

SR 229

SHIP RESEARCH SUMMARY REPORT

数値流体力学による最適船型設計法の研究

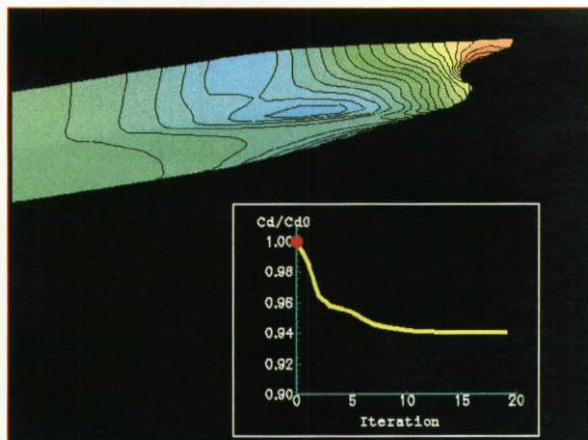
成 果 報 告 書

平成11年3月

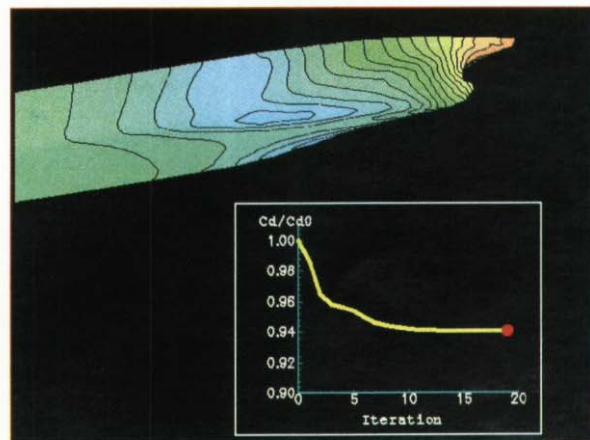
社団 法人 日本造船研究協会

CADとCFDによる船型の自動最適化

船型を表現し且つ自由に変形するCAD技術と、船体周り流れを数値計算によって推定する数值流体力学(CFD)を組み合わせ、計算機が与えられた初期船型を排水量一定などの拘束条件を満たしながら最適化する、船型の自動最適化技術を開発した。タンカーボート型(SR221B 船型)の船体後半部を対象として、排水量一定、船尾でのプロペラや主機のスペース確保などの拘束条件の下に船体抵抗を最小化し、19ステップの反復の後、6%の船体抵抗低減が得られた。最適化によって船尾断面がU字型からV字型に変形し、図1に示すようにビルジ部の負圧が減少し、図2に示すように船尾縦渦が弱くなった。図1には船体抵抗の低減履歴も示されている。なお、抵抗低減効果は水槽試験によって確認された。



初期船型

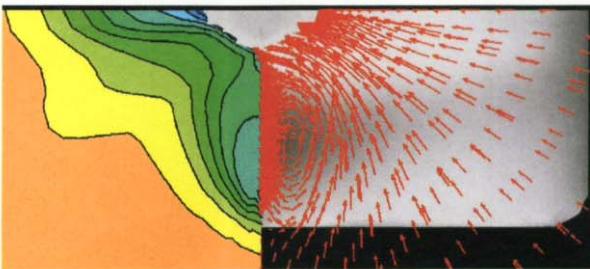


最適船型 (19ステップ目)

図1 粘性抵抗最小化のための船型最適化における
船尾表面圧力分布と粘性抵抗値の変化



初期船型



最適船型 (19ステップ目)

図2 粘性抵抗最小化のための船型最適化における
AP面における流速分布の変化

数値流体力学による最適船型設計法の研究 要 約

Ship Research Panel 229

Development of a Design System for Hull Form Optimization based on CFD

Summary

Conventional methods of hull form optimization usually rely on laborious work of tank tests, know-how of skilled engineers and design calculations based on simple mathematical models, and they form a neck to be broken for efficient ship design. Recent progresses in information technology and computational methods of fluid dynamics lead to potential to establish integrated system of hull form optimization, which plays a functional role in the ship design and production system.

Aiming at establishment of hull form design system, which enables designers to give rational decision for hydrodynamics performance of ships, Ship Research Panel 229 has tackled the issues of constructing a new system for hull form optimization based on Computational Fluid Dynamics (CFD). The system was constructed breaking through following research subjects,

- (1) Improvement of computational accuracy, computing time and robustness of CFD codes.
- (2) Connection of hull form CAD with grid generation system of CFD
- (3) Development of hull form optimization process by CFD and its interconnection with the hull form CFD.
- (4) Improvement of data exchange process of hull form expression.

The CFD codes applied to the system includes prediction of resistance, propulsive performance and maneuverability and the CFD codes of resistance prediction, as an example, are combined with hull form optimization process.

The performance of the system has been tested by a trial design of hull form optimization. A full ship form is selected as a parent ship and is optimized to give a new hull form of minimum propulsive power. The result of tank test for both models of the parent and optimized ship forms gives conviction for availability of the system to hull form design and the system has been established as a prototype of The Simulation-Based Hull Form Design System.

