

船舶CFD計算における自由表面の計算法と 砕波を伴う中高速船への適用例

佐藤 陽平、日野 孝則

Free Surface Treatments in Marine CFD and Flow Simulation around a High-Speed Ship with Wave Breaking

by

Yohei SATO and Takanori HINO

1. まえがき

1990年代以降、数値流体力学(Computational Fluid Dynamics, 以下CFDと記す)を主とする数値解析と水槽試験とを連携的に活用して船型開発を行った結果、船舶の燃費は飛躍的に向上した。CFDは、水槽試験に比べてコストパフォーマンスに優れ、また流場の可視化により船型が流場に与える影響を評価しやすいため、近年、船型設計において積極的に活用されてきている。CFDで造波抵抗を評価するためには、自由表面の変形を計算する必要があり、その解析方法も改良されてきた。自由表面の取扱いは、自動車や航空機周りの流れの解析にはない、船舶周りの流れ解析の特徴である。

また近年では、CFDは抵抗性能の評価以外に、耐航性能の評価^{1),2)}や操縦性能の評価^{3),4)}にも用いられ始めている。前者の自由表面の取扱いにおいては、入射波の造波方法や流出境界における波の無反射条件などが開発されている。水面以外では、プロペラにおけるキャビテーションの評価にも用いられ、実用的な解析が行われ始めている。

本報告では、まず、CFDにおける自由表面の取

扱法について述べる。次にCFDによる自由表面の解析例として、砕波を伴う中高速船の抵抗計算を紹介する。この計算は、海上技術安全研究所のCFDコードSURF⁵⁾で、非定常解析したものである。

2. 自由表面の計算法

CFDにおける自由表面の取扱い方法は、次の二種類に分類される。

- 境界適合格子型
- 固定格子型

境界適合格子型は、自由表面の界面を格子境界で追跡する方法である。計算例として、ある船舶の長手方向一定断面における自由表面形状を図1(上図)に示す。これは、海上技術安全研究所のCFDコードNEPTUNE⁶⁾で計算した結果である。自由表面と格子境界形状が一致しており、それに伴い水中の格子も変形していることがわかる。本手法は、自由表面の動力学的条件を正確に与えられる長所がある。ここで、自由表面の動力学的条件とは、水の表面張力を無視した場合において、自由表面上の圧力が大気圧であり、かつ、自由表面の

接線方向のせん断力がゼロであるという二つの条件である。しかし、本手法は自由表面の変形に伴い計算格子を変形する必要があるため、自由表面が大変形すると格子形状に大きなねじれが生じて計算が不可能になる欠点がある。

固定格子型は、固定した格子上で自由表面の界面位置をマーカー関数の値で捕獲する方法である。例えばレベルセット法^{7),8)}では、変数配置点から自由表面までの距離を関数として定義し、その距離関数の支配方程式を解くことで、自由表面位置を追跡する。ここで、自由表面の運動学的条件より、支配方程式としての輸送方程式が導かれる。レベルセット法の計算例として、ある船舶の長手方向一定断面における自由表面形状を図1(下図)に示す。固定した格子上で、自由表面境界が表されている。固定格子型の長所は、計算格子の変形を伴わないため、自由表面が大変形しても計算が可能な点である。しかし、自由表面の動力学的条件を正確に与えることが難しく、計算精度が格子サイズに依存するという短所がある。また、輸送方程式を離散化して解くことから、数値散逸や拡散により、自由表面の計算精度が低下するという問題がある。

数値散逸や拡散を避けるための手法としてCIP(Constrained Interpolation Profile)法⁹⁾が開発されているが、直交格子もしくはそれに類する格子を用いなくては精度が向上しないという制約がある。しかし、直交格子を船体周りの計算に用いると、境界層の格子解像度が低くなるため、粘性影響を十分には考慮できない。従って、CIP法を船体抵抗計算のように粘性影響が大きな流れ場に適用するためには、更なる研究が必要である。

固定格子型において、レベルセット法以外では、マーカーとして密度関数を用いる方法も提案されている。密度関数とは、計算セルが完全に水中にある場合は1.0、空中の場合は0.0とし、自由表面は0.5の位置と定義した関数である。支配方程式は、レベルセット法と同じく輸送方程式である。Volume of fluid法¹⁰⁾は、密度関数としてセル内での気相の体積比率(ボイド率)を定義することに相当し、密度関数法の一つの手法と考えることができる。本手法は、体積移動量を保存形で計算するため、流体の連続性をより高い精度で満たすことが可能であるという特徴がある。

