

日本船舶振興会昭和49年度補助事業  
“巨大タンカーの研究”

研究資料No.232

## 第151研究部会

# 大型化に対応する船舶操縦 システムの調査研究

## 報 告 書

昭和50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49年度補助事業「巨大タンカーの研究」の一部として、日本造船研究協会が第151研究部会においてとりまとめたものである。

### 委 員 名 簿 (敬称略、五十音順)

部会長	野本謙作(大阪大学)	
幹事	岩柳順二(船舶技術研究所)	小川陽弘(船舶技術研究所)
	鳥野慶一(神戸商船大学)	小瀬邦治(広島大学)
	小林弘明(東京商船大学)	小山健夫(東京大学)
	高木又男(日立造船)	前田至孝(船舶技術研究所)
	森正彦(石川島播磨重工業)	
委員	伊藤憲治(川崎重工業)	今田東行(川崎汽船)
	岩田秀一(日本海事協会)	岡本洋(川崎重工業)
	音成卓哉(日本钢管)	小保方準(住友重機械工業)
	片山勇(出光タンカー)	坂本昭弘(佐世保重工業)
	谷初藏(東京商船大学)	花園史郎(函館ドック)
	日尾勇次(太平洋海運)	平野雅祥(三井造船)
	広田清一(東京タンカー)	藤井齊(三菱重工業)
	森川卓(日本船主協会)	渡辺久記(三井造船)

# 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. 研究計画 (SR151船舶操縦シミュレータの構想) .....	2
2.1. 船舶操縦システムの定義とその調査研究方法の展望 .....	2
2.2. 船舶操縦シミュレータに何を期待するか .....	3
2.3. 広島大学船舶操縦シミュレータの経験 .....	5
2.3.1 広島大学の操縦シミュレータ .....	6
2.3.2 操舵員による針路制御のシミュレータスタディ .....	7
2.3.3 避航操縦のシミュレータスタディ .....	7
2.3.4 シミュレータ設計に対する若干の考察 .....	8
2.4. シミュレータ用操縦運動モデルについて .....	14
2.5. Visual Display .....	15
2.6. 設計方針 .....	16
2.7. 対象とする船の特性、模擬すべき操船状況の設定と検討すべき新計装 .....	20
3. 設備の進捗状況 .....	21
4. 実験結果 .....	24
4.1. コンパス・レピータの応答特性 .....	24
4.2. Yaw-rate Wheel方式操舵コントロールを使用した保針と変針 .....	28
4.3. Yaw-rate Wheelによる針路不安定タンカーの特性補償 .....	32
4.4. Course Wheelによる保針・変針 .....	35
5. 結 言 .....	37

## 1. 緒 言

近年急速に進んだタンカーの大型化と海上交通の輻輳は、これら大型タンカーの操船を、船と操船者を一体とするマン・マシン系の制御問題として分析し、安全運航の指針、そのための新しい計装の開発、船型や操舵設備の最適設計等に資する必要を痛感させるようになった。これらの調査研究には船舶運航の状況を実時間で模擬する操船シミュレータが極めて有用である。さらにこれらの巨大船の運航要員の訓練、再教育にもこのシミュレータが大きい効果を発揮することが指摘されている。本研究はこのような背景の下に、特に近い将来建造を予想される100万トン大型タンカーを直接の対象として上記の船舶操縦シミュレータを開発製作し、緊急に必要とされる二、三の運航問題をマン・マシン系制御の立場から分析して上記巨大タンカーの安全運航に資せんとするものである。なお本研究は昭和49～51年度にわたる3ヶ年計画で行うもので、本報告はその初年度の中間報告である。

## 2. 研究計画—SR151船舶操縦シミュレータの構想

### 2.1 船舶操縦システムの定義とその調査研究方法の展望

従来造船学の分野において船舶の操縦性能とは、ある操舵を加えたとき船がどのように運動するかと云う、もっぱら船自体の運動性能を意味している。ところが実際の操船状況を考えてみると、操舵は船の運動に無関係に外から加えるものではない。操船者は船の運動を時々刻々、コンパスなどの計器や自らの視覚を通じて検知し、船が予定されたコースを走るように、次々に操舵を加えている。予定されたコースが一定針路であれば外乱の影響や船自身の不安定性のために次々と誘発される船首の振れに応じてそれを打ち消すように操舵するであろうし、さらに予定されたコースが一定角度の変針とか、航路標識ブイの回航とか、もっと複雑な場合にはそれに応じてさらに多様な操舵を行うであろう。いずれにせよ、操船者が船の運動を検知し、それに対応して操舵を加減していると云う点が重要である。舵の動きが船を動かしていると同時に、その船の動きが操船者を介して舵を動かしていることになる。こうして船、操船者、航海計器、操舵管制機構は一つの“閉じた回路”を構成し(図2.1.1参照)，現実の操船はこの閉じた回路全体の運動とみなすべきである。この人間と機械—船をも含む広い意味の機械—の混成からなる閉回路を船舶操縦システムと定義しよう。

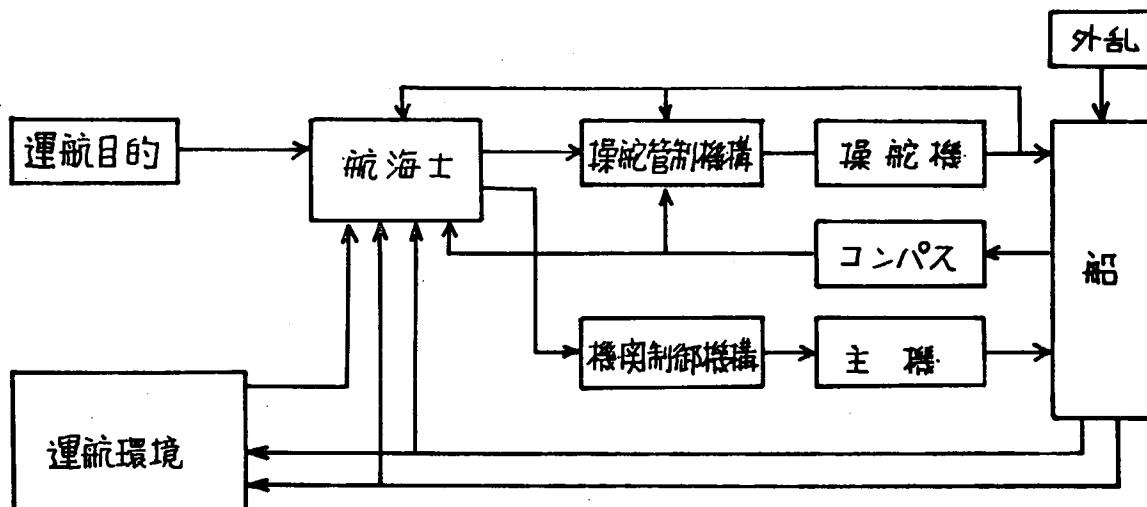


図 2.1.1 船舶操縦システムの構成

本研究部会の目的は既に述べたとおり、この人間・機械混成の閉回路制御問題の立場から、巨大タンカーの安全運航に資するいろいろの資料を提供することにある。このような調査研究を進めるに当って一つの大きな問題は人間の制御特性をどう取扱かうかであろう。

船自身の特性については多くの未解決の問題はあるものの、その操舵応答の性質、数学的表現について一応の知識はでき上っていると考えてよい。操舵機やオートパイロット、コンパスをはじめとする汎用の計装についても同様である。ところが操船者—一部の小型船をのぞき、直接操舵に当る操舵員と、船の運航全般を判断、指揮する航海士の2名が基本単位—の入出力特性、時間おくれ、分解能などははなはだ複雑微妙であって、そのメカニカルな記述は不明な点が多い。

そこで当然のなり行きとして、現実の人間を組みこんだシステムの実験によって研究を進める方法が考えられる。このような実験は同時に人間の特性について多くの有用な資料を与えるであろう。

最も直接的なこの種の実験は実船の就航状態におけるそれであろう。これはいろいろな意味で切札となるべきものではあるが、時間的、経費的な制約は大きい。また、現実そのものであるために、あまりに多くの要素が介入して来て解析を迷路に追いかむおそれもある。さらに現存しないような巨大船とか、将来現われるかも知れない特異な特性の船などの調査はできない。

次に考えられるのは模型船に操船者が乗込む方式で、たとえば有名なグルノーブルの訓練施設などがこれに属する。既に指摘されているようにこの方法の致命的短所は時間尺度の不一致である。模型船の運動の時間尺度は  $L/V$  — L : 船長(m), V : 船速(m/s) — で決まり実船の  $1/5 \sim 1/10$  に短縮されるが、人間の神経系統の時間尺度は模型船を運転するからと云ってそんなに大巾に短縮できるものではない。

第三の手段が本部会で採用した実時間シミュレータである。この設備は実験室内に航海船橋の実寸の模型を作り、操舵スタンド、コンパス、舵角指示器その他の計器もなるべく実船と同じように配置する。操船者が舵輪を回すと舵角に対応する電圧信号が発生し、これが別室にある計算機に送られる。計算機はその舵角に応ずる船の運動を実際の時間尺度 — 実時間 — で時々刻々計算し、船の回頭角、速力、船位などを電圧信号の形で出力する。この出力に応じて上述の模擬船橋にあるコンパスが回転して船の回頭運動を模擬表示する。一方、模擬船橋の周囲には大きい円周に沿って投影スクリーンがあり、幻灯装置、テレビ投影機などを使って船橋の窓から見える水路風景や行きあい船などの映像をスクリーンの上に映し出す。自船の運動、他船の運動に応じてそれらの映像は姿や位置を変化して、あたかも実際の船橋から周囲を眺めているのと同じ具合になる（以下、この装置を Visual Display と呼ぶ）。推進機関の回転数の制御も同様な方法で模擬することができる。

計算機の設定を変えれば船の寸法、特性などは自由に選択できるし、いろいろな新しい計器や操舵管制機構なども簡単に付加したり取り外したりできる。すべての動きは実時間であり、また、現実の操船を実験室内に模擬再現するから上記の二つに比べてこの方法は大変便利である。この種の装置は現在国内には広島大学工学部船舶工学科に簡単なものが稼動しているにすぎないが、オランダ、スウェーデンには既に相当高度な設備があり、西ドイツ、イギリス、米国等においても計画なし建設が進んでいる。また、航空機乗員の訓練には同様のものが多年にわたる実績をもち、潜水艦にも同様の応用が知られている。

## 2.2 船舶操縦シミュレータに何を期待するか

船舶操縦シミュレータを本部会で開発するにあたり、それがわれわれの目的に対し具体的にどのような仕様をもつべきかという点については、諸外国で既に開発されあるいは計画されつつあるシミュレータなどにより大体の見当はつくにしても慎重に考慮を払う必要がある。そのためにはわれわれの直接の目的からは一応はなれて操船シミュレータに対し何を期待できるか、そのためには具体的な仕様として何が必要で、それらの実現の可能性がどの程度あるかということを多面的に考えて見ることは、われわれのシミュレータの目的を具体的に検討する上で有意義なことであろう。

操船シミュレータの目的として、現在語られているものを分類してみると次の4点に分けられるようである。

1. 訓練用
2. 操船マニュアルの補助
3. 船の操縦性能、操縦制御のための諸計装等の設計、評価
4. 港湾あるいは水路の設計、評価

これらの目的は互に強い関連をもち、したがってそれぞれの目的に対して別々の形態のシミュレータが対応するというものではない。しかし目的を分類することにより、それぞれの角度から焦点をしぼった見方をすることができ、それによってより具体的に問題点を把握することができるであろう。

訓練用シミュレータの大きな特色はマンーマシンシステムにおいてマシンの方に対してマンを適応させるという点であろう。操船者は如何なる事態においてもそのシステムがもつ能力を最大限に發揮させる必要がある。そのためには通常の航海時における操船の習熟はもちろんのことであるが、機器の故障・火災の発生・衝突・乗揚げなどの緊急時における対策の訓練ができるような能力をもったシミュレータであることが望ましい。特にタンカーでは事故時における流出油を最小限にとめること及び防火対策は万全を期す必要があり船上での訓練の他にシミュレータによりいろいろな状況を作り、それぞれの状況に対し適確な行動をとれるような手順を身につける訓練を定期的に行うべきであろう。

人間は常時くり返して行っている作業に対してはそれがかなり高度なものであっても反射的に的確な行動がとれるが、不測の事態に対しては無力な場合が多い。たとえば、視程の悪い場所を航行しているときのレーダーの故障・舵故障・主機制御系統の故障などのとき、直ちにとるべき行動が身についていなければならない。

操船マニュアルの補助という表現は一般的ではないが、いわば造船所側と運航者側との対話の場としてのシミュレータも大いに意義がある。船の操縦性能に対して重大な関心が払われるようになってきたのは比較的最近のことであり、操船マニュアルといわれるべき完備した操縦性に関する資料も様式すら定まったものはない。しかし最近のタンカーに見られるような急速な大型化が行なわれ、従来の運航者の経験からは、その性能の類推が困難であるような船に対しては、実用性の高い完備したマニュアルを提供すべきであることは当然である。

しかし造船所側・運航者側双方に共通した、船の操縦性を的確に表現する言語がないため、現在完備したマニュアルを作成することは非常に困難となっている。たとえば、運航者側で知りたいのは、「こういうときにこうすればどうなる」という具体的な運動であるのに対し、造船所側から出る資料は「 $T$ がいくつ、 $K$ がいくつ、非線型項がこうでループ幅は…」という運動方程式のパラメタに類するものが多く、運航者側に十分理解されない例は少なくない。

造船所側がパラメトリックな物の考え方をし、運航者側が感覚的な見方をするのは当然ではあるが、両者が互いに自己の立場に立っているかぎり話は通ずるようにはならないであろう。論理的には両者の間には運動方程式というExplicitな関係が存在するのであるから、通じないはずはないのであるが、運航者側から見てパラメタから船の運動を感覚的に体得すること、あるいは造船所側から見ると運航者側の感覚的な表現をパラメタの上に正確に投影し、さらに具体的に船の設計に反映させることは容易ではない。

両者をつなぐ手段として操縦シミュレータを利用することは、はかり知れない意義があることに注目すべきであろう。この場合、運動方程式は感覚に訴える形で解かれているわけで単に数式的な解析解を出すことによっては得られない意志疎通が可能になる。したがってこの目的のためにはどのようなVisual Displayが必要かということが問題になるであろう。

一般論としては、この目的のためのDisplayのグレードはcost/benefitの関連からきまるものであろう。任意の制御入力に対して運動方程式を解きメーターの上に指示したり、航跡をX-Yレコーダーに画くという非常に簡単な装置でもある程度は役に立つし、精密な船橋模型と大型スクリーンをもつ本格的なシミュレータがあればそれに越したことはない。常識的な仕様としては、保針、変針・旋回・停止・加減速中の操縦性などのシミュレーションなどは十分に行なえる必要があり、そのため物標などのVisual Displayが必要となると考えられる。

対話の場としてのシミュレータという考え方をして来たわけであるが、対話は船の引渡しのときにその船の性能の説明という意味で必要であることは当然であるが、さらに進めて設計の段階にも使うことを考えるべきである。船の主要寸法や舵面積の決定、また計装の面でもある航海計器を設置するかどうかの判断あるいは同一機能を持つ数種類の機器の中からの選択さらには、新しい計装の開発評価、これがシミュレータの目的分類の第3項である。

船は伝統的に独立した主権をもつという意識が強く、他からの制約を極力排除しようとする傾向が強かった。しかし、わが国をはじめ世界各国の港湾において海上交通の輻輳が問題となり、これに加えて大型タンカー、LNGキ

ヤリアーなど従来は想像もつかなかつたような大量の危険物を積載した船の出現により海上交通自由の原則は急速に後退しつつあり、近い将来かなり強い管制が行われようとしている。わが国の場合、東京湾・伊勢湾・瀬戸内海などに海上交通の輻輳の激しい水域に20万トンクラスのタンカーが出入港しなければならない工業立地となつておるこの問題は特に深刻である。

通行隻数から見て大多数を占める中・小型船の交通流の中に巨大船を入れることは管制上非常に困難であり、管制の方式を決めるためにもマン・マシンシステムとしての巨大船が交通流に対しどのような影響を及ぼすかについて十分な評価を行なわなければならない。このためには単一のマン・マシンシステムだけではなく、それがマン・マシンシステムである複数の船の交通流としてのシミュレーションも必要となるであろう。