1. 従来の船型改良手法の問題点

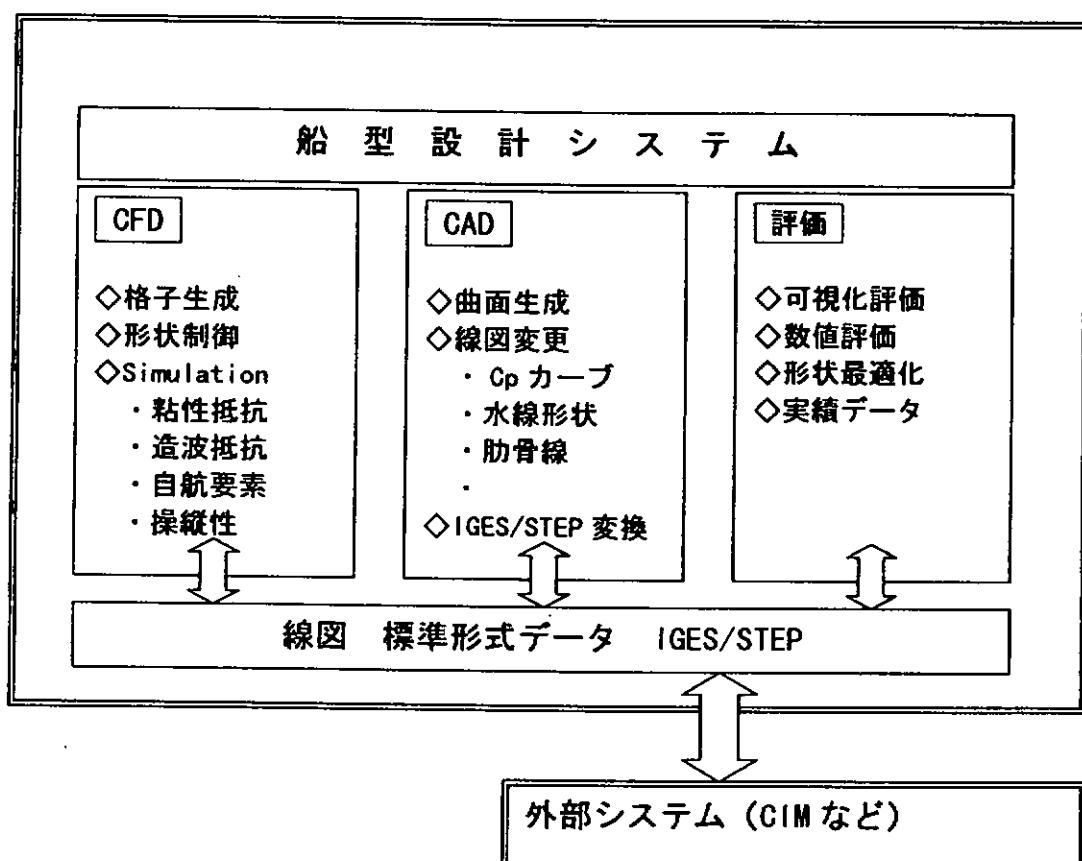
船舶性能にかかわる従来の船型改良手法の現状と主な問題点を挙げる。

- ・簡易理論モデルによる性能推定→精度に難
- ・性能の諸要素毎に水槽試験→莫大な経費と日数
- ・ノウハウを持った専門家が必要→教育が困難

2. 研究開発内容

従来の船型改良手法における問題点の解決に向けて、第229研究部会は CFD 応用技術に関する研究課題に取り組み、次の成果を上げた。

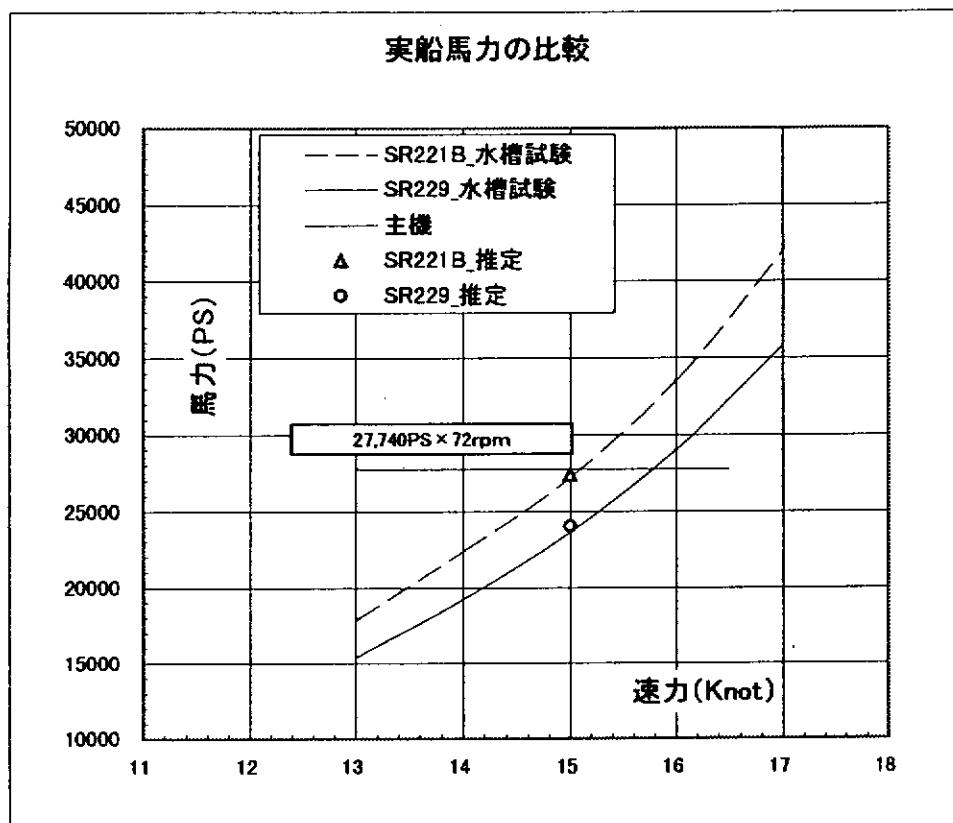
- ・CFD による船体周り流場シミュレータの高度化を行った。
(粘性抵抗、造波抵抗、自航性能および操縦運動)
- ・線図 CAD にこれらの CFD 計算システムをリンクした。
- ・線図 CAD に CFD による形状最適化システムをリンクした。
- ・性能評価プロセスを CAD に実装した。
- ・船型データ交換形式に IGES を採用、STEP 規格への変換も可能とした。
- ・これらを統合化して最適形状設計システムとした。
- ・いわば、船型設計段階における Simulation Based Hull Form Design System のプロトタイプが完成したといえる。



3. 研究成果の一例

船の推進性能と操縦性能に関するCFD応用技術を向上させ、CFDによる最適船型設計法を開発した。研究成果の一例を以下に示す。

- ・SR221Bタンカー船型を母船型として、船型改良の試設計を行った。
- ・設計プロセスは、順問題手法と逆問題（最適化）手法の組み合わせで以下の通り。
 - 1) 浮心位置Lcbを変更→L2船型（2%抵抗減）
 - 2) 最適化手法により船尾形状変更→O2船型（7%抵抗減）
 - 3) 順問題手法で最終改良→SR229船型（実船馬力換算で12%減予測）
- この間、CFDによる各種性能確認計算、最適プロペラ設計等を実施
- 4) 水槽試験による確認（実船馬力換算で14%減）
- ・最適化手法段階での船型改良の例を、本報告書冒頭の図に示した。
- ・下図に実船換算馬力の比較を示す。



4. 本研究のメリット

本研究成果により、次のメリットが期待される。

- ・必要とされる水槽試験が従来法に比べ、格段に減少。
- ・計算工数の大幅減少。
- ・最適形状の自動生成。

- ・種々の設計要件の変化に迅速に対応可能。

5. 今後の課題

CFDを採用した船型設計法をさらに拡充するための今後の課題を示す。

- ・本システムはプロトタイプであり、推進性能、操縦性のコア部分のみ実装。
したがって、今後要素性能の推定部分を更に拡張する必要あり。
- ・今後の拡張、展開は、各社の自助努力にゆだねる。
- ・CIMとのリンクも可能ではあるが、今後の適用・調整が必要。

はしがき

本成果報告書は、日本財団の補助事業として、日本造船研究協会 第229研究部会において、平成8年度から平成10年度の3カ年計画で実施した「数値流体力学による最適船型設計法の研究」の成果をとりまとめたものである。

なお、平成10年度は、日本造船工業会から受託して行ったものである。

第229研究部会委員名簿

(敬称略、順不同)

部会長	姫野 洋司 (大阪府立大学)	
代表幹事	荻原 誠功 (石川島播磨重工業)	
幹事・委員	宮田 秀明 (東京大学)	佐藤 徹 (東京大学)
	鈴木 和夫 (横浜国立大学)	児玉 良明 (船舶技術研究所)
	斎藤 泰夫 (川崎重工業)	佐々木紀幸 (住友重機械工業)
	笠原 良和 (日本鋼管)	藤本 留男 (日立造船)
	長浜 光泰 (日立造船)	藤井 昭彦 (三井造船)
	永松 哲郎 (三菱重工業)	
委員	鈴木 敏夫 (大阪大学)	川村 隆文 (東京大学)
	大和 裕幸 (東京大学)	安東 潤 (九州大学)
	田原 裕介 (大阪府立大学)	日野 孝則 (船舶技術研究所)
	石黒 剛 (石川島播磨重工業)	大森 拓也 (石川島播磨重工業)
	前田 直樹 (川崎重工業)	水谷 直樹 (川崎重工業)
	下山 敬次 (川崎重工業)	高井 通雄 (住友重機械工業)
	増田 聖始 (日本鋼管)	山森 隆江 (日立造船)
	江口 辰哉 (三井造船)	石川 曜 (三菱重工業)

ワーキンググループ1

主査	荻原 誠功 (石川島播磨重工業)(H8年度)	
	児玉 良明 (船舶技術研究所)(H9年度~)	
副主査	藤本 留男 (日立造船)(H8年度)	
	長浜 光泰 (日立造船)(H9年度~)	
委員	荻原 誠功 (石川島播磨重工業)	鈴木 敏夫 (大阪大学)
	佐藤 徹 (東京大学)	川村 隆文 (東京大学)

石黒 剛 (石川島播磨重工業)	大森 拓也 (石川島播磨重工業)
前田 直樹 (川崎重工業)	水谷 直樹 (川崎重工業)
下山 敬次 (川崎重工業)	高井 通雄 (住友重機械工業)
笠原 良和 (日本鋼管)	増田 聖始 (日本鋼管)
山森 隆江 (日立造船)	藤井 昭彦 (三井造船)
江口 辰哉 (三井造船)	石川 曜 (三菱重工業)
永松 哲郎 (三菱重工業)	

ワーキンググループ2

主　　査	児玉 良明 (船舶技術研究所) (H 8 年度)	
	鈴木 和夫 (横浜国立大学) (H 9 年度～)	
副　主　　査	鈴木 和夫 (横浜国立大学) (H 8 年度)	
	日野 孝則 (船舶技術研究所) (H 9 年度～)	
委　　員	荻原 誠功 (石川島播磨重工業)	佐藤 徹 (東京大学)
	川村 隆文 (東京大学)	安東 潤 (九州大学)
	田原 裕介 (大阪府立大学)	日野 孝則 (船舶技術研究所)
	永松 哲郎 (三菱重工業)	佐々木紀幸 (住友重機械工業)

オブザーバー・討議参加者

平田 信行 (船舶技術研究所)	日夏 宗彦 (船舶技術研究所)
角川 明 (船舶技術研究所)	戸田 保幸 (大阪大学)
門松 浩司 (住友重機械工業)	高田 翼尚 (三菱重工業)
伊岡森信臣 (横浜国立大学)	吉田 巧 (横浜国立大学)
古川 慶之 (東京大学)	

