# 17 船舶の総合性能評価にむけた CFD 技術開発

大橋 訓英\*,小林 寛\*,坂本 信晶\*,一ノ瀬康雄\*\* 日野 孝則\*\*\*,廣田 匡俊\*\*\*\*

# Development of CFD techniques for evaluation of ship's overall performance

by

# OHASHI Kunihide, KOBAYASHI Hiroshi, SAKAMOTO Nobuaki, ICHINOSE Yasuo HINO Takanori and HIROTA Masatoshi

# Abstract

The new system for the evaluation of the ship's overall performance is under development at NMRI. The system is based on the computational fluid dynamics (CFD) with the overset grids method. At first, the results at full scale are introduced. The points for a computation at full scale are the minimum spacing on wall surface and the roughness effect. The minimum spacing on wall surface can be determined by using the ITTC formula, and the roughness effect is accounted for by the roughness models on the turbulence models. The computed results are compared with the particle image velocimetry data of the actual ship measurement on the condition with the ship equipped the energy saving duct. The computation with the roughness effect shows agreement with the measured data. Apart from that, the effect of the energy saving duct at full scale is examined, and the traditional scale out method based on the model experiments differs from the simulated results based on the CFD method. The flow features are different from the model and the full scales, and the optimized design of the duct shape can be changed in both scales. The new duct shapes which have the full scale effect are proposed. Next, the computational method with incoming waves is developed. The parameters which are suitable for the simulation with the incoming waves are introduced, and the numerical results show agreement with the experimental data which includes the relative difference in the bow shapes. Additionally, the CFD method can reproduce the time variation of the wake flows which are caused by the interaction between the incoming waves and ship's motions. Finally, the results based the multi-objective optimization system which the cargo volume and horse power are selected as the objective functions is introduced, and the summaries are stated with the future prospects and plans.

\* 流体性能評価系、\*\*流体設計系、\*\*\*横浜国立大学、\*\*\*\*(一財)日本造船技術センター
 原稿受付 令和2年4月24日
 審 査 日 令和2年6月 4日

# 1. はじめに

海上技術安全研究所では,数値流体力学手法 (computational fluid dynamics, CFD)に基づく新たな船舶 の性能評価ツールの開発を行っている.開発内容や将来目標 については海上技術安全研究所長期ビジョンに示しており,

●マルチスケール/マルチフィジックスに基づく実海域実船 スケールの高精度推定手法の確立

●船舶の安全性評価に向けた新規手法の開発

●実海域性能・安全性予測に向けた CFD 統合システム開発 等を主要なテーマとしている.

ここでは、開発中の性能評価ツールを用いた成果として、 海上技術安全研究所の重点研究や国土交通省海事局におけ る「i-Shipping」プロジェクトにおける成果、並行して進め ている横浜国立大学との共同研究等の成果の中から、実船性 能の CFD による推定に向けた実船スケール計算手法と波浪中 性能評価に向けた波浪中計算手法について、実用化における 計算のポイントを含めて結果とともに示す.また、CFD を活 用し、主機配置等を考慮した船型設計システムも海上技術安 全研究所の重点研究において構築されており、最新の成果に ついて紹介する.

### 2. 海技研 CFD システムの概要

CFD による新たな性能評価システムは重合格子手法に基づ いている.重合格子手法では要素に分けて複数の計算格子を 生成し,格子を組み合わせるための重合情報に基づき流場変 数を格子間で補間することで,全ての格子における流場を計 算できる.また,計算格子を入れ替え,重合情報を生成する だけで様々な形状や計算条件を扱うことができる自由度の 高い計算手法である.開発中の主要なツールについては汎用 性も有しており,ツールの概要を下記に述べる.

