

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

大型肥大船船尾流場推定法の高度化

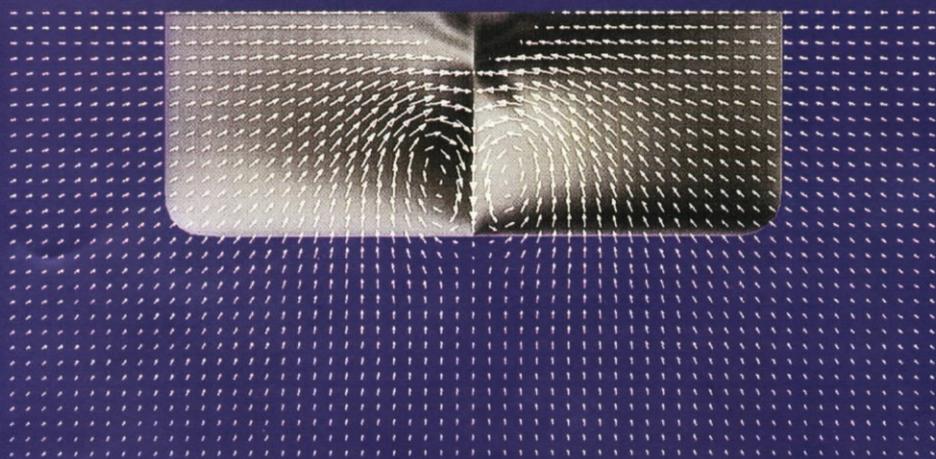
成果報告書

(第222研究部会)

平成8年3月

社 団 法 人
日 本 造 船 研 究 協 会

Prop. Position



Velocity Vector Dist. (x-dir. scan)

SR196_C

口絵2 SR196C船型 プロペラ面内流速分布(基礎粘性流場推定法:NICE法)
一対の船尾縦渦が形成されている。(Rn=1.9×10⁶)

は し が き

本報告書は、日本財団補助事業として、平成5年度から3ヵ年計画で実施した日本造船研究協会第222研究部会「大型肥大船船尾流場推定法の高度化」の研究成果をとりまとめたものである。

第222研究部会委員名簿

(敬称略、順不同)

部会長	梶谷 尚	(熊本工業大学 (H6.4~)、東京大学 (~H6.3))
副部長	北川 弘光	(船舶技術研究所) (H5.4~H5.6)
代表幹事	野沢 和男	(川崎重工業)
委員	山口 眞裕	(船舶技術研究所) (H5.6~)
	宮田 秀明	(東京大学)
	中武 一明	(九州大学)
	鈴木 敏夫	(大阪大学)
	茂里 一紘	(広島大学)
	姫野 洋司	(大阪府立大学)
	奥野 武俊	(大阪府立大学)
	池畑 光尚	(横浜国立大学)
	戸田 保幸	(神戸商船大学)
	児玉 良明	(船舶技術研究所)
	船野 功	(川崎重工業)
	笠原 良和	(NKK)
	永松 哲郎	(三菱重工業)
	日下 祐三	(三井造船昭島研究所)
	佐々木 紀幸	(住友重機械工業)
	長浜 光泰	(日立造船)
	増子 章	(石川島播磨重工業)
オブザーバ	秋元 博路	(東京大学) (H6.4~H7.3)

第222研究部会幹事会名簿

(敬称略、順不同)

部会長	梶谷 尚	(熊本工業大学 (H6.4~)、東京大学 (~H6.3))
副部長	北川 弘光	(船舶技術研究所) (H5.4~H5.6)
主査	野沢 和男	(川崎重工業)
委員	山口 眞裕	(船舶技術研究所) (H5.6~)
	宮田 秀明	(東京大学)
	鈴木 敏夫	(大阪大学)
	茂里 一紘	(広島大学)

児玉良明 (船舶技術研究所)
永松哲郎 (三菱重工業)

第222研究部会ワーキンググループ名簿

(敬称略、順不同)

主 査 委 員	野沢和男 (川崎重工業)
	宮田秀明 (東京大学)
	川村隆文 (東京大学) (H7.7~)
	金井亮浩 (東京大学) (H7.4~H7.7)
	朱明 (東京大学) (H5.4~H6.3)
	鈴木敏夫 (大阪大学)
	茂里一紘 (広島大学)
	土井康明 (広島大学)
	奥野武俊 (大阪府立大学)
	塩谷茂明 (長崎大学)
	戸田保幸 (神戸商船大学)
	児玉良明 (船舶技術研究所)
	日夏宗彦 (船舶技術研究所)
	日野孝則 (船舶技術研究所) (H6.4~)
	船野功 (川崎重工業)
	増田聖始 (NKK) (H7.4~)
	島崎克教 (NKK) (H5.4~H7.3)
	永松哲郎 (三菱重工業)
	石川暁 (三菱重工業)
	福田和廣 (三井造船昭島研究所)
江口辰哉 (三井造船昭島研究所)	
高井通雄 (住友重機械工業)	
長浜光泰 (日立造船)	
増子章 (石川島播磨重工業)	
オブザーバ	秋元博路 (東京大学) (H6.4~H7.3)
討議参加者	光武英生 (東京大学)
	松村清重 (大阪大学)
	金井亮浩 (東京大学)
	田原裕介 (大阪府立大学)
	村上恭二 (住友重機械工業)

目 次

1. 要 約	1
2. 研究の目的	6
3. 研究の目標	8
4. 研究の内容	9
5. 得られた成果	13
5.1 基礎粘性流場推定法	13
5.1.1 はじめに	13
5.1.2 数値計算法	13
5.1.3 模型試験	18
5.1.4 流場推定法構築・評価	20
5.2 造波粘性流場推定法	27
5.2.1 はじめに	27
5.2.2 数値計算法	27
5.2.3 模型試験	27
5.2.4 流場推定法構築・評価	28
5.3 自航時粘性流場推定法	32
5.3.1 はじめに	32
5.3.2 数値計算法	32
5.3.3 流場推定法構築・評価	33
5.4 将来に向けた研究	36
5.4.1 高次乱流モデル	36
5.4.2 格子生成法	36
5.4.3 碎波モデル	37
5.4.4 可視化情報定量化	37
5.5 成 果	38
6. 成果の活用	39
7. 結 言	41

1 要 約

研究の目的

我国造船業の国際競争力を増強、発展させるには、船舶の性能向上・設計の高効率化・新技術開発の拡大などがある。船舶性能設計分野では、従来からの模型試験中心の船型設計法から理論・実験に支援された計算を中核とする新しい船型計画法への転換が必要である。これをブレイクスルーする新しく高精度な方法として期待されたものが数値流体力学（CFD）を中核とする流場推定法の構築である。

本SR222「大型肥大船船尾流場推定法の高度化」は上述の要請に基づき、数値計算技術、計測技術、コンピュータ・CG技術の3つの高度先端技術を有効に駆使して従来達成し得なかった複雑な肥大船船尾粘性流場が解明できる高精度の実用的推定法を開発することを目的とし、これを「流場解析的設計計画法」、即ち、船体周囲流場を計算しCG技術を駆使し視覚化して多面的角度から対話的に船型改良が可能となる新しい船型計画法の構築に役立てようとするものである。

研究の目標

推進性能の主な設計因子として、①抵抗要素、②効率要素、起振力の見地から③プロペラ位置伴流分布があるが、この現象を支配する船体周囲流場が高精度で推定できれば上記の目的が達成できる。本SRでは、下記3種類の流場推定法の開発を研究目的とした。

- (1) 基礎粘性流場推定法：2重模型船流れの仮定（自由表面を固定壁と仮定し波の発生を考慮しない）で計算する船体周囲の基礎的粘性流場
- (2) 造波粘性流場推定法：(1)に造波計算の機能を付加、造波特性を含めた流場計算
- (3) 自航時粘性流場推定法：(1)にプロペラの影響を付加、自航状態をシュミレートする

RANS（レイノルズ平均ナビエ・ストークス）方程式を差分法で解く。実用的計算法を目指して、高精度／適応性／簡便な計算システム、短い計算時間（CPU）（EWS：1日、スーパーコンピュータ：1H程度）、設計情報の豊富なポスト処理法を考慮した。

研究の内容

船尾粘性流場の高精度推定法を目指し下記3つの研究を相互に関連させながら進めた。

- ① 要素技術高度化：・乱流モデルの研究　・自航時粘性流場推定法の研究
・将来に向けた研究：砕波、高精度格子生成法、可視化情報定量化
- ② 実用的計算法：・基礎粘性流場推定法構築：
計算コード／格子生成法／乱流モデルの改良
適応性検討による推定精度向上（流場、抵抗、縦渦、伴流）
・造波粘性流場推定法構築：波／流場／抵抗の計算法、改良
・CG・アニメによる後処理技術、設計パラメータの表示法検討
- ③ 模型試験：・乱流計測法・解析法（風洞試験／3次元熱線流速計）
・レイノルズ応力分布の計測／解析／乱流モデル改良・評価へ
・造波流場の計測：造波粘性流場計算評価用
- ④ 流場推定法総括：・設計応用計算・評価・まとめ ……→ 構築

得られた成果

1.1 基礎粘性流場推定法構築

(1) 位置付け

本推定法は、波の発生を考慮しない状態で粘性流場の高精度計算に着目して船体周囲流場を支配する基礎流場を数値的に解くことを目的とする。自由表面を持つ水上船は、波を起こし、プロペラの作用を受けて航走するから、本来はこれらを全て考慮して解くのが正統であるが、複雑で、かつ数値計算上の問題も残されているため、正面から一度に取り組むのは非効率的である。肥大船では粘性抵抗が全抵抗の大部分を占めており、この解明が最も重要であることを考え、まず、波の影響をとりあえず無視した基礎粘性流場に集中して計算法を確立する。これを基盤として波の影響（造波粘性流場）とプロペラ作用の影響（自航時粘性流場）の研究を行った。

(2) 数値計算法

船体周囲流場を支配するRANS方程式を差分法で解く。推定法構築の手順としては

- (a) NS方程式の数値解法（NSコード）の作成
- (b) グリッド生成法
- (c) 乱流モデルの選定・改良
- (d) Post処理法
- (e) 計算法構築
- (d) 適応性検討・評価？ ……→ 繰り返し研究へ

- ・NSコードとしてNICE法とWISDAM法を選定、推定法として改良・開発した。
- ・パラメータスタディ：数値計算は沢山の近似から成り立つ。第1年度にこの構成パラメータについてEWS/スーパーコンピュータによる膨大な組み合わせ計算を実施、船型追従性を調べ、改良すべき課題を抽出した。

・改良課題

- (a) 乱流モデル改良：船尾流場の推定精度向上（縦渦、伴流のくびれが推定不可）
- (b) 格子生成法改良：スターンバルブなど最近の船型への適用
- (c) NSコード改良：ロバストネス
- (d) Post処理法：設計情報の表現・CG表示法

(3) 模型試験

乱流モデルの改良の為、模型船のレイノルズ応力分布の計測が必要。計算結果と比較、その差違を流体力学的解釈を加えてモデルの改良を図る。肥大船尾の詳細な計測例は世界的に殆ど皆無であり、計測法解析法を検討し高精度なデータを取得、乱流モデルの改良に活用すると共に、今後のCFD計算評価用データが構築できた。

- ・模型船：2隻 SR196A/SR196C 船型 寸法： $L_{ppm} = 3.0m$ 、風洞試験
実船想定 ($L_{pp} \times B \times d = 320.0m \times 53.3m \times 19.3m$, $C_b = 0.802$)
- ・実験計測：3次元熱線流速計/トラバース装置、計測断面：SS1, 1/2, 1/8, Prop.
平均流速/レイノルズ応力分布 ……→ 動粘性係数などの導出

(4) 流場推定法構築

乱流モデル、格子生成法、NSコード、Post処理法の改良を実施、多種類の船型へ応用し、全体的にまとめて流場推定法を構築した。

- (a) 乱流モデル：乱流計測結果を基にチューニングを行い、3次元影響や圧力勾配影響を考慮した強制減衰・圧力勾配修正付BLモデルを開発。船体抵抗、圧力分布、船尾渦、伴流分布等の推定精度が格段に向上した。
- (b) 格子生成法：船首・船尾バルブを持つ肥大船型に適用できる実用的生成コード開発。
- (c) Post処理法：船舶設計情報としてのCG表示を研究し作成した。

(5) 評価

- ・基礎流場推定法を多種類の肥大船型（船尾肋骨線シリーズ船型、スターンバルブ船型、超肥大船型）に応用して適応性検討を行い、船体周囲流場、圧力分布、伴流分布、公称伴流値、粘性抵抗とその成分等の計算結果を実験結果と比較し、推定精度と船型追従性を確認した。また、今後の応用に当たっての留意すべき点（格子依存性など）を抽出した。
- ・所期の目標であった船尾粘性流場に関する実用的推定法を構築することが出来た。

1.2 造波粘性流場推定法

- ・肥大船の造る波は非線形性が強く、船尾粘性流場にも影響を与える。船尾流場や造波抵抗の推定精度向上のためには自由表面を考慮した粘性流場推定法の開発が必要である。基礎粘性流場推定法を基盤として4つの計算コード（NICE, WISDAM-V, WISDAM-VI, FRESH）について流場推定法の開発を行った。
- ・肥大線型にこれらの計算法を適用し、計測した波紋と比較、NSコードと格子生成法の両面から繰り返し計算コードの改良を行った。
- ・応用計算として、多種類の肥大船の船体周囲の波紋、船側波形、全抵抗とその成分について検証を行い、満足する結果を得た。
- ・従来、計算が不可能であった肥大船の造波粘性流場の計算法を開発することができた。しかし、水面近傍の格子が造波の影響を受けることがあり、格子依存性などの検討が残される。満載状態については計算実績を増やし幅広い適応性検討と評価を加えながら実用化に向けて改良を加える必要がある。バラスト状態については開発課題が残されている。

1.3 自航時粘性流場推定法

- ・船尾粘性流場は自航性能とも密接な関係があるので肥大船の性能予測のためにはプロペラ作動時の船尾粘性流を精度良く推定する必要があるが、高精度計算法がなかった。
- ・基礎粘性流場推定法に無限翼数理論による流体力をBody Forceとして組み込んだ自航時粘性流場推定法を開発、肥大船型について適応性計算を行い、推定法を構築した。
- ・多種類の船型に応用して実験結果との検証を行い、自航時の船尾粘性流場特性が精度良く推定できること、船型改良の指針として役立つことが分かった。
- ・今後、さらに計算実績を増やし、定量的精度を向上させるための改良を加える事により有効なツールとなることが明らかにされた。

1.4 将来に向けた研究

- ・高次乱流モデル（1方程式、2方程式）、格子生成法（局所格子細分化／非構造格子）、砕波計算法（砕波現象のモデル化）、可視化情報定量化（非接触計測法）の研究を実施。

1.5 成果

(1) 「流場解析的船型計画法」を目指した流場推定法の構築：

(a) 流場推定法開発

NICE法、WISDAM法を中核とした下記3つの推定法を開発した。

- ① 基礎粘性流場推定法
- ② 造波粘性流場推定法
- ③ 自航時粘性流場推定法

(b) 設計への応用法の開発：

多種類の船型に応用した適応性計算により、推定精度を評価、設計指針に有効なポスト処理法を作成、「流場解析的船型計画法」に向けた流場推定法を構築。

(c) 乱流データベースの構築：

レイノルズ応力分布の計測により、乱流モデルの改良と検証用データベースを構築。

(d) CFD要素技術の高度化：

- ・将来に向けた要素技術研究として、高次乱流モデル、格子生成法、砕波モデル、可視化情報定量化等の研究を実施し、今後の更なる流場推定法高度化に備えた。
- ・さらに、本推定法構築を通して汎用性のあるCFDのキーテクノロジー：数値計算法、格子生成法、乱流モデルの蓄積が出来た。

(2) CFD技術者の成育

本共同研究の遂行により多数の有能なCFD技術者が成育した。

成果の活用

我国造船業のかかえる問題は国際競争力の維持・強化であり、これの達成課題として、

- ① 船舶のハイパフォーマンス化
- ② 設計・開発研究の効率化
- ③ 先端技術対応と新規需要創出

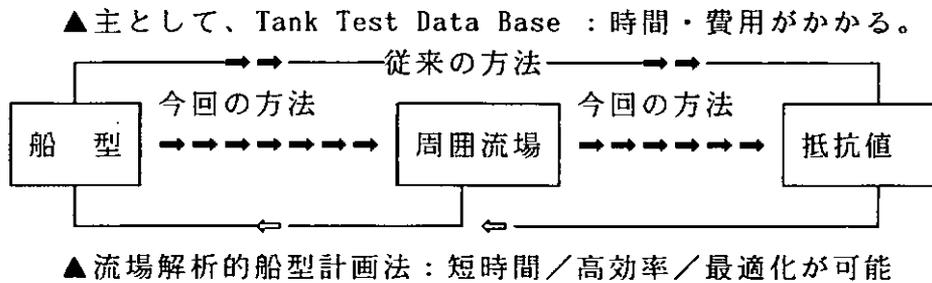
などがある。

本SRでは従来達成し得なかった肥大船の船尾粘性流場の解明に挑戦し、新しい船型計画法に活用できる各種流場推定法を開発した。即時利用可能な活用法から短期、中期研究への活用法について以下に述べる。

(1) 即時活用：設計における「流場解析的船型計画法」のツールとして：

従来から行われてきた模型試験中心の船型計画法は時間と費用がかかるだけでなく、抵抗値（積分量・結果）が得られるだけで、どこが改良のポイントなのか判然とせず、設計のための情報量が極めて少なかった。一方、本SRで開発した船体周囲流場を活用することにより、船型（原因）から抵抗（結果）へのプロセスの途中で、周囲流場という（因果関係を握る豊富なデータ）を短時間で、しかも計算条件を変えて計算でき、設計指針に必要な物理量を好む形に変換して即時にCG表示できるため、「船体の

