船体と舵の干渉計算

正員 宮 崎 英 樹* 正員 野 中 晃 二*
正員 二 村 正 正員 上 野 道 雄*

Study of Interaction between Ship Hull and Rudder by Computation

by Hideki Miyazaki, *Member* Koji Nonaka, *Member*
Tadashi Nimura, *Member* Michio Ueno, *Member*

Summary

Accurate estimation of not only hydrodynamic forces acting on a ship hull, but also interaction among ship hull and propeller, rudder is essential for the mathematical model of ship maneuverability.

In the present paper, the Navier-Stokes code NEPTUNE developed at Ship Research Institute has been extended to compute flows around a ship with a rudder in a maneuvering motion.

Brief description of the numerical method is given followed by the comparisons of the computational results with experimental values.

Since both the hydrodynamic forces and the interaction between ship hull and rudder show good agreement between the simulations and the measurements, the practical usefulness of the present method has been demonstrated

1. 緒 言

現在、船舶の操縦性能を推定する方法は幾つか存在するが、中でも最も多く用いられる方法に MMG モデルによるシミュレーション計算がある。MMG モデルのもととなる数学モデルは流体力微係数により構築されるため、如何に船舶の操縦流体力を精度良く推定するかが重要となる。船体単独での操縦流体力については著者ら¹⁾によりタンカー船型とコンテナ船型については CFD(Computational Fluid Dynamics)による計算で十分な精度で推定することが確認された。

船体・プロペラ・舵の単独性能が精度良く推定できた場合、次に問題となるのは船体とプロペラ、舵間の相互

干渉である。今まで三者間の相互干渉はその現象の複雑さから実験による検証が中心となってきたが、日野、平田ら²⁾により発展してきた NEPTUNE コードを拡張することにより船体と舵角付きでの舵を同一計算領域として取り扱うことを可能とし、最終的には三者間の相互干渉計算を行うことを目標として研究を進めている。本論文ではまず船体と舵間の相互干渉係数を数値計算により推定し、実験結果との比較により推定精度について検証する。

2. 計算法

操縦運動している船体に働く流体力の推定には、船体の速度は操縦流体力への造波現象の影響が無視出来る程度の速度域と仮定し、水面を剛体平面とする鏡像を考えた上下対称な 2 重モデルを用いる。

ベースとした NS ソルバーは、抵抗・自航性能を推定するために船舶技術研究所で開発した NEPTUNE コード³⁾であり、その概要は以下の通りである。

* 海上技術安全研究所

支配方程式は擬圧縮性を導入した3次元のNS方程式で、セル中心の有限体積法を用いて離散化した。非粘性流束はRoe法で評価し、MUSCLにより3次精度を保持した。粘性流束には2次精度の中心差分を適用した。離散化した方程式を準Newton緩和法に基づいて陰的に解き、計算効率向上のために3段階のMG (Multi-Grid) 法と局所時間刻み法を課した。詳細は参考文献[3]を参照されたい。

本論文では船体が一定偏角 β で斜航運動をしている船体に働く流体力の横力、回頭モーメント、舵に働く直圧力について実験結果と比較する。

2.1 座標系と支配方程式

本論文では船体単独での計算に用いた計算コードを使用した。今後定常旋回での計算も予定しているのでそれによる項も考慮に入れて定式化する。

Fig.1 に示すように、空間固定座標系を $O^*-x^*y^*z^*$ 、船体固定座標系を $O-xyz$ とし、 x 軸を船首から船尾方向へ、 y 軸を左舷から右舷方向へ、 z 軸を垂直上方向へとる。船体は角速度 $\omega(0,0,\omega)$ で z 軸まわりに旋回し、船体固定座標系原点 O が速度 $\vec{U}$ で動いているとする。

