斜航船体と舵の干渉に関するCFD計算

正員 田 中 進*

木 村 校 優*

A Numerical Study on Hydrodynamic Interaction between Oblique Ship Hull and Rudder

by Susumu Tanaka, *Member* Koyu Kimura

Summary

The result of the previous validation study has shown a significant error especially for the prediction of course stability of an unstable ship. To improve the accuracy of the prediction, it will be required to estimate high accuracy hydrodynamic interaction among ship hull, propeller and rudder as well as hydrodynamic forces acting on a bare hull taking account of the detailed ship form such as stern profile and frame line.

This paper describes a study on the application of CFD(Computational Fluid Dynamics) to ship's manoeuvrability prediction at design stage. A numerical method has been applied to compute flows around a ship with a rudder in several oblique motions. Calculated interaction forces between ship hull and rudder are compared with measured ones. From this study, it is found that this hydrodynamic approach would be useful for prediction of ship manoeuvring motion

1. は じ め に

IMOの操縦性能暫定基準を契機に、船舶の設計の段階から操縦性能をより定量的に推定して評価することが求められるようになった。このため、停止性能を除く基準については、主機出力一定下における最大舵角の旋回試験と、10度、20度Z試験の操縦運動を精度良く推定することが必要になる。

現状、操縦運動を記述するMMG (Mathematical Modeling Group) 型の数学モデルを用いた運動シミュレーションによって、実用的には十分な精度で実船の操縦性能を予測できるものの、操縦性能の予測精度は、数学モデルに含まれる船体、プロペラ、舵のそれぞれ単独に作用する流体力と、船体、プロペラ、舵間の相互干渉力の推定精度に左右される。とりわけ針路安定性の評価に当たっては、対象船型の針路安定性が劣化するに従って、入力する流体力データの感度が増加する傾向にある

1)。また流体力データのうち、船体から舵への干渉を表す流体力係数は、主船体流体力の線形微係数に次いで操縦性能の推定精度に少なからず影響を及ぼす。このため初期設計の段階において、干渉流体力の推定精度を確保することも重要となる。

船体、プロペラ、舵の間の相互干渉の理論的な取り扱いについては、流場の粘性影響を強く受けるため、従来、一般的な流れ模型に置き換えて理論解析することは困難な場合が多かった²⁾。ところが、粘性流場を直接的に解くいわゆるCFD(Computational Fluid Dynamics)は、原理的には3次元剥離を伴う船体まわりの複雑な流れを取り扱うことができるため、操縦性の分野でも船体とプロペラ、船体と舵の干渉問題にCFDを適用した検討も行われるようになってきた。

例えば高田³⁾は、CFDにプロペラモデルを組み込んで、プロペラ作動時の斜航・旋回時の船体流体力の計算を行った。また宮崎ら⁴⁾は、現象の解明が十分に行われていない操縦運動中の干渉問題のうち、斜航中の船体と

* (株) 三井造船船島研究所

舵の干渉問題にCFDを適用し、船体と舵に働く流体力が概ね精度良く推定できることを示している。さらに、CFD手法の操縦性への適用研究として、従来の数学モデルによる流体力表現を用いずに時刻歴ベースに流体力をCFDで求め、同時に運動計算して求める方法も提案されている⁵⁾⁶⁾。このようなCFD手法は、流体力のメモリー効果や干渉影響を直接考慮した操縦運動の計算にも適用可能と思われる。このようにCFDの操縦性への応用研究は今後ますます進展するものと期待される。

一方、現状、操縦性能推定に供しているMMG型の数学モデルの流体力表現法について考えてみると、その思想が物理的に有意で、可能な限り簡潔な表現を目指して組み立てられている⁷⁾ため、例えば舵への平均流入角、平均流入速度などに代表されるように、現象をマクロ的に捉えることのできるメリットがある⁸⁾。そのメリットを生かすと、例えば今後ますます発展するであろうCFD手法の検証過程において、CFDから大量詳細出力される情報のうち積分値としての流体力をピックアップし、この流体力を数学モデルの表現に即して解析すれば、CFD結果の第1次チェックが行えることになる。