どこから、どのような抵抗が増加しているのか？、またその改良のポイントは何か？」などの設計者が欲しい情報を短時間で把握する事が可能となる。



これと設計者の経験的知見を総合すれば、本推定法は、船舶設計における新しい流体力学的設計システムのツールとして、

- ① 船尾流場推定法の高精度化 -----> 性能向上（ハイパフォーマンス化）
- ② 船型改良作業の効率化 -----> 工数・コスト低減
- ③ 計算法の応用性拡大 -----> 新技術開発、新規需要創出

に役立つ。これらは技術競争力、コスト競争力の強化に繋がり、我国造船業の国際競争力の増強に大いに寄与する。

(2) 短期研究への活用

- 1) 最適設計法への応用：本推定法を最適化ルーチンにリンク、-----> 新規SR229
- 2) 船舶操縦性能 : 操縦性能の推定高度化（SR221 で1部実施）

(3) 中期研究への活用

- 1) 船舶耐航性能 : 大波高中動揺、海水打込、スラミングなどの現象解明
- 2) 実船性能 : レイノルズ数大（ 10^9 レベル）、船体粗度、流動などの影響解明
- 3) 流力弾性 : スロッシング、スラミングの応答解明
- 4) 革新性能 : 摩擦抵抗軽減など流体力学の基本に迫る研究による性能向上
- 5) その他 : 環境問題における流況シミュレーションの高度化

2 研究の目的

今後、21世紀に向かって我国造船業の国際競争力を増強、発展させるための課題として、船舶の性能向上と性能設計・開発の効率化がある。このためには最適化に時間と費用がかかる水槽模型試験を中核とした従来の船型計画法から理論・実験に支援された数値計算を中核とする新しい船型計画法への転換が必要となる。これを達成するための実用的性能推定法の構築が強く期待されてきた。

V L C C等大型肥大船の船体周囲流場、とりわけ、船尾流場の挙動は船体の抵抗性能やプロペラ近傍の流れに与える影響が大きく、性能設計における極めて重要な流体力学的情報となっている。この推定法の高度化は船舶流体力学分野の中で最も難しい研究課題の1つであるが、これが達成できれば肥大船のみならず全ての船種の推進性能向上に波及的に役立つことになる。このため、従来から境界層理論などを中心とした多くの研究が試みられ、進歩をみてきたが、肥大船の船尾流場では剥離や縦渦の発生など極めて複雑な三次元的現象を伴う粘性流が支配していること、さらに造波やプロペラの影響が付加されて現象をより一層複雑にしていることなどにより、現在までこれらの問題に十分な精度で応え得る推定法が開発されていなかった。

これをブレイクスルーする新しく高精度な方法として、数値流体力学(CFD)を利用した計算法の確立が強く要望されてきたが、主として、コンピュータの処理能力や表示能力の限界など計算環境条件の未発達により実用化研究までには至らなかった。しかし、1990年以降、数値計算技術、コンピュータ支援技術、計測可視化技術などの高度先端技術が飛躍的に発展することにより、いままで不可能と考えられていたCFDを基盤とした新しい大規模計算に挑む機が熟した。

本SR222「大型肥大船船尾流場推定法の高度化」は上述の要請に基づき、到来した技術環境を最大限に活用して各種推定法を評価改良し、従来達成し得なかった肥大船船尾粘性流場の物理的構造を明らかに出来る精度の高い実用的推定法を開発することを目的とし、これにより、新しい流体力学的設計法である「流場解析的船型計画法」の構築に役立てようとするものである。(図2.1にその概念図を示す。)

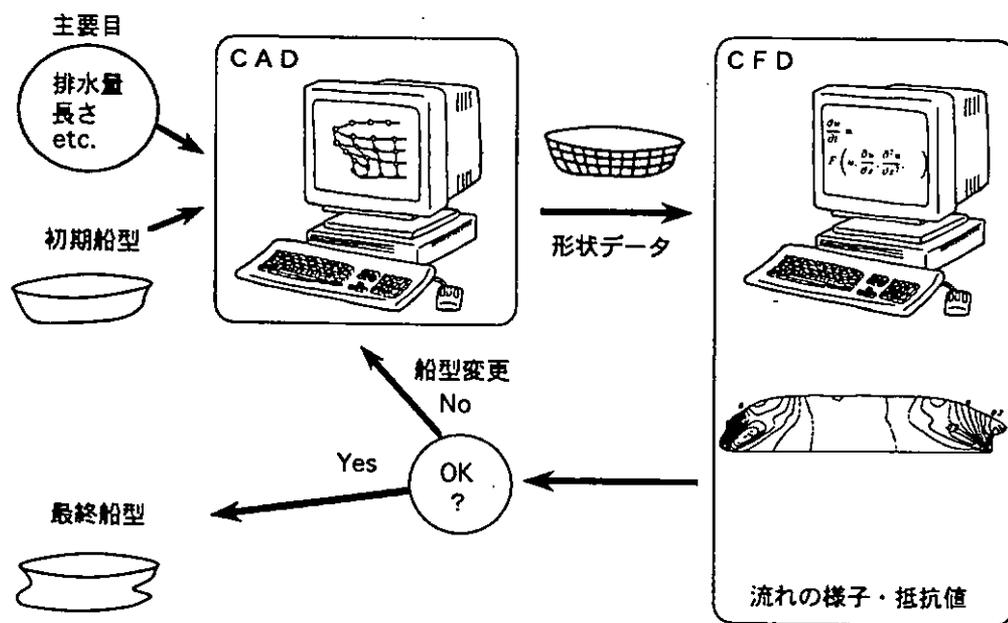


図2.1 流場解析的船型計画法の概念図

流場推定法の高度化が達成できれば、船体抵抗の90%以上を占める粘性抵抗や造波特性、プロペラとの相互作用のメカニズムが結果として推定できるだけではない。実験的方法では特別な方法をとらない限り、船型（原因）に対して抵抗値（積分量：結果）が得られるだけで情報量が少なく、さらにどこに改良のポイントがあるのか判然としない場合が多いが、本流場推定法によれば、途中のプロセスで周囲流場という（因果関係を握る豊富なデータ）を計算、CG表示できるため、「船体のどこが抵抗を増加させているのか？、また、その改良のポイントは何か？」などの設計者が欲しい設計指針を短時間に把握可能となる。これを繰り返し試行し、設計者の経験的知見を加味することにより、(1)船型性能の向上、(2)船型改良等に有効に役立たせることができ、新しい船舶流体力学設計システム、即ち、「流場解析的船型計画法」の基礎となる。更に、これらは技術競争力、コスト競争力の強化に繋がり、我国造船業の国際競争力の向上に寄与する。

3 研究の目標

船舶流体力学性能や船型設計に必要な性能関連の設計情報として、①抵抗要素、②効率要素、さらに、起振力の見地から③プロペラ位置伴流分布がある。これらの優劣が評価できる流場のメカニズムの解明を主眼として、(1)基礎粘性流場推定法、(2)造波粘性流場推定法、(3)自航時粘性流場推定法の3つの推定法の開発を目標とした。

基礎粘性流場推定法は波の発生を考慮しない状態で粘性流場の高精度計算に着目して船体周囲流場を支配する基礎流場を数値的に解くことを目的とする。本来、自由表面を持つ水上船は、波を起こし、プロペラの作用を受けて航走するから、これらを全て考慮して解くのが正統であるが、複雑で、かつ、数値計算上の問題も残されているため、正面から一度に取り組むのは非効率的である。肥大船では粘性抵抗が全抵抗の大部分を占めており、この解明が最も重要であることを考え、まず、波の影響をとりあえず無視した基礎粘性流場に集中して計算法を確立する。これを基盤として波の影響（造波粘性流場）とプロペラ作用の影響（自航時粘性流場）の研究を行うこととした。

- (1) 基礎粘性流場推定法 : 2重模型船流れの仮定（自由表面を固定壁と仮定し波の発生を考慮しない）で船体周囲流場（流速、圧力分布 p 、剪断摩擦力 τ 、伴流分布、伴流値 $1-w$ ）、船体抵抗 C_v （粘性抵抗係数で圧力係数 C_{vp} と摩擦抵抗係数 C_f の和）を計算。
- (2) 造波粘性流場推定法 : (1)に造波計算の機能を付加、波形と造波抵抗係数 C_{wp} を含む全抵抗係数を計算する。
- (3) 自航時粘性流場推定法 : (1)にプロペラ・サクシヨンの影響を付加し、自航状態を想定した計算を行い、自航要素として重要な推力減少率 $1-t$ や有効伴流値 $1-w$ の評価を可能とする。

（計算法について）

従来流場計算は主として積分法により行われてきたが、複雑な3次元剝離を伴う肥大船船尾流場を表現する上で限界があった。本SRではこれを克服するためにRANS（レイノルズ平均ナビエ・ストークス）方程式を差分法で解いた。計算コードは、基礎基盤が強固で船尾流れ場の計算に適した実用化の期待が持てるコード（NICE法、WISDAM法）を選択、改良した。

（流場推定法の条件）

本SRの目標は船型設計に役立つ推定法の構築にある。よって、CFDによる計算方法の満足すべき条件として次のように考えた。

- ・計算コード : 高精度／適応性／ロバストネス
- ・計算システム : 簡便性／拡張性
- ・CPU : 短時間（EWS : 1日、スーパーコンピュータ : 1H程度）
- ・ポスト処理 : 各種設計パラメータのCGによる処理機能

4 研究の内容

以上の研究目標を遂行するために、①要素技術の高度化、②実用的計算法、③模型試験の3つの研究を設定し、これらを相互に関連させながら改良研究を進めた。

その内容は次のとおりである。(図 4.1 研究フローチャート参照)

①要素技術の高度化：

- ・乱流モデルの理論的研究：現状調査、0 方程式モデルの改良、高次モデルの研究
- ・造波粘性流場推定法の研究：
- ・自航時粘性流場推定法の研究：
- ・将来に向けた研究：砕波の計算法研究、高精度格子生成法の研究

②実用的計算法：

- ・基礎粘性流場推定法構築：

初期コードの選定・信頼性／追従性検討評価：NICE法、WISDAM法について格子依存性やパラメータの感度解析

乱流モデルのチューニング：計算結果と模型試験結果（流場、レイノルズ応力分布）との比較・評価・改良

適応性検討：パラメータスタディによる推定精度向上（船尾流場、抵抗成分、船尾縦渦、プロペラ伴流）

- ・造波粘性流場推定法構築：自由表面波の計算法研究、模型試験による高精度化
- ・関連利用技術調査／改良：CGを利用した後処理技術を調査、設計パラメータの表示法検討

③ 模型試験：

- ・3次元熱線流速計を使用した乱流計測法・解析法の研究
- ・風洞を利用した3次元境界層およびレイノルズ応力分布の計測：
計算結果の詳細な検証や乱流モデル改良のために計算対象船SR196A及びC船型でレイノルズ応力を計測、評価用データベースを取得
- ・造波流場の計測：造波粘性流場計算評価用データ取得（SR196C船型波形計測）
- ・可視化情報数値化研究：船体表面摩擦応力推定法

④ 流場推定法開発と設計応用計算

以上の研究により下記3つの推定法

- (1) 基礎粘性流場推定法
- (2) 造波粘性流場推定法
- (3) 自航時粘性流場推定法

を構築、設計への応用性把握の観点からこれらの推定法を肥大船4種類計8隻に適用し、推定精度や船型追従性等の適応性評価を行って全体取り纏める。

表 4.1、図 4.1 に応用計算に使用した対象船の概要を示す。

注) 抵抗及び推進効率要素

①抵抗要素：

$$C_t = C_p + C_f = C_{wp} + C_{vp} + C_f$$

$$= C_{wp} + (1+K) C_f \quad (4.1)$$

ここで、

$$C_p \propto \iint p \cdot n_x \, ds, \quad C_f \propto \iint \tau_x \, ds \quad (4.2)$$

p : 船体表面圧力	n_x : 船体法線ベクトルの x 方向成分	} (4.3)
τ_x : 船体表面摩擦応力の x 方向成分	s : 船体表面積	
C_t : 全抵抗係数	C_p : 圧力抵抗係数 C_f : 摩擦抵抗係数	
C_{wp} : 造波抵抗係数	C_{vp} : 粘性圧力抵抗係数	
	K : 形状影響係数 C_{vp}/C_f	

②効率要素：

$$\eta = \eta_H \cdot \eta_O \cdot \eta_R \quad (4.4)$$

ここで、

η : 推進効率	η_H : 船殻効率 (= $1 - t / 1 - w$)	} (4.5)
η_O : プロペラ効率	η_R : プロペラ効率比	
$1 - t$: 推力減少率	$1 - w$: プロペラ流入伴流率	

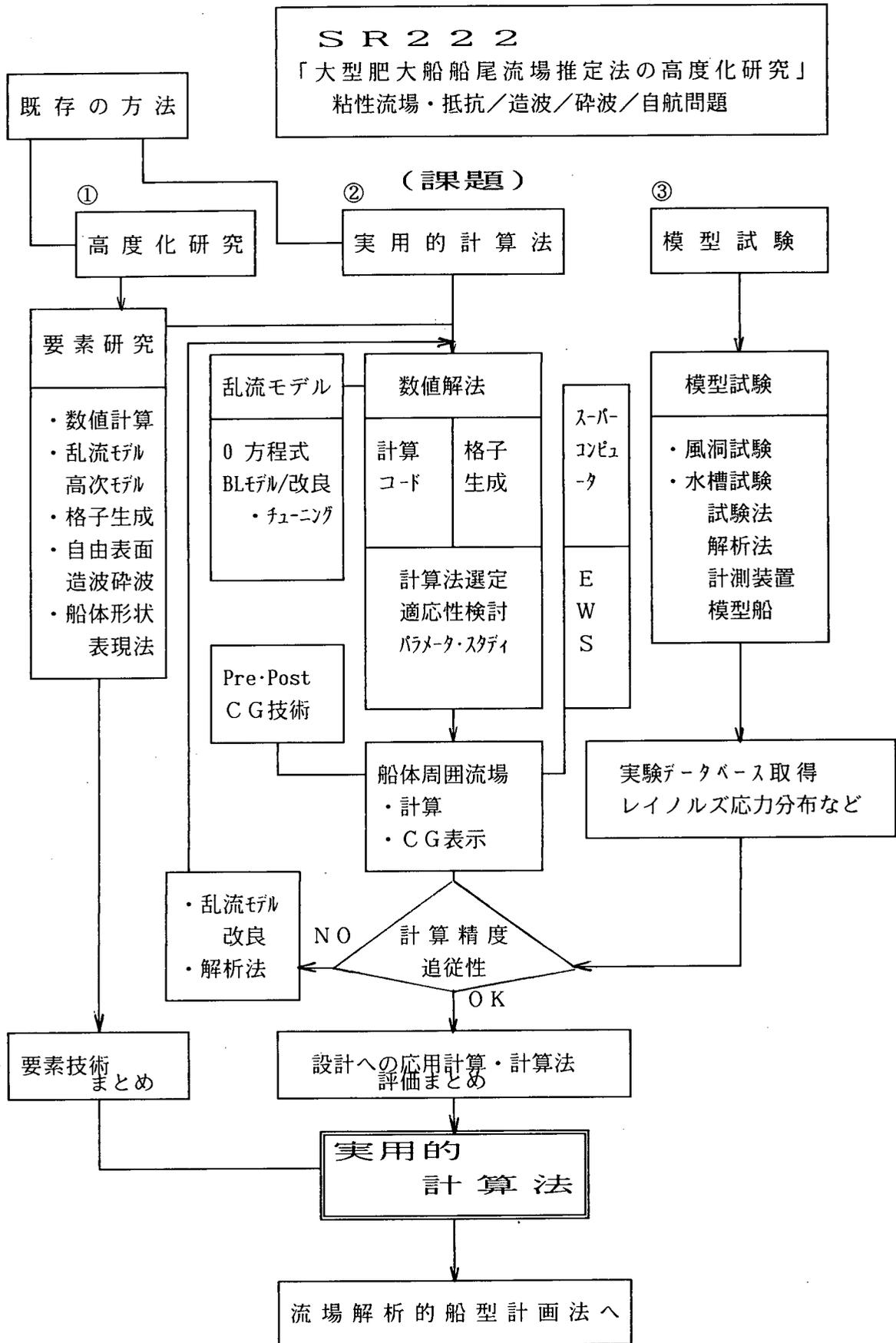


図4.1 SR222 研究フローチャート

5 得られた成果

水上を進むタンカー等肥大船のまわりには、水の粘性によって生じる、流速の遅い領域である境界層が厚く発達している。このような流場を理論的に推定することは、粘性影響を無視したポテンシャル流理論や、薄い境界層の仮定に基づく境界層理論等の従来の理論では不可能であり、水など粘性流の大本の支配方程式であるナビエ・ストークス (Navier-Stokes、略称NS) 方程式に立ち返る必要がある。NS方程式は非線形であるため解析解を得ることができず、膨大な計算によって数値的に解かざるを得ないが、近年、計算機の急速な発達と数値計算法の進歩によって、NS方程式の数値解法であるCFD (Computational Fluid Dynamics) が、工学的にも利用可能となってきた。

本SRでは、肥大船まわりの流れの高精度推定のために、CFDに基づく数値計算法の研究を、4つのアプローチに基づいて行った。第1番目は船尾縦渦に注目した基礎粘性流場推定法、第2番目は波に注目した造波粘性流場推定法、第3番目はプロペラを含む推進性能に注目した自航時粘性流場推定法、第4番目は今後の技術の発達の芽となる将来に向けた研究である。

