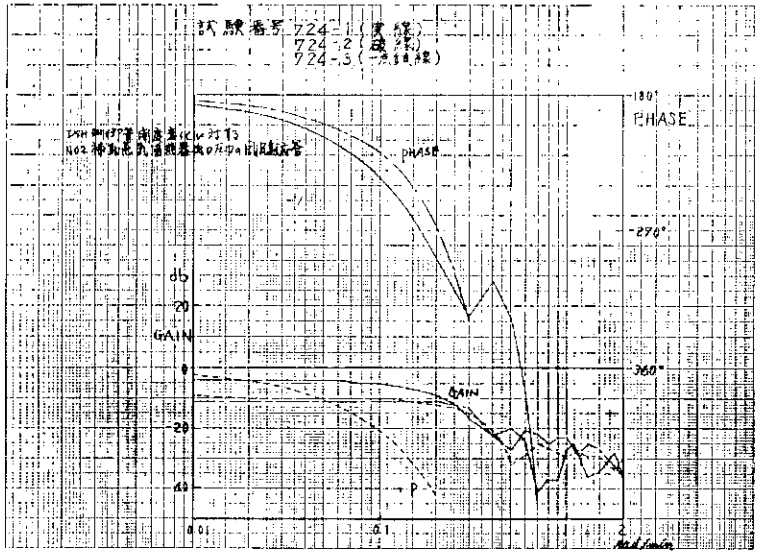
付図　130



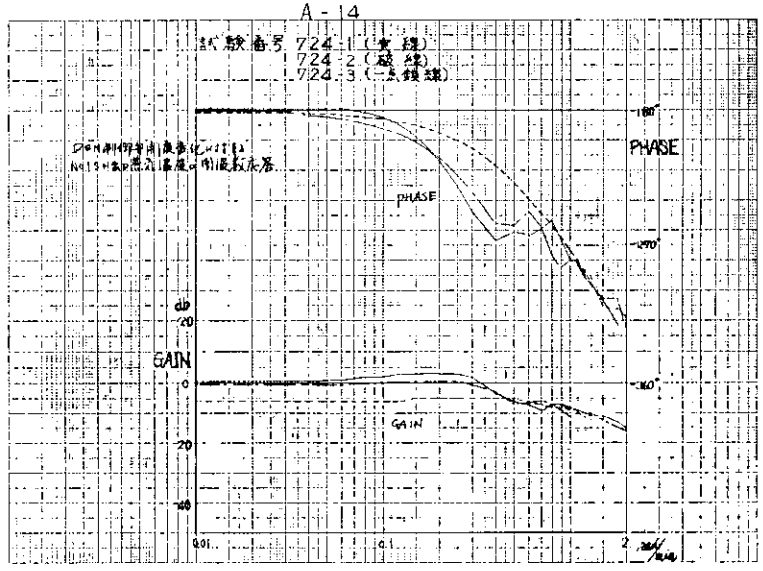
付図　131



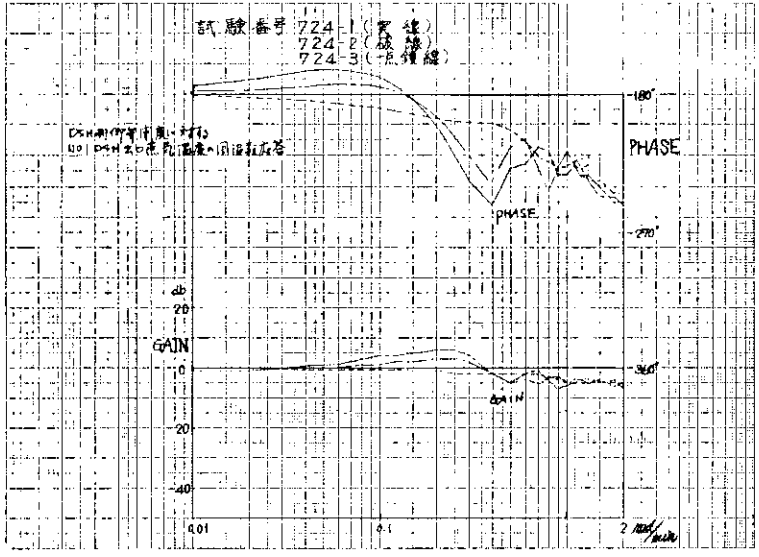
付図　132



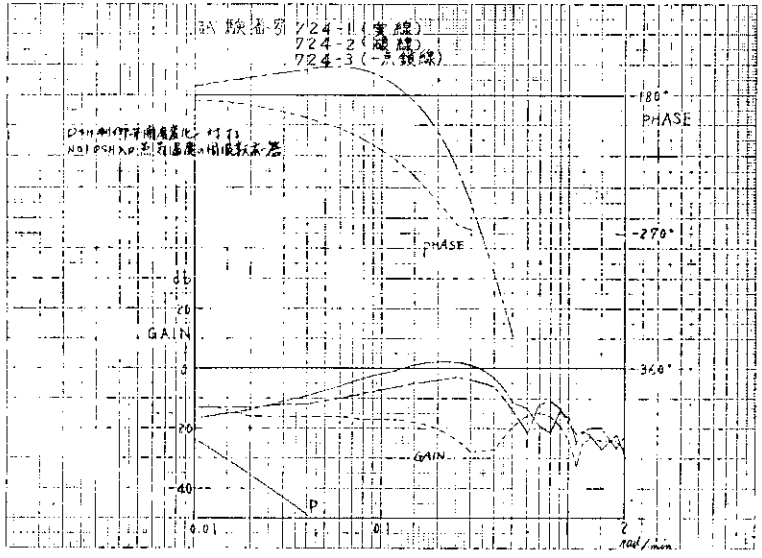
付図　133



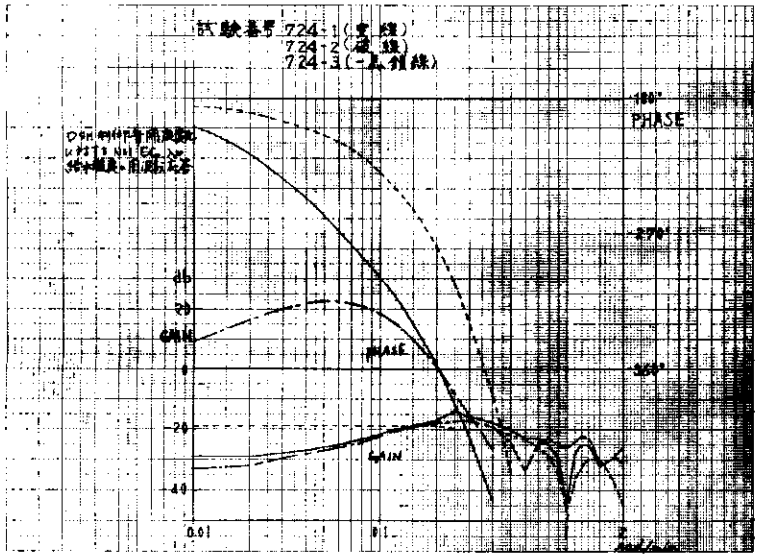
付図　134



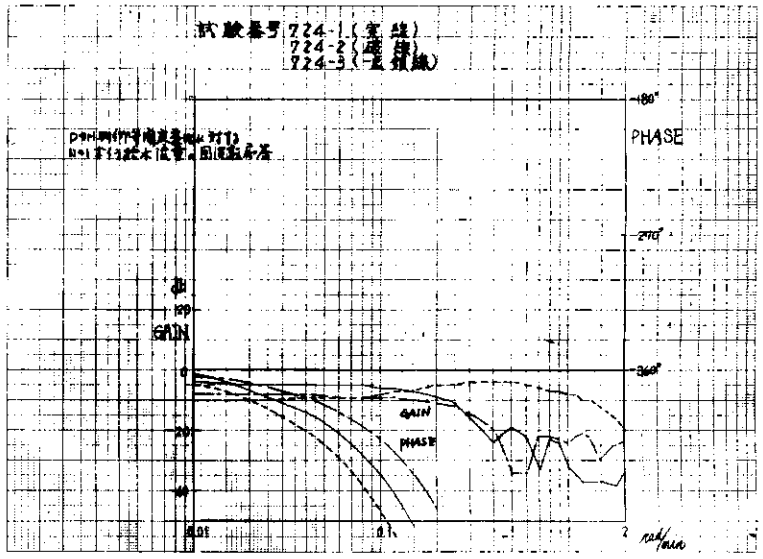
付図　135



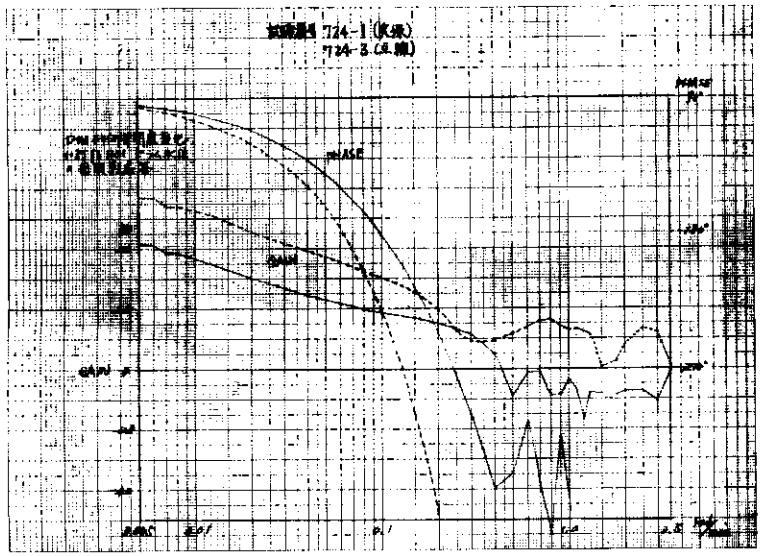
付図　136



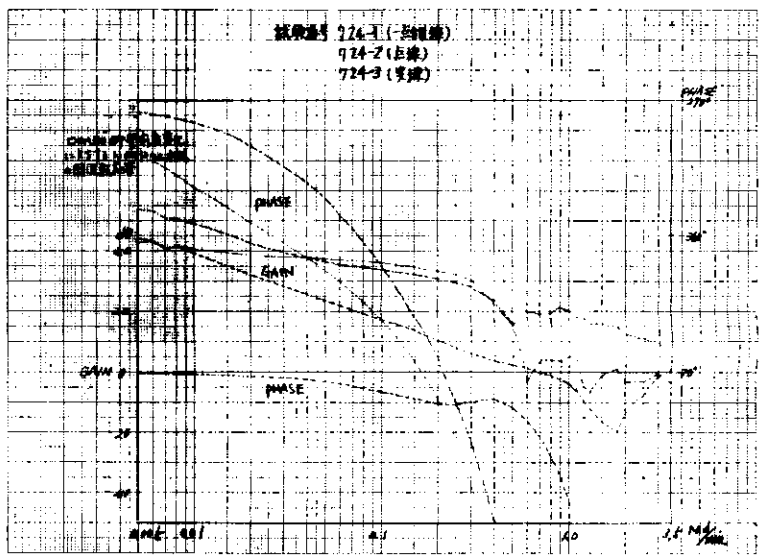
付図　137



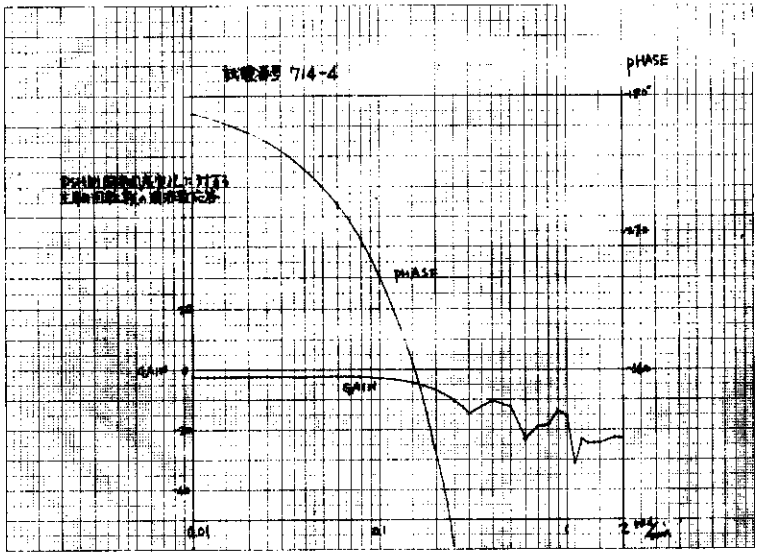
付図　138



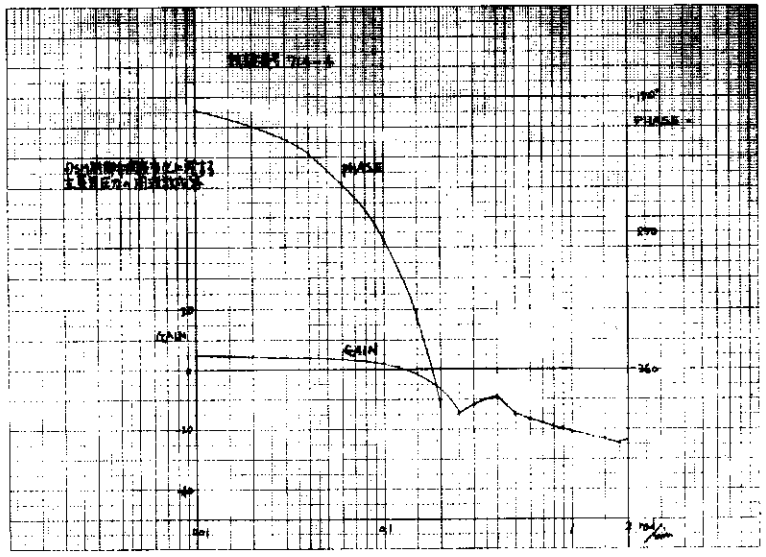
付図　139



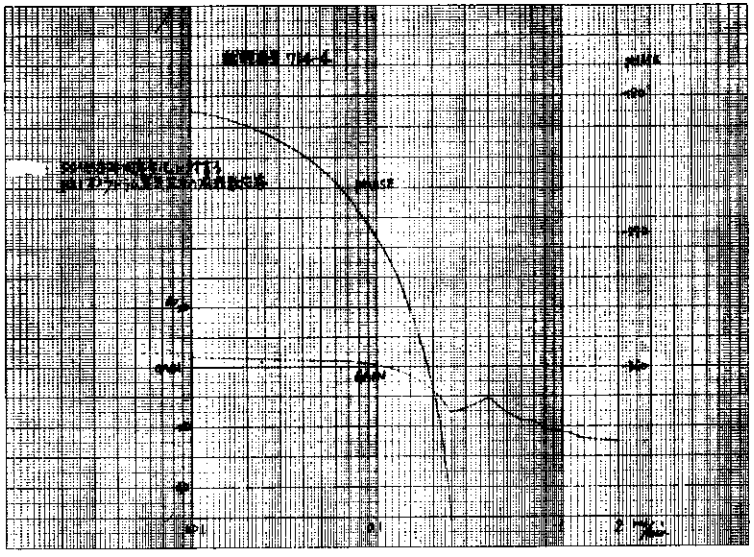
付図　140



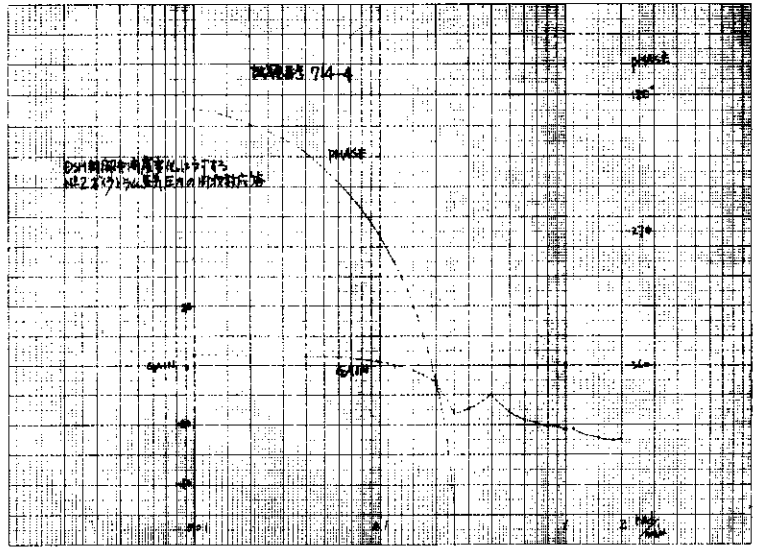
付図　141



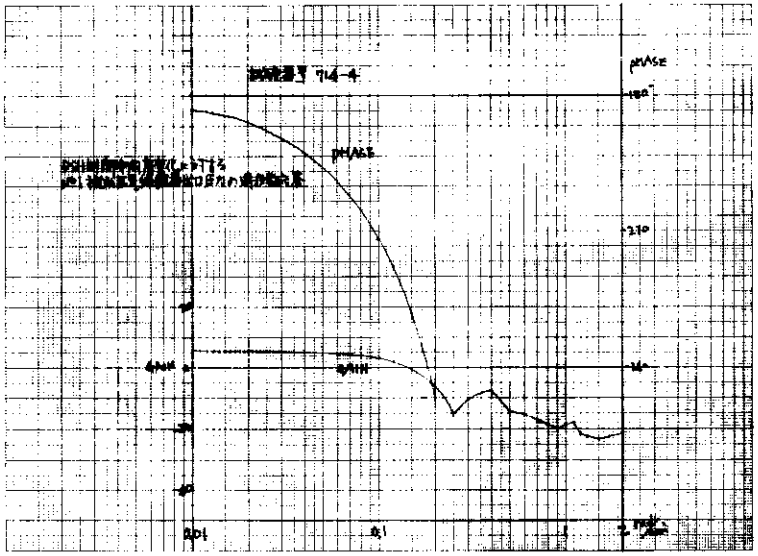
付図　142



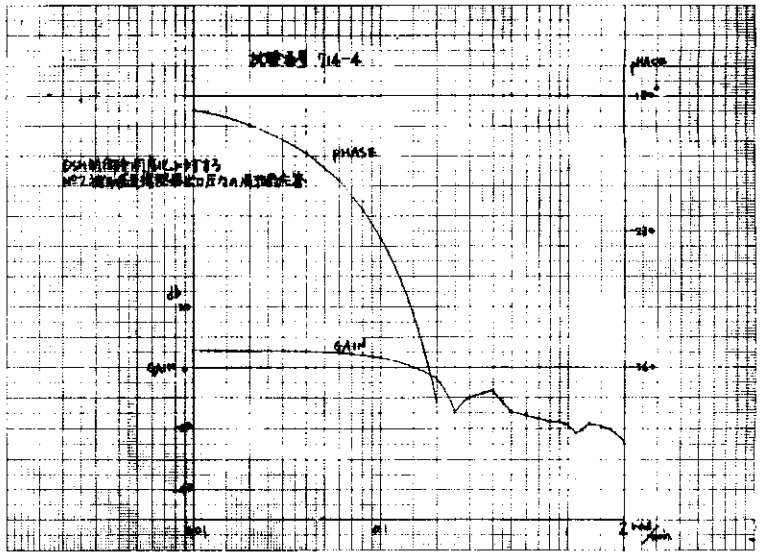
付図　143



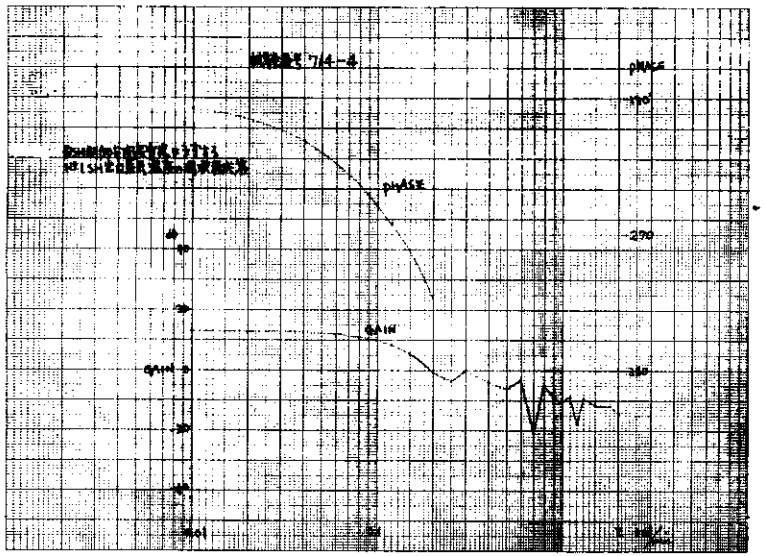
付図　144



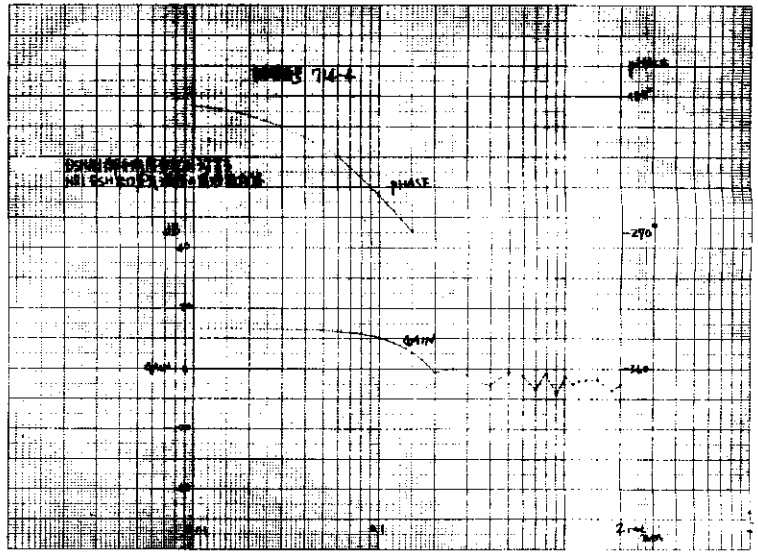
付図　145



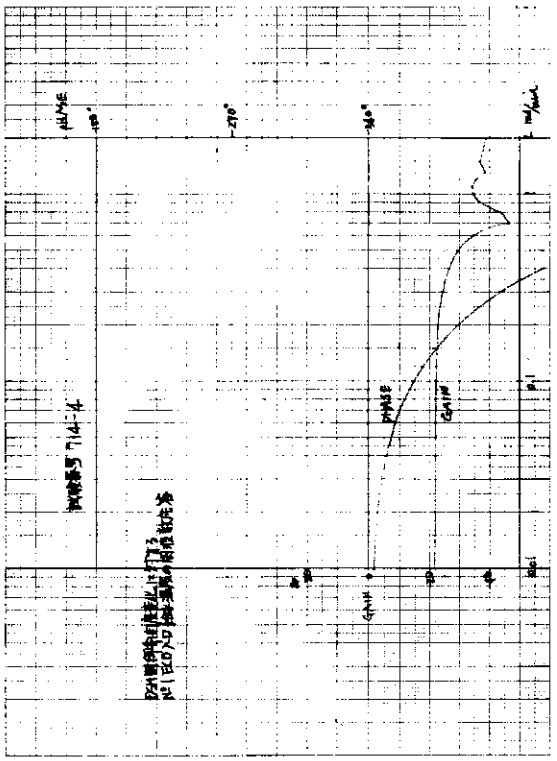
付図　146



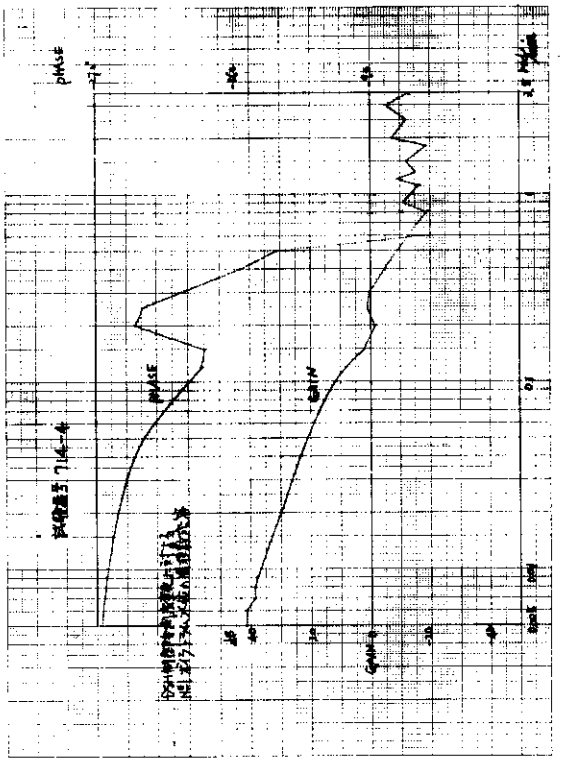
付図　147



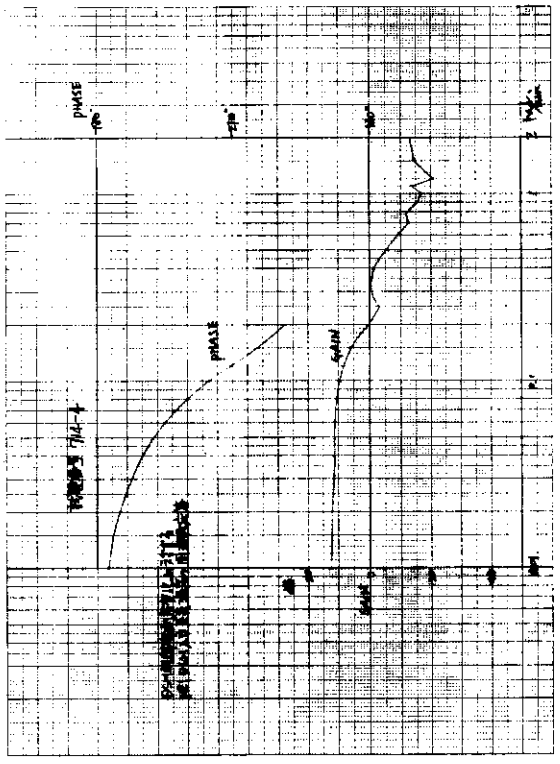
付図　148



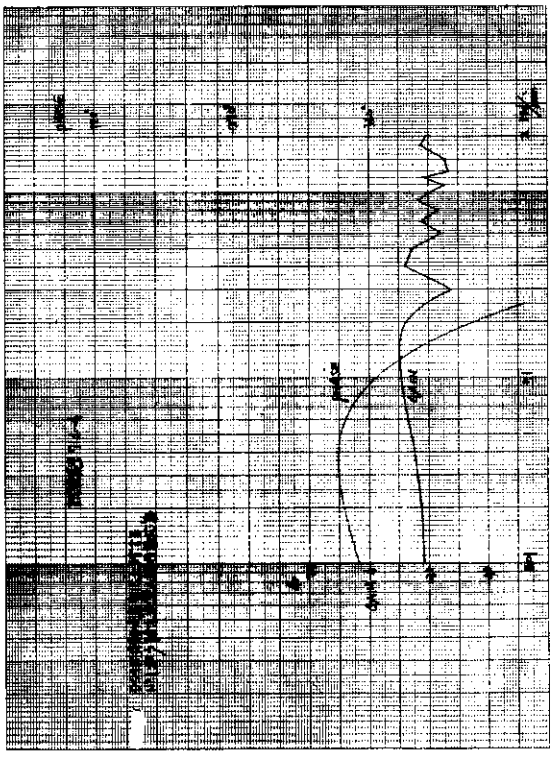
付図 150



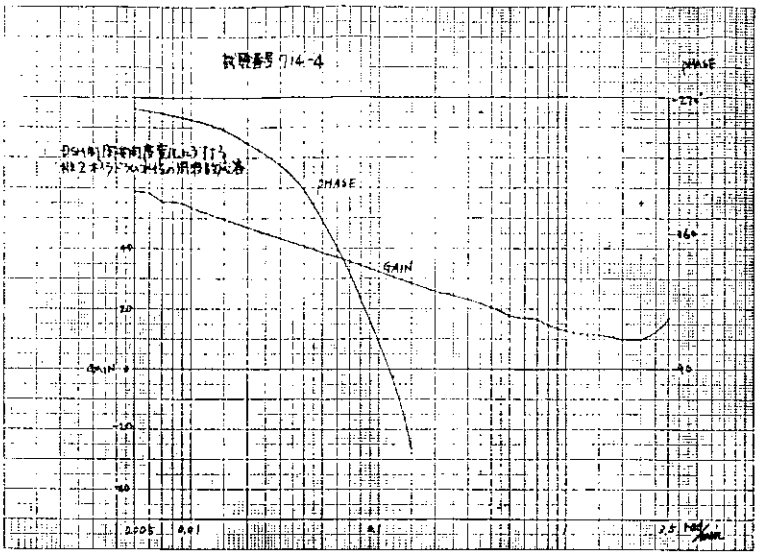
付図 152



付図 149



付図 151



付図　153

4. センサーの実験的研究

4.1 研究の目的

タービンの運転時の加速度振動スペクトラムを常時検知することにより、タービン内部の異常の有無をチェックし、また、異常発生時にはその異常の性格もある程度推定させようとする構想で44年度に始められた研究を、本年度も継続して実施した。

44年度の研究は、主として新造船の海上運転時に計測を実施し、いくつかの正常運転時のタービンの1/3オクターブバンドの加速度スペクトラムとその性格の一部が明らかになつた。その結果、タービンのある回転数以上の出力範囲では、振動加速度スペクトラムは狭い幅の中に納まることがわかり、この方法による異常検知が有効であるとの見通しが明るくなつた。

しかし、低回転時には回転数とスペクトラムの関係に乱れがあること、低周波領域で雑音を拾う場合があること、また、比較的回転数の低いとき、ある周波数で加速度レベルが特異的に高くなることがあるなど、法則性を把握しがたいいくつかの問題も提起された。それで、特に、回転数の低い場合や、船体や補機などの振動が主機タービンにおよぼす影響などを、さらに、深く調べる必要があることがわかつた。

45年度の研究は、上記の問題点に注目しながら海上運転時の計測を続け、正常運転時の振動加速度スペクトラムをできる限り数多く集積してその性質を糾明する一方、就航した船に1航海乗組んで実際の航海中に計測を行ない、数種の周波数バンドに対する正常運転時の加速度レベルを基準として、異常を発見することが可能かどうか、および外洋航海時と海上運転時とで音響のパターンに差がないかについて調べた。

4.2 研究経過

45年度の第1回小委員会（4月28日）で、本年度に行なう海上運転時の具体的な計測方法を決め、第2回小委員会（5月24日）で、タービン内部異常検知の実船実験方法についての方針を決めた。第3回小委員会（9月29日）ではそれまでの計測結果の中間検討を行ない、また外洋航海時の実船実験の方法についてさらに詳細に検討した。44年度の計測結果および45年度のこの時点までの計測では、タービンの正常運転時のデータだけしか得られず、タービン内部に異常が発生した場合に、加速度スペクトラムがどのような形になつて現われるかについては不明のままであつた。異常時の振動加速度スペクトラムの傾向がわかれば、タービン内部の異常の検知方法もさらに進歩するものと考えられるので、同委員会で異常状態のシミュレート実験についての方針を立案した。第4回小委員会（46年2月4日）では、45年度の計測結果について総合的な検討を行ない第5回小委員会（2月24日）および第6回小委員会（3月16日）で報告書についての検討を行なつた。

45年度の計測の概要をつぎに示す。

① 正常音の集積

	計測日	計測担当会社	タービン			造船所
			メーカ	最大出力／回転数	型式	
第1回計測	45年 5月19日～24日	日立	三菱	30,000PS／87rpm	MT300－3	日立
第2回計測	45年 7月 8日～11日	石播	石播	36,000PS／93rpm	{MH51 ML41	石播
第3回計測	45年 7月17日	三菱	三菱	36,000PS／90rpm	MS36	三菱
第4回計測	45年 9月 8日～10日	石播	石播	28,000PS／95rpm	{MH21 ML31	石播
第5回計測	45年 9月 9日～11日	日立	三菱	30,000PS／87rpm	MT300－3	日立

	計測日	計測担当会社	タービン			造船所
			メーカ	最大出力／回転数	型式	
第6回計測	45年10月26日 11月3日～5日	日本鋼管	三菱	31,000PS／85rpm	MS32	日本鋼管
第7回計測	45年11月25日～28日	日立	川重	30,000PS／87rpm	UA－310	日立

② タービン内部異常検知の実船実験

計測月日 ： 45年11月1日～12月6日

計測担当会社 ： 三菱重工業

タービンメーカ ： 三菱重工業

タービン型式 ： MS36

定格出力／回転数 ： 34,000PS／90rpm

造船所 ： 三菱重工業

③ タービン内部接触のシミュレート実験

実験月日 ： 45年12月26日～28日

実験担当会社 ： 日立造船

4.3 正常音パターンの集積

44年度の計測によつて、タービンメーカの違いによる加速度スペクトラムの比較を行なつたが、45年度は、さらに同型のタービンを異なつた船に搭載した場合のスペクトラムについて比較した。

また、44年度の計測結果の解析から、主機の周囲条件の影響を明らかにする必要のあることが認められたので、主機の周囲条件でスペクトラムに影響を与える主要現象としてつぎの3項目を考え、重点を置いて計測を行なつた。

① 補機の運転状態の影響

補機の運転がタービン軸受部で採つた計測値に与える影響を調べるために、補機の運転状態を明らかにして計測した。本計測では荷油ポンプ、空気圧縮機の運転の有無が最も大きく影響を与えると考え、それらの運転状態の影響について明らかにした。

② 操舵の影響

操舵の影響を調べるために、45年度は旋回中にも計測を実施し、直進の場合と比較した。

③ 載荷状態の影響

満載状態とバラスト状態について計測し、載荷状態の影響を明らかにした。

また、44年度の研究で、正常音のスペクトラムのパターンを設定する上で、さらに検討を必要とするとされた事象について、十分な結論を得られるよう、下記の項目に特に注意して計測を行なつた。

① 低回転時の計測

44年度の計測結果によれば、低回転時において、回転数とスペクトラムの関係に乱れがあること、比較的回転数の低いとき、ある周波数で加速度レベルが特異的に高く現われるなどの現象があつたので、これらの点について明らかにするために低回転時の計測を行なつた。

② 低周波領域での計測値のばらつきについて

44年度の計測では、低周波領域の計測値にばらつきがあつたので計測方法に注意しながら計測した。また非接触型振動計を軸受に設置して軸と軸受との相対振動を計測し、低周波領域における軸振動の様子を調べ、加速度振動計を軸受カバー上部に設置した場合のスペクトラムとの差を調べた。

③ 時間的な変動

同一運転状態で長時間経過した場合のレベルの変化を調べるために、同一タービンで日をちがえて計測した。また、整定時における4分間あるいは1分間というような短時間内のレベルの平均値の変動についても調べた。また、タービンの熱的な影響を調べるために、ある回転数に上昇した直後から回転整定中に10分ごとに5回計測した。

第1回計測

① 計　測　日　昭和45年5月19日～24日

② 運転状態　海上運転、バラスト状態および満載状態

③ タービン要目

型　式	MT300－3（三菱重工製）
連続最大出力	30000PS／87rpm
常用出力	30000PS／87rpm
蒸気条件	60Kg／cm²×510℃
主復水器真空	722mmHg

	高圧タービン	低圧タービン	後進タービン
段落数	8	8	カーチス1　ラト－2
NCR時回転数	5548	3582	2470
MCR時回転数	5548	3582	
危険回転数	4300	5700	

④ 主減速装置要目

	高圧タービン側				低圧タービン側		
	第1段減速		第2段減速			第1段減速	
	小歯車	大歯車	小歯車	大歯車	小歯車	大歯車	小歯車
歯数	51	451	71	512	79	451	71
回転数	5548	627.4		87	563.9		3582

⑤ プロペラ翼数　5枚

軸系ねじり振動共振点　47rpm

第2回計測

① 計　測　日　昭和45年7月8日～11日

② 運転状態　海上運転、バラスト状態

③ タービン要目

型　式	HH31，HL41（石播製）
連続最大出力	360000PS／93rpm
常用出力	324000PS／90rpm
蒸気条件	59.8Kg／cm²×510℃
主復水器真空	722mmHg

	高圧タービン	低圧タービン	後進タービン
段落数	9	8	2列カーチス2段
NCR時回転数	6499	3241	2268
MCR時回転数	6715	3349	
危険回転数	3691	2526	

④ 主減速装置要目

	高圧タービン側				低圧タービン側		
	第1段減速		第2段減速			第1段減速	
	小歯車	大歯車	小歯車	大歯車	小歯車	大歯車	小歯車
歯数	37	287	55	512	55	205	53
回転数	6715	865.7		93	865.7		3349

⑤ プロペラ翼数　　5枚

軸系ねじり振動共振点　　45.3 rpm

第3回計測

① 計　測　日　　昭和45年7月17日

② 運 転 状 態　　海上運転、バラスト状態

③ タービン要目

型　　式	MS36（三菱重工業製）
連続最大出力	36000PS／90rpm
常用出力	36000PS／90rpm
蒸気条件	60Kg／cm²・g×510℃
主復水器真空	722mmHg

	高圧タービン	低圧タービン	後進タービン
段落数	9	8	カーチス1 ラト−2
NCR時回転数	6485	3155	2240
MCR時回転数	6485	3155	
危険回転数	4100	3000	

④ 主減速装置要目

	高圧タービン側				低圧タービン側		
	第1段減速		第2段減速			第1段減速	
	小歯車	大歯車	小歯車	大歯車	小歯車	大歯車	小歯車
歯数	43	292	49	520	61	292	71
回転数	6485	955		90	767.2		3155

⑤ プロペラ翼数　　5枚

軸系ねじり振動共振点　　43.1 rpm

第4回計測

① 計　測　日　　昭和45年9月8日～10日

② 運 転 状 態　　海上運転、バラスト状態

③ タービン要目

型　　式	NH21、NL31（石播製）
連続最大出力	28000PS／95rpm
常用出力	28000PS／95rpm
蒸気条件	59.8Kg／cm²・g×510℃
主復水器真空	722mmHg

	高圧タービン	低圧タービン	後進タービン
段落数	9	8	2列カーチス2段
NCR時回転数	6512	3293	2305
MCR時回転数	6512	3293	
危険回転数	3755	2433	

④ 主減速装置要目

	高圧タービン側				低圧タービン側		
	第1段減速		第2段減速			第1段減速	
	小歯車	大歯車	小歯車	大歯車	小歯車	大歯車	小歯車
歯数	46	469	76	511	76	299	58
回転数	6512	639		95	639		3293

⑤ プロペラ翼数　　5枚

軸系ねじり振動共振点　　41.5rpm

第5回計測

① 計測日　　昭和45年9月9日～11日

② 運転状態　　海上運転、バラスト状態

③ タービン要目

型式	MT300－3（三菱重工製）
連続最大出力	30000PS／87rpm
常用出力	30000PS／87rpm
蒸気条件	60Kg／cm²×510℃
主復水器真空	722mmHg

	高圧タービン	低圧タービン	後進タービン
段落数	8	8	カーチス1　ラト－2
NCR時回転数	5548	3582	2470
MCR時回転数	5548	3582	
危険回転数	4300	5700	

④ 主減速装置要目

	高圧タービン側				低圧タービン側		
	第1段減速		第2段減速			第1段減速	
	小歯車	大歯車	小歯車	大歯車	小歯車	大歯車	小歯車
歯数	51	451	71	512	79	451	71
回転数	5548	627.4		87	563.9		3582

⑤ プロペラ翼数　　5枚

軸系ねじり振動共振点　　47rpm

第6回計測

① 計測日　　昭和45年10月26日および11月3日～4日

② 運転状態　　海上運転、満載状態およびバラスト状態

③ タービン要目

型　　式	MS32（三菱重工製）
連続最大出力	31000PS／85rpm
常用出力	31000PS／85rpm
蒸気条件	60Kg／cm²・g×510℃
主復水器真空	722mmHg

	高圧タービン	低圧タービン	後進タービン
段落数	9	7	カーチス2
NCR時回転数	6424	3991	2800
MCR時回転数	6424	3991	
危険回転数	4100	4100	

④　主減速装置要目

	高圧タービン側				低圧タービン側		
	第1段減速		第2段減速		第1段減速		
	小歯車	大歯車	小歯車	大歯車	小歯車	大歯車	小歯車
歯数	41	292	49	520	61	292	53
回転数	6424	902		85	724.6		3991

⑤　プロペラ翼数　　6枚

軸系ねじり振動共振点　　37.6rpm

第7回計測

①　計測日　　昭和45年11月25日～28日

②　運転状態　　海上運転、バラスト状態

③　タービン要目

型　　式	UA－310（川重製）
連続最大出力	30000PS／87rpm
常用出力	30000PS／87rpm
蒸気条件	60Kg／cm²・g×510℃
主復水器真空	722mmHg

	高圧タービン	低圧タービン	後進タービン
段落数	10	8	カーチス2列2段
NCR時回転数	4896	3282	2300
MCR時回転数	4896	3282	
危険回転数	3916	4614	

④　主減速装置要目

	高圧タービン側				低圧タービン側		
	第1段減速		第2段減速		第1段減速		
	小歯車	大歯車	小歯車	大歯車	小歯車	大歯車	小歯車
歯数	39	365	78	469	85	335	49
回転数	4896	523		87	480		3282

⑤　プロペラ翼数　　5枚

軸系ねじり振動共振点　　46rpm

4.3.1 計測方法

45年度の計測に使用した計器の概略を第4.3.1～4.3.5表に示す。加速度検出器の取り付け位置は44年度と同様、タービンの船尾側の軸受カバーの上部とし（第4.3.1図参照）、加速度検出器の取り付け方法も44年度と同じとした。（第4.3.2図参照）

第4.3.1表　第1回計測の計測器要目

計測器	メーカおよび型名	概略仕様	
加速度検出器	EMIC 541－AT	感度	50.0（HP） 53mVPeak／GPeak（LP）
		周波数範囲	0～10KHz
		共振周波数	33KHz（HP） 32KHz（LP）
前置増幅器	IMV. VM4300M	S／N	40dB以上
		周波数範囲	5Hz～15KHz
		出力電圧	1V
データレコーダ	NAGRA GUDELSKI－Ⅲ	記録トラック数	DIRECT 1ch.
		周波数範囲	20Hz～10KHz
		記録入力	±1V
		再生出力	±1V
		テープ速度	19.05cm／S
		テープ幅	¼inch
周波数分析器	B&K 2112	周波数範囲	25Hz～40KHz
		分析幅	1/3オクターブ
		選択度	50dB／oct
レベルレコーダ	B&K 2305	周波数範囲	10Hz～200KHz
		記録速度	4～2000mm／S
		送り速度	0.0003～100mm／S
		記録紙幅	100mm
非接触振動計	Indikon	周波数範囲	10Hz～1000Hz

第4.3.2表　第2回、第4回計測の計測器要目

計測器	メーカおよび型名	概略仕様	
加速度検出器	リオン PV－06	感度	11mV／g
		周波数範囲	2Hz～12500Hz
		共振周波数	25KHz
前置増幅器	リオン NA－51	S／N	50dB以上
		周波数範囲	20Hz～20
		出力電圧	2V
データレコーダ	TEAC R－410	記録トラック数	4ch.
		周波数範囲	0～10KHz
		記録入力	±1V～±20V
		再生出力	±1V

計測器	メーカおよび型名	概略仕様	
データレコーダ	TEAC R−410	テープ速度	30 inch/s
		テープ幅	¼ inch
周波数分析器	B&K 2112	周波数範囲	25Hz〜40KHz
		分析幅	⅓オクターブバンド
		選択度	50dB/oct
レベルレコーダ	B&K 2305	周波数範囲	10Hz〜200KHz
		記録速度	4〜2000㎜/s
		送り速度	0.0003〜100㎜/s
		記録紙幅	100㎜

第4.3.3表　第3回計測の計測器要目

計測器	メーカおよび型名	概略仕様	
加速度検出器	B&K 4333	感度	16.6PC/g
		周波数範囲	0〜9000Hz
		共振周波数	60KHz
前置増幅器	B&K 1606	S/N	40dB以上
		周波数範囲	2.0Hz〜20KHz
		出力電圧	±10V
データレコーダ	PHILIPS ANA−LOG 7	記録トラック数	7 ch.
		周波数範囲	0〜5KHz
		記録入力	1Vrms
		再生出力	1Vrms
		テープ速度	15inch/s
		テープ幅	½inch
周波数分析器	リオン SA−20	周波数範囲	25Hz〜20KHz
		分析幅	⅓オクターブ
		選択度	50dB/oct
レベルレコーダ	リオン SA−20	周波数範囲	25Hz〜20KHz
		記録速度	直視式
		送り速度	— *
		記録紙幅	— *

＊　周波数分析器とレベルレコーダは一体型であり、分析結果はブラウン管に表示される。

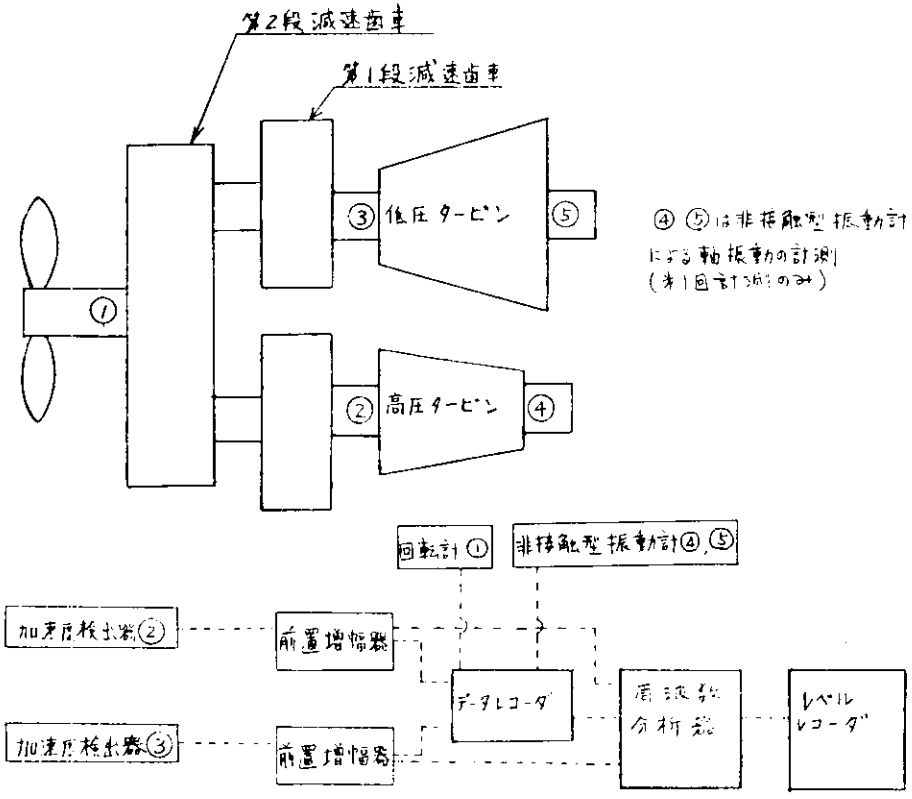
第4.3.4表　第5回，第7回計測の計測器要目

計測器	メーカおよび型名	概略仕様	
加速度検出器	B&K	感度	1.68PC/g(HP)、2.31PC/g(LP)
		周波数範囲	0〜100KHz
		共振周波数	130KHz(HP)、129KHz(LP)

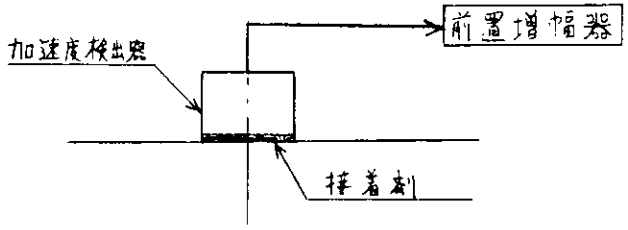
計測器	メーカおよび型名	概略仕様	
前置増幅器	IMV. VM4300M	S／N	40dB以上
		周波数範囲	5Hz～15KHz
		出力電圧	1V
データレコーダ	NAGRA GUDELSKI－Ⅲ	記録トラック数	DIRECT 1ch.
		周波数範囲	20Hz～10KHz
		記録入力	±1V
		再生出力	±1V
		テープ速度	19.05cm／s
		テープ幅	$\frac{1}{4}$inch
周波数分析器	B&K 2112	周波数範囲	25Hz～40KHz
		分析幅	1/3オクターブ
		選択度	50dB/oct
レベルレコーダ	B&K 2305	周波数範囲	10Hz～200KHz
		記録速度	4～2000mm／s
		送り速度	0.0003～100mm／s
		記録紙幅	100mm

第4.3.5表　第6回計測の計測器要目

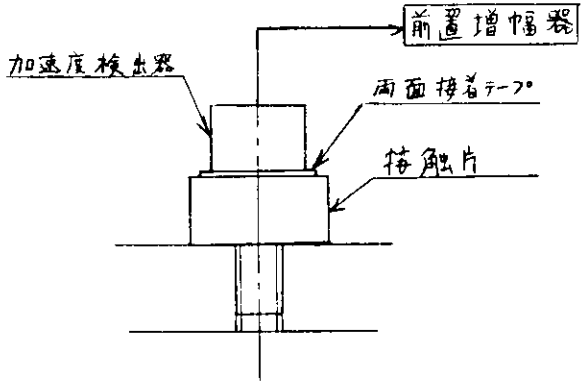
計測器	メーカおよび型名	概略仕様	
加速度検出器	B&K	感度	1.68PC／g(HP)、2.31PC／g(LP)
		周波数範囲	0～100KHz
		共振周波数	130KHz(HP)、129KHz(LP)
前置増幅器	IMV. VM4300M	S／N	40dB以上
		周波数範囲	5Hz～15KHz
		出力電圧	1V
データレコーダ	AKAI MODELY－N	記録トラック数	4ch.
		周波数範囲	40Hz～20KHz
		記録入力	1V
		再生出力	1.228V
		テープ速度	19.05
		テープ幅	$\frac{1}{4}$inch
周波数分析器	B&K 2112	周波数範囲	25Hz～40KHz
		分析幅	1/3オクターブ
		選択度	50dB/oct
レベルレコーダ	B&K 2305	周波数範囲	10Hz～200KHz
		記録速度	4～2000mm／s
		送り速度	0.0003～100mm／s
		記録紙幅	100mm



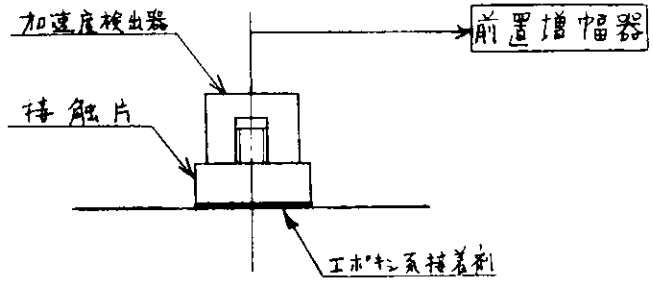
第 4. 3. 1 図　測定位置および計測ブロックダイヤグラム



第2回，第4回計測の取り付け方法



第3回計測の取り付け方法



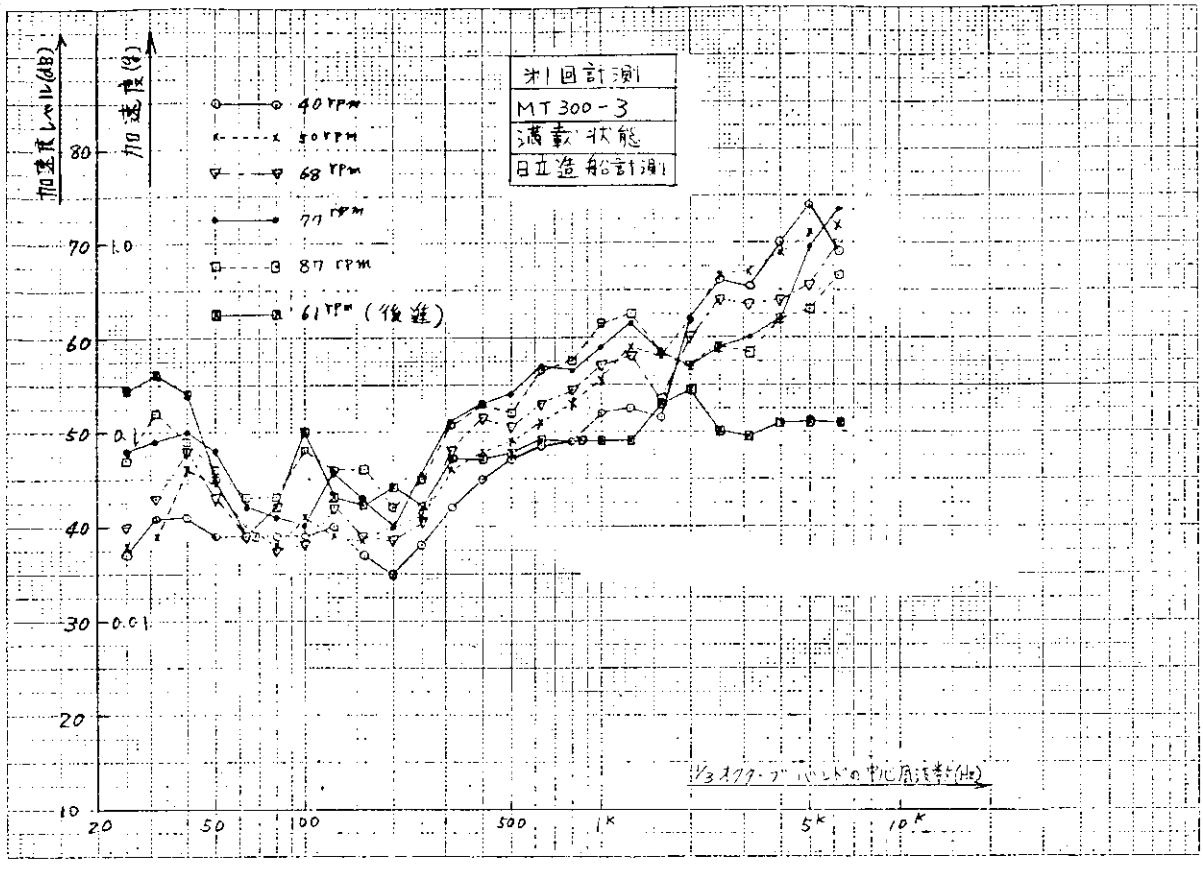
第 4. 3. 2 図　加速度検出器の取付け方法

4.3.2　計測結果

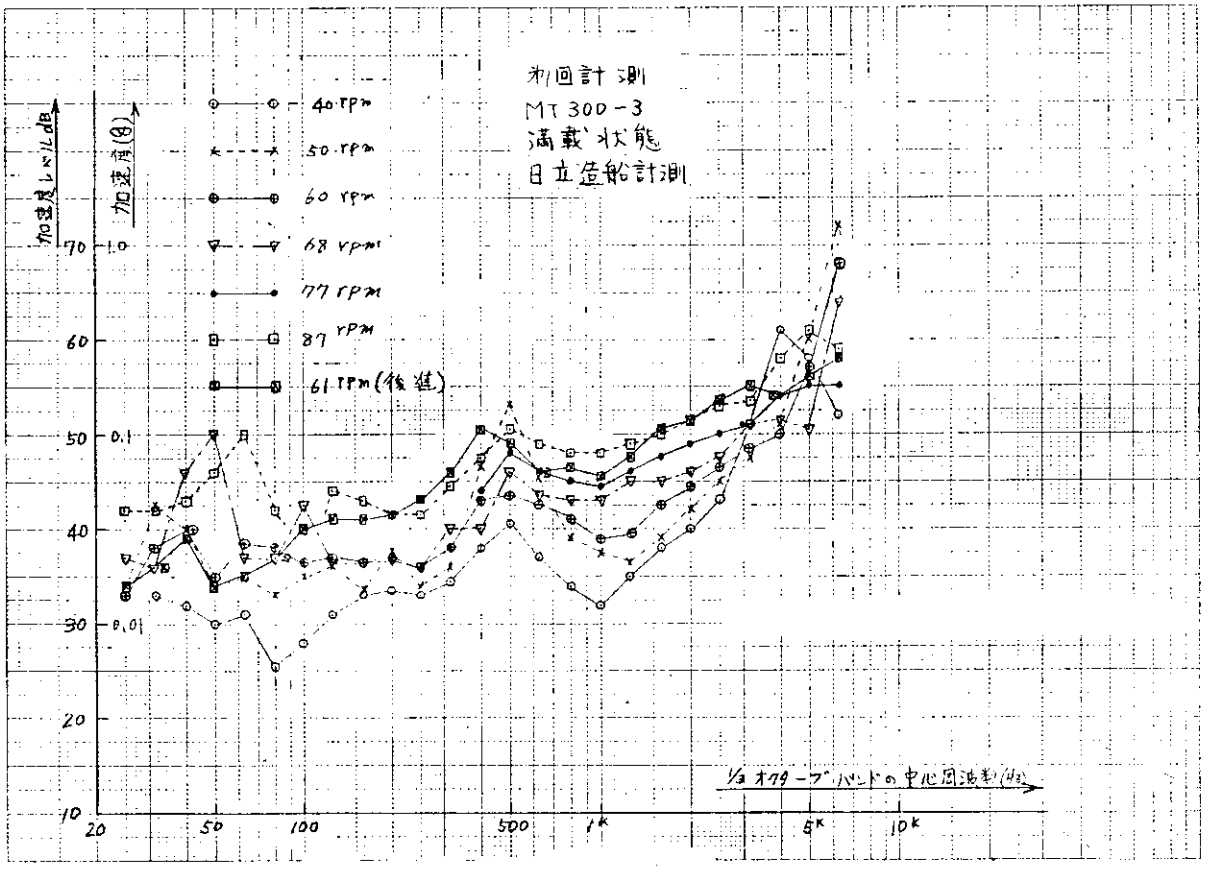
４５年度の計測によって得た結果を以下に示す。計測結果は４４年度と同様、周波数分析を行ない各バンドのレベルの平均値を求め1/3オクターブバンドのスペクトラムに表わして示す。

(1)　一般計測結果

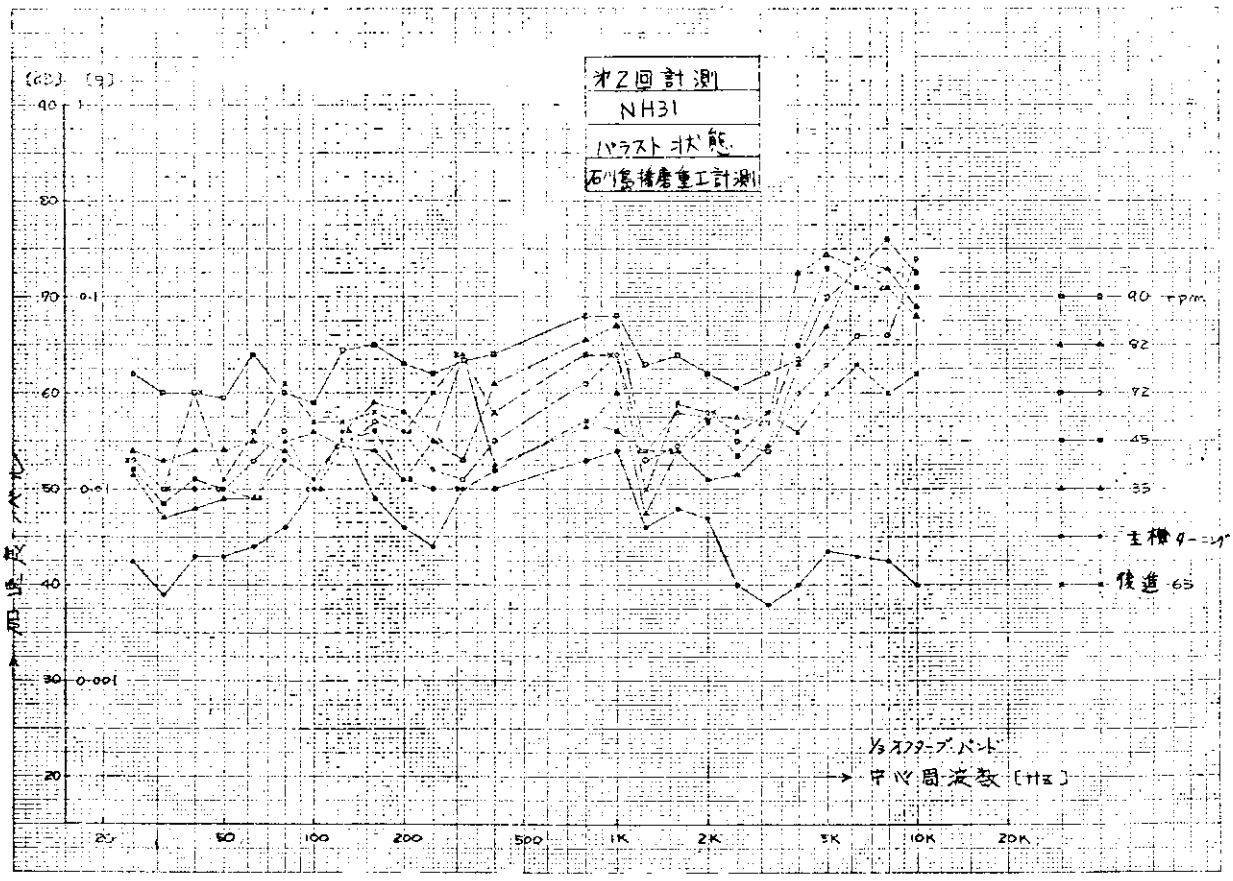
第4.3.3～4.3.15図には、４５年度の計測結果を示す。４５年度で計測した回転数範囲（30rpm～90rpm）では、レベルが10dB～15dB の巾の中に納まる。



