CFD の船体周り流場計算への適用と抵抗評価に関する研究 - その1 波形解析法の応用と造波抵抗-

原 文枝*1·平山明仁*2·八木 光*3

An Application of CFD to Ship Flow Field and Resistance Evaluation — 1st Report: Wave Pattern Analysis and Wave Resistance —

Fumie HARA, Akihito HIRAYAMA and Hikaru YAGI

Abstract

For more than ten years, CFD (Computational Fluid Dynamics) has been utilized as powerful tools in ship design, especially for the evaluation of hull resistance and propulsive performance. It has been contributing to shorten the lead time for obtaining the detail information of the flow around ship and also to minimize a number of model tests. At present, it is generally understood that such calculation gives a lot of useful hydrodynamic data and information but that minimum number of model tests are still required in the final stage of hull form development in view of the definitive quantity of hull resistance.

As such calculation methods are used in daily design works, it is also necessary to clarify the correlation between the calculation results and the traditional series model test data on top of improvement of calculation tools.

In this study, a PC-base CFD system are developed adopting some general purpose computer softwares and a validation is made on a typical hull form of Series 60 focusing wave patterns and wave making resistance. The calculated results indicated that wave profile on the hull showed a reasonable agreement with model tests at high and low Froude's numbers. The calculated wave pattern around the ship also showed good agreement. With respect to the wave making resistance, the results indicated that the resistance coefficient curves can give a good agreement with the model tests in magnitude and the location of hump and hollow. Conclusively, the system is promising for practical application in terms of computation time, qualitative trend and quantitative wave-making resistance value.

1. 前書き

船舶の抵抗,推進性能の評価に CFD (Computational Fluid Dynamics) が利用されるようになってから十数年 経過した.その間数多くの先端的な研究開発が行われ,船 型の開発,船型設計への実用利用の段階へ向かいつつあ る.CFD は最近では実際の船型開発業務に日常的に使わ れるようになり,その有効性が確認されつつある(例えば 増田,笠原1997,藤井他,2002).さらに,肥大船の粘性 抵抗を始めプロペラとの相互干渉も含めた取り扱いについ ての研究も進められている.(例えば,日夏ほか,1994). 一方,実用上問題となる CFD を用いた抵抗値の定量的 評価に関しては,やせ型船舶では船型と抵抗の関係が形状 抵抗,造波抵抗の各成分について評価できるレベルまで研 究が進んでいる.(Hirayama, 1998,藤井他, 2002,菅 井,平田, 2004)さらに,各種の CFD 間でもソルバーと 船型の格子の生成方法および計算精度と格子数の関係等に ついて波形,流向流速,船体表面圧力など詳細流場をはじ め船体抵抗値の実験結果との比較により代表船型に対する Benchmarking Test が継続的に行われているのが現状で ある.(Larsen et. al. 2003)

船型開発への実用的な利用面では、PCの進歩を受け、 船型評価の数値実験としてCFDを利用し、船型開発や船

2005年1月18日受理

^{*1} 東海大学大学院海洋学研究科海洋工学専攻(Graduate School of Marine Science and Technology, Tokai University)

^{*2 (}株)三井造船昭島研究所 (Akishima Laboratories (Mitsui Zosen) Inc.)

^{*3} 東海大学海洋学部マリンデザイン工学科 (Department of Marine Design and Engineering, School of Marine Science and Technology, Tokai University)

型評価のスピードアップを図る事も可能になっており,著 しい PC の性能向上を受け,実用的利用が格段に進むこと が考えられる.

従来,造船学では系統的模型試験(シリーズ模型試験) の結果を用いた船型と抵抗要素の関係を幅広くかつ詳細に 検討し利用してきたが,CFDの実用的利用面では,局所 流場の計算のほか,計算システムとしての特性を把握する ために従来の実験結果との比較実績が重要と考えられる.