一方、交通管制の方式が決定された場合、それが逆に船に対して一定以上の性能を要求することになるであろう。それらの性能の中には情報の伝達といった航海計器の一種の装備ですむものから、船の運動能力そのものまで含まれる可能性もある。実際問題として交通管制としては航路指定→信号制御→個別管制という順に高度化されるものと考えられているが、航路指定による空間的制約に加えて信号制御による時間的制約が加わると、おそらく現在のままの巨大船の運動性能ではその交通の流れに乗ることは特に加減速性能の点で困難であろう。

従来、船は単独の性能のみに注目して設計されて來たため、その性能は船の大きさに応じた程度のものになっている。しかし輻輳する交通流の中で他船と調和した形で航行するためには、それに応じた満足すべき最小限の性能に対する要求は当然あるはずである。

操縦シミュレータの利用目的の第4のものは、輻輳する交通流が効率的にさばける港湾や水路の設計に関するものである。交通管制の方式にせよ、港湾や水路の仕様にせよ、そこを航行する船舶の運動性能に適合していなければその機能を十分に発揮できない。この場合の船舶の運動性能とは、単に船のみではなく、人間によって操縦される船のそれとして考えねばならないことはこれまでの議論を通じて全く明らかであろう。

現在の港湾や水路に、将来建造される100万トンタンカーが航行可能であろうか。航行させる場合、あるいは現在のそれを改造する必要が生じるかも知れないし、新たな交通管制や航行援助装置の開発が必要かも知れない。新たな港湾を設計する場合、どのような設計とすべきであるかも問題である。このためには、その水域における交通流、潮流などの外乱の中で、人間一船系がどのような挙動を示すかについてのデータを判断の基礎とする必要がある。このようなデータを得る上で、操縦シミュレータによる方法は経費や時間の点からも全く有用であると言えよう。

以上、操船シミュレータの目的及び利用法について4つの異なる面から概観したが、われわれの目的は、操船マニュアルの補助及び船の操縦性能の検討を合わせたものと考えてよいであろう。具体的なシミュレーションの内容としては

1. 変針および保針
2. 指定された航路の通過
3. 港口あるいは係留ブイへの接近および減速法
4. 他船の避航
5. 上記の合成

を行なう必要があり、そのためのシミュレータとしては、港口・係留ブイ・他船を投影できるかなり高度なVisual Displayと、種々の航海計器の評価を容易に行ない得る柔軟性のある模擬船橋を開発しなければならない。

## 2.3 広島大学船舶操縦シミュレータの経験

広島大学工学部船舶工学科教室には船舶操縦シミュレータがあり、上記の立場から船の操縦システムの基礎的研究を行っている。文献(1)(2)この装置は小型かつ簡単なものであるが、今のところ、国内で稼動している唯一のシミュレータであるから、その設計や各種のシミュレータ・スタディの経験は本部会の研究の参考になるものと思われる。

以下に、このシミュレータの概要と、それを用いた操縦性研究の一端を紹介する。

### 2.3.1 広島大学の操縦シミュレータ

一定の速力で走りながら、専ら操舵によって目的地に船を誘導する局面は、船の操縦のうちで頻度が高く、基本的である。広島大学のシミュレータはこの点に着目して、一定速力下における針路制御の模様を再現しうるよう設計している。

船の針路制御系の構成要素のうち、操舵機特性、船の運動性能および波浪や風による外乱はアナログ計算機の演算で模擬する。操舵員による操舵指令は、舵輪に接続したポテンショメータの出力電圧の形でアナログ計算機に入力し、計算機出力電圧の形で得られる船の回頭運動はコンパスディスプレーや視界投影装置(Visual display)によって操舵員に伝える。針路制御の模様を再現するシミュレータは以上の構成からなり、この構成を図 2.3.1、配置を図 2.3.2 に示す。

操舵に対する船の回頭運動は、次のいずれかの数学モデルを選択して使用する。

$$T_1 T_2 \ddot{\phi} + (T_1 + T_2) \dot{\phi} + \phi = K\delta + KT_3 \dot{\delta} \quad (\text{線型2次系})$$

$$T \ddot{\phi} + \dot{\phi} = K\delta \quad ("1")$$

$$T_1 T_2 \ddot{\phi} + (T_1 + T_2) \dot{\phi} + \phi + \alpha\phi^3 = K\delta + KT_3 \dot{\delta} \quad (\text{非線型2次系})$$

$$T \ddot{\phi} + \dot{\phi} + \alpha\phi^3 = K\delta \quad ("1")$$

針路安定に欠ける船の場合には、非線型2次系の数学モデルを主に使用している。

操舵機特性は、電動油圧形式のものを想定し、1次遅れ特性で表現する。

$$\delta + T_E \dot{\delta} = \delta^* \quad \delta^* \text{ (指令舵角)}$$

$$\delta \quad \text{（実際 “ ” )}$$

コンパスディスプレーは、実寸大の操舵スタンド上面に取付けているが、コンパスカードの形式としては、船の回頭が $1^\circ$ に対してカードが $1^\circ$ だけ回転する Ordinary scale のもの、5倍に拡大した Vernier scale のものの他に、磁気コンパスの特性を組みこんだものや回頭角速度計を併置したもの等を製作している。

シミュレータの構成部分のうち、視界投影の問題が技術的に難しい。このシミュレータでは、次の二形式の投影装置のいずれかを、シミュレーションの目的に応じて選択し、使用することにした。

投影装置の一つは、船の回頭だけを操船者に示す目的で製作したものである。投影する物標が十分に遠方にあると、スクリーン上の物標は船の回頭に応じて専ら横移動するのみだから、投影機にセットした遠視物標のカラーフィルムを船の回頭に応じて横移動させればよい。この場合、投影を簡略にするため透視スクリーンを使用し、スクリーンの裏側から投影する方法を採用した。この投影法は十分に明瞭な視界を簡単に作りうる点で優れているが、本船と物標の相対位置変化等は表現できない。

他の一つは、避航操縦の模様を再現する目的で製作した影絵方式の投影装置で、図 2.3.3 (12 頁) に構成を示す。本船および物標(避航対象船)の相対位置変化と各々の回頭に対応する 4 個のサーボ系によって縮率模型を駆動し、点光源による影絵の形で避航物標の動きを表現する。この点光源の周囲に、遠視物標を写したフィルムを設け、本船の回頭を表わす回転円板とともに回転させると、遠視物標を投影することもできる。この方法によって、一応、避航時の視界を与えることができるが、次のような問題がある。

- (i) 遠方にある物標ほど明瞭に投影され、現実と逆になる。
- (ii) 影絵は、物標の輪郭しか表現しないから、操船者は内部の構造を知ることができない。固定物標の場合は、位置や大きさが判別できればよいことが多いが、船等の場合には進行方向の変化等の判別も大切であり、角度によっては実際よりもはなはだ識別が困難になる。
- (iii) 透視スクリーンを採用したために、操船者と点光源をスクリーンに対して対称の位置に設置でき、縮率模型をあらかじめ歪ませておく必要がなく、また投影距離の短縮によって明るい視界が得られる反面、視界が広く取れないことになる。

## 2.3.2 操舵員による針路制御のシミュレータスタディ

船の操縦において、操舵員による針路制御は重要な地位を占めている。この針路制御はまず、保針と変針の操縦の組合せを考えることができる。上記のシミュレータを用いて、針路不安定な船を中心て、針路不安定の程度や船の運動の時間スケール ( $L/V$ ) が操舵員による保針、変針の操縦に及ぼす影響を調査した。また、併せて、コンパス等の計装の影響についても検討を加えた。供試船 A, B, C は表 2.3.1 に示す操縦性指標を持つ針路不安定船で、不安定ループ巾は各々、 $6.5^\circ$ ,  $17^\circ$ ,  $30^\circ$  である。この調査の主な結果は次の通りである。

### (i) 船の性能が保針に及ぼす影響

図 2.3.4 と 2.3.5 は、保針中の舵角、回頭角および回頭角速度の R.M.S と操舵時間間隔の例を示す。 $L/V$  が大きな船では、運動のテンポがゆっくりしているから、操舵員の操舵に余裕があり、効果的な操舵が可能になっており、保針結果は良い。 $L/V$  の小さい船では、操舵頻度が高く、保針が難しくなる傾向があり、針路不安定の著しい船ほど保針結果が悪い。

一般に、船の性能が許容できる範囲にあれば、人間は船の性能の変化に適応した制御を加えるから、保針結果に大きな変化は生じない。しかし、人間の適応能力の限界に達すると、保針結果は急に劣化する。 $L/V$  が 10 秒以下になる場合には、十分な針路安定性を与える必要がある。

### (ii) 針路指示装置の形式が保針に及ぼす影響

図 2.3.6 は針路指示装置の形式が、操舵員の制御能力の変化を介して、保針に影響を与えることを示す。 $L/V$  の小さな船の場合、Ordinary Scale のコンパスや磁気コンパスでは保針が困難な船において、Vernier Scale のコンパスが保針結果の改善に有効であることがわかる。このように、針路指示装置の形式は保針の難易に大きな影響を与えるから、適切な針路指示装置の開発、評価が期待される。

### (iii) 船の性能が変針に及ぼす影響

図 2.3.7 は船の性能が変針の操縦に及ぼす影響を示す例である。時定数  $T_L'$  は変針時の回頭変化を 1 次遅れで近似した場合の時定数を  $L/V$  で無次元化したものである。 $L/V$  の大きな船の場合、運動のテンポがゆっくりしているから、操舵員は余裕をもって船の性能を一杯に引き出すように操舵する結果、 $T_L'$  は比較的小さい。しかし、 $L/V$  の小さい船では、船の回頭変化が早いから操舵員が効果的に対応することが難しくなり、専ら運動が過大にならないように操舵する結果、船の性能を十分に引き出すことができない。 $L/V$  が 10 秒以下の船で  $T_L'$  が急増する傾向が認められ、針路不安定な船ほど著しい。

### (iv) 針路指示装置の形式が変針に及ぼす影響

通常のコンパスの他に、回頭角速度計を併置して変針操縦を実施するとコンパスだけの場合に較べて操縦しやすくなるとの結果がえられた。

## 2.3.3 避航操縦のシミュレータスタディ

前述した影絵方式の Visual Display を利用して、避航操縦のシミュレータスタディを実施した。本船は船長 100m の針路不安定な船 A, B, C であり、停泊あるいは航行中の相手船と 900m 前方で衝突する状況下でシミュレーションを行った。操船は現役の航海士が担当した。

このシミュレータに関する感想を聴取し、次の如き指摘を得た。

- (i) 遠視物標が明瞭であり、視界良好の場合の操船と考えると、一応の臨場感がえられる。
- (ii) 海上の場合とちがい、緊張感が得にくい。
- (iii) 視界が狭く、避航中、相手船が確認できなくなる。

視界の狭さという透視スクリーン方式の欠陥は、図 2.3.8 に示す避航完了時（原針路に復帰する指令を発令した時）の相手船の位置の分布から考えて当然である。このシミュレーションにおいては、相手船の相対位置軌跡の表示装置によって、この欠陥を補っているが、視覚情報は基本的であり、少くとも  $\pm 120^\circ$  程度の視界投影を考えるべきと思われる。

また、緊張感の問題はシミュレータにとって重要である。職業航海士によるシミュレーションの場合、彼らは自分の避航操縦法を身につけており、それを想起しながら操船しているようであり、避航動作の研究という今回の目的の場合には、この経験豊富な被験者を導入することで解決した。しかし、突発事態のシミュレーション等では、この緊張感の問題は大層重要になると予想できる。

図2.3.9は避航操縦シミュレーションの結果の一部を、本船に対する相手船の相対位置軌跡の形で表わしたものである。結論を導びくに十分なデータが得られている段階ではないが、次のような傾向を指摘できる。

- (i) 本船の針路安定性は操舵員による針路制御に影響を与え、安定の劣る船では操舵員の負担が増す。しかし、操舵員が本船の性能変化を保証しえている場合には、航海士によって主に決定される避航動作への影響は少ない。
- (ii) 本船の速力は避航動作に影響を与え、高速船ほど避航針路角を大きく取る傾向がある。本船の大きさも避航に影響を与えるが、今日、十分なデータを得ていない。(図2.3.10)
- (iii) 航海士と操舵員の機能分化の有無によって、避航動作に差が生じる例が多い。完全に機能分化した船では針路変更を通じた平行移動操船をする例が多く、両機能を同一人が担っている場合には時々刻々の船位に応じて操舵する例がある。

#### 2.3.4 シミュレータ設計に対する若干の考察

今後、操縦シミュレータは研究目的に、あるいは訓練目的にと広汎な利用が期待される。この設計に際しては研究や訓練の内容を正確に把握することが重要である。広島大学のシミュレータの経験によると、主に操舵員によって担われる針路制御の問題と、航海士の機能である航法制御の問題はある程度独立に考察しうるようである。この点に着目すると、操舵員の訓練や針路制御系の研究には比較的簡単なシミュレータで十分であると言えよう。しかし、航海士の訓練のためには、大規模のVisual Displayの開発や、離接岸あるいは速力変更時の操縦運動モデルの確立等々が不可欠となる。この場合、シミュレータの目的を明確にし、適合したハードウェアの開発を図るとともに、そのハードウェアの機能を補う適切なソフトウェア(例えば訓練プログラム)の開発が必要である。

広島大学のシミュレータは、このような本格的なシステムを製作する上での一種の試作であったと考えることができる。あるいはSR151操縦シミュレータも一層広汎な機能を有するシミュレータの設計のためのパイロットプラントの機能を明確にしてその製作にあたるべきかも知れない。

