

日本船舶振興会昭和52年度補助事業
“加減速時における操船性能に関する研究”

研究資料 No. 303

第175研究部会

● 加減速時における操船性能に関する研究

報 告 書

昭和53年3月

社 団 法 人
日 本 造 船 研 究 協 会

本研究は港湾内や海峡通過等の交通量の多い海域で、航行安全を確保することを目的として今年度から3か年計画で開始したものであり、初年度である本年度は次のような諸研究を行なった。

1) 加減速時の船の性能

加減速直進運動の記述法、船体に働く流体力、プロペラ逆転時船体運動の推定法等の実験研究

2) マンマシン操船性能のシミュレーション

数学モデルの開発、SR151で製作した操船シミュレータを使用した定点停止・定点定時通過・追従操船等の実験

3) 交通工学的シミュレーション

海上交通管制と加減速性能、定点定時定速通過操船のモデル化等のリアルタイムシミュレータによる研究

4) 港内、狭水道における加減速操船の実態調査

一般商船、試運転船等による出入港および狭水道航行時の機関操作例調査

本報告書はこれらの研究成果をとりまとめたものである。

はしがき

本報告書は日本船舶振興会の昭和52年度補助事業「加減速時の操船性能に関する研究」として、日本造船研究協会が第175研究部会においてとりまとめたものである。

本研究部会の委員は次のとおりである。

第175研究部会委員名簿

(敬称略、順不同)

部会長	元 良 誠 三 (東京大学)	
委員	井 上 正 祐 (九州大学)	野 本 謙 作 (大阪大学)
	仲 渡 道 夫 (広島大学)	小 山 健 夫 東京大学
	藤 野 正 隆 (東京大学)	小 澄 邦 治 (広島大学)
	原 潔 (神戸商船大学)	小 林 弘 明 (東京商船大学)
	菅 井 和 夫 (船舶技術研究所)	野 中 晃 二 (船舶技術研究所)
	藤 井 巍 (日本造船技術センター)	相 原 和 樹 (三菱重工業)
	藤 井 斎 (三菱重工業)	山 田 孝 三 郎 (日立造船)
	高 井 忠 夫 (日立造船)	石 橋 賢 諭 (日本钢管)
	松 本 慶 洋 (日本钢管)	山 上 順 雄 (川崎重工業)
	平 野 雅 祥 (三井造船)	田 中 槱 (石川島播磨重工業)
	山 崎 芳 翠 (佐世保重工業)	永 松 秀 一 (住友重機械工業)
	西 田 正 孝 (大阪造船所)	篠 原 喜 代 美 (函館ドック)
	森 川 卓 (日本船主協会)	山 本 尚 二 (昭和海運)
	川 崎 豊 彦 (大阪商船三井船舶)	菅 原 四 郎 (古野電気)
	二 宮 鎮 男 (日本無線)	早 見 信 博 (神戸製鋼所)
	前 島 孝 雄 (北辰電機製作所)	米 山 三 治 (かもめプロペラ)

目 次

1. 緒 言	1
2. 加減速時の船の性能	3
2.1 加減速直進運動	3
2.2 加減速時に船体に働く流体力	5
2.2.1 プロペラ逆転で惰力航走する船体に加わる流体力について	5
(1) 内航タンカーハン丸でのプロペラ逆転による流体力の計測	5
(2) 5-27Mモデルによる浅水域でのプロペラ逆転による流体力の計測	6
(3) 5-27Mモデルと天長丸モデルのプロペラ交換によるプロペラ逆転時の流体力の計測	6
(4) プロペラ逆転中の船尾流場の観測	7
(5) プロペラ逆転時のCMT試験	8
(6) まとめ	10
2.2.2 プロペラ逆転時に船体に働く流体力の実験	32
(1) 供試模型船要目	32
(2) 試験結果	32
(3) 結果の考察	32
(4) プロペラ逆転時船体表面圧力の測定	33
2.2.3 プロペラ順転の範囲で加減速している船に働く流体力と操縦性	47
(1) Planar motion mechanismによる拘束操縦性試験	47
(2) 船に作用する横方向の力	48
(3) 主船体に作用する横方向の力	49
(4) 舵によって誘起される力	50
(5) 加減速中の操縦性	52
(6) 結論	53
2.3 プロペラ逆転時船体運動の推定法 — 応答の数学モデルとその実験的検証 —	65
2.3.1 応答方程式の誘導	65
2.3.2 自走模型実験による応答モデルの検証	67
2.3.3 本節の結言と今後の問題点	68
3. マン・マシン操船性能のシミュレーション	71
3.1 供試数学モデル	71
3.1.1 供試船の想定	71
3.1.2 数学モデルの形式	71
3.1.3 特性値の推定	73
3.1.4 E-Series船の停止惰力と逆転停止性能	75
3.2 実験方法	76
3.2.1 SR151操船シミュレータ	76

3.2.2 操 船 者	76
3.2.3 実験の種類	76
3.3 実験結果	76
3.3.1 定点停止操船	76
3.3.2 定点定時通過操船	78
3.3.3 追従操船	80
3.4 東京商船大学操船シミュレータによる実験	81
3.4.1 定点停止操船	81
3.4.2 定点定時通過操船	82
3.5 シミュレータスタディにおける今後の問題点	82
4. 交通工学的シミュレーション	108
4.1 海上交通管制と加減速性能	108
4.1.1 海上交通管制の問題点	108
4.1.2 交差部制御の方式	108
4.1.3 加減速性能への要求	109
4.2 定点定時定速通過操船のモデル化	110
4.2.1 交差部交通問題の一般化	110
4.2.2 Real Time Simulatorの構成	110
4.2.3 時間調整のための必要調整距離	110
4.2.4 実験・解析	111
4.3 今後の課題	111
5. 港内狭水道における加減速操船の実態調査	120
5.1 調査目的	120
5.2 調査方法	120
5.2.1 資料収集方法	120
5.2.2 資料収集結果	120
5.3 調査結果	121
5.3.1 機関操作設定と回転数、速力の関係	121
5.3.2 入船岸壁留時の機関操作法と舵効のある最低速力（アンケート集計）	122
5.3.3 港内における加減速操船	122
5.4 狹水道における加減速操船	123
5.4.1 データ概要	123
5.4.2 機関操作回数	124
参考文献	138

1. 緒 言

港湾内や海峡通過等の交通量の多い海域での航行安全確保は從来より重要視されてきた問題であるが、海上交通の過密化に伴なってますますその重要性が指摘されつつある。本研究はこうした海域での航行安全の向上をはかるため、操船・操縦性能面で、從来研究が比較的遅れている加減速時の操船性能についての調査研究を行ない、その改善をはかることを目的として企画されたものである。

このため本部会では下記の研究を実施した。なお、本研究は3ヶ年の予定で計画されており、本報告はその初年度の成果をとりまとめたものである。

(1) 加減速時の船の性能

① 加減速直進運動

この方面的研究は最近著しい進歩を見た分野であるが、從来の研究成果を総括すると共に、機関性能をも考慮した表現について触れた。

② プロペラ順転中の加減速操縦性能

プロペラが順転しつつも、船速と平衡していない場合、特に舵に作用する流体力が大きく変動する。この変化の挙動を解析的に表現することは、加減速中の操縦性能を知る上で中心的な課題のひとつである。

この面での表現法として、最近 J T T C 第2部会に設けられたMMGによる提案があるが、この提案に基づいて実験結果を解析し、流体力の分析を試みた。

③ プロペラ逆転中の加減速操縦性能

プロペラ逆転中に船体に加わる流体力とその結果としての船の挙動について、從来断片的ではあるが数多くの報告が行なわれており、その性質の複雑さが指摘されている。

プロペラ逆転時の特性は、緊急停止はもとより通常のオペレーションにおいても重要な特性であり、本年度の重点課題として研究を行なった。

広範にわたる実験を行なった結果、船の運動の状態に対応した流体力の整理方法について、一般的な表現を行ない得る見通しを得たことは大きな成果であった。またこれを裏付けるものとして、船尾付近の圧力分布・流場の観測など基礎的実験の積重ねを行なった。

(2) マン・マシン操船性能のシミュレーション

交通量の多い海域での航行安全確保という目的から見ると船の加減速性能は、船単体としての性能に止まらず、操船者と船を合せた Man-Machine Systemの性能として捉えることが必要である。そこで、昨年度まで継続して行なわれたS R 151による研究成果と、Visual Display付実時間シミュレーターを用いて研究を進めた。

試験項目は、定点停止操船・定点定時通過操船・追従操船・その他である。

また、本シミュレーション用として応答モデルの見地から、加減速中の船の運動を十分に精度よく表現し得るモデルを開発し、シミュレーション用として E-Series と呼ぶ系統的特性を設定した。

(3) 交通流シミュレーション

交通量の多い海域での船に対する加減速要求性能の仕様の一環として、交差部における管制の方法を仮定し、マクロな交通流のシミュレーションを行なうことにより、要求される加減速性能を、所要調整時間という形で求めた。

また、更に細部にわたる交通流シミュレーションを行なうための準備として、操船者の加減速制御における操作のパターン化について検討した。

(4) 加減速操船の実態調査

加減速操船の実態を調査するため、調査事項をとりまとめたアンケート用紙を作り、船会社・造船所に協力を求めた。

本年度は合計36隻、延63ケースについて回答を得、これらを集計して、本研究を遂行する上で貴重な基礎資料とすることができた。

2. 加減速時の船の性能

船の操縦運動の一般的記述は例えばMMGの方法¹⁾に従うと次のようになる¹⁾

$$\left. \begin{array}{l} m(\dot{u} - vr) = X \\ m(\dot{v} + ur) = Y \\ Iz\dot{r} = N - Yx_G \end{array} \right\} \quad (2.0.1)$$

ただし原点は重心で、X,Y,Nは夫々それに関する力、モーメントを意味し x_0 は \overline{OG} である。また、力およびモーメントは次のように記しらる。¹⁾

$$\left. \begin{array}{l} X = Xu\dot{u} + (Xvr - Yv)\dot{v}r + Xvv\dot{v}^2 + Xrr\dot{r}^2 + (1-t)T\left(\frac{u_p}{nD}\right) + X(u) + X_{R0} - F_N \sin \delta \\ Y = Yv\dot{v} + Yr\dot{r} + YvV + (Yr + Xu\dot{u})r + \int_L(v + xr)/v + xr/C_D(x)dx - (1+a_H)F_N \cos \delta \\ N = Nv\dot{v} + Nr\dot{r} + NvV + NrV + \int_L(v + xr)/v + xr/x \cdot C_D(x)dx - (x_R + a_H x_H)F_N \cos \delta \end{array} \right\} \quad (2.0.2)$$

加減速運動の場合はこれらの式に更に機関特性の式として次式が加わる。²⁾

$$2\pi I_E \frac{dn}{d\tau} = Q_d - Q_p - Q_f \quad (2.0.3)$$

2.1 加減速直進運動

ここでは船が舵中央で船首尾方向に直進している場合を考える。従って(2.0.1)(2.0.2)式中の最初の式と(2.0.3)式を用いる場合である。(2.0.2)の最初の式中▲印の項は直進時であるから零となり、 Xu を m_x 、 $T(u_p/nD)$ の項は単にTと記し、かつ舵の抵抗 X_{R0} を $X(u)$ と一緒にして船体抵抗 $R(v)$ と記すと加減速直進運動の式は良く使われている次の形となる。

$$(m+m_x)\ddot{u} = T(1-t) - R \quad (2.1.1)$$

この式あるいはこの式と(2.0.3)式の組み合せによる加減速運動の取り扱いは古くから研究されており、その代表的な取り扱い方は第2回操縦シンポジウム³⁾に詳述されている。なお同テキスト末尾の参考文献リストには1970年までの主要文献が示されているためここでは、それ以後の類似の取り扱いをした文献をついでに示しておく。^{4),5),7),8)}

これらの研究の多くは(2.1.1)式の右辺のadded mass m_x を何等かの方法で推定して一定と置き、右辺の抵抗Rは大体船速uの2乗としている。そして次にプロペラ回転数nの時間的変化を仮定して与え、プロペラ単独特性曲線を利用して推力T又は有効推力T(1-t)を算出した後(2.1.1)式を解いて時間と速度uの関係を求めている。また実船ではトルクQが計測されることが多いため、実船のQとnの関係からT～nの関係を求めているものもある。

さて、現在、我々が(2.1.1)式により、加減速直進運動を取り扱う場合、どのようにすれば一番適当であるかを考えてみる。この際(2.1.1)式の右辺は本来もっと複雑な形となりTとRの相互干渉も入る筈のものであるが、実用的な見地から干渉項はすべて(1-t)に含ませることとする。

(1) 附加質量(m_x)

現時点で推定するのであれば、いわゆる元良の図表⁹⁾が唯一のものである。もし水槽で実験が出来るものであ

ればPMMによる強制surging試験あるいはもっと簡単な重錐式surging試験によって比較的精度よく求められる。⁶⁾ 外国では橢円体の理論値などを借用してそのまま船に用いている場合も少くない。なお m_x は通常の航走範囲では速度に依らないで一定と見なしてよいようである。

(2) 抵抗 (R)

(2.1.1) 式を用いる最大の利点は通常の平水中の抵抗値がそのまま使えることであって、抵抗曲線を近似式で代用して用いることが出来る。その近似度については簡単な2次式でも可成り良い結果が得られる。⁵⁾

(3) 推力 (T) および推力減少係数 ($1-t$)

T も $1-t$ も船速 V_s を使った前進率 $J_s = \frac{V_s}{nD}$ で整理出来ることが判明している。^{10), 6)} しかしながら現在のところ実験を行なわないで、任意の J_s に対する $T, (1-t)$ を推定することは type ship の資料にでも頼る以外に方法はない。

比較的瘠せた船型の場合には $w \neq 0$, $(1-t)$ は J_s に対して変化しないとして第1近似的な T をプロペラ単独性能曲線を介して推定しうる。

船型試験水槽において実験的に $T, (1-t)$ を求めるには、通常の自航試験の方法でプロペラ荷重度の変更試験を広い範囲の回転数で行なえばよい。

(4) なお(2.1.1)式右辺の有効推力 $T(1-t)$ の項は船の普通の加減速運動の加速度には、依存しないことが実験的に確められている。⁶⁾ 従って(2.1.1)式は準定常的に取り扱ってよい。

加減速運動、殊に停船あるいは後進性能の正確な推定には機関の操作と運動を考慮することは必須であり(2.0.3)式について述べる。²⁾

$$2\pi I_E \frac{dn}{d\tau} = Q_d - Q_p - Q_f \quad (2.0.3)$$

式中の I_E は回転系(附加質量を含む)の慣性モーメント、 Q_d はプロペラ軸に伝達される機関トルク、 Q_p はプロペラトルク、 Q_f は軸受等の摩擦トルクで、 K_g を減速ギヤ比、 Q_E を機関発生トルクとすると $Q_d = K_g Q_E$ である。(2.0.3)式右辺の機関特性に関する項について考える。

(5) 機関発生トルク (Q_E)

(i) ディーゼルエンジン

燃料投入時の機関発生トルク Q_E は燃料噴射量(ポンブラック目盛FO)とプロペラ回転数 n より定り、¹¹⁾ $Q_E = \pm C \cdot p_{me}$ の関係がある。ここで C は比例定数、 $p_{me} = p_{mi} \cdot \eta$ は平均有効圧力、 $p_{mi} = p_{mi}(FO)$ は図示平均圧力、 $\eta = \eta(|n|, p_{mi})$ は機械効率である。

なお燃料遮断、圧縮空気投入時の機関発生トルク Q_E は圧縮空気によるトルク Q_B である。 $Q_E = Q_B = \pm C p_m$ 、ここで p_m は圧縮空気による平均有効圧力である。

燃料噴射量は主機コントロール・シーケンス(通常プログラム・コントロール)とガバナーの特性による。したがって主機コントロール・シーケンスおよびガバナー特性のモデル化が必要になるがこれについては今後検討する。

(ii) タービン

機関発生トルク Q_E は前進タービンのトルク Q_{E1} か後進タービンのトルク Q_{E2} のいずれかである。

$Q_E = Q_{E1} \text{ or } -Q_{E2}$ 、そして各々は蒸気流量 G_1, G_2 とプロペラ回転数 n より定まる。 $Q_{E1} = Q_{E1}(G_1, n)$, $Q_{E2} = Q_{E2}(G_2, n)$ 、この蒸気流量は主機コントロール・シーケンスに依る。したがってこのモデル化が必要になるがこれも今後検討する。

(6) 摩擦トルク (Q_f)

減速ギア、軸系および機関燃料遮断時の摩擦トルクであり、プロペラ遊転時にはこの Q_f の影響は大きく、無視できない。したがって少くとも遊転時には摩擦トルクを考慮する必要がある。²⁾

固定ピッチ・プロペラの船では(2.0.3)式を解いて回転の時間的変化を知り(2.1.1)式に代入するより、むしろ図2.1.1のように時間領域を分け、各領域で回転数変化をモデル化して与えて(2.1.1)式に代入して解く方法が簡便である。この場合も逆転開始回転数および空転時の Q_f は重要である。

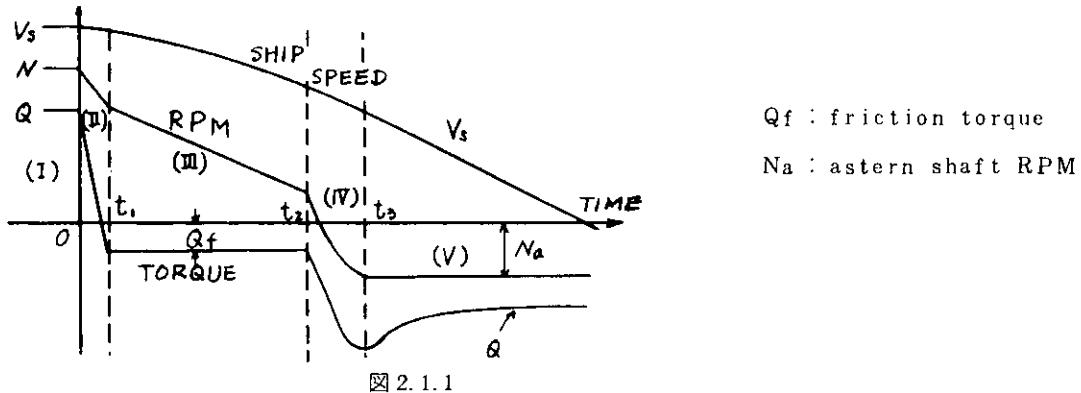


図 2.1.1

2.2 加減速時に船体に働く流体力

2.2.1 プロペラ逆転で惰力航走する船体に加わる流体力について

東京大学では、SR154研究部会での研究の一環として、表2.2.1.1に主要目、図2.2.1.1に船体形状を示したSR154 5-27Mの模型船を主として用い、一定船速で前進中にプロペラを逆転させることによって船体に生ずる流体力——横力と回頭モーメント——を実験計測したが、そこでの結論は大略、次のようにであった。¹²⁾

a) 低速の範囲では、船体を左舷側に押す横力と船首を右に振る回頭モーメントを受ける。この横力と回頭モーメントは船速の増加とともに、しばらくは増加するが極値に達したのち減少はじめる。

b) さらに、船速が増すと、横力および回頭は一旦零になったのち、低速時とは逆の方向に働くようになる。このa), b)の傾向が、どのような要因によるのかを検討するため、舵・プロペラ付の標準装備状態から、舵のみを取りはずした状態、さらにプロペラをも分離した状態（このときはプロペラは船体の後方に設けられた別個の駆動装置によって回転させられる）でプロペラ逆転によって船体に生ずる流体力を計測し、これらを標準装備状態での流体力と比較した結果、

c) これら異なる3状態での流体力は、前進定数 J_p ($\equiv U/n_p$) に対してほぼ同一の曲線で近似できることがわかり、プロペラ逆転によって生ずる流体力は主船体に大部分生ずることが確認された。

さて、a), b)の傾向が、肥えた5-27M特有の性質であるのか否かを検討するため、やせたコンテナー船を選び、同様にプロペラ逆転による流体力を計測したところ、5-27Mの船型とは明らかに違う傾向が見られた。

d) コンテナー船に働く流体力は、5-27Mでの実験における J_p と同じ範囲では、その作用の方向が逆転することはないが、 J_p とともに複雑に変化することがわかった。

このように、順回転が右回転であるプロペラを装備した一軸船でも、船型の相違によりプロペラ逆転によって船体に生ずる流体力の定性的傾向には違いがあることがみとめられた。

以上の結果を踏まえて、本研究部会昭和52年度研究として、東京大学では次のような研究を行なった。

(1) 内航タンカー天長丸でのプロペラ逆転による流体力の計測

表2.2.1.1にその主要目を示した縮尺 $1/31.6$ の内航タンカー天長丸の $L_{pp} = 2.5\text{ m}$ の模型船を用いて、直

進中のプロペラ逆転による流体力を計測した。結果を図 2.2.1.2 に示す。これによると、天長丸のプロペラ逆転による流体力の定性的傾向はコンテナー船のそれに近く、 J_p を変えても流体力の作用の方向が逆転することはない。図にはコンテナー船の実験結果の平均線も示しているが、これを天長丸での実験点と比較してみると、横力・回頭モーメントの J_p による変化の様子はかなり異なることがわかる。

すなわち、コンテナー船では前進速度が 0 の場合にもプロペラ逆転によってかなりの横力と回頭モーメントを発生するとともに、 $0 \leq -J_p \leq 1.8$ の範囲において横力と回頭モーメントは 2 個所の hollow をもつて対して、天長丸では上述の範囲では $J_p = -1.0$ に hollow をもつてのみで、しかも、このときの横力と回頭モーメントはほぼ 0 に等しい。

以上の結果を考慮して、プロペラ逆転による流体力に関する詳細な比較実験を、S R 154 5-27 M モデルと天長丸モデルの 2 隻を用いて実施することにした。

(2) 5-27 M モデルによる浅水域でのプロペラ逆転による流体力の計測

航走中の船においてプロペラを逆転させて制動をかける必要が生ずる場面では、航路の水深がかなり浅い場合が多いと思われる。そこで、5-27 M の模型船について浅水時のプロペラ逆転による流体力を計測した。結果を図 2.2.1.3 から図 2.2.1.10 に各水深(H)・奥水(d)比ごとに示す。また図 2.2.1.11～12 には横力および回頭モーメントごとにまとめて、実験値の平均線を示した。実験時の模型船はヒープ・ピッチ自由であるので、とくに浅い場合には船体沈下・トリム等がかなりの量に達するはずであるが、これら沈下量・トリム等は計測されていない。

実験時の逆転プロペラ回転数は 504, 672, 1008, 1176 RPM の 4 通りであるが、計測された横力および回頭モーメントはそれぞれ $\rho n^2 D^4$, $\rho n^2 D^4 L$ (ρ : 流体の密度, n : プロペラ毎秒回転数, D : プロペラ直径, L : 船の垂線間長) で無次元化すれば、プロペラ回転数に相違はあっても J_p ベースにうまくまとめられるとは、今迄の場合と同様であるが、細く見ると H/d が小さいところで、このようなまとめ方をしても $-J_p$ の大きいところでかなりのバラツキが見られる。このバラツキは、浅水路を比較的高速で航走するときの船の姿勢変化が大きく、低速で航走するときと、たとえ J_p の値が同一でも、流体力には姿勢の相違による影響が大きく現われて、 J_p の値だけでは整理できないことによるものと思われる。

さて、本実験の結果から、次のようなことがわかる。

a) $H/d \geq 1.5$ では、プロペラ逆転による流体力は無限水深の場合と同様な定性的傾向をもつ。しかし、流体力の大きさは、浅水影響をかなり受け、たとえば船体を左舷側に押しやる横力と船首を右に振る回頭モーメントの極大値は、 $H/d = 1.5$ 位までは水深が浅いほど大きくなる傾向が明らかに認められる。とくに横力の増加は著しい。

b) しかし、 $H/d = 1.2$ での J_p による定性的傾向は、その他の場合と著しく異なり、むしろ無限水深での天長丸の場合に見られた傾向に近く、 $0.4 \leq -J_p \leq 0.5$ の範囲で一時的に横力の作用方向が逆転しているよう見えるほかは、横力および回頭モーメントの作用の方向が J_p によって逆転することはない。

この b) の結果は、本節の最初に述べたプロペラ逆転による流体力の J_p 値に依存する定性的傾向の相違を検討する上で、1 つのヒントを与えるものと思われる所以、さらに詳細に調査する必要があると思われる。

(3) 5-27 M モデルと天長丸モデルのプロペラ交換によるプロペラ逆転時の流体力の計測

前述したように、5-27 M モデルと天長丸モデルではプロペラ逆転による流体力の J_p の変化による定性的傾向に大きな相違があった。このような相違が、ある特定の主船体と特定のプロペラの組合せに依存するのかどうかを調査するため、5-27 M モデルと天長丸モデルのプロペラを入れかえて、直進中のモデルに働く、ブ

プロペラ逆転による流体力を計測した。計測結果を前と同様な方法で整理して図2.2.1.13～2.2.1.14に示した。この結果、次のことがわかった。

a) 5-27Mに天長丸のプロペラを取りつけた場合、 $-J_p$ の値が大きくなると流体力の作用方向が逆転するという定性的傾向は5-27M固有のプロペラがついている場合と変りない。但し、天長丸のプロペラがついた場合には、流体力が逆転する $-J_p$ の値は本来のプロペラがついた場合より大きく、流体力の大きさも、逆転する J_p の値の前後から差が著しくなる。

b) 一方、天長丸に5-27Mのプロペラをつけた場合のプロペラ逆転による流体力は、天長丸本来のプロペラを有する場合と定性的にも定量的にもほぼ等しい結果を与えている。

さらに天長丸の場合にも、主船体とプロペラを切りはなし、プロペラは別個の駆動装置で逆回転させ船体のみに働く流体力を計測した結果を、舵およびプロペラ付きの状態での同様の計測値と比較して図示したのが図2.2.1.15である。これによれば5-27Mの場合と同様、天長丸でもプロペラ逆転によって船全体に加わる流体力のほとんどの部分は主船体そのものに加わる流体力であって、プロペラ、舵等に作用する流体力は無視できるほど小さいことがわかる。

以上の結果を総合すると、プロペラ逆転によって生ずる流体力の J_p 依存の定性的傾向が5-27Mと天長丸とで異なるのは、主として主船体形状の相違によるものと推定される。

(4) プロペラ逆転中の船尾流場の観測

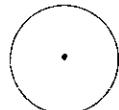
前述のように5-27Mモデルと天長丸モデルでは、プロペラ逆転によって船体に誘起される流体力の J_p に依る定性的傾向には大きな差が認められた。このような違いがどのようなメカニズムによって発生するのかの検討の一助とするために、図2.2.1.16に示したタフトを船尾附近の船体表面上に植え、プロペラ逆転中の流場を観測することにした。

タフトは、長さ40mmのナイロン製レース糸①を「の字型のエナメル線②に固着した上で、「の字の両端に真鍮製パイプ③を図のように取付け、これを図中④の真鍮棒のまわりに自由に回転できるようにとり付けて製作した。レース糸とエナメル線の可動部分の自重は0.020～0.025grであるため、レース糸の方向が完全には流れの方向を表わすとはいえないが、本実験の目的には十分であると思える。

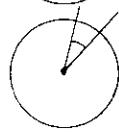
なお、本実験中の5-27Mモデルのプロペラとしては、本モデル本来のプロペラではなく、天長丸モデルのプロペラを用いた。このようにしても5-27Mモデルでのプロペラ逆転による流体力は5-27Mモデル本来のプロペラを装備した場合とはほぼ同じであることは3)に述べたとおりであるので、流れ場の観測が明確にできるよう本来のプロペラ($D=0.0603m$)より大きい天長丸のプロペラ($D=0.0886m$)を選択したのである。

観測は船尾附近のほぼ真横で、観測に支障をきたさないように離して設置されたミラー・ボックスを通して目視によると同時に8ミリシネで撮影した。後に示す流れ場の概略図は8ミリシネに基いて描かれている。観測は2組のミラー・ボックスと8ミリシネカメラを使用して1回の航走中に左右舷の観測を同時にに行なうことが望ましいが、機材の制約から、左右舷の流れ場の観測は別々の航走によった。なお、この観測の際船体に加わる流体力をも計測しており、流れ場観測中のプロペラ逆転による流体力が、先に計測された流体力と同一であるかどうかをチェックした。その結果、流体力はほぼ先のものと同一であることが認められている。8ミリシネの画面から、個々のタフトの方向を観測し、図示したのが図2.2.1.17から図2.2.1.46までの図である。図中●の・はタフトのピン、—がナイロン製レース糸である。なお図中のレース糸の長さは、船体形状の寸法とは幾何学的に厳密には対応していない。

また、プロペラ逆転流の及ぶ範囲内の流れの様子はかなり非定常であるので、このようを流れを図に正確に描くことは不可能に近いが、極力正確にタフトの動きを再現するように努めた。たとえば図中、



はタフトの方向が一定せずビンのまわりを廻っていることを、



はタフトはビンのまわりをまわることもあるが、主として  の扇形内で動いていることが多いことを、



はタフトがこの扇形内を動いている

ことなどを表現している。

図 2.2.1.17 から図 2.2.1.30 までが 5-27M モデルでの船尾流場を、図 2.2.1.31 から図 2.2.1.46 までが 天長丸モデルでの船尾流場を表わしている。観測は 5-27M モデル、天長丸モデルとともに船速 $U = 0.23, 0.46, 0.69 \text{ (m/sec)}$ 、プロペラ回転数 = -298, -447, -596, -894, -1043 RPM について行なわれたが、図は $J_p (= U/n_p)$ の値の順に示してある。

上述の船速とプロペラ回転数の組合せによれば、図 2.2.1.22, 2.2.1.23, 2.2.1.24 に示されたように、異なる船速と異なるプロペラ回転数でも同一の J_p を与えることがあるが、そのような場合の船尾流場は、全く同じであるとはいえないにしてもかなり類似の流場を与えることが、図 2.2.1.21 ($J_p = -0.675$) や図 2.2.1.25 ($J_p = -1.050$) に示された流場と比較してみるとわかる。このことは $J_p = -0.525$ での図 2.2.1.19, 2.2.1.20, $J_p = -1.575$ での図 2.2.1.27, 2.2.1.28 についてもいえる。

なお図 2.2.1.30, 2.2.1.44, 2.2.1.45, 2.2.1.46 にはプロペラが逆転していないときの船尾流場のうち左舷側のみのタフトの方向を参考のために描いてある。また各図中の点線は、船首方向に向かうプロペラ逆転流と船首から船尾に向かって流れる主流との境界線と思われる線である。

これらの図より次のことがいえる。

a) 天長丸モデルでは J_p のいかんにかかわらず、プロペラ逆転流の及ぶ範囲は左舷側より常に右舷側で大きい。一方、5-27M モデルでは J_p の絶対値の大きい $J_p = -1.575, -2.361$ で左右舷ともほぼ同じか、やや左舷側でプロペラ逆転流の及ぶ範囲が大きく、 J_p の絶対値が小さい場合と異なることは注目に値する。

この事実は、前述の 5-27M モデルと天長丸モデルにおけるプロペラ逆転による流体力の作用方向が、5-27M モデルでは J_p とともに変化するのに対し天長丸モデルではそのような変化が認められなかった事と符合するものと思われる。

b) 逆転プロペラ回転数が高いときには、プロペラの直上附近での水面に時折、著しい躍みが生じ、プロペラへの空気吸い込みが起っていることが認められた。

c) プロペラ逆転流の及ぶ範囲を天長丸モデルと 5-27M モデルで比較すると、 $0 \leq -J_p \leq 1$ では両モデルともほぼ同じか幾分天長丸モデルの方が大きいが、 $1 \leq -J_p$ では明らかに 5-27M モデルの方が大きい。 $1 \leq -J_p$ での明確な差は両船の肥せき度の相違による船尾附近の圧力勾配の差によるものと思われる。

(5) プロペラ逆転時の C M T 試験

前節まではプロペラ逆転による流体力は専ら直進時 ($v = r = 0$) についてのみ実験的に計測されてきたが、船が横流れ速度や旋回角速度を有するときプロペラ逆転による流体力がどのように変化するかを主として検討

するため 5-27M, 天長丸の両モデルにつき, 以下に述べる CMT 試験¹³⁾を行なった。

いづれの模型についても裸船状態(プロペラ, 舵ともになし)を基準状態と考え, まず, この状態において横流れ速度(v'), 旋回角速度(r')を種々変化させて CMT 試験を行なう。次に, それぞれ模型船固有のプロペラおよび舵を装備しプロペラを下記の回転数で逆転させつつ CMT 試験を行なう。なお, この際船全体に加わる力, モーメントを計測するとともに舵のみに加わる流体力も 3 分力計で計測した。

$$\begin{aligned} 5-27M \text{ モデル} &: \text{船速 } U = 0.377 \text{ m/sec} \\ &\quad \text{プロペラ回転数 } -504, -840, -1008 \text{ RPM} \\ \text{天長丸モードル} &: \text{船速 } U = 0.300 \text{ m/sec} \\ &\quad \text{プロペラ回転数 } -447, -596, -1043 \text{ RPM} \end{aligned}$$

CMT で計測された流体力は次式

$$\left. \begin{aligned} Y' &= \frac{Y}{\frac{1}{2} \rho L d U^2} \\ N' &= \frac{N}{\frac{1}{2} \rho L^2 d U^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.2.1.1)$$

で無次元化し図 2.2.1.47 以降に示した。図中, 実線等は横力 Y' , モーメント N' をともに v' と r' の 3 次多項式で近似したものである。

$$\left. \begin{aligned} Y' &= Y_0' + Y_r' r' + Y_v' v' + Y_{rr}' r'^2 + Y_{rv}' r' v' + Y_{vv}' v'^2 \\ &\quad + Y_{rrr}' r'^3 + Y_{rrv}' r'^2 v' + Y_{rvv}' r' v'^2 + Y_{vvv}' v'^3 \\ N' &= N_0' + N_r' r' + N_v' v' + N_{rr}' r'^2 + N_{rv}' r' v' + N_{vv}' v'^2 \\ &\quad + N_{rrr}' r'^3 + N_{rrv}' r'^2 v' + N_{rvv}' r' v'^2 + N_{vvv}' v'^3 \end{aligned} \right\} \quad (2.2.1.2)$$

なお, 横力 Y' は遠心力の項 $-m' r'$ を修正したものであり, Y' は純然たる流体力である。このような近似式による実験結果のあてはめによって決められた(2.2.1.2)式中の諸係数の値は表 2.2.1.2, 2.2.1.3 の T.EXP の欄に示してある。なお表中, 最左欄の $1, r, v, rr, \dots$ 等は, それより右側の欄が Y か N であるかによって, それぞれ $Y_0', N_0', Y_r', N_r', Y_v', N_v', Y_{rr}', N_{rr}, \dots$ 等を意味する。

さて, プロペラ逆転によって生ずる付加流体力に及ぼす横流れ速度および旋回角速度の影響を調べるために, 前述のプロペラ逆転時の CMT で計測される流体力を次のとく, 裸船時の流体力とプロペラ逆転によって新たに誘起された流体力の和によって表わされると考える。

$$Y' = Y_{BARE HULL}' + \Delta Y' \quad (2.2.1.3)$$

$\Delta Y'$ のなかには舵に作用する力も幾分かはあるが, 今回の計測では全く無視できるほどのオーダーの力であることが舵力計による舵力の計測の結果わかっているので, プロペラ逆転時の全横力 Y' から $Y_{BARE HULL}'$ を差し引いた残り $\Delta Y'$ はプロペラ逆転によって船体に生じた付加流体力と考えてよいことになる。このような $\Delta Y'$ を図 2.2.1.47 ~ 図 2.2.1.54 と同じように, たとえば横軸に v', r' をパラメーターにとって図示することは勿論可能であるが, これではデータは十分なまとまりを示さない。

ところで, プロペラ逆転による付加流体力に及ぼす横流れ運動と旋回運動の効果は, プロペラ位置に於ける等価横流れ速度 v_s'

$$v_s' = v' + x_p' r' \quad (2.2.1.4)$$

でまとめて評価できるのではないか考えられる。ここで x_p' はプロペラと船の重心間の無次元距離であるが,

以下の解析では簡単のため

$$x_p' = -\frac{1}{2} \quad (2.2.1.5)$$

としている。

このように付加流体力 $\triangle Y'$, $\triangle N'$ を v_s' に対して図示したのが図 2.2.1.55 ~ 図 2.2.1.60 である。これによれば

a) 5-27M モデルでは $\triangle Y'$, $\triangle N'$ ともに v_s' に対して比較的まとまりがよく、 v_s' の一次関数で近似できるが、天長丸モデルでは $\triangle Y'$ がかなりばらつき、 v_s' の一次関数では必ずしも十分良く表現できるとは思えないが、 $\triangle N'$ の方は 5-27M モデルと同様、 v_s' の一次関数としても良さそうである。

そこで、

$$\triangle Y' = \triangle Y_0' + \triangle Y_{vs} \cdot v_s' \quad (2.2.1.6)$$

と表わすことにする。

このとき、全横力 Y' は (2.2.1.2) と (2.2.1.6) より

$$\begin{aligned} Y' = & \tilde{Y}_0' + \triangle Y_0' + (\tilde{Y}_r' - \frac{1}{2} \triangle Y_{vs}) r' + (\tilde{Y}_v' + \triangle Y_{vs}) v' + \tilde{Y}_{rr} r'^2 + \tilde{Y}_{rv} r' v' \\ & + \tilde{Y}_{vv} v'^2 + \tilde{Y}_{rrr} r'^3 + \tilde{Y}_{rrv} r'^2 v' + \tilde{Y}_{rvv} r' v'^2 + \tilde{Y}_{vvv} v'^3 \end{aligned} \quad (2.2.1.7)$$

と書ける。ただし、上式中 (~) は裸殻での微係数を表わす。モーメント N' についても全く同様である。よって (2.2.1.7) によればプロペラ逆転時の線形微係数は結局、

$$\left. \begin{aligned} Y_r' &= \tilde{Y}_r' - \frac{1}{2} \triangle Y_{vs} & N_r' &= \tilde{N}_r' - \frac{1}{2} \triangle N_{vs} \\ Y_v' &= \tilde{Y}_v' + \triangle Y_{vs} & N_v' &= \tilde{N}_v' + \triangle N_{vs} \end{aligned} \right\} \quad (2.2.1.8)$$

と表わせる。

先の図 2.2.1.55 から図 2.2.1.60 までの結果から $\triangle Y'$, $\triangle N'$ を (2.2.1.6) で近似したときの $\triangle Y_{vs}$, $\triangle N_{vs}$ を用いて、プロペラ逆転時の流体力線形微係数を (2.2.1.8) に従って求めた結果を表 2.2.1.2, 2.2.1.3 の V_s Model という欄に示した。

この V_s Model での線形微係数と純然たる Taylor Expansion model での線形微係数との定量的一致度や、これら線形微係数の裸殻状態での値から、プロペラ逆転時での値への変化の定性的傾向の両モデル間の一一致度は十分良いとはいえないが、これら線形微係数に基づく針路安定性の判別のための Hydro dynamic levers ℓ_v , ℓ_r

$$\ell_v' = \frac{N_v'}{Y_v'}, \quad \ell_r' = \frac{N_r'}{Y_r' - m} \quad (2.2.1.9)$$

は、ほぼ同一の傾向をもつことが図 2.2.1.61 より認められる。すなわち

b) プロペラ逆転時の針路安定性は J_p の絶対値が小さくなるほど — プロペラ逆転回転数が高くなるほど — 不安定度が増すといえる。

(6) まとめ

本年度主として

- (i) プロペラ逆転によって生ずる回頭力の発生メカニズムに関する検討
- (ii) プロペラ逆転による制動時の操縦数学モデルに関する検討

を二本の柱とする、実験的研究を行なった。その結果、(i)について

- a) プロペラ逆転による回頭力は見掛けの前進率 $J_p (= u/n_p)$ でよく整理できること。
- b) 船型の違いによって、プロペラ逆転による回頭力の J_p に依る定性的傾向に典型的な 2 つのパターンがあること。
- c) b) の流体力のパターンの違いに対応するように、プロペラ逆転中の船尾流場にも 2 つのパターンがあること。
- d) プロペラ逆転による流体力の大部分は、いずれのパターンの船においても、船体そのものに作用していること。すなわち回頭力はプロペラ、舵にはほとんど作用していないこと。

などがわかった。しかし、船尾流場にしても、流場の細かい様子等についても、わかったわけではないし、前述の 2 つのパターンが何故起るかの理由まで解明されたわけでもない。これらについては引き続き来年度で検討を行なう。また(ii)についても

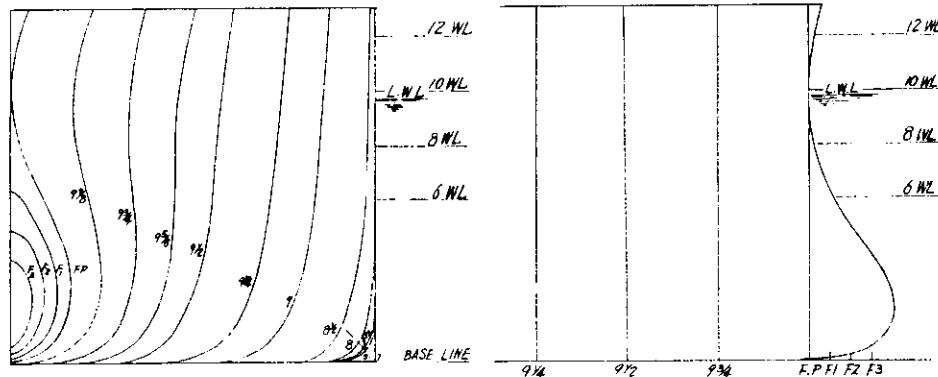
- a) プロペラ逆転時の流体力を裸殻に加わる流体力とプロペラ逆転による付加流体力の和で表現する試みを行なった。
- b) プロペラ逆転による付加流体力をプロペラ位置での等価な横流れ速度でまとめる試みをしてみたところ、比較的よくまとめられることができた。
- c) b) の方法で付加流体力を表現し、a) の仮定でプロペラ逆転時に船体に加わる全流体力を考えるとき、針路安定性に及ぼすプロペラ逆転の効果をほぼ良く表現することができた。
- d) プロペラ逆転で惰力航走中の船の針路安定性は、プロペラ逆転回転数が高いほど、不安定側になることが認められた。

しかし d) については他の実験結果とも十分、比較検討しておく必要性があるとともに、a), b) についても引きつき検討を要することが多い。これらも来年度検討される予定である。

さらに、プロペラ逆転による制動時の操縦運動のシミュレーションを、前述(i), (ii)の検討と並行して行なう予定である。

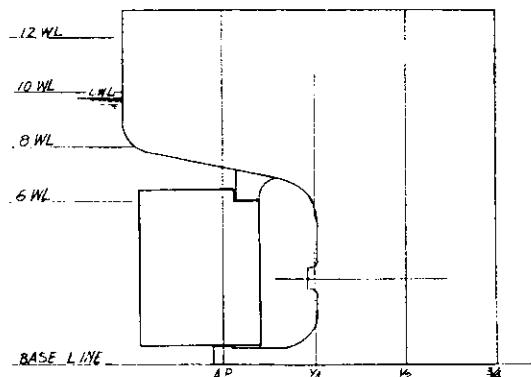
表 2.2.1.1 供試模型船主要目

	5 - 27 M	天長丸
垂線間長 L	2.5000 m	2.5000 m
幅 B	0.5000 m	0.4144 m
奥水深 d	0.1832 m	0.1740 m
■ B	0.0735 m fore	0.0290 m fore
排水量	188.31 Kg	131.61 Kg
C B	0.820	0.738
舵面横比	1/55	1/64.86
プロペラ直径 D	0.0603 m	0.0886 m
プロペラ・ピッチ P	0.0366 m	0.0585 m
展開面積比	0.72	
プロペラ正転方向	右	右
縮率	1/185.6	1/31.6



body plan of fore part

bow profile



stern profile

body plan of aft part

図 2. 2. 1. 1

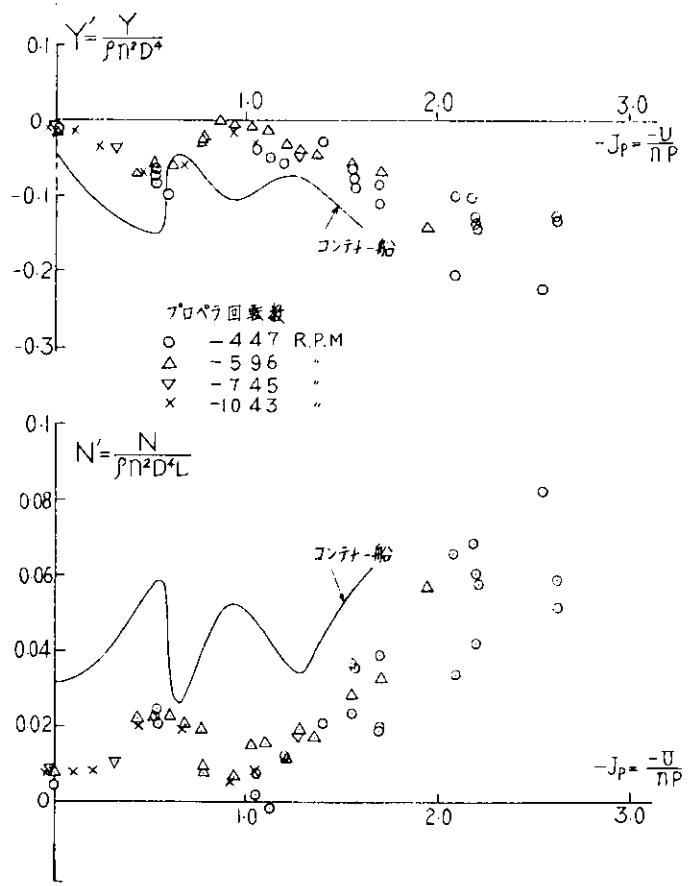


図 2. 2. 1. 2

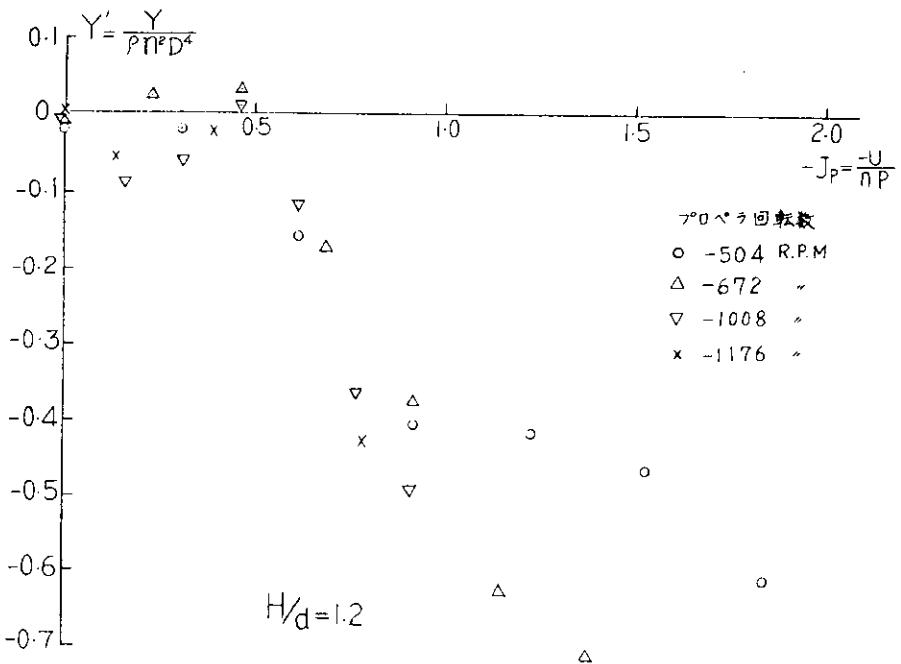


図 2. 2. 1. 3

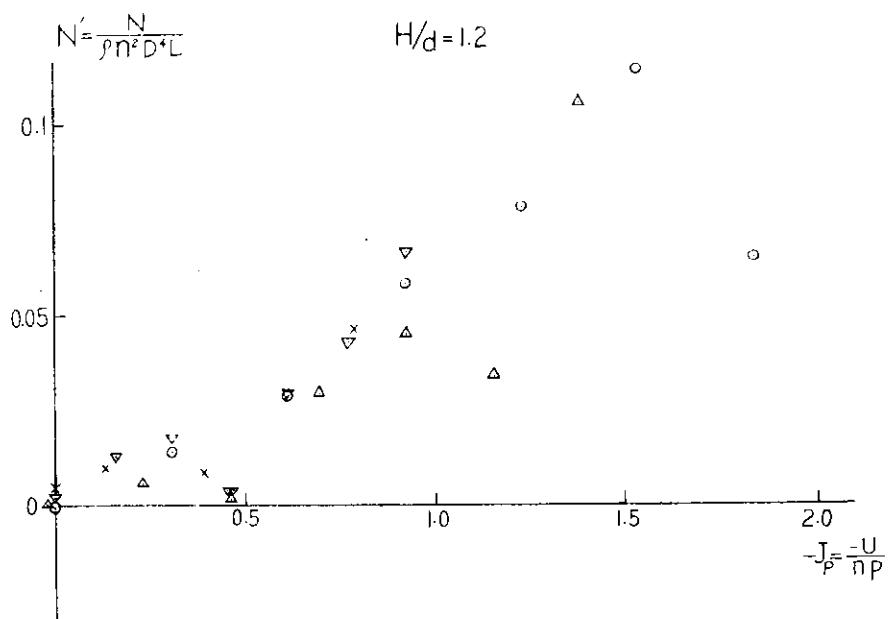


図 2. 2. 1. 4

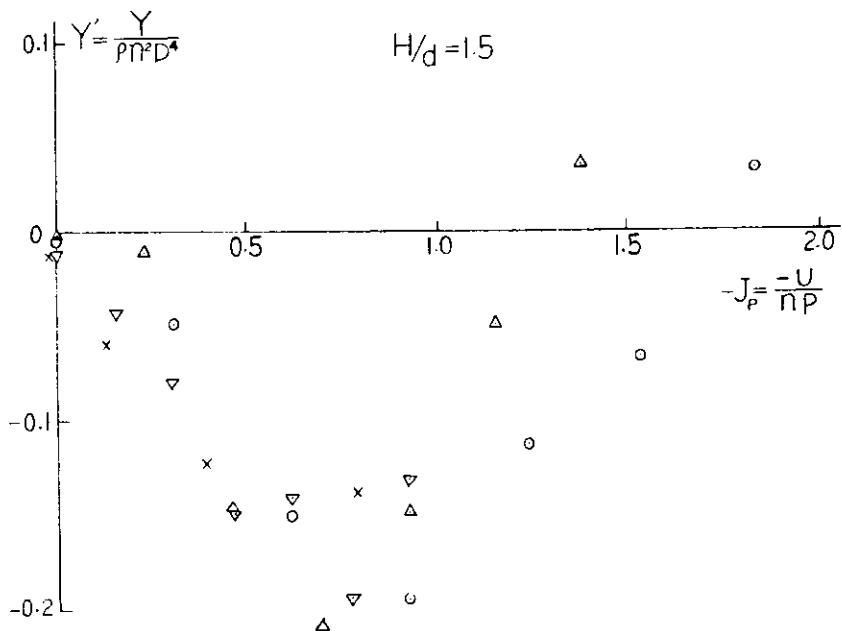


図 2. 2. 1. 5

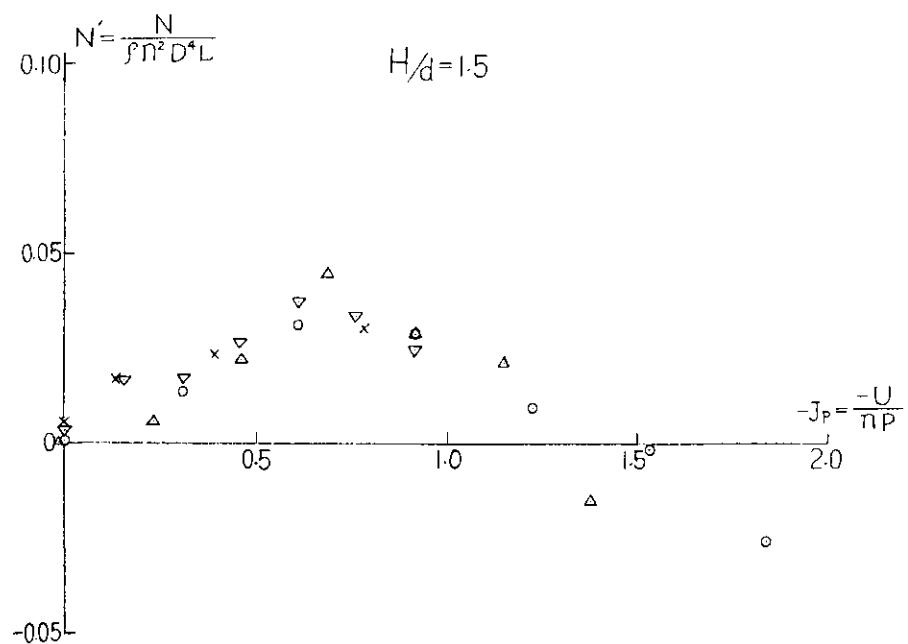


図 2. 2. 1. 6

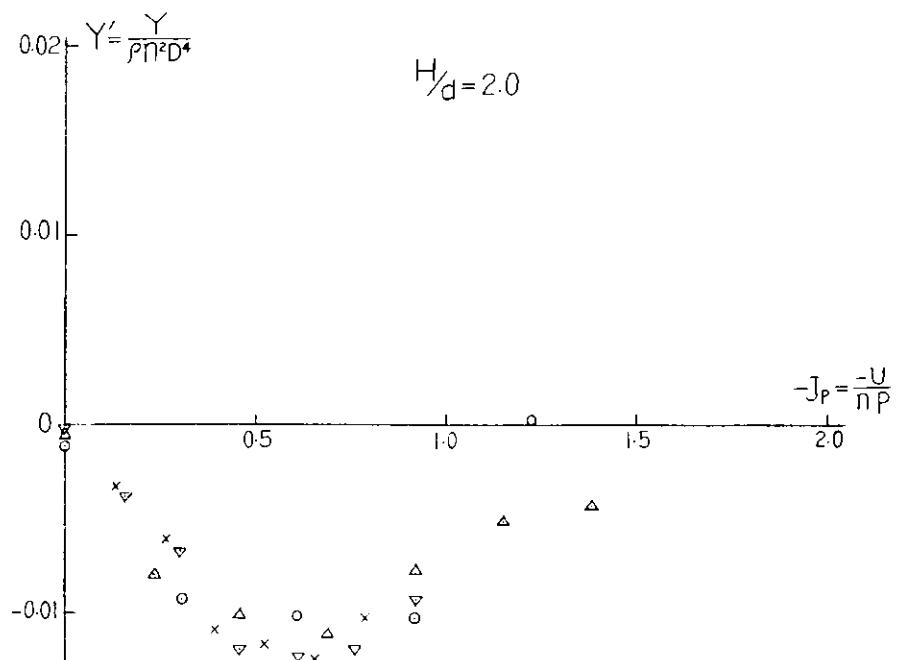


図 2. 2. 1. 7

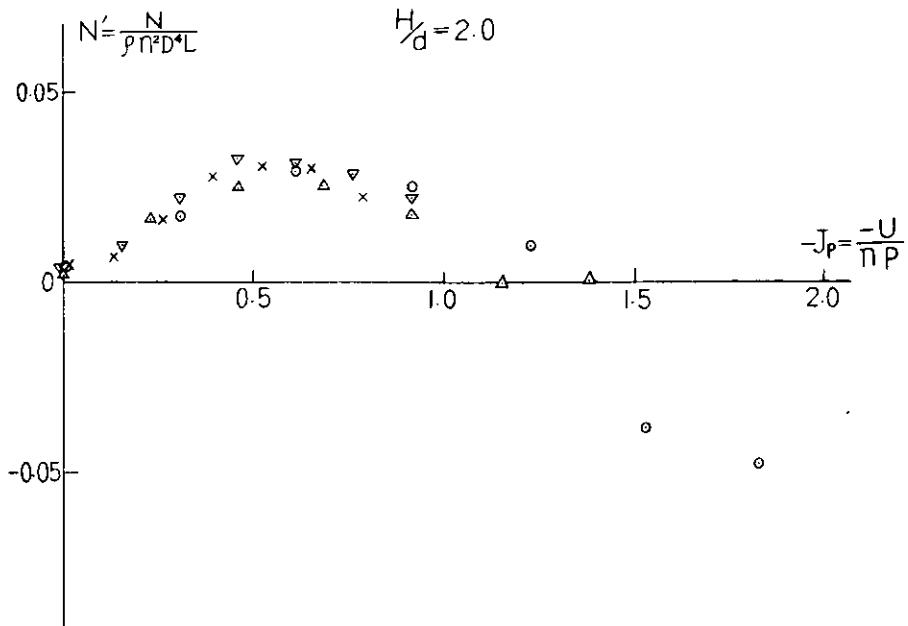


図 2.2.1.8

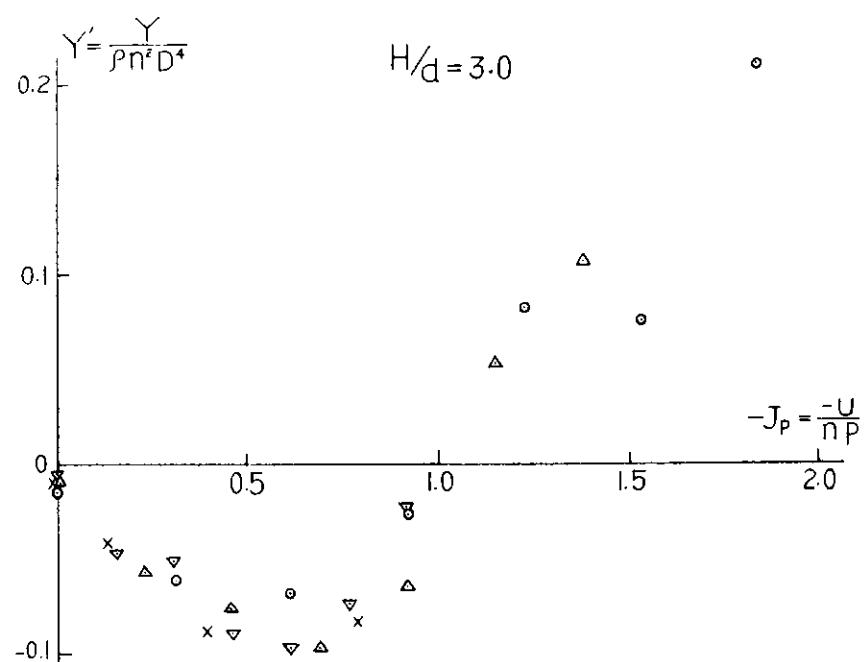


図 2.2.1.9

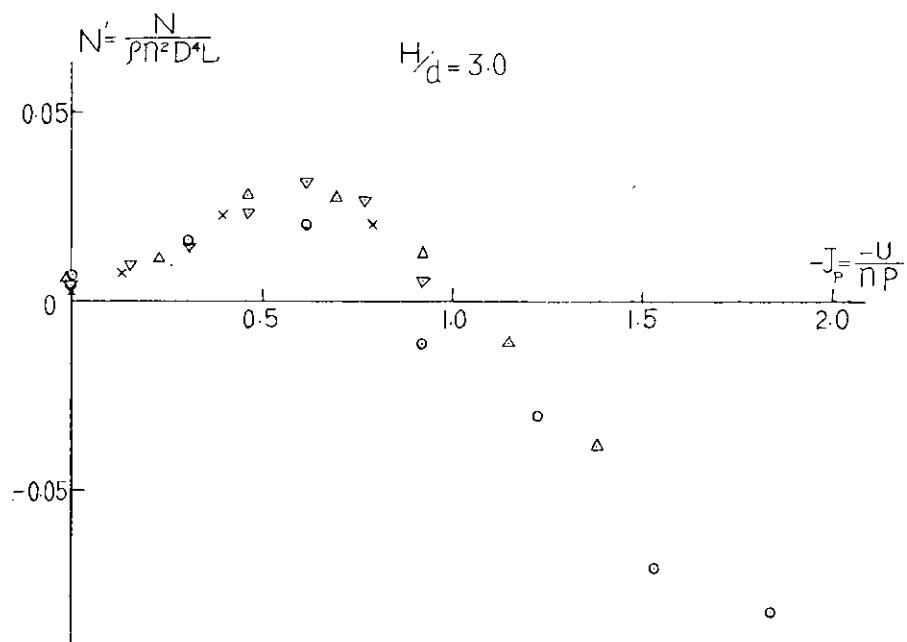


図 2. 2. 1. 1 0

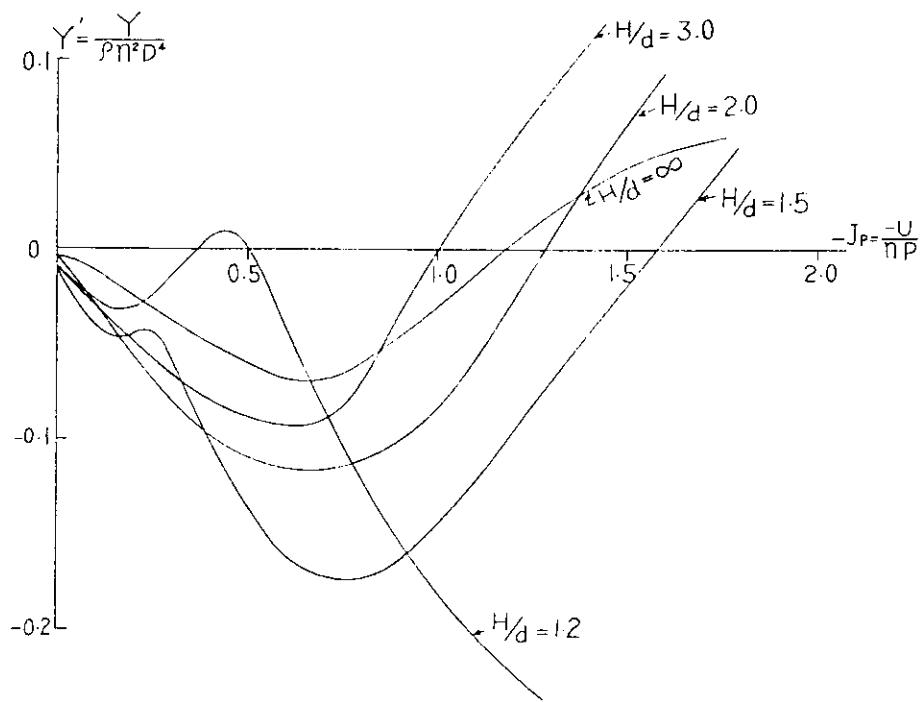


図 2. 2. 1. 1 1

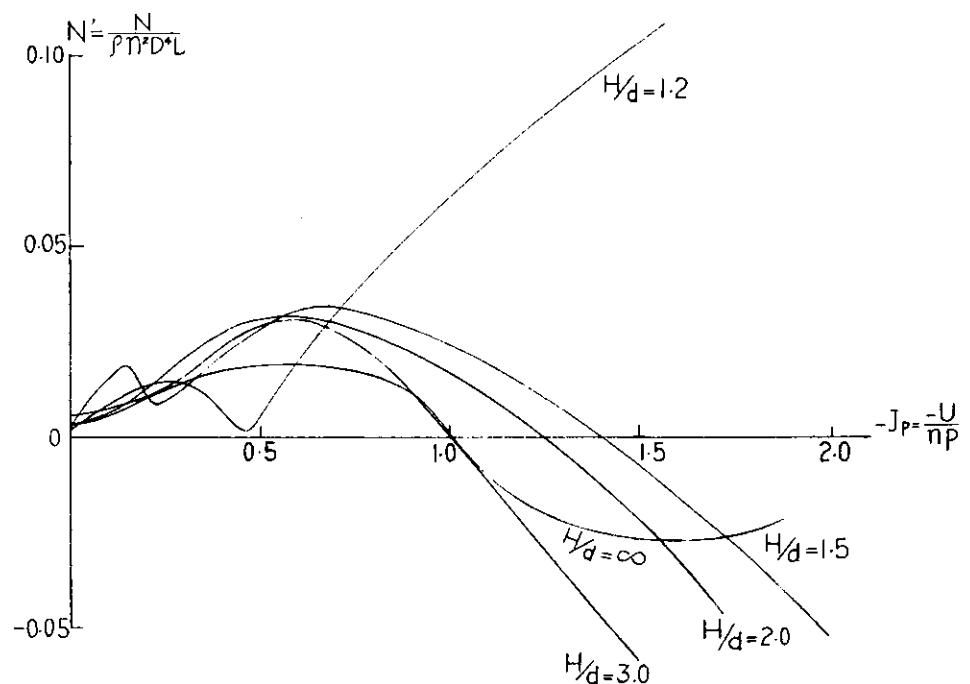


図 2. 2. 1. 12

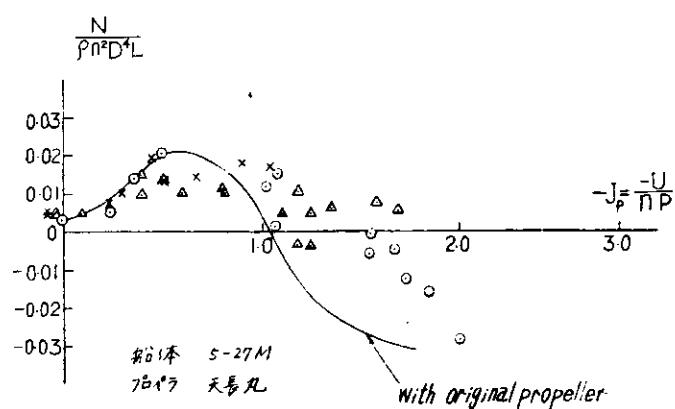
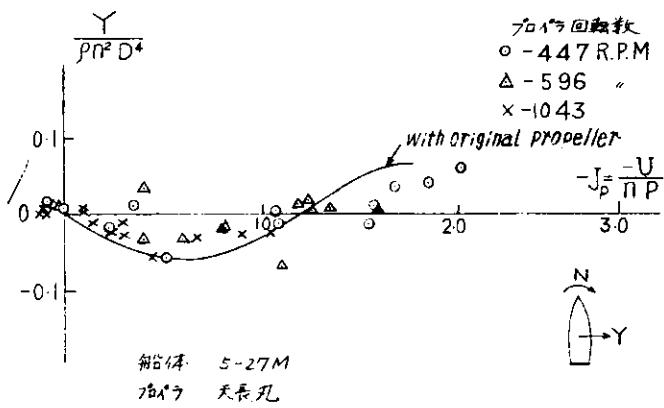
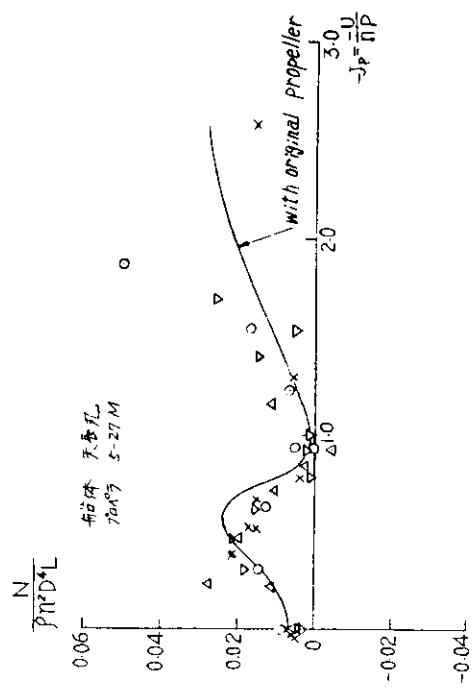
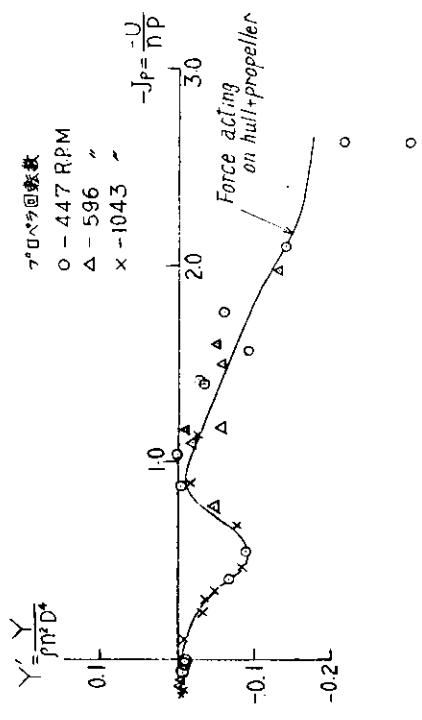
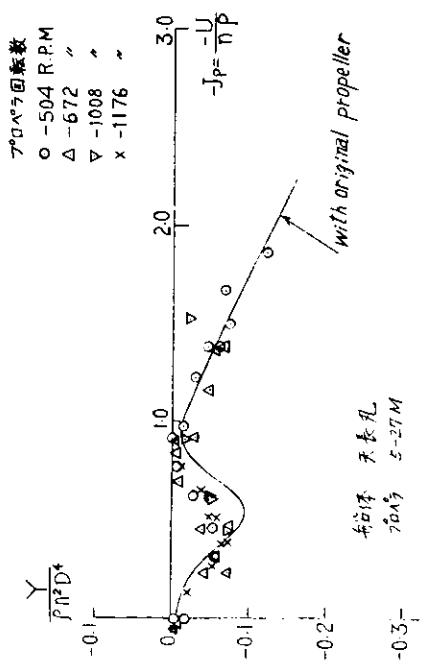


