

船型設計のための流体シミュレーション技術

Computational Fluid Dynamics technology for ship hull form design

海上技術安全研究所
CFD研究開発センター

日野 孝則

Abstract

CFD (Computational Fluid Dynamics 計算流体力学) は、流体方程式の数値解法であり、流体现象をシミュレーションすることによって種々の解析を行う技術である。CFDは汎用技術であり、その適用範囲は幅広いが、船型設計においては、流体力学的性能の推定に用いられている。

船型設計における性能推定にはこれまで水槽試験が用いられてきたが、縮小模型を使うことに伴う尺度影響や、多大なコストと労力、また、結果を得るまでの時間の長さなどの問題がある。CFDは、水槽試験を補完して効率的な船型設計を実現するための解析ツールとして期待されている。

ここでは、船型設計のための流れのシミュレーション技術の現状を概観するとともに、CADとCFDを統合する船型設計システムのコンセプトについて述べる。

1 はじめに

CFD (Computational Fluid Dynamics 計算流体力学) は、流体方程式の数値解法であり、流体现象をシミュレーションすることによって種々の解析を行う技術である。CFDは汎用技術であり、その適用範囲は非常に幅広いが、船型設計においては、流体力学的性能の推定に用いられている。

航空機や自動車などと同様に、船舶の設計においても流体力学的性能が極めて重要である。できる限り少ない馬力で仕様で定められたペイロードを所定のスピードで運ぶことができる船型を見出すことが船型設計の第一目的である。このためには設計された船型の抵抗性能や推進性能を評価する必要がある。さ



図1 水槽試験による流体性能計測

らに、操縦性能や波浪中での性能の検討によって総合的な性能を評価して最終的な船型が決定される。

従来、船型設計における性能推定には水槽試験が用いられてきた。図1に示すように、長さ6~10m程度の縮小模型を用いて、試験水槽で性能計測を行う。しかし、尺度影響が不可避であること、また、多大なコストや労

力を必要とし、結果を得るまでの時間が長いことなどが効率的な設計作業のボトルネックとなっている。

一方、近年の計算流体力学 (CFD: Computational Fluid Dynamics) 技術の進展に伴い、CFDが船型設計において流体力学的性能を推定するためのツールとして水槽試験を補完して用いられるようになってきた。

ここでは、船型設計のための流れのシミュレーション技術の現状を概観するとともに、CADとCFDを統合する船型設計システムのコンセプトについて述べる。

2 船舶まわりの流れのシミュレーション

船舶まわりの流れは自由表面を含む高レイノルズ数の3次元剥離流れであり、自由表面と乱流境界層が干渉する複雑な流れ場となっている。また、船舶は自由曲面で1構成される主船体に舵や推進器が付いた複雑形状である。したがって、船舶まわりの流れのシミュレーションには、これらの特徴が扱えるような手法を適用しなくてはならない。ここでは海上技術安全研究所で開発しているCFD手法の概要と流れシミュレーションの例を紹介する。

CFD手法の基礎式は非圧縮性Navier-Stokes方程式である。この式を有限体積法で離散化し、擬似圧縮性を導入して解く計算法を用いている。海上技術安全研究所では、六面体格子が規則的に配置された構造格子を用いるソルバー NEPTUNE [1] と、種々の形状の格子をランダムに配置する非構造格子を用いるソルバー SURF [2] の2種類の手法を開発している。

シミュレーションによる性能推定の基本要素として、船体抵抗の推定精度を評価するために、水槽試験結果とCFDによる計算結果の相関を調査した [3]。対象船型は図2に示すような内航タンカーの船型シリーズ11隻である。図には正面から見た船体の断面形状(右:

前半部、左:後半部) が示されている。このシリーズ船型に対する抵抗係数の相関を図3に示す。横軸は水槽試験において計測された抵抗係数、縦軸はCFDによって計算された抵抗係数である。両者は非常に良い相関を示しており、シミュレーションによる性能評価が船型設計において有用であることが検証された。