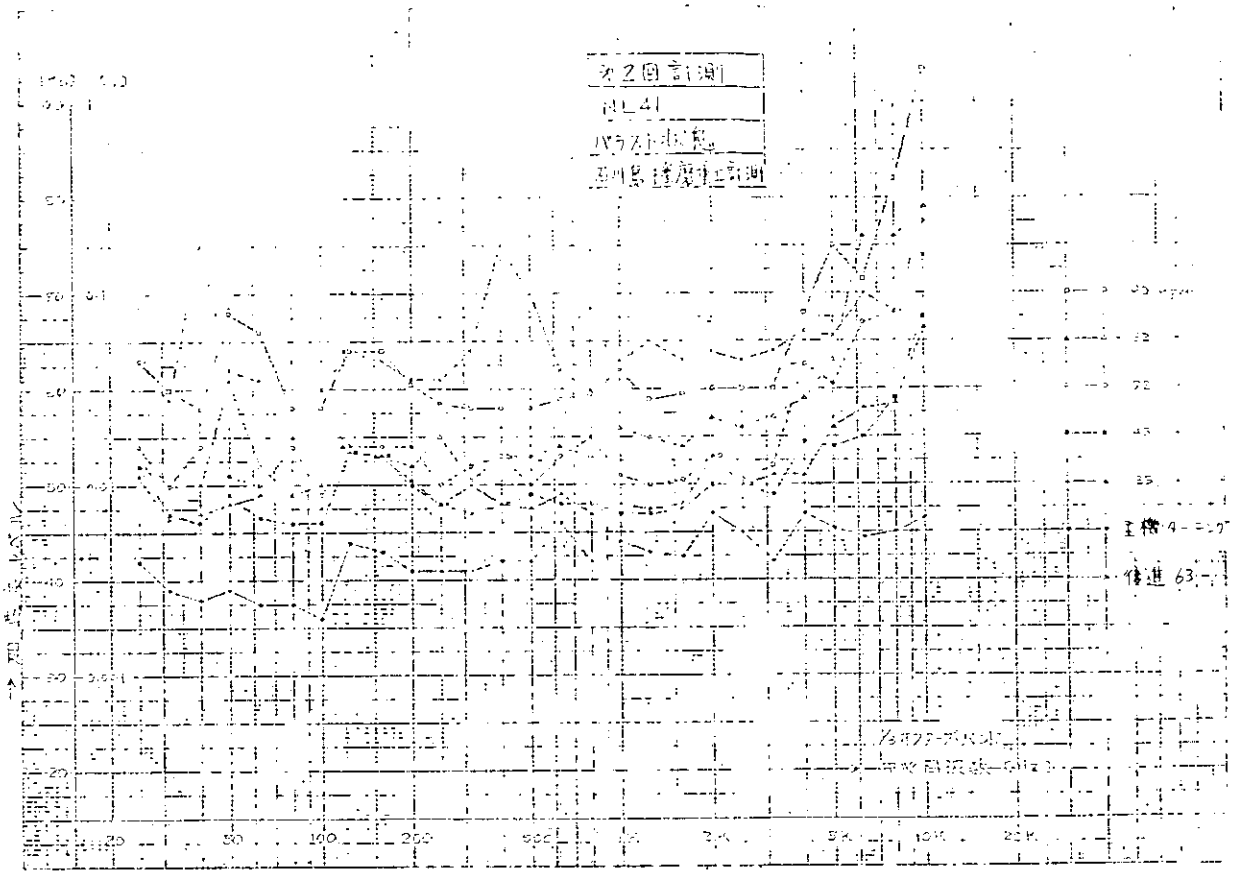
第4.3.3図　高圧タービン船尾側軸受振動



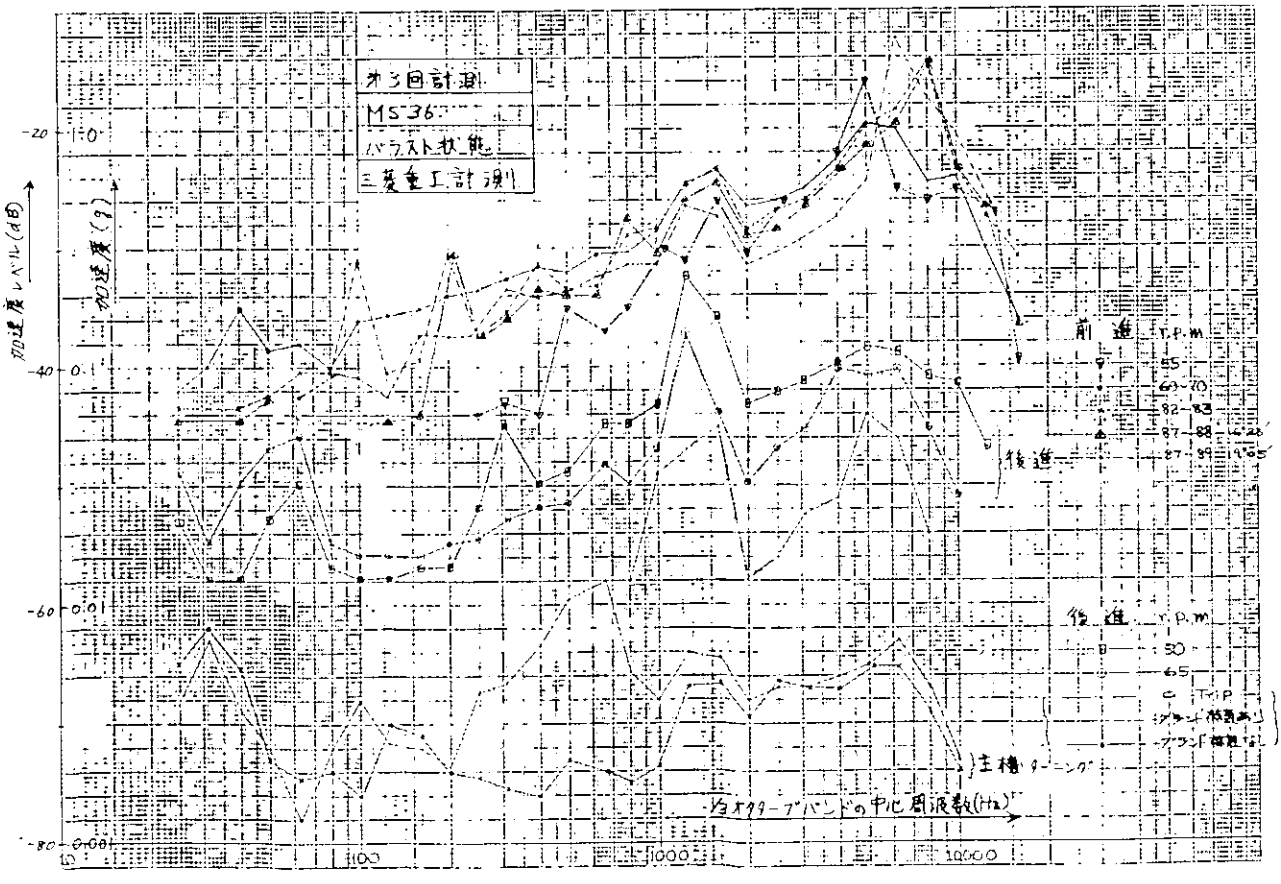
第4.3.4図　低圧タービン船尾側軸受振動



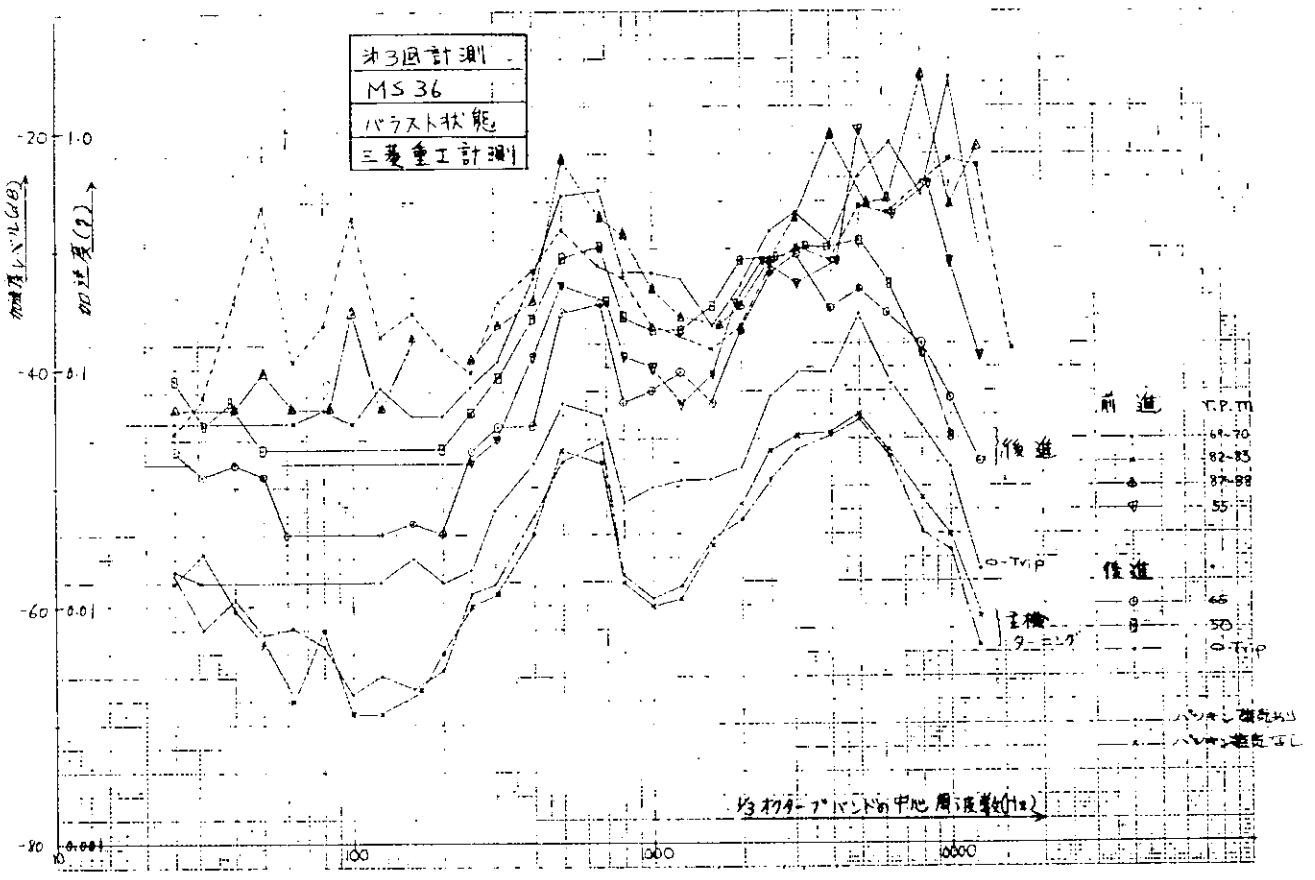
第4.3.5図　高圧タービン船尾側軸受振動



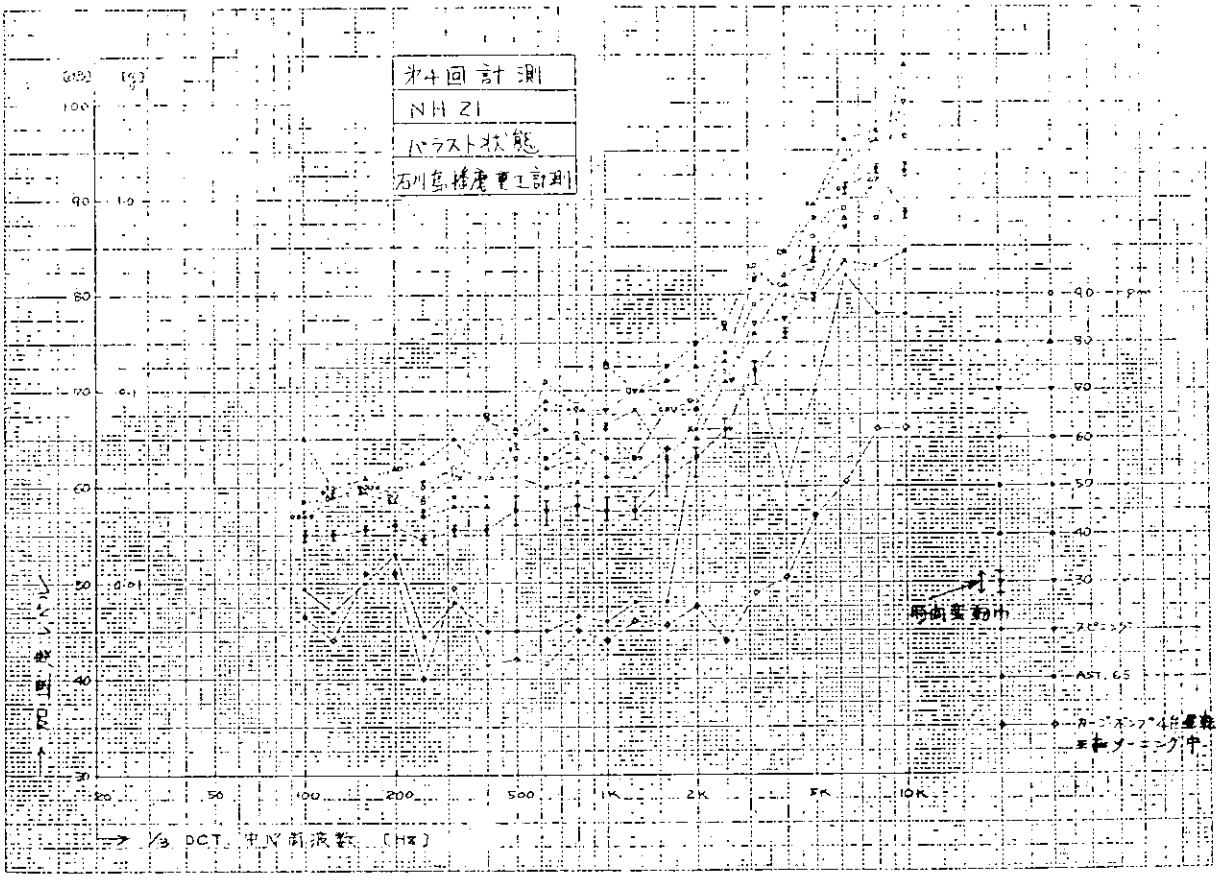
第4.3.6図　低圧タービン船尾側軸受振動



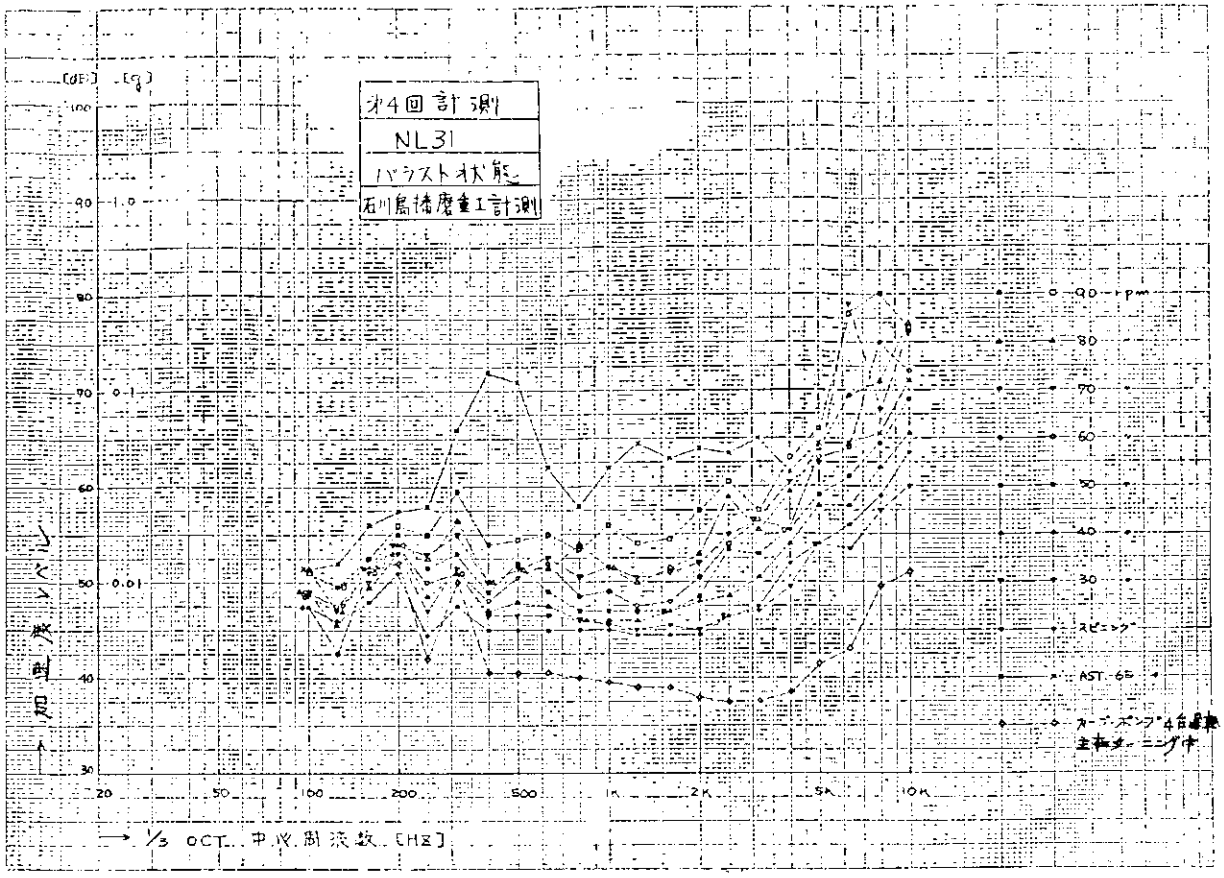
第4.3.7図　高圧タービン船尾側軸受振動



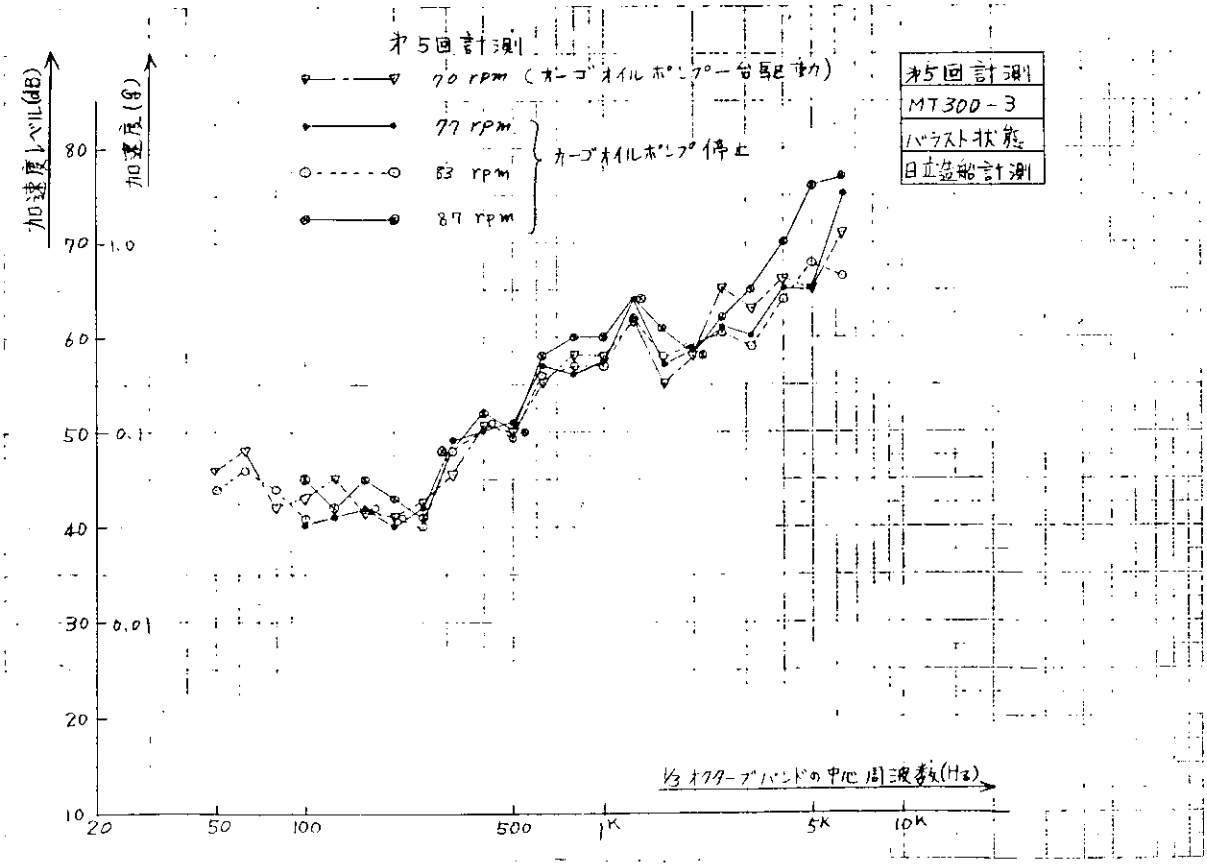
第4.3.8図　低圧タービン船尾側軸受振動



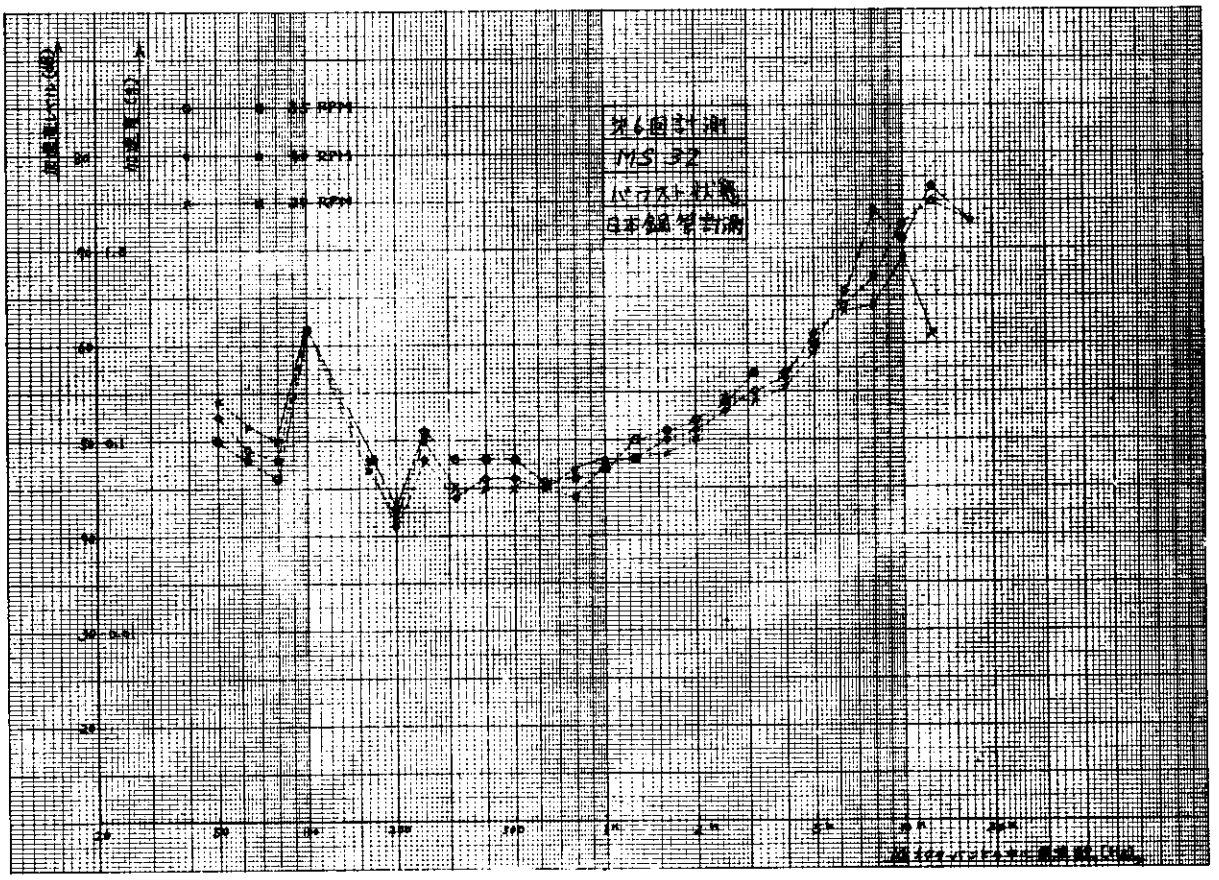
第4.3.9図　高圧タービン船尾側軸受振動



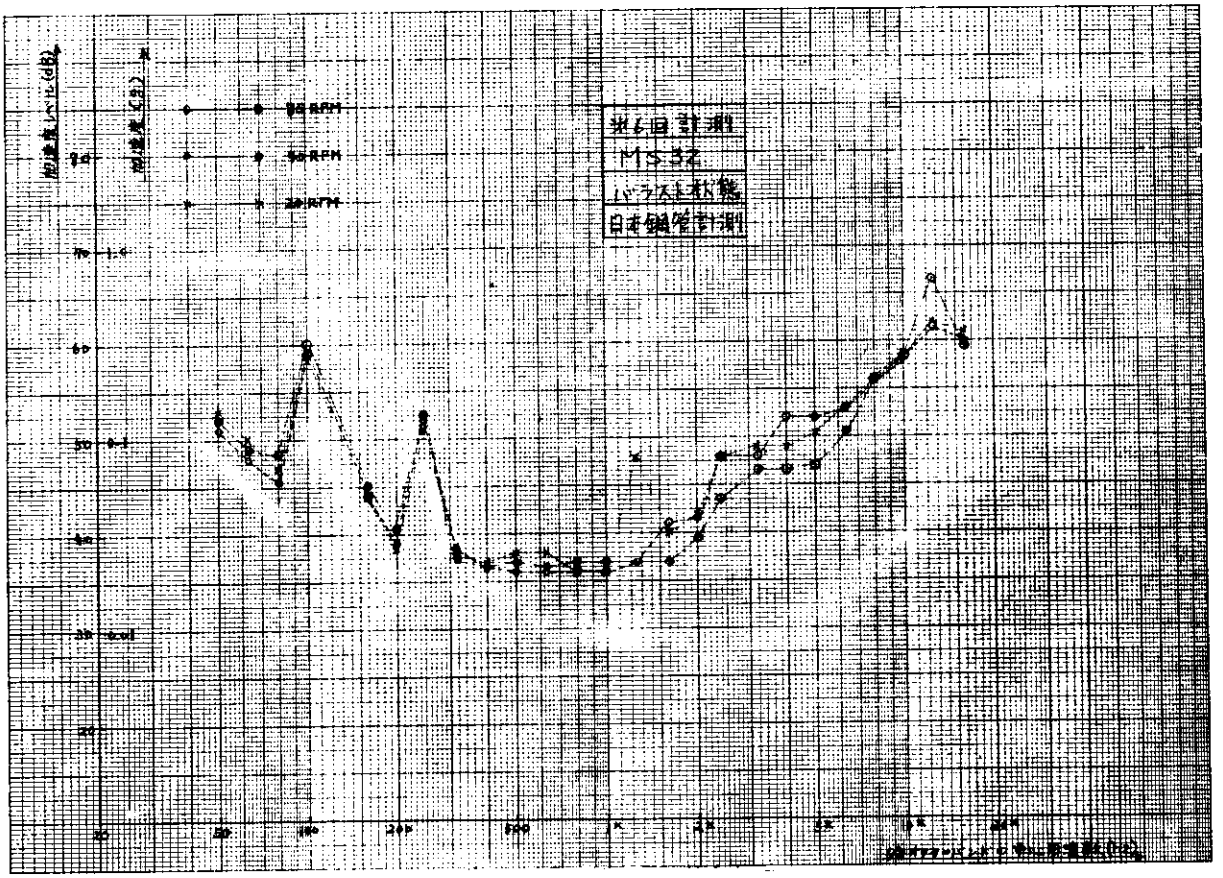
第4.3.10図　低圧タービン船尾側軸受振動



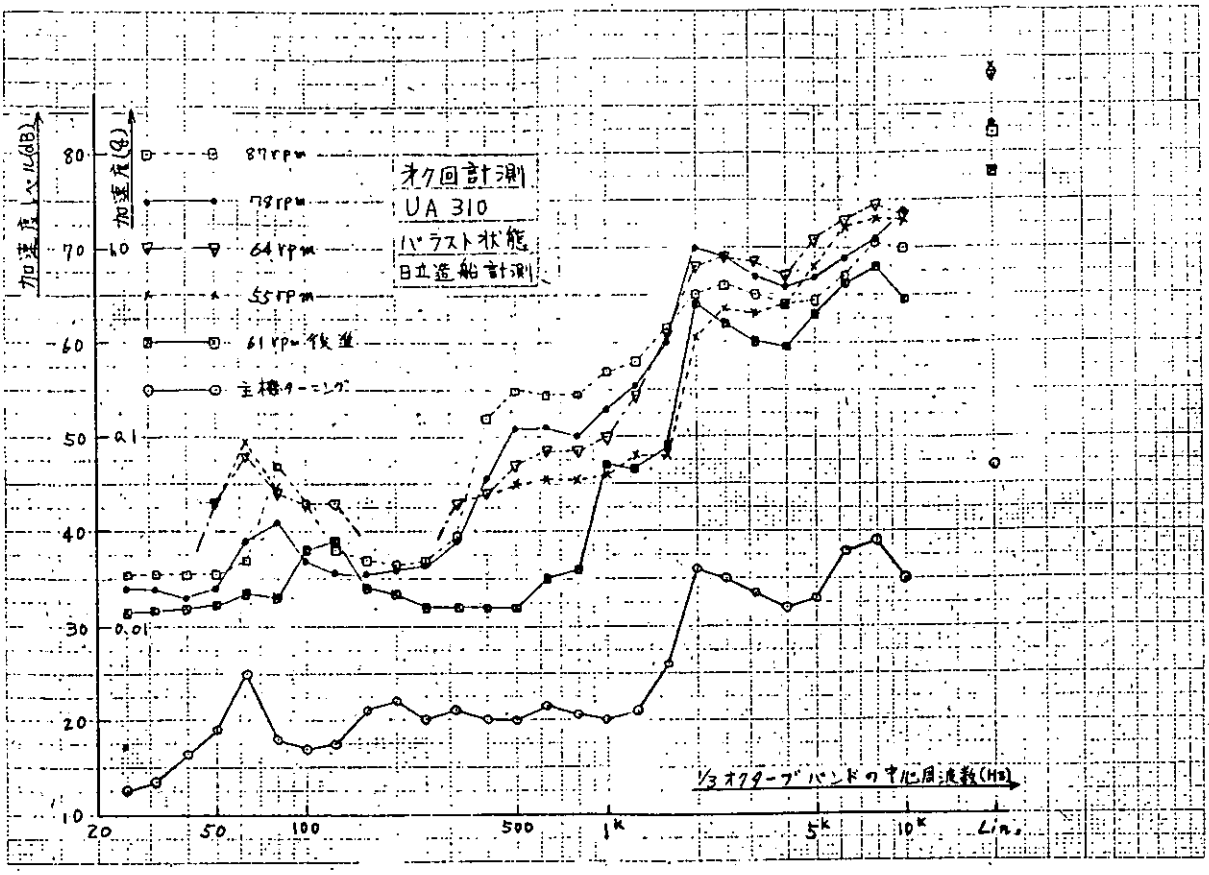
第4.3.11図　高圧タービン船尾側軸受振動



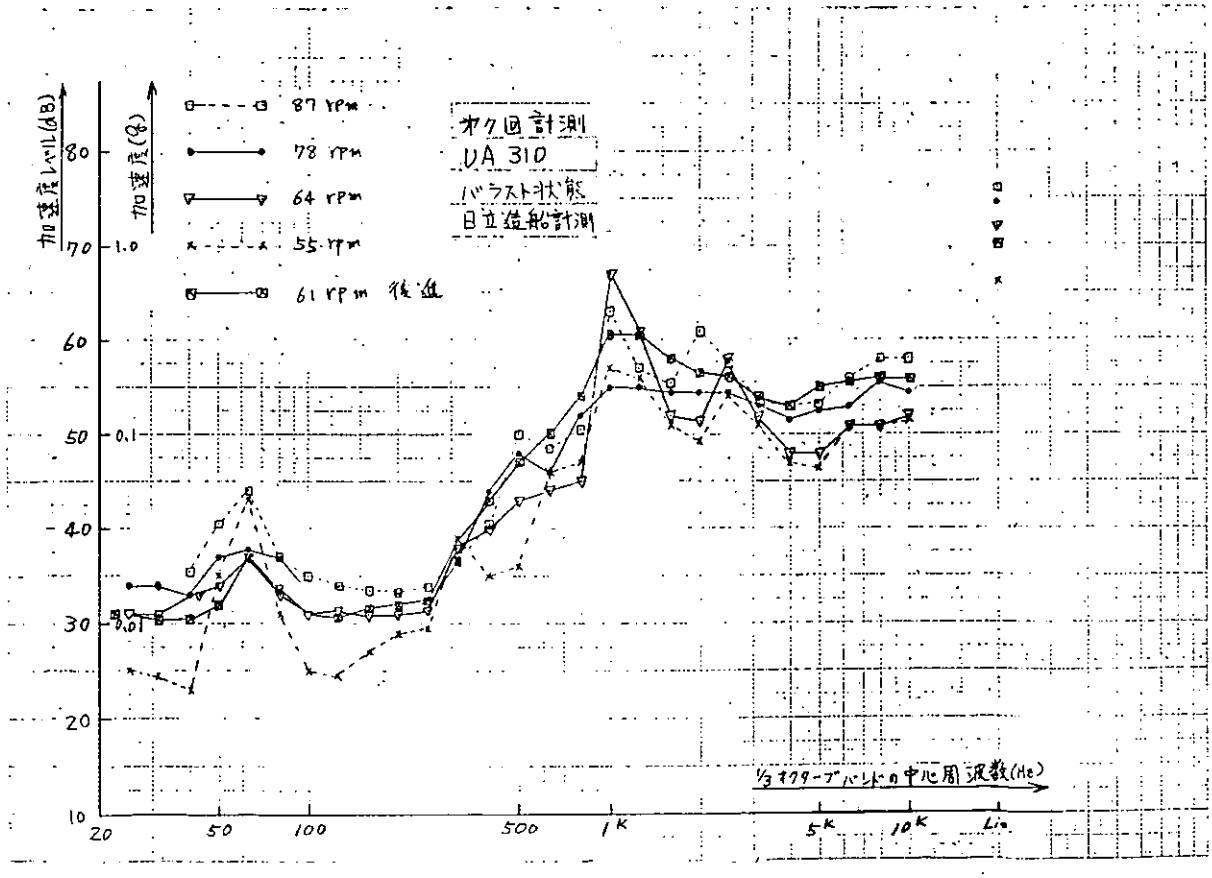
第4.3.12図　高圧タービン船尾側軸受振動



第4.3.13図　低圧タービン船尾側軸受振動



第4.3.14図　高圧タービン船尾側軸受振動



第4.3.15図　低圧タービン船尾側軸受振動

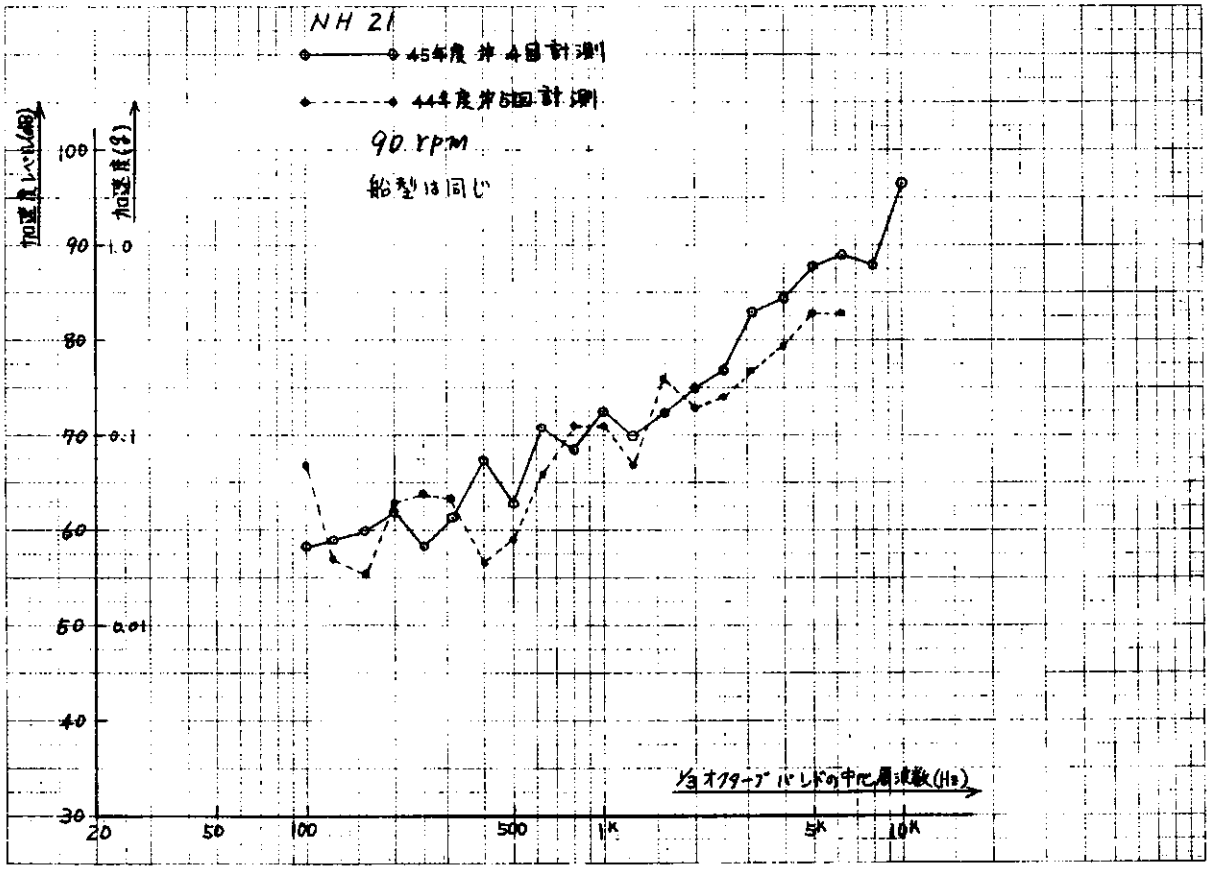
(2) タービン機種について

同型タービンにおける機差を調べるために、同型タービンを異なった船に搭載した場合のスペクトラムのうち、常用回転数、または、それに近い回転数のものを機種ごとに1枚の図にまとめて比較した。

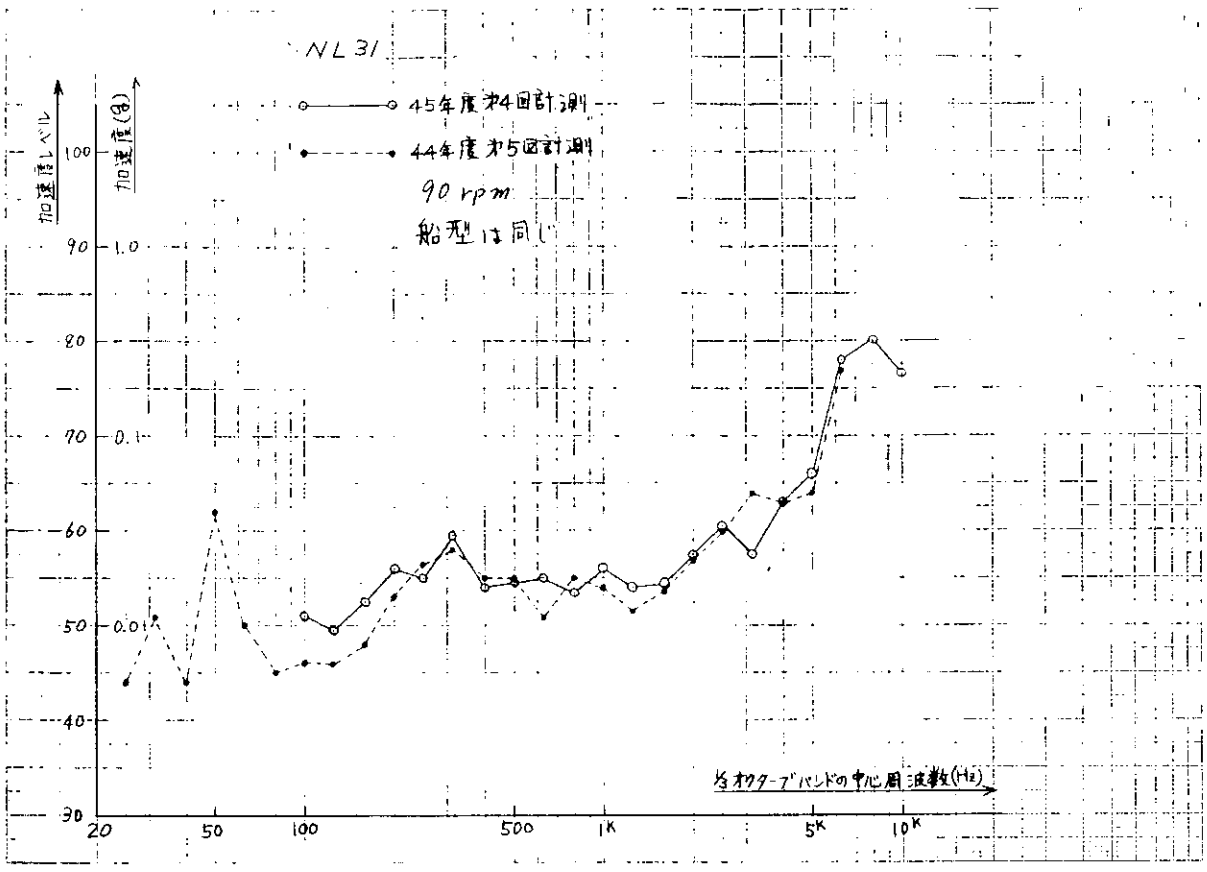
第4.3.16図および第4.3.17図に石播製タービン（NH21、NL31）の44年度の第5回計測と45年度の第4回計測の比較を示した（船型は同じ）。高圧タービンでは高周波領域（2000Hz以上）で約5dBの差が見られる。低圧タービンでは、ほとんど差はない。第4.3.18、4.3.19図は、三菱製タービン（MT300−3）の44年度の第4回計測と45年度の第1回計測、第5回計測の比較を示した（船型は同じ）。高圧タービンでは、400Hz以上の領域で44年度の計測値と45年度の計測値の差は約10dBである。

また、3000Hz以上の周波数領域では、今年度の計測値の間にも約5dB〜10dBの差が見られる。また、100Hz以下の低周波領域では、計測値にさらに大きな差がある。一方、低圧タービンでは、三者間には高圧タービンにおけるほど大差は見当らない。第4.3.20、4.3.21図は川重製タービン（UA−310）の44年度第6回計測と45年度第7回計測の比較を示す（船型は異なる）。高圧タービンでは、45年度の計測値と44年度の計測値の差は約5dB、低圧タービンでは10dB〜15dBぐらいである。

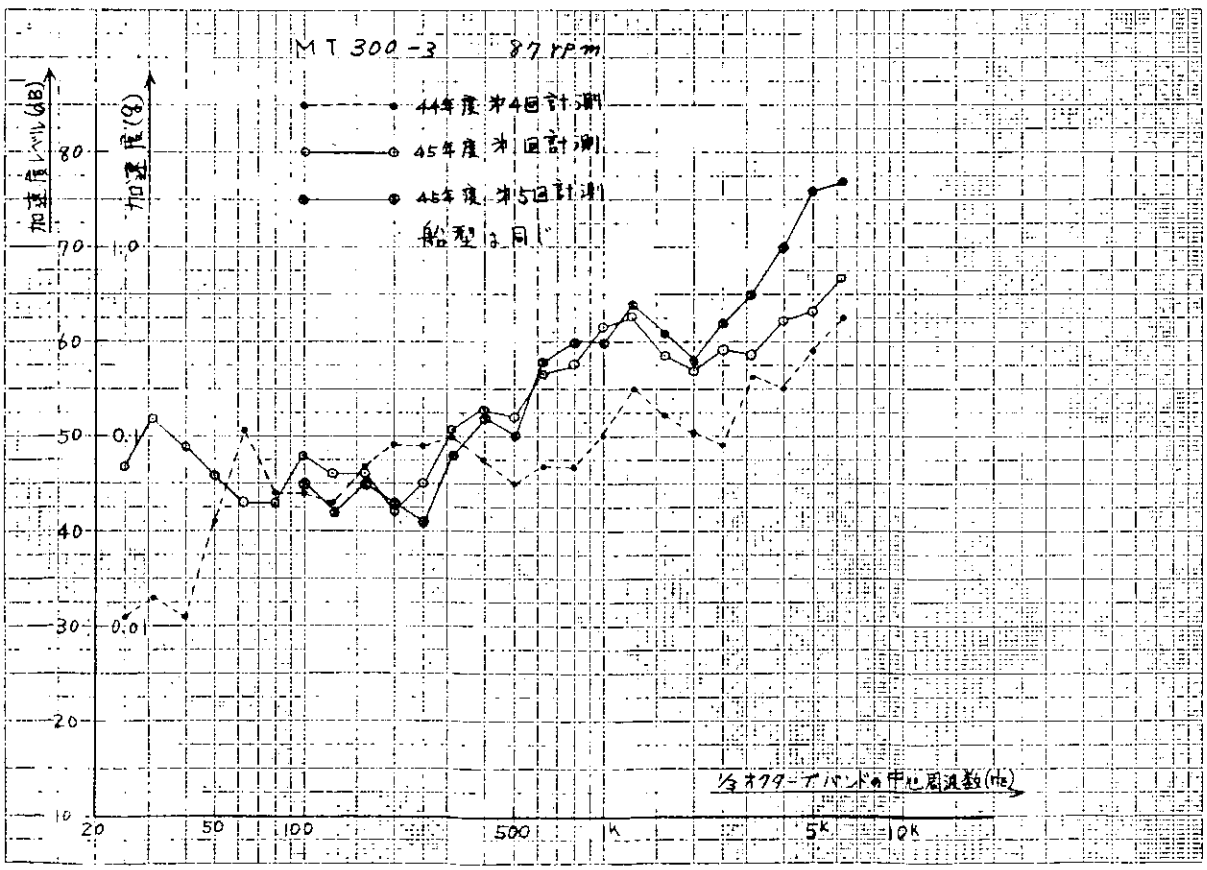
これらの比較によれば、同型のタービンにおいては加速度スペクトラムの傾向は同じであるが、加速度レベルはタービンごとに若干の差が現われると考えるべきであろう。



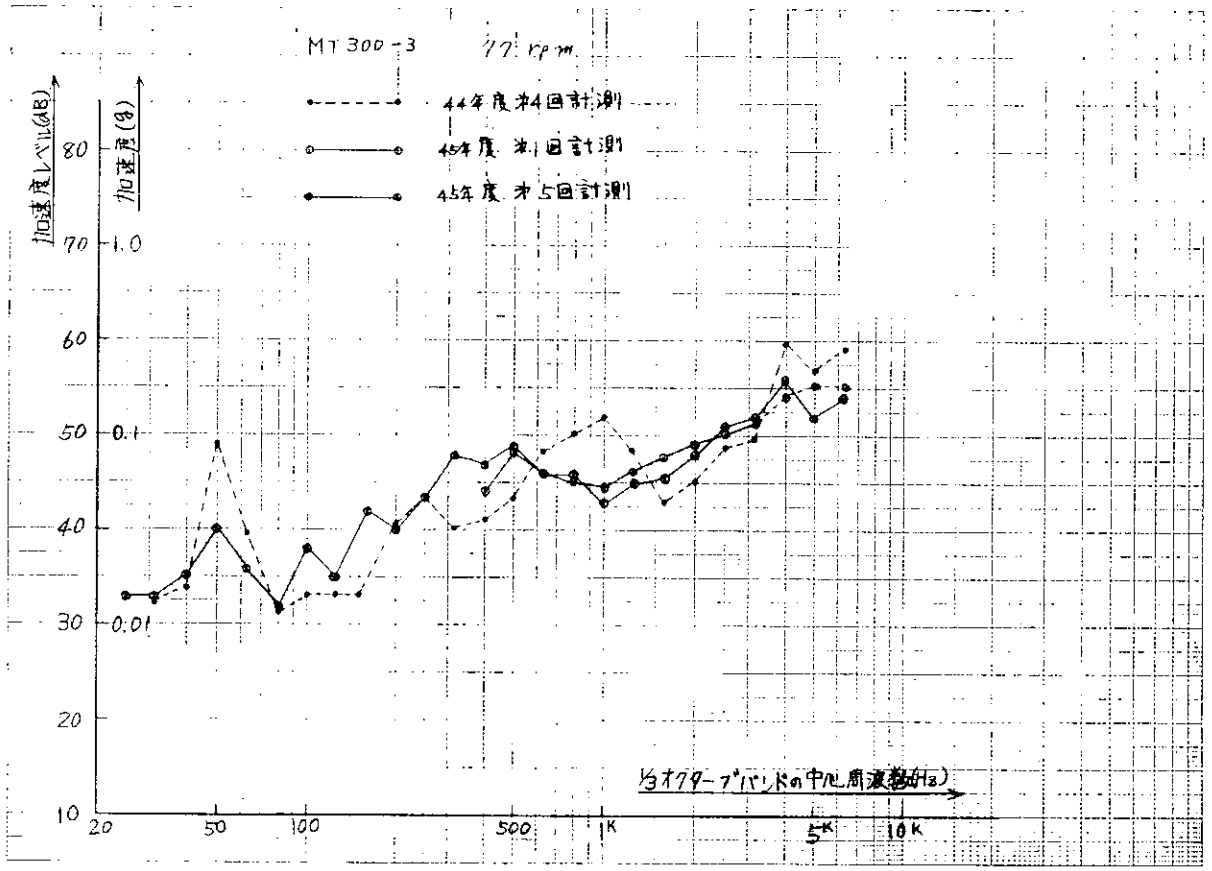
第4.3.16図　高圧タービン船尾側軸受振動（機差の影響）



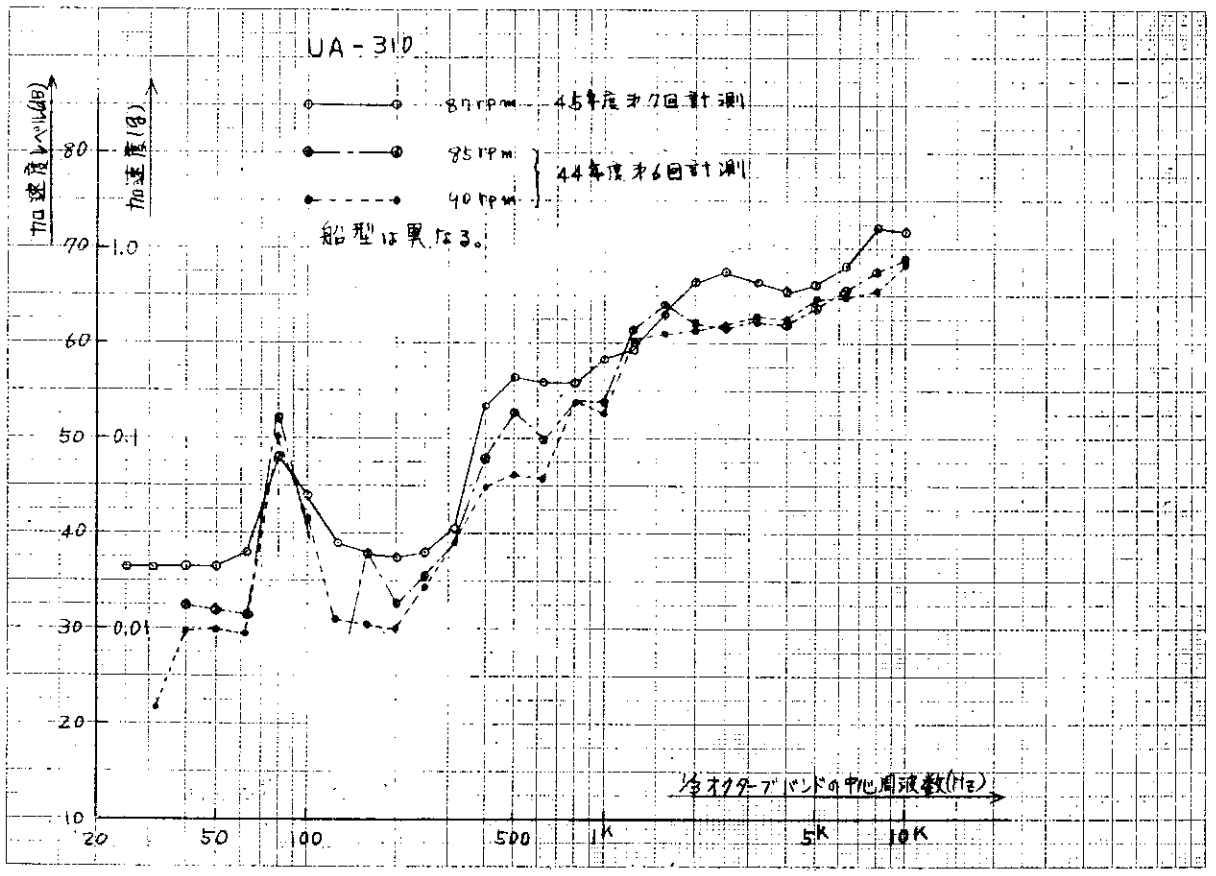
第4.3.17図　低圧タービン船尾側軸受振動（機差の影響）



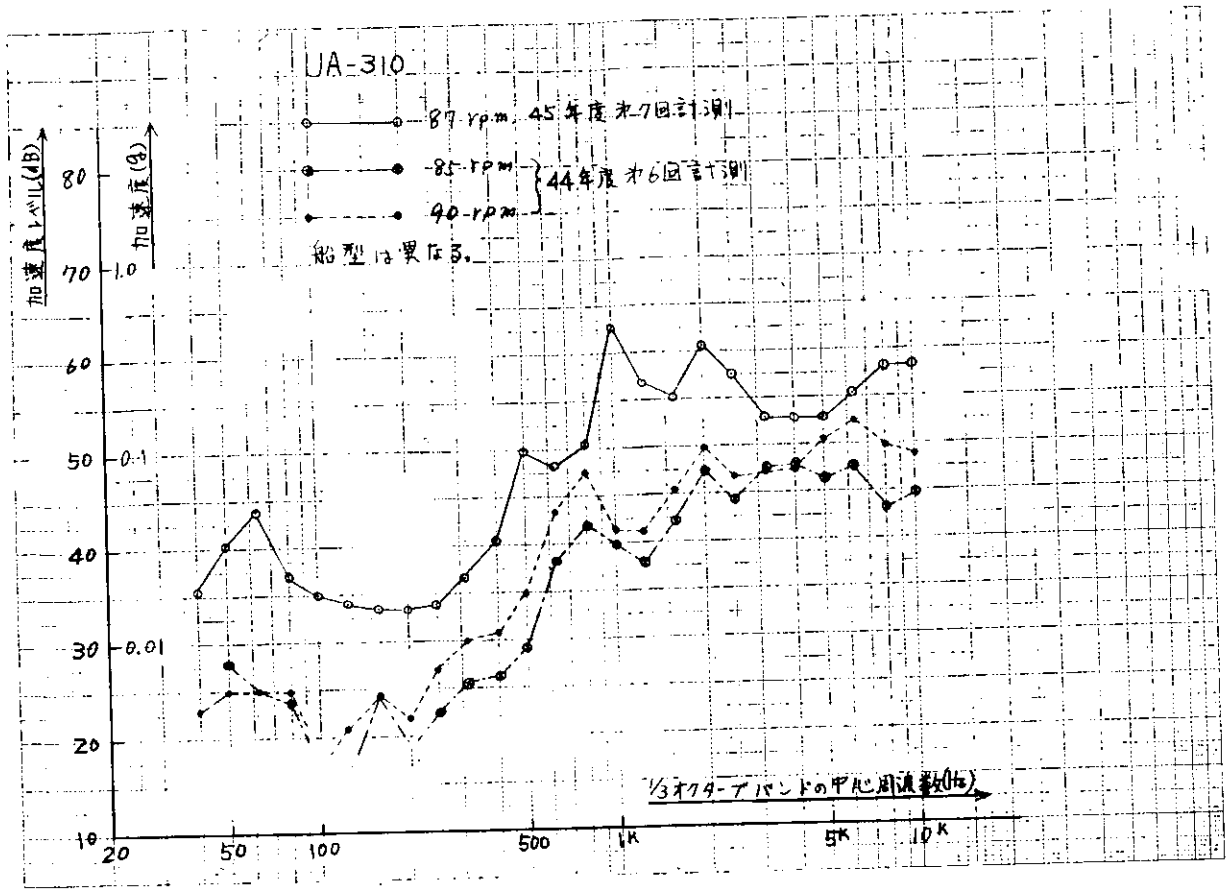
第4.3.18図　高圧タービン船尾側軸受振動（機差の影響）



第4.3.19図　低圧タービン船尾側軸受振動（機差の影響）



第4.3.20図　高圧タービン船尾側軸受振動（機差の影響）



第4.3.21図　低圧タービン船尾側軸受振動（機差の影響）

(3) コンスタント周囲条件の変化の影響

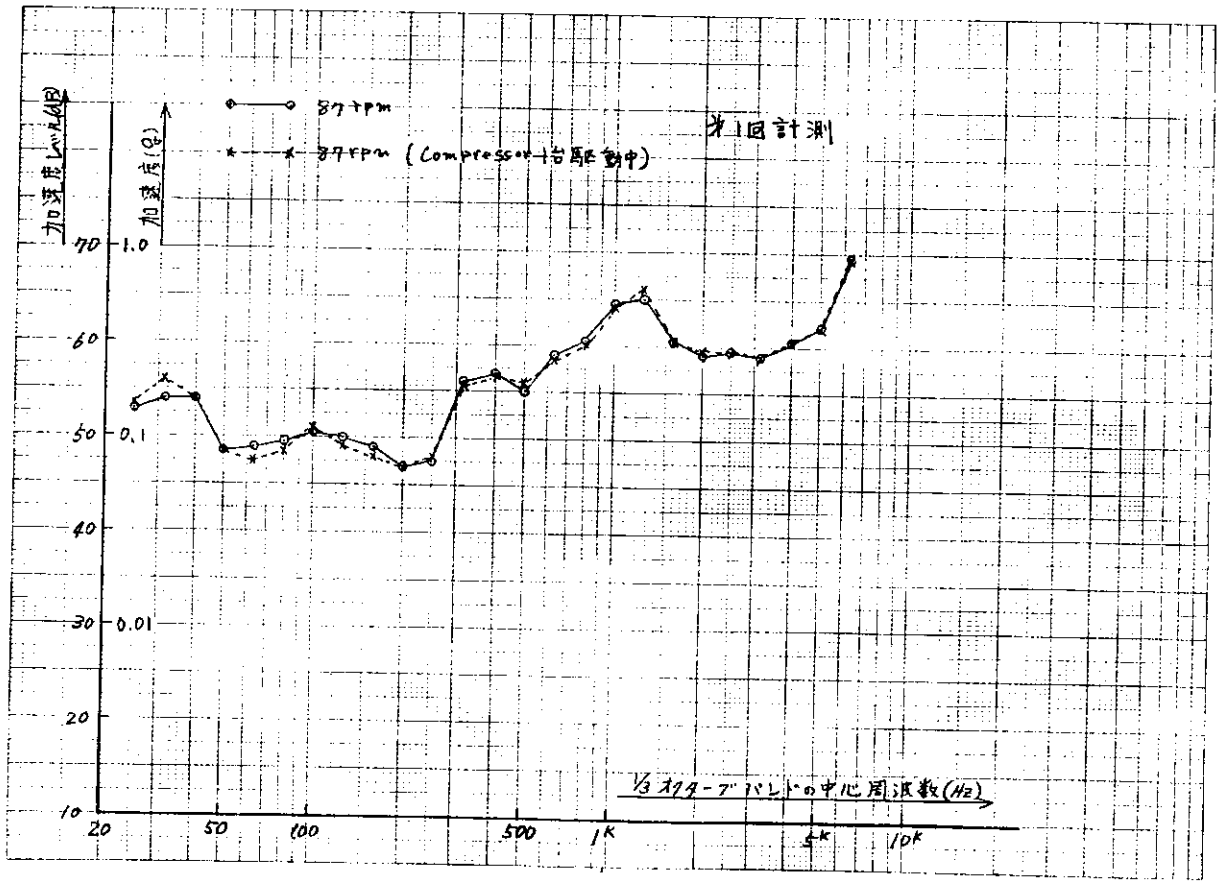
周囲条件の変化の影響として、４５年度はつぎの項目に留意して計測した。

(a) 補機の影響について

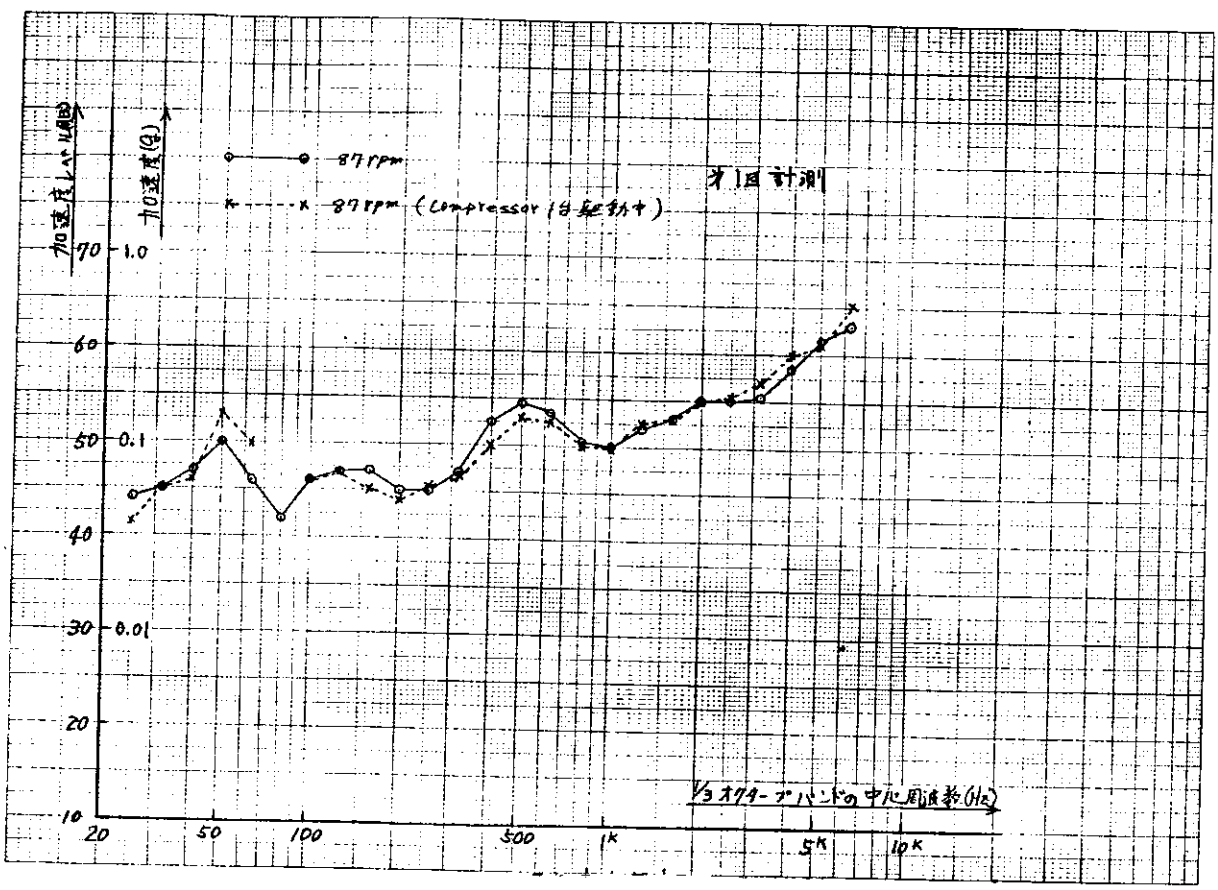
第4.3.22、4.3.23図には、空気圧縮機が１台運転されている状態とそうでない状態のときの加速度スペクトラムの比較を示している（第１回計測）。この図によれば、空気圧縮機が１台運転されていても、主機のレベルには影響を与えないことがわかる。第4.3.9図および第4.3.10図（第４回計測）には、主機ターニング中で荷油ポンプが4台運転中の計測結果を示す。高圧タービン側では、この時の計測値がタービン運転中の計測値よりも非常に小さい。特に４００Hz以上の周波数領域では３０rpm時の計測値より１０dB以上も小さい。

また、低圧タービン側でも荷油ポンプが運転中の計測値は、タービン運転中の計測値よりも小さく、周波数が高くなるに従ってその差は大きくなる。４００Hz以上の周波数領域では３０rpm時の計測値との差は５dB～１０dBの範囲にある。しかし、４００Hz以下の周波数領域では、３０rpm時の計測値との差は小さくなる。荷油ポンプの影響は、高圧タービン側では現われず、また、低圧タービン側でも４００Hz以上の周波数領域ではレベルの重ね合わせを考えれば現われない。しかし、低圧側の４００Hz以下の周波数領域では、荷油ポンプの影響は低速時に現われると考えられるが、タービン回転数が高い場合には、ほとんど影響は受けないものと考えられる。

以上の検討により補機の運転状態は主タービン軸受の加速度スペクトラムにほとんど影響を与えないものといえる。



第4.3.2 2図　高圧タービン船尾側軸受振動（補機の影響）

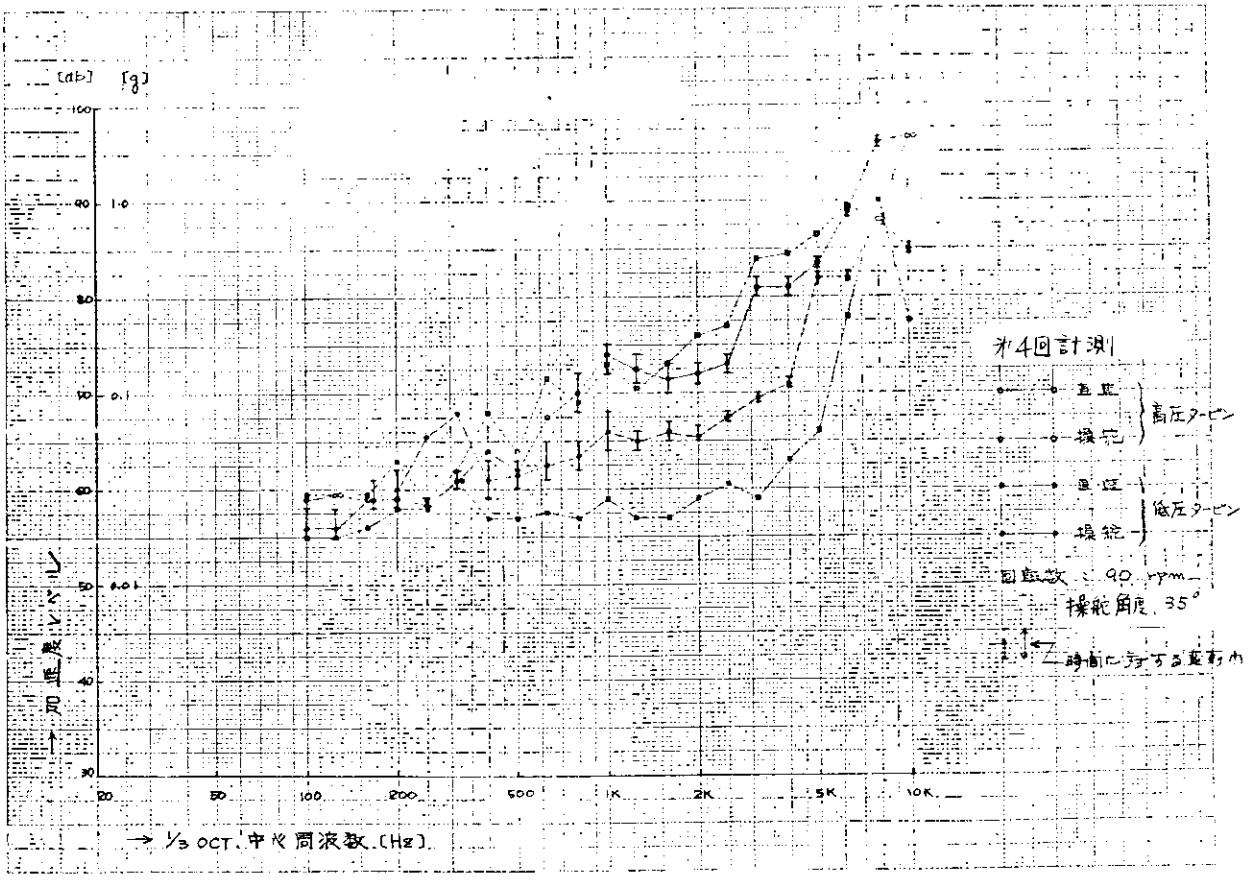


第4.3.2 3図　低圧タービン船尾側軸受振動（補機の影響）

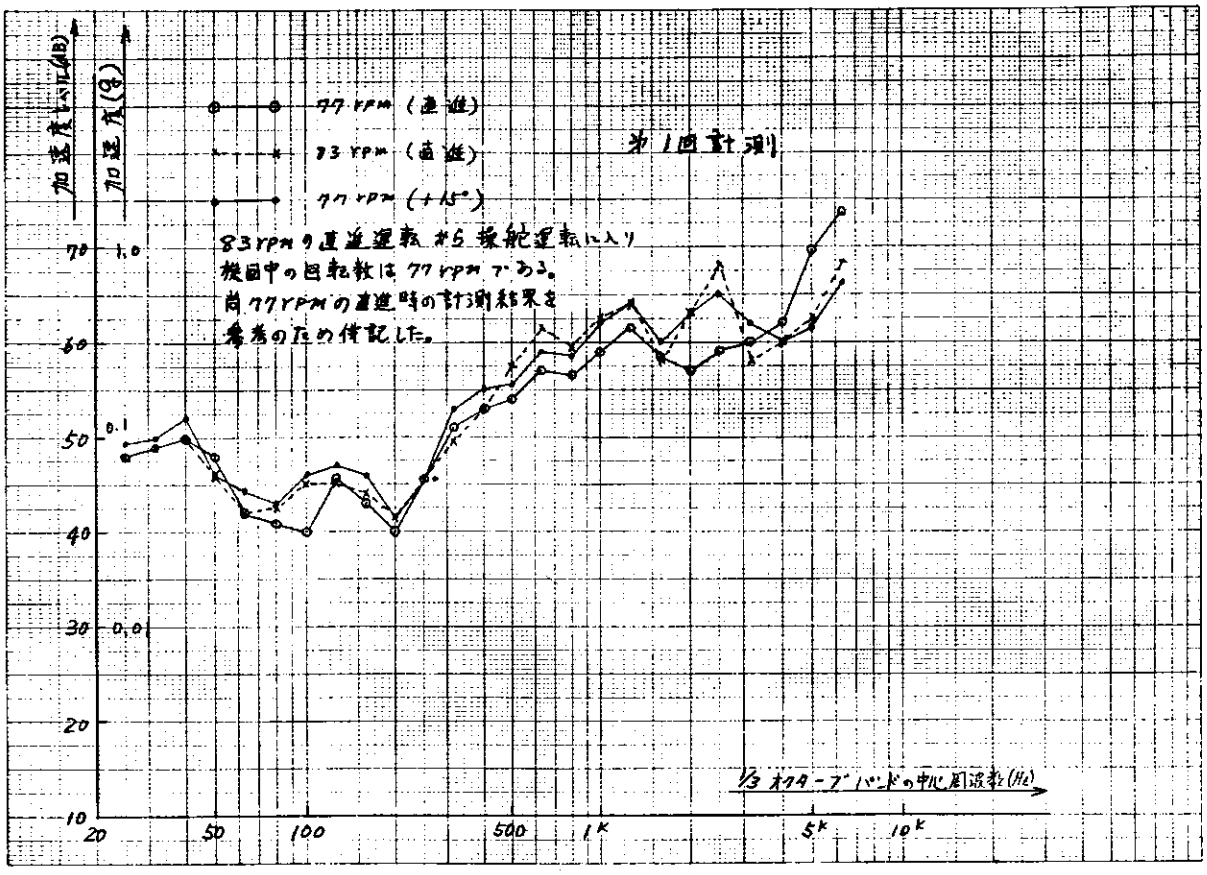
(b) 操能の影響

第4.3.24図（第4回計測）、第4.3.25、4.3.26図（第1回計測）、第4.3.27、4.3.28図（第7回計測）に、旋回中と直進中の計測値の比較を示す。高圧タービンについては、どの計測結果をみても、旋回中と直進中の計測結果に大差はないが、低圧タービンでは、第4.3.24図（第4回計測）に示すように、400Hz以上の周波数領域では旋回中の計測値が直進中の計測値を約5dB～12dBくらい上回る。しかし、第1回の計測結果（第4.3.26図）、第7回計測結果（第4.3.28図）によれば、直進中と旋回中では計測値にほとんど差がない。

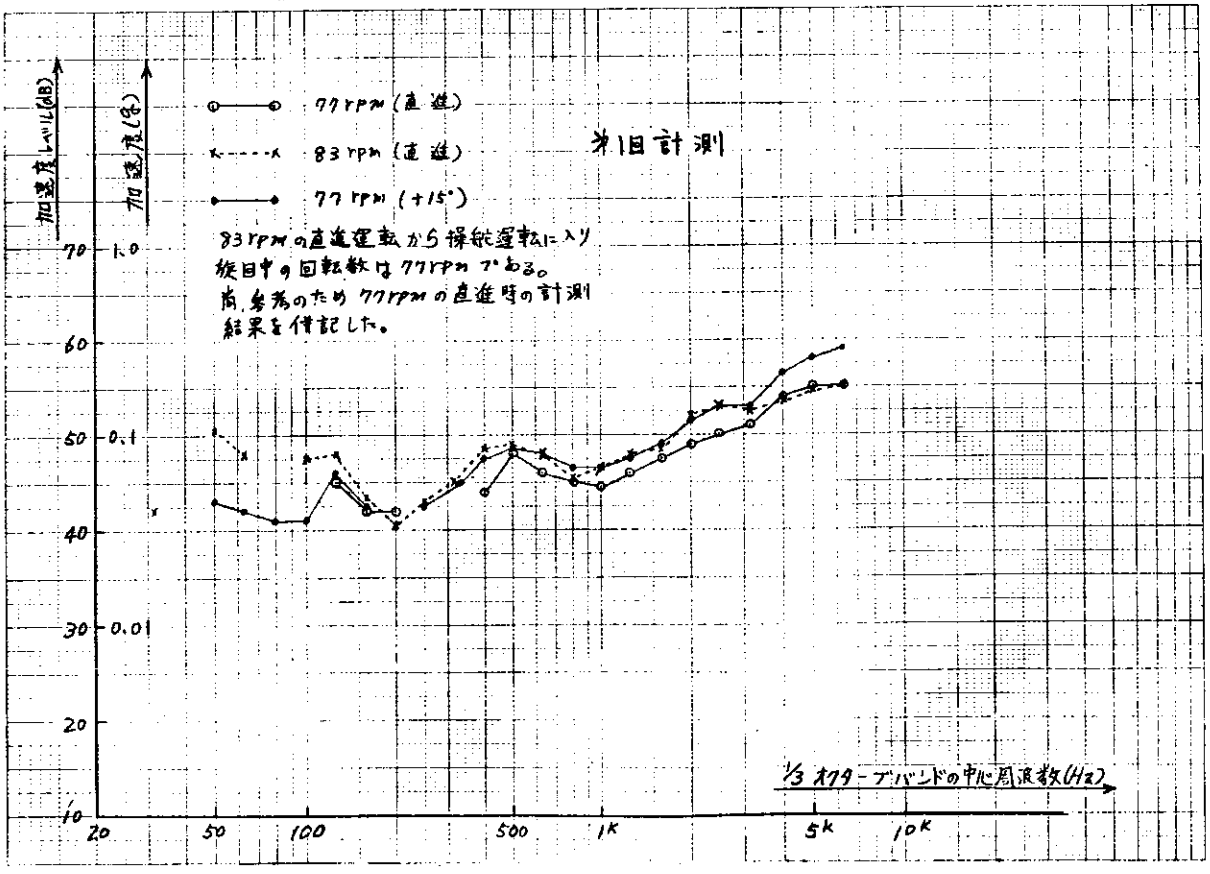
第1回、第7回の計測は右方向に15°操能したときに行ない、第4回、計測は右方向に35°操能したときに行なつた。低圧タービンにおいて旋回中と直進中でこのような差が現われた理由は、主として操能角度の差によるものと考えられる。



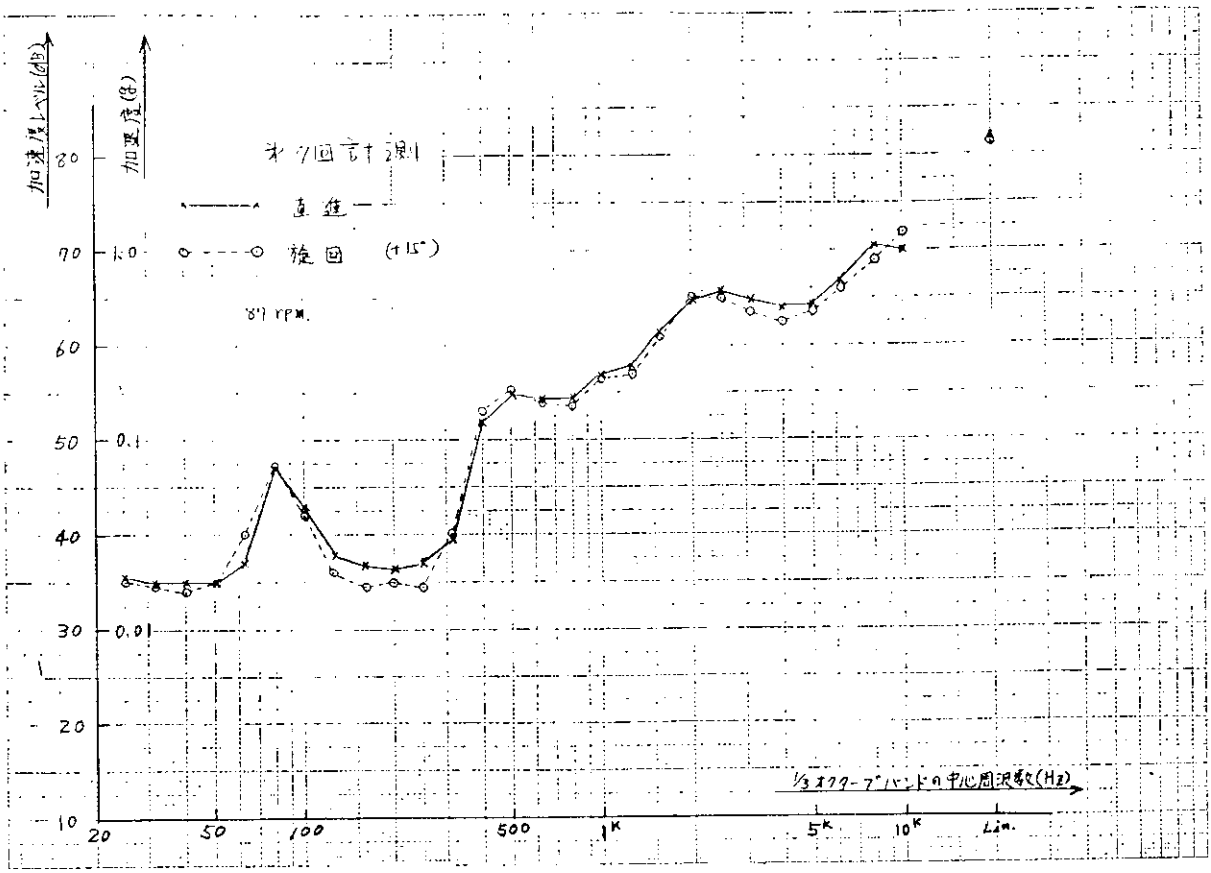
第4.3.24図　タービン船尾側軸受振動（操能の影響）



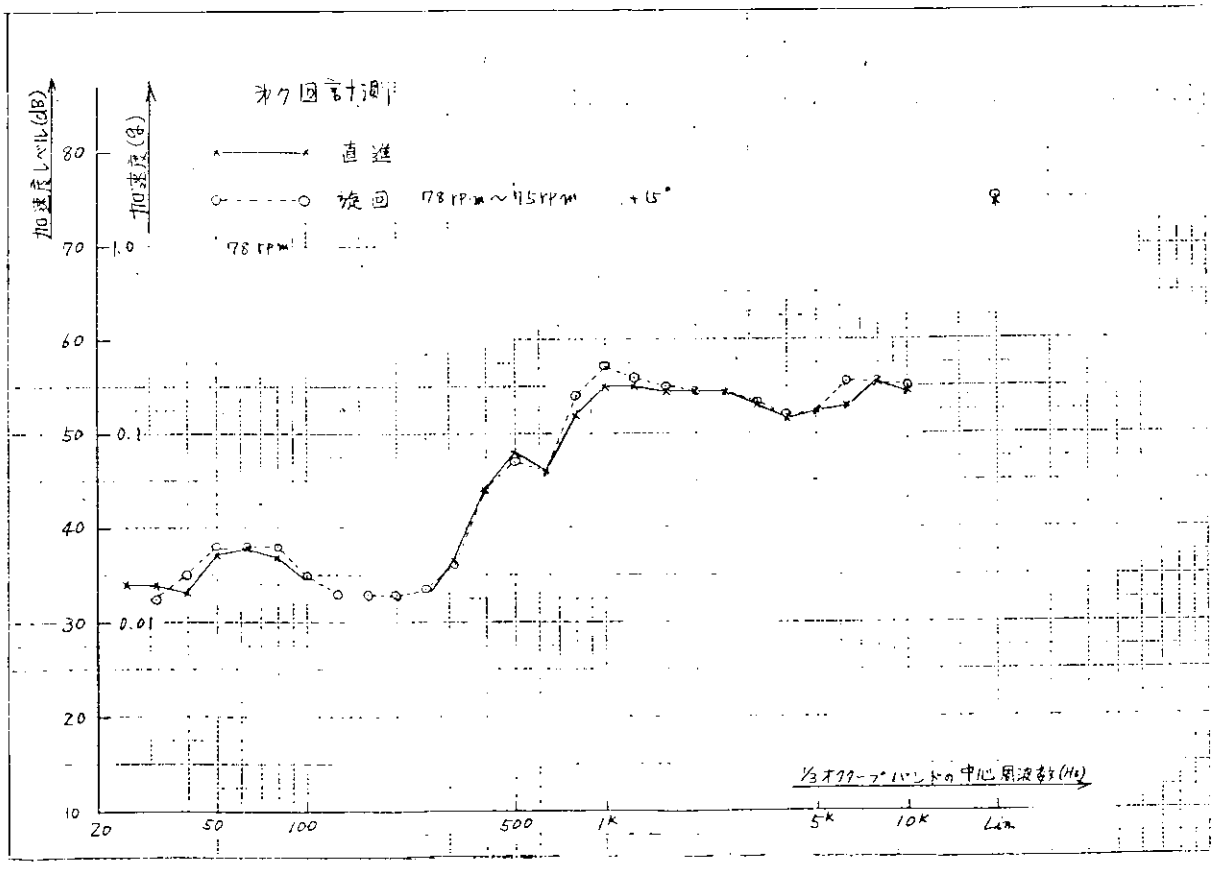
第4.3.25図　高圧タービン船尾側軸受振動（操舵の影響）



第4.3.26図　低圧タービン船尾側振動（操舵の影響）



第4.3.27図　高圧タービン船尾側軸受振動（操舵の影響）

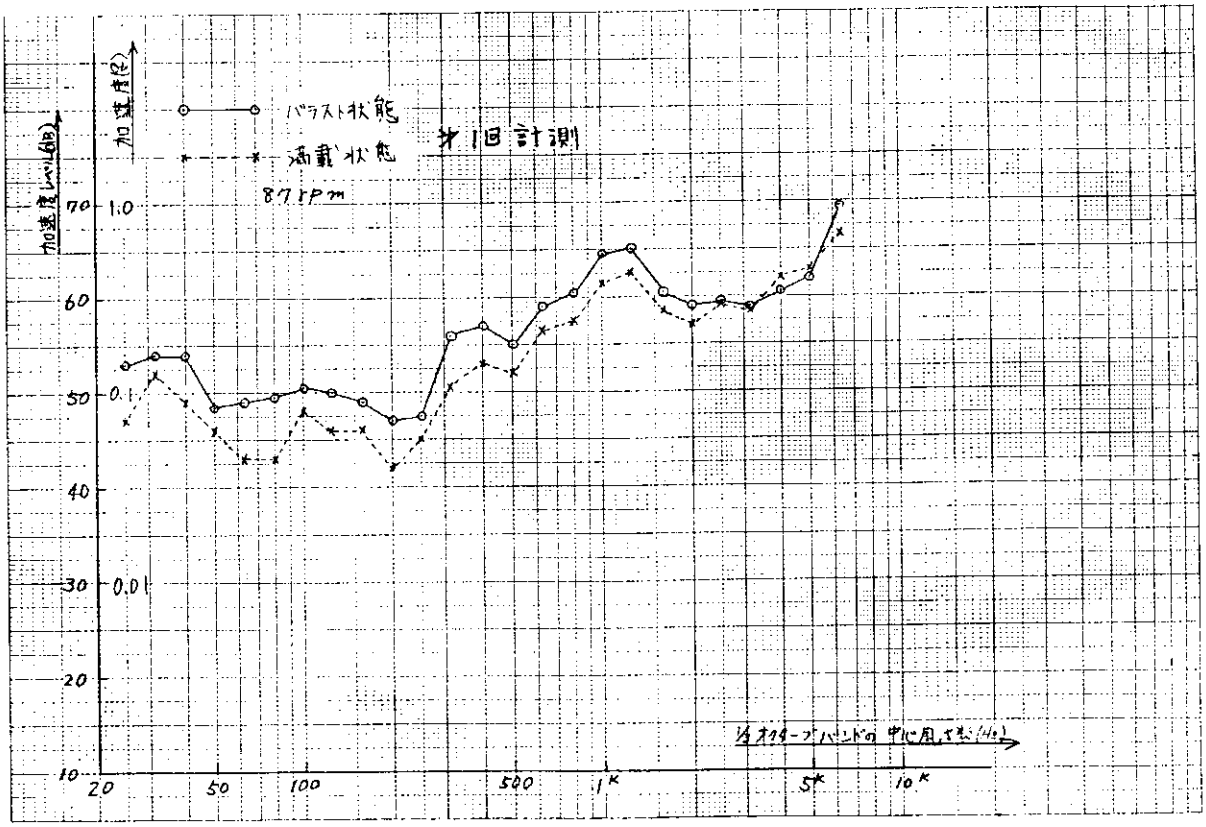


第4.3.28図　低圧タービン船尾側軸受振動（操舵の影響）

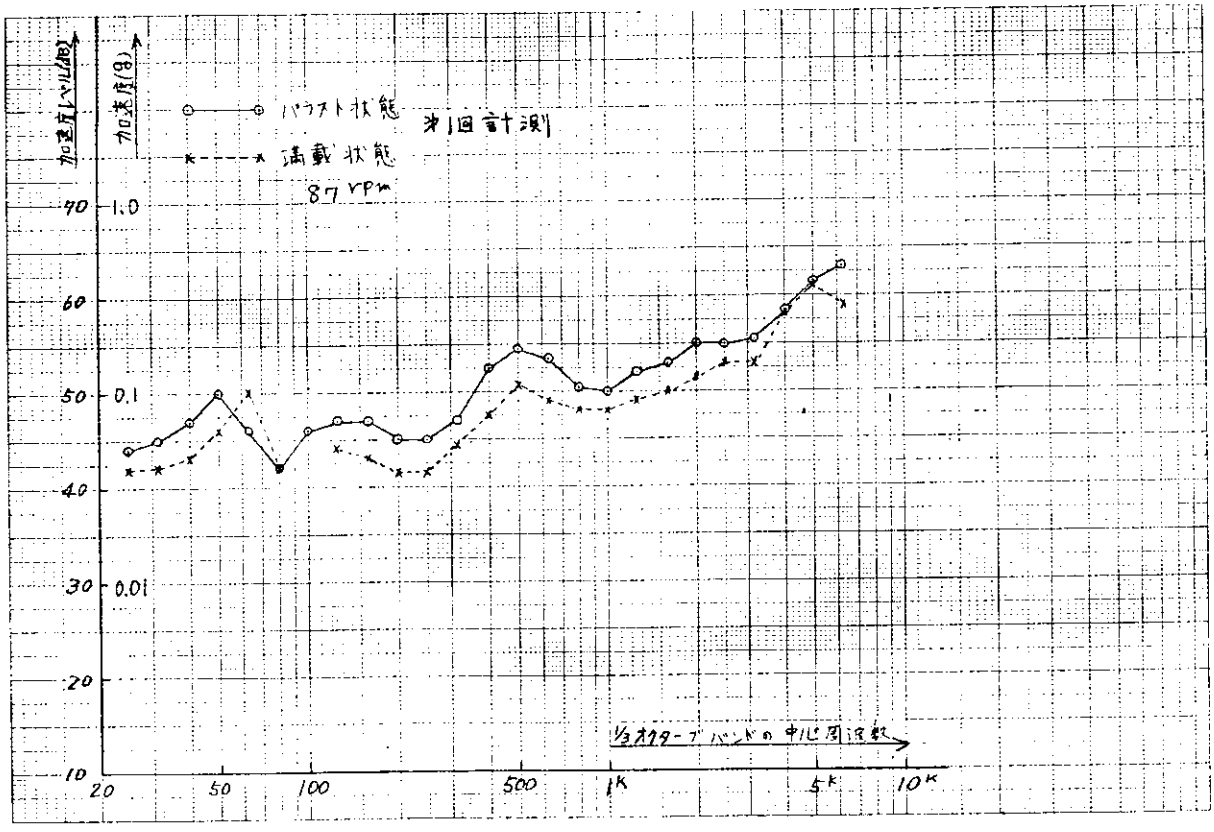
(c) 載荷状態の影響

第4.3.29, 4.3.30図（第1回計測）に，満載状態とバラスト状態時の計測値の比較を示す。高圧タービン低圧タービン共に満載時の計測値とバラスト状態の計測値の差は小さいと考えられる。

外洋航海時における実船実験計測の結果（4.4.3(1)(9)項参照）でも同様な傾向が得られた。



第4.3.29図　高圧タービン船尾側振動（載荷状態の影響）

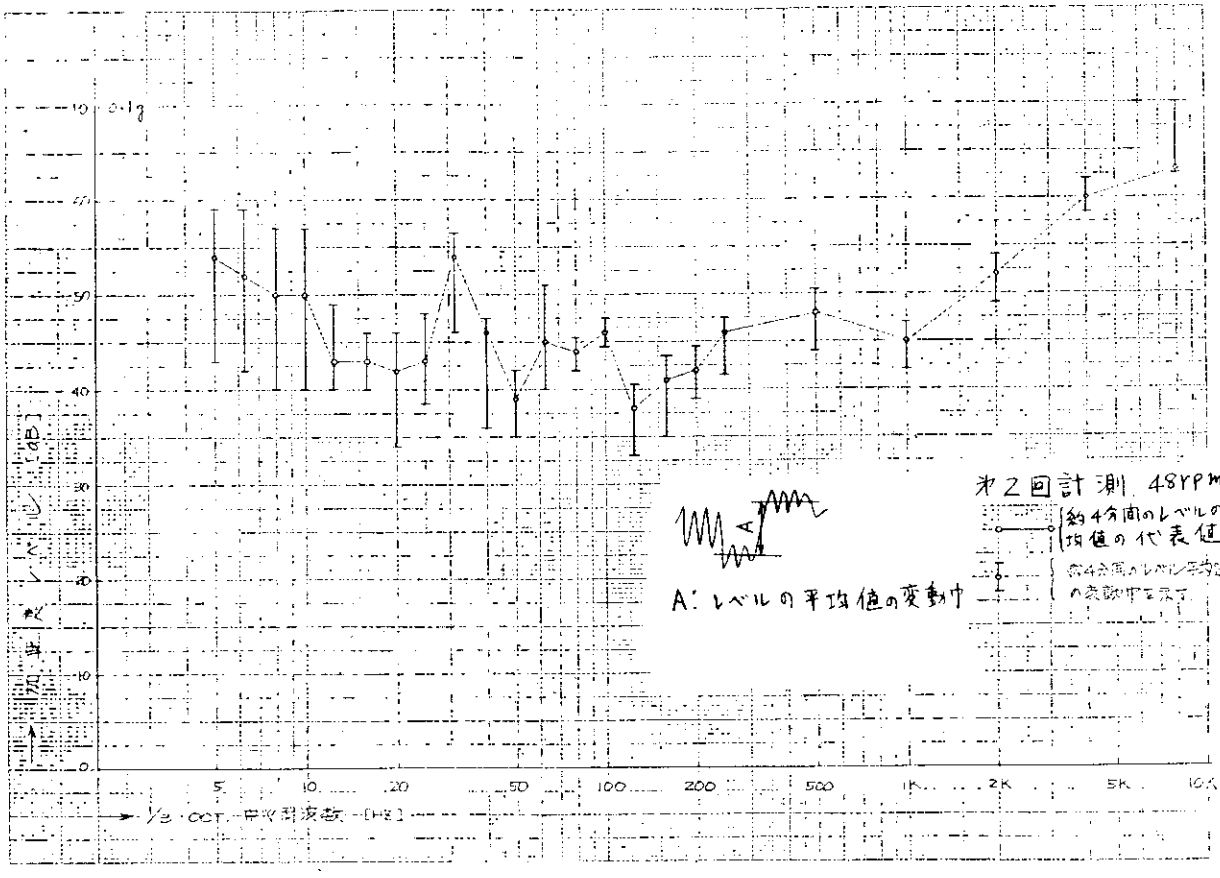


第4.3.30図　低圧タービン船尾側振動（載荷状態の影響）

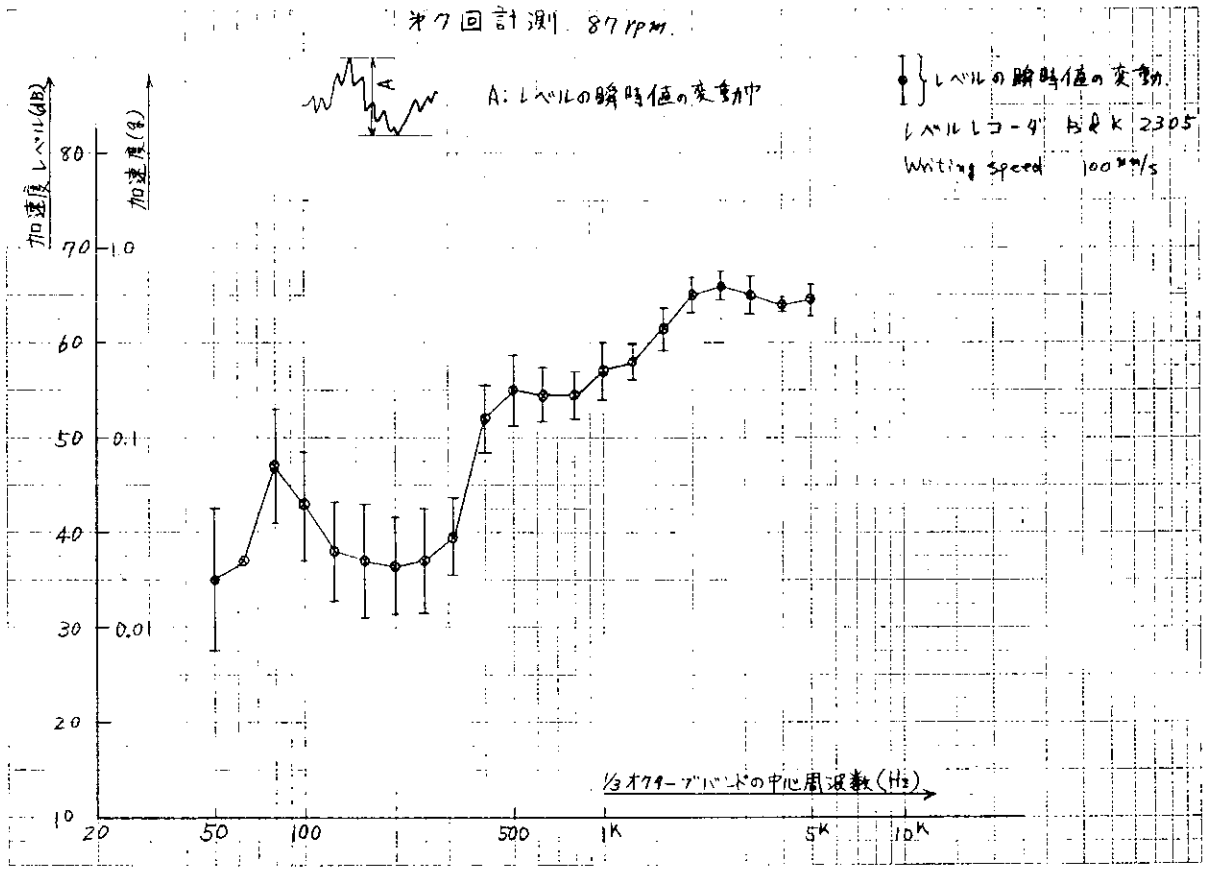
(f) その他

(a) 低周波領域の計測について

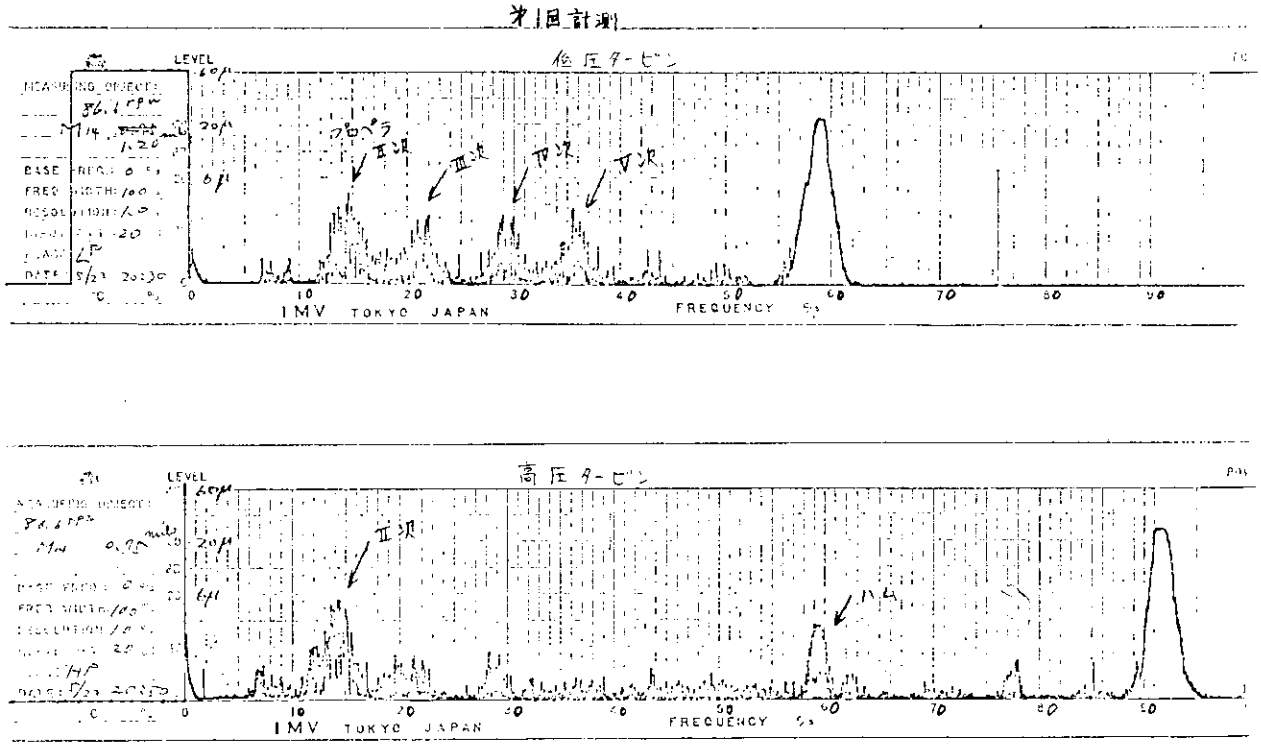
第4.3.3.1図に4分間におけるレベルの平均値の変動の例を、第4.3.3.2図に1分間におけるレベルの瞬時値の変動の例を示す。低周波領域でレベルの変動幅は大きくなる傾向にある。一方、非接触型振動計によつて軸振幅の計測を行なうと第4.3.3.3図に示すように、低周波領域では軸振動とプロペラ翼数に基づく振動が明瞭に現われている。加速度検出器を軸受カバーの上部に取り付けて検知する方法では、低周波領域におけるレベルの変動が大きくなるので、このような低周波領域では軸と軸受との相対振動を計測することによつて、タービン内部の異常を検知した方が有効と思われる。すなわち、低周波領域では軸振幅によつてタービン内部の異常を検知し、高周波領域では加速度検出器によつて異常を検知する方法が有効であると考えられる。



