

第 125 研 究 部 会

超高速コンテナ船の耐航性に関する研究

報 告 書

昭 和 4 9 年 3 月

社 団 法 人

日 本 造 船 研 究 協 会

は し が き

本報告書は日本船舶振興会の昭和48年度補助事業「大型超高速船の開発に関する研究」の一部として日本造船研究協会が第125研究部会においてとりまとめたものである。

第125研究部会委員名簿（敬称略、順不同）

部会長	中村 彰一（大阪大学）		
副部会長	竹沢 誠二（横浜国立大学）		
委員	安部 光弘（三井造船）	相原 和樹（三菱重工業）	
	岡本 洋（川崎重工業）	小川 陽弘（船舶技術研究所）	
	辻田 孝（三菱重工業）	黒井 昌明（日立造船）	
	岸本 修（三井造船）	北川 弘光（船舶技術研究所）	
	斉藤 公男（大阪大学）	滋野 正明（佐野安船渠）	
	鈴木 勲（造船技術センター）	瀬尾 敏一（日本鋼管）	
	高石 敬史（船舶技術研究所）	高木 又男（日立造船）	
	首藤 保信（日立造船）	田上 暉（東京計器）	
	田才 福造（九州大学）	田崎 亮（石川島播磨重工業）	
	田添 英士（大阪造船）	田中 紀男（大阪府立大学）	
	田中 兵衛（昭和海運）	永松 秀一（住友重機械工業）	
	永松 宣雄（川崎重工業）	八田 守江（日本郵船）	
	花園 史郎（函館ドック）	原田 信作（大阪商船三井船舶）	
	三井 明（ジャパン・ライン）	姫野 洋司（大阪府立大学）	
	藤井 斉（三菱重工業）	藤野 正隆（東京大学）	
	藤原 芳夫（名村造船）	細田 竜介（大阪府立大学）	
	前田 久明（東京大学）	牧園 正孝（山下新日本汽船）	
	元良 誠三（東京大学）	森 正彦（石川島播磨重工業）	
	森川 卓（船主協会）	山崎 芳嗣（佐世保重工業）	
	山本 修（日本鋼管）	山口 勇男（日本海事協会）	
井上 篤次郎（神戸商船大学）			

小委員会委員名簿（敬称略、順不同）

主査委員	竹沢 誠二（横浜国立大学）		
	大川 豊（船舶技術研究所）	山本 修（日本鋼管）	
	鬼木 博文（川崎重工業）	江口 純弘（東京大学）	
	黒井 昌明（日立造船）	相原 和樹（三菱重工業）	
	田中 久仁雄（石川島播磨重工業）	辻田 孝（三菱重工業）	
	田中 兵衛（昭和海運）	岸本 修（三井造船）	
	星野 史明（ジャパン・ライン）	朝長 義英（三菱重工業）	
	溝口 純敏（石川島播磨重工業）	八田 守江（日本郵船）	
	山下 保己（川崎重工業）	前田 久明（東京大学）	

委 員 伊 藤 憲 治 (川 崎 重 工 業)
更 田 康 夫 (日 本 鋼 管)
高 木 幹 雄 (九 州 大 学)
川 口 昇 (三 菱 重 工 業)
清 水 徹 (三 菱 重 工 業)

川 崎 邦 夫 (三 井 造 船)
藤 本 幸 夫 (日 本 鋼 管)
小 山 義 一 (三 井 造 船)
原 田 信 作 (大 阪 商 船 三 井 船 舶)
島 中 勝 則 (三 菱 重 工 業)

目 次

1. 緒 言	1
2. 理論計算	3
2.1 波浪中におけるNominal speed loss の計算	3
2.1.1 船型および計算法	3
2.1.2 計算結果	4
2.1.3 結果の検討	4
2.2 ウェザルーチンに関する計算	11
2.3 耐航性に関するシミュレーション計算	16
参考文献	16
3. 模型実験	30
3.1 斜め波中の波浪圧力に関する模型実験	30
3.1.1 はしがき	30
3.1.2 実 験	30
3.1.3 実験結果	30
3.1.4 む す び	33
3.2 波浪中における抵抗増加および推進性能の実験	55
3.2.1 はしがき	55
3.2.2 供 試 模 型	55
3.2.3 実験の種類および試験状態	55
3.2.4 実験結果および考察	55
参考文献	57
4. 実 船 試 験	65
4.1 解 析 法	65
4.1.1 経 緯	65
4.1.2 演算ルーチン	65
4.1.3 標準プログラム	73
4.1.4 船体運動間の相関	77
4.1.5 FFT法と従来法との結果の比較	80
4.1.6 む す び	80
付録 FFTアルゴリズムの解説	81
参考文献	84
4.2 J・A・号による実船試験結果の解析	101
4.2.1 統計極値解析結果	101
4.2.2 目視波高波周期による計測値と理論計算との比較	102
4.2.3 応答の計測値のパワースペクトラムと計測した波高のパワースペクトラムによる理論計算との比較.....	103
4.3 S・A・号による実船試験結果の解析	136
4.3.1 緒 言	136
4.3.2 航 海 状 況	137

4.3.3	解析結果	138
4.4	PNW航路コンテナ船H・T・号による実船試験	150
4.4.1	概要	150
4.4.2	本船要目	150
4.4.3	計測準備	150
4.4.4	計測項目詳細および計測時間	151
4.4.5	実船試験概要	152
4.4.6	おわりに	153
4.5	ニューヨーク航路コンテナ船N・J・丸による実船試験	158
4.5.1	概要	158
4.5.2	供試船主要目および乗船計測者	158
4.5.3	計測項目、計測時間	158
4.5.4	計測装置の配置	159
4.5.5	おわりに	159
5.	結 言	162

1. 緒 言

数年来飛躍的に増加の一途をたどっているコンテナ輸送は、コンテナ船の大型化、高速化の傾向をますます促進させている。

本研究は内外のかかる情勢に対処し、超高速コンテナ船の耐航性に関する諸問題を解明することを目的としている。すなわち、超高速コンテナ船の波浪中就航時における船体運動や推進性能などの計測と、これに並行して模型実験および理論計算を行ない、船体運動によって誘起される海水打込み、プロペラ露出、スラミング、シャダーなどの現象や、馬力増加、波浪荷重を解明し、この種船舶の波浪中特性を、船型、海象、運航状態と関連づけて把握し、基本設計時に主要寸法、一般配置や抵抗推進性能に関する要目等を決定するために必要な資料を求めようとするものである。また、艙装品の損傷防止や積荷の安全輸送を図るために必要な資料を得るとともに、大波浪中における過激な船体運動あるいはそれに伴う諸現象を回避するための意識的な減速や変針など、荒天時における操船上の諸問題についても検討を加え、操船資料の一助としようとするものである。

以上のような目的で、昭和46年度から4年計画で実施され、本年度は3年目として次のような研究を実施した。

1. 理論計算

a) 波浪中における nominal speed loss の計算

昭和47年度までに実施した斜め規則波中における船体抵抗増加の理論計算法に基づき、 $L/B=6.89$ の1軸コンテナ船型について数値計算を行ない、さらに風による抵抗増加を考慮して、長さ175mの実船の短波頂不規則波中における nominal speed loss を推定した。

b) ウェザールーチンに関する計算

冬期北太平洋航海について、次の3方法によって計算し、比較検討を行なった。

i) 大圏を通る場合

ii) 前年度までに実施した計算法による場合

iii) 中間の目的地を数点指定し、それらを通る航路のうちから最良のものを選ぶ場合

c) 耐航性に関するシミュレーション計算

昭和45年度SR108の研究の一環として実施された加州丸による実船試験の資料を基にして、海象図の与え方を種々変えた場合の最適航路計算と実際の航路との比較を行なった。

2. 模型実験

a) 斜め波中の波浪圧力に関する模型実験

船研角水槽において、SR108型1軸コンテナ船模型を用い、斜め波中を自由航走する場合に船体表面に働く変動圧および船首フレアー部に働く衝撃的水圧を計測した。

b) 波浪中における抵抗増加および推進性能の実験

阪大水槽において、SR108型に類似な $L/B=6.81$ の1軸コンテナ船模型を用い、正面規則波中の抵抗試験、自航試験を行ない、推進性能に対する波高影響およびプロペラの推力、トルク変動を調べるとともに強制縦揺プロペラ単独試験を実施し、平水中特性との比較を行なった。

3. 実船試験

a) 昭和46年度実施した欧州航路高速コンテナ船「KM丸」による実船試験結果について、2現象間の相関解析を行なった。

- b) 昭和47年度実施したニューヨーク航路コンテナ船「J A号」および北米南西海岸航路コンテナ船「S A号」による実船試験結果の統計解析およびスペクトル解析を行ない、就航状態での波浪中特性を調べた。
- c) 北米北西海岸航路コンテナ船「H T丸」およびニューヨーク航路コンテナ船「N J丸」の2隻に計測コンテナを搭載し、冬季航海中の船体運動、加速度、船首衝撃水圧等を計測するとともに、投棄式波高計による波高計測やレーダによる波向計測を行なった。

2. 理 論 計 算

2.1 波浪中における Nominal speed loss の計算

Nominal speed loss の計算法およびその数値計算例は、すでに、昭和46年度報告書¹⁾に報告されている。しかし、入力となる斜波中の船体抵抗増加に関しては、正面規則波中における実験値を用いてかなり大胆な仮定のもとに求められた値を使用している。

このため、Nominal speed loss の値には実情に即していない点があったと考えられる。

今年度は、昭和47年度報告書²⁾に示されている理論計算法によって斜規則波中における船体抵抗増加を理論的に求め、その値を使用して Nominal speed loss の計算を実施した。斜波中抵抗増加理論によって得られる抵抗増加の計算値は、追い波状態において過大な値を与える傾向があるため、実験値を参考にして修正して用いた。

2.1.1 船型および計算法

計算に使用した船型は、SR108型1軸コンテナ船($L/B=6.89$)で、この船型は、数年来本部会の研究対象となった船型である。供試船の主要目、線図等は報告済みであるので省略する。

計算は、抵抗増加の計算と Nominal speed loss の計算に分けて実施した。計算状態は次に示すとおりである。

(1) 斜規則波中抵抗増加

船 速 : $F_n = 0.15, 0.20, 0.25, 0.30$

波 長 : $\lambda/L = 0.5, 0.7, 0.9, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 2.0$

波向角 : $\theta = 0^\circ$ (Follow sea), $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ (Beam sea), $120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ (Head sea)

(2) 短波頂不規則波中馬力曲線

船 速 : $F_n = 0.15, 0.20, 0.25, 0.30$

波向角 : $\alpha = 0, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$

海 象 : Beaufort $M_6 = 6, 7, 8, 9, 10$

(3) Nominal speed loss

主機馬力 : BHP = 20,000, 22,500, 25,000, 27,500 (HCR), 30,000, 32,500

波 向 角 $\alpha = 0, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$

さきに述べたように、斜規則波中抵抗増加の計算値は、追い波状態($0^\circ < \alpha < 90^\circ$)において、実験値よりかなり大きな値を示す傾向にあるため、同じ船型による高石の模型実験結果³⁾あるいは、Series 60 模型による Vossers の系統的模型試験結果⁴⁾を参考にして理論計算値の修正を行なった。

短波頂不規則波中馬力曲線の計算に必要な入力情報となる不規則波の波スペクトラムはISSC型を用い、海象を表わす Beaufort M_6 と有義波高、平均波周期、風の関係は、Fig. 2.1.2 に示されるように、第12回ITTCの勧告による値⁵⁾を用いた。

短波頂不規則波を表わすにあたって、素成波の進行方向は、卓越波の進行方向に対して $\cos^2 \theta$ 状に分布しているものとした。

風抵抗の計算にあたって、船体の正面風圧抵抗係数は Wagner の図表⁶⁾より、供試船に対応する値を読み取って使用した。また、風向影響係数は、水櫃委員会の標準曲線⁶⁾を使用した。

軸馬力の計算にあたって、波浪中におけるプロペラの単独特性は平水中と同一であるとし、目航要素に関しては、波浪中における低下を考慮するため、正面不規則波中模型実験⁷⁾によって得られた値を使用した。

Nominal speed loss の計算は、上記の計算によって得られた軸馬力-船速曲線を2次式近似し、機関出力一定の状態における船速の低下量を求めた。

2.1.2 計算結果

Fig. 2.1.1(1)~(4)に、斜規則波中抵抗増加の計算値および実験値を参考にした修正値を示す。

Fig. 2.1.3(1)~(7)に、短波頂不規則波中における全抵抗および、波による抵抗増加、風による抵抗増加を分離して示す。

Fig. 2.1.4(1)~(4)に、短波頂不規則波中における有効馬力、波による有効馬力増加および風による有効馬力増加の波向角 α に対する変化の様子を示す。

Fig. 2.1.5(1)~(7)に、波浪中における軸馬力および軸回転数を示す。

Fig. 2.1.6に、計算の結果得られる Nominal speed loss、すなわち、限界船速の海象に対する変化の様子を示す。

2.1.3 結果の検討

Fig. 2.1.1(3)、(4)に見られるように、斜め追い波中における抵抗増加の理論計算値は、角水槽における実験値に比べてかなり大きな値となっている。この点については、来年度実施される予定の角水槽における斜波中抵抗試験の結果を待って検討したい。

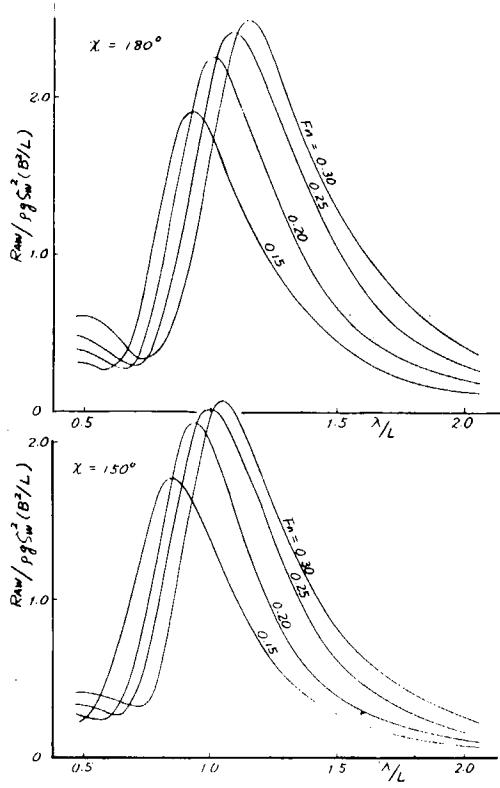
Fig. 2.1.3(1)~(7)より、波浪中における船体抵抗の増加は非常に大きく、特に、波による抵抗増加は、同一船速における平水中全抵抗を遙かに超える場合のあることがわかる。一方、風による抵抗増加は、波によるものに比べて比較的小さいが、やはり無視することはできない。

Fig. 2.1.4(1)~(4)より、波浪中有効馬力は、向い波の状態では非常に大きく、横波から追い波の状態では、その値も比較的小さく、あまり変化しないことがわかる。また、有効馬力の増加は、抵抗増加と同様に大部分が波によるものである。

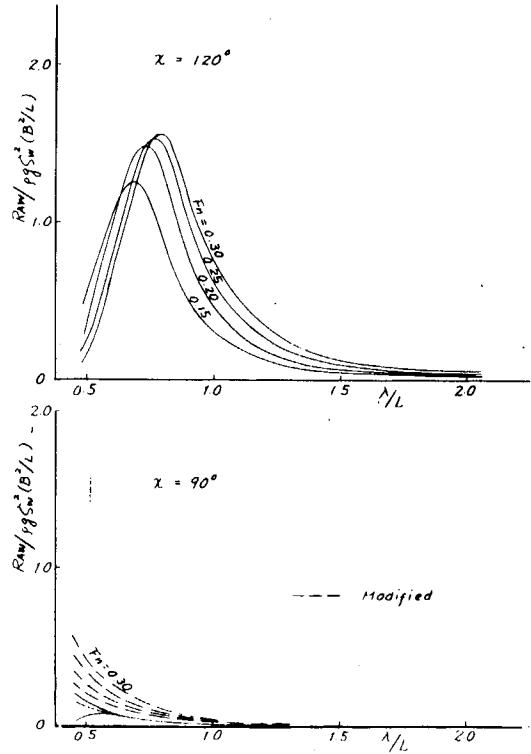
Fig. 2.1.5(1)~(7)より、波浪中の軸馬力は非常に大きいことがわかる。また、追い波の状態においても軸馬力はやはり増加している。これは、Fig. 2.1.3にも示されているように、波による抵抗増加が、追い風による抵抗減少を遙かに上回っているためである。

Fig. 2.1.6に示される Nominal speed loss の向い波状態における値は大きく、特に Beaufort No. 9、10 となれば 10 kt 位の船速低下が起っている。しかし、このような荒海では、向い波の状態で航行することはなく、また、主機の危険回転数、激しい船体応答などを考慮して船速低減が行なわれるであろう。本部会の実船実験による実績点⁷⁾は向い波状態 ($120^\circ < \alpha < 180^\circ$) の平均値であるため、あまり大きな値とはなっていないものと考えられる。

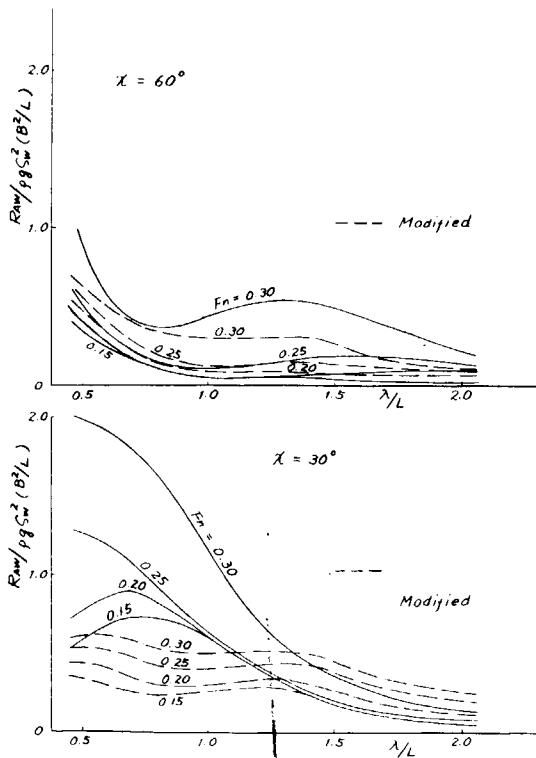
ここで求められた Nominal speed loss は、種々の仮定のもとに算出されたものであるが、実用的には十分満足できるものであると考える。



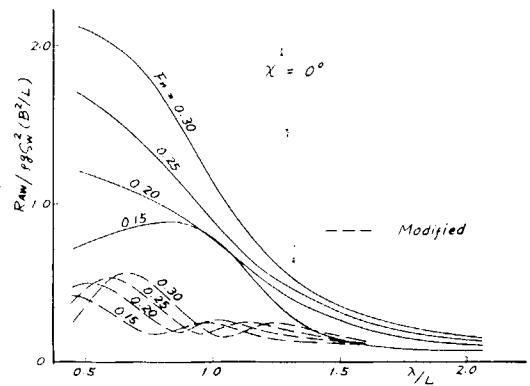
(1)



(2)



(3)



(4)

Fig. 2.1.1 Resistance Increase in Regular Oblique Waves

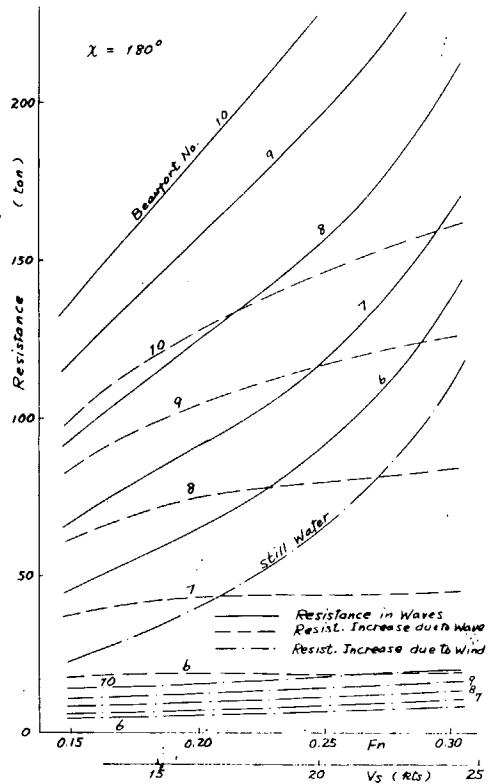
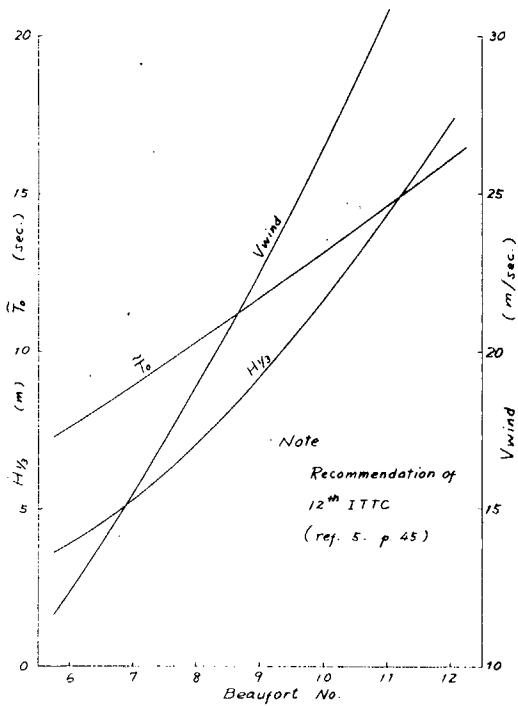
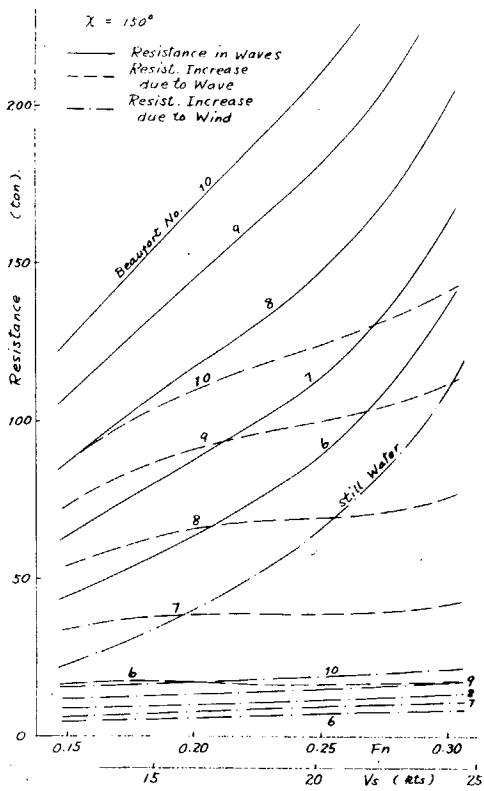
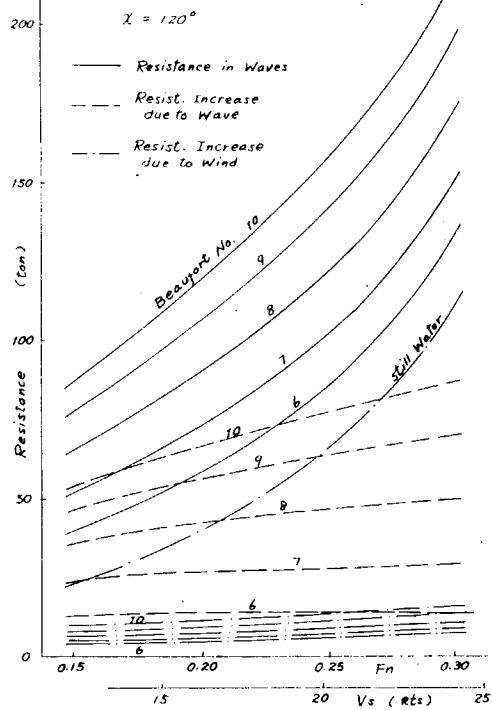


Fig. 2.1.2 Characteristics of Irregular Waves

(1)

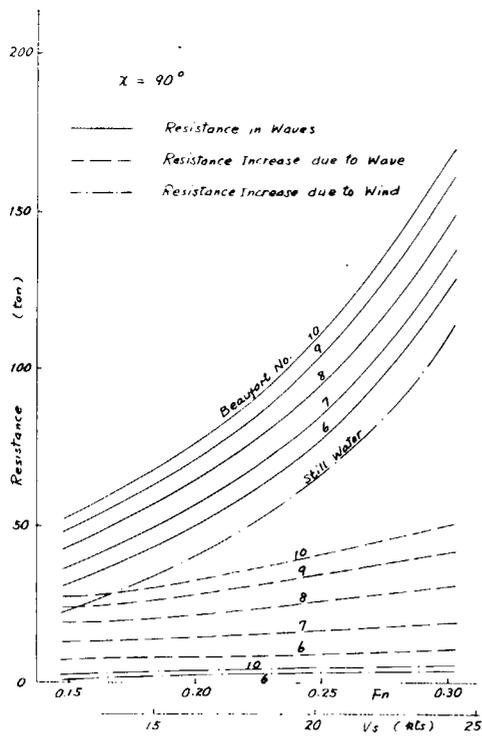


(2)

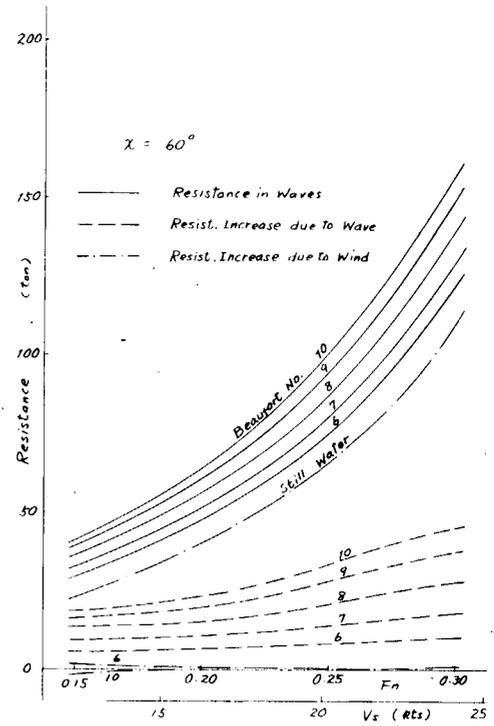


(3)

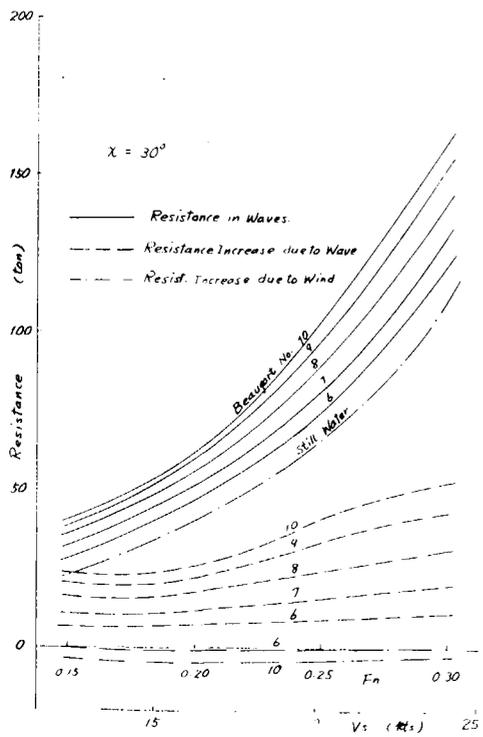
Fig. 2.1.3 Resistance in Waves



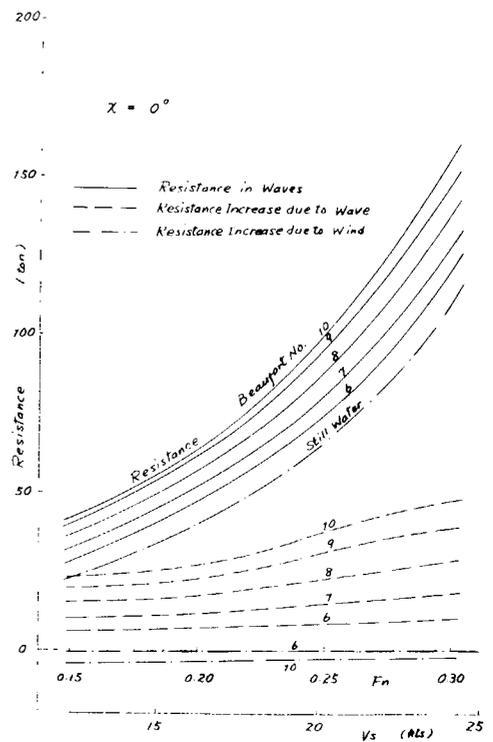
(4)



(5)

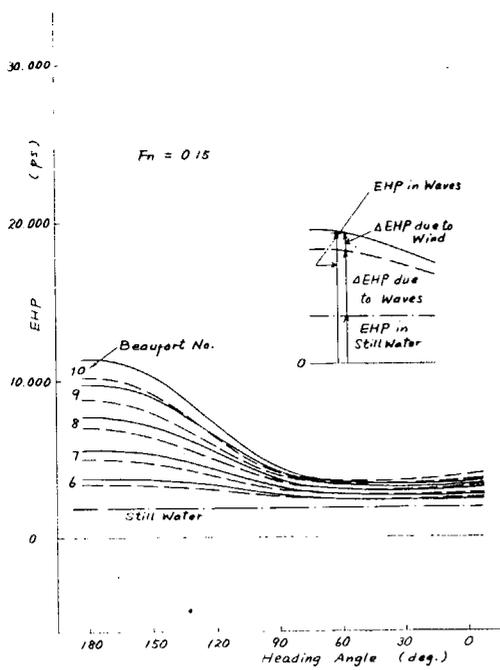


(6)

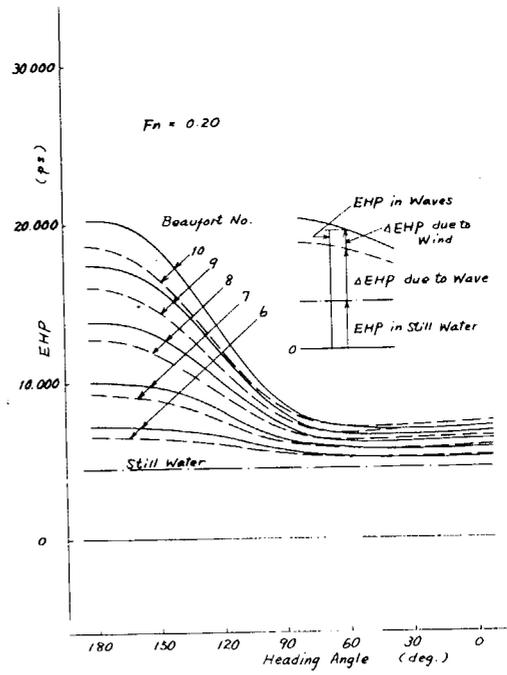


(7)

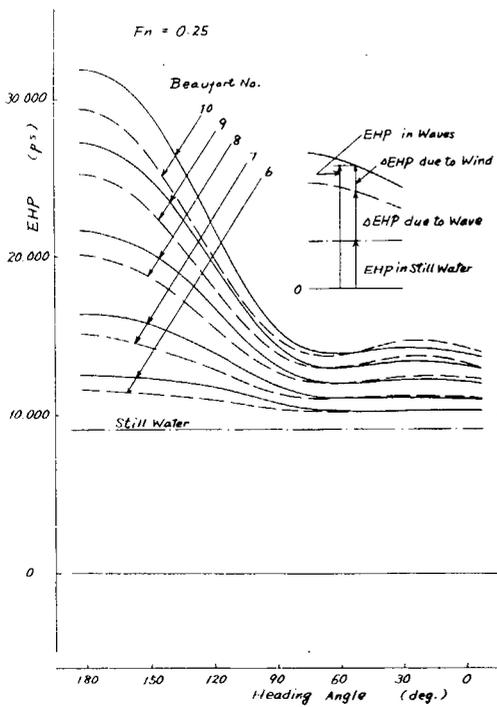
Fig. 2.1.3 Resistance in Waves



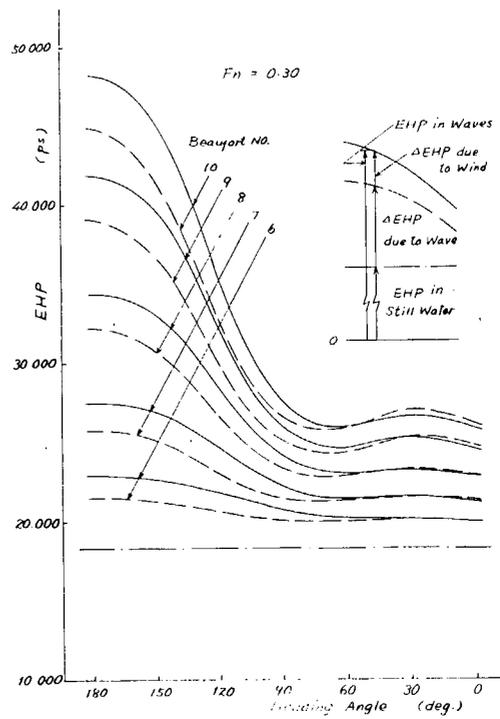
(1)



(2)

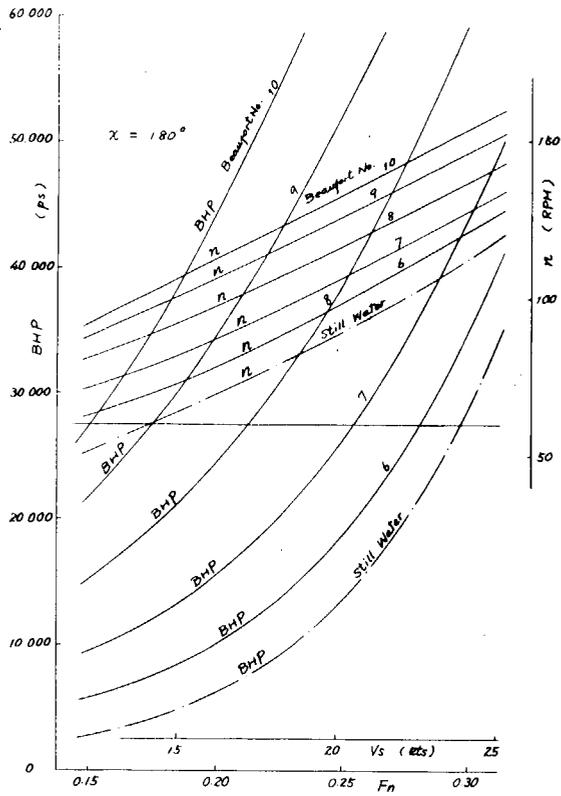


(3)

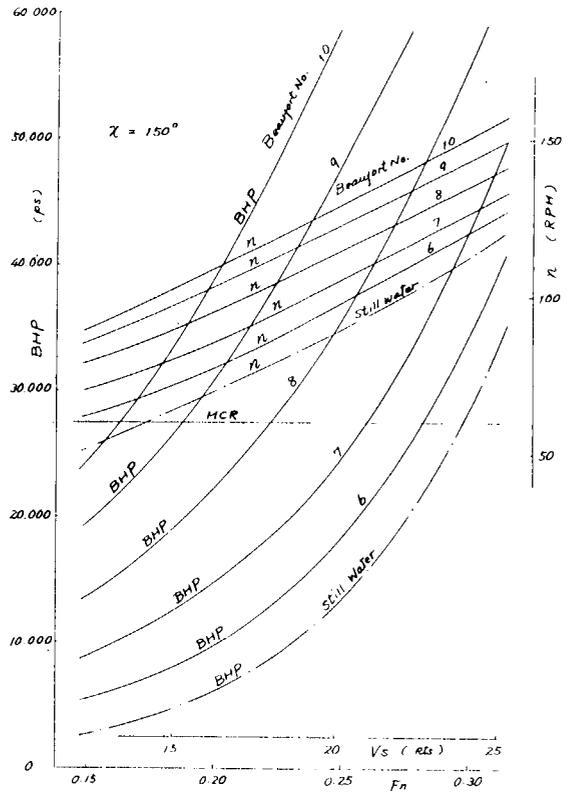


(4)

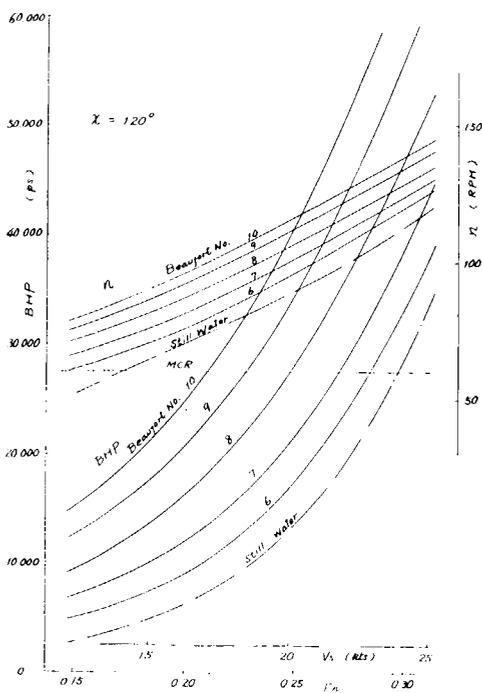
Fig. 2.1.4 EHP in Waves



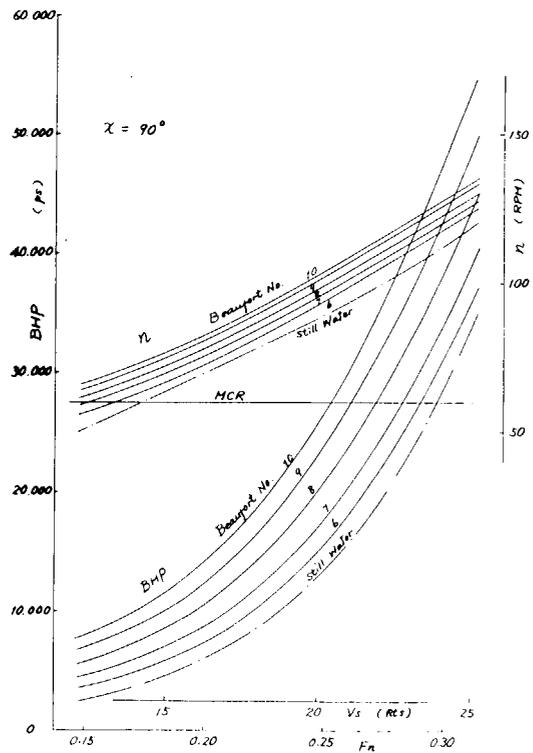
(1)



(2)

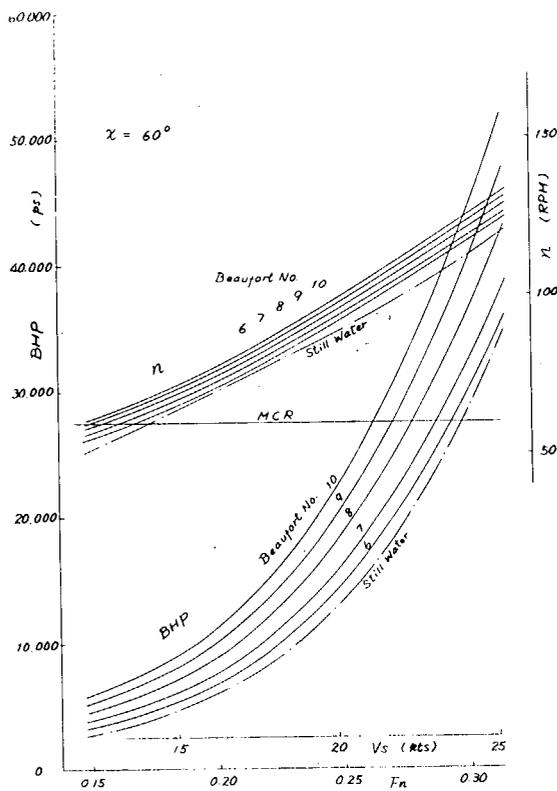


(3)

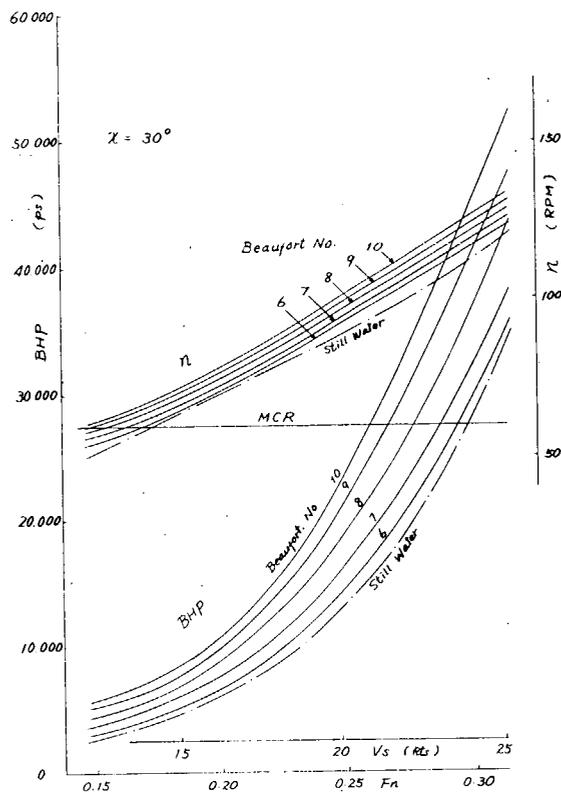


(4)

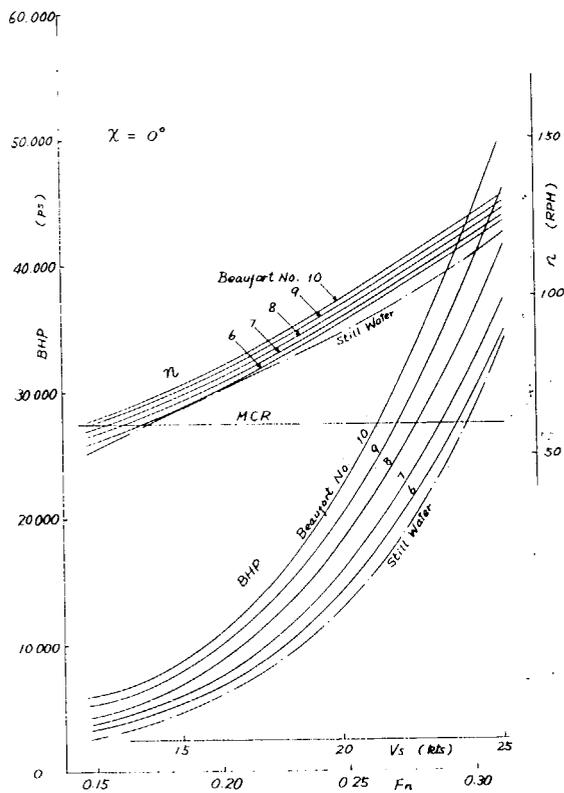
Fig. 2.15 BHP and Propeller Revolution in Waves



(5)



(6)



(7)

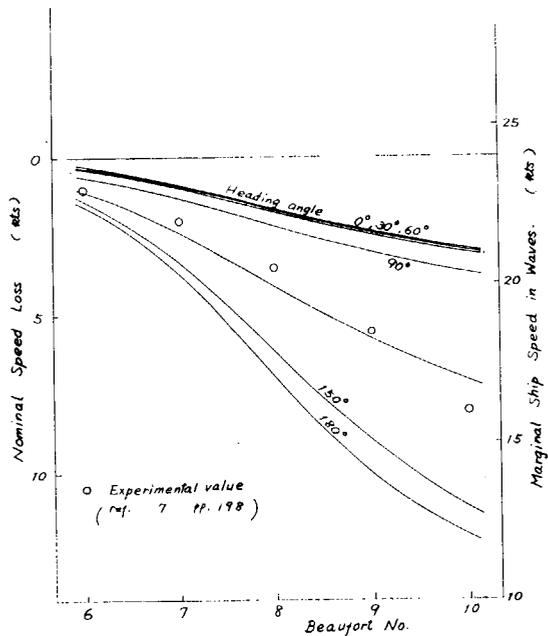


Fig. 2.1.5 BHP and Propeller Revolution in Waves

Fig. 2.1.6 Nominal Speed Loss in Waves

2.2 ウェザールーチンに関する計算

最適航路の計算法については、すでにSR108の46年度報告書¹⁾およびSR125の47年度報告書²⁾でのべたが、それはポントリヤギンの最大原理から求まる式により船の方位の時間変化を求め、数値積分により船の航跡、航行距離、航行時間を求めるもので、この際船速は海象の影響を受ける。すなわち、ある海象中を航行するときの船の速力は田才等⁸⁾が指摘しているように抵抗増加にもとづくNominal loss of speedと危険回避のためのDeliberate loss of speedによって決まる。今回の計算ではNominal loss of speedとしてはFig. 2.1.6の値を使い、Deliberate loss of speedを決めるための耐航性諸要素の限界値としては、有義両振幅が縦揺れで6°、横揺れで2.4°、F. P.の上下加速度で0.6 g、S.S.8の甲板上コンテナの2段積みを中心における横加速度で0.2 gとした。計算対象とした船は長さ175 mのSR108 1軸高速コンテナ船⁹⁾である。

なお、ウェザールーチンのプログラムの前年度よりの改良点は、時間とともに変化する海象の場合にも計算できるようにしたこと、航路として、以下のAからEにのべる5つのうち任意のものを選べるようにしたことである。

- (A) 出発点と目的地が与えられたときに決まる大圏航路。
- (B) 出発点と目的地の他に中間の1点を指定したときの、それら3点を通る円航路。
- (C) 最終目的地の他に中間の目的地を1点指定する方法。

この場合は、出発点から中間の目的地、中間の目的地から最終の目的地というように計算を2回に分けることになる。それぞれの計算は次にのべる(D)の方法に従う。

- (D) 前年度までと同じポントリヤギンの最大原理を用いる方法。

この方法は、まず出発点での船の方位を適当に定め、航路の計算を行ない、トライアル・アンド・エラーの方法で目的地に到達するものを求めようとするものである。しかし、海象状況によっては繰り返し計算を行なっても目的地に到達しない場合がある。そのときは、適当と思われる航路を1日進み、そこを新しい出発点として上記の計算を繰り返す。

- (E) 中間の目的地を数点指定し、そのうちの最良のものを選ぶ方法。

これは、中間の目的地を数点指定し、それぞれの中間点を通る場合について(C)の計算を行ない、そのうちから最良のものを選ぶ方法である。

以上にのべたウェザールーチンのプログラムの有効性を調べるために、昭和45年度の実船計測⁵⁾に参加した船のうち加州丸を例にとり、実際の航跡と計算で求めた航跡の比較を行なってみた。なお、加州丸はSR108 1軸高速コンテナ船⁹⁾とはほぼ同じ船型であるので、Nominal loss of speed、Deliberate loss of speed等はSR108船型に対する計算値を用いている。また、平水中での船速は22.5 ktsとしている。

Fig. 2.2.1が航跡の比較であり、Table 2.2.1が航行時間、平均船速などの比較である。計算は3種類について行った。WR1というのは、さきにのべた(D)の方法によるもので、この時、Fig. 2.2.2-(a)からFig. 2.2.2-(d)に示した海象図は前もって、すべて分っているものとした。WR2は、WR1と同じ計算法であるが、海象図は次のものが手に入るまで現時点のものを使用するという、いわば海象の変化を予測しない場合である。WR3は(E)の方法によるもので、170°Wを通過するときの緯度は40°Nと30°Nの間に納まるようにして最適のものを求めた。

この結果をみると、往航に関してはWR3と加州丸の航跡が大変良く似ており、航行時間などについてもほぼ等しい。復航ではWR1と加州丸の航跡が割合似ており、航行時間などもほぼ等しい。普通、冬期のPSW航路では復航時に大圏航路の近くを通ることはまずないのであるが、このウェザールーチンの計算結果をみると、加州丸は大変良い航路を選んでいると言えよう。

復航時のWR1とWR2では航行時間に大きな差がある。このことは、先々の海象をうまく予測することがウェザールーチンにとって大変重要であることを示している。

Table. 2.2.1

	往 航 (東京→ロス)			復 航 (オークランド→神戸)		
	航行時間 (日:時間)	航程係数	平均船速 (kts)	航行時間 (日:時間)	航程係数	平均船速 (kts)
加 州 丸	9 : 8.0	1.022	22.05	10 : 0.5	1.019	20.40
WR1	8 : 20.5	1.001	22.14	9 : 21.7	1.015	19.89
WR2	8 : 20.5	1.001	22.14	11 : 23.0	1.069	17.35
WR3	9 : 1.1	1.021	22.11	11 : 10.7	1.174	19.92

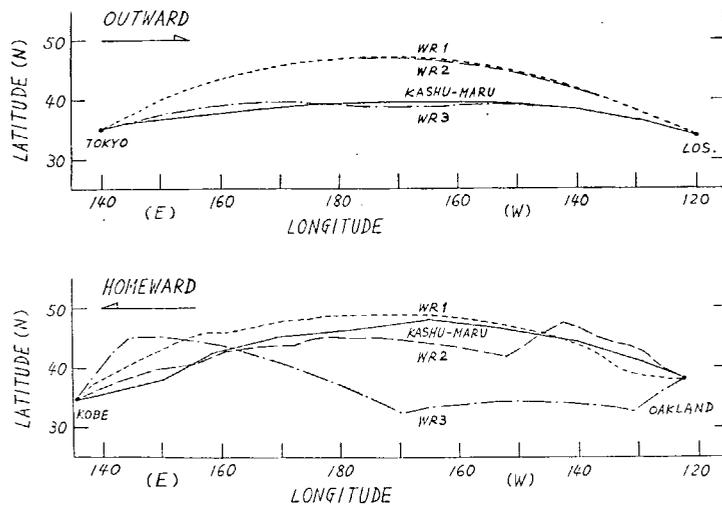
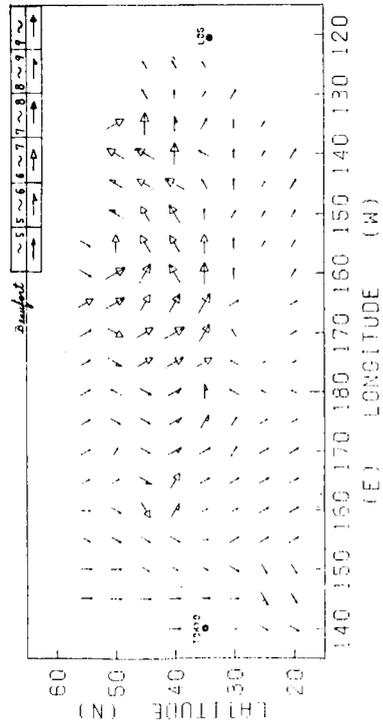


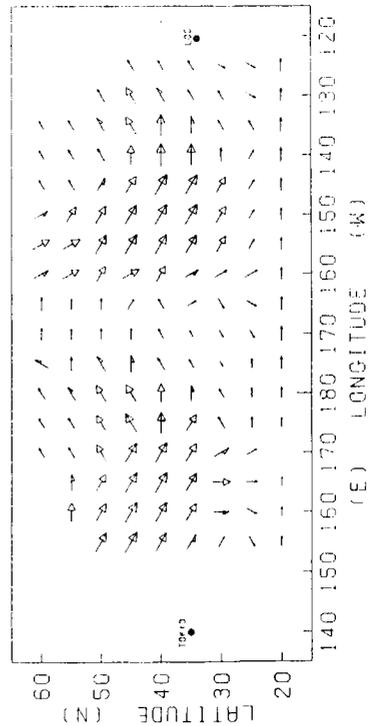
Fig. 2.2.1 航 跡 の 比 較

KASHU-MARU OUTWARD
1970.11.10 00:00Z (ELAPSE TIME 10 HR)



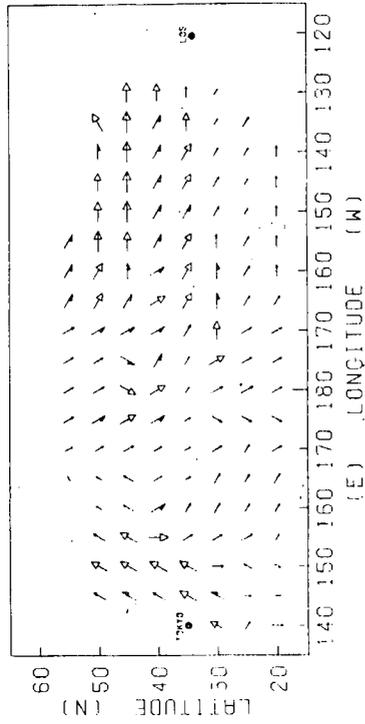
(a)

KASHU-MARU OUTWARD
1970.11.13 14:00Z (ELAPSE TIME 36 HR)



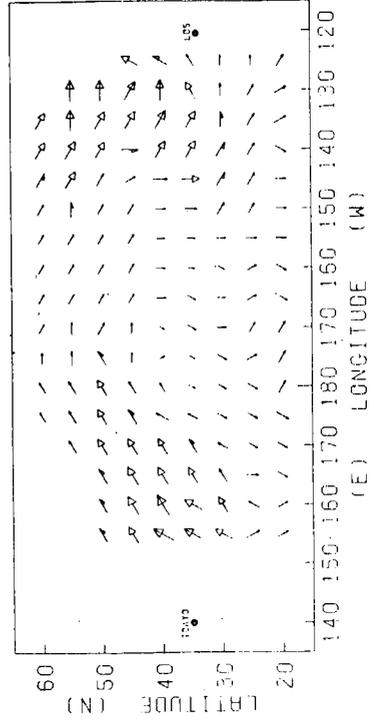
(c)

KASHU-MARU OUTWARD
1970.11.11 00:00Z (ELAPSE TIME 34 HR)



(b)

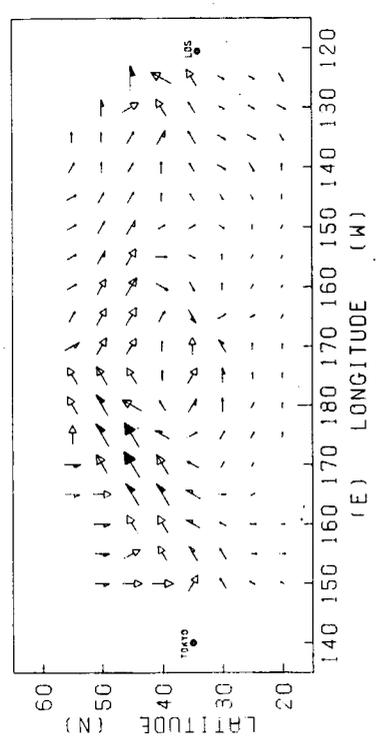
KASHU-MARU OUTWARD
1970.11.14 15:00Z (ELAPSE TIME 121 HR)



(e)

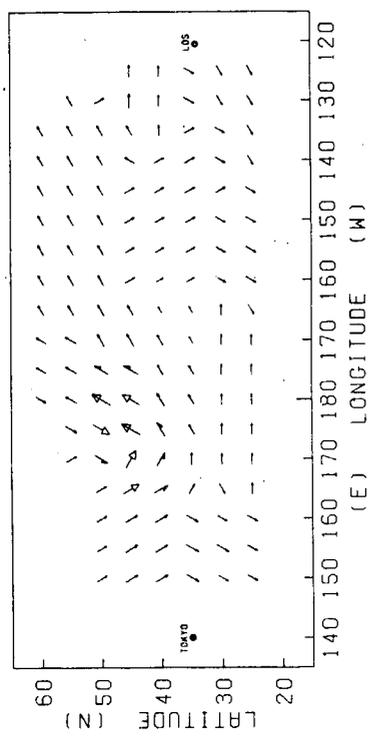
FIG. 2.2.2

KASHU-MARU OUTWARD
 1970.11.15 16:00Z (ELAPSE TIME 146 HR)



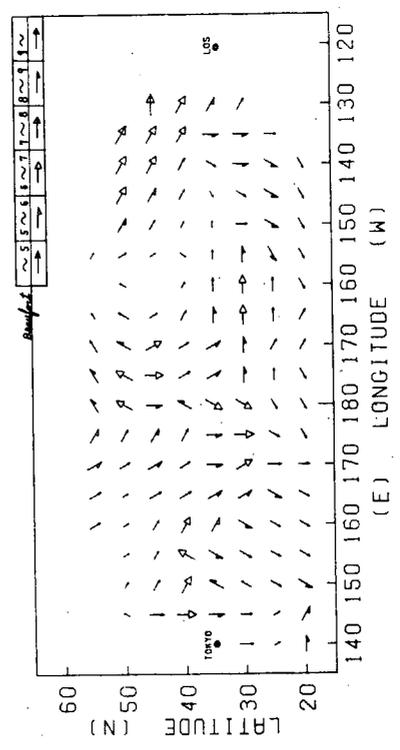
(e)

KASHU-MARU OUTWARD
 1970.11.15 17:00Z (ELAPSE TIME 147 HR)



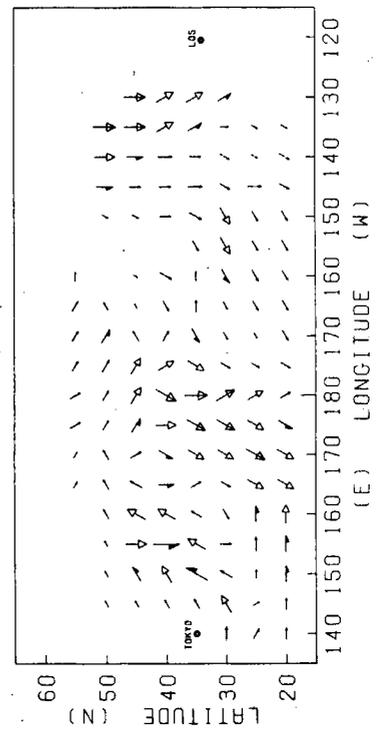
(f)

KASHU-MARU HOMEWARD
 1970.11.27 00:00Z (ELAPSE TIME 48 HR)



(g)

KASHU-MARU HOMEWARD
 1970.11.28 00:00Z (ELAPSE TIME 72 HR)

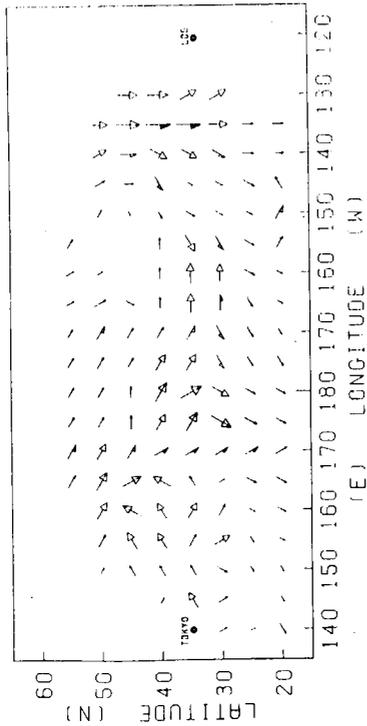


(h)

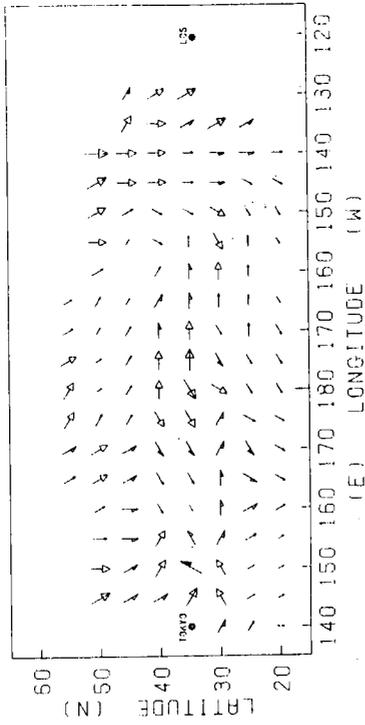
Fig. 2.2.2

KASHU-MARU
1970.11.29 00:00Z (ELAPSE TIME 95 HR)

KASHU-MARU
1970.11.30 00:00Z (ELAPSE TIME 120 HR)



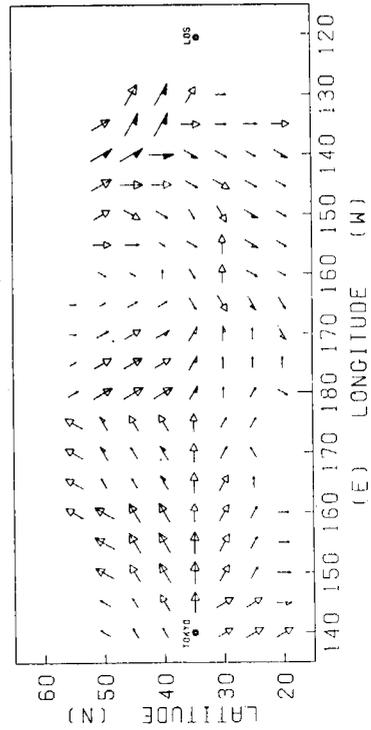
(i)



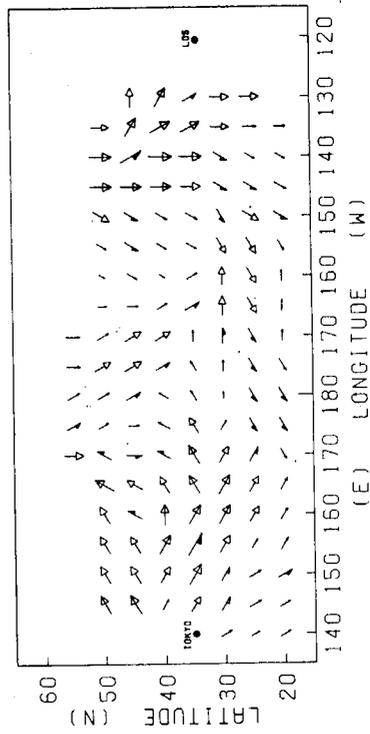
(j)

KASHU-MARU
1970.12.1 00:00Z (ELAPSE TIME 144 HR)

KASHU-MARU
1970.12.2 00:00Z (ELAPSE TIME 168 HR)



(k)



(l)

Fig. 2.2.2

2.3 耐航性に関するシミュレーション計算

2.2のウェザルーチンに関する計算のところでのべたプログラムを使い、冬期のPSW航路のシミュレーション計算を行なった。

海面状態の発生方法は、SR125の47年度報告書²⁾でのべられている乱数による方法であり、もとの資料としては、北太平洋における船舶からの報告を山内等¹⁰⁾がまとめたもののうち、12月、1月、2月の冬期3か月のデータを用いた。平水中船速は24 ktsとしている。

航路の計算方法は2.2のA、B、C、D、Eの5方法によっている。ただし、Bの中間の1点としては(170°W、35°N)、Cの中間の目的地は(170°W、35°N)とするが、到達時の誤差を大きくとり30°N～40°Nの間にあれば到達したものとみなすことにした。Eの方法の場合は、170°Wにおける中間の目的地を45°N、40°N、35°N、30°Nの4点とし、Cの場合と同じく到達誤差を5°まで認めることにした。それぞれの方法による航跡を、Cの場合についてはFig. 2.3.1-(a)から(f)に、Dの場合についてはFig. 2.3.2-(a)から(f)に、Eの場合についてはFig. 2.3.3-(a)から(f)に示す。

シミュレーション計算は、12月、1月、2月それぞれについて20往復ずつ行なっているため、冬期3か月の合計では60往復の計算を行なったことになる。以下では、冬期3か月の合計についてみてゆく。

まず、航行日数、航程係数などが計算方法でどう変わるかを比較したものをFig. 2.3.4からFig. 2.3.9に示す。

航行日数について、往航ではEの方法によるものが一番良いので問題はないが、復航の場合、Aの、むりやり大圏航路を通った場合にくらべ、Eの方法によるもので日数の大変長くなっているものがあるのが問題である。このようすをTable 2.3.1でみると往航、復航ともAの大圏航路にくらべ、Eの方法の場合の方が、平均として遭遇海象がおだやかで、平均船速も上がっていることが分る。しかし、航行日数については往航では短くなったが、復航では少し長くなっている。これは復航の場合Fig. 2.3.9のように向い波状態が多く、Deliberate loss of speedが大きくなるので、それを避けるため、おだやかな海象ばかりを選んで航行した結果、航行距離が大変長くなったり、最初のうち荒天を避けても、最終目的地が定められているから、最後にはしかたなしに荒天中を航行することになるためのようである。したがって、現在のウェザルーチンのプログラムについてはもう少し改良の余地があることになる。

Table 2.3.2は、速度低下の原因のパーセンテージを示したものであるが、往航にくらべ復航時にはDeliberate loss of speedによるものが多くなる。これは、さきにもべたように復航の場合の方が向い波状態が多く、上下加速度の制限にひっかかる率が多くなるためである。

170°W通過時の緯度は通常の航路にくらべ大変北よりであるが、これは使用した海象のデータの圏航路付近の値が、比較のおだやかなためであり、最近のように、大形船、高速船が多くなった時点での船舶よりの報告海象の値を使えば、異なった結果が得られるかも知れない。

参考文献

- 1) 高速貨物船の波浪中における諸性能に関する研究
SR108、研究資料№143 S47-3
- 2) 超高速コンテナ船の耐航性に関する研究
SR125、研究資料№171 S48-3
- 3) 高石敬史他：斜め波中におけるコンテナ船のプロペラのスラスト、トルクの増加および変動、試験水槽委員会、第2部会資料SK-36-11 S48-8
- 4) Vossers, a, o: Experiments with Series 60 Model in Waves TSNAME, Vol. 68, 1960
- 5) 高速貨物船の波浪中諸性能に関する研究
SR-108、研究資料№125 S46.3

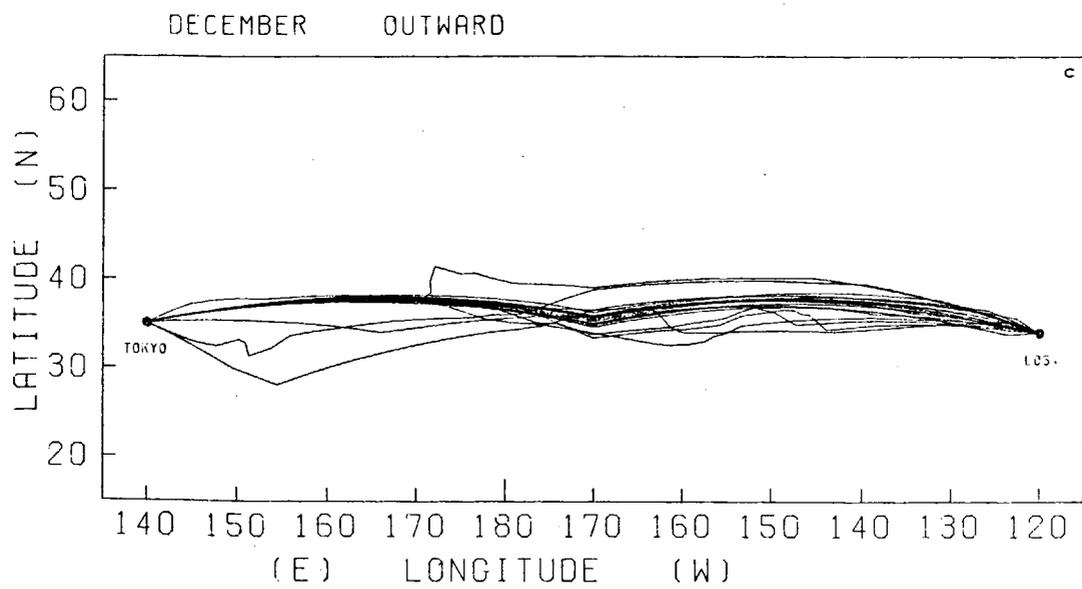
- 6) 中村彰一：耐航性の諸要素、耐航性に関するシンポジウム
第4章 S 4 4 - 7
- 7) 超高速コンテナ船の耐航性に関する研究
S R 1 2 5、研究資料№157 S 4 7 - 3
- 8) 田才福造他：肥大船の耐航性能に関する研究
西部造船会会報、第37号、昭和44年2月
- 9) S R 1 0 8 昭和44年度報告、研究資料№110、昭和45年3月
- 10) Y. Yamanouchi and A. Ogawa: Papers of S. R. I.、Supplement №2、1970

Table. 2.3.1

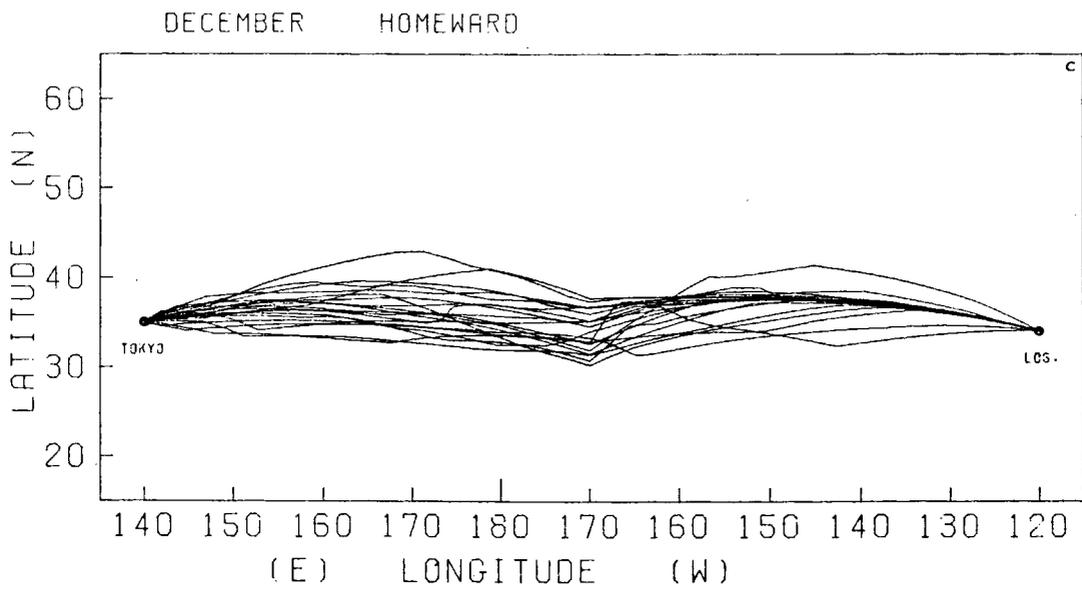
	往 航 (東京→ロス)					復 航 (ロス→東京)				
	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ	Ⓓ	Ⓔ	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ	Ⓓ	Ⓔ
航行日数の平均(日)	8.9	9.3	8.9	8.8	8.5	8.9	10.8	10.2	9.5	9.0
航程係数の平均	1.00	1.05	1.05	1.02	1.02	1.00	1.05	1.07	1.03	1.03
平均船速の平均(kts)	22.2	22.1	23.3	22.8	23.5	22.0	19.5	20.9	21.7	22.6
遭遇海象の平均(Beaufort)	3.9	4.2	3.7	3.7	3.5	3.9	4.6	4.1	3.9	3.5

Table. 2.3.2

	往 航 (東京→ロス)					復 航 (ロス→東京)				
	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ	Ⓓ	Ⓔ	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ	Ⓓ	Ⓔ
Nominal loss of speed	86.3	89.3	96.3	91.2	98.0	82.6	61.1	71.7	78.0	84.8
上下揺れの有義両振幅 ≦ 6°	2.9	3.6	0.8	2.0	0	1.6	7.5	5.3	3.0	1.6
横揺れの有義両振幅 ≦ 24°	0.2	0.8	0.4	0.5	0	0.4	0.2	0.3	0.2	0.2
F.P.の上下加速度の有義両振幅 ≦ 0.6 g	9.4	4.8	2.1	5.0	1.6	13.9	3.0	2.23	17.7	13.2
S.S. 8の横加速度の有義両振幅 ≦ 0.2 g	1.2	1.5	0.4	1.3	0.4	1.5	1.2	0.4	1.1	0.2

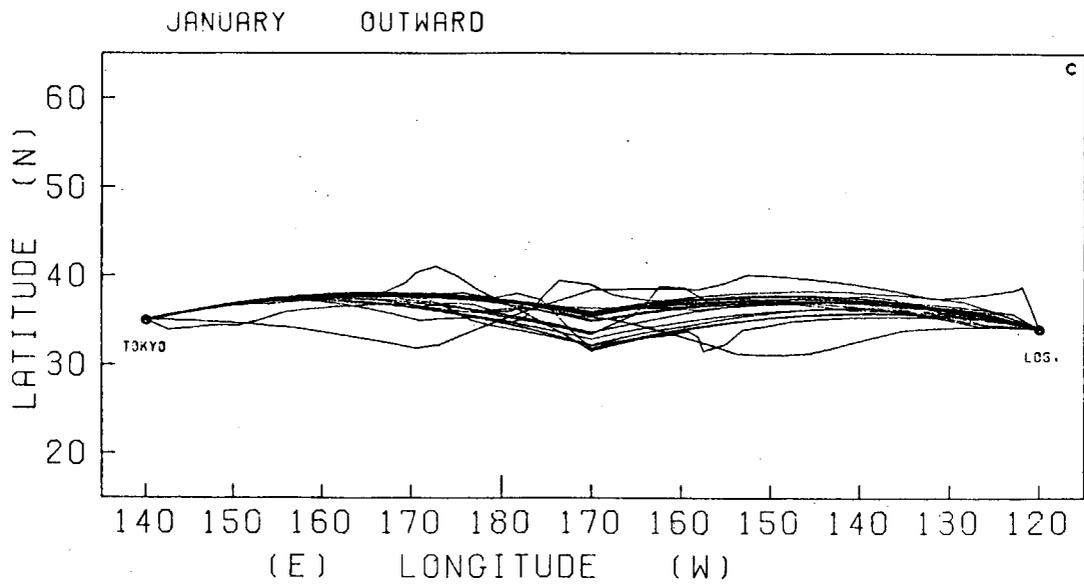


(a)

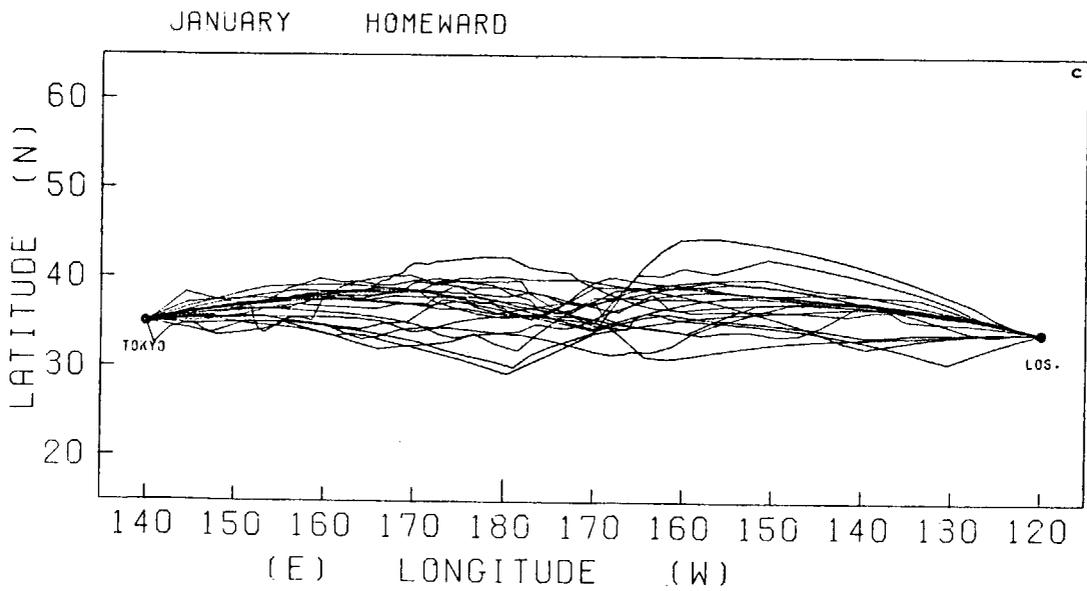


(b)

Fig. 2.3.1 航 跡

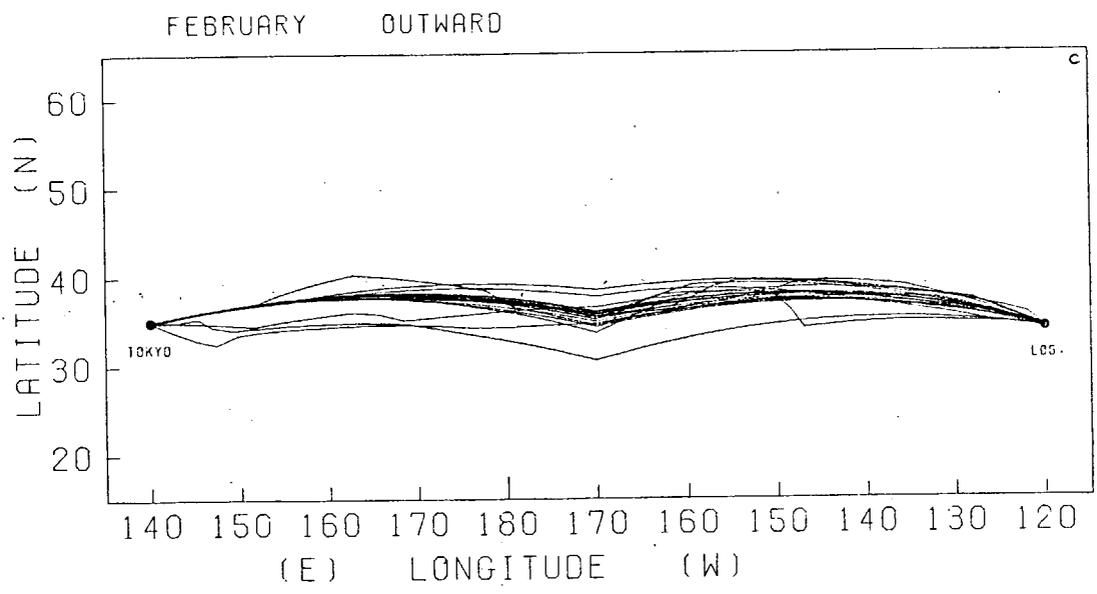


(c)

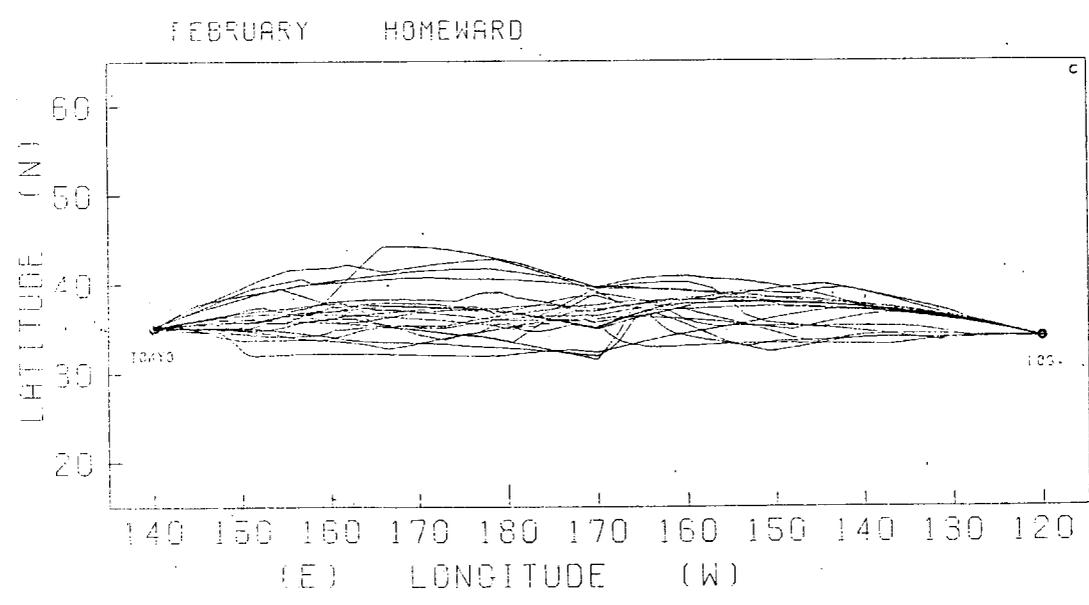


(d)

Fig. 2.3.1 航 跡

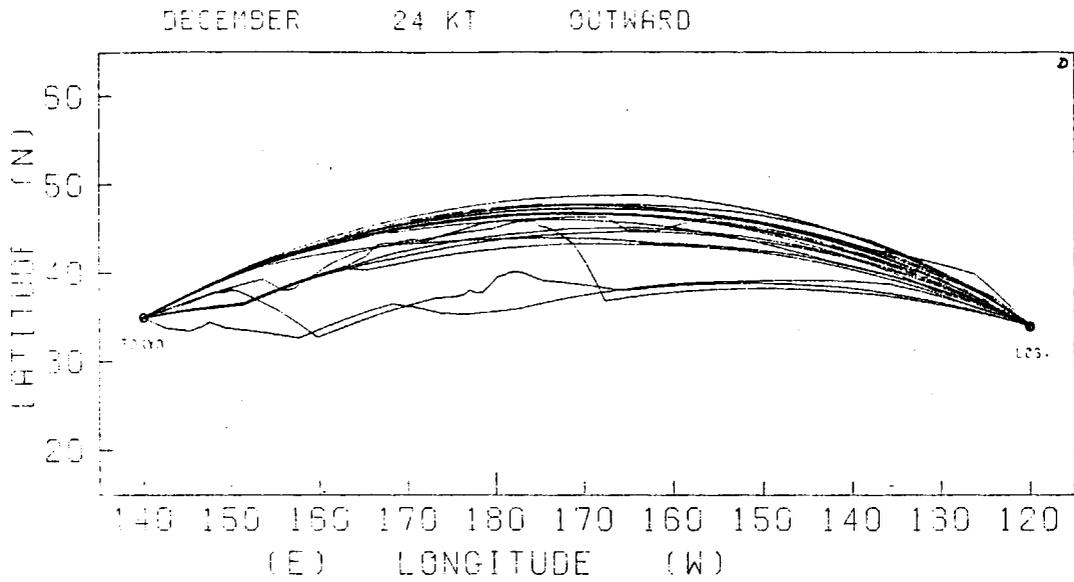


(e)

