ＣＦＤによる内航船の自航性能の推定

CFD 研究開発センター　*佐藤　陽平、日野　孝則

１．はじめに

近年、CFD を活用した船型設計が盛んに行われるようになってきた。これは、計算機の処理能力が向上し、比較的安価なパソコンで CFD 計算が可能になってきたことや、CFD の計算精度が向上したこと、また CFD を使った船型設計の認知度が上がってきたことが、主な要因だと考えられる。現状では、計算時間の制約から、抵抗性能の推定が CFD の主な使われ方であるが、今後更に計算機の処理能力が上がり、また計算精度が向上すれば、設計現場において、自航性能の推定も CFD を用いて行われるようになると考えられる。

CFD による自航計算においては、様々なモデルが提案されているが、大まかには二つの手法に分類される。すなわち、『プロペラの流体力を体積力としてモデル化する方法[1]』と、『実際にプロペラが回転するように、プロペラ形状の格子を回転させる方法[2]』である。前者は計算速度が速いという長所があるが、計算結果がモデルに依存してしまう、または、モデルの適用範囲外の流場を推定できないという短所がある。後者は、逆の特徴を有する。船型設計に CFD を用いる場合、後者の、プロペラ形状周りの格子を作成して計算する方法は、現状では、手間と時間の面で現実的ではないと考えられる。従って、CFD 研究開発センターでは、当面、前者の方法を開発している。

本研究では、船型設計の現場で CFD による自航計算を行うことを目的として、シリーズ船型の自航性能の CFD 計算を行い、計算結果を検証すると共に、計算に要した時間を示す。

２．計算方法

海上技術安全研究所で開発を進めている粘性流体解析ソフト SURF[3]を用いて、抵抗および自航計算を行った。乱流モデルは、Spalart-Allmaras 一方程式モデル[4]を使用した。また、プロペラ流体力は、無限翼数プロペラ理論[5]を応用したモデル[6]を用いた。多重格子法を使い、計算効率を上げた。

三次元外挿法を用いた自航計算の計算手順を、図 1 に示す。自航計算をするためには、水槽試験と同様に、前もって抵抗試験を行う必要がある。

第一段階として、二重模型流れ用の格子の生成と CFD 計算を行う。並行して、自由表面付き流れ用の計算格子の生成と CFD 計算を行う。これらの計算結果から、全抵抗係数、造波抵抗係数および形状影響係数が得られる。なお、これらの計算は、片舷のみのを計算対象とすることで、計算時間を短縮することが可能である。

第二段階として、自由表面付き自航計算を行う。主な入力データは、プロペラ関連のデータ、実船レイノルズ数、曳航状態の計算で得られた造波抵抗係数および形状影響係数である。なお、第一段階の自由表面付き流れの計算結果を両舷に変換したものを、自航計算の初期状態として用いることで、計算時間を短縮することが可能である。計算結果として、自航要素と流場データが得られる。

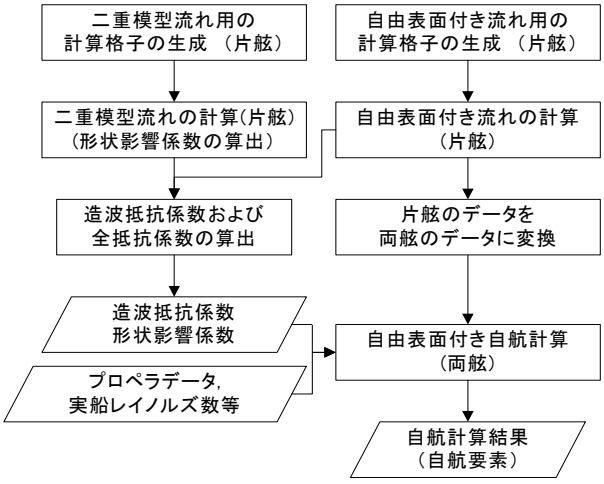

図 1: SURF による自航計算手順
（三次元外挿法の場合）

３．船型およびプロペラ形状

計算対象に選んだ船型およびプロペラ形状は、船舶整備公団（現 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構）との共同研究で使用した 999GT の内航タンカー[7] のうちの 3 隻である。船型およびプロペラの主要目を、それぞれ表 1 および表 2 に示す。

舵無しの状態で計算を行い、同じく舵無しの状態での水槽試験結果と比較した。

表 1: Principal particulars of model ships.