第4.3.3.1図　低圧タービン船尾側軸受振動（時間的な変動）



第4.3.3.2図　高圧タービン船尾側軸受振動（時間的な変動）



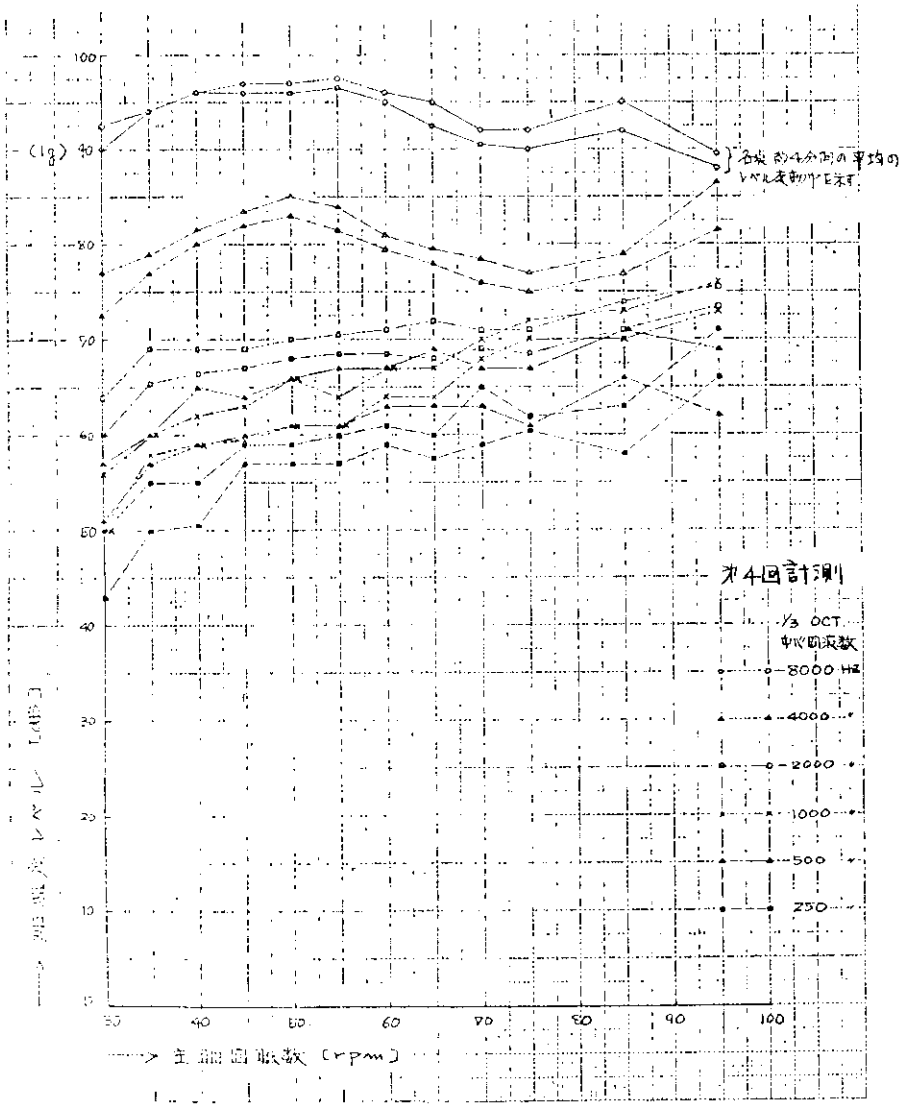
第4.3.3.3図　非接触型振動計による軸振幅（船首側）

(b) 時間的な変動について

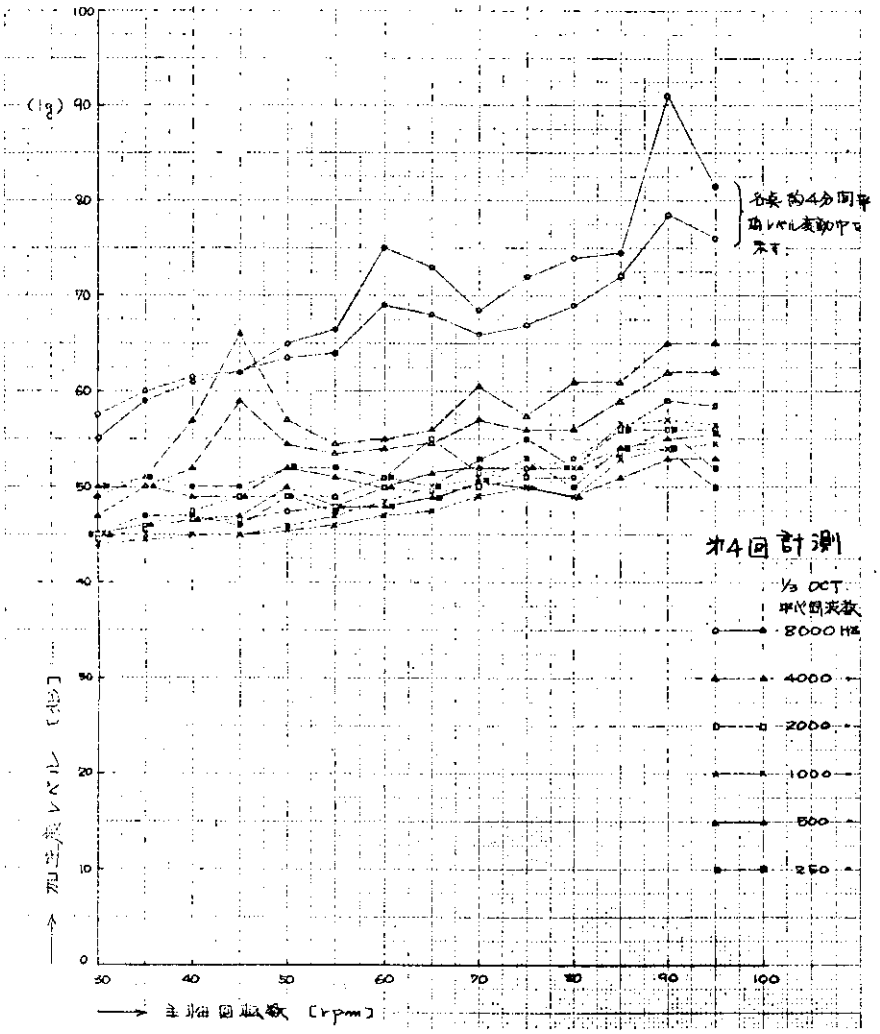
第4.3.34、4.3.35図（第4回計測）に、一定回転で4分間の計測中の平均レベルの変動を回転数に対して示す。第4.3.37図（第7回計測）に、回転数が78 rpmに上昇した直後から運転終了中に10分ごとに5回計測した値の変動幅を示した。回転上昇直後と終了後では計測値にほとんど差のないことがわかつた。

また、第4.3.36図（第2回計測）および第4.3.37図に同タービンで計測日の異なつた場合の比較を示した。計測日が異なつても、レベルにほとんど差のないことがわかつた。ただし、周波数領域では約5dBの差が観測された。

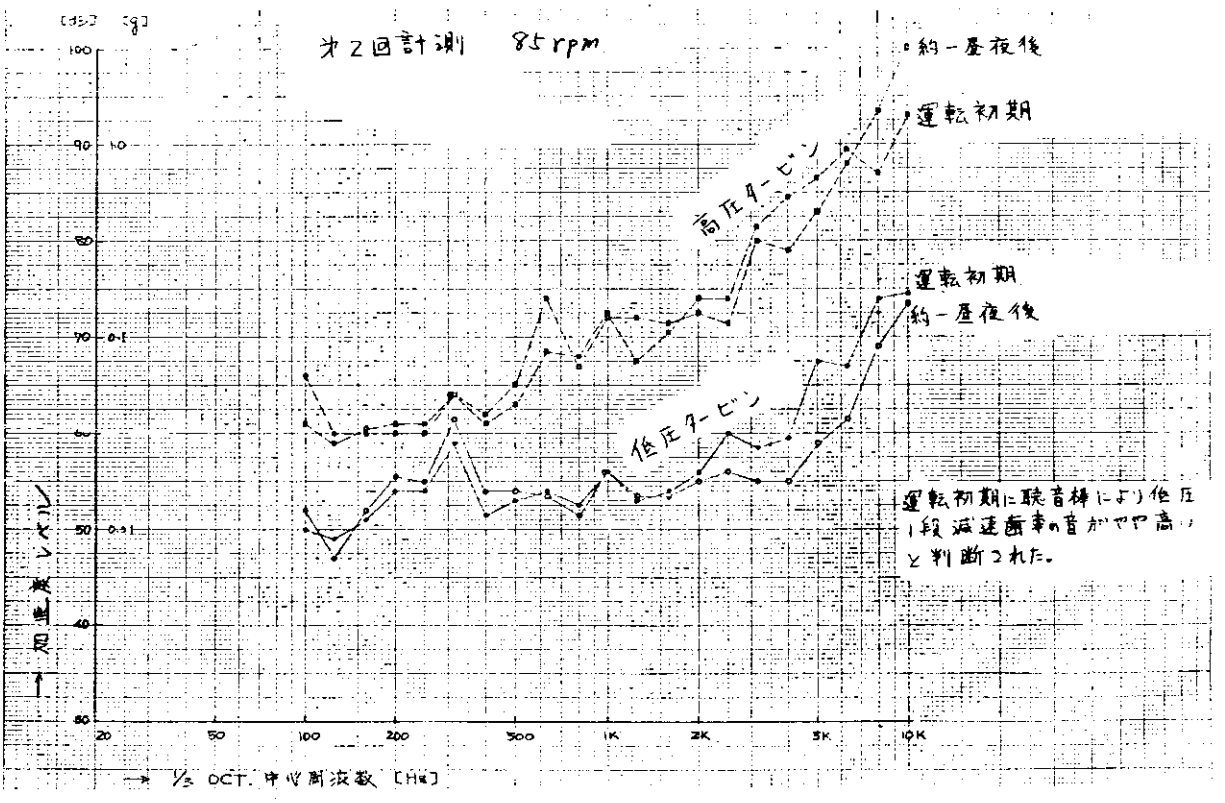
・これらの例より判断すれば、高圧タービン、低圧タービンとも平均レベルの時間的変動幅は5～10dBである。



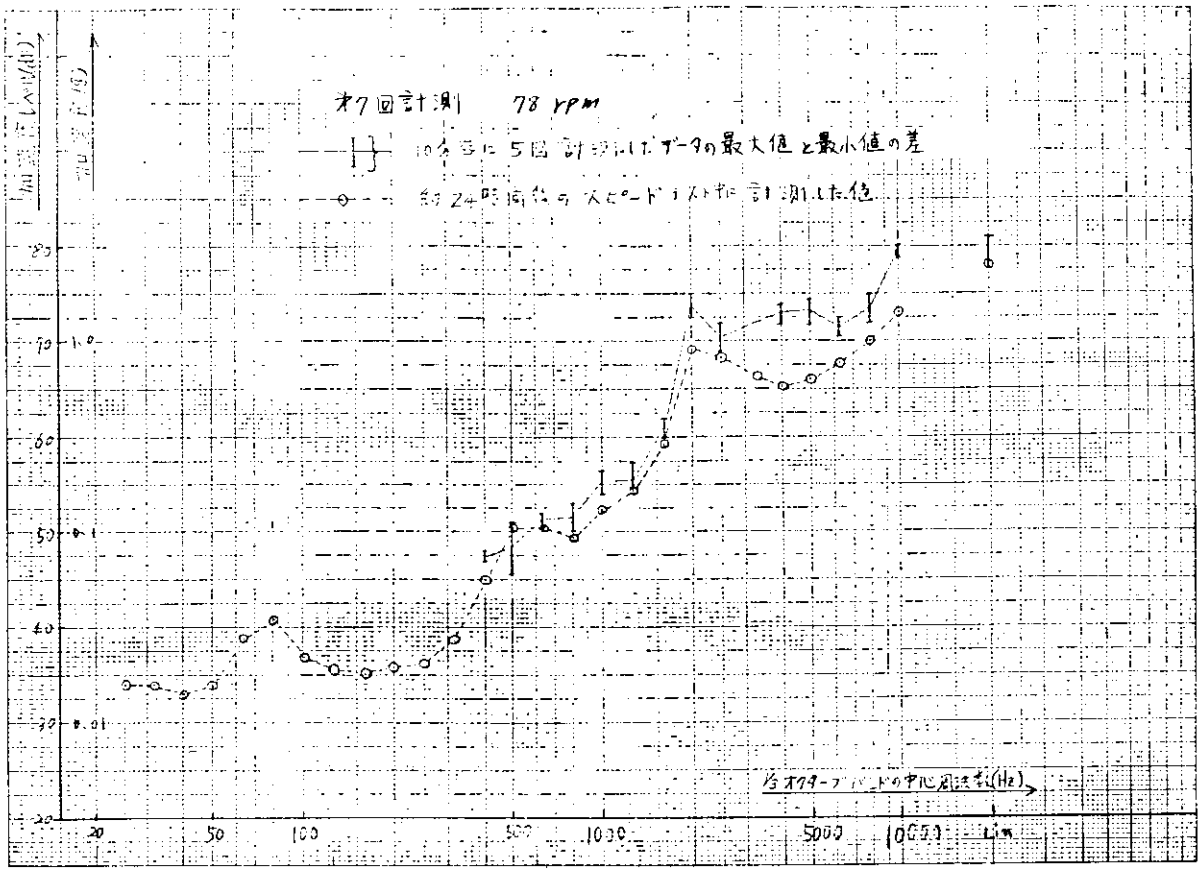
第4.3.34図　高圧タービン給気側軸受振動（時間的なレベル変動）



第4.3.3 5図　低圧タービン船尾側軸受振動（時間的な変動）



第4.3.3 6図　主機タービン船尾側軸受振動（時間的なレベル変動）

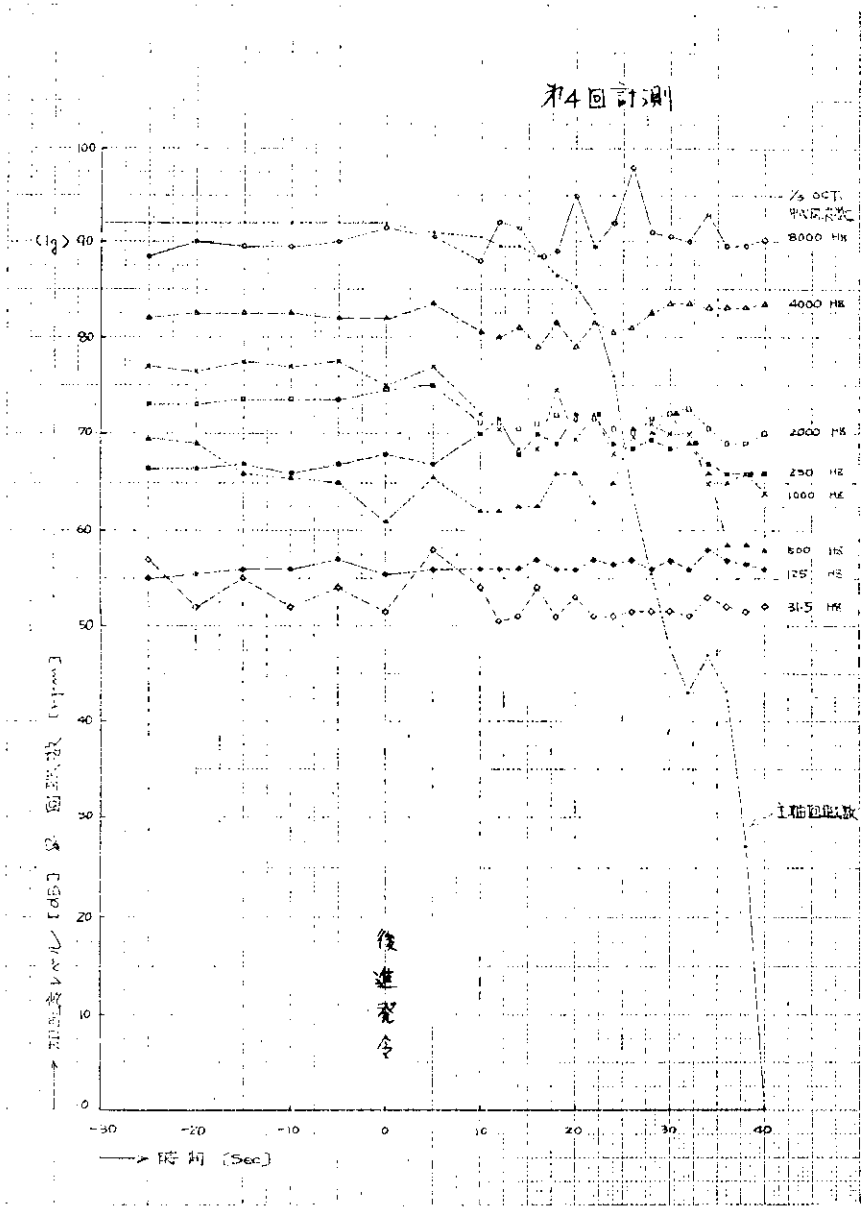


第4.3.37図　高圧タービン船尾側軸受振動（時間的なレベル変動）

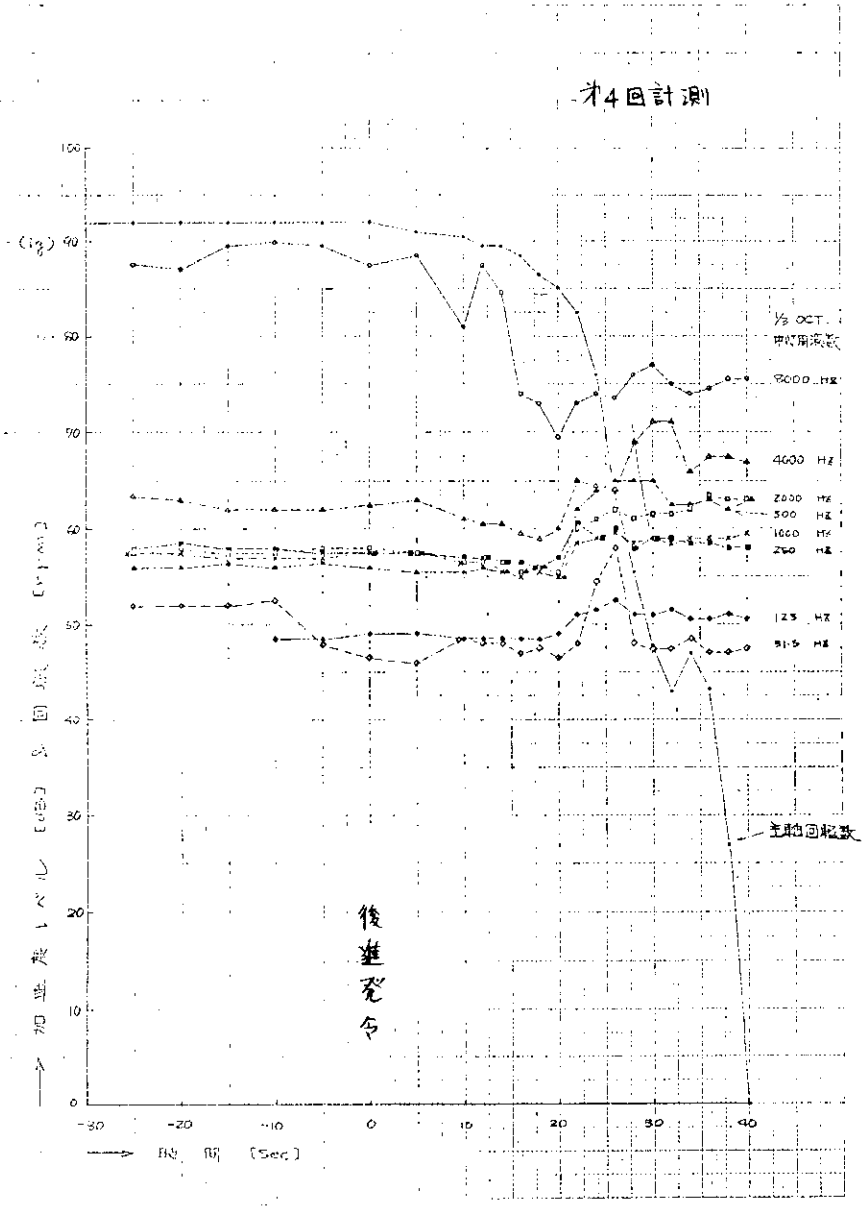
(c)　急速後進時の計測結果

第4.3.38、4.3.39図に第4回計測の急速後進時の計測結果を示す。高圧タービンでは回転数の変化に対する各1/3オクターブバンドの中心周波数におけるレベルの変化は小さい。一方、低圧タービンでは、8000 Hzのレベルが大きく減少しているが、他の周波数におけるレベルはやや上昇気味である。第4.3.40図には、第5回計測の高圧タービンの急速後進時の計測結果を示し、第4.3.41図には、第7回計測の急速後進時の低圧タービンの計測結果を示す。三菱製のタービンや川重製のタービンは前進蒸気弁が閉鎖されてから後進蒸気が低圧側にある後進タービンに流入する。このとき、高圧タービン内には蒸気流が存在しない。すなわち、高圧タービンでオーバオールのレベルが急減少した付近が前進弁が完全に閉鎖した状態であり、以後、高圧タービン内には蒸気流が生じないので、低いレベルのままである。また、低圧タービンでは、前進蒸気弁が閉鎖したときに、レベルは最も小さくなるが、後進弁の漏洩に伴い、低圧タービンに内蔵された後進タービンに蒸気が送られるので、レベルが再び大きくなったと考えられる。

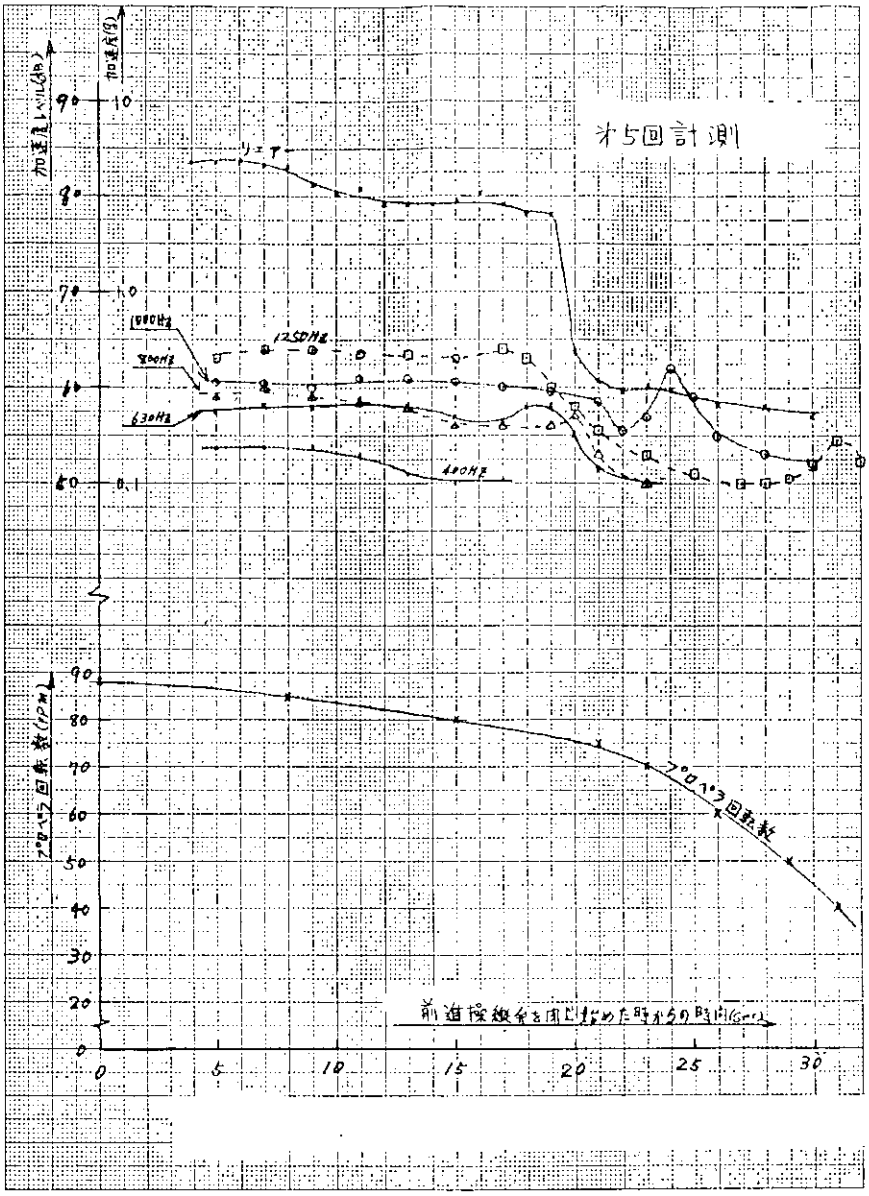
石播製のタービン（第4回計測）は、三菱や川重製のタービンと異なり、後進中に、高圧タービンの蒸気室に接続した後進弁を蒸気が通過する構造になっているので後進運転に切換えた場合も高圧タービンのレベルが前進運転時と余り変わらないと考えられる。低圧タービンでは、後進蒸気の流入とともに、各周波数のレベルの上昇が見られることは他型式のタービンと同様である。



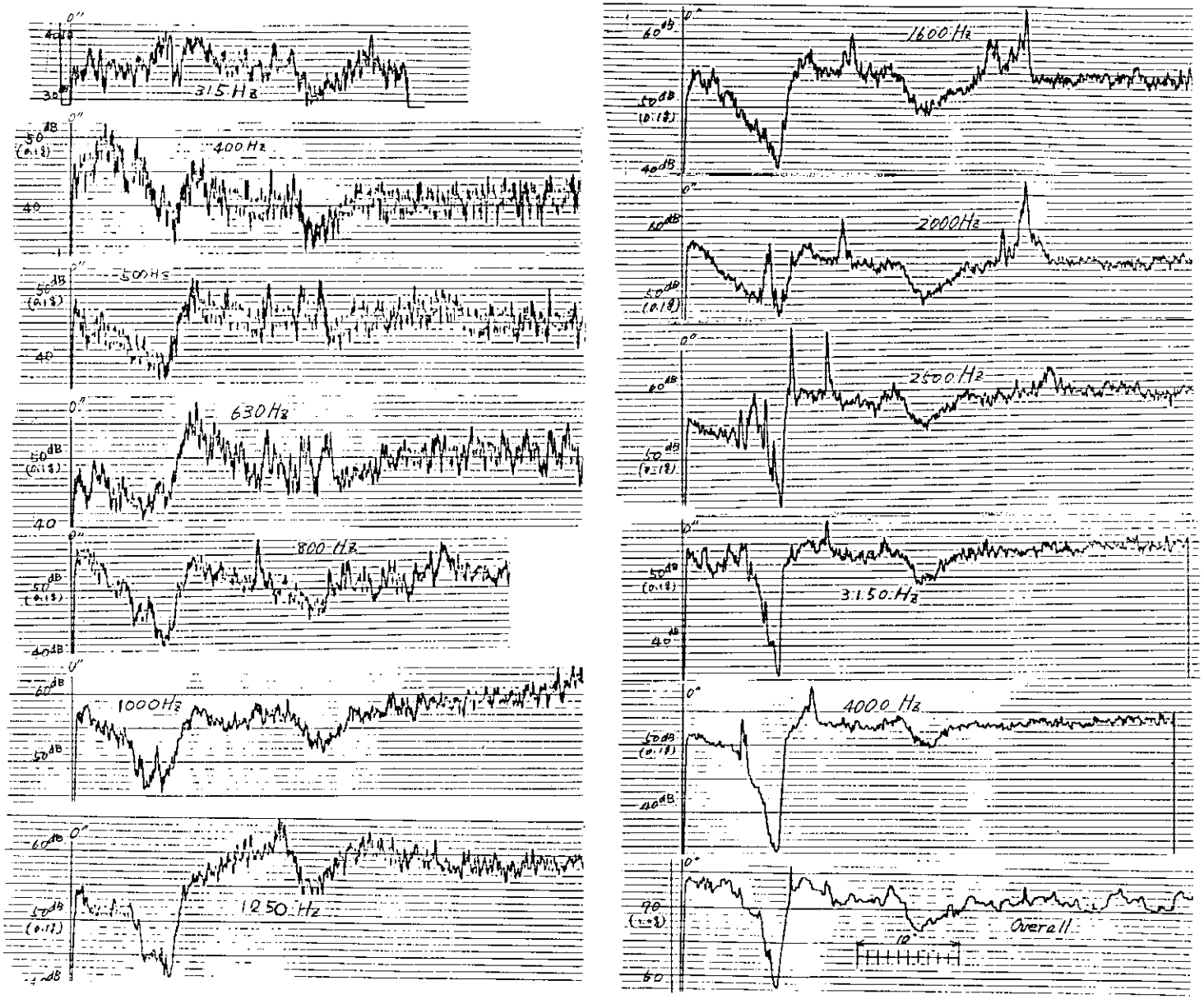
第 4. 3. 3 8図　高圧タービン船尾側軸受振動（急速後進時の計測）



第 4. 3. 3 9図　低圧タービン船尾側軸受振動（急速後進時の計測）



第4.3.40図　高圧タービン船尾側軸受振動（急速後進時の計測）



第4.3.41図　低圧タービン船尾側軸受振動（急速後進時の計測）

(d) 低回転時の計測結果について

低回転時の計測結果（５０ｒｐｍ以下の回転数の計測結果）によれば、約2,０００Hz～4,０００Hz以下の周波数領域では、回転数の順にレベルが決まり、余り乱れが見られなかつた（第4.3.３、4.3.４、4.3.９、4.3.10図）。この周波数よりも低い周波数領域では低回転時のレベルが高回転時のレベルより高くなる場合が比較的多く観測された。しかし、正常音パターンを１０～１５dBの幅をもつたものとして取扱う際には、その幅の中におさまる。

4.4 タービン内部異常検知の実船実験

過去数十回にわたつて造船各社はタービン内部音を海上運転時に計測し、データの収集を行なつた。

しかし、下記の問題が常に残つた。

1）異常音のパターンはどのようなものか。

2）外洋航海時と海上運転時に音のパターンに差がないか。

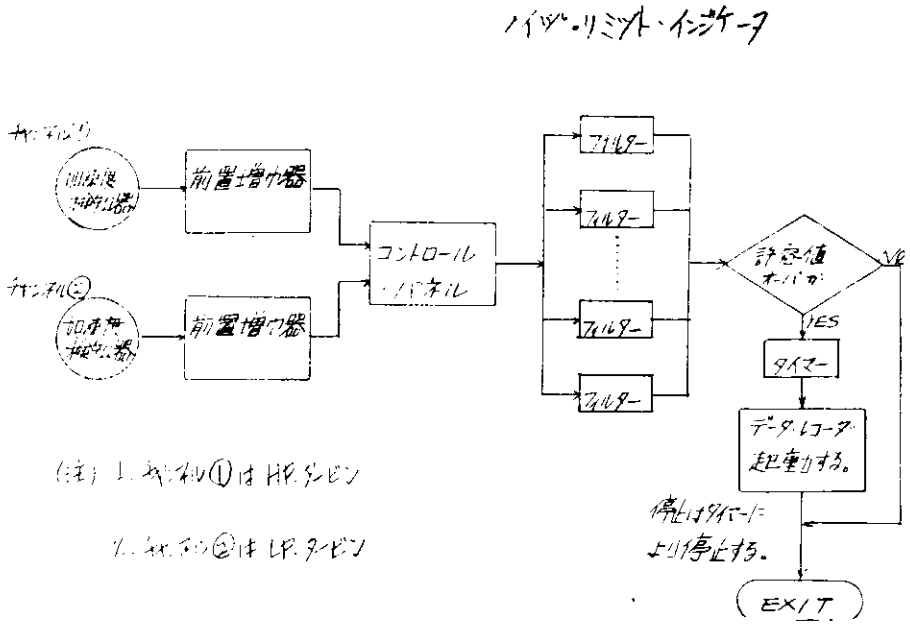
そこで今回、日本郵船㈱および太平洋海運㈱のご好意により十和田丸の第２次航にて１航海（約１カ月）にわたつて実船計測を実施した。

本節はその経過と実測結果をまとめたものである。

4.4.1 計測概要

上記の問題点特に 1）の異常音を収集する手段として従来の計測器に加えてノイズ・リミット・インジケータを使用した。

ノイズ・リミット・インジケータの作動原理はつぎの図に示すようにあらかじめ設置されたバンドパス・フィルタのおのおのに設定値をもうけることができ、この設定値をオーバすれば自動的に録音機が起動し異常音を録音するしかけである。



この計器により２４時間中万一異常が発生しても異常音を自動的に録音できる。

起動されたデータ・レコーダはタイマ装置により自動的に停止される。

(1) 計測器要目

第4.4.1図に自動的に起動されたデータ・レコーダを自動的に停止するためのタイマ装置を示す。第4.4.2図にノイズリミット・インジケータの要目を示す。

今回の計測では1/3オクターブ・バンドを使用すると14個のフィルタしかセットできない。同計器では、周波数レンジが狭くなるので1オクターブ・バンドを使用した。

第4.4.1表に計測器要目を示す。

第4.4.1表　計測器要目

計測器	メーカおよび型名	概略仕様	
加速度検出器	B&K　4333(4335)	感度	10～20PC/g
		周波数範囲	0～9,000Hz(0～8,000)
		共振周波数	60KHz
前置増幅器	B&K　1606	S/N	40dB以上
		周波数範囲	2.0Hz～20KHz
		出力電圧	±10V
データレコーダ	TEAC　R410	記録トラック数	4 ch.
		周波数範囲	0～10KHz
		記録入力	±1V～±20V
		再生出力	±1V
		テープ速度	30inch/s
		テープ幅	1/4inch
周波数分析器	B&K　2113	周波数範囲	1/3オクターブ：25Hz～20KHz 1/1オクターブ：31.5Hz～16KHz
		分析幅	1/3オクターブ：1/1オクターブ
		選択度	50dB/oct.
レベルレコーダ	B&K　2305	周波数範囲	10Hz～200KHz
		記録速度	4～2,000mm/s
		送り速度	0.0003～100mm/s
		記録紙幅	100mm

(2)　プラントの要目

今回計測したプラントの要目をつぎに示す。

(a)　タービン要目

型式	MS36(三菱重工製)
連続最大出力	34,000PS/90rpm
常用出力	34,000PS/90rpm
蒸気条件	60Kg/cm²g×510℃
主復水器真空	722mmHg

	高圧タービン	低圧タービン	
段落数	9	8	カーチス1 ラトー2
MCR時回転数	6486	3155	約2240
MCR時回転数	6486	3155	
試験回転数	4100	3000	

(b) 主減速装置要目

	高圧タービン側				低圧タービン側		
	第1段減速		第2段減速		第1段減速		
	小歯車	大歯車	小歯車	大歯車	小歯車	大歯車	小歯車
歯数	43	292	49	520	61	292	71
回転数	6486	955.1		90	767.6		3155

(c) 主ボイラ

型式　三菱－CE2胴水管強圧送風機（V2M－8W×2台）

(d) プロペラ翼数　5枚

軸系ねじり振動共振点　45.9 rpm

(3) 十和田丸の概要および航海日程（第2次航）

（十和田丸の概要）

船主　日本郵船㈱、太平洋海運㈱

建造所　三菱重工業㈱長崎造船所（竣工45－9－22）

船種　油槽船

全長　320.0 m

型幅　52.4 m

型深　24.6 m

満載吃水　19.06 m

載貨重量　227,290 t

（第2次航海日程）

昭45	11／1	川崎港発
	11／4～6	航海中タンククリーニング
	11／8	マラッカ海峡通過
	11／16	カーグ島着（ペルシャ湾）
	11／17	接岸→荷役
	11／18	荷役→カーグ島発
	11／28	マラッカ海峡通過
	12／6	川崎着港

上記は十和田丸の航海記録である。この間に、11／14計測機器のデータレコーダが故障*1)するトラブル発生し、以後は磁気テープによるデータ採取ができず、ノイズ・リミット・インジケータのメータ指示値のみを記録した。

*1) データレコーダの故障

11／15夕、主タービンのAuto設定した。翌11／14朝、データレコーダ起動せずすなわちモータの故

(4) 計測要領

下記要領にて計測した。

(a) 計測点　高・低圧タービン縦側軸受カバー上部（第4.4.3図参照）

(b) 計測範囲　○データ・レコーダによる録音はオーバオール。（11／1～11／13のみ）

○異常音検知のための夜間Auto設定は、ノイズ・リミット・インジケータの計測結果、バラツキの大きさを考慮して、各周波数に若干のプラスをしてSetした。

○ノイズ・リミット・インジケータの計測は、31.5Hz、63Hz、125Hz、250Hz、500Hz、1,000Hz、2,000Hz、4,000Hz、8,000Hz およびオーバオールについて分析した。

(c) 計測条件　補機の発停状況（主および補発電機、荷役用ポンプ、給水ポンプ、エアーコンプレッサ）、主機の状況（回転数、軸振動計）および船の状況（積載状況、海上模様、船速、直進または操舵）を考慮して、これら種々状態の変化の比較ができるように実施した。

(d) 計器構成および使用状況　第4.4.4図に示す。

4.4.2 計測結果

前述のように、データ・レコーダが航海途中の約1/3で故障したため、今回の実船計測はノイズ・リミット・インジケータによる計測が主になつた。

ノイズ・リミット・インジケータは1/1オクターブ・バンド分析に使用したので、従来実施されてきた1/3オクターブ・バンド分析にくらべて精度が悪い。

ゆえに、データ・レコーダの記録から1/1および1/3オクターブ・バンド分析を行ないノイズ・リミット・インジケータとデータ・レコーダの記録を比較し、ノイズ・リミット・インジケータについては1航海のデータ・レコーダ記録は約1/3航海（往航時バラスト状態について）の考察を別々に記述した。

計測にあたつて、プロペラ回転数・船体進行方向・積載状況・海上模様および補機使用状況を記録し、これらがタービン内部音にどのような影響があるのかチェックした。

これらを記録メモとして表に示す。第4.4.3表に記録メモの記号説明を、第4.4.4表、第4.4.5表にノイズ・リミット・インジケータおよびデータ・レコーダの記録メモをおのおの示す。

さらに第4.4.5表の1/3オクターブ・バンド分析結果を添付資料（377～385ページ）に示す。

つぎにノイズ・リミット・インジケータとデータ・レコーダの分析結果の考慮を述べる。なお、考察の中で述べる計測番号は第4.4.4表、第4.4.5表に示す計測番号である。

4.4.3 考　察

(1) ノイズ・リミット・インジケータによる計測結果

計測結果は、従来1/3オクターブ・バンドにて解析していたが、ノイズ・リミット・インジケータは今回1/1オクターブ・バンド分析用に使用したため、パターンおよび精度が若干違つてくる。したがつて、従来の計測資料と比較して定義づけるのは十分でない。ただし、種々状態の変化によるパターンの変化を相対的にみることは十分意義をもつと思う。

後述のごとく、1/1オクターブ・バンド分析結果はノイズ・リミット・インジケータとデータ・レコーダに差がないことが判明したので、上記の相対変化をみるのにはノイズ・リミット・インジケータで十分だと思われる。

障が判明し、これを修理したが、なおもモータ回転せず。したがつて、電源部からコントロール部をチェックするとトランジスタ（サーボ系統）2個がパンクしていた。本船にも予備品がなく、型式の若干異るトランジスタを使用したが、モータの回転が若干高く、そのトランジスタも数秒でパンクした。故障したトランジスタ以前の回路にも不具合点が認められたので、それ以上の原因究明が不可能となつた。ゆえに、やむをえずデータレコーダはCutした。（メーカの修理結果もほぼ上記のとおりであつた）

(a) 主機関は好調に稼動され、ノンストップで航海を終えた。したがつて、異常振動は採取できなかつたが、正常音はかなりの成果が得られたと思う。以下は正常音の計測結果である。

(b) 回転数の違う代表的な計測結果を第4.4.5図～第4.4.8図に示す第4.4.5図、第4.4.7図はBallast Cond.第4.4.6図、第4.4.8図はFull Cond.である。70rpm以上はほぼ同じ音帯と考えてよいだろう。50rpmは100Hz以上は70rpmと同じ音帯であるが、500Hz以下はかなり差がある。

(c) 第4.4.5図より、11／1計測記録87rpm（番号④）が他の記録より高い。このときの軸振動計は複振幅で約40μである。

84rpmで番号④より2Hz前に計測した番号③は、軸振動計が約50μである。番号③は番号④よりも音帯がやや低い。

なお、通常HOR航海時の軸振動計はHPタービンで複振幅20～25μである。

(d) ターニング時

暖機中のターニングを高圧タービンは第4.4.5図、低圧タービンは第4.4.7図におのおの示す。

(e) 音帯がほぼ同じと考えられる70rpm以上の記録をプロットしたものをHPタービンを第4.4.9図、第4.4.10図に、LPタービンを第4.4.11図、第4.4.12図に平均値[*2]を示す。

本図はマラッカ海峡通過時もプロットした。また、横幅が広いほど安定し、縦方向に長いほど不安定でバラツキが大きいことを示す。

この結果、HP、LPタービンともに、ほぼ一定のパターンを示している。しかし、500Hz以上は比較的安定しているが、250Hz以上はバラツキが大きい。

(f) 海上模様の影響

第4.4.13～4.4.16図に海上模様の影響について示す。

図中、○印は Calm sea（海上鏡面のごとし）～Slight sea（白波値少）

＊印は Moderate sea（全白波）～Rough sea （大波）

を示す。

Ballast & Full Cond.ともに、海上の影響は特にみられない。

(g) 積載状態の影響

Ballast Cond.（往航）とFull Cond.（復航）の比較を第4.4.17図、第4.4.18図に示す。本図は第4.4.13図～4.4.16図をそのままシフトして、往復航時を比較したものであり○印、＊印の海上模様も考慮した。

この結果、積載状態の違いによる差は特にないようである。

(h) 計測値のバラツキ

第4.4.19～4.4.22図に示す。

(b)～(g)項までは全て平均値を示した。[*2]

しかしながら、メータ指針は不安定で振れが大きい。

ノイズ・リミット・インジケータで自動記録する場合は、瞬間的な最大指示値が問題となる。[*3]したがつて、瞬間最大値と最小値をそれぞれ計測し、これをプロットした。

第4.4.19、4.4.20図は約2分間ノイズ・リミット・インジケータのメータを計測したもの。

＊2） 平均値；ノイズ・リミット・インジケータのメータ指針は、常に一定の値を指示していることは全サイクルにわたつて採るんどなく、たえず振れている。したがつて、比較的安定する値を平均値として求めた。また、比較的安定するところは、1カ所とは限らず2カ所あることもある。

＊3） データ・レコーダの自動記録信号は、ノイズ・リミット・インジケータのメータ指針が瞬間的にでもゼロ点を超えれば発信され、Recordされる。

第4.4.21、4.4.22図はコントロールパネルの赤ランプ指示にて30～60分間計測したもの。この結果、第4.4.19図のHPタービンにて、最大値と最小値の差、すなわちバラツキの小さいもので5dB、バラツキの大きいもので20dBとなる。

第4.4.20図のLPタービンにて、加速度レベルのバラツキは10～25dBとなる。いずれも低サイクルほどバラツキが大きくなる傾向である。

第4.4.21、4.4.22図は、第4.4.19、4.4.20図の範囲であり、長時間計測しても差がないことを示す。

(i) マラッカ海峡通過時

往復航時の比較をHP、LPタービンについておのおの第4.4.23、4.4.24図に示す。

この結果、低サイクル、特にタービン回転数成分（HPタービン125Hz、LPタービン63Hz）にて、復航時（Full Cond.）が大きくなる。

復航時は、プロペラ回転数が89rpmから85～87rpmに自然低下[*4]し船体振動が大きく感じられたが、この影響が入ったとも考えられる。マラッカ海峡通過以外の計測結果との比較は第4.4.9～4.4.12図に示すとおり、往航時はほぼ平均的な値であるが、復航時はバラツキの最大点にある。

軸振動計は往復航時ともに、通常航海時と大差なく、HPタービン約20μ、LPタービン約30μであつた。

(j) 補機の発停状況

第4.4.9～4.4.12図に示すように、補機の発停によつてレベルの変化は明確にあらわれない。

(k) 直進と操舵時の比較

舵角のMax.が5～8°であり、直進時と操舵時の差を明確にできなかつた。5～8°の舵角は直進時と差はない。

(l) 以上、ノイズ・リミット・インジケータによる計測結果（$1/1$ オクターブ・バンド）をまとめたが、データ・レコーダの収集資料を分析（$1/3$ オクターブ・バンドまたは$1/1$ オクターブ・バンド）した結果の考察をつぎに示す。

(2) データ・レコーダの分析結果

前述のように11/14にデータ・レコーダ故障のため記録は11/1（出港）から11/13の間実施できた。

1/3オクターブで分析した。また、ノイズ・リミット・インジケータと比較するために1/1オクターブについても分析した。

以下はデータ・レコーダの分析結果である。

(a) 1/1オクターブ分析結果（ノイズ・リミット・インジケータ分析結果との比較）

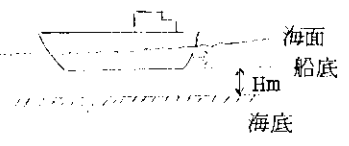
使用条件の同じ（計測時刻も同じ）データ・レコーダとノイズ・リミット・インジケータの分析比較を、HPタービンは第4.4.25図に、LPタービンは第4.4.26図に示す。第4.4.25、4.4.26図の使用条件等を第4.4.2表に示す。

この結果、高圧タービンの○印（84rpm）を除けば、低圧タービンもほとんど差がなく、ノイズ・リミット・インジケータの計測結果考察に述べたことは正しいと考えてよいだろう。

(b) 1/3 オクターブ分析結果

---

*4) 往復航時ともに、Speed Downせずに運航した。しかしながら、復航時（Full Cond.）は右図の船底と海底の距離（H*m*）最短8*m*までになつた。第4.4.23、4.4.24図の(68) (69)はH＝12～15*m*における計測結果である。



a　回転数によるパターンの比較

第4.4.27図　　高圧タービン

第4.4.28図　　低圧タービン

b　補機使用の影響

第4.4.29図　　補助発電機

第4.4.30、4.4.31図　カーゴオイルポンプ

第4.4.32図　　コンプレッサ

第4.4.29～4.4.32図に示すように、補機の発停によつて高圧、低圧タービンともに影響がない。

c　海上模様の影響について（第4.4.33図）

第4.4.33図はマラッカ海峡通過直前からのHOR.航海時について、V.Smooth～Slight sea（比較的静か）とModerate～Rough sea（荒海）に分けて比較したが、ノイズ・リミット・インジケータと同じく海上模様の影響はほとんどないものと思われる。

d　マラッカ海峡通過時（ただし往航・Ballast Cond.のみ）

第4.4.29図の補助発電機使用時がマラッカ海峡通過中を示す。高・低圧タービンともその差はない。ただし、復航時（Full Cond.）は計測記録がないため不明である。

e　船の進行方向一直進または旋回

高圧タービンでデータ・レコーダ計測No.（110）、（111）、（117）、（123）、

低圧タービンで（109）、（112）、（118）、（124）、（127）が舵角2°～5°の運航である。これらの計測記録（添付資料377～385ページ）から直進時と比較しても大差ない。

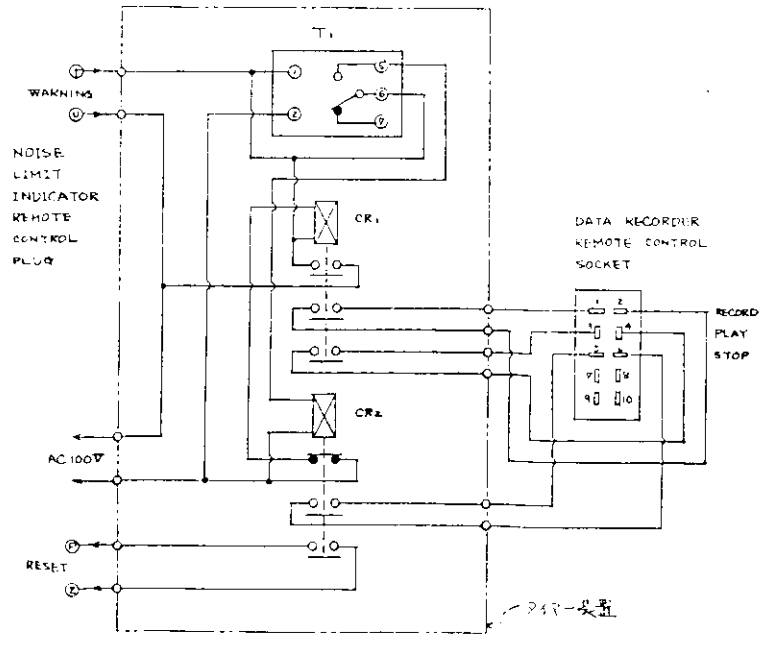
今回は舵角が5°以下と小さいので差はないが、さらに大きな舵角になると従来の実績ではパターンの変化は若干あらわれるようである。

f　軸振動とタービン回転数成分、Lin.成分について（H成分）

第4.4.34図（その1～その4）に示す。本図はプロペラ回転数の変化に伴う軸振動、タービン回転数成分およびLin.成分の変化を高・低圧タービンについて相互の関係を示したものである。

ただし、H成分は中心周波数（バンドの）の中間に位置するときは大きい方の値をプロットした。

本図からは、軸振動計の指針変化とH成分およびLin.成分とが必ずしも一致しないようである。



T_1　：タイマ（設定時間10～360秒繰返し精度±5％）

CR_1：電磁リレー（接点数3a、動作電圧AC100V）

CR_2：電磁リレー（接点数2a・1b、動作電圧AC100V）

使用温度（－10～＋60℃）

相対湿度（45～85％）

電源電圧（AC100V）

電源周波数（50／60Hz共用）

第4.4.1図　タイマ装置回路図

〔動作説明〕

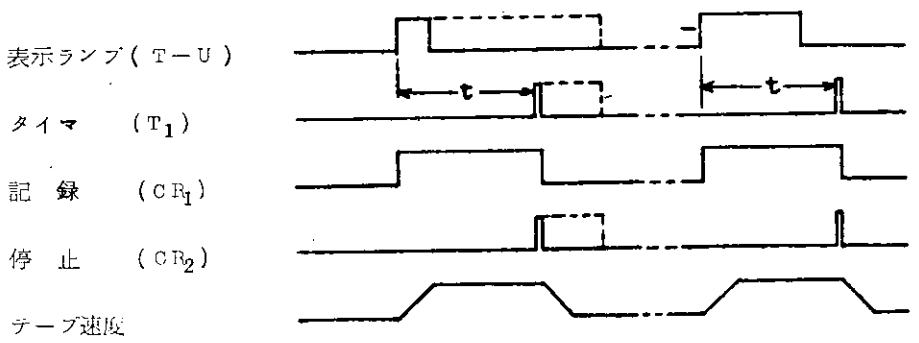
ノイズ・リミット・インジケータで測定中の高圧および低圧タービンの振動加速度レベルが、各バンドパス・フィルタごとに前もつて設定したリミットを越えると、リモート・コントロール・ボックスの表示ランプが点灯すると同時に、警報用出力端子TおよびU間が短絡され、リレーCR_1 およびタイマT_1が作動し、データ・レコーダがスタートしてデータを記録する。

タイマの設定時間に達するとリレーCR_2 が作動し、データ・レコーダを停止すると同時にリレーCR_1 を開放する。

なお、データ・レコーダの送り速度が整定するまでに約5秒（テープ速度60 ips のとき）かかるので、後のデータ解析に必要な記録時間にこれをプラスした時間をタイマにセットする必要がある。

また、リレーCR_2 が作動してからデータ・レコーダのテープ送りが停止するまで最大約5秒（テープ速度60 ips の時）かかるが、この間、データの記録は行なわれない。

〔動作シーケンス〕



Specification

Frequency Range: With the output amplifier switched to "Lin" positions the response for the entire instrument is linear to within
±0.4 db from 20 c/s to 20000 c/s, and
±1.2 db from 2 c/s to 50 kc/s
For the input amplifiers only, the response will be linear to within
±0.2 db from 10 c/s to 50 kc/s
±0.4 db from 2 c/s to 50 kc/s
For the output amplifiers only, the response will be linear to within
±0.2 db from 20 c/s to 20000 c/s
±0.8 db from 2 c/s to 50 kc/s

Sensitivity: 32—140 db re. 1 μVolt "normal"
27—140 db re. 1 μVolt with "Sensitivity Increase"

Noise Measurements. Employing a microphone with a sensitivity of 5 mV/μbar the sound level range that can be measured is: *32—140 db S.L.* (with increased sensitivity: 27—140 db S.L.), using ½ or ⅓ octave filters.

Vibration Measurements. Employing an accelerometer with a sensitivity of 50 mV/$\overline{G}$ the vibration range that can be measured is: *0.001 g to 200 g*, using ½ or ⅓ octave filters.

Input Impedance: Approximately 150 kohms with input attenuator in position 80—120 db.
Approximately 500 kohms with input attenuator in position 130 db.
Approximately 1.5 Mohms with input attenuator in position 140 db.
The input is paralleled with approximately 80 pF.

Attenuator Ranges: "Input Level" attenuator: 60 db in 10 db steps.
"Indicator Level" attenuator: 48 db in 1 db steps.

Amplification: Maximum overall amplification: 100 db.
The amplification of the input amplifiers when the "Input Level" attenuator is set to the most sensitive positions is *40 db*. When the "Sensitivity Increase" button is depressed, the amplification can be increased by *5 db* to *45 db*.
The output amplifiers give an amplification of 55 db when the "Indicator Level" attenuators are set to their most sensitive position.

Output Voltage: AC output terminals: Maximum 7 V, sinusoidal waveform.
Approximately 2.24 V when relay operates.

Output Impedance: AC output terminals: Approximately 25 ohms.

Meter: Scale divisions of 1 db from —12 db to +3 db.
Full deflection for approximately 3.16 V.
0 db deflection for approximately 2.25 V.

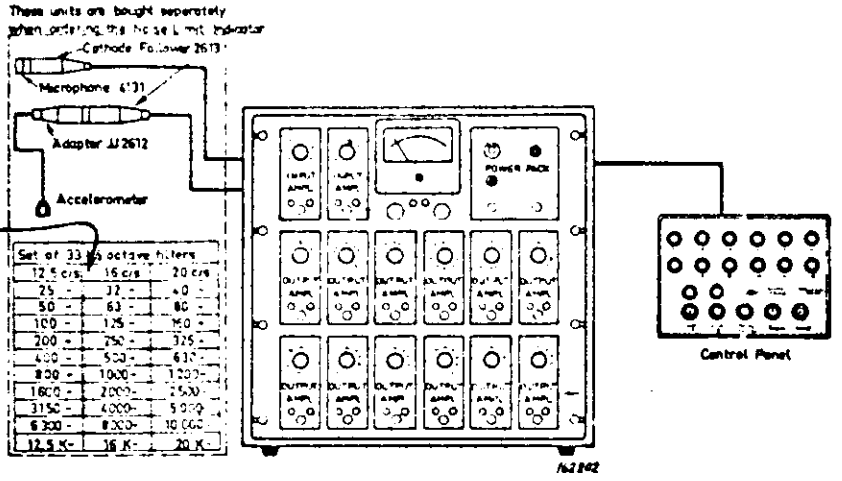
Type of Rectification: Rectifiers for relays as well as the meter rectifier are of the Quasi-RMS type.

Damping: The meter is provided with two degrees of damping, "Slow" and "Fast". The relay circuits also are provided with two levels of damping, "Low" and "High", which correspond to the damping of the meter.

Stability: The reference voltages vary by less than 0.2 % for a 10 % variation in power line voltage.

Power Supply: The instrument can be operated from power lines of 100—115—127—150—220 and 240 Volts, 50 to 400 c/s.
Power consumption approximately 43 Watts:
with all lamps lit, aproximately 67 Watts.

第 4. 4. 2 図　ノイズ・リミット・インジケータ



このレンジのカウンターを使用する。

Fig. 1. The Noise Limit Indicator shown with the necessary extra items for the measurement of noise and vibration. Two input channels and twelve output channels with filters can be plugged in.

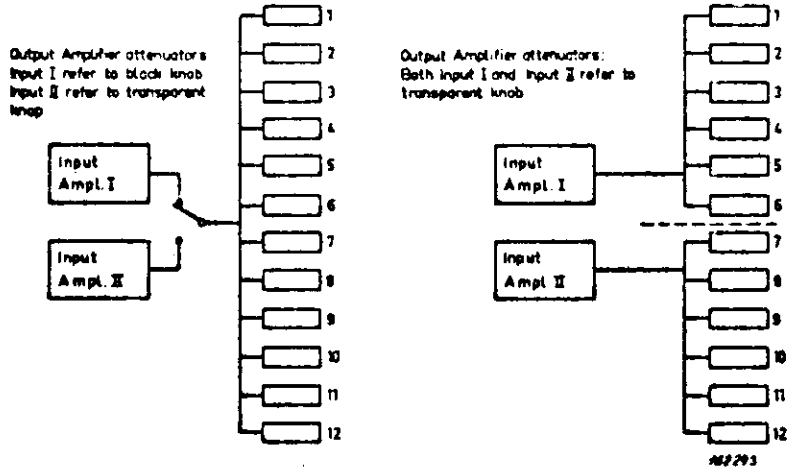


Fig. 2 *The instrument can be connected for successive or simultaneous operation of the two input amplifiers.*

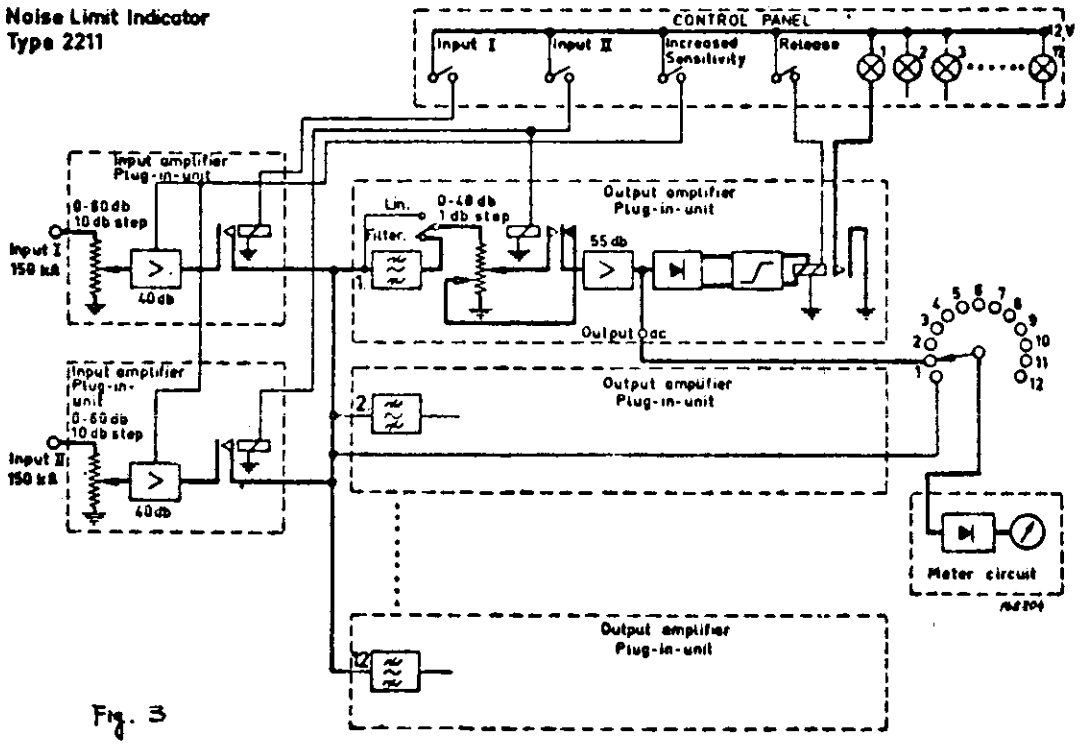
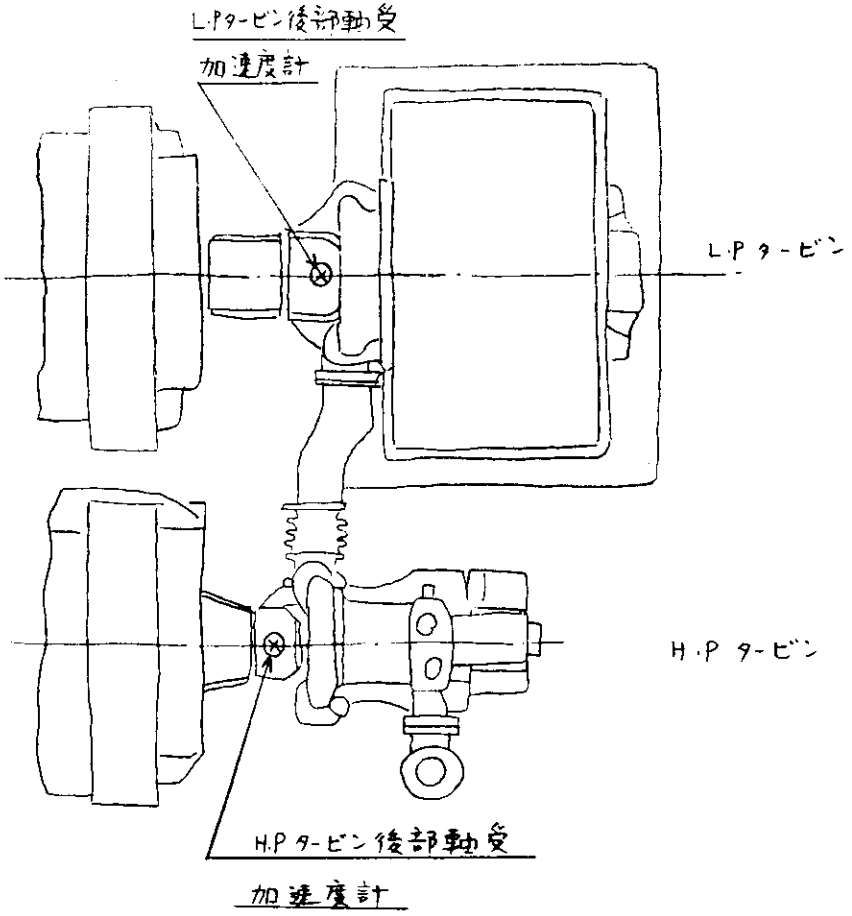
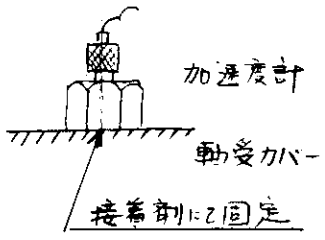


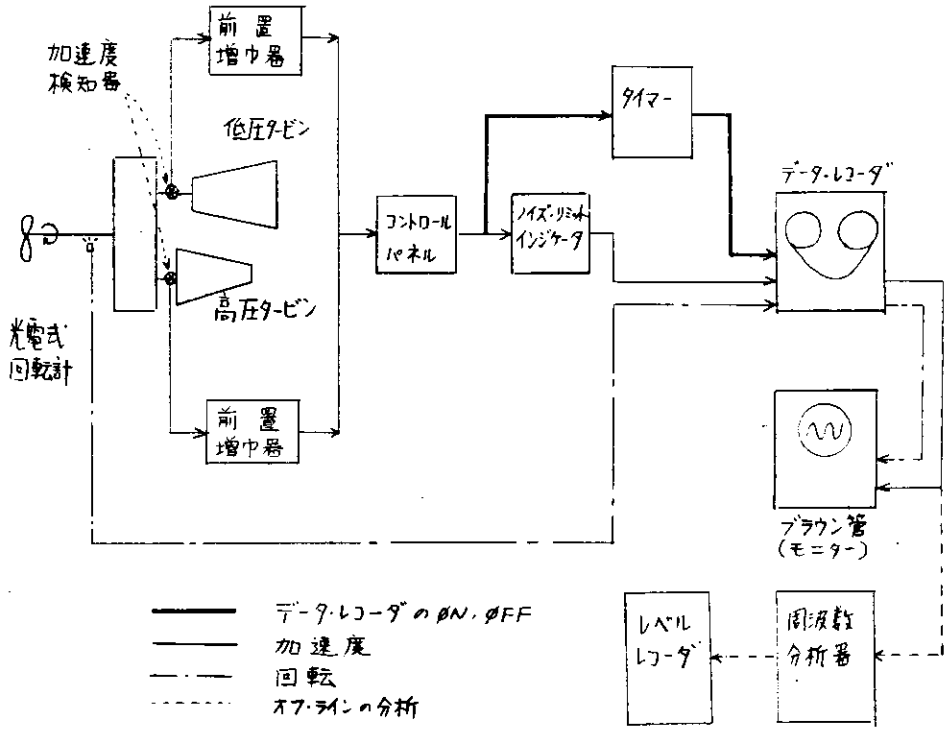
Fig. 3





第4.4.3図　計測個所

〔計器構成〕



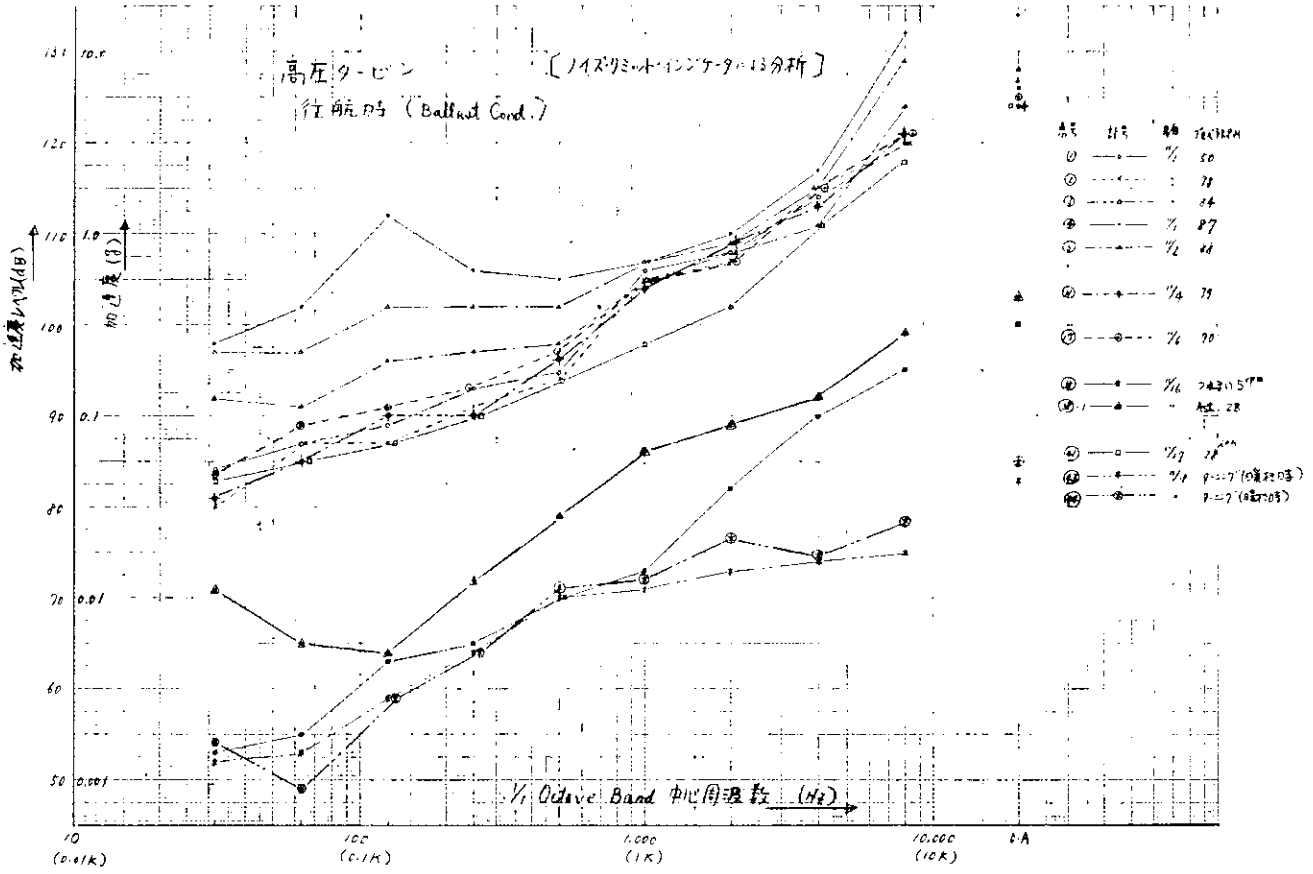
〔使用状況〕

(1) 高・低圧タービンの同時計測はできないのでコントロールパネルでいずれか一方にセットし計測した。

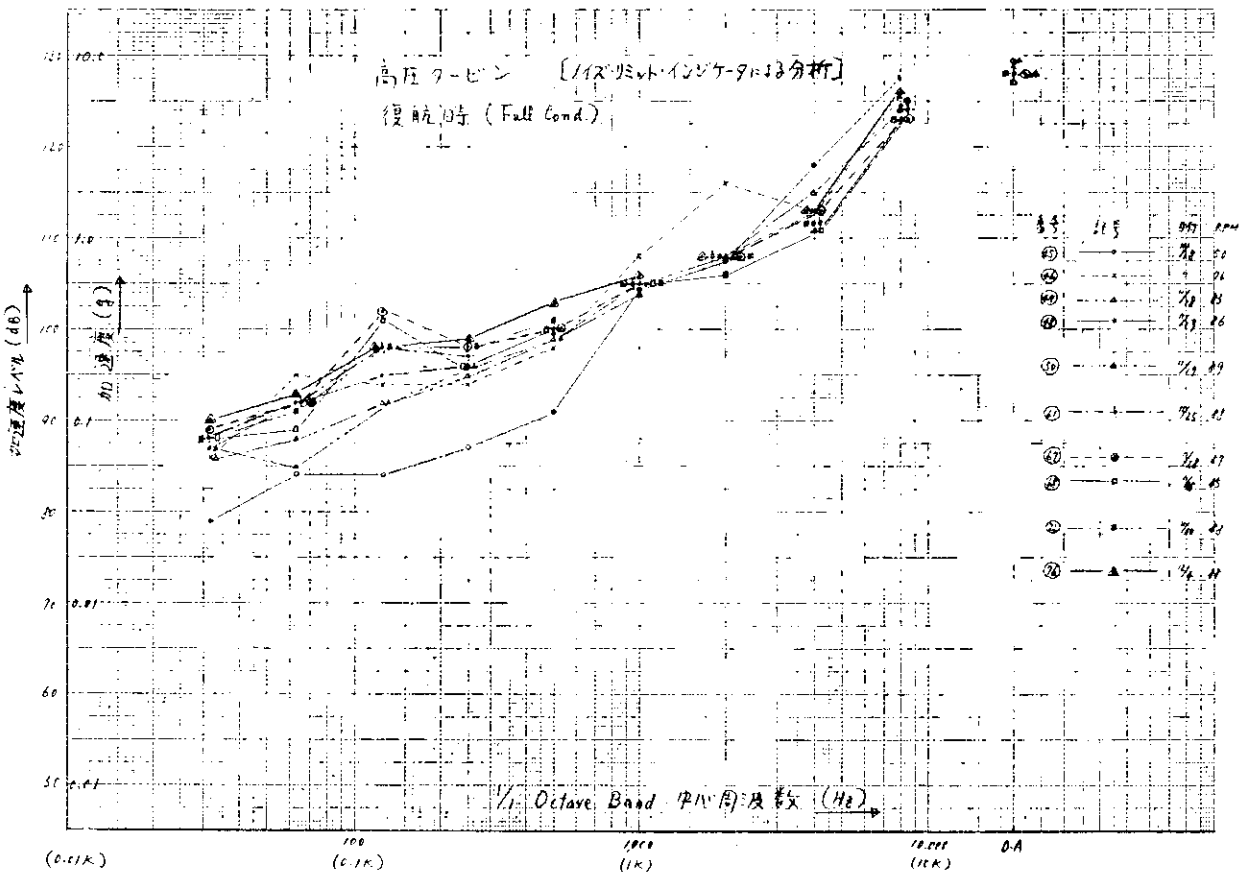
(2) 異常音計測のため、ノイズ・リミット・インジケータで正常値を求めて、これに余裕をもたせて自動記録を設定し、１日２４時間監視を行なつた。

(3) データ・レコーダ故障のため、１１月１４日以降はタイマ及びデータ・レコーダをカットして計測した。

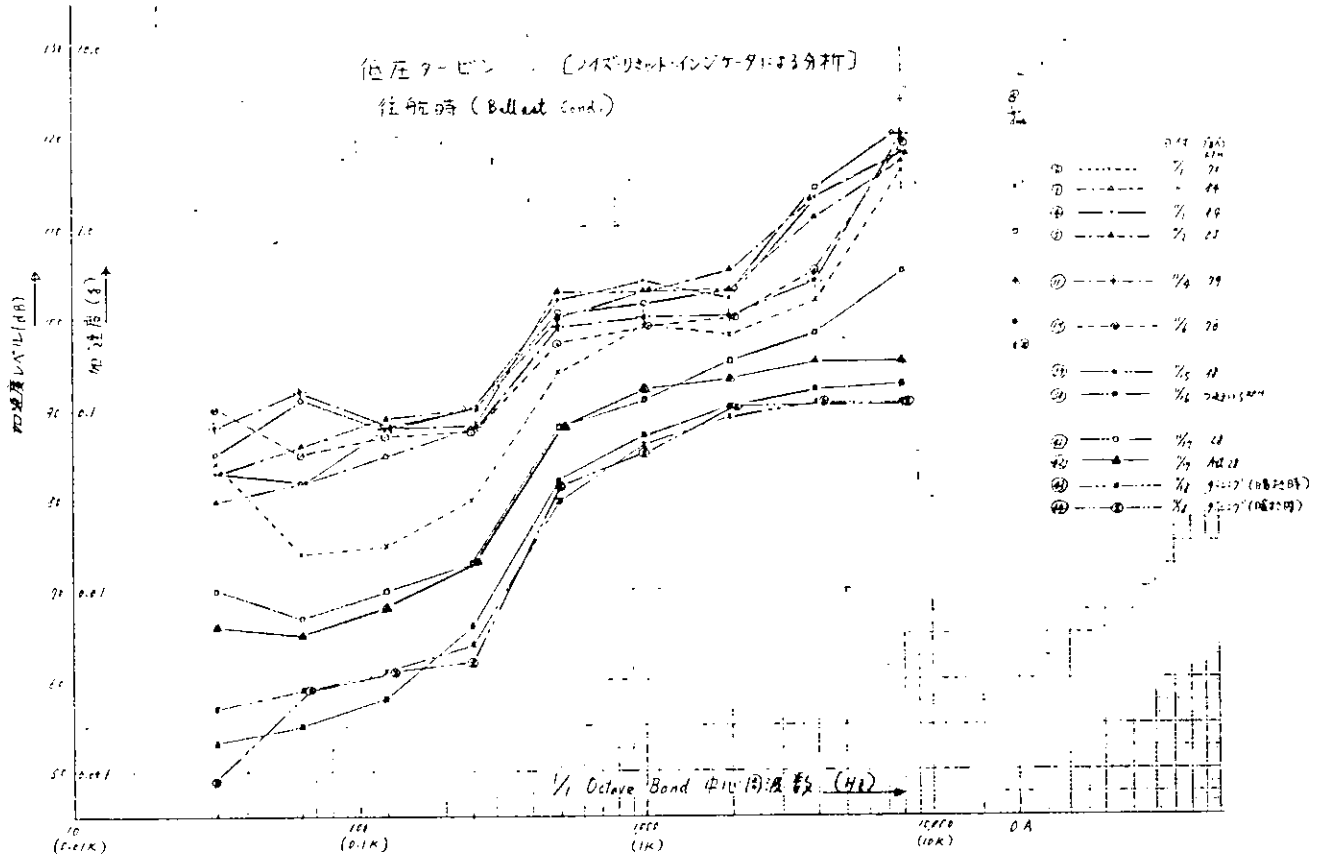
第4.4.4図　計器構成および使用状況


高圧タービン
復帰時 (Ballast Cond.)
〔ノイズリミット・インジケータによる分析〕
1/1 Octave Band 中心周波数 (Hz)