### 2. 1 重合格子生成システム UP\_GRID

重合格子生成システム UP\_GRID<sup>1</sup>は構造格子ベースで,重合 格子計算に必要な重合格子および重合情報(補間情報)を生 成する.所定のトポロジーに則っていれば,オフセットデー タや CAD(IGES 形式)データを元に,任意形状周りに計算格子 も生成できる.また,重合格子に使用する格子の組合せ数に



図-1 UP\_GRID のユーザーインターフェース

制限はない.計算格子の平行移動,回転やスケーリング等の 機能も有し,省エネ付加物等が任意の物体表面に取り付けら れている状態も計算格子のトリミング機能により正確に交 差面を抽出できる.海技研 CFD システムでは UP\_GRID の各機 能について図-1 のようにユーザーインターフェースを用意 している.

### 2. 2 重合格子対応ソルバー NAGISA

重合格子手法に対応したソルバーNAGISA<sup>2)</sup>の支配方程式は 3 次元非圧縮レイノルズ平均ナビエストークス方程式であ り、擬似圧縮性を仮定し圧力と流速のカップリングを行って いる. 空間離散化には構造格子を用い, セル中心に変数を配 置した有限体積法を適用する.非粘性項にはFDS 法に基づく 3 次風上差分,粘性項には中心差分を用いている.実時間微 分は2次精度,擬似時間微分は1次精度後退差分で近似し擬 似時間については局所時間刻みによる収束加速を行ってい る. 自由表面モデルとしてレベルセット法による界面捕獲 型,格子トポロジーを限定した界面追跡型を有する. 乱流モ デルには低レイノルズ数型と壁関数モデルの両方に代数型 の高次のモデルまでを用意している.船舶の推進状態は実形 状のプロペラ格子を使用した計算と, 簡易に自航状態を再現 できるプロペラモデルも開発済みである. 波向き変更も可能 な規則波を生成する波浪モデルを有し、物体の運動について は曳航及び自航試験状態に適したトリムシンクモード、操縦 試験における斜航と定常旋回モード, PMM 運動モードと自由 航走モードとともに、運動方程式に基づく任意の物体の6自 由度運動も扱える. 海技研 CFD システムでは図-2 のように NAGISA のユーザーインターフェースを用意し,計算結果のレ ポート機能も有している.

Report × Nagisa bor	Filter × No Ministra Resid	agisa ×	III Force history	Self prop. 1	Plot history 1	× fotion history	POT S	ries Comp. C	10							- ( ) *
Input data fi	ile C.timpisan	- nple2tnagisa	- hwaveinstwave	halflinput.da	ta.wave										Browse	Sav
name data																
nblock	2															
gridfile list	_grid.bd														Browse	Edit
Initile fowunstogns															Browse	
Rowfile forware.cgns															Browse	
histfile his	twave														Browse	
rdcfile list	_rdc.bd														Browse	Edit
mfg ieddy xdamp1 cfl n iprt rotaxis(1)	3 SA ~ -0.5 5.0 2050 0	Generati its xotamp2 isub nend ipost rotaxis(2)	nbgnf[           OFF         0           10         4000	t:10] 0 ibodyf ydamp1 naccel intvf bido rotaxis(3)	50 50	101 101 nemotion yelamp2 diphi iqave irelead retorigin(1)	1 1.0 01F ~	Generate ah dext b_ave rotorigin(Z)	100.0	ioverset ditop nstacc iendi rotorigin(3	1  ON ~	lunst dhbot impulsive ihistf		iwave jing ifsord	2	
turb data si	a turb data ko	unsteady	data wave_c	ata post_c	lata mot	ion data 1										
lambda	0.85506d0	uz_amp	0.005106940	e_angle	180.040											
up_wave	2051	calpha	2.030	zonecoel	0.540											
theouth	1	Ger	ver alte	mawp	wp-										Bri	owse
and the second s	0.0	ywpcmp1	-1.0													
Ampenipi																