5.1 基礎粘性流場推定法

5.1.1 はじめに

本研究の主目的の1つは、肥大船船尾で作動するプロペラに流入する流場の高精度推定法の開発にある。プロペラ流入流場については、自由表面波の影響が比較的小さく、自由表面を上下対称の鏡像面で置き換える2重模型船流れ (double model flow) の近似が有効である。この近似を用いると、自由表面波を計算する必要がなくなり、計算負荷が大きく軽減できると共に、対応する実験として、上下対称な模型を用いた、風洞における流場の微細計測が可能になるという、研究効率上の大きなメリットが生まれる。そこで、基礎粘性流場推定法に関する研究として、2重模型船流れの近似を用いた数値計算法に関する研究と、風洞における2重模型船を用いた実験的研究を行い、肥大船まわりの流場の推定法を改良・構築し、数種の船型に適用して、その評価を行った。

5.1.2 数値計算法

(1) 乱流計算法と乱流モデル

船のまわりの流れは、水の粘度の低さから、模型船、実船を問わず高レイノルズ数流れであり、流れの微細な時間的変動が重要な役割を果たす乱流状態にある。ここでは、乱流の数値計算法と、用いられる乱流モデルについて、図 5.1.2.1 に沿って説明する。

乱流の数値計算法の中で最も計算量が多いのは、微細な乱流変動も含めて非定常な流場を細かな格子を用いて直接解く、直接数値シミュレーション (Direct Numerical Simulation、略称DNS) である。DNSは、極めて細かい格子と、莫大な計算時間を必要とするため、実用的でない。

DNSの次に計算量が多いのが、流場を空間方向に平均化し、格子の解像度以下のスケールの乱流現象をモデル化する、LES (Large-Eddy Simulation) である。格子 (grid) サイズ以下のスケールの現象をモデル化するために、その乱流モデルはSGSモデル (Sub-Grid Scale Model) と呼ばれる。LESも、膨大な計算量を必要とするため、船体まわりの複雑な3次元流場に関して未だ実用的でない。

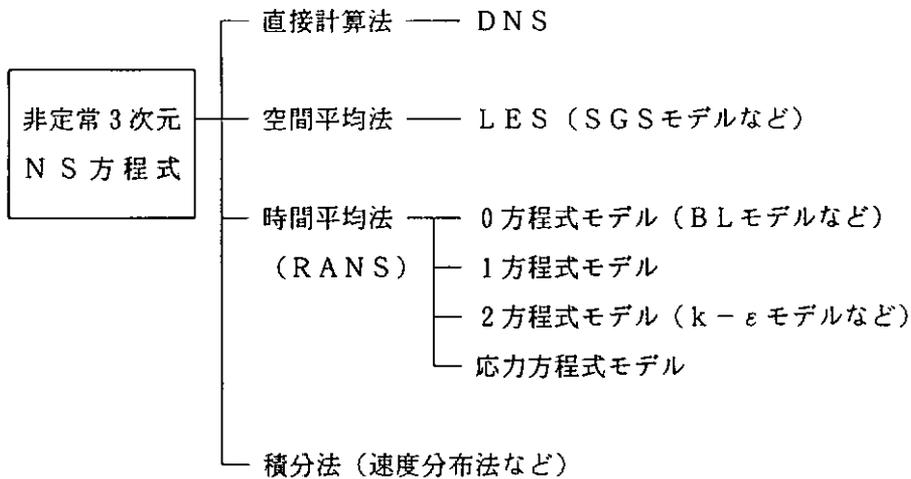


図5.1.2.1 乱流計算法と乱流モデル

一方、実用的な乱流モデルを導く方法として、流れの支配方程式であるNS方程式を時間方向に平均化してレイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式 (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations, 略称RANS方程式) を導く方法がある。非定常NS方程式で、速度 u 、 v 、 w と圧力 p を定常成分と変動成分に分けて表し、時間平均をとると、速度の微細な非定常成分の積の平均値が応力項として現れる。例えば、 x -方向のNS方程式では、 $\bar{\quad}$ で時間平均を、 $'$ で時間変動量を表すと、

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \bar{u} - \frac{\partial}{\partial x} (\overline{u'u'}) - \frac{\partial}{\partial y} (\overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{u'w'}). \quad (5.1.2.1)$$

$\overline{u'u'}$ 、 $\overline{u'v'}$ 、 $\overline{u'w'}$ 等の6成分 (対象応力テンソル) はレイノルズ応力項と呼ばれ、これらの項をモデル化するため、様々な乱流モデルが提案されている。RANS方程式と乱流モデルの組み合わせによって、格子の細かさの制限が緩和されると共に、非定常流を計算する必要がなくなり計算時間が大幅に短縮できるので、CFDが初めて実用的価値をもつ。なお、速度の空間分布を多項式近似して支配方程式を積分する積分法があり、更に計算時間を短縮できるが、船尾の厚い境界層では問題があり、研究の発展はCFDに移行した。

時間平均流に関する乱流モデルには、数多くのモデルが存在するが、工学的実用性の見地から、比較的単純なモデルに重点が置かれる。そこでは、レイノルズ応力を平均流場の速度勾配に比例すると置く Boussinesque近似が用いられ、比例定数である渦粘性係数 (Eddy viscosity coefficient) μ_t について、様々な乱流モデルが提案されている。

$$-\overline{u_i u_j} = \frac{\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{k}{\rho} \delta_{ij} \quad (5.1.2.2)$$

ただし、 κ は乱動エネルギー、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。

ゼロ方程式モデルは最も単純な部類に属し、渦粘性係数 μ_t を平均速度場の関数として代数的に定める。ゼロ方程式モデルの中で最もよく用いられているものが、本SRで中心的に使用されるBaldwin-Lomaxモデル (略称、BLモデル) であり、薄い境界層に対して良好な結果を与えるとの定評がある。後述の計

算スキームでは、NICE法ではBLモデルが、WISDAM法では、ゼロ方程式モデル的に用いられたSGSモデルとBLモデルの混合モデルがSR研究開始時に組み込まれており、これらのモデルの適応性を調べ、精度向上を目指して改良するのが、本SRの主要テーマの1つである。

ゼロ方程式の次に単純なモデルは、乱流を表す1つの変数に関する場の方程式をNS方程式と連立させて解く1方程式モデルである。そして、工学的によく用いられているモデルの中で最も複雑なのが、2方程式モデルであり、その中でも、乱動エネルギー κ とその散逸率 ε の2つを変数とする $\kappa-\varepsilon$ モデルが最もよく用いられている。本SRでは、これら高次の乱流モデルについては、将来に向けた研究の1つとして取り組んでいる。

(2) 計算スキームの選定

(a) 選定方針

CFDの数値計算法には、差分法 (Finite Difference Method: FCM)、有限体積法 (Finite Volume Method: FVM)、有限要素法 (FEM)、等があるが、船舶分野では、以前から差分法や有限体積法が多く用いられてきた。3年間という短い研究期間に有効な推定法を構築するため、平成5年度の研究開始時に、今後実用的推定法として発展が期待できる有力な計算スキーム (計算手法) を調査し、以下の選定条件により選定した。

- ・船尾流場計算 (流場、抵抗、伴流分布) ができ、自由表面付計算への拡張性がある。
- ・前後処理を含む一貫システムをもち、EWSで走る等、計算時間が妥当である。
- ・技術的基盤が確かで検討実績があり、実用化の期待がもてる。

その結果、「NICE法」と「WISDAM法」を選定した。この2つの計算スキームは互いに異なった特徴を持っており、応用性の拡大の見地と計算結果同士の検証という見地から、改良を並行して進めた。

(b) NICE法 (Navier-Stokes Solver Using Implicit Cell-Centered Formulation)

有限体積法に基づく計算スキーム。船型表現・格子生成・NSソルバー・後処理のコード群からなる、一貫したシステムを構成している。NSソルバー部の特徴は、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いることにあり、

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \beta \nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (5.1.2.3)$$

速度場と圧力場が強くカプリングされ、時間積分に陰解法、空間差分に前処理 (MUSCL) 型3次風上差分の採用など合わせて、定常流を効率良く解ける、ロバストな計算法となっている。乱流モデルは、計算が容易なBLモデルを用いる。

(c) WISDAM法 (Wave viscous flow Difference Accurate Method, WISDAM-V)

WISDAM-V法も、NICE法と同様に有限体積法に基づいたNSソルバーであるが、NICE法との大きな違いは時間陽解法を用いている点であり、非定常流計算にも適用できるという長所を持つ。時間刻みが小さいため、定常流計算には、やや計算時間がかかる。変数配置は、スタガード変数配置を採用している。

対流項に3次上流差分 (風上差分) を用い、速度場の更新は、陽的時間積分によって行われ、圧力は、次式のポアソン方程式を、反復解法であるSOR法を用いて解いて、更新される。

$$\nabla^2 p^{n+1} = \frac{\nabla \cdot \{u^n + \Delta t \cdot (\text{div}T)\}}{\Delta t} \quad (5.1.2.4)$$

ただしTは応力テンソルである。

(3) パラメータ計算と課題抽出

NICE法及びWISDAM法は、船体まわりの数値計算に適した計算スキームであるが、実用的計算法のレベルに高めるためには、図 5.1.2.2に示すような数多くのパラメータについて適応性を検討し、改良を重ねて問題点をクリアーしなければならない。

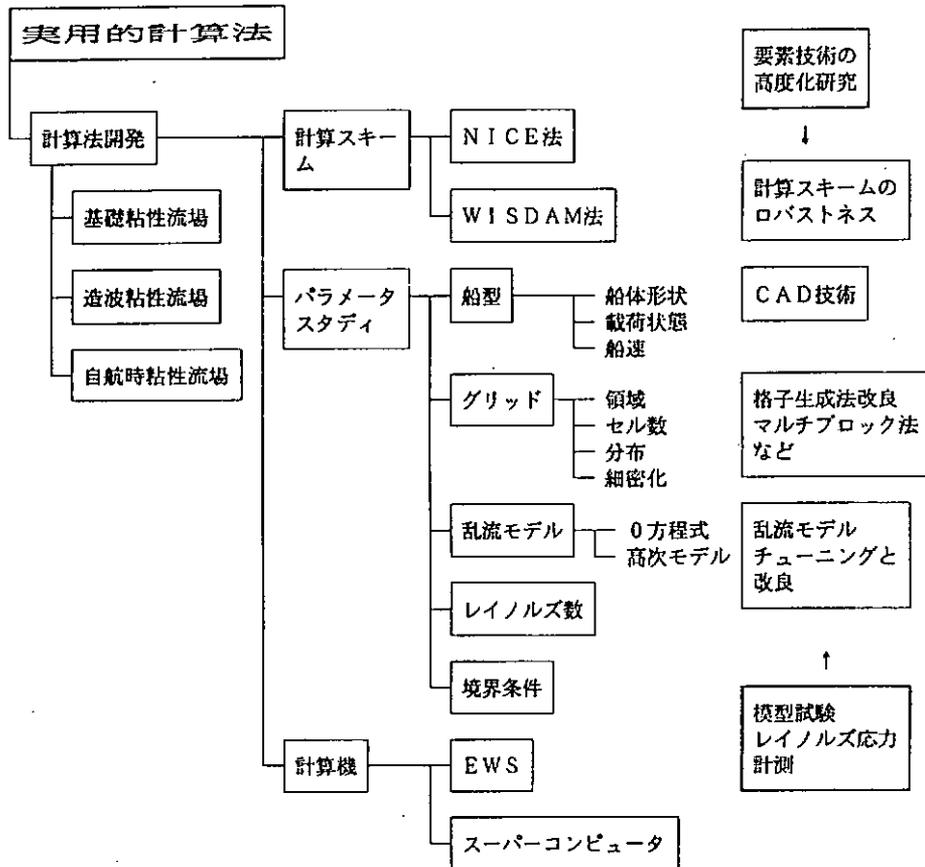


図5.1.2.2 改良課題と計算パラメータ

(a) パラメータ計算

船のまわりに流場が無限に広がる外部流場問題を解く計算パラメータとしては、領域の広さ、格子点数、格子点の船体表面あるいは船首尾への引きつけ (clustering)、などがある。これらを10数種のパラメータで表現し、船型はSR196A船型、レイノルズ数は $R_\infty = 1.9 \times 10^6$ 、水面のdouble model (鏡像) 近似などの条件の下に、NICEコードを用いて、パラメータ計算を行い、計算精度・計算効率の点で最適値を求めた。抵抗係数がパラメータ変化に最も敏感であることが分かったため、計算結果の評価は主に抵抗係数で行った。一例として、全格子点数 $N_p (= I_{max} \times J_{max} \times K_{max})$ の変化による抵抗係数の変化を図 5.1.2.3に示す。格子点数の増加により、抵抗係数が一定値に収束することが分かる。このような結果から、格子点数や計算領域の大きさに依存しない計算結果を得るための最適なパラメータ値を選定した。代表例を表 5.1.2.1に示す。これらの値は、以降の乱流モデルのチューニング計算において使用された。

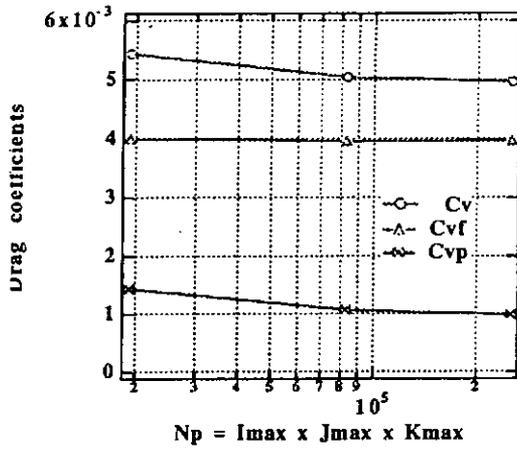


図5.1.2.3 全格子点数と抵抗係数

表5.1.2.1 最適パラメータ

	意味	最適値
I_{max}	x-方向点数	101
J_{max}	壁垂直方向点数	41
K_{max}	ガス方向点数	41
N_p	全格子点数	17.0万

(b) 特大計算

計算スキームの信頼性検討の一環として、格子点数を極力大きくとる特大計算を実施した。計算にはスーパーコンピュータを用いることとし、NICEコードのベクトル化を実施した。ベクトル化の結果、計算速度はVP-400使用時に14倍に向上した。船型はSR196A船型、レイノルズ数 $R_e = 1.9 \times 10^6$ (bowからすべて乱流)の条件の下に、格子点数 $151 \times 81 \times 77$ の約94万点を用いて、 $\Delta t = 0.002$ で無次元時間 $T = 10.1$ まで計算を行った。

図5.1.2.4にプロペラ断面($x = 0.4835$)における伴流分布を、実験結果と共に示す。約100万点の計算によっても、実験で得られる伴流分布のくびれにはほど遠い。すなわち、計算結果に見られる船尾伴流分布の不十分なくびれの原因は、格子点数の不足によるものでなく、それ以外(恐らく乱流モデル)にあるとすることができる。

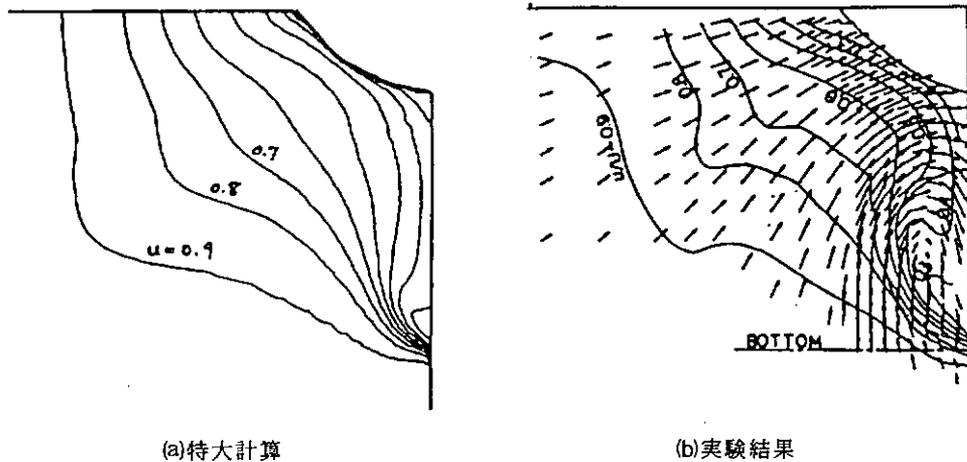


図5.1.2.4 プロペラ面伴流分布 ($x = 0.4835$)

(c) 船型追従性

研究開始時点での計算スキーム(NICE法)・乱流モデル(BLモデル)の、肥大船の船型変化に対する追従性を調べた。船型はSR196A、B、Cの3船型を用いた。結果の詳細は、5.1.4において本SRの成果であるSR222修正BLモデルの結果と共に述べられているので省略するが、計算では船尾縦渦の強さを過少評価するために、プロペラ面伴流分布と形状影響係数共に、船型差の順番は捕

らえられるものの、差が小さく、定量的には改善の余地があるとの結論が得られた。

(d) 課題抽出、まとめ

初年度（平成5年度）に実施したNICE法の信頼性検討において、以下の点が明らかになった。

- ・無限に広い一様流中に置かれた船体まわりの流れについて、計算領域の大きさや格子点数をある程度以上にとれば、それらに依存しない計算結果を得られることが分かり、格子の標準化が得られた。それらの値は、乱流モデルの改良など今後の計算において用いるべきである。
- ・複数の船型の計算によって、オリジナルのBLモデルが、抵抗値の絶対値を数%以内の誤差で予測することができることと、船型差の傾向も予測できることが分かり、乱流モデルのチューニングのベースとして利用できるということが分かった。ただし、船尾縦渦を弱く表現し、伴流分布のくびれが欠如するという問題点も同時に明らかになった。
- ・オリジナルのBLモデルを用いた特大計算（約100万格子点）によって、船尾縦渦の強度不足による伴流分布のくびれの欠如の原因が、少ない格子点数による解像度不足にあるのではなく、乱流モデルにあり、乱流モデルの改良の重要性が明らかになった。

