

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K20996

研究課題名(和文)GPUスパコンによる固気液多相流の大規模計算

研究課題名(英文)Large-scale gas-liquid-solid multi-phase simulation on the TSUBAME supercomputer

研究代表者

小野寺 直幸 (Naoyuki, Onodera)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：50614484

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：荒天下での船舶の操縦性性能は安全性に直結するため、重要な研究課題の一つである。船舶の運動を詳細に解析するためには、固気液三相流に対して大規模解析を行う必要がある。本研究では格子ボルツマン法に適した多相流モデル開発し、大規模計算に対応した。提案した解析モデルは自由表面流モデルに基づいており、気相と液相に対して独立に解析を行うことで、強非線形現象に対しても安定に解析できる。以上の提案により、スプラッシュ等の衝撃圧および基本的な気泡挙動が評価可能であるだけでなく、実スケールの船体を読み込んだ解析に成功した。研究で得られた成果を進めることで、船舶の評価技術の発展への貢献が期待される。

研究成果の概要(英文)：Ship maneuverability under heavy weather is one of important themes for safety. In order to understand the detail of ship motion, it is necessary to carry out large scale gas-liquid-solid multiphase simulations. We have developed a CFD code based on LBM (Lattice Boltzmann Method) with a two-phase free-surface model. The proposed two-phase model is based on a free-surface model, and both liquid and gas phases are independently time-integrated. It was confirmed that proposed method can evaluate impact pressure by splash and basic air behavior. Finally, we achieved a fluid-structure interaction simulation by using a full-scale ship data, and the effectiveness of our method was also confirmed.

研究分野：高性能数値流体計算

キーワード：格子ボルツマン法 ラージエディ・シミュレーション 自由表面流モデル 気液二相流モデル GPU 並列計算

## 1. 研究開始当初の背景

気液界面を含む工業製品の設計において、物体表面近傍の気泡の制御は、船舶の推進性能の向上やギアボックス内の攪拌抵抗の低減を可能とするなど、工学分野において非常に重要である。物体表面近傍の乱流境界層中では気泡の合体・分裂や変形が繰り返され、高精度解析の実現には、計算対象全体の流体の挙動と小スケールの気泡挙動を捉えた大規模計算が必須となる。

GPU(Graphics Processing Unit)は画像処理用の演算器であったが、近年これを汎用計算に適用する GPGPU(General-purpose computing on GPU)研究が盛んに行われている。GPU は従来の演算器である CPU と比べて計算の処理能力が非常に高く、且つ消費電力あたりの演算性能が高いため、ペタスケールのスパコンにおいても GPU を搭載したシステムが構築されている。また、次世代 GPU スパコンとして、東工大の TSUBAME 3.0 が稼働予定であり、GPU を用いたものづくりのための設計技術の確立は学術的・工学的にも注目を集めている。

ステンシルに基づく二相流解析として、差分法による非圧縮性流体計算が行われており、高精度の界面捕獲手法の導入により、気液界面から発生する気泡やスプラッシュなどの詳細な液面挙動を捉える事が可能である。しかしながら、計算手法内に Poisson 方程式の反復計算を含むため、数十億程度の格子点数で収束性が悪化し演算性能が低下するなど、こう並列の詳細解析は困難である。

一方で、格子ボルツマン法は陽的に時間発展を行うため大規模計算に適している。しかし、気液界面を含む乱流解析は計算が不安定であり確立されていない。申請者のこれまでの実績として、格子ボルツマン法にラージェディ・シミュレーションの乱流モデルを導入することで、東京工業大学のスパコンの 3,968 台の GPU を用いた 499 億格子の単相乱流計算に成功し、流体のアプリケーションの性能としては極めて高い 1.14 PFlops(単精度)を達成した。本研究では、これまでに構築した乱流解析手法に気液界面の捕獲手法を適用することで、高並列計算を実施し次世代スパコン上で動作する多相流解析手法を確立する。

## 2. 研究の目的

報告者が所属している海上技術安全研究所では、船舶の推進性能および安全性に対する解析を実施している。船舶に対して高精度な実験・計算を実施するためには、レイノルズ数だけでなく、自由界面に関する他の無次元数も合わせる必要がある。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ている。また、従来から解析に用いられている RANS の乱流モデルを用いた定常流解析手法をそのまま大規模計算に適用したとしても、

非定常現象に対しての解析精度に課題が残る。

本課題では、実海域における船舶を対象とした非定常解析手法を構築することで、従来手法では解析が困難であった非線形現象への適用を目指す。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モデルの提案により、大規模計算が可能となる。最終的には、造波による海面の大変形や海水打ち込みによる衝撃荷重、転覆時の浸水計算など、安全性の向上に貢献することを目指す。

## 3. 研究の方法

### (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、

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

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。

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

## 4. 研究成果

本研究の代表的な研究成果として、(1)東京工業大学でのスーパーコンピュータ TSUBAMEでの実効性能、(2)気液二相流モデルを用いた高密度比のダム崩壊計算、(3)気泡上昇問題、(4)バルクキャリアに対する計算、が挙げられる。以下に詳細を示す。