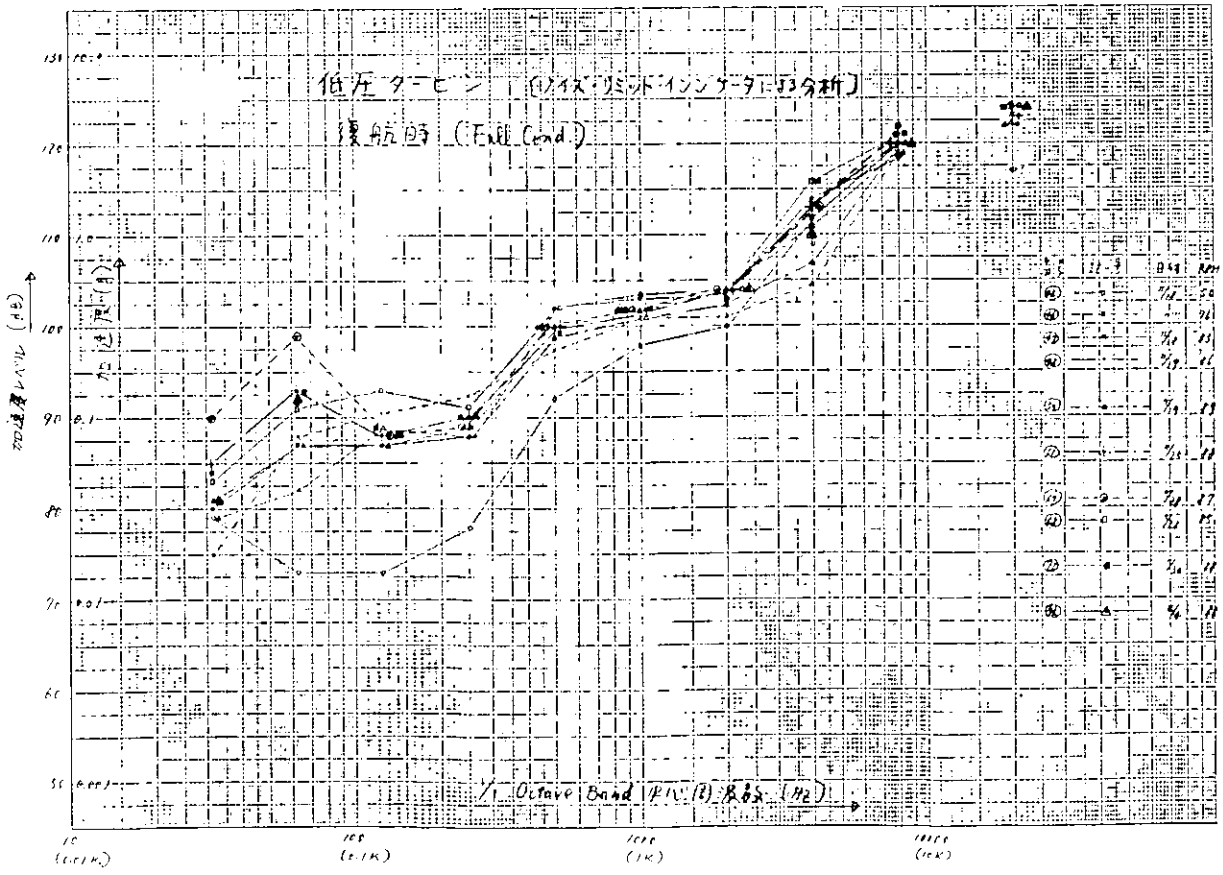
第 4. 4. 5 図


高圧タービン
復帰時 (Full Cond.)
〔ノイズリミット・インジケータによる分析〕
1/1 Octave Band 中心周波数 (Hz)

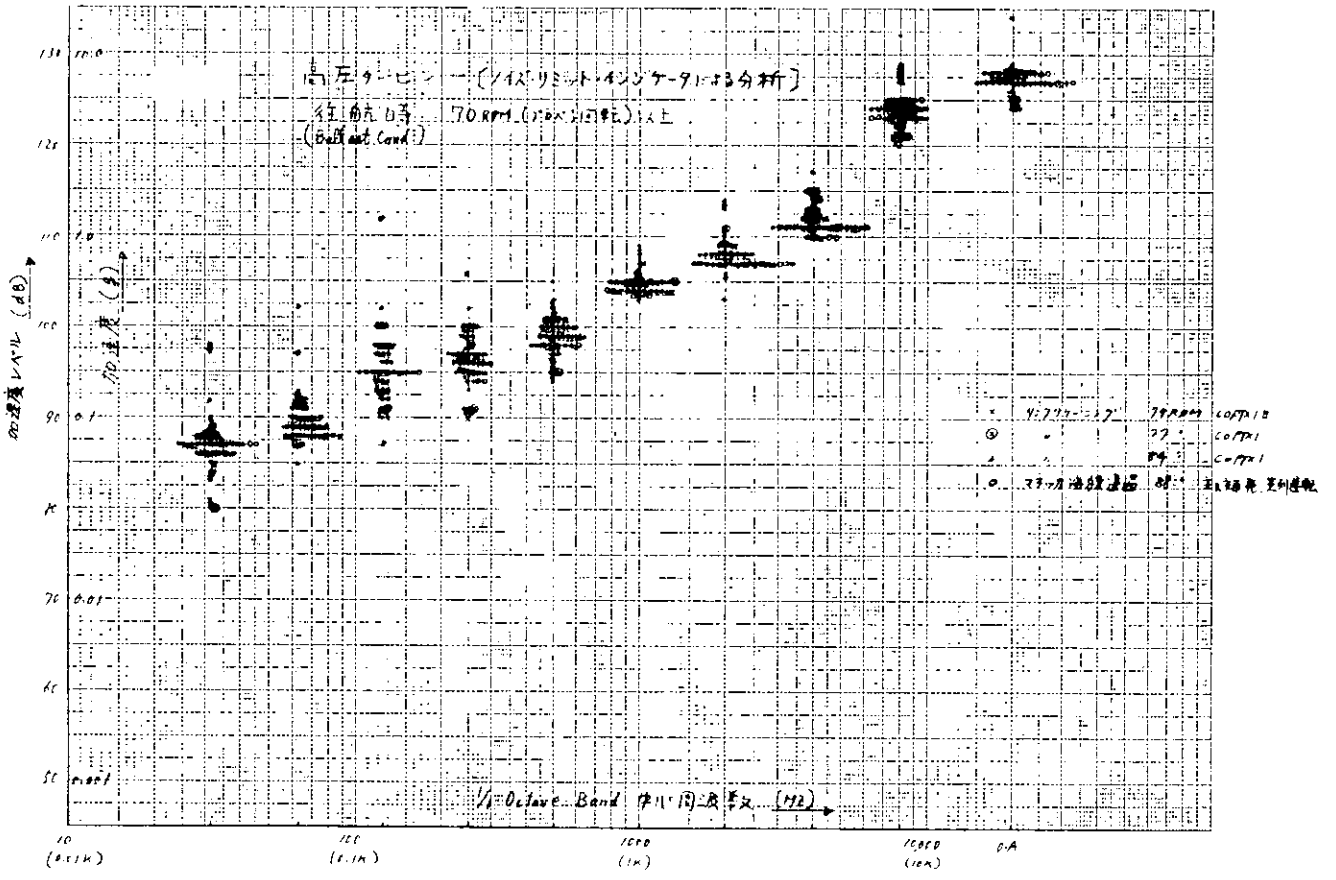
第 4. 4. 6 図


低圧タービン (ノイズ・リミット・インジケータによる分析)
往航時 (Ballast Cond.)
1/1 Octave Band 中心周波数 (Hz)

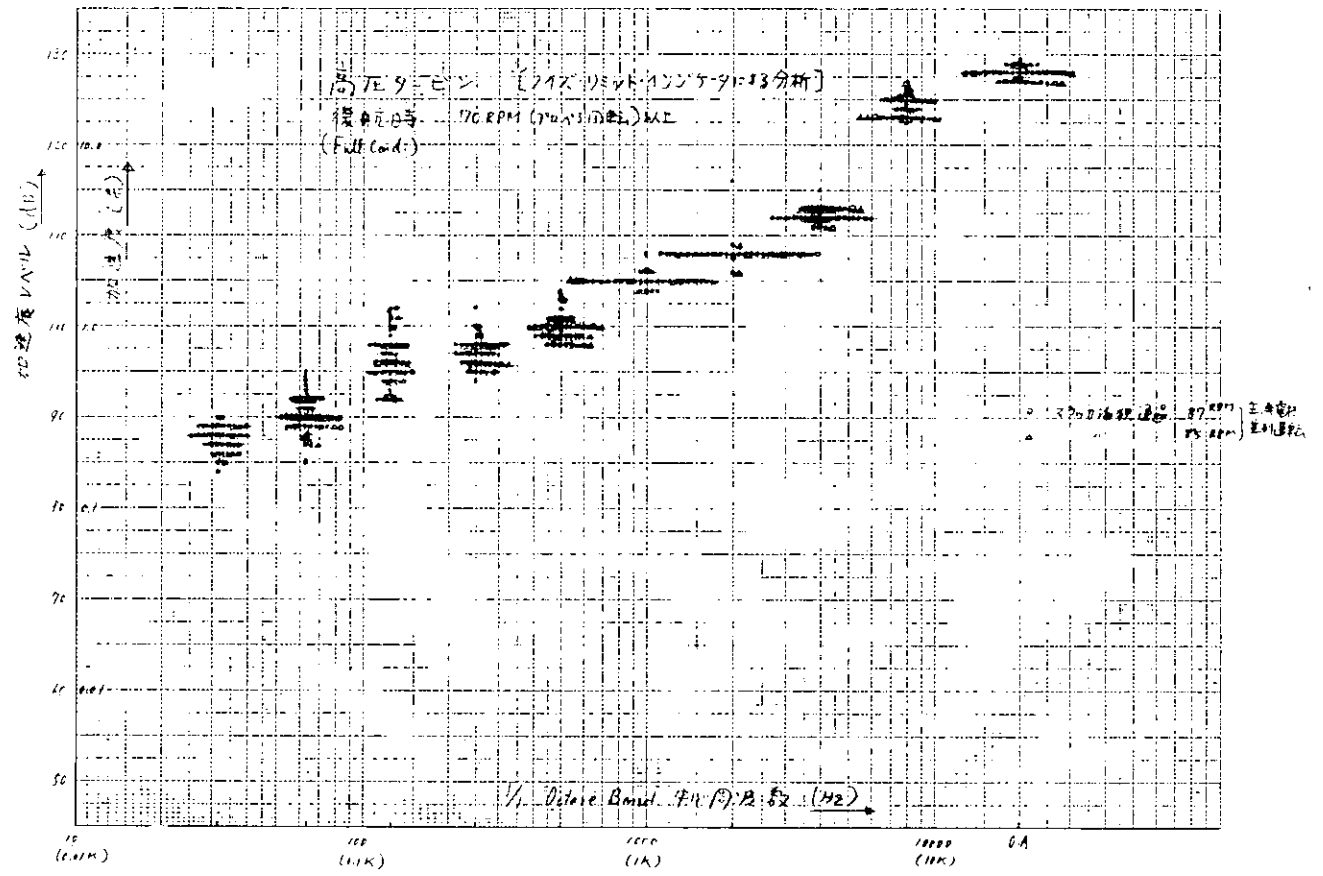
第 4. 4. 7 図


低圧タービン (ノイズ・リミット・インジケータによる分析)
復航時 (Full Cond.)
1/1 Octave Band 中心周波数 (Hz)

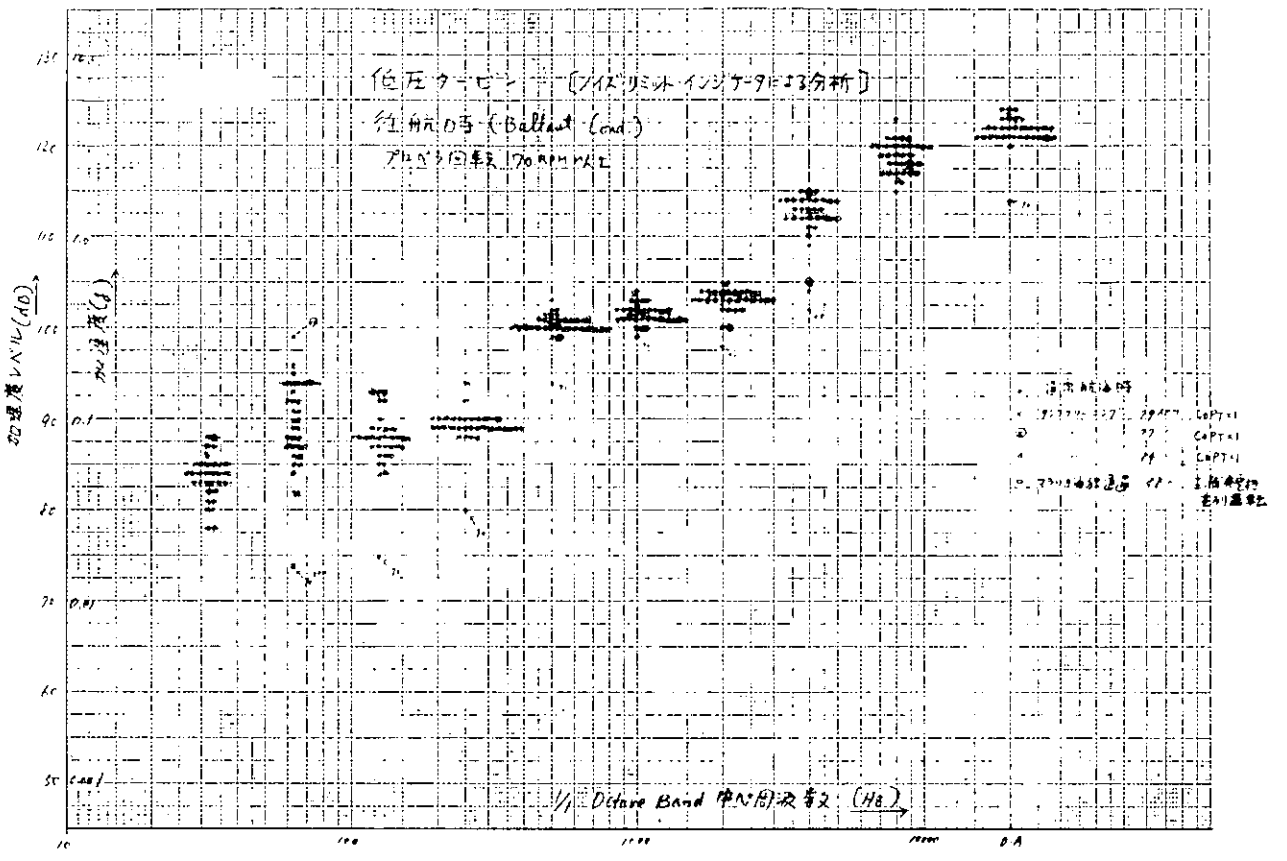
第 4. 4. 8 図



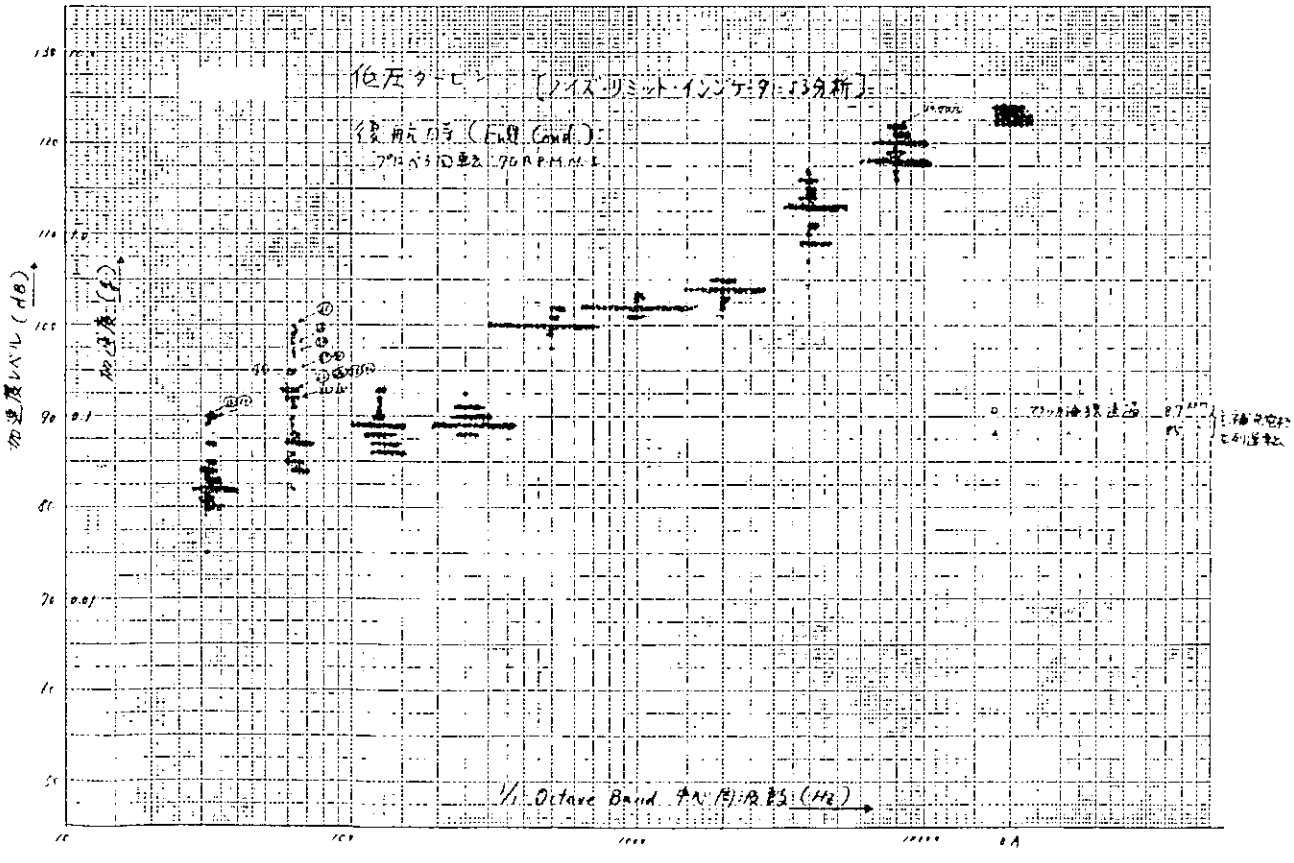
第4.4.9図



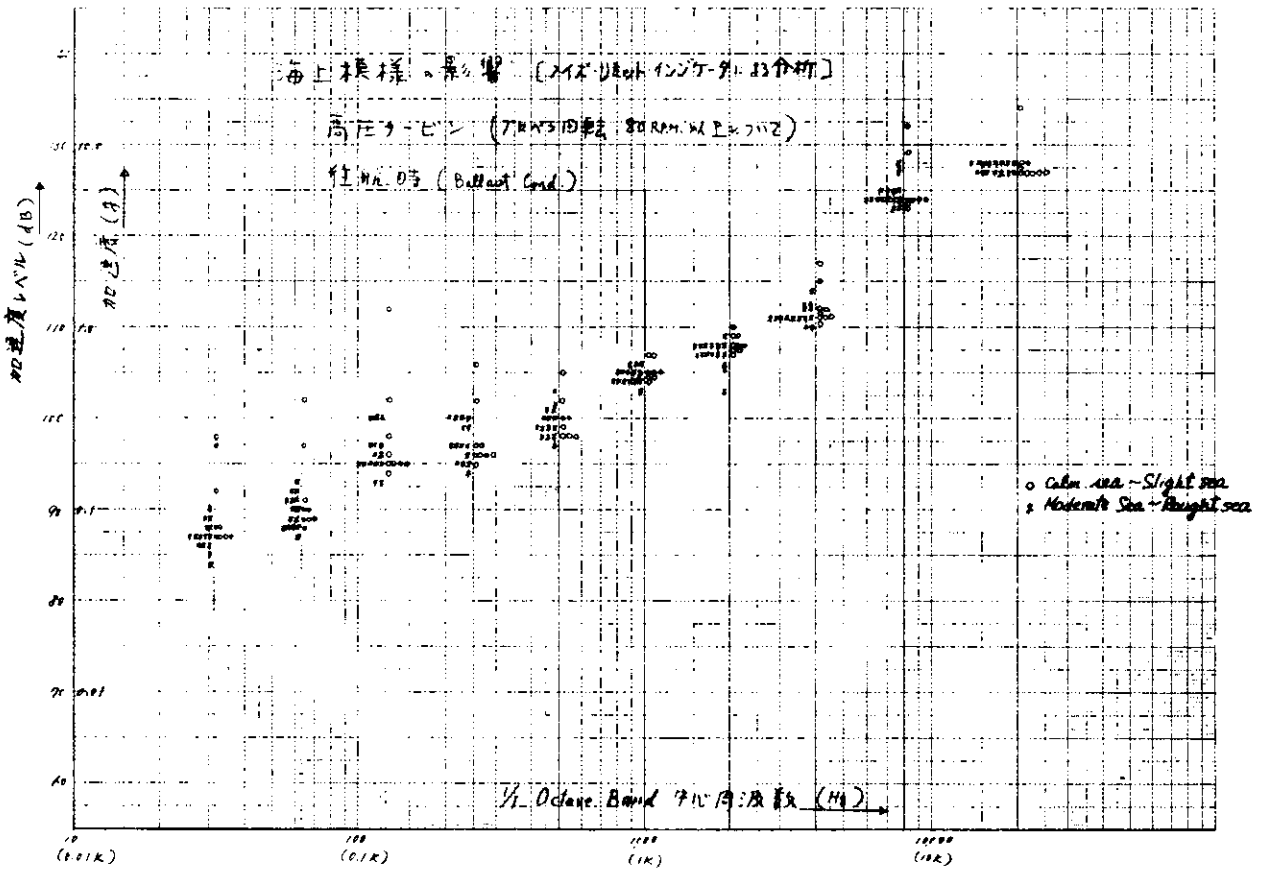
第4.4.10図



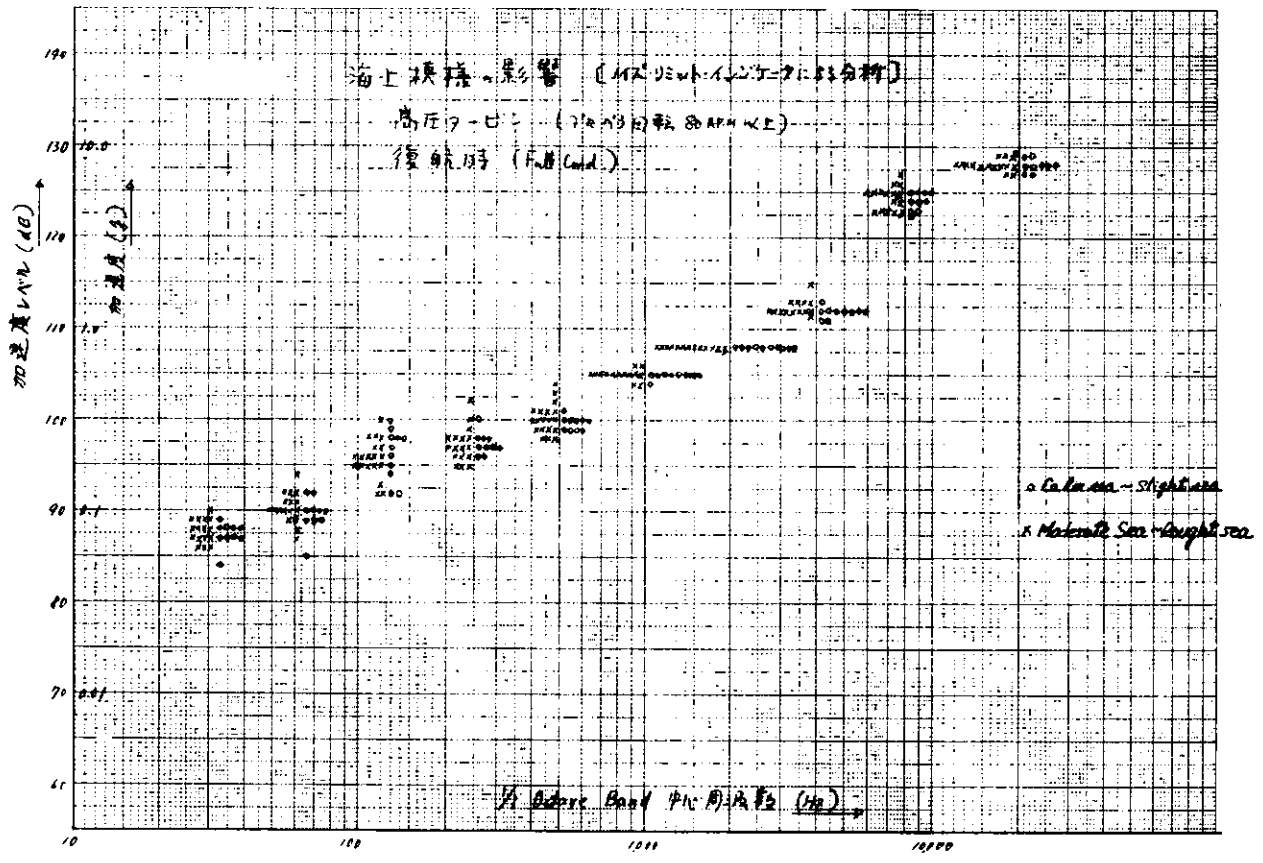
第 4.4.1.1 図



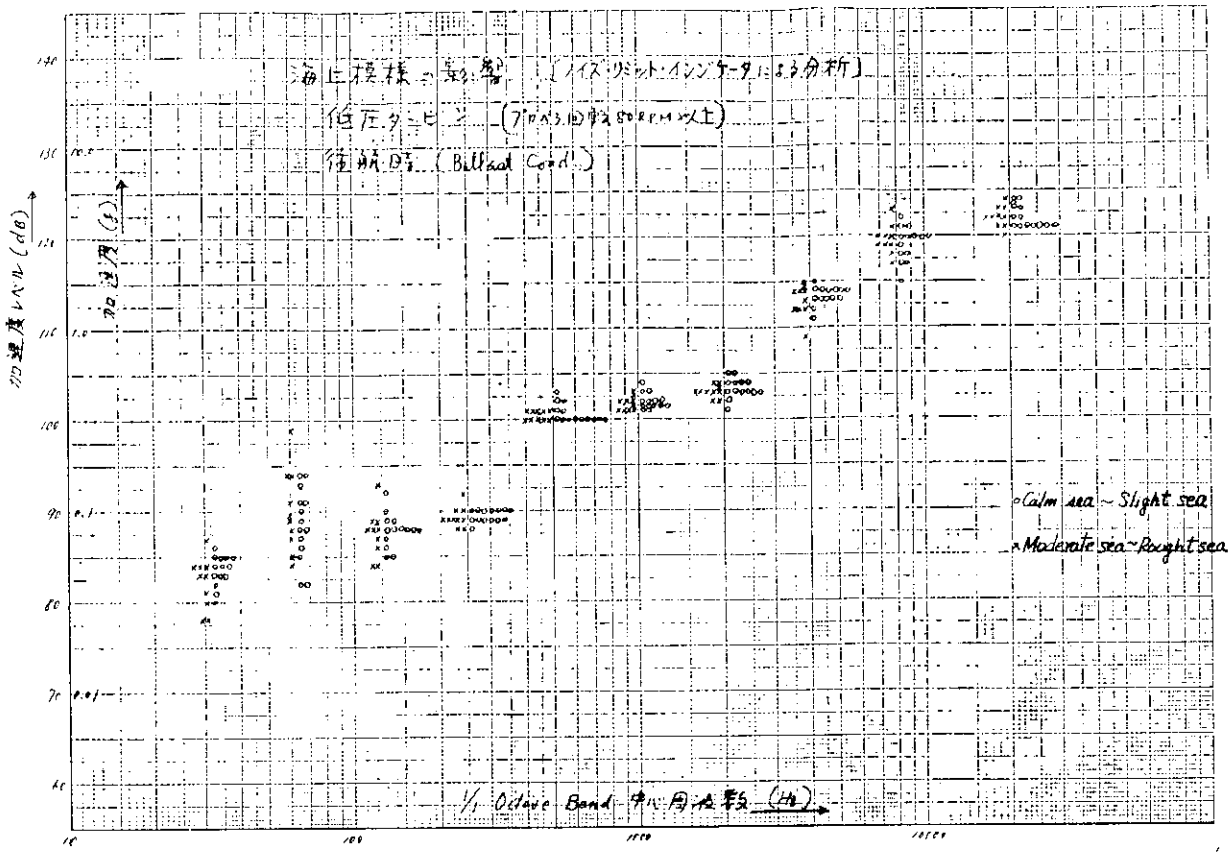
第 4.4.1.2 図



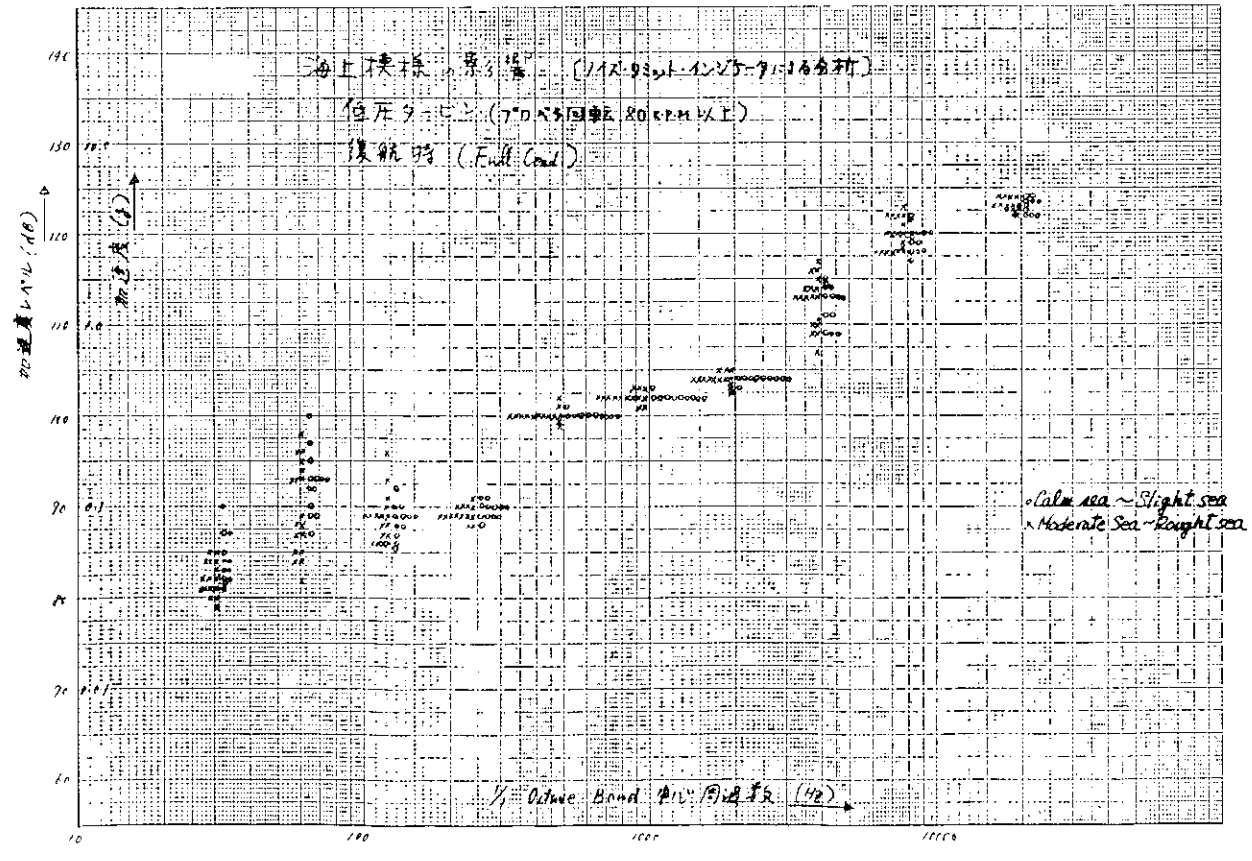
第 4. 4. 1 3 図



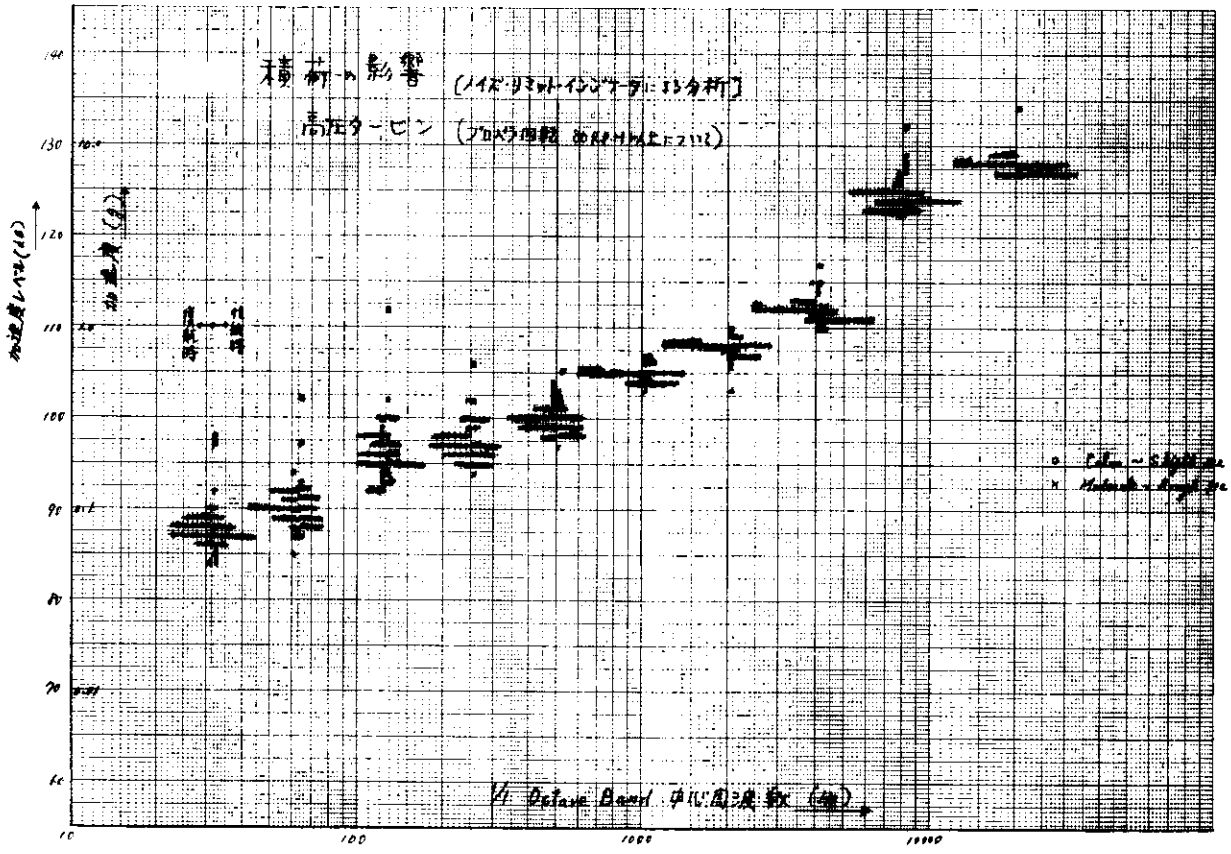
第 4. 4. 1 4 図



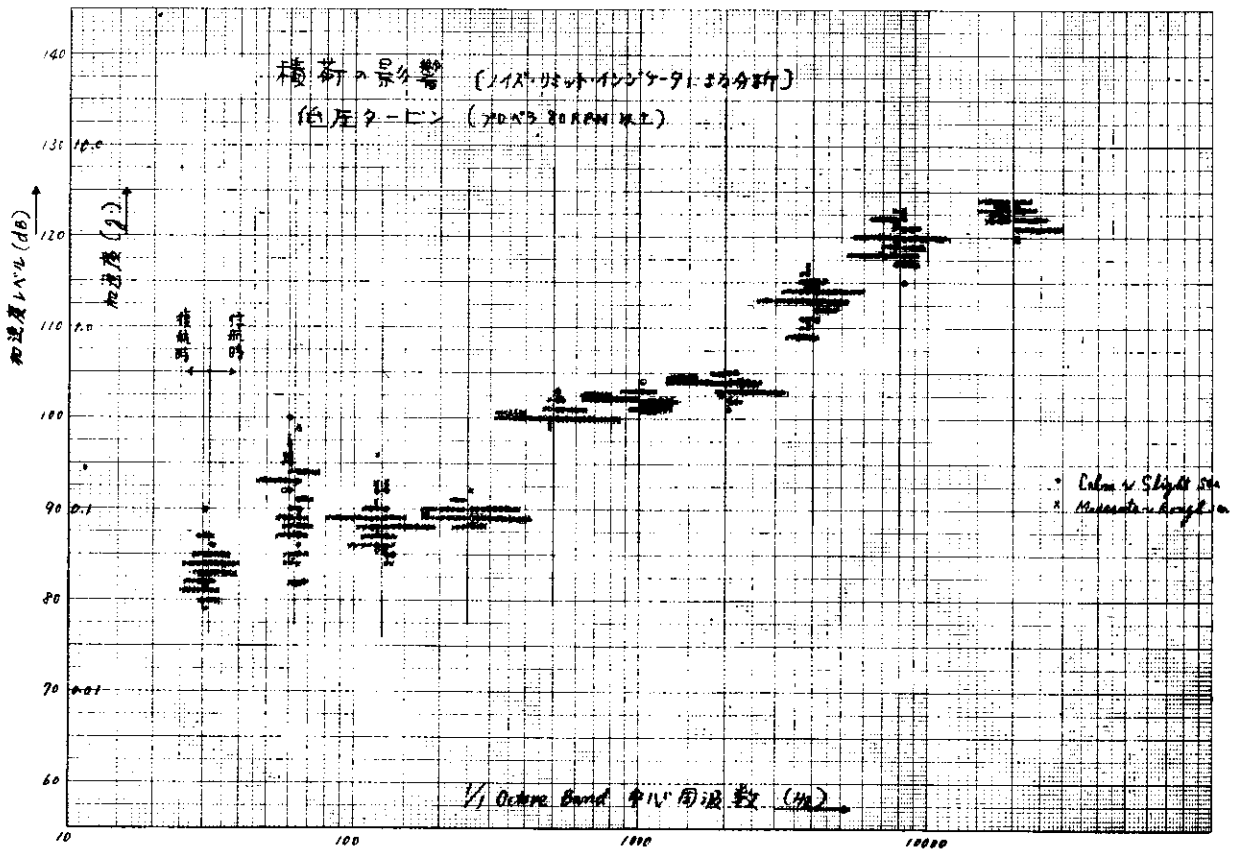
第4.4.15図



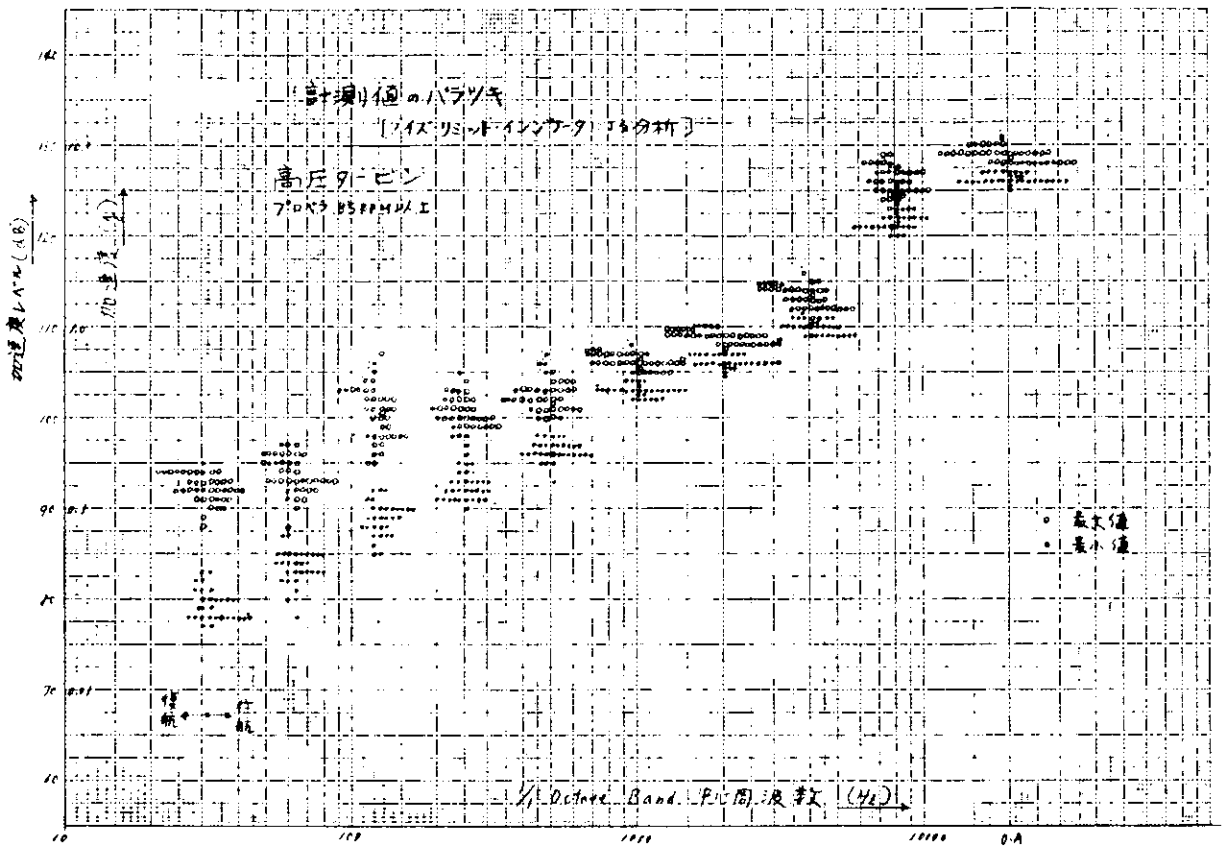
第4.4.16図



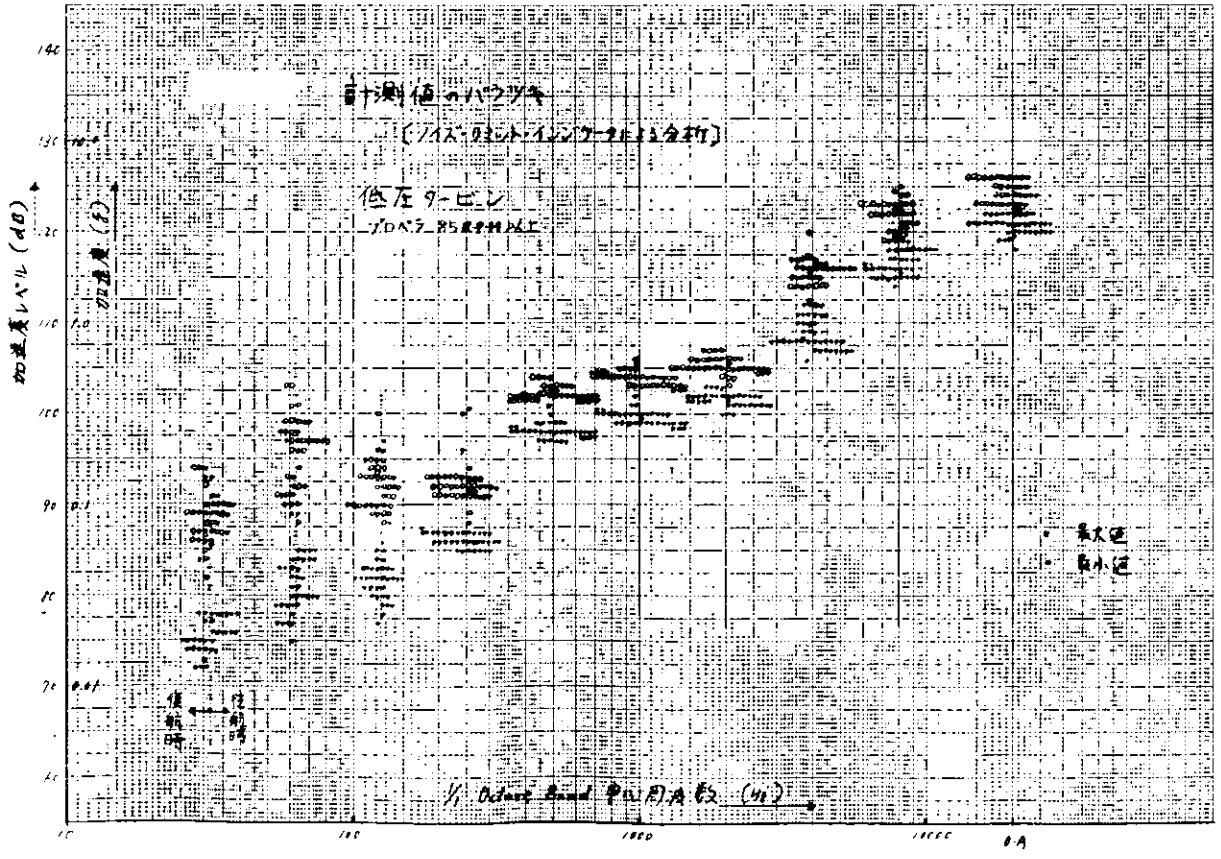
第 4. 4. 1 7 [図]



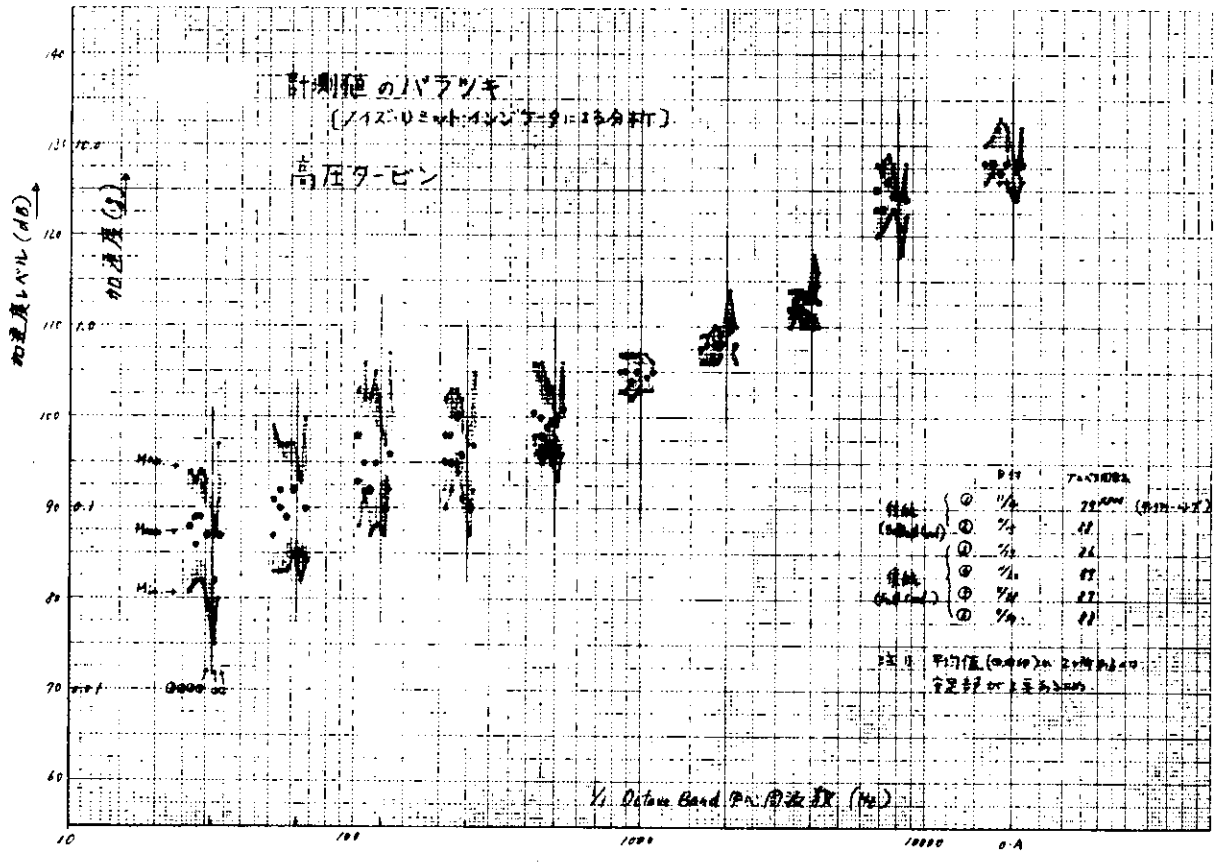
第 4. 4. 1 8 図



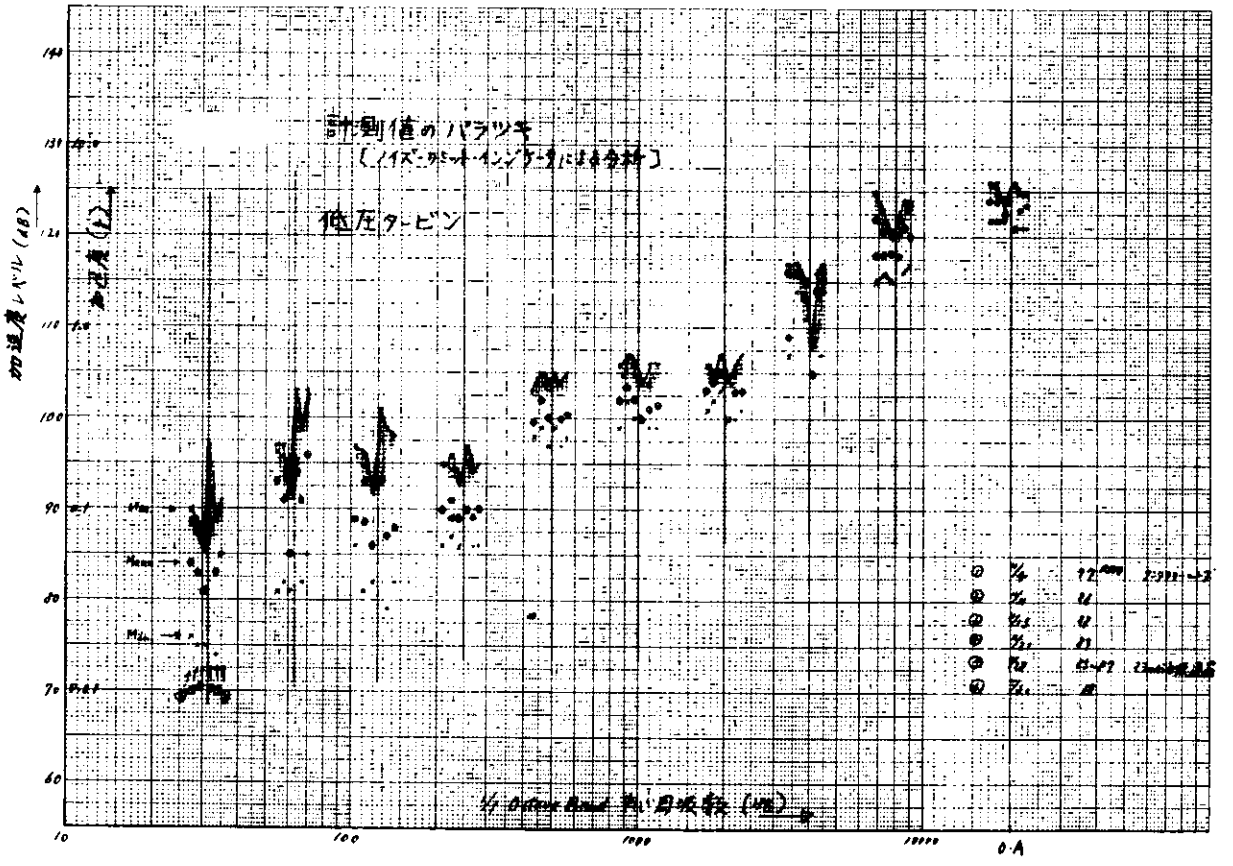
第4.4.19図



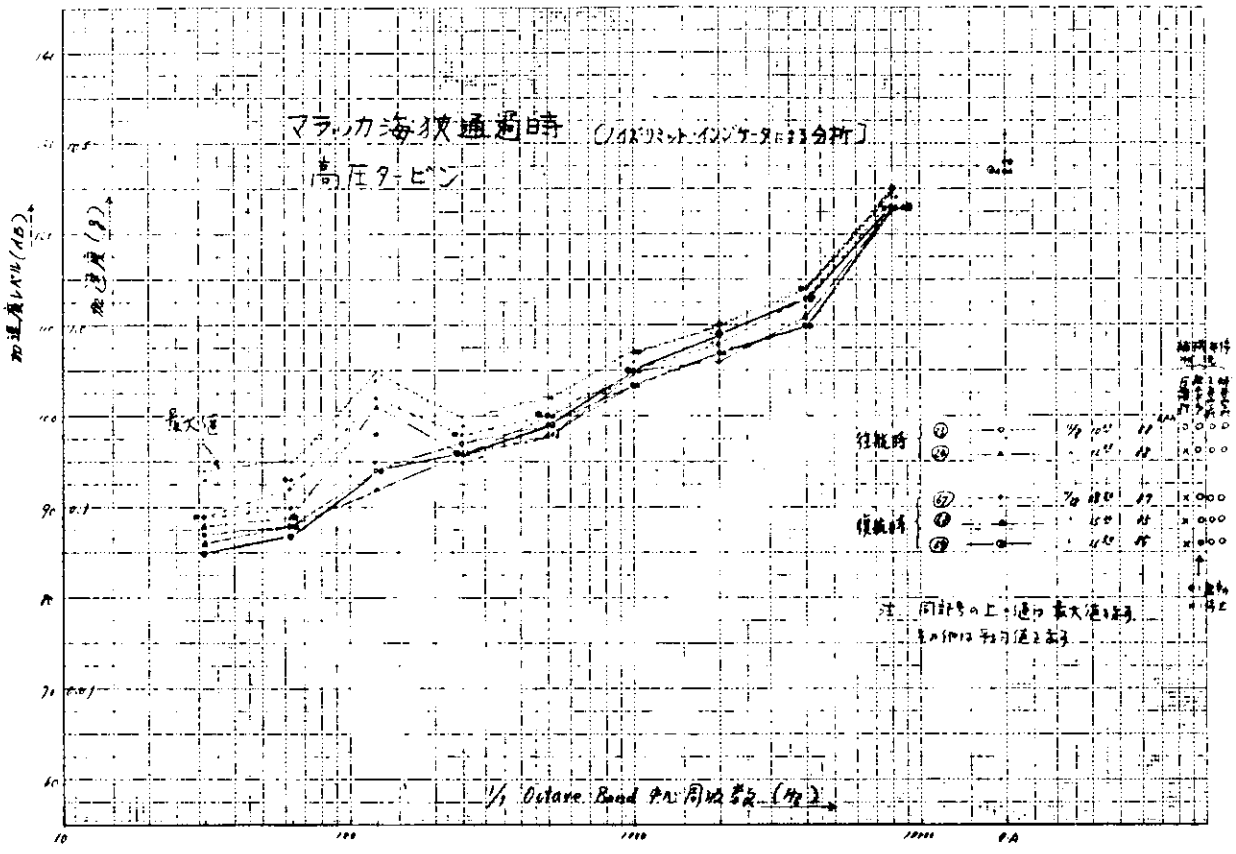
第4.4.20図



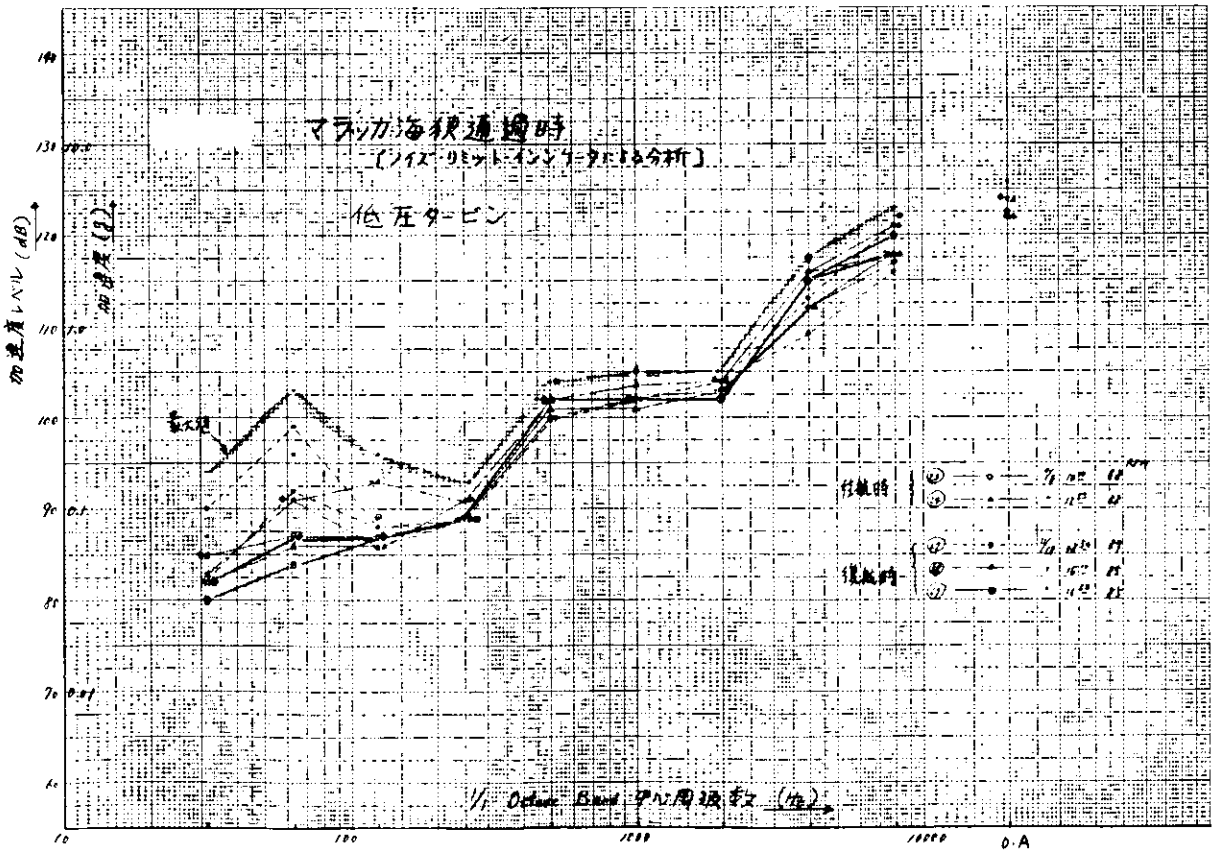
第 4. 4. 2 1 図



第 4. 4. 2 2 図



第 4. 4. 2 3 図



第 4. 4. 2 4 図

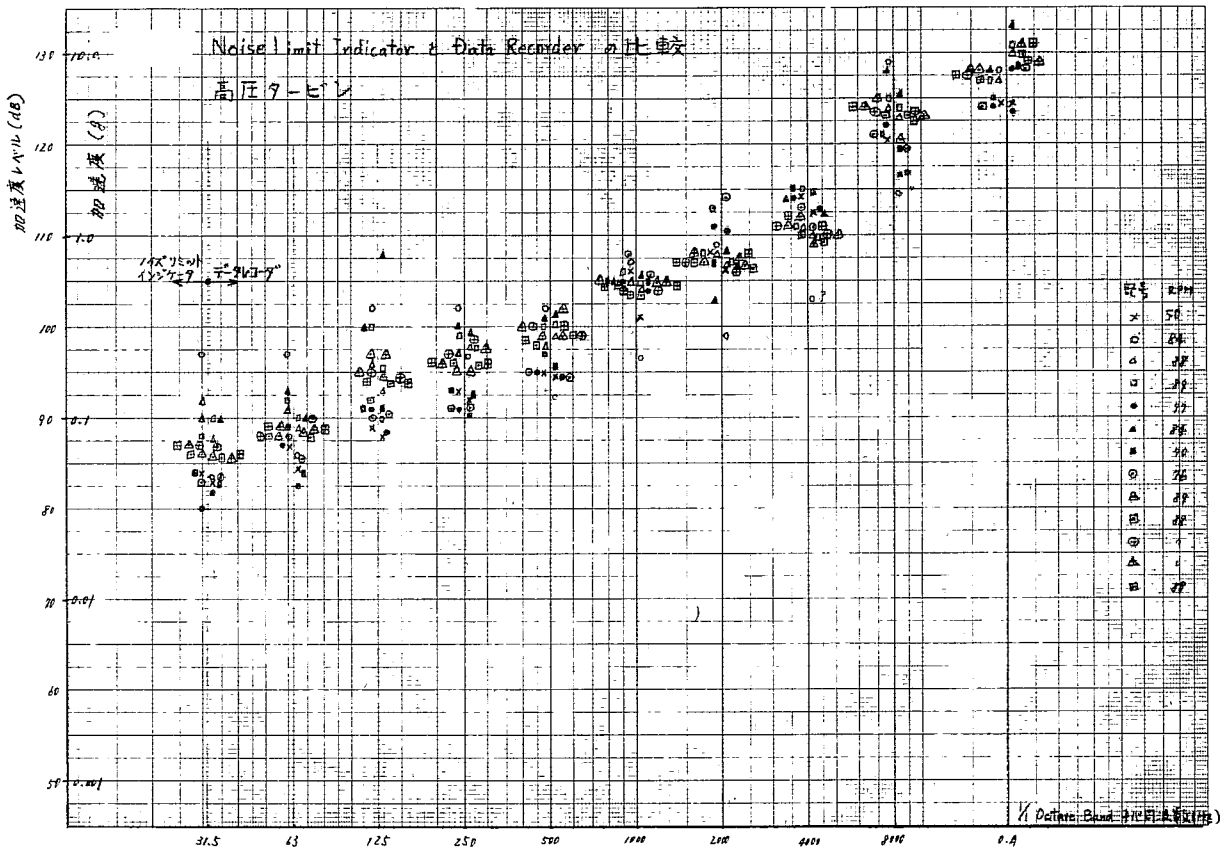
第4.4.2表　ノイズ・リミット・インジケータとデータ・レコーダの比較

1/1 オクターブ

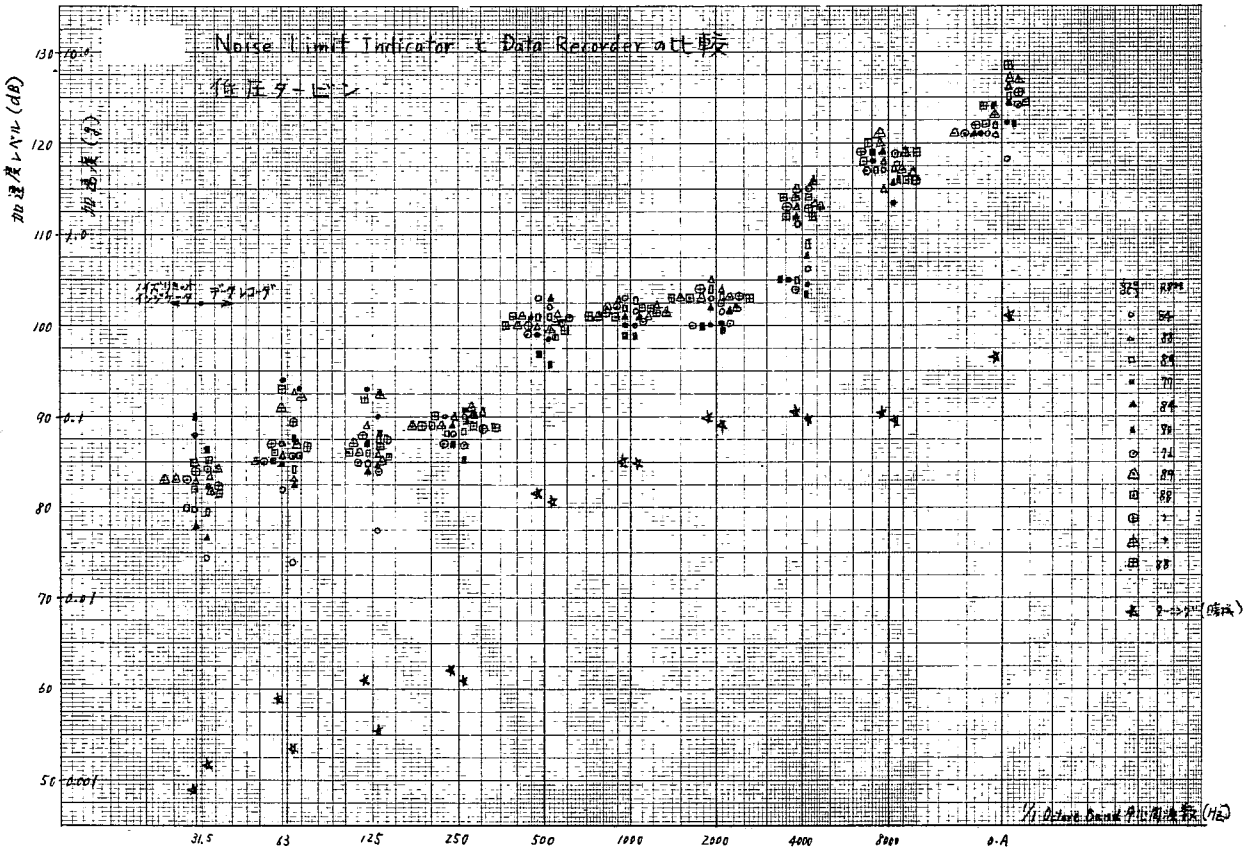
補機使用は下記記号にて示す。海上模様は第4.4.3表参照。

MG　：主発電機
AG　：補助発電機
COP　：荷役用ポンプ
FWP　：給水ポンプ
COMP　：圧　縮　機

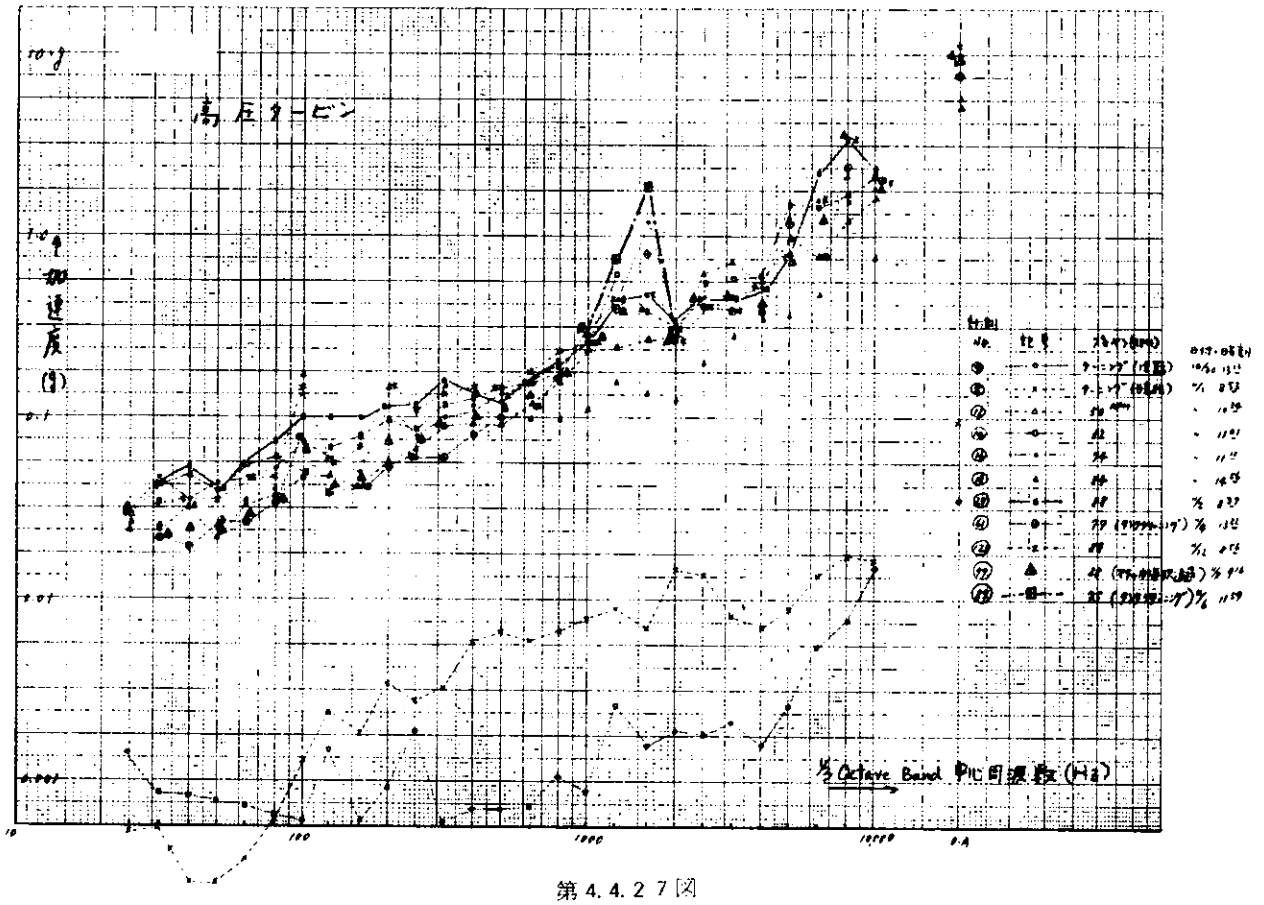
	記号	主機・補機・船体及び海上の状況 プロペラ回転数	日付	積荷進行	海上模様	補機使用	ノイズ・リミット・インジケータ 計測No.	時刻	データ・レコーダ 計測No.	時刻	備考
高圧タービン	×	50	11月/1日	Ballast 直進	Moderate	MG, AG, FWP, COMP	(1)	9°47′	(12)	10°34′	
	○	84	1		R' Rough	MG, FWP, COMP	(3)	16 30	(18)	14 56	
	△	88	2		Slight	NoiseL. DataRec. 同上 MG. Fwp	(5)	8 45	(27)	8 37	
	□	89	3		R' Rough or Rough	同上 同上	(9)	13 15	(42)	13 07	
	●	77	4			MG, FWP, COMP COP×1	(12)	13 25	(61)	13 22	タンクリーニング中
	▲	84	5			MG, FWP, COP×1	(15)	13 30	(74)	13 10	
	■	70	6			MG, FWP, COP×2	(17)	8 55	(82)	9 05	
	⊙	76	6		R' Rough or Rough	MG, FWP, COMP COP×2	(19)	17 42	(89)	17 30	
	⊛	89	7		Smooth	MG, FWP	(21)	18 45	(97)	18 35	
	⊡	88	8		Smooth or V. Smooth	MG, AG, FWP	(24)	12 55	(101)	12 50	マラッカ海峡通過中
	⊕		9		Slight	MG, FWP, COMP	(27)	12 55	(111)	12 48	
	⊛		11		Moderate	同上	(31)	9 08	(117)	8 48	
	⊞	88	13	Ballast 直進	Smooth	同上	(33)	9 27	(126)	9 20	
	☆	ターニング					(44)	11/18 18 50	(8)	11/1 8 53	
低圧タービン	○	84	11/1	Ballast 直進	R' Rough	MG, FWP, COMP	(3)	16 30	(19)	15 00	
	△	88	2		Slight	NoiseL. DataRec. 同上 MG. Fwp	(5)	8 45	(28)	8 40	
	□	89	3		R' Rough or Rough	MG, FWP, COMP	(9)	13 15	(43)	13 10	
	●	77	4			MG, FWP, COMP COP×1	(12)	13 25	(60)	13 13	タンクリーニング中
	▲	84	5			MG, FWP, COP×1	(15)	13 30	(73)	13 05	
	■	70	6			MG, FWP, COP×2	(17)	8 55	(83)	9 07	
	⊙	76	6		R' Rough or Rough	MG, FWP, COMP COP×2	(19)	17 42	(90)	17 37	
	⊛	89	7		Smooth	MG, FWP	(21)	18 45	(98)	18 40	
	⊡	88	8		Smooth or V. Smooth	MG, AG, FWP	(24)	12 55	(102)	12 53	マラッカ海峡通過中
	⊕		9		Slight	MG, FWP, COMP	(27)	12 55	(112)	12 50	
	⊛		11		Moderate	同上	(31)	9 08	(118)	8 50	
	⊞	88	13		Smooth	同上	(33)	9 27	(127)	9 22	
	☆	ターニング					(44)	11/18 18 50	(9)	11/1 8 58	