Fig.1 Coordinate System

船体固定座標において、支配方程式は以下のように書ける。

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial z} = B$$

$$q = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} u^2 + p & -2vu_x \\ uv & -v(u_y + v_x) \\ uw & -v(u_z + w_x) \\ \alpha u & 0 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} vu & -v(v_x + u_y) \\ v^2 + p & -2vv_y \\ vw & -v(v_z + w_y) \\ \alpha v & 0 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} wu & -v(w_x + u_z) \\ wv & -v(w_y + v_z) \\ w^2 + p & -2vw_z \\ \alpha w & 0 \end{bmatrix}, \quad v = \frac{1}{R_e} + v_t$$

ここで、 u, v, w は流速、 p は圧力、 v_t は乱流モデルで決定する渦動粘性係数である。 α は擬圧縮性の正のパラメータで、 R_e は船長に基づくレイノルズ数である。

また、 B は定常旋回状態を船体固定座標系で計算するときに付加される見かけの外力項であり、次式で与えられる。

$$B = \begin{bmatrix} 2\omega v + \omega^2(x + R \sin \beta) \\ -2\omega u + \omega^2(y + R \cos \beta) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

第1項はコリオリの力であり、第2項は遠心力である。 ω は船体固定座標系での回転角速度である。

2.2 乱流モデル

乱流モデルは、SR222 修正 Baldwin-Lomax モデル (以下 BL モデルと呼ぶ) を適用している。

BL モデルは、直進する船舶の抵抗を推定する上で大変有効な乱流モデルであり、計算負荷が小さいことからこれまで広く用いられてきた。しかし、BL モデルは平板や2次元の比較的薄い境界層の実験データに基づいたモデルであるため、肥大船舶尾流場のように境界層が厚く発達し、かつ3次元性の強い流場では渦動粘性係数を過大評価し縦渦が弱くなることが知られている。そのため、壁面せん断応力の方向、及び速度ベクトルと渦度ベクトルのなす角に関連付けて v_t を強制的に減衰させ、さらに、船尾において圧力勾配が正の場合には BL モデルの外層において v_t を減衰させる SR222 修正モデルが開発され、船尾流場において本来の BL モデルより良い結果を与えることが示された⁴⁾。そこで本論文では SR222 修正モデルを使用する。

2.3 格子生成

今回のような船体・舵との干渉計算に使用する格子は川北ら⁵⁾により重合格子が提案されているが、本論文では船体と舵を同一の計算領域として取り扱う単一格子とした。単一格子は舵角つき状態や船体付加物など形状が複雑になるにつれ格子の生成が難しくなるという短所がある反面、今まで使用していたプログラムがそのまま使える点や、プログラム自体が保存則を満足していれば保存則を維持したまま計算が可能で計算精度が期待

できる点などの長所があげられる。

船体・舵角付き舵を単一格子で生成するために下記のような方法を用いた。船尾と舵付近の側面概略図を Fig. 2 に示す。

Fig.3 Illustration of Grid System around Rudder

まず初めに船体・舵表面の格子を生成する。そのとき船体表面は船体とオーバーハング部の二つの部分で構成する。次に舵軸を中心に舵角の分だけ舵を回転し、舵の前縁部と船体の船尾から構成される領域、舵の上縁部と船体オーバーハング部から構成される領域、船尾端や舵後縁などと下流に設定した格子点（本論文では $x = 0.6$ とした。）から構成される領域の五つ格子面を生成し、この五つの格子面で舵角によるギャップを吸収し単一格子での生成を実現している。

本論文では舵角 20 度まで格子生成し計算を行っているが、30 度程度までは可能であると考えている。

3. 舵単独性能

船体と舵の干渉計算について述べる前に、舵単独性能試験結果⁵⁾との比較を行う。今回計算対象としたのは日

Fig.3 Comparison of Rudder Normal Force Coefficient

本造船研究協会 SR221 で用いられた C 船型である。本来 SR221-C 船型ではマリナー舵が使用されているが、計算の都合上可動部とホーンが一体となった台形舵としている。

ここで使用した舵表面の格子は船体と舵との干渉計算で使うものとはほぼ同じ状態の格子であり、舵のコード長方向に 14 点、ガース方向に 19 点の計 266 点である。

