

粘性の影響を考慮した自由表面流れの計算

CFD Simulation for Viscous Flow with Free-surface of Ship

技 術 本 部 石 川 暁*¹ 高 田 憲 尚*¹

近年、数値流体力学 (CFD) による船舶性能の予測技術が向上し、船型設計の有効なツールとして活用されるようになってきている。本報では、これら最新の CFD 技術の一つである粘性の影響を考慮した自由表面流れ計算法の実用コンテナ船への適用例を紹介する。まず、コンテナ船周りの流れ・波高分布並びに抵抗係数を水槽試験結果と対比し、これらが精度良く推定可能であることを示す。次に、船体形状の相違による抵抗性能の差違を正しく推定することが可能であることを確認し、CFD による流れ解析法が船型開発に有用であることを示す。

Computational fluid dynamics (CFD) have greatly improved the accuracy of ship performance prediction, and therefore, CFD is now used in the initial stage of hull design. Among the various CFD method one of the latest method to simulate free surface viscous flow are taken into account, in the present paper. At first, calculated wave and flow distribution and ship resistance of a practical container ship were compared with measurements. Next, the method is applied to two container ships with different forebody shapes. We confirmed that CFD predicts the flow field and ship resistance very well, and estimates differences in resistance due to differences of hull form, as was found in experiments. This analysis is thus useful in developing superior hull forms.

1. ま え が き

近年の数値流体力学 (CFD) 技術の発展により、船体周りの流れや船体抵抗を数値解析によって精度良く推定することが可能となりつつある。

船舶が航行するときに船体に作用する抵抗は、主に造波抵抗と粘性抵抗の2成分から成っている。前者は水面に波を造るのに消費するエネルギーに相当する。

このような自由表面流れを CFD で計算する場合、粘性を無視した理想流体の仮定に基づくランキン・ソース法⁽¹⁾などが用いられることが多い。

一方、後者は水の粘性に起因する抵抗で、これを推定するためには境界層流れや離れ流れなどの粘性流れを扱える計算法が必要となり、Reynolds Averaged Navier-Stokes Solver (RANS 法) が用いられる⁽²⁾。

ただし、このような計算では、波がない状態に相当する水面が平たんであるという仮定が用いられる場合が多い。

しかしながら、実際の流れでは自由表面流れと粘性流れが相互に干渉するため、船体周りの流れや船体抵抗の推定精度の向上を図るためには、これらが同時に取扱える計算法が必要となる。

このような背景の下、近年 RANS 法による自由表面流れの計算法の開発が活発に行われている。

そこで、本報では、これら最新の解析法の一つである船舶技術研究所で開発された NEPTUNE 法⁽³⁾を実用船型周りの流れ解析へ適用し、水槽試験結果と対比して波高分布・流れや船体抵抗の計算精度の検証を行う。また、設計への応用例として、船体形状の異なるコンテナ船への適用例を示し、本計算法の有用性を検証する。

2. 計算法の概要

2.1 支配方程式及び境界条件

座標系は、図1に示すように、静止水面上に x 軸をとり、鉛直上向きに z 軸をとる。船体は x 軸方向の一様流れ U の中に固定されていると考え、船体の中央に座標原点をとる。船体周りの流れを重力が作用する定常非圧縮粘性流れと考えれば、この流れの支配方程式は式(1)で示される。

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_m} (\mathbf{F}_m + \mathbf{F}_{vm}) = 0 \quad (m=1, 2, 3)$$

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ p \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_m = \begin{bmatrix} u_m u_1 + p \delta_{m1} \\ u_m u_2 + p \delta_{m2} \\ u_m u_3 + p \delta_{m3} \\ u_m \beta \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_{vm} = -\nu \begin{bmatrix} \frac{\partial u_m}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_m} \\ \frac{\partial u_m}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_m} \\ \frac{\partial u_m}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_m} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\nu = \frac{1}{Re} + \nu_t$$

