

次世代 CFD を用いた実海域省エネ性能評価に関する研究

平田 信行*, 田原 裕介*, 大橋 訓英*, 小林 寛*
宮崎 英樹*, 荒木 元輝**, 児玉 良明***, 小野寺直幸****

Study on Evaluation of Energy-Saving Performance at Actual Sea Using Next Generation CFD

by

Nobuyuki HIRATA, Yusuke TAHARA, Kunihide OHASHI, Hiroshi KOBAYASHI
Hideki MIYAZAKI, Motoki ARAKI, Yoshiaki KODAMA and Naoyuki ONODERA

Abstract

In order to evaluate fluid-dynamic performance of a practical ship with energy-saving devices (ESD) at actual sea, National Maritime Research Institute (NMRI) has been making great efforts in CFD (Computational Fluid Dynamics) research and developing the next generation CFD software which enable to compute flows around a complex geometry of a ship in waves and in free running condition. In addition, flows around a rotating propeller can be simulated by using dynamic overset grid approach. These new CFD software consist of 3 softwares: (1) G-TOOL & (2) UP_GRID for structured mesh generator and overset grid assembler, and (3) NAGISA for structured Reynolds-averaged Navier-Stokes solver in overset grid approach.

In this paper, the outlines of these next generation CFD software and the present status of fluid-dynamic performance evaluation of a ship, i.e. ship resistance, propulsion, sea-keeping and maneuverability performance, are presented.

* 流体性能評価系, ** 海洋開発系, *** 児玉設計事務所, **** 日本原子力研究開発機構 (すべての著者ともに, 研究当時は流体性能評価系に所属)

原稿受付 平成29年6月5日

審査日 平成29年7月11日

目 次

1. まえがき	54
2. 重合格子法に基づく新しい CFD コードの開発	55
2.1 重合格子法とは?	55
2.2 G-TOOL	55
2.3 UP_GRID	56
2.4 NAGISA	58
3. 次世代 CFD を用いた船舶の流体性能評価	59
3.1 省エネデバイス (ESD) 付き船体の抵抗・推進性能評価および ESD の最適設計	59
3.2 船体の波浪中性能評価	62
3.3 船体および舵の操縦性能評価	66
3.4 実プロペラの性能評価	67
4. CFD ワークショップ TOKYO2015 の開催	68
4.1 ワークショップの概要	68
4.2 テストケース	69
4.3 CFD 技術開発の展望	71
5. あとがき	71
参考文献	72

1. まえがき

海事産業においても GHG 排出の削減が求められており、省エネ性能に優れた船型設計能力は産業競争力として極めて重要である。船型設計においては、基本計画に基づく船型要素と流体性能をバランスさせる必要があり、船型変更と性能評価を繰り返すことになる。従来は水槽試験に頼らざるを得なかった流体性能評価も、近年の CFD 技術の発展に伴って数値シミュレーションによる効率化が進行している。

船舶の省エネ達成のためには、平水中のみならず波浪影響などを考慮した実海域における総合的な流体性能評価が必要となる。また、近年の船舶は抵抗・推進性能向上を図り、省エネデバイス (ESD) を船尾まわりなどに装着することが一般化してきている。省エネ装置の効果も考慮しつつ実海域で運航される船舶の省エネ性能を精度良く推定するためには、領域全体の詳細な流れを求めることができる CFD 手法が適している。このような CFD の高度利用により、先進的な船型を効率よく設計することが可能となり、産業競争力の強化に資する。

これらの要求を満足させるため、重点研究「次世代 CFD を用いた実海域省エネ性能評価に関する研究」、先導研究「CFD による推進性能評価の高度化に関する研究」、先導研究「次世代 CFD ソルバーの高度化に関する研究」を通して、複数の格子を重ね合わせ、それぞれの格子間で情報を交換しながら流れ場を解くことにより、実海域における複雑物体まわりの流れ計算が可能になる重合格子法に基づいた次世代 CFD ソフトウェアの開発を進めている。

本稿では、現在も開発を進めている次世代 CFD ソフトウェアとして、重合格子用の格子生成ソフトで重合情報も計算する G-TOOL と UP_GRID, 重合格子法に対応可能な Navier-Stokes ソルバー NAGISA の 3 種類の CFD ソフトウェアについて概説する。これらの新しいソフトウェアは共有メモリ型並列計算機に対応しており、コア数の多い CPU 上では非常に効率的な計算が可能となるとともに、高次の乱流モデルを導入することにより、複雑な流れにも対応できるようになっている。上記のソフトウェアを用いて、省エネデバイスなどがついた複雑な形状を有する実用的な船型の流体性能評価の現状をまとめる。また、2015 年 12 月に当所で開催した第 7 回国際 CFD ワークショップの概要とその成果について報告する。

2. 重合格子法に基づく次世代 CFD コードの開発

2.1 重合格子法とは？

重合格子法は、互いに重合（オーバーラップ）する複数の格子ブロック間で計算領域をカバーし、計算時には物理量等を補間し合うことで流場を求める。例えば、船体、船尾フィン、舵、舵フィン等の周りの流場を計算する場合、個々の物体周りの計算格子を個別に作成し、計算領域内に配置する（図 2.1.1 参照）。計算格子ブロック間で流速や圧力といった物理量を補間するための補間係数を予め計算しておき、CFD 計算時には物理量を補間し合うことで対象物体周りの流場を求めることができる。

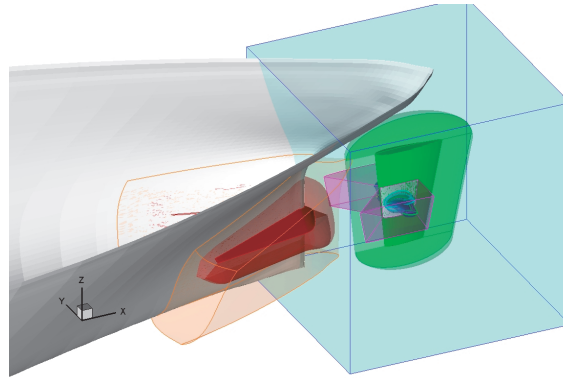


図 2.1.1 重合格子の作成例

重合格子法による CFD 計算の手順は概ね次のとおりである。

1. 個々のブロック周りの計算格子の作成
2. それぞれの計算格子を、アフィン変換等により所定の位置、大きさ、向きに配置する。なお、物体間で接合がある場合は接合部分の格子の切り取り処理等を行う。
3. 計算格子ブロック間で流場情報を補間し合うための補間係数（重合格子情報）を計算する
4. 重合格子法対応の NS ソルバーにより、CFD 計算を行う
5. CFD 計算結果を、可視化ソフト等を用いて確認する

1.-3.の部分が、CFD 計算の前段階として必要な手順であり、この部分の処理（重合格子および重合格子情報の生成）を行うためのソフトウェアとして、当所では G-TOOL と UP_GRID を、また 4. の部分に対しては NAGISA の開発を進めている。

2.2 G-TOOL

G-TOOL¹⁾は、G-TOOL Parts / G-TOOL Assembly / G-TOOL Overset の3つのプログラムで構成されており（図 2.2.1）、それぞれ 2.1 における 1.-3.の手順に対応している。G-TOOL Parts では、個々の ESD の形状定義と格子作成、G-TOOL Assembly では個々の計算格子の結合等、G-TOOL Overset では重合格子情報の生成をそれぞれ行う。