Fig.3 に直圧力係数と接線分力係数の計算結果と九州大学で実施された実験結果⁶⁾、藤井の式との比較を示す。それぞれに用いた係数は下記の通りである。

直圧力係数

$$C_N = \frac{F_N}{1/2 \rho S V^2}$$

藤井の式

$$F_N = \frac{1}{2} \rho \frac{6.13 \Lambda}{\Lambda + 2.25} S V^2 \sin \delta$$

ただし $1.0 \leq \Lambda \leq 2.5$, $0^\circ \leq \delta \leq 35^\circ$

計算結果は実験結果・藤井の式ともに定量的に良く一致しており、十分な精度で計算できていることがわかる。

4. 実験と計算結果の比較

4.1 実験の概要

数値計算による船体と舵間の干渉係数の推定精度を確認するため、実験を船舶技術研究所の動揺水槽にて実施した。模型船は SR221-C 船型の 3.5m 模型を使用した。舵はマリナー舵の可動部とホーンが一体となった台形

Fig.4 Body Plans of Model Ship

Table 1 Principal Dimension of Model Ship

	Tanker (SR221-C)
L (m)	3.5
B (m)	0.634
D (m)	0.211
L/B	5.51
B/d	3.00
C _b	0.803

舵を使用した。模型船の主要目を Table.1 に、正面船体図を Fig.4 に示す。

船速は 0.713 m/s とし斜航角を 0 度から 15 度まで 5 度刻みで、舵角を -15 度から 20 度までを 5 度刻みで計測を行った。

計測項目は船体に働く前後力 X ・横力 Y 、midship まわりの回頭モーメント N と、舵に働く直圧力 F_N と接線方向分力 F_T である。また計測した流体力の符号を Fig. 5 に示す。

Fig.5 Coordinate System of Hydrodynamics Force

4.2 計算条件

計算ではレイノルズ数 R_0 を模型実験に対応する 2.10×10^6 とした。格子は H-O 型の 3 次元境界適合格子を用いた。計算領域は、2 重モデルを仮定して上下対称とし、Fig.6 に示すような半円柱型で、船首より上流に 1 船長、船尾より下流に 2 船長、外側境界は 2 船長とした。格子点数は船首尾方向（長さ方向）173 点、ガース方向（両舷）69 点、壁面垂直方向 69 点の約 82 万点である。また主船体部は船首尾方向に 59 点、船尾オーバーハング

Fig.5 Grid System

部には長さ方向に 26 点、舵はコード長方向に 15 点、ガース方向に 33 点である。今回の計算で用いた SR221-C 船型の船体・舵付きでの船尾付近の格子を Fig.6 に示す。

Fig.6 Grid System around Stern with Rudder

4.3 直進状態

直進状態での船体と舵との干渉計算を行い、干渉係数を求める。舵角を 0 から 20 度までを 5 度刻みで計算を行い、船体に働く横力、回頭モーメント、舵直圧力の実験値との比較を Fig.7,8,9 に示す。

舵直圧力と船体に働く横力の干渉影響を検討するため、横軸に舵直圧力の y 方向成分を、縦軸には船体に働く横力をとったグラフを Fig.7 に示す。

船体と舵の干渉係数（直進時）

$$Y_{HR} = (1 + a_H) F_N \cos \delta$$

Fig.7 Comparison of Sway Force

図から明らかとなおり計算値は実験値に対し十分な精度で推定できていることがわかる。 $1+a_H$ となる傾き

は実験値、計算値とも 1.249 と一致しており船体と舵の干渉現象を十分に推定していることがわかる。

舵直圧力と船体の回頭モーメントの干渉影響を検討するため、横軸に舵直圧力の y 方向成分を、縦軸には船体に働く回頭モーメントとったグラフを Fig.8 に示す。

舵直圧力により誘起された横力の着力点 (直進時)

$$N_{HR} = (x_R + a_H x_H) F_N \cos \delta$$

Fig.8 Comparison of Yaw Moment

図から明らかなとおり計算値は実験値を十分な精度で推定できていることがわかる。それぞれの傾きは実験値で -2.100、計算値で -2.063 と良く一致しており、船体に働く横力の着力点を船長で無次元化した x_H は実験値で 0.402、計算値で 0.359 と十分に推定できていることがわかる。

