

船舶の総合性能評価のための次世代 CFD 技術の高度化に関する研究

大橋 訓英*, 小林 寛*

Study on Next-Generation CFD Development for Evaluation of Ship Overall Performances

by

OHASHI Kunihide*, KOBAYASHI Hiroshi*

Abstract

The new overset grids system and flow solver which can evaluate ship overall performances are developed. The governing equations are incompressible Navier-Stokes and continuity equations, and the artificial compressibility approach is utilized to couple the pressure and velocities. The full multigrid method which is adopted to the overset grids method is developed to get the fast convergence, and the physical models which include the free surface, turbulence models and body motions based on the prescribed motion and motion equations are employed. The flow solver is parallelized by the shared memory type with OpenMP and distributed memory type with the message passing interface including the hybrid parallelization on the both methods. The roughness model on the turbulence model show the effectiveness on the estimation of the wake at the full scale condition. The new overset grids method which can cope with complex geometries including the hybrid energy saving devices and actual propeller shape is developed. The novel grid modification method is employed to realize the actual complex geometries. The numerical method at the damaged ship condition including the ship motions and incoming waves is constructed based on the new overset grids system. The flows inside the compartments of ship hull at the damaged condition are also computed, and the new system which can adopt to the actual ship accident is constructed. The integrated system which includes the present new methods is released to the related industrial fields, and the system is updated to respond the requests including the usability at the actual design stage. The outcome of the present new development is summarized in this report with using the references of the published articles.

* 流体性能評価系

原稿受付 令和7年 1月21日

審査日 令和7年 3月 5日

目 次

1. はじめに.....	46
2. 平水中での性能計算手法の高機能化・高速化.....	46
2.1 移動格子法に基づく重合格子対応ソルバーの開発.....	46
2.2 マルチタイムステップ及び領域分割法と OpenMP のハイブリッド並列化による高速化.....	47
2.3 実船スケールにおける性能推定.....	48
3. 実形状プロペラを用いたハイブリッド型省エネデバイスの性能計算手法の開発および二相流への拡張.....	49
3.1 ハイブリッド型省エネデバイスの性能計算手法の開発.....	49
3.2 実形状プロペラ格子生成法.....	52
3.3 二相流への拡張.....	55
4. 荒天下における大振幅動揺計算手法の開発.....	56
4.1 横波中の損傷船の動揺計算.....	56
4.2 国内フェリー海難事故を対象とした損傷・浸水を伴う動揺計算の開発.....	59
5. 船体や省エネ付加物等の形状最適化システムの構築.....	62
6. ハイブリッド計算手法の新規開発.....	62
7. おわりに.....	64
謝 辞.....	64
References.....	64

1. はじめに

環境規制の強化等により、船型を代替するまでのターンアラウンドが短くなるとともに、実海域性能推定等の多様化も進んでいる。船型設計では、基本計画に基づく船型要素と省エネ付加物について抵抗・推進性能から耐航・操縦性能に至る総合的な流体力学性能をバランスさせる必要があり、形状変更と性能評価を繰り返すことになる。近年の数値流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)の分野での技術の発展に伴い、船型設計における CFD の適用も高機能化・高効率なものへと移行しつつある。当所における CFD 技術においても高機能化・高速化を図るため、実海域での推進性能、操縦性能、耐航・復原性能等の幅広い現象に対して適用できる手法の開発、荒天下における船体運動等の計算手法の開発、二相流への拡張とキャビテーション計算手法の開発、重合格子に基づくハイブリッド計算手法等の開発を行った。以降で、これらの手法等の概要を述べる。各手法の詳細等については各章の既発表の参考文献を参照されたい。

2. 平水中での性能計算手法の高機能化・高速化

2.1 移動格子法に基づく重合格子対応ソルバーの開発

重合格子手法に対応したデータ構造を持つベースソルバーとともに自由表面モデル、乱流モデル、運動モデル等を開発した。ソルバー及び各種数値モデルの詳細は文献^{1),2)}を参照されたい。

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、擬似圧縮性により圧力と流場のカップリングを行う。実時間と擬似時間を導入し、非定常計算を行う。支配方程式の非粘性項には Flux-Difference-Splitting³⁾に基づく 3 次風上差分(MUSCL type)、粘性項には中心差分を用いる。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する。

短時間で収束解を得るために重合格子に対応するマルチグリッド手法¹⁾を開発し、収束加速を行った。重合格子の補間関係を維持しつつ、細かい格子で得られた解を粗い格子に変換し、粗い格子で時間ステップを大きくした上で修正方程式を解き、細かい格子上の解に修正量を加える処理を行うことで計算時間を短縮した¹⁾。

重合格子手法への対応として、複数の格子ブロックのデータ処理、格子ブロック間での変数の補間が必要となるが、格子ブロックのデータ構造には Fortran の構造体を適用した。格子及び流場データの入出力にはマルチブロックの CFG General Notation System (CGNS)形式⁴⁾を使用し、CGNS 形式に対応したソフトウェアなどと前後処理なしでのファイルの使用を可能とした。

共有メモリ型である OpenMP により計算を高速化した。構造格子における処理のループに OpenMP のディレクティブを記述し、コンパイルすることで並列化した実行ファイルを生成できる。図 2.1 に OpenMP による並列化率の一例を示す¹⁾。理想的な並列化率(緑線)と比較して、おおよそ 6 割の並列化率となっている。

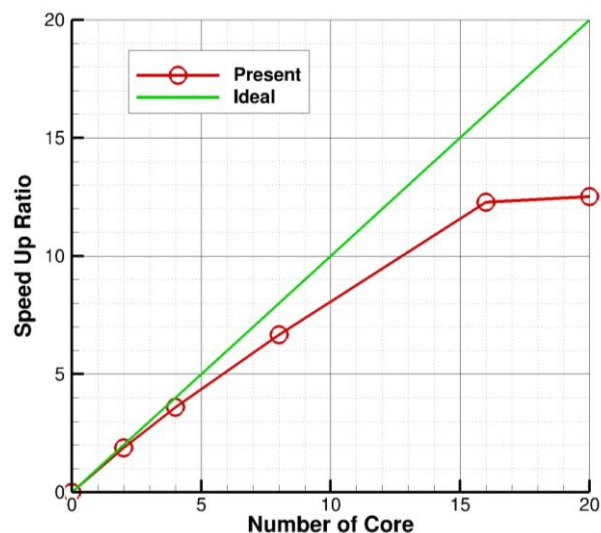


図 2.1 OpenMP による高速化率の一例¹⁾

自由表面モデルとして単相のレベルセット法⁵⁾を適用し、スカラー関数であるレベルセット関数により自由表面を捕獲する手法を導入した。レイノルズ平均ナビエーストックス方程式に現れるレイノルズ応力項には 1 方程式モデルの Spalart-Allmaras モデル⁶⁾、線形の 2 方程式モデルである $k-\omega$ Baseline 及び Shear Stress Transform モデル⁷⁾、代数型応力モデルである Explicit Algebraic Stress Model (EASM)モデル⁸⁾を適用した。2 方程式モデルでは壁関数モデル⁹⁾も適用した。推進器影響はポテンシャル理論に基づく翼数を無限大とした簡易プロペラモデルによる体積力¹⁰⁾で表した。

船体運動のモードとして姿勢変化のトリムとシンケージだけを効率良く計算できるモード、操縦性能に用いられる斜航・旋回モードと Planar Motion Mechanism (PMM)モード、6 自由度の運動方程式に基づくモードがあり、移動格子法^{1),11),12)}により船体運動を考慮している。それぞれ、または運動を組み合わせた船体運動付きの計算を行うこともできる。船体運動付きでの計算例については文献¹³⁾⁻²¹⁾を参照されたい。

2.2 マルチタイムステップ及び領域分割法と OpenMP のハイブリッド並列化による高速化

マルチグリッド法による高速化や OpenMP に基づく共有メモリ型の並列化に加え、重合格子の計算格子ごとに時間ステップを定めるマルチタイムステップを導入し、計算時間の短縮を図った²²⁾。計算対象は自由表面影響下、船後で実形状のプロペラが動的重合格子手法で回転する状態とし^{23),24)}、プロペラの時間刻みと船体の時間刻みをそれぞれ設定し、船体の時間刻みはプロペラの時間刻みの 50 倍となっている。マルチグリッド手法の粗い格子の解を初期解として計算時間を短縮でき、重合格子にも対応したフルマルチグリッド手法¹⁾も併用し、マルチタイムステップの効果を確認した。詳細は文献²²⁾を参照として省くが、マルチタイムステップの導入により 17%程度、

計算時間を短縮できること、重合格子に対応するフルマルチグリッド手法と併用することで計算時間を約半分にできることを示した²²⁾。

さらに重合格子における重合情報やマルチグリッド手法を考慮した領域分割及び Message Passing Interface (MPI)に基づく分散メモリ型並列手法と OpenMP による共有メモリ型並列手法を組み合わせたハイブリッド並列計算手法を開発した^{25),26)}。領域分割の際にはマルチグリッドのレベルを考慮した物理量を授受するオーバーラップ領域を設定し、重合格子のレセプターセルとオーバーラップ領域が重複する場合はオーバーラップ領域に設定することで物理量の過剰な重ね合わせを回避している。重合格子のドナーセルとオーバーラップ領域が重複する場合もドナーセルと設定しないことで重ね合わせを回避する。重合格子を構成する計算格子の格子数は大きく異なるため、全格子の計算負荷もしくは送信量に関わる総数と各格子での総数から領域分割数を設定し、格子数が多い格子に領域分割が割り当てられる。物理量は送信及び受信バッファに集めて通信を行い、MPI におけるノンブロッキング通信と同期待ち関数を使用した。分散メモリの各ランク(分割後の計算格子)においても共有メモリ型の OpenMP により並列化することでハイブリッド手法を構築している。図 2.3 に開発したハイブリッド手法を含む計算時間の比較²⁵⁾を示す。図中、Flat MPI の記載は分散メモリ型のみでの並列化による計算時間、MPI と OMP の記載はハイブリッド手法による計算時間であり、赤色のグラフは MPI の通信に要する時間、緑色のグラフは流場を解くのに必要な時間を示している。分散メモリ型のみ(Flat MPI)の場合と比較して、OpenMP による並列化を含むハイブリッド手法は最大約 13 倍(Flat MPI6 と MPI6OMP24 の比較)、高速化しており、通信時間と流場を解くのに必要な時間を短縮することができている。

