

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51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50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。

本研究は、実時間で作動する操船シミュレータを開発製作し、これを使用して船と操船者を一体とするマン・マシン系制御問題の立場から操船問題の分析研究を行なうものであって、3カ年研究の第2年度である本年度はシミュレータの視界表示部分を製作、調整の上、模擬操船実験を行って、その性能を評価し、また、数学モデルの改良及び解析法の検討等を行った。

委 員 名 簿 (敬称略、順不同)

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)
	烏野 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)	小黒 英男 (船舶技術研究所)
	森 正彦 (石川島播磨重工業)	原 潔 (神戸商船大学)
委員	伊藤 憲治 (川崎重工業)	今田 東行 (川崎汽船)
	日高 正孝 (日本海事協会)	岡本 洋 (川崎重工業)
	音成 卓哉 (日本鋼管)	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 初蔵 (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 斉 (三菱重工業)
	森川 卓 (日本船主協会)	渡辺 久記 (三井造船)
	前島 孝雄 (北辰電機製作所)	広川 洋一 (東京計器)

委 員 会 等 開 催

第5回幹事会	昭和50年 6月11日 (於IHI田無)
第4回委員会	昭和50年 8月 8日 (於阪大工学部)
第6回幹事会	昭和50年 8月27日 (於阪大工学部)
第7回幹事会	昭和50年 9月25日 (於日本船舶倶楽部)
第8回幹事会	昭和50年12月 9日 (於阪大工学部)
第9回幹事会	昭和51年 1月27日 (於阪大工学部)
第5回委員会	昭和51年 2月18日 (於日本船舶倶楽部)

大型化に対応する船舶操縦システムの調査研究

目 次

1. 緒 言	1
2. S R 1 5 1 操船シミュレータ設備の詳細	2
2.1 模擬船橋および内部計装	4
2.2 近接物標投影装置	4
2.3 遠景投影装置	6
2.4 スクリーン	6
2.5 自船船首部	6
2.6 電源および筐体	7
2.7 信号演算部	8
3. S R 1 5 1 シミュレータ設備の評価	11
3.1 視界表示部性能調査	11
3.1.1 調査目的	12
3.1.2 調査計画事項	12
3.1.3 調査実施日、状態および結果	14
3.1.4 参考資料	15
3.2 職業操船者のシミュレータ設備評価(感想、助言)	15
3.2.1 船 橋	15
3.2.2 スクリーン	18
3.2.3 自船船首部	19
3.2.4 相手物標	19
3.2.5 操船感覚	19
3.2.6 総合判定	19
4. 模擬操船実験	21
4.1 模擬操船の状況設定	21
4.1.1 模擬操船の種類	21
4.1.2 シミュレータ用海図	21
4.2 自船の要目ならびに運動特性の設定	26
4.2.1 自船の要目	26
4.2.2 自船の回頭運動の特性	26
4.2.3 速力変動の特性	27
4.2.4 主機回転数の制御特性	28
4.2.5 操舵機特性	29
4.3 操 船 者	39
4.4 操船シミュレーションの概要	39
4.5 操船シミュレーションの結果	31
4.5.1 保針・変針操船	31
4.5.2 避航操船	38
4.5.3 入港操船	44

5. 数学モデルの問題点とその改良	5 1
5.1 前進速度およびプロペラ回転数の変化の影響	5 1
5.1.1 従来の操縦運動モデルの構成とその問題点	5 1
5.1.2 回頭運動に及ぼすプロペラスリップの影響	5 1
5.1.3 X方向の運動モデル	5 6
5.2 速力変動モデルのための模型実験	6 2
5.2.1 実験の背景	6 2
5.2.2 実験の目的	6 2
5.2.3 実験の種類	6 2
5.2.4 実験の結果	6 3
5.2.5 前進方向応答方程式の適用限界	7 0
5.2.6 一般的な前進方向の応答方程式	7 4
5.3 操縦シミュレーション時に加える外乱について	7 6
5.3.1 加えるべき外乱の種類	7 6
5.3.2 風圧力が操縦運動に及ぼす影響	7 6
5.3.3 波浪によって誘起される船の回頭運動	8 3
5.3.4 潮流による船の位置変化	8 4
6. 解析方法の検討	8 5
6.1 保針・変針における操舵員モデル	8 5
6.2 避航操船解析の考え方	8 7
6.2.1 避航操船研究の目的	8 7
6.2.2 実験・解析の考え方	8 8
6.3 入港操船の解析法	8 8
6.4 船舶操縦システム研究の展望	9 1
6.4.1 機能の分析	9 1
6.4.2 データ処理能力	9 2
7. 参考文献	9 6

1. 緒 言

近年急速に進んだタンカーを主とする船舶の大型化、また、コンテナ船を中心とする高速化、さらに史上例を見ない海上交通の輻輳は船と操船者を一体とするマン・マシン系制御問題の立場から操船問題を分析する必要をもたらした。このような分析の結果、安全運航の指針、新しい計装を含む船舶操縦システムの開発、設計も可能となるであろう。

本研究はこのような背景の下に実時間で作動する操船シミュレータを開発製作し、これを使用して上記の操船問題の分析研究を行なうものであり、本年度は昭和49年度に続き第2年度に当る。

2. SR151 操船シミュレータ設備の詳細

49年度に引き続き上記設備が完成した。以下にその内容、要目、性能等を記載する。設備の一般配置を図2.1および2.2に、また座標系、記号等を図2.3に示す。

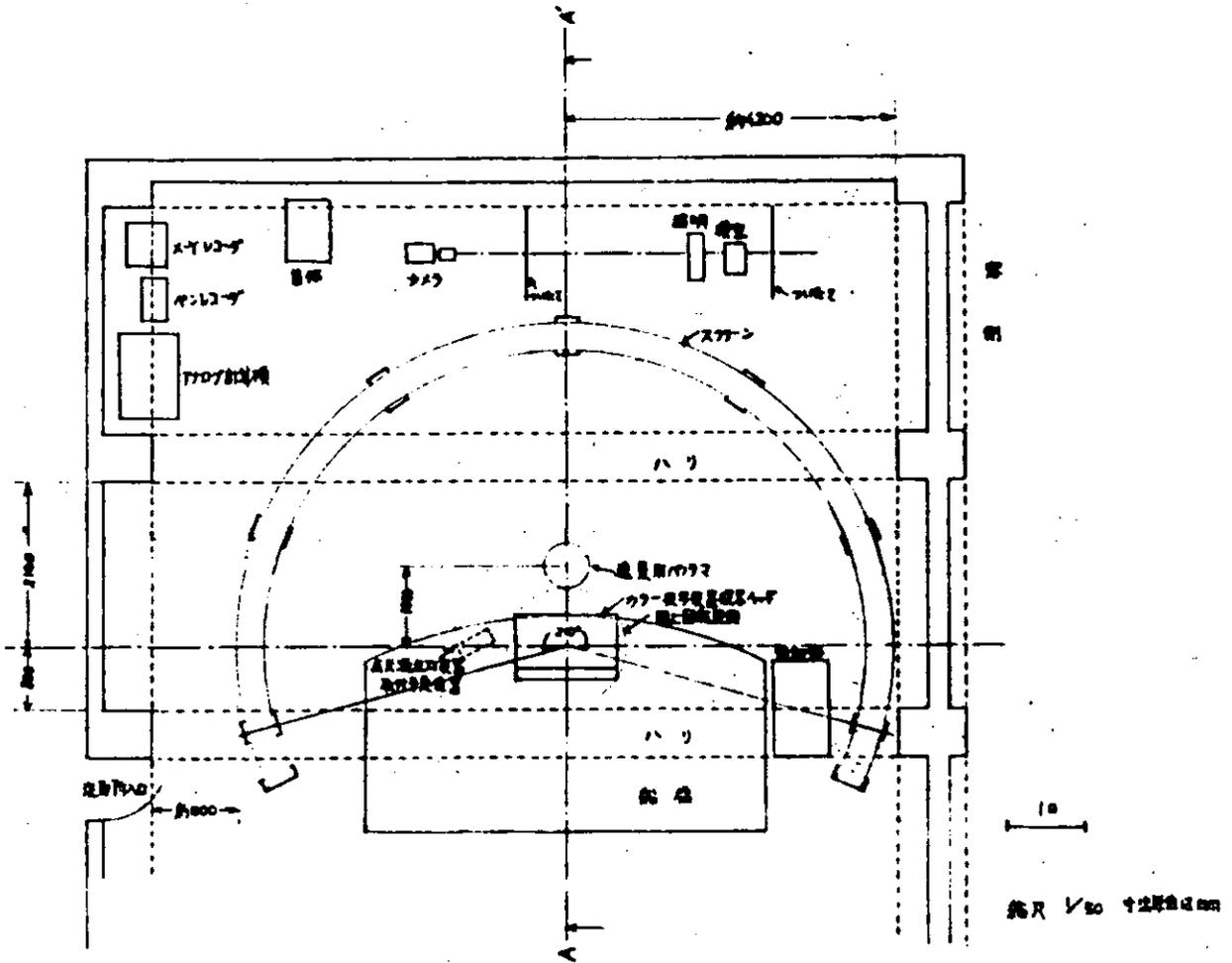


図 2.1 PLAN OF SIMULATOR ROOM

窓と天井と内部視野

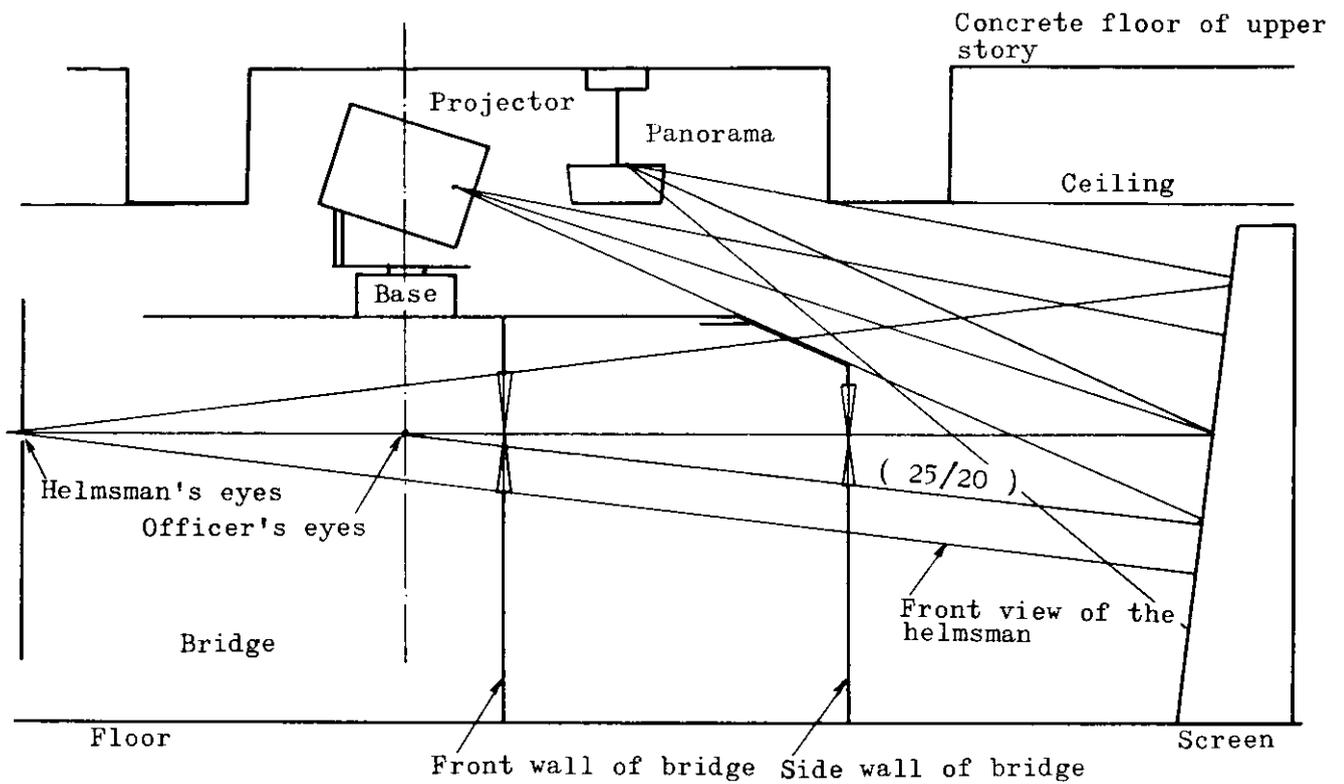


図 2.2 PROFILE OF SIMULATOR ROOM

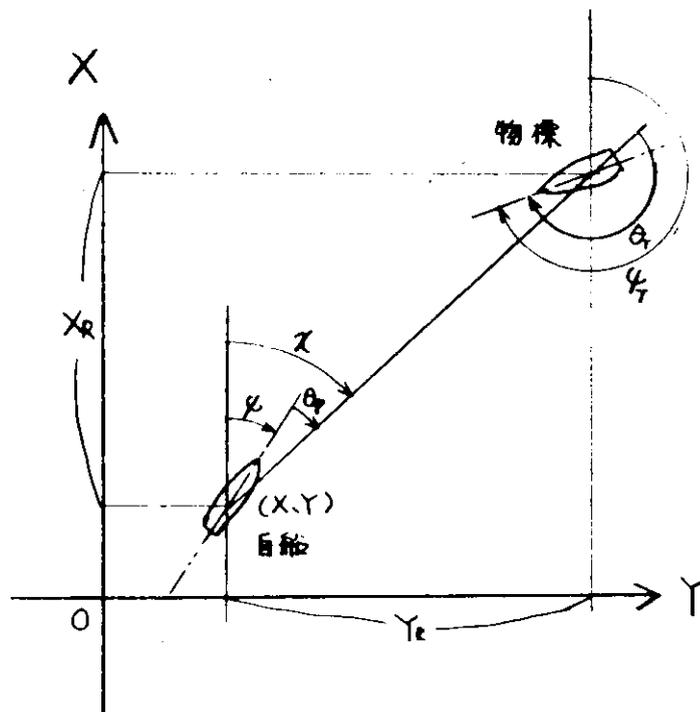


図 2.3 CO-ORDINATE & SYMBOLS

2.1 模擬船橋および内部計装

船橋は、幅4.4m、高さ1.9m、奥行き3.0mのほぼ直方体である。船橋の前面および側面には、高さ約50cmの窓があり、その有効視野は、航海士の位置で上下角60°、左右角210°、操舵手の位置で上下角15°、左右角130°である。前端には、高さ90cm奥行き30cmのコンソールデスクが設けてある。室内はすべてうす緑色、天井は白色である。

内部の計装は、操舵スタンド、レーダー・コンパス、エンジンテレグラフならびに舵角計、船速計、および回転数計である。また、実験によっては、X-Yレコーダを航跡プロッタとして使うことがある。

2.2 近接物標投影装置

近接物標（他船、港湾、島、浮標など）の投影方式の概略を図2.4に示す。物標の縮尺模型をカラーテレビカメラで撮影し、模擬船橋上のカラー投写装置に送出し、スクリーン上に拡大投影する。ここで画面上の物標の向き θ_T は模型の向きを制御することによって模擬し、画面上の物標の位置 θ_P はカラー投写装置の投影方向を制御することによって模擬する。また、自船と物標との距離 R_R はズームレンズを用いて模擬する。さらに、物標の種類は模型を交換することにより変えることができる。

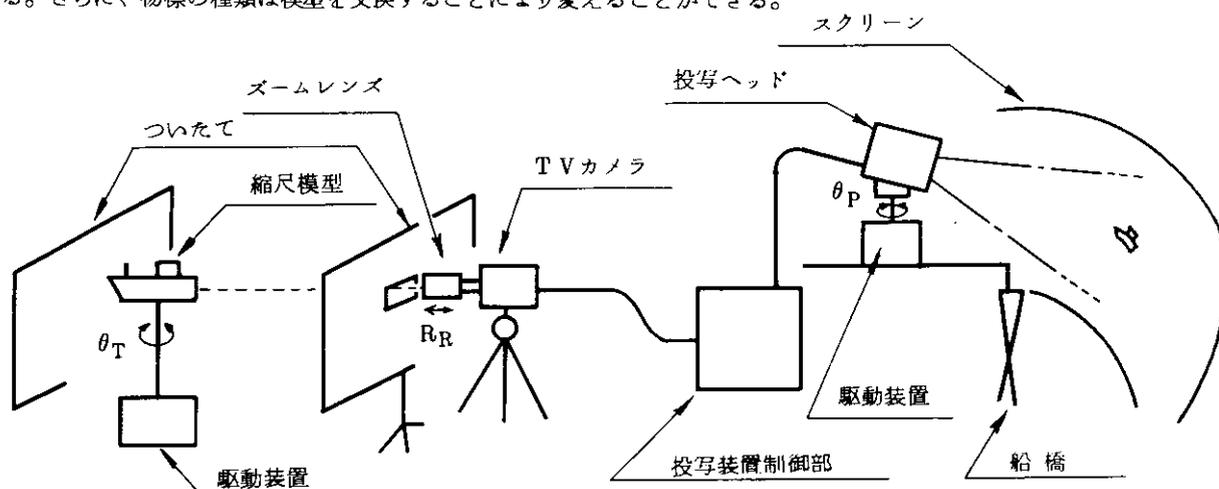


図2.4 近接物標投影方式

また、今年度に作成し使用した模型を表2.1に示す。

表2.1 物標模型

種類	形状	縮尺	実寸(cm)
大型船	船長300m大型タンカー	1/1000	30
中型船	船長150m外航貨物船	1/500	30
中型船	船長185mカーフェリー	3/2000	28
小型船	船長50m沿岸航路貨物船	3/1000	15
港湾	横幅 500m	3/5000	30
島	286m × 225m × 40m	1/1000	30
浮標	6m × 3.6m φ	1/200	1.8

2.3 遠景投影装置

図 2.5 に示すように上方に開いた透明円筒の外周に遠景を描いたパノラマを用い、その内側に点光源を置いてスクリーン上に表示する。パノラマは自船の回頭（ ψ ）に応じて回転し、無限遠景の変化を表わす。ここで、点光源はパノラマの回転軸に対して、ずれた位置に置いてパノラマがスクリーンの中心にない（約 1 m 前方）ことによって生ずるスクリーン上の歪を補正している。

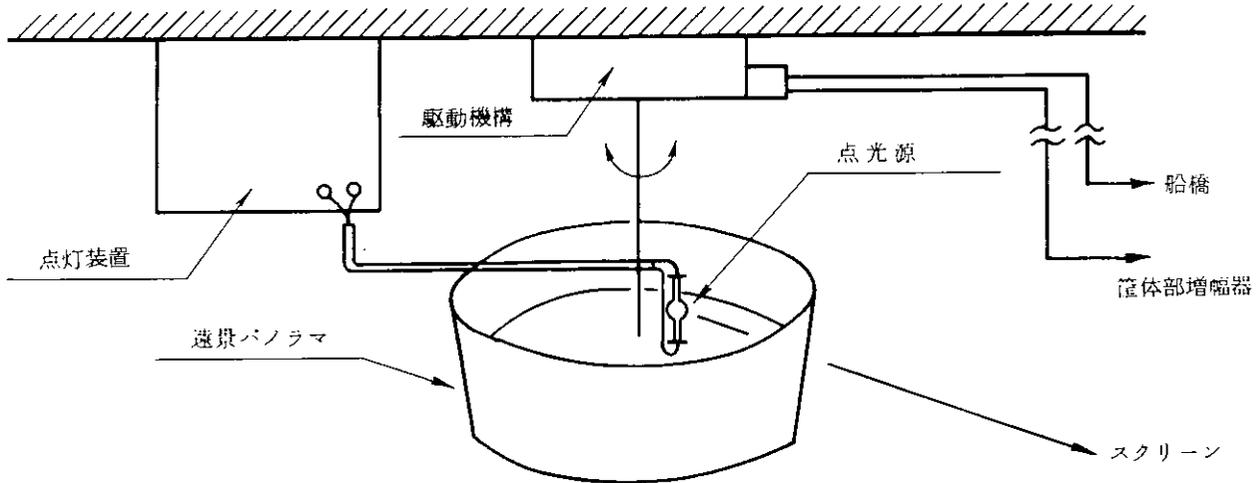


図 2.5 遠景投影方式

- (1) パノラマ・フィルムは図 2.5 に示すような形状（円錐台の側面）で 360° 範囲に遠景が描かれている。
- (2) 点光源は、パノラマ上の遠景をスクリーン上に投写した時ボケが少なくなるよう、点状光源が使用されている。
- (3) 駆動機構はモータ、ギヤ、ポテンショメータ、タコジェネレータ、シンクロ発信機、バッファアンプより構成され、増幅器の出力に応じてパノラマをスクリーン正面に対し +100° ~ -100° の範囲に回転させる機構となっている。なお、構造としては、リミットスイッチがなく、全回転が可能である。

主な仕様を次に示す。

- | | |
|-------------|---------------|
| (a) 回転範囲 | -100° ~ +100° |
| (b) 最大回転角速度 | 1°/sec |
| (c) 静止精度 | ±1°以内 |

2.4 スクリーン

スクリーンは、広い視野範囲を得るために半径 4 m、中心角 210° の大型スクリーンとし、パノラマによって投影される遠景とカラー投写装置によって投影される物標とを合成して表示する。

その他の主な仕様

- | | |
|----------------|--------|
| (a) スクリーン幅（高さ） | 1.8 m |
| (b) スクリーン傾斜角 | 後方へ 7° |

なお、床面との間 50 cm、天井との間 30 cm には、スクリーンがなく、補助スクリーンによって、海面および空を投影すべく準備中である。

2.5 自船船首部

自船の船首を模擬する部分で、立体感を増すため、また、視点の変動にも異和感を与えないように、スクリーンの手前にパネルを立てかける方式である。現在は、そのパネルの上に直接甲板が描かれているが、将

来は、天井から別の投写装置によってスライドを投影させる予定である。この場合、スライドを入れかえるだけで、自由に自船の船種が変更できる。図 2.6 にスクリーンおよび自船船首部の概略を示す。

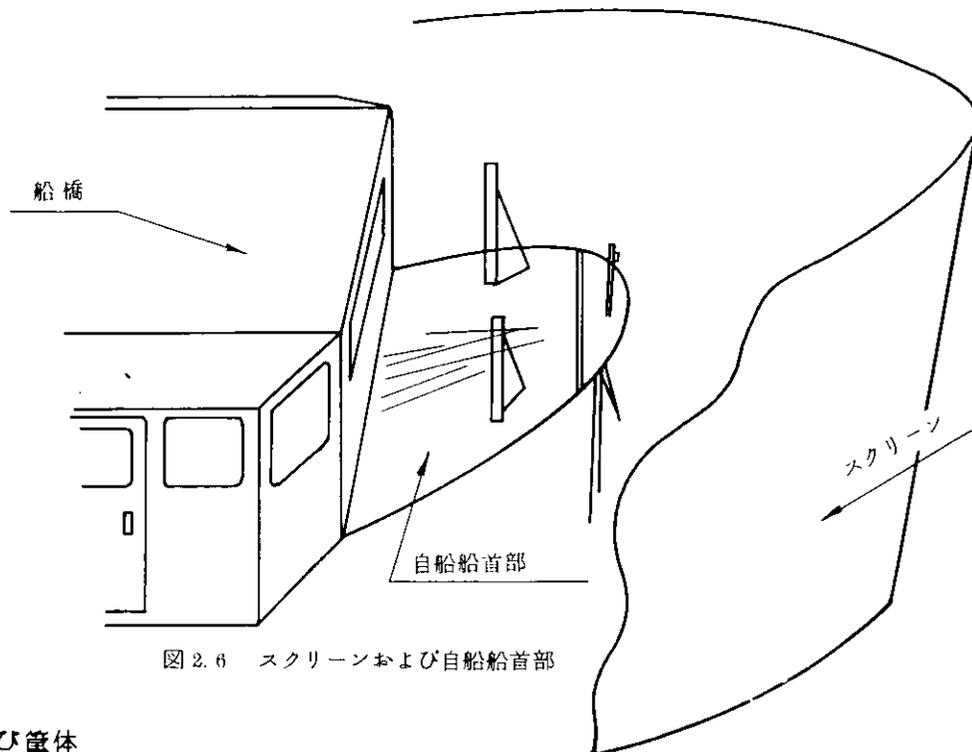


図 2.6 スクリーンおよび自船船首部

2.6 電源および筐体

アナログ計算機と遠景投影部および近景投影部との間に介在し、アナログ計算機からの入力信号によりサーボ機構を駆動する出力を発生し、また、カメラ系の制御信号等を発信する。

(1) パノラマ部増幅器および模型部増幅器

周波数特性	DC ~ 300 Hz
出力温度ドリフト	0.5 mV/°C以下 (入力換算)
出力	200 W最大
出力電流	±5 A / 連続

(2) カラー投写ヘッド部増幅器

周波数特性	DC ~ 300 Hz
出力温度ドリフト	0.5 mV/°C以下
出力	250 W最大
出力電流	±8 A / 連続

(3) ズームレンズコントローラ

撮影部のズームレンズのモータを駆動し、ズームの位置を制御する部分で、入力信号はアナログ計算機から受信する。

(4) カメラ制御器

撮影部の小型単管式カラーカメラを制御する部分で映像信号をTV投影部に送出する。

(5) 目標設定盤

物標の方位、速度をダイヤルにて設定し、その目盛に対応する電圧レベルをアナログ計算機に入力する。

速度設定は $\sin - \cos$ 曲線のポテンシオメータにより速度の X、Y 成分を出力し、方位は直線ポテンシオメータにより出力する。

設定精度	±2%	
方 (φ _T)	-180°~+180°	-10V~+10V
速 (V _T)	0~10m/sec	0~+10V
速度のX成分	V _{TX} = V _T sin φ _T	(2.6.1)
	V _{TY} = V _T cos φ _T	(2.6.2)

(2.6.1)、(2.6.2)式の出力は、V_Tとφ_Tの設定により自動的に計算され、アナログ計算機に入力される。

(6) スイッチ盤

筐体部電源、アナログ計算機電源の開閉および模型用ランプ(航海灯等の灯火)点滅などを行なう部分である。

2.7 信号演算部

本シミュレータの計算部であり、汎用アナログ計算機と専用のアナログ演算機で、以下の各演算を行なう。

$$T_E \dot{\delta} + \delta = \delta^*, \quad |\dot{\delta}| \leq \dot{\delta}_{\max} \quad (2.7.1)$$

$$T_5 \dot{n} + n = n^* \quad (2.7.2)$$

$$T_4 \dot{V} + V + C_r \dot{\phi}^2 + C_\delta V^2 \dot{\delta}^2 = K_4 n \quad (2.7.3)$$

$$S^* = \frac{K_4 n}{V} \quad (2.7.4)$$

$$T_1' T_2' \left(\frac{L}{V}\right)^2 \ddot{\phi} + (T_1' + T_2') \left(\frac{L}{V}\right) \dot{\phi} + (1 + f(S^*)) \left(\phi + \alpha' \left(\frac{L}{V}\right)^2 \dot{\phi}^3\right)$$

$$\phi = (1 + g(S^*)) \left(K' \left(\frac{V}{L}\right) \dot{\delta} + K' T_3' \dot{\delta}\right) \quad (2.7.5)$$

$$X = \int V \cos \phi dt + X_0 \quad (2.7.6)$$

$$Y = \int V \sin \phi dt + Y_0 \quad (2.7.7)$$

$$X_R = \int (V_{TX} - V \cos \phi) dt + X_{R0} \quad (2.7.8)$$

$$Y_R = \int (V_{TY} - V \sin \phi) dt + Y_{R0} \quad (2.7.9)$$

$$R_R = \sqrt{X_R^2 + Y_R^2} \quad (2.7.10)$$

$$\chi = \sin^{-1} \left(\frac{Y_R}{R_R}\right) \quad (2.7.11)$$

$$\theta_T = \phi_T - \chi \quad (2.7.12)$$

$$\theta_P = \chi - \phi \quad (|\theta_P| \leq 130^\circ, |\theta_P| \geq 230^\circ) \quad (2.7.13)$$

$$\theta_Z = F \theta_Z(R_R) \quad (2.7.14)$$

また、 $130^\circ < |\theta_P| < 230^\circ$ でのカラー投写ヘッドの動きと、ビームの点滅を制御する演算も行なっている。

図2.7、2.8に演算ブロック図を示す。

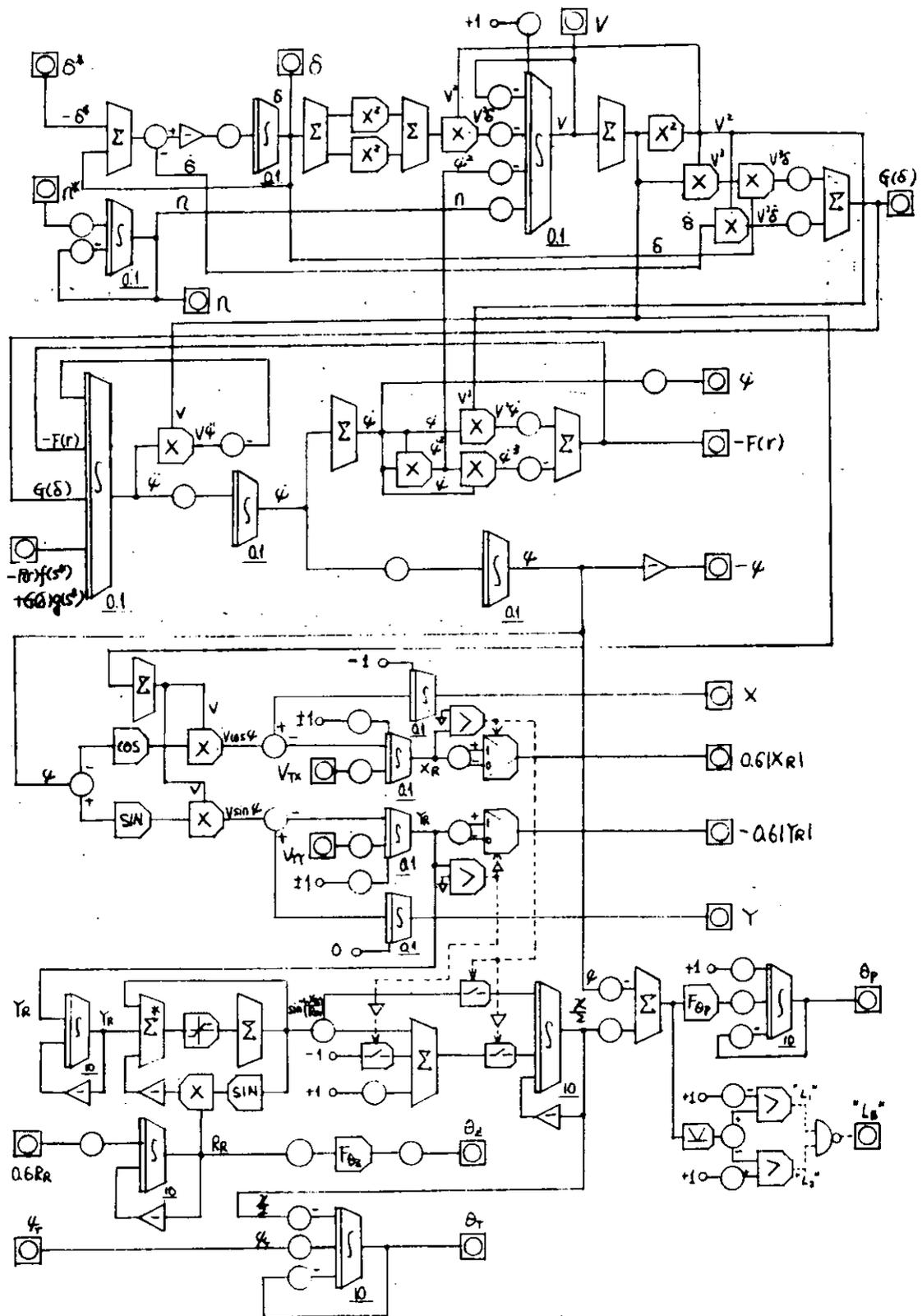
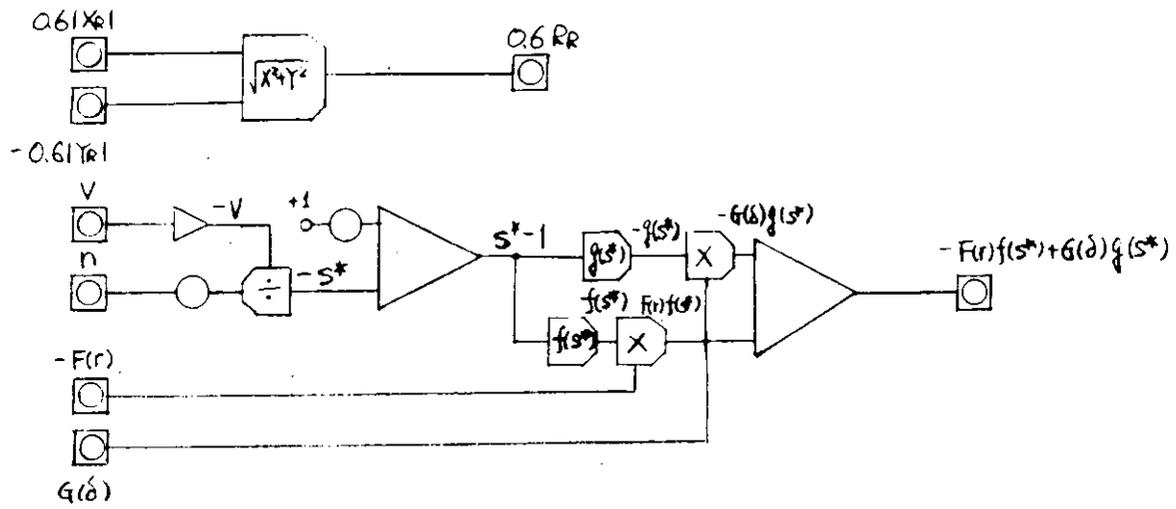


图 2.7 BLOCK DIAGRAM OF COMPUTER



2.8 BLOCK DIAGRAM OF AUXILIARY COMPUTER

3. SR151シミュレータ設備の評価 —特に視界表示装置を中心として—

視界表示部 (Visual Display) は操船シミュレータ設備のうち、最も問題の多い部分と目されており、また、他の分野の実時間シミュレータと比較して、最も特徴的な部分でもある。そこで本部会シミュレータのこの部分を中心に若干の評価調査を行なった。

3.1 視界表示部性能調査

船舶操縦シミュレータの Visual Display はシミュレータにおいて最重要な要素の一つに挙げられており、本研究部会の前年度報告書で再三強調されている。この Visual Display の性能はシミュレータの生命を左右すると言っても過言ではない。なぜなら、商船運航のブロック図 (図 3.1.1) をみて分るように、操船者の技倆が最高に発揮される場面は港内及び港へのアプローチ時で、これは又、シミュレータの対象とすべき最も重要な操船状況となり、この状況下では操船者の眼からみた景色が主要な情報源となるからである。従ってシミュレータが実験、研究、訓練の実用として稼動する以前に手掛けておくべきは操船者の眼に映る影像及びその動きが自然と感ぜられるかどうかの調査であろう。

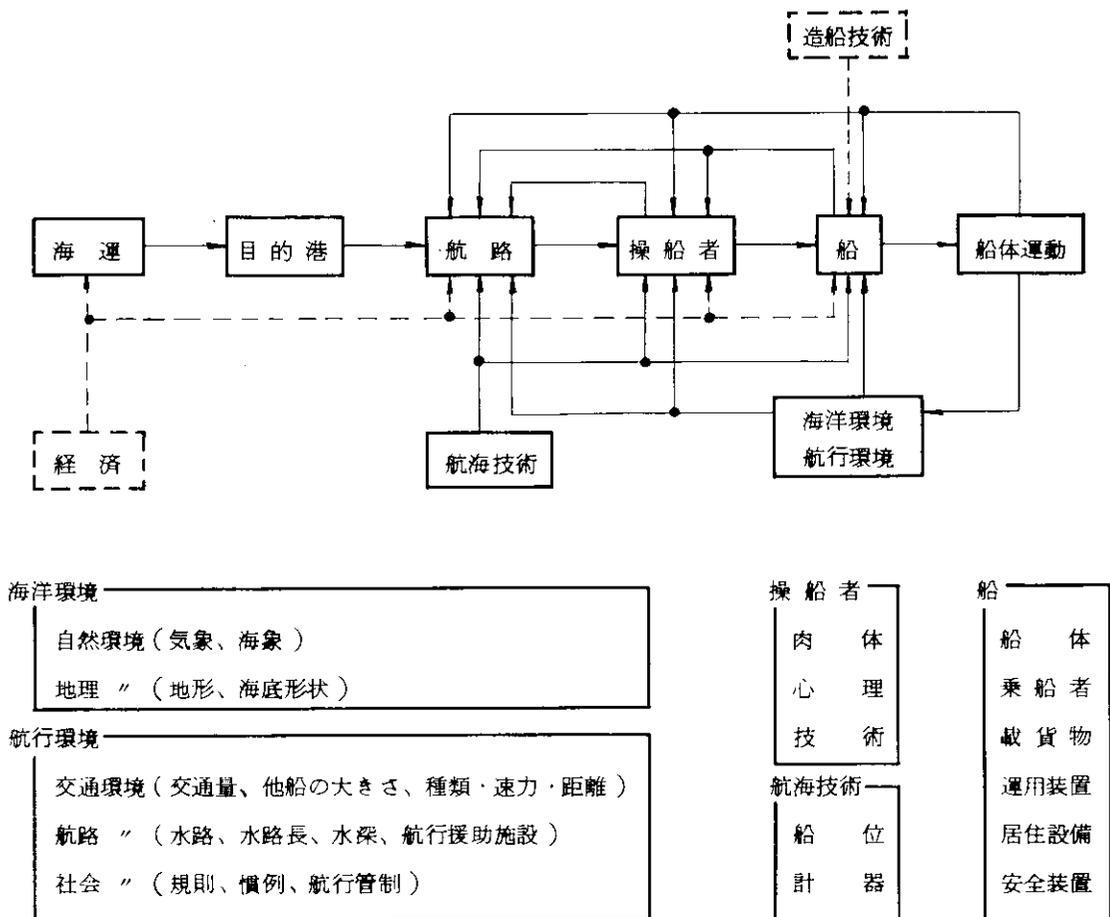


図 3.1.1 商船運航のブロック図

本研究部会シミュレータの Visual Display は円筒スライド（遠方物標の投影）とズーム付 TV カメラの TV プロジェクタ（近接物標の投影）によって 4 m 前方の円筒スクリーンに影像を写し出す方式である。本方式の本質的な欠点は、

- 1) スクリーン影像のため、物理的な意味で距離感覚を実際と同一に出来ない。
- 2) ズームによる拡大方式のため、近接物標の接近感覚を実際と同様にできない。
- 3) 円筒スライドと TV プロジェクタの重複投影であるため、近接物標に黒色が出せない。
- 4) スクリーン影像までの距離を 4 m にとっているため、操船者が影像に焦点を合わせるに要する眼球筋肉の疲労度が大きい（遠方物標に対して 6 m 以上必要とされている）。

等が挙げられる。しかしながら、人間の感覚は、例えば目視による距離測定法については図 3.1.2 に示すようであるから、相対的測定の要素が相当強いものであることを考えると前記の欠点は致命的なものではなく、何等かの方法で補われる可能性がある。

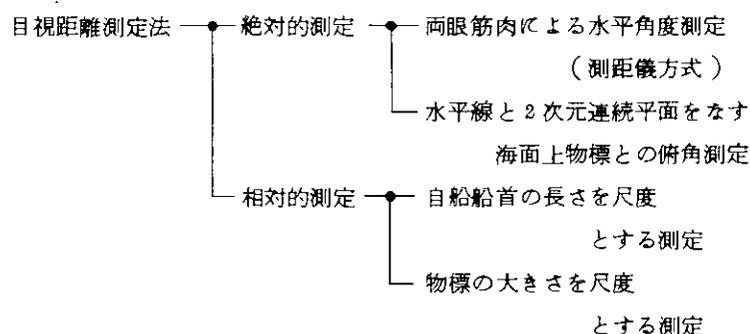


図 3.1.2 目視距離測定法

ここで、本 Visual Display がどの程度まで実際を模擬できるか、スクリーン上の物標の動きを通じて調査する必要がある。

3.1.1 調査目的

Visual Display の特性を把握し、シミュレータ運用上の参考とする。また、実際との比較に於て本装置が具備すべき項目及び性能を調査する。

3.1.2 調査計画事項

Visual Display は人間の視覚に与える主要な情報源であるから、Visual Display の性能を調査するには先ず人間の視覚に影響を与える要素の分析から始めるのが妥当であろう。これを図で表わすと図 3.1.3 のようになる。図を参考にして、調査すべき項目を列挙すると、

- A 照度関係 — 眼のおかれている環境、物標、背景の照度関係等を調査。
- A 1. スクリーン円周方向の明るさのむら。
 - A 2. スクリーン照度 — 映像スクリーン上の明るさを 3 段階に変化させ、昼間、日没薄明時、夜間に設定し、それぞれ不自然さを感じさせない照度を調べる。
 - A 3. 船橋内照度 — 前記 3 状態の明るさに対して、適当なコントラストになる船橋内の明るさを調べる。（操舵室標準照度 20 lux）
 - A 4. フリッカー・テスト — 前記 3 状態のコントラストにおける眼の疲労度測定を行なう。

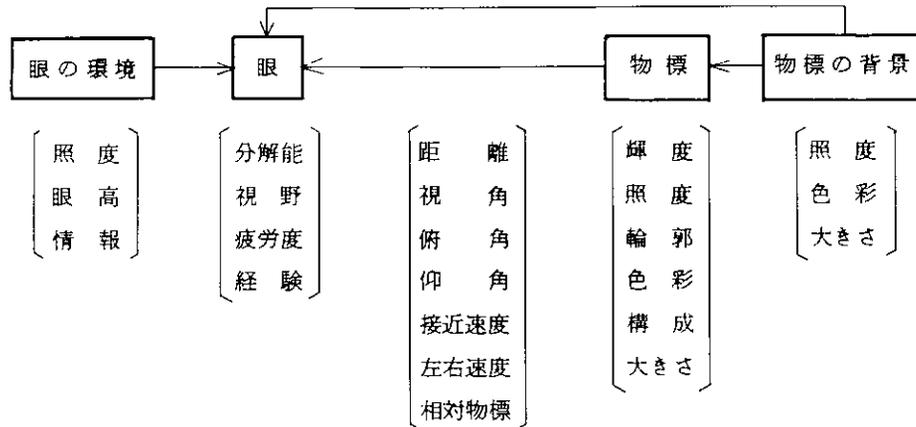


図 3. 1. 3 視覚のブロック図

B スクリーン映像およびその解像度関係 — 実物の輪郭は鮮明に見えるが、これに対して V. Display の鮮明度を調べる。

B 1. 灯火の映像（夜間の場合）について

- (1) マスト灯—1灯—の初認距離測定（法規では 5 mile 以上）
- (2) マスト灯—2灯—の分離視認距離測定
水平分離 — 他船の真横を見る。
垂直分離 — 他船の正面を見る。
- (3) 舷灯（赤灯、緑灯）の初認距離測定（法規では 2 mile 以上）
- (4) その他の灯火（浮標、燈台）

B 2. 近接物標の映像（昼間・薄明時の場合）について

- (1) 使用物標の種類および色彩
船舶（白）、島（緑）、浮標（赤）
- (2) 物標初認距離での映像の良否
- (3) 物標の質（行合船か、横切船か）を判定できる最遠距離 — 実際は双眼鏡を使用する。

C 物標の動きに対する視覚判定関係

C 1. 左右の動き — この方向の動きは船舶操縦シミュレータの主体をなすもので、この動きは、眼軸に対して直角をなすために人間の感覚は鋭敏である。従って不自然な動きに対する検知は容易であろうと思われる。

- (1) 遠方物標及び近接物標を対象にする。
- (2) $0 \text{ deg/s} \sim 3 \text{ deg/s}$ の一定角速度で各物標を水平運動させ、その動きが人間の眼にとってスムーズに自然な感じで動くかを船橋内で観察する。
- (3) 観測者の眼の位置を船橋中心及び中心からある程度偏心した位置に変えて実施する。

C 2. 前後の動き — 距離感・遠近感と関係して、この動きは眼軸に平行であるから人間の感覚は鈍感であると思われる。又、本 Visual Display は物理的に前後の動きのシミュレーションができないために距離判定がより困難になると予想される。

- (1) $0 \text{ kt} \sim 30 \text{ kt}$ の一定速度で近接物標を接近及び離反させ、動きがスムーズかどうか判定する。
- (2) 物標の接近、離反の判定限界を探る。
- (3) 目視観測距離と計算機設定距離との相関をとる。

- (4) 物標の大きさ及び物標のAspect 状況及び眼高を変化させる。
- (5) 船橋内における観測者の水平位置を変える。
- (6) 目視距離測定の基本尺度として与える情報の種類（自船船首長さ、物標の大きさ、正解）を変える。