	999GT OIL TANKER		
M.S.No.	m407	m426	m426m
L_{PPS} (m)	76.0	78.0	
L_{PPM} (m)	6.000		
L_{DWL}(m)	6.1624	6.1623	
B (m)	0.9474	0.9231	
d design (m)	0.3987	0.4077	
Initial trim	0.0		
L/B	6.33	6.50	
B/d	2.38	2.26	
C_b	0.678	0.675	0.675
C_p	0.713	0.693	0.694
C_m	0.950	0.973	
Design Speed (knot)	12.0		
Remarks	without bulbous bow	With bulbous bow	

表 2: Principal particulars of model propeller

M.P.No.	2195
Diameter (m)	0.213
Boss ratio	0.170
Pitch ratio (0.7R)	0.700
Expanded area ratio	0.570
Number of blades	4
Direction of turning	Right
Blade section	AU

４．計算結果

４．１．計算格子

商用の格子生成ソフトウェア Gridgen®を用いて計算格子を生成した。格子のトポロジーは H-O 型を用いた。計算領域は、船首から上流方向に 1.0L、船尾から下流方向に 2.0L とし、幅および深さ方向の領域は、1.2L とした。また、境界層方向の最小格子間隔は 3.0×10^{-6} L とした。なお、L は垂線間距離である。

自由表面付き抵抗計算用の計算格子の船体表面および船体近傍の格子を図 2 に示す。SURF では界面捕獲法を用いて自由表面を計算しているため、自由表面近傍の格子を、鉛直方向に細かくしている。

計算格子数を表 3 に示す。二重模型流れ計算用の格子は、喫水より下側のみを計算領域としているため、自由表面付きの計算格子よりも格子数が少ない。自由表面付き自航計算では、両舷の格子が必要となるため、自由表面付き抵抗計算（片舷）の約 2 倍の格子数が必要となる。

表 3: 計算格子数

	二重模型流れ抵抗（片舷）	自由表面付き抵抗（片舷）	自由表面付き自航（両舷）
格子数*	137×41×81 (=454,977)	137×61×81 (=676,917)	137×121×81 (=1,342,737)
船体表面格子数**	73×41	73×61	73×121

*: 長手方向×周方向×境界層方向
**: 長手方向×周方向

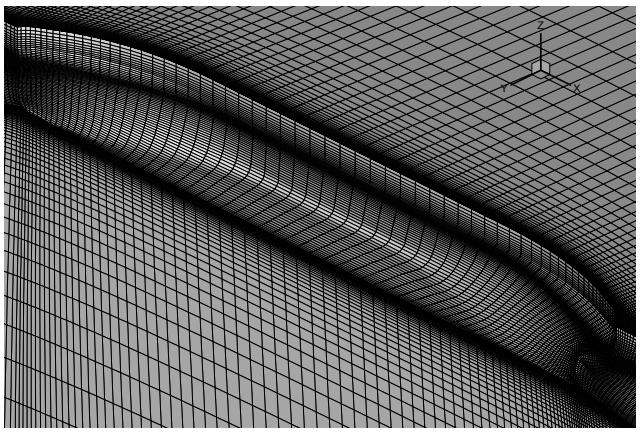

図 2: Computational grid around M.S.No. m407

４．２．抵抗計算結果

抵抗計算の計算条件を表 4 に示す。レイノルズ数とフルード数は、水槽試験相当に設定した。形状影響係数（1+K）の計算結果と水槽試験結果の比較を図 3 に示す。計算結果は水槽試験結果に比べて、0.03 程度小さい値となったが、比較的高い精度で一致していることが分かる。造波抵抗の計算結果と水槽試験結果を図 4 に、全抵抗を図 5 に示す。計算結果は水槽試験結果に比べて大きい値となっているが、船型間の相対差は高い精度で推定できていることが分かる。

表 4: 抵抗計算の計算条件

	レイノルズ数	フルード数
二重模型流れ計算	4×10^{6}	−
自由表面付き計算	1×10^{7}	0.22

４．３．自航計算結果

プロペラ単独性能の計算結果と水槽試験結果の

比較を図 6 に示す。K_Q、K_T および η_o の全てにおいて、計算結果と水槽試験結果は高い精度で一致している。

自航計算のフルード数およびレイノルズ数は、抵抗計算と同じ値を用いた。自航要素の解析にはスラスト一致法を用いている。

1-t, 1-w_t, η_r, η_O の計算結果と水槽試験結果の比較を、それぞれ図 7 から図 10 に示す。1-t については、船型間の差を良く計算できていることが分かる。1-w_t については、水槽試験結果よりも計算結果の方が船型間の差を過剰に評価する結果となった。効率については、水槽試験並びに計算結果において船型差はそれほど大きくはなが、計算精度に改善の余地がある。