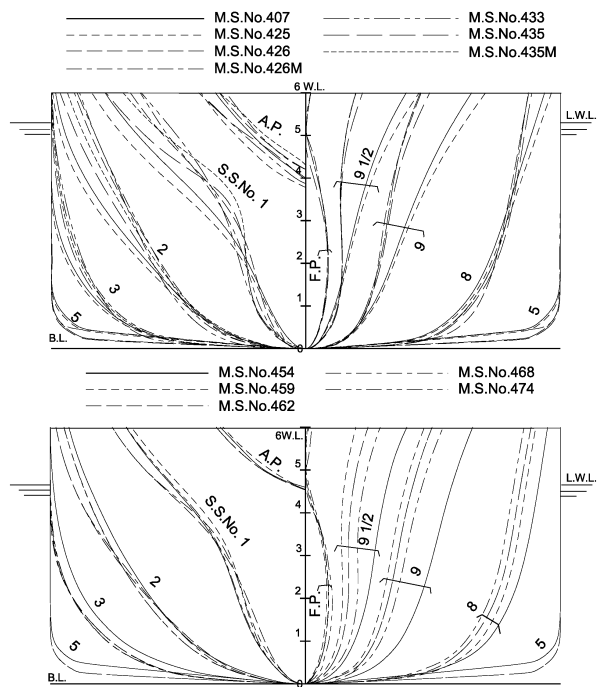


図2 内航タンカーのシリーズ船型

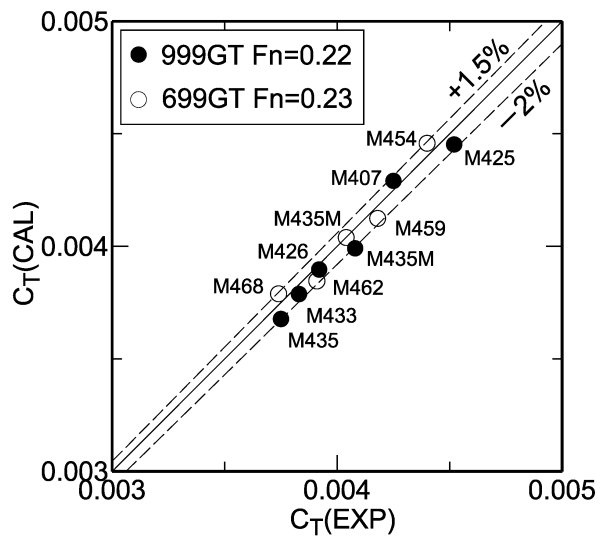


図3 水槽試験とCFDによる抵抗係数の相関

水面上を走る船体は波を造る。これは造波抵抗と呼ばれる抵抗の源となるので、その特性を知ることは性能推定の面から極めて重要である。また、特に高速船が航行する際には船体の造る波が、岸壁や漁業設備などに影響を与えることがあり、そのような環境影響評価のためにも、船体の造る波のシミュレーションは有用である。自由表面問題は典型的な非線形問題であり、その解析にはCFDのような数値解法が適している。

図4は、コンテナ船まわりの波高分布のCFDによる計算結果を水槽試験結果と比較した図である。船体から離れたところでは、計算格子が粗くなるので計算結果の波高はやや減衰しているが、全体的な波のパターンは計測結果をよく再現している。

図5は高速船の船首波の計算例[4]である。高速で航行する船では、船首において波面が大きく変形し、スプレー状の巻き波が発生する。自由表面の扱いに特別なモデルを採用することにより、このような巻き波もある程度までシミュレートすることが可能となる。実験時の写真と比較すると、波面の変形がよく計算されていることがわかる。

船舶の推進性能を決定する要因は船体の抵抗性能のみではなく、推進システムの性能もまた重要である。船体の後ろで作動するプロペラの設計のためには、プロペラに流入する

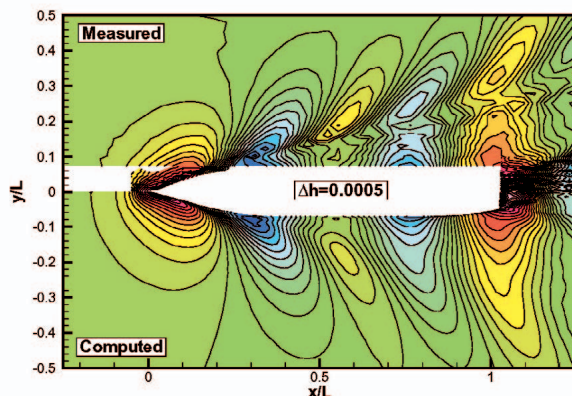


図4 コンテナ船まわりの波紋の比較（上：計測結果、下：計算結果）

流速分布（伴流）を知る必要がある。船体まわりの流れは3次元剥離を伴う乱流境界層であり、適切な乱流モデルの選択が精度の良い伴流推定のキーとなる。

図6は肥大船のプロペラ位置における流速分布の計算値と計測値の比較である。特にチューニングを施した乱流モデル[5]の採用により、剥離によって生じる縦渦が精度良くシミュレートされている。