図 2. 2. 1. 13



- 19 -

図 2. 2. 1. 14

図 2. 2. 1. 15

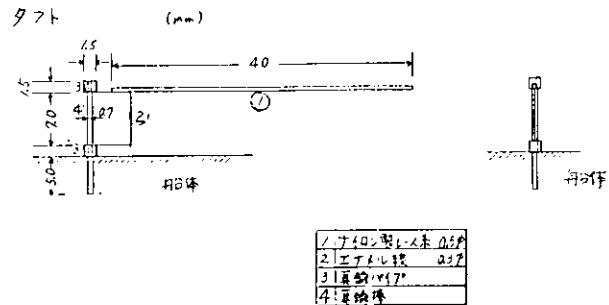


図 2.2.1.16

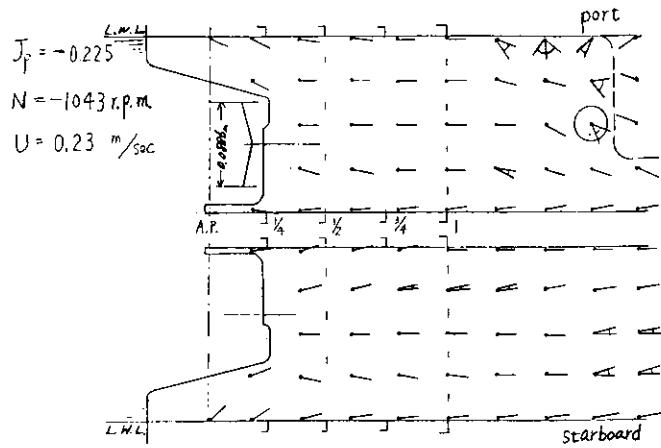


図 2.2.1.17

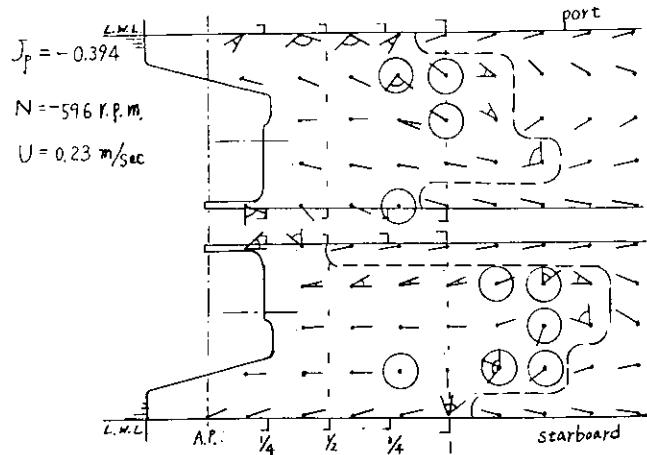


図 2.2.1.18

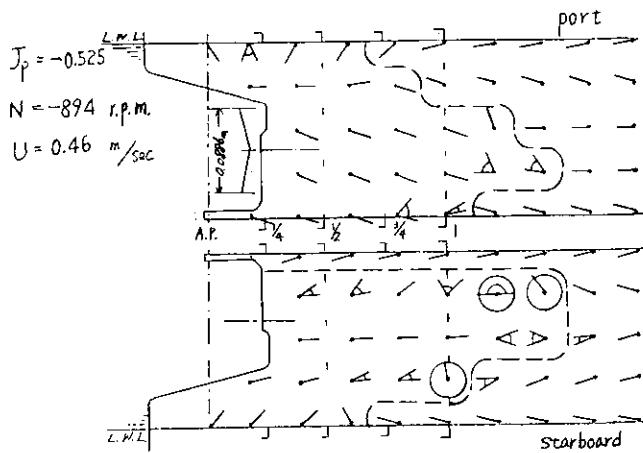


図 2.2.4.19

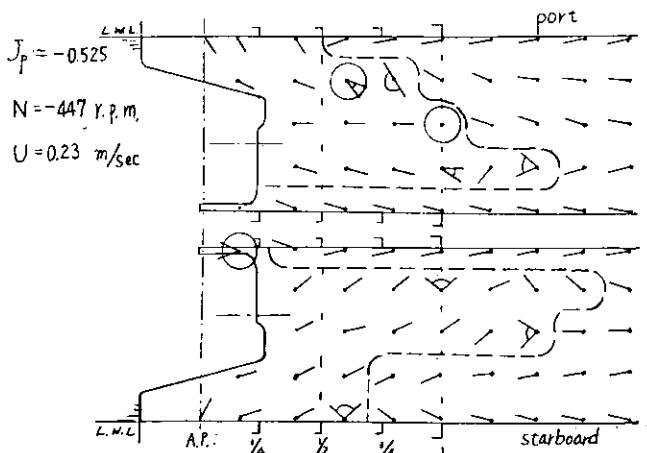


图 2.2.1.20

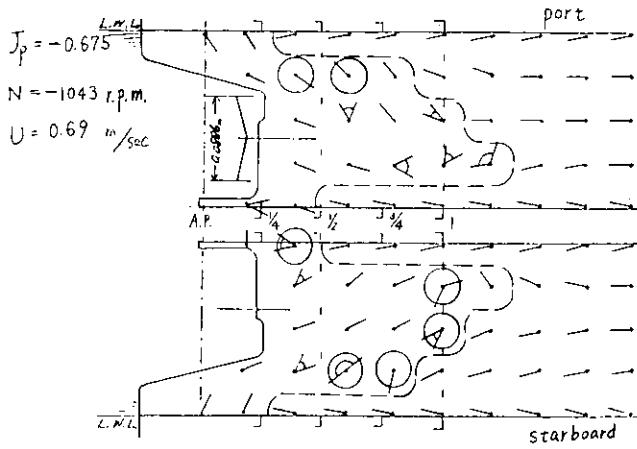


図 2. 2. 1. 21

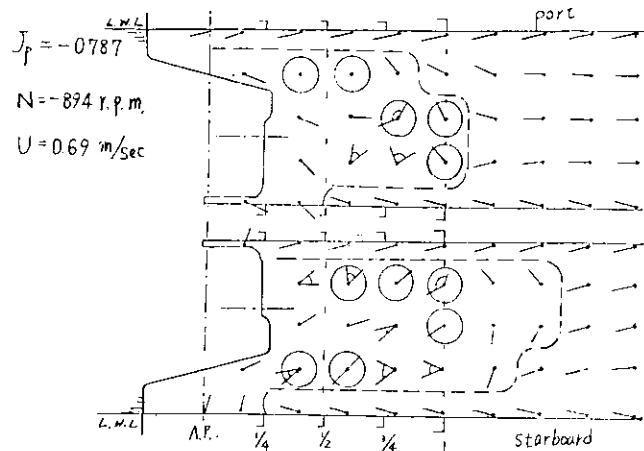


図 2. 2. 1. 22

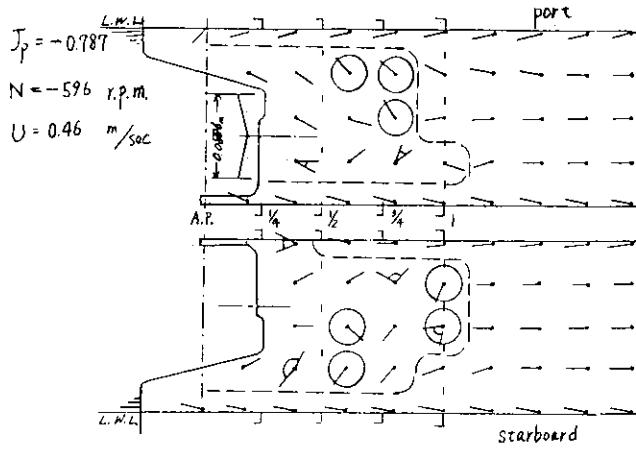


図 2. 2. 1. 23

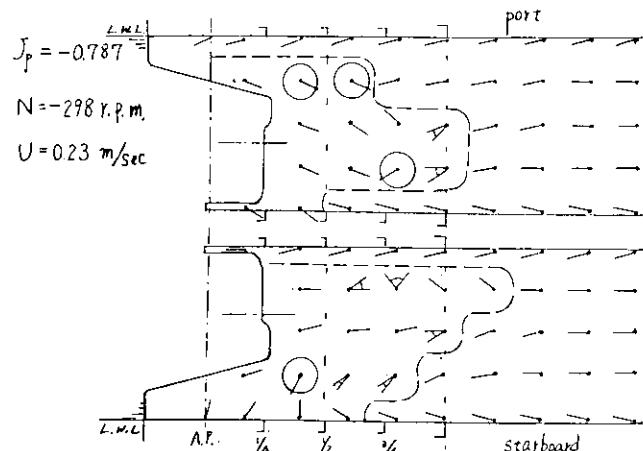


図 2. 2. 1. 24

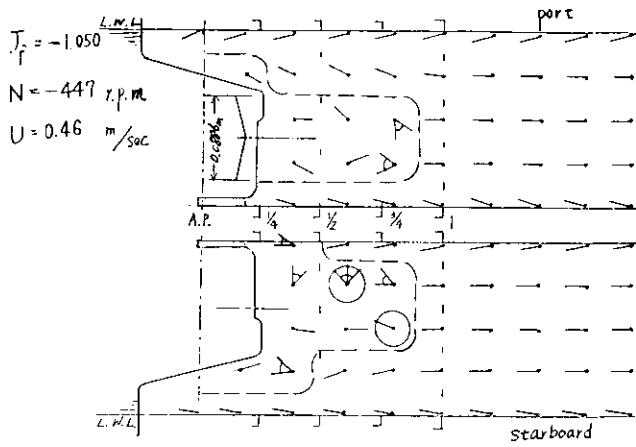


図 2. 2. 1. 25

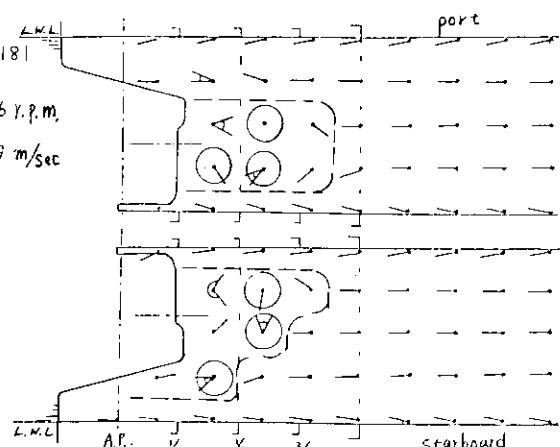


図 2. 2. 1. 26

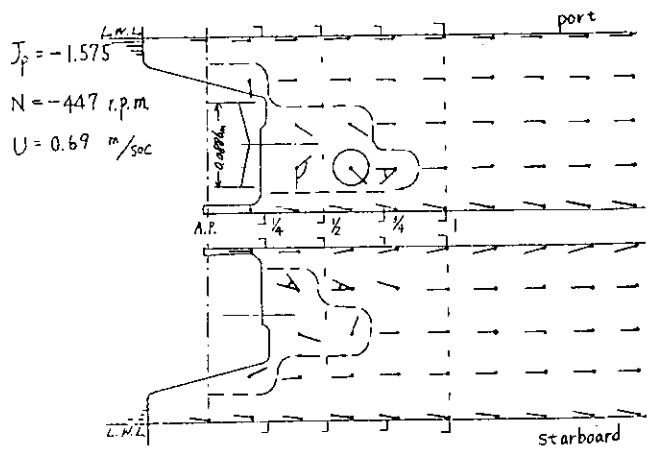


図 2. 2. 1. 27

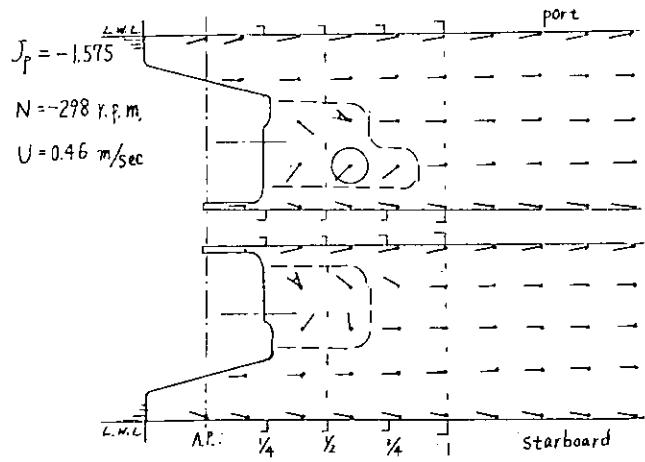


図 2. 2. 1. 28

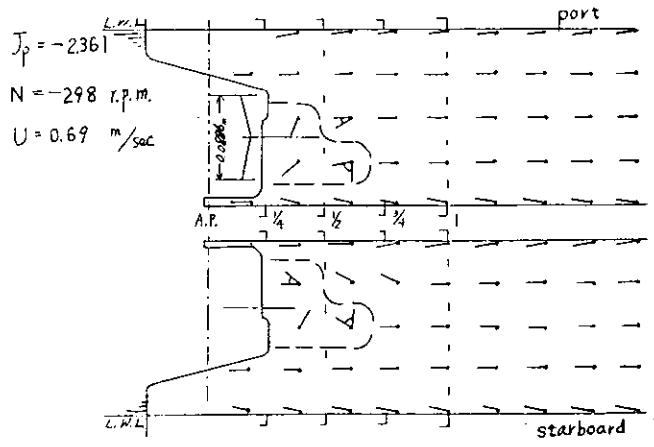


図 2. 2. 1. 29

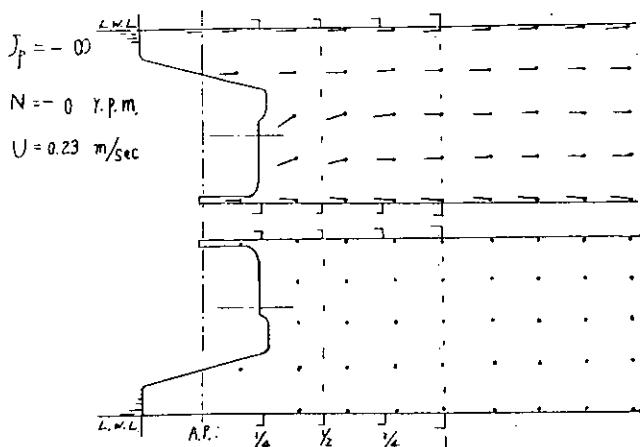


図 2. 2. 1. 30

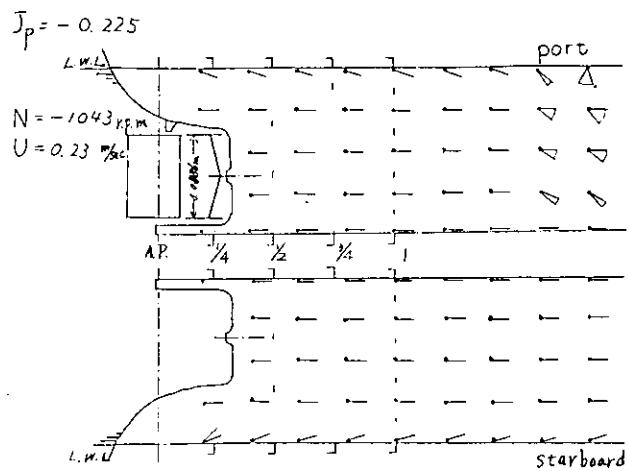


図 2. 2. 1. 31

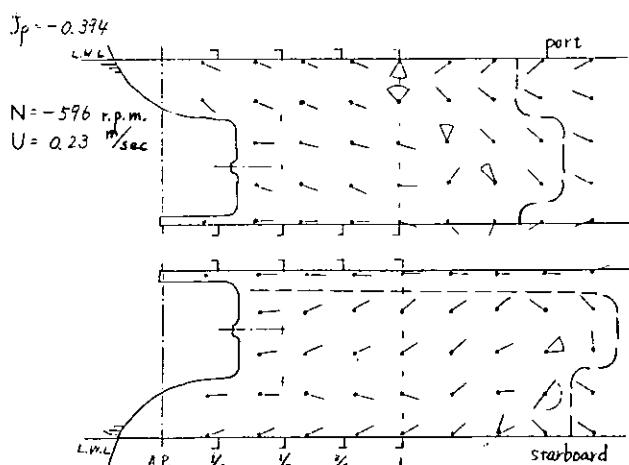


図 2. 2. 1. 32

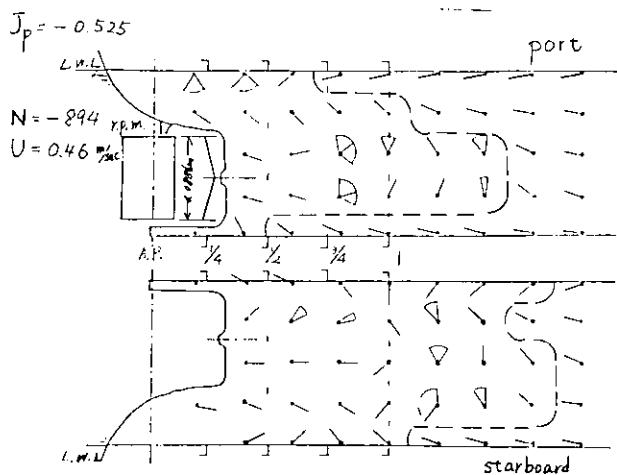


図 2. 2. 1. 33

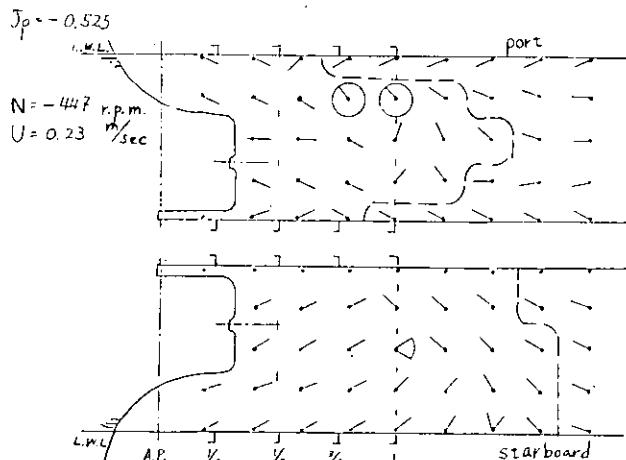


図 2. 2. 1. 34

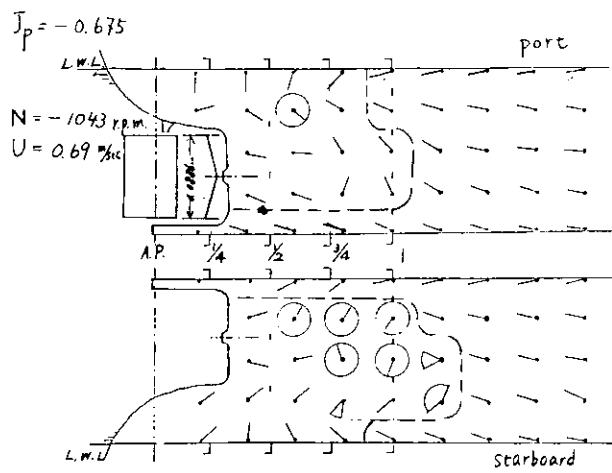


図 2. 2. 1. 35

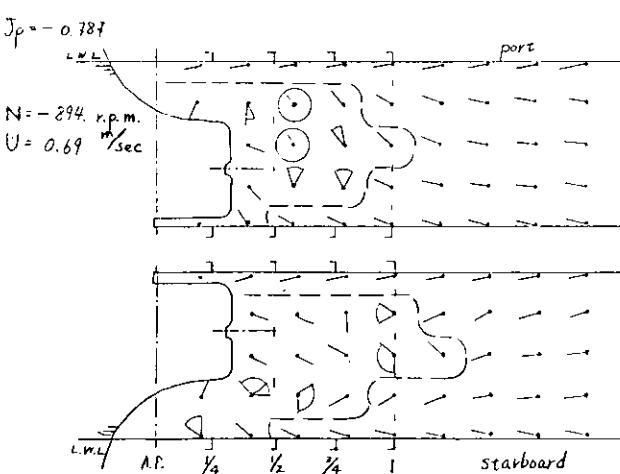


図 2. 2. 1. 36

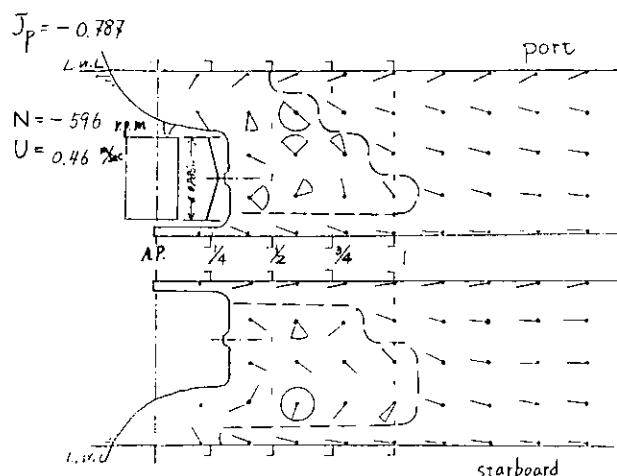


図 2. 2. 1. 37

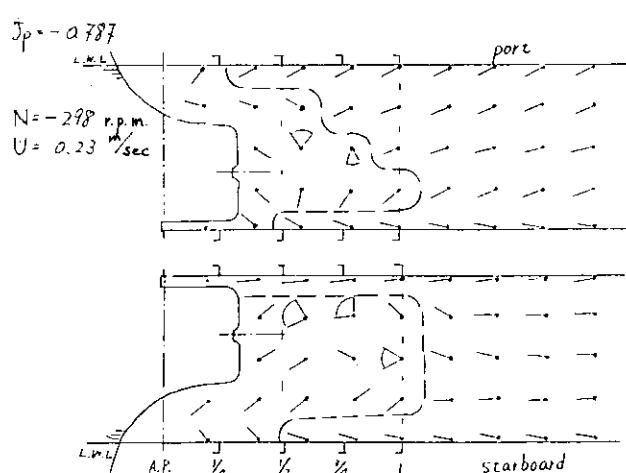


図 2. 2. 1. 38

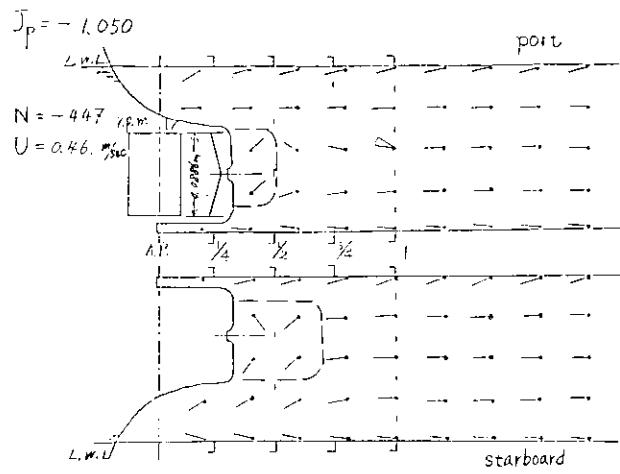


図 2. 2. 1. 39

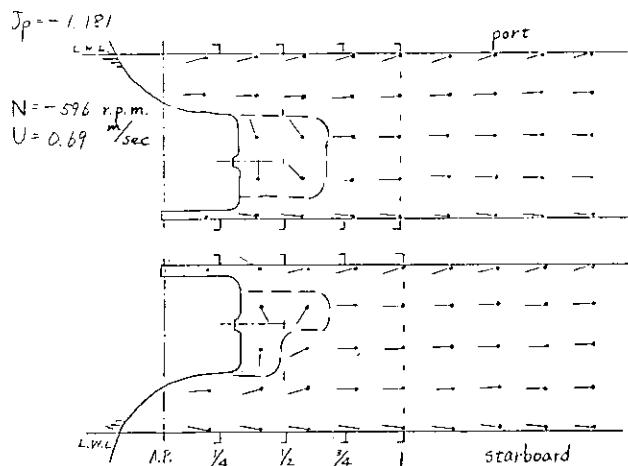


図 2. 2. 1. 40

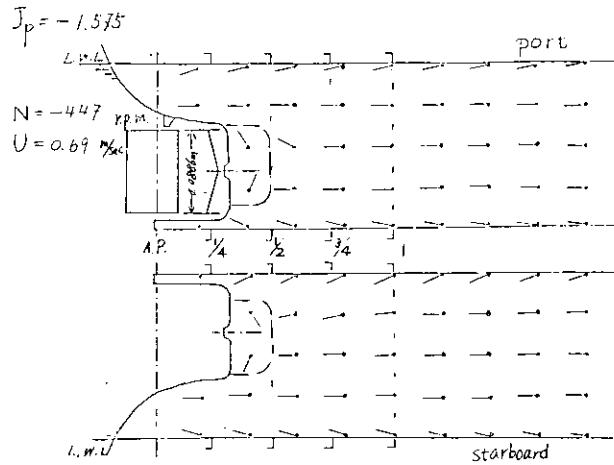


図 2. 2. 1. 41

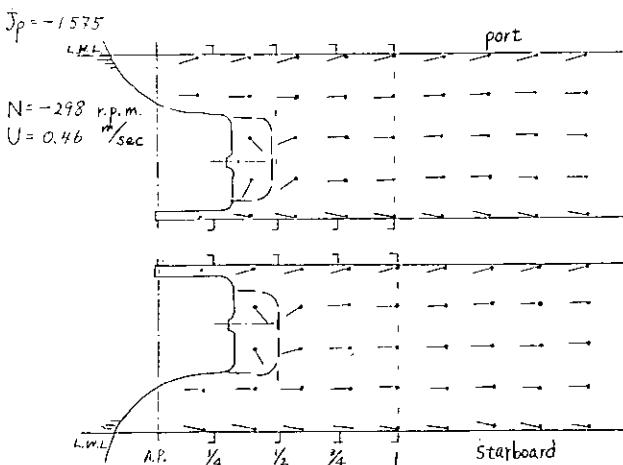


図 2. 2. 1. 42

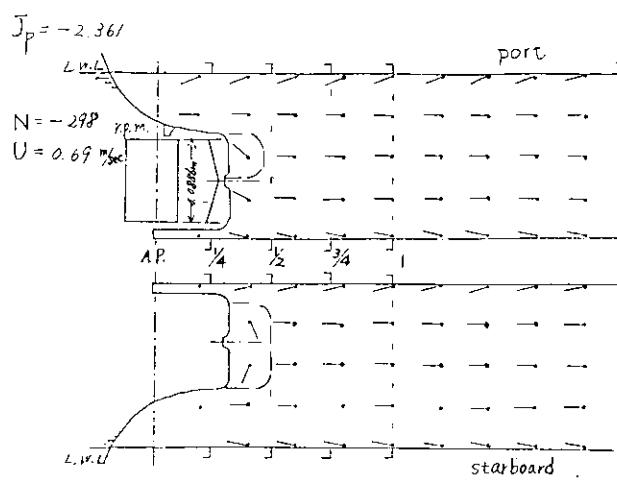


図 2. 2. 1. 43

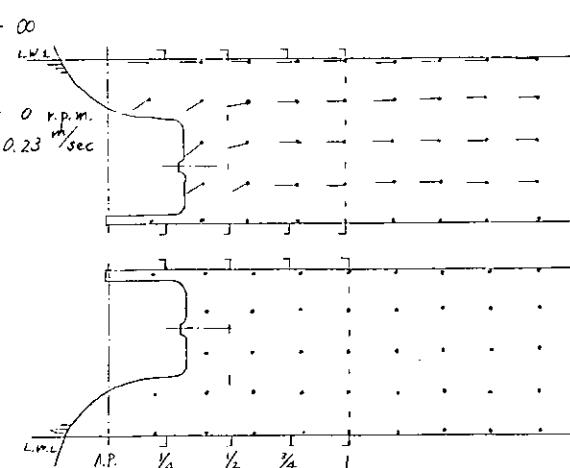


図 2. 2. 1. 44

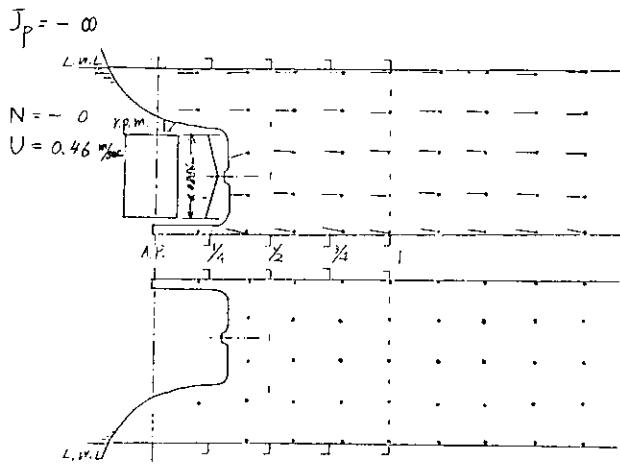


図 2. 2. 1. 45

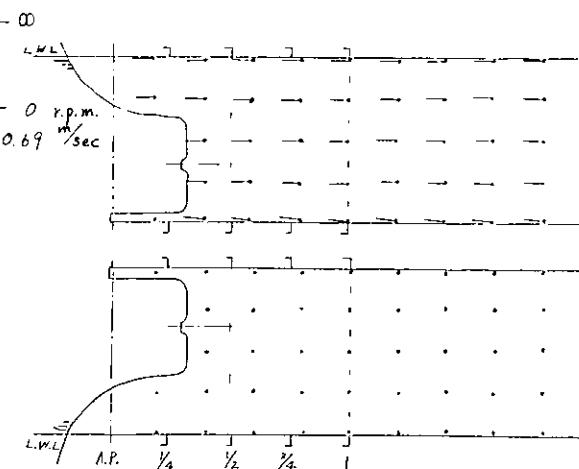


図 2. 2. 1. 46

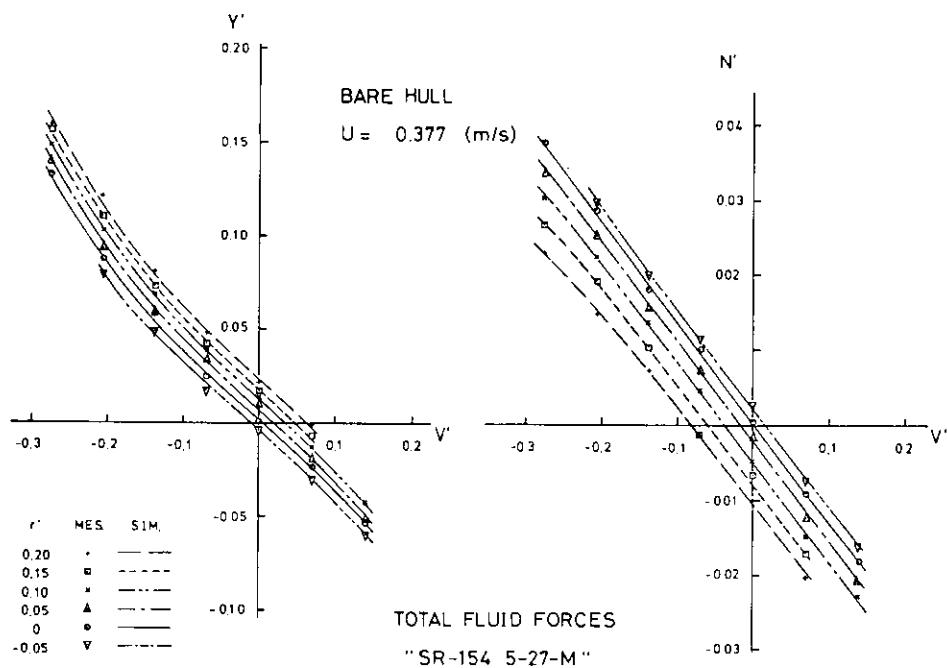


図 2. 2. 1. 47

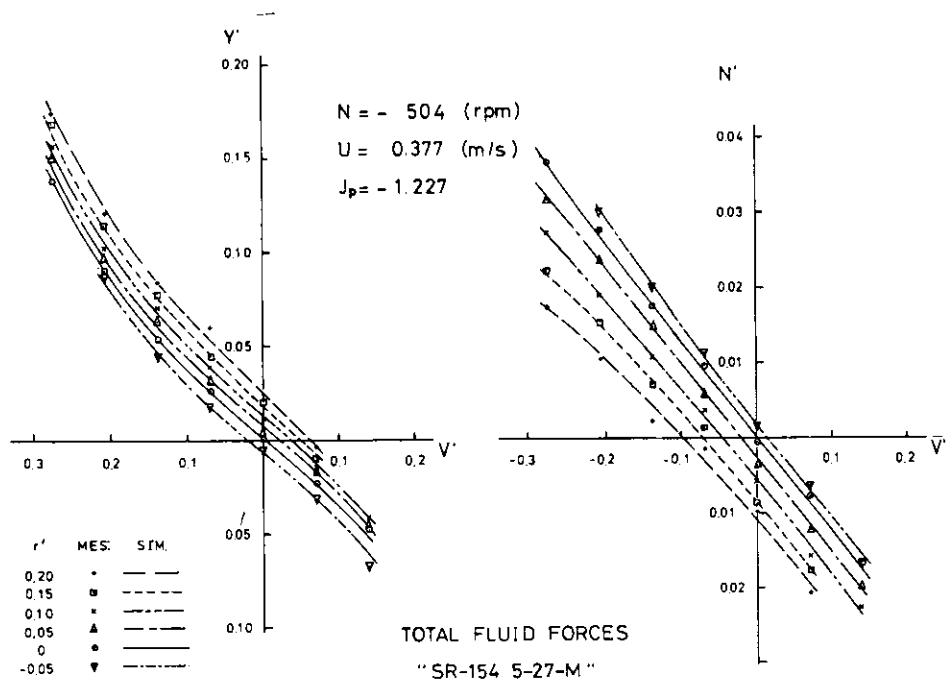


図 2. 2. 1. 48

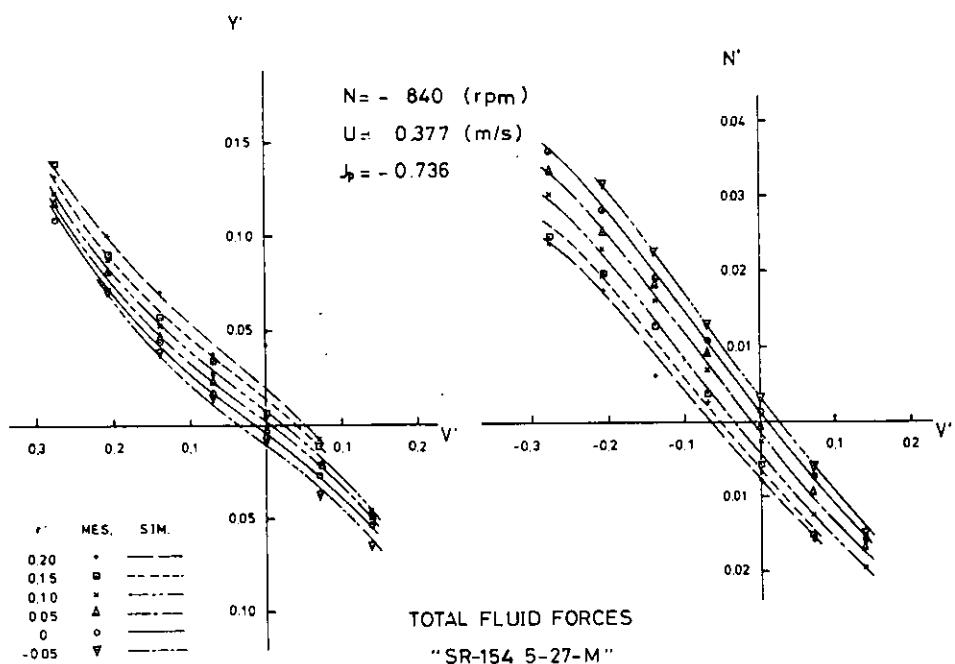


図 2. 2. 1. 49

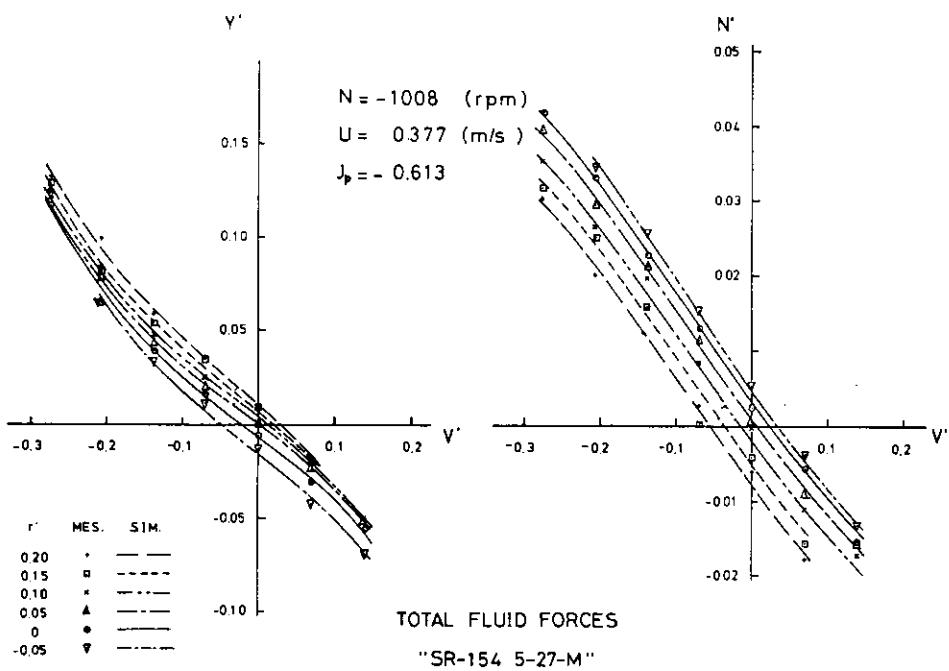


図 2. 2. 1. 5 0

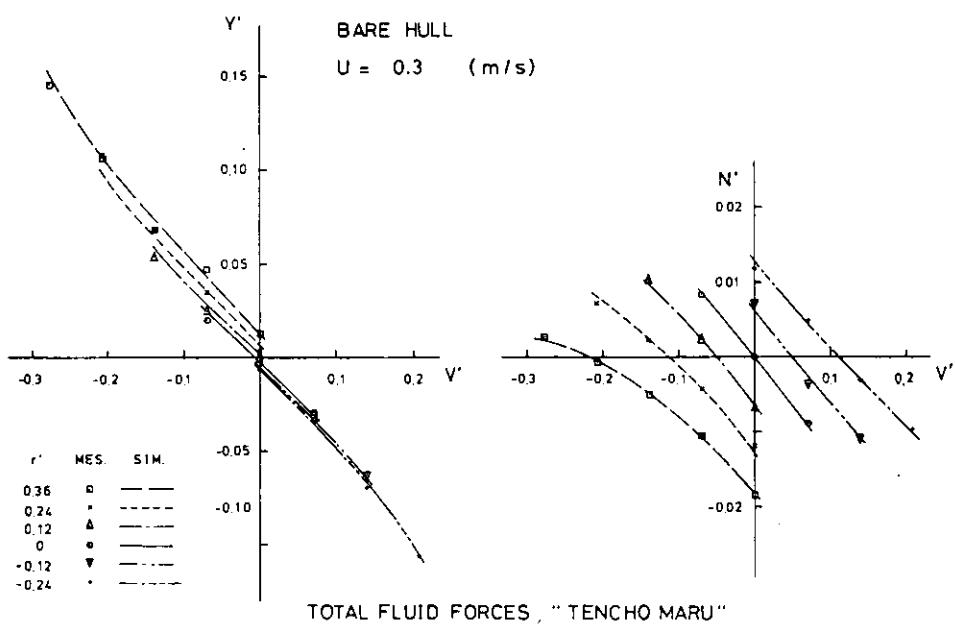


図 2. 2. 1. 5 1

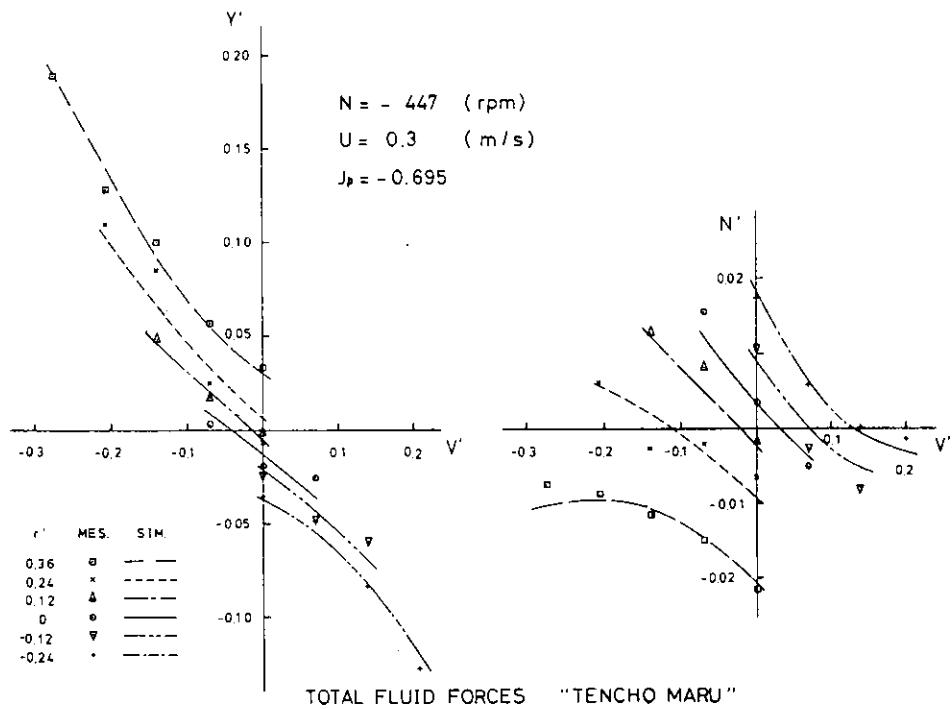


図 2.2.1.52

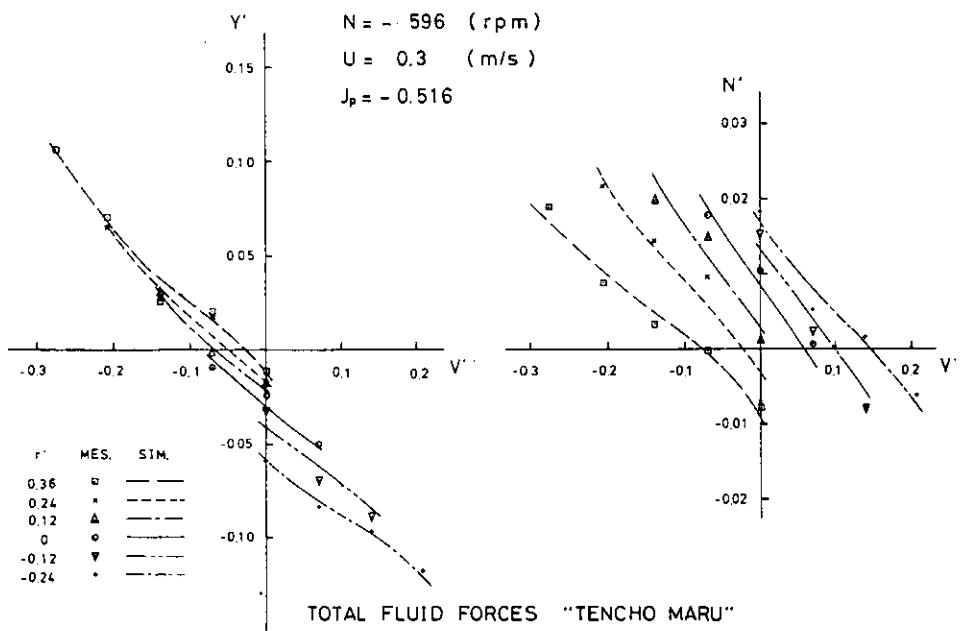


図 2.2.1.53

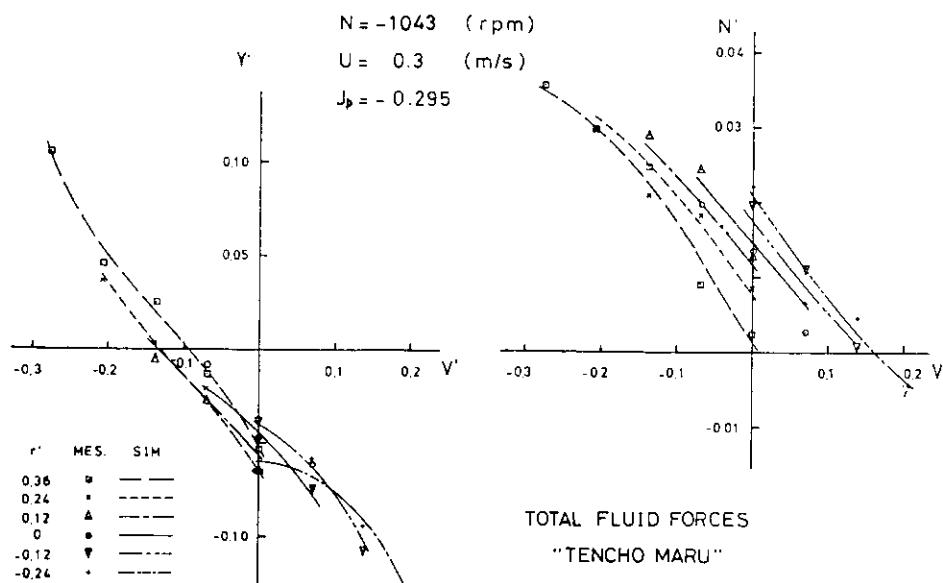


図 2.2.1.54

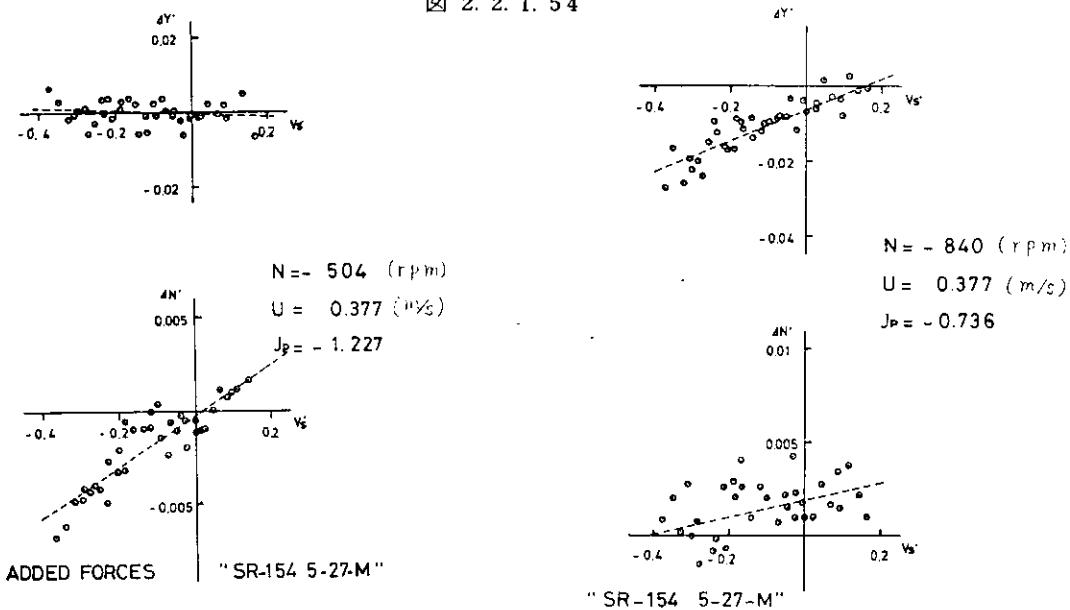


図 2.2.1.55

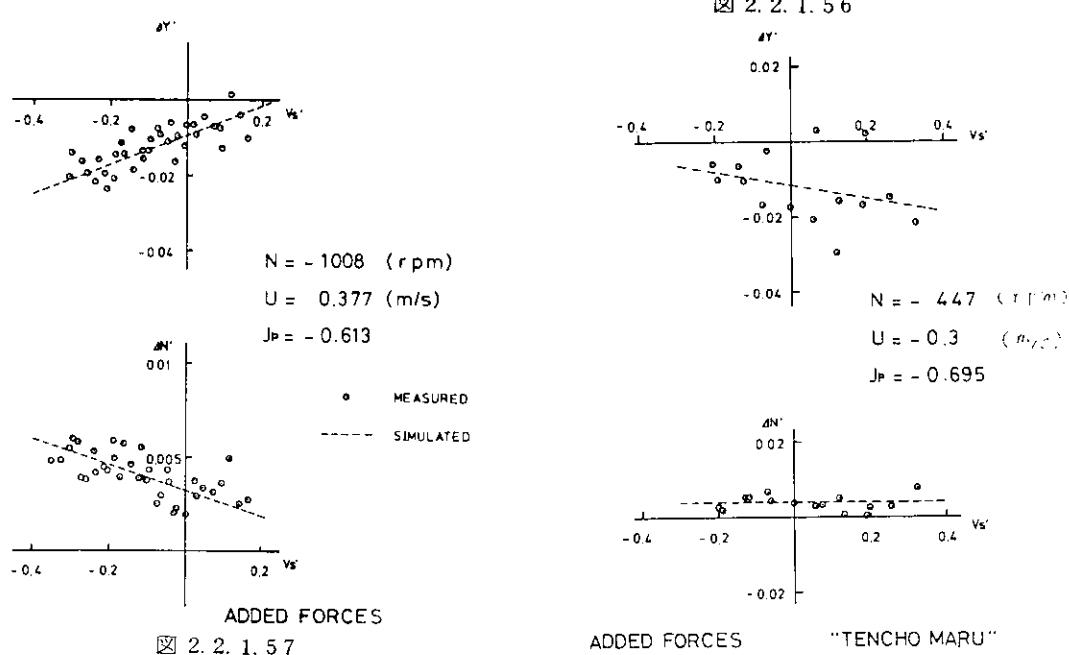


图 2.2.1.57

ADDED FORCES "TENCHO MARU"

図 2.2.1.58

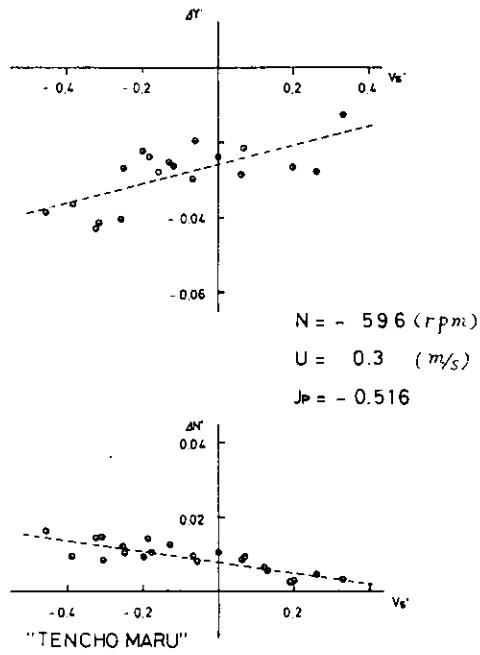


図 2.2.1.59

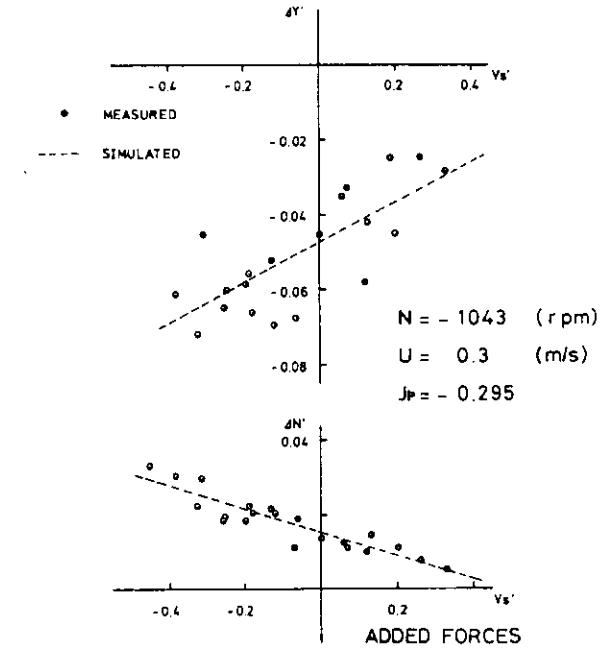


図 2.2.1.60

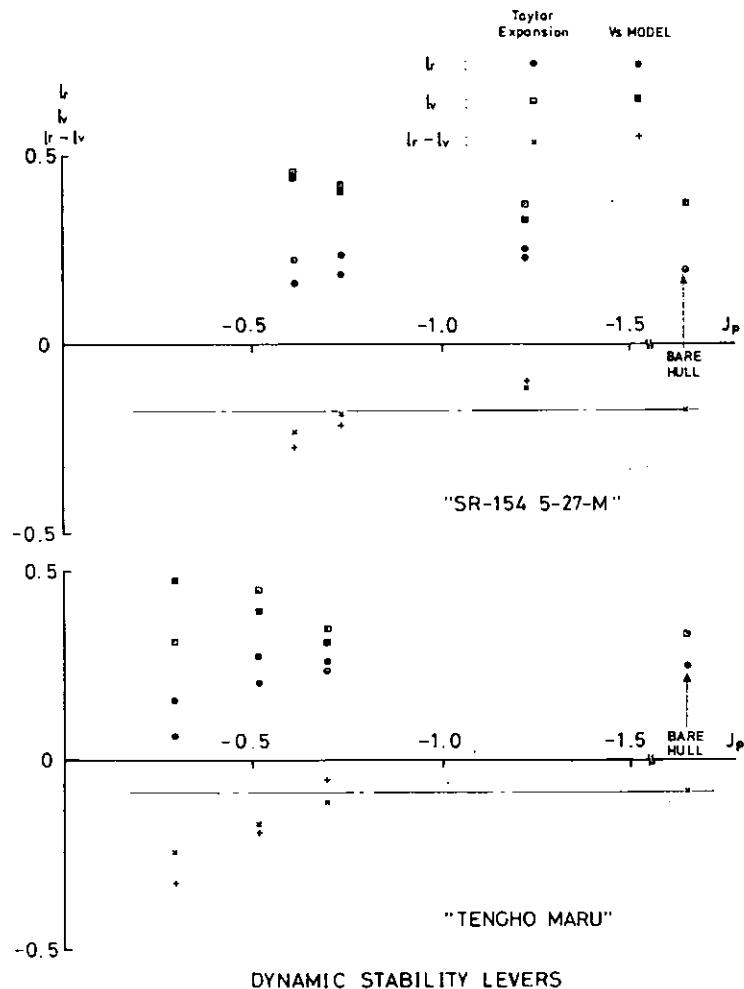


図 2.2.1.61

表 2. 2. 1. 2

"SR-154 5-27-M"

CONDITION	BARE HULL	N = - 504 (rpm)				N = - 840				N = - 1008			
SHIP SPEED	0.377	0.377 (m/s)				0.377				0.377			
$J_p = \frac{U}{n_p}$	—	-1.227				-0.736				-0.613			
		T. EXP.	T. EXP.	Vs MODEL		T. EXP.	Vs MODEL		T. EXP.	Vs MODEL			
		Y	N	Y	N	Y	N	Y	N	Y	N	Y	N
1		0.0012	0.0003	0.0007	0.0001	0.0009	0.0001	-0.0047	0.0012	-0.0049	0.0022	-0.0062	0.0033
r (m' = 0.3294)	0.1108	0.0429	0.1459	-0.0463	0.1129	-0.0497	0.1260	-0.0487	0.0900	-0.0453	0.1504	-0.0405	0.0912
v	-0.3548	-0.1326	-0.3430	-0.1275	-0.3590	-0.1190	-0.3160	-0.1337	-0.3133	-0.1279	-0.3051	-0.1405	-0.3156
rr	-0.0410	-0.1394	-0.2730	-0.1650			0.0151	-0.1514			-0.5057	-0.1647	
rv	-0.1196	-0.0142	0.0263	0.0318			0.0894	0.0776			0.1155	0.0487	
vv	-0.0430	0.0051	0.0179	0.0177			-0.1058	0.0562			0.1523	0.0668	
rrr	0.2137	0.4229	0.8175	0.5997			-0.2439	0.7364			1.3506	0.4207	
rrv	0.3743	0.1500	-13.646	0.0631			-1.4978	0.0661			-1.9584	-0.1912	
rvv	0.3970	-0.1688	-0.1832	-0.3895			-0.6422	0.1004			-0.7922	0.0093	
vvv	-1.7299	0.0029	-2.1255	-0.0220			-1.9064	0.2756			-23.880	0.2719	
lr	0.1962	0.2523	0.2296	0.2394	0.1891	0.2263	0.1661						
lv	0.3737	0.3717	0.3314	0.4231	0.4082	0.4605	0.4413						
lr-lv	0.1775	-0.1194	-0.1018	-0.1837	-0.2191	-0.2342	-0.2751						

表 2. 2. 1. 3

"TENCHO MARU"

CONDITION	BARE HULL	N = - 447 (rpm)				N = - 596				N = - 1043			
SHIP SPEED	0.3	0.3 (m/s)				0.3				0.3			
$J_p = \frac{U}{n_p}$	—	-0.695				-0.516				-0.295			
		T. EXP.	T. EXP.	Vs MODEL		T. EXP.	Vs MODEL		T. EXP.	Vs MODEL			
		Y	N	Y	N	Y	N	Y	N	Y	N	Y	N
1		-0.0028	-0.0001	-0.0123	0.0033	-0.0101	0.0040	-0.0298	0.0087	-0.0287	0.0077	-0.0441	0.0146
r (m' = 0.2421)	0.0314	-0.0527	0.0579	-0.0437	0.0402	-0.0527	0.0806	-0.0450	0.0183	-0.0456	-0.0874	-0.0229	0.0047
v	-0.3797	-0.1263	-0.3297	-0.1154	-0.3974	-0.1263	-0.3111	-0.1409	-0.3536	-0.1406	-0.3776	-0.1185	-0.3263
rr	0.0570	0.0002	-0.0402	0.0224			-0.1377	-0.0315			-0.3077	-0.0073	
rv	0.0170	-0.0180	-0.3050	0.2398			0.0193	0.0017			-1.1426	0.0100	
vv	-0.0587	-0.0401	-0.2026	0.1982			0.2711	0.0173			-1.0361	0.0060	
rrr	-0.0688	0.0159	0.5859	-0.2419			0.0442	0.0512			1.3453	-0.0848	
rrv	-0.7768	0.1268	1.093	-0.6060			-1.4697	-0.1277			0.7766	-0.4325	
rvv	-1.8947	-0.2646	4.8042	-1.2873			-5.5507	-1.6035			-2.6182	-0.2840	
vvv	-2.9930	0.0599	1.2083	-0.0525			-5.3996	-1.2325			-5.4533	0.2628	
lr	0.2501	0.2372	0.2611	0.2786	0.2036	0.0695	0.1558						
lv	0.3326	0.3500	0.3178	0.4529	0.3976	0.3138	0.4834						
lr-lv	-0.0825	-0.1128	-0.0567	-0.1743	-0.1940	-0.2443	-0.3276						

2.2.2 プロペラ逆転時に船体に働く流体力の実験

プロペラ逆転は制動の主力であるが、一方これに伴って発生する回頭運動は操船制御上しばしば問題となる。

本年度は大型タンカー模型（S R 154部会5-27M型）を使用してプロペラ逆転時に船体に働く力を計測した。船体は直進だけでなく士40°におよぶ斜航角を与える、またプロペラ逆転速度も広い範囲に変化している。さらにこの流体力の分布を知るためにS.S. 1/2~2の間に多数の圧力測定孔を設け、プロペラ逆転、斜航船体の船尾付近の船体表面圧力を測定した。

(1) 供試模型船要目

S R 154部会第2次母型の5-27M型の4.00m模型で、その要目等は本報告書2.2.1に示すとおりである。

(2) 試験結果

図2.2.2.1~10に結果を示す。横軸は横流れ角、縦軸は横抵抗ならびに回頭モーメントの無次元値、副変数は見掛けの前進率 V/nD である。こゝに L : 船長、 d : 吃水、 D : プロペラ直径、 n : プロペラ毎秒回転数（前進回転を正）、 V : 船速である。なお図2.2.2.1中の記号図参照。

(3) 結果の考察

以上の結果から、ある一つの β に対して $J_s = V/nD$ と同じであれば、 V と n はそれぞれ異っていても無次元の横力 Y' と回頭モーメント N' は等しいと考えてよいようである。

次に中心的問題であるところのプロペラ逆転の誘起する横力と回頭モーメントを取出してみよう。そのため各 β ごとに、プロペラ逆転中の Y 力および N モーメントからプロペラなしの時の Y 力および N モーメントを差引いた量を求め、これを $J_s = V/nD$ ベースに示すと図2.2.2.11~21のようになる。なおこれらの図では $V = 0$ でプロペラ逆転、すなわち $J_s = 0$ の結果を加え、かつこれに関連して無次元化に当っては V の代りに nD を使っていることに注意する必要がある。

(i) 直進中 ($\beta = 0$)、逆転プロペラが誘起する流体力

図2.2.2.11に示すとおり、 J_s が負に大きい時は Y 力は右向き、 N は左回りになる。換言すれば、弱い逆転回転で前進速力が大きいときは左回頭力が作用する。ただしこの力は比較的小さい。（ Y の値はかなり大きいが nD が小さいので Y 力にすると小さい）。

$J_s = -0.2 \sim -0.4$ の間は最も著しい流体力を示す。その方向は Y は左向き、 N は右回頭で船尾を左に振りながら右回頭することになる。前進中、急速に後進を掛けると J_s は略このあたりの値になるので、船は右回頭しながら止まることになる。

これに対して後進を徐々に加え回転も余り強くしないときは J_s の値が負に大きく、前に述べたところから船は左回頭を起こす可能性がある。

船が停止した状態でプロペラを逆転する時には余り大きくはないけれども右回頭の力が働くようである。

(ii) 船が左舷方向に横流れ ($\beta > 0$)、プロペラ逆転のときの流体力

図2.2.2.12~16に示すとおり $\beta = 0$ のときの力の J_s に対する変化の様子が正負共強調される傾向である。従ってプロペラを逆転しながら右旋回に入るとますます強い右旋回力が船に作用する結果となり、プロペラ逆転時の船が全体として針路不安定であることと相俟って、プロペラ逆転に伴ない強い右旋回が起ることになる。なお左舷向き横流れでは右舷向き横流れよりも計測点もよくまとまり、傾向も明らかであるが、これは逆転プロペラが押し戻す水流の回転方向と、横流れによる一般流の方向がいずれも左舷から右舷へ向う方向となり、比較的スムーズに水流が船底に流れ抜けるからであろう。このことは後に示す船体表面圧力測定結果からもうかがい知ることができる。

(iii) 船が右舷方向に横流れ ($\beta < 0$) , プロペラ逆転のときの流体力

図 2.2.2.17 ~ 21 に示すように $\beta > 0$ の場合に比べて傾向が余り定かでない。計測中も力の不規則な変動が観測された。これは上記のとおり斜航一般流に対して逆転プロペラの押し戻す流れが正面衝突する形となって船尾付近、特に右舷側の流れがスムーズに流れていないとによるものであろう。

(4) プロペラ逆転時船体表面圧力の測定

以上の流体力計測の結果を補ない、流れのメカニズムを知る手がかりとして図 2.2.2.22 に示す圧力測定孔を設け、プロペラ逆転中の船尾部船体表面圧力を測定した。結果の数例を図 2.2.2.23 ~ 26 に示す。これらの図においても図 2.2.2.12 ~ 21 同様、プロペラ逆転中の圧力から裸般の圧力を差引いて、逆転プロペラが誘起すると見なされる圧を取り出して示している。

これらの圧力測定結果を右舷、左舷別に積分して逆転プロペラが誘起する流体力を求めてみると、定性的には前述の流体力計測結果とよく話が合う。

(3)の(i), (ii), (iii) 考察はこの圧力測定結果をも参考にして導き出したものである。なおこの測定結果の詳細な解析については次年度報告する予定である。