図-2 NAGISA のユーザーインターフェース

### 3. 実船スケール計算

#### 3.1 実船スケール計算のポイント

実船スケール計算においても、基本的に模型スケールでの 計算法は有効で、自由表面モデル、プロペラモデルや乱流モ デルも活用できる.計算格子生成時の注意点として、物体表 面での最小格子間隔は模型スケールのままでは乱流モデル の制約を満たさないため、変更が必要になる.国際試験水槽 会議の推奨 CFD 計算ガイドラインに、最小格子間隔を求める 式が次式のように用意されている<sup>3)</sup>.

$$\frac{y}{L} = \frac{y^+}{Re_L \sqrt{\frac{C_{f0}}{2}}} \tag{3.1}$$

ここでy/Lは船長 L で無次元化された最小格子間隔, ReL は船 長ベースのレイノルズ数、Cfoは船長ベースのレイノルズ数に 基づく相当平板の摩擦抵抗係数, y+は無次元距離である. Cfo の推定にはシェーンヘル式等を用いる.y+は使用する乱流モ デルによる制約で決まる.低レイノルズ数型の乱流モデルで はy+=1により最小格子間隔が求まり、一般にオーダーは 10<sup>-8</sup>から 10<sup>-9</sup>で非常に小さな値が要求される。 壁関数を使用 するとy+は 30 から 200 程度まで緩和され、オーダーは 10<sup>-6</sup> と模型スケールでのy<sup>+</sup> = 1相当の大きさになる. あらかじめ 検討しておくことが必要だが、模型スケールでは低レイノル ズ数型,実船スケールでは壁関数を使用することで同じ計算 格子で両方のスケールの計算を行うことも可能である. 模型 スケールとの違いとして、実船では表面粗度を考慮すること も重要になる.詳細は文献4を参照いただきたいが、粗度モ デルを導入することで物体表面の摩擦抵抗が変わり,物体周 りの流場等も影響が見られる(図-3). 図中、z/L は吃水をゼ ロとした水面下位置を船長Lで無次元した座標である.



図-3 表面粗度有無での船尾伴流の比較 4)

# 3.2 付加物(ダクト)付き外航ばら積み船における検証

国土交通省海事局からの請負研究「実船の流場計測等による船舶の高度性能評価システムの構築のための調査研究業務」では、省エネ付加物としてダクトが船尾に搭載された外航ばら積み船においてParticle Image Velocimetryにより、世界初のダクト周りを含む実船流場計測が行われた<sup>5)</sup>.実船での付加物周りを含む検証データが得られたことにより、CFD の高度化がなされた.最小格子間隔は式(3.1)に基づき $y^+ = 1$ 相当とし、主船体や船尾ダクト等の各要素の計算格子を生成し、重合格子手法により実船計測と同状態でのシミュレーションと実船流場データとの比較検証を行った<sup>6)</sup>.粗度有無の比較(図-4)から、粗度を考慮することで実船流場と概ね一致する結果が得られた.図中、Lppは船長、u/uinfは計測された速度で無次元化した速度である.



93

図-4 船尾ダクト周りを含む実船流場計測結果との比較<sup>6)</sup>
 (左:ダクト前縁付近,右:ダクト後縁付近)





# 3. 3 Japan Bulk Carrier (JBC) 船型における実船スケール で有効なダクト形状の検討

模型スケールで有効な省エネ付加物が実船スケールでは 効果が小さくなるもしくは効果がない場合も起こりえる.

横浜国立大学との共同研究の中で, Ikenoue ら<sup>¬</sup>は JBC 船 型を使用し,実船スケールにおける船尾ダクトの性能評価を 行い,実船スケールでも有効なダクト形状を示している.始 めに,模型スケールにおけるダクトによる有効伴流係数の差 分を残したまま,実船スケールに外挿する方法を用いて実船 馬力を推定すると,模型スケールと同様に実船馬力でダクト による省エネ効果が見られるものの,CFD により実船スケー ル計算を行うと,実船馬力はダクトなしの状態よりも悪化す ることが示されている.実船スケールでは船尾伴流が模型ス ケールと変わるため,模型スケールで有効なダクト形状が実 船では効果が得られない可能性があることを示したもので 94

ある.実船で有効なダクト形状を新たに検討し、模型スケー ルと実船スケールでダクトなしの状態との比較を行い、実船 スケールの CFD においても有効なダクト形状を提案している (図-5 中 Duct3 及び Duct4). 粗度影響を考慮していないもの の、実船との相関においても新たな知見を示した結果といえ る.