をより高次に表現することで、格子点の再配置や物体同士の接合面の切り取り（トリミング）等を高精度に行うことが可能である（図2.3.1及び図2.3.2）。

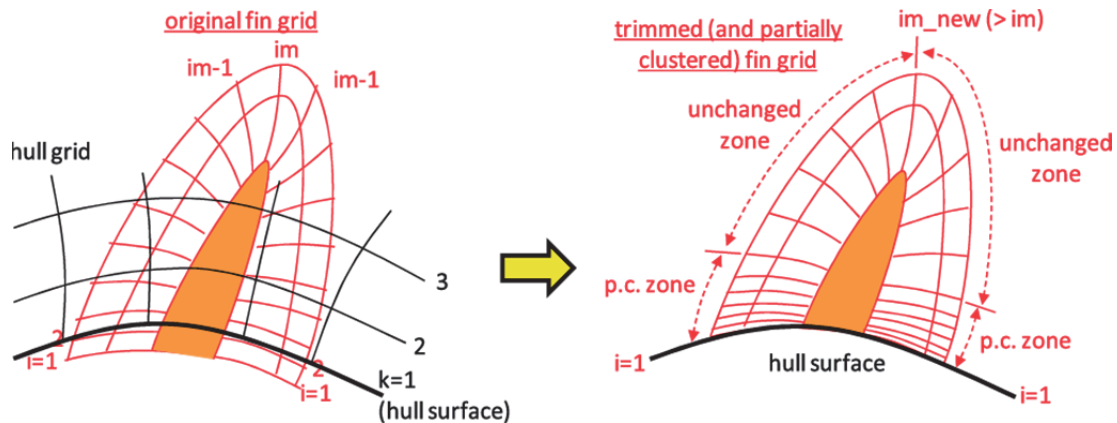


図2.3.1 トリミング及び格子再配置の概念図（フィンを取り付けた場合）

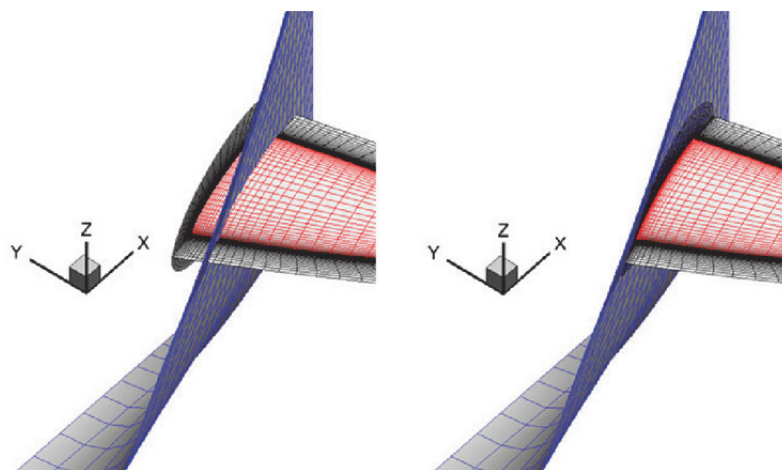


図2.3.2 船体に取り付けたフィンをトリミング・格子再配置した例

UP_WING は、物体及び外周境界の形状をオフセットで定義することにより、空間格子を生成するプログラムである。格子生成については、GMESH³⁾と同じ IGM 法を用いている。UP_MOD は、既存の計算格子に対するアフィン変換、格子点の集中化・再配置、トリミング処理、IGES データの Coons パッチとしての読込、Coons パッチからオフセットの生成等を行うプログラムである。UP_OVS は、UP_MOD で所定の位置に配置、切り取り処理等を行った計算格子間の重合情報を計算するプログラムである。計算に際しては、各計算格子の格子点毎に、他の計算格子の spline 座標系での位置を計算して計算格子同士の重なり具合を判断し、重合情報を生成する。本手法では、計算格子の重合状態によっては、orphan セルが発生する可能性がある。この場合は CFD 計算を正しく行うことができないため、計算格子の修正等が必要となる。

UP_GRID を用いて重合格子情報を生成し、NAGISA を用いて CFD 計算を実施した例を図2.3.3 に示す⁴⁾。船尾ダクトを取り付けたバルクキャリア船型 (JBC) の船尾周りの流れを計算している。左側の図は計算格子であり、船尾ダクトだけでなく、船尾管・プロペラボス・プロペラキャップを含む船尾突起部及び船尾ダクトを取り付けているストラットについても計算格子を作成し、物体形状を忠実に再現している。右側の図は自航計算の計算例であり、ダクト後方で回転するプロペラによる吸込みやプロペラ後方での旋回流が計算でシミュレートできている。

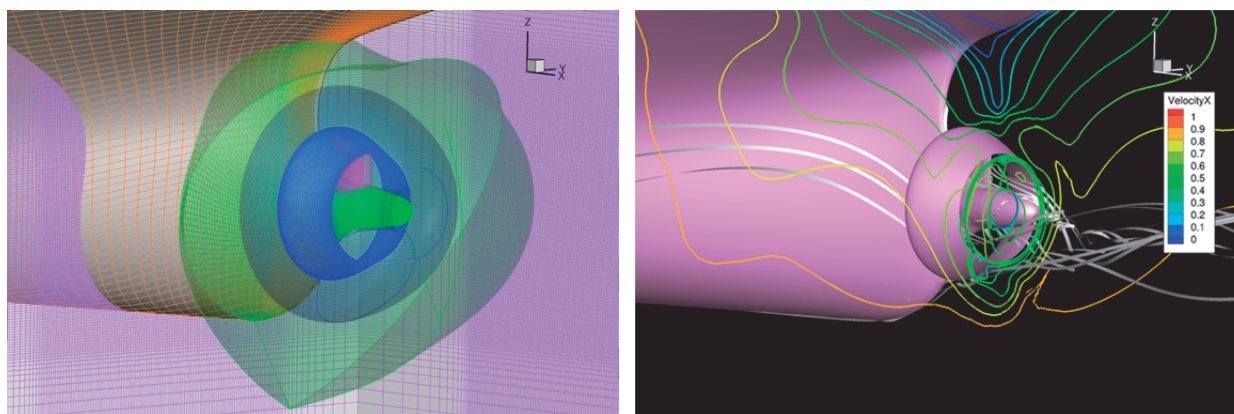


図 2.3.3 船尾ダクトを取り付けたバルクキャリア周りの自航計算例（左：計算格子，右：計算結果）

実際に利用されている船尾付加物の形状や取り付け位置は様々であり，付加物の一部分だけが船体や舵に接合しているような例も多数存在する．このような接合関係にある場合に対応するため，ダクトやフィン等についてコード方向に H 型のトポロジーを有する格子にも対応する開発を行った．図 2.3.4 左に一例を示す．上部前縁部分のみが船体に部分的に接合している船尾ダクトと，舵前縁に部分的に接合している舵フィンを取り付けたタンカー（KVLCC2）周りの重合格子を生成し，NAGISA で計算を行った．図 2.3.4 右側は抵抗計算例であり，物体表面の圧力分布及び流線を示している．

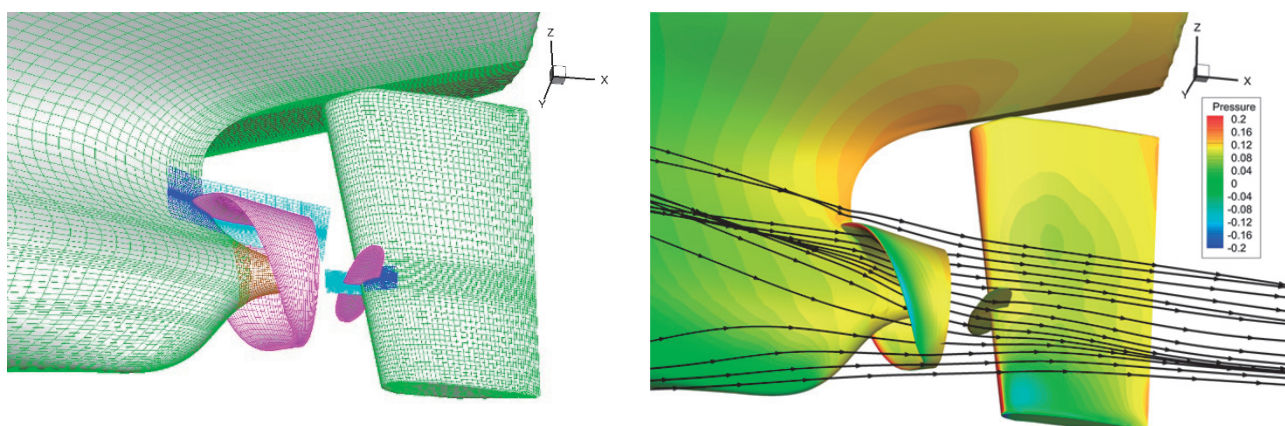


図 2.3.4 部分接合する船尾ダクトと舵フィンを取り付けたタンカー周りの計算例
（左：計算格子，右：計算結果）

2.4 NAGISA

NAGISA⁵⁾は，構造型格子ベースの重合格子法に対応した Navier-Stokes ソルバーとして開発された CFD ソフトウェアであり，抵抗性能，伴流分布，航走姿勢，自航性能，操縦性能の推定が可能である．支配方程式や空間，時間の離散化，解法等は NEPTUNE に準じる．特徴としては，以下のとおりである．

- ・重合格子法に対応
- ・擬似圧縮性を導入した非圧縮性 NS 計算
- ・流体変数はセル中心に配置
- ・有限体積法による離散化
- ・非粘性項には Roe 法で評価した MUSCL 型 3 次風上差分を使用