以上のことから、船尾縦渦がより強く表現できるためのBLモデルの改良をはじめとする以下の点が、第2年度以降に実施すべき課題となった。

1. 模型試験データを活用した乱流モデルの改良
2. 船首尾形状表現能力を高めるための格子生成法改良
3. アルゴリズムの改良による計算スキーム（NICE法、WISDAM法）のロバストネスの向上
4. 風洞実験結果との対応をとるためのblockage影響の考慮

5.1.3 模型試験

(1) レイノルズ応力計測の必要性

実船のみならず、模型船まわりのレイノルズ数 $R_n = 10^6$ レベルの流場は、既に乱流である。乱流場のCFD計算を行うためには、RANS方程式(5.1.2.1)式のレイノルズ応力項が乱流モデルによって与えられなければならない。乱流モデルの一つであるBLモデルは、船尾周囲流場、特にプロペラ位置での伴流分布のhook状のくびれが正しく推定できないことが明らかになり、長所を残しつつ問題点を改良するチューニング作業が必要となったが、そのためには、レイノルズ応力分布の計測データがあれば、大変役立つ。そこで、模型船まわり流場のレイノルズ応力計測を行った。

(2) 模型試験

大阪大学大型試験風洞において、3方向の速度成分を同時計測することによってレイノルズ応力計測が可能な3線式熱線流速計を用いて、模型船まわり流れのレイノルズ応力分布計測を行った。実験条件を表5.1.3.1に示す。

表5.1.3.1 風洞試験要目

模型船の種類	2重模型船(SR196A, SR196Cの2船型)
模型船寸法	$L_{pp}=3m$ (縮尺 1/107)
実船想定	$L_{pp} \times B \times d = 320.0m \times 53.3m \times 19.3m, C_B=0.802$
Blockage m	0.056 (計測断面 1.8m × 1.8m)
実験レイノルズ数	$R_n = 約4.0 \times 10^6$ (風速 20m/s)
計測断面位置	SS1、1/2、1/8、プロペラ面位置

計測では、3線式熱線流速計を用いて速度の3成分を同時計測し、解析処理によって平均速度成分とレイノルズ応力成分を求めた。まず、流れの性質がよく調べられている円管と平板まわりの流れを計測して計測システムの精度を確認し、次に、船体まわりの流れを計測し、結果をデータベース化した。

SR196A船型のプロペラ面位置における計測結果を図 5.1.3.1 に示す。(a)図は主流方向速度 u の分布、すなわち伴流分布を、(b)図は面内速度成分を示す。船尾縦渦による伴流分布のくびれと、渦運動が見える。レイノルズ応力分布の計測例として、(c)図に直応力である $u'u'$ 分布を、(d)図に $u'v'$ 分布を示す。(a)図と比較すると、両者は共に速度勾配の大きな部分で大きな値をとることが分かる。SR196A船型よりも船尾断面がU字型に近いSR196C船型について、プロペラ面位置における同様な計測結果を図5.1.3.2 に示す。C船型では船尾縦渦がA船型よりも更に強く、伴流分布が大きく変形し、渦中心も外側に移動している。

以上のようにして得られた計測結果が、乱流モデルの改良に活用された。

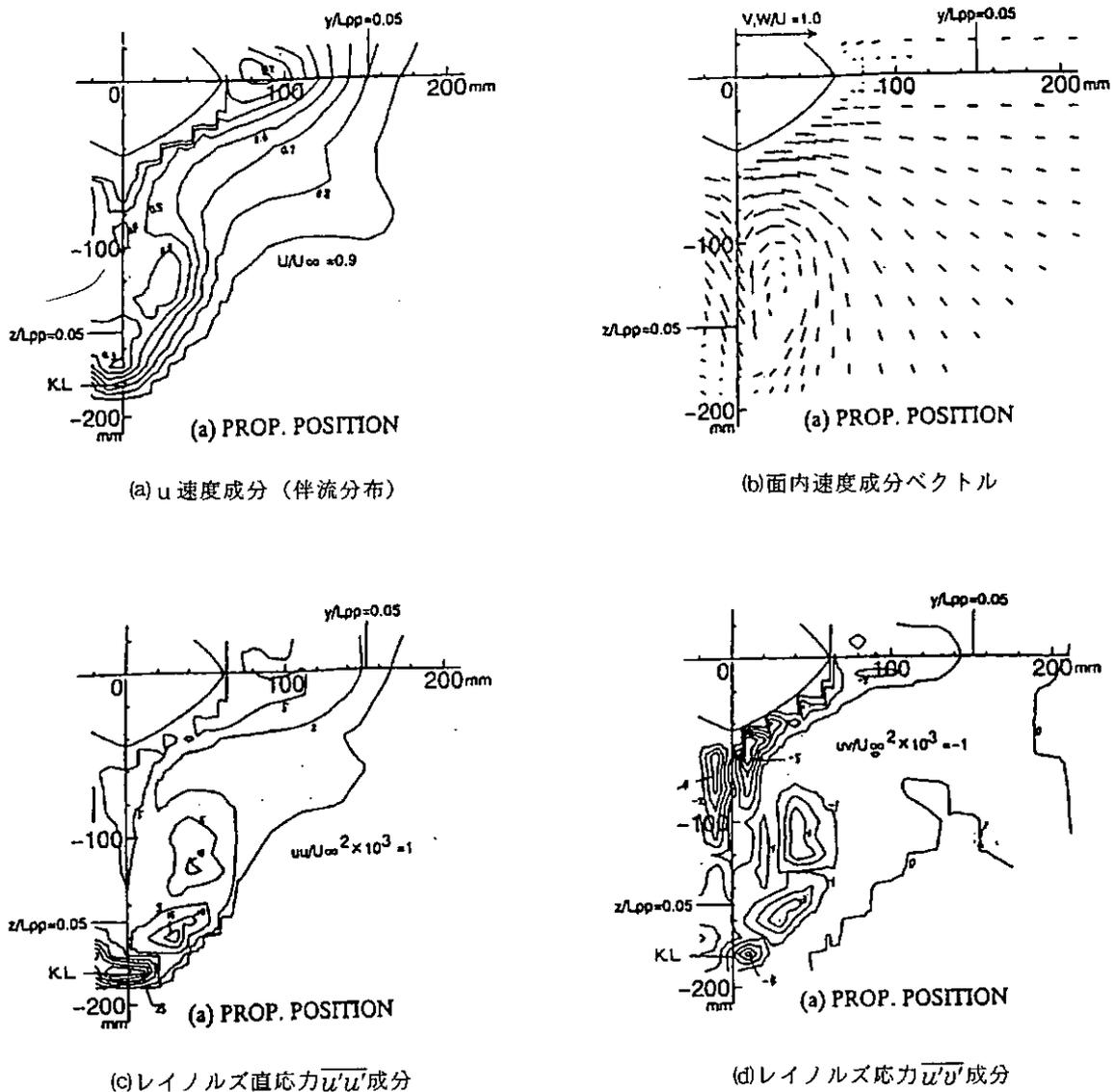
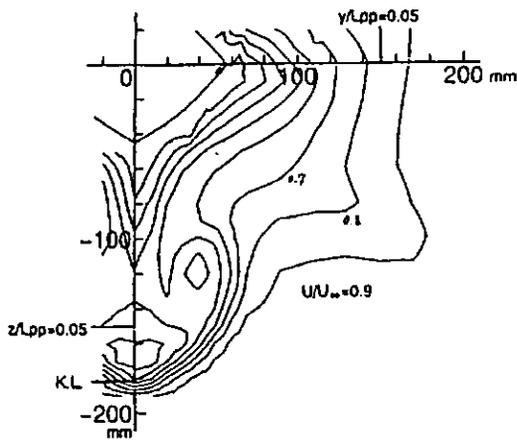
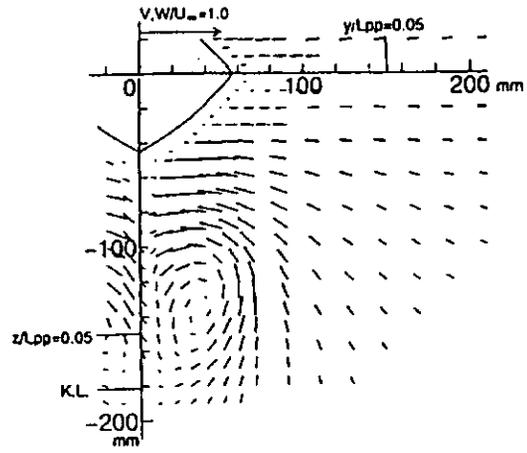


図5.1.3.1 SR196A船型のプロペラ面位置における計測結果



(a) u 速度成分 (伴流分布)



(b) 面内速度成分ベクトル

図5.1.3.2 SR196C船型のプロペラ面位置における計測結果

5.1.4 流場推定法構築・評価

(1) 流場推定法構築

乱流モデルのチューニング（改良）、格子生成法改良、NSコードの改良の3つの課題について研究し、推定法を開発した。さらに、設計への応用を考慮したPost処理法の研究を行い、全体的にまとめて流場推定法を構築した。

(a) 乱流モデルとチューニング

パラメータスタディ等により、NICE法で用いられているオリジナルのBaldwin-Lomaxモデル（以下、BLモデルと略称）では船尾縦渦を過少評価するので、乱流モデルの改良が必要であることが明らかになった。

そこで、本SRでは、縦渦の中心位置および逆圧力勾配の流場では乱れが減少するという現象を考慮可能にすることに主眼に置いて、模型試験で得られたレイノルズ応力分布と比較しながらBLモデルのチューニングを実施し、現象に応じた各種モデルを考案した。

(i) 強制減衰モデル（BL（CF）モデル）

- ・BLモデルでは渦動粘性係数を渦度の絶対値に関連づけていたが、これを剪断渦成分のみの大きさに関連づけるようにした。
- ・縦渦成分が占める割合を求め、これを用いて渦動粘性係数を強制的に減衰させた。この修正により、縦渦の中心位置近傍での渦動粘性係数を小さくすることが可能になる。

(ii) 逆圧力勾配の考慮（BL（PG）モデル）

このチューニング（以下、BL（PG）モデルと略称）では、圧力勾配（Pressure Gradient）が正の場合に剪断応力とその分だけ減ると仮定している。これにより、軸対称物体周りの流場でも、船尾近傍で乱れが小さくなる現象が推定可能になる。

(iii) 最終チューニングモデル（BL（CF+PG）モデル）

最終チューニングモデル（以下、BL（CF+PG）モデルと略称）では、上述の2つのチューニングをカップリングした。これにより、縦渦の中心位置および正の圧力勾配の領域で乱れが減衰する効果を取り入れたことになる。

(b) 格子生成法改良 図5.1.4.1

実用船型では、船首尾バルブ等の存在のため船首尾線にfitした単純な格子では、形状表現が困難なことが多い。そこで、船体表面格子を船首尾バルブや船尾オーバーハング部を独立したブロックで表せるマルチブロック構成とすることにより、実用船型に対応した高い形状表現を可能にした。

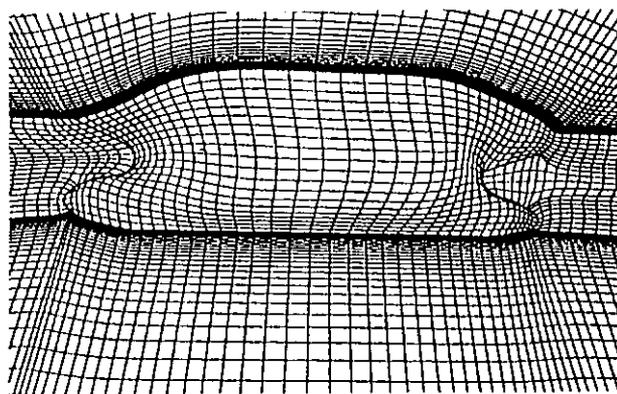


図5.1.4.1 マルチブロック格子による船首尾バルブ表現

(c) NSコード改良

ロバストネス向上のためのアルゴリズムの改良や風洞実験との対応をとるためのblockage影響の考慮など、NSコードの改良を計った。

(d) 設計への応用を考慮したPost処理法の研究

粘性流場計算法を船舶設計へ有効に活用するために、出力すべき設計パラメータの種類、表現形式、後処理法、評価法など利用技術を研究し、最終計算法へ組み込んだ。この出力データから抵抗成分の分布や増加が顕著となる領域が分かり、船型改良の指針を得る「流場解析的船型計画法」の構想に沿った詳細情報が得られる。

(2) 適応性検討

(a) SR196A/B/C船型（船尾肋骨線形状シリーズ：B，A，Cの順にV→Uに変化）

(i) 目的

乱流モデルの妥当性の検証および船型形状追従性の評価

(ii) 計算条件

表5.1.4.1 計算条件

格子分割数	$I_{max} = 101, J_{max} = 41, K_{max} = 41$
船首尾の格子No	$i_{FP} = 21, i_{AP} = 75$
解析領域	$X_{up} = -1.5, X_{dn} = 1.5, R = 1.0$
船首尾への格子集中度	$\Gamma_{CFP} = 0.2, \Gamma_{CAP} = 0.2$
最終時間刻み	$\delta t = 0.005$
乱流モデル	SR222修正BLモデル (BL (CF+PG))

(iii) 計算結果と考察

<乱流モデルの妥当性>

乱流モデル改良前後の伴流分布の計算結果と実験結果の比較を図5.1.4.2に示す。オリジナルのBLモデルでは実験結果に表れる船尾縦渦に起因する伴流分布のHook状くびれが全く表現できなかったが、乱流モデルの改良 (BL (CF+PG) モデル) により船尾縦渦が強くなり、伴流分布の形状が実験結果にかなり良く一致する様になった。船体周囲流場全体の推定精度が向上したことを示す。

〈船型形状追従性〉

SR196A/B/C船型をNICEコードで解析し、船体周囲流場についての実験結果との比較による精度検証、形状影響係数 K や公称伴流係数 $1-w$ の船型追従性の検討および計算結果を基にした船型評価を試みた。プロペラ位置での伴流分布を図5.1.4.3に示す。公称伴流係数および形状影響係数を図5.1.4.4に示す。また、船体表面圧力分布を図5.1.4.5に示す。さらに誘導抵抗値の分布(図5.1.4.6)を計算し船型評価を行った。

以上の結果より、以下のような知見が得られた。

- ・伴流分布や船体表面の圧力分布の計算結果は実験結果とほぼ一致する。
- ・形状影響係数や公称伴流係数の船型差による定性的変化は推定可能である。
- ・形状影響係数は $B \rightarrow A \rightarrow C$ の順に増加するが、これは船尾縦渦による誘導抵抗に起因している。図5.1.4.5、図5.1.4.6は「流場解析的船型計画法」への本推定法の活用の一例である。

(b) その他の例

スターンバルブをもつ現代版肥大船SR221A/B/Cシリーズ船型、 $C_b = 0.837$ の超肥大船型「だいおう」への適用性を検討した。

SR221船型は $A \rightarrow C \rightarrow B$ の順に船尾肋骨線形状が $V \rightarrow U$ 型になるシリーズで、スターンバルブ付近の格子生成にマルチブロック法を用いている。格子分割数13~14万で、NICE法により計算した。図5.1.4.7にA.P.断面での伴流分布を示す。hook状のくびれが推定できており、実験との対応も良い。形状影響係数 K の計算結果は、実験結果に比べ定量的にはやや大きめであるが、船型変化には追従している。

「だいおう」周りの流場を8.3万の格子分割数でNICE法により計算した。船体表面圧力分布を図5.1.4.8に示す。船尾近傍では圧力等高線の歪みまで実験結果と対応しており、オリジナルの乱流モデル(BLモデル)に比べ格段に改良されている。粘性抵抗の大きさの指標である $1+K$ は計算値が1.526、計測値が1.37で約11%高めに推定している。

SR221A/B/Cシリーズ船型周りの流場を約7万の格子分割数でWISDAM法により計算した。伴流分布については実験結果と良好な一致が得られた。形状影響係数 K の計算結果(図5.1.4.9参照)は、船型差に追従しており、また定量的にも実験結果とほぼ一致している。ただし、A船型の計算結果はやや低目になっている。圧力抵抗は船体前半部と後半部の積分により減算的に産出されるので、前後半部の格子生成に基づく計算誤差が混入されやすい。最終比較評価をする前に格子依存性を十分検討する必要があると考えられる。

(2) 評価

- ・多種類の肥大船型(船尾肋骨線シリーズ船型、スターンバルブ船型、超肥大船型)に対して適応性検討を行い、本基礎粘性流場推定法が船体周囲流場、圧力分布、伴流分布のみならず粘性抵抗とその成分($1+K$)や伴流係数 $1-w$ についても推定精度が高く、良好な船型追従性を有することが明らかになった。
- ・所期の目標であった船尾粘性流場に関する実用的推定法を構築することが出来た。