3.1.3 調査実施日、状態および結果

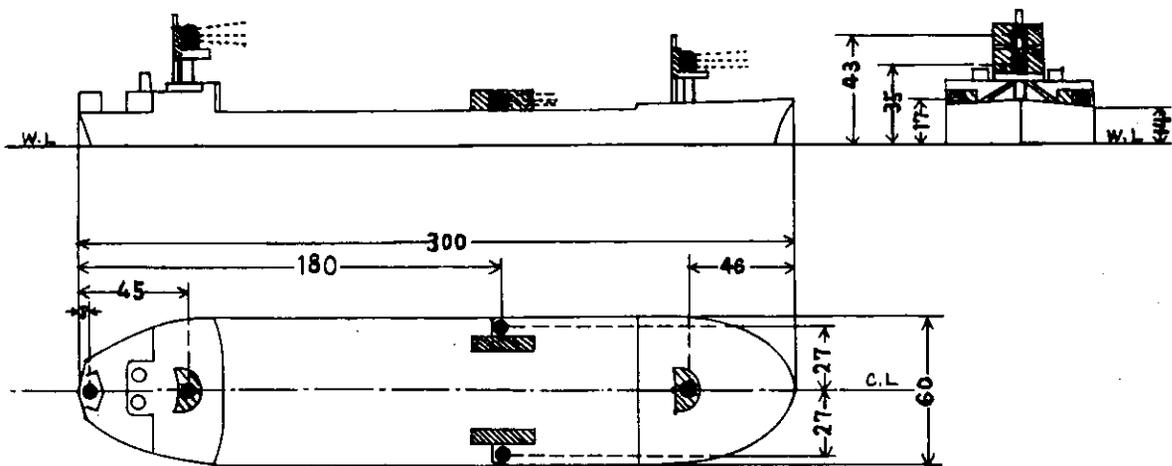
実施日：昭和50年9月17日

被験者：2名 A（商船大学教官）、B（商船大学大学院生）

実施状態：自船；L=300m、眼高≒25m、タスカー

自船船首映像の投影なし

近接物標（他船）；L≒300m、船体白塗タンカー（図3.1.4参照）



実船船長約300m、縮尺約1/1,000の300mm長の模型である。

塗装は斜線部は黒色、他はすべて白色である。

図 3.1.4 大型船模型船燈配置図

調査実施項目及び調査結果

A 1. スクリーン及び船橋内照度の測定

0～300 Lux測定範囲の通常の照度計を用いた測定結果を表3.1.1に示す。船橋内は電灯等による照明はなされておらず船橋前方から来る明るさに依っている。なお、夜間の状況設定は遠方物標（パノラマ）の投影を断った状態である。

表 3.1.1 スクリーン及び船橋内の照度

測定場所 設定状況	航海士の位置	正面窓の内側	正面窓の外側	スクリーン上
昼間	2 lux	1.3	1.4	1.2
夜間	0	9	1.0	6

A 2. スクリーン円周方向の明るさのむら

遠方物標投影による昼間状況設定時に於ては、目視観測による明るさのむらは特になかった。

A 3. 眼の疲労度測定

シミュレータによる操船実験30分間の実験直前・直後のフリッカー値に差は見られなかった。

B 1. マスト灯、舷灯による初認距離及び分離視認距離の測定

夜間航行の状態（遠方物標の消灯、灯火による航行）に於て近接物標（他船）の移動による各灯の確認位置を測定。自船から見た他船の姿勢を4種に変えて接近した場合の結果を図3.1.5に示す。

C 1. 目視距離と計算機設定距離との相関

自船船速12ktで航行中、他船（ $L=300m$ 、白塗タンカー）が12kt、相対方位 45° で横切る状態で接近。他船長300mを情報として与える。前記状況に於て自船・他船間の目視観測距離を聴取し、計算機指示距離との相関をみる。実験経過は図3.1.6の通りである。又、目視距離と計算機指示距離の結果は図3.1.7である。

C 2. 近接物標の左右及び前後の動き

前記C 1.における調査時に次記の事項が出た。

左右方向の動きに於ては相対方位 $\pm 45^\circ$ あたりでスムーズな動きをしない。又、前後方向に対しては接近すると影像の伸縮が見られる。

3.1.4 参考資料

海上におけるVisualに関する調査研究資料は希有であって、これからの問題になるが、最近の資料の一例を示すと、海上における距離感の実験例(1)の他に(2)、(3)がある。

3.2 職業操船者のシミュレータ設備評価（感想・助言）

実験終了後、各被験者にアンケート用紙を配布して、その卒直な感想、助言を求めた。アンケートは、記述式とし、無記名でおこなった。

さらに、基本性能調査の項で聴取した意見も含め、そのうち、いくつかの項目について、主要なものを列記する。

（アンケート記入者 3名）

（意見聴取者 商船大生2名）

3.2.1 船 橋

(1) 計器類の種類とその配置

(a) 種類（不足しているもの）

時計（全員）

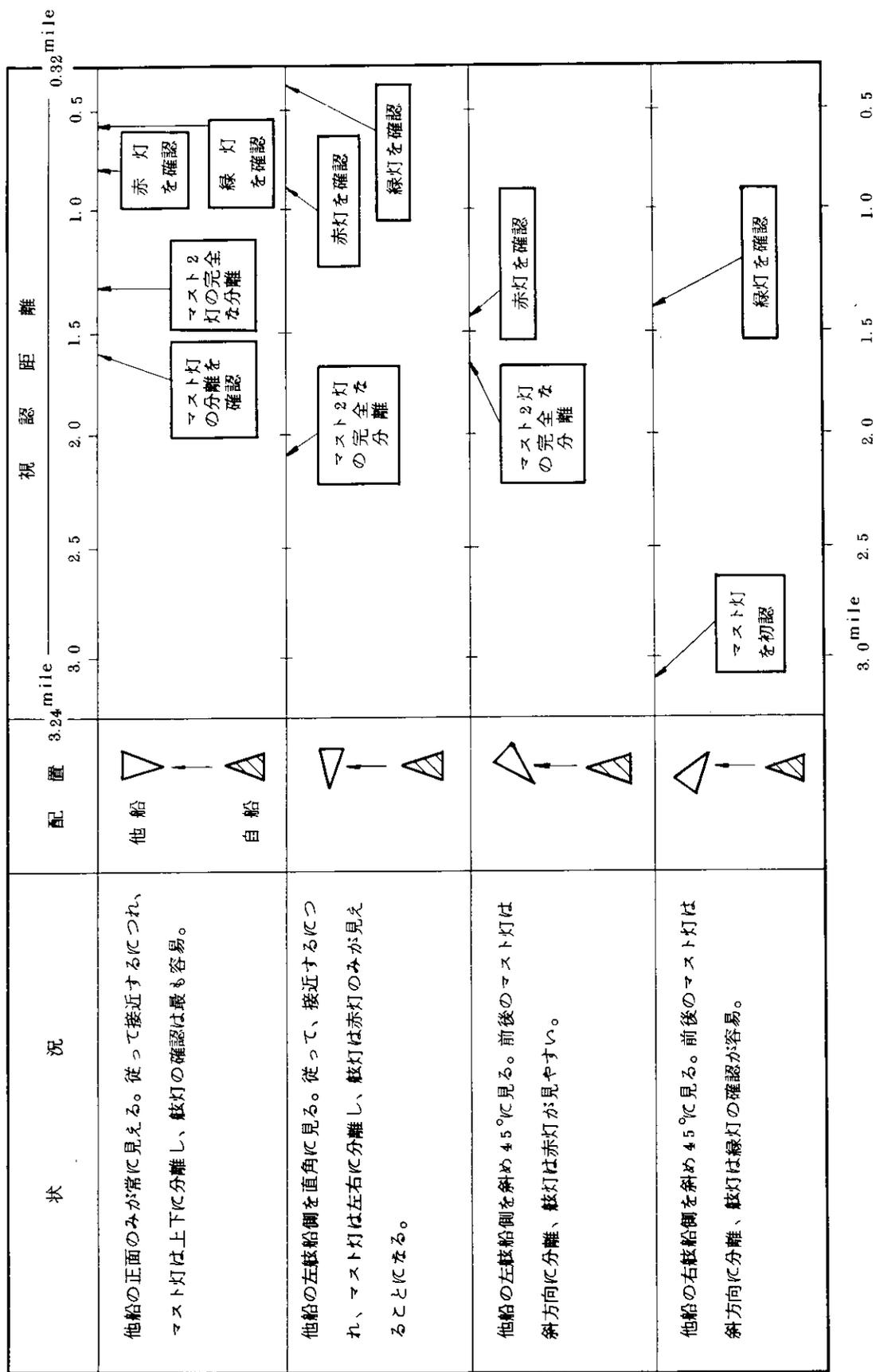


図 3. 1. 5

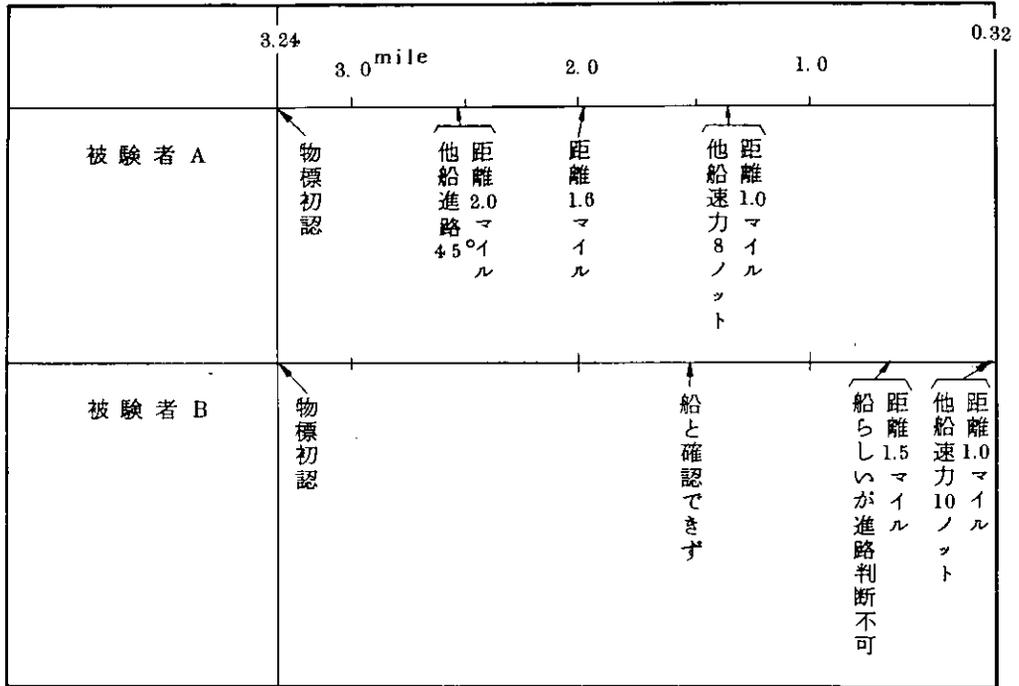


図 3.1.6 目視距離測定実験経過

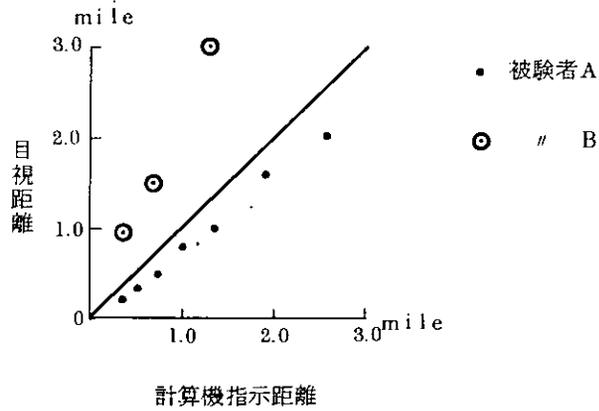


図 3.1.7 目視距離測定結果

(外乱がある時)風向・風速計(全員)
レーダ(航海士2名及び商船大生2名)
チャート・テーブル(商船大生2名)
エンジン・テレグラフと回転数、速力の関係を示す標示盤
(例えば、FULL AHD - 80 R.P.M - 12k't)

(b) 配置(アンケートのみ)

・ 適当(航海士2名)

(2) 船橋の広さ、コンソール・デスクの高さ、窓の大きさ、視界の広さ

- ・ 船橋の広さは、もう少し広い方がよい。
- ・ 実験用ブリッジとしては適当。
- ・ 天井が低く大型船の感じが出ない(2名)。
- ・ その他は適当(アンケート記入者全員)。

(3) 船橋内照度(アンケートのみ)。

- ・ 現在くらいでよい。
- ・ もう少し明るい方がよい。
- ・ 遠景が昼間用であるなら、船橋内ももっと明るくした方がよい。

(4) その他、船橋に関すること(アンケートのみ)。

- ・ エンジン テレグラフを作動させたときに、ブザーが鳴るとよい。

3.2.2 スクリーン

(1) スクリーンの大きさ(アンケートのみ)

- ・ 現状でよい(2名)
- ・ 水平方向は十分、垂直方向に関しては、下部の方にもう少し広げ、船首部から船体中央にかけての海面が写し出せる程度にすれば、より実感がわく。

(2) スクリーンの照度、鮮明度(アンケートのみ)

- ・ 照度は特に問題ないと思われるが、鮮明度をもう少し出すようにすれば、遠近感が出て実感が倍増するでしょう。(全員)

(3) その他

(a) 水平線の高さ(アンケートのみ)

- ・ 船首マストから見て妥当。
- ・ 船橋が高く感じる。
- ・ 水平線をもう少しはっきりさせた方がよい。

(b) 島の大きさ

- ・ 良いが、色や形がもっとはっきりした方がよい。
- ・ 水平線のかなり手前に位置している(本船との距離5マイルぐらい)ようなので、もう少し大きくするか、水平線近くに持っていく方がよい。
- ・ 無限遠にあり、近づくことはないのだから、もっと小さく淡い色にすればよい。

(c) 海の色

- ・ もう少し鮮明に。
- ・ もっと青をきつく、空の青をうすくした方がよい。
- ・ 海の色は遠くは白く、近くはより青く見える。
- ・ 空の色は良好である。

- ・夜間は、水平線のみ写す方がよい。

3.2.3 自船船首部（アンケートのみ）

- ・大きさは妥当だが、Deck上のパイプライン、マスト等をもう少し現実的にした方がよい。
- ・ポストの位置をもう少し手前にして、根本の部分が操舵スタンドの位置より見えないようにした方がよい。

3.2.4 相手物標

今回の実験の場合、1) 300mタンカーと、2) 港湾を見ていただいた。

(1) 相手物標の色、形

- ・タンカー、港湾とも色に問題はない。
- ・白色が現在のスクリーンにはよい。
- ・現在、白色であるが、投影の状態を損わず、かつ実船の代表的な色彩にも近い色を考えてみるべきだ。また、輪郭をはっきりさせるためには、船体にフチどりするのもよい。
- ・遠距離で良好な投影が得られるが、近距離、方位±45°以上で歪を生じている。
- ・船体上部構造、マストなどが小さい。
- ・船室の窓などをつけ加えてはどうか。
- ・2箇のマスト灯の上下位置の差が小さいので、進行方位の判定を困難にしている。もっと差を大きくすればよい。
- ・現在、マスト灯は白色だが実船は黄色に近い。
- ・舷灯は、その位置がブリッジに近く、後方からは見えない。

(2) 相手船の動き

- ・特に問題はない。
- ・他船の動きがぎくしゃくする箇所があった。
- ・相手船の影像が実際より小さい（速く感ずる）。
- ・遠近感の違いをもっとはっきりした方がよい。
- ・投影に波がないため、相手船の速度の判断が難しくなっている。
- ・方位・距離の判断が、実際に比して非常に困難である。

3.2.5 操船感覚（アンケートのみ）

(1) 設定船の操船感

- ・（B-20）舵効きがよすぎる。（全員）
- ・船速変動は実船よりおそい（ $T_4=800\text{sec}$ ）。
- ・スピードの減速、回頭によるスピード・ダウンは実船の感じがよくでている（ $T_4=500\text{sec}$ ）。

(2) 船内環境

- ・船内騒音、振動とも少ない。（全員）
- ・特に、Astern時の振動があれば実感がわく。
- ・緊張感は特に実船より劣るというわけではない。

3.2.6 総合判定

- ・船の操縦性能については、実船とかなり類似していて優秀な装置と思われる。スクリーン上の影像に遠近感、鮮明度を出せば、より一層、すぐれた装置となるでしょう。

・操船者・操舵手にとってV L C Cの操船が地上でおこなわれるということは、非常に有意義である。なかなか、むつかしいと思うが、外力の影響も実船同様となれば効果は倍加させるだろう。今後、船会社においてもどしどしシミュレータを取り入れ研修するならば、地上においてある程度、V L C C操船の勘を会得することができ、海難防止にも役立つものと思う。

以上のアンケート結果及び意見聴取は、ごく少数の被験者のものであって、結論的な判断は下せないまでも、ほぼ、次のような評価ができる。

- 1) 本シミュレータの数学モデルは、十分に、実船に近い操船感覚を模擬することができる。
- 2) 前進方向の応答方程式は、係数さえ適当に選択すれば、相当広範囲な速度変化(5~15ノット)でも使用できる。
- 3) 船橋の広さ、視角等は、実験用として十分であり、さらに、時計、風向計、風速計、レーダ、チャート・テーブルなどの装備を漸次充足することによって、より実際的なものとなるであろう。
- 4) スクリーンそのものの大きさは十分であるが、その上方や海面部分を投影できるような、補助スクリーンを設置すべきである。
- 5) パノラマの投影方式は、現状のままでよいが、より現実味のある鮮明度にくれたフィルムにするべきである。実際の海上で撮影したパノラマ写真が望ましい。
- 6) 自船船首部は、現在の方式がある程度の視点の移動にも違和感がなく、すぐれているが、より、実感をだすために、スライド投影方式などを併用するとよい。
- 7) 相手物標は、プロジェクタの走査線の関係上、現在以上の鮮明度は分解能からして無理である。まだ、ズームングが所望の範囲で大きくように再考すべきである。模型そのものは、もう少し、リアルなものを使うべきであるが、必要以上に精密でなくてもよい。さらに、変針点附近では浮標の投影が望ましい。
- 8) 相手物標の動きは、よく模擬できているが、演算誤差や、ズームングむら(断続的なズームング)による、いずれも機械的な不良動作は、被験者に異和感を与えるので除去すべきである。
- 9) 総合的に評価すると、本シミュレータは、十分、現実即した船の運動が模擬できる。あと、残された問題は、集約すればVisual Display部である。そして、いくつかの試みによって、ある程度の改善は可能である。

4. 模擬操船実験

4.1 模擬操船の状況設定

4.1.1 模擬操船の種類

運航技術的な面からみると、操船は操船環境と操船者という人間からなるシステムと考えられ、当然のことながら操船に影響する要因は人的な要因と環境的な要因とからなる。このうち人的な要因は操船者の素質、一般心理（錯誤、不注意等）、経歴、意欲、心身状態などを内容としている。一方、環境的要因としてはおよそ次のものが操船に影響を与える条件と考えられる。

- 1) 物理的条件（操船する船の大きさ、速力・操縦性能、航海計器等）
- 2) 地理的条件（操船する水域の水深、水路幅、彎曲、航路標識の整備状況等）
- 3) 交通的条件（自船以外の航行船舶の船の大きさ、速力、交通量、通行密度分布、海上交通管制等）
- 4) 自然的条件（天候、視界、潮流、風向、風力等）

又、これらの環境的要因のもとで行なわれる操船を動作の面から分けると、1) 保針、変針動作、2) 避航動作、3) 増減速動作、になり、与えられた上記の環境の中で運航目的に応じて安全かつ効率的にこれらの動作を組合せて船を運航している。したがって、シミュレータによる操船は、最終的には多様な環境下での模擬操船が考えられるが、操船シミュレータの大きな利点は操船上のパラメータを系統的に変えることによって、操船の基本パターンを調べることができる点である。

本年度はこの操船の基本パターンと船の操縦性能の関係の基礎的な資料をうる目的のために次のような模擬操船を実施した。被験者（操縦者）には人的な要因の影響をみるために、操船の経験者と未経験者を選び、操船する船は巨大タンカーの三つのタイプとした。

(1) 保針・変針操船

これは水深、水路幅、彎曲等の地理的な制約条件および風、潮流等の自然的条件がない状態で、定められた針路を保持し、又は指示される針路に変針する操船で、最も基本的なものである。しかし、同時に操船者が操船する船の回頭性能を知る上で重要なものである。この基本操船に地形的、自然的条件を加えると通常の狭水道航行になる。

(2) 避航操船

操船者の行なり避航動作は、広義には、他船、障害物の状況確認、判断 → 避航の意志決定 → 避航処置の実施 → 安全の確認というプロセスを経て終了するので、他船、障害物の状況の設置によって避航動作の基本パターンは異なるが、本年度は他船（針路交差角 90° ）を 45° にみて衝突の危険のある場合に設定した。そして、避航開始距離、避航量、他船の相対運動等の基本的なパターンを調べた。

(3) 出入港操船

増減速動作は主として、出入港操船で行なわれるので、4.1.2のシミュレーション用海図の一部を抜粋して、港湾入港航路を設定して、増減速動作と変針動作を併用して、指定された錨地へ投錨のために入港していく操船を行なった。これによって、操船者のとる減速パターンおよび船の減速性能の学習程度を調べた。

4.1.2 シミュレータ用海図

操船シミュレータは将来、教育訓練および研究用に使用されるが、その際使用するシミュレータの機能および経費の点から任意の市販海図を使用するよりも、模擬操船の目的にかなった海図を使用することが望ましい。一方操船者は海図から航行水域の地形的、自然的な情報をえて船位を記入する作業をす

るので、臨場感を与えるためには出来るだけリアルな感じのする海図が必要である。そこで、一つは仮想的な水道であって、保針、変針、避航、出入港などの模擬操船が系統的に行なえる海図とシミュレータの機能を考慮しながら、できるだけ実際に近い水域の海図を作成した。作成する際には表 4.1.1 に示す我国主要狭水道の地理的条件⁽⁴⁾および NSMB の操船シミュレータに使用されている訓練水域⁽⁵⁾を参考とした。

表 4.1.1 わが国の主要狭水道の地理的条件

水道名	D	W	n	ϕ_m
明石海峡	18.5	4	2	41.0
備讃東部	35.7	2	5	18.6
備讃西部	31.7	2	6	14.5
来島海峡	27.8	2	6	32.0
釣島水道	16.9	3	3	11.0
関門海峡	27.8	1	10	34.9
友ヶ島水道	20.4	3	0	0
伊良湖水道	11.1	12	0	0
浦賀水道	28.0	2	6	28.3

D : 水道の長さ (km) W : 水道の幅 (km) n : 変針回数
 ϕ_m : 平均変針量 (Deg.)

A 水道附近の海図 (図 4.1.1) は、航路幅片側 750m の tow way passage で、直線航路およびそれぞれ 1、2、3 回の変針を必要とする三つの航路とからなり、変針角は左右に 30°、変針点間隔は 2.5 哩にとった巨大船でも航行可能な仮想的な水道である。ここで、一回変針の航路は明石海峡に、三回変針の航路は浦賀水道とほぼ同じ航路であり、わが国で巨大船がひんばんに航行する二つの主要狭水道にも対応するように作成されている。

一方、図 4.1.2 に示す B 島附近の海図は、B 島 (図 4.1.3) をスクリーン上に表示し、それを右舷にみてまわり込むような操船をするために作成したものである。巨大船の航行する水域でこれと似た操船をする水域の一つである備讃瀬戸西部の鍋島附近をモデルにして、航路附近に浅瀬を散在させて、海図上の情報によって操船者に緊張感を与えようとしている。次年度において本シミュレータにレーダが装置されると、海図に Bouys を配置して、それと対応してレーダー画面上にそのエコーを出し、一層臨場感を与えることが可能となるだろう。

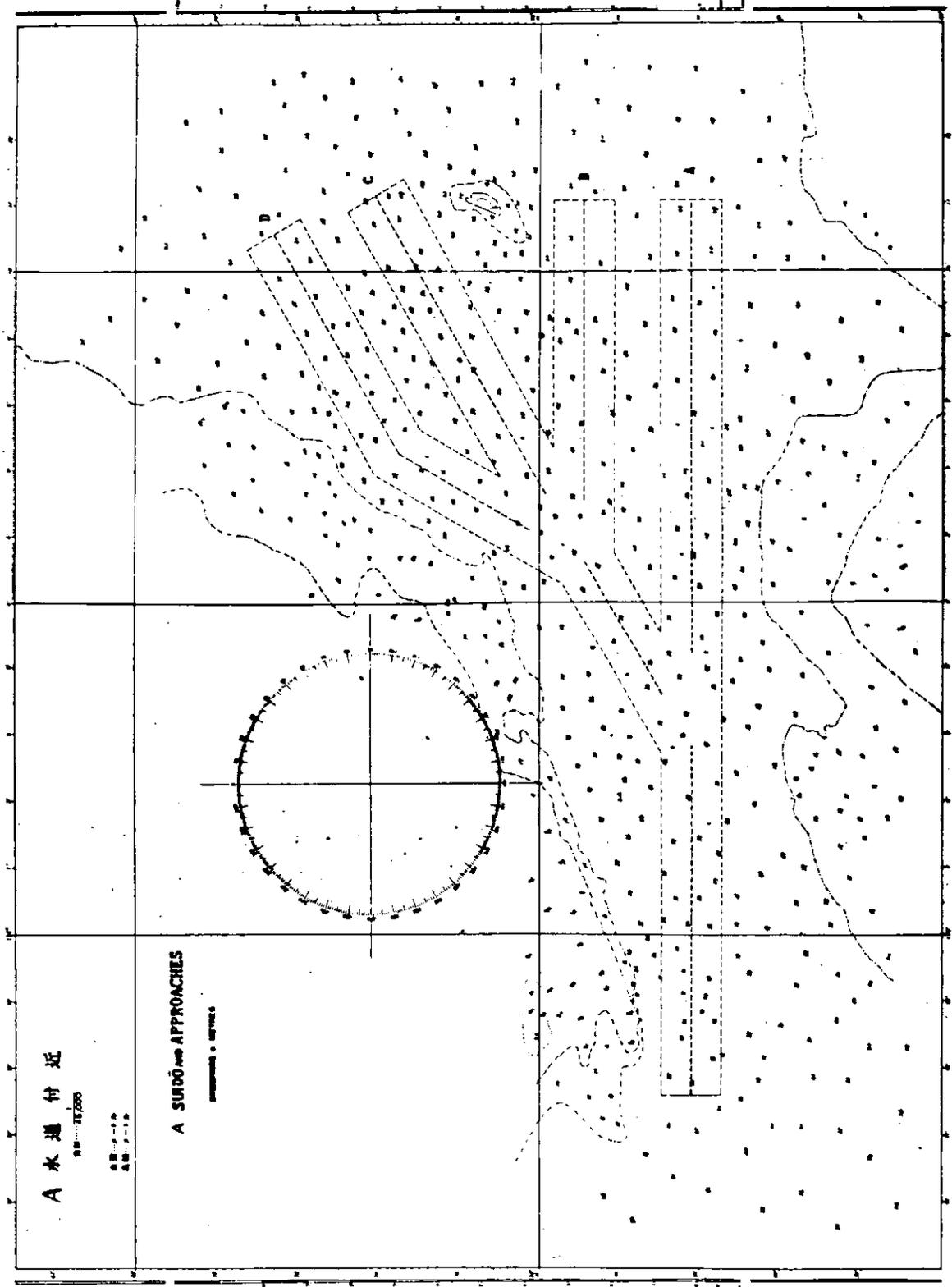


図 4.1.1 シミュレーター用海図 (A 水道付近)

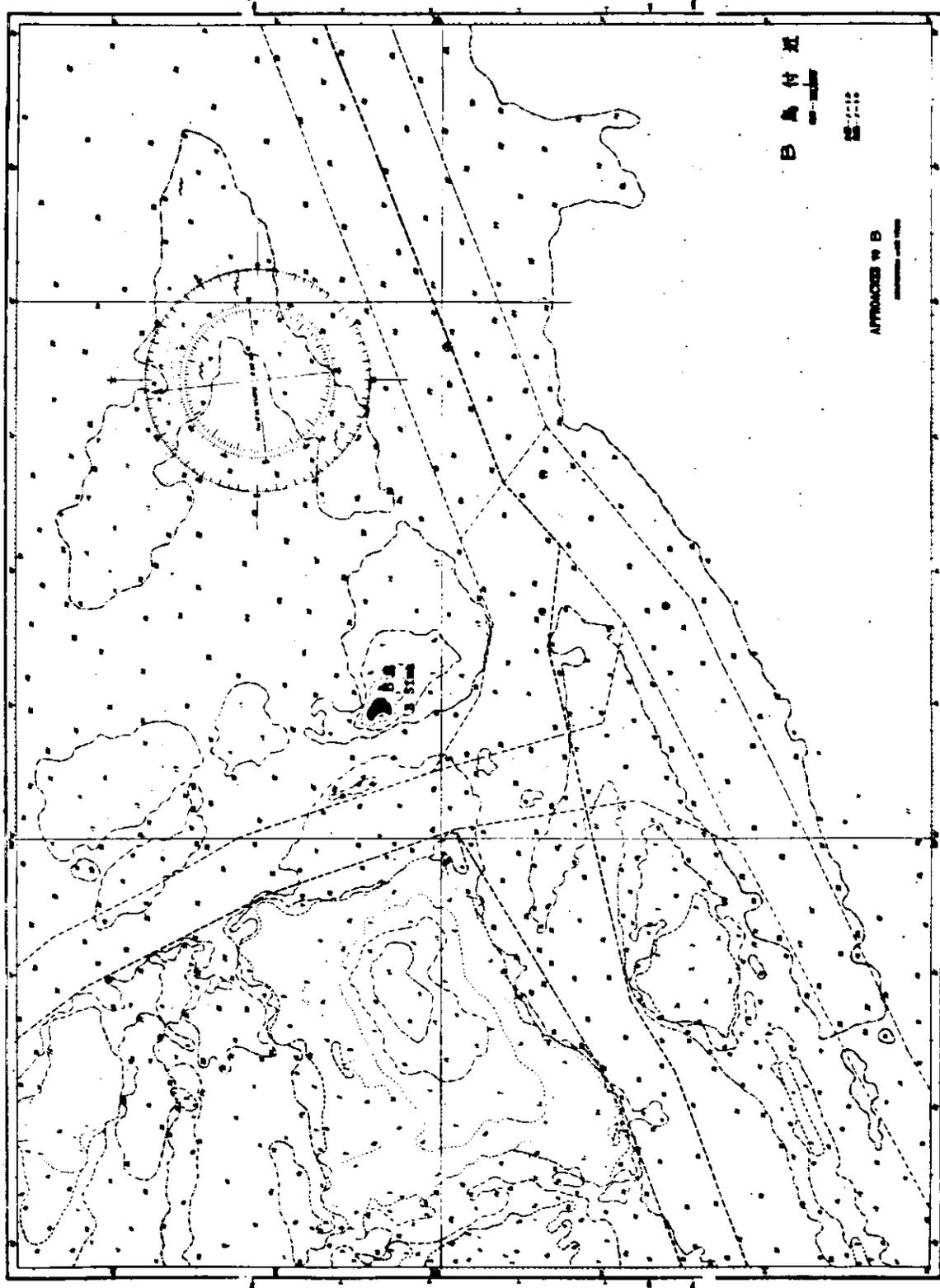


図 4.1.2 シミュレーター用海図 (B島付近)

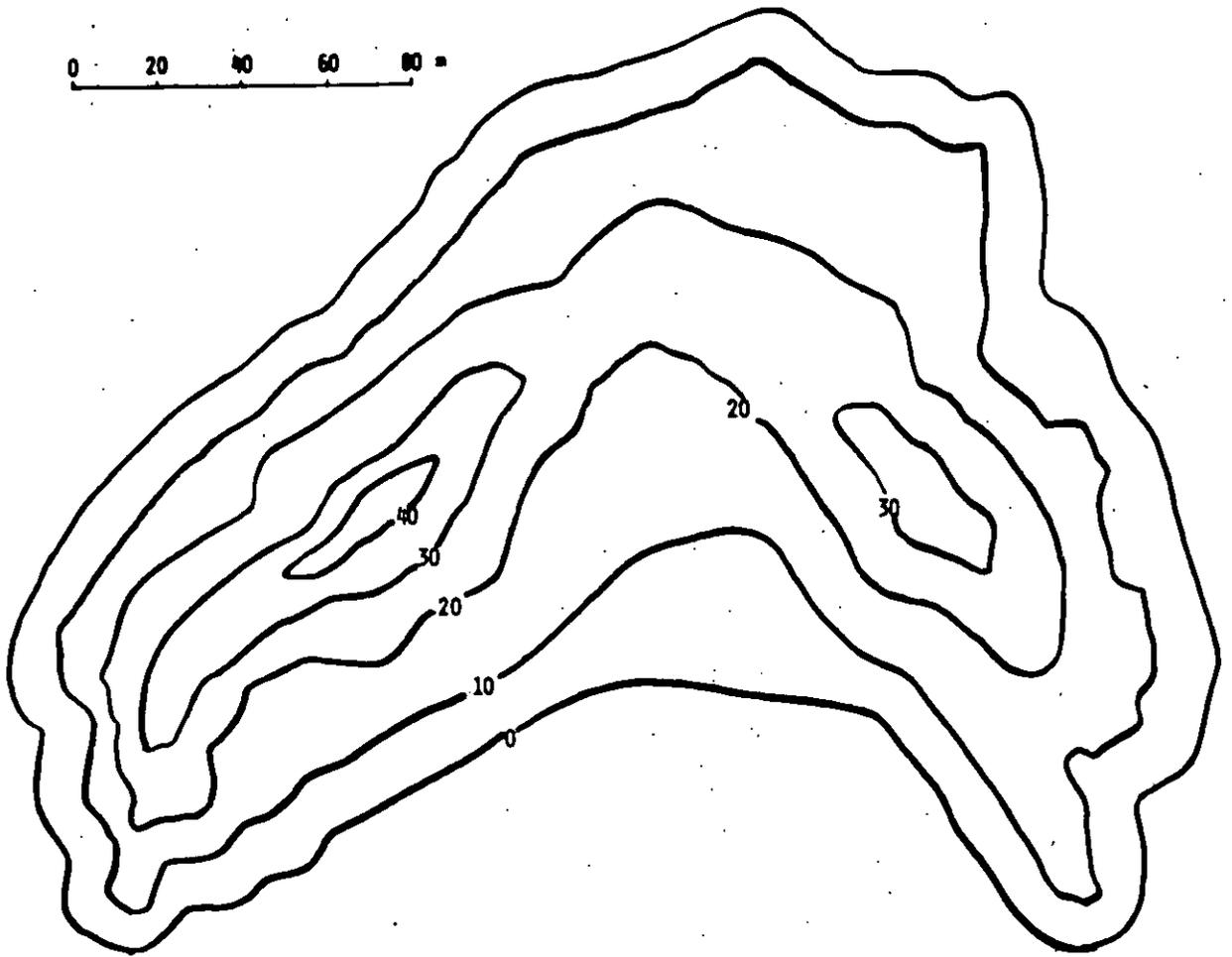


图 4.1.3 B 岛 地 图

4.2 自船の要目ならびに運動特性の設定

比較的頻繁に主機回転数を変更したり、大幅な船速低下を招くような操船の局面では、昨年度の報告で述べられた運動モデルには難点が生じる。この点の改良の具体策は、第5章で述べられている通りであり、近い内に、改良モデルの決定が可能であろう。しかし、このモデルの改良とは別に、本年度は、具体的に操船シミュレーションを実施する計画であったから、とりあえず、基本的には昨年度報告書に述べられているモデルに従って、本船の運動特性を確定することが求められる。この節では、本年度の操船シミュレーションで使用了本船の運動特性について説明する。

4.2.1 自船の要目

本年度のシミュレーションにおいては、表4.2.1に示す7隻の供試船が使用された。本年度の研究は、主として本船の大きさ、速力および針路安定性の差が、操船に及ぼす影響を調査することを目的として実施された。そのため、自船の大きさは2~3万トンから50万トン船までを考えて、 $L=150m \sim 390m$ とした。

表4.2.1 自船の要目

母型 船名 主要目	SHIP B					SHIP C
	B-20 B-200	B-201	B-202	B-203	B-50	C-20
垂線間長 $L_{pp}(m)$	300	150	150	200	390	300
型幅 $B_m(m)$	50.0				65.0	50.0
満載吃水 $d(m)$	17.0				22.0	17.0
方形係数 C_b	0.86				0.86	0.86
満載排水量 $\Delta(ton)$	224,800				491,600	224,800
航海速力 $V(knot)$	12.0	12.0	18.0	12.0	15.0	12.0
主機回転数 $N(rpm)$	100	100	100	100	100	100
L/V	48.6	24.3	16.2	32.4	50.5	48.6

4.2.2 自船の回頭運動の特性

本年度の実験で使用了運動モデルは次式である。

$$(L/V)^2 T_1' T_2' \ddot{\phi} + (L/V)(T_1' + T_2') \dot{\phi} + \dot{\phi} + (L/V)^2 \alpha' \phi^3 = (V/L)K' \delta + K' T_3' \dot{\delta} \quad (4.2.1)$$

この方程式の特性常数を決めるために、20万トンクラスのタンカー数隻の実績を参考にして、次に示すようないくつかの仮定を設ける。

- 1) 実船の定常旋回特性の実績によると、針路安定の劣る船においては、舵角 $10^\circ \sim 15^\circ$ に対応する定常旋回角速度にあまり大きな差が見受けられない。そこで、舵角 10° において、 $r' = L/R$ を一律に $0.32(rad)$ とする。
- 2) 実船のZ試験解析例によると、 $K'/(T_1' + T_2')$ にはあまり大きな差がない。 $K'/(T_1' + T_2')$ は、物理的には、船の旋回力と慣性の比に支配されると考えてよく、参考にした実船がいずれも $L/B = 6$ 、 $C_b = 0.82$ 程度で舵面積比も殆んど同じであることから、これらの船で $K'/(T_1' + T_2')$ を略一定と考えてよいと思われる。本年度の研究では、針路安定性の異なる数種の供試モデルを使用するが、こ

これらの性能の差は専ら旋回抵抗の差によると考え、各種供試モデルの $K'/(T'_1 + T'_2)$ は一定と考えることにする。参考にした実船の例から次式を用いる。

$$K'/(T'_1 + T'_2) = 0.45$$

3) T'_2, T'_3 については、実船の Z 試験解析によっては必ずしも十分な精度で求められないことが多いが、この両者の比については、参考にした実船例の多くでほとんど一定の値を取り平均的に $T'_2/T'_3 = 1/2.5$ 程度である。この T'_2, T'_3 は、両者の比を一定にしておけば、個々の値の大きさが多少変化しても、操縦運動の様相をあまり変えない。そこで実船例を参考にして T'_2, T'_3 を次のように定める。

$$T'_2 = 0.32$$

$$T'_3 = 0.8$$

以上の仮定のもとで、針路安定性の異なる数種のモデルを決める。針路安定性の目安としては、一般に定常旋回特性におけるループ幅が用いられているから、ここでもそれに従うことにする。針路不安定ループの半幅を次の 4 種にし、各々をモデル A、B、C、D とする。

モデル A	ループ半幅 (δ_c) =	1°
" B	"	2°
" C	"	5°
" D	"	10°

モデル A、B は大型肥大船で一般的な性能を表わす。モデル C は、大型肥大船の実績で大きく針路不安定であった例の性能を表わす。モデル D は、実績より大部針路不安定にした性能を表わし、針路不安定の許容限界の調査に使用する。

以上の条件から、 $T'_1, T'_2, T'_3, K', \alpha'$ を算定したものを表 4.2.2 に示す。

表 4.2.2 自船の操縦性指数

model	δ_c	K'	α'	T'_1	T'_2	T'_3
A	1°	-3.72	-0.01071	-8.51	0.32	0.8
B	2°	-2.19	-0.00772	-5.19	"	0.8
C	5°	-1.04	-0.00548	-2.63	"	0.8
D	10°	-0.573	-0.00451	-1.59	"	0.8

4.2.3 速力変動の特性

このモデルは、本年度、種々の議論の集中したところの一つであるが、とりあえず、本年度は昨年度の報告書に記載されたモデルで実験が実施されている。このモデルは、次式で与えられる。

$$T_4 \dot{V} + V + Cr \dot{\phi}^2 + C_\delta V^2 \delta^2 = K_4 n$$

これらの諸係数は、いずれも、そのなりたちから考えると、 V あるいは n の函数と考えられるが、運動モデルとしては可能な限り、簡略であることが望まれる。どこまで簡略化した形で取り扱うかについては、最終的には今後の検討に待つことになるが、とりあえず、本年度は阪大で実施された自航操縦性試験成績等を参考にして、いずれも一定として取り扱った。

本年度の実験における各々の係数の算定は次のようにして実施した。

1) T_4 については、自航模型試験例のうち、常用速力から半速の間の速力変化が生じたデータの実績にスケールを考慮して算出すればよい。本年度の実験は、模型実験と並行して実施されたので資料が

十分でなく、とりあえず、表 4.2.3 に示す値を用いた。

2) K_4 については、常用速力に対応する主機回転数を 100 rpm として算定した。

3) C_r , C_δ については、舵角 20° の定常旋回中の船速が常用速力の 60% であったので、この船速低下に慣性抵抗 $C_{r_2} \phi^2$ と操舵抵抗 $C_\delta V^2 \delta^2$ が同じ割合で効いているとみなして算出している。この両抵抗成分をどのように見積るのかについては、引き続き検討を要するが、とりあえず、本年度は表 4.2.3 に示す値を用いてシミュレーションを行っている。

表 4.2.3 自船の特性常数

母型 船名 係数	SHIP B				SHIP C
	B-20	B-200 B-201 B-202	B-203	B-50	C-20
T'_1	-5.19	-5.19	-5.19	-5.19	-2.63
T'_2	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
T'_3	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
K'	-2.19	-2.19	-2.19	-2.19	-1.04
α'	-0.00772	-0.00772	-0.00772	-0.00772	-0.00548
ループ幅	4°	4°	4°	4°	10°
T_E	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
δ_{max}	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
T_4 (sec)	300	245	500	400	300
C_r ($m \cdot s / deg^2$)	19.6	8.58	8.58	26.6	21.3
C_δ ($s / m \cdot deg^2$)	0.000225	0.00473*	0.00473*	0.000180	0.000225
K_4 (m)	3.70	3.70	3.70	4.63	3.70
T_b (sec)	4.0	60	300	4.0	4.0

$$*) T_4 \dot{V} + V + C_r \dot{\phi}^2 + C_\delta V^2 \delta^2 = K_4 n \text{ による } C_\delta' (m/s \cdot deg^2)$$

4.2.4 主機回転数の制御特性

船橋からの主機回転数指令に対する主機の追従特性を与える数学モデルとして、次の形が考えられる。

$$n^* = n + T_n \dot{n}$$

実船の例によると、常用出力から後進を発令した時、主機停止に至るまでに、まず、前進出力を停止するが、船速が一定以上に強い場合にはプロペラの遊転速力が速く、直ちには後進出力を発動できない。プロペラ速力がある程度低下した後、後進が発令されるから、後進出力を得る迄には、タービン船で 45~90 sec、ディーゼル船で 15~45 sec を要するといわれる。そこで、 T_b の値としては、60 sec 位が妥当と思われる。

なお、 $T_b = 60 \text{ sec}$ として、操船シミュレーションを行った際、職業操船者の印象としては、現在、主機回転数指令に対する主機の追従がプログラム制御されている船の主機特性の感じが表現されているとの判断であった。しかし、前進出力の間で、回転数を切りかえる場合には、60 sec では追従が遅いとの印象もあった。これらは、スラスト変化に対する船の速力の時定数の大きさから考えて、実際の船の運動性能に対する影響としては必ずしも重要ではないかも知れないが、操船者の操船感覚に与える

影響は必ずしも小さくないから、今後の検討を期待したい。

4.2.5 操舵機特性

操舵スタンドからの指令舵角に対する舵角の追従は、現在、一般に使用されている電動油圧式操舵機の場合、一次遅れと操舵速度制限とで表現できる。

$$\begin{aligned} \delta^* &= \delta + T_E \dot{\delta} & |\delta^* - \delta| &\leq \delta_a \\ |\dot{\delta}| &= \dot{\delta}_{\max} & |\delta^* - \delta| &> \delta_a \end{aligned}$$

何隻かの実船の例によると、 T_E および $\dot{\delta}_{\max}$ は略、次の値でよい。

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_{\max} &= 3^\circ/\text{s} \\ T_E &= 2.5 \text{ sec} \end{aligned}$$

4.3 操船者

本年度の研究における操船者は次の通りである。

まず、昭和50年11～12月に実施された予備実験においては、大阪大学の学生4名(A、B、C、D氏)が操船を行った。彼らは、いずれも、実船の操縦の経験は皆無であるが、本シミュレータによって十分な操船練習を行い、供試モデルの特性にも慣れている。

昭和51年1月の本実験における操船者は、日立造船(株)および川崎重工(株)から航海士と操舵員、各2名を派けんして頂いた。各氏の乗船経歴は、E氏(航海士、26年)、F氏(操舵員、10年)、G氏(航海士、12年)およびH氏(操舵員、18年)であり、いずれもベテランである。このうち、F氏およびH氏は広島大学船舶操縦シミュレータの経験者である。