事務局

(日本造船研究協会)	山内 康勝	翁長 一彦
	青木 元也	海部 雅之
(日本造船工業会)	吉識 恒夫	

目 次

1. 船型設計法の現状と本研究の目標	1
(1) 船型設計法の現状	1
(2) 本研究の目標	1
2. 船体周り流場シミュレータの高度化	3
(1) 粘性抵抗シミュレータの高度化	3
(2) 造波抵抗シミュレータの高度化	4
(3) 自航性能シミュレータの高度化	4
(4) 操縦運動シミュレータの高度化	5
(5) まとめ	6
3. 最小抵抗船型計算法の開発	7
(1) 最適化手法	7
(2) 最小造波抵抗船型計算法の開発	8
(3) 最小粘性抵抗船型計算法の開発	9
(4) まとめ	10
4. CFDによる船型設計システムの開発	11
(1) システムの概要と特徴	11
(2) 最適化設計の試行	12
(3) システムの評価	12
5. 成果と今後の活用	18
(1) 成果	18
(2) 今後の活用	19

1. 船型設計法の現状と本研究の目標

(1) 船型設計法の現状

従来の船型改良の方法は、経験的に蓄積されたデータベースから設計船の主要目と類似な船型を母船型として選定し、その性能データと性能計算ツールを利用して、あるいは水槽試験を繰り返して船型変更による性能の変化を予測しながら優良船型を選択する。性能計算ツールは簡易的な理論モデルによるものが多く、船型性能の序列を測るには必ずしも満足なものではない。従来の方法には次のような問題がある。

- (i) 簡易的な理論モデルによる性能計算ツールは、その汎用性が限られ精度的にも満足のいくものではない。特に、大型船舶の主要な抵抗成分である粘性抵抗の推定に非力である。
 - (ii) 性能の順位を確かな精度で推定するためには水槽試験を繰り返し実施し、そのために多大な労力と経費がかかる。
 - (iii) 船型の改良設計は高度な専門的知識と経験を持った専門家によって行われているが、流体力学的な根拠が必ずしも明確でなく、その技術やノウハウが誰にでも理解できるようになっていない。また、そうした専門家の育成が困難になっている。

(2) 本研究の目標

経験的知識ベースと水槽試験を用いた従来の船型改良法に対し、本研究ではCFDによる性能推定をベースとした、いわゆるSimulation Based Designに基づいた性能評価システムを構築する。目標とするシステムは線図CAD、CFDツール、船型最適化ツールおよびこれらを結ぶインターフェースによって構成される。CFDツールには粘性抵抗、造波抵抗、自航要素および操縦運動を推定する計算法を更に高精度化、計算の高速化、計算格子の品質向上と標準化を図りながらシステムに装備する。船型の最適化では粘性抵抗あるいは造波抵抗を最小とする船型の最適化計算法を新たに開発する。これらによって船型の推進性能と操縦性能が評価で

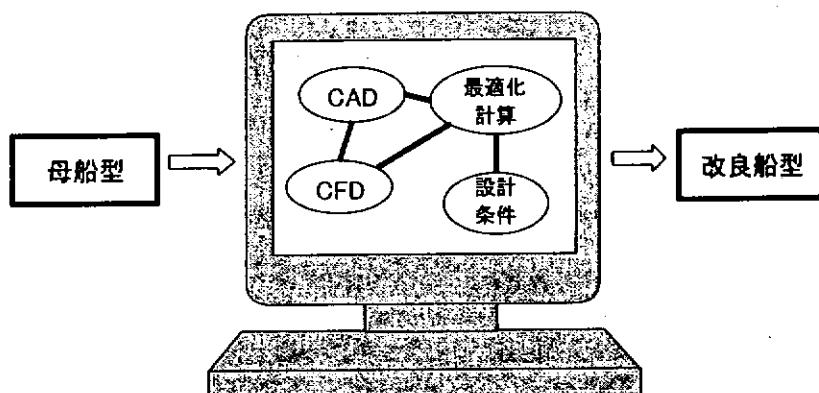


図1.1 目標とする船型最適化システムのイメージ

きるばかりでなく、ある船型に対して設計条件を与えて粘性抵抗あるいは造波抵抗を最小とする船型を直接求めることを可能とする。実用的な船型を対象としてシステムの実証を行い、その船型設計への適用性を評価する。

また、本システムによる設計船の線図C A Dと生産C I Mとの結合を視野に入れて、船型データの交換において、国際基準であるS T E P形式データ変換の適用性を明らかにする。

2. 船体周り流場シミュレータの高度化

船舶の流体力学的性能を推定する、CFDを用いた船体周り流場の各種シミュレータについて、その信頼性と実用性を高めるため、高度化研究を実施した。

(1) 粘性抵抗シミュレータの高度化

CFDによる粘性抵抗の推定法の精度及び計算効率の向上、そして適用範囲の拡大を目的として、粘性抵抗シミュレータの高度化を実施した。先ず、舵付き船体まわりの格子生成法を改良し、従来の直進状態だけでなく、舵角付き状態の格子生成を可能にした。また、マルチグリッド法と緩和法を用いてCFD計算法を改良し、従来の計算法であるNICE法と比較して、7～8倍の高速化を可能にした。図2.1に示す船体抵抗値の収束状況では、NICE法ではEWSを用いて約10時間かかっているのに対して、新しい手法(NEPTUNE法)では1時間余りで収束している。新しい船型の船体抵抗が約1時間で推定できれば、CFDの実用性が大幅に向上了と言える。

粘性抵抗シミュレータの推定精度について、従来肥大船についてはSR222等で既に確認されているが、コンテナ船型についてNICE法を適用して形状影響係数 $1+K$ の推定精度を検討した。得られた伴流分布は、図2.2(a)に示すように実験結果とよく一致しており、 $1+K$ についても、図2.2(b)に示すように、従来の肥大船での実験結果との±2%の相関範囲に納まっており、コンテナ船型についても十分な推定精度をもつことが確認された。

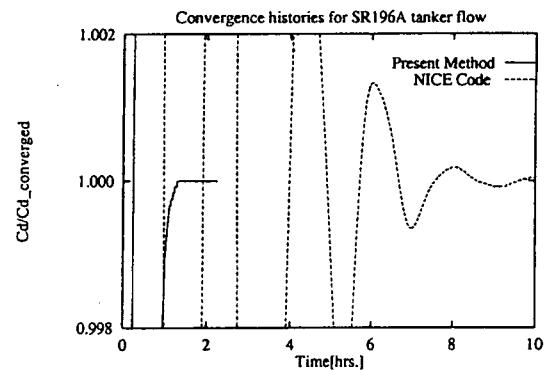
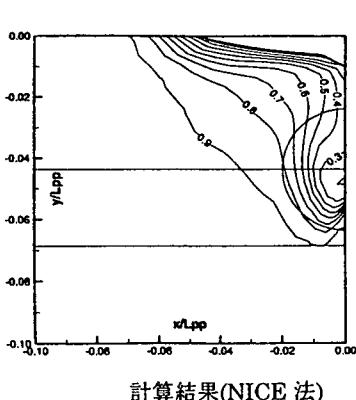
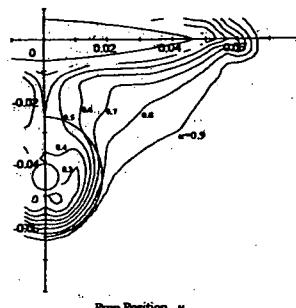


図2.1 船体抵抗値の収束状況によるCFD計算の高速化の確認

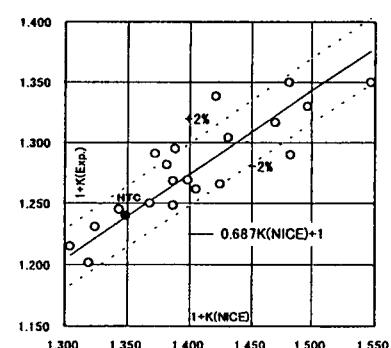


計算結果(NICE 法)



計測結果(風洞試験)

(a) 伴流分布（プロペラ面）



(b) $1+K$ の実験値との相関

図2.2 粘性抵抗シミュレータによるコンテナ船型周り流れの推定

(2) 造船抵抗シミュレータの高度化

ランキンソース法に基づいた造波抵抗シミュレータについて、計算効率と計算精度の向上を実施し、コンテナ船型及び肥大船型に適用した。図2.3に2種類の肥大船型（SR221B、SR229船型）の船側波形の実験値との比較を示す。良好な一致が得られている。