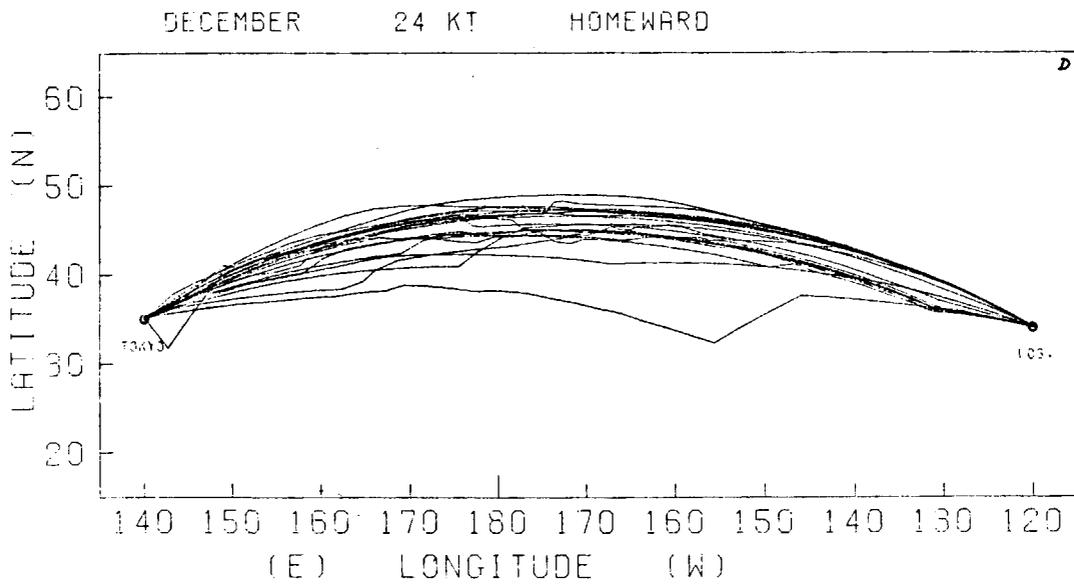


(f)

Fig. 2.3.1 航 跡

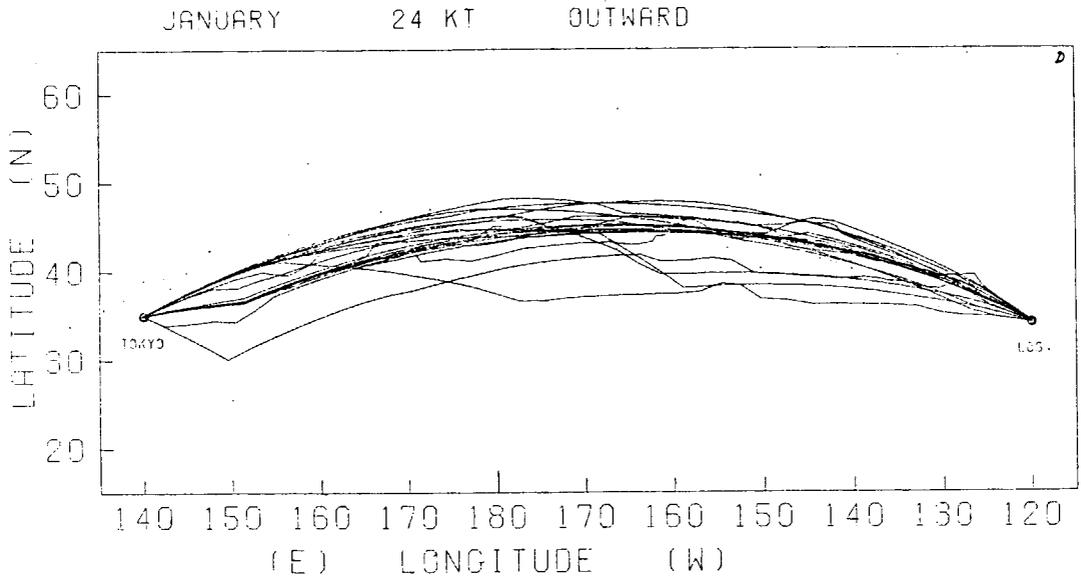


(a)

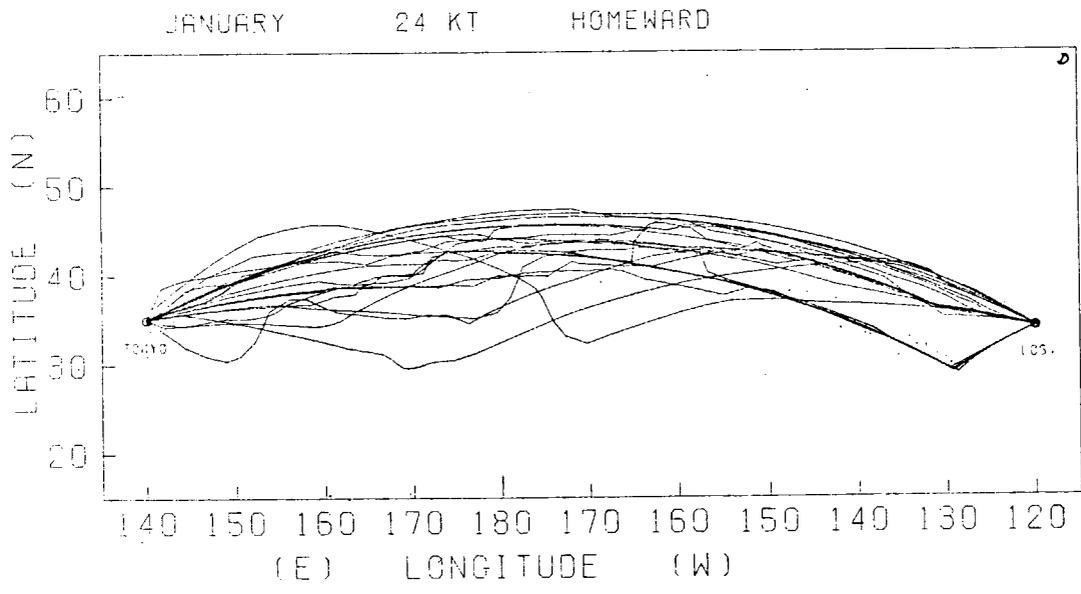


(b)

Fig. 2.3.2 航 跡



(c)



(d)

Fig. 2.3.2 航 跡

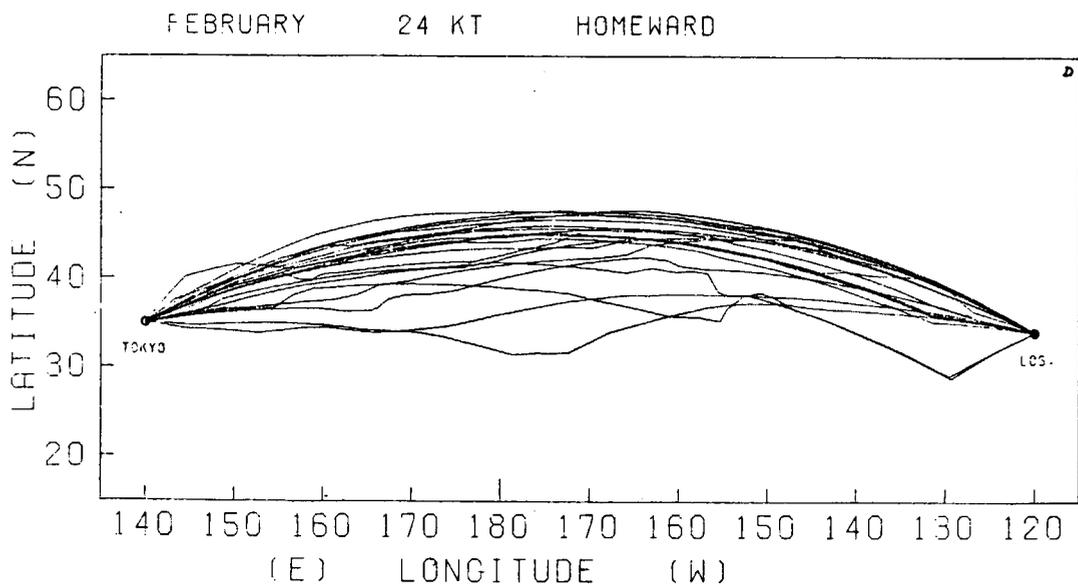
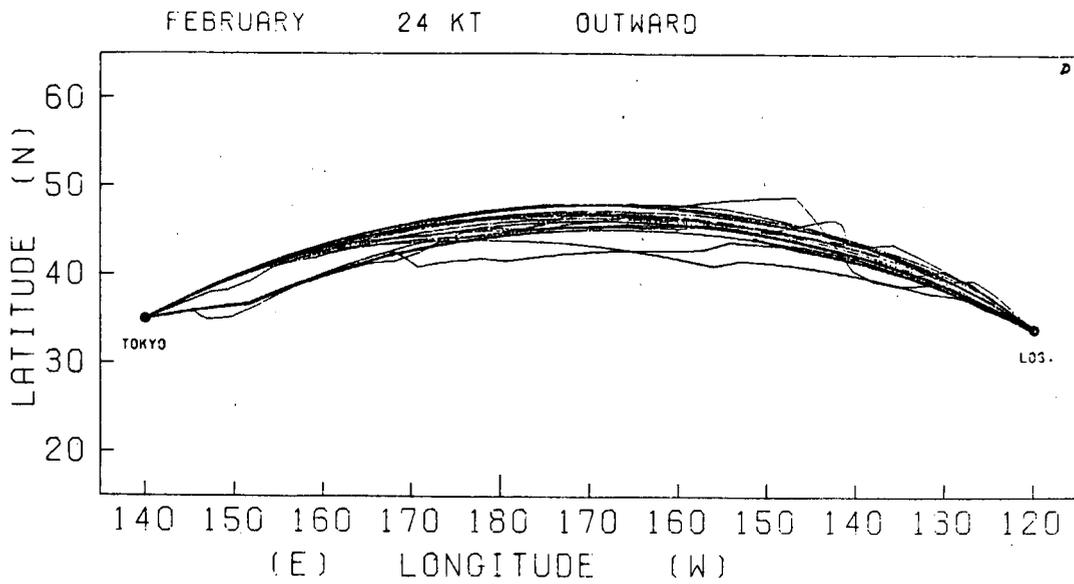
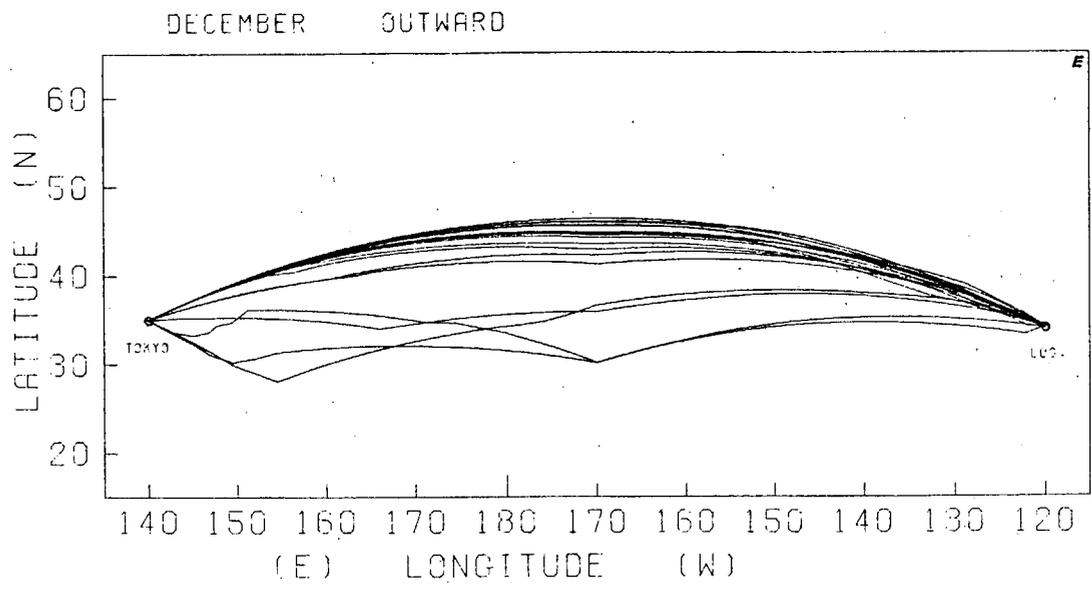
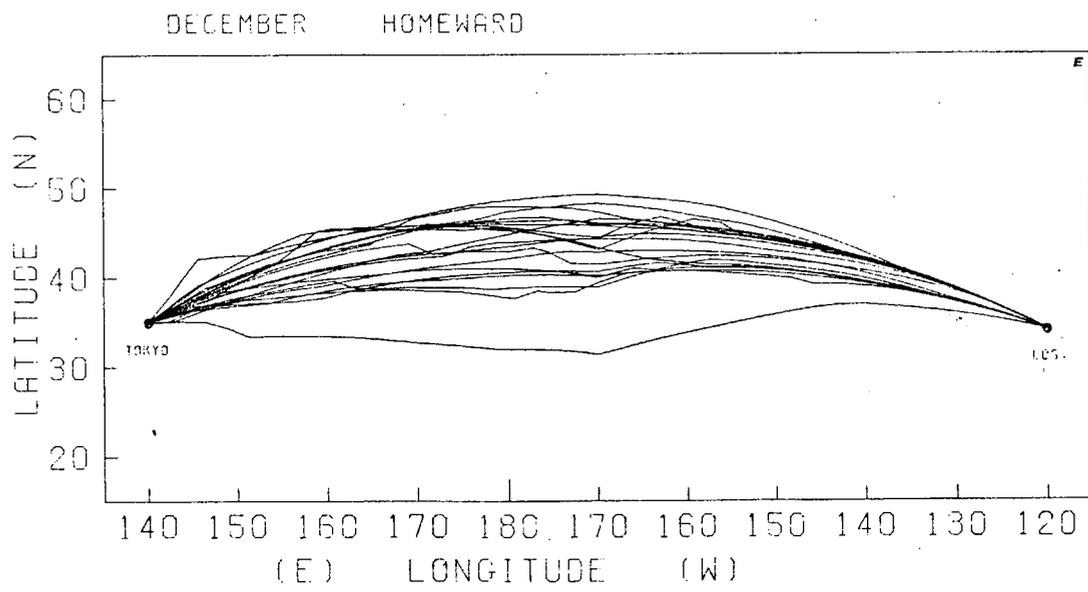


Fig. 2.3.2 航 跡

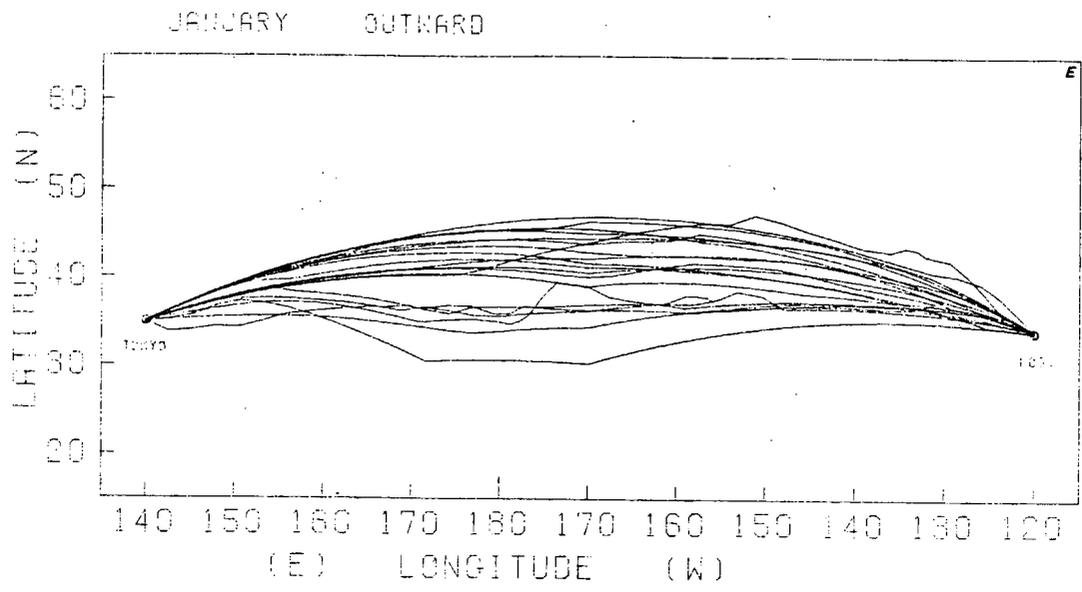


(a)

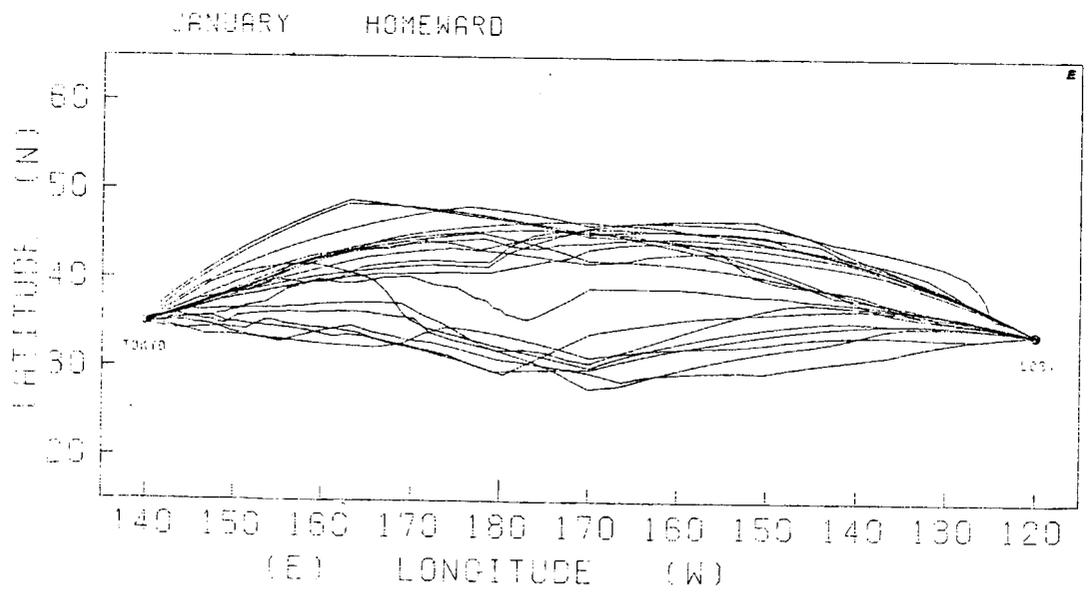


(b)

Fig. 2.3.3 航 跡

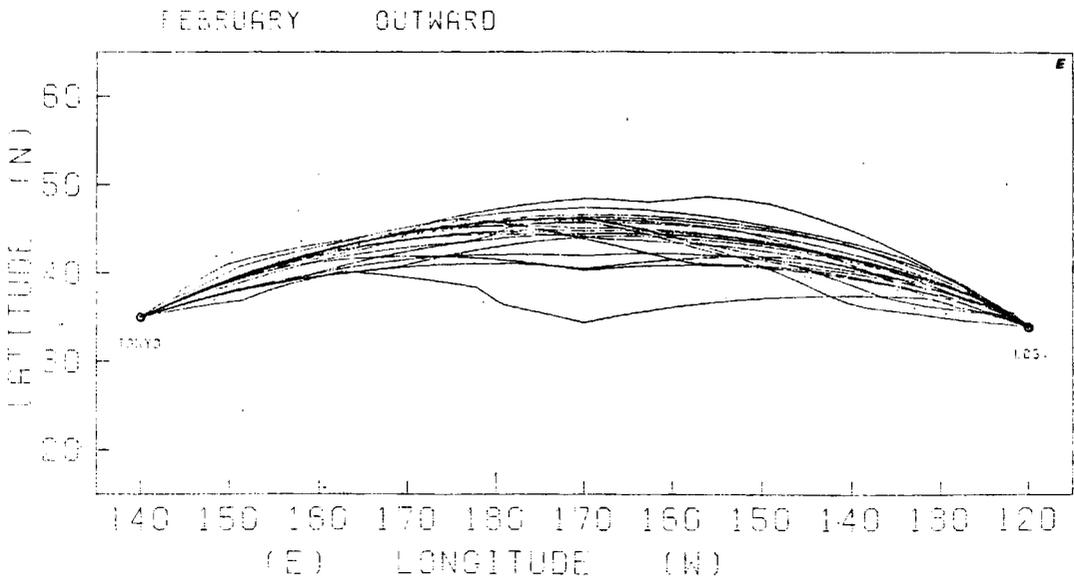


(c)

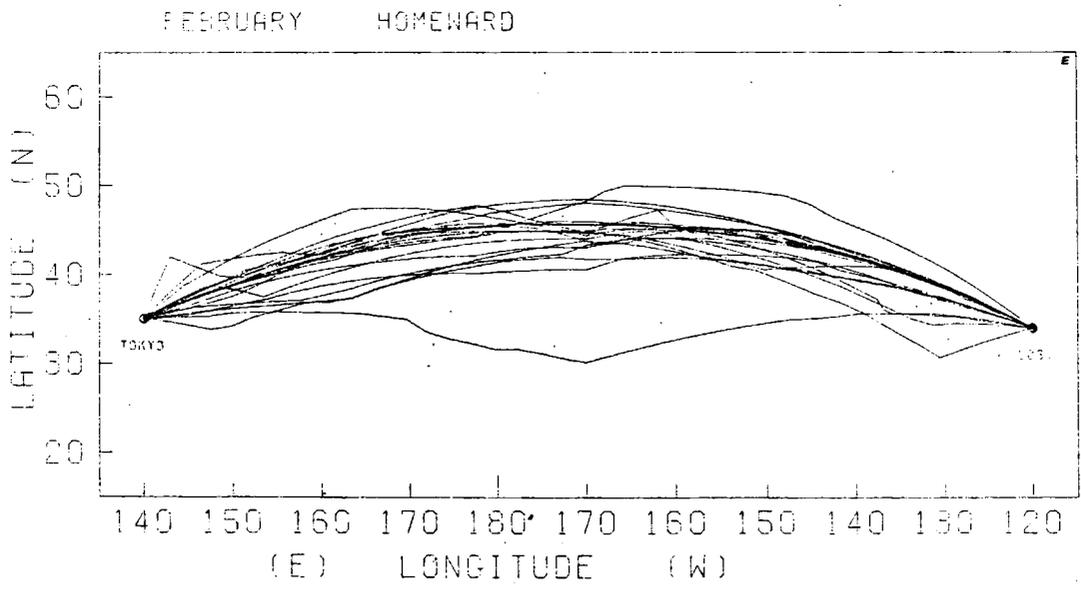


(d)

Fig. 2.3.3 航 跡



(e)



(f)

Fig. 2.3.3 航 跡

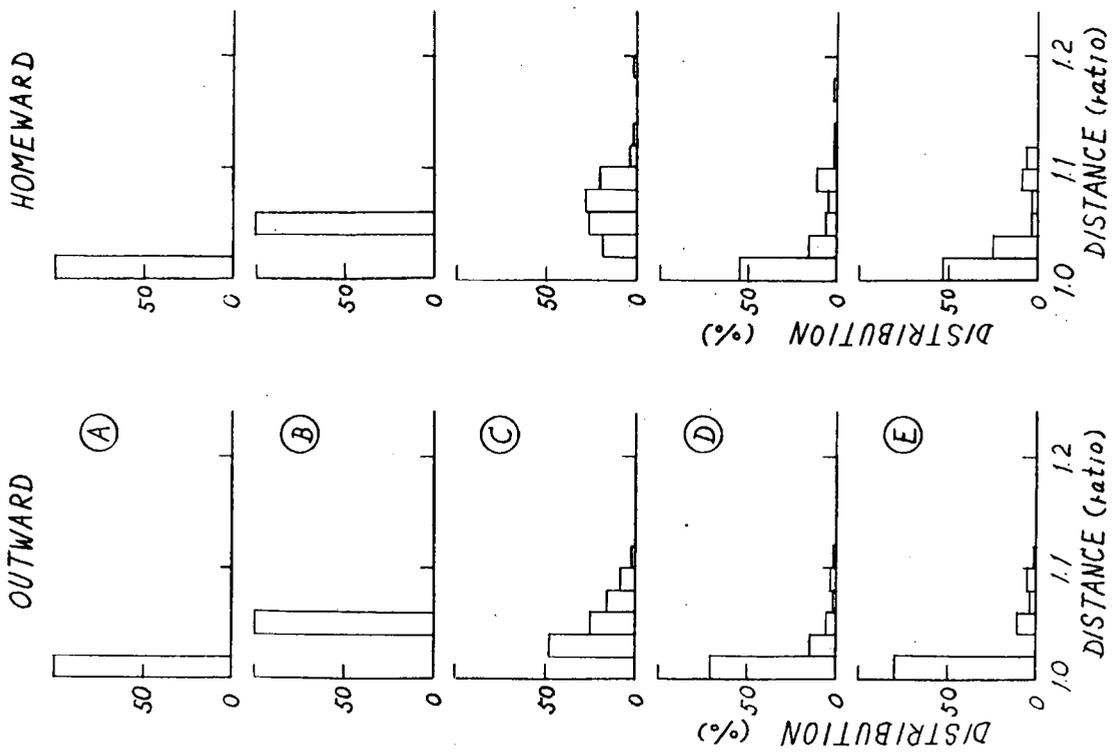


Fig. 2.3.4 航行日数

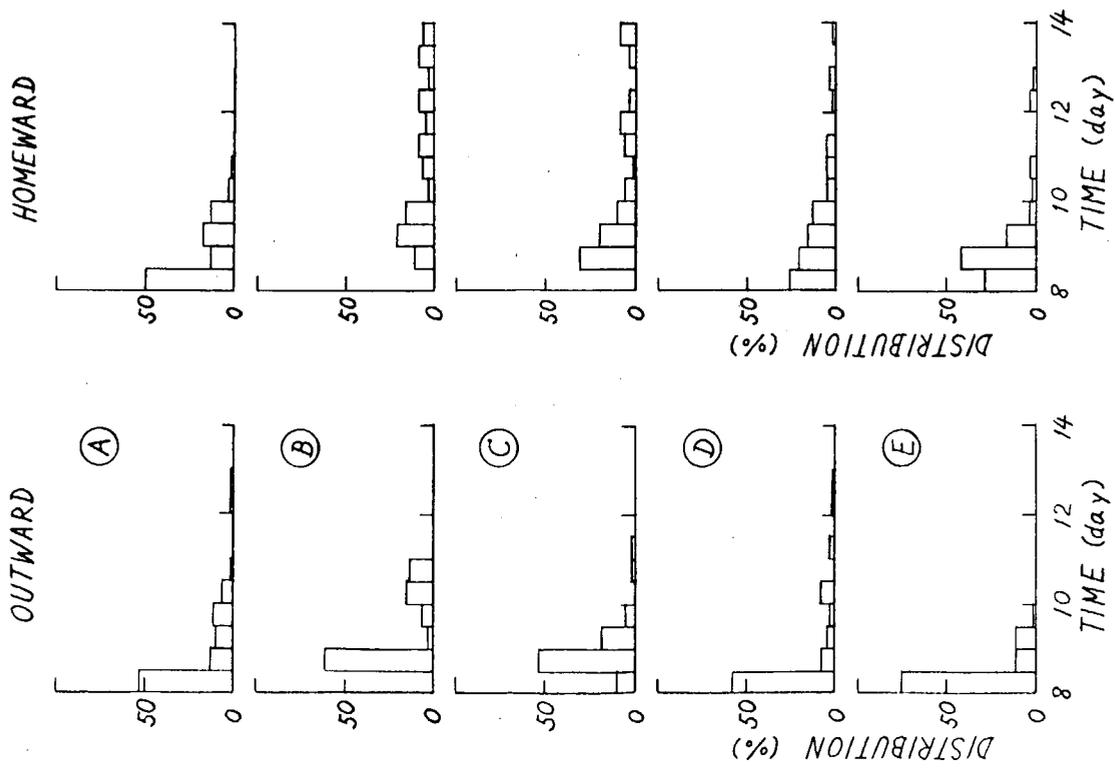


Fig. 2.3.5 航程係数

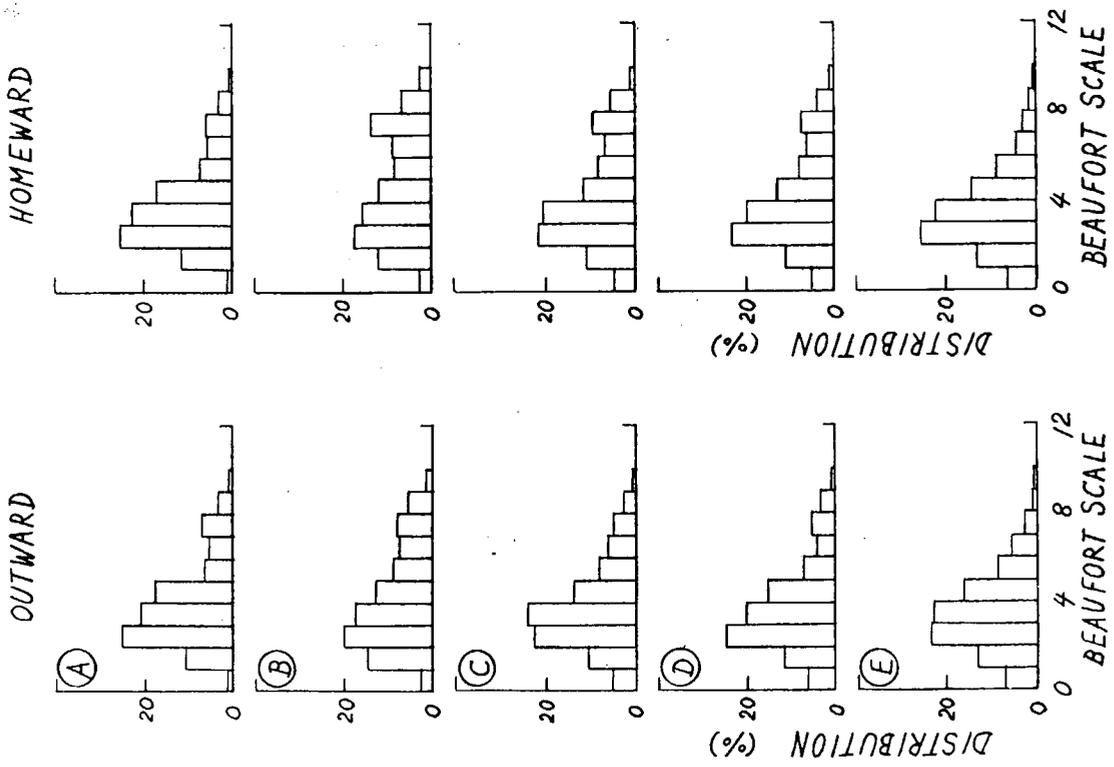


FIG. 2.3.6 平均船速

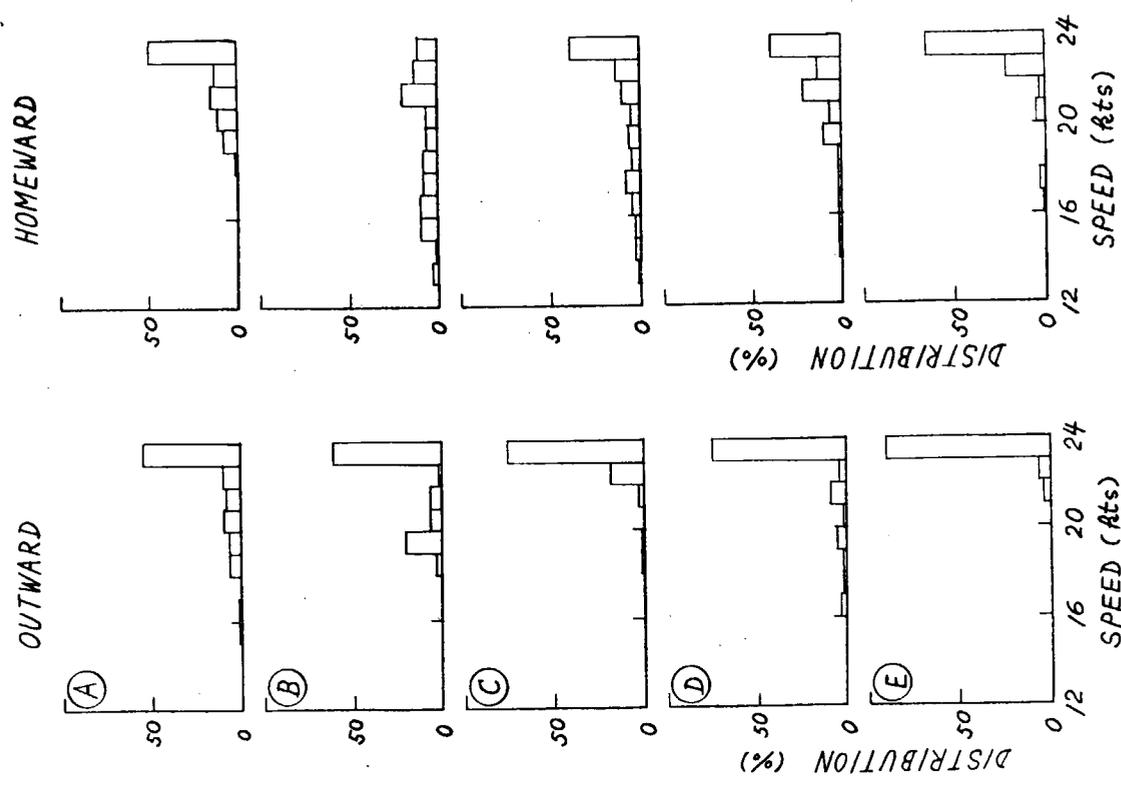


FIG. 2.3.7 遭遇海象

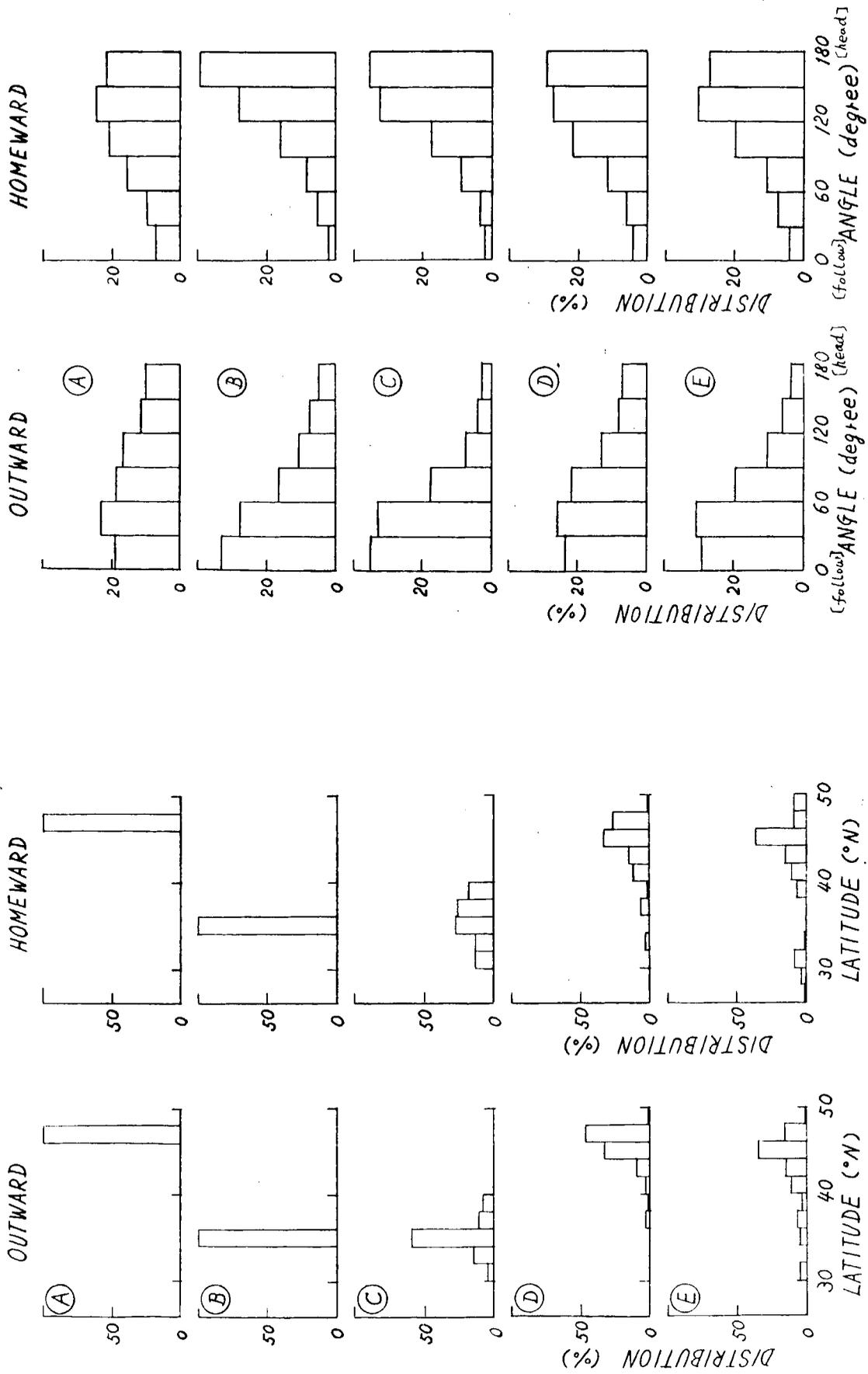


FIG. 2.3.8 170°W通過時の緯度

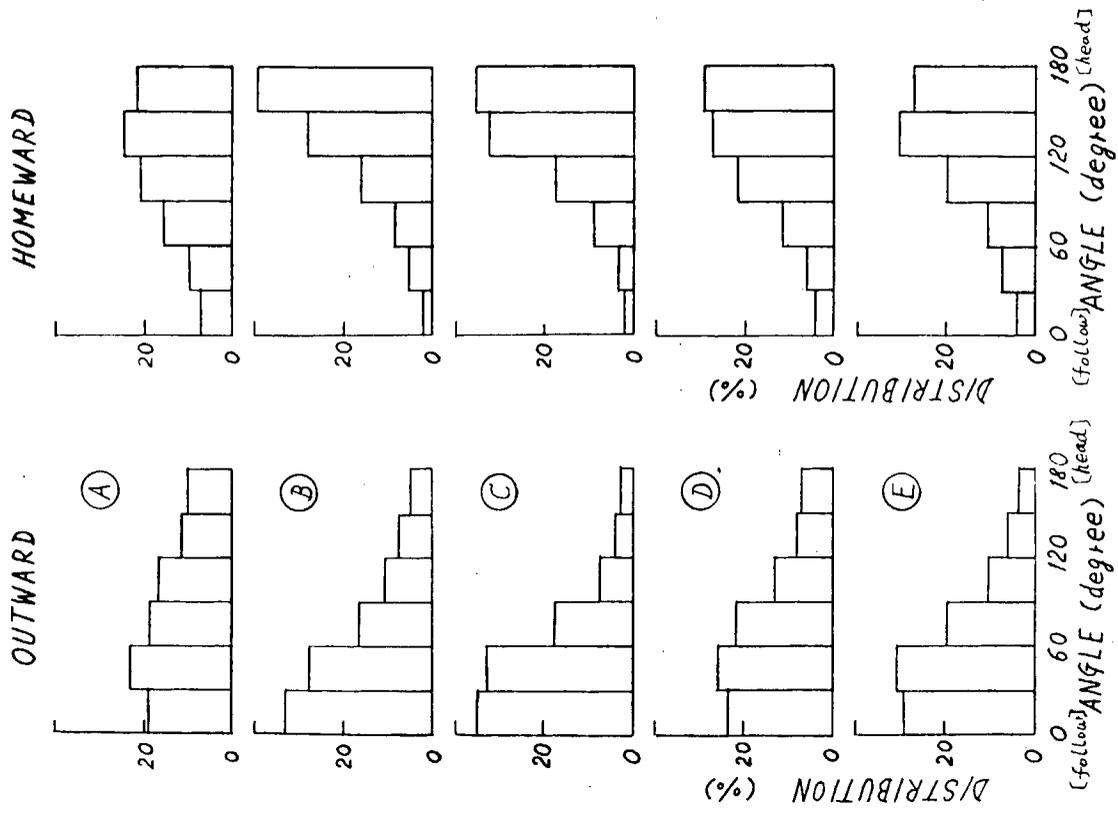


FIG. 2.3.9 船と波との出合い角

3. 模 型 実 験

3.1 斜め波中の波浪圧力

3.1.1 はし が き

高速コンテナ船型に作用する波浪変動圧力に関しては、これまで主に正面向い波について、様々な実験的理論的な検討が進められてきた。一般に斜め波中の波浪圧力に関しては実験設備等の制約もあって実験例は少い。今回、斜め波中を自由航走するコンテナ船に働く変動圧力を測定する実験を行なった。この実験の第一の目的は、斜め波中での船体表面上の変動水圧の定性的傾向を把むことにある。とりわけ高速で航行するコンテナ船にあって問題となる船首附近の変動水圧および衝撃水圧について詳細な実験的検討を行うことにした。

3.1.2 実 験

(1) 供試船型

SR108一軸コンテナ船型(高船首楼型)の5m模型を対象とし、実験時の喫水は満載喫水とした。動揺周期その他主要寸法等はTable 3.1.1に示す。

(2) 計測項目

計測項目は30種類である。その内、運動に関するもの7点、相対水位2点、圧力測定点20点、その他に造波機の作った波の記録1点である。

運動に関する計測値は、縦揺、横揺、重心位置での加速度2点(上下加速度、左右加速度)、船首揺、船首揺角速度および舵角である。相対水位変動はS.S. 8 $\frac{1}{2}$ とS.S. 5のWeather sideに容量型水位計を設けて計測した。取付方法をFig. 3.1.19に示す。圧力測定点の詳細位置はFig. 3.1.1、概念図はFig. 3.1.2に示すが、位置を定めるに当っては、水面附近の水圧振幅、長手方向の水圧振幅分布、船首部の水圧、代表2断面のGirth方向の水圧振巾分布などが計測できるよう配慮した。使用した水圧計は豊田工機製PMS-5M-0.5Hが大部分であるが、船首部衝撃波形成記録用に同社製THP-3型の圧力計も使用した。

(3) 実験状態

実験状態をTable 3.1.2に示す。表からもわかるとおり、規則波中の実験が大部分を占める。なお、上にも述べたごとく、船首フレア部に規則波中에서도衝撃的な水圧が観測されたため、圧力計を衝撃水圧計測に適したタイプに交換し、 $\lambda/L = 1.0$ 、 $\alpha = 180^\circ$ 、 150° 、 $F_n = 0.1 \sim 0.3$ の状態の実験を最後に附加した。実験は船舶技術研究所の角水槽でおこなった。

3.1.3 実験結果

(1) 運動、相対水位変動

Fig. 3.1.3~Fig. 3.1.7に本船型の航海速力にはほぼ相当する $F_n = 0.25$ の場合の、運動と相対水位の両振幅を示す。動揺振幅は最大波傾斜角の2倍で、加速度は重力加速度と波高船長比で、また、相対水位の記録は波高でそれぞれ無次元表示してある。この実験状態における各運動の同調周期は、横揺れでは3.10sec、縦揺れでは1.3sec、上下揺れでは1.2secである。運動の結果は、以前に得られた実験結果とほぼ一致しており、妥当な傾向を示している。運動の特徴としては、

- 横揺れが最大となるのは実験の波長の範囲では $\alpha = 60^\circ$ の附近であり、横波ではそれほど揺れない。
- 縦揺れが最大となるのは、 $\alpha = 180^\circ$ または、 150° の近辺である。
- 重心の上下加速度の最大値は、出会角 $\alpha = 180^\circ \sim 90^\circ$ の間であまり変わらず、たゞ最大値の現れる波長がずれるだけである。

相対水位変動の両振幅はS.S. 8 $\frac{1}{2}$ とS.S. 5(Midship)のWeather sideでの計測値を示したものである。ただし、Fig. 3.1.19にも図示してあるが、水位計は船体表面に沿わず、直線的に張り渡したため、水線面で船体よ

り、10cmほど離れている。したがって、船体によって引起される局部的攪乱の入り方が幾分少なく船体表面での水位とは若干異なった内容を示すと思われる。

相対水位変動は運動と入射波の位相関係によって規定されるため、振巾の比較だけでは支配的な運動との対応が一見明らかではないが、位相の関係も含めて若干の考察を加えると次のようなことが言える。

- (d) S.S. $8\frac{1}{2}$ での相対水位変動は縦波とそれに近い斜め波中では縦揺れと関係が強い。 λ/L が大きくなれば船体は波面に沿った運動をして相対水位を減少させ、 λ/L が小さくなれば船体はほとんど運動せず、波面が船側に沿って過ぎる等のことを考慮すれば両者の振巾の曲線は関係づけられる。

横波かそれに近い斜め波中では λ/L の小さい場合、船体による波の攪乱成分が大きく影響するので、両者の関連はそれほど明らかではない。

- (e) S.S. 5での相対水位変動は、 λ/L の小さい所は船体による波の攪乱成分と関係がある。 λ/L の大きい所、とりわけ $\alpha = 60^\circ$ の斜め追波中では横揺れとの相関がある。そして、船体中央部でも波長と出会角によっては、波高の3倍に達する相対水位変動(両振巾)が起ることが注目される。

Fig. 3.1.8に縦揺れの激しい点の近傍での相対水位および水圧変動を速度に対して描いてある。運動と相対水位の関係から言えば、縦揺れは速度によってそれほど変化しないにもかかわらず、S.S. $8\frac{1}{2}$ での相対水位、水圧変動は大きくなる。これは、入射波と縦揺れの位相差が速度によって変化し相対水位変動に影響するからである。また、相対水位と水圧変動の速度に対する対応が若干異なっているが、この点については後に触れる。斜め追波状態における横揺れ同調点附近での横揺れと相対水位の記録は比較的傾向が良く合っているようである。

また、相対水位と船側の水位変動とは、高速の点を除いて、一般によく一致している。

以上の事から相対水位変動、水圧変動等と運動の関係を考える際、振巾だけでなく位相的な関係を考慮する必要がある。

(2) 変動水圧

はじめに、ここで用いた変動水圧の両振幅を定義する。船側の水面附近で記録されるのは、Fig. 3.1.9に示すようなタイプの波形が多い。この場合には、 t_a と t_b が等しい線をMean lineと定めて、上半分の極値を振幅とし、その二倍を両振幅Pとした。

まず、代表的な計測点の $F_n = 0.25$ の時の変動水圧両振幅と λ/L との関係を示す。Fig. 3.1.9はS.S. $8\frac{1}{2}$ 船側Weather side ⑤ (Fig. 3.1.2 参照) の、Fig. 3.1.10は同じ断面の船底中心線上⑦の圧力変動である。全体の傾向は両者で異なり波長の長い所では斜め向波中で船底の方が圧力が大きく、波長の短い所では船側の圧力がかなり大きい。これは波長の短いところでは船体動揺が小さく圧力に寄与するのはIncident waveとDiffracted waveが大部分であり、それらは深さ方向の減衰が早いことを考えれば、船底への影響が小さくなるのは当然である。事実、相対水位の記録との対応は水面附近の圧力変動の方が良く、船底での圧力は、それを減衰させたような値となっている。運動のはげしい、波長の長い場合は船底の水圧の方が相対水位に対応しているようであるが、これは波長の長いところでは水深に対する波の減衰が小さいこと、また水面附近の波形が大振巾の動揺で乱されることなどが理由として考えられる。Fig. 3.1.11と12はS.S. 5断面上の二点の水圧変動を示す。前者はWeather side水線面附近の点⑩、後者は船底中心線上の点⑤である。Fig. 3.1.11と相対水位の記録は或る程度良く対応しているが、⑩とは異なり船底の値は総体的に小さい。以上のことから次のようなことが言える。

- (a) S.S. $8\frac{1}{2}$ の圧力変動の大きいところは縦揺れの影響が支配的である。短い波長では船体による攪乱波の影響も大きい。この場合は水線附近だけしか影響を与えない。
- (b) S.S. 5の船側部分に作用する大きい圧力変動は波長の大きいところでは横揺れと関係が強い。波長の短いところでは船体による攪乱の影響が大きい。船底はこれと異なり、上下動によって規定されるようであるが、その値は小さい。

船長方向の分布

Fig. 3.1.13からFig. 3.1.18は船側(7cm水面下)での水圧変動の船長方向分布を $F_n \approx 0.25$ について示したものである。また、各図の下半に示したのは、代表的な運動との位相差の船長方向の変化である。 $\alpha = 180^\circ$ から 90° までは縦揺れとの位相差($\epsilon_{p\theta}$)、 $\alpha = 60^\circ$ 、 30° では横揺れとの位相差($\epsilon_{p\phi}$)を示した。向い波中では、出会角一定とすれば、ほぼ縦揺れ最大の波長の所で分布の値も最大となる。出会角が小さくなるにつれて、船体中央部の変動値が相対的に次第に大きくなり、斜め追い波中ではS.S.5の船側に最大振幅が来る。

位相差に関して考察すると波長が短くて船体運動が小さい所では、ほぼ船長方向に直線的な変化をする。しかし、向い波の波長が長い場合、運動が激しくなると、位相の変化は緩やかになり、船首近傍は π の位相差を持つようになる。この事は縦揺れの符号を船首上げを正と定めたことによるもので、これからも船首附近の圧力が縦揺れと関係深いことがわかる。一方追い波での横揺れとの位相差は、横揺れの小さい所では直線的に位相がかわる。横揺れが激しい点では、船長方向の位相差はほぼ零に近づき、フラットとなり横揺れによって圧力が規定されることを示している。

船長方向の水圧変動分布と運動に対する位相差の傾向をまとめると次のようになる。

- (a) 縦揺れが激しくなるにつれて、圧力変動の激しい領域が、船首部からS.S.7附近まで広がる。変動の大きさは両振幅で $P/\rho gh_w = 2$ 以上である。船首附近の変動水圧の位相は縦揺れのそれにほぼ一致する。
- (b) 横波から追波状態にある場合は、変動最大となる点は船体中央部になる。変動の両振幅は $P/\rho gh_w = 2.0$ 程度で、位相は横揺れと等しい。

Girth方向の分布

Fig. 3.1.20からFig. 3.1.25にS.S.8 $\frac{1}{2}$ とS.S.5の断面上で測定した水圧変動の分布を示す。横軸の α と船体表面位置の対応はFig. 3.1.19に図示したとおりで、BottomのCenter lineが 90° 、Weather sideのWater lineが 0° となるような角度を取った。計測値全体を通して、水線部と船底中央の間にピークを持つような分布形状が多い。特にS.S.8 $\frac{1}{2}$ にこの種の形状が多い。両振幅の定義になお考慮すべき余地もあるように思われるが、船側で記録された波形自体が頭のつぶれた台形に近い波形になっていることが確かめられているので、何らかの現象に対応する結果だと思われる。

分布形状の波長に対する変化は λ/L が大きくなるにつれ、断面上全体的に変動が増していく。S.S.8 $\frac{1}{2}$ の分布では水線附近での落ち込みが大きくなっていく。やがて分布は最大となり、それより長い波長では、逆に小さくなっていく。分布が最大となる点はS.S.8 $\frac{1}{2}$ では縦揺れ最大の波長に対応する。S.S.5では波長による変化はそれほど極端ではないが、 $\alpha = 180^\circ$ の場合には比較的目立つ変化をする。この場合、 $\lambda/L = 1.0$ で最大振幅になるが、これは縦揺れより上下動による寄与と思われる。

出会角を変えた時の、S.S.8 $\frac{1}{2}$ とS.S.5の変化は対照的である。斜め向い波から、横波に移るにつれて、S.S.8 $\frac{1}{2}$ の分布は平坦化されるのに対し、S.S.5では船側Weather sideに大きな変動が生ずるようになり、その大きさは $P/\rho gh_w = 2.0$ 程度である。追波に変わってもこの傾向は続くが、船側水面下にあった変動のピークは次第に消えていく。しかし、斜め追波中でも水線附近に動く変動は横波中とあまり変らない大きさである。

波長の変化に対する分布形状の変化はS.S.8 $\frac{1}{2}$ の方が大きい。波長の短い所では、Weather sideに圧力変動の大きな部分が存在するが、船底、Lee sideにはあまり圧力変動はない。

波が長くなれば、断面上の各点とも、同じ程度の圧力変動が生ずるようになる。S.S.5ではS.S.8 $\frac{1}{2}$ ほど極端ではないが同じ傾向を持つ。ただし、平均化される変動のレベルはS.S.8 $\frac{1}{2}$ より大分小さい。

Fig. 3.1.26に船側変動水圧の船長方向分布とS.S.8 $\frac{1}{2}$ におけるGirth方向圧力分布の速度に対する依存性を示した。低速ではS.S.7 $\frac{1}{2}$ から後部は、ほぼ同程度の変動幅を持つが、速度が増大するにつれて、変動の大きい領域が次第に広がり、やがてS.S.7 $\frac{1}{2}$ 附近に変動の大きさの等しい領域が形成される。S.S.8 $\frac{1}{2}$ の分布の変化は、速度の増大とともに平坦な分布形から、山を持った分布形へと移行していく。これら速度による変化はFig. 3.1.13、20等もあわせて考

えれば、運動と入射波の位相差が速度によって変化するためと理解するのが妥当だと思われる。

(3) 船首フレアの衝撃水圧

ここでは規則波中における船首フレア部に働く衝撃的な水圧について述べる。

まず、Fig. 3.1.27～Fig. 3.1.31に船首Stemと上甲板の交点附近の水圧計①により測定した記録を配列した。ピークは、大部分は2ヶ連続して示すが、第1のピークの立ち上がりのところの F_n の値が、そのときの速度を示している。この記録に用いた圧力計は、変動圧用のものであり、しかもその出力をテレメーターで送信し、かつペン書きオシロに記録したので、波形記録の忠実性にはやや問題があると考えられる。しかし、比較的正確に波形を記録していると考えてよい後述の船載の電磁オシログラフの記録と比較したところ、ピークの高さが前者がやや高めであるという程度であった。そこで、定量的に精密な比較検討には問題があるとしても、全般的な傾向を定性的に見ることは差支えない。

この記録から次のような傾向がうかがわれる。

- (a) 急激な立ち上りを示す先端の尖ったピークの高さは、この速度範囲では、波長や出会角にかかわらずほぼ船速によって直線状に増加する。
- (b) $F_n = 0.25$ 附近で最も大きい値を示すのは $\lambda/L = 1.0 \sim 1.25$ の向波中である。
- (c) 波長が短くなると斜め向波の方が向波中より大きい値となる。Fig. 3.1.32に水圧のピークの値が波高の2倍以上となった範囲を示す。これによっても上記の(c)の点が明らかである。Fig. 3.1.33にはストリップ法による計算により求めた水圧計の位置の相対水位変動を示す。これはFig. 3.1.32とはかなり異なった傾向を示しており、衝撃的な水圧の大きさを推定するためには相対水位変動のほかの要素も考慮する必要があることを示している。

ついで、実験により得た水圧波形を電磁オシログラフの記録で考察する。Fig. 3.1.34およびFig. 3.1.35に波形記録をそのまま重ね合わせて示す。これにより船速の変化による波形の移り変りを見ることができる。Fig. 3.1.36に出会角が変化したときの波形を比較してある。

これらの図にはS.S. 9 $\frac{1}{2}$ の水面上の点②での水圧記録も示されているが、どの場合でも水圧の大きさはせいぜい波高と同じオーダーであり、船首部に比べて小さい。

Fig. 3.1.37に示すようにこれらの波形をを解析し、ピークの高さ h_1 、 h_2 圧力の持続時間 τ_1 、縦揺れとの位相差 ϵp などを求めて、船速(F_n)に対して示すとFig. 3.1.38のようになる。この図から次のようなことがわかる。

- (a) 船首衝撃圧のピークの高さは船速に従って直線状に増加している。S.S. 9 $\frac{1}{2}$ のピークの高さはS.S. 8 $\frac{1}{2}$ の相対水位変動と似た傾向を示す。ピークの高さは前者では波高の3倍程度、後者では波高と同じ程度の大きさである。
- (b) 持続時間はほぼ一定か、あるいは船速が大となるに従ってわずかに減少気味である。その値は前者で0.4秒、後者で0.35秒程度である。
- (c) 縦揺れに対する位相差を見ると、衝撃のピークの起る位相は船首を下げきった時点より $\pi/4$ 程度進んでいる。
- (d) 衝撃のピークの立ち上がり時間は船首の点において約30ミリ秒のオーダーであった。

3.1.4 む す び

本章においては、主として斜め規則波中における船体表面に働く変動水圧に関する模型実験の結果を述べた。前半では水線下の変動水圧について、圧力と相対水位あるいは船体動揺との関連、船側水面直下の圧力の船長方向分布、代表的な2つの断面における圧力のgirth分布などを、出会角、波長、船速などをパラメータとして考察した。船体動揺との関連では単に振幅だけでなく位相も含んだ考察が必要である。すなわち、船首S.S. 8 $\frac{1}{2}$ 附近の変動水圧は向波、斜め向波中で大となるが、これは縦揺れに支配され、また、この時の船体中央部S.S. 5附近の変動水圧は上下揺れに支配される。斜め追波の短波長の場合、S.S. 5の船側部に波高の2倍の変動水圧が出るが、これは船体動揺のほか、波のDiffractionがきいてくるためである。

後半では水線上の船首フレア部に働く衝撃的な水圧について、大まかな考察をおこなった。計測された記録は衝撃

といっても立上りが鋭い鋸歯状波形を示すに過ぎないが、その解析から、船首 Stem では波高の3倍程度、S.S. 9 $\frac{1}{2}$ では波高程度のピーク値が出たこと、ピーク値は縦揺れの船首下げが最大となる時点より $\pi/4$ 程度位相が進んで現れたこと、立上り時間は30ミリ秒程度であったことなどが明らかになった。

以上のように今回は実験データをもとにして船体表面の圧力の定性的な傾向を概観するにとどまった。

今後は、変動水圧に関する理論計算との比較、不規則波中における水圧と規則波中の水圧との関連づけ、衝撃的な水圧に対する理論づけなどをおこない、本実験結果の実際への適用をはかりたい。

Table 3.1.1 供試船型主要目 (M14000)

Item	Model Ship	Actual Ship
L_{PP} (m)	5.00	175.00
B (m)	0.7257	25.40
D (m)	0.44	15.40
d (m)	0.2714	9.50
∇	563.0 kg	24,119.227 (m^3)
C_B	0.5717	0.5717
C_P	0.5894	0.5894
C_W	0.7108	0.7108
$C_{\bar{M}}$	0.9700	0.9700
l_{CB} (m)	0.041	1.417
L/B	6.89	6.89
B/d	2.67	2.67
KG (m)	0.272	9.52
GM (m)	0.0284	1.00
T_R (sec)	3.09	18.28
K_l	0.239	0.239
K_t	0.382	

K_l : longitudinal radius of gyration / L_{PP}

K_t : transverse radius of gyration / B

Table 3.1.2 実験状態

1. 変動水圧測定実験

規則波						
波長 (λ/L)	0.35	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
波高 (h_w/L)	1/50	1/35	1/35	1/35	1/35	1/35
出会角 (α)	180°	150°	120°	90°	60°	30°
船速 (F_n)	0.1~0.3の間 6点から10点					

不規則波	ISSC スペクトラム ただし、実船換算の値で表示してある。	
有義波高 (H_v)	7.1 m	5.3 m
平均周期 (T_v)	10.3 sec	9.0 sec
出会角 (α)	180° 150° 120°	180°
船速 (F_n)	0.15~0.3の間(4~6点) 1ケース3回航走	

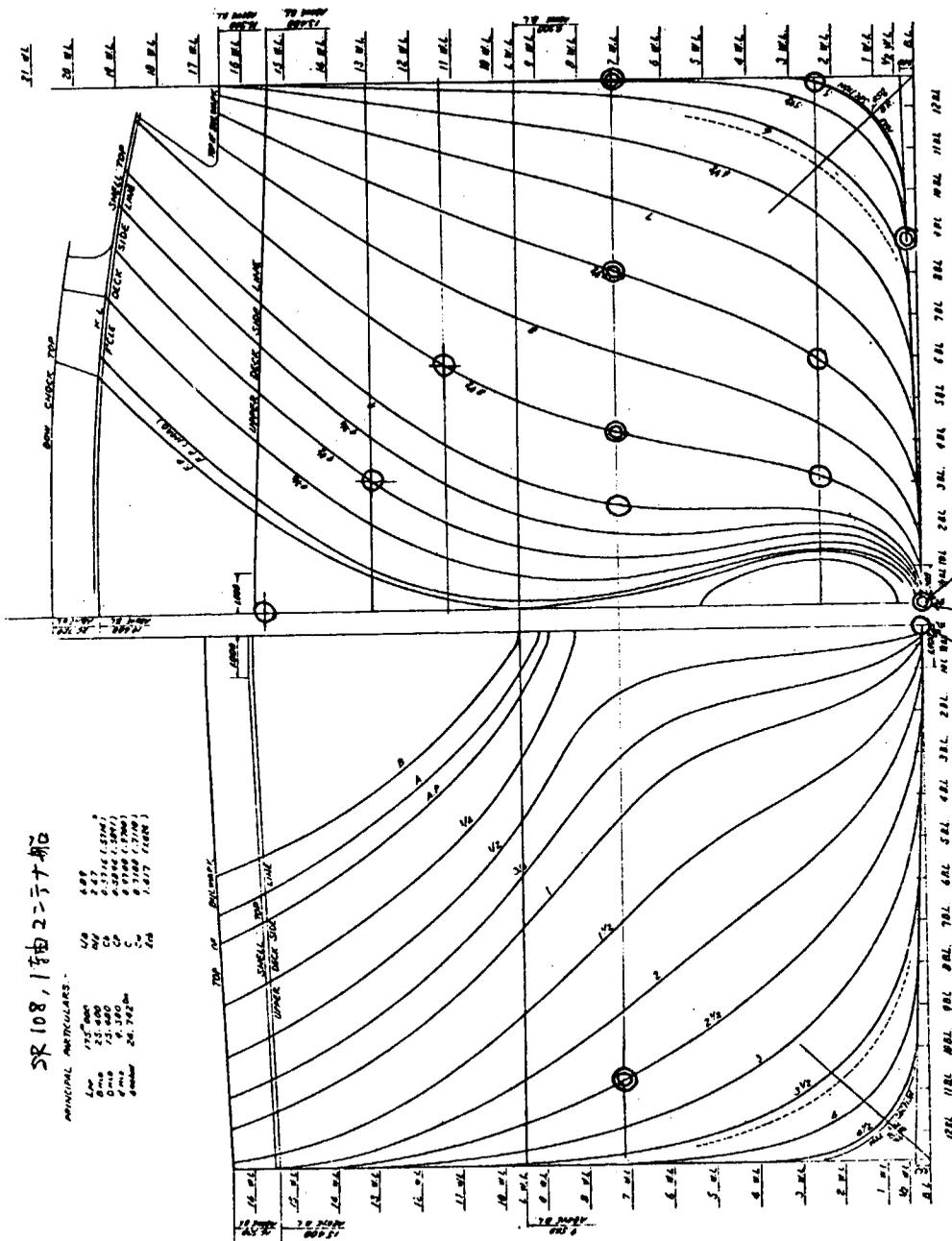
2. 衝撃水圧測定実験

規則波	
波長 (λ/L)	1.0
波高 (h_w/L)	1/35
出会角 (α)	180° 150° 120°
船速 (F_n)	0~0.3 6点程度

SR 108, 1軸2コンナ航

PRINCIPAL PARTICULARS:

Len	172.000	4.89
Bread	23.000	6.75
Displ	12,500	2,516 (LSM)
Area	12,500	2,506 (SM)
Area	24,742	5,108 (SM)
		1,017 (LSM)
		70

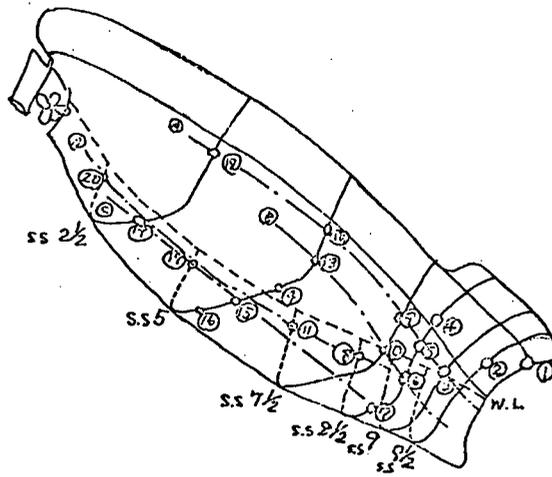


{ 2½, 5, 8/2 }
BODY PLAN

○ 氷圧計取付位置 (Weather Side)

◎ 全上 (兩舷)

Fig. 3.1.1 圧力測定点の分布



--- は同一水深の系列圧力計位置

① : 水面下 7cm (Actual 2.45M)

② : 水面下 20cm (7M)

③ : Bottom Center line上

④ : Stem 水面上 16.3^{cm}

⑤ : 9 1/2 水面上 10^{cm}

Fig. 3.1.2 圧力計取付位置概念図

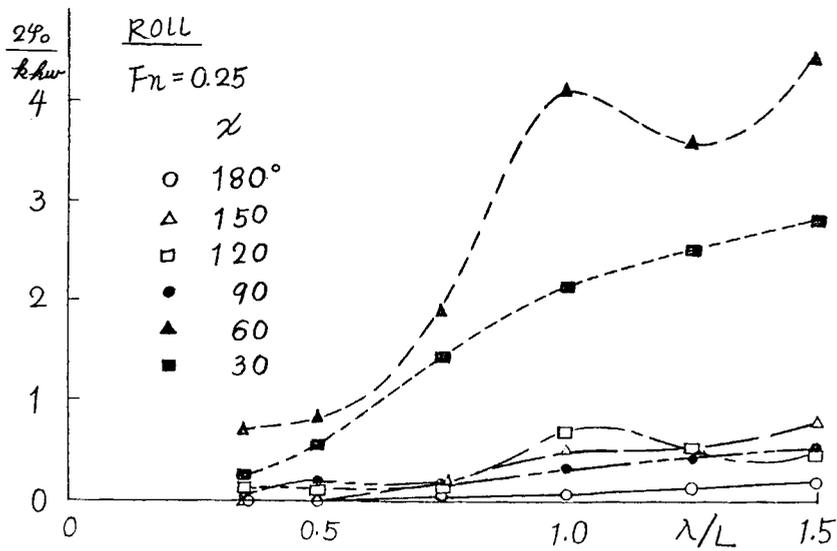


Fig. 3.1.3 横揺れ振巾

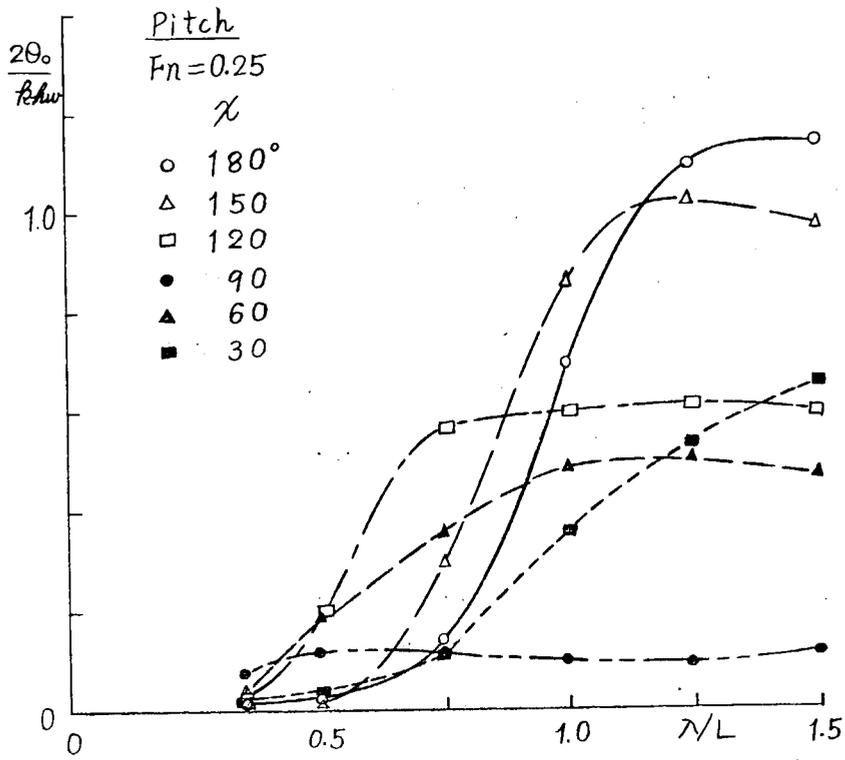


Fig. 3.1.4 縦揺れ振巾

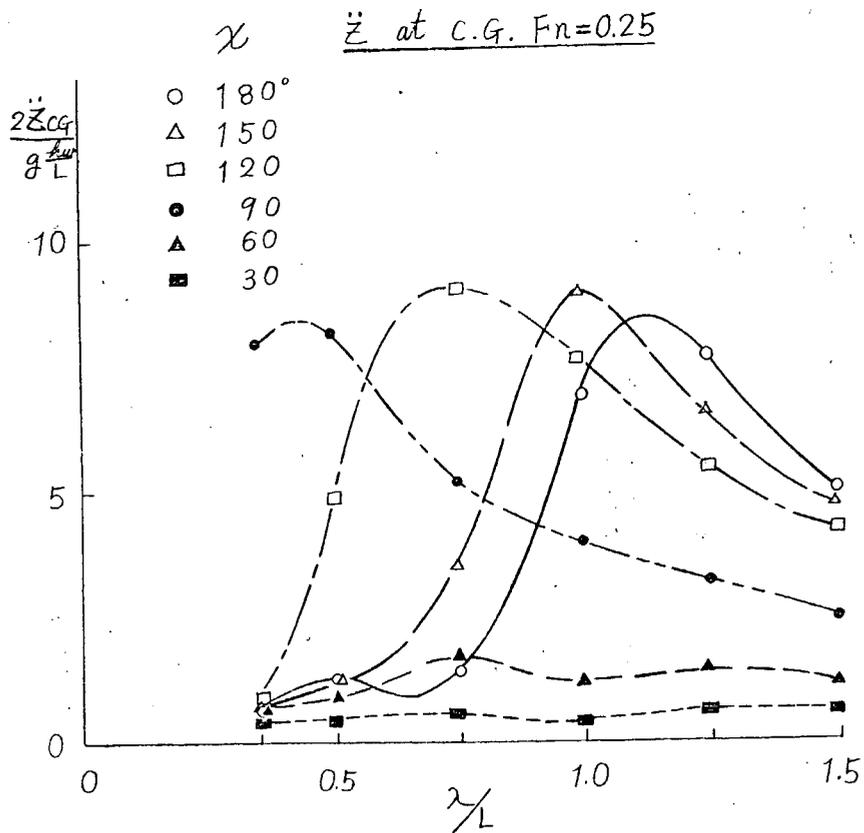


Fig. 3.1.5 上下加速度(重心位置)振巾

Rel. Wave Height (SS 8½)

$Fn = 0.25$

- χ
- 180°
 - △ 150
 - 120
 - 90
 - ▲ 60
 - 30

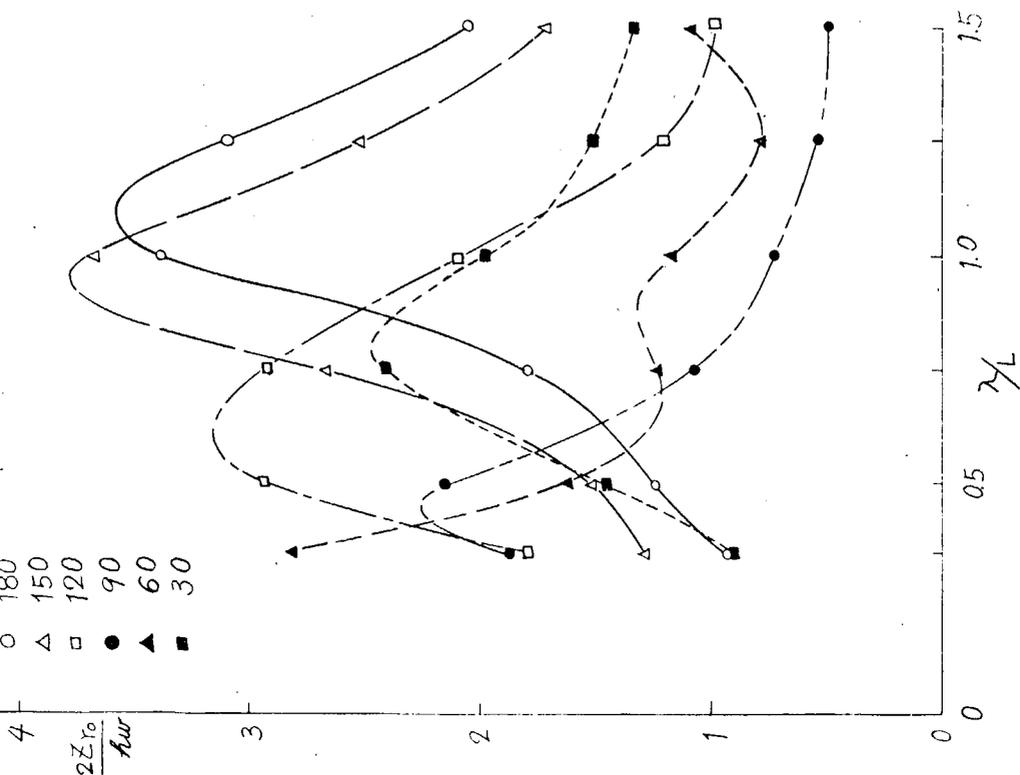


Fig. 3.1.6 相对水位变动 (SS 8½, Weather side)

Rel. Wave Height (SS 5)

$Fn = 0.25$

- χ
- 180°
 - △ 150
 - 120
 - 90
 - ▲ 60
 - 30

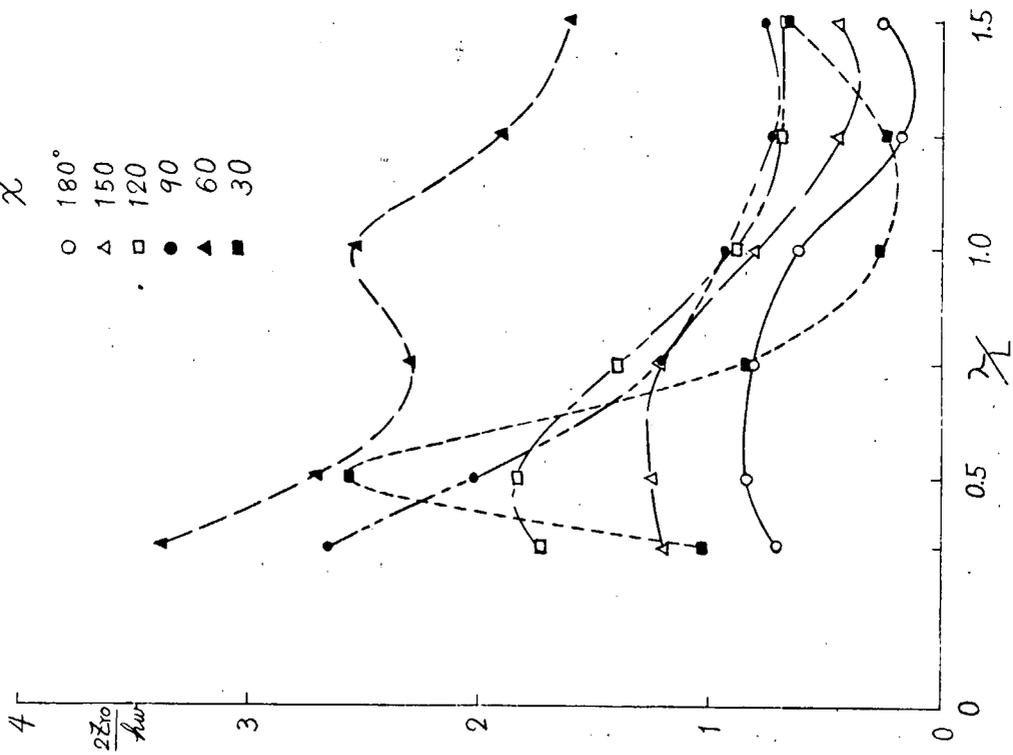


Fig. 3.1.7 相对水位变动 (SS 5, Weather side)

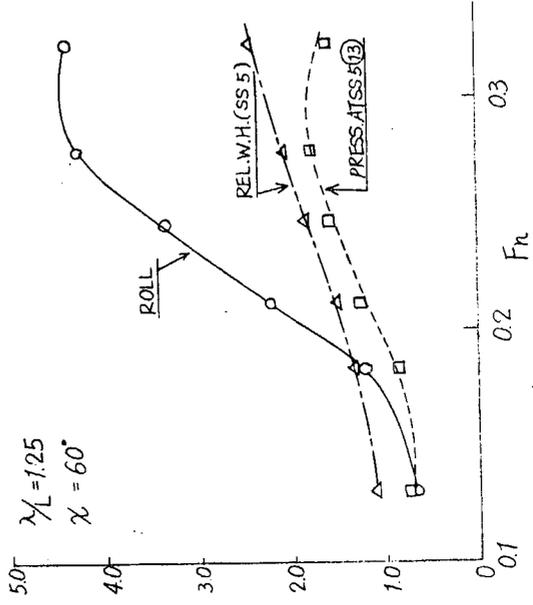
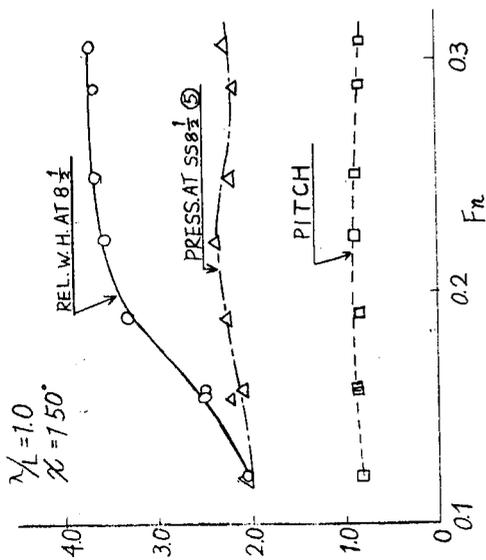


Fig. 3.1.8 運動及び相対水位の速度に対する変化の一例

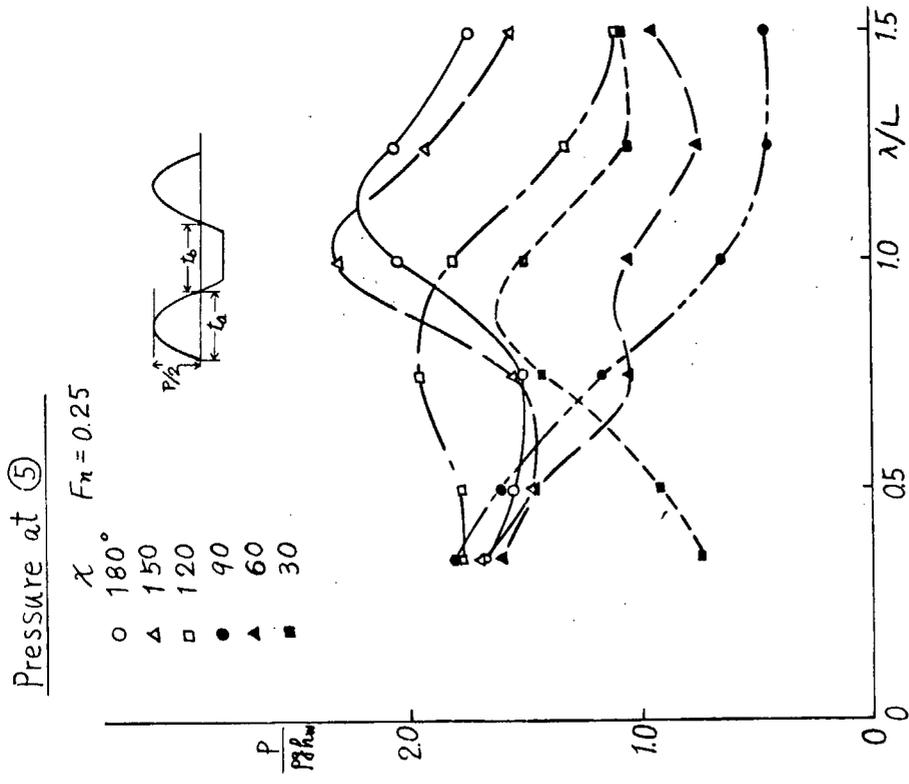


Fig. 3.1.9 変動水圧(1) (SS8本, 船側⑤)