- ・粘性項には2次中心差分を使用
- ・時間積分には1次 Euler 後退差分を使用
- ・対称 Gauss-Seidel 収束計算に基づく準 Netwon 法
- ・収束加速にはフルマルチグリッド法 (FMG) と局所時間法を使用
- ・乱流モデルとして, Spalart-Allmaras(SA)モデル, $k-\omega$ モデル(BSL 及び SST), 代数応力方程式モデル (EASM), DES モデル, 壁関数モデル($k-\omega$ モデル(BSL 及び SST), EASM モデル)が選択可能
- ・自由表面計算には, 界面適合型と界面捕獲型 (Level-Set) が選択可能
- ・プロペラ計算には, 簡易プロペラモデル
- ・斜航・旋回・平水時の姿勢変化にも対応可能
- ・波浪中の船体運動計算
- ・共有メモリ型の並列計算が可能

複雑な形状まわりの一例として, 図 2.4.1 にタンカー船型 (龍光丸) の船尾に船尾フィン, ダクト, 舵, 舵フィンを装着した場合の自航計算結果を示す. 自航状態の複雑な船尾流場においても, 流体力や自航要素などの積分量だけではなく, 物体表面圧力分布や流線等を基に, 省エネ付加物の形状や位置等の検討が可能である. また, 図 2.4.2 には舵ホーンが付いたタンカー船型 (KVLCC2) が斜航している流れの自航計算結果を示す. プロペラ後流の旋回流による舵左舷側の負圧が再現され, 舵ホーンと舵の間のギャップについても破綻することなく計算可能である. このように, 推進性能や操縦性能の重要なファクターであるが格子生成が難しい船尾付加物や舵ホーンに対しても, 重合格子法は有用であることが分かる.

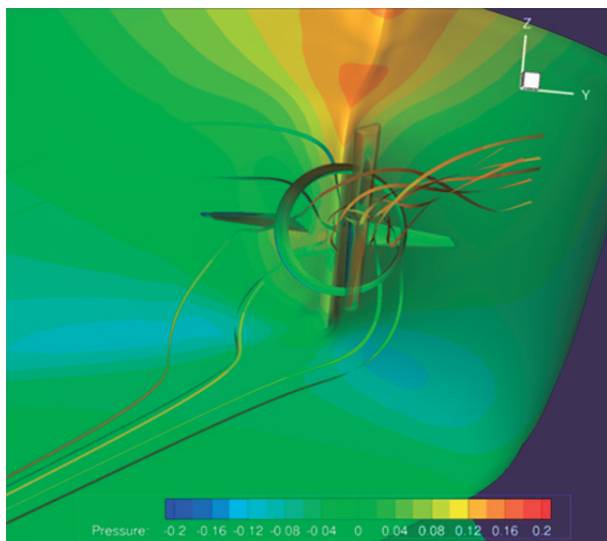


図 2.4.1 重合格子による船尾付加物付自航計算

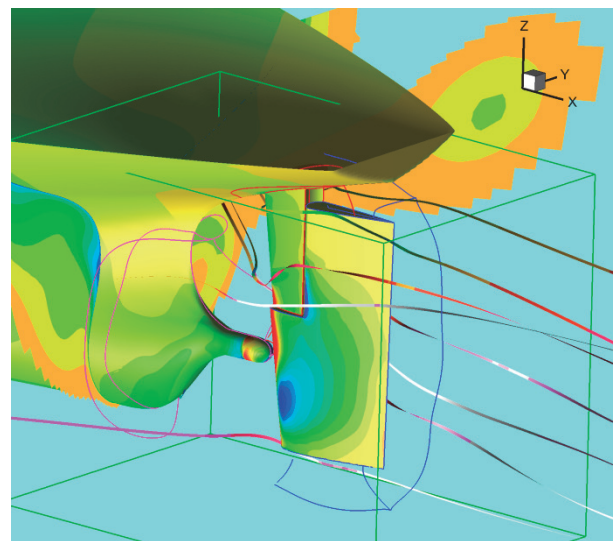


図 2.4.2 重合格子による舵ホーン付き斜航・自航計算

3. 重合格子法を用いた新しい流場解析

3.1 省エネデバイス (ESD) 付き船体の抵抗・推進性能評価および ESD の最適設計

省エネ付加物をデザインするためには, 取り付け位置や形状について様々なケースについて検討が必要である. 重合格子法は個々の付加物の位置や形状が変化した場合でも, 格子の修正は当該付加物のみに限られ様々なケースをパラメトリックに検討することに適している. バルクキャリア船型 (JBC) ⁶⁾ に2種類の船尾ダクト (図 3.1.1 参照) をつけた場合とダクトが無い場合に対して, 水槽試験と CFD の計算結果を比較した ⁷⁾. 抵抗値及び自航要

素の実験値との比較を表 3.1.1 に示す。計算格子が充分には細かくないため、肥大船特有の大きい伴流係数は捉えきれていないが、3つのケースの相対的な順番は正しく評価されるとともに、抵抗や他の自航要素に関しては絶対量としても高精度に評価できている。また、図 3.1.2 に2つのダクトに対する自航計算の船尾流場を示す。

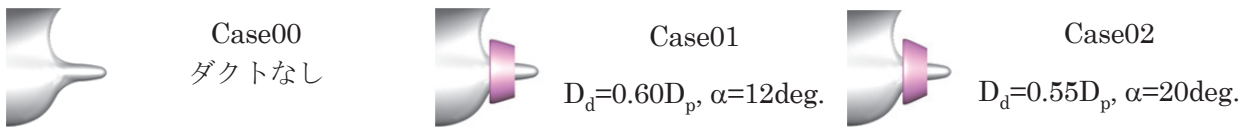


図 3.1.1 JBC 船型の船尾ダクト

表 3.1.1 抵抗値及び自航要素の計算値と実験値の比較

		Exp.	CFD	Error [%]
case00	(1+k)	1.314	1.302	-0.9
	(1-t)	0.804	0.809	+0.6
	(1-w _T)	0.553	0.498	-10.0
	eta _R	1.015	1.007	-0.8
case01	(1+k)	1.282	1.290	+0.6
	(1-t)	0.813	0.840	+3.3
	(1-w _T)	0.526	0.469	-10.9
	eta _R	1.009	1.003	-0.6
case02	(1+k)	1.305	1.303	-0.2
	(1-t)	0.810	0.820	+1.3
	(1-w _T)	0.481	0.398	-17.3
	eta _R	1.009	0.998	-1.1

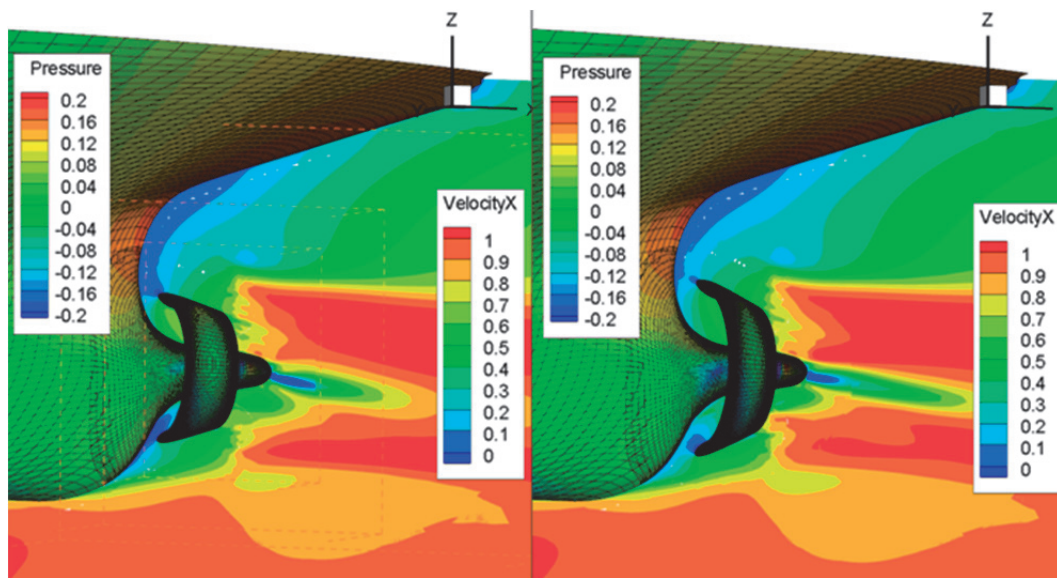


図 3.1.2 船体表面圧力分布及び対称面の流速分布の計算結果（左：Case01，右：Case02）

次に、ダクト径と開き角を設計変数としたダクトの最適設計を試みた⁸⁾。本設計において、船体はタンカー船型（KVLCC2）を使用し、ダクト径は $0.65 \leq D_D/D_P \leq 1.05$ （ D_D : ダクト径, D_P : プロペラ径）、開き角は $-5.0 \leq \alpha[\text{deg}] \leq 15.0$ の範囲で変化させることとする。なお図 3.1.3 に、ダクト径・開き角ともに最小の赤いダクト及びダクト径・開き角ともに最大の青いダクトを図示した。図 3.1.4 は、開き角、直径それぞれ5通り変化させた場合のパラメトリックスタディを行った際の、ダクト無の状態に対する、 $1-t$ 及び $1-w_T$ の変化率である。