### (1) 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1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。

### (2) 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2に界面高さおよび圧力値の時刻歴変化を示す。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2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

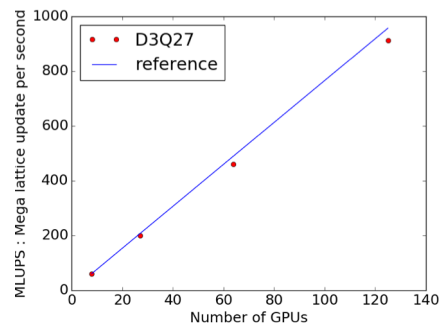


図1 TSUBAME2.5での気液二相流モデルによる弱スケーリング

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

### (3) 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 3 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.

### (4) 船体データを用いた解析

#### (4-1) 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。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

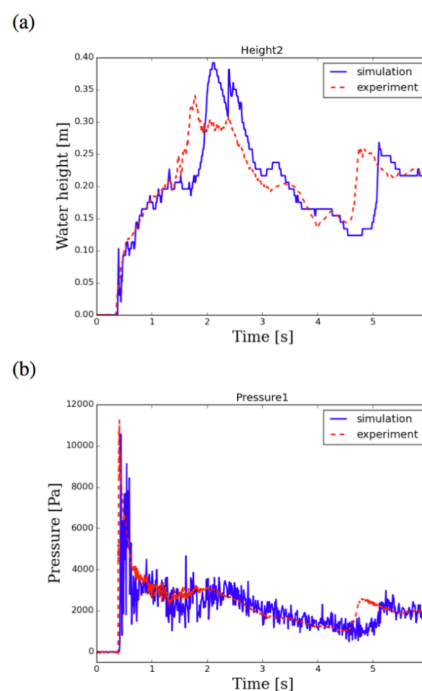


図 2 界面高さ (a) および圧力 (b) の時間履歴

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。

#### (4-2) バルクキャリアに対する二相流計算

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 4, 5 に示す。津波を模擬した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。

### (5) 研究成果のまとめ

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り、



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

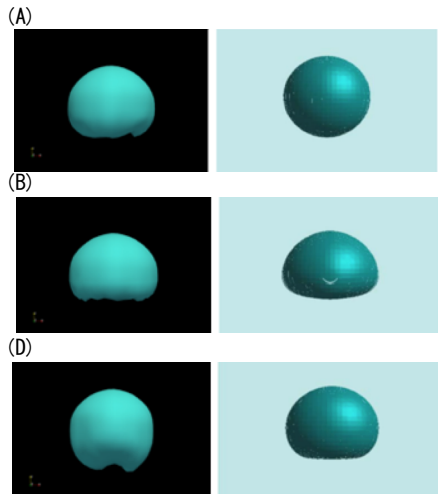


図3 単気泡上昇問題での気液界面形状  
左) 計算結果, 右) 差分法による比較結果  
(計算条件: A, B, D)

それにより計画が遅れたことが挙げられる。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、局所的に解像度を上げることのできるAMR(Adaptive Mesh Refinement)法の導入および乱流の壁モデルの導入により乱流境界層を高精度に捉えられ、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、スーパーコンピュータを用いた船舶性能や安全性向上に貢献が期待される。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

1. Huda AN, Inagaki A, Kanda M, Onodera N, Aoki T: Large Eddy Simulation of the Gust Index in an Urban Area using the Lattice Boltzmann Method, Boundary-Layer Meteorol, 2017, DOI: 10.1007/s10546-017-0233-6, 査読有り
2. Inagaki A, Kanda M, Huda AN, Yagi A, Onodera N, Aoki T: A numerical study

of turbulence statistics and the structure of a spatially developing boundary layer over a realistic urban geometry, Boundary-Layer Meteorol, 2017, 10.1007/s10546-017-0249-y. 査読有り

[学会発表] (計7件)

1. 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
2. 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. 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
4. 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
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. 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
7. 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", 計算工学講演会, 新潟, 2016

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他] 該当なし

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

小野寺 直幸 (Naoyuki Onodera)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号: 50614484