Pressure at ⑦

$F_n = 0.25$

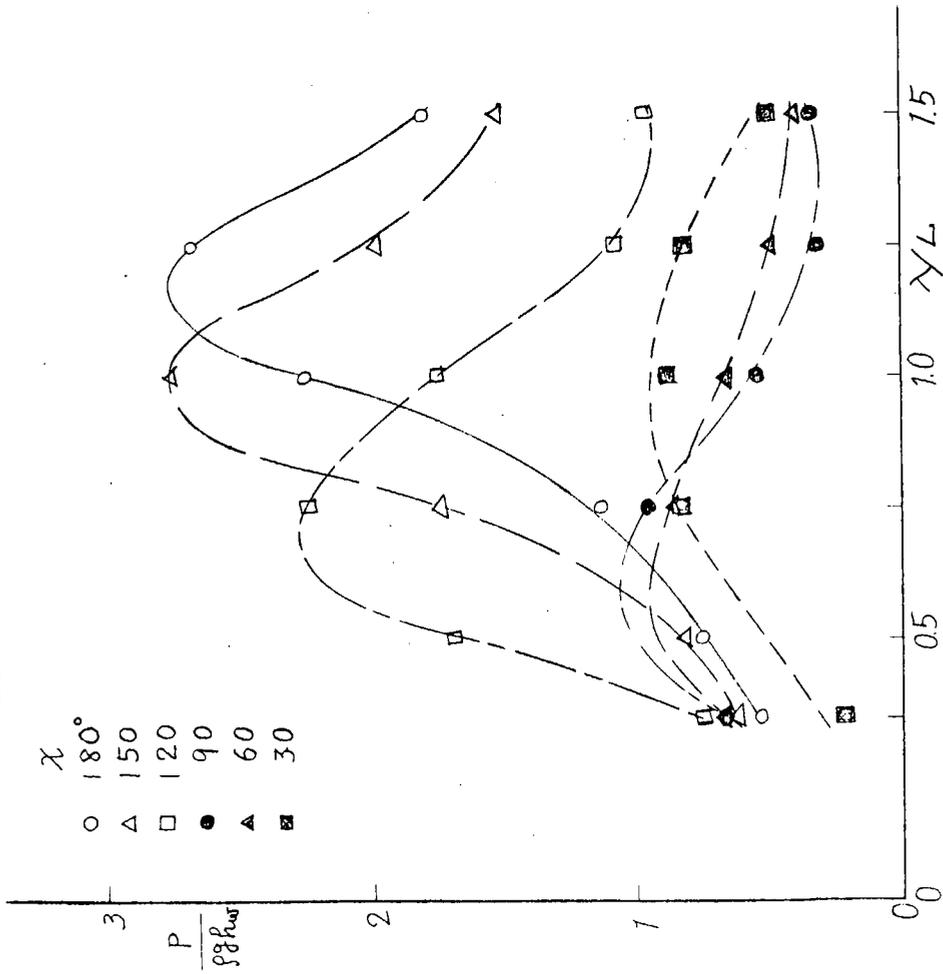


Fig. 3.1.10 変動水圧(2) (SS8 $\frac{1}{2}$, 船底⑦)

Pressure at ⑫

$F_n = 0.25$

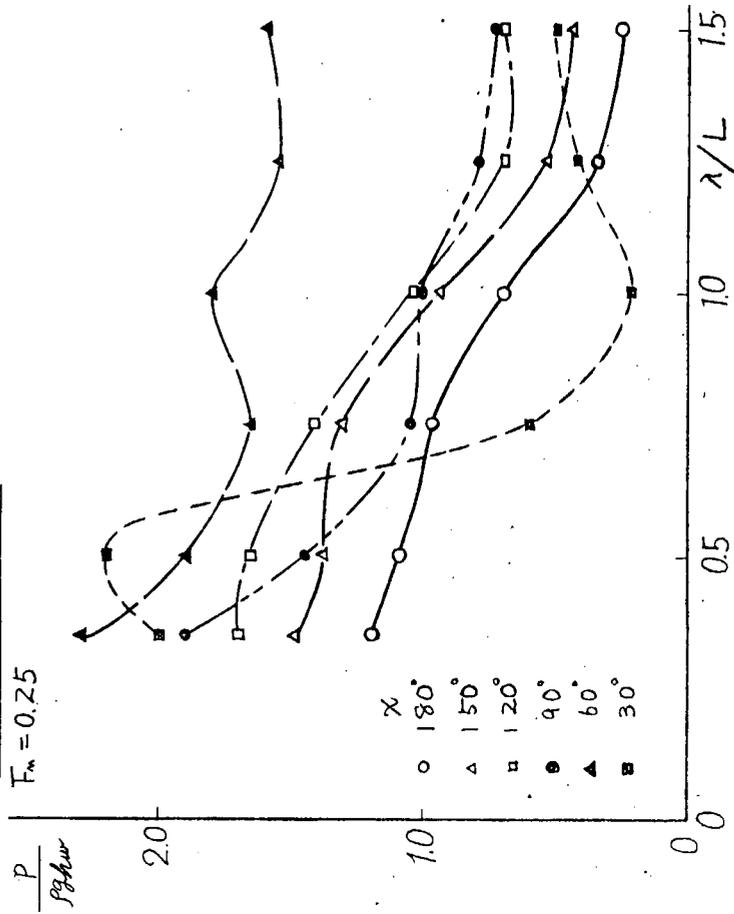


Fig. 3.1.11 変動水圧(3) (SS5, 船側⑫)

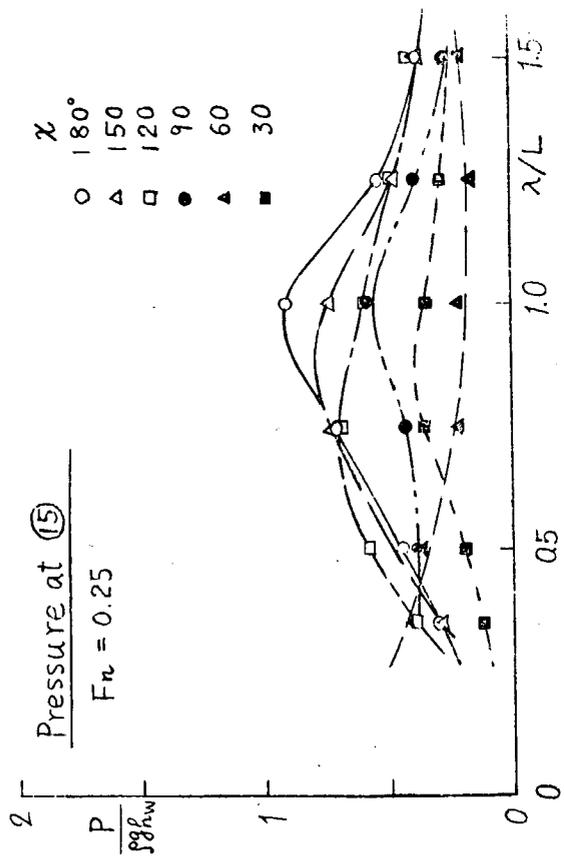


Fig. 3.1.12 変動水圧(4) (SS5, 船底⑤)

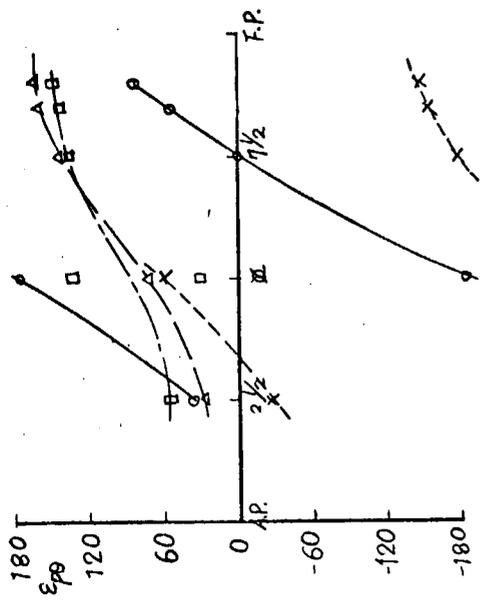
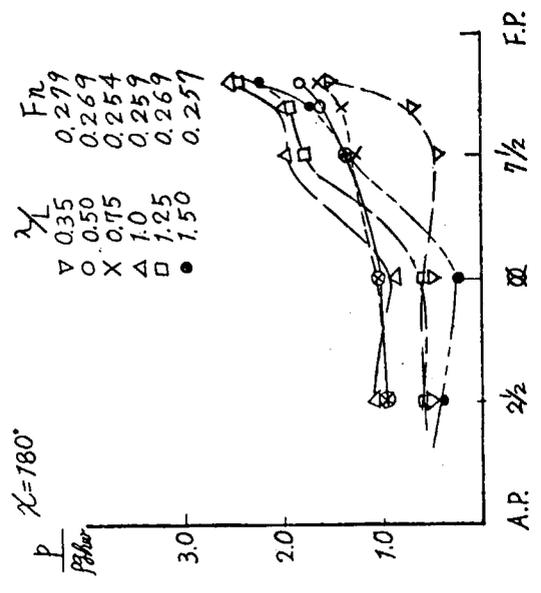


Fig. 3.1.13 船側水圧変動の船長方向分布(1) ($\alpha = 180^\circ$)

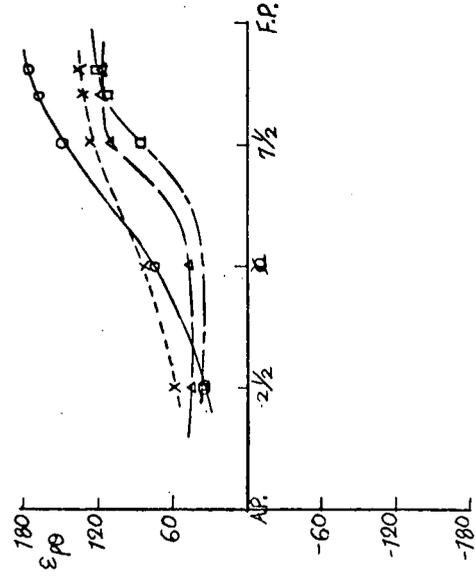
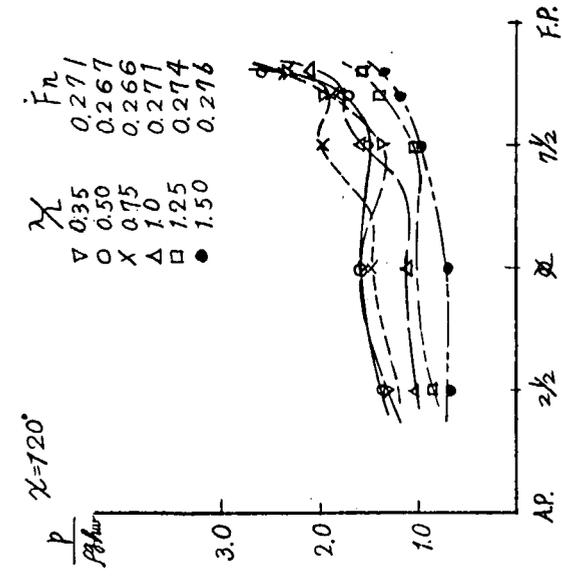


Fig. 3.1.1.5 船側水圧変動の船長方向分布(3) ($\alpha = 120^\circ$)

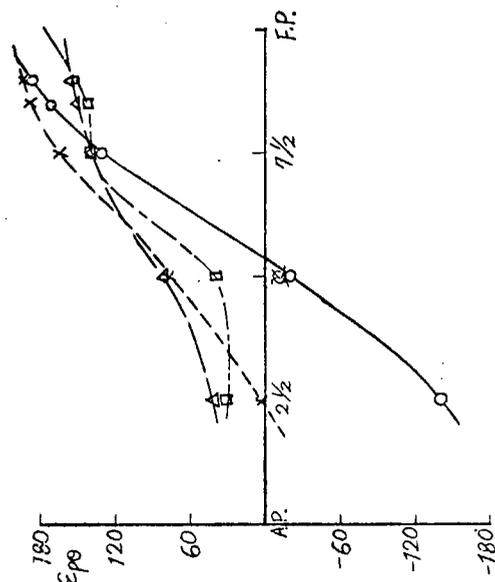
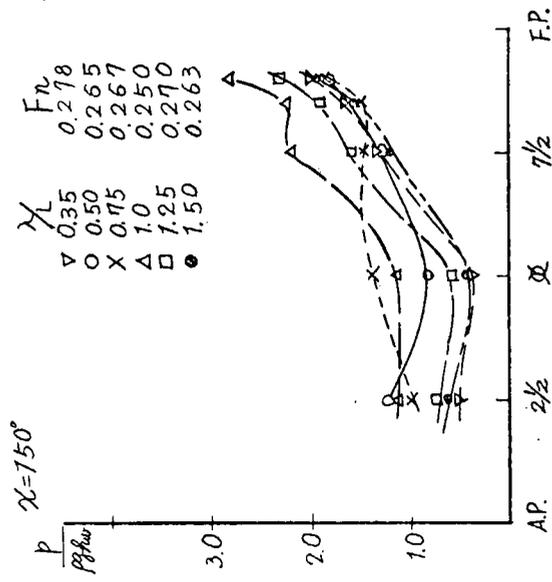


Fig. 3.1.1.4 船側水圧変動の船長方向分布(2) ($\alpha = 150^\circ$)

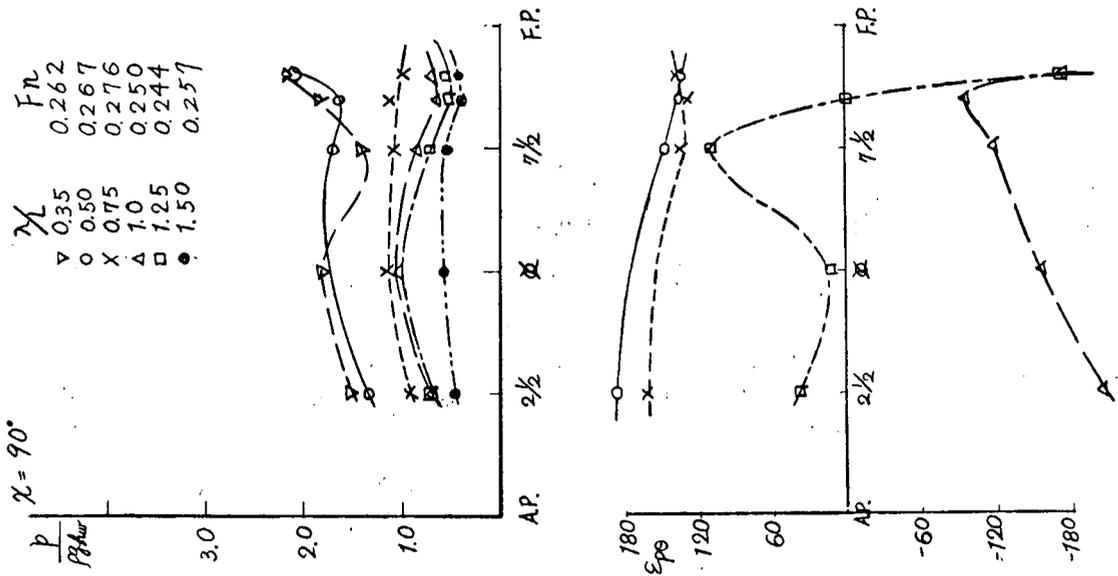


Fig. 3.1.16 船側水圧変動の船長方向分布(4) ($\chi = 90^\circ$)

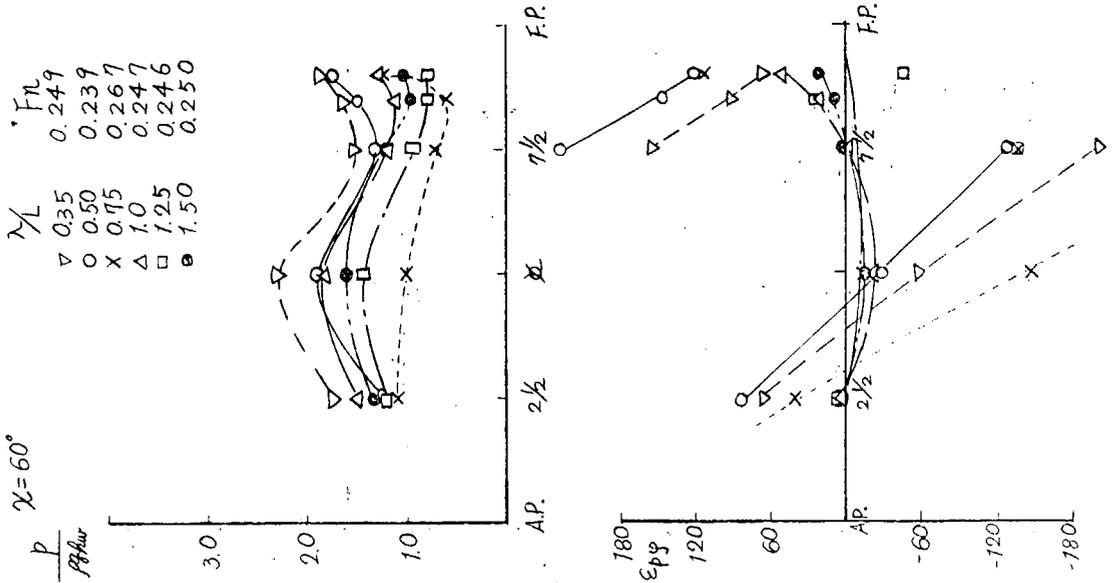


Fig. 3.1.17 船側水圧変動の船長方向分布(5) ($\chi = 60^\circ$)

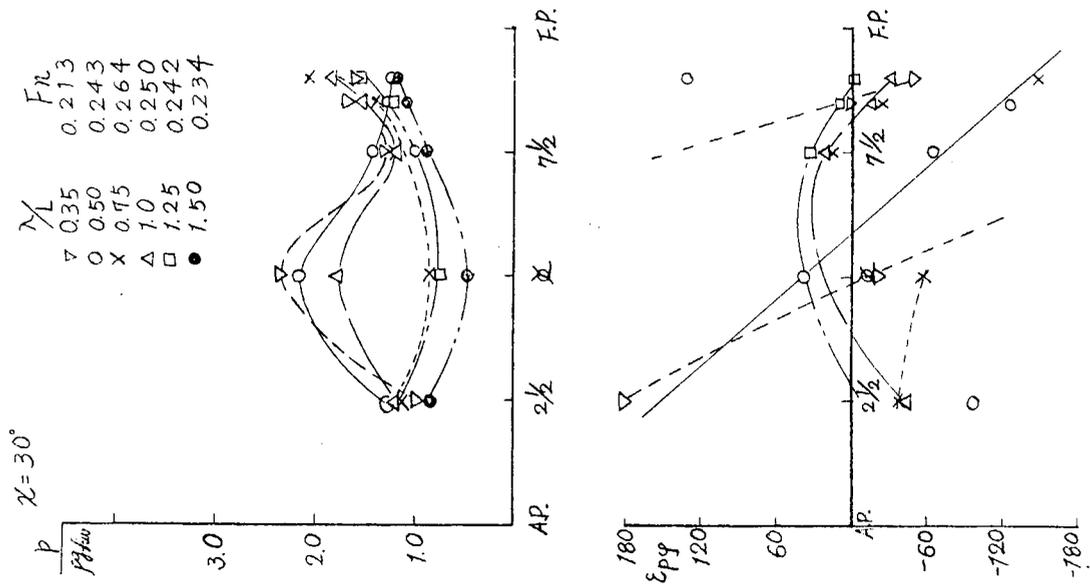


Fig. 3.1.1.8 船側水圧変動の船長方向分布(6) ($\alpha = 30^\circ$)

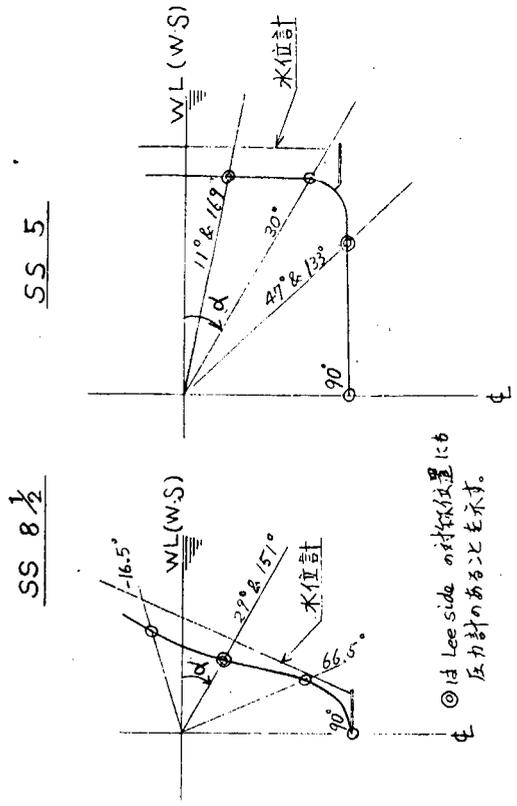


Fig. 3.1.19 断面における圧力測定位置

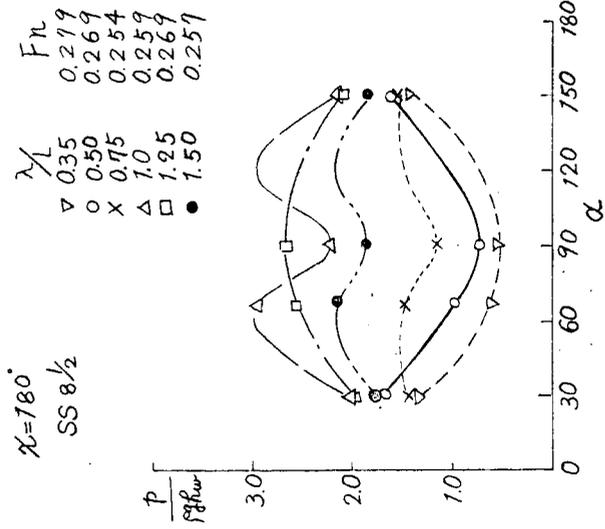


Fig. 3.1.20 変動水圧のGirth方向分布(1)($\chi=180^\circ$)

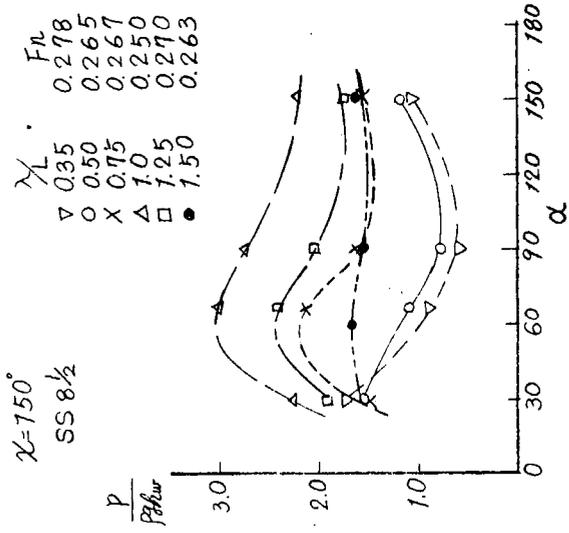


Fig. 3.1.21 変動水圧のGirth方向分布(2)($\chi=150^\circ$)

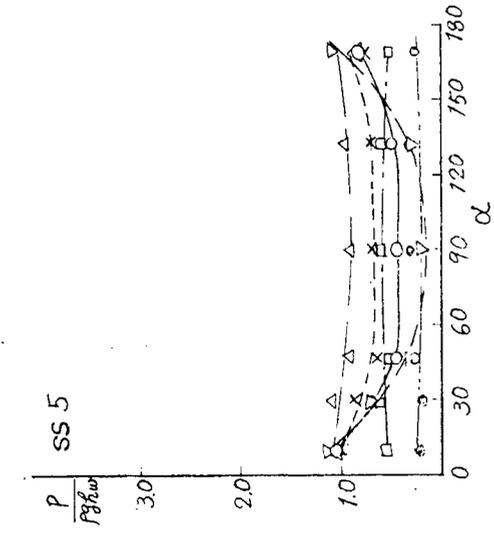


Fig. 3.1.20 変動水圧のGirth方向分布(1)($\chi=180^\circ$)

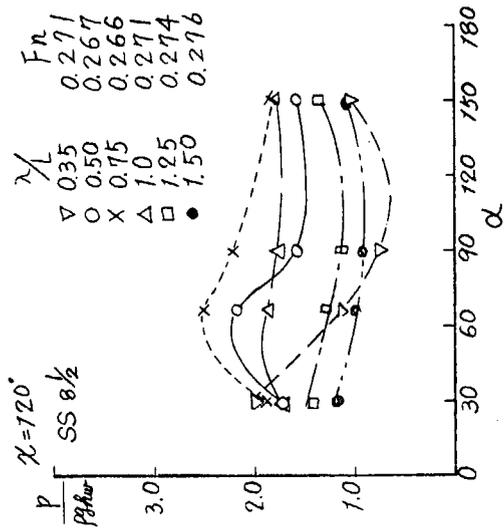


Fig.3.1.22 変動水圧のGirth方向分布(3)
($\chi=120^\circ$)

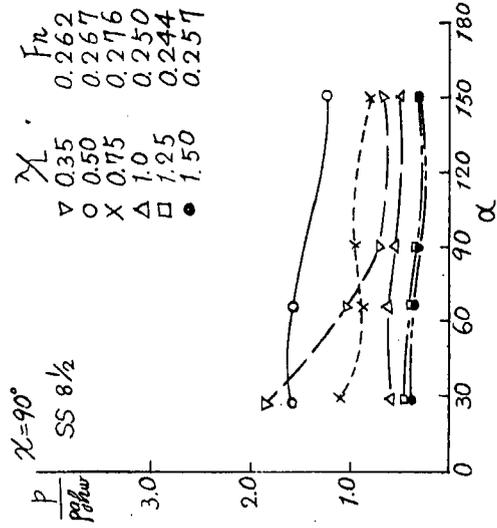


Fig.3.1.23 変動水圧のGirth方向の分布(4)
($\chi=90^\circ$)

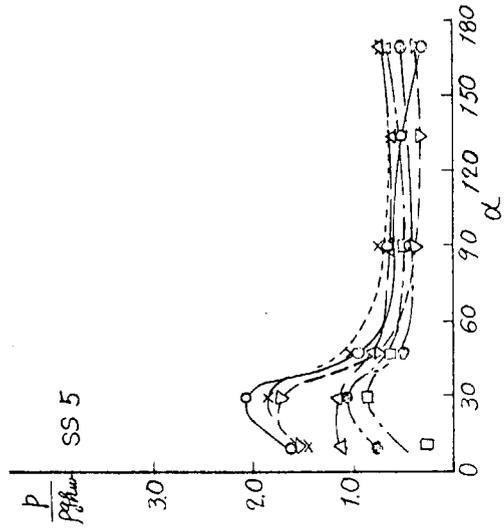


Fig.3.1.22 変動水圧のGirth方向分布(3)
($\chi=120^\circ$)

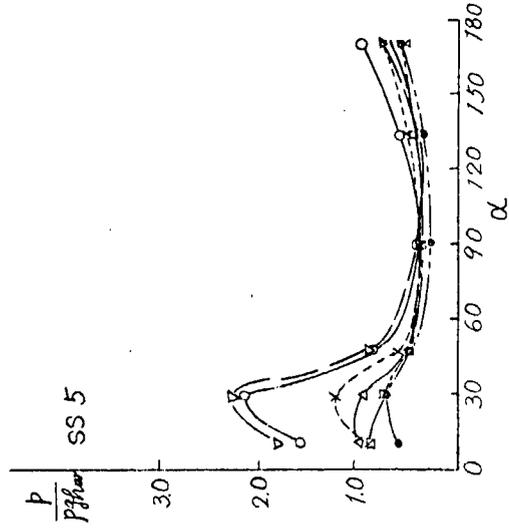


Fig.3.1.23 変動水圧のGirth方向の分布(4)
($\chi=90^\circ$)

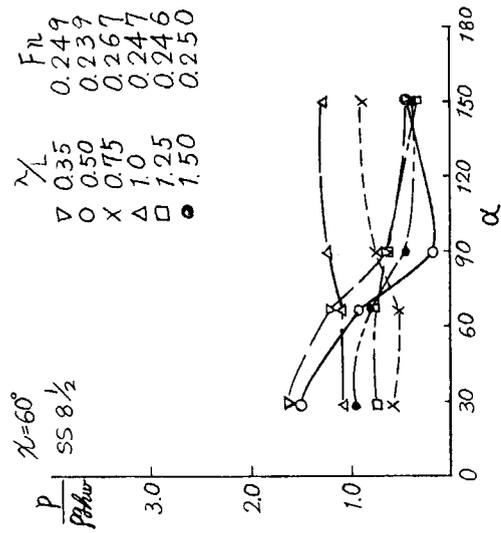


Fig.3.1.24 変動水圧のGirth方向の分布(5)
($\alpha=60^\circ$)

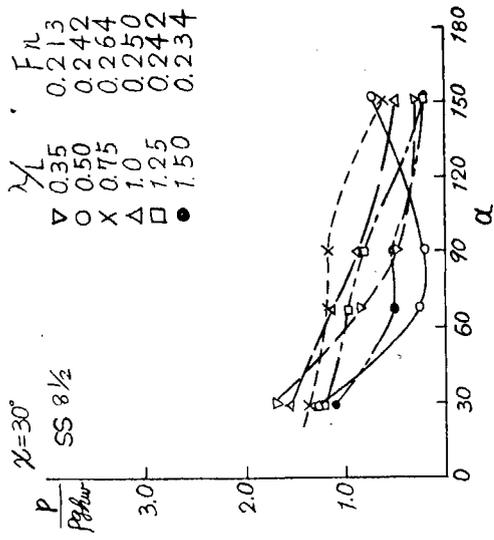


Fig.3.1.25 変動水圧のGirth方向の分布(6)
($\alpha=30^\circ$)

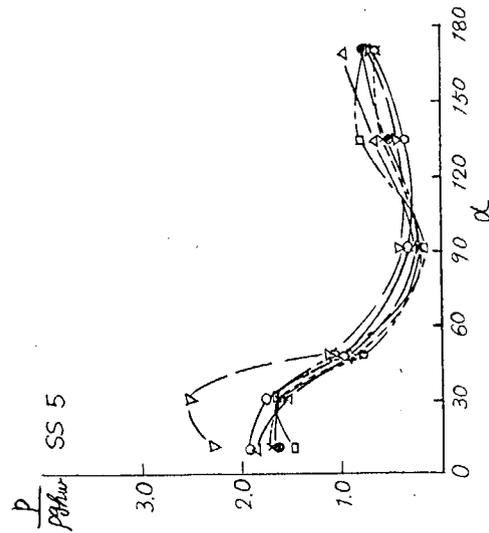


Fig.3.1.24 変動水圧のGirth方向の分布(5)
($\alpha=60^\circ$)

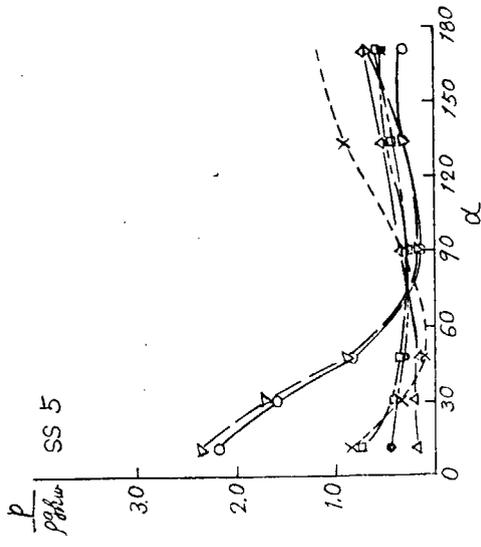


Fig.3.1.25 変動水圧のGirth方向の分布(6)
($\alpha=30^\circ$)

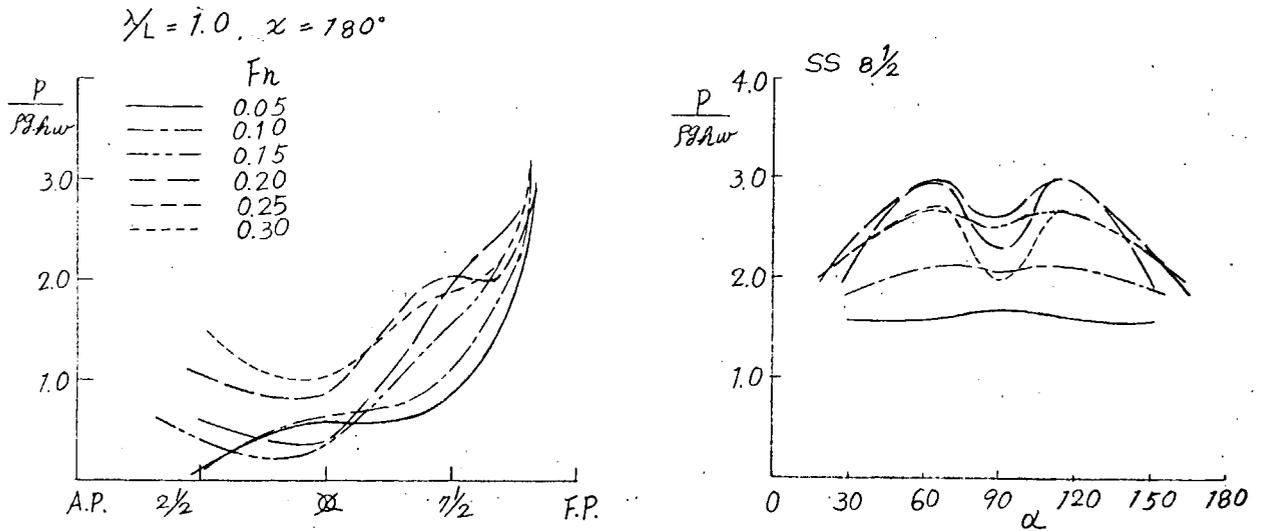


Fig. 3.1.26 船速による分布の変化

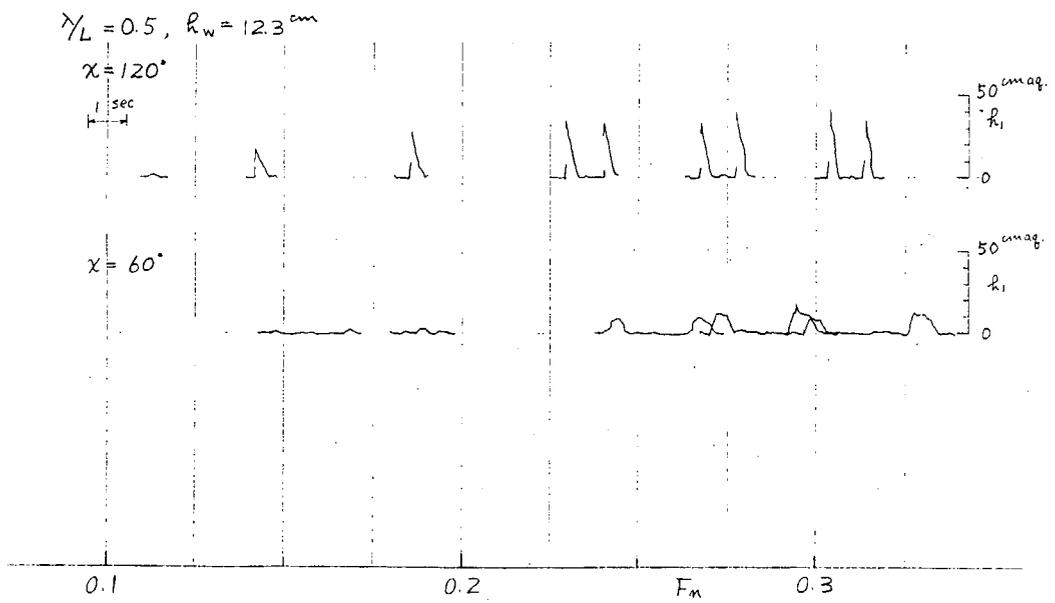


Fig. 3.1.27 船首フレアー部の圧力記録(1)

$\lambda/L = 0.75, h_w = 14.1 \text{ cm}$

$\chi = 180^\circ$

1 sec

$\chi = 150^\circ$

$\chi = 120^\circ$

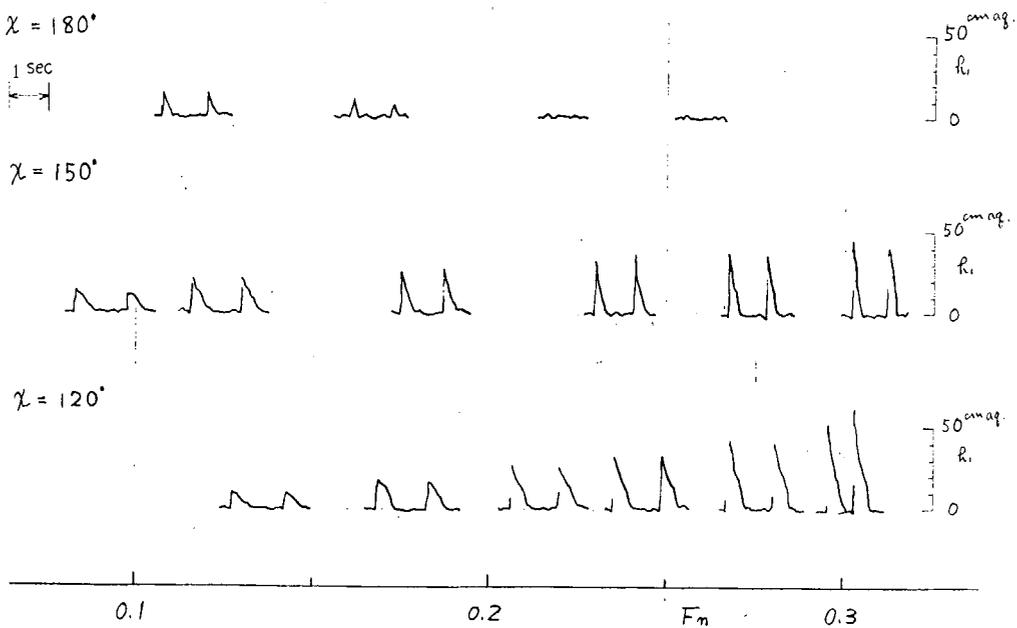


Fig. 3.1.28 船首フレアー部の圧力記録(2)

$\lambda/L = 1.0, h_w = 11.6 \text{ cm}$

$\chi = 180^\circ$

1 sec

$\chi = 150^\circ$

$\chi = 120^\circ$

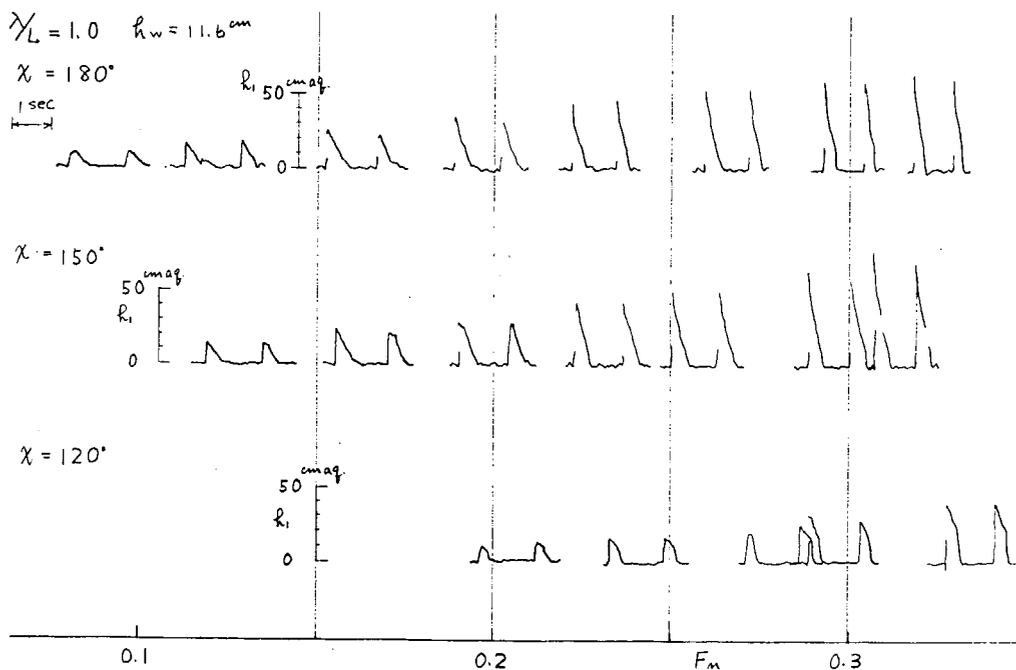


Fig. 3.1.29 船首フレアー部の圧力記録(3)

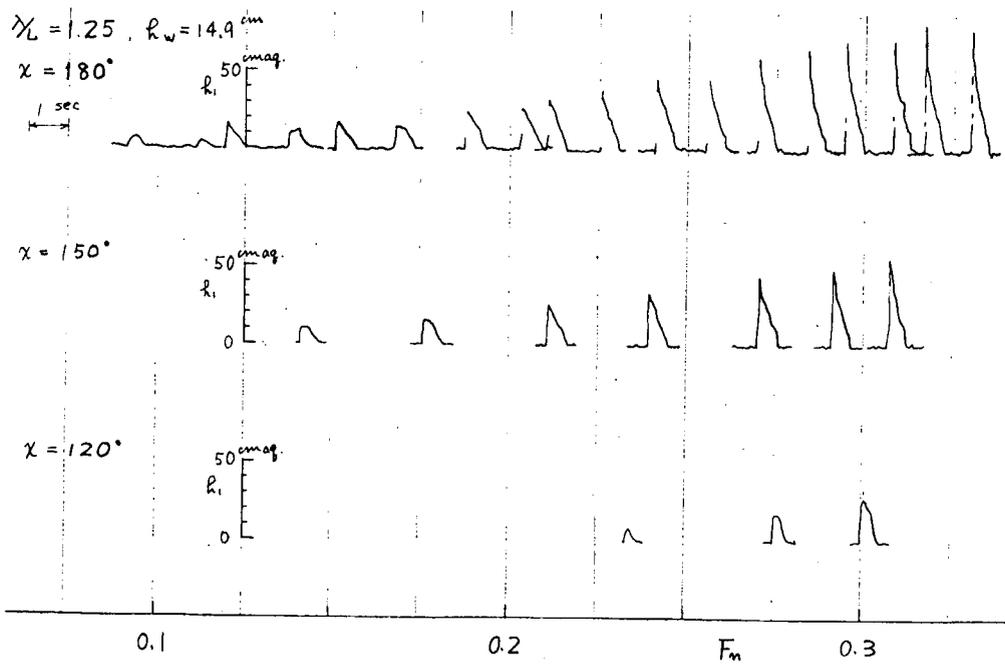


Fig.3.1.30 船首フレアー部の圧力記録(4)

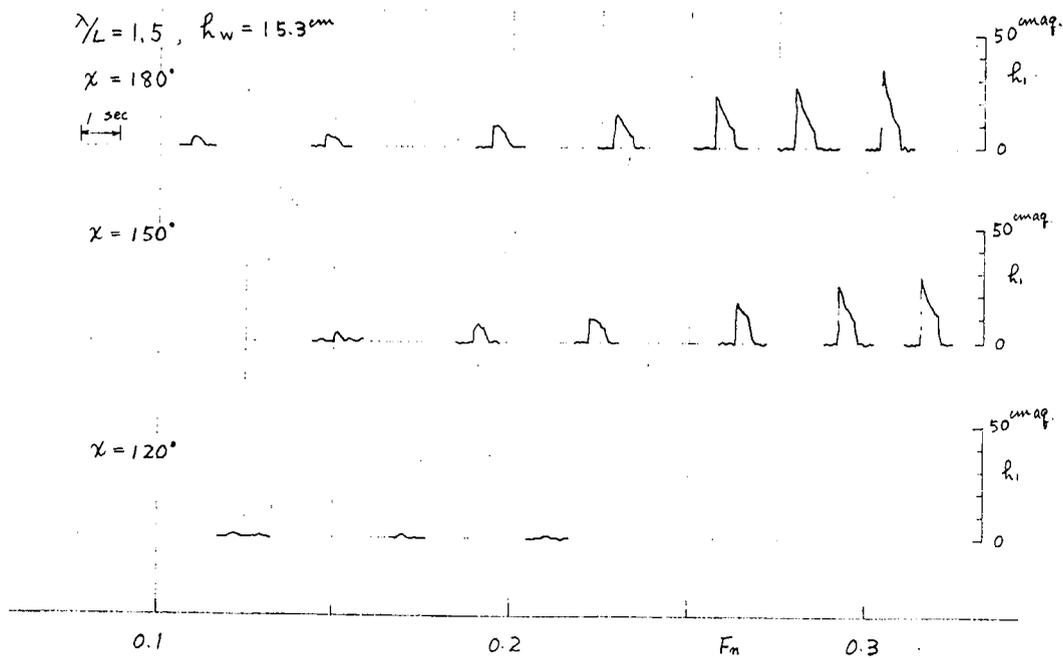


Fig.3.1.31 船首フレアー部の圧力記録(5)

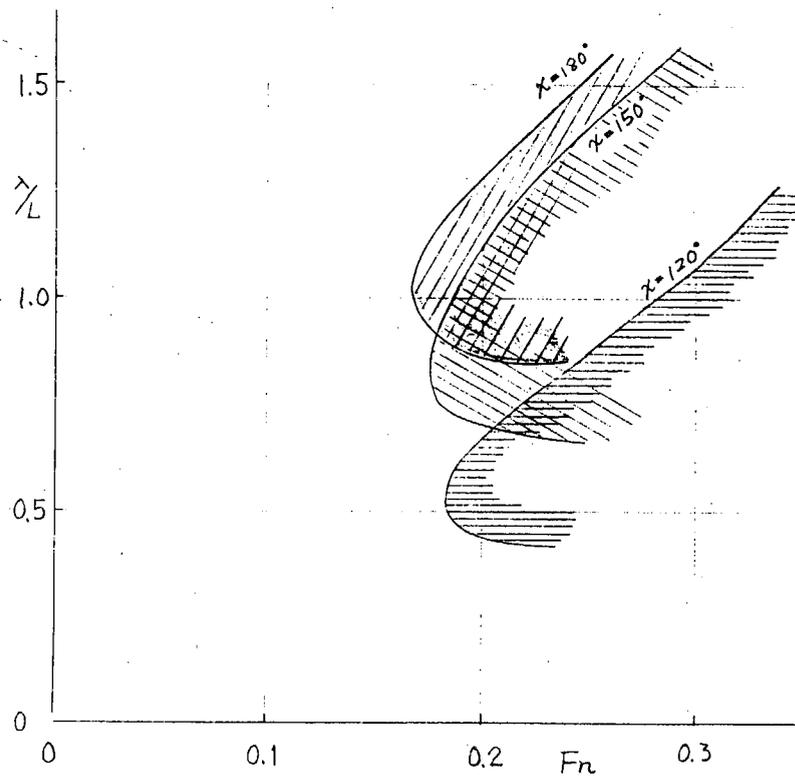


Fig.3.1.32 ピーク値 $2h_w$ 以上になるゾーン

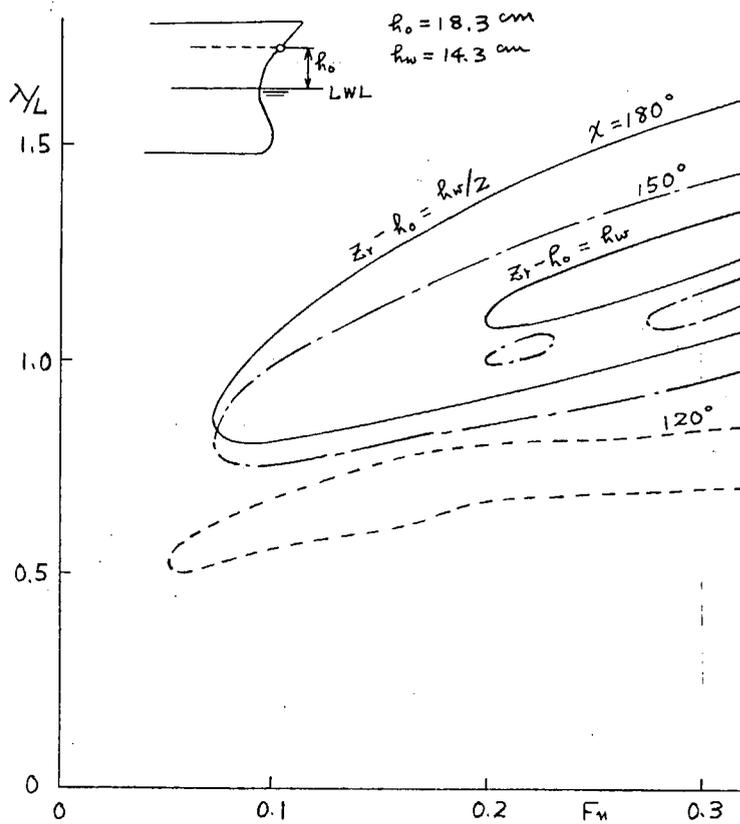
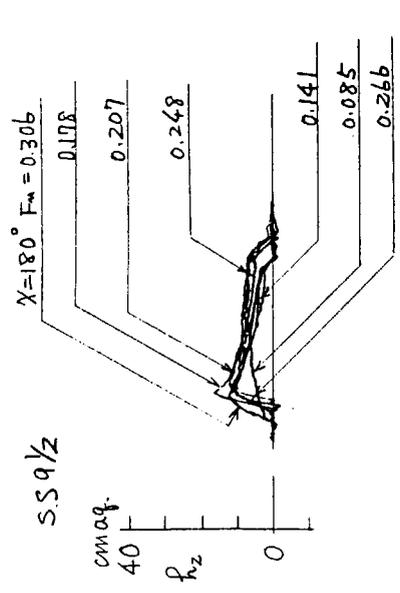


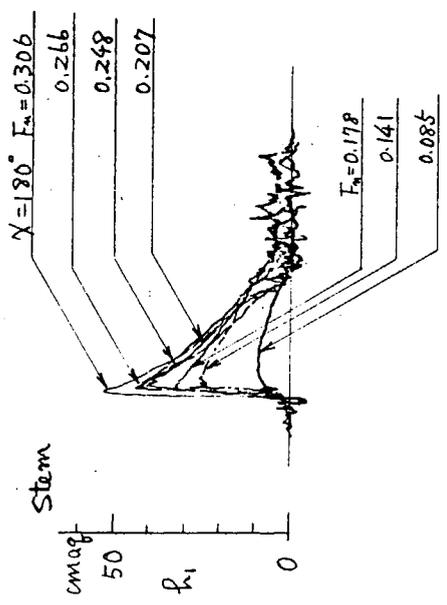
Fig.3.1.33 船首Stemの相対水位変動計算値(ストリップ法)

$\lambda/L = 1.0, R_w = 12 \text{ cm}, \gamma = 180^\circ$

SS 9/2



$\chi = 180^\circ, F_w = 0.306$

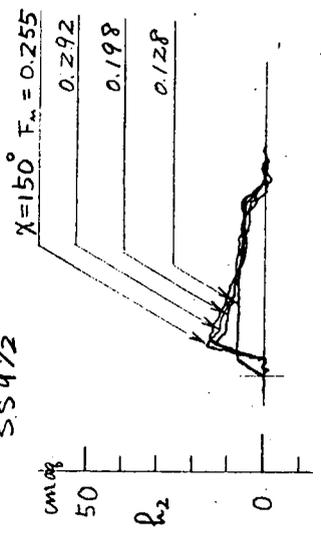


$F_w = 0.178$
0.141
0.085

Fig. 3.1.34 船首フレアー部の水圧(1)

$\lambda/L = 1.0, R_w = 12 \text{ cm}, \chi = 150^\circ$

SS 9/2



$\chi = 150^\circ, F_w = 0.292$

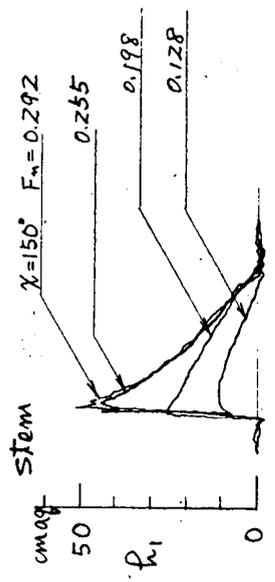


Fig. 3.1.35 船首フレアー部の水圧波形(2)

$$\lambda_L = 1.0, h_w = 12 \text{ cm}$$

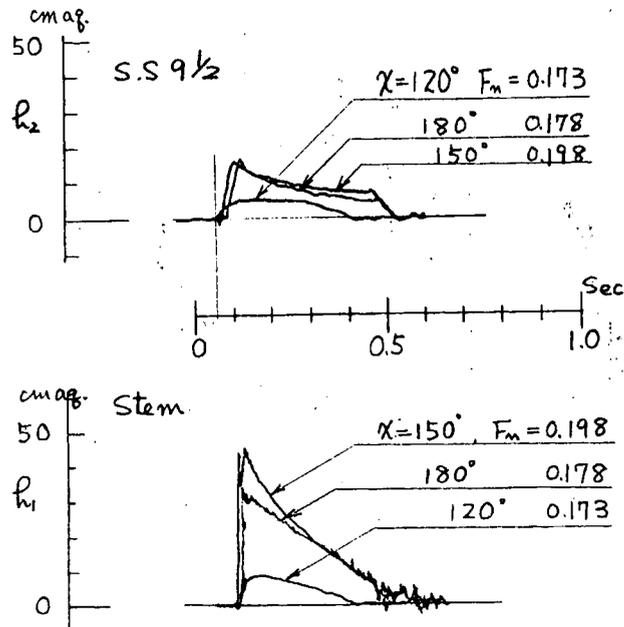


Fig.3.1.36 船首フレアー部の水圧波形(3)

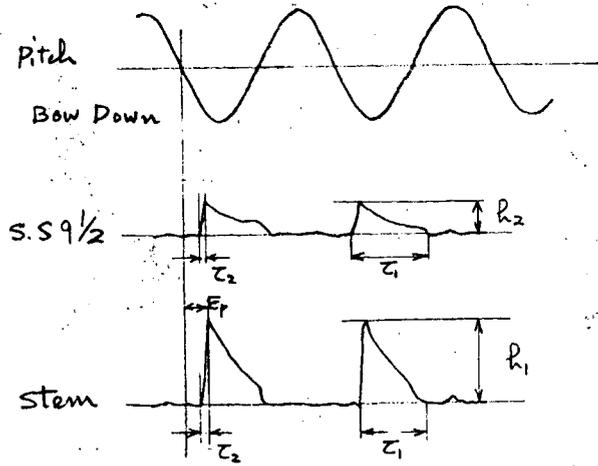


Fig.3.1.37 衝撃波形の解析法

3.2 波浪中における抵抗増加および推進性能の実験

3.2.1 はしがき

本年度は、昨年度までに使用したSR108型と類似な1軸コンテナ船型の4m模型船を用いて、正面規則波中における抵抗試験および自航試験を実施し、特に船体運動および推進性能に対する波高の影響と、波浪中におけるプロペラの推力、トルク変動について検討を加えた。さらに、平水中でプロペラボートを強制縦揺させてプロペラ単独試験を実施し、船体運動のプロペラ単独特性に及ぼす影響を調べた。

3.2.2 供試模型

実験に使用した船型およびプロペラの要目をTable 3.2.1に示す。この模型船は、田才等が九大応力研水槽において実施した研究¹⁾に使用した1軸コンテナ船型で、SR108船型が $L/B=6.89$ 、 $C_B=0.559$ 、 $B/d=2.99$ であるのに対し、本船型では $L/B=6.81$ 、 $C_B=0.568$ 、 $B/d=2.83$ である。

3.2.3 実験の種類および試験状態

実施した実験の種類、試験状態および計測項目をTable 3.2.2に示す。

Test 1は波高を $L/50$ (8cm) 一定にして波長を変化させた実験で、船速はフルード数 $F_n=0.15$ 、 0.20 、 0.25 、 0.30 の4種類について行ない、Test 2は、 $F_n=0.20$ 、 0.25 、 $\lambda/L=0.9$ 、 1.5 の場合について、波高を $L/100 \sim L/200$ の範囲に変化させた実験である。Test 1、2とも正面規則波中の抵抗試験および自航試験を行った。

Test 3は、自航動力計およびモータを中に装備したプロペラボートを、強制動揺装置で強制縦揺させ、動揺周期を4種に変化させて実施したプロペラ単独試験である。各動揺周期ごとに、動揺によりプロペラボートの造る波が、プロペラボートより前方に伝播しない速度を選びプロペラの回転数を変化させて $J=0.4 \sim 0.8$ の範囲の実験を行ない、プロペラの推力、トルクおよびそれらの変動を計測した。

3.2.4 実験結果および考察

(1) Test 1 (波高一定、波長変化の実験)

(a) 船体運動

規則波中抵抗試験および自航試験で得られた上下揺および縦揺振幅の無次元値をFig. 3.2.1、Fig. 3.2.2に示す。図中にOrdinary Strip Method (O. S. M.)による計算結果を比較のため示してある。図に示すように、上下揺、縦揺とも抵抗試験時と自航試験時とで、ほとんど差は認められない。また、O. S. M.による計算値と実験値とを比較すると、縦揺に関してはかなりよい一致を示すが、上下揺に関しては $\lambda/L > 10$ の範囲で計算値が実験値より高く、フルード数の高いほどその差は大きい。以上のことは、SR108船型の実験結果²⁾と全く同様の傾向である。

また、抵抗試験で計測された前後揺振幅の無次元値をFig. 3.2.3に示し、前後揺強制力としてFroude-Kriloff forceのみを考えた計算値と比較した。波長による変化の傾向は両者よく一致しているが、速度による変化の様子が必ずしも一致していない。

さらに、船尾のA. P.の位置に取付けた水位計により測定した船尾の波面に対する相対運動振幅の無次元値と、O. S. M.による計算値との比較をFig. 3.2.4に示す。実験値は抵抗試験時と自航試験時とであまり差がないが、計算値と比較すると、波長の長いところで全般に高く、一方波長の短い $\lambda/L < 0.7$ では逆に計算値より低く、しかもその差が大きい。

船体運動と波との位相差は、実験が前後揺を自由にしているため記録からの読みとりが困難なため、縦揺を基準にとり、縦揺と上下揺、前後揺との位相差を読みとり、一方縦揺と波との位相差 $\epsilon_{\theta\zeta}$ はO. S. M.による計算値を用い、この両者から求めた上下揺と波との位相差 $\epsilon_{z\zeta}$ および前後揺と波との位相差 $\epsilon_{x\zeta}$ をFig. 3.2.5に示した。また、同図中には計算だけで求めた $\epsilon_{z\zeta}$ 、 $\epsilon_{x\zeta}$ の曲線も示されている。位相差は、いずれも波頂が船体中央にあ

るときを基準にとり、位相遅れを正にとってある。上下揺の位相差は計算値とかなりよく合っているが、前後揺の位相差は、波長の長いところで縦揺の位相差の計算値と一致しており、 $\lambda/L=1.0$ 付近で急激に変化するのが目立っている。また、位相差は速度によってはあまり変化しないことがわかる。

(b) 抵抗増加およびプロペラの推力、トルク、回転数増加

正面規則波中における抵抗試験より得られた抵抗増加の無次元係数を Fig. 3.2.6 に、また、自航試験で求められたプロペラの推力増加、トルク増加および回転数増加の無次元係数を Fig. 3.2.7、Fig. 3.2.8 および Fig. 3.2.9 に示す。これらの曲線の波長および速度による変化の様子は S R 1 0 8 船型に対する実験結果²⁾と非常によく似ている。

(c) 自航要素

規則波中の抵抗試験、自航試験結果より平水中のプロペラ単独特性を用いて解析し、得られた自航要素の波長による変化の様子を示すと Fig. 3.2.10 のとおりである。図中に比較のため平水中の自航要素の値を水平な破線で示してある。

(d) プロペラの推力、トルク、回転数変動

規則波中自航試験で計測したプロペラの推力、トルク、回転数の記録波形より、それぞれの変動の全振幅 ΔT 、 ΔQ 、 ΔN を求め、波浪中における推力、トルク、回転数の平均値 T 、 Q 、 N との比の形で変動率を λ/L に対して示すと Fig. 3.2.11 のとおりである。ただし、回転数変動については、 $F_n = 0.15$ 、 0.20 の場合は計測に失敗したので図示されていない。この図からこれらの変動率は、速度の高いほど小さく、傾向として波長の長い場合に大きくなることわかる。

一方計算でプロペラ面における前後方向流速変動 U_p を求め、プロペラの平水中単独特性を用いて、推力およびトルクの変動を求めた結果が Fig. 3.2.12 である。このたうにして求めた計算値は実験結果と傾向はかなり似ているが、値としては実験値の方が小さい。この計算に、 $F_n = 0.25$ 、 0.30 の場合に計測された回転数変動を考慮して推力、トルクの変動を求めると図の破線のようになり、実験値にある程度近づくことがわかる。

また、推力変動 ΔT の波に対する位相差 $\epsilon_{\Delta T \zeta}$ を船体運動の場合と同様に、縦揺に対する位相差から推定し、さらに、プロペラ面での前後方向流速変動の波に対する位相差 $\epsilon_{U_p \zeta}$ を計算で求め、Fig. 3.2.5 中に示した。この図より前後揺は推力変動とはほぼ 90° の位相差があり、したがって、前後揺速度とはほぼ同位相であることがわかる。またプロペラ面の前後方向流速変動とも推力変動はほぼ 90° の位相差であり、これらよりプロペラの推力、トルク、回転数変動の主要原因はプロペラ面における前後方向の流入速度変動にあるものと考えられる。

(2) Test 2 (波高変化の実験)

(a) 船体運動

波高を変えた規則波中抵抗試験および自航試験で計測された上下揺、縦揺、前後揺の両振幅を波高ベースに示したのが Fig. 3.2.13 である。この図より船体運動振幅の線形性は、波高が極端に大きい場合を除いて非常によいことがわかる。また、上下揺、縦揺振幅に関しては抵抗試験時と自航試験時とでほとんど差がないが、前後揺振幅は両者に差があり、今後検討を要する問題と思われる。

(b) 抵抗増加およびプロペラの推力、トルク、回転数増加

抵抗増加およびプロペラの推力、トルク、回転数増加を波高の 2 乗で割った無次元係数を波高ベースに示したのが Fig. 3.2.14 である。この図より抵抗増加および推力、トルクの増加は、波高 7~15cm の範囲ではほぼ一定値をとり、波高の 2 乗に比例しているが、この範囲より波高が小さい場合には値が大きく、逆に波高が大きい場合には小さくなる傾向がある。回転数増加係数は以上の諸係数に比べると波高による変化の傾向が異なっており、上記の波高範囲で必ずしも波高の 2 乗に比例するとは言えないようである。

(c) 自航要素

波高による自航要素の変化の様子を示すと Fig. 3.2.1 5 のとおりである。(1-t) および η_R は波高が増加してもあまり変化はないが、 η_0 は波高の増加によるプロペラ荷重の増大により低下し、(1-w) は若干増加する傾向にあることがわかる。全体としての推進効率も波高の増加とともに低下する。なお、図中に平水中の値が破線で記入してある。

(d) プロペラの推力、トルク、回転数変動

計測したプロペラの推力、トルク、回転数変動の全振幅を波高で割った値を波高ベースに示すと Fig. 3.2.1 6 のとおりである。この図から推力、トルク変動は波高の極端に高い場合を除いて、ほぼ波高の1乗に比例することがわかる。回転数変動は $\lambda/L = 1.5$ の場合はほぼ波高に比例しているが、 $\lambda/L = 0.9$ の場合は若干傾向が異なっている。一方計算でプロペラ面における前後方向流速変動 U_p を求め、推力およびトルク変動を推定し、図中に並記してある。波長によっては計算値が実験値とかなり差がある場合もあるが、推力、トルクの変動の主原因が U_p にあると考えてよさそうである。波高の大きいところで変動値が極端に大きくなっているのは、プロペラがレーシングをしているためである。

(3) Test 3 (平水中強制縦揺プロペラ単独試験)

まず、平水中を通常の方法でプロペラ単独試験を実施し、その結果を Fig. 3.2.1 7 に示す。両振幅3°、動揺周期を4種に変えてプロペラボートを強制縦揺させて行なったプロペラ単独試験結果が Fig. 3.2.1 8 である。図中曲線が平水中単独試験結果であり、点が強制動揺試験時の計測平均値、点の上下の範囲が変動両振幅を示している。この図から強制動揺させても、推力、トルクの平均値は平水中試験時の値とほとんど変わらないことがわかる。また、強制縦揺試験では推力変動はきわめて少なく、トルク変動がかなり大きいこと、さらに、推力変動とトルク変動とが逆位相のためプロペラ効率 η_0 の変動がかなり大きいという結果が得られた。

参考文献

- 1) 田才福造他：一軸高速コンテナ船の耐航性能に関する研究、西部造船会々報、第41号、昭和46年3月
- 2) S R I 2 5 研究部会：超高速コンテナ船の耐航性に関する研究、報告書、日本造船研究協会、研究資料 No 157、昭和47年3月

Table 3.2.1 Principal particulars of ship model and propeller

Length between perpendiculars	L_{pp} (m)	4.0 0 0
Breadth	B (m)	0.5 8 4 7
Draft fore	d_f (m)	0.1 9 5 2
aft	d_a (m)	0.2 1 9 9
mean	d_m (m)	0.2 0 7 6
Trim	t (m)	0.0 2 4 7
Displacement volume	∇ (m^3)	0.2 7 6 9
Block coefficient	C_B	0.5 6 8
Midship section coefficient	C_M	0.9 5 9
Longl. center of buoyancy from F. P.	FB	0.5 2 0 L
Length-breadth ratio	L/B	6.8 1
Breadth-draft ratio	B/d	2.8 3
Longl. radius of gyration	K_{yy}	0.2 4 L
Height of center of gravity above base line	KG (m)	0.1 7 7 8
Propeller		
Diameter	D (m)	0.1 5 0
Boss ratio		0.1 8
Pitch ratio		1.0 0
Expanded area ratio		0.7 0
Blade thickness ratio		0.0 5
Number of blades		5
Direction of turning		Right

Table 3.2.2 Experiment conditions

Tests 1	F_n	ζ_w	λ/L	Measuring items	Notes
Resistance test	0.15	L/50	0.5 0.6	Pitch, Heave, Surge, Relative stern motion, Resistance, Wave	by gravity dynamometer
	0.20		0.7 0.8		
	0.25	8 (cm)	0.9 1.0		
	0.30		1.1 1.2 1.3 1.5 2.0		
Self-prop. test	0.15	L/50	0.5 0.6	Pitch, Heave, Surge, Relative stern motion, Thrust, Torque, Revolution, Wave	by diff. trans. type dynamometer
	0.20		0.7 0.8		
	0.25	8 (cm)	0.9 1.0		
	0.30		1.1 1.2 1.3 1.5 2.0		
Test 2	F_n	λ/L	ζ_w	Measuring items	Notes
	Effect of wave height	0.20	0.9	4.0 (cm)	Pitch, Heave, Surge, Wave, Thrust, Torque, Revolution, Resistance
0.25		1.5	20.0 (cm)		
Test 3 (Propeller Open Test)	Inclination	J	Frequency (Period)	Measuring items	Notes
	0 deg (Even)	0.0 1.0 0.3 0.7		Thrust, Torque, Revolution, Ship Speed	
Forced pitch oscillation	Double Amp. = 3 deg	0.4 0.8	0.51 (1.96) 0.57 (1.75) 0.66 (1.52) 0.88 (1.14) H_z (sec)	Thrust, Torque, Revolution, Ship Speed, Pitch	

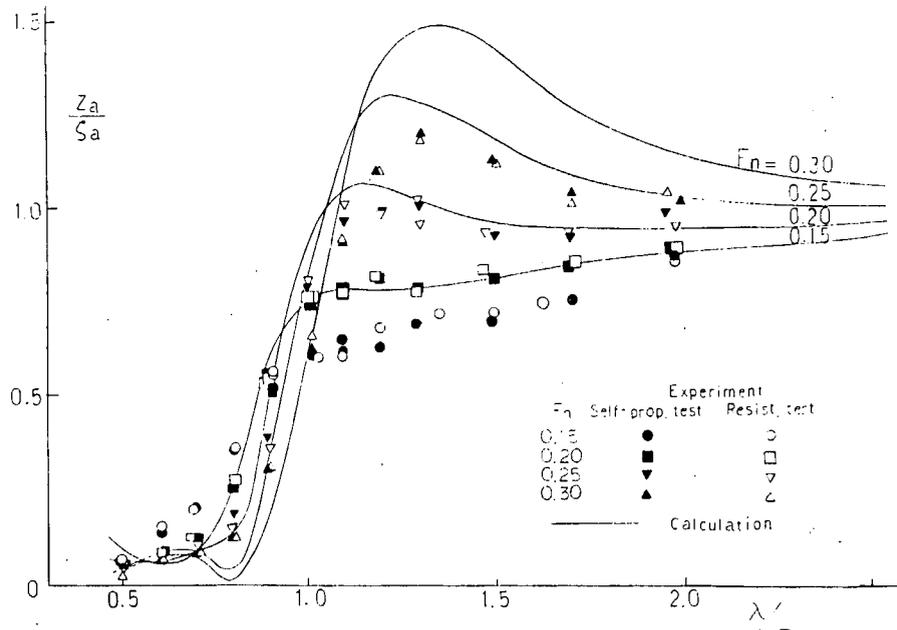


Fig.3.2.1 上下揺振幅

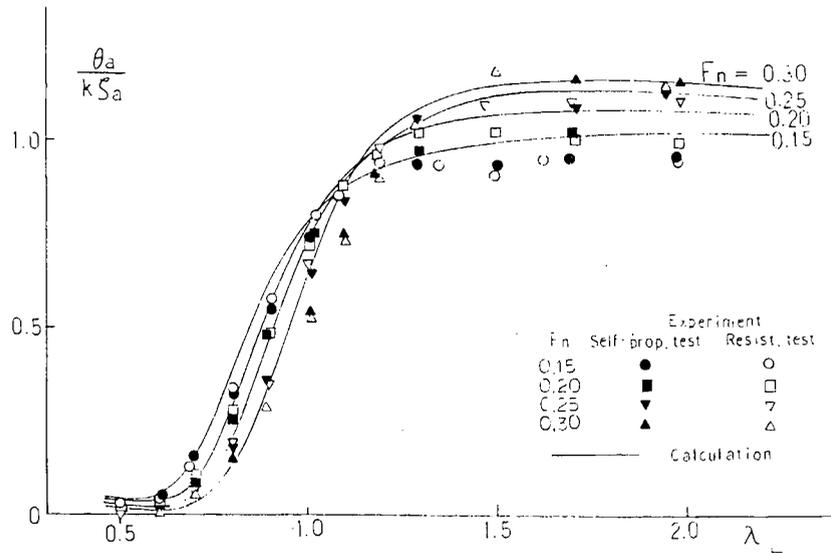


Fig.3.2.2 縦揺振幅

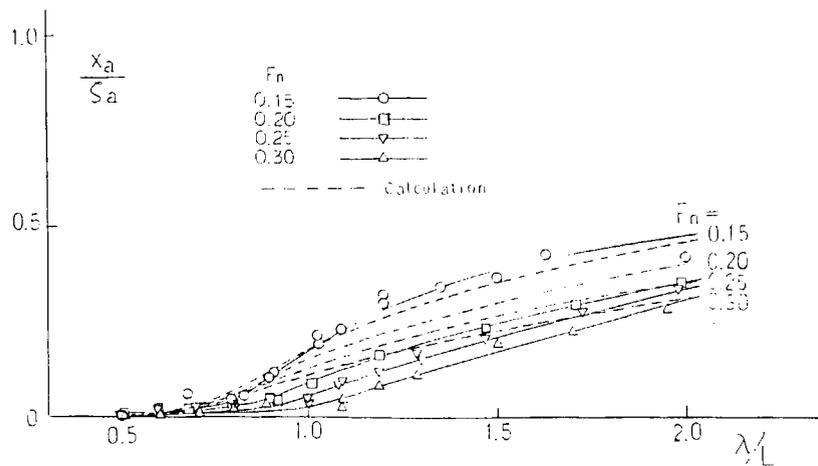


Fig.3.2.3 前後揺振幅

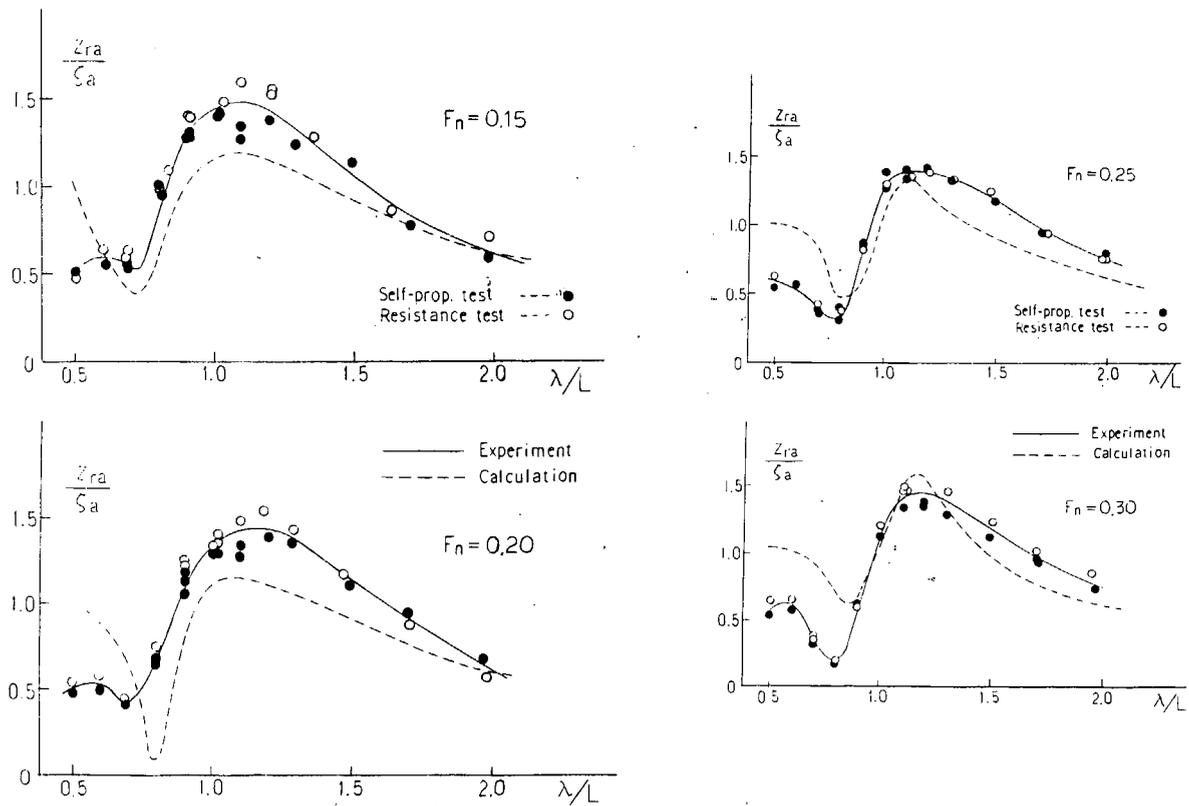


Fig. 3.2.4 船尾相对運動振幅

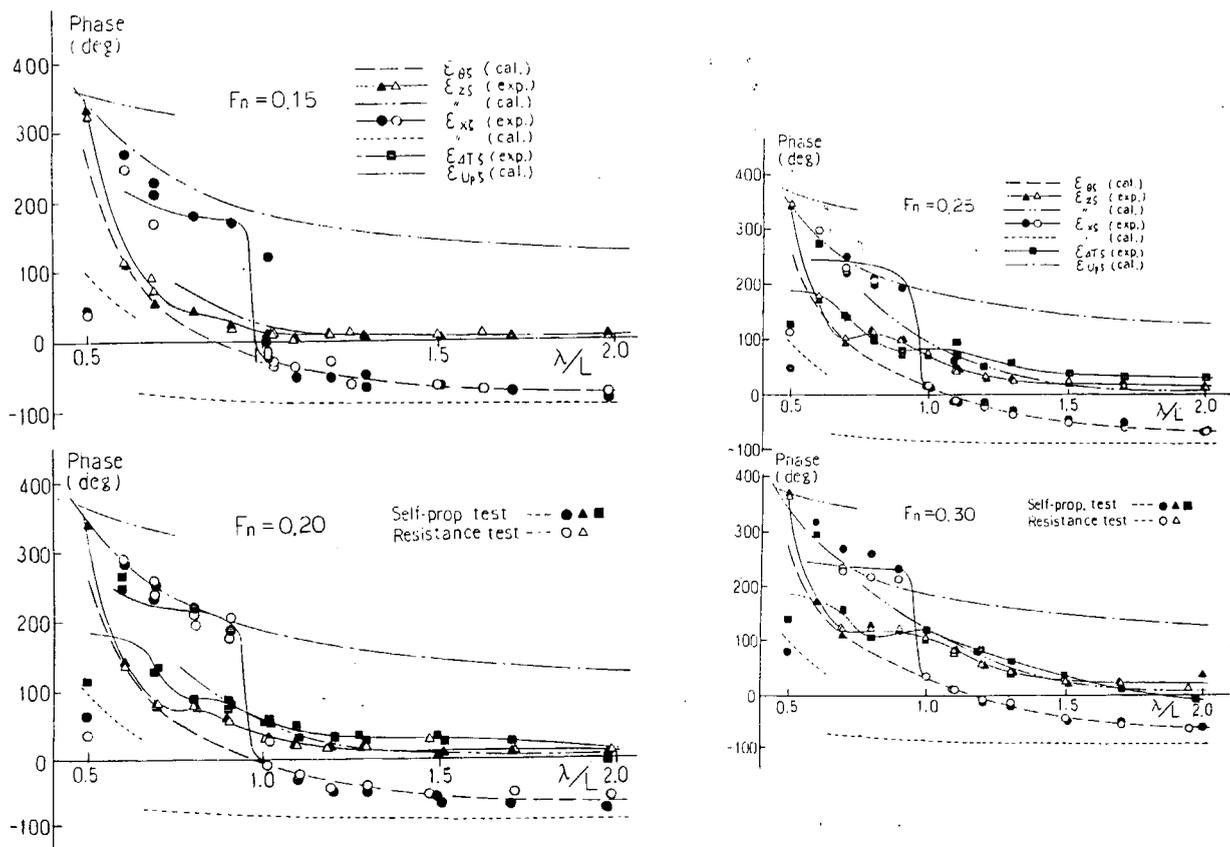


Fig. 3.2.5 波に対する位相差

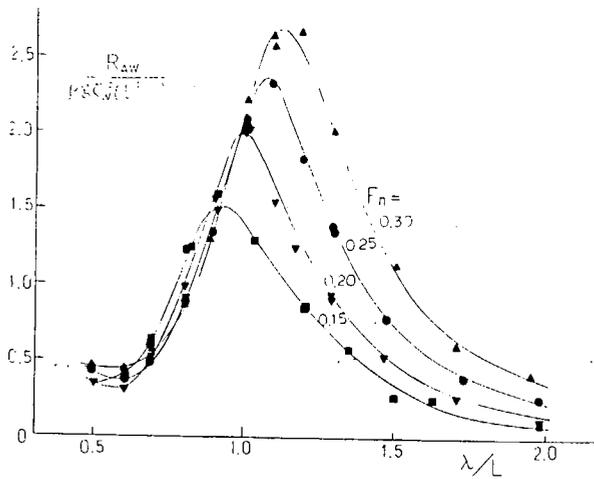


Fig. 3.2.6 抵抗増加係数

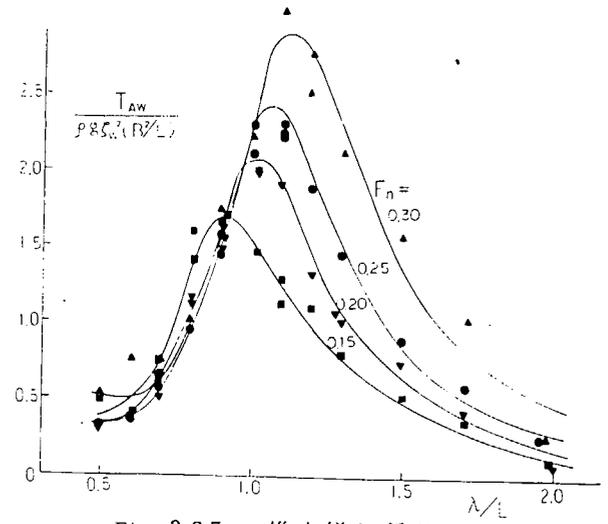


Fig. 3.2.7 推力増加係数

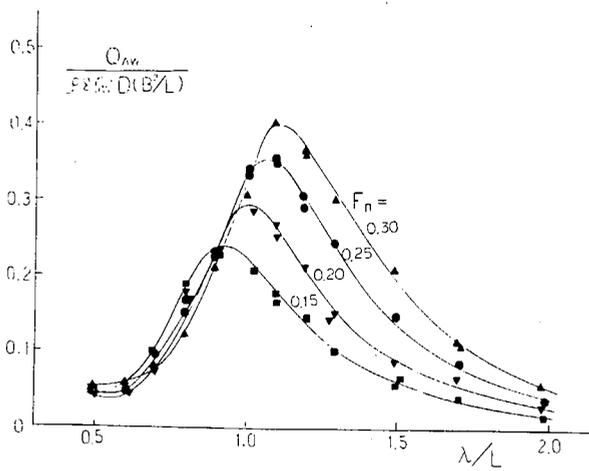


Fig. 3.2.8 トルク増加係数

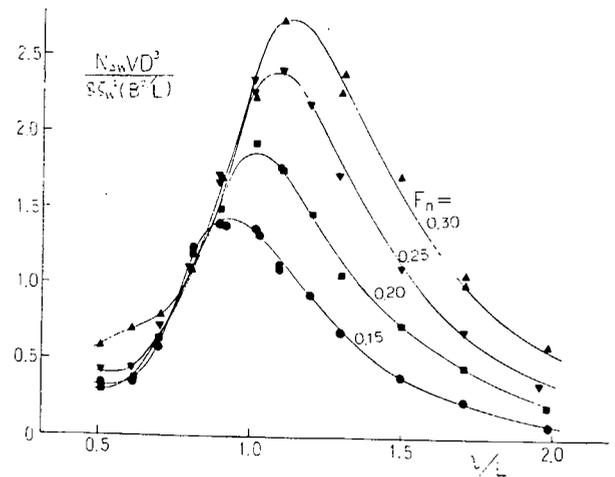


Fig. 3.2.9 回転数増加係数

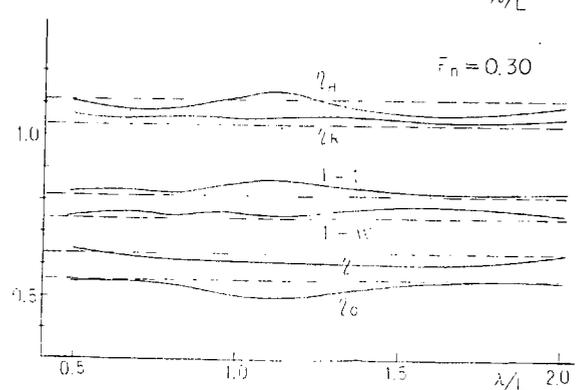
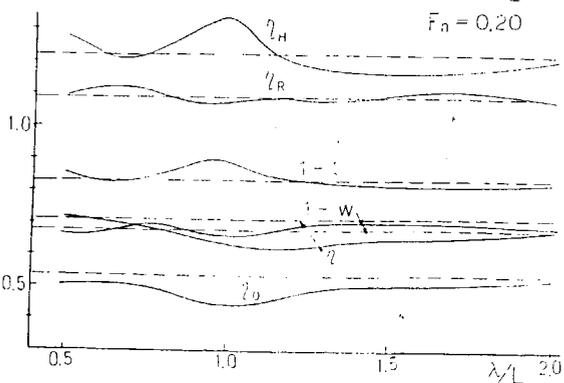
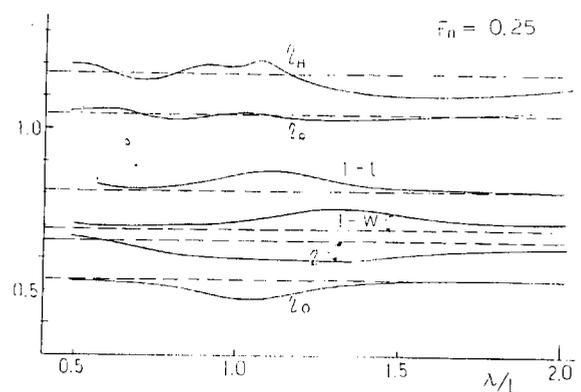
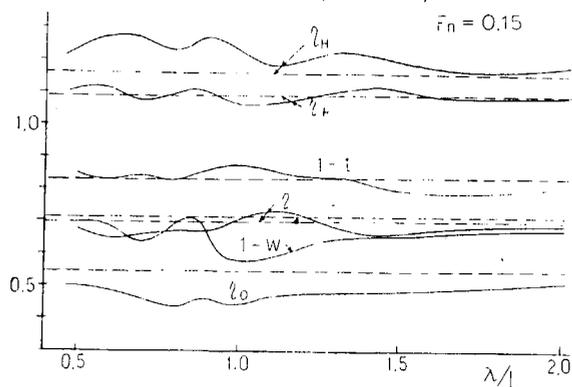