$1-t$ については開き角が大きくなると改善する傾向が見られたが $1-w_T$ では局所的なピークはあるが $1-t$ と同様な傾向は見られなかった。更に、擬似馬力 ($VHP = C_d/(\eta_H\eta_R)$) を目的関数とする離散的 SQP を用いた最適設計を試みた。図 3.1.5 にその結果を示す。2つの設計変数の最大・最小の組合せ (図 3.1.5 における#1, #5, #21, #25) 及び中央値 (#13) の5つの初期値から最適化を行ったところ、3つの初期値 (#1, #5, #25) についてはパラメトリックスタディでの最小値 (#20) に辿り着いたが、残りの2つの初期値は他の局所解に留まり、勾配法特有の初期値依存が見られた。最適化設計を実用化するためには、今後実験との詳細な比較が必要である。

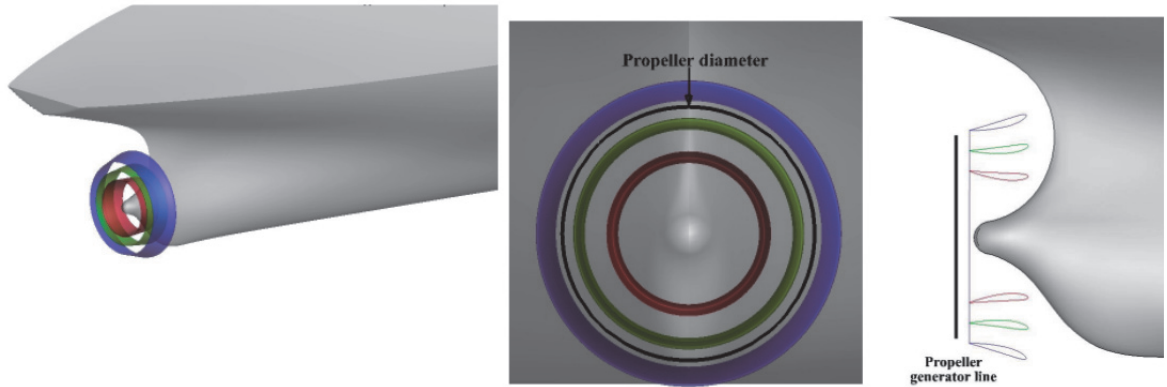


図 3.1.3 船尾ダクトの位置と形状

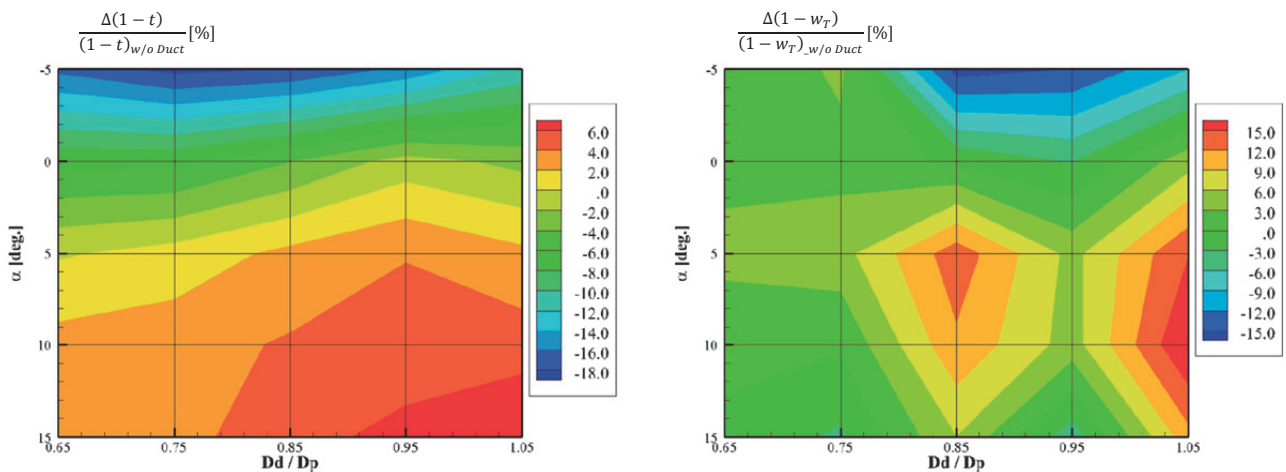


図 3.1.4 ダクト無の状態に対する $1-t$ (左) と $1-w_T$ (右) の変化率 [%]

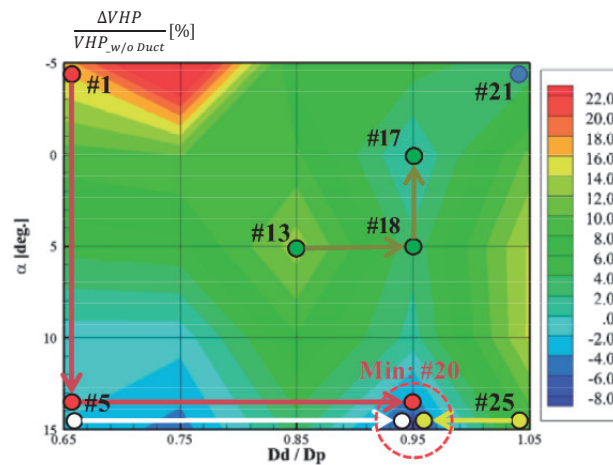


図 3.1.5 ダクト無の状態に対する VHP の変化率 [%] と初期値を変えた離散 SQP による最適化の経路

これらの研究・開発により，重合格子法を用いた省エネデバイス（ESD）付き船体の抵抗・推進性能評価が可能となり，ESD の最適設計についても重合格子法により効率的に行うことが可能となった．今後は様々な ESD に対して適切な設計変数とより優れた最適化手法に関しても検討を行う予定である．

3.2 船体の波浪中性能評価

規則波中の計算に使用した船型はコンテナ船型で，検証用のデータが揃っている KCS を対象とした⁹⁾．規則波の条件を表 3.2.1 に示す．前進速度と船長 L_{PP} に基づくフルード数は 0.261，レイノルズ数は 1.074×10^7 である．

表 3.2.1 規則波の計算条件

ケース	λ/L	h/L
C1	0.6506	0.0102
C2	0.8507	0.0128
C3	1.1497	0.0203
C4	1.3708	0.0245
C5	1.9505	0.0323

計算格子の分割数を表 3.2.2 に，船体近傍における格子を図 3.2.1 を示す．表 3.2.2 は重合格子の優先順位に並べており，舵近傍の流場を解像する矩形格子（Refined Rect.），舵格子（Rudder），船体格子（Hull），規則波を生成するとともに計算領域を担う矩形格子（Rect.）を重合格らせている．計算領域を担う矩形格子については領域の大きさを変えず，波長船長比に応じて船長方向の分割数 IM を変更した格子を 3 種類用意し，重合格子の利点を活かして船体格子等は変更せずに重合格らせることで，各ケースにおいて規則波を解像する格子を使用することができる．

表 3.2.2 計算格子の分割数

計算格子	分割数 IM $\times$ JM $\times$ KM
Refined Rect.	49 $\times$ 49 $\times$ 49
Rudder	49 $\times$ 89 $\times$ 33
Hull	257 $\times$ 161 $\times$ 61
Rect.(C1)	185 $\times$ 89 $\times$ 97
Rect.(C2,C3)	153 $\times$ 89 $\times$ 97
Rect.(C4,C5)	117 $\times$ 89 $\times$ 97

乱流モデルには $k-\omega$ SST モデルを使用し，物体表面には壁関数モデルを適用した．壁関数モデルを使用することにより物体表面での最小格子間隔を無次元距離 y^+ で 200 程度に設定でき，波高が大きいケース C3 から C5 においても安定した計算が可能である．

運動についてはヒープ運動とピッチ運動の 2 自由度の計算であり，無次元時間刻み Δt は $\Delta t=0.005$ に設定した．船体近傍の格子のみを船体運動に伴って変形させて，移動格子法を適用する．流場情報を補間し合う領域では各計算格子同士の幾何学的な相対位置を変えないことで，補間に必要な重合格子情報を各時刻ステップで再計算する動的重合格子を使用せず，計算負荷を低減させる方法を採用している．計算領域内の造波領域において規則波の波高と速度の解析解を与え，計算格子における変数と $\sin$ の 2 乗に基づく重み関数を使用して混合させる手法により，規則波を造波させた．

