

jh240023

## 二相系格子ボルツマン法による洋上風力発電用浮体の波浪中動揺シミュレーション

渡辺勢也（九州大学）

多数の風車から構成される大規模洋上ウィンドファームでは、風車ウェイク（後流）が下流域の風車の発電量や疲労荷重に影響する。日本で導入が期待される浮体式洋上風車では、浮体運動によりウェイクは複雑な流れとなり、それを予測可能な高精度な CFD 技術が求められる。本研究では、大規模計算に適した格子ボルツマン法に基づく浮体式洋上風車のシミュレーション手法の開発を目的とし、従来のナビエ・ストークス方程式に基づく解析よりも高い格子解像度で高精度なウェイク予測を目指す。今年度の研究課題では、風車計算部分を除き、洋上風車浮体の波浪中動揺を計算する気液二相系格子ボルツマン法コードの開発を行う。ダムブレイク流れや波浪伝播などの海洋工学のベンチマーク問題の取り組み、二相流格子ボルツマン法の計算安定性と計算精度を評価する。

### 1. 共同研究に関する情報

#### (1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名

東京科学大学 情報基盤センター

#### (2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

#### (3) 参加研究者一覧と役割分担

渡辺勢也（九大）：計算手法とコード開発

青木尊之（東工大）：気液二相流 LBM と GPU 計算に関する助言

胡長洪（九大）：水槽実験データの提供

金田昌之（大阪公立大）：気液二相流 LBM の助言

Yos Panagaman Sitompul（日本原子力研究開発機構）：気液二相流 LBM の助言

柿本耀（九大）：ポスト処理，データ整理

### 2. 研究の目的と意義

#### 研究の目的

風車の下流にはウェイクが形成され、風速

の低下と乱流強度の増加が起こる。風力発電施設には多数の風車が設置されるが、建設サイトの空間的制約からウェイクが回復するのに十分な風車間距離を確保できない。その結果、上流側風車のウェイクは後続風車に発電量低下と高い疲労負荷をもたらす。海に囲まれた日本では洋上風力発電、特に浮体上に風車を設置する浮体式洋上風力に大きな期待が寄せられている。陸上風車と異なり、浮体式風車のウェイクには浮体の動揺が影響するため、浮体式風車のウェイク干渉は複雑な流れとなり、高精度な数値流体シミュレーションが有効である。

課題代表者は 2022 年度・2023 年度の JHPCN 課題 (jh220016, jh230039) において、GPU コンピューティングと大規模計算に適した流体解析手法である格子ボルツマン法 (LBM : Lattice Boltzmann Method) を用い、着床式洋上風車から構成されるウィンドファームのシミュレーション手法を開発した。本研究では、浮体式風車の波浪中動揺とウェ

イクのシミュレーションに開発してきた格子ボルツマン法コードを適用することを目的とし、気液二相系 LBM への変更、浮体と流体の連成解析の実装に取り組む。本年度の課題では、風車計算部分を除き、洋上風車浮体の波浪中動揺を計算する気液二相系格子ボルツマン法コードの開発を目的とする。具体的には、二相流格子ボルツマン法コードの複数 GPU 実装、複雑物体境界条件の実装、造波水槽のモデリング、波浪中浮体応答シミュレーションを行う。ダムブレイク流れや波浪伝播などの海洋工学のベンチマーク問題の取り組み、二相流格子ボルツマン法の計算安定性と計算精度を評価する。

### 研究の意義

高密度比・高レイノルズ数の二相流に対する格子ボルツマン法の計算安定性の問題は、最新の二相流モデル<sup>(1)(2)</sup>で解決されつつあるが、気泡上昇やダムブレイクなどのベンチマーク問題での検証にとどまり、海洋工学分野への適用されていない。浮体式風車へ適用するには、波のシミュレーションや造波、浮体動揺を安定かつ高精度に扱えることが重要であり、本研究ではそのための手法開発と計算精度評価を重点的に研究する。

開発する浮体式風車の高速・高精度な CFD 技術により、流入風や波浪状態、後続風車の位置などを変えた数百数千の条件でシミュレーションを実施可能になる。大量の解析結果は、ウェイク干渉の現象理解のためだけでなく、データ駆動型モデルの訓練データとして利用できる。

### 3. 当拠点の公募型共同研究として実施した意義

格子ボルツマン法はアルゴリズムが単純で GPU コンピューティングと非常に相性が良く、GPU スパコンの利用が適している。GPU コンピューティングの第一人者である東京科学大学の青木尊之氏から JHPCN の枠

組みを使い、NVIDIA H100 