# 4. 波浪中計算

# 4. 1 波浪中計算のポイント

CFD による波浪中計算は、定期的に開かれている国際 CFD ワークショップのテストケースに 2005 年に初めて設定され て以来、大きな発展を遂げている.折原は波浪中での計算法 における自由表面の扱いや計算領域の大きさ、格子分割数等 についてまとめた<sup>7)</sup>.小林らは実海域実船性能評価プロジェ クトで実施した向波中の波浪中抵抗増加 CFD 計算における 実用的な計算法をまとめた<sup>9)</sup>.この実用的計算法での計算条 件パラメータについては.まず、波長(λ)当たりの格子解像 度は1 波長を 50 分割以上とすること、規則波の波高の格子 解像度は波高(両振幅)を短波長では 17 分割、それ以外では 13 分割としている.時間刻みについては出会い周期の 1/30 を基本としている.物体表面については出算の安定性も考慮 して壁関数を使用することを基本とし、波浪中抵抗増加量に ついてはサージは固定して実用上問題ないことを示してい る(図-6).



図-6 JBC 船型での向波中抵抗増加量の無次元値 Kaw の比較<sup>9)</sup>

# 4. 2 JBC 船型における船首部形状変更計算



久米らは上記の実用的計算法に基づき,JBC 船型で船首部 形状を変更した場合について同じく実海域実船性能評価プ ロジェクトの中で検討を行った<sup>10</sup>.オリジナルの船首部形状 から水面付近から上のフレア角を減少させたタイプ A,ブラ ントネス係数を大きく減少させたタイプ Bの2種類(図−7)を



作成し、水槽試験とCFD 計算を行っている.図-8に3船型の 抵抗増加量の無次元値、図-9にヒーブ運動の振幅、図-10に ピッチ運動の振幅の実験結果との比較を示す.いずれも横軸 は実験値、縦軸は計算値である.CFD 計算結果は船型差を含 めて定性的かつ概ね定量的にも水槽試験結果と良い一致を 示すことが分かる.

### 4.3 肥大船における船首形状変更

CFD の実設計への利用を目的に,造工中手造船所を主体と した Ship Performance Calculation Group (SPCG)委員会が(一 財)日本造船技術センターにより主催されている.その中で 船首バルブ有無と水面上のフレア形状を変更した3船型の波 浪中計算について検討が行われた.廣田は重合格子手法に基 づく CFD 計算による波浪中抵抗増加量の導出手順や解析方法 とともに抵抗増加量等で船型差を定性的に再現できること を示している(図-11,図-12)<sup>11)</sup>.また,規則波の短波長と長 波長で,規則波を生成する造波領域格子を使い分けること や,抵抗増加量を導出するために基準となる平水中での姿勢 変化有の計算も,波浪中と同じ運動方程式に基づいた非定常 計算を行う必要があることも示している.



図-12 波浪中船体表面圧力分布<sup>11)</sup>

### 4. 4 コンテナ船型での波浪中における伴流推定

抵抗増加量等について CFD により精度良く推定できること を示したが、伴流の時系列変化を計算できることも CFD を使 用する利点の一つとして挙げられる.波浪中では入射波と船 体運動の干渉により、非定常で複雑な流場となることが近年 発展した非接触型の流場計測法である Stereo PIV 計測によ り示されている<sup>12)</sup>.同条件(向波,波長船長比=1.15)のコン テナ船型(KRISO Container Ship, KCS)での計算例を図-13 に 示す(図中 t/Te は出会い周期 Te に対する時間 t)<sup>2)</sup>.曳引台車 固定座標系での可視化図で、入射波と船体運動の干渉により 船尾伴流が大きく変動することが分かる.計測結果における 変動を CFD により再現できていることを確認できる.