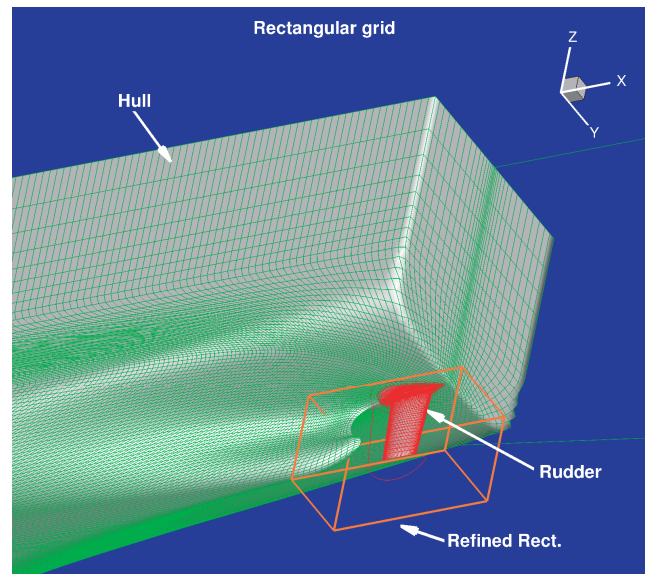


図 3.2.1 船体近傍の計算格子

図 3.2.2 にケース C1 から C5 までの船体近傍の自由表面の可視化例を示す。規則波の波長が長くなるとともに、規則波の波高が高くなる様子が確認できる。船体格子と計算領域を担う矩形格子との間で不自然な不連続は見られず、船体と規則波の干渉の広がりも見られ、今回の重合格子に基づく計算により、規則波の生成と伝搬、船体運動を含む干渉計算が問題なく行えることが分かる。

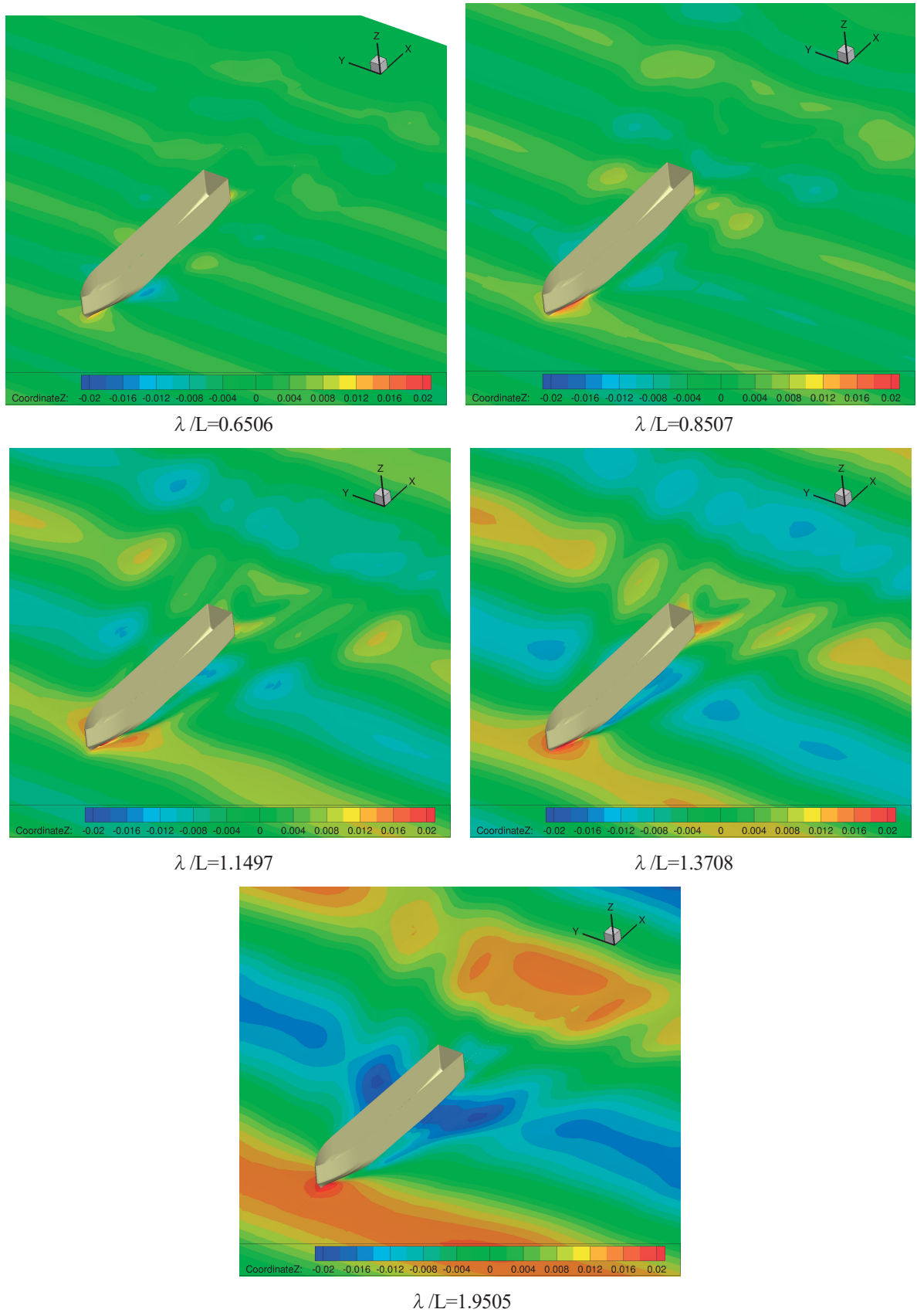


図 3.2.2 船体近傍の自由表面

図 3.2.3 に波浪中抵抗増加の無次元値の実験値との比較を示す。 $\lambda/L = 1.1497$ で抵抗増加のピークとなる傾向を計算でも捉えることができおり、実験値と比較的精度よく一致していることが分かる。

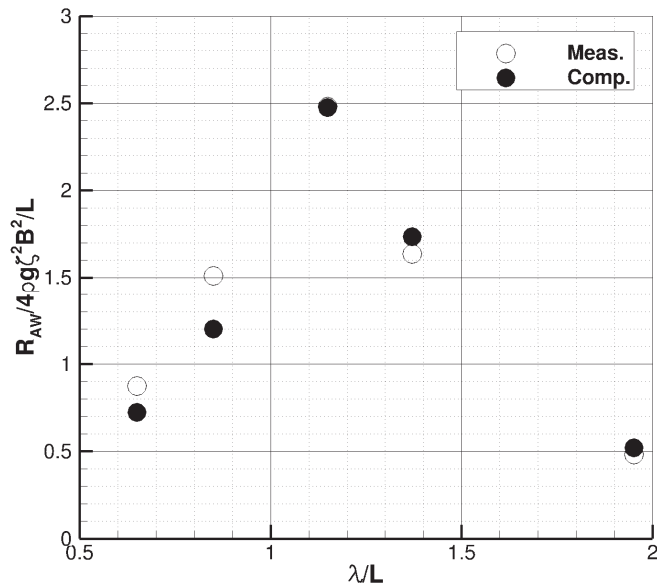


図 3.2.3 波浪中抵抗増加の比較

最後に図 3.2.4 に船体運動の 1 次振幅の無次元値の比較を示す。ヒープ運動の振幅が $\lambda/L = 1.1497$ でピークを迎える傾向、ピッチ運動の振幅が λ/L とともに大きくなる傾向を計算でも捉えられていることが分かる。