$$p = p_r + \frac{z}{F_n^2}$$

ここで、

(u_1, u_2, u_3) : (x, y, z) 方向の流速

p_r : 実圧力

p : 重力項を含んだ圧力

F_n : フルード数

Re : レイノルズ数

ν_t : 渦動粘性係数

δ_{mn} : Kronecker の delta

*¹ 長崎研究所船舶・海洋研究推進室

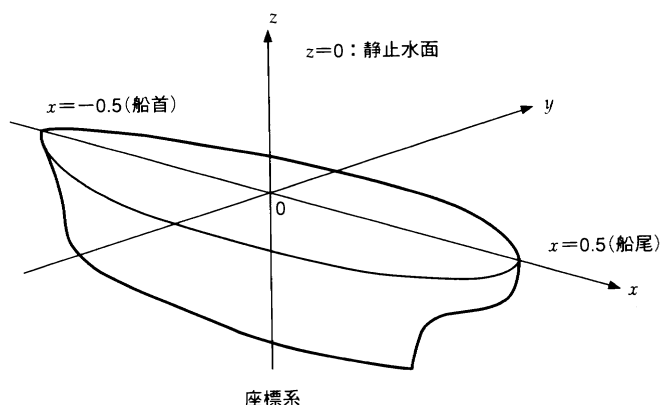


図1 座標系 本計算で用いた座標系を示す。
Coordinate system

F_m : 非粘性項

F_{vm} : 粘性項

式(1)の第3列までが運動量保存則を、第4列が質量保存則(連続の式)を表す。ただし、連続の式に擬似圧縮性の概念を導入しており、時間微分項 $\partial p / \partial t$ 及び擬似圧縮性のパラメータ β が付加されている(定常状態に達すれば $\partial p / \partial t = 0$ となり、連続の式そのものとなる)。自由表面の境界条件は、次の動力学的条件と運動学的条件の2つである。

- (1) 動力学的条件は水と空気の間での応力の連続性を課すものである。すなわち、自由表面に働く応力の法線成分は空気の圧力 $p_{air} (= 0)$ と釣り合い、接線成分(2方向)は0であるという条件である。
- (2) 運動学的条件は、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とどまるという条件で、式(2)で表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u_1 \frac{\partial h}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial h}{\partial x_2} = u_3 \quad (2)$$

その他の境界条件として、流入境界に一樣流の条件を、流出境界では0こう配条件を、物体表面にはnon-slip条件を与える。

2.2 数値解法

数値計算には、平田らの開発したNEPTUNE法を用いた。その詳細は文献(3)に譲り、ここではその概要を以下に示す。

- (1) 支配方程式は、変数 (u, v, w, p) をセルセンタに配置し、有限体積法を用いて離散化する。
- (2) 支配方程式を離散化の際、セル界面での非粘性流束は、3次精度風上差分である。さらに、流束差分分離法(Flux Difference Splitting)を採用し、数値安定性の向上を図る。粘性項はGaussの積分定理を用いて2次精度の中心差分的に評価する。
- (3) 時間微分は1次後退差分で近似し、準Newton法を用いて解を求める。
- (4) 乱流モデルには、Baldwin-Lomax Model(0方程式系モデル)を用いる。
- (5) 局所時間刻み法及びマルチグリッド法による収束加速を行う。
- (6) 流れの左右対称性を考慮して船体の片舷側に1/4円筒状

のH-Oタイプと称されるトポロジーを有する格子を生成して計算を実施する。

- (7) (6)で述べた格子を参照格子とし、計算格子は自由表面の変形に追従して移動させる。

3. 計算結果及び考察

本計算法の計算精度を検証するために、抵抗特性に加えて波高及び流場計測が実施されている船首バルブ付き実用コンテナ船を対象に計算を実施した。さらに、設計への応用例として、船首フレームライン形状がU型・V型と異なる実用コンテナ船の計算を行い、船体抵抗特性に与える船型の影響を調査した。

3.1 計算精度の検証

図2に示すコンテナ船(以下、Ship Aと称す)について計算を実施した。計算に用いた計算格子の格子点数は、長手方向137点、円周方向に37点、半径方向に69点で、合計で約35万点である。図3にフルード数 $F_n = 0.254$ 、レイノルズ数 $Re = 1.54 \times 10^7$ における船体周りの波高分布計算結果と試験結

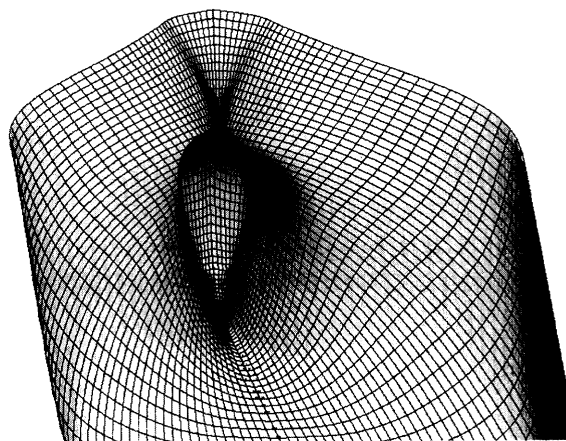


図2 コンテナ船(Ship A) コンテナ船(Ship A)の形状を示す。
Arrangement of hull surface panels of Ship A