反面、数学モデルはより簡素な表現を旨として構築されているから、船体・プロペラ・舵間の細かな相互干渉影響や、実船の操縦性能推定を行う場合の合理的な尺度影響の取り扱いを考慮しきれない可能性もある⁹⁾。その意味でCFD計算によって得られる任意の瞬間・場所の流場や流体力の詳細情報は、現状使用している数学モデルの合理性の評価や高精度化、さらには操縦運動の推定精度の向上に寄与する可能性も考えられる。

本報告では、様々な応用研究が期待されるCFD手法を船体と舵の間の干渉問題に適用してその有効性を検証した。具体的には、タンカー船型(ESSO OSAKA)を対象に、斜航中の船体と舵(プロペラなし)まわりの流れを計算し、操舵によって船体に働く干渉力、船後の舵直圧力特性を求めて模型実験結果と比較した。また実船操縦性能を予測する場合の舵力の尺度影響を調べるため、本CFD手法を用いて実船レイノルズ数での斜航中の舵まわりの流れを試行的に求めて若干の考察を行った。

2. 操縦運動推定と船体・舵間の干渉係数

2.1 座標系および舵に作用する流体力

操縦運動の座標系と舵に作用する流体力の座標系をFig.1に示す。座標系はMMG型モデルの慣例に従い、操縦運動は船体重心を原点として船体固定座標系を用いる。ここでUは船速、u, v, rは速度成分、 β は横流れ

角、 δ は舵角、 F_N は舵直圧力、 U_R は舵への有効流入速度、 u_R , v_R は舵への有効流入速度成分、 α_R は舵への有効流入角を表す。

Fig.1 Coordinate Systems of Manoeuvring Motion

2.2 舵の力と数学モデル

舵力は操縦運動の重要な制御力であり、一般に船尾に配置されるため、船体および船の運動に大きく影響を受ける。舵力を表現もMMGの考え方に従う。すなわち舵力は、舵の単独性能を基本にして船体・プロペラ・舵の相互干渉を考慮して次のように表現する。

舵力および操舵によって主船体に誘起される縦方向の流体力 X_R 、横力 Y_R および回頭モーメント N_R は次式で表す。

$$\begin{aligned} X_R &= -(1-t_R)F_N \sin \delta \\ Y_R &= -(1+a_H)F_N \cos \delta \\ N_R &= -(x_R + a_H x_H)F_N \cos \delta \end{aligned} \quad (1)$$

ここで t_R , a_H , x_H は、舵から船体へ及ぼす干渉係数を表す。

舵の直圧力 F_N は次式で表す。

$$F_N = \frac{1}{2} \rho \frac{6.13\Lambda}{\Lambda + 2.25} A_R U_R^2 \sin \alpha_R$$

$$U_R = \sqrt{u_R^2 + v_R^2}$$

$$\alpha_R = \delta + \delta_0 - v_R / u_R$$

$$u_R = U(1-w_R)[1+C \cdot g(s)]^{1/2}$$

$$v_R = U\gamma(\beta - 2x_R \cdot r)$$

(2)

$$\begin{aligned}
 g(s) &= \eta \kappa \{2 - (2 - \kappa)s\} s / (1 - s)^2 \\
 \eta &= D_p / h_R \\
 \kappa &= 0.6(1 - w_p) / (1 - w_R) \\
 s &= 1 - u(1 - w_p) / (nP) \\
 w_R &= w_{R0} \exp(-4.0\beta_R^2) \\
 \beta_R &= \beta - 2x_R \cdot r
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

ただし、 ρ は水の密度、 A_R は舵面積、 Λ は舵のアスペクト比、 C は左右旋回時の舵力差を表す定数、 γ は整流係数（船の操縦運動時における舵への有効流入角が船体の整流作用によって変化する度合いを表す係数）、 x_R は船体中央から舵位置の前後方向距離、 w_{R0} は船体直進時の舵位置における有効伴流係数、 D_p はプロペラ直径、 h_R は舵高さ、 P はプロペラピッチを表す。

3. CFD 計算法および計算対象船

流場計算は、CFD コードである NICE 法⁹⁾を用いて行った。乱流モデルは修正型 BL(Modified Baldwin-Lomax)モデル¹⁰⁾を適用した。自由表面の影響は考慮しない。計算対象船は 278,000DWT タンカー ESSO OSAKA である。Table.1 に実船の主要目を示す。Fig.2 に船体（舵付、プロペラなし）の計算格子を示す。なお、本計算で使用した格子の分割数は $I \times J \times K = 101 \times 69 \times 41$ で、格子数は約 29 万個である。

Table.1 Principal Particulars of ship.