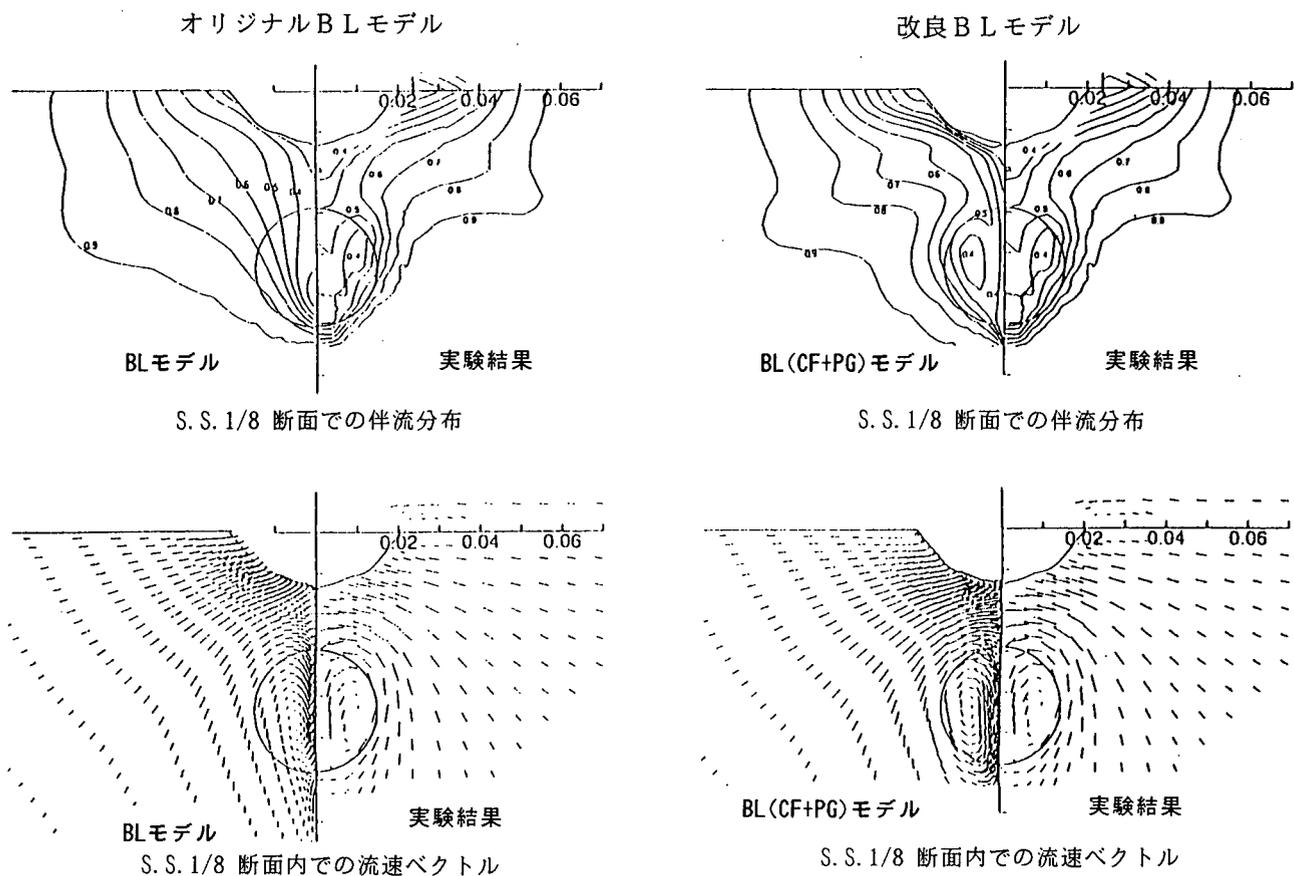


図5.1.4.2 乱流モデル改良の検証
(伴流分布と2次流れ：計算と実験、 $Rn = 4 \times 10^6$)

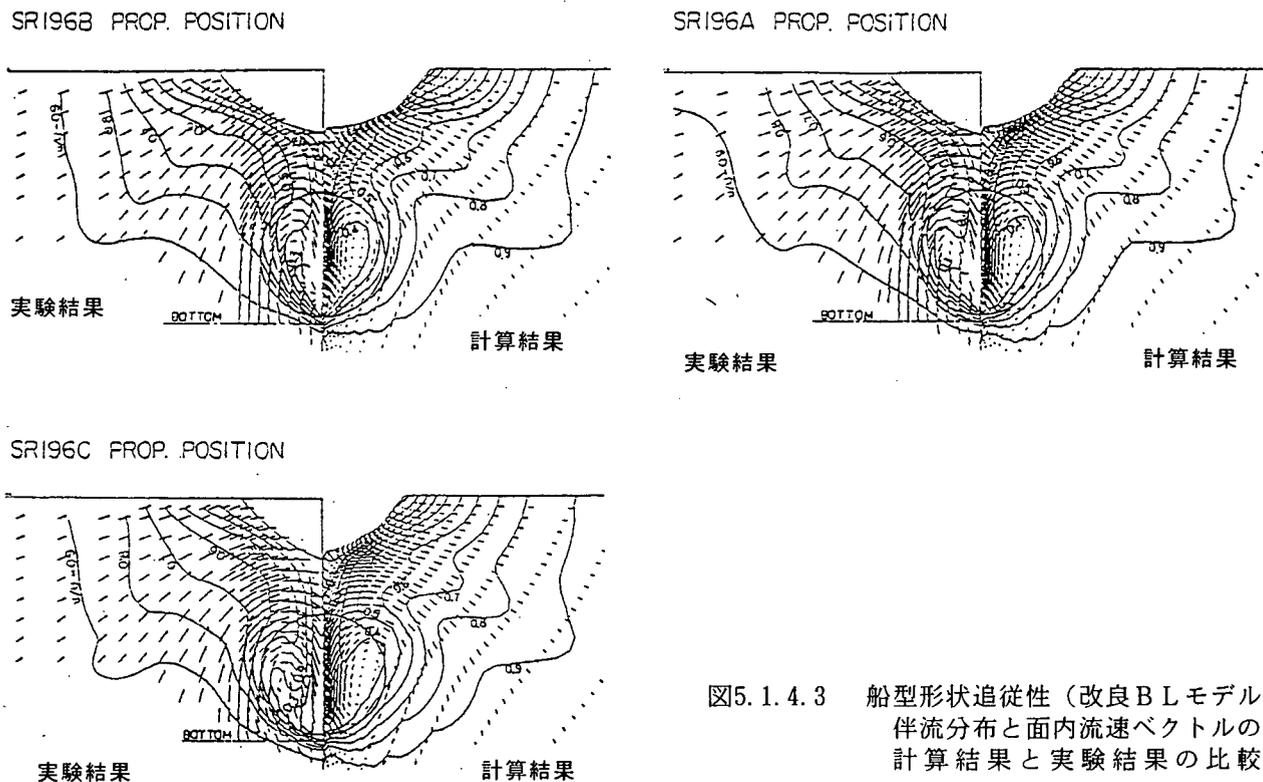


図5.1.4.3 船型形状追従性 (改良BLモデル)
伴流分布と面内流速ベクトルの
計算結果と実験結果の比較

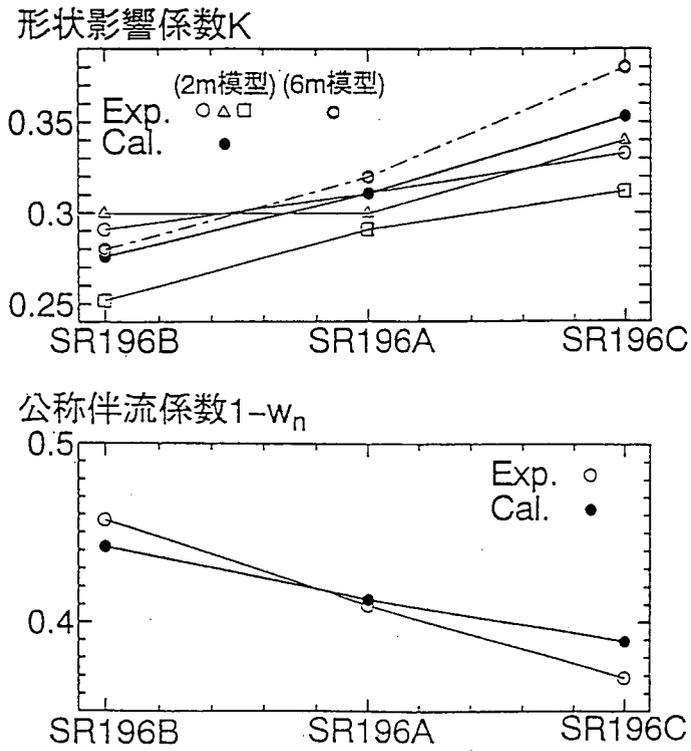


図5.1.4.4 船型形状追従性(改良BLモデル)
公称伴流係数と形状影響係数の
計算結果と実験結果の比較

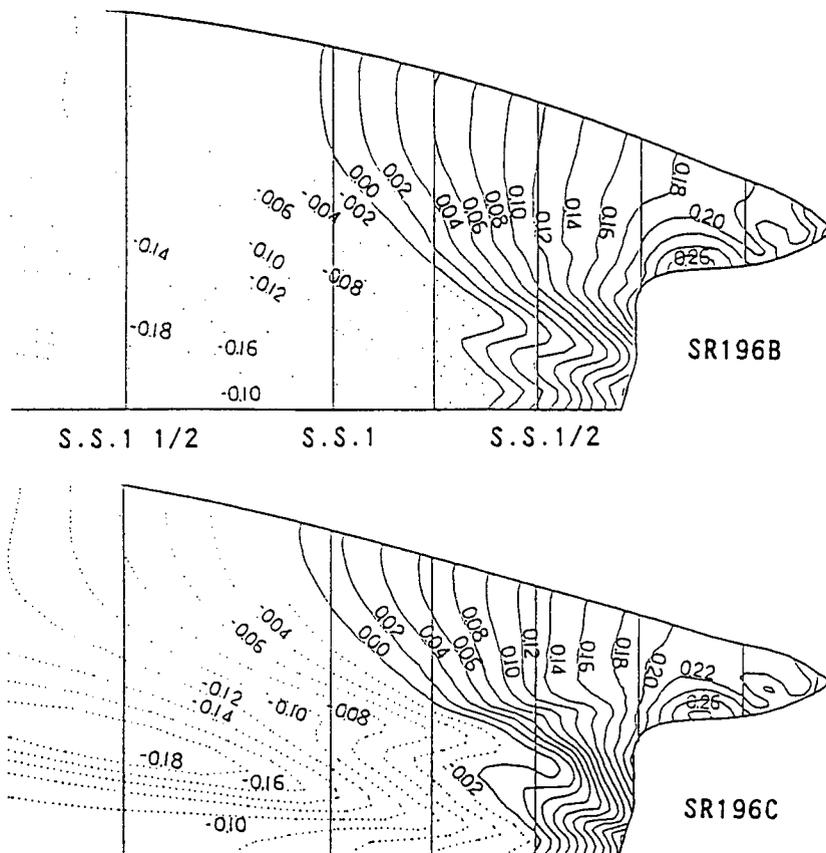


図5.1.4.5 船体表面圧力分布の計算結果(船尾)

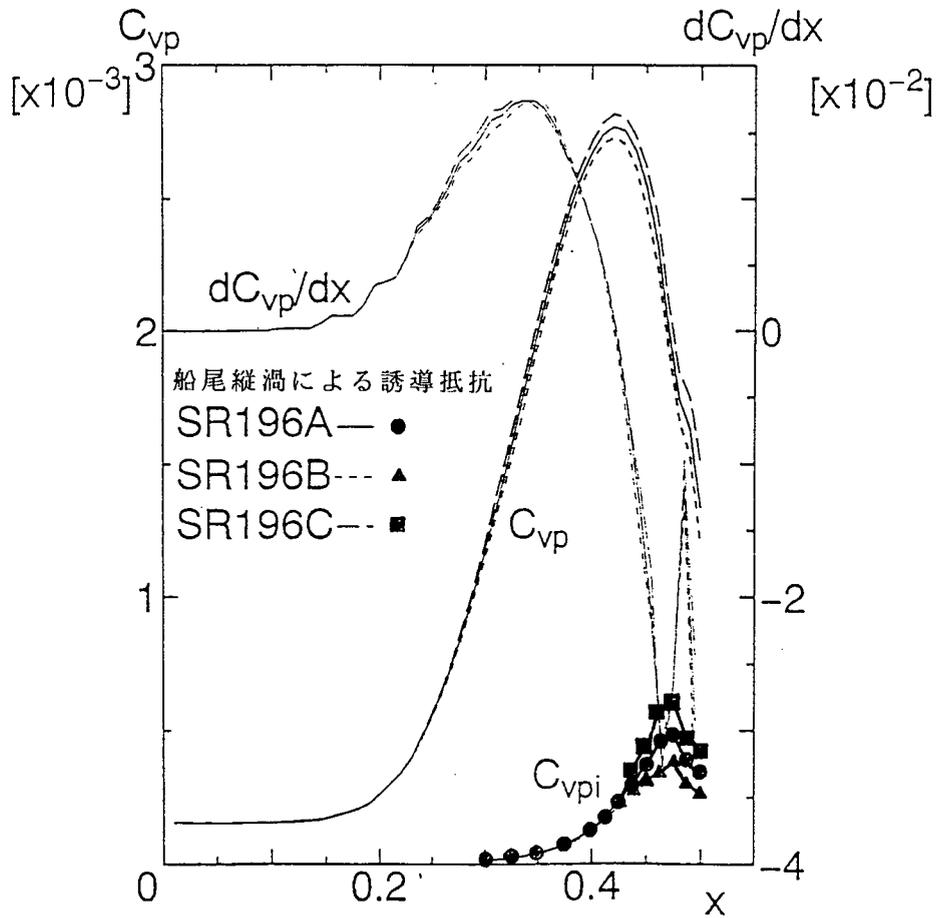
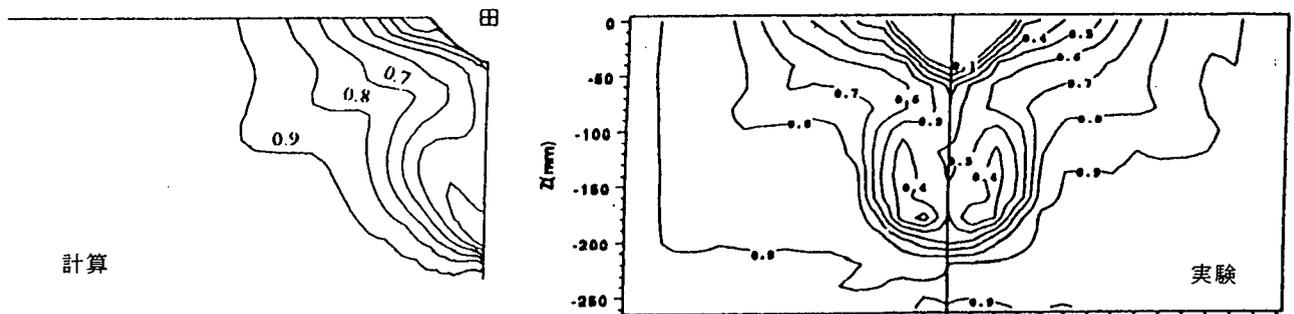


図5.1.4.6 粘性抵抗係数（計算結果）の船型間の比較



SR221B船型 grid-2: マルチブロック格子 BL(CF+PG)モデル

図5.1.4.7 SR221船型 AP断面 伴流分布 実験 (SR221 船研)

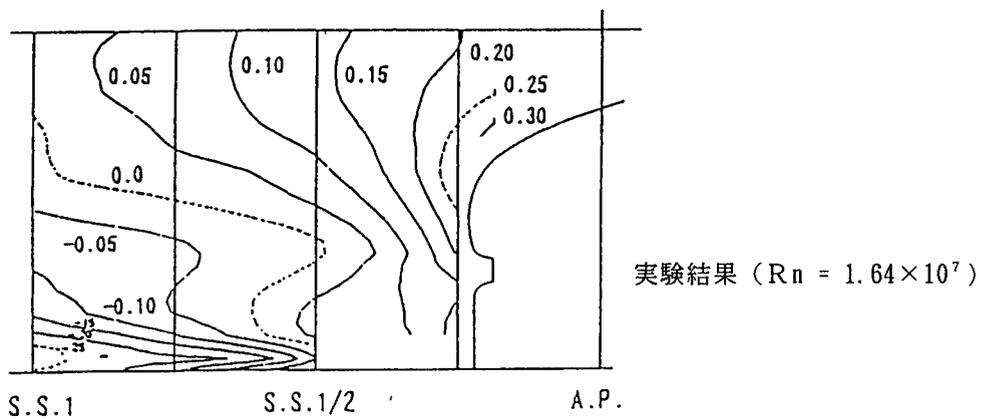
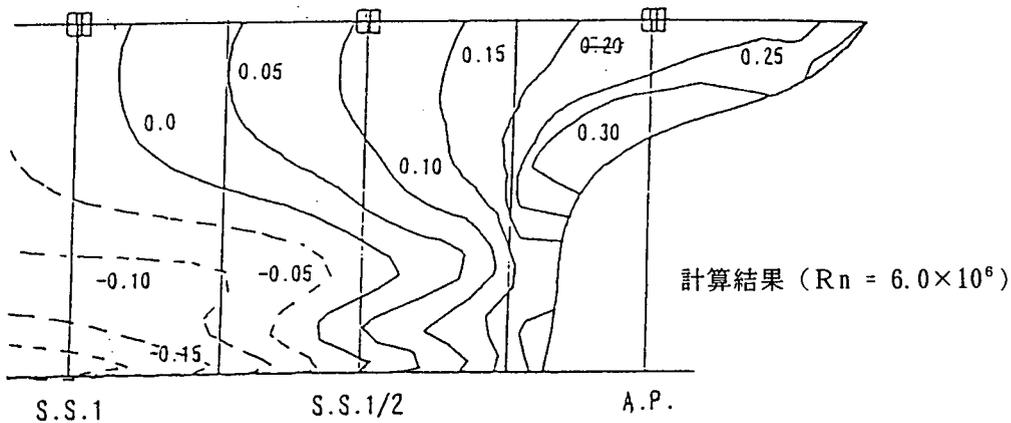


