

jh160054-NAH

## 実海域の船舶挙動の推定に向けた大規模計算手法の開発

小野寺 直幸（海上技術安全研究所）

船舶の推進性能・操縦性の向上は省燃費性能や安全性に直結するため、水槽実験や CFD ソフトウェアによる解析等の多くの研究が行われている。しかしながら、水槽設備や計算機資源の制約により、模型船を用いた性能評価が主であり、実船性能は模型船結果から経験的な知識を用いて推定される。本課題では大規模計算を実施することで、模型船と実船間に働くスケール効果の影響を受けない解析手法の構築を目指す。船舶の気液二相流においては、自由界面の変形に伴う数値不安定性が懸念されるが、格子ボルツマン法に LES の乱流モデルおよび自由表面流モデルを拡張した二相流解析モデルを提案することで、高精度な解析を実現できる。本計算手法に対して、TSUBAME を用いて弱スケールの性能測定を実施した結果、8-125 台の GPU の計算で良いスケーリングが得られた。また、船舶の安全性解析で重要な海水の打ち込み衝撃荷重および浸水評価に対して、ダム崩壊現象および気泡上昇による検証計算により適用性を確認した。最終的に、実スケールの船体データに対して気液二相流計算を実施し、本解析手法が船舶の大規模解析が可能であることを確認すると共に、船舶の安全性解析に有効であることを示した。

### 1. 共同研究に関する情報

#### (1) 共同研究を実施した拠点名

東京工業大学学術国際情報センター

#### (2) 共同研究分野

- 超大規模数値計算系応用分野
- 超大規模データ処理系応用分野
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

#### (3) 参加研究者の役割分担

- ・ 代表者（海上技術安全研究所）：  
小野寺直幸、(役割分担) 船舶の性能評価手法の構築および解析結果の評価
- ・ 協力者（海上技術安全研究所）：  
大橋訓英、(役割分担) 船舶の性能評価のための計算条件の設定および結果の評価  
河村昂軌、(役割分担) 計算結果の可視化およびデータ処理
- ・ 協力者（東京工業大学）：  
青木尊之、(役割分担) TSUBAME での大規模計算に関する助言  
下川辺隆史、(役割分担) 並列計算および大規模データ入出力に関する助言

### 2. 研究の目的と意義

#### (1) 研究目的

船舶の推進性能・操縦性の向上は省燃費性能や安全性に直結するため、水槽実験や CFD ソフトウェアによる解析等の多くの研究が行われている(図 1)。しかしながら、水槽設備や計算機資源の制約により、模型船を用いた性能評価が主であり、実船性能は模型船結果から経験的な知識を用いて推定されている。本課題では、実海域における船舶を対象とした大規模計算を実施することで、模型船と実船間に働くスケール効果の影響を受けない解析手法の構築、およびスーパーコンピュータに適した陽解法に基づく気液二相流の解析手法を提案する。最終的には、造波による海面の

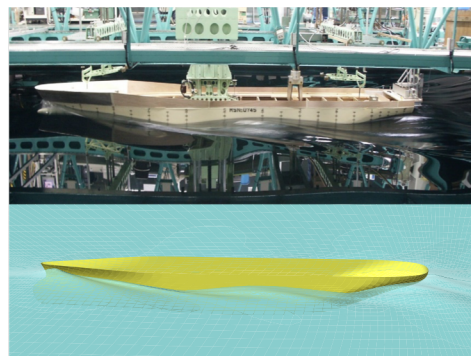


図 1 水槽試験と CFD による自由表面流解



図 2 模型船を用いた多方向不規則波中の

大変形や海水打ち込みによる衝撃荷重、転覆時(図 2)の浸水計算など、従来手法では解析が困難である強非線形現象を解析可能な手法を提案することで、船舶の操縦性および安全性の向上に貢献する。

## (2) 研究の意義

船舶の CFD 解析として、Navier-Stokes(NS)方程式に対して、RANS の乱流モデルを用いた解析が広く行われている。それらの解析手法は、長年の経験の蓄積により、少ない計算資源の制約下でも、船舶の推進性能の推定が可能である。一方で、実海域で現れるような非線形性の強い現象に対しては、RANS の乱流モデルの適用範囲と非定常現象に対する精度が問題となる。また、従来の CFD 手法ではメニーコアの演算器に対して、メモリアクセスの最適化および並列化が困難であるため、将来のエクサスケール・スパコンへの対応が難しい。そのような問題に対して、本課題では乱流の非定常解析手法であるラージエディ・シミュレーション(LES)と GPU 計算に適している格子ボルツマン法を採用することで解決を試みる。LES は実用レベルの乱流計算手法としては最も精度が高く、GPU を用いた大規模解析と組み合わせることで、高いレイノルズ数の解析が可能となる。

