

本調査研究はモーターボート競走公益資金による  
日本財團の補助金を受けて実施したものである

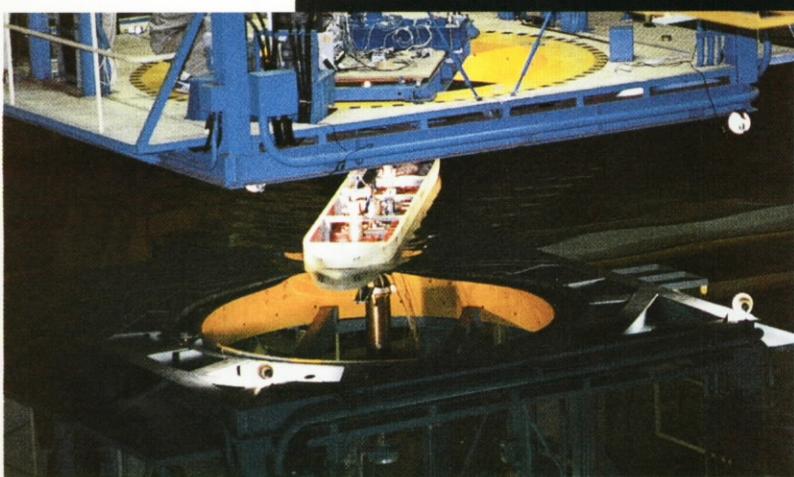
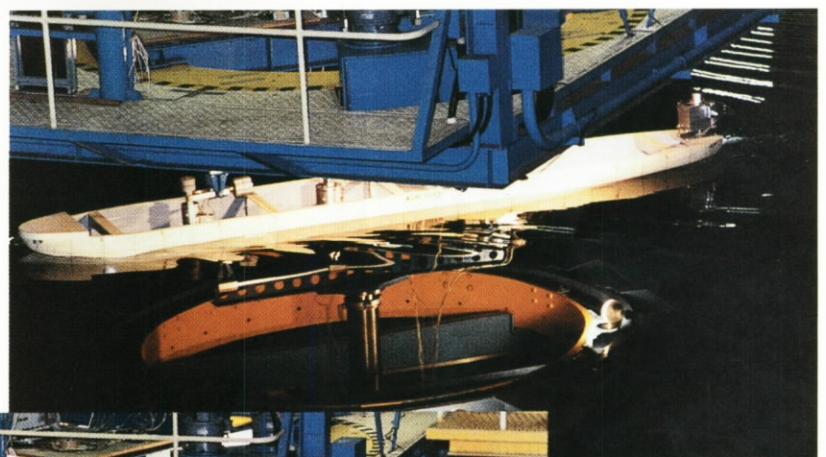
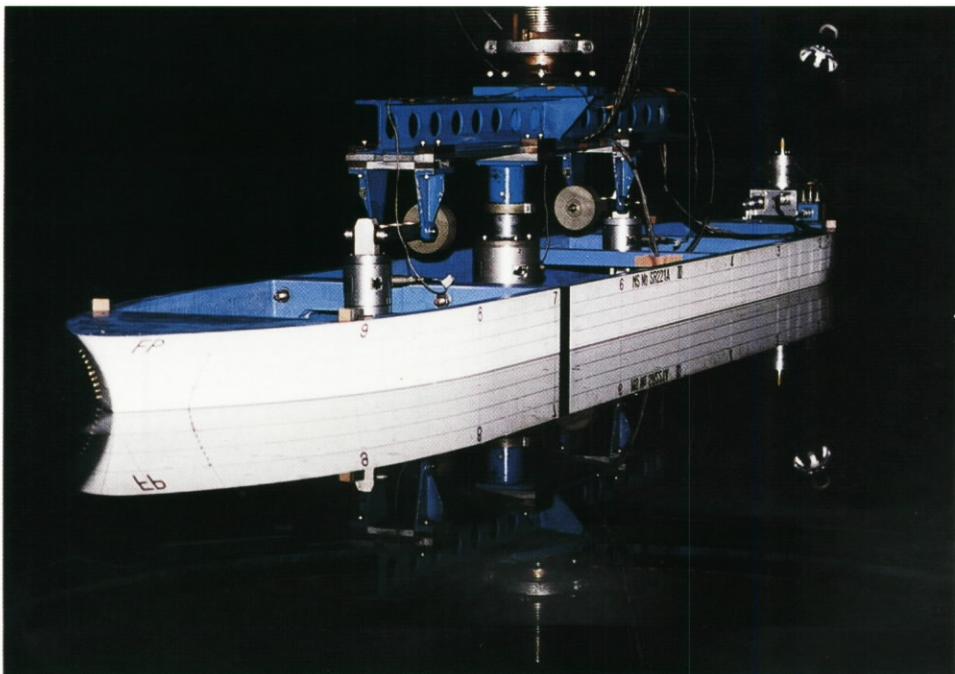
## 操縦運動時の船体周囲流場に関する研究

### 成 果 報 告 書

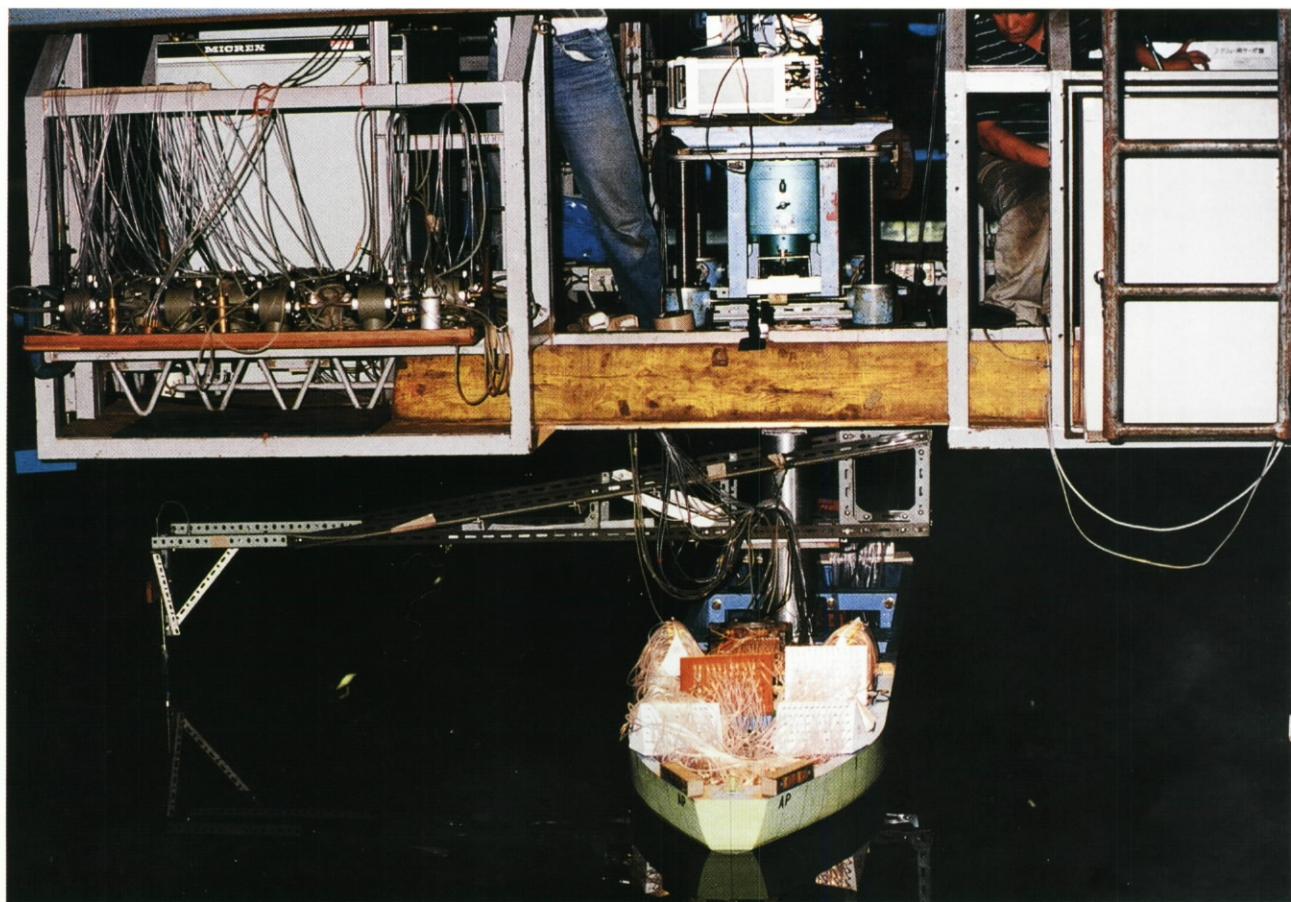
(第221研究部会)

平成 8 年 3 月

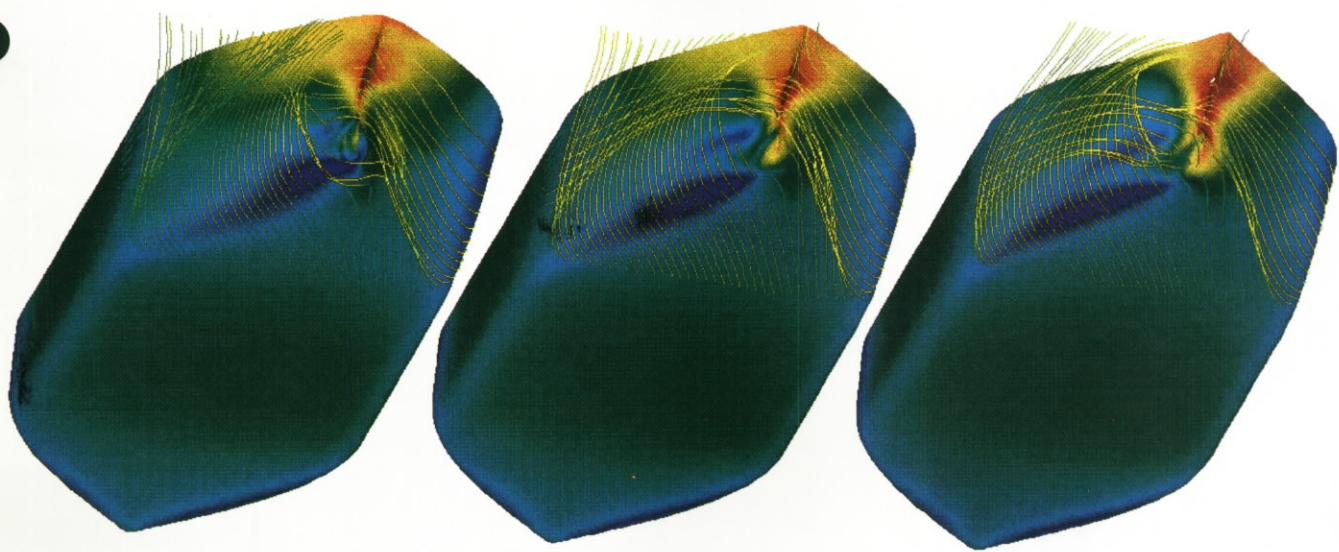
社 団 法 人  
日 本 造 船 研 究 協 会



拘束模型試験



旋回中の船体表面圧力計測



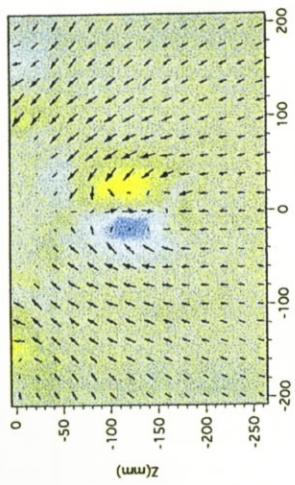
SR221A

SR221C

SR221B

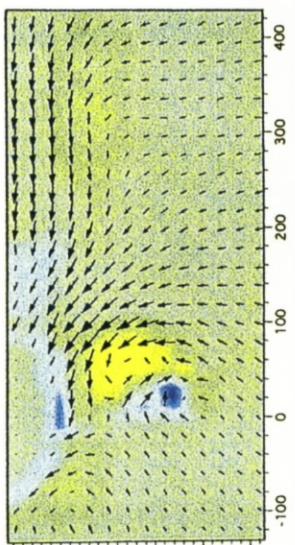
斜航角

$\beta = 0^\circ$

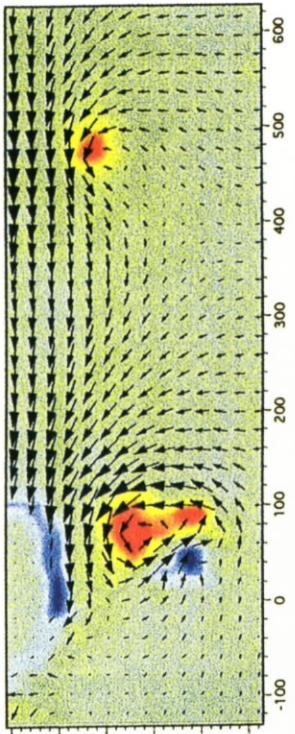


SR221A

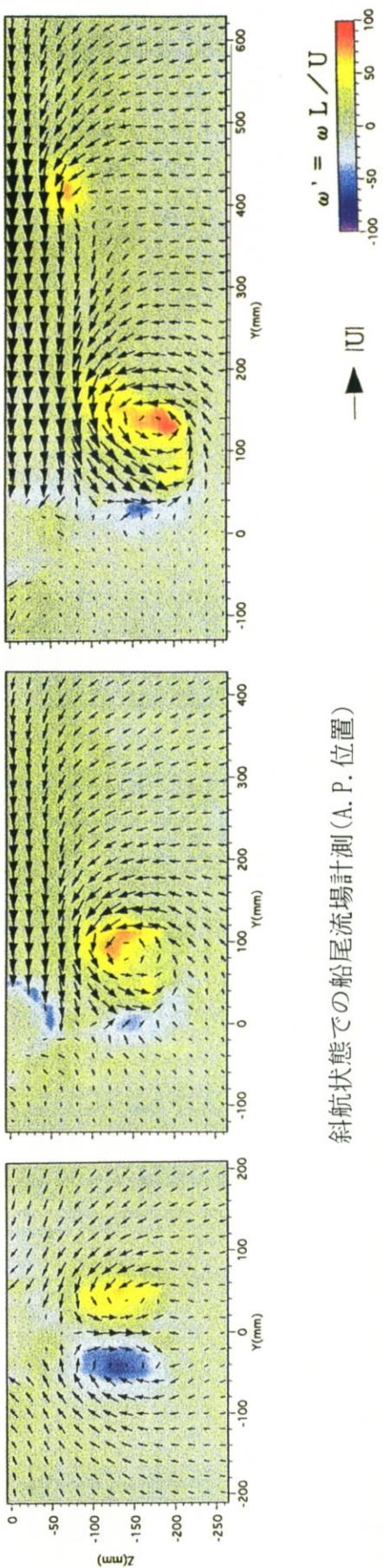
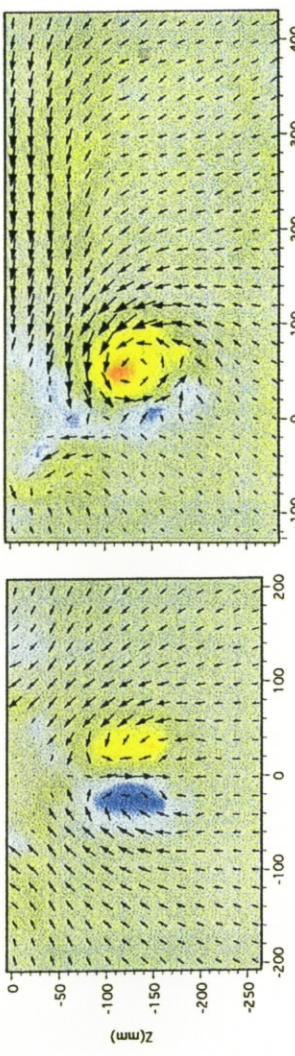
$\beta = 9^\circ$



$\beta = 18^\circ$



SR221C  
SR221B



斜航状態での船尾流場計測(A. P. 位置)

## はしがき

本報告書は、日本財團平成5年度～平成7年度補助事業として日本造船研究協会第221研究部会において実施した「操縦運動時の船体周囲流場に関する研究」の研究成果をとりまとめたものである。

### 第221研究部会委員名簿

(敬称略、順不同)

部会長	藤野正隆	(東京大学)
代表幹事	佐々木紀幸	(住友重機械工業)
幹事・委員	貴島勝郎	(九州大学)
	小瀬邦治	(広島大学) (平成6年度から)
	野中晃二	(船舶技術研究所)
	萩原誠功	(石川島播磨重工業)
	石黒剛	(石川島播磨重工業)
	高品純志	(三井造船昭島研究所)
	芳村康男	(住友重機械工業)
	宮沢多	(三菱重工業) (平成6年度まで)
	小林英一	(三菱重工業) (平成7年度から)
委員	宮田秀明	(東京大学)
	浜本剛実	(大阪大学)
	中武一明	(九州大学)
	小瀬邦治	(広島大学) (平成5年度まで)
	松永昌樹	(日本海事協会)
	松本光一郎	(NKK)
	池淵哲朗	(川崎重工業)
	飯田隆	(日立造船)
	安川宏紀	(三菱重工業)
	原口富博	(船舶技術研究所) (平成7年度から)

### ワーキンググループ1

主査	貴島勝郎	(九州大学)
幹事	高品純志	(三井造船昭島研究所)
	藤野正隆	(東京大学)
	佐々木紀幸	(住友重機械工業)
	宮田秀明	(東京大学)
	浜本剛実	(大阪大学)
	小瀬邦治	(広島大学)
	中武一明	(九州大学)
	石黒剛	(石川島播磨重工業)

松本光一郎 (NKK)  
池淵哲朗 (川崎重工業)  
飯田 隆 (日立造船)  
安川宏紀 (三菱重工業)  
芳村康男 (住友重機械工業)  
野中晃二 (船舶技術研究所) (平成7年度から)

ワーキンググループ2 (平成6年度まで)

主査 野中晃二 (船舶技術研究所)  
幹事 石黒剛 (石川島播磨重工業)  
芳村康男 (住友重機械工業)  
藤野正隆 (東京大学)  
佐々木紀幸 (住友重機械工業)

ワーキンググループ3

主査 小瀬邦治 (広島大学)  
幹事 芳村康男 (住友重機械工業)  
藤野正隆 (東京大学)  
佐々木紀幸 (住友重機械工業)  
原口富博 (船舶技術研究所)  
松永昌樹 (日本海事協会)  
石黒剛 (石川島播磨重工業)  
松本光一郎 (NKK)  
池淵哲朗 (川崎重工業)  
飯田 隆 (日立造船)  
高品純志 (三井造船昭島研究所)  
小林英一 (三菱重工業)  
川村隆文 (東京大学)  
加藤陵 (住友重機械工業)  
大森拓也 (東京大学)  
二村 正 (船舶技術研究所)  
安東潤 (九州大学)  
門松浩司 (住友重機械工業)  
田中進 (三井造船昭島研究所)  
児玉良明 (船舶技術研究所)  
牧野雅彦 (船舶技術研究所)  
W.A.ミシャグ (広島大学)  
小磯康 (運輸省海上技術安全局)

オブザーバ 原口富博 (船舶技術研究所) (平成6年度まで)

西川康士 (運輸省海上技術安全局技術課第1係長) (平成6年度まで)

禮 田 英 一 (運輸省海上技術安全局技術課第1係長)(平成7年度から)

峰 本 健 正 (運輸省海上技術安全局技術課第1係長)(平成7年度から)

伊 崎 明 彦 (運輸省海上技術安全局安全基準課企画第1係長)(平成6年度まで)

小 磯 康 (運輸省海上技術安全局安全基準課企画第1係長)(平成7年度から)

# 目 次

## 要 約

1. 緒 言 .....	5
2. 研究の必要性とねらい .....	6
3. 実施内容と研究成果 .....	7
3.1 現状の操縦性能推定法の問題点 .....	7
3.2 供試船の選定と実施した水槽試験 .....	7
3.2.1 概 要 .....	7
3.2.2 供試船 .....	9
3.2.3 水槽試験 .....	10
3.2.3.1 抵抗自航試験およびプロペラ単独試験 .....	10
3.2.3.2 操縦流体力測定のための拘束模型試験 .....	11
3.2.3.3 操縦性能測定のための自由航走模型試験 .....	16
3.2.3.4 斜航船体の船尾流場計測 .....	19
3.2.3.5 斜航および旋回時の船体表面圧力分布と後流計測 .....	22
3.2.4 まとめ .....	26
3.3 船体流体力の理論計算法改良 .....	26
3.4 船体、舵、プロペラの干渉計算改良法 .....	31
3.4.1 理論計算法 .....	32
3.4.2 計算結果とまとめ .....	32
3.5 操縦流体力に対する CFD 利用の試み .....	35
3.5.1 WISDAM-V 法による操縦流体力の推定 .....	35
3.5.2 NICE コードを用いた斜航流計算 .....	39
3.6 データベースを用いた操縦性能推定法 .....	40
4. 成果のまとめ .....	43
5. 成果の活用等 .....	45
6. 結 言 .....	46

# SR221操縦運動時の船体周囲流場に関する研究（要約）

## 研究の背景と現状評価

船舶の安全性の観点から、基本計画時ににおける操縦性能の推定精度向上が緊急の課題となっている。とりわけVLCCなどの大型タンカーは、ともすればその貧弱な操縦性能が図1に示されるような地球的な規模の環境破壊に結びつくので、設計の初期における操縦性能の検討が十分に実施されなければならない。国際海事機関（IMO）では、このような観点から第18回総会において船舶が満たすべき操縦性基準が決議された。

従来からの操縦性能推定は、模型試験による方法とシミュレーション計算による方法に大別される。模型試験による方法は直接的に精度的にも実用レベルに達していると言えるが、船体形状が確定していない基本計画段階で実施することは不可能であり、後に確認はできても船型設計に生かす時間的余裕が無いのが欠点である。一方、シミュレーション計算による場合は、何らかの方法で船に作用する流体力を推定し入力する必要があり、実質的な操縦運動の推定精度はこの流体力すなわち流体力微係数に関するデータベースの量と精度にリンクしていると言っても過言ではない。

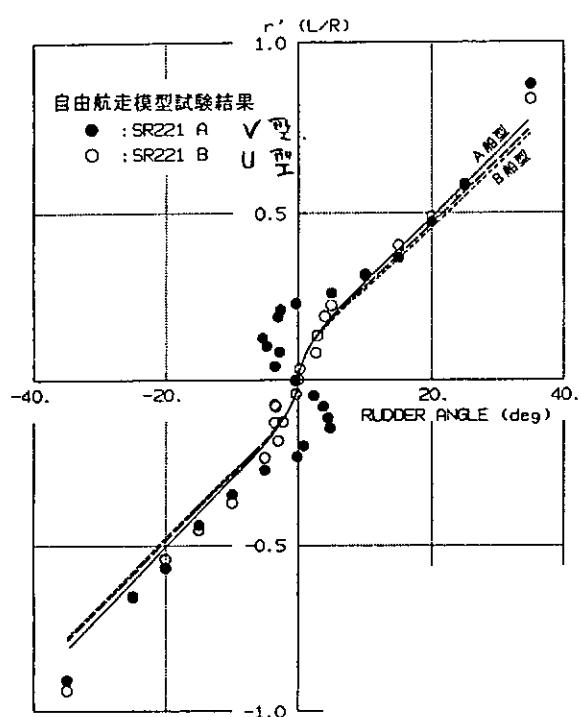
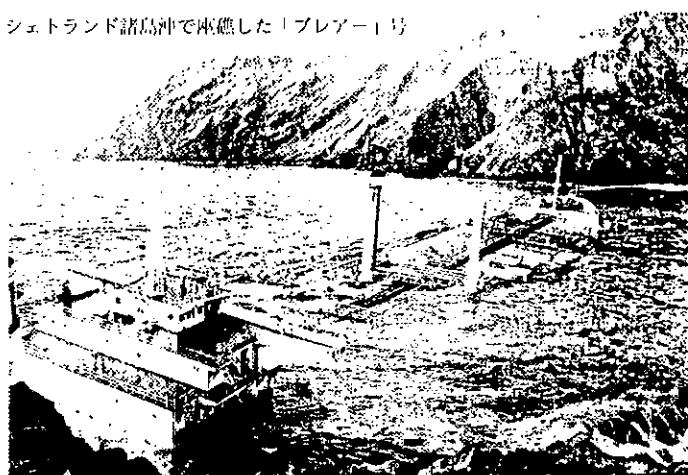