本研究では、汎用 CFD ソルバーを用いた船舶用 CFD システムを用いて、船型要素と抵抗の関係を系統的に調査 し、計算波形に波形解析手法を用いることにより造波抵抗 を計算するという試みを行った。また、実用的利用面から 格子分割方法と計算時間の関係を検討することとした。

2. 数値計算の概要

2.1 システム構成

本研究において使用する CFD システム (NeoShip) は、PC を使用することをベースとし市販ソフトウエアー をシステムの一部のモジュールとし、造波抵抗の推定法等 の理論手法を統合したものである。その構成は、船体形状 作成のための 3 次元船型 CAD (Maxsurf)、汎用 3 次元 流体解析ソルバー (FLOW-3D)、計算結果可視化プログ ラムなどから構成されており、Fig. 1 に示す計算フローの



Fig. 1 Procedure of CFD Simulation

解析作業を行うシステムである.本システムは,比較的容 易な操作と実用的な計算時間で,日常の船型設計に利用で きる数値流体解析結果を得ることを目的としたものであ る.特に,ソルバーおよび関連システム構成プログラムに 汎用システムを用いることにより,計算目的にあった精度 の確保と利便性の向上を図ったものである.

船型 CAD と CFD ソルバー間は,DXF 形式のデータで 受け渡しを行うようにし,長時間の CFD 計算と船型検討 の平行作業を可能とし,利便性の向上を図った.

2.2 計算手法の検討

本研究に於いて使用する CFD システムは,種々の数値 計算のスキームが選択できる.(Flow Science Inc. 1999) ここでは船舶に適用する際に,解の安定性に対する影響を 強く持つ上流差分法と圧力解法についての調査および計算 時間と精度に関係するメッシュ分割の影響を中心に事前検 討を行い,計算条件の選定を行った.

なお、本研究の対象船は、バルバスバウの無い通常型船 首形状をした船型として、Toodによるシリーズ60の中 から、方形係数 Cb=0.6 を選んだ.(Todd et. al., 1952, Todd, 1953) 船型主要目および線図を Table 1 と Fig. 2 に示す. なお,使用した PC は Dell Optiplex (Celron 2.0GHz) である.

1) 差分法

上流差分法の影響は 2 次上流差分法 (2nd Order Method), MP法 (Monotonicity-Preserving Second Order) およ び 3 次精度の QUICK 法 (Quadratic Upstream Interpolation for Kinematics) の 3 種類について行い,計算収束 速度および計算波形を比較し,その結果を Table 2 に要約 した.

本計算例では 2nd Order 法では計算が収束せず解が得 られなかったが, MP 法および QUICK 法両者については 計算時間の差異は見られるが妥当な解が得られることがわ かった.精度面でも波形レベルでは両計算法に殆ど差異が ないことが確認された.

2) 圧力解法

圧力解法については SOR 法 (Successive Over Relaxation Method) と ADI 法 (Alternating Direction Implicit Method) の 2 種を比較した.

計算結果については両計算法ともほぼ同等な収束安定性 を示した。計算時間に関しては Table 3 に示すように ADI 法は SOR 法に比べ約 2 倍強の時間を要する結果とな り有意な差が見られた。

MIT

190 WL

100 WL

75 W.

50 W.L

25 WL

075%L



80W

25 WL.



Fig. 29.—Lines of 0.60 C_B Parent (4210)

Fig. 2 Hull Form of Todd Series 60, Cb=0.6

Model No.	4210W	
Lpp (m)	121.920	
B (m)	16.255	
d (m)	6.501	
СВ	0.60	
Cm	0.977	
СР	0.614	
riangle, tons	7,807	
LCB (%Lpp)	1.5 aft	

Table 1Principal Particulars of Series 60, Cb=0.6

2.3 計算メッシュの検討

メッシュ分割については以下の4点について検討を行った.