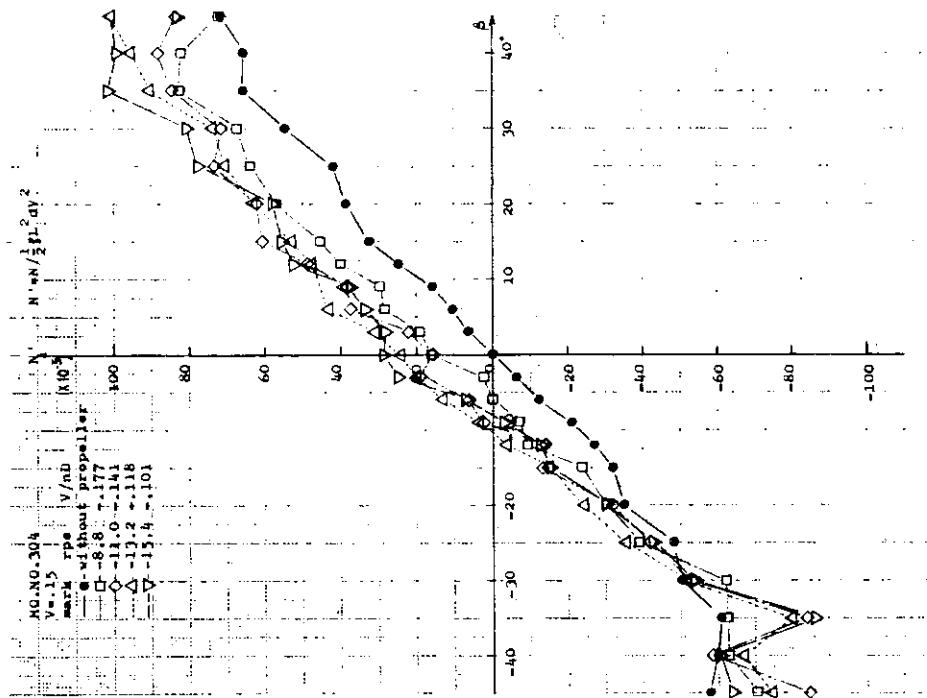


図 2.2.2.2 プロペラ逆転、船体斜航時の旋回モーメント
 $V = 0.15 \text{ m/s}$

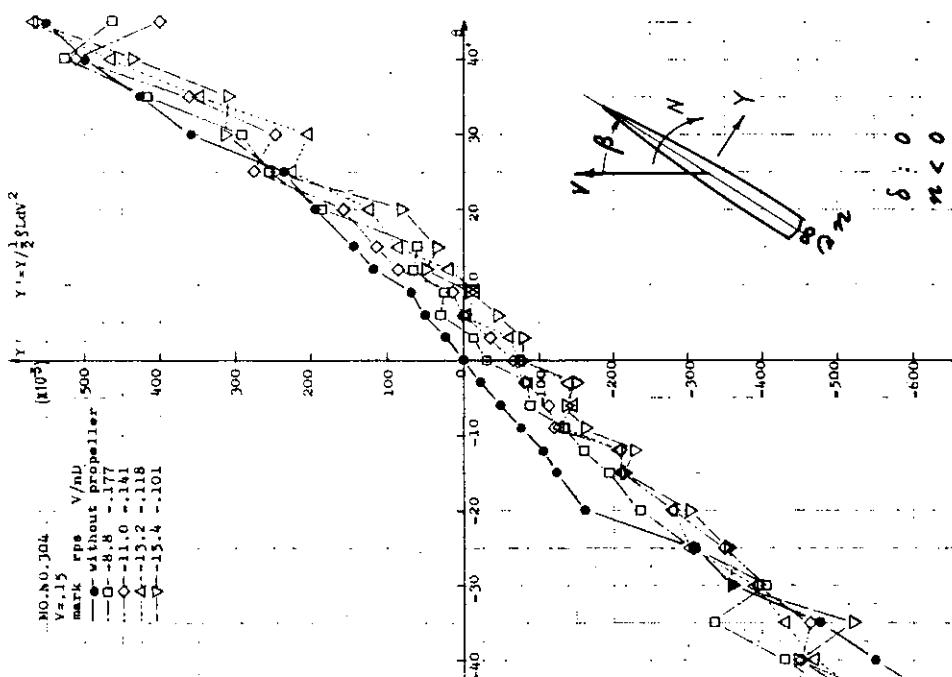


図 2.2.2.1 プロペラ逆転、船体斜航時の横抵抗
 $V = 0.15 \text{ m/s}$

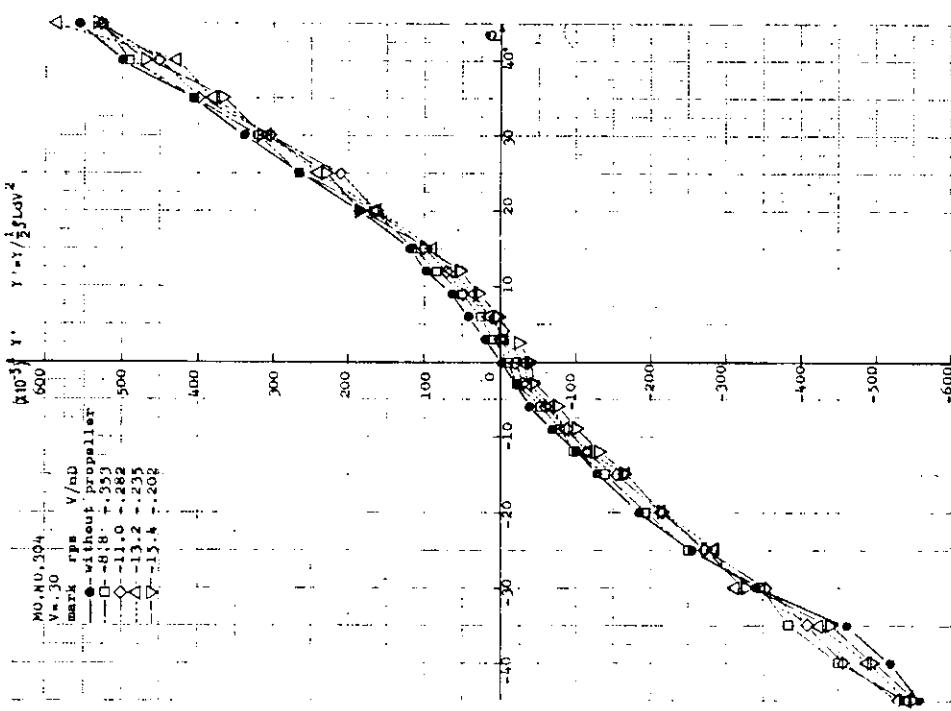


図 2.2.3 プロペラ逆転、船体斜航時の横抵抗
 $V = 0.30 \text{ m/s}$

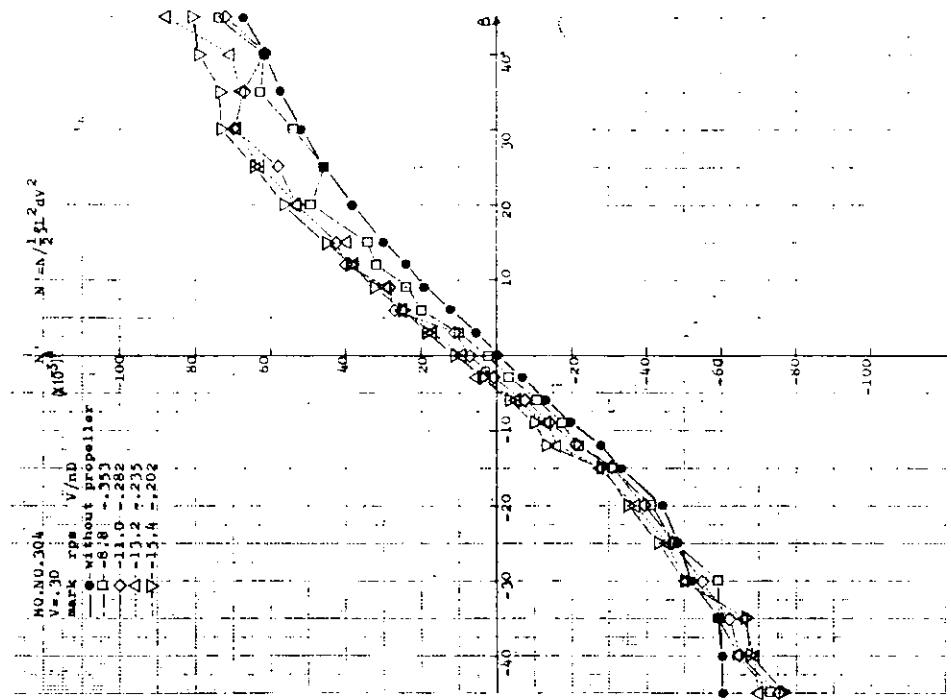


図 2.2.4 プロペラ逆転、船体斜航時の旋回モーメント
 $V = 0.30 \text{ m/s}$

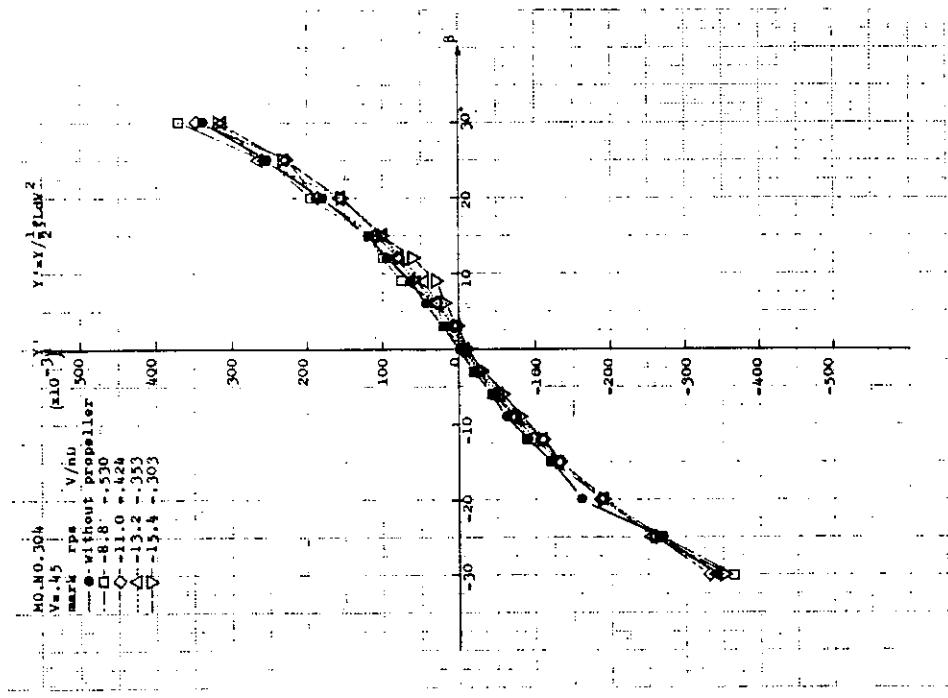


図 2.2.5 プロペラ逆転、船体斜航時の横抵抗
 $V = 0.45 \text{ m/s}$

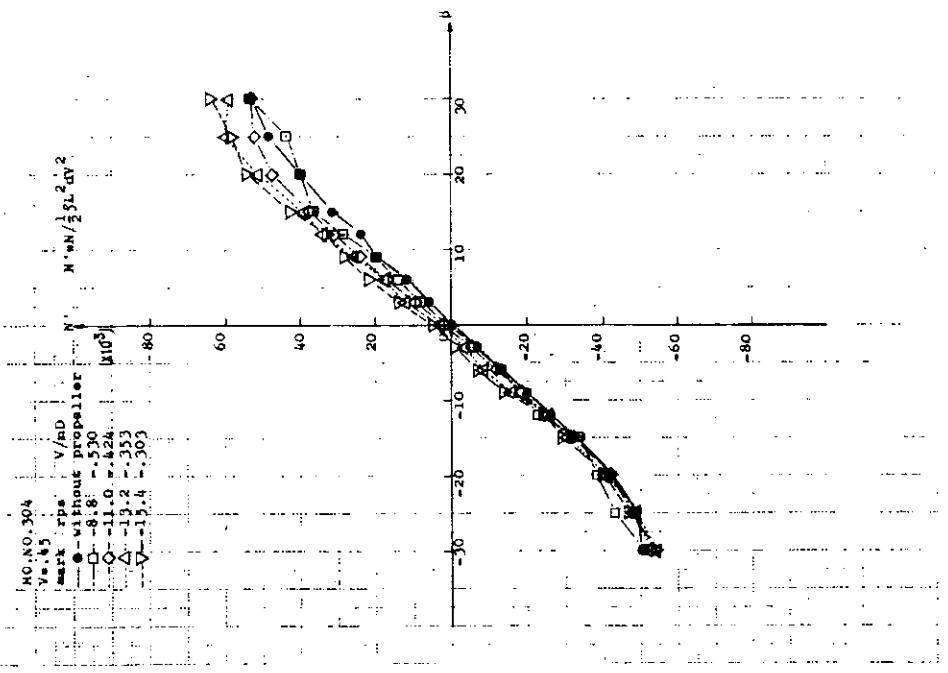


図 2.2.6 プロペラ逆転、船体斜航時の旋回モーメント
 $V = 0.45 \text{ m/s}$

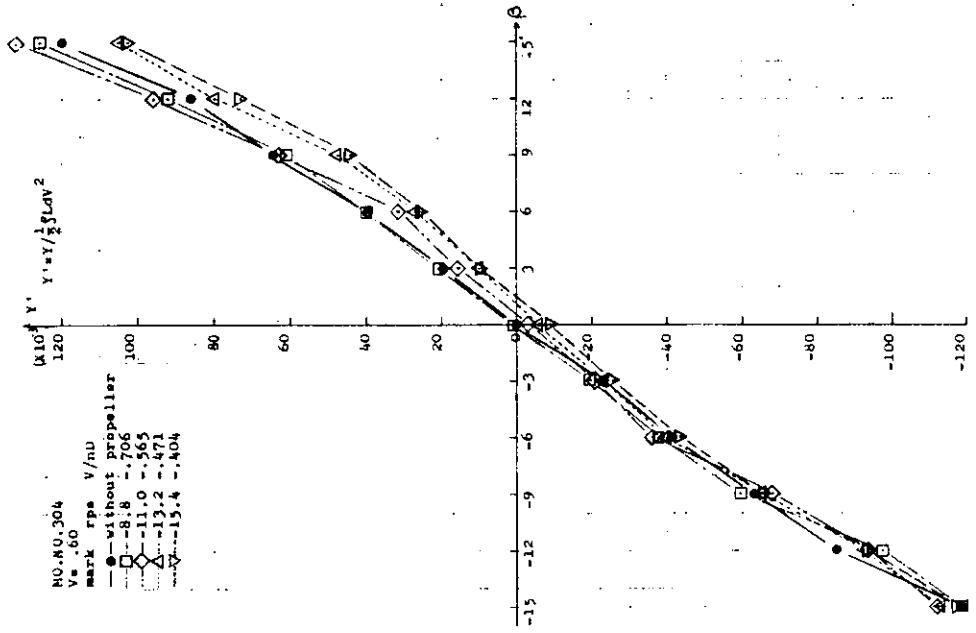


図 2.2.2.7 プロペラ逆転、船体斜航時の横抵抗
 $V = 0.60 \text{ m/s}$

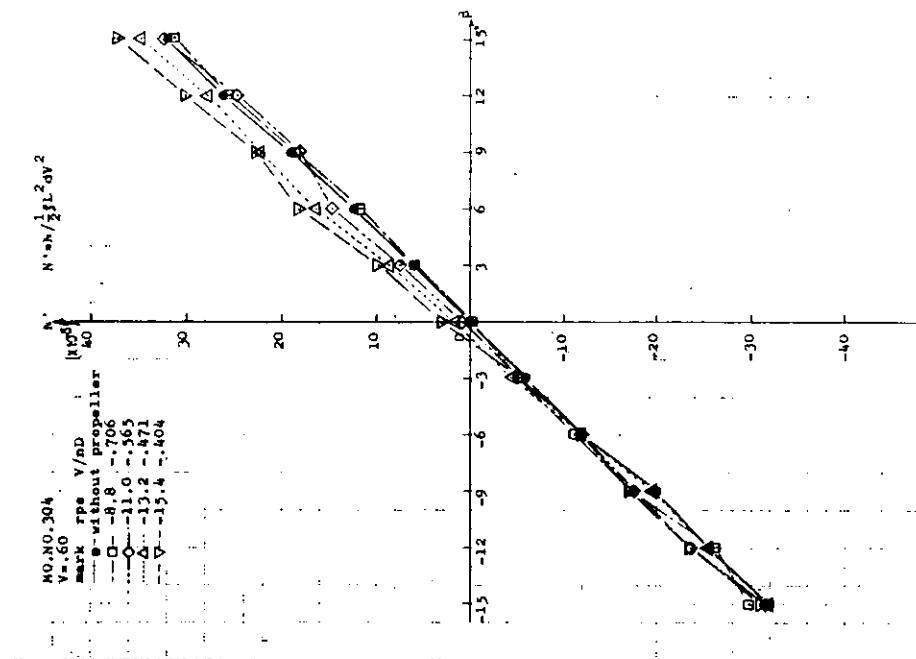


図 2.2.2.8 プロペラ逆転、船体斜航時の旋回モーメント
 $V = 0.60 \text{ m/s}$

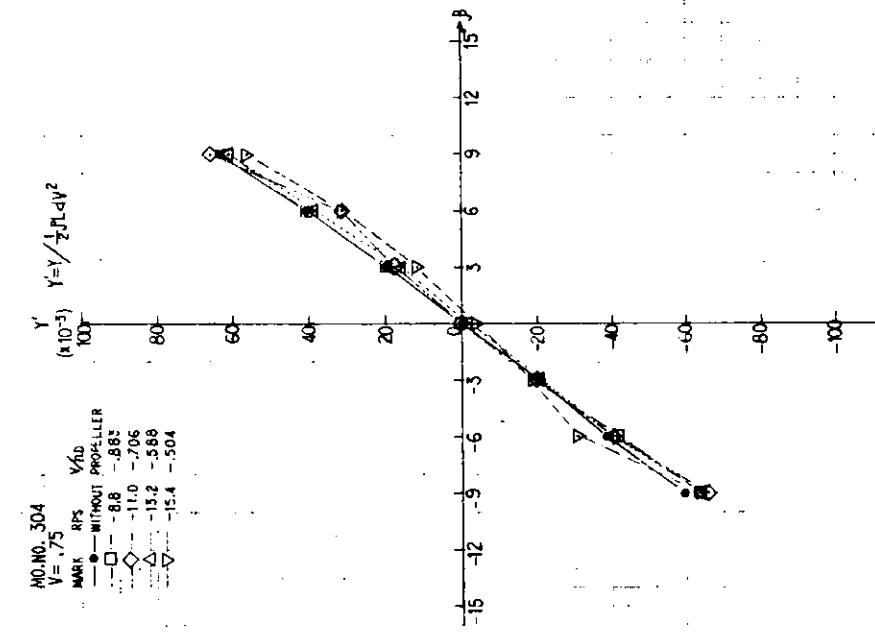


図 2.2.9 プロペラ逆転、船体斜航時の横抵抗
 $V = 0.75 \text{ m/s}$

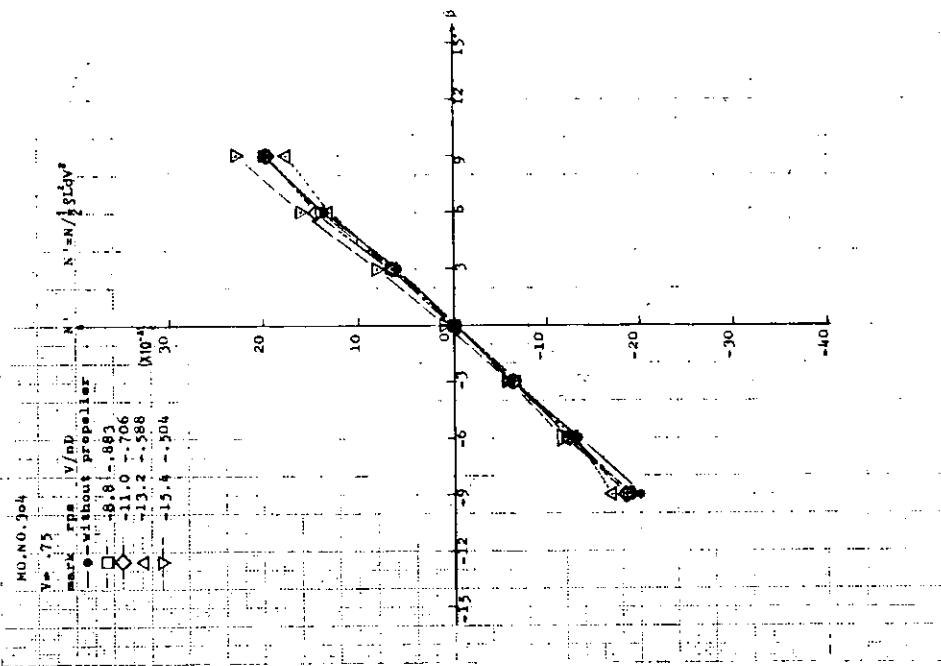


図 2.2.10 プロペラ逆転、船体斜航時の旋回モーメント
 $V = 0.75 \text{ m/s}$

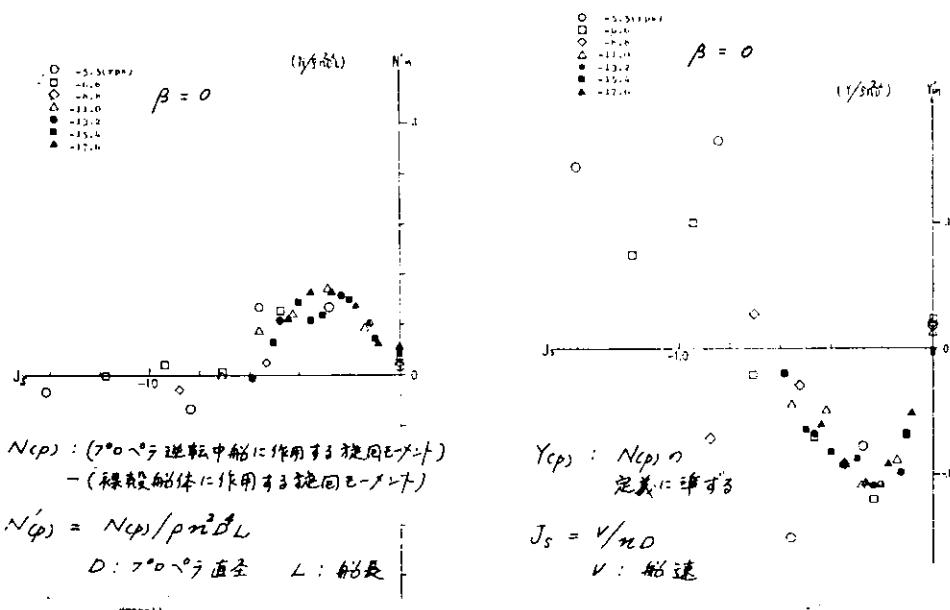


図 2.2.2.11 逆転プロペラが誘起する流体力, $\beta = 0$

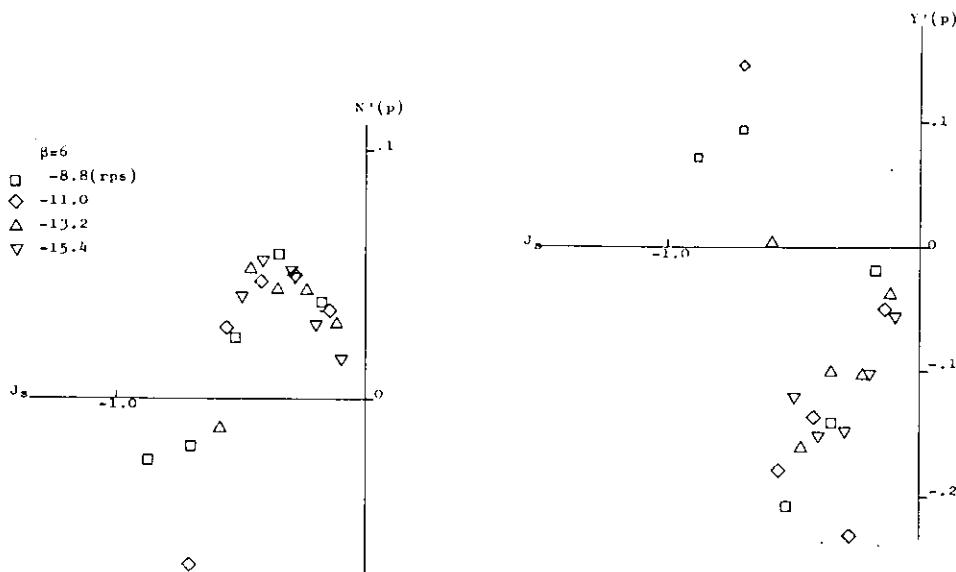


図 2.2.2.12 逆転プロペラが誘起する流体力, $\beta = 6^{\circ}$
(記号定義は図 2.2.11)

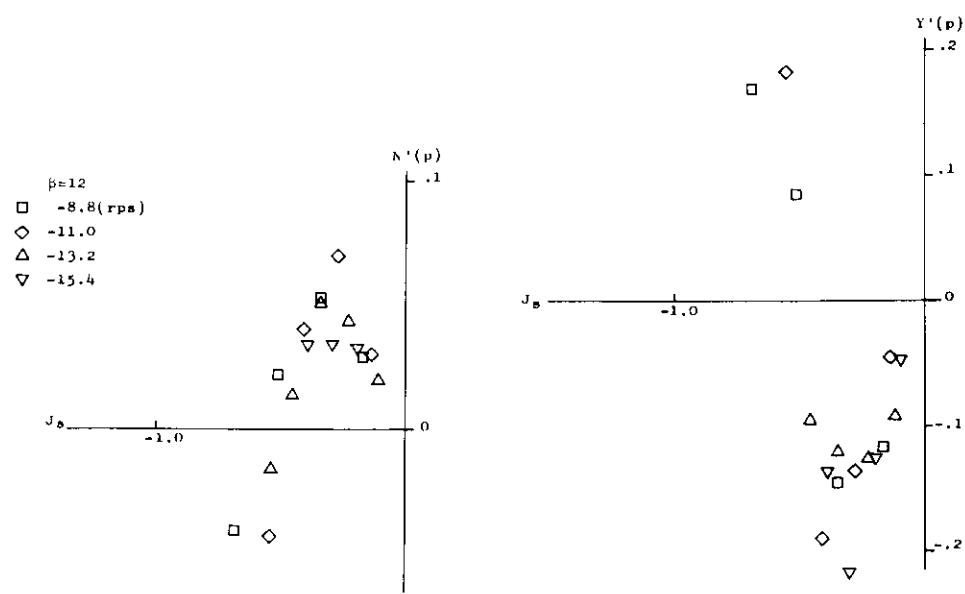


図 2.2.2.13 逆転プロペラが誘起する流体力, $\beta = 12^\circ$

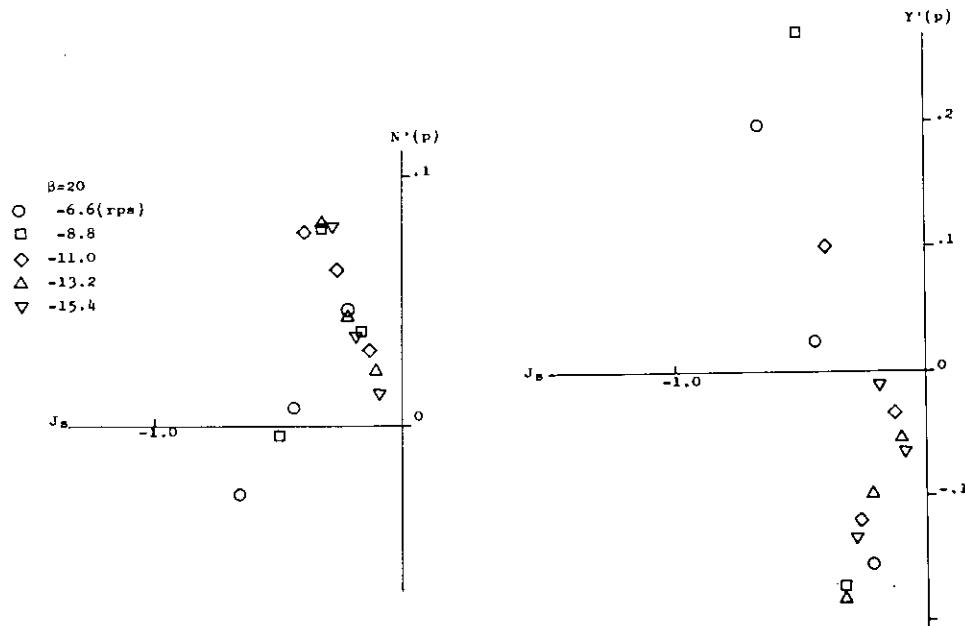


図 2.2.2.14 逆転プロペラが誘起する流体力, $\beta = 20^\circ$

(記号定義は図 2.2.2.11)

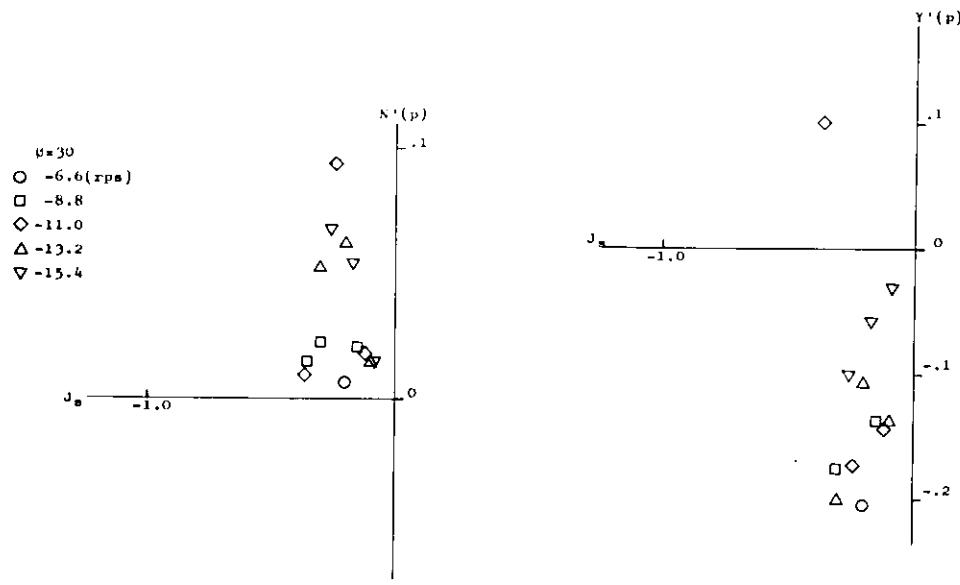


図 2.2.2.15 逆転プロペラが誘起する流体力, $\beta = 30^\circ$

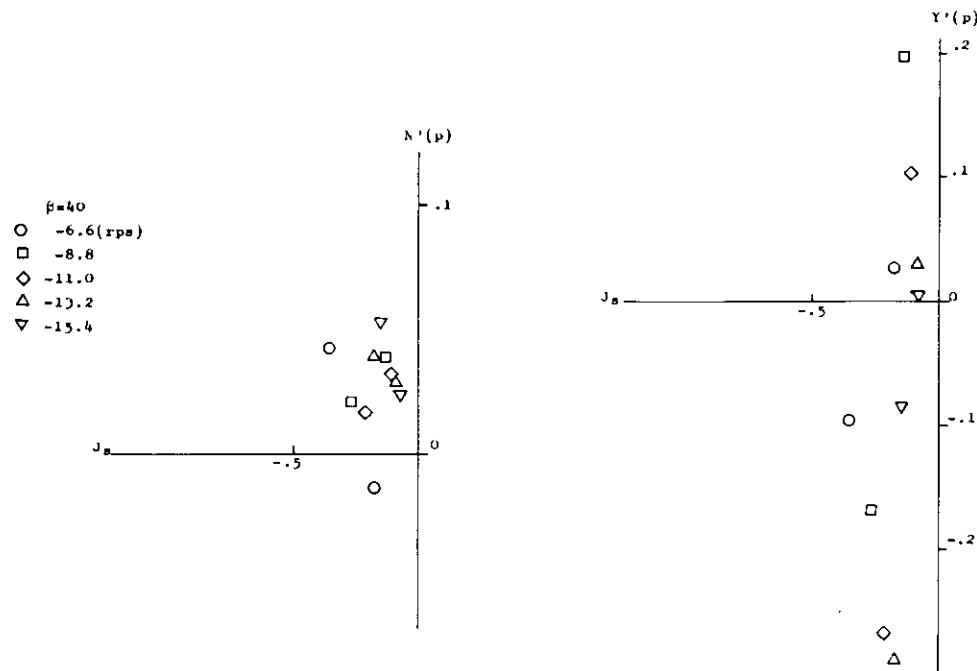


図 2.2.2.16 逆転プロペラが誘起する流体力, $\beta = 40^\circ$

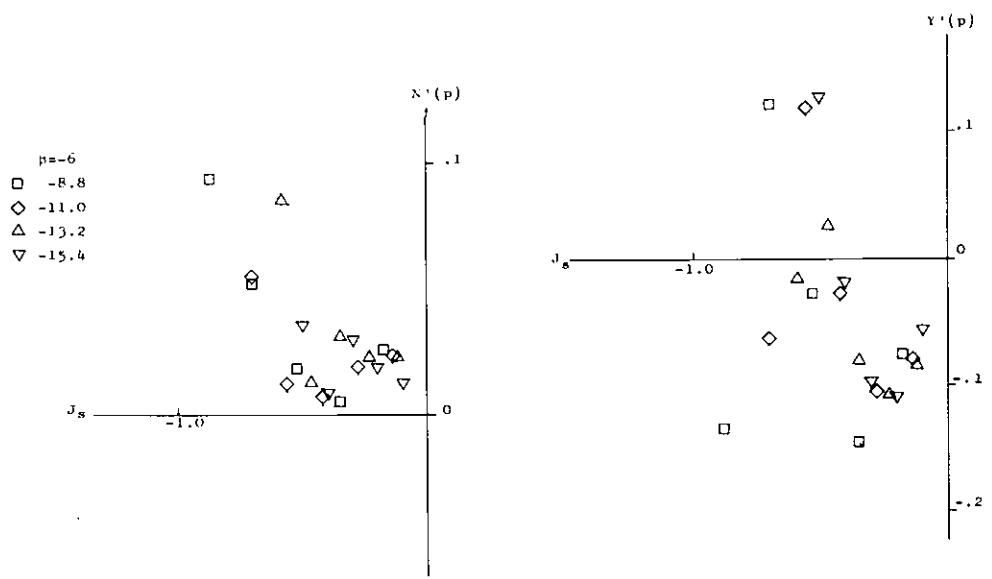


図 2.2.2.17 逆転プロペラが誘起する流体力, $\beta = -6^\circ$
(記号定義は図 2.2.2.11)

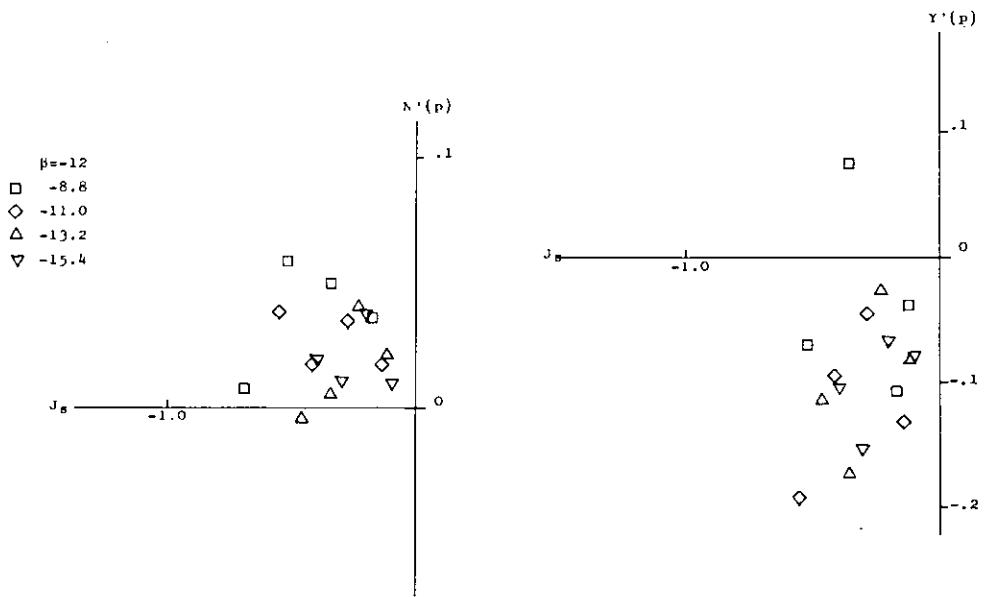


図 2.2.2.18 逆転プロペラが誘起する流体力, $\beta = -12^\circ$

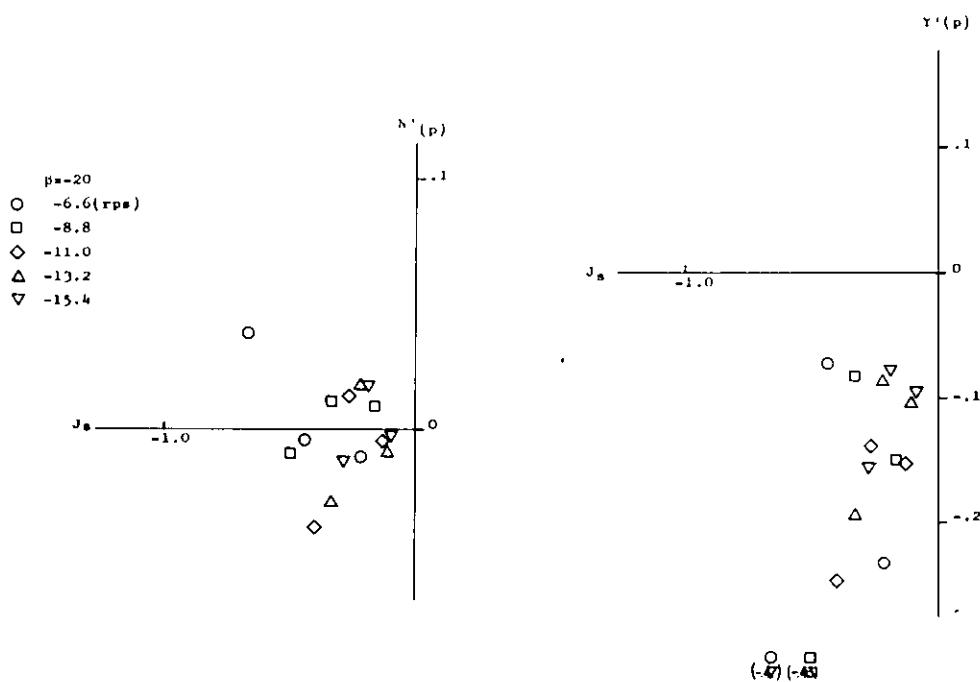


図2.2.2.19 逆転プロペラが誘起する流体力, $\beta = -20^\circ$
 (記号定義は図2.2.2.11)

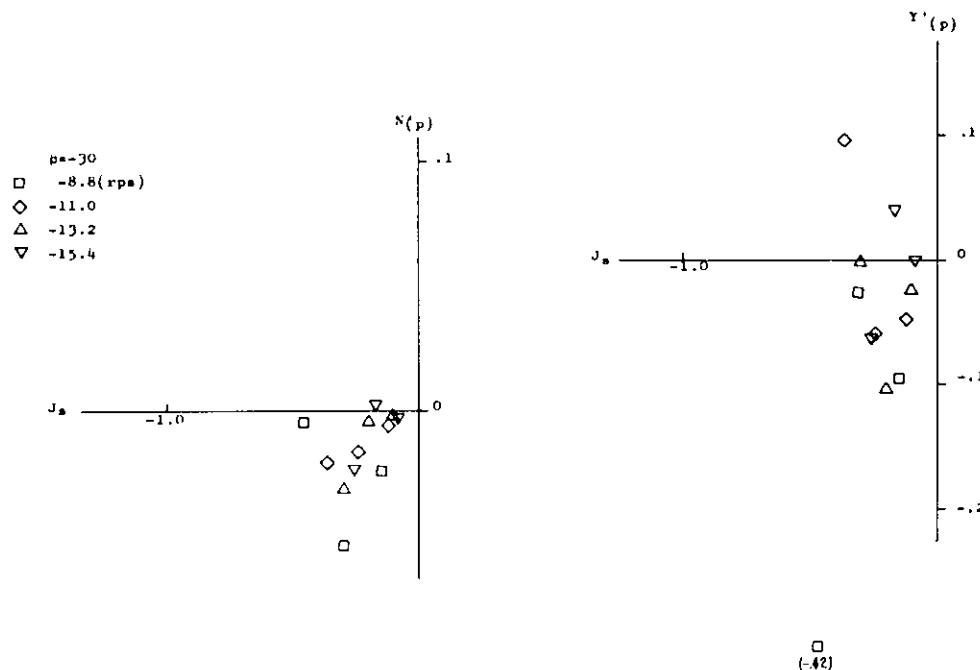


図2.2.2.20 逆転プロペラが誘起する流体力, $\beta = -30^\circ$

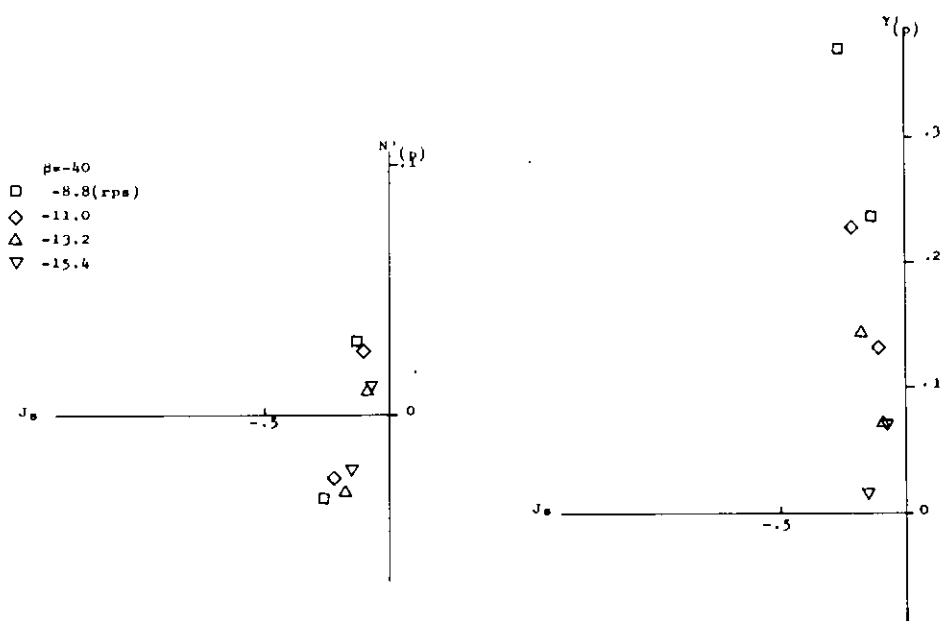


図 2.2.2.21 逆転プロペラが誘起する流体力, $\beta = -40^\circ$
 (記号定義は図 2.2.2.11)

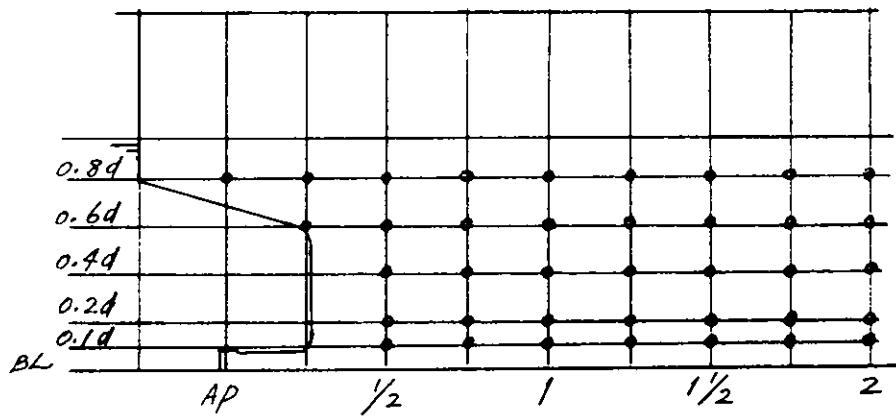


図 2.2.2.22 圧力測定孔配置

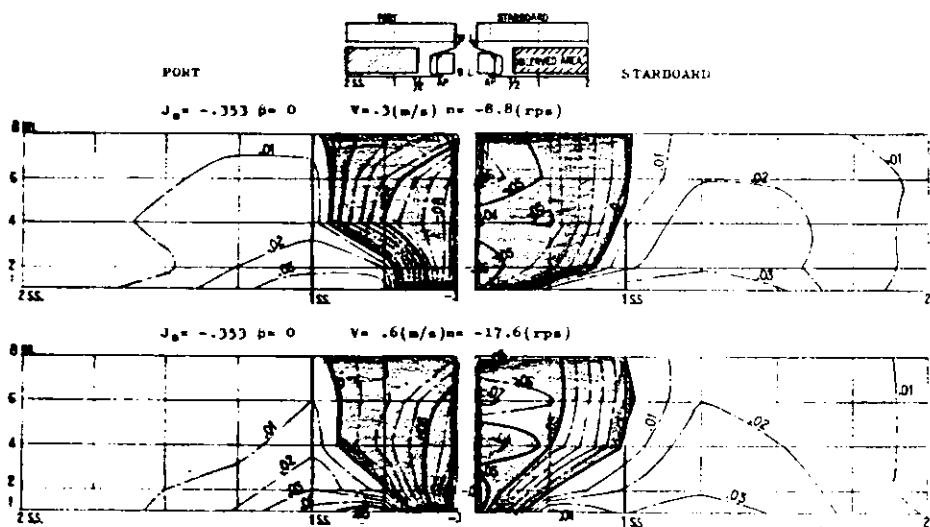


図 2.2.2.23 逆転プロペラの誘起する無次元圧力分布

$$P / \frac{\rho}{2} (nD)^2, \beta = 0, J_s \text{一定で } V \text{ と } n \text{ を変化}$$

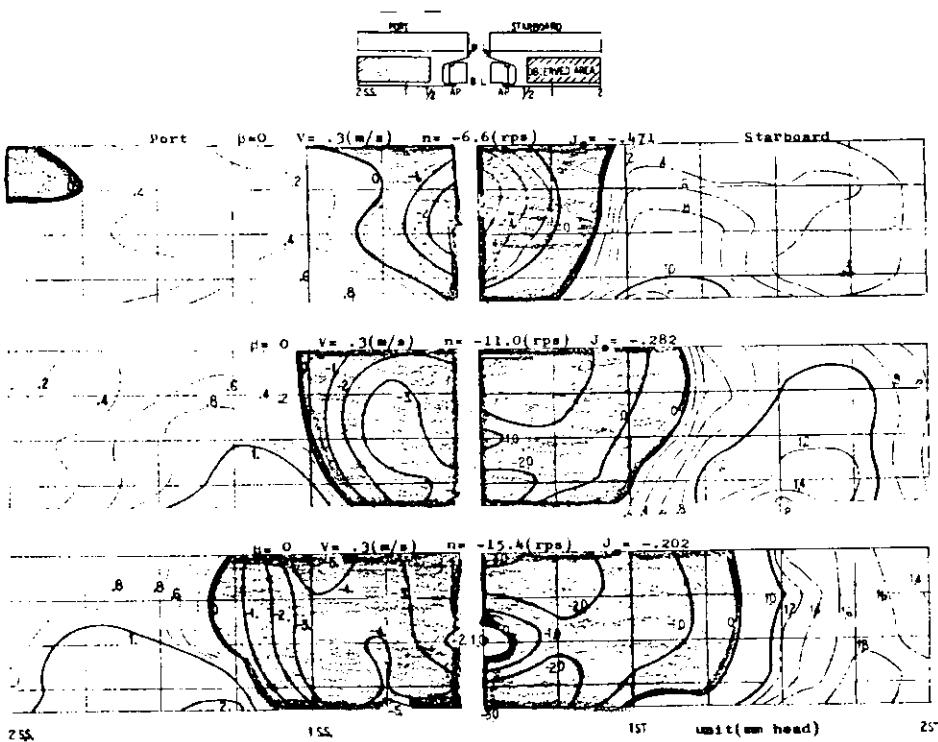


図 2.2.2.24 逆転プロペラの誘起する圧力分布

単位は \overline{mm} 水頭, $\beta = 0$, $V = 0.3 \text{ m/s}$ 一定で
 J_s を変化

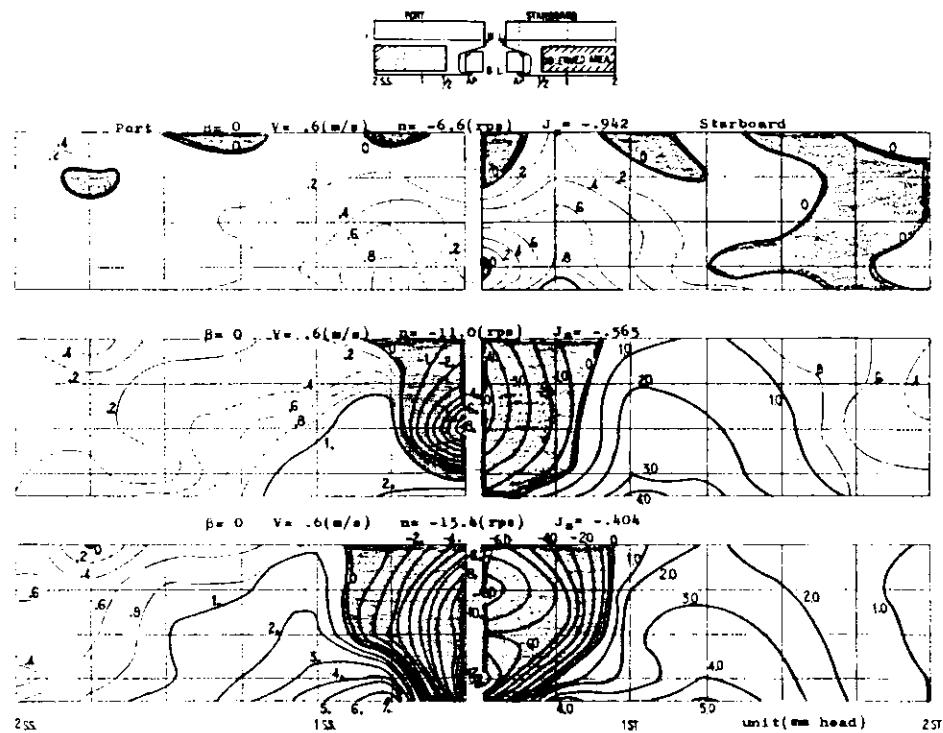


図 2.2.2.25 逆転プロペラの誘起する圧力分布

—mm水頭, $\beta = 0$, $V = 0.6 \text{ m/s}$ 一定で

J_s を変化

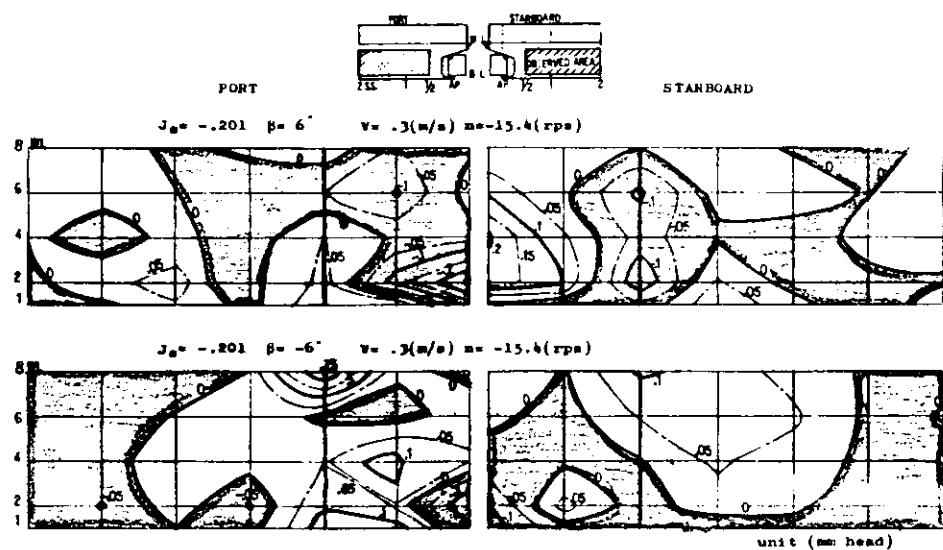


図 2.2.2.26 逆転プロペラの誘起する圧力分布

—mm水頭, $\beta = \pm 6^\circ$

2.2.3 プロペラ順転の範囲で加減速している船に働く流体力と操縦性

加速中あるいは減速中の操船を考えるには、速力変更の性能と方向制御の性能の両方を考えねばならない。その両性能を知る上で、加速あるいは減速中の船に作用する流体力の性質について調べることがまず必要であろう。広島大学工学部では、この為に系統的な拘束操縦性試験を実施した。本年度の実験は船が一定以上の速力で前進しており、プロペラは順転している状態について実施した。プロペラ逆転の状態については次年度に実験を予定している。ここでは、まず実施した拘束操縦性試験の概要について述べる。

続いて、これらの試験で計測した流体力の記述の仕方について検討する。加速中あるいは減速中には船の速力とプロペラ回転数とを種々に組合せた運動状態が生じる。こうした運動状態においては船の夫々の部分で、船速やプロペラ回転数の影響が異なる結果となるから、船に作用する流体力を夫々に分けて考えるのが妥当である。そこで、主に船速によって定まる主船体とプロペラ後流の影響を強く受ける舵に作用する流体力を別々に記述することを試みる。こうした流体力の記述法として、J T T C 第二部会の下に設けられた操縦運動の数学モデル検討グループ（略称MMG）の提案したモデル^{1),14),15),16)}があり、本稿ではこの提案に沿って加速、減速中の流体力の整理を試みている。

最後に、加速中あるいは減速中の方向制御性能、特に針路安定性に対するプロペラ荷重度の影響について述べる。

(1) Planar motion mechanismによる拘束操縦性試験

加減速しながら、旋回あるいは横流れしている船に作用している流体力を実験的に求める為には、実際にそのような運動を作ればよいわけだが、既存の拘束操縦性試験施設は一定船速時の流体力の調査を行うように作られている。また、横運動のみならず、前進速力の変化を同時に与えた試験から、夫々の運動によって生じた流体力を分離することは实际上難しい。そこで、加速、減速中の操縦性能に寄与する流体力を調べるには、次のような仮定を設けて試験するのが実際的であろう。

つまり、前進方向の加速度の横運動による流体力への影響が小さいとみなし、加減速中の横運動に寄与する流体力はその時々の船速と回転数を一定に保った操縦性試験によって得られると仮定するわけである。この仮定によって、加減速中の拘束操縦性試験は、加減速中に生じる前進速力とプロペラ回転数を適当に組合せた状態の船に、普通実施されている拘束操縦性試験を適用すればよいことになる。

このような仮定の下で加減速中の操縦性試験を行う際に生じる問題は、前進速力とプロペラ回転数を組合せた状態の数だけ試験が必要になることである。一つの状態について、普通、舵角試験、斜航試験、Pure yawing試験等々の試験が必要になるから、前進速力とプロペラ回転数を総て組合せた状態数の試験の実施は不可能に近い。そこで、何らかのパラメタでこの試験状態の整理が必要となる。

さて、直進を保ちつつ加減速する船に作用する縦方向の力については、みかけの前進率 ($J_s = V_s / nD$, V_s : 船速, n : プロペラ回転数, D : プロペラ直径) によってうまく整理できる^{5),10)}ことが知られている。この性質が横運動に関連する流体力についてもそのまま当てはまるならば大変便利である。そこで今回の試験では船速を $F.no.=0.2, 0.15$ とし、それにプロペラ回転数を適当に組合せ、船速は異なるがみかけの前進率は同じとなるような試験状態を選んだ。主に試験を実施した船速、プロペラ回転数を表2.2.3.1に示す。

試験によって得られた流体力の整理にあたってはMMGモデルに従って、船体、プロペラ、舵の単独性能を基礎とし、それに相互干渉を考慮するという方法を探るから、船体、プロペラの単独試験を実施した。また、流体力の記述において、主船体(プロペラを含む)と舵によって誘起される流体力を別々に扱う為に、船全体に作用する縦横方向の力およびまわりのモーメント(X, Y, N)の他に、プロペラスラストおよび舵に作

用する二力（舵トルクは計測していない）を同時に計測している。

供試船型は操縦性研究において巾広い実績をもつ Series 60 ($L/B = 7.0$, $C_b = 0.70$) である。このような基礎的な研究においてはできるだけ、多くの実績をもつ標準的な船型が望ましいこと、および S R175 部会の研究目的の一つが中速貨物船々型であることを考慮して選択している。供試船の主要目および線図を表 2.2.3.2 および図 2.2.3.1 に示す。

実施した試験は、広島大学工学部の P M M 試験で標準的に行っている次のものである。

- 斜航試験
- 舵角試験
- Pure swaying 試験
- Pure yawing 試験
- Yawing with constant drift angle 試験

もちろん、これらの試験以外にも必要とされる試験は適宜行っている。

(2) 船に作用する縦方向の力

操縦運動中、船に作用する縦方向の力については、その量が比較的小さく、計測が難しいため今まで極めてデータが乏しい。ここでは、操縦運動中の船に作用する縦方向の力は、MMG の提案に従って次式で表現できると考える。

$$\begin{aligned} X' &= X'_u u' + (X'_{vr} - Y'_{v'}) v' r' + X'_{vv} v'^2 + X'_{rr} r'^2 \\ &\quad + (1-t) T' + X'(u) \\ &\quad + X'_{R0} - F_N \sin \delta \end{aligned}$$

この記述式は船に作用する縦方向の力を、主船体、プロペラ、舵の夫々に作用する力と主船体およびプロペラ間の相互干渉力（スラスト減少率）とから成ると考えている。

まず、主船体に作用している力（正確にはそれからプロペラの干渉力を差し引いた力）については、主船体のみの拘束試験から求める。抵抗試験は慣例に従い、舵をつけた状態で実施した。これは P M M の X ゲージをそのまま利用して計測したもので、結果を図 2.2.3.2 に示す。船速が 0.5 m/s 以下の場合には検力計の分解能、乱流促進等に多少問題があるが、一応の精度を得ている。

操縦運動によって、主船体に作用する力は主船体のみの斜航試験、Pure yawing, Pure swaying, Yawing with constant drift angle 試験から求めた。この結果を表 2.2.3.3, 表 2.2.3.4 に示す。操縦運動によって生じる抵抗変化の主力はいわゆる $v' r'$ の項であり、その係数は殆んど $m - Y'_{v'} (= m + m_y')$ であることがわかる。Pure swaying 試験で得られる $Y'_{v'}$ の値を用いて X'_{vr} を求めると、 $F_n = 0.2$ で $X'_{vr} = -1.5 \times 10^{-3}$, $F_n = 0.15$ で $X'_{vr} = -2.0 \times 10^{-3}$ であり、 $Y'_{v'}$ の夫々 13%, 17% 程度である。

ところで、操縦運動による抵抗増加を $(m + m_y') v' r'$ の項のみで表現する方法がしばしば用いられる。 m_y' に較べて X'_{vr} , X'_{rr} , X'_{vv} が十分に小さいことから考えると、これは第一近似としては許容される簡略化である。しかし、操縦運動中、 $v' = 0.5 r'$ とみつもって、 X'_{vr} , X'_{vv} , X'_{rr} の項の寄与を見積ると m_y' の 35% 程度になるから、この場合には m_y' の代りに $0.65 m_y'$ を用いる必要がある。

プロペラが稼動している時に、操縦運動による抵抗増加を表わす上記諸項がそのまでよいか否かには問題が残るかも知れない。しかし、今回用いた MMG モデルによれば、このプロペラの影響は $(1-t)$ が横運動によって変化する形で表現されることになるから、上記諸項は主船体のみの値を採用する。

縦方向の力を考へる際に大きな影響を有するのは、スラスト変化の推定である。このスラストの推定を行う際にプロペラ単独性能を用いる。これを求める単独試験はVとnを正負に組合せて実施しており、結果を図2.2.3.3に示す。本年度はV, n ≥ 0 の範囲の運動を対象にしているので第一象限の特性を次式で近似する。

$$K_T = 0.463 - 0.251J - 0.124J^2$$

斜航試験中のスラストおよびスラスト一致法によって求めた(1-w)を図2.2.3.4, 図2.2.3.5に示す。この試験中、実際にはプロペラは斜流の中にあり、単独試験と状態を異にする。しかし、軸方向の流速の推定に対して、斜流の影響は比較的少い¹⁷⁾ので、単独試験成績をそのまま使用した。斜航中の(1-w)は相当に複雑な変化をしており、左右の非対称性も強いようである。斜航角が増すに従って(1-w)は単調に増すのではなく、3~4°位まで一度減じた後次第に増すという特徴がみられ、保針操舵中のスラストの推定等に注意を要する。

- (1-w)に対する船速、プロペラ回転数の影響は本船型に関する限り、比較的に小さいようである。しかし、直進中の(1-w)がプロペラ荷重によって相当大巾に変化するという肥大船の例もあるから、この結果を直ちに一般化することはできない。
- 斜航中の推力減少率(1-t)を図2.2.3.6に示す。みかけの前進率J_sが大きくなると、計測する力そのものが小さくなるのでデータのまとまりが悪くなっている。しかし、この結果から、(1-t)は船速とプロペラ回転数によって変化するが、J_sで整理できることがわかる。また斜航角が(1-t)に及ぼす影響は予想通り小さい。

- さて、操舵をすると舵に作用する直圧力の縦方向成分が抵抗として働く。この直圧力の推定法については後に述べるとして、ここでは船体やプロペラに誘起される力に対する操舵の影響について確認しておきたい。図2.2.3.7, 図2.2.3.8は直進中の船に操舵して得られる縦方向の力から(1-w), (1-t)を求めた結果を与える。(1-w)については舵角の影響は殆んどみられず、操舵によるスラスト変化は常用舵角の範囲では無視できそうである。(1-t)については多少、操舵の影響がみられるがその程度は小さい。
- PMMでは旋回による流体力は周期運動を与える試験で求める。このような試験から旋回による自航要素の変化を求めるには時々刻々と変化する船体、プロペラ、舵による縦方向の流体力を計測し、それから算定することになる。しかし、こうした計測あるいは解析の精度を保つことは必ずしも容易ではない。そこで旋回中の自航要素については機を得てCMT等で詳細に検討することにし、今回は詳しい調査を省略した。

(3) 主船体に作用する横方向の力

ここで主船体に作用する流体力と表現したのは、正確に表現すると船全体に作用する流体力から、舵の存在によって誘起された流体力を差し引いたものという意味である。舵の存在によって誘起される流体力は舵自身に働いていると同時に、無視できない量が船体にも作用している。舵の存在によって主船体に作用する流体力は、続く舵の項で取り扱う。

船体に作用する横方向の力とまわりのモーメントY', N'はMMGモデルでは次式で表現する。

$$\begin{aligned} \frac{Y}{\frac{1}{2}\rho L^2 U^2} &= Y'_v V' + Y'_r R' + Y_v V + (Y'_r + X_u U') R' \\ &\quad + \int_{-L_2}^{L_2} (V' + x R') | V' + x R' + (C_0 + C_1 x + C_2 x^2) dx \\ \frac{N}{\frac{1}{2}\rho L^3 U^2} &= N'_v V' + N'_r R' + N_v V + N_r R' \\ &\quad + \int_{-L_2}^{L_2} (V' + x R') | V' + x R' + x (C_0 + C_1 x + C_2 x^2) dx \end{aligned}$$

まず、プロペラと舵を取り外した主船体のみの斜航試験結果を図 2.2.3.9 に示す。図には $F_{no.} = 0.20$ と 0.15 の結果が示されているが、 Y' , N' とも微少斜航角における特性はよく似ている。しかし斜航角が大きくなると、 N' の非線型項にやゝ差があるようである。

斜航試験時には、 $\dot{V}' = \dot{r}' = r' = 0$ であるから、上式は次のようになる。

$$Y' = Y_v V' + (C_0 + \frac{C_2}{12}) |V'| V'$$

$$N' = N_v V' + \frac{C_1}{12} |V'| V'$$

最少自乗法によって、 Y'_v , N'_v , C_1 , C_2 , C_3 を求めた結果を表 2.2.3.3 に示す。 Y'_v , N'_v には船速の影響が小さいことがわかる。しかし、非線型項を表わす C_0 , C_1 , C_2 の夫々の値のまとまりは悪い。しかし、非線型性の強い Y' の非線型項 $C_0 + C_2/12$ は比較的によくまとまっている。また、 N' についてはもともと非線型性が小さく、しかも船速やプロペラ荷重によって微妙に変化する為にまとまりが悪い。

船体にプロペラと舵を取りつけた場合の斜航試験、「Pure swaying」試験の結果も表 2.2.3.3 に示す。ここに示す微係数は船全体に作用している Y' , N' から、舵が存在することによって誘起された力を舵直圧力と後述する a_H , x_H を用いて推定し、差し引いて求めたものである。 N' の非線型項 $C_1/12$ を除くと「Pure swaying」試験と斜航試験の結果はおよそ一致している。

他方、Yawing による流体力の微係数を表 2.2.3.4 に示す。この場合も、Swaying の時と同様に線型微係数はよくまとまっているが、 C_0 , C_1 , C_2 の夫々のまとまりは良くない。しかし、 $|r'| r'$ の項の係数である $\frac{1}{32}(C_0 + C_2/6)$ の値はうまくまとまっている。

広島大学のPMMでは Yawing と Swaying の連成した試験は斜航角を一定に保ちながら、正弦函数の形で Yawing を与える Yawing with constant drift angle test を常用している。Yawing, Swaying のみの微係数は夫々、単独の試験で求めた値を使用し、この試験からは連成項のみを決める。 C_0 , C_1 , C_2 の形では整理が難しいので、別の形で表現したものを表 2.2.3.4 に示す。

以上によって求まった流力微係数のうちの主要な項をみかけの前進率 J_s によって整理したものを図 2.2.3.10, 図 2.2.3.11 に示す。多少のばらつきはあるが、船速、プロペラ回転数が夫々異なる試験結果が J_s によってうまく整理できることがわかる。個々の微係数では J_s の影響の程度には差があるものの、いずれも主船体のみの試験結果にプロペラの影響をつけ加える形で微係数の表現が可能である。

(4) 舵によって誘起される力

MMG モデルでは舵に作用する力（直圧力）を舵に対する有効流入速度と有効流入角に舵単独性能を組合せる形で表現している。従って、これらの夫々を求めなければならない。

まず、舵単独性能については多くの推定式があり、ここでは日本で広く用いられている藤井の式を用いて推定した。

$$\text{直圧力係数 } C_N = \frac{6.13\lambda}{\lambda + 2.25} \sin \alpha_R = \frac{6.13\lambda}{\lambda + 2.25} \alpha_R$$

この単独性能の考え方には、Whicker の式のよう、鏡像モデルを用いた実験から導びかれたものがあり、舵の上部に存在する船体の影響の取り扱いが異なっている。この Whicker の式は本供試船の舵 ($\lambda = 2.17$) に対して藤井式より約 30% 大きい直圧力を与える。舵単独性能の考え方にもちがったものがあるから注意を要する。結論的には本船程度の舵上面の間隙があれば、鏡像の概念は使用しない方がよいようである。

続いて、舵に対する有効流入速度と角度について検討する。プロペラに対する有効流入速度については、す

で述べた $(1 - w)$ で与えられる。従って、舵に対する有効流入速度を推定するにはプロペラの增速効果を見積らねばならない。MMG モデルはこれを次式で表現している。

$$U_R/U_P = \sqrt{1 + \kappa S^{1.5}} \quad (a)$$

$$= \sqrt{(1 - S)^{-\kappa}} \quad (b)$$

$$= \sqrt{1 + \frac{8}{\pi} \frac{K_T}{J^2}} \quad (c)$$

$$= \sqrt{1 + \kappa \frac{8}{\pi} \frac{K_T}{J^2}} \quad (d)$$

舵に流入する速度を実験的に定めるには、プロペラの時に使用したスラスト一致法と同様な考えに従い、計測した舵直圧力から舵単独性能を利用することができます。こうした舵直圧力一致法によって求めた直進中の舵流入速度を図 2.2.3.12 に示す。この流入速度もみかけの前進率 J_S でうまく整理できるようである。この算定に用いた舵の単独特性の傾斜 $f_\alpha(\lambda) = 2.62$ については後述する。