図2 従来手法によるスパイラル特性の推定結果

シェトランド諸島沖で座礁した「ブレアード」号



(時事通信提供)

図1 大型タンカーの座礁事故

そこで、新しく設計する船の操縦性能を推定する際の最大の問題は、データベースに無いその船の微係数を如何に精度良く求めるかと言った点に帰着する。残念ながら、現時点ではまだ船の詳細形状を考慮した操縦性能推定技術が十分に確立できていない。すなわち、現状では、船の長さ、幅、深さなどの船体主要目から微係数を推定するしか無く、例えばフレームラインなどを考慮した高精度な操縦性能推定技術はまだまだ不十分な状況にある。これは、本研究がスタートした平成5年度に実施した現状調査のための実験結果と推定計算の比較（図2）からも明らかである。

## 研究内容とその成果

以上述べたように、操縦性能の高精度化のためには、フレームラインなどの船体形状情報を考慮できる推定法の確立が急務である。したがって、本研究部会ではそのために次の研究を実施した。

- (1) 操縦運動中の流体力や船尾流場に関する模型実験
- (2) 流体力や干渉力の理論計算法の改良
- (3) データベースによる操縦流体力微係数の推定法改良

これらの研究は、相互に補完すべき関係にある。例えば模型実験として実施した斜航中の圧力計測データは流体力の理論計算法の検証に用いたり、また流体力の理論計算結果はデータベースを整理するためのパラメータを決定するために利用した。このように、各々の研究が有機的に結びつくことができたため、効率よく開発が進捗し当初の目標であったフレームラインを考慮した操縦性能推定法が十分な実用性を以て確立できたものと考える。次に、各々の研究に対して得られた成果を簡単に述べる。

### (1) 模型実験

ここでの最大の成果は、船体周囲流場の精密な計測データを得ることができた点である。これにより、船体形状が異なるとき、船尾ビルジ部から発生する縦渦にどのような違いが生じるか、またその場合の船尾付近の圧力はどう変化するかなど、これまで流体力だけで判断されていた操縦運動の問題に、より流体力学的にミクロな視点からメスを入れることができた。言い換えると、フレームラインが異なるとき、なぜ針路安定性が大きく変化するのかが流体力学的メカニズムとして捉えることができた。すなわち、図3に示されるようにフレームラインがV型からU型に変化するにつれ強いビルジ渦が現れる。この強い縦渦は、船尾周りの圧力場を変え、船体の中心付近にあった横力中心を後方へシフトさせ運動を安定させる効果がある。すなわちU型フレームラインの船型は、この強い縦渦のためにV型フレームラインの船型に比べて針路安定性が向上するわけである。

以上のように、操縦運動中の船尾流場を詳細に調査することで定性的な傾向のみならず、定量的にもフレームラインの影響を捉えられることができた。

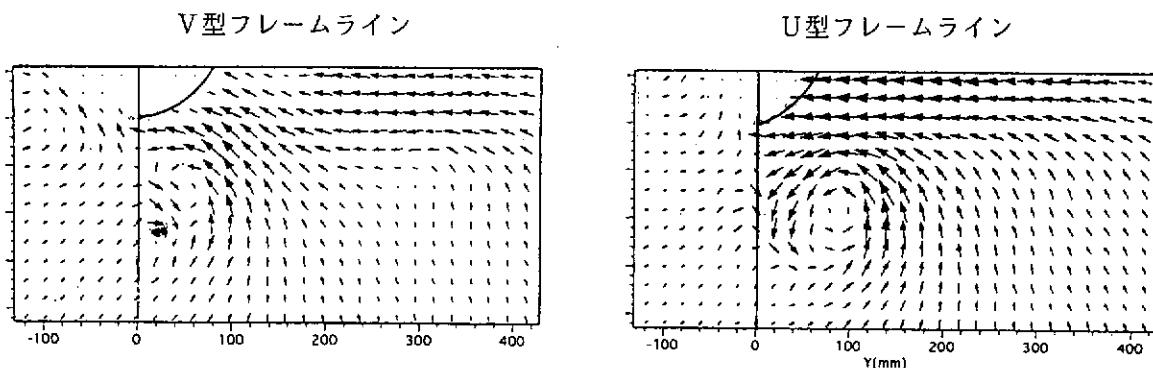


図3 斜航状態での船尾流場(A.P.)  $\beta = 9^\circ$

### (2) 流体力の理論推定

これまで操縦運動における流体力の理論推定は専ら細長体理論を用いて研究してきた。しかしながら、この手法を肥大船などの縦渦成分が顕著な船型に適用しようとすると、その計算精度は、理論の中で用いられる渦の発生位置や流出方向などの仮定に大きく左右される。したがって、従来からの細長体理論を肥大船の操縦問題に適用していくには実際の船体周りの流場を詳細に調査し、理論に用いる種々

の仮定の妥当性を確認しながら改良していかねばならない。このような観点から、先に述べた模型実験は理論の改良に大いに役立った。図4にその一例を示す。これは、従来はキールラインから流出させていた渦を模型実験で認められたように両舷のビルジ部に変更して精度を向上させた例である。

このようにして理論計算法を改良する一方で、改良された理論を用いて船型要目が大きく異なる船型の操縦性能を計算し理論の汎用性も確認した。細長体理論による操縦性能の推定は次に述べるCFDによる計算精度には及ばないものの、船体形状を決定していく初期の船型計画段階ではむしろ多くのパラメータスタディができる意味で貴重である。

次に操縦運動中の流体力を求める新しい試みとして、本研究部会ではNS-Solverに基づく数値計算(CFD)と船体、プロペラおよび舵をモデル化した干渉計算を実施し、それらの有効性を確認した。図5に示されるように理論計算結果は実験で求められた船体表面の圧力分布や操縦運動中の舵力やプロペラ推力との比較がなされ、今後の操縦性能推定精度向上にこれらの理論計算が必要不可欠であることが明らかとなった。

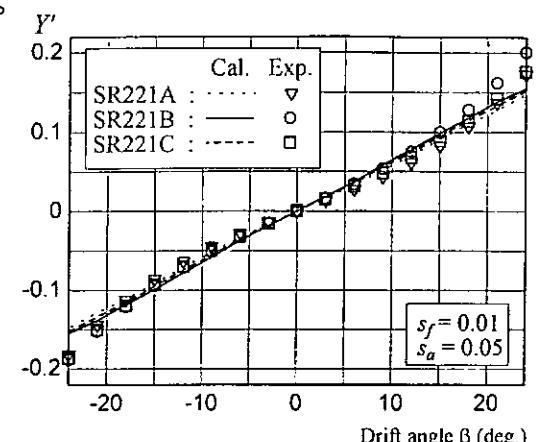


図4 細長体理論による流体力の推定

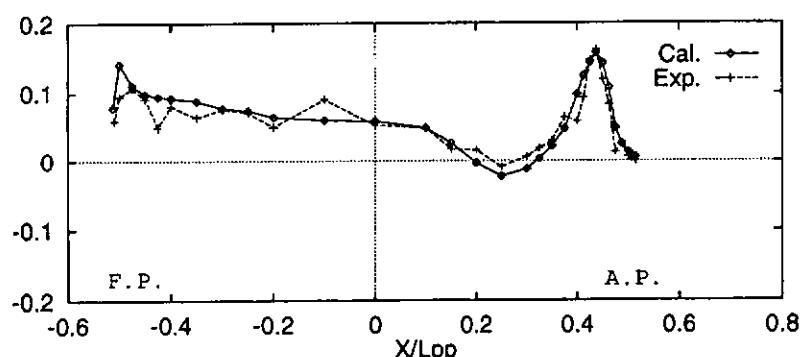
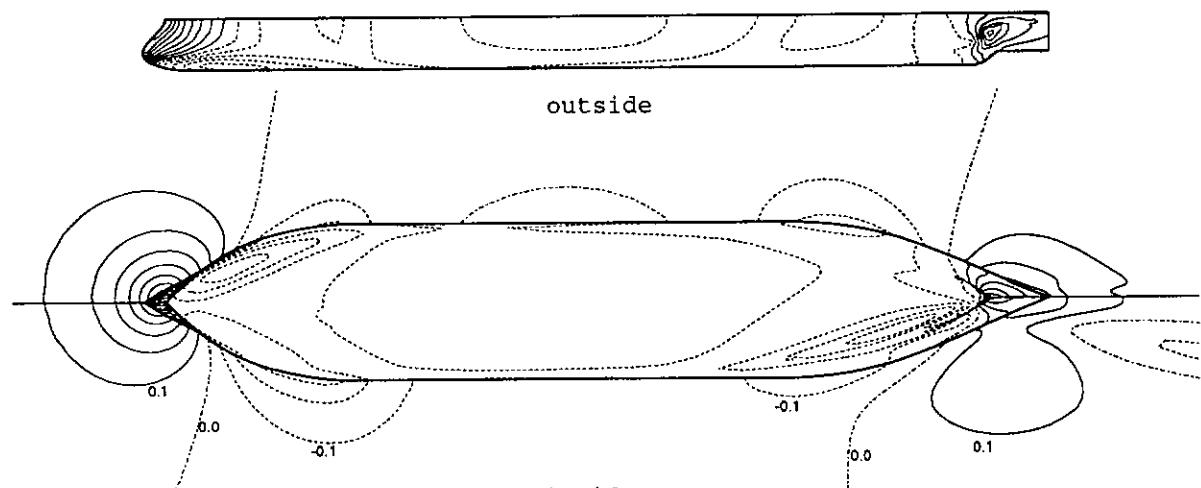


図5 斜航中の圧力分布と横力(CFD及び実験)

### (3) データベースによる推定

改良された細長体理論によってある程度容易に操縦性能が推定できるようになったが、船舶の初期計画段階では、操縦性能をさらに手軽に推定する手法も必要である。こうした観点から主要目や船型を表す簡単なパラメータを用いた流体力の推定法を検討した。具体的には、本研究で実施した拘束模型試験結果に重点をおいたデータベースを用いて、船体に作用する流体力の推定法についての検討を重ねた。その結果、主要目の影響は従来の井上の式で表現し、船尾フレームライン形状の影響は、フレームライン形状を表すパラメータ  $\sigma$  を導入して修正する方法が簡単かつ精度も高いことが判明した。

最終年度では、これらの成果をより明確にするために、初年度に現状評価として実施した同一主要目で船尾フレームラインが異なるVLCC 2船型の操縦運動の推定を再度実施した。その一例として図6に針路安定性の違いが明確に判別できる定常旋回特性に対する比較計算結果を示す。図からも明らかなように、フレームラインの影響を取り入れることにより従来不可能であった2船型の違いを明瞭に捉えることができるようになった。

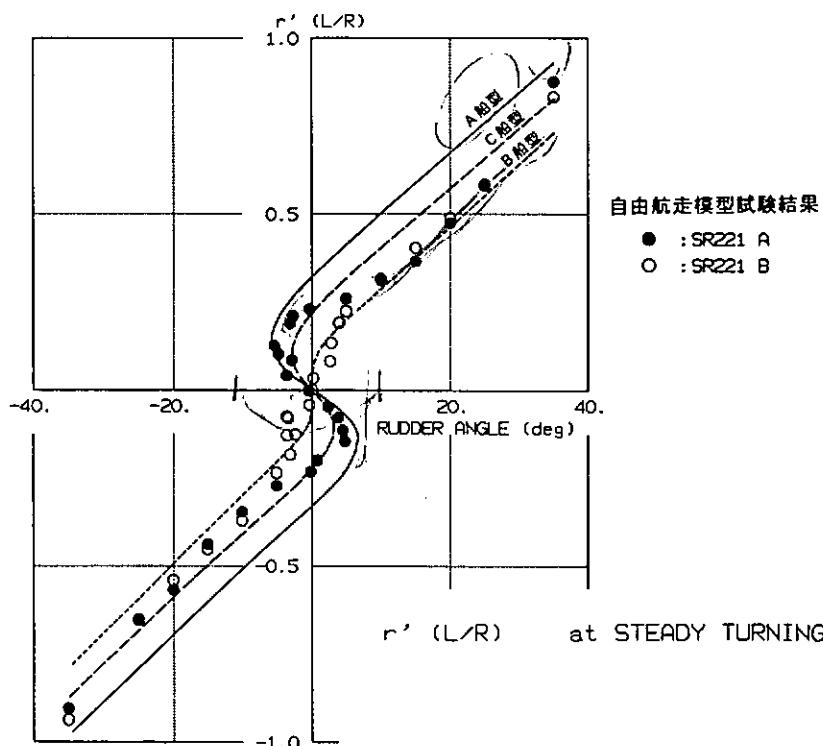


図6 本研究成果を取り入れた推定結果

## 1 緒 言

航行の安全を確保する観点から、船舶の操縦性能の一層の向上が求められてきたが、とくに最近の大型タンカーなどの海難事故等による海洋環境への甚大な影響に対する配慮から、国際海事機関（IMO）では、第18回総会において船舶が満たすべき操縦性基準が決議された。

このように、新造船計画時における操縦性能予測技術の高度化が以前にもまして要求されるようになったにもかかわらず、現状の操縦性能予測技術は、その船型の模型実験を実施して実船の性能を予測するか、もしくは、その船の主要寸法から過去のデータに基づいて推定される流体力学的係数を用いて操縦性能を推定するほかなく、フレームライン等の具体的な船体形状を反映できる推定法は確立されていなかった。

このような状況に鑑み、本研究は平成5年度から3ヵ年の計画で開始され、従来の細長体理論による船体流体力推定法の改良を試みるとともに、最近の発展が著しい船体周囲流場の数値解析技術や船体・プロペラ・舵の流体力学的干渉効果の理論的推定法などを、操縦性の分野の研究にも応用して、現状の推定法よりもさらに合理的にフレームラインなどの船体形状を考慮できる操縦流体力の予測法を向上させることとした。一方、類似の船型に対する流体力学的係数のデータから、新造船の流体力学的係数を推定し、これを用いて操縦性能を予測する方法の簡便さも捨てがたく、最近の船型に相当する流体力学的係数を収集し、これをフレームライン形状の相違を代表する船型パラメータ等で整理することとした。これらにより、新造船の計画段階から操縦性能の面で安全性の高い船舶が設計できる技術を開発し、わが国の造船業の発展に資することを本研究の目的とする。

## 2 研究の必要性とねらい

緒言で述べたように、地球環境保全の観点から良好な操船性を持った船舶を設計することが重要になってきた。しかしながら、研究のスタート時点では、船の主要目によりその船の操縦性能を推定する方法しか無く、船体形状を正確に反映した操縦性能の推定法は確立された技術では無かった。そのため、船舶の基本計画時において類似船の実績や模型試験結果が無い場合には操縦性を十分に考慮した船型計画ができると言った問題があった。特に、操縦性能が問題となりやすい肥大船に於いては、縦渦の減少を狙う船体抵抗の小さい優良船型が操縦性の観点からはともすれば進路不安定となりやすく、操縦性能からの設計限界を見極めることができよりトータルバランスを考慮した最適船型とも一致することが十分に考えられた。

このように、今後の船型設計の観点から本研究の重要性に対する認識が高まり、かつ緊急な課題と位置づけられたため、平成5年度から3ヵ年をかけ、実験および理論の両面からV L C Cを対象船型とした操縦運動時の船体流場が調査研究することになった。

むろん、これまででも肥大船を対象とした操縦性能の精度向上のための研究は実施されてきたが、本研究では、新しいテーマとして次の研究項目も付け加えて、さらに大きな成果が得られるようにした。

- (1) 理論的な面では、細長体理論を利用した解析的な推定法の精度向上はもちろんのこと、新たに数値計算としてNS-Solverを利用してCFDや船体・舵・プロペラ間の干渉計算、船型をより具体的に表すパラメータを用いたデータベースに基づく推定法なども加えて、より多面的に操縦性能の推定法を見直すと共に、操縦運動中の船体周囲流場の基礎的な研究から設計にすぐ使える実用的な推定法までの幅広い調査研究を行う。
- (2) 実験的な面では、斜航中や旋回中の船体周囲の流場や圧力を詳細に調査し、細長体理論や数値計算によって得られる情報と突き合わせることによって、理論の精度を検証すると共に、理論のさらなる精度向上に役立てる。特に、旋回中の船体表面圧力計測や流場計測は、世界でも例が無く操縦運動中の流体力解明につながる貴重なデータを得ることができる。

以上の基本的な研究方針を定めると同時に、成果をより確実にするために以下の3つのワーキンググループを構成し、各グループでタスクを分担した。

- WG 1 : 細長体理論や数値計算を利用した操縦性能推定法を検討するグループ
- WG 2 : 操縦性試験、流場計測、圧力計測などの実験を担当するグループ
- WG 3 : 船体形状を表すパラメータを導入しデータベースを利用した操縦性能の推定法を検討するグループ

### 3 実施内容と研究成果

#### 3.1 現状の操縦性能推定法の問題点

船の操縦性能を推定するには模型試験が最も確実な方法であるが、問題もある。例えば、自由航走模型試験は簡単に性能確認するには魅力的な方法であるが、模型と実船の尺度影響の補正が困難である。拘束模型試験法の場合、船体・プロペラ・舵に作用する流体力を計測し、数式モデルを当てはめて操縦運動方程式を解く形で性能の推定を行うので、任意の操縦運動の推定ができ、MMGモデルの確立後はこの方法が操縦性能推定の主たる地位を占めるに至った。しかし、模型による方法は船型の細部が決まった後でないと試験できないし、この方法による推定にはかなりの経験と労力を要し、経費と時間も無視できない。

そこで操縦性能を模型試験なしに推定する方法が注目され、理論的、あるいはデータベースによる経験的方法、あるいは両者を併せたような手法が検討された。まず理論的な方法は船体を矩形平板に置き換える井上の方法以後、不破による細長体理論の適用で船型要素を考慮して船体に作用する操縦流体力推定の可能性を与えるに至った。また、船体・プロペラ・舵間の干渉を推定する方法も、模型試験データの蓄積や理論的解明によって、かなり実用的になってきた。一方、データベースによる方法は、上記理論を反映しつつ、模型試験の実績を整理し、実用的な流体力推定式が井上、貴島、平野らによって提案され、船型主要目を入力データとする流体力推定法が、多方面で活用されるに至った。こうした背景から、操縦流体力を経て、操縦性能の推定を行うという試みが設計にも取り入れられ、船型主要目の操縦性能に対する影響をある程度は把握できるようになってきた。

しかし、船体流体力の理論的推定においては、特定の船型で試験結果に合うように経験的なチューニングを施す必要があり、一般船型の操縦流体力推定法として実用化をはかるには一層のプラシュアップと経験の蓄積が必要な他、データベースによる推定においても、過去の船型と異なる場合にどの程度確かな推定が可能かと言った問題が予想された。とりわけ船尾フレームライン形状や船尾プロファイルが操縦性能に及ぼす影響が大きいことは、従来から設計者によって経験的によく知られており、また操縦流体力が性能に及ぼす影響を系統的に解析した結果からも、性能推定にはこれらの影響の考慮が不可欠であることが指摘された。

そこで、操縦流体力の計測データの解析や、船体流体力の推定法の改善が本研究部会の主たる目的として登場することとなった。そのため、まず、本研究部会では同一主要目で船尾フレームライン形状が異なるA、B船型を供試船に選び種々の検討を行った。予想通り、両船型の流体力特性、操縦性能の違いは顕著で、上記の主要目のみから流体力を求め、操縦運動を推定する従来の方法では全く両船型間の違いを反映できず、当時の操縦性推定法の問題点を浮き彫りにした。

こうした操縦推定の状況と問題点を十分把握し、本研究部会では操縦流体力の理論的推定精度の向上とデータベースの再構築に主眼を置いて研究開発を行った。この3年間にわたる検討結果は、フレームライン形状を考慮した実用に近い船体流体力の推定法の見通しを与えると共に、干渉流体力のモデル化と量的推定の他、数値流体力学的手法の有効性についても途を開きつつあると言える。続く各章では、これら本研究部会の活動で得られた成果を明確にする。

#### 3.2 供試船の選定と実施した水槽試験

##### 3.2.1 概 要

与えられた船型の操縦性能推定という問題に対して、船体主要目の影響だけでなく、フレームライン等船体形状の影響まで精度良く評価するには、船体形状を流体力学的に表現する計算モデルが必要となる。さら

に、それらの計算モデルが船体の操縦運動を適切に表現出来ているかどうかを判断するには、船体全体に働く流体力のみならず、船体まわりの流れ場を実験と比較検討する必要がある。

操縦運動の推定法として、本研究では、設計の初期に使用出来る実用的な推定法と、今後の発展が期待できる数値計算を利用した推定法の2つに分け、それぞれの特徴を活かした推定法を開発した。

実用的な流体力推定法の研究は、細長体理論等を用いた理論計算による操縦流体力の推定法と、実船試験等の資料によるデータベースをもとに、主要目の他に船尾形状等を表すパラメーターを取り込んだ流体力推定法の研究が進められた。

操縦流体力推定法の研究においては、第一に主として拘束模型試験より得られる操縦流体力のデータが必要になるが、これに加えて船体まわりの流場のデータも必要となる。

細長体理論等を用いた理論計算による推定法では、操縦運動時の流場の特徴をうまく近似し簡単化した流れのモデルが必要になる。CFDによる高精度の推定法の研究には、詳しい流場のデータが必要になる。

さらに、流体力から操縦運動を計算する数学モデルの研究のためにも、模型実験等による詳しい流体力のデータが必要になる。

これらの流場・流体力のデータを得るために種々の模型実験を行ったが、本研究で最終的に推定したいのは操縦性能であり、操縦性能推定技術の有効性の最終的チェックは、運動の場で行われる。

運動の場での推定精度のチェック、および、船尾形状変化の操縦性能に与える影響を把握するため、自航模型船による操縦性能試験を行った。その検討結果は、流体力推定法および数学モデルの研究にフィードバックされた。

以上のように、本操縦性能推定技術の研究においては、流場、流体力、運動、という三つの場において、必要となるデータを得るための模型実験を行った。

実施した模型実験の一覧を表3.2.1.1に示す。

表3.2.1.1 模型実験

実験の種類		実験変数	計測または解析項目
推進性能試験	POT	前進常数	スラスト、トルク
	抵抗・自航試験	船速、プロペラ回転数	抵抗・自航要素
操縦流体力測定試験	斜航試験 (H)	斜航角、船速	主船体3分力
	CMT (H P R)	斜航角、角速度、舵角	主船体3分力 H P R相互干渉力 舵直圧力、スラスト
	舵角試験 (H P R)		
流場測定試験 (H)	5孔ピトーメトによる流場測定	斜航角、角速度	速度分布、渦度分布
	船体表面圧力分布測定		圧力分布、機力分布
自由航走模型試験 (H P R)	旋回試験	舵角	時系列データ 舵角、角速度、方位角、偏角、船速、スラスト、プロペラ回転数、航跡
	逆スパイラル試験	角速度	
	Z操舵試験	10° Z, 20° Z	

(H) 主船体単独試験

(H P R) 舵・プロペラ付き船体による試験

### 3.2.2 供試船

供試模型船としては、操縦性能に対する改良のニーズが大きいV L C C船型を用いることとし、最新のV L C Cに近い主要目と船尾形状を持つ船型を母型とし、この船型を修正し、船尾フレームラインが大きく異なる2隻の模型船を作成した。

1隻は船尾断面形状がV型のA船型であり、もう1隻はU型のB船型である。このA、B船型は、操縦性能に及ぼすフレームラインの影響が明確に出てくるよう、平均的なフレームラインからはやや極端なV型、U型となっている。

このA、B船型についての模型実験結果は、流場、流体力、運動の場において、2船型の違いを明確に示した。

そこで次に、実用的船尾形状船型の示す流場、流体力、運動の場での値の把握、船尾形状を実用的船尾形状から変形した場合の流場、流体力、運動の変化の程度を把握するため、実用的なフレームラインに近いと考えられるV型とU型の中間的なフレームラインを持つC船型を作成した。

さらに、操縦流体力推定法の研究を一層進めるため、A、B、C 3船型について、船幅を広げたり船長を長くする等した新たな7隻の模型船について、操縦流体力測定の拘束模型試験を行った。