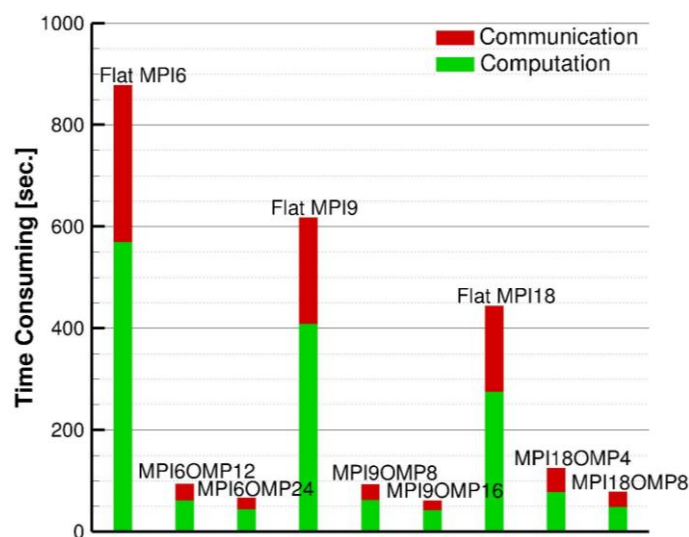
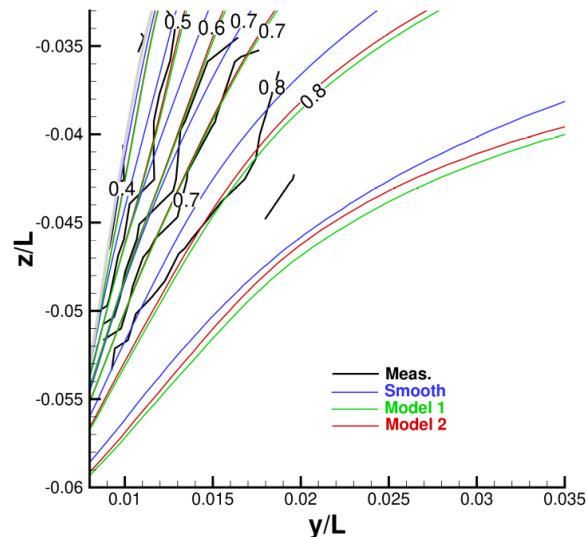


図 2.2 ハイブリッド手法を含む計算時間の比較²⁵⁾

2.3 実船スケールにおける性能推定

実船性能の推定において、物体表面の塗膜や汚損による粗度の影響は大きく、粗度影響を考慮できる粗度モデルを導入した²⁷⁾。2 方程式の乱流モデルにおいて、粘性低層まで解像する低レイノルズ数型と壁法則に基づく壁関数型の粗度モデルを導入した。図 2.4 に船尾での粗度モデル(図中 Model1, Model2)と粗度モデルなし(図中 Smooth), 実船流場計測結果(図中 Meas.)との比較を示す²⁷⁾。粗度モデルによる結果は粗度モデルなしと比較して、実船流場計測結果と良い一致を示すことが分かった。

図 2.3 粗度モデルによる実船流場の推定²⁷⁾

開発した粗度モデルについては付加物付きの実船伴流の推定にも適用され、粗度影響を考慮することで推定精度が向上することが示されており、あわせて実船スケール計算において考慮すると良い要素が簡潔にまとめられている²⁸⁾。この他、実船スケールでの操縦性能として、実船の旋回及びZ操舵のシミュレーションと検証も行っている¹⁵⁾。

3. 実形状プロペラを用いたハイブリッド型省エネデバイスの性能計算手法の開発および二相流への拡張

実形状プロペラデータを用いたハイブリッド型省エネデバイスの性能計算の実用化に向けて、複雑な省エネデバイスの形状再現等を可能にする格子生成手法や高度な境界面処理法等及び各種格子トポロジーに対応する重合処理手法を開発した。また、ソルバーを二相流に対応するよう拡張し、界面捕獲に優れた Volume of Fluid (VOF) モデルの導入とキャビテーション計算の検討を行った。

3.1 ハイブリッド型省エネデバイスの性能計算手法の開発

省エネデバイスの形状や取り付け方は多岐にわたり、個々の形状や取り付け方を極力反映した状態に対応する数値計算手法が求められている。特に、省エネデバイスの一部分が船体や舵に接合しているような場合は、従前の手法では重合格子を作成することが難しいため CFD 計算ができなかったが、新しく開発した格子生成手法により、CFD 計算が可能となった。当該手法について概要を述べる。

3.1.1 対象とする省エネデバイス

計算例としてタンカー船型のプロペラ前方に取り付けられたダクトと、舵前縁に取り付けられた舵フィンを対象とする（図 3.1）。

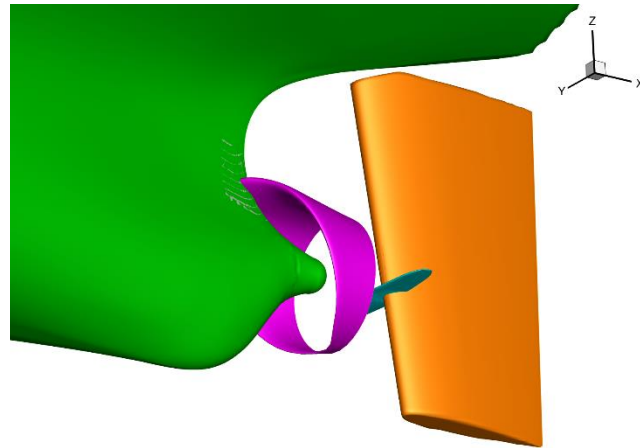


図 3.1 プロペラ前方に取り付けられたダクト及び舵前縁に取り付けられた舵フィン

3.1.2 接合面の処理とトポロジー

図 3.1 のダクトや舵フィンのように、一部が船体や舵に取り付けられている場合には、構造格子の境界面の全てが物体表面上の接合面とはならず、一部分だけが接合面となる。さらに、接合面の端部と格子線が一致する必要もあるため、新たな接合処理の手法が必要になる。接合処理の手法開発に際しては、ダクトやフィンなどの形状も再現できるように適切な構造格子のトポロジーの導入も必要である。

これを受け、H 形のトポロジーを新規に導入した。ダクトに対する H 形トポロジー `duct_H` と、フィンに対する H 形トポロジー `fin_H` を図 3.2 と 3.3 に示す。H 形トポロジーは、翼の内側と外側（上側と下側）を別々の格子とすることで、それぞれ別個に接合処理を行うことができる。

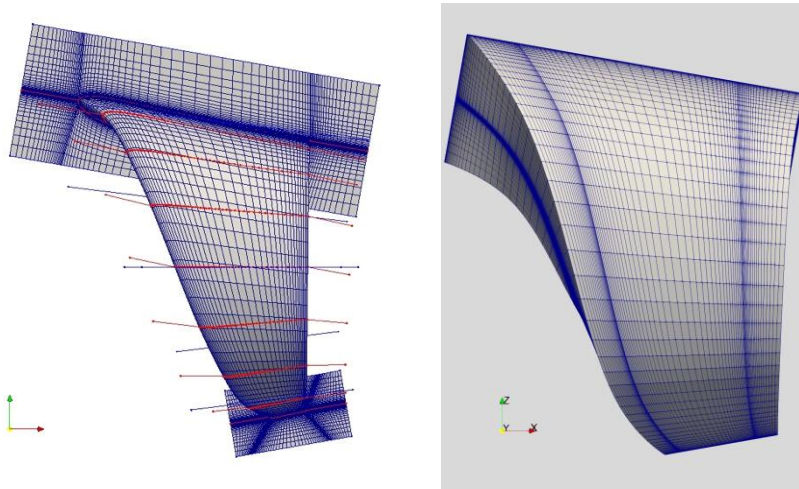


図 3.2 duct_H トポロジー例

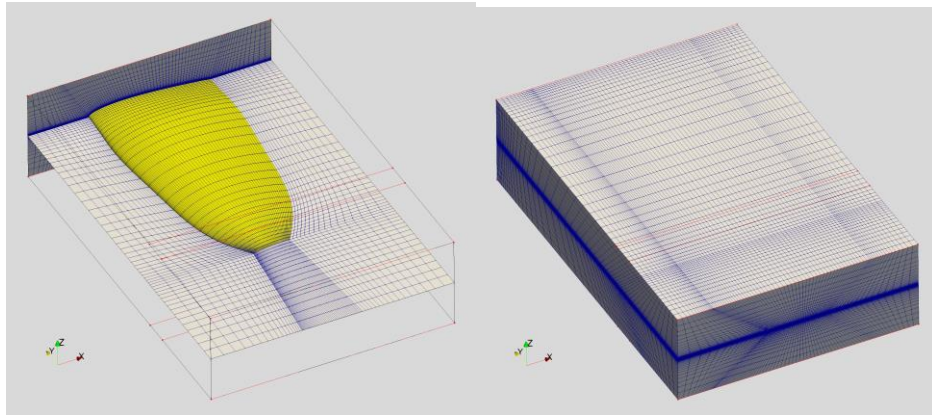


図 3.3 fin_H トポロジー例

図 3.4 に duct_H トポロジーの $i = 1$ 面を船体に取り付けた例を示す。ダクトの内側と外側をそれぞれ接合している。接合に際しては、コード方向インデックス (j 方向) の適切な場所で、格子線を船体のプロファイルラインに一致させる必要がある。図の例では、ダクト内外の格子線を船体のプロファイルラインに一致させている。それに伴い、船体表面と接合する範囲は船体表面へ投影し、その他の流体中の境界面は反対舷の格子点と 1 対 1 対応するように処理した。フィンについても同様の処理を用いて舵前縁部分に取り付けられる。これらの格子をもとに CFD 計算を行った結果を図 3.5 に示す。複数の省エネデバイスで構成されるハイブリッド型省エネデバイスについて、形状及び取り付け位置を忠実に再現した計算が可能となった。