- ・A-TEST:分割数と計算時間の調査
- B-TEST:メッシュサイズと計算波形の検討
- C-TEST:メッシュの幅長比影響の調査
- ・D-TEST:幅方向のメッシュ分割配置の検討
- Table 4 に上記検討のパラメータ等を要約して示す.
- A-TEST:分割メッシュ数と計算時間との関係の調 査は、同一計算領域内の分割数を4種変更することによ り行った。その計算領域は垂線間長Lppを基準とし長 さ方向(x)を-0.74Lppから+1.3Lpp,幅方向(y)は 船幅Bを基準とし船体中心から1.7Bの範囲とした。な

 Table 2
 Results of Momentum Equation Solution Scheme

 Survey
 Survey

	Method	Required Time	Accuracy
1	2nd Order	—	Not converge
2	MP 法	12.3 hrs	Same Level
3	QUICK 法	7.0 hrs	(Wave Pattern)
N + : D 0.010			

Note: Fn=0.316

Table 3	Calculation	Time for	Pressure	Solution	Algorithm
---------	-------------	----------	----------	----------	-----------

Method	SOR	ADI
Time	12.3 hrs	28.5 hrs

Note: Fn=0.316

- お,上下方向 (z) はすべて同一範囲,同一分割数とした. Fig. 3 にはメッシュ数と計算時間の関係を示す.この結 果ではメッシュ数約100万程度まではほぼ直線的な時間 増加であるが,150万と増加すると時間が大幅に増える ことがわかる.また,計算手法の選択にもよるが100万 までのメッシュ数であればほぼ1日で計算結果が得られ ることがわかる.
- 2) B-TEST:メッシュサイズと波形調査は計算領域平 面内のメッシュの幅長比の分布をほぼ同一に保ちつつ, サイズを3種変更することにより行った。その計算領域 は長さ方向(x)を-0.81Lppから+1.52Lpp,幅方向 (y)は船体中心から2.2Bの範囲とした。なお,上下方

Table 4	Scope of	Mesh A	Arrangement	Survey
Table 4	Scope of	Mesh A	Arrangement	Survey

TECT	MESH	No. of Mesh	Range of Detail Mesh		
IESI	NO.	(approx.)	(From Midship)	(From Center Line)	
A Mesh No.	A1	258×10^{3}	_		
	A2	500×10^{3}	-0.74 Lpp	0 (Center Line)	
	A3	$1,001 \times 10^{3}$	+1.3 Lpp	1.7 B	
Lincet	A4	$1,492 \times 10^{3}$	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		
В	MESH	No. of Mesh	Range of Detail Mesh		
Mesh Size Effect	NO. (approx.)		(From Midship)	(From Center Line)	
	B1	44×10^{3}	-0.81 Lpp	0 (Center Line)	
	B2	172×10^{3}			
	B3	663×10^{3}	+1.52 Lpp	2.2 B	
С	MESH	No. of Mesh	Note		
Aspect	NO.	(approx.)	(Breadth Length Ratio)		
Ratio	C1		Base		
Effect	C2	663.3×10^{3}	C1×1.5		
	C3		C1×2.0		
D Mesh Size Distri- bution	MESH	No. of Mesh	Mesh Size	Range	
	NO.	(approx.)	(Mesh Breadth/Bmld)	(From Center Line)	
	D1		0.0167	0-0.35 B	
	D2	663×10^{3}	0.0238	0-0.55 B	
	D3		0.0523	0-1.10 B	





Fig. 3 Correlation of Mesh Number and Calculation Time (A-TEST) (SOR Method, MP method, Fn=0.316)

向(z)はすべて同一範囲,同一分割数である。

その結果を y/Lpp=0.1 位置の波高分布として Fig. 4 に示す.メッシュ数が B1, B2, B3 と増えるに従い, 波形分布は実験値に近くなる傾向が分かる.メッシュ数 の最も少ない B1 の場合には波のピーク値が大幅に下が ることが確認され, B2 (217×10³) 程度以上のメッシュ 数が必要なことが確認された.