以上の特徴より、実用上は自由表面の取扱法を、次のように使い分けることができる。

- 自由表面の変形が小さい場合には境界適合型を用いると、高い精度で自由表面の計算ができる。
- 自由表面の変形が大きい場合には固定格子型

を用いることで格子のねじれを避けることができる。

3. SURF の計算法

CFDによる自由表面計算法として、海上技術安全研究所で開発を進めているCFDコードSURF⁵⁾の非定常流場の解析法について説明する。

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¹¹⁾を採用している。擬似圧縮法で

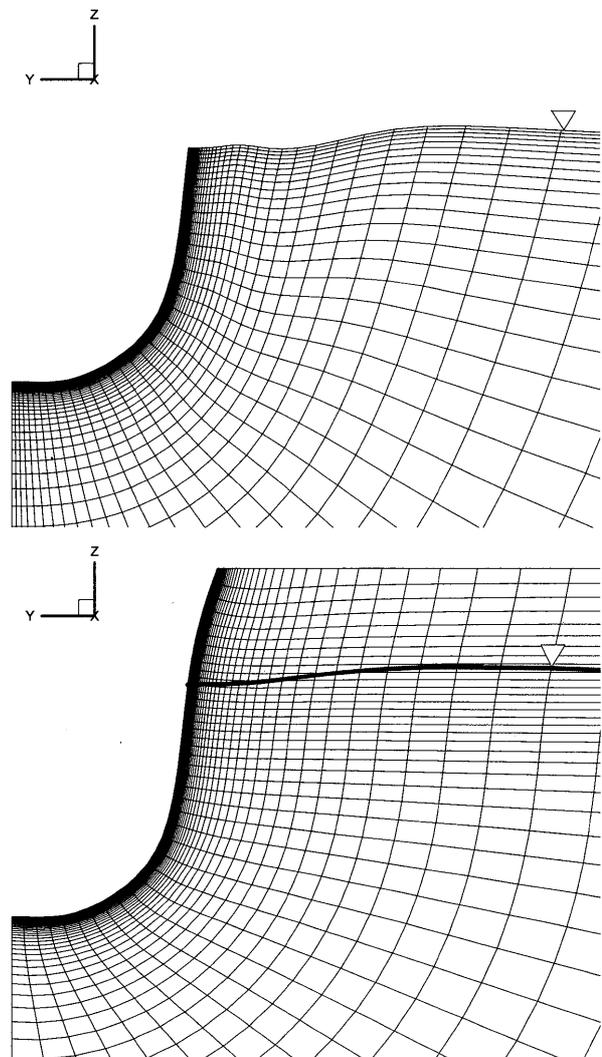


図1: 境界適合型(上図)と固定格子型(下図)による自由表面の取扱法

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。今回は非定常な砕波状態の自由表面流れを計算するため、非定常流れ計算法を適用した。具体的には、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、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。

支配方程式を次に示す。

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

ここで、

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

$$E = eS_x + fS_y + gS_z, \quad E^v = e^v S_x + f^v S_y + g^v S_z,$$

$$q = \begin{bmatrix} 0 \\ u \\ v \\ w \end{bmatrix}, \quad q^* = \begin{bmatrix} p \\ u \\ v \\ w \end{bmatrix},$$

$$e = \begin{bmatrix} \beta u \\ uu + p \\ vu \\ wu \end{bmatrix}, \quad f = \begin{bmatrix} \beta v \\ uv \\ vv + p \\ wv \end{bmatrix}, \quad g = \begin{bmatrix} \beta w \\ uw \\ vw \\ ww + p \end{bmatrix}$$

$$e^v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \end{bmatrix}, \quad f^v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix}, \quad g^v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zz} \end{bmatrix},$$

$$\tau_{ij} = \left(\frac{1}{Re} + \nu_i \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

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^v 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。 $Re (= UL/\nu)$ はレイノルズ数であり、ここで ν は動粘性係数、 U と L