表 3.2.2.1にA、B、C 3船型の要目を、図 3.2.2.1に3船型の正面図を示す。

表3.2.2.1 模型船要目

	Ship-A	Ship-C	Ship-B
L(m)	3.50		
B(m)	0.634		
d(m)	0.211		
L/B	5.52		
B/d	3.00		
Cpa	0.756	0.753	0.750

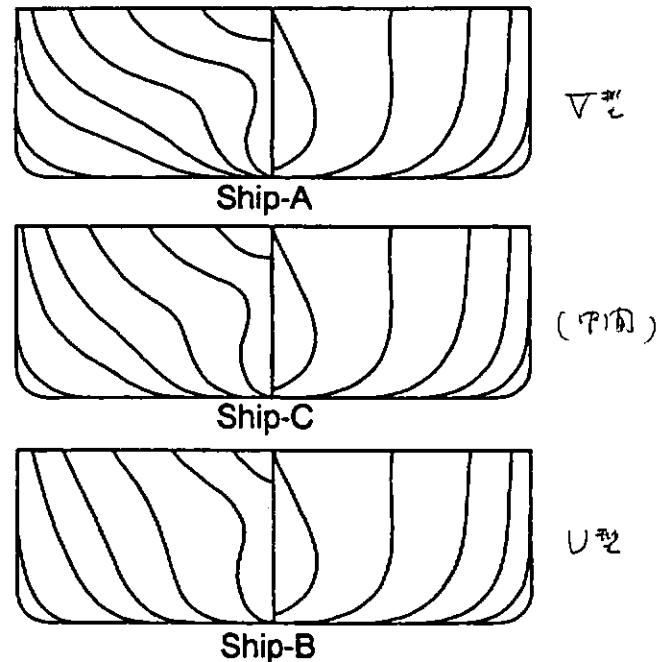


図3.2.2.1 模型船正面図

これら模型実験に用いたA、B、Cの3船型とその変形の6船型(A', A'd+, A'd-, B', Cpt+, Cpt-)が、実際に建造されたV L C Cに対してどのような位置づけになるのかを調査した。調査対象の建造実績船は、載貨重量20万トン以上のOil Tankerで、1970年以降のV L C C 200隻がリストアップされた。

調査結果を図 3.2.2.2に示す。母型のA、B、C 3船型は、調査船型群のおおよそ平均的な位置にある。

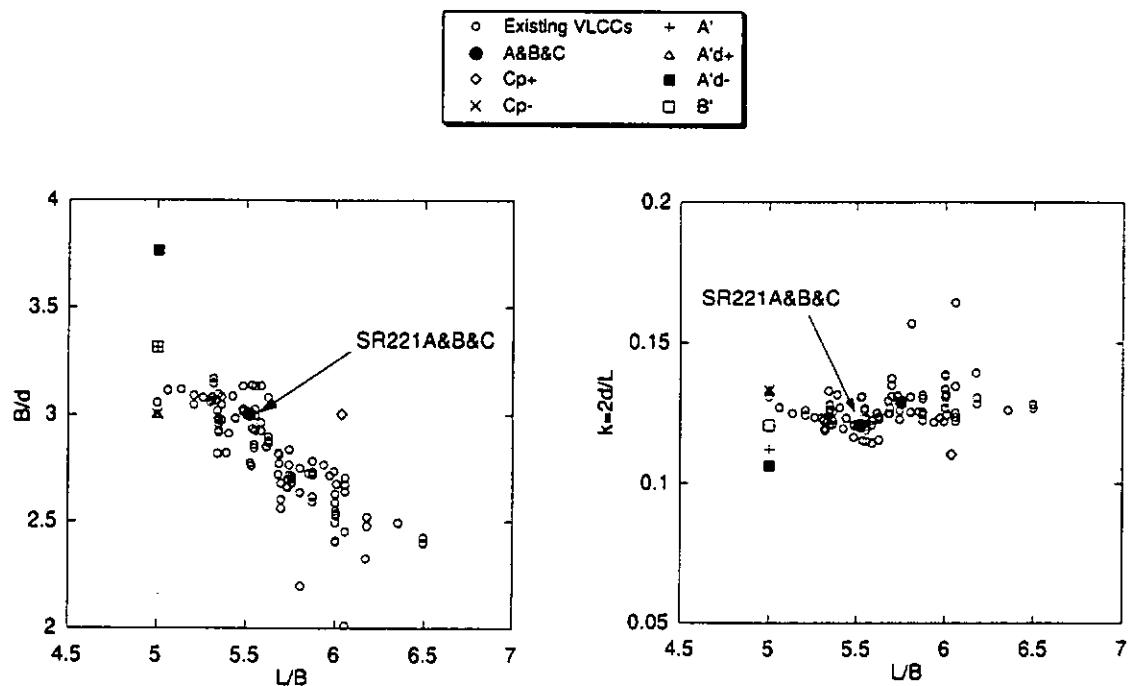


図3.2.2 VLCC建造実績に対するSR221船型の位置づけ

### 3.2.3 水槽試験

#### 3.2.3.1 抵抗自航試験およびプロペラ単独試験

##### (1) 試験目的

主要目が同じで船尾フレームライン形状の異なるA、B、C 3船型について推進性能を明らかにするため、抵抗試験、自航試験およびプロペラ単独試験を行った。

##### (2) 試験結果

###### ① プロペラ単独試験

A、B、C 3船型に使用する模型プロペラの単獨特性  $K_T$ 、 $K_Q$  および  $\eta$ 。を図 3.2.3.1.1 に示す。

###### ② 抵抗自航試験

抵抗試験データは3次元外挿法で解析し、その結果を表 3.2.3.1.1 に示す。形状影響係

数  $K$  は A、C、B 船型の順に大きくなり、全抵抗係数数もこの順に大きくなる。自航試験から解析された自航要素も同表に示す。 $1 - w_{\infty}$  ( $= 1 - w_1$ ) は船尾フレームライン形状が U 型になるほど小さく A、C、B 船型の順に伴流が増加している。実船の馬力推定を行った結果では、A、C、B の順に馬力が増大し、推進性能は V 型フレームラインを有する A 船型が優れている。

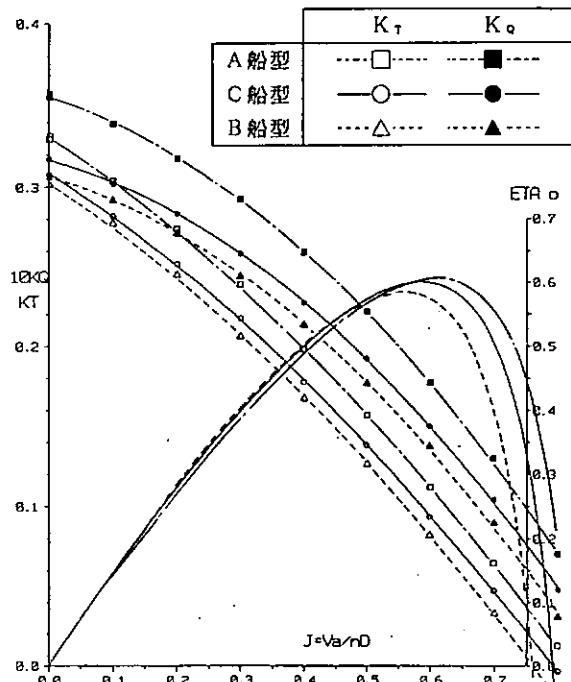


図3.2.3.1.1 プロペラ単獨特性

表3.2.3.1.1 実船15knot相当の抵抗自航試験の結果

	A船型	C船型	B船型
$C_{TM}$	$4.501 \times 10^{-3}$	$4.685 \times 10^{-3}$	$5.101 \times 10^{-3}$
$K$	0.230	0.280	0.385
$r_w$	$0.198 \times 10^{-3}$	$0.317 \times 10^{-3}$	$0.315 \times 10^{-3}$
自航要素（実船自航点）			
$\eta_R$	0.961	0.954	0.957
$I - t$	0.797	0.776	0.767
$I - w_{PO}$	0.620	0.488	0.375
自航要素（模型自航点）			
$\eta_R$	0.980	0.977	0.970
$I - t$	0.820	0.822	0.794
$I - w_{PO}$	0.672	0.561	0.438

### 3.2.3.2 操縦流体力測定のための拘束模型試験

#### (1) 試験目的

主要目が同じで船尾フレームライン形状の異なるA、B、C 3船型の他、下記の4船型6状態について、操縦運動時の流体力を明らかにするため、拘束模型試験を行った。

#### (2) 追加供試模型船

- ・船型と載荷状態 : 1) CP- : C船長圧縮船型 : 満載
- 2) CP+ : C船長拡張船型 : 満載
- 3) A' : 幅広A船型 : 満載
- 4) B' : 幅広B船型 : 満載
- 5) A' d+ : 幅広A船型 : 吃水増加 (A船型と同一B/b)
- 6) A' d- : 幅広A船型 : 吃水減少 (トランサム下端)

表3.2.3.2.1 追加船型の船体主要目

船型	A' d+	A'	A' d-	B'	CP+	CP-
主船体						
$L$ (m)	3.5000				3.8281	3.1719
$B$ (m)	0.7000				0.6344	0.6344
$d$ (m)	0.2329	0.2111	0.1859	0.2111		
$L/B$	5.0000				6.0345	5.0000
$B/d$	3.0051	3.3161	3.7647	3.3161	3.0052	
$C.b(naked)$	0.8128	0.8047	0.7941	0.8019	0.8197	0.7834

### (3) 試験方法・項目

操縦運動及び流体力の座標系は、図 3.2.3.2.1に示すように、原点を船体中心に固定した座標系を用いる。

- ・計測項目：船速、プロペラ回転数、舵角、斜航角、旋回角速度、前後力、横力、回頭モーメント、舵直圧力、プロペラ推力

なお、旋回・斜航による模型船及び検力計の慣性力は解析の段階でこれらを控除した。また、船体の流体力は同時に計測される舵力と推力および②の舵角試験から解析される干渉係数を用いて、全体の流体力(HPR)から控除し、主船体の流体力(H)に換算した。回頭モーメント中心は船体中央。

- ・拘束方法：ヒーブ、ピッチ、ロールをフリー。

- ・拘束点：船体中央。

- ・船速：0.807m/s (実船15knot相当)

- ・プロペラ回転数：模型自航回点数

試験は、以下の①～③を実施した。

① 拘束旋回・斜航試験 (CMT)

② 舵角試験 (直進操舵試験)

③ 斜航・旋回時舵角試験

### (4) 試験結果

$\beta$ 、 $r'$ に対する主船体に働く流体力（船体前後力： $X$ 、船体横力： $Y$ 、旋回モーメント： $N$ ）を図 3.2.3.2.2 に示す。

これら計測された流体力を解析して得られた線形微係数を図 3.2.3.2.3 に示す。同図には井上の推定式を点線で比較している。これらの線形微係数を井上の推定値に対する比率で表した結果を図 3.2.3.2.4 に示す。線形微係数は船尾のフレームライン形状がU型になるほど井上の推定値に近づく傾向にある。これは、井上の推定式のベースとなっている船型は、船尾プロファイルが逆G型で、船尾フレームラインもU型が多いことから、U型フレームライン形状を持つB船型が推定式に比較的合いやすいものと考えられる。したがって、データベースに基づいて主船体の線形微係数を精度よく推定するには、従来のアスペクト比や ( $C_{bB}/L$ ) の他に、船尾フレームライン形状を表すパラメータを取り入れる必要があることが指摘できる。

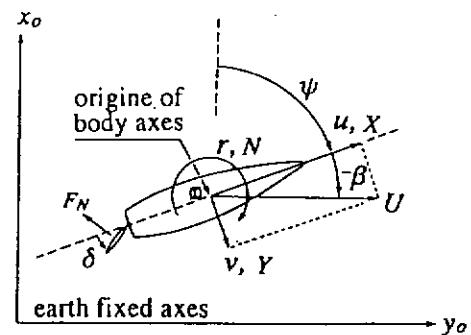


図3.2.3.2.1 操縦流体力の座標系

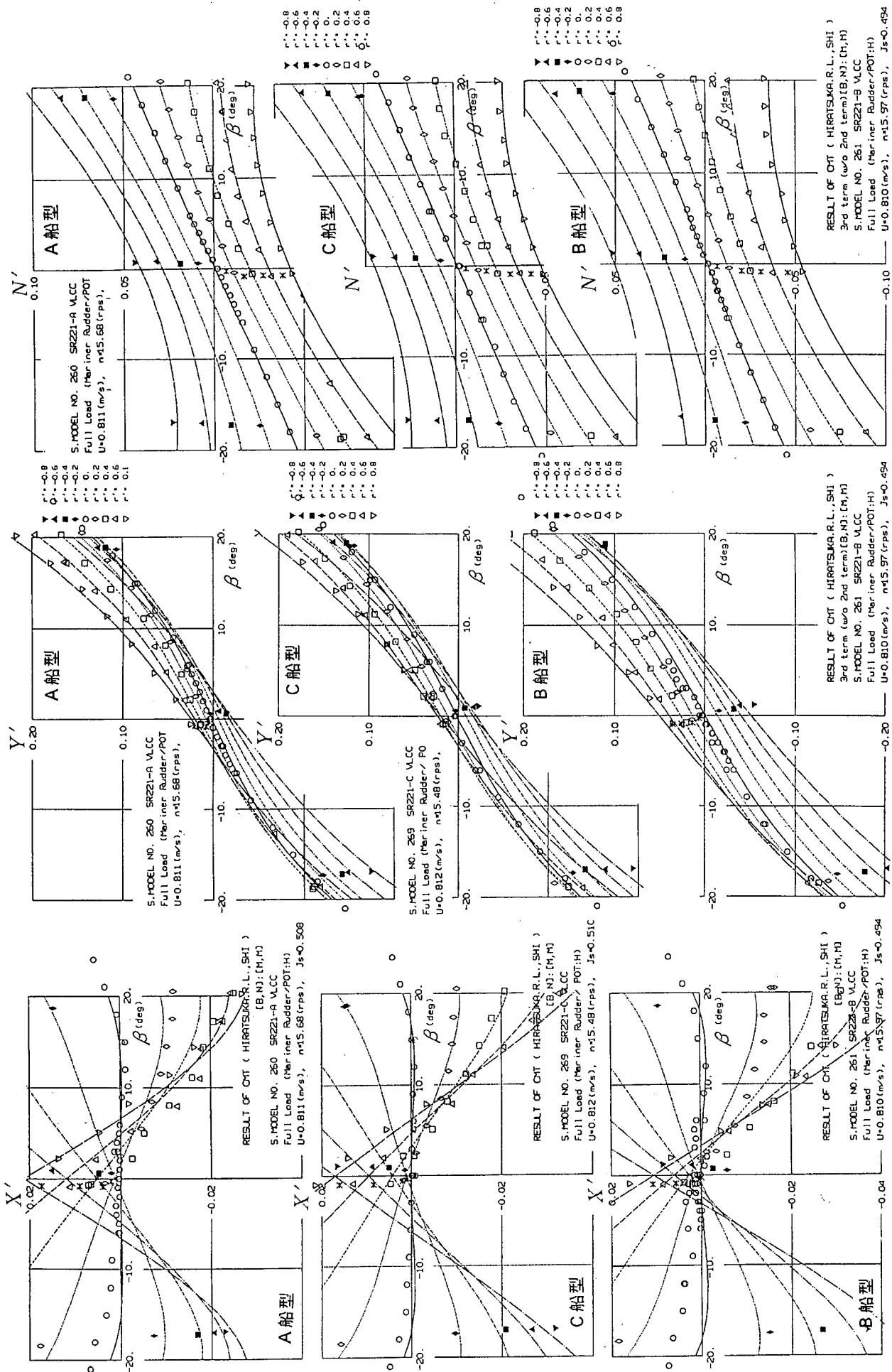
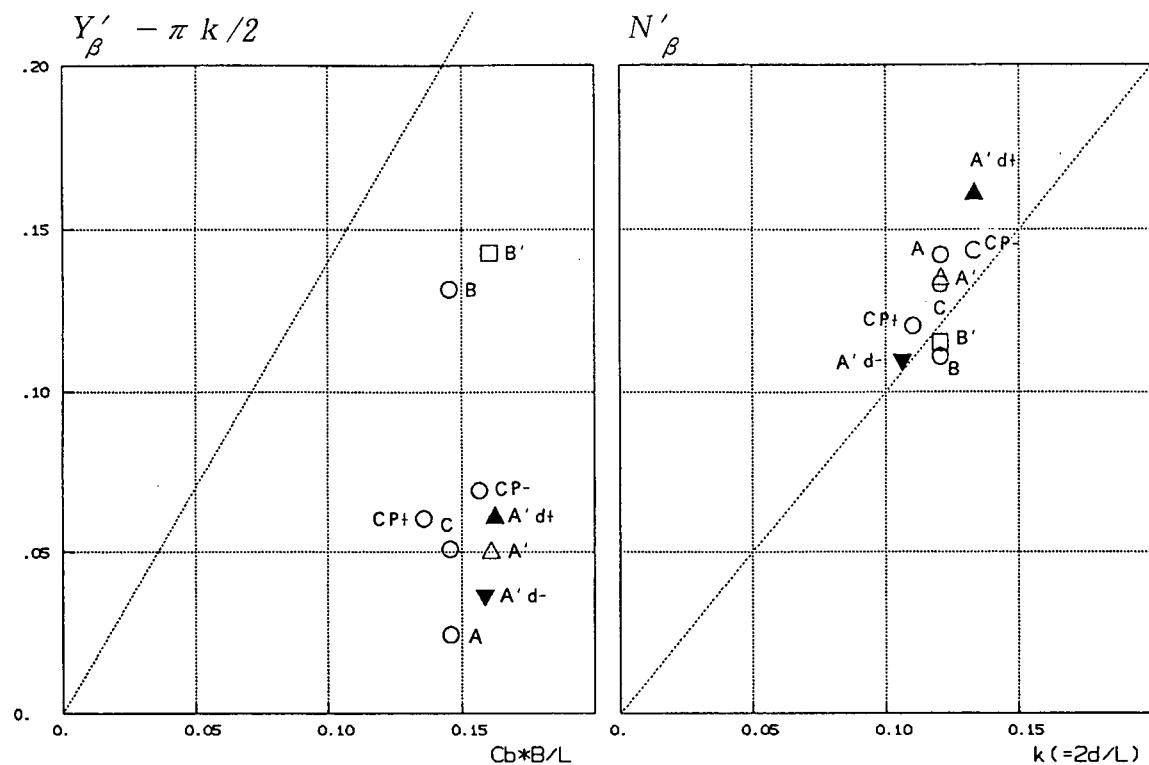
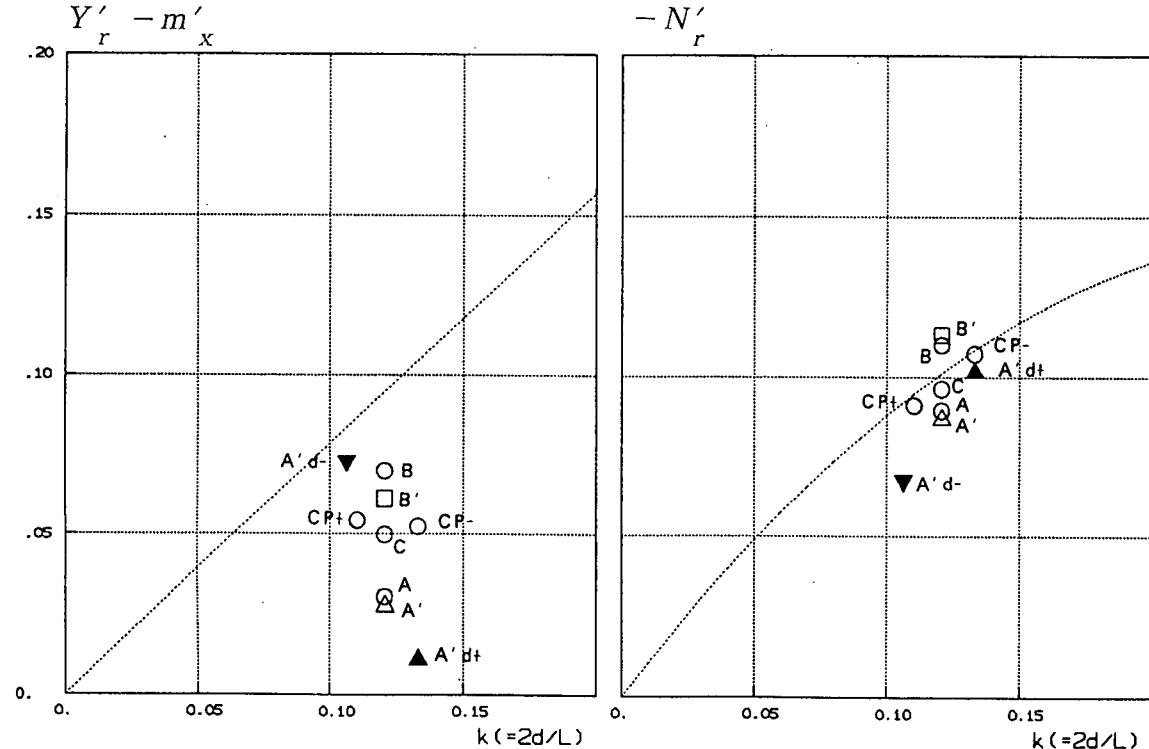


図3.2.3.2.2 主船体に働く流体力の計測例(A、B、C船型)



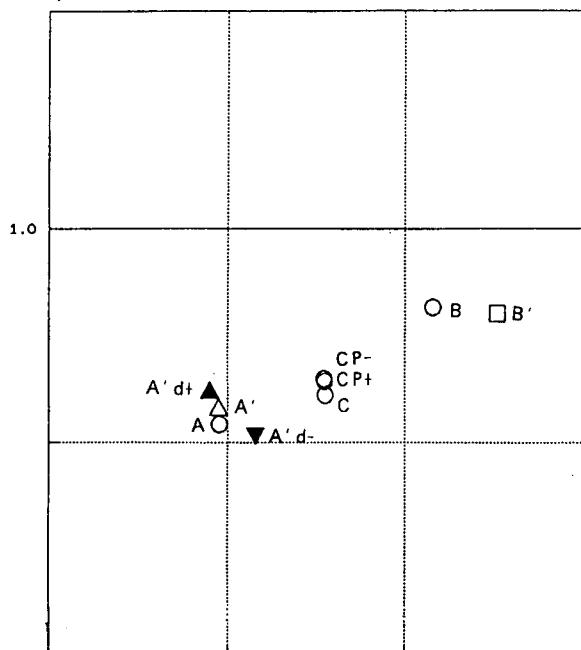
LINEAR SWAY DERIVATIVES



LINEAR YAW DERIVATIVES

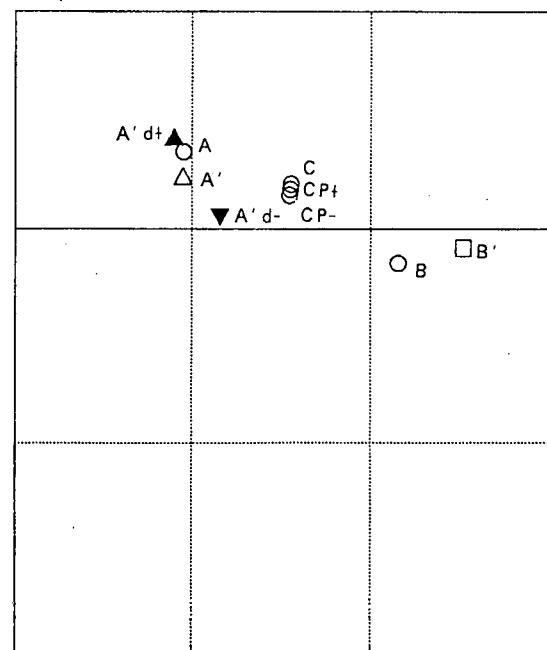
図3.2.3.2.3 線形微係数の比較

$Y'_\beta$  / 井上式



V ← 船尾フレームライン形状 → U

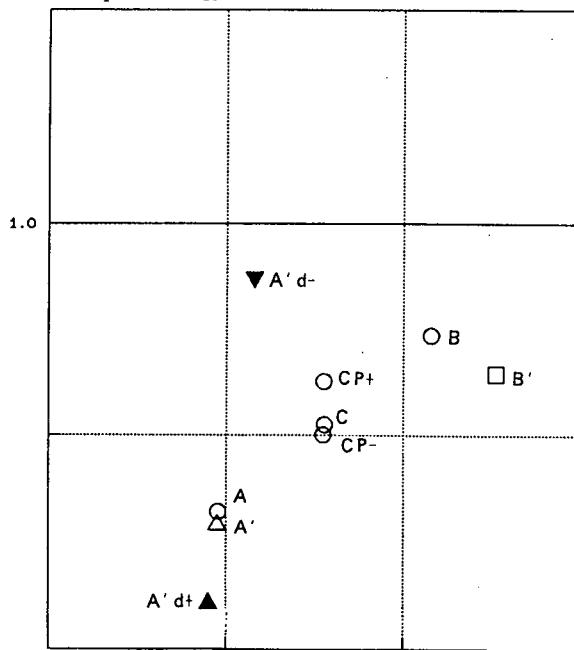
$N'_\beta$  / 井上式



V ← 船尾フレームライン形状 → U

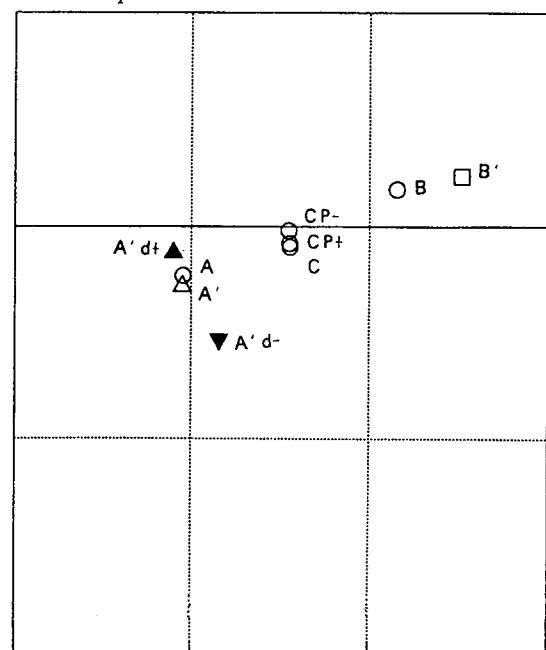
#### LINEAR SWAY DERIVATIVES

$(Y'_r - m'_x)$  / 井上式



V ← 船尾フレームライン形状 → U

$(-N'_r)$  / 井上式



V ← 船尾フレームライン形状 → U

#### LINEAR YAW DERIVATIVES

図3.2.3.2.4 井上の推定値に対する補正量

### 3.2.3.3 操縦性能測定のための自由航走模型試験

#### (1) 実験の目的

フレームライン等の船尾形状の違いが操縦性能に与える影響を把握するとともに、本研究において実施された流場・流体力の理論的推定法、データベースによる流体力の測定法、およびこれらを用いた数学モデルによる操縦運動推定法の精度検証に供することを目的として、自航模型船による自由航走試験を実施した。供試船型は3.2.2 の、主要目が同じで船尾形状の異なるA、B、C船型とした。