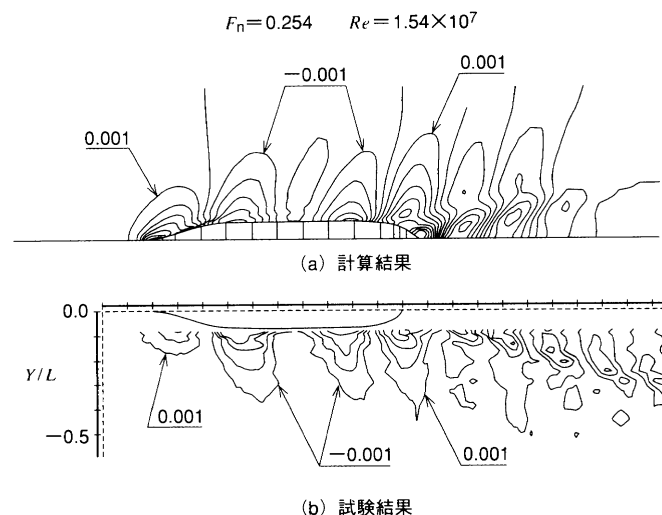


図3 波紋の比較 船体周りの波紋の様子が試験結果と良く一致している。(a)に計算結果、(b)に試験結果を示す。
Comparison of wave contours

果を比較して示す。ここで、波高 h は船長 L で無次元化されている。なお、水槽試験では船の最大幅から外側の領域のみで波高計測が実施されており、船首尾端の船体近傍の波高分布は不明である。図3より、船体から広がる波の様子、すなわち波の山・谷のパターンやその位置が計算でも良く捕えられていることが分かる。次に、もう少し密な比較を行うため、図3の $y=0.1$ 及び 0.3 の位置で長手方向に縦切りして求めた波高を比較して図4に示す。いずれの位置でも計算で得られた波の波高及び位相が試験結果と良く一致していることが分かる。

次に、抵抗の計算結果を図5に示す。ここで、全抵抗 R_t 、摩擦抵抗 R_f 及び造波抵抗 R_w は式(3)のように無次元化した。

$$\begin{aligned} C_t &= \frac{R_t}{\frac{1}{2} \rho U^2 \nabla^{2/3}} \\ C_f &= \frac{R_f}{\frac{1}{2} \rho U^2 \nabla^{2/3}} \\ C_w &= \frac{R_w}{\frac{1}{2} \rho U^2 \nabla^{2/3}} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、

ρ : 流体密度
 U : 船速
 ∇ : 排水容積

また、 C_f の試験結果は式(4)で示される Prandtl-Schlichting の算式を使用して求めた相当平板の摩擦抵抗係数 C_f (PS) である。

$$C_f(\text{PS}) = \frac{0.455}{(\log Re)^{2.58}} \cdot \frac{S}{\nabla^{2/3}} \quad (4)$$