さらに、一部の実験においては、練習船船長の経験を有する商船大学教官I氏および同大学大学院学生(J、K、L氏)(彼らは操船経験がある)による操船が行われた。

4.4 操船シミュレーションの概要

本年度、実施した実験の概要は次の通りである。

実施した実験の種類は模擬操船の内容の項で述べた次の3つである。

- 1) 保針、変針操船
- 2) 避航操船
- 3) 出入港操船

いずれも、予備実験、本実験にわけて行われた。予備実験は、本シミュレータの基本性能を確認するとともに、本実験をひかえて、実験の手順、解析法の検討、その他、実験に際して起こる種々の問題の提起を目的としておこなわれた。供試船、操船者は前節迄に示した通りである。

次に、個々の実験の具体的な内容や設定条件を示す。

(1) 保針、変針操船

この場合には、船の回頭運動のみが与えられればよいから、Visual displayは遠視物標のみとした。また、外乱は一切、与えていない。実験データを集録する前に、5～10分間自由に操舵を行った。実験の新針路指示は、すべて、オペレータ(シミュレータ操作員)から行ない、その指示によって航海士は任意の舵角または針路指示を操舵手に行なった。なお、予備実験にあっては、航海士は介在していない。新針路整定以後は、保針してもらい、同時に保針実験とした。

供試船は、予備実験ではB-200、201及び202とし、主にL/Vの影響を調べ、B-20、B-50、C-20の三隻で、主にループ幅の影響を調べた。

操船者は、模擬船橋内の舵角指示器、ジャイロレピータ、回頭角速度計および船速指示器、主機回転数

指示器をみて操船を行った。

(2) 避航操船

相手船は船長300mの大型タンカーであり、船速は、12ノットまたは15ノットでいずれも自船の設定船速と同一とした。

相手船の設定位置、進行針路は、行合船（針路180°、初期距離5.4マイル）と横切船（針路270°、初期位置5.4マイル、初期見合角45°）である。

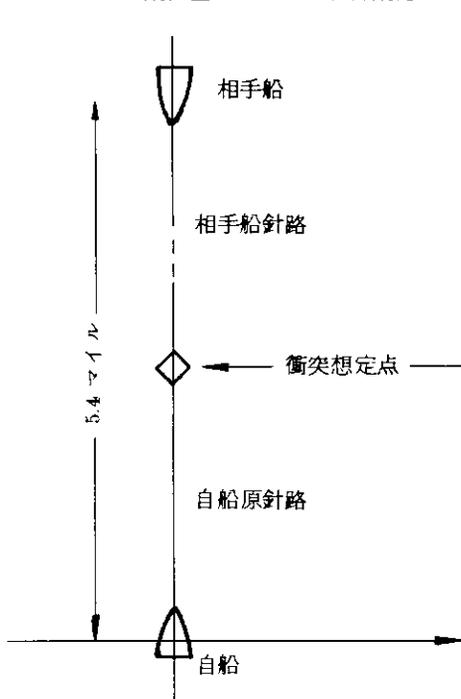


図 4.4.1 行合船

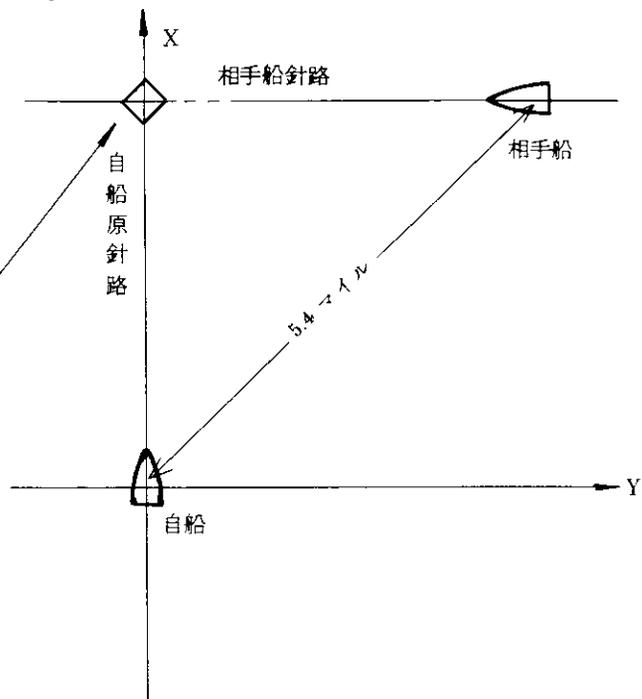


図 4.4.2 横切船

供試船は、予備実験がB-200、本実験がB-20とB-50である。なお本実験では横切船のみ実験した。いずれも、オペレータからの指示は一切おこなわず、航海士の判断に一任している。もし、必要であれば、エンジン・コントロールをおこなってもよいほか、舵角の制限、針路、航路の制限はない。1ケースを除いて、すべて原針路復帰後、保針を行なった。また、本実験では、不慣れのため、スクリーン上からのみ、相手船との距離を判断するのは困難と思われるので、口頭またはメータによって、相対距離を情報として与えた。他の情報は、船橋内メータのみである。

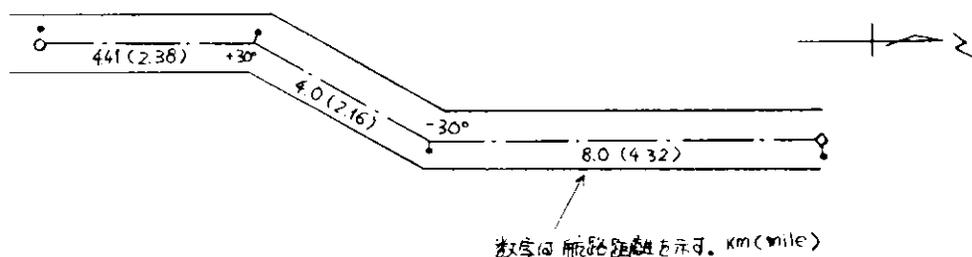


図 4.4.3 港湾へ接近する場合の指定航路



4.5 操船シミュレーションの結果

予備実験および本実験の結果は、目下、大阪大学において解析中であって、まだ、完全なものとはなっていないが、そのなかから、一部をかいつまんで紹介する。その前に、現在、行なっているデータ処理のフローチャートを図4.5.1に示す。

4.5.1 保針・変針操船

(1) 保針操船

今回の実験では、波、風、潮流等のランダムな外乱は加えられなかったので、保針は比較的容易である。しかし、そうかといって、平衡状態に達すると、それ以後一回の操舵も加えなくてよいか、というわけではない。自分自身の履歴である過去の操舵、そして、それによって誘起された船の運動、さらに、わずかばかりの電氣的雑音等によって、たえず平衡状態がくずれていると考えてよい。

一方、外乱のある状態で、保針中、比較的単純なパンパン制御操舵などを行なっている時には「繰返し操舵によって、十分に予測可能となり、この予測の助けを借りて加えられた外乱を濾波していると考えることができる。」⁽⁶⁾

したがって、外乱のない状態では、舵角や舵切換針路、舵切換角速度などのヒストグラムは、実際の操舵時のものとある程度様相のちがったものになることが予想される⁽⁶⁾が、舵角や針路誤差のスペクトラムには、人間の操舵による自励発振が顕著にあらわれている。

図4.5.2、図4.5.3、図4.5.4はそれぞれ舵角のタイムヒストリー、自己相関関数およびスペクトラムの例である。図4.5.3中の実線は、得られた自己相関関数を次の形の関数で近似した結果を示す。

$$R(\tau) = A e^{-\alpha \tau} \cos \Omega \tau \quad (4.5.1)$$

$$\text{ただし } A = 1.54$$

$$\alpha = 0.0314$$

$$\Omega = 0.170$$

図4.5.4のスペクトラムは、この $R(\tau)$ から計算したものである。この結果によると、 $\omega = 0.17$ (rad) 周期 $T = 3.7$ 秒の明瞭な自励発振が認められる。

(2) 変針操船

変針操船は、予備実験で各種船型、指令針路、被験者を変えて36ケース、本実験で、同じく20ケース行なった。ここではそのうち本実験の結果について述べる。表4.5.1に実験名およびその内容を示す。

表4.5.1 実施した変針操船の種類

番号	供試船	変針角	被験者	番号	供試船	変針角	被験者
1	B-20	20°	E/F	11	B-50	10°	G/H
2	B-20	20°	E/F	12	B-50	20°	G/H
3	B-20	40°	E/F	13	B-50	30°	G/H
4	B-20	40°	E/F	14	B-50	40°	G/H
5	C-20	20°	E/F	15	B-50	50°	G/H
6	C-20	20°	E/F	16	C-20	10°	G/H
7	C-20	40°	E/F	17	C-20	20°	G/H
8	C-20	40°	E/F	18	C-20	30°	G/H
9	B-50	20°	G/H	19	C-20	40°	G/H
10	B-50	20°	G/H	20	C-20	50°	G/H

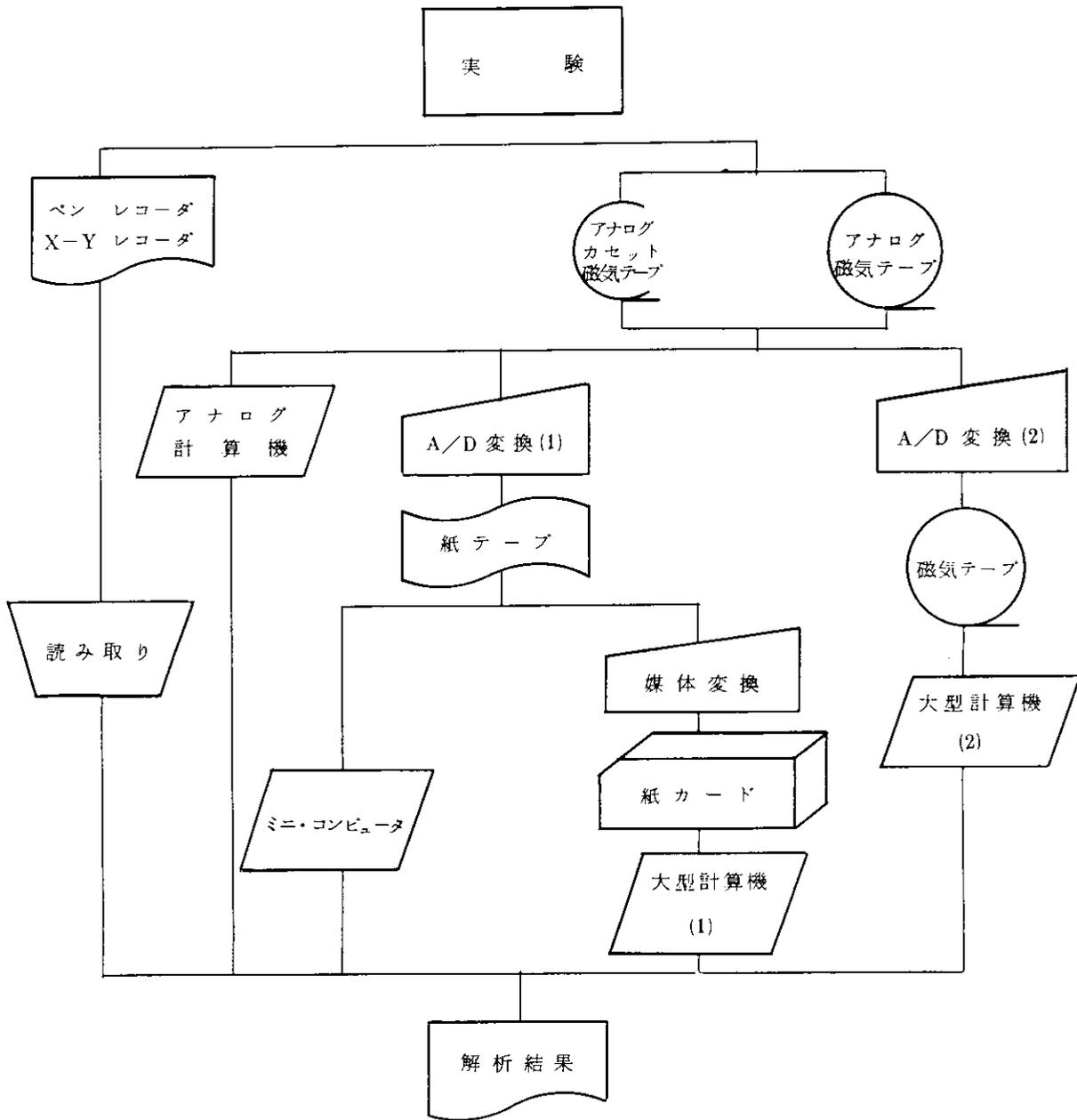


図 4.5.1 データ処理のフローチャート

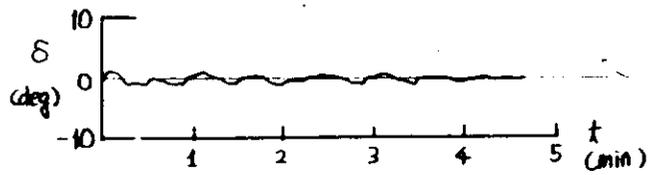


図 4.5.2 舵角のタイムヒストリーの例

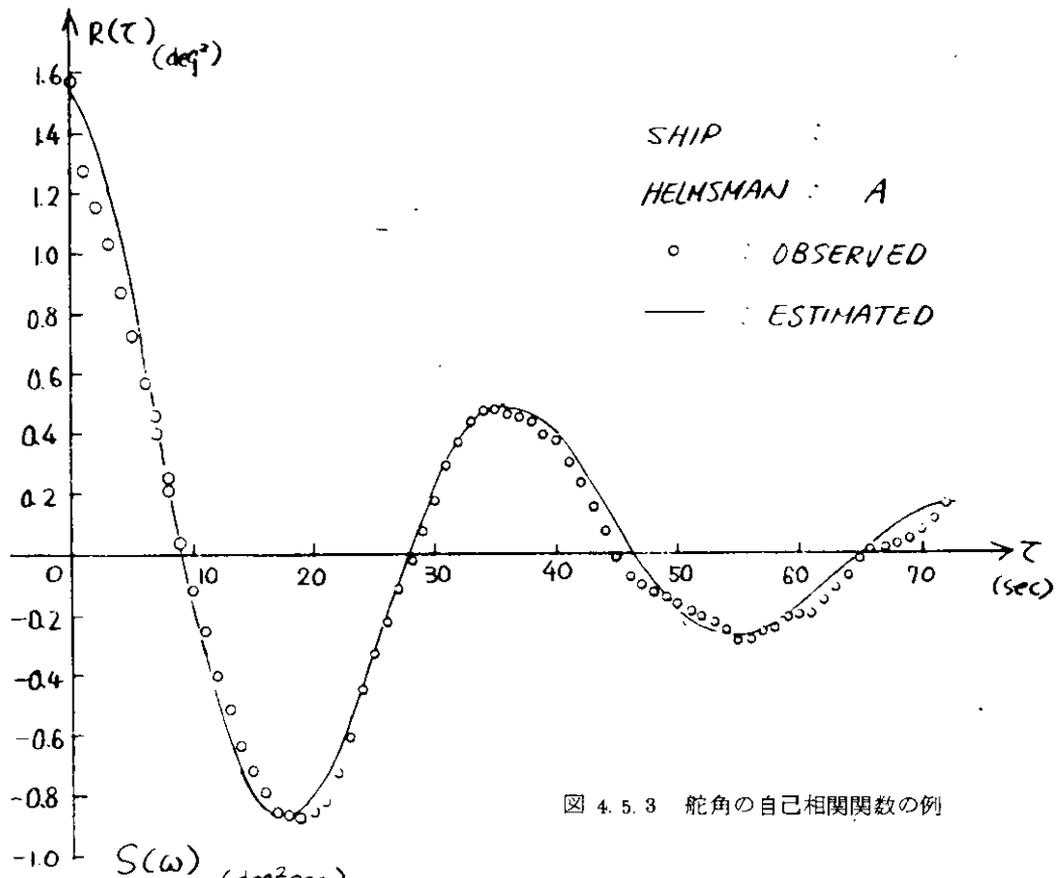


図 4.5.3 舵角の自己相関関数の例

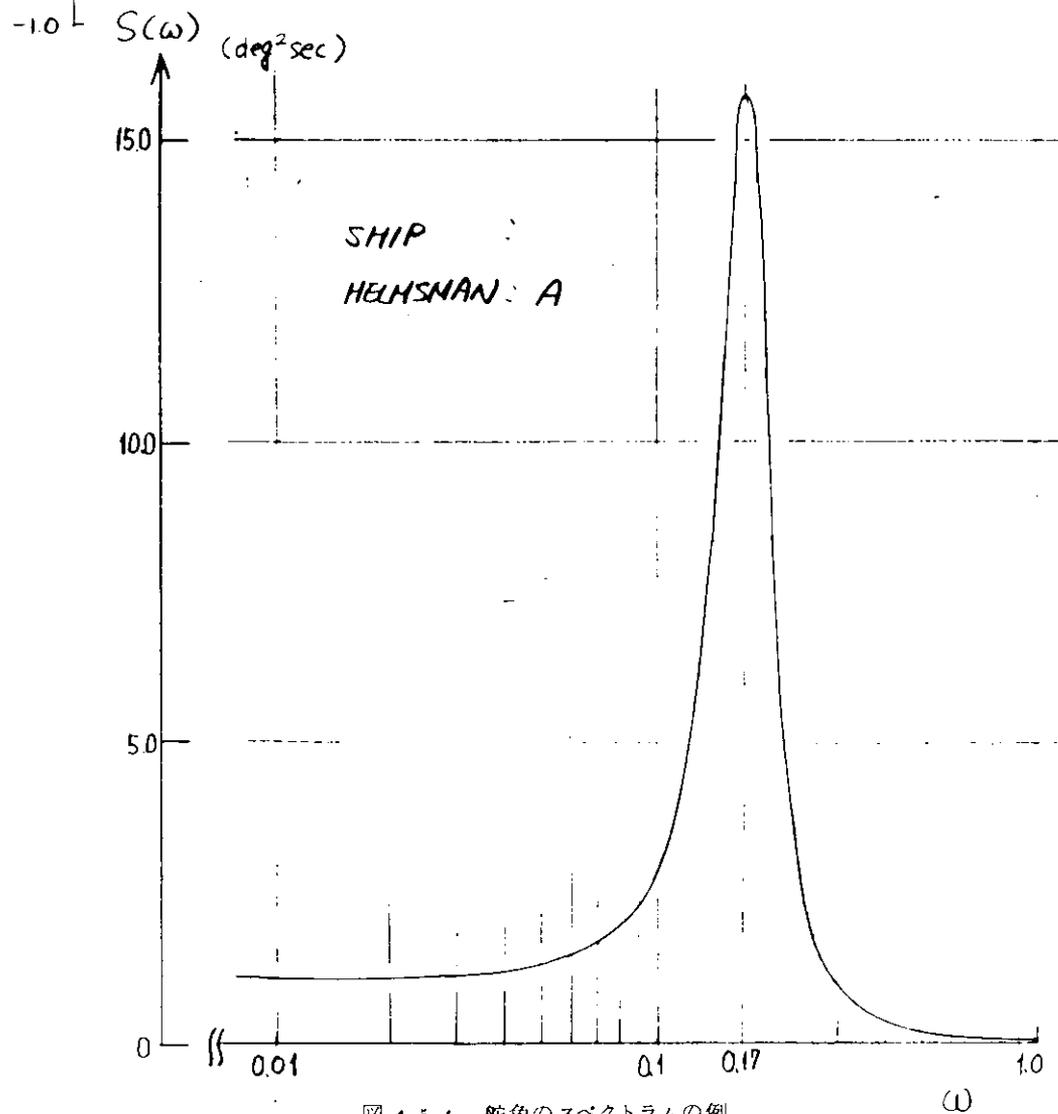


図 4.5.4 舵角のスペクトラムの例

今回は、変針時定数、舵角の自乗平均、回頭角速度の自乗平均について調べた。

(a) 変針時定数 T_L

新針路への追従のすみやかさを表わす指標であり、次式で定義する。

$$T_L = \frac{1}{\phi_I} \int_0^{\infty} |\phi_I - \phi| dt \quad (4.5.2)$$

あるいは

$$T_L = \frac{1}{\phi_I} \int_{t_1}^{t_2} |\phi_I - \phi| dt \quad (4.5.3)$$

ただし t_1 : 変針開始時刻

t_2 : 変針完了時刻

$T_L^* = \frac{1}{\phi_I} \int_0^{\infty} (\phi_I - \phi) dt$ によって定義される T_L^* は、変針時の針路角変化を一次遅れ特性で近似した場合の時定数を表わす。これは新針路時間と考えるとよく、 $T_L^* \cdot V$ は新針路距離を与える。今回、求めた T_L は $(\phi_I - \phi)$ の絶対値を採用することによって、オーバーシュートをマイナス側に評価する意味を持たせた。従って、新針路距離の概念とはやや異なったものになっている。

さらに、刻々に変化する船速を考慮して、無次元化した T_L' を定義する。

$$T_L' = \frac{1}{L\phi_I} \int_0^{\infty} V |\phi_I - \phi| dt \quad (4.5.4)$$

この無次元化された T_L' は、

$$T_L'' = T_L \left(\frac{\bar{V}}{L} \right) \quad (4.5.5)$$

ただし、 \bar{V} は変針中 ((4.5.3) 式の積分区間) の平均船速 (m/s)

によって定義した T_L'' とほぼ等しい。(約3割ほど (4.5.5) 式の T_L' の方が小さい。)

図 4.5.5 および図 4.5.6 はこの T_L および T_L' を与える。なお、本実験は、同一船、同一被験者で、指令針路を順番にかえておこなったので、各 ϕ_I 変針時の初期船速は 2 ~ 3 ノットの違いがある。したがって、比較は T_L' の方が容易である。まず、このグラフを見て気づくのは、旋回性能の違い (B-20 と C-20) や L/V の違い (B-20 と B-50) よりも、はるかに個人差の方が大きいことである。このことは、舵角のタイム・ヒストリーを見れば明らかであるが、この両者は、全く対称的といってよいほど操舵のパターンが違ふ。一方、同一試行に対する分散は、あまり見られない (20°、40° の変針) から、各被験者に対する T_L' の値は、かなり確度の高いものであろう。

なお、実験番号 13 は、オペレータが指示針路のミスに実験中に気づいたために他との比較は困難である。

(b) 舵角の自乗平均 $\sqrt{\delta^2}$

変針に要した舵角の大きさを表わす指標として、舵角の自乗平均値を用いる。

$$\sqrt{\delta^2} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \delta^2 dt} \quad (4.5.6)$$

(c) 回頭角速度の自乗平均 $\sqrt{\phi^2}$

変針による運動の大きさを表わす指標として、回頭角速度の自乗平均値を用いる。

$$\sqrt{\phi^2} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \phi^2 dt} \quad (4.5.7)$$

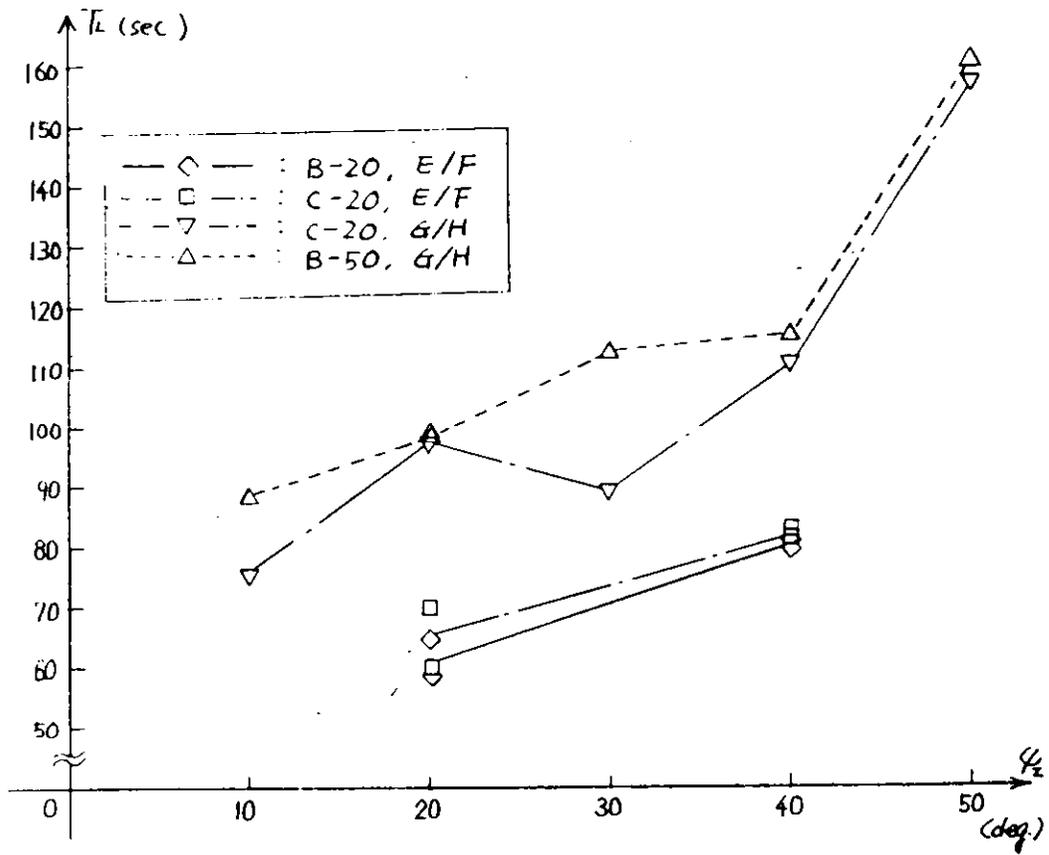


図 4.5.5 変針角と追従遅れの関係

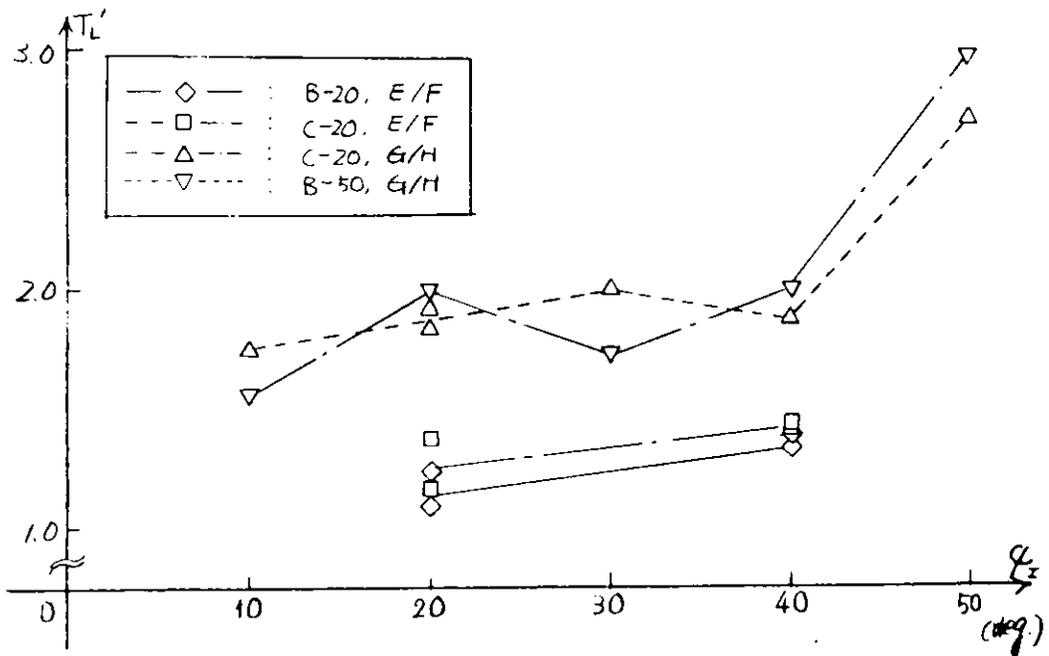


図 4.5.6 変針角と無次元追従遅れとの関係

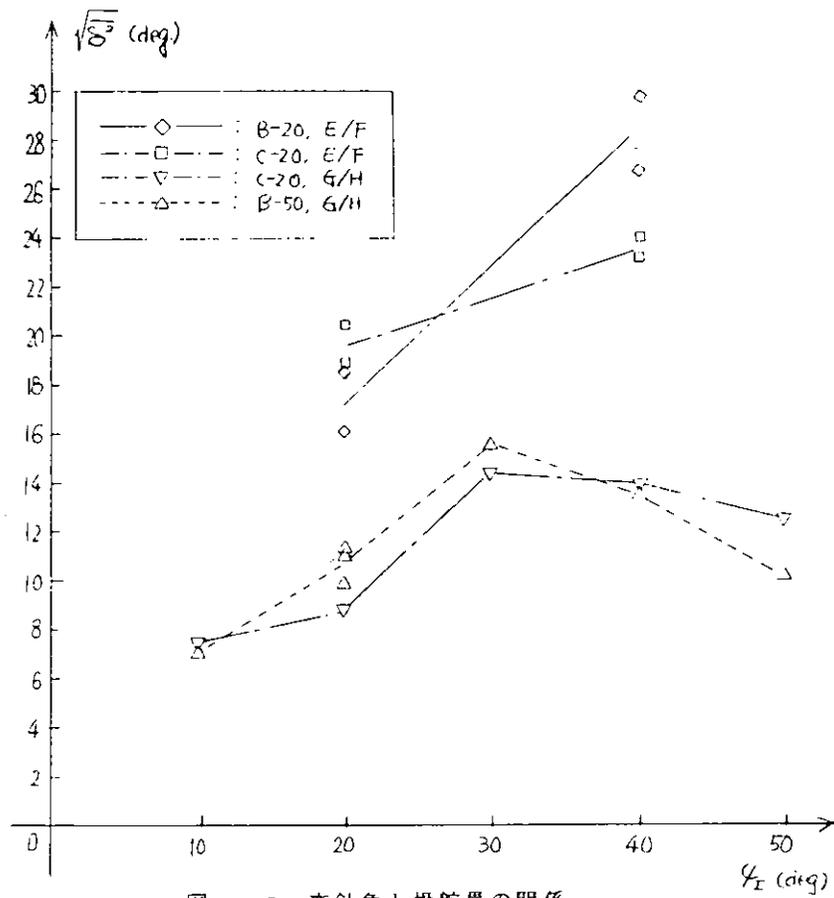


図 4.5.7 変針角と操舵量の関係

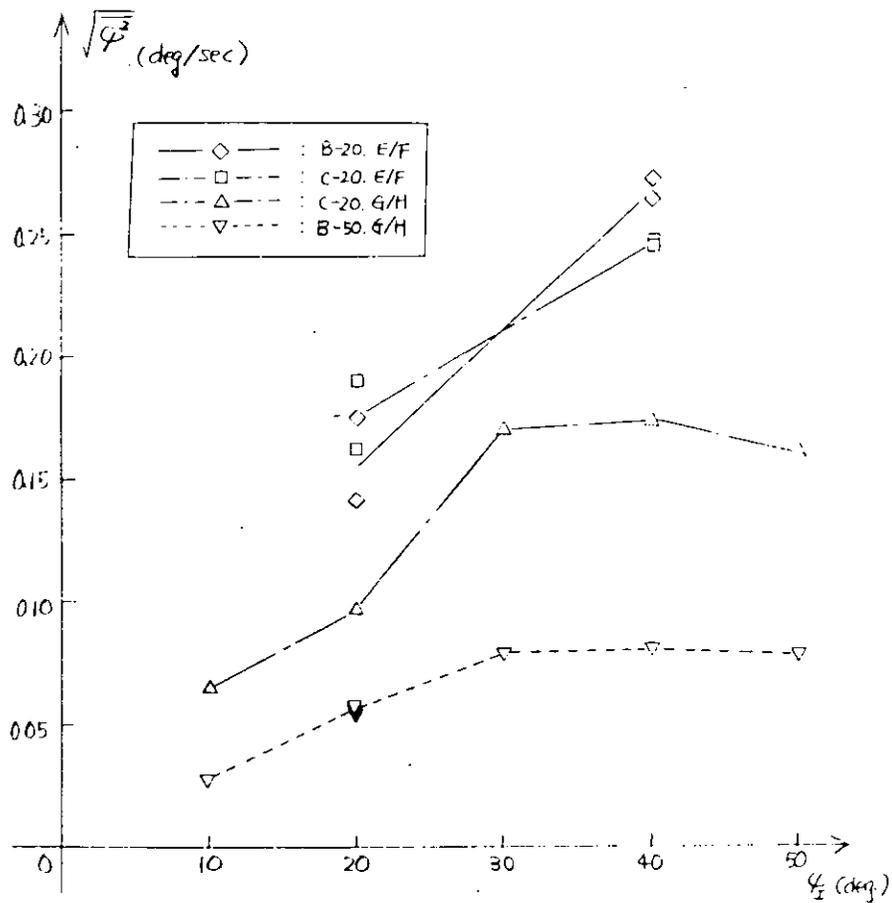


図 4.5.8 変針角と変針運動の大きさの関係

図4.5.7、図4.5.8にこの自乗平均値をそれぞれ示す。さきほどの T_L と同様、これらにも操舵員の違いが大きく、はっきりとあらわれている。また、G/Hのペアで、 T_L が $\sqrt{\delta^2}$ の傾向をよくうつしていることがわかる。また、G/Hのペアで、 $\sqrt{\phi^2}$ がB-50とC-20とで平行的な開きがあるのは、旋回性能のちがいのあらわれであろう。

次に、個人差による違いを処理するために、次のような仮定をおく。人間が操舵した場合、ある程度の船型の違い、性能の違いは吸収され、大きな影響を受けない。そして、その船に十分に習熟しておれば、被験者の判断で最適に近い変針を行なう。

そう仮定すると、実験の結果出てくる被験者ごとのバラつきは、個人による最適判断のバラつきであろう。そこで図4.5.9に注目する。この図は、先ほど別個に求めた T_L' 、 $\sqrt{\delta^2}$ をそれぞれ両軸にとり、逆に ϕ_I をパラメータとした図である。 ϕ_I が一定の線に沿ってながめるなら、おのずとスケッチのようなラフな双曲線らしきものとなるであろう。こうすると、先ほどの個人差も説明できる。現実には、他にもオーバーシュート、操舵回数等の要素がはいり、複雑になるが、変針操舵評価の一助となる。

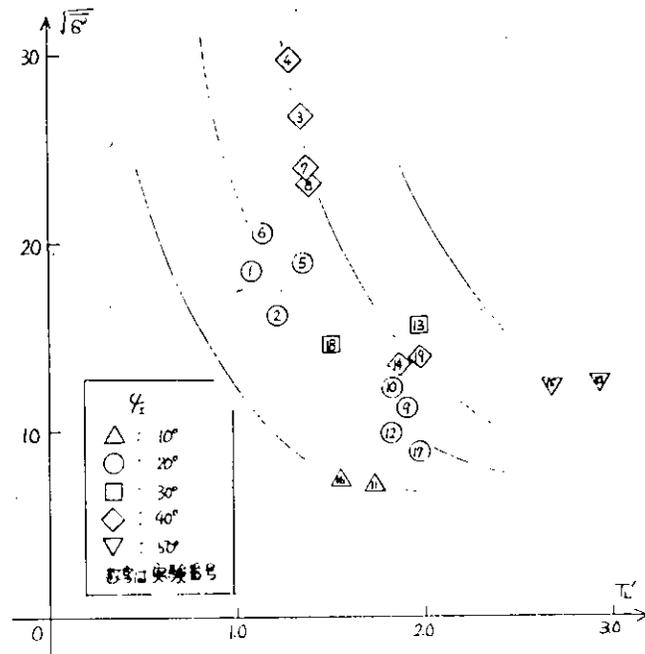


図4.5.9 追従遅れと平均舵角の関係

以上の解析は、すべて、変針を完了した時に定まる評価値であった。しかし、一見、簡単そうに見えるが、人間の操舵による変針という動作は、制御工学的に解析することは困難である。そこで、そのメカニズムを垣間見ようとしたのが $\phi - \phi$ 位相面であって、図4.5.10にその一例を示す。この例では $+40^\circ$ および -40° 変針をおこなっている。なお、新しい試みとして、この位相面に δ をも表示している。すなわち、 $+40^\circ$ 変針を例にとるなら、最初“Hard”のレンジで旋回させ ϕ が 24° 付近から“Starboard”、“Easy”、そして“Midship”とおとしてゆき、 ϕ が 32° 付近から細かいあて舵をとって、 ϕ を 40° 付近へ収束させている。

この位相面の例では、被験者は、 $\frac{2}{3} \times \phi_1$ まで、旋回を発達させ、以後は $\dot{\phi} = k(\phi_1 - \phi)$ となるような制御を加えつつ、変針しているようすが読みとれる。また、右旋回および左旋回を比較すると、ほぼ対称と思えるほどの軌跡を描くような操舵をしている。したがって、このパターンがこの被験者の基本的な変針制御であると思われる。

今後、この種の基本的操船のデータ収集・解析によって、人間の応答を予測し、記述することが可能となり、さらに、手近なところでは、人間の肩がわりをするオートパイロットの設計・改良に役立つものと期待できる。

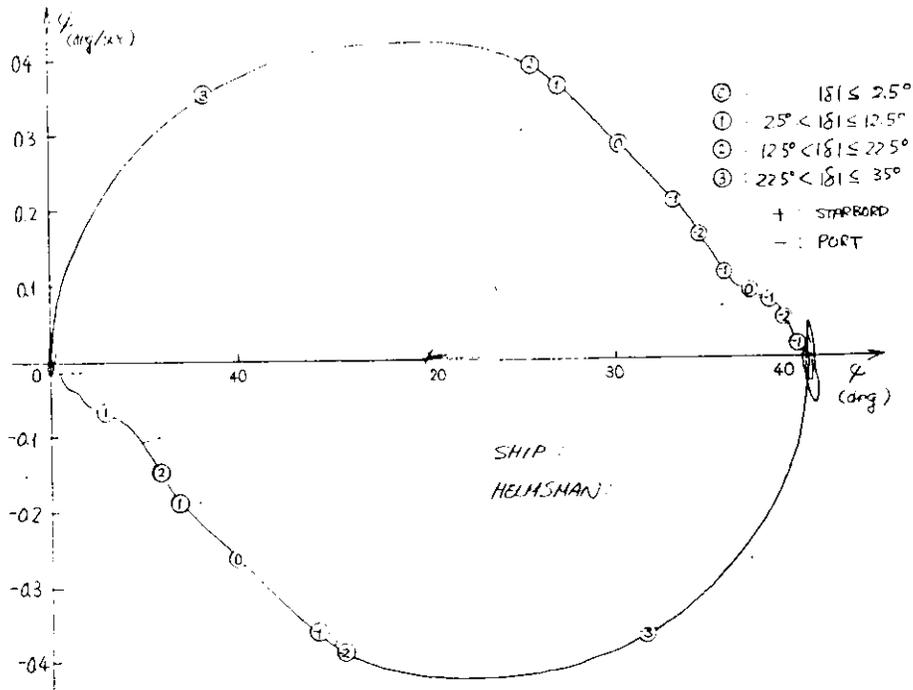


図 4.5.10 変針中の $\dot{\phi} - \phi$ 位相面軌跡

4.5.2 避航操船

特に、最近、海上交通量の増大、船型の大型化に伴ない、いかに安全に運航するかは、当事者の操船者はもちろん、オーナーや行政管理者にとっても、切実な問題となっている。

したがって、シミュレータを使った実験で、その避航・衝突の状況が再現できる有効なデータが得られたなら、非常に有益である。そこで、今回は、その手はじめとして、代表的な場面を設定して、その後の、人間の処置をできるだけ Visual な形で実現してみた。それゆえ、単なるケーススタディの域を脱し切れないが、ある程度、定量的な把握は十分な実験数がそろった段階で発表することにして、ここでは、本実験の 4 ケース (交角 90° の横切船) を紹介する。

図 4.5.11 ~ 図 4.5.14 にその航跡を示す。黒丸が自船、白丸が相手船で、横にうってある数字が時間経過 (分) を示す。なお、図 4.5.12 のみは、原針路ではなく、原航路へ復帰する操船を行なっている。

次に、図 4.5.15 は、以上の航跡を重ねてみたものであり、変針と同じく、明らかに被験者による差違が見られる。さらに、それぞれで避航開始距離、横移動量等が類似していることは、定着した操舵パターン、一貫した航海士の指示等を示すものとして注目される。

では、その両者の操舵パターンがいかなるものであるかを ϕ 、 $\dot{\phi}$ とともにタイム・ヒストリーの形で図 4.5.16 ~ 図 4.5.19 に示す。 δ 、 $\dot{\phi}$ の波形にその差が顕著である。

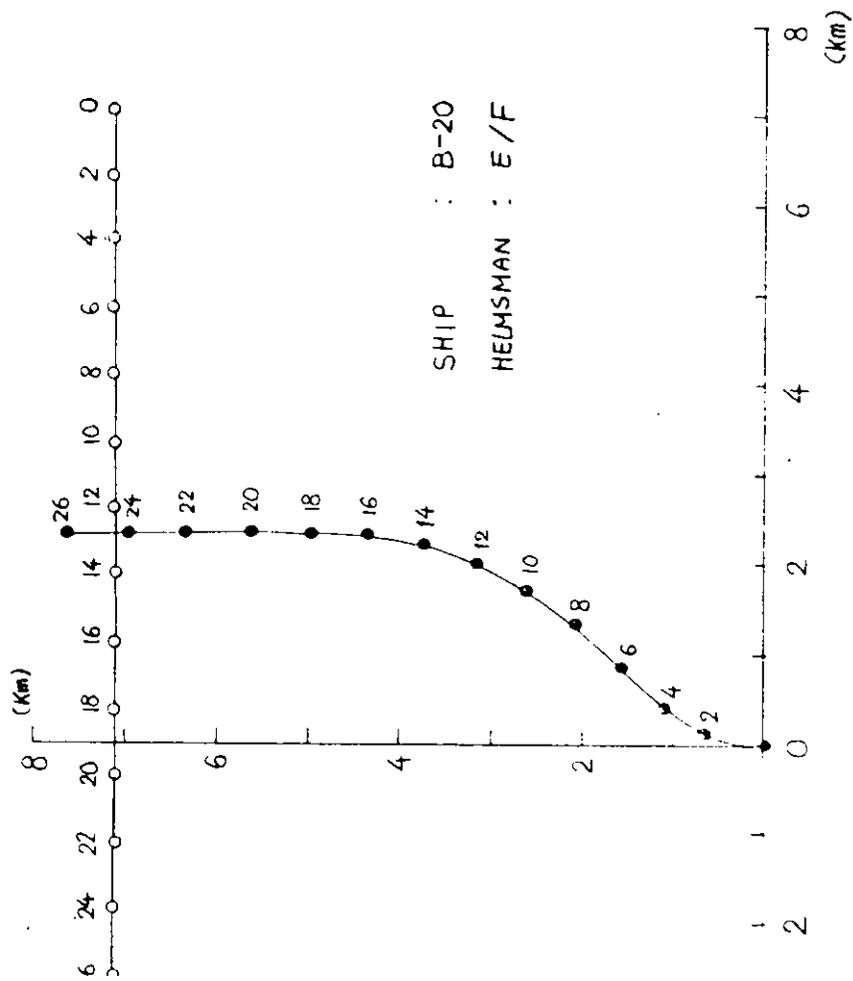


図 4.5.11 避航中の自船の航跡例(1)

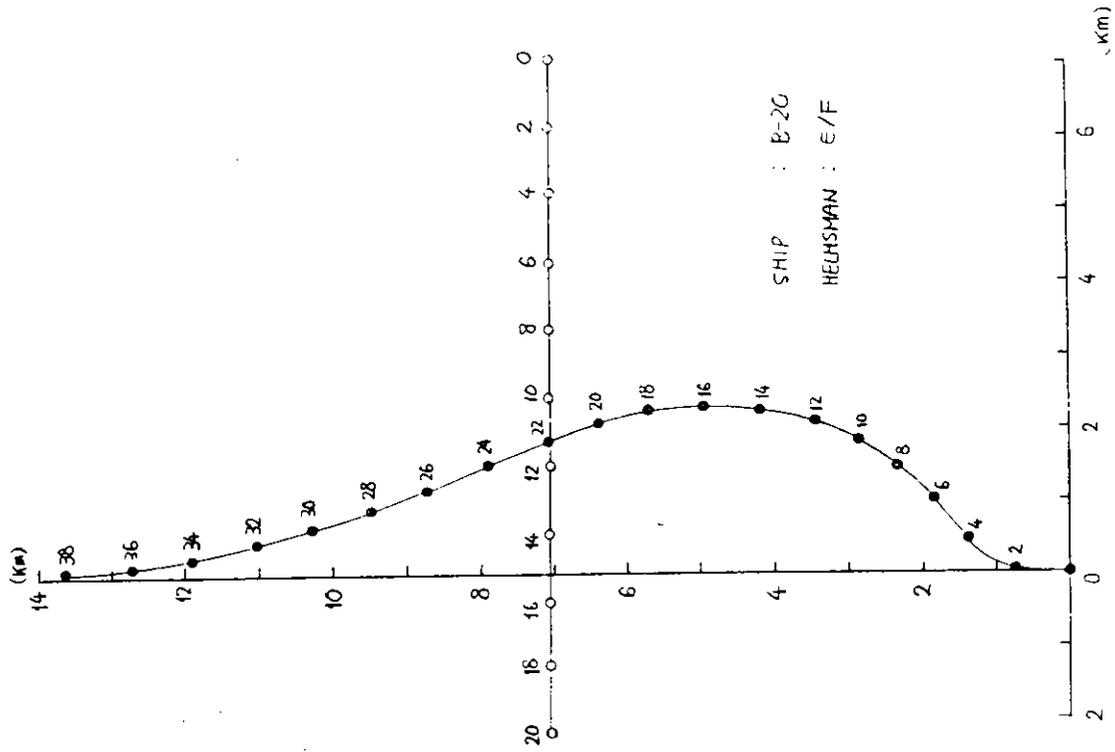


図 4.5.12 避航中の自船の航跡例(2)