#### (2) 実験方法

プロペラと舵を装備した模型船を用いて、自航モーターにより模型プロペラを駆動して実船15ノット相当の船速で航走させ、かつ遠隔操縦により旋回、Z操舵、逆スパイラルモードの舵角を模型舵に与え、その結果生じる操縦運動特性を計測した。試験では、舵角及びプロペラ回転数の操作入力や、航跡、船速、船首方位角、回頭角速度の運動特性値の他、運動中の舵直圧力及びプロペラ推力についても計測した。

#### (3) 実験結果

図 3.2.3.3.1にスパイラル試験及び逆スパイラル試験により得られた、各舵角に対する無次元旋回角速度： $r'$ （＝船長／定常旋回半径）及び船速低下率： $U/U_0$ （＝定常船速／初期船速）を示す。本試験結果から各船型の不安定ループ幅をみると、約 $10^\circ$  の不安定ループ幅を有するV型船尾船型（A船型）と不安定ループを持たないU型船尾船型（B船型）に対して、A、Bの中間的船尾フレームラインを有するC船型では、不安定ループ幅が $3^\circ$  程度となり、両船型の中間的な針路安定性を示すことが確認された。

図 3.2.3.3.2に舵角 $35^\circ$  の旋回試験により得られた旋回航跡の比較を示す。ここで見られるようにA及びB船型と比べて、C船型の旋回半径が若干大きいものの、左右の旋回特性を平均的に見ると、船尾フレームラインの違いに応じた旋回性能の明瞭な違いは認められなかった。

図 3.2.3.3.3に、 $10^\circ$  Z操舵試験結果を示す。本図より、船首方位の第1及び第2オーバーシュートを3船型について比較すると、B、C、A船型の順でその値が増加しており、船尾フレームラインがU型からV型へと変化するにしたがって、追従性能が劣化する事が確認された。この傾向は、図 3.2.3.3.4に示した $20^\circ$  Z操舵試験結果においても認められた。

以上、船尾フレームラインの異なる3船型による自由航走試験により、同一主要目の船型でも、船尾フレームラインがU型からV型へと変化するにしたがって、特に針路安定性及び追従性が低下することが、自由航走模型試験により確認された。

#### (4) まとめ

主要目が同じで船尾形状の異なる3隻のVLC C船型について、自由航走模型試験を実施し、フレームラインの形状が針路安定性等に無視できない影響を及ぼすことを明らかにした。船尾形状と操縦運動特性の関係を把握するとともに、操縦運動時の流場と流体力の理論計算法や流体力データベースによる操縦運動推定法の精度検証に関して有益な資料を得た。

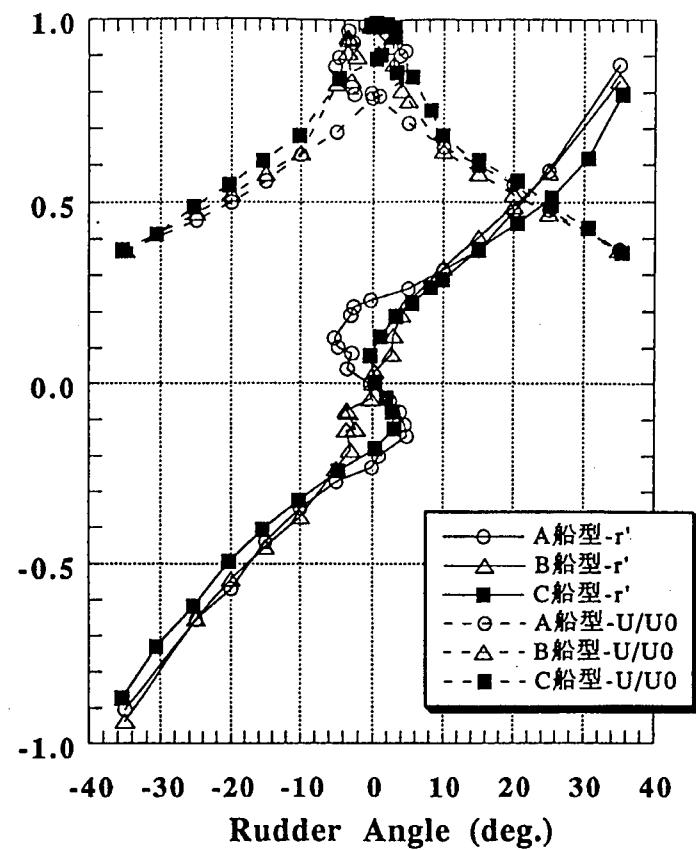


図3.2.3.3.1 スパイラル特性

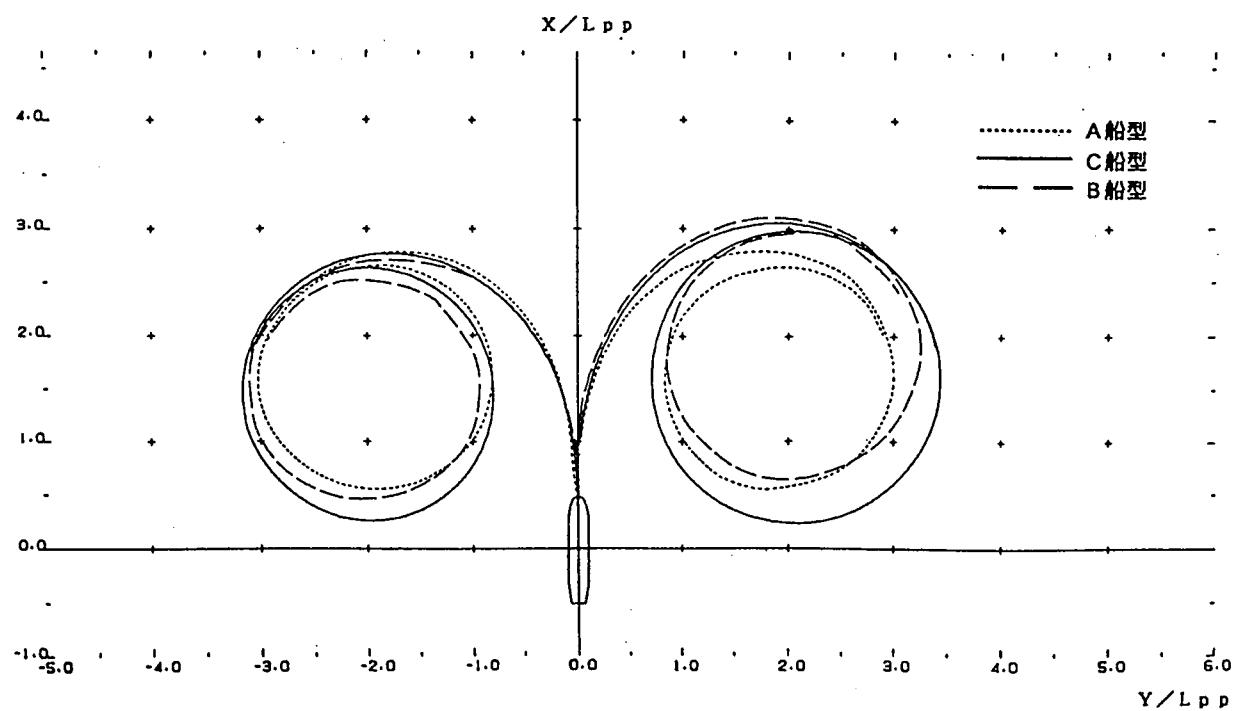


図3.2.3.3.2 35° 旋回試験結果

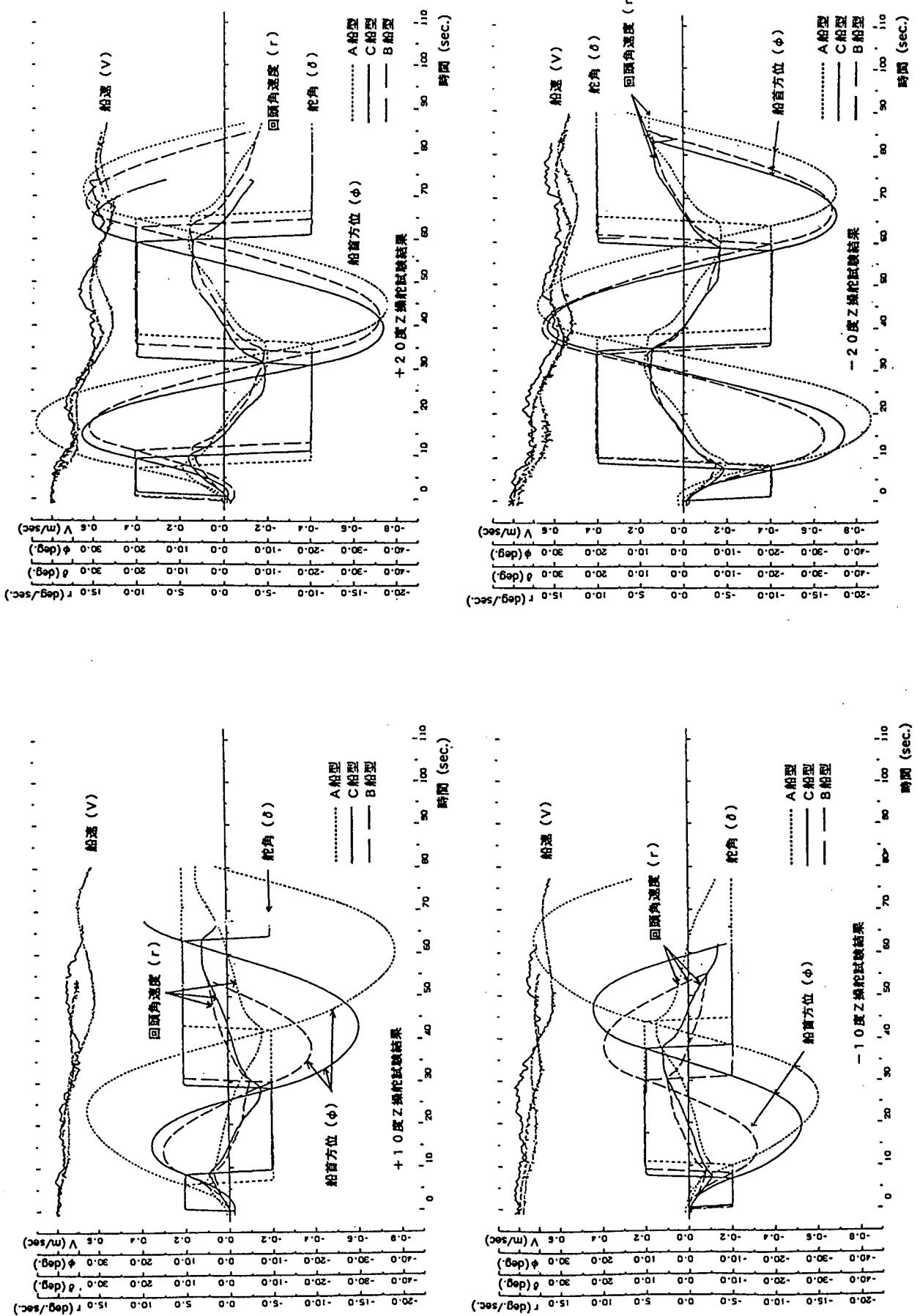


図3.2.3.3-3 10° Z操舵試験結果

図3.2.3.3-4 20° Z操舵試験結果

### 3.2.3.4 斜航船体の船尾流場計測

#### (1) 実験の目的

主船体に働く操縦流体力の理論的推定法、及びCFDによる高精度の流場・流体力推定法の研究に利用するため、主要目が同じで船尾形状の異なるA、B、C 3船型について、斜航状態における流場測定を行った。

計測対象の流場としては、操縦性上重要な流場情報が最も集積している船尾まわりの流場とした。

#### (2) 実験方法

舵およびプロペラを装備していない主船体のみの模型船を、斜航状態で曳航し、船体の長手方向に垂直ではなく、船体の進行方向に垂直のA.P.を通る断面内の流場を、5孔ピトー管を上下左右に5mm間隔でトラバースさせて計測した。

計測結果は、進行方向の速度成分の分布（伴流分布）、進行方向の渦度成分の分布（渦度分布）、断面内での速度ベクトル分布、という形で表わした。

中間型船尾形状のC船型については、船体後方での流場を調べるために、A.P.断面に加えて、S.S.-2断面においても流場測定を行った。

5孔ピトー管による流場測定に加えて、斜航時の3分力測定、タフトグリッドおよび船体表面にタフトを張り付け、斜航時の船尾流場の観測を行った。実験内容を表 3.2.3.4.1に示す。

表3.2.3.4.1 実験内容

( $\beta$ :斜航角)

	後流計測	流場観測		流体力測定
計測装置	5孔ピトー管	船体表面 タフト	タフトグリッド	3分力計
船速	0.81 m/s (Fn=0.138)	0.43 m/s (Fn=0.073)	0.43 m/s	0.81 m/s 0.43 m/s
Ship-A	A.P. $\beta = 0^\circ, 9^\circ, 18^\circ$	$\beta = 0^\circ, 9^\circ, 18^\circ$		$\beta = -24^\circ \rightarrow +24^\circ$ (3° step)
Ship-C	A.P., S.S.-2 $\beta = 0^\circ, 9^\circ, 18^\circ$		A.P., S.S.-2 $\beta = 0^\circ, 4.5^\circ, 9^\circ,$ $13.5^\circ, 18^\circ$	$\beta = -24^\circ \rightarrow +24^\circ$ (3° step)
Ship-B	A.P. $\beta = 0^\circ, 9^\circ, 18^\circ$	$\beta = 0^\circ, 9^\circ, 18^\circ$		$\beta = -24^\circ \rightarrow +24^\circ$ (3° step)

### (3) 実験結果

操縦流体力に支配的影響を与える揚力体としての性質をもたらす剥離渦は、斜航時流場においては、前部船体から剥離して流れてくる剥離渦グループと、船尾縦渦を主体とする船尾渦グループに大別される事が確認された。

解析結果の一部であるA、B、C 3 船型のA. P. 断面における渦度分布を、図 3.2.3.4.1に示す。

右に斜航角がつくと、右舷側に前部船体からの剥離渦が現れ、斜航角が大きくなるにつれて、前部船体からの剥離渦と右舷船尾縦渦は強さと大きさを増してゆき、左舷船尾縦渦は弱く小さくなつてゆく。

伴流分布においても、斜航角がつくと生じる剥離渦に対応する伴流域が現れてくる。強い伴流分布域は、おおよそ強い渦度分布域に対応している。

船尾形状の違いによる流場の違いは、船尾断面の渦度分布、伴流分布においては、集中度と分布位置に現れている。U型船尾（B）とV型船尾（A）では明瞭な差が現れ、中間型船尾（C）では、中間的な流場となっている。

直進状態においては、U型船尾がV型船尾に比べ、船尾縦渦は強く、伴流分布も強くかつ広く分布している。

斜航状態においては、渦度分布は、V型船尾の方が集中度が強く、U型の法は集中度が弱く広い範囲に分布している、前部船体からの剥離渦および船尾渦の重心位置も、船尾形状により明瞭な差が出ている。伴流分布は、おおよそ渦度分布の分布状況に対応している。

中間型船尾のC船型については、船体後方の流場も計測した。

船体後方では、直進状態においては、船尾流場の相殺が進むとともに伴流分布も大きく回復している。

斜航状態になると、船尾上流舷側に生じた剥離渦は相殺され、おおよそ斜航成分のみの渦度分布となる。この斜航状態における船尾渦と前部船体からの剥離渦の循環はA. P. 断面とS. S. -2断面とで殆ど変わっていない。

つまり、剥離渦の斜航成分は同じ強さを保ちながら船体後方へ流れしており、船体を揚力体と見なす自由渦モデルによる流場近似の妥当性を示している。

### (4) まとめ

主要目が同じで船尾形状の異なる3隻のV L C C船型について、斜航時の船尾流場を計測し、船尾断面における流場の様子を定量的に把握した。

船尾断面における渦度分布、船体後方での剥離渦の挙動等、理論計算による実用的操縦流体力推定法の研究に有益な資料、および、詳しい速度分布、渦度分布等、CFDによる高精度流場推定法の研究に有益な資料を得る事が出来た。

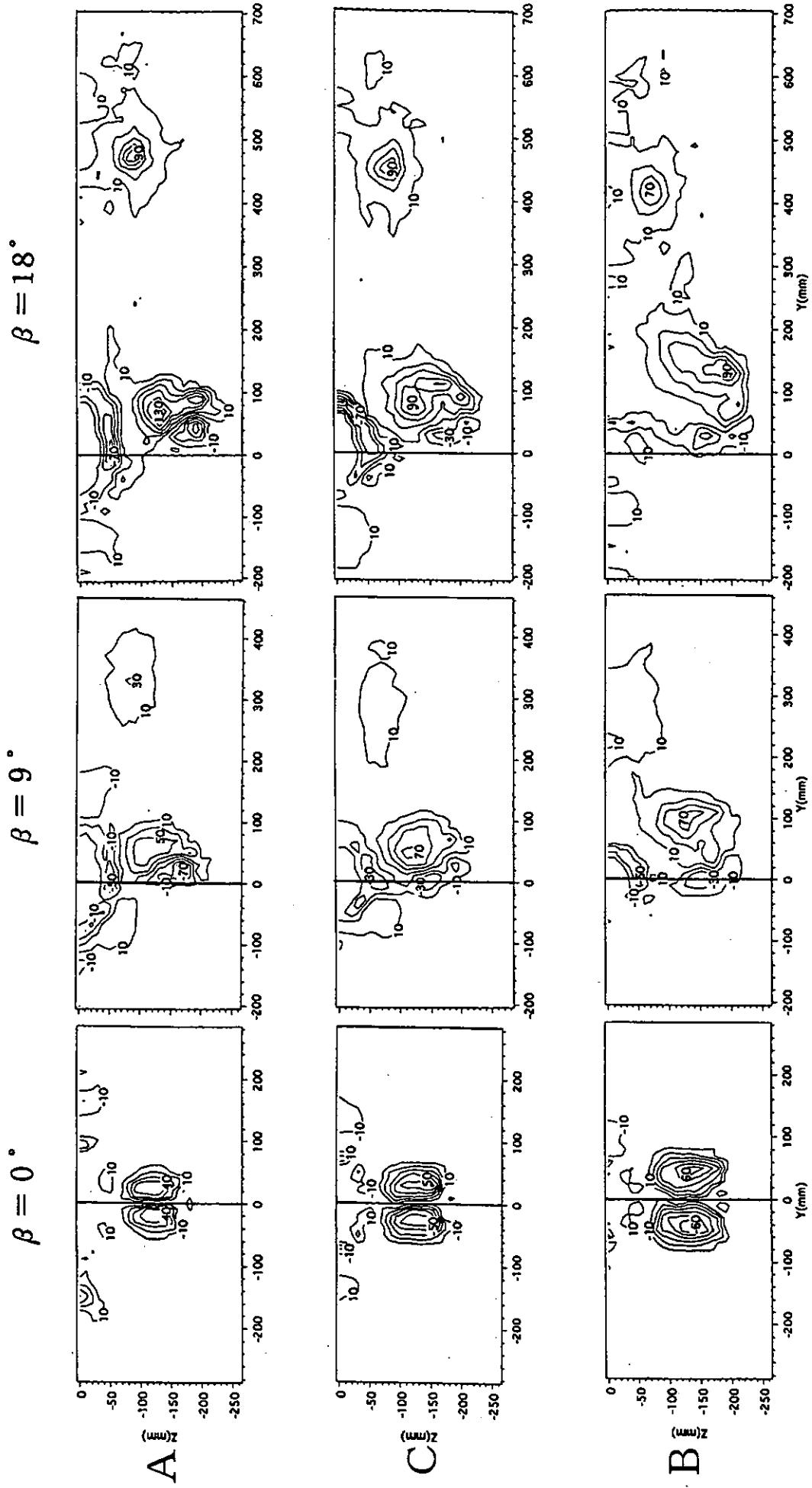


図3.2.3.4.1 斜航状態での渦度分布  $\omega_L/U(A.P.$  断面)

### 3.2.3.5 斜航および旋回時の船体表面圧力分布と後流計測

#### (1) 実験の目的

船尾フレームラインが大きく異なるA、Bの2隻の模型船を用いて、斜航及び旋回時の船体表面分布を詳細に計測し、船体に作用する横力の船長方向分布がどのように異なるかを明らかにする。さらに、A.P.位置での横断面内での後流を計測し、とくに従来、計測例のない、旋回中の船尾流場の特徴を明らかにする。また、これらの計測結果は、後述する数値流体力学の手法による船体まわりの流場計算の妥当性の検証にも利用することとした。

#### (2) 実験方法

##### (i) 圧力計測

A、Bの両模型とも、水面下の船体全体にわたって、約440点の圧力計測孔を、左右両舷対象に配置した。圧力計測には差圧型圧力変換器を用いたが、旋回時の計測結果には旋回に伴い、圧力計測孔から圧力変換器に到るビニール・パイプのなかの水に遠心力が作用するが、これを修正する必要があった。図3.2.3.5.1にB船型船尾部の圧力孔の配置と船内の圧力計測用ビニール・パイプを示した。

##### (ii) 後流計測

後流計測には5孔ピトー管を使用したが、ピトー管の位置を変えるトラバース装置は、旋回時の計測を行うために模型船に搭載した。このため、船長方向に計測位置を変えることが極めて困難であり、後流計測は、A.P.を通る横断面内のみとした。図3.2.3.5.2に模型船の船尾部に搭載されたピトー管・トラバース装置を示す。A.P.断面内の計測位置は水平方向および鉛直方向とも20mm間隔としたが船体近傍は10mm間隔とし、1状態での計測個所は700～800点である。