Fig. 3.2.10 自航要素

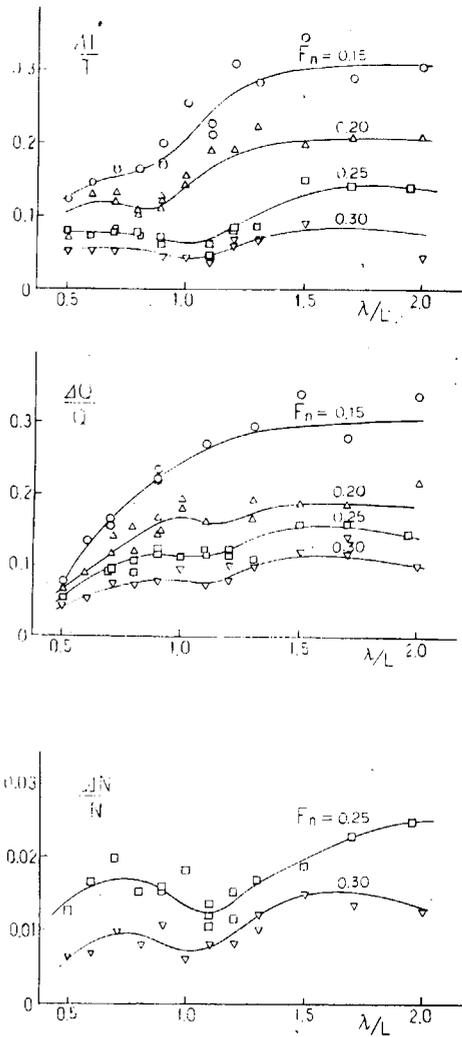


Fig. 3.2.11 推力、トルク、回転数変動(実験値)

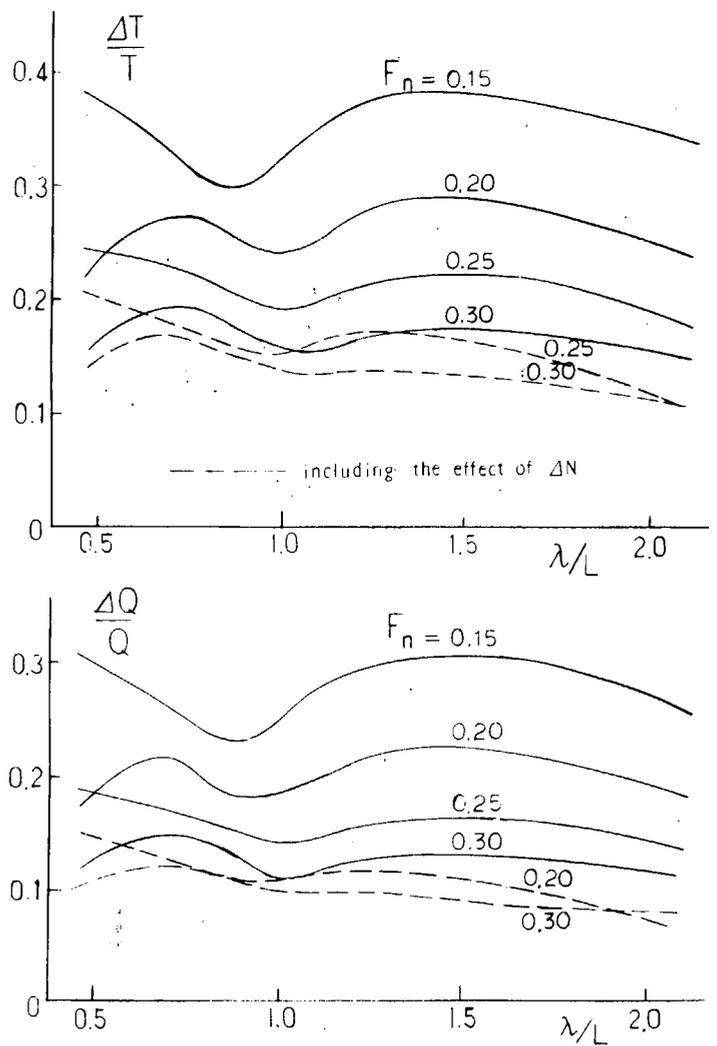


Fig. 3.2.12 推力、トルク変動(計算値)

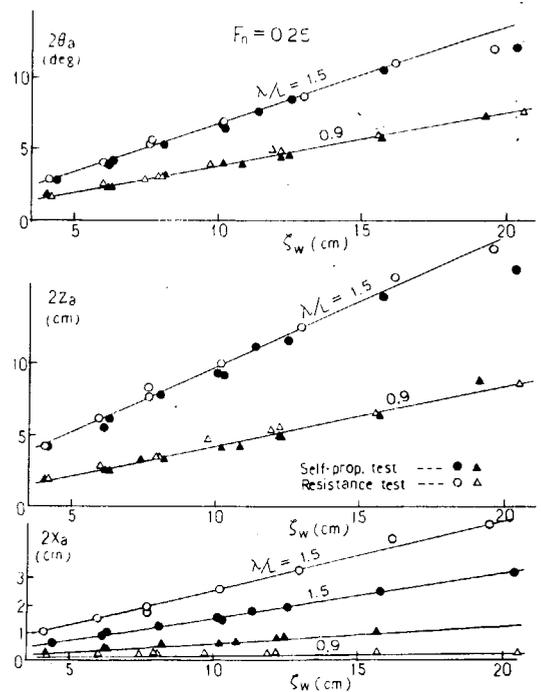
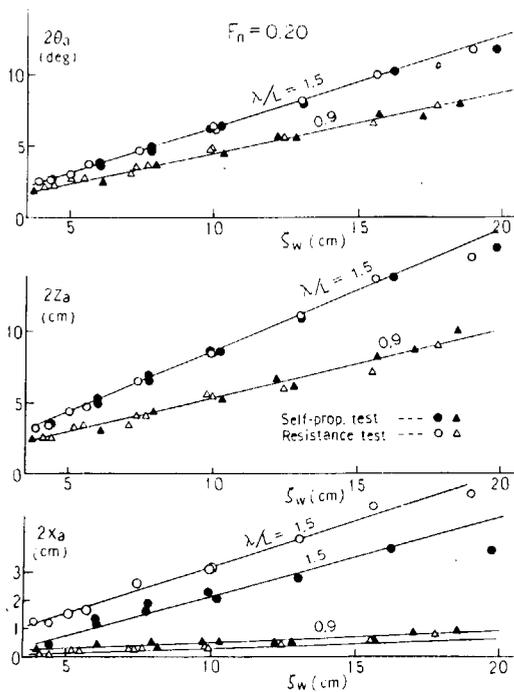


Fig. 3.2.13 縦揺、上下揺、前後揺振幅に対する波高影響

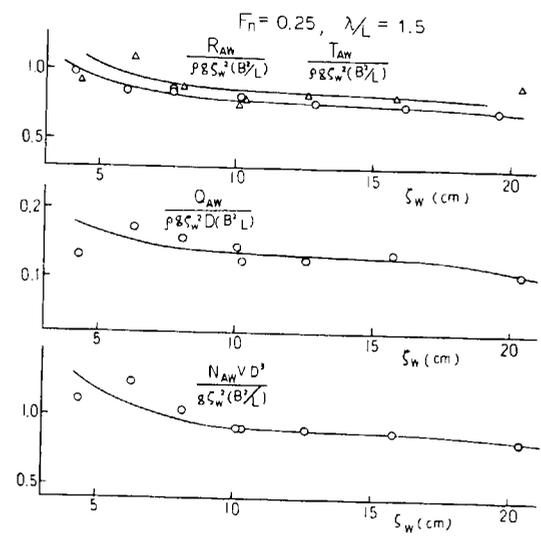
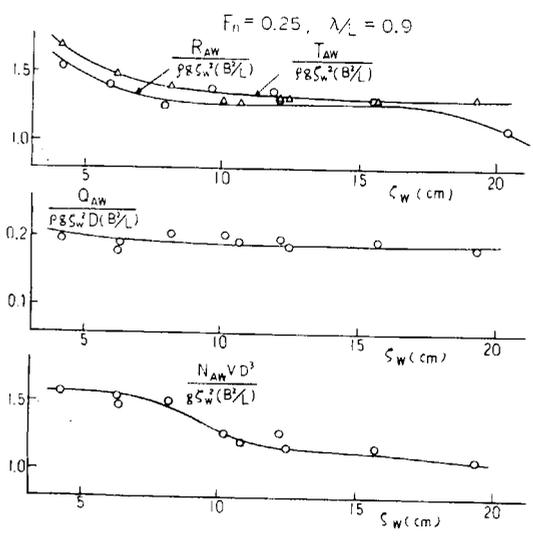
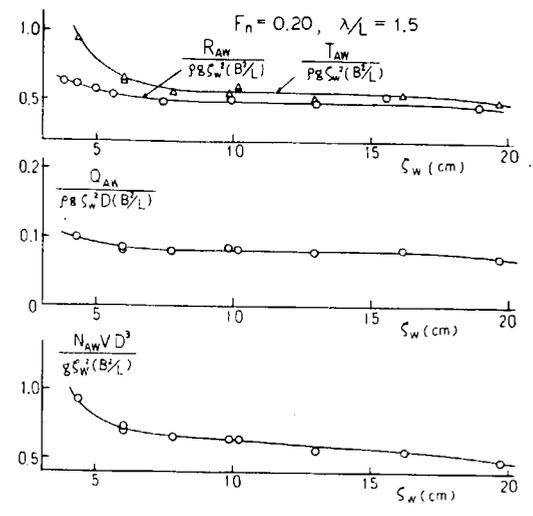
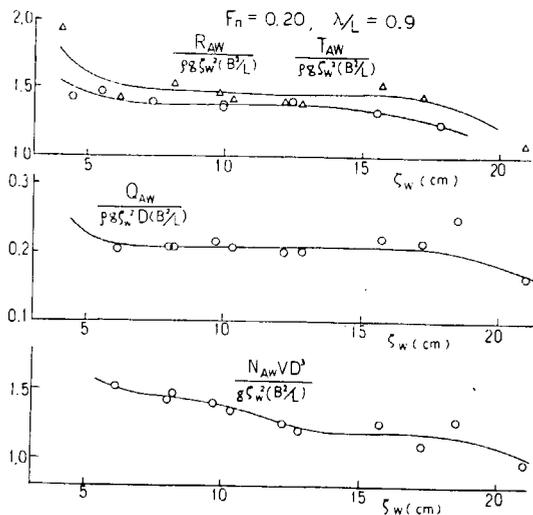


Fig. 3.2.14 抵抗、推力、トルク、回転数増加に対する波高影響

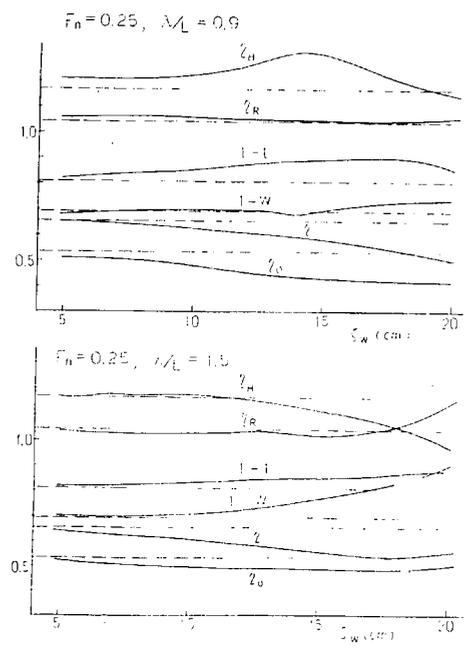
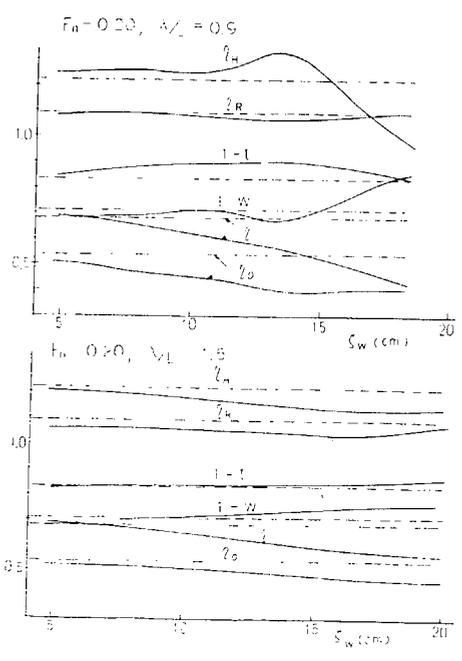


Fig. 3.2.15 自航要素に対する波高影響

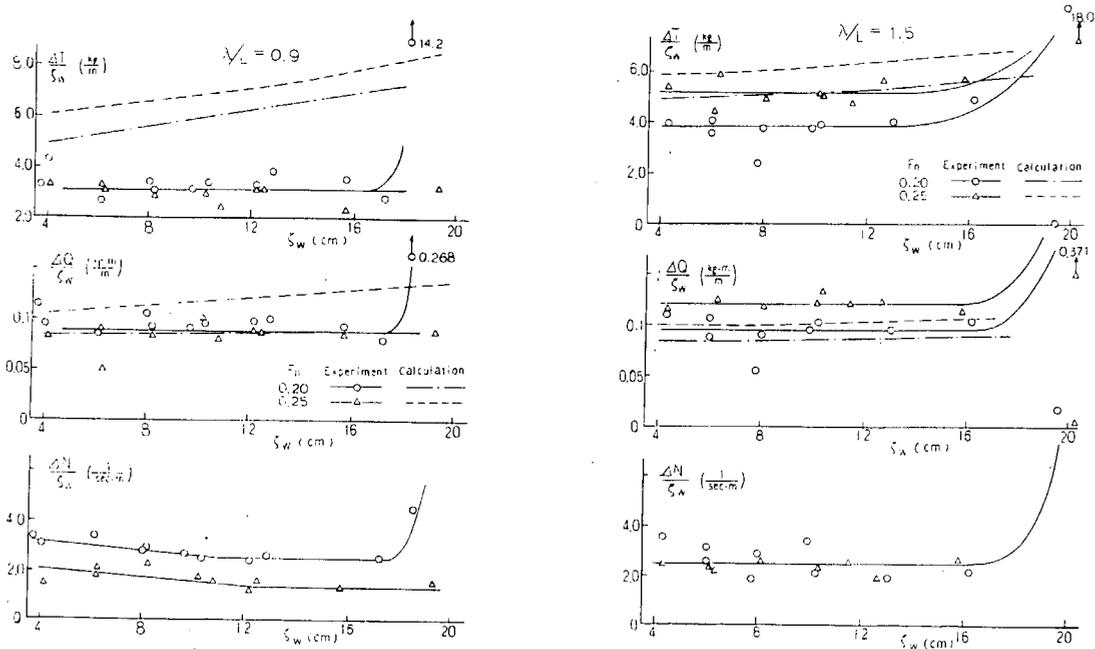


Fig.3.2.16 推力、トルク、回転数変動に対する波高影響

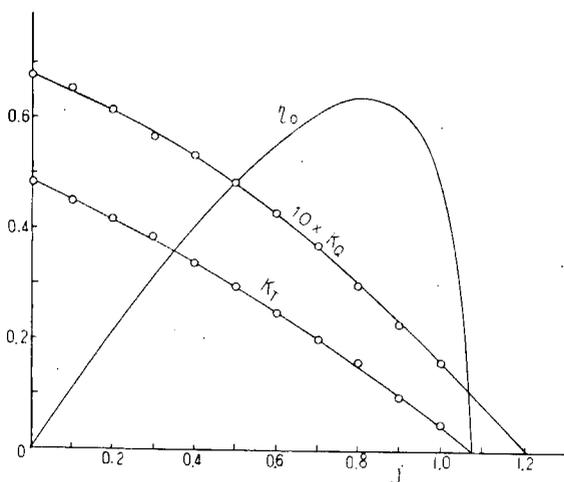


Fig.3.2.17 平水中プロペラ単独特性

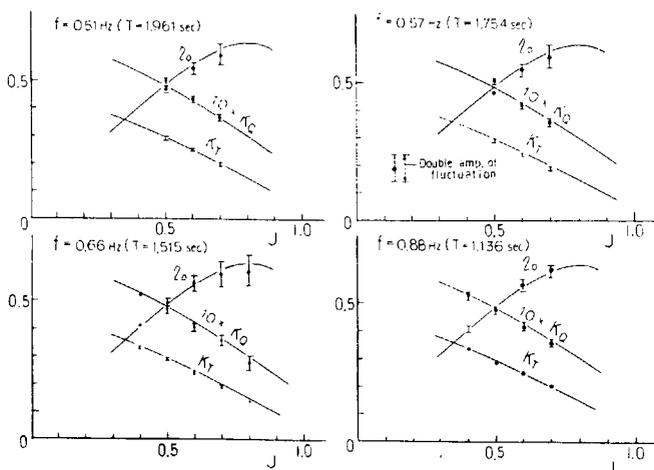


Fig.3.2.18 強制縦揺プロペラ単独試験結果

4. 実 船 試 験

4.1 解 析 法

4.1.1 経 緯

SR125 部会では実船試験用専用高速解析装置を開発した(研究資料№171の5.1参照)。

47年度に実施した実船試験(JA号, SA号)のデータはこの装置を使用して解析され, その結果が本報告の4.2, 4.3に記載されている。

この2船の解析後に48年度予算でメモリーを4Kワード増設し, 本装置のメモリーは合計12Kワードとなり, より複雑な解析が可能になった。

本装置のハードウェアはこれで一応の完成となったので, ソフトウェアの充実が計られた。その結果, 実船試験用としては, ほぼ所期の目的を達成する段階にいたったので, ここに前年度報告では省略したソフトウェアの解説をまとめて記述することにした。

なお, メモリー増設により本格的に可能になった2現象間の相関関係の計算法の解説および解析例についても述べる。

本解析装置はもともとは汎用の時系列解析装置であり, 多種多様の機能を持つが, 本部会の解析にあたっては標準プログラムとも称すべきプログラムを作成した。すなわち, 各チームは第一次解析としてこのプログラムによって計算することになっている。さらに, 同一データサイズ, 同一サンプリングタイムおよび同一の図化の方法をとることになっているので, 同一解析法による完全にそろった結果が得られ, 各船間の比較が完全に行なえることになる。

本稿では, この標準プログラムを取り上げ詳細な解説を行なうことにする。

4.1.2 演算ルーチン

本解析装置では時系列解析に不可欠なフーリエ交換, スペクトラム, 伝達関数, コンボリューションなどの計算がソフトとして組み込まれており, 解析プログラムの作成にあたってはこれらの演算はルーチン略号で指定するすればよい。以下に, 本部会の解析プログラムで使用している演算ルーチンについて説明する。表題に記入した記号は本解析装置での指定用記号である。

(1) 有限フーリエ変換(FOU)

等時間間隔(Δt)でサンプリングして得られる有限時系列 X_t (標本数 N の t 番目)に対する有限フーリエ変換(DFT, Discrete Fourier Transform)は次式で与えられる。なお N は本装置ではブロックサイズと呼ばれている。

$$C_x(f) = \sum_{t=0}^{N-1} X_t \exp(-2\pi j f t / N) \quad (1)$$

$$f = 0, 1, \dots, N-1$$

$C_x(f)$ は X の f 次の復素型有限フーリエ係数で, 次式のように f 次の実部フーリエ係数 $A_x(f)$, 虚部フーリエ係数 $B_x(f)$ でも表現できる。 $A_x(f)$ を余弦フーリエ係数, $B_x(f)$ を正弦フーリエ係数とも言う。

$$A_x(f) = \sum_{t=0}^{N-1} X_t \cdot \cos(2\pi f t / N) \quad (2)$$

$$f = 0, 1, \dots, \frac{N}{2}$$

$$B_x(f) = \sum_{t=0}^{N-1} X_t \cdot \sin(2\pi f t / N) \quad (3)$$

$$f = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1$$

ここで, 無限に長い原信号から有限時間の信号を切りとったこと, また Δt ごとにナイキストサンプルしたことによって原信号の持つ性質を若干ゆがめてしまっているため, ウィンドーなどによる修正が必要になる。

X_t が時系列であると、 f は周波数に対応した番号になり、(1)式では N 個の周波数に対する C_x を得ることになる。著者によっては $C_x(f)/N$ をフーリエ係数と定義している。

(2) 有限逆フーリエ変換 (INV)

(1)式の有限逆フーリエ変換 (IDFT, Inverse Discrete Fourier Transform) は次式で与えられる。

$$X_t = \frac{1}{N} \sum_{f=0}^{N-1} C_x(f) \cdot \exp(2\pi j f t / N) \quad (4)$$

$$t = 0, 1, \dots, N-1$$

(2), (3)式の $A_x(f)$, $B_x(f)$ で書くと

$$X_t = \frac{1}{N} \left[A_x(0) + 2 \sum_{f=1}^{\frac{N}{2}-1} A_x(f) \cdot \cos(2\pi f t / N) + A_x(N/2) + 2 \sum_{f=1}^{\frac{N}{2}-1} B_x(f) \cdot \sin(2\pi f t / N) \right] \quad (5)$$

$$t = 0, 1, \dots, N-1$$

ここに、 $C_x(f)$ と $A_x(f)$, $B_x(f)$ の間には次の関係がある。

$$C_x(0) = A_x(0), \quad C_x\left(\frac{N}{2}\right) = A_x\left(\frac{N}{2}\right). \quad (6)$$

また、

$$\left. \begin{aligned} C_x(f) &= A_x(f) + j B_x(f) \\ C_x(N-f) &= A_x(f) - j B_x(f) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$f = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1$$

したがって、 $C_x^*(f) = C_x(N-f)$ (8)

$$f = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1$$

* は共役複素数を表わす。

普通 X_t は実数値の数列であるので、(2), (3)式からわかるように、 $A_x(f)$, $B_x(f)$ は実数である。したがって(6)式から、 $C_x(0)$, $C_x\left(\frac{N}{2}\right)$ も実数であることがわかる。(7), (8)式からこれ以外の $C_x(f)$ は $f = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1$ に対する $A_x(f)$, $B_x(f)$ を求めれば全部求まることがわかる。すなわち、(2), (3)式による $\frac{N}{2}$ 個の複素数値を求める計算と(6)式による 2 個の実数値を求める計算によって、(1)式の N 個のフーリエ係数 $C_x(f)$ の算出ができたことになる。本解析装置では(2), (3)式のような $\frac{N}{2}$ 個の計算方式を採用している。

(1), (2), (3)式の演算を高速化したアルゴリズムが FFT (Fast Fourier Transform) である。本装置ではこのアルゴリズムを使用しているため、フーリエ変換は従来型の算法である直接フーリエ変換 (Direct Fourier Transform) の $1/100$ 程度の演算時間で処理される。また、(4)式の逆フーリエ変換は(1)式と同じ形であるから、(1)式のアルゴリズムで処理できる。すなわち、逆フーリエ変換も高速演算される。

FFT algorithm についての解説を附録として本節の末尾に述べてあるので参考にされたい。

(3) オートパワースペクトラム (POW)

本装置の計算は、クーリー、チューキー法 (Cooley & Tukey method) と呼ばれる FFT を応用したスペクトラム計算法を採用している。したがって、有限時系列 X_t に対して、FFT によって(1)式の $C_x(f)$ あるいは(2), (3)式の $A_x(f)$, $B_x(f)$ が求まると、これを次式によってオートパワースペクトラム $P_{xx}(f)$ に直ちに換算してしまう。

$$\begin{aligned}
P_{xx}(f) &= C_x(f) \cdot C_x^*(f) \\
&= [A_x(f) + j B_x(f)] [A_x(f) - j B_x(f)] \\
&= A_x^2(f) + B_x^2(f)
\end{aligned}
\tag{9}$$

$$f = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1$$

FFT法によると(9)式の計算は極めて短時間に終るので、パワスペクトラムの時々刻々の変化の様子も知り得る。したがって時々刻々に算出されるパワスペクトラム $P_{xx}(f)$ の平均値 $\overline{P_{xx}(f)}$ なる量を考えることができる。

$$\overline{P_{xx}(f)} = \overline{A_x^2(f) + B_x^2(f)} \tag{10}$$

本解析装置では、時々刻々の $P_{xx}(f)$ およびそれらの平均値 $\overline{P_{xx}(f)}$ の算出、表示が可能である。後述のように、標準プログラムでは重ねづらし法でもとめた平均値 $\overline{P_{xx}(f)}$ を最終結果としてハードコピーするようになっている。

従来型の算法 (Blackmann, Tukey 法と呼ぶ場合がある) では、オートパワスペクトラム $S_{xx}(f)$ オート・コリレーション関数 $R_{xx}(\tau)$ のフーリエ変換として、次式により算出する。本稿では従来法をFFT法と区別するため別の記号で表示する。

$$\begin{aligned}
S_{xx}(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) \cdot \exp(-j 2\pi f \tau) \cdot d\tau \\
&= 2 \int_0^{\infty} R_{xx}(\tau) \cdot \cos(2\pi f \tau) \cdot d\tau
\end{aligned}
\tag{11}$$

すなわち、時系列 X_t からまず $R_{xx}(\tau)$ を求めた後に、 $S_{xx}(f)$ を求めている。また、従来法ではこのフーリエ変換も直接フーリエ変換で行なっているので、FFT法に比し演算時間が大になるが、 $R_{xx}(\tau)$ の算出に非常に時間がかかるのが欠点である。

今、 X_t が meter の次元を持つ現象だとすると、(11)式から、 $S_{xx}(f)$ は周波数 f (1/sec) の関数として $m^2 \cdot \text{sec}$ の次元を持つ。したがって $\int_{-\infty}^{\infty} S_{xx}(f) df$ は m^2 の次元となり、現象のパワを表わす。

これに対し、(9)式の $P_{xx}(f)$ は m^2 の次元であり、 f は周波数に対応する番号であり無次元である。したがって $\sum P_{xx}(f)$ は m^2 であり現象のパワを表わす。1回の計算に使用する時系列の数すなわちブロックサイズ N を 256 とすると、

$$X_0, X_1, X_2, \dots, X_{255}$$

なる数列の解析をすることになる。ここでサンプリングタイム Δt を 1 sec とすると、この時系列の長さは $N \times \Delta t = 256 \text{ sec}$ である。(1)式の $C_x(f)$ は

$$C_x(0), C_x(1), C_x(2), \dots, C_x(255)$$

のように、 $\frac{1}{N \cdot \Delta t} = 1/256 \text{ Hz} = 0.00391 \text{ Hz}$ ごとに 256 ケ算出される。すなわちこの値は周波数分解能を表わす。実際には(2), (3)式および(9)式によって $\frac{N}{2}$ ケの計算を行なっているので、

$$P_{xx}(1), P_{xx}(2), \dots, P_{xx}(127)$$

が算出される。その周波数間隔は $\Delta f = \frac{1}{N \cdot \Delta t} \text{ Hz}$ であるので、 $f_{\text{max}} = \frac{1}{N \cdot \Delta t} \times \frac{N}{2} = 0.5 \text{ Hz}$ まで計算されることになる。なお、 $S_{xx}(f)$ を f が $-\infty \sim +\infty$ の範囲で定義したオートスペクトラムであるとする

$$P_{xx}(f) = 4 S_{xx}(f) \cdot \Delta f, \quad (\text{例えば } m^2) \tag{12}$$

$$S_{xx}(f) = P_{xx}(f) / 4 \cdot \Delta f, \quad (\text{例えば } m^2 \cdot \text{SEC}) \tag{13}$$

$$\text{ここに } \Delta f = 1/N \cdot \Delta t \text{ (SEC}^{-1}\text{)}$$

なる関係にあることに注意されたい。

なお、本解析装置でオートパワースペクトラム $P_{xx}(f)$ を算出し、その結果をグラフィックディスプレイさせると、
 図中に次の量の算出値が自動的に記入されるように特別にプログラムを追加してある。

パワースペクトラムから求めた分散

$$\begin{aligned} P.VAR = m_0 = \sigma_x^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} S_{xx}(f) \cdot df = \int_0^{\infty} 2S_{xx}(f) \cdot df \\ &= \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} P_{xx}(f), \text{ (例えば } m^2 \text{)} \end{aligned} \quad (14)$$

パワースペクトラムから求めた標準偏差

$$P.STD = \sqrt{P.VAR} = \sigma_x, \text{ (例えば } m \text{)} \quad (15)$$

パワースペクトラムから求めたゼロクロス平均周期

$$T(z) = \sqrt{m_0/m_2} \quad (\text{SEC}) \quad (16)$$

パワースペクトラムから求めたピーク間の平均周期

$$T(p) = \sqrt{m_2/m_4} \quad (\text{SEC}) \quad (17)$$

パワースペクトラムから求めたバンド幅パラメーター

$$BWP = \varepsilon = \sqrt{m_0 m_4 - m_2^2 / m_0 m_4} \quad (18)$$

ここに、

$$m_n = \sum_{r=1}^{\frac{N}{2}-1} \left(\frac{f}{N \cdot \Delta t} \right)^n \cdot P_{xx}(f) \quad (19)$$

(4) クロスパワースペクトラム (POW)

2現象の有限時系列 X_t, Y_t のクロスパワースペクトラム $P_{YX}(f)$ は、FFT 法ではフーリエ係数の積として次式から求める。

$$\begin{aligned} P_{YX}(f) &= C_X^*(f) \cdot C_Y(f) \\ &= [A_X(f) - j B_X(f)] \cdot [A_Y(f) + j B_Y(f)] \\ &= [A_X(f) \cdot A_Y(f) + B_X(f) \cdot B_Y(f)] \\ &\quad + j [A_X(f) \cdot B_Y(f) - B_X(f) \cdot A_Y(f)] \end{aligned} \quad (20)$$

$$f = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1$$

X_t を入力、 Y_t を出力時系列とすれば、 $P_{YX}(f)$ は入出力間のクロススペクトラムであり、第3式のような実部と虚部を持つ。

逆に、 Y_t を入力、 X_t を出力と考えると

$$\begin{aligned}
P_{xy}(f) &= C_y(f) \cdot C_x^*(f) \\
&= [A_y(f) - jB_y(f)] [A_x(f) + jB_x(f)] \\
&= [A_x(f) \cdot A_y(f) + B_x(f) \cdot B_y(f)] \\
&\quad + j [A_y(f) \cdot B_x(f) - B_y(f) \cdot A_x(f)] \\
&= [A_x(f) \cdot A_y(f) + B_x(f) \cdot B_y(f)] \\
&\quad - j [A_x(f) \cdot B_y(f) - B_x(f) \cdot A_y(f)] \\
&= P_{yx}^*(f) \tag{21}
\end{aligned}$$

となり、 $P_{yx}(f)$ の共役複素数すなわち虚数部の符号が逆になる。

従来方式ではクロスパワスペクトラム $S_{yx}(f)$ は、クロスコリレーション関数 $R_{yx}(\tau)$ のフーリエ変換として、次式で求める。

$$S_{yx}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{yx}(\tau) \cdot \exp(-j2\pi f\tau) \cdot d\tau \tag{22}$$

ここに $R_{yx}(\tau)$ は $R_{xx}(\tau)$ と異なり一般に偶関数ではないので、 $S_{yx}(f)$ は一般には実関数ではない。したがって、次式のように実数部であるコースペクトラム (co-spectrum) $C_{oxyx}(f)$ と虚数部であるクォーダレイチュアスペクトラム (quadrature-spectrum) $Q_{uoyx}(f)$ を持つ。

$$S_{yx}(f) = C_{oxyx}(f) + jQ_{uoyx}(f) \tag{23}$$

この表現は(20)式の第3式に対応している。したがって、

$$\left. \begin{aligned}
C_{oxyx}(f) &\equiv A_x(f) \cdot A_y(f) + B_x(f) \cdot B_y(f) \\
Q_{uoyx}(f) &\equiv A_x(f) \cdot B_y(f) - B_x(f) \cdot A_y(f)
\end{aligned} \right\} \tag{24}$$

の関係にある。さらに

次式のように、クロススペクトラムの振幅部

$$|S_{yx}(f)|, \text{位相部 } \theta_{yx}(f) \text{ を考えることができる。}$$

$$S_{yx}(f) = |S_{yx}(f)| \cdot \exp[j\theta_{yx}(f)] \tag{25}$$

$$|S_{yx}(f)| = [C_{oxyx}^2(f) + Q_{uoyx}^2(f)] \tag{26}$$

$$\begin{aligned}
\theta_{yx}(f) &= \text{Arg} [S_{yx}(f)] \\
&= \tan^{-1} [Q_{uoyx}(f) / C_{oxyx}(f)] \tag{27}
\end{aligned}$$

本装置ではPOWで指定し、 $Y=X$ とすればオートパワスペクトラムの計算となり、 X, Y を共に生かせばクロススペクトラムが算出されるので、クロススペクトラムの指定記号もPOWである。

(25), (26), (27)式の計算は、本装置では自動制御の用語を使用し、ボード変換 (直交座標→極座標) と呼ばれており、組み込み演算ルーチンの一つになっていて、BODで指定できる。

(5) トランスファー関数 (TRA)

トランスファー・関数 (Transfer Function, 伝達関数) は造船関係では周波数応答関数 (Frequency Response Function) と呼ばれる場合が多い。トランスファー関数は一般に複素数で、振幅部すなわち振幅比特性 (Amplitude Ratio) と、位相部すなわち位相差特性 (Phase Difference) を含む。

造船関係では振幅比特性を振幅応答演算子 (Response Amplitude Operator) と呼ぶこともある。

不規則な入力時系列 X_t に対して、不規則な出力時系列 Y_t が得られたとすると、その系の伝達関数 $G_{YX}(f)$ は入出力のクロススペクトラム $P_{YX}(f)$ と入力オートスペクトラム $P_{XX}(f)$ の比として求まる。

$$G_{YX}(f) = P_{YX}(f) / P_{XX}(f) \quad (28)$$

この演算を TRA なる指定記号で行ないうる。 $G_{YX}(f)$ は複素数であるから、BOA でボード変換演算を行なうと、振幅比 $\bar{A}_{YX}(f)$ と位相差 $\Psi_{YX}(f)$ を得る。

$$\begin{aligned} \bar{A}_{YX}(f) &\equiv |G_{YX}(f)| \\ \Psi_{YX}(f) &\equiv \text{Arg}[G_{YX}(f)] \end{aligned} \quad (29)$$

(28) 式の演算も短時間で終了するので、伝達関数の平均値 $\overline{G_{YX}(f)}$ が算出できる標準プログラムでは $\overline{G_{YX}(f)}$ を算出しておき、その値に対して (29) 式の換算を行ない、平均特性としての振幅比と位相差を図化して表示している。

伝達関数の振幅比特性は入出力のオートパワスペクトラムの比として次式からも求め得る。

$$\bar{A}_{YX}(f) = [P_{YY}(f) / P_{XX}(f)]^{1/2} \quad (30)$$

もちろん、この演算も演算ルーチンの組合せで簡単に可能であるが、一般に出力信号 Y_t にはノイズ N_t が含まれており、出力のオートパワスペクトラムは

$$P_{YY}(f) = P_{Y'Y'}(f) + P_{NN}(f) \quad (31)$$

のように、ノイズのオートスペクトラム P_{NN} を含む。(30) 式にこれを代入すると、得られる特性 $\bar{A}_{YX}(f)$ にはノイズの影響が直接に入ってしまうことがわらう。これに対し、出力にノイズが入っている場合の入出力間のクロススペク

$$P_{YX}(f) = P_{Y'X'}(f) + P_{NX}(f) \quad (32)$$

となる。ところが、ノイズと入力信号は全く無関係な完全独立事象であるので、ノイズ (外乱) 信号と入力信号のクロスパワスペクトラム $P_{NX}(f)$ は 0 となり、(28) 式による伝達関数の算出ではノイズの影響を受けない。したがって、本解析の標準プログラムでは (28), (29) 式の方式を採用している。位相差 $\Psi_{YX}(f)$ を必要としない場合、あるいは算出しなくても意味のない場合でも、この算法によって外乱の影響を除去できるので、この方式を常用することになっている。

(6) コーヒーレンシー・ファンクション

(5) 項に示したように、周波数伝達関数の振幅比 $\bar{A}_{YX}(f)$ は、(28) 式と (30) 式から独立に求まるこの二つの $\bar{A}_{YX}(f)$ の比をコーヒーレンシー関数 (Coherency Function) $\gamma^2(f)$ という。

$$\gamma^2(f) = \frac{|P_{YX}(f) / P_{XX}(f)|^2}{P_{YY}(f) / P_{XX}(f)} = \frac{[P_{YX}(f)]^2}{P_{YY}(f) \cdot P_{XX}(f)} \quad (33)$$

この計算は演算ルーチンの組合せで行なっており、指定記号はない。

出力信号に (31), (32) 式のようにノイズが含まれているとすると、(33) 式は次のように書ける。

$$\begin{aligned} \gamma^2(f) &= \frac{[A_{YX}(f)]^2 \cdot P_{XX}(f)}{P_{Y'Y'}(f) + P_{NN}(f)} \\ &= \frac{[A_{YX}(f)]^2 \cdot P_{XX}(f)}{[A_{Y'X'}(f)]^2 \cdot P_{XX}(f) + P_{NN}(f)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 1 - \frac{P_{NN}(f)}{[A_{YX}(f)]^2 \cdot P_{XX}(f) + P_{NN}(f)} \\
&= 1 - \frac{P_{NN}(f)}{P_{YY}(f)} \tag{34}
\end{aligned}$$

この式から $0 \leq r^2(f) \leq 1$ であることがわかる。

ここに $P_{NN}(f)$ が $P_{YY}(f)$ に占める割合が増すとコーヒレンシーは下がる。 $P_{NN}(f)$ は単にノイズだけとは考えないで、線型な応答特性 $A_{YX}(f)$ で説明できない部分を全部含むと考えると、 $r^2(f)$ は今考えている系が線型応答関数 $G_{YX}(f)$ あるいは $A_{YX}(f)$ で説明できる度合いを示していることになる。すなわち完全に説明できている場合には $r^2(f) = 1$ となり、全く説明できていない場合には $r^2(f) = 0$ となる。

これらのことは(33)式にも示されている。すなわち、 Y_t と X_t が完全無相関であれば $P_{YX}(f)$ は 0 となるので $r^2(f) = 0$ となる。またノイズ成分がなければ分母と分子は等しくなり、 $r^2(f) = 1$ となる。

(7) オート・コリレーション・ファンクション (COR)

オート・コリレーション・ファンクション (Auto Correlation Function, 自己相関関数) ϕ_{xx} はオートパワースペクトラムの時間領域での表示であるので、FFT法ではオートスペクトラム $P_{xx}(f)$ のフーリエ逆変換で求める。

$$\begin{aligned}
\phi_{xx}(t) &= \frac{2}{N} \sum_{f=0}^{\frac{N}{2}-1} P_{xx}(f) \cdot \exp(j 2\pi f t / N) \\
&= \frac{1}{N} \sum_{f=0}^{N-1} C_x(f) \cdot C_x^*(f) \cdot \exp(j 2\pi f t / N) \tag{35}
\end{aligned}$$

$$t = -\frac{N}{2}, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1$$

この演算は指定記号 COR で行なえる。すなわち、FFT法ではフーリエ変換、フーリエ逆変換がきわめて高速に演算可能なので、フーリエ係数 $C_x(f)$ 、 $C_x^*(f)$ を先に求め、これらの積を逆フーリエ変換してオート・コリレーション・ファンクション $\phi_{xx}(t)$ を求めている。

従来法では、次式によって生の数列から定義に従って自己相関関数 ϕ_{xx} を直接求めるが、この計算に時間がかかるのが従来法の欠点である。

$$\begin{aligned}
\phi_{xx}(\tau) &= \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} X_t \cdots X_{t+\tau} \tag{36} \\
\tau &= 0, \pm 1, \dots
\end{aligned}$$

前述の従来法の記号に従えば、オートコリレーションファンクションは $R_{xx}(\tau)$ で表わされ、次式で定義されている。

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \cdot x(t+\tau) \cdot dt \tag{37}$$

(36)式は(37)式と同様の式である。また

$$\begin{aligned}
R_{xx}(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} S_{xx}(f) \cdot \exp(j 2\pi f \tau) \cdot df \\
&= 2 \int_0^{\infty} S_{xx}(f) \cdot \cos(2\pi f \tau) \cdot df \tag{38}
\end{aligned}$$

と書けるが、これは(35)式と同様である。

(8) クロスコリレーション・ファンクション (COR)

X_t, X_t 間のクロスコリレーションファンクション (相互相関関数, Cross Correlation Function)

$\phi_{xy}(t)$ は自己相関関数と全く同様に次式で算出される。

$$\begin{aligned} \phi_{xy}(t) &= \frac{2}{N} \sum_{f=0}^{\frac{N}{2}-1} P_{xy}(f) \cdot \exp(j 2\pi f t / N) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{f=0}^{N-1} C_x(f) \cdot C_y^*(f) \cdot \exp(j 2\pi f t / N) \end{aligned} \quad (39)$$

$$t = -\frac{N}{2}, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1$$

この演算も COR で指定でき、 $X = Y$ とすれば(35)式の自己相関関数が算出される。

従来型の算式は

$$R_{yx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \cdot y(t + \tau) dt \quad (40)$$

$$R_{yx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{yx}(f) \cdot \exp(j 2\pi f \tau) \cdot df \quad (41)$$

であるが、オートコリレーションの場合と異なり、 $S_{yx}(f)$ は偶関数でないので、(38)式のような正の周波数領域のみの積分では表現し得ない。

(9) 全振幅分布関数 (DEX)

タイムヒストリー X_t から、全振幅 (Double Amplitude) を順番に読み取り、各種の統計値を算出するもので、新しく開発したソフトである。

指定番号 DEX (Double Amplitude Extream Value Density Function の略号) で演算を指定すると、両振幅分布関数が図化表示されるとともに、図中に以下の統計解析値が算出表示される。

なお、この解析では研究資料 No. 157 の解析法と同じ方式としたので、負の極大値、正の極小値を無視するような全振幅のとり方を採用しているため、全振幅の数はゼロクロス数の $\frac{1}{2}$ になる。また、ゼロクロスの回数で全時間を割った値の 2 倍が平均ゼロクロス周期となっている。

N : 全振幅の数

H.VAR : 全振幅の分散

H(1.) : 全振幅の平均値

H(.3) : 全振幅の高い方から $\frac{3}{10}$ の平均値, 有義値

H(.1) : 全振幅の高い方から $\frac{1}{10}$ の平均値

H(MX) : 全振幅の最大値

T.ZOR : ゼロクロスの平均周期

T.PTP : ピークとピーク間の平均周期

$\epsilon = 0$ の Rayleigh 分布の場合には次の関係がある。

$$\begin{aligned} H(.3) &= 1.598 H(1), \quad H(.1) = 2.032 H(1) \\ H(MX) &= 2.4 \sim 2.7 H(1) \quad (N=50 \sim 200) \end{aligned} \quad (42)$$

また、オートスペクトラムから求めた値との間には次の関係にある。

$$\begin{aligned}
 T.ZOR &\doteq T(Z) \\
 T.PTP &\doteq T(P) \\
 \sqrt{1 - (T.PTP/T.ZOR)^2} &\doteq BWP \\
 H.VAR &\doteq 8 \times (P.VAR) \\
 H(1) &\doteq 2.51 \times (P.STD)
 \end{aligned}
 \tag{43}$$

4.1.3 標準プログラム

標準プログラムはさん孔テープの型で保存されているので、これを通しさえすれば一定のフォームに従って直ちに解析を開始することができる。

このさん孔テープには

1. 演算法
2. ハードコピーされる内容
3. ハードコピー上の図面の書き方およびその図の縦、横軸のスケール

が、詳細に指定されて入っているので、全くそろった型で解析結果が得られ、実験相互間の比較に極めて便である。

標準プログラムは現在約10種あるが、各チームが必ず使用するプログラムを例にあげて、本解析装置のプログラムの組み方を略説する。

(1) 1現象の解析プログラムの例

Table 4.1.1 のプログラムによって、得られた解析結果のハードコピーを Fig. 4.1.1, 2, 3 として示した。

Table 4.1.1 はキーボードによりディスプレイ用のブラウン管上に書き込んだプログラムのハードコピーである。これをリンクテーブルと称しており、ブラウン管上にリンクテーブルを書き入れることで、プログラムの組込みは終っており、そのまま解析演算に入れる。プログラムの内容は下記のとおりである。

ANA, A;

アナログ入力信号を A/Dコンバーターを通して、Aエリアの先頭番地からブロックサイズ(N)だけ入力データとして取り込め。

DEX, A, B;

Aエリアの先頭番地からNデータ取り出して、DEXの演算を行ない、その結果をBエリアの始めの部分に格納せよ。前半に分布、後半に累積分布がメモリーされる。

COR, A, C;

Aエリアの先頭番地からNデータ取り出して、CORの演算を行ない、その結果をCエリアの始めからNデータ格納せよ。前半の $\frac{N}{2}$ に正の時間の分、後半に負の時間の分が格納される。

POW, A, D;

Aエリアの先頭番地からNデータ取り出して、POWの演算を行ない、その結果をDエリアの始めにNデータ格納せよ。オートパワーの場合には前半の $\frac{N}{2}$ だけが有意である。

JAV;

ここまでの演算を平均回数(AVE.TIME)に達するまで繰返し解析せよ。JAVはJump Averageの略、

DIS, B, 1, 8;

Bエリアデータ(この場合はDEXの結果)を $\frac{N}{2}$ だけ表示エリア1~8の範囲に表示せよ。グラフの表示エリアは縦軸方向が10等分されており、上から0~9の番号が附されている。図の横軸の長さは常に一定である。DISはDisplayの略。

COP;

前項の命令でストレージブラウン管上に表示されている画面をハードコピー（永久記録）せよ。ハードコピーユニットが自動的にスタートして画面のコピーが出て来る。ハードコピー中は解析は停止する。ここで出て来たのが Fig. 4.1.1 で、DEX の演算結果を大きく示している。COP は Copy の略

PAG;

ブラウン管上の画面を消去せよ。単に画面上のグラフを消すだけで、演算結果は記憶されている。PAG は Page の略。

DIS, D, 1, 8;

D エリアデータ（本例では POW の結果）を $\frac{N}{2}$ だけ表示エリア 1 - 8 の範囲に表示せよ。コピーがとれると、前の画は自動的に消去され、この画が出て来る。1 回で表示できるデータ数は $N/2$ になっているので、オートパワースペクトラムの場合にはこれでよいが、クロススペクトラムなどでは残りの $\frac{N}{2}$ を別の指示で呼び出してやらねばならない。

COP;

ハードコピーせよ。Fig. 4.1.2 のオートパワースペクトラムの図が得られる。

PAG;

この画を消去せよ。

DIS, B, 0, 2;

B エリアの内容（DEX の結果）を表示領域 0 ~ 2 に表示せよ。

DIS, C, 4, 4;

C エリアの内容（COR の結果）を表示領域 4 ~ 表示せよ。

DIS, D, 6, 8;

D エリアの内容（POW の結果）を表示領域 6 ~ 8 に表示せよ。

COP;

以上の 3 つの DISPLAY の命令で、3 種の画が同時にブラウン管上に表示される。このコピーが Fig. 4.1.3 であるが、この解析の総合結果が一枚の図に要領よく書き込まれているので、保存用として役立つ。

END;

この解析プログラムはここで終了することの命令。

本装置のデータエリアは A, B, C, D, E の 5 エリアであり、各エリアは 1024 words の容量である。したがってデータエリアのコアメモリーは合計で $5 \times 1024 = 5120$ words である。

また、1 回に計算する時系列の数 (N) をブロック・サイズと称しているが、附録に記したような N は FFT 法では 2^2 である必要があり、本装置では $N = 2^7, 2^8, 2^9, 2^{10}, 2^{11} = 128, 256, 512, 1024, 2048$ の 5 種の内から選択するようになっている。もちろん、大きな N を選ぶと一回に解析できる演算ルーチンの数が少なくなる。

なお、N データごとの演算を行っており、演算が終ると使用済みのデータは消してしまうので、本解析装置の容量はブロックサイズ N によって決まる。すなわちデータ総数 (NO OF DATA) はメモリーの容量には無関係なのでデータがありさえすれば相当大きくとり得る。

さて、以上で演算ルーチンの指定は終わったが、具体的な解析にあたっては、例えば Fig. 4.1.3 の右のタイトルディスプレイエリアに示されている内容の指示をしなければならない。

DATE TIME

実験が行なわれた日時あるいは解析を行なった日時をメモとして書き込む。

EXP. NO

今から解析する実験番号をメモとして打ち込む。

PHENOMENON

解析する現象名をメモとして記入する。2 現象分書き込むスペースがある。

CAL. FACT.

較正係数で 2.9985 Degree/Volt のような記入を行なう。これも 2 現象分のスペースがある。この係数が A/D コンバータによって読み取った数列に乘じられ、次元を持った現象の数列として演算が行なわれる。したがって結果の表示にも、DEX では横軸にその次元が記入され、POW では縦軸にその次元が自動的に記入される。

NO. OF DATA

解析に使用するデータの総数を指定する。

BLOCK SIZE

1 回の演算に使用するデータ数で X_t なる有限時系列の数 N に対応する。この指定は解析装置に切換スイッチがあり、例えば 256 のスイッチを押すと自動的に、このスペースに 256 と書き込まれ、演算も $N = 256$ で実行される。

NO. OF LAG

ラグ数の意で、前項の BLOCK SIZE を幾つずらして取るかということで、16 の倍数で指定できる。

AVE. TIME

重ねづらし平均法における平均回数 (Average Times) の意味で、何回計算をして (10 式) に示されているような平均をとるかということで、Fig. 4.1.4 に NO OF DATA, BLOCK SIZE, NO OF LAG, AVE TIME の関係を図示した。BLOCK SIZE と NO OF LAG および NO OF DATA を指定すると AVE TIME は自動的にきまるので、解析装置が算出して記入してくれる。また、NO OF DATA の指定に誤りがあれば、自動的に訂正した数字が記入されて、解析結果がでてくる。NO OF LAG は演算速度と関係があるが、指定した LAG 数で演算不能な場合にも自動的に訂正される。

SAMP TIME

サンプリングタイムの意で、本体の切換スイッチと連動して、文字が自動的に記入される。この数値に連動して、図の周波数軸のスケールおよび表示文字も自動的に変化する。

WINDOW

ウィンドウ処理を指定する欄で HAN (Hanning), HAM (Hamming), Q (Q) の指定記号で自動的にそれぞれのウィンドウがかかる。ただし、ここで指定するウィンドウ処理はパワースペクトルのみに有効である。なお記入なしでは Do nothing window である。

COMMENTS

メモ用の欄で何を書き込んでもよい。本例では上から順に全振幅分布関数、オートコリレーション、オートパワーの順に図示されており、これはプログラム番号 164 によるものである事をメモとして記入している。

図のタイトルスペースに記入されていない情報として、図の横軸および縦軸のスケールがある。縦軸は任意のスケールを指定できるが、指定しないとオートスケールで表示される。横軸は 2.4.8 倍の拡大と、任意量のカットができる。いろいろと加減して、希望の型の図ができたところで、標準プログラム用の紙テープを作成すると、図のスケールも記憶されるので大変便利である。

図の横軸の分割数は $64 \times 11 = 704$ である。横軸には必ず 11 等分点が記入されるが、その 1 目盛の間に最大

64ポイント書き込めるわけである。横軸の拡大、縮小は倍率係数で行なわれる。倍率を1にしておくと、1目盛の間に64ポイント、倍率を8にすると $64/8=8$ ポイント、倍率32では $64/32=2$ ポイントということになる。横軸が周波数軸の場合には1ポイントの間隔はブロックサイズが256の場合にサンプリングタイムが1secであると、 $1/256\text{Hz}$ であるから、このとき倍率が1であると1目盛の周波数は $\frac{1}{256} \times 64 = \frac{1}{4}\text{Hz}$ 、倍率が8では $\frac{1}{256} \times \frac{64}{8} = \frac{1}{32} = 0.03125\text{Hz} = 3.13\text{E-}02\text{Hz}$ となる。Fig. 4.1.2の横軸はこの数値がそのままあてはまる場合である。

Fig. 4.1.5として、Fig. 4.1.4の平均化の過程がわかる図を示した。オートコリレーションとオートパワーが示されているが、それぞれの図で上段に、各ブロックごとの算出結果を重ねて書き込んであり、下段の図は最終結果として使用する平均値である。

(2) 2現象の解析プログラムの例

Fig. 4.1.6~11にプログラムナンバー10と称している標準プログラムで、得られた一連の図および表のハードコピーの例を示した。

このプログラムは2現象の相関を知るためのもので、周波数伝達関数、コーヒレンシー関数などの算出を目的としているが、参考データとして各現象の全振幅の統計値、オートパワースペクトラムも図示させている。

プログラムの組み方は1現象の場合と同様であるので省略し、各図の内容を以下に略説する。2現象の解析では、線型系を仮定し、1現象はその系に対するインプットであり、他の現象はアウトプットであるとみなして解析するので、どちらをinにどちらをoutにするかを最初に決める必要がある。

Fig. 4.1.6は上図にインプットの全振幅統計解析結果、下図にアウトプットのそれが示されている。横軸はそれぞれの現象の次元で目盛られており、縦軸はパーセント表示でオートスケールである。もちろん縦軸を定量的に比較したい場合には固定スケールにすることができる。

Fig. 4.1.7の上図はインプット X_t のオートスペクトラム $P_{XX}(f)$ 、下図はアウトプット Y_t のオートスペクトラム $P_{YY}(f)$ である。この図の場合、周波数軸はFig. 4.1.2の2倍に拡大されており、低周波域をカットしている。このような操作で必要な周波数範囲のみを拡大してみる事ができる。なお、この周波数軸の選び方も、標準プログラムの紙テープの中に記憶されている。縦軸はオートスケールであるので、スペース一杯に図が書かれ、型の比較には便である。オートパワーの計算では、必要な定量的データは図中の右に文字で記入されるので、定量比較の場合にはこの値を利用すればよい。

Fig. 4.1.8の上図は周波数伝達関数 $G_{YX}(f)$ の振幅比部分 $\bar{A}_{YX}(f)$ 、下図は位相差部分 $\Psi_{YX}(f)$ を示している。TRAで(28)式の $G_{YX}(f)$ を求め、それをBOAでボード変換すると、前半の $N/2$ の部分に $\bar{A}_{YX}(f)$ 、後半の $N/2$ の部分に $\Psi_{YX}(f)$ がメモリーされるので、図化にあたって、前半の $N/2$ 部と、後半の $N/2$ 部を上下に並べて書くようなプログラムにしておけば、本図のごとき画が得られる。なお、本図は他の解析結果と定量的に比較する必要があるので、縦軸は固定スケールにするが、その値は2.3の試解析を行なって決めることになる。位相差のスケールは常に $\pm\pi$ ラジアンに固定しておくのが便である。

Fig. 4.1.9, 10は周波数伝達関数をさらに詳細に比較するときのために用意しておく演算結果の数表である。左端の列は、(29)式の f で、番号である。2番目の列は f に対応する周波数で、 $f \times \frac{1}{N \cdot \Delta t}$ (Hz)で算出される。したがって番号 f とこの周波数の関係は、ブロックサイズ N とサンプリングタイム Δt を変えない限り一定している。3番目の列はFig. 4.1.9では(29)式の振幅比特性 $\bar{A}_{YX}(f)$ 、Fig. 4.1.10では位相差特性 $\Psi_{YX}(f)$ を与えている。なおTableは希望する番号 f の範囲だけを取り出すことができるが、一枚のハードコピーに入る数は30ケになっている。

Fig. 4.1.11の上図は(33)式によるコーヒレンシー関数 $r^2(f)$ を示している。 $r^2(f)$ は理論的には1.0~0であるので、縦軸を本図のように1, 2の固定スケールにしておくとう便である。中図および下図は(20)式のクロスパワースペ

トラム $P_{YX}(f)$ で、中図はその実数部で24式の $C_{O_{YX}}(f)$ 、下図は虚数部 $Q_{U_{YX}}(f)$ を示している。クロスワーカーの演算では T R A の演算と同様に、前半の $N/2$ に実数部、後半の $N/2$ に虚数部が格納されるので、虚数部の Display にあたっては特に後半の $N/2$ を呼び出してやらなければならない。

- 以上の図および表は全く自動的にハードコピーされて出て来るが、データ読み込みを終わってから、演算およびハードコピーに要した時間は約 190 sec であった。この解析は一番時間のかかる方であるので、本解析装置がいかに高速であるかが理解いただけよう。この場合ハードコピーが 8 枚でてくるが、コピーのため演算が停止する時間は約 10 sec/枚であるので、約 80 sec の演算しない時間があったことになり、ネットの演算時間は約 110 sec である。

4.1.4 船体運動間の相関

前述の 2 現象間の相関関係を知る解析プログラムの適用例として、K 丸の実測記録を使用して得られた結果について略記する。

K 丸の実船試験では前報（研究資料 171）に述べられているように、まれに見る大時化に遭遇したが、今回の解析ではこのような異常状態を除外して、通常の波浪中航海時における 2 現象の船体運動間の相互関係を検討することにした。

解析した実験番号と海況および運動の値を Table 4.1.2 に示した。風の方向を Head, Bow, Beam, Quartering, Following に分け、それぞれ典型的な場合と思われるケースを選択して解析している。風の方向およびビューポート階級は風向風速計による値であるので、信頼性に富むから、その時の波の方向と風の方向が一致していたとは言えない。通常航海船速の場合のみを採り上げており意識的減速時のものは除外した。Head Sea（図中にこのような表現がしてあるが、厳密には Head Wind）の場合は比較のため 2 グループを解析している。

以下に示す一連の図は、前述の解析プログラムによって自動的に得られるハード・コピーをトレースして重ね合せた図である。

最上部の図はオートスペクトラムの図で、縦軸はオートスケールになっているので、各スペクトラムの形の比較と、周波数帯域の比較に便である。絶対量は前記の表を参照されたい。

2 番目と 3 番目の図は周波数伝達関数の振幅比部分と位相差部分である。振幅比部分の縦軸は適当な量の固定スケールを使用しているので、定量的に特性を読むことができる。位相差特性も $\pm 180^\circ$ 範囲の図になっている。

最下部の図はコーヒーレンシーで、縦軸は 1.2 までの固定スケールで描えてある。

なお、横軸はヨー角の入っていない図は出会い周波数 (f_e) で約 0.03~0.20 Hz, 出会い周期 (T_e) で約 30 sec ~ 5 sec の範囲が示されている。

ヨー角の入っている図では、 $f_e = 0 \sim 0.17$ Hz, $T_e = 0 \sim 6$ sec になっていることに注意されたい。

なお、パワースペクトラムが小なる周波数域での周波数伝達関数、コーヒーレンシーの算出値は無視した方がよいので、一部の図ではその部分をトレースしていない。

(1) ピッチ角とヒープ加速度 (Fig. 4.1.12~17)

ピッチ角はバーチカルジャイロで計測されており、模型試験あるいは理論計算でのピッチ角と厳密に対応している量である。一方、ここでのヒープ加速度はバーチカルジャイロのコマの上で測定された量であるので、加速度計がピッチ、ロールにより傾むくことによる影響が入らな正確な上下加速度になっているが、ジャイロの設置位置が船体重心位置上ではなく、相当船尾よりであったのでピッチ、ヒープの合成量としての設置位置でのヒープの加速度を測定していることに注意しなければならない。

波浪中の船体運動理論では、縦運動方程式としてピッチとヒープの線型連成運動方程式を用いている。そして、これは横運動方程式であるスウェー、ヨー、ロールの線型連成運動方程式とは連成しないとしている。この仮定は実海面の航走時においても適当であるかどうかを検討することが、今回の解析の一つの目標である。

Head Sea の場合の 2 枚の図 (Fig. 4.1.12, 13) を比較すると、周波数伝達関数、コーヒーレンシーともに傾

向的にも定量的にも非常によい一致を示す。したがって、これらの図の平均特性は、K丸の向い波中の周波数伝達関数を与えているとみなされる。一方、コーヒーレンシーは $f_e \div 0.1 \sim 0.18 H_s$ の範囲ではほぼ1に近く、非常に良い。すなわち、この範囲ではピッチとヒープ加速度の応答特性は図示の線型周波数関数でよく説明されることを意味している。

おそらく、理論計算によって測定位置でのピッチ角と上下動加速度の線型応答関数を算出すると、この図に示されている特性に非常に近くなるであろう。

次の2図 (Fig. 4.1.14, 15), Bow or Beam SeaではHead Seaの場合と同様に、コーヒーレンシーは $f_e \div 0.1 \sim 0.18$ では良い。一方、振幅比はHead Seaの場合の約 $\frac{1}{2}$ に減っていることが判る。オート・スペクトラムを見るとHead Seaの場合と同様にピッチとヒープ加速度がほぼ同じ周波数域で有意である。これを要するに、Bowあるいは向い波ぎみのBeam SeaではHead Seaの場合と同様に、ピッチとヒープ加速度のコーヒーレンシーは良く、線型応答で説明できるので、おそらく線型理論による算出値で実船特性も解説できることがわかる。

Quartering および Followingの図 (Fig. 4.1.16, 17)では、ピッチ角のパワーが低周波数域で、またヒープ加速度のパワーが高周波域で大であることが今までの場合とは異なる。したがってコーヒーレンシーは全般に低い。しかし振幅比特性は両者類似しており、位相差は長周期の場合すなわち波に船が乗っている時にはほぼ 90° に近くになっていることは興味深い。

以上のように、ピッチ角とヒープ加速度は互いに線型応答すると見てよいように思われる。その適合度は向い波で良く、追い波でやや悪いようである。

(2) ロール角とヨー角 (Fig. 4.1.18~22)

スウエー、ヨー、ロールの線型連成運動方程式で波浪中の横運動は説明されている。そこでヨー角とロール角の関係について検討してみよう。

ヨー角は船の方位ジャイロ、ロール角はバーチカルジャイロによって測定された量であるので、理論などで取り扱う重心回りのロール角、ヨー角と厳密に対応する量である。

この解析結果は出会い角ごとにFig. 4.1.18~22に示されているが、最上段のオートスペクトラムの図に注目してみると、いづれの図でもヨー角は出会い周期で100sec程度の位置に、ロール角では18sec程度の位置にパワーのピークがある。ヨー角のこの値は自動操舵系の固有周期に対応すると類推され、ロール角のそれはローリングの固有周期そのものにはかならない。

したがって、海況あるいは波と船の出会い角とは無関係に、この周期で選択的に動揺している可能性が考えられる。そうだとすると、ヨー角とロール角間の線型応答の度合いは低く、したがってコーヒーレンシー関数も低い値になる。この推測が妥当であったことが、各図のコーヒーレンシーを見ると如実に示されている。特にローリングの同調時にはコーヒーレンシーは低くなっている。これは同調横揺れはヨー角とは線型応答の関係にないことに示している。一方、ヨー角がピークパワーになる長周期時にはコーヒーレンシーの値は1に近づいているのが目立つが、これはロール角が小であるこの周波数帯では線型応答に近くなることを示している。

振幅比特性のピークはいづれも同調横揺れ周波数にあり、その値は波との出会い方向に無関係に約1.0であることは面白い。また、位相差はその周波数まではほぼ -180 度であることも目立つ。

以上のように、ロール角とヨー角間には線型応答の関係は乏しい。

(3) ロール角とスウエー加速度 (Fig. 4.1.23~25)

前項のようにロールは同調周期で勝手に動揺する傾向にあるので、本項の場合も前項と同様な特性になる可能性がある。

Fig. 4.1.24, 25の最上段のワスペクトラムを見ると、スウエー加速度のスペクトラムはヨー角のそれとは異なり、広い範囲にわたって有意であるが、コーヒーレンシーは前の場合と同様に全般に悪い。特に同調横揺れ時には

コーヒーレンシー関数が低いことは前と同じである。

このように、コーヒーレンシーが悪い場合には、周波数伝達関数の意味は少ないが、位相差が 0° を中心として変化していることは他の場合と異なる所である。

- なお、スウェー加速度はパーティカルジャイロのコマの上に置かれた加速度計によって測定されているので、ロール、ピッチによる測定誤差は取り除かれているが、設置位置が船尾よりであるので、純粋のスウェー加速度以外に、ヨー角による左右動加速度を含んでいる。

(4) ロール角とピッチ角 (Fig. 4.1.26~28)

平水中で模型船を強制的にピッチさせた時にロールは生じない。この意味ではロール角とピッチ角に線型応答系を考えるのはおかしい。一方、波浪中を航走するとロールとピッチは同時に起る。波が縦運動の基因となりピッチを生じさせるとともに、横運動をも起しロールするのである。正面向い波あるいは正横波中以外ではピッチとロールは必ず併発するが、連成はしないというのが現在の考え方である。

ピッチ角と波は線型応答系であり、ロール角と波も線型応答系で説明できるとすると、ロール角とピッチ角にも線型応答系を考えることができる。ただ、大角度ロールと波は非線型応答系であるので、一般にはロール角とピッチ角に線型応答を適用するのには無理がある。

解析例 Fig. 4.1.26 を見ると、ピッチが小なのにロールが固有周期で大きく揺れている帯域では、コーヒーレンシー関数は小になり、線型応答でないことが示されている。これに対し、ロールの周調周期から離れた周波数領域でほどほどにロールしている場合にはコーヒーレンシーが良くなる傾向がある。

Fig. 4.1.27, 28 ではコーヒーレンシーは全般的に悪いことが目立つ。Fig. 4.1.27 では同調ローリングの帯域で特に悪いが、Fig. 4.1.28 ではこの帯域でたまたまピッチが大であるのでそれ程悪くない。

3図を総合すると、コーヒーレンシーは予想より悪い。これはロールが同調動揺することに原因があるように思われる。

位相差が低周波域ではほぼ 90° で、同調ローリングの周波数で -180° へ急激に変る傾向にあるのは面白い。振幅比特性は3図とも似た特性を与えていることは興味深い。

(5) ヨー角とピッチ角 (Fig. 4.1.29, 30)

ヨー角とピッチ角も連成しないと考えられている。Fig. 4.1.29 は斜め向い波の場合であるが、ヨー角のスペクトラムのピークは極低周波域にあり、その帯域でのピッチ角は少なく、コーヒーレンシーも悪い。中程度の周波数帯域ではヨー角もピッチ角も程々であり、コーヒーレンシーは良くなる。高周波域ではピッチ角のみが大であるので、コーヒーレンシーはまた悪くなる。

以上の傾向は Fig. 4.1.30 の追い波の場合でも見られる。すなわち、ロール角とピッチ角の場合に比し、全般的にコーヒーレンシーが良い。つまり波を介してヨー角とピッチ角はある周波数帯域では線型応答していると見せる。

振幅比特性は2つの図で似たような傾向を示し、位相差は2つの図の特性が約 180° 一様にずれていることが目立つ。これは、波との出会い方向の差を考えると当然のことのようであり面白い。

(6) スウェー加速度とヒープ加速度 (Fig. 4.1.31, 32)

実測されたスウェー加速度は計測コンテナ設置位置での左右動の加速度であるので、Gまわりのヨーとスウェーの合成運動としての左右動の加速度になっているが、ロールの影響は全く入っていない。同様にヒープ加速度も、コンテナ設置位置での上下動の加速度でGまわりのピッチとヒープの合成運動の加速度である。したがってこの二者の間に、やはり連成はないと考えられる。

Fig. 4.1.31, 32 を見ると、この2現象とも加速度であるので、広い帯域にわたって分布していることがわかる。したがってコーヒーレンシーが広い範囲にわたって良い。

位相差特性は両図の特性がほぼ一致しており、振幅比特性は約2:1の関係になっているが傾向は全く似ているこ

とが目立つ。

このように、この2現象の関係も波を介在させて線型な応答特性で説明できるようである。

4.1.5 F F T法と従来法との結果の比較 (Fig. 4.1.33, 34)

・ F F T法を応用したスペクトラム解析は、従来法とは全く異なる原理で行なわれており、一部の学者の間では原理上正しくないとされている。

ここでは、原理の問題は別にして、従来法で算出した結果と比較して、実用算法として価値があるかどうかを検討してみる。

すでに莫大な計算を F F T法ですませておきながら、今さらこの問題を取り上げるとは何事だという疑問を持つ人が多いと思うが、多数の文献を調べて見ても比較の具体例が見あたらないので、この場所を借りて具体例を提示しようというわけである。

この厳密な比較は全く同じ数列を使用して行なわなければならないが、これが案外めんどりな作業であるので、比較の具体例の発表が少ないのではないと思われる。F F T法ではブロックサイズは 2^n でなければならないので、数列の数が512とか1024とか変な数になっている。一方、従来法では任意の数にとれるので、すでに計算されている例では1000とか2000とかきりのいい数になっているが、全く任意の数になっているので、比較のために改めて計算し直さなければならない。また、F F T法の解析装置では、ソフトとしてプログラムを組み込んでしまっているので、データの生の数列を出すのに不便になっている場合が多い。F F T法の解析装置を使用している所では、従来法の解析をしたことがない所が多いのであらためて従来法と比較するには大変な手間がかかる。したがって、このような検討は十二分にメーカーでなされているとの前提で使用している。ところが、案外に比較例がない、特にスペクトラム解析においてしかりである。

同一数列を使用した厳密な解析は現在進行中であるので、ここに提示できないが実用的な比較を Fig. 4.1.33, 34として掲げた。実線で示されている Spectrum 法で記入されている特性は、従来法の算法により電算機を使用して算出した結果である。SR108部会の実船試験のデータの解析結果であるが、サンプリングタイムを1 secとし、Qウィンドウをかけていることは点線で示されている本解析装置による F F T法の場合と同じである。

Spectrum法ではデータ数が1200~1300であるのに対し、F F T法では1024であり、Spectrum法ではラグ数を130~120としているのに対して、F F T法ではラグ数と同様に周波数分解能を決めるブロックサイズを256にしているので、分解能は約2倍になっている。なお、F F T法での平均回数は本例の場合7回である。

Fig. 4.1.33に示した実験番号Y-39の場合では、解析した時系列の場所はほぼ同じである。ロールの場合、両者がほぼ一致しており、スペクトラムの型で非常に似たものが得られている。加速度IIの場合は縦軸の定量的な一致度はやや悪いが、スペクトラムの型はよく似ている。

Fig. 4.1.34に示したY-52のピッチは、使用した時系列が約20分ずれている。スペクトラムのピークが2ヶ所にあり、複雑な型をしているにもかかわらず、両者の型はよく類似しており、時刻の差を考えると定量的にもほぼ一致していると見てよいであろう。

これらの例から判るように、F F T法によるスペクトラム計算は実用上は従来法による結果と一致するとみなしてよいようである。

4.1.6 む す び

具体例を用いて高速解析装置の使用法およびソフトウェアの一端を説明したが、使用者の参考になれば幸いである。

2現象の解析例として、船体運動相互間の解析を試行しているが、船首尾の上下、左右加速度と船体運動；ある点の変動水圧と船体運動；ある点のストレスと船体運動；回転数、トルクなどと船体運動などの相関関係を調査する方がより有用な解析となろう。

また、船体運動の2現象間の周波数伝達関数は海況をパラメータとしない一般特性として理論特性が計算可能である

ので、これを算出し本論で試みたような実船解析値と比較することには大きな意義が存在しよう。

附録 FFTアルゴリズムの解説

高速フーリエ変換 (FFT, Fast Fourier Transform) の解説は、造船学会関係では山内、大津の論文の附録に述べているのが唯一の例のようであるが、この記述は平易であるとはいえない。容易に入手できる和文の解説としては、吉沢正著 "数値解析" (岩波, 基礎工学) に有限フーリエ係数のクーリー・チューキーの算法として詳細に述べられている。電気通信あるいは数値計算関係の学会では5~6年前に非常に関心が持たれた項目のようであり、FFTに関する解説記事は予想外に多い。

解説論文としては、Cochran, Cooley の論文が有名のようであるが、山内、大津の論文および山田、横井の論文でもこの論文に従った説明がなされている。ここでは、もう一つの著名な解析論文である Bergland の解説を紹介することにしよう。なお、Cochran, Cooley の解説とは相当に異なるので、山田、横井の論文なども参考にされたい。なお、FFTアルゴリズムの原論文は Cooley と Tukey による論文である。また、従来法を Blackmann, Tukey 法とよぶことがあるのは、文献があるからである。

$$\text{いま} \quad W_N = \exp(i 2\pi/N) \quad (44)$$

と定義すると、(1)式のフーリエ変換は

$$C_x(f) = \sum_{t=0}^{N-1} X_t \cdot \exp(-i 2\pi f t/N) \quad (1)$$

$$C_x(f) = \sum_{t=0}^{N-1} X_t \cdot W_N^{-ft} \quad (45)$$

と書け、(4)式の逆フーリエ変換は

$$\hat{X}_t = \frac{1}{N} \sum_{f=0}^{N-1} C_x(f) \cdot W_N^{ft} \quad (46)$$

となる。

ここで、(45), (46)式をまとめる一般型を考える。

$$\hat{X}(j) = \sum_{k=0}^{N-1} A(k) \cdot W_N^{jk} \quad (47)$$

$\hat{X}(j) \rightarrow X_t$, $A(k) \rightarrow C_x(f)/N$ とすれば(46)の逆変換式になる。

(45)式を共役複素数で変形すると

$$C_x(f) = \left[\sum_{t=0}^{N-1} X_t^* \cdot W_N^{ft} \right]^* \quad (48)$$

となるので、(47)式で

$$\hat{X}(j) \rightarrow C_x^*(f), \quad A(k) \rightarrow X_t^* \quad \text{とすれば正変換式と同じになる。}$$

故に、ここでは以後(47)式的一般型でFFTのアルゴリズムを考えることにしよう。

説明を簡単にするため、 $N=8$ の場合について述べることにすると、

$$j = 0, 1, \dots, 7 \quad k = 0, 1, \dots, 7$$

までを考えればよい。

j, k を 2 進数で表わすと

$$\left. \begin{aligned} j &= j_2 4 + j_1 2 + j_0 \\ k &= k_2 4 + k_1 2 + k_0 \end{aligned} \right\} \quad (49)$$

となり, ここに j_0, j_1, j_2 および k_0, k_1, k_2 はそれぞれ 0 か 1 の値しかとれない。

(47)式を j_0, j_1, \dots など書き換えると

$$\begin{aligned} \widehat{X}(j_2, j_1, 0) &= \sum_{k_0=0}^1 \sum_{k_1=0}^1 \sum_{k_2=0}^1 A(k_2, k_1, k_0) \cdot W_N^{(j_2 4 + j_1 2 + j_0)(k_2 4 + k_1 2 + k_0)} \end{aligned} \quad (50)$$

$$\text{ここに } W_N^{m+n} = W_N^m \cdot W_N^n \quad (51)$$

であるから

$$\begin{aligned} &W_N^{(j_2 4 + j_1 2 + j_0)(k_2 4 + k_1 2 + k_0)} \\ &= W_N^{(j_2 4 + j_1 2 + j_0)k_2 4} \cdot W_N^{(j_2 4 + j_1 2 + j_0)k_1 2} \cdot W_N^{(j_2 4 + j_1 2 + j_0)k_0} \end{aligned} \quad (52)$$

右辺の各項を書き改めると

$$W_N^{(j_2 4 + j_1 2 + j_0)k_2 4} = \left[W_N^{8(j_2 2 + j_1)k_2} \right]^{j_0 k_2 4} \quad (53)$$

$$W_N^{(j_2 4 + j_1 2 + j_0)k_1 2} = \left[W_N^{8j_2 k_1} \right]^{(j_1 2 + j_0)k_1 2} \quad (54)$$

$$W_N^{(j_2 4 + j_1 2 + j_0)k_0} = W_N^{(j_2 4 + j_1 2 + j_0)k_0} \quad (55)$$

$$\text{ここに } W_N^8 = \left[\exp(2\pi i/8) \right]^8 = \exp(2\pi i) = 1 \quad (56)$$

であるから, (53), (54)式の [] 内は 1 になる。

ゆえに(50)式は次のように書ける。

$$\begin{aligned} \widehat{X}(j_2, j_1, j_0) &= \sum_{k_0=0}^1 \sum_{k_1=0}^1 \sum_{k_2=0}^1 A(k_2, k_1, k_0) \cdot W_N^{j_0 k_2 4} \cdot W_N^{(j_1 2 + j_0)k_1 2} \cdot W_N^{(j_2 4 + j_1 2 + j_0)k_0} \\ &\quad \underbrace{\hspace{10em}}_{A_1(j_0, k_1, k_0)} \\ &\quad \underbrace{\hspace{15em}}_{A_2(j_0, j_1, k_0)} \\ &\quad \underbrace{\hspace{20em}}_{A_3(j_0, j_1, j_2)} \end{aligned} \quad (57)$$

この式を上記のようにサンメーションを分けて考えると, (57)式は以下の式で順番に計算されることになる。

$$A_1(j_0, k_1, k_0) = \sum_{k_2=0}^1 A(k_2, k_1, k_0) W_N^{j_0 k_2 4} \quad (58)$$

$$A_2(j_0, j_1, k_0) = \sum_{k_1=0}^1 A_1(j_0, k_1, k_0) W_N^{(j_1 2 + j_0)k_1 2} \quad (59)$$

$$A_3(j_0, j_1, j_2) = \sum_{k_0=0}^1 A_2(j_0, j_1, k_0) W_N^{(j_2 4 + j_1 2 + j_0) k_0} \quad (60)$$