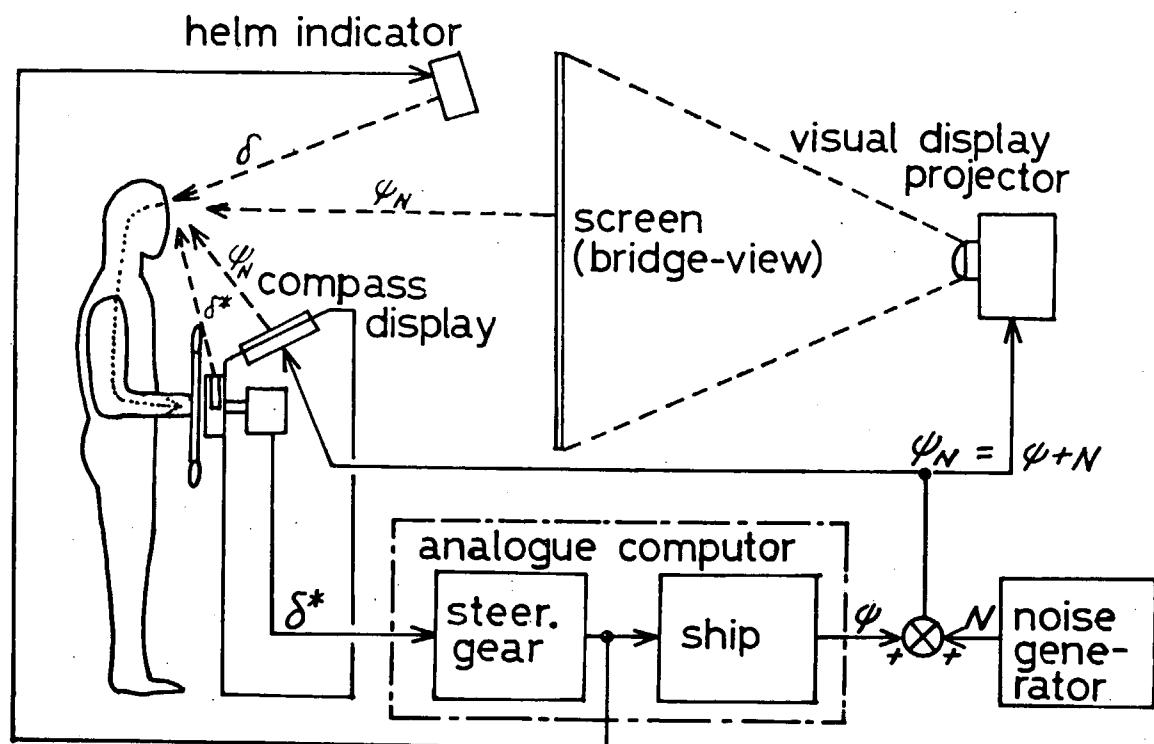


図 2.3.1 広大操縦シミュレータの構成

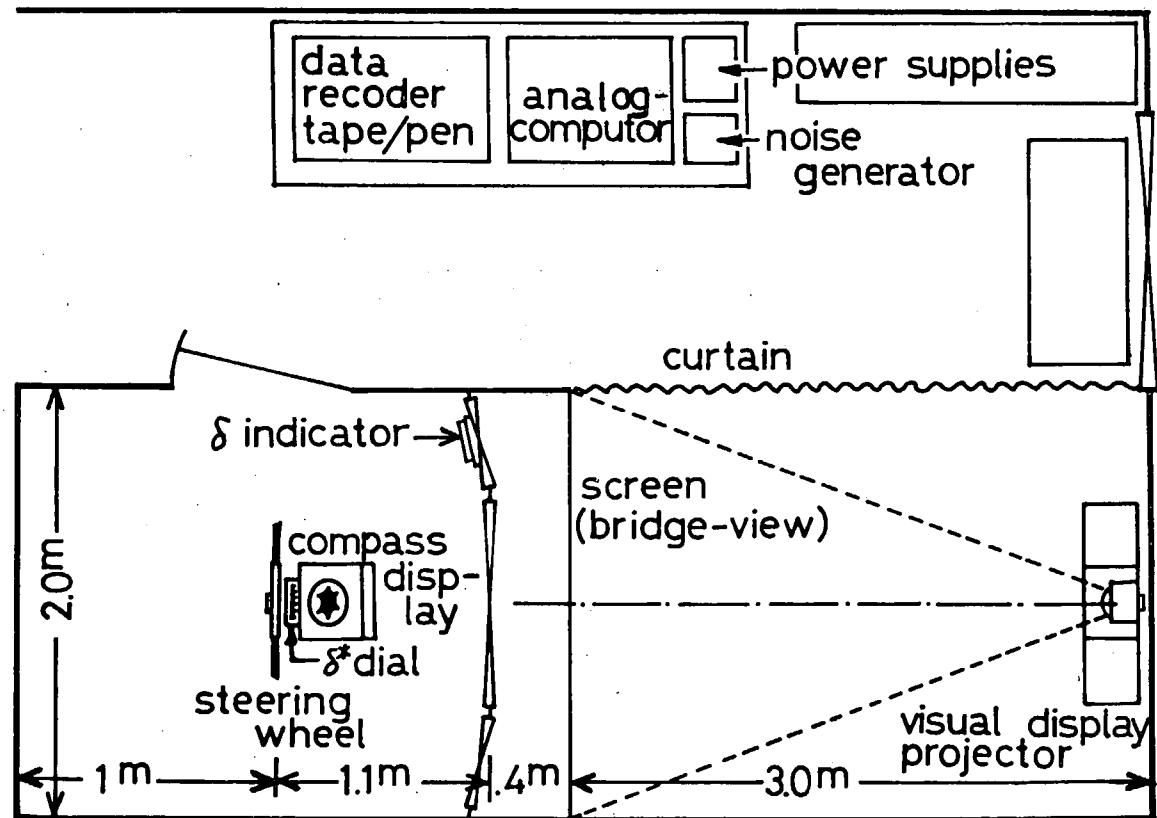


図 2.3.2 広大操縦シミュレータの配置図

表 2.3.1 鋒路制御シミュレーションの供試船の特性

model	$2\delta_c$	$K_{\alpha'}$	$\alpha'$	$T'_1 T'_2$	$T'_r + T'_2$	$T'_3$
A	6.5°	-1.89	-0.00395	-1.585	-4.49	0.674
B	17.0°	-0.836	-0.00291	-0.456	-1.72	0.674
C	30°	-0.509	-0.00254	-0.235	-1.04	0.674

$2\delta_c$  : 鋒路不安定ループ巾

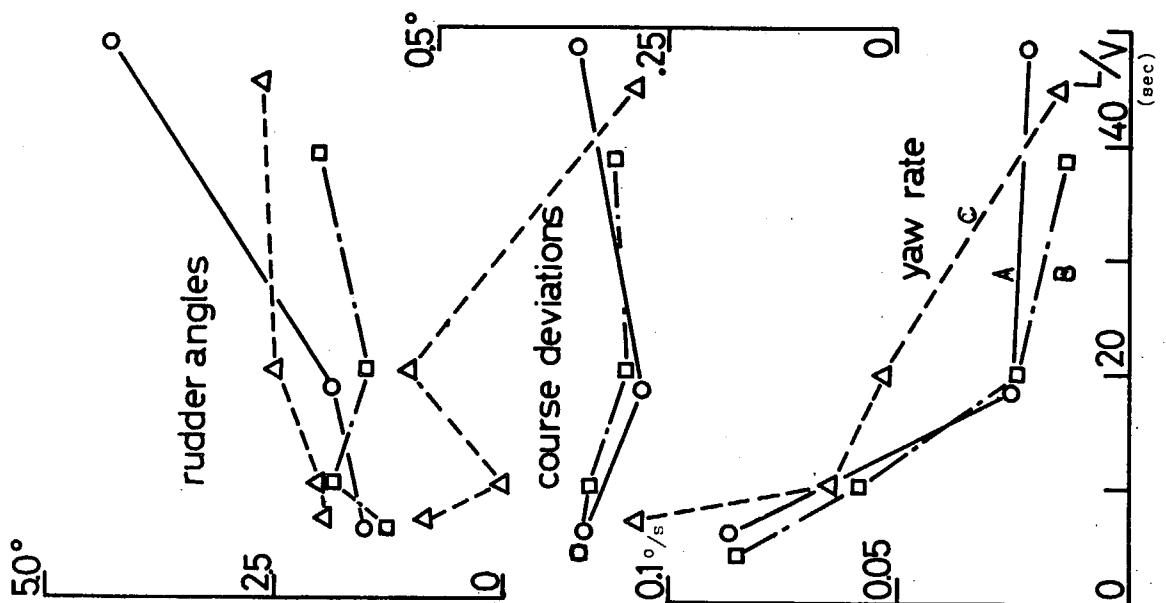


図 2.3.4 鋒路不安定船の保針性能

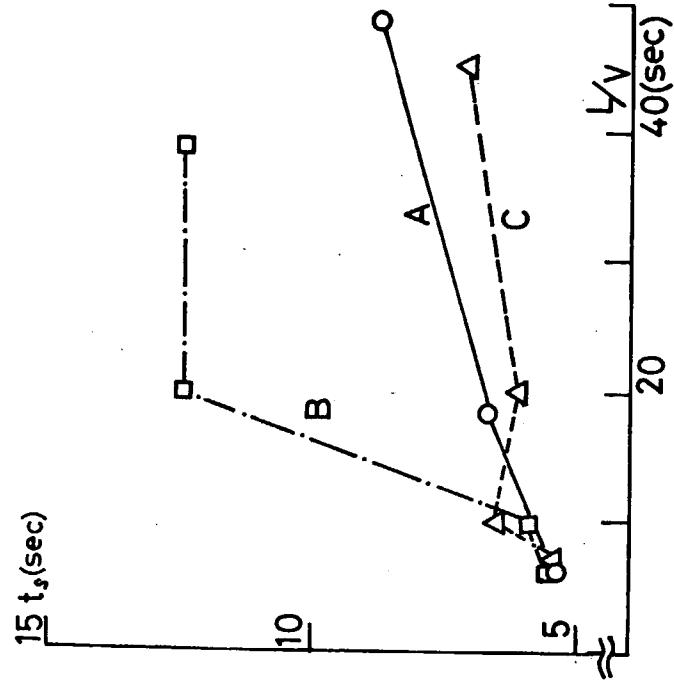


図 2.3.5 鋒路不安定船の保針時ににおける操舵時間々隔

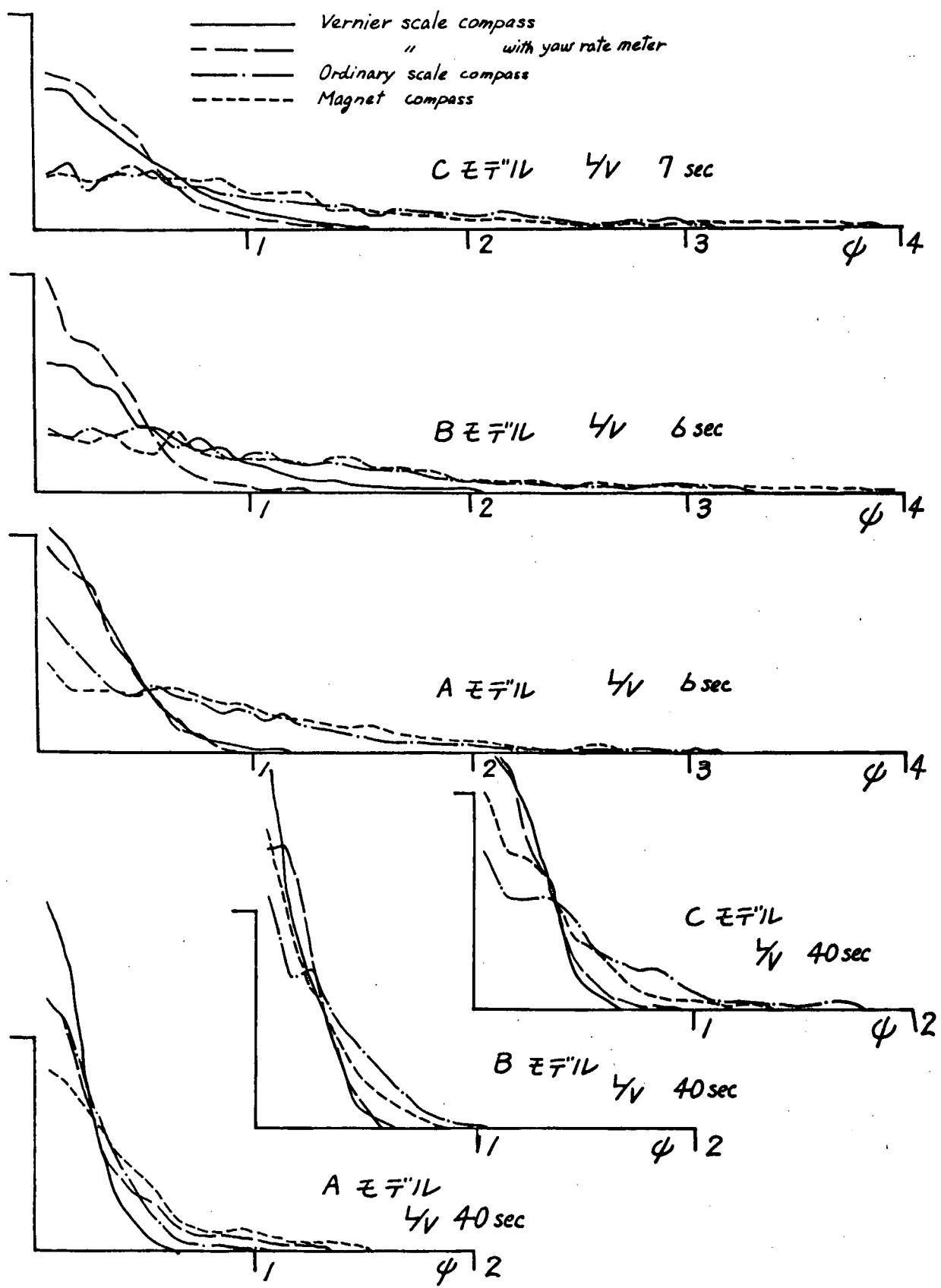


図 2.3.6 針路指示装置の形式が保針に及ぼす影響

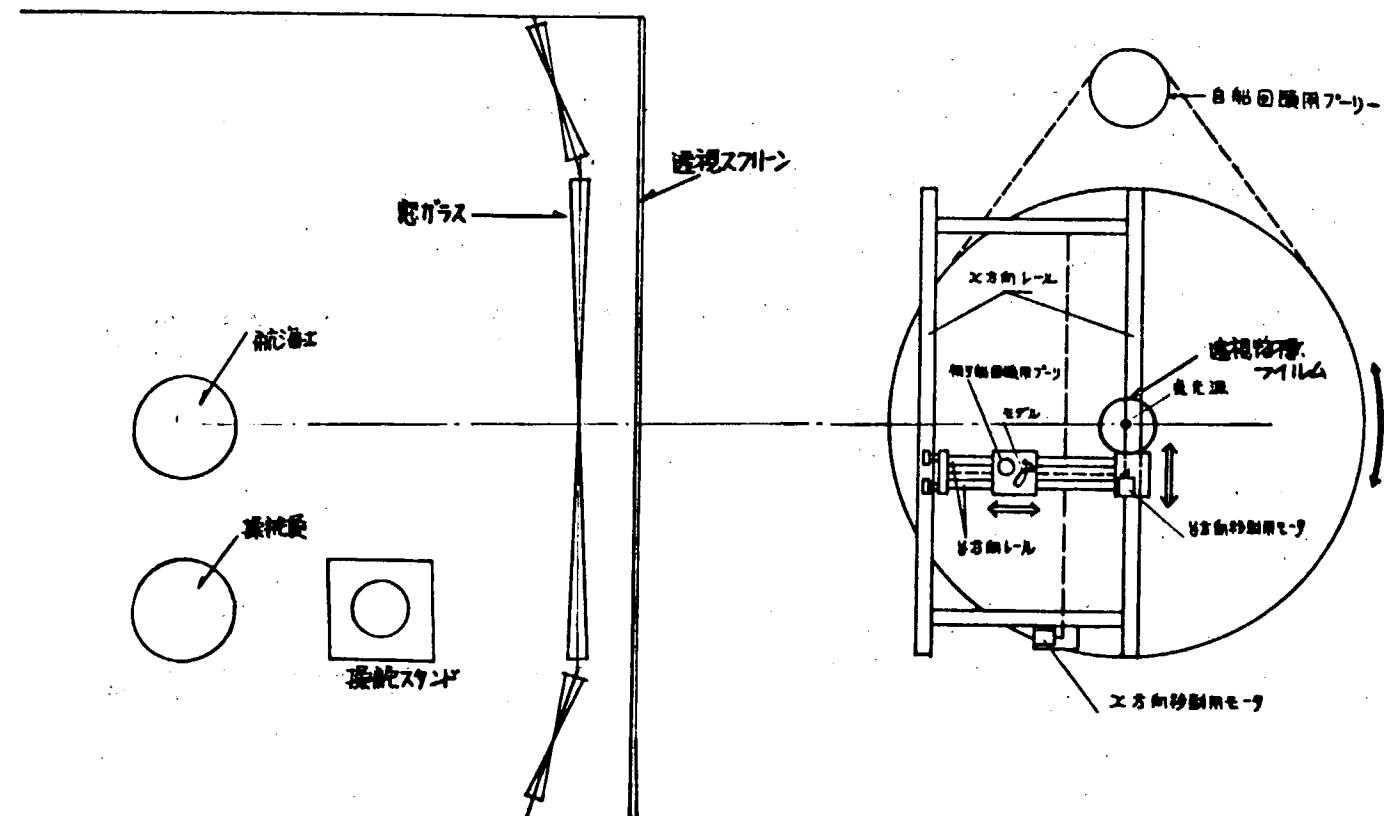


図 2.3.3 避航操縦シミュレータ投影システム

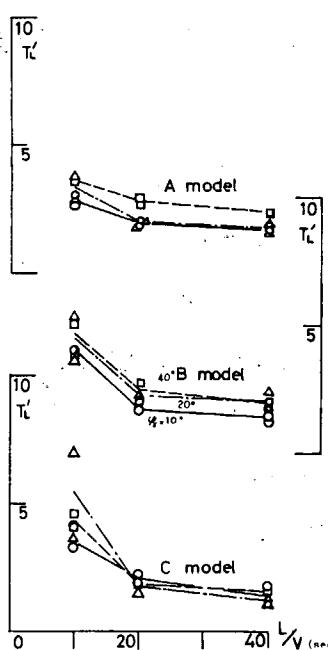


図 2.3.7 針路不安定船の変針性能

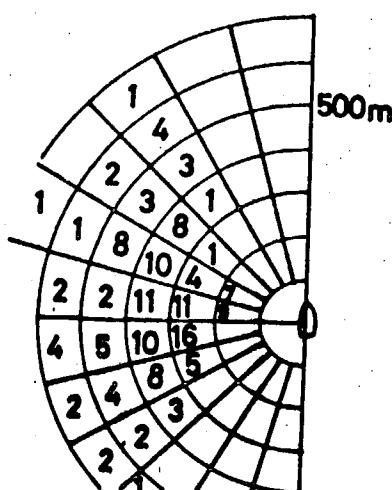


図 2.3.8 原針路復帰発令時の相手船の分布

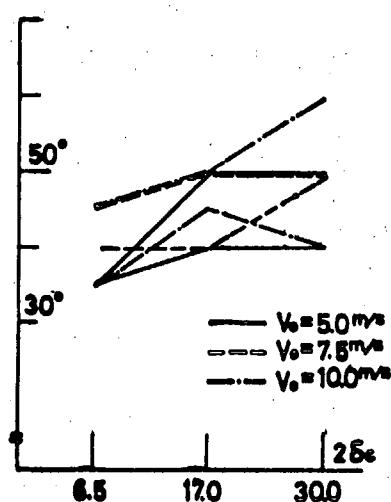
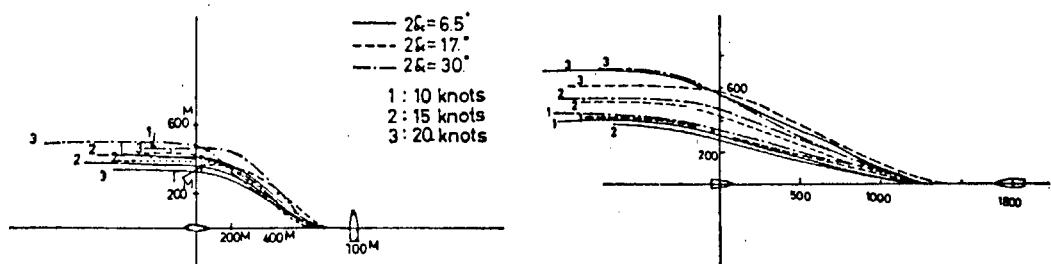
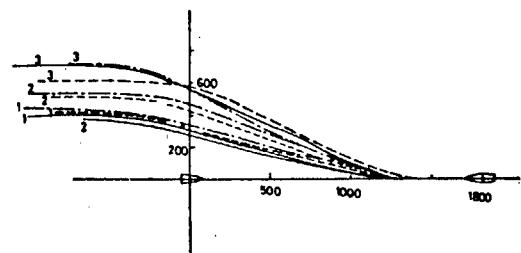