#### (3) 実験結果

##### (i) 圧力計測

計測結果から、旋回中の船体表面圧力分布のセンターを描いた一例を図3.2.3.5.3に示す。A、B両船は前半部の船型は同一であり、後半部の船型のみ異なる。計測された圧力分布も前半部はほぼ同一であり、後半部に船型の相違が明確に現れていることが判る。図3.2.3.5.4は、圧力計測の結果から、旋回中の船体に加わる横力の船長方向分布を求めたものである。S.S.4以降の船尾での横力分布の相違が明確に示されている。

##### (ii) 後流計測

トラバース装置に取り付けられた5孔ピトー管の速度計測値には船体の運動成分を含むので、これを差し引いた結果の一部を図3.2.3.5.5に示す。直進中には左右対象であった伴流域は旋回の結果、旋回の内側（図の右側）に移動し、かつ、プロペラ付近の強い伴流域が縮小していることが判る。また図3.2.3.5.6には図3.2.3.5.5と同一の状態の縦渦の渦度分布を示す。総じて、B船型の縦渦がA船型のそれよりも強いことが明かである。

#### (4) まとめ

船体表面の圧力計測およびA.P.断面における後流計測の結果、船体後半部のフレーム形状が異なる2船間の横力分布や伴流および渦度分布に明確な相違があり、これらが、本章の前半部で述べられた2船間の操縦性の相違と対応していることが判った。また、圧力計測や後流計測の結果は、後述の数値流体力学的流場計測の検証に使用しうるデータとなりうることが示された。

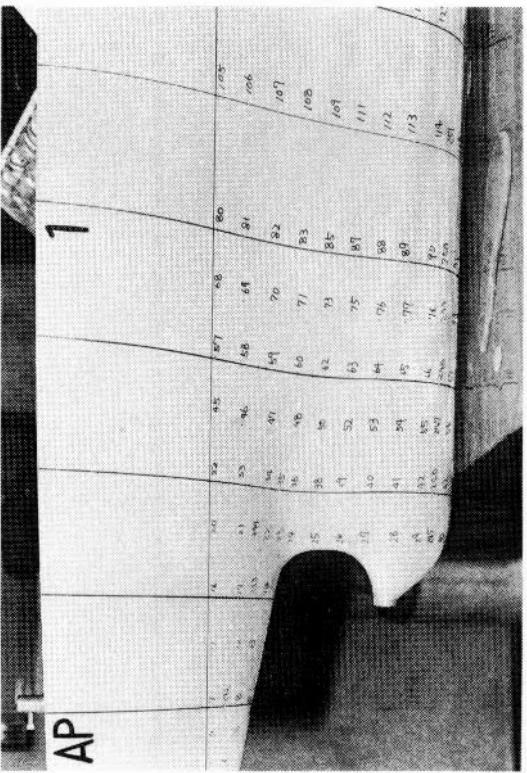


図3.2.3.5.1 圧力計測孔と圧力計測用ビニール・パイプ

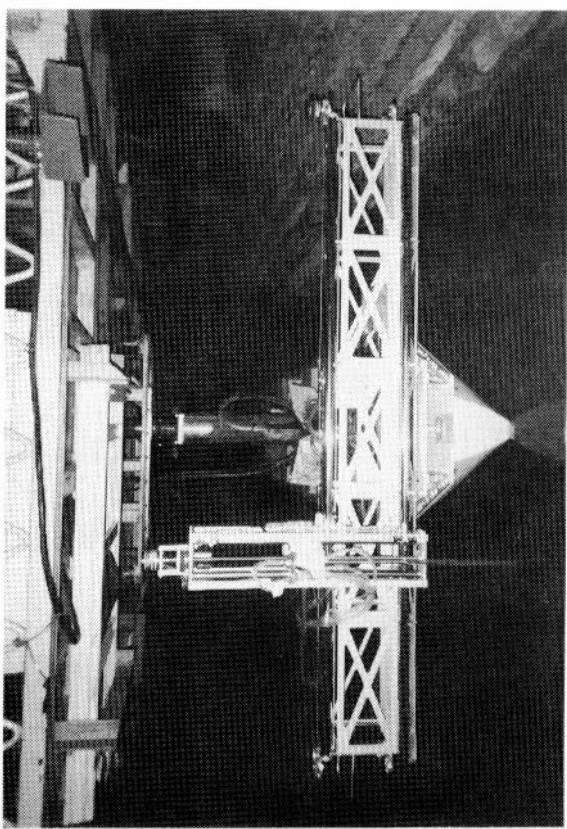


図3.2.3.5.2 船尾に取り付けられた5孔ピトー管とトラバース装置

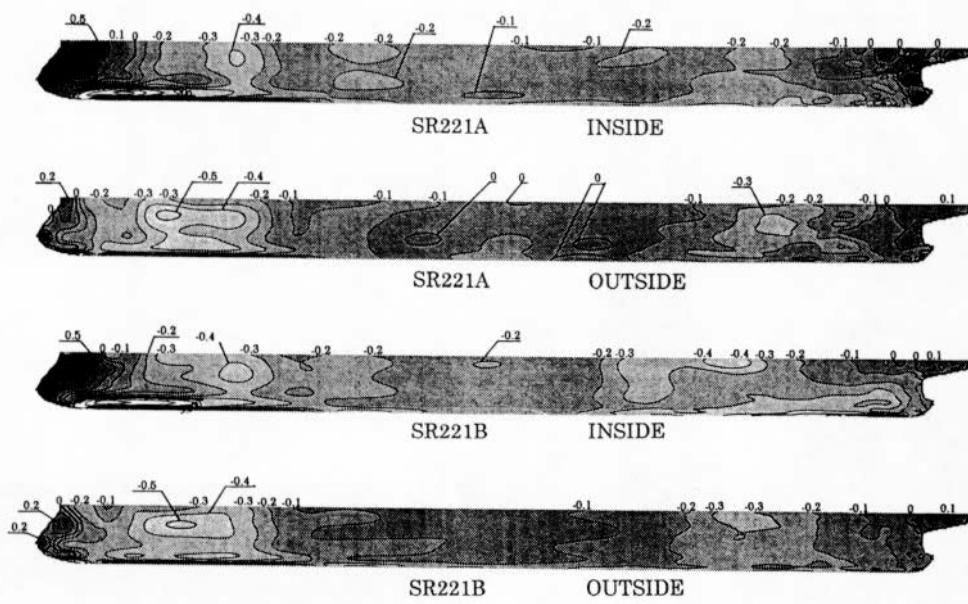


図3.2.3.5.3 船体表面圧力分布の一例( $r'=0.4$ ,  $\beta=0^\circ$ )

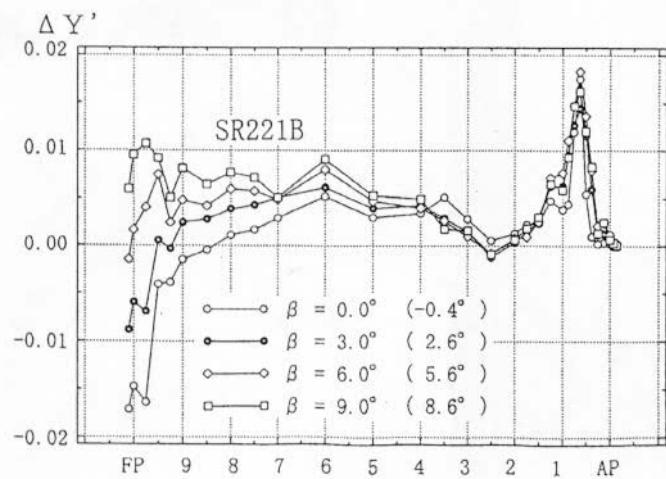
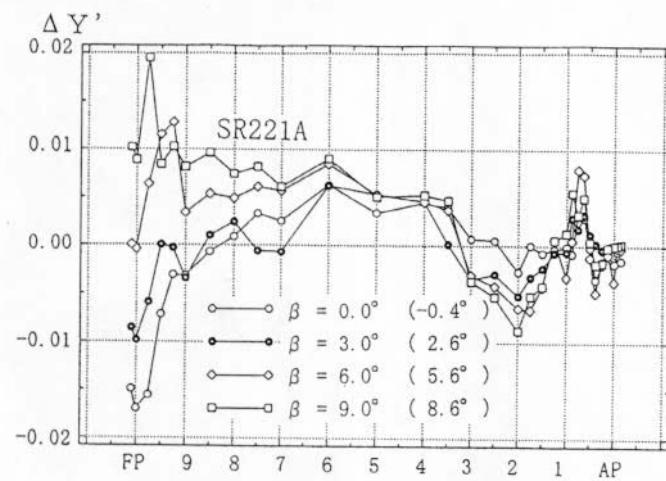


図3.2.3.5.4 旋回中の横力の船長方向分布( $r'=0.4$ )

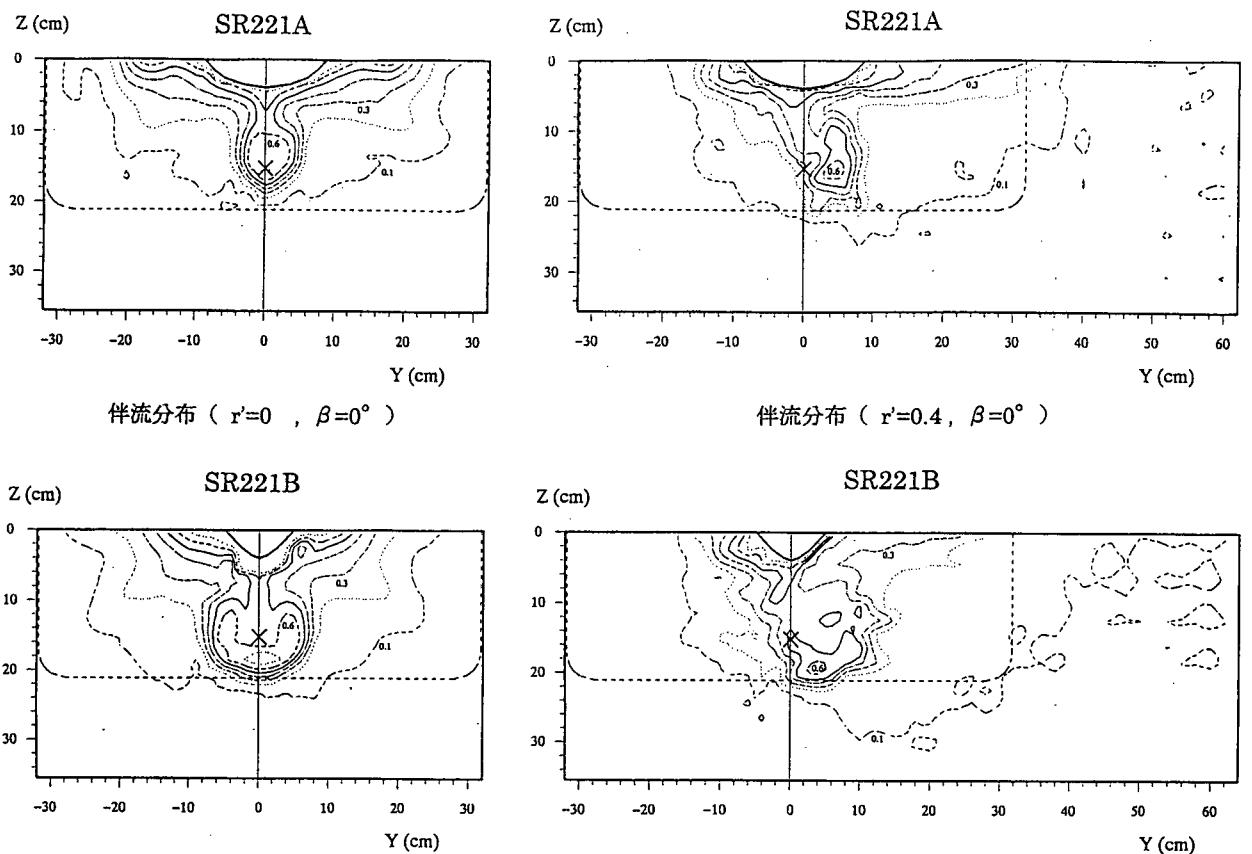


図3.2.3.5.5 伴流分布の一例

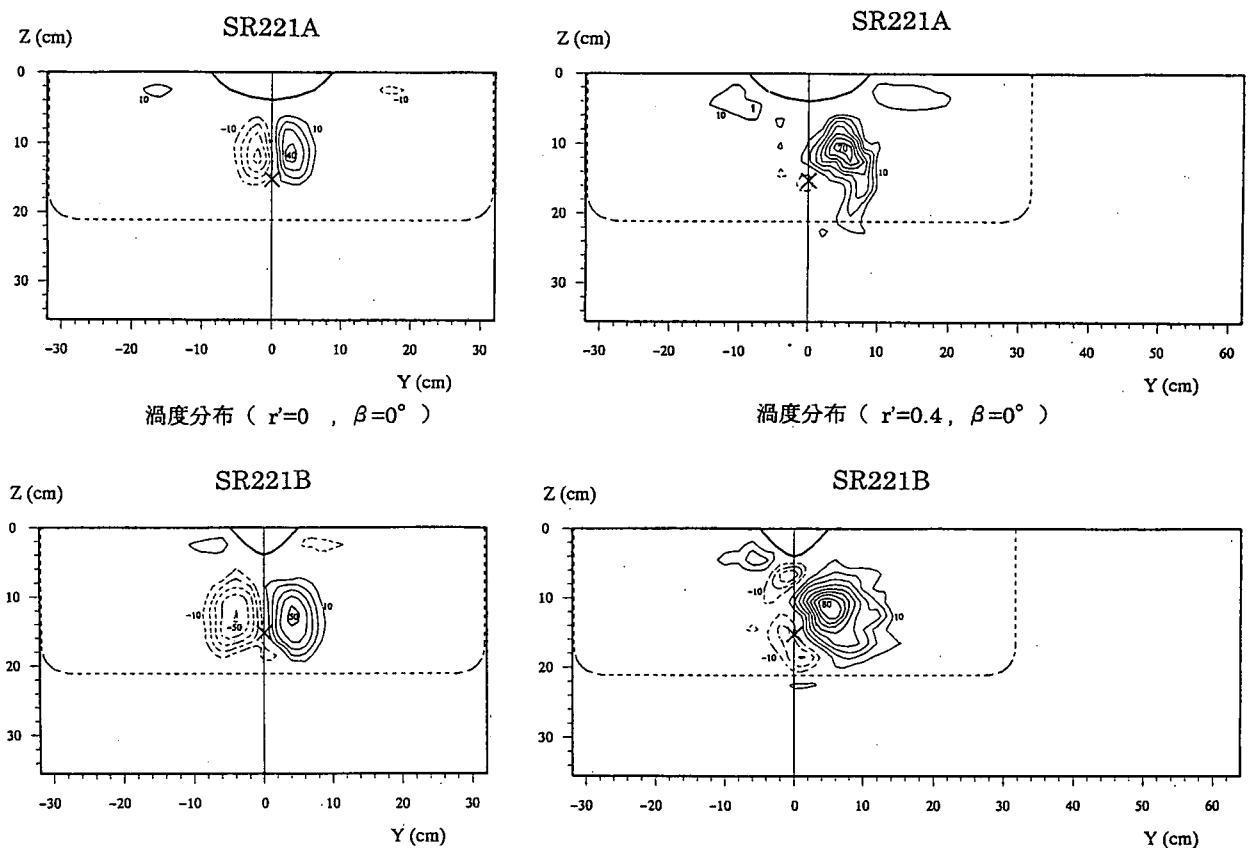


図3.2.3.5.6 湍度分布の一例

### 3.2.4 まとめ

船尾形状がU型、V型、及び、その中間型という3隻のVLCC模型船を中心に、操縦性能推定技術の研究に必要な資料を得るために、種々の模型実験を行った。

拘束模型船による流体力及び流場測定結果には、船尾形状による違いが明確にとらえられ、流場モデルの改良等による主船体に働く流体力推定法の検討、及び、船体・プロペラ・舵の相互干渉の検討に役立てられた。

流体力のデータは、理論及びデータベースによる流体力推定法の研究に加えて、数学モデルの検討にも用いられ、自由航走模型船による実験結果との比較により、通常用いられているMMGモデルは、全般的な運動の特徴はよく表しているが細部については改良すべき点があることや、線形微係数の重要性等が明らかになった。

自由航走模型試験においては、船尾形状の違いが保針性能に大きく影響する様子が明確に示された。

流場測定に加えて、船体表面での圧力分布測定データは、主としてCFDによる高精度の流場・流体力推定法の検討に用いられたが、さらに、圧力分布測定結果は、船尾形状の違いによる操縦性能の変化の主因が船尾部の圧力分布の違いにあることを明確にした。

本調査研究における以上の模型実験により、操縦性能推定技術の研究に有益な種々のデータを得ることが出来たが、まだ必要とするデータは数多く、実験的検証のもとに更に信頼性ある操縦性能推定法へと発展させるには、今後も着実な実験データの蓄積が必要であろう。

### 3.3 船体流体力の理論計算法改良

IMOの操縦性能暫定基準の採択に伴い、設計段階において船舶の操縦性能を精度良く推定する方法の確立が望まれている。操縦性能の精度良い推定のためには、運動時に船体に作用する流体力を正確に推定することが不可欠であり、フレームライン形状等の細かな船型要素の違いを可能な限り考慮することができる理論的な推定法の確立が重要である。そこで本研究においては、現在用いられている流体力計算法を対象とし、主として計算精度の向上を目的とした計算法の改良を行った。

ここでは、主船体流体力の計算法について、6つの機関において検討を行った計算法の概要、ならびに各計算法による船体流体力の推定結果を示す。

#### (1) 流体力計算法（その1）

この流体力計算法は、船体を船幅、吃水が船長と比較して十分小さい細長体であると仮定して、高次の項まで考慮した写像関数を用いて船体横断面を精度良く近似し、伴流を表す離散的な自由渦を付加することによって船体まわりの流場のモデル化を行っている。この方法においては、船体に作用する流体力は各横断面における運動量の変化より求めることができる。船体流体力を推定する上で、伴流を表す自由渦の剥離点の位置は流体力の推定精度に影響を及ぼす非常に重要なパラメータであるが、本計算法では自由渦の剥離点を連ねた線である剥離線をkeel line 上に仮定した場合と、計算精度をより向上させることを目的として、剥離線を両舷のビルジ部分に仮定した場合について検討を行っている。また、剥離点から剥離した自由渦の初期位置を表すパラメータ  $s$  を導入し、模型試験結果との比較・検討に基づき、パラメータ  $s$  の値を船長方向に変化させることによって推定精度の向上を図っている。

図3.3.1には、本計算法によってSR221A、SR221B、SR221C船型を対象として、横力Yおよび回頭モーメントNの無次元値Y'、N'の推定を行った結果を示している。図中の▽、○、□印はそれぞれSR221A、SR221B、SR221C船型に対する模型試験結果を表し、点線と実船および破線はそれぞれ3船型に対す

る推定結果を示している。斜航角  $\beta$  が小さい範囲においては、模型試験結果と同様に、推定結果においても 3 船型に大きな差は見られず、精度良く推定できているが、回頭モーメントについては、多少大きめに推定する結果となっている。また、斜航角  $\beta$  が大きい範囲においては定量的な差が若干見られるものの、定性的な傾向は 3 船型とも良く一致しているものと思われる。

#### (2) 流体力計算法（その 2）

この流体力計算法も細長体理論に基づく計算法である。本計算法においては、斜航運動および旋回運動を対象として、船体まわりの流場を船体に極めて近づいた領域（near field）と船体から遠く離れた領域（far field）の 2 つの領域に分けて取り扱った場合に、通常は省略される高次の項を far fieldにおいて考慮することによって、船体流体力の推定精度の向上を図っている。さらに、剥離渦を伴って運動している船体からの剥離渦を自由渦層で表して取り扱う場合、船体に働く流体力は物体表面における圧力を積分することによって求める方法が通常用いられるが、本計算法では、高次の項まで考慮した速度ポテンシャルの値そのものを使って船体流体力の計算を行っている。また、流体力の計算のためには船体後方の全ての渦層の情報を必要であるが、本計算法においては船体後方に検査面を設置し、検査面における流場の情報を用いて後方の渦層の情報を求めている。また、船体から剥離する渦層は自由に運動する離散渦で与えており、剥離点の位置や剥離渦の強さは、船体流体力の推定精度に非常に大きな影響を及ぼすパラメータとなる。ここでは、剥離点の位置については両舷ビルジ部に仮定している。また、新たに剥離する自由渦の発生位置は剥離点における流速が 0 になるように決定し、その強さは剥離位置における断面内の 2 次元流速、船体を船長方向に分割した時の断面間の距離を用いて表している。さらに方形係数  $C_s$  の関数として表した係数  $C_T$  を用いて修正を施している。

図 3.3.2～図 3.3.4には、本計算法によって SR221A、SR221B、SR221C 船型の 3 船型を対象として、斜航時の流体力を推定した結果を示しているが、図中実線で示されている流体力推定結果は、□印および■印で示した実験値と良い一致を示している。従って設計段階において船体流体力を推定する場合、非常に有用な計算法であると思われる。

#### (3) 流体力計算法（その 3）

この流体力計算法は、流体中を運動する船体の横断面形状を Lewis の写像関数を用いて円柱に写像し、その背後に渦対を配置することによって船体まわりの流場のモデル化を行っている。船体に作用する流体力は、各横断面における運動量変化を考えることによって求めている。この方法では、船体を写像した円柱の背後に配置する渦対の停留位置をどのような条件で定めるかが重要な問題であるが、本計算法においては特異点間に作用する Lagally の力が 0 になる Föpple line 上に位置するものと仮定している。この方法においては、渦対が流出する船長方向における位置を表すパラメータ  $x_s$  およびその流出角度を表す  $\theta$  の選定が推定精度を向上させる上で重要である。

図 3.3.5～図 3.3.6には、本計算法によって SR221A、SR221B 船型を対象として、船体流体力を推定した結果を示している。SR221A 船型の回頭モーメントについては、旋回運動時についても推定結果は実験値と非常に良く一致しているが、横力については斜航角  $\beta$  が小さい範囲において回頭角速度が大きくなるにつれて、やや大きめに推定する結果となっている。SR221B 船型については、やはり回頭角速度が大きい場合に横力を大きめに推定する結果となっており、また斜航角  $\beta$  が大きな範囲では回頭モーメントの定性的な傾向も実験結果と異なる結果となっている。

#### (4) 流体力計算法（その 4）

この流体力計算法も船体を細長体として取り扱うことにより、船体流体力を求める計算法である。船

体横断面形状を精度良く近似し、各横断面の両舷より離散的な自由渦を流れに沿って放することによって、船体まわりの流場のモデル化を行っている。船体に作用する流体力は、船体の各横断面における運動量変化より求めることができる。また、自由渦の剥離位置は各横断面における船体表面において圧力が最小となる点に仮定されている。細長体近似を用いた場合、船体近傍の流れは2次元的に取り扱われるため、船体前後端部における3次元影響を考慮することが困難である。従って、本計算法においては、船体前端部における流体力の計算において、横力については船体と長さおよび体積が等しい回転橢円体の厳密解に基づく3次元修正ならびに2次元平板翼の渦度分布を参考にした修正の平均値を適用し、船体後端部における流体力の計算については2次元平板翼の渦度分布を参考にして渦強さの修正を行っている。

図3.3.7には、本計算法によってSR221A、SR221B、SR221C船型を対象として、船体流体力を推定した結果を示している。斜航角 $\beta$ が小さい範囲においてはSR221B船型の方がSR221A船型よりも大きな横力が作用しているが、 $\beta$ が大きくなるにつれてその傾向は逆転している。一方モーメントについては、斜航角 $\beta$ の小さい範囲においてはSR221A船型の方が大きな値を示しているが、この傾向も $\beta$ が大きい範囲では逆になっている。SR221C船型に対する横力、モーメントについては、ともにSR221A、SR221B船型のはば中間の値として推定されている。