図5.1.4.8 「だいおう」船体表面圧力分布

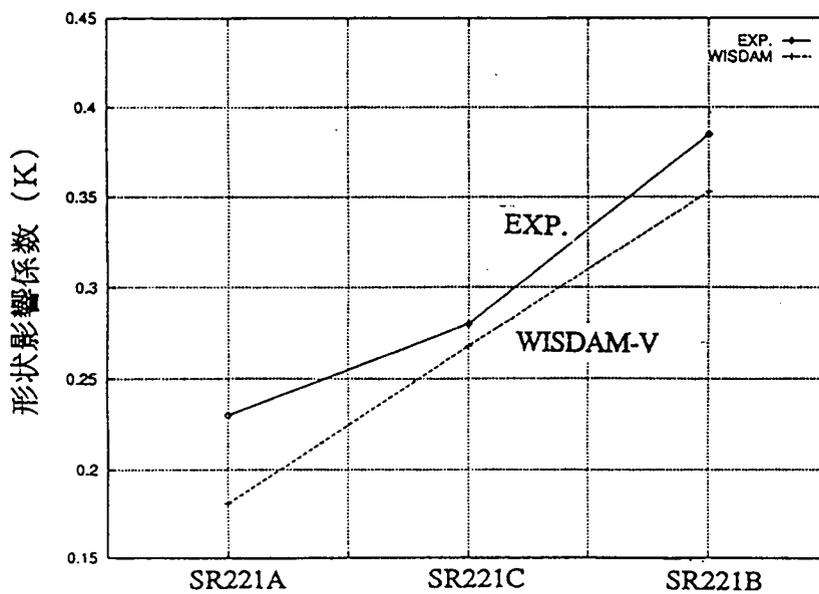


図5.1.4.9 SR221船型の形状影響係数(計算値と実験値)

5.2 造波粘性流場推定法

5.2.1 はじめに

タンカー等の肥大船の満載状態では船速が遅く、造波抵抗や船尾流場に及ぼす波の影響は大きくないが、軽荷状態では船速も比較的速くなるので肥大船の推進性能に及ぼす波の影響が無視できなくなる。しかし、肥大船の作る波は非線形性が強く、現象が複雑で数値計算上も難しい問題があるので、厳密な取り扱い是将来の課題として、ここでは、肥大船の造波シミュレーションの基本的な数値計算法について研究し、実験結果と検証しながら課題の抽出を行った。

造波粘性流場推定法は、基礎粘性流場の推定法をベースとして、自由表面の境界条件、水面の変形に応じた計算格子の生成等について新たに機能を加えた。

5.2.2 数値計算法

計算には、NICE法、WISDAM法、FRESH法の3種類の計算法を使用した。自由表面を考慮した計算では、船体及び自由表面に適合した格子を用いて計算を行う。いずれの計算法においても、自由表面形状が時々刻々変化するため、格子系もそれに合わせて動く、動格子系の計算となる。WISDAM法では時間精度を持つMAC法を用いているため、時間変化が物理的意味を持つが、NICE法とFRESH法では擬似圧縮法を用いているため、物理的意味のない擬似時間変化を辿って定常解に収束する。

自由表面から離れた流体内部における動格子系の計算は、コントロールボリュームが時間的に動く影響を考慮する以外は、double modelの計算と同じである。

自由表面に接する箇所での計算では、自由表面境界条件を考慮する必要がある。自由表面境界条件は、3方向の運動量の保存則である動的条件と、ある時刻に自由表面上に存在する流体粒子は、ずっと自由表面上に留まるといった運動学的条件からなる。具体的には、自由表面において圧力が大気圧と釣り合い、接線方向に応力を持たないという条件と、波高 h に関する次式である。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = w \quad (5.2.2.1)$$

各時間ステップにおける格子は、点をガス方向に移動させることによって、新しい自由表面形状に適合するよう、代数的に生成される。

5.2.3 模型試験

造波粘性流場推定法のValidationのためのデータベースとするために、SR196C船型の4m模型船について、満載状態と軽荷状態で、自由表面波の計測を行った。模型船の航走速度は満載、軽荷状態ともに1.0m/sで、フルード数(Fn)は0.16である。波高はサーボ式波高計を計測架台の上に並べて、5cm間隔の格子点上で計測した。満載状態の波高鳥瞰図を図5.2.3.1に示す。

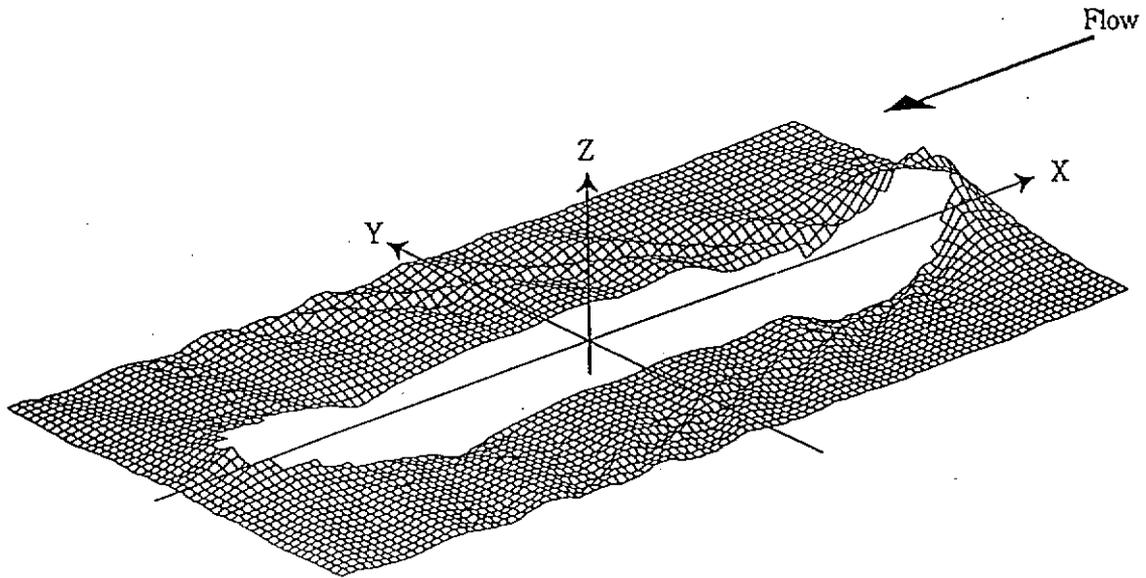


図5.2.3.1 SR196C (満載状態) 波紋鳥瞰図 (波高倍率10倍、 $F_n=0.15$)

5.2.4 流場推定法構築・評価

(1) 流場推定法構築

船舶の船型を決定する際には、船型計画とその性能予測が繰り返し実施される。その際、性能予測に用いる各種推定法が船型の相違に基づく流場の違いや性能の優劣を正しく評価できることが極めて重要である。そこで、ここでは5.2 (2)で述べた各種流場推定法を用いて形状の異なる3船型 (SR196B, Cの満載状態およびSR196Cの軽荷状態) に関する計算を実施し、実験結果と比較検討を実施した。

(a) SR196B, C [満載状態] の計算

SR196B, C船型について、造波特性や抵抗値の差違が計算でどの程度把握できるかをNICE法を用いて検討した。同シリーズ船型は、船体前半部形状は全く同型で、船体後半部のフレームライン形状がC→Bの順にU型からV型に変更されている。 F_n および R_n の条件は、4m模型船を用いた船体周りの波高の詳細計測を実施した際の試験状態 ($F_n=0.16$, $R_n=4.0 \times 10^6$) と同一とした。なお、抵抗値に関してはSR196研究部会にて実施された4m模型を用いた水槽試験の結果を参照した。図5.2.4.1にSR196C船型の船体周りの波紋を実験結果と比較して示す。これによると、船体近傍の波高分布は実験と良く一致しているが、船体から離れるにしたがい計算の波高は大きく減衰している。次にSR196B, Cの船側波形 (計算結果) を比較して図5.2.4.2に示す。船首の波形は、船体形状が同型であることに対応してほぼ同じであるが、船尾では、水線面が急激に内側に入り込むC船型がSS2 1/2 ~ 2 ($x=0.25 \sim 0.3$) 付近の波の谷、およびその後方の波の峰の高さが、僅かではあるが大きく計算されて水線面形状の差が現れている。

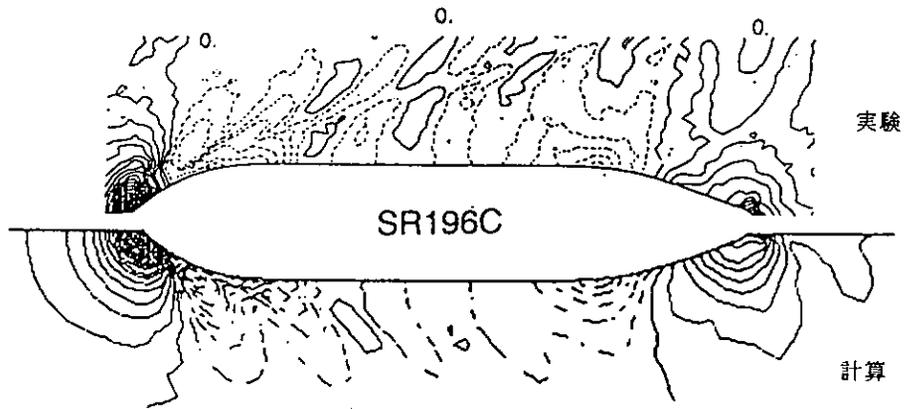


図5.2.4.1 船体周りの波紋の比較：SR196C [満載状態] ($\Delta h=0.0005$)

抵抗値を比較して図 5.2.4.3 に示す。全抵抗係数 C_T は、SR196C に比べ SR196B 船型が小さいが、計算でも同様の違いが得られた。ただし、両船型の形状の相違は、前述のとおり船尾フレームライン形状にあるため、抵抗値の差違は主に形状影響係数 $(1+K)$ の差違によるものである。そこで、水面を平坦と仮定したいわゆる Double Model Flow の計算を実施し、水槽試験結果の解析と同手法、すなわち上記 C_T および $(1+K)$

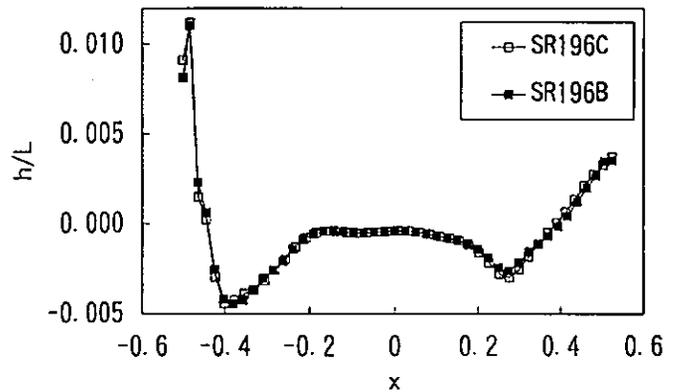


図5.2.4.2 船側波形の比較：SR196B, C [満載状態]

を用いて造波抵抗係数を算定して図 5.2.4.4 に示す。計算、実験ともに船尾波の山谷の大きい SR196C 船型の造波抵抗が大きくなる傾向を示している。

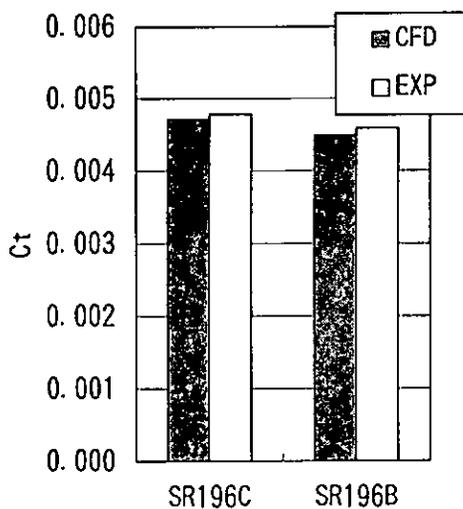


図5.2.4.3 C_T の比較

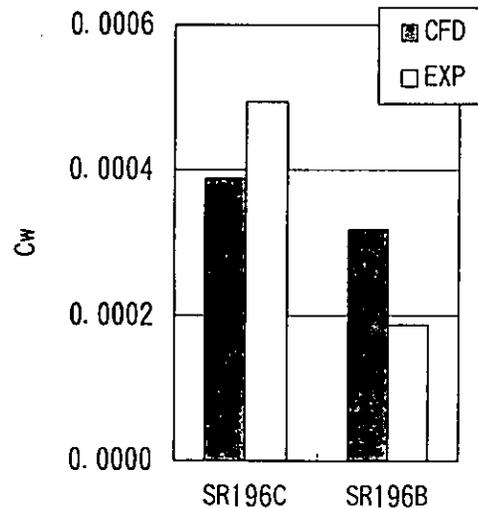


図5.2.4.4 C_w の比較

(b) SR196C船型の満載状態と軽荷状態

同一の船型でも載荷状態が異なると一般に造波現象は大幅に異なる。そこで、SR196C船型の満載状態と軽荷状態の自由表面流れを計算し、波紋と船側波形を水槽試験結果と比較して計算精度の検証を実施した。計算法として、FRESH法およびWISDAM法を用いたが、計算結果はほぼ同等であったため、ここでFRESH法の計算結果を用いてその推定精度を概説する。

波紋図を図 5.2.4.5に示す。船体近傍での船首波、船首肩波、船尾肩波、船尾波の形はよくシミュレートされてる。しかし、低いフルード数の短波長の波を解像するには、格子の数が十分ではないと思われる。同じ理由で船体から離れたところの波の計算値は減衰が強い。満載と軽荷状態の波紋の実験結果を比較すると、満載状態では船首波波頂線は円弧状であるのに対し、軽荷の波頂線は直線的に

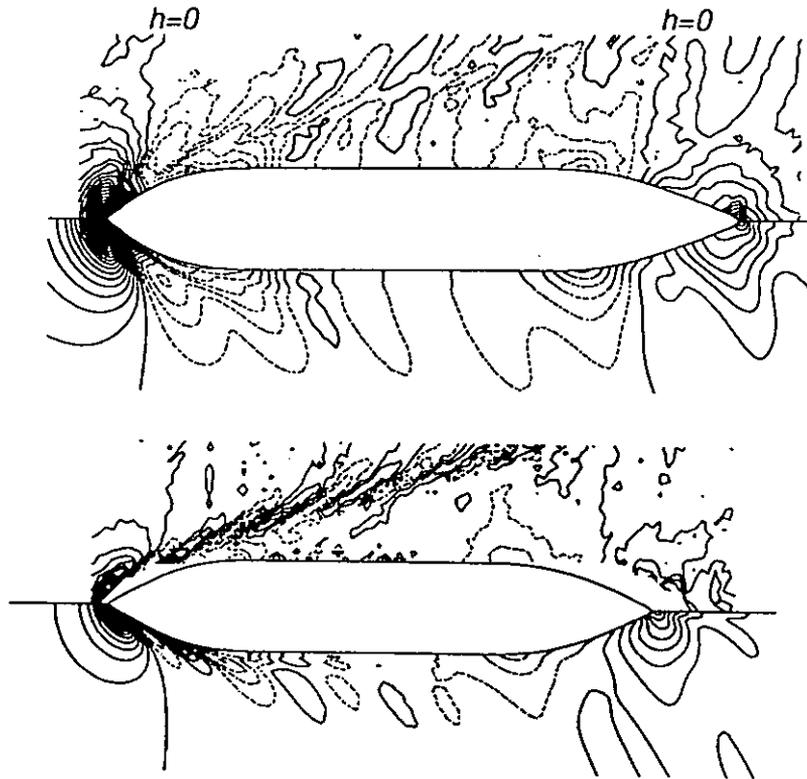


図5.2.4.5 波紋図の比較（上段：満載状態、下段：軽荷状態）
 $\Delta h = 0.5 \times 10^{-3}$ 、上半分：試験結果、下半分：計算結果

斜め後方へのびている。また、船尾肩波は軽荷状態の方が大きい。計算結果はこれらの違いを船体近傍ではよく再現している。

次に、船側および船体近傍の縦切り波形を実験結果と比較して図 5.2.4.6および7に示す。満載状態では、満載状態の船側波形は実験結果とほぼ一致するが、縦切り波形には、若干の位相遅れと波高の減衰が見られる。一方、軽荷状態は、実験結果との比較は縦切り波形のみである。計算結果の波形にやや振動が見られるものの、それを除けば満載状態とほぼ同様の計算精度を有しているものと考えられる。

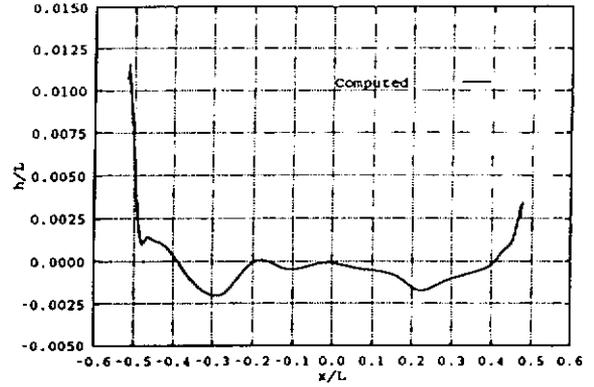
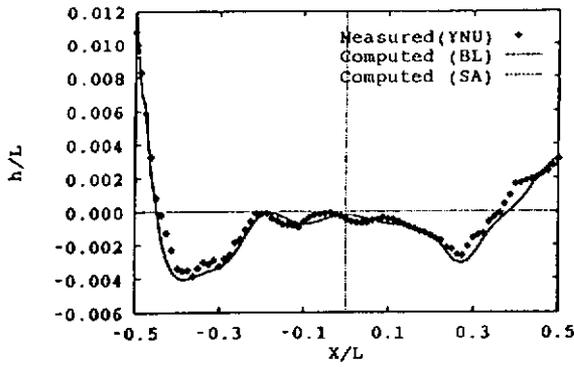