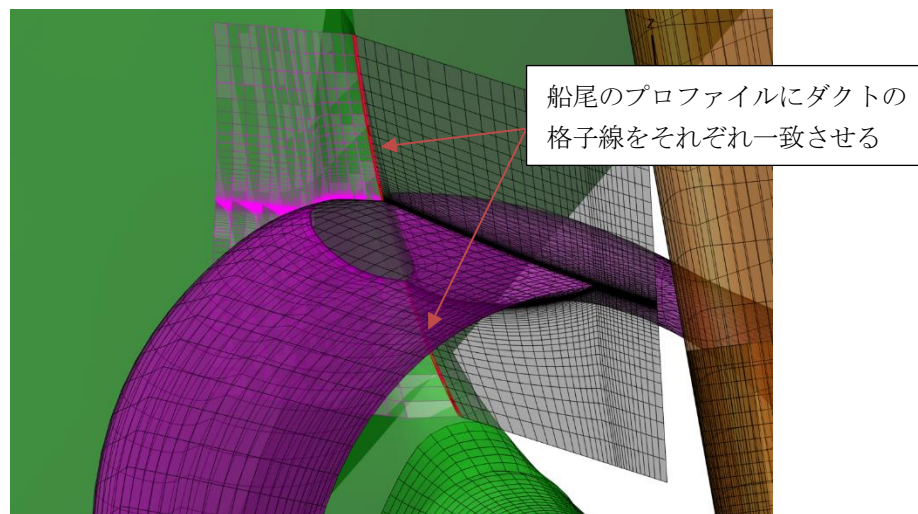


図 3.4 duct_H トポロジーによる物体交差面の再現

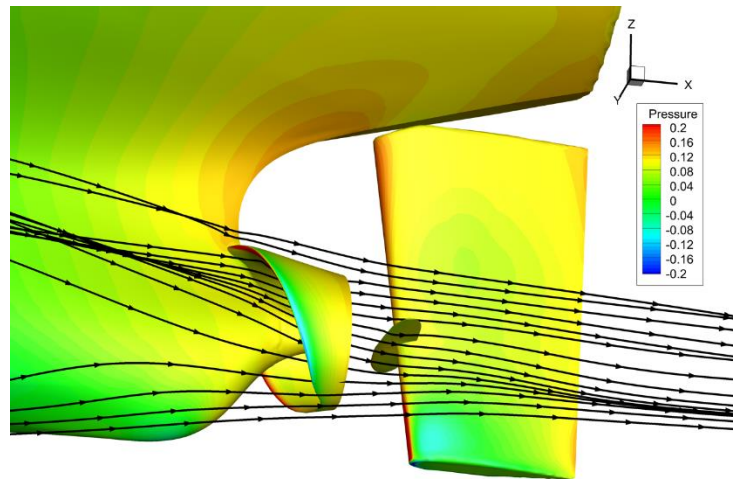


図 3.5 物体表面圧力分布とハイブリッド型省エネデバイス付近の流線可視化図

3.2 実形状プロペラ格子生成法

船舶の自航状態の計算においてはプロペラ推力を体積力として扱う手法が有用であり、広く用いられているが、プロペラ近傍の局所的な流場を評価したい場合などでは、プロペラそのものの計算格子を作成して回転させて流場計算を行う必要がある。開発したプロペラブレード周りの重合格子生成手法を示す。

3.2.1 プロペラブレードの特徴

プロペラブレードは、ボスに取り付けられたフィン形状の物体である。フィン形状については、従前開発されている重合格子手法で **fin** トポロジー(図 3.6)として格子生成が可能である。スパン方向(i 方向)の開始位置($i = 1$)が開口部であり ($i = 1$ 面が端面)、翼先端(i の最大値)が合わせ面となっている。

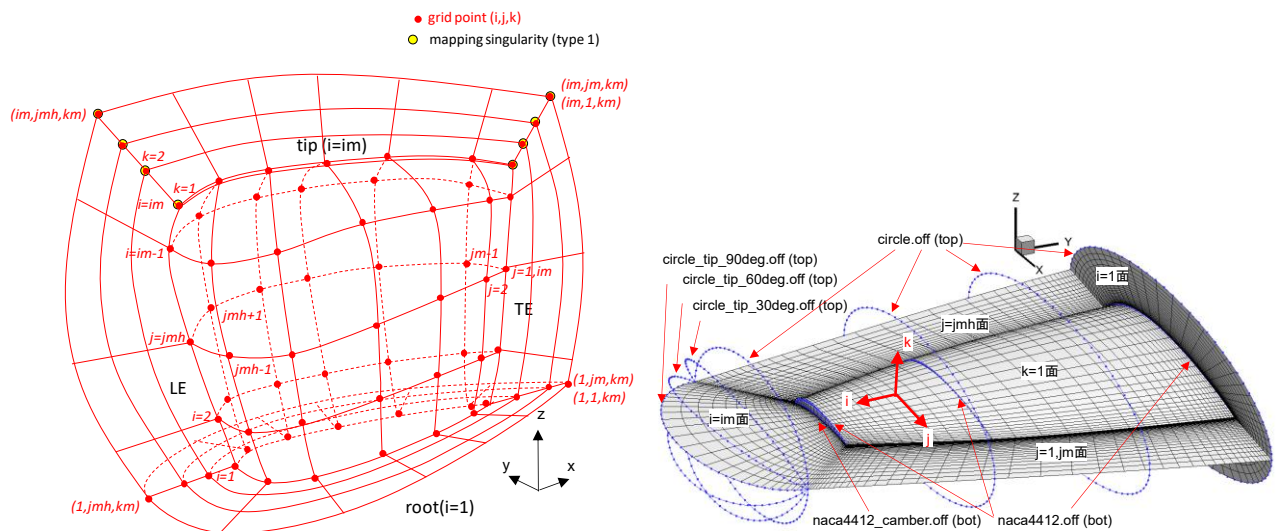


図 3.6 **fin** トポロジー例(左図)及び **fin** 格子例(右図)

fin トポロジー形状の格子を、IGES などのデータから生成する場合は、異なるスパン位置での翼断面オフセットデータを切り出して、それを元に表面格子を生成する。一般的なフィンでは、図 3.7 のように切り出し面を平面として切り出す(図中水色線)ことができ、翼前縁・後縁位置の特定も比較的容易である。

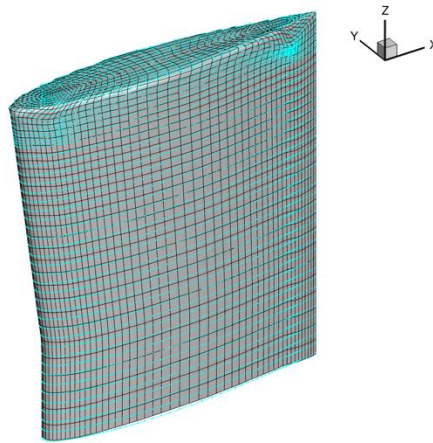


図 3.7 フィントポロジにおけるオフセットデータ生成例

一方、プロペラブレードでは、半径位置によってひねりやコード長が異なるため、それに対応した手法が必要となる。プロペラ形状（図 3.8）でのオフセットデータの切り出し手法を以下に説明する。

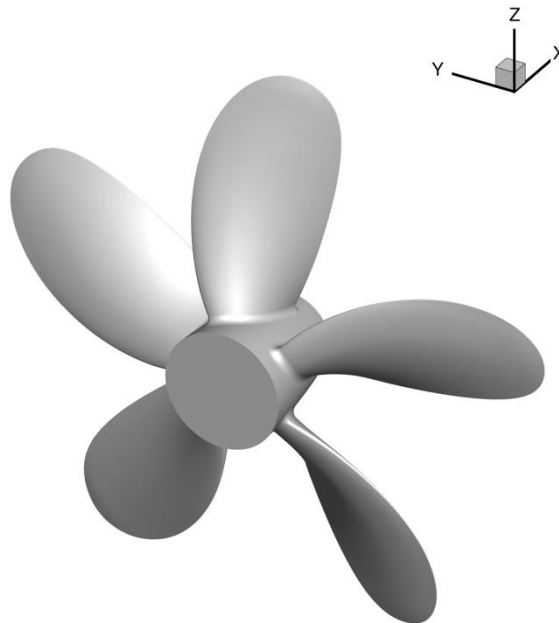


図 3.8 プロペラ形状例

3.2.2 プロペラブレードのオフセットデータ切り出し

図 3.9 に示すように、ボス中心の位置に点 P_c を配置し、シャフトを x 軸とする。 x 軸を中心軸とする同軸の円筒面を考える。各円筒面上で x 軸に並行な探索直線を置き、翼面形状との交点を求める。交点が2価となる場合は、適宜正面側の点と背面側の点を判別する。前縁と後縁については、近傍の背面側/正面側の2点の midpoint からキャンバー面の方と考えられる方向への円筒面上の線を求め、翼面形状との交点を求める等で抽出する。切り出したオフセットデータの例を図 3.10 に示す。