#### (5) 流体力計算法（その5）

この流体力計算法は船体横断面内を横切る流れ（Cross flow）を主体に取り扱う方法である。船体の横断面形状はフレームライン上に連続的に分布させた束縛渦によって表し、横断面積の船長方向の変化に基づく3次元影響を表すために、横断面積の変化に対応する吹き出しを船体中心線上に配置している。フレームライン上に分布させた束縛渦の強さは物体表面条件を満足するように決定する。また、船体から剥離する渦層は、船体横断面から流出する離散的な自由渦を用いて表しており、剥離位置は各横断面の表面流速分布に基づいてビルジ部に仮定している。剥離する自由渦の発生位置は、仮定した剥離位置から深さ方向に吃水の $s'$ 倍離れた位置としている。以上のように船体まわりの流場をモデル化した時、船体に作用する流体力は各横断面まわりの流体の運動量変化を見積ることにより求めることができるが、この流体力はいわゆる船体に極めて近傍の領域についてのみ考えた近似解であるため、その船長方向の分布らなびに回頭モーメントの推定精度に影響を及ぼすことが考えられる。従って、本計算法においては自由渦を考慮しない場合の船体の各横断面の流体力成分について、上記の方法で求められるCross flowに基づく成分とLagallyの定理に基づく船体から遠く離れた領域まで考慮して求めた流体力の平均値を採用することにより、推定精度の向上を図っている。

図3.3.8にはSR221A、SR221B、SR221C船型の3船型を対象として、斜航時の流体力を推定した結果を示している。横力、回頭モーメントとともに斜航角 $\beta$ が小さな範囲においては模型試験結果と比較的良く一致しているが、斜航角 $\beta$ の値が大きくなるにつれ、横力の推定結果は模型試験結果よりも大きくなってしまっており、モーメントについては模型試験結果より小さくなっている。しかしながら、3船型の船型の違いに基づく流体力の変化の定性的な傾向については一致する結果となっている。

#### (6) 流体力計算法（その6）

この流体力計算法は、細長体理論に基づく推定法である。船体横断面形状を高次の項まで考慮した写像関数を用いて近似して表し、船体から剥離する渦層は各横断面の両舷より流出する離散的な自由渦でモデル化している。自由渦が剥離する位置は各横断面内の圧力が最小となる点に仮定されており、自由渦は船体まわりの流れに沿って自由に移動するものとして取り扱っている。また、流体力の推定精度の

向上を目的として、流体力計算法（その4）と同様に船体の前後端において3次元修正を施している。本計算法における3次元影響を表す修正法としては、船長、排水量、ならびに幅と吃水の比から決定される楕円体を求め、この楕円体に関する厳密解を用いて修正を行っている。図3.3.9に本計算法による流体力の推定結果を示す。

以上のように本研究においては、フレームライン形状等の細かな船型要素の違いを可能な限り考慮することができる理論的な推定法の確立を目的として、現在用いられている流体力計算法の計算精度の向上を目的とした改良を行った。その結果、定量的な精度については、計算法によっては未だ改良の余地もあるが、船型の違いが船体に作用する流体力に及ぼす影響の定性的な傾向については、十分に推定することが可能であるものと思われる。

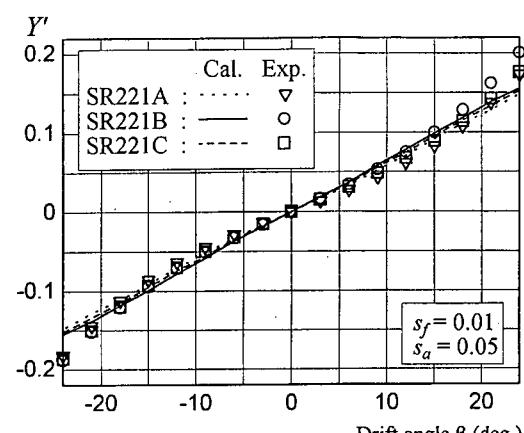


図3.3.1 流体力計算法(その1)による推定結果

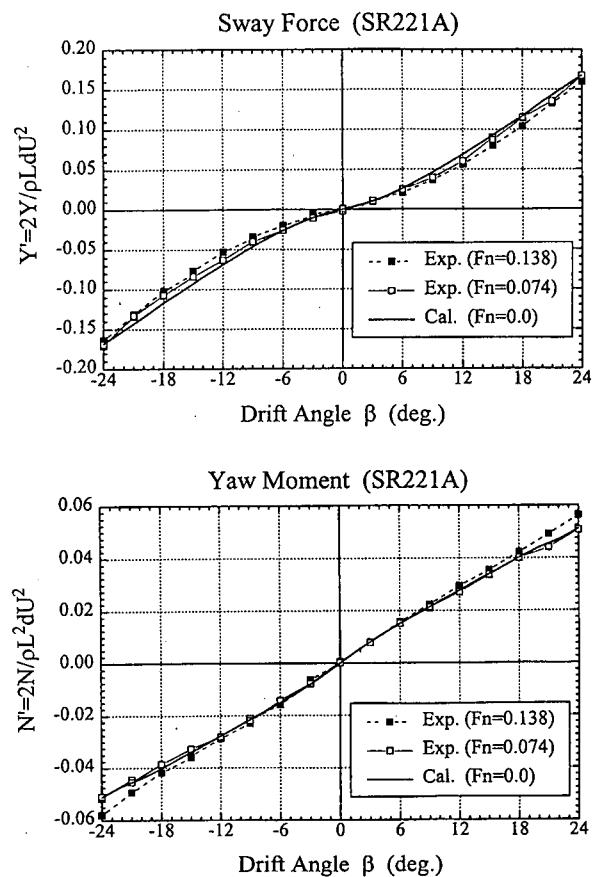


図3.3.2 流体力計算法(その2)による推定結果  
(SR221A船型)

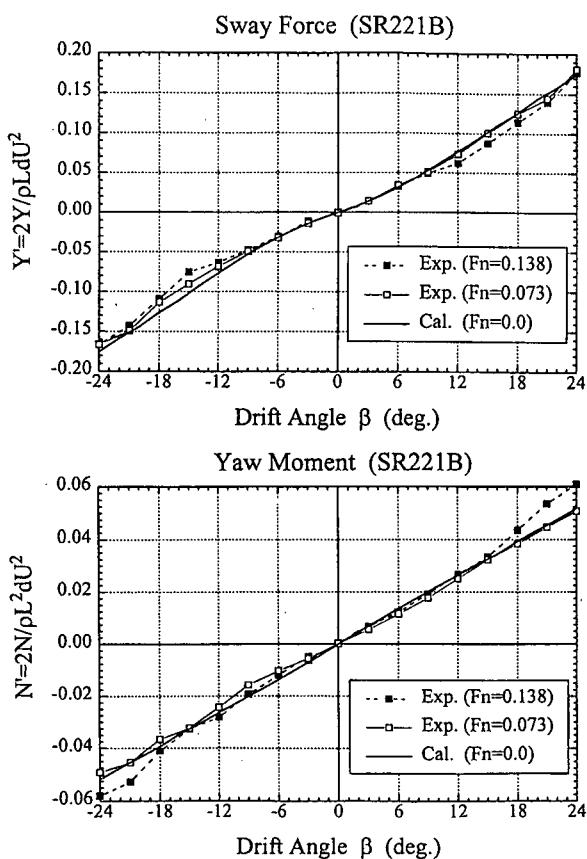


図3.3.3 流体力計算法(その2)による推定結果  
(SR221B船型)

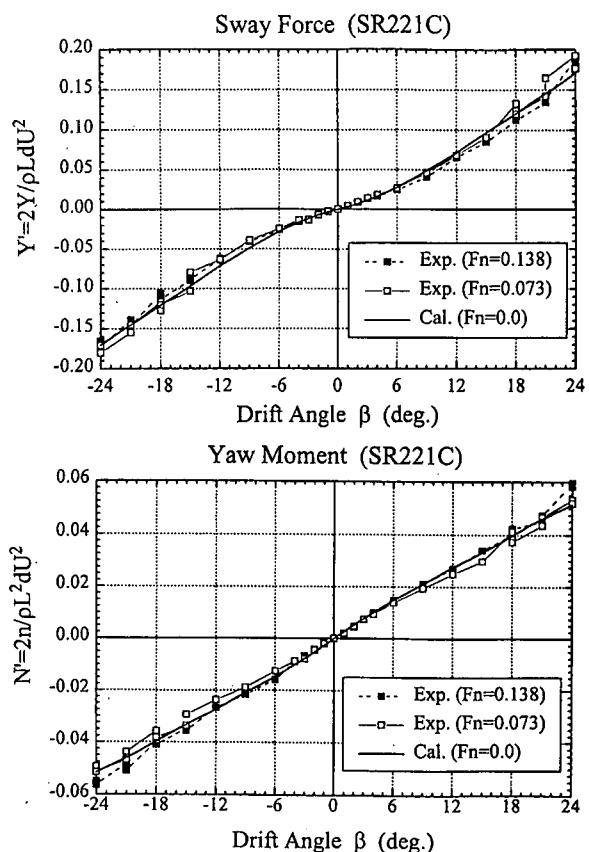


図3.3.4 流体力計算法(その2)による推定結果  
(SR221C船型)

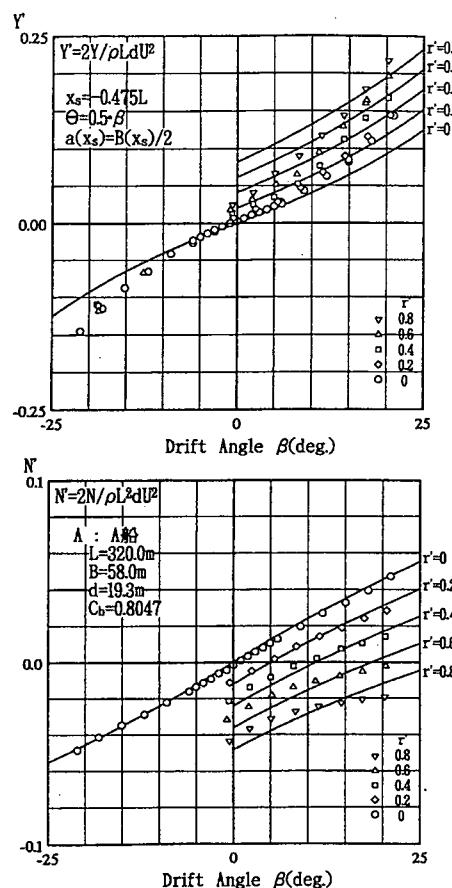


図3.3.5 流体力計算法(その3)による推定結果  
(SR221A船型)

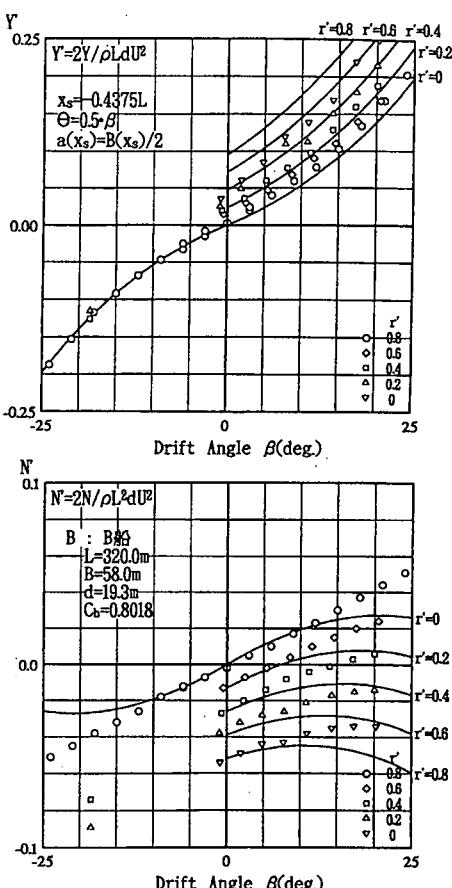


図3.3.6 流体力計算法(その3)による推定結果  
(SR221B船型)

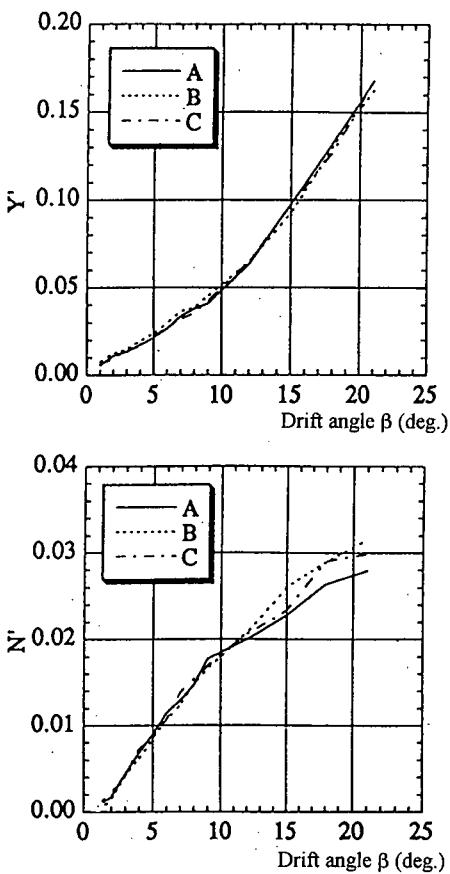


図3.3.7 流体力計算法(その4)による推定結果

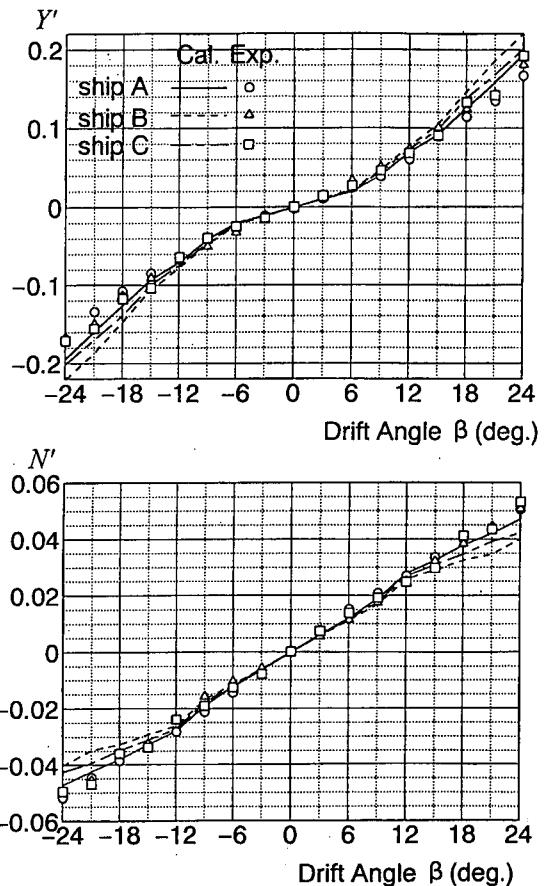


図3.3.8 流体力計算法(その5)による推定結果

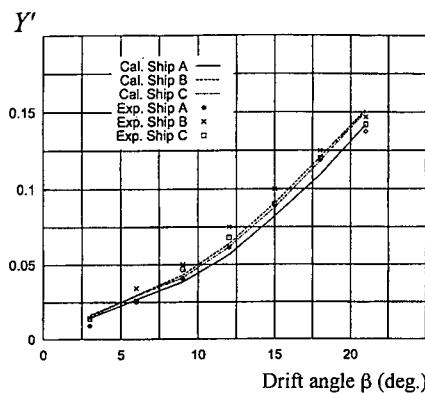


図3.3.9 流体力計算法(その6)による推定結果

### 3.4 船体、舵、プロペラの干渉計算改良法

船の操縦性能をシミュレーション計算で推定する場合には、主船体の斜航ならびに旋回時の流体力特性に加え、船体、プロペラ、舵3者間の干渉を考慮した舵力特性を把握する必要がある。そのため、一定舵角を取りながらプロペラを回転させて直進航行する船に作用する流体力を計測する「舵角試験」と呼ばれる試験が実施され、舵直圧力の特性やそのプロペラ荷重度の影響、操舵によって船体に誘起される干渉流体力等を把握している。

理論的に「舵角試験」を取り扱うためには、船体、プロペラ、舵3者間の干渉を考慮した流体力学問題を解かなくてはならない。本節では、2つの機関で開発した理論計算法を用いて、肥型船を対象とした「舵角試験」の計算を実施し、水槽試験結果との詳細な比較により、理論計算法の検証を行う。本節では、各理論計算法の概要ならびに理論計算結果について報告する。

### 3.4.1 理論計算法

#### (1) 計算法（その1）

船体と舵をRubbert らの定式化にもとづくパネル法、プロペラを山崎、中武の簡易プロペラ理論によって取り扱った。パネル法では、船体（もしくは舵）表面に分布されたソースおよびその中心面に分布したタブレット（渦）で流場を表し、ソースと渦の強さを船体表面条件およびKutta の条件から求める。これら特異点強さが求まると、ベルヌーイの式から船体表面圧力を計算し、その積分により流体力を求める。船体については伴流を横切る速度成分が0という条件（伴流のKutta の条件）舵については翼後縁で圧力が等しいという条件（圧力Kutta の条件）を課す。プロペラについては、精度向上のため、スリップストリーム中での流速について縮流の影響を表す係数を導入した。

#### (2) 計算法（その2）

船体と舵をパネル法の一種であるSQCM法、プロペラを山崎、中武の簡易プロペラ理論によって取り扱った。SQCM法は、吹き出しによるソース分布法と揚力面理論の1解法であるQCM（準連続渦分布法）を組み合わせた手法であり、Source and Quasi Continuous vortex lattice Method の略称である。船体（もしくは舵）表面に分布されたソース及びその中心面に分布した渦で流場を表し、ソースと渦の強さを船体表面条件と中心面を横切る速度は0という条件から求める。Kutta の条件は、QCMにもとづき自動的に満足される。ソース渦の強さが求まると、ベルヌーイの式から船体表面圧力を計算し、その積分により流体力を求めることができる。

### 3.4.2 計算結果とまとめ

図3.4.1に計算法（その1）における船体、プロペラ、舵のパネル分割図を示す。船体、プロペラ、舵の総計で1760パネルを用いた。図3.4.2にSR221A船型を対象にした舵直圧力係数  $F'_N$  の比較を示す。見かけのプロペラ前進係数  $J$  が小さいところをのぞき、計算値は実用上の精度で水槽試験結果と一致している。図3.4.3に舵力成分 ( $F'_N \cos \delta$ ) をベースとした操舵による船に作用する横力係数  $Y_R$  と回頭モーメント係数  $N_R$  の比較を示す。この曲線の傾きが干渉係数 ( $a_H, x'_H$ ) となる。計算値は、実用上の精度で水槽試験結果と一致している。図3.4.4にSR221A船型を対象とした  $a_H$  と  $x'_H$  の比較を示す。 $a_H$  はやや大きめであるが、見かけのプロペラ前進係数  $J$  とともに大きくなる傾向は良い一致を示している。 $x'_H$  については、定量的にも実験結果と良い一致を示している。

以上のように、船体、舵、プロペラ3者間の干渉を考慮した理論計算法により、定量的な精度については改良の余地が残されているものの、VLCCのような実用船型の舵直圧力係数や干渉流体力の全般的な特性把握が可能であることが分かった。

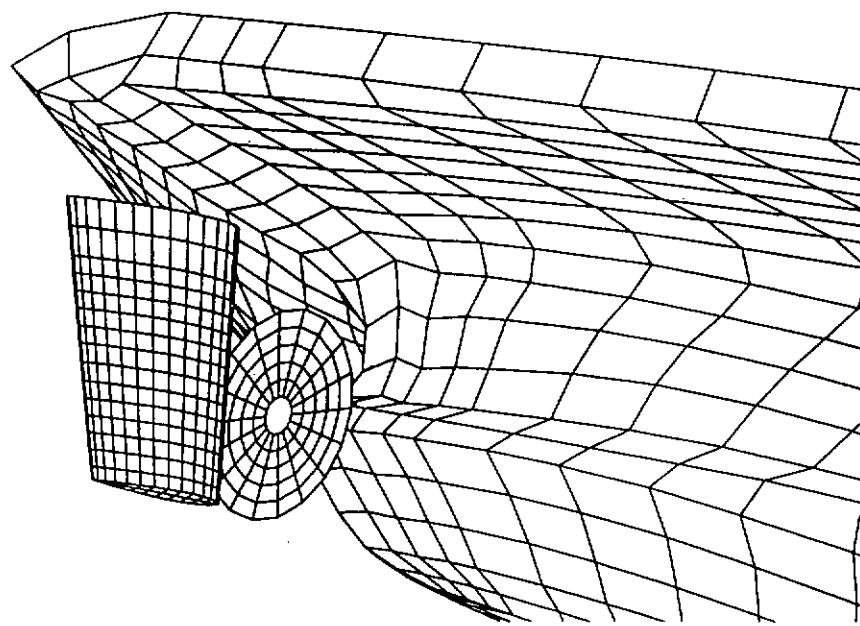


図3.4.1 船体、プロペラ、舵のパネル分割

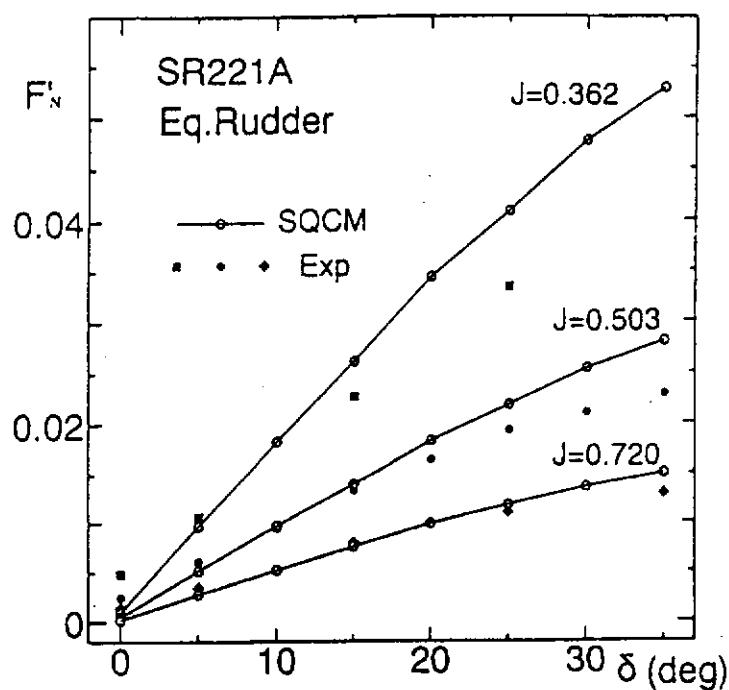


図3.4.2 舵直圧力係数の比較

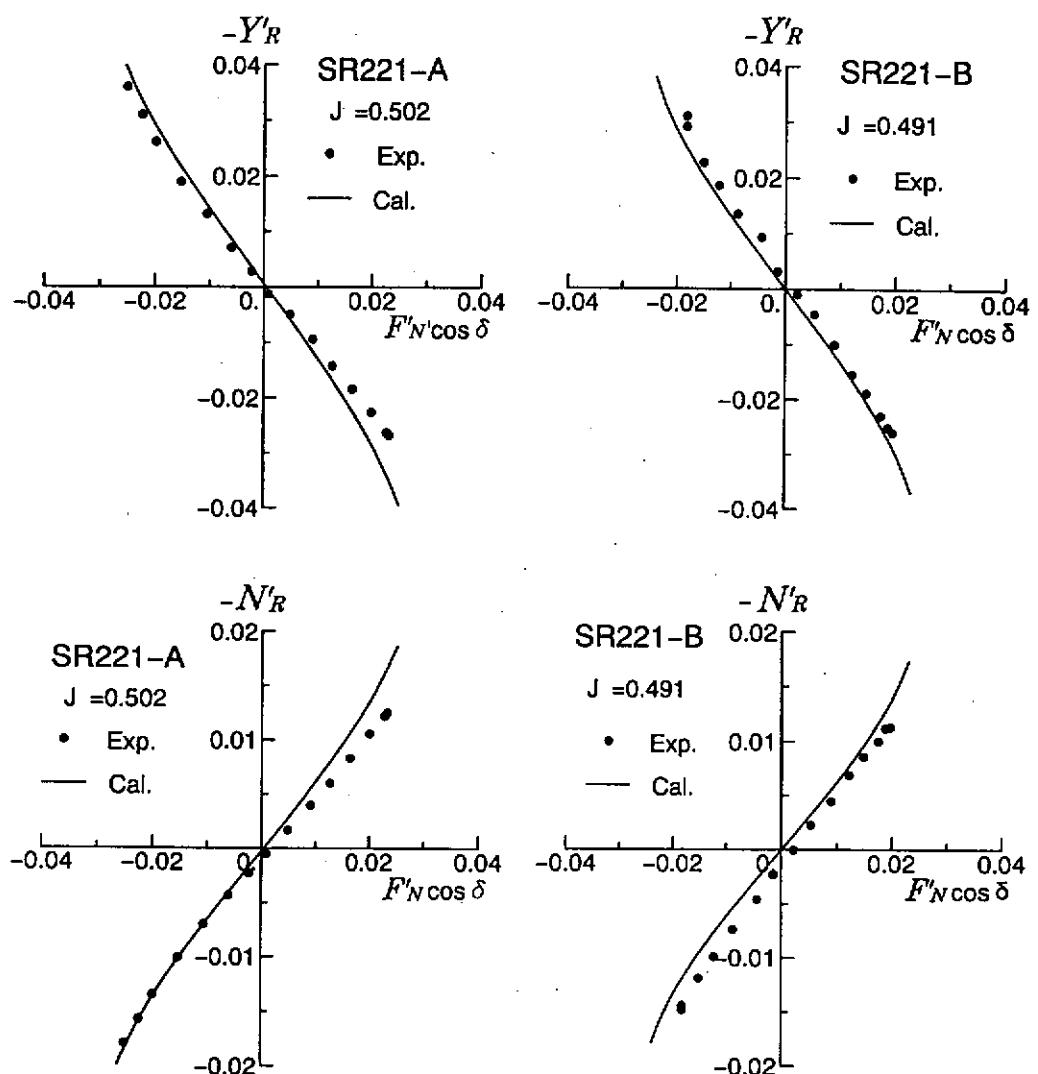


図3.4.3 舵力成分をベースとした流体力特性( $Y'_R, N'_R$ )の比較

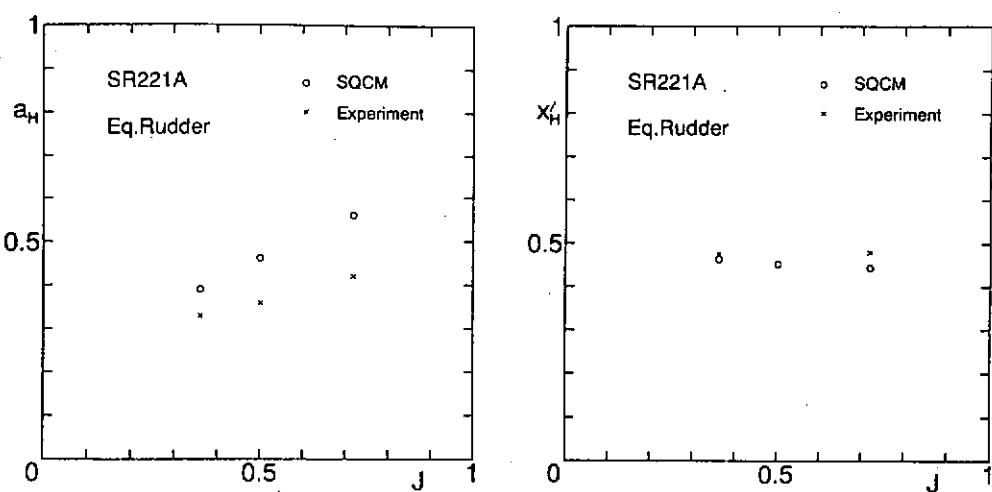


図3.4.4  $a_H$  と  $x'_H$  の比較 (SR221A船型)

