CFD による船首砕波を伴う船舶の抵抗値の推定法

CFD 研究開発センター * 佐藤 陽平、日野 孝則、日夏 宗彦

1.はじめに

フルード数が 0.4 を超えるような中高速船で は、一般に船首において砕波現象が起こる。砕波 現象は、砕波抵抗として船舶の抵抗増大の原因と なるため、これまでに砕波現象に関しては多くの 研究がされてきた。例えば、宮田は CFD と実験に より、自由表面衝撃波のメカニズムを研究し、そ の応用として船首薄型バルブの開発を行った^[1]。 また、中高速船に限定すると、玉島らが実験的ア プローチで砕波現象を低減する船首形状を研究し た例^[2]などがある。

砕波を伴う船舶の抵抗を推定するためには、砕 波の影響も含めた造波抵抗および粘性抵抗を計算 する必要がある。通常、CFDを用いて抵抗性能を 推定する場合、流場が定常状態であることを仮定 し、定常状態の支配方程式を解く。しかし、砕波 現象は時々刻々と変化し続ける非定常現象である ため、定常状態を仮定した計算では、収束解を得 ることが難しく、抵抗性能を推定することは困難 と考えられる。

そこで、本研究では、非定常状態の流場解析法 を開発し、砕波現象を伴う船体周りの流場の解析 を行い、船舶の抵抗性能の推定することとした。

2.数值計算法

海上技術安全研究所で開発を進めている粘性流 体ソルバーSURF^[3]を、非定常流場の解析ができ るように拡張する。

支配方程式は、3次元 Navier-Stokes 方程式と、 連続の式である。セル中心に圧力および速度

(p,u,v,w)を定義する。コントロールボリュームは、

セルの体積である。

SURFは、速度と圧力のカップリングの手法として、擬似圧縮法^[4]を採用している。擬似圧縮法

では、 $\frac{1}{\beta} \frac{\partial p}{\partial t}$ の項が連続の式に付加される。ここで、 β は擬似圧縮性パラメーターである。通常、擬似 圧縮法では、圧力および速度が収束して定常状態 となった時のみ流体の非圧縮性が満足され、収束 過程においては、非圧縮性は満足されない。今回、 非定常状態でも非圧縮性を満足させるために、物 理時間 t の他に、擬似時間 τ を導入した。物理時 間の各時間ステップにおいて、擬似時間を進行さ せ、圧力場と速度場が非圧縮性を満足するまで計 算を進める。

解くべき方程式は以下の通りとなる。

$$\frac{\partial V_i q_i}{\partial t} + \frac{\partial V_i q_i^*}{\partial \tau} + \sum_{faces} \left(E - E^v \right) = 0 \tag{1}$$

ここで、

$$q_i = \frac{\int_{Vi} q^n dV}{Vi} ,$$

$$E = eS_{x} + fS_{y} + gS_{z}$$
, $E^{v} = e^{v}S_{x} + f^{v}S_{y} + g^{v}S_{z}$,

$$q = \begin{bmatrix} 0\\ u\\ v\\ w \end{bmatrix}, q^* = \begin{bmatrix} p\\ u\\ v\\ w \end{bmatrix},$$
$$e = \begin{bmatrix} \beta u\\ uu + p\\ vu\\ wu \end{bmatrix}, f = \begin{bmatrix} \beta v\\ uv\\ vv + p\\ wv \end{bmatrix}, g = \begin{bmatrix} \beta w\\ uw\\ vw\\ ww + p \end{bmatrix}$$
$$e^v = \begin{bmatrix} 0\\ \tau_{xx}\\ \tau_{xy}\\ \tau_{xz} \end{bmatrix}, f^v = \begin{bmatrix} 0\\ \tau_{xy}\\ \tau_{yz}\\ \tau_{yz} \end{bmatrix}, g^v = \begin{bmatrix} 0\\ \tau_{xz}\\ \tau_{zz}\\ \tau_{zz} \end{bmatrix},$$
$$\tau_{ij} = \left(\frac{1}{Re} + v_i\right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$$