#### 4. 5 コンテナ船型(KCS)での波向き変更計算

波向きを変えた状態にも CFD の適用は可能で、主には入射

波の波向きから造波する領域と境界条件を設定する.波向き により計算領域の大きさは変わり、1波長を50分割以上とし た等間隔で入射波を解像する領域端から、進行波の反射をさ けるために流出側に1船長もしくは1波長以上大きくとるこ とが望ましい.図-14 に KCS 船型で波向きを変更した場合の 計算例を示す.図中左側が斜め向波 45 度での自由表面の可 視化図で、図中右側が波向きを0度(向波)から180度(追波) まで変更した場合のピッチ運動の振幅応答関数の実験結果 と他機関の計算結果との比較である.海技研 CFD システムに よる計算結果(図中 Present)は実験結果や他機関の計算結果 と比較して、精度良く運動を推定できることが分かる.



図-14 左:斜波での自由表面可視化, 右:ピッチ振幅応答関数比較

5. 多目的最適化



図-15 主機配置を考慮した伝達馬力(DHP)と積載量(Hold Volume) の多目的最適化<sup>13)</sup>

CFD の活用例として、海上技術安全研究所の重点研究にて 行われている船型最適化について紹介する.一定サイズ以上 の船舶に対し、船種毎に設定されたエネルギー効率設計指標 規制値を満たすことが義務づけられた. エネルギー効率設計 指標には、簡易化すると機関出力と載荷重量が主要なパラメ ータとして使用されており、最適化の目的関数として挙げら れる. 一ノ瀬らは船舶用の CAD システムの一つである NAPA システムを利用して、主機配置(図-15 左図)に伴うクリアラ ンス等による制約条件の元,船型 CAD データからの貨物倉容 積の自動計算と海技研 CFD システムを組み合わせ,船型設計 システムを構築した<sup>13)</sup>.船型変形には浮心位置,船体後半部 の CP カーブと船尾のフレームライン形状をパラメータとし て NAPA システムの機能を使用している. 図–15 右図に伝達馬 力と積載量を目的関数とした結果を示す.両者によるパレー トフロントを確認でき、オリジナルの船型から馬力と載貨容 積のバランスのとれた図中赤下三角の船型と青下三角の馬

力最小の船型等が得られていることが分かる.この他にぎょう鉄等の加工作業のある船首形状について,海技研 CFD システムと曲率線展開プログラムを組み合わせた,造波抵抗と加工難易度を同時に評価するシステムも構築されている<sup>14)</sup>.

## 6. まとめと今後の課題

海上技術安全研究所で開発している CFD に基づく新たな性 能評価システムを使用した成果の中から,実船スケール計算 と波浪中計算手法について,実用化における計算のポイント を含めて概要を示した.また,海上技術安全研究所の重点研 究で進められている多目的最適化と船型設計システム構築 による成果について紹介した.

実船スケール計算については、詳細な実船流場計測データの取得により、計算手法開発と結果の検証が大幅に進んだ一 方で、実用化に向けては、水槽試験との検証数と比べるとか なり少なく、実船馬力との比較や粗度データの蓄積を含め て、より多くの適用例と検証を必要としている状況である.

また, エネルギー効率設計指標については段階的に規制値が 厳しくなるスケジュールのため, 今後は超低速船も想定され る中, CFD 計算手法を活用した実船ベースの設計法や試運転 状態での馬力推定等は, 国際標準化も視野に重要な開発テー マになるものと考えられる.

向波中での計算については標準的計算法が構築され,船首 形状変更においても有効であることが示された.今後は,よ り実用的な船首形状等への適用が期待される.波向き変更に ついても実用化の目途がつきつつあり,より複雑な問題への 適用に伴う計算負荷の増大に対応すべく,並列計算手法の新 規開発も進めている.