数値シミュレーションによって推進性能を

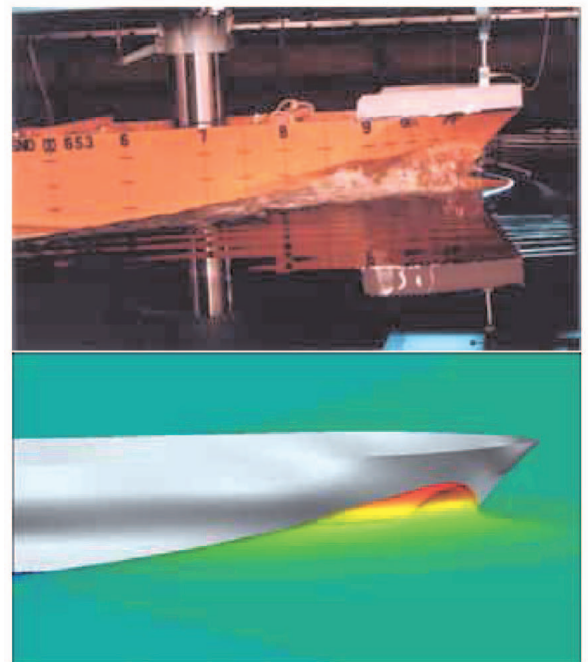


図5 高速船の船首波形の比較（上：実験、下：計算）

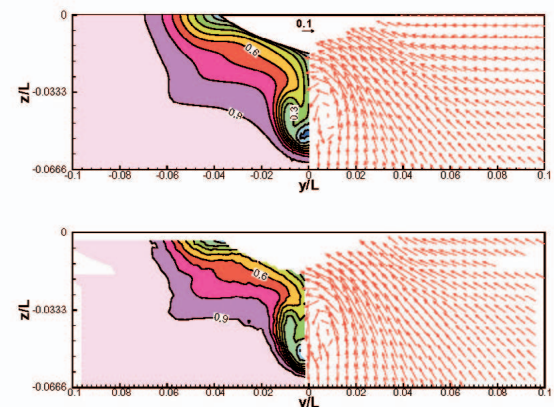


図6 プロペラ位置における流速分布（上：計算結果、下：計測結果）

推定するためには、流れ解析手法においてプロペラの影響を考慮しなければならない。プロペラを扱うモデルは種々あるが、ここでは体積力によってプロペラによる流れの加速と旋回流れ発生効果を表現している。

図7はコンテナ船を対象とした、プロペラ作動時の流れ場の計算値である。図6の流速分布と比べると、明瞭にプロペラ影響が表れている。

実用船型は、船尾部に推進器だけではなく舵やその他の付加物が付く場合も多い。付加物の取り付け位置の最適化や抵抗算定のためには、付加物付き船体のまわりの流れのシミュレーションが必要となる。このような複雑形状を扱う際には格子の並び方の自由度が高い非構造格子法が特に有効である。

図8は船尾の複雑形状の計算例[7]であり、船体表面の圧力分布と流線を示している。船型は内航フェリーであり、船尾には舵の他にプロペラシャフトおよびそれを支えるストラットが付いている。また、プロペラの影響は前述の体積力モデルによって考慮している。

船舶の操縦性能の推定は航行安全の観点から重要であり、設計段階で安全基準を満たしていることが求められる。操縦運動する船体にかかる流体力の計算は操縦性能評価の基礎となる技術である。図9に斜航する船体まわ