図5.2.4.6 船側波形の比較（左側：満載状態、右側：軽荷状態）

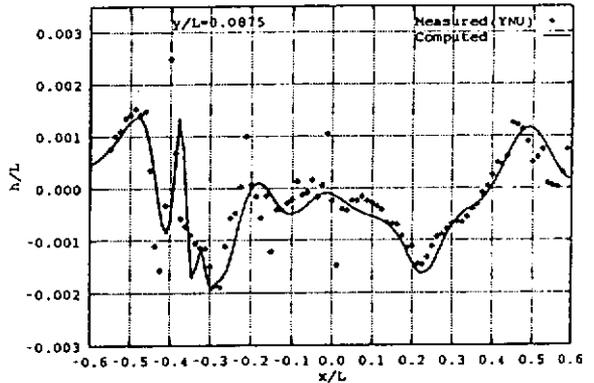
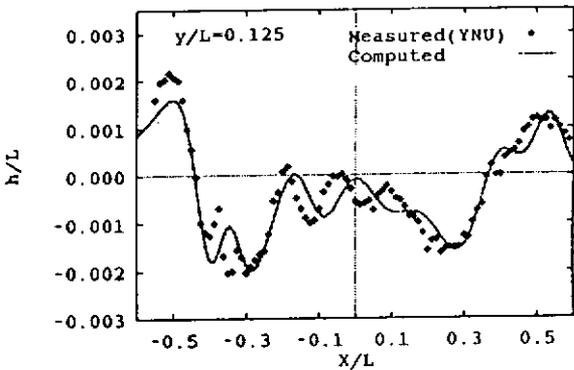


図5.2.4.7 縦切り波形の比較（左側：満載状態、右側：軽荷状態）

(2) 評価

本研究において構築した造波影響を考慮した流場推定法は、船型の相違による船体近傍の波紋の違いや抵抗の差が定性的にはあるが予測可能であることが分かった。ただし、波形の計算精度は船体近傍では良好であるが、船体から離れた所では、波高の減衰や位相の遅れが見られる。フルード数が低いいため水面波の波長が短くなり、それに対して格子解像度が不足していることが原因と思われる。

造波影響を考慮した流場推定法は、数値安定性が悪く、計算が途中で発散するなどの問題が生じた。5.1の基礎粘性流場推定法に比べ、計算の安定性に対する格子依存性が高く、また、軽荷状態では、碎波も含んだ非定常性の強い波となることから、特に数値計算の安定性が悪い。歪みの小さい格子を作成すること、時間刻みを小さくすること、ゆるやかな加速を行う等によって、ある程度の計算の安定化を図ることも可能であるが、今後、さらに計算法そのものの改良が必要と考えられる。

5.3 自航時粘性流場推定法

5.3.1 はじめに

通常の船は船尾にプロペラを装備して、プロペラが発生する推力により推進している。このため、プロペラは船の伴流の中で作動し、またプロペラの吸引作用により船尾周りの流れが変化するなどの流体力学的な相互作用が生じて、これが船の推進効率に大きな影響を及ぼしている。したがって、船の推進性能を推定するためには、船体単独の流場や抵抗のみならず、プロペラを含めた自航時の船尾粘性流場についても精度の高い推定法が必要である。

ここでは、基礎粘性流場推定法をベースにしてプロペラの影響を流場の支配方程式の中に外力項として考慮した自航時の粘性流場を推定する方法について研究した。

5.3.2 数値計算法

船体まわり粘性流場計算用のNS計算スキームと、ポテンシャル流に基づくプロペラ計算法を組み合わせ、自航時粘性流場の数値計算法を構成する。

船体まわり流場用NSコードとしてNICEコードあるいはWISDAMコードを用いると、プロペラ位置における流速分布が得られる。これを計算条件として、無限翼数プロペラ理論を用いてプロペラ計算を行うと、プロペラの推力 T とトルク Q が、プロペラ作動円に働く単位面積あたりの推力 P_x 、および回転方向の力 P_θ の積分値として得られる。

$$\begin{aligned} T &= \rho \int_{r_B}^{r^0} \int_0^{2\pi} P_x r dr d\theta \\ Q &= \rho \int_{r_B}^{r^0} \int_0^{2\pi} r P_\theta \cdot r dr d\theta \end{aligned} \quad (5.3.2.1)$$

この P_x と P_θ の分布を、プロペラ面位置における外力項として船体まわり流場用NSコードに加えて再度計算すると、プロペラ影響が考慮された流場が得られる。

数値計算によって、船体とプロペラ推力がつり合う自航状態に対応するプロペラ回転数の決定は、以下の手順で行う。

- 1) 曳航状態の船体まわりの流れを計算し、得られたプロペラ面での流速分布をプロペラ流入速度分布としてプロペラ計算に入力する。
- 2) プロペラ計算を行い、プロペラ推力が船体周囲流場計算で求めた船体抵抗と一致するよう、プロペラ回転数を決定する。ただし、シップポイントに対応する場合は摩擦抵抗修正を考慮する。
- 3) 2)のプロペラ計算で求めたプロペラ力 P_x 、 P_θ をNSコードに入力し、プロペラ影響を考慮した船体まわりの流れの計算を行う。
- 4) プロペラ面内流速分布を再度求め、プロペラ誘導速度を差し引いたものをプロペラ流入速度分布としてプロペラ計算に入力する。

以下、2)~4)を、プロペラ回転数が収束するまで繰り返す。

上記の計算を行うためには、NS計算用格子とプロペラ計算用パネルとの間で、流速およびプロペラ力を補間によって受け渡す必要がある。図 5.3.2.1に船体周りの格子とプロペラパネルの空間的配置例を示す。また、図 5.3.2.2に、舵を考慮した計算も行った場合の船体と舵まわりの格子を示す。

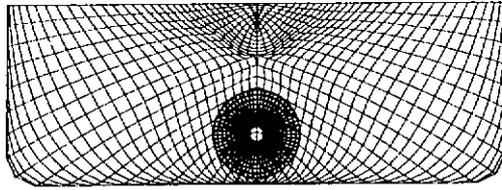


図5.3.2.1 船体表面格子とプロペラパネル

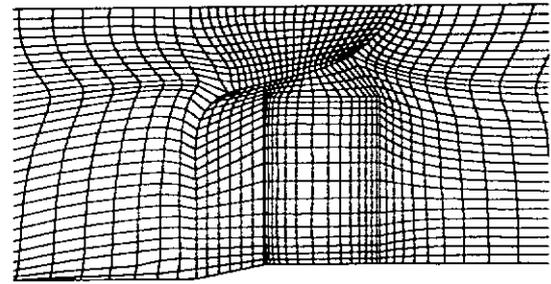


図5.3.2.2 船尾と舵まわりの格子

5.3.3 流場推定法構築・評価

(1) 流場推定法構築

NICEコードとWISDAMコードを用いた自航時粘性流場推定法を使用して「SR196A/B/C船型」、「龍光丸」、「だいおう」の3船型についての計算を行った。

NICEコードによる「龍光丸」の曳航時と自航時（プロペラ作動時）の伴流分布の比較を計測値と合わせて図 5.3.3.1 に示す。プロペラ作動の吸引作用により流れや縦渦が船体中心面の方に縮む傾向があるがS.S.1/4の断面に着目すると良く分かり、曳航時、自航時ともに、計測値と良く合っている。プロペラと舵の後流（ $x=0.55$ ）では流れが舵により上下に分断されている様子が再現されている。図 5.3.3.2 にプロペラ作動時の船尾部の圧力分布について計算と実験の比較を示す。計算によって定性的定量的に現象が良く捉えられている。図 5.3.3.3 に曳航時と自航時との船体表面差圧力分布 ΔC_p を示す。プロペラ吸い込み効果が船尾に向かって急増しているのが分かる。これを積分した量が推力減少率 t に比例する量であり、自航時の伴流値とともに自航性能の評価に重要な情報量となる。

WISDAM-Vコードを用いた計算によるSR196C船型の圧力分布を、実験値と比較して図 5.3.3.3 に示す。若干の違いはあるが概ね良く実験値と一致している。WISDAM-VコードによるSR196A, B, C船型の推力減少係数（ $1-t$ ）を実験値と比較して図 5.3.3.4 に示す。また有効伴流係数（ $1-w$ ）の比較を図 5.3.3.5 に示す。SR196船型はB, A, Cの順に船尾の肋骨線形状がV型からU型に変化している。計算による $1-t$ はA船型が幾分大きくなっているが、B船型とC船型の定性的な関係は実験と良く一致している。また、計算値と実験値の定量的な差は、舵なしの計算値を舵有りの実験値と比較しているため、舵なし状態についての比較を行った「だいおう」では、計算による $1-t$ が0.795に対し実験値が0.792と、定量的にも良い一致を示している。

$1-w$ については計算と実験値のRn数が異なるため一概に評価できないが、B, A, C船型間の大小関係は一致しており、船型間の違いを表していることがわかる。

(2) 評価

- ・従来、高精度計算が不可能であった船体とプロペラの相互作用の計算が可能となり、自航時粘性流場をシュミレートできるようになった。これによりプロペラ作動による船尾部の圧力変化や伴流分布の縮小が計算で捉えることができ実験と良い一致を示した。
- ・計算による自航要素（ $1-t$ 、 $1-w$ ）については船型間の比較が可能となり、流場の計算結果とともに船型改良の指針として活用できることがわかった。
- ・今後、計算実績を増やし、舵の取扱いやプロペラの相互作用に関係する格子密度などのパラメータスタディを行いつつ、改良を加えることにより定量的な精度も大きく向上するものとする。

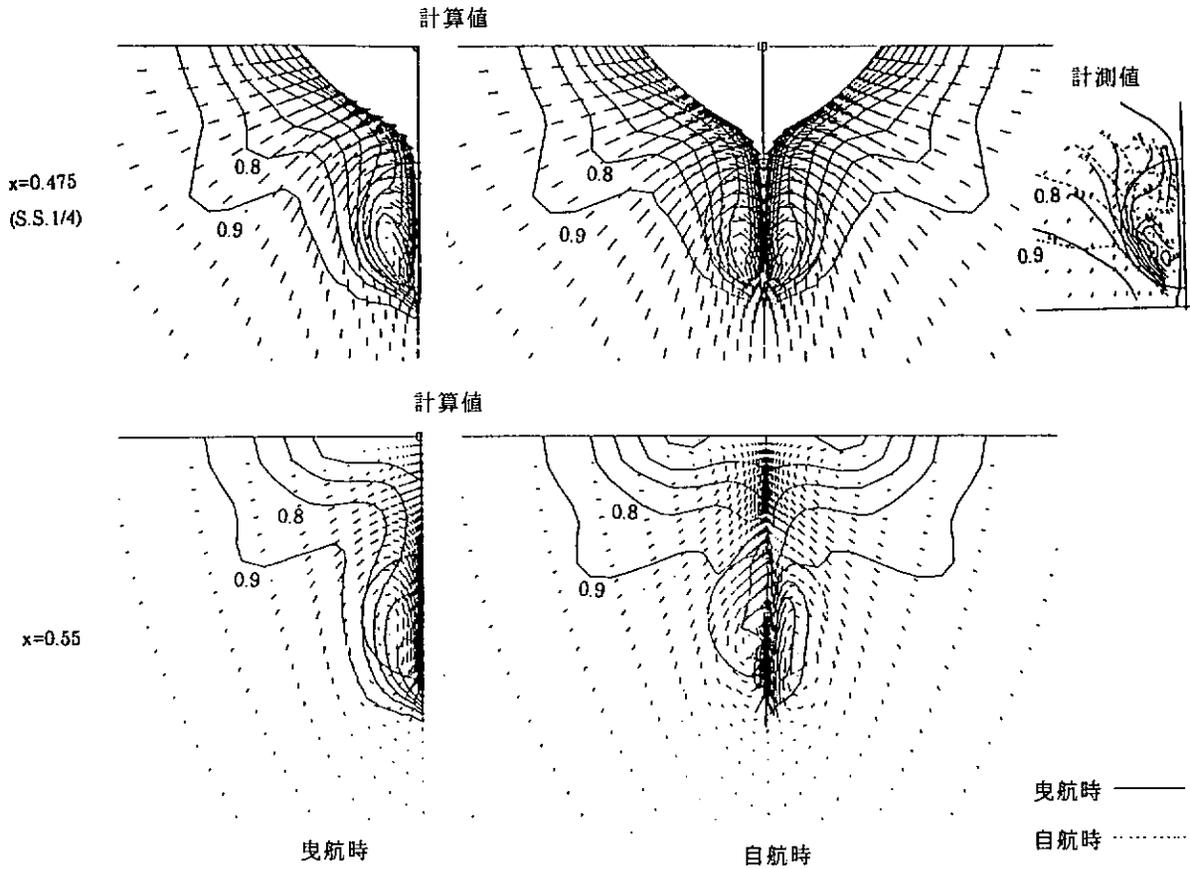


図5. 3. 3. 1 曳航時と自航時の伴流分布（龍光丸）

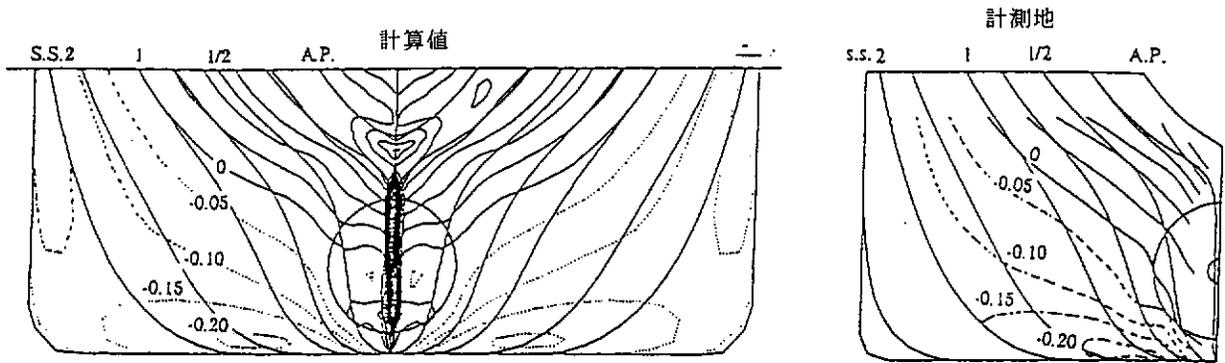


図5. 3. 3. 2 自航時の船体表面圧力分布（龍光丸）

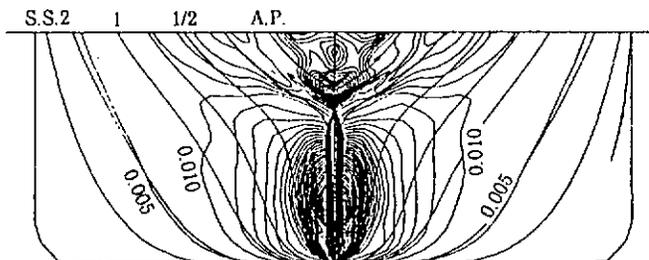
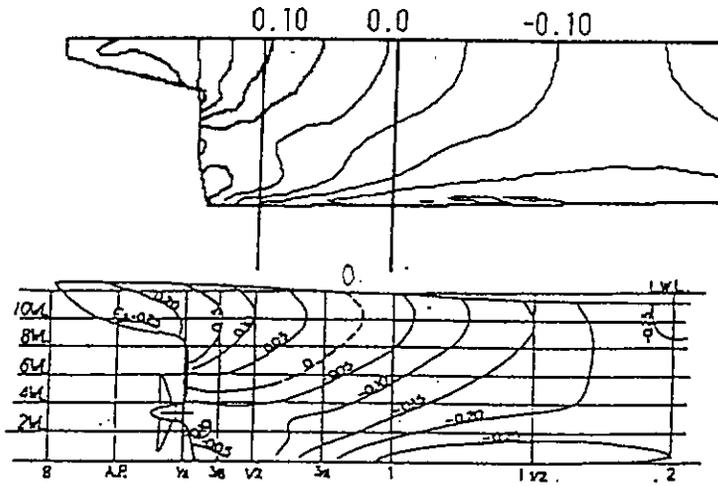


図5. 3. 3. 3 曳航時と自航時との船体表面差圧力分布 ΔC_p （龍光丸）



SR196C(上:計算、下:実験)

図5.3.3.4 自航時の船体表面圧力分布 (SR196C船型)