Items	
Length between perpendiculars (m)	325.00
Breadth moulded (m)	53.00
Draught moulded at midship (m)	21.73
Block coefficient	0.8293
Wetted surface area (m ²)	27,680
Displacement (t)	319,040
Rudder	
Breadth (m)	9.0
Height (m)	13.85
Aspect ratio	1.539
Effective rudder area ratio	1/56.66

Fig.2 Grid system around stern with rudder

4. 船体と舵の干渉に関する CFD 計算結果

CFD 手法を流体力場で検証するため、模型実験相当のレイノルズ数 1.0×10^6 において、Fig.3 に示すように、船体の直進および斜航中の舵角変更時の流場計算を行うと共に、CFD 計算で得られる船体に作用する舵の干渉力および船後の舵直圧力特性について模型実験結果と比較した。

Fig.3 An example of computed flow around a ship with a rudder in a manoeuvring motion.

4.1 直進状態

Fig.4 は、模型船相当のレイノルズ数 (10^6) について、直進状態（プロペラなし）、舵中央におけるA P位置での伴流分布の計算結果である。模型相当のレイノルズ数における船後の舵付近の流れは、大きな伴流が形成されている。

Fig.4 Wake distribution calculated at A.P. section ($\beta=0\text{deg.}$, $\delta=0\text{deg.}$, without propeller)

次に、直進状態で舵角を変更して船後の舵直圧力の計算を行った。舵角は0、 ± 5 度、 ± 10 度とした。

Fig.5 は、直進中の舵直圧力について、計算結果と実験結果¹¹⁾を比較したものである。ただし縦軸は舵直圧力 F_N を無次元化して表し、 L は船長、 d は喫水を表す。

Fig.5 Rudder normal force without propeller ($\beta=0\text{deg.}$)

Fig.5 に示すように、保針時に多用される小舵角において、本CFD計算結果と実験結果との一致度は良いと思われる。Fig.6 は、舵直圧力一致法で舵位置での伴流係数 ($1-wR$) を求めた結果である。なお舵直圧力モデルは前述の(2)、(3)式に従った。Fig.6 より、計算で得られた舵角 10 度での舵への有効流入速度と実験結果¹¹⁾との対応は良好と考える。

Fig.6 Effective rudder inflow velocity ($\beta=0\text{deg.}$)

さらに、Fig.7 および Fig.8 に示すように、直進状態において操舵によって船体に作用する横力および回頭モーメントを計算し、船体に作用する舵の干渉力を表す係数 a_H および着力位置 x_H/L について、計算結果と実験結果¹¹⁾を比較した。その結果を Table.2 に示した。

Fig.7 Lateral force induced by steered rudder ($\beta=0\text{deg.}$, Calculated)

Fig.8 Yaw moment induced by steered rudder($\beta=0\text{deg.}$, Calculated)

Table.2 Comparison of rudder-to-hull interaction coefficients between present calculation and experiment (without propeller)

Items	a_H	x_H/L
Calculated	0.811	-0.247
Exp.(HIROSHIMA UNIV.)	0.991	-0.269

Table.2を見ると、本CFD結果は、操舵によって主船体に誘起される横力と回頭モーメントの実験結果を説明していることが分かる。

4.2 斜航状態

斜航中の舵付船体（プロペラなし）の流場計算を行った。一例として Fig.9 は、斜航角 10 度、右舵 10 度の場合の A.P. 位置での伴流計算結果である。松本ら⁸⁾が指摘しているように、斜航による主船体の縦渦が船後の舵まわりの流れに影響を及ぼしていることが分かる。このような CFD でシミュレートされる操縦運動中の複雑な船尾流場は、舵への流入速度、流入角度に及ぼす船体の回頭影響、細かな船型影響など、有用な情報が得られる可能性が高い。今後とも引き続き、舵力の詳細について検討したい。