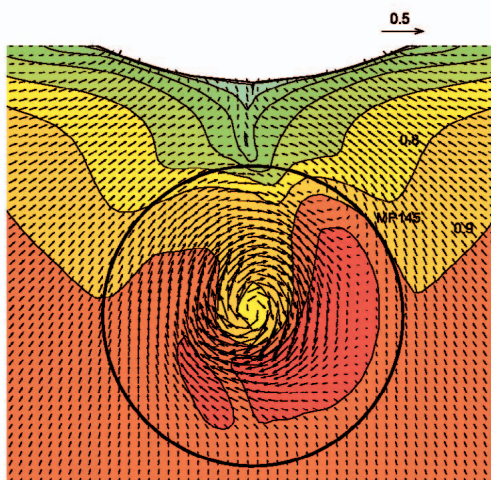


図7 プロペラ作動時のプロペラ後方の流速分布

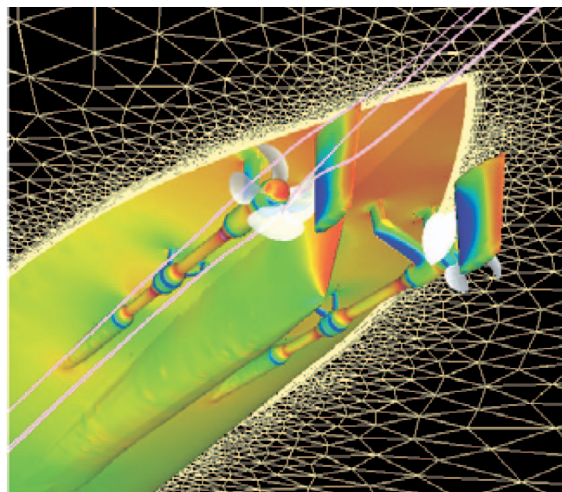


図8 プロペラシャフトと舵が付いた船体まわりの船体表面圧力分布と流線

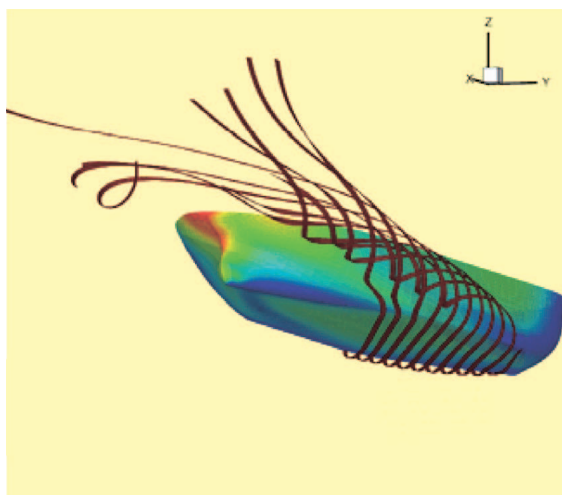


図9 18度の斜航角で航走する船の表面圧力と流線

りの流れの計算における船体表面圧力分布と流線を示す。図は斜航角18度の例であり、大規模な剥離と渦の発生が見られる。船舶の操縦性能を評価するためには、このような斜航状態に加え、旋回する船体に働く流体力の計算を行い解析することになる。

3 船型最適化への適用例

近年、最適化手法とCFDを組み合わせた形状最適化の研究が活発に実施されており、船型設計についても適用例が増えている[8, 9, 10]。通常のCFD解析が、与えられた

形状の性能を評価する順問題であるのに対して、形状最適化は性能を満足するような形状を求めるといって逆問題を解くアプローチと言える。

この問題は、Navier-Stokes 方程式は非線形であることから、非線形最適化問題として扱う必要があり、最適化の過程で多数のCFD解析が必要になる。また、形状を表現する設計パラメータの選択が極めて重要な要素となる。最適化のプロセスを図10に示す。設計変数から形状を定義しCFD解析を行って、目的関数を求め、感度解析によって感度を計算して最適化のための探索を行う、というループを収束するまで繰り返すことになる。

粘性抵抗が最小になるように船尾船型を最適化した例 [8] を示す。対象船型は肥大船であり、与えられた初期船型の船体後半部を変形する。排水量一定という拘束条件を課している。

最適化過程における目的関数（粘性抵抗）の履歴を図11に示す。19回の反復により粘性抵抗は初期値から約6%減少した。図12に船体形状を示す。原型ではU型である断面形状が変更後はV型へと変形している。