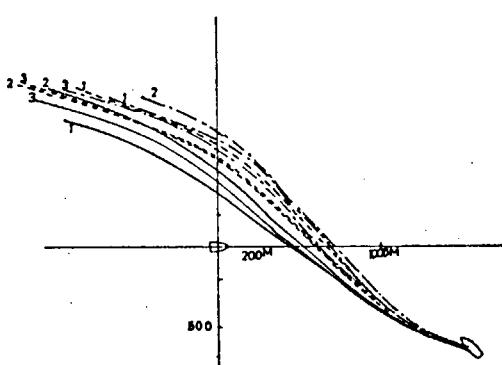
図 2.3.10 避航針路の一例



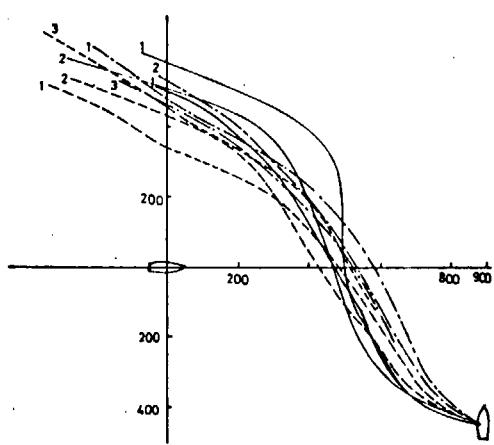
停泊船避航（相対位置軌跡の一例）



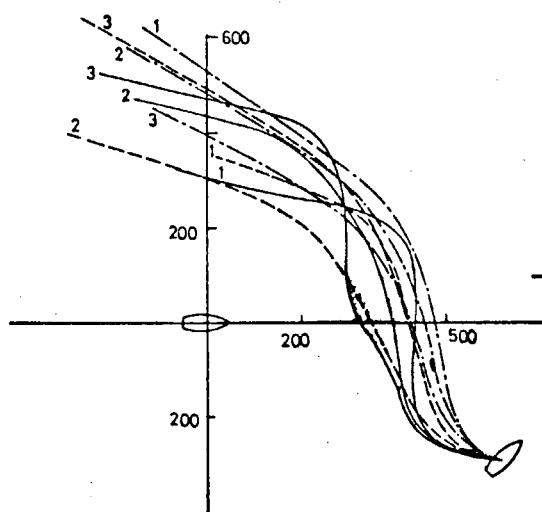
行き合い船避航



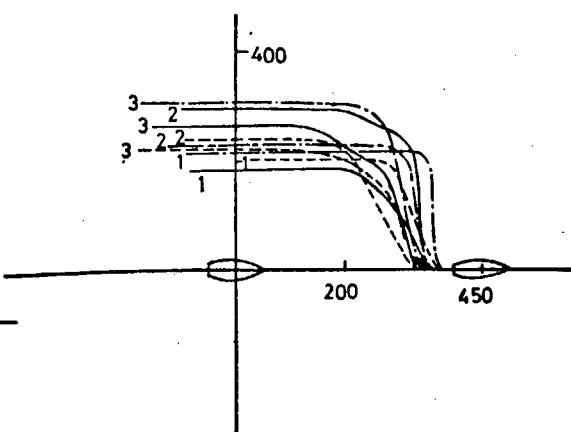
45°行き合い避航



横切り船避航



45°追い越し



追い越し

図 2.3.9 避航運動の相対位置軌跡の例

## 2.4 シミュレータ用操縦運動モデルについて

船の運動方程式は本来同じものであり、特にシミュレータに用いるからといって特別なものがあるわけではない。静水中の船の操縦運動方程式は次のように表現される。

$$\begin{cases} m(\dot{u} - rv) = X \\ m(\dot{v} + ru) = Y \\ I\dot{r} = N \end{cases}$$

ここで  $X$ ,  $Y$ ,  $N$  は流体力および外力の和であり、流体力は状態変数および操作量の関数である。たとえば  $X$  は  $X_d$  を外乱とすると

$$X = f_x(u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, \delta, n) + X_d$$

となり、 $Y$ ,  $N$  についても同形式の表現となる。

ここまで表現には近似はないが、通常の船の操縦性の解析には、前進速度の変化はすくないものと考えて流体力  $f$  を自航点すなわち

$$u = u_0, \quad n = n_0, \quad v = r = \dot{u} = \dot{v} = \dot{r} = \delta = 0$$

のまわりでテーラー展開したものを用いる。したがって自航点から離れるにしたがって近似度は悪くなる。また、船の操縦運動は方位角の制御が基本であるから、 $v$  と  $r$  に関する連立微分方程式から  $v$  を消去した形の運動方程式で十分な事も多く、現在はこの形のものが最も多く使われている。

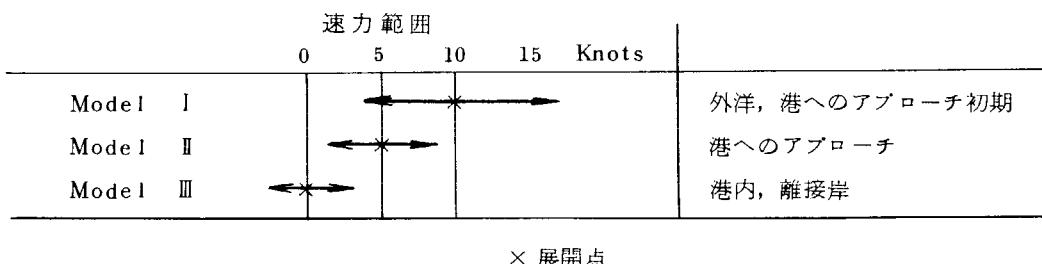
どの形の運動方程式を使うかは目的に応じてきまるものであり、どの範囲の船の運動をどの程度の精度で表現するかによってきめられる。運動方程式は簡単であればあるほど見とおしもよく便利であるが、近似式である以上広範囲な運動を表現しようとすると精度がおちる。

さて、シミュレータ用の操縦運動モデルであるが、従来のモデルと比較して異なる点は下記の 3 点であろう。なおこれらの要求は船を陸岸に近づけるにしたがい強くなる。

1. 前進速度の範囲が広い
2. プロペラ回転数の範囲が広い
3. 横移動に対する計算に精度を要する

これらの要求のうち、プロペラ回転数はどのようなモデルを使うにしても正逆方向共に全速、あるいは少なくとも正方向には  $0 \rightarrow$  全速をカバーしなければならない。

前進速力の範囲は理想的には微速後進から全速前進までをカバーしたいが、速力 0 のまわりでは操船自体が大層複雑になるからそれをカバーしうる Visual Display が非常に困難となるので実用的には前進速力の下限をある程度に抑える必要がある。仮に全速力をカバーするとしても単一の方程式では困難で、先に述べたテーラー展開の展開点を変えて 3 種類程度のモデルを速力に応じ切替えて使用することになるであろう。たとえば巨大タンカーの場合従来の研究結果から見て下記のようになると考えられる。



これらのモデルのうち、I は従来の研究成果を前進速力およびプロペラ回転数の可変範囲を広くとれるよう改良することによって比較的容易に実現できるが、II については実績不足、III になると運動方程式が I や II と異なる形

になるから基礎的研究から始める必要がある。ただしⅡとⅢでは慣性力が主体となるから、ある程度の近似的取扱いは現在でも可能と思われる。

その他制限水路問題、船長方向の潮流分布など巨大タンカーのシミュレーションに不可欠な問題について十分資料のないものも多いが、これらは実行段階で手直しできるものはして行くこととし、とりあえずModel I から始め、その上でModel II・III その他の問題へ進む手がかりをつかむべきであろう。

## 2.5 Visual Display

装置の面でいうと船舶操縦シミュレータで最も工夫をする部分は Visual Display、すなわち操船者が船橋から眺める水路風景や他船などをスクリーン上に映し出す装置である。このことは一般に、必ずしも十分理解されてない面があるので強調する必要がある。

まず操船者にとって、この形で視覚的に入ってくる情報はきわめて重要である。窓を閉め切って計器航行をすることは理論的には可能かも知れないが本気でそれを行う操船者はまずあるまい。この点はオペレーターに入る視覚情報がもっぱら計器盤から入ってくる形のマン・マシン系、たとえば機関制御室からのエンジンブレーキ制御とか、荷油 loading / unloading 制御などと基本的に異なっている。同じ操縦制御でも潜水艦の場合は完全に計器航行だし、航空機の場合でさえも窓から視覚的に入る情報は船に比べてずっとウェイトが小さい。だから航空機のシミュレータでは操縦席前面の窓枠に当る部分にテレビ受像器をはめこむ程度で事足りる。船の場合にはもっと手の込んだ、現実的な視覚表示をしないと実状と大きな差が出て来るおそれが強い。

船の場合のもうひとつの特徴は2人の人間が分業で操船に当り、そしてこの2人とも視覚情報をそれぞれに大きなよりどころとしていることである。直接操舵に当る操舵員は航海士から指示された針路に船首方位を保つためにコンパスや舵角指示器の目盛とともに絶えず船首方向の物標の移動に注目している。一方周囲の状況を判断しながら操船を指揮する航海士は船の位置、速力、回頭の速さ、他船との相対位置、港湾への接近状況などを海図上へのプロットやレーダー映像などのほかに、直接目に入る情報から機敏に判断している。彼の場合には前方のみならず360°全周にわたる目標の動きに絶えず目を配っていると考えねばならない。（ウイングに出て下をのぞきこむような特別な場合は現段階ではひとまず除外するとしても）。従って操船シミュレータの視覚表示はこれに対応できるものでなければならない。

従来使用されている Visual Display にはいくつかの方式がある。

最も簡単なものは遠方物標の左右移動で船の回頭運動だけを表示する。遠方だから船が走ってもその大きさや形は変わらない。1枚のカラーフィルムの移動で行なうことができる。操舵員の針路制御の情報としてはよいが、それ以上の機能は果せない。

近接物標、それが他船であれ、ブイであれ、また、港湾などの陸岸物標であっても、それは自船の運動に伴なって大きさが変り、また、その視角によって形も変化する。見える方位が変ることはもちろんである。このような映像をスクリーンに写すために数種の方法がある。

オランダのデルフト工科大学の考案にはじまり、同国研究機関TNOの手で発展し、現在NSMBの大型機に採用されている方式は「点光源と影絵」である。文献〔3〕。物標の3次元縮尺模型を色ガラスで作り、輝度の強い点光源とスクリーンの間におく。点光源と物標模型の相対運動を自船と物標の相対運動に対応させてやると、スクリーンに写る影絵は自船から見た物標の映像となる。現在の方式ではスクリーンを模擬船橋周囲に円周状に配し、船橋頭上に点光源と物標模型の駆動サーボを載せている。

もうひとつの方式は計算機から出力された船と物標の相対位置から、もっぱら電子回路でプラウン管上に物標の映像を作り出し、適当な方法で操船者に視覚表示するものである。実用されているものではスウェーデン国立水槽SSPA〔4〕のシミュレータがある。現在のところ、島は三角形、ブイは上字形というように簡単な図形しか出せないが、理論的には最も自由度が大きい。もっともそれに対応して経費もまた天文的数字に達するであろう。

米国の海運研究組織でこの方式の開発が進んでいるが、未だ詳細は公表されていない。

この「電子作像」に対して「物理作像」とでもいうべき方式は飛行機のシミュレータでよく使われて来た。物標の縮尺模型をテレビカメラで写し、以後の処理は上記と同じである。カメラを自船の運動に応じて模型の間を動き回らせねばよい。あるいはズームレンズを使って相対距離を表現し、物標の形の変化だけを回転であたえるという変形方式もある。

電子作像にせよ物理作像にせよ、テレビのビデオ信号の形で出て来る映像を操船者に視覚表示するためにまたいくつかの手段がある。

上記 S S P A のものは船橋前面に 7 個の窓を並べ、そのひとつひとつにテレビ受像器をはめこんでいる。市販のテレビブラウン管を使う関係上窓の寸法が相当実状と異なること、航海士がコンパス・ペアリングを取ることができないこと、航海士の位置で著しい視差の出ることなどの欠点がある。飛行機の landing simulator では汎用されているこの方法が船では問題が多いわけで、これは既に述べた船における Visual Display の特質から来ている。

この点を改善し、あわせてより現実感のある Display を得るにはやはり模擬船橋をとりまく円周状のスクリーンにこのテレビ映像を拡大投写するのがよい。

そのための機器のひとつは高輝度の特殊ブラウン管上の画像をレンズと反射鏡で投写するもので、たとえば 4 m の距離に  $4 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  のカラー画像を、映画より少し明るい程度の輝度で投影する製品がある。

さらに長い距離に大きい画像を、しかも明るく投写する装置も輸入されているが前者に比べると経費の面ではかなりの差がある。この装置はブラウン管の螢光面に当る部分を連続的に流れる油膜でおきかえ、映像信号に対応する電子ビームの衝突で起る油膜の瞬間的な変形を一種の反射鏡として利用し、外部の高輝度の光源からの光をここで反射して放出して輝度の高いビデオ映像を得る装置である。赤青緑の色フィルターをビデオ信号と同期してそう入することによってカラー画像を作ることもできる。

この他にまだ完全に実用されている例はないようであるが、全く別のアイディアがある。物標の方位、距離、視角などに応ずる映像を多数のカラー・スライドにしてストアしておき、計算機の出力に応じて対応するスライドを抽出、投写する。一般の映画の例から理解されるように 1/15 秒程度以下の間隔で画像をさしかえて行けば人間の視覚はそれを連続した変化と知覚すると言われている。