ここで、

S : 浸水面積

造波抵抗係数 C_w は、Hughes の方法⁽⁴⁾に従い、形状影響係

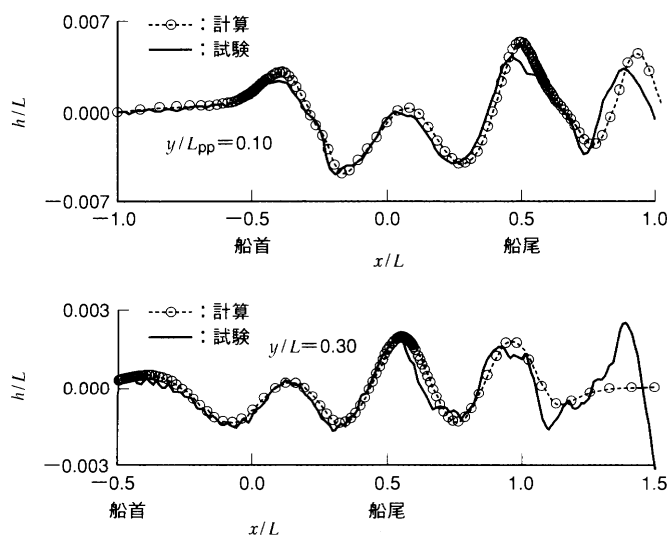
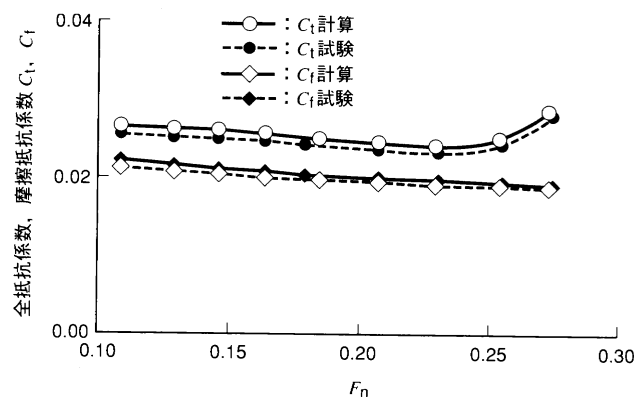
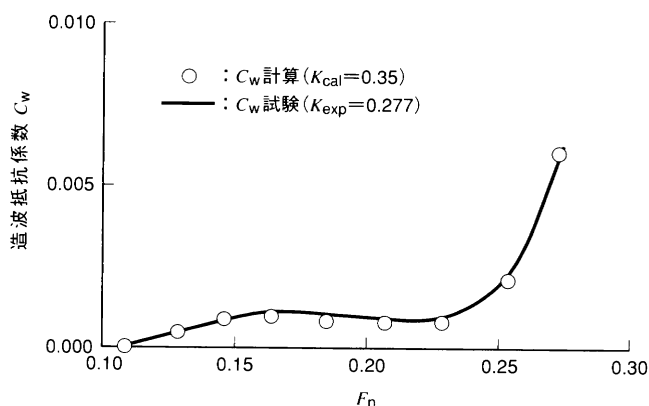


図4 縦切り波形の比較 船長方向に縦切りした波形を比較して示す。計算の波高分布は試験結果と定量的に良く一致している。
 Comparison of longitudinal wave profile



(a) 全抵抗、摩擦抵抗



(b) 造波抵抗

図5 抵抗係数の比較 フルード数の変化による抵抗係数の違いが試験結果と良く一致している。(a)に全抵抗係数及び摩擦抵抗係数、(b)に造波抵抗係数を示す。
 Comparison of resistance coefficients

数 K を造波抵抗がほとんど見られない低速点で $C_w = 0$ と仮定して決定し、式(5)を用いて算出した。

$$\begin{aligned} C_w &= C_t - (1 + K) C_{th} \\ C_{th} &= \frac{0.066}{(\log Re - 2.03)^2} \cdot \frac{S}{\nabla^{2/3}} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、

C_{th} : Hughes による相当平板の摩擦抵抗係数

各種抵抗係数とフルード数の関係は、計算と試験結果で良く一致している。特に、フルード数の増加に伴う造波抵抗の変化の様子が定性的のみならず定量的にも試験結果と良く一致している。なお、詳細に比較すると全抵抗係数が試験結果よりやや大きく、摩擦抵抗係数が逆にやや小さい。その結果、形状影響係数は試験結果よりもやや大きく推定されている。

最後にプロペラ面における伴流分布を比較して図6に示す。図6の等値線は式(6)で定義される W_x を、ベクトルはプロペラ面内流速成分 (u_2 , u_3) ベクトルを表す。

$$W_x = 1 - u_1 \quad (6)$$

等値線の位置や面内流速ベクトルの全体的な傾向は計算でおおむね捕えられている。ただし、試験で見られるプロペラ円内の渦及びこれに伴う W_x 等値線のくびれは計算では捕えられていない。これは、船尾のはく離渦の計算精度が不十分な

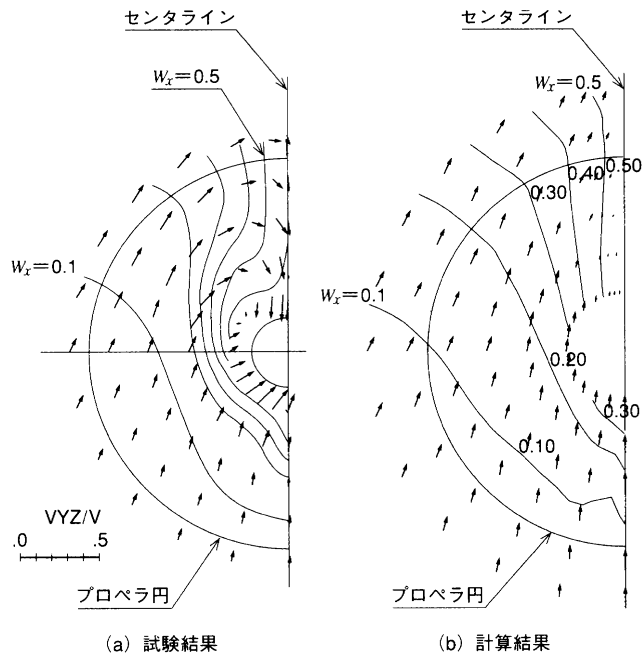


図6 プロペラ面における伴流分布の比較 W_x 等値線の形状や位置が試験結果と良く一致している。(a)に試験結果、(b)に計算結果を示す。
Wake distribution at propeller plane [(a) experiment, (b) calculation]