図13は単純な数式船型を対象として、排水容積一定の拘束条件の下で全抵抗（粘性抵抗

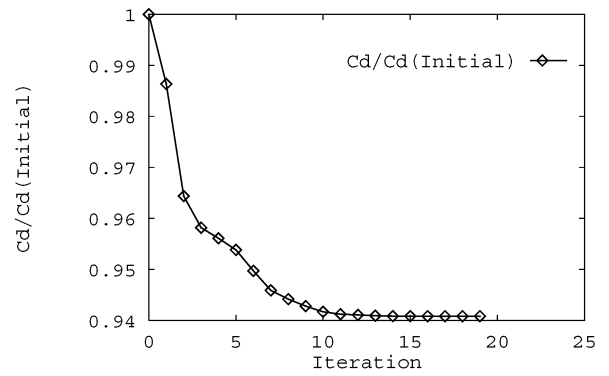


図11 最適化過程における目的関数の履歴

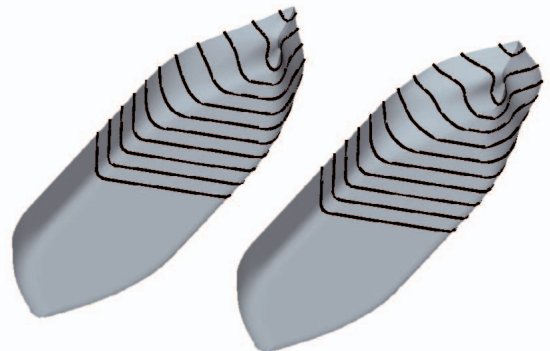


図12 船型の比較(原型(左)および最適船型(右))

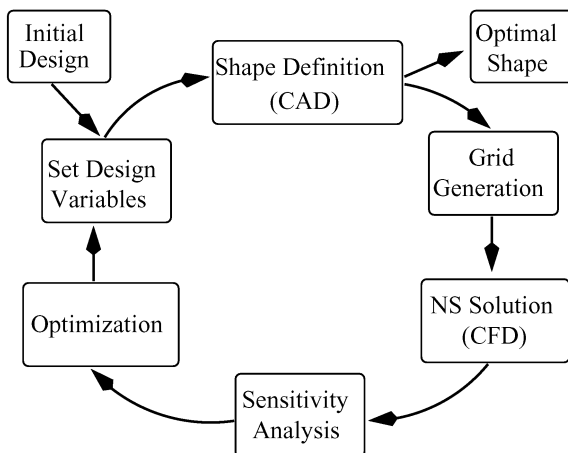


図10 形状最適化プロセス

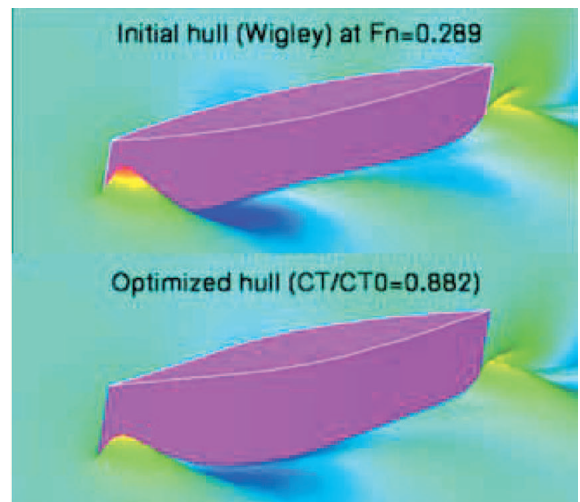


図13 全抵抗を最小にする形状最適化（原型（上）と最適船型（下）の波形）

と造波抵抗の和) が最少になるように最適化を行った例である[10]。最適化手法としては、遺伝アルゴリズム (GA) を用いている。

この例では抵抗を原型から約12%低減することができた。原型 (上) に比べて最適船型 (下) では船首部分が細くなり、それに伴って船首波の波高が抑えられていることがわかる。

現在は、実用船型に対する適用の研究をさらに進めている [11]。

4 CAD/CFD統合設計システム

効率的な設計環境構築のためには、図14に示すようなCADとCFDを統合した船型設計システム [12] が必要となる。

このシステムは基本計画パート (設計条件である船種、速力、ペイロードをもとに船の長さ、幅、深さ、排水量などの主要目を決める部分) とCADおよびCFDを密接にリンクさせたものである。