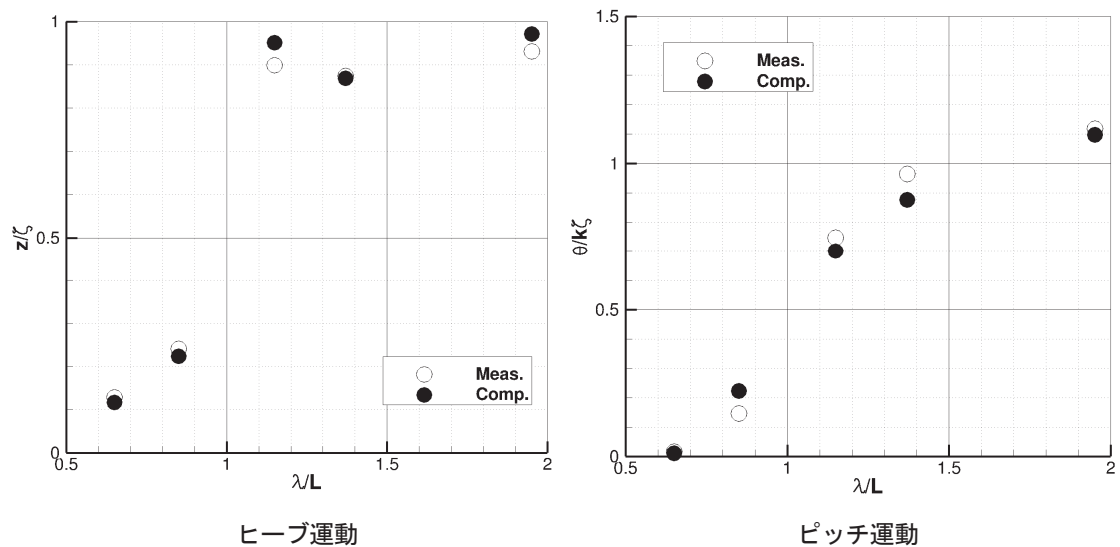


図 3.2.4 船体運動の 1 次振幅の比較

以上の結果から、規則波中で運動を伴う船体周り流れについても、重合格子に基づく計算手法の有効性を示すことができていると言える。

3.3. 船体および舵の操縦性能評価

重合格子法は、船体と舵を異なる計算格子として重合させることで計算が可能のため、舵角が変更された場合でも、格子の再生成は必要なく、舵格子を舵角にあわせて回転して重合情報の更新を行うだけで計算が可能であり、舵角変更を伴う計算に適した手法である。

一例として、タンカー船型 (KVLCC2) を使用した PMM シミュレーションを行った¹⁰⁾。図 3.3.1 に示すように、舵格子、局所細分化用矩形格子、船体格子の 3 ブロック構成とし、表 3.3.1 に示す格子点数とした。

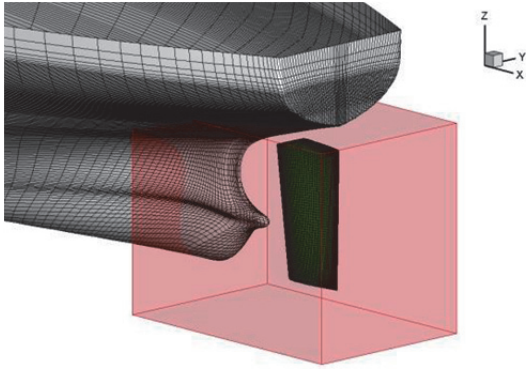


表 3.3.1 PMM 計算用格子の格子点数

計算格子	分割数 IM×JM×KM (格子点数)
Rudder	93 × 121 × 61(0.69M)
Refinement	101 × 121 × 101(1.23M)
Bare hull	105 × 281 × 105(3.10M)

図 3.3.2 に、pure yaw 計算の結果を示す。船体表面圧力分布、各段面での主流方向速度分布とともに、非対称性が顕著である。yaw 運動の角度が 0 になる時 (0/4T, 2/4T) でも、非対称性が生じており、船体のビルジ部では負圧が生じていることが分かる。

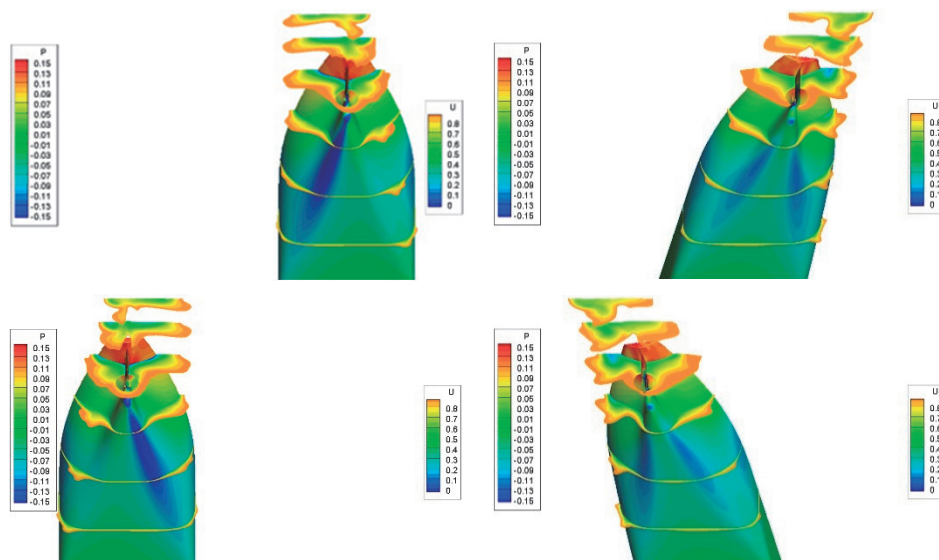
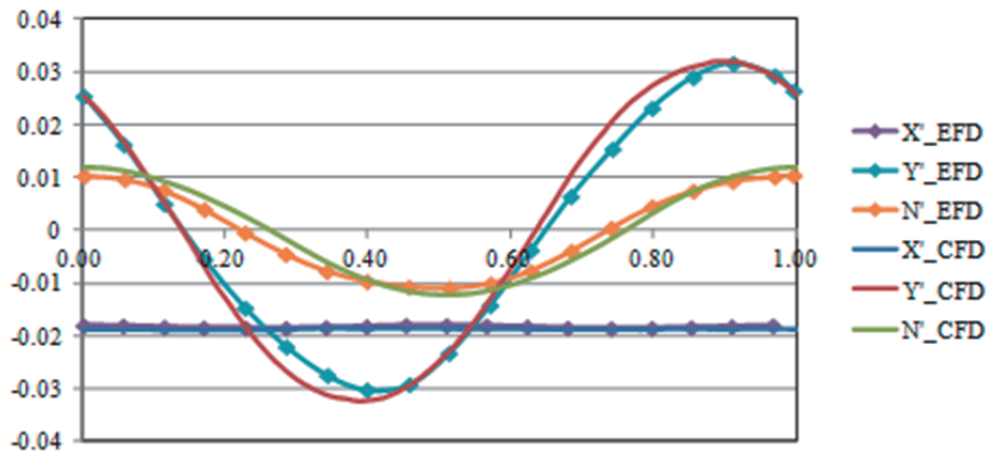


図 3.3.2 タンカー船型の PMM (pure yaw) 計算結果における、船体表面圧力分布といくつかの断面での主流方向速度分布。0/4T (左上)、1/4T (右上)、2/4T (左下)、3/4T (右下)

図 3.3.3 は、pure yaw 計算での流体力の比較である。主流方向、横方向の力と、鉛直軸周りのモーメントが実験と計算で良く一致した。重合格子を用いた CFD 計算により、操縦性能の推定や流場の検証が可能であることが確認された。



3.4. 実プロペラの性能評価

物体の運動をとまなう非定常計算においても、各時刻ステップで重合情報を再計算して更新する動的重合格子法（Dynamic Overset）を用いることで、計算が可能である。運輸省航海訓練所（当時）練習船「青雲丸」の通常プロペラを対象として、一様流中の単独プロペラ計算を行った¹¹⁾。図 3.4.1 に計算格子の概要を示す。直方体で覆われる計算領域内で、プロペラブレード及びボスの計算格子をプロペラ軸周りに回転させて計算を行った。図 3.4.2 にスラスト及びトルク係数の計算結果について、動的重合格子法の計算結果と実験結果及び体積力モデル（Body Force）との比較を示す。MAU プロペラに関しては、体積力モデルはチューニングされているため全般的に実験値に合う傾向にあるが、スラスト係数については本計算の方が、実験値に近い結果となった。トルク係数については粘性影響が大きく現象が複雑で、かつ格子依存性も強いため、今後更なる検証が必要である。一方、船後でプロペラを回転させる自航シミュレーションに際しては、プロペラの回転運動をとらえるために時間刻みを細かくする必要がある。このため、効率的かつ高速に計算を行うことが、実用面で重要である。そのため、各ステップでの重合情報更新が必要な非定常計算においても、粗い格子で計算を開始し、細かい格子に移行する Full Multigrid 法を適用可能とする開発を行った¹²⁾。粗い格子（Coarse grid）と、細かい格子（Fine grid）での格子及び流線を図 3.4.3 に示す。詳細流場は細かい格子で計算を行う必要があるが、計算開始時は粗い格子で行うことで、計算を効率的に実施可能である。