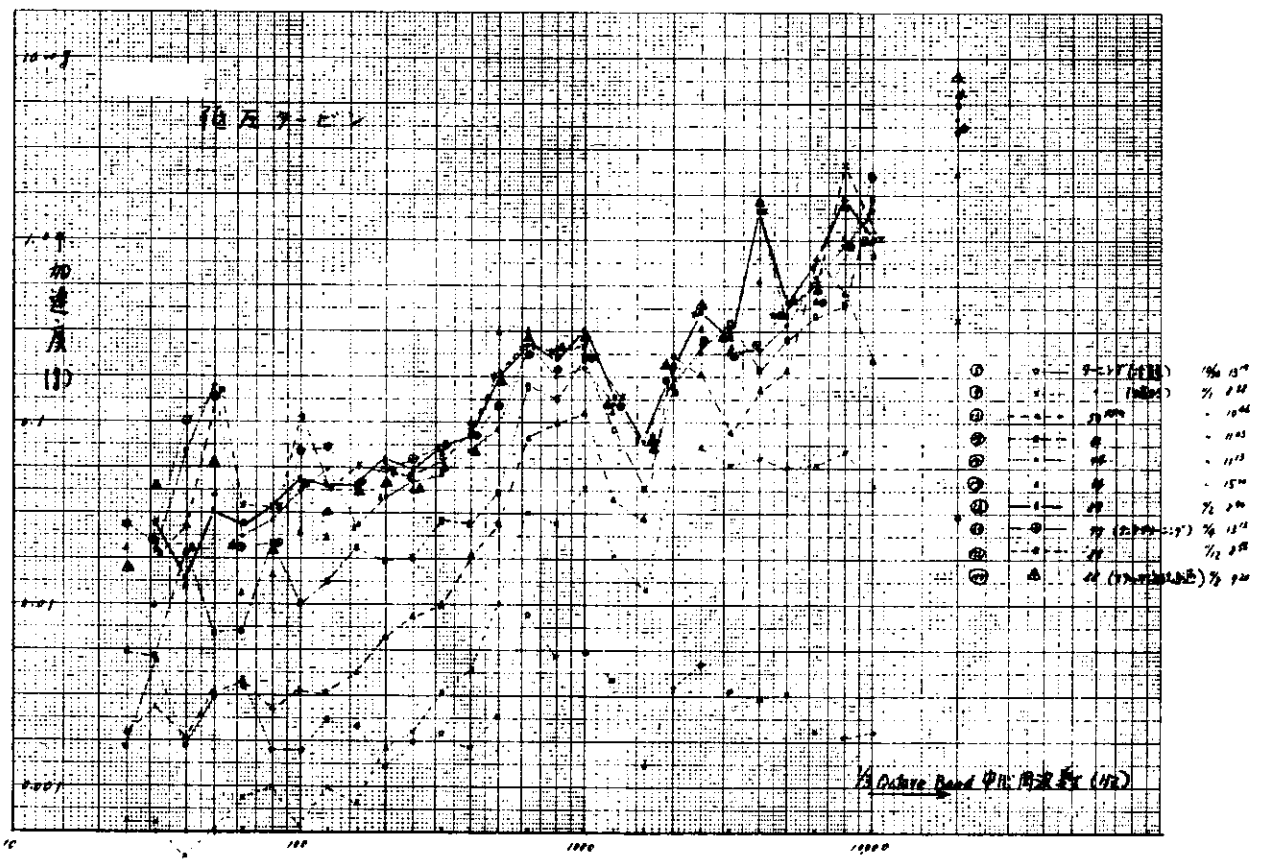
第 4.4.2 5 図



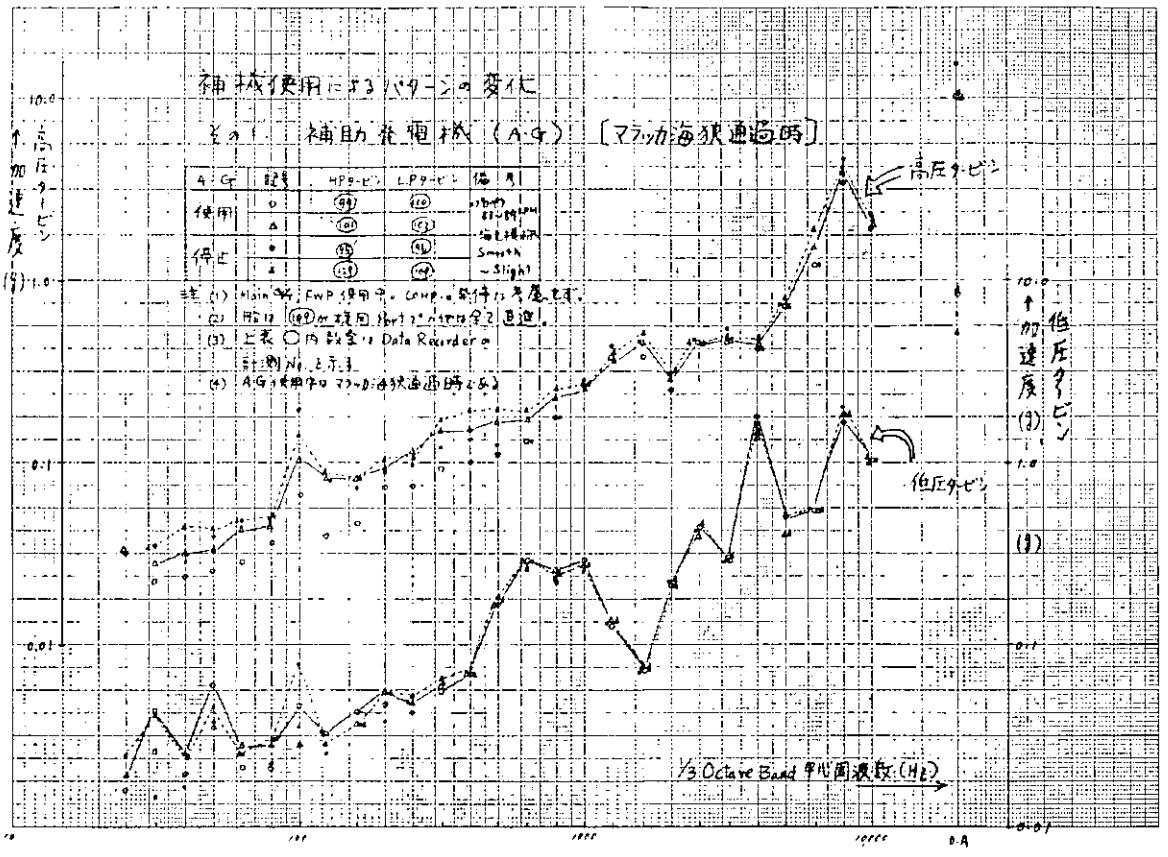
第 4.4.2 6 図



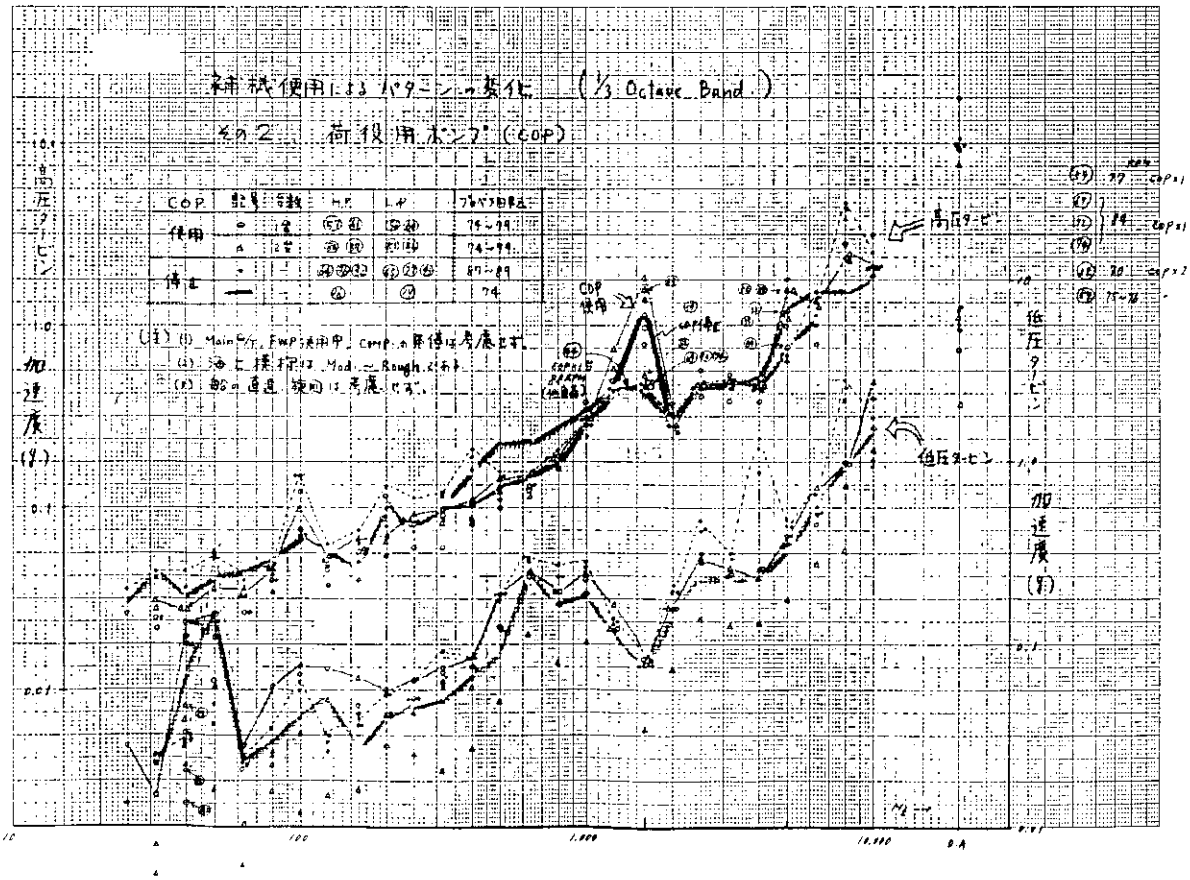
第 4. 4. 2 7 図



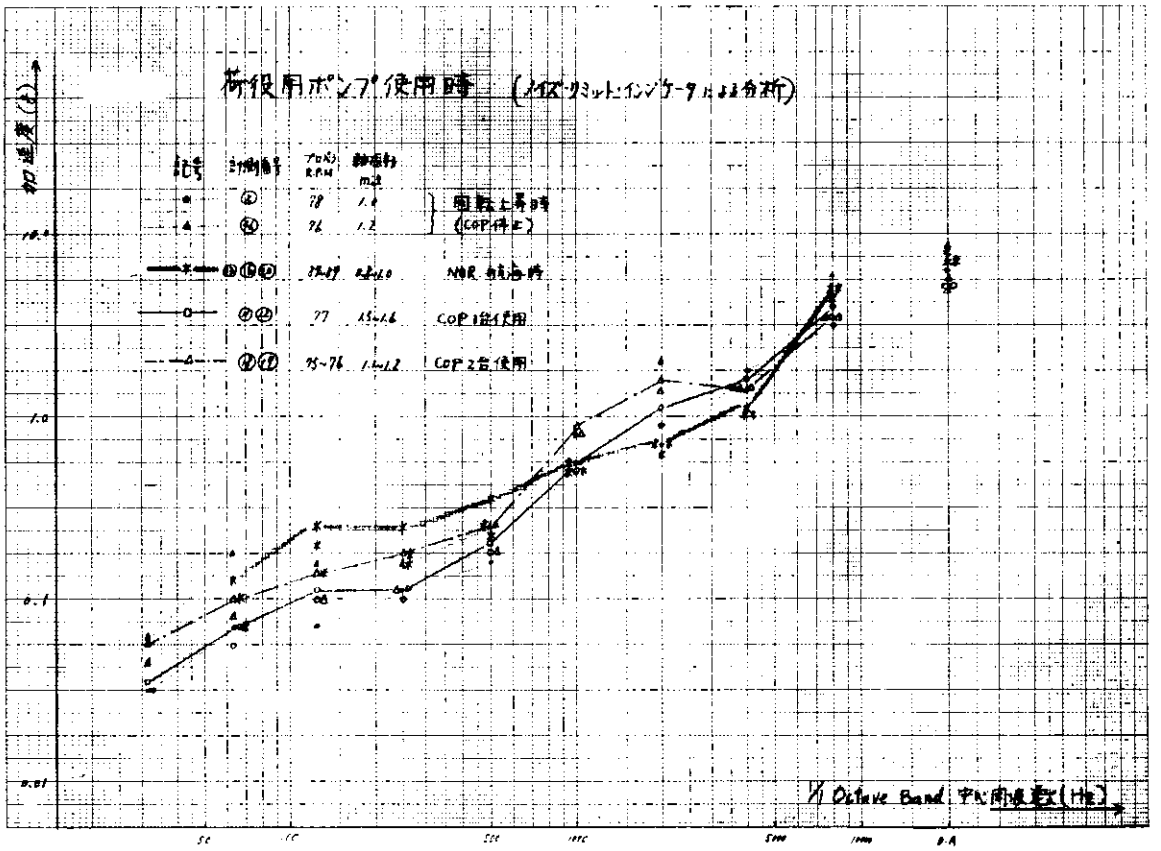
第 4. 4. 2 8 図



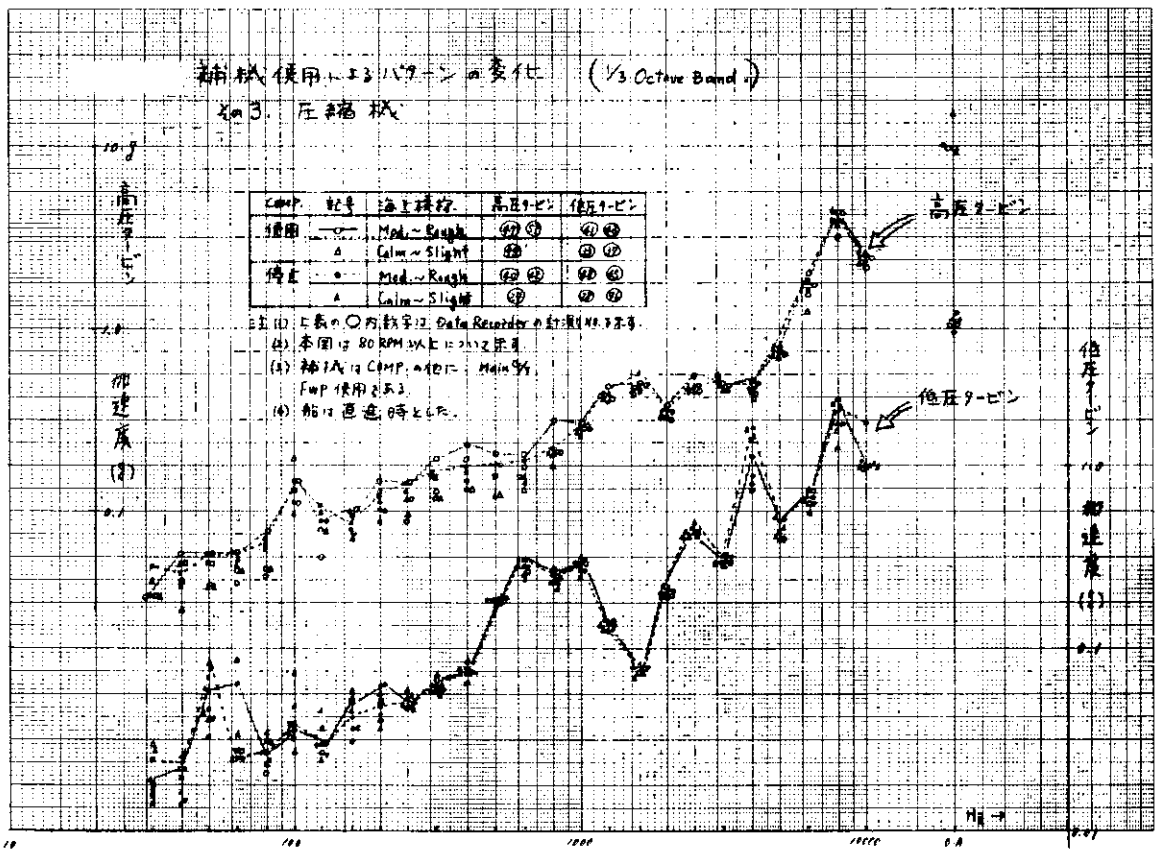
第4.4.29図



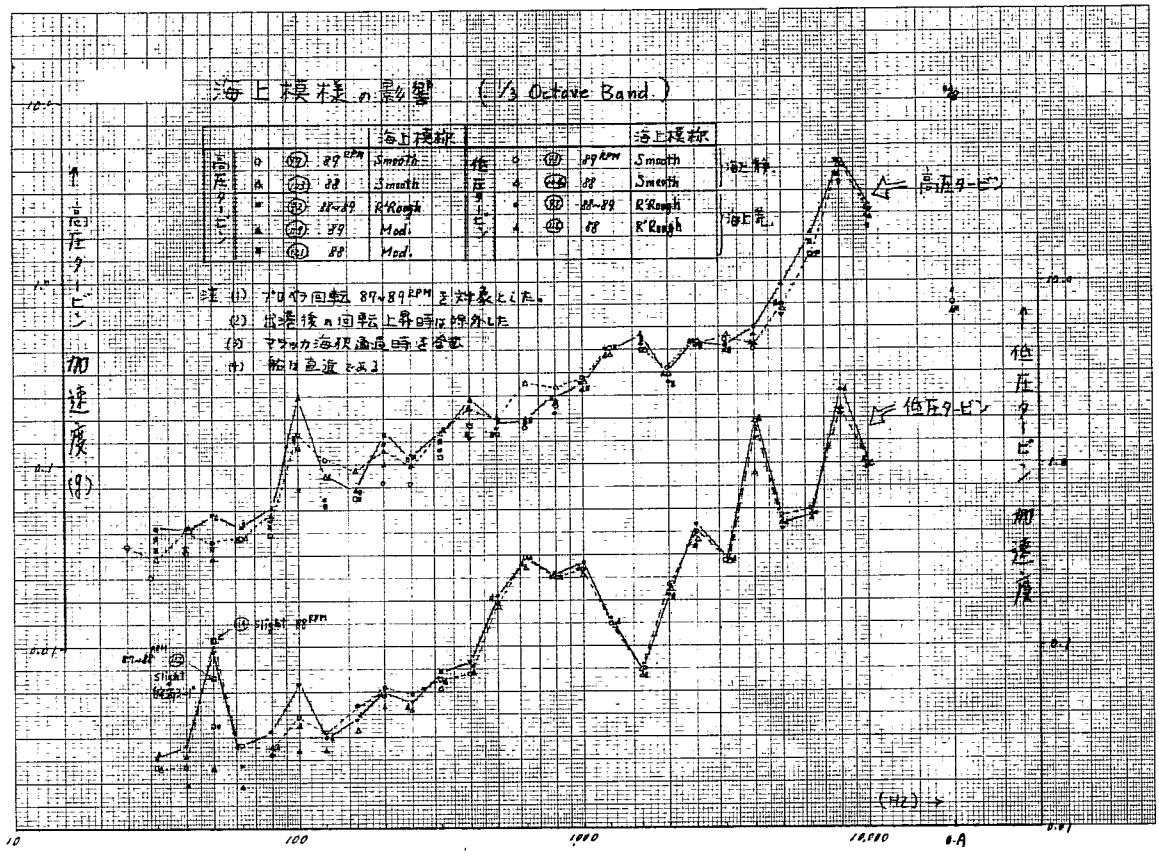
第4.4.30図



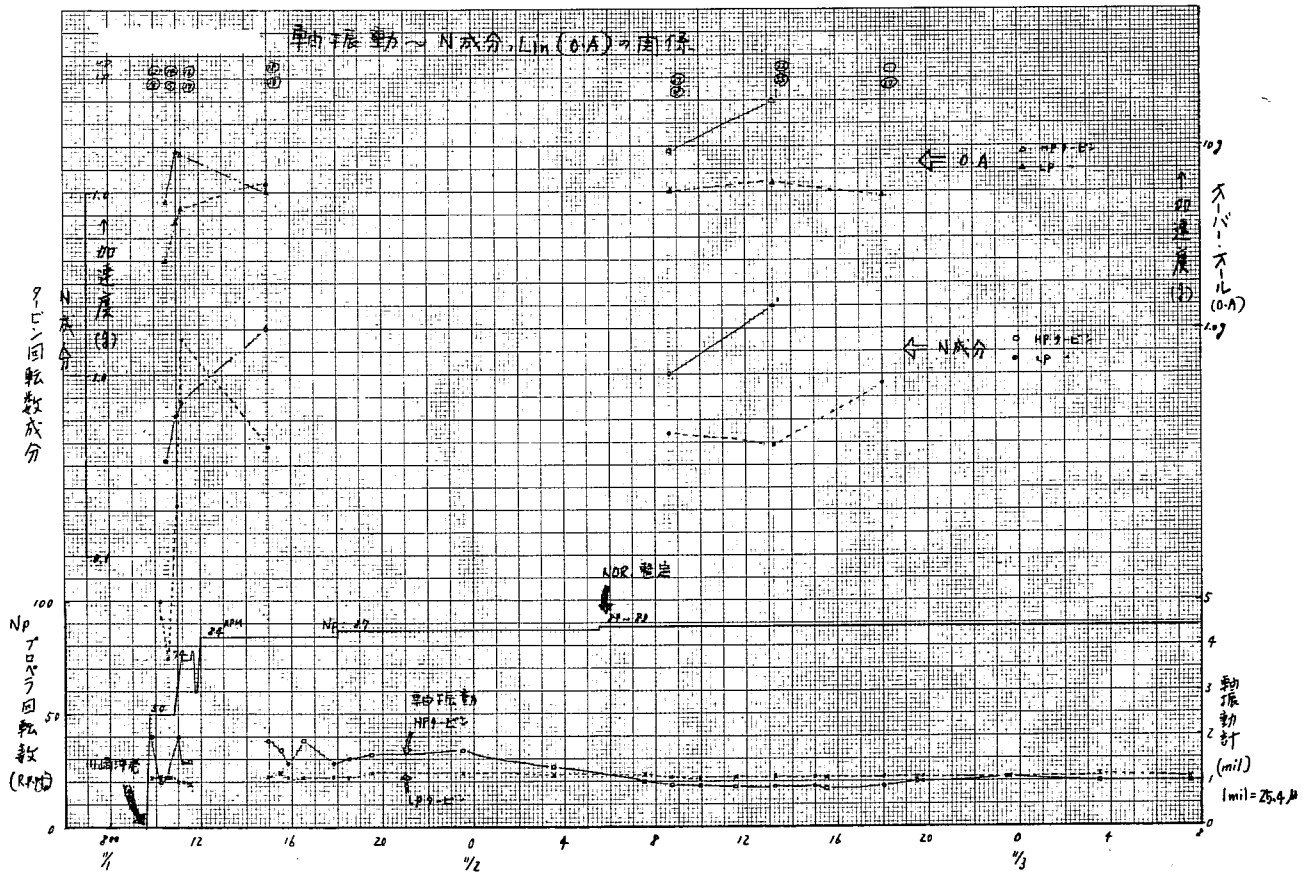
第 4. 4. 3 1 図



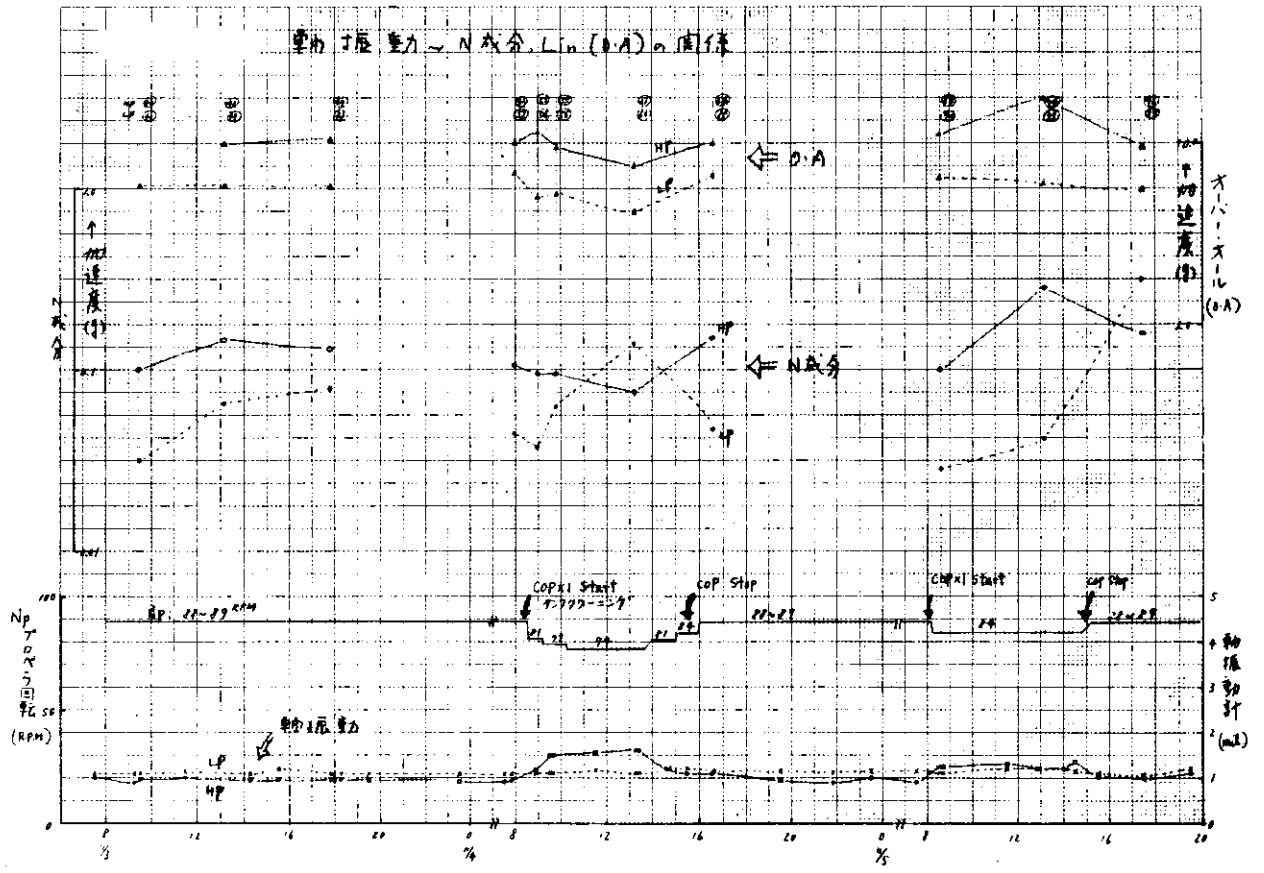
第 4. 4. 3 2 図



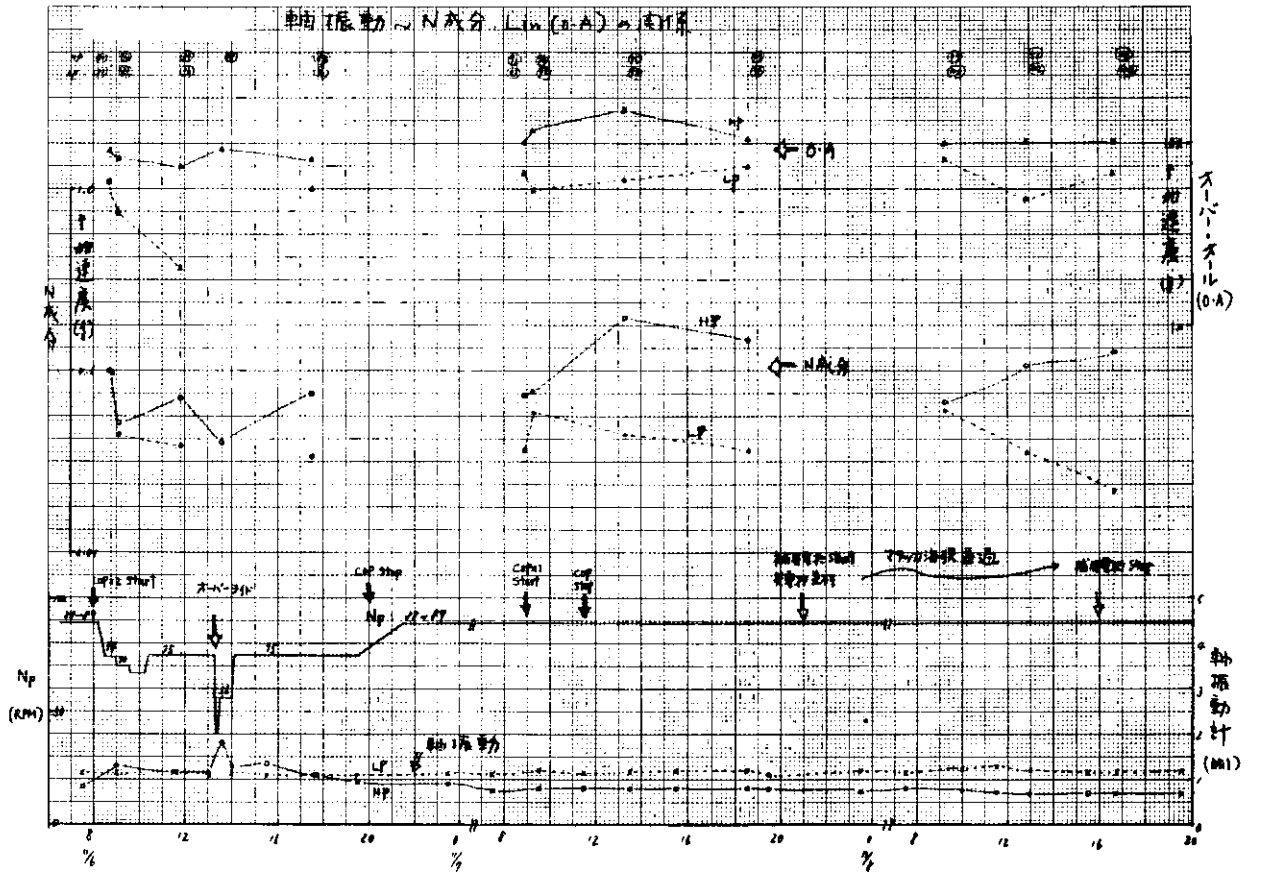
第4.4.33図



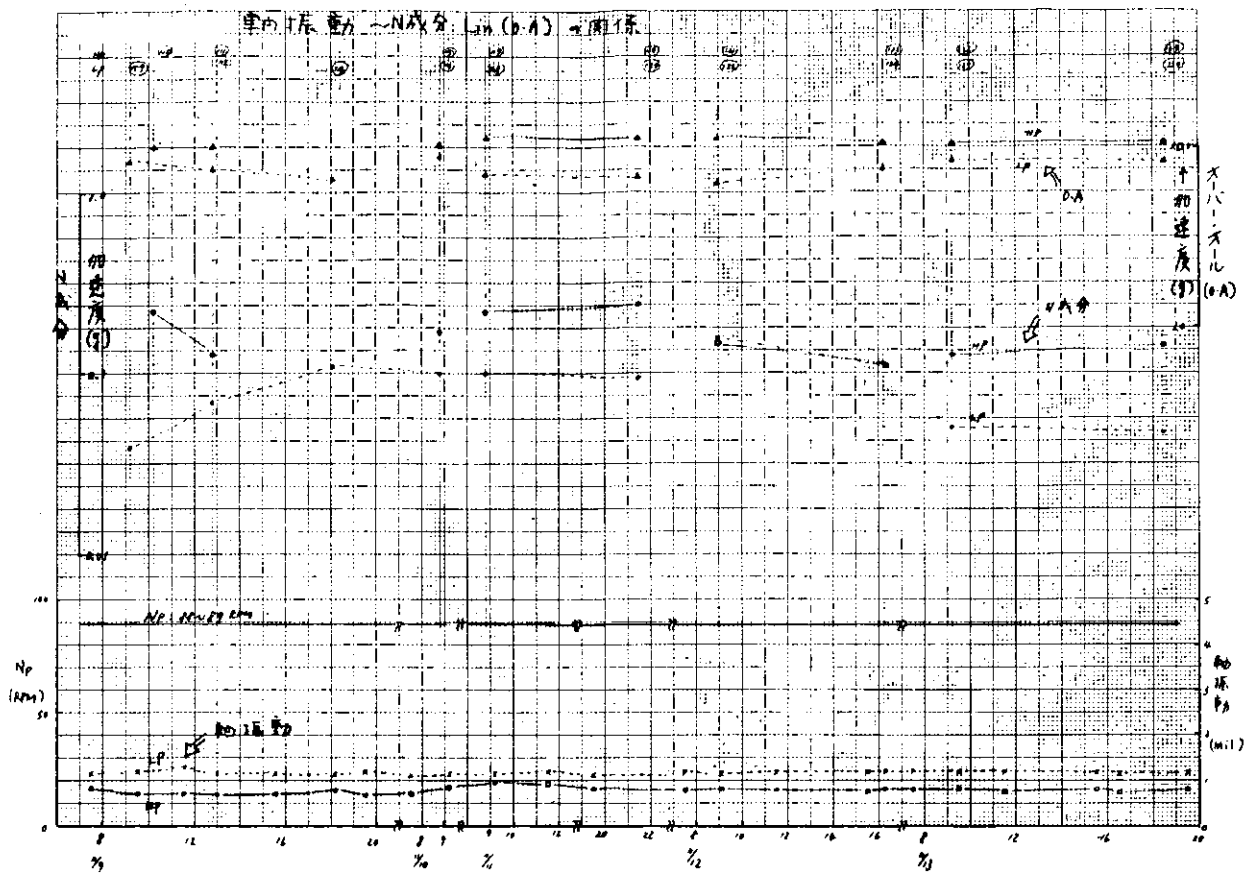
第4.4.34図（その1）



第 4.4.3 4 図 (その 2)



第 4.4.3 4 図 (その 3)



第4.4.3.4図（その４）

第4.4.3表　記録メモの記号説明（第4.4.4表、第4.4.5表の説明）

1）計測名の項	☆印は自動記録を示す。ただし、データ・レコーダ記録メモのみ。	
2）直進 or 旋回の項	Ⓐ ： 直進 Ⓣ ： 旋回	
3）海上模様の項	Calm	鏡の如くなめらか
	V. Smooth	さざ波がある
	Smooth	なめらか、小波がある
	Slight	やゝ波がある
	Mod.	かなり波がある
	V' Rough	白波が高い
	Rough	波がかなり高い
4）補機の使用状況の項	MG	主発電機
	AG	補助発電機
	COP	カーゴ・オイル・ポンプ
	FWP	給水ポンプ
	COMP	コンプレッサ
5）そ の 他	ⓘ ？印は、自動記録あるいはその他の理由で不明な項目。	

第4.4.4表　ノイズ・リミット・インジケータ記録メモ

計測No.	日付・時刻	プロペラ回転数 R.P.M	直進または旋回 Ⓐ Ⓑ	海上模様	補機使用状況 MG	AC	COP	FWP	COMP	備考
①	11/1 9°47′	50		Mod.	○	○		○	○	
②	〃 11 32	HPタービン 78, LPタービン 70	Ⓐ	〃	○	○		○	○	
③	〃 16 30	84		R′ Rough	○			○	○	
④	〃 18 30	87		〃	○			○	○	
⑤	11/2 8 45	88		Slight	○			○	○	
⑥	〃 13 20	89		Smooth	○			○		
⑦	〃 18 50	89		〃	○			○	○	
⑧	11/3 9 20	89		R′ Rough or Rough	○			○		
⑨	〃 13 15	89			○			○		
⑩	〃 17 57	89	Ⓐ		○			○		
⑪	11/4 9 35	77	Ⓑ Port4°		○		○1台	○		タンククリーニング中
⑪ −1	〃 9 35 〜	79	?		○		○1台	○	?	HPタービンのみ LPタービンのみ バラツキの計測
⑪ −2	〃 10 30	79	?		○		○1台	○	?	
⑪ −3	〃 13 40 14 30	77	?		○		○1台	○	?	
⑫	〃 13 25	77	Ⓐ		○		○1台	○	○	同　上
⑬	〃 16 45	89			○			○		
⑭	11/5 8 45	84			○		○1台	○		
⑮	〃 13 30	84			○		○1台	○		
⑯	〃 17 30	87			○			○		
⑰	11/6 8 55	70			○		○2台	○		
⑱	〃 13 00	75			○		○2台	○		
⑲	〃 17 42	76			○		○2台	○	○	
⑳	11/7 9 15	88		R′ Rough or Rough	○			○		
㉑	〃 13 28	88		Slight	○			○		
㉒	〃 18 35	89		Smooth	○			○		
㉓	11/8 10 00	88		Smooth or V.Smooth	○	○		○	○	⇐ マラッカ海峡通過中
㉔	12 55	88	Ⓐ	〃	○	○		○		⇐ 〃
㉕	11/8 16 43	88	Ⓐ	〃	○			○		
㉖	11/9 9 30	89	?	〃	○			○		
㉗	〃 12 55	88	Ⓐ	Slight	○			○	○	
㉘	〃 18 10	88	?	〃	○			○		
㉙	11/10 9 10	88		R′ Rough	○			○		
㉚	〃 13 10	87〜88	Ⓐ	〃	○			○		
㉛	11/11 9 08	88	Ⓑ Port3.5°	Mod.	○			○	○	
㉛ −1	〃 9 40 10 00	88		〃						LPタービンのみ、バラツキ計測
㉜ −1	11/12 9 05	88		〃	○			○	○	
㉜ −2	〃 16 20	88		Smooth	○			○	○	

計測No.	日付・時刻	プロペラ回転数 RPS	直進または旋回 ↑Ⓐ ↑Ⓑ	海上模様	補機使用状況 MG	AG	COP	F'WP	COMP	備考
33	11/13 9°27′	87～88		Smooth	○			○	○	
34	〃 13 35	88		Mod.	○			○		← Data Recorder故障
35	11/13 15 25	88		Slight	○			○		
36	11/13 9 35	88			○			○	○	
37	〃 17 55	88	Ⓐ		○			○		
38	11/16 19 45	こわせん 5rpm		Smooth	○	○		○	○	Steam Cut. HPタービンのみ ⇒ カーグ脱入港物揃
38-1	〃	Ast.28			○	○		○	?	
39	11/17 10 45	38	Ⓑ Port35°		○	○		○	○	HPタービンのみ ⇒ 接岸
41	〃 11 30	28	Ⓐ		○	○		○	○	
42	〃 11 42	Ast.28								LPタービンのみ ⇐ 荷役中
43	11/18 9 05	ターニング	—			○		○	○	
44	〃 18 58	ターニング	—			○		○	○	⇐ カーグ積発
45	〃 20 27	48～50	Ⓐ	Mod.	○	○		○	○	
46	〃 22 15	76	Ⓐ	〃	○			○	○	
47	〃 23 16	82	Ⓑ Port5°→Ⓐ	F' Rough	○			○	○	
48	11/19 10 00	86	Ⓐ	〃	○			○	○	
49	〃 15 00	86	Ⓐ	Smooth or v. Smooth	○			○	○	
50	〃 16 30	89	Ⓐ	〃	○			○	○	
51	11/20 10 20	88	Ⓑ Port3°～2°	〃	○			○	○	
52	〃 17 53	89	Ⓐ	Smooth	○			○	○	
53	11/21 9 50	89	〃	Mod.	○			○	○	
54	〃 16 30	89	〃	F' Rough	○			○	○	
55	11/22 9 40	89	Ⓑ Port2°→Ⓐ	〃	○			○	○	
56	〃 16 40	88	Ⓑ Port 2°	〃	○			○	○	
57	11/23 10 05	88	Ⓐ→Ⓑ Port3°	Mod.	○			○		
58	〃 17 20	88	Ⓐ	Smooth	○			○	○	
59	11/24 8 35	89	Ⓐ→Ⓑ Port2°	F' Rough	○			○	○	
60	〃 18 20	88	Ⓐ	Mod.	○			○		
61	11/25 10 00	88	Ⓐ	Slight	○			○		
62	〃 17 20	88	Ⓑ Port 2°	↕	○			○		
63	11/26 9 40	87～88	Ⓑ Port 2°		○			○	○	
64	〃 17 40	87～88	Ⓑ Port5°～4°	Slight	○			○		
65	11/27 9 55	88	Ⓑ Port 2°	Smooth	○			○		
66	〃 15 45	88	Ⓑ Port 2°	Slight	○			○		← マラッカ海峡通過
67	11/28 8 50	87	Ⓑ 〃	Mod.	○	○		○		
67-1	〃 9 40～10 20	87	?	Mod.	○	○		○	?	回頭角大制限 (HP).
68	〃 15 00	85	Ⓐ～Ⓑ変化激しい	F' Rough	○	○		○	○	船速～回転数 12m

計測No.	日付・時刻	プロペラ回転数 RPM	直進または旋回 Ⓐ↑ ↑Ⓑ	海上模様	補機使用状況 MG	AG	COP	FWP	COMP	備考
68 −1	11/28 15°20′ ~16 40	85~87	Ⓐ~Ⓑ変化激しい	R Rough	○	○		○	?	瞬間最大値計測 (LP)
69	〃 16 50	85	〃	Mod.	○	○		○	○	船底~海底間 15 m
70	11/29 13 40	88	Ⓑ Port 2°	Mod.	○			○	○	
71	11/30 7 35	88	Ⓐ	R Rough or Rough	○			○		
72	〃 17 50	88	Ⓐ		○			○		
72 −1	〃 18 00~ 18 40	88	?		○			○	?	HPタービンのみ
72 −2	〃 18 40~ 19 00	88	?		○			○	?	LPタービンのみ
73	12/1 07 40	87	Ⓑ Port 2°		○			○		
74	12/2 11 40	88	Ⓐ		○			○		
75	12/3 10 15	87	Ⓑ Port 2°	R Rough or Rough	○			○		
76	12/4 10 00	88	Ⓐ	Mod.	○			○	○	

第4.4.5表 データ・レコーダ記録メモ

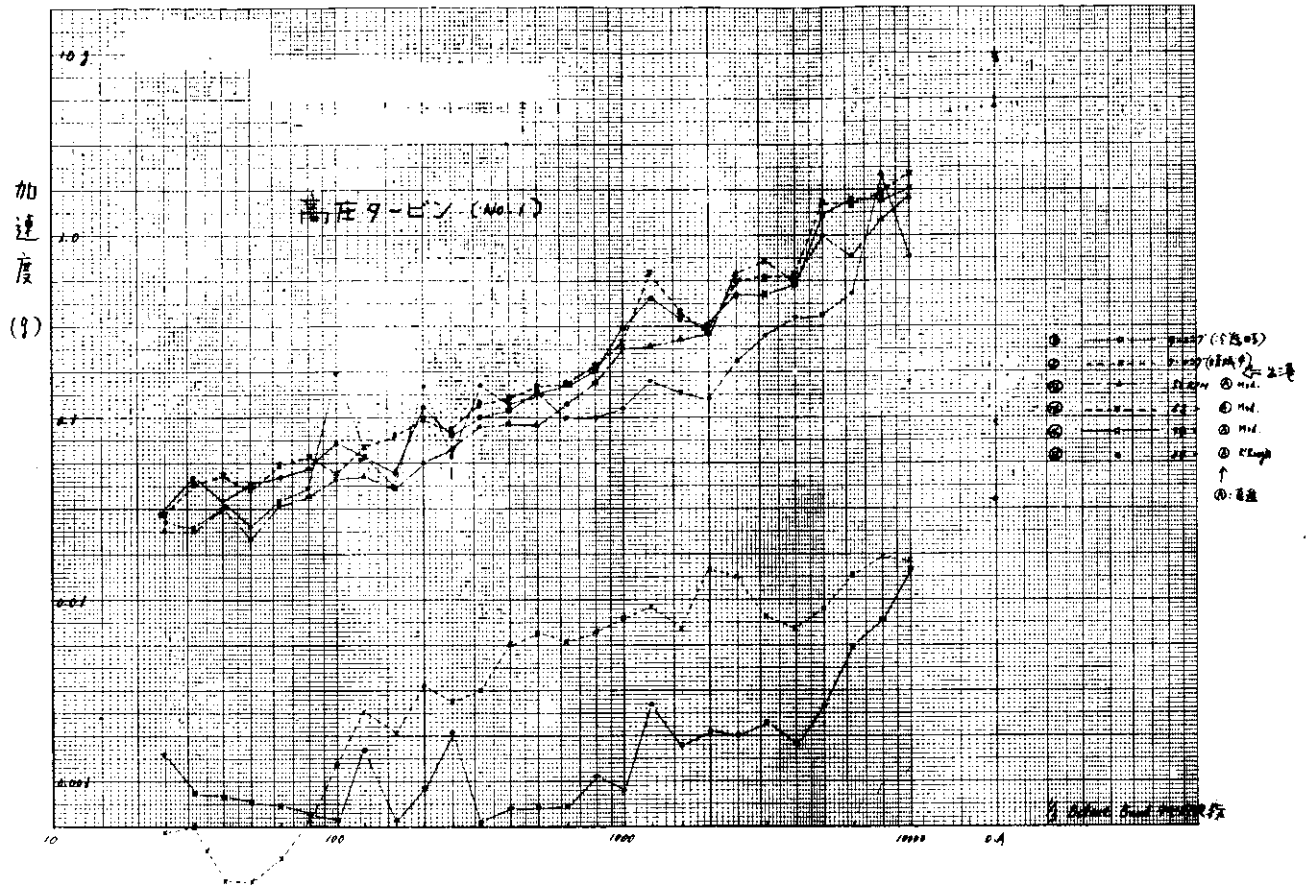
10/30~11/13のバラスト状態

計測No.	日付・時刻	HPまたはLPタービン	プロペラ回転 RPM	直進 旋回 Ⓐ↑ ↑または Ⓑ	海上模様	補機使用状況 MG	AG	COP	FWP	COMP	備考
4	10/30 13°13′	HP	ターニング (冷態時)	—	—		○	○	○	○	約50%積荷 (荷役中)
5	〃 13 17	LP	ターニング (冷態時)	—	—		○	○	○	○	
8	11/1 8 53	HP	ターニング (暖機時)	—	—		○		○	○	
9	〃 8 58	LP	ターニング (暖機時)	—	—		○		○	○	
10	〃 10 13	LP	50		Mod.	○	○		○	○	←川崎沖発
12	〃 10 34	HP	50	Ⓐ		○	○		○	○	
13	〃 10 46	LP	50			○	○		○	○	
14	〃 11 01	HP	62			○	○		○	○	
15	〃 11 03	LP	62			○	○		○	○	
16	〃 11 11	HP	74		Mod.	○	○		○	○	
自動記録 17	〃 11 13	LP	74		〃	○	○		○	○	
↓ 18	〃 14 56	HP	84		R Rough	○			○	○	
☆ 19	〃 15 00	LP	84		〃	○			○	○	
27	11/2 8 37	HP	88		Slight	○			○		
28	〃 8 40	LP	88	Ⓐ	〃	○			○		
☆ 30	〃 ?	HP	88	?	〃	○			○	?	
32	〃 13 12	HP	89	Ⓐ	Smooth	○			○		
33	〃 13 16	LP	89	Ⓐ	〃	○			○	○	
☆ 36	〃 ?	HP	89	?	〃	○			○	?	
37	〃 18 04	LP	89	Ⓐ	Smooth	○			○	○	
40	11/3 9 25	HP	↑	↑	R Rough or Rough	○			○		

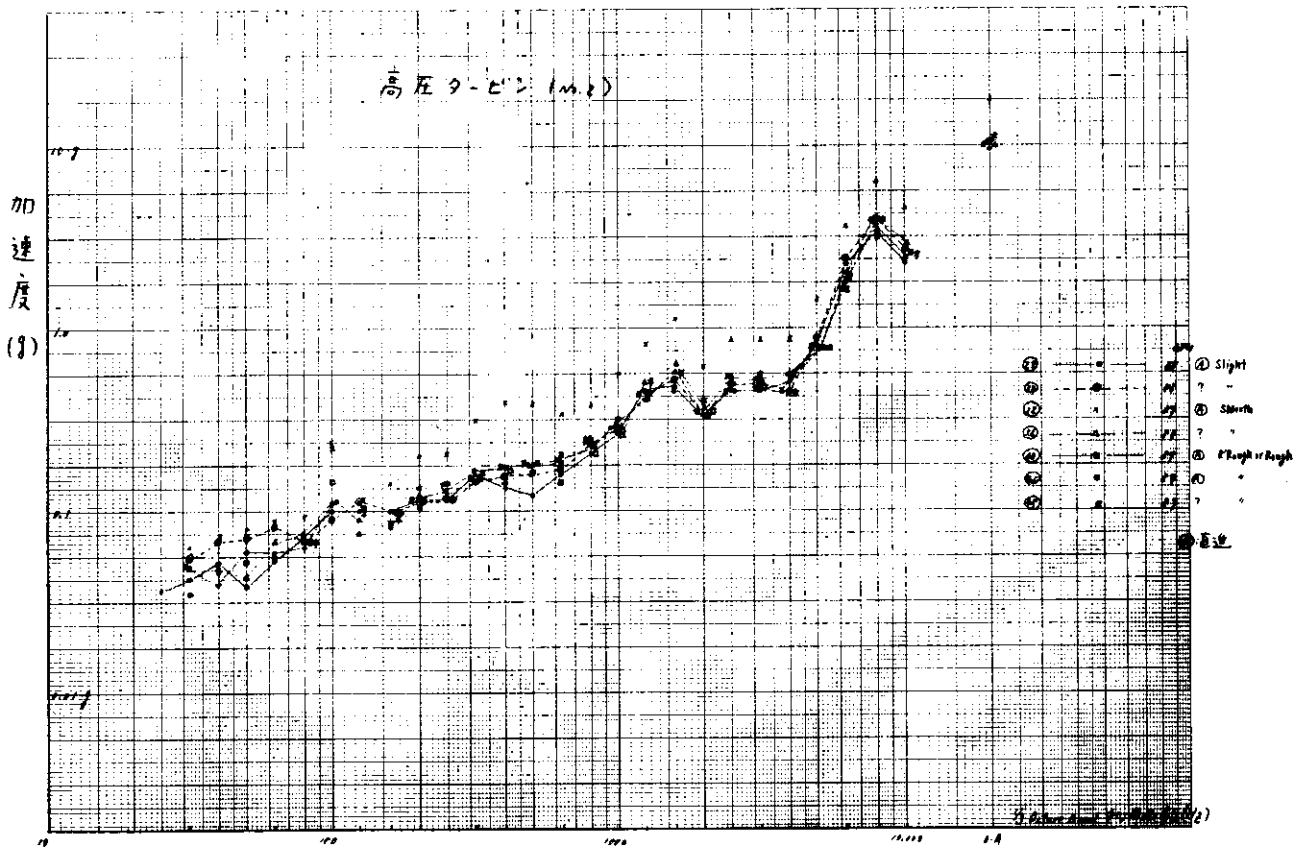
	計測№	日付・時刻	HPまたはLPタービン	プロペラ回転数 RPM	直進 旋回 ↑Ⓐまたは↑Ⓑ	海上模様	補機使用状況 MG	AG	COP	FWP	COMP	備考
	(41)	11/3 9°28′	LP				○			○	○	
	(42)	〃 13 07	HP				○			○		
	(43)	〃 13 10	LP		Ⓐ		○			○	○	
☆	45	〃 ?	HP		?		○			○	?	
	(47)	〃 17 52	HP		Ⓐ		○			○	○	
	(48)	〃 17 55	LP	89	Ⓐ		○			○		
☆	(50)	〃 ?	HP	88	?	R′ Rough or Rough	○			○	?	
	(51)	11/4 7 54	HP	88	Ⓑで→Ⓐ	〃	○			○	○	
	(52)	〃 7 58	LP	89	Ⓐ		○			○	○	
	(53)	〃 8 50	HP	81	〃		○		○1台	○	○	タンククリーニング中
	(54)	〃 8 55	LP	81	Ⓐ		○		○1台	○		
	(55)	〃 9 02	HP	81	Ⓑ Port3.5°		○		○1台	○		
	(56)	〃 9 42	LP	79	Ⓐ		○		○1台	○		
	(57)	〃 9 58	HP	79	Ⓐ		○		○1台	○		
☆	(59)	〃 ?	HP	77	?		○		○1台	○	?	
	(60)	〃 13 13	LP	77	Ⓐ		○		○1台	○	○	
	(61)	〃 13 22	HP	77	Ⓐ		○		○1台	○		↓
☆	(63)	〃 ?	LP	82~83	?		○		?	○	?	↓?
	(64)	〃 16 30	HP	89	Ⓐ		○			○	○	
	(65)	〃 16 38	LP	89	Ⓐ		○			○		
☆	(67)	〃 ?	HP	89	?		○			○	?	
	(69)	11/5 8 34	HP	84	Ⓐ		○		○1台	○		
	(70)	〃 8 40	LP	84	Ⓐ		○		○1台	○	○	
☆	(72)	〃 ?	HP	84	?		○		○1台	○	?	
	(73)	〃 13 05	LP	84			○		○1台	○	○	
	(74)	〃 13 10	HP	84	Ⓑ Port3°Ⓐ		○		○1台	○	○	
	(76)	〃 17 25	HP	87~88	Ⓐ		○			○	○	
	(77)	〃 17 27	LP	〃	Ⓐ		○			○		
☆	(79)	? ?	HP		?		○		?	○	?	
☆	(80)	11/6 8 40	HP	74	Ⓐ→Ⓑ Port 3°		○		○2台	○		
	(81)	〃 8 52	LP	74	Ⓐ		○		○2台	○	○	
	(82)	〃 9 05	HP	70	Ⓑ Port3°		○		○2台	○	○	
	(83)	〃 9 07	LP	70	Ⓑ Port3°		○		○2台	○		
☆	(84)	〃 ?	LP	70~74	?		○		○2台	○	?	
	(86)	〃 11 50	LP	75	Ⓐ		○		○2台	○	○	
	(87)	〃 11 59	HP	75	Ⓐ		○		○2台	○	○	←オーバライド(操作ミス)
	88	〃 13 35	HP	56		R′ Rough or Rough	○		○2台	○		

計測No.	日付・時刻	HPまたはLPタービン	プロペラ回転数 RPM	直進 旋回 ↑ ㊂ または ↑ ㊃	海上模様	補機使用状況 MG	AG	COP	FWP	COMP	備考
89	11/6 17°30′	HP	75～76	㊁Port 3°	R′ Rough or Rough	○		○2台	○	○	
90	〃 17 37	LP	76	㊁Port 2°		○		○2台	○		
92	11/7 8 53	HP	88～89	Ⓐ		○			○	○	
93	〃 8 55	LP	88～89			○			○	○	
94	〃 9 17	HP	88			○		○1台	○	○	
95	〃 9 20	LP	88		R′ Rough or Rough	○		○1台	○		
95′	〃 13 21	HP	88		Slight	○			○	○	
96	〃 13 25	LP	88		〃	○			○		
97	〃 18 35	HP	89		Smooth	○			○		
98	〃 18 40	LP	89		〃	○			○		
99	11/8 9 16	HP	88		Smooth or V. Smooth	○	○		○	○	マラッカ海峡通過
100	〃 9 20	LP	88			○	○		○		
101	〃 12 50	HP				○	○		○	○	
102	〃 12 53	LP				○	○		○	○	
103	〃 16 39	HP				○			○		
104	〃 16 41	LP	88	Ⓐ		○			○	○	
☆107	? ?	HP	88～89	?		○			○	?	
109	11/9 9 20	LP	89	㊁Port2°		○			○	○	
☆110	〃 10 15	HP	89	㊁Port2°	Smooth or V. Smooth	○			○	○	
111	〃 12 48	HP	87～88	㊁Port3°→1°	Slight	○			○		
112	〃 12 50	LP	87～88	㊁Port3°,1°	〃	○			○	○	
☆113	〃 ?	HP	88	?	〃	○			○	?	
114	〃 18 08	LP		Ⓐ	Slight	○			○		
115	11/10 8 47	HP		㊁Port2°→Ⓐ	R′ Rough	○			○	○	
116	〃 8 53	LP		Ⓐ	〃	○			○	○	
117	11/11 8 48	HP		㊁Port5°→1°	Mod.	○			○	○	
118	〃 8 50	LP	88	㊂Port5°,3°→1°		○			○	○	
119	〃 21 28	HP	89	Ⓐ		○			○		
120	〃 21 31	LP	89	Ⓐ	Mod.	○			○		
121	11/12 8 56	HP	88	Ⓐ	〃	○			○		
122	〃 8 58	LP	88	Ⓐ	〃	○			○	○	
123	〃 16 15	HP	88	㊂Port 2°	Smooth	○			○		
124	〃 16 16	LP	88	㊂Port 2°		○			○		
☆125	? ?	HP	88	?		○			○	?	
126	11/13 9 20	HP	87～88	Ⓐ→㊂Port 2°		○			○		
127	〃 9 22	LP	87～88	㊂Port 2°	Smooth	○			○	○	
☆128	〃 ?	LP	87～88	?		○			○	?	

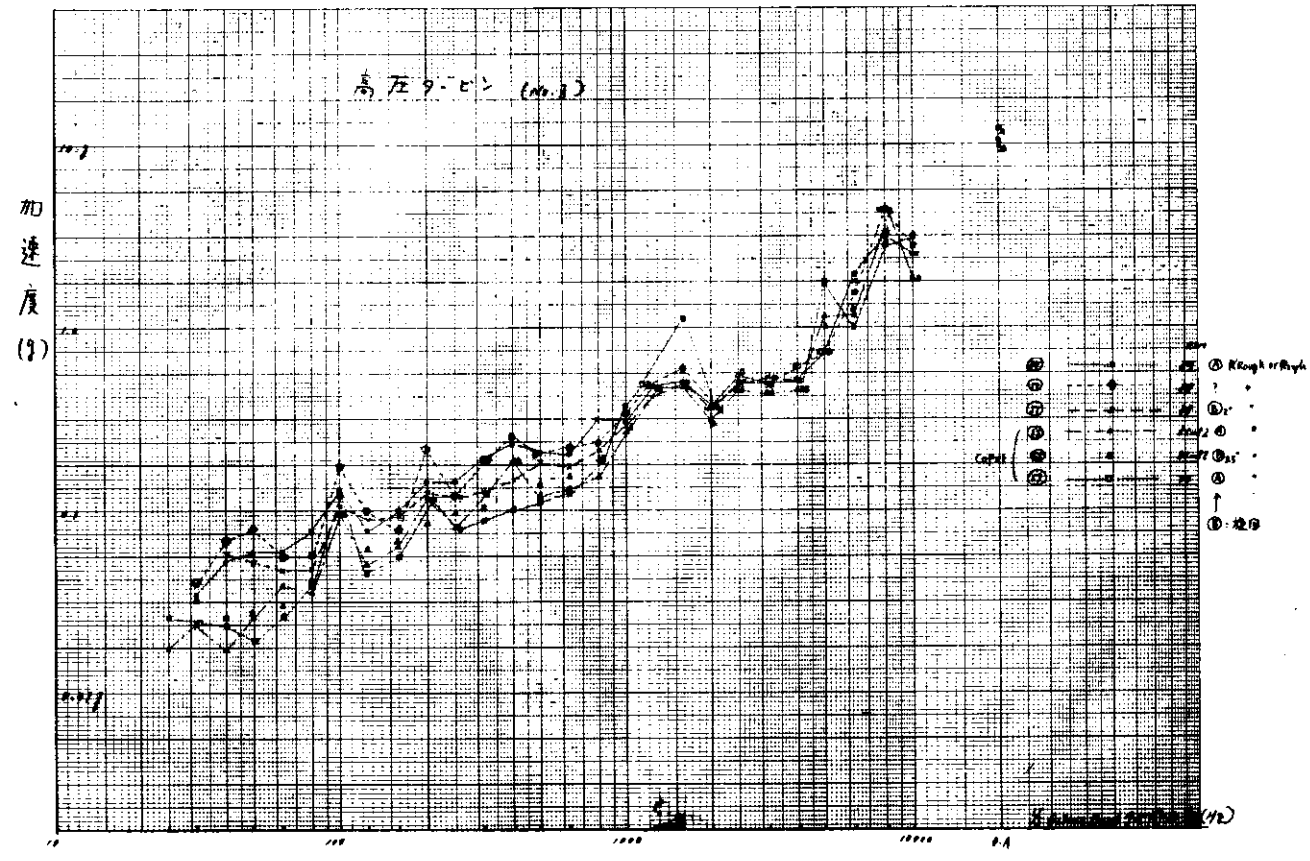
計測No.	日付・時刻	HPまたはLPタービン	プロペラ回転数 RPM	前進 旋回 ↑ または ↑ (A) (B)	海上模様	補機使用状況 MG	AG	COP	PWP	COMP	備考
(129)	11/13 18°26′	HP	88	(B)Port 5° (A)	Mod.	○			○	○	
(130)	〃 18 50	LP	88	(A)	〃	○			○		←データ・レコーダ故障
	11/14										