図 2.2.3.13(a) は藤井の舵単独性能算定式で求めたプロペラの增速比を示すが、この関係をどの式がよく表現できるであろうか。それには J_S の如何にかかわらず、同じ κ の値で両者の関係が説明できることを一つの目安にしろるであろう。 U_P と U_R から κ の値を計算してみたものが図 2.2.3.14 である。これによると運動量理論によって導びかれた(c)あるいは(d)式がよい結果を与えている。この(d)式はプロペラ径と舵の高さが異なる場合にも使用しやすいのでここではこの式を用いることにする。

この(d)式を用いた場合は $\kappa = 0.402$ であり、図 2.2.3.13(a)の実線がこの結果を示す。一応のよい近似をえており、プロペラと舵の単独性能を用いて夫々に対する流入速度を求め、この比から κ を決める方法が使用できることがわかる。

しかし、今回のようにいくつかの J_S に対する直圧力を計測している場合には、舵の単独特性の傾斜 $f_\alpha(\lambda)$ と κ の両方をプロペラ流入速度と舵直圧力から同時に決めることができる。この方法で $f_\alpha(\lambda)$ と κ を求めると夫々次の値をとる。

$$f_\alpha(\lambda) = 2.62 \quad \kappa = 0.493$$

この結果は図 2.2.3.13(b) に示すように J_S 全般に対してよい近似を与える。この $f_\alpha(\lambda)$ は藤井式による値 $f_\alpha(\lambda) = 3.01$ よりもさらに小さい値をとれており、舵の単独特性としては船体と舵の間のクリアランスが余程小さい場合には鏡像モデルの考えは使わない方がよさそうである。

斜航中の舵有効流入速度の計測結果を図 2.2.3.15 に示す。図中の破線は $f_\alpha(\lambda) = 2.62$, $\kappa = 0.493$ と斜航中の伴流係数を用いた推定値を示す。全般によい近似をとっている。なお、この推定に用いた伴流係数は微少斜航角における複雑な変動や J_S による多少の伴流変化を無視して次式で近似している。

$$(1 - w) = (1 - w_0) + \tau (V' + C_p |V'| V')^2$$

$$\text{ただし } 1 - w_0 = 0.68 \quad (\text{直進中の平均的な値})$$

$$\tau = 4.5 \quad C_p = -0.86 \quad V' > 0$$

$$\tau = 1.2 \quad C_p = -0.56 \quad V' < 0$$

次に舵に対する有効流入角について検討する。斜航中の船に取りつけられた舵直圧力が零になる舵角をその斜航角における舵位置での有効流入角と考える。図 2.2.3.16 は斜航中の有効流入角の計測値を示す。よく知られる通り、この有効流入角については左右の非対称性が大きく、相当に複雑な変化をしている。

この有効流入角について整理する為に、直進中の流入角と操縦運動によって生じる流入角に分けて考える。直進中の流入角を図 2.2.3.17 に示すが、 J_s によっておよそ直線的に変化している。操縦運動によって生じる流入角の変化は大変複雑で、簡単なモデル化は容易でない。ここでの主目的はプロペラの荷重がこの流入角に及ぼす影響を調べることであるのでプロペラの機能について考えると、それは第一義的には軸方向の流速を増すが横方向の流速には影響しないとみなしうる。そこで舵に対する横方向の流入速度を求めてみたものが図 2.2.3.18 である。同図の縦軸は舵に対する横方向の流速を幾何学的な横方向の速度で割ったものであるから、いわゆる整流効果係数 γ である。この γ の変化を簡単に特徴づけると、 β が正の場合にはみかけの前進率の影響が小さく、 β が負になるとそれに大きく影響されていると言えよう。そこで簡単に $\beta > 0$ では J_s によらず γ は一定とし、 $\beta < 0$ の場合にのみ、 γ を J_s によって定まると考えることにする。この考えに基づいて斜航中の有効流入角を近似すると、誤差は僅かですむので、とりあえず、今回はこのように取り扱うこととした。しかし、この有効流入角は船型によって大きく変化するのみならず、旋回の影響も極めて複雑であることが知られているので、最終的なモデル化には今後のデータの蓄積が必要である。

さて、以上の検討を通じて、舵に作用する直圧力についてはおよそわかった。残る問題は舵が主船体に及ぼす影響についてである。鳥野は舵まわりの循環が主船体に影響し、無視できない横方向の力を生じることを指摘している。¹⁹⁾ この舵の効果を MMG モデルでは次式で表現している。

$$Y' = (1 + a_H) F_N' \sin \delta$$

$$N' = (x_R + x_H a_H) F_N' \sin \delta$$

この a_H , x_H を求めたものが図 2.2.3.19 である。この舵に作用する力と船体に作用する力との比率 a_H 、あるいは船体に作用する力の着力点 x_H は舵角を変えても殆んど一定値を取るようである。しかし、みかけの前進率を変えるとそれに応じて a_H , x_H ともに多少変化する。従って、少くともこの a_H , x_H は J_s の関数と考えねばならない。

(5) 加減速中の操縦性

以上の検討を通じて、プロペラ順転の範囲であるが加速度あるいは減速中に作用する流体力についておよその知識がえられたといえる。この流体力は船体、プロペラおよび舵の単独性能を基礎にし、それらの間の相互干渉を考慮するという方法で記述できそうである。この際、みかけの前進率 J_s というパラメタを導入することによって、船速とプロペラ回転数の組合せが大巾に変化した場合の流体力もうまく整理できる。こうして、少くともこの供試船については加速時あるいは減速時の操縦運動方程式を作ることができる。この運動方程式を解いて得られる船の運動と、自航状態のそれを比較することによって、本稿で述べた流体力の取り扱いの方の妥当性を調べよう。

現在迄に、操縦運動があまり大きくなれない範囲では本稿で述べた流体力を用いて自航中の船の運動をうまく推定できることがわかっている。運動が大きくなった場合、Yawing の影響に関する更に詳しい調査が必要であり、これらを含めて、ここで述べた加減速中の操縦運動モデルの有効性については後日報告する。

そこで、本稿では加減速中の針路安定性に限って述べる。針路安定性について考えるには、よく知られているように針路安定性判別項を調べればよいが、この判定は結局のところ Yawing による減衰力の着力点と Swaying によるそれとの前後位置を比較することになる。

図 2.2.3.10, 図 2.2.3.11 では Yawing と Swaying による流体力を表わす微係数が J_s によってどのように変化するかが示されている。個々の微係数をみると限りでは J_s によるその変化は必ずしも大きくなないと見える。しかし安定判別を行う時はその組合せで考えねばならない。図 2.2.3.20 は Yawing と Swaying による

減衰力の着力点およびその前後位置の関係を示す。もちろん、この着力点位置の算定においては舵による流体力も含めて船全体に作用している流体力を用いている。

この結果によると、個々の微係数の変化は小さいものの、夫々が針路安定性を変える方向に変わっているのがわかる。この結果、減速中には針路安定性が悪くなり、加速中にはその逆になる。 $J_s = 0.904$ が本船の $F_n = 0.2$ の自航点であるが、この状態では十分に針路安定であるのに $J_s > 1.1$ 以上では不安定になっている。

ただ、この安定判別において注意すべきこととして、線型微係数の求め方がある。本例は非線型項をCross-flow dragの考えに基づいて r^2, V^2 の形で表現しているが、これを3次の項にすると Curve fitting の問題として線型項自身が多少変わってくる。そこで従来からよく用いられていた3次の非線型項を用いた Curve fitting から求めた線型微係数による安定判別も同時に示しておいた。この場合には針路不安定にはならないが、相当に大きな安定性の変化があることは同様である。

この線型微係数の変化を与えているのは主船体に作用する力の変化なのか、それとも舵が存在することによって生じる流体力の変化なのかを調べたものを図 2.2.3.21 に示す。この結果によると、プロペラの荷重が主船体に直接効いてそれに働く力（含プロペラ）を変える量 Y_p （主船体のみの試験結果との比で示す）は、舵の寄与している力の変化量 Y_R よりも大きいことがわかる。同図中には C. C. Glansdorp²⁰⁾ らの示した肥大タンカーの例を示すが、この例でも船体に作用する力の変化が無視できないことを示している。ただし、Glansdorp らの結果は舵を取り外した状態でプロペラの荷重を変えて試験し、求めたものであるが、ここでは舵つきの実験結果から舵の寄与分を差引いて求めている。

(6) 結論

加速中あるいは減速中の操縦性について、拘束操縦性試験（PMM）によって調査し、今日までに得られた主な結論は次の通りである。

- (i) 加減速中の船に作用する流体力を船体、プロペラそして舵の単独性能を基礎にし、それに相互干渉を考慮するという形で記述することは十分に可能である。
- (ii) この相互干渉の表現において、みかけの前進率 ($J_s = V_s / n_D$) というパラメタを導入することによって、船速とプロペラ回転数が種々に組合せられた状態における流体力をうまく整理できる。
- (iii) 加減速中の操縦性については、みかけの前進率によって針路安定性が相当大巾に変化する。減速中には一定速力航行時と較べて針路不安定の傾向をもつ。

今後の問題としては、旋回によって生じるスラストあるいは舵直圧力の変化について同様な調査が必要であるといえる。また、自航操縦性試験の結果と対照させ、ここで示した流体力の記述法の有効性を確認したい。さらに、今回はプロペラ順転に限定して検討したが、逆転中の挙動も今後の課題である。

表2.2.3.1 主たる試験状態

F_n	0.5	0.904	1.30	2.30
0.2	—	○	○	○
0.15	○	○	○	—

表2.2.3.2 供試船の主要目 (Series 60 , $C_b = 0.7$, $L/B = 7.0$)

LENGTH BETWEEN PERPENDICULARS	L_p (m)	4.000
BREADTH	B (m)	0.571
DRAFT	d (m)	0.229
DISPLACEMENT	V (m)	0.366
BLOCK COEFFICIENT	C_b	0.700
PRISMATIC COEFFICIENT	C_p	0.710
MIDSHIP COEFFICIENT	C_m	0.985
L/B	7.00	
B/d	2.50	
LONGITUDINAL CENTER OF BUOYANCY FROM F.P.	$0.495 L_p$	
LONGITUDINAL RADIUS OF GYRATION	K_m	0.250 L_p
RUDDER AREA RATIO	A_r	1/66.7
RUDDER ASPECT RATIO	λ	2.17
PROPELLER FOR FREE RUNNING TEST		
PROPELLER DIAMETER	D (m)	0.160
PITCH RATIO	1.100	1.000
EXPANDED AREA RATIO	0.500	0.400
BLADE THICKNESS RATIO	0.045	0.045
BOSS RATIO	0.167	0.250
ANGLE OF RAKE	6°	10°18'
NUMBER OF BLADE	4	4
DIRECTION OF TURNING	RIGHT	RIGHT

表2.2.3.3 主船体に作用する流体力を表わす微係数

(横流れ運動によるもの)

F_n	J_s	X_{vv} $\times 10^3$	Y_{vv} $\times 10^3$	$m \cdot V_v$ $\times 10^3$	Y_v $\times 10^3$	N_v $\times 10^3$	$m_{vv} - N_v$ $\times 10^3$	N_{vv} $\times 10^3$	C_d	C_l	C_t	$C_d + C_t$ $\times 10^3$	C_d / C_t $\times 10^3$
0.2	—	-1.974	-12.85	—	—	-7.128	—	—	0.1795	-0.00387	2.602	-37.33	-0.323
0.15	—	-1.230	-12.50	—	—	-6.829	—	—	-0.3435	0.01182	3.047	-37.92	0.985
0.2	—	-1.330	-13.09	—	—	-7.459	—	—	-0.2195	0.01945	2.180	-37.83	1.530
0.90	—	-15.24	—	—	-6.465	—	—	—	0.4487	-0.00810	5.779	-31.60	-0.675
0.2	1.30	—	-14.15	—	—	-6.523	—	—	0.5845	-0.01446	8.647	-36.08	-1.205
2.30	—	-13.04	—	—	-6.948	—	—	—	1.0580	0.00336	-13.15	-37.93	0.290
0.50	—	-16.65	—	—	-5.223	—	—	—	0.0639	-0.02790	-1.084	-24.77	-2.325
0.150.90	—	-17.90	—	—	-5.890	—	—	—	0.3771	-0.00360	-4.955	-35.82	-0.300
1.30	—	-13.67	—	—	-6.178	—	—	—	0.2569	-0.00135	-3.511	-35.68	-0.113
0.2	—	-2.364	-12.48	23.24	-11.80	-7.320	0.5710	-0.514	3.2360	0.01510	-39.33	-41.50	E.258
0.15	—	-2.132	-11.99	22.93	-11.49	-6.836	0.5587	-0.502	-0.1528	0.00526	1.403	-35.88	0.438
0.90	—	-15.70	23.17	—	-11.73	-6.296	0.4709	-0.414	0.1617	-0.00513	-2.322	-31.80	-0.428
0.2	1.30	—	-13.20	23.50	-12.06	-6.393	0.5475	-0.490	0.3071	-0.01446	-4.115	-35.82	-1.217
2.30	—	-11.87	23.30	-11.86	-7.012	0.5475	-0.490	-0.0252	0.01120	-0.1667	-39.09	1.180	
0.50	—	-24.54	23.40	-11.96	-5.714	—	—	0.0026	0.01760	-0.3417	-25.64	1.467	
0.150.90	—	-13.06	23.09	-11.65	-6.061	0.4784	-0.421	-0.0281	0.01200	-0.0370	-31.18	1.008	
1.30	—	-11.78	23.11	-11.67	-5.963	0.4852	-0.428	-0.0365	0.00295	0	-36.50	0.246	

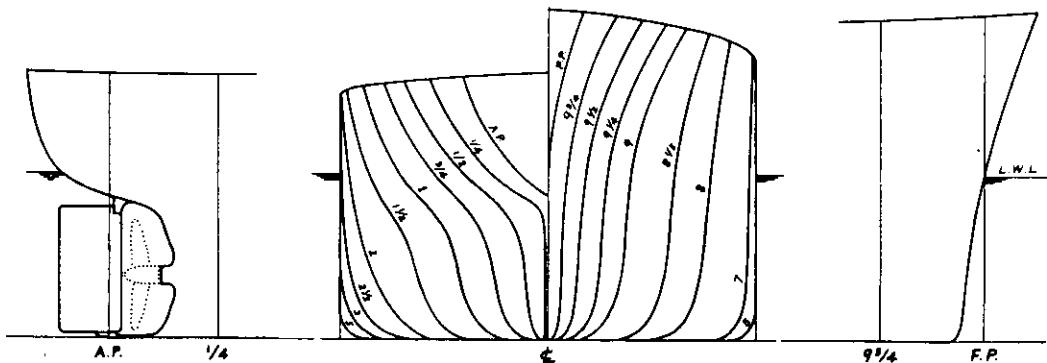
 $m \cdot 10^3 = 11.44$ $X_{vv} = 0.005$ T_f
 N_{vv}

表2.2.3.4 主船体に作用する流体力を表わす微係数
(旋回運動によるものおよび横流れ運動との連成によるもの)

PURE YAW MOTION TEST												
F_n	J_s	$m_{\text{ex}} X_{\text{fr}} \times 10^3$	$m_{\text{ex}} X_{\text{st}} \times 10^3$	$m_{\text{ex}} Y_{\text{fr}} \times 10^3$	$m_{\text{ex}} Y_{\text{st}} \times 10^3$	$m_{\text{ex}} N_{\text{r}} \times 10^3$	$m_{\text{ex}} N_{\text{st}} \times 10^3$	C_p	C_t	C_i	$\frac{1}{2} (C_p + C_i) \times 10^3$	$C_{V32} \times 10^3$
-0.2	-	-0.745	12.55	8.414	1.062	2.897	1.110	-0.4856	0.01020	2.641	-1.425	0.319
0.15	-	-0.818	12.25	8.521	1.005	2.740	1.284	-0.1207	0.03510	0.4552	-1.400	1.097
		0.904	-	-	7.775	1.174	3.101	1.270	2.4406	0.00052	-14.84	-1.054
R.	0.2	1.30	-	-	8.019	1.183	2.925	1.266	0.2798	0.00819	-1.943	-1.376
O.	2.30	-	-	8.449	1.175	2.832	1.274	1.5929	0.0373	-9.840	-1.472	1.166
+	0.50	-	-	7.352	1.047	3.052	1.177	0.2516	0.00774	-1.714	-1.067	0.242
I.	0.15	0.904	-	-	7.792	1.048	2.901	1.215	-1.0616	0.00789	6.143	-1.163
	1.30	-	-	8.064	1.013	2.880	1.234	0.0340	0.04274	-0.4416	-1.237	1.336

$m_{\text{ex}} = 1.44$ $X_{\text{st}} = 0.005$ $N_{\text{st}} = 0.715$ $N_{\text{fr}} = 1.0$ $N_{\text{st}} = 1.0$

YAW MOTION TEST WITH CONSTANT DRIFT ANGLE											
F_n	J_s	$m_{\text{ex}} X_{\text{fr}} - Y_{\text{v}} \times 10^3$	$m_{\text{ex}} Y_{\text{fr}} \times 10^3$	$m_{\text{ex}} N_{\text{r}} \times 10^3$	$m_{\text{ex}} N_{\text{st}} \times 10^3$	C_p	C_t	C_i	$\frac{1}{2} (C_p + C_i) \times 10^3$	$C_{V32} \times 10^3$	
-0.2	-	21.74	-11.423	5.566	1.253	-2.865					
0.15	-	20.89	-8.953	4.582	1.553	-3.191					
	0.904	-	-5.211	8.037	3.851	-5.164					
R.	0.2	1.30	-	5.761	8.598	3.446	-5.024				
O.	2.30	-	-6.650	9.087	3.435	-5.267					
+	0.50	-	-8.848	10.621	3.578	-5.360					
I.	0.15	0.904	-	6.484	7.425	2.829	-3.508				
	1.30	-	-7.363	5.867	3.449	-3.838					



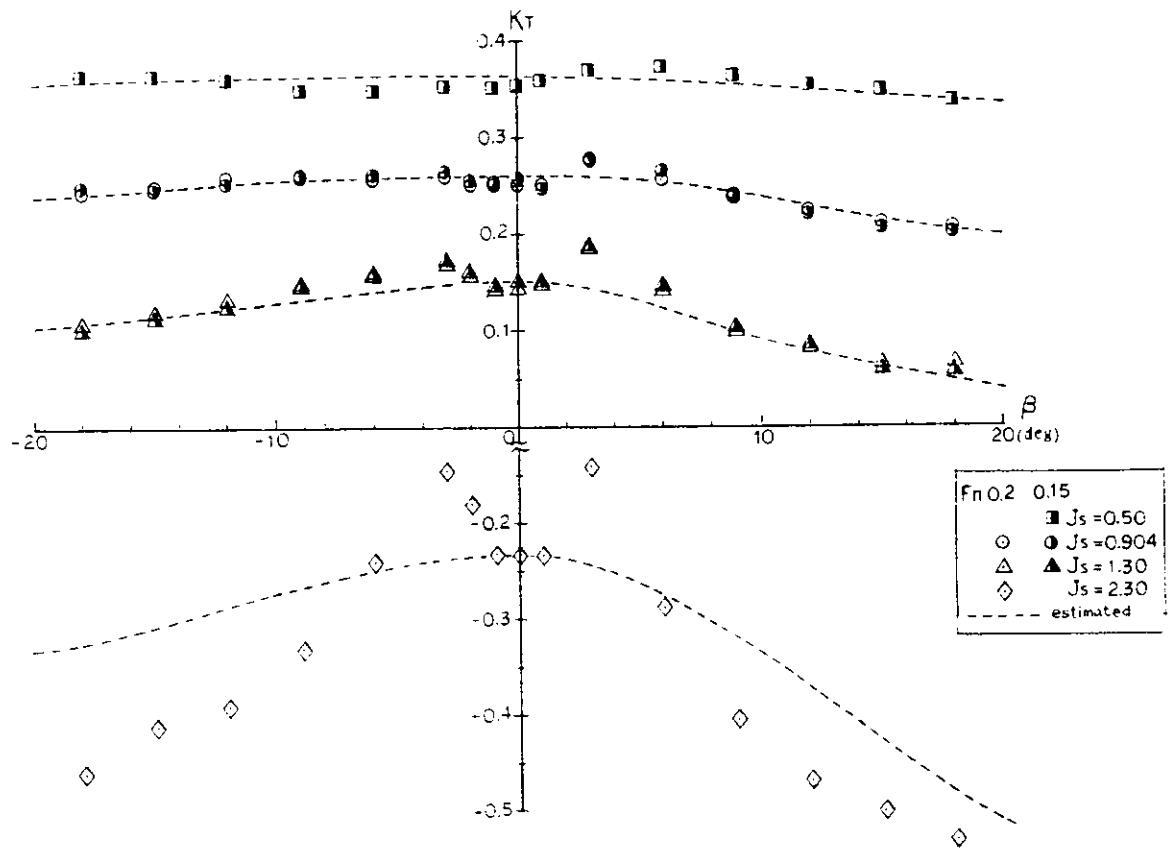


図2.2.3.4 斜航中の船後プロペラ特性

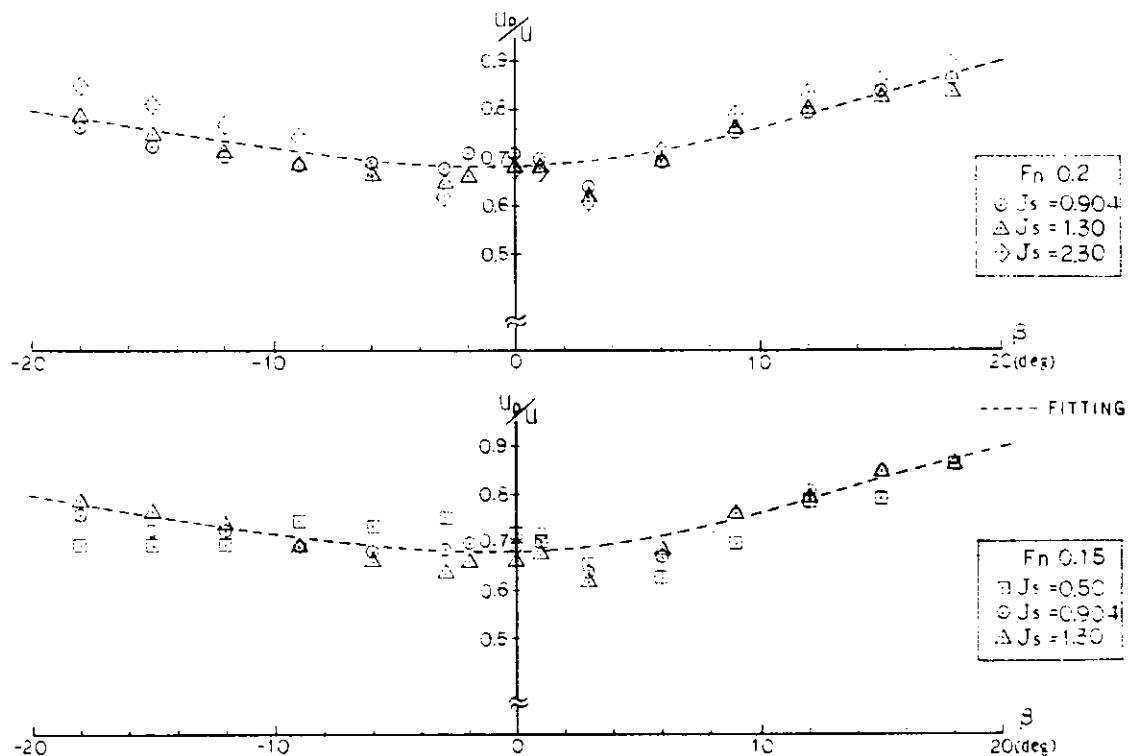


図2.2.3.5 斜航中のプロペラ有効流入速度 ($1 - w$)

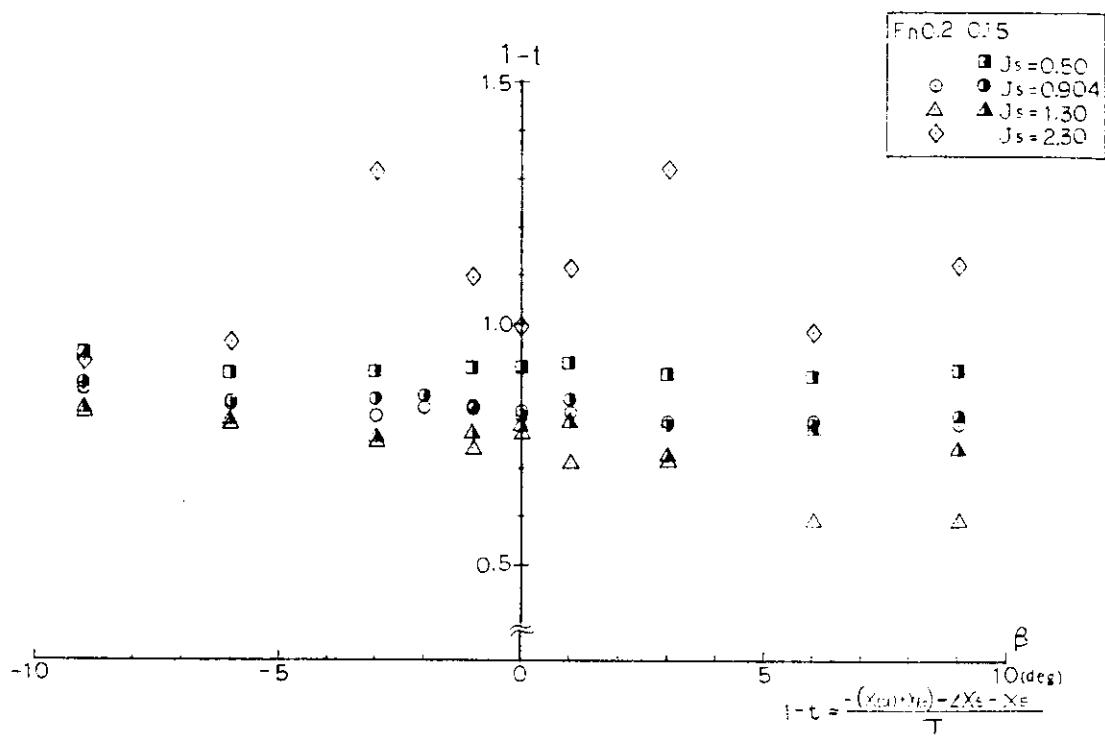


図 2.2.3.6 斜航中のスラスト減少係数 ($1-t$)

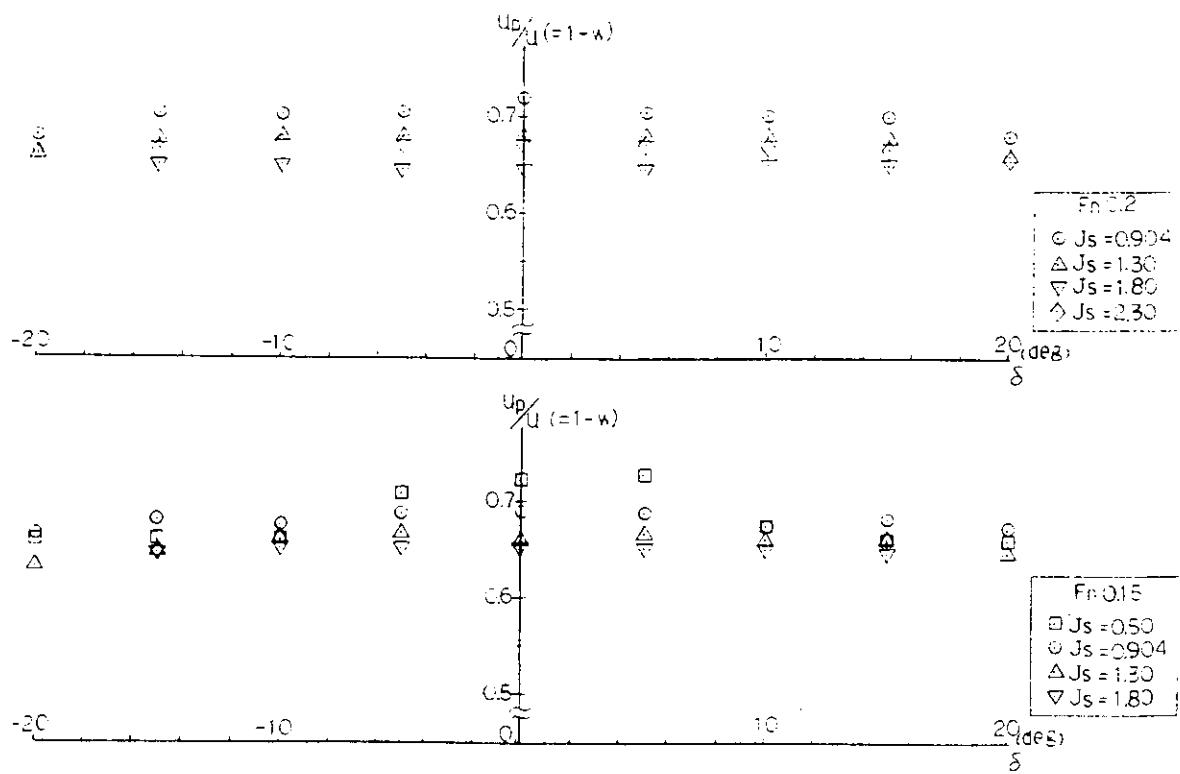


図 2.2.3.7 操舵によるプロペラ有効流入速度の変化

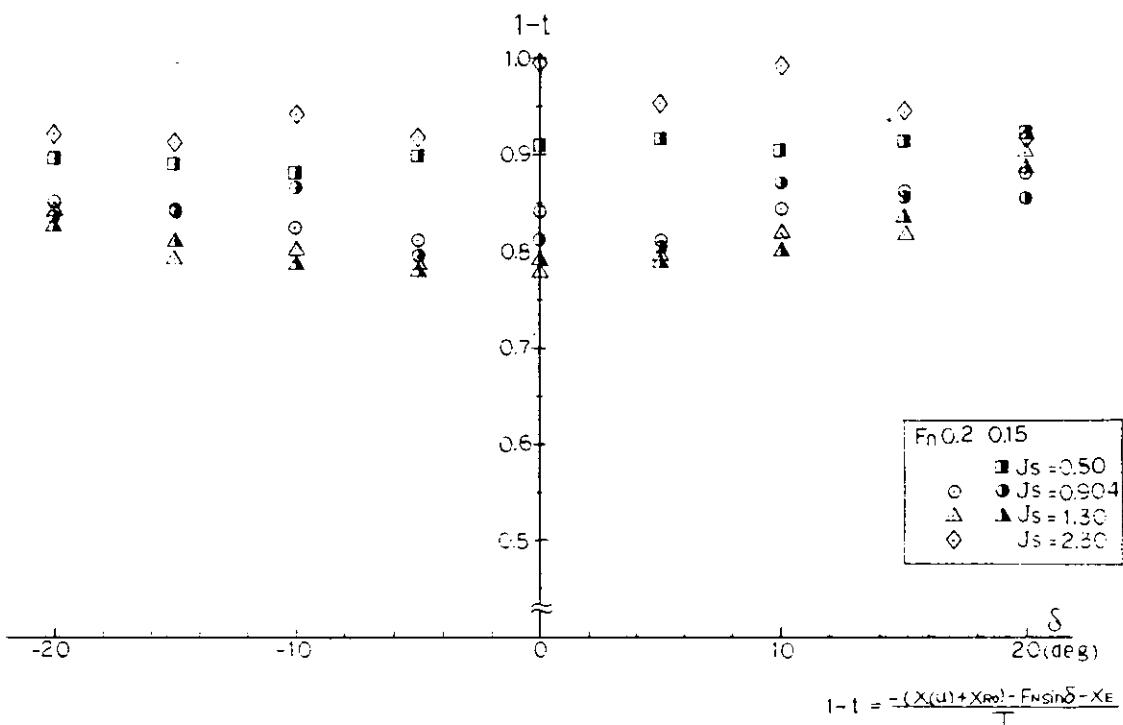


図2.2.3.8 操舵によるスラスト減少係数の変化

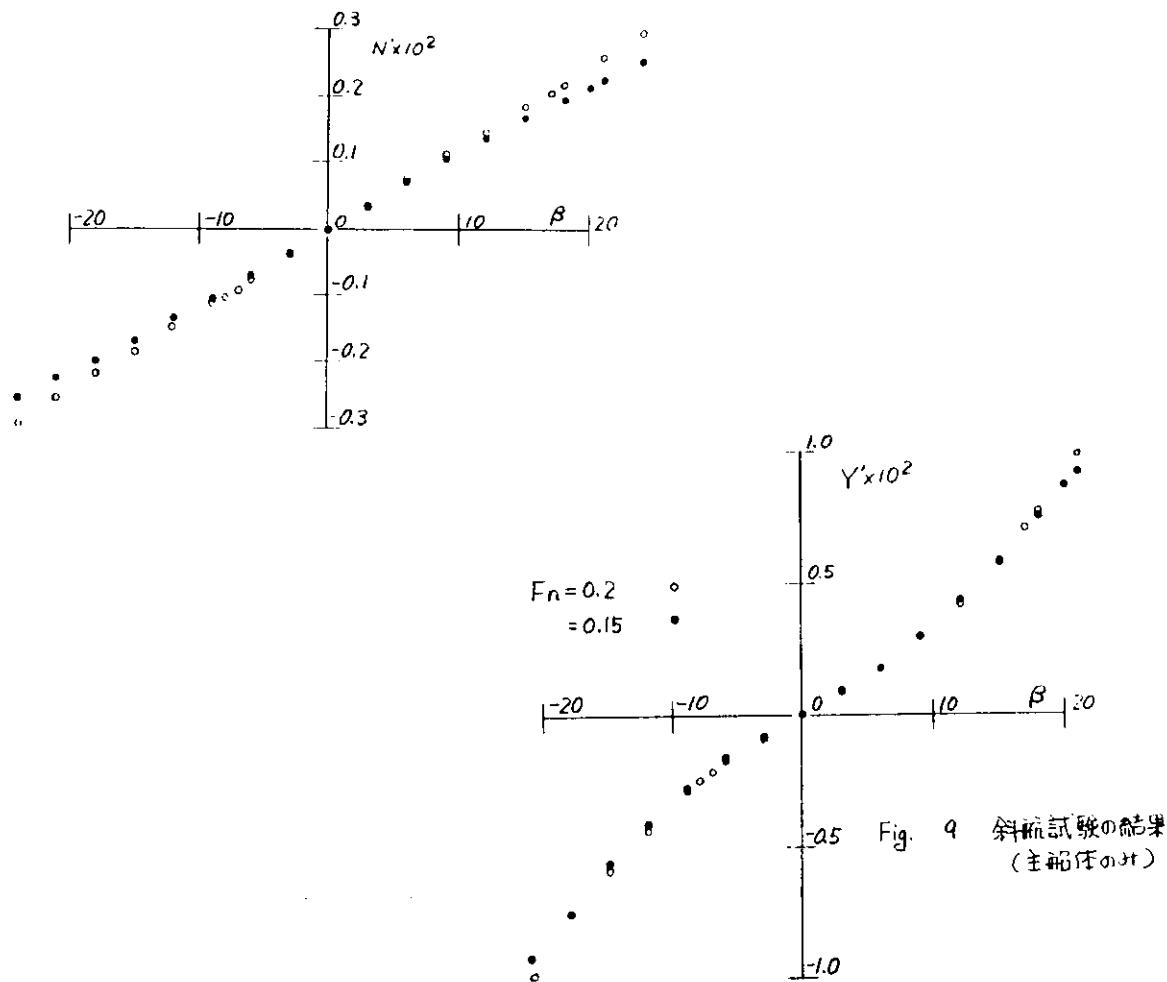


図2.2.3.9 斜航中の主船体に作用する横方向の力
(プロペラと舵を取り外した試験による)

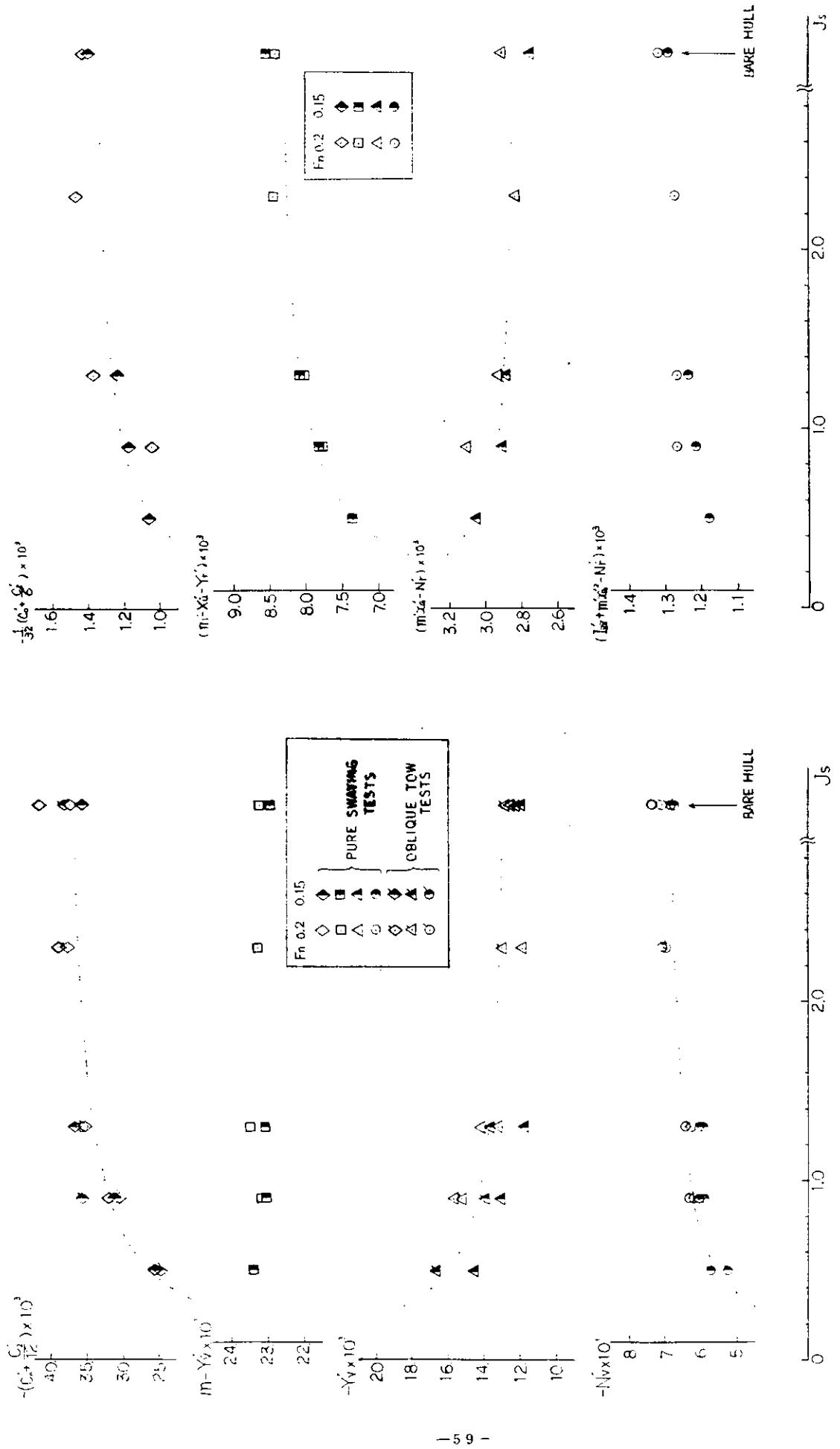


図 2.2.3.11 主船体に働く流体力に対するみかけの前進率の影響
(旋回運動に関するもの)

図 2.2.3.10 主船体に働く流体力に対するみかけの前進率の影響
(横流れ運動に関するもの)

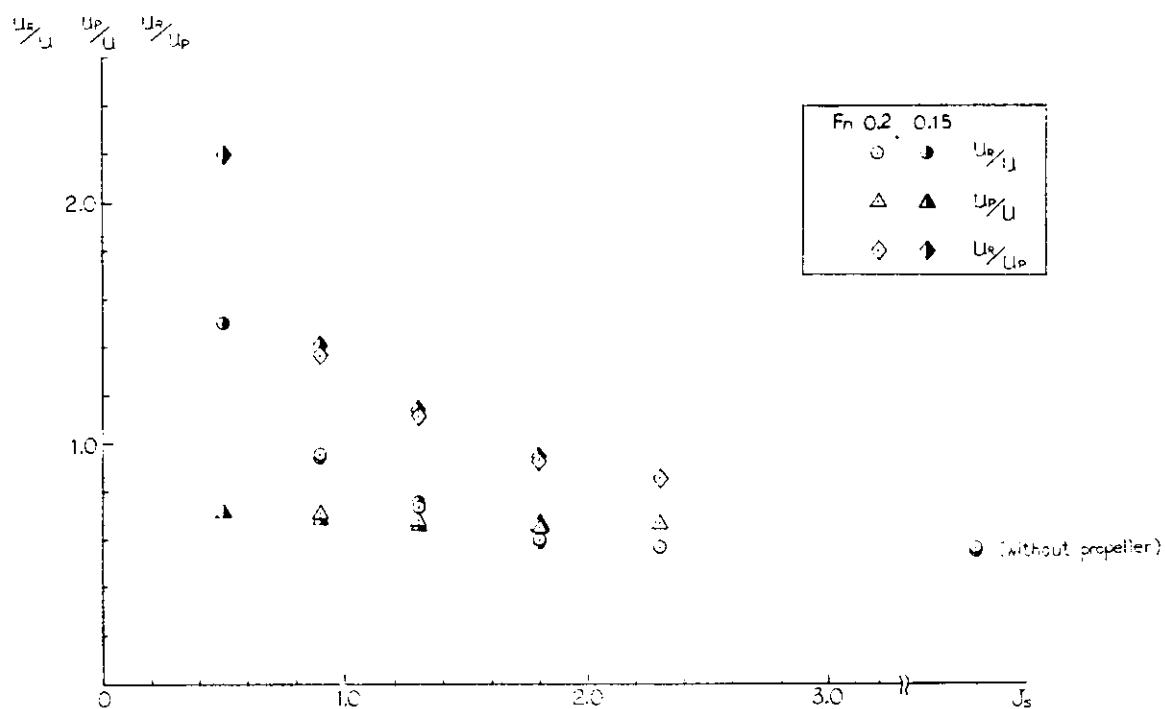


図 2.2.3.12 直進中のプロペラと舵に対する有効流入速度

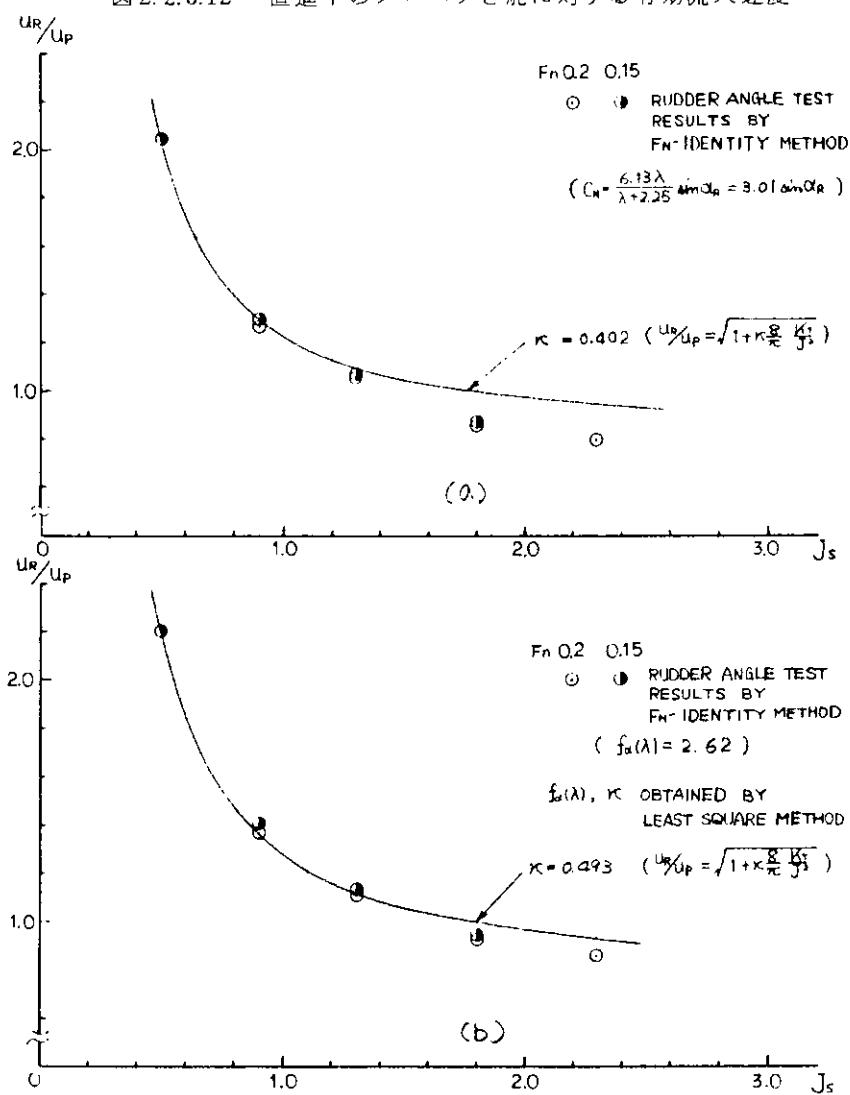


図 2.2.3.13 プロペラの增速効果の近似法

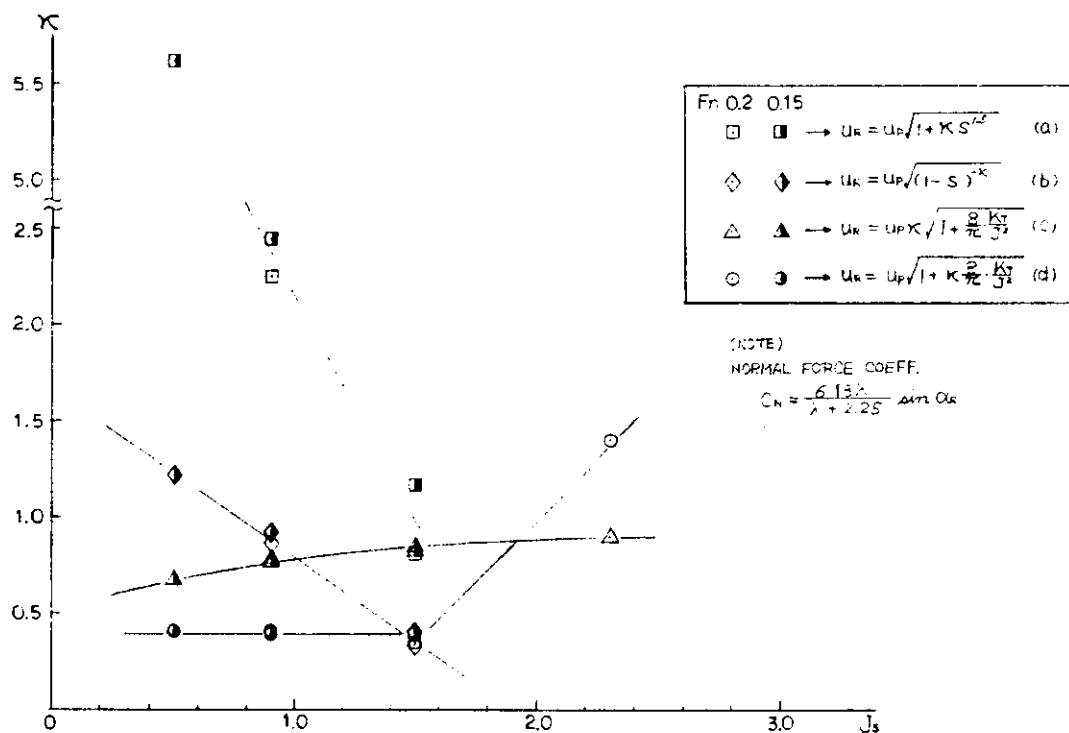


図2.2.3.14 プロペラの增速効果の各種近似式の係数

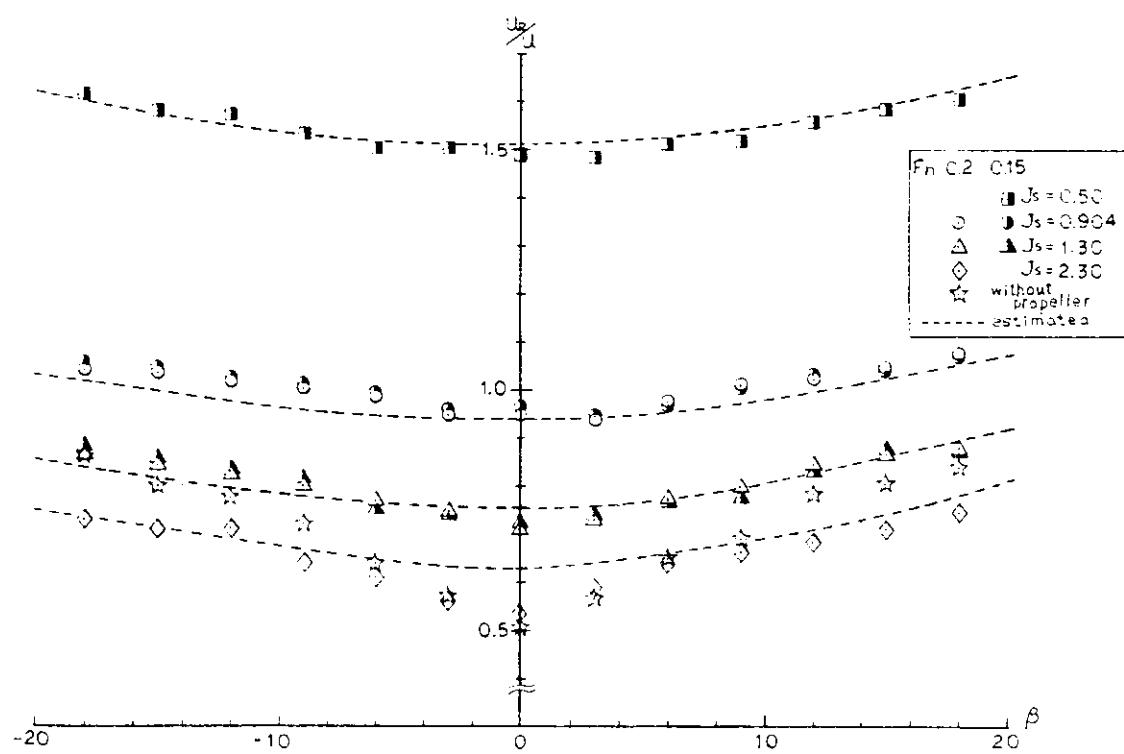


図2.2.3.15 斜航中の船に対する有効流入速度

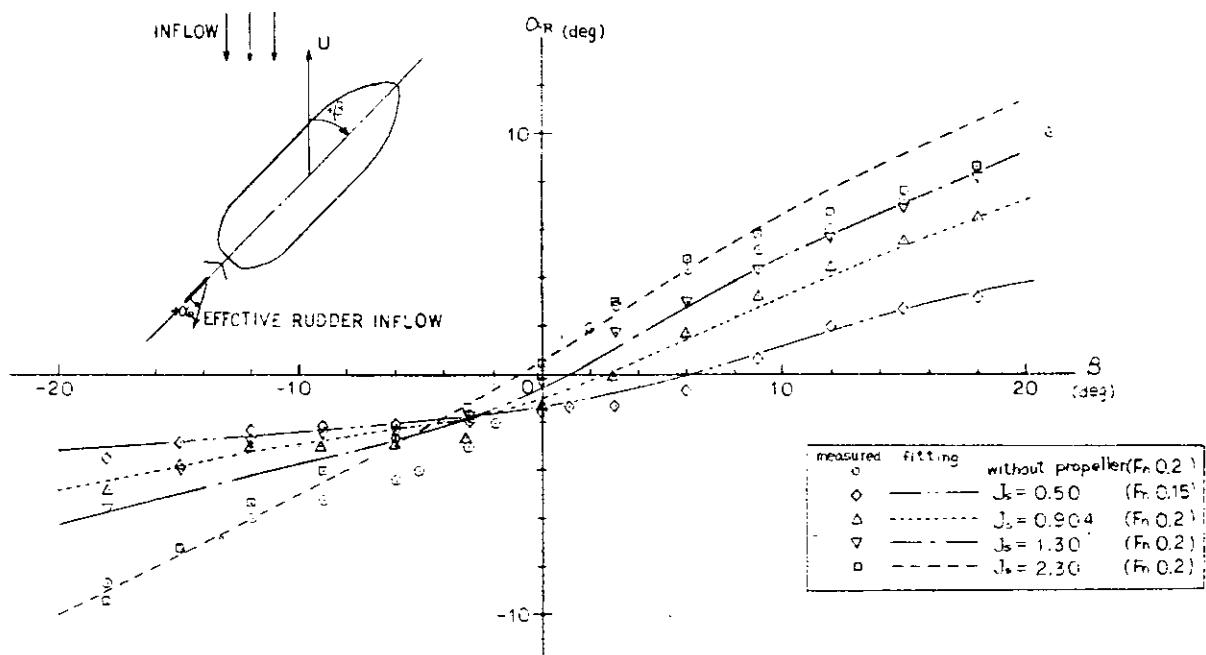


図2.2.3.16 斜航中の船に対する有効流入角

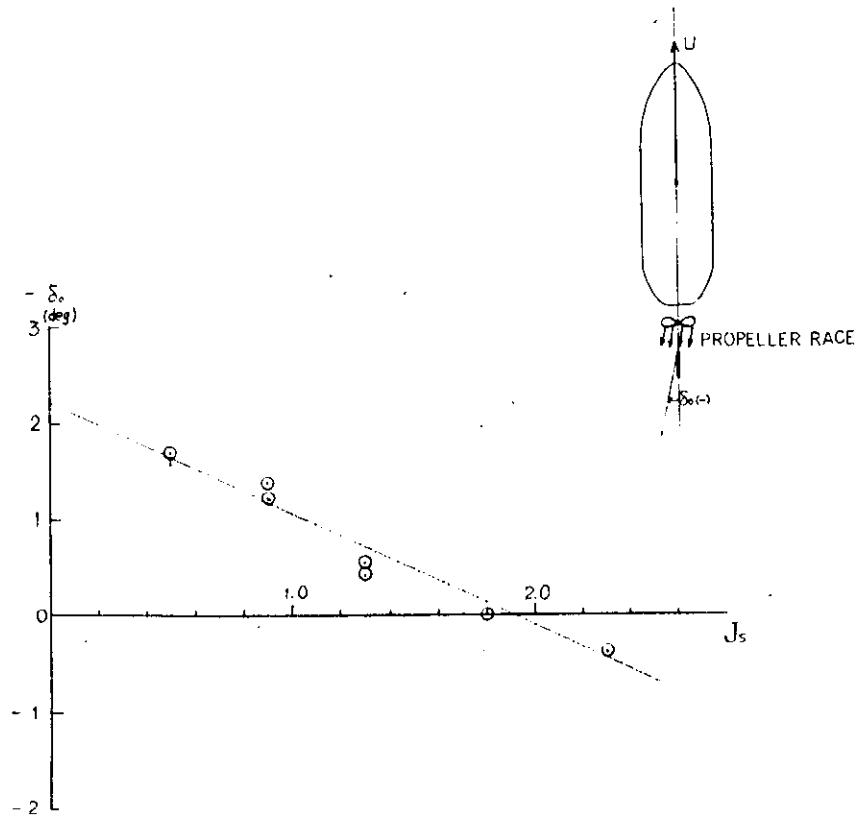


図2.2.3.17 直進中の船に対する有効流入角

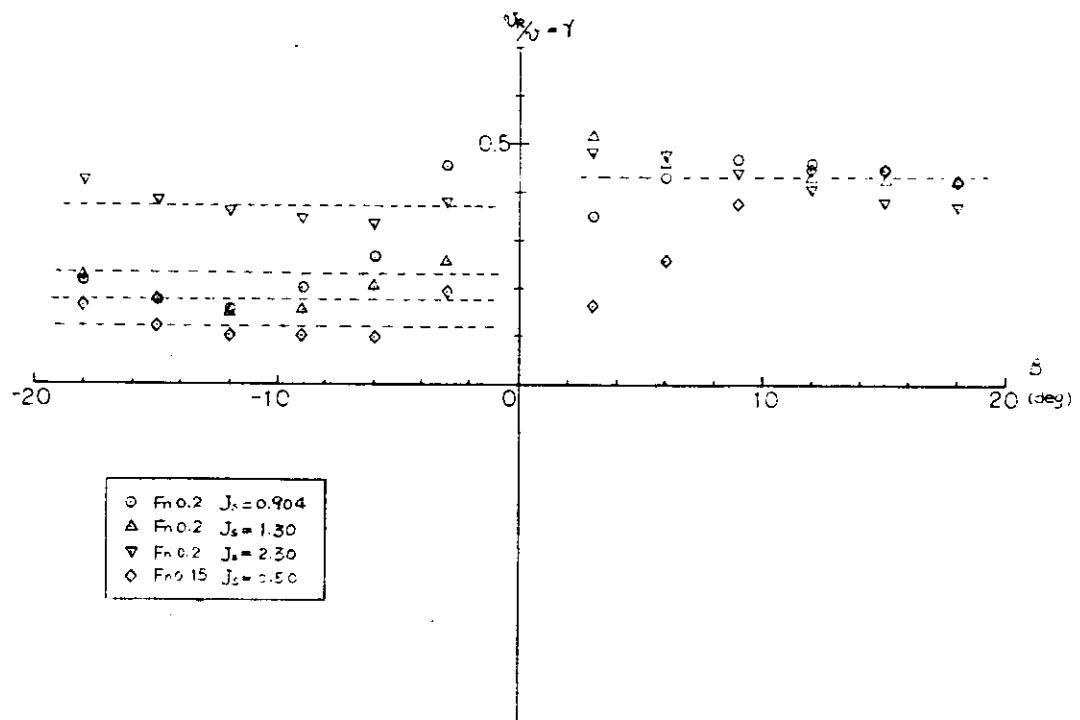


図2.2.3.18 斜航中の整流効果係数

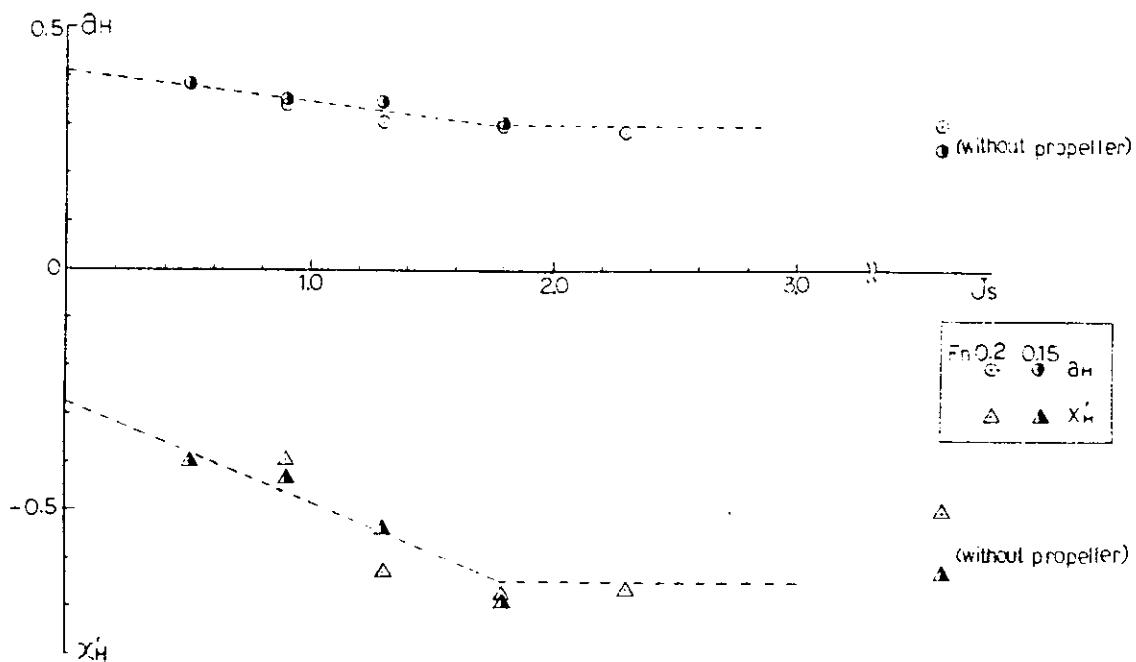
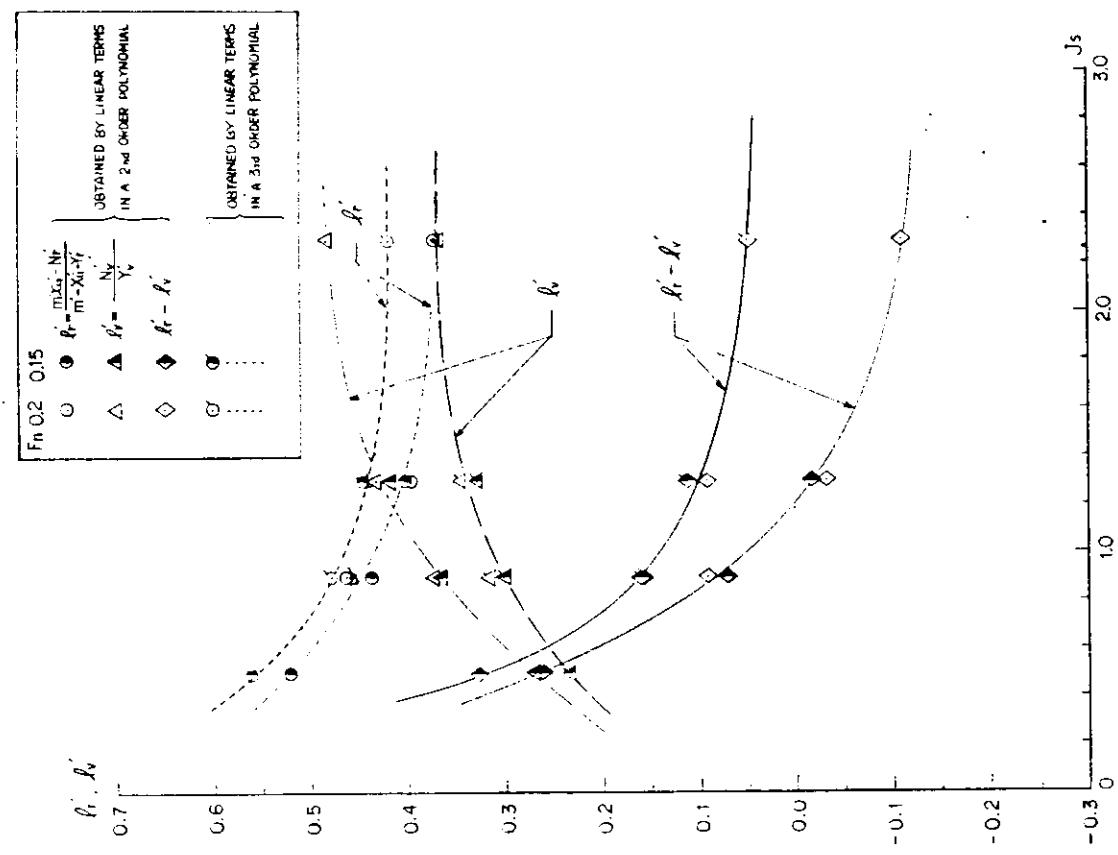


図2.2.3.19 航の主船体に対する干渉を表わす係数



- 64 -

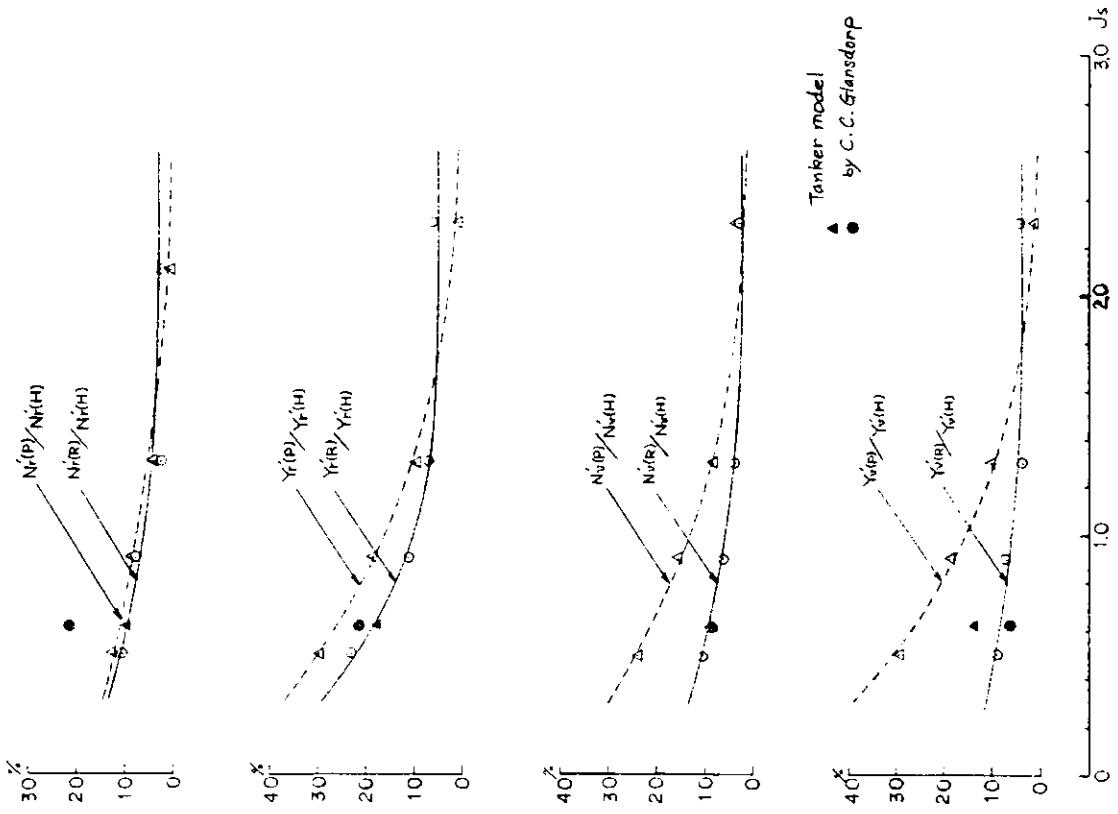


図 2.2.3.20 みかけの前進率の変化による針路安定性の変化

図 2.2.3.21 主船体に働く力と舵によって誘起される力に
対するみかけの前進率の影響

2.3 プロペラ逆転時船体運動の推定法 — 応答の数学モデルとその実験的検証 —

2.3.1 応答方程式の誘導

プロペラを逆転すると船は漸次速力を減ずると共に左右いずれかに回頭を起こす。この運動を記述する基礎的運動方程式は

$$\left. \begin{aligned} (m + m_x) \dot{u} - (m + m_y) v \dot{\psi} &= X(u, v, \dot{\psi}, n, \delta) \\ (m + m_y) \dot{v} + (m + m_x) u \dot{\psi} &= Y(u, v, \dot{\psi}, n, \delta) \\ (I + I_z) \ddot{\psi} &= N(u, v, \dot{\psi}, n, \delta) \end{aligned} \right\}$$