有効舵流入速度 U_R を検討するため、横軸に舵角を、縦軸には船体に固定した舵の舵直圧力と舵単独での舵直圧力の比の平方根を Fig.9 に示す。

Fig.9 Effective Rudder Inflow Velocity

有効舵流入速度

$$U_R = U \sqrt{F_N / F_{N0}}$$

今回の実験では舵単独性能試験を行わなかったため、九州大学で実施された舵単独性能試験結果⁶⁾を使用した。このとき流速が一致しなかったため、実験結果から内層に対応する流速での舵直圧力を求め、それをもとに実験値の有効舵流入速度を求めた。舵角が 5 度のときの一致が良くないが、これはタンカー船型のような肥大船では微小舵角での舵効きが良くなく、今回の実験でも 5 度での計測値はあまり信頼できない。しかしそれ以外の点については計算結果は実験結果を十分な精度で推定できている、舵角による影響をあまり受けていない。

舵直圧力により誘起される横力が船体のどの部分に作用しているかを確認するため、横軸に船体の midship を原点とした座標を船長で無次元化したものを、縦軸には船体に働く横力をとったグラフを Fig.10 に示す。

Fig.10 Longitudinal Distribution of Lateral Force ($\beta=0$ deg.)

ここで示す計算結果は直進状態で舵角を5から15度まで5度刻みで行ったものである。

直進状態では舵によって誘起される横力が作用する部分は船尾付近で、舵角による影響は少ないと言える。

4.4 斜航状態

操縦運動の一例として斜航状態での船体と舵との干渉計算を行う。斜航角は幾つかの状態について計算を行ったが今回は斜航角10度について干渉係数を求める。舵角を-10から15度までを5度刻みで計算を行い、船体に働く横力、回頭モーメント、舵直圧力と実験値との比較をFig.11,12,13に示す。

船体が舵の前にあることによる有効舵流入角、有効舵流入速度への影響を確認するために、計算結果と実験結果との舵直圧力の比較を行う。横軸に舵角を、縦軸には舵直圧力をとったグラフをFig.11に示す。

Fig.11 Comparison of Rudder Normal Force Coefficient ($\beta=10$ deg.)

船体の有効舵流入角への影響は実験値で-0.38度、計算値で-1.15度と0.77度の違いがある。これは模型船の設定誤差などの影響も考えられるが、今回計算で使用した格子が船尾付近の曲率を十分に表現しきれていないことも原因と考えられる。また、それぞれの傾きは実験値が-0.0065であるのに対し、計算値は-0.0055と実験値に対して85%となっている。流体力は速度の2乗に比例することを考えると実験値に比べ有効流入速度が92%程度となっていることがわかる。これは船尾付近で壁面上を流れてきた流体が、一度壁面の無い領域を通過し、再度舵付近で壁面上を流れるという非常に複雑な現象を、今回使用した代数方程式による乱流モデルが表現しきれていないことが原因と考えられる。この微妙な違いが以下のグラフにも影響を及ぼしている。

舵直圧力と船体に働く横力の干渉影響を検討するため、横軸に舵直圧力のy方向成分を、縦軸には船体に働く横力から船体単独に働く横力を差し引いたものをとったグラフをFig.12に示す。

Fig.12 Comparison of Sway Force ($\beta=10$ deg.)

計算値は傾向を捕らえてはいるが、あまり精度良く推定できているとは言えない。1+ a_H となる傾きは直進状態、斜航状態ともそれほど変わらない値を示すことは知られているが、実験値で1.263と直進状態とあまり変わらない値を示しているのに対し、計算値は1.017と実験値とも直進状態とも異なっている。

Fig.13 Comparison of Yaw Moment ($\beta=10$ deg.)