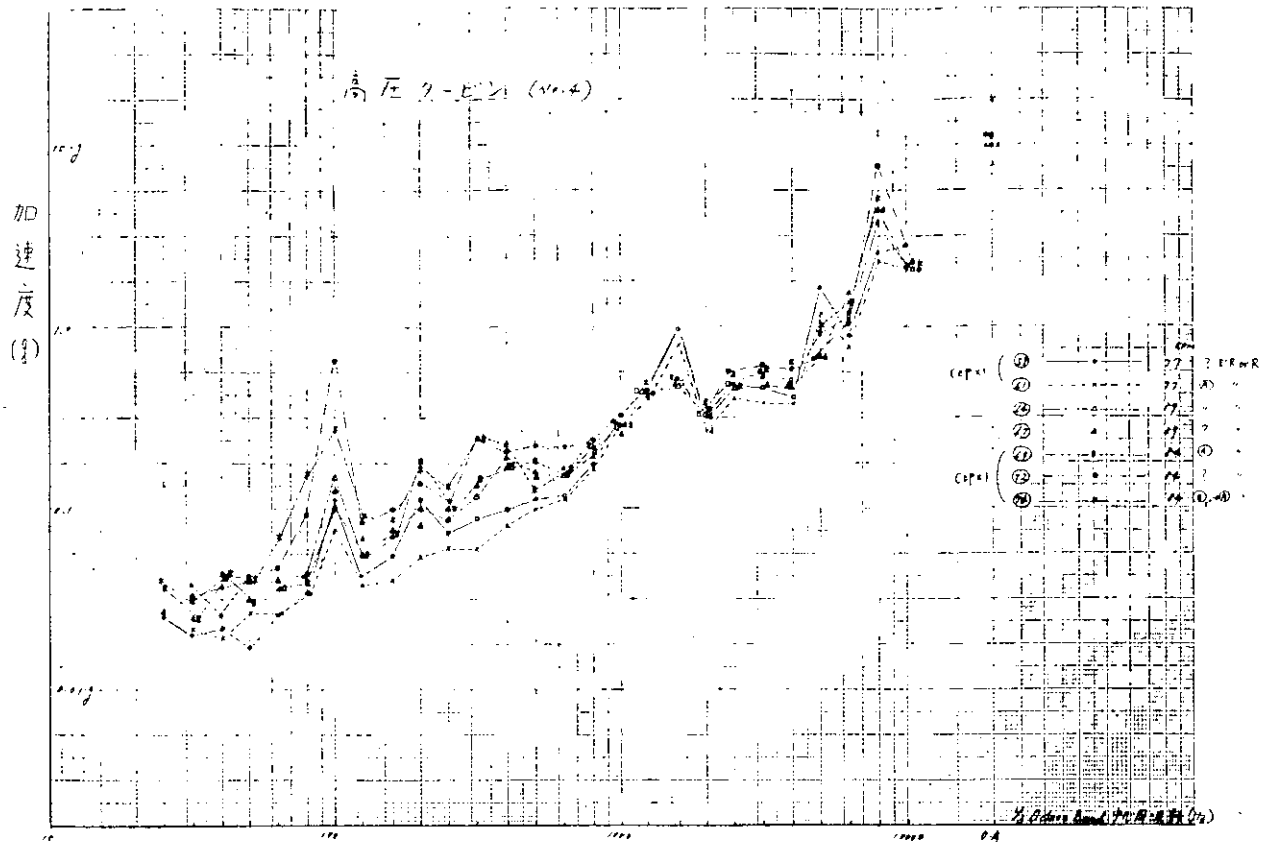
添付資料：データ・レコーダによる計測結果（1/3オクターブ・バンド分析）



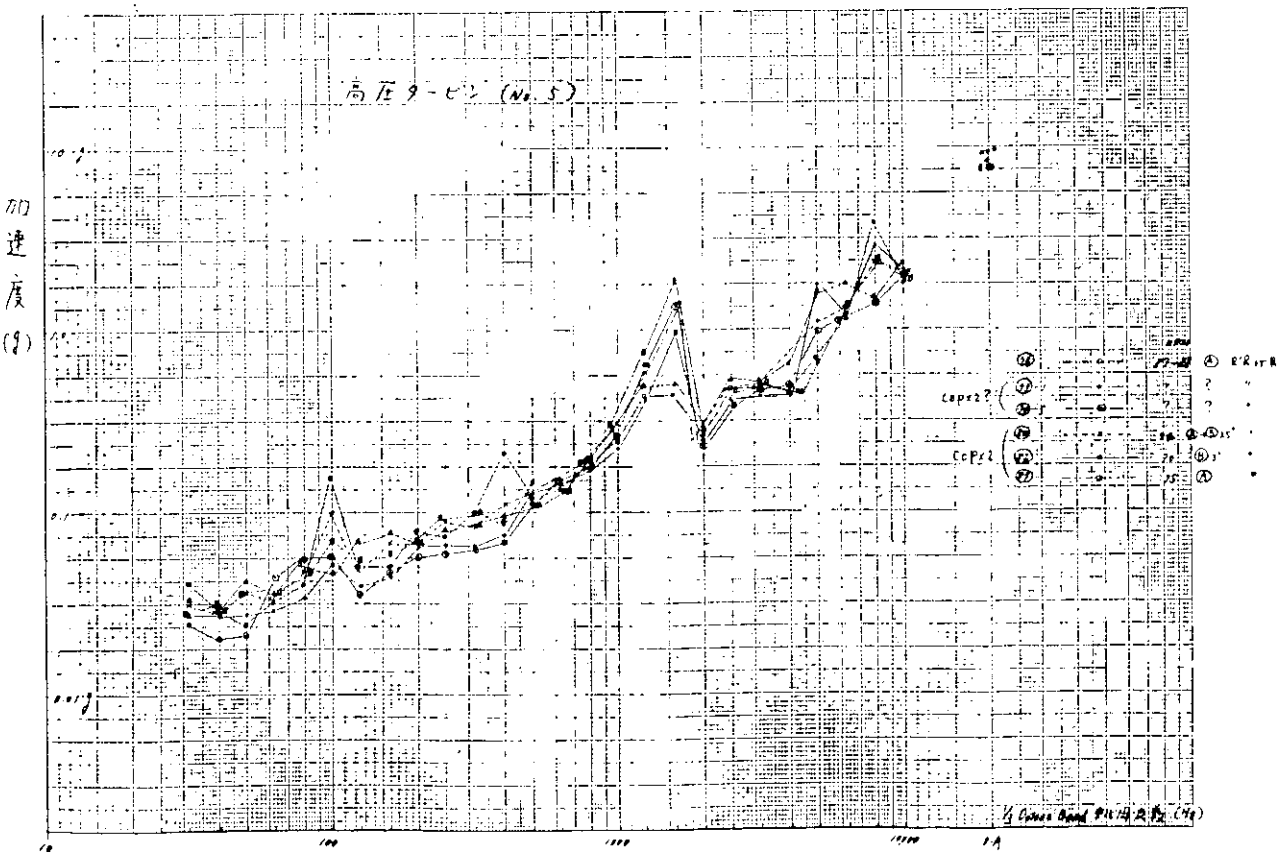
添付資料：データ・レコーダによる計測結果（1/3オクターブ・バンド分析）



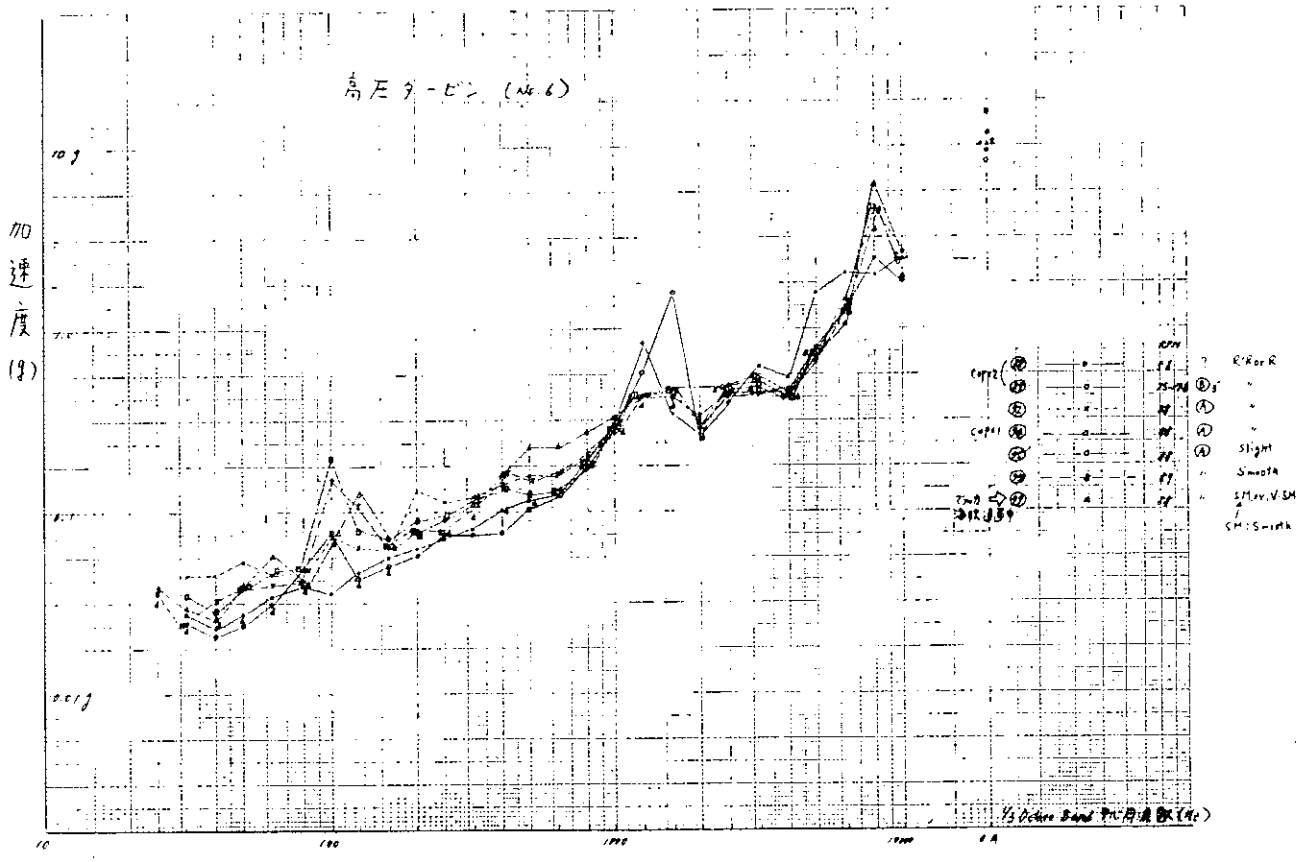
添付資料：データ・レコーダによる計測結果（1/3オクターブ・バンド分析）



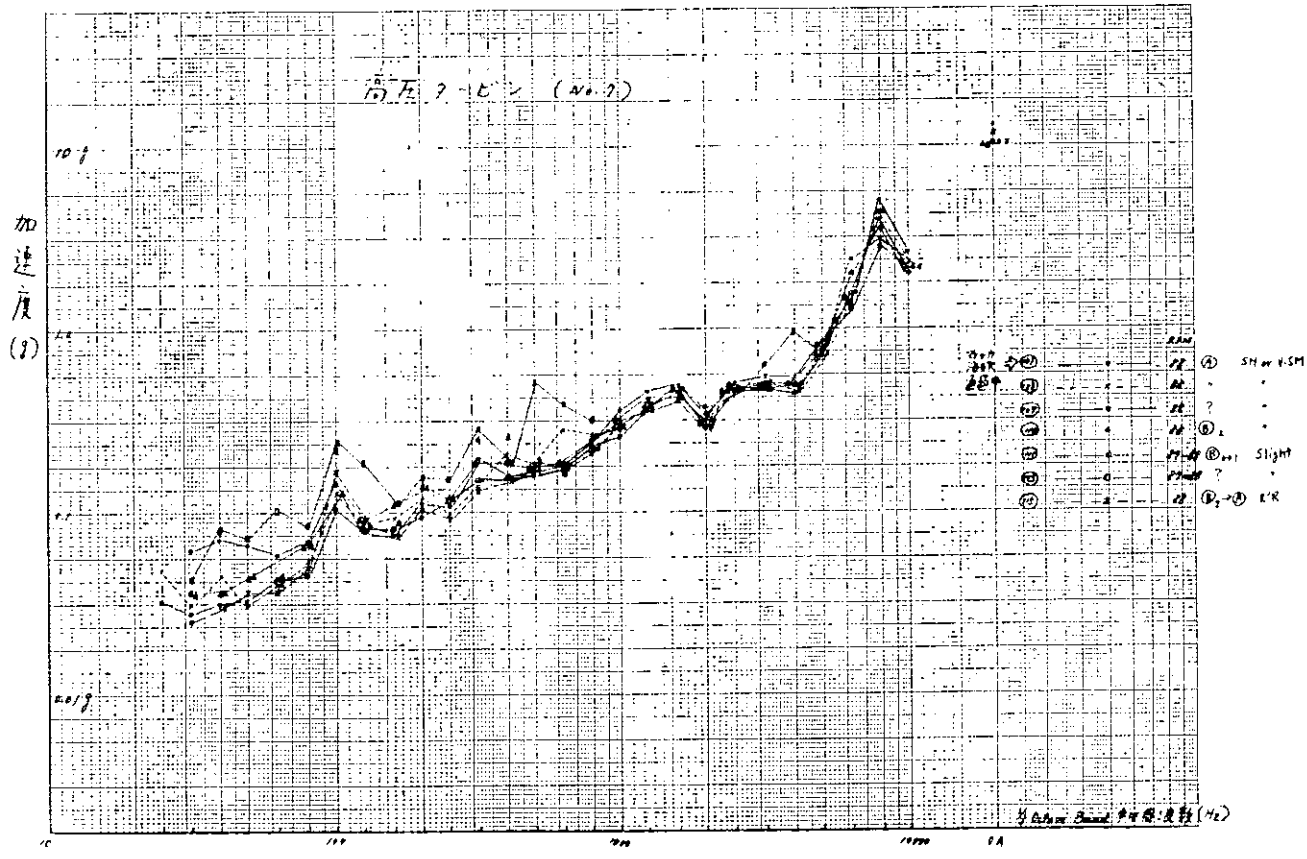
添付資料：データ・レコーダによる計測結果（⅓オクターブ・バンド分析）



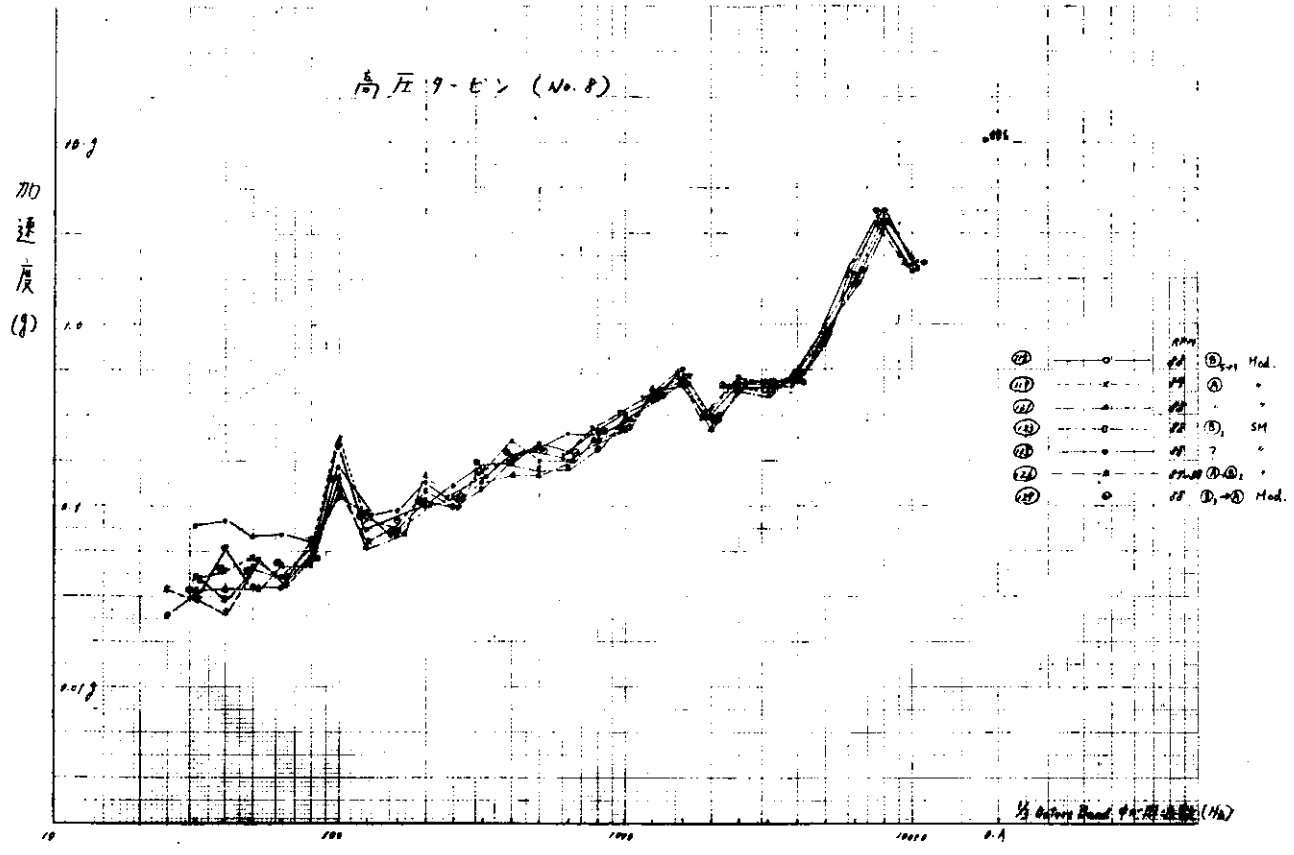
添付資料：データ・レコーダによる計測結果（⅓オクターブ・バンド分析）



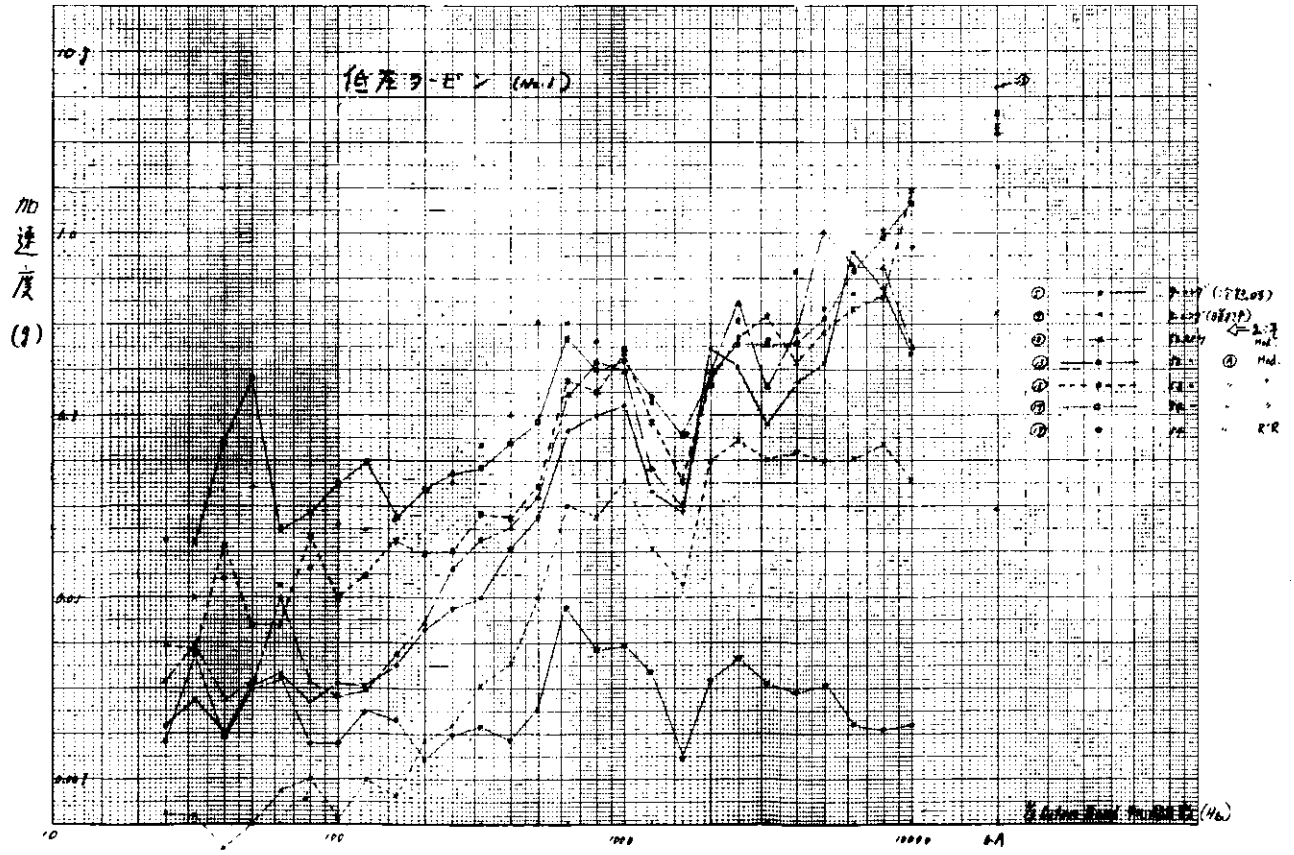
添付資料：データ・レコーダによる計測結果（1/3オクターブ・バンド分析）



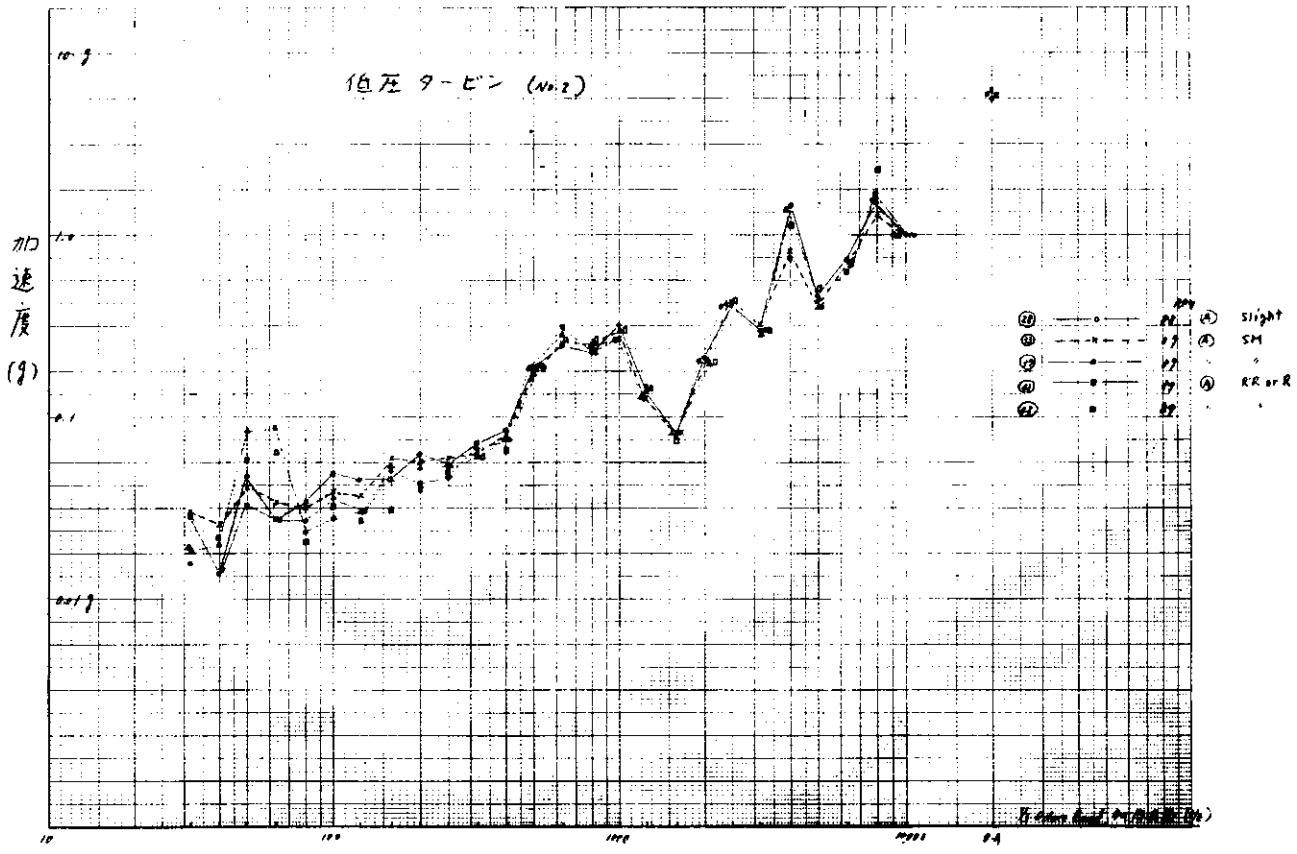
添付資料：データ・レコーダによる計測結果（1/3オクターブ・バンド分析）



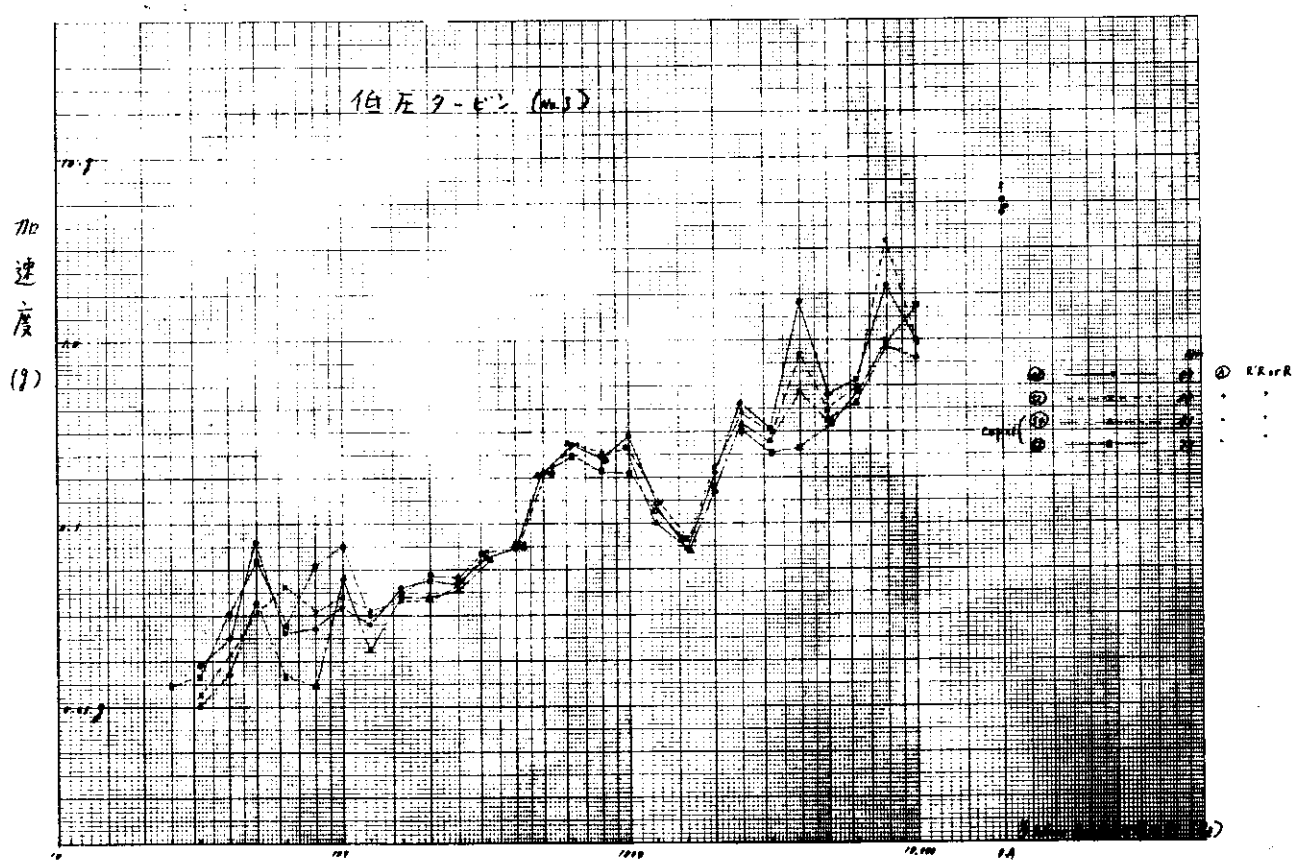
添付資料：データ・レコーダによる計測結果（1/3オクターブ・バンド分析）



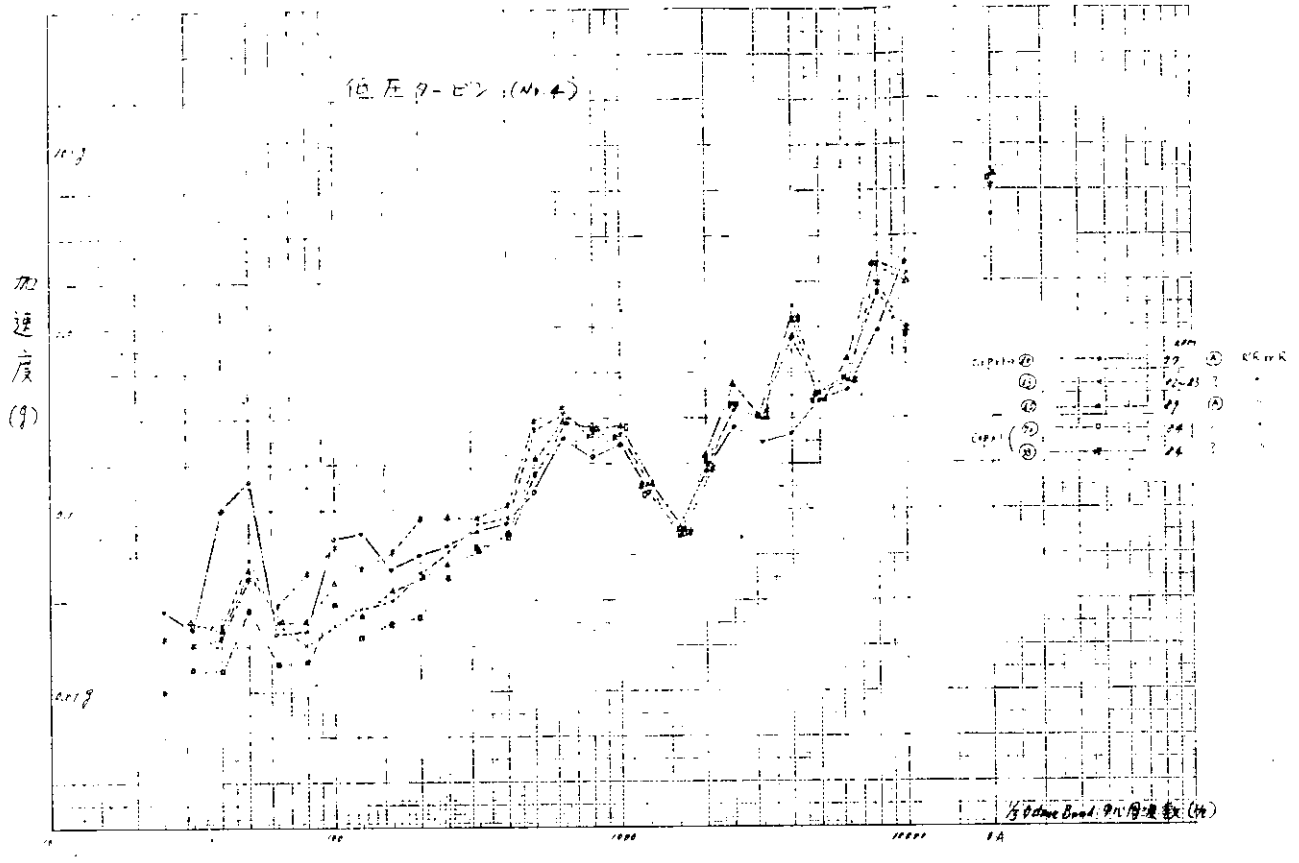
添付資料：データ・レコーダによる計測結果（1/3オクターブ・バンド分析）



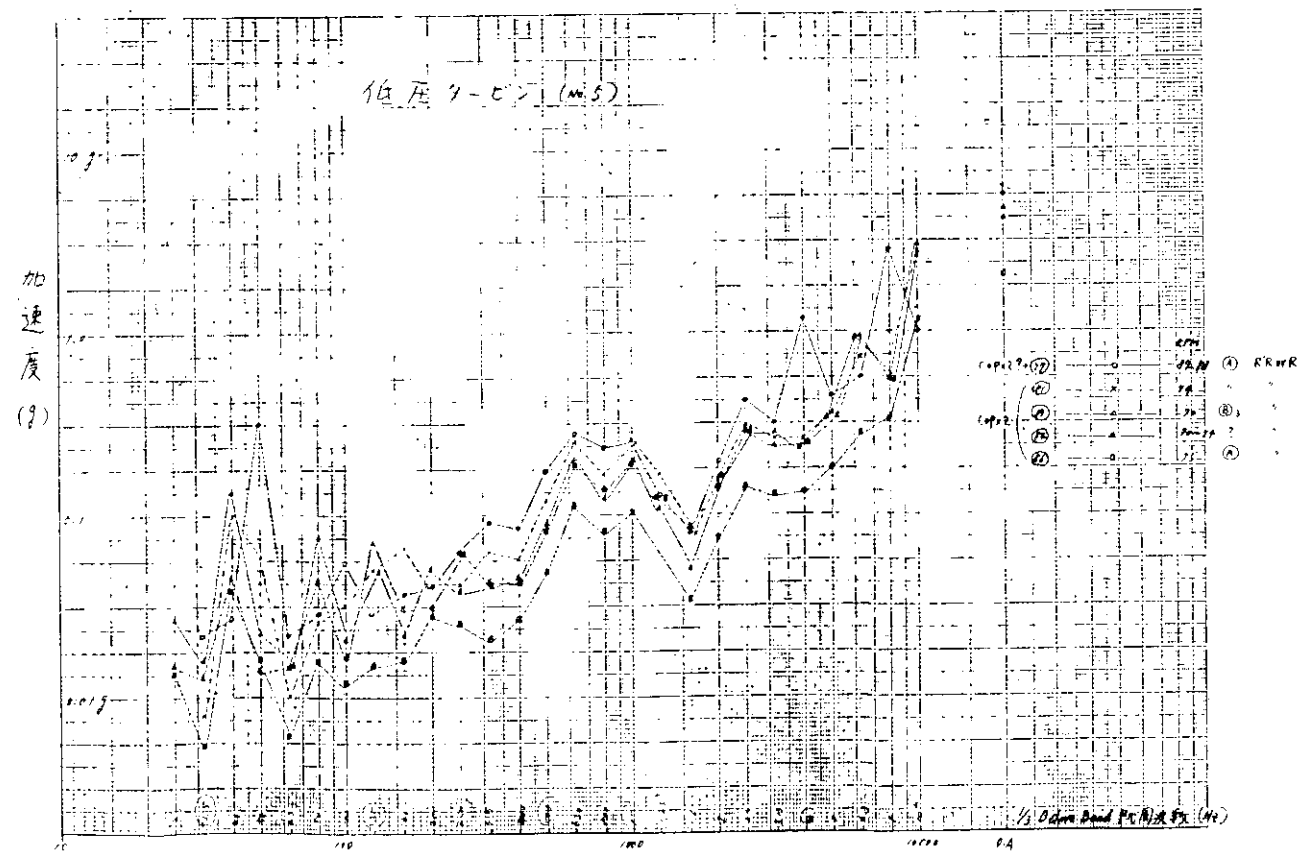
添付資料：データ・レコーダによる計測結果（1/3オクターブ・バンド分析）



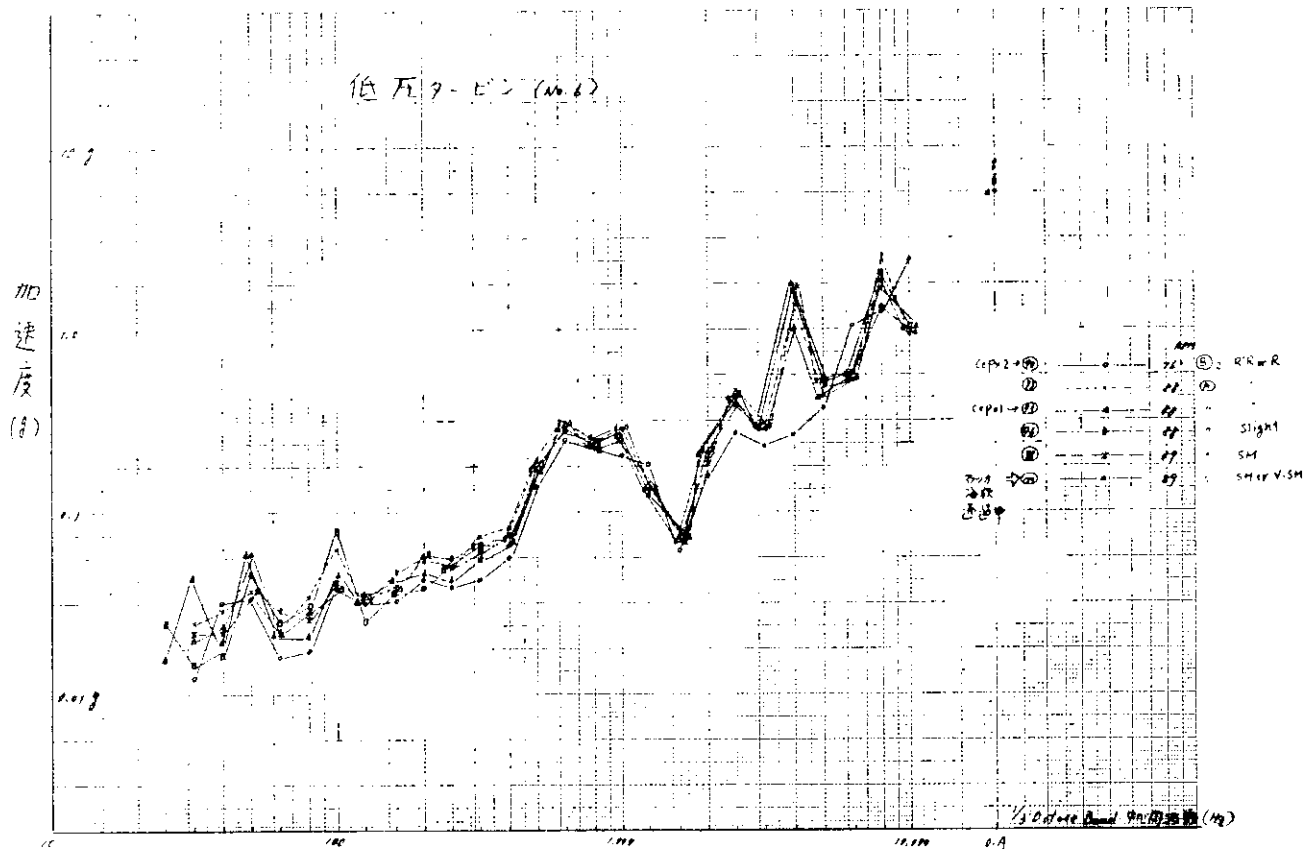
添付資料：データ・レコーダによる計測結果（1/3オクターブ・バンド分析）



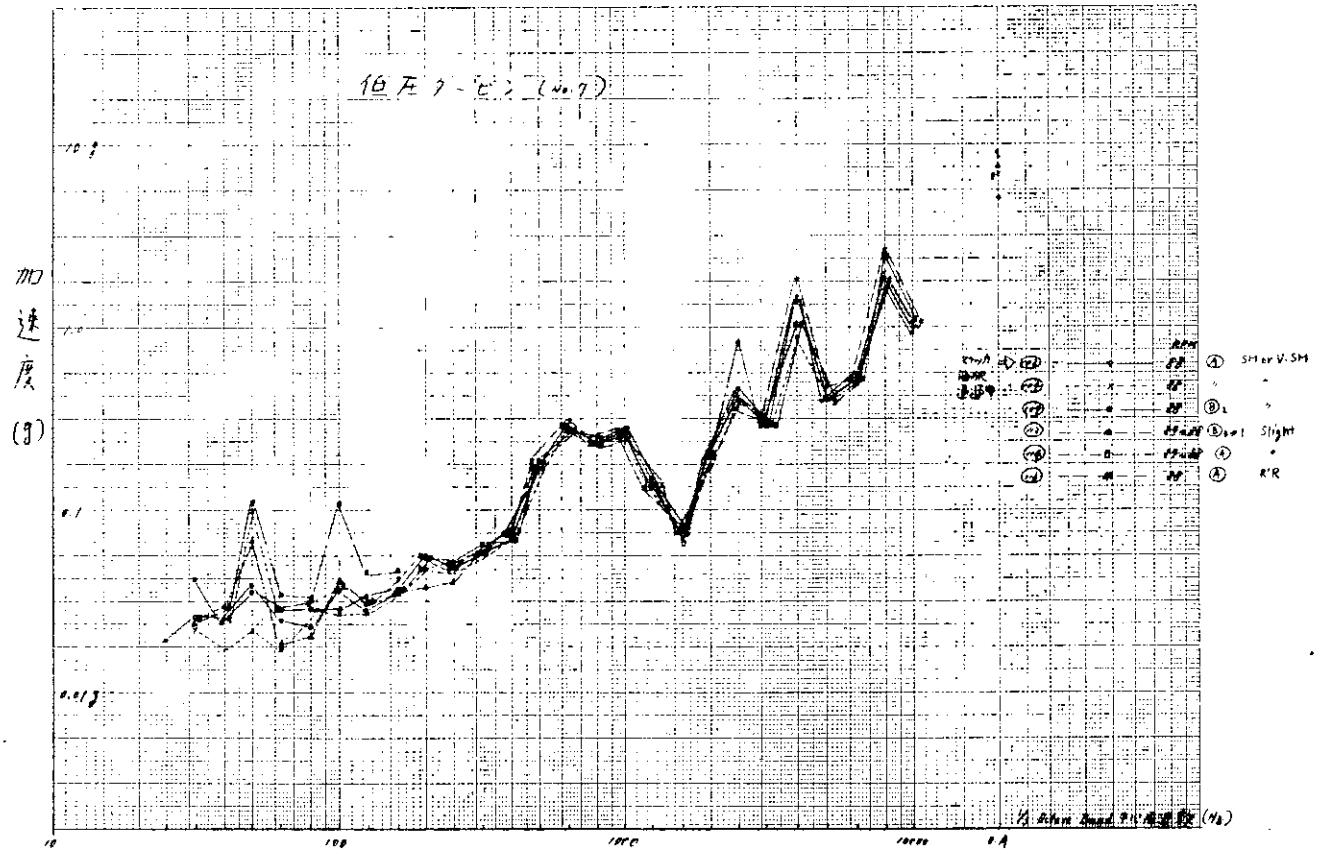
添付資料：データ・レコーダによる計測結果（1/3オクターブ・バンド分析）



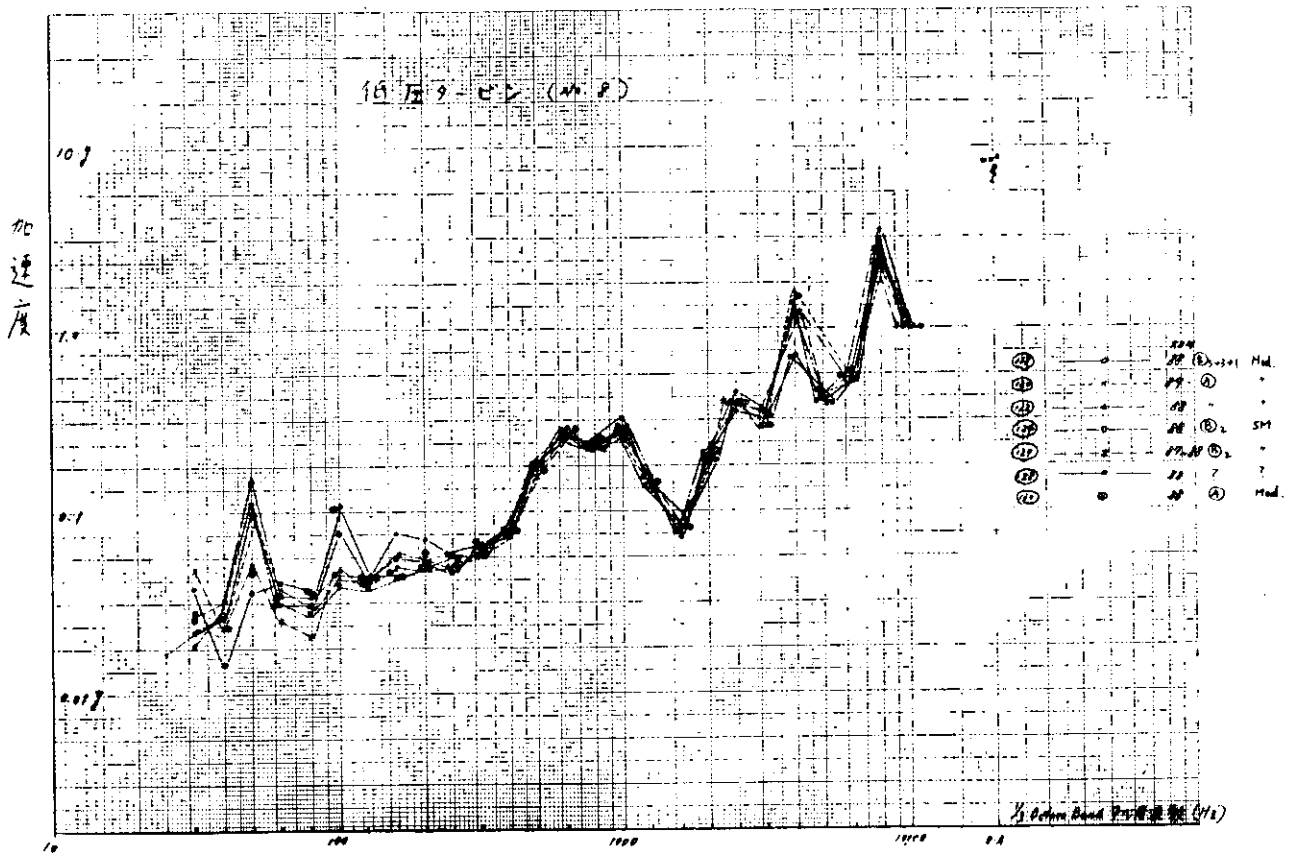
添付資料：データ・レコーダによる計測結果（1/3オクターブ・バンド分析）



添付資料：データ・レコーダによる計測結果（1/3オクターブ・バンド分析）



添付資料：データ・レコーダによる計測結果（1/3オクターブ・バンド分析）



添付資料：データ・レコーダによる計測結果（1/3オクターブ・バンド分析）

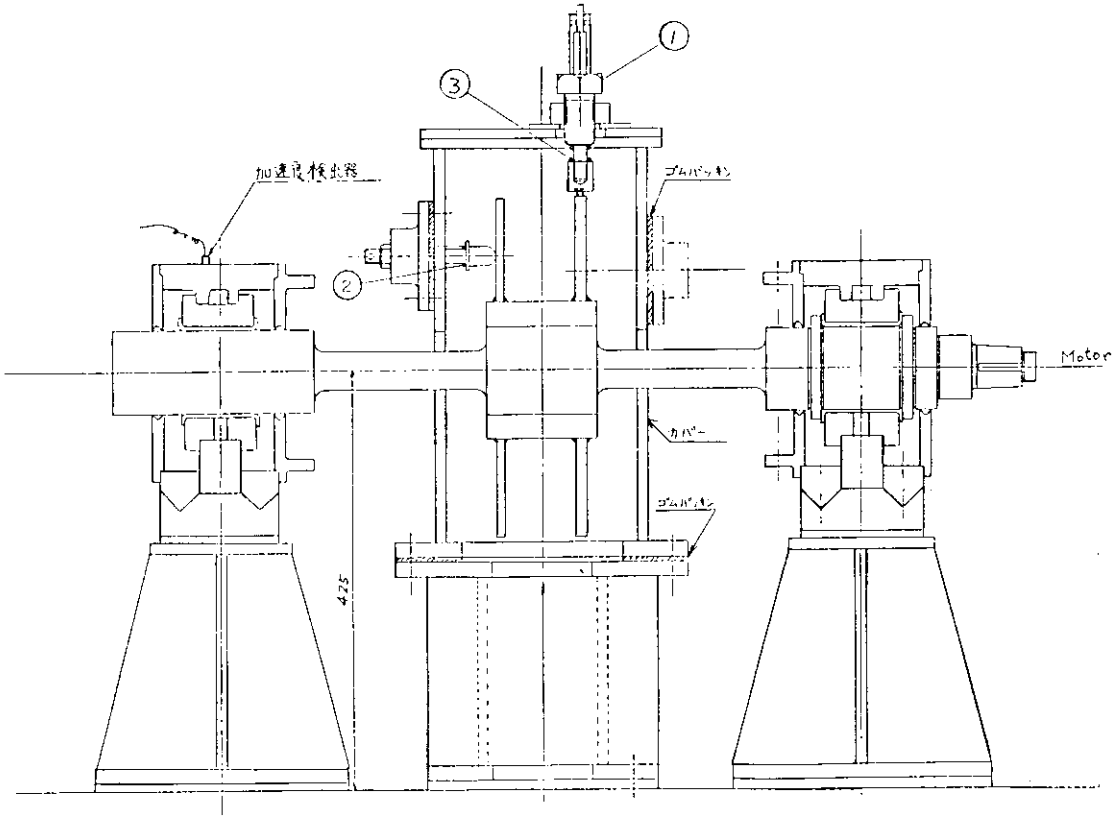
4.5　タービン内部接触のシミュレート実験

4.5.1　実験方法

第4.5.1図に実験装置の概略を示す。軟鋼の円板をボスに溶接し、そのボスを焼ばめによつて軸に取り付けた。また、各円板は実際のタービンの円板と自然振動数が大体等しくなるように設計した。また、この軸の危険回転数は約4,000 rpm である。

蒸気タービンにおける内部接触のうち翼先端と車室の接触の場合を想定して、本装置の円板の外周に薄板のステンレス製の接触片を接触させた。接触力はボルト①とバネ③によつて制御した。また蒸気タービンにおけるロータと仕切板の接触および車室内に異物が侵入した場合を想定して円板の側面に黄銅の丸棒を接触させた。接触力をバネ②によつて制御した。

以上の装置で内部接触のシミュレートを行ない軸を駆動するモータと反対側の軸受カバーに検出器をとりつけて振動加速度を計測した。計測器の概要を第4.5.1表に示す。



第4.5.1図

第4.5.1表 計測器要目

名称	使用数	メーカおよび型名	概略仕様	
加速度検出器	1	EMIC5411−AT	感度	50.0mV Peak/G・Peak
			周波数範囲	0〜10KHz
			共振周波数	33KHz
増幅器	2	IMV. VM4300M	S/N	40dB以上
			周波数範囲	5〜15000Hz
			出力電圧	1V
データ・レコーダ	1	NAGRA GUDELSKI−III	記録トラック数	DIRECT 1ch.
			周波数範囲	20Hz〜10000Hz
			記録入力	±1V
			再生出力	±1V
			テープ速度	19.05cm/s
			テープ幅	¼inch
周波数分析器	1	B&K 2112	周波数範囲	25〜40000Hz
			分析幅	⅓オクターブ
			選択度	50dB/oct
レベル・レコーダ	1	B&K 2305	周波数範囲	10〜20,000Hz
			記録速度	4〜2000mm/s
			送り速度	0.0003〜100mm/s
			記録紙幅	100mm

4.5.2　実験結果

計測結果を1/3オクターブバンドスペクトラムでまとめて検討した結果つぎのことがわかつた。

1）接触音のある場合（以後異常と称する。）とない場合（以後正常と称する。）の差は、高周波数領域に相当広く現われており、ある特定の狭い範囲の周波数のレベルだけが高くなるものではない。（第4.5.2図）

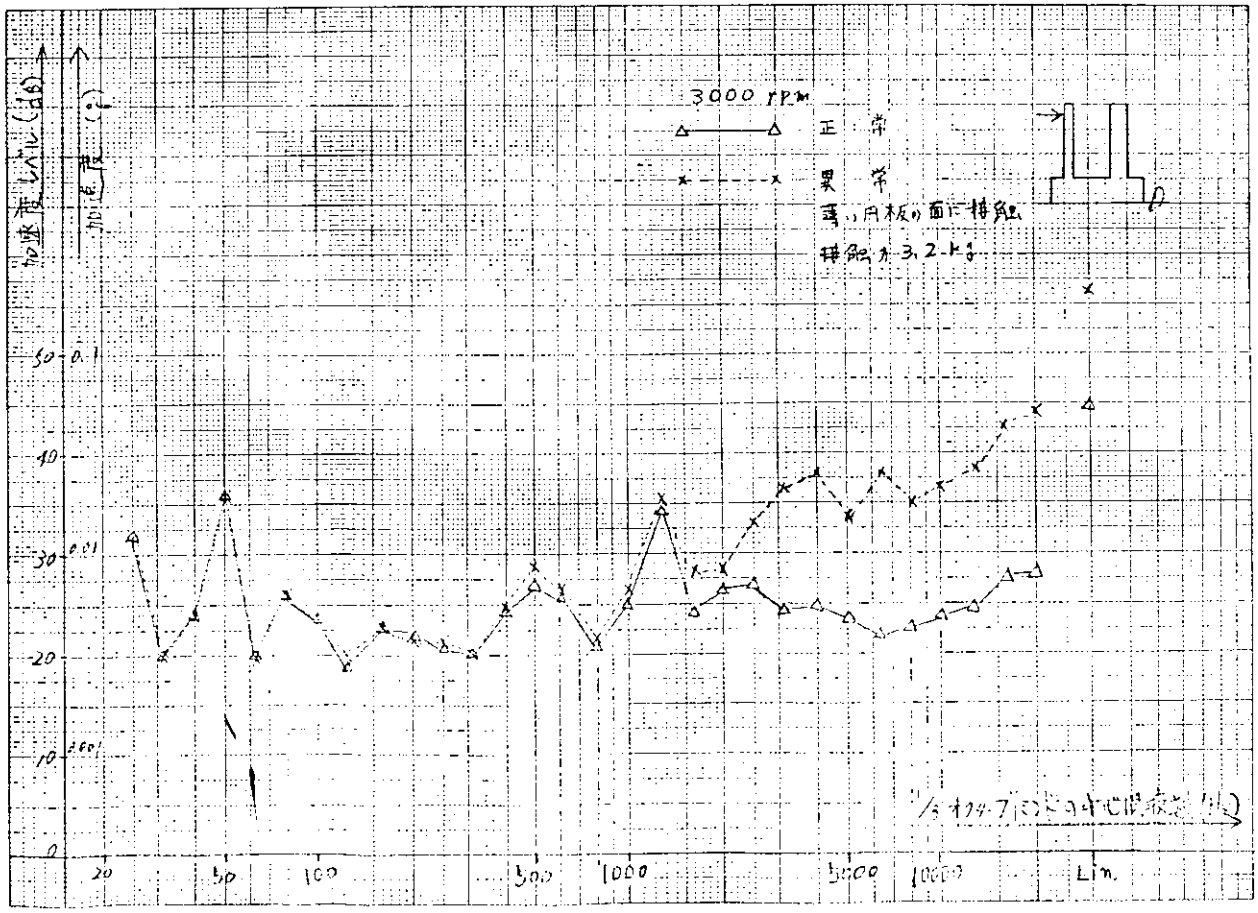
2）一定回転で円板の面に接触させた場合、接触力が大きくなるほど、異常のレベルは高くなる。この場合も、周波数が狭い領域において明白な差が生じる（第4.5.3図）。しかし、円板の外周に接触させた場合、接触力の差の影響は見られない（第4.5.4図）

3）接触力が一定の場合、接触部の速度が大きくなるほど異常のレベルは高くなる（第4.5.5、4.5.6、4.5.7図）

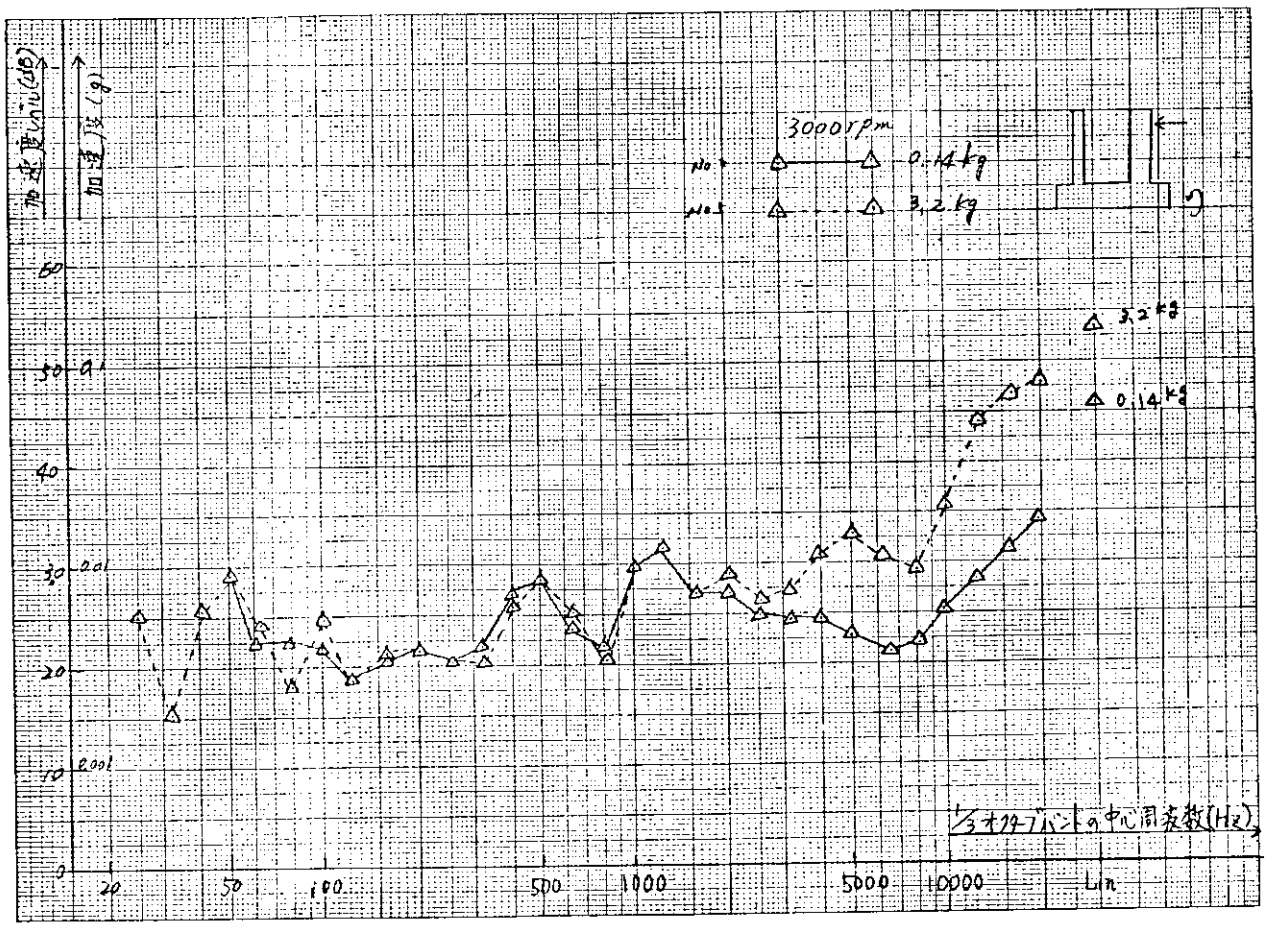
4）接触力および接触部の速度が一定で、内径の異なる円板の外周に接触させた場合、スペクトラムは、1,600Hz 2,000Hzの間で若干の差が現われる（第4.5.8、4.5.9図）

結局、本実験で行なつたような接触方法では、レベルの上昇の幅は接触部の速度および接触力に関係がある。

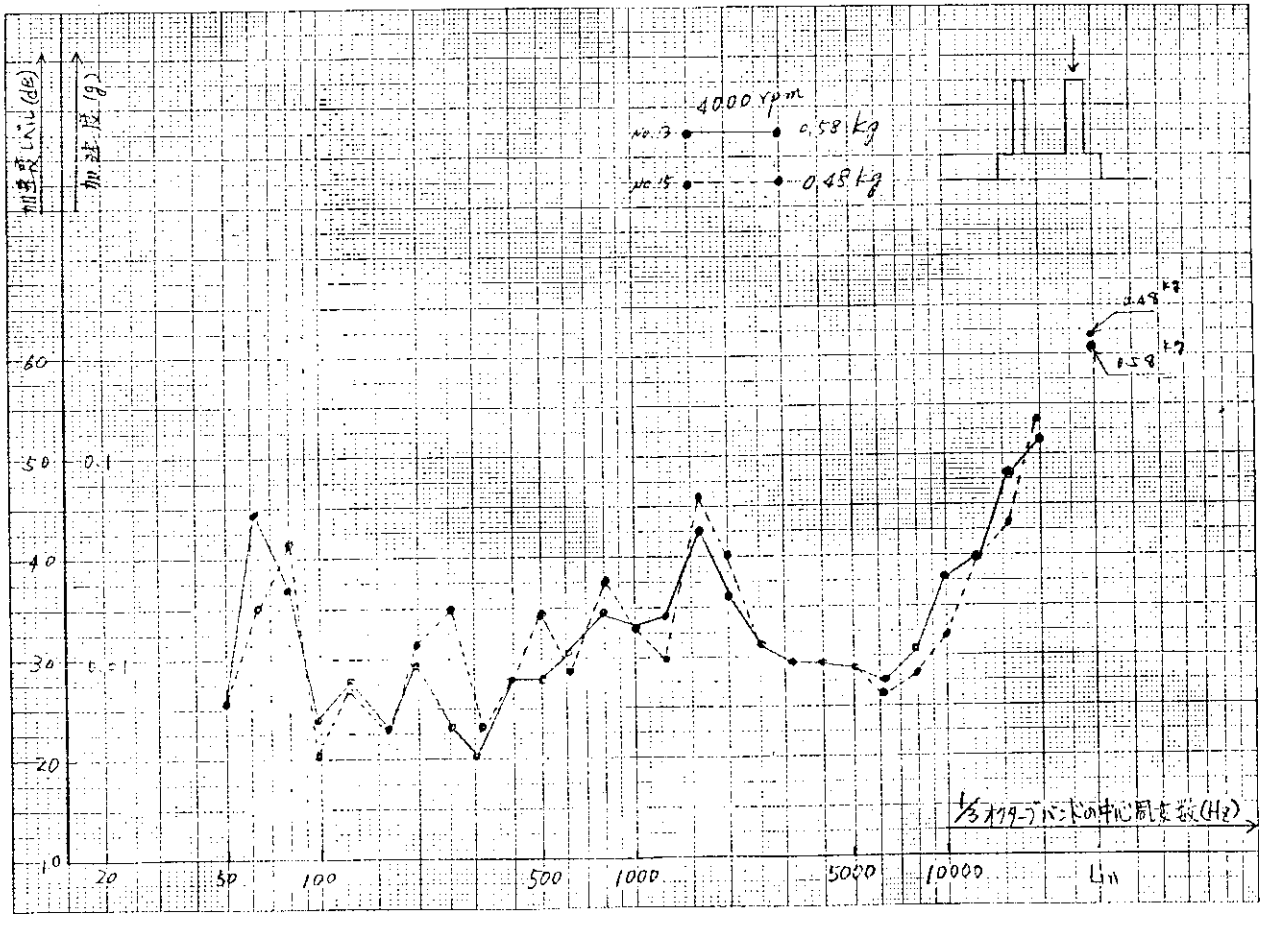
この二つの因子の中で、特に、接触部の速度に注目して実機の異常検知の可能性について推測するとつぎのようになる。実機の正常時のスペクトラムは蒸気音の影響により高周波域のレベルが高い。一方本実験の結果によれば、接触が生じた場合に、その影響は周波数の高い領域に現われる。したがつて接触部の速度が小さい場合（たとえばローターとラビリンスパッキンの接触）は、その接触音が蒸気音によつて打ち消されて、検知は困難になる。一方、接触部の速度が大きな場合（たとえば翼植と仕切との接触、シュラウドリングと車室との接触）は、接触音が蒸気音を上回り異常検知は容易になる。



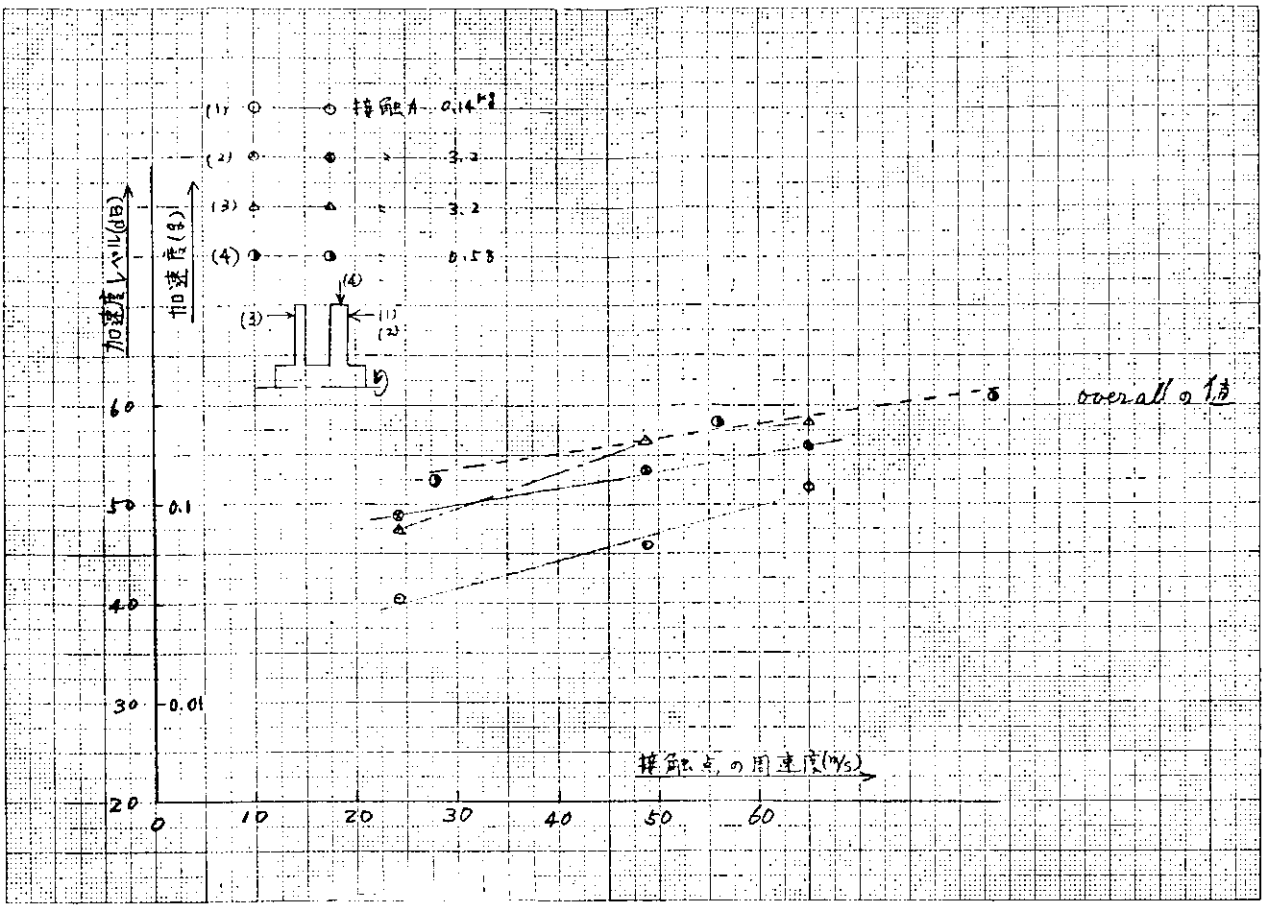
第4.5.2図


3000rpm
No.1 0.14kg
No.5 3.2kg
3.2kg
0.14kg
1/3オクターブバンドの中心周波数(Hz)

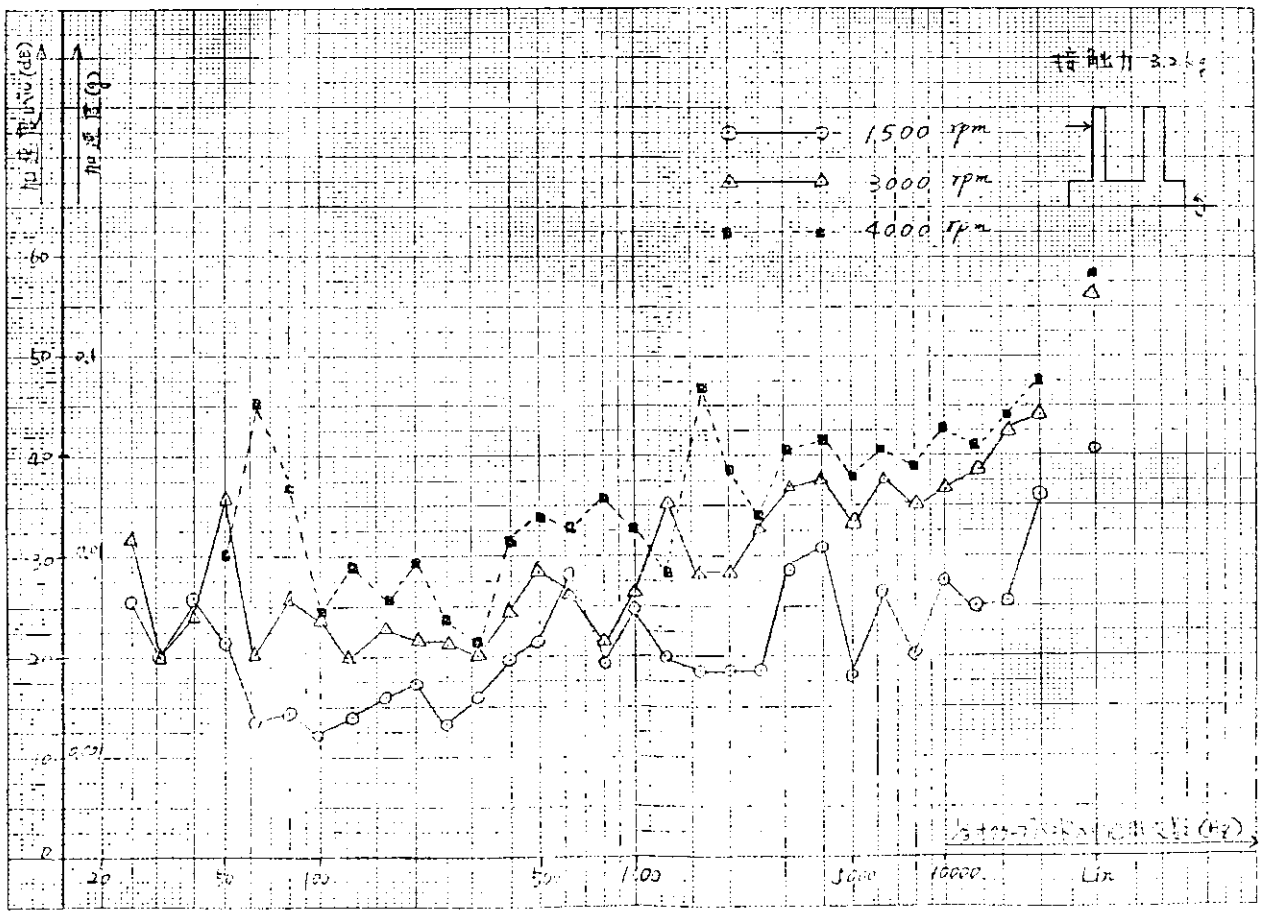
第 4. 5. 3 図


4000rpm
No.3 0.58kg
No.15 0.48kg
0.48kg
0.58kg
1/3オクターブバンドの中心周波数(Hz)

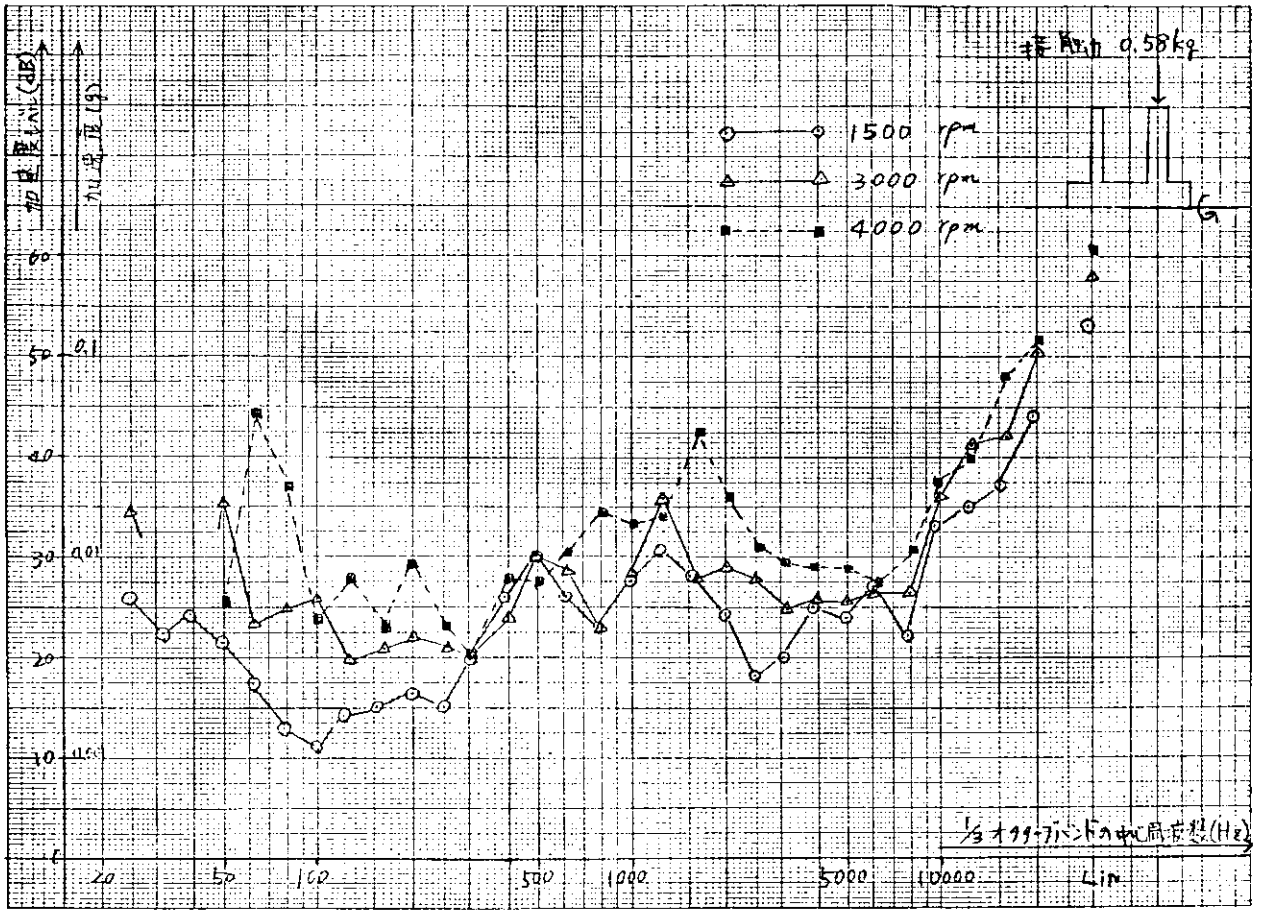
第 4. 5. 4 図



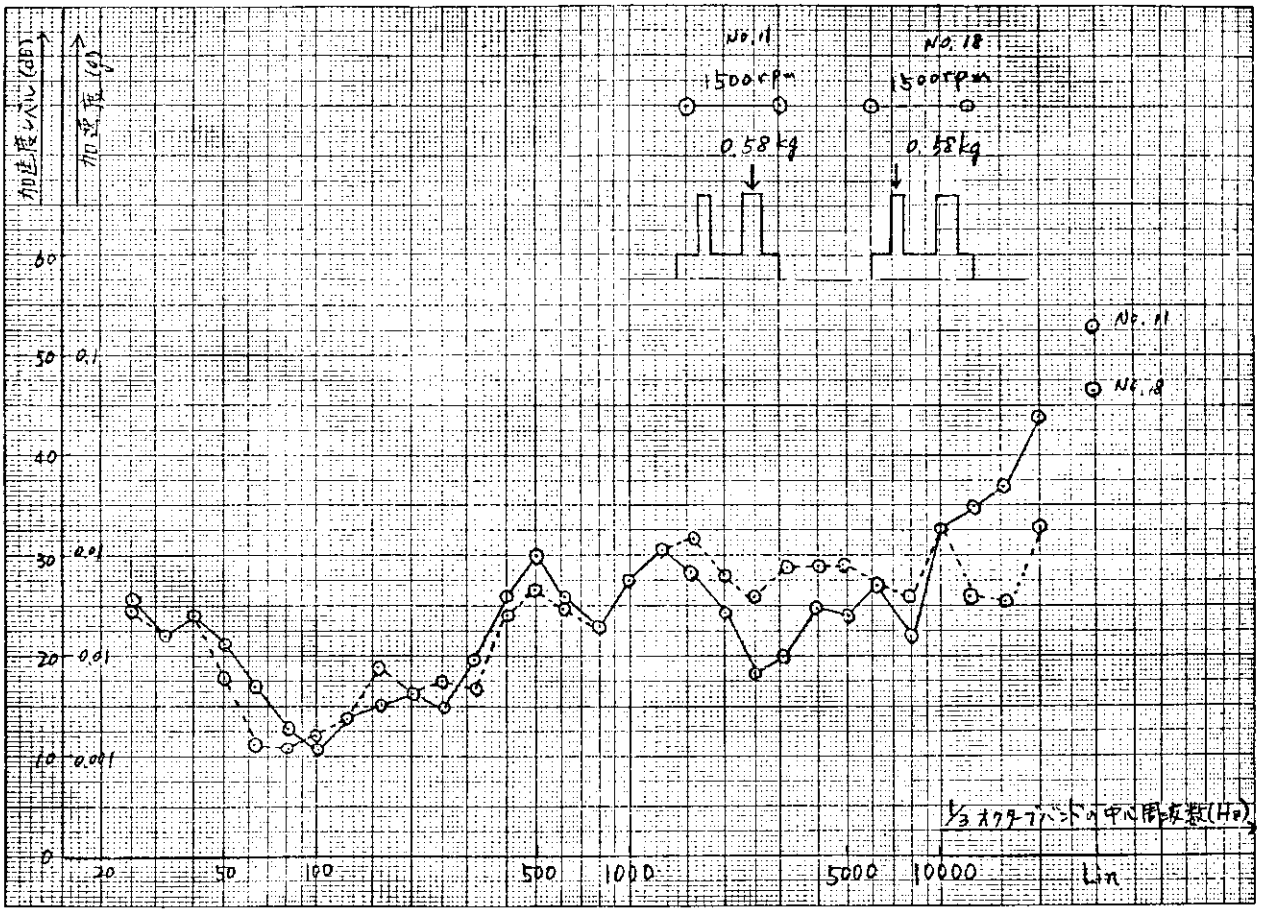
第 4. 5. 5 図　Overall 値



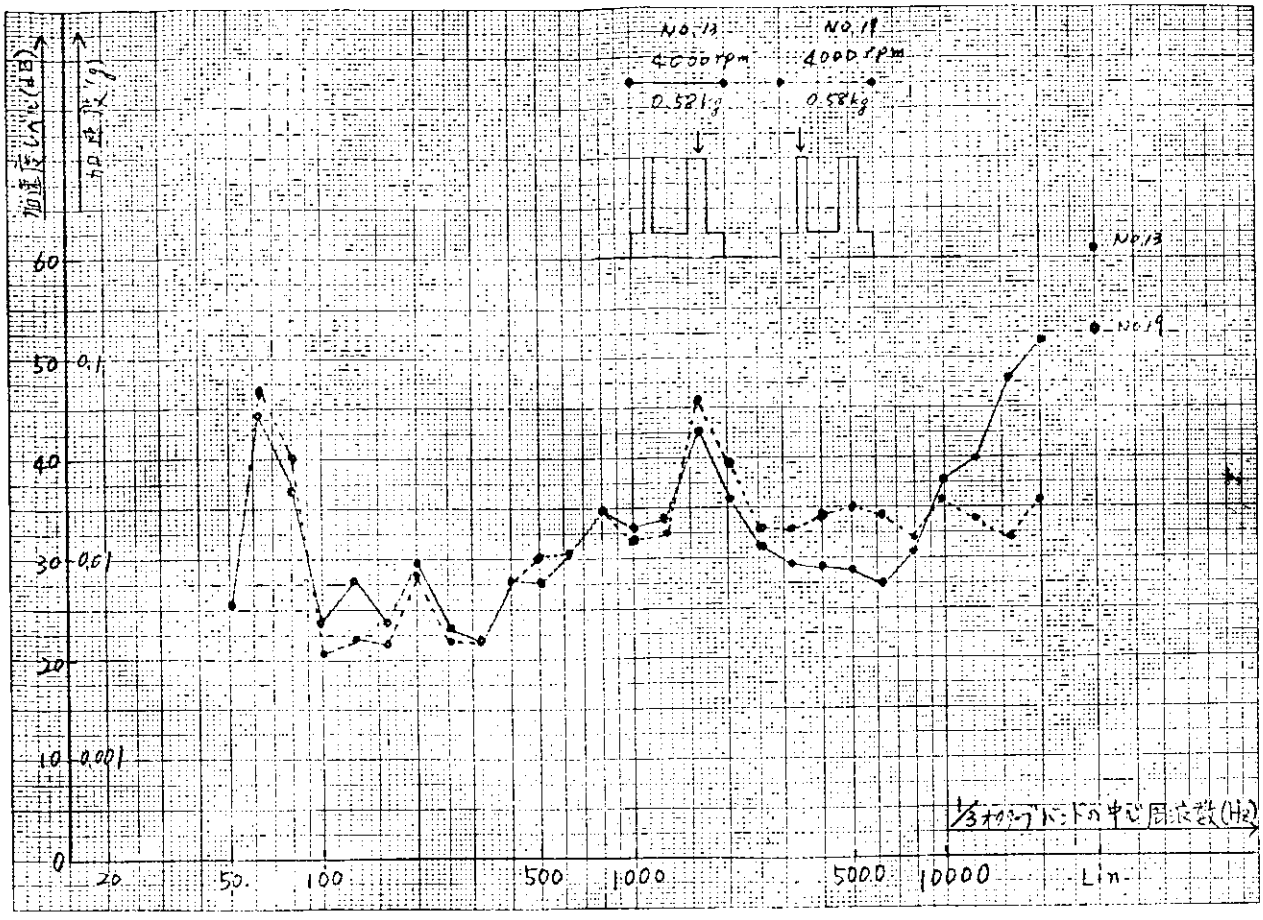
第 4. 5. 6 図


加速度レベル(dB)
加速度(G)
1500 rpm
3000 rpm
4000 rpm
0.58kg
1/3オクターブバンドの中心周波数(Hz)
Lin

第 4. 5. 7 図


加速度レベル(dB)
加速度(G)
No.11
1500rpm
0.58kg
No.18
1500rpm
0.58kg
No.11
No.18
1/3オクターブバンドの中心周波数(Hz)
Lin

第 4. 5. 8 図



第4.5.9図

4.6 結　　言

前年に引き続き昭和45年度には7隻の新造タンカーの海上試運転時に高揚程タービンの駆動制動装置カバー上部において振動加速度を計測し、種々の運転状態における主タービン内部の正常音パターンを集積し解析を行なった。

また、実際航海時における正常音の特性を把握するためにタービンタンカー中和田丸に乗船し日本ペルシャ湾間一往復の航海で、いろいろな航海状態における正常音を計測し、解析を行なった。

なお、これらの計測の際に、タービンの異常状態が発生しなかったので実機における異常音パターンを計測できなかった。

そこで研究室において模型により回転円板の周辺および側面に外部から静止物体を接触させて、その音響を計測し、接触による異常音パターンの傾向を調べた。

これらの検討の結果、23万トン程度のタンカーの場合について、下記のとおりタービン内部音響のパターンの特徴が相当明らかになり、音響によるタービン内部異常検知が可能である見通しが得られた。

1）タービンが、ある回転数以上で運転されている場合、その振動加速度スペクトラムのうち約1,000Hzより高周波の領域で種々のタービンのスペクトラムは一定の狭い帯の中に存在する。

しかし約250Hzより低い周波数領域では、その幅は相当大きい。

2）タービンが一定回転で運転している場合、その正常音スペクトラムの各中心周波数におけるレベルの平均値、および瞬時値の時間的変動の幅も、一般に高周波数領域ではせまく、低周波数領域では大きい。前項1）項の場合も含めて低周波数領域では、船体振動の影響など複雑な原因によるものと考えられるが、一方加速度形の振動計による計測では、低周波数領域において発生した計測結果が得られていないので、一般として低周波数領域を音響検出器によ

り検出し、低周波数領域は非接触形の軸振動計により検出する方法とを併用すれば有効と思われる。

3) 同型のタービンでも、その音響スペクトラムは個々の場合についてわずかながら異なる。したがつて異常判定を行なうためのレベルの設定は、個々の船について就航初期に実測をした上決定する必要がある。

4) 後進時の音響スペクトラムは前進時のものと異なるので、別個に設定しなければならない。

5) タービンの周囲の条件は、タービンの音響スペクトラムに対し、実際上影響を与えないことがわかつた。すなわち補機の発停、積荷状態の差、海上模様などは、ほとんど影響しない。また操舵角度が約15°以下ではスペクトラムにはほとんど影響しないが、35°程度にもなつた場合には低圧タービンのスペクトラムに影響が出たことがあつたので、この点はソフト的に考慮する必要がある。

6) 模型実験によつて内部接触をシミュレートした際の観察によれば、接触の場合に約1,600Hz以上の高周波数域にスペクトラムの変化が現われた。この結果からみれば接触の検知には高周波数領域に注目することは有効と思われる。

おわりに、45年度の外洋就海時の実船実験にあたつてご協力をいただいた日本郵船、大洋海運両社に感謝の意を表する。

5. タービン軸受焼損予防手段確立のための実験的研究

5.1 研究の目的

タービン給機関室の超自動化を目的として昭和44年度において「タービン軸受メタル温度と摩耗の検知」に関する実験的研究を軸受試験機を用いて行ない、軸受の正常作動時および給油量減少の異常時における軸受メタル温度、軸変位、軸受台振動加速度等の諸値の実態を明らかにした。

昭和45年度には軸受の異常状態を上記の軸受の状態値によつて検出し、緊急停止（ここでは主としてクラッシュアスターンを考えた）することによつて、軸受の焼損を予防し、ひいては軸受の焼損につながる回転部と静止部の接触等の重大事故を未然に防せごうとする場合、軸受状態の検出値およびその方法が実船におけるタービン主機の作動状態を考慮に入れてどの程度有効でありまた有効にすべき方法について検討を行なうことを目的とした。さらにセンサーに組合せる制御回路を試作し、制御回路製作上の検討を行なうとともに、これを用いて軸受焼損が防止できるかについても合せて実験し、実船におけるタービン軸受焼損予防手段としての実用性を検討した。

5.2 研究の概要

実機における軸受異常の原因としては給油量の減少、異物の混入、振動等による過大な負荷など種々のものが考えられるが、本試験では、軸受の異常状態として上記のうち代表的な給油量が減少した場合について行なつた。この場合、検出値としては、昭和44年度の結果を基礎に軸受メタル温度、軸変位、軸の振動、軸受台振動加速度を取り上げた。

軸受の異常を検知した場合、その処置としては、実船におけるクラッシュ・アスターンを想定し、約30secで、軸を停止させることを標準とした。

本試験では、軸受試験装置を用いて行なつたが、実験条件を実機になるべく近いものとし、本研究によつて得られた結果ができ得る限り、そのまま実船に適用し得るように考慮した。また、軸受焼損予防に対し、条件の厳しい軸受形式が軸受荷重方向上向きの固定軸受であることを実験的に見出して、これを試験用軸受とした。

試験変数には、軸回転数、軸受荷重、軸受すきま、潤滑油、給油圧力の低下割合、減速所要時間、設定温度（減速開始時の軸受メタル温度）、回転軸の振幅を取扱つた。

そして、各作動条件に対して、異常時に起こる軸受状態値の変化過程および異常時の処置として緊急停止あるいはスローダウンを行なつた後の軸受状態値の推移を把握し、許容し得る最高メタル温度に抑えるための方法を検討した。また、軸変位、軸受台振動加速度についても、その有用性を検討しさらにこれらの検出端に組合わせる軸受焼損予防用制御装置を試作検討した。

以上、本研究により、軸受焼損予防手段については、つぎのような結果を得た。

1）軸受メタル温度について、許容限界温度範囲を求めメタル温度を限界温度までに抑えるための設定値の範囲を得た。

2）メタル温度上昇率は、軸受異常の初期の段階にて極大値を示すため、異常の早期発見には有効である。しかし、給油圧力の低下が緩慢なる異常の場合には、メタル温度上昇率も小さいため、メタル温度にて異常判断する必要がある。

3）メタル温度およびその変化率の検知は、荷重方向不変の場合には軸受荷重の方向で行なえばよい。

4）軸変位は、軸受が境界潤滑状態になる時期をつかむことができる。変位は荷重方向の軸移動量を求め、軸受との接触位置に設定点を置けばよい。

5）軸の振動は境界潤滑の異常の初期には顕著に現われない。

6）軸受台の振動加速度は軸受焼損の初期段階ではレベル変化が微小であり、絶対値も実機に比して小さいので軸受焼損予防の検知手段にはなり得ない。

7）軸受焼損予防用制御装置を試作し、各検出値に対して、本試験にて得られた設定値を用いて軸受の焼損を予防し得ることを確認した。

5.3　実験の方法

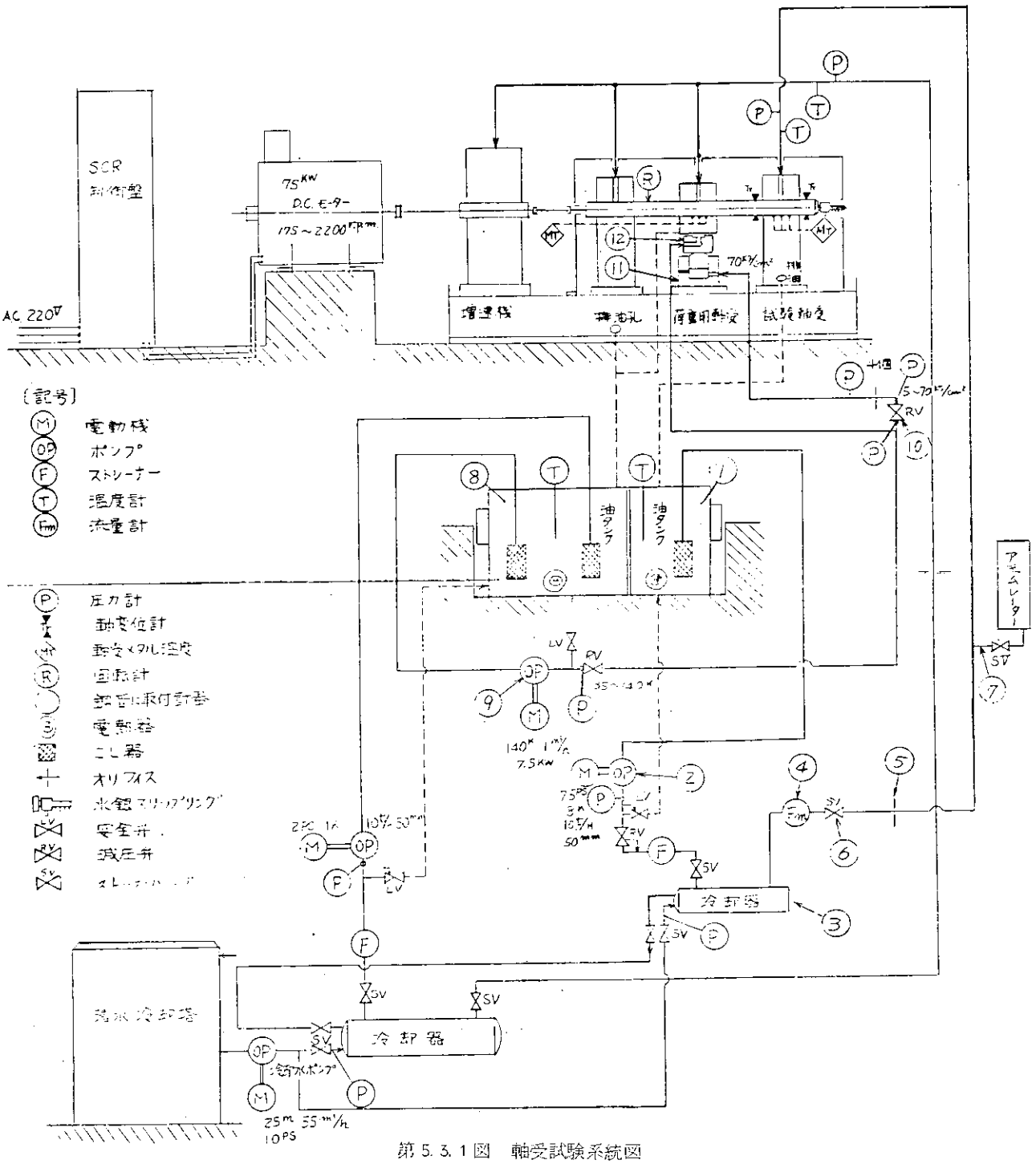
5.3.1　実験装置

実験装置の系統図および組立図を第5.3.1、5.3.2図に示す。

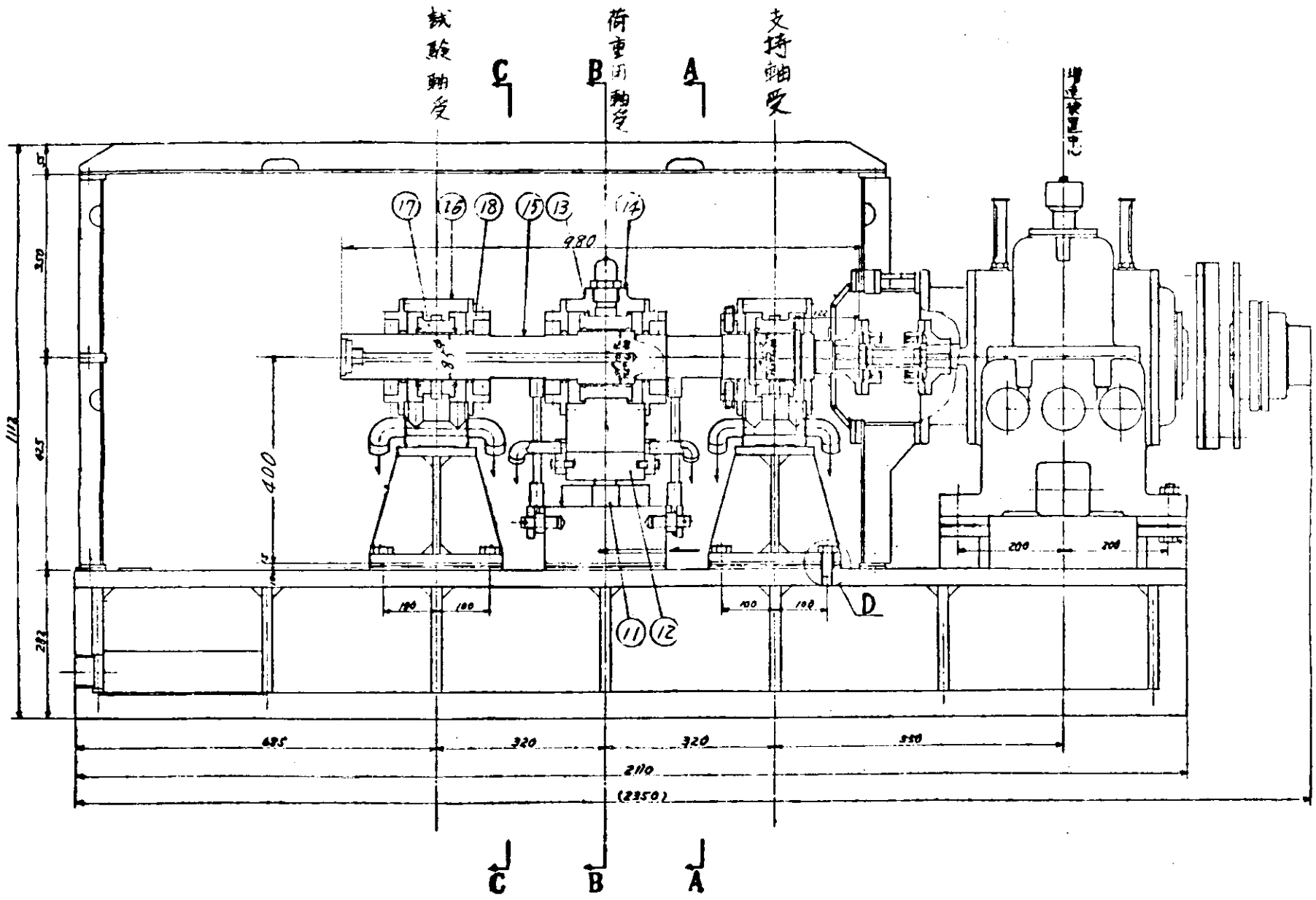
(1)　試験軸の駆動と試験軸受の潤滑

試験軸の駆動は電動モータによる。三相220V電源をSCR整流器により整流し、直流モータ（定格75kW、175～2,200rpm 連続可変）を駆動し、増速機により5.96倍に増速し、歯車継手を介して試験軸を駆動した。

試験軸受の潤滑油は、油タンク①からギャー・ポンプ②により加圧され、減圧弁、ストレーナ、オイルクーラ③を経て、オーバル流量計④で流量を計測して試験軸受に供給される。流量はまた管路オリフィス⑤の差圧をU字管にても計測した。供給油量、圧力の調整はストップ・バルブ⑥で行ない、供給油温度はタンク①内の電熱器とオイルクーラ③とで調整され、その温度は給油管中におかれた2mmφアルメル・クロメルシース熱電対で測定した。給油遮断時



第5.3.1図　軸受試験系統図



第 5. 3. 2 図　平軸受試験装置組立図

の圧力変化の影響を調べるために容量9.25ℓのタンク3基を設置した。（アキュムレータ装置）。

(2) 試験軸受の軸受荷重と負荷方法

試験軸受の軸受荷重は第5.3.3図に示す負荷装置によつてなされた。本装置は前年度試験軸受として使用したものであるが、本試験においては負荷装置として用い、試験軸受は第5.3.2図に示す反駆動側の軸受にした。この理由については後述する。

軸受荷重は負荷用軸受の下に設けた静圧軸受⑫を介して油圧ピストン⑪によつて加えられる。これに用いられる潤滑油は支持軸受用潤滑油タンク⑧からギャ・ポンプ⑨にて加圧され、減圧弁を経て静圧軸受⑫と油圧ピストン⑪に供給される。

軸受荷重の調整は減圧弁⑩の開閉によつて行ない、軸受荷重の測定は、事前に検定された歪ゲージ（120Ω4枚ゲージ）を貼つた荷重計をピストンと静圧軸受の間に設置して、静歪計により検出し、その歪値によつて軸受荷重を設定した。また、軸受荷重方向を測定するために、試験軸の回転中の曲げ応力を歪ゲージによつて、水銀スリップリングを介して検出した。同時に歪ゲージが鉛直方向にあるときの信号をフォト・トランジスタにて検出し、曲げ応力の最大値との位相を求めたところ軸回転数、軸受荷重によつて荷重方向は変らず鉛直方向に一致していることを確認した。

(3) 試験用軸受

本試験に用いた軸受は直径、軸受幅が85㎜、75㎜の真円二ツ割れでその詳細図を第5.3.4図に示す。荷重方向は上向の固定軸受である。軸受メタルの成分は錫基ホワイトで前年度の試験軸受と同質のものでその組成を第5.3.1表に示す。

また、試験に用いた軸および軸受の寸法を第5.3.2.表に表記した。

5.3.2 計測事項とその方法

(1) 軸受メタル温度とその変化率の計測

軸受メタル温度の計測は、0.5㎜径のアルメル・クロメルシース熱電対を用い、軸受表面から1㎜の所に取り付け測定した。

熱電対の出力は、冷接点で室温補正を行ない直流増幅器で増幅して電磁オシログラフにて記録した。また、異常試験においてメタル温度が早期に上昇する計測点については制御装置にて監視すると同時に電磁オシログラフに記録した。

軸受メタル温度計測位置を第5.3.4図に示す。

(2) 軸変位の計測

軸変位の計測にはインダクタンス型無接触式変位計を用いた。ピックアップは、試験軸受の駆動側と反駆動側に上横計4点設置し、軸たわみ量を補正できるようにした。また、軸と軸受の相対変位と変位計出力との関係は測定域を大きくすれば直線性に欠け、雰囲気温度および被測定物の温度により零点移動が大きい。これらのドリフトを補正するために、試験日ごとに変位出力の関係を求め、毎試験直後に軸と軸受の接触位置（変位計測の基準点）を測定した。

(3) 軸受の振動加速度の計測

前年度と同様、加速度検出器を試験軸受の上部カバーの上にシアノ・アクリレート系接着剤で固定し、振動加速度を計測した。検出器出力はチャージ増幅器で増幅し、騒音用テープレコーダ（周波数特性は30Hz～17,000Hz）で記録し、周波数分析器で⅓オクターブバンド加速度スペクトラムを求めた。

5.3.3 実験条件

軸受異常の原因としては種々なものがあるが、本試験では、それ等のうち代表的な例として供給油量が減少した場合を取り上げて、軸受焼損予防手段についての検討を行なつた。

軸受状態の検出値は5.3.2項で述べたとおり、軸受メタル温度およびその上昇率、軸変位、軸振動、軸受台振動加速

度であり、試験変数として軸回転数、軸受平均面圧、軸受隙間、減速所要時間、設定温度（減速開始時の軸受メタル温度）、潤滑油、給油圧力の低下割合、回転数の振幅を取り上げた。

軸回転数、軸受平均面圧、軸受隙間については本試験における実験条件が許し得る限り実機の作動状態に近いものとするためにつぎのように決めた。第5.3.3表は、現用舶用タービンの軸受諸元であり、第5.3.4表は実機に合せた場合の試験軸受の作動条件である。これらの諸値を考慮し、本試験装置に許容しうる範囲でつぎのように選んだ。

試験軸回転数　(n)　3000～10,000 rpm

試験軸受平均面圧　(p_m)　10　～　15　Kg/cm^2

試験軸直径すきま　(c)　0.25～0.30　mm

異常検知後の処置としては軸を減速してメタル温度の上昇を抑え軸受の焼損を防ぐのであるが、減速方法は直線的な減速とし、その所要時間は実船におけるクラッシュアスターンを想定して30 sec を標準とし、また減速所要時間の影響を調べるために、60 sec および120 sec の場合についても実験を行なつた。

潤滑油給油圧力の低下割合を調節するためにアキュムレータを設置して、圧力の低下速度の影響を調査した。

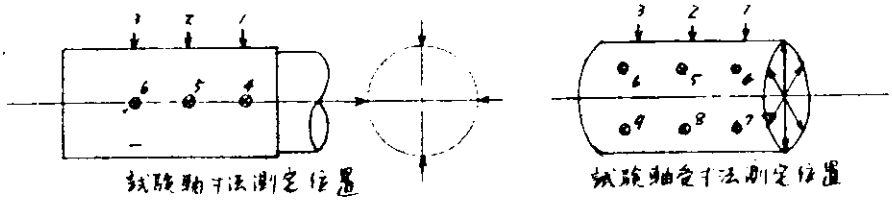
回転軸の振幅については、試験軸の形状が簡単なために通常問題数μの振動しか生じないが、振動の大きさがメタル温度等に及ぼす影響を調査するために、試験軸にアンバランスを特別につけて実機と略同等な40～50μの振動のある場合についても実験を行ない、その影響を調査した。