なお、こゝに言うX, Y, Nは本章冒頭(2.0.1)式のX, Y, Nから見掛け質量の力を減じたものであることに注意する必要がある。また、右辺のX, Yのなかにはそれぞれv $\dot{\psi}$ ならびにu $\dot{\psi}$ の項があり、これは左辺のm_yv $\dot{\psi}$ ならびにm_xu $\dot{\psi}$ と同類項で、流体力としては分離して測ることはできない。普通v $\dot{\psi}$ の項は左辺のm_yに0.6~0.8程度の修正係数を乗ずる代りに右辺ではこれを省略すると云う形で処理されており、一方u $\dot{\psi}$ の項は左辺ではm_xu $\dot{\psi}$ 、右辺では流力微係数Y_rの項で代表されている。また上式では船体の前後非対称が付加質量力に与える影響は小さいので省略している。

上記第一式において船を直進に拘束した場合($\dot{\psi} = 0, v = 0, \delta = 0$)については、既に詳細な研究があり、本報告においてもすでに述べたところである。一方現実の運動ではプロペラ逆転に伴う旋回($\dot{\psi}$ とv)は無視できないことが多いが、その速力変化に与える影響は要するに上記第一式両辺それぞれに含まれるv $\dot{\psi}$ の項の与えるところである。これを既に述べた様に左辺のm_yに修正係数を乗ずることで処理するならば、結局、左辺のm_yv $\dot{\psi}$ の項にこの影響を集約することができる。

一方、逆転に伴う旋回に関しては、プロペラ逆転が誘起する横押力は船尾付近に作用するので(2.2.1, 2.2.2参照)，船の回頭運動は通常の操舵の誘起する運動と類似のモードを持っている。換言すればvと $\dot{\psi}$ の相互関係は通常の旋回運動と大差ないと考えてよい。従って上記v $\dot{\psi}$ は船の重心から転心(pivoting point)までの距離 ℓ_p を導入して $\ell_p \dot{\psi}^2$ で置き換えることができる。

最後に、逆転プロペラの発生する逆推力(抵抗)を見掛けの前進常数 $J_s = V/nD$ に対して表現する特性曲線は近似的に折線で表わすことができる(図2.3.1)。また、船体の抵抗は船速Vの2乗に比例すると考えて十分である。

このようにして船速変動を表わす上記第一式は次の形に簡易化することができる。

$$\dot{v} + a_{vv} V^2 + a_{rr} \dot{\psi}^2 = a_{nn} n^2 + a_{nv} n V \quad (2.3.1)$$

$$\text{こゝに } a_{vv} = \left(\frac{1}{L}\right) \frac{X'_{vv}}{(m' + m_x)} = \left(\frac{1}{L}\right) a'_{vv}$$

$$X'_{vv} = \frac{R_t}{\frac{\rho}{2} L d V^2}, \quad R_t : \text{船体全抵抗}, \quad d : \text{吃水}$$

$$m' = \frac{m}{\frac{\rho}{2} L^2 d}, \quad m'_x = \frac{m_x}{\frac{\rho}{2} L^2 d}$$

$$m = \frac{w}{g} : \text{船の質量}, \quad m_x : \text{前後方向付加質量}$$

$$a_{rr} = L \cdot \frac{(m' + c_m m'_y)}{(m + m'_x)} \cdot \ell'_p \equiv L \cdot a'_{rr}$$

$$m'_y = \frac{m_y}{\frac{\rho}{2} L^2 d}, \quad m_y : \text{横方向付加質量}$$

c_m : 上述の m_y の修正係数で $0.6 \sim 0.8$

$$\ell_p' = \frac{\ell_p}{L} = 0.45 \sim 0.50, \quad \ell_p : \text{重心から軸心までの距離}$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} a_{nn} = L \cdot \frac{2c_3}{(m' + m'_x)} \left(\frac{D}{L}\right)^3 \left(\frac{D}{d}\right) \equiv L \cdot a_{nn}' & J_{ST} < Js < 0 \\ a_{nn} = L \cdot \frac{2c_5}{(m' + m'_x)} \left(\frac{D}{L}\right)^3 \left(\frac{D}{d}\right) \equiv L \cdot a_{nn}' & Js < J_{ST} \end{array} \right.$$

c_3, c_5 : プロペラ逆転自航試験から決まる常数で図 2.3.1 参照。

又、近似的推定法は図 2.3.1 下方の式に示す。

D : プロペラ直径 d : 吃水 L : 船長

$$\left\{ \begin{array}{ll} a_{nv} = 0 & J_{ST} < Js < 0 \\ a_{nv} = \frac{2c_4}{(m' + m'_x)} \left(\frac{D}{L}\right)^2 \left(\frac{D}{d}\right) \equiv a_{nv}' & Js < J_{ST} \end{array} \right.$$

c_4 : プロペラ逆転自航試験から決まる常数で図 2.3.1 参照。

又、近似的推定法は図 2.3.1 下方の式

次にプロペラ逆転の誘起する回頭運動は既に述べたとおり通常の操舵によって起る運動と類似のモードをもつて、すなわち類似の v と ψ の関係を保ちつつ運動が推移する。このことから通常の操舵応答の 3 乗非線型、一次系近似のモデル²¹⁾

$$T \ddot{\psi} + \dot{\psi} + \alpha \dot{\psi}^3 = K \delta$$

をこの場合に応用し、右辺の $K \delta$ の代りにプロペラ逆転が誘起する旋回力を置き換えることにする。このことは本節冒頭の操縦応答の基礎式の第 2, 3 式をまとめて、通常操舵応答の簡潔な表現に実績のある上記数学モデルで簡易化することになる。従って上記 $K \delta$ に代る逆転プロペラの旋回力の表現を得るために、まず基礎方程式の第 2, 3 式を線型化したものに運転プロペラの横押力および回頭モーメントを代入し、通常の手順によって回頭運動の応答方程式を作ることになる。

線型化した第 2, 3 式は

$$\left. \begin{aligned} (m' + m'_y) \frac{L}{V} \dot{\beta} + Y'_\beta \cdot \beta - \left(\frac{L}{V}\right) (m' + m'_x - Y'_r) \dot{\psi} &= -Y'_0 / J_s^2 \\ (I' + I_z') \left(\frac{L}{V}\right)^2 \ddot{\psi} + \left(\frac{L}{V}\right) N_r' \cdot \dot{\psi} - N_\beta' \cdot \beta &= N_0' / J_s^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.3.2)$$

ここで $Y'_0 = \frac{Y_0}{\frac{\rho}{2} L d (n D)^2}$ $N_0' = \frac{N_0}{\frac{\rho}{2} L^2 d (n D)^2}$

Y_0, N_0 はプロペラ逆転の誘起する横押力および旋回モーメント

通常操舵に對すると同じ手順で進むと結局

$$T \ddot{\psi} + \dot{\psi} + \alpha \dot{\psi}^3 = \left(\frac{V}{L}\right) a_R' / J_s^2 \quad (2.3.3)$$

$$\text{ここで } a_R' = \frac{-N_\beta' Y_0' + Y_\beta' N_0'}{Y_\beta' N_r - (m' + m'_x - Y'_r) N_\beta'} \quad (2.3.4)$$

なお比較のために K を示すと

$$K = \frac{N_\beta' Y_\delta' + Y_\beta' N_\delta}{Y_\beta' N_r - (m' + m_x' - Y_r') N_\beta} \quad (2.3.5)$$

分母は共通で所謂 Stability discriminant であり、分子は逆転プロペラあるいは操舵が船に加える横押力と回頭モーメントが相俟って船の旋回を起すメカニズムを物語っている。

ところで (2.3.4) 式の形で a_R' を求めるには船の流力微係数を知らねばならないが、それでは (2.3.3) の簡易化応答モデルの意味は薄いと云わねばならない。

この点についてはなお検討を進めているが、本報告では次節に中間的な一つの方法を示すに止める。

2.3.2 自走模型実験による応答モデルの検証

S R 154 部会第 2 次母型 5-27M タンカーの 4.0 m 模型を無線操縦で自走させ、プロペラを逆転して船速の変化と回頭運動を記録し、一方前節の簡易応答モデルで推定した運動と比較した。模型船の要目等は 2.2.1 に示すところである。又、2.2.2 に示すプロペラ逆転時流体力の実験に使用した模型は本自走実験のものと同一である。

(1) 模型船が回頭しないよう拘束した場合

試験水槽曳引車で模型船を直進に拘束、前後方向のみ自由にしてプロペラを逆転、船速の変化、停止距離などを測定した。この場合プロペラは前進から直ちに後進に切り換えるステップ状逆転である。これに対しては (2.3.1) 式から停止距離 S_s と停止時間 t_s を次のように求めることができる。

(i) $J_{ST} < J_{SR0} < 0$ の場合

$$\text{ここで } J_{SR0} = V_0/n_a D, \quad V_0 : \text{発令直前の船速(前進)}$$

$$n_a : \text{後進回転数}$$

また J_{ST} は図 2.3.1 に定義される。

$$\left. \begin{aligned} t_s' &= t_s \left(\frac{n_a D}{L} \right) = \frac{k_1}{a_{vv}'} \tan^{-1} (k_1 J_{SR0}) \\ S_s' &= S_s / L = \frac{1}{2a_{vv}'} \ln \left(1 + k_1^2 J_{SR0}^2 \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.3.6)$$

$$\text{ここで } k_1 = \frac{(D/L)}{\sqrt{\frac{(-a_{nn}')}{a_{rr}'}}} \quad , \quad a_{nn}' \text{ は } J_{ST} < J_s \text{ のものを使う。}$$

(ii) $J_{SR0} < J_{ST}$ の場合 (定義は i と同じ)

$$\left. \begin{aligned} t_s' &= t_s \left(\frac{n_a D}{L} \right) = \frac{k_2}{2a_{vv}'} \ln \left\{ \frac{(k_2 J_{ST} - k_3 + 1)(k_2 J_{SR0} - k_3 - 1)}{(k_2 J_{ST} - k_3 - 1)(k_2 J_{SR0} - k_3 + 1)} \right\} \\ S_s' &= S_s / L = \frac{k_3}{2a_{vv}'} \ln \left\{ \frac{(k_2 J_{ST} - k_3 + 1)(k_2 J_{SR0} - k_3 - 1)}{(k_2 J_{ST} - k_3 - 1)(k_2 J_{SR0} - k_3 + 1)} \right\} \\ &\quad + \frac{1}{2a_{vv}'} \ln \left\{ \frac{(k_2 J_{SR0} - k_3)^2 + 1}{(k_2 J_{SR0} + k_3)^2 - 1} \right\} + \frac{1}{2a_{vv}'} \ln (1 + k_1^2 J_{ST}^2) \end{aligned} \right\} \quad (2.3.7)$$

$$\text{ここで } k_2 = \frac{(D/L)}{\sqrt{\frac{(-a_{nn}')}{a_{vv}'} + \left(\frac{a_{nv}'}{2a_{vv}'}\right)^2}}, \quad k_3 = \frac{\left(\frac{a_{nv}'}{2a_{vv}'}\right)}{\sqrt{\frac{(-a_{nn}')}{a_{vv}'} + \left(\frac{a_{nv}'}{2a_{vv}'}\right)^2}}$$

ただし a'_{nn} , a'_{nv} は $J_s < J_{ST}$ のものを使う。

図 2.3.2, 2.3.3 はそれぞれ停止時間 t_s ならびに停止距離 S_s について計算と実験を比較したもので、よい一致を示す。回頭を考えなければ(2.3.1)式の応答モデルはその単純な形にしてはよい精度を持っている。

(2) プロペラ逆転に伴う回頭を自由にする場合

これが本来の船の運動になるわけであるが、この場合最大の困難は既に述べた a'_R 係数の推定である。こゝでは次の方法に依った。まず(2.3.4), (2.3.5)両式から

$$\frac{a'_R}{T'} = \frac{-N_\beta Y'_\delta + Y'_\beta N'_\delta}{N'_\beta Y'_\delta + Y'_\beta N'_\delta} \left(\frac{K'}{T'} \right)$$

このうち Y'_δ と N'_δ はプロペラ逆転、直進中の船体に働く流体力を測って求める。右辺の流力微係数はすべて斜航実験で求めることができる(PMMやCMTを必要とする N_r', Y_r' を含まないだけ一般の水槽で精度よく求めることができる)。 K'/T' は自由航走Z試験から求める。よく知られているように K'/T' の比は運動の強弱によらず略一定で、精度よく求められる量である。

図 2.3.4 にこうして求めた a'_R/T' を示す。実験点はプロペラ逆転、直進中にY力およびNモーメントを測った点に対応する。(J_s 正の部分にも測定があるが、これは前進回転、前進時にはスリップの如何に関せず旋回力はほとんど働かないことを示す。)

プロペラ逆転に伴なう旋回の応答モデル(2.3.3)式に現われるその他の係数は T と α であるが、これらは通常のZ試験で求める。プロペラ正転前進時と逆転時とで安定性、追従性を代表する T 指数が変わらないと云う仮定は乱暴ではあるがひとまずこのように考える。

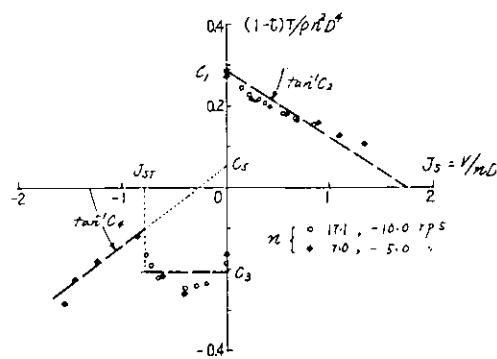
これで船速応答方程式(2.3.1), 回頭応答方程式(2.3.3)の係数が一応全部求まったから、これを使ってプロペラ逆転に伴なう船速の変化と回頭運動、さらに航跡や停止時間、停止位置なども計算できる。

図 2.3.5～2.3.7 は自走模型実験との比較である。中間的な成果としては意外によい一致を見ているものと考える。特に船速変化の様子や停止距離については旋回を考慮に入れた場合にも本節の応答モデルは実用上十分の精度をもつと考えてよいようである。

2.3.3 本節の結言と今後の問題点

プロペラ逆転時の船の運動について、速力の変化ならびに横振れ旋回を同時に取扱うことのできる簡単な応答モデルを作ることが出来た。一隻のタンカー模型の自走実験と比較するとこの計算は一応の正しさをもっているよう見える。

今後の問題点としては、プロペラ逆転に伴なう旋回力の合理的かつ実用的推定法と、同じく逆転に伴なう針路安定性の変化の把握であろう。そのためにはまず運動中の船に働く流体力を明らかにする拘束模型実験、特にCMT法の活用が強く望まれる。



$C_1 \dots C_5 \sim$ 近似係数:

$$C_1 = K_T (J=0) \quad J=0 \text{ で} \quad \text{単純特性より}$$

$$C_2 = C_1 (1-w)/(J^2), \quad \% : C^{\circ} \text{ ッチ比}$$

$$C_3 = -0.8 C_1$$

$$C_4 = 1.7 C_2$$

$$C_5 = 0.5 C_3 - C_4 J_{SR}$$

$$J_{SR} = -0.4 (\frac{V_w}{D}) / (1-w)$$

図 2.3.1 プロペラ有効推力の実験結果とその折線近似

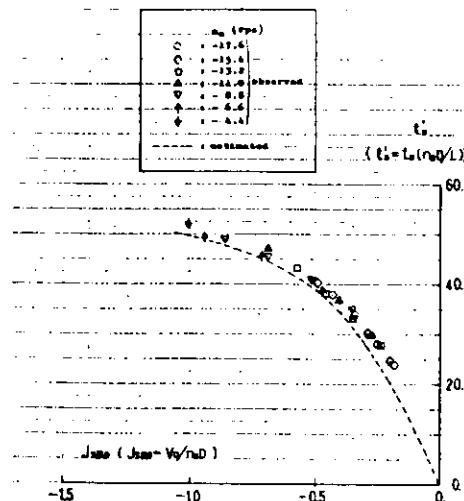


図 2.3.2 直進停止時間

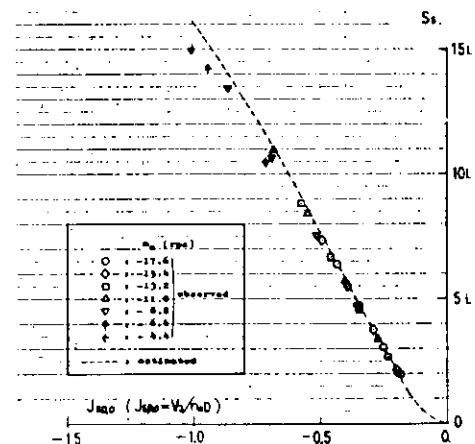


図 2.3.3 直進停止距離

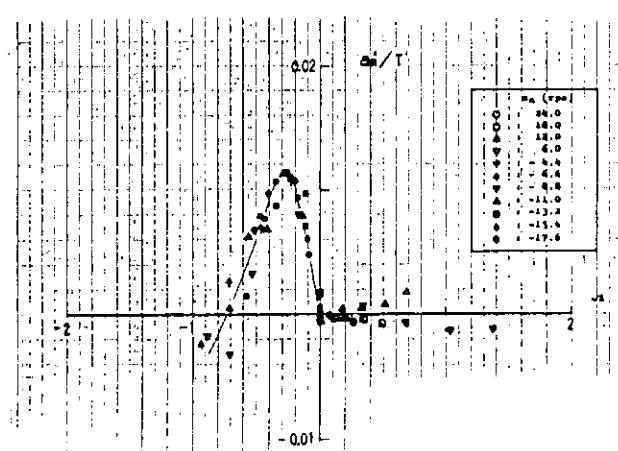


図 2.3.4 逆転プロペラの旋回効果を示す a'_R 係数

(プロペラ逆転試験、斜航試験、Z 試験から求めた。)

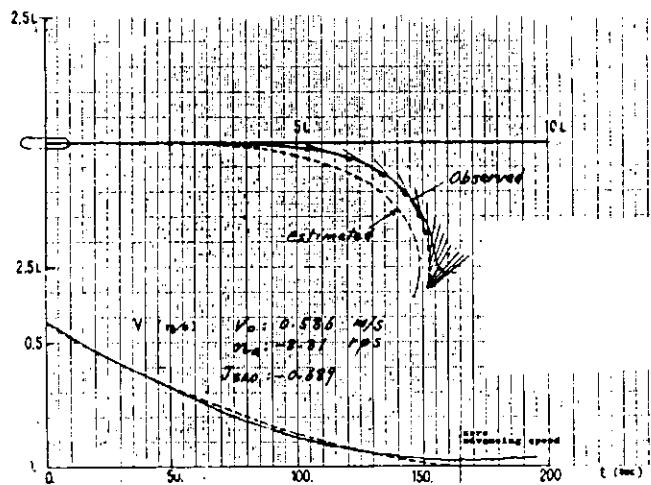


図 2.3.5 プロペラ逆転時船の運動の推定と実測(1)

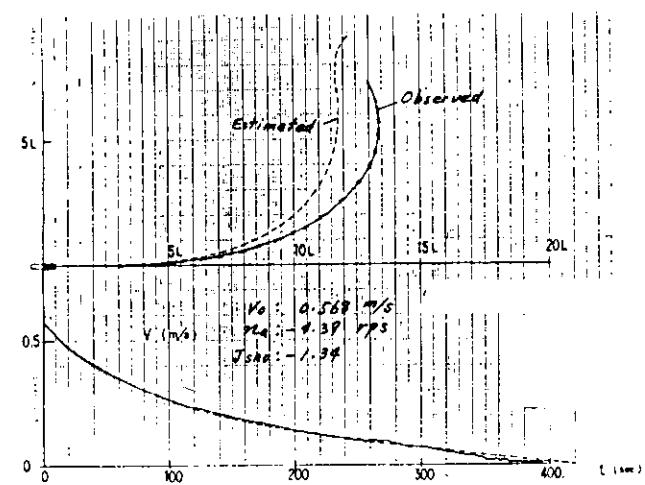


図 2.3.6 プロペラ逆転時船の運動の推定と実測(2)

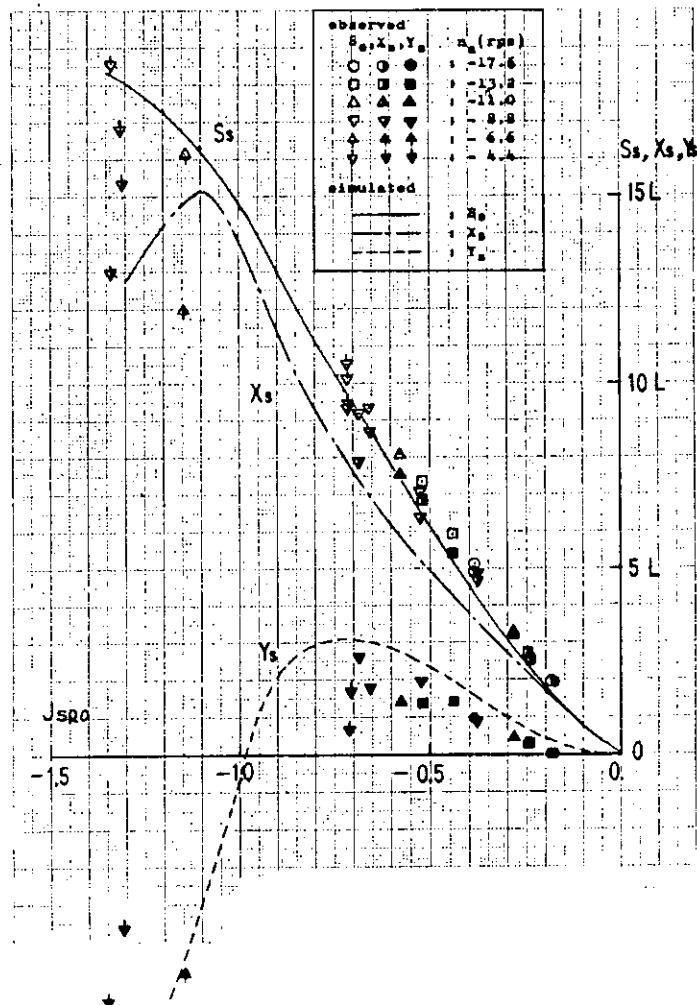


図 2.3.7 プロペラ逆転時停止位置の推定と実測

3. マン・マシン操船性能のシミュレーション

概要

日本造船研究協会で開発されたSR151操船シミュレータと東京商船大学操船シミュレータの二基の操船シミュレータを使って、各種の加減速操船を実施し、操船性能を評価する基礎資料をえた。SR151操船シミュレータによる実験は、SR151で開発された数学モデルを基礎にして、機関停止および機関逆転操作が可能な新しい数学モデルを用いて、実験し、3.3節までにその結果を述べる。又、東京商船大学操船シミュレータによる結果は、3.4節にまとめて紹介する。

3.1 供試数学モデル

3.1.1 供試船の想定

加減速操船のシミュレータ・スタディを行なうのにあたり、以下の船を想定し、Eシリーズモデルとして作成した。

- E50 : 大型タンカー ($L = 300\text{m}$)
- E40 : バルクキャリア ($L = 240\text{m}$)
- E25 : 高速貨物船 ($L = 150\text{m}$)
- E10 : 内航貨物船 ($L = 50\text{m}$)
- E5 : 内航小型貨物船 ($L = 25\text{m}$)

想定船の主要目は、表3.1.1～3.1.7に示すよう過去5ヶ年間の新造船の実績を参考にして決められた。

各々の想定船について、不安定ループ幅がStable, $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 25^\circ$ の5種類を想定して、これらを組合せることによって25種類の数学モデルが作成された。

ここで、モデルの各称のうち、はじめの数字は、 L/V の値を示し、次の数字が不安定ループ幅を示している。ただし、Vは、 $^6\text{m/sec}$ (約11.6ノット)としている。

これらの数学モデルのうち、シミュレータ・スタディのための使用モデルの設定にあたっては次の諸点を考慮した。

- (1) 加減速操船の困難さの大きい大型船を中心にして、不安定度については今回は標準的なものを選定した。
- (2) 加減速操船が行なわれるのは、主として狭水道、港内なので、港内全速(Maneuvering Full)を基準として、狭水道へ進入する場合も想定して航海速力(Navigational Full)を使用できるように考慮した。
- (3) 結局、大型船の中でも、船の大きさの影響を見るため、E25-sとE50-sの二隻を中心に実験することにし、その中間のE40-sを比較のため加えた。

3.1.2 数学モデルの形式²²⁾

SR151によって開発された数学モデル²²⁾を基本として、2.3で詳述されているモデルを使用し、機関停止発令後、プロペラが遊転中の能効を実状に近くなるように改良した。(記号の意味は2.3を参照)

(1) 船速の応答方程式

- |) プロペラ正転の場合 ($J_s > 0$, 遊転を含む)

$$+ a_{rr} \dot{\phi}^2 + a_{\delta\delta} V^2 \dot{\delta}^2 = a_{nn} n^2 + a_{nv} n v \quad (3.1.1)$$

$$+ a_{rr} \dot{\phi}^2 = \begin{cases} a_{nn_1} n^2 & (J_{ST} < Js < 0) \\ a_{nn_2} n^2 + a_{nv_2} nv & (Js < J_{ST}) \end{cases} \quad (3.1.2)$$

$V \neq nD$

$$\begin{aligned} a_{vv}' &= \left(\frac{1}{L} \right) \frac{X_{vv}'}{(m' + m'_x)} \\ a_{rr}' &= L \cdot \frac{(m' + c_m m_y')}{(m' + m'_x)} \ell_p' \\ a_{\delta\delta}' &= \left(\frac{1}{L} \right) \frac{X_{\delta\delta}'}{(m' + m'_x)} \left(\frac{A_R}{L_d} \right) \end{aligned}$$

$$a_{nn} = L \cdot a_{nn}' = (L) \frac{2 C_1}{(m' + m'_x)} \left(\frac{D}{L} \right)^3 \left(\frac{D}{d} \right)$$

$$a_{nv} = a_{nv}' = \frac{2 C_2}{(m' + m'_x)} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \left(\frac{D}{d} \right)$$

$$a_{nn_1} = L \cdot a_{nn_1}' = (L) \frac{2 C_3}{(m' + m'_x)} \left(\frac{D}{L} \right)^3 \left(\frac{D}{d} \right)$$

$$a_{nn_2} = L \cdot a_{nn_2}' = (L) \frac{2 C_5}{(m' + m'_x)} \left(\frac{D}{L} \right)^3 \left(\frac{D}{d} \right)$$

$$a_{nv_2} = a_{nv_2}' = \frac{2 C_4}{(m' + m'_x)} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \left(\frac{D}{d} \right)$$

$$\text{また, } m' = m \neq \frac{\rho}{2} L^2 d \quad (= 2 \cdot c_b \frac{B}{L})$$

$$X_{vv}' = R_t \neq \frac{\rho}{2} L d V^2$$

$$X_{\delta\delta}' = R_\delta \neq \frac{\rho}{2} A_R V^2$$

$$(1-t) K_T = \begin{cases} C_1 + C_2 Js & (0 < Js) \\ C_3 & (J_{ST} < Js < 0) \\ C_5 + C_4 Js & (Js < J_{ST}) \end{cases} \quad (3.1.3)$$

C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 の図 3.1.8 に示すように、 $(1-t) K_T - Js$ 曲線を折線に近似したときの値を示して
いる。

(2) 主機回転の応答方程式

$$i) n_E^* = \begin{cases} n^* & (n^* > n_i, n^* < 0) \\ n_i & (0 \leq n^* < n_i) \end{cases} \quad (3.1.4)$$

n^* : 指令回転数 n_E^* : 主機指令回転数

n_i : 遊転回転数 = $0.7(1-w)V/P$

$$ii) T_n \dot{n} + n = n_E^* \quad (3.1.5)$$

T_n : 主機の時間おくれ

(3) 回頭運動 方程式

i) プロペラ正転の場合 ($J_s > 0$)

$$T'_1 T'_2 \left(\frac{L}{V}\right)^2 \ddot{\psi} + (T'_1 + T'_2) \left(\frac{L}{V}\right) \dot{\psi} + \dot{\psi} + \alpha' \left(\frac{L}{V}\right)^2 \psi^3 = g(s) K \left(\frac{V}{L}\right) \{ \dot{\delta} + T'_3 \left(\frac{L}{V}\right) \dot{\delta} \} \quad (3.1.6)$$

ただし $g(s) = \frac{1 + k s^{1.5}}{1 + k s_0^{1.5}}$

$k = 3.2$

S : プロペラスリップ比

S_0 : 定常直進中のスリップ比

ii) プロペラ逆転の場合 ($J_s < 0$)

$$T'_1 T'_2 \left(\frac{L}{V}\right)^2 \ddot{\psi} + (T'_1 + T'_2) \left(\frac{L}{V}\right) \dot{\psi} + \dot{\psi} + \alpha' \left(\frac{L}{V}\right)^2 \psi^3 = a'_R \left(\frac{V}{L}\right) / J_s^2 \quad (3.1.7)$$

(4) 操舵機の応答方程式

$$T_E \dot{\delta} + \delta = \delta^* \quad (|\delta^* - \delta| \leq \delta_c) \quad (3.1.8)$$

$$\dot{\delta} = \text{sign}(\delta^* - \delta) |\dot{\delta}_{\max}| \quad (|\delta^* - \delta| > \delta_c)$$

ただし δ^* : 指令舵角

δ : 実舵角

δ_c : 先進角 ($= |\dot{\delta}_{\max}| \cdot T_E$)

3.1.3 特性値の推定²²⁾

(3.1.1) 式から (3.1.3) 式までの船速応答関係の方程式の諸係数は、表3.1.2に示すように推定された。

又、回頭応答関係の方程式の諸係数は、表3.1.3に示される。

(1) 船速応答関係の諸係数

i) 抵抗係数 (X'_{vv})

$$X'_{vv} = C_t \cdot S / L \cdot d \quad (3.1.9)$$

$$C_t = \begin{cases} C_{fp} + \Delta C_f & \text{外航貨物船} \\ C_{fp} + C_r & \text{内航貨物船} \\ (1+k) C_{fp} + C_w & \text{大型タンカー} \end{cases} \quad (3.1.10)$$

$$C_r = \begin{cases} 0.0004 & \text{maneuvering full} \\ 0.4 C_{fp} & \text{maneuvering speed} \end{cases} \quad (3.1.11)$$

$$(3.1.12)$$

の関係で C_{fp} は Schoenherr の近似式を用いた。

大型タンカー、バルクキャリアでは、 C_t を (3.1.12) 式で計算し、 k は笠島一田中の式を用いた。造波抵抗係数 C_w は maneuvering full を想定するからゼロとする。高速貨物船では (3.1.10) 式を用いて $\Delta C_f \approx 0.0004$ とし、内航貨物船では maneuvering speed がかなり高いフルード数となるので $C_r \neq 0.4 C_{fp}$ とした。

浸水面積 S の値は Taylor の式を用いて $C_s (= S / \sqrt{L \cdot d}) \approx 2.6$ として求めた。すなわち

$$S / L d = C_s \sqrt{L \cdot d} / L d \quad (3.1.13)$$

$$\approx 2.6 \sqrt{C_b (B/d)}$$

ii) プロペラ直径と主機回転数

プロペラ直径は、図 3.1.6 に示す在来船の実績より

大型タンカー・バルクキャリアで 2.7% L

高速貨物船で 3.5% L

内航貨物船で 4.0% L とする。

プロペラ回転数は、DHPとの関係図表²³⁾(図 3.1.9)を用いて、

$$n_0 = 1.77 \left(\frac{V}{D} \right) \left(X'_{vv} \left(\frac{L}{D} \right)^2 \cdot \left(\frac{d}{L} \right) \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.1.14)$$

より決めた。ここで、 X'_{vv} は(3.1.9)、(3.1.10)、(3.1.12)を用いて求めたものを使い、推進効率は 0.6 とした。

iii) 伴流係数の推定

過去に実施された模型船の実測例から C_p ベースで求めた図 1.3.10²³⁾ をもとに実船へ換算、図 3.1.11²³⁾ を使って最終的に実船の(1-w)を推定した。これより、プロペラスリップ比が決まる。

$$\begin{aligned} s_0 &= 1 - \frac{V_0 (1-w)}{n_0 P} \\ &= 1 - \left(\frac{D}{P} \right) (1-w) J_{s0} \end{aligned} \quad (3.1.15)$$

vi) 推力係数の推定

図 3.1.1 に示したような(1-t)K_T-J_sの関係で $J_s > 0$ の部分では

a) $(1-t)K_T = 0$ になるのは $P/D(1-w)$ と近似できる

b) 定常航走中は $X_{vv} V^2 = (1-t)T$ である。

これを使うと、

$$C_1 = \frac{X'_{vv}}{2s_0} \left(\frac{L}{D} \right)^2 \left(\frac{B}{L} \right) \left(\frac{d}{B} \right) J_{s0}^2 \quad (3.1.16)$$

となり、(3.1.3)式より C_2 が決まる。 C_1, C_2 が決まると、 C_3, C_4, C_5, J_{ST} は実験的におよそ次の関係があり、これから推定できる。

$$C_3 = -\frac{4}{5} C_1 \quad C_4 = -\frac{5}{3} C_2 \quad C_5 = \frac{C_3}{2} - C_4 J_{ST}$$

$$J_{ST} = -\frac{2}{5} \left(\frac{P}{D} \right) / (1-w)$$

v) 付加質量係数 m'_x, m'_y の推定

元良の図表²⁴⁾より m'_x/m' , m'_y/m' を推定した。なお横付加質量修正係数 C_m は L・Wagner Smitt の実験結果より

大型タンカー、バルクキャリア、内航貨物船で 0.75

高速貨物船で 0.50

と推定した。

vi) Pivoting Point, ℓ'_p の推定

大型タンカー、バルクキャリア、内航貨物船で 0.50

高速貨物船で 0.45

とした。

vii) $X'_{\delta\delta}$ の推定

藤井の直圧力算定の式より求めた

$$X'_{\delta\delta} = \frac{6.13\lambda}{2.25+\lambda} (1-w)^2 (1+ks_0^{15}) \quad (3.1.17)$$

$$k=3.2$$

viii) T_n の推定

回転数整定までの時間遅れは、船や主機の特性と関係づけて決めるべきだが、近似的に一定として E50 および E40 のモデルで 10^{sec} 、E25 のモデルでは 5^{sec} とした。

以上により係数設定の手順が図 3.1.12 に示される。又、主機回転数と船速の関係は、表 3.1.4 に示される。

(2) 回頭運動応答関係の諸係数²²⁾

回頭運動応答モデルは、文献(25),(26),(27)を基礎に次のように推定された。

V L C C の E50-5 つまり、 $L/V=50$ 、不安定ループ幅 5° のモデルを基準にして、このモデルの K' 、 T_1' 、 T_2' 、 T_3' 、 α を実績をもとに決めた。その後、他の不安定ループ幅の異なるモデルについては、 K'/T_1' の比がループ幅が変わっても 0.50 に保たれ、又舵角 15° における定常旋回半径が 0.43 と一定として、 K' 、 T_1' 、 α を求めた。そして、実用船型の範囲では T_2' と T_3' はあまり変わらず、船の旋回特性への影響も比較的小さいので、 $T_2' = 0.35$ 、 $T_3' = 0.60$ と一律に設定した。又、機関逆転にともなう回頭力 a'_k は、 J_s の関数になるけれども、現在のところまだデータの集積が十分ではないので、一応一定とみなして、 $a'_k/T_1' T_2' = 0.0024$ とした。(3.1.6) におけるプロペラ・スリップの影響 $g(s)$ は図 3.1.13 に示される。

このようにして決めた操縦特性は、母型が V L C C なので、貨物船や内航小型船に対して妥当なものかどうかという点、および機関逆転時の回頭力の推定上にはまだ問題点が残っている。しかし、 L/V が時間スケールすべてにかかるので、船の大きさの影響は取り入れられており、針路安定の程度が決められると、機関正転中はほぼ個々のモデルの操縦特性を示すものと考えられる。ただ、機関逆転時の回頭力は、本委員会では次年度以降においても、なお詳細に検討されるべき課題と言える。

各モデルの回頭運動応答関係の諸係数は、表 3.1.3 に示される。

3.1.4 E-Series 船の停止惰力と逆転停止性能

(1) 惰力航走距離、時間

主機停止発令時の遊転回転数は、(3.1.4) 式で与えられているので、これを船速の応答方程式(3.1.1) 式に代入して解くと、機関停止発令時の速力を V_0 とし、速力が V_f になるまでの航走時間 t ($V=V_f$) および航走距離 S ($V=V_f$) は次式で与えられる。

$$t(V=V_f) = \frac{1}{a_{vv}^*} \left(\frac{1}{V_f} - \frac{1}{V_0} \right) \quad (3.1.17)$$

$$\begin{aligned} S(V=V_f) &= \int_0^{t(V=V_f)} V dt \\ &= \frac{L}{a_{vv}^*} \ln \left(\frac{V_0}{V_f} \right) \end{aligned} \quad (3.1.18)$$

ここで、 $a_{vv}^* = a_{vv}' + \Delta a_{vv}'$

a_{vv}' は、遊転にともなう抵抗増加分で、各モデルについて応答方程式より計算できる。

E シリーズモデルの航走距離が V_0/V_f をベースに図 3.1.14 に示される。

(2) 逆転停止距離、時間

船速 V_0 で航走中にプロペラを n_a にして、逆転停止を行なう時、回頭と主機の遅れを考えない場合の逆転停

止距離(S_s)および停止までの時間(t_s)は、船速の応答方程式をもとに計算できる。

逆転停止時間と逆転停止距離の計算結果が図3.1.15, 3.1.16に示される。同図中に丸印で示したのは、以下のシミュレータスタディで標準の接近速力とした $V_0 = 6 \text{ m/s}$ (11.66ノット)に対応する値である。

実際の逆転停止に際しては、回頭運動を伴ない、又主機遅れも存在するので、これを考慮した逆転停止性能を求めるには、主機特性と回頭運動方程式を連立させて解く必要がある。

3.2 実験方法

3.2.1 SR151操船シミュレータ^{22),28)}

SR151操船シミュレータは、日本造船研究協会が開発したもので、図3.2.1に示すように船橋の前面に210°にわたるスクリーンを持ち、その上に海面、遠方物標およびテレビカメラにより別に撮影された近接する島、Buy, 他船のいずれか1物標が投影される。これらは、船の操縦とともに相対運動をするように作られている。そして、常用する航海計器と共に、レーダーが設置され、投影されている物標と同じ相対運動をレーダー画面上です。したがって、操船者は視覚とレーダーを併用しながら操船することが出来る。

3.2.2 操 船 者

航海士として乗船経験が2年のT航海士が担当した。操舵手はH.Uが適宜交代した。操船者には、本実験に入る前に供試船と実験に馴れるために2日間に7回繰り返して予備的な操船を行なった。

3.2.3 実験の種類

加減速操作をともなう操船として、次の三種の操船を実施した。

- 1) 定点停止操船……定められたところで、停止する操船
- 2) 定点定時通過操船……定められたところを定時に一定速力で通過する操船
- 3) 追従操船……先行船と一定間隔を保つように追従する操船

計測した項目は、実験の種類によって異なるが、(1)船速、(2)機関回転数、(3)舵角、(4)回頭角、(5)航跡、(6)操船者の動作分析については共通して計測された。この他に定点停止操船では、船速一残航程の関係、定点定時通過操船では、残航程一時間の関係、追従操船では、相対速力一相対距離の関係がX-Yレコーダに記録された。

3.3 実験結果

3.3.1 定点停止操船

(1) 実験内容

図3.3.1のように航路幅700mの航路内に定めた点で停止する操船を行なう。初速 V_0 、原針路 ψ_0 で航行中から減速して航跡の横偏位ができるだけ少なくするように舵と機関を操作しながら操船する。

ここで、指定地点B点での残速を $\epsilon_v (=V_0 - V_f)$ およびB点に至るまでの最大横偏位置を $(\epsilon_y)_{\max}$ とする。

(2) 設定条件

実験は図3.3.1に示すように3ヶの航路ブイと停止予定水域付近に島を設け、レーダー画面上に表示し、島はスクリーン上に表示した。

操船者はレーダーおよびコンパスにより自船の船位を確認しながら減速していく。接近速力(V_0)は7ノット(Slow ah'd)から11.7ノット(Full ah'd)の範囲でかえて、最終速力は0ノットとして、表3.3.1に示すように設定した。なお、外乱は、操舵手に臨場感を与える程度に波による影響を常時入れ、又、潮流を因

3.3.2 に示すように順流又は正横から一定区間入れて、その影響を調べる場合も実施した。

実船の入港時の減速状況を回帰して求めた減速パターン²⁹⁾を操船者に示し、これを目標値にして操船する場合の効果も調べた。これらの場合は表 3.3.1 の Exp. No に *印を付した。*印以外はこの情報を示していない。

表 3.3.1 定点停止操船の設定条件

Model	$(X_R)_0$ (miles)	V_0 (Knots)	Current	Exp. No
E 25-8	2.5	11.7	—	8, 9, 11, 14, 54*, 55*
"	"	"	exist	12 (following C.) 15 (beam C.)
	2.0	8.8	—	80
E 50-5	5.0	11.7	—	56, 57, 58*, 60
"	"	"	exist	59 (following C.)
	3.0	7.0	—	81
E 40-0	4.0	11.7	—	76, 77*
	3.0	9.3	—	78 -
	2.0	7.0	—	79

(3) 実験結果と検討

図 3.3.3 は定点停止操船中、船速 (V)、回転数 (n)、舵角 (δ)、回頭角 (ψ) を一例として示したもので、後進時の右回頭を止めるために、左舵を大きくとり Half ah'd をかけ Boosting をしていることがわかる。

図 3.3.4 は一例として、E 50-5 について操船中の航跡を示しており、図 3.3.5 はその $V - R_R$ の関係を示している。 V と R_R を航海速力 V_N と L で無次元化して、各減速曲線について $R_R/L = 0.2$ ごとに V/V_N の平均値を求めて得た減速曲線が図 3.3.6 に示される。同時に以下に述べるような入港操船のモデル化によってえた減速パターンとよく応答していることがわかる。図 3.1.7 はこの減速パターンを操船者がみながら操船した場合とそうでない場合の平均減速曲線を示しており、 V_0 が異なってもこの減速パターンに沿うように減速していくことがわかる。

$V/V_N - R_R/L$ 曲線中に示されている減速パターンは、操船者が入港操船をする時の減速操作をいくつかの近似のもので

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\lambda \frac{1}{x} \frac{dx}{dt} \quad (3.3.1)$$

で行うものとして推定したものである。²⁹⁾ここで x は着岸点までの想定航跡上の航走距離にとり、 λ は操船者の特性によって決まる値である。(3.3.1) から x を $x = -D$ と残航程にとると、

$$V = \lambda \ell_n D + C \quad (3.3.2)$$

の形になる。D を船の長さ、V を航海速力 V_N で無次元化して

$$\frac{V}{V_N} = \lambda' \ell_n D/L + C' \quad (3.3.3)$$

とする。そして、レーダによる入港時の航跡計測結果 77 例によって、 λ' および C' を次のように決めている。

一般貨物船 (G.T. 3,000t ~ 15,000t)

$$D/L \approx 20 \text{ 以下} \quad \lambda' = 0.109 \quad C' = 0.15 \quad (3.3.4)$$

タンカー (G.T. 20,000t ~ 28,000t) (実測例は少ない)

$$D/L \approx 10 \text{ 以下} \quad (3.3.4) \text{ に同じ}$$

$$D/L \approx 18 \sim 40 \quad \lambda' = 0.25 \quad C' = -0.15 \quad (3.3.5)$$

図 3.3.8, 3.3.9 はその結果を示す。

ここで, $D \neq R_R$ なので, (3.3.3) により減速パターンが計算できる。

図 3.3.10 は, 定点停止操船を評価する値として, 両舷の回頭角のズレ量の最大値 (ϵ_ψ)_{max}, 橫偏位量の最大値 (ϵ_y)_{max}, 機関操作回数 N を示している。横軸には, 減速操作を開始してから船体が停止するまでの X 方向の進出距離 (S_x) と所要時間 t_s の比を平均速力 V_m として探っている。 ϵ_ψ , ϵ_y の値は使用する後進機関操作の回数および時間によって大きく影響されて, 右回頭, 右偏位で最大値が出ている。V_m による影響はあまり顕著ではない。機関を後進にすると, どの船も不安定になるが, 前進中の不安定ループ幅が大きい場合 (E50-5) は Boosting をかけても効きが遅く, (ϵ_ψ)_{max} が大きくなる傾向があり, したがって (ϵ_y)_{max} も大きくなる。これは, 加減速操船に与える操縦特性の影響の重要な点である。

図 3.3.11 は, 減速操作の開始点と予定停止点との相対距離 τ_s と停止所要時間 t_s をそれぞれ L と V₀/L で無次元化して, τ'_s と t_s' の関係を示している。予定停止点より, オーバーラン (+△S_x) したり, 手前で停止したりする (-△S_x) ことがなければ S_x と τ_s は等しい。±△S_x の値は, 0 ~ 0.16 マイルなので, τ'_s / t_s' はほぼ V_m に等しい。同図には, 3.1.4 で求めた回頭をしないとしたときの逆転停止距離, 時間および機関停止から 3 ノットになるまでの航走距離, 時間が合せて示されている。これらを結んだのが点線で, ほぼ直線になり, V_m が一定であることを示している。操船者は Stop Eng. や後進機関操作は停止直前まで使用しないので, この V_m よりやや大きい値であるが, 各モデルを通じてほぼ一定値をとっている。

図 3.3.12 は, 計算でえられた各モデルの機関逆転又は停止時の加速度と, 操船者のとった平均加速度 ($a_m = V_0/t_s$) との関係を示したもので, 逆転時の加速度を 1 として, 減速操作開始時機 τ'_s を横軸に示している。(1-a_m/a_{max}) は操船者が運動制御に関して持つ余裕を示すことになる。船が大きいほど, 又 τ'_s が小さいほどこの余裕が小さくなっていくことがわかる。たゞ, これにはまだ逆転に伴う回頭を考えていないので, これらを組込んでいくと加減速性能の操船上の一つの評価方法になると考えられる。

3.3.2 定点定時通過操船

(1) 実験内容

図 3.3.13 のように, 航路入口へ V₀ の船速で航行中の船に最終速度を V_f 以下にして指定時刻 t_f に航路入口を通過するように操船する。

この時, $x_R - t$ の関係は, 図 3.3.14 のようになる。

ここで, 指定地点 B における通過指定時刻および速力よりのズレ量を ϵ_v , ϵ_t とし, (X_R)₀ を航行中の原針路よりのズレ量の最大値 (ϵ_y)_{max} とする。操船者は, (X_R)₀, △t, V₀, V_f が与えられたときに ϵ_v , ϵ_t , (ϵ_y)_{max} を出来るだけ小さくするように操船する。

(2) 設定条件

実験は, 実際の操船場面に近いものとして, 図 3.3.13 に示すようにレーダー上に 4 ケのブイ (うち 1 ケをスクリーン上に表示) で表示される。航路幅 700m の航路に接近中の船を想定した。V₀ は, S/B Full にとり, V_f は海上交通安全法に定める上限速力 12 ノット以下として, 表 3.3.2 に示すように (X_R)₀, △t を変化させて設定した。E50-5 で V_f を 9.3 ノットと小さくしたのは表 3.1.5 に示すように, S/B Full が E25-5 に比べて低いので, その割合で小さくした。

又、 $X_R - t$ 図を直接操船者に示してこれをを利用して操船した場合の有効性も調べた。表 3.3.2 で E, №に *印をつけたのは、この $X_R - t$ プロッターを使用した場合である。これらの場合には、レーダーは使用していない。

表 3.3.2 実験設定条件

Model	$(X_R)_0$ (miles)	V_0 (knots)	Δt (min)	V_f (knots)	Exp. №
E 25-s	1.5	14.6	3	1.2	20, 27, 30, 33*, 40*
"	1.5	"	6	"	18, 28, 31, 34*, 41*
"	1.5	"	9	"	19, 29, 32, 35*, 42*
"	3.0	"	3	"	21, 24, 37*
"	3.0	"	6	"	22, 25, 38*
"	3.0	"	9	"	23, 26, 39*
E 50-5	3.0	14.6	3	9.3	63
"	3.0	"	6	"	64
"	3.0	"	9	"	65
"	6.0	"	3	"	62
"	6.0	"	6	"	66, 69*
"	6.0	"	12	"	67, 70*
"	6.0	"	18	"	68, 71*

(3) 実験結果と検討

図 3.3.15 は、計測記録の一例で、上から船速 V 、回転数 n 、舵角 δ 、船首方位角 ψ を示す。後進をかける時には、舵を左一杯にとって ψ の増加を防止しているのは、定点停止操船の場合と同様である。

図 3.3.16, 3.3.17 は、 $X_R - t$ 曲線を E 25-5, E 50-5 について示したものである。又、図 3.3.18 は、この操船結果を評価するために ϵ_v , ϵ_t , $(\epsilon_x)_{max}$ を調整時間／航走距離 [$\Delta t / (X_R)_0$] で示したものである。ここで、まず、 $X_R - t$ プロッターを使用しないで、レーダーのみでこの操船を行う場合を考える。

この操船を、 $V - t$ 図にかくと、模型的に図 3.3.19 のようにかけ、この時の調整可能時間 Δt は

$$\Delta t = (X_R)_0 \left(\frac{1}{V_m} - \frac{1}{V_0} \right) \quad (3.3.6)$$

V_m : $0 \sim t_f$ 間の平均速力

となる。

操船者は、

- (1) 平均速力 $V_m = (X_R)_0 / t_f$ で航走すること
- (2) 最終速力を V_f にすること

の二つの目標を持つ。これは、図 3.3.19 で、 $V(t)$ と t 軸上 $0 \sim t_f$ がかかる面積と $V_m \times t_f$ が等しくなるよう $V(t)$ を決めるところになる。

操船者は、適宜、レーダーにより残航程 $X_R(t)$ を測り、残り時間 ($t_f - t$) とから、その時刻 t から t_f までの平均速力 $V_m(t)$ を計算し、それと現在の速力 $V(t)$ との大小関係から機関操作内容を決めている。つまり、

$V(t) > V_m(t)$ 減速操作

$V(t) < V_m(t)$ 増速操作

しかし、 $V(t) = V_m(t)$ になんて、最終速度を V_f にするという制約条件があるので、 $V_m(t) \div (V_f + V(t)) / 2$ になるように、 $V(t)$ を操作する。このことは、一例として、図3.3.15に示されているように、 V_m が $V(t)$ よりも大きくなる付近で増速している。こうした操作方法が一般的なものかどうかは今後も調べる必要があるが、レーダーを利用した定点定時通過操船としては有効な方法であろう。

図3.3.18から調整時間と航走可能距離の比 $\Delta t / (X_R)_0$ が大きくなると、いずれの評価量 ϵ_v , ϵ_t , (ϵ_y)_{max}も大きくなり、この比が同じであれば、同じ船についてはこれらの値はほぼ同じになる。しかし、 L/V が大きくなると、通過時間は調節できるけれども、速力が目標値より低くなる。これは、船の增速性能が L/V が大きい船ほど劣るためである。

$X_R - t$ プロッターを利用して操船すると、図3.3.18に添字Pをつけて示すように、操船結果のうち速力よりも通過時間に関してより正確な操船が可能となる。使いたれると、操船者の負担を軽減して、この操船には有用な計器となろう。ただ、レーダーを利用する場合は、自船周りの他船の動きなどの操船環境に関する情報も同時にえられるのに比べて、このプロッターでえられるのは、自船に関する情報だけなのは、実際の海上で利用する時のマイナス点であろう。

実務上の観点から接近速力 V_0 、最終速 V_f の種々の組合せに関して操船方法を一定（例えば、Full ah'd → D.s ah'd → Full ah'd）にしたときの調整可能時間と必要航走距離の関係を図又は表にするのが有効である。又、 ϵ_v , ϵ_t , (ϵ_x)_{max}の評価量の許容限界とその重みづけも実務上検討すべき問題である。

3.3.3 追従操船

(1) 実験内容

図3.3.20.aのように、自船が V_A で航走中に V_B で航行する先行船と相対距離 R_R ($\div X_R$)と相対速力 V_R を一定に保つように操船する。ここで先行船の速力 V_B のパターンは、図3.3.20.bのように三つのTypeを想定した。

(2) 設定条件

実験は先行船をVisual displayとレーダーPPI上に表示し、操船者は視覚およびレーダー情報により機関操作を行うものとする。

自船の初速は、6 m/s(11.7ノット)として、表3.3.3のように設定した。

表3.3.3 追従操船の設定条件

Model	X_R (マイル)	V_B	Exp. No
E 25-s	0.5	Type 1	44, 47, 50, 53
	"	Type 2	45, 49, 51
	"	Type 3	46(T=10分), 48(T=15分), 52(T=20分)
E 50-5	1.0	Type 1	72, 75
	"	Type 2	73
	"	Type 3	74

(3) 実験結果と検討

図3.3.21は、E 25-5のモデルについて V_B の変化がType 1つまり、ステップ状に変化していく時の応答を求めた結果のうち、比較的うまく通常値に達することが出来た例である。図3.3.22は、その時の V_R と R_R の変化量つまり $R_{R0} - R_R(t)$ を示しており、一種の位相面図である。これからこうした操船の安定性の概要を知

ることが出来る。図 3.3.23, 3.3.24 は、それぞれ V_B が Type II および Type III の場合の典型的な例を E 25-5, および E 50-5 について示している。

こうした操船を、伝達関数を導入して解析することが考えられるが、同じ操船でも異なった傾向を示すので、直ちに操船者を伝達関数表示するのはさけて、ここでは、位相面からえられる V_R と $R_R - (R_R)_0$ に関する諸量を図 3.3.25 にまとめた。ここで、相対速度誤差の最大値 $(\epsilon_v)_{max}$ 、相対距離誤差の最大値 $(\epsilon_R)_{max}$ を L で無次元化して、これから過渡状態の多い V_B が Type III のときには E 50-5 の場合に誤差が大きくなること、又 E 25-5 では実験をくり返しているが、繰返すと操船成績が向上すること等の傾向がみられる。

いずれにしても、追従操船の解析は、今後の研究に待つべき点が多いが、船の加減速性能を評価する一つの方法として利用出来るのではなかろうか。

3.4 東京商船大学操船シミュレータによる実験

本節には、東京商船大学、東京大学の各操船シミュレータを使用して 3.2, 3.3 と類似の実験を行った結果をまとめてある。東京商船大学のシミュレータの概要を図 3.4.1 に示す。東京大学のシミュレータについては 4.2.2 を参照されたい。

3.4.1 定点停止位置

供試船は、 $L_{pp} 300m$ の大型タンカー、 $150m$ の一般貨物船、 $50m$ の小型貨物船の 3 種である。使用した数学モデルは(3.1.1)式～(3.1.6)式であり、諸定数については表 3.4.1 に示す。機関操作位置と速力の関係を表 3.4.2 に示す。

実験は図 3.4.2 に示すように、初期船速 V_0 から距離 D_0 航走後、最終船速 V_f まで減速することを目的として行った。 D_0 , V_0 の組合せを表 3.4.3 に示す。最終船速 V_f は $2.5 m/s$ とした。これは、アナログ・コンピュータの精度を考慮したためである。

次に実験結果について述べる。図 3.4.3 に、航程に対する船速の変化を機関操作の状況を含めて示してある。丸印の中に F と記してあるのは Full ahead を意味し、四角印の中に F とあるのは Full astern を意味する。H は Half を S は Slow, D は Dead slow を各々意味する。黒丸は Stop Engine を示している。

$300m$ の大型船では保針のためのブースティングがひんぱんに行われている。

初期船速の違いは、減速操作開始距離を変化する事で対応し、その後の残航に対する減速率は同一船では、ほぼ同じパターンをとることがわかる。この点から見ると $L_{pp} : 300m$, 初速 $9 m/s$ の場合、 $10,000 m$ 以上の停止距離が必要と云う事になる。

図 3.4.4 は各船に対し減速開始距離を、初期船速ベースに示したものである。白丸、黒丸は異なる操船者を表わしている。実線で示すものは、最終船速が $2.5 m/s$ になるまでに要する航走距離である。この時の機関操作は直接、目標とする最終船速に対応する回転数まで下げたものとし、船速が目標船速の $0.25 m/s$ 以内に漸近するまでに要する距離をもって必要航走距離としている。破線は最終船速が $0 m/s$ に対する航走距離である。実験により得られた必要航走距離は、計算値の 3～4 倍の距離を必要としており、大略、実船の記録とも一致している。

図 3.4.5 a に定点停止操船中の機関操作頻度を示す。図中、白丸は初期船速 $9 m/s$ を、黒丸は $6 m/s$ のものを示す。操作頻度は船長に比例して増大し、初期船速の違いには影響を受けていない。これは、初期船速 $9 m/s$ の場合でも 1～2 回の機関操作で船速を $6 m/s$ 程度まで下げてしまうためである。機関操作の頻度は $6 m/s$ 以下に集中しているので 1～2 回の操作回数の違いはあらわれなくなる。

図 3.4.5 b に速力制御中の最大針路振れ角を示す。針路振れ角も、船長に比例し、初期船速の影響は少ない。

最大針路振れ角が低速において現われることからみても当然の事と云えるであろう。添字Bのついているものは、ブースティングを行っていると思われる実験結果であり、この場合、針路振れ角は小さく抑えられている。

図3.4.5 cに速力制御中の船位の最大横偏位量を示す。最大針路振れ角と大略同じ傾向をとっているが、初期船速の大きなものは比較的横偏位量も大きな値をとっているようである。

3.4.2 定点定時通過操船

本項に示すものは、4章に述べた表記実験において、針路制御に関するもの、操船者の直接負担となる機関操作回数等についてのものである。実験の概要については4章を参照されたい。

図3.4.6に保針操船に関連する最大針路振れ角、平均当舵角度、最大横偏位量の実験結果を示す。丸印は L_{pp} 150m、四角印は L_{pp} 300mのものをそれぞれ表わしている。記号にヒゲのついたものは、Graphic Displayを用いたシミュレータ実験により得られたもので、この実験については図4.2.7に示すような船首揺れに対する外乱が加えられており、操舵はオート・パイロットによっている。図3.4.6においては、当舵量で船長の違いが出ている他は、船長の違いは現われず、定点通過時の速度に比例して各値が増加している点が顕著である。

図3.4.7に単位航走距離に対する機関操作回数を示す。横軸は時間調整のための航走距離(D)を基準となる距離(D_τ)で正規化した値である。横軸 D/D_τ の値が大きい程、ゆとりのある操船状況といえる。詳しくは4.2.3を参照されたい。通過時刻、通過時船速の精度の面からは D/D_τ が3~4以上必要とみられるが機関操作頻度の点からも同様の事が云えるであろう。

3.5 シミュレータ・スタディにおける今後の問題点

船の加減速性能と操船者の特性を操船上で評価するために、3種の加減速操船を実施したが、シミュレータ・スタディ上次の諸点を今後検討すべきである。

- 1) 今回のシミュレータ操船では、他船はいないものとしたので、操船者はほとんどログ、レーダ、時計又は付加した計器から情報をえて、加減速操船のみに全力を傾注している。実際の操船では、他船、障害物の避航や変針操作が同時に必要となるので、今回の実験を基礎にしてこうした状況を組み込んだシミュレータ操船が必要である。
- 2) 今回の数学モデルでは、低速(約5ノット以下)又は停止時に大舵角をとり、機関を前進したとき、つまり Boosting 時の回頭がかなり遅く感じられた。こうした状態での舵効の表現を改善する必要がある。
- 3) 各種の加減速操船の操船結果を総合的に評価できる方法を求める必要がある。

表3.1.1 E-Series モデルの主要目

	E 50 (V.L.C.C)	E 40 (Bulk Carrier)	E 25 (Liner)	E 10 (Small Cargo)	E 5 (Small Cargo)
Hull					
L (m)	300	240	150	50	25
B (m)	50	36.92	21.43	8.33	4.55
d (m)	20	14.77	9.32	3.33	1.82
∇ (m^3)	240,000	104,702	17,968	1,042	155
C _b	0.8	0.8	0.6	0.75	0.75
L/B	6.0	6.5	7.0	6.0	5.5
B/d	2.5	2.5	2.3	2.5	2.5
Rudder					
A _R /L _d	1/60	1/60	1/60	1/45	1/40
λ	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Propeller					
D (m)	8.0	6.5	5.0	2.0	1.0
p (m)	5.2	4.23	5.0	1.5	0.75
P/D	0.65	0.65	1.0	0.75	0.75
D/L	1/37.5	1/36.9	1/30	1/25	1/25

表3.1.2 E-Series モデルの諸係数(船速応答関係)

	E 50 (V.L.C.C)	E 40 (Bulk Carrier)	E 25 (Liner)	E 10 (Small Cargo)	E 5 (Small Cargo)
$m' (=2C_b B/L)$	0.267	0.246	0.171	0.250	0.273
$m' + m'_x$	0.286	0.262	0.186	0.267	0.294
$m' + c_m m'_y$	0.436	0.403	0.264	0.415	0.451
ℓ_p	0.5	0.5	0.45	0.5	0.5
$X'_{vv} (=C_t S/L_d)$	0.952×10^{-2}	0.916×10^{-2}	0.605×10^{-2}	0.934×10^{-2}	1.061×10^{-2}
$X'_{\delta\delta}$	1.76	1.68	2.62	1.60	1.68
$1-w$	0.60	0.60	0.80	0.633	0.60
J_{so}	0.586	0.616	0.810	0.781	0.714
S_o	0.459	0.43	0.352	0.34	0.429
C_1	0.334	0.339	0.315	0.349	0.287
C_2	-0.308	-0.313	-0.252	-0.295	-0.230
C_3	-0.267	-0.271	-0.252	-0.279	-0.230
C_4	0.513	0.522	0.420	0.490	0.383
C_5	0.089	0.070	0.084	0.093	0.077
J_{st}	-0.433	-0.433	-0.500	-0.474	-0.500
a'_{vv}	3.33×10^{-2}	3.49×10^{-2}	3.39×10^{-2}	3.50×10^{-2}	3.61×10^{-2}
a'_{rr}	0.761	0.749	0.666	0.777	0.768
$a'_{\delta\delta}$	0.103	0.107	0.245	0.133	0.143
a'_{nn}	1.77×10^{-5}	2.26×10^{-5}	7.02×10^{-5}	1.00×10^{-4}	6.88×10^{-5}
a'_{nv}	-6.13×10^{-4}	-7.72×10^{-4}	-1.69×10^{-3}	-2.12×10^{-3}	-1.38×10^{-3}
a'_{nn1}	-1.42×10^{-5}	-1.81×10^{-5}	-5.62×10^{-5}	-8.03×10^{-5}	-5.58×10^{-5}
a'_{nn2}	0.47×10^{-5}	0.47×10^{-5}	1.87×10^{-5}	2.68×10^{-5}	1.85×10^{-5}
a'_{nv2}	1.02×10^{-3}	1.29×10^{-3}	2.81×10^{-3}	3.52×10^{-3}	2.30×10^{-3}

表 3.1.3 E-Series モデルの諸係数（回頭特性関係）

Sub Number	S	0	5	10	25
Loop Width(deg)	Stable	0	5	10	25
K'	1.6	∞	-2.24	-1.30	-0.60
T'_1	3.2	∞	-4.48	-2.60	-1.20
T'_2	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
T'_3	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
$\alpha' \text{ (deg}^{-2}\text{)}$	0.00009	∞	-0.00470	-0.00352	-0.00265
T_E (sec)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
δ'_{\max} (deg/sec)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
$a'_R / T'_1 T'_2$ (const.)	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024

* g(s) : s shown in Fig. 3.1.13

表 3.1.4 E-Series モデルの主機回転数と船速

	E 50 (V.L.C.C.)		E 40 (Bulk Carrier)		E 25 (Liner)		E 10 (Small Cargo)		E 5 (Small Cargo)	
	RPM (rps)	Knot (m/s)	RPM (rps)	Knot (m/s)	RPM (rps)	Knot (m/s)	RPM (rps)	Knot (m/s)	RPM (rps)	Knot (m/s)
Navigational Full ahead	96.0 (1.60)	14.58 (7.50)	112.5 (1.88)	14.58 (7.50)	138.8 (2.31)	18.20 (9.38)	240.0 (4.00)	12.15 (6.25)	420.0 (7.00)	9.72 (5.00)
Maneuvering Full ahead	76.8 (1.28)	11.66 (6.00)	90.0 (1.50)	11.66 (6.00)	111.1 (1.85)	14.60 (7.50)	192.0 (3.20)	9.72 (5.00)	336.0 (5.60)	7.78 (4.00)
Half ahead	61.4 (1.02)	9.33 (4.80)	72.0 (1.20)	9.33 (4.80)	88.8 (1.48)	11.66 (6.00)	153.6 (2.56)	7.78 (4.00)	268.8 (4.48)	6.22 (3.20)
Slow ahead	46.1 (0.77)	7.00 (3.60)	54.0 (0.90)	7.00 (3.60)	66.6 (1.11)	8.75 (4.50)	115.2 (1.92)	5.83 (3.00)	201.6 (3.36)	4.67 (2.40)
Dead slow ahead	30.7 (0.51)	4.67 (2.40)	36.0 (0.60)	4.67 (2.40)	44.4 (0.74)	5.83 (3.00)	76.8 (1.28)	1.89 (2.00)	134.4 (2.24)	3.11 (1.60)
Stop eng.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
Dead slow astern	-	-	-	-	-44.4 (-0.74)	-	-76.8 (-1.28)	-	-134.4 (-2.24)	-
Slow astern	-30.7 (-0.51)	-	-36.0 (-0.60)	-	-66.6 (-1.11)	-	-115.2 (-1.92)	-	-201.6 (-3.36)	-
Half astern	-46.1 (-0.77)	-	-54.0 (-0.90)	-	-88.8 (-1.48)	-	-153.6 (-2.56)	-	-268.8 (-4.48)	-
Full astern	-61.4 (-1.02)	-	-72.0 (-1.20)	-	-111.1 (-1.85)	-	-192.0 (-3.20)	-	-336.0 (-5.60)	-