本研究では実海域の船舶挙動の推定するために、上記で示した解析手法に自由表面流モデル及び気液二相流モデルを導入する。これにより、従来の手法では実現不可能であった高解像度の自由表面解析が実現可能となり、非常に革新的といえる。格子ボルツマン法を用いた船舶の挙動解析はほと

んど実施されておらず、適用可能性を探ると行った面についても新規性が大きい。本研究は、実海域の様々な海象を再現した船舶の挙動推定だけでなく、船体付加物による省エネ性能の向上など、最適設計手法にも繋がるため、工学的にも非常に有意義な結果を残すことが期待される。また、スーパーコンピュータを用いて、船舶の安定性解析及び浸水時の安全性解析に貢献する事で、海上交通の信頼性の向上にも繋がる。

以上の事より、本研究を実施する事によって、船舶分野でのスーパーコンピュータの研究を牽引する事及び、船舶の性能や安全性向上に貢献することは大きな意義がある。

## 3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

高レイノルズ数の自由表面流解析では、海面形状が船舶の推進性能や操縦性に大きな影響を与えるため、それらの相互作用を捉えた大規模非定常計算を実施する必要がある。しかしながら、申請者の所属する海上技術安全研究所では計算機資源の制約から、単純化した解析対象に対して、レイノルズ平均モデル(RANS)を用いた定常解析が行われてきた。JHPCN の枠組みを使うことで、GPU スパコンである TSUBAME を利用することが可能となり、LES に基づく大規模な非定常解析が初めて可能となった。

更に、大規模計算技術に関して、東京工業大学の青木尊之教授および下川辺隆史助教の助言を得ることで、並列計算の経験が少ない海上技術安全研究所内の研究協力者の知識・技術を高めることが可能となり、平成 29 年度の JHPCN の採択課題「大規模粒子法による大型クルーズ船の浸水解析」(研究課題代表者、橋下博公、神戸大学)の提案に繋がるなど、将来の船舶分野での CFD 解析の発展に大きく貢献している。

## 4. 前年度までに得られた研究成果の概要

該当なし(初年度採択課題)

## 5. 今年度の研究成果の詳細

本章では今年度の研究成果の詳細を述べる。5-(1)から5-(3)は中間報告書内で記述した成果であり、5-(4)から5-(5)は以降の成果である。

### (1) 格子ボルツマン法による船舶の詳細挙動解析手法の構築

格子ボルツマン法は規則的なメモリアクセスと高密度の演算を持つ陽的な計算手法であるため、GPU を用いた大規模計算に適している。本課題では、LES の乱流モデルおよび二相流解析モデルを適用することで、実海域での船体運動の詳細解析手法を開発する。以下に詳細を記述する。

#### (1-1) LES に基づく乱流モデルの適用

LES は格子で解像できる物理量に対して直接計算を行い、格子解像度以下の成分に対してはサブグリッド・スケールモデルによりモデル化する。渦粘性に基づいた SGS モデルでは、SGS 変動の効果が分子粘性と同様に作用すると仮定し、渦粘性  $\nu_{SGS}$  を導入する。

$$\nu_{SGS} = C \bar{\Delta}^2 |\bar{S}|$$

ここで  $C$  はモデル係数、 $\bar{\Delta}$  はフィルター幅であり、ひずみ速度テンソル  $S_{ij}$ 、およびひずみ速度テンソルの強さ  $|S|$  は、

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right), \quad |S| = \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}}$$

と定義される。

コヒーレント構造スマゴリンスキーモデル (CSM) は乱流のコヒーレント構造からモデル係数を決定する手法であり、複雑物体および気液界面を含む流れ場に対しても高精度に計算を行う事ができる。モデル係数  $C_{CSM}$  は速度勾配テンソルの第二不変量 ( $Q$ ) と速度勾配テンソルの大きさ ( $E$ ) から求められるコヒーレント構造関数 ( $F_{CS}$ ) により決定される。

$$C_{CSM} = C' |F_{CS}|^{3/2},$$

$$F_{CS} = \frac{Q}{E} \quad (-1 \leq F_{CS} \leq 1),$$

$$Q = -\frac{1}{2} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}, \quad E = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2.$$