ためと考えられる。

3.2 設計への応用例

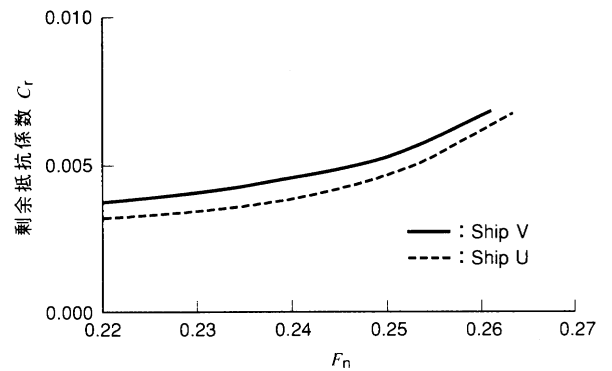
設計への応用例として、主要目が同一で船首フレームライン形状がU型・V型と異なる2隻のコンテナ船の計算を実施した(以下 Ship U 及び Ship V と称す)。計算結果から式(7)で定まる剰余抵抗係数を求めて図7に示す。

$$C_r = C_t - C_f \text{ (PS)} \quad (7)$$

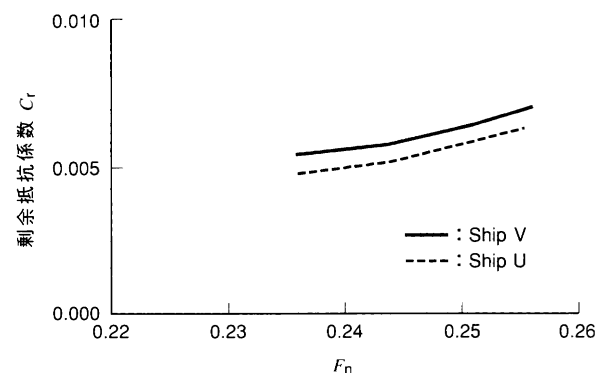
剰余抵抗係数は造波抵抗と粘性圧力抵抗の双方の抵抗成分が含まれる抵抗係数で、船舶の抵抗性能の優劣を評価する指標の一つである。さらに、これら2成分を同時に計算することができる本手法の計算精度を評価する上でも好都合な係数である。図7に示すように、船首形状がV型からU型へ変わると剰余抵抗係数が減少するが、計算でもこの傾向を良く捕えている。このように、本手法は船型間の船体抵抗の差違を正しく推定することができることから、船型の優劣の判断や船型改善の検討に有効なツールとして活用している。

4. おわりに

以上の検討により、本手法で求めた船体周りの波高分布や流場並びに船体抵抗は、水槽試験結果と大略一致することが確認された。特に造波抵抗について高精度の推定が可能であることが確認された。さらに、本手法は船体形状の違いによる船体抵抗の相違も精度良く推定することが可能である。し



(a) 試験結果



(b) 計算結果

図7 Ship U と Ship V の剰余抵抗係数 U型フレームラインのShip UがV型のShip Vに比べて剰余抵抗係数が小さくなる傾向を、計算も精度良く推定している。(a)に試験結果、(b)に計算結果を示す。
Comparison of residual resistance coefficient between Ship U and Ship V [(a) experiment, (b) calculation]

たがって、本手法は船舶の初期計画あるいは船型改良を実施する際に、有効に活用することができる。

参考文献

- (1) Yasukawa, H., A Rankine Source Kochin-Function Method to Remove the Negative Ship Wave Resistance, Schiffstechnik Bd 45/ Ship Technology Research Vol.45 (1998)
- (2) 石川, CFDによる船体周りの流場ならびに推進性能の尺度影響に関する検討, 西部造船会会報第91号 (1996)
- (3) Hirata, N. et al., An Efficient Algorithm for Simulating Free-Surface Turbulent Flows around an Advancing Ship, Journal of the Society of Naval Architects of Japan Vol.185 (1999)
- (4) Hughes, G., Frictional and Form Resistance in Turbulent Flow, and a Proposed Formulation for Use in Model and Ship Correlation, TINA Vol.96 (1954)