### 3.5 操縦流体力に対するCFD利用の試み

#### 3.5.1 WISDAM-V法による操縦流体力の推定

操縦流体力に対するCFD利用の試みとして、WISDAM-V法による、斜航時および旋回時の流場計算をSR 221A、B、およびC船型に対して行った。WISDAM-V法は圧力および流速の基礎変数を用い、有限体積法に基づいたナビエ・ストークス方式(NS方式)のソルバーである。特徴として時間陽解法を用いている点が挙げられ、時間的に非定常な問題にも適用できるという長所を持つが、陰解法に比べると安定性が低く時間刻みを小さくとらなければならないという短所がある。また、各計算セルの面上にそれぞれの方向の流速成分を定義し、圧力はセル中心に定義するスタガード変数配置を採用している。なお、流速にはデカルト成分を使用している。

支配方式は以下の非圧縮性流体のNS方式および連続式である。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \operatorname{div} \{ p\mathbf{I} + \mathbf{T} \} = \mathbf{f} \quad (3.5.1)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = 0 \quad (3.5.2)$$

ここで、 $\mathbf{f}$ は外力項であり、 $\mathbf{T}$ は以下に定義される応力テンソルである。WISDAM-V法においてはMAC法のアルゴリズムを採用しているためあらかじめ圧力項を分離して表記してある。

$$\mathbf{T} = \mathbf{u}\mathbf{u} - \frac{1}{Re} \{ \operatorname{grad} \mathbf{u} + (\operatorname{grad} \mathbf{u})^T \} \quad (3.5.3)$$

式(3.5.1)と式(3.5.2)の各項の有限体積近似において、対流項には3次上流差分法、その他の項には2次中心差分法に相当する流束の内挿法を用いている。

式(3.5.1)の左辺を1次前進差分により差分近似することにより、以下の速度場の更新の式が得られる。

$$\mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{u}^n + \Delta t \cdot \operatorname{div} \mathbf{T} - \Delta t \cdot \nabla p^{n+1} \quad (3.5.4)$$

ただし、上付きの添え字nは時間ステップのレベルを指す。式(3.5.4)の発散をとることにより、以下のような圧力 $p^{n+1}$ についてのポアソン方程式が得られる。

$$\nabla^2 p^{n+1} = \frac{\nabla \cdot \{ \mathbf{u}^n + \Delta t \cdot (\operatorname{div} \mathbf{T}) \}}{\Delta t} \quad (3.5.5)$$

連立1次方程式の反復解法の一つであるSOR法を用いて、式(3.5.5)をとき、(n+1)番目の時間ステップの圧力場 $p^{n+1}$ が求められ、ついで、式(3.5.4)により(n+1)番目の時間ステップの速度場 $\mathbf{u}^{n+1}$ が求められる。さらに旋回のシミュレーション時には船体固定の座標系で旋回流を表現するために、遠心力とコリオリ力をN-S式の外力項として加える。旋回半径 $r_0$ 、旋回角速度 $\omega$ 、斜航角 $\beta$ で働く船体固定座標系o-x<sup>1</sup>x<sup>2</sup>x<sup>3</sup>上の点(x<sup>1</sup>, x<sup>2</sup>)の単位体積の流体に作用する遠心力およびコリオリ力は以下のように与えられる。

$$\mathbf{a}_{centrif} = \omega^2 \begin{pmatrix} r_p \cos \phi + r_0 \sin \beta \\ r_p \sin \phi + r_0 \cos \beta \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.5.6)$$

ただし、

$$\mathbf{a}_{\text{coriolis}} = -2\omega \begin{pmatrix} -u^2 \\ u^1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.5.7)$$

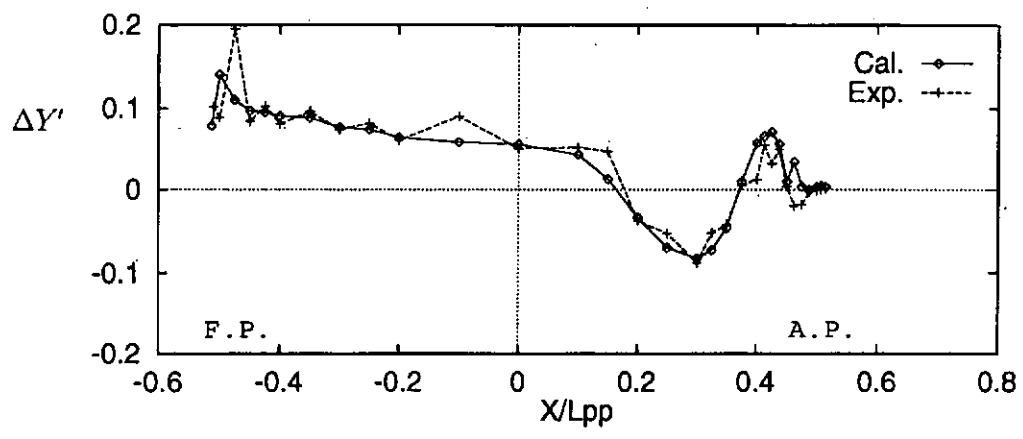
$$r_0 = \sqrt{(x^1)^2 + (x^2)^2} \quad (3.5.8)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{x^2}{x^1} \right) \quad (3.5.9)$$

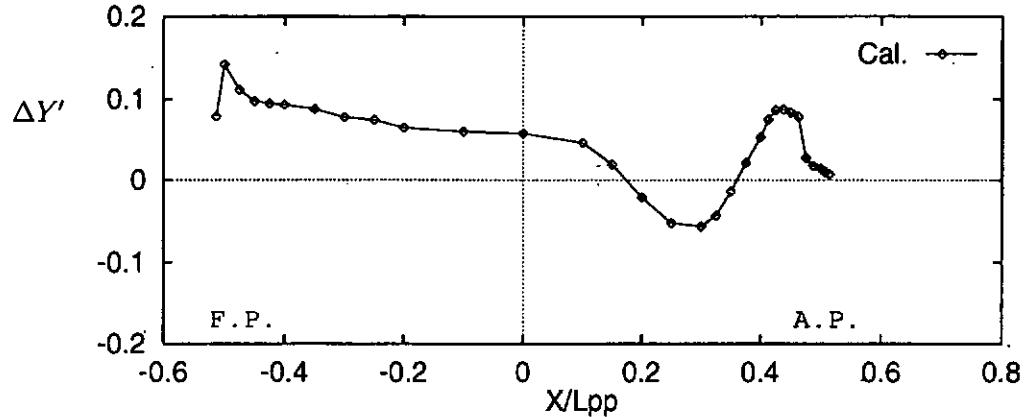
であり、 $(u^1, u^2)$  は点  $(x^1, x^2)$  における面内の流速である。

計算には、長手方向に 111、半径方向に 31、ガース方向に 61 の合計約 20 万点の格子を使い、主記憶 96 メガバイトを搭載したワークステーション (DEC Alpha Station 250) 上で 1 ケースあたり 2、3 日を要した。

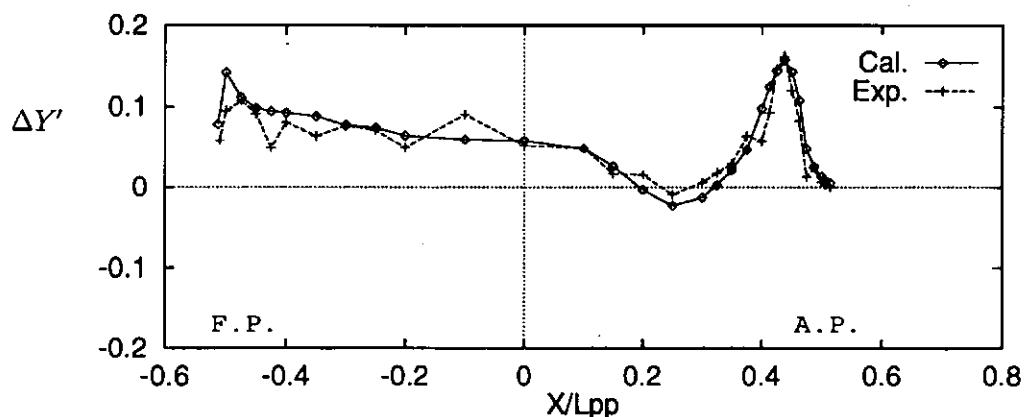
$r' = 0.2, \beta = 9^\circ$  の定常旋回の 1 ケースについて、図 3.5.1 に横力分布の実験による圧力積分値との比較、図 3.5.2 に A.P. 断面における縦渦成分  $\omega^1$  の分布の実験との比較を示す。横力の分布は、計算値と計測値を比較すると、両者はほとんど一致しており、本研究の方法が定常旋回中の流体力分布を良好な精度で推定できることを示している。また、渦度分布についても、渦の位置、大きさ、形において実験に非常によく一致していることが分かる。本研究で用いた粘性流の直接計算による数値解析手法は、剥離渦の位置や強さを人為的に与える必要がないため、このような複雑な流場及びそこから発生する流体力を高い精度で推定することができたものと考えられる。



SR221A



SR221C



SR221B

図3.5.1 横力分布の実験との比較( $\gamma' = 0.2, \beta = 9^\circ$ )

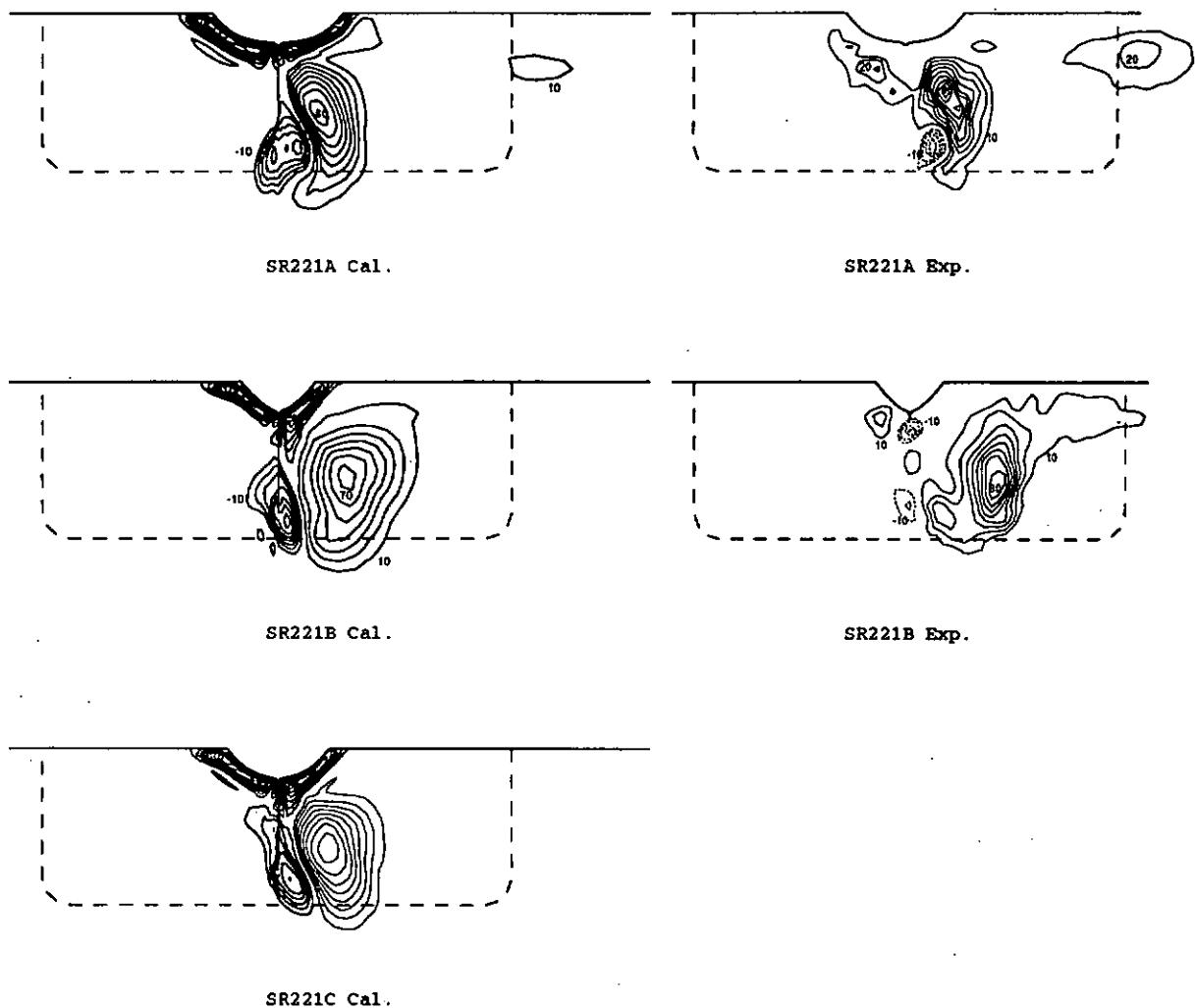


図3.5.2 A.P.断面における縦渦成分  $\omega^1$  の分布の実験との比較 ( $\gamma' = 0.2, \beta = 9^\circ$ )

### 3.5.2 NICEコードを用いた斜航流計算

#### (a) NICEコードの概要

NICEコード (Navier-Stokes Solver Using Implicit Cell-Centered Formulation)は、船研において開発された、船体まわり流れに関するCFDコードである。連続の式に圧力の時間微分項を人工的に付加した擬似圧縮法を用いており、時間積分に陰解法、空間差分に前処理 (MUSCL)型3次風上差分を用いている。乱流モデルはBaldwin-Lomax モデル（以下、旧BLモデル）を用いている。BLモデルは薄い境界層の実験データを基にチューニングされているため、肥大船の船尾縦渦のような強い3次元性を十分に表現できないという問題点があり、SR222 委員会で改良が行われ、SR222 修正BLモデル（以下新BLモデル）としてNICEコードに組み込まれた。

#### (b) 斜航流計算

自由表面は上下対象面として近似し (double modelの仮定)、模型実験と同一のレイノルズ数 ( $R_\infty = 2.835 \times 10^6$ ) で、斜航状態のSR221A、B 船型まわりの流れを計算した。図 3.5.2.1に、斜航角  $\beta = 9^\circ$  におけるSR221A船型のAP断面の伴流分布を示す。新BLモデルの利用により、実験との一致度が向上している。図 3.5.2.2に、斜航角  $\beta = 9^\circ$  における2船型の横力分布を示す。座標xは、PPで-0.5、APで0.5 である。A船型では旧BLモデルの方が一致度が高く、B船型では、その逆である。B船型がU型断面をもち、強い船尾縦渦を発生することを考えると、新BLモデルは船尾縦渦を過大評価していると思われる。

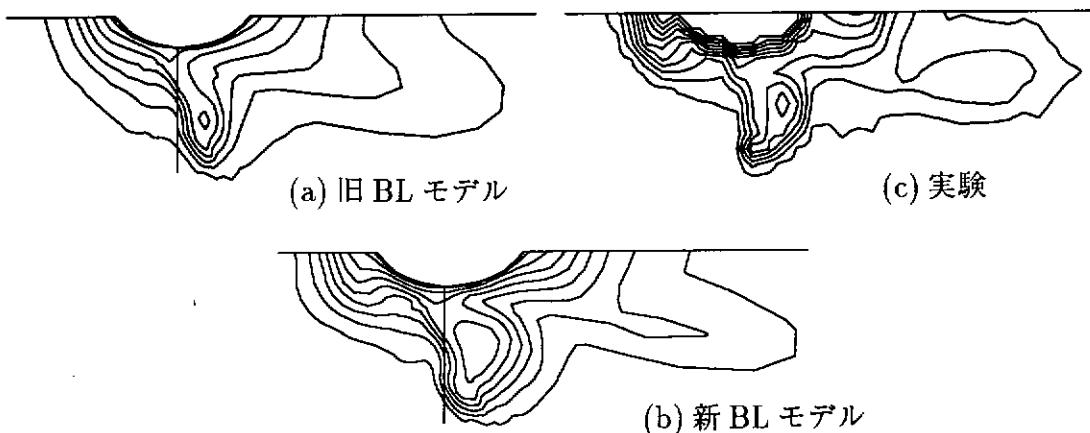


図3.5.2.1 SR221A船型の伴流分布  
(斜航角  $\beta = 9^\circ$  )

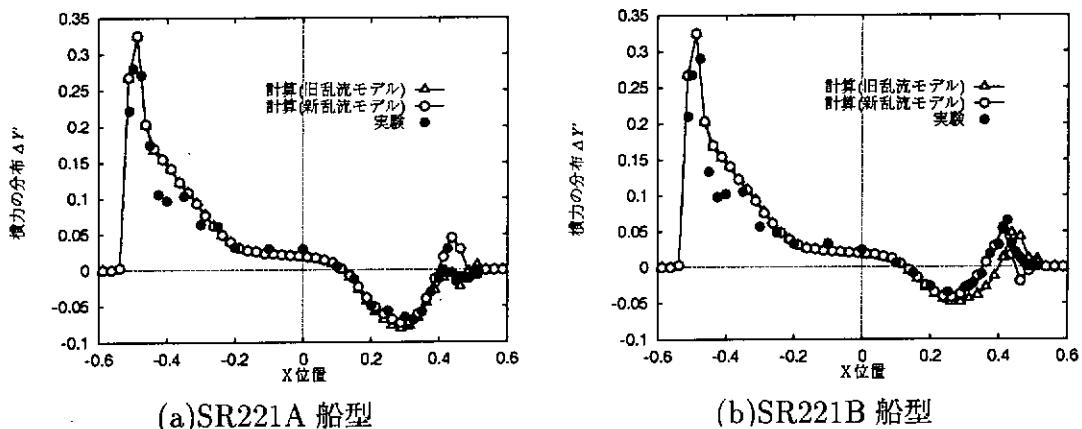


図3.5.2.2 横力の分布(斜航角  $\beta = 9^\circ$  )

### 3.6 データベースを用いた操縦性能推定法

船型主要目のような初期設計時に用いられるパラメタを用いて操縦流体力、さらには操縦性能をおよそ把握できれば、船型設計上は大変に有利になるから、本研究では拘束模型試験実績のデータベースから操縦性能を推定する試みを行った。操縦性能を推定するには船体に作用する流体力を表す線形・非線形の微係数と共に、船体・プロペラ・舵間の干渉を表すパラメータの推定が必要になるが、船尾フレームライン形状の影響を含めてデータベースから操縦流体力を求める試みとして、まず線形微係数を対象にした。とりあえずこの線形項がわかれば、船型と針路安定性の関係が把握できるからである。

#### (1) 解析に使用したデータベース

この解析に供する操縦流体力のデータベースとして、本研究で拘束模型試験を実施したA、B、C船型、およびそれらを変形した6隻、計9隻の拘束模型試験結果を使用した。これらの試験結果は共に同一の試験水槽、試験装置、試験法、解析法を用いているから、求められた微係数の値は基本的に船型の違いを反映していると考えることができる。

その他、参加各機関から手持ちの拘束操縦性試験結果も持ち寄り、解析に供した。ただし、このデータの場合、計測されたデータから線形微係数を求める際、可能な限り共通した方法で解析を行うこととしたが、試験の方法、装置等は各機関の方法によるので、必ずしも条件が統一されていない。本来、試験法等の影響は少ないはずであるが、これらのデータを用いて解析した結果は相当にばらつくことが判明し、したがって、今回は上記の9隻のデータから推定式を求めることとし、他のデータは結果的一般性を検証する目的として活用した。

#### (2) 船型を表すパラメータ

線形微係数の推定式の説明変数となるパラメータは、まず主要目であるが、その他に船尾フレームラインの形状を表すパラメータ、特に船尾フレームライン形状を表すパラメータを決め、解析に使用した。このパラメータとして、採用したのは、従来から推進性能の分野でよく使用される $\sigma_a [= (1 - C_{w_0}) / (1 - C_{P_0})]$ である。この他に、操縦流体力に影響を及ぼすと推測されるS.S.1とS.S.2の断面の上面の面積と下面の面積の比( $S_u / S_t$ )<sub>1</sub>、<sub>2</sub>やその断面積を水線幅と喫水で除して得られるパラメータ等も検討に加えた。

#### (3) 線形微係数推定式の改良

##### (a) 井上の推定式にフレームライン影響を取り入れる方法

井上らは実用船型の拘束試験結果を整理すると共に、小縦横比翼理論やcross flow theoryに基づく理論的考察から操縦流体力を推定する次式を提案した。

$$\begin{aligned} Y'_\beta &= \pi k/2 + 1.4(C_b B/L) \\ Y'_r &= \pi k/4 \\ N'_\beta &= k \\ N'_r &= -(0.54k - k^2) \end{aligned} \quad (3.6.1)$$

ただし、 $k = 2d/L$ である。上式は従来から幅広く使用されており、ここでは上式を基礎にして主要目の影響を反映し、それに船尾フレームラインの影響を取り入れる形で推定を試みた。まず、井上式で9船型の微係数を推定した結果を縦軸にし、拘束模型試験解析結果に対して図3.6.1に示す。この比較から横力微係数の近似に難点があることがわかり改善を試みた。既に図3.2.3.2.4に示したよう