## 2.6 設計方針

上の各節に述べた考え方や実績を基礎とし、一方本部会の研究予算の規模を考慮に入れた上で委員会で次のようなシミュレータ設計方針を決定した。

### (1) 数学モデルと計算機

#### (i) 船の運動：

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1' T_2' \left( \frac{L}{V} \right)^2 \ddot{\phi} + (T_1' + T_2') \left( \frac{L}{V} \right) \ddot{\phi} + \dot{\phi} + \alpha' \left( \frac{L}{V} \right)^2 \dot{\phi}^3 = K' \left( \frac{V}{L} \right) \delta + K T_3' \dot{\delta} \\ T_4 \dot{V} + V + K_2 \dot{\phi}^2 + K_3 \delta^2 = K_4 n \end{array} \right. \quad (2.6.1)$$

$$(2.6.2)$$

このモデルは 2.4 節の MODEL I に相当する。広い外洋から港湾へ近づくあたりに相当し速力は大型タンカーを対象として  $5^{KT} \sim 15^{KT}$ 、主機速力の設定変更は時たま、そして徐々に行なわれる程度で急速な反転とか、一時的 boosting などはない。従って操縦はほとんど操舵だけで行なわれると考える。もっとも操舵に伴なう速力の変化は考えに入れる (2.6.2)。

$\phi$  : 回頭角、 $\delta$  : 舵角、 $V$  : 船速 ( $m/s$ )、 $n$  : 主機回転数、その他の係数は船によって定まる。

#### (ii) 船位と他船または港湾物標の関係

図 2.6.1 に示す。

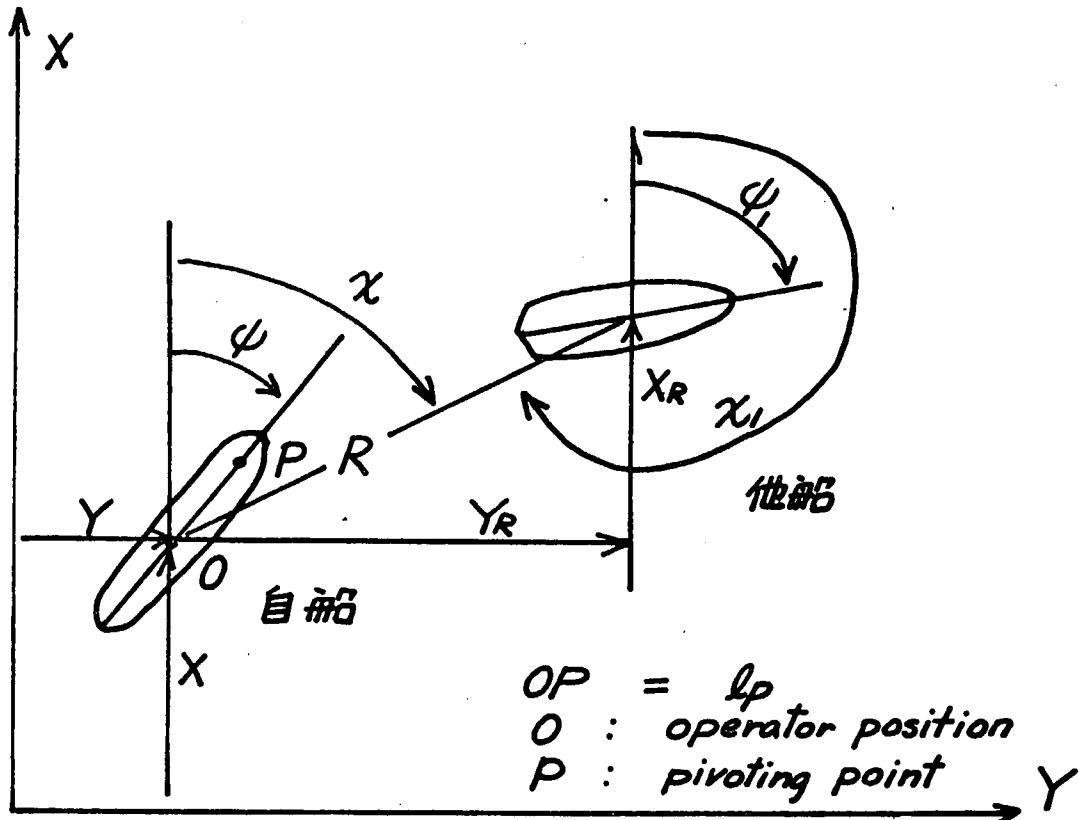


図 2.6.1 自船位と他船の見合関係

$$\left. \begin{array}{l} X = \int_0^t V \cos \phi dt - l_p \cos \phi \\ Y = \int_0^t V \sin \phi dt - l_p \sin \phi \end{array} \right\} \text{自船} \quad (2.6.3)$$

$$\left. \begin{array}{l} X_1 = X_{01} + V_1 \cos \phi_1 \cdot t \\ Y_1 = Y_{01} + V_1 \sin \phi_1 \cdot t \end{array} \right\} \text{他船} \quad (2.6.4)$$

港湾物標など静止物標の場合は  $V_1 = 0$

$$X_R = X_1 - X, \quad Y_R = Y_1 - Y, \quad R = \sqrt{X_R^2 + Y_R^2} \quad (2.6.5)$$

$$\chi = \sin^{-1} \frac{Y_R}{R} \quad (2.6.6)$$

$$\chi_1 - \phi_1 = 180^\circ + \chi - \phi_1 \quad \text{他船相対姿勢角} \quad (2.6.7)$$

#### (ii) 操 舵 機

$$\begin{aligned} T_E \dot{\delta} + \delta &= \delta^* \quad \text{at} \quad \delta^* - \delta \leq \delta_C \\ T_E \dot{\delta} &= \delta_C \quad \text{at} \quad \delta^* - \delta \geq \delta_C \end{aligned} \quad (2.6.8)$$

汎用される電動油圧操舵機の特性にもとづく。 $\delta_C = 6^\circ$   $T_E \doteq 2 \text{ sec}$  が普通である。船によって余り変らぬ。

#### (iv) 計算機

市販されるアナログ計算機の高精度機種の仕様を一部変更して使用する。アナログとディジタルの選択については委員会内にも両意見があったが、(1)現在考へている操船シミュレータの数学モデルに対してはアナログ計算機で十分の性能が出せること、(2)経費面でアナログの方が有利であることからアナログ型が採用された。一般論としてアナログ、ディジタル両計算機にはそれぞれの長所があり適材適所に使うべきである。実時間シミュレータにおいてはアナログの長所が生きて来る局面も多いから、場合に応じて両者を使いわけることがcost/benefit的に考へても最適条件になるであろう。

#### (2) 模擬船橋内計装

種々の条件から考へてVisual Displayのスクリーン半径が約4m程度になるから模擬船橋の横幅は5m程度となり、巨大タンカーとは寸法が合わない。しかし今考へているシミュレーションが(1)に述べたように沿岸航行から港湾への接近までを対象とすることを考えればまず問題はないであろう。前後方向に関しては視角を揃える必要があり、そしてこれは可能である。

操舵スタンド、主機操作ブリッジレバー、コンパス、レビータなどはなるべく実物を装備し、インターフェイスを工夫することにする。

#### (3) Visual Display

既に述べたようにVisual Displayのメカニズムは最も工夫を要するところであり、われわれの調査でも多くの方式を検討した。その結果SR151操縦シミュレータでは次の2方式を併用することにした。

##### (i) 遠方物標の投影

船橋頭上に点光源をおき、それを取り巻く円筒状のスライドに空、海、遠方物標の画像を描く。自船の回頭角だけ円筒スライドを回転させれば周囲のスクリーン上の映像も船の回頭に応じて左右に移動する。これがスクリーン上の背景となり、この上に次項に述べる近接物標の映像が重複投写されることになる。

##### (ii) 近接物標の投影

他船、ブイ、港湾物標などのうち1個をえらび、式(2.6.7)の他船相対姿勢角で回転する台の上にのせる。一定距離はなしてズームレンズ付カラーテレビカメラをおき、物標と自船の距離に応じてズームレンズを駆動する。こうして得られた近接物標の映像信号はその物標の大きさと形を模擬している。これを高輝度プラウン管とショミットレンズ・反射鏡の光学系でスクリーンに投影するが、この投影器は船橋頭上に設置され、そして自船船首から( $\chi-\phi$ )の角度に光軸が来るよう制御されている。これで1個の近接物標の映像がスクリーン上に現われる。これを2個以上にするためには同様の機構を増設すればよいが、本部会の研究においてはひとまず1個だけで出発することにする。

なお、本船の船首部は別のスライドプロジェクタで投影することにする。

以上のVisual Display装置全体のスケッチを図2.6.2に示す。

#### (4) データ処理

すべての信号はアナログ信号で出て来る。モニタとしてX-Yレコーダー1個、6ペン・インク書きオシログラフを使用する。この他別途調達したデータレコーダとA/D変換器を使い、紙テープ出力を得て汎用のミニコンピュータでデータ処理を行なう。

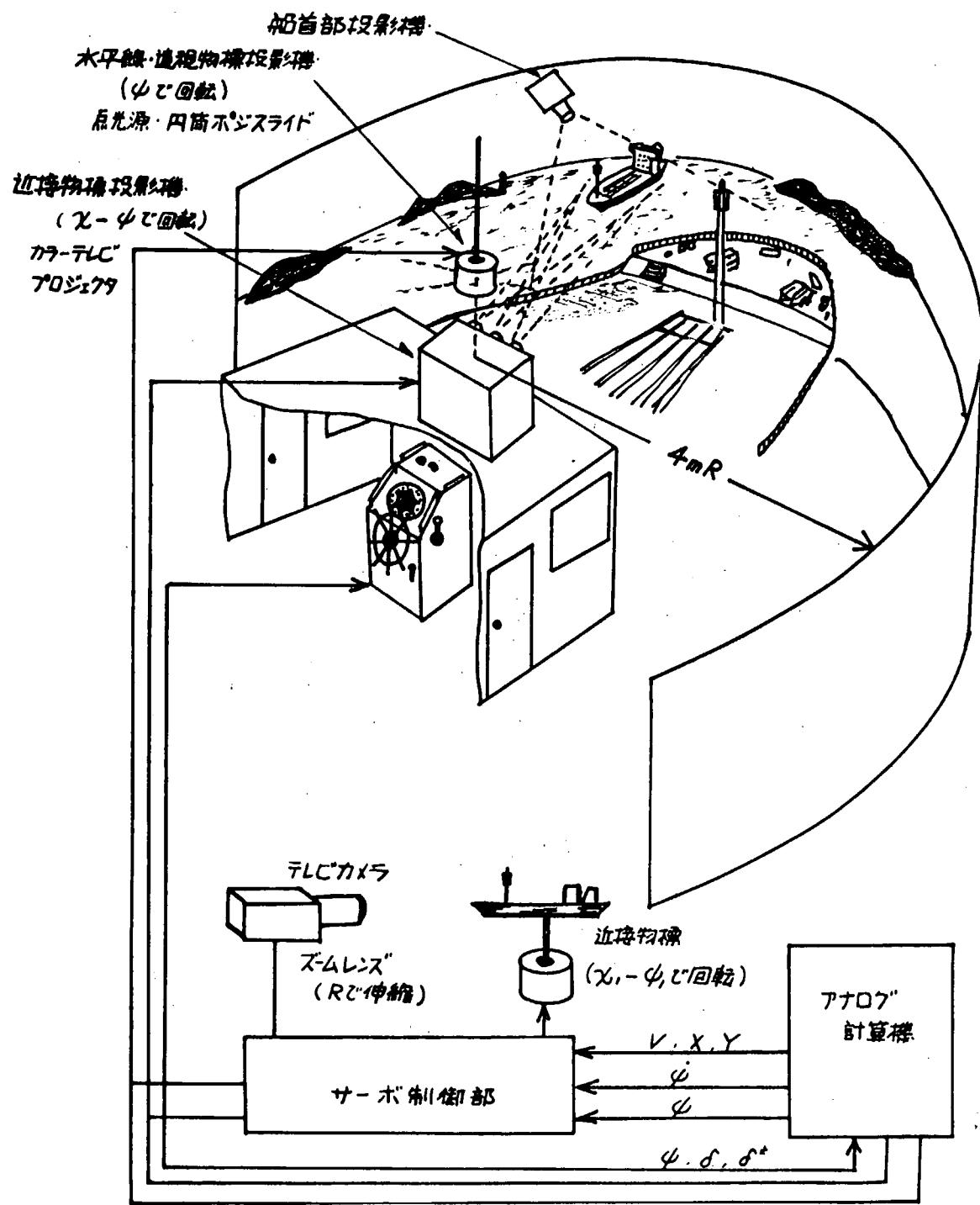


図 2.6.2 SR151操縦シミュレータの Visual Display の構成

## 2.7 対象とする船の特性、模擬すべき操船状況の設定と検討すべき新計装

詳細については各年度にわたって決定実施して行くが、概略の方針として次のようなものを考える。

### (1) 操船状況

- (a) 一定時間定針し一定角度変針後再び定針する。
- (b) 遠方に現われた小島を左(右)舷に見て左(右)へ回りこむ。
- (c) 遠方に現われたブイにけい留すべく接近してゆく。
- (d) いろいろの見合角の権利船 — こちらが避ける義務のあるゆきあい船 — を避航する。

### (2) 対象船舶

特性の分っている 200,000 DWT の弱不安定タンカーを母型とし、これを 500,000, 700,000, 1,000,000

DWT に拡大したものをまず考える。

次に 500,000, ならびに 1,000,000 DWT 型について不安定の程度を強くしたもの数種を取り扱う。

速力は全速約 15kt, 港内全速約 10kt を中心に若干の変更を考える。

### (3) 検討すべき新計装

- (a) 角速度計の付加
- (b) Yaw-damper auto-pilot システム
- (c) Yaw-rate Wheel
- (d) Position Plotter
- (e) Prediction Display
- (f) Course Wheel (Auto-Pilot を介する操舵装置)

## 参考文献

- (1) 野本、小瀬 : 人間が操舵する船の操縦運動に関する実験的研究(一)  
日本造船学会論文集 132号 1972
- (2) 小瀬、小林 : 避航操縦シミュレータの製作とその応用例  
日本航海学会論文集 50号 1973
- (3) J.D.Manen : The Netherland Ship Model Basin Ship Handling  
and Manoeuvring Simulator, I.S.P., Vol17, 1970
- (4) N.H.Norrbin : Ship Manoeuvring with Application of Shipborne  
Predictors and Real-time Simulators, Jof M.E.S.  
Vol14 No.7, 1972
- (5) 日本海難防止協会 : 船員の技能向上のためのシミュレータ利用に関する調査研究 1973

### 3. 設備の進捗状況

既に述べたとおり本部会の研究はまず操船シミュレータを開発製作することから出発しなければならなかつたので、既存の設備を使用して行なうルーティン的な研究とは様相を異にする面がある。特に本年度は初年度であるから、シミュレータの開発、計画、設計に多くの時間と労力を費した。

2.に述べた設計方針に従い基本計画を7月末完成、日立電子株式会社に計算機、Visual Displayを含む大部分の装置を一括発注する方針を決定した。

計算機は11月完成、実施場所である大阪大学工学部造船学教室に搬入、据付を終った。その回路の構成を図3.1に示す。XYレコーダーとペン書オシログラフも同機に付属している。なお本機は日立アナログ・ハイブリッド計算機ALS-200Xの仕様を一部変更したものである。

操舵スタンドは東京計器製ハイレスコ・オートパイロットスタンドのオートパイロット回路を除去したものを実装することとし、10月完成、大阪大学の現地に搬入された。

計算機出力の回頭角信号とコンパスレピータ、ならびに舵輪回転角と計算機への指令舵角入力の2カ所のインターフェイスが未完成のため、この部分は実験用消耗品の部品を使用、本部会委員ならびに大阪大学、広島大学関係者の手で仮設インターフェイスを製作、計算機と接続して模擬船橋内に設置、Visual Displayを除く操船シミュレータが一応の体裁を整えたのが昭和49年12月末である。この設備を使用して行なった実験結果は4章に述べる。

また操舵スタンドの外形図を図3.2に示す。

残りの設備のうち、Visual Displayを構成する一部の機器（テレビカメラ、プロジェクターへッド等）は本年度完成したが、Visual Displayは全体が完成しないと最終調整ができないので、これらを用いた調査研究は年次計画に従い50年度に移行することになる。