である。 V_i はセルの体積、 s_x, s_y, s_z は面積ベクトルである。 また、EおよびE'は、それぞれ非粘性フラックス および粘性フラックスである。 $Re(\equiv UL/v)$ はレイ

ノルズ数であり、ここで*v*は動粘性係数、*U とL*は 代表速度と長さである。*v_t*は無次元化された渦粘 性係数であり、Spalart-Allmaras 一方程式モデル ^[5]から算出する。

非粘性フラックスは Roe の Flux-difference splitting 法^[6]による風上差分で評価する。粘性フ ラックスは、2次精度の中心差分^[7]により評価す る。

式(1)における時間進行は、物理時間 *t* と擬似時 間 *r* で別々に行う。擬似時間 *r* は、1 次精度であ るオイラー陰解法で、物理時間 *t* は 2 次精度の後 退差分で計算する。

時間に関する離散化を行うと、解くべき方程式 は次の通りとなる。

$$\frac{3V_{i}^{n+1}q_{i}^{n+1,m+1} - 4V_{i}^{n}q_{i}^{n} + V_{i}^{n-1}q_{i}^{n-1}}{2\Delta t} + \frac{V_{i}^{n+1}q_{i}^{*n+1,m+1} - V_{i}^{n+1}q_{i}^{*n+1,m}}{\Delta \tau} + \sum_{Faces} E^{n+1,m+1} - \sum_{Faces} E^{\nu,n+1,m+1} = 0$$
(2)

ここで、上付き文字 "は物理時間の時間ステ ップを、"は擬似時間の時間ステップを意味する。 Δt および $\Delta \tau$ は、それぞれ物理時間と擬似時間の 時間間隔である。

各物理時間ステップにおいて、物理時間を固定 した状態で、擬似時間のみ進行させて *q^{* n+1,m+1} q^{* n+1,m}* と収束するまで、すなわち非圧縮性 が満足するまで計算する。以上の計算手法により、 擬似圧縮法を用いた非定常解析を行う。

自由表面の計算には、界面捕獲法のひとつであ るレベルセット法^[8]を用いた。界面捕獲法は、自 由表面の大変形の計算が可能であり、フルード数 が高い船舶の計算に適している。SURF にレベル セット法を導入した例^[8]では、Series60の船側波 形について、水槽試験結果と計算結果を比較し精 度検証を行った結果、その有効性が示されている。

3.計算条件

船首バルブを有し、船尾形状がトランザムスタ ンである中高速船を計算対象の船型とした。満載 と軽荷の2状態に対して表 1 に示す計算条件で 計算を行った。

トリムおよびシンケージは、水槽試験から得られた値を既知として計算条件に与えた。

計算格子は、図 1 に示す O-O 系の格子を用いた。計算格子に関するパラメータを表 2 に示す。 SURF は、非構造格子に対応しているが、今回は 格子生成の容易さから構造格子系を採用した。

非定常解析の条件としては、物理時間の時間ス テップ幅を 0.02 無次元時間、擬似時間の時間ステ ップ幅はクーラン数が 5.0 となるように、また擬 似時間ステップの最大進行回数を 10 回と設定し た。

4.計算結果

4.1.造波抵抗係数

CFD 計算では、水槽試験と同様に、波なしの条件で計算し、形状影響係数を求め、造波抵抗を算出した。

造波抵抗係数の計算結果と水槽試験結果の比較 を図 2 に示す。軽荷状態のフルード数が高い領域 では計算結果と水槽試験結果で若干の差がある が、特に満載状態では、両者は高い精度で一致し ている。

4.2.波形

船首および船尾における波形を、計算結果と水 槽試験結果で比較し、本計算法で水槽試験と同様 な砕波現象を計算できているか確認する。

船首の計算結果を図 3 に、水槽試験結果を図 4 に示す。比較し易いように、CFD計算結果にも水 槽試験と同様に、船体にセクション番号を記載す る。

船首で発生した波が裏返るように盛り上がる状態が計算できている。FP と SS9¹/2 との間で波高 のピークとなっていることも計算で再現されてい る。細かい飛沫までは計算できていないが、これ は計算格子の解像度不足が原因で、飛沫よりも細 かい格子を用いれば、飛沫まで含めた計算が可能 だと考えられる。