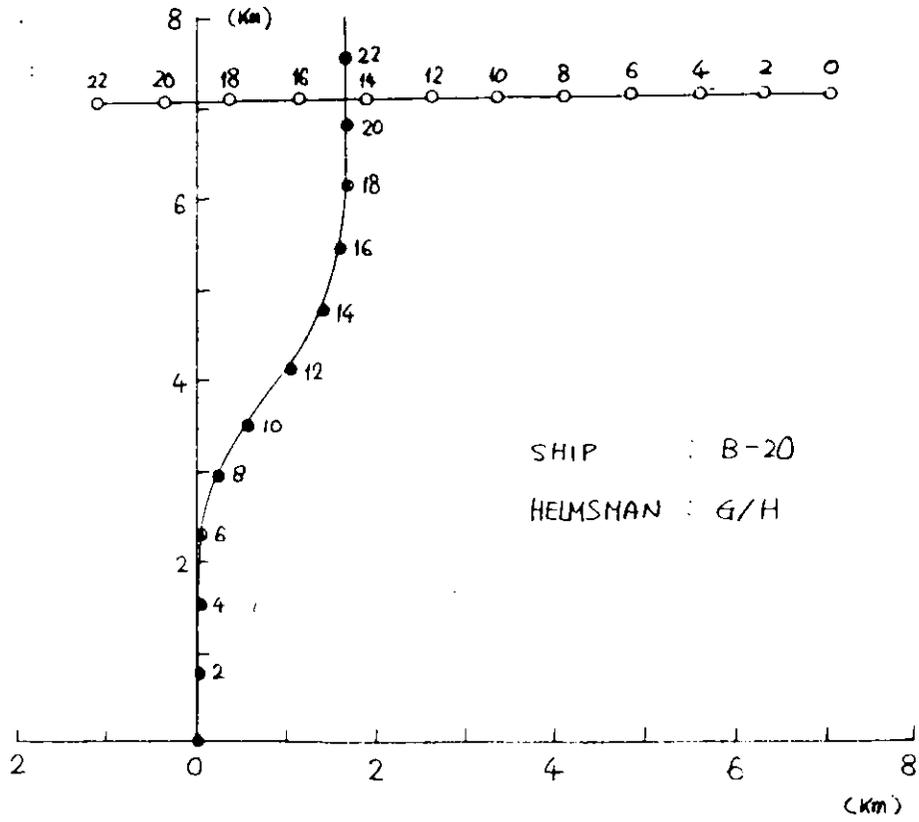


図 4.5.13 避航中の自船の航跡例(3)

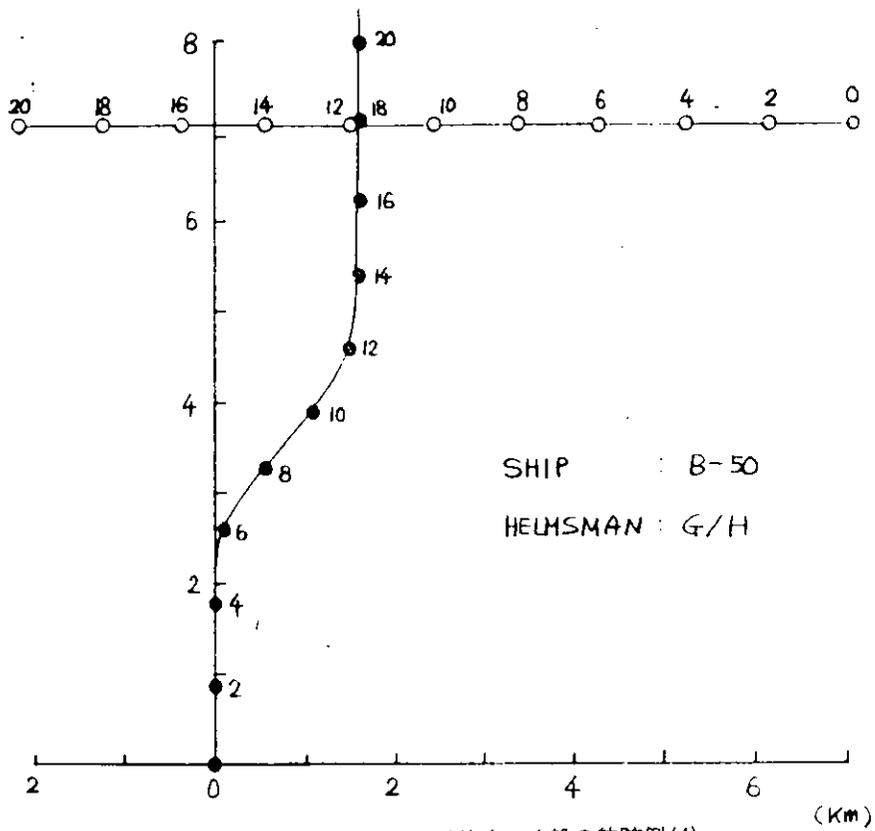


図 4.5.14 避航中の自船の航跡例(4)

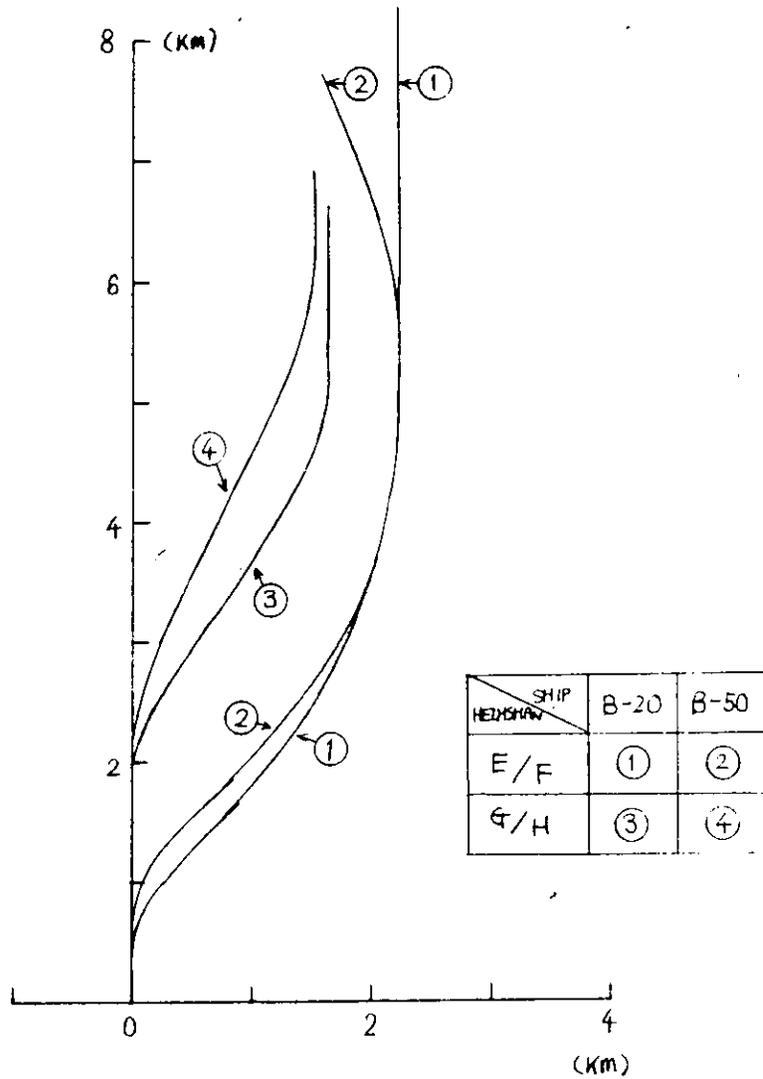


図 4.5.15 避航中の自船の航跡例 (1~4)

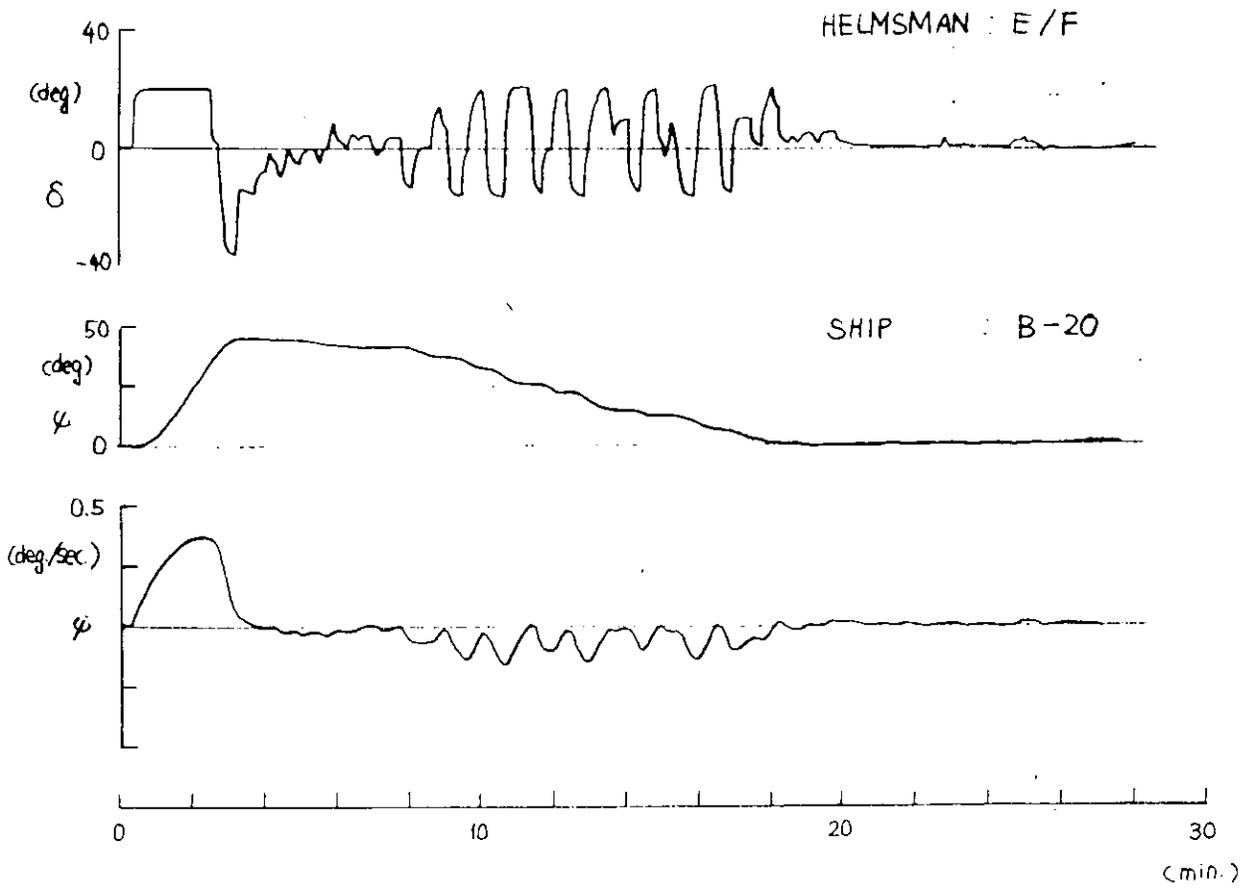


図 4. 5. 16 避航運動のタイムヒストリーの例(1)

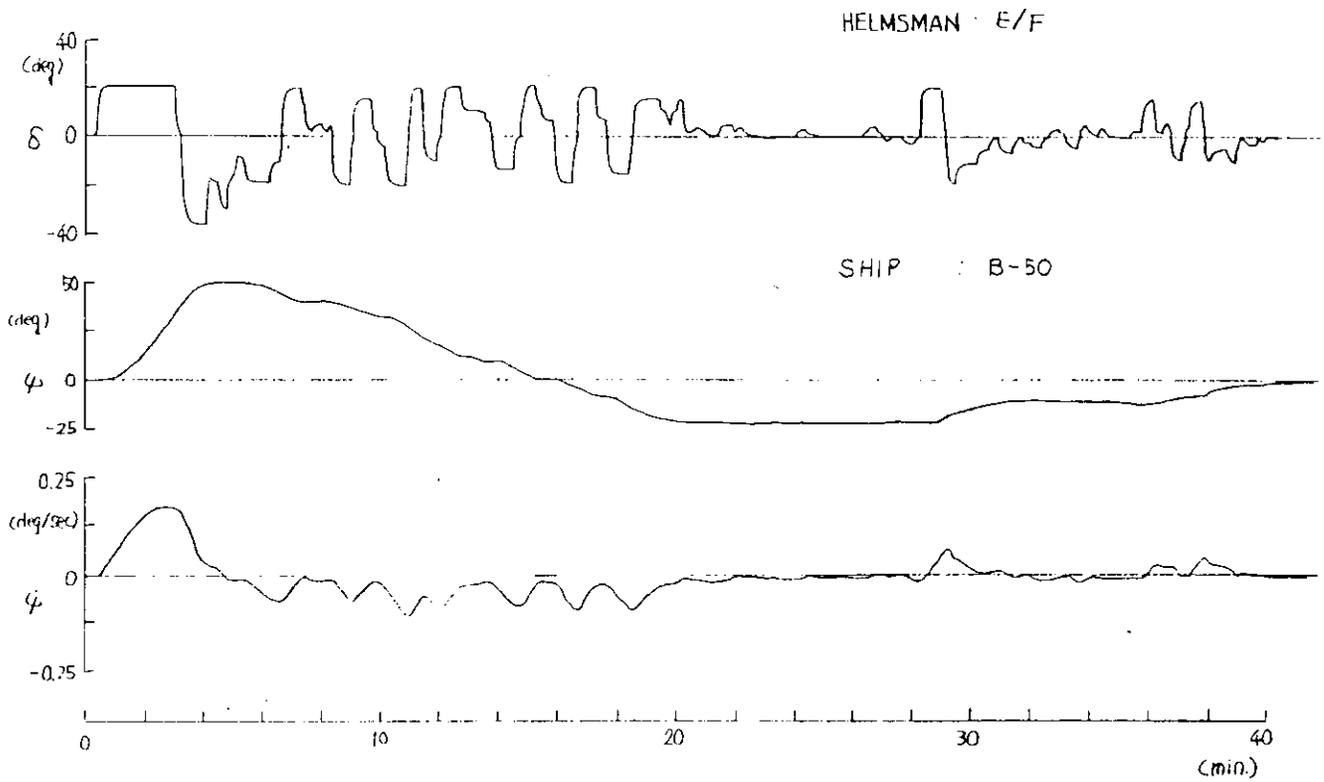


図 4. 5. 17 避航運動のタイムヒストリーの例(2)

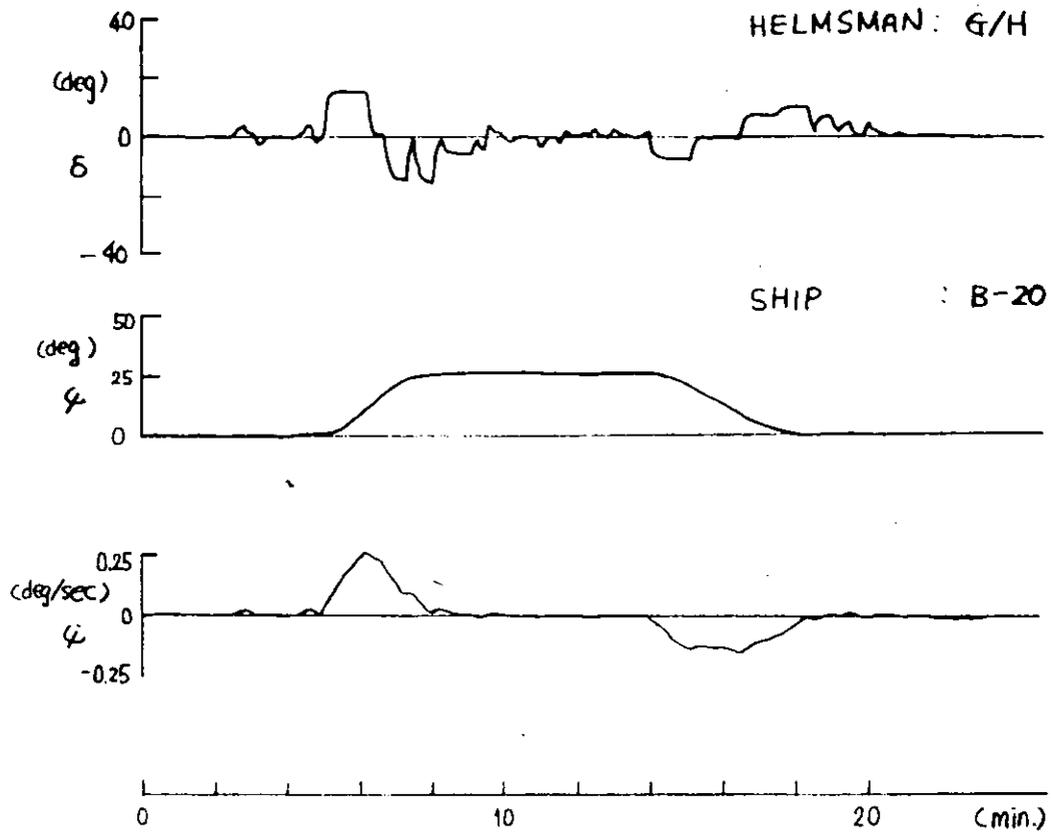


図 4.5.18 避航運動のタイムヒストリーの例(3)

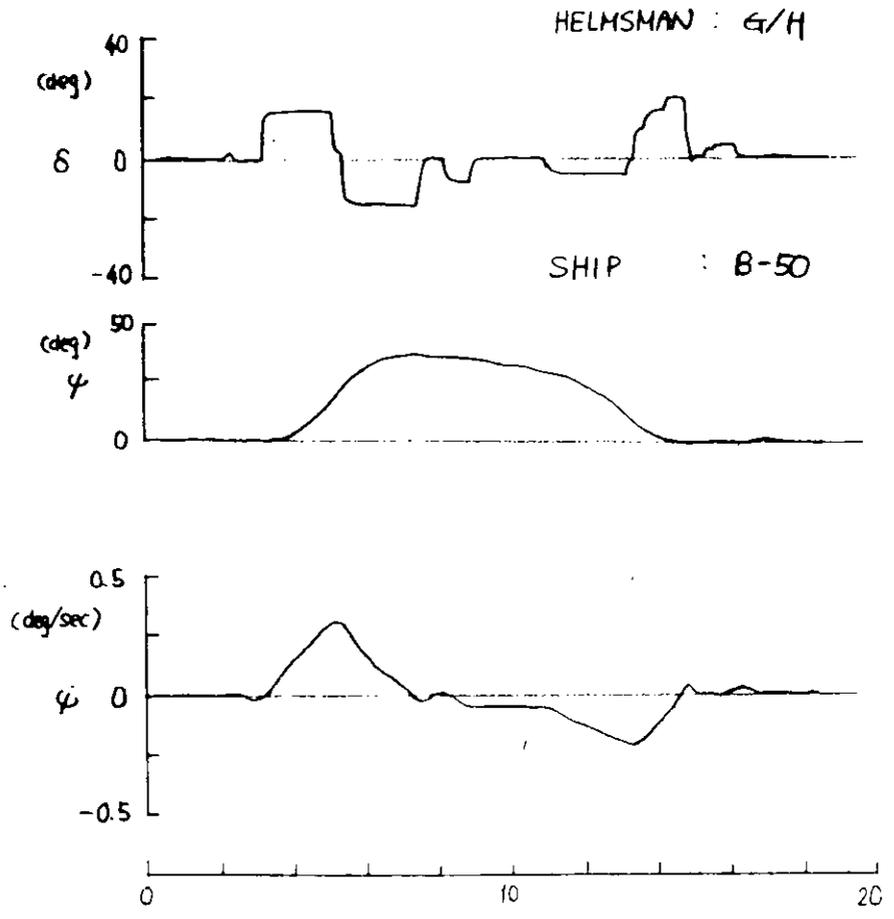


図 4.5.19 避航運動のタイムヒストリーの例(4)

以上で、どういふ操舵で、どういふ航路を通して避航したかがわかった。しかし、相手船がどういふ角度に見え、いつ船首を横切ったか、最接近距離とその方位はいくらかという問題になると、もうひとつよくわからない。ひとつの方法は、相手船との相対座標を刻々にプロットして作る相対軌跡である。⁽⁷⁾ 先ほどの図4.5.11～図4.5.14において、同時刻における点を結ぶベクトルを作り、起点(自船)を原点に寄せ集めて、その終点(相手船)を結ぶことによって得られる。相手船までの距離がひと目でわかり便利である。しかし、この軌跡の欠点は、その時に見える相手船の角(自船船首から見た角)がわからないのである。

そこで、もうひとつの方法として、大きさは同じく相手船までの距離であるが向きが自船船首から見た相手船の見える角度であるようなベクトル軌跡を導入した。図4.5.20に示すのがそれで、相対軌跡と仮称する。この図の原点に自船があり、しかも、常に縦軸が自船船首方向である。ちょうど操船者がブリッジから見たり、自船の回頭に同期させたレーダ上で見る相手船の航跡であり、操船者の得る情報や感覚に近い。

この図は、絶対航跡や相対軌跡とは大分様相が異なり、避航の動作が非常に鋭敏に出てくる。そして、この図から読みとれば、避航動作を評価する諸量が多く求まる。

4.5.3 入港操船

船の速度制御は、操縦性能の中でも、まだ未知な問題が山積している分野である。操船者は、長年の勘にたよるか、今までの統計的資料から算定して、増減速を行なっているのが現状である。さらに最近の大型タンカーは、低速での保針性能に劣っているものが多く、タグ・ボートの助けなしには接岸できない。

もし、シミュレータが、船の前進方向の応

答、特に推力変動時の応答をかなり精度よく模擬し得るなら、入港操船に対する数々のデータを供することができよう。

今回の実験の目的のひとつは、数学モデルの検定であり、もうひとつは、人間がどういふ状態量でもって、長時間の予測を行ない、速度の制御を行なっているかを調べることである。

実験は、学生および商船大生に対して16ケース、専門家に対して4ケース行なった。実験中、専門家の意見を聞きながら、数学モデルを修正する方法をとったため、十分な資料とはなり得ないので、主に学生の行なった実験の解析結果を例示する。

図4.5.21～図4.5.27は船速を港までの航程 R_D に対してプロットしたものであり、途中○印で示された回転数に変更したことを示す。また、その上方は船速、回転数および舵角のタイム・ヒストリーである。専門家の場合、直線に近いかっこうで減速し、学生の場合はどちらかという円弧に近い形で

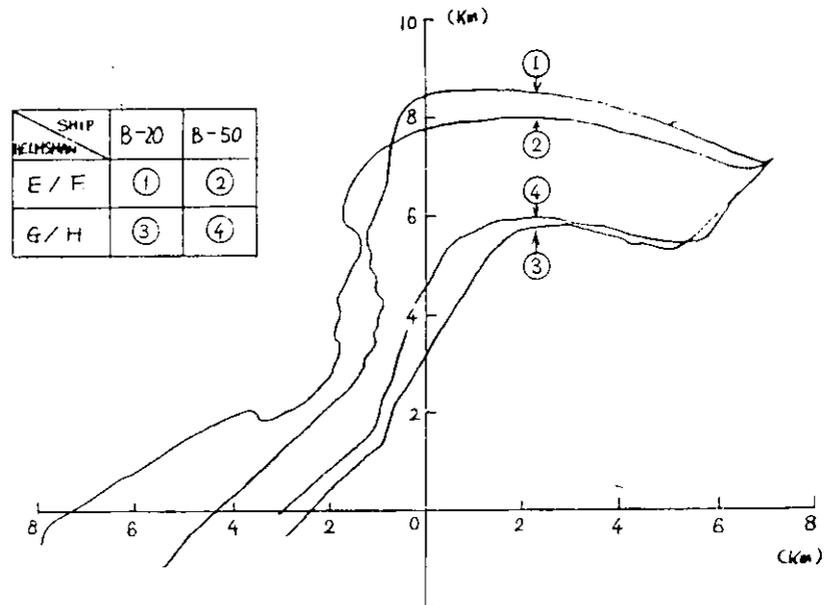


図4.5.20 避航中の相手船の相対位置軌跡例

減速しているようすがわかる。

次に回転数の変更を発令した時と船速を時間ベースでプロットしたのが図 4.5.28 であり、これを見ると、Half 発令後の時間はさほど影響のないことがわかる。

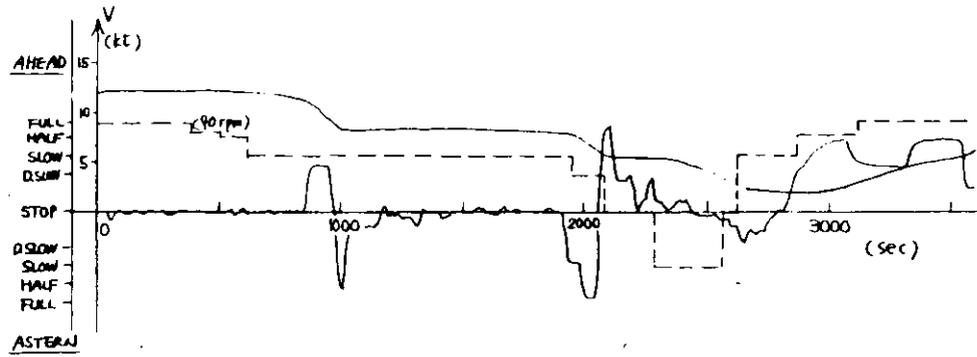
他方、 R_I を次のように定義する。

$$R_I = -\frac{V^2}{2V} \quad (4.5.6)$$

これは、その時の船速、加速度を維持するとき、止まるまでに走る航程距離であり、理論的には R_D (その時の港までの航程) になるように常に保っておけばよい。

しかし、実際には、図 4.5.29 ~ 図 4.5.31 に示すように、多少の個人差はあれ、 $R_I = R_D$ の直線より下方を平行に走るようになる。これ以上の議論については現在、継続、考察中である。

また、操船者の側から見た数学モデルの検定については、評価の項でも述べたが、 n の演算は 1 次遅れでよい、 T_d は 500 sec くらいがよく感じが出ている。 C_r 、 C_d は、妥当な値か、やや大きすぎる等の意見が出され、全体としては、十分よく模擬できたようである。



HELMSMAN : E/F
SHIP : B-20

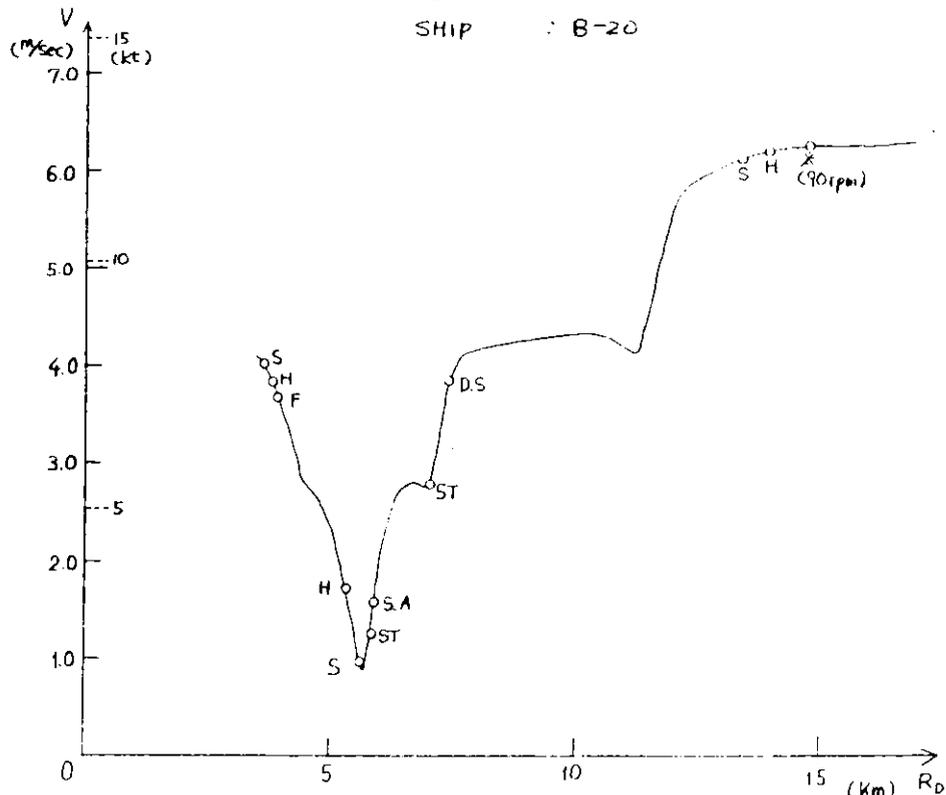
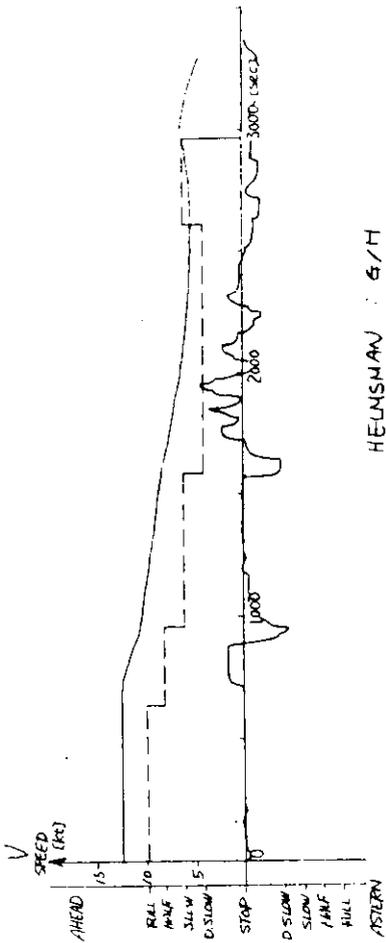
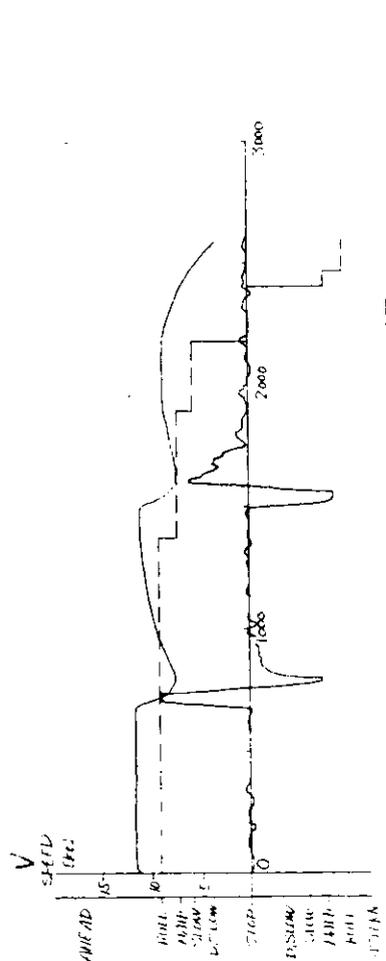
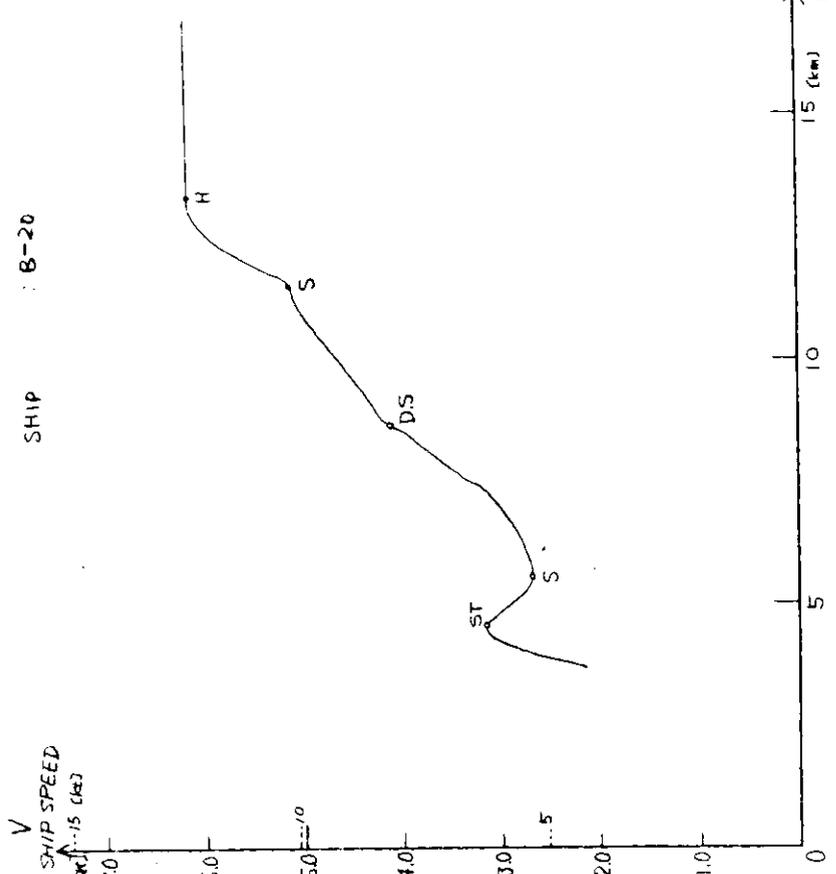


図 4.5.21 入港操船のタイムヒストリーと V-R_D 軌跡 (I)



HEUSMAN : E/H
SHIP : B-20

V
SHIP SPEED
(kts) 15 (kts)
7.0
6.0
5.0
4.0
3.0
2.0
1.0
0



HEUSMAN : E/F
SHIP : B-20

V
SHIP SPEED
(kts) 15 (kts)
7.0
6.0
5.0
4.0
3.0
2.0
1.0
0

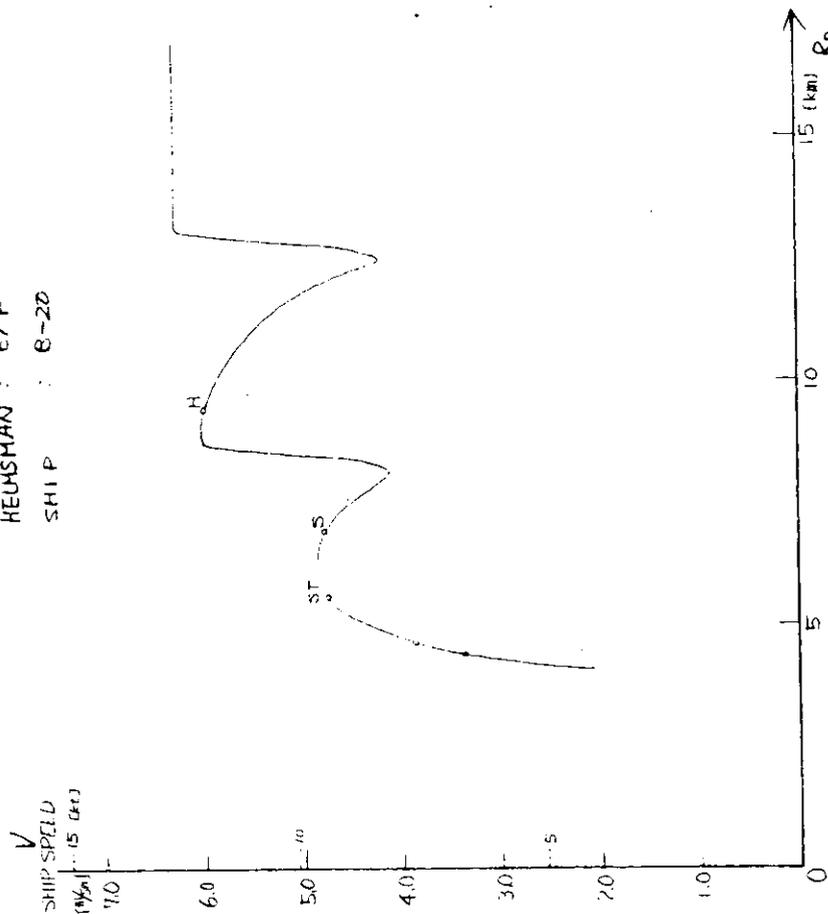


図 4.5.23 入港操船のタイムヒストリーとV-RD軌跡(3)

図 4.5.22 入港操船のタイムヒストリーとV-RD軌跡(2)

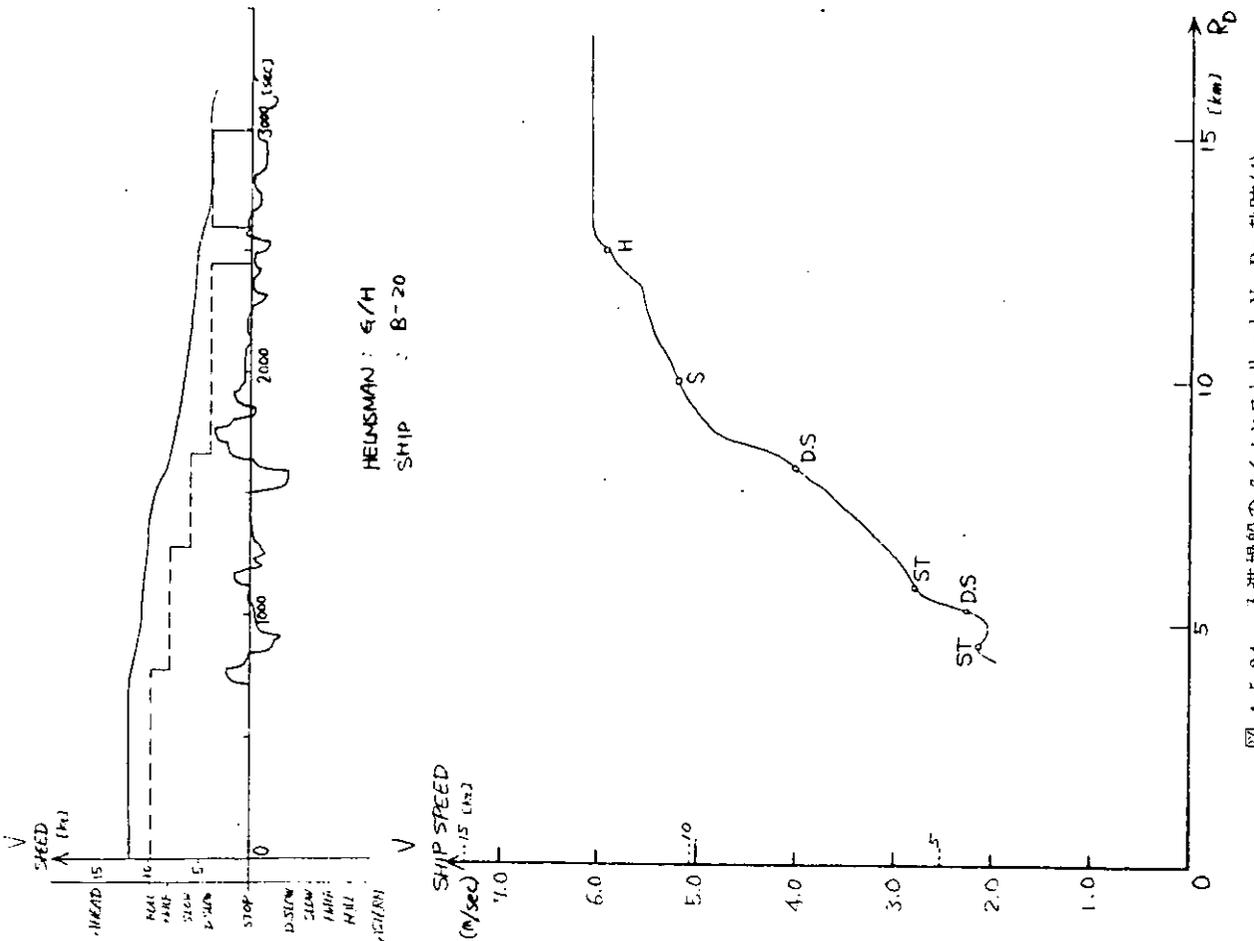


図 4.5.24 入港操船のタイムヒストリーと V-RD 軌跡 (4)

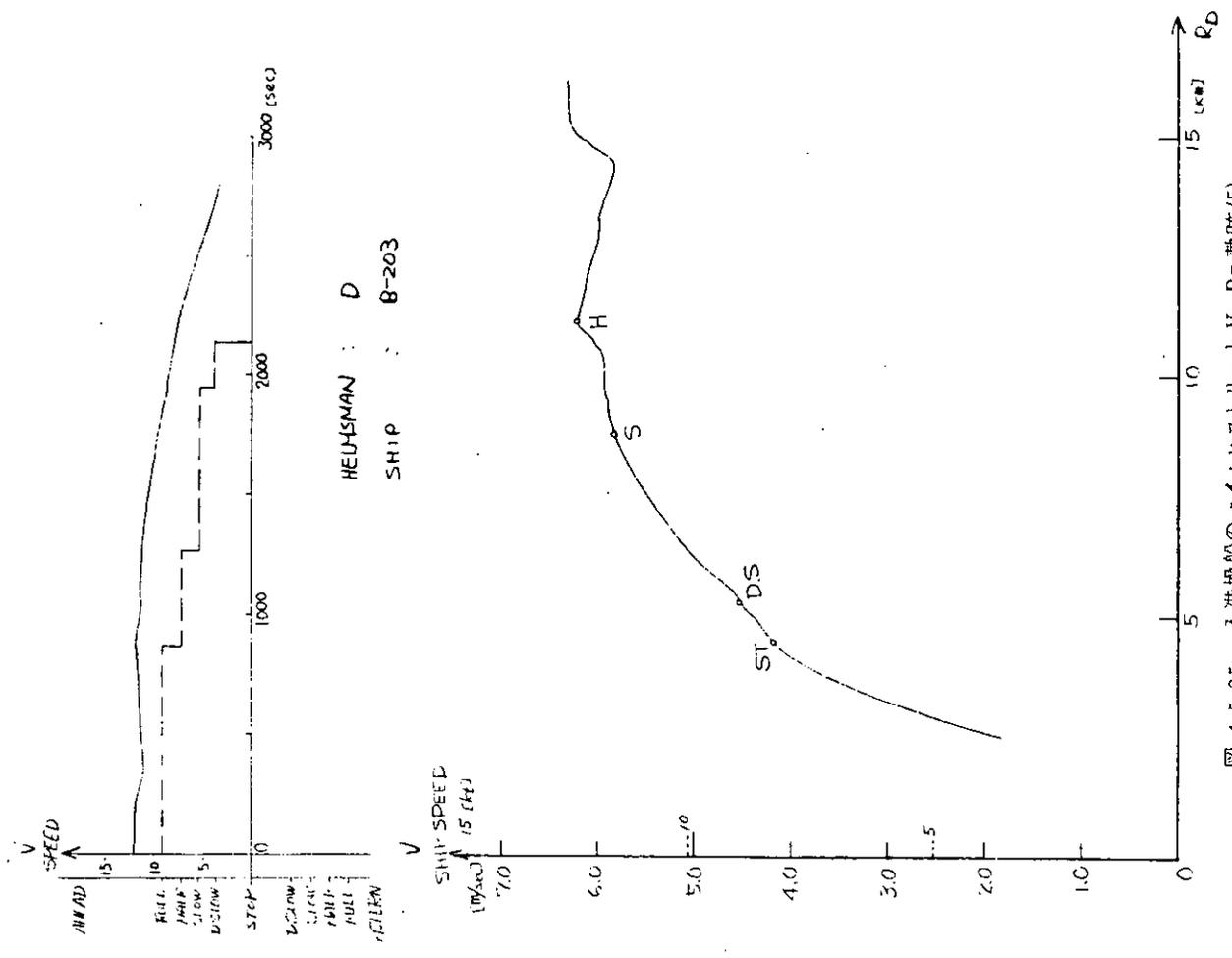
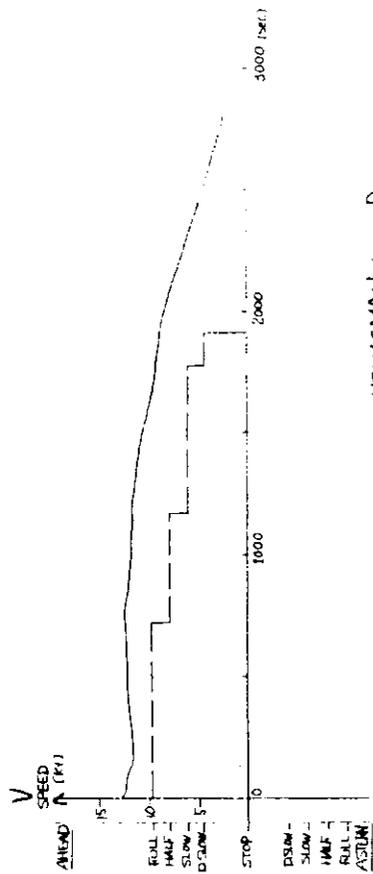