計算結果の流場の一例として、m407 の伴流分布を図 11 に示す。プロペラ体積力のモデルにより、プロペラによる加速や旋回流れが計算されている状況がわかる。

４．４．計算時間

抵抗計算および自航計算に要した大体の計算時間を表 5 に示す。二重模型流れと自由表面付き流れの抵抗計算は、計算機が 2 台あれば、並行して計算可能であるので、見かけ上の計算時間は 60 時間となる。自航計算の 100 時間と足し合わせると、約 1 週間で抵抗計算および自航計算が出来ることになる。

５．まとめ

999GT の内航タンカーのシリーズ船型について、海上技術安全研究所で開発を進めている粘性流体解析ソフト SURF を使用して自航計算を行い、水槽試験結果と比較を行った。その結果以下のことが分かった。

(1) 抵抗計算は、船型差を評価することが十分可能な計算精度がある。
(2) プロペラ単独計算は、定量的に高い精度で水槽試験結果に一致する。
(3) 自航計算結果のうち、1-t は船型差を良く評価することができた。1-w_t および η_O については、別の乱流モデル（修正 Spalart-Allmaras モデル）を使って計算する等、今後の改良が必要である。
(4) 自航計算を行うために必要な計算時間は約 1 週間程度である。

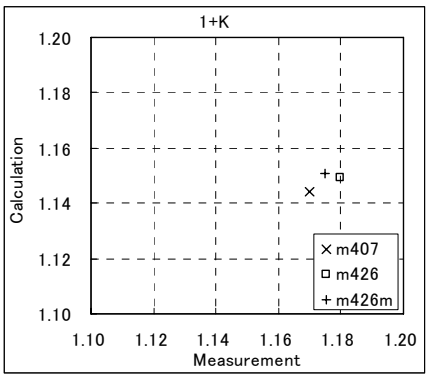

図 3: Correlation of form factor.

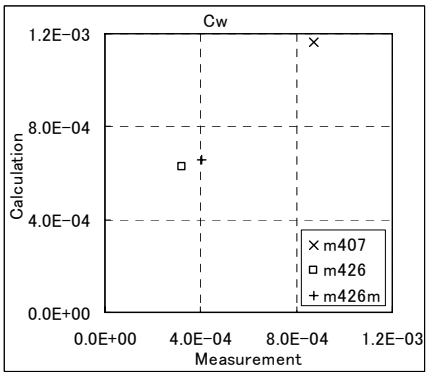

図 4: Correlation of wave making resistance.

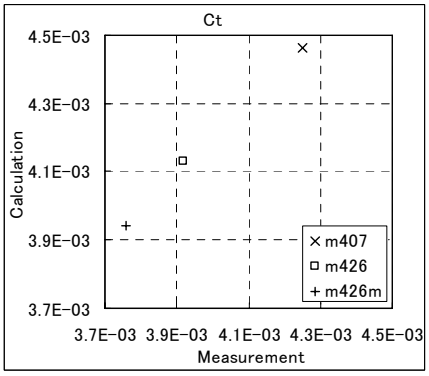

図 5: Correlation of total resistance coefficient.

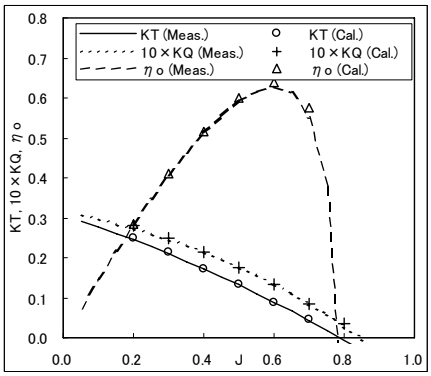

図 6: Open water characteristic curves.