軸受給油温度については40～50℃の範囲では他に与える影響が小さいことが前年度の実験結果によつて分つているので本年度の実験では40℃一定とした。また、使用潤滑油は140#タービン油で、その粘度および比重を第5.3.5図に示した。

第5.3.1表　錫基ホワイトメタル成分(%)

元　素	%	元　素	%			
Sb	7.6	Cd	1.0	固	相	点	約225℃
Cu	3.0	接種エレメント	約0.4				
Ni	0.2	Sn	rest				

第5.3.2表　試験軸、試験軸受の寸法



単位（mm）

		A	B	C	D_0	E
軸	1	84.8−0.005		84.8−0.013	84.8−0.018	84.6 0
	2	0	A	−0.010	−0.015	0
	3	0	と	−0.010	−0.015	−0.005
	4	0	同	−0.013	−0.020	0
	5	0	軸	−0.010	−0.015	0
	6	0		−0.010	−0.015	−0.003
	平均	84.800	84.800	84.789	84.784	84.799
軸受	1	85 +0.050	85 +0.046	85 +0.050	85 +0.060	85 +0.088
	2	+0.050	+0.048	+0.052	+0.062	+0.070
	3	+0.042	+0.050	+0.050	+0.060	+0.088

		A	B	C	D_0	E
軸受	4	＋0.042	＋0.040	＋0.065	＋0.065	＋0.075
	5	＋0.040	＋0.045	＋0.064	＋0.070	＋0.060
	6	＋0.040	＋0.045	＋0.060	＋0.060	＋0.075
	7	＋0.040	＋0.060	＋0.048	＋0.060	＋0.055
	8	＋0.035	＋0.060	＋0.048	＋0.070	＋0.045
	9	＋0.040	＋0.048	＋0.050	＋0.070	＋0.040
	平均	85.047	85.049	85.054	85.064	上下方向の平均 85.062 全体の〃 85.066
直径スキマ		0.247	0.249	0.265	0.280	0.283

第5.3.3表　実船のタービン軸受諸元

記号	軸受位置	軸受内径 D (mm)	直径スキマ C (mm)	回転数 n (rpm)	周速 V (m/s)	面圧 Pm (Kg/cm²)	pmV 値	$pm^{1/2}V$値
イ	H.P.タービン　軸受	120	約 0.3	4975	31.3	8.3	260	90.2
ロ	L.P.タービン　〃	200	〃 0.4	3353	35.1	13.3	467	128.0
ハ	H.P測一減小歯車軸受	160	〃 0.4	4975	41.7	22.2	927	196.0
ニ	〃　一減親　〃	560	〃 0.5	524	15.4	7.1	109	41.0
ホ	〃　二減小　〃	560	〃 0.5	524	15.4	12.0	185	53.3
ヘ	二減親　〃	800	〃 0.5	90	3.8	6.5	24.7	9.7
	本試験軸受	85	0.25～0.3					

第5.3.4表　実機軸受と試験軸受との対比

実機との対応位置	1) nt(rpm)	2) nt(rpm)	3) nt(rpm)
イ	7030	3890	5240
ロ	7900	6990	7440
ハ	9375	13900	11400
ニ	3460	1630	2310
ホ	3460	2765	3100
ヘ	855	371	564

※上表において

1)：周速を実機に合わせた場合の本試験軸回転数（nt）

2)：pmV 値を実機に合わせた場合　〃

3)：$pm^{1/2}V$値を実機に合わせた場合　〃

ただし　試験軸受内径：85mmφ

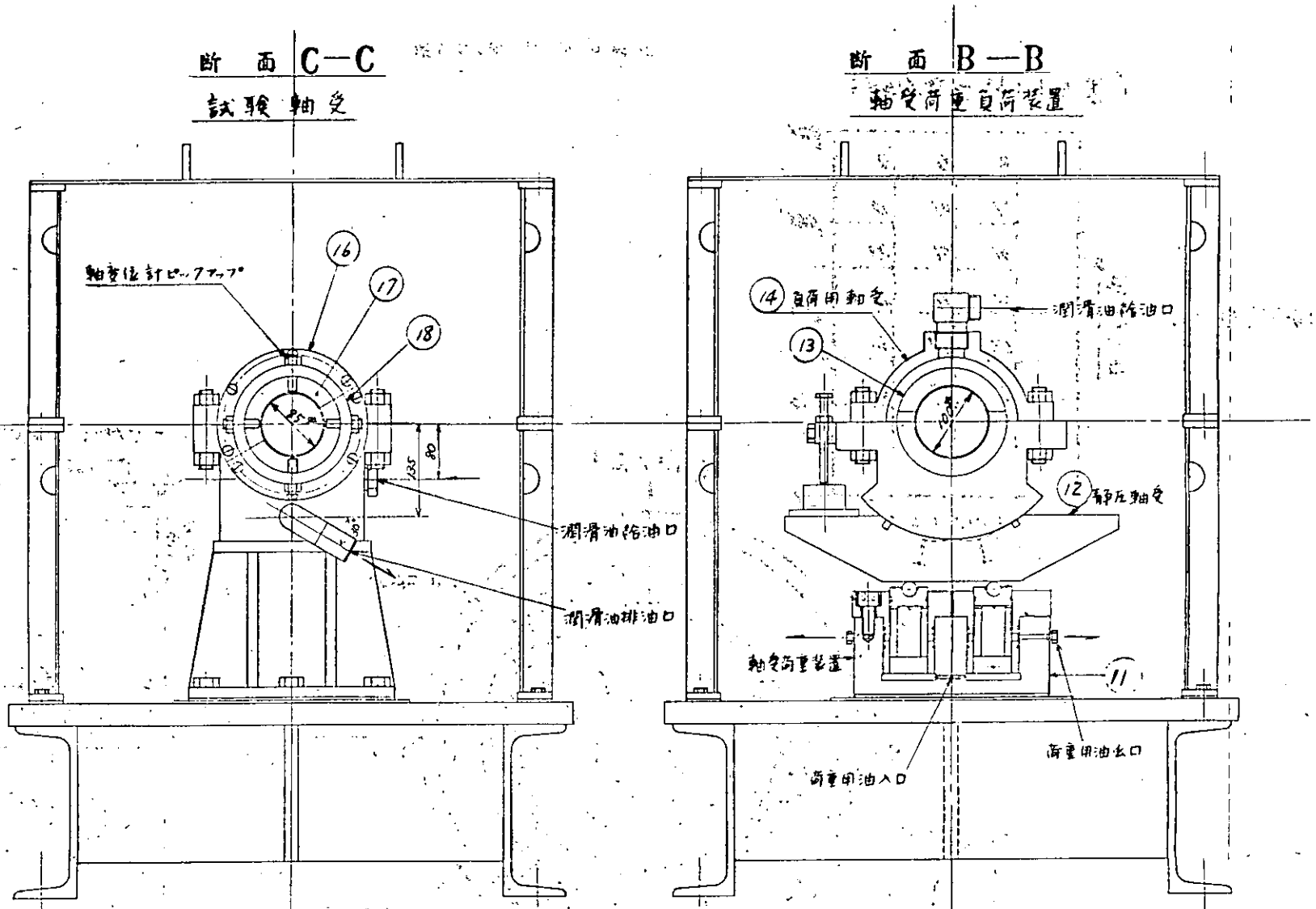
軸受平均面圧：15Kg/cm²

5.3.4　試験用軸受について

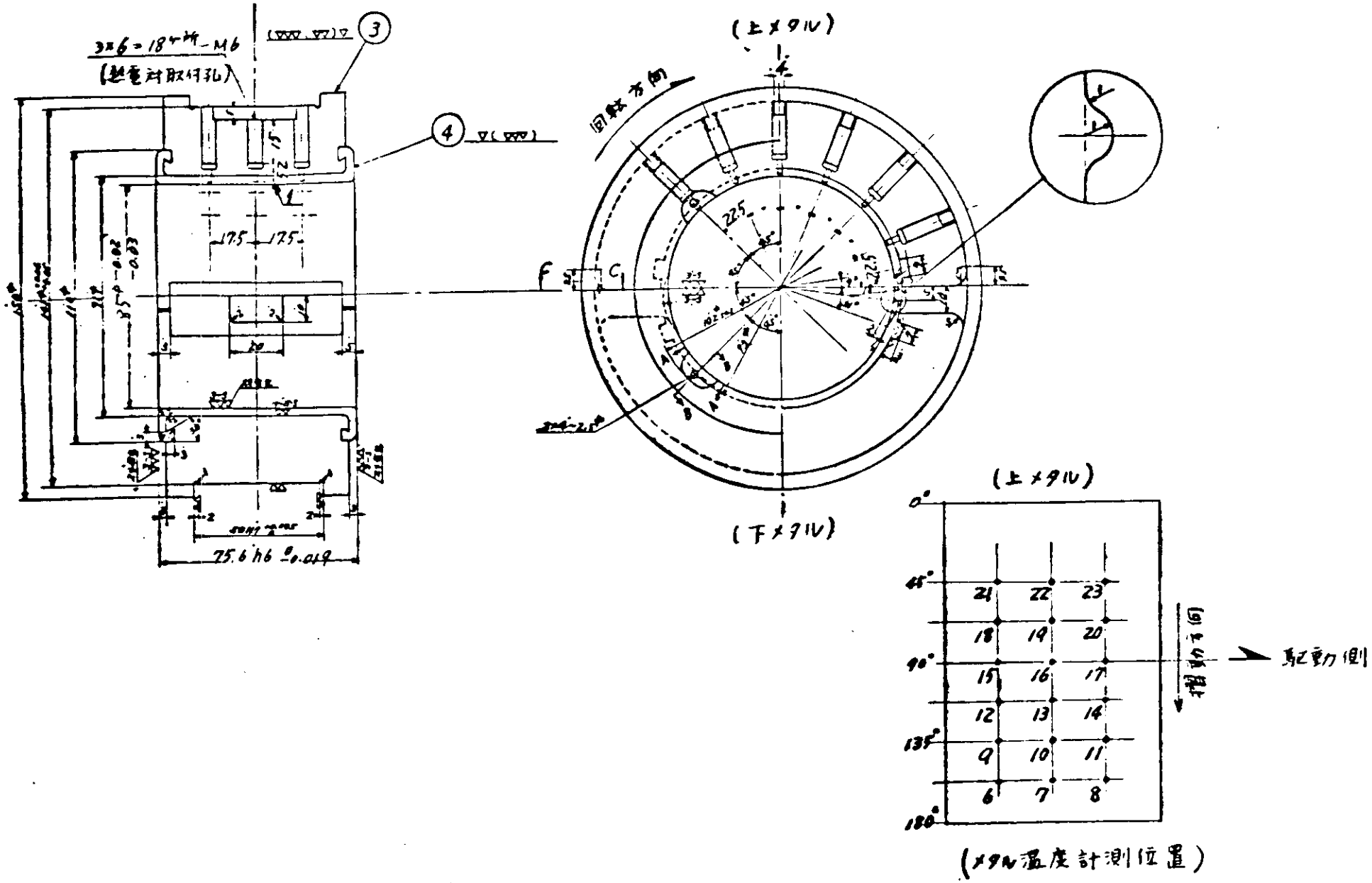
前年度の試験においては第5.3.2図の中央軸受を試験軸受としたが、本試験においては下記の理由により第5.3.2図の反駆動側に位置する固定軸受（荷重方向は上向）と中央軸受との差異を実験的に求めて、試験用軸受の選定について検討した。

1)　中央軸受は第5.3.3図よりわかるとおり、その下部の2個の油圧ピストンにより静圧軸受を介して荷重は常に中央軸受の下部にかかるようになつているが、舶用タービン（減速装置を含む）の軸受の中には蒸気力あるいは歯車反力によつて必ずしも荷重は軸受下部にかからず、荷重方向が軸受面の側方あるいは上方にかかる軸受があり、このような場合給油減少時における軸受の挙動に差異を生ずる可能性のあること。

2)　中央軸受は上述のように静圧軸受の上にのつている型式であるが、実際のタービン軸受は、ボルトで固定された



第 5.3.3 図　平軸受実験装置図


3×6=18ヶ所-M6
(熱電対取付孔)
(上メタル)
(下メタル)
回転方向
75.6 h6
(上メタル)
0°
45°
90°
135°
180°
21 22 23
18 19 20
15 16 17
12 13 14
9 10 11
6 7 8
駆動側
(メタル温度計測位置)

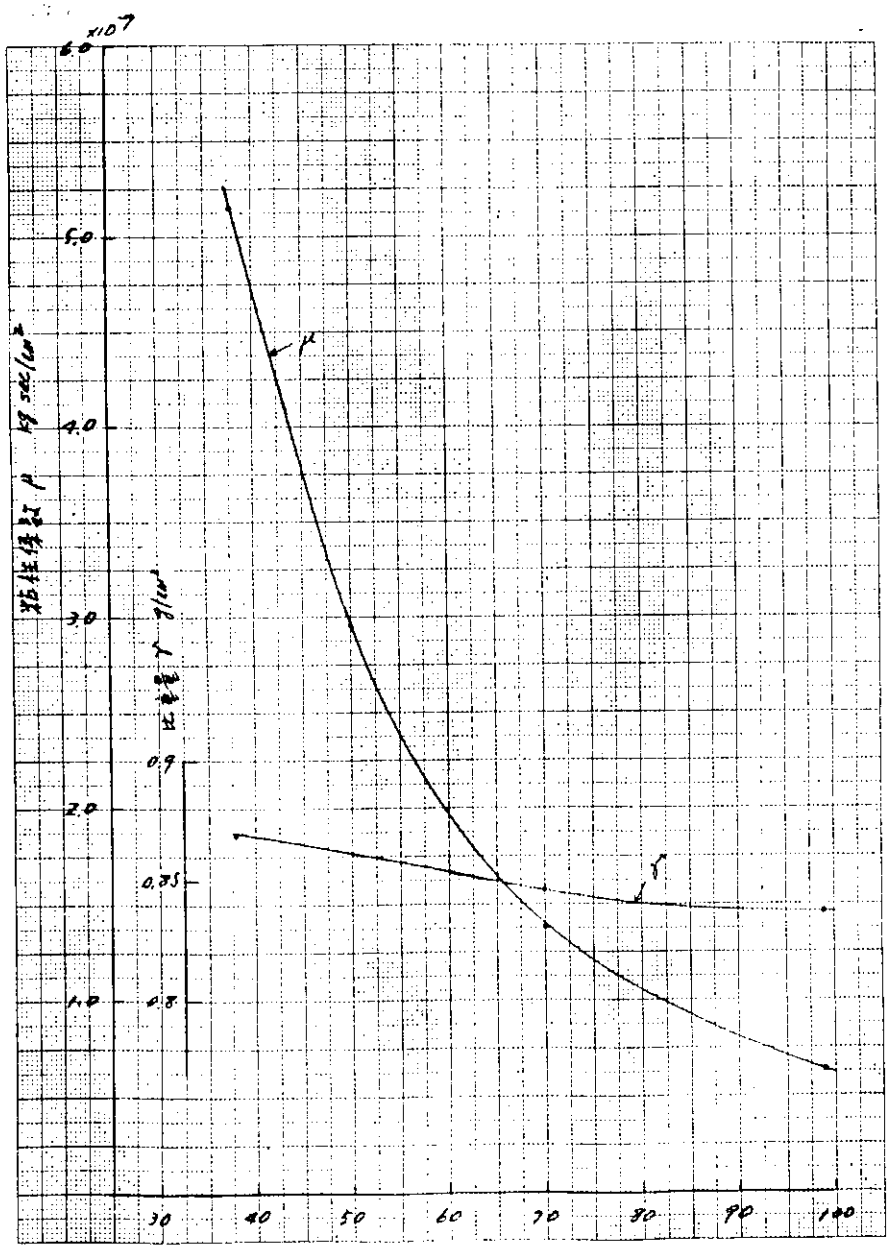
第5.3.4図　試験用軸受

型式であるため、特に軸、軸受台の変位あるいは振動に構造に基づく差異が表われてくる可能性があること。

第5.3.6図は試験軸を回転させながら、給油をしや断して異常状態を起させた場合の軸受メタル温度および軸変位の時間的経過を示したものであるが、中央軸受と固定軸受のそれぞれを試験用軸受とした場合の差異を同図によつて説明する。

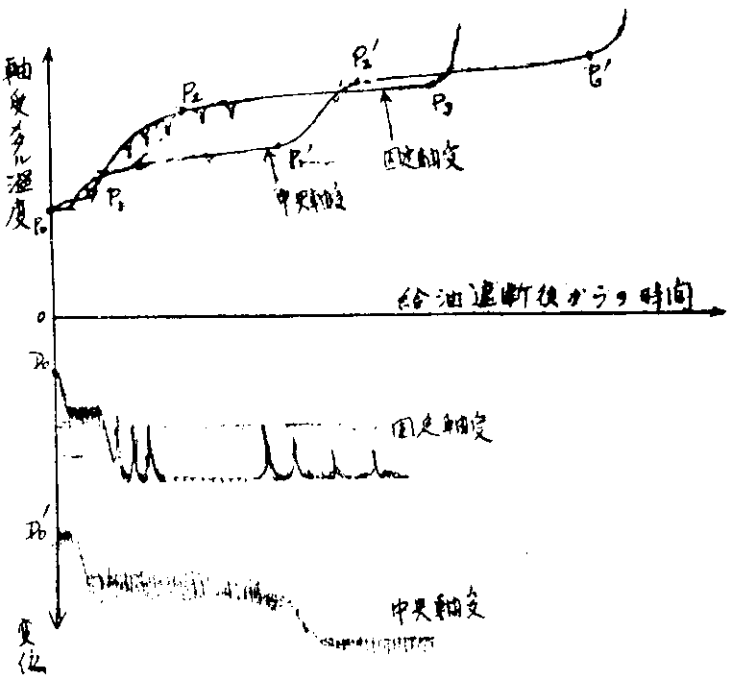
1） 軸受メタル温度

中央軸受の場合にはメタル温度は、給油しや断後約2 sec 経過してから急上昇し、その後比較的ゆるやかな温度上昇を経過して P_1' 点に到る。この期間は給油しや断後も軸受内に残存する潤滑油によつて流体潤滑を続けている期間で、P_1' 点から変位、温度とも増大して遷移域にうつり、P_2' 点から P_3' 点までは また温度上昇のゆるやかな期間が続く。この期間は変位からも判断しうるように境界潤滑の期間であつて、境界油膜は機械的および熱的な擾乱をうけて摩損あるいは不安定となり、P_3 点においてついに境界油膜の破断が起つて、摩擦の急増による急激な温度上昇すなわち軸受の焼き付きが生じる。固定軸受においては給油しや断後の温度上昇の開始は早いが、上昇温度そのものは2℃程度で少さく、またこれに続く流体潤滑期間も短く、その過程の大部分は境界潤滑域で占められるようになつて、P_3 点でついに焼き付きが生じる。P_3 点の温度はいわゆる機械的転位温度と呼ばれるものであり、後



第5.3.5図 供試潤滑油（140番タービンオイル）の粘性係数と比重量

述のように、この温度を軸受メタルに対する許容限界温度としたが、軸受の解放検査によればP_3（P_3'）点以内で温度上昇を抑えた場合には、メタル内面の損傷は肉眼では認め難い程度であり、事実このような経過を経た軸受を使つた運転においても、定常時の温度分布は前と変らず異常が認められなかつた点から実用上P_3（P_3'）点における温度を許容限界値としてよいものと考えられる。また、この許容限界温度は回転数、面圧、軸受の形状、表面状況や測定の誤差によつて、後述のようにある範囲にばらつくが、中央軸受と固定軸受での区別は認めがたい。またP_3（P_3'）に到達するまでの時間については回転数、負荷、軸受の形状、表面状況等により影響をうけるのはもちろんであるが、大体の傾向として流体潤滑域の短かい固定軸受（これは荷重方向が上向きの影響が大きいと考えられる）で実験した場合が短い。



第 5.3.6 図　中央軸受と固定軸受におけるメタル温度および変位の差異

2）　軸変位および振動

中央軸受と固定軸受をそれぞれ試験軸受とした場合の変位の様子を第 5.3.5 図の下部に示す。図からわかるように変位と温度の関係は密接な関係を有し、変位の増加時に対応して必ず温度も上昇する。変位において両軸受で最も異なつているところは境界潤滑域において、固定軸受で試験した場合に、軸変位の跳躍がより明瞭に見られる点である。この現象は、境界摩擦の期間において局部的に境界膜が機械的および熱的な擾乱のために摩損して摩擦力が急増する時点でこの摩擦力とトルクの反力の合成力が荷重にうちかつて軸が変位し、軸と軸受が一時的にはなれる。この間に局部的な境界膜破断個所が潤滑油で補修させられるために跳躍のサイクルを繰り返すものと考えられる。このような明瞭な軸の跳躍が中央軸受で試験した場合に表われないのは、中央軸受が基礎に固定したものではなく、油圧ピストンおよび静圧軸受で支えられているという構造に起因するものであり、支持部分の減衰性能が大きいことによるものと考えられる。

3）　軸受台振動加速度

中央軸受を試験軸受にした場合は前年度で報告したように軸回転数の前後の周波数において、異常時加速度が増加するが、固定軸受の場合は軸回転数以上の高周波においても加速度の増加が見られ、これも軸受支持の構造に起因すると考えられる。

以上、中央軸受と固定軸受をそれぞれ試験軸受とした場合の軸受メタル温度、軸変位、軸受台加速度の差異についてのべたが、

1）　軸受メタル温度に関しては荷重方向が上向きの固定軸受を試験軸受として用いたほうが初期の流体潤滑域における温度上昇が小さいことから、設定温度と定常温度の差の小さい場合には検出時期がおくれること。さらに焼損までの時間は上向き荷重の場合が短かく、軸受の焼損保護上、当試験機の固定軸受のほうが条件が厳しい。

2）　軸変位（振動）、軸受台加速度についても両者に差があり、固定軸受を試験軸受にするほうが実際のタービン軸

受の構造に近いために異常時の現象も同様であると考えられる。

以上の理由により、以後においては、全て固定軸受を試験軸受として実験を行なつた。

5.4 実験結果と考察

5.4.1 応急手段の設定

軸受の異常を検知した時、とるべき応急手段として軸の回転をできるだけ早く停止させることを考えた。実船においては、緊急後進の操作を行なえば、最も速やかにタービンロータ等の回転を停止することができる。前進全力状態から、緊急後進を行なつて、軸回転数が0になるまでの経過を当分科会資料から調べると第5.4.1図のようになる。ほとんどの場合が約30secで軸回転が停止する。したがつて当試験においては異常検知の場合の減速方法として試験回転数から0回転まで電圧制御により30secで減速することを標準とした。

また、実際のタービンおよび減速歯車装置の軸受では緊急後進操作を行なうことにより回転数のみの変化ではなく、高圧タービンロータの軸受では、部分流入蒸気による荷重がなくなり軸受荷重はロータの自重のみとなり、減速歯車装置の軸受では伝達トルクが変化することによつて、各軸受の荷重、荷重方向が変わるが当実験においては荷重の大きさ、方向とも一定である。

5.4.2 軸受メタル温度とその上昇率

(1) 軸受メタル温度の許容限界

軸受メタルが焼付くときには軸の回転速度を低下しているときでも、（第5.4.5図）速度を一定に保つていても（44年度報告書P．172、第2.2.37図）軸受メタル温度は、温度上昇の比較的緩かな境界潤滑域（乾操摩擦を含む）から急激に上昇する。この急激な立ち上り直前の温度は機械的転移温度と呼ばれているものであり、これを実用上の軸受メタル温度の許容限界とした。給油しや断を行なつて軸受に異常を発生せしめた実験において、軸受メタル温度をこの許容限界以内に抑えた場合には、メタル内面の損傷は肉眼では認め難い程度であり、このような経過を経た軸受を使つた運転においても、定常時の軸受温度分布は前とほとんど変らず、異常が認められなかつたからである。なお機械的転移温度以上にメタル温度が上昇した実験後の軸受面には肉眼でも認めうる程度の微細なクラックが軸方向に発生しており、明らかに軸受は異常と判断される。

第5.4.2図は、試験軸の回転数を変えて求めた軸受メタルの許容限界温度である。この図より軸回転数が高いほど許容限界温度は高くなる傾向があることがわかる。一般に潤滑境界膜は繰り返し摩擦により摩耗し、この機械的擾乱の大きい場合ほど機械的転移温度は低下する。軸受においてはすべり速度が高いほど摩擦係数は高く表われるが、一方潤滑膜の摩耗速度は、すべり速度の大きいほど小さい。これはすべり速度の大きいほど、くさび効果によつて境界膜は厚く構成され、境界膜に加えられる機械的擾乱は小さいからである。すべり軸受では後者の影響が大きく、すべり速度の大きいほど限界温度が高く表われたものと考えられる。

第5.4.3図は、同一運転条件（n＝6000rpm、pm＝10kg/cm^2）において、軸受メタルの最高温度が許容限界に達したときのメタル温度の円周方向分布を軸受中心線について求めたものである。この実験は減速、非減速をとわずメタル温度が焼き付きの徴候を示すとただちに給油弁を開いて軸受を正常の状態にもどした後、運転を停止し、軸受の開放を行なつて当り面をならして実験を繰り返したものである。この図より、許容限界温度は90℃～120℃の範囲にばらついており、また、円周方向温度分布が平坦な場合には限界温度が低く、温度分布のするどいときには限界温度が高いことがわかる。給油がしや断されて軸受が流体潤滑域を得て境界潤滑域に入いつた場合、軸受面における高圧接触部には他の部分から油が導入されて新たな潤滑膜を構成するような努力が払われており、この油導入効果の有効さ如何によつて機械的擾乱の程度が異なり、結局同一回転数における機械的転移温度の高低となつて表われたのであろう。上述の油導入効果はもちろん軸受潤滑面のうねり、傾きに影響を受けるものであるが、メタル最高温度点周辺にある低温の油が導入されることも機械的擾乱を減ずる上に効果があることが、円周方向温度分布のするどいほ

ど限界温度が高いという実験結果が示している。

(2) メタル温度の上昇

給油を遮断して軸受に異常を引き起した場合、メタル温度が上昇するのであるが、メタル温度がある温度に達して異常と判断し、軸の回転を低減あるいは停止させて、メタル温度が限界温度を超えぬようにするためには、異常を判断する温度（設定温度）が、軸受の負荷、減速方法によつて適正な値でなければならない。これを決定するために種種の負荷条件での実験を行なつた。しかし同一負荷でも軸受のすきまの他、表面の凹凸、軸との中心線の狂いなどの要素がメタル温度の上昇に影響を及ぼしている。

まず、直径すきまの違つた軸受について負荷条件一定（ｎ：６０００ｒｐｍ、ｐｍ：１０Kg／cm²）で定常温度、温度上昇を求めた。定常時の軸受中心線上の円周方向分布を第5.4.4図に示す。直径すきまの小さいほど定常温度が高い。給油遮断後のメタル温度の時間的経過は１例を第5.4.5図に示すように荷重方向で上昇する（温度計測位置１６第5.3.4図参照）正常な状態に仕上げられた軸受についてはメタル温度の上昇は、この点で最も高く、また焼付きに至るのもこの計測点を中心にしてであるので、以下ではメタル温度はこの計測位置１６を代表して論議を進める。直径すきまが異なると温度上昇にも相違が生ずる。これを統計的に示すため設定温度までの上昇温度とそれに達するまでの時間の関係を示したものが第5.4.6図である。上昇温度はやはりすきまの大きさに影響される。給油遮断した場合の軸心の変化の１例をオシログラムで第5.4.7図に示す。給油圧力が０ａｔｇになると軸は、ただちに変位を起こすが、ただちにメタルと接触を起こすのではなく、中間で軸は平衡の位置に達し、その位置をしばらく保ち、この平衡位置にある時間が長いと温度上昇は時間的に遅い。この平衡位置は、給油がなくなつても軸受内に溜つている潤滑油によつて一応の流体潤滑が保たれるために得られるものである。しかし、潤滑油は軸受端より流出するために消耗し流体潤滑を保持し得なくなつて軸と軸受は接触する。したがつてこの平衡位置にある時間は、すきまの大きさに左右される。すきまの大きさと平衡位置にある時間とを比較したものが第5.4.8図ですきまが大きくなるとこの時間は短くなり温度上昇も大きい。

すきまの違いによる温度上昇率の相違を示したものが第5.4.9図である。温度上昇率も軸受すきまの変化によつて起るものであるから軸変位の２段階に対応して２つのピーク値がある。メタルＤでは第１段の温度上昇率が非常に高い。第２段のピークは各メタルについてほぼ同じ値である。

(3) 設定温度と最高温度

メタルの温度がある温度に達したとき、軸の回転を一様な速さで減速した場合、減速によつてもメタル温度が低下せず焼損に至ることがある。したがつてある温度で回転を低下させた場合、そのときの温度（設定温度Ｔｓｅｔ）とその後メタル温度の達する最高温度（Ｔｍａｘ）の関係を知ることはメタルを焼き付きに至らしめずに減速するために必要である。いま、先と同様すきまの大きさが違う軸受について軸受負荷をｎ＝６０００ｒｐｍ、ｐｍ＝１０Kg／cm²、給油温度ｔｓ＝４０℃一定のもとに行なつた実験結果を第5.4.10図に示す。減速時間は３０ｓｅｃである。

この条件では減速すればメタル温度の上昇はほぼ抑制される。温度上昇率は第5.4.7図からわかるように時間とともに減少するから設定温度が低い（減速開始時間が早い）とその後の温度上昇は少しあるが、設定温度が高くなると温度上昇が見られずＴｍａｘ＝Ｔｓｅｔとなる。この場合には、メタルのすきまの大きさには、ほとんど影響されない。

一つの軸受について、負荷条件を変えた場合の設定温度と最高温度の関係を知るために軸回転数の変更、平均面圧の変更の実験を行なつた。軸回転数が異なつた場合の結果を第5.4.11図、平均面圧が増加した場合の結果を第5.4.12図に示す。回転数（周速）が増加すれば設定温度からの温度上昇は非常に大きくなり、回転数が8,０００ｒｐｍにもなるともはやＴｍａｘ＝Ｔｓｅｔとなる（温度上昇が０となる）ような設定温度は見出されない。一方面圧が増加しても温度上昇はあまりない。これは境界潤滑においては面圧が潤滑性能に及ぼす影響は、$p^{1/2\sim1/4}$に比例する＊）という事実に一致している。第5.4.12図中のｎ＝7,５００ｒｐｍ、ｐｍ＝１０Kg／cm²のデータは、ＰＶ値ではｎ＝６０００ｒｐｍのｐ＝１２.５Kg／cm²に$p^{1/2}$Ｖ値ではｐ＝１５Kg／cm²に一致またはほぼ一致するものである。

第5.4.10図にはすきまは、供試試受Dとほぼ同じであるが給油遮断時にはメタル中心から軸方向にずれたところにあたりができ、温度計測点15の温度も高くなるメタルの実験結果を示している（メタルCの場合）。またこのメタルでは設定温度が低くてもメタル温度の上昇はあまりなく、メタル温度が設定温度に到達する時間も長い。

＊）たとえば、曽田範宗「軸受」P．237

(4) メタル温度上昇率

メタル温度の単位時間当りの上昇も軸受の異常検知の要素として有効なものである。同一軸受負荷で軸受すきまの大きさの違う場合は先に第5.4.9図に示した。同一メタルについて回転数の違う場合を第5.4.13図、面圧が異なつた場合を第5.4.14図に示す。同一軸受については、軸受負荷が同じならば温度上昇同様温度上昇率もほぼ同じ値を示す。図には数回の実験において平均的な値を示す代表例を表示している。同一メタルについて軸回転数が高いと最高温度上昇率も高くそれに到達する時間も早い。しかし面圧の大きさは試験範囲（10 Kg／cm^2～15 Kg／cm^2）では最大値の大きさにあまり影響されていない。

先にも述べたが温度上昇率は軸心が正常潤滑位置から中立平衡位置に移動した後に一つの極大値が認められ、境界潤滑状態に移行してからさらに増加し極大値を記録して低下する。温度上昇率が低下するのは、境界潤滑状態で、摩擦仕事が熱的に平衡状態に近づくためである。軸心が正常位置から中立平衡位置に移行した後に非常に高い極値を示す場合もある（メタルD、第5.4.9図）

各実験において境界潤滑における最高温度上昇率を軸回転数について示したものが第5.4.15図であり、軸回転数における上昇率の下限界が求まる。

(5) 減速時間の影響

線形な減速所要時間を60 sec、120 secとした場合のメタル温度の設定温度と最高温度の関係をn＝6,000 rpm、pm＝10 Kg／cm^2 の場合について第5.4.16図に示す。減速所要時間が長いと設定温度が低くてもメタルの温度上昇は大きくなる。設定点での温度上昇率の変化が軸回転の減速率に影響されていることを示す。

n＝6000 rpm、pm＝10 Kg／cm^2の軸受負荷では減速時間30 secでは設定温度からの温度上昇が低かつたが第5.4.9図に示すように軸回転数が大きい場合には減速時間を長くすると最高温度は許容限界温度を超える。

(6) 給油圧力変化の影響

同一メタルについてアキュムレータを付けて給油の遮断の状況を変化させた場合のメタル温度と温度上昇率のグラフを第5.4.17図に示す。アキュムレータを付加したときの設定温度と最高温度の関係は第5.4.8図に◎印で示してあるがアキュムレータを用いないときと変らない。

アキュムレータ付きの場合のメタル温度は軸受における給油圧力が完全に0 atg になつてから上昇する。温度上昇率はアキュムレータなしに比して最大値の大きさは小さくなつており、特に第1段の極大値は小さい。上昇率が最大に達した後の値はアキュムレータなしと同じ値（1～2℃／sec）であり、設定温度と最高温度の関係は変らない。また限界温度も変らない。

(7) メタル温度による異常検知

(a) 温度設定

第5.4.8図から明らかなごとく軸回転数が低い場合には設定温度で減速すれば、メタル温度はある値しか上昇しないが、回転数の高いときには減速を行なつても、メタル温度はただちに低下せず、上昇し、場合によつては限界温度を超えて焼き付きに至ることもある。したがつて軸受を焼き付きに至らしめずに減速を開始すべき温度は軸回転数によつて変つてくる。軸受の焼き付きに至る限界温度は一定でないので、メタル温度に一定の上限値を設けて、これに至らしめずに減速を開始すべき温度の上限（設定温度上限）を求めると第5.4.18図のごとくなる。図中の破線は軸受中央の点（計測位置16）の定常時における温度を示す。したがつてメタルの最高温度を一定に抑えるためにはTmaxで与えられた温度に設定点をおかなければならない。軸回転数の高い（減速の大きい）軸受では設

定温度範囲が非常に狭くなる。ただ第5.4.15図に見られるように回転数の大きいときに限界温度が高いという傾向があるので設定温度範囲は少し広めにとりうる。

(b) 温度上昇率の設定

給油遮断のように軸受が正常状態から急激に異常に移行するような現象については、温度上昇率は大きな値を示すので、温度上昇率をもつて軸受の異常を判別することは可能であり、メタル温度そのものより、早く検知ができる。

しかし、船舶の操船上には急激な発進、停止が考えられ、その場合軸受負荷が変化し、メタル温度は上昇する。このときの温度上昇と異常時の温度上昇とを区別することが必要である。メタル面上に急激な温度上昇を与えるために、軸回転数を一定に保つて、面圧を急に増加させたときの面圧とメタル温度の時間的経過を第5.4.19図に示す。負荷変化前の定常温度をT_0、変化後の定常温度をT_1とし過渡時の温度をTとして$(T_1-T)/(T_1-T_0)$を時間について示すと第5.4.20図のである。第5.4.20図にはメタル温度の最高点（計測点10）と荷重方向のメタル温度を示している面圧の増加が階段状に変化したとして第5.4.20図から最大勾配をとり時定数を求めると、最高温度点では、5.65 sec 荷重方向では12.3 sec である。この差は油膜厚さ、油膜温度等の違いによる熱伝達率の違いによるものと思われる。実際の場合には荷重方向の温度で論議すればよいので、いま荷重方向で定常温度が20℃変るような負荷変動があつても、そのときの最大温度上昇率は20／12.3＝1.6℃／sec くらいと推定され、先に第5.4.13図で示した異常時における温度上昇率の最低限よりも低い値である。また実際には荷重方向の軸受温度が短時間で20℃も変化する負荷変動はまずあり得ないので、温度上昇率による異常検知の設定点を1.5℃／sec に設けておけば正常な負荷変動と混同することなく異常の判定が可能で、その時点では、メタル温度も高くないので減速の手段をとれば十分に焼損を防ぐことができる。

また電子計算機など他の情報と合わせて判断を下すことの可能な機能をもつた装置と組合せた異常検知システムでは設定値をもつと低くできる。さらに温度による検知と組合せて異常の緊急度を判定することも可能になる（たとえば温度上昇率が過大であるという情報があつた後に温度がその設定値に達した場合は最緊急異常とする）。

5.4.3 軸変位

給油遮断時におけるメタル温度、同上昇率と軸の荷重方向変位を同一試験について第5.4.21図に示す。軸変位は第5.4.5図に見るように低周波の振動があるがこれを無視して軸の平均的な動きを表わした。温度の項でも述べたようにメタル温度の上昇は、境界潤滑状態で起るのであり軸の変位によりそれが誘発されるので軸の動きを測定することは異常検知には非常に有用である。軸受とのすきまが0になり境界潤滑状態になつてもその時点で検知すれば検知能は十分にはたされるので軸変位の設定値は軸受との接触点におけばよい。

5.4.4 軸受台の振動加速度

給油遮断時における軸受台の振動加速度をテープレコーダに録音し、これを繰り返し再生して⅓オクターブ周波数分析器を用いて、各周波数バンドでのレベルの時間的変化を求めたのが第5.4.22図である。

第5.4.23～5.4.2.5図は、給油しや断による異常状態における軸受台の加速度レベルを示したものである。異常時としては、給油しや断後流体潤滑域を得て温度が急上昇し、境界潤滑域にはいつた初期をとり、試験条件はいずれも、6,000 rpm、軸受平均面圧10 Kg／cm²、軸振幅約5 μと同一であるが、使用軸受は異つている。この図において100 200、1250、2500 Hz における正常および異常時のピークは軸回転および駆動歯車歯数にもとづくものである。上記は、軸振幅が約5 μと実機に比し少さいので軸振幅が実機とほぼ匹敵する約50 μ程度になるように軸に不釣合重量をつけて、同様な試験を行なつた結果が第5.4.26図である。

図よりわかるとおり、軸受の正常と異常時における軸受台の加速度レベルの変化は大きいところで10～15 dB 程度であり、強制振動によるピークのところでは、異常時の値は正常時のそれにマスクされてレベル変化はほとんど表われていない。このレベル変化の少ない強制振動によるピークを除いて考えると軸振動の大きな第5.4.26図の場合でも、

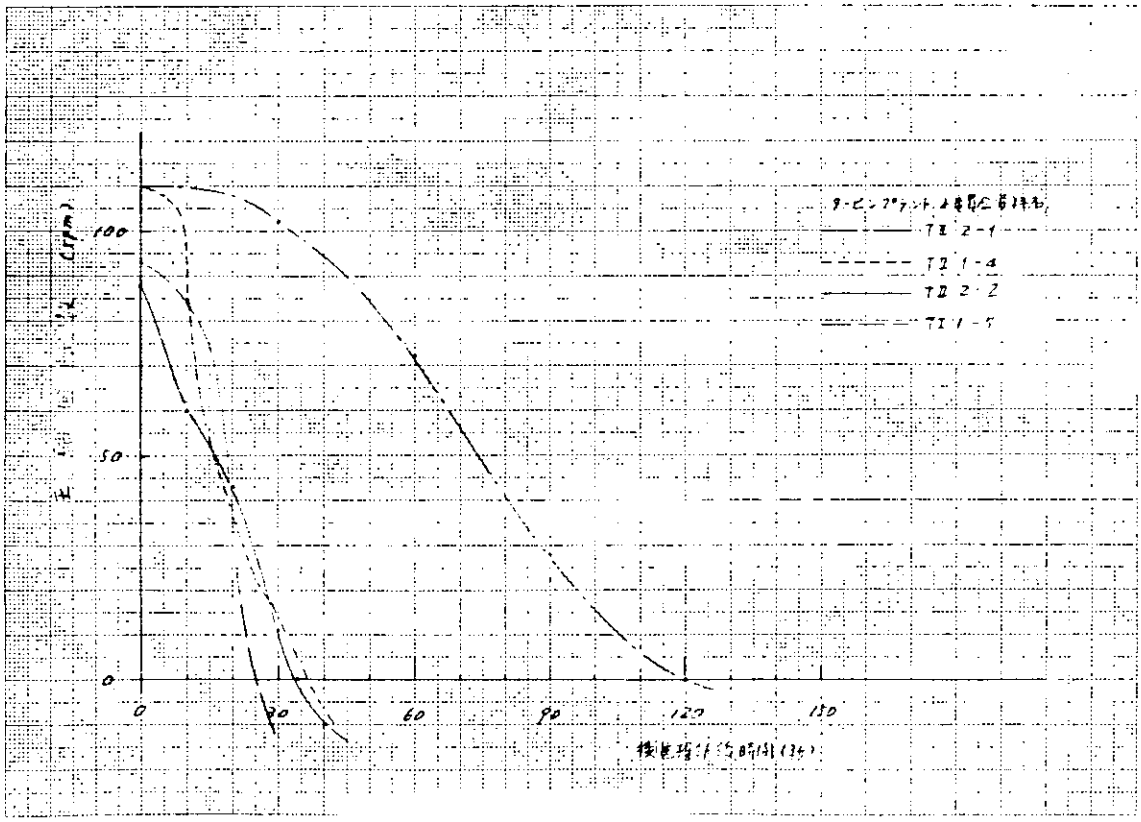
異常時の加速度レベルの最高は０．１ｇ程度であり、軸振動の小さな場合は一般にこれ以下である。

一方、実機における軸受台加速度の実測※によれば定格運転中の正常時において、各周波数においてほとんど０．１ｇ以上の加速度レベルを有しており、高周波数域になるほど大きくなって１ｇ程度になることが知られている。

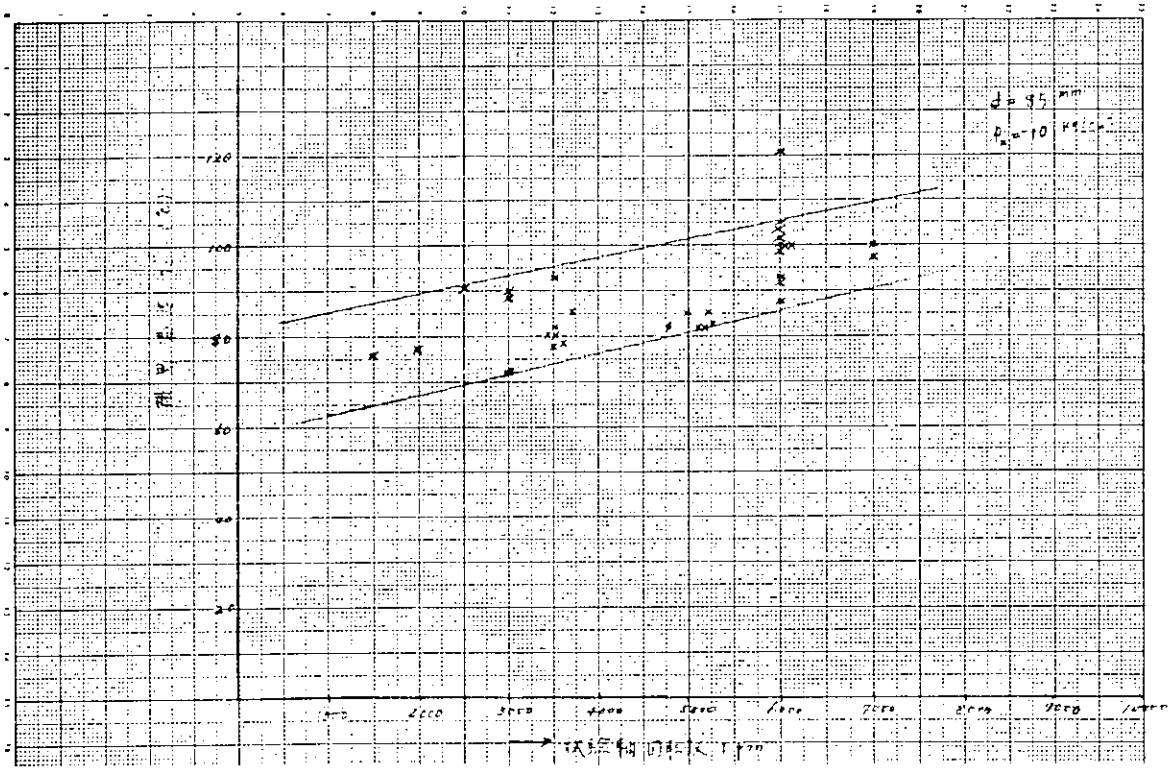
※　ＳＲ１０６、タービンプラント報告書（Ｓ．４５．３）

軸受における異常による軸受台の加速度レベルの上昇の原因と考えられるものは、境界潤滑域においては、局所的な軸と軸受との金属接触と前述した境界潤滑域における軸の跳躍現象にもとづくものである。軸と軸受の局所的な金属接触は周速、面圧ともに実機とほぼ同じ値で行なった本試験と実機の場合で性状的に変るとは考えられないが、軸の跳躍現象にもとづく加速度レベルについてはロータの質量や軸受台の剛性によってその値が決定されるから実機における軸受焼損時のこのような現象についての定量的な判断は今後の研究に待たなければならない。

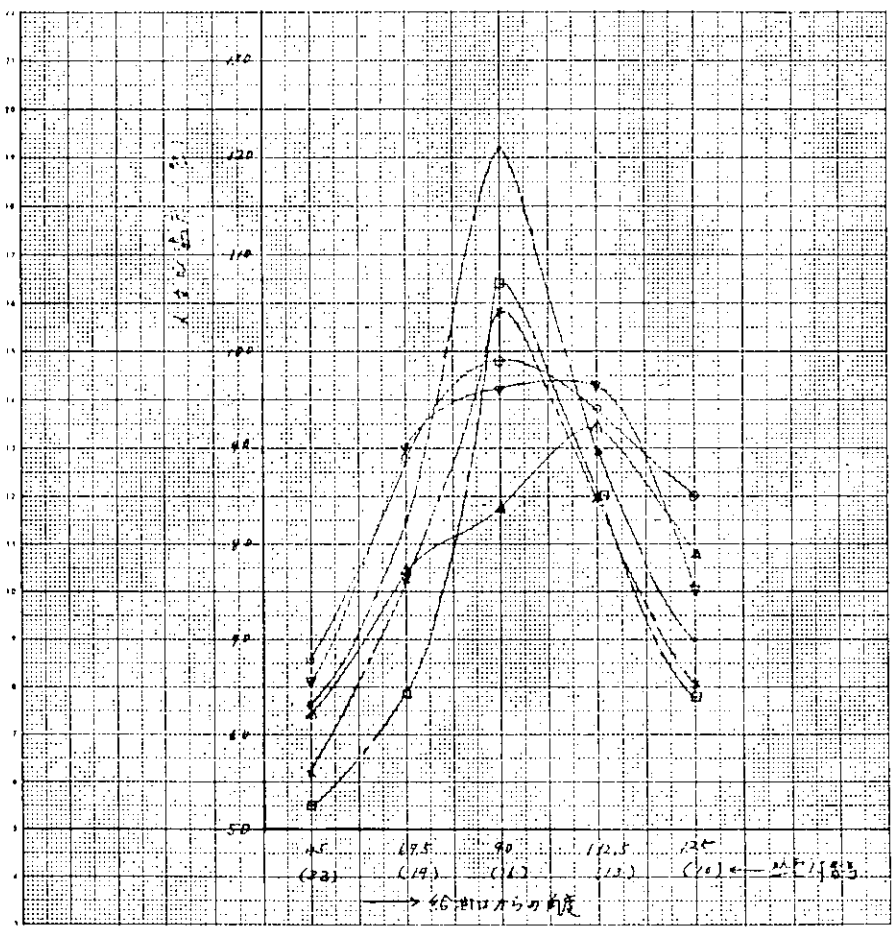
以上述べたところにより、軸受台の振動加速度を軸受焼損の検出要素とすることは、実機タービン主機における正常運転状態における加速度レベルが比較的大きいと、軸受焼損に至るまでの境界潤滑域における実機ロータの跳躍現象にもとづく軸受台の加速度レベルの大きさが現在のところ不明であることを考慮すれば、軸受メタル温度や変位に比して現時点では有用とはいえない。



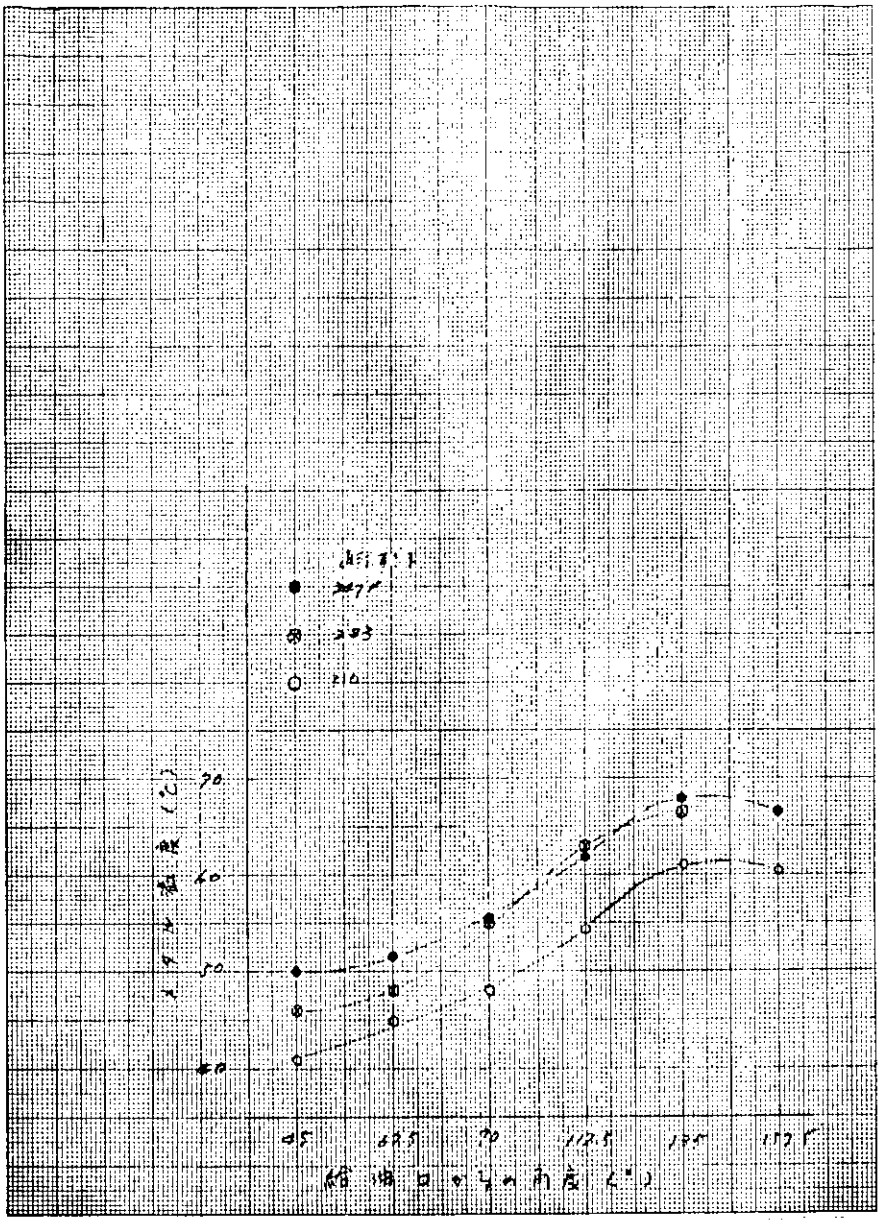
第５．４．１図　緊急後進時の軸回転の例



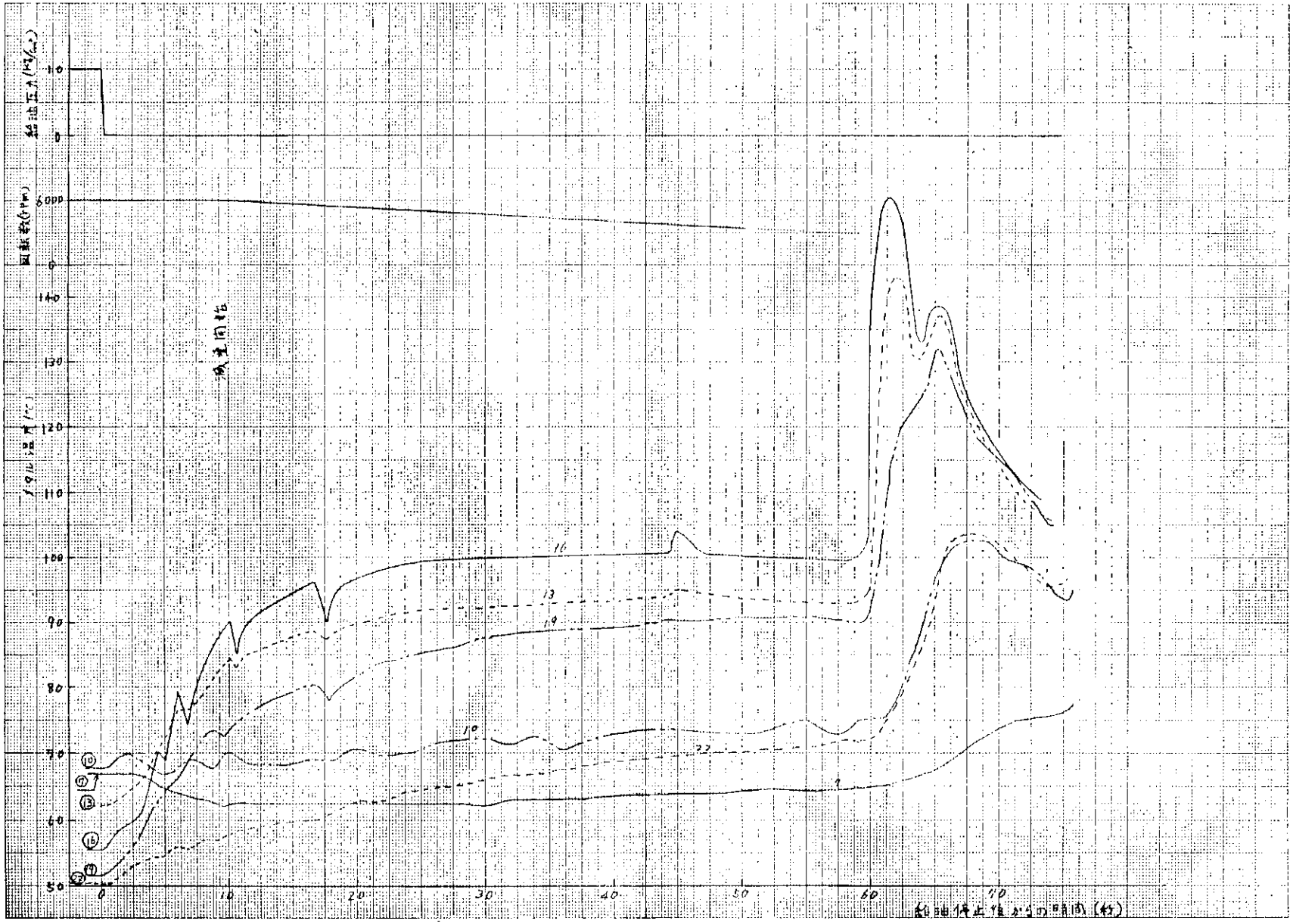
第 5. 4. 2 図　許容限界メタル温度



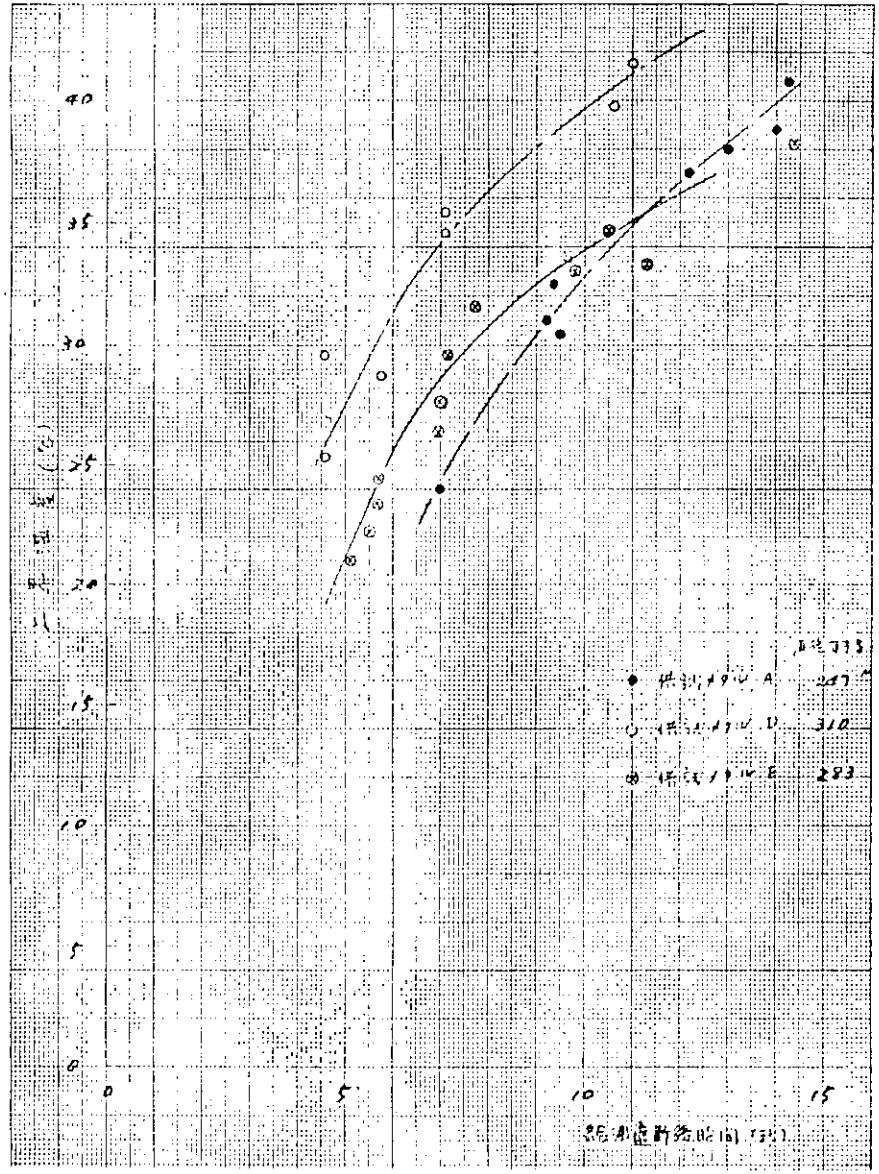
第 5. 4. 3 図　許容限界における軸受メタル温度分布



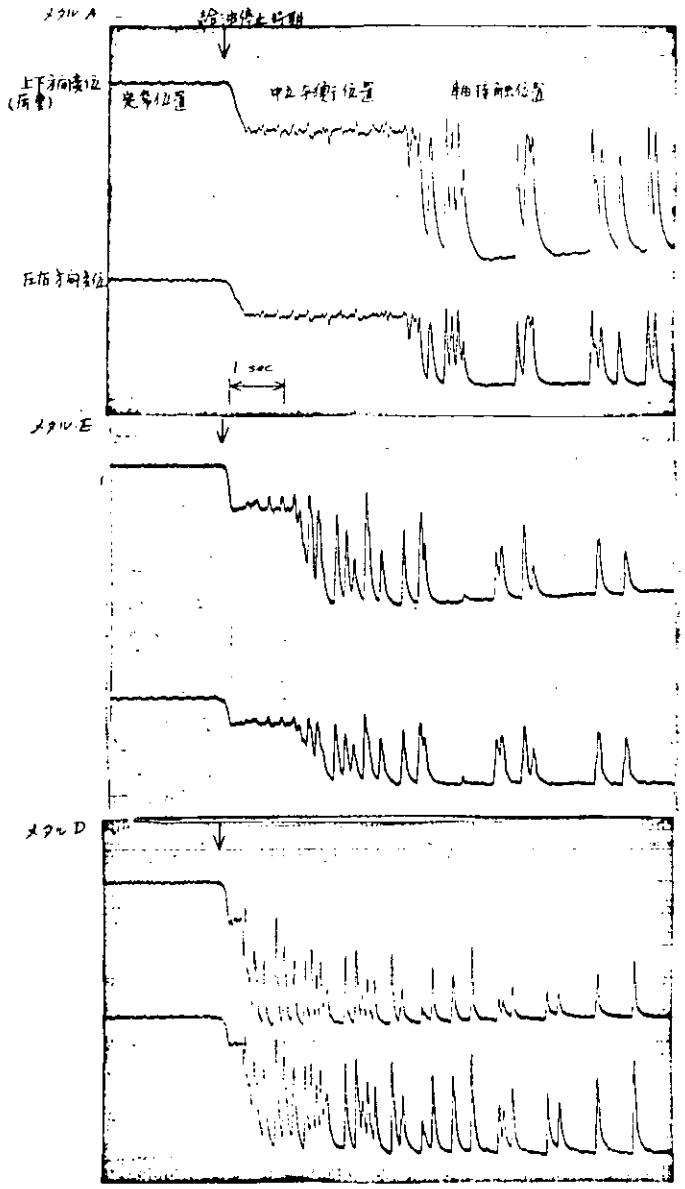
第 5. 4. 4 図　定常状態におけるメタル温度分布



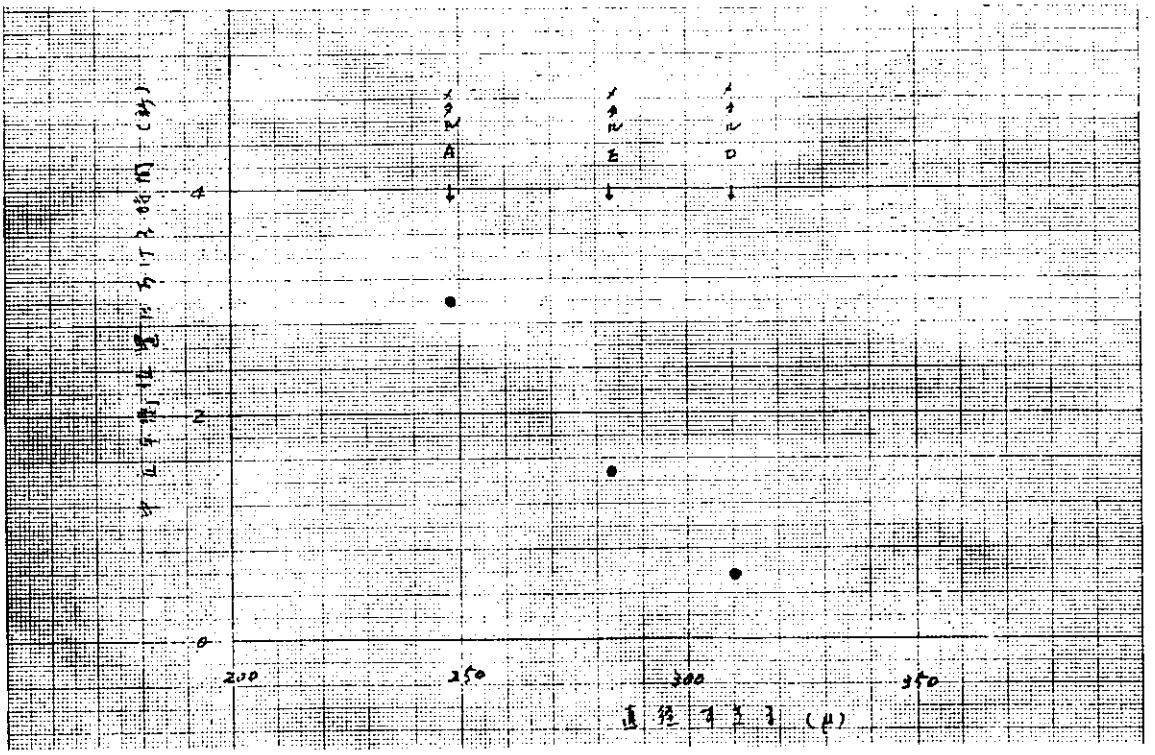
第 5. 4. 5 図　給油停止試験におけるメタル温度



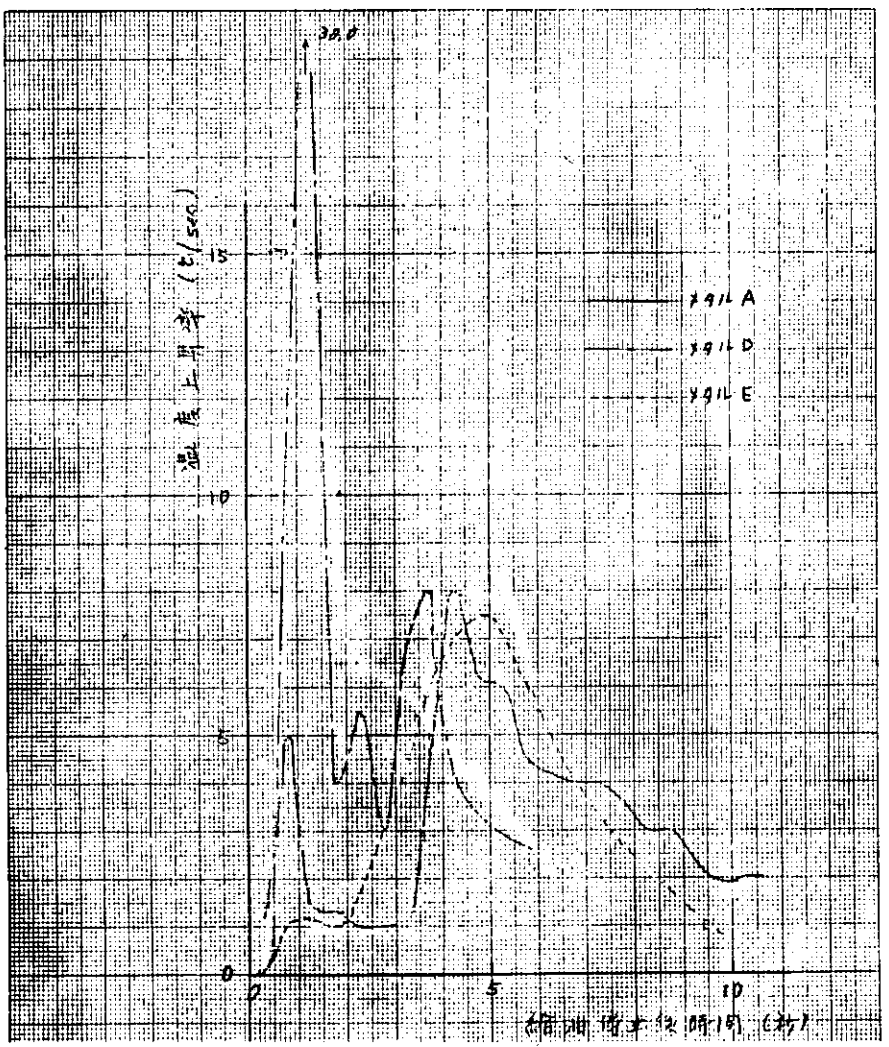
第 5. 4. 6 図　給油遮断後のメタル温度の上昇



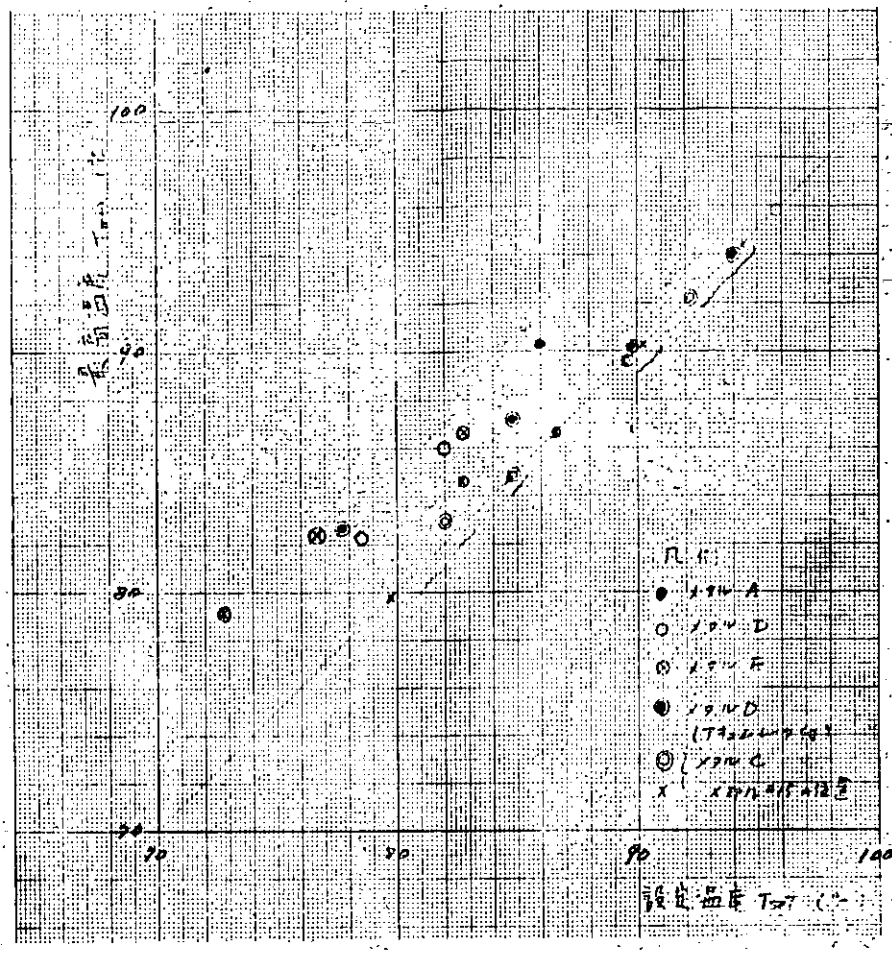
第 5. 4. 7 図　軸変位のオシログラム



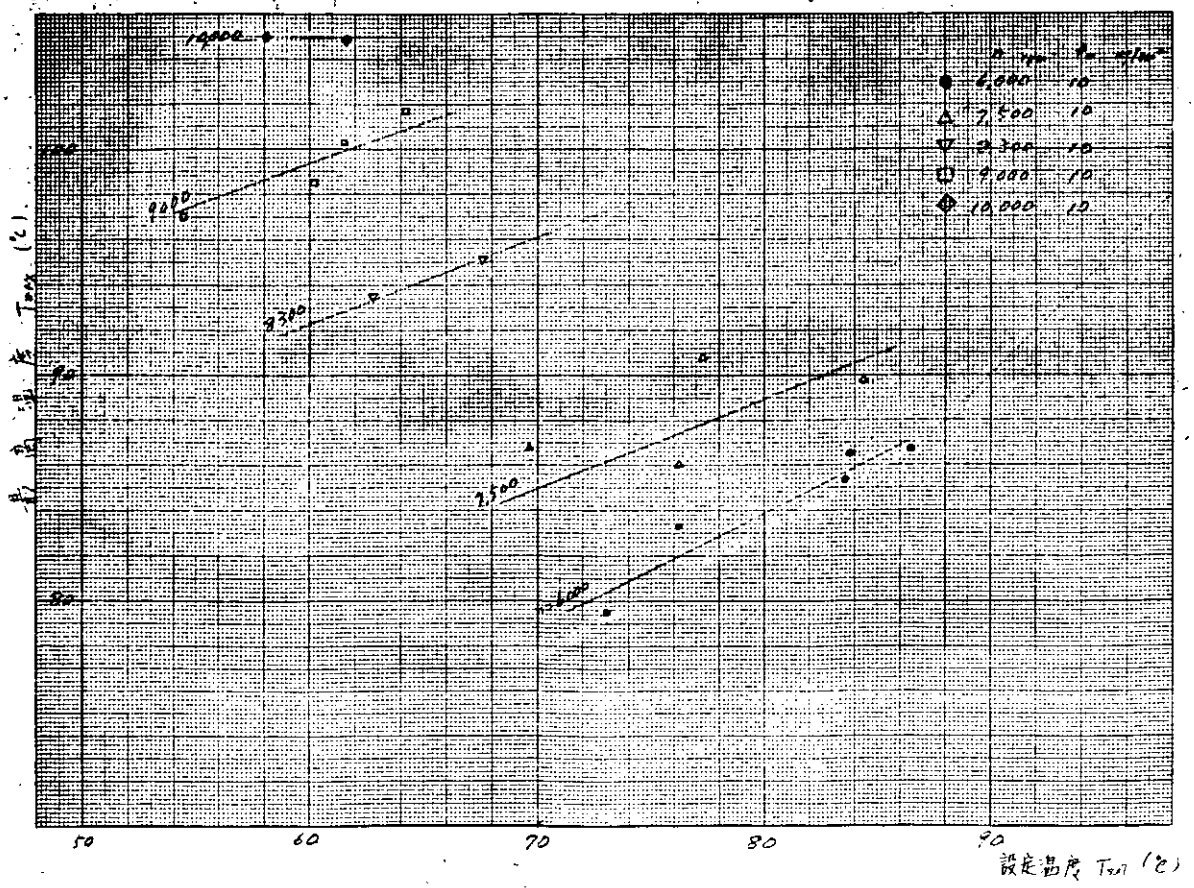
第 5. 4. 8 図　直径すきまと中立平衡位置における時間の平均値



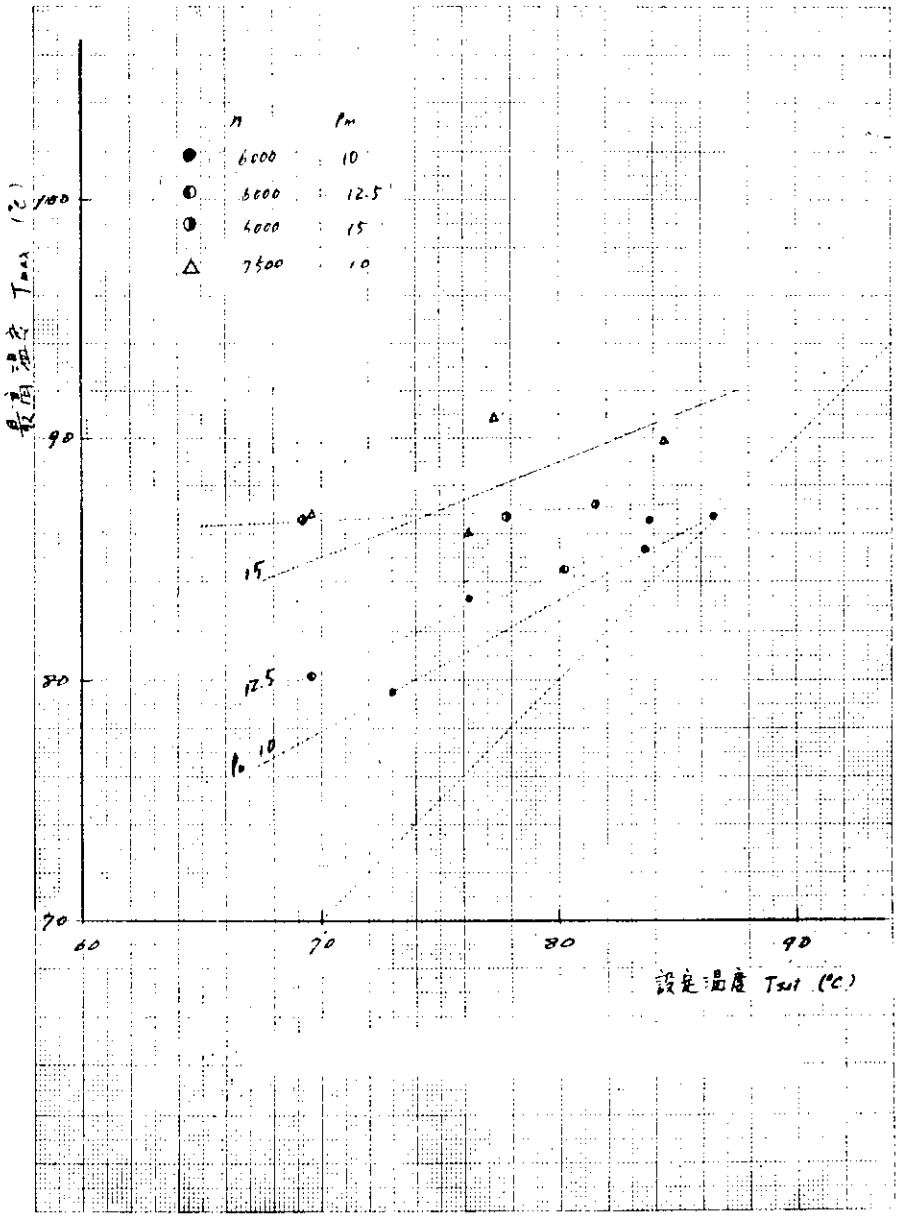
第 5. 4. 9 図　メタル温度上昇率



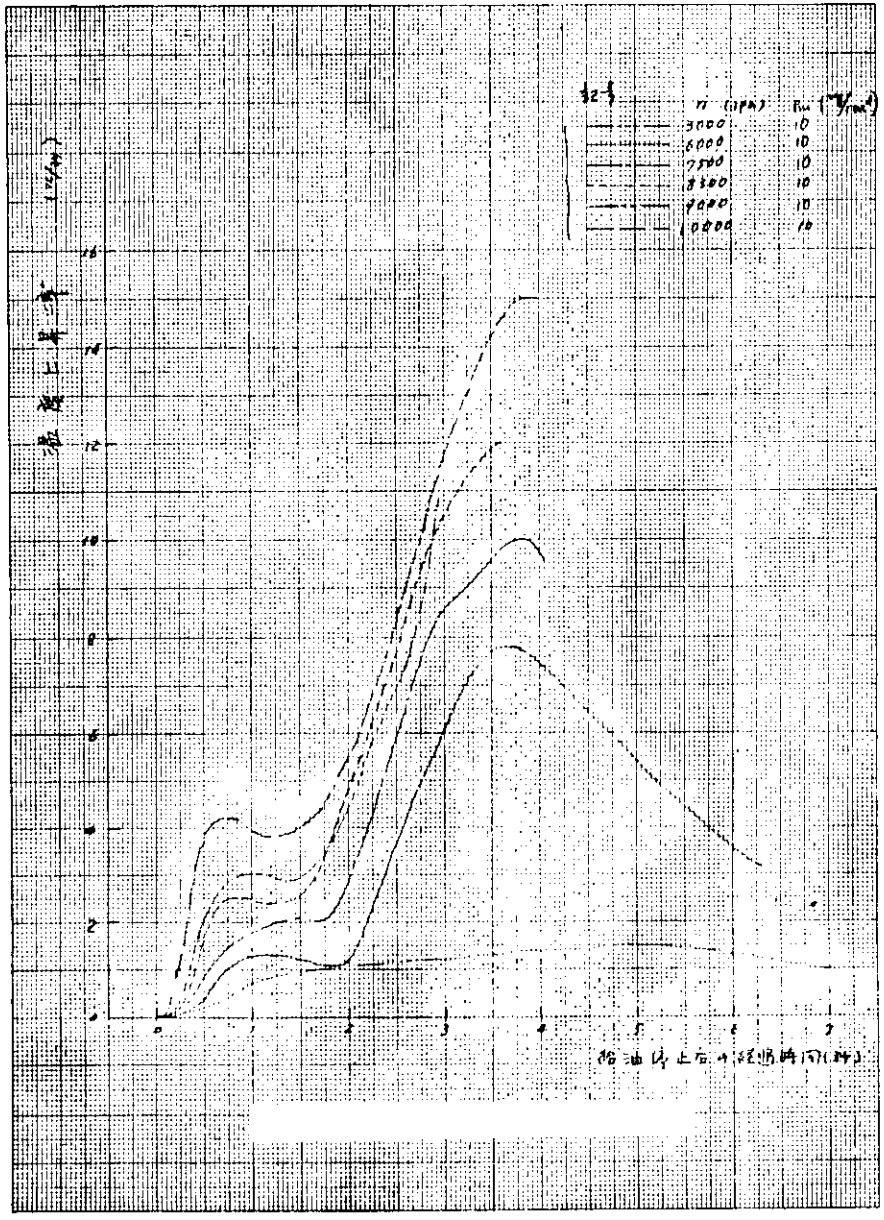
第5.4.10図　設定温度と最高温度（n、6,000rpm、pm、10Kg/cm²、減速時間30秒）