図 4.5.25 入港操船のタイムヒストリーと V-RD 軌跡 (5)



HELMSMAN : D
SHIP : B-203

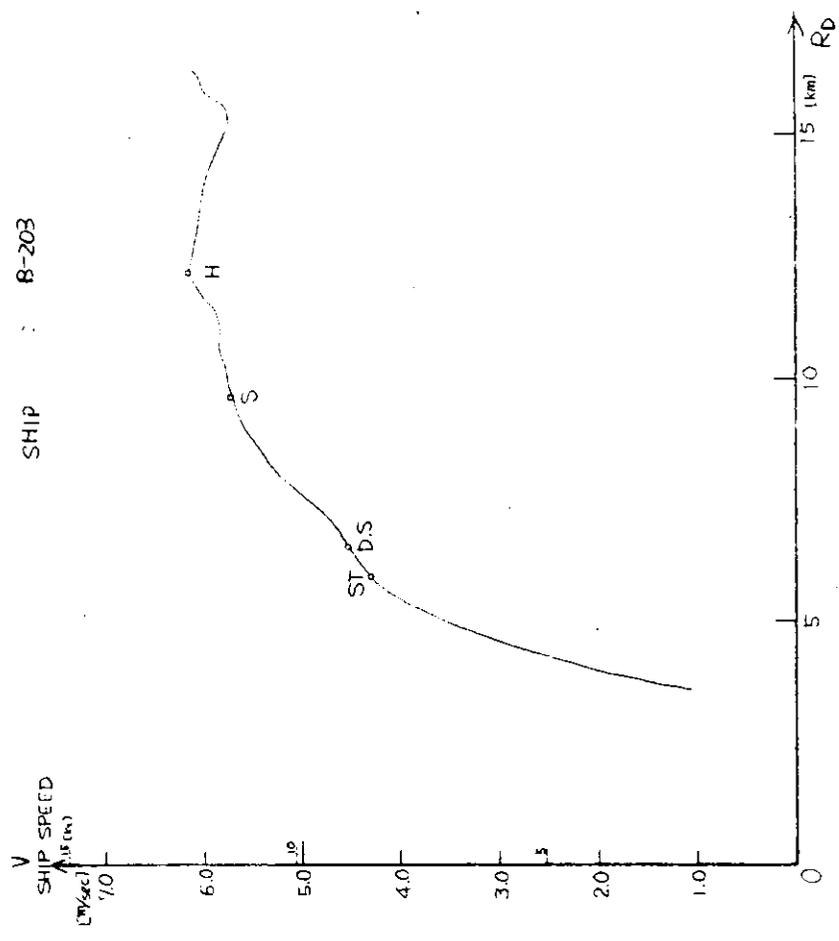
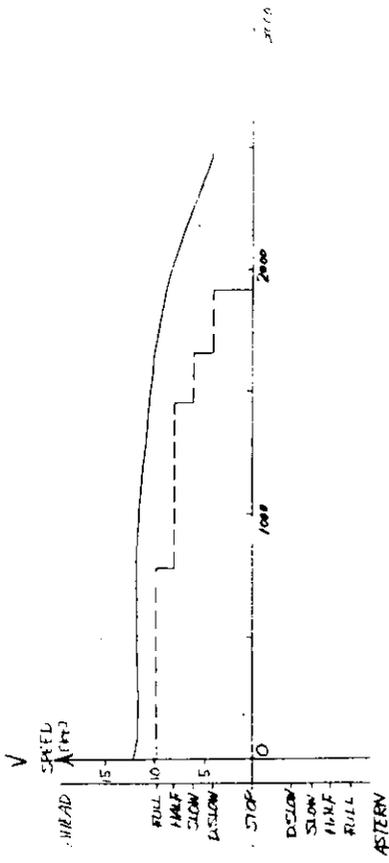


図 4.5.26 入港操船のタイムヒストリーとV-RD軌跡



HELMSMAN : A
SHIP : B-203

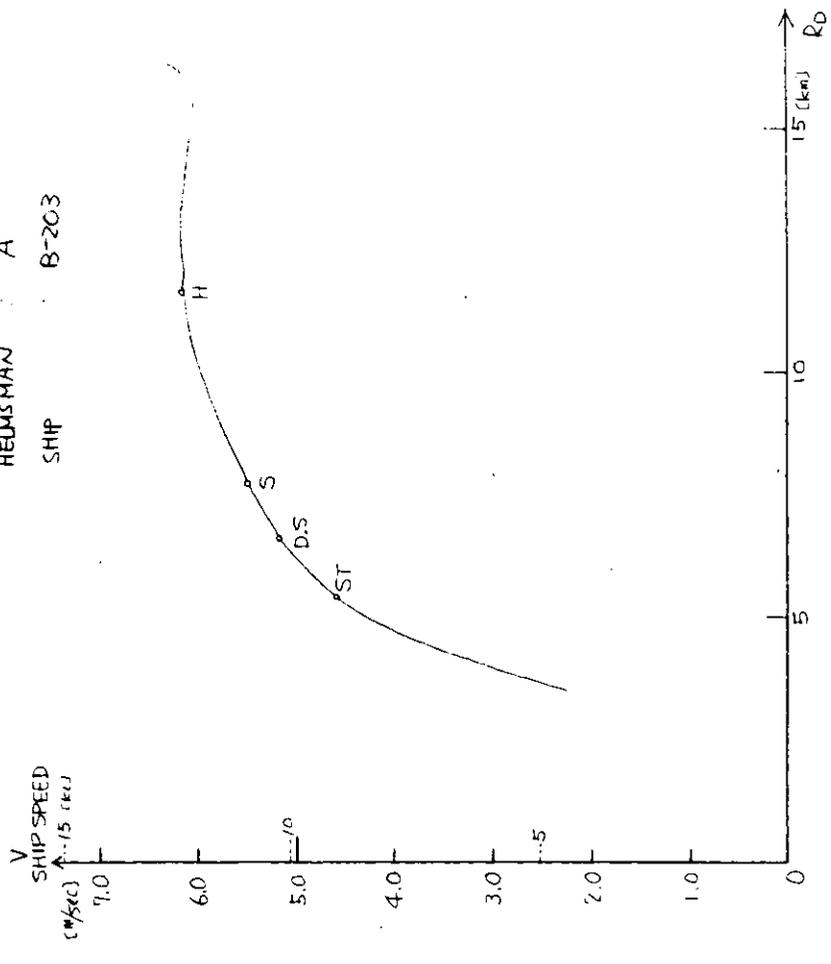


図 4.5.27 入港操船のタイムヒストリーとV-RD軌跡

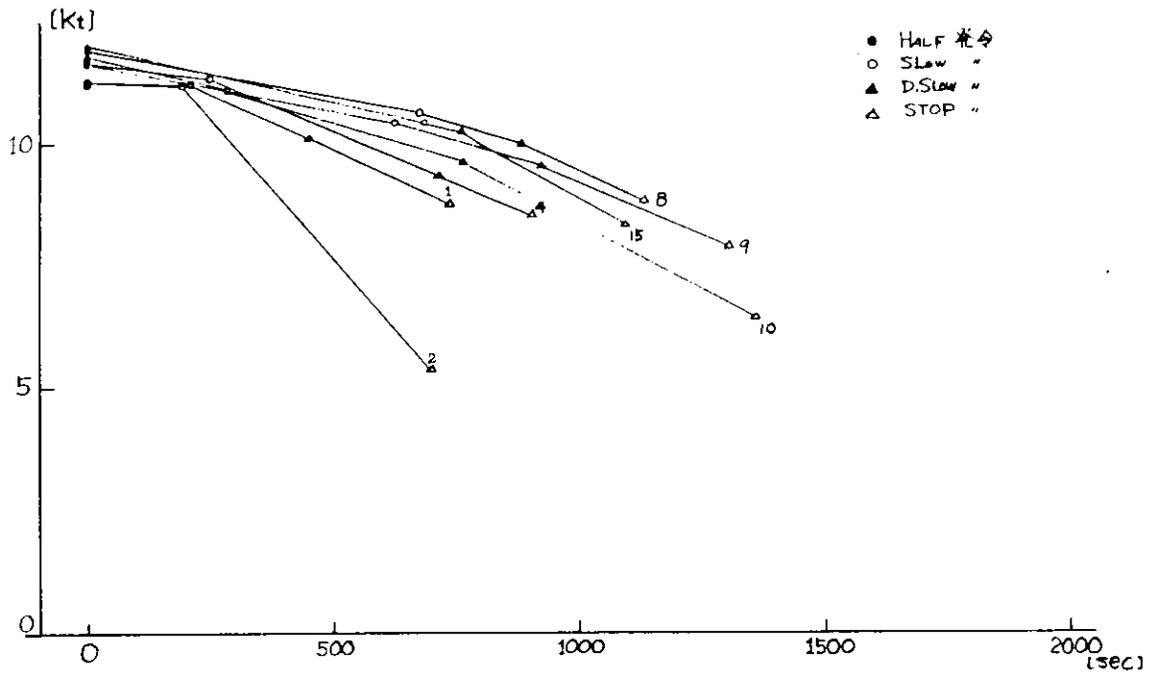
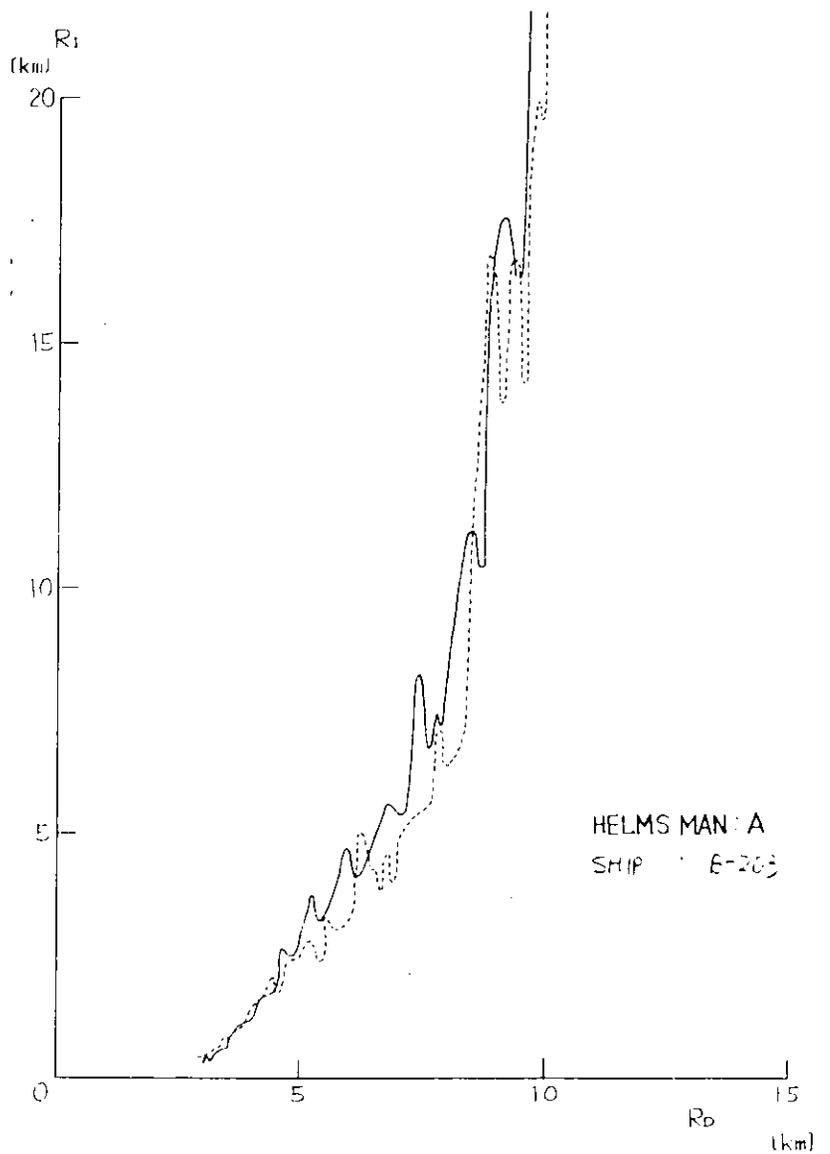
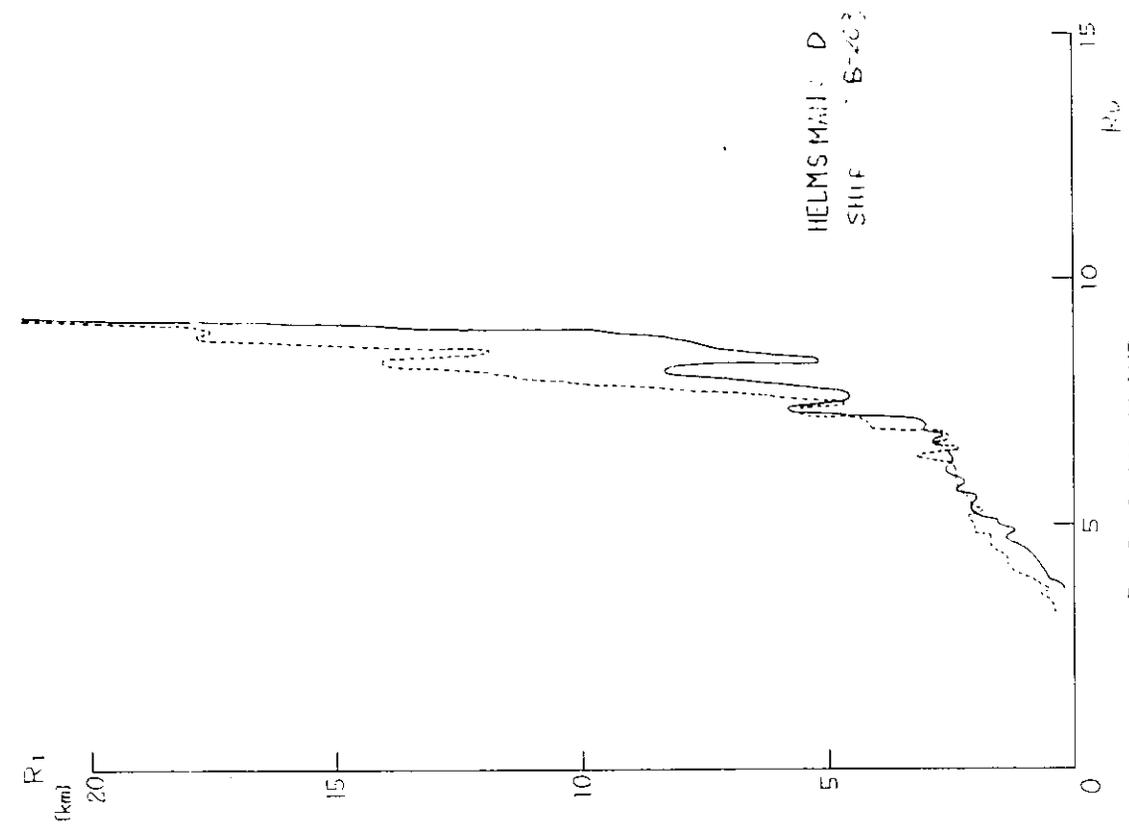


図 4.5.28 主機出力選択のタイミング

図 4.5.29 RD - RI 軌跡





R₀-R₁ PHASE PLANE

图 4.5.31 R₀ - R₁ 軌跡

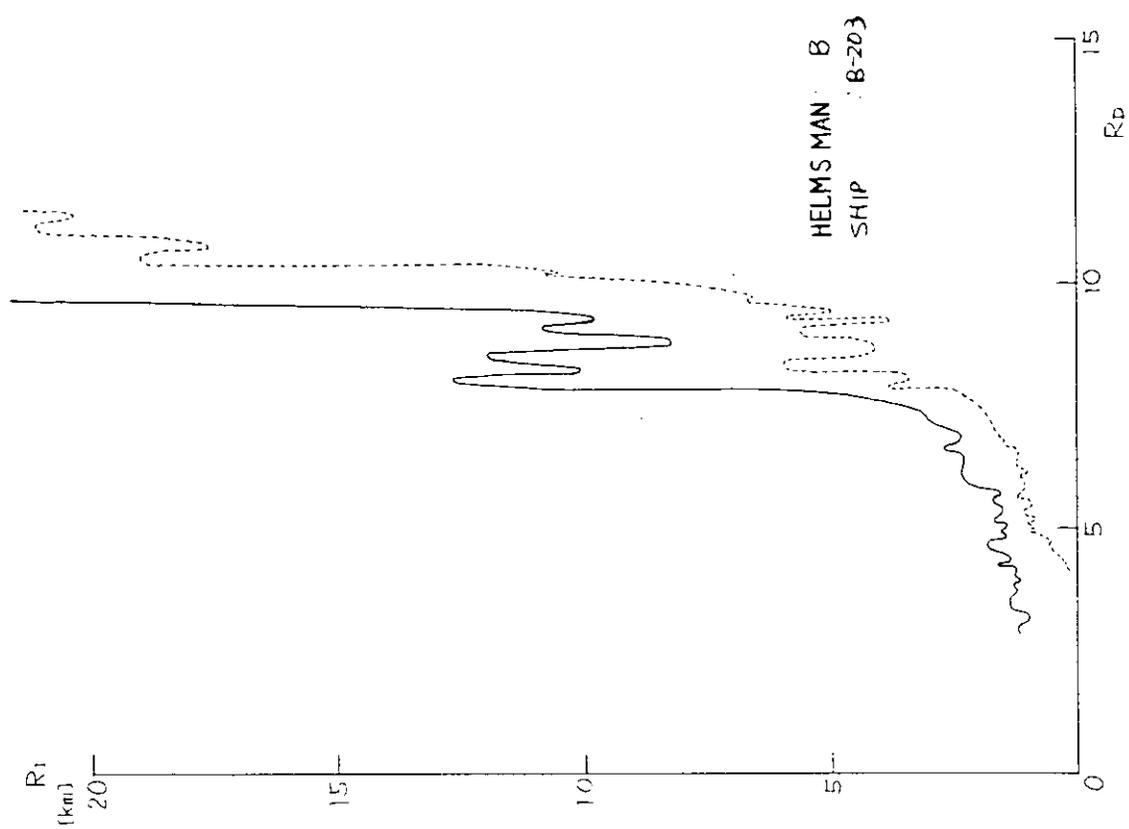


图 4.5.30 R₀ - R₁ 軌跡

5. 数学モデルの問題点とその改良

5.1 前進速度およびプロペラ回転数の変化の影響

5.1.1 従京の操縦運動モデルの構成とその問題点

現在のシミュレータ用数学モデルとしては、次のものが用いられている。

$$\begin{aligned} T_1' T_2' \left(\frac{L}{V}\right)^2 \ddot{\phi} + (T_1' + T_2') \left(\frac{L}{V}\right) \dot{\phi} + \phi + \alpha' \left(\frac{L}{V}\right)^2 \phi^3 \\ = K' \left(\frac{V}{L}\right) \delta + K' T_3' \dot{\delta} \end{aligned} \quad (5.1.1)$$

$$T_4 \dot{V} + V + C_r \dot{\phi}^2 + C_\delta V^2 \delta^2 = K_4 n \quad (5.1.2)$$

$$\left. \begin{aligned} T_E \dot{\delta} + \delta = \delta^* \quad (\text{at } \delta^* - \delta \leq \delta_c) \\ T_E \dot{\delta} = \delta_c \quad (\text{at } \delta^* - \delta \geq \delta_c) \end{aligned} \right\} \quad (5.1.3)$$

$$T_3 \dot{n} + n = n^* \quad (5.1.4)$$

ここで、 ϕ : 回頭面, δ : 舵角, V : 船速, n : 主機回転数, δ^* , n^* はそれぞれの発令値である。

このモデルは、前年度報告にも述べたように、広い外洋から港湾へ近づくあたりを想定し、主機速力の設定変更は時々、しかも徐々に行われる程度で、急激な加減速操作は考慮していない。従って操縦はほとんど操舵だけで行われると考えている。その理由は、もともと(5.1.1)式が前進速度の変動が無視できる程度の弱い運動であることを前提としている所に主としてある。従って、加減速、即ち回転数の変化の機会が多い状態を扱うには、それによる舵効きの変化を先ず考慮する必要がある。

次に(5.1.2)式は、その物理的意味は後に述べるが、基本的には一定回転、一定速力での船の特性として $V \propto n$ の関係があることを前提に、これに旋回及び操舵による抵抗増加を加え、更に1次遅れを与えた形となっている。アナコンの演算要素の数に制限があることでもあり、この式は必要なパラメータをすべて組入れた巧妙なモデルではあるが、或る程度以上の回転数変化を与える場合には、再検討の余地がある。

以上2点が主要な問題点であり、これらへの対応策について検討した結果を次項以下に述べるが、これらの弱い運動を基礎にした応答モデルに次々に修正を加えて行くよりは、本来の運動方程式に立ち返って XYN の連立方程式で運動を解いた方が良いのではないか、という考え方もある。現在は演算容量の関係で無理であるが、例えばマイクロコンピュータ等を増設してハイブリッド化できるようなでもなれば、実現可能性は大いにあり、追々検討されている。

5.1.2 回頭運動に及ぼすプロペラスリップの影響

プロペラのスリップが変化した場合に運動応答モデルをどのように表わしたら良いか、という問題に対する一つの解答として、スリップの変化を等価的に舵面積の変化に置き換えて、操縦性指数の修正係数を求める方法を試みた。

操縦運動を線型微係数を用いて表わした応答方程式は、周知のように次式で表わされる。

$$\begin{aligned} (I_{zz}' + J_{zz}) (m' + m_y') \ddot{r}' - \{ (I_{zz}' + J_{zz}') \dot{Y}_r + (m' + m_y') N_r' \} \dot{r}' \\ + \{ N_r' Y_v' - (Y_1' + m' + m_x') \dot{N}_v \} r' \\ = (N_v' Y_\delta' - Y_v' N_\delta') \delta + (m' + m_y') N_\delta' \dot{\delta} \end{aligned} \quad (5.1.5)$$

プロベラスリップの変化を (5.1.5) 式の中で表わすために、次の仮定を設ける。

- 1) プロベラスリップの変化は舵直圧力係数 (面積当り直圧力) を変化させるが、これは等価的には舵面積の変化で置き換えられるものとする。
- 2) スリップの変化によって、 Y_{δ}^1 , N_{δ}^1 は勿論、 $Y_{\dot{v}}^1$, $N_{\dot{v}}^1$, $Y_{\dot{r}}^1$, $N_{\dot{r}}^1$ の各微係数も変化するが、後者の影響は左辺第3項に非常に大きく現われるので、左辺第1, 2項に対するスリップ変化の影響は無視できるものとする。
- 3) 等価舵面積の変化は $(1 + ks^{-1.5})$ に比例するものとする。

(k:定数, s:スリップ比)

以上の仮定のもとに (5.1.5) 式に定常非線型項を加え、微係数の変化分を修正係数として表わし、(5.1.1) 式に対応する形に書き直すと、

$$T_1' T_2' \left(\frac{L}{V}\right)^2 \ddot{r} + (T_1' + T_2') \left(\frac{L}{V}\right) \dot{r} + \left\{ r + \alpha' \left(\frac{L}{V}\right)^2 \right\} f(s) = \left\{ K' \left[\frac{V}{L}\right] \delta + K' T_3' \dot{\delta} \right\} g(s) \quad (5.1.6)$$

ただし、 $f(s)$ は (5.1.5) 式の左辺最終項の微係数変化を表わす修正係数、 $g(s)$ は左辺のそれで、スリップの関数である。

この $f(s)$, $g(s)$ を求めるために、まず舵面積の変化に対する操縦性指数の変化を求める。ここでは同一船型で舵面積を種々に変えた。野本外の自航型船による実験結果⁽⁸⁾を用いた。図 5.1.1, 5.1.2 は舵面積の変化に対する $1/T'$, K' の変化を示す。

RUDDER	A	C	G	H
A_R/L_d	0.0164	0.0118	0.0083	0.0067
$T_1' \cdot T_2'$	1.20	1.70	2.00	2.50
$1/(T_1' \cdot T_2')$	0.83	0.59	0.50	0.40

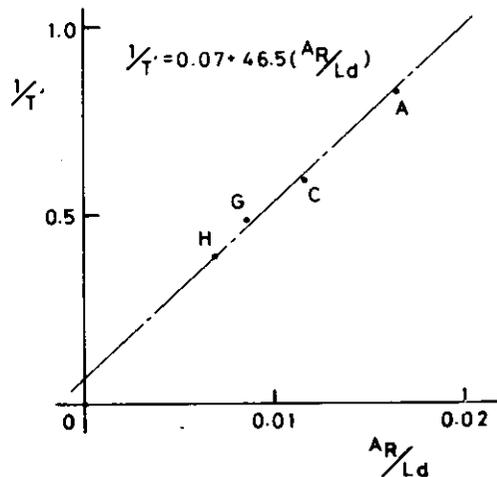


図 5.1.1 舵面積比に対する $1/T'$ の変化

RUDDER	A	C	G	H
A_R/L_d	0.0164	0.0118	0.0083	0.0067
K'	(0.90)	0.98	0.80	0.69

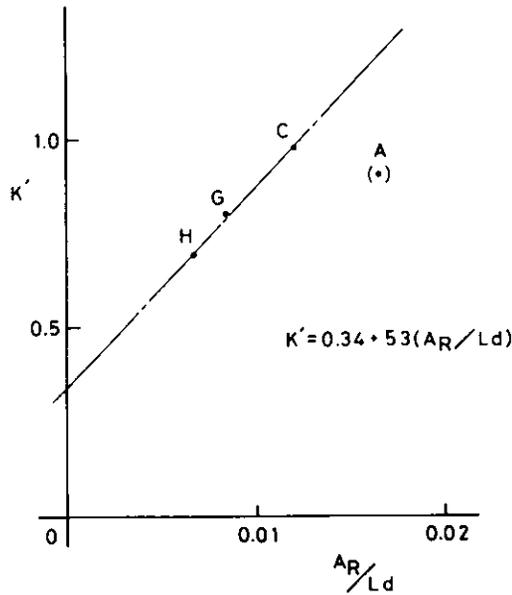


図 5.1.2 舵面積比に対する K' の変化

この結果によると、これらの値はほぼ次式で近似できる。

$$\left. \begin{aligned} 1 / (T_1' + T_2') \doteq 1 / T' &= 0.07 + 46.5 (AR / L_d) \\ K' &= 0.34 + 53.0 (AR / L_d) \end{aligned} \right\} \quad (5.1.7)$$

(5.1.6) 式中の $f(s)$, $g(s)$ をこれによって表わせば、

$$\left. \begin{aligned} f(s) &= \frac{0.07 + 46.5 (AR / L_d)}{0.07 + 46.5 (AR_0 / L_d)} \\ g(s) &= \frac{0.34 + 53.0 (AR / L_d)}{0.34 + 53.0 (AR_0 / L_d)} \end{aligned} \right\} \quad (5.1.8)$$

ここで AR_0 は或る基準状態の舵面積である。

さて、スリップの変化は、先の仮定により、

$$\frac{1 + ks^{1.5}}{1 + ks_0^{1.5}} = \frac{AR}{AR_0} \quad (5.1.9)$$

と表すことが出来る。ここで、 s_0 は定常船速で航行する際のスリップ比 ($= 1 - V_a / n_0 P$) であり、 AR_0 を幾何学的舵面積にとれば、 AR は等価舵面積と考えられる。

(5.1.8) 式に (5.1.9) 式を代入すると,

$$\left. \begin{aligned}
 f(s) &= \frac{0.07 + 4.65 (AR_0 / Ld) \left(\frac{1 + ks^{1.5}}{1 + ks^{1.5}} \right)}{0.07 + 4.65 (AR_0 / Ld)} \\
 g(s) &= \frac{0.34 + 53.0 (AR_0 / Ld) \left(\frac{1 + ks^{1.5}}{1 + ks^{1.5}} \right)}{0.34 + 53.0 (AR_0 / Ld)}
 \end{aligned} \right\} (5.1.10)$$

図 5.1.3, 5.1.4 はこの $f(s)$, $g(s)$ を $V / K_4 n$ に対してプロットしたものである。ただし, $s_0 = 0.42$, $w = 0.38$ (一定), $k = 3.6$, $AR_0 / Ld = 1/60$ としている。

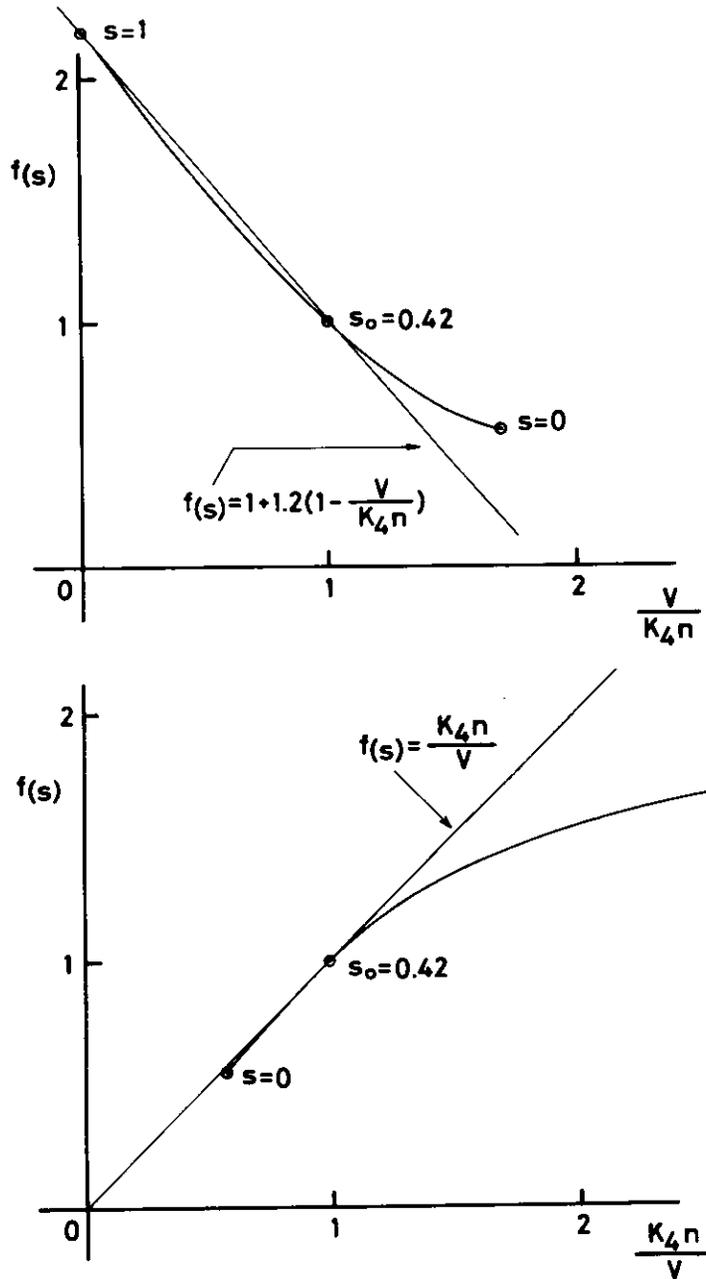


図 5.1.3 修正係数 $f(s)$ の線型近似

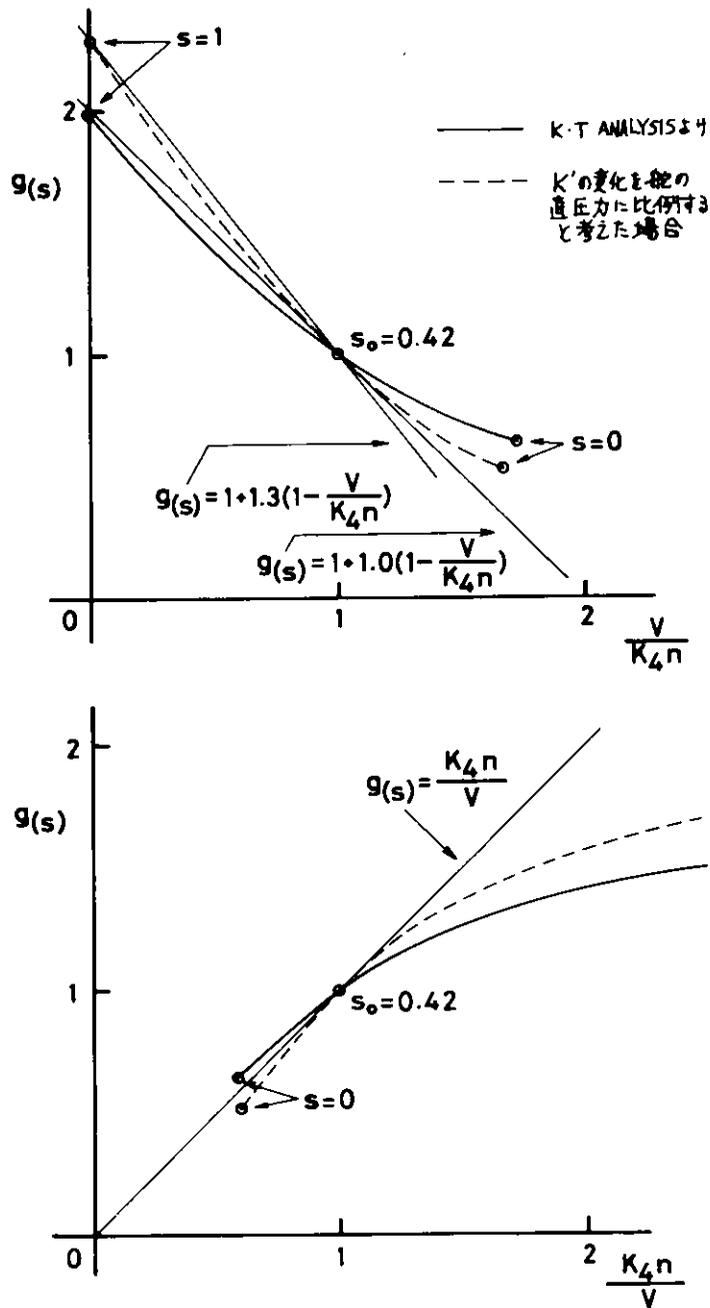


図 5. 1. 4 修正係数 $g(s)$ の線型近似

図 5. 1. 3, 5. 1. 4 の上図の曲線は、ほぼ次のように近似できる。

$$\left. \begin{aligned} f(s) &= 1 + 1.2 \left(1 - V / K_4 n \right) \\ g(s) &= 1 + 1.0 \left(1 - V / K_4 n \right) \end{aligned} \right\} \quad (5.1.1.1)$$

図 5. 1. 4 の破線は K' の変化が、舵の直圧力に比例すると仮定した場合である。このときは

$$g(s) = 1 + 1.3 \left(1 - V / K_4 n \right) \quad (5.1.1.2)$$

なる近似式が得られる。

図 5. 1. 3, 5. 1. 4 の下図は (5. 1. 1. 0) 式の $f(s)$, $g(s)$ を、上記とは逆に $K_4 n / V$ に対してプロットしたものである。この場合には $f(s)$, $g(s)$ と

$$f(s), g(s) = K_4 n / V \quad (5.1.13)$$

と近似して間に合いそうであるが、スリップが基準状態から大きくなるに従って近似度は悪くなる。一方スリップの小さい方から $s = 0$ (遊転) までは十分高い近似度があると見られるから、本シミュレータの目的には相当実用性があると考えられる。同図で $s = 0$ の修正係数の値が、基準状態の約半分になっているのは、舵の前にプロペラがない場合とある場合との対比に相当するもので、従来の知識と合致している。

以上のモデルはプロペラ回転数が遊転以上の場合にしか適用できないから、逆転の場合には別の工夫が必要である。現在、前進中プロペラ逆転した場合には舵はほとんど効かなくなることが知られて居り、辻の実験結果⁽⁹⁾によってもこのことは裏付けられている。同実験によれば、この場合の船体に働く回頭モーメントは、前進速度の増大と共に、また逆転回転数の増大と共に、増加している。この関係を現用の応答モデルにあてはめるには多少無理があるので、現在の段階では、逆転の場合には上記の修正係数は $f(s) = g(s) = 1$ とし、舵角を適当な一定値 $\delta = \delta_R$ と置いて回頭モーメントを算入するのが便利であろうと考えられている。

逆転の場合には、この他にも過渡状態の取扱い等検討を要する部分も多く、一部は本報告の別項でも考察されているが、更に研究を継続する予定である。

なお、前進から遊転までの範囲の回転数の演算については後に述べる。

5.1.3. X方向の運動モデル

(1) 基本的考察

前記のようにX方向の運動(速度変動)は、現在(5.1.2)式を使用しており、或る程度の範囲では十分実状をシミュレート出来ることが確かめられているが、式の由来(物理的意味)に多少あいまいな点があること、実用上も広範囲の速度・回転変動時の適合性が劣ること、等の理由から、現在の実用上は十分価値を認められながらも、一方ではまた常に議論の対象になって来た。そこでここでは、本来の運動方程式の流力的解釈から出発して、簡単な考察を加え、次いでこれの応答モデルへの移行ないしは応答モデルとの比較対照を試みる。

X方向の運動方程式は次のように表わされる。

$$(m + m_x) \dot{u} = (m + m_y) v r = X_T + X_H + X_R \quad (5.1.14)$$

ただし、 X_T はプロペラのスラスト、 X_H は船体抵抗、 X_R は舵の抵抗で、干渉による力もこれらの中に含ませるものとする。

まず現用の回頭運動モデルと併用する目的であるから、 v を消去する必要がある。

$$v = -p r \quad (5.1.15)$$

と置けば、 p は pivoting point の重心からの距離で、定常旋回の場合には、船型により $0.35 \sim 0.5 L$ 程度の一定値であることは周知のとおりであるが、一般の運動に伴って $-\infty \sim +\infty$ の範囲で変化する。しかしこの場合も、時間的には大部分が一定値 p_0 の付近にあり、そこから離れた値をとっている時間は短い。従って $p = p_0 = \text{const}$ と置いても大過ない。 p_0 としては上記の定常旋回時の値を採用することができる。以上より、

$$v r = -p_0 r^2 \quad (5.1.16)$$

が得られる。これは現用のモデルにとって非常に都合な関係であるが、例えば定常風を受けて大きくドリフトしているとき等には当てはまらないので、厳密には多少の難点がないわけではない。

さて、(5.1.4)式はX方向についての式であるが、便宜上これを船の進行方向と等しいと見なす。即ち、

$$u \doteq v, \quad \dot{u} = \dot{v} \quad (5.1.17)$$

とするが、これは十分満足されると考えられる。

プロペラのスラスト X_T は次のように表わされる。

$$X_T = K_T \rho n^2 D^4 (1-t) \quad (5.1.18)$$

K_T は前進係数 J の、 $0 \leq J < J_{(K_T=0)}$ の範囲で実用的に、

$$K_T = k_0 + k_1 J, \quad J = V(1-w)/nD \quad (5.1.19)$$

と線型化近似できるから、これを用いれば

$$\left. \begin{aligned} X_T &= C_1 n^2 - C_2 n V \\ \text{ただし、} \quad C_1 &= k_0 \rho D^4 (1-t) \\ C_2 &= k_1 \rho D^3 (1-t)(1-w) \end{aligned} \right\} \quad (5.1.20)$$

と表わせる。

船体抵抗 X_H は、常用の抵抗係数 r_s を用いれば、

$$X_H = -r_s \rho \nabla^{2/3} V^2 \quad (5.1.21)$$

であるが、 $F_n < 0.16$ 程度の範囲では $r_s \doteq \text{const}$ と見なしても差支えない。そこで次のように置く。

$$X_H = -C_3 V^2 \quad (5.1.22)$$

舵の抵抗 X_R は、

$$X_R = -\frac{1}{2} \rho A_R V_R^2 C_D \delta_e^2 \quad (5.1.23)$$

が基本的な形である。ここで、 $C_D \delta_e^2$ は $\delta_e = 0$ で直進時の値を除く抵抗係数である。 V_R は舵の平均前進速度で、 V で代用しても良いが、一般には $V_R = nP$ (P はプロペラのピッチ)の方が实际的であろう。但し厳密には V_R/nP はスリップ比の増加に従って小さくなること、岡田の実験⁽¹⁰⁾によっても示されている。 δ_e は有効舵角で、

$$\delta_e = \delta + \gamma (v' - \ell' r') \quad (5.1.24)$$

のように書ける。 γ は整流係数といわれるもので、船体と舵との相互干渉を表わす係数であるが、現状では未知の面もある。(5.1.15)式を用いて v' を消去すれば、

$$\delta_e = \delta - \gamma (p' + \ell' r') r' \quad (5.1.25)$$

現状ではデータが不足で、これ以上の簡略化は困難であるが、 $p' + \ell' r'$ はほぼ0.9の程度であり、 γ は一定として0.5の程度と仮定すれば、

$$\delta_e = \delta - \gamma' r' \quad , \quad \gamma' \doteq 0.45 \quad (5.1.26)$$

と表わすことができる。差当ってこれはこのままの形にして置くことにすれば、

$$\left. \begin{aligned} X_R &= -C_4 n^2 \delta_e^2 \\ \text{ただし, } C_4 &= C_D \frac{1}{2} \rho A R P^2 \end{aligned} \right\} \quad (5.1.27)$$

以上の関係から、(5.1.14)の運動方程式は次のようになる。

$$(m+m_X) \dot{V} + (m+m_Y) p_0 r^2 = (C_1 n - C_2 V) n - C_4 n^2 \delta_e^2 \quad (5.1.28)$$

この式はプロペラが遊転している場合も含めて、 $n, V > 0$ の範囲で有効であり、いまの所最も近似度の高いモデルであろう。係数の値を変えれば、プロペラ逆転の場合にも適用できるので、これを基本式と考えることができる。

(2) 応答モデルとの対応

(5.1.28)式で定常直進時を考えると、 $n/V = \text{const}$ となり、実状を満足していることは直ちにわかる。しかしながら、(5.1.28)式のままでは、やや複雑過ぎて、現用のシミュレータの容量では収容不可能であり、諸係数の決定も、一応流力的データから出来るが、応答モデルとの対応がやや困難である。

問題は(5.1.28)式の基本的性質を損わずに、どこまで簡略化することが出来るか、あるいは、現用モデルも含めて、新しく考え出された応答モデルが、どの範囲でこれを満足しているかということであり、これらについて種々の討議が加えられた。いずれの場合も(5.1.28)式中の δ_e までは考慮していないので、以下の考察では δ_e の代りに δ を用いる。この場合には残りの r との干渉分が他の項に振り分けられるので、応答モデルとしての諸係数は、(5.1.28)式から少し外れたものになってくる可能性がある。そこで以下の説明の便宜上、次のように書き直しておく。

$$(m+m_X) \dot{V} = (C_1 n - C_2 V) n - C_3 V^2 - C_4' n^2 \delta^2 - C_5 r^2 \quad (5.1.29)$$

(i) まず(5.1.2)式で表わされる現用モデルについて考える。

(5.1.29)式で、差当って操舵及び回頭の影響を除外して、直進状態について考えると、

$$(m+m_X) \dot{V} + C_3 V^2 = (C_1 n - C_2 V) n \quad (5.1.30)$$

これを、 $V = V_0, n = n_0$ の自航点の近傍で V, n が変化すると考えて展開すると、

$$(m+m_X) \dot{V} + (2C_3 V_0 + C_2 n_0) V = (2C_1 n_0 - C_2 V_0) n \quad (5.1.31)$$

であるから、ここで

$$\left. \begin{aligned} T_4 &= \frac{m+m_X}{2C_3 V_0 + C_2 n_0} \\ K_4 &= \frac{2C_1 n_0 - C_2 V_0}{2C_3 V_0 + C_2 n_0} \end{aligned} \right\} \quad (5.1.32)$$

とおき、更に(5.1.29)式の δ_e 及び r の項に相当する項をつけ加えれば、

$$T_4 \dot{V} + V + C_R r^2 + C_\delta V^2 \delta^2 = K_4 n \quad (5.1.33)$$

となって現用モデルが得られる。ただし、 $C_R = C_5 / (2C_3 V_0 + C_2 n_0)$ であり、 $C_\delta V^2 \delta^2$ の項は $C_4' n^2 \delta^2$ の n の代りに V を用いたものであるが、もともと(5.1.29)式においても $C_4' n^2 \delta^2$ の項は説得力のやや弱いものであったわけで、これを $C_\delta V^2 \delta^2$ で置き換えることには強い異論もないであろう。

(5.1.3.2)式からも明らかなように、 T_4 、 K_4 等の係数は V_0 、 n_0 の関数であるから、展開点(自航点)が違えばその値が変化することが想像される。アナコンで演算する場合には、これらを例えば n の関数として表わし、

$$T_4(n)\dot{V} + V + C_r(n)r^2 + C_\delta(n)V^2\delta^2 = K_4(n)n \quad (5.1.3.4)$$

などとするとも、回路的に実現可能性があるのでないかと考えられている。これに関しては、次の5.2節の模型実験によって、更に詳しく検討を加えることとする。

(ii) (5.1.2.9)式の流力的モデルに近い簡易モデルという意味で、次の形のモデルも提案されている。

$$T_4\dot{V} + V^2 + C_r r^2 + C_\delta V^2\delta^2 = K_4 n |n| \quad (5.1.3.5)$$