すなわち

$$\hat{X}(j_2, j_1, j_0) = A_3(j_0, j_1, j_2) \quad (61)$$

となるが、この式から X と A_3 はビット変換 (bit reversal) の関係に並べ換えられることが判る。

(57)式あるいは(58)→(61)式の演算を図示すると Fig. 4.1.35 のようになる。なお図中の・印の近くの数字は例えば4ならば W_N^4 であることを意味している。本図が理解できれば、FFTアルゴリズムの大半が判ったと言える。(57)~(61)式と対比しながらじっくりと見ていただきたい。

なお、 $N = 8$ の場合には

$$W_N = \exp(i 2\pi/8) = \cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4} \quad (62)$$

である。したがって、次式の関係があり、実際の演算は1または i を乗ずることが多く、著しく簡単になっている。

$$\left. \begin{aligned} W_N^2 = i, \quad W_N^4 = -1, \quad W_N^6 = -i, \quad W_N^8 = 1 \\ W_N^1 = -W_N^6, \quad W_N^3 = -W_N^7 \end{aligned} \right\} \quad (63)$$

Fig. 4.1.35 で Node (・印) の数は 8×3 すなわち $N = 8 = 2^3$, $3 = \log_2 N$ であるので、 $8 \times 3 = N \times \log_2 N$ であることが理解できる。

一般に $N = 2^n$ の場合には、Fig. 4.1.35 の縦線上の Node の数は、縦線1本につき n 個となるので、

$$N = 2^n \text{ では } \text{Nodeの数} = N \log_2 N \quad (64)$$

なる関係がある。また、一つの Node では図中に例示したように、

$$A_1(7) = A_0(3) + W_N^4 \cdot A_0(7) = A_0(3) W_N^0 + A_0(7) \cdot W_N^4 \quad (65)$$

一般に、2回の複素乗算と1回の加算が行なわれるが、第1の乗算は1を掛けるだけであるから、実質上は乗算回数は半分に減る。また、(63)式のような関係があるので、第2の乗算回数も大約半分になってしまう。すなわち、FFT法では $\frac{N}{2} \cdot \log_2 N$ 回の複素乗算と $\frac{N}{2} \cdot \log_2 N$ 回の複素加算で演算が完了する。これに対し、(47)式を式に従って直接計算すると N^2 回の複素乗算と加算の複合計算が必要である。FFT法と直接法の演算回数の比を安全側に見積もって

$$2 N \log_2 N / N^2 = 2 \log_2 N / N \quad (66)$$

とすると、

$$N = 256 = 2^8 \text{ では } \frac{1}{16} = 0.063$$

$$N = 512 = 2^9 \text{ では } \frac{1}{28} = 0.035$$

$$N = 1024 = 2^{10} \text{ では } \frac{1}{51} = 0.020$$

$$N = 2048 = 2^{11} \text{ では } \frac{1}{93} = 0.011$$

となり、 N が増すにつれて小になり、よく使用される $N = 1024$ の場合で約2%、すなわち約50倍の速度で演算可能なことがわかる。

計算時間の短縮率はこのような簡単な算式では厳密には表わせないが、 $N = 2^{13} = 8192$ の場合に、IBM-7094 (2) でFFT法では約5 sec、従来法では約30分の計算時間であったとの記述がある。この時間の比は $1/360$ で、上式で算出すると約 $1/300$ であるから、略算式はほぼよい値を与えることがわかる。

参 考 文 献

- (1) 山内, 大津: "船の応答の非線型性と高次元スペクトラム" 造船学会論文集 №131, 1972.6
- (2) Cochran, Cooley etc :
"What is the Fast Fourier Transform?"
IEEE, Vol AU-15, №2, June 1967
- (3) Bergland :
"A guided tour of the fast Fourier transform"
IEEE Spectrum, July 1969
- (4) Cooley, Tukey :
"An algorithm for machine calculation of complex Fourier series"
Mathematics of Computation, 19-90 (1965)
- (5) Blackmann, Tukey :
"The measurement of power spectra"
Dover, N.Y. (1958)
- (6) 山田, 横井
"リアルタイム信号解析システム"
日本無線技報, №6, 1972

Table 4.1.1

```
!ANA, A;  
!DEX, A, B;  
!COR, A, C;  
!PON, A, D;  
!JAU;  
!DIS, B, 1, 8; ..... (Fig. 4.1-1)  
!COP;  
!PAG;  
!DIS, D, 1, 8; ..... (Fig. 4.1-2)  
!COP;  
!PAG;  
!DIS, B, 0, 2; } (Fig. 4.1-3)  
!DIS, C, 4, 4; }  
!DIS, D, 6, 8; }  
!COP;  
!END;
```

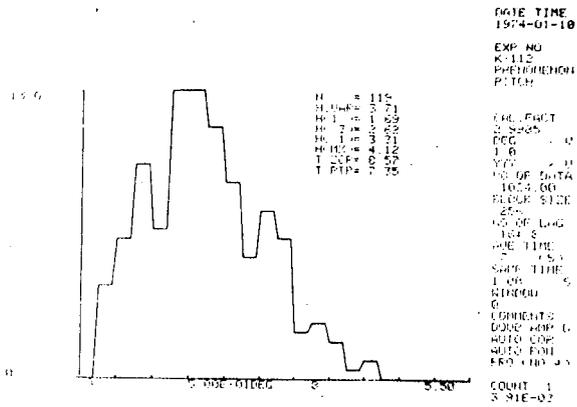


Fig. 4.1.1

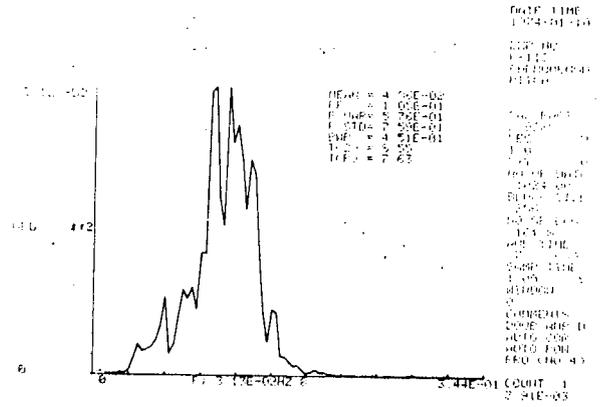


Fig. 4.1.2

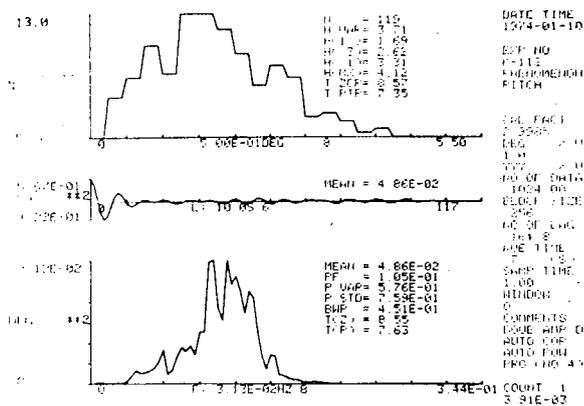


Fig. 4.1.3

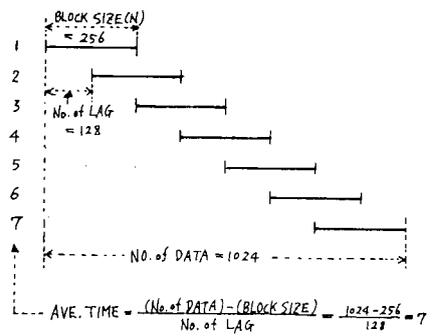


Fig. 4.1.4 重ねづらし平均法

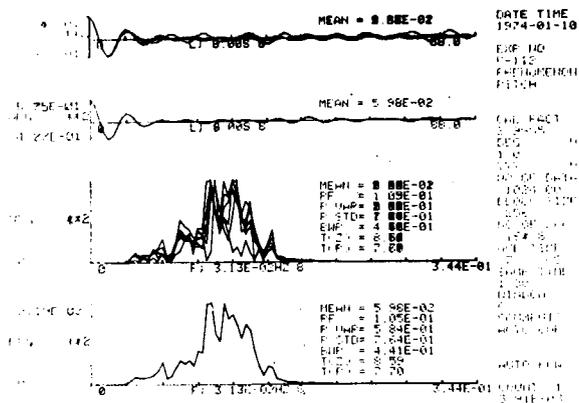


Fig. 4.15

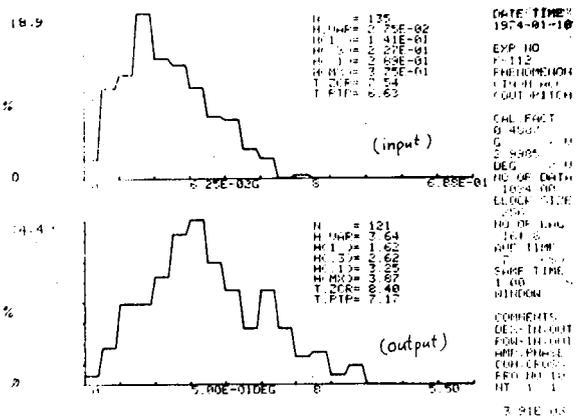


Fig. 4.16

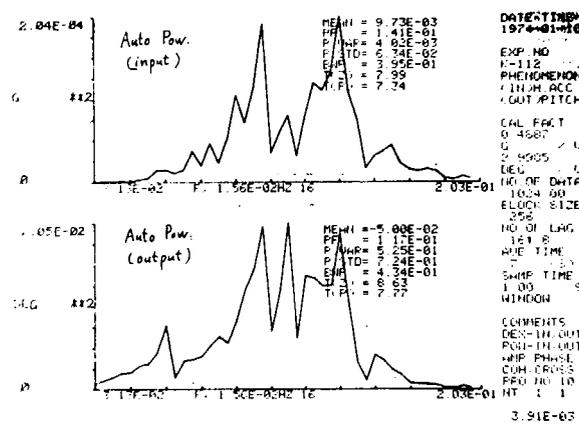


Fig. 4.17

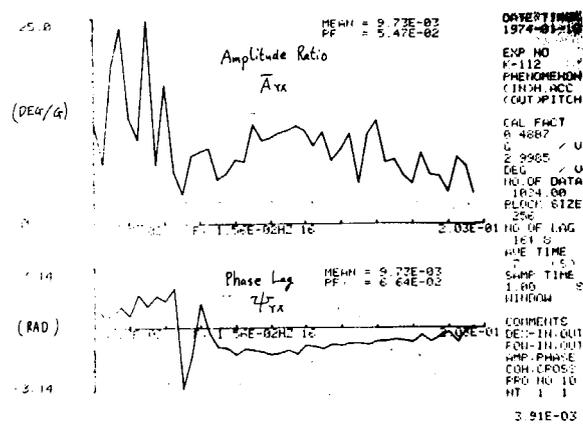


Fig. 4.18

$$F1: 3.91E-03 \text{ Hz} = \frac{1}{N \Delta t} \Delta f$$

MEAN = 9.73423E-03
 FF = 5.46875E-02

DATE/TIME
 1974-01-10

01	1.17188E-01	11.2834
02	1.11094E-01	11.7945
03	1.15008E-01	11.2068
04	1.12890E-01	9.44388
05	1.132813E-01	11.0208
06	1.136719E-01	7.66994
07	1.140625E-01	8.96532
08	1.144531E-01	10.8101
09	1.148438E-01	4.98611
10	1.152344E-01	10.8578
11	1.156250E-01	12.4661
12	1.160156E-01	7.51235
13	1.164063E-01	7.83958
14	1.167969E-01	5.91244
15	1.171875E-01	4.96127
16	1.175781E-01	8.58675
17	1.179688E-01	5.96703
18	1.183594E-01	5.83078
19	1.187500E-01	3.81634
20	1.191406E-01	8.06855
21	1.195313E-01	7.00850
22	1.199219E-01	2.99641
23	1.203125E-01	5.30919
24	1.207031E-01	4.95329
25	1.210938E-01	5.35133
26	1.214844E-01	5.41482
27	1.218750E-01	6.20263
28	1.222656E-01	4.22896
29	1.226563E-01	5.99136
30	1.230469E-01	4.86055

EXP NO
 K-112
 PHENOMENON
 (IN)X.ACC
 (OUT)PITCH

CAL FACT
 0.4887
 G / U
 2.9985
 DEG / U
 NO OF DATA
 1824.00
 BLOCK SIZE
 256
 NO OF LAG
 164.8
 AVE TIME
 7 (S)
 SAMP TIME
 1.00 S
 WINDOW

COMMENTS
 DEX-IN.OUT
 POW-IN.OUT
 AMP.PHASE
 COH.CROSS
 PRO.NO 10
 NT 1 1

3.91E-03

No. Encounter Frequency Amplitude
 (f) [fxΔf (Hz)] [A_x(f), %/Δf]

Fig. 4.1.9

$$F1: 3.91E-03 \text{ Hz} = \frac{1}{N \Delta t} \Delta f$$

MEAN = 9.73423E-03
 FF = 1.95313E-02

DATE/TIME
 1974-01-10

01	1.17188E-01	-1.09218
02	1.11094E-01	-1.38872
03	1.15008E-01	-8.53798E-01
04	1.12890E-01	-9.12899E-01
05	1.132813E-01	-1.00704
06	1.136719E-01	-8.13876E-01
07	1.140625E-01	-8.65881E-01
08	1.144531E-01	-7.53541E-01
09	1.148438E-01	-7.46632E-01
10	1.152344E-01	-8.36680E-01
11	1.156250E-01	-8.45070E-01
12	1.160156E-01	-6.40112E-01
13	1.164063E-01	-5.72594E-01
14	1.167969E-01	-6.19515E-01
15	1.171875E-01	-6.94813E-01
16	1.175781E-01	-7.58895E-01
17	1.179688E-01	-6.78968E-01
18	1.183594E-01	-4.25752E-01
19	1.187500E-01	-2.11308E-01
20	1.191406E-01	-7.10942E-01
21	1.195313E-01	-4.53734E-02
22	1.199219E-01	9.11565E-02
23	1.203125E-01	-4.96518E-01
24	1.207031E-01	-2.95201E-01
25	1.210938E-01	-2.44933E-02
26	1.214844E-01	-3.71840E-01
27	1.218750E-01	-1.29560E-01
28	1.222656E-01	-8.98206E-01
29	1.226563E-01	-2.05524
30	1.230469E-01	-6.47071E-01

EXP NO
 K-112
 PHENOMENON
 (IN)X.ACC
 (OUT)PITCH

CAL FACT
 0.4887
 G / U
 2.9985
 DEG / U
 NO OF DATA
 1824.00
 BLOCK SIZE
 256
 NO OF LAG
 164.8
 AVE TIME
 7 (S)
 SAMP TIME
 1.00 S
 WINDOW

COMMENTS
 DEX-IN.OUT
 POW-IN.OUT
 AMP.PHASE
 COH.CROSS
 PRO.NO 10
 NT 1 1

3.91E-03

No. Encounter Phase
 (f) Frequency Lag (RAD)
 [fxΔf (Hz)] [A_x(f)]

Fig. 4.1.10

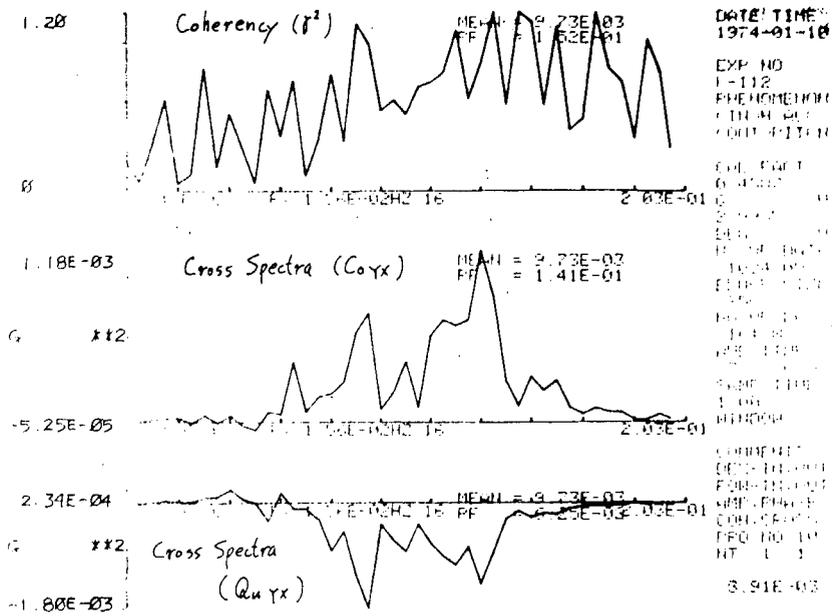


Fig. 4.111

Table 4.12

H_{1/3}: 統計解析上の全振幅の概値, T₀: 統計解析上の20%平均周期

実験番号	風		E-7°角		E-10°角		E-1°角		E-7°加速度		E-10°加速度		船速 kts
	出発方向	風力等級 (E-72+)	H _{1/3} deg	T ₀ sec	H _{1/3} deg	T ₀ sec	H _{1/3} deg	T ₀ sec	H _{1/3} g	T ₀ sec	H _{1/3} g	T ₀ sec	
K-56	Head	5	2.06	6.93	3.00	11.7	2.25	42.8	0.274	6.09			27
57	"	E	2.19	7.15	2.25	14.3	2.00	28.6	0.274	6.70			27
58	"	7	2.00	7.04	2.75	13.3	1.75	32.1	0.274	6.93			27
K-168	Head	7	1.74	7.07	2.50	13.6	1.5	32.7	0.152	6.25	0.152	6.25	27
169	"	7	2.75	8.00	2.00	12.5	1.0	45.3	0.211	6.66	0.211	6.66	27
170	"	7	1.75	7.90	2.00	13.7	1.25	45.1	0.167	6.70			27
K-111	Beam	7	2.93	8.99	4.00	11.3			0.158	6.27	0.158	6.27	27
112	"	7	2.65	8.29	3.50	12.9	2.00	19.7	0.257	6.27	0.257	6.27	26
113	Beam	7	2.56	9.43	5.75	13.1	2.50	17.4	0.2	6.51	0.2	6.51	27
114	"	7	1.53	9.43	4.50	13.9	2.62	22.5	0.173	6.70	0.211	6.27	27
115	"	6			2.60	14.5	3.25	28.7					27
K-147	Beam	6	1.88	7.80	2.0	13.9	2.50	22.8	0.305	6.90			26
148	"	6	1.81	7.69	2.50	14.0	1.50	22.7	0.225	7.15			27
149	"	6			2.0	14.7	1.62	11.1					27.5
K-151	Quartering	6	1.06	11.7	14.0	16.1	2.50	26.9	0.102	6.21	0.102	6.21	27
152	"	6	1.77	11.3	16.0	17.2	2.00	23.8	0.094	6.5	0.094	6.5	27
153	"	6	1.94	11.4	11.0	17.8	2.00	28.9	0.2	6.51	0.166	6.21	27
K-75	Following	5	1.77	11.5	11.5	17.0	10.0	14.2	0.156	6.64	0.172	6.4	27.5
76	"	7	2.25	12.1	13.0	17.3	2.5	27.7	0.172	6.27	0.224	6.6	28.3
77	"	7	2.06	11.7	12.5	17.1	2.5	27.2	0.156	6.27	0.274	6.27	27

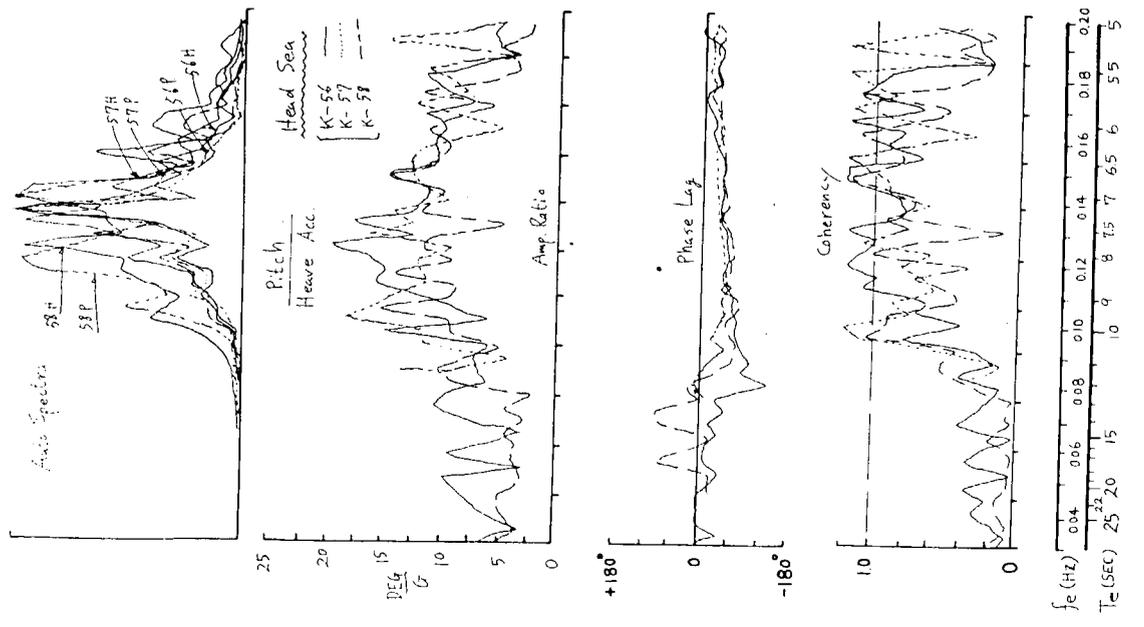


FIG. 4.1.1.2

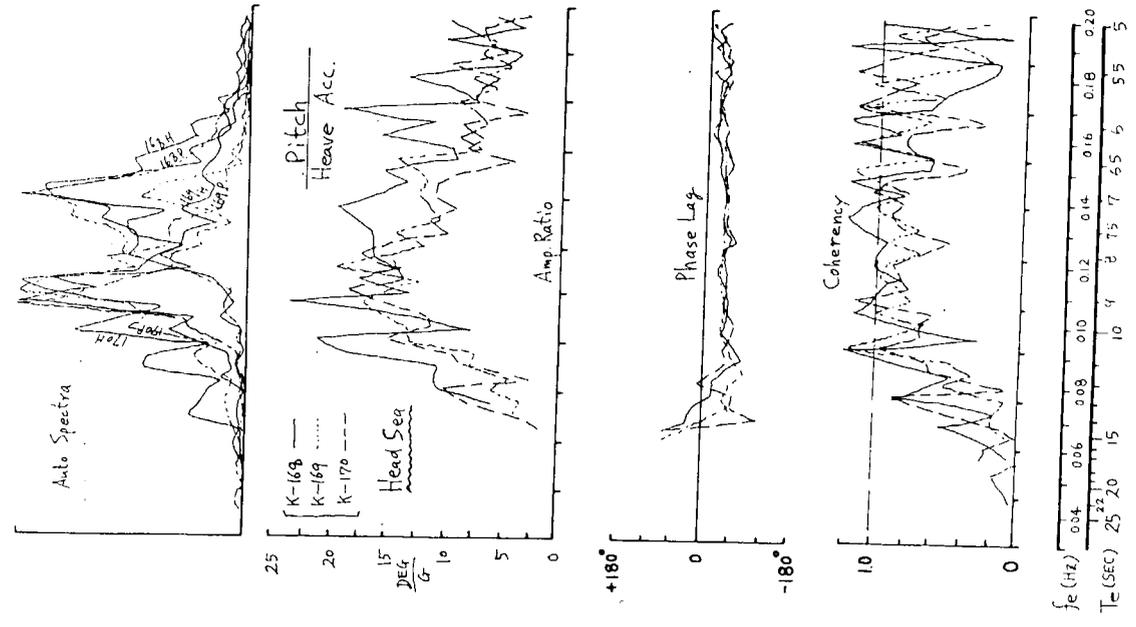


FIG. 4.1.1.3

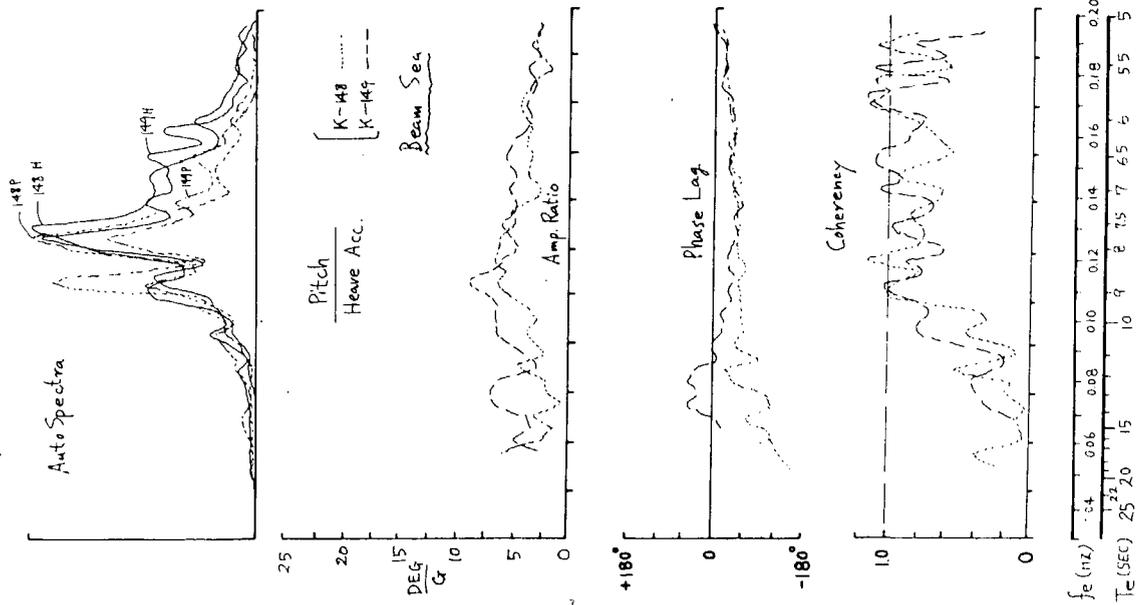


FIG. 4.1.15

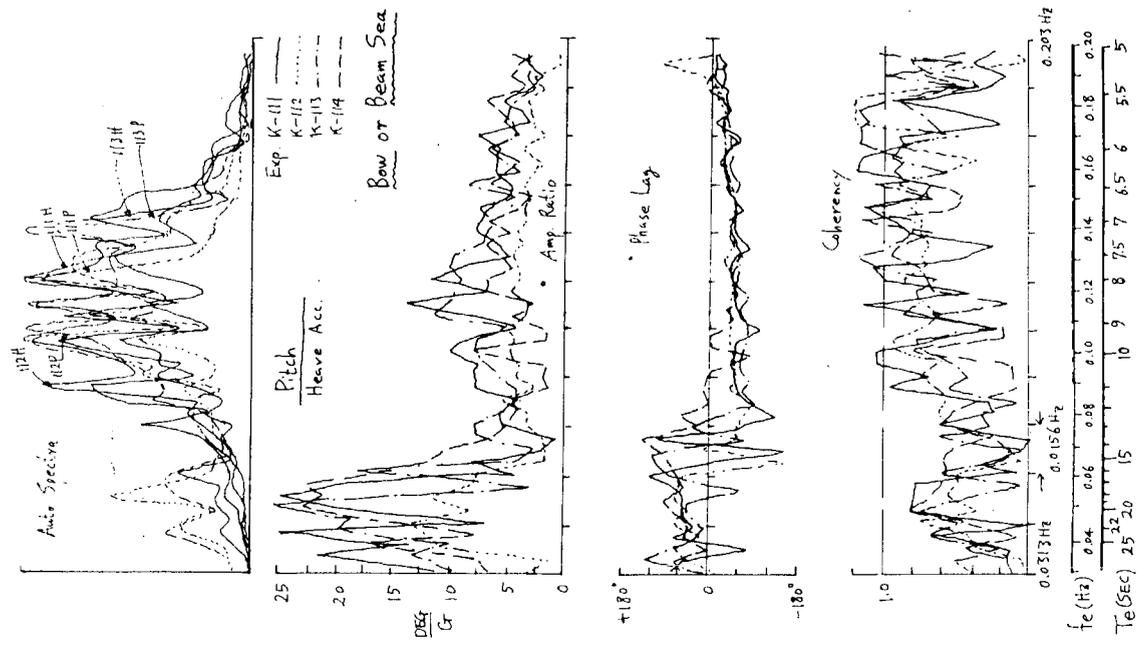


FIG. 4.1.14

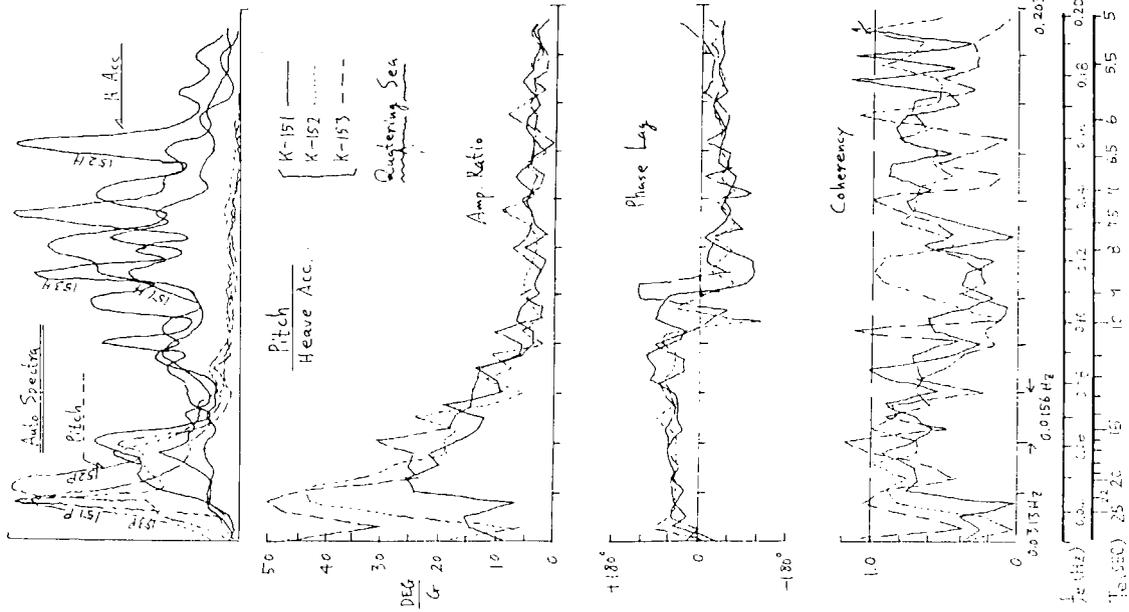


FIG. 4.1.16

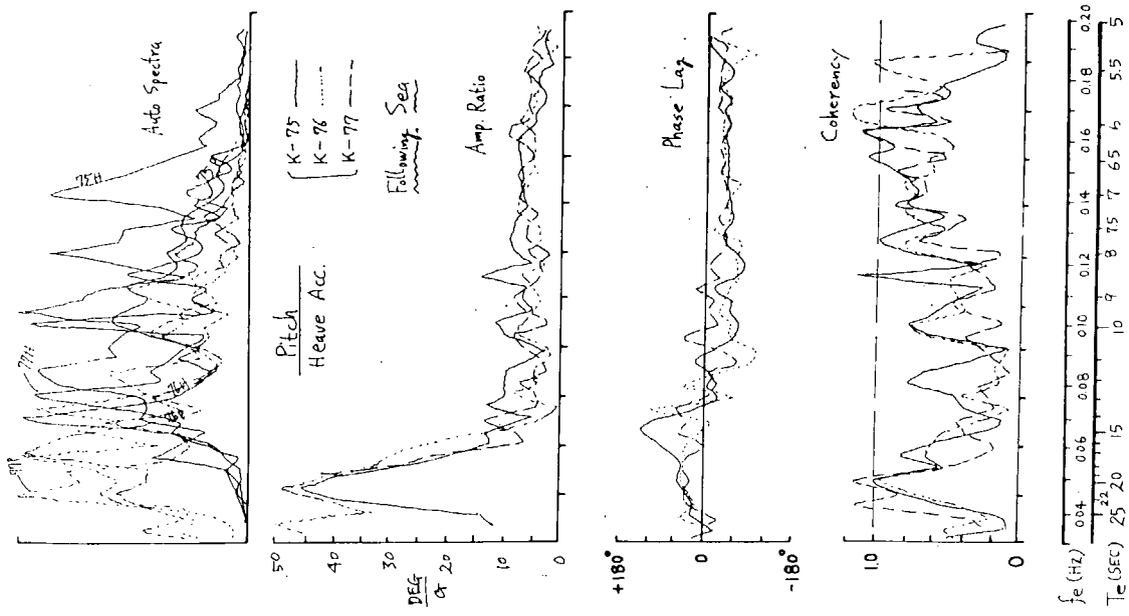


FIG. 4.1.17

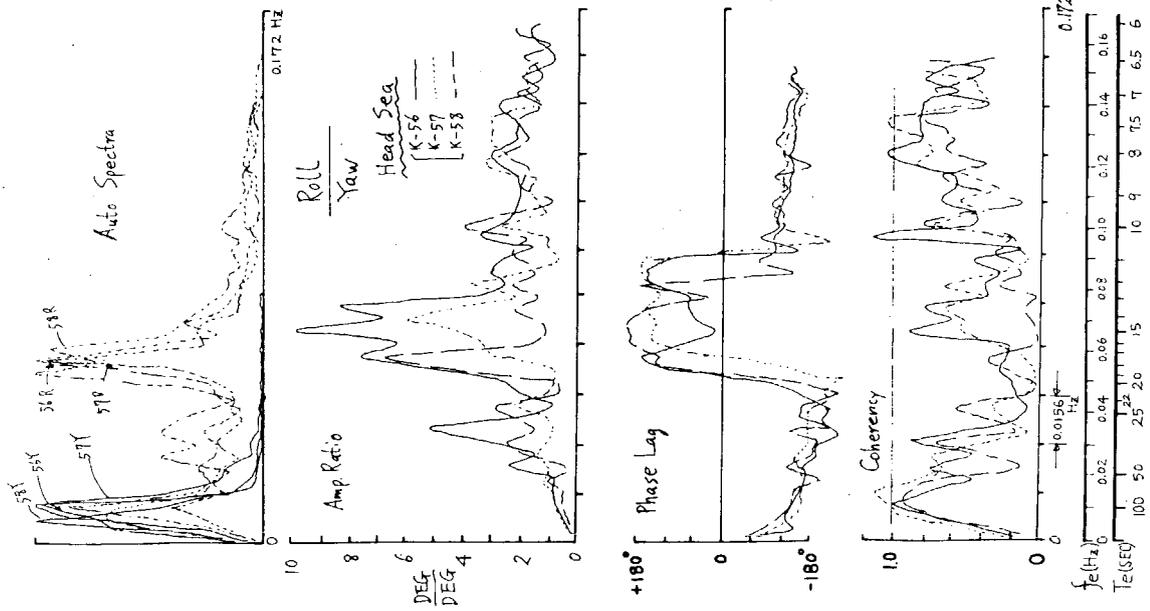


FIG. 4.1.18

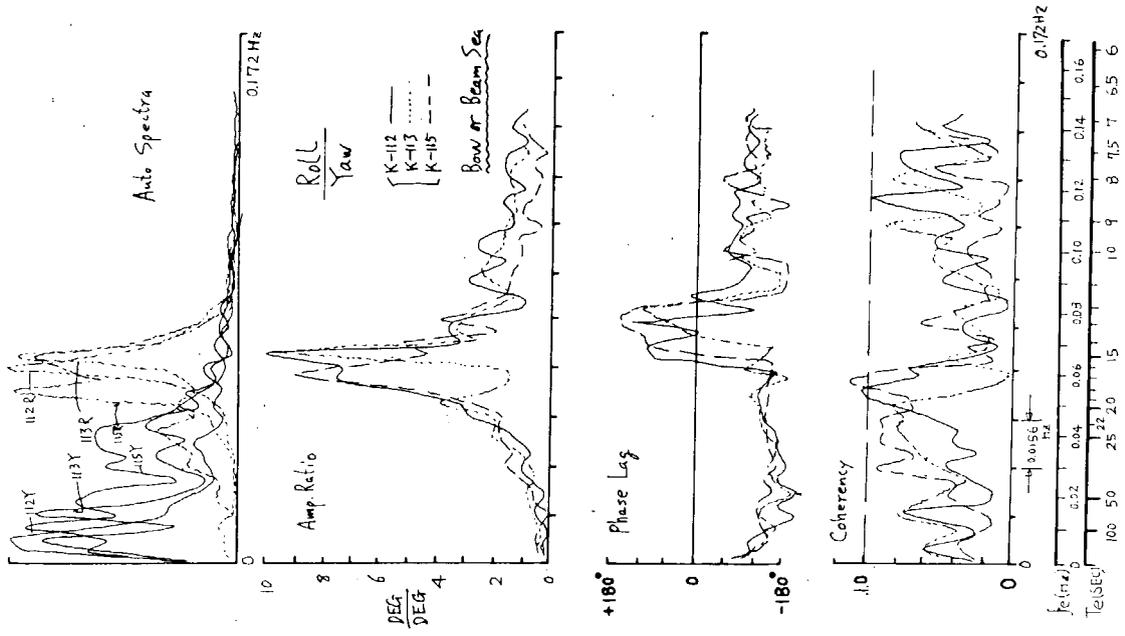


FIG. 4.1.19

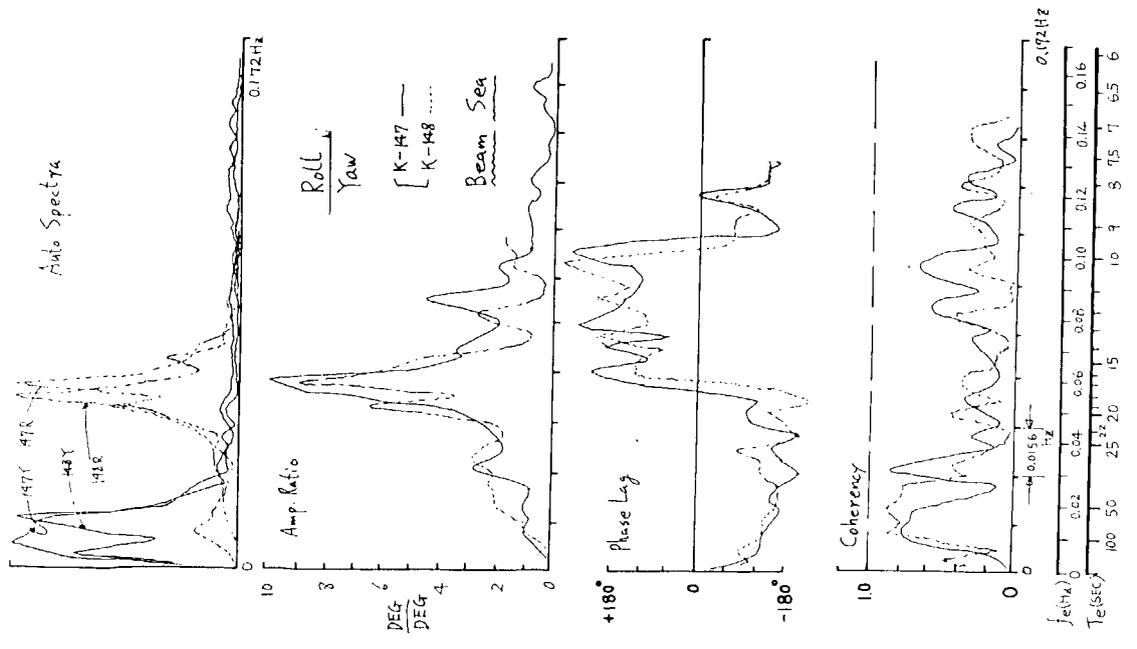


FIG. 4.1.20

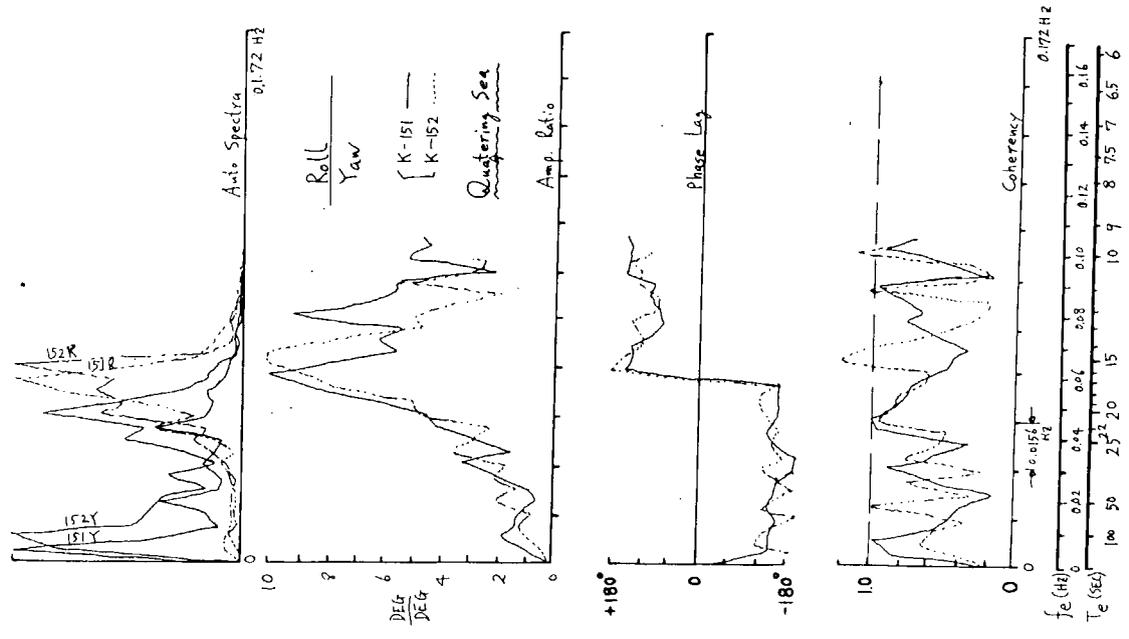


FIG. 4.1.21

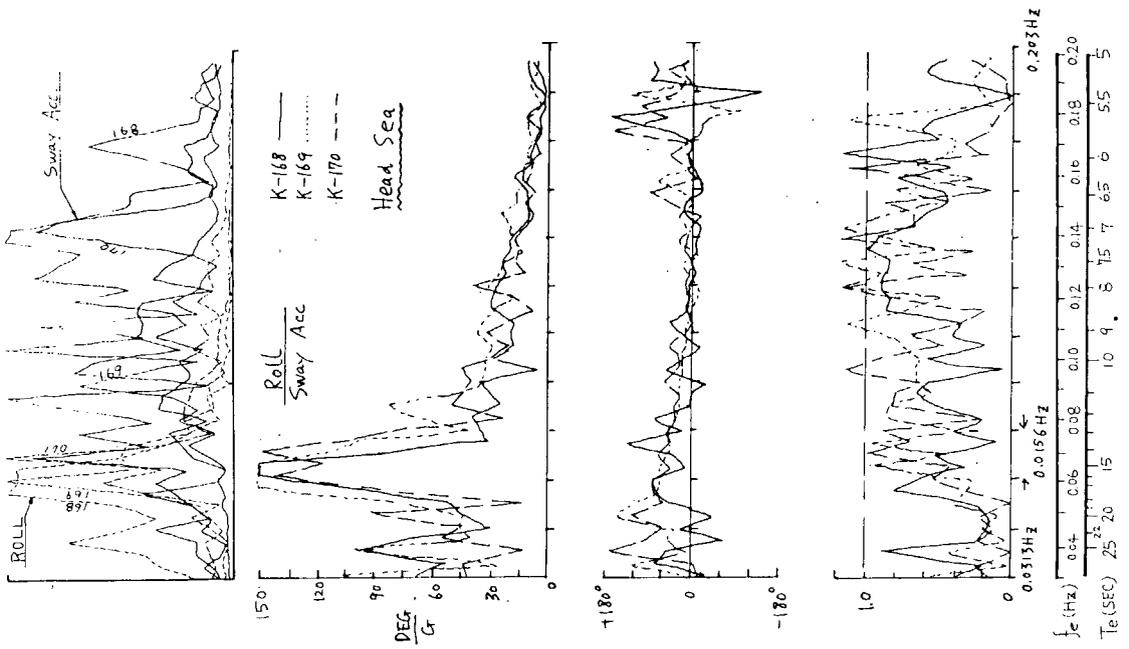


FIG. 4.1.23

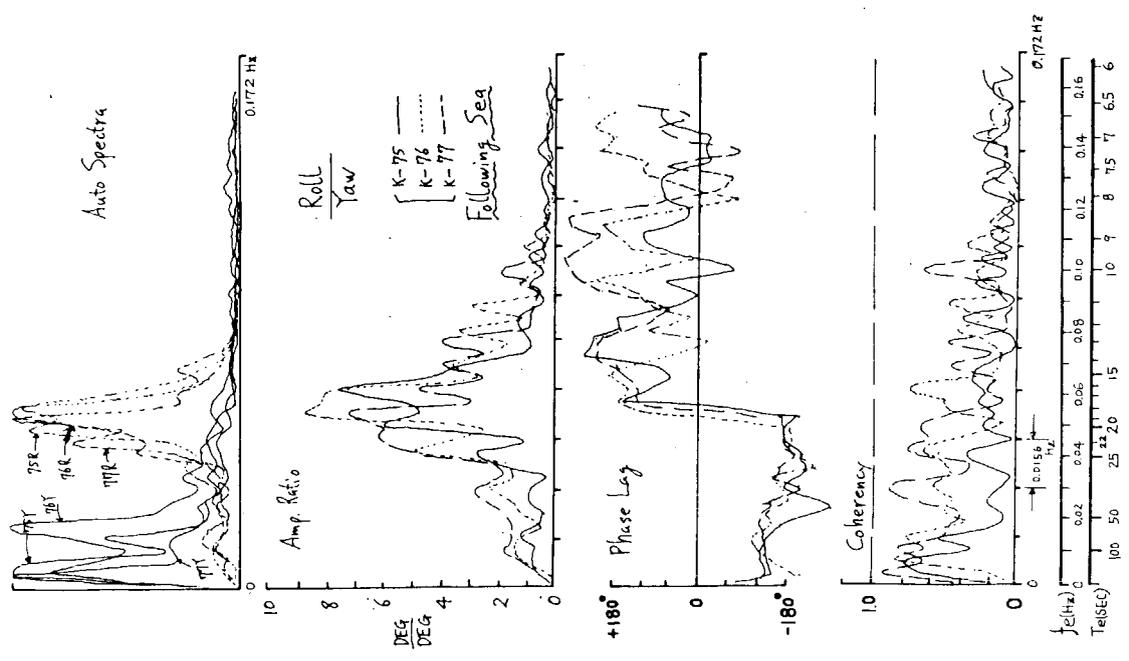


FIG. 4.1.22

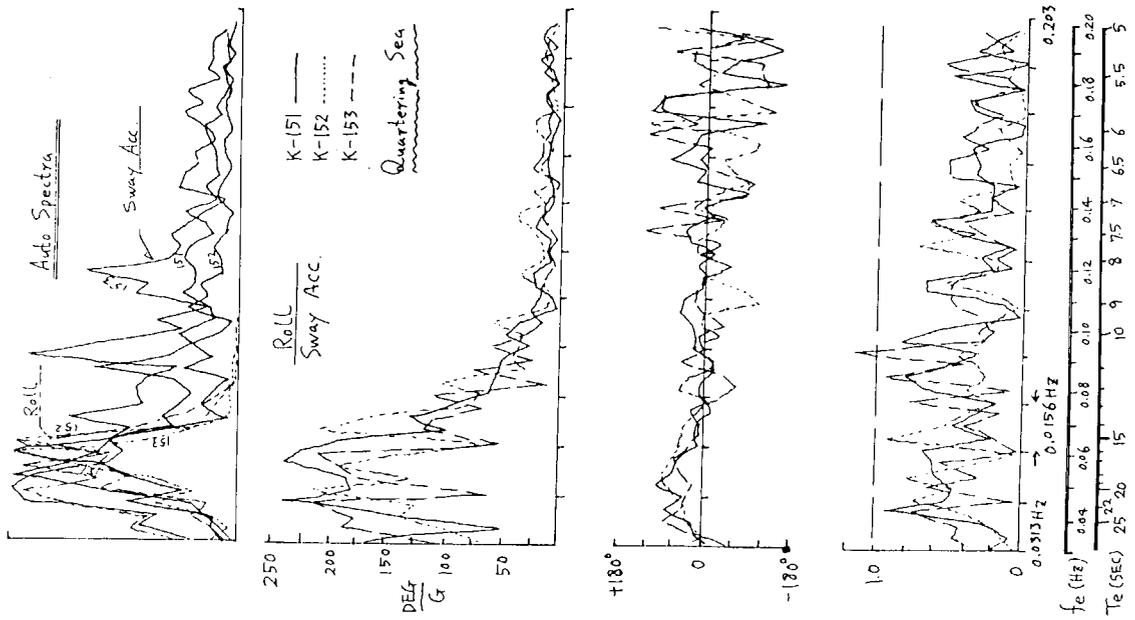


FIG. 4.1.24

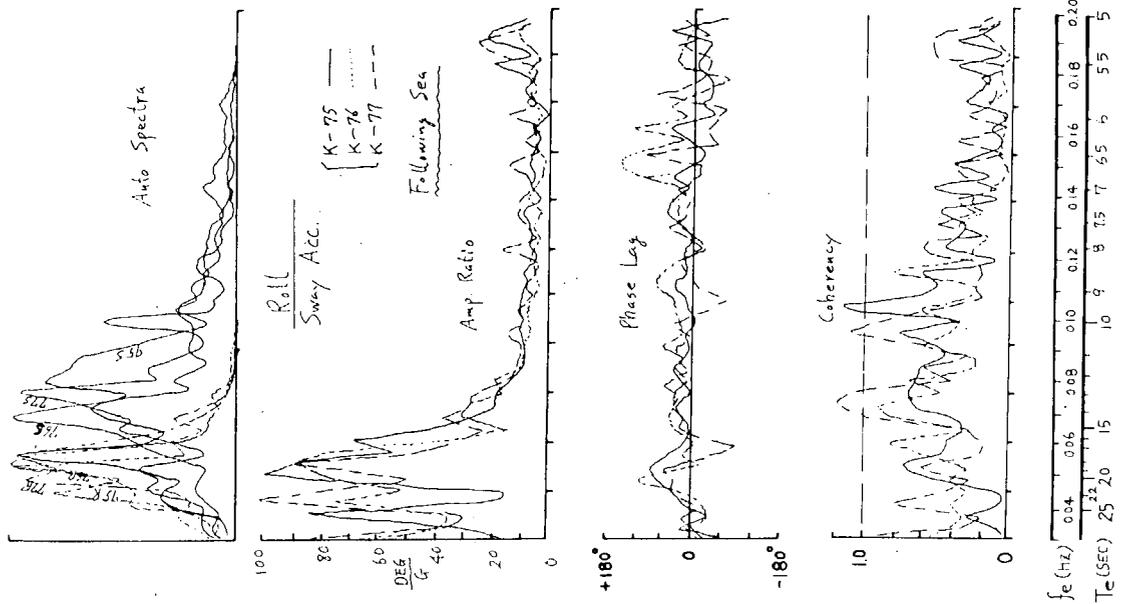


FIG. 4.1.25

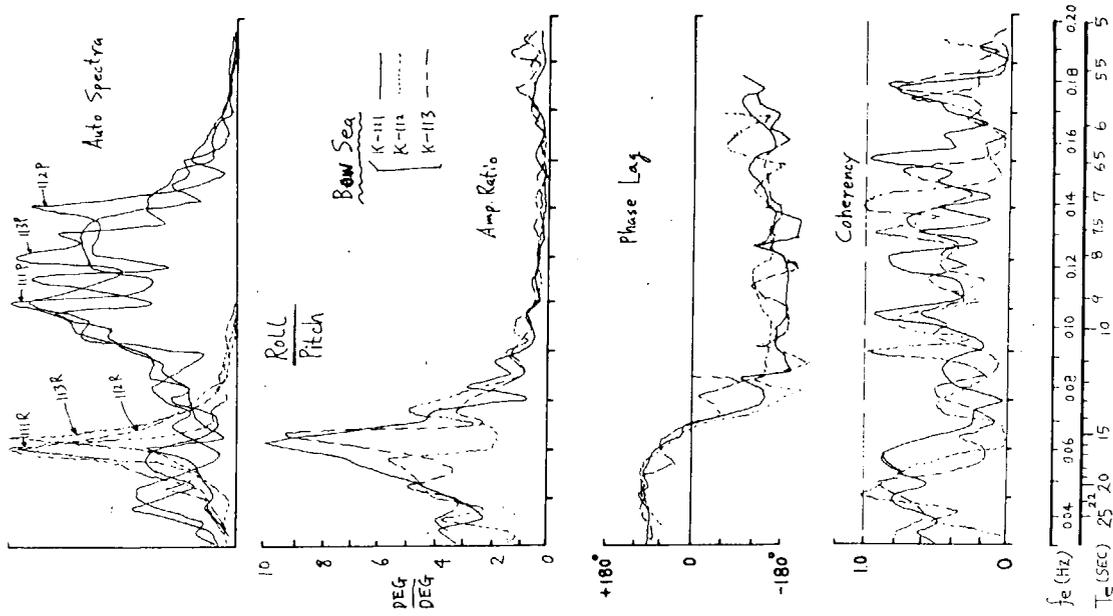


FIG. 4.127

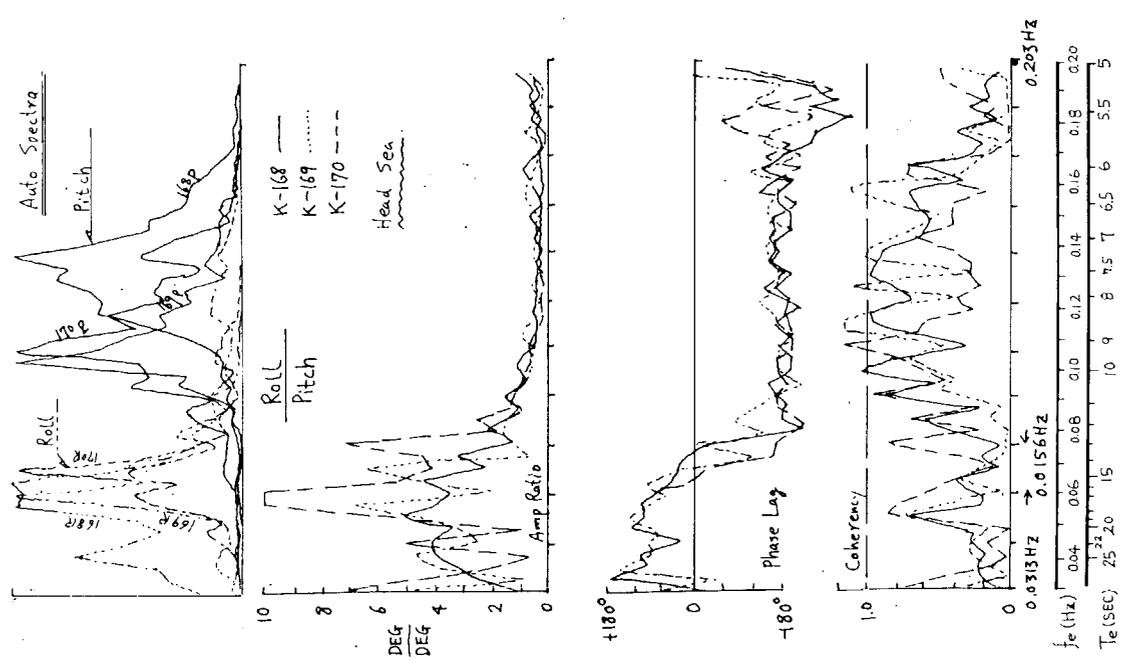


FIG. 4.126

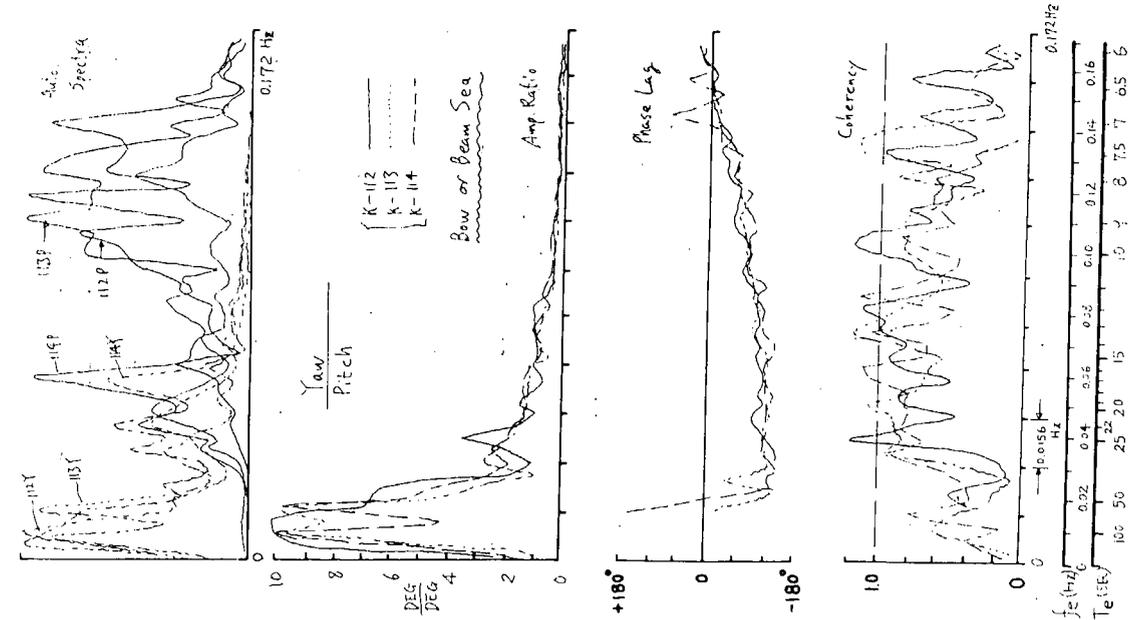


FIG. 4.1.28

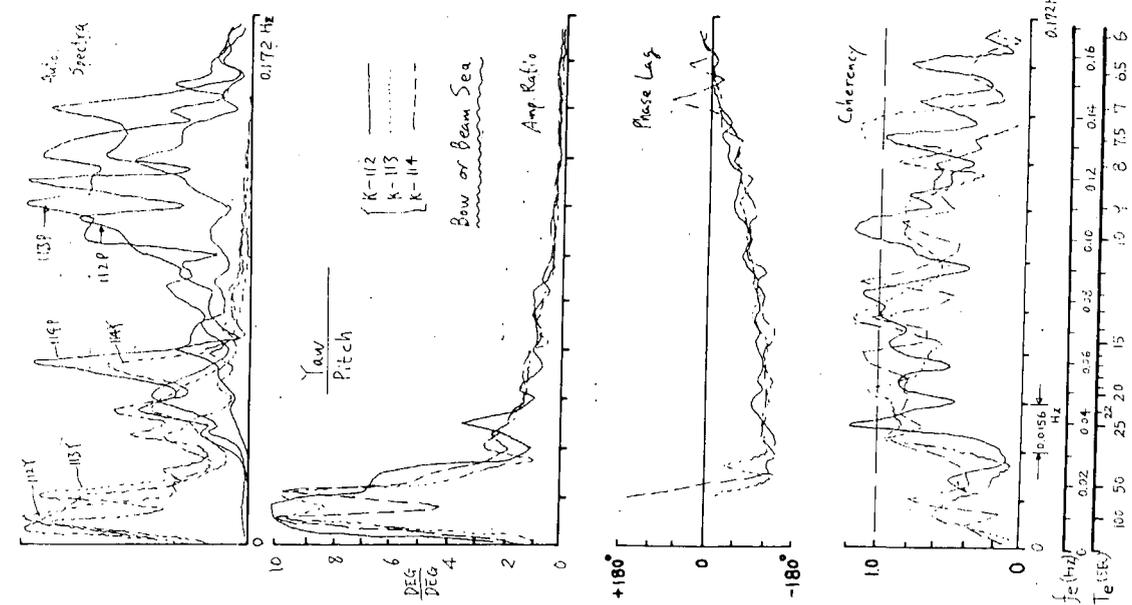


FIG. 4.1.29

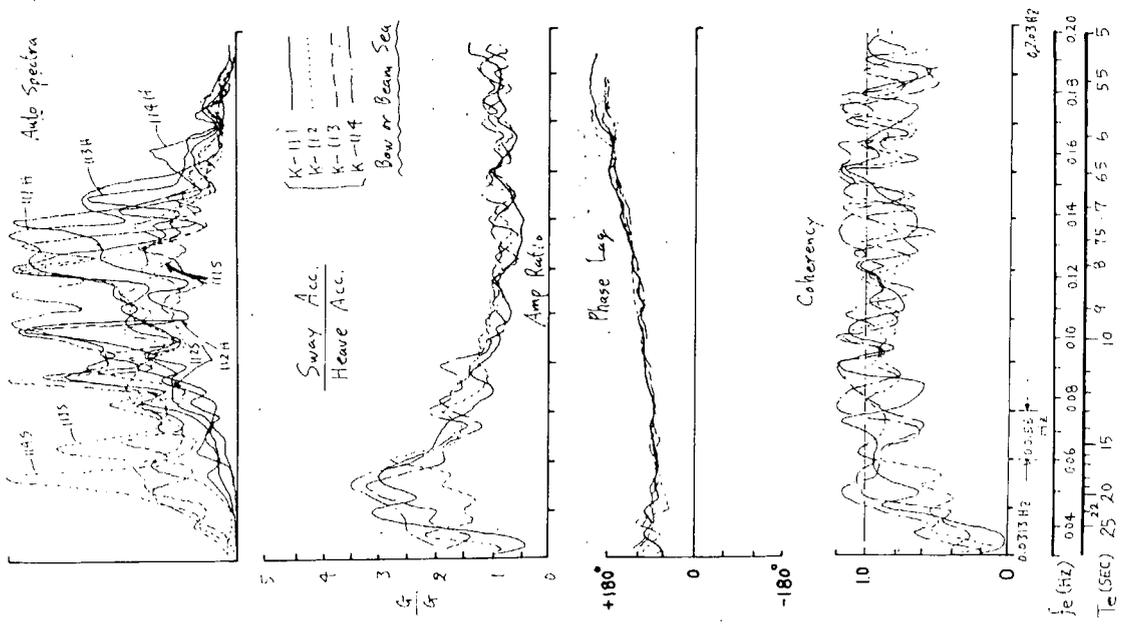


FIG. 4.1.31

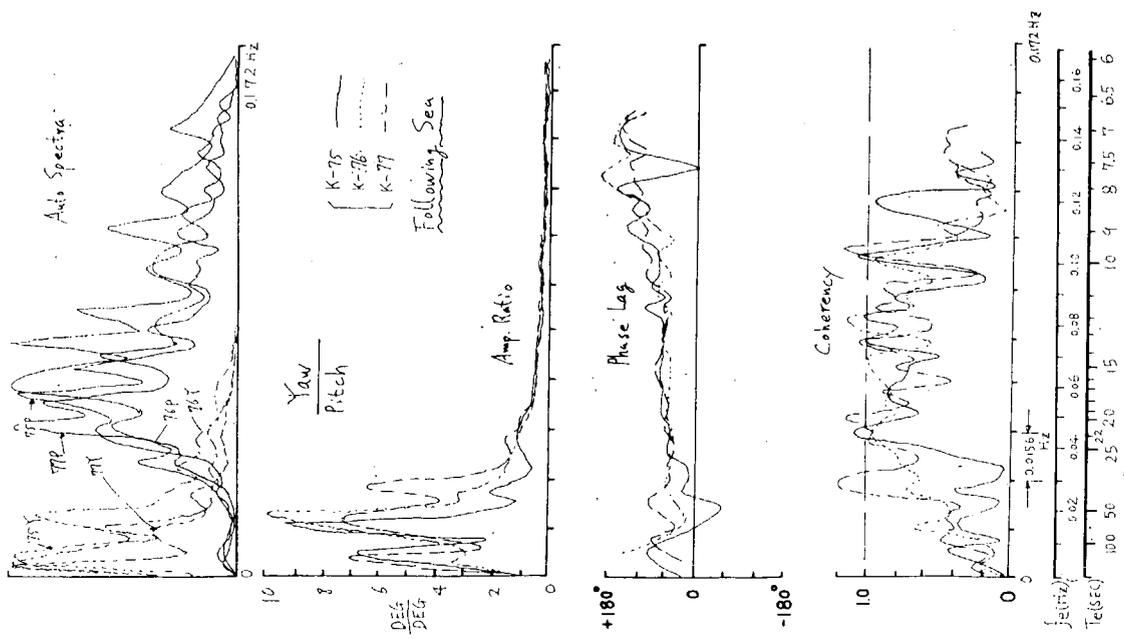


FIG. 4.1.30

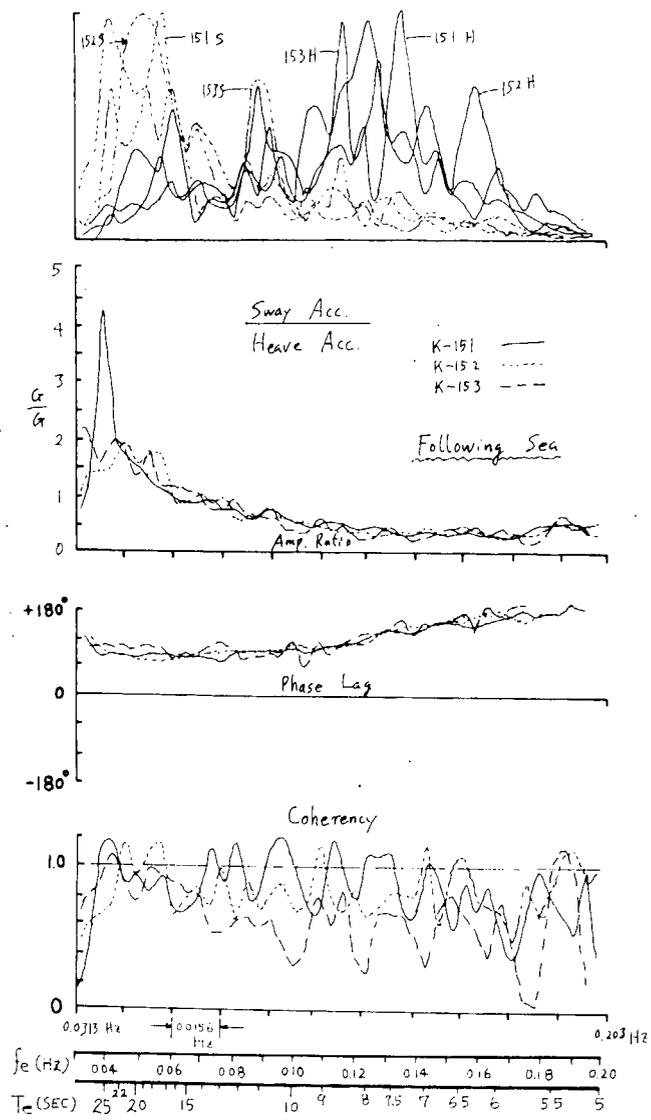


Fig. 4.1.32

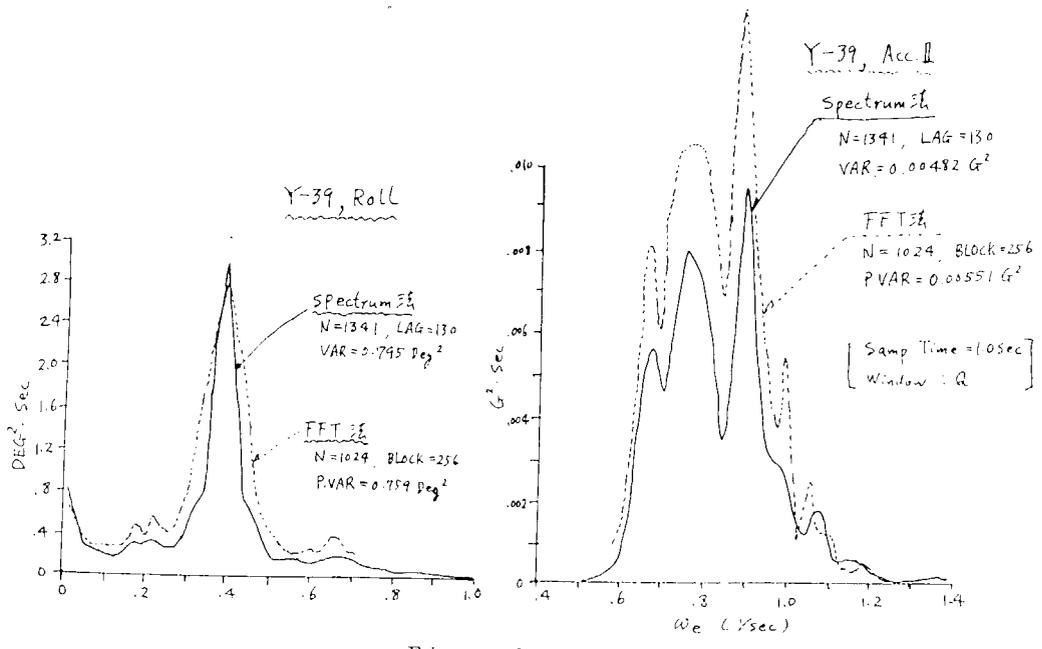


Fig. 4.1.33

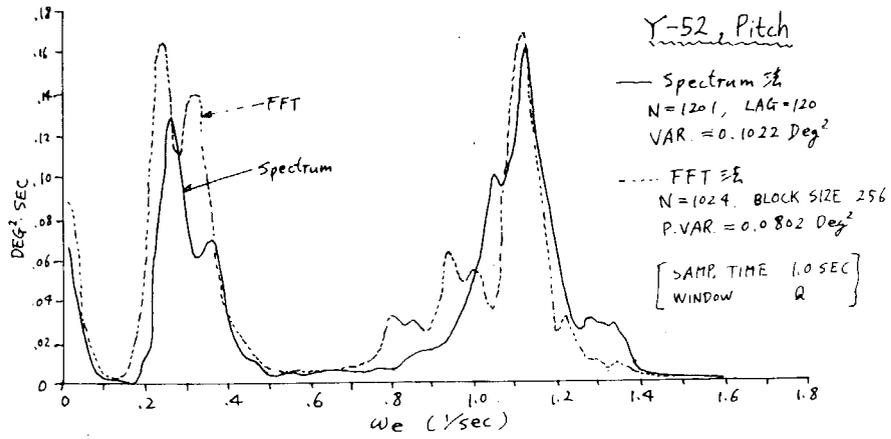


Fig. 4.134

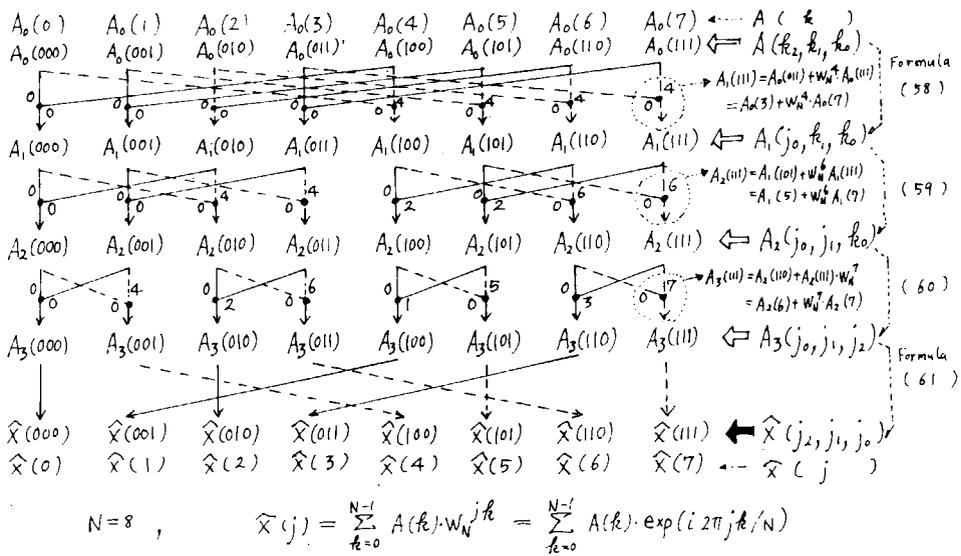


Fig. 4.135

4.2 JA号による実船試験結果の解析

本試験結果の統計極値解析およびスペクトラム解析はSR125で昭和47年度に製作した船載型船体運動高速解析装置¹⁾を使用して実施した。なおピッチおよびロールについては全試験データについて、その他は比較的運動が大きい試験データ¹⁾について行なった。その結果を以下に示す。なお計測および計測器等の設置については前年度報告書を参照されたい。

4.2.1 統計極値解析結果

船体運動の極値分布を調べるため、Zero-Crossの平均周期 T_0 およびPeak to Peakの平均周期 T_m を用いた計算式(1)を利用し、バンドパラメーター ϵ を求めた。

$$\epsilon = 1 - \left(\frac{T_m}{T_0} \right)^2 \quad (1)$$

また、最大値 $H(\max)$ をデータのサンプリング時間内に1回程度生じる最大期待値と考え、ピッチなら約5~7秒程度の周期を持ち、サンプリング時間が1024秒であるから、Rayleigh分布($\epsilon=0.0$)の $1/200$ 最大期待値と最大値との比較を行なった。

ここで解析は文献2)の方法によっておこなわれているので、極値は両振巾の値を示している。

ゆえに最大値 $H(\max)$ と標準偏差 σ_s の関係は

$$H(\max) = 6.86 \sigma_s \quad (2)$$

$$(\epsilon=0.0 \quad N=200 \text{の場合})$$

となる。また、Swellの向きHeading($\alpha=135^\circ \sim 180^\circ$)、Beam($\alpha=45^\circ \sim 135^\circ$)、Following($0^\circ \sim 45^\circ$)をそれぞれ記号H、B、Fにて図中に解析結果を示した。

(1) ピッチ

ϵ の分布(Fig. 4.2.2)から、Headingの場合にはRayleigh分布に、Followingの場合にはGaussian分布に近いことがわかる。また $H(\max)$ と σ_s の関係(Fig. 4.2.1)より図の上の表と見くらべて、Headingの場合には $\epsilon=0.0$ $N=200$ の値と、Followingの場合には周期の長くなることも考えて $\epsilon=0.82$ $N=100$ の値と一致している。このことから上記と同様のことがわかる。

Fig. 4.2.3~Fig. 4.2.4から本航において、最大のピッチ角は両振巾で6度程度であったことを示している。スペクトラムのピーク値周波数の頻度分布(Fig. 4.2.7)からHeadingの時には周波数が高くFollowingの時には周波数が低くなる。これは波との出会い周波数の関係から自明のことであろう。

また、Zero-Crossの平均周波数 $1/T_0$ の頻度分布(Fig. 4.2.5)からも、上記と同様のことが言える。しかし、Peak to Peakの平均周波数 $1/T_m$ の頻度分布(Fig. 4.2.6)はある帯域に集中している。これは0.12~0.14 Hz(7.2~8.3秒の周期)の固有周波数を持っていることを示しており本船の予測した固有周波数とよく一致している。

(2) ロール

ϵ の分布(Fig. 4.2.9)から明らかにHeading、Followingの場合ともにGaussian分布に近いことが示されている。

また、 $H(\max)$ と σ_s の関係(Fig. 4.2.8)から明らかにRayleigh分布の中心ではなく、 $\epsilon=0.82$ $N=100$ の値とよく一致している。このことからロールの極値分布はGaussian分布に近いことがわかる。

スペクトラムのピーク値周波数の頻度分布(Fig. 4.2.14)およびZero-Cross平均周波数 $1/T_0$ の頻度分布(Fig. 4.2.12)からある帯域に集中している。これは0.04~0.08 Hz(25~13秒の周期)の固有周波数を持っていることを示しており、本船の予測した値とよく一致している。またPeak to Peakの平均周波数 $1/T_m$ については上記と全く異なった頻度分布(Fig. 4.2.13)をしている。これはロールについては固有周波数が非常に低いため、

出会周波数をもつ外力による強制揺れが Peak to Peak として表われたものと思われる。

(3) 船首上下加速度

ϵ の分布 (Fig. 4.2.16) から大半が Rayleigh 分布に近いことを示している。また $H(\max)$ と σ_s の関係 (Fig. 4.2.15) から同様のことが言える。

ピッチに比べ Gaussian 分布に近いものが少なくなったのは、ピッチの変動に比べ加速度は ω^2 倍されているので、高周波数の項が大きく、低周波数の項が小さくなるためであろう。このことはスペクトラムのピーク値周波数の頻度分布 (Fig. 4.2.18) から知る事ができる。

(4) 船速

ϵ の分布 (Fig. 4.2.20) から Gaussian 分布に非常に近いことがわかる。このことは $H(\max)$ と σ_s の関係 (Fig. 4.2.19) からもうかがえる。

(5) プロペラ回転数

ϵ の分布 (Fig. 4.2.27) から船速と同様、Gaussian 分布に非常に近いことがわかる。また、 $H(\max)$ と σ_s の関係 (Fig. 4.2.26) からもうかがうことができる。

Zero-Cross 平均周波数 $1/T_0$ の頻度分布 (Fig. 4.2.30) および Peak to Peak 平均周波数 $1/T_m$ の頻度分布 (Fig. 4.2.31) とともに船速のそれぞれの頻度分布によく似ている。

4.2.2 目視波高波周期による計測値と理論計算との比較

実船の船体運動の標準偏差 σ_s と理論のそれとを目視波高 H_v 、波周期 T_v を用いて比較する。しかし一般に大きい波は実際より低目に、小さな波は高目に、また短い周期は実際より短く、長い周期は実際より長く観測しやすいと言われている。この関係を目視波高 H_v 波周期 T_v から文献 3), 4) より次式によって $1/3$ 有義波高 $H(1/3)$ および波周期 T_c を求め、修正した。

$$H(1/3) = 2.55 + 0.66 H_v \quad (3)$$

$$T_c = 5.19 + 0.37 T_v \quad (4)$$

また、文献 3) によれば、一般気象通報船の目視波高の誤差の標準偏差は 1.34 m ある。本船においてもこの程度の誤差が生じているものと考えられる。

理論計算は平均的船の状態、ISSC 波スペクトラム、短波頂波を用い、Heading 角を 15° ごとにピッチ、ロール、船首上下加速度について計算した。そこで Heading ($\alpha = 135^\circ \sim 180^\circ$)、Beam ($\alpha = 45^\circ \sim 135^\circ$)、Following ($\alpha = 0^\circ \sim 45^\circ$) の各波向について、計算結果の最大値と最小値の包絡線により、理論計算の範囲を求め、それを図中に記入しておいた。そして実船の解析結果がどの程度その範囲の中にふくまれるかを調べた。

また、実船の解析結果がその範囲からはずれている場合に理論計算の最大または最小の包絡線に一致させるためには、いかに波高を修正すれば良いかを計算し、その値 ΔH の頻度分布を作った。この結果と目視の誤差の程度とを比べ理論と実船との対応を調べた。

また、図中の数字は解析結果がその点に重ねてプロットされた回数を表わしている。

(1) ピッチ

目視波高 H_v 、波周期 T_v と運動の標準偏差 σ_s の実船試験解析結果と理論計算との比較を各波向について Fig. 4.2.33~Fig. 4.2.35 に示す。

また、これらの修正波高 ΔH の頻度分布を Fig. 4.2.36~Fig. 4.2.38 に示す。さらに (3), (4) 式により求めた $1/3$ 有義波高 $H(1/3)$ 波周期 T_c と σ_s の解析結果と理論計算との比較を各波向について Fig. 4.2.39~Fig. 4.2.41 に示す。また、これらの修正波高 ΔH の頻度分布を Fig. 4.2.42~Fig. 4.2.44 に示す。これらの結果から、全般的に目視によるものはばらつきが多いが、 $1/3$ 有義波高等に修正するとばらつきが少なくなり、 $\sigma_s/H(1/3)$ は理論値より小さい

傾向にある。

この修正波高 ΔH の頻度分布は約 2 m 程度中心よりはずれて分布している。

(2) ロール

1/3 有義波高 $H(1/3)$ 波周期 T_c と σ_s の解析結果と理論計算との比較を Fig. 4.2.45~Fig. 4.2.47 に示す。また、それらの修正波高 ΔH の頻度分布を Fig. 4.2.48~Fig. 4.2.50 に示す。Following はピッチと同様の傾向を持っているが、Heading と Beam は理論の範囲にかなり良くおさまっている。

(3) 船首上下加速度

1/3 有義波高 $H(1/3)$ 、波周期 T_c と σ_s の解析結果と理論計算との比較を Fig. 4.2.51~Fig. 4.2.53 に示す。また修正波高 ΔH の頻度分布を Fig. 4.2.54~Fig. 4.2.56 に示す。全般的にピッチと同様の傾向がある。