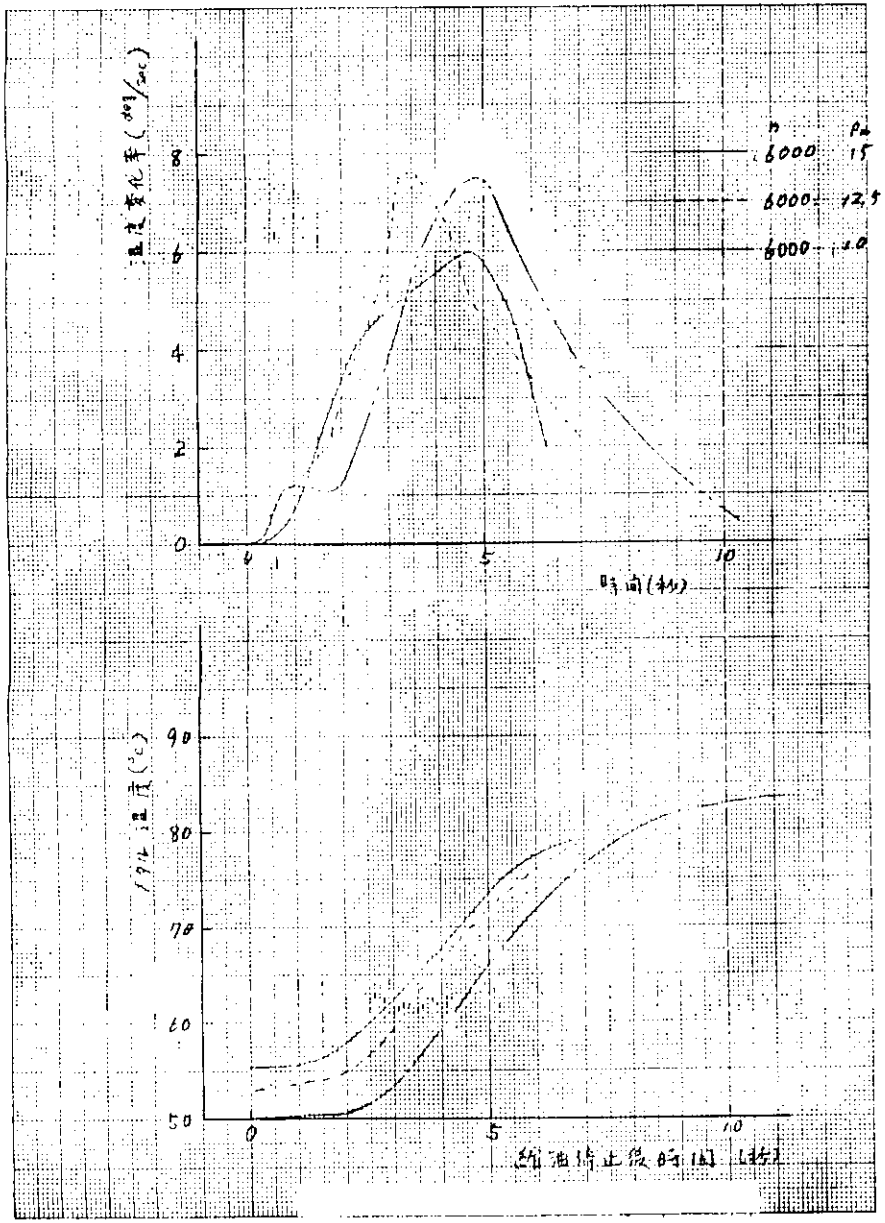
第5.4.11図　設定温度と最高温度（回転数の影響）



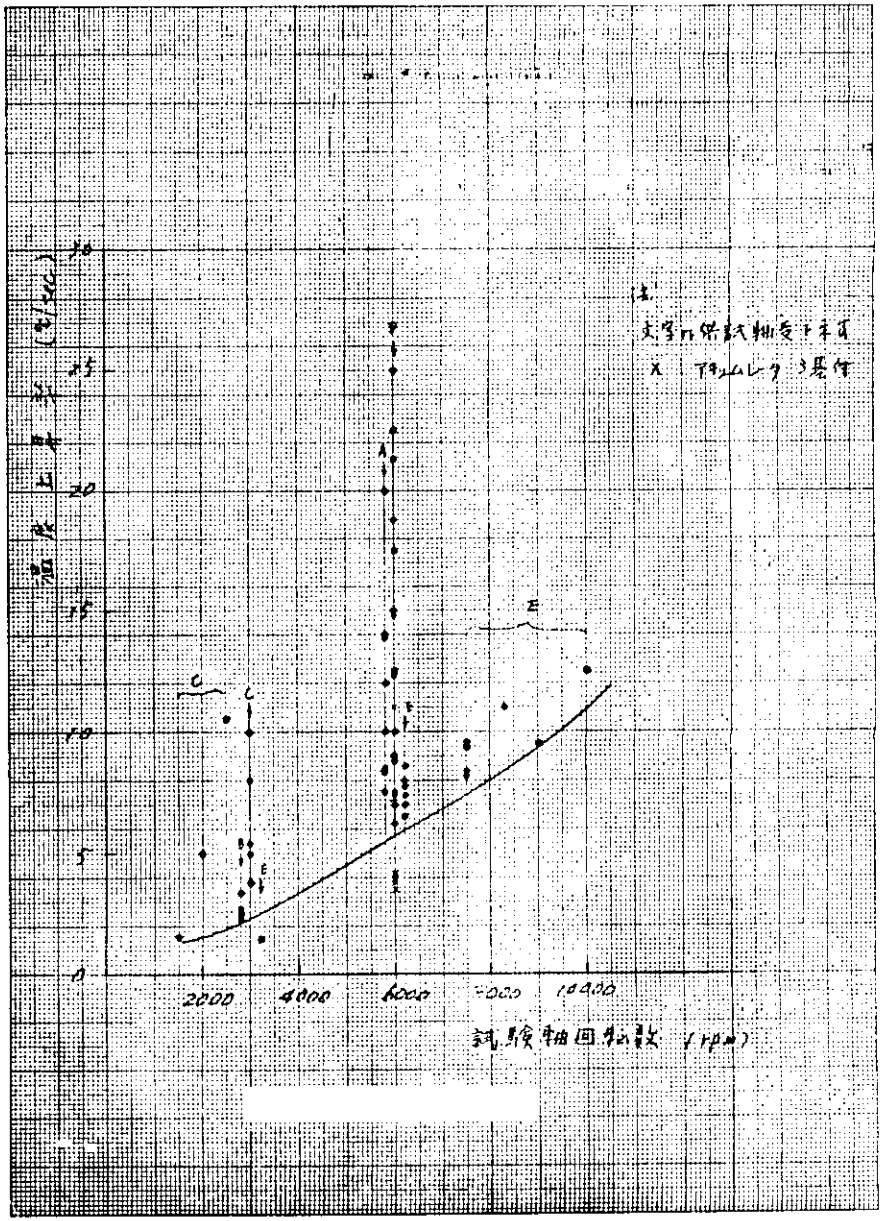
第 5.4.12図　設定温度と最高温度（面圧の影響）



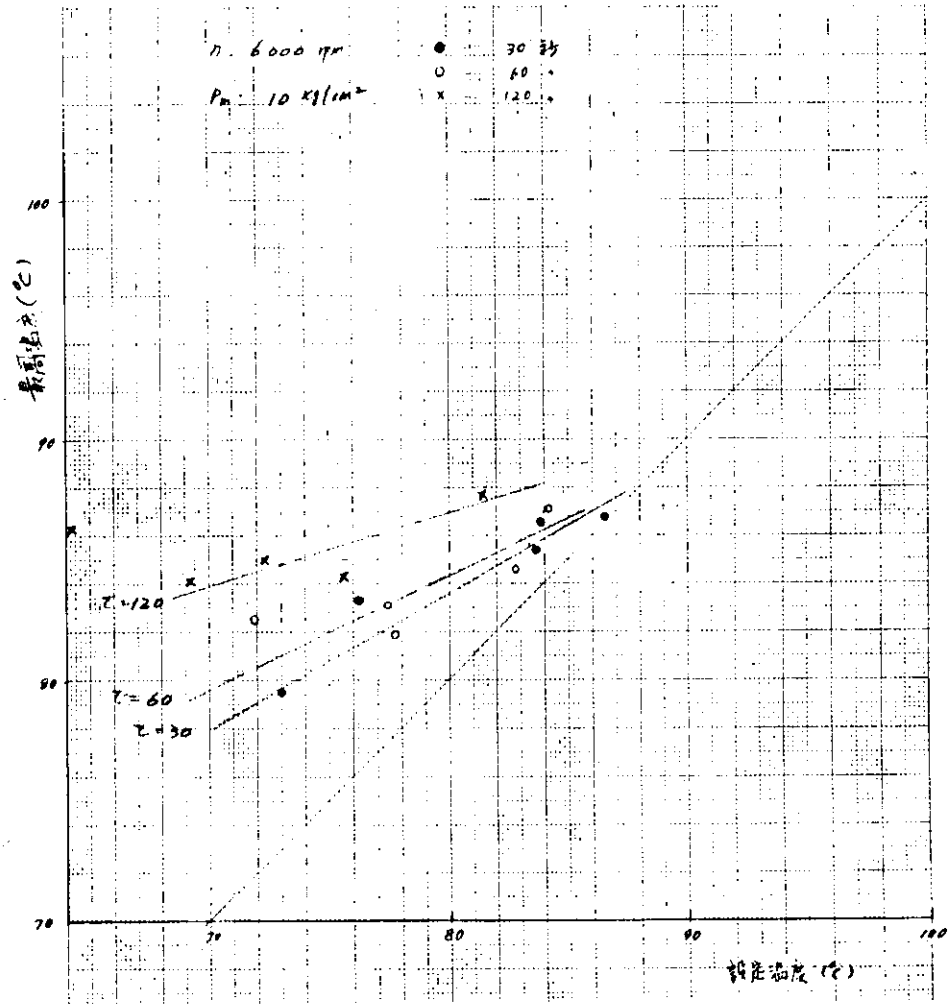
第 5.4.13図　温度上昇率（回転数の影響）



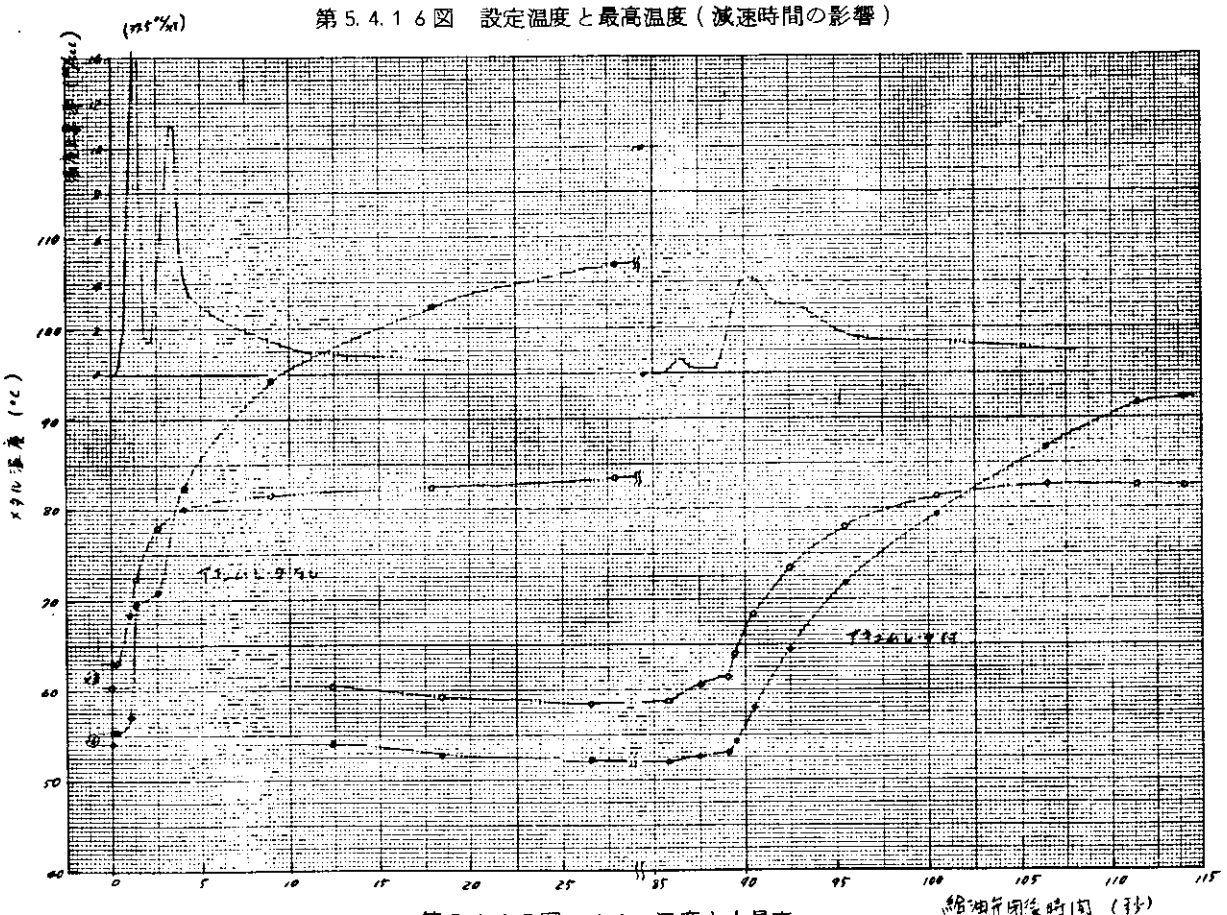
第5.4.14図　面圧の違いによる温度上昇と上昇率



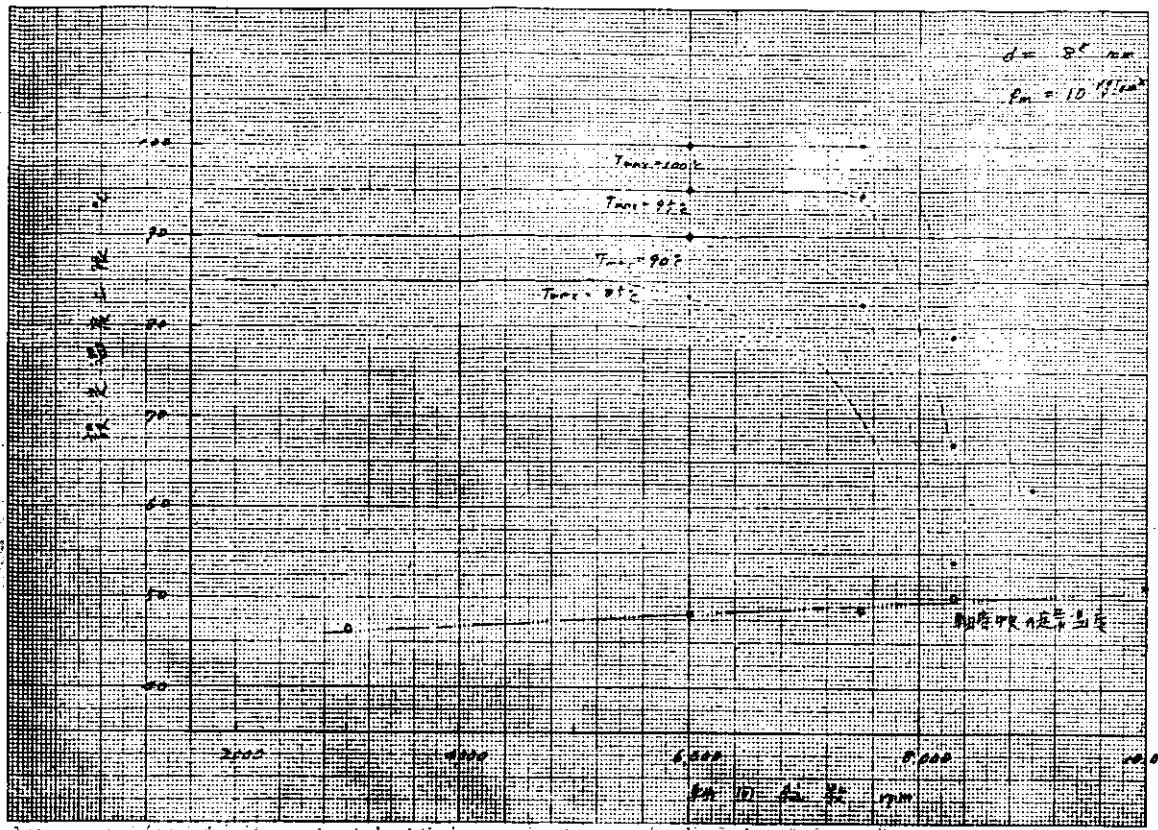
第5.4.15図　温度上昇率



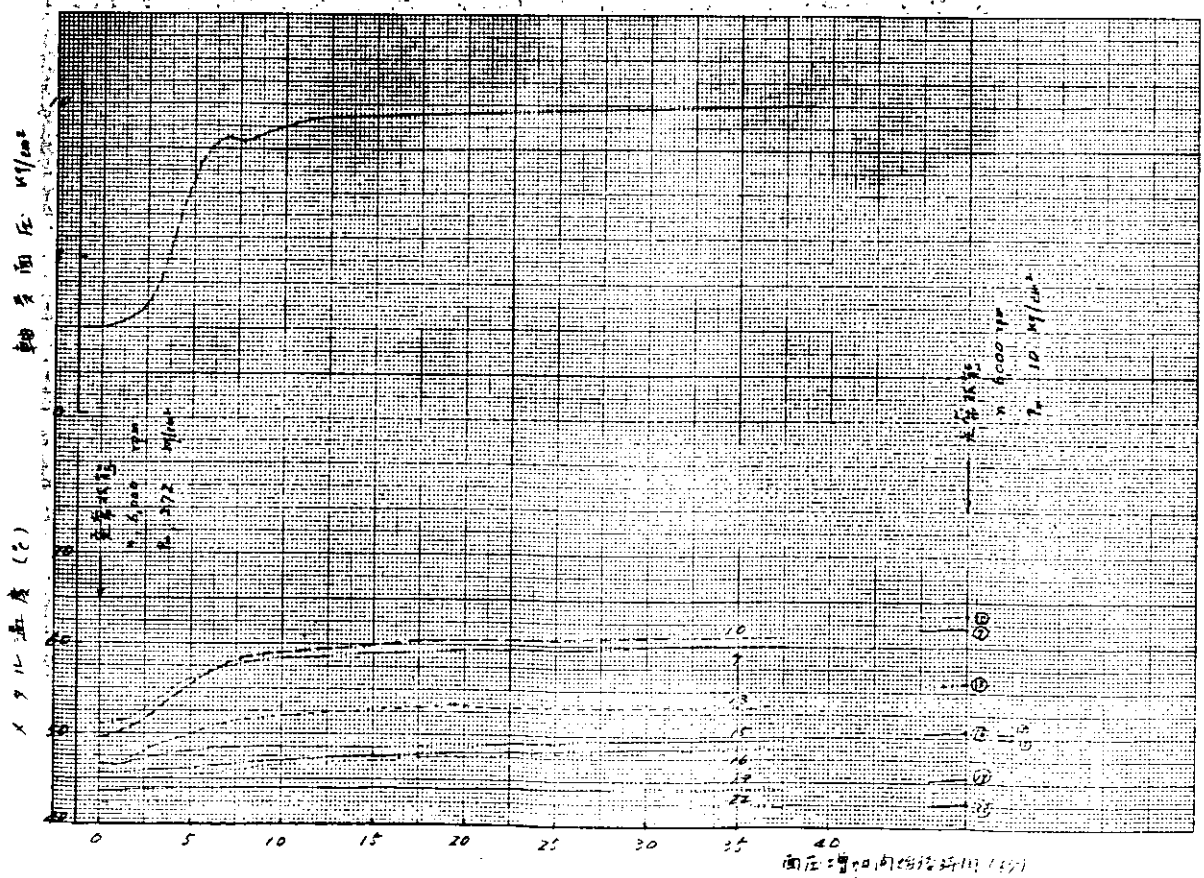
第 5. 4. 1 6 図　設定温度と最高温度（減速時間の影響）



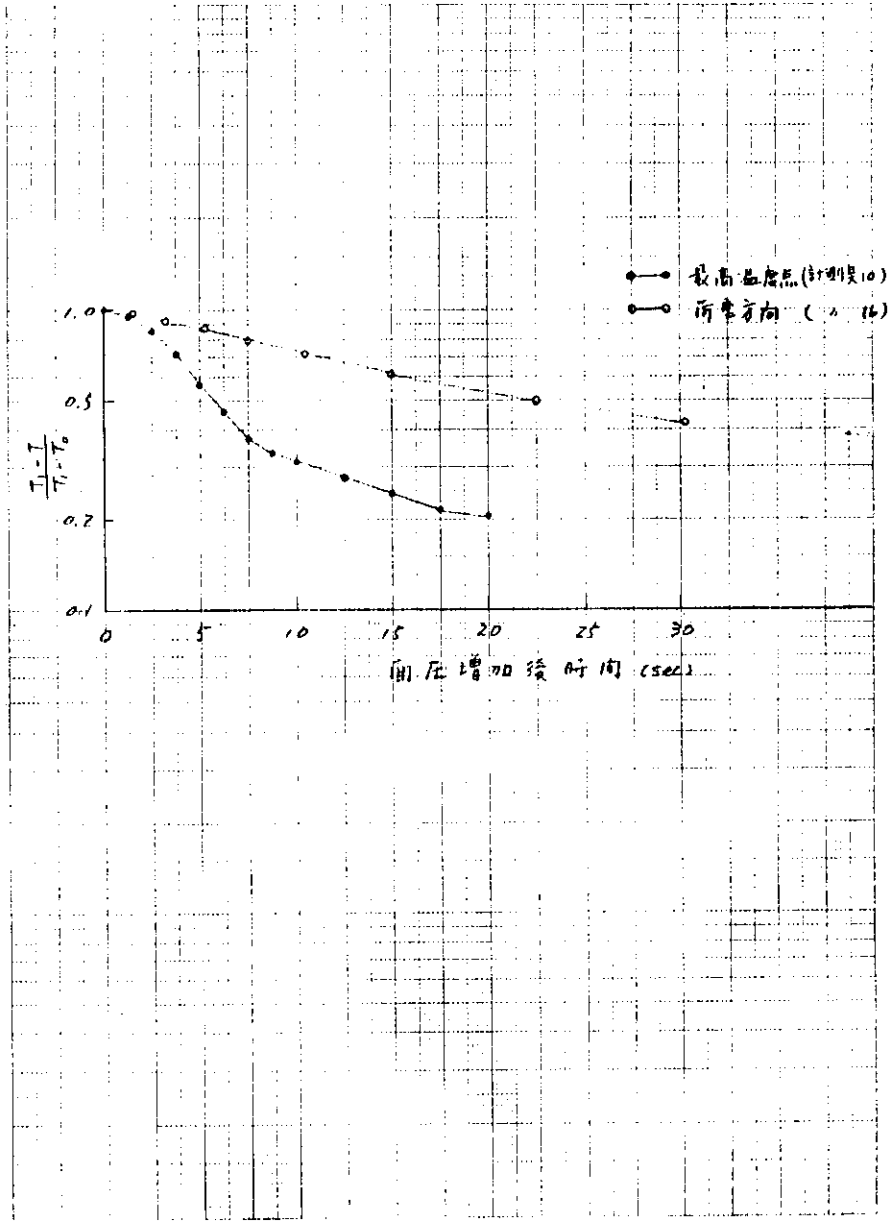
第 5. 4. 1 7 図　メタル温度と上昇率



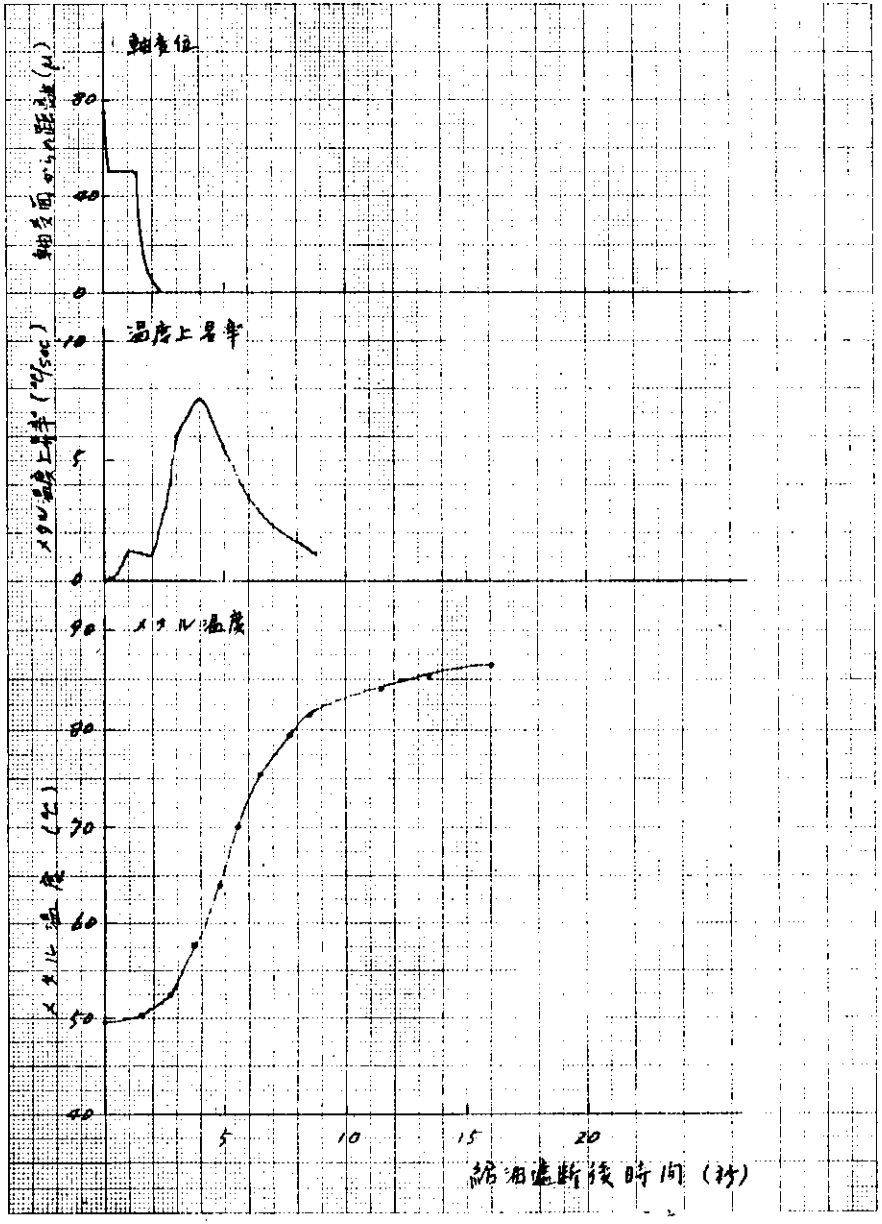
第 5.4.1-8図　メタル温度の設定範囲



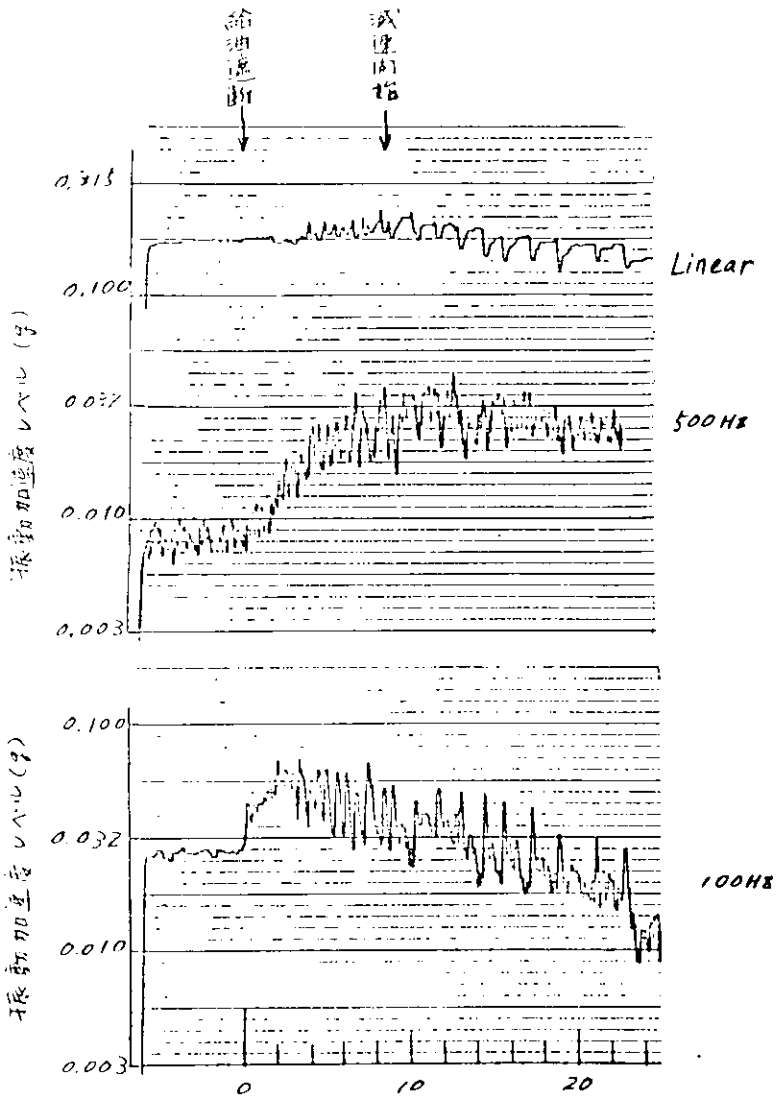
第 5.4.1 9図　負荷増加時のメタル温度



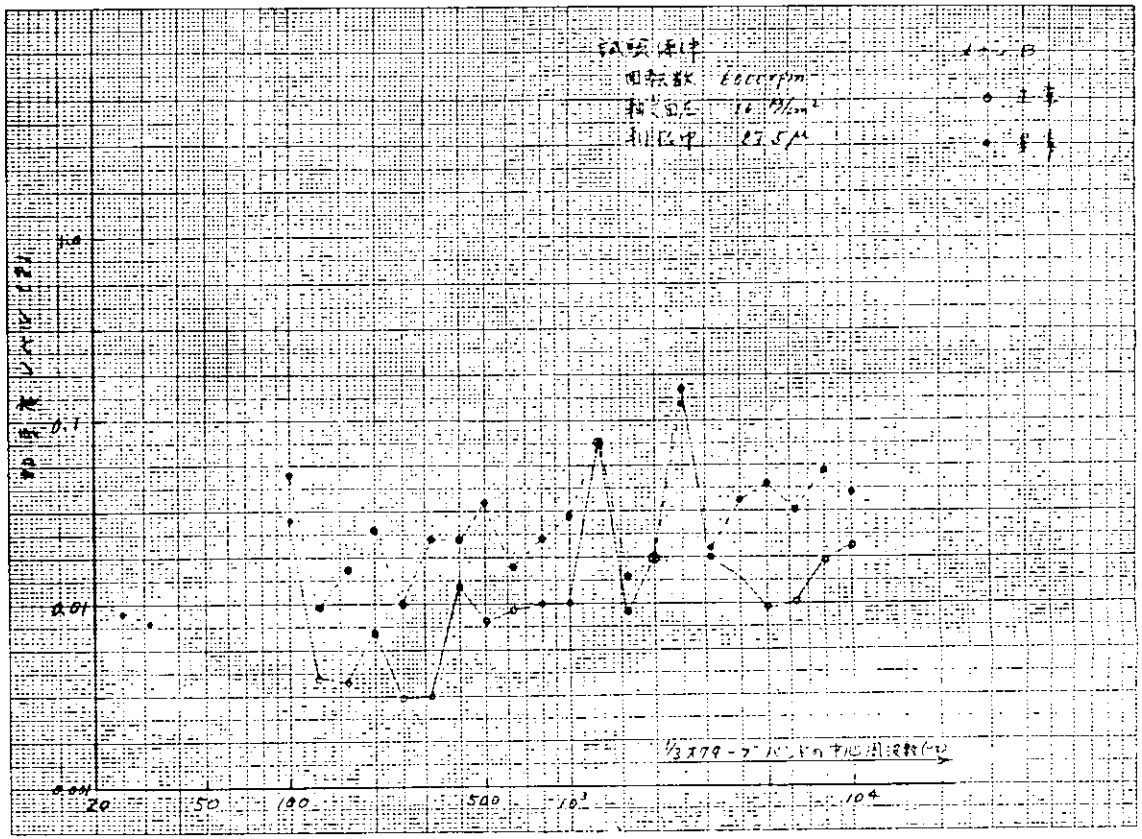
第 5.4.20図　負荷増加時の温度上昇



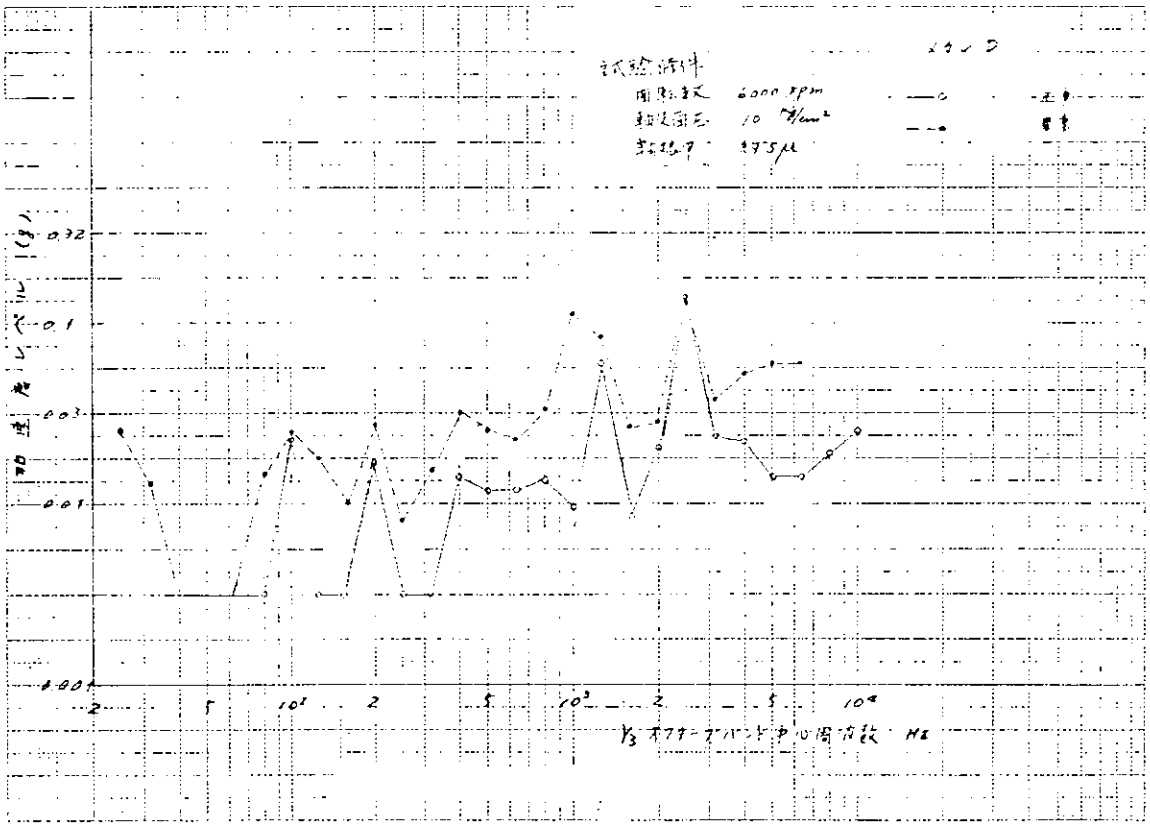
第 5.4.21図　給油遮断における軸変位とメタル温度



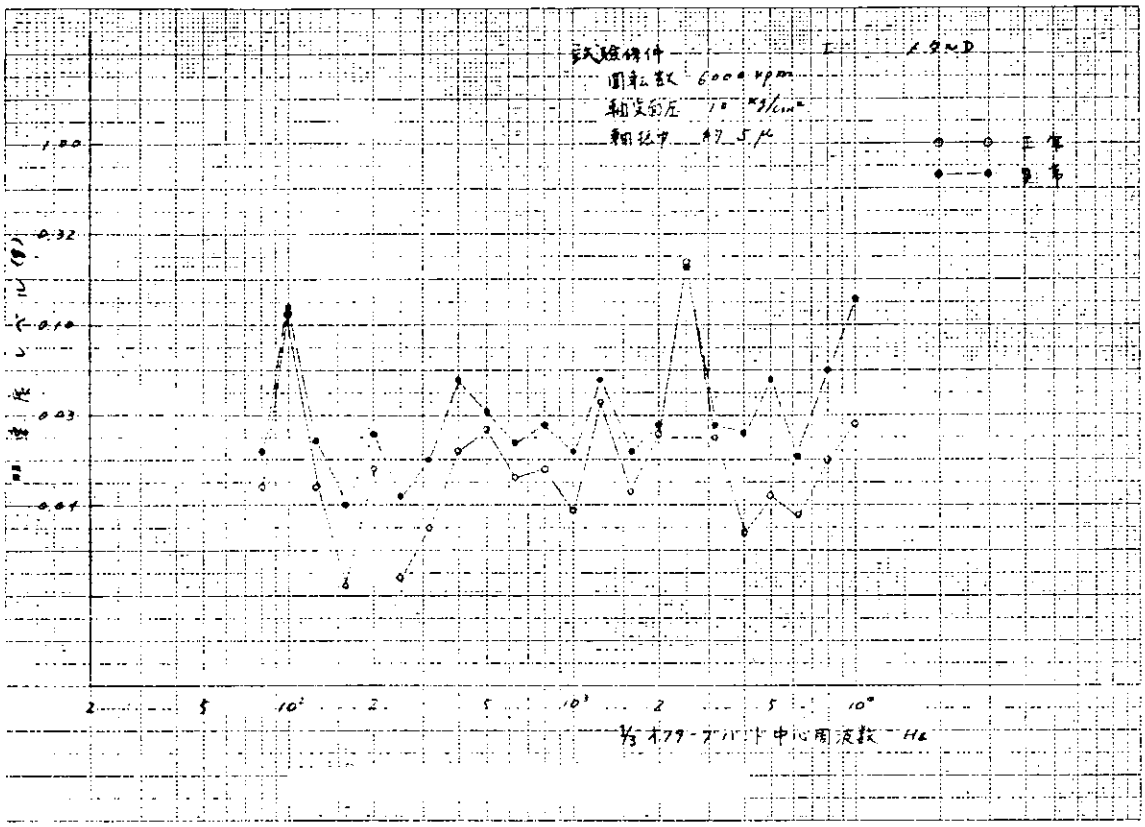
第 5. 4. 2 2図　給油遮断における振動加速度のレベル変化



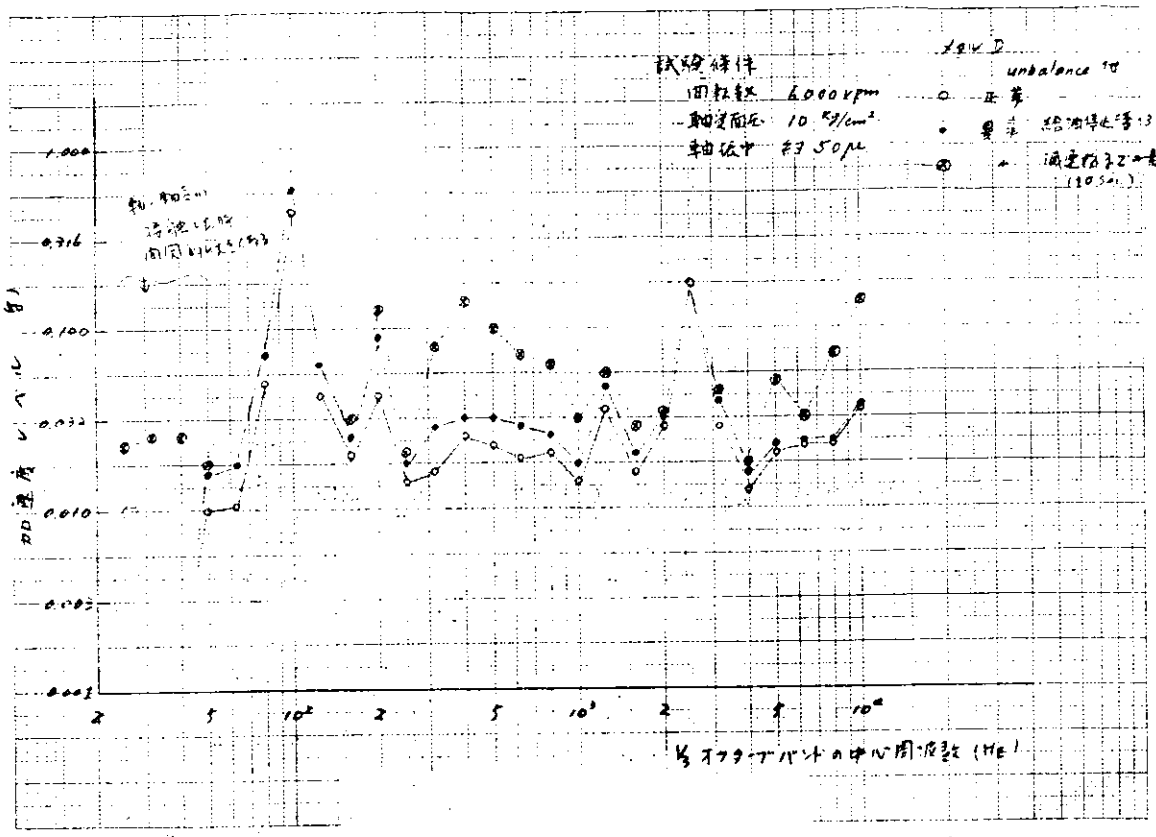
第 5. 4. 2 3図　軸受台振動加速度のスペクトラム



第 5. 4. 2 4図　軸受台振動加速度のスペクトラム



第 5. 4. 2 5図　軸受台の振動加速度のスペクトラム



第5.4.26図　軸受台の振動加速度のスペクトラム（軸振動の大きい場合）

5.5　制御装置の作成

制御装置のブロックダイアグラムを第5.5.1図に示す。設計に際して特に考慮した諸点はつぎのようである。

1）メタル温度の設定

メタル温度検出の熱電対は接地型シースカップルを用いるので、増幅器入力は平衡型とした。設定温度は50℃～250℃で2℃間隔で行なう。増幅器の零点ドリフトは適宜入力短絡状態で調整できるようにした。比較器は入力が設定値を超えているときのみ出力があり、入力が設定値より小さくなると出力がなくなる。変位等他の制御対象との組合せも考え制御部では比較器からの作動出力を保持できるようにした。（これは他の制御対象についても同じである）。メタルの片当りを考慮して3要素作成した。

2）メタル温度上昇率の設定

熱電対とその挿入部のメタルの熱容量から温度上昇率の応答は10Hz以下である。増幅器の内部雑音による誤動作を防ぐため増幅器と比較器の間に10Hzのローパスフィルタを設けた。設定範囲は0～10℃/secでその間0.2℃/secの間隔とした。

3）軸　変　位

異常時における軸変位と軸振動を区別するために10Hzのローパスフィルタを用いた。インダクタンス型変位計の出力電圧にて制御するようにした。したがって軸移動量の感度等は変位計にて調整するので設定量は任意に与えることができる。変位計の零点ドリフトは軸移動量に比して十分小さく、短時間の試験では考慮しなくてもよい。

4）軸　振　幅

軸変位とは逆に10Hzのハイパスフィルタを用いた。軸振幅量の設定は当制御装置では0～1 VP～Pの交流電圧量とし、振幅への換算は変位計の較正曲線によるものとした。

5）振動加速度

周波数の選択は1/3オクターブごとに設定できるローパスフィルタとハイパスフィルタを直列につなぎ、それぞれ単

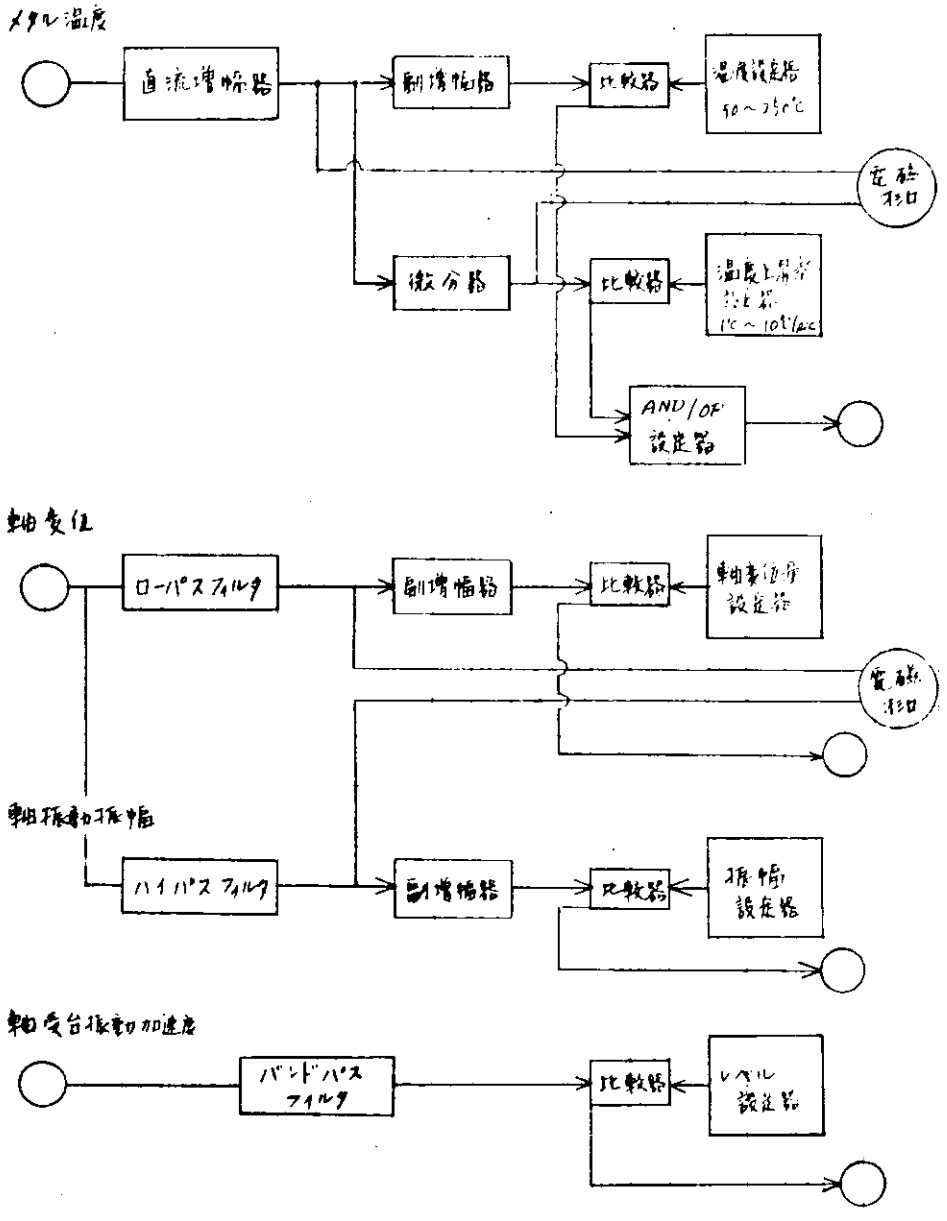
独に設定してもオクターブ以上のバンド幅で選ぶことができるようにした。振動レベルは 0.1 V P～Pの交流電圧幅で１Ｖまで１０段階の設定ができるようにした。

6）各制御要素の出力は電流出力をもち電磁オシログラフにて計測が可能とした。

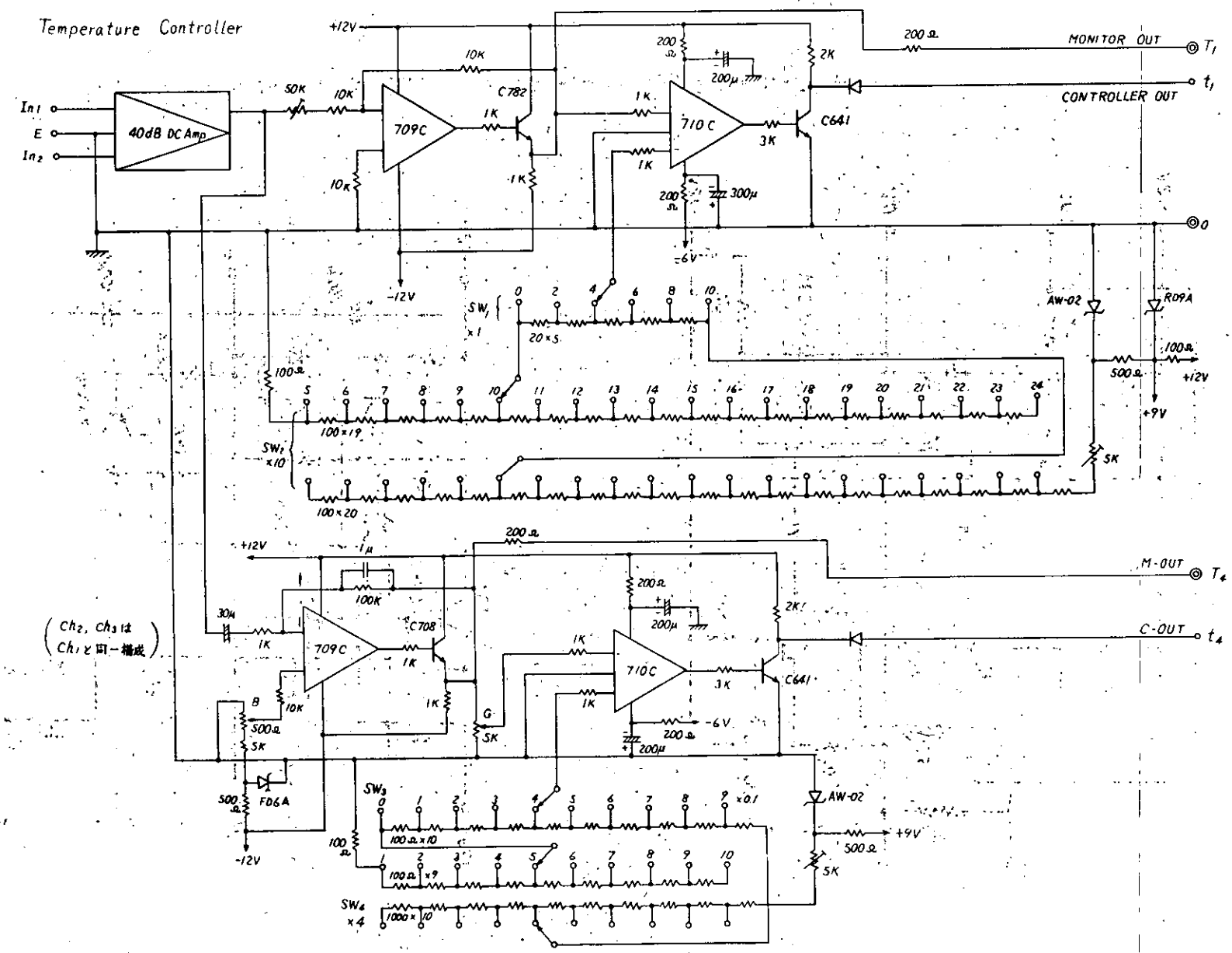
7）メタル温度と温度上昇率の制御出力部にはＡＮＤとＯＲの切換器を設けた。

8）主制御部は各要素の出力にて電動機の制御用電源を切り、軸回転を停止するようにした。また各要素出力から主制御部作動までの間に時間遅れを有することができるようタイマリレーを設置した。

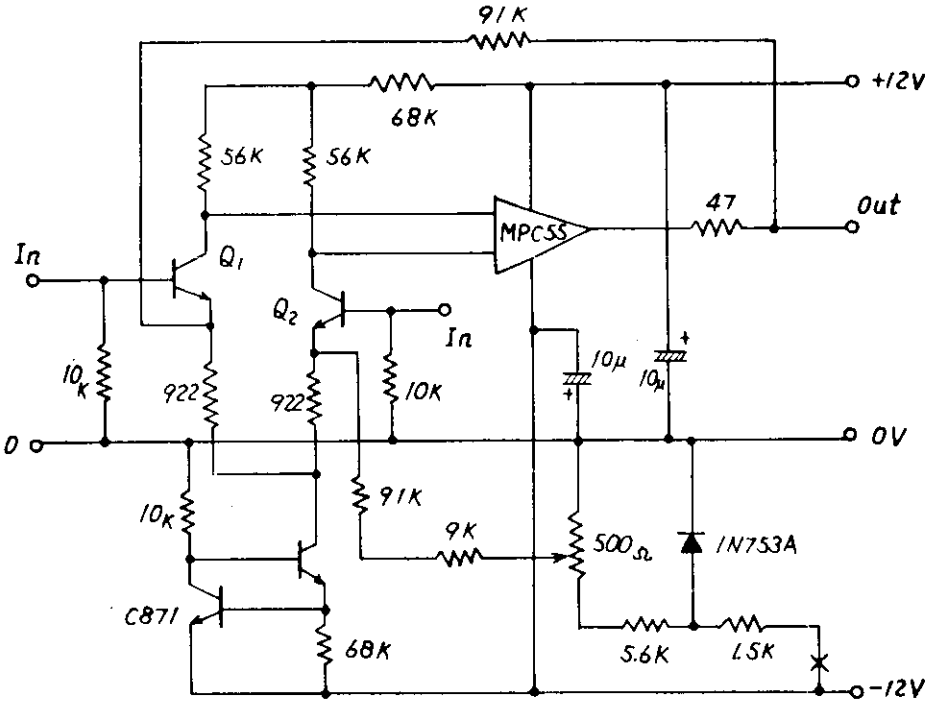
各制御要素、主制御部の回路図を第5.5.2～5.5.7図に示す。

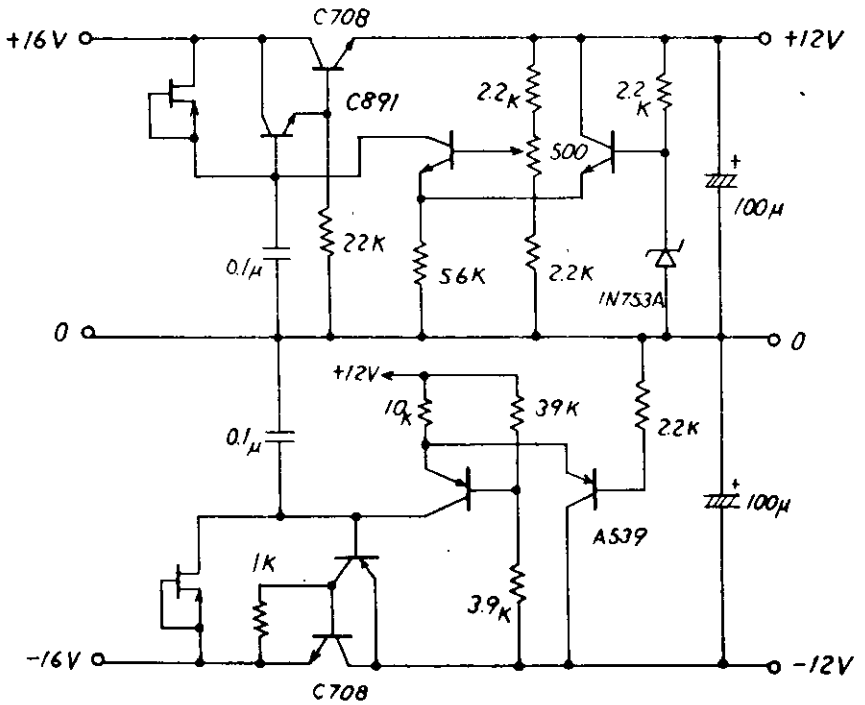


第5.5.1図　制御装置ブロックダイアグラム

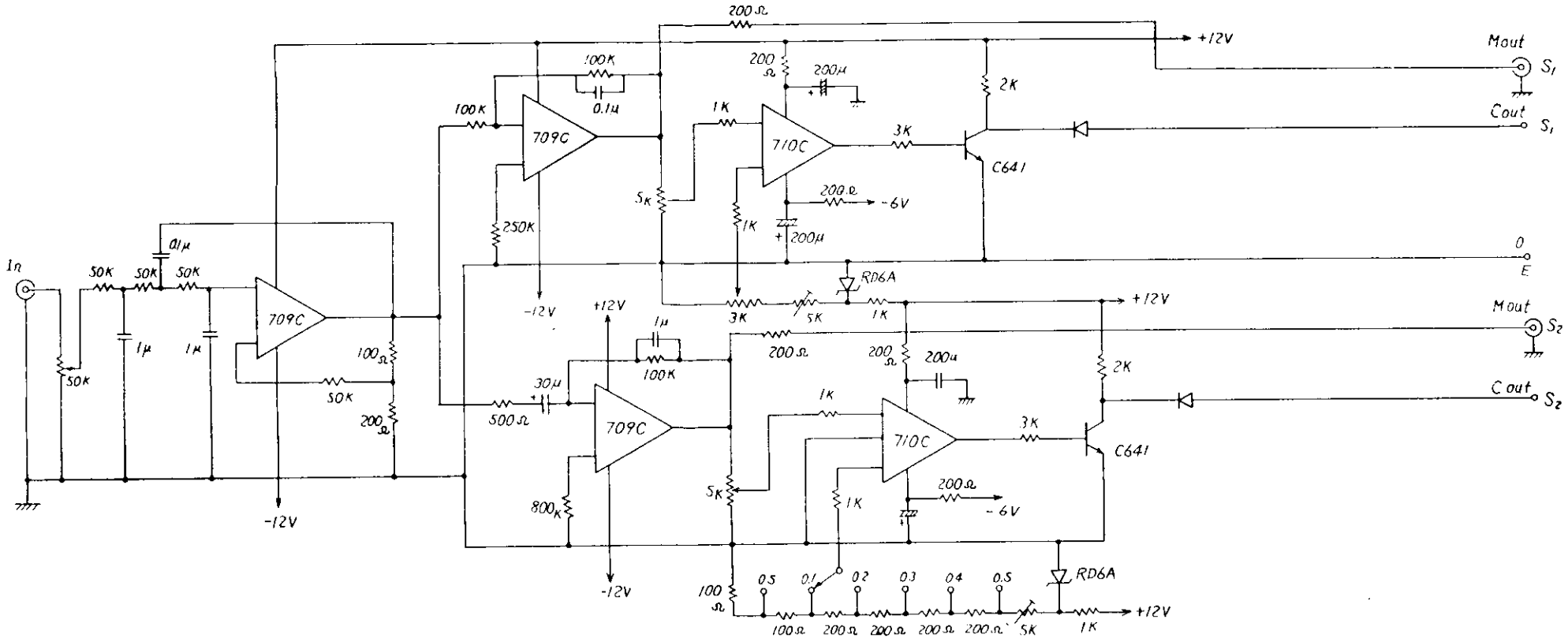


第 5. 5. 2 図　温度および温度上昇率設定回路

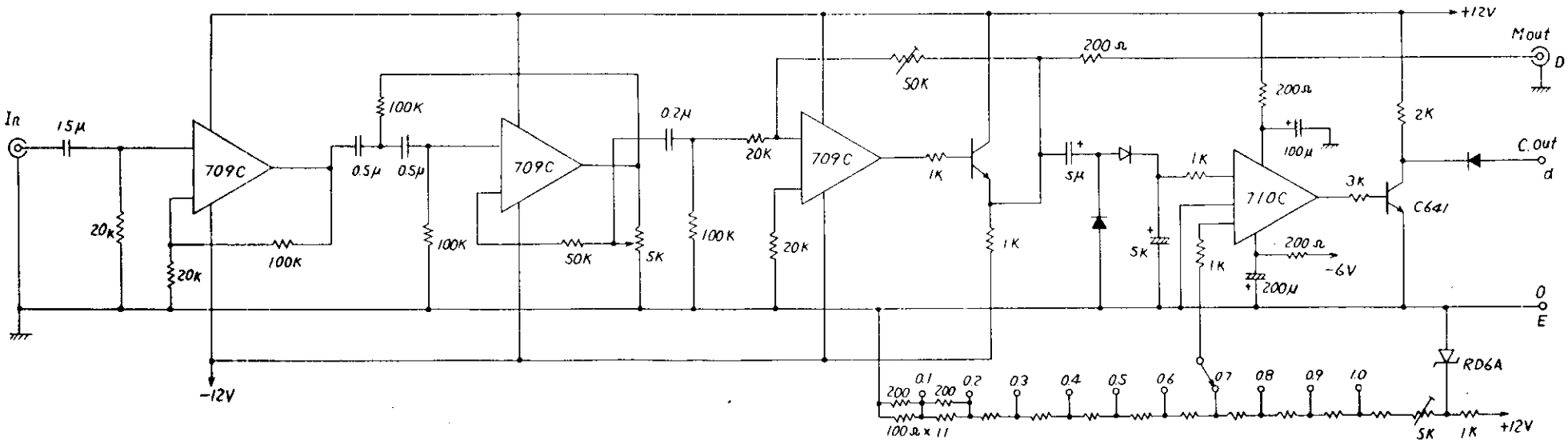




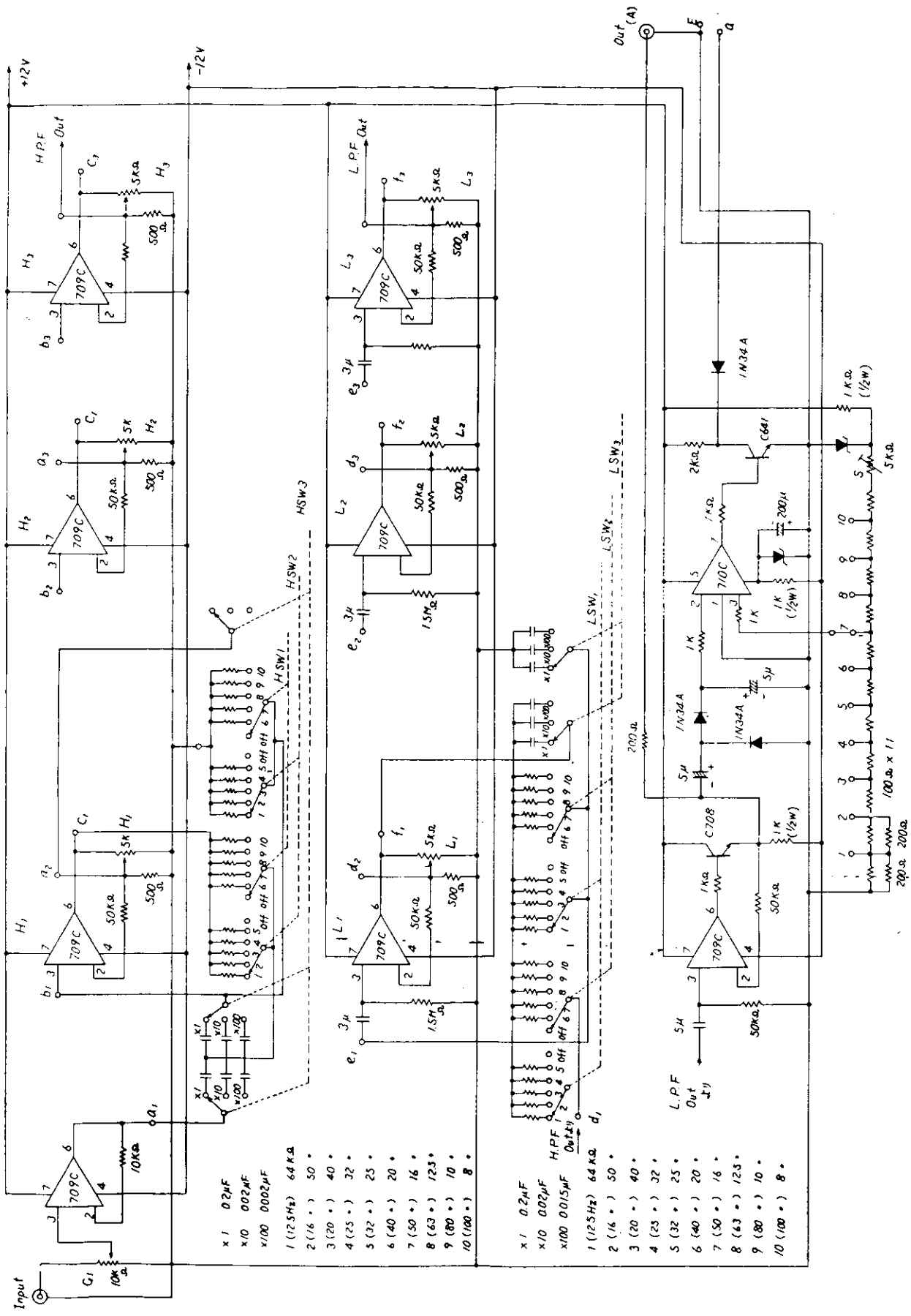
第 5. 5. 3 図　４０ｄＢ直流増幅器



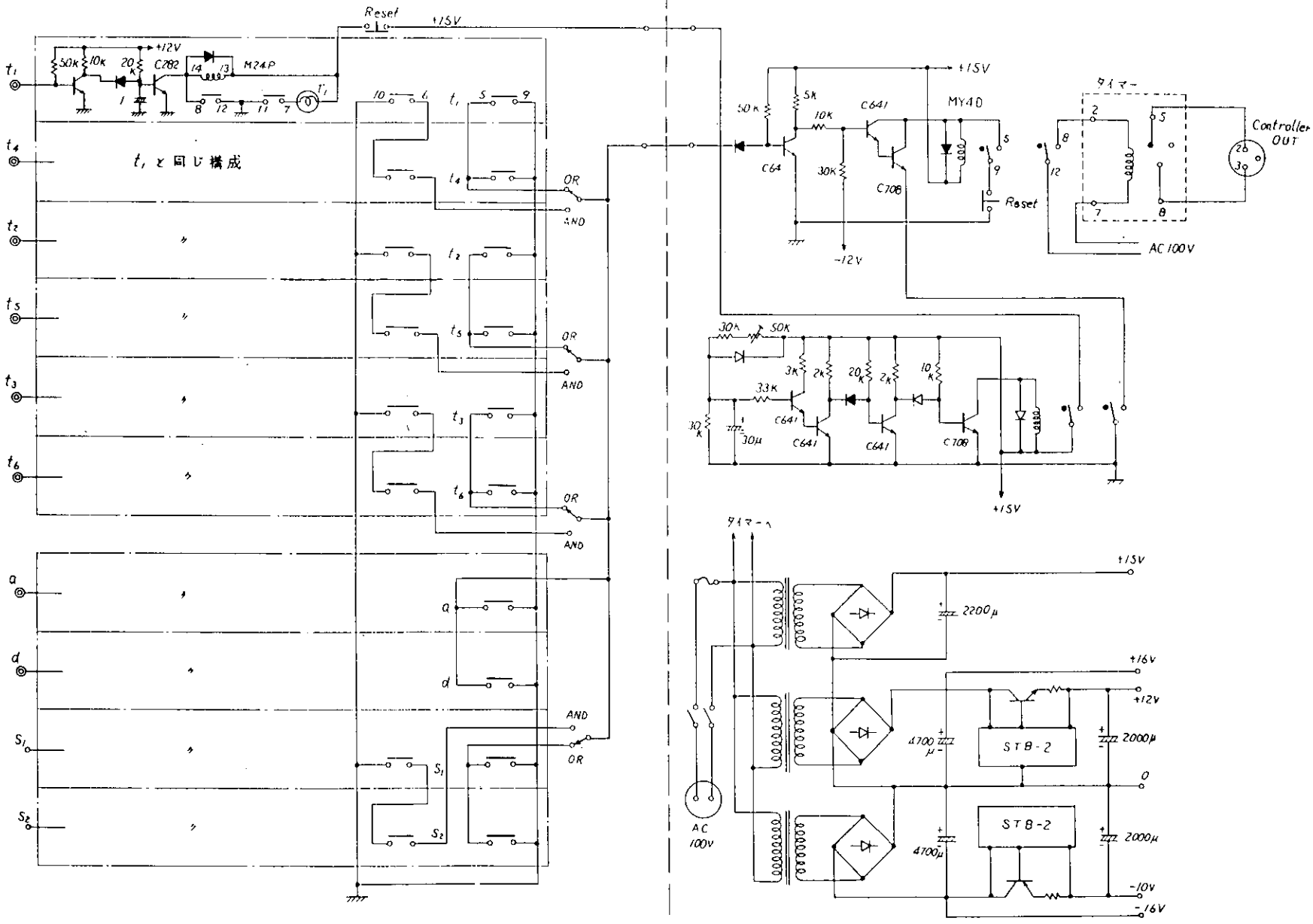
第 5. 5. 4 図　軸変位設定回路



第 5. 5. 5.図　軸振動設定回路



第 5. 5. 6 図　振動加速設定回路


Reset
+15V
+12V
50k
10k
20k
C282
M24P
t_1
t_4
t_2
t_5
t_3
t_6
a
d
S_1
S_2
t_1 と同じ構成
OR
AND
C64
5k
50k
10k
30k
C641
C708
MY40
Reset
-12V
タイマー
Controller OUT
AC 100V
30k
50k
3k
2k
20k
33k
30μ
+15V
AC 100V
2200μ
+16V
+12V
4700μ
STB-2
2000μ
0
-10V
-16V

第5.5.7図　制御部回路

5.6　制御装置の作動確認

5.4 節の考察から潤滑油遮断による軸受の異常の検知には、軸受メタル温度、同上昇率、軸変位の異常検出が有効であることが判明したので、試験装置のこの出力を制御装置に導き各量に設定値を設けて潤滑油遮断を行ない作動の確認を行なつた。実験はアキュムレータ 9.25 ℓ 1 基を含んだ場合と含まぬ場合について行なつた。n＝6,000 rpm, p＝10 Kg／cm²の場合の実験をつぎに示す。各要素の設定量は次表のごとくである。

実験番号	1	2
アキュムレータ容量	0	9.25 ℓ
軸変位	−45 μ	−60 μ
メタル温度	76 ℃	70 ℃
同上昇率	4.6 ℃／sec	4.0 ℃／sec
主制御部作動	遅れ時間　6 秒	遅れ時間　6 秒

温度については荷重方向にて軸方向の 3 点（温度計測点 15、16、17）用いたが実際に作動したのは、計測点 16 のみである。実験におけるメタル温度、温度上昇率（計測点 16）、軸変位の経過と各要素の作動点の電磁オシログラムを第 5.6.1 図に示す。主制御器のタイマリレーを 6 秒に設定し軸変位による異常検知があつてから 6 秒後に軸駆動モータの電源が切れるようにした。アキュムレータなしではこの間に温度；温度上昇率の設定器が働らいていることを示し、アキュムレータ付きの場合では温度上昇率の設定器は働らいていない。

各設定値を適切に選んでおけば潤滑異常の場合軸受焼損を防げることが確認された。

5.7　ま と め

軸受の異常として給油が遮断され流体潤滑から境界潤滑に移り境界膜が破断して軸受が焼損に至る状態を取り上げ、異常を検知した場合軸の回転をタービン弁の緊急停止で軸回転が 0 になる時間（30 sec）で停止して軸受焼損を防ぐため異常判定の設定値を求めつぎの結論を得た。

1）　メタル温度の検知は軸受荷重の方向のメタル温度を用いればよい。メタル温度をメタル焼損に至らしめたための設定値の範囲を求めることができた。

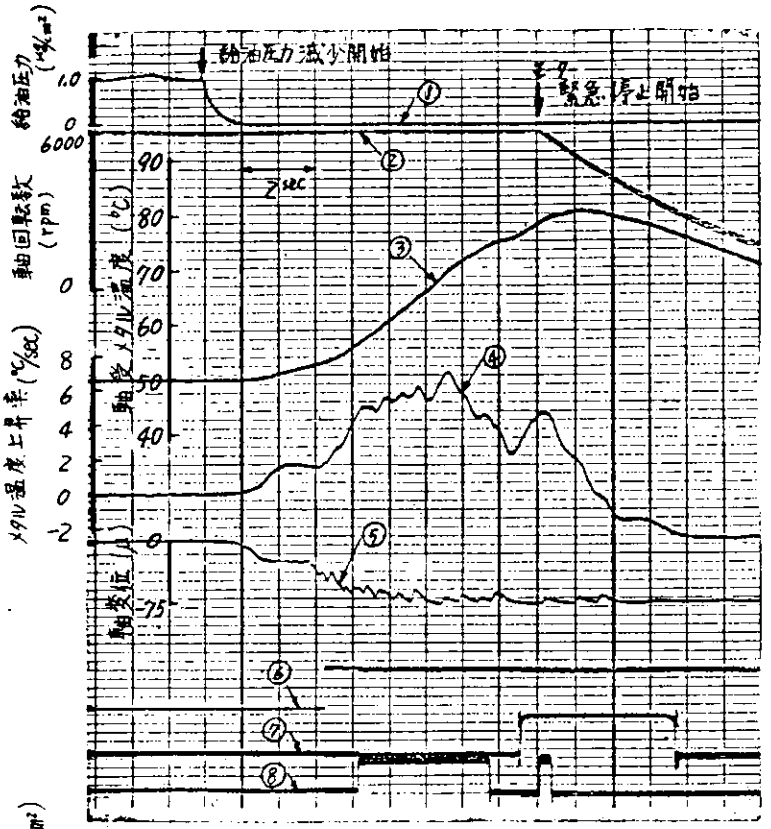
2）　メタル温度の上昇率も荷重方向にて検知すればよい。メタル温度上昇率は軸受異常の初期段階にて高い値を示すので異常の判定には有効である。

3）　軸変位は軸受が境界潤滑状態になる時期をつかむことができる。変位は荷重方向の軸移動量を求め軸受との接触位置に設定点をおけばよい。

4）　軸の振動は境界潤滑の異常の初期には顕著に現われない。

5）　軸受台の振動加速度は軸受焼損の初期段階ではレベル変化が微小であり絶対値も実機に比して小さいので、軸受焼損予防の検知手段にはなり得ない。

6）　以上の検出要素にて異常の検知が行なえる制御回路を試作し、本試験にて得られた設定値を用いた。給油遮断の異常に対しては軸受の焼損を予防しうることが確認できた。



試験条件

n ：6,000 rpm

pm ：10 Kg/cm²

（上図） 実験 1

（下図） 実験 2

オシログラムの記号

① ： 給油圧力

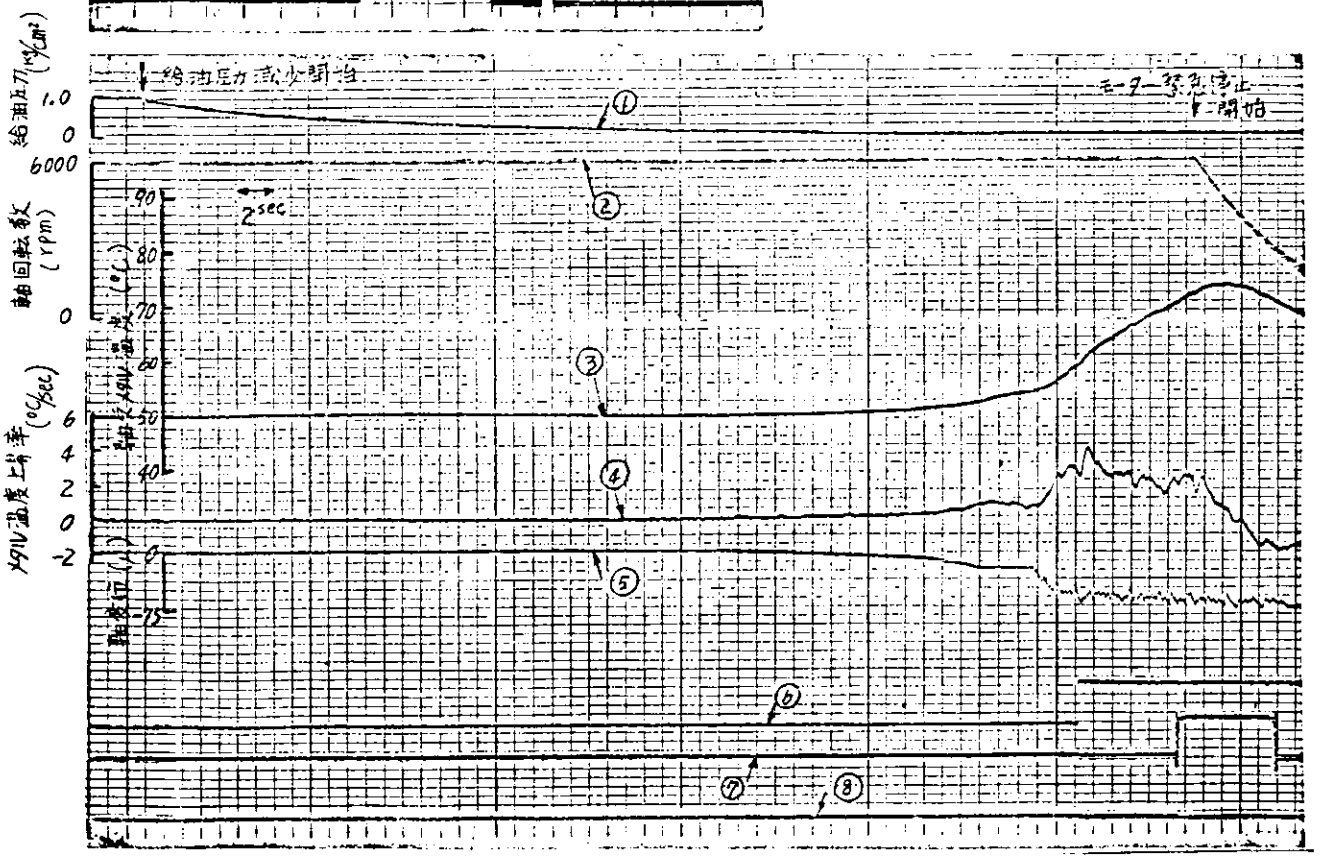
② ： 軸回転数

③ ： 軸受メタル温度（計測位置 16 ）

④ ： メタル温度上昇率（計測位置 16 ）

⑤ ： 軸 変 位

⑥ ⑦ ⑧ ： 制御回路作動信号：⑥ 軸変位、⑦ メタル温度、⑧ メタル温度上昇率



第 5. 6. 1 図　制御装置作動確認試験