ここで  $C'$  は係数であり、本研究では  $C'=1/20$  を用いる。モデル係数は格子点上の物理量の値より求められ、高効率な並列演算処理を行うことができる。

### (1-2) 格子ボルツマン法による自由表面流モデルに基づく二相流解析モデル

格子ボルツマン法による気液二相流解析として、二相系格子ボルツマン法等が提案されており、高密度比においても精度良く解析ができています。しかし、船舶などの非常に大きなスケールの解析においては、海中に取り込まれた微小気泡等を無視しても十分な近似解が得られるため、液体だけの運動を解く自由表面流解析手法が有効である。一方で、海面の大変形や砕波を伴う荒天下においては、プロペラの空気中への露出や上部構造物の空気抵抗など、平水中では遭遇しない現象が問題となるため、液相と気相の両相を解析できる手法が必要となる。本研究では計算の安定性を重要視し、自由表面流モデルを拡張することで、気相・液相の両相が解析可能な計算手法を構築する。

#### (1-2-1) 液相に対する自由表面流モデル

自由表面流解析では気液二相の流れに対して、質量の重い液相部分のみ時間発展を行い、気相部分に対しては自由表面流モデルを与える。計算セルの種類は流体率 (VOF 率) から定められ、計算を行う (i) 流体セル、(ii) 気液境界セルと、計算を行わない (iii) 空隙セルの 3 種類のセルに分類することで計算を行う。境界セルは空隙セルに接しているため、気液界面の境界条件を与える必要がある。液相セルの計算の具体例として、streaming step の空隙セルを参照する粒子分布関数に対して、以下の境界条件を与える。

$$f_{-i}(x, t + \Delta t) = f_i^{eq}(\rho_A, u_B) + f_{-i}^{eq}(\rho_A, u_B) - f_i(x, t).$$

ここで  $\rho_A$  は気相側の密度、 $u_B$  は気液界面の速度である。気液二相流においては、気相側の密度を以下の式より推定する。

$$\rho_A = 1 + (\rho_{A,Gas} - 1) \frac{\rho_{Air}}{\rho_{Water}}.$$

ここで、 $\rho_{Air}$  および  $\rho_{Water}$  は気体および液体の密度 (物性値) となる。空気を解かない自由

表面流解析では、気体側の密度を大気圧( $\rho_A = 1$ )と設定する。

### (1-2-2) 気相セルの自由表面流モデル

気相側( $g_i$ )の時間発展において、液相密度が気相密度に対して十分に重いと考え、気液界面を固体壁面と同様に扱う。具体的には、液相界面に対して物体境界モデルである **Interpolated bounce-back** 法を採用し解析を行なった。

$$g_{-i}^*(r_w, t) = 2\Delta g_i^*(r, t) + (1 - 2\Delta)g_i^*(r + \text{sgn}(c_{-i})\Delta x, t) + F_{-i}, \quad (0 \leq \Delta < 0.5),$$

$$g_{-i}^*(r_w, t) = \frac{1}{2\Delta}g_i^*(r, t) + \frac{(2\Delta - 1)}{2\Delta}g_{-i}^*(r, t) + \frac{1}{2\Delta}F_{-i}, \quad (0.5 \leq \Delta < 1)$$

ここで、 $\Delta$ は気相セルと液相セルの 界面までの距離の比であり、VOF 値より求められる。

$$\Delta = \frac{|lv(\text{VOF}_{air})|}{|lv(\text{VOF}_{air})| + |lv(\text{VOF}_{water})|}.$$

気相セルが液相セルから受ける外力は、界面速度より求められる。

$$F_{-i} = \omega_i \rho \frac{c_{-i} \cdot u_{w,i}}{c^2}.$$

### (2) TSUBAME での実効性能測定

東京工業大学のスーパーコンピュータ TSUBAME 2.5 の GPU (NVIDIA K20X)を用いて、Weak scaling での実効性能測定(単精度)を行った。

計算モデルとして、気相・液相の両相に対して、格子ボルツマン法の D3Q27 モデルを採用した。計算条件として、各 GPU に格子点数 ( $N_1, N_2, N_3$ )=(384, 128, 128)を割り当てる Flat MPI にて並列化を行った。