また,海技研 CFD システムを組み合わせた船型最適化や生産性も同時に評価できる船型設計プロトタイプシステムについては,今後,設計現場での実用化に向けた検討が進められる.

ここでは主に船舶の性能評価に関連する事例を紹介した が、開発中のツールは汎用性も有していることから、波浪荷 重評価や流体構造連成システムの開発,海洋開発関連への適 用等,関係各所の協力を得て,適用分野の拡大も進めており, 今後,成果についても順次,公表される予定である.

### 謝辞

本講演の内容については多くの関係各位のご協力をいた だきました.付加物(ダクト)付き外航ばら積み船については 国土交通省海事局からの請負研究「実船の流場計測等による 船舶の高度性能評価システムの構築のための調査研究業務」 により実施しました.関係各位に深く御礼申し上げます.JBC 船型に関する波浪中での検証については海事クラスター実 海域実船性能評価プロジェクトにおいて実施されました.関 係各位に謝意を表します.肥大船における船首形状変更計算 は、(一財)日本造船技術センターが主催する造工中手造船所 を主体とした SPCG 及び HRC 委員会において実施されました. 関係各社に深謝いたします. 最後に本講演の一部は JSPS 科 研費 JP16K06919, JP19K04869 及び JP17K06975 の助成を受け たものです. 記して謝意を表します.

# 参考文献

1)Hiroshi Kobayashi and Yoshiaki Kodama : Developing Spline Based Overset Grid Assembling Approach and Application to Unsteady Flow Around a Moving Body, Journal of Mathematics and System Science, Vol. 6 (2016), pp. 339-347.

2)Kunihide Ohashi et al. : Development of a structured overset Navier-Stokes solver with a moving grid and full multigrid method, JMST, Vol.65(3) (2019), pp.884-901.

3) ITTC: Practical Guidelines for Ship CFD Applications.4) Kunihide Ohashi: Numerical Study of Roughness Model Effect Including Low-Reynolds Number Model and Wall Function Method at Actual Ship Scale, JMST, (2020).

5)Takamichi Hiroi et al. : Full-scale on-board measurements of wake velocity profiles, underwater noise and propeller induced pressure fluctuations, 日本船舶 海洋工学会講演会論文集, 第 29 号, (2019).

6)Nobuaki Sakamoto et al. : Overset RaNS Computation of Flow around Bulk Carrier with ESD in Full Scale and its Validation, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 29 号, (2019).

7) Harushi Ikenoue et al. : Hydrodynamics Design of Energy Saving Device for Ship Scale Performance Improvement, 33rd Symp. on Naval Hydro., (2020). (to be published). 8) 折原秀夫:耐航性シミュレーション(<連載>船舶 CFD の最 前線),日本船舶海洋工学会誌 KANRIN, 第 64 号, (2015). pp. 29-34.

9)小林寛他:向波中の波浪中抵抗増加CFD計算における計算 条件の設定について-RANS計算のパラメトリックスタディ -,日本船舶海洋工学会講演会論文集,第29号,(2019).

10) 久米健一他:船首部形状変更と波浪中抵抗増加の関係に ついて-水槽試験による CFD 計算の検証-,日本船舶海洋工 学会講演会論文集,第30号,(2020).

11) 廣田匡俊: CFD を用いた船首形状が異なる船型の波浪中性
 能推定,第14回船舶用 CFD セミナー(海上技術安全研究所),
 (2020).

12)P.C. Wu et al. : Forces, ship motions and nominal wake for KCS ship model in regular head waves, 日本船舶海洋 工学会講演会論文集, 第 25 号, (2017).

13)Yasuo Ichinose et al. : A Study of Multi-objective Optimization for Propulsion Performance and Cargo Capacity, PRADS, (2019).

14) ーノ瀬康雄他:船首バルブ部の推進性能と生産性との一 貫評価システムの試設計とその有効性評価,日本船舶海洋 工学会講演会論文集,第25号,(2017).