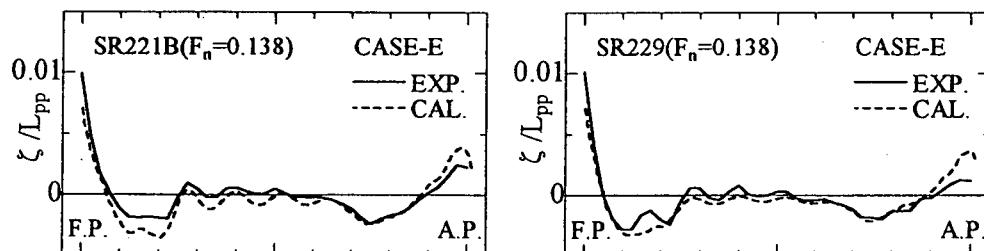


図2.3 造波抵抗シミュレータによる2種類の肥大船の船側波形の比較

(3) 自航性能シミュレータの高度化

NICE法を用いた船体・プロペラ・舵の干渉を考慮に入れた自航性能シミュレータについて以下の高度化研究を実施した。

先ず、プロペラ影響の船体まわり流れのCFD計算法に入れるためにプロペラによる推力とトルク分布の推定に用いた簡易プロペラモデルについて、分割数の影響を調査し、従来から用いられてきた分割方法でほぼ十分な精度をもつことが確認された。

一様流中にプロペラと舵だけが置かれた流場を計算し、両者の干渉影響の計算精度を検証した。CFD計算は舵に働く抗力を過大評価する傾向があるが、その原因の一つが、計算においてはプロペラ・ハブ・ボルテックスによる圧力低下が考慮されていないことがあることが分かった。図2.4にプロペラ後流に置かれた舵の表面圧力分布を示す。プロペラ中心から離れた断面Cでは実験と計算が良く一致しているが、プロペラ中心に近い断面Eでは前縁の負圧ピークが計算では表現出来ていない。

船体・プロペラ・舵の干渉計算を行い、解像度・平滑度・直交性などの格子品質が計算精度に及ぼす影響を検討した。また、プロペラボスが及ぼす影響を検討し、これらが伴流率に大きな影響を及ぼすことを明らかにした。さらに、肥大船の自航要素の計算精度をSR221B、SR229の2船型についての実験結果と比較することにより検討し、推力減少率 τ については船型差による影響が、大小関係は推定できるが差が小さいこと、伴流率 W_T については精

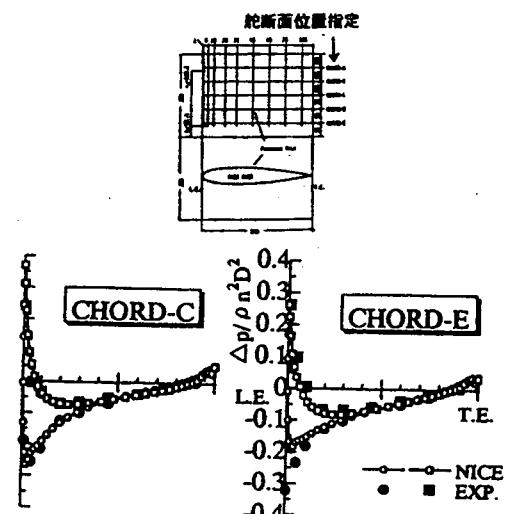


図2.4 単独プロペラ後流に置かれた舵表面圧力分布

度高く推定できること、プロペラ効率比 η_p については精度不足であることが明らかになった（図2.5）。

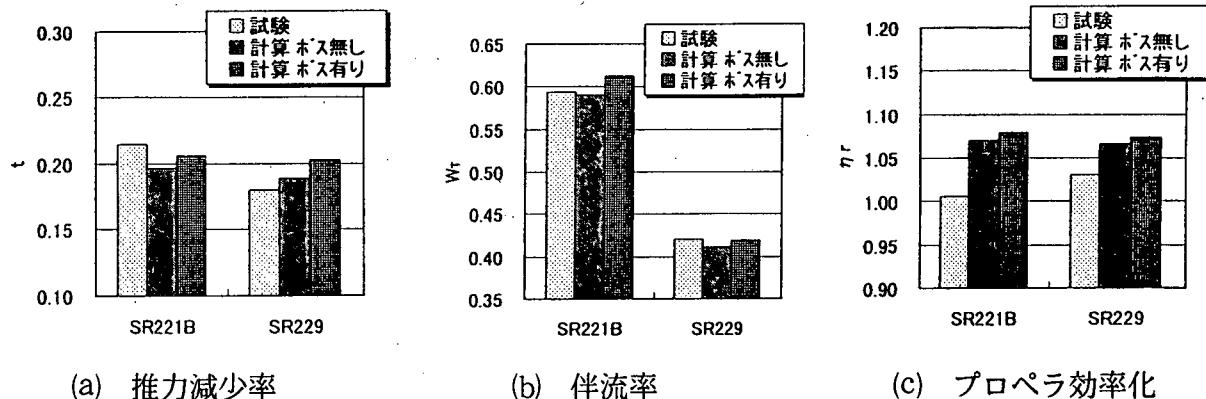


図2.5 自航性能シミュレータによる肥大船の自航要素の推定

(4) 操縦運動シミュレータの高度化

WISDAM法に基づいた操縦運動シミュレータの高度化を実施した。先ず、操縦運動時の複雑な流れに適した乱流モデルを、いくつかのモデルについて長短を明らかにすることにより、選定した。次にCFD計算と船体の運動方程式をカップリングさせ、船体に働く流体力はCFDを用いて推定し、舵・プロペラと船体干渉は数学モデルを用いて表現することにより、操縦運動シミュレータを構築した（図2.6）。そしてZ試験シミュレーションを行って実験結果と良い一致を得た（図2.7）。

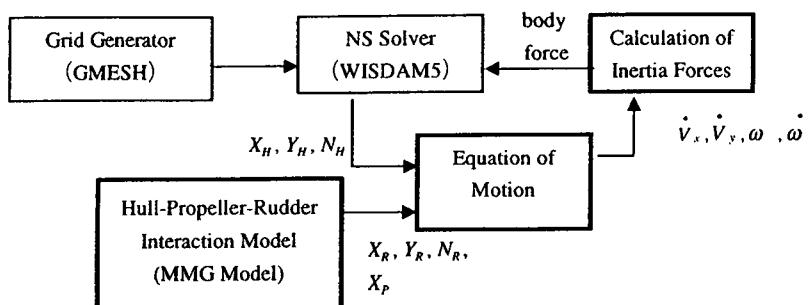


図2.6 操縦運動シミュレータの構成と計算の流れ

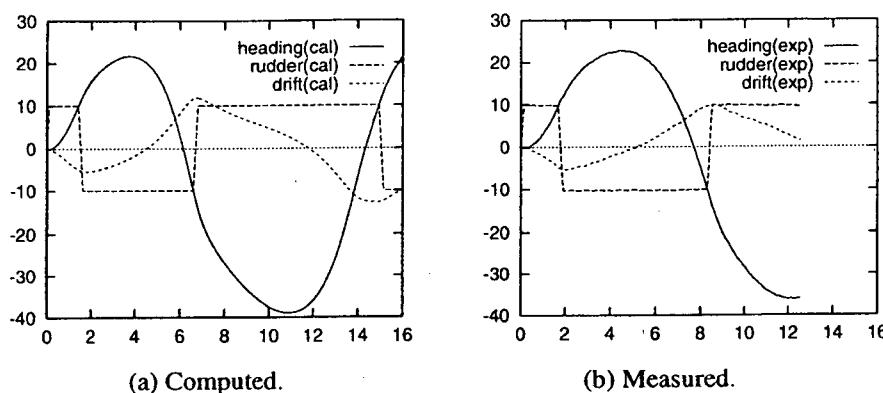


図2.7 操縦運動シミュレータによるZ試験シミュレーション

(5) まとめ

CFDの実用化のために、粘性抵抗を推定する粘性抵抗シミュレータ、造波抵抗を推定する造波抵抗シミュレータ、プロペラ・舵・船体の相互干渉をシミュレートする自航性能シミュレータ、そしてプロペラ・舵・船体からなる船の操縦運動を推定する操縦運動シミュレータについて、計算精度の向上、計算効率の向上、計算対象の拡大などを通じて高度化研究を実施し、実験結果と比較検討することにより、これらのシミュレータが船舶の流体力学的性能の推定ツールとして実用的価値を持つことと、今後の研究の方向性を明らかにした。

3. 最小抵抗船型計算法の開発

本研究の主要な目的は数値流体力学（CFD）を援用して最適船型を直接計算する方法を開発することである。推進性能を支配する最も大きな要因は船体抵抗であることから、造波抵抗あるいは粘性抵抗を最小とする船型を求める最適化手法を開発した。