は代表速度と長さである。 ν_i 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¹²⁾から算出する。

非粘性フラックスは Roe の Flux-difference splitting 法¹³⁾ および MUSCL 法¹⁴⁾ による 2 次の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¹⁵⁾ 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 τ で別々に行う。擬似時間 τ 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。

$$\begin{aligned} & \frac{3V_i^{n+1} q_i^{n+1,m+1} - 4V_i^n q_i^n + V_i^{n-1} q_i^{n-1}}{2\Delta t} \\ & + \frac{V_i^{n+1} q_i^{n+1,m+1} - V_i^{n+1} q_i^{n+1,m}}{\Delta \tau} \\ & + \sum_{\text{Faces}} E^{n+1,m+1} - \sum_{\text{Faces}} E^{v,n+1,m+1} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、上付き文字 n は物理時間の時間ステ

ップを、 m 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 $q_i^{n+1,m+1} = q_i^{n+1,m}$ となり反復計算が収束するまで、

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、固定格子型のひとつであるレベルセット法を用いた。SURF にレベルセット法を導入した計算例¹⁶⁾ としては、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た例があり、精度検証を行った結果、その有効性が確認されている。

4. 砕波を伴う中高速船の抵抗計算例

4.1 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¹⁷⁾。計算に用いたフルード数とレイノルズ数を表 1 に示す。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与えた。

表 1: 計算条件

Reynolds number	6.0×10^6
Froude number	0.335, 0.364, 0.393

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	3.0×10^{-6}
	長手方向	5.0×10^{-3}
	周方向(自由表面上下方向)	4.0×10^{-3}

表 3: 形状影響係数

	Measured	Calculation
1+K	1.556	1.381

計算格子は、

図 2に示す 0-0 系の格子トポロジーを用いた。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、物理時間の時間刻み幅を無次元時間で 0.02、擬似時間の時間刻み幅はクーラン数が 5.0 となるように、また擬似時間ステップの最大反復回数を 10 回と設定した。ここで、クーラン数とは、対流項の安定性に関するパラメータであり、流速と時間刻み幅の積を格子間隔で除した値である。

4. 2 造波抵抗係数の計算結果

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。

形状影響係数の計算結果と水槽試験結果を表 3に示す。CFD 計算では、付加物を考慮していないため、付加物が付いている水槽試験結果よりも低い値となった。

造波抵抗係数の計算結果と水槽試験結果の比較を図 3に示す。両者は高い精度で一致しており、SURF の計算手法が造波抵抗の推定において有効であることがわかる。

4. 3 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する。

船首付近の計算結果の鳥瞰図と水槽試験の写真を図 4に示す。船首で発生した波がオーバーターンするように盛り上がる状態が計算できている。FP と SS9 $\frac{1}{2}$ との間で波高のピークとなっていることが計算で再現されていることがわかる。た

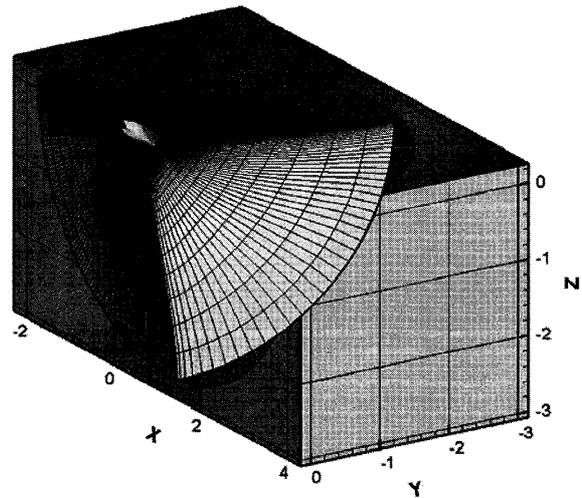


図 2: 0-0 系トポロジーの計算格子

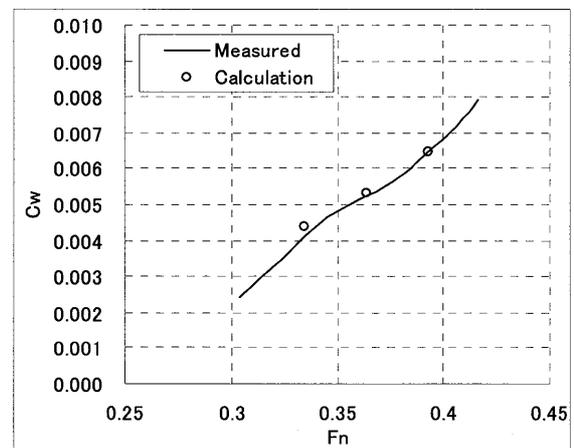


図 3: 造波抵抗係数

だし、細かい飛沫までは計算できていない。これは計算格子の解像度不足が原因であるが、抵抗算定の観点からは、十分な解像度があるといえる。

長手方向一定位置における船首波の断面図を図 5に示す。図中、 $x=0.0$ が F.P. 位置、 $x=0.1$ が SS9 の位置であり、 $y=0.0$ がセンターラインである。船首波が船首部をはい上がり、その後オーバーターンしていく状況が計算されていることがわかる。