船尾の計算結果を図 5 に、水槽試験結果を図 6 に示す。船首と同様に、水槽試験と計算で、よく 似た波形となっている。

4.3.定常解析と非定常解析の比較

砕波現象が非定常現象であるという仮定で、非 定常状態の粘性流場ソルバーを開発したが、その 仮定が正しかったか確認するために、従来の定常 状態を仮定した解析と、今回の非定常状態の解析 を比較する。定常解析と非定常解析では、同一の 格子を用い、同一のフルード数およびレイノルズ 数で計算を行った。定常解析の時間ステップの条 件は、クーラン数が 5.0 となるように設定した。

全抵抗値の時系列データの比較を図 7 に示す。 非定常解析結果は、全抵抗の平均値 ±1%以下の範 囲を振動し続けている。一方、定常解析では、収 束した解が得られていない。

すなわち、非定常解析結果では、2000時間ステ ップ以降のある一定時間以上の平均化で抵抗値を 推定することは可能であるが、定常解析結果では、 平均化する時間長により抵抗値が変ってしまい、 抵抗値を推定することが困難である。

以上より、非定常状態の解析が、本計算例にお いて有効であったといえる。

4.まとめ

本研究では砕波現象を伴う船舶の抵抗性能を推 定することを目的として、非定常状態の粘性流体 ソルバーの開発を行った。

開発した推定法の検証として、船首バルブを有 し、トランザムスタン形状である中高速船の計算 を行った。計算された造波抵抗および波形を、水 槽試験結果と比較した結果、両者が高い精度で一 致することが確認された。

また、定常解析と非定常解析の比較を行い、定 常解析では収束解が得られない計算において、非 定常解析では抵抗値を推定可能な解が得られるこ とを示した。

表 1: 計算条件

	Re	Fn
Full load	6.00E+06	0.335, 0.364, 0.393
Ballast	6.00E+06	0.334, 0.364, 0.393, 0.417

表 2: 計算格子に関するパラメータ

格子数	679,185
(長手方向x周方向x境界層方向)	(129x65x81)
格子全体の直径	6.0
最小格子間隔 境界層方向	3.0x10 ⁻⁶
長手方向	5.0x10 ⁻³
周方向 (自由表面上下方向)	4.0x10 ⁻³







図 2: 造波抵抗係数



図 3:船首の波形 (計算結果)



図 4:船首の波形 (水槽試験)



図 5: 船尾の波形 (計算結果)



図 6: 船尾の波形 (水槽試験)





参考文献

- [1] 宮田秀明, "FSSW,砕波,首飾り渦," 日本造船学会誌, 第673
 号, 1985, pp.428-441
- [2] 玉島正裕,西本仁,小倉里一,茂里一紘,"静水中における高速
 肥大船型の船首近傍流れの実験的調査,"西部造船会々
 報,No.68, 1984, pp.1-10
- [3] T.Hino, "A 3D Unstructured Grid Method for Incompressible Viscous Flows," J. Soc. of Naval Archit. Japan, Vol 182, 1997, pp.9-15
- [4] A.J.Chorin, "A Numerical Method for Solving Incompressible Viscous Flow Problems," J. Comput. Pys., Vol.2, 1967, pp.12-26
- [5] P.R.Spalart, et al., "A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows", La Recherche Aèrospatiale, No.1, 1994, pp.5-21
- [6] P.L.Roe, "Characteristic-based scheme for the euler equations," Ann. Rev. Fluid Mech., Vol.18, 1986, pp.337-365
- T.Hino, "Navier-Stokes Computations of Ship Flows on Unstructured Grids," Proc. of the 22nd Symp. on Naval Hydro., 1998, pp.463-475
- [8] T.Hino, "An Interface Capturing Method for Free Surface Flow Computations on Unstructured Grids," J. Soc. of Naval Archit. Japan, Vol 186, 1999, pp.177-183