Fig.9 Computed wake distribution at A.P. section ($\beta=10\text{deg.}$, $\delta=10\text{deg.}$, without propeller)

次に斜航中の CFD 計算で得られた舵直圧力結果より、舵直圧力がゼロとなる舵角 δ_R を求め、舵への有効流入特性を調べた。

Fig.10 および Fig.11 は、斜航角は 0 度、 ± 10 度、 ± 15 度および ± 20 度、舵角は 0 度、 ± 5 度、 ± 10 度の場合の CFD 計算で得られた舵直圧力より求めた舵への有効流入速度および舵への有効流入角を示す。

Fig.10 Effective rudder inflow velocity in oblique motion(Calculated)

Fig.11 Effective rudder inflow angle in oblique motion

Table.3 Comparison of flow-straightening effect coefficient between present calculation and experiment (without propeller)

Items	γ
Calculated	0.393
Exp.(HIROSHIMA UNIV.)	0.373

ただし Fig.11 では、舵への有効流入角特性について実験結果¹¹⁾と比較している。さらに Table.3 は、Fig.11 の傾きを意味する整流係数について、本計算結果と模型実験結果を比較したものである。Fig.11 および Table.3 を見ると、本CFD計算値は模型実験で得られた舵への有効流入特性を十分に説明している。したがってCFD手法は、船体から舵への干渉影響の観点から船の針路安定性を評価する上で有効な方法であると言える。

5. 舵力の尺度影響に関する一考察

実船の操縦性能推定を行うためには、プロペラ位置における伴流係数、模型試験で得られた舵位置における伴流係数など、実船対応にスケールアップする必要がある¹²⁾。そこでまず、本CFD手法を用いて、斜航中の船後の流れに及ぼすレイノルズ数影響の調査を試みた。

Fig.12 は、ESSO OSAKA 船型を対象に、斜航角5度、舵角0度の場合のA.P.位置での伴流計算結果について、模型船レイノルズ数($Re=10^6$)の場合と実船レイノルズ数($Re=10^9$)の場合とを比較したものである。Fig.12を見ると、実船相当レイノルズ数の場合の舵まわりの流れは、伴流の大きさの違いだけではなく、船底からの流れが加速している傾向が見られる。したがって操縦運動時の実船と模型船とでは、舵への有効流入特性が異なる可能性がある。

舵への有効流入角に関する尺度影響の可能性を運動予測の観点から検討するため、15万DWTタンカー¹²⁾を対象に、操縦運動シミュレーションを行った。計算条件は、外乱がなく深水域状態における10/10Z試験とした。シミュレーションに必要な操縦流体力は、斜航試験、PMM試験および舵力計測試験で取得した。なお実船予測に先立ち、数学モデルの再確認するため、当社大水槽（長さ220m×幅14m×水深6m）において、自由航走模型（模型船長さ2.5m）を用いてラジコンZ試験を実施した。

Fig.12 Comparison of wake distribution at A.P. section in oblique motion between model ship and full scale ship (ESSO OSAKA, $\beta=5\text{deg.}$, $\delta=0\text{deg.}$, without propeller)

Fig.13 The large tanker scale model on the free running in indoor conventional towing tank

Fig.13にラジコン模型Z試験状況を示し、Fig.14はラジコンZ試験とシミュレーション計算とを比較した例

である。なおシミュレーションで用いた舵力の数学モデルは(1)~(3)式による。Fig.14 に示すように、ラジコン Z 模型模型試験とシミュレーションの一致度より、本数学モデルは妥当であることを再確認した。

Fig.14 Comparison of 10/10Z-maneuvre motion of a model ship, observed and simulated

次に本数学モデルを用いて実船予測した。Fig.15 は、平野のスケールアップ手法¹³⁾に加えて、CFD による舵まわりの流れのレイノルズ数影響の調査結果をもとに、整流係数 γ に尺度修正を施して実船予測した例である。具体的には、舵力試験で得られた整流係数 γ を 25% 程度減じて実船シミュレーションした。