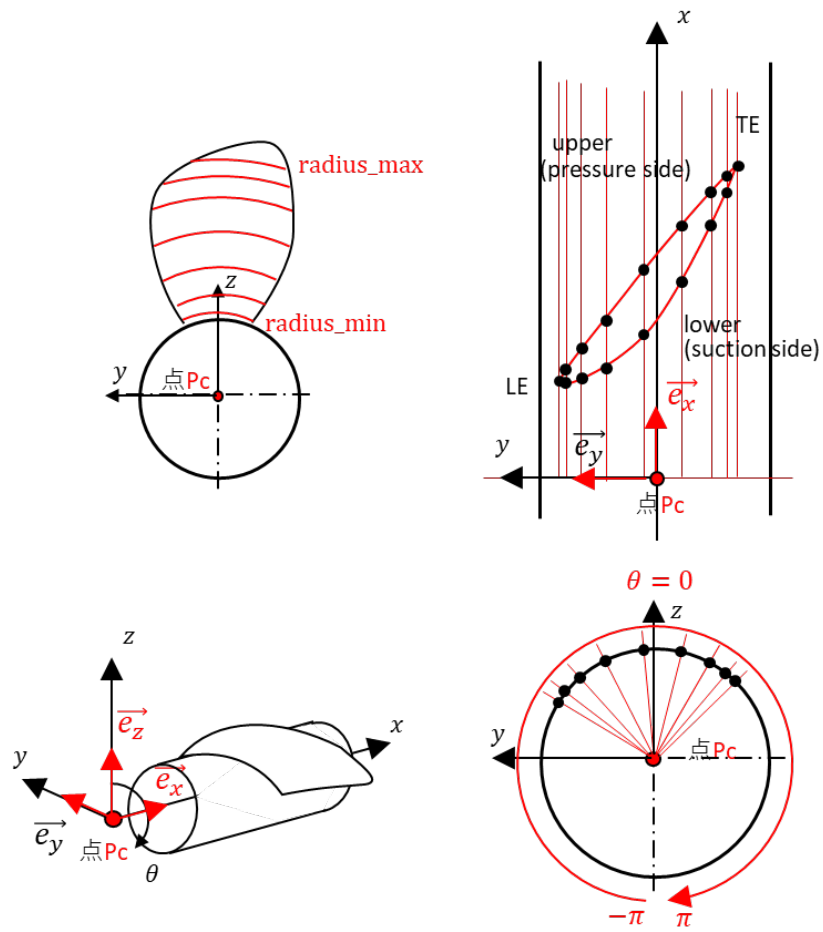


図 3.9 プロペラブレードにおけるオフセットデータの抽出軸

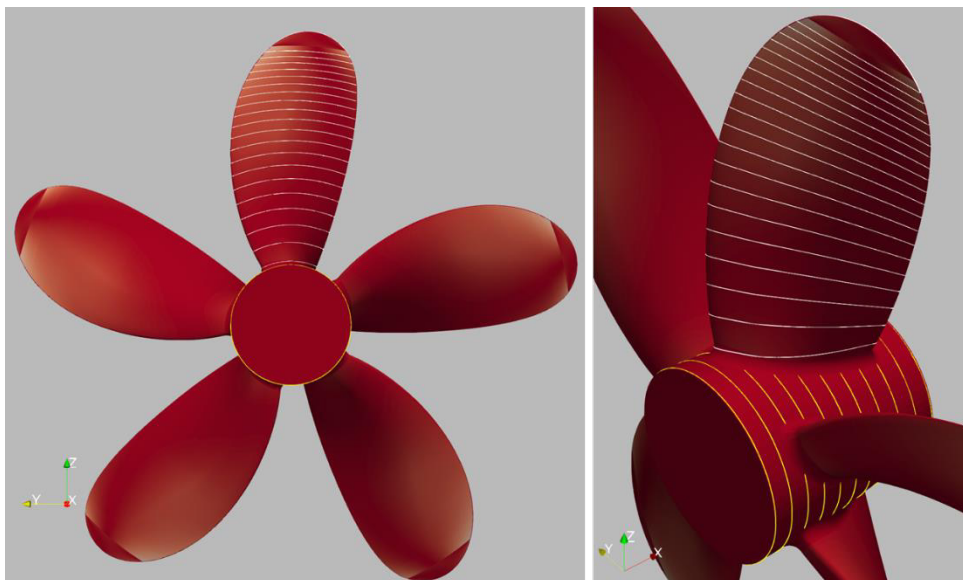


図 3.10 プロペラブレード上のオフセットデータ (白線)

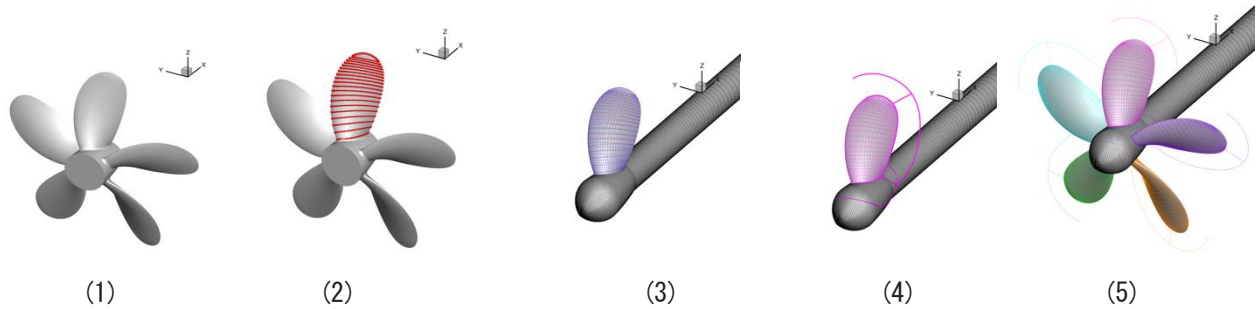


図 3.11 プロペラ重合格子の生成手順

3.2.3 プロペラブレード周りの格子生成

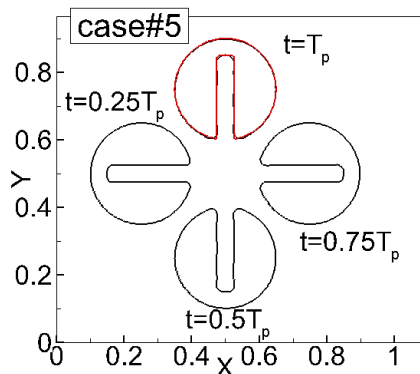
プロペラ周りの格子生成は次の手順で行う。（以下の手順番号(1)～(5)は、図 3.11 の各番号と対応する。）

- (1) 元となる形状の IGES データを用意する
- (2) 12 時の位置のブレードについてオフセットデータ生成(図中赤線)
- (3) オフセットデータをもとに格子生成プログラムの押し出し格子生成機能で空間格子生成（図ではプロペラ単独性能試験におけるシャフト周りでの生成例）
- (4) 翼根部をスパン方向に局所細分化する
- (5) 他のブレードについても回転後(4)と同様
- (6) 全ての格子を使って重合処理(重合格子生成)を行う

開発した重合格子生成法を基に実形状プロペラ計算を行った^{23),24)}。船後でプロペラが回転する状態を動的重合格子により実現し、プロペラ後流の実験結果との比較等を通して適用性を示した^{23),24)}。

3.3 二相流への拡張

VOF モデルの中から界面捕獲に優れた THINC 法を選定し、VOF モデルの基礎検証で用いられる、切り欠きが入った円盤を回転運動させるケースで確認を行った²⁹⁾。図 3.12 に初期状態(赤線)と円盤を一周させた場合の円盤形状(黒線)の比較を示す。界面捕獲精度が悪いモデルでは切り欠き円盤の初期体積や形状を維持できないが、導入した THINC 法により初期体積や形状を良い精度で維持できることを確認した。

図 3.12 THINC 法による形状維持の検討結果²⁹⁾

次に、THINC 法による VOF モデルに基づきベースソルバーを二相流れに拡張するとともに、キャビテーションモデルとして Schnerr-Sauer モデルを導入し、2 次元翼周り流れにおけるキャビテーション計算の基礎検討を行った³⁰⁾。図 3.13 に 2 次元翼周りの体積率分布を示す。キャビテーションの発生により、体積率(図中 Volume Fraction の値)が水(1.0)から大きく変動していることが分かる。

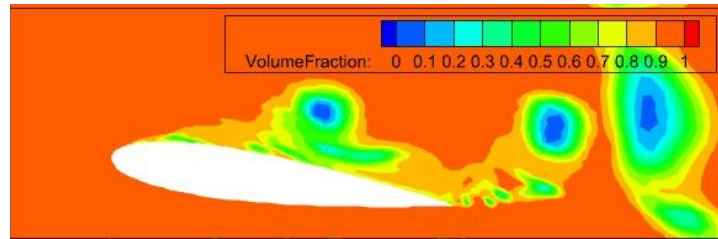


図 3.13 2次元翼周り流れにおけるキャビテーション計算の検討結果³⁰⁾

4. 荒天下における大振幅動揺計算手法の開発

船体の動揺問題を扱う場合は、積荷の移動や事故時に浸水した水が考慮されないことが多かったが、液体の積荷や自由水などが存在する場合等では船体内における流体運動を考慮する必要がある。特に船体が損傷して区画内に浸水があるようなケースでは、浸水した水の影響で船体運動が大きく変化する。航行の安全性にも大きく関わるため、過去に The International Towing Tank Conference (ITTC, 国際試験水槽会議)においても、数値計算手法のベンチマークが行われている^{31),32)}。本研究では、この ITTC のベンチマークを踏まえて行われた水槽試験・数値計算を参照し、船側を損傷して船倉内が浸水した状態の船の横波中での動揺計算手法の開発を行い、さらに実際に発生した国内フェリー海難事故を踏まえた損傷、浸水を再現する計算を行った。これらについて概要を以下に述べる。

4.1 横波中の損傷船の動揺計算

4.1.1 対象船型

ITTC のベンチマーク計算で用いられた、ストラスクライド大学の Ship Safety Research Center(SSRC)設計の客船船型^{31),32),33)}を対象とした。模型船の主要目を表 4.1 に示す。

表 4.1 主要目

载荷状態	満載
船長 L_{PP} [m]	3.00
幅 B [m]	0.43
喫水 d [m]	0.10
排水量 Δ [kg]	97.9
GM [m]	0.029
KM [m]	0.227
重心位置(舵込み, ミッドシップより後方を正) x_G/L_{pp}	0.01514
KB [m]	0.0495
KG [m]	0.0199
x軸周り慣動半径 k_{xx} [m]	0.01794
y軸周り慣動半径 k_{yy} [m]	0.75

4.1.2 計算格子

計算領域全体をカバーする直方体格子を配置し、その中に船体格子を配置した。図 4.1 に計算格子の概観図を示す。模型試験に相当する実際のスケールで格子を生成した。船首尾方向の船尾向きを正としてx軸を、左舷から右舷方向にy軸を、鉛直上方にz軸をとり、ミッドシップで静止水面位置を原点とする。計算領域は $-6.0[m] \leq x \leq 9.0[m]$, $-4.725[m] \leq y \leq 7.725[m]$, $-6.0[m] \leq z \leq 0.42[m]$ である。対象は開孔部のない非損傷時と、直方体形状の船倉が2つ並んで開孔部でつながっていて船倉内の流体が移動できる損傷状態であり、各状態での計算格子のセル数を表 4.2 に示す。船倉の1つは船側に開いた開孔部で船外とつながっており、船体周りと船倉内で流体の