造波抵抗成分の大きなコンテナ船型および粘性抵抗成分の大きなタンカーボート型を対象にそれぞれ最適化計算を実施し、その有効性を実証した。

(1) 最適化手法

最小抵抗船型の計算には最適化手法が必要である。本研究では最適化手法として主に非線形計画法を用いた。非線形計画法を用いて最小抵抗船型を計算する際のイメージをブロック図として図3.1に示す。非線形計画法は多設計変数の非線形な関数として与えられる目的関数を非線形な制約条件の下で最小化する手法であり、本研究では船型を表現するパラメータが設計変数、船体抵抗が目的関数、設計条件が制約条件に各々相当する。非線形計画法を利用すれば本研究のようにCFDに基づいて目的関数を評価するような複雑な最適化問題を解くことが可能であり、さらに制約条件として実用的な設計条件を採用することもできる。

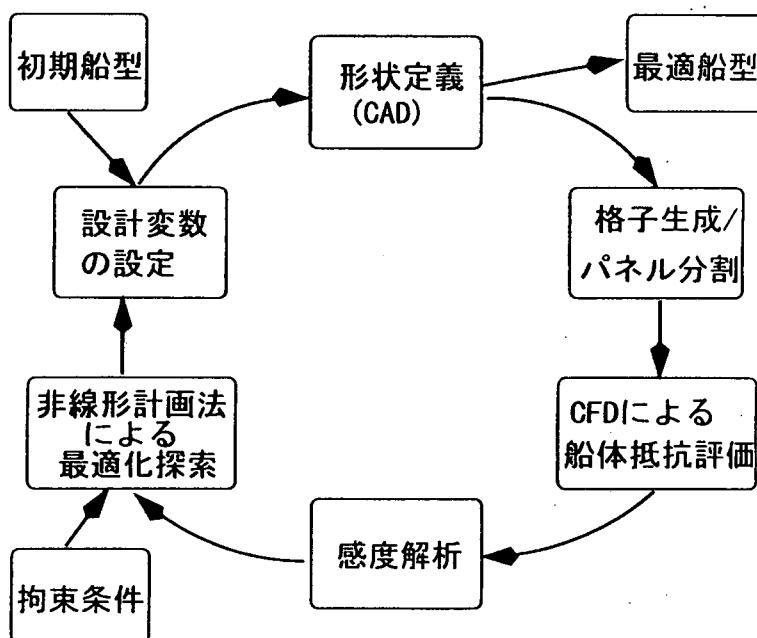


図3.1 最小抵抗船型計算法の概要

本研究ではこのような手法に基づく計算の他に、船体まわりの波紋を計算し波のエネルギー・スペクトルを分析して船型改良を行う手法も提案した。与えられた船体のまわりの波紋をランキン・ソース法により計算して波のエネルギー・スペクトルを求め、船型と波とのあいだに

線形重ね合わせの原理を仮定して、造波抵抗を目的関数とする変分法により造波抵抗を最小化する船型を求める手法である。

(2) 最小造波抵抗船型設計法の開発

最小造波抵抗船型設計法として、ランキン・ソース法による造波抵抗の数値計算法に基づく方法を調査・研究した。ランキン・ソース法と逐次2次計画法と呼ばれる非線形計画法を組み合わせて、小造波抵抗船型を直接計算する手法である。非線形計画法によれば複雑な制約条件、例えばプロペラや主機の配置スペースによる制約条件が与えられる問題も解くことが可能になる。

実際に建造され就航しているコンテナ船型を対象船型として、造波抵抗を最小とする最適化計算を行った。計算結果に基づく線図の比較を図3.2に、造波抵抗係数の比較を図3.3に示す。この計算例では、排水量、水線面積、浮心位置、船首バルブ断面積等について制約条件が課されている。本船の計画フルード数0.238では最適化計算の結果が初期船型と変わらずほとんど改良の余地がなかった。しかし、より高速のフルード数0.305で最適化を行った図3.2の計算例では、排水量分布が船首部分に移動し経験的な傾向に合致しており、本計算法の妥当性が検証された。

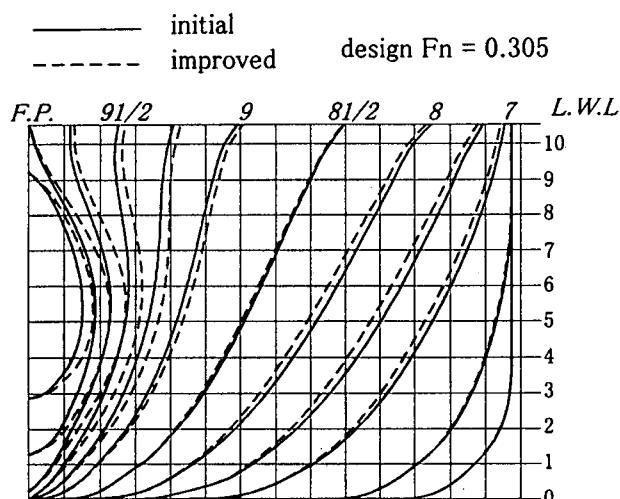


図3.2 コンテナ船型・初期船型
および最適船型の線図

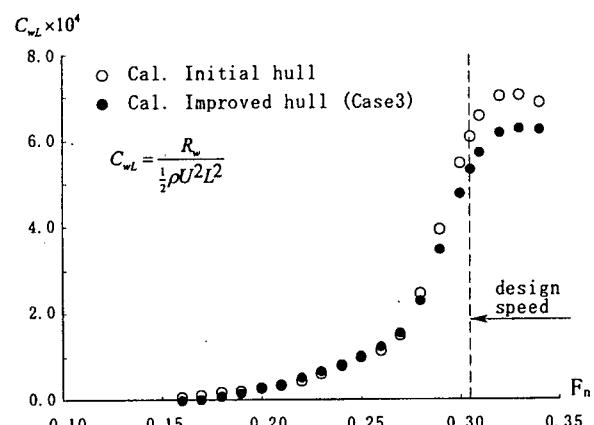


図3.2 コンテナ船型・初期船型および
最適船型の造波抵抗

一方、前記の波のエネルギー・スペクトルを利用する手法により、同じコンテナ船型を対象として最適化計算を行った。造波抵抗を最小とする船型と船体まわりの波紋を検討した結果、求めた船型は非線形計画法による場合と同様な傾向を与えることが確認でき、その実用性が検証された。

(3) 最小粘性抵抗船型設計法の開発

粘性抵抗を最小とする船型を直接計算によって求める方法では、2通りのアプローチを研究した。両者とも最適化手法には非線形計画法の逐次2次計画法が利用されているが、主な違いは粘性抵抗を計算するCFD計算部分と粘性抵抗の少ない形状を探る感度解析の手法および形状変化の方法である。これらの方針により、低速肥大船型（SR221B-L2 船型）を対象として、船の長さ、幅、喫水、排水量のほかにプロペラや主機関の配置スペース等の制約条件を与え、最小粘性抵抗となる船尾形状を求めた結果、得られた肋骨線形状は両者とも同様な傾向を示すことがわかり、CFDと非線形計画法を組み合わせた最適化手法が有効であることが実証された。

この最適化計算手法によれば、船型の最適化計算の過程で、船型変化に伴う粘性抵抗や流場の変化も同時に出力することができる。図3.4は初期船型と得られた最適船型の線図の比較を示す。図3.5は最適化の過程で粘性抵抗が逐次減少していく傾向が示されており、最終的に計算で約6%の粘性抵抗低減が得られている。