これはプロベラ逆転の範囲まで考慮したもので、各係数の決定が容易であれば実用可能性はある。逆転の場合については、別に、 n は考慮しないでスラスト一定としても間に合うのではないかといい見解もあるが、更に詳細には模型実験に関連した考察を次の5.2節で示す。

(iii) 最も(5.1.2.9)式に近い形として、

$$T_4\dot{V} + V^2 + C_r r^2 + C_\delta V^2\delta^2 = K_4(n^2 - nV) \quad (5.1.3.6)$$

というモデルも提案されている。次年度には、アナコンの能力を考え合わせながら、(5.1.3.6)式または(5.1.2.9)式を中心に、逆転まで含めたモデルを更に検討して行く予定である。

(3) プロベラ回転数の演算

プロベラ回転数の演算は、現在(5.1.4)式で行われているが、他の形のモデルについても検討したので以下に述べる。

(i) モデル0

現用モデルであって

$$T_5\dot{n} + n = n^* \quad (5.1.4再)$$

を常時使用、船橋内のメータにもこの n を指示している。この場合、 n は単に指令スラストの変形に他ならず、プロベラスリップ、遊転などの処理ができない欠点がある。

(ii) モデル1

$$\left. \begin{aligned} T_5\dot{n}_t + n_t &= n^* \\ n &= \frac{1}{2}\left(n_t + \frac{V}{K_4}\right) \end{aligned} \right\} \quad (5.1.3.7)$$

新しく n_t という量を定義して、これを指令スラストの変形とみなし、更に遊転回転数が V に比例することに注目して、 V をフィードバックして、プロベラ回転数を模擬しようとしたものである。直進時の減速(エンジンテレグラフの指令による)では、定性的に遊転回転数をシミュレートしているが、増速時にも同様に漸時回転数が増加するし、更にやっかいなことには、操舵・旋回等に起因する抵抗増加によって速度が減少する場合にも、同様なパターンで回転数が低下してしまう。

(iii) モデル2

モデル1における不合理は、連続関数として V をフィードバックしたことにあった。そこで、モデルは複雑になるが、プロベラスリップが正の時、プロベラスリップが0または負のとき、及び遊転の起動をも模擬することを試みた。その際次の仮定を設けた。

a) スリップが0のときは

$$n = \frac{V a}{P D} \left(\approx \frac{V}{2 K_4} \right) \quad (5.1.3.8)$$

とする。

b) 速度5ノット以下では遊転しない（プロベラ回転は停止する）ものとする。また逆転発令しても、速度5ノット以上では遊転し、速度が5ノットになって逆転に入るものとする。

b) の条件は全く仮空のものであり、この場合は単にこういう条件でのシミュレートを試みたものである。図5.1.5, 5.1.6にブロックダイアグラム及び代表的なシミュレーション結果を示す。

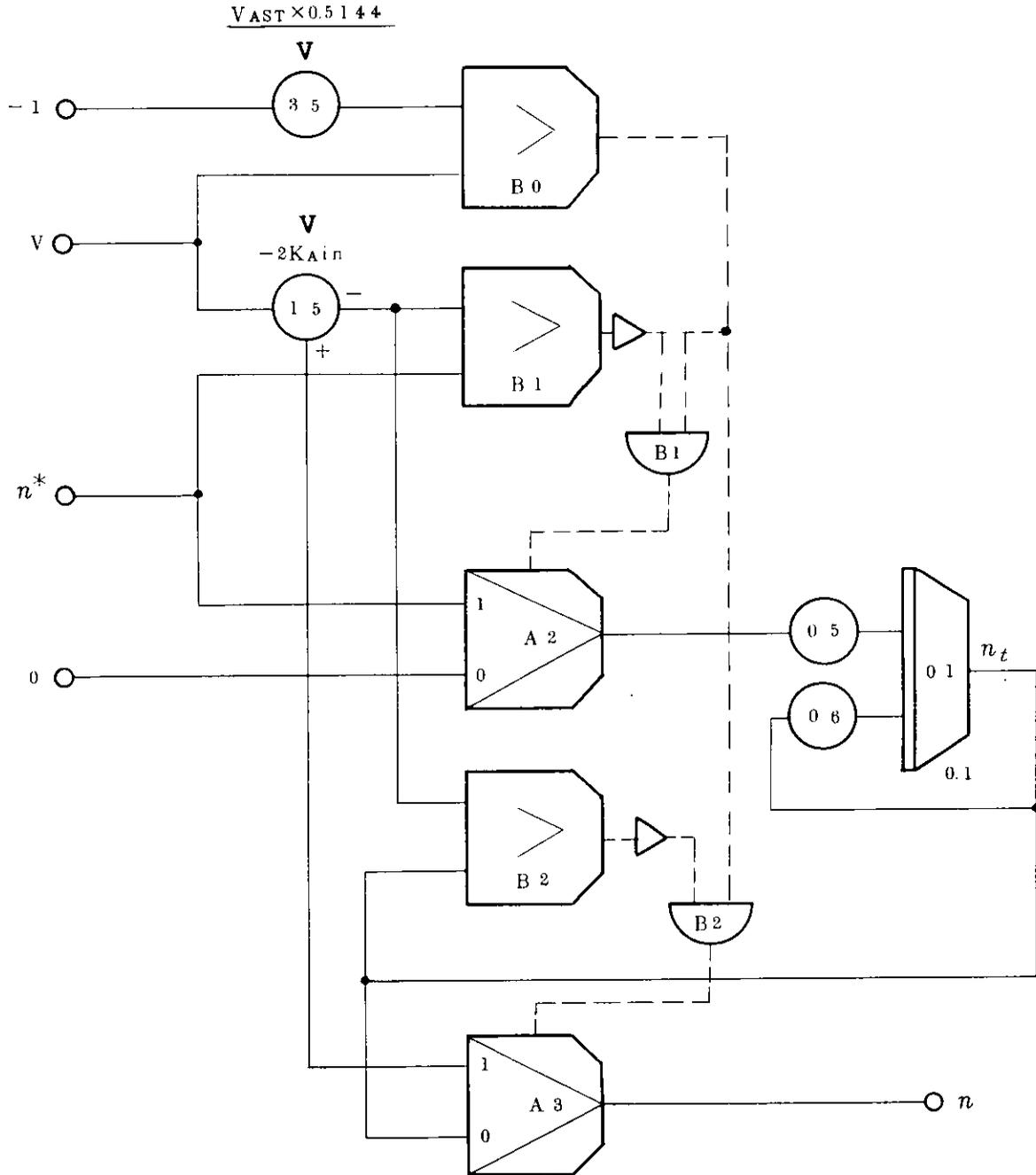


図5.1.5 遊転・逆転を考慮した回転数演算モデル例

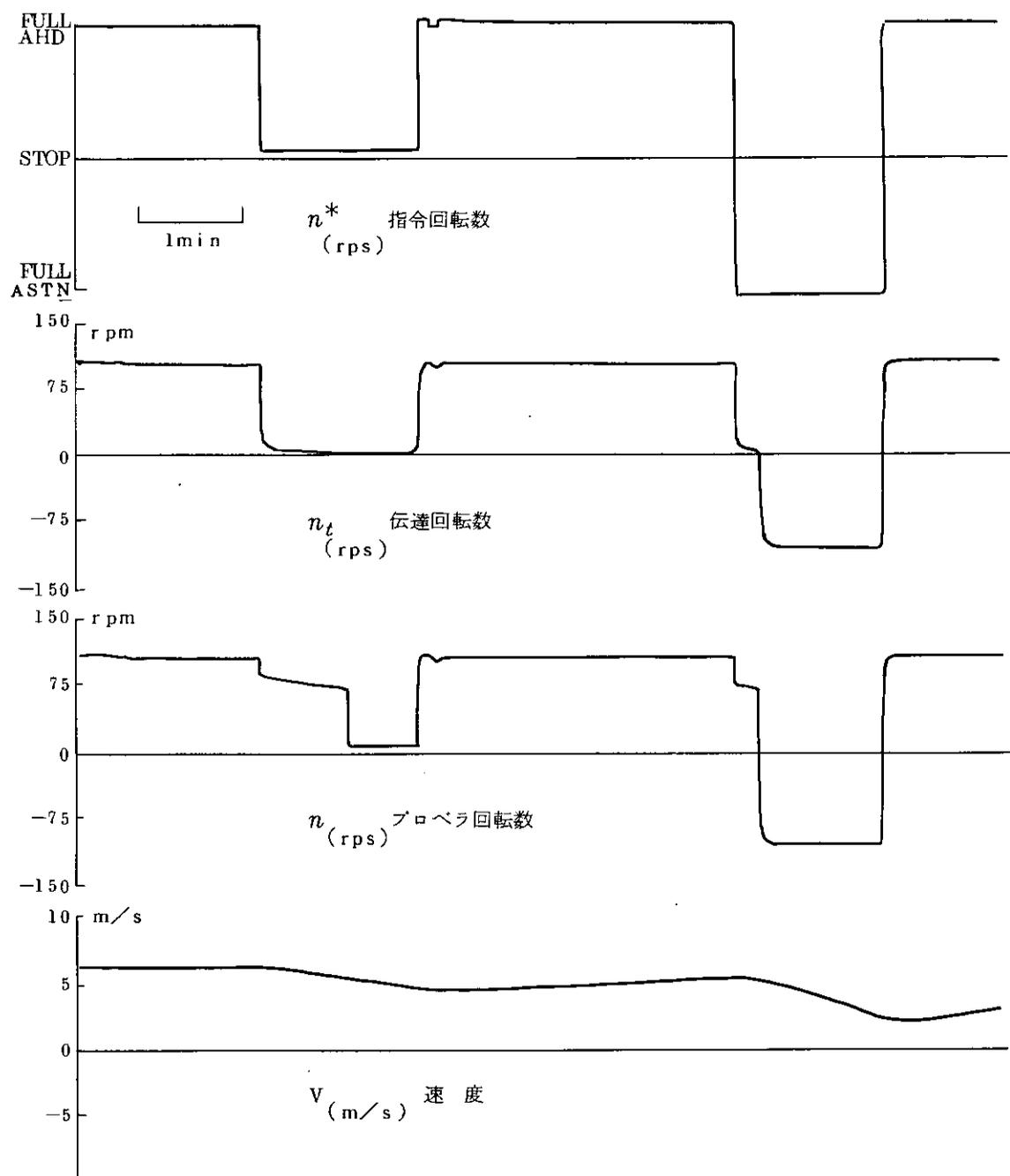


図 5.1.6 遊転・逆転のシミュレーション例

5.2 速力変動モデルのための模型実験

5.2.1 実験の背景

本研究部会で前進方向の運動を模擬するために導入された運動方程式

$$T_4 \dot{V} + V + C_r \dot{\phi}^2 + C_\delta V^2 \delta^2 = K_4 n \quad (5.2.1)$$

は、式の形が簡潔なことから、今後、各方面で利用されることが期待できる。しかし、その前に、この式の有効性、適用限界を調べておくことは、重要である。さらに、その適用範囲外では、どのような数学モデルが必要であり、有効かという若干の議論を加えた。

5.2.2 実験の目的

主機回転数を変化させた場合の非定常な船の応答は、プロペラと船体の相互作用がかなり複雑であり、その力学的な解明は、一部、緊急停止試験等に見るだけで、未だ十分とはいえない。さらに、船の旋回、操舵等の抵抗増加による船速低下も存在し、問題をいっそう複雑化している。

今回は、特に、プロペラ回転数の操作により起こる船の前後方向の力関係と、またそのときの船の挙動を把握するために、模型船を用いた実験をおこなった。

5.2.3 実験の種類

- I 船体単独の性能を調べるための抵抗試験
- II プロペラ単独試験
- III 船体とプロペラとの相互作用を調べるための自航試験およびオーバーロード試験
- IV プロペラ回転数の操作により起こる船の運動を直接調べるための、回転数をステップ状に変更する自航試験

以上は、いずれも、大阪大学造船試験水槽において、模型船 M. No. 277 を用いて行なわれた。模型船およびプロペラの主要目を表 5.2.1 に示す。

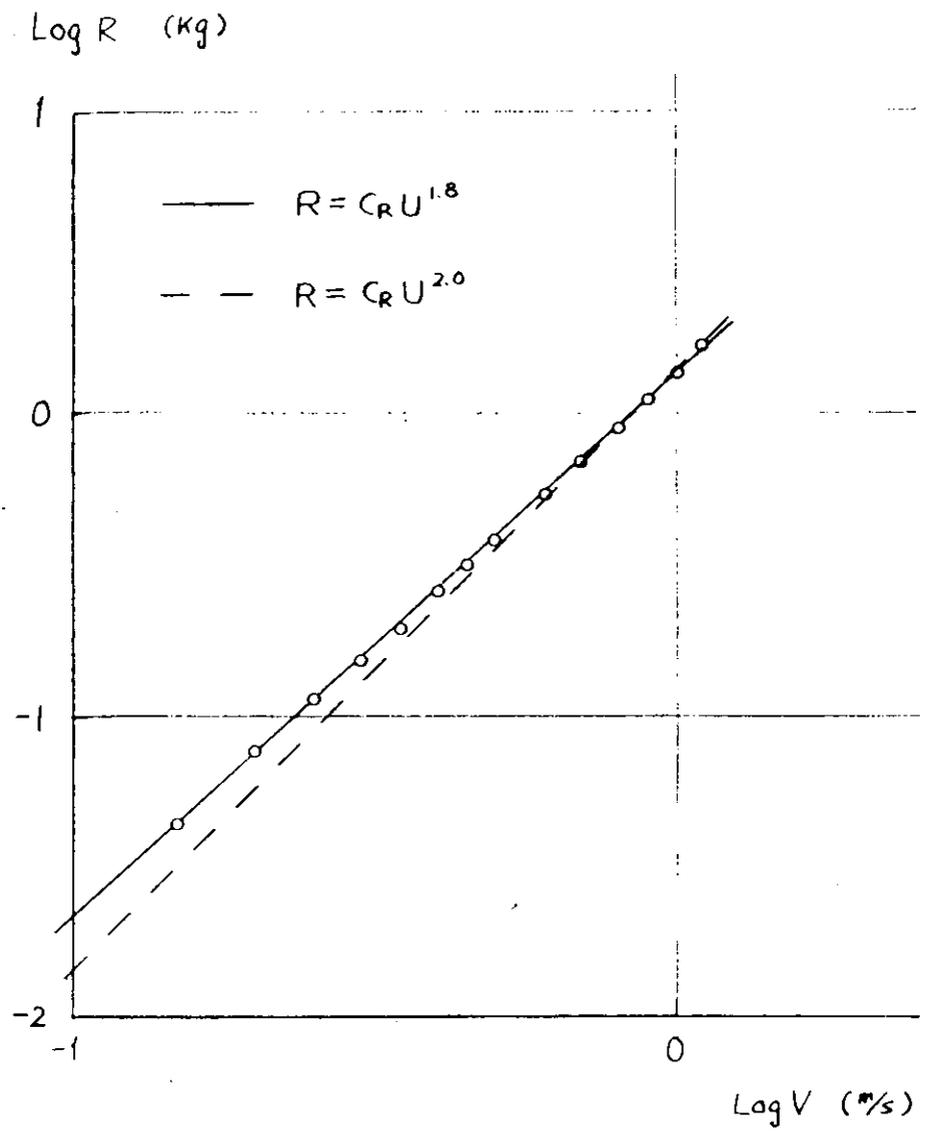
表 5.2.1 PRINCIPAL DIMENSION

M. No. 277	
L _{pp} (m)	4.4
B (m)	0.7932
d _m (m)	0.2834
C _b	0.831
ℓ _{cb} (%)	2.935
L/B	5.55
B/d	2.80

スタッドは 9/2 と F. P.

PROPELLER No. 41

直径 D (m)	0.12057
ピッチ比 P	0.6669
展開面積比	0.651
翼数 Z	5



☒ 5.2.2 Log R - Log V CHARACTERISTICS

5.2.4. 実験の結果

(1) 船体単独の性能

プロペラをつけない HULL 単独の抵抗試験の結果を図 5.2.1 に示す。また、この結果を対数軸上にプロットすると図 5.2.2 となり、抵抗 R は船速の 1.8 乗に比例することがわかる。

タンカー模型では、粘性抵抗が主であるから、いまの場合造波抵抗を含めて、

$$R = C_R V^{1.8} \quad (5.2.2)$$

としてよいであろう。

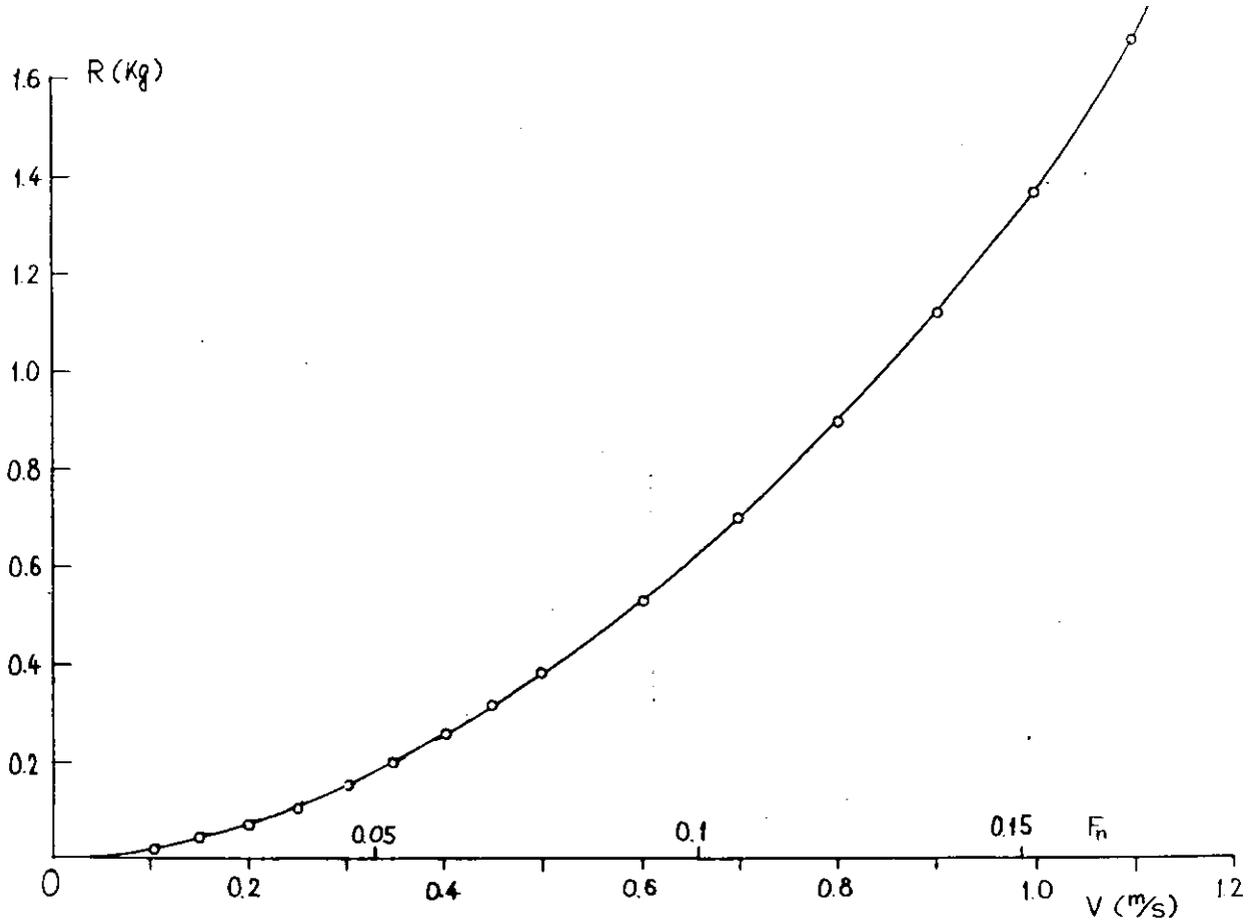


図 5.2.1 HULL RESISTANCE

(2) プロペラ単独試験

プロペラの単独性能は、図5.2.8に示す。一部、回転数を変えて、 K_T を求めたが、図に示す如く、 K_T の値はほとんど変わらない。

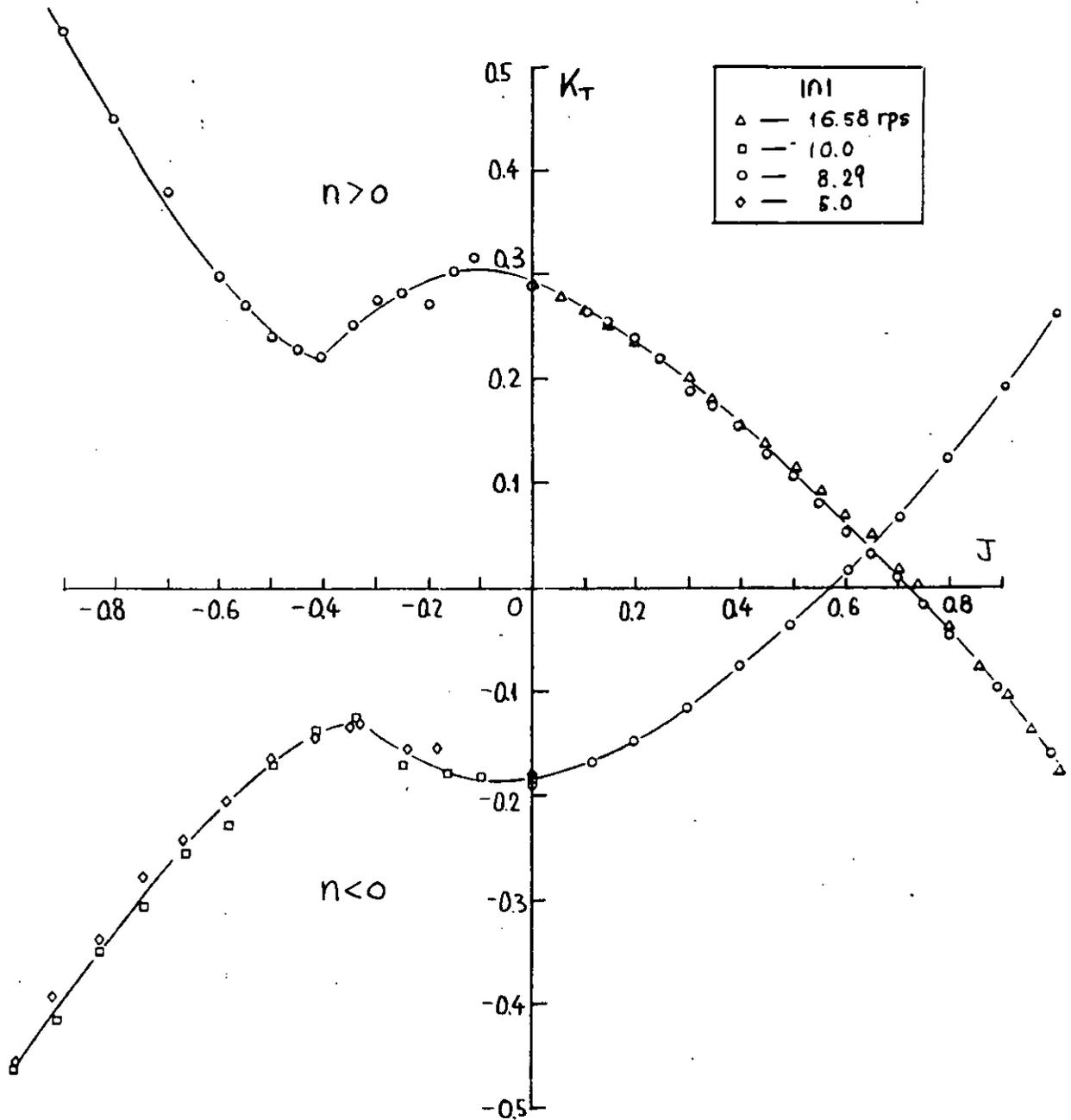


図5.2.8 PROPELLER OPEN CHARACTERISTICS

(3) 自航試験およびオーバーロード試験

図 5.2.4 に、自航試験の結果を示す。

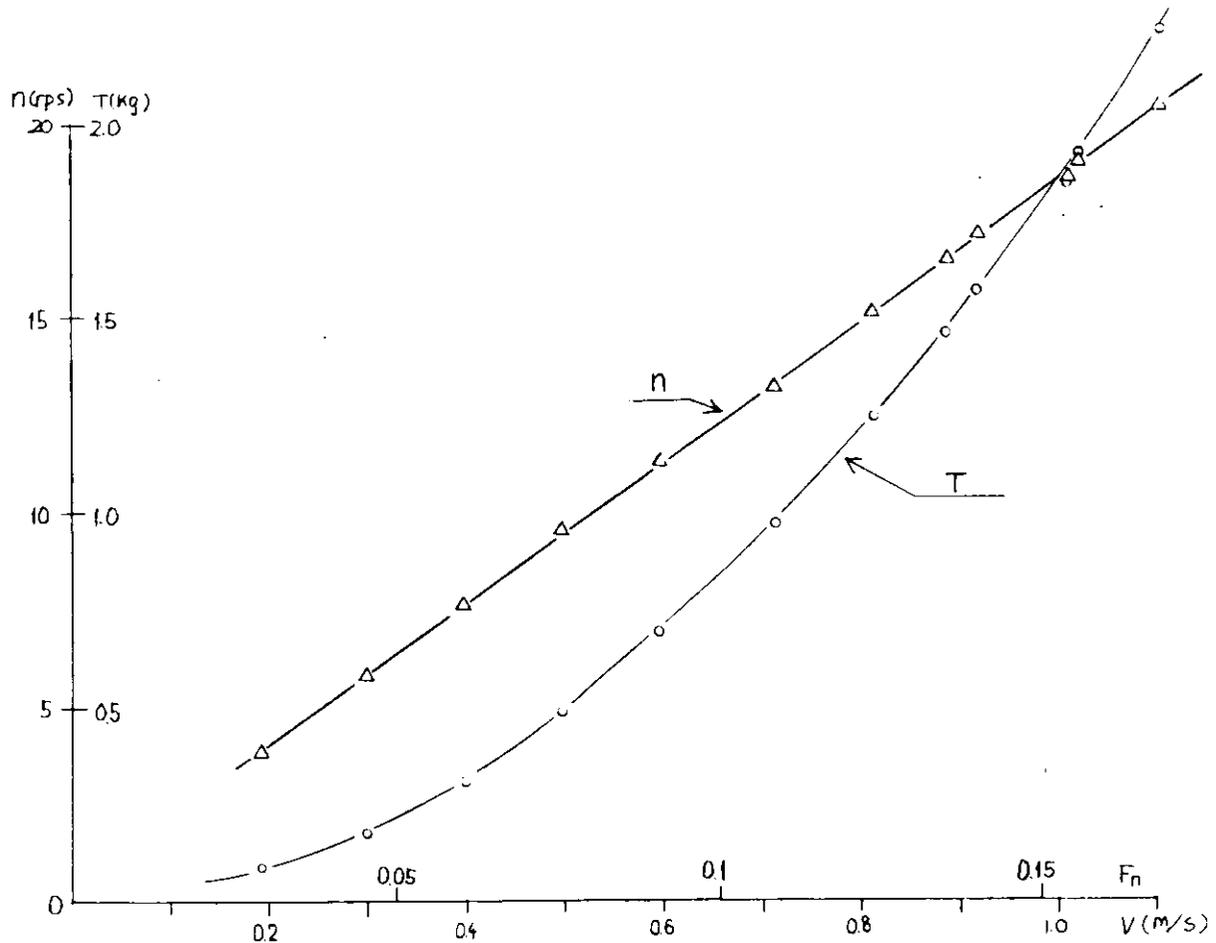


図 5.2.4 SELF-PROPULSION TEST

船の増減速運動において、流体力のヒステリシスが少なく考えるならば、船体に働く力は、その時の船の速度、加速度、およびプロペラ回転数で決定されるといえる。さらに、流体力の加速度依存性がすべて、付加質量 (m_x) で表現できる場合には、船の受ける流体力は、回転数と船速が主なパラメータである。そこで、種々の回転数と種々の一定船速とを組合わせて、故意に過渡状態を作り出す。いわゆるオーバーロード試験を行なった。この試験結果を表わすに際し、 T (推力), R (抵抗), F (抵抗動力計にかかる力) の向きを、図 5.2.5 のように定義する。

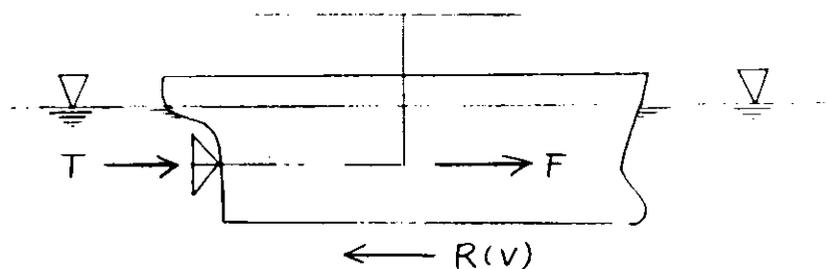


図 5.2.5

図 5.2.6 は、種々の船速に対し、プロペラの出す T と F をプロペラ回転数(n)をパラメータにして示したものである。

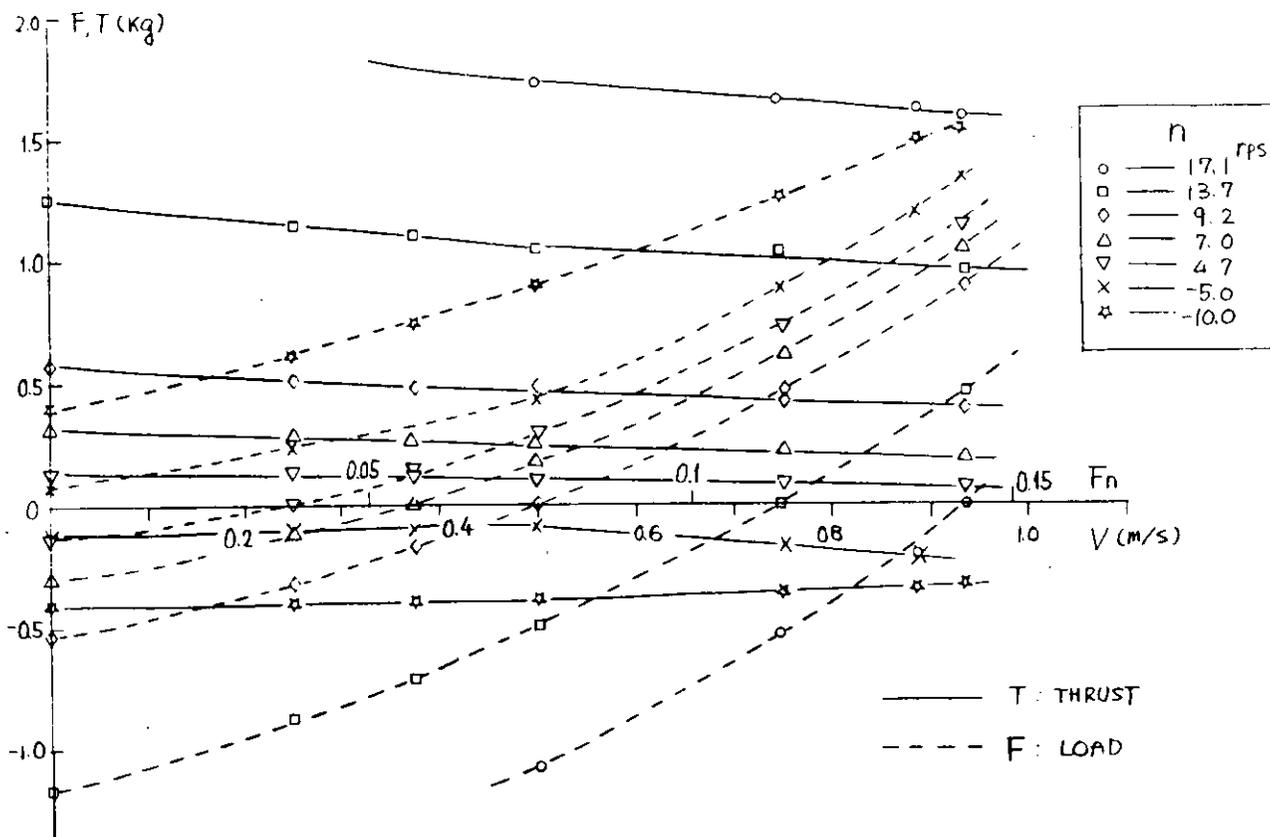


図 5.2.6 PROPELLER THRUST AND LOAD CONDITION

(4) $1-t$, $1-w$ の推定

オーバーロード試験における船の運動方程式は $\dot{V} = 0$ であるので、

$$T(1-t) - R(V) + F = 0 \quad (5.2.3)$$

t : 推力減少率

したがって、この時、船体とプロペラが相互作用を起こし、一体となって出す推力は、

$$T(1-t) = R(V) - F \quad (5.2.4)$$

となる。図 5.2.7 に、この total thrust を船速に対し、回転数をパラメータにして示す。

一方、 $(1-t)$ は (5.2.4) 式より

$$1-t = \frac{R(V) - F}{T} \quad (5.2.5)$$

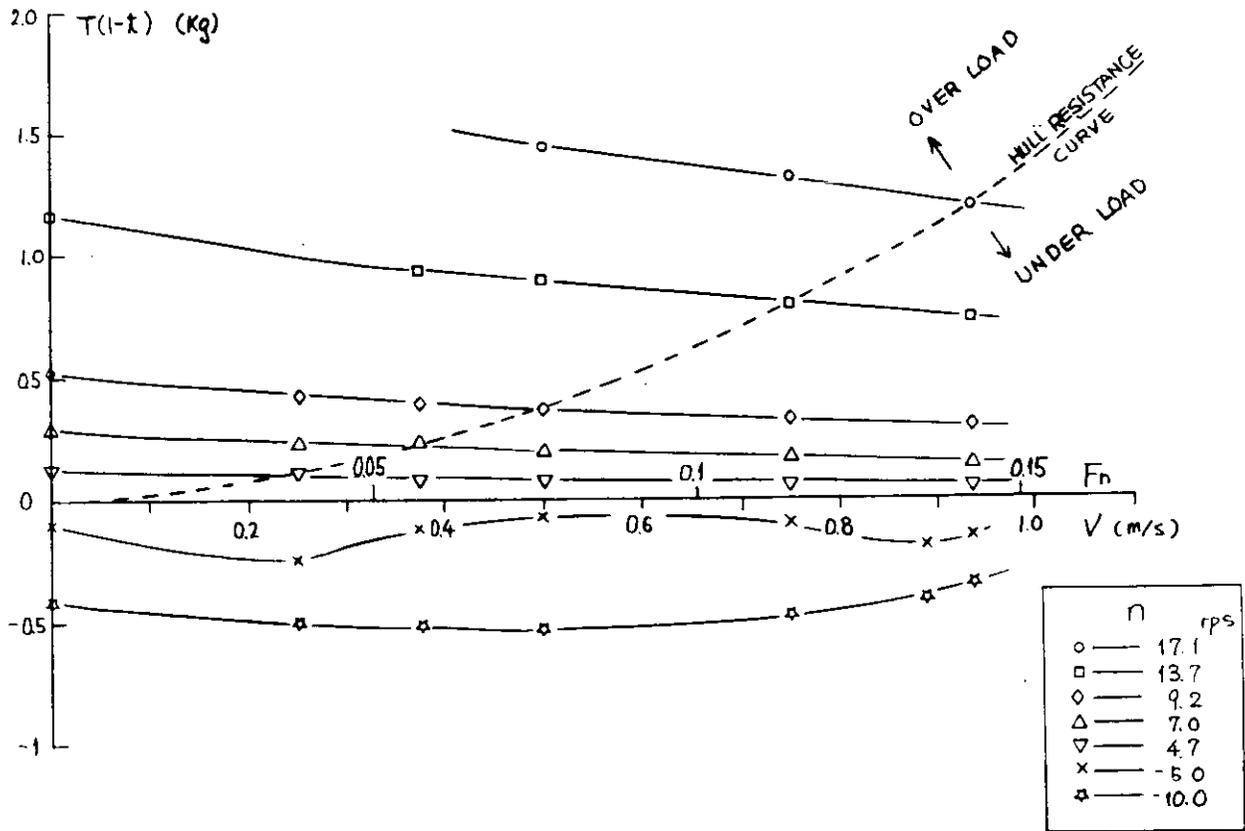
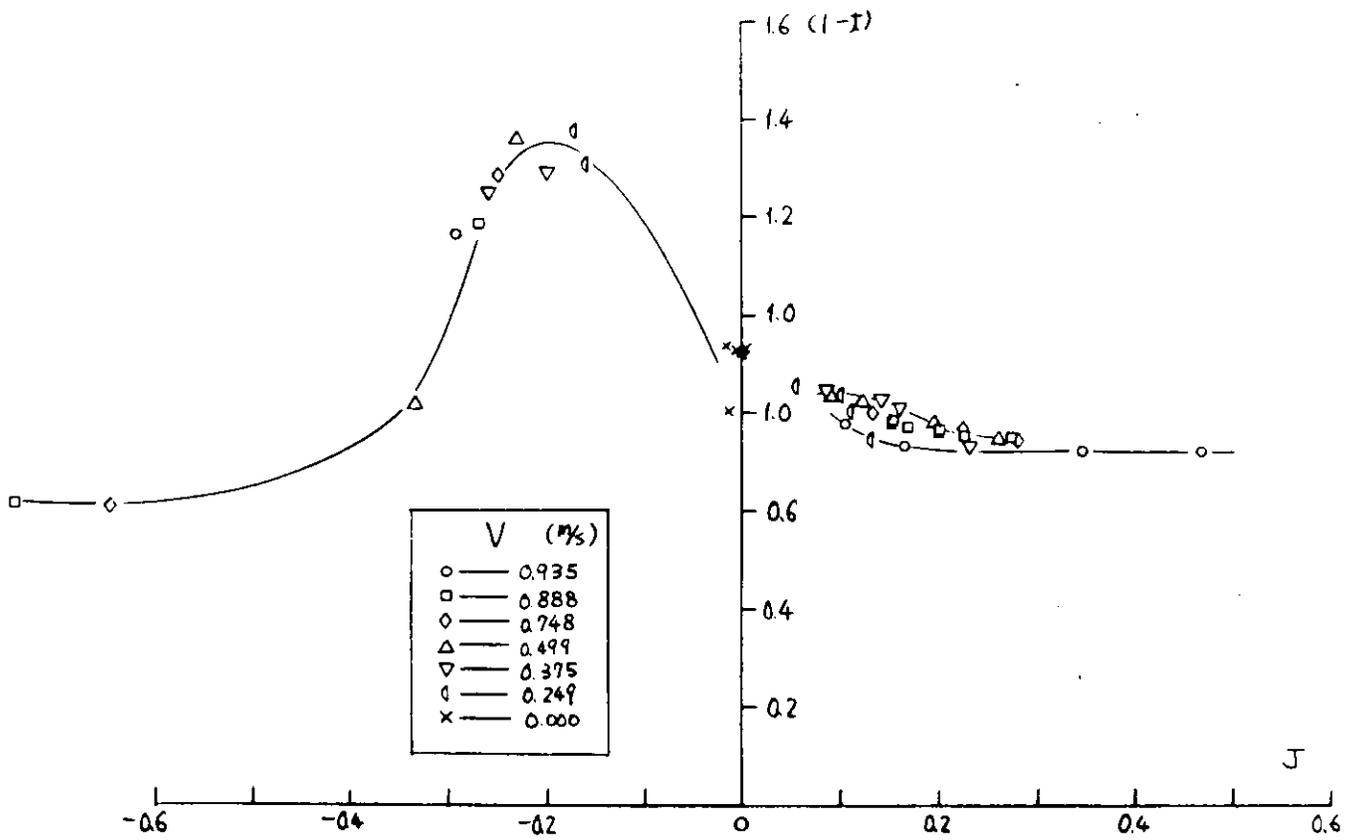


図 5.2.7 TOTAL THRUST IN VARIOUS LOAD CONDITION

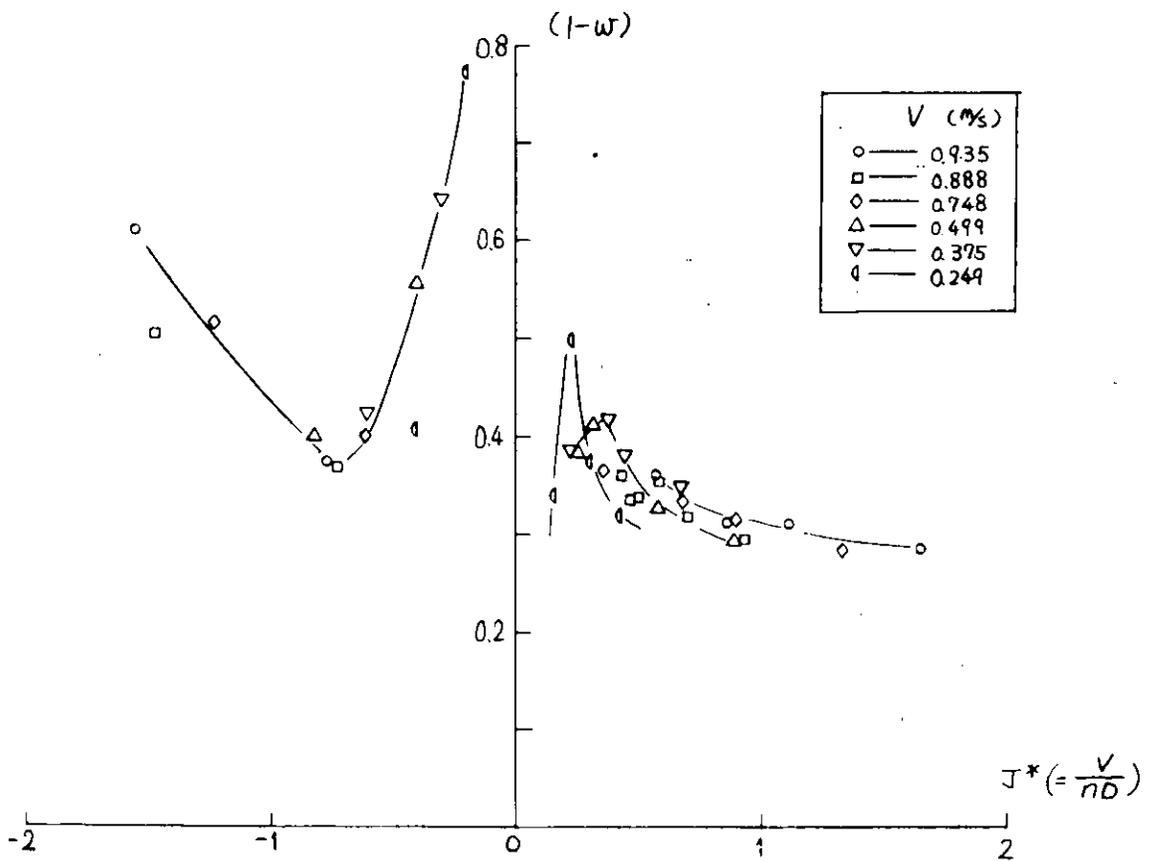
で求まるが、プロペラの荷重度により大幅に異なると考えられ、Harvald 等が解析したように、前進率 $J (= \frac{V_a}{nD})$ に対してプロットしている。

図 5.2.8 は、この $(1-t)$ の変化を示す。これによると正転時には、 J が減少するにつれ $(1-t)$ が増加する傾向にあり、一方、逆転時には $(1-t)$ が 1 を越えるところが存在し、 $J \approx 0.2$ でピークとなっている。

一方、このオーバーロード試験中の effective wake $(1-w)$ を見かけの前進率 $J^* (= \frac{V}{nD})$ に対してプロットしたのが、図 5.2.9 である。この $(1-w)$ は $\frac{V}{nD}$ の減少とともにやや増加する傾向にあり、逆転時には、ほとんど船速のいかんにかかわらず、 J^* によって $(1-w)$ が決定され、 $J^* = 0.7$ 付近で極小値をもつことがわかる。



5.2.8 $(1-t)$ FOR VARIOUS LOAD CONDITION



5.2.9 EFFECTIVE WAKE FOR VARIOUS LOAD CONDITION

(5) 回転数を変更する自航試験

一定船速で航走中、急に回転数を変更し、その時の船の運動を解析した。この際、船速の計測は、超音波位置計測装置により測定した情報を解析し、加速度はその数値微分フィルタにより計算した。このときの船の速度および加速度を位相面軌跡に示したのが図 5.2.10 である。