図 3 に弱スケーリングの単精度実効性能を示す。横軸が GPU 数、縦軸が 1 秒間に更新できる格子点数 (MLUPS: Mega-lattice update per second)である。計算結果より、8 台の GPU では 61 MLUPS (0.82 sec/step)、27 台の GPU では 200 MLUPS (0.84 sec/step)、64 台の GPU では 460 MLUPS (0.87 sec/step)、125 台の GPU では 913 MLUPS (0.86 sec/step)となる。以上の結果より、125GPU を用いた解析においても、8 GPU の解析と比較して約 5% の性能低下が見られるものの、良い弱スケーリングが得られていることが確認できる。

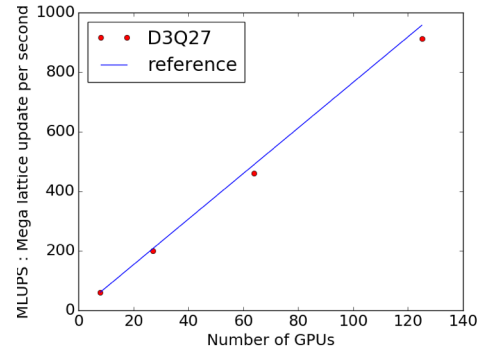


図 3 TSUBAME2.5 での気液二相流モデルによる弱スケーリング

### (3) ダム崩壊問題での検証計算

船舶の操縦性及び安全性解析において、荒天下での海水の打ち込みによる衝撃荷重の再現が重要となる。本研究では、Kleefsmann(参考文献)によるダム崩壊の実験結果と比較により検証を行った。

解析条件として、格子点数を  $320 \times 96 \times 96$ 、時間刻みの音速を 100m/s、気体と液体の密度をそれぞれ  $1.205 \text{ kg/m}^3$ 、 $998.22 \text{ kg/m}^3$  と設定した。

図 4 は、気液界面の等値面およびスパン方向の中央断面内の速度ベクトルを示した図である。計算結果より、気液二相流モデルを採用する事で、高密度の条件下において安定に気液二相流解析を行えていることが確認できる。

次に、界面高さおよび圧力値の時刻歴変化を図 5 に示す。測定方法として、界面高さは液相と連続している計算領域高さから、圧力は測定点の 27 隣接点の圧力平均値より求めた。図 5 の 1.5 秒までダム先端部と物体の衝突時までの界面高さおよび圧力値は、実験結果と良く一致していることが確認できる。また、先端衝突以後の反射波が帰ってくる時刻 (1.5 秒以降)においては、実験結果と比較して遅れが見られるものの、同様の傾向を示しており、船舶の衝撃圧の評価手法として適用可能であると考えられる。

(参考文献) KMT Kleefsmann, et al., A volume of fluid based simulation method for wave impact problems, J. comp. phys., 206(1):363-393, 2005.



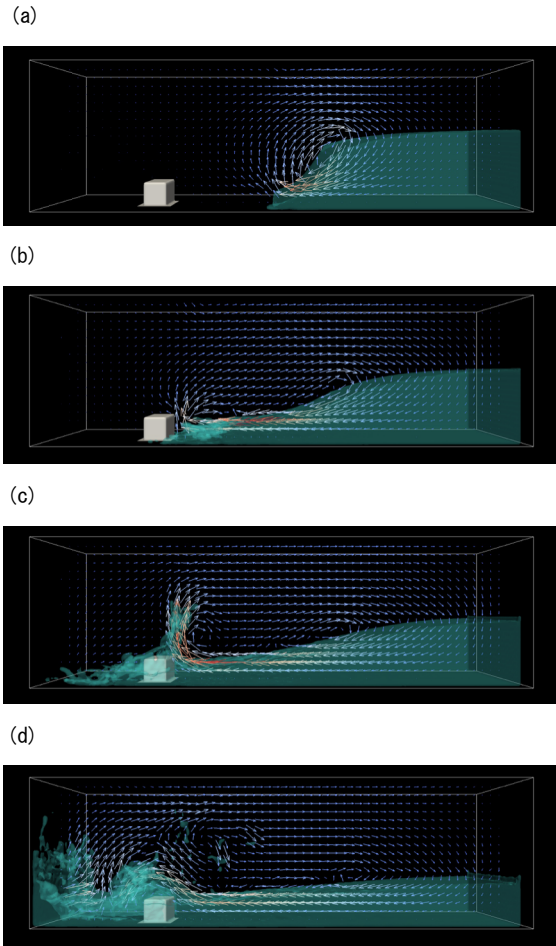


図 4 ダム崩壊での気液界面および断面速度。  
(a) 0.2, (b) 0.4, (c) 0.6, (d) 1.0 秒 (N=320x96x96)