船尾付近の計算結果の鳥瞰図と水槽試験における写真を図 6に示す。船首と同様に、水槽試験における自由表面形状が、CFD 計算により再現されていることがわかる。

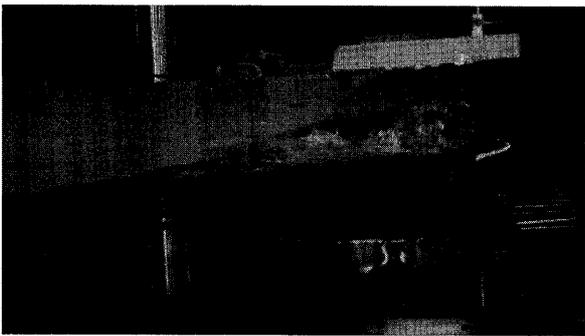
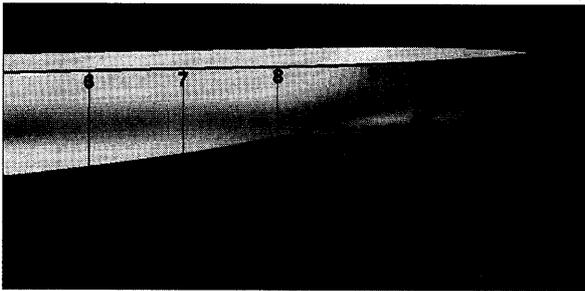


図 4: 船首波形 (上図: 計算結果, 下図: 水槽試験)

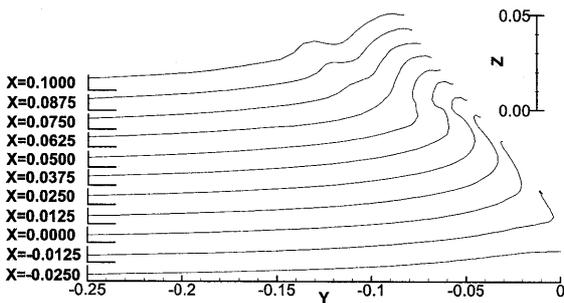


図 5: 波形の断面図

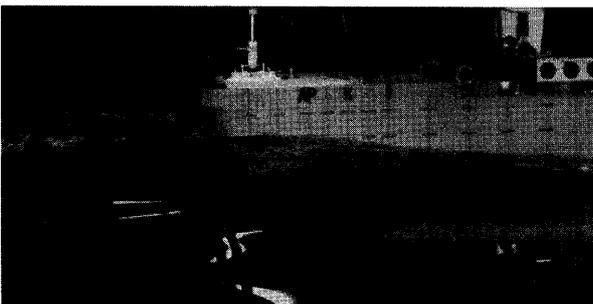
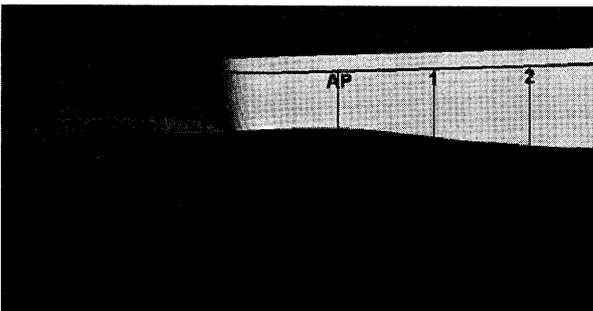


図 6: 船尾波形 (上図: 計算結果, 下図: 水槽試験)