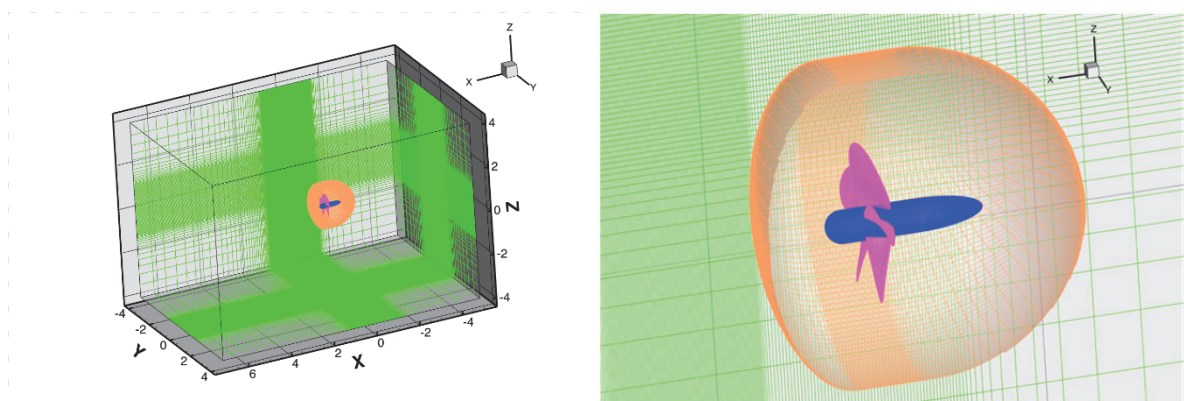


図 3.4.1 プロペラ周りの重合格子全体図（左）、プロペラ部分の拡大図（右）

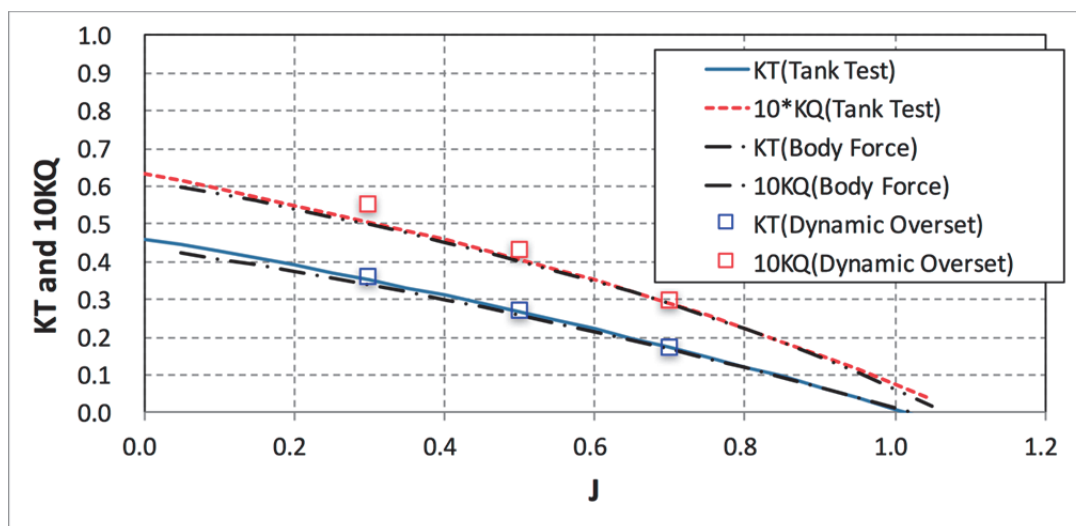


図 3.4.2 POT 計算結果

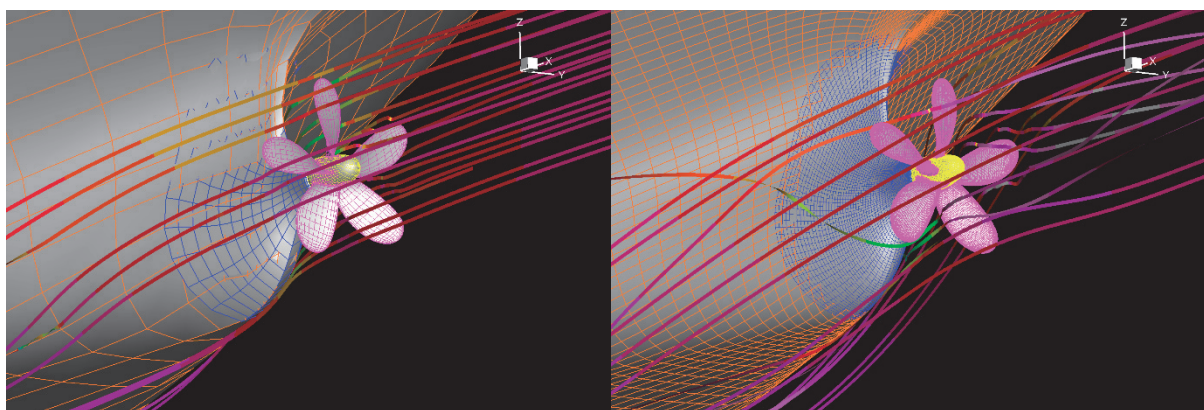


図 3.4.3 Full Multigridによる自航シミュレーション (右: Coarse grid, 左: Fine grid)

4 CFD ワークショップ TOKYO2015 の開催

4.1 ワークショップの概要

Tokyo 2015 A Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics (東京 2015 船舶 CFD に関するワークショップ) は、2015 年 12 月 2 日から 4 日に海技研で開催された。船舶 CFD に関するワークショップは、共通の計算対象・計算条件を定めて参加者が計算結果を持ち寄り、実験結果等と比較・検証することにより、船舶流体力学分野における CFD 計算技術の現状を評価するとともに、世界的な今後の船舶 CFD の開発方針を議論するものである。本ワークショップは過去 1980, 1990, 1994, 2000, 2005, 2010 年とほぼ 5 年毎に開催されてきた。海技研は 1994, 2005 年に続いて今回が 3 回目のホスト役となる。

今回のワークショップでは、従前のワークショップで計算対象としてきたコンテナ船 KCS に加えて、省エネ付加物付船舶に対する CFD 計算の検証用に海技研を中心に開発したバルクキャリア JBC と米国駆逐艦 ONRT を新船型として採用した (図 4.1.1)。計算条件については、これまで行われてきた抵抗性能や自航性能の解析に加えて、付加物付状態での抵抗・推進性能 (JBC)、斜波中の船体運動 (KCS)、波浪中の自由航走 (ONRT) 等も新たに対象とした。これらのテストケースに対して、総計で 15 ケ国 30 グループの約 100 人が参加し、熱心なディスカッションが行われた。

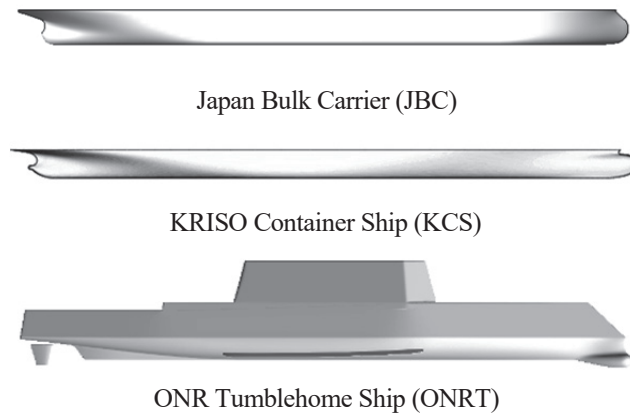


図 4.1.1 対象船型

4.2 テストケース

JBC では、船尾ダクトの有無の両方について、抵抗・自航計算を対象とした。抵抗計算では、抵抗値及び姿勢 (sinkage & trim) 並びに両者の不確かさ解析とともに、船尾における流場と SPIV による計測結果との比較が行われた。自航計算では、抵抗値、 K_T 、 K_Q 、 n (回転数) 等及びそれらの不確かさ解析とともに、抵抗計算同様 SPIV 結果との流場の比較が行なわれた。また、抵抗 (船尾ダクト無し) 状態での船側波形や縦切り波形の比較も行われた。

KCS では、前回のワークショップ (G2010)¹³⁾から引き継いだ平水中抵抗のフルード数シリーズ計算、平水中自航計算及び向波中での船体運動計算 ($\lambda/L_{PP} = 0.65 \sim 1.95$) に、新たに斜波中曳航計算 ($\chi = 0, 45, 90, 135, 180$ [deg], $\lambda/L_{PP} = 1.0$) が加わった。

ONRT では、平水中並びに幾つかの波向きの入射波中での自由航走計算 ($\chi = 0, 45, 90, 135, 180$ [deg], $\lambda/L_{WL} = 1.0$) がテストケースとなった。

現在、各セッションの司会者によるプレゼンテーションが参照可能¹⁴⁾であり、ここではその中から幾つかを紹介する。

4.2.1 JBC

抵抗計算における、抵抗値及び姿勢の結果の集計値を表 4.2.1 に示す。計算値と実験値の差を示す E%D ((実験値-計算値)/(実験値)) の平均値は、抵抗値では 1% 程度であり、ダクトの有無を合わせると sinkage は 2~3% 程度、trim は 1% 程度となっている。自航計算における $1-t$, $1-w$ の結果の集計値を表 4.2.2 に示す。実プロペラ計算 (表中 A) と体積力モデル (表中 BF) で、有意な差異は認められなかった。