この結果の利用については後に述べる。

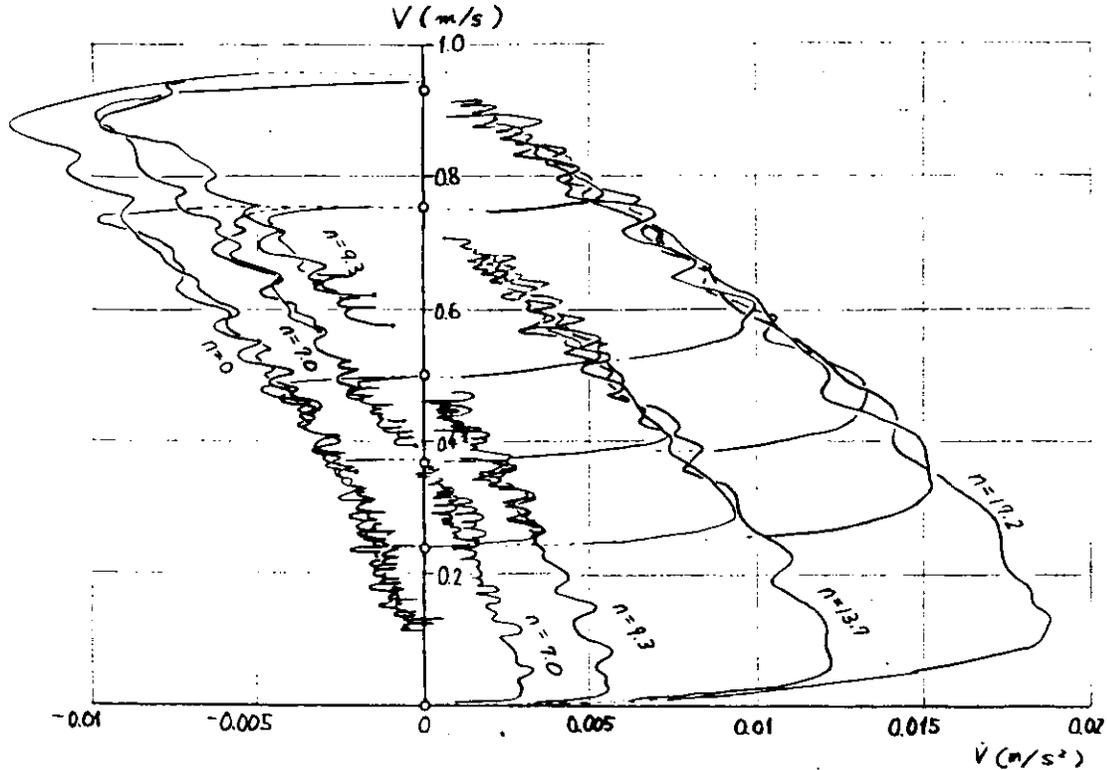


図 5.2.10 V - \dot{V} PHASE PLANE TRAJECTORIES

5.2.5. 前進方向応答方程式の適用限界

(1) 前進方向応答方程式の導出

(5.2.1) 式の算出については、すでに、5.1.3 で述べたが、ここでは模型実験解析との関係上、操舵や回頭運動がない場合の式

$$T_4 \dot{V} + V = K_4 n \quad (5.2.6)$$

に注目して、もう一度、簡単に要約する。

(i) 船の増減速運動方程式は、

$$(m + m_x) \dot{V} + C_R V^2 = (1 - t) \rho D^4 n^2 K_T \quad (5.2.7)$$

D: プロペラ直径 (m)

と表わせるが、前節 (5.1.3.0) 式では、その右辺を $K_T - J$ 特性を直線で近似して $C_1 n^2 - C_2 n V$ と表わしていた。

(ii) ここでは自航点の近傍での展開を考えているので、 $K_T - J$ を同様に自航点の近傍で展開して考えれば、

$$\begin{aligned} K_T &= (K_T)_{J=J_0} + \left(\frac{\partial K_T}{\partial J}\right)_{J=J_0} (J - J_0) \\ &= \left\{ (K_T)_{J=J_0} - \left(\frac{\partial K_T}{\partial J}\right)_{J=J_0} \frac{1-w}{n_0 D} V_0 \right\} + \left(\frac{\partial K_T}{\partial J}\right)_{J=J_0} \frac{1-w}{D} \cdot \frac{V}{n} \end{aligned} \quad (5.2.8)$$

$$\text{ただし, } J_0 = \frac{V_0}{n_0 D} (1-w)$$

(iii) (i), (ii)より (5.2.7) 式を変形すると、

$$(m+m_x) \dot{V} + C_R V^2 = a_0 n^2 + a_1 n V \quad (5.2.9)$$

$$\text{ただし, } a_0 = \rho D^4 (1-t) \left\{ (K_T)_{J=J_0} - \left(\frac{\partial K_T}{\partial J}\right)_{J=J_0} \frac{1-w}{n_0 D} V_0 \right\}$$

$$a_1 = \rho D^3 (1-t) (1-w) \left(\frac{\partial K_T}{\partial J}\right)_{J=J_0}$$

a_0 , a_1 は前節の C_1 , $-C_2$ にそれぞれ相当するものであり、 C_R は同じく C_3 に等しい。

(iv) $V = V_0$, $n = n_0$ の自航点の近傍で、 V , n が変化すると考えて、(5.2.9) 式を展開すれば、

$$(m+m_x) \dot{V} + (2 C_R V_0 - a_1 n_0) V = (2 a_0 n_0 + a_1 V_0) n \quad (5.2.10)$$

ここで、

$$T_4 = (m+m_x) / (2 C_R V_0 - a_1 n_0)$$

$$K_4 = (2 a_0 n_0 + a_1 V_0) / (2 C_R V_0 - a_1 n_0)$$

とおけば、(5.2.6) 式が得られる。

(2) 種々の船速、回転数における T_4 , K_4 の推定

(5.2.6) 式の線型の応答方程式は、回転数 n_0 と、この回転数に対応する定常船速 V_0 から、 V , n があまり変化しなければ、かなりよい近似を与えることが予想される。しかし、大幅な回転数の操作をするときには、(5.2.6) 式でもはや近似することは困難である。もし、あえて、この応答方程式で近似を試みた場合、 T_4 , K_4 の値はかなり変化するものと考えられる。

したがって、ここでは、種々の (V, n) の組合わせに対して、どのような T_4 , K_4 をとるか調べてみる。その前に、任意の回転数 n ($n > 0$) に対して (5.2.9) 式を $V = V_0$ の近傍で展開する。すなわち、

$$(m+m_x) \dot{V} + (2 C_R V_0 - a_1 n) V = a_0 n^2 + C_R V_0^2 \quad (5.2.11)$$

ここで、

$$T_4(V_0, n) = (m+m_x) / (2 C_R V_0 - a_1 n)$$

$$K_4(V_0, n) = \left(a_0 n + \frac{C_R V_0^2}{n} \right) / (2 C_R V_0 - a_1 n)$$

とおくと、次式が得られる。

$$T_4 (V_0, n) \dot{V} + V = K_4 (V_0, n) n \quad (5.2.12)$$

この (5.2.12) 式中の $T_4 (V_0, n)$, $K_4 (V_0, n)$ を種々の V_0, n に対して計算した結果を図 5.2.11, 5.2.12 にそれぞれ示す。この際、諸係数の値は、先の模型実験結果より、次のようにした。

$$1 - t = 0.732$$

$$1 - w = 0.37$$

$$D = 0.1206$$

$$R = 1.382 V^2$$

$$K_T = -0.292 J^2 - 0.198 J + 0.3$$

(自航要素は $V = 0.81 \text{ m/s}$ の値である。)

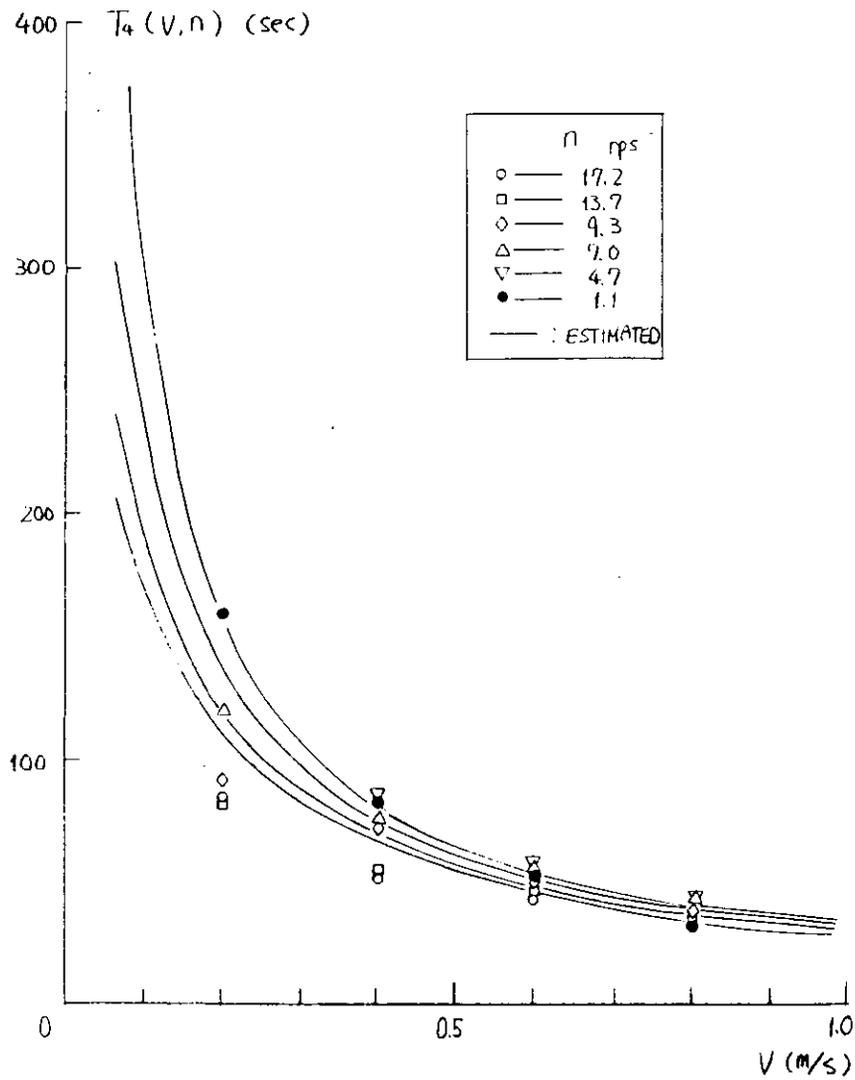


図 5.2.11 VARIATION OF T_4

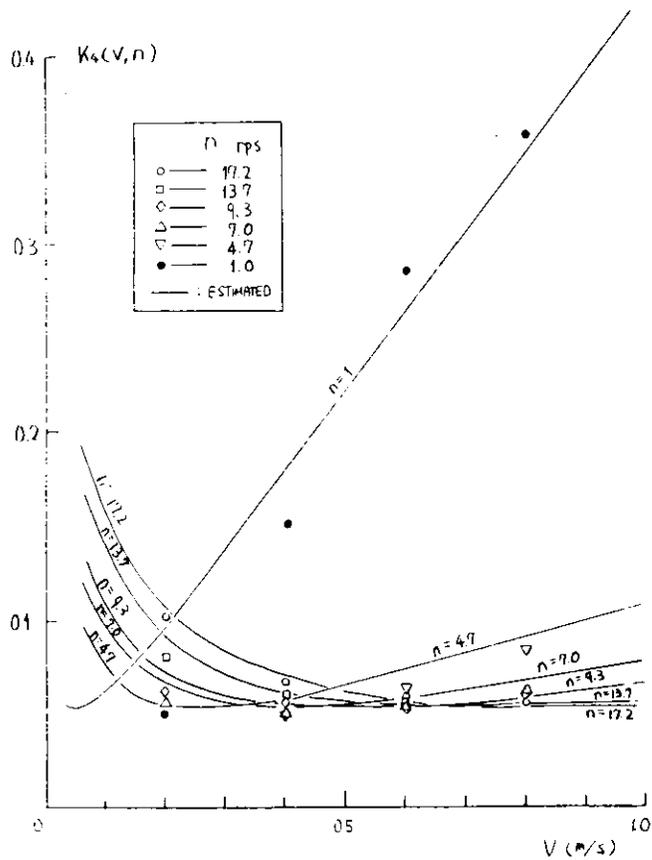


図 5.2.1.2 VARIATION OF K_4

(3) 模型実験による T_4 , K_4 の推定

先の回転数を変更する自航試験の結果求めた、 $V - \dot{V}$ 位相面 (図 5.2.1.0) より、 T_4 , K_4 を推定することができる。すなわち (5.2.6) 式は変形すると、

$$V = -T_4 \dot{V} + K_4 n \quad (5.2.13)$$

となるから、この位相面の傾斜が $n = n_1$ での $-T_4$ であり、 V 軸との交点が $K_4 n_1$ である。

(図 5.2.1.3 参照)

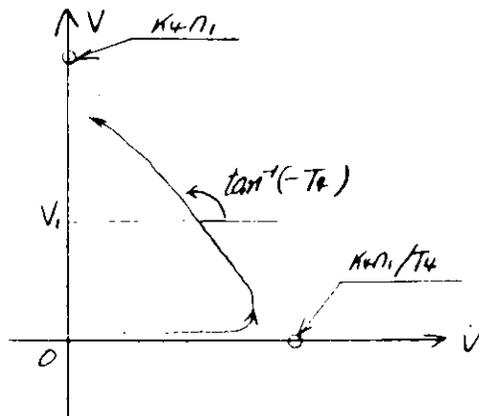


図 5.2.1.3

図 5.2.1.1, 5.2.1.2 の推定曲線上に重ねてプロットされているのが, この位相面より求めたものであり, ほぼ, 推定曲線と同様の傾向をしていることがたしかめられる。

(4) 線型応答方程式の適用限界

(2), (3)の結果より, 次のことが言える。

(i) 定常の船速で航走する場合に, K_4 は各自航点で一定であるが, T_4 は船速に対して, 反比例となる。

(ii) T_4 は低速域において, さらに, 回転数の操作の程度により大幅に変化する。

(iii) K_4 は船速の程度にかかわらず, 大幅な回転数の変更に対して, 大きく変化する。

(iv) しかし, 航海速力 (この模型船では 0.935 m/s) から, この速力の半分までの船速域においては, T_4 の変化は少なく, また, 大幅な回転数の減少を行なわない場合には K_4 もほぼ一定と考えてさしつかえない。

以上のことから, ある自航点 V_0, n_0 から回転数および船速の変化, $\Delta V, \Delta n$ が存在することにより起こる T_4, K_4 の変化率が最大 50% と仮定して, 許容し得る $\Delta V, \Delta n$ の範囲を示したのが, 表 5.2.2 である。

表 5.2.2 AVAILABLE RANGE OF V AND n

自航点 (展開点)				T_4, K_4 の許容範囲	$\Delta V, \Delta n$ の許容範囲 $\Delta V (\text{m/s}), \Delta n (\text{rps})$	線型応答方程式 の適用範囲
(m/s) V_0	(rps) n_0	T_4	K_4			
0.8	14.6	36.8	0.0544	$24.5 < T_4 < 55.2$ $0.0544 < K_4 < 0.816$	$-0.25 < \Delta V$ $-7.5 < \Delta n$	$0.55 < V$ $7.0 < n$
0.6	11.0	50.0	0.0544	$33.3 < T_4 < 75.0$ $0.544 < K_4 < 0.816$	$-0.2 < \Delta V < 0.3$ $-4.0 < \Delta n$	$0.4 < V < 0.9$ $7.0 < n$
0.4	7.3	74.0	0.0544	$49.3 < T_4 < 111$ $0.544 < K_4 < 0.816$	$-0.15 < \Delta V < 0.2$ $-2.8 < \Delta n < 6.0$	$0.25 < V < 0.6$ $4.5 < n < 13.0$
0.3	5.5	98.0	0.0544	$65.3 < T_4 < 147$ $0.544 < K_4 < 0.816$	$-0.12 < \Delta V < 0.16$ $-2.0 < \Delta n < 3.5$	$0.18 < V < 0.46$ $3.5 < n < 9.0$
0.2	3.7	152	0.0544	$101 < T_4 < 228$ $0.544 < K_4 < 0.816$	$-0.07 < \Delta V < 0.08$ $-1.5 < \Delta n < 2.0$	$0.13 < V < 0.28$ $2.2 < n < 5.7$

5.2.6. 一般的な前進方向の応答方程式

5.2.5において, 中高速域で, 大幅な回転数変化を伴なわない場合の船の応答を (5.2.1) 式ないしは (5.2.6) 式が, かなりよく近似していることを述べた。では, その適用範囲外の船速, 回転数変化に対しては, いかなる応答方程式が有効か, 若干のアプローチを試みる。

(1) 大幅な回転数の変更を伴った直後の場合

V_0 ($V_0 > 0$) で航走中において, 大幅な回転数の変更 ($n > 0$) を操作した直後で, 船速の変化がさほど発達していない場合, 5.2.5で述べた如く, もはや, (5.2.9) 式を n に対して展開することは困難である。したがって, 同式を $V=V_0$ の近傍のみで展開して, 次式を得る。すなわち

$$(m+m_x) \dot{V} + (2 C_R V_0 - a_1 n) V = a_0 n^2 + C_R V_0^2 \quad (5.2.14)$$

この場合、船速の減衰係数 $(2 C_R V_0 - a_1 n)$ は n の関数で定数ではない。あえて (5.2.6) 式の形にするならば、

$$T_4(n) \dot{V} + V = K_4(n) n^2 + C_0(n) \quad (5.2.15)$$

$$\text{ただし } T_4(n) = (m+m_x) / (2 C_R V_0 - a_1 n)$$

$$K_4(n) = a_0 / (2 C_R V_0 - a_1 n)$$

$$C_0(n) = C_R V_0^2 / (2 C_R V_0 - a_1 n)$$

(2) 回転数の大幅な変更の後、船速も大きく変動した場合

(1) の操作の後、時間がたてば、 V も大きく変動し、再び新しい自航点に達する。その場合には、やはり (5.2.15) 式で近似するのは困難である。

図 5.2.10 の $V - \dot{V}$ 位相面からもわかるように、もし (5.2.15) 式で、このような運動を記述するなら、 T_4 等の値は、 V 、 n に対して、大幅に変化するであろう。この場合には、むしろ (5.2.6) 式を適用する方が望ましい。

(3) プロペラ逆転の場合

プロペラ逆転時の $(1-t)$ 、 $(1-w)$ および K_T の変化は、先に示したように非常に複雑である。ところが、図 5.2.7 を見てもわかるように、オーバーロード試験中の $T(1-t)$ の値は、船速の変化に対して、さほど大きく変わっていない。したがって、 $V > 0$ でプロペラが逆転 ($n < 0$) している場合には、 $T(1-t)$ を回転数のみの関数として取扱っても大差はないと考えられる。そこで、簡略化した方程式 (5.2.16) を得る。

$$(m+m_x) \dot{V} + C_R V^2 = a_3 n^2 \quad (5.2.16)$$

$$\text{ただし } a_3 = \rho D^4 a_3'$$

$$a_3' = -0.2 \sim -0.25$$

ここで、 a_3' は船速の変化に対しては無関係と仮定しているので、前進航走時に逆転を発令した直後の船の運動は、船速の変化が少ない範囲で、 $V = V_0$ の近傍で (5.2.16) 式を展開することにより、次式となる。

$$(m+m_x) \dot{V} + 2 C_R V_0 V = a_3 n^2 + C_R V_0^2 \quad (5.2.17)$$

上式を $2 C_R V_0$ で割って、プロペラ逆転時の近似式を得る。

$$T_R \dot{V} + V = K_R n^2 + \frac{V_0}{2} \quad (5.2.18)$$

$$\text{ただし } T_R = (m+m_x) / 2 C_R V_0$$

$$K_R = a_3 / 2 C_R V_0$$

5.3 操縦シミュレーション時に加える外乱について

港湾への接近、決められた航路の航行、行合船の回避等、このシミュレータを利用して実施される当面のシミュレーションパターンの設定が行われた。これらのシミュレーションを行う上で、実際の航行時と同じように、種々の外乱を加えることが必要である。外乱の有無は、操船の難易を大巾に左右するからである。例えば、操舵員の針路制御を取り上げた場合、船自体の針路安定性が劣るに伴って、操舵員は微分制御を強めるが、高周波の外乱の存在は微分制御能力を劣らせることになり、保針に困難を生じさせることが知られている。この節では、操縦シミュレーションの実施において、さし当り、考慮すべき外乱の取り扱いについて述べる。

5.3.1. 加えるべき外乱の種類

本部会で取り扱う操縦シミュレーションの局面で、加えられる外乱には實際上、制限がある。例えば波浪によって誘起されるローリング、ピッチング、ヒーヴィング等の存在は、船橋上の操船者の作業環境を劣化させ、例えば、船の回頭運動の識別能力を低下させるという形で、操船の難易に影響する。しかし、本シミュレータの船橋模型は、ローリングその他を再現しうる機構を装備していないから、これらの外乱は加えることができない。

このシミュレータが加えることのできる外乱は、基本的には、水平面内における船の運動に対する外力の影響のみである。そして、この範囲内でもどのような外乱が加えられるかについては制約がある。この制約は、一つには、実際の複雑な外乱をどこまで正確に記述する数学モデルが得られるかという点にある。また、数学モデルが得られる場合でも、徒らに複雑な外乱の印加は、それを発生させる機構の実現を困難にしたり、コストパフォーマンスの低下につながるのみならず、シミュレーション結果の解析を徒らに複雑にする可能性もある。特に、本シミュレータでは、演算部としてアナログ型の計算機を使用しており、その素子数からも厳しい制約がある。

以上の問題を与えて、このシミュレータにおける外乱の印加機構は、実際の操船の様態を再現する上で必要不可欠とみなされるものに限定することにする。このような見地から、さしあたり、考慮する方向で検討すべき外乱の種類について、次の各項を考えることにする。

- 1) 風圧力が誘起する船の回頭運動および横流れ運動
- 2) 波浪によって誘起される船の回頭運動
- 3) 一様な潮流によって生じる船の位置変化

この他、狭水路航行や港湾への接近等のシミュレーションにおいては、船の操縦性能に対する浅水影響が重要であり、できるだけ早期にこの点への考慮が必要である。しかし、本部会において採用された数学モデルに浅水影響あるいは狭水路影響をどのような形で組みこむかについては、まだ、検討されていない。浅水影響は水深と吃水の比が1に近づくにつれて、急激に表われることを考えると、港湾への接近等のシミュレーションでは、時々刻々の船位に応じて、水深が変化し、それに伴って、船の操縦性能が次第に変化するという形で考える必要がある。このような局面の実現は、アナログ計算機の場合、難しいと言える。より単純化した局面として、浅い一様な水深を考えると、これはアナログ計算機に設定する数学モデルを、あらかじめ、浅水影響を考慮したモデルにすることで実現できる。

このように、できるだけ早期に浅水影響の問題を考えることにし、さしあたり、上記三項目の外乱を得る方法について述べることにする。

5.3.2. 風圧力が操縦運動に及ぼす影響

風圧力は、低周波数の成分が多く、とりわけ、船速が低下した場合には操船に大きな影響を与えることが知られている。狭水路航行や港湾への接近のシミュレーションに際しては、船速が5～7ノット程

度まで低下する局面を想定しているから、風圧力が操縦運動に及ぼす影響についてはできるだけ正確に取り入れる必要がある。

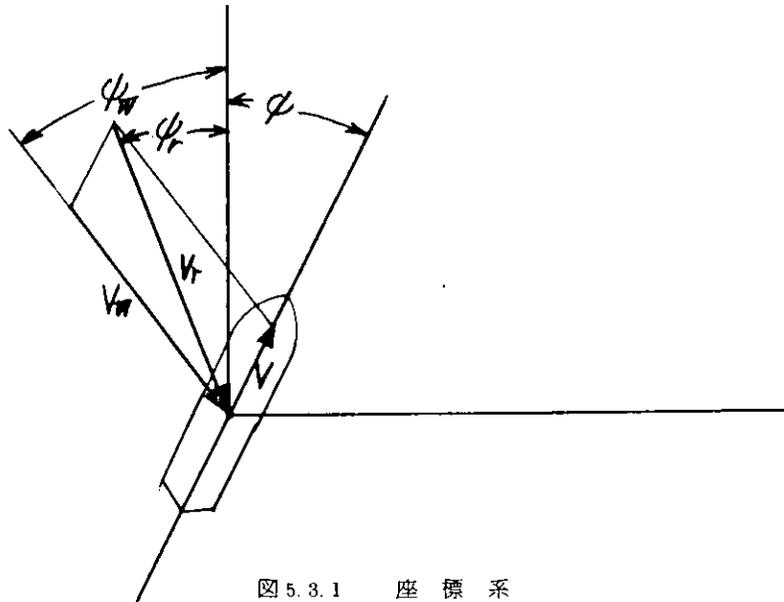


図 5.3.1 座 標 系

風圧力が操縦運動に及ぼす影響を運動方程式の上で表現するには、旋回と横流れの連成運動方程式に風圧力係数を導入する形が一般に採用される。

まず、図 5.3.1 に示す座標系を考える。船速を V 、船首方位を ϕ とし、風速、風向をそれぞれ、 V_w 、 ϕ_w とする。この場合の相対風速および風向を V_r および ϕ_r とする。相対風および風速の算出においては、船の横流れ運動は小さいから無視することができ、相対風向、風速は次式で与えられる。

$$V_r = V_w \left\{ 1 + (V/V_w)^2 + 2 (V/V_w) \cos(\phi - \phi_w) \right\}$$

$$\phi_r = \tan^{-1} \left\{ \frac{\sin(\phi - \phi_w)}{(V/V_w) + \cos(\phi - \phi_w)} \right\} \quad (5.3.1)$$

この相対風向、風速によって船に誘起される横力および重心まわりのモーメントは次式で表現される。

$$Y_w = \frac{\rho_w}{2} S C_Y V_r^2$$

$$N_w = \frac{\rho_w}{2} S L C_N V_r^2 \quad (5.3.2)$$

$\left\{ \begin{array}{l} S : \text{水線上の船体横投影面積} \\ L : \text{船長} \\ C_Y, C_N : \text{風圧力および風圧モーメント係数であり、風洞試験成績を使用できる。} \end{array} \right.$

横流れおよび旋回の運動方程式は、この風圧力の影響を導入すると次式で与えられる。

$$\frac{\rho}{2} L^2 d (m' + m_y') \dot{V} - \frac{\rho}{2} L^2 d (m' + m_x') u_r = \frac{\rho}{2} L d V^2 Y' + \frac{\rho_w}{2} S C_Y V_r^2$$

$$\frac{\rho}{2} L^4 d (I_z' + J_z') \dot{r} = \frac{\rho}{2} L^2 d v^2 N' + \frac{\rho_w}{2} S L C_N v r^2 \quad (5.3.3)$$

操縦シミュレーションの局面における殆どどの時間は、直進に近い状態で走っているとみなされるから、微小運動時の風圧力影響を主に取り扱うことにすれば、 Y' 、 N' は線型微係数のみで表現されるとしてよい。(5.3.3) 式の両辺を $\frac{\rho}{2} L d v^2$ および $\frac{\rho}{2} L^2 d v^2$ で除し、 v を横流れ角 β に書き改めると次式をうる。

$$\begin{aligned} (L/V) (m' + m_y') \dot{\beta} + Y_{\beta}' \beta - (L/V) (m' + m_x' - Y_r') r &= Y_{\delta}' \delta + Y_w' r^2 \\ (L/V)^2 (I_z' + J_x') \dot{r} - N_{\beta}' \beta + (L/V) N_r' r &= N_{\delta}' \delta + N_w' r^2 \end{aligned} \quad (5.3.4)$$

$$\text{ただし} \quad \begin{cases} Y_w' = \rho_w S C r / \rho L d \\ N_w' = \rho_w S C N / \rho L d \\ r = (v_r / V) \end{cases}$$

ここで、初期運動を零として、(5.3.4) をラプラス変換すると、

$$\begin{aligned} \{ (L/V)^2 (I_z' + J_z') P + (L/V) N_r' \} r(P) - N_{\beta}' \beta(P) &= N_{\delta}' \delta(P) + N_w' r^2(P) \\ - (L/V) (m' + m_x' - Y_r') r(P) + \{ (L/V) (m' + m_y') P + Y_{\beta}' \} \beta(P) &= Y_{\delta}' \delta(P) + N_w' r^2(P) \end{aligned} \quad (5.3.5)$$

(5.3.5) 式から、 $\beta(P)$ を消去すると

$$\begin{aligned} \{ (L/V)^3 (I_z' + J_z') (m' + m_y') P^2 + (L/V)^2 \{ (I_z' + J_z') Y_{\beta}' + N_r' (m' + m_y') \} P + (L/V) \\ \{ N_r' Y_{\beta}' - (m' + m_x' - Y_r') N_{\beta}' \} \} r(P) \\ = \{ (N_{\delta}' Y_{\beta}' + N_{\beta}' Y_{\delta}') + (L/V) N_{\delta}' (m' + m_y') P \} \delta(P) + \{ (N_w' Y_{\beta}' + Y_w' N_{\beta}') + (L/V) N_w' \\ (m' + m_y') P \} r^2(P) \end{aligned} \quad (5.3.6)$$

書き改めると

$$\begin{aligned} \{ (L/V)^2 T_1' T_2' P^2 + (L/V) (T_1' + T_2') P + 1 \} r(P) &= (V/L) K_w' (1 + (L/V) T_w' P) r^2(P) \\ &+ (V/L) K' (1 + (L/V) T_3' P) \delta(P) \end{aligned} \quad (5.3.7)$$

$$\text{ただし} \quad \begin{cases} T_1' T_2' = (I_z' + J_z') (m' + m_y') / D \\ T_1' + T_2' = \{ (I_z' + J_z') Y_{\beta}' + N_r' (m' + m_y') \} / D \\ K_w' = (N_w' Y_{\beta}' + Y_w' N_{\beta}') / D \\ T_w' = N_w' (m' + m_y') / (N_w' Y_{\beta}' + Y_w' N_{\beta}') \\ D = N_r' Y_{\beta}' - (m' + m_x' - Y_r') N_{\beta}' \end{cases} \quad \begin{cases} K' = (N_{\delta}' Y_{\beta}' + N_{\beta}' Y_{\delta}') / D \\ T_3' = \frac{N_{\delta}' (m' + m_y')}{N_{\delta}' Y_{\beta}' + N_{\beta}' Y_{\delta}'} \end{cases}$$

操舵を考えない時には、風圧力に対する船の応答は

$$r(P) = \frac{(V/L)K_w \{1 + (L/V)T_w P\}}{(L/V)^2 T_1' T_2' P^2 + (L/V)(T_1' + T_2')P + 1} \tau^2(P) \quad (5.3.8)$$

風の中で、保針している時の平均相対風速と平均当舵 ($\bar{\delta}_r$) の関係は、

$P \rightarrow 0, r(0) \rightarrow 0$ として

$$\bar{\delta}_r = \frac{N_w' Y_\beta' + Y_w' N_\beta'}{N_\delta' Y_\beta' + N_\beta' Y_\delta'} \tau^2(0) \quad (5.3.9)$$

同様にして、横流れ運動は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \{ (L/V)^2 T_1' T_2' P^2 + (L/V)(T_1' + T_2')P + 1 \} \beta(P) &= K_\beta' \{ 1 + (L/V)T_{\beta 3}' \} \delta(P) \\ &+ K_{\beta w}' \{ 1 + (L/V)T_{\beta w}' \} \tau^2(P) \end{aligned} \quad (5.3.10)$$

$$\text{ただし、} \left\{ \begin{aligned} K_\beta' &= \{ N_r' Y_\delta' + N_\delta' (m' + m_X' - Y_r') \} / D \\ T_{\beta 3}' &= \frac{(I_z' + J_z') Y_\delta'}{N_r' Y_\delta' + N_\delta' (m' + m_X' - Y_r')} \\ K_{\beta w}' &= \{ N_r' Y_w' + N_w' (m' + m_X' - Y_r') \} / D \\ T_{\beta w}' &= \frac{(I_z' + J_z') Y_w'}{N_r' Y_w' + N_w' (m' + m_X' - Y_r')} \end{aligned} \right.$$

風の中で保針している時の平均の横流れ運動は、 $P \rightarrow 0,$

$$\begin{aligned} \delta_r &= \frac{N_w' Y_\beta' + Y_w' N_\beta'}{N_\delta' Y_\beta' + N_\beta' Y_\delta'} \tau^2(0) \quad \text{として} \\ \beta(0) &= K_\beta' \delta_r + K_{\beta w}' \tau^2(0) \\ &= \left\{ K_\beta' \frac{N_w' Y_\beta' + Y_w' N_\beta'}{N_\delta' Y_\beta' + N_\beta' Y_\delta'} + K_{\beta w}' \right\} \tau^2(0) \end{aligned} \quad (5.3.11)$$

つまり、風の中で保針中の平均の横流れ運動は、保針に要する平均当舵に対応する横流れ運動と、平均相対風速による横流れ運動の和の形で与えられることになる。

さて、風速および風向は一般に時間的に変動することが知られている。風向は平均風向のまわりにある分布を持つが、問題を単純化するために、風向の変化はないものとみなすことにする。風速については、十分に低域の変動があり、操船に与える影響が大きいから、できるだけ、実際に近い形で変動を考慮することにする。従って、風速は平均風速 + 変動風速の形で与えることになるが、変動風速のスペクトルについては、広く知られている Davenport のスペクトルの形で考えることにする。

$$\frac{n F_u(n)}{\bar{U}^2} = 2K \frac{X^2}{(1+X^2)^{4/3}} \quad (5.3.12)$$

ただし、 $X = 1.200 \frac{n}{\bar{U}}$
 \bar{U} : 基準高度 (10 m) の平均風速
 K : 表面のまさつ係数

(水上の場合、0.003程度)

平均風速 1.0 m/s , 2.25 m/s の場合のスペクトルを図 5.3.2 に示す。(1)

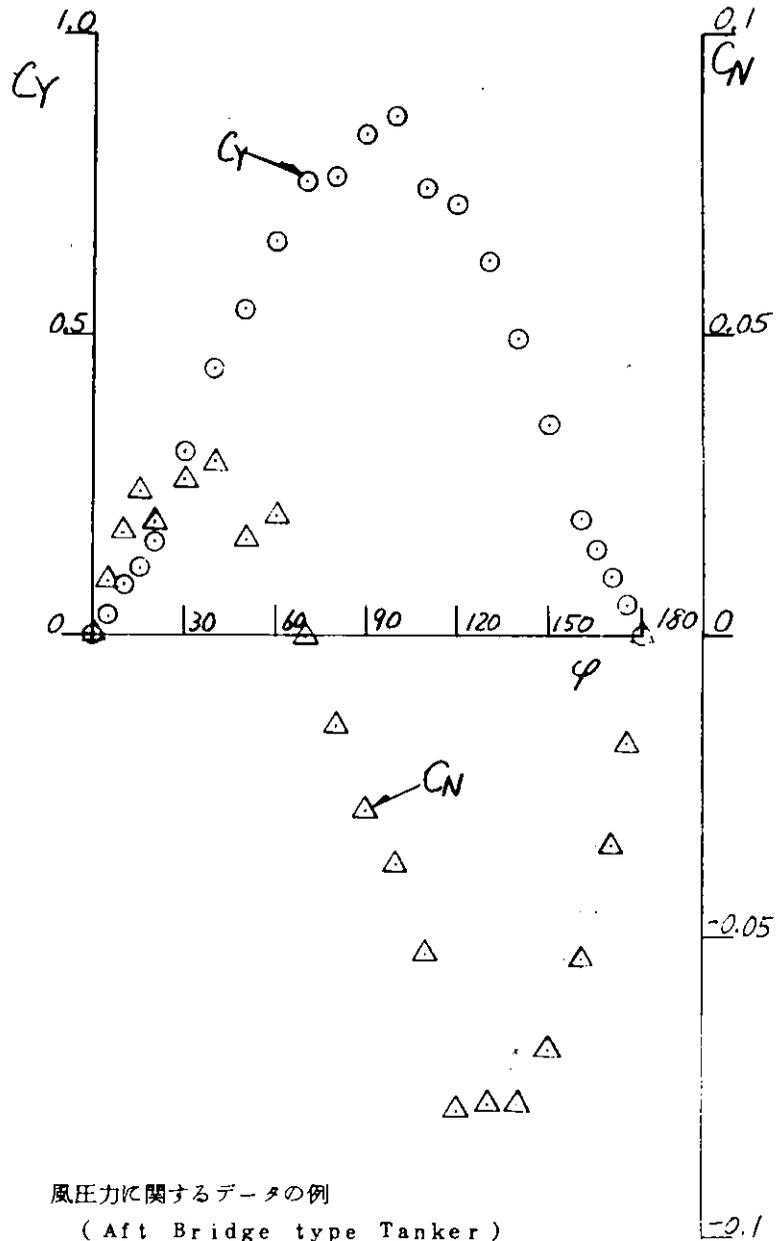
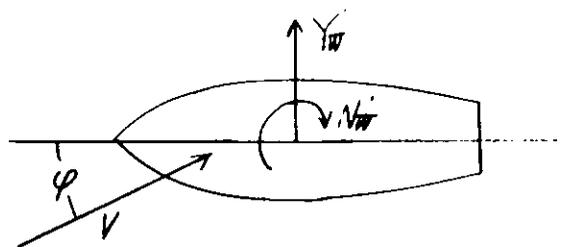


図 5.3.2 風圧力に関するデータの例
(Aft Bridge type Tanker)



(船研報告 7巻5号 より引用)

以上に従えば、風速、風向を与えた場合の船の回頭運動と横流れ運動を計算することができる。しかし、實際上、アナログ計算機でこの計算を行うことは容易でないから、簡略化することが必要である。さしあたり、次のように考えるのも一方法である。

(a) 相対風向、風速の計算

風圧力が大きな影響を及ぼすのは、船速に較べて相対風速が十分に大きい場合であるから、 $V_w \gg V$ の時に正確に相対風向、風速が計算できればよいと考える。 $V/V_w \rightarrow 0$ とみなして、

$$V_r \doteq V_w$$

$$\phi_r \doteq \phi - \phi_w$$

(b) 風圧力による回頭運動の計算

式(5.3.7)に従うと、操舵に対する船の回頭運動を計算している演算回路に、 r (相対風速と船速の比) の自乗の項を入力としてつけ加えればよいことになる。従って、種々の相対風向に対して、あらかじめ $K\dot{w}$ 、 $T\dot{w}$ を計算しておき、非線型素子(折線函数発生器)で、これを発生させて利用すればよい。

(c) 横流れ運動の計算

横流れ運動に対しては、比較的高周波の応答は操舵にあまり影響しないと考えてよいから、式(5.3.11)による平均の横流れ運動のみを問題にする。種々の相対風向に対して、

$$\left\{ K'_\beta \frac{N\dot{w} Y'_\beta + Y\dot{w} N'_\beta}{N'_\beta Y'_\beta + N'_\beta Y'_\beta} + K'_{\beta w} \right\}$$

を計算しておき、(b)と同様に非線型素子を用いて、 β を計算することができる。しかし、現在、使用している運動モデルによれば、この β を船の位置の計算に取り入れることは必ずしも容易でないから、風圧力による横流れの問題をどこまで考えるかについて別に検討する必要がある。

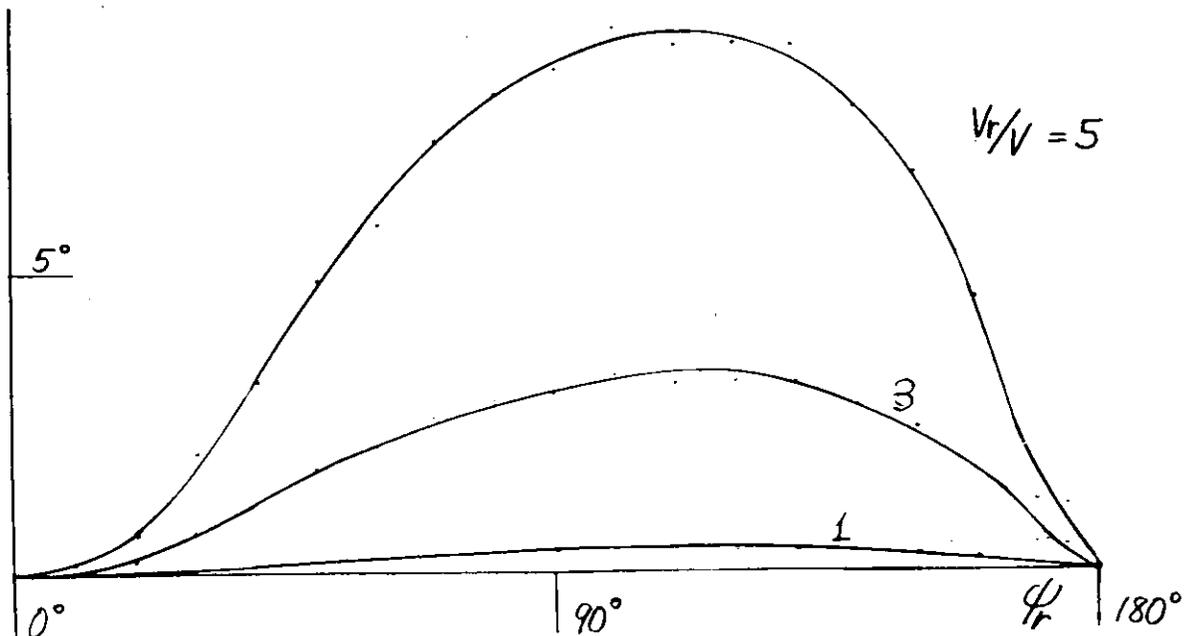


図 5.3.3 風の下で保針される船の当舵量

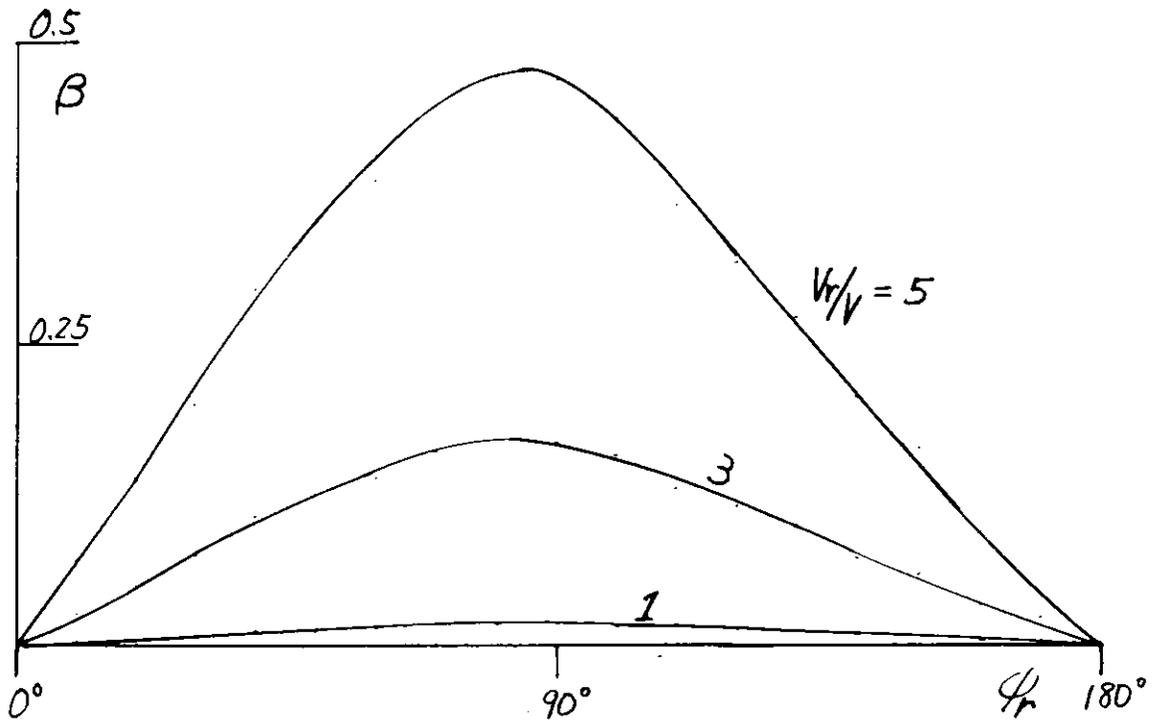


図 5.3.4 風の下で保針される船の横流れ運動

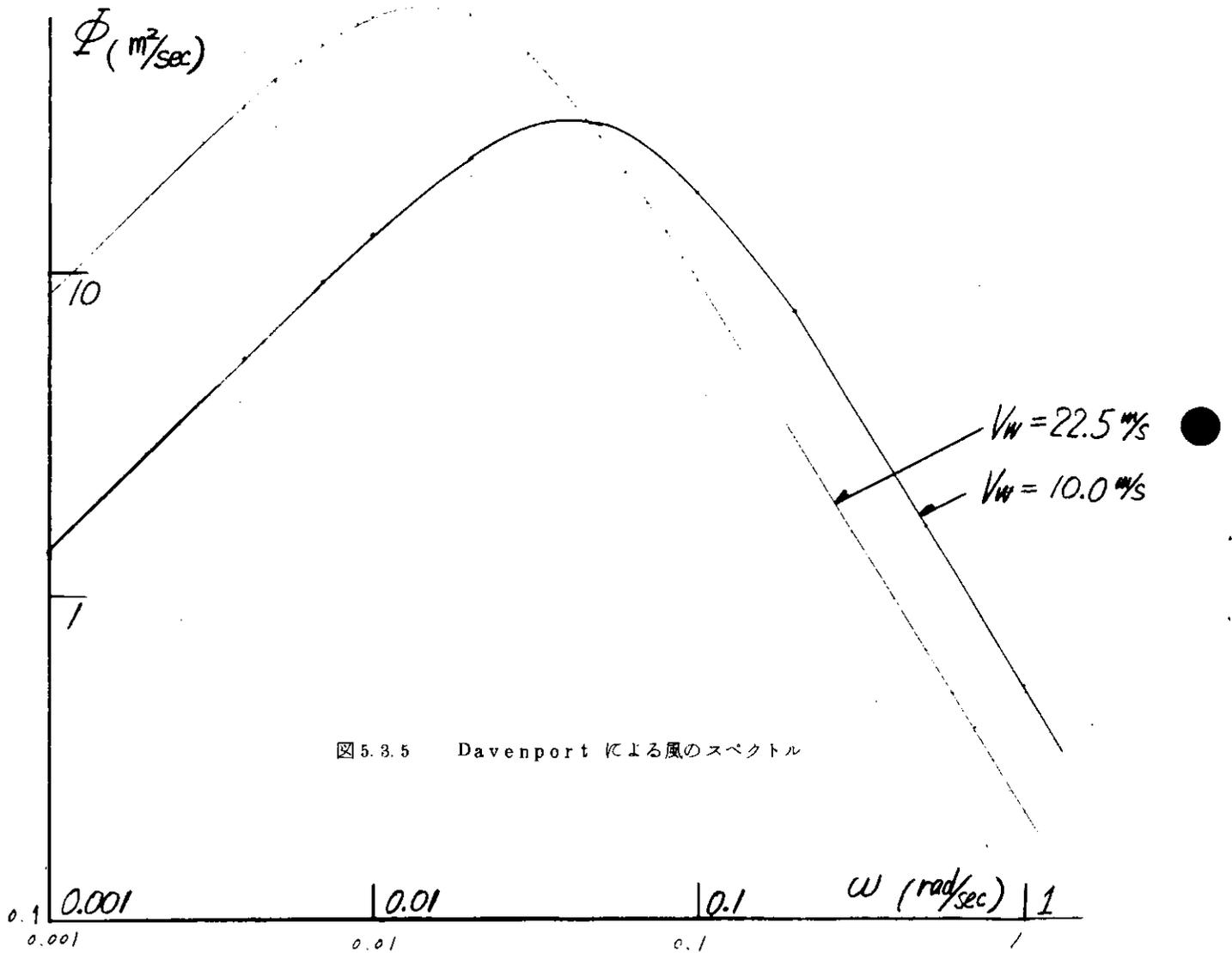


図 5.3.5 Davenport による風のスペクトル

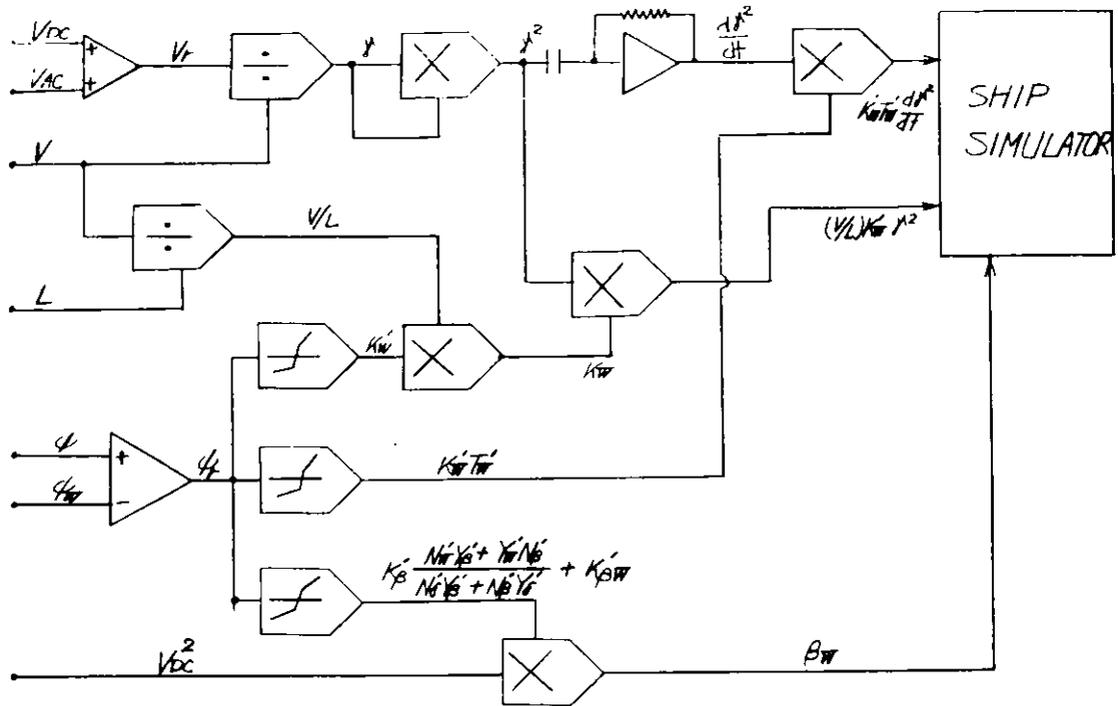


図 5.3.6 風による外乱の発生回路

5.3.3. 波浪によって誘起される船の回頭運動

波浪によって、船に回頭運動が誘起される。この回頭運動は、海象とともに船首方位、船速によって変化する。この外乱のスペクトルは、ストリップ理論で計算することができる。あらかじめ、船首方位と船速を種々に変えた場合のスペクトルを計算しておき、シミュレーション時に適宜、選択して外乱を加えるのも一方法であり、デジタル計算機を利用する時には有効である。しかし、アナログ計算機の場合、この方法は容易ではない。