以上 3 現象について比較した結果、1/3 有義波高等に修正した場合に、修正波高 ΔH の頻度分布が約 2 m 中心よりずれている原因は、理論計算結果と一致していないのか、目視から 1/3 有義波高に修正する方法が悪いのか不明である。しかし、目視の波高の誤差の標準偏差が 1.34 m あることを考えると、人間の目視波高誤差 ($2\sigma = \pm 2.68 m$, $3\sigma = \pm 4.02 m$) の範囲で実船試験結果と理論計算と大略よい一致をしている。もっと精度を上げた比較をする場合には波高計により正確な有義波高および波スペクトラムを求める必要がある。

4.2.3 応答の計測値のワースペクトラムと計測した波高のワースペクトラムによる理論計算との比較

応答の計測値のワースペクトラムと波高計によって得られた波高のワースペクトラムを用いた理論計算との比較をピッチとロールについて行なう。

Fig. 4.2.58, Fig. 4.2.59 に波高のワースペクトラムを示す。この波高のワースペクトラムと理論計算によって求めた応答関数より応答のワースペクトラムを求めたのが Fig. 4.2.59~Fig. 4.2.63 である。Fig. 4.2.59, Fig. 4.2.60 はピッチ, Fig. 4.2.61, Fig. 4.2.62 はロールについて示す。

同図において実線が計測結果、破線が理論計算結果である。なお、理論計算は長波頂不規則波中について行なった値である。またワースペクトラムの表示において縦軸はエネルギーであるが、その単位がデータ解析に使用したリアルタイム解析装置による解析結果であるので従来の取扱いと異なっている。つまりフーリエ解析における振幅の自乗になっている。

ピッチに関しては(a)(b)の場合ともに、計測値と計算値はかなりの一致を示している。周波数帯域が両者に少しのずれが見られるが、これは計算値において波の方向を目視によるものを用いたためであると考えられる。

波高のワースペクトラムを $S_w(\omega)$ とし、船の波高に対する応答の周波数特性を $H(\omega)$ とすると応答のワースペクトラム $S(\omega)$ は次の式で与えられる。

$$S(\omega) = |H(\omega)|^2 S_w(\omega)$$

いま、 $S(\omega)$ および $S_w(\omega)$ が求められている。

Fig. 4.2.63 はこの船の波高に対する応答の周波数特性について示してある。実線は理論計算結果である。

応答のワースペクトラムにおいては、(a)と(b)の場合ではあまり差が見られなかったが周波数応答特性では、両者は少し異なった傾向を示している。

(b)の場合は、周波数応答特性は理論計算とよく一致しているが、

(a)の場合は、その大きさは同じ程度ではあるが、その傾向は一致していない。

(a)(b)の波高のワースペクトラムを比較すると(a)の場合は、(b)の場合に比べて周波数帯域が広く、かつエネルギーの大きいピーク値が異なる周波数帯で 2 ケ所あり、このように波高のワースペクトラムの型が単純でないことが起因しているようである。つまり波のワースペクトラムの方向成分の分布が(b)の場合に比べて(a)の場合が複雑であったと考えられる。

ロールに関しては、計測値と計算値とはピッチの場合と異なり大きな差がある。

コンテナ船のようなGMの小さな船の場合はロールの固有周波数は $\omega = 0.32 \text{ } 1/\text{sec}$ (周期で20sec) 附近であるが、波高のパワースペクトラムにおいて明らかなごとく、この周波数附近における波高のエネルギーは非常に小さい。それゆえ計算値が計測値にくらべて極端に小さくなっている。

これは、この周波数附近は波高計の計測範囲の下限であり、計測したデータの精度はよくない。さらに、理論計算では横運動の場合は縦運動の場合に比べて正確さに欠ける、などが考えられる。しかし、前述の問題があるにしても、周波数が $0.32 \text{ } 1/\text{sec}$ 附近の波高のエネルギーが(a)(b)の波高のパワースペクトラムから推察して極端に大きくなることは考え難い。

応答の計測値のパワースペクトラムと計算値とがピッチとロールとでは大きな相違があるのは前述の理由以外にも原因があるようである。すなわち、波のパワースペクトラムの方向成分の分布が結果に対して大きく影響するのではないかと考える。ピッチの場合はロールの場合に比べて応答のパワースペクトラムのピーク値は波高のパワースペクトラムのピーク値の周波数とほぼ一致していることから、波の方向成分の分布の影響はあまり受けない。ロールの場合は同調運動が顕著であるので波のパワースペクトラムに方向の分布があると、目視の波の主方向に対して、別の成分があった場合、この方向成分の波と同調横揺れを起こす可能性がある。

これらのことは、波の方向成分を $\cos^2 \alpha$ 分布していると仮定した短波頂不規則波中における応答の理論計算結果にあらわれる傾向と同じである。

以上2回の波高計測結果を利用して、実海面における船の応答の計算値と計測値との比較であるが、今後このようなデータがより多く蓄積されることによって、理論計算によって船体運動の短期予測がより確実なものとなるであろう。

最後に、当然のことながら外力としての波のより正確な計測すなわち計測周波数の範囲はもちろん波の方向性分布の計測が可能な計測システムの開発が望まれる。

参 考 文 献

- 1) SR125 「超高速コンテナ船の耐航性に関する研究」報告書 昭和48年3月 研究資料№171
- 2) 同 上 報告書 昭和47年3月 研究資料№157
- 3) I.S.S.C.(1967) Report "Environmental Conditions"
- 4) 「北太平洋及び日本近海の波浪統計調査」造船研究 Vol.7 №2 昭和40年

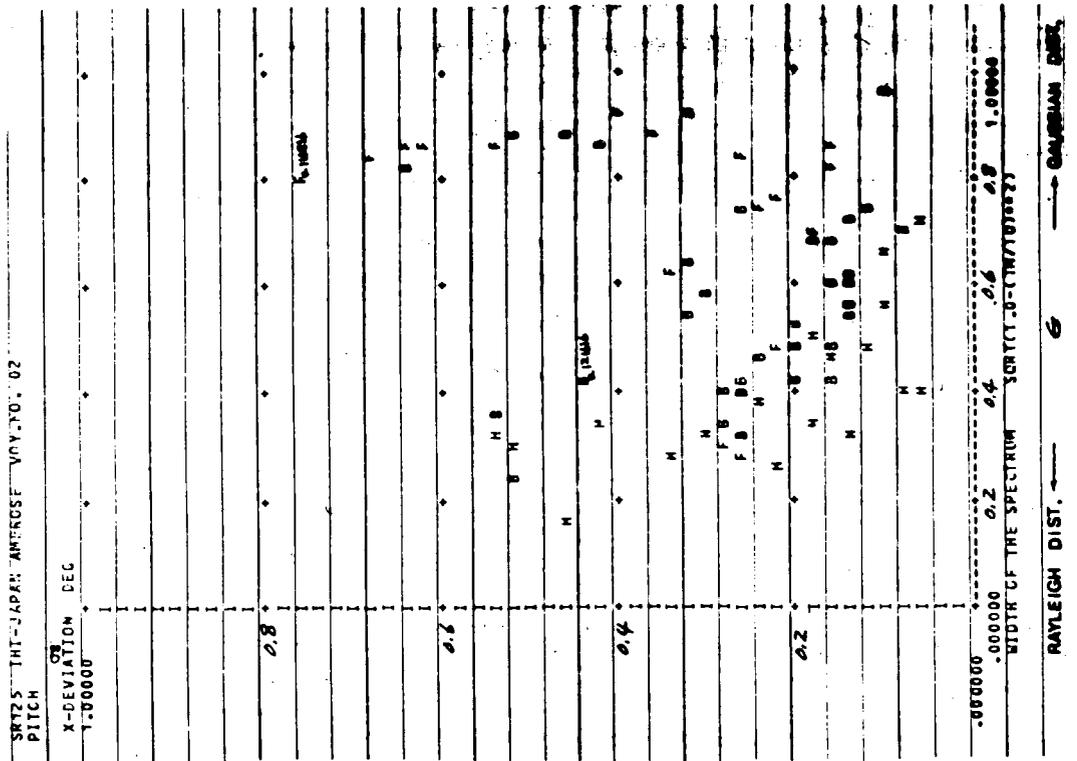


FIG. 4.2.2

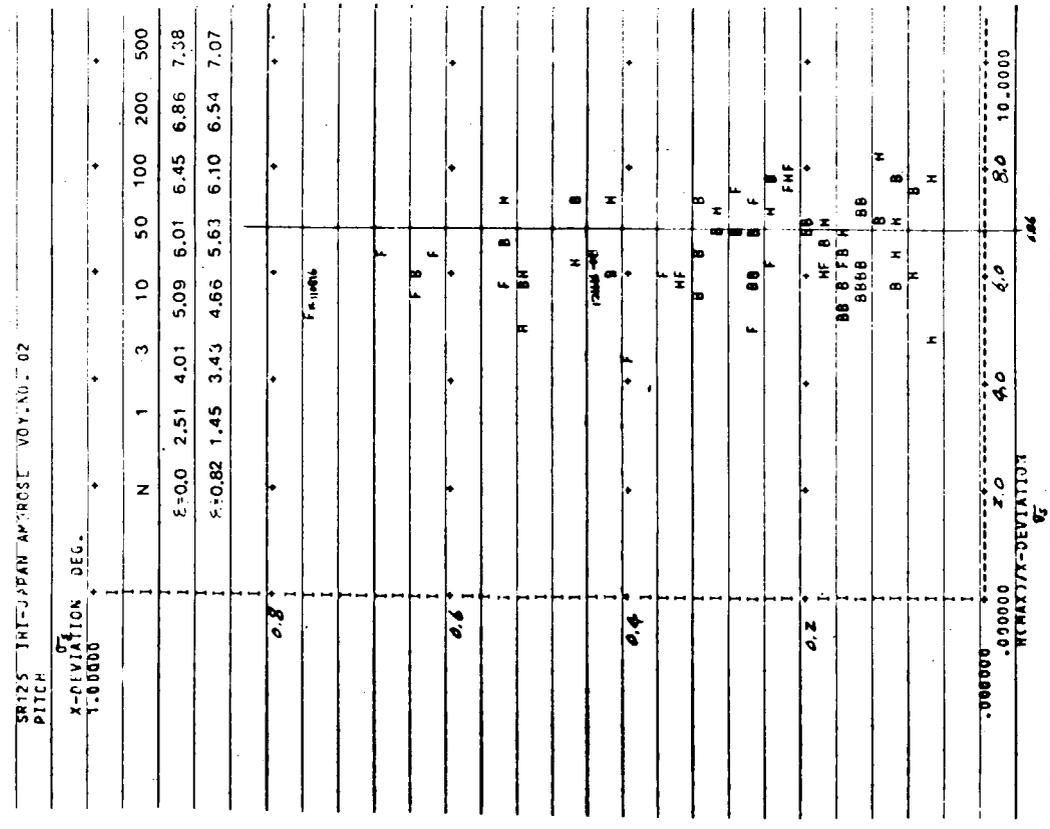


FIG. 4.2.1

SRI25 IHI-JAPAN AMRCSE VOY-NO. 02
PITCH

HISTOGRAM OF K(MAX)
50*0000

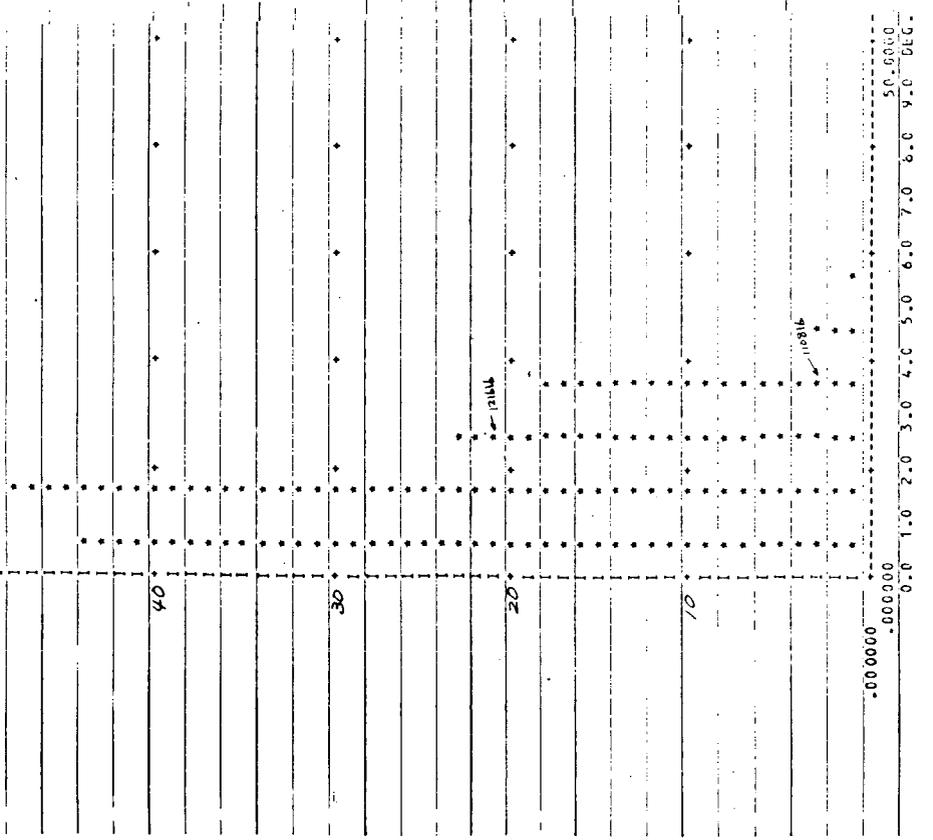


FIG. 4.23

SRI25 IHI-JAPAN AMRCSE VOY-NO. 02
PITCH

HISTOGRAM OF K(.3)
50*0000

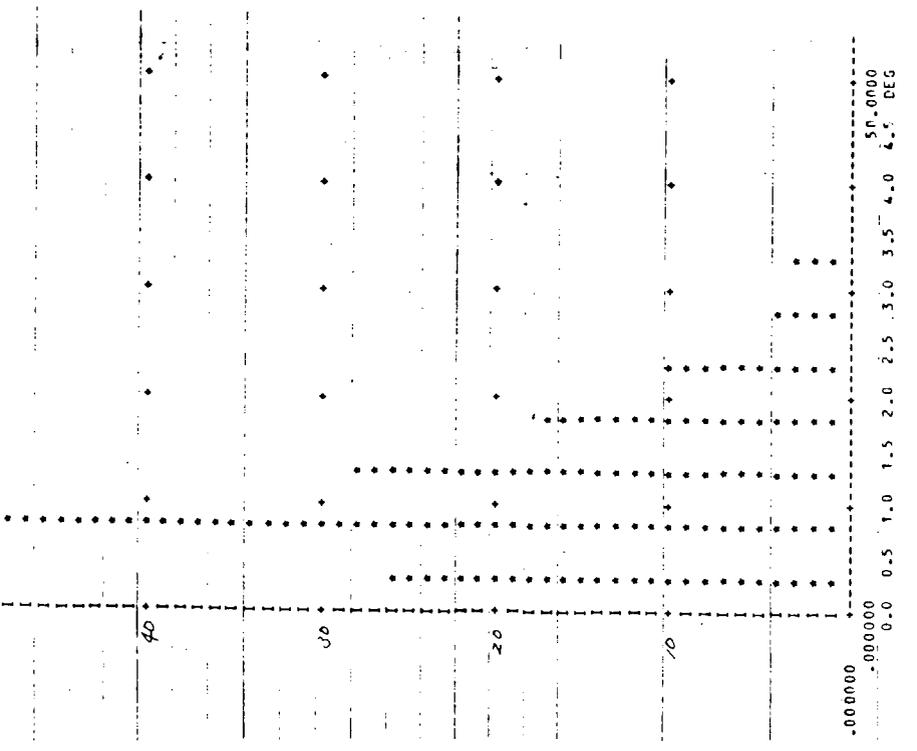


FIG. 4.24

SRI25 IHI-JAPAN AMROSE VOY.VO. 02
PITCH

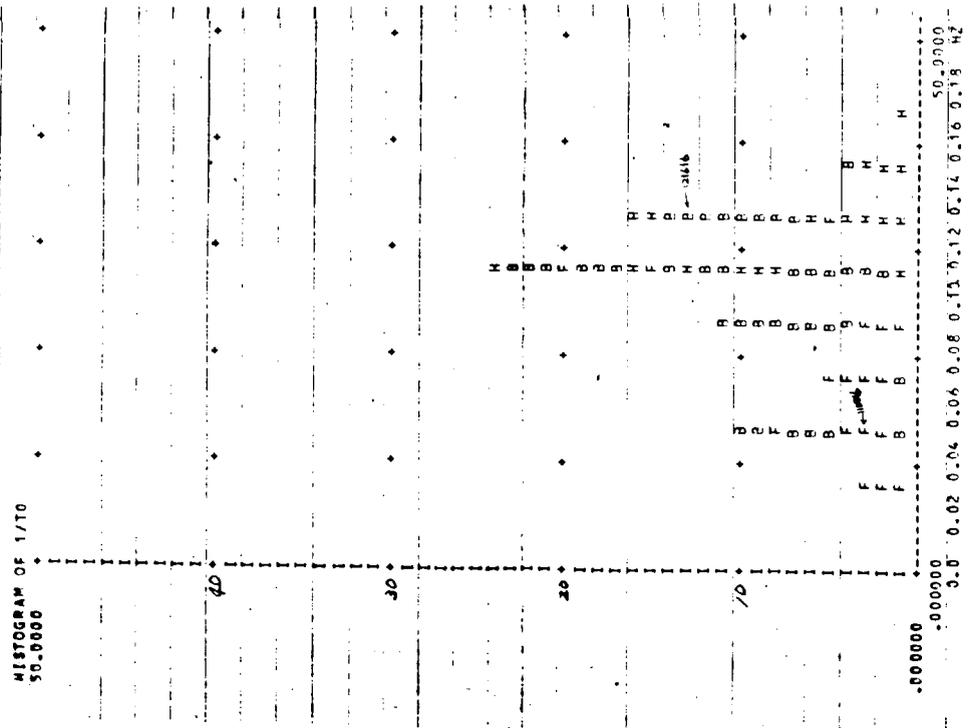


Fig. 4.25

SRI25 IHI-JAPAN AMROSE VOY.NO. 02
PITCH

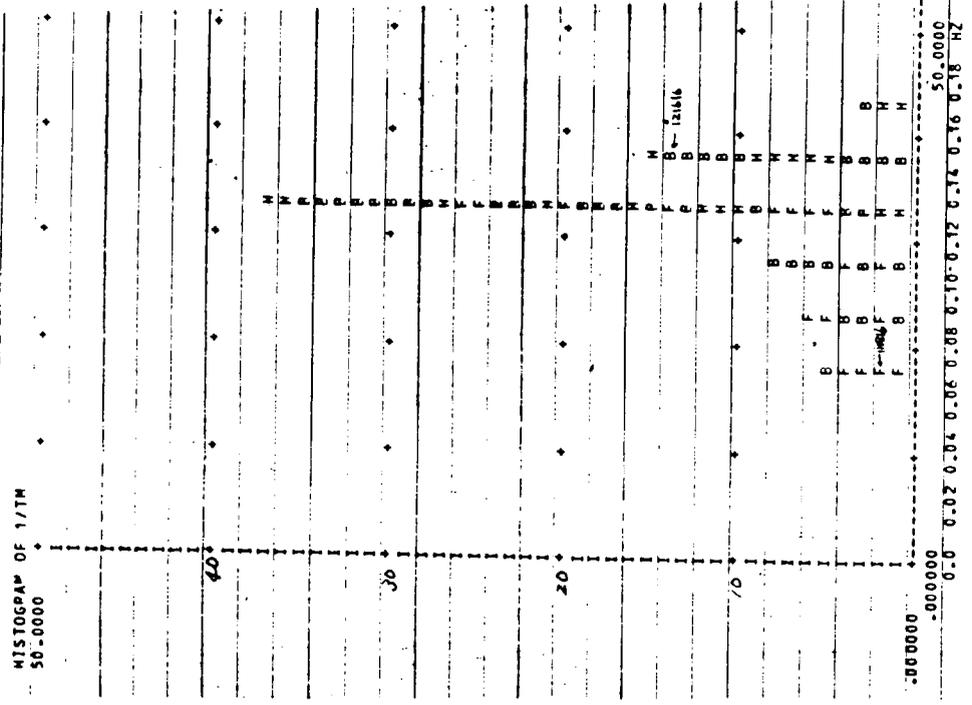


Fig. 4.26

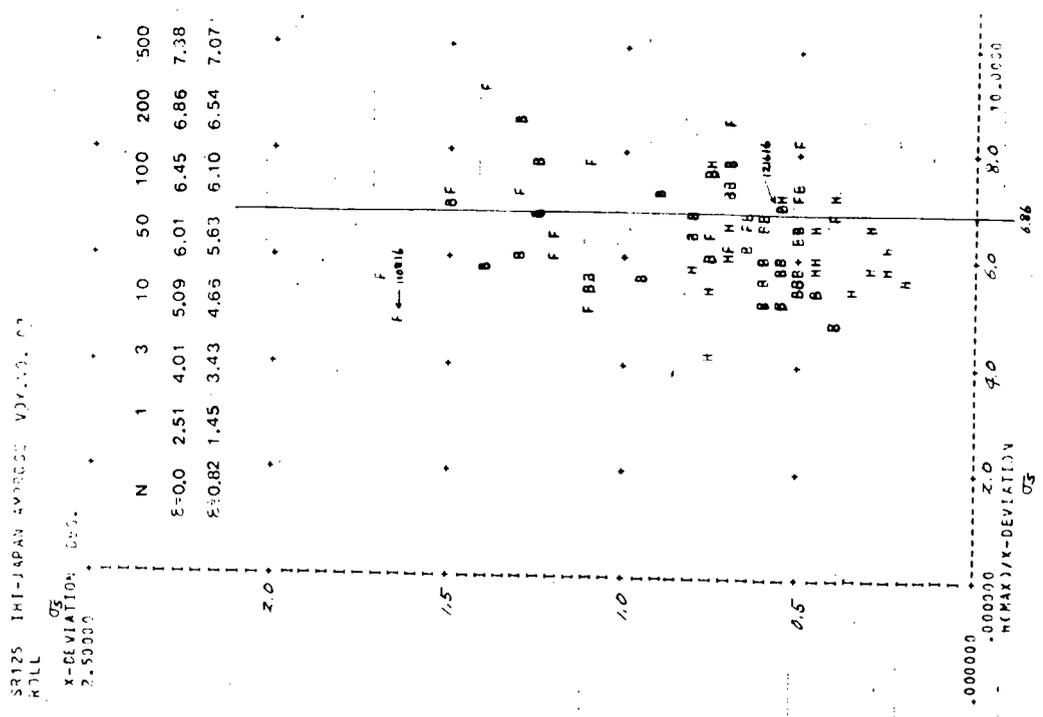


FIG. 4.27

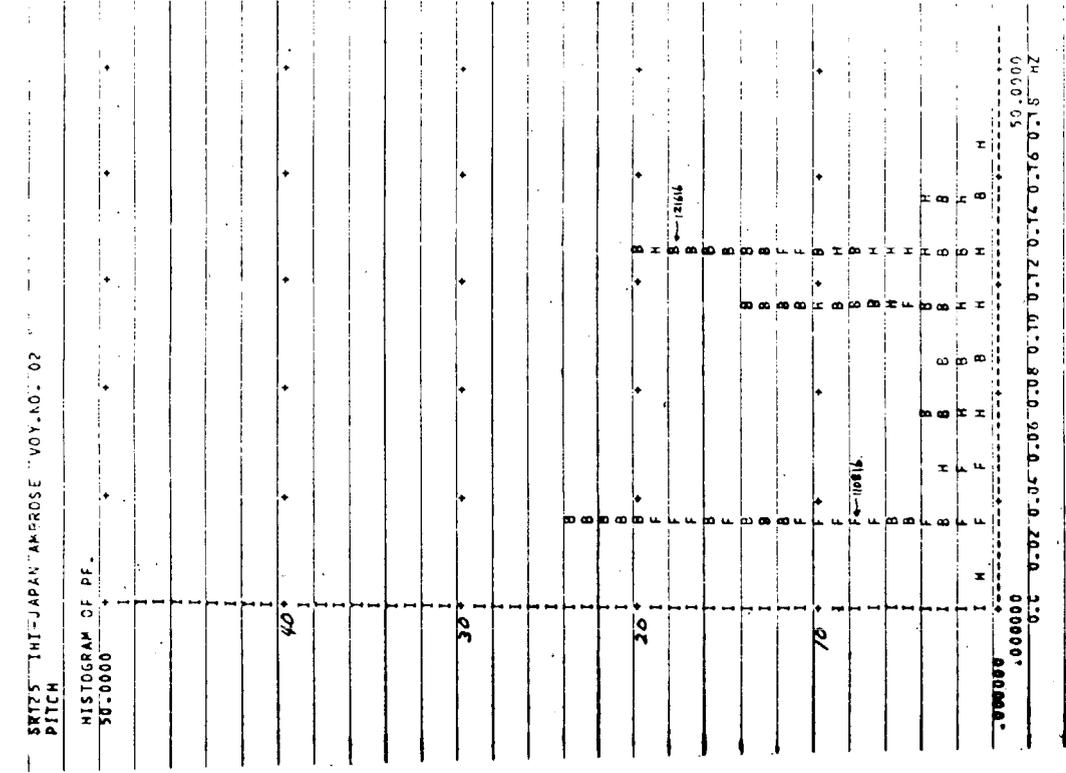


FIG. 4.28

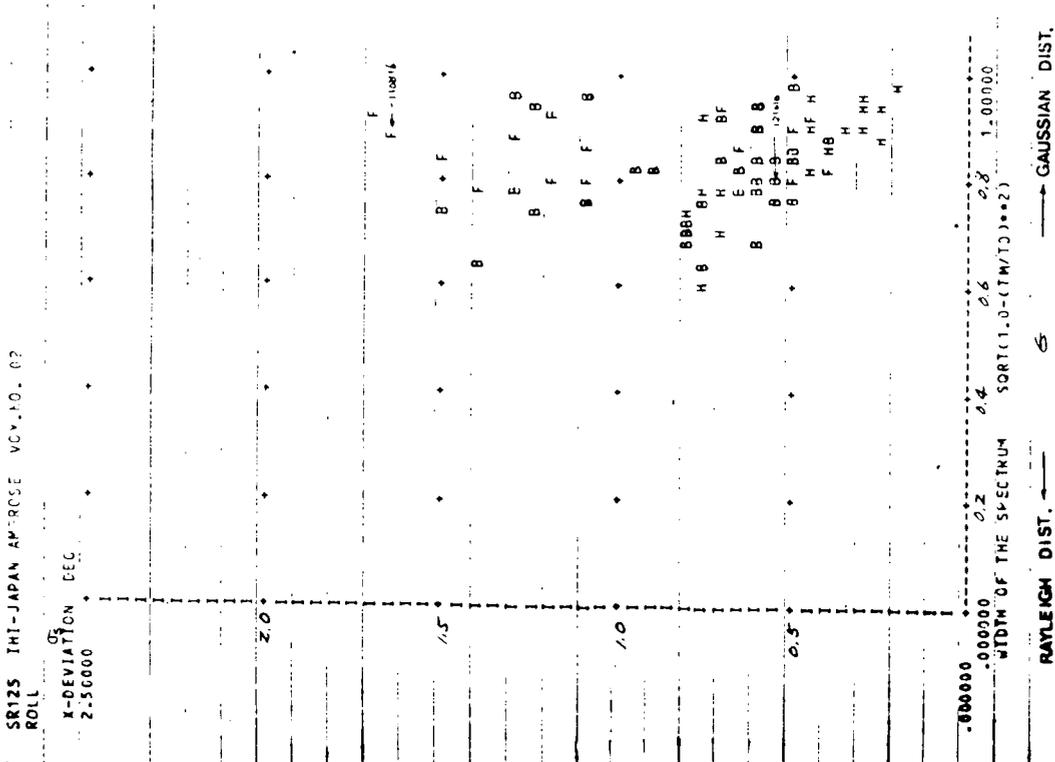


FIG. 4.2.9

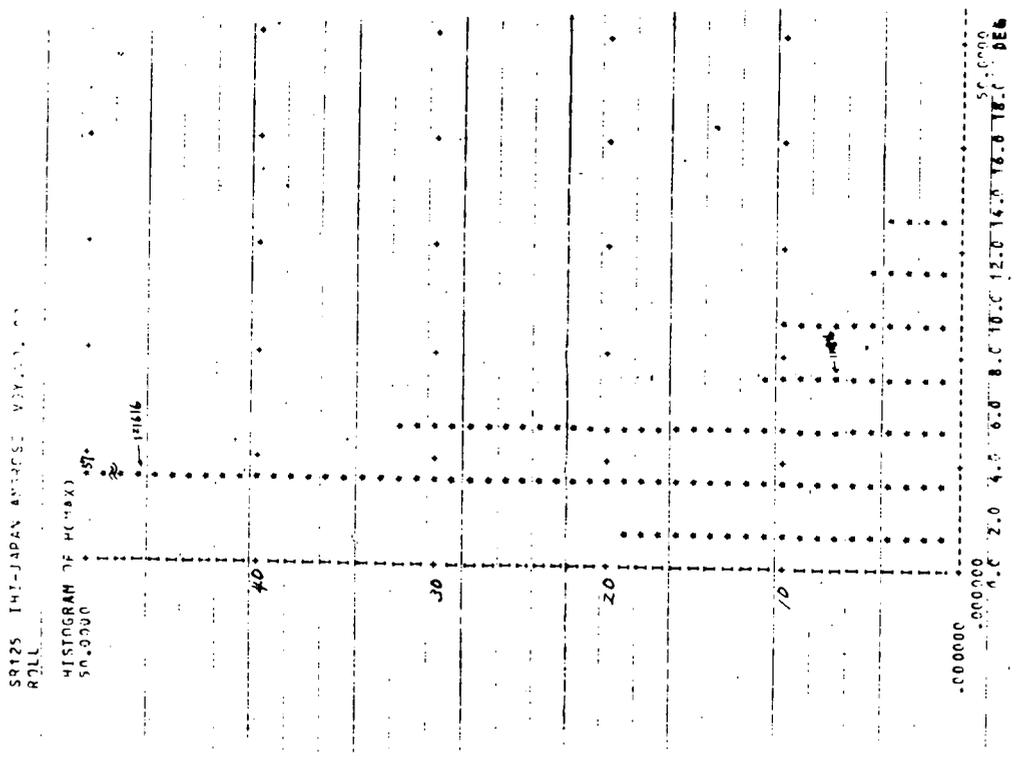


FIG. 4.2.10

SRI25 IHI-JAPAN AMRCSE VOY. FC. 07
ROLL

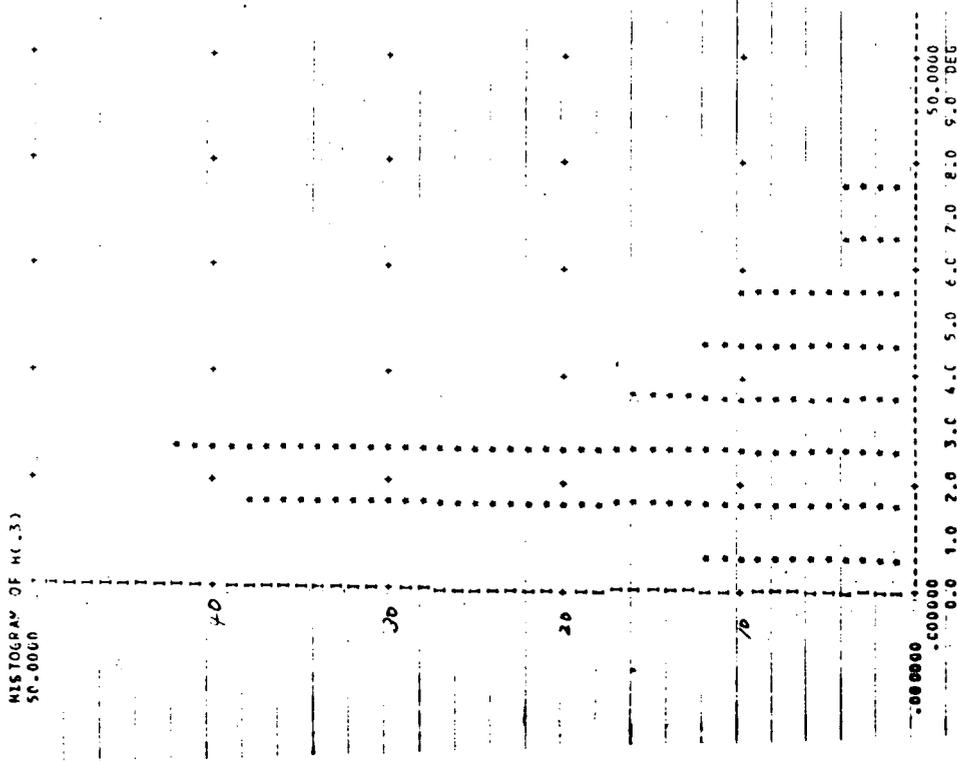


FIG. 4.211

SRI25 IHI-JAPAN AMRCSE VOY. NO. 02
ROLL

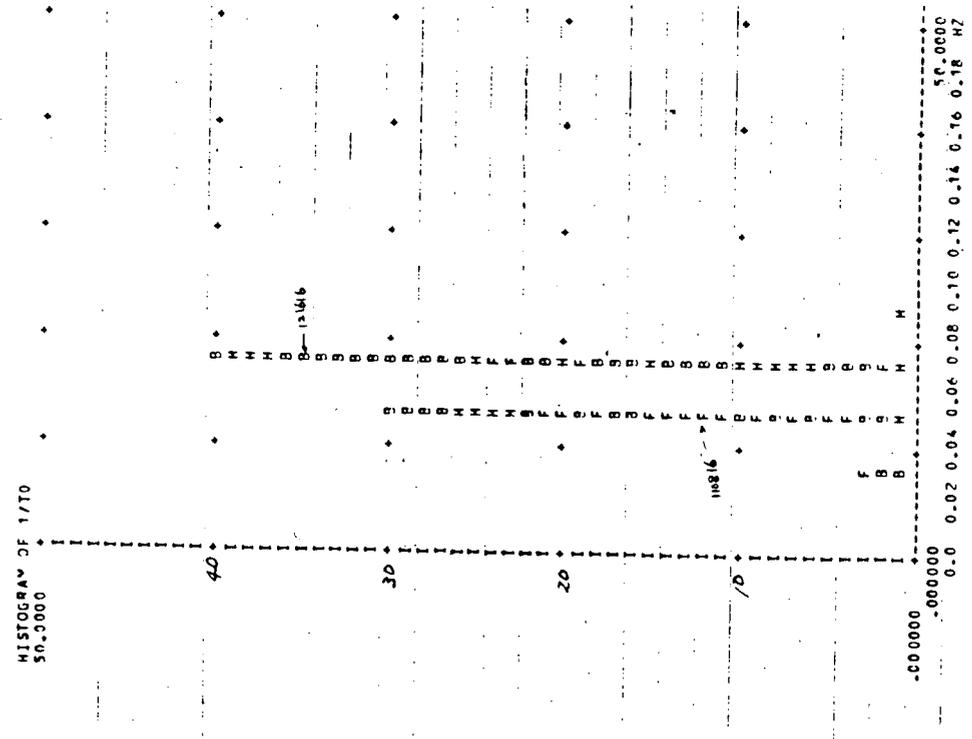


FIG. 4.212

SR125 IHI-JAPAN AMPROSE VOY.NO. 02
ROLL

HISTOGRAM OF 1/TM
50.0000

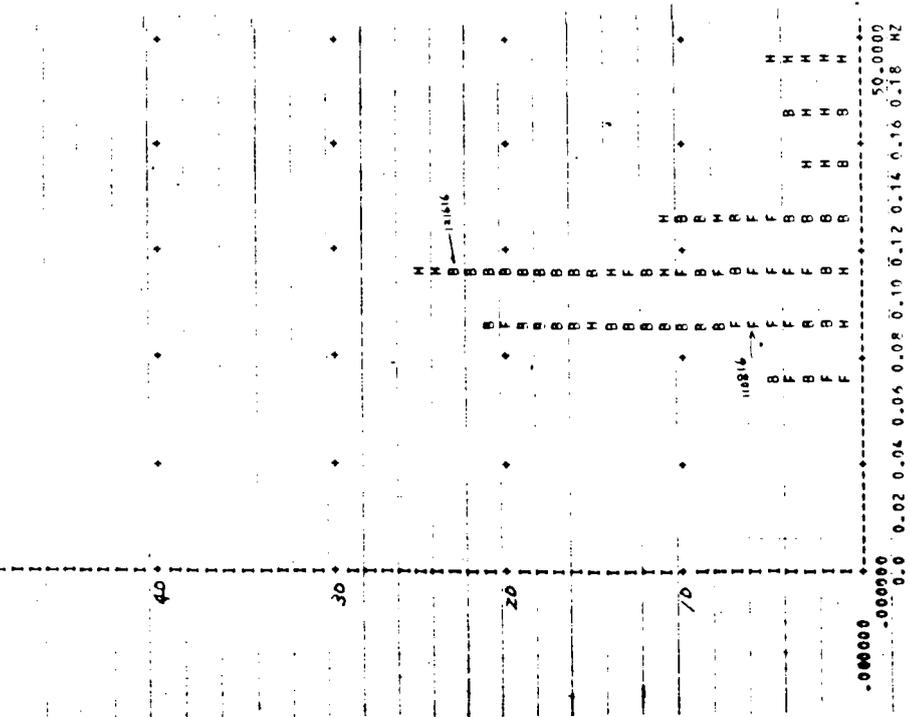


FIG. 4.213

SR125 IHI-JAPAN AMPROSE VOY.NO. 02
ROLL

HISTOGRAM OF PF.
50.0000

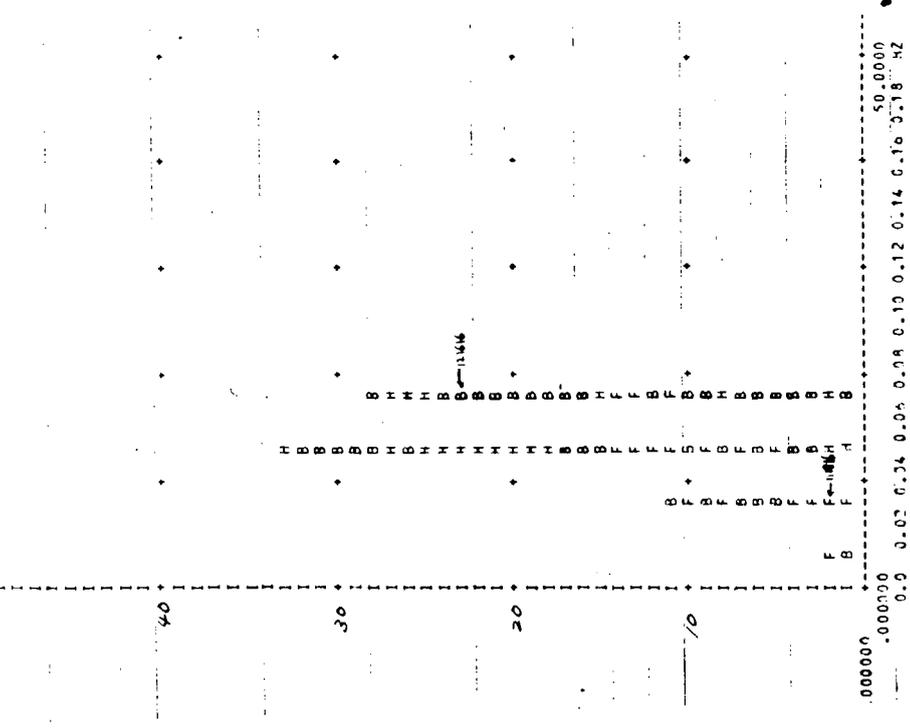


FIG. 4.214

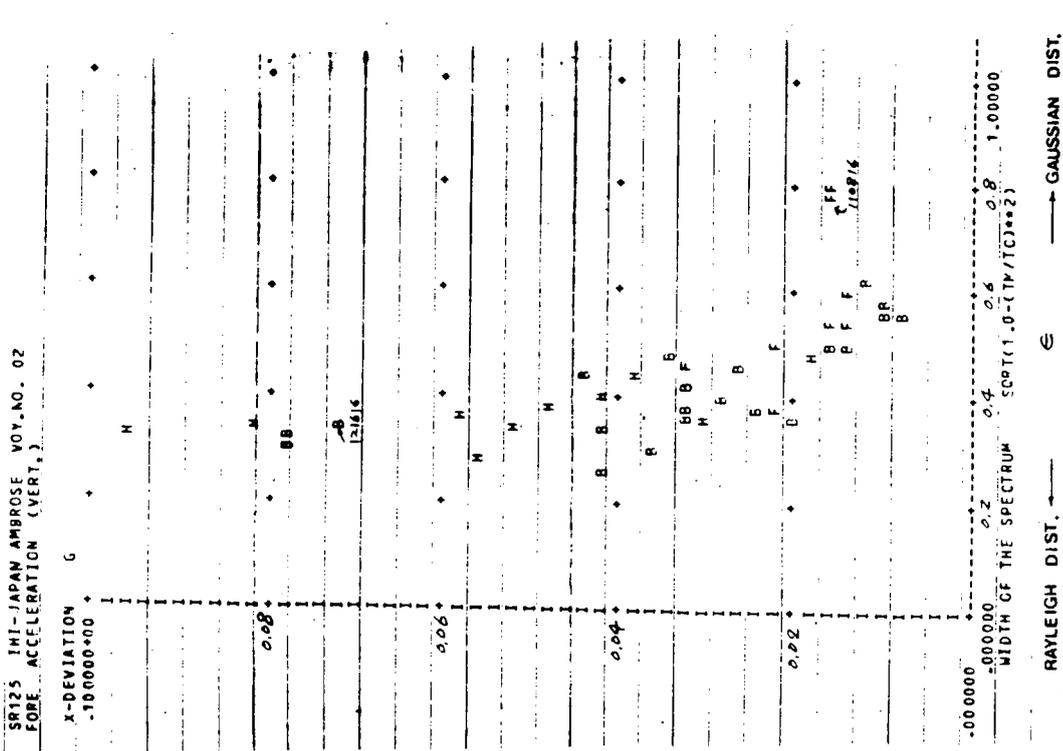


FIG. 4.215

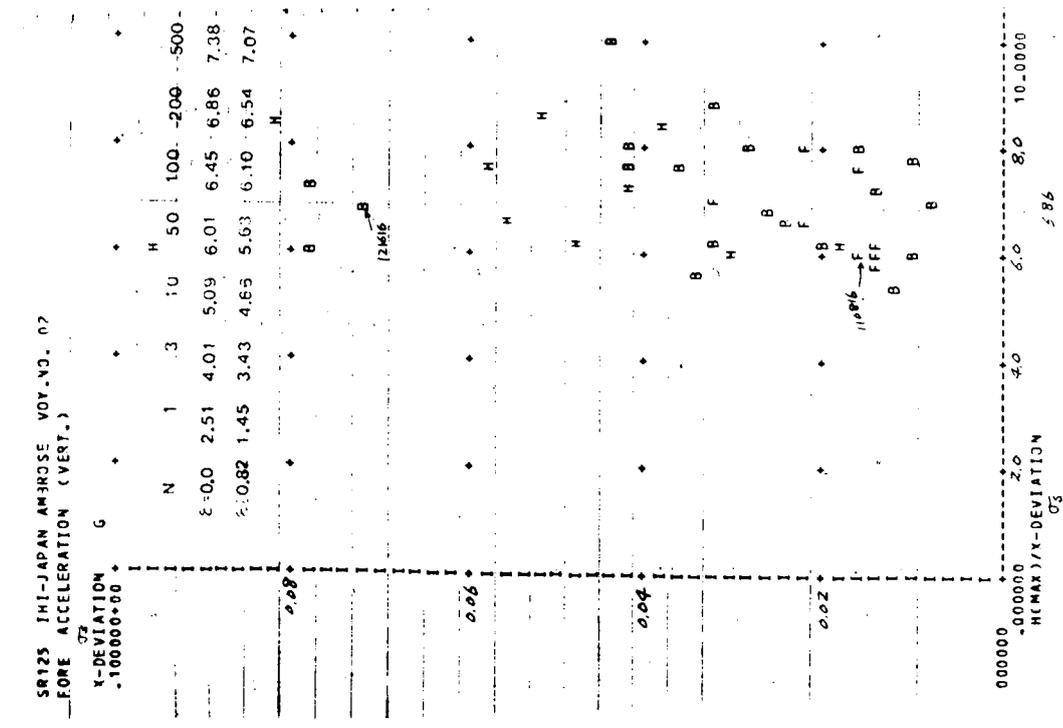


FIG. 4.216

SRI25 IHI-JAPAN AMINOSE VOY.NO. 02
 FORE ACCELERATION (VERT.)

HISTOGRAM OF H(RMX)
 50.0000

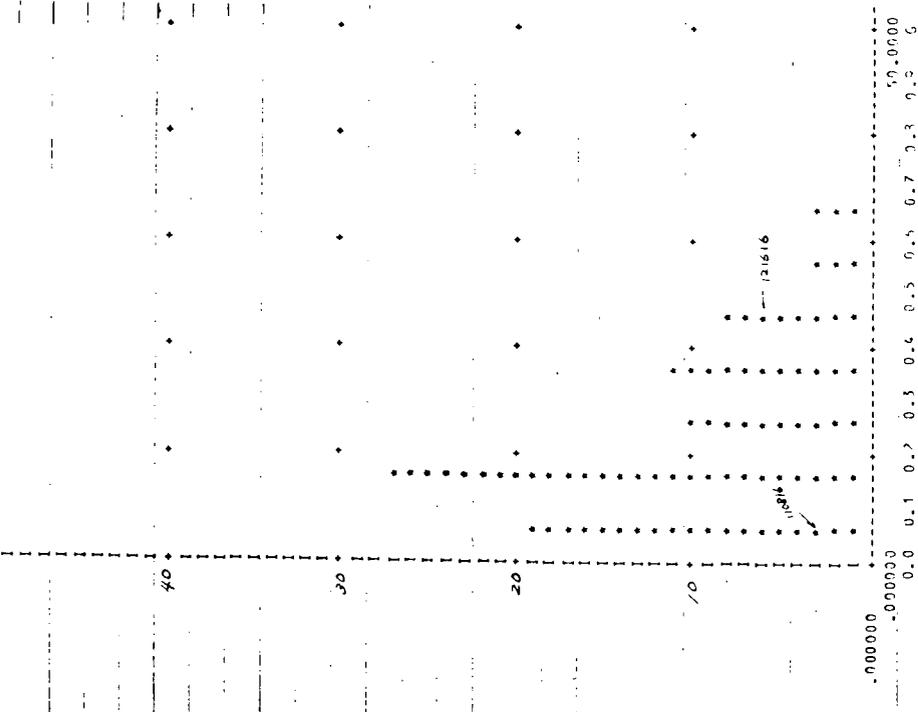


FIG. 4.217

SRI25 IHI-JAPAN AMINOSE VOY.NO. 02
 FORE ACCELERATION (VERT.)