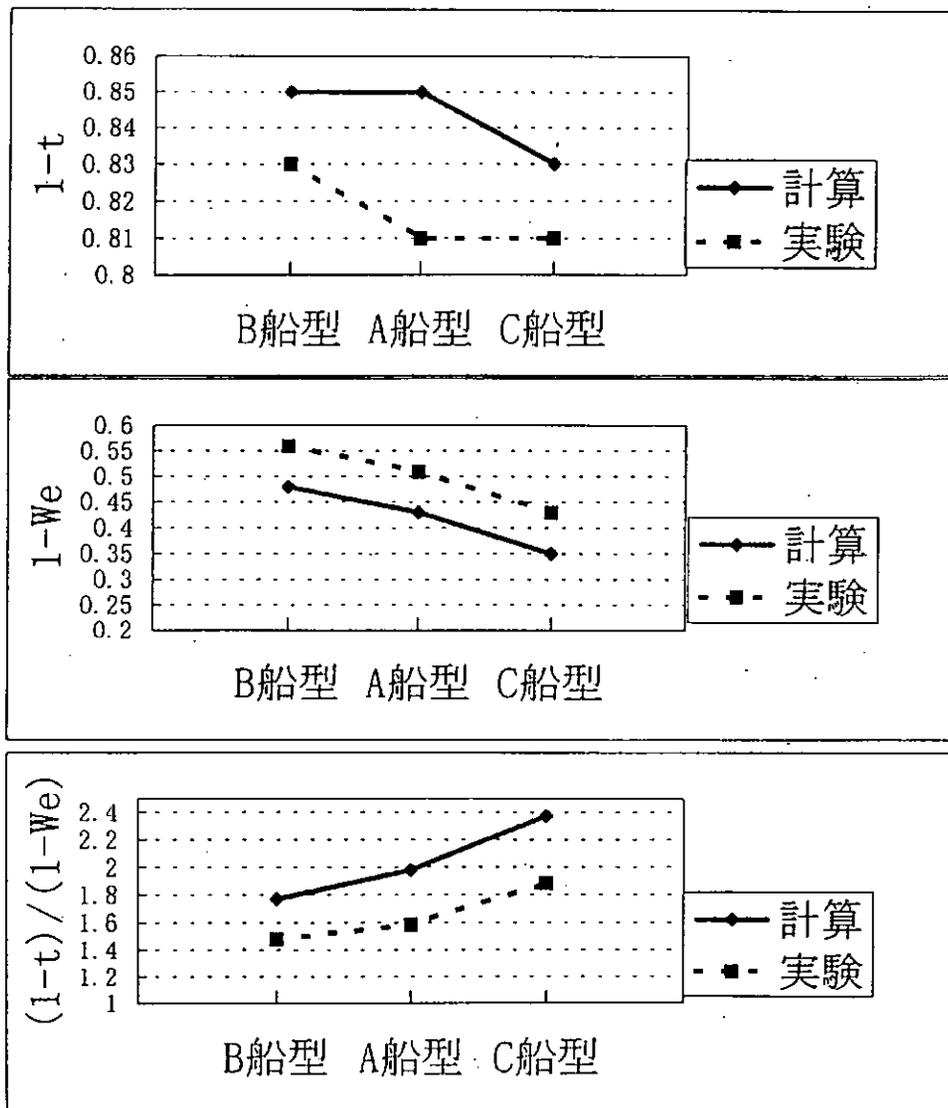


図5.3.3.5 SR196A/B/C船型の推定自航要素 (計算と実験)

5.4. 将来に向けた研究

本SRでは、CFDを柱とした「流場解析的船型計画法」を将来にわたって推進するために、これまで説明した実用化研究だけでなく、今後有望と思われる要素技術を開発する高度化研究を行った。

5.4.1 高次乱流モデル

将来、CFDの適用が副部等がついた複雑形状船型へと拡大することを考慮し、本SRで用いたゼロ方程式系乱流モデルに留まらず、より高次の乱流モデルについて検討した。

Spalart-Allmarasモデル（以下、SAモデル）は、過動粘性係数 ν_t に関する輸送方程式を解く1方程式モデルであり、ゼロ方程式モデルでは困難な、剥離等を伴う流れの計算にも適用することができる。図5.4.1.1にSR196A船型の ν_t 分布と伴流分布を示す。BLモデルが不連続的な ν_t 分布をしているのに対して、SAモデルは、流場の輸送方程式に類似の輸送方程式に基づいているため、滑らかで自然な分布形状を有している。伴流分布に大きな改善は見られないが、BLモデルと同様な改良を行うことによって、性能向上が期待される。

乱動エネルギー k とその散逸率 ϵ の2つの量に関する輸送方程式を解く2方程式モデルである $k-\epsilon$ モデルは、工学において最もよく用いられる乱流モデルであり、本SRにおいても、壁近傍では k の方程式だけを解く2層式 $k-\epsilon$ モデルの検討を行った。

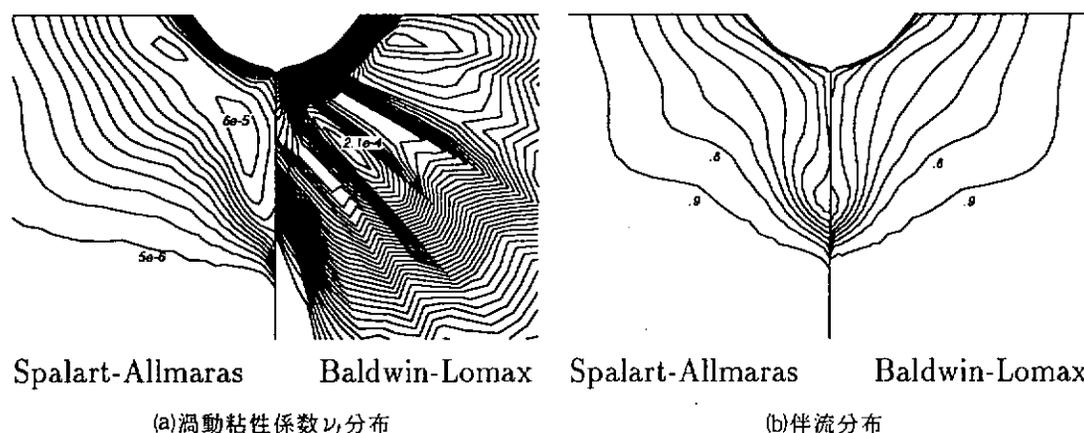


図5.4.1.1 Spalart-Allmaras モデルとBaldwin-Lomax モデルの比較
SR196A船型、プロペラ面

5.4.2 格子生成法

CFDの実用問題への適用野ポトルネックの一つである複雑形状問題の解決を目指して、局所格子細密化法と非構造格子法を検討した。

局所格子細密化 (Local Grid Refinement) 法は、格子密度を局所的に高めることによって、計算時間の僅かな増加だけで計算精度を大幅に向上させることができる。図5.4.2.1に船尾縦渦の形成に寄与する肥大船尾ビルジ部の細密化を示す。

非構造格子 (unstructured grid) 法は、2次元では3角形、3次元では4面体を要素とした格子であり、形状自由度が非常に高い。図5.4.2.2にフラップ付き2次元翼型まわりの非構造格子を示す。なお、非構造格子法に用いる乱流モデルは、幾何学的拘束条件の少ない1方程式モデルや2方程式モデルが適当である。

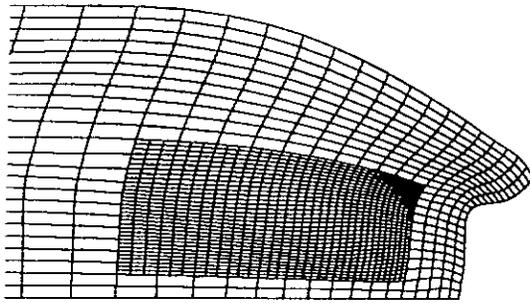


図5.4.2.1 局所格子細密化

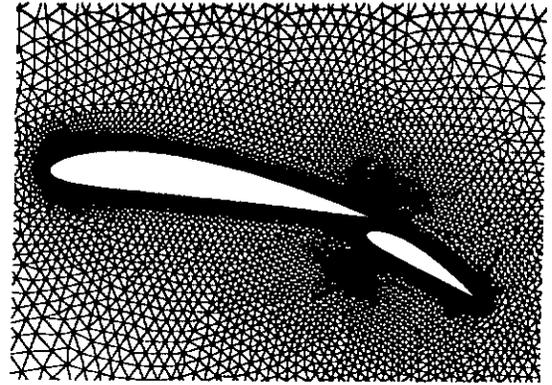


図5.4.2.2 非構造格子

5.4.3 碎波モデル

肥大船の船首で、特にバラスト状態において発生する碎波現象は、自由表面計算を困難にするため、詳細計算による検討とモデル化を検討した。図 5.4.3.1、2 に水面貫通柱まわりの波紋を示す。船首の首飾り状の波が捉えられている。

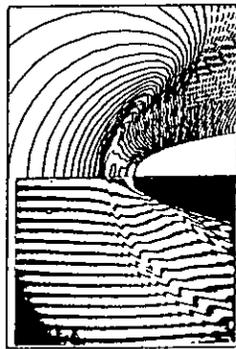


図5.4.3.1 水面貫通翼型柱の碎波計算
上：計算値、下：実験

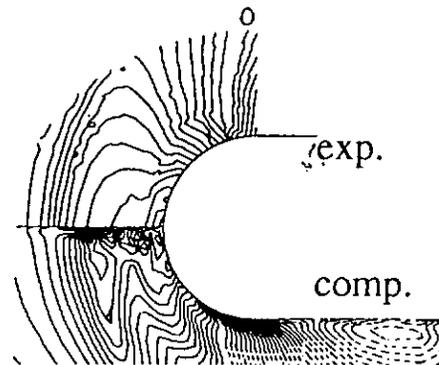


図5.4.3.2 水面貫通翼円柱の碎波計算
上：実験、下：計算

5.4.4 可視化情報定量化

船体表面摩擦応力分布は船尾縦渦の形成と密接な関連がある。従来は定性的なパターン認識にのみ用いられていた油膜法を改良し、油膜の移動量を画像処理によって計測することによって、表面摩擦応力計測ができる、新しい可視化計測法を開発した。図 5.4.4.1に、回流水槽で得られたSR196C船型の限界流線と船体表面摩擦応力分布を示す。

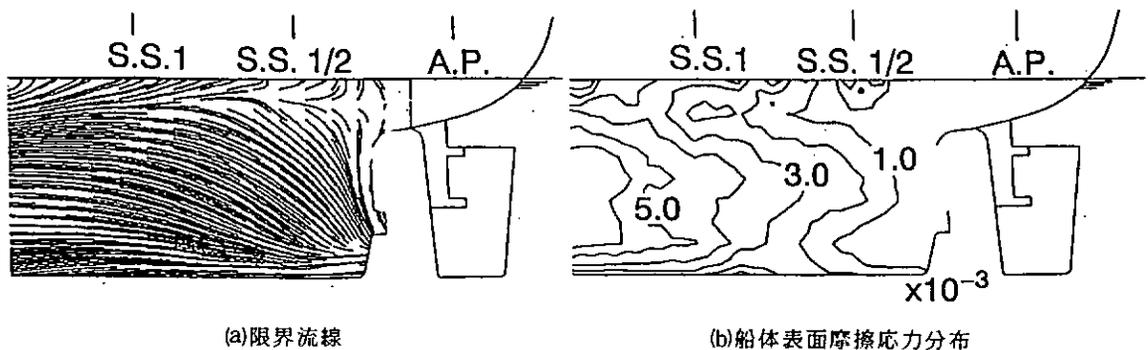


図5.4.4.1 油膜の移動量に基づく可視化情報定量化 (SR196C船型)

5.5 成 果

(1) 「流場解析的船型計画法」を目指した流場推定法の構築：

3年間のSR研究「大型肥大船船尾流場推定法高度化」により要素技術研究、実用化研究、模型試験の3研究を遂行し、これらを総合的に取り纏めて「流場解析的船型計画法」を目指した流場推定法を構築した。

(a) 流場推定法開発

NICE法、WISDAM法を核として数値計算法、格子生成法、乱流モデルの改良を積み重ね、

(1) 基礎粘性流場推定法

(2) 造波粘性流場推定法

(3) 自航時粘性流場推定法

の3つの推定法を開発した。

(b) 設計への応用法の開発：

上記の推定法を多種類の船型に応用した適応性計算により、粘性流場、伴流、造波、抵抗等の各観点から推定精度を評価するとともに、設計指針に有効な計算情報のポスト処理法を作成して推定法に組み込み、「流場解析的船型計画法」に応用できる流場推定法の構築を行った。

(c) 模型試験法開発と検証用データベースの構築：

肥大模型船2隻のレイノルズ応力分布の詳細計測を実施、乱流モデルの改良に有効に利用すると共に今後の貴重なCFD検証用データベースを構築した。

(d) CFD要素技術の高度化：

将来に向けた要素技術研究として、高次乱流モデル、格子生成法、砕波モデル、可視化情報定量化等の研究を実施し、今後の更なる流場推定法高度化に備えた。

さらに、本推定法構築を通して得られたCFDのキーテクノロジー（数値計算法、格子生成法、乱流モデル）の研究成果は、今後、本推定法の高度化のみならず他の技術開発の要素技術として有効に役立つ。造船キーテクノロジーの高度化が達成できた。

(2) CFD技術者の成育

本共同研究の分担研究遂行により多数の有能なCFD技術者が成育した。

発展途上にあるCFDに基づく方法論の構築には理論／実験／数値解析／設計／電算等多岐にわたる学問・技術と優秀な若い人材の一致団結した研究の推進が必須であり、単独では殆ど達成不可能である。推定法構築に対する一致したニーズと計算・実験環境の発展に支えられてSR共同研究の場で効果的に達成できた。

6 成果の活用

我国造船業のかかえる第1の問題は、国際競争力の維持・強化であり、これを達成するための課題として、

- 1) 船舶のハイパフォーマンス化
- 2) 設計・開発研究の高効率化
- 3) 先端技術対応と新規需要創出

などがある。

いずれの課題達成にも船舶海洋流体力学の果たすべき役割は大であり、とりわけ、高度先端技術であるCFD技術はそのキーテクノロジーとして位置付けられてきた。CFDは数値流体力学という学問であり、これを基礎とて開発した技術の要素は他の目的の技術の要素として容易に利用できるからその応用範囲は極めて大である。

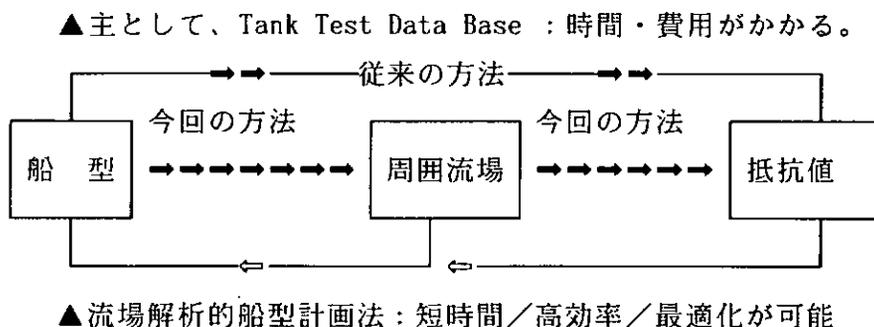
本SR「大型肥大船船尾流場推定法の高度化」は従来達成し得なかった肥大船の船尾粘性流場の解明に挑戦し、新しい船型計画法として使用できる各種流場推定法を開発した。残された更なる高度化のための課題は種々あるが、設計の現場で計算実績を増やし地道に保守、改良を加えて行くことが必要である。

即時利用可能な活用法から短期、中期研究への活用法について以下に述べる。

- 1) 即時活用：設計における「流場解析的船型計画法」のツールとして：

所与の設計条件下で性能の良い安全な船型をニーズに応じていかに効率良く設計するかという日常的设计から新規需要創出を目指した船型開発まで、従来から模型試験中心の船型計画法が行われてきた。この方法は時間と費用がかかるだけでなく、特別な計測をしない限り、ある船型（原因）に対して抵抗値（積分量・結果）が得られるだけで、どこが改良のポイントなのか判然とせず、設計のための情報量が極めて少なかった。

一方、本SRで開発した船体周囲流場（基礎／造波／自航時粘性流場）推定法を有効に活用すれば、肥大船の船体抵抗の90%以上を占める粘性抵抗や造波、プロペラとの相互作用を説明するメカニズムが短時間に効率良く高精度で推定できるだけではない。



船型（原因）から抵抗（結果）へのプロセスの途中で、周囲流場という（因果関係を握る豊富なデータ）を短時間で、しかもパラメトリックに条件を変えて計算でき、設計指針に必要な物理量を好む形に変換して即時にCG表示できるため、「船体のどこが、どのような抵抗を増加させているのか？、またその改良のポイントは何か？」などの設計者が欲しい情報を短時間で把握する事が可能となる。これと設計者の経験的知見を総合すれば、本推定法は、船舶設計における新しい流体力学設計システムのツールと

して、

- (1) 船尾流場推定の高精度化 ……→ 性能向上 (ハイパフォーマンス化)
- (2) 船型改良作業の効率化 ……→ 工数・コスト低減
- (3) 計算法の応用性拡大 ……→ 新技術開発、新規需要創出

に役立つ。これらは技術競争力、コスト競争力の強化に繋がり、我国造船業の国際競争力の増強に大いに寄与する。

2) 短期研究への活用

- 1. 最適設計法への応用 : 本推定法 (Analysis) を最適化ルーチンにリンク、最適船型設計法 (Synthesis) を構築する。 ……→ 新規 SR229で実施予定
- 2. 船舶操縦性能 : 操縦性能の推定高度化 (SR 2 2 1で1部実施)

3) 中期研究への活用

- 1. 船舶耐航性能 : 大波高中動揺、海水打込、スラミングなどの現象解明
- 2. 実船性能 : レイノルズ数大 (10^9 レベル)、船体粗度、流動などの影響解明
- 3. 流力弾性 : スロッシング、スラミングの応答解明などの研究
- 4. 革新技術開発 : 摩擦抵抗軽減など流体力学の基本に迫る研究
- 5. その他 : 現在他の手法で実施されつつあるが、環境問題における流況シミュレーション技術の高度化

本SRの成果と2)および3) - 1、- 2、- 3は実船性能推定法を高度化するキーテクノロジーである。

7 結 言

SR222「大型肥大船船尾流場推定法の高度化」では、委員各位の鋭意研究と努力により、発足にあたって設定した研究課題を遂行し、模型試験を中心とした従来の船型計画法から脱皮して新しい「流場解析的船型計画法」を目指した流場推定法を構築することが出来た。この方法が設計の現場で有効に活用され、更に発展することを願うとともに、我国造船業の国際競争力の増強に寄与することを期待する。

最後に、本研究の実施を支援して頂いた日本船舶振興会にお礼を申し上げますと共に、終始活発な研究と討論を行って頂いた参加委員各位に、また、研究の円滑な実施に終始、努力を払われた日本造船研究協会の方々に心から感謝する次第である。