この外乱をどこまで正確に加える必要があるかは、結局、この外乱が予定しているシミュレーションの局面で、どのような影響をもつかによって決まる。シミュレーションの局面は、狭水路とか、港湾の近くが主体であるから、波浪自体はあまり大きくないと考えても良く、この外乱は、特に大型船に対して、あまり大きくないと考えてよい。また、この外乱の周波数域は比較的高域であり、低周波成分は少い。このような外乱の場合、操舵員やオートパイロットに対しては、微分制御を難しくすることを通じて、大きな影響を与えるが、位置制御を主とする航海士の機能に対する影響は少い。このシミュレータを用いた研究の主目的は、航海士による操船の問題であるから、可能な限り簡略化した形で、この外乱を取り扱うことにする。

まず、この外乱はシミュレーション中、船速や船首方位に変化があっても、変化しないと考える。そして、適当な海象、船速、船首方位の条件の下で、波浪による船の回頭運動のスペクトルをあらかじめ計算しておくとか、実船におけるスペクトルの解析例を使用するとかの方法で、外乱の形を決めることにする。実際には、外乱の角速度スペクトルのピーク値を $0.05 \sim 0.1$ (deg^2/sec) 程度、中心周波数を $0.3 \sim 0.6$ (rad/sec) 程度に考えておけばよい。

この外乱をうるためには、適当なノイズ発生器の出力にバンドパスフィルターを適用すればよい。

図 5.3.7 は Binary Noise Generator を使用した外乱発生器の設計例である。

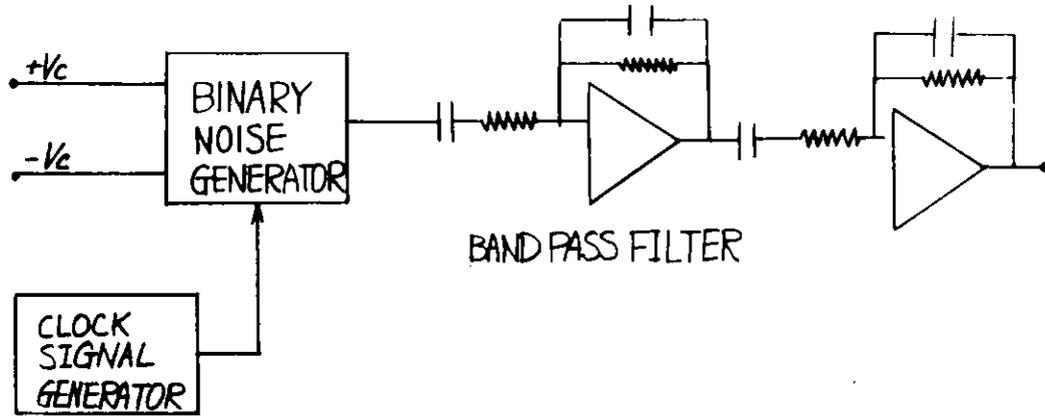


図 5.3.7 波浪による外乱の発生回路例

5.3.4. 潮流による船の位置変化

狭水路域の航行においては、潮流は操船に大きな影響を及ぼす。こうした海域においては、航行中、潮流はその速さと方向を変化させているところが少なくない。極端な場合には、船体の前と後で潮流の強さが異なる場合すら生じる。このような場合、船は潮流に流されるとともに、回頭運動をも誘起されるが、船の運動モデルにこれらを取り入れることは、運動モデルの形から考えて、必ずしも容易でない。

しかし、港湾への接近やパイを利用した狭水路航行の局面における潮流の影響の大きさを考えると、これを全く無視してしまうのも問題を残すといえよう。操船上、潮流の影響として、まず重要なのは潮流に乗って船が流されることであるから、この様子だけでも取り入れれば大きな改善になる。そこで、船体運動に対する潮流の影響は、重心の位置変化のみに現われ、回頭運動は生じないと考えることにする。

全く一様な潮流中では、船は完全に潮流に乗って走っていると考えてよいから、潮流の影響は、船位の計算式に潮流の項を取り入れればよい。

$$\left. \begin{aligned} X &= \int_0^t V \cos \phi dt - \ell p \cos \phi + \int V_{xs} dt \\ Y &= \int_0^t V \sin \phi dt - \ell p \sin \phi + \int V_{ys} dt \end{aligned} \right\} \quad (5.3.13)$$

潮流の強さが時間的に変化する場合、大変、荒っぽいやり方であるが、式(5.3.13)の潮流によるX, Y方向の船速 V_{xs} , V_{ys} は潮流速度 V_{xc} , V_{yc} に1次遅れの形で追従すると考えるのも一つの方法かも知れない。

6. 解析方法の検討

6.1 保針・変針における操舵員モデル

保針・変針における操舵員の役割は、船長あるいは航海士により指示された針路に変針したり、一定の針路を保持したりすることである。したがって、船舶操縦システム合体から見るとかなり小さなサブシステムであり、考え方によっては、本部会の対象から除外してもよいとも言える。

しかし、この問題は操船における Man-Machine System の基本であり、また船舶設計の立場から見れば、人間が操船できるためにはどの程度の性能を備えておくべきかという問いに対する解答とも関連し、その面では重要な課題である。したがって、Man-Machine System における操舵員のモデルを求めるといことは、平均的な能力をもつ操舵員がどのような操舵を行なうかを調べ、一方ではそれによって規定されるサブシステムに対し、船長や航海士がどのような指示を行なうかという問題についてのサブシステムの基準化を目的とするものであり、他方では、その程度の操舵アルゴリズムに対し、満足すべき性能を保証するためには、船はどの程度の性能を有すべきかという船の設計指針を得ることを目的とするものと考えてよいであろう。

従来の研究をふり返ると、初期においては、飛行機や自動車におけるパイロットモデルの先例に倣って、操縦士の行動を PD あるいは PID による線型モデルにあてはめようという動きが中心であったが、その後特に大型船においてはパンパン的な操舵が目立つことに注目が集まり、現在では非線型モデルが興味を中心になっている。

最近の研究では、Verdhuyzen と Stassen⁽¹²⁾ が船の状態についての操舵員の手測値を位相面の上でつぎのように分類し、(図 6.1.1)

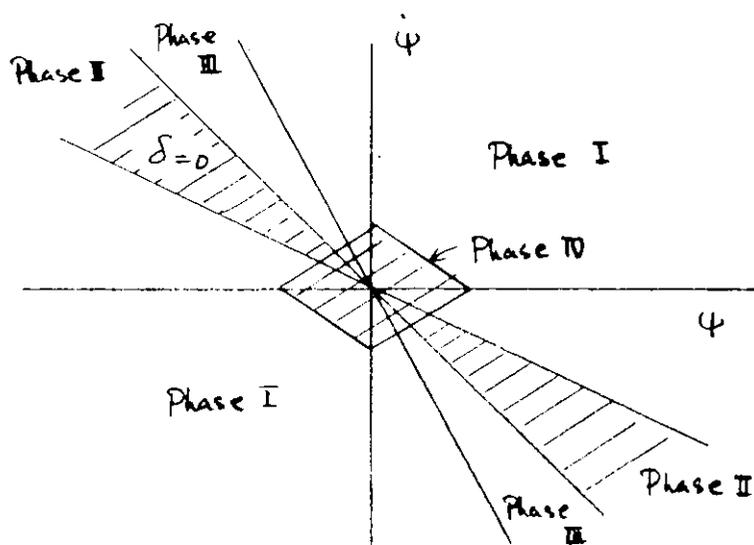


図 6.1.1 可変舵角ゼロ付パンパン制御モデル
(Verdhuyzen & Stassen)

- Phase I 針路修正のため旋回を開始する部分
- Phase II 旋回を舵角=0で継続する部分
- Phase III 旋回をとめ、目標値に近づける部分
- Phase IV 目標値からの偏差が小さく、舵角=0の部分

Phase I, IIIにおいては適当なアルゴリズムで一定の舵角をとるといふ、いわば、可変舵角ゼロ付パンパン制御とでもいふべき複雑なモデルを作り、大型船においては操舵員の操作を非常によく表現している。

本部会の実験結果についてもこの方法で解析してみるべきであろうが、このモデルはパラメータが多く、複雑すぎるのが難点である。とくに、操舵員を全体のシステムの中でのサブシステムと見て、その基準化あるいは船に対する要求性能を求めるといふ立場から見れば、もっと簡単で、できれば線型のモデルであることが望ましい。

図 6.1.2 は以上の考え方に基づいた量子化線型モデルの提案である。舵の切替え線は Verdhuyzen 等のモデルと大差ないが、舵角の任意性という点は犠牲にしている。しかし、図中に例示した舵角は、いわば大舵角、中舵角、小舵角ともいふべき値の一例で、Verdhuyzen 等のモデルでも、舵角は Feed Back 制御的アルゴリズムから決められていることを見れば本質的な差異はないと期待してよいであろう。

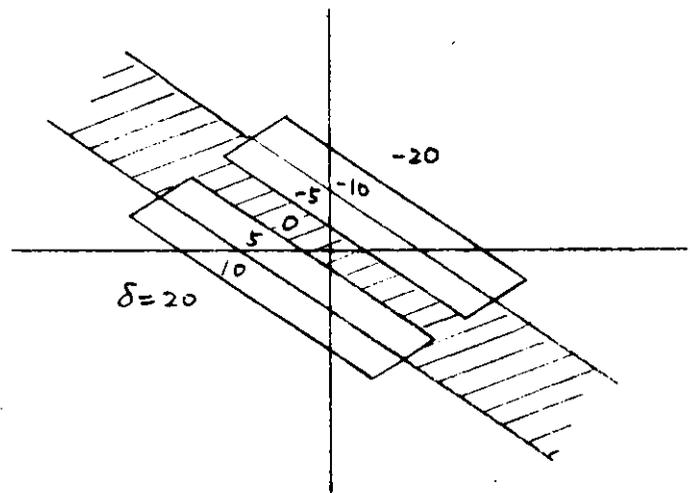


図 6.1.2 量子化線型モデルの提案

操舵員の動作は、制御すべき船の特性、外乱の状況によって変ると考えられるので、まず平均的な特性の船について平水中のモデルをつくり、そのモデルが

- (1) 船の特性 (L/V, 不安定の度合)
- (2) 外乱の状態 (波浪, 風)

によってどのように変るかを調べるという方法になる。

操舵員の動作をあるモデルにあてはめる場合、あてはめの良さを示す何らかの評価が必要である。また、船に対する要求性能を求めるといふ立場からは、操舵の難易に関連した評価値も必要となる。以上の目的に対しては、つぎのようなものが考えられるであろう。

- (1) あてはめのよさ:

$$\frac{1}{T} \int_0^T (\delta_{QM} - \delta_M)^2 dt$$

(2) 保針の難易

- 針路誤差, 回頭角速度の r m s
- 舵角の r m s , 操舵回数

(3) 変針の速応性

$$\frac{1}{\phi_1} \int_0^T (\phi_1 - \phi) dt \quad \text{又は} \quad \int_0^T t |\phi_1 - \phi| dt$$

6.2 避航操船解析の考え方

船舶の重要な操船パターンには, 保針変針, 離着岸操船, 航路上航行操船, 障害物避航操船等が掲げられる。しかし, これらのものは, それぞれが独立なものでなく, ここで対象とする障害物避航操船にしても基本的には, 保針変針そして航路上航行操船の組合せと云える。(避航操船の場合, 避航の為の航路は操船者自身が計画するものであるので第三者には, 計画航路を一般に知る事は出来ない訳ではあるが。)

では, 障害物避航操船の解析に当って, その基本となる操船パターンの解析評価をどの様に取り入れ, 何が基本操船の上に加わって避航動作が成立しているのかが問題である。

はじめに, 避航操船が基本的な操船とどの様な点に於て異っているのか検討する。

(1) 一般に操船者と操舵手と云う複数の人間が直列に結ばれて操船を行う。

この事は, 解析に当ってそれぞれの機能別に検討を行えば良いのではないかと一見, 都合の良い形態に思われるが, 実際には避航動作の主である操船者の出力が段階的で数の少なくなる原因でもある。そしてこの事は主たる操船者の応答特性の調査を困難にしている原因とも考えられる。

(2) 一つの状況の処理に要する時間が長い。

これは, 操船者に時間的にかなり先の状態を予測させるもので, 短時間に処理する人間の一定能力を調査するものと大きく異なる点である。又, 操船中に複雑に入力情報をサンプリングする事にもなる。

(3) 最適な行動結果の評価基準がない。

人間の行動は望ましい結果が決められている場合, 多くの人間が同じ状況におかれると最終的にどの人間も同様な行動をとると云われている。しかし避航操船に於ては, 一般にその様な明確な評価基準はない。この事は, シミュレータにおいて実験する場合重要な事となる。即ち, 実際の海上の場合では, 個人差があまり現われないものもシミュレーションに於て, その点が強調される事もあり得る。又リヤリティの欠除や, シミュレータの制約のために, 実船における操船と異なるシミュレータ特有の操船をする事も考えられる。

(4) 周辺状況に大きく影響をうける。

避航操船には影響する因子が多く, 又複雑でありシミュレータと, 実船との僅かな相違が避航動作に影響を及ぼす原因ともなり得る。

以上, 避航操船の成り立ち, 他の操船との相違, シミュレータによる避航操船実験の任意点等を考えて来たわけだが, これ等の事を念頭において避航操船研究の目的, シミュレータによる避航操船解析の考え方について述べる。

6.2.1 避航操船研究の目的

(1) 避航操船のメカニズムの解析

操船者は何を入力情報とし, どの様な重み付けをして操縦性能等の制約条件の中で何を予測し, 何を決定するのか, そして, 状況の変化に伴い, どの情報を重視し, 操船にどの様な形でフィード・バックしてゆくのか調査研究する。

- (2) 避航操船に関する諸条件の調査、研究。

6.2.2. 実験・解析の考え方

- (1) 調査項目を抽出し、対象項目が強調される実験を行う。

これは、どのような実験にも通用する事ではあるが避航実験の場合、系、特に人間に影響を与える要素が多く、要素間の重みも変化しやすいので、因子と出力との関係を知るために一般の避航実験だけでは、莫大な実験数を行う必要が生ずるのであろう。そこで操船者の行っているであろう「予測」、
「相手船の状況の把握」、
「予定航路の設定」、
「航路上航行」等を分離して、それ等の一つ一つについて、何がどの様に影響するかを調査する方法が考えられる。たとえば、二船の針路交角を変化させて実験を行う方法、入力情報の有無（レーダ情報、口頭による相手船の状況の通知、相手船と自船の相対軌跡の提示の有無等）による操船方法の相違、操船者の負担度等を調査する等が考えられる。

- (2) 同じ実験を同一人で繰り返し行くと共に多くの被験者を対象に行う。

既に行われた実験においても不確定な要素（人間の気分等）による変動が大きく、確定した変数による影響をかくしてしまっている。それ故、同一の実験を繰り返し行くと共に不確定な要素を抑えた形の実験も必要であろう。たとえば制限水域での避航実験等も、その一例と考えられる。又実際海面においても云える事かも知れぬが、個人差は避航操船において大きい事は前述の通りであるから、多くの被験者を対象にする必要があろう。

- (3) 操船者特性を詳細に検討する場合には操船者出力を直接計測する必要がある。

避航操船は、主となる操船者の出力の形が特殊である為、数少ない「指令」のみから、その特性を把握する事は困難を生ずる。よって、本項を調査対象とする場合は「指令」以外の操船者の行動も計測する必要がある。たとえば、Eye - Camera による操船者の注視点の計測、入力情報のサンプリングの状況の計測等は、興味深いものであろう。

6.3 入港操船の解析法

通常の入港操船は、視覚環境からえた情報と、各種航海計器からえた情報を操船者が相互に関連づけて判断を行ない、舵、主機関を操作して船を目的に沿うように船の速度ベクトル \vec{V} 、つまり自船の進行方向と速力の制御を行うことになる。外海→湾内→港外→港内→係留の航行水域のうちで速力の制御を必要とする段階からの操船を入港操船と呼ぶことにする。在来型のG・T 1万トン以下の船の場合は港外に到着するまでの操船と港口から岸壁までの操船に分けられる。港外に到着するまでの操船は比較的自由度が大きく、主として航海計器によってえられる船位から係留点までの距離を求めて、それをもとに速力の制御をするが、港口付近から係留点までの操船は操船者が主として視覚環境からえた情報をもとに、経験やカンをもとに速力の制御を行なうのが通常であるので、操船者がはたす役割が大きくなる。しかし、巨大船になると、係留点水深等の関係で陸岸から離れたところにあることが多く、港外、港内の区別がなく、又眠高が高いため視覚からの情報がえにくいので、主として航海計器によって船位、速力を求めて、これから速力の制御をしている。いずれの場合も船位は操船者が速力制御をするときの重要な要素なので、減速状況を解析する際には、時間よりも係留までの残航程距離をベースにとるのが妥当であろう。又船の進行方向の制御は、航路の与えられ方によって異なるので、岸壁直前の場合をのぞいて入港操船としては二次的な意味をもつことになる。

シミュレータによる入港操船の場合は、操船に影響を与えるパラメータを変えて操船を行ない、その時の速力の変化の記録、および機関操作時機にどのようなパラメータが影響を与えているか知り、それらの基本的なパターンを求めることが先決である。この考え方を在来船のG・T 1万トンクラスの船を実際に港口付近から係留点まで入港操船した結果に適用⁽¹³⁾したのが図6.3.1に示されている。

陸上に設置したミリ波レーダを使って大阪港と神戸港で観測された航跡から、大阪港で53例、神戸港で19例の入港操船時の速力(V)とその時の係留点までの航程距離(D)の関係を平均値で示したものが図6.31である。○印(神戸港)と●印(大阪港)はG.T 8,000t~12,000tの船の場合、×印(大阪港)はG.T 3,000~8,000tの船の場合を示している。速力を平均の船の大きさの航海速力(V_N)で、距離を船の長さ(L)でそれぞれ無次元化すると、図6.31に実線で示されるように V/V_N は D/L の対数で示される。但し、これは上述のように港口附近から係留点まで(航程距離で約20L)の間の減速パターンであり、機関操作でいえばslow ah'dから船体停止に至る範囲である。したがって湾口から港外に至るまでの減速パターンは別な傾向を示す可能性が考えられる。この図のもとになった各々の観測値の変動係数は、0.2程度であり、港、船の大きさ、載貨状態等操船におよぼす条件が異なっても平均的なパターンが一致することは興味深い。シミュレータ操船の場合は、このような実際の操船結果の解析よりも、状況の設定が系統的にできるので、こうした平均パターンの設定および変動の推定がもっと詳細にかつ容易に出来ると思われる。そしてその結果から操船者が身につけている船の操縦性能とそれの補正可能な限界の関係といった問題を議論することができるだろう。

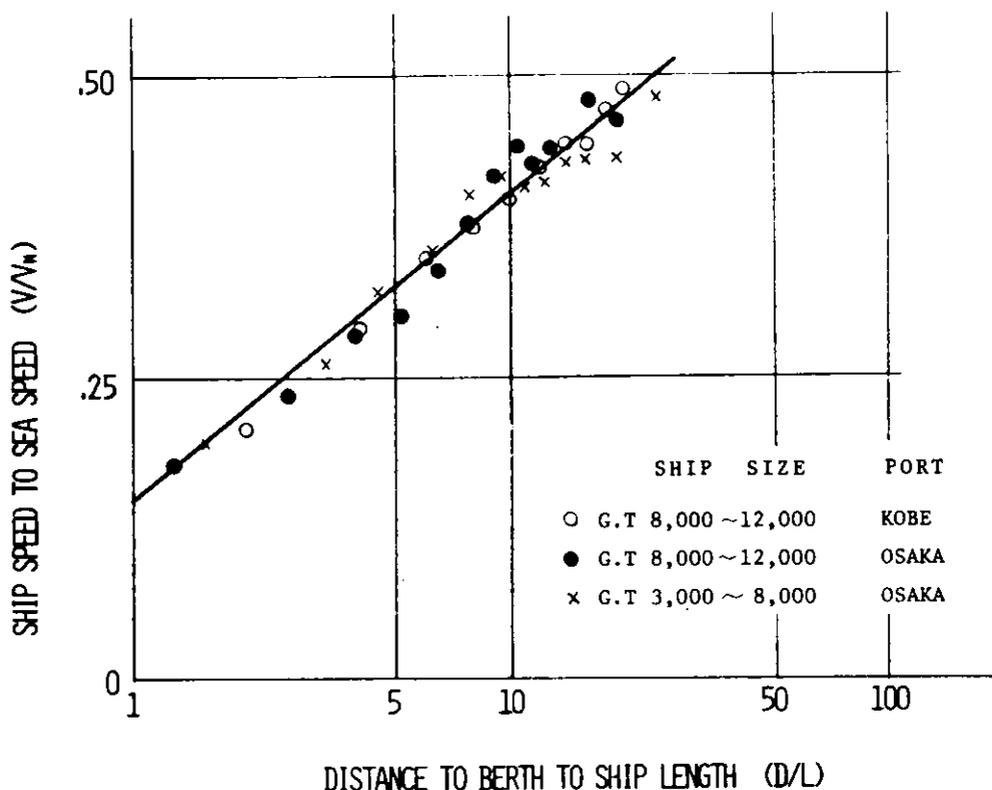


図6.31 入港時の減速パターン(在来船型)

図6.3.2は本シミュレータによってD.W 20万トンタンカー(L=300m)で図4.4.3に示す航路で入港操船を行なった結果を速力と係留予定点までの残航程距離の関係で示したものである。図中で点線で示したのは、大阪湾へ友ヶ島水道から神戸港沖および大阪港沖までD.W 4万tクラスの船が進入した時の航跡をRaderで観測¹⁴⁾した結果5例から求めた速力の平均値を300mの船の長さに変換して示したものである。観測例および実験例ともに少なく、実験では船の減速性能 T_4 が300sec~500secと異なり、又操船経験者と未経験者の例を含んでいるので一般的な結論は言えないにしても、速力-距離の関係はよく似ていることがわかる。

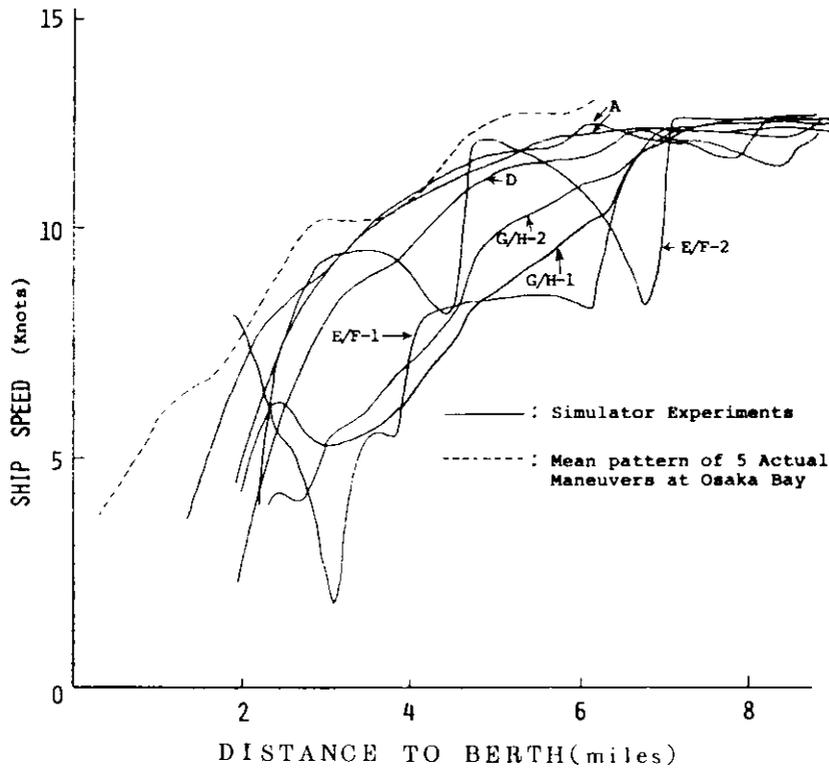


図 6.3.2 入港操船における減速状況

一方表 6.3.1 には、実験における機関操作時機を示したものである。シミュレータでは、Full ah'd 12'、Half ah'd 9'、Slow ah'd 7'、Dead Slow ah'd 4' に設定されている。

○ 実験では一たん Stop してから再び増速する場合もあったが表 6.3.1 には初めの各操作時機の平均値を示している。表中に参考のために機関操作の実務上の一つの基準例(15)からえた DW20 万トンタンカーに対する機関操作時機が示されている。この時の速力設定は Full ah'd 12'、Half ah'd 9'、Slow ah'd 6'、Dead Slow ah'd 3' とシミュレータの場合よりもやや低目にセットされている。シミュレータ実験の場合に各操作時機が基準例よりも約 1 埋錨地より速くなっているのはこのことも影響していると思われる。

表 6.3.1 入港操船中の機関操作時間

	実験値	実務基準例(15)
Half ah'd	6.5	5.9
Slow ah'd	5.2	3.8
D. Slow ah'd	3.9	3.0
Stop Eng.	3.0	1.9

単位は係留点までの距離 (マイル)

入港操船をシミュレータで実験した結果は、以上のようにほぼ実際の操船に近いことがわかり、シミュレータの有効さが示されているが、210° の視角の Visual Display を持っているこのシミュレータの利点を生ずには、操船者が動的な視覚環境を中心に操船する港口から着岸点付近までの入港操船を行うと、より一層興味深い結果を得られるであろう。

6.4 船舶操縦システム研究の展望

6.4.1 機能の分析

船舶操縦システムをMan-Machine Systemとして研究しようとする本部会の活動として、Machineの部分を構成すべきシミュレータの製作は本年度でほぼ終了し、来年度はこれを用いて本来の研究に集中することになる訳であるが、ここで船舶の操縦におけるMan-Machine Systemの中で人間がどのような機能を果しているかを更めて整理しておく必要がある。

IstanceとIvergård⁽¹⁶⁾は、船舶操縦システムにおける船長・航海士の役割を一種のデータ処理システムとして考え、どのような情報がどのような方法でDecision Makerに渡されるかの機能分析を行ない、かなり一般的な形で分類を行なっている。彼等の研究成果を図6.4.1～6.4.3に示す。

彼等によれば、Decision Makerが操縦に必要とする情報は次のように要約される。

- (1) 自船に関する情報
位置、速力、目的地、操縦特性 -----
- (2) 外乱に関する情報
風速、風向、潮流、干満 -----
- (3) 他船に関する情報
相対位置、速力、意志 -----
- (4) 航行の制約に関する情報
航路、標識、衝突予防法、航行規則 -----
- (5) その他

Decision Makerはこれらの情報を収集して操縦を行なうが、情報は得られたものがそのまま使える訳ではない。

たとえば、ベアリングをとった場合ランドマークの方位そのものは操縦には使えず、海図の上にプロットしてはじめて操縦のための情報となる。また、船のように制御に対する応答が遅いものをコントロールする場合、現在の情報をもとにしてDecision Makerは将来の状態を予測し、その予測に基づいて行動を起すと考えられる。

図6.4.1ではこの点を特に強調してAssessという機能とPredictという機能を別ブロックに表現強調している。

図6.4.2では情報がどのような方法でDecision Makerに伝えられるかを整理している。情報収集の手段としては、

- 1) 外界の観察
- 2) 方位ジャイロ、舵角指示器など動的な情報
- 3) 海図、水路誌などの静的な情報
- 4) 他船、陸上施設などから送られる情報
- 5) パイロットなどがもつコンサルタント的の分類される。これらの情報は直接Decision Makerに渡ることもあれば、補助者が収集しそれを処理したのちDecision Makerに渡るものもある。

図6.4.3には、収集すべき情報とその伝達手段のマトリックスの中で、具体的にどのような方法で情報が伝達されているかを整理している。彼等はこのマトリックスの中のどの部分がネックとなっており、どのようにしてそれを解消すればよいかを、船を訪問してアンケートをとることによって発見しようとしているが、その整理はまだついでない。

本部会の研究においても、個々の調査が全体の構成の中のどの位置を占めているかを常に注意

しておく必要があり、その意味において彼等の研究は大変参考になり、図 6.4.3 などを修正しながら研究を進めたいと考える。

6.4.2 データ処理能力

操船システムにおいては、Decision Makerは将来とも一名であることはまちがいないであろう。したがって 6.4.1 で述べた機能分析において、操船が困難とされる場合は論外としても、操船可能なものでも、Decision Maker に対する処理の要求が時間的に集中して来ると処理能力の限界を超え、ひいては事故の発生につながる可能性がある。

原 (17, 18) は Decision Maker に対する処理要求を単一窓口におけるサービス要求、処理に要する時間を窓口におけるサービス時間としてとらえ、Decision Maker による処理を待合せ問題として扱うことにより、処理要求に対する待ち時間と衝突発生確率の関係について論じている。このような考え方はまさしく船舶操縦システムに関する研究の本質をつくものであり、機能分析の中にデータ処理時間の要素を導入する必要性を示唆している。

具体的には、シミュレーションにおいて、単なる保針・変針・避航のみでなく、航路に制御のある場合の避航、あるいは、減速中の変針などの複合した課題を設定し、それぞれにどの程度の時間が割当てられ、あるいはどの程度 Decision Maker にデータ処理の余力があるのかを知ることができるような実験を設定しなければならない。

船舶操縦システムにおける新しい計装の評価は、主としてこのような、いかにして Decision Maker の処理を機械にかたがわりすることができ、処理時間に余裕をもたせることができるかという点について行なわれるべきである。

一方、サービス要求の頻度についても知る必要があるが、この問題は混雑する水域で、どの程度の交通量を予測しどのような管制が行なわれるかが前提となるため、本部会の範囲をこえた問題となる。この点については、日本海難防止協会が本年度行われた、「東京湾海上交通安全システム研究委員会」などの結果が参考になるであろう。同委員会では、東京湾における航路体系の原案を設定し、予想される交通量についてのシミュレーションを行なっている。その結果によれば、一部の交差点での混雑が信号制御を必要とするほど激しくなると推定されており、操船に対する性能の要求がかなり厳しくなると考えられる。

信号制御が行なわれるとすれば、従来操船といえば針路制御が中心であったが、速力制御についても同程度に考えることが要求されると考えられる。

本部会で作製したシミュレータは、速力変動に対応する能力は十分とは言えないが、ある程度の速力範囲はカバーしているので、この点についての足がかりはつかんでおく必要がある。

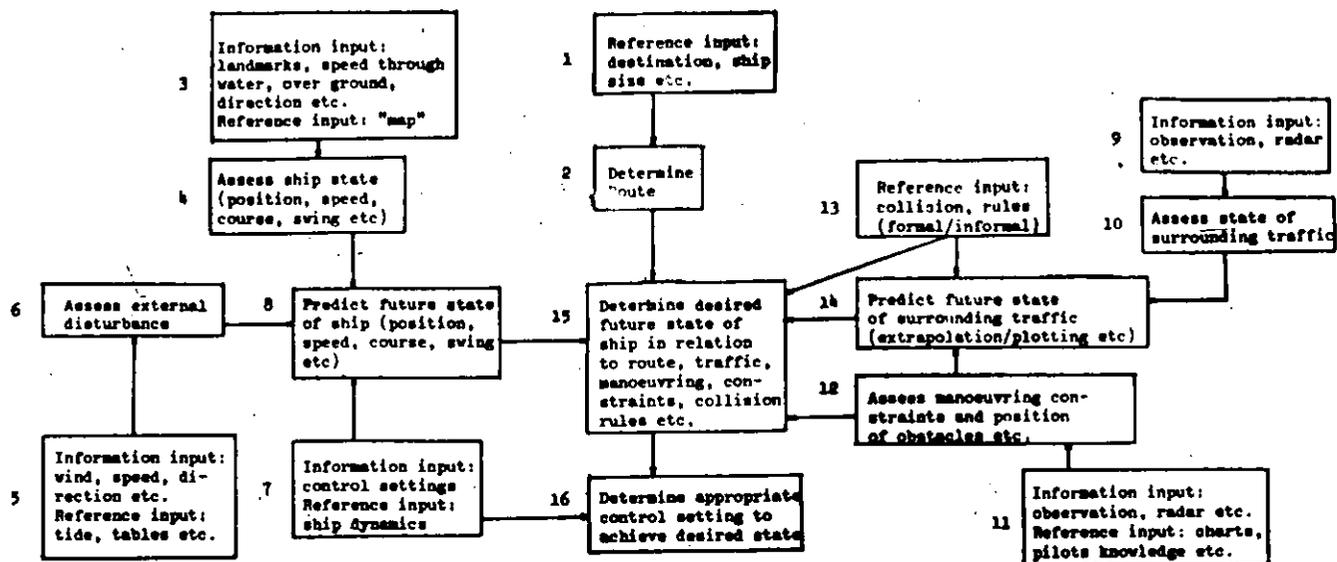


图 6.4.1 功能性流程图 of 船舶控制

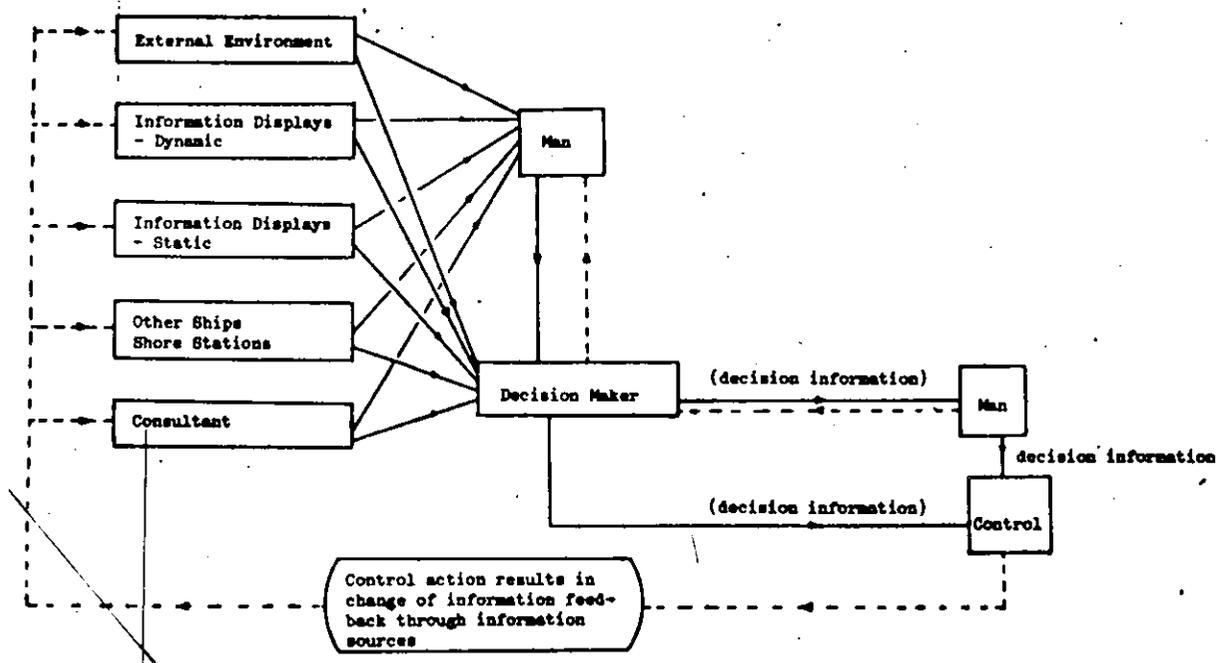


图 6.4.2 船舶操纵系统中的信息流图

☑ 6.4.3 A classification of the information used in the ship handling system

Own Ship	External Environment	Information Display - Dynamic	Information Display - Static	Consultant	Other Ships, Shore Stations
<p>Position - Obs. of known features Obs. of known features Obs. of sun and stars</p>	<p>(Position) pelorus (") sextant (") radar Navigation Aids Depth below keel indicator</p>	<p>(Position) charts (") chart/tables (") charts charts/tables charts</p>	<p>(Position) Local know- ledge</p>		
<p>Heading Ship speed Obs. using external visual cues</p>	<p>Gyro compass magnetic compass (off course alarm) Ship speed Doppler system (land) Ship speed indicator (sea) Heading of Rudder angle indicator</p>	<p>Rate of turn indicator on ship dynamics charts</p>	<p>Rate of turn Rate of ship dynamics</p>	<p>Rate of turn Knowledge of ship dynamics</p>	<p>Ship speed Land based inf. Rate of turn Doppler docking system</p>
<p>Rate of turn Obs. using external visual cues</p>	<p>Rate of turn indicator Tachometer Engine room information</p>	<p>Wind speed Tables Wind direction Tides Currents</p>	<p>Wind speed Wind direction Tides Currents</p>	<p>General info Weather fore- cast</p>	<p>Local knowledge Local knowledge</p>
<p>Wind speed Obs. of sea, clouds Wind direction Obs. of clouds</p>	<p>Wind speed Wind speed indicator</p>				

<p>Other ships</p>	<p>Existence - observation</p> <p>Range } Bearing } Course } Speed }</p> <p>estimated from visual sighting</p>	<p>Existence - radar</p> <p>Range } Bearing } Course } Speed }</p> <p>radar radar plotting</p>	<p>Other information Information on shipping lanes</p>	<p>Existence Range Bearing Course Speed Intended behaviour Direct Ship/Ship Communication</p>
<p>Manoeuvring Restrictions</p>	<p>Position } Extent } estimated form observation</p>	<p>Position } Extent } radar</p>	<p>Position Extent</p> <p>Charts</p> <p>Others</p> <ul style="list-style-type: none"> - Collision avoidance rules - Other rules - Information on ship manoeuvring capabilities - Ship Drafts 	<p>Position Extent</p> <p>Local knowledge</p>
<p>Other Information</p>		<p>Information concerning state of cargo</p> <p>Time - chronometer</p>	<p>Owners schedules and requirements</p> <p>Information concerning cargo</p>	<p>Information concerning pilot pick-up</p> <p>Information concerning berthing</p>

7. 参 考 文 献

- (1) 長畑 司：避航の判断と操船者の特性，日本航海学会誌 48号，昭47年
- (2) 神田 寛：夜間における船舶灯の視認力に関する実験的検討，日本航海学会誌 44号，昭45年
- (3) 若生知己，鎌崎幸一，稻垣襄二：航行安全上からみた航海者のための視覚伝達に関する研究
(I) 各種燈火の実状調査に基づくシミュレータの利用，日本航海学会誌 49号，昭48年
(II) 眼の感度分布と背景光の関係，日本航海学会誌 52号，昭49年
- (4) 宮西，堀越：瀬戸内海航法図，海文堂，昭43年
- (5) 操船実習装置による5日間訓練コース SR151資料幹6-6
- (6) 操舵員による船の針路制御に関する研究 小瀬邦治
- (7) 避航操縦シミュレータの開発と基礎実験 小林弘明
- (8) 野本・空中及び野本・藤井：大型油槽船の操縦性に関する模型試験，造船協会論文集 第103号，第106号，1958，1960
- (9) 辻 豊治：プロペラの逆転による船体の回頭モーメントに関する模型試験，船研報告，第9巻第1号，1972
- (10) 岡田正次郎：船の背後に置かれた舵の性能に関する実験結果について（その5），造船協会論文集，第105号，1959
- (11) 辻豊治他：船体に働く流体力に関する模型試験船研報告 7巻5号 昭45年
- (12) W. Verdhuyzen, H.G. Stassen: Simulation of Ship-manoeuvring under Human Control. 4th Ship Control System Symposium, 1975
- (13) 原：操船モデルによる入港時減速パターン，日本航海学会運用研究部会資料，未発表，昭50.10
- (14) 神戸商船大学港湾運航技術研究会：大阪湾通航船舶航跡調査報告書，昭44.12
- (15) 日本船渠長協会：ドックマスター，第30号 P22
- (16) H. Instance, T. Ivergård: Ergonomics and Reliability in Ship Handling Systems, 4th Ship Control System Symposium, 1975
- (17) 原 深：船の衝突確率を任意の水域で推定する方法について，日本航海学会論文集 46号，1971
- (18) 原 深：避航システムモデルによる衝突確率の考察，日本航海学会論文集 50号，1973