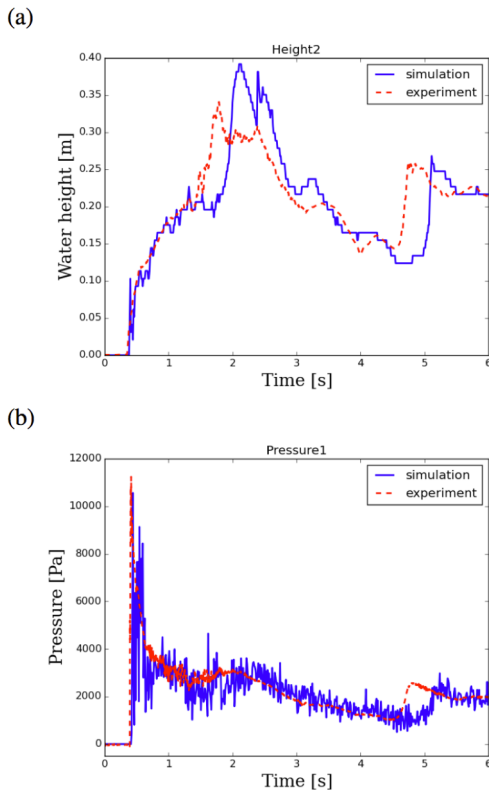


図 5 界面高さ (a) および圧力値 (b) の時間履歴

#### (4) 気泡上昇問題での検証計算

船舶の安全性計算において、転覆時の浸水解析は重要である。本節では、浸水時の船内に残存した空気の評価するために Grace による気泡上昇問題(参考文献)の解析を行った。計算条件として、気泡直径  $D=10\text{mm}$  に対して 14.5 格子 ( $dx=0.6875\text{mm}$ )、計算領域を  $L=(11D, 11D, 22D)$ 、気液密度比は 1:100 と設定した。計算手法として、界面捕獲に THINC-WLIC 法を表面張力モデルに Sharp interface model を採用した。

計算結果を表 1 に示す。条件(A), (B), (D)においては、気泡上昇速度に対して 2 割程度の誤差が見られる結果となった。気泡上昇速度が大きい(C)の条件においては、気泡形状を保つことができず、気液界面が拡散的になった。図 6 に差分法(参考文献)との界面形状の比較を示す。計算結果より、界面形状に若干の際が見られるが気泡体積が保存されている事が確認できる。上昇速度および界面形状の誤差の原因として、界面近傍にて連続の式が満たされない事が挙げられ、改善の余地がある。

以上より、提案した解析モデルは従来の差分法の結果の再現には至らなかった。一方で、自由表面流モデルでは解析が不可能な気泡上昇問題の解析が可能であり、浸水計算で常用な船内の残存空気の解析に対して適用可能であると考えられる。(参考文献)・J.R. Grace: Trans. Inst. Chem. Eng., 51(1973), 116.

・M. van Sint Annaland, et al., Numerical simulation of gas bubbles behavior using a three-dimensional volume of fluid method, Chem. Eng. Science 60(2005), 2999-3011.

表 1 解析条件及び気液二相流モデルによる計算結果(cal)と Grace の実験による上昇速度の比較

計算条件	Morton number	Eötvös number	Re(cal.)	Re(ref. Grace)
A	$1.26 \times 10^{-3}$	0.971	1.61	1.7
B	0.1	9.71	3.97	4.6
C	0.971	97.1	-	20
D	1000	97.1	1.73	1.5

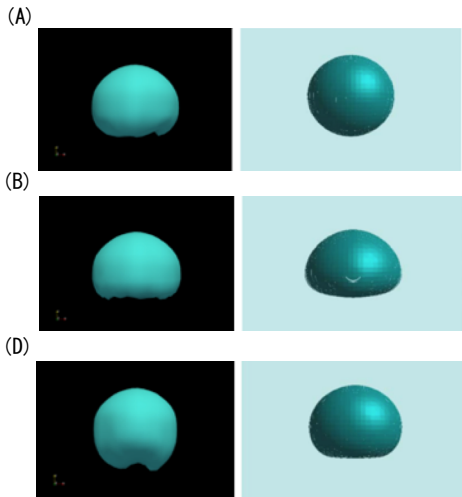


図 6 単気泡上昇問題での気液界面形状  
左) 計算結果, 右) 差分法による比較結果  
(計算条件 : A, B, D)