出入りが発生する．図4.2に船倉部付近の計算格子を示す．船倉格子（Cargo1, Cargo2：青色及び黄色）2つ，開孔部の格子（Hole1, Hole2：マゼンタ）2つ，船体格子（Hull：緑色）1つ，計算領域の直方体格子（Rectangular）1つの計6つの計算格子を重合させている．通常，船体内部は物体内部として扱い，他の計算格子のセルが船体内部に所在する場合は流体計算から除外するが，船倉部及び開孔部の格子も浸水した流体を計算する必要があるため，船体内部であっても流体計算を行うセルとして扱えるように重合格子手法を拡張した．

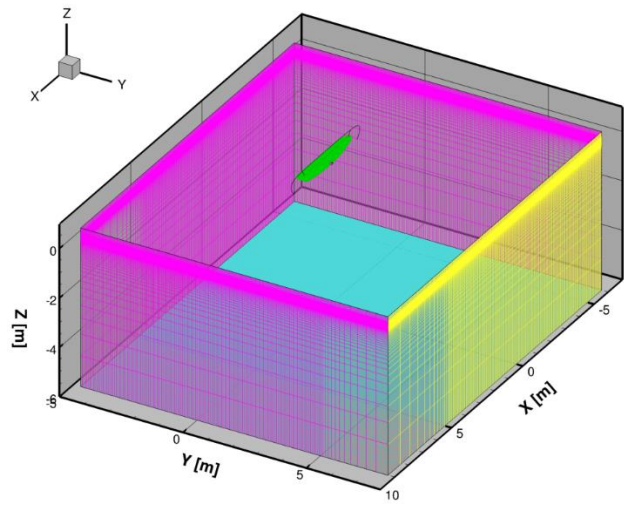


図 4.1 計算格子概観図

表 4.2 計算格子セル数

計算格子	セル数	
	非損傷時	損傷時
Hole1	---	43,008
Hole2	---	64,512
Cargo1	---	196,608
Cargo2	---	196,608
Hull	2,580,480	2,580,480
Rectangular	2,928,640	2,928,640
総数	5,509,120	6,009,856

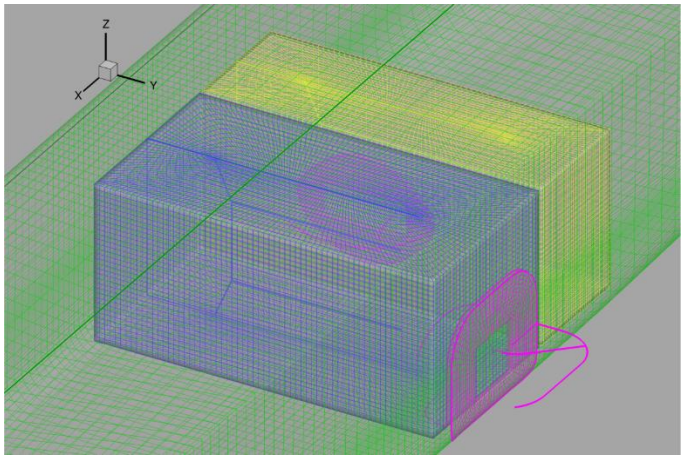


図 4.2 損傷状態における船倉部及び開孔部の計算格子

4.1.3 計算条件

文献^{31),32),33)}にある模型試験と同状態を設定し、入射波については文献²⁾の領域造波モデルを使用し、直方体格子の左舷側境界面付近の計算領域で造波している。入射波の波長船長比は $\lambda/L_{PP} = 1.17$ 、波高波長比は $H/\lambda = 1/60$ である。船の前進速度なしの状態 で非定常計算を実施し、時間刻みは $\Delta t = 0.03$ [秒]に設定した。船体運動の自由度は、過去の文献^{33),34),35),36)}の実験では6自由度で可能な限りサージ、スウェイとヨーの運動がキャンセルされるようにワイヤーとスプリングで船体を係留しているが、本計算では簡略化し、船体運動の自由度はヒープ、ロール、ピッチの3自由度とした。乱流モデルにはEASMモデル⁸⁾を適用し、物体表面条件には壁関数を採用した。船倉部及び開孔部が無い船体みの場合(非損傷時, intact case)と、船倉部及び開孔部がある損傷時(damaged case)の2ケースを設定している。

4.1.4 計算結果

図4.3は、それぞれ非損傷時と損傷時における波高と運動の時刻歴である。横軸の時間範囲は $12.0[s] \leq t \leq 24.0[s]$ である。非損傷時では、波高(图中マゼンタ線)とヒープ運動(图中青線)の履歴がほぼ一致している。図4.4は、計算開始後 $t = 12.0$ 秒における非損傷時と損傷時の船体周りの自由表面の可視化図で、コンターは波高によるものである。ロール角が両ケースで異なっていることが分かる。

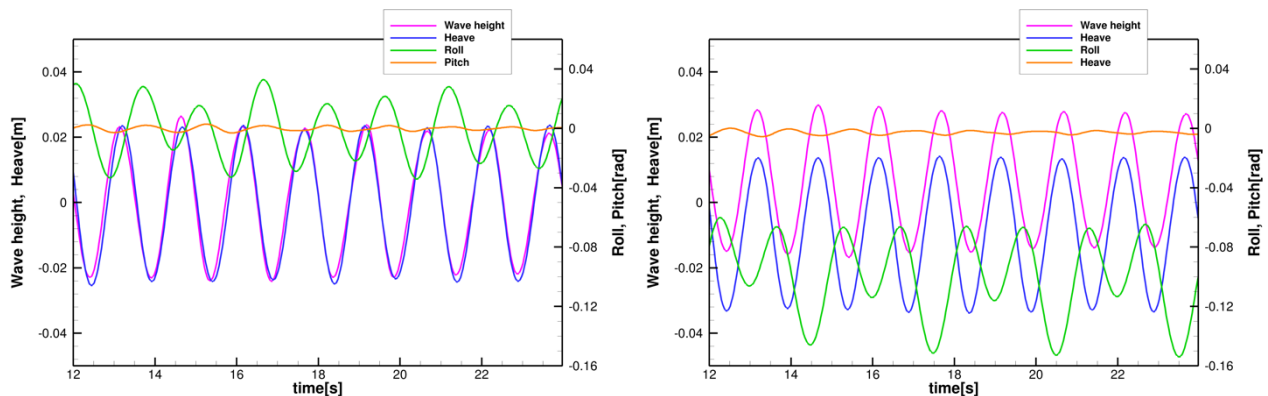


図 4.3 非損傷時(左図)と損傷時(右図)における入射波と船体運動の時刻歴

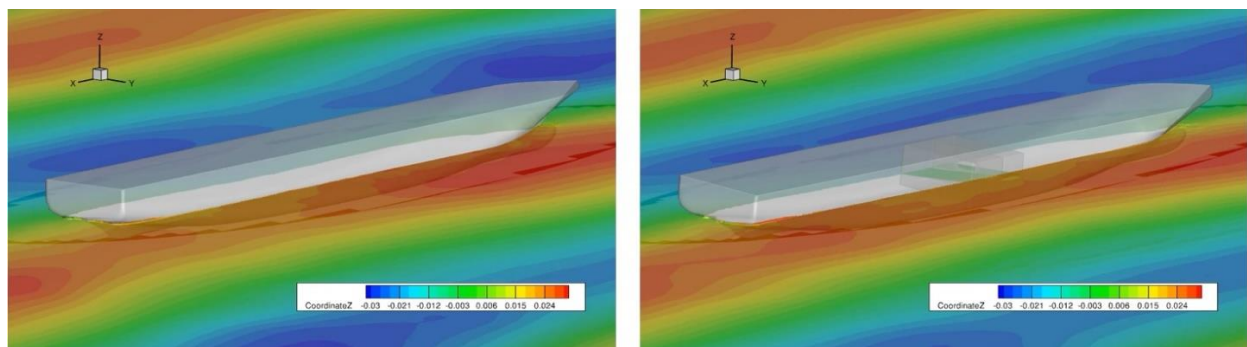


図 4.4 非損傷時(左図)と損傷時(右図)における同時刻($t=12$ 秒)の船体周りの自由表面可視化図

表 4.3 は、非損傷時と損傷時における船体運動の1次振幅無次元値の、計算結果と実験結果の比較を示している。実験結果と参照計算結果³⁴⁾の値は、文献³⁴⁾のTable 5 から引用した。本研究の計算結果は、非損傷時については実験結果と良い一致を示している。しかし、非損傷時から損傷時へのロール運動振幅の傾向は、両計算結果ともに実験と異なる傾向を示しており、実験状態との拘束条件の違い等が原因として考えられる。

表 4.3 船体運動の1次振幅の計算結果と実験結果との比較

非損傷時			
	実験結果 ³⁴⁾	参照計算結果 ³⁴⁾	計算結果
ヒープ運動振幅	1.030	1.081	1.033
ロール運動振幅	0.548	0.354	0.597
ピッチ運動振幅	0.006	0.030	0.046
損傷時			
	実験結果	参照計算結果 ³⁴⁾	計算結果
ヒープ運動振幅	0.966	1.016	1.083
ロール運動振幅	0.391	0.572	0.790
ピッチ運動振幅	0.013	0.021	0.043

4.2 国内フェリー海難事故を対象とした損傷・浸水を伴う動揺計算手法の開発

4.2.1 対象船型

2014年7月に徳島県小松島東方沖の、沖の瀬に乗り上げた国内フェリー³⁷⁾を想定船とした。主要目を表4.4に示す。浸水した区画も対象として計算格子を作成し、向波中での動揺計算を行った。