- 3) C-TEST: メッシュの幅長比の影響については C1 を基準に C2, C3 と1.5倍 2 倍と変更することにより検 討した。幅位置 y/Lpp=0.1 の波高分布を Fig.5 に示 す。この図から AP 位置より前方の波形は 3 者間に顕著 な差は見られないが,後方位置ではわずかながらも C1 が最も実験値に近い傾向を示すことがわかる。
- 4) D-TEST:メッシュ総数を一定に保ち,計算領域内のメッシュサイズ分布を変更することにより船側波形を調査した。メッシュ分割の比較をFig.6に示す。分割総数はx方向×y方向×z方向=157×65×65である。 D1は0.35Bの範囲を,D2は0.55Bの範囲,D3は1.1Bの範囲をそれぞれ21分割したものである。

計算結果として得られた船側波形分布をFig.7に示 す.この船側波形結果から、3つの種類で調査範囲では メッシュサイズの幅方向分布を変更しても大きな差異は



Fig. 4 Wave Pattern at y/Lpp=0.1 (B-TEST)



Fig. 5 Wave Pattern at y/Lpp=0.1 (C-TEST)



No. of mesh : $x \times y \times z = 157 \times 65 \times 65 = 663,325$

Fig. 6 Mesh Pattern of D-TEST

認められず,船型表現については Robust なシステムで あることが示された.

以上の計算メッシュに関する検討結果から,

- •B2以上の十分な細かいサイズのメッシュを用いること
- ・メッシュの幅長比が C1 程度とすること
- ・A-TEST を参照し,許容時間内で出来る限りメッシュ数を多く取ること

が重要であり、メッシュサイズの幅方向分布の分割は計 算結果にあまり大きな影響を与えないことがわかった.

2.4 造波抵抗計算手法の概要

流場が与えられた時の抵抗計算の方法は、船体に働く圧 力を積分する直接的な方法や、船体の前後に設けた検査面 間の運動量変化による方法などがあるが、ここでは造波抵 抗に着目し、流場計算による波高データを実験による波高 計測結果とみなし、谷口(1965)による造波抵抗計算の手 法を用いた。

今,船長方向に X 軸,幅方向に Y 軸をまた上方に Z 軸 をとり,船首が X 軸の負の方向に速度 Uで航走する場合 を考えると,船体のはるか後方の自由波の波高 $\zeta(x, y)$ と振幅関数 $S(\theta)$, $C(\theta)$ の関係は次式で表わすことがで きる.

$$\begin{aligned} \zeta(x, y) &= \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} S(\theta) \sin(K_0 p \sec^2 \theta) \, d\theta \\ &+ \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} C(\theta) \cos(K_0 p \sec^2 \theta) \, d\theta \end{aligned}$$

ここで、 $p = x\cos\theta + y\sin\theta$, $K_0 = \frac{g}{U^2}$, gは重力加速度 である。

この関係を用い、谷口の方法と同様に、計算によって得 られた複数点での波高と振幅関数により計算された波高の 差分が最小化するように最小二乗法を用いて振幅関数*S* (*θ*)、*C*(*θ*)を定め、求められた振幅関数を使い次式によ り波形造波抵抗を算出した.

$$Rw = \pi \rho U^2 L^2 \int \left[\left\{ \overline{S}(\theta) \right\}^2 + \left\{ \overline{C}(\theta) \right\}^2 \right] \cos^3 \theta \cdot d\theta$$

また、無次元化係数は $Cw = Rw / \left(\frac{1}{2}\rho S\nu^2\right)$ として求められる.

ここで、 ρ は密度、Sは浸水表面積である。

この造波抵抗計算に用いた波高計算位置は,抵抗の精度 を確保するために,造波抵抗に寄与しない局部波の影響の 少ない範囲で,かつ計算格子が粗く波高の計算値が低いと 考えられる領域を避けた部分のデータを用いた.