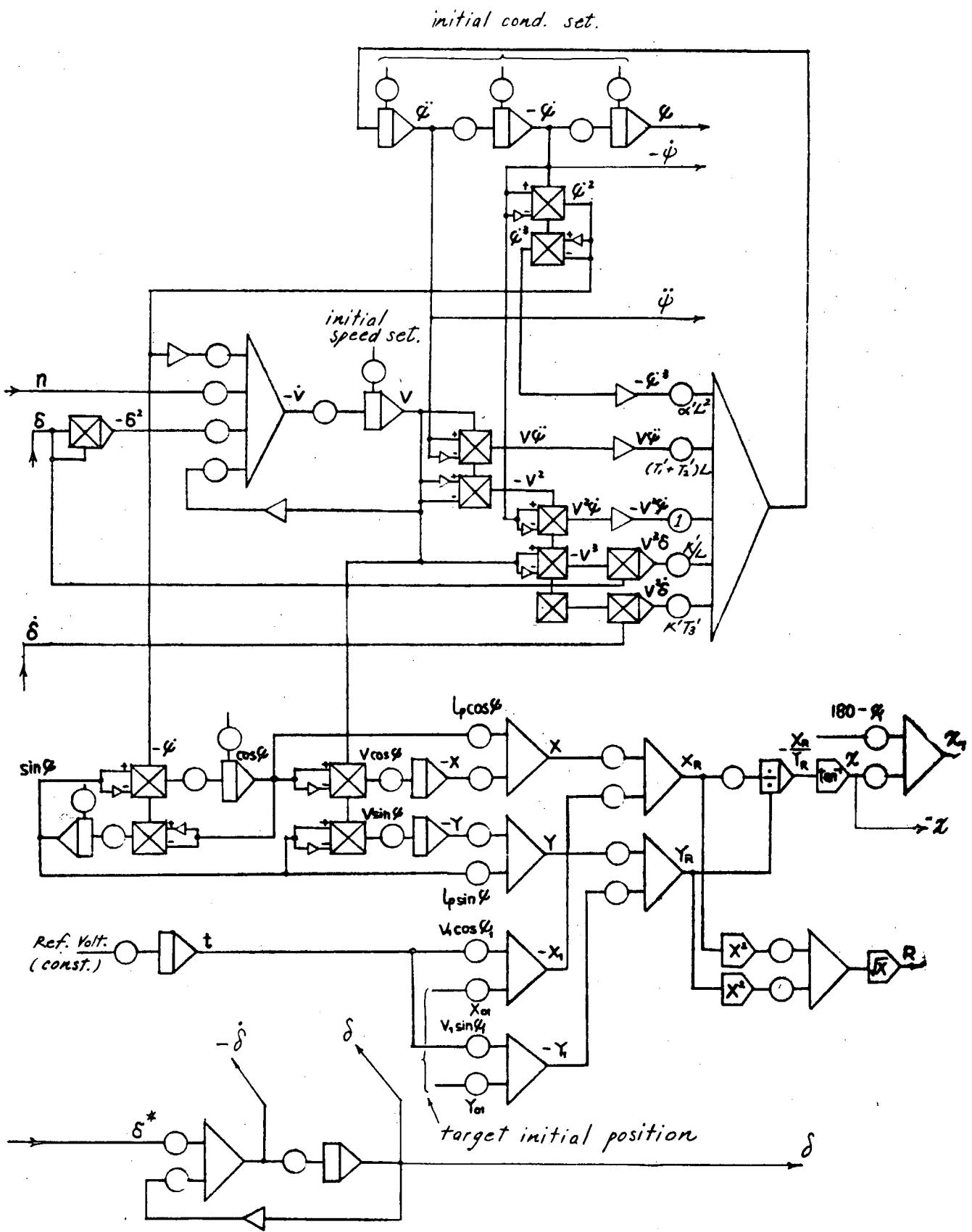


図 3.1 アナログ計算ブロック図

操舵スタンド

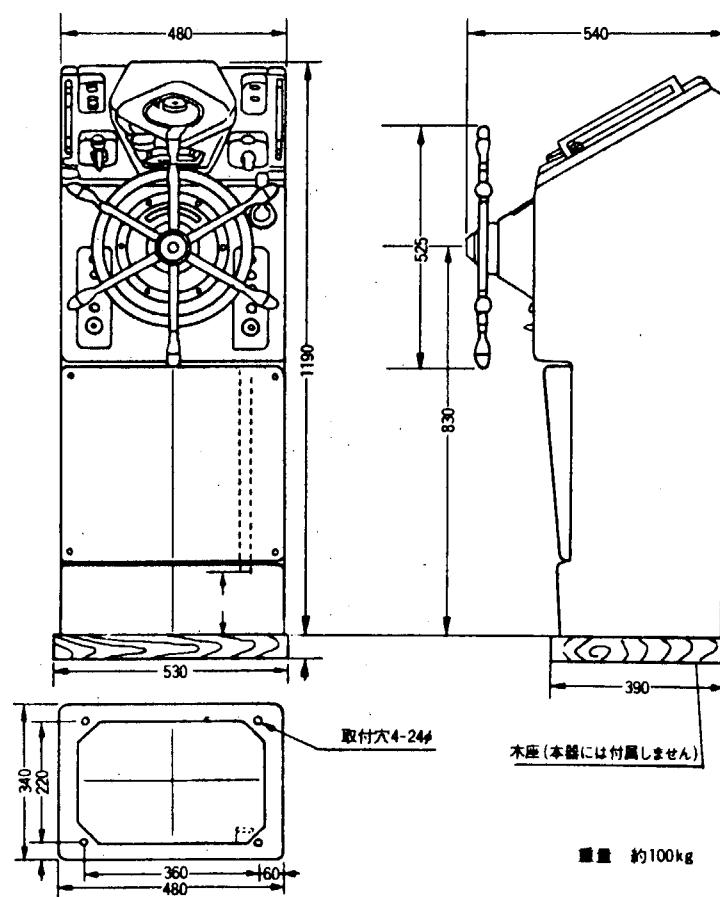


図 3.2 操舵スタンド外形図

## 4. 実験結果

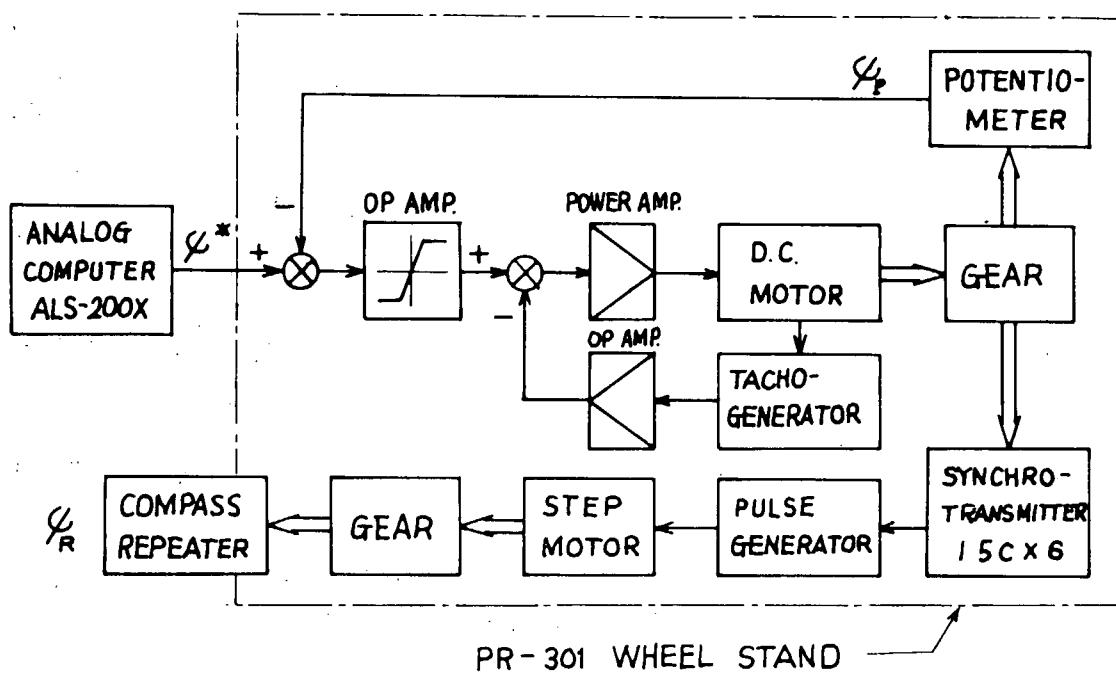
本年度においては年次計画に従い Visual Display を伴わない、計器航行における操縦システムの調査を行なった。夜間とか霧中などを想定すればこの状況はあながち非現実的ではなく、特に 4.2 に述べる "Yaw-rate Wheel" の評価には一応の成果をおさめたものと考える。

### 4.1 コンパス・レピータの応答特性

船用ジャイロコンパスで検出された船首方位角をレピータコンパスで表示する機構には数種の方式があるが、本シミュレータでは広く使われているセルシン検出、ステップモータ駆動の方式を採用した。この方式では親ジャイロコンパスに回転角検出用のセルシンを歯車を介して連結、セルシンの出力波型をステップ信号発生回路に送り、その出力でステップモータを回転させる。汎用されているのは  $1/8$  度が 1 ステップになるものである。

シミュレータでは親ジャイロの回転に当る量、すなわち船首方位がアナログ計算機の出力電圧であたえられる。回頭角 1 度が 0.1 V に相当する。従ってこの電圧に追従して回転角検出、セルシンを回転させるサーボ機構を付加してやれば、それからあとは船用のステップモータ駆動レピータコンパスを実装すればよいことになる。図 4.1.1 はこのシステムのブロック線図である。

ここで一つの問題はこのレピータ・システムの応答、特に周波数応答である。実際のシステムにくらべてカットオフ周波数に差があると、全操縦系の特性にも何らかの影響をあたえる可能性がある。図 4.1.2 はアナログ計算機の回頭角出力レピータ・コンパスの回転の周波数応答で、意外にカットオフ周波数が低い。換言すれば比較的ゆっくりした運動でも表示におくれが出ることになる。この原因の一部は計算機の回頭角出力をセルシンの回転に変換するサーボ機構にある可能性が大きい。図 4.1.3 はこのサーボ機構の周波数応答である。誤差信号に飽和要素をそう入するため非線形特性のサーボになるが、いずれにしても相当のおくれがこの部分に存在することは疑えないようである。図 4.1.4, 4.1.5 はこのサーボのループゲインを上げて特性の改良を図った結果であるが、まだ十分とはいがたい。一方では実船のレピータ・システムの周波数応答を正確に調査して、それに合致するよう、この部分の特性を補償すべきである。これは次年度の一つの問題点となる。本年度は一応この状態で次に述べる若干の計器航行のシミュレーションを行なうこととした。ここに述べた点がさらに詳細に詰めが行われても基本的な結論には変化はないものと考えてよい。