## (5) 船体データを用いた強非線形現象解析

### (5-1) STL データを用いた物体表現手法

船体表面などの複雑形状は、三角形の頂点と法線ベクトルからなら STL データを用いることで表現できる。しかし、STL データを LBM から直接的に参照する場合、メモリアクセスが不連続となり、計算効率が低下する。本研究では、STL データを直接的には参照せず、直交格子点上に保持された符号付き距離関数を用いる事で、効率的な解析を行った。図 7 に用いた符号付き距離関数の等値面を示す。物体の符号付き距離関数の計算領域は小領域に分割され、さらに小領域内に  $N^3$  の格子点を生成した。本計算では、バルクキャリアの STL データに対して小領域  $25 \times 4 \times 5$ 、および小領域内の格子点数は GPU のメモリアクセスの効率化を考慮して  $64^3$  と設定した。計算の効率化のために、物体表面近傍の小領域のみ計算対象とすると共に、各 MPI プロセスでは計算領域に含まれる小領域のみデータを読み込んだ。LBM の計算においては高解像度の符号付き距離関数から、格子点上に線形補間を行うことで、物体を表現した。

### (5-2) バルクキャリアに対する気液二相流計算

バルクキャリアに対して気液二相流のテスト計算を実施した。計算条件として、主方向の計算領域を 700m に対して、格子点数  $768 \times 134 \times 444$  を用いた。計算結果を図 7, 8 に示す。津波を模擬した

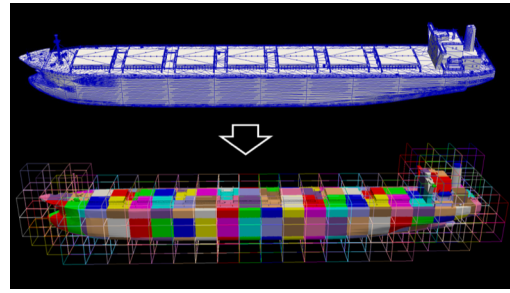


図 7 船体近傍のブロック格子の生成

高波により船舶が激しく流されていく事が確認できる。また、高密度比の気液界面が激しく乱される二相流現象に対しても安定に計算を実施できる事が確認された。

以上より、本解析手法を発展されていく事で、荒天下での海面変形やそれに伴う海水打ち込みによる衝撃荷重の評価や、転覆時の浸水解析など、船舶の安全性に対して貢献できる事が期待される。

## 6. 今年度の進捗状況と今後の展望

課題「実海域の船舶挙動の推定に向けた大規模計算手法の開発」を実施する事で、格子ボルツマン法での気液二相流モデルの構築及び、それを用いた船舶に対しての解析手法の提案を行った。提案した解析手法では、スプラッシュによる衝撃圧の評価及び基本的な気泡評価が可能であり、荒天下での海水打ち込みによる衝撃荷重の評価や、転覆時の浸水解析などに展開できる事が期待される。

本課題で実施できなかった事として、模型実験との比較及び AMR 法を用いた高速化が挙げられる。原因として、船舶の浸水計算で重要となる、格子ボルツマン法での気液二相流モデルの構築が困難であった事が挙げられる。最終的には、従来の自由表面流モデルでは解析が困難な気泡問題に対して適用可能となったものの、差分法で得られる高精度な結果の再現には至らなかった。今後の展望として、AMR 法の導入の後に乱流境界層を高精度に再現するための壁モデルの適用する事で、船舶分野での RANS 解析を置き換える事が可能であると考えられる。

以上より、本課題を展開していく事で、陽解法に基づく船舶の解析手法が構築され、スパコンを用いた船舶性能や安全性向上に貢献が期待される。

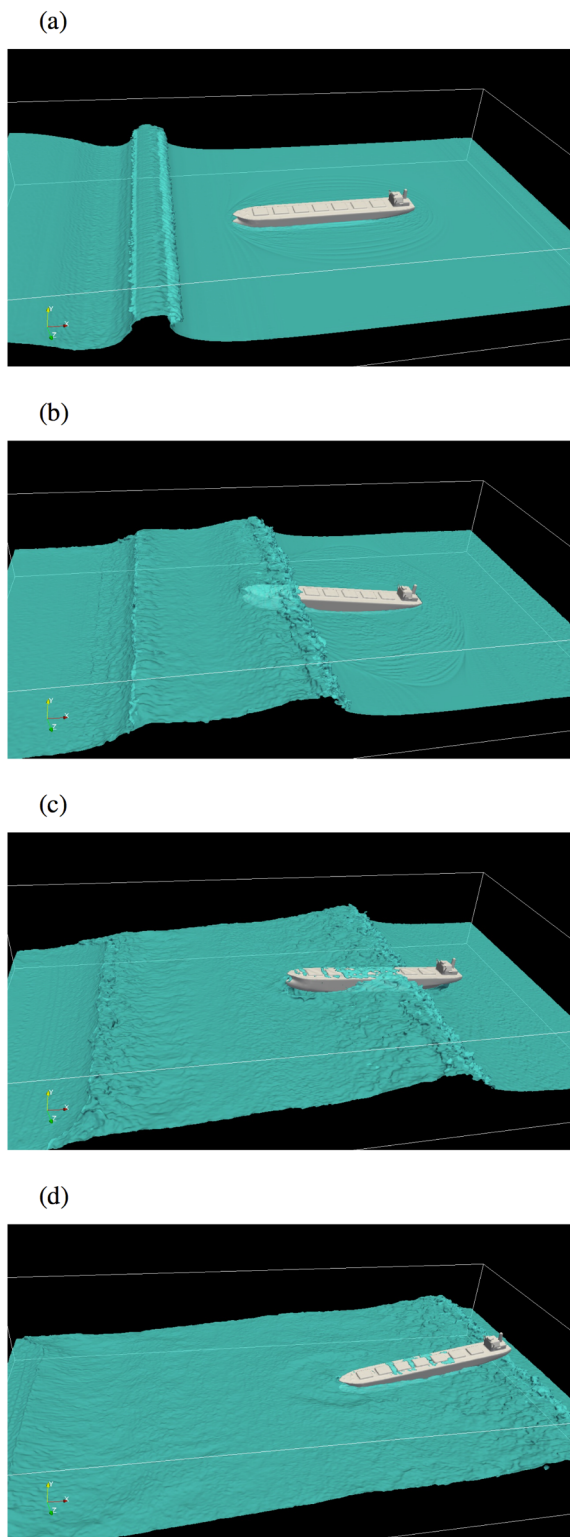


図 8 高波高中の船舶に対する固気液連成計算での気液界面.  
 (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20 秒. (N=736x132x444)

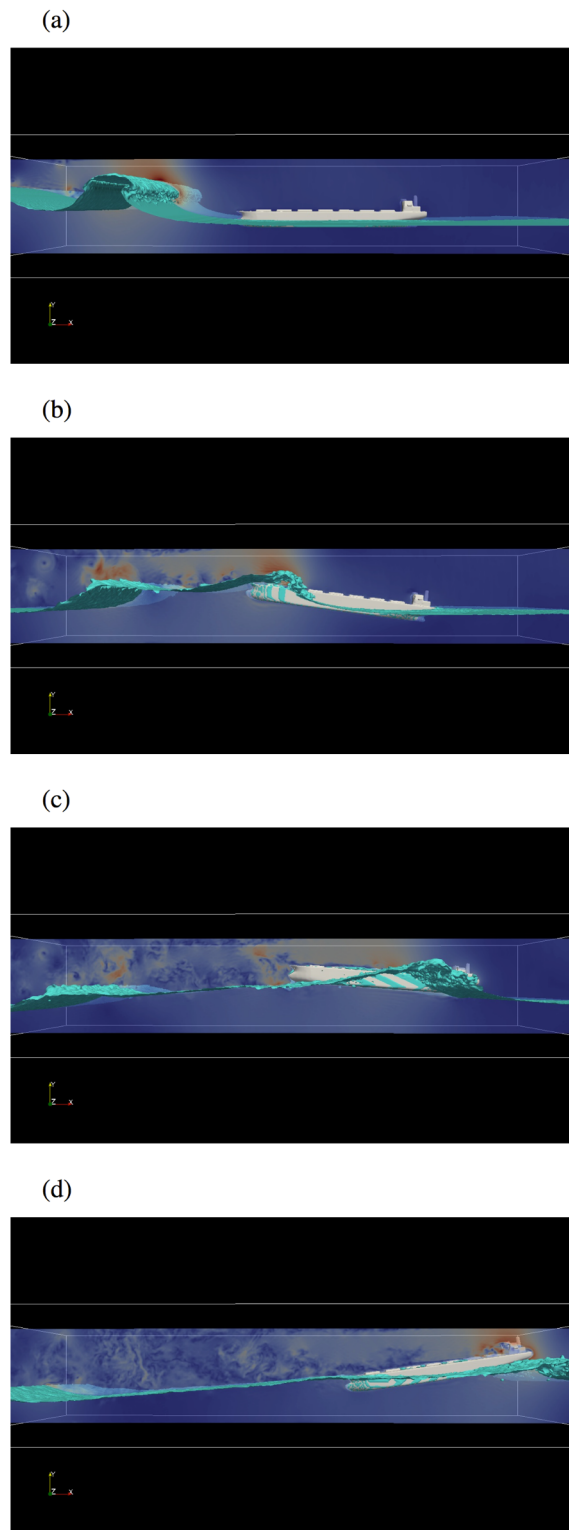


図 9 高波高中の船舶に対する固気液連成計算での二次元断面内の速度分布.  
 (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20 秒. (N=736x132x444)

## 7. 研究成果リスト

### ・課題前期(中間報告書記載)

#### (1) 学術論文

1. N. Onodera, T. Aoki, and K. Yokoi, “A fully conservative high-order upwind multi-moment method using moments in both upwind and downwind cells”, Int. J. Numer. Meth. Fluids, DOI: 10.1002/flid.4228, (2016), 査読有り

#### (2) 国際会議プロシーディングス

2. N. Onodera and K. Ohashi, “Large-scale Free-surface Flow Simulation using Lattice Boltzmann Method on Multi-GPU clusters”, ECCOMAS Congress 2016, Crete Island, Greece, June 2016, 口頭発表, 査読無し
3. T. Shimokawabe, T. Aoki, and N. Onodera, “High-productivity Framework for Large-scale GPU/CPU Stencil Applications”, ICCS 2016. The International Conference on Computational Science, California USA, June 2016, 口頭発表, 査読無し

#### (3) 会議発表

4. 小野寺直幸、大橋訓英、“GPU を用いた格子ボルツマン法による船舶周りの自由表面流解析”, 日本計算工学会講演会, 新潟, 2016, 口頭発表, 査読無し
5. 小野寺直幸、大橋訓英、“GPU を用いた格子ボルツマン法による船舶周りの自由表面流解析の高速化”, 日本機械学会 第 29 回計算力学講演会, 名古屋, 2016, 口頭発表, 査読無し
6. 小野寺直幸、大橋訓英、“格子ボルツマン法による気相・液相連成解析手法の開発”, 日本流体力学会年会 2016, 名古屋, 2016, 口頭発表, 査読無し
7. 河村昂軌, 小野寺直幸, “耐航性能シミュレーションのための GPU クラスタを用いた粒子法の動的負荷分散手法の開発”, 日本機械学会 第 29 回計算力学講演会, 名古屋, 2016, 口頭発表, 査読無し

8. 河村昂軌, 小野寺直幸, 橋本博公, 松田秋彦, “並列 GPU を用いた MPS 法の海水打ち込みシミュレーションの開発”, 日本船舶海洋工学会 秋季講演会, 広島, 2016, 口頭発表, 査読無し
9. 河村昂軌, 橋本博公, 小野寺直幸, “GPU を用いた MPS コードの強非線形自由表面流れへの適用”, 船舶海洋工学会春, 福岡, 2016, 口頭発表, 査読無し, 若手優秀講演賞

### ・課題後期(中間報告書以後)

#### (3) 会議発表

10. 小野寺直幸, 大橋訓英, “GPU を用いた格子ボルツマン法による気液連成解析モデルの開発”, 日本計算工学会 第 22 回計算工学講演会, 2017, 口頭発表, 査読無し
11. 大橋訓英, 小野寺直幸, “Xeon Phi による共有メモリ型計算手法の船舶周り流れへの適用性について”, 日本計算工学会 第 22 回計算工学講演会, 2017, 口頭発表, 査読無し
12. 下川辺隆史, 青木尊之, 小野寺直幸, “高精度計算を実現する AMR 法フレームワークの開発”, 日本計算工学会 第 22 回計算工学講演会, 2017, 口頭発表, 査読無し
13. 小野寺直幸, 大橋訓英, “格子ボルツマン法による気液二相流解析モデルの開発”, 日本流体力学会 第 30 回数値流体シンポジウム, 2016, 口頭発表, 査読無し