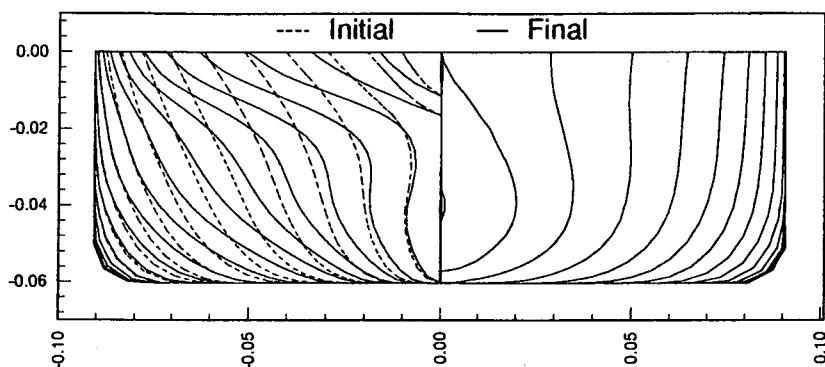


図3.4 初期船型（SR221B-L2 船型）及び改良船型の線図

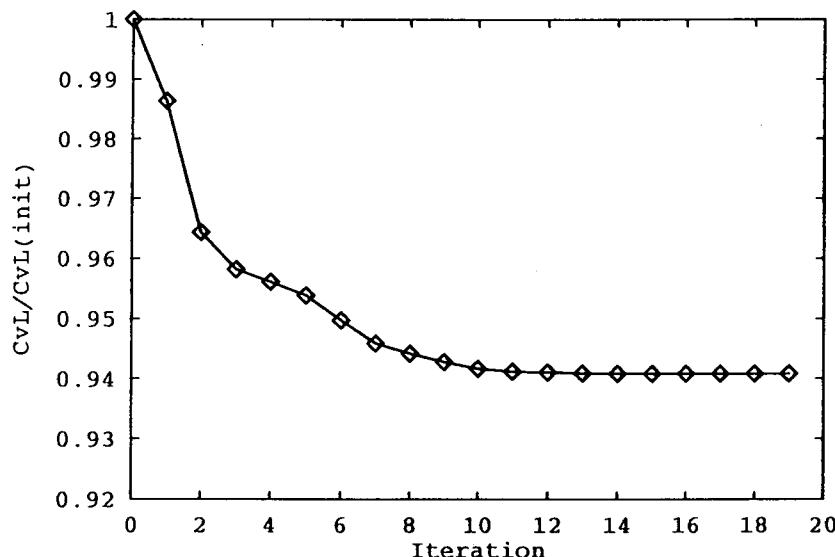


図3.5 初期船型から最適船型に至る粘性抵抗の減少

これらの情報の他に、最適化に伴う船体まわりの圧力分布や渦分布の変化を表示することができ、船型改良における流体力学的な理解を助けることができる。従来の水槽試験や経験的手法に対して、より豊富な情報を用いて迅速かつ合理的に船型を決定するツールが開発されたことになる。

(4) まとめ

以上のように CFDに基づく最小抵抗船型設計法によれば、造波抵抗あるいは粘性抵抗を最小とする最適形状が得られるだけではなく、船体まわりの流場情報、例えば船体周囲の波高分布や船体表面上の圧力分布といった情報を取り出すことができるので、流体力学的な根拠に基づいた船型設計が可能となる。また将来的にはこれらの手法を全抵抗最小船型や推進性能も考慮した馬力最小船型の設計法に拡張していくことも不可能ではなく、Simulation-Based Designに基づいた船型設計を実現する糸口が開けたと考えられる。

4. CFDによる船型設計システムの開発

船型設計分野におけるシステム設計の整備を促進するためCFDコードと、最近の最適化アルゴリズムを組み合わせて船型改良の指針を得る設計ツールの開発を行い、船型設計の自動化に取り組む。これらにより、従来経験的・実験的手法に頼っていた船型改良手法をCFDによる流体解析に基づいたシミュレーション設計の手法に変革し、造船設計におけるCFD-CAD-CIMの一貫システムの構築に寄与することを目的とする。

(1) システムの概要と特徴

本システムの構成は、CAD、CFD、性能評価の3つの基本要素からなる。船体形状データ形式として標準規格曲面データのIGES (the Initial Graphics Exchange Specification) 形式を採用するとともに、STEP規格への変換機能も考慮した。また船型最適化のアプローチとして順問題と逆問題最適化アプローチを併用した。順問題アプローチとは設計者がCAD上にて船体形状の変形を行い、CFD計算を実施して計算結果を評価し、再度CAD上で形状変更を行うというプロセスを繰り返して、目標とする性能が得られるまで船型を最適化していく、図4.1に示すアプローチである。逆問題最適化アプローチとは、初期船型に対してCFD計算および最適化プログラムにより、ある拘束条件の下で目的関数が最小(あるいは最大)となるように自動的に最適形状を検索する、図4.2に示すアプローチである。

CADには汎用性の高い標準データ形式であるNURBS (ノンユニフォーム有利B-スプライン) 曲面表現の標準規格IGES形式を採用した。従来はCADとCFDとの船型データの交換は、主にオフセットテーブルのような点列データで行われてきたが、船首尾端部のような曲率の大きい部分、ナックル点や平面部とのとりあいを正確に表現できないという問題があった。NURBS曲面表現形式の採用により、船体形状を正確に表現でき、前述の問題は解消された。

CFDツールとしては、粘性抵抗計算、造波抵抗計算、自航要素計算および操縦流体力計算が装備されている。船型最適化ツールとしては、粘性抵抗あるいは造波抵抗を最小とする最適化計算が含まれている。これらによって与えられた船型の推進性能と操縦性能が評価できるばかりでなく、船型に拘束条件を与えることによって粘性抵抗あるいは造波抵抗を最小とする船型を直接に計算から求めることが可能である。

順問題アプローチの場合、CFD計算結果の評価は設計者がCFDから直接算出された粘性抵抗値、自航要素、造波抵抗値に加えて、伴流分布、圧力分布、波形パターン等の流場情報を可視化技術を用いて評価する。しかしCFDから直接算出される推定値には定量性が、いまだ十分とは言えない。定量的な推定値を得るために、蓄積された水槽試験Date BaseとCFD解析結果データを基に、両者の相関を用いてCFDによる性能推定の精度を向上させる手法を

採用した。

逆問題最適化アプローチの場合、得られた船型の妥当性は、計算された流場の可視化によって船型と性能との関連から効率的に認識することができる。

(2) 最適化設計の試行

開発した船型設計システム、CFD、最適化手法の有効性を検証するため、低速肥大船であるSR221Bタンカーボードを母船型として実際に船型改良を行い、水槽試験結果と比較検討した。船型改良プロセスでは、従来の順問題アプローチに上記の逆問題最適化アプローチを組み合わせた。逆問題最適化では、実際的な拘束条件を与えて粘性抵抗を最小とする船型を求ることにした。具体的には、 C_p 曲線および肋骨線形状の変更が行われた。形状変更された船型は、CFDを用いて造波抵抗、粘性抵抗、自航要素などの性能を推定し、改良効果を確認した。また操縦性能についてもCFDにより検討し、保針性能が許容範囲内であることも確認している。

船型変更は主要目（長さ、幅、喫水、排水量）を固定し、副次要目（lcb [浮心前後位置]、 C_p 曲線の肩張り／肩落ち傾向）の変更を許している。最終的に得られた船型をSR229船型とした。図4.3に船尾形状を比較して示す。

(3) システムの評価

船型が順次に改良されていった例として、粘性抵抗最小化の過程を図4.4に示す。粘性抵抗を形状影響係数($1+K$)で表わしている。L2船型は、母船型(SR221B)から機械的にlcbを変更し全抵抗（粘性抵抗+造波抵抗）から最適なlcbをもつ船型である。L2船型の母船型(SR221B)からの粘性抵抗減少効果は約2%である。L2船型と同じlcbをもち逆問題最適化アプローチによって船型改良されたO2船型は、約5%弱の減少効果に達している。したがって母船型に対して、lcb、 C_p 曲線および肋骨線形状の変更により7%の粘性抵抗減少が期待される。L2船型を順問題アプローチにより改良したO3船型とほぼ同じ粘性抵抗性能をもつ船型が、計算から生み出されたことは大いに評価できる。

これらの検討により最適船型(SR229船型)を設計して、母船型とともに水槽試験を行った。図4.5に実船馬力における船型改良効果を母船型と比較している。最適船型は母船型と比べて14%の馬力低減が確認された。14%の内訳は抵抗性能の改良が約10%、自航要素の改良とプロペラ再設計による効率向上が約4%となる。CFDを用いた推定値に基づく馬力の削減効果の予測は12%であり、水槽試験結果と良好な一致を示している。本システムが定量的にも十分満足できるシステムであることが実証されたと考える。

粘性抵抗を評価する場合の計算ツールの進展を従来システムとで比較すると表4.1のようになる。従来システムとは、本研究成果を含まないCFD計算を援用した船型設計手法である。

表4.1 粘性抵抗評価への計算ツールの比較

設 計 計 算 手 順	従 来 シ ス テ ム	本 シ ス テ ム
① CADによる線図変更	フレームオフセット手修正	主要線要素の関数変形
② CADデータ読み込み格子生成	オフセットデータ GMESH	IGESデータ 新GMESH(IGES対応)
③ CFD計算(粘性抵抗)	NICEコード	NEPTUNEコード
④ CFD計算結果の評価	可視化、実績相関	可視化、実績相関

このように各構成要素のインターフェースの強化、IGESデータを用いた格子生成の効率化により、従来システムでのデータ交換および格子生成での煩雑な手続きの大部分が節減される。CFD計算法の更なる高速化と計算機の高速化が期待できるため、CFD計算が大幅に短縮化され、粘性抵抗の観点から船型を評価する作業時間は半減される。今後は設計現場において、さらに機能・操作性の向上を図ることによって極めて実用性の高い効率のよい船型設計システムが可能となる。