に、計測された微係数を井上式で除して、前述のフレームライン形状を表すパラメータ  $\sigma a$  で整理して見ると、これらはいずれも  $\sigma a$  の影響を簡単な 1 次式で表現でき、次の微係数推定式を得た。

$$\begin{aligned} Y'_\beta &= \{\pi k/2 + 1.4(CbB/L)\} (a_{11}\sigma a + a_{10}) \\ Y'_r &= (\pi k/4)(b_{11}\sigma a + b_{10}) \\ N'_\beta &= k(c_{11}\sigma a + c_{10}) \\ N'_r &= -(0.54k - k^2)(d_{11}\sigma a + d_{10}) \end{aligned} \quad (3.6.2)$$

この式による近似結果を図 3.6.2 に示すが、相当な改善が見られ、フレームライン形状を考慮することの重要性が明らかとなった。

#### (b) 主要目と $\sigma a$ に対するより一般的な回帰式

井上式の理論的背景を考慮して、井上式の主要目を表すパラメータと  $\sigma a$  を種々に組み合わせ、式の簡略さも考慮しながらより推定精度の高い回帰式を選びだし、次の推定式を得た。

$$\begin{aligned} Y'_\beta &= a_{22}(\pi k/2) + a_{21}(CbB/L) + a_{20}\sigma a \\ Y'_r &= (\pi k/4)(b_{21}\sigma a + b_{20}) \\ N'_\beta &= k(c_{21}\sigma a + c_{20}) \\ N'_r &= -0.54k(d_{22}\sigma a + d_{21}) + d_{20}k^2 \end{aligned} \quad (3.6.3)$$

この推定式による推定の程度を図 3.6.3 に示すが、井上式にフレームライン形状の影響を修正する一次式を組み合わせた (3.6.2) 式に比べ、近似の程度は更に改善されている。

以上述べた 2 種類の推定式いずれも、船尾のフレームライン形状の操縦流体力に及ぼす影響をパラメータ  $\sigma a$  で表現すると、簡単な式の割には精度よく、線形微係数の推定ができることがわかった。今後、データを蓄積して、この方向で推定式の改善を行うことが課題となろう。現在の時点ではデータも限られているから、推定精度の多少の良否から優劣を判断するのは尚早で、実績のある井上式で主要目の影響を考慮して、これにフレームライン影響を  $\sigma a$  の一次式で簡単に取り入れるという (3.6.2) 式が目下の段階では実用的と思われる。

#### (4) 改良推定式による操縦性能の推定

ここでは船体に作用する流体力の線形項に限定して検討をしてきたから、この結果から操縦性能全般の推定は困難であるが、比較的小さな操縦運動の範囲であれば、この流体力推定法の改善が操縦性能推定にどの程度効果があるかを判断できる。本研究の当初、船体に作用する流体力は主要目のみの関数として (3.6.1) 式で推定してきたから、図 4.1 に示すように針路安定性の程度が大幅に異なる A、B、C の 3 船型の操縦性能はほとんど同じに推定されていた。ここで、線形微係数に改良された (3.6.2) 式を用いた結果を図 4.2 に示す。船尾フレームライン形状の違いによる針路安定性の変化がループ幅の形で巧く推定でき、本研究の成果として、初期設計の段階で実用船型の針路安定性を推定することが可能になったと結論できる。

今後、この成果を操縦性能全般の推定に活用するには船体流体力の非線形項や干渉流体力についてもデータベースの解析を行い、推定法を確立することが必要になる。また、ここで示した方法は幅広い範囲の船型の流体力特性をわずかなパラメータで推定するという考え方であるが、船型を幾つかのタイプ

シップに分類して、適用範囲を細分化するとか、あるいは一部理論計算法を修正の道具として利用する方法等を用いれば、データベースを用いた操縦性能推定法は更に有用になると期待できる。

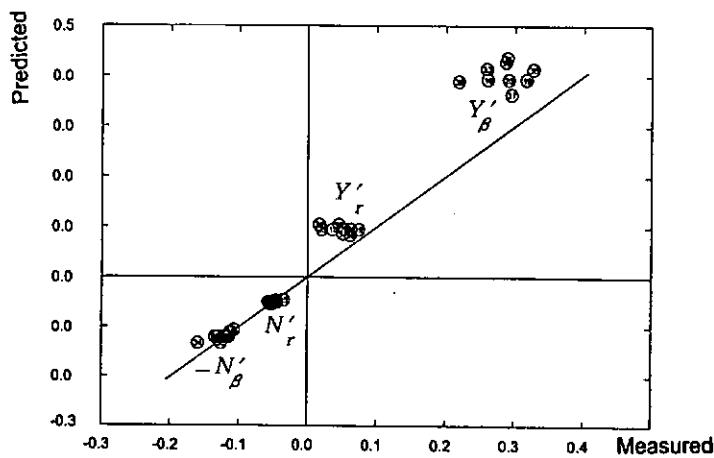


図3.6.1 井上式(3.6.1式)による線形微係数の推定と計測値との比較

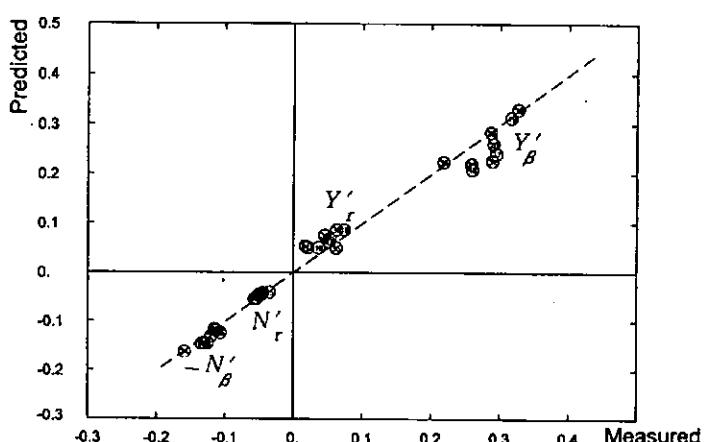


図3.6.2 改良された(3.6.2式)による推定と計測値との比較

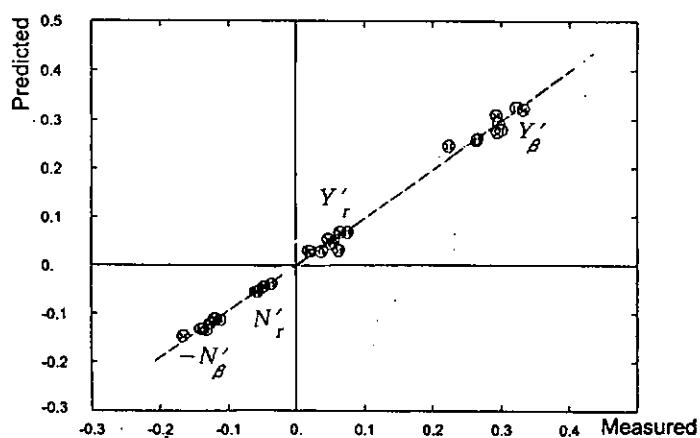


図3.6.3 改良された(3.6.3式)による推定と計測値との比較

## 4 成 果 の ま と め

### (1) 模型試験

操縦運動およびこれを計算する流体力の推定精度検討に必要なデータを得るために、同一主要目で船尾フレームライン形状が異なる3隻のV L C C船型を中心に、自由航走模型による操縦性能測定試験、拘束模型による流体力測定試験、および圧力・流場測定試験を行った。

自由航走模型試験においては、保針性能に3船型の差が強く現れ、船尾フレームライン形状がV型の船型では針路安定性が著しく低下することが判明した。拘束模型試験においては、旋回および斜航運動時の船体に働く流体力、船体・プロペラ・舵間に干渉について、船型による違いが数値として明確に得られた。また、圧力・流場の計測結果からは、船尾フレームライン形状の違いが船尾付近の流れ、特に縦渦の強さを変え、船尾の圧力分布をも変えることが判明し、これら一連の実験結果から、船尾フレームライン形状の違いが、船の針路安定性に大きく影響する過程が明らかとなった。

これらの実験で得られたデータと知見は、以下の船舶に働く流体力の理論計算による推定法とデータベースに基づく推定法の検討の他、C F Dによる高精度の流場推定法の検討に用いた。

### (2) 流体力の理論推定

上記の模型試験結果を基に、操縦運動時に船舶に作用する流体力や船体・プロペラ・舵間に生じる干渉力、および船体まわりの流場を理論的に推定する方法について、その推定精度を向上させる目的で理論計算法の改良を重ねた。その結果、船体に作用する流体力に関しては、細長体理論に基づく改良した計算法によって、船尾フレームライン形状の影響を定量的に取り入れることが可能となり、計算結果は実験値と良い一致を示した。また、船体・プロペラ・舵間に生じる干渉力については、船体と舵については揚力体理論、プロペラについては簡易プロペラ理論を適用した新しい計算法によって、船体に作用する舵の干渉力およびその作用位置等が実用的精度で推定できることが明らかとなった。さらに、C F Dを利用した船体まわりの流場の詳細な計算法に関しても、操縦運動時の複雑な船体まわりの流場や圧力が実験値と良い一致が得られ、この種の数値計算法が今後、操縦流体力の推定に活用できる見通しが得られた。

### (3) データベースによる推定

船舶の初期計画段階では、操縦性能を簡単に推定する手法も必要である。こうした観点から、複雑な数値計算を一切行わず簡単な数式で操縦流体力を推定する手法について検討を行った。具体的には前述の拘束模型試験結果を主なデータベースとして、船体に作用する流体力の線形項の推定方法について検討を重ねた。その結果、主要目の影響は従来の井上式で表現し、船尾フレームライン形状の影響は、船尾形状を表すパラメータ $\sigma_a$ の1次式で修正するという簡単な推定式を得た。また、船尾形状を表すその他のパラメータや種々の近似式の可能性についても検討した結果、従来は全く考慮できなかった船尾フレームライン形状の影響が反映され、線形流体力の推定精度が大幅に改善できることが明らかとなった。

以上の成果を踏まえて、同一主要目で船尾フレームライン形状が異なるV L C C 3船型（A、B、C船型）の操縦運動の推定を試みた。その一例として、針路安定性の違いが明瞭に判別できる定常旋回特性（通常スパイラル特性）を示す。従来の操縦運動の推定結果は図4.1に示すように、同一主要目であるためこれら3船型で大きな違いが認められないが、図4.2に示すように、船尾フレームラインの違いを取り入れることによって、スパイラル特性に現れるループ幅が模型試験結果と同程度に推定でき、推定精度を格段に向上させることができた。

ただし、本研究では主として針路安定性に主眼を置き、比較的操縦運動の小さい範囲に絞って研究を進めて来た。したがって、流体力の非線形性が強い大舵角の操縦運動等に適用するには、まだ幾つか解決すべき問題が残されており、操縦運動全般の推定精度を向上させるには、今後更に研究を進める必要があると思われる。

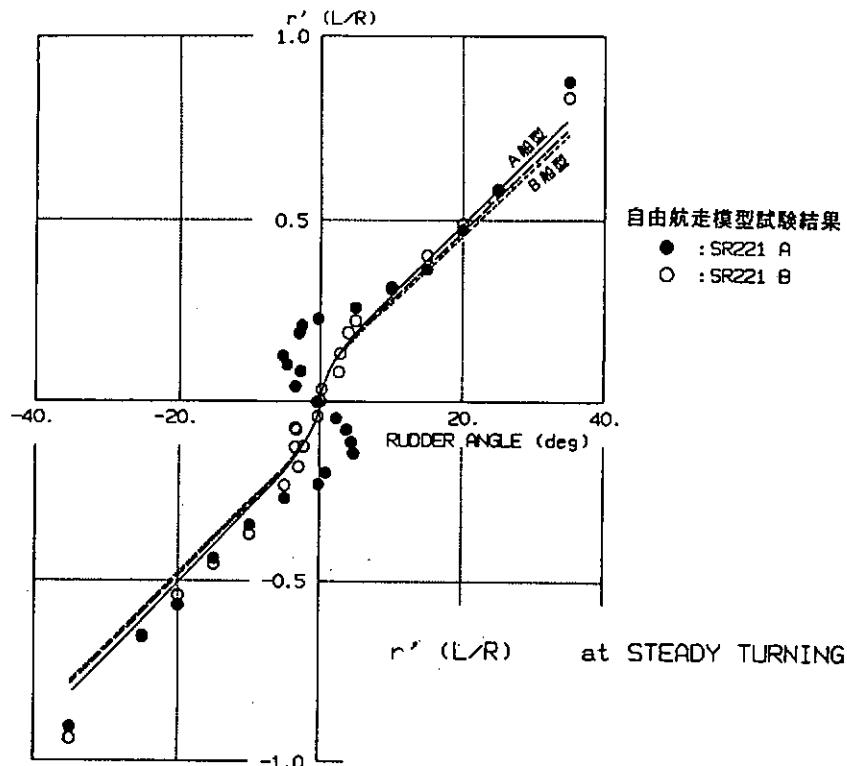


図4.1 従来手法によるスパイラル特性の推定結果

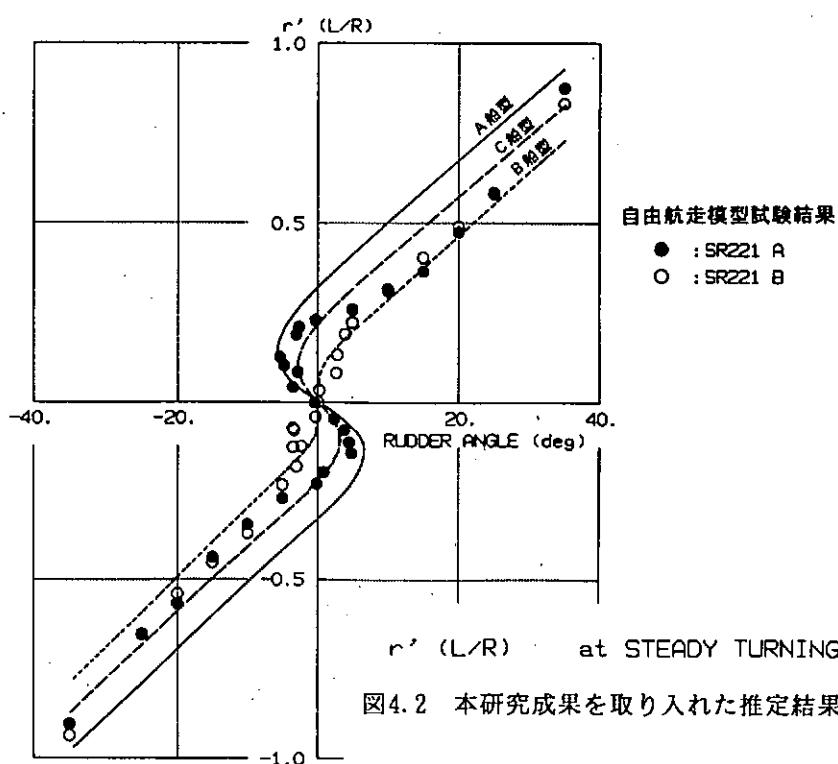


図4.2 本研究成果を取り入れた推定結果

図4.2 本研究成果を取り入れた推定結果

## 5 成 果 の 活 用 等

ここでは、本研究で得られた成果の新造船計画や基本設計段階における活用について考えてみたい。本研究では、フレームライン等細かな船型要素を考慮した操縦性能予測技術の確立が大きな目標の一つであり、すでに述べたようにこの目標に対して大きく前進することができた。本研究の意義は、「船尾形状のU型、V型に代表されるフレームライン形状が操縦性能に大きな影響を及ぼす」、逆に言えば、「フレームラインによって操縦性能をコントロールできる可能性がある」という認識を持ち得た点に、むしろあったのではないかと考えられる。すなわち、「抵抗・推進性能だけでなく操縦性能も考慮した船型設計」という従来からの命題が、本研究を通してかなり現実性を持ってきたと考えられるからである。

その理由の1つは、操縦流体力の理論計算法が実用的なレベルに近づいたことである。本研究で検討した細長体理論による方法およびCFDによる方法は、いずれも模型実験で得られたフレームラインの操縦流体力に及ぼす影響を良く説明しており、少なくとも船型間の針路安定性の比較等には十分な実用性を有していると考えられる。細長体理論による方法は、入力データ作成の簡便さや計算時間の短さが特長と考えられ、設計段階での針路安定性能のチェック等に対する実用的なツールとして活用されることとなろう。一方、CFDによる方法は、抵抗・推進性能と操縦性能を同じ土俵で評価できるという点において特に効力を発揮できるものと思われ、船型開発等の局面における両性能間のトレード・オフの問題を含めた性能評価用ツールとして今後活用されることとなろう。いずれの方法にしても、これらのツールをより有効に活用していくためには、線図システムとの接続等による入力データ作成の効率化も重要な課題にあると思われる。

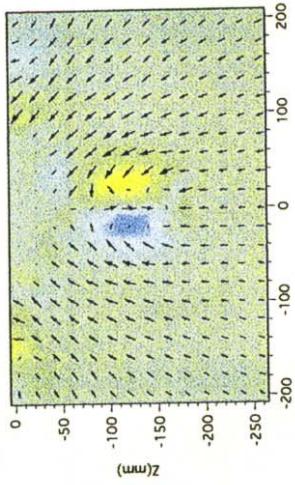
また、本研究で得られた各種模型試験データも、肥大船の設計や船型開発を進めていく上で、重要な指針や方向性を与えるものと考えられる。本研究では模型試験結果をベースに、船尾フレーム形状を代表するパラメータにより線形微係数を推定する方法を提案したが、この方法は設計の初期段階でおよその操縦性能（主として針路安定性能）をチェックする方法として利用できるだけでなく、抵抗・推進性能と操縦性能を両立させる船型設計を行う上で主要目や船型パラメータの選定に利用することも可能である。一方、操縦運動中の船体まわりの流場に関する詳細な計測データが得られ、船型と操縦性能の関係を物理的に解明していく手がかりとして、またより優れた理論計算法の開発にその検証データとして、今後幅広く利用されるものと期待される。

## 6 緒 言

新造船計画時に操縦性能を的確に予測するには、その船に働く操縦流体力を性格に推定する必要がある。このため本研究では、船体に働く流体力および船体・プロペラ・舵の流体力的干渉効果の推定法の確立と、船型パラメータに基づく流体力微係数の予測を可能とするデータベースの整備を、主な柱として3ヵ年の研究を行ってきた。その結果、前章にまとめられたように、当面の目標をほぼ達成する成果をあげることができた。とはいえ、より正確には、フレームライン等の船型の相違を考慮に入れた操縦性能の予測を可能にする端緒をひらいたというべきであり、操縦流体力の定量的予測の精度向上には、今後も予測法の一層の改善を図って行く必要がある。また、船型の変化は日進月歩であり、これからも引き続き新しい船型が開発されると期待される。そのような新船型に対しても適用可能な操縦性予測法の確立のために、今後とも不断の努力を行わねばならない。

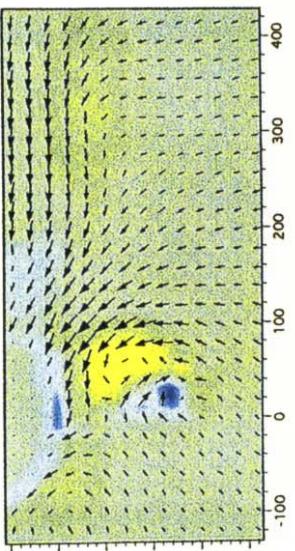
斜航角

$\beta = 0^\circ$



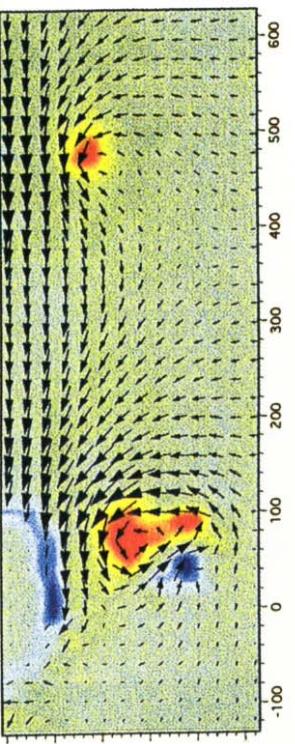
SR221A

$\beta = 9^\circ$



SR221C

$\beta = 18^\circ$



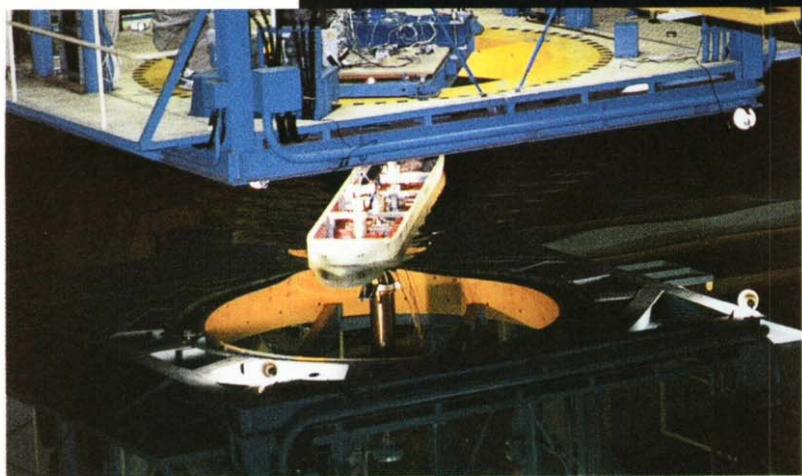
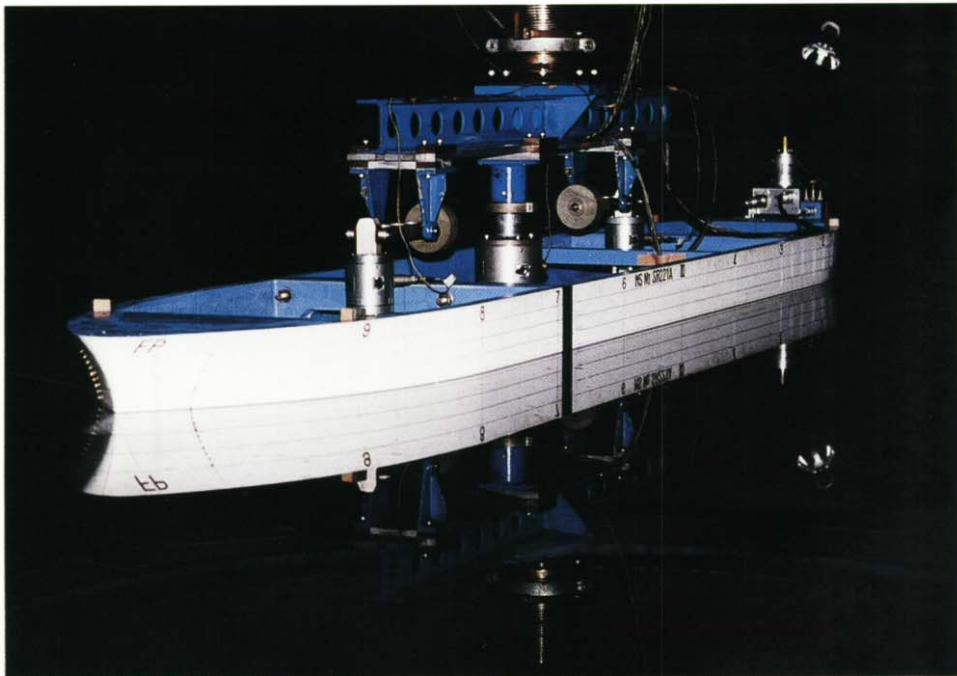
SR221B

斜航状態での船尾流場計測(A, P. 位置)

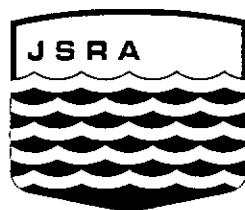
$\omega' = \omega L / U$

→  $|U|$

A color bar indicating the ratio  $\omega' = \omega L / U$ . The scale ranges from -100 (blue) to 100 (red), with intermediate ticks at -50, 0, 50, and 100. A black arrow points to the right, labeled  $|U|$ , indicating the direction of the free-stream velocity.



拘束模型試験



The Shipbuilding Research Association of Japan