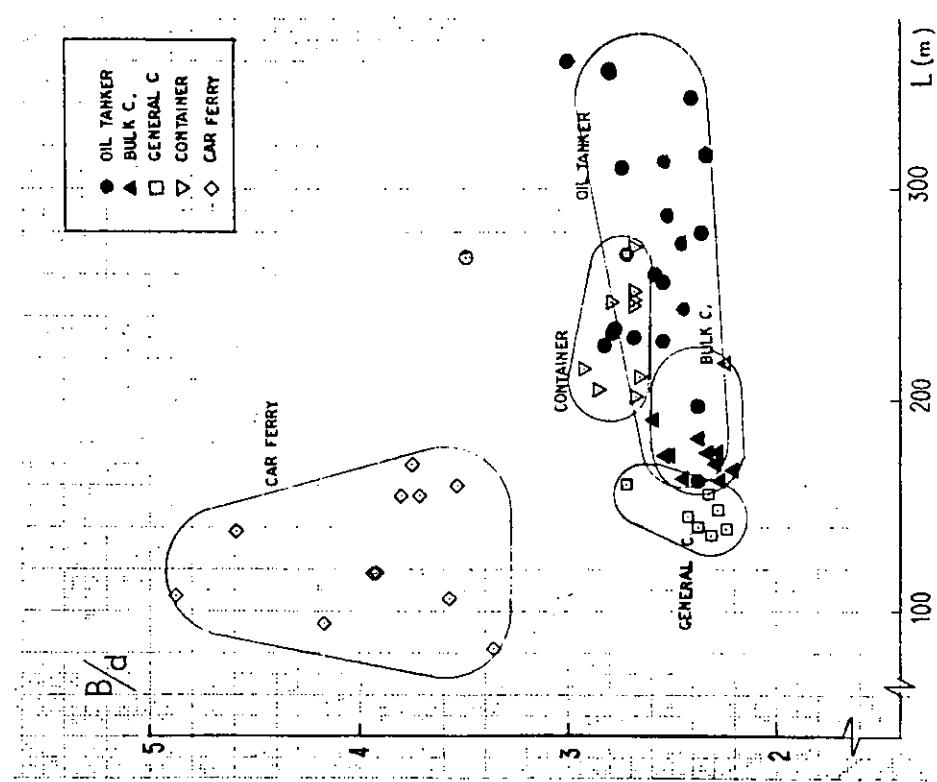


図 3.1.2 $B/d < L$

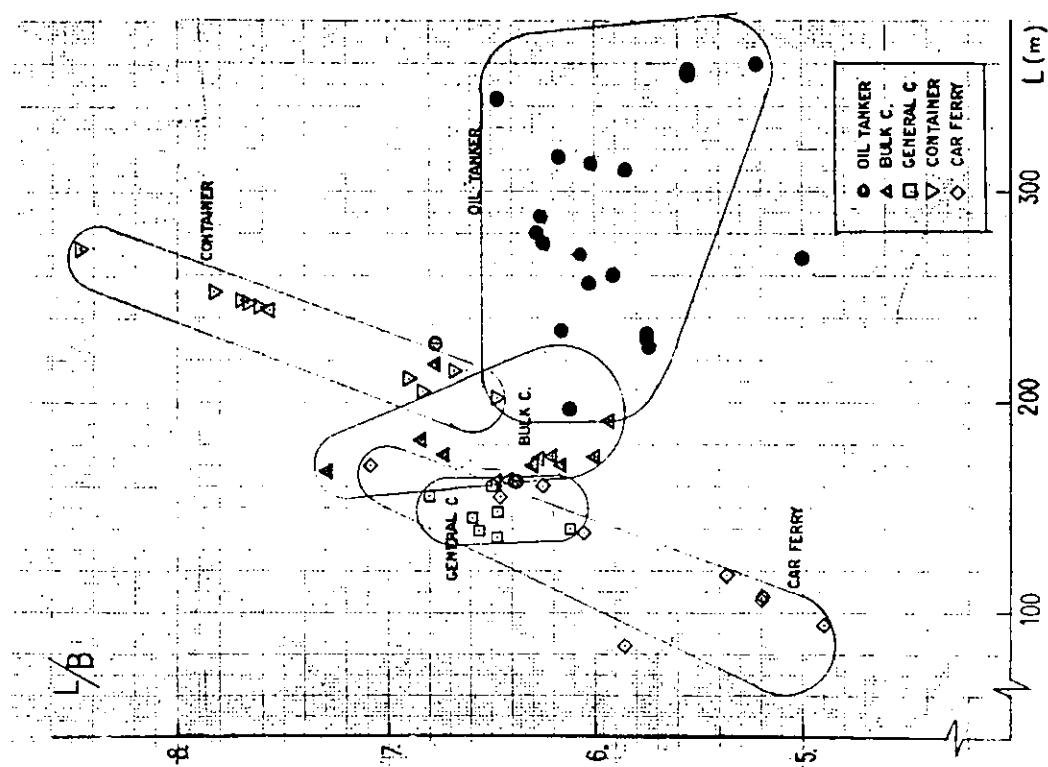


図 3.1.1 $L/d < B - L$

図 3.1.4 $A_R / L_d - L$

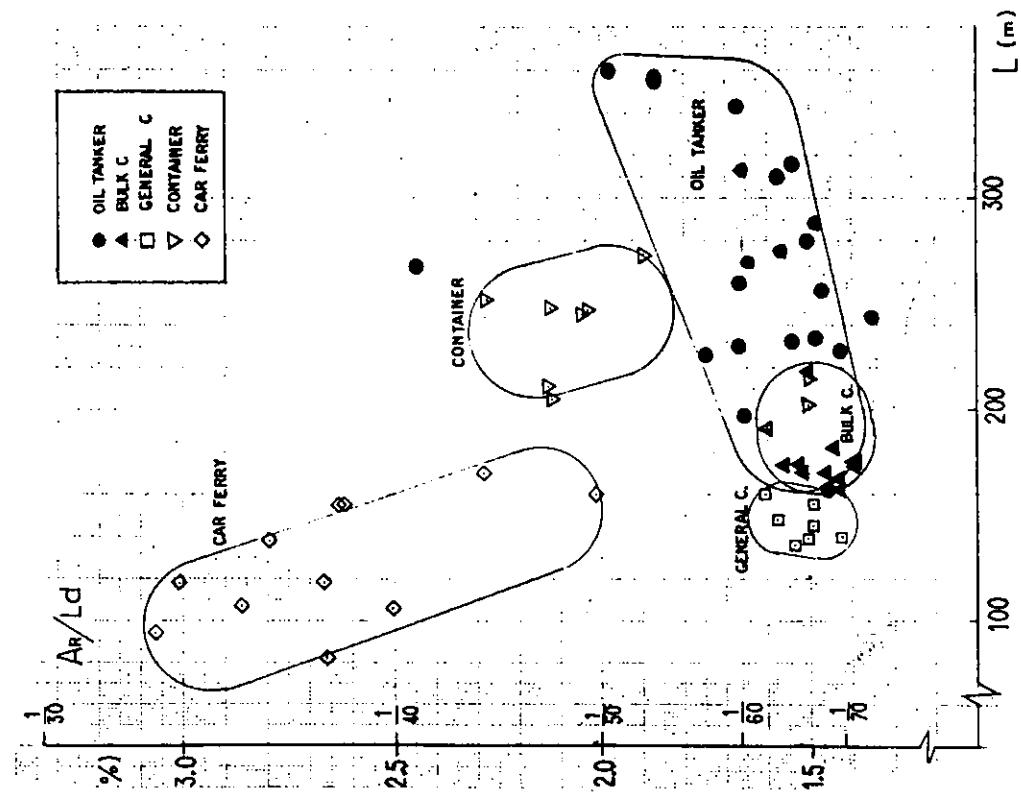
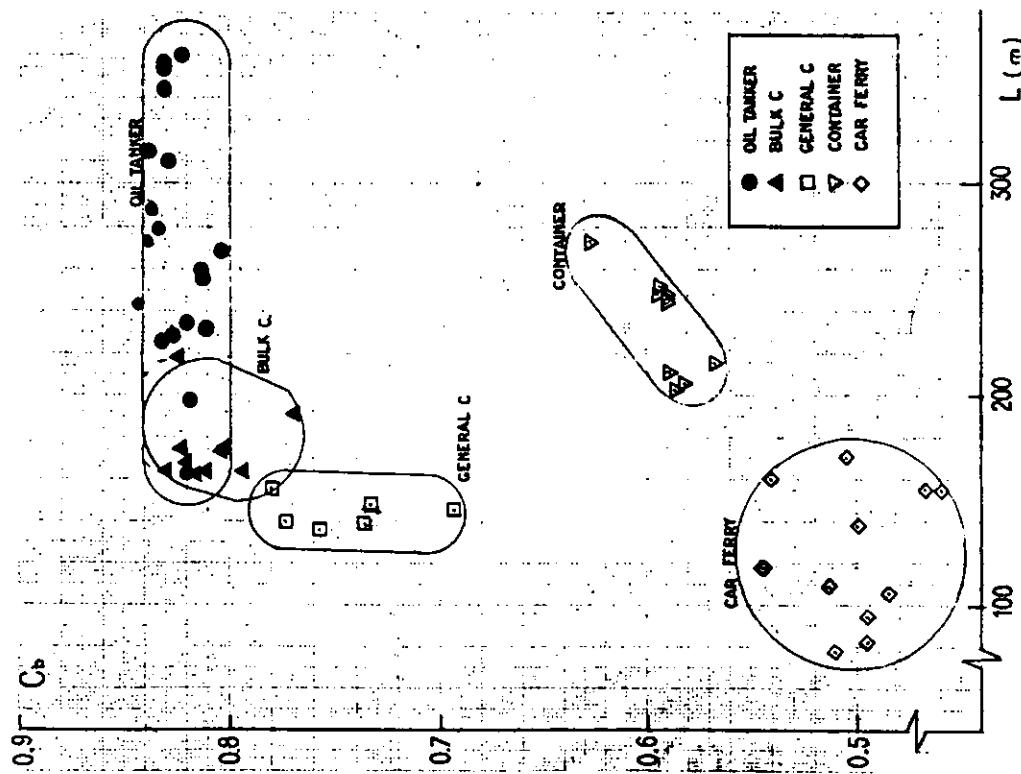


図 3.1.3 $C_b - L$



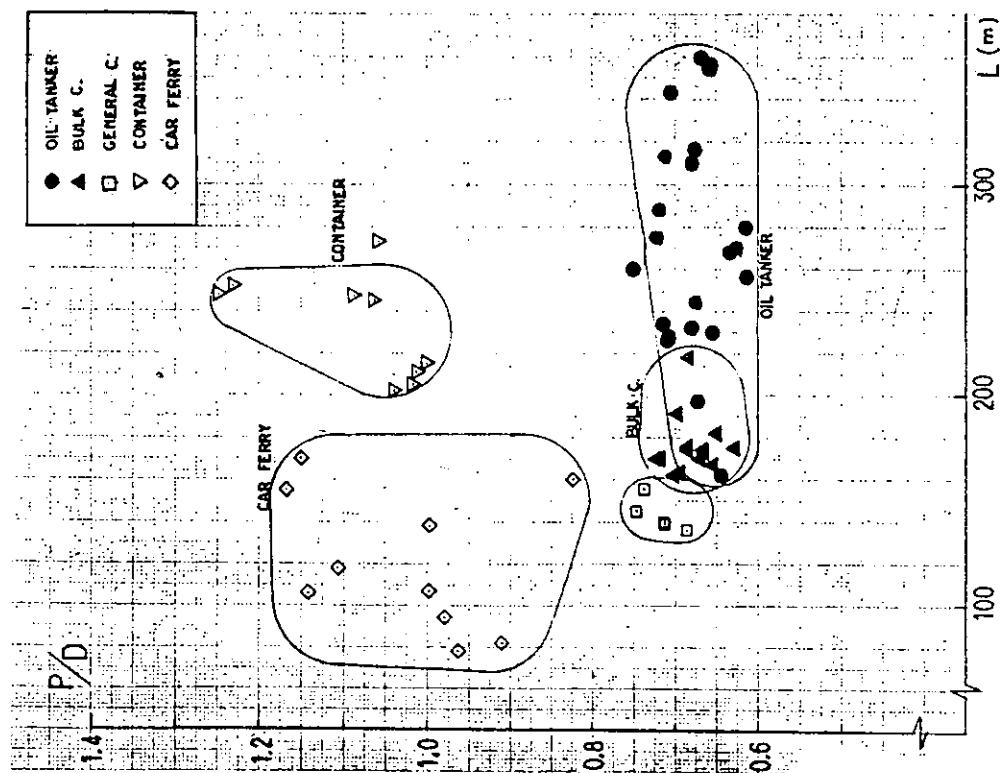


図 3.1.6 $P/D \neq D_1/L$

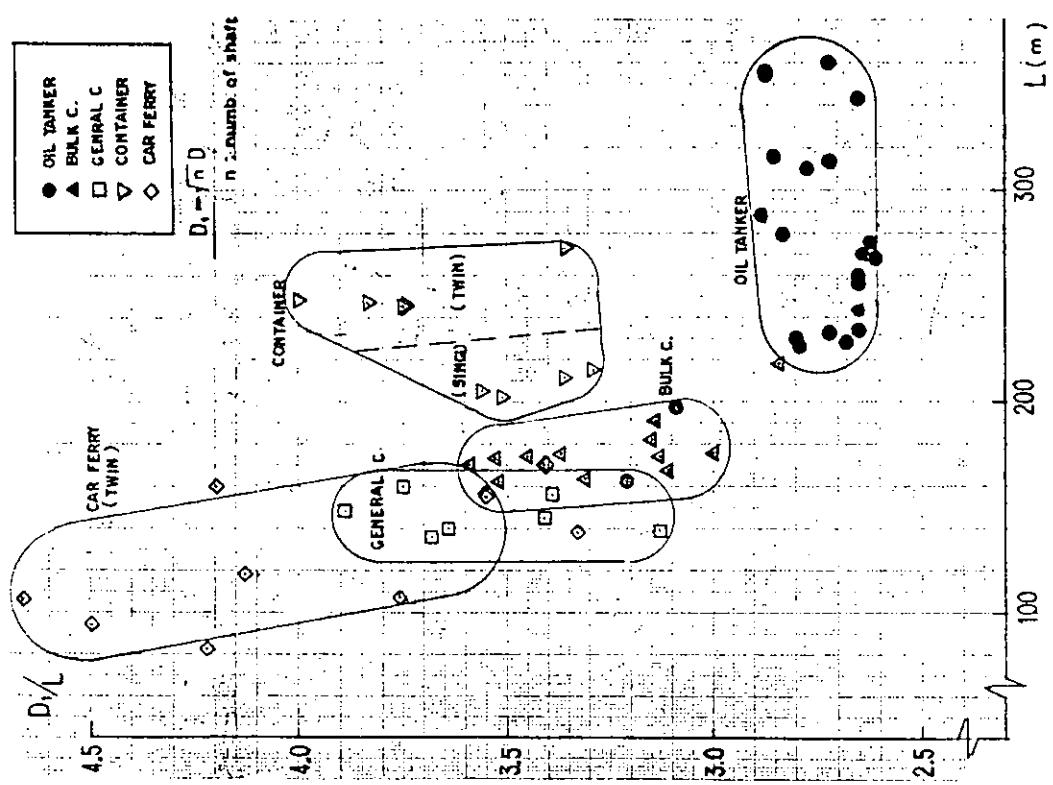


図 3.1.5 $D_1/(L - L_c) \neq D_1/L$

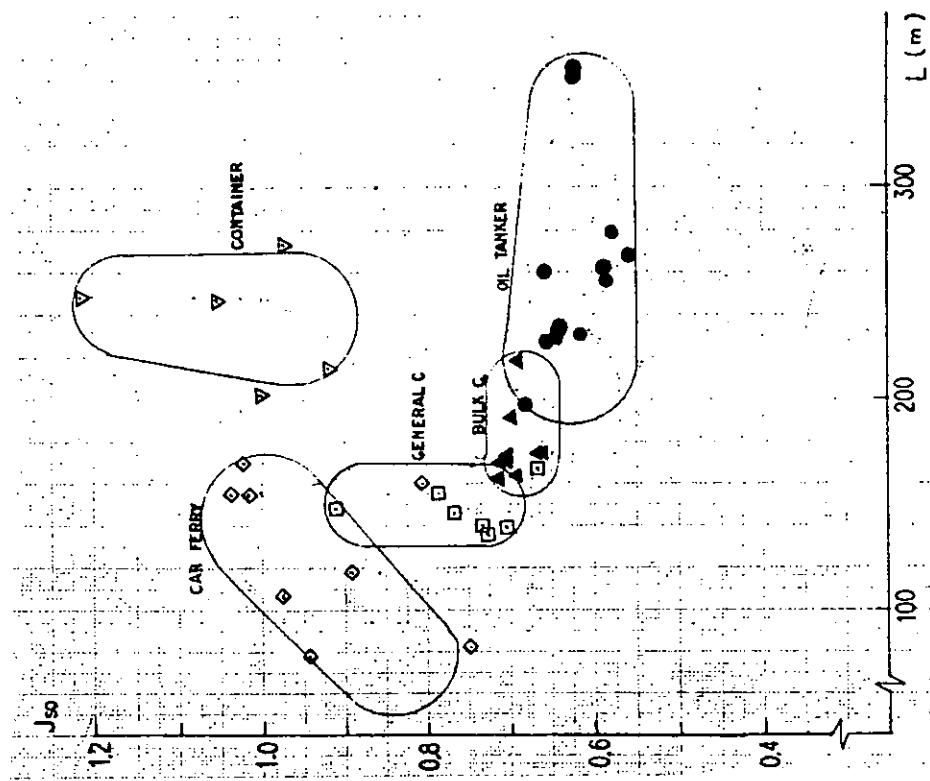


図 3.1.7 JSO-L

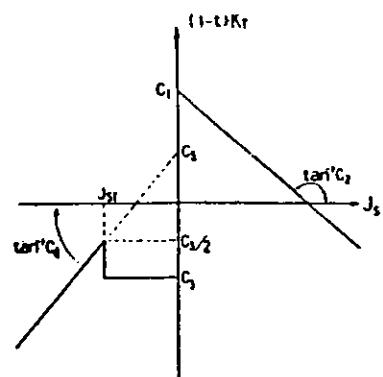


図 3.1.8. $(1-t)K_r - J_s$ の近似モデル

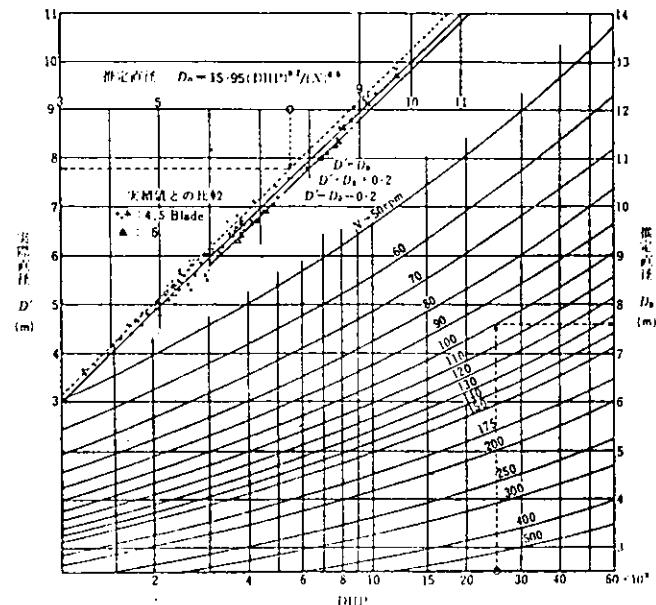


図 3.1.9 推進器直径概算図²³⁾

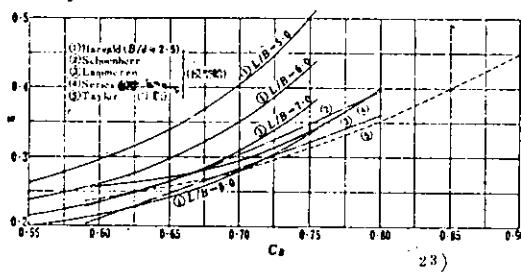


図 3.1.10 伴流係数（1軸比）

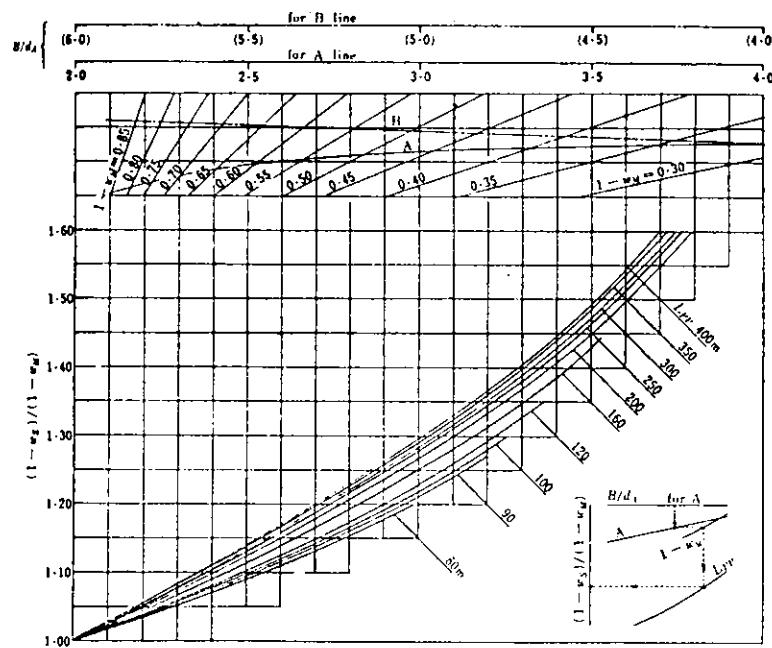


図 3.1.11 $\frac{(1-w_g)}{(1-w_u)}$ 推定図表（1軸比）²³⁾

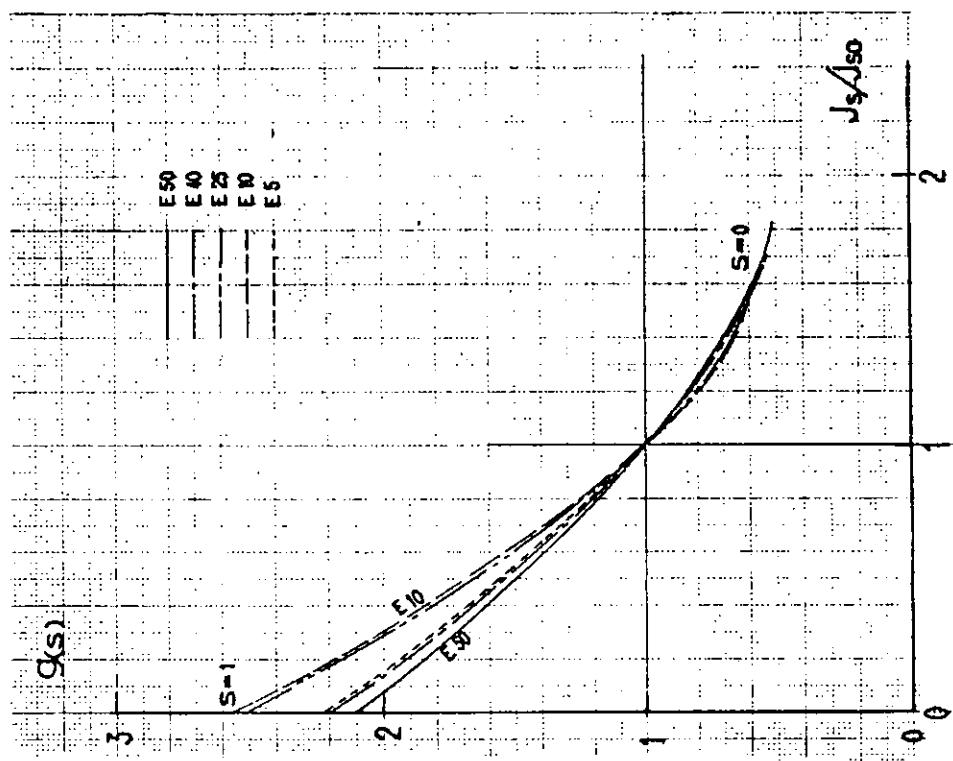


図 3.1.13 $g(s)$

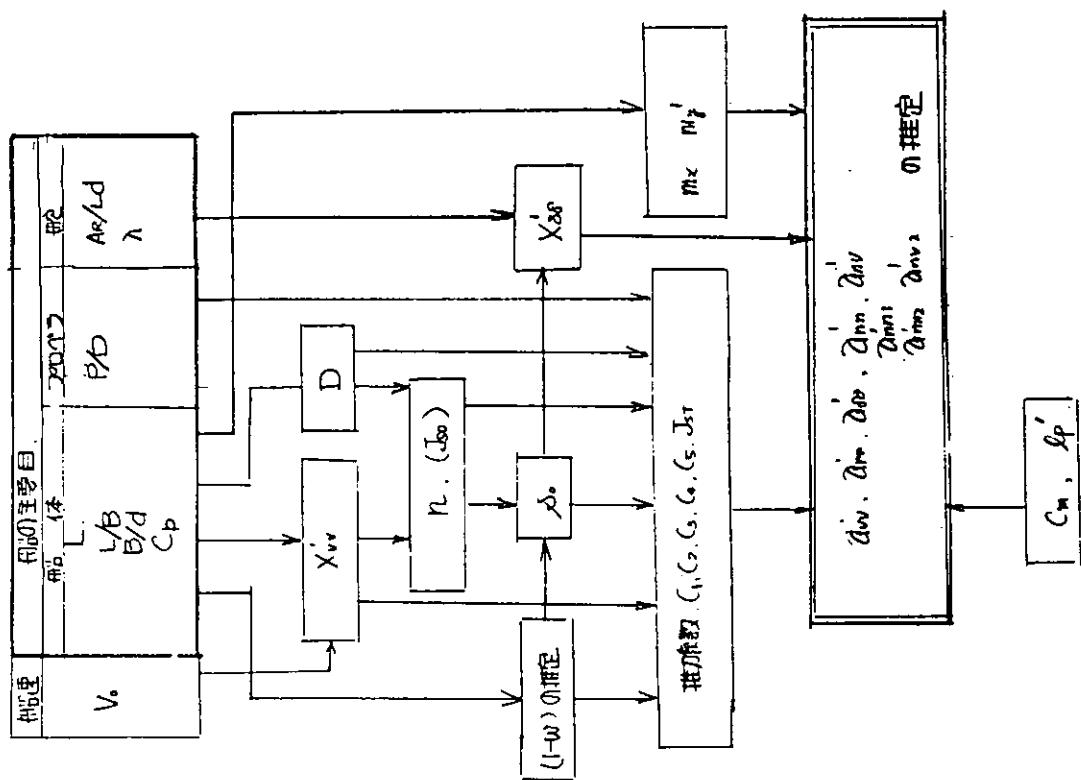


図 3.1.12 係数設定の手順

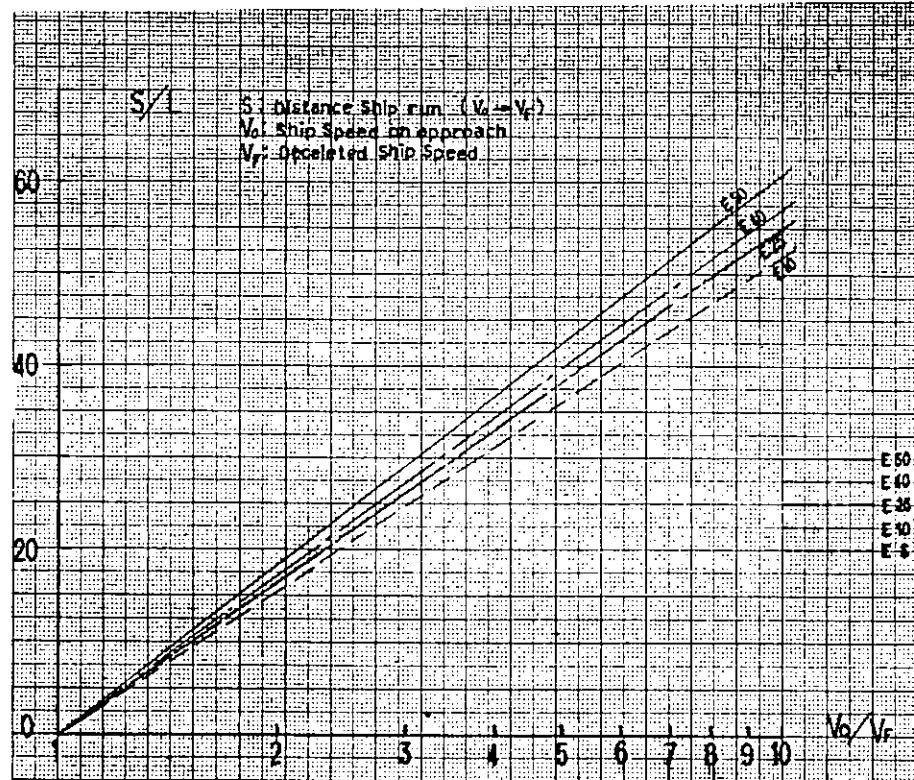


図 3.1.14 E - Series モデルの停止惰力

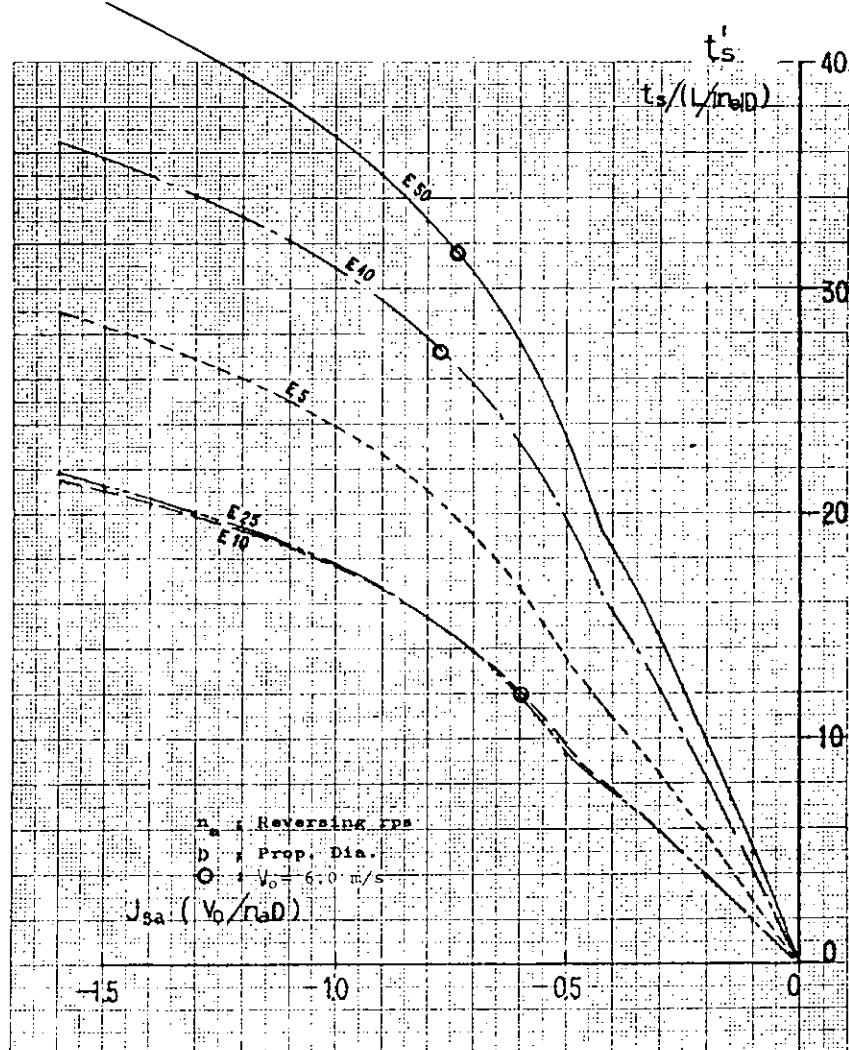


図 3.1.15 機関逆転停止時間

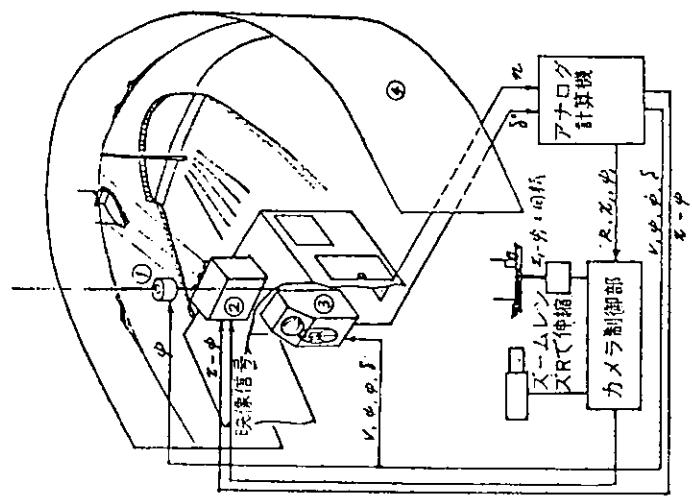


図 3.2.1 SR 151 船舶シミュレータ
①点光源回り反射式物体検出装置、②近接物探知用カラーテレビ・プロジェクタ、③操舵スタンド、④
映像幕

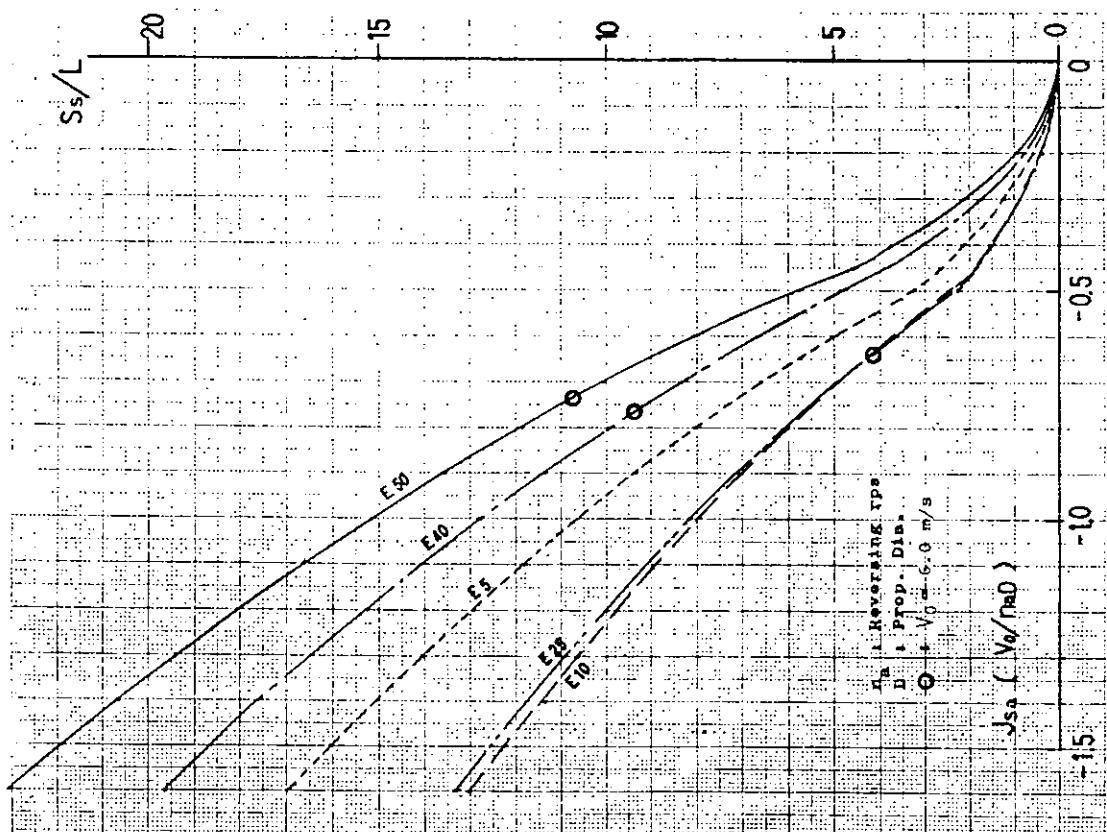


図 3.1.16 機関逆転停止時間

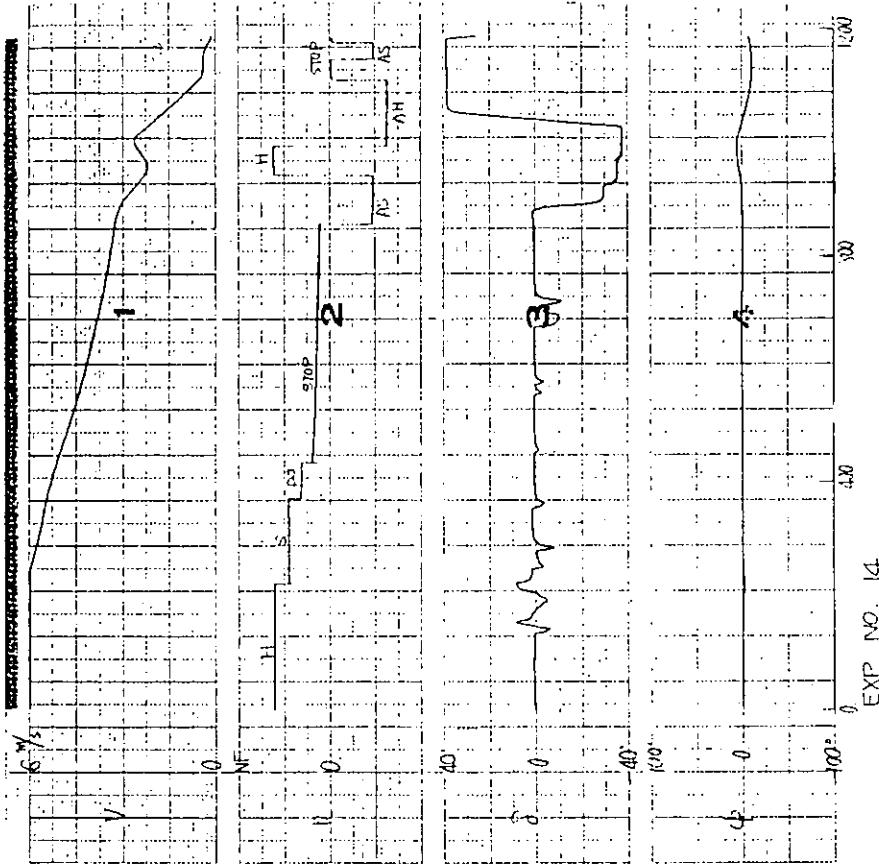


図 3.3.3 定点停止操船の計測例 (E 25-s)

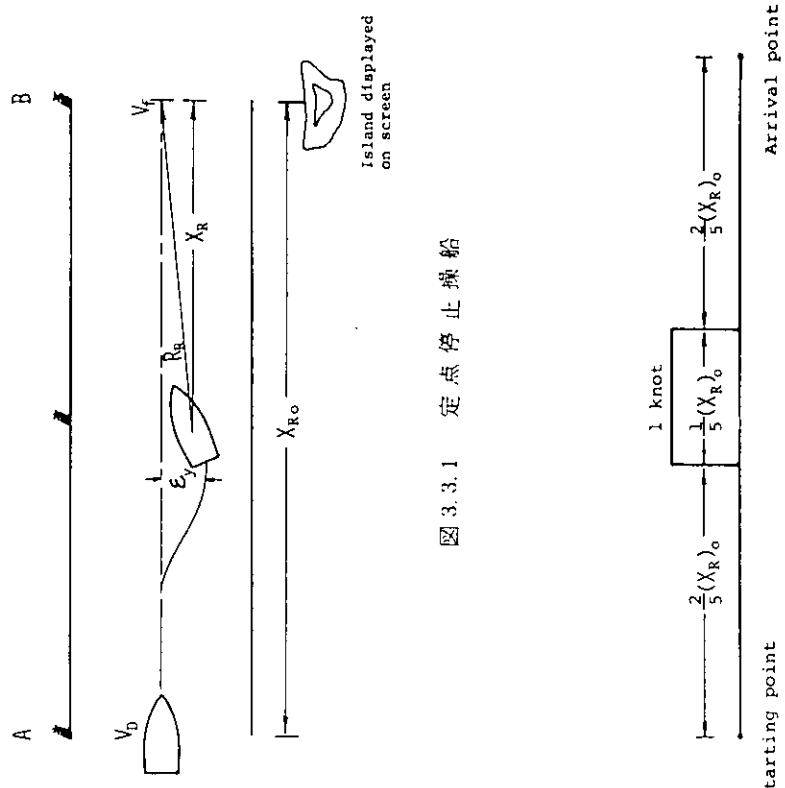


図 3.3.2 潮流の設定

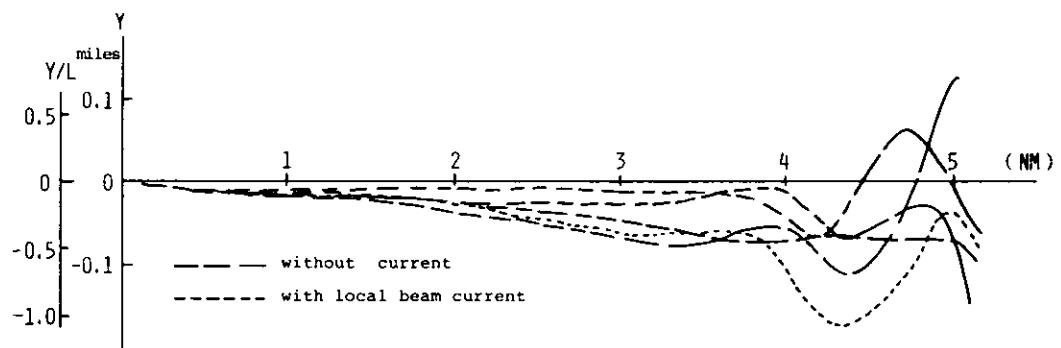


図 3.3.4 定点停止操船中の航跡図 (E50-5)

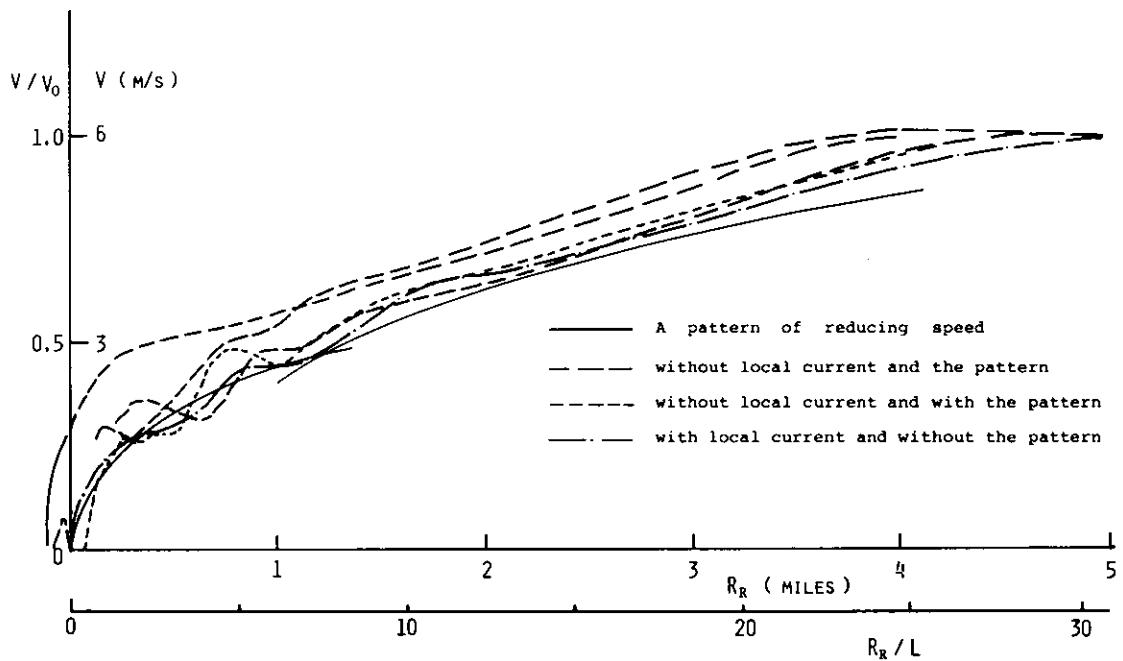


図 3.3.5 減速曲線 (E50-5)

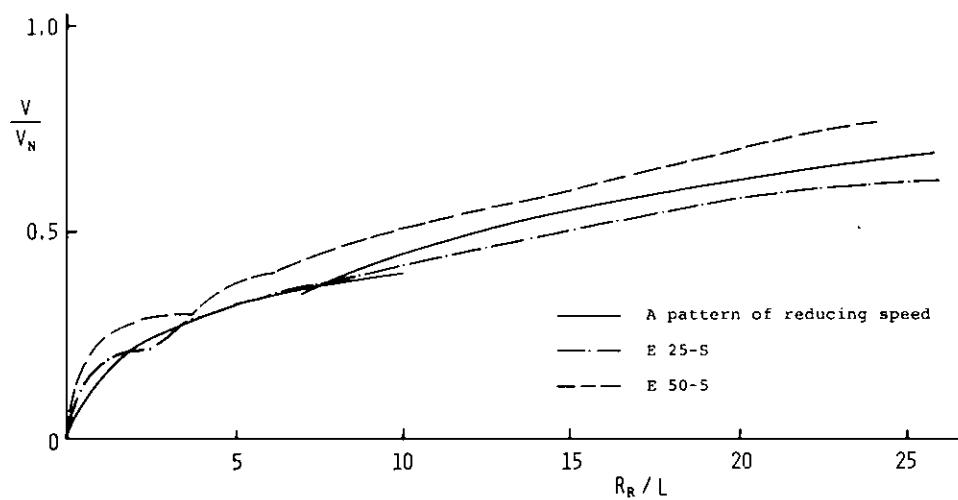


図 3.3.6 平均減速曲線と減速パターン

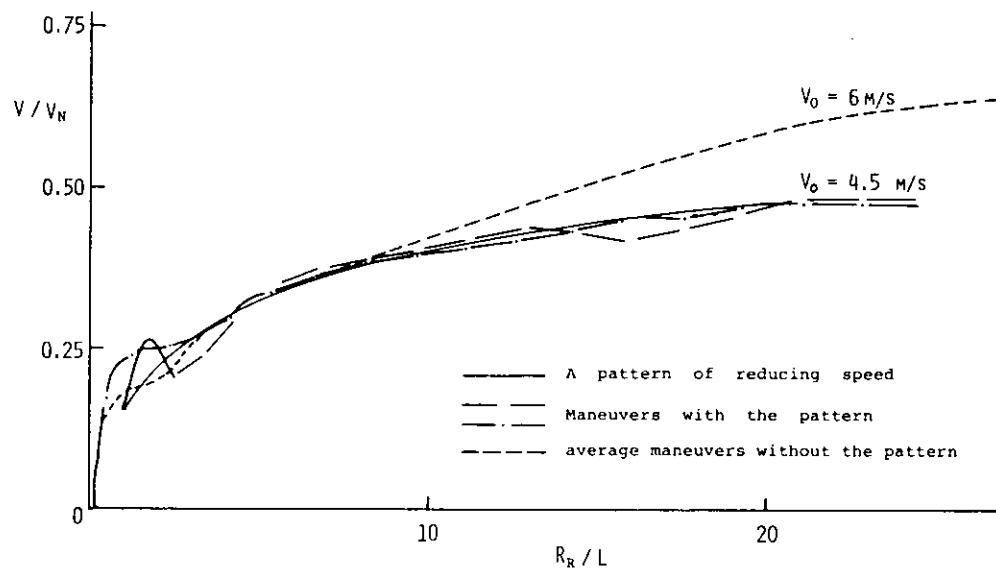


図 3.3.7 減速パターンを使用した操船

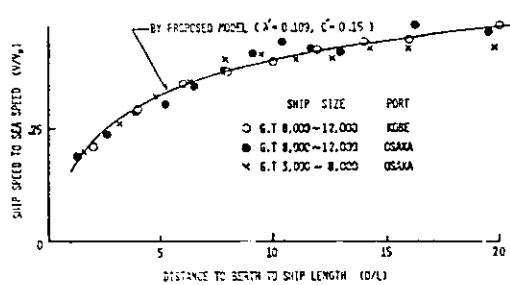


図 3.3.8 減速パターン(一般貨物船)²⁹⁾

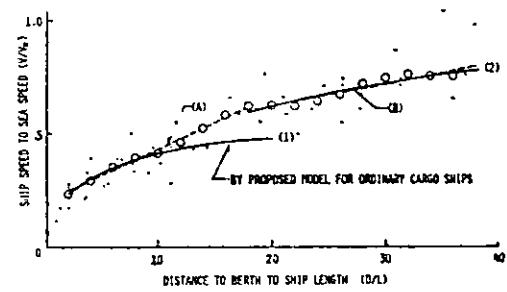


図 3.3.9 減速パターン(D.W 2万トンタンカー)²⁹⁾

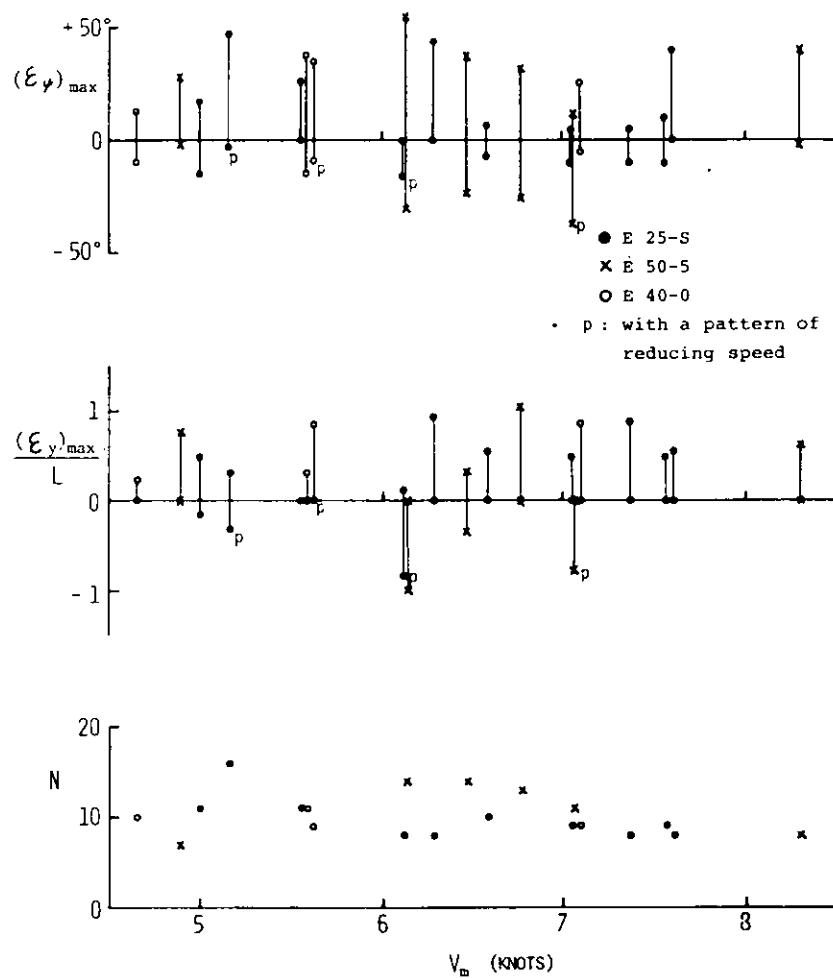


図 3.3.10 ε_y , $\dot{\varepsilon}_y/L$, N

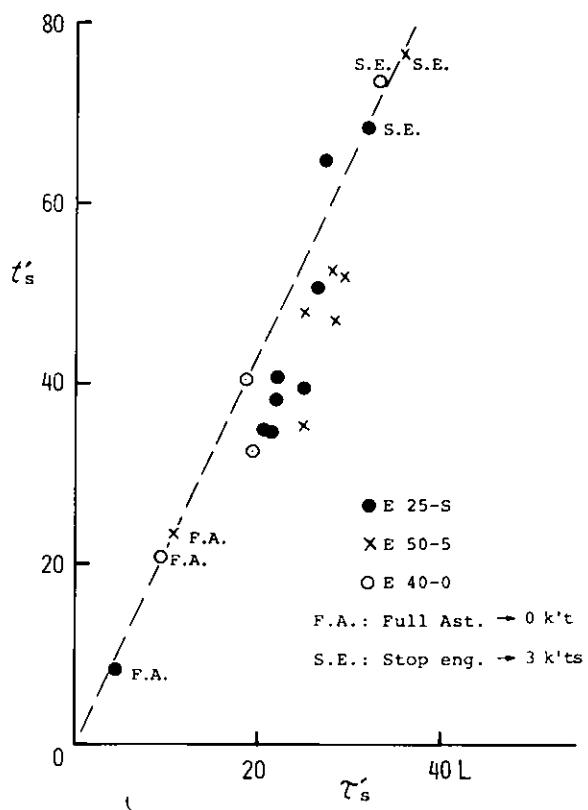


図 3.3.11 減速操作所要時間 (t'_s) - 操作開始時機 (τ'_s)

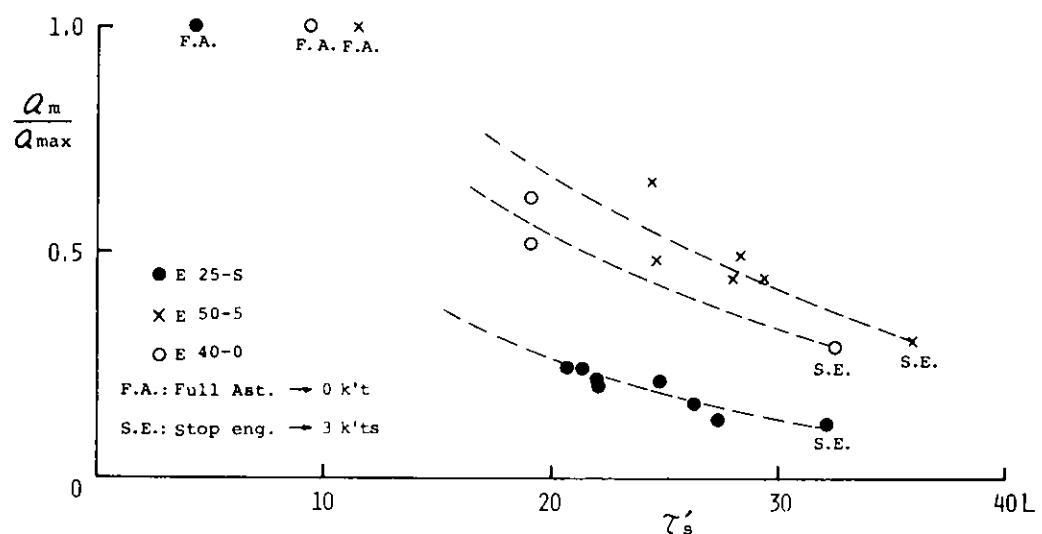


図 3.3.12 平均加速度 (a_m) / 最大加速度 (a_{max}) - 減速操作開始時機 (τ'_s)

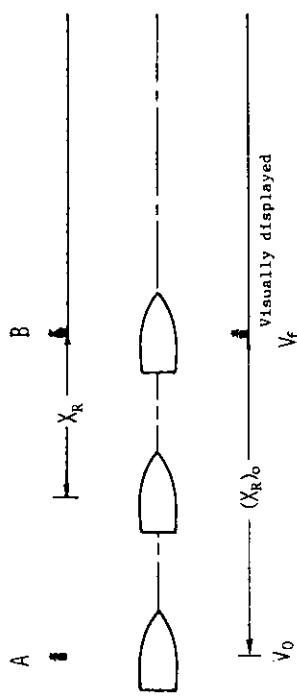


図 3.3.13 定点定時通過操船

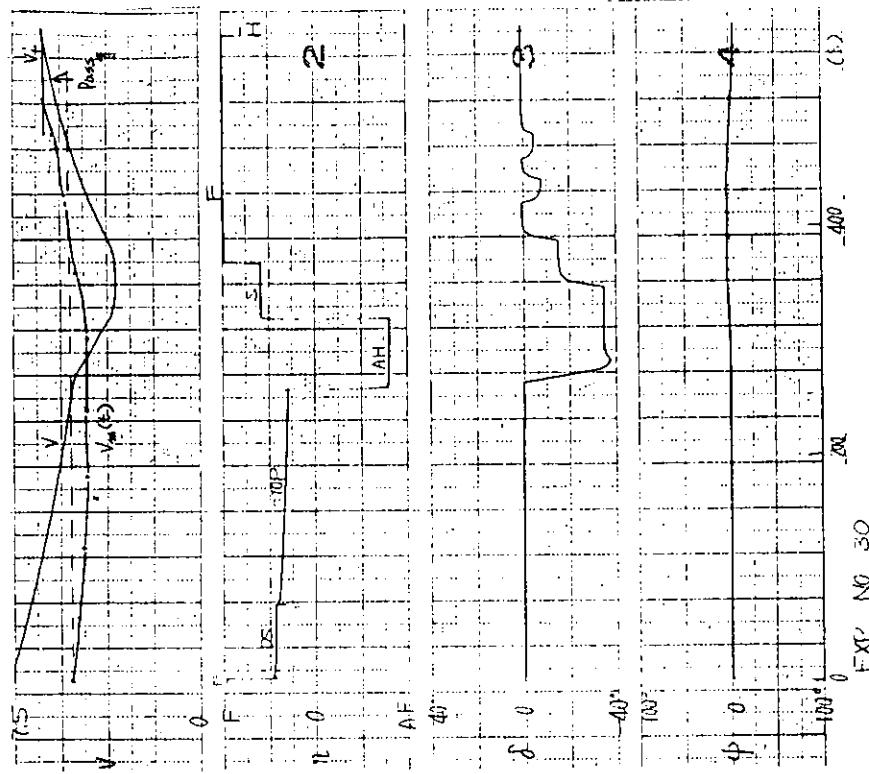


図 3.3.14 $X_R - t$ のグラム

図 3.3.15 定点定時速通過操船の計測例 (E 25-s)

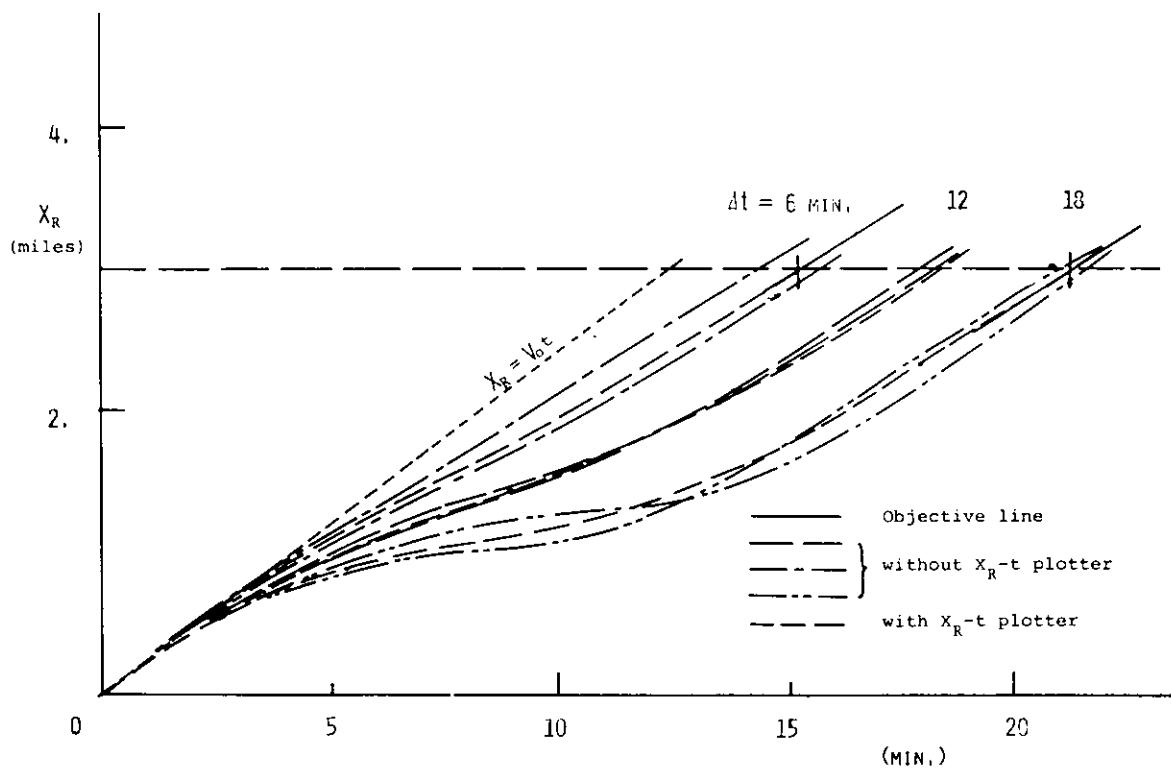


図 3.3.16 $X_R - t$ (E 25-S, $(X_R)_0 = 3$ miles)

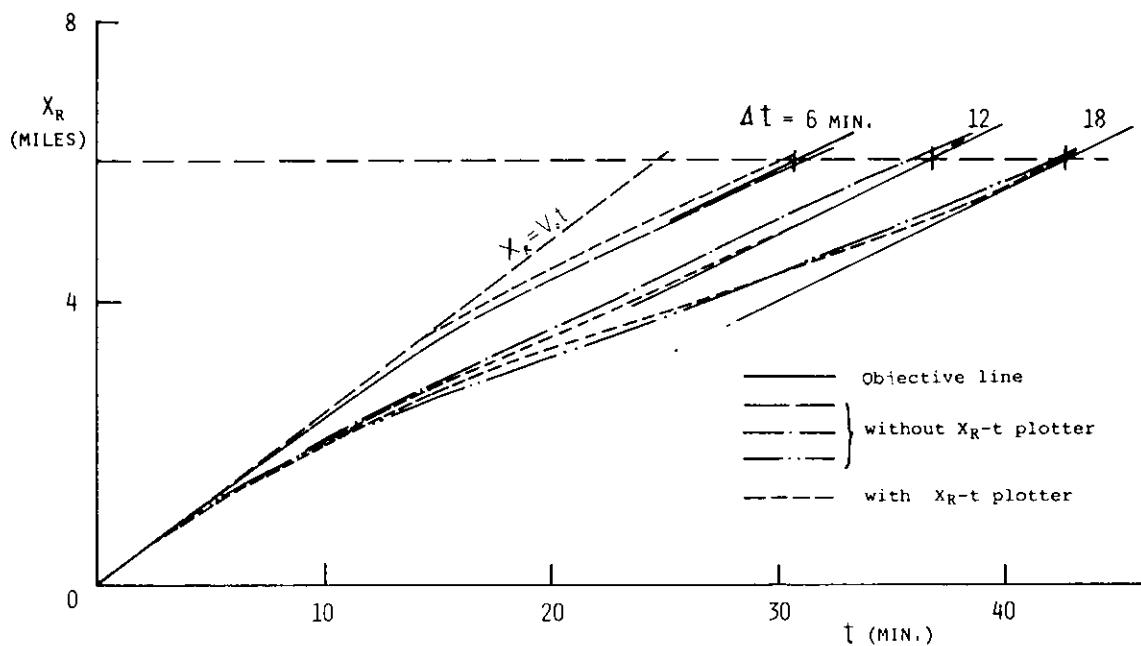


図 3.3.17 $X_R - t$ (E 50-5, $(X_R)_0 = 6$ miles)

図 3.3.18 a 速力誤差 (ϵ_v)

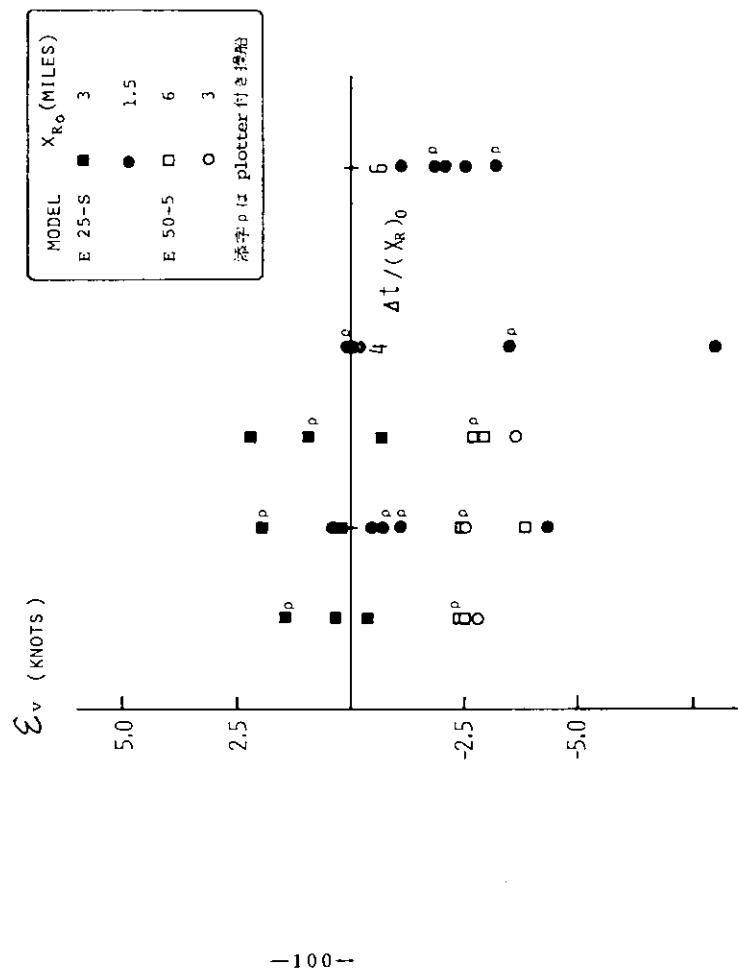
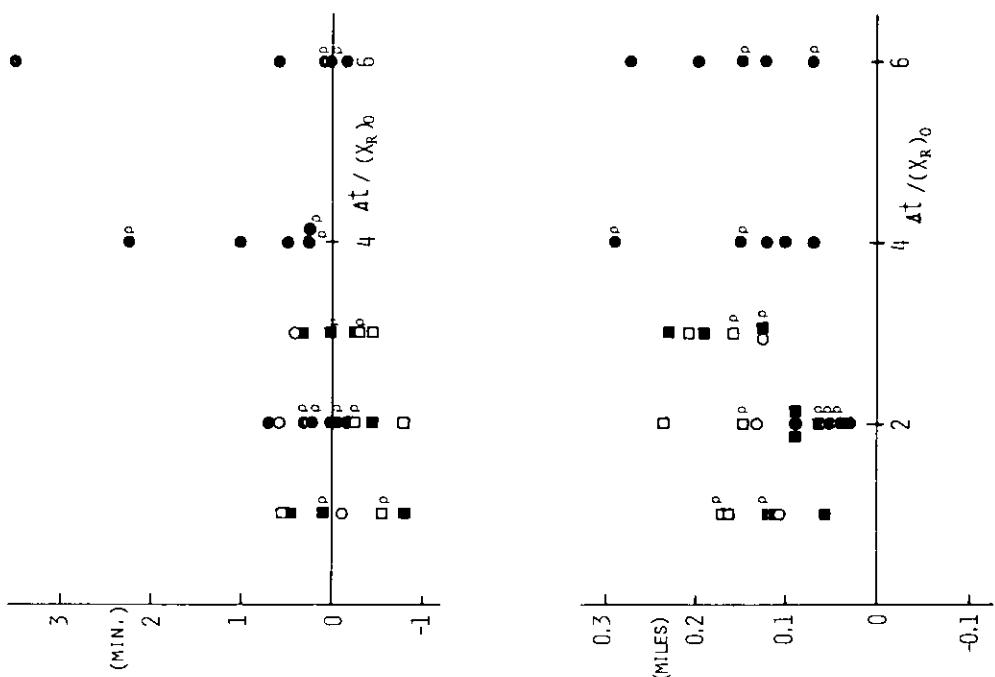


図 3.3.18 b 時間誤差 (ϵ_t), 偏位量 (ϵ_y)