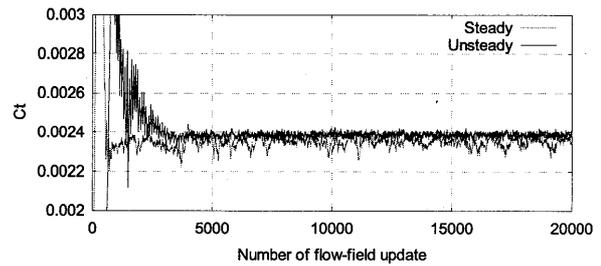


図 7: 非定常解析と定常解析の比較

4. 4 定常解析と非定常解析の比較

定常に近いと考えられる現象に対して非定常計算を行ったが、その有効性を検証するために、定常状態を仮定した解析を行い、収束解が得られるか確認をした。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。定常解析の時間刻み幅の条件は、クーラン数が5.0となるように設定した。

全抵抗値のヒストリーデータの比較を図7に示す。なお、図7の横軸は、流場の更新回数である。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、横軸5000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、抵抗値の平均値を推定することが困難である。

以上より、今回のような碎波現象を伴う流場は、定常ではなく、非定常解析を行うことが有効だといえる。

5. まとめ

本報告では、初めに、CFDによる自由表面の取扱法を整理して紹介した。

次に、CFDによる自由表面の計算例として、碎波現象を伴う中高速船の抵抗計算を紹介した。計算結果と水槽試験結果の造波抵抗は、十分な精度で一致することを確認した。また、船首波形および船尾波形について、計算結果と水槽試験結果を比較し、両者が同様な形状であることを確認した。以上より、SURFの計算手法の有効性を示すことができた。さらに、定常解析では収束解が得られないことを示し、碎波を伴う流場は非定常問題として解析することが有効であることを示した。

参考文献

- 1) Y.Sato, H.Orihara, H.Miyata, "Practical Application of Two CFD Codes for Ship Motions in Arbitrary Waves," Proc. of the 26th Symp. on Naval Hydro., (2006)
- 2) P.M.Carrica, R.V.Wilson, R.Noack, et al., "A Dynamic Overset, Single-Phase Level Set Approach for Viscous Ship Flows and Large Amplitude Motions and Maneuvering," Proc. of the 26th Symp. on Naval Hydro., (2006)
- 3) C.D.Simonsen, F.Stern, "Flow Structure around Maneuvering Tanker in Deep and Shallow Water," Proc. of the 26th Symp. on Naval Hydro., (2006)
- 4) A.Cura-Hochbaum, "Virtual PMM Tests for Maneuvering Prediction," Proc. of the 26th Symp. on Naval Hydro., (2006)
- 5) T.Hino, "A 3D Unstructured Grid Method for Incompressible Viscous Flows," J. Soc. of Naval Archit. Japan, Vol.182 (1997), pp.9-15
- 6) N.Hirata, T.Hino, "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), pp.1-8
- 7) M.Sussman, et al., "A Level Set Approach for Computing Solutions to incompressible 2-phase flow," J. Comput. Phys., Vol.114, (1994), pp.146-159
- 8) Y.C.Chang, et al., "A level set formulation of Eulerian interface capturing methods for incompressible fluid flows," J. Comput. Phys., Vol.124, (1996), pp.449-464
- 9) T.Yabe, et al., "The Constrained Interpolation Profile Method for Multiphase analysis," J. Comput. Phys., Vol.169-2, (2001), pp.556-593
- 10) C.W.Hirt, B.D.Nichols, "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries," J. Comput. Phys., Vol.39, (1981), pp.201-225
- 11) A.J.Chorin, "A Numerical Method for Solving Incompressible Viscous Flow Problems," J. Comput. Pys., Vol.2 (1967), pp.12-26
- 12) P.R.Spalart, et al., "A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows", La Recherche Aérospatiale, No.1 (1994), pp.5-21
- 13) P.L.Roe, "Characteristic-based scheme for the euler equations," Ann. Rev. Fluid Mech., Vol.18 (1986), pp.337-365
- 14) B.van Leer, "Toward the Ultimate Conservative Difference Scheme. 4, A New Approach to Numerical Convection, J. Comput. Phys., Vol.23, (1977), pp.276-299
- 15) T.Hino, "Navier-Stokes Computations of Ship Flows on Unstructured Grids," Proc. of the 22nd Symp. on Naval Hydro., (1998), pp.463-475
- 16) 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
- 17) 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 回海上技術安全研究所報告会, (2004), pp.163-166