Fig. 7 Comparison of Wave profiles on the Hull Surface (D-TEST)

3. 計算結果と実験との比較

3.1 計算方法

前章の結果を踏まえ D3 を基本として,計算時間を約1 日とする計算モデルのメッシュ分布を決定した.その結 果,本検討で用いたメッシュ数は約600,000個であり,そ の平面メッシュ分割を Fig.8 に示す。

なお,選定したその他計算方法を以下にまとめる。 圧力解法:ADI法 船体の取扱い:FAVOR (Fractional Area/Volume Obstacle Representation)法 自由表面取扱い:VOF (Volume of Fluid)法 乱流モデル:RNG (Renormalization-Group)モデル







Fig. 9 Calculated Wave Profile on the Hull Surface

3.2 実験値との比較

計算結果と実験との比較は SERIES60, Cb=0.6, Fn= 0.16 および 0.316 を中心に行った. なお, 波高に関する 比較用実験データは Proceedings of CFD Workshop Tokyo 1994 を参照した.

1) 船側波形

Fig.9にFn=0.160とFn=0.316における船側波形を

計算値と実験値を比較して示す. Fn=0.16 では,計算結 果は全般的には波形分布形状は実験値と類似していること がわかるが,船首端ではピーク位置のずれが見られる.ま た,船首および船体中央部の波高についてみると,実験値 とは位相,波高とも比較的良い一致が見られる.

船首の局所波高については,実験では前端部が最も高い 結果となっており,計算との傾向に差異が見られる.この



⊿ ζ /Lpp=0.0025

Fig. 10 Contour of Wave Height



Fig. 11 Longitudinal Wave height Distribution



Fig. 12 Comparison of Wave Resistance Coefficient

原因は計算精度の問題と考えられるが、模型の表面張力影響などにも一部起因するものと考えることができる.

Fn=0.316 の場合には、Fn=0.160 の結果に比べ、全般 的には波高およびその分布とも実験値との一致度が増して いると判断できる。また、船首尾波高に関しては波高には 差異が見られるが位相が比較的良い一致を示すことがわか る.

2) 船体周り波高分布

Fig. 10 には Fn=0.316 の場合の波高分布を等波高線図 として実験と計算の結果を比較した.また,Fig. 11 には, その波高を船長方向分布として,船体中心線から幅方向 y を y/Lpp=0.1,0.2 の例を実験結果と比較して示した.

Fig. 10 の等波高線図で見ると波高パターンは計算と実験とで良い一致を示している。また, Fig. 11 で詳細に波高分布を見ると,船体に近い y/Lpp=0.1 では計測との一致度が高く, y/Lpp=0.2 と大きくなると計算波高の減衰が大きいことがわかる。

3) 造波抵抗

本計算による造波抵抗係数 Cw を Tood の実験および著 者の1人が行った Rankine Source 法による結果(Hirayama et. al.)とあわせて Fig. 12 に示す.本計算では縦 方向波高計測の対応位置を船体中央から幅方向を $0.4 \le y/$ Lpp ≤ 0.8 ,幅方向波高計測位置を船体中央からの後方位 置を $0.8 \le x/Lpp \le 1.2$ とした.造波抵抗係数については, 本計算法が実験値に比べやや低い値を示す傾向があり, Rankine Source 法の場合とは逆の傾向がある.しかし, 両計算例とも同等の値を示していると考えられ,本計算法 が妥当であることが分かる。また、実用船型開発で重要な 指標となる造波抵抗係数のハンプホローの発生フルード数 についても本計算値は実験値と比較的良い一致を示してい るといえる。