舵直圧力と船体の回頭モーメントの干渉影響を検討するため、横軸に舵直圧力のy方向成分を、縦軸には船体に働く回頭モーメントから船体単独に働く回頭モーメントを差し引いたものをとったグラフをFig.13に示す。図から明らかとなおり計算値は精度良く推定できて

いるとは言えない。それぞれの傾きは実験値で -2.132 と直進状態とあまり変わらない値を示しているが、計算値で -1.720 と実験値とも直進状態とも異なっている。

船体に働く横力の着点を船長で無次元化した x_H は実験値で 0.416 、計算値で -0.490 とこれについても傾きと同じことが言える。この原因は舵直圧力のところで触れたものが考えられる、それとは別に計算では舵軸を考慮に入れていないことも原因の一つと考えられる。舵軸自体に働く横力は大きくないがレバーとなる midship からの距離を考えると回頭モーメントへの影響は無視できないように思える。

5. 結 言

船体の操縦運動を推定する上で重要となる数学モデルの中で、現象の解明が十分に行われていない船体とプロペラ、舵間の干渉問題のうち、本論文では船体と舵の干渉問題をタンカー船型について CFD を適用した計算結果と実験結果とを比較・検討した結果、下記のような結論が得られた。

1. 船体と舵を単一格子として格子を生成することにより、船体と舵に働く流体力が概ね精度良く推定できる。
2. 直進状態での舵角試験の計算結果から船体と舵の干渉係数である a_H 、 x_H を精度良く推定できる。
3. 直進状態での舵角試験の横力分布から舵により誘起される横力が作用する部分は船尾付近で、舵角による影響は少ないと言える。
4. 斜航状態での舵角試験では船体による有効舵流入角や有効舵流入速度への影響が実験結果との間に微小な相違が見られる。
5. 斜航状態での干渉係数は精度よく推定できていない、これは上記のことが原因と考えられる。

本論文では計算の都合上、台形舵で計算および実験を行い船体と舵の干渉問題について検討を行ったが、実際にはマリナー舵などのホーン付きの舵が使われており、これらについてはさらに検討が必要である。

今後はより実用的な舵への適用、乱流モデルの変更、格子の生成法の改良により斜航状態での推定精度を向上するとともに、プロペラを導入し、船体・プロペラ・舵の3者間の干渉問題について検証していく予定である。

参 考 文 献

- 1) 宮崎英樹、野中晃二、日野孝則、平田信行、二村正、上野道雄：CFD による操縦流体力の推定について、日本造船学会論文集、第 187 号、2000、pp.121-130
- 2) Y. Kodama : Computation of Ship Resistance Using an NS Solver with Global Conservation — Flat Plate and Series 60 ($C_B=0.6$) Hull, 日本造船学会論文集、第 172 号、1992、pp.147-155
- 3) . Hirata and T. Hino : An Efficient Algorithm for Simulating Free-Surface Turbulent Flow around an Advancing Ship, 日本造船学会論文集、第 185 号、1999、pp.1-8
- 4) 第 222 研究部会：大型肥大船舶尾流場推定法の高度化、SR222 成果報告書、1995、3 月
- 5) 川北千春、石川暁、佐々木壮一、林秀千人：解強制置換法を用いた船体周りの流場計算法、日本造船学会論文集、第 186 号、1999、pp.185-192
- 6) 小田耕吉、山下周一、一瀬哲也、中武一明：マリナー舵模型に働く直圧力と抗力について、西部造船会々報、第 91 号、1995、pp.15-23
- 7) 第 221 研究部会：操縦運動時の船体周囲流場に関する研究成果報告書、日本造船研究協会研究資料、No.410、1996、pp.9-13
- 8) 葛西宏直、湯室彰規：舵に作用する力と船体・プロペラとの干渉、日本造船学会誌、第 579 号、pp.20-34
- 9) 小瀬邦治、湯室彰規、芳村康男：操縦運動の数学モデルの具体化 - 船体、プロペラ、舵の相互干渉とその表現方法を中心に -、第 3 回操縦性シンポジウム、1981、pp.27-80