HISTOGRAM OF PF.
 50.0000

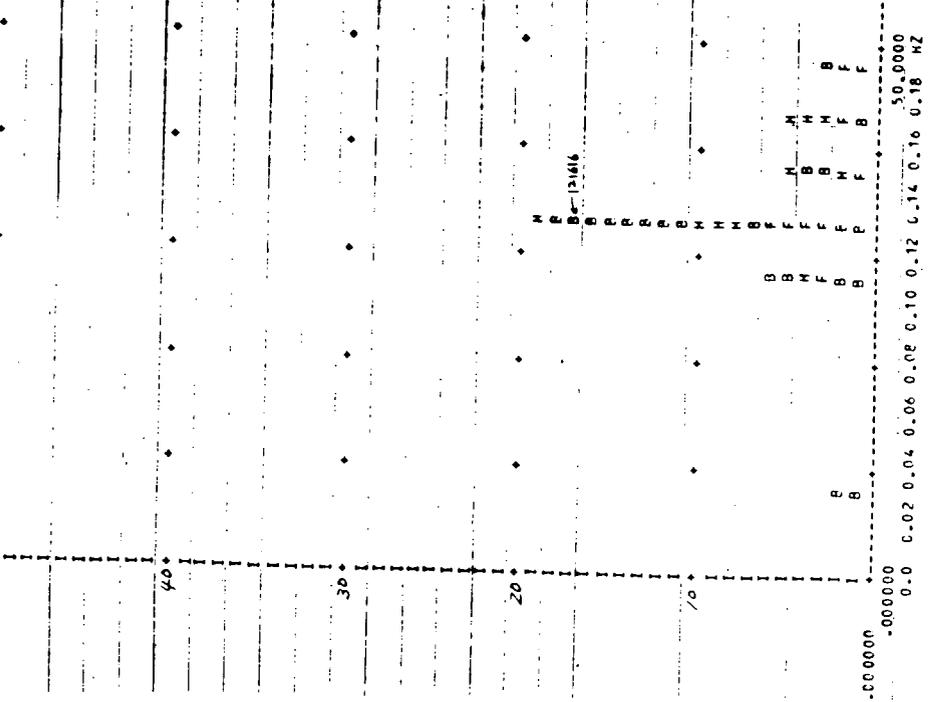


FIG. 4.218

SRT25 IHI-JAPAN AMROSE VOY. NO. 02
SHIP SPEED

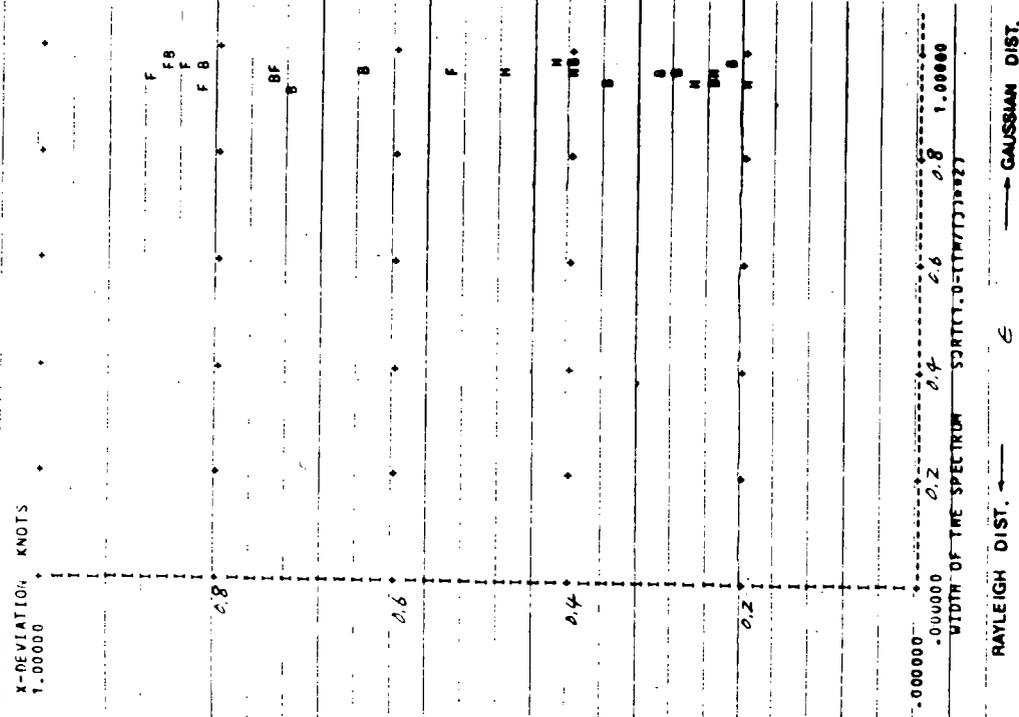


FIG. 4.2.20

SRT25 IHI-JAPAN AMROSE VOY. NO. 07
SHIP SPEED

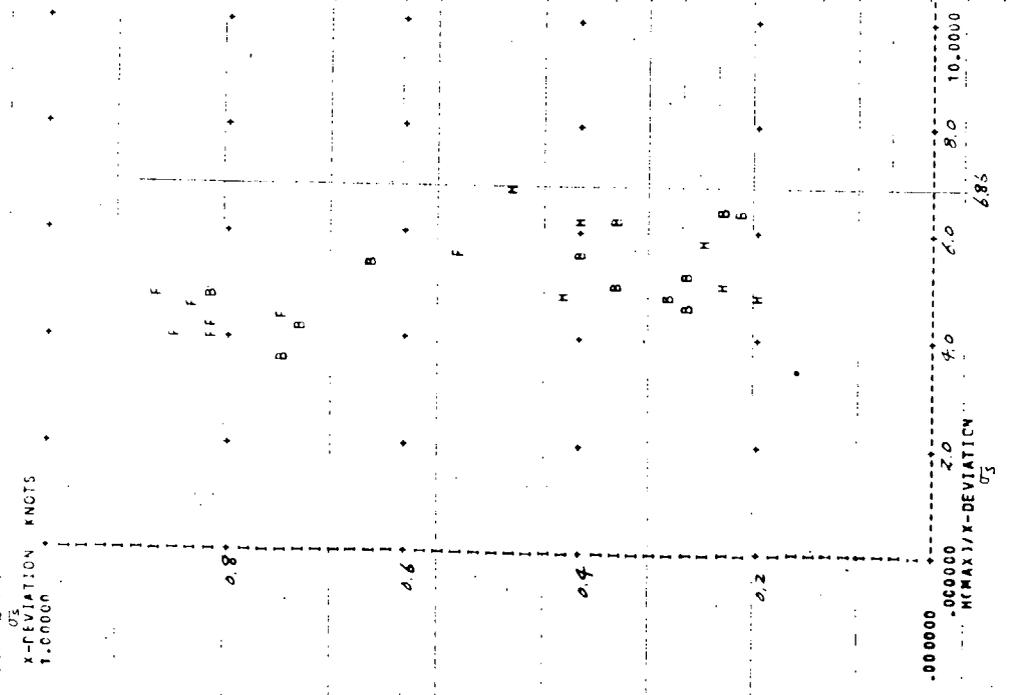


FIG. 4.2.19

SM125 IHI-JAPAN AMROSE VOY.NO. 02
SHIP SPEED

HISTOGRAM OF H(MAX)
50.0000

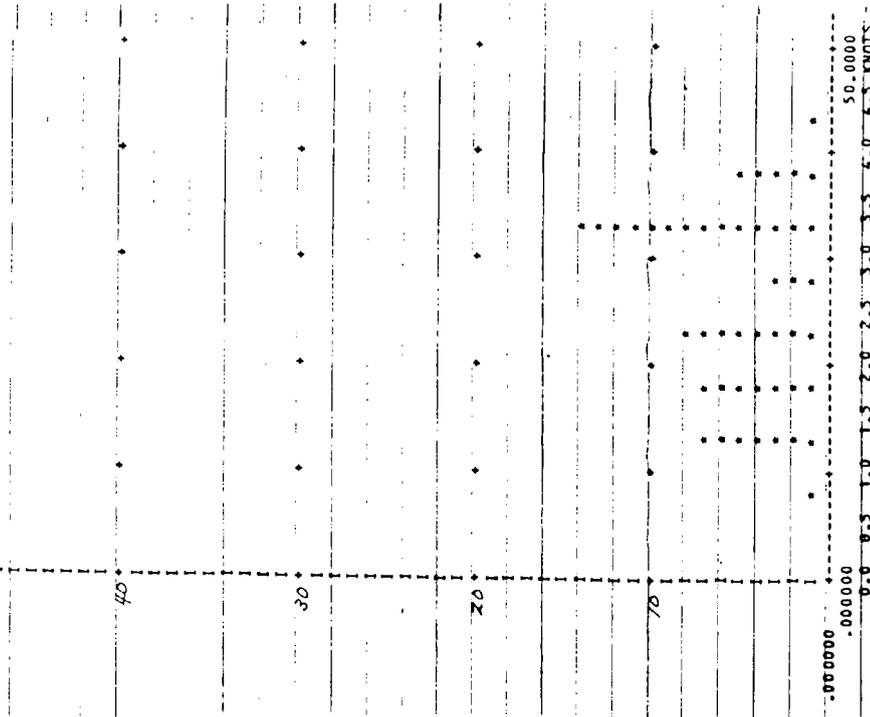


Fig. 4.2.21

SM125 IHI-JAPAN AMROSE VOY.NO. 02
SHIP SPEED

HISTOGRAM OF H(3)
50.0000

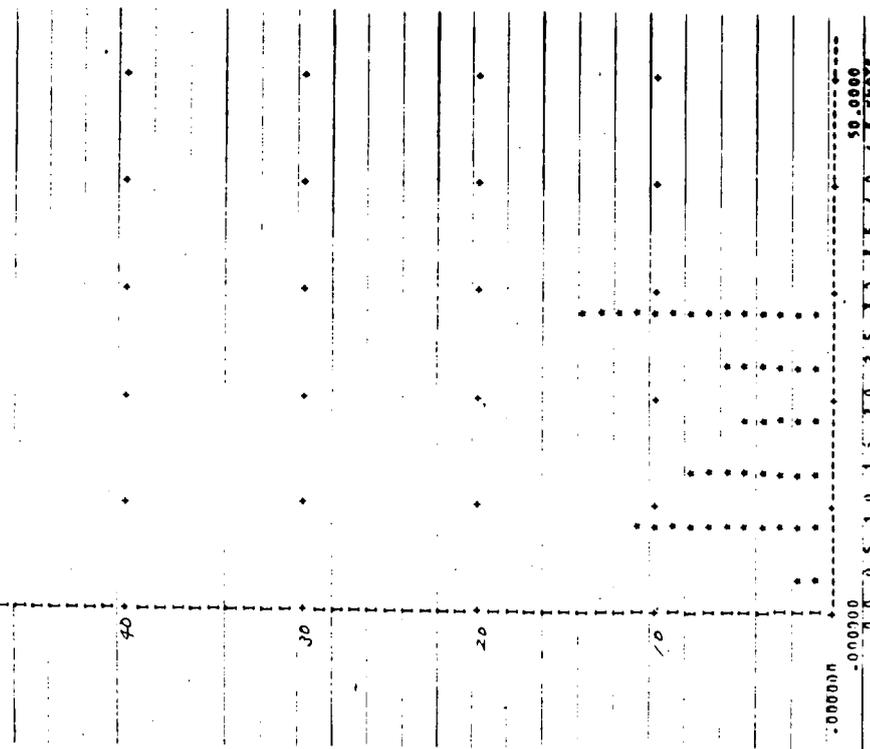


Fig. 4.2.22

SR125 IHI-JAPAN AMBROSE VOY.NO. 02

SR 125 IHI-JAPAN AMBROSE VOY.NO. 02

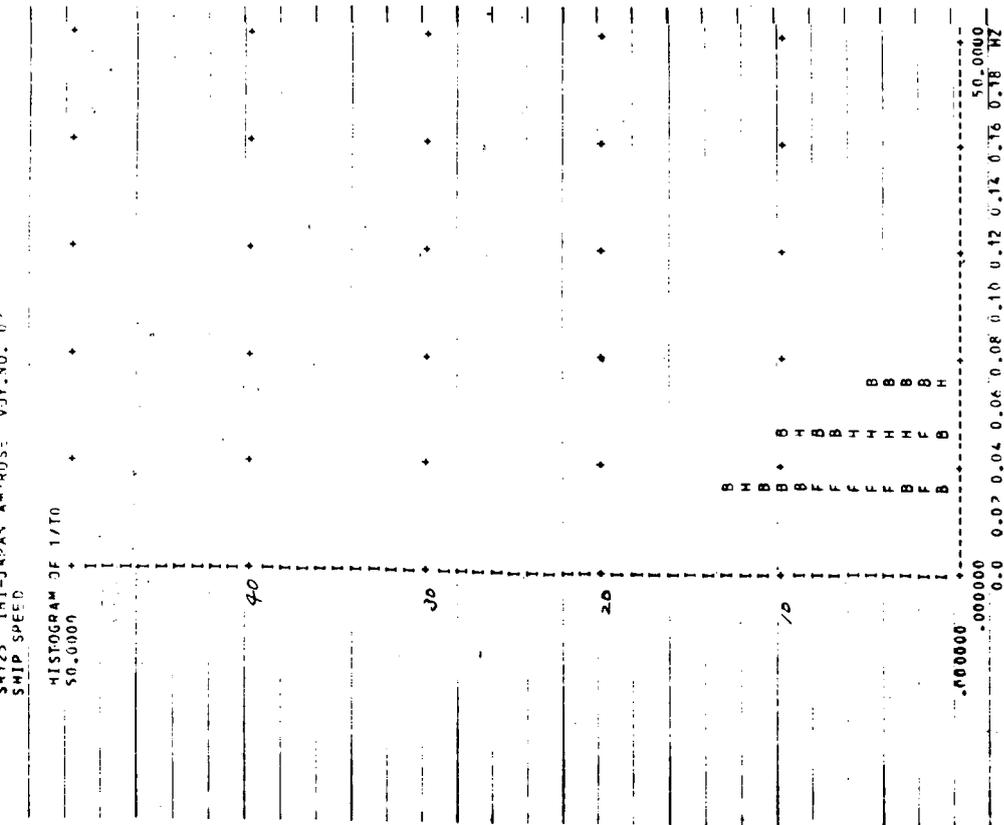


FIG. 4.2.23

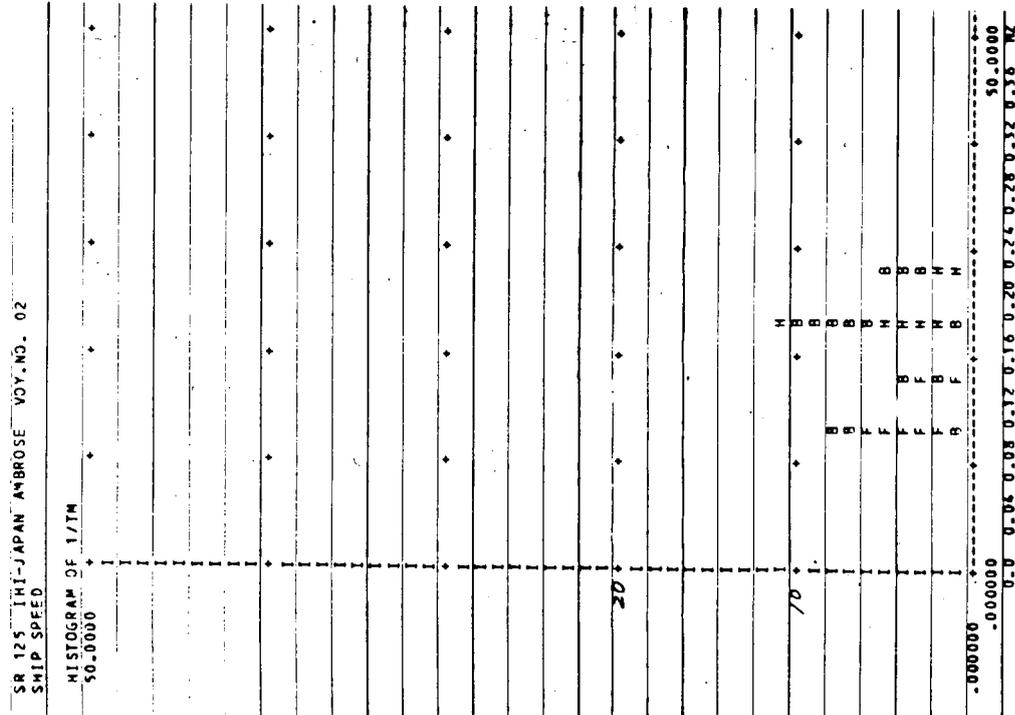


FIG. 4.2.24

SRI25 IHI-JAPAN AMBROSE VOY. NO. 02

HISTOGRAM OF PF.
SHIP SPEED

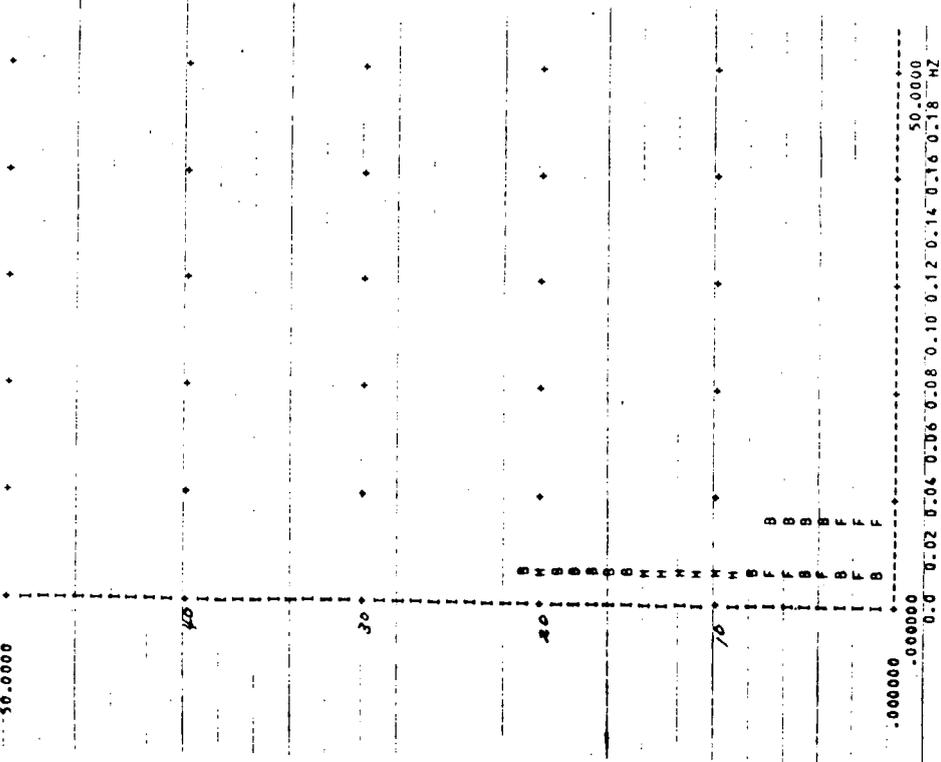


FIG. 4.2.25

SRI25 IHI-JAPAN AMBROSE VOY. NO. 02

HISTOGRAM OF PF.
PROPELLER REVOLUTION

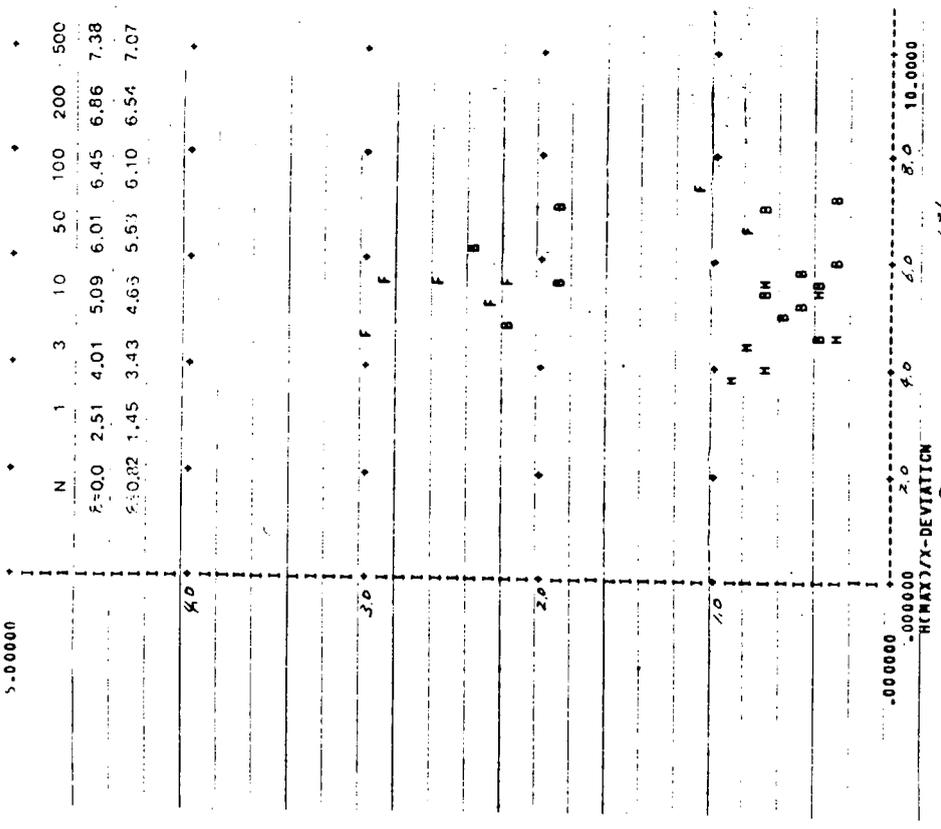


FIG. 4.2.26

SR125 IHI-JAPAN AMBROSE VOY-NO. 02
 PROPELLER REVOLUTION

X-DEVIATION R.P.M.
 5.00000

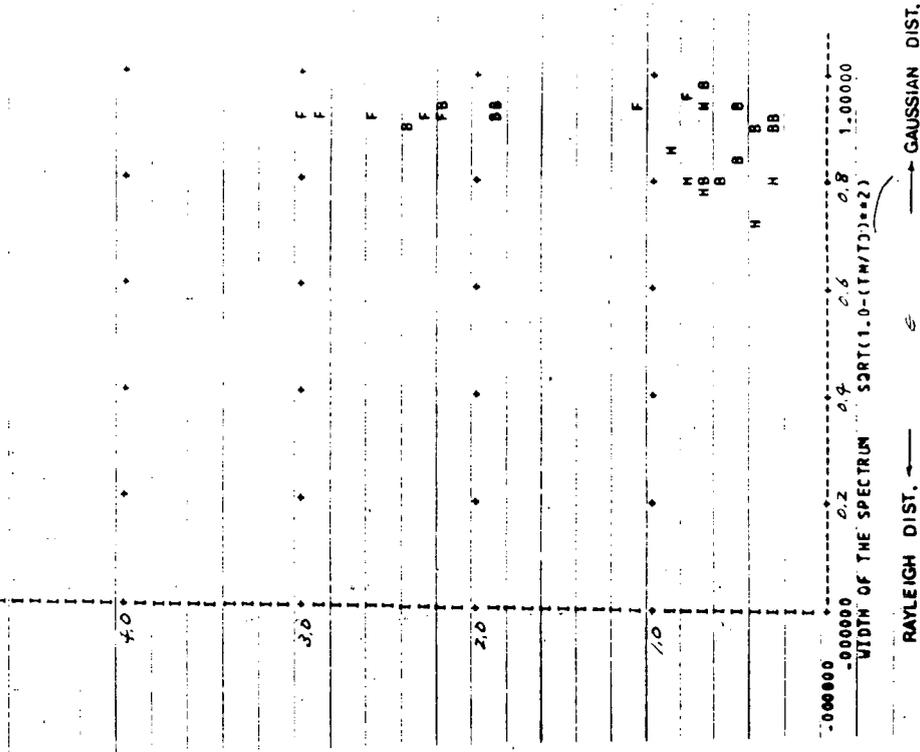


Fig. 4.2.27

SR125 IHI-JAPAN AMBROSE VOY-NO. 07
 PROPELLER REVOLUTION

HISTOGRAM OF H(MAX)
 50.0000

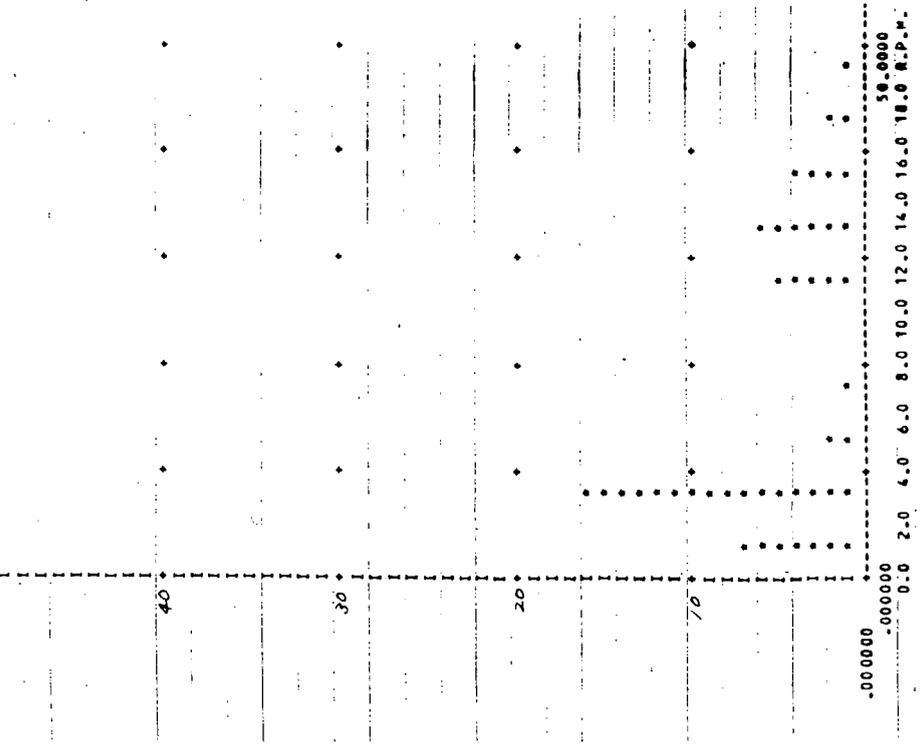


Fig. 4.2.28

SR125 IHI-JAPAN AMBROSE VOY. NO. 02.
PROPELLER REVOLUTION

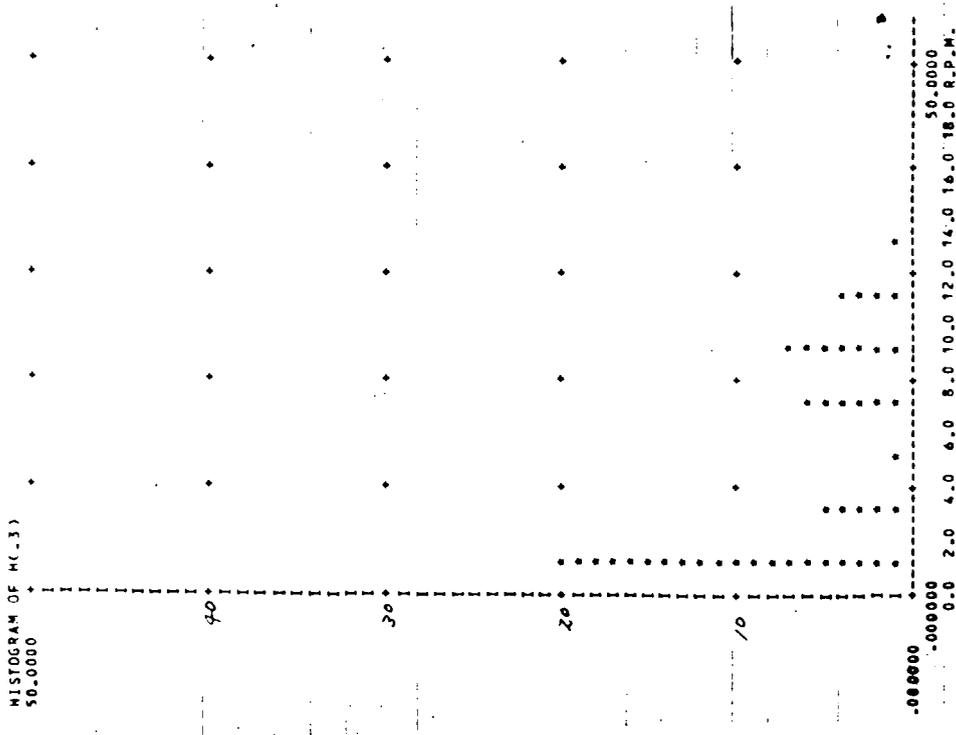


FIG. 4.229

SR125 IHI-JAPAN AMBROSE VOY. NO. 02
PROPELLER REVOLUTION

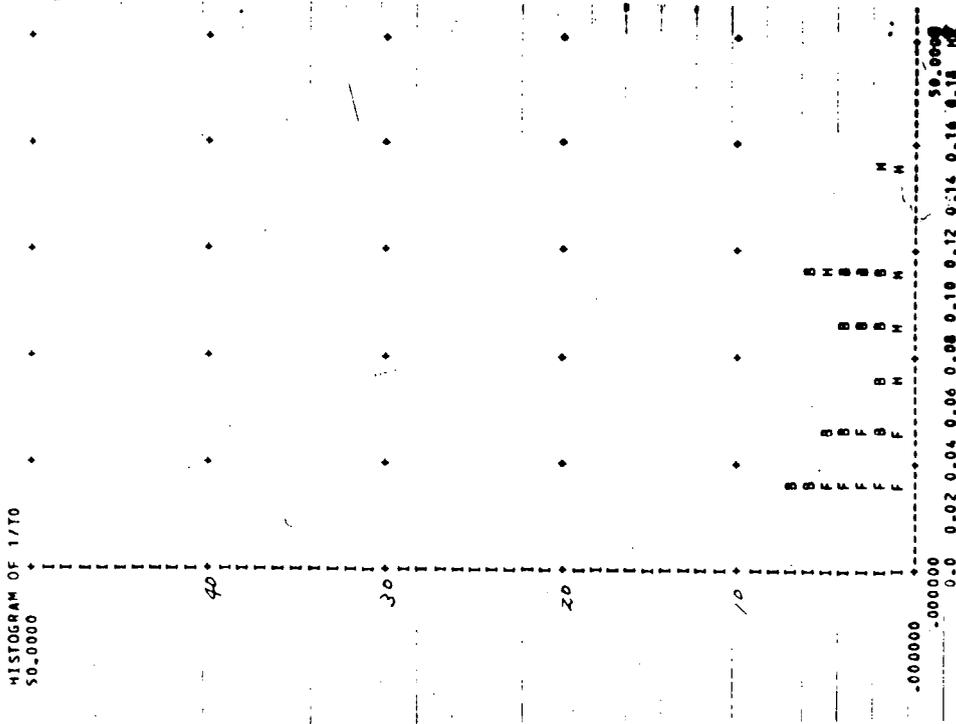


FIG. 4.230

SRI25 IHI-JAPAN AMBROSE VOY.NO. 02
 PROPELLER REVOLUTION

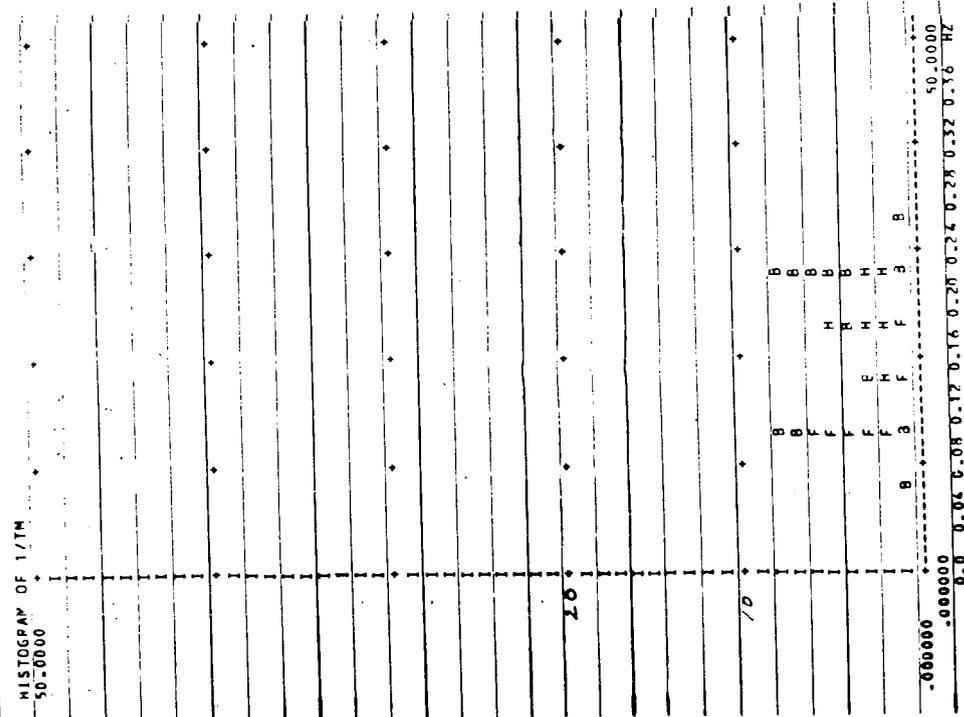


FIG. 4.231

SRI25 IHI-JAPAN AMBROSE VOY.NO. 02
 PROPELLER REVOLUTION

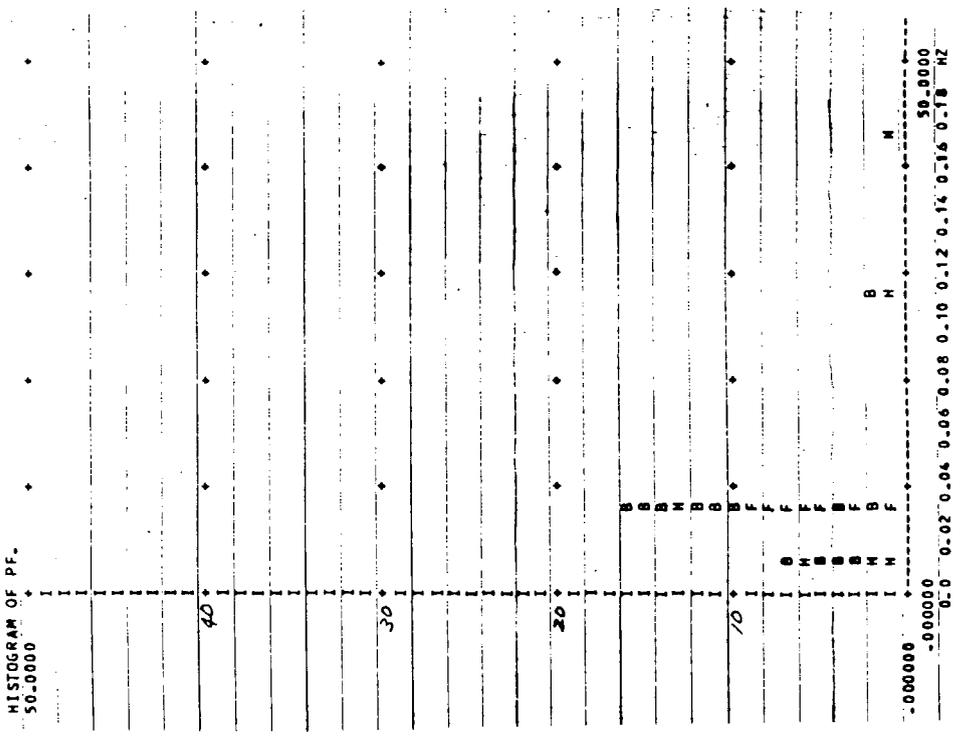


FIG. 4.232

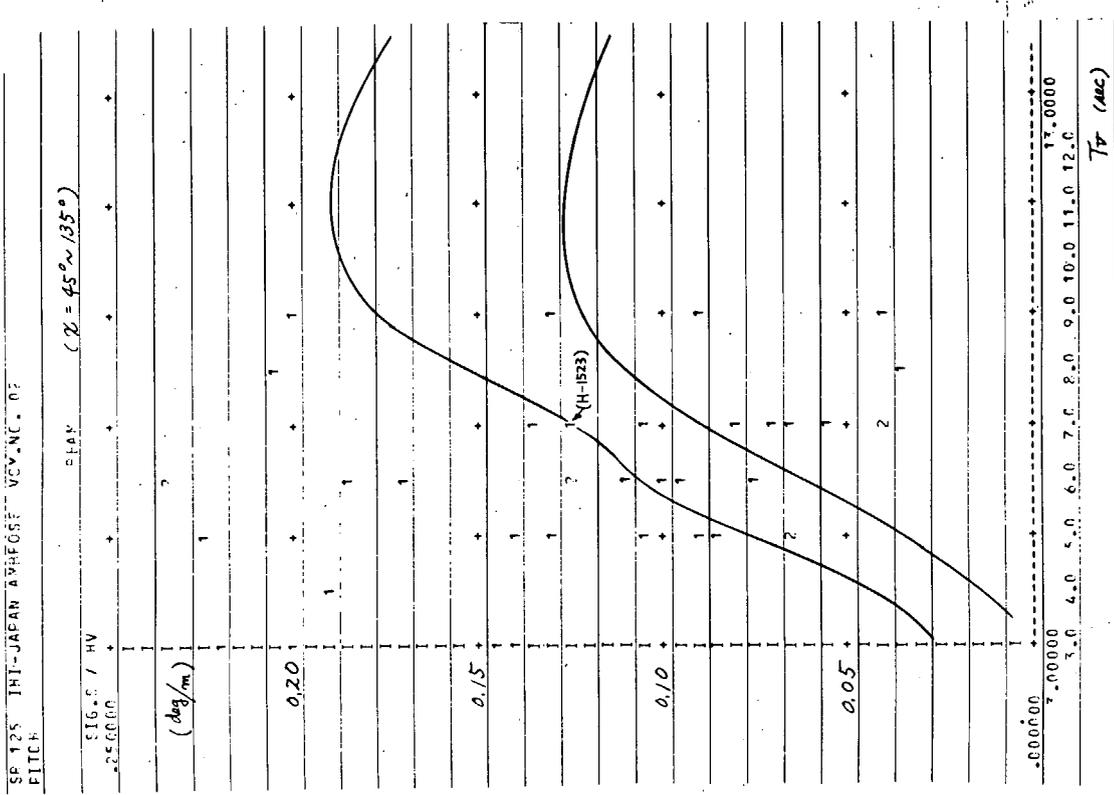


FIG. 4.234

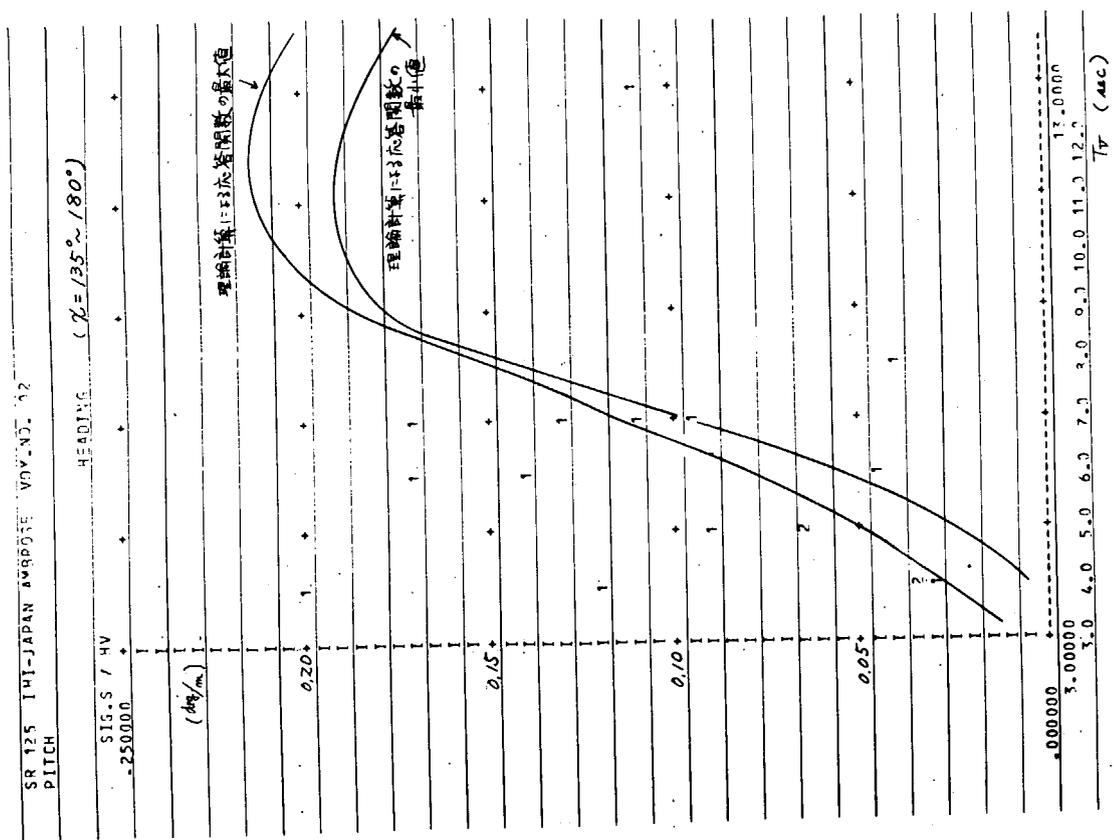


FIG. 4.233

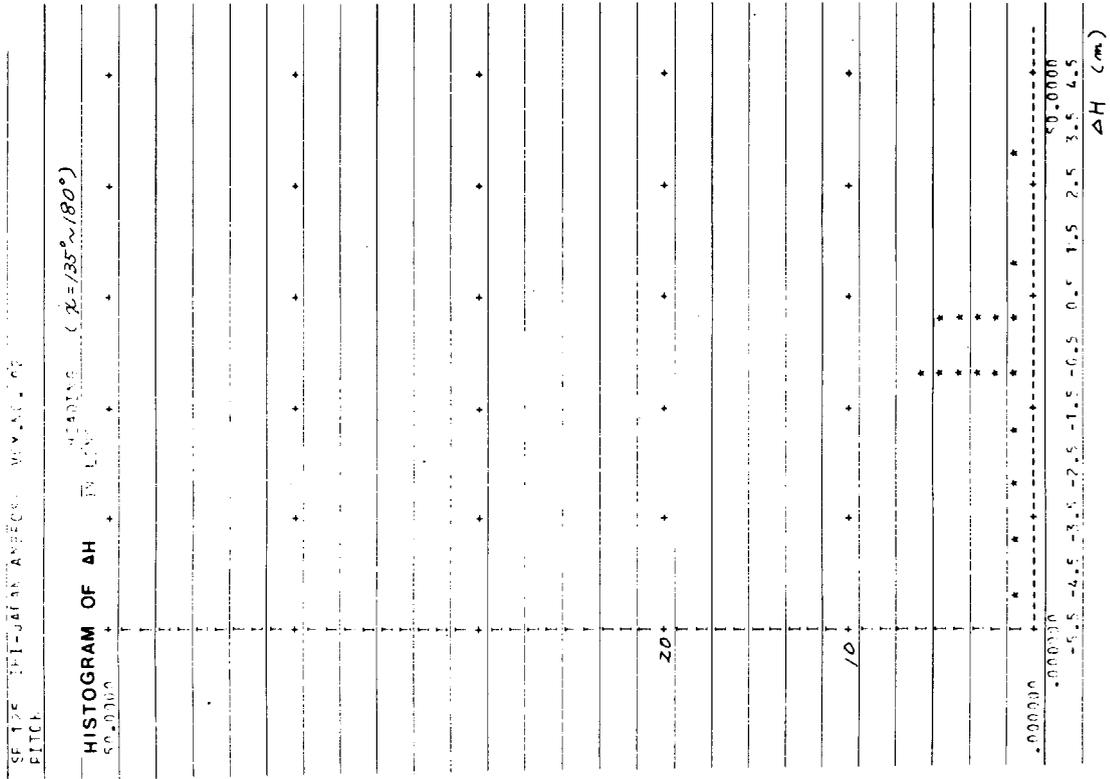


FIG. 4.236

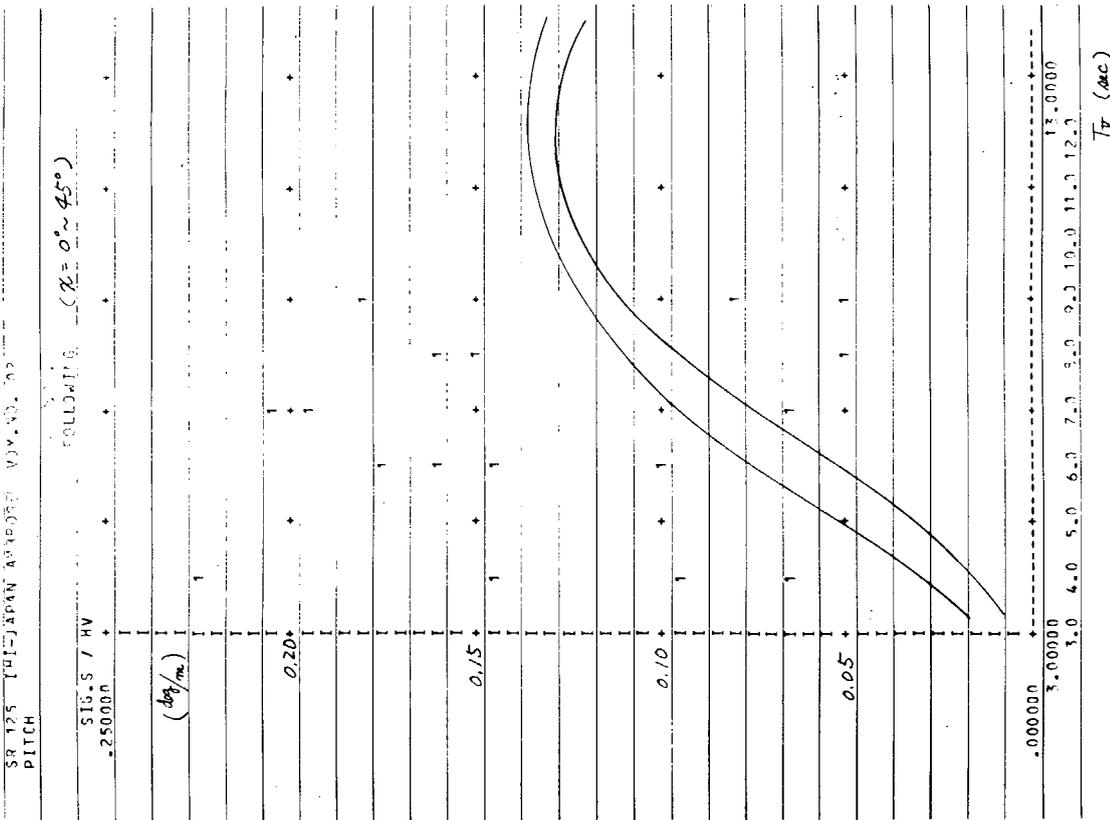


FIG. 4.235

53 THE JAPANESE ARCHIVES, VOL. 92
PITCH

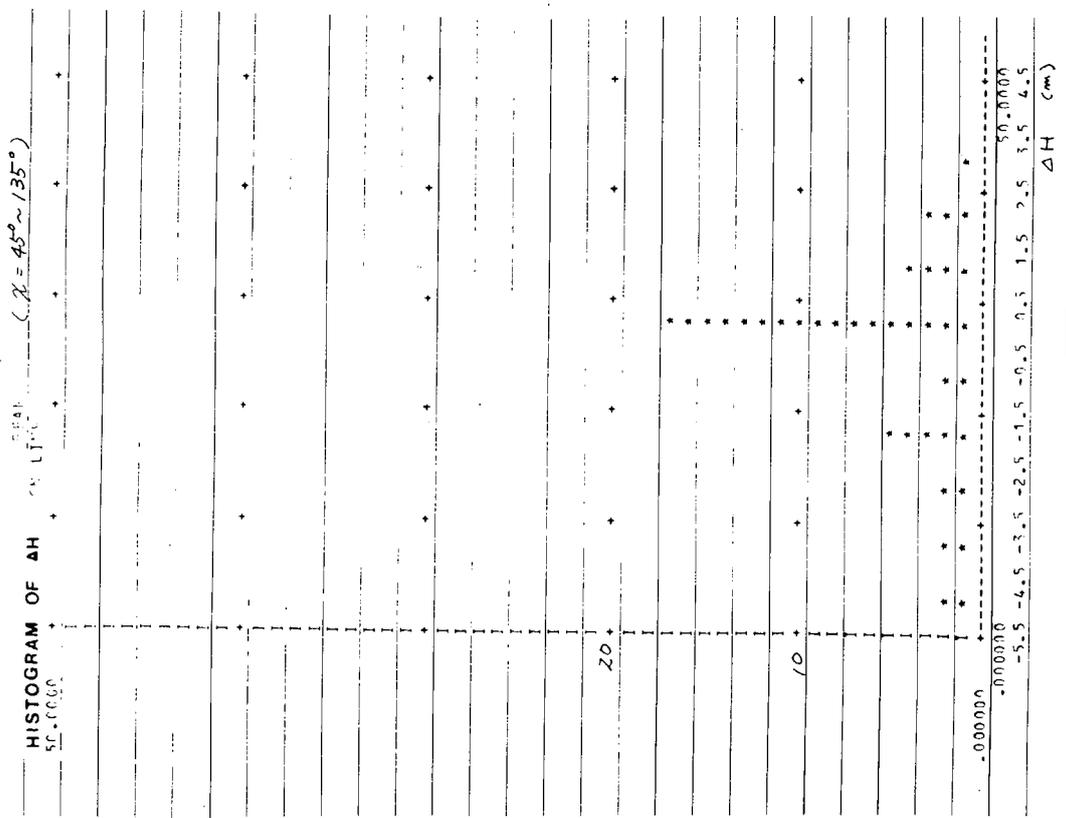


FIG. 4.237

53 THE JAPANESE ARCHIVES, VOL. 93
PITCH

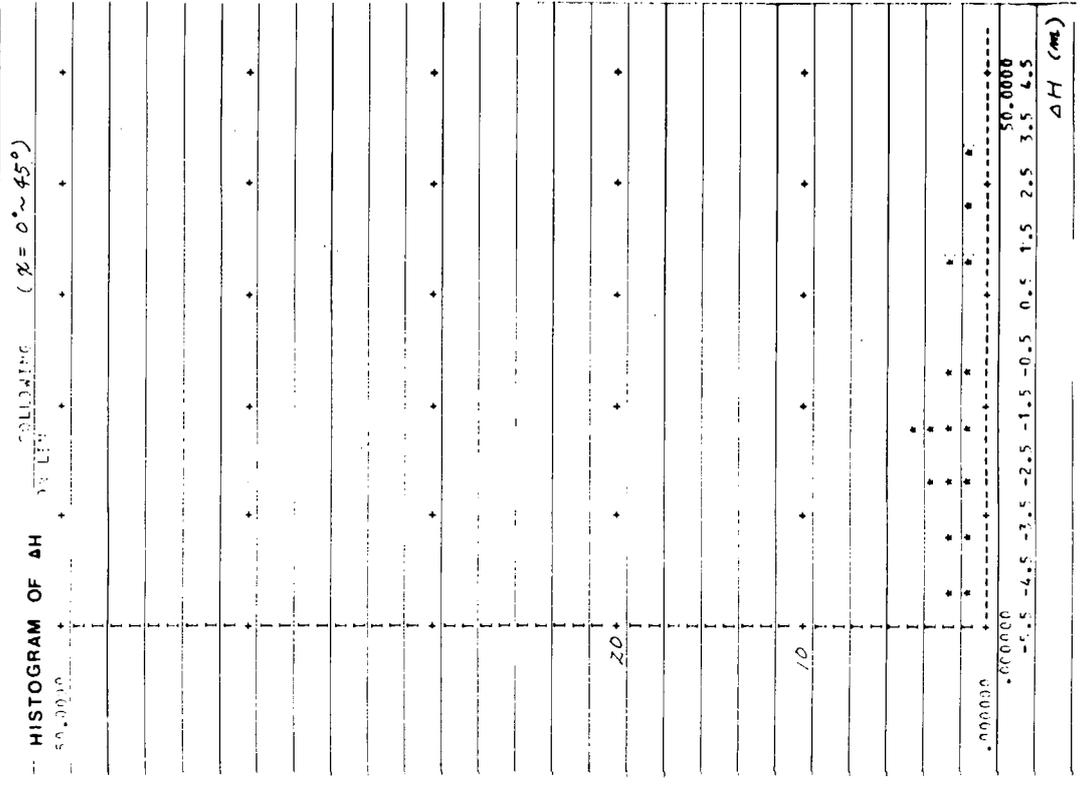


FIG. 4.238

SR 175 IHI-JAPAN APPROX. DIV. NO. 00
PITCH

SIG.S / H(173) HEARING (X=35°~180°)
-250000

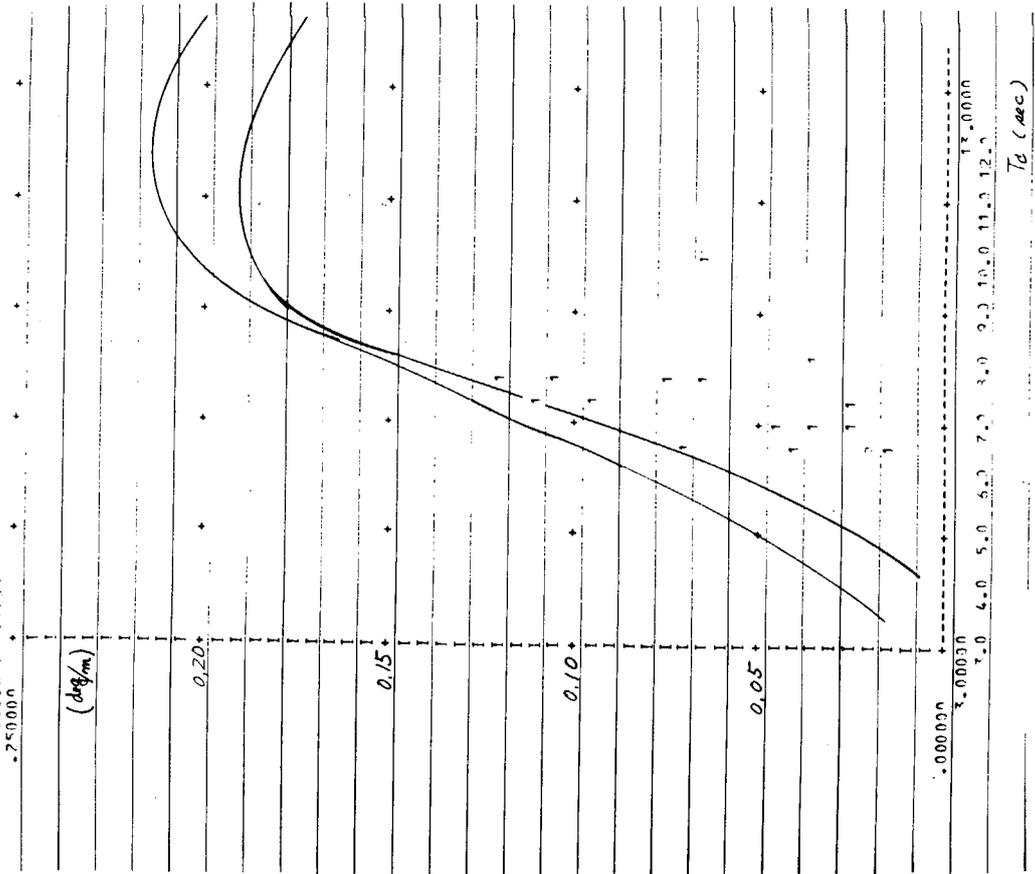


FIG. 4.239

SR 175 IHI-JAPAN APPROX. DIV. NO. 00
PITCH

SIG.S / H(173) HEARING (X=45°~135°)
-250000

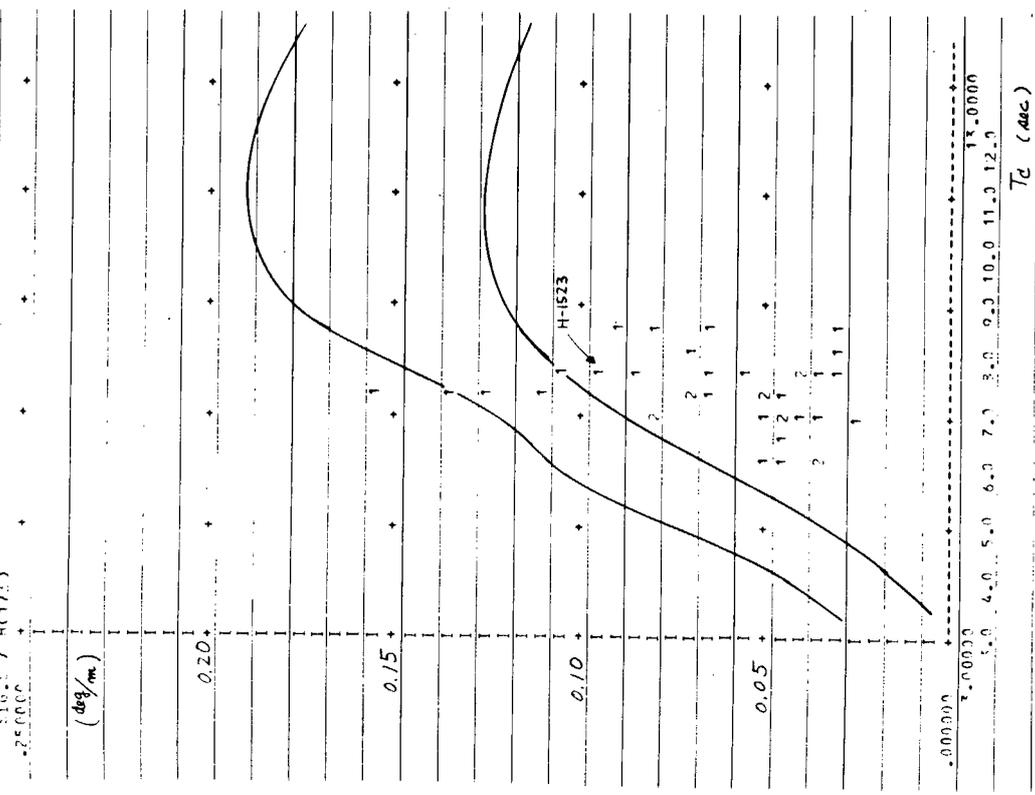


FIG. 4.240

SR 125 IHI-JAPAN AVANCE VV. 43. 02
PITCH

HOLDING
($\alpha = 0^\circ \sim 45^\circ$)

513.57 H(1/3)
-250.000

(deg/acc)

0.20

0.15

0.10

0.05

.00000

1.0 2.0 3.0 4.0 5.0 6.0 7.0 8.0 9.0 10.0 11.0 12.0

T_d (acc)

FIG. 4.241

SR 125 IHI-JAPAN AVANCE VV. 43. 02
PITCH

HISTOGRAM OF ΔH
513.57 H(1/3) BEARING (X = $135^\circ \sim 180^\circ$)
-50.0000

20

10

.000000

0.00000

-2.5 -4.5 -6.5 -8.5 -10.5 -12.5 -14.5 -16.5 -18.5 -20.5

ΔH (cm)

FIG. 4.242

SF 125 101-JAPAN AIRCRAFT DIV. NO. 02
PITCH

HISTOGRAM OF ΔH

31.5 / 4(17)

($\alpha = 45^\circ \sim 135^\circ$)

50,000

IN LINE

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

20

10

50,000

50,000

50,000

50,000

50,000

50,000

50,000

50,000

50,000

50,000

50,000

50,000

50,000

50,000

50,000

50,000

50,000

50,000

ΔH (m)

FIG. 4.243

SF 125 101-JAPAN AIRCRAFT DIV. NO. 02
PITCH

HISTOGRAM OF ΔH

31.5 / 4(17)

($\alpha = 0^\circ \sim 45^\circ$)

50,000

IN LINE

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

20

10

50,000

50,000

50,000

50,000

50,000

50,000

50,000

50,000

50,000

50,000

50,000

50,000

50,000

50,000

50,000

50,000

50,000

ΔH (m)

FIG. 4.244

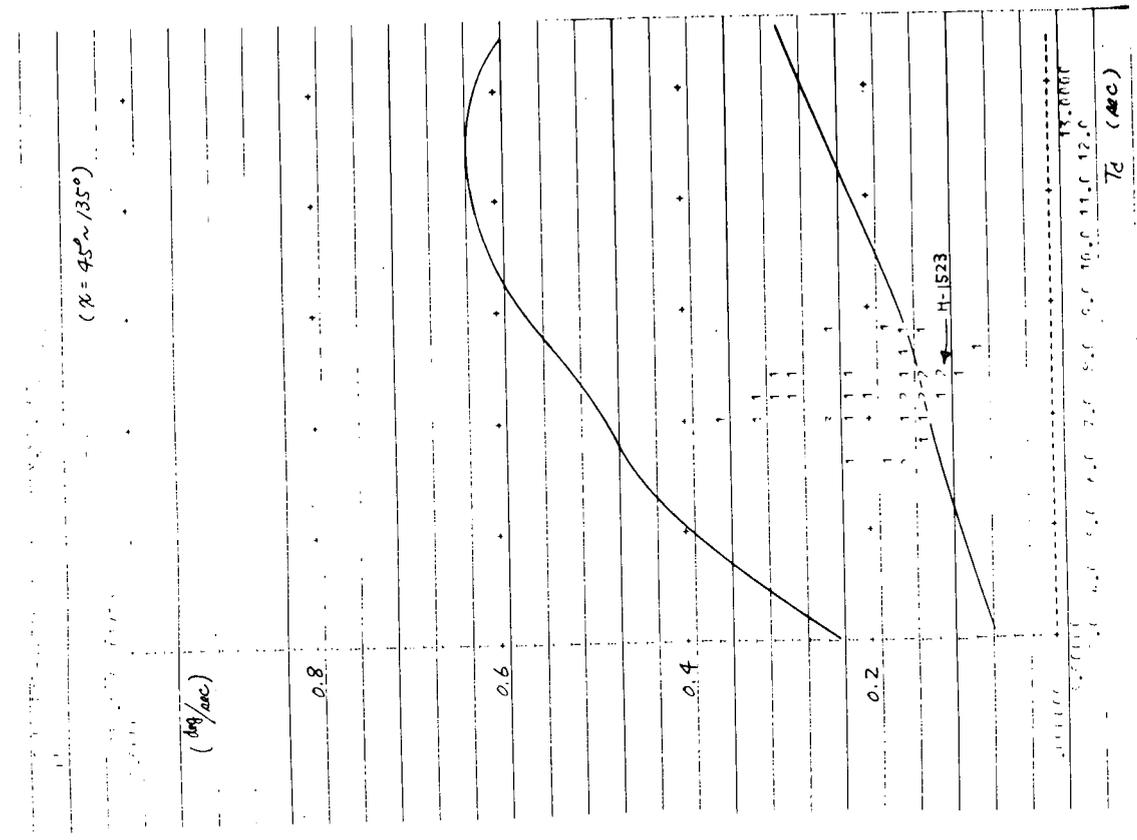


FIG. 4.246

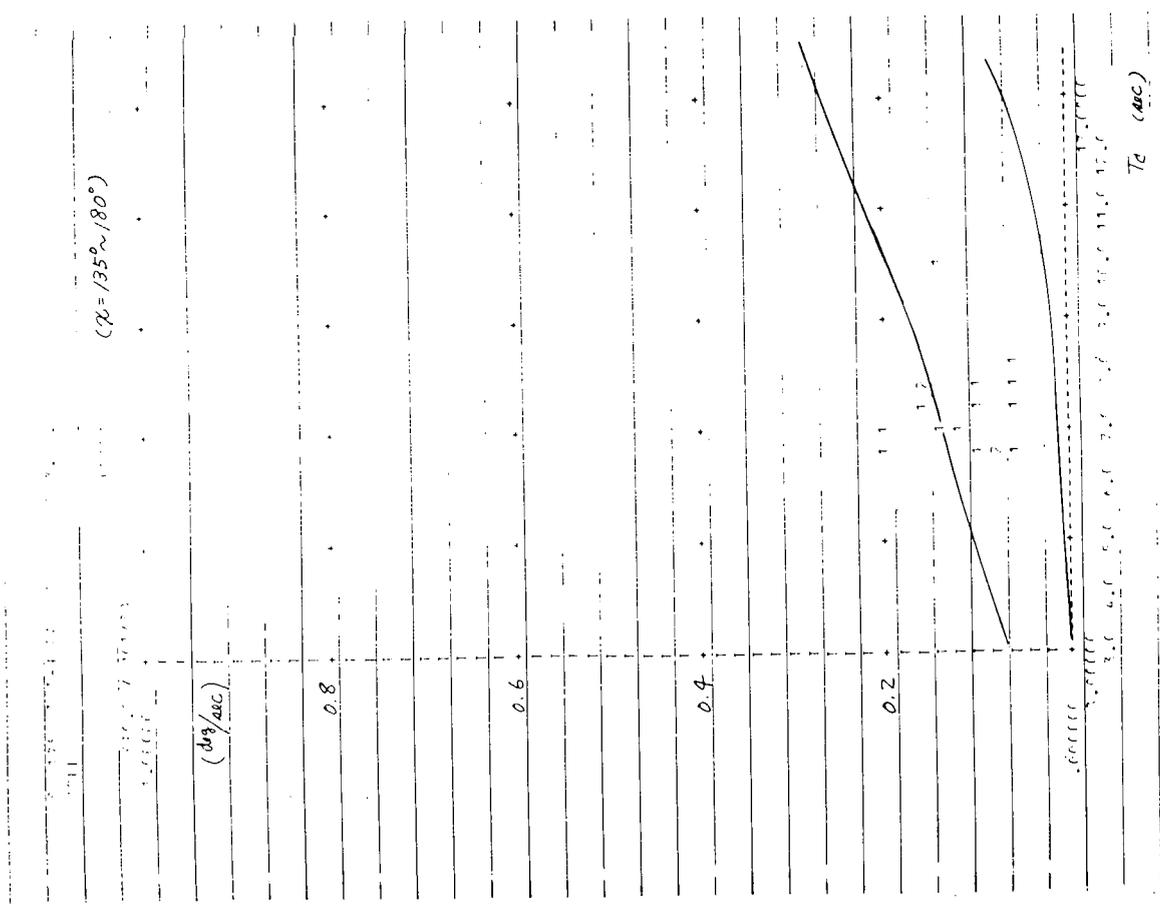


FIG. 4.245

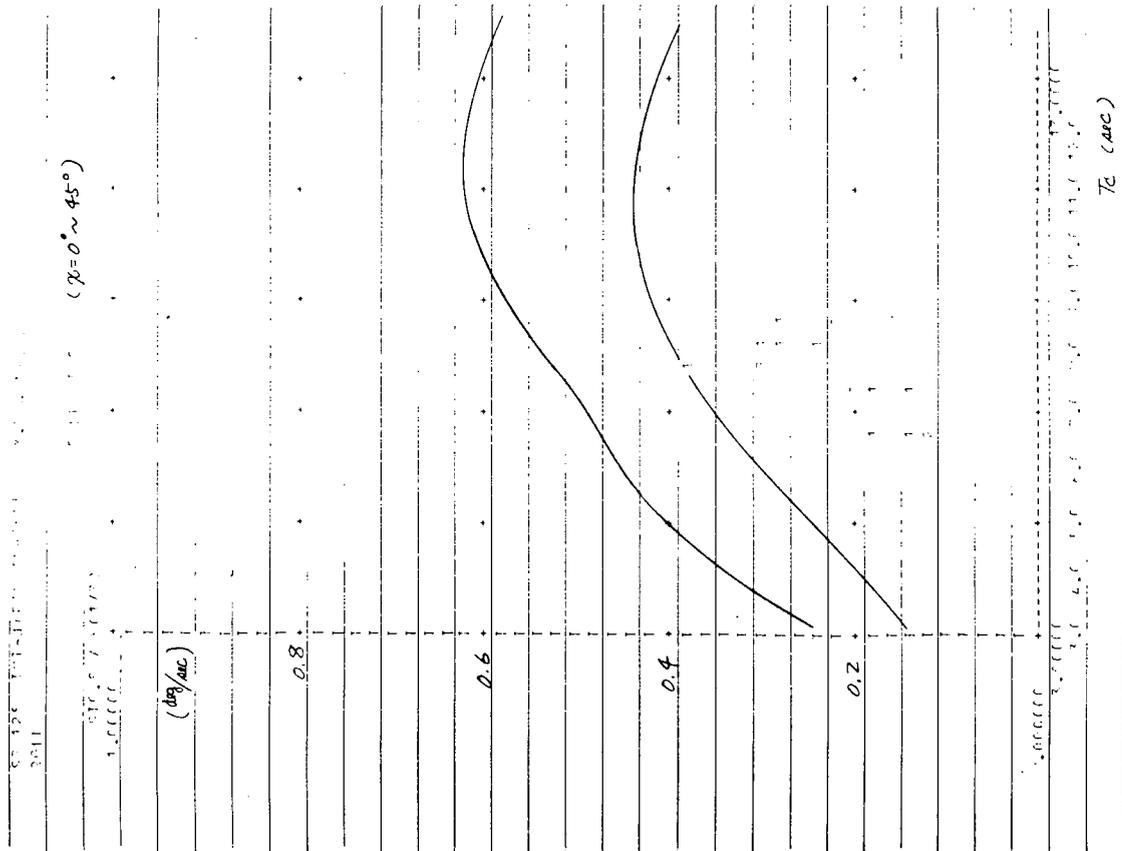


Fig. 4.247

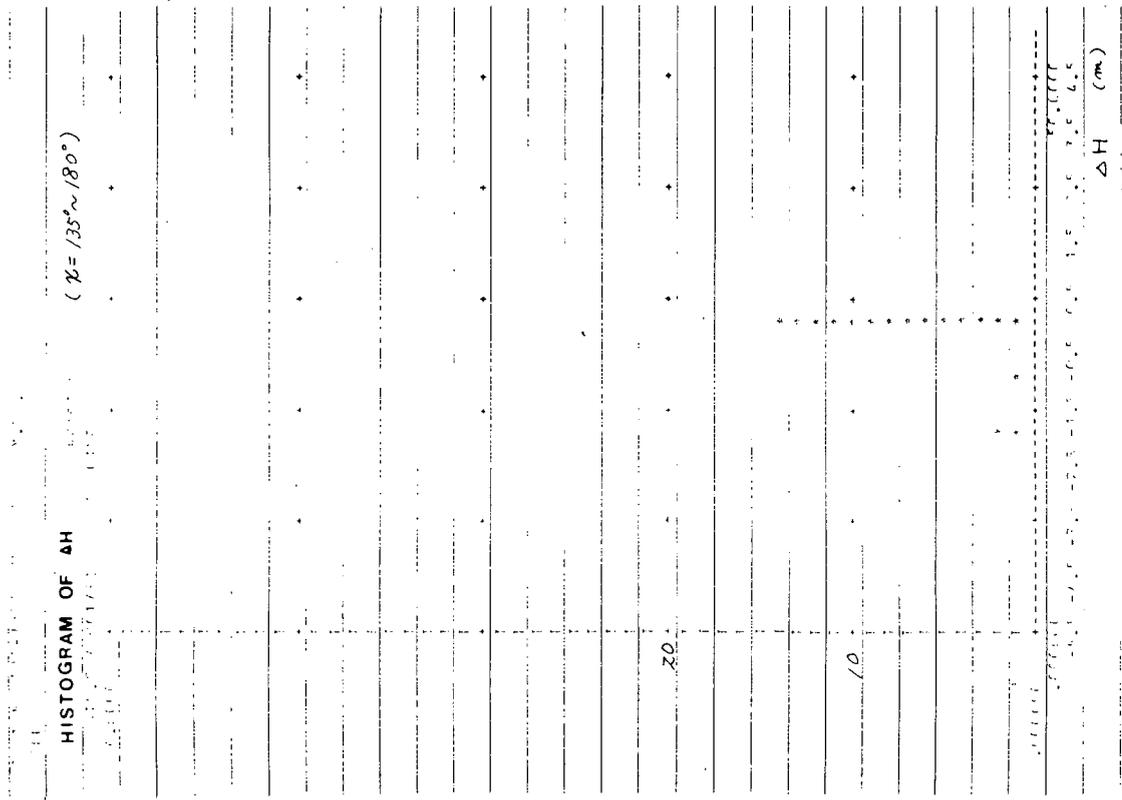


Fig. 4.248

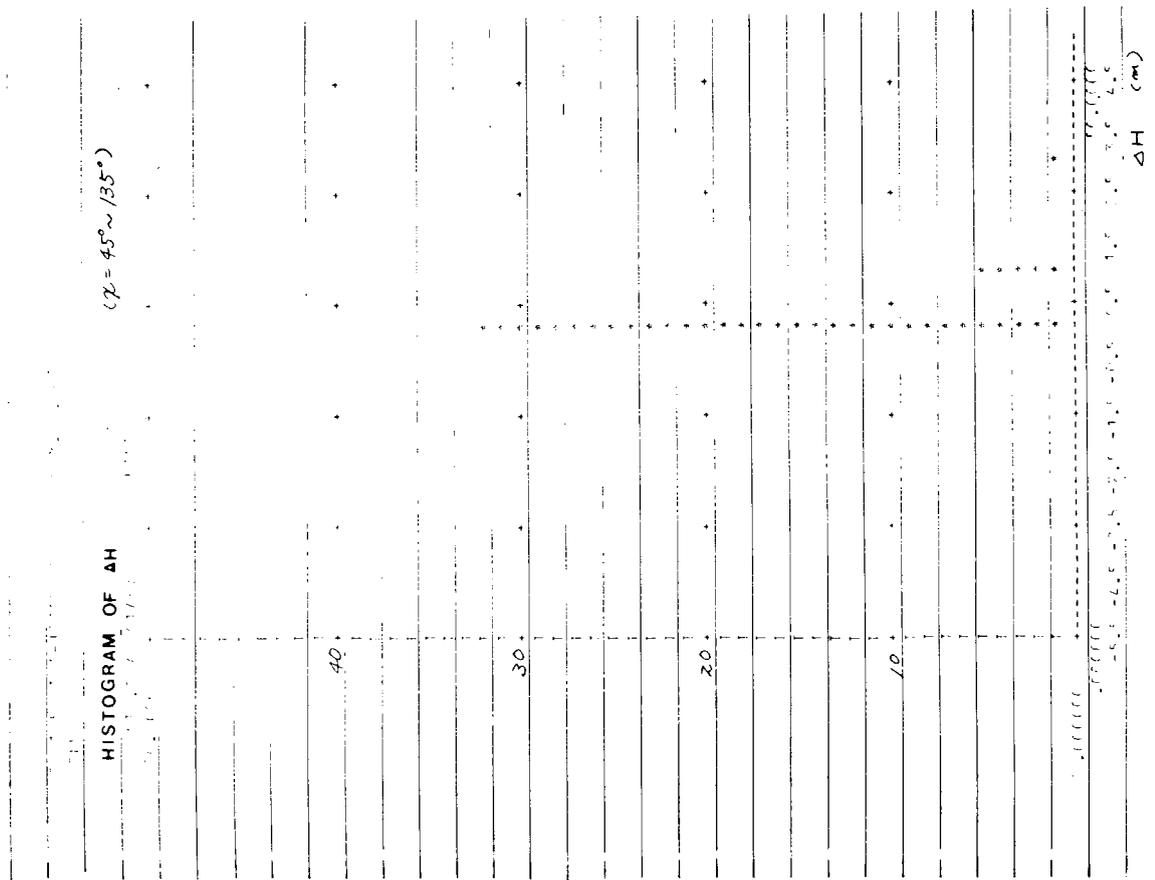


FIG. 4.2.49

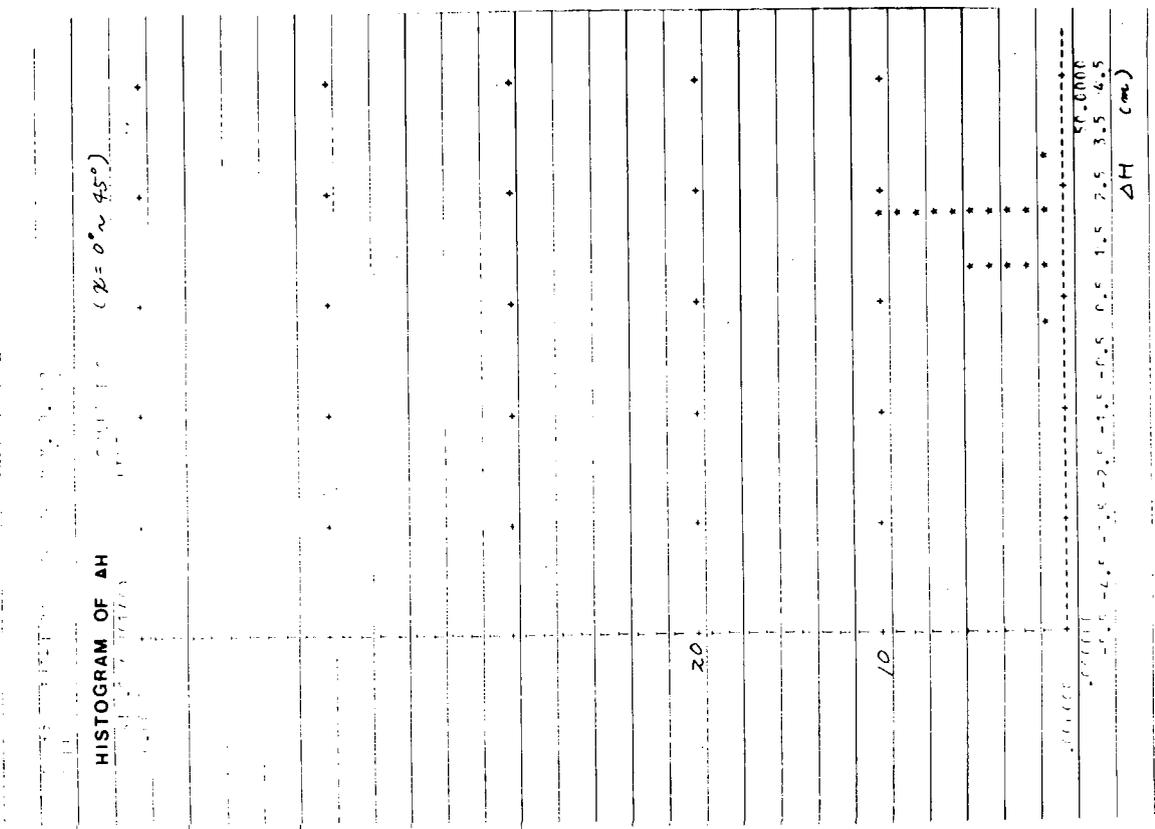


FIG. 4.2.50

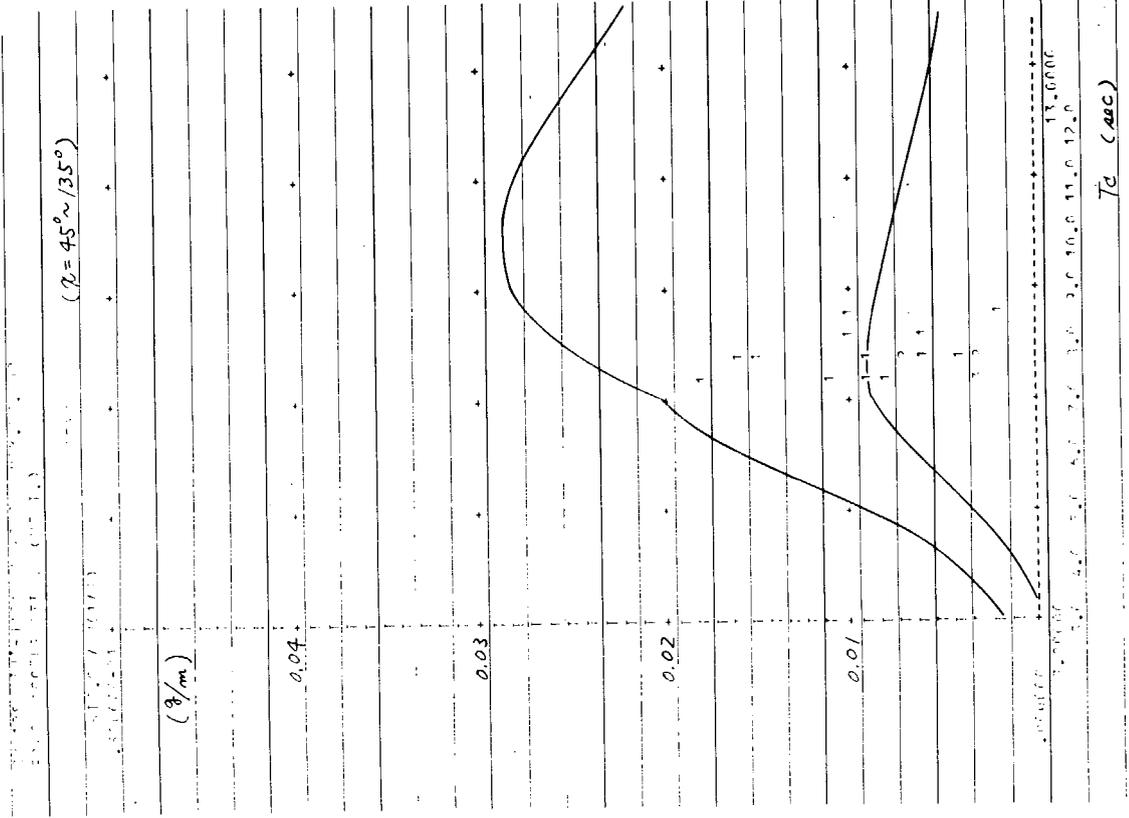


FIG. 4.252

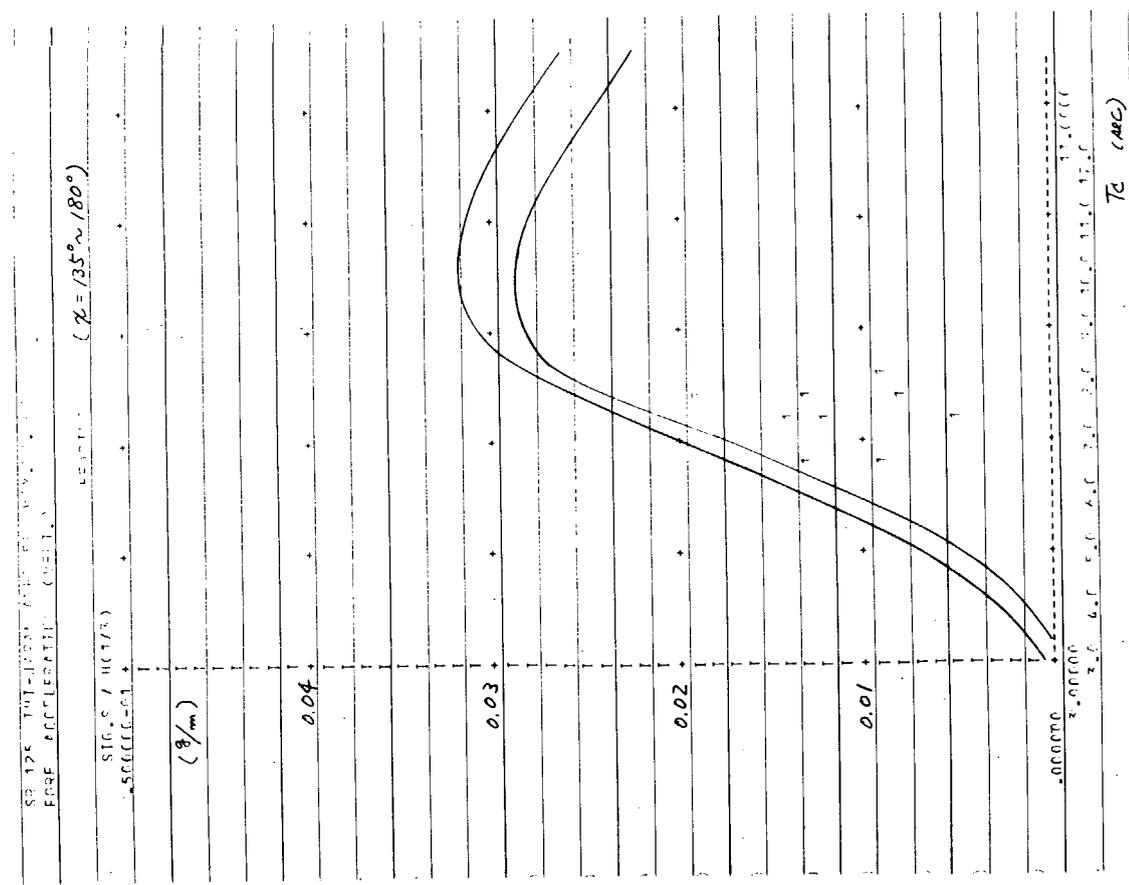


FIG. 4.251

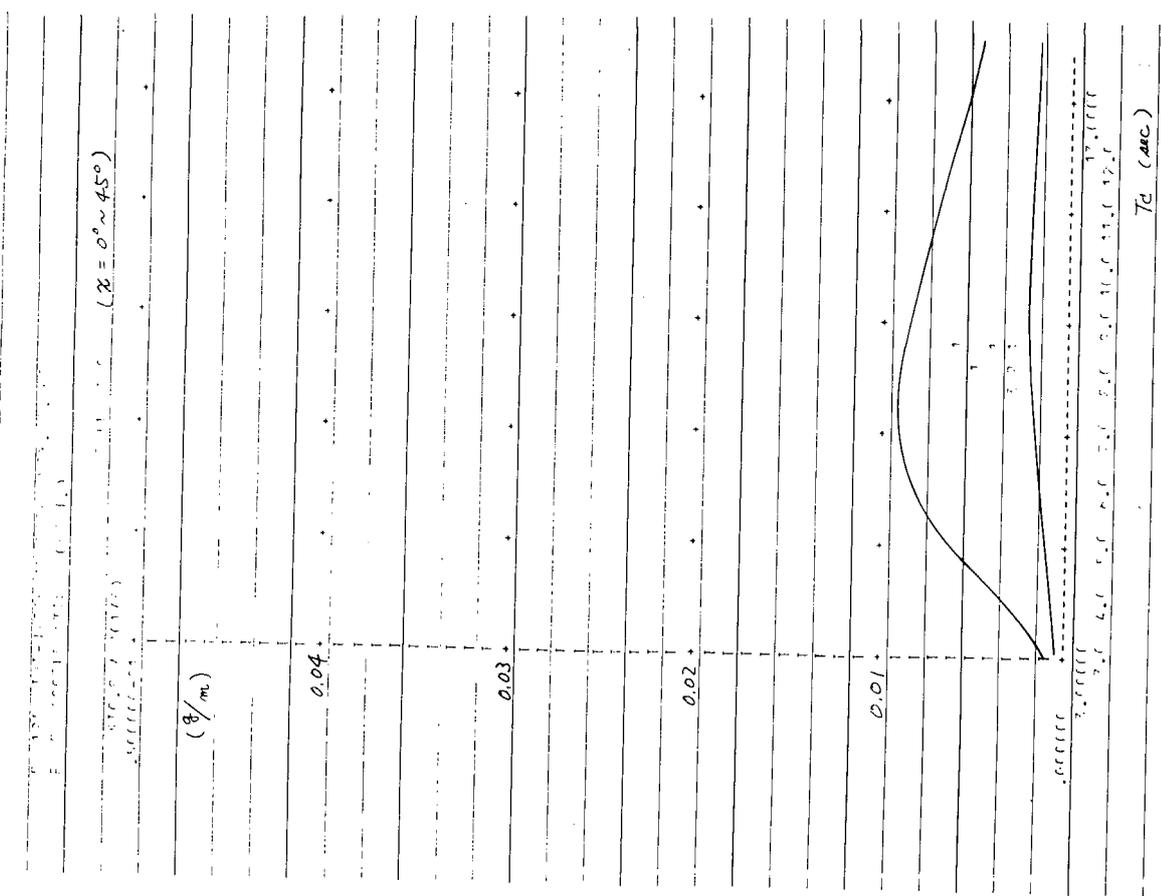


FIG. 4.253

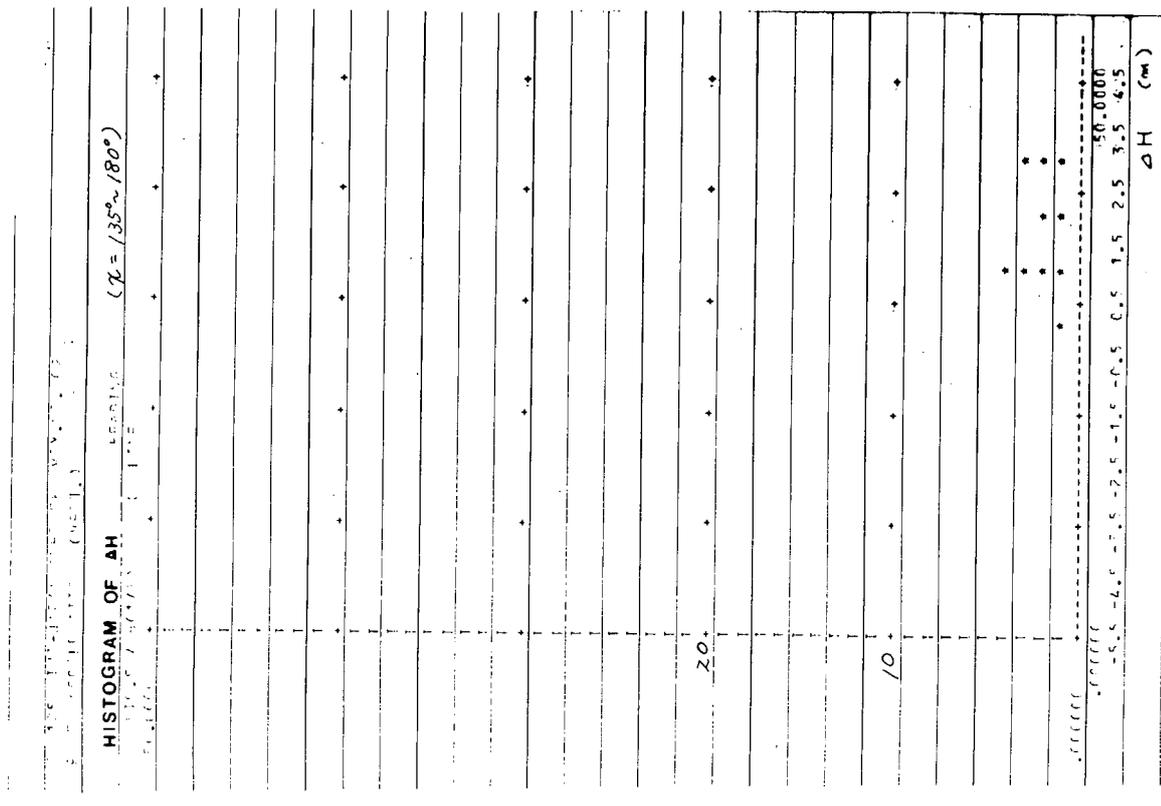


FIG. 4.254

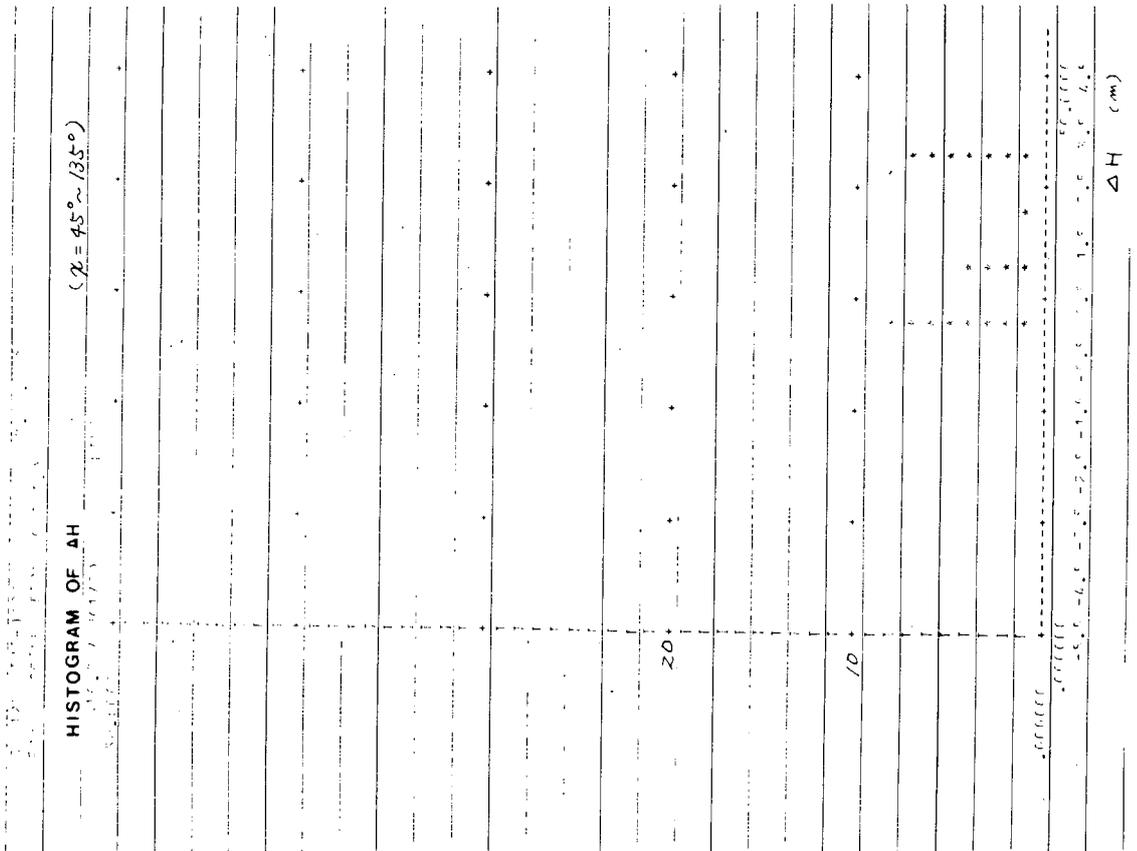


FIG. 4.2.5.5

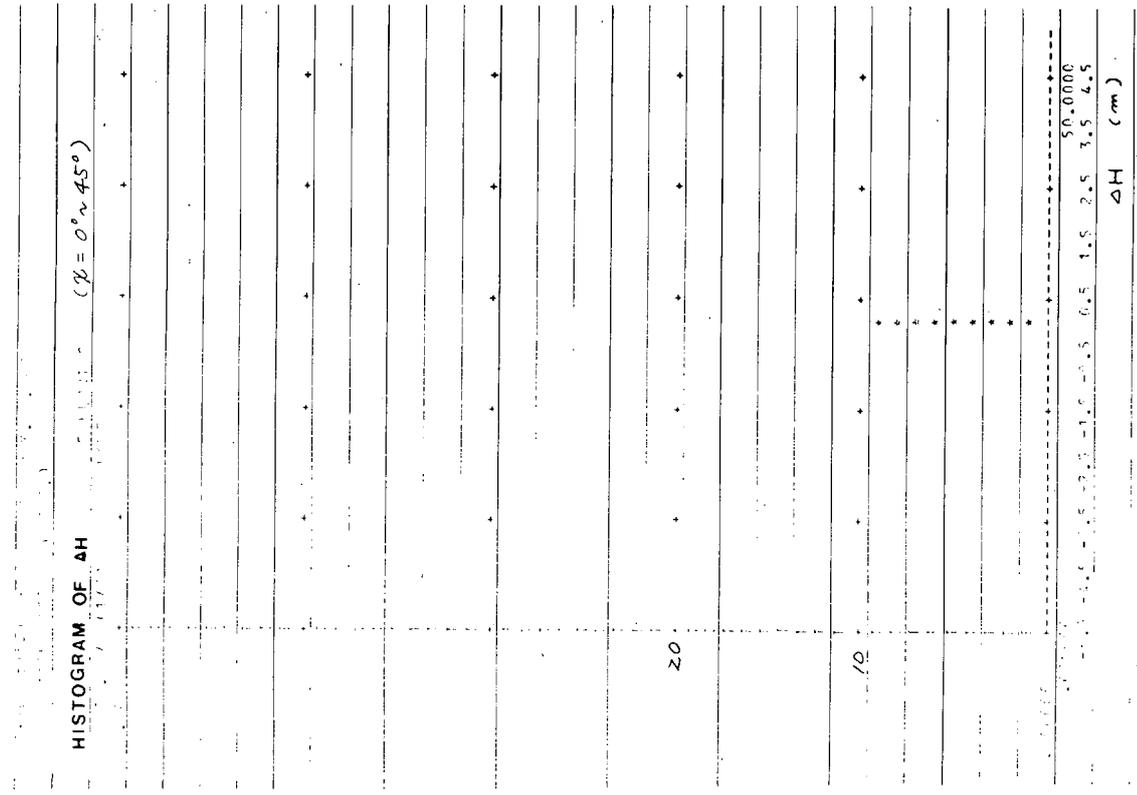
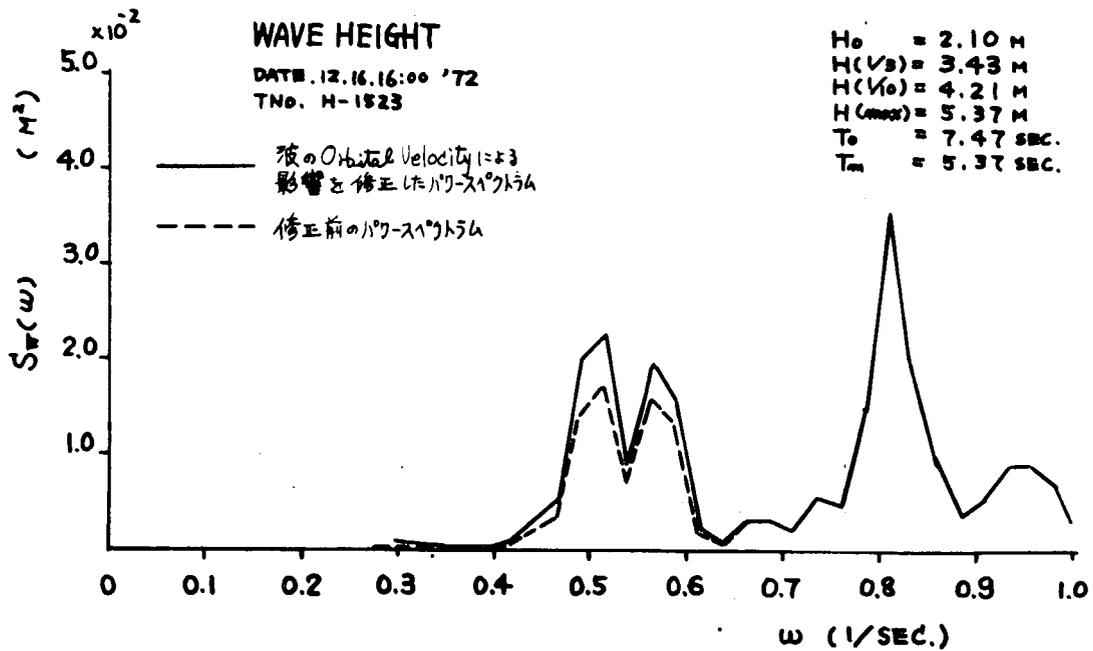
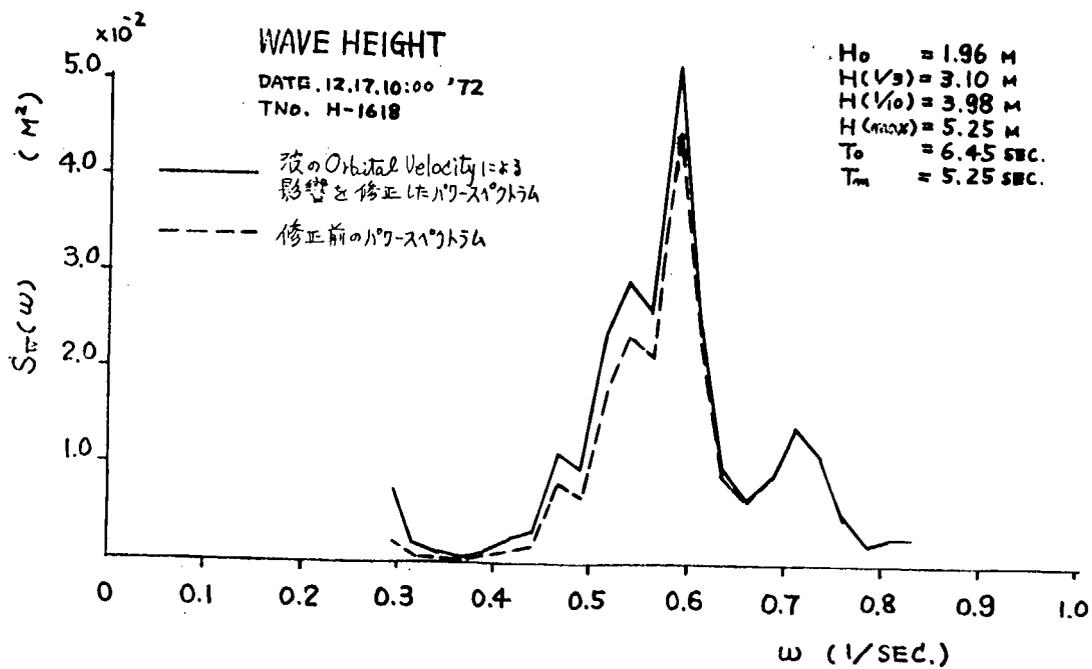


FIG. 4.2.5.6



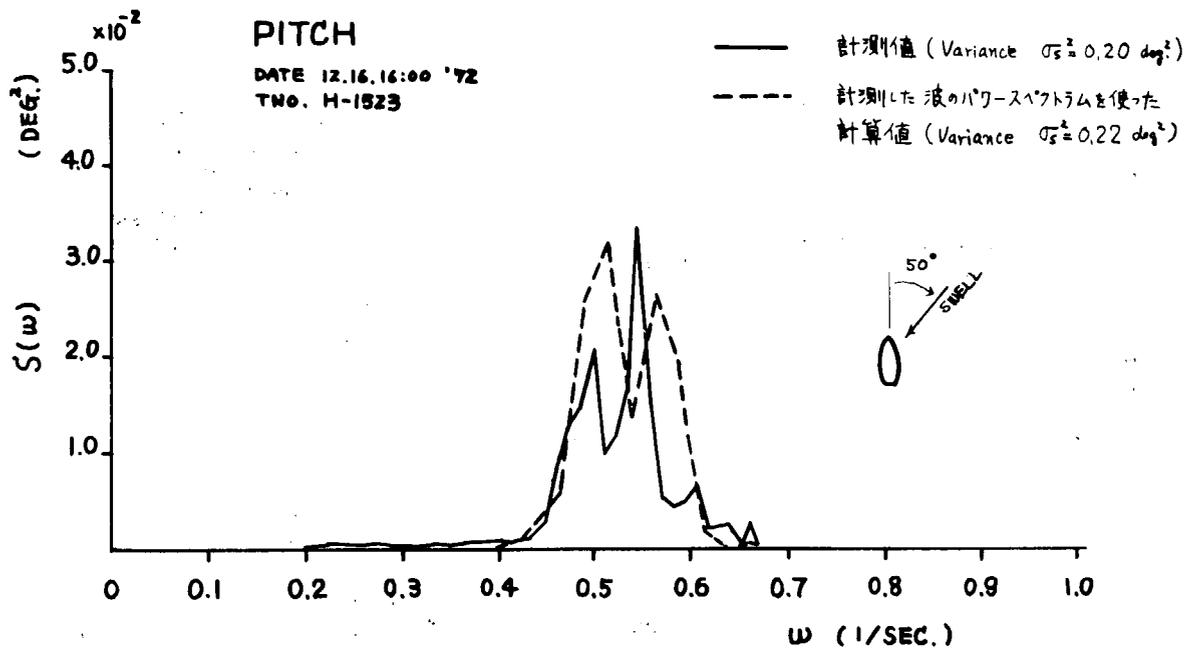
WAVE HEIGHT (a) のパワー・スペクトラム

Fig. 4.257



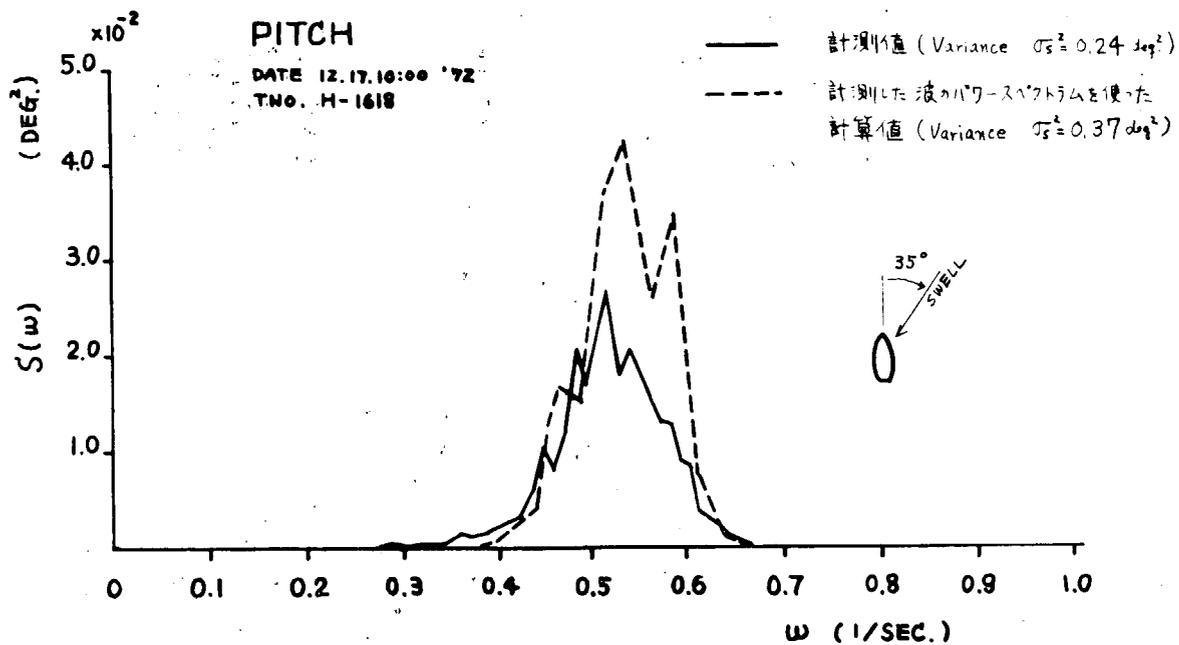
WAVE HEIGHT (b) のパワー・スペクトラム

Fig. 4.258



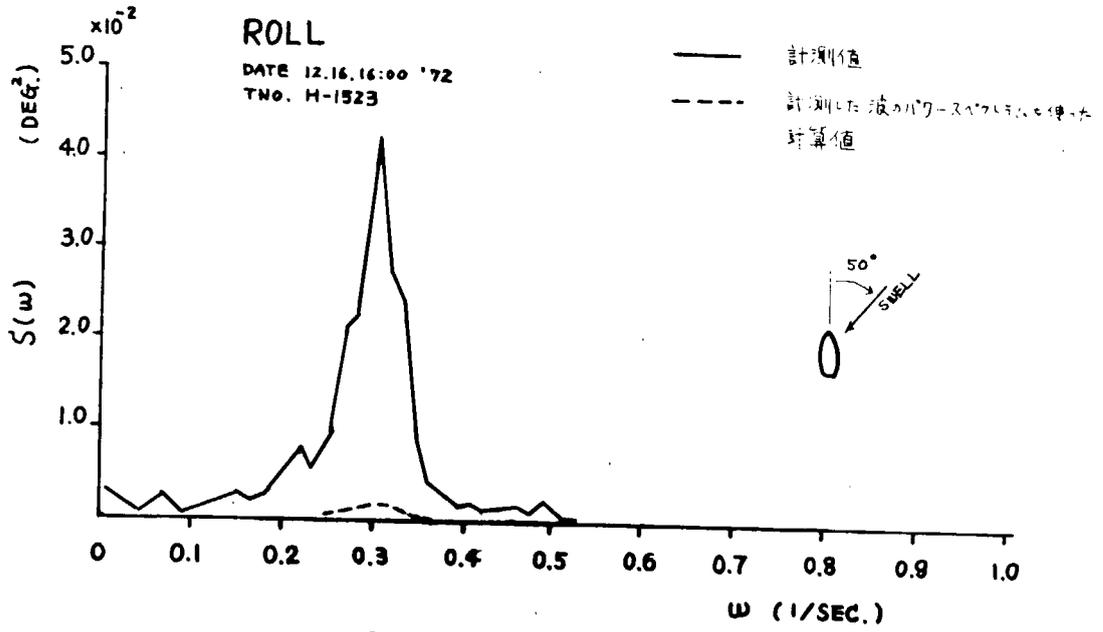
PITCH (a) のパワースペクトラム

Fig. 4.25.9



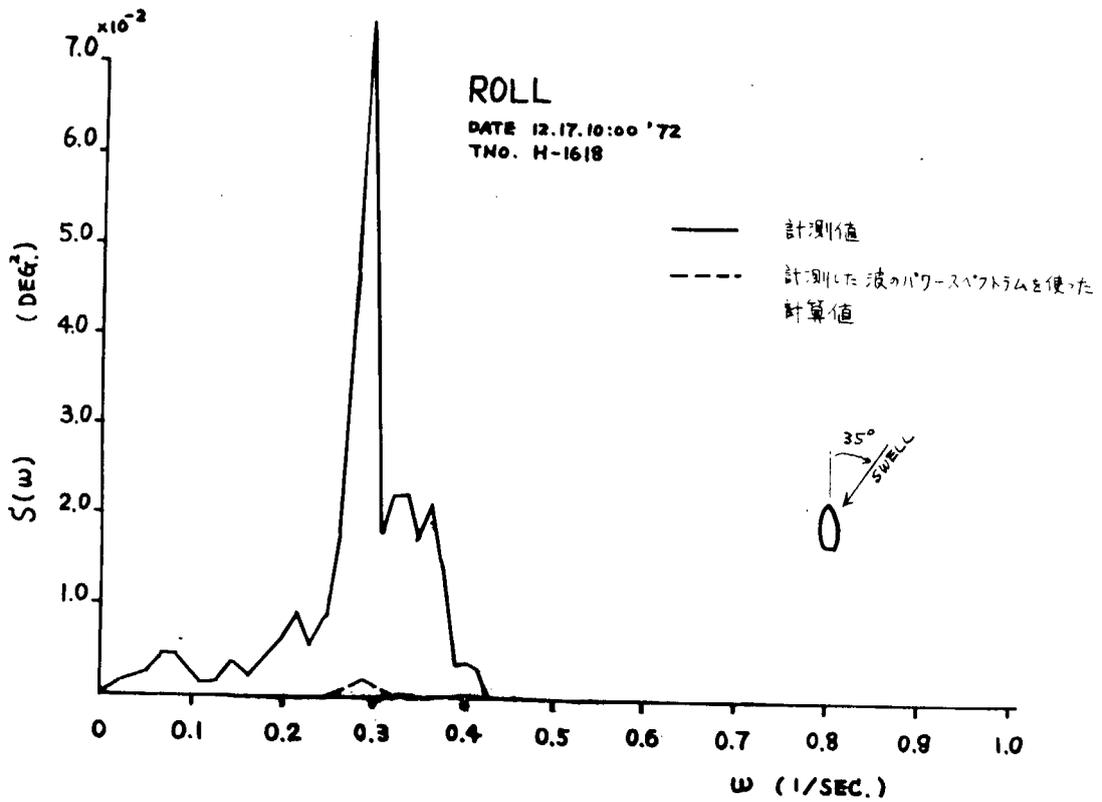
PITCH (b) のパワースペクトラム

Fig. 4.260



ROLL (a) のパワー・スペクトラム

Fig. 4.2.16



ROLL (b) のパワー・スペクトラム

Fig. 4.2.62

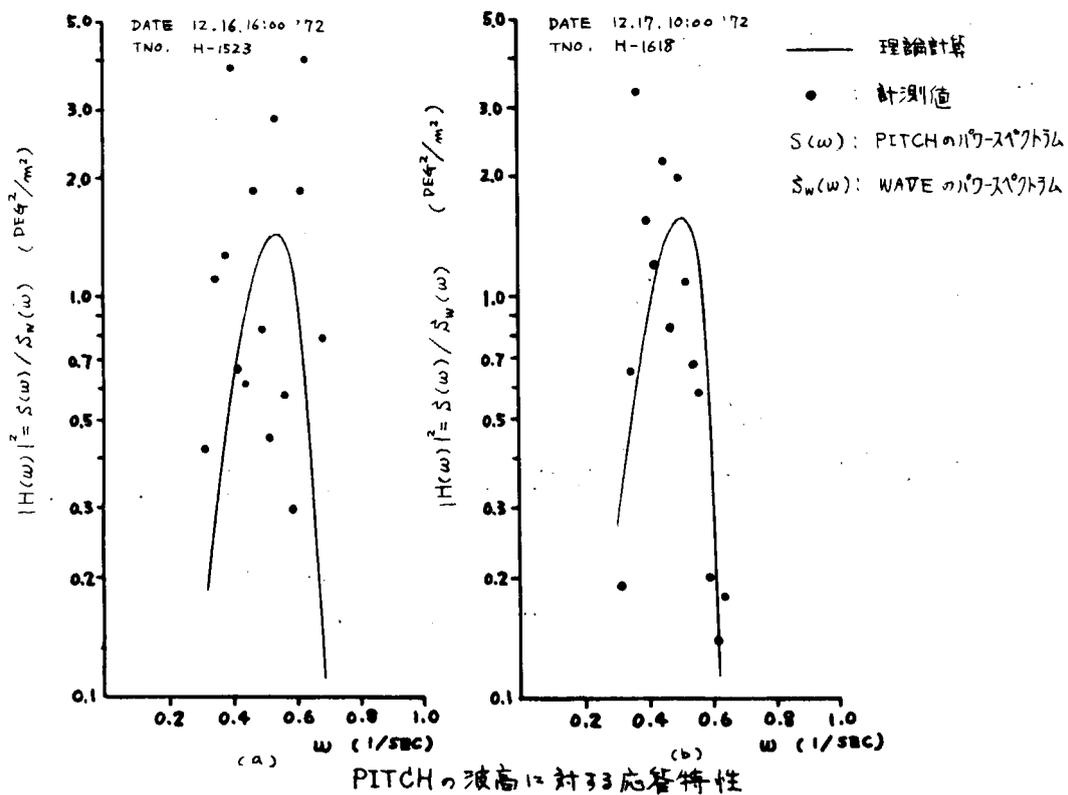


Fig. 4.2.63

4.3 SA号による実船試験結果の解析

4.3.1 緒言

SA号の実船試験の概要は、すでにSR125の47年度研究報告に述べた。ここでは本年度研究として行われた実船試験結果の解析について述べる。

本試験の載荷状態をTable 4.3.1に示す。

航路図をFig. 4.3.1に示した。点の位置は船内時間の正午における位置を示している。また図中には1日の平均船速を記入しておいた。

SA号の実船試験は本委員会が製作したリアルタイム解析装置を搭載した最初の実験である。航海中はピッチ角、ロール角のみリアルタイムで解析を行ない、他は帰港後陸上にて解析した。

記録は3台のアナログデータ・レコーダに次のように配列しており、3台のデータ・レコーダは航海中完全に連動して記録を取っている。

№1 データ・レコーダ

- CH. 1 ピッチ角
- 2 ロール角
- 3 船首上下加速度
- 4 上下加速度
- 5 船尾上下加速度
- 6 波高

7 タイム・コード

№2 データ・レコーダ

- CH. 1 船速
- 2 ヨーレート
- 3 ヨー角
- 4 舵角
- 5 回転数
- 6 方位角
- 7 タイム・コード

№3 データ・レコーダ

- CH. 1 予備
- 2 左右加速度
- 3 船首左右加速度
- 4 風向
- 5 風速
- 6 前後加速度
- 7 タイム・コード

本試験の計測日誌を Table 4.3.2 に示している。

計測は原則として2時, 8時, 14時, 20時の4回とし, 1回の計測時間は40分とした。復航では14時の計測を省いた。

各回の計測にはテープ番号, 計測番号の順に I-2, V-3 のように実験番号 (EXP.№) を附している。テープ番号はデータ・レコーダ3台とも共通し, 各データはデータ・レコーダ№1~№3の各チャンネルに1~21の一貫番号を附し, I-2-1, I-2-21 のように番号を取って区別した。

4.3.2 航海状況

実験番号を横軸に平均船速, 風力階級, 出会い風向, およびピッチ角, ロール角の全振幅の有義値を併示して Fig. 4.3.2 とした。

本航は一度も時化に会うことがなく, 全般的に非常に平穏な航海であった。

海の状態は波高2~3m程度のうねりが支配的であり, 計測中のピッチ角, ロール角の最大値は全振幅の有義値で, それぞれ, 3°, 9°程度であった。

往航はうねりを横から受けることが多かったので, 横揺れが比較的大きくなっている。

復航は斜め向いからうねりを受けたため船体運動は小さくなり, ピッチ角, ロール角ともに全振幅の有義値が平均約2°程度となっている。このため復航では14時の計測を中止して daytime はリアルタイム解析装置による解析を行った。

波高計測は東京出港直後波高計受信器が故障したため実施できなかった。

故障の原因は帰港後メーカーで調査した結果, 電源表示用のネオンランプが焼損したためであることが判明した。

計測メンテナンスシステムでは3月16日の夕刻よりジャイロ水平儀の動きが異常となり, 3月17, 18日の計測は中止した。

ロサンゼルス入港後ジャイロ水平儀の自立用円板が外れているのを発見し修復することができた。それ以外は計測メンテナンスに関し異常はなかった。

リアルタイム解析装置は船体振動の影響を心配していたが全く無事故であった。

4.3.3 解析結果

データの解析はピッチ角, ロール角, 上下加速度, 左右加速度, 前後加速度, ヨーレート, 船首上下, 左右各加速度, 船尾上下加速度の9現象について行なった。

波浪のデータが得られなかったので, ここではリアルタイム解析装置による極値統計解析結果の整理にとどめた。

タイムヒストリー解析から得られた全振幅の平均値(\bar{H}), root mean square(Hrms), 有義値($H_{1/3}$), $1/10$ 最大平均値($H_{1/10}$), および最大値(Hmax)について整理してFig. 4.3.3とした。

また, スペクトラム解析より求められた標準偏差(σ_s)を横軸に全振幅の統計値を示してFig. 4.3.4とした。

Rayleigh分布の場合には,

$$\begin{aligned} \text{Hrms} &= 1.128 \bar{H} \quad , \quad H_{1/3} = 1.598 \bar{H} \quad , \quad H_{1/10} = 2.032 \bar{H} \\ \text{Hrms} &= 2.506 \sigma_s \quad , \quad H_{1/3} = 2.828 \sigma_s \quad , \quad H_{1/10} = 4.006 \sigma_s \\ \bar{H} &= 5.093 \sigma_s \end{aligned}$$

の関係があるので図中にはこれらの線を記入しておいた。

また, Hmaxについては, リアルタイム解析装置による解析は, 各運動の揺れ数は多くて約200であるので, 参考のためRayleigh分布の場合の200揺れ中の最高期待値, $H_{200} = 2.738 \bar{H} (6.862 \sigma_s)$ の線を加えた。

各運動とも振幅が小さかったためか, Rayleigh分布の線との一致度はかなり良い。

zero cross平均周期 \bar{T}_0 とpeak to peak平均周期 \bar{T}_m との関係をFig. 4.3.5に示した。

帯域幅パラメータ(ϵ)は近似的に次式で表わされる。

$$\epsilon \doteq \sqrt{1 - (\bar{T}_m / \bar{T}_0)^2}$$

$0 \leq \epsilon \leq 1$ であり, $\epsilon = 0$ ではRayleigh分布となり, $\epsilon = 1$ ではGauss分布となる。

一般に $0 \leq \epsilon \leq 0.8$, $0.6 \leq \bar{T}_m / \bar{T}_0 \leq 1.0$ がRayleigh分布の適合範囲とされているので, 図中には $\bar{T}_m / \bar{T}_0 = 0.6, 1.0$ の線を記入している。

また, Fig. 4.3.6には ϵ と σ_s との関係を示した。

明らかにRayleigh分布の適合範囲内にあるものは上下加速度, 船尾上下加速度の二つで, 逆に範囲外のものはヨーレートである。

他は, ほぼRayleigh分布の適合範囲内におさまっているが, ピッチ角, ロール角, 前後加速度, 船首上下加速度はRayleigh分布とGauss分布の両範囲にまたがって広範囲に分布しており, 左右加速度, 船首左右加速度は海洋波のNeumannスペクトラム($\epsilon \doteq 0.816$)に近い分布をしている。

以上の解析データをみやすく整理してみる。

\bar{T}_0, \bar{T}_m およびスペクトラムがピークを示す周波数(ω_s)の頻度分布を併示してFig. 4.3.7-1, 2とした。

ロール角, 上下加速度, 船尾上下加速度は \bar{T}_0 と ω_s の頻度分布のピークの位置がほぼ一致しているが, 左右加速度, 船首左右加速度, ヨーレートでは ω_s のピークはかなり低周波域にずれている。

また, ピッチ角, 船首上下加速度では ω_s は \bar{T}_0 のピーク付近の他に低周波域にもピークが存在している。

次に全振幅について整理を行ない, Hmaxの頻度分布をFig. 4.3.8, Hmaxと \bar{T}_0 との関係を波方向別に示してFig.