4.まとめ

- 汎用ソルバーを用いた船舶用 CFD システム (Neo-Ship) は, Series 60, Cb=0.6 の船型に適用した結 果,計算波形分布は実験結果と妥当な一致を示してお り,本計算法は波形による船型評価の有効な手段とな ることが示された.
- 2)谷口の波形解析手法を利用した造波抵抗計算手法は, 造波抵抗係数の値およびハンプ,ホローの位置とも実 用的に十分な精度で計算できることがわかった。
- 3)船型および流場のメッシュ分割数は多いほど精度面では好ましいが、実用上の船型改良の目的にあわせて利用すれば、ほぼ600,000個程度でも波形、抵抗値ともに精度良く求めることが可能である。また、計算時間は一般用の PC レベルでもほぼ1日程度で1速力の評価が可能であり、高性能機種の利用により一層の短縮が可能となる。

参考文献

Flow Science Inc. FLWO-3D User's Manual, 1999Hirayama, et.al.: Optimum Hull Form Design using Numerical Wave pattern Analysis, Proceedings of the Seventh International Symposium on Practical Design of Ships and Mobile Units. The Hague, The Netherlands, September, 1998

- Larsen, L., Stern F., and Bertram V.: Benchmarking of Computational Fluid Dynamics for Ship Flows: The Gothenburg 2000 Workshop, Journal of Ship Research, Vol. 47, Number 1, P63-81, March 2003
- Proceedings of CFD Workshop Tokyo 1994 Vol, 1 and Vol.2, Ship Research Institute, Ministry of Transport, Ship & Ocean Foundation
- Todd, F. H., and Forest, F.X.: A Proposed New Basis for the Design of Single-Screw Merchant Ship Forms and Standard Series Lines, Vol. 59, Trans. SNAME, P642-744, 1951
- Todd, F. H.: Some Further Experiments on Single-Screw Merchant Ship Form=Series 60, Vol. 61, Trans.

SNAME, P517-589, 1953

- 菅井信夫,平田信行:内航タンカーのシリーズテストに対す る CFD の検証 (Validation of CFD Code for Series of Domestic Tankers),関西造船協会論文集第241号, P19-24, 2004年3月
- 谷口 中:造波抵抗の推定,造波抵抗シンポジウム 1965, 造船学会 P55-P63
- 日夏宗彦,児玉良明,藤沢純一,安東潤:プロペラ影響を考 慮した船体まわりの流れの数値シミュレーション,西部造 船会会報,88号,1994, pp.1-12.
- 藤井昭彦,平山明仁,木村校優,山本虎卓:CFDを用いた 船型開発システム,三井造船技報第177号,2002年10月, P1-P7
- 増田聖始, 笠原良和: CFD コードにより推定した流場の検 証", 関西造船協会誌, 228号, 1997, pp. 21-28.

要 旨

CFD (Computational Fluid Dynamics) が船舶設計の有効な武器として実用に供されて以来ほぼ十数年が経過してい る.特に,船体周りの詳細な流場情報や船体抵抗および自航要素の評価に対しては有効であり,船型開発に不可欠とされ ていた船体周りの流場の詳細計測や抵抗のシリーズ試験に要する所要時間の短縮など実際の開発業務の改善に大きく貢献 してきた.この CFD システムの位置づけとしては,有意義な各種の流体力学的情報を提供するが,船型開発の最終段階 では船体抵抗の最終確認のための試験を行わなければならないことも現時点での技術者の共通認識である.

このようなシステムが日常の設計業務に利用されるにつれ、より一層の精度向上の努力も必要であるが、伝統的な系統 的模型試験の結果との相関を明らかにしておくことも求められている.

本研究では市販ソフトウェアーを活用した PC ベースの船型開発用 CFD システムを開発し,代表的船型である Todd の Series 60 を対象に波形と造波抵抗に焦点を絞りその評価を実施した.計算結果によれば,船側波形および発散波の波 高分布とも実験結果と比較的良く一致することを示した.また,造波抵抗値についても,波形解析の方法を利用し計算 し,抵抗値とハンプ,ホローの位置ともに適切に計算できることを明らかにした.