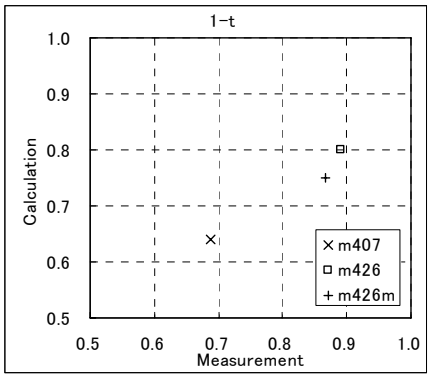

図 7: Correlation of (1−t).

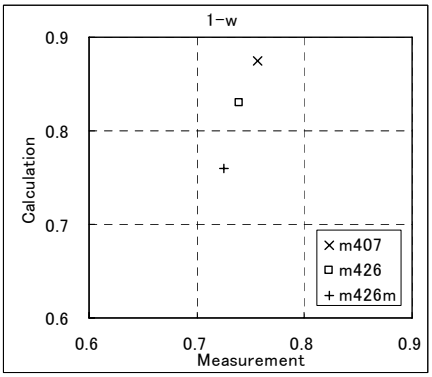

図 8: Correlation of (1−w_t).

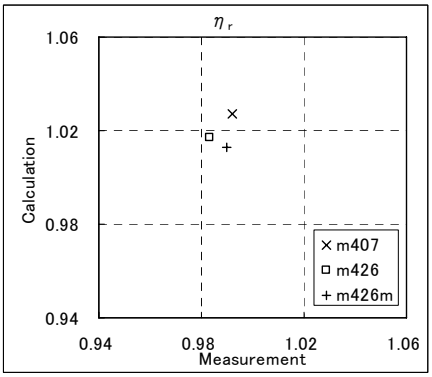

図 9: : Correlation of η_r.

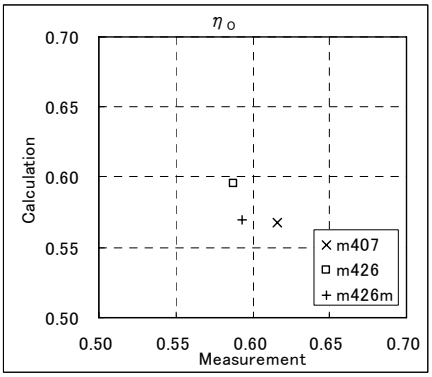

図 10: : Correlation of η_o.

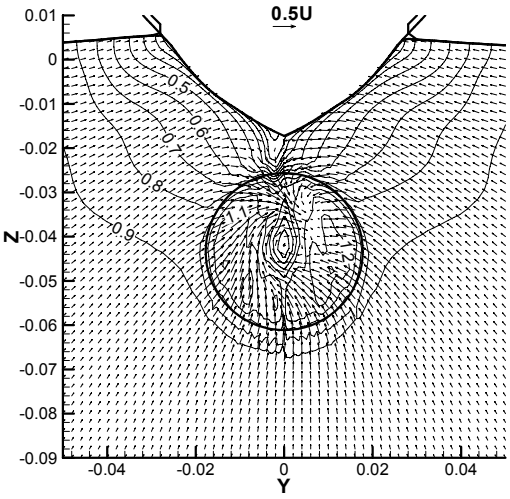

図 11: Axial and tangential velocity distribution. (m407)

表 5: 計算時間

	二重模型流れ抵抗（片舷）	自由表面付き抵抗（片舷）	自由表面付き自航（両舷）
計算時間 [hour]	30	60	100

CPUは、Intel Xeon 2.8GHzを使用。
メモリーは自航計算時で約1GB使用。

参考文献

[1] K.Ohashi, “A Comparative Study of Body Force Models Representing Effects of Contrarotating Propellers,” Trans. West-Japan Soc. Naval Archit, Vol.105, 2003, pp.55-64

[2] Lübke L, Mach K.-P., “LDV Measurments in the Wake of the Propelled KCS Model and its use to validate CFD Calculations,” Proc. 25th Sympo. on Naval Hydrodynamics, 8-13 August, St. Johnes, 2004

[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] P.R.Spalart, et al., “A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows”, La Recherche Aèrospatiale, No.1, 1994, pp.5-21

[5] 山崎隆介,小柴幸雄,上田耕平, “最適プロペラの設計について,” 西部造船会会報, 第53号, 1976

[6] 森山文雄, “プロペラ性能の近似計算法について, ”船舶技術研究所報告, 第16巻, 第6号, 1979, pp.361-376

[7] 船舶整備公団, “内航船の船首尾形状の改善およびプロペラの高効率化に関する調査研究, ” 昭和60年3月