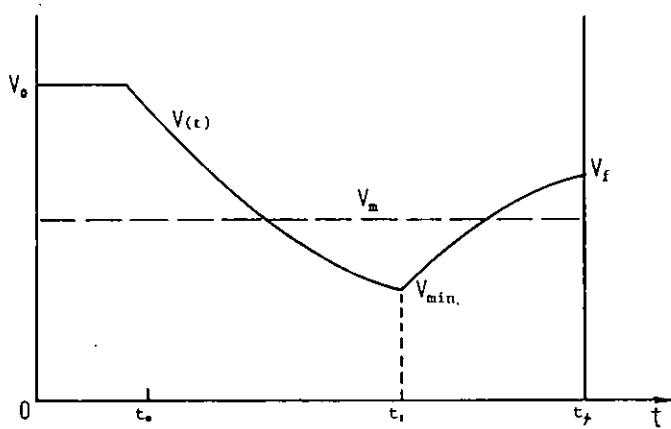


図 3.3.19 速力変化の模型図

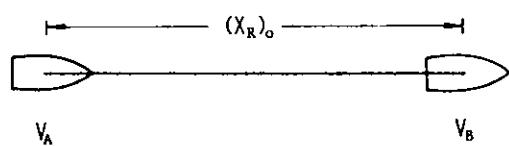


図 3.3.20 a 追従操船

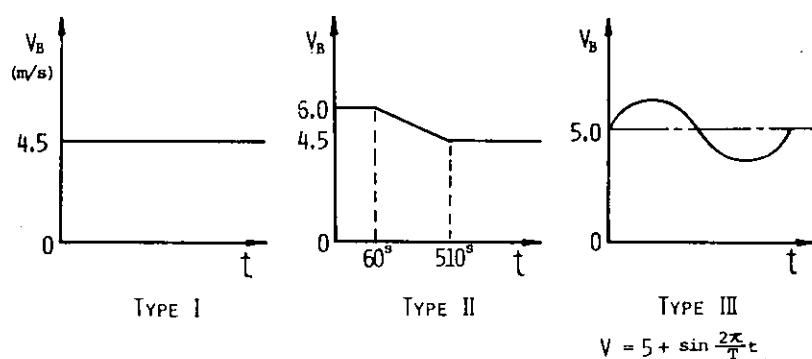


図 3.3.20 b 先行船の速力 (V_B) パターン

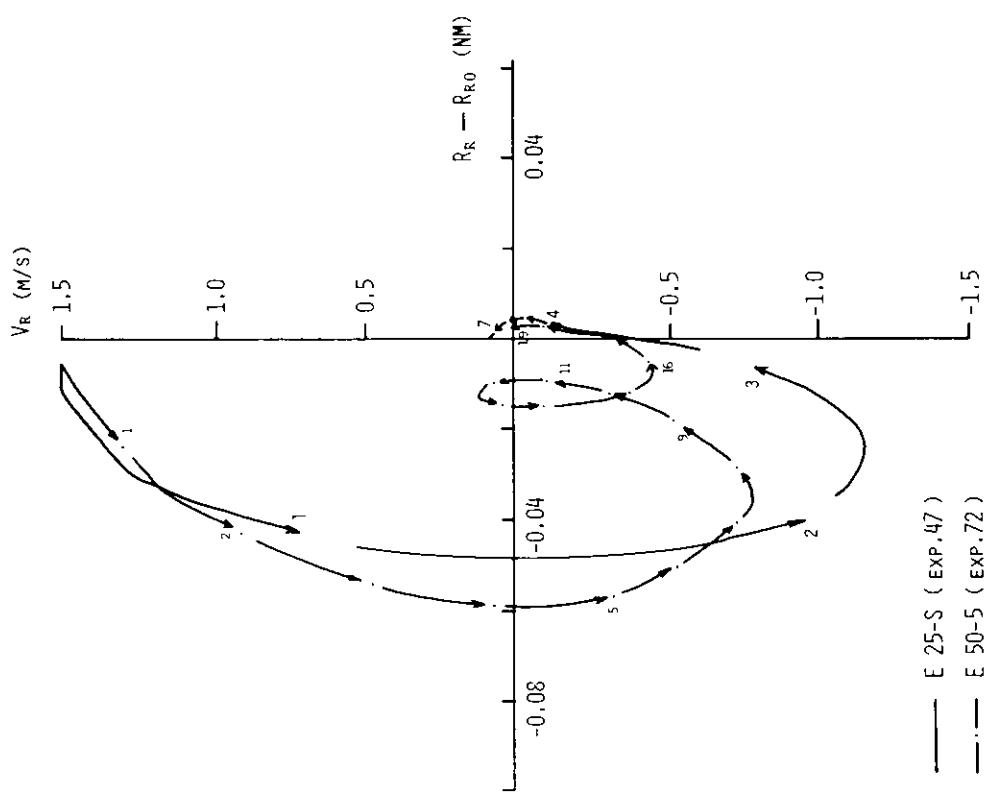


図 3.3.22 (V_B : Type I , Stepping)

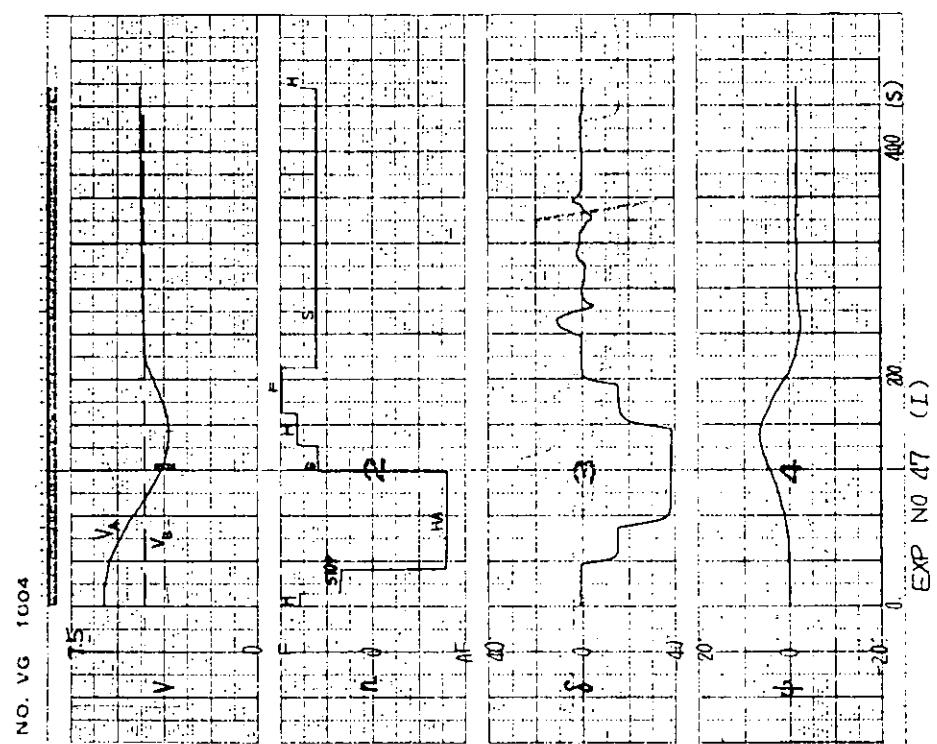


図 3.3.21 追従操作 (E 25-s , V_B : Type I , Step)

図 3.3.24 $V_R - \Delta R_R$ (V_B : Type III, Sloping)

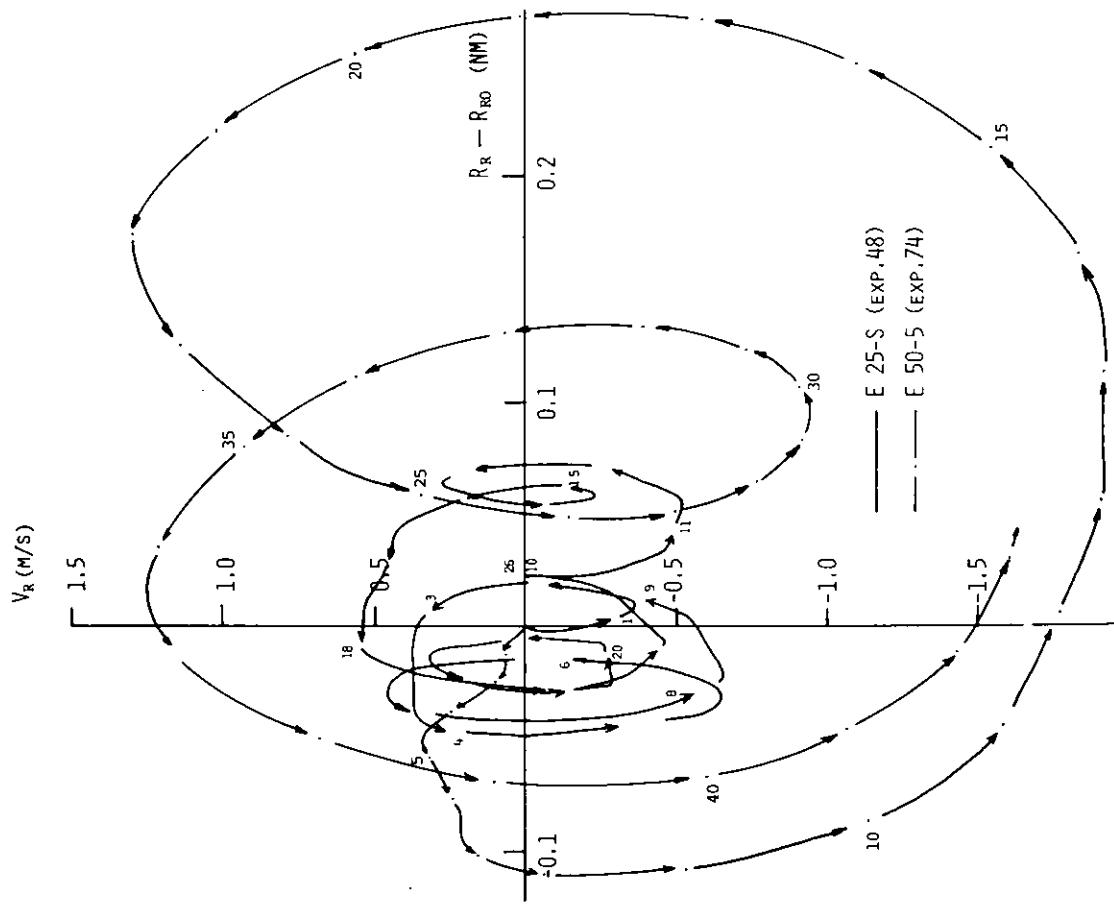
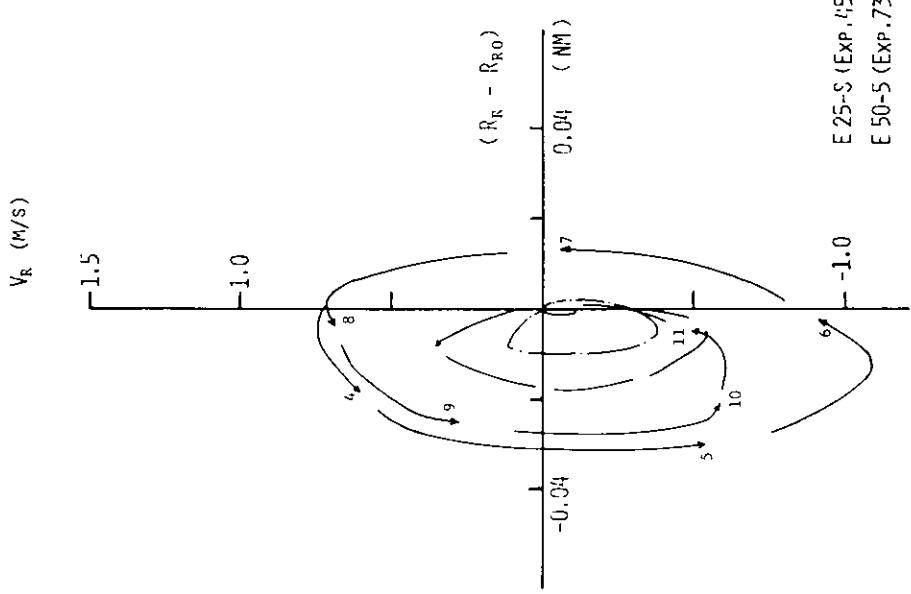
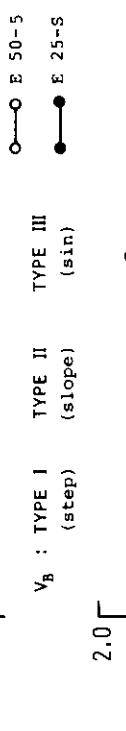
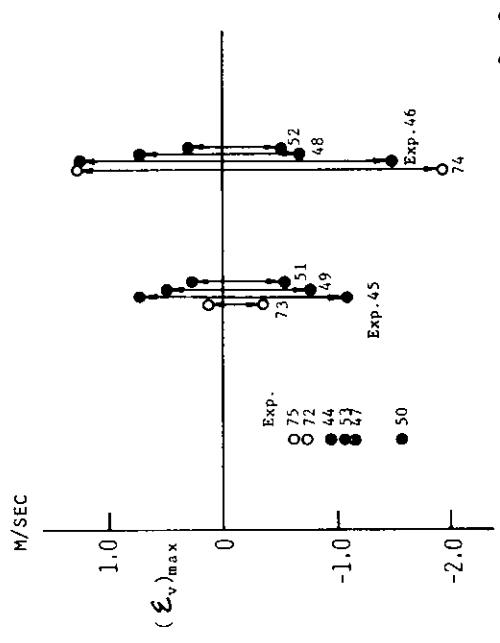


図 3.3.23 $V_R - \Delta R_R$ (V_B : Type II, Sloping)





-104-

表 3.4.1 供試船の諸定数

	Lep	50 m	150 m	300 m
α_w	6.4×10^{-4}	2.9×10^{-4}	1.4×10^{-4}	
α_{rr}	3.70	11.00	20.70	
α_{nv}	-2.1×10^{-3}	-9.9×10^{-4}	-2.7×10^{-4}	
α_{nn}	6.8×10^{-3}	8.6×10^{-4}	4.8×10^{-4}	
$\alpha_{\theta\theta}$	2.6×10^{-3}	6.3×10^{-4}	1.7×10^{-4}	
K'	-2.24	-2.24	-2.24	
T_1'	-4.48	-4.48	-4.48	
T_2'	0.35	0.35	0.35	
T_3'	0.60	0.60	0.60	
α'	-0.0047	-0.0047	-0.0047	

表 3.4.2 機関操作位置と
速力の関係

	m/s
FULL AHEAD	9.0
HALF AHEAD	5.6
SLOW AHEAD	4.2
D.SLOW AHEAD	2.7
STOP	0.
D.S. ASTERN	-1.6
SLOW ASTERN	-2.5
HALF ASTERN	-3.5
FULL ASTERN	-5.7

図 3.3.25 $(\epsilon_v)_{\max}$ $(\epsilon_R)_{\max}/L$

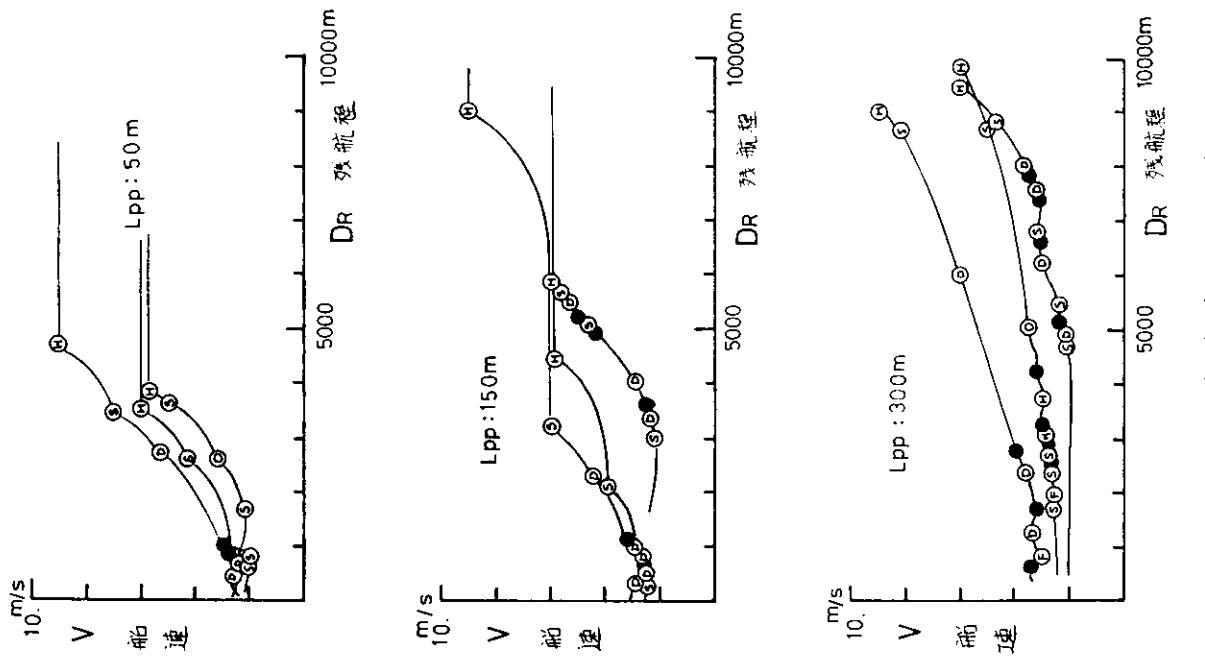


図 3.4.3 定点停止操船例

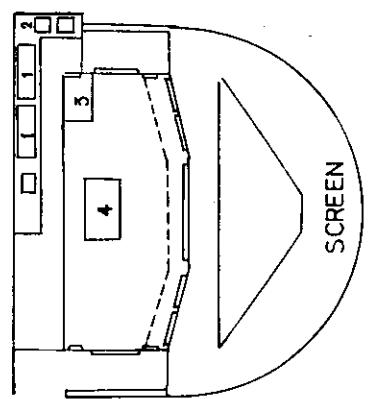


図 3.4.1 東京商船大学シミュレータ概要

D_o	L_{PP}	50m	150m	300m
10000		○	X	
8000		○	X	
6000		○	X	

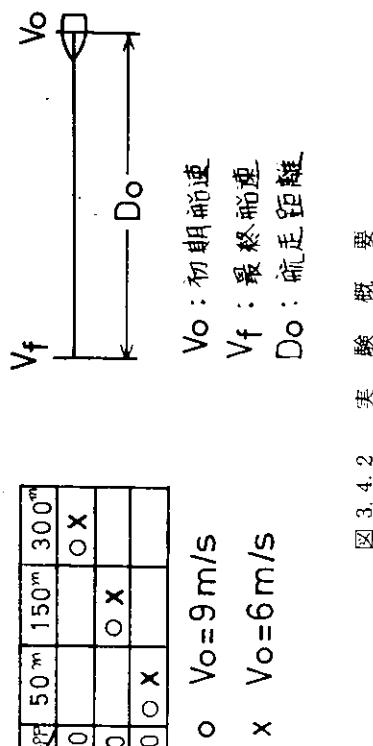


図 3.4.2 実験概要

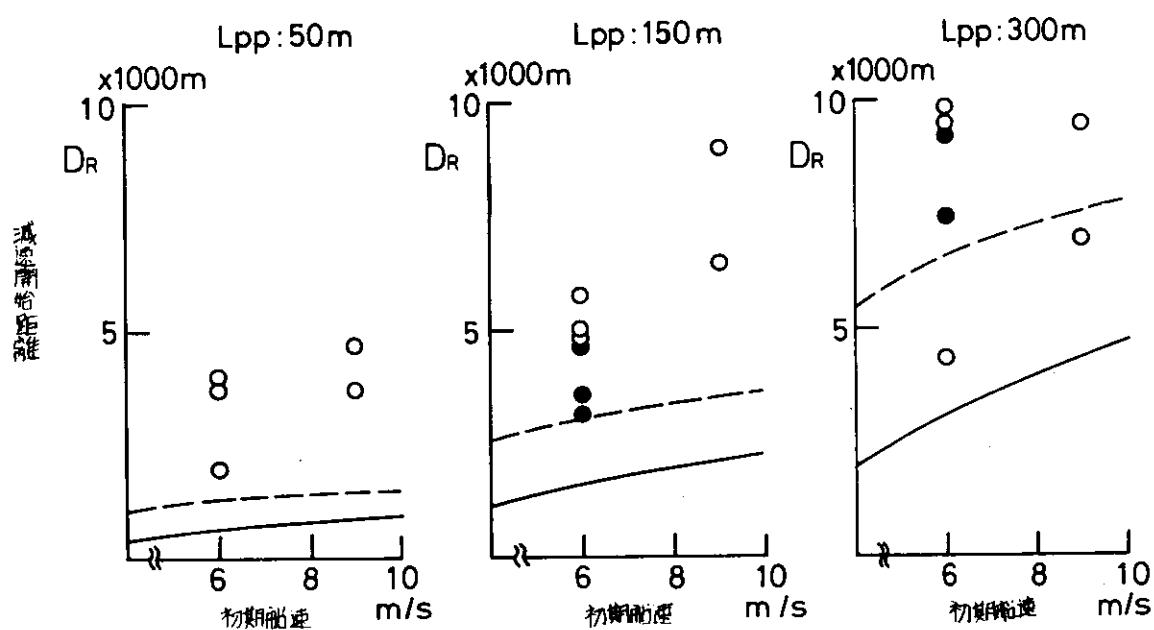


図 3.4.4 減速開始距離

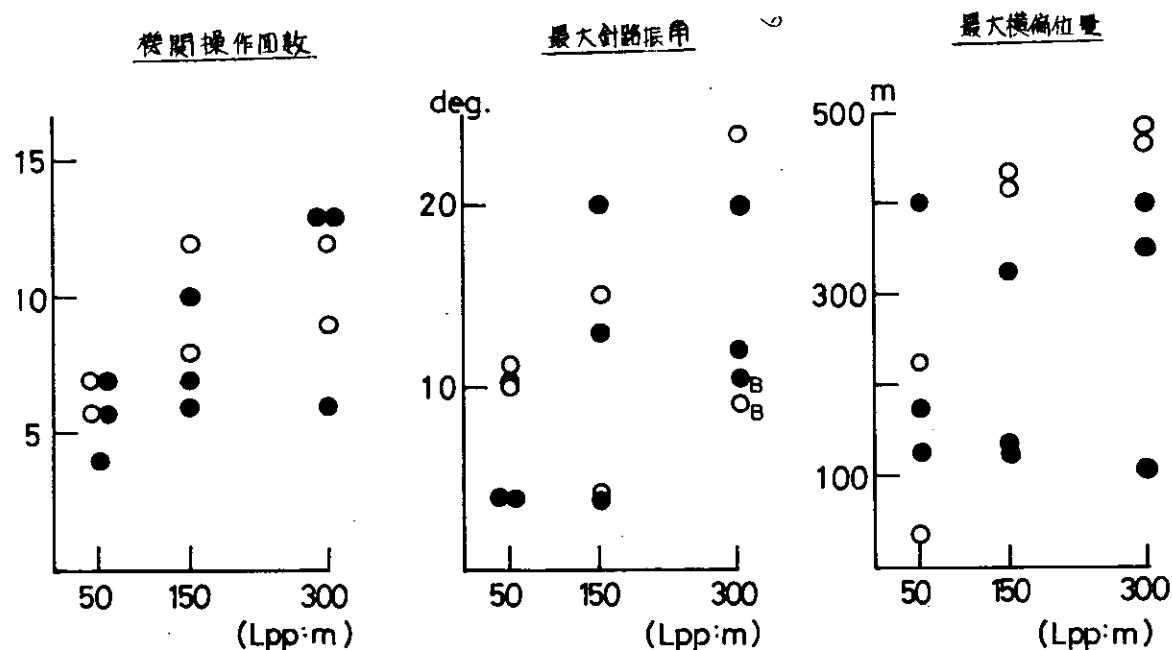


図 3.4.5 a

図 3.4.5 b

図 3.4.5 c

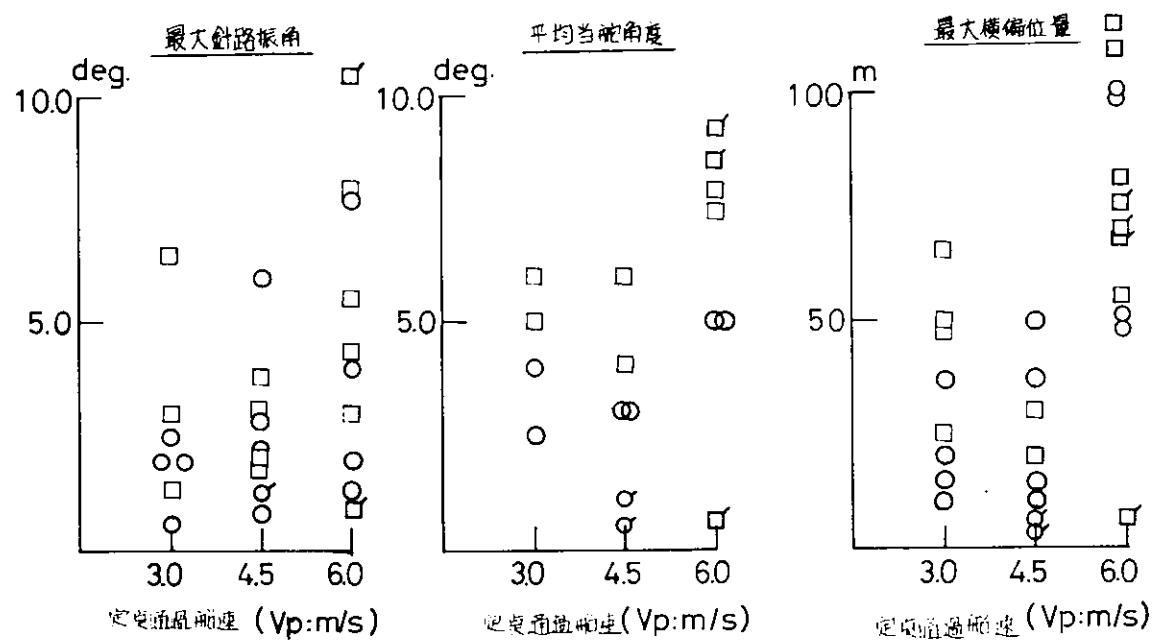


図 3, 4, 6

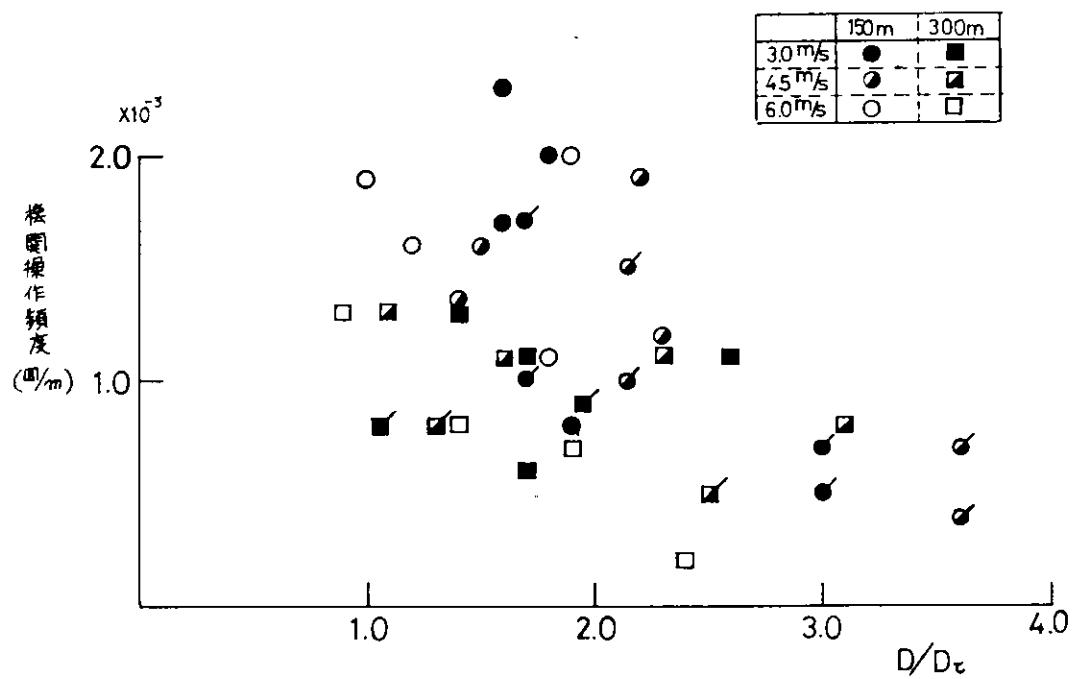


図 3, 4, 7 定点定期通過操船中の機関操作頻度

4. 交通工学的シミュレーション

4.1 海上交通管制と加減速性能

4.1.1 海上交通管制の問題点

かつては全く自由であった海上の交通も、経済活動の進展に伴ない一部の港湾では混雑が顕著となって、交通の安全を図るために相当高度な管制が行なわれ始めている。

交通管制の目的は、個々の船の行動に制約を加えることによってその自由裁量の空間をせばめ、画一化することにあると言えよう。全くの自由裁量の下では、各船が各時点でとり得る行動の場合の数が多くなりすぎ、多数の船が航行する水域では次の時点で発生する状態の数は天文的な数となる。このように絶望的に多数の状態の可能性の中で、刻々の状態を見ながら操船することは、人間の情報処理能力から見て困難であることは当然で、どこかに限度があるはずである。

現在既に行なわれている、航路分離・航路制限・速力制限などの交通管制は、上記の理由による自由裁量空間の制約という解釈が自然であり、それによって次の時点で発生可能な状態の数を、人間の情報処理可能な範囲に止めるための方策であると考えられよう。このように考えると、交通管制による制約は、その水域の混雑の度合に応じて指數関数的に強まるものと考えなければならない。

日本においては、東京湾・明石海峡・備讃瀬戸などの水域がこれにあたり、海上交通安全法により航路指定・速力制限・巨大船の航行時通報義務など一連の処置が義務づけられた後、数年を経ずして既に次に行なうべき更に高度な交通管制が検討されている。

現在検討されている交通管制の大きな特徴は、特定の水域全体の海上交通をパターン化するため、航路のネットワークを指定しようとする点である。従来の航路指定は、ある水域全体から見ればきわめて部分的なものであったが、これを全体に拡大しようとすれば必然的に指定航路同志の交差が生ずる。海上交通では立体交差は不可能であるため、2本の指定航路を交差させる場合、交差部の使用を時間的に分割して2本の航路が共用する以外方法はなく、ここに従来とはまったく異なる、航路通過における時間的制約が加わることになる。即ち、航路指定による空間の制約に加えて、交差部を利用可能な時間帯という制約が追加されることとなり、その管制下に入る個々の船の性能に大きな関係をもつようになる。

従来、船の操縦性能を論ずる場合、問題の一般化のため船の運動を無次元化し、また速力変動も小さい範囲に限定して来た。しかし、上記のように将来実施されるであろう交通管制との関連で見た場合、航路指定という空間的制約が、船の運動を有次元の値で見ることを要求し、交差部通過のための時間調整が、船の加減速性能に対するより深い知識を要求するようになることは明白である。また、交通が混雑する水域に限られるとは言え、そこを通行する船には、交通管制の方式に対応した操縦性能に対する要求がこれまでにない明白な形で行なわれるであろうと考えなければならない。

4.1.2 交差部制御の方式

交差部を時間的に分割して2本の航路が共用する方式としてはつきのようなものが考えられる。

- 個々の船が個別に交差部通過時刻を予約し、そのスケジュールに合せて航行する方法（予約方式）。
- 交差部の通行方向を一定時間毎に切替え、各船は青信号時に通過する方法（信号方式）。

道路交通から容易に類推できるように、交差部の通行方向をきり替える場合、一時交差部の中をクリアしなければならない。この点で予約方式は信号方式にくらべ、切替えが多くなるため交差部の使用効率は下る。一方、

交通量が少ないにも拘らず信号方式をとると、交差部が空いているのに利用できないというロスが生ずる。したがって、交通量が少ないう場合は予約方式、多くなれば信号方式が優れ、また信号方式も交通量が多くなるにしたがい切替周期を長くした方がよいことは常識である。

この関係をシミュレーションにより定性的に求めた結果を以下に示す。これらの結果は、日本海難防止協会が昭和50年度に行なった東京湾交通体系の研究により提案された航路ネットワークの中で、最も問題となる横浜沖の交差部をもとにしている。交通量は昭和49年度の年間平均を基準として、それに対する相対値を用い、ボアン到着であると仮定し、また船型の分布は大・中・小の3段階として同じく昭和49年度の実績値を用いた。

図4.1.1に49年相対交通量をベースとした予約方式の場合の平均待ち時間、図4.1.2に相対交通量をバラメータとし、信号周期をベースとした信号方式の平均待ち時間を示す。また、図4.1.3～4.1.4に予約方式および信号方式（周期24分の場合）の待ち時間の累積分布を示す。

交通量について注意すべきことは、ここに用いている値は49年度の年間平均交通量であり、過去の観測結果から見るとピーク時には年間平均の2倍程度にはなり得るという点である。このことを考慮に入れて相対交通量が2の場合に注目すると、

- a. 信号の最適周期は20分程度である。
- b. この程度の交通量では予約方式の方が信号方式よりも平均待ち時間が短いが、もう少し交通量が多くなると優劣が逆転する。
- c. 待ち時間の分布を見ると90%の船は予約方式で7分以内、信号方式で10分以内となっているが、いずれの場合もまれに15分以上の待ち時間となる船が存在する。

などの結論が得られる。

4.1.3 加減速性能への要求

前節におけるシミュレーションは、問題を簡単化するため船の運動性能は考慮せず、急停止・急発進が可能であるとして行なったものである。船を時間調整のため停止させることが非現実的であることは当然であるが、求められた待ち時間を交差部利用可能時刻に合せるための調整時間であると理解するならば、このシミュレーションの一般性は失なわれていない。

即ち、図4.1.5に示すように、横軸に時間、縦軸に距離をとった場合、現在A点に居る船がBで示す時刻に交差部を通過するよう指示された場合、船は減速および加速を行ないながら実線で示すような形で航行するであろう。これに対し、前節のシミュレーションでは点線で示すように、AからCまで現在の速力のまま移動し、Cで急停止しBまで待ち、そこから元の速力で急発進をすると仮定したことになる。このようにして見ればシミュレーションで得られた待ち時間は、交差部通過に要する調整時間を与えるということが理解できよう。

ここで用いた横浜沖交差部の待ち特性は、当面の海上交通における交差部としては最も要求のきびしい場所の代表として考えてよいとすれば、当面海上交通管制の面で要求される調整時間は10分ないし15分と結論づけてよいであろう。

これに対応した、船に要求される加減速性能は、時間調整を行なうための図4.1.5に示す調整距離の関数となる。この距離をどの程度とり得るかということは、交差部管制の方式が具体化して来ないと判断できない問題であるが、管制側から見ればこれをなるべく短くしたいという方向であることは当然である。

したがって、現在我々が行なうべき研究は、現存する種々の船の加減速性能をより正確に把握すると共に、その船を操船する操船者の特性も含せて10分ないし15分程度の時間調整を行なうためにはどの程度の調整距離が必要であるかという問題ととり組むことであろう。

4.2 定点定時定速通過操船のモデル化

4.2.1 交差部交通問題の一般化

図4.2.1は横軸に時間、縦軸に航程をとったものであり、 \oplus 印を交差部の通過指定時刻とする。今、現在の速力 v_0 で航行すると②の軌跡をたどり、指定時刻以前に交差部に到達することになるので、何らかの形で、時間調整を必要とすることになる。

一方、第1、第2の交差部の通過指定時刻から、2点を結ぶ速力 v_p が決定される。これにより①あるいは②の軌跡上を進めば第1ならびに第2以降の交差部を指定時刻に通過出来る事になる。

結局、通過時刻の指定された2つの交差部がある時、第1交差部通過時の速力を v_p とおくことにより、单一交差部問題として取り扱うことが出来る事になる。

交差点における管制の問題としては、船の特性と{初期船速(v_0)、第1交差部通過時船速(v_p)、時間調整量(τ)、時間調整のための航走路距離(D_τ)}との対応について、制御可能範囲を検討すればよいことになる。

4.2.2 Real Time Simulatorの構成

4.2.1により、一般化された交差部航行問題を調査する目的で実時間で動作するシミュレータを作成した。図4.2.2にてシミュレータの構成を示す。演算部は、東京大学・船舶工学科のミニ・コンピュータ(FACOM・U-200)を使用している。操舵角、主機関操作量はA-D変換器を介して、ミニ・コンの入力になり、ミニ・コンによる演算結果はD-A変換器を経て、実舵角、針路角、回転数、船速を各インジケータへ出力するとともに、図4.2.3に示すような形式でGraphic Displayにて表示している。

Graphic Displayにて表示されるものは、次の各項目である。

- (1) 図4.2.1に相当する航程を時間ベースにて表示したもの。図4.2.1に示す目標とする状態等は図中の破線で示されている。
- (2) 船速の時間変動
- (3) 航路ならびに航跡図
- (4) 針路角度

4.2.3 時間調整のための必要調整距離

要求される調整時間に対し、それに要する調整距離の関係を、減速パターンを図4.2.4のように仮定して求めたものが図4.2.5である。

実線で示す減速パターンが図4.2.1の②に対応する。即ち、減速を必要と認めた時点で直ちに機関停止を発令し、これにより速力は徐々に低下する。この過程で時間調整が完了すれば、主機を通過速力に対応する回転数に戻す事になるが、速力が5ノットになっても、時間調整が不足の場合には、5ノットに対応する回転数で主機を運転し、船速が5ノット以下にならないようにする。これは舵効きを保持するために必要なことである。

図4.2.4で破線で示す減速パターンは、図4.2.1の①に相当するもので適当な時期にて、直接目的の回転数に下げるにより、時間調整と速力調整が同時に実行される場合にあたる。

図4.2.5には船長150m、300mの各船に対し、通過時船速別に時間調整に必要な調整距離の計算値を示してある。実線が②の操船パターンの場合であり、破線が①の操船パターンの場合である。

なお、図4.2.5の計算においては、船速が目標速力の0.25m/s以内に漸近した時点で目標速力になった事として、次のステップの計算を行なっている。

次に、時間調整のための加減速操船の難易度について考えてみる。既に述べたように図4.2.1の①による操船パターンは、適当な時期に目標の速力に移行する事により時間調整と速力調整が同時に実行される事になり比較

的容易な操船と考えられる。これに対し、⑥の操船パターンでは一旦減速し必要な時間調整の後、再び目標速度まで增速する事になり操船者への負担度は大きくなるであろう。

図4.2.6に示す様に調整距離を長くとる事は、①の領域に入ることであり、⑥の操船パターンを可能にする。逆に、①の領域にある場合でも⑥のパターンをとらずに、原速のまま航走すると②の領域に入る事になり⑥のパターンをとらざるを得ない事になる。

4.2.4 実験・解析

実験は L_{pp} : 150m, 300mの船に対し、一定の時間調整の条件下で調整距離と交差部通過時の船速を表4.2.1, 4.2.2のように変化させて行なった。実験に使用した数学モデルは(3.1.1)式～(3.1.6)式であり、各定数値は表4.2.1, 4.2.2に示す。

表4.2.1で示す実験は、4.2.2で説明したGraphic Displayを使用したシミュレータにより行なった。操船者は、Graphic Displayに表示される情報量のみによって操船を行なっており、操舵はオート・バイロットを用いて行ない、機関操作だけを人間が行なっている。

表4.2.2で示す実験は、3.4に述べる東京商船大学のシミュレータを使用している。この場合、操船は、通常の航海計器とスクリーンに投影されたブイ等周囲の状況、ならびに $x-y$ レコーダに示される表4.2.1に相当する時間ベースの航程図により行なわれている。操舵は操舵員により行なった。

なお、前者の実験では、ヨーイングに対し外乱が加えられており、その大きさは、舵角相当で図4.2.7に示している。

実験により得られた時間調整と航走距離の例を図4.2.8に示す。図4.2.8aは150mの船の例であり、図4.2.8bは300mの船の例である。図中、一点鎖線は図4.2.5に示された一定の減速パターンによる計算結果を減速開始点として図4.2.4に示される機関操作を行なった時の計算軌跡である。白丸は通過船速が6m/s、黒丸は3m/sの場合を示す。通過船速が6m/sの場合は負担の大きい⑥の操船を要求するものであり、3m/sの場合は⑥の操船を行なえる場合である。それぞれ、2種の調整距離について示してある。

調整距離の大小と時間調整の精度、並に、通過船速の精度との対応を図4.2.9、図4.2.10に示す。(図中ヒゲの付いたものはGraphic Displayを用いた実験結果である) 各々の図において、調整距離は図4.2.5で得られる調整距離 D_T に対する比で示してある。データにバラツキはあるが、調整距離に比例して時間調整、通過時船速の精度は向上している。 D/D_T が1に近づいても比較的精度よく行なわれているのは、図4.2.1に相当する記録を実験中、操船者に示しているためであろう。

特にGraphic Displayを用いた実験では船速の時間変動の記録も示される事になり、運動の予測が容易になり大変精度の高い結果が得られている。

この他、速力制御中の針路制御の状態、機関操作回数等についての結果は、3.4に示してあるので参照されたい。

4.3 今後の課題

本年度の研究課題は、航路交差部の交通管制を行なうにあたり、交差部制御の方式と船の加減速性能との関連をどのような観点からとらえるかということであった。この問題を扱うにあたり、まずG P S Sを使ったマクロなシミュレーションによって船が急停止、急発進可能であるとの前提で交差部の特性を待時間という量でとらえ、つぎにこの待時間を通常の操船による加減速によって消化するとすれば、どのような問題が生ずるかという順で2段階に分けて考えた。

GPSSによるマクロなシミュレーションからは、現在我国において交差部交通の管制が必要になりそうな場所では、約10分程度の待ち、即ち時間調整をひとつの基準として考えなければならないことがわかった。

つぎに、この程度の時間調整を行なうためには、操船者も含めたMan-Machine系としての船に、どの程度の余裕をもたせなければならぬかが問題である。このため、図4.2.4に示すような加減速パターンをひとつの基準として考え、このパターン、即ち仮の制御則による計算結果と、操船者を実際に入れた実時間シミュレーターによる実験との比較を行なった。この実験は第4章の表現にならえば、定点・定時・定速度通過の実験である。

実験結果によれば、

- (1) 試験結果は操船者に与える情報量により相当影響される。
 - (2) グラフィック・ディスプレイを用いたシミュレーション程度の情報を与えれば、図4.2.4の制御則で可能な程度の条件下では、操船者はほとんど困難を感じない。
- などの結論が得られた。

今後の課題としては、操船者に提供する情報量の関数としての平均的なMan-Machine系の特性の把握に努力すると共に、このようにして求めた個々の船の特性を考慮しながら、GPSSシミュレーションより更に精密化した船舶交通流のシミュレーションを行ない、相互に補完しながら問題点を抽出することが必要である。

表 4.2.1

L	150 m		300 m	
τ	5 min		5 min	
V_p	4.5 m/s	6	4.5	6
D_τ	2200	2600	3200	4000
D	4000, 7000		4000, 8000	
L_{qop}	Stable	5.0	5.0	25.0
a_{nn}	0.00554		0.00412	
a_{nv}	-0.0007		-0.000364	
a_{vv}	0.00079		0.00038	
a_{rr}	25.63		58.16	
$a_{\delta\delta}$	0.00066		0.000296	
K'	1.6	-2.24	-2.24	-0.6
T'_1	3.2	-4.48	-4.48	-1.2
T'_2	0.35	0.35	0.35	0.35
T'_3	0.6	0.6	0.6	0.6
α'	-0.0009	-0.0047	-0.0047	-0.00265

表 4. 2. 2

L	150 m						300 m											
V ₀	6 m/s						6 m/s											
τ	3 min			5 min			5 min			6 min								
V _p	3 m/s	4.5	6	3	4.5	6	3	4.5	6	3	4.5	6						
D _τ	1400	1700	2100	1900	2200	2600	2900	3500	4300	2600	3200	4000						
D	2200, 3600			3000, 5000			4000, 6700			7000, 9200								
a _{nn}	5.54×10^{-3}						4.12×10^{-3}											
a _{nv}	-7.0×10^{-4}						-3.6×10^{-4}											
a _{vv}	7.9×10^{-4}						3.8×10^{-4}											
a _{rr}	25.7						58.2											
a _{δδ}	7.2×10^{-4}						2.8×10^{-4}											
K'	-2.24						-2.24											
T' ₁	-4.48						-4.48											
T' ₂	0.35						0.35											
T' ₃	0.6						0.6											
a'	-4.7×10^{-3}						-4.7×10^{-3}											

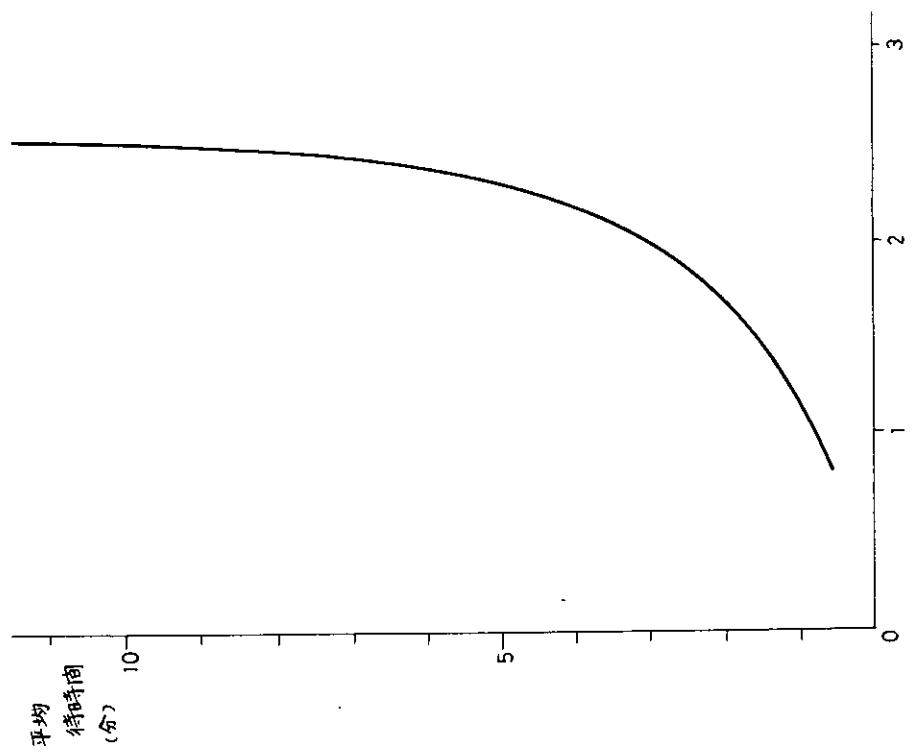


図 4.1.1 予約方式による交差部の待時間

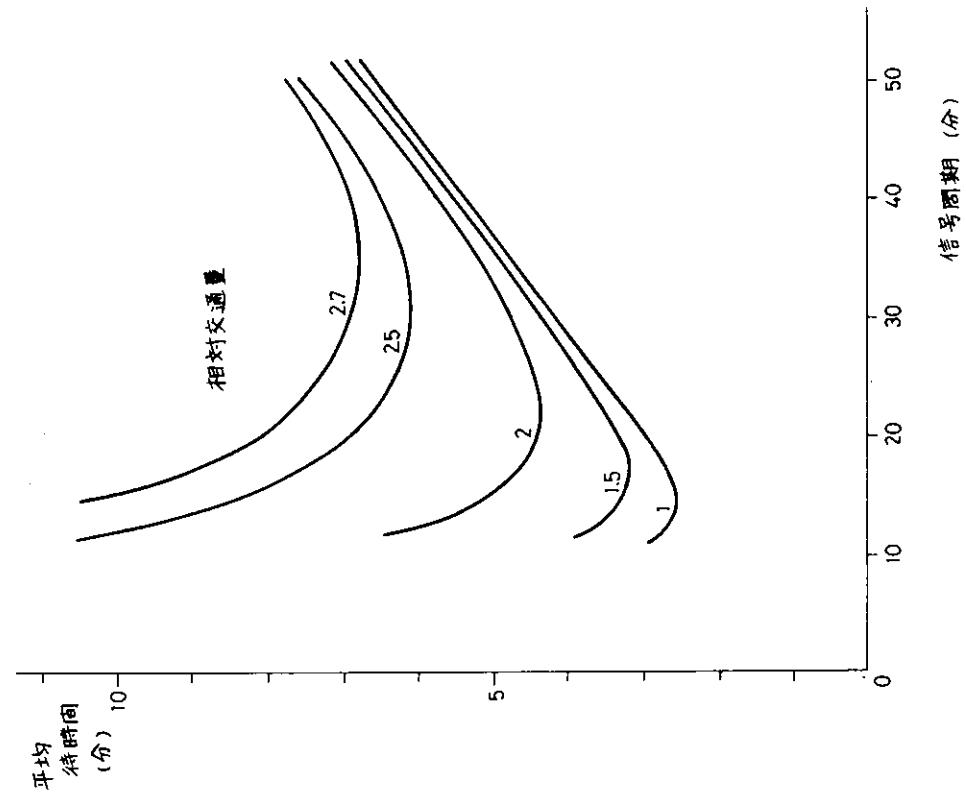


図 4.1.2 信号制御による交差部の待時間

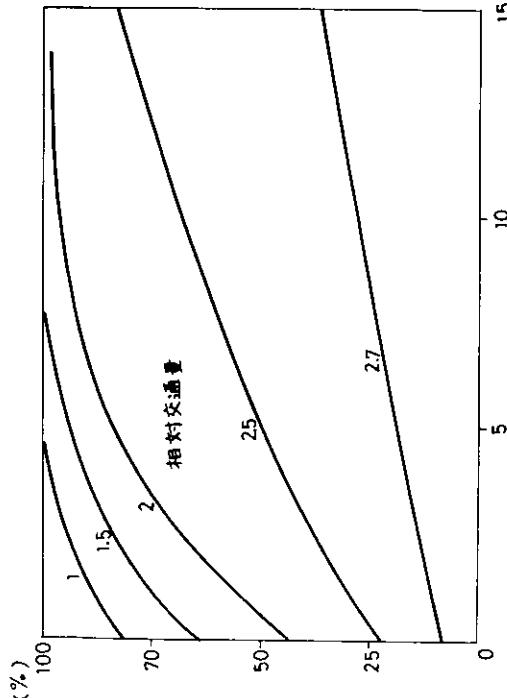


図 4.1.3 待時間累積分布（予約方式）

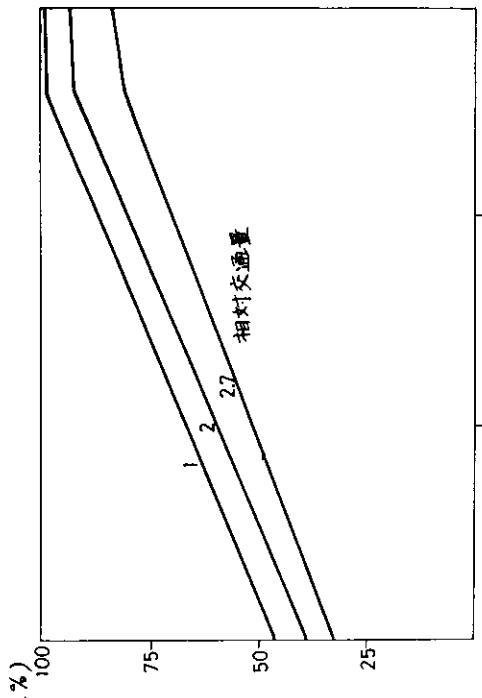


図 4.1.4 待時間累積分布（信号方式、周期 24 分）

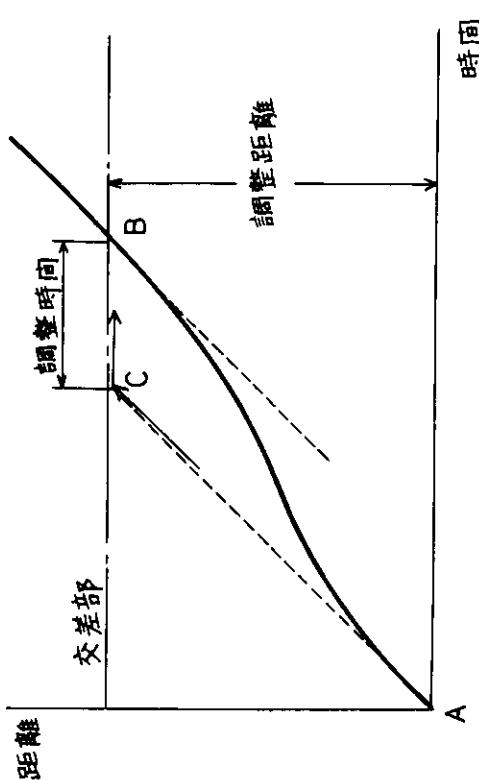


図 4.1.5 シミュレーションによる待時間と
加減速性能との関連

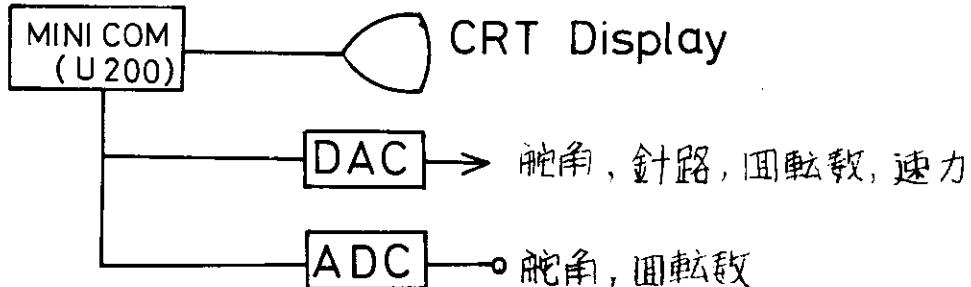
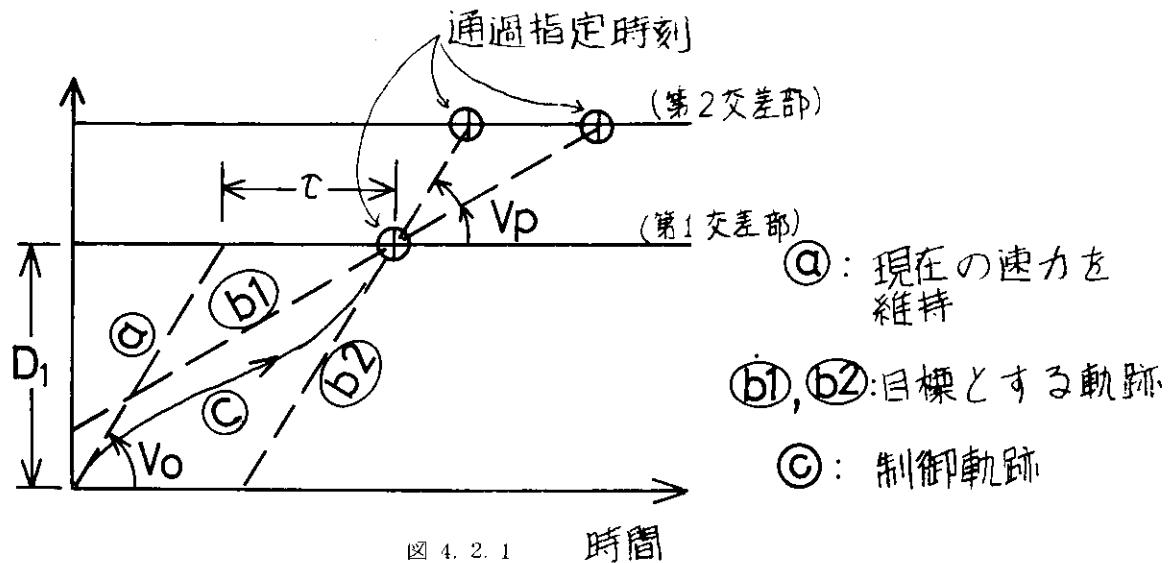


図 4. 2. 2 操船シミュレータの構成

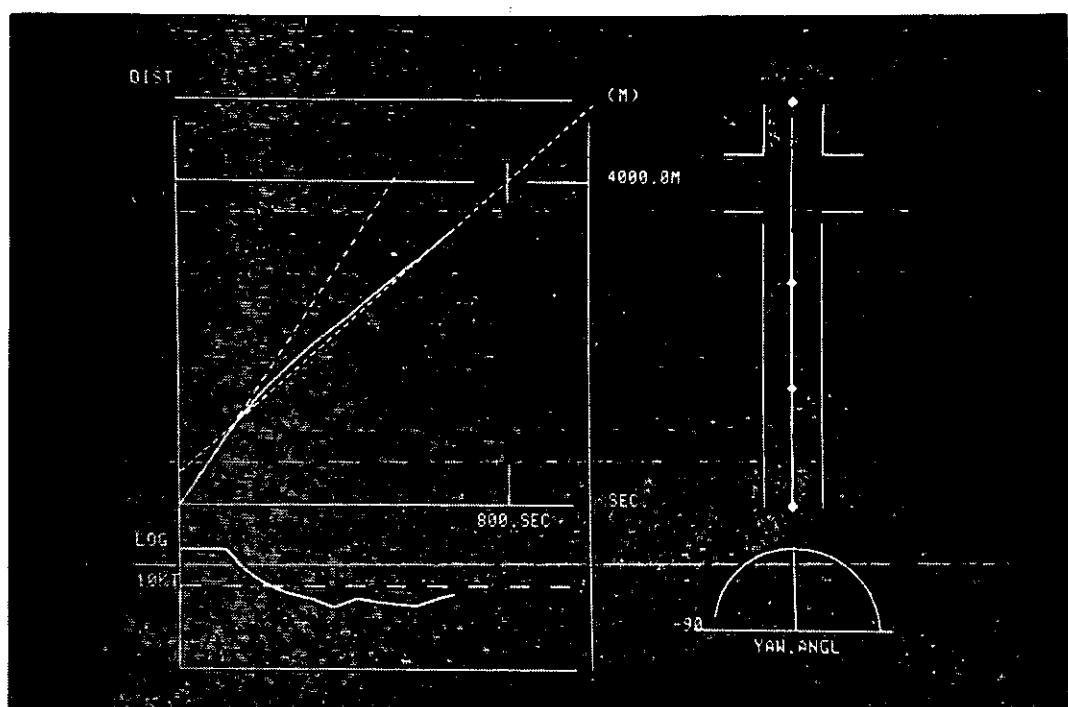


図 4. 2. 3 Graphic Display 映像

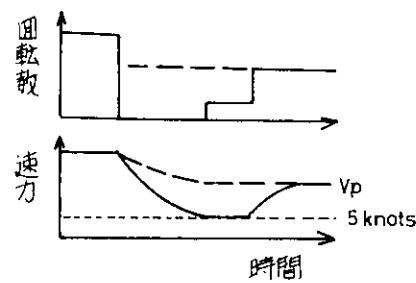


図 4.2.4 機関操作パターン

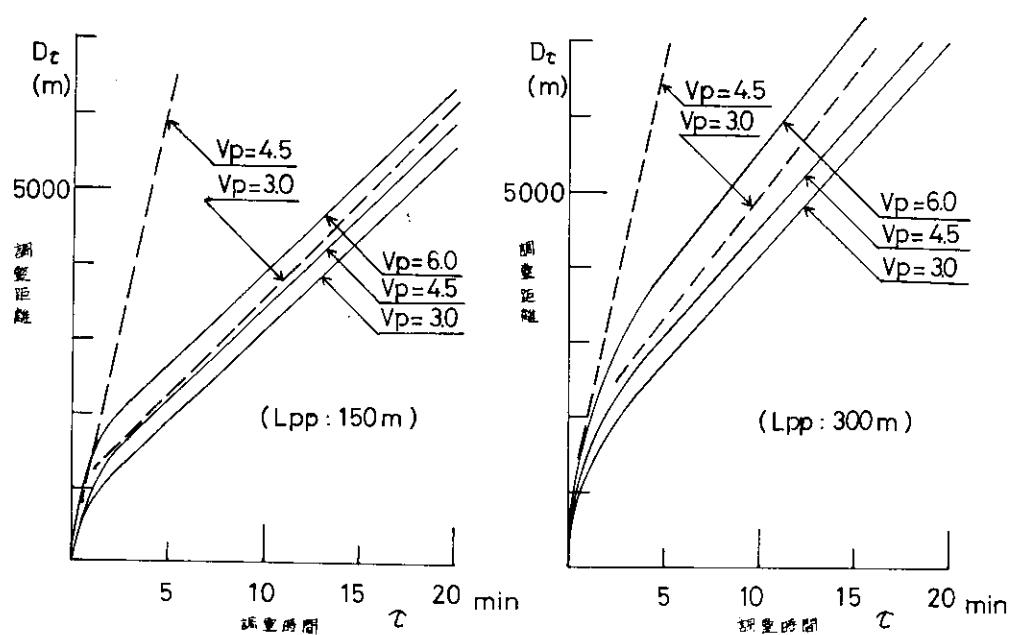


図 4.2.5

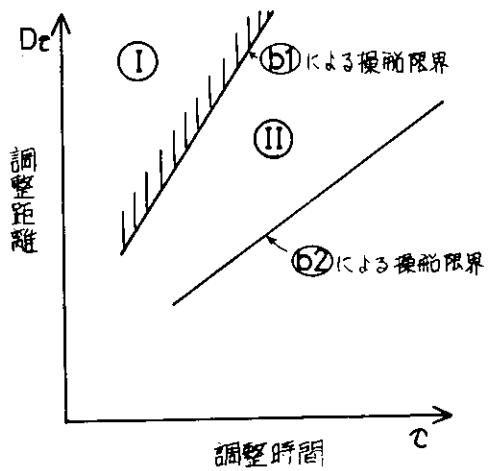


図 4. 2. 6

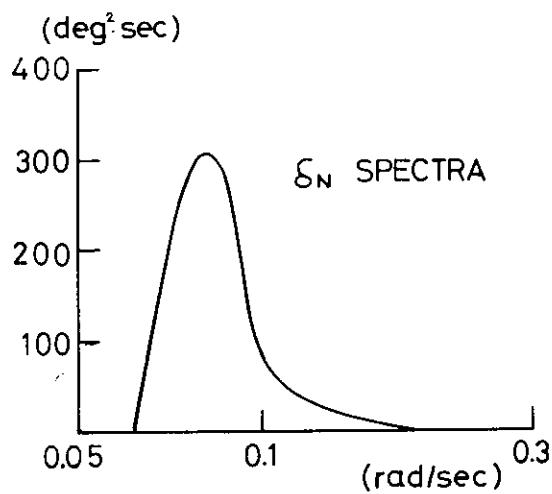


図 4. 2. 7

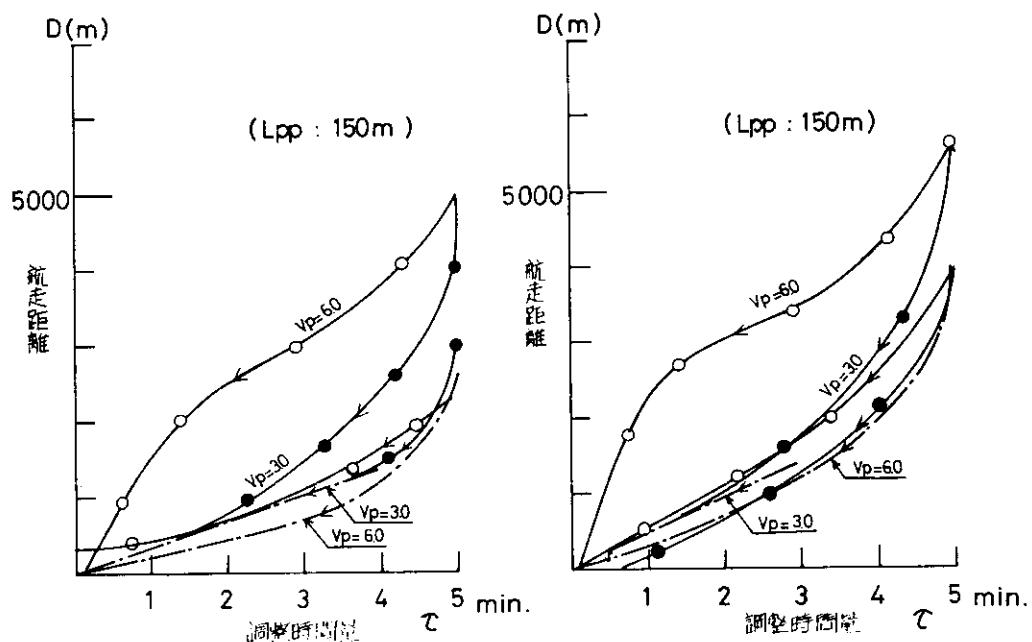
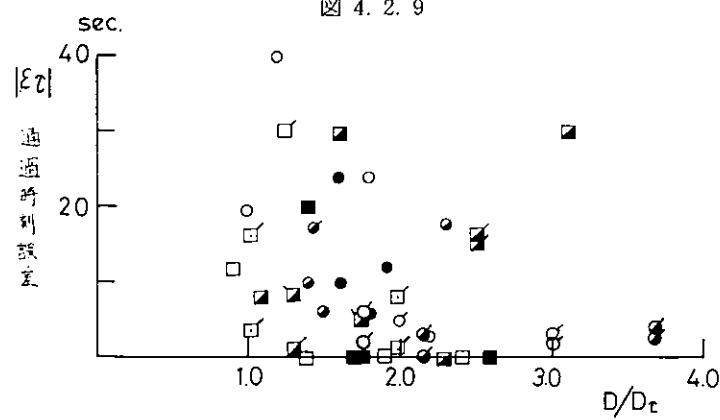
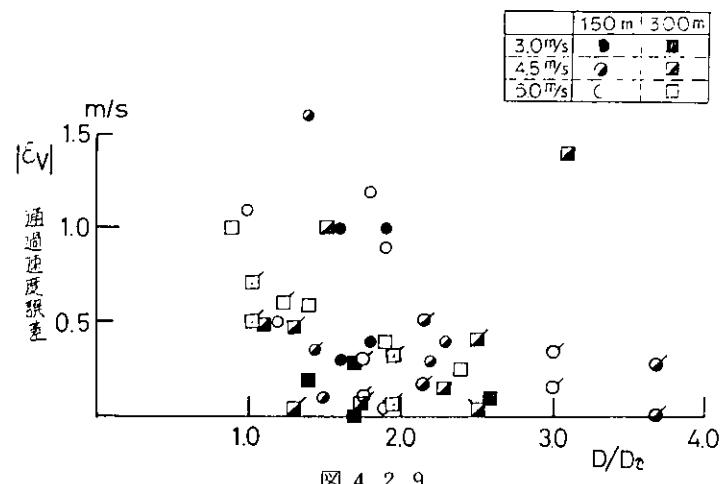


図 4. 2. 8 a

図 4. 2. 8 b



5. 港内、狭水道における加減速操船の実態調査

5.1 調査目的

本年度は、港内出入港時および狭水道通過時の加減速操船の実態を調査して、操船上必要な加減速性能を評価するための基礎資料を得ることを目的として作業を実施した。

5.2 調査方法

5.2.1 資料収集方法

アンケート方式により、船会社、造船所などに協力を依頼して出入港および狭水道航行時のエンジンテレグラフ・ロガー、コースレコーダの記録等の操船記録入手すると同時に、出入港時の機関操作時機、増減速時の方向制御方法等の一般的な経験則についても、船長、ドックマスターなど操船者の意見を収集した。

アンケートフォームは、表5.2.1に示すもので、下記の合計16ヶ所あてに依頼した（アイウエオ順）。なお、狭水道操船の実態については5.4に述べる様式で別途実施した。

船会社（7社）

大阪商船三井船舶、川崎汽船、三光汽船、ジャパンライン、昭和海運、日本郵船、山下新日本汽船
造船所（8社）

石川島播磨重工、川崎重工、佐世保重工、住友重機、日本钢管、日立造船、三井造船、三菱重工
その他（1社）

航海訓練所

の合計16社である。

5.2.2 資料収集結果

アンケートは1ヶ所当たり約4通以上の回答の入手を予定して実施した結果、53年1月31日現在において、表5.2.2に示すような内訳で操船記録および経験則について、各船社、造船会社、官庁等の協力をえてほぼ予定通りの回答数がえられた。図5.2.1、図5.2.2に操船記録の回答のうち比較的詳細に記録された例を示す。