4.3.9とした。

Fig. 4.3.9をみると各運動の振幅と波方向との相関がよくわかる。

本試験では追波の状態が少なかったため判然としない現象もあるが, 前後加速度, 船首左右加速度, 上下加速度は追波, 横波で大きいことがよくわかる。

4.3.4. 緒 言

以上、SA号による実船試験結果のリアルタイム解析装置による解析結果を整理して、船体運動の統計値の概要を示すことができた。

Table 4.3.1 "SA号" SHIPS CONDITIONS

VOYAGE	OUT VOYAGE		HOME VOYAGE	
	TOKYO	LOS ANGELES	OAKLAND	KOBE
df (m)	7.977	7.588	8.837	8.414
da (m)	9.313	9.102	10.163	9.927
dm (m)	8.645	8.345	9.500	9.171
TRIM (m)	1.336	1.514	1.326	1.513
DISP.(t)	31,165	30,479	34,739	34,051
KG (m)	9.86	9.55	10.91	10.54
KM (m)	13.41	13.57	13.71	13.68
GGo (m)	0.35	0.41	0.19	0.26
GGM (m)	3.20	3.61	2.61	2.88
F.O.(t)	2,873	1,756	1,664	538
W.B.(t)	5,493	5,489	5,610	5,665
CONT (t)	6,967	6,967	11,606	11,606

Table 4.3.2 SA 号 計 測 日 誌

I-1 等の数字は実験番号を示す。
 は計測時を示す。
 は V.T.R. 録画時を示す。

船内時間	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
3月10日	東京出港										
11	0-4		0-5		I-1		I-2			I-3	I-4
12				I-5			I-6			I-7	I-8
13(A)				I-9			I-10			I-11	
13(B)				II-1			II-2			II-3	
14	II-4			II-5			II-6			II-7	
15	II-8			II-9			II-10			II-11	
16	II-12			II-13			II-14				
17											
18	ロスアンゼルス入港										
24	オークランド出港										
25	III-8		III-9		III-6					III-7	
26	III-11		III-12							III-10	
27	III-14		III-15							III-13	
28	IV-2		IV-3				IV-4			IV-1	
30	IV-6		IV-7							IV-5	
31	IV-9		IV-10							IV-8	
4月1日	IV-12		IV-13							V-1	
2	V-2		V-3								
3	神戸入港										
船内時刻	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22

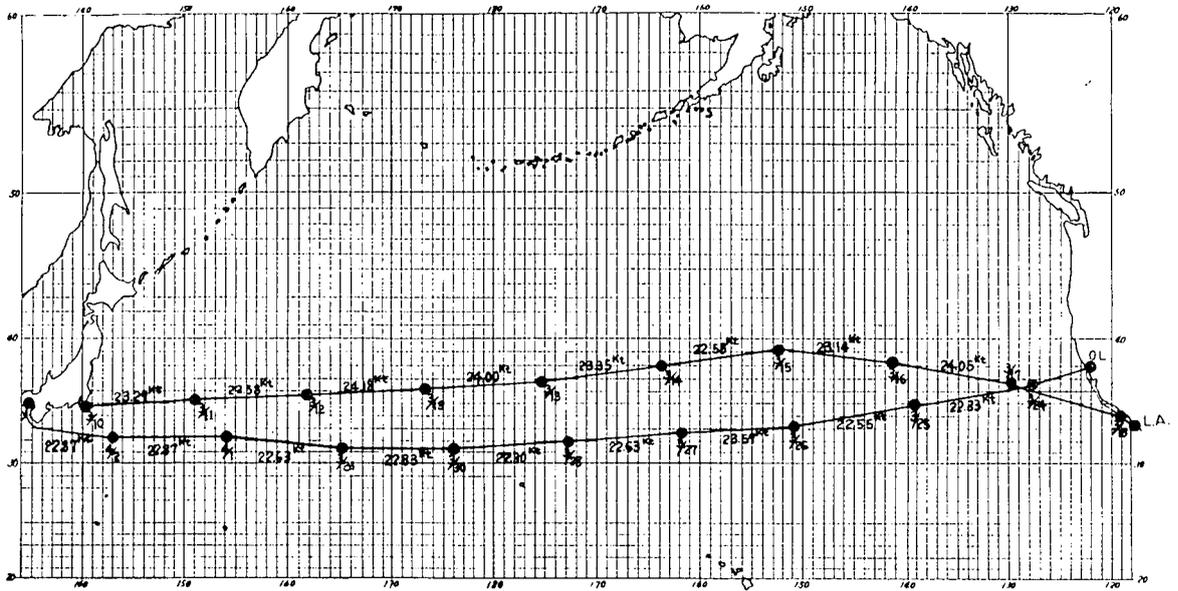


Fig. 4.3.1

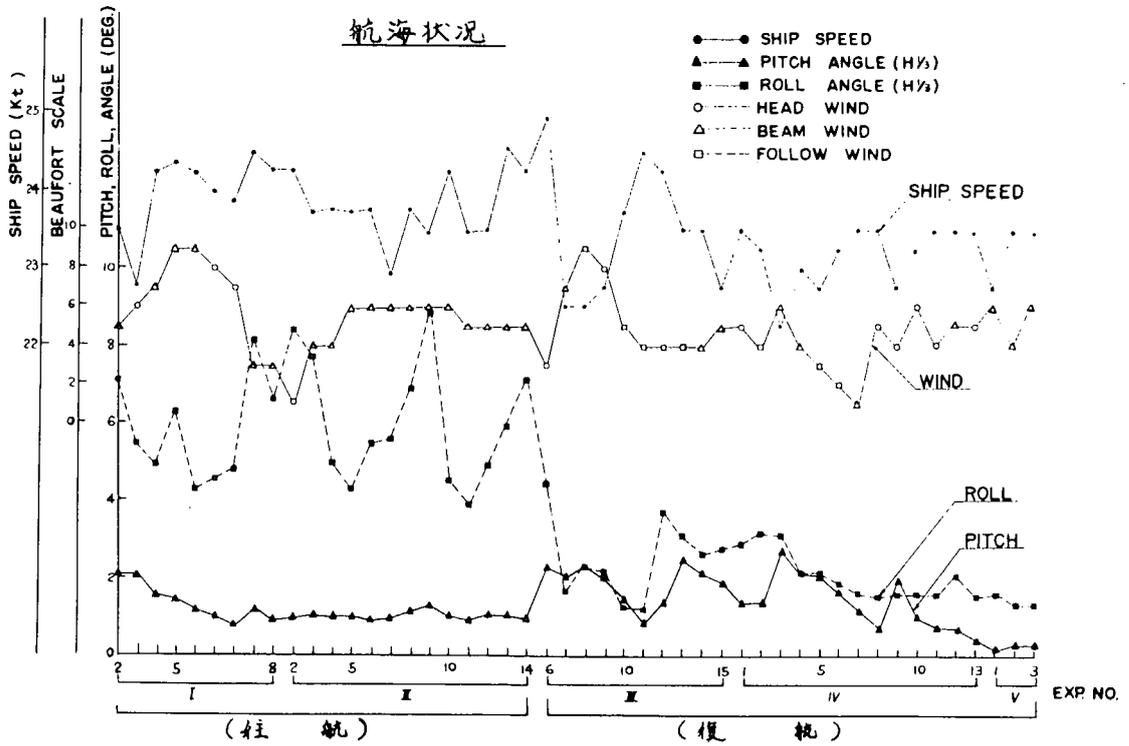


Fig. 4.3.2

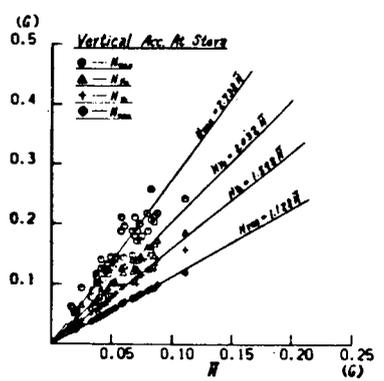
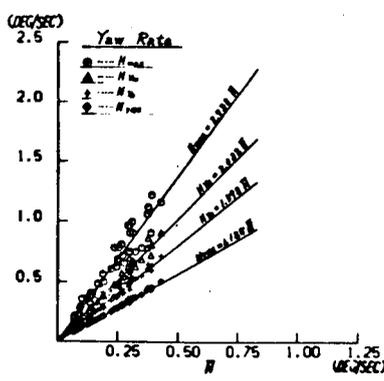
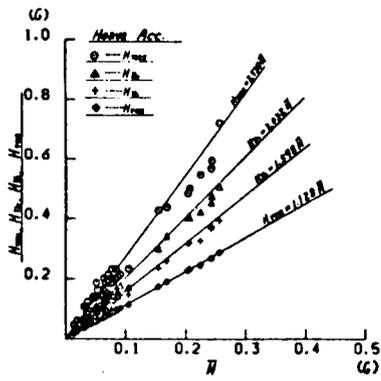
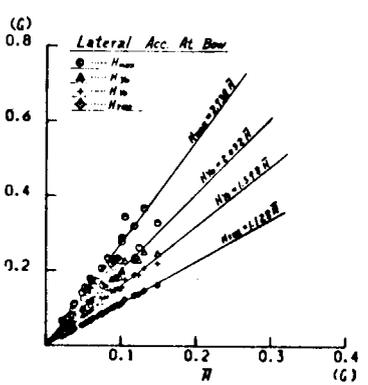
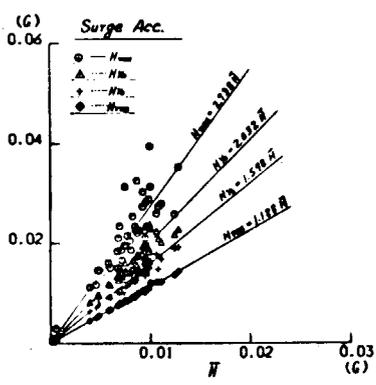
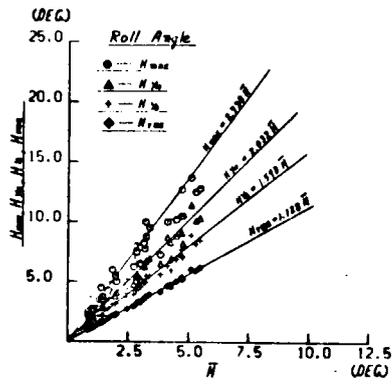
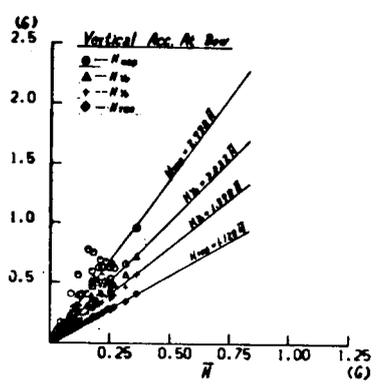
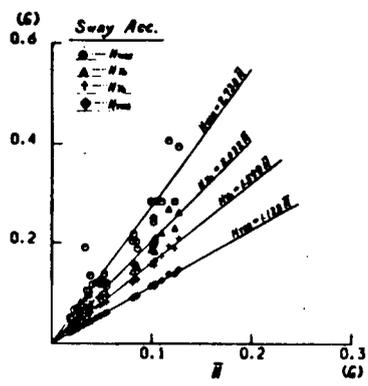
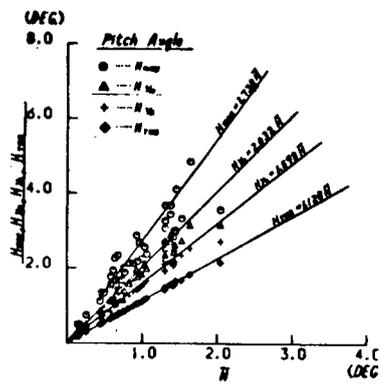


Fig. 4.3.3

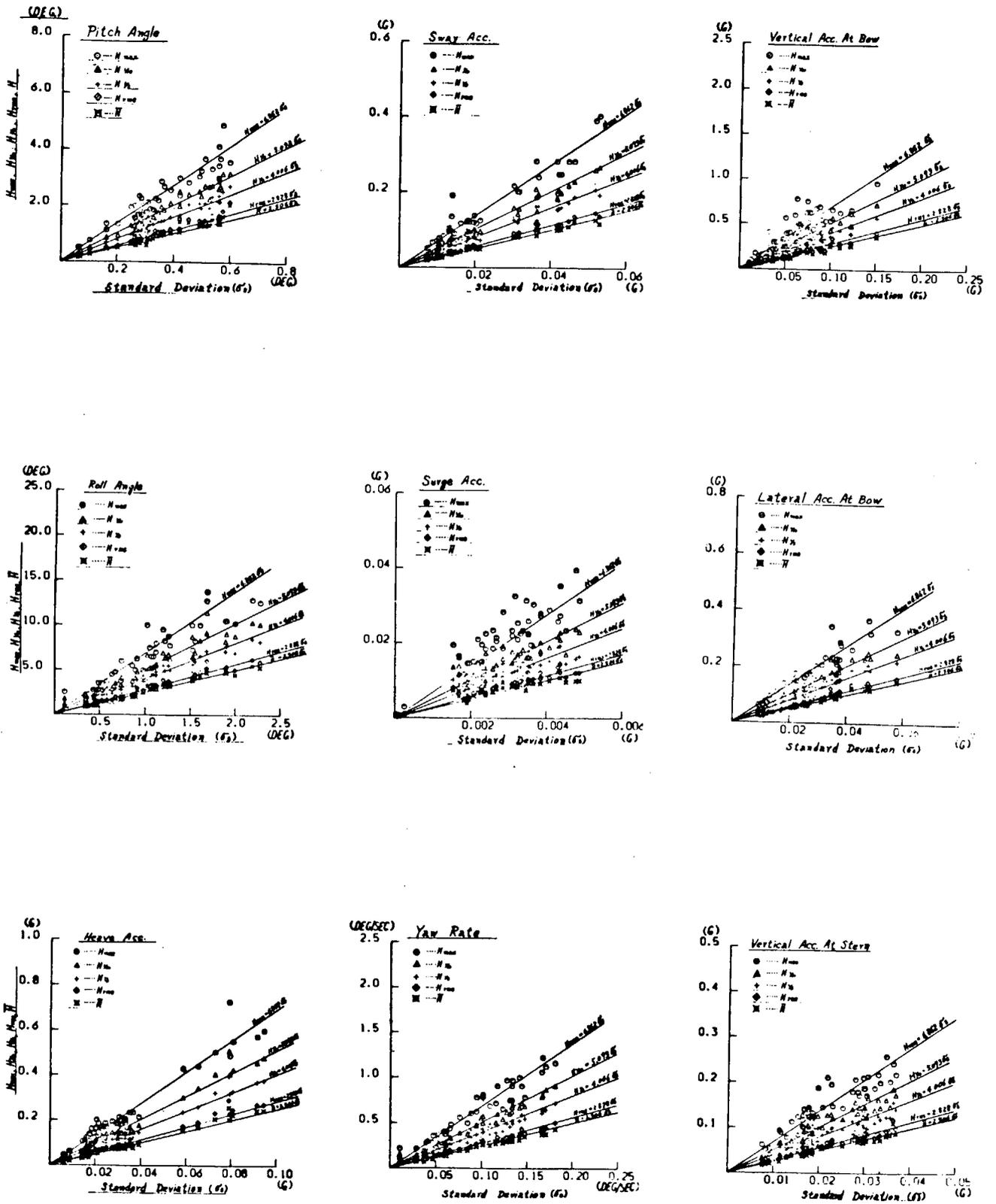


Fig. 4.3.4

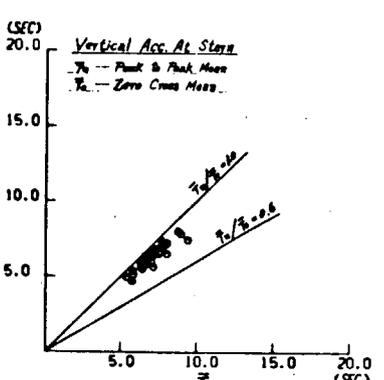
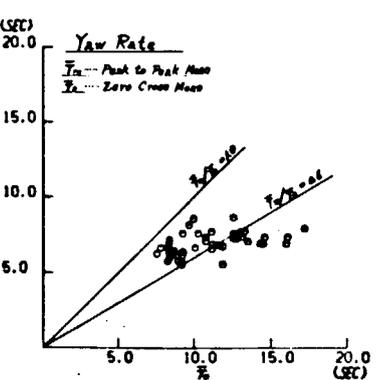
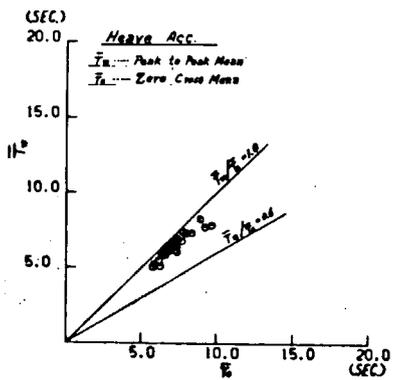
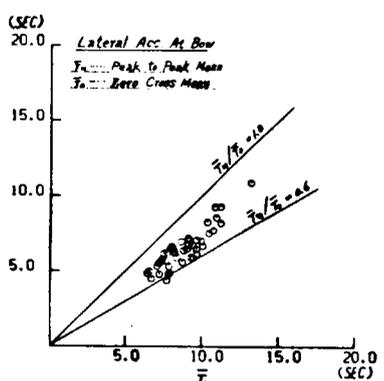
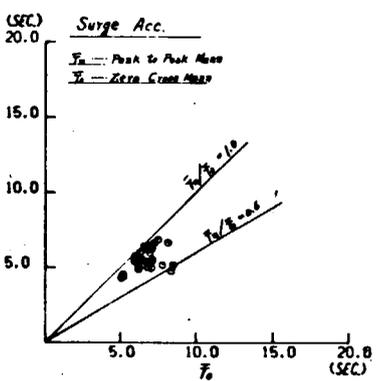
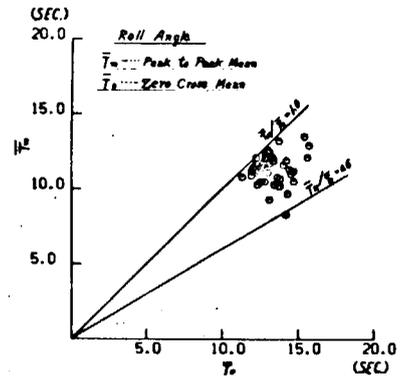
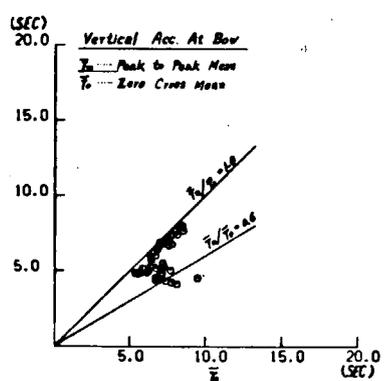
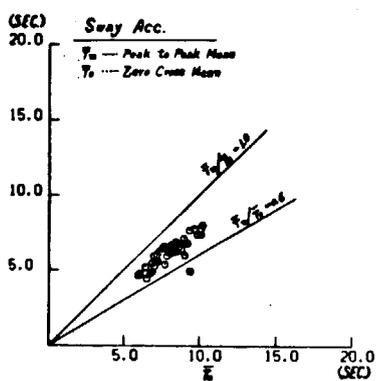
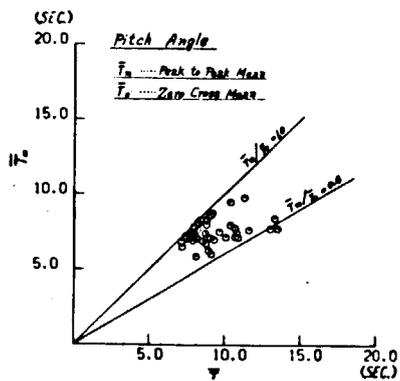


Fig. 4.3.5

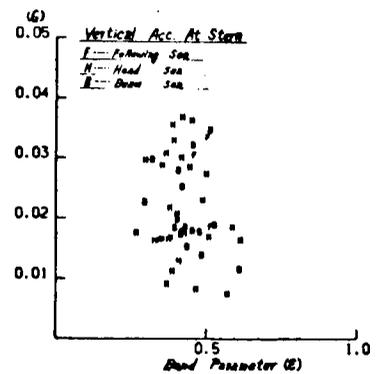
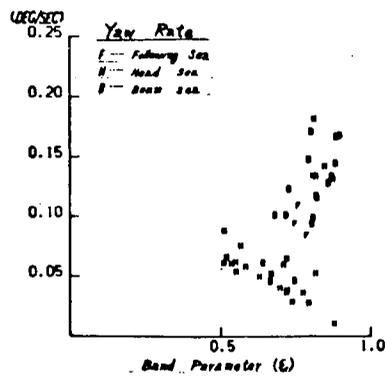
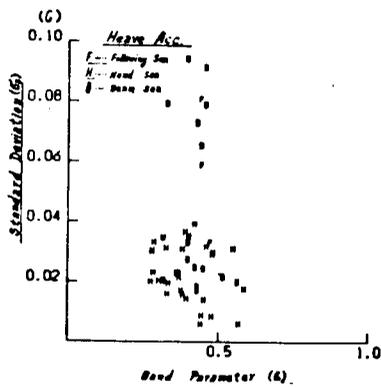
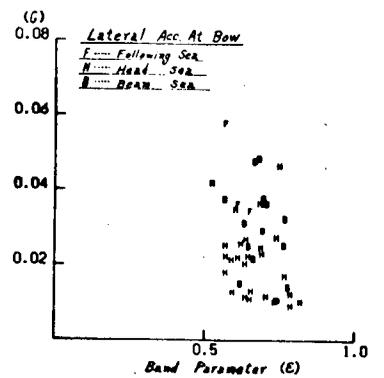
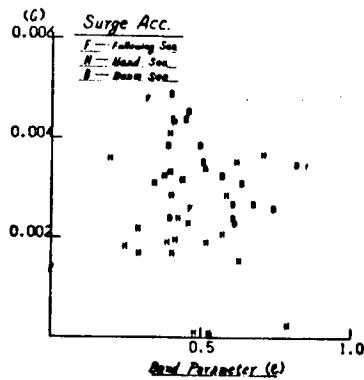
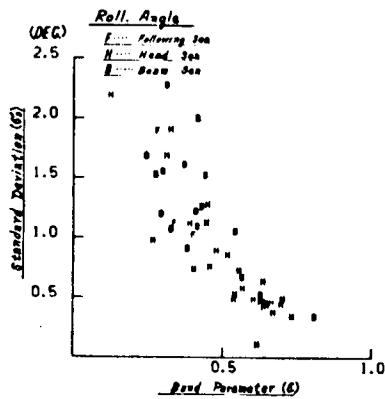
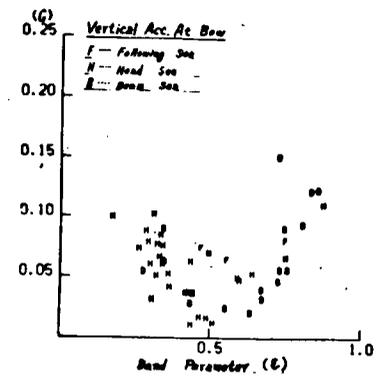
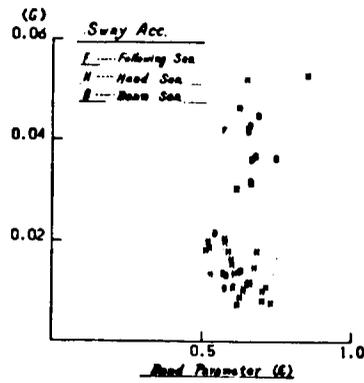
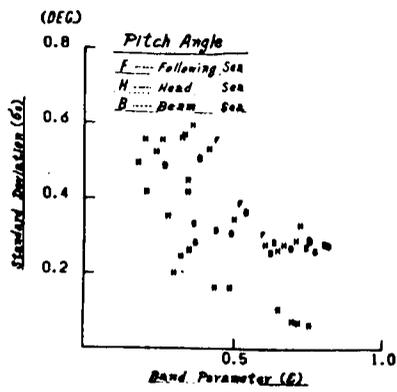


Fig. 4.3.6

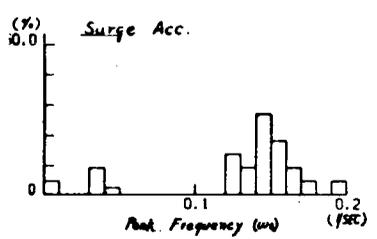
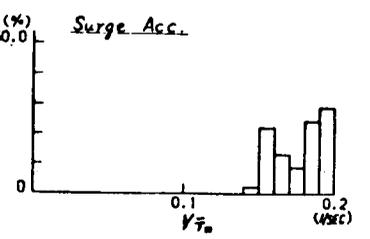
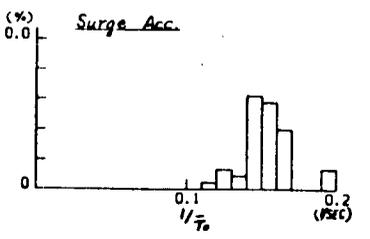
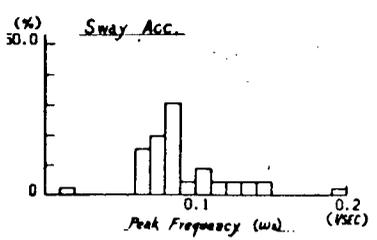
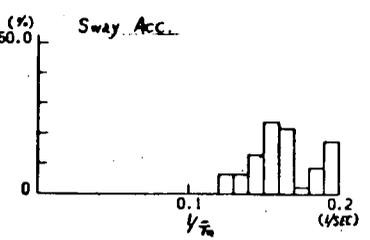
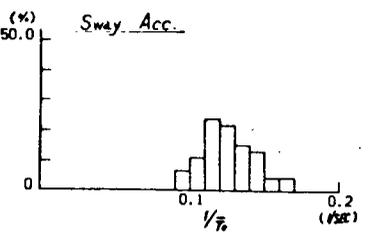
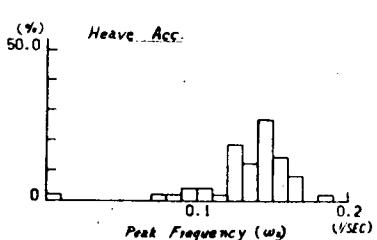
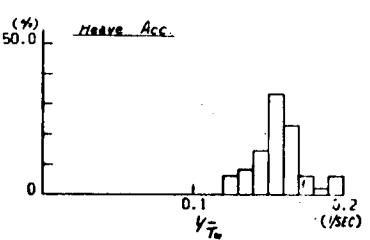
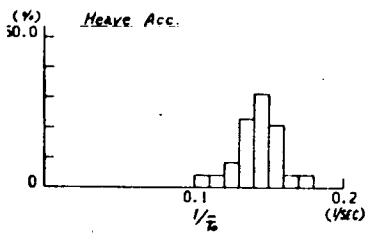
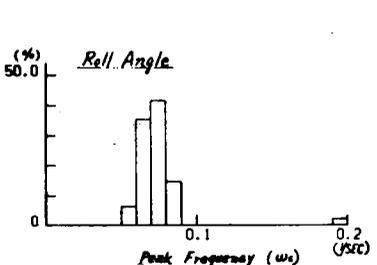
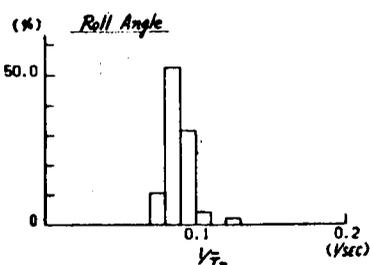
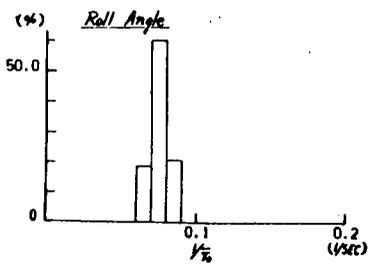
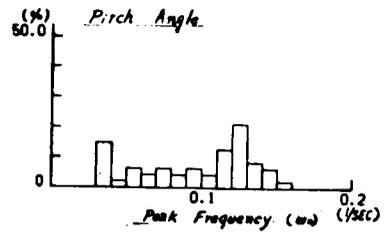
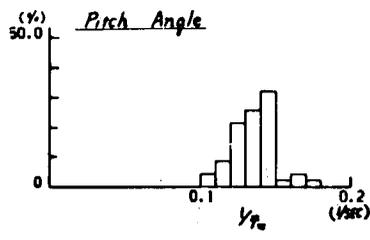
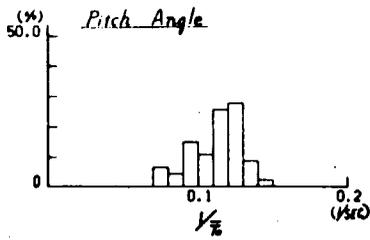


Fig. 4.3.7 - 1

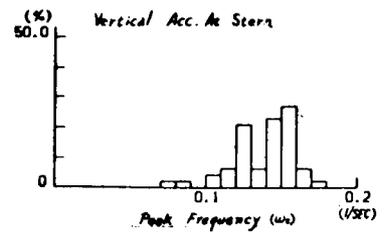
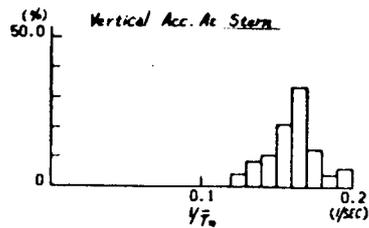
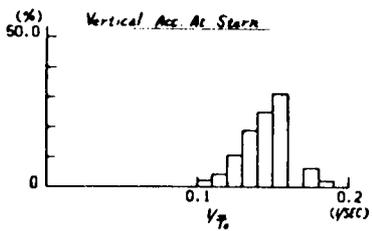
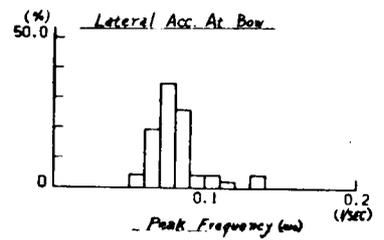
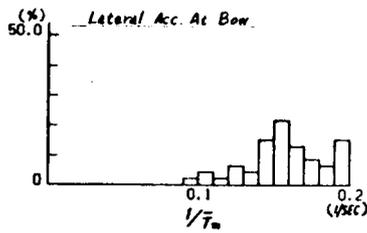
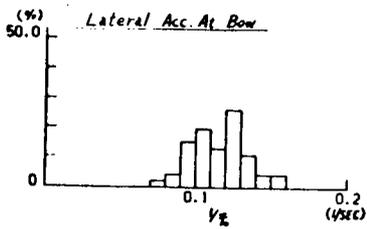
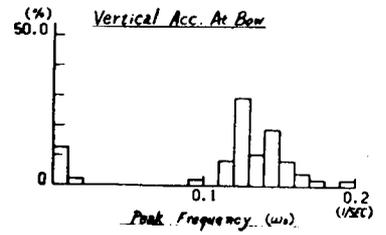
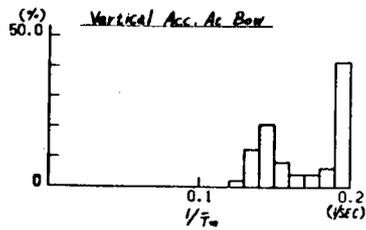
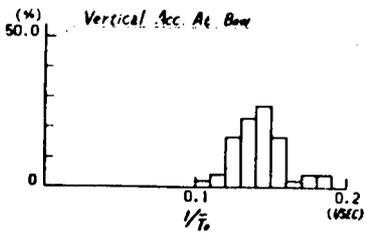
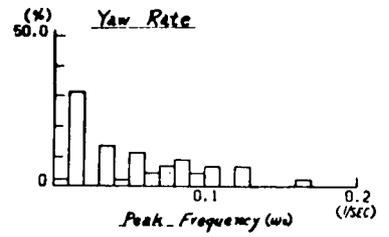
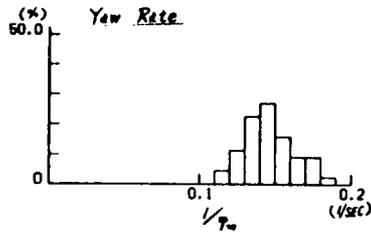
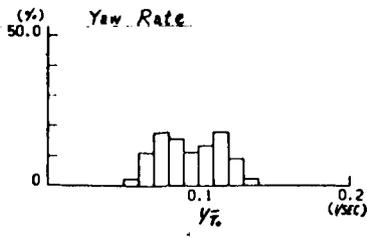


Fig. 4.3.7 - 2

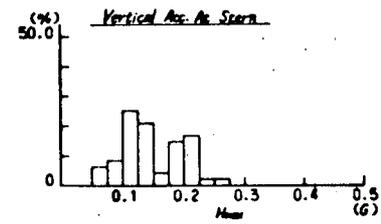
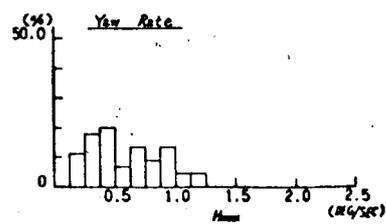
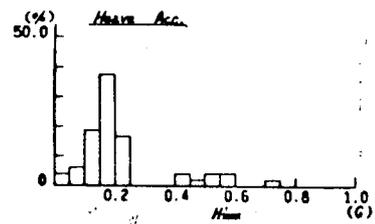
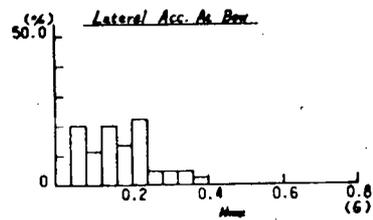
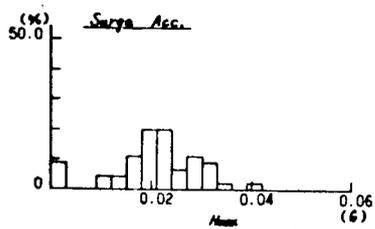
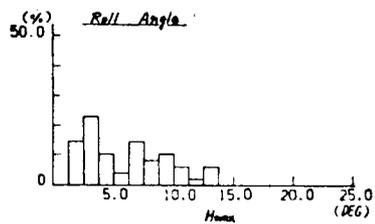
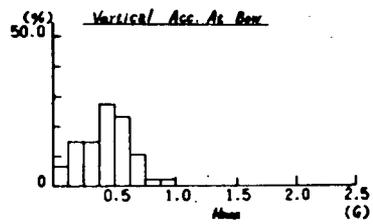
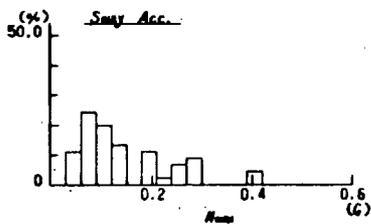
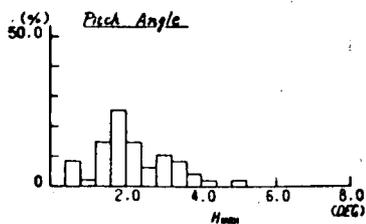


Fig. 4.3.8

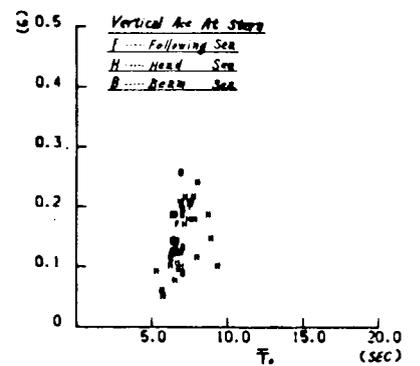
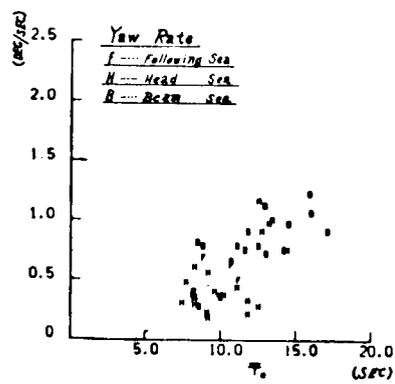
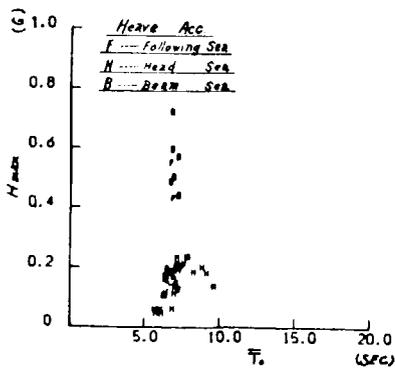
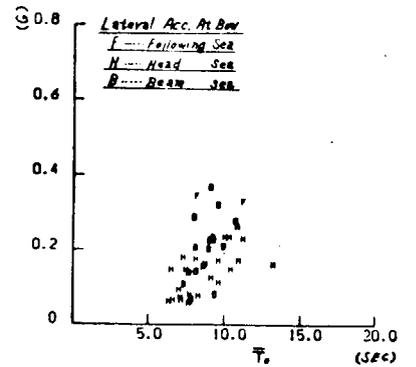
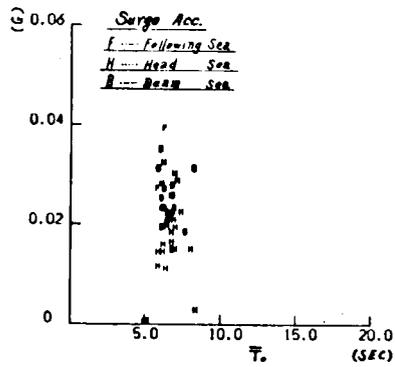
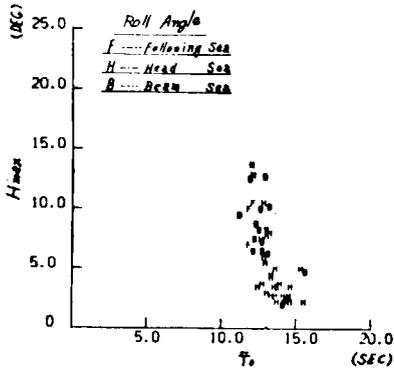
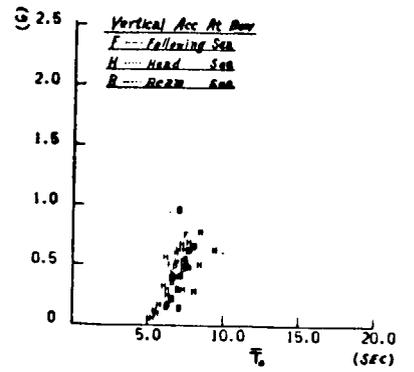
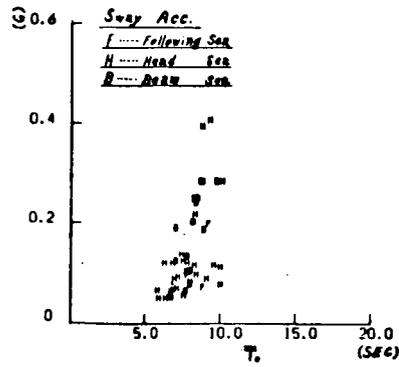
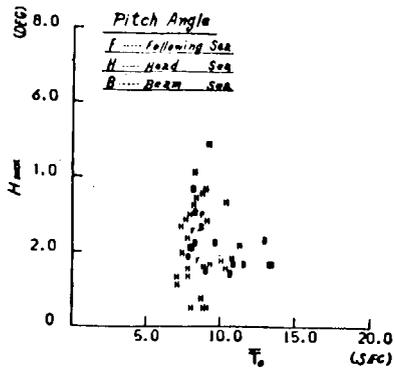


Fig. 4.3.9

4.4 PNW 航路 コンテナ船 HT 号による実船試験

4.4.1 概 要

本実船実験は、SR125 部会 48 年度研究事業の一環として、冬季 PNW 航路におけるコンテナ船の耐航性能を調査する目的で実施されたものである。

供試船は、昭和 45 年に三菱重工業(株)神戸造船所で建造された日本郵船(株)・昭和海運(株)共有のコンテナ船であり、調査期間、項目などは下記のとおりである。

供試船 日本郵船(株)・昭和海運(株)共有 HT号
調査航路 往航 横浜→シアトル
復航 ポートランド→神戸
調査期間 昭和 48 年 12 月中旬～昭和 49 年 1 月中旬
(本船 第 37 次航)

乗 船 者

三菱重工業(株)本社	川 口 昇
三菱重工業(株)神戸造船所	清 水 徹
三菱重工業(株)長崎研究所	畠 中 勝 則
東京大学生産技術研究所	江 口 純 弘

調査項目

(1) 船体運動(データレコーダ収録)

計測コンテナによる計測および船首(上下および左右), midship(上下), 船尾(上下)加速度

(2) 海象調査

投棄式波高計(SR132より20個支給受)による波高計測(データレコーダ収録), ポラロイドカメラによる波向計測(レーダ映像撮影による), ITVによる船首被波状況撮影(ビデオ・テープに収録)および目視による波高, 波周期計測

(3) 船首衝撃圧およびmidshipストレス計測(データレコーダ収録)

本計測は、SR124よりの依頼により実施したものである。

(4) その他(8ミリ撮影, 目視記録など)

4.4.2 本船要目

長さ(垂線間)	Lpp	183.00m
幅	Bmid	27.60m
深さ	Dmid	16.60m
吃水(満載)	dmid	9.60m
載荷重量	D.W.	20,400t
主機	ディーゼル	30,400 ^{ps(SHP)} × 108 ^{rpm} × 1 ^{set}
プロペラ		5翼 × 1set

4.4.3 計測準備

神戸商船大学に保管されていたSR125計測コンテナの調整を昭和48年8月下旬～9月上旬に実施し、また本船搭載前に陸上における最終調整を行なった後、12月11日神戸摩耶埠頭において本船に搭載した。

船首, midship, 船尾各加速度計, midshipストレス計測用ストレイン・ゲージ, 船首衝撃水圧計の取付けは昭和48年10月下旬～11月上旬の本船入渠時に実施した。

波高計ランチャーの取付けは、12月6日～7日に実施したが、重量が大きい(単体80kg×6基)ため、本船上での

移動・取付けに苦勞した。

なお、計測コンテナ、波高計用ランチャーなどの船上における最終調整のため、昭和48年12月11日～14日にかけての神戸→横浜間の航海に、以下の2氏が計測員以外に乗船したことを付記する。

高千穂精機(株)	永島氏
久保田気象測器(株)	大矢氏

両氏は、計測準備にも参加されており、ここに感謝の意を表する。

また、本船神戸港出港時、折悪しく港湾ストにかゝり、出港が予定より5日程度遅延した。

4.4.4 計測項目詳細および計測時間

計測コンテナには、7CHデータレコーダ3台を設置し、それぞれ以下の項目を記録した。なお、ブロック・ダイアグラムをFig. 4.4.1に、また、各計器取付位置をFig. 4.4.2に示す。

№1 データレコーダ

1. ピッチ
2. ロール
3. 上下加速度(計測コンテナ位置)
4. 前後加速度
5. 左右加速度
6. ヨー角
7. タイム・コード

№2 データレコーダ

1. 船首上下加速度
2. midship上下加速度
3. 船尾上下加速度
4. 船首左右加速度
5. 船速
6. 舵角
7. タイムコード

№3 データレコーダ

1. midship 左舷ストレス
2. midship 右舷ストレス
3. 船首衝撃水圧(1)
4. 船首衝撃水圧(2)
5. 主機回転数
6. 波高
7. タイムコード

計測は、船内時内にてそれぞれ8:30, 12:30, 16:00, 20:00の1日4回、各40分間づつ定時計測を実施した。状況に応じ、計測の回数を増加した。なお、今回の実船実験中の計測時間をTable 4.4.1に示す。

計測コンテナ内データレコーダ、船首被波状況撮影用VTR、波高計ランチャー駆動は、すべて計測室より遠隔操作を行なったが、完全無人自動計測("AUTO")は、海象の穏やかな日の20:00の計測に時々使用したのみで、その他はすべて計測員が計測室にて、各計器のモニタリングをしながら(すなわち"MANUAL"にて計器を作動)、その時々々の状況をできるだけデータレコーダに音声にて記録した。

このため、定時計測時には、原則として計測室に2名、ブリッジに2名づつ交代に配置につき、計測室ではデータレコーダモニター用ペンオシロによるチェック、A-カメラのモニターにより船首被波状況の観察およびVTR録画、音声による状況の記録などを実施し、また、ブリッジにおいては、波浪状況観測、航海計器読取り、必要に応じ、ポラロイドカメラによる波向計測(レーダ映像撮影)、8ミリまたはカメラによる状況撮影等々を実施した。

なお、風向、風力は、本船装備の計器の出力が小さいため、データレコーダへの記録は中止し、ブリッジにて読取ることとした。また、計測室内の遠隔操作盤等々の計器の固縛は、横浜出航後、船長のアドバイスにより、太い角材およびローブにより、再度補強を行なった。

4.4.5 実船試験概要

(1) 往航

(a) 海象および計測全般

往航は、Fig. 4.4.3の航路図に示すとおり、PNW航路としては、比較的南側の航路を航行したが、横浜出港後2日目の12月17日より、低気圧の影響を受け比較的大きな斜追波に会い、ローリングが大きくなり始め、片舷 10° 以上はめずらしくない状態となった。ただし、追波のため船速低下はあまりなかった。この低気圧の影響を12月19日(B)まで受け、相当ローリングに悩まされた後、12月20日夕刻に至り、後より追いかけて来た新しい低気圧の勢力範囲に入り、本船にて計測している気圧は急降下したが、当日はたいした時化にはならなかった。

しかし、12月21日に至りその低気圧により発生した長大な風浪およびうねりが、斜め後方より本船を襲い始め、ブリッジより見ると周囲の波は、にえくりかえるような大時化となった(目視ではあるが、最大波高10m程度はあると思われた)。このため、ローリングは両振巾で最高約 43° 程度、ピッチングは、両振巾にて最高約 9° 程度が計画中に記録された(ただし、ペンオシロの記録による)。

このため、本船は、ローリングをできるだけ少なくする目的で、波を真後より受けるように針路を変更し、また、主機回転数が危険回転数に入るのを防ぐため、70~75rpmに回転数を落として航行した。

この大時化で、上記のように大角度のローリング、ピッチングが発生したが、周期がいずれも2.0秒前後と大きいため、あまり大きな加速度は発生しなかった。また、追波のため、船速の自然低下もあまり生じなかったと思われる。

衝撃圧ならびにDeck wetnessとも、追波であることからほとんど発生しなかった。

この低気圧の影響は、12月21日夜半に入ってから弱まったものの、12月22~23日は、その余波が残り、依然として、ローリングは両振巾で 30° を越える場合もあったが、12月21日のそれと較べれば、大したことはないという感じである。

いずれにしても、往航は、そのほとんどがBeaufort Scale 6以上の海象であり、最後まで大きな船体運動が計測された。

(b) 波高計およびランチャー

波高計は、ランチャーのテストも兼ねて、神戸→横浜へ回航中に1基投棄し、その作動を確認して横浜より始まる本計測に備えた。

横浜出港後、往航ではFig. 4.4.3およびTable 4.4.1に示す通り、波高計を4基投棄し、そのうち3回は計測に成功した。

これら4基のうち、3基はランチャーにより、残る1基(12月22日に投棄のもの)は、舷側より計測員が直接投下したものである。

Fig. 4.4.3にあるように、ランチャーは往航中5回使用したが、海象がはげしい時にかぎって、2回作動しなかった。

この場合、波高計は、ランチャー作動以前にpower onになり、発振状態となるため、波高計の電池が切れるか、

または、ランチャーの所に行って波高計の電源をOFFに（電源は、計測室からはOFFにできない）しない限り、次の波高計は投棄できなかった。ランチャーが作動しなかった原因は、2回ともランチャー側のヒューズがとんだためである。

12月17日の場合は、天候の回復をまって補修したが、12月21日の場合は、それが不可能であったので、波高計の電源のみOFFにした上、12月22日は、計測員が直接舷側より波浪計を投棄した。この点に関しては、ランチャーの改良が必要であると考える。

（なお、復航では、上記ヒューズ部分を短絡させて使用。その結果、ランチャーは正常に作動した。）

(c) その他計器類不調箇所

(i) A-カメラ（船首被波状況観測用）

12月22日午後より、A-カメラの同期が不調になり、使用不能となった。

シアトル入港後、A-カメラを取外し、調べた結果、カメラ裏側のコネクター内側のハンダ付部分が断線していることが判明し、補修を行なった。

また、A-カメラ前面に取付けてある二重ガラス部分の水密が不完全で、ガラスの間に水滴が発生して全面が曇ったので、これを取外し、水滴をぬぐい去った上、できるだけ水密にして取付けた。

(ii) VTR

復航直前、VTRの再生が不能となった。VTRについては回路図もないため補修を断念した。ただし、音声および記録回路は生きていた（本船装備のVTRにより検証）ので、復航においても記録はできたが、同時再生による確認はできなかった。

(2) 復航概況

復航は、Fig. 4.4.3に示すとおり航路をとったが、低気圧と低気圧の谷間をぬって航行したことになり、ほとんど荒天には遭遇せず、スプレー、シャッターを発生する程度の向波に遭遇したのは、1月9日の1日程度であり、その他はほとんど追波またはごく穏かな海象の向波であった。したがって、船首衝撃圧が計測しえたのは、上記1月9日程度である。

なお、復航においては、波高計ランチャーは正常に作動し、波高計は7個投棄、そのうち4回計測に成功した。往復航合せて、波高計による計測確率は約50%である。

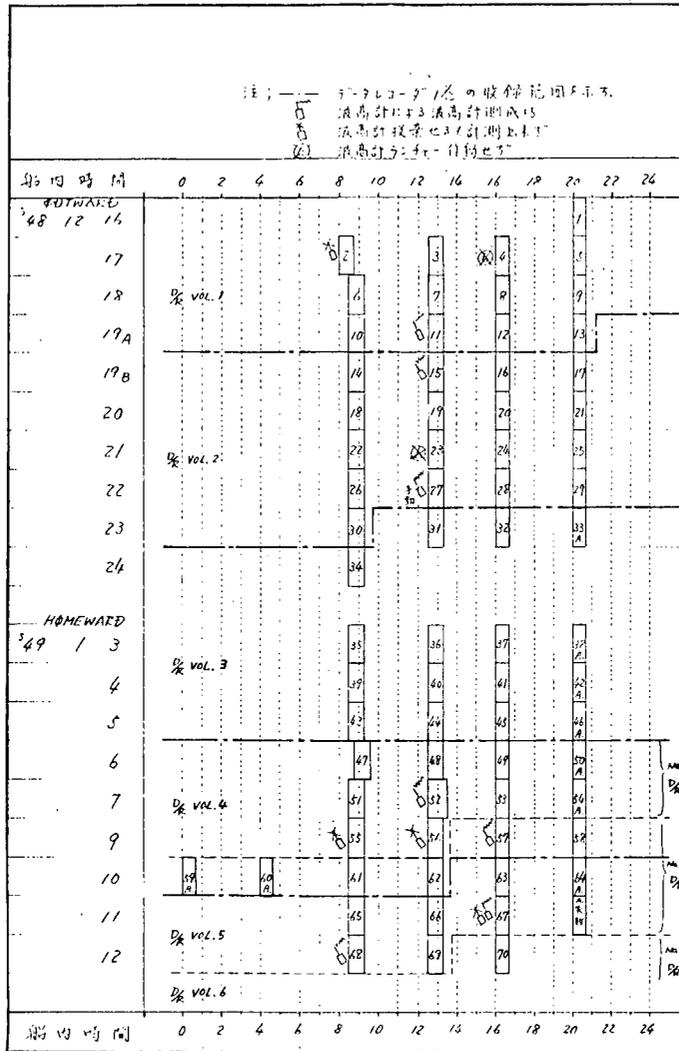
4.4.6 おわりに

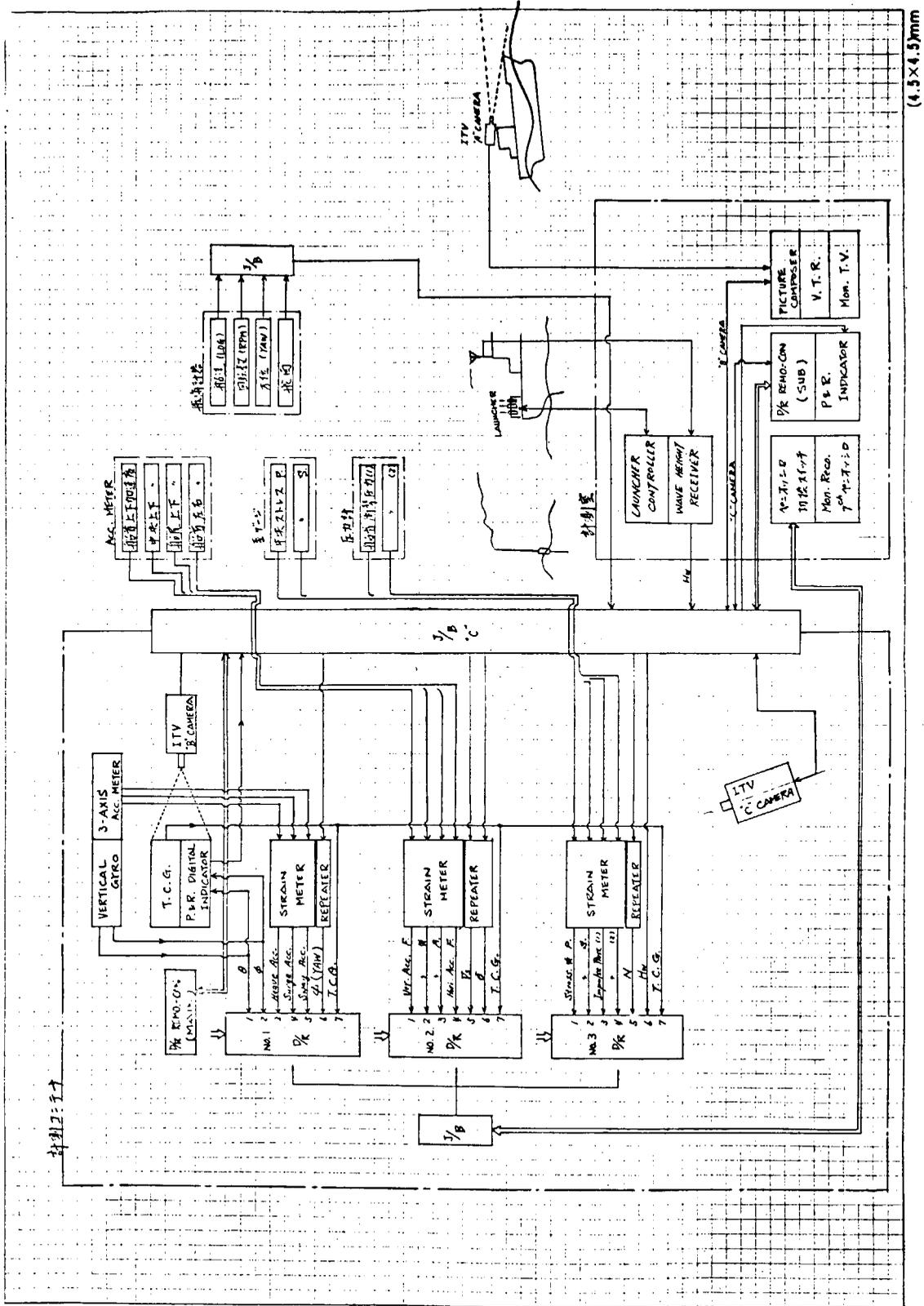
今回の実船実験により、多くの貴重なデータ（特に追波中）を収録し、計測を無事終了できた。

これは、本実船実験に当たっての、昭和海運株式会社の御理解と御協力に、また、HT号船長以下の方々の熱心な御協力によるものであり、ここに、あらためて感謝の意を表します。

Table 4.41 HT号計測日誌

VOY No 37





(4.5×4.5)mm

Fig. 4.4.1 "HT号" 実船試験計測ブロックダイヤグラム

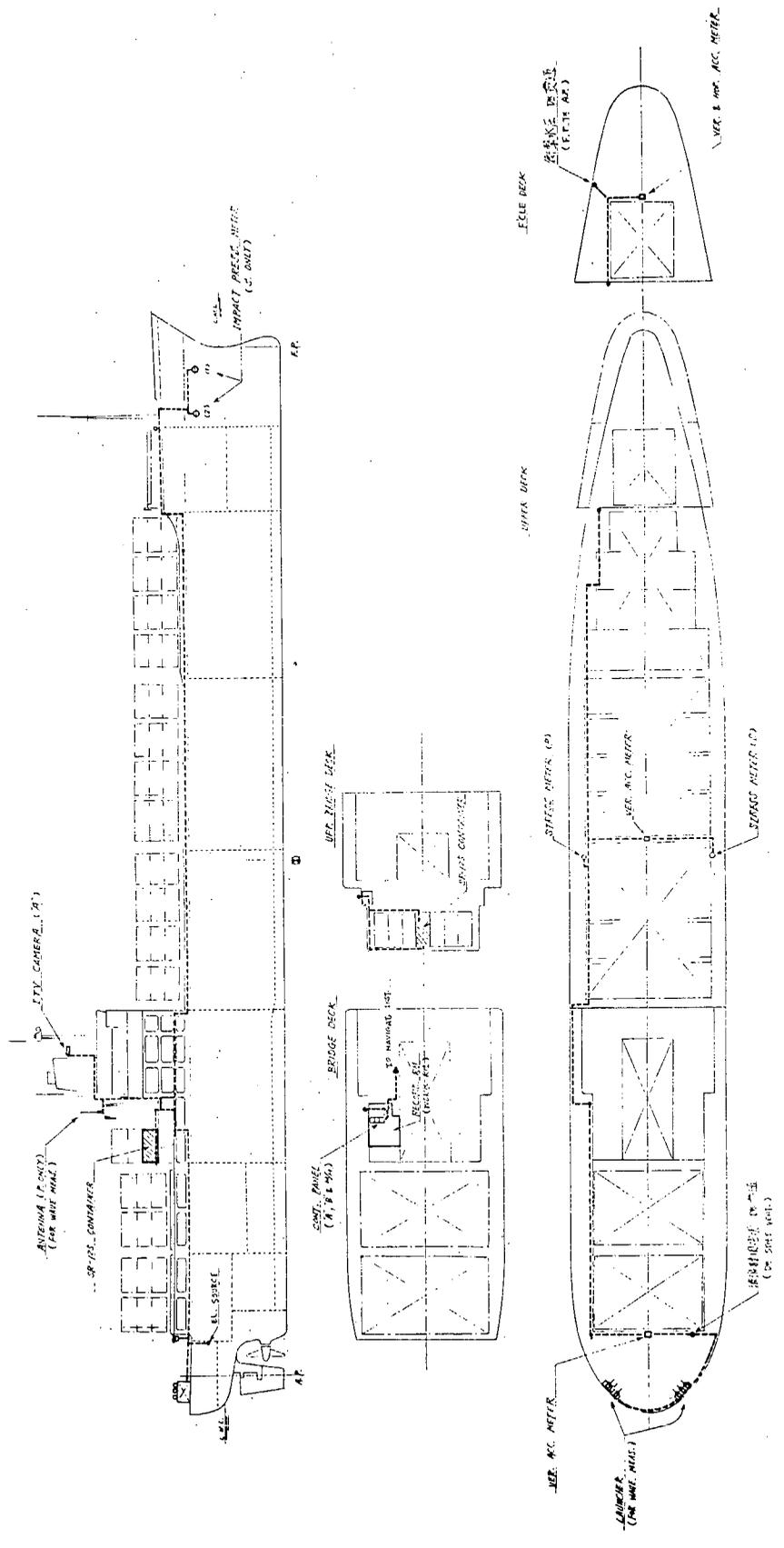


Fig. 4.4.2 "HT"号 実船試験計器取付配置図

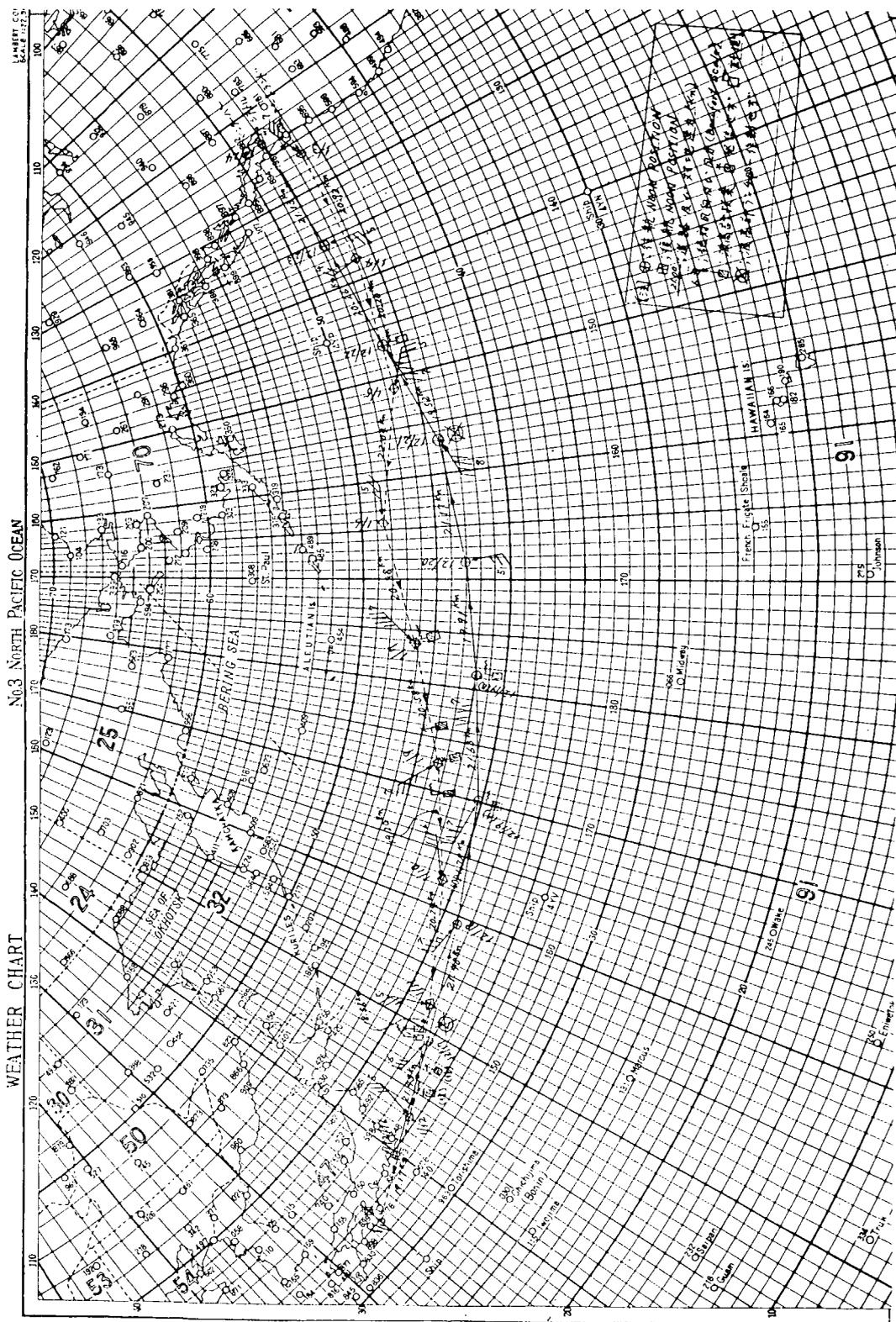


Fig. 4.4.3 HT号 3 7次航々跡図

4.5 ニューヨーク航路コンテナ船N.J丸による実船試験

4.5.1 概 要

第125 研究部会昭和48年度研究事業の一環として、ニューヨーク航路の高速コンテナ船「N.J.丸」の一往復航海において計測コンテナによる船体運動及び衝撃水圧などに関する実船計測を実施した。

なお、本実船計測は第124 研究部会「大型鉄鉱石運搬船の船首部波浪荷重および鉱石圧に関する実船試験」昭和48年度研究事業の一環である「高速コンテナ船による波浪荷重計測」と併せて実施されたものである。

4.5.2 供試船主要目および乗船計測者

供試船はニューヨーク航路の高速コンテナ船「N.J.丸」であり、今回の実船試験は同船の第7次航において行なわれた。

「N.J.丸」の主要目は次のとおりである。

船主	:	大阪商船三井船舶株式会社
建造所	:	三井造船株式会社玉野造船所
長さ(垂線間)	L _{PP}	: 247.000m
幅	B	: 32.200m
深	D	: 19.800m
計画満載吃水	d _{FULL}	: 11.500m
載貨重量トン数	D.W.	: 33.000t
主機	ディーゼル	: 34,800ps×2set
プロペラ		: 6翼×2set
回転数		: MCR 119rpm
満載航海速力(d=10.500m)		: 26.15kt
コンテナ積載数		: 1,887個(8'-8'-20'換算)

本実船計測のために乗船した者は次の3名である。

九州大学応用力学研究所	高 木 幹 雄
三井造船(株)玉野造船所	川 崎 邦 夫
三井造船(株)技術本部	小 山 義 一

4.5.3 計測項目、計測時間

計測コンテナには7ch.のデータレコーダ3台を設置し、それぞれ次の項目を記録した。

№1 データレコーダ

- CH. 1 ロール
- 2 ピッチ
- 3 上下加速度
- 4 左右加速度
- 5 波高
- 6 舵角
- 7 タイムコード

№2 データレコーダ

- CH. 1 変動水圧
- 2 衝撃水圧
- 3 衝撃水圧

- 4 縦曲げ応力
- 5 縦曲げ応力
- 6 船首方位角速度
- 7 タイムコード

№3 データレコーダ

- CH. 1 船首方位
- 2 回転数(右舷)
- 3 回転数(左舷)
- 4 トルク(右舷)
- 5 トルク(左舷)
- 5' 舵角
- 6 船速
- 7 タイムコード

上記計測項目で重複しているCH.は計測目的により切換えて計測を行なった。

データレコーダは完全自動運転が可能なので、定時計測はログブック記入時刻に合わせて、全く平穏な日には8時、12時、16時の3回、それ以外では4時、8時、12時、16時、20時、24時の6回とし、1回の計測時間は40分とした。船内時間の変更は20時～24時の間に行なわれるので、計測装置の時刻もそれと同じくして変更した。

なお、荒れた日(風力階級5以上)には、臨時計測として60分の記録を行なった。

波高はSR132より投棄式波浪計19個の支給を受けたので、波高計ランチャーにより適宜投下し計測を行なった。

また、正午には、波の進行方向と波長を本船のレーダにより観測し、ポラロイド写真により記録した。

4.5.4 計測装置の配置

Fig. 4.5.1に計測コンテナ、計測室およびセンサーの取付位置を示す。

同図中の上下加速度、左右加速度、前後加速度、青波水圧及び衝撃水圧の残り2点は計測コンテナのデータレコーダとは別に、計測室に設置したデータレコーダ2台(TEAC製R-250)により計測、記録を行なった。

衝撃水圧または変動水圧計測用圧力計の取付部組立断面図をFig. 4.5.2に、縦曲げ応力計測用歪ゲージの取付要領をFig. 4.5.3に示す。

4.5.5 おわりに

今回の実船計測は計画どおり完了し、高速コンテナ船の耐航性能に関する貴重なデータを得ることができた。

これは、大阪商船三井船舶株式会社および「N.J.丸」船長以下乗組員の方々の積極的なご協力によるものと、あらためて謝意を表すものである。

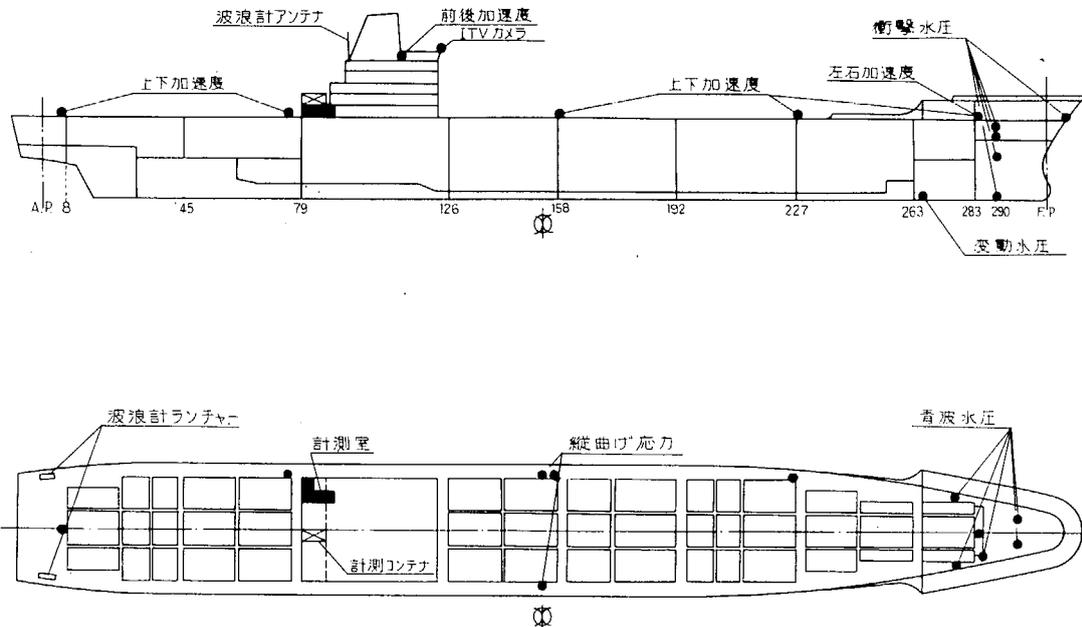


Fig. 4.5.1

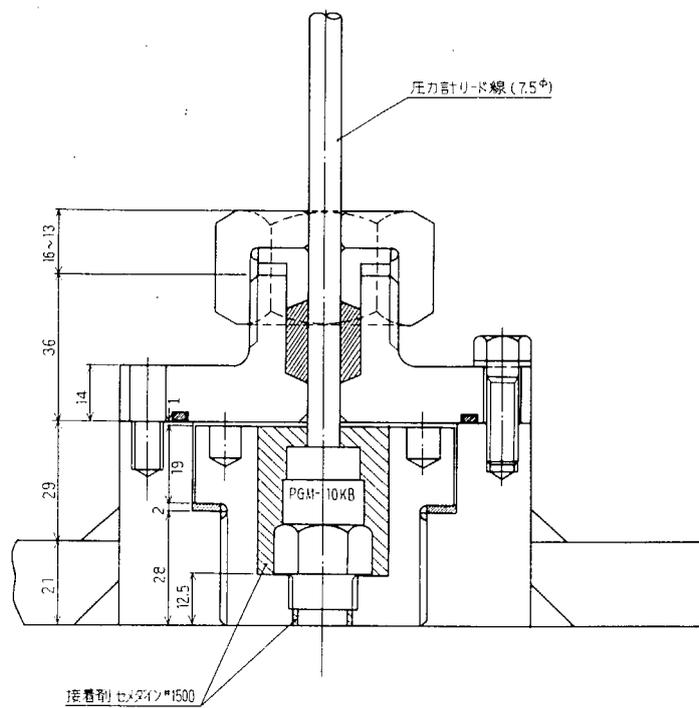


Fig. 4.5.2

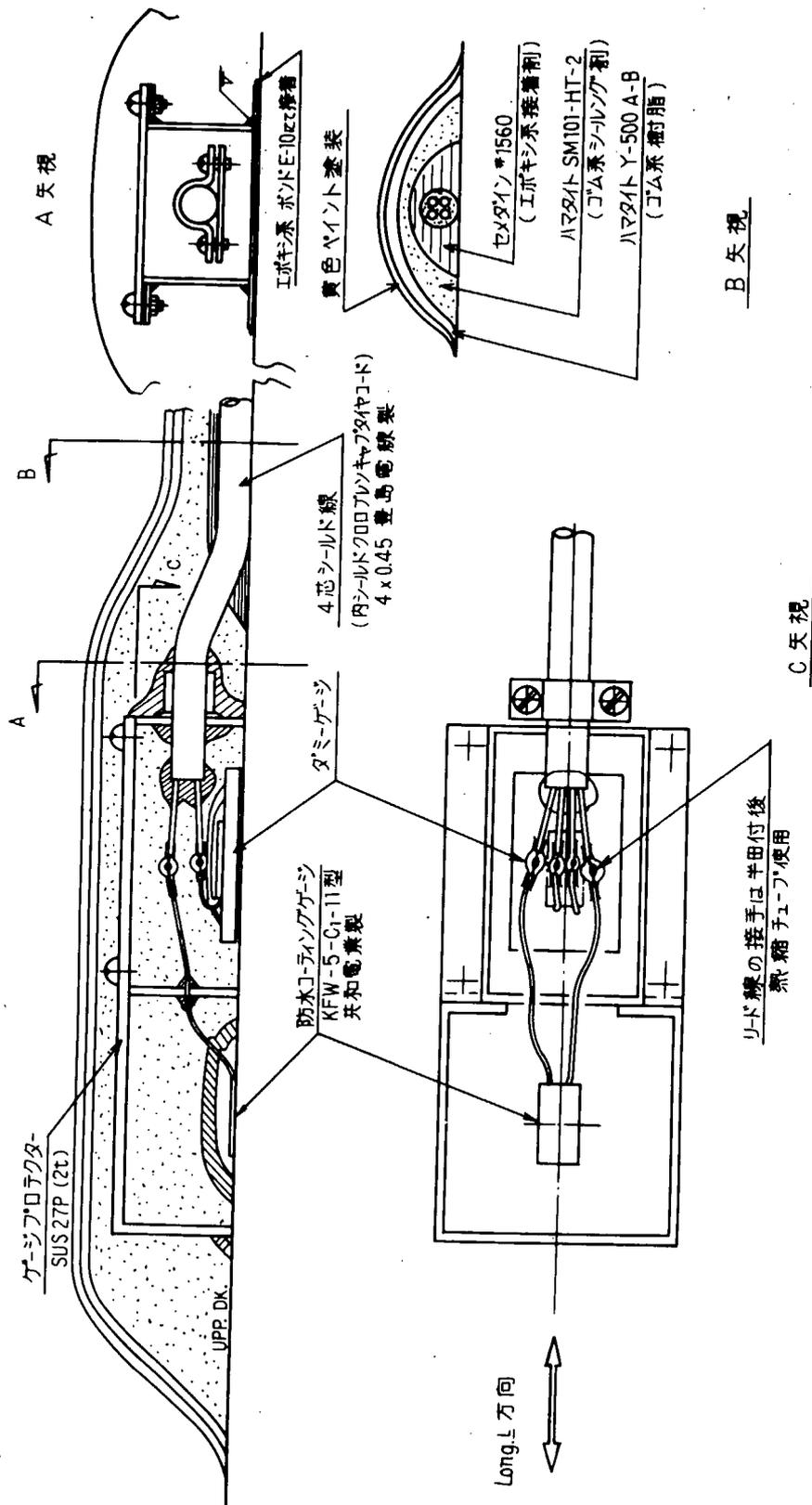


Fig. 4.5.3

5. 結 言

本研究は、昭和44年度から実施されたSR108研究部会の継続研究として、昭和46年度より4年計画で実施されており、本年度はその第3年目として、前述のような理論計算、模型実験および実船実験の3本柱で研究が進められ、高速コンテナ船の耐航性能について色々な角度から調査、検討が行なわれた。

来年度は研究計画の最終年度として、今までに行なわれて来た諸研究の成果を総合的に取りまとめ、あるいは補足計算や実験を追加して、高速コンテナ船の設計資料や操船資料を整備する予定である。