基本計画パートは船舶の復原性や貨物倉の配置などの設計における拘束条件を与え、これらのデータはCADシステムに送られる。

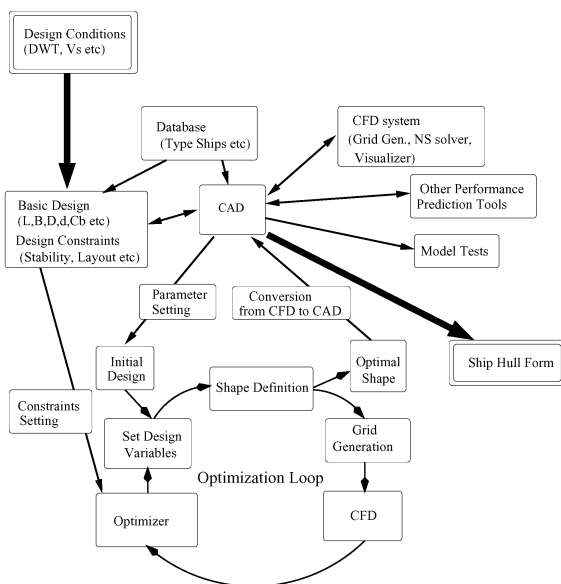


図14 CAD/CFD統合船型設計システムコンセプト

CADシステムはデザイナーと設計システムとの間のインターフェースとして機能する。デザイナーはCAD上でデータベースを参照しながら設計条件を満たすような初期設計を行う。この段階ではラフな船型形状を扱う簡単なツール [13] があると便利である。

CFD部分は格子生成、流れ解析および可視化ツールにより構成される。デザイナーは形状を決定した後、CFD解析を実行して性能を予測する。必要があれば流れ場を可視化し、船型改良のポイントを探索して再設計する。基本計画に戻って長さや幅の変更を行うこともある。デザイナーから見たときに、CFD部分はブラックボックス的に使える必要がある。したがって設計システムの中に組み込まれるCFDは自動化と設計サイクルに適合する高速化がキーポイントとなるであろう。

上で述べたような形状最適化がもう一つの重要要素になるが、当面は、設計自動化というよりも、デザイナーを補佐するツールとしての役割を果たすことになるであろう。例えば、広い範囲で形状パラメータを変化させて、最適なパラメータの組み合わせを探索するような場合には、膨大な量のシリーズ計算を行うよりも最適化システムによる自動探索が効率的である。

5 おわりに

船型設計のためのCFDによる船舶まわり流れのシミュレーション技術およびそれを用いた計算例を紹介するとともに、CADとCFDを統合した設計システムのコンセプトについて述べた。

CFDは今後も流体設計の基幹ツールとして用いられていくであろう。海上技術安全研究所も船型設計の分野で必要とされるCFD技術の開発を続けていく所存である。

参考文献

- [1] Hirata, N. and Hino, T.: An Efficient Algorithm for Simulating Free-Surface Turbulent Flows around an Advancing Ship, *J. the Society of Naval Architects, Japan*, 185, 1-8, 1999.
- [2] Hino, T.: A 3D Unstructured Grid Method for Incompressible Viscous Flows, *J. of the Society of Naval Architects, Japan*, 182, 9-15, 1997.
- [3] 菅井信夫、平田信行：内航タンカーのシリーズテストに対するCFDの検証、関西造船協会論文集、241、19-24、2004.
- [4] 佐藤陽平、日野孝則、日夏宗彦：CFDによる船首碎波を伴う船舶の抵抗値の推定法、第4回海技研研究発表会講演集、163-166、2004.
- [5] Hirata, N. and Hino, T.: A Comparative Study of Zero- and One-Equation Turbulence Models for Ship Flows, *J. of Kansai Society of Naval Architects, Japan*, 234, 1-8, 2000.
- [6] Ohashi, K., Hirata, N. and Hino, T.: A Comparative Study of Body Force Models Representing Effects of Contrarotating Propellers, *Trans. West-Japan Society of Naval Architects*, 105, 55-64, 2003.
- [7] Hino, T., Ohashi, K. and Ukon, Y.: Flow Computations around a Ship with Appendages by an Unstructured Grid Based NS Solver, *Proc. of 8th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Busan*, 2003.
- [8] 日野孝則：CFDによる船型最適化、ながれ、21、2002.
- [9] Campana, E.F., Peri, D., Tahara, Y. and Stern, F.: Comparison and Validation of CFD Based Local Optimization Methods for Surface Combatant Bow, *Proc. 25th Symposium on Naval Hydrodynamics, St. John's*, 2004.
- [10] Hirata, N.: Comparison of Genetic Algorithm and Gradient-Based Method Applied to Ship Shape Optimization, *J. Kansai Society of the Naval Architects, Japan*, 241, 59-65, 2004.
- [11] 平田信行、日夏宗彦、辻本勝：高速フェリーの船型最適化、第4回海技研研究発表会講演集、179-182、2004.
- [12] Hino, T. and Hirata, N.: A CAD/CFD Integration System for Ship Hull Form Design, *Proc. of World Maritime Technology Conference, San Francisco*, 2003.
- [13] Kawashima, H. and Hino, T.: A Hull Form Generation Method on Initial Design Stage, *Proc. of 9th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Luebeck-Travemuende*, 2004.