Fig.15 Comparison of 10/10Z-maneuvre motion of a full scale ship (150,000 DWT tanker), observed and simulated (Dotted line: Full scale trial, Solid line: Simulation)

Fig.15 に示すように、実線で示したシミュレーション結果と破線で示した実船試験結果と一致は良好である。ただし、船後の舵力に対する尺度修正法の検討は 1 隻についてのみであり、本尺度修正法の妥当性については、引き続き検証を重ねたい。

6. おわりに

船舶の操縦性能予測の分野でも種々の応用が期待される CFD 手法を斜航中の船体と舵（プロペラなし）の干渉問題に適用し、船体に働く舵の干渉力と船後の舵直圧力特性を計算で求めて模型実験結果と比較した。その結果、本 CFD 計算法は、斜航運動による船後の舵直圧力の変化を十分に評価できるものであることが確認された。

また実船レイノルズ数における斜航中の船後の流れを CFD 計算で求め、船後の舵まわりの流れに及ぼすレイノルズ数影響について考察したのち、舵への有効流入角特性に尺度影響を考慮して実船操縦運動シミュレーションを実施した。その結果、シミュレーション結果と実船試験結果との対応が良好であった。

以上より、本 CFD 手法は、船体と舵の干渉という観点から船の針路安定性を評価する上で非常に有効なツールであると言える。

今後の課題としては、舵力に及ぼす船体の回頭運動、プロペラ回転流および船型の影響を本 CFD 計算法が十分に把握できるものかどうか検証すること、CFD 計算法を活用して船後の舵力モデルや尺度影響などについて詳細検討し、実船操縦性能予測の更なる推定精度向上を図ることなどが挙げられる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、試験水槽委員会 運動性能部会 操縦性推定専門委員会（略称 MaP）におきまして、長谷川代表、芳村代表をはじめ、会員の方々にご助言を賜りました。記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

1) Ishiguro T., Tanaka S. and Yoshimura Y.: A study on the accuracy of the recent prediction technique of ship's manoeuvrability at early design stage, Proceedings of the international conference MARSIM'96, Copenhagen(1996)

2) 松本憲洋, 湯室彰規: 船体、舵、プロペラの流体力学的相互干渉, 日本造船学会 運動性能研究委員

会・第 4 回シンポジウム(1987)

3) 高田憲尚：操縦運動中の肥大船の船体・プロペラ干渉を考慮した流場計算，西部造船会技術研究会 第 152 回性能部会(2000)

4) 宮崎英樹，野中晃二，二村正，上野道雄：船体と舵の干渉計算，日本造船学会論文集，第 189 号(2001)

5) 和泉一裕，佐藤徹，宮田秀明：CFD による肥大船の操縦運動シミュレーション，日本造船学会論文集，第 184 号(1999)

6) Sato T., Izumi, K. and Miyata H.: Numerical simulation of manoeuvring motion, 22nd Symposium on Naval Hydrodynamics, Washington D.C.(1998)

7) 小川陽弘，浜本剛実：操縦運動の数学モデルの基礎，第 3 回操縦性シンポジウム(1981)

8) 松本憲洋，高井忠夫：操縦性能の推定精度の向上，”船の操縦性能の推定特集”，日本造船学会誌(1985)

9) 牧野雅彦，児玉良明：NICE 法による斜航・定常旋回状態の肥大船まわり流れの計算，日本造船学会論文集，第 181 号(1997)

10) Kodama, Y.: Scope of CFD for Computing ship flows, Proc. 3rd Osaka Colloquium on Advanced CFD Applications to Ship Flow and Hull Form Design, (1998)

11) 貴島勝郎，浅井滋，山上順雄：深水域における操縦性能の推定，”船の操縦性能の推定特集”，日本造船学会誌(1985)

12) 高品純志，石黒剛：船の設計と操縦性能，”船の操縦性能の推定特集”，日本造船学会，運動性能研究委員会・第 10 回シンポジウム(1993)

13) 平野雅祥：初期設計時における船の操縦運動計算法について，日本造船学会論文集，第 147 号(1980)