表5.2.2 収集した資料

船種	港内						狭水道 浦賀水道北航	
	隻数	データ区分			Engine motion	アンケート		
		入港	出港	シフト				
TANKER	24	23	9	2	35	20	5	
CARGO	11	8	4	3	15	11	12	
専用船(ORE, BULK)	12	15	3	3	21	7	4	
CAR, CAR-BULK	4	6	3	0	9	4	0	
CONTAINER	13	16	5	4	25	12	18	
練習船	3	7	0	0	7	3	0	
合計	67	75	24	12	112	57	39	

注) 表5.2.2のEngine motionとは、エンジンテレグラフ記録スタンバイ・ブックなど、何らかの形で主機操作内容の記録が得られたものの資料数を示す。

表5.2.2の資料の船をD.W.別に分類すると表5.2.3の通りである。

表5.2.3 収集資料船 D.W.別内訳

D.W.	港内(隻数)	狭水道
1万トン未満	3	0
1万トン以上2万トン未満	18	12
2～3	8	6
3～5	8	6
5～10	5	7
10～20	7	3
20～30	16	2
30～50	1	0
50万トン以上	1	0
合計	67	36

5.3 調査結果

5.3.1 機関操作設定と回転数、速力の関係

(1) 機関操作設定と速力の関係

アンケート質問2に対する回答により、機関操作設定と速力の関係をとりまとめると、表5.3.1および図5.3.1のような傾向を示す。

表5.3.1 機関操作設定と速力の関係

(i) 資料入手船全体

	Vs		データ数
	平均値	標準偏差	
NAV. FULL (SEA SPEED)	18.08 kt	3.656	59
S.B. FULL	11.45	1.429	62
HALF	9.03	1.496	62
SLOW	6.95	1.449	62
DEAD SLOW	5.15	1.585	62

(ii) Container船などVs (SEA SPEED) 20kt以上の船を除いた場合

NAV. FULL	15.98	1.205	42
S.B. FULL	11.08	1.284	45
HALF	8.53	1.269	45
SLOW	6.34	1.118	45
DEAD SLOW	4.51	1.206	45

表5.3.1の平均値、標準偏差および図5.3.1頻度分布を見てもわかるようにNAV. FULLでは船種が種々あるため、当然のことながら分布はばらつくが、スタンバイ(Stand by, 以下S/Bと略す)以下になるとばらつきは小さくなり、また、高速船か否かによる差もあまりないことがわかる。

(2) 機関操作設定と回転数の関係

アンケート質問2に対する回答により、機関操作設定と回転数の関係をまとめたものが図5.3.2である。これによれば、S/B FULLの回転数はほぼNAV. FULLの65%程度に設定しているものが多い。

また、(1)において、S/B FULL以下になれば、機関操作設定と速力の対応のバラツキが小さくなっていることを考慮して、HALF以下の設定の回転数をS/B FULLの回転数に対する比で表示すると、設定の回転数はHALF, SLOW, DEAD SLOW各自にはほぼまとまった値を取っていることがわかる。

エンジンテレグラフにおける機関操作のrpmと船速の関係はほぼlinearに設定されているので、図5.3.2のHALF以下の設定回転数と表5.3.2の船速の平均値は大略linearな対応関係を示している。

5.3.2 入船岸壁係留時の機関操作法と舵効のある最低速力（アンケート集計）

(1) 機関操作法

アンケート質問3に対する回答により、入船岸壁係留時の減速のための標準的な機関操作時機の頻度分布を示したもののが図5.3.3である。D/Lの平均値および標準偏差を表5.3.2に示す。ここでDは停泊地までの残航程、Lは船の長さ(L_{pp})を示す。

表5.3.2 入港時機関操作時機

	D/Lの平均値	D/Lの標準偏差	データ数
S/B FULL	5.2.4.2	1.6.7.0	4.9
HALF	3.8.4.7	1.3.9.9	4.6
SLOW	2.6.0.8	1.1.5.4	4.9
DEAD SLOW	1.9.2.2	9.6.4	4.3
STOP ENGINE	1.1.1.4	6.4.8	4.8

注 D/L：停泊地までの残航程(D)/L_{pp}

S/B FULLおよびHALFではかなりD/Lにはばらつきがあるが、低速になってくるとばらつきは減り、船の大小などに関係なく機関操作法がある程度決まってくる傾向にあることを示している。

上記の機関操作値とD/Lの関係を、アンケート質問2の回答の機関設定値と速力の関係を用いて発令速力とD/Lの関係に引き直したものと2,3例について図5.3.4に示す。縦軸は発令速力のNAV. FULLの速力に対する比で示しており、これによれば、経験則による入港時の減速のパターンがある程度のまとまりを示しているのがわかる。

入港時の機関操作時機は、船の長さだけではなくて、その他の要素も影響すると考えられるが、その他の要素の効果の検討は今後の課題とする。

(2) 舵効のある最低速力

アンケート質問3に付記して、Stop Engineで、実用的に舵が効かなくなる速力を何ノットとみているかについての回答を集計したものを図5.3.5に示す。これによれば操船者は、おおよそ3ktで舵効がなくなるものと見ており、これは従来一般に言われている値と同程度である。したがって、船速がこれ以下になれば、Tug Boatなどの補助操船手段に頼ることになるものと見なすことができる。

5.3.3 港内における加減速操船

(1) 機関操作法

港内における一般的な加減速操船はおよそ次の3つの段階がある。入港操船の場合で言えば、(1)湾口から港

外まで、(2)港口又は航路入口から着岸点付近まで、(3)タグ又は係留索で横付けするまで、(1),(2),(3)のいずれの段階でも加減速操船を行なうが、(1)の段階は速力および船位の制御に余裕(自由度)があり、(3)の段階は横方向の制御になるので、機関操作は補助的になる。したがって(2)の段階が港内における加減速操船の主要部分となる。出港の場合も、これと同じ段階を経るが、入港に比べて速力の制御に余裕があるので、操船者の負担が軽い。錨泊は、(1)の段階に対応する。

今回得られた実測データは、これらの区別が明確につけられないデータが多いため、(1),(2),(3)をまとめた形で整理する。ただ、上述の理由により出港と入港、着岸、錨泊の区別をして解析した。なお、今回の解析の対象とした実測データは解析上の時間的な制約から47ケースについて行なった。

図5.3.6は、機関操作記録から入港時のS/B時間を調べたもので、錨泊の時は、スタンバイ時間が着岸の場合のそれの $\frac{1}{2}$ 以下となっている。S/B時間は、港の地形、交通条件、操船する船の性能により影響されるが、図5.3.7は船の長さ別に調べたもので、大型船など当然のことながら、S/B時間が長く、つまり早目に機関操作をはじめている。

図5.3.8は、S/B時間中に行なった機関操作の各設定値の使用頻度及びその継続時間を調べたもので、図5.3.9は、これらを合計して一つの操作の継続時間の分布と各設定値の総使用頻度と平均継続時間を示している。Stopの使用頻度が高いのは、Stopで航走する場合と前進から後進に又は、後進から前進に操作したとするとき、一度Stopの設定を慣習的に使う場合とが重なったためとみられる。これらの図から(1)継続時間は指數的に減少すること、(2)機関を後進にする時間は前進に比べて $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ であること、(3)後進の使用はSlow asternの頻度が高いことがわかる。これらの傾向から操船者は、小刻みに機関操作をし、機関を後進にするのを極力少なくして船首の保持に注意を払っていることが推察される。

(2) 減速曲線

航跡からえられた速力を縦軸に、停止予定位置からの残航程を横軸に示したのが図5.3.10である。S/B Speedは、主機関の馬力や船の排水量にあまり関係なく図5.3.1のように決められるが、逆転停止性能は、主機関の馬力と船の排水量に大きく影響される。したがって、操船者は、後進推力/排水量の比が大きい船を操船する時の方がこの比が小さい場合に比べて高い速力で接近するとみられる。これを考慮して、速力を航海速力V_Nで残航程を船のLで無次元化して示したのが図5.3.11である。図5.3.10よりややまとまりを見せていく。錨泊の場合に、着岸よりも高速で接近するのは(1)でのべたとおり、操船上の余裕が大きいからである。ただ今回のデータはデータ数が少ないと、船位の測定間隔(0.5~1.0マイル)が長いため、その間の平均速力であること等、船位の測定からえた速力の精度とを考えると、これらの曲線は一つの傾向を示すとみるべきであろう。今後はもっと精度よく速力を求める方法も考えるべきである。

(3) 出入港時のタグの使用隻数、馬力

出入港時に使用したタグの隻数と馬力をたずねたが、D.Wベースにタグの総使用馬力を示したのが図5.3.12である。図5.3.13にD.Wあたりの使用馬力も示している。従来経験的に言われているタグの必要馬力数はD.Wの10~15%とされるが、今回のデータはこの数値を下限としている。

5.4 狹水道における加減速操船

5.4.1 データ概要

D.W 10,000tから270,000tまでのタンカー、貨物船、コンテナ船等について図5.4.1に示す浦賀水道から中ノ瀬航路を北行通航時の記録を収集した。図5.4.2に示すような調査表をもとに、浦賀水道通航中の主要点

通過時刻とその時の船位の記録、この間のエンジンテレグラフ・ロガーの記録、コースレコーダの記録を収集した。調査表の一例を図5.4.2に示す。データ総数39件、船舶数27船である。データを船種別、D.W別に図5.4.3と5.4.4に示す。主機の種類は、コンテナ船にて一隻タービン船を含む以外は全てディーゼル主機である。

5.4.2 機関操作回数

パイロット乗船が対象域内で行なわれた場合、機関操作回数は著しく増加する。それで、明らかに、このための操船が含まれるもの除外して、各ポイント間における機関操作回数を調査した。なお、パイロットの乗船は、No.1ポイントからNo.2ポイントの間で行なわれるのが通常のようである。各主要地点番号は図5.4.2に示すとおりである。

(1) 狹水道入口手前における機関操作回数

現在、浦賀水道の通航は、速力12ノット以下に海上交通安全法により規制されているので、狭水道入口手前で速力制御を必要とする。この操作が入口手前何マイル付近で行なわれるかは明確ではないが、今回の調査では、No.1ポイントからNo.2ポイントを入口直前の場所として、入口手前の機関操作回数を調べて図5.4.5に船種別機関操作回数、図5.4.6に排水トン数別機関操作回数を示す。又主機が2機あるものは、各主機の操作回数の平均値をとっている。

(2) 狹水道通航中機関操作回数

狭水道通過のための速力制御は、(1)に示すように手前で適当な速力になるように操作するのが通常であり、通航中は避航等特別な事情がない限り、あまり機関操作を行なわないのが普通である。

No.2ポイントからNo.7ポイントまでの間で行なわれた機関操作回数を図5.4.8～図5.4.10に示す。図5.4.5、図5.4.4に比べ、はるかに操作頻度は少ないことがわかる。さらに、各ポイント間での操作回数の分布をみると、狭水道入口付近のものが大半であり、狭水道手前での操作の延長区間とみることができる。

(3) 航行速力分布

ここに示す速力は、ポイント間の距離と、通過所要時間から計算した平均的な値である。

図5.4.12～図5.4.15に、各区間通過速力の変化を各船種について示す。コンテナ船AS丸は4回、AM丸は6回の通航記録があり、図5.4.12にそれぞれの速力変化を示してある。同じ船であっても、通過する毎に速力は変化し、一定の傾向を見い出すことは難しいようである。図5.4.13にAS丸、AM丸以外のコンテナ船の速力変化を、図5.4.14に貨物船、図5.4.15には撒播船の速力変化を示す。

図5.4.16には航海速力別に主要区間通過時の船速を示してある。各速力は全船舶を航海速力で1ノット刻みのグループに分割し、各グループ内の平均速力より求めている。ポイント2,3の間、ポイント4,5の間、ポイント7,7の間で各船が比較的同一速力をとることがわかる。しかし、これが、浦賀水道の航路状況によるものか、データの精度のバラツキによるためかはさらに詳細な検討が必要である。

図5.4.16から、航海速力の大きな船舶は、比較的高速で航路内を航行していることがうかがえる。図5.4.17は、航路内全体を通しての平均船速を航海速力ベースで個々の船ごとにプロットしてある。図中、実線は各航海速力ごとの平均速力を結んだものである。図5.4.18には、航路内全体の平均速力を排水量ベースに個々の船ごとにプロットしてある。実線は平均速力を結んだものである。大型船ほど低速で航行していることがわかるが、データが少ないので正確なことは言い難い。

謝 辞

今回の調査は、各船会社、造船会社、官庁等の御協力をえて実施したものであり、データ収集にお世話をなった関係各位に深謝致します。

表 5.2.1 アンケート・フォーム

出入満月の作狀

お手数ですが下記の質問にお答え下さい。

第三回 本懸念の會田の入選時(ノ)傳用さる事多々

	r.p.m	速力(ノット)
Sea speed (full)		
s/p Eng (full)		
Half	ah'd	
Slow	ah'd	
Dead slow	air'd	

	ハーフ・アンド・ハーフの距離 (c=1/n)
Eng.	
Half ah'd	
Slow ah'd	
Dead slow ah'd	
stop Eng.	

本船で、風波浪の影響はほとんど無い状態で岸壁(又はシーパース)に人を休留させる場合、波速のための静的な燃焼操作炉を改めて下さい。

- (1) 主要操作、方位、距離、速度は、**8/2 Eng.** から操作又は操作して **Ring up Eng.** までについてくるだけ繋かくど記入下さい。とくに、可能なならば、主要操作のベースからの距離 (**1/km**) を記入下さい。

(2) 戰闘操作内容は、エンジン、ナレーター、ロガーの記録を添付していただきたいお様です。

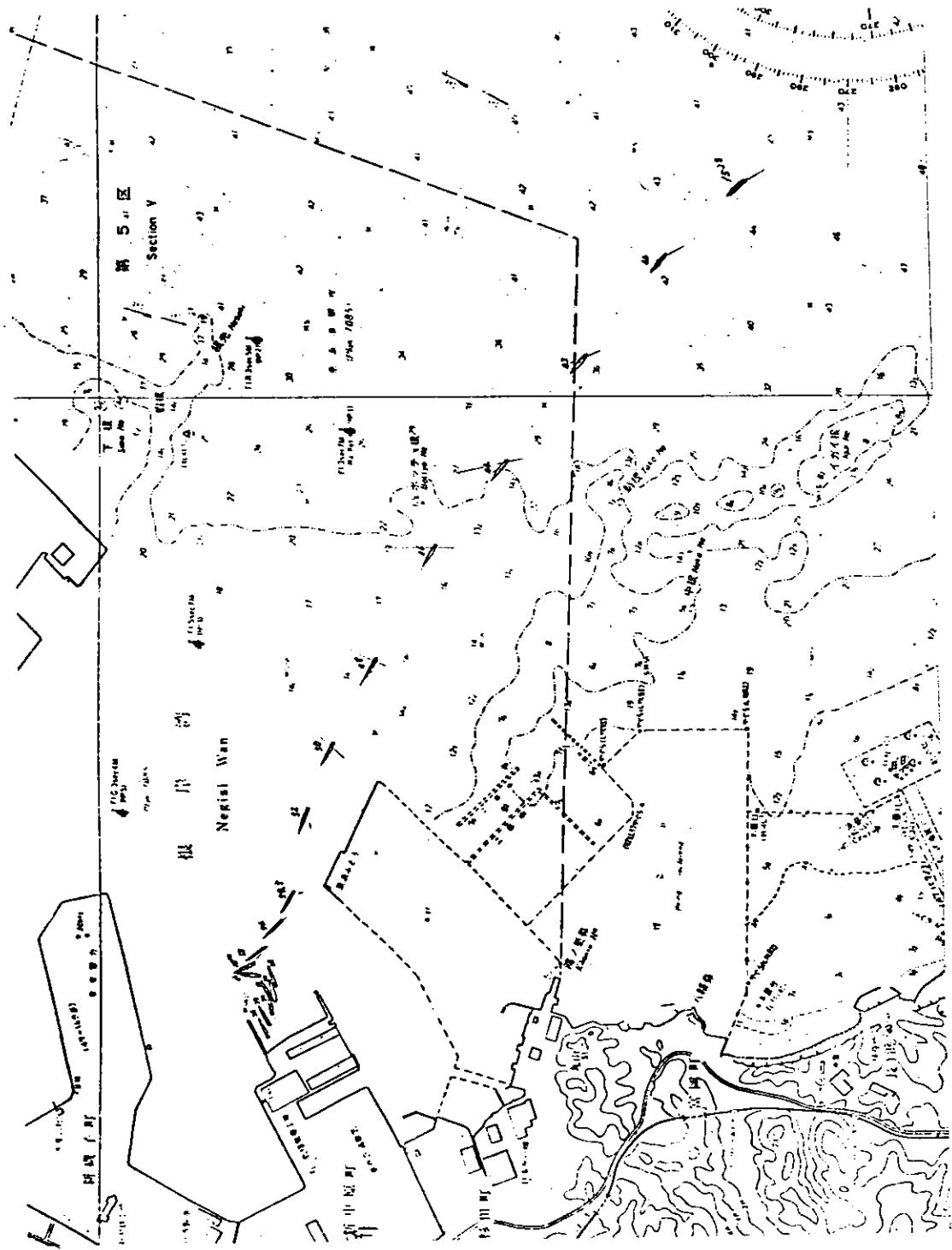


図5.2.1 実側した航跡 (Bulk Carrier, D.W. 36200t)

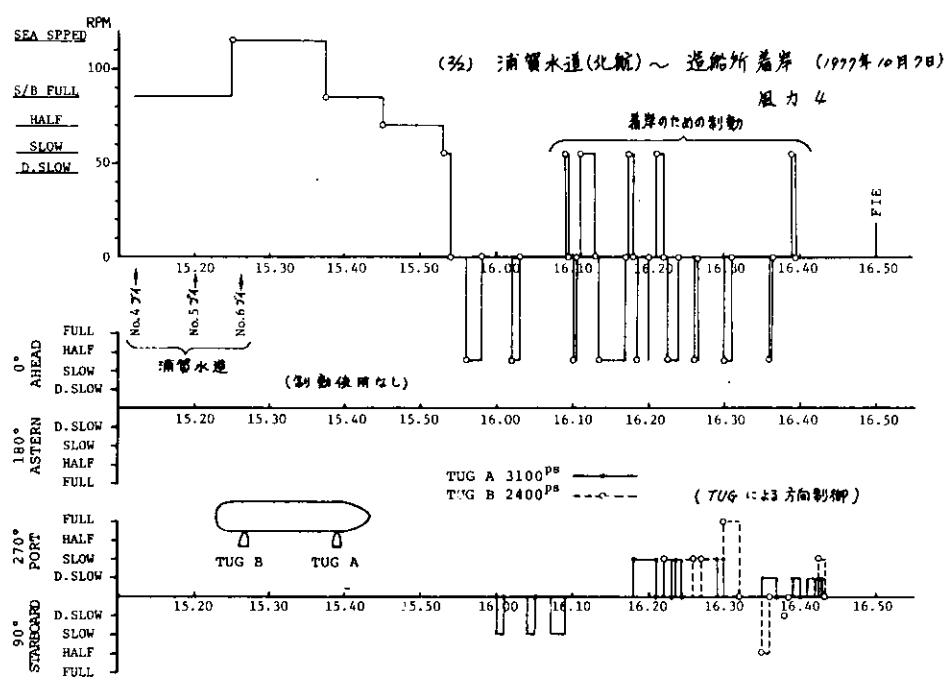


図 5.2.2 入港時の機関操作の実測例 (Cargo Ship, G.T. 10,000t)

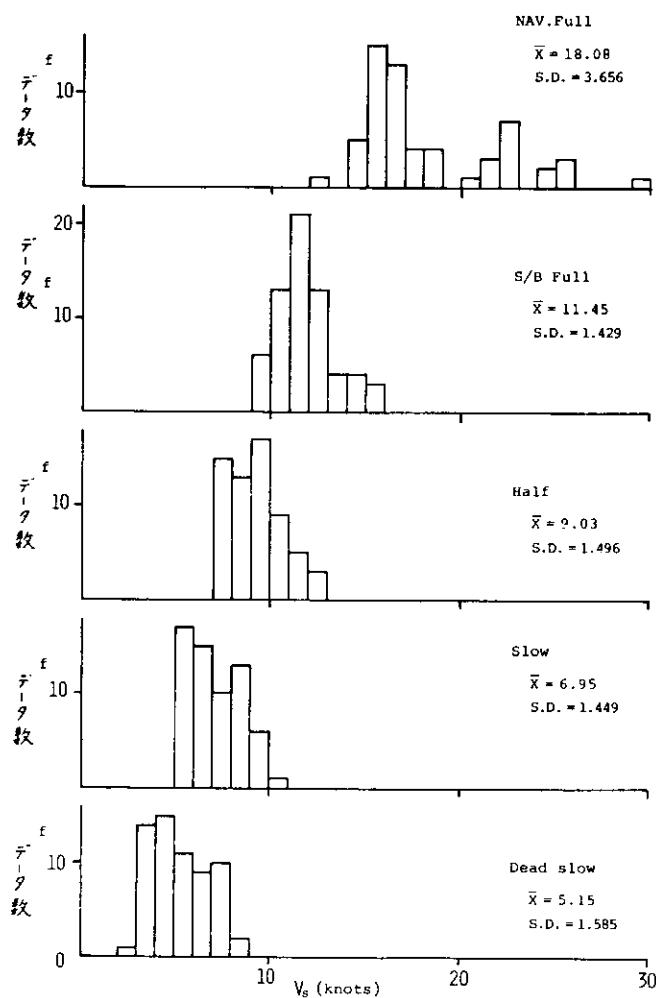


図 5.3.1 機関操作設定と速力の関係 (アンケート)

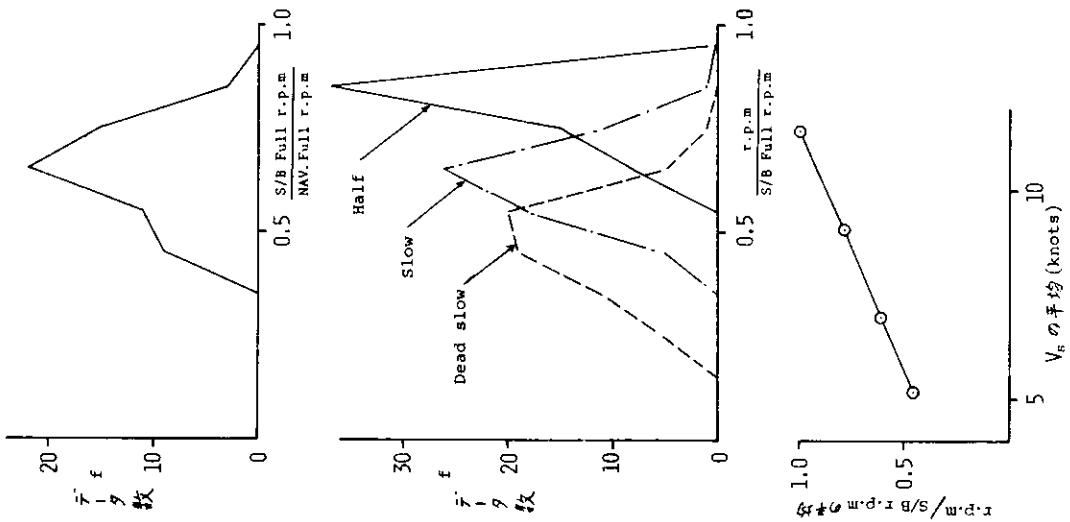


図 5.3.2 機関操作設定と回転数 (r.p.m.) の関係

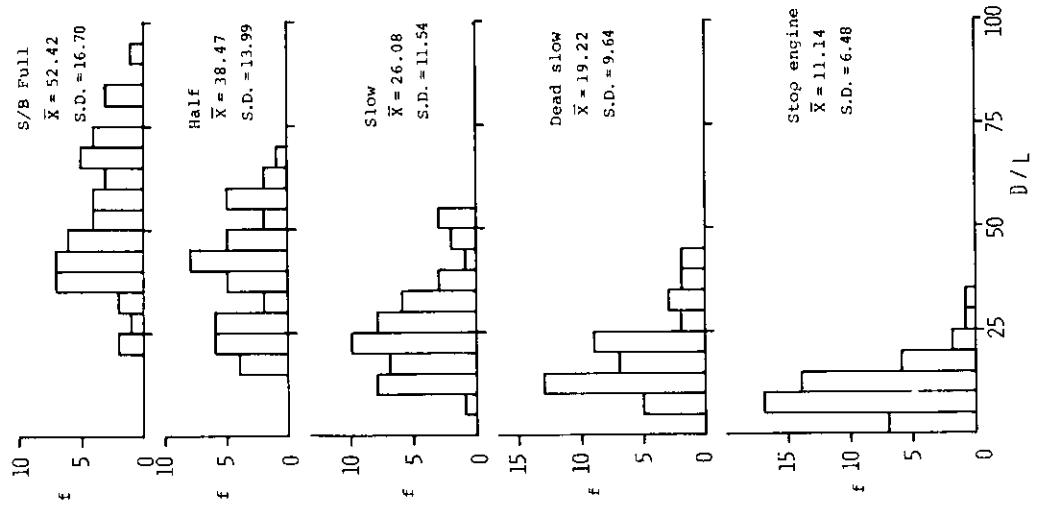


図 5.3.3 入港時の機関操作時間（経験則）

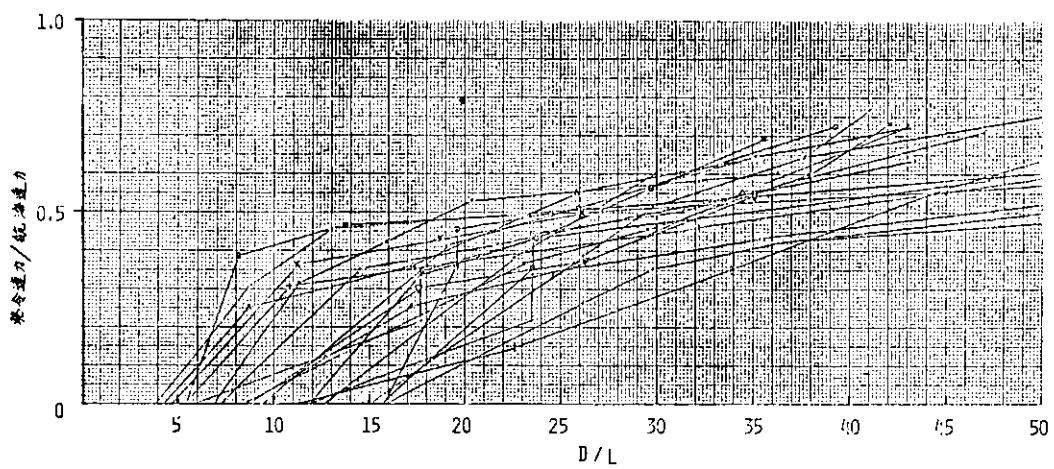


図 5.3.4 発令速力と機関操作時機（経験則）

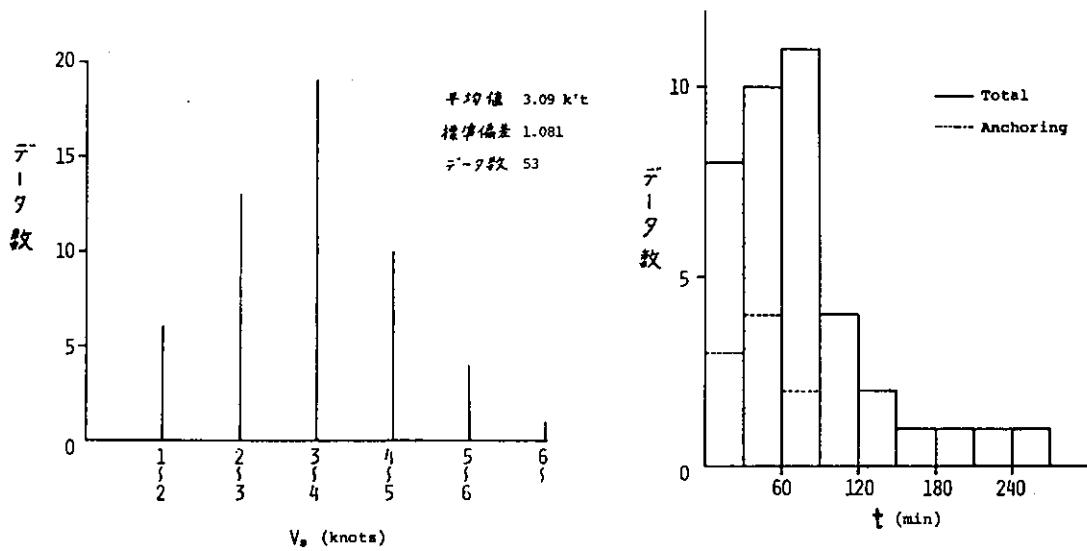


図 5.3.5 航効のある最低速力（アンケート）

図 5.3.6 STAND-BY 時間の分布（入港）

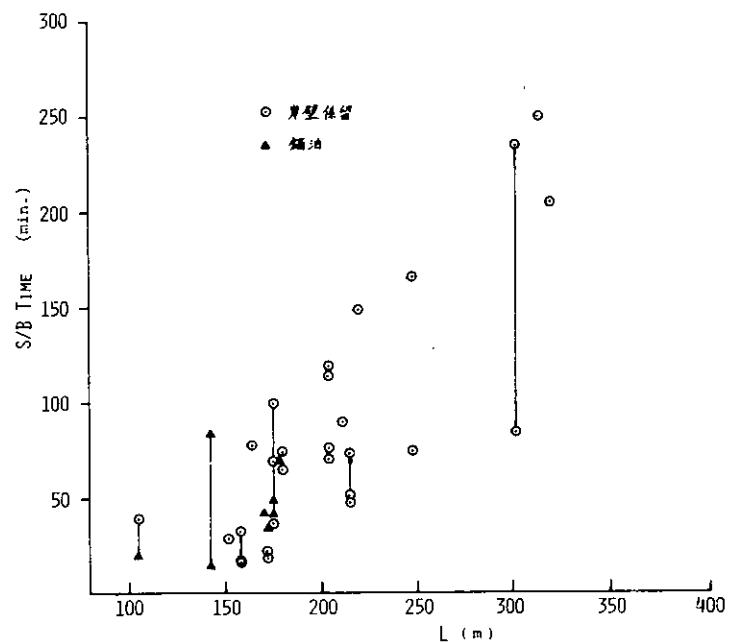


図 5.3.7 スタンバイ時間（実測）

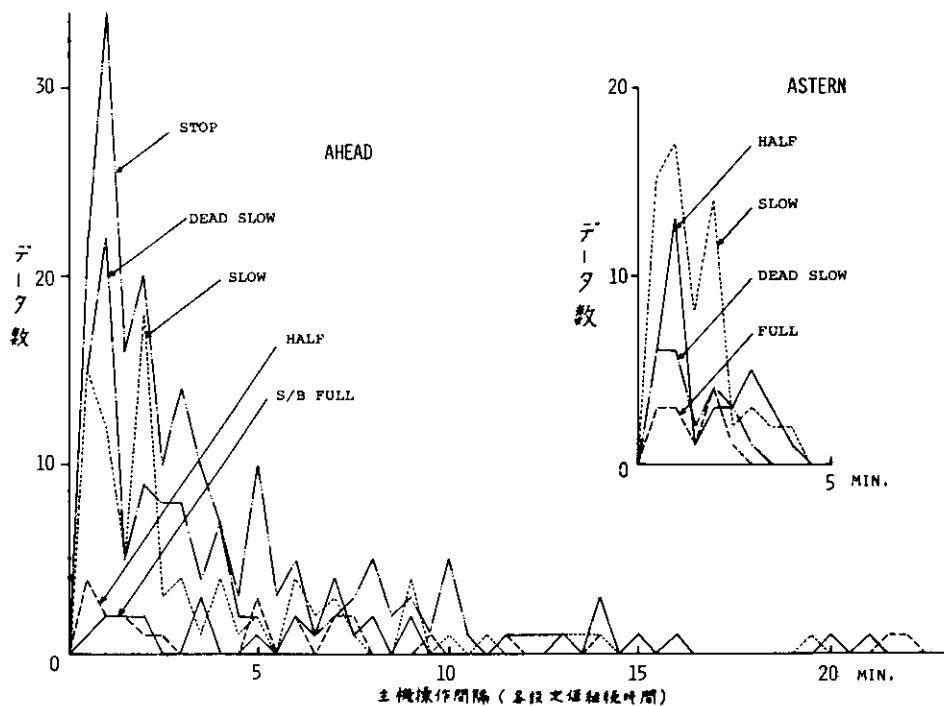


図 5.3.8 機関操作時間間隔の分布（入港）

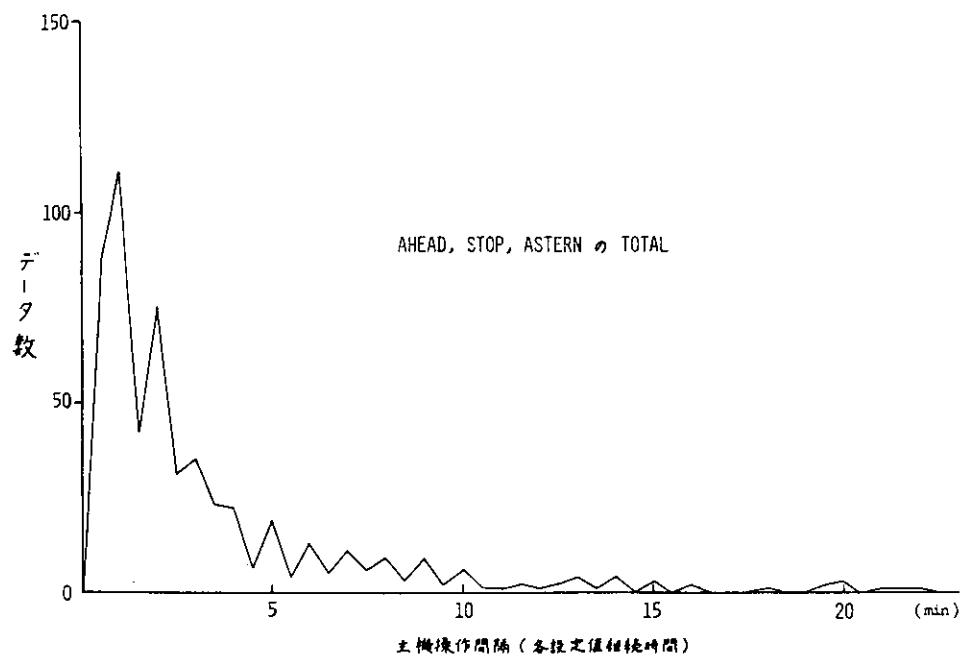


図 5.3.9 機関操作時間間隔の分布（入港）

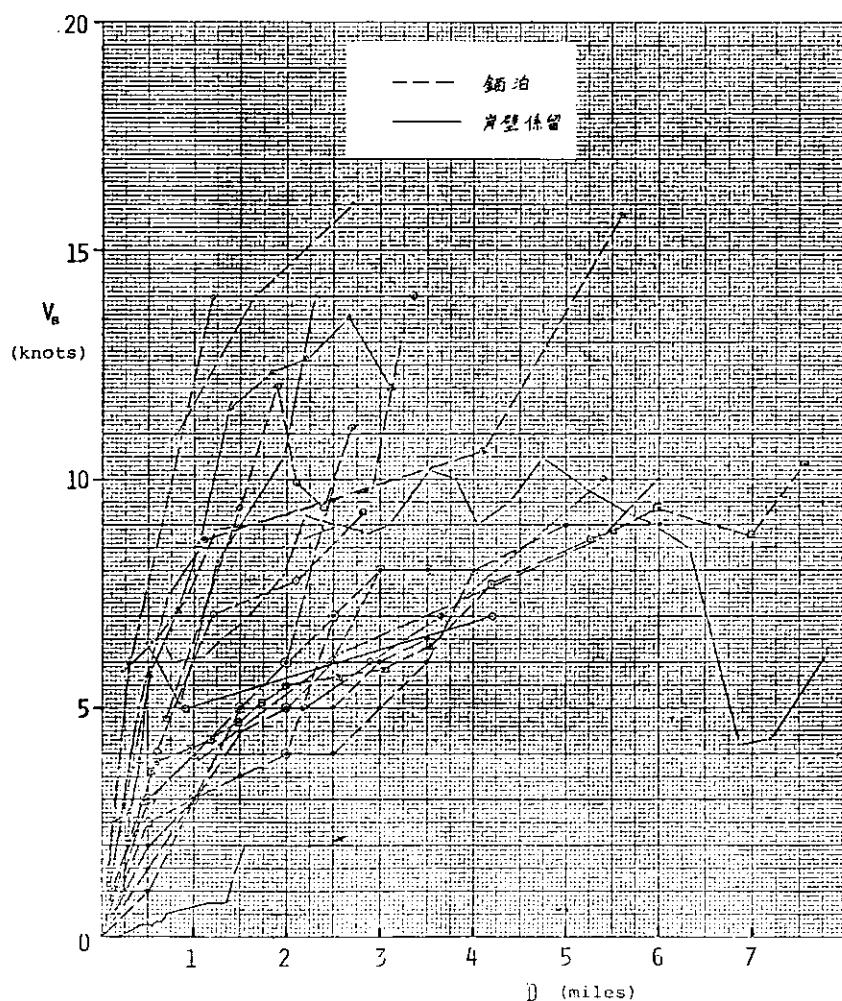


図 5.3.10 入港時の速力（実測）

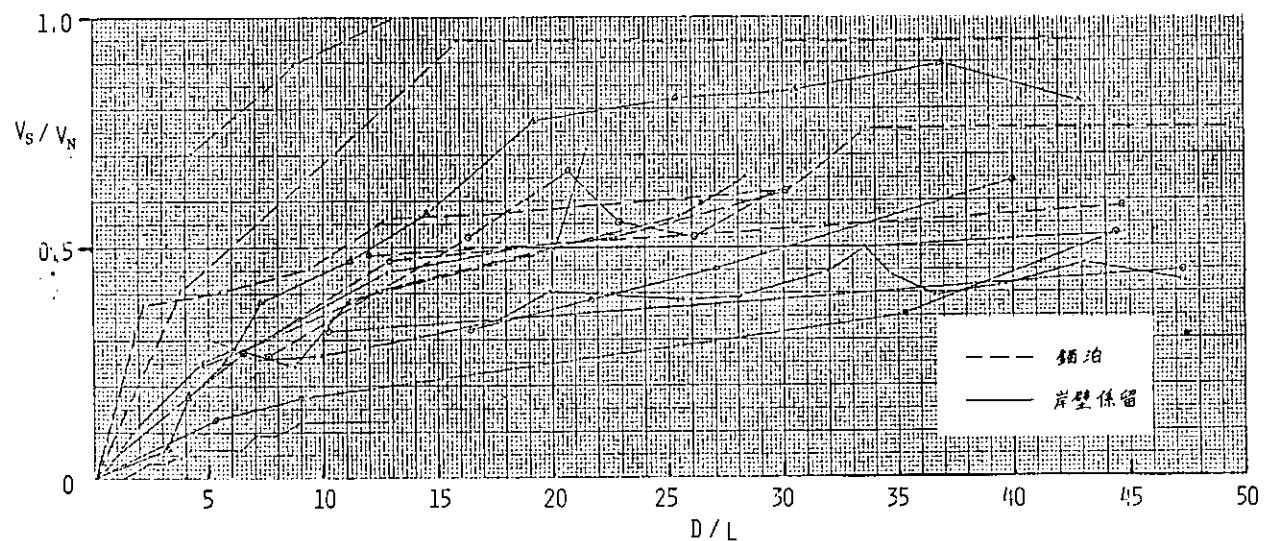


図 5.3.11 入港時の速力（実測）

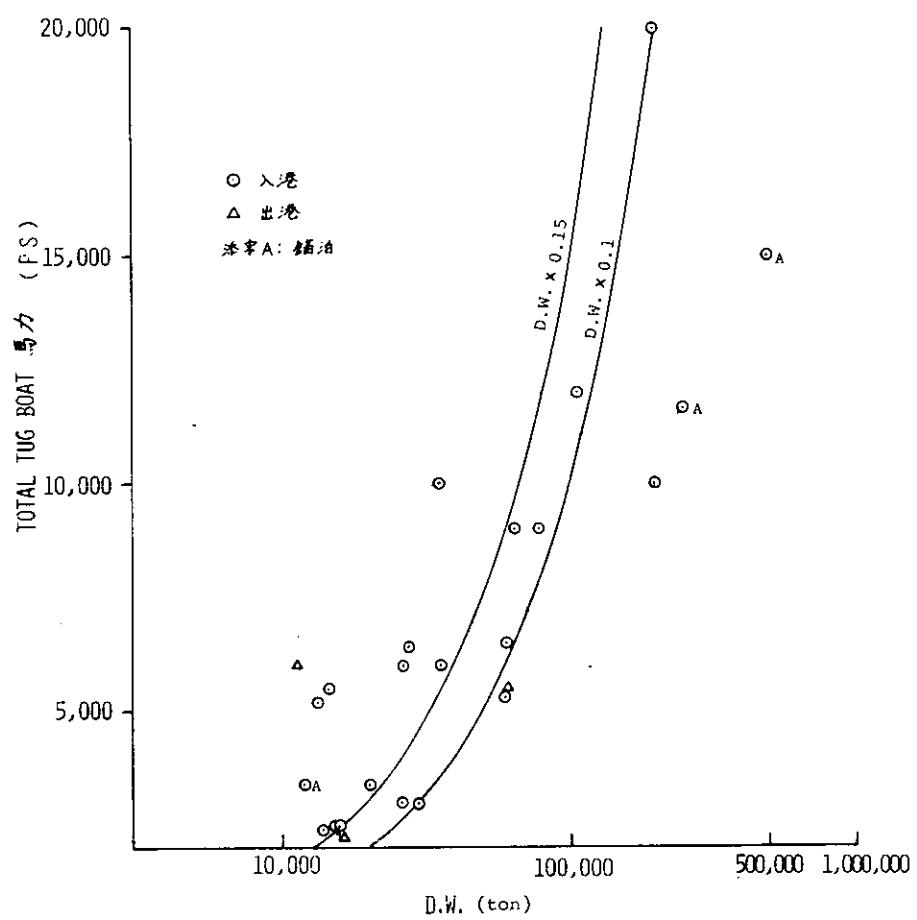


図 5.3.12 使用タグの馬力数（実測）

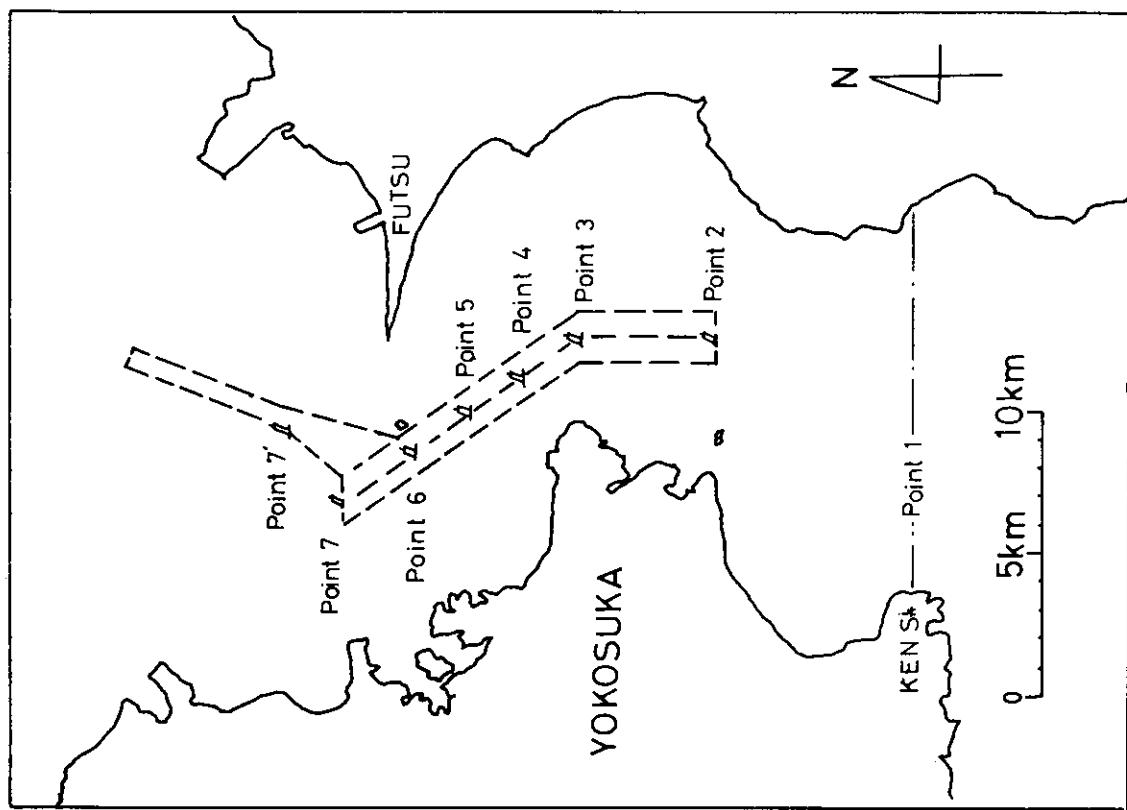


図 5.4.1 湘賀・中ノ瀬航路

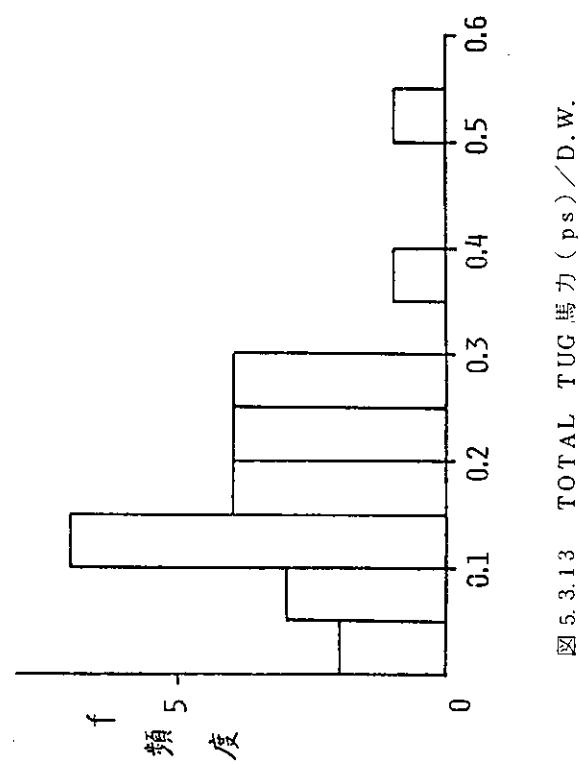


図 5.3.13 TOTAL TUG 馬力 (ps) / D.W.

上卷
第三章 通關外塞盤上勝地

通志卷之二

卷之三

卷之三

表查語彙

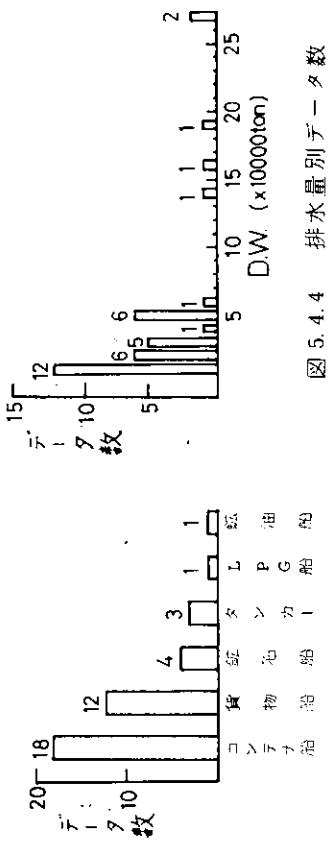


図 5.4.3 船種別データ

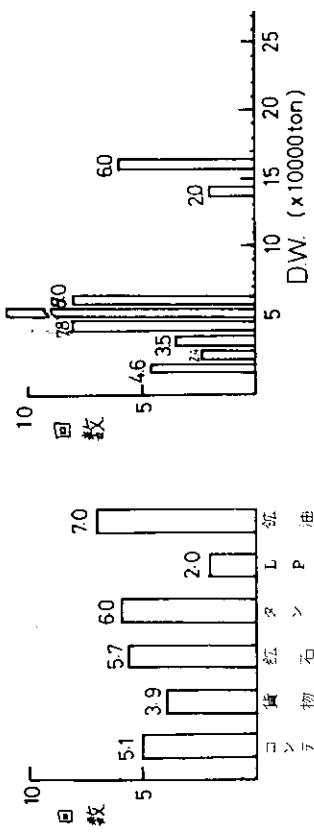


图 5.4.5 船舶 I 型船操作回数

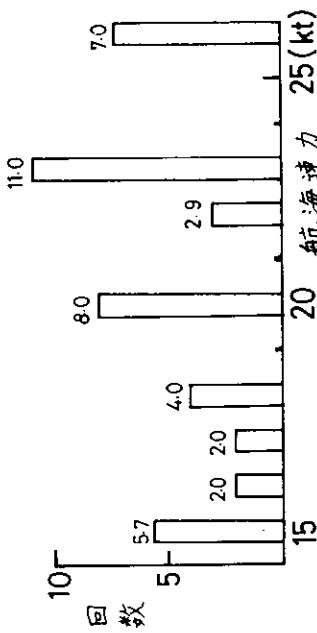


圖 5-4-7 (P't 1 ~ P't 2) 機器操作回數

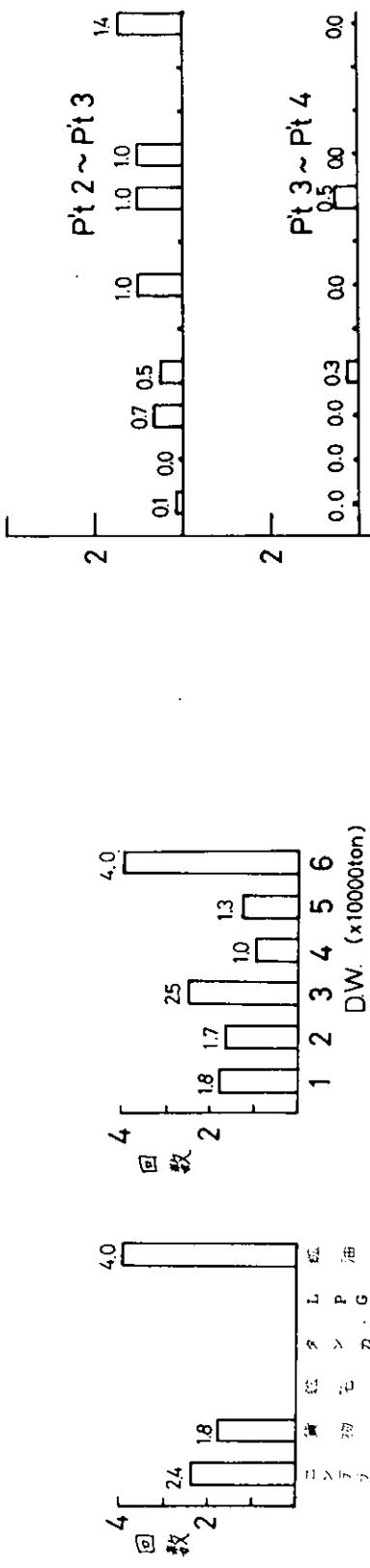


図 5.4.8 航路内機関操作回数

図 5.4.9 航路内機関操作回数

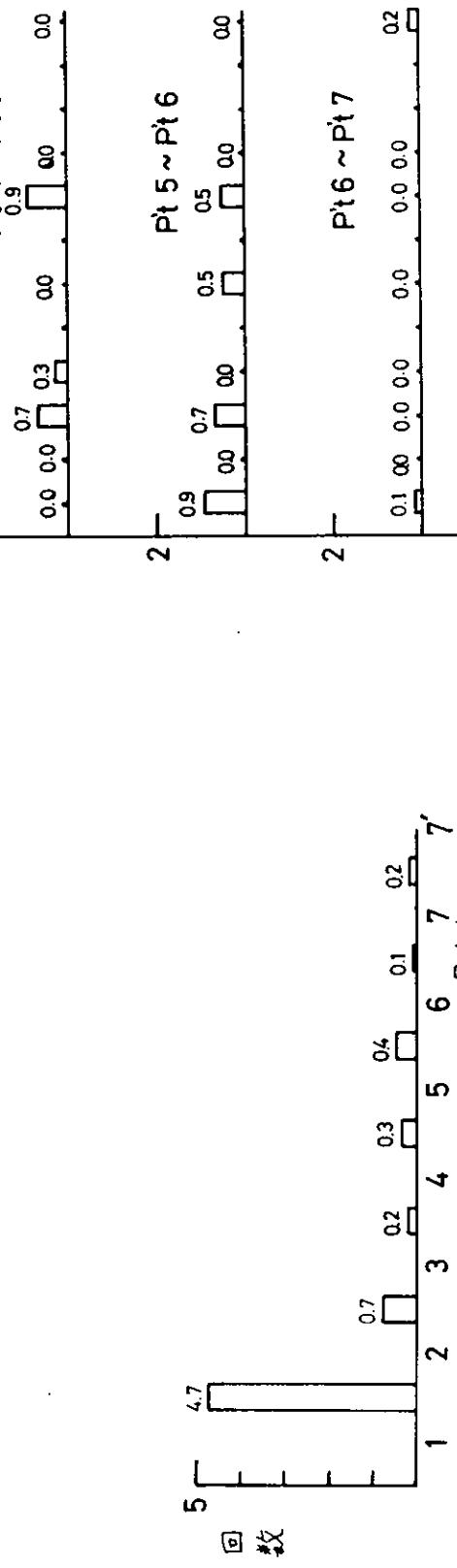


図 5.4.10 主要区間内機関操作回数（全データの平均値）

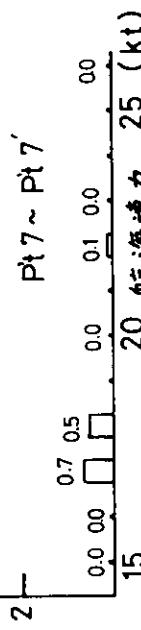
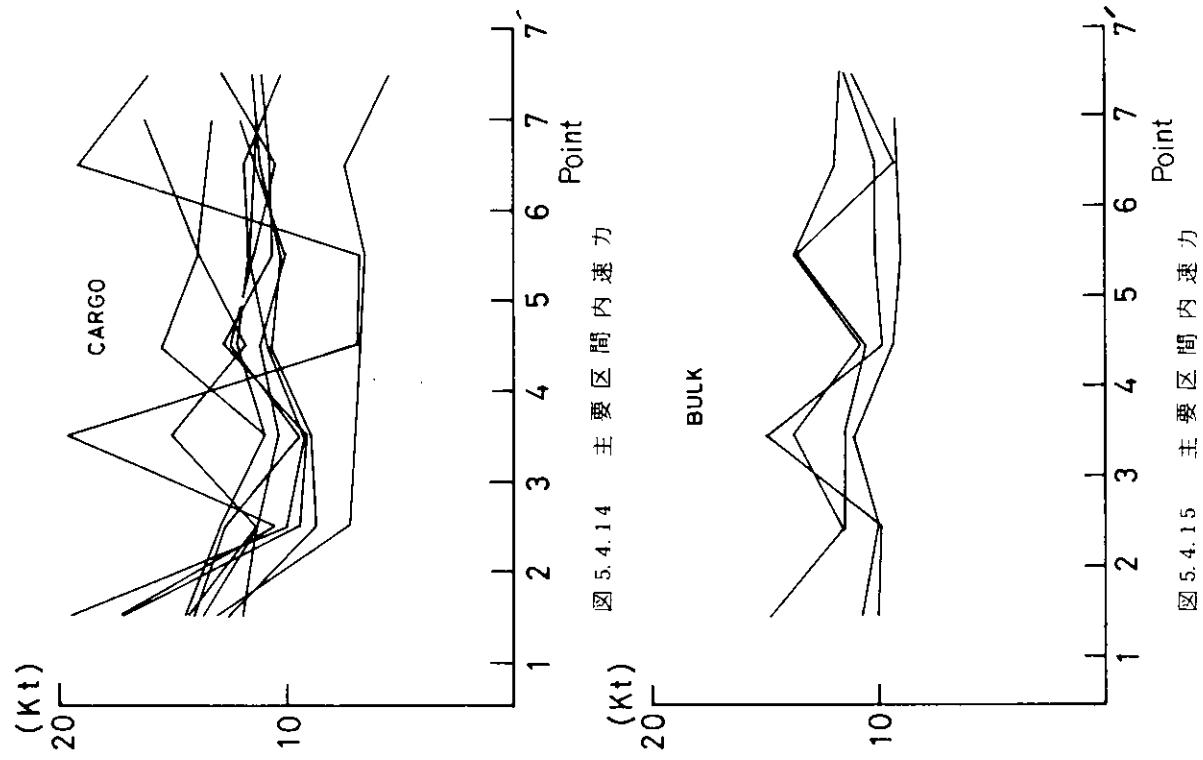
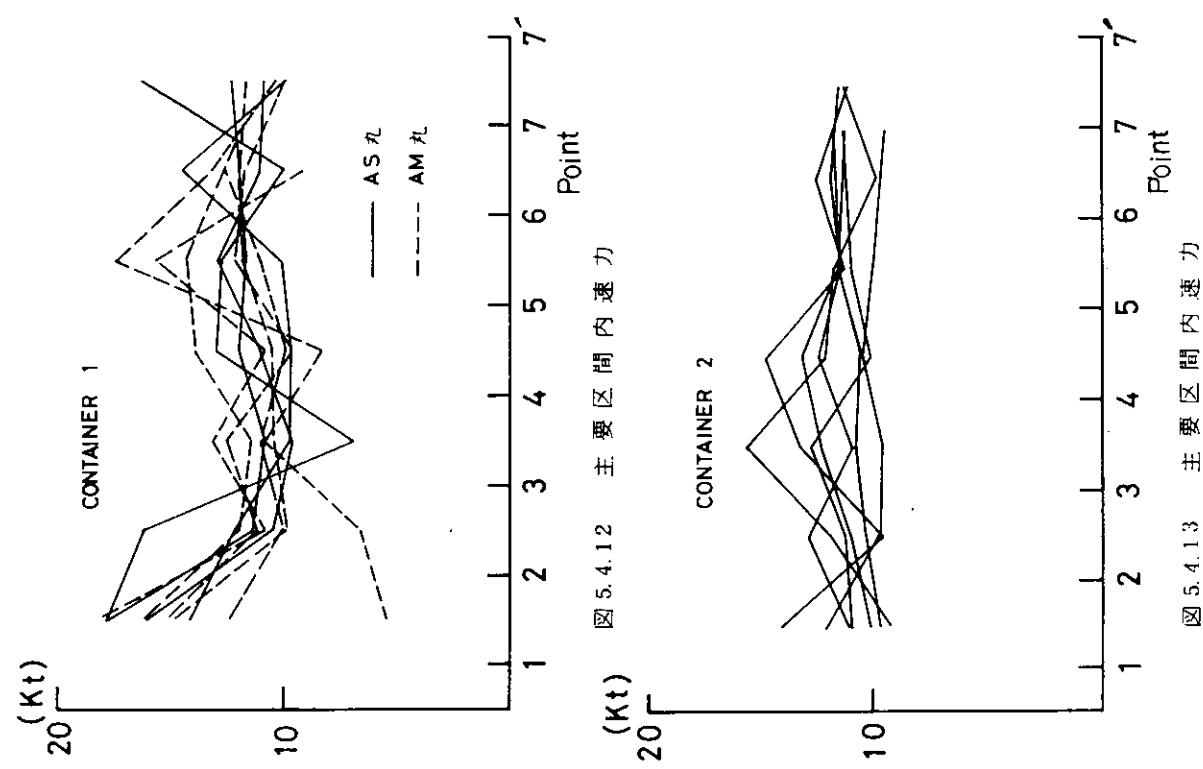


図 5.4.11 機関操作回数（航路内）



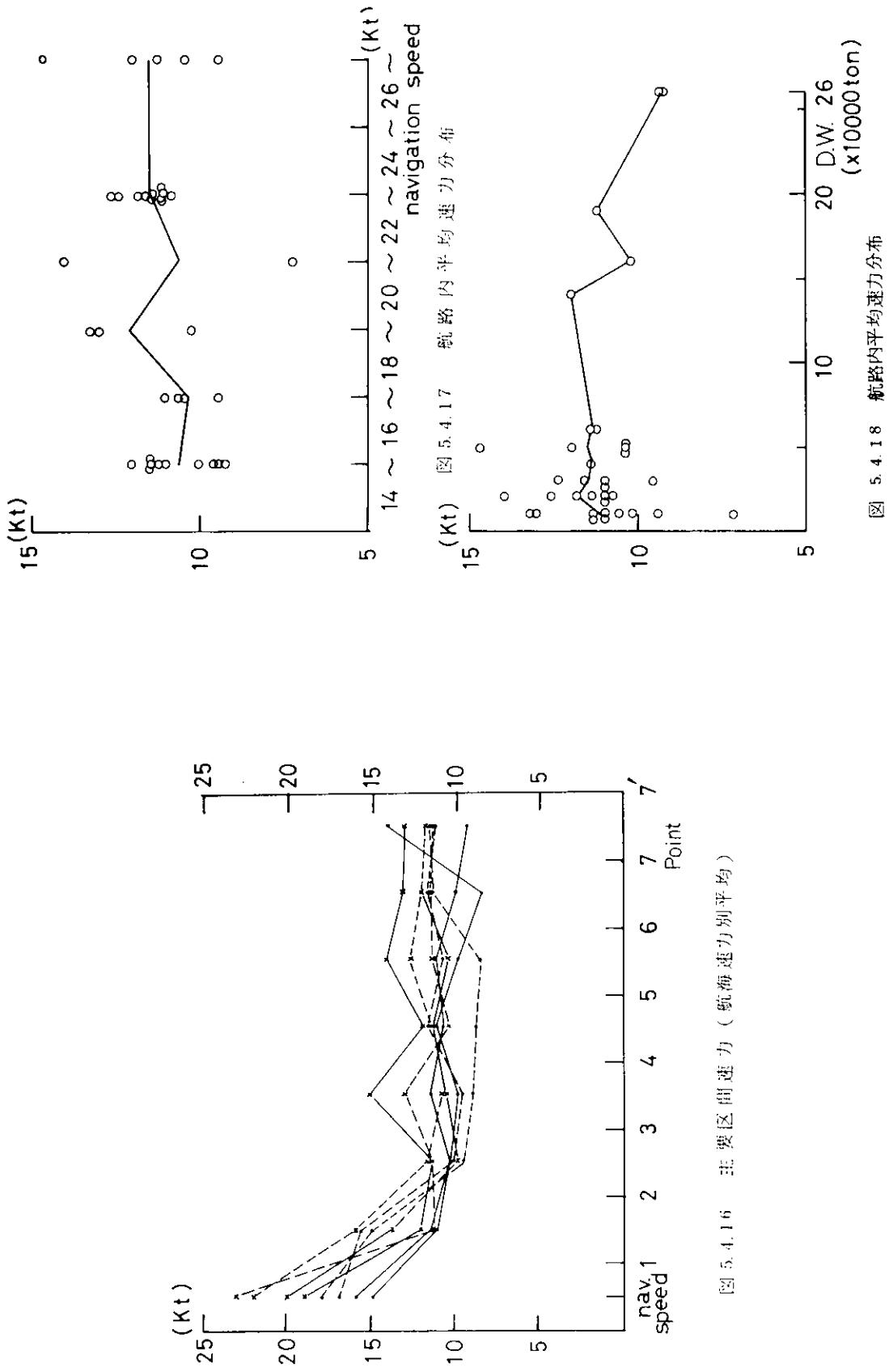


図 5.4.16 主要区間阻力（航路速力別平均）

参考文献

- 1) 小川, 小山, 貴島; MMG 報告-I, 「操縦運動の数学モデルについて」 日本造船学会誌 № 575, 昭. 52. 5
- 2) 岡本, 田中, 野沢, 斎藤; 「可変ピッチプロペラ装備船の後進性能(第2報)」 関西造船協会誌 第144号, 昭. 47. 6
- 3) 谷, 藤井; 「船の急速停止について」「第2回操縦性シンポジウム」 造船学会 昭. 45
- 4) Von R. Dien, J. Prien; "Die rechnerische Ermittlung von Stoppmanövern auf Schiffen mit Propellerantrieb" Schiff und Hafen, Heft 8/1973
- 5) 谷, 藤井; 「船の増減速運動の解法」 東京商船大研究報告(自然科学) 第21号 昭. 45. 10
- 6) 仲渡, 小瀬, 寺本, 島宗; 「船の加減速運動に関する実験的研究」 日本造船学会論文集, 第140号, 昭. 51. 12
- 7) R. Dien; "A Proposal for Assessing the Stopping Ability of Ships." I.S.P. vol 23, № 268, 1976 (also Schiff u Hafen, Heft 6, 1977)
- 8) Sv·Aa. Harvald; "Factor Affecting the Stopping Ability of Ships." I.S.P. vol 23, № 260, 1976
- 9) 元良; 「船体運動に対する付加質量及び附加慣性モーメントについて(その2)」 造船協会論文集, 第106号, 昭. 35. 1
- 10) SV. AA. Harvald; "Wake and Thrust Deduction at Extreme Propeller Loadings." SSPA Rept. Nr 61, 1967
- 11) 西山, 島本, 堂上; 「ハイブリッド計算機によるディーゼル主機操縦系のシミュレーション」 関西造船協会誌 第150号, 昭. 48. 9
- 12) 日本造船研究協会; 幅広肥大船の運航性能に関する研究, 第154 研究部会報告書 № 268, 1977
- 13) 小山健夫外; Circular Motion Test (CMT) による操縦性試験法について, 日本造船学会論文集, 第138号, 1975
- 14) 浜本; MMG 報告II "操縦性数学モデルの理論的背景" 造船学会誌, 577号, 1977
- 15) 葛西, 湯室; MMG 報告III "舵に作用する力と船体・プロペラの干渉" 造船学会誌, 578号, 1977
- 16) 小瀬, 貴島; MMG 報告IV "拘束操縦性試験の方法および試験装置" 造船学会誌, 579号, 1977
- 17) 谷口, 渡辺; "推進器の斜流特性に関する実験" 西部造船会々報, 8号, 1954
- 18) L. F. Whicker, L. F. Fehlner; "Free-stream characteristics of a family of low-aspect-ratio all-movable control surface for application to ship design", DTMB Report 933, 1958
- 19) 烏野; "操舵が船体に誘起する横方向の力について" 関西造船協会誌 133号, 1969
- 20) C. C. Glansdorp, J. G. L. Pijfers; "Effect of design modifications on the natural course stability of full tanker models" J. M. E. S. vol 14, № 7, 1972
- 21) 野本, 小瀬, 芳村; "Z試験の新しい解析法" 造船学会論文集 第134号, 1973
- 22) 日本造船研究協会; 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. 50. 3, 昭. 51. 3
- 23) 関西造船協会編; 造船設計便覧第3版

- 24) 日本造船学会 ; 第二回操縦性シンポジウム, p.109, 1970. Nov.
- 25) 田中 豊, 小瀬邦治 ; 船の操縦運動の位相面解析, 関西造船協会誌 第147号, 1973. 3
- 26) 小瀬邦治, 芳村康男 ; Z試験の新しい解析方法(続報) 日本造船学会論文集 第138号, 1975. 12
- 27) 野本謙作, 田口賢士 ; 船の操縦性について(2) 造船協会論文集 第101号, 1957. 8
- 28) 野本謙作 ; 操船シミュレータについて, 船舶, vol 48, №9 1975. 9
- 29) 原 肇 ; 操船者の知覚モデルによる入港時の減速パターン, 日本航海学会論文集 55号, 1976. 12