表 4.4 主要目

設計船速 [ノット]	21.5
船長 L_{pp} [m]	166.0
幅 B [m]	25.0
喫水 d [m]	6.165
総トン数 [トン]	11,522

船型については、4.1で使用したSSRCのフェリー船型を基に、スケーリングを行うことで対象船型とした。模型スケール相当の計算とするため、船長 $L_{pp} = 3.0$ mとして計算条件を設定した。主要目を表4.5に示す。

表 4.5 主要目

船長 L_{pp} [m]	3.0
幅 B [m]	0.4839
喫水 d [m]	0.1193
排水量 [kg]	130.8
重心位置(x_G, y_G, z_G) [m]	(0.07669, 0.0, 0.099)
x軸周り慣動半径 k_{xx} / B	0.4
y軸周り慣動半径 k_{yy} / L_{pp}	0.264

事故調査報告書³⁷⁾の図等を参考に、浸水した区画の形状データを作成した。右舷については、座礁にともなって生じた損傷を開孔部として再現した。概略図を図4.5に示す。

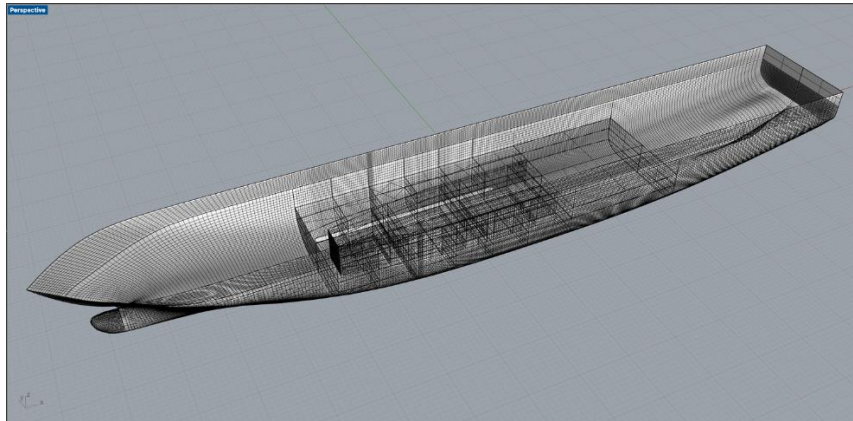


図 4.5 浸水区画等の概略図

4.2.2 計算格子

計算領域全体をカバーする直方体格子を配置し，その中に船体格子を配置した．図 4.6 に計算格子の概観図を示す．模型試験に相当する実際のスケールで格子を生成した．船首尾方向の船尾向きを正として x 軸を，左舷から右舷方向に y 軸を，鉛直上方に z 軸をとり，ミッドシップかつ静止水面上を原点とする．計算領域は $-6.0[\text{m}] \leq x \leq 9.0[\text{m}]$ ， $-6.0[\text{m}] \leq y \leq 6.0[\text{m}]$ ， $-6.0[\text{m}] \leq z \leq 0.535[\text{m}]$ である．

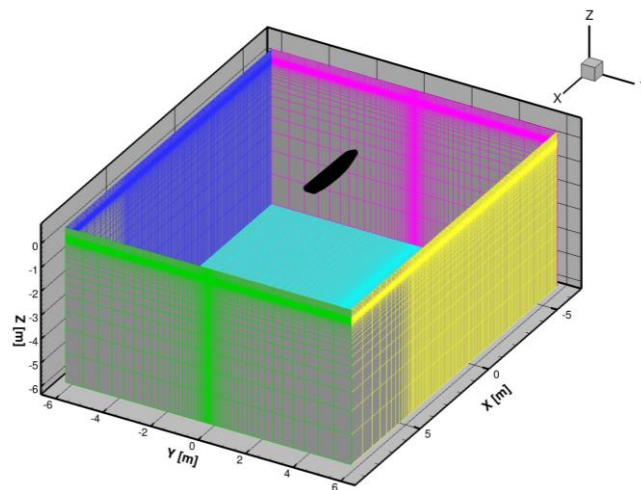


図 4.6 計算格子概観図

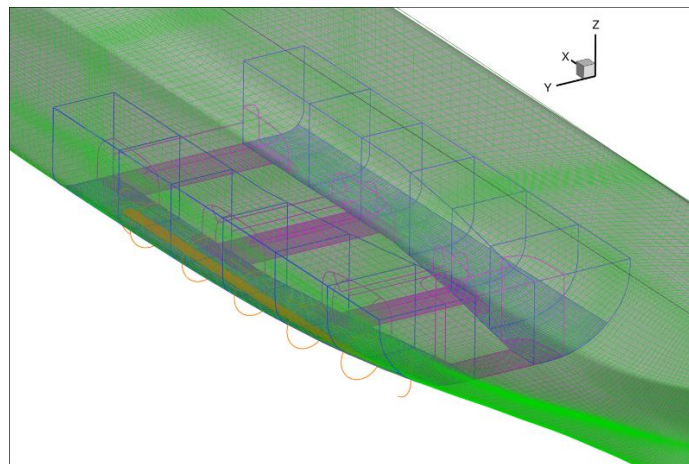


図 4.7 浸水区画付近の計算格子

船体ではデッキ部分も含めて計算格子を作成した。左右の浸水区画と右舷開孔部については、それぞれ計算格子を作成した。図4.7に浸水区画付近の計算格子を、表4.6に格子数及びセル数を示す。

表 4.6 各計算格子数及びセル数

計算格子		格子数	セル数
Hole		6	1,142,784
Compartment	Center	6	209,664
	Port	6	318,976
	Starboard	6	318,976
Hull		1	3,735,552
Rectangular		1	675,840
総数		26	6,480,640

4.2.3 計算条件

入射波は文献³⁷⁾も参考に設定し、波長船長比は $\lambda/L_{PP} = 1.0$ ，波高は実船換算で3.0 mとした。船の前進速度は1.0 m/sで、非定常計算での時間刻みは $\Delta t = 0.015$ [秒]に設定した。船体運動はヒープ、ロール、ピッチ運動の3自由度とした。物体表面条件には壁関数を適用した。

4.2.4 計算結果

図4.8に波高(マゼンタ点線)、ヒープ運動(青線)、ロール運動(緑線)、ピッチ運動(オレンジ線)の時刻歴を示す。浸水影響により、全運動の平均値がそれぞれゼロ値からシフトしていることが分かる。図4.9は船体周りの自由表面の可視化図で、物体表面のコンターは圧力、水面のコンターは波高によるものである。浸水していない側(左舷側)の区画内でも圧力の変動が起きていることが分かる。

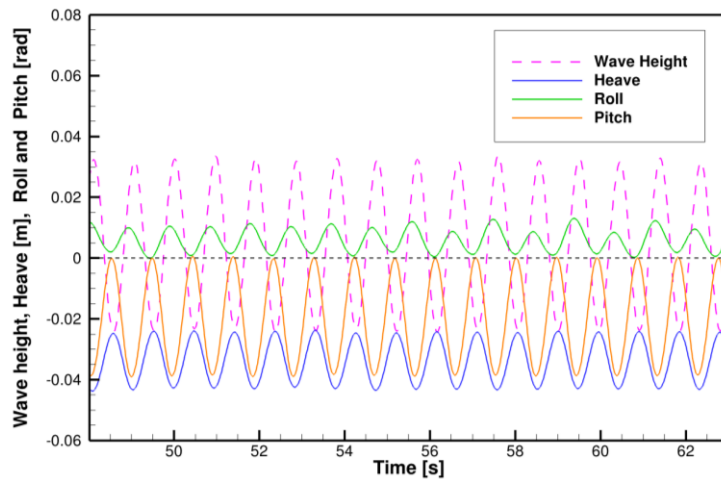


図 4.8 入射波と船体運動の時刻歴

以上により、複数区画に損傷が生じて浸水している状態についても重合格子手法に基づいた波浪中動揺計算を行うことが可能になり、より実際の事故状況等にも即した評価手法を構築した。

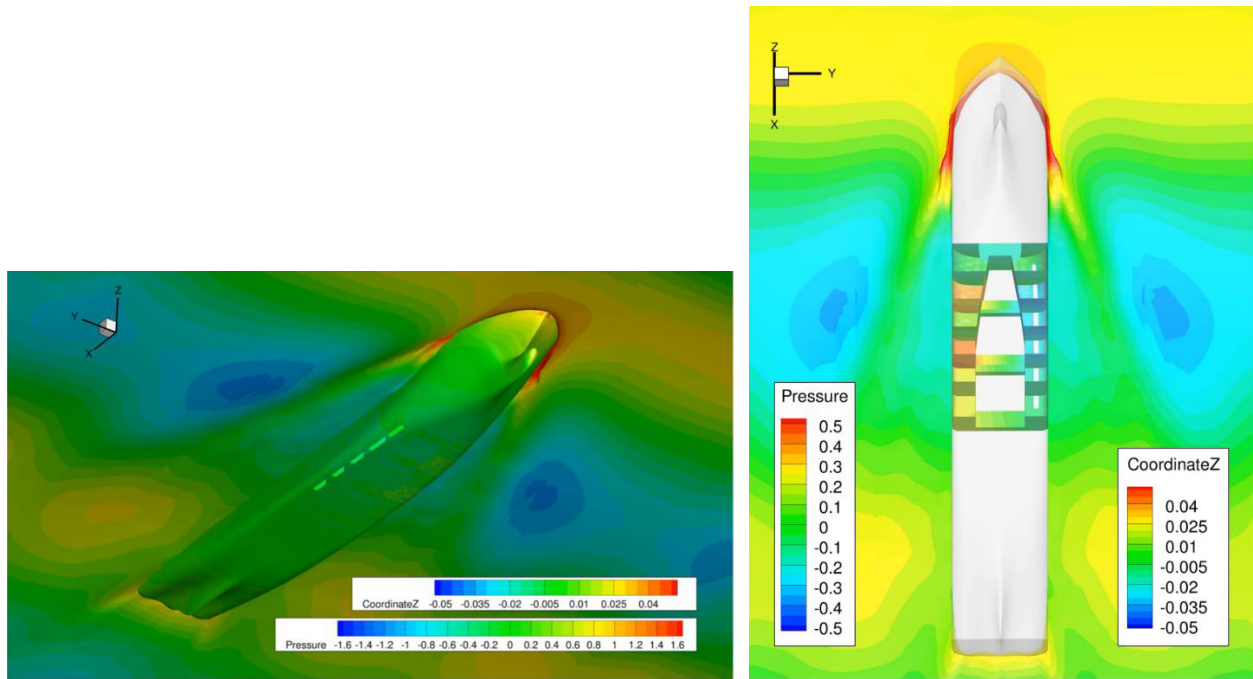


図 4.9 船体周りの自由表面可視化図

5. 船体や省エネ付加物等の形状最適化システムの構築

開発した重合格子手法対応ソルバーをベースに、船型や付加物の最適化システムの構築を行った。文献^{38),39)}では遺伝的アルゴリズムに基づく最適化手法により、付加物形状の最適化を行っている。また、内航船の省エネルギー船型開発を行い、2 船種について要目等のバリエーションを有する船型群も生成されている^{40),41)}。単一目的にとどまらず、多目的最適化手法の開発⁴²⁾も行われ、目的関数のパレート解が得られている。また、付加物に最適な伴流分布を与えることで船型群から船型を導出するシステムも構築され、その有効性が示されている⁴³⁾。いずれも詳細については各文献を参照されたい。