4.2.2 KCS

結果の 1 例として、向波中の抵抗増加を図 4.2.1 に示す。各参加者の計算の平均値が実線、計測値が破線で表されている。計算の平均値が波長の違いによる抵抗増加量の傾向を概ね捉えていることが分かる。

4.2.3 ONRT

ONRT では、幾つかの波向きについて 6 自由度自由航走計算が行われた。例として、heave と pitch の 1 次の振幅について図 4.2.2 に示す。両者とも参加者の平均は実験とよく一致している。

表 4. 2. 1 JBC の抵抗計算の集計結果

Item			Without Duct	With Duct
$C_t(10^3)$	Experiment(D)		4.289	4.263
	CFD	Mean(S)	4.243	4.233
		Mean of E%D	1.06	0.70
sinkage	Experiment(D)		-0.086	-0.086
	CFD	Mean(S)	-0.088	-0.088
		Mean of E%D	-2.1	-3.13
trim	Experiment(D)		-0.180	-0.180
	CFD	Mean(S)	-0.179	-0.180
		Mean of E%D	0.62	1.26

表 4. 2. 2 JBC の自航計算の集計結果

Item				Without Duct	With Duct
1 – t	Experiment(D)			0.804	0.811
	CFD	Mean(S)	A	0.800	0.779
			BF	0.799	0.808
		Mean of E%D	A	0.483	3.972
			BF	0.615	0.415
1 – w	Experiment(D)			0.554	0.481
	CFD	Mean(S)	A	0.548	0.485
			BF	0.543	0.468
		Mean of E%D	A	1.229	-0.779
			BF	1.992	2.756

A: Actual propeller, BF: Body force model

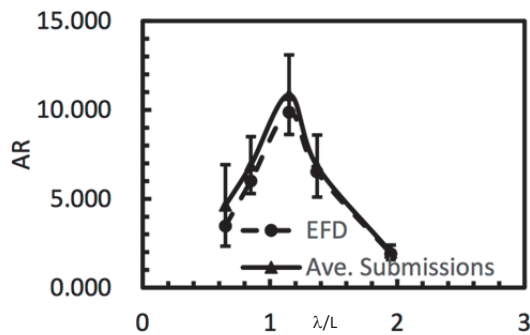


図 4.2.1 KCS の波浪中抵抗増加 ($Fr=0.26$) (破線：実験値，各実線：各参加者の結果)

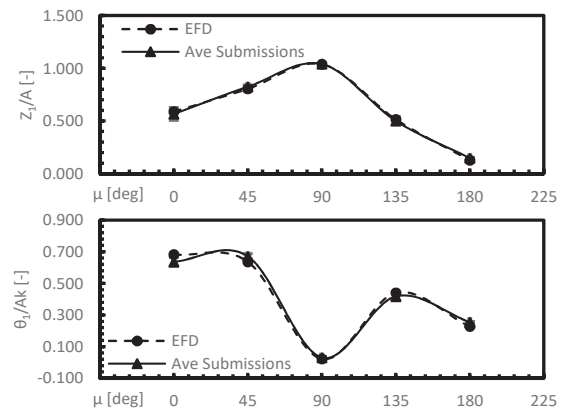


図 4.2.2 規則波中を航行する ONRT の縦運動の 1 次振幅 (上：heave，下：pitch) (破線：実験値，実線：参加者の平均値)

4.3 CFD 技術開発の展望

ワークショップでは、各参加者に対して NS ソルバーの手法や計算条件等について詳細にアンケートをとった。使用している NS ソルバーでは、オープンソースのコードである OpenFOAM が 3 船型全てについて submission されており、JBC では商用コード・in house コード・OpenFOAM がほぼ同じ割合であった。

計算手法に関しては、低レイノルズ数のケースについて、LES (Large Eddy Simulation) の submission があった。他、自由表面は、VoF あるいは Level-set による Capturing method (界面捕獲法) がほとんどであった。乱流モデルについては、抵抗計算については 2 方程式で十分であるとの見解が得られた。

格子数に関しては、前回のワークショップでは、300 万セル程度で抵抗計算において 4% 程度の精度内に各結果が収まっていたが、今回の JBC の抵抗計算では、1000 万セル程度まで細かくしないと、4% の精度内に各結果が収まらないことが示された。これは、JBC が前回のワークショップで用いた KVLCC2 に比べて船尾肥大度が大きいこと、船尾に強い縦渦 (3 次元剥離渦) が発生する複雑な流れになったことが一因と考えられる。今後も対象流れの複雑さに伴い、計算は大規模になる可能性があり、効率的な計算手法の開発や、精度向上の検証等が行われていくものと思われる。

各参加者の結果は、Proceedings Vol. II 及び Vol. III にまとめられている¹⁵⁾。ワークショップでの議論内容を踏まえた Proceedings Vol. I が現在ワークショップの Steering Committee により編纂中である。次回のワークショップは 2020 年頃に開催される予定である。

5. あとがき

海上技術安全研究所は、2004 年から当所で開発した CFD ソフトウェアを国内造船所等に対して有償で提供してきた。引き続き 2017 年 7 月からは、実海域における船舶の省エネ性能の推定を目的とした次世代 CFD ソフトウェアとして、現在開発を進めている重合格子法に対応したプログラムの提供を開始した。本論では、次世代 CFD ソフトウェアについて概要及び結果を報告した。

今後も日本の造船関連分野におけるニーズを把握して、船舶用 CFD の研究開発を継続し、ソフトウェアの外部提供によって国内産業競争力に維持・向上に貢献する所存である。

参考文献

- 1) 田原裕介, 金井亮浩, 新郷将司, “重合格子技術と非線形最適化理論を導入した CFD 援用最適省エネルギーデバイス設計法”, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第 16 号(2013), 2013S-GS4-16.
- 2) 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, Issue 9, 2016, doi: 10.17265/2159-5291/2016.09.001, pp. 339-347
- 3) Kodama, Y., “Generation of 2D, 3D and Surface Grids Using the Implicit Geometrical Method”, AIAA 33rd Aerospace Science Meetings, AIAA95-0218(1995).
- 4) 大橋 訓英, 日野 孝則, 平田 信行, 小林 寛, “重合格子対応構造格子 NS ソルバーの開発”, 第 28 回数値流体力学シンポジウム講演集(2014), F06-2.
- 5) H. Kobayashi, K. Ohashi and N. Hirata, Flow Simulations Using Overset Grid Assembler UP GRID and Navier-Stokes Solver NAGISA, Proc. of “Tokyo 2015 A Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics”, 2015
- 6) T.Hino, et. al., Hull Form Design and Flow Measurements of a Bulk Carrier with an Energy-Saving Device for CFD Validations, Proceedings of the 13th International Symposium on PRACTical Design of Ships and Other Floating Structures, PRADS2016, 2016
- 7) 荒木元輝, 大橋訓英, 平田信行, 省エネ付加物に関する形状最適化とその尺度影響に関する一考察, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第 20 号(2015), 2015S-GS15-1.
- 8) 荒木元輝, 大橋訓英, 平田信行, 重合格子法を用いた船舶省エネ付加物に関するパラメトリック・スタディ, 第 27 回数値流体力学シンポジウム講演集(2013), A08-1
- 9) Ohashi, K., Sakamoto, N. and Hino, T., “Numerical Simulation of Flows around KVLCC2 Hull Form with Ship Motions in Regular Waves”, Proc. V Intern. Conf. on Computational Methods in Marine Engineering, MARINE 2013(2013), pp.172.1-172.12.
- 10) M. Araki, K. Ohashi and N. Hirata, KVLCC2 SIMULATIONS WITH OVERSET GRID METHOD, Proc. of SIMMAN 2014, 2014
- 11) 小林寛, 児玉良明, 平田信行, 動的重合格子法を用いたプロペラ周りの粘性流れ計算, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第 18 号(2014), 014S-GS2-8.
- 12) Hiroshi Kobayashi, Kunihide Ohashi, Flow simulation around a rotating propeller with dynamic overset grid approach, Proceedings of the 7th International Conference on Computational Methods, 2016
- 13) L. Larsson et. al., Numerical Ship Hydrodynamics / An assessment of the Gothenburg 2010 workshop, 2014
- 14) Proceedings of Tokyo 2015 a Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics, Vol. II & Vol. III, 2015
- 15) Tokyo 2015 - Program(presentations), <http://www.t2015.nmri.go.jp/program.html>