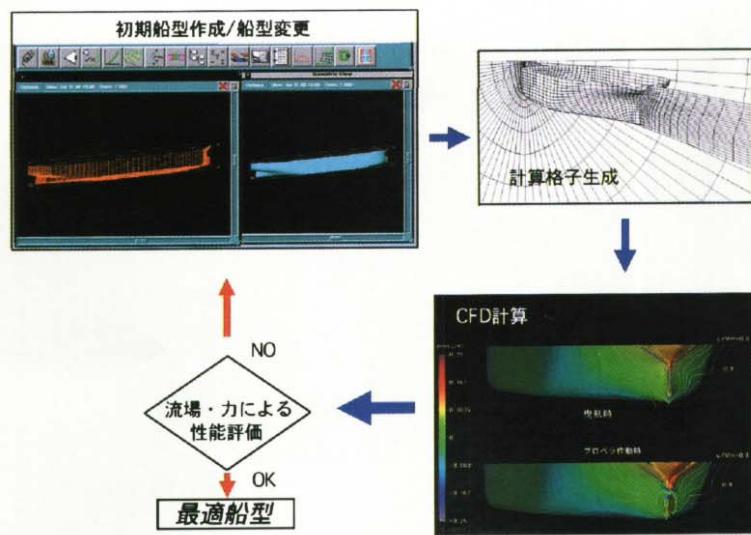


図4.1 順問題アプローチによる船型改良

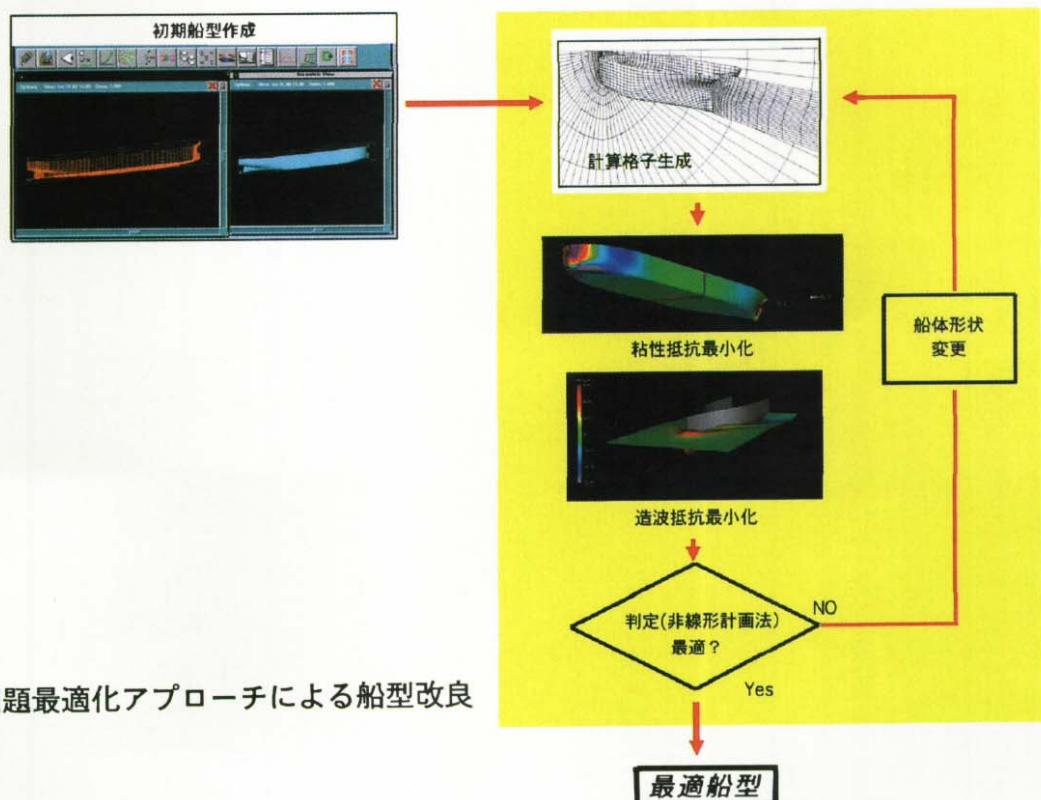


図4.2 逆問題最適化アプローチによる船型改良

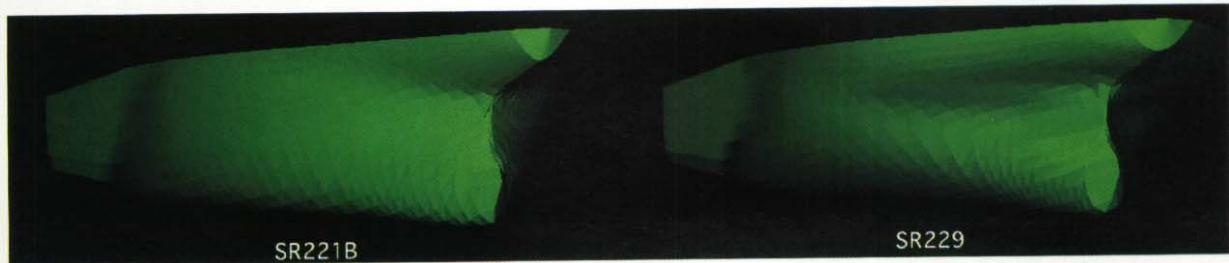


図4.3 母船型（SR221B 船型）と最適船型（SR222 船型）の船尾形状の比較

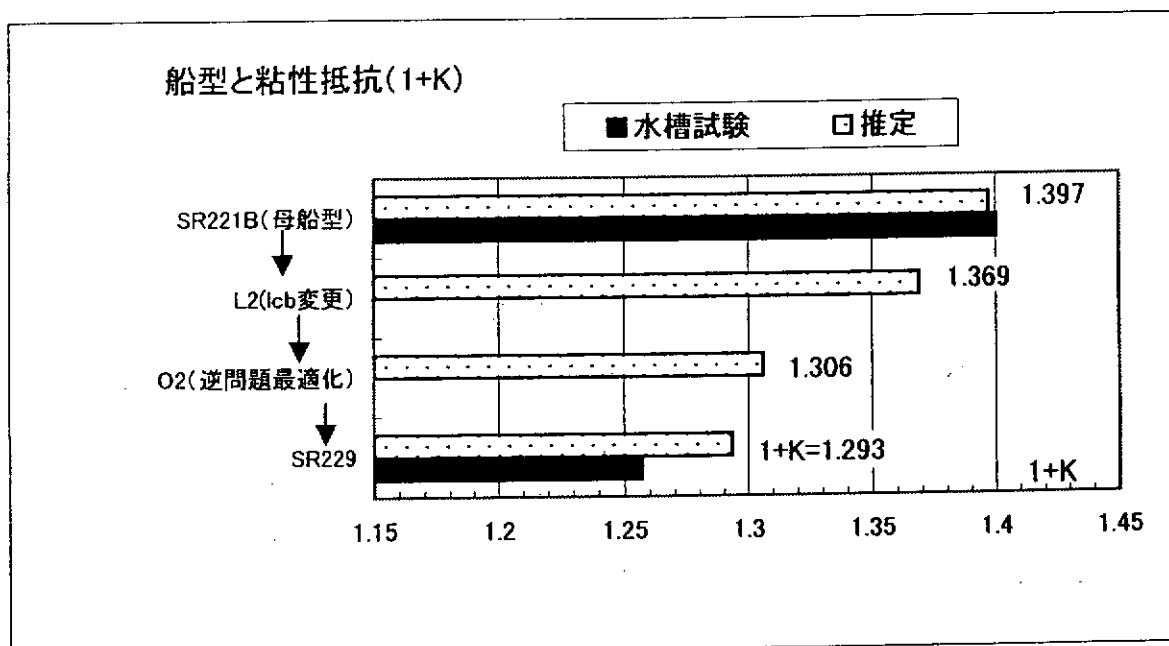


図4.4 粘性抵抗における船型改良効果

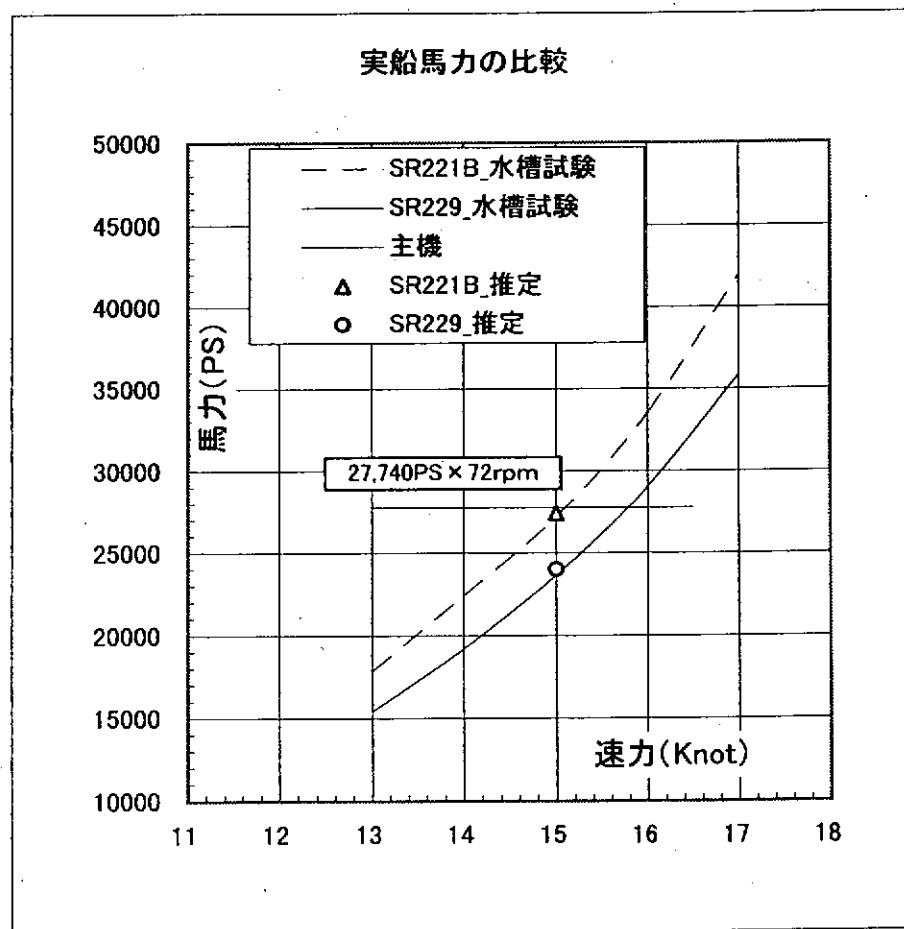


図4.5 実船馬力における船型改良効果

5. 成果と今後の活用

(1) 成果

(i) CFDシミュレータの高度化

船型最適化システムの基本要素となる各種のCFDの高度化を計った。すなわち、これまでのSR研究等で開発された粘性流場計算コード(NICE法、WISDAM法)に対して、推進性能計算および操縦性能計算における格子生成の標準化を図り、計算のアルゴリズムを改良した計算時間の大幅な短縮、船体とプロペラの干渉影響の計算精度の向上、操縦運動時の乱流モデルの改良とZ試験シミュレータの開発など、CFDの高度化を図った。操縦運動シミュレータの高度化により、推進性能のみならず操縦性能も考慮した性能評価が可能となった。造波抵抗計算法についてはランキン・ソース法の改良研究を実施し、造波抵抗成分が比較的大きい船型に対しては実用的にも十分な精度で推定可能となった。

(ii) 船型最適化計算法の開発

粘性抵抗あるいは造波抵抗を最小とする船型を直接計算する方法を開発した。粘性抵抗最小船型の計算手法は、CFDシミュレータに感度解析手法と非線型計画法を組み込んで、与えられた母船型と拘束条件のもとに粘性抵抗を最小とする船型を自動的に計算して求める方法であり、粘性抵抗成分の大きいタンカー等の肥大船型の改良に有力な設計ツールを完成させた。

ランキン・ソース法による波や圧力の情報から、最小造波抵抗となる船型を直接求める方法を開発し、コンテナ船等の造波抵抗成分が比較的大きい船型に対して、船型改良の指針を与えるツールとして実用化した。

(iii) 船型の最適化システムの構築

船型改良の方法として、複数の船型を与えて性能比較計算を行って優良船型を選択する方法および船型に拘束条件を与えて粘性抵抗あるいは造波抵抗の最小船型を直接計算する方法を備えたシステムを構築した。本システムでは構成要素間のインターフェースの整備、データ交換の効率化、各種シミュレータの高精度化、計算時間の高速化等の技術を導入することによってシステム全体の効率化を図った。