→ ELECTRIC SIGNAL

⇒ MECHANICAL TRANSMITTING

$\varphi^*$  : ANALOG-COMPUTED  $\varphi$  SIGNAL

$\varphi_p$  :  $\varphi$  SIGNAL AT POTENTIOMETER

$\varphi_R$  :  $\varphi$  SIGNAL AT COMPASS REPEATER

図 4.1.1 BLOCK DIAGRAM OF COMPASS REPEATER

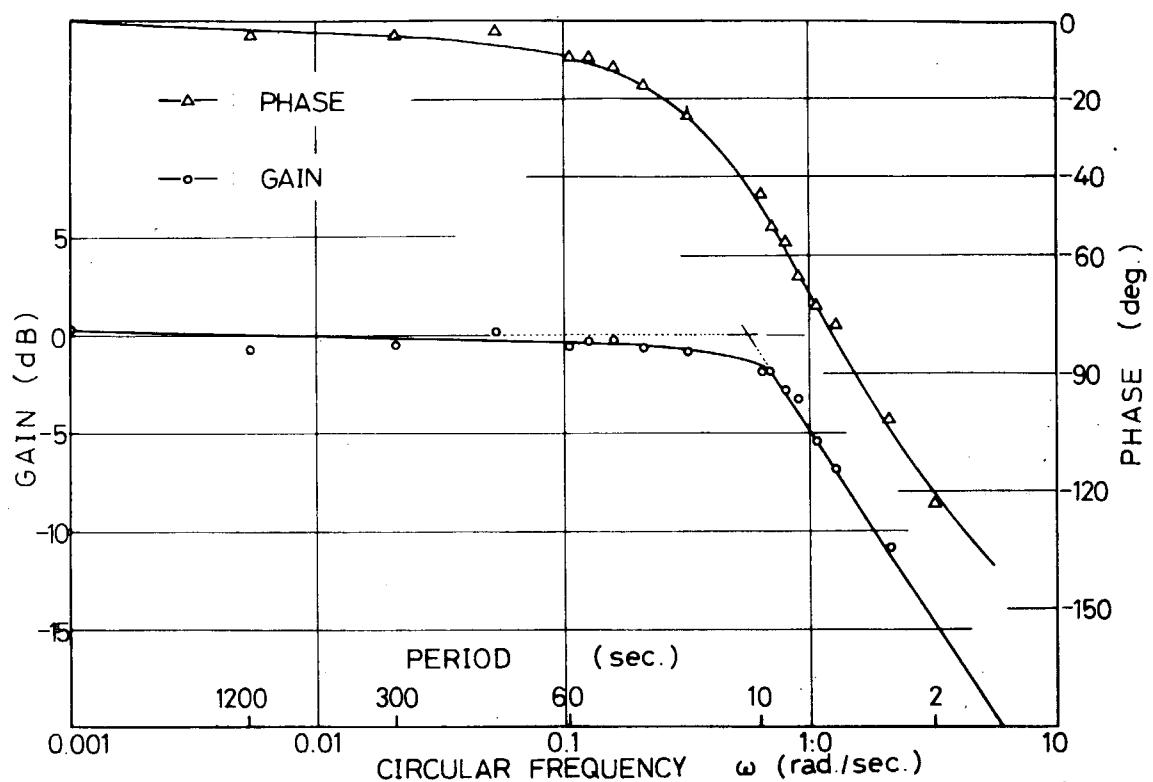


図 4.1.2  $\phi^* - \phi_R$  RESPONSE

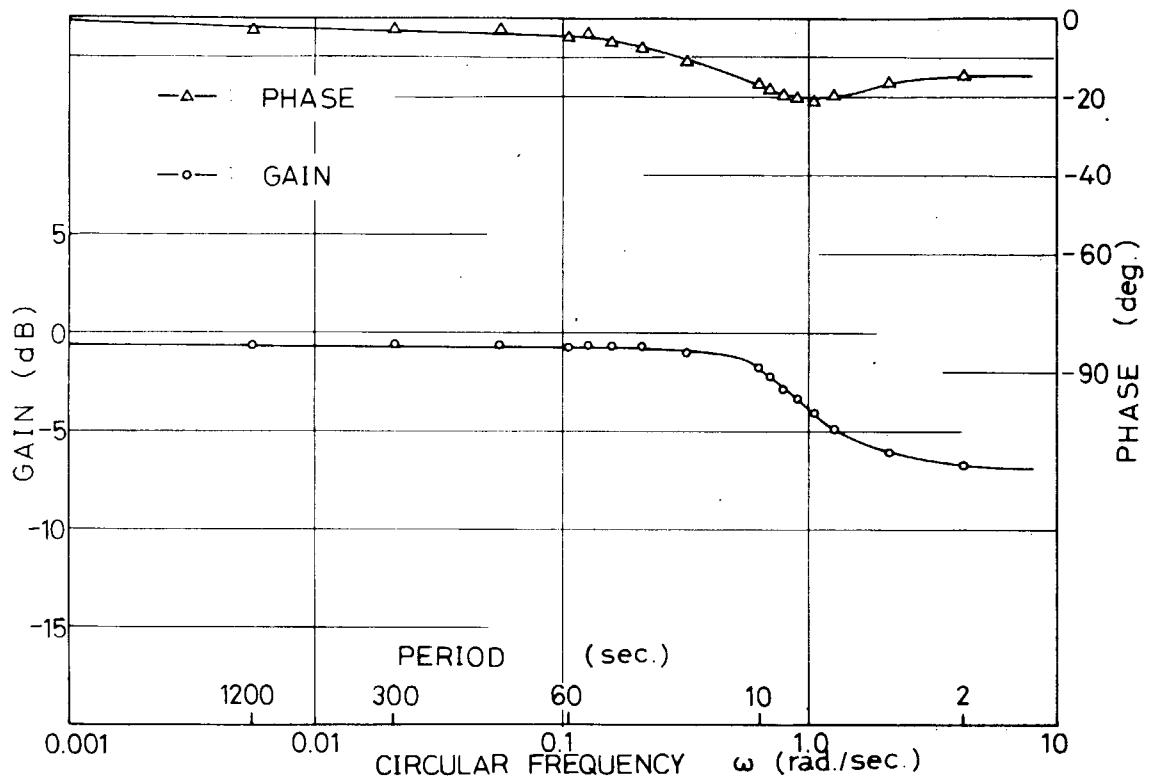


図 4.1.3  $\phi^* - \phi_P$  RESPONSE

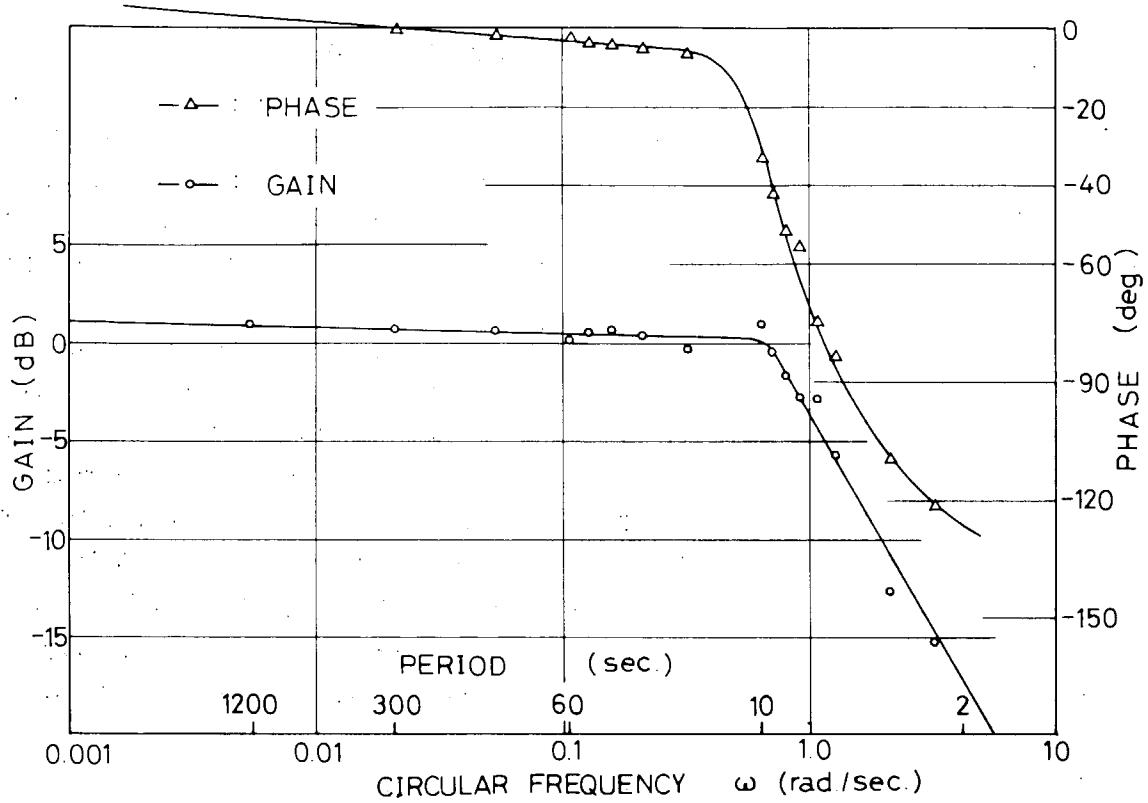


図 4.1.4  $\phi^* - \phi_R$  ( $\times 20$  GAIN) RESPONSE

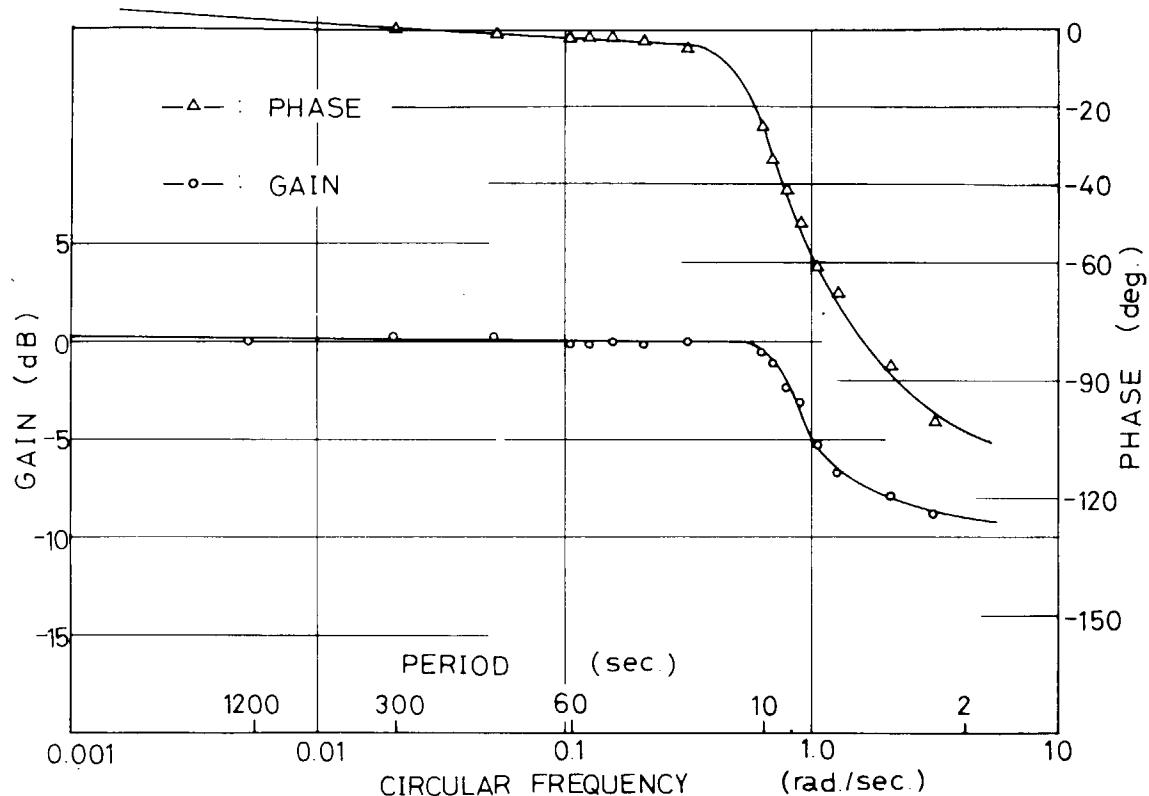
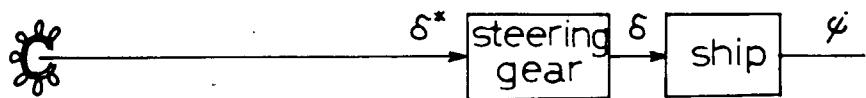


図 4.1.5  $\phi^* - \phi_P$  ( $\times 20$  GAIN) RESPONSE

## 4.2 Yaw-rate Wheel 方式操舵コントロールを使用した保針と変針

在来の動力操舵装置では操舵員が握る Steering Wheel の動きに応じて舵角が設定される機構になっている。ここに述べる Yaw-rate Wheel 方式は Steering Wheel で舵角を指令するかわりに回頭角速度を指令する操舵装置である。従来の操舵系と本操舵系をブロック図で示すと図 4.2.1 となる。従来の“あて舵”操作は自動的に加えられるので操舵員は意識的に行って舵を行なう必要がない。あたかも全く別の船を操縦している感覚を与える。操縦性理論の言葉で言えば操縦性指数が変わった感を与え、中でも特に追従性指数が小さくなつて、追従性能がよくなる。

この Yaw-rate Wheel を使つた保針と変針のシミュレータ実験例を以下に示す。操舵スタンドのレビータ・コンパスだけに頼つて、保針および変針を行なう。船は 20 万トンタンカー、弱不安定の操縦性能を有する。本船の旋回特性曲線は図 4.2.2 に示されるもので、約  $4^{\circ}$  の不安定ループ幅をもつ。また、操縦性指標等は表 4.2.1 に掲げる。通常の操舵装置による操船と比較するために、次の 2 つの操舵を例にとっておいた。まず、第一の操舵はステップ操舵であり、Steering Wheel の動き  $\delta^*$ 、実際舵角  $\delta$ 、回頭角速度  $\dot{\phi}$  やび回頭角  $\phi$  の時間的变化の様子を図 4.2.3 に示す。第二の操舵は保針および変針操舵で、対比させた結果を図 4.2.4 に示す。約 1 分間保針し、次いで右舷  $5^{\circ}$  の変針を行なう。6 分間定針したのち、次に左舷  $5^{\circ}$  の変針で原針路にもどり定針する。図中、従来の操舵装置では変針に必ずあて舵操作をしていること、保針に頻繁な細かい操舵を繰返していること、および周期 3 分、振巾  $1^{\circ}$  弱の自励ヨーイングをしていることが目につく、一方、Yaw-rate Wheel では Steering Wheel の動きが少なく、保針、変針がずっと容易である。



(Conventional Rudder Control)

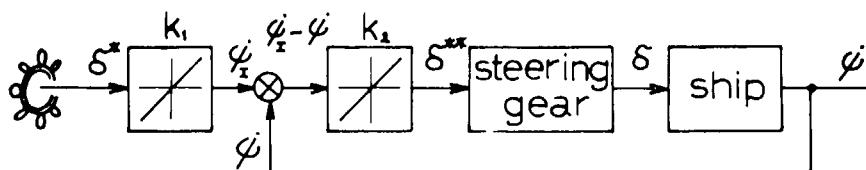


図 4.2.1 Yaw Rate Wheel のブロック図

$L \times B \times d$	$307^m \times 48.2^m \times 17.4^m$
$C_B$	0.85
$A_R / Ld$	1 / 69
$V_o$	14.6 kt. ( $7.5^m/s$ )

$K'$	-2.43
$T_1'$	-5.42
$T_2'$	0.349
$T_3'$	0.926
$\alpha'$	-0.008
$T_E$	3.12 sec.
$\delta_{max}$	2.3 deg/sec.

表 4.2.1 供試船の主要寸法および操縦性指數

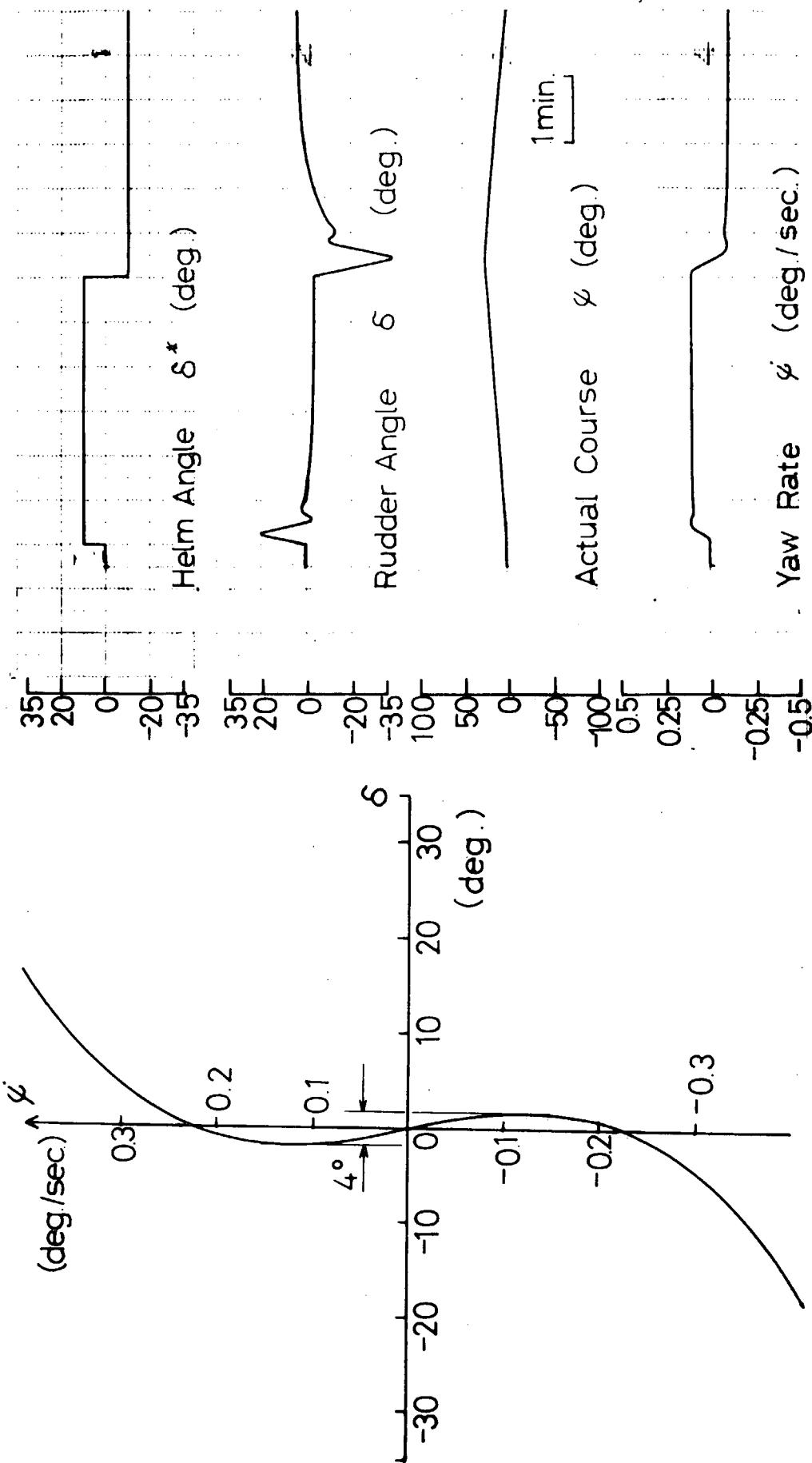


図 4.2.8 Yaw Rate Wheel のステップ応答

図 4.2.2 Simulated  $\delta-\dot{\varphi}$  Curve

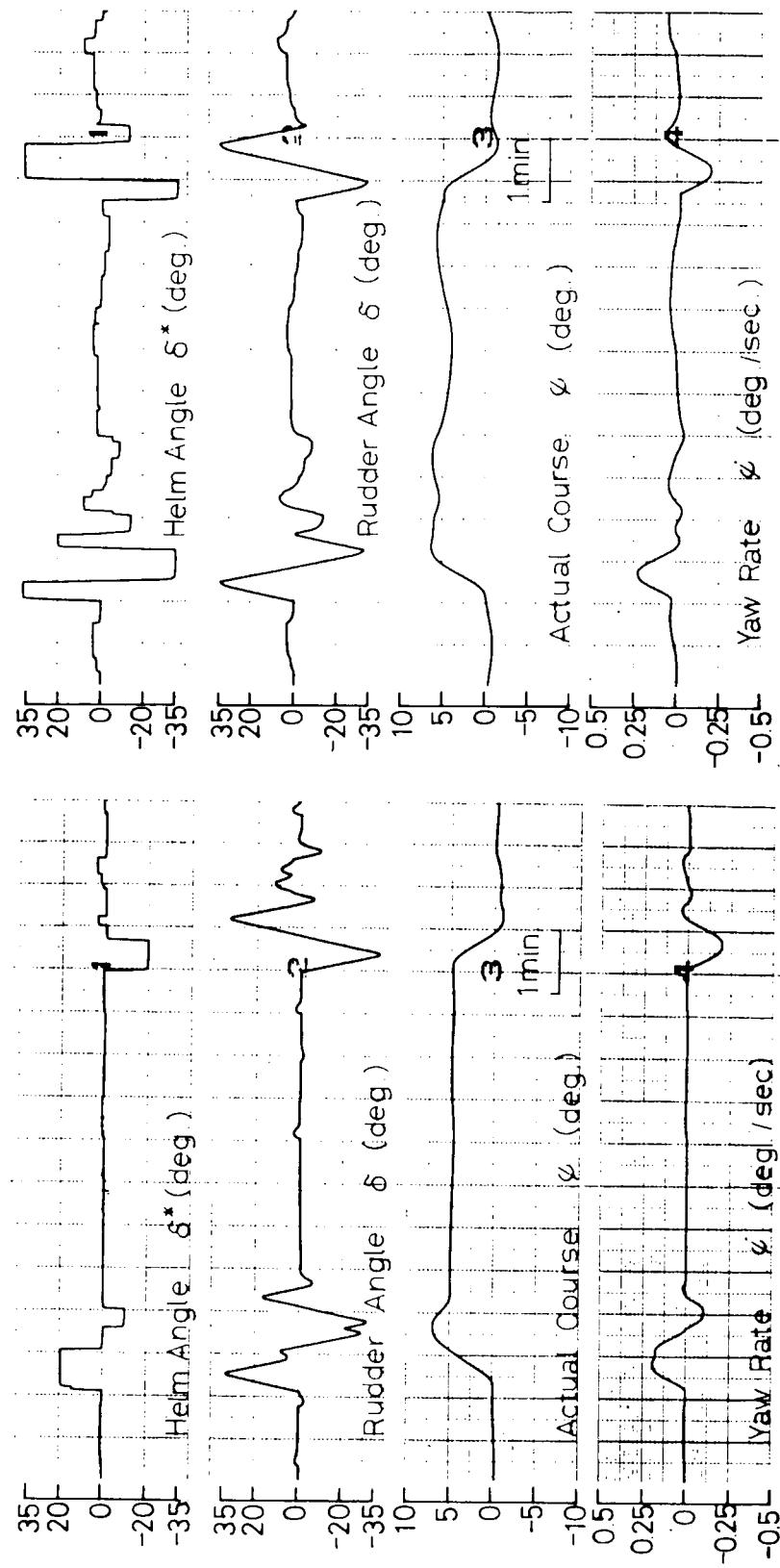


図 4.2.4 (a) Yaw Rate Wheel による保針・変針

図 4.2.4 (b) Conventional Rudder による保針・変針

#### 4.3 Yaw-rate Wheel による針路不安定タンカーの特性補償

4.2に示す針路不安定なタンカーであっても Yaw-rate Wheel を使うと操舵員はあたかも追従性のすぐれた針路安定な船を操縦しているかのような感覚を覚えるはずである。どの程度の効果が現われるかは操舵員・船の人間・機械系に関する人間工学的研究に委ねなければならない。しかし、船の追従性能がどの程度変えられるかは、ここでも推定することができる。以下この特性補償について考えてみることにする。