6. ハイブリッド計算手法の新規開発

将来的な計算環境を視野に、有限体積法と格子ボルツマン法のハイブリッド化について基礎的検討を行った⁴⁴⁾。物体周りには有限体積法、その外側に格子ボルツマン法を適用し、両者の間で重合格子手法により流場変数を交換することで、両手法の利点を活かしたハイブリッド計算法を構築した。有限体積法には上述の計算手法¹⁾を使用している。格子ボルツマン法は、格子上で並進・衝突する仮想粒子の集合と仮定し、格子上の粒子の速度分布関数の時間発展を求める手法である⁴⁵⁾。粒子の分布関数 $f_i(x, t)$ の時間発展は単一緩和時間を使用して次式で与えられる⁴⁴⁾。

$$f_i(x + c_i, t + \Delta t) = f_i(x, t) - \frac{1}{\tau} (f_i(x, t) - f_i^{eq}(x, t)) + F_i \quad (6.1)$$

ここで Δt は格子ボルツマン手法における時間刻み、 τ は緩和時間係数、 F_i は外力項、 f_i^{eq} は局所平衡状態における分布関数であり、次式で表される。

$$f_i^{eq} = w_i \rho \left(1 + \frac{3c_i \cdot q}{c^2} + \frac{9(c_i \cdot q)^2}{2c^4} - \frac{3q^2}{2c^2} \right) \quad (6.2)$$

ここで c_i は各方向の離散速度、 ρ は密度、 w_i は重み係数、 c は代表離散速度である。緩和時間係数 τ は次式で定義される。

$$\tau = \frac{1}{2} + \frac{3}{Rc^2\Delta t} \quad (6.3)$$

R はレイノルズ数である。

流体の密度と速度は次式から導出できる。

$$\rho(x, t) = \sum_i f_i(x, t) \quad (6.4)$$

$$q(x, t) = \frac{1}{\rho(x, t)} \sum_i c_i f_i(x, t) \quad (6.5)$$

また、圧力は密度との関係から次式で求められる。

$$p(x, t) = c_s^2 \rho(x, t) \quad (6.6)$$

ここで c_s は格子ボルツマン法の音速で $c_s = c/\sqrt{3}$ である。

ハイブリッド化においては有限体積法と格子ボルツマン法それぞれに局所時間刻みを適用し、収束計算を行った。重合格子では流場変数を補間し、有限体積法から格子ボルツマン法では、圧力から密度を求めるとともに、局所平衡状態における分布関数を導出し、レセプターセルに設定することで、分布関数の時間発展を計算する。また、格子ボルツマン法から有限体積法では分布関数から流場変数を導出し、レセプターセルに補間する。

一様流中におかれた円柱周りの流場計算に本手法を適用した⁴⁴⁾。レイノルズ数は75である。図5.1に円柱表面の圧力分布を示す。0度が前方中心位置、180度が後方中心位置にあたり、上下面は対称のため、片方のみを比較している。有限体積法のみ(図中FVM)の場合とハイブリッド計算法ではほぼ一致する結果が得られた。

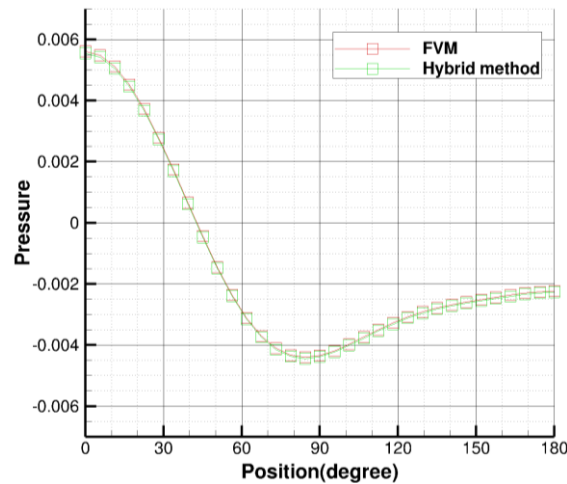


図 5.1 ハイブリッド手法と有限体積法による円柱表面の圧力分布の比較⁴⁴⁾

7. おわりに

実海域での推進性能、操縦性能、耐航・復原性能等の幅広い評価を可能とする CFD 技術の開発を行った。開発した手法については統合システムとしてパッケージ化し、毎年、リリースすることで社会実装につなげている。設計の現場での利用とフィードバックに基づき統合システムの改善を行うとともに、統合システムの概要や提供方法等については専用のホームページを用意し、普及にも努めている⁴⁶⁾。開発にあたっては横浜国立大学との共同研究も行い、文献^{47)~58)}に成果がまとめられており、詳細は各文献を参照されたい。あわせて、実海域実船性能評価プロジェクト(OCTARVIA プロジェクト)においては、上部構造物の風圧力や波浪中抵抗増加の推定にも適用し⁵⁹⁾、成果は標準計算法やガイドラインとしてまとめて発表されている^{60),61),62)}。加えて、波浪中計算法は波向きを変更した状態⁶³⁾、上部構造物の風圧力計算については風力推進の 1 種であるローター付きの状態⁶⁴⁾まで、それぞれ拡張済みである。また、ITTC の専門家会議が設定した調査研究等にも参加し、成果は国際共著の論文^{65),66)}にまとめられている。この他、統合システムを活用した外部機関からの発表⁶⁷⁾に加えて、Autonomous Underwater Vehicle(AUV)の性能推定についても報告^{68),69)}されている。いずれも詳細については既発表の各文献を参照されたい。最後に、CFD 技術開発についてはうみそら研の第 2 期中期計画にも引き継ぎ、Model Based Systems Engineering(MBSE)に対応するシステムへの拡張や港湾内操船シミュレーションの実現を目指し、新たな粗度塗料モデル^{70),71)}、浅水域や狭水路でのシミュレーション^{72),73)}等の成果を創出している。

謝 辞

本研究の一部はJSPS科研費JP16K06919, JP19K04869の助成を受けたものである。記して謝意を表す。

References

- 1) Ohashi, K. et al. : Development of NS solver with a structured overset grid method, 第 28 回数値流体力学シンポジウム, 2014.
- 2) Ohashi, K. et al. : Development of a structured overset Navier-Stokes solver with a moving grid and full multigrid method. J. Mar. Sci. Tech., Vol.24(2019), pp.884–901, <https://doi.org/10.1007/s00773-018-0594-7>
- 3) Roe, P.L.: Characteristic-Based Schemes for the Euler Equations, Ann. Rev. Fluid Mech., Vol.18(1986).

- 4) <https://cgns.github.io/>
- 5) Hino, T. : An Interface Capturing Method for Free Surface Flow Computations on Unstructured Grids, J. of the Soc. Naval Archit. Japan, Vol.186(1999), pp.173-183.
- 6) Spalart, P.R. and Allmaras S.R. : A one-equation turbulence model for aerodynamics flows, La Recherche Aérospatiale, No.1(1994), pp.5-21.
- 7) Menter, F.R. : Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, AIAA Journal, 32(8)(1994), pp.1598-1605.
- 8) Rumsey, C.L. and Gatski, T.B. : Recent Turbulence Advances Applied to Multielement Airfoil Computations, Journal of Aircraft, vol.38(5)(2001), pp.904-910.
- 9) Ohashi, K. and Hino, T. : Numerical study on the applicability of wall function models for the flows around an appendage attached to a body, AIAA paper 2012-0445.
- 10) Ohashi, K. : Development of numerical method to simulate flows around a ship at propulsion conditions in regular waves coupling with the ship propulsion plant model, Applied Ocean Research, Vol.73(2018), pp.141-148, <https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.02.006>, 2018.4, (2018).
- 11) Ohashi, K. et al. : Numerical simulation of flows around moving bodies using an overset moving grid technique, Proceedings of the 20th NuTTS, (2017).
- 12) Ohashi, K. : A new approach for handling body motions combining a grid deformation method and an overset grids technique, Ocean Engineering, Vol. 213, pp.1-23, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107836>, 2020.10, (2020).
- 13) Ohashi, K. et al. : Numerical simulation of free running of a ship with using dynamic overset grid method, Ship Technology Research, Vol.65(3), pp.153-162, <https://doi.org/10.1080/09377255.2018.1482610>, 2018.9, (2018).
- 14) Sakamoto, N. et al. : Identification of KVLCC2 manoeuvring parameters for a modular-type mathematical model by RaNS method with an overset approach, Ocean Engineering, Vol.188, pp.1-16, (2019).
- 15) Sakamoto, N. et al. : Model and full scale CFD of the Esso Osaka under 35deg turning circle maneuver in deep water, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 31 号, pp.165-170, (2020).
- 16) Sakamoto et al. : CFD based turning circle maneuvering simulation for a merchant ship with high-lift rudder, Proceedings of 31st ISOPE 2021, 2729-2736, (2021).
- 17) Ohmori, T. et al. : Numerical study to improve the estimation of manoeuvring fluid force for a container ship in deep and restricted water, Proceedings of PRADS 2022, (2022).
- 18) 大森拓也他 : 狭水路における旋回運動時操縦流体力の CFD 計算法, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 35 号, pp.373-376, (2022).
- 19) 高橋克尚他 : 狭水路を斜航する船体と舵に働く流体力について, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 35 号, pp.323-326, (2022).
- 20) Sakamoto, N. et al. : False bottoms revisited: computational study for KCS under pure yaw motion in shallow water($H/T=1.2$), J. Mar. Sci. Tech., Vol. 28, pp.117-135, <https://doi.org/10.1007/s00773-022-00912-7>, 2022.11, (2022).
- 21) Sakamoto, N. et al. : Overset RaNS simulations and validations for the effect of false bottom to the KCS under static drift and static rudder in shallow water, J. Mar. Sci. Tech., Vol. 28, pp.248-269, <https://doi.org/10.1007/s00773-023-00922-z>, (2023).
- 22) 大橋訓英 : マルチタイムステップと動的重合格子法による船舶の推進状態の計算手法の開発, 日本流体力学会年会 2019 講演論文集, (2019).
- 23) 大橋訓英他 : フルマルチグリッド手法と動的重合格子による船舶の推進状態の数値シミュレーション, 日本流体力学会年会 2017 講演集, (2017).
- 24) 大橋訓英 : 動的重合格子による船舶の自由表面影響下での推進状態の数値シミュレーション, 日本流体力学会年会 2018 講演集, (2018).
- 25) 大橋訓英 : 船体周り流れの重合格子における領域分割とハイブリッド並列計算手法の開発, 日本流体力学会年会 2021 講演集, (2021).