従来の経験的知識ベースや水槽試験を用いた船型改良手法に対し、CFDを用いたSimulation Based Designに基づいた性能評価システムの構築に成功した。これによって船型の推進性能のみならず操縦性能の評価が可能となり、また、これまで高度な経験に頼っていた船型の最適設計をコンピュータによって自動化できる可能性が生まれた。

線図CADとCFD計算のあいだの船型データの交換に関して、標準IGES形式による

データ交換機能を有しているが、生産CIMとの結合をも視野に入れて、国際標準であるSTEP形式を容易に適用可能であることを検証した。

(2) 今後の活用

タンカーや船型を母船型として選んで本システムによっての最適化設計を行ない、母船型と最適船型の水槽試験により本システムの有効性が確認された。本システムは設計者が流体力学的な考察に基づいて船型設計の方針を決定することを支援し、かつ、水槽試験を主体とした従来の船型最適化手法に比べ、設計時間を大幅に短縮することが実証された。これからの船型設計手法に変革を与えるKey Technologyになると考えられる。

本システムを発展させた将来の姿をイメージして第5.1図に示す。本研究では粘性抵抗あるいは造波抵抗を最小とする最適化問題を取り上げたが、最適化のアルゴリズムは一般性があり、粘性抵抗と造波抵抗を加えた全抵抗を最小とする船型、プロペラ効率を最大とするプロペラ形状さらには推進馬力を最小とする船型とプロペラとの組み合わせ、等々その応用範囲が拡大することが容易に推察される。そのためには、設計システムの核となる個々のCFDツールは、その利用目的に応じて今後も継続的に改善が図られるべきであり、それらのCFDツールが他の計算ツールに容易に置換できるようなCompatibilityを持つことが肝要である。

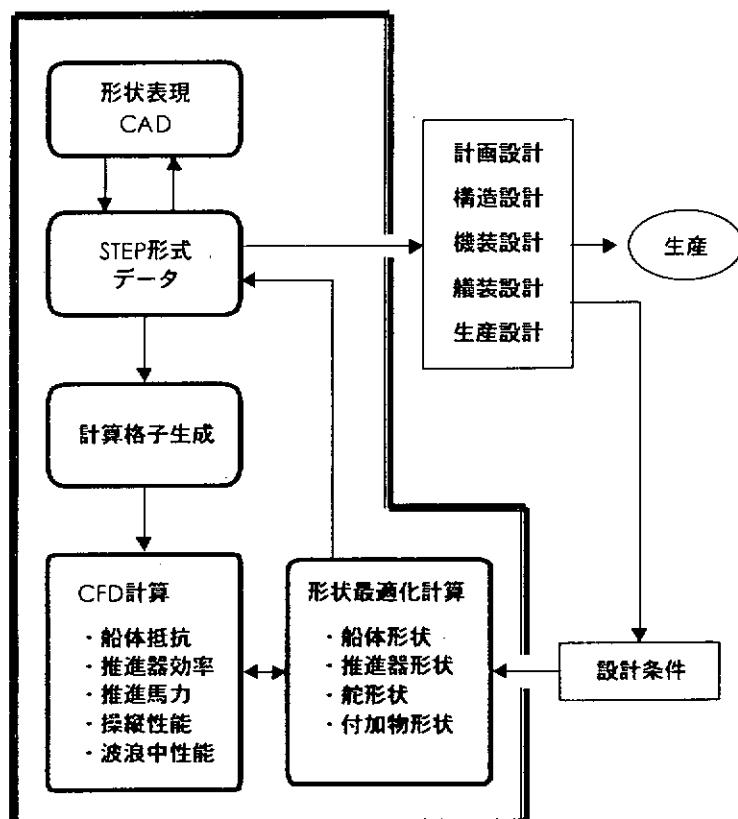
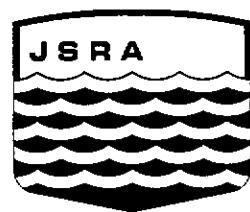


図5.1 最適船型設計システムの将来構想

本研究により、Simulation-Based Design に基づいた最適船型設計システムのプロトタイプが完成した。造船システムの一環としての船型設計は最も上流側にあるため、船型設計法とそのプロダクトは生産システムの中に効率的に統合され、造船システム全体の効率向上に貢献することが肝要となる。その中で各種データ交換の機能向上を目指して、本研究では、船型データの交換に国際標準である S.T.E.P 形式の適用性を確認したが、本システムと他の設計分野（構造、舾装、生産設計等）とのデータ交換に係わる諸検討は今後の課題である。



The Shipbuilding Research Association of Japan