Yaw-rate Wheel 操縦系を簡単化して図4.3.1に示すブロック図で近似する。操舵機は1次遅れ要素で、船もまた線型1次系近似で表わされるものとし、設定要素および制御要素も線型に選び、その比例係数を  $k_1$  および  $k_2$  とする。

入力（目標値） $\delta^*$ に対する出力  $\dot{\phi}$  の関係を伝達関数の形で表わすと

$$\dot{\phi} = \frac{K}{1 + p \cdot T} \cdot \frac{1}{1 + p \cdot T_E} \quad k_2 (k_1, \delta^* - \dot{\phi}) \quad \text{の関係から}$$

$$\frac{\dot{\phi}}{\delta^*} = \frac{1}{1 + p \cdot \frac{T+T_E}{k_2 K+1} + p^2 \frac{T \cdot T_E}{k_2 K+1}} \left( \frac{k_1}{1 + \frac{1}{k_2 K}} \right) \quad (4.3.1)$$

Y.R.W  
 $p$  : 複素数

となる。一方通常の操縦系の入出力関係は

$$\frac{\dot{\phi}}{\delta^*} = \frac{1}{1 + \beta (T+T_E) + p^2 (T \cdot T_E)} \cdot (K) \quad (4.3.2)$$

C.S.W

である。(4.3.1), (4.3.2)式の比較から  $|k_2 K| >> 1$  に選べば Yaw-rate Wheel 系の時定数は十分小さくなる。この時(4.3.1)式は

$$\frac{\dot{\phi}}{\delta^*} = \frac{1}{1 + p \cdot \frac{T+T_E}{k_2 K} + p^2 \frac{T \cdot T_E}{k_2 K}} \cdot (k_1) \quad ; \quad |k_2 K| >> 1 \quad (4.3.3)$$

Y.R.W

となる。(4.3.2), (4.3.3)式の比較から、大型タンカーでは  $T_E \ll |T|$  であることを考慮して船の等価ゲイン定数と時定数を比べると表4.3.1のようになる。時定数は Yaw-rate Wheel 系では  $T/K \cdot k_2$  となり、 $T$  が負の針路不安定船でも必ず  $|T|$  の数分の一以下の正值をとり安定となる。一方、ゲイン定数は任意の  $k_1$  に選ぶことができるが、人間一機械系の観点から決定すべきものであろう。

前述したように  $|k_2 K|$  を 1 より十分大きくとればとるほど時定数は小さくなるが、大きくとれば Yaw-rate Wheel 系は振動系となる。これを防ぐために  $k_2$  の限界を調べてみる。(4.3.1)式を書きかえると

$$\frac{\dot{\phi}}{\delta^*} = \frac{1}{(1 + p \cdot \alpha)(1 + p \cdot \beta)} \cdot \left( \frac{k_1}{1 + \frac{1}{k_2 K}} \right)$$

$$\text{ここで } \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \left( \frac{T+T_E}{k_2 K+1} \right) \left\{ 1 \pm \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{T \cdot T_E}{(T+T_E)^2} (k_2 K+1)} \right\}$$

となる。系が非周期限界の状態となる  $k_2$  は

$$k_2 K = \frac{(T+T_E)^2}{4 \cdot T \cdot T_E} - 1$$

である。この時(4.3.1)式は

$$\dot{\phi}/\delta^* = \frac{1}{(1 + p \cdot 2 \frac{T T_E}{T + T_E})^2} [k_1 \{ 1 - \frac{4T}{(T+T_E)^2} \}] \quad (4.3.4)$$

Y.R.W

となる。

今、 $k_2 = \frac{1}{K} \{ \frac{(T+T_E)^2}{4T} - 1 \}$  なる臨界値を選んで (4.3.2), (4.3.4) 式の比較から、船の等価なゲイン定数と時定数を比べると略、表 4.3.2 になる。大型タンカーでは  $|T| \gg T_E$  であるから、臨界値  $k_2$  は  $k_2 K \approx T/4 T_E$  で与えられる。従って針路不安定タンカーの特性補償には Yaw-rate Wheel の調整係数  $k_2$  の目安として、 $1 \ll |k_2 K| \leq |T/4 T_E|$  を選ぶことで、追従性能をよくし、操縦を容易にすると期待される。ところが、船は浪・風等の外乱を必ず受けるものであるからこの影響が直接 Yaw-rate Wheel の角速度フィード・バックに現われて操舵頻度と舵角振巾を大きくすることになる。この問題を無視して実用化することはできない。今後、角速度における外乱の処理が重要な課題である。

System	Gain Constant	Time Constant
Conventional Steering Wheel	$K$	$T$
Yaw Rate Wheel	$k_1$	approx. $T/Kk_2$

ただし  $|k_2 K| \gg 1$

表 4.3.1

System	Gain Constant	Time Constant	Remarks
Conventional Steering Wheel	$K$	$T$	
Yaw Rate Wheel	$k_1 \left\{ 1 - \frac{4 \cdot T T_E}{(T + T_E)^2} \right\}$	$2 T_E$	$k_2 = \frac{1}{K} \left\{ \frac{(T + T_E)^2}{4 T T_E} - 1 \right\}$
Do. : $ T  \gg T_E$	$k_1 \left\{ 1 - \frac{4 T_E}{T} \right\}$	$2 T_E$	$k_2 = \frac{1}{K} \left\{ \frac{T}{4 T_E} - 1 \right\}$

表 4.3.2

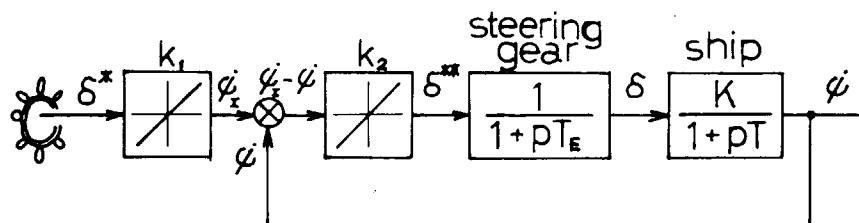


図 4.3.1 Yaw Rate Wheel の演算ブロック図  
(船は一次系で近似)

#### 4.4 Course Wheel による保針・変針

"Course Wheel" 方式は従来のオートパイロット装置にある Course (針路指令ノブ) を Steering Wheel で動かすもので、Wheel は Course を設定することになる。この装置が有用であるためには、針路変更に要する時間が短かく、しかも行過ぎることなく、新針路に整定する必要がある。そのためには、コース誤差を修正する舵の動き (P 制御) と回頭角速度を減衰させるための動き (D 制御) の比率を上手に選ぶ必要がある。実際には、非線型制御の導入など高度の制御も考慮に値するがここでは線型制御だけで考えてみる。また、4.3 にならう船を一次系でおきかえるとこのシステムのブロック図は図 4.4.1 のようになる。

$$\begin{aligned}\text{制御法則は } \delta^{***} &= k_2 (\dot{\phi}_I - \dot{\phi}) \\ &= k_2 \{ k_3 (\phi_I - \phi) - \dot{\phi} \} \\ &= k_2 \cdot k_3 (\phi_I - \phi) - k_2 \dot{\phi}\end{aligned}$$

で示され、 $k_2$  は従来のオートパイロットで使われる微分制御の係数、 $k_3$  は同じく比例制御の係数／微分制御の係数なる比で表わされるものである。

前記 4.2 の船型について Course Wheel のシミュレータ実験例を図 4.4.2 に示す。Steering Wheel を  $5^\circ$  に設定するだけで変針と保針を同時に実行し、すばやい応答と整定を示している。

ここで調整係数  $k_3$ 、 $k_2$  についての理論的推定を行なうために 4.3 に述べた手法を使って  $k_3$ 、 $k_2$  を決める。伝達函数は

$$\frac{\phi}{\phi_I} = \frac{1}{1 + \frac{1+k_2 K}{k_2 K} \cdot \frac{1}{k_3} \cdot p \{ 1 + p \cdot \frac{T+T_E}{1+k_2 K} + p^2 \frac{T \cdot T_E}{1+k_2 K} \}}$$

となる。ここで Yaw-rate Wheel の非周期限界の条件を適用すると

$$\frac{\phi}{\phi_I} = \frac{1}{1 + \frac{1+k_2 K}{k_2 K} \cdot \frac{1}{k_3} p (1 + p \cdot \alpha)^2}$$

$$\text{ここで } k_2 K = -\frac{1}{4} \frac{(T+T_E)^2}{T \cdot T_E} - 1$$

$$\alpha = 2 \cdot \frac{T \cdot T_E}{T+T_E}$$

になる。さらに Course Wheel としての非周期限界を考えると  $k_3$  は

$$k_3 = \frac{1+k_2 K}{k_2 K} \cdot \frac{2}{27} \cdot \frac{T+T_E}{T \cdot T_E}$$

となり、この時

$$\frac{\phi}{\phi_2} = \frac{1}{(1+\beta \cdot p)(1+3\alpha \cdot p)^2}$$

$$\text{ここで } \alpha = 2 \cdot \frac{T \cdot T_E}{T+T_E}$$

$$0 < \beta < \alpha$$

である。大型タンカーで応答性をよくするために  $k_2$  の値を

$|k_2 K| >> 1$  に選べば、 $|T| >> T_E$  を考慮すると  $k_3$  の値は  $k_3 \approx \frac{2}{27} \cdot \frac{1}{T_E}$  で最大の時定数は約  $6 T_E$  となる。 $k_3$  は船型にかかわらず一定値でよい。

従って Yaw-rate Wheel を組込んだ Course Wheel では調整係数  $k_2$  のみを船型により設定すればよい。なお、この装置の問題点は 4.3 に述べられたものと同じである。

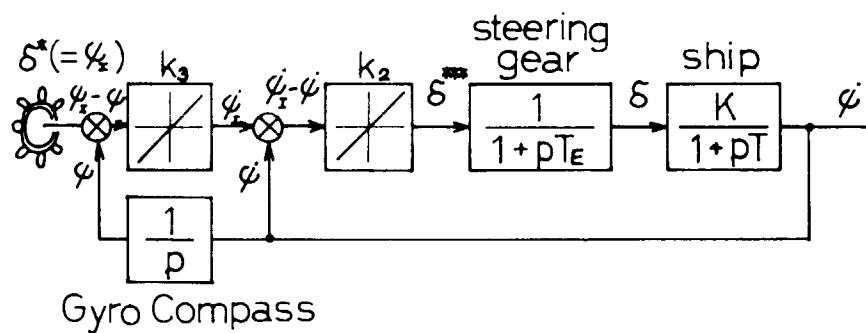


図4.4.1 Course Wheel の演算ブロック図

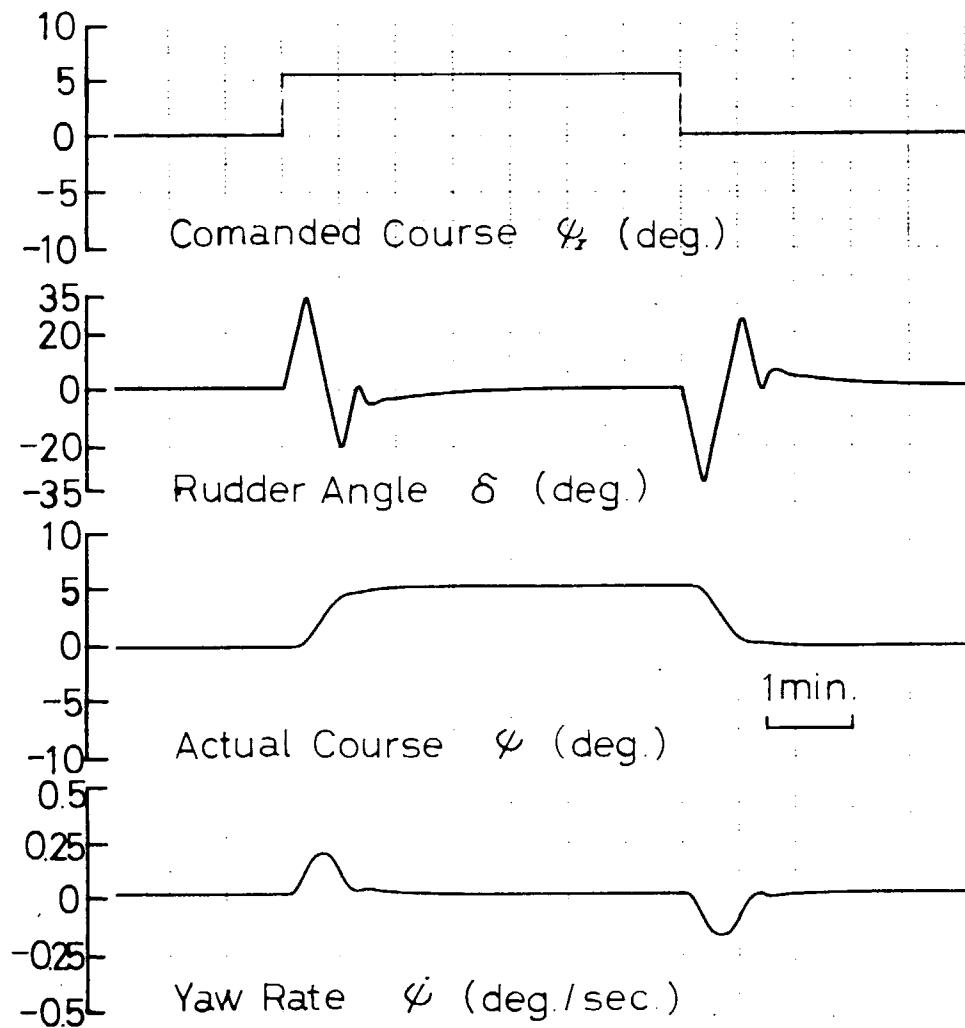


図4.4.2 Course Wheel による保針・変針

## 5. 結 言

以上をもって昭和49年度報告を終る。初年度のため製作途上の設備もあるが、本年度に予定された事業はひととおり完了したものと考える。関係者御一同に御協力を感謝する。

### 参考文献

1. G.T.Hoefl & I. Oldenkamp : Construction, Operation and Capabilities of the NSMB Ship Manoeuvring Simulator, NSMB Publication No.382, 1971
2. N.H.Norrbin & AKe Williams : The SSPA Steering & Manoeuvring Simulator, Allmän Rapport från SSPA, Göteborg 1974.
3. N.H.Norrbin : Ship Manoeuvring with Application to Ship-born Predictors and Real-time Simulators, Proceedings of an International Symposium on Directional Stability and Control of Bodies Moving in Water, London 1972.