- 26) Ohashi, K. : Development of hybrid parallelization method on overset-grids method using shared memory (OpenMP) and distributed memory (MPI), Proceedings of 13th ACFD2022, (2022).
- 27) Ohashi, K. : Numerical study of roughness model effect including low-Reynolds number model and wall function method at actual ship scale, J. Mar. Sci. Tech., Vol.26, pp.24-36, (2020), <https://doi.org/10.1007/s00773-020-00718-5>.
- 28) Sakamoto, N., Kobayashi, H. et al. : An overset RaNS prediction and validation of full scale stern wake for 1,600TEU container ship and 63,000 DWT bulk carrier with an energy saving device, Applied Ocean Research, Vol.105, pp.1-23, (2020), <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102417>.
- 29) Sakamoto, N. et al. : Application of “THINC” interface capturing scheme to the structured overset CFD solver, 混相流シンポジウム 2020 講演論文集, (2020).
- 30) Sakamoto, N. et al. : Fundamental validation of cavitation and interface capturing models implemented on NAGISA, 混相流シンポジウム 2021 講演論文集, (2021).
- 31) The Specialist Committee on Stability in Waves, Final Report and Recommendations to the 24th ITTC, <https://itc.info/media/5872/volume-ii-specialist-committee-on-stability-in-waves.pdf>
- 32) The Specialist Committee on Stability in Waves, Final Report and Recommendations to the 25th ITTC, https://itc.info/media/3495/volume2_6stabilityinwave.pdf
- 33) Lee, S., You, J., Lee, H., Lim, T., Rhee, S. H., Rhee, K. : Preliminary tests of a damaged ship for CFD validation, Int. J. of Naval Arch. and Ocean Eng., Vol.4, (2012), <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0088>.
- 34) Sadat-Hosseini, H., Kim, D., Carrica, P. M., Rhee, S.H., Stern, F. : URANS simulations for a flooded ship in calm water and regular beam waves, Ocean Engineering, Vol.120, (2016), <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.02.019>.
- 35) Lee, S. et al. : Experimental Study on the Six Degree-of-Freedom Motions of a Damaged Ship Floating in Regular Waves, in IEEE J. of Oceanic Eng., Vol.41(1), (2016).
- 36) Haro, M.P.E., Seo, J., Sadat-Hosseini, H., Seok, W., Rhee, S.H., Stern, F. : Numerical simulations for the safe return to port of a damaged passenger ship in head or following seas, Ocean Engineering, Vol.143, (2017).
- 37) 船舶事故調査報告書, (2015), https://jtsb.mlit.go.jp/ship/rep-acci/2015/MA2015-10-1_2014tk0013.pdf.
- 38) Tahara, Y. et al. : Application of simulation based design for ESD installed commercial ships, Proceedings of the 31st Symposium on Naval Hydrodynamics, (2016).
- 39) 田原裕介, 新郷将司, 金井亮浩 : 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論文集 26 巻, pp.1-16, (2017), <https://doi.org/10.2534/jjasnaoe.26.1>.
- 40) 久米健一他 : 749GT 型一般貨物船の省エネルギー船型の開発, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 24 号, pp.157-162, (2017).
- 41) 一ノ瀬 康雄他 : 749GT 型一般貨物船の船型バリエーションの開発, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 24 号, pp.163-168, (2017).
- 42) Tahara, Y., Ichinose, Y., Kaneko, A., Kasahara, Y. : Variable decomposition approach applied to multi-objective optimization for minimum powering of commercial ships, J. Mar. Sci. Tech., Vol.24, pp.260-283, (2018), <https://doi.org/10.1007/s00773-018-0551-5>.
- 43) Ichinose, Y., Tahata, Y. : A wake field design system utilizing a database analysis to enhance the performance of energy saving devices and propeller, J. Mar. Sci. Tech., Vol.20, pp.1119-1133, (2019), <https://doi.org/10.1007/s00773-018-0611-x>.
- 44) 大橋訓英 : 重合格子による有限体積法と格子ボルツマン法のハイブリッド化に関する基礎検討, 日本流体力学会年会 2022 講演論文集, (2022).
- 45) 瀬田剛 : 格子ボルツマン法, 森北出版.
- 46) https://www.nmri.go.jp/study/research_organization/fluid_performance/software.html
- 47) Duy, T.N., 日野孝則 : A Study on the Stern Shape Optimization of a Container Ship using Navier-Stokes Analysis, 日本船舶海洋工学会論文集 22 号, (2016).
- 48) 播秀明, 日野孝則, 鈴木和夫 : 重合格子によるコンテナ船の波浪中運動シミュレーション, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 23 号, (2016).

- 49) Duy, T.N., Hino, T., Suzuki, K. : Numerical study on stern flow fields of ship hulls with different transom configurations, *Ocean Engineering*, Vol.129, pp.401-414, (2017).
- 50) 日野孝則他 : 船首船底下流場の実船スケール CFD 解析, 日本船舶海洋工学会論文集 24 号, (2017).
- 51) 新井祐司, 日野孝則 : 重合格子法を応用した局所細密化格子による PMM 試験の CFD 計算, 日本船舶海洋工学会論文集 25 号, (2017).
- 52) Chen, S., Hino, T. et al. : RANS investigation of influence of wave steepness on ship motions and added resistance in regular waves, *J. Mar. Sci. Tech.*, Vol.23, pp.991-1003, (2018).
- 53) Hino, T. et al. : CFD Simulations breaking Stokes waves, *Proceedings of 38th OMAE*, (2019).
- 54) 池之上晴視, 日野孝則, 高木 洋平 : Single-phase と Two-phase によるストークス波の碎波シミュレーション, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 28 号, (2019).
- 55) Hino, T. et al. : Parameter Tuning of $k-\omega$ Turbulence Model for Ship Flow Simulation, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 30 号, (2020).
- 56) Ikenoue, H., Hino, T., Takagi, Y. : Hydrodynamic Design of Energy Saving Device for Ship Scale Performance Improvement, *Proc. 33rd Symposium on Naval Hydrodynamics*, (2020).
- 57) Ma, C., Hino, T., Ma, N. : CFD investigation on the hydrodynamic loads and motions when ship maneuvers in regular and irregular waves, *Ocean Engineering*, Vol.266, (2022).
- 58) Hino, T. et al. : Modification of $k-\omega$ turbulence model for ship resistance flow predictions, *J. Ocean Eng. Mar. Energy*, Vol.8(4), (2022).
- 59) 海上技術安全研究所報告, 第21巻, 2号, 特集号, (2021).
- 60) 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ー-, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 29 号, (2019).
- 61) Kobayashi, H. et al. : Parametric study of added resistance and ship motion in head waves through RANS : Calculation guideline, *Applied Ocean Research*, Vol.110, (2021), <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102573>.
- 62) Kobayashi, H. et al. : CFD assessment of the wind loads of superstructures through RANS, *Applied Ocean Research*, Vol.129, pp.1-24, (2022), <https://doi.org/10.1016/j.apor.2022.103364>.
- 63) Ohashi, K. : Development of the numerical method for simulation of ship motions in regular waves with changing wave direction, *Proceedings of ICCM 2020*, (2020).
- 64) Kume, K., Hamada, T., Kobayashi, H. et al. : Evaluation of aerodynamic characteristics of a ship with flettner rotors by wind tunnel tests and RANS-based CFD, *Ocean Engineering*, Vol.254, (2022), <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111345>.
- 65) Korkmaz, K.B. et al. : CFD based form factor determination method”, *Ocean Engineering*, Vol.220, (2021).
- 66) Andersson, J. et al. : Ship-scale CFD benchmark study of a pre-swirl duct on KVLCC2, *Applied Ocean Research*, Vol.123, pp.103-134, (2022), <https://doi.org/10.1016/j.apor.2022.103134>.
- 67) 廣田匡俊, 若原正人 : 肥大船に対する向波中 CFD 計算と波浪中船体表面圧力計測, 第34回数値流体力学シンポジウム講演論文集, (2020).
- 68) 梅田隼他 : 航行型 AUV 隊列制御の実海域試験と数値計算, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 30 号, (2020).
- 69) 梅田隼他 : 付加物が航行型 AUV の流力性能に与える影響, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 31 号, (2020).
- 70) 西岡諒他 : 回転円筒を模擬した CFD 計算による流場に対する表面粗度の影響調査, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 38 号, (2024).
- 71) 西岡諒他 : 実船 CFD 計算における等価砂粗度高さについて, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 39 号, (2024).
- 72) 鏡園将成他 : Free-Run CFD による浅水域における船の旋回運動シミュレーション, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 37 号, (2023).
- 73) 松永勇也他 : 狭水路を航行する船体に作用する流体力に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 37 号, (2023).