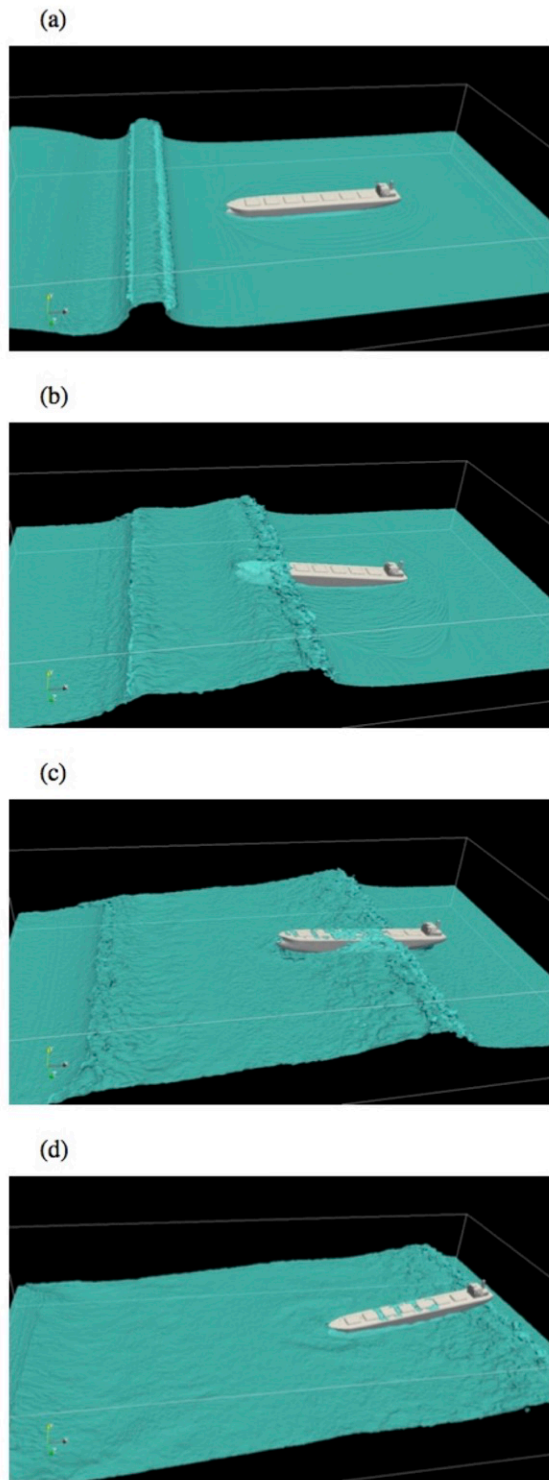


図 4 高波高中の船舶に対する固気液連成計算での気液界面.  
 (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20 秒. (N=736x132x444)

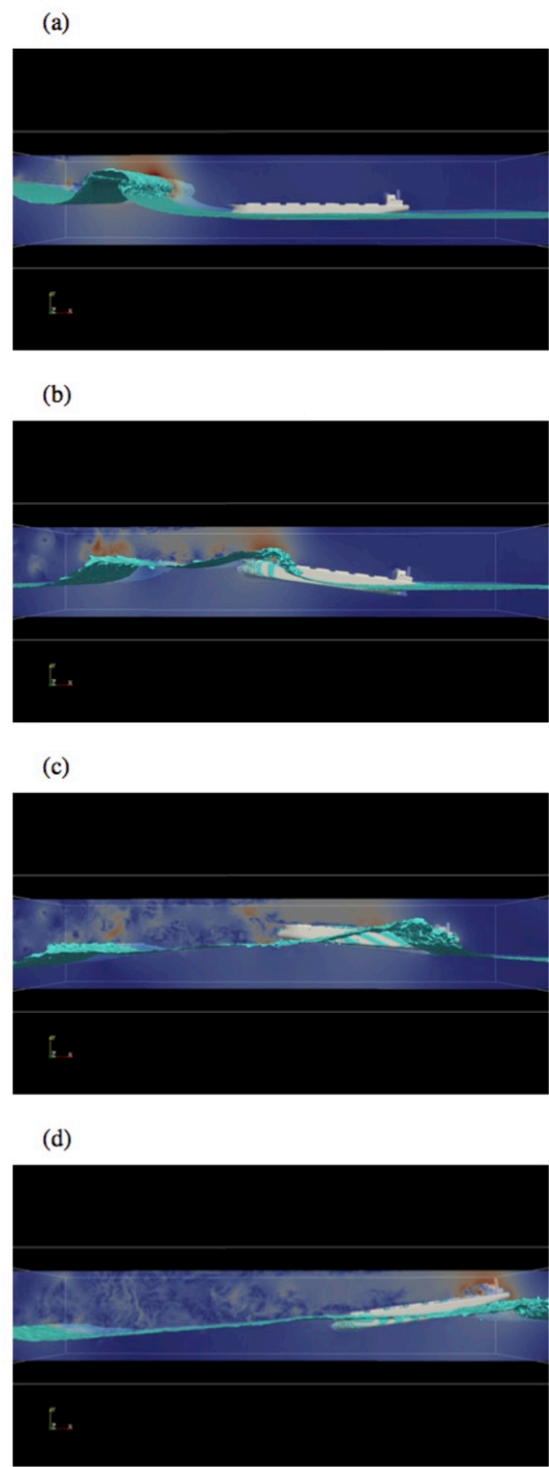


図 5 高波高中の船舶に対する固気液連成計算での二次元断面内の速度分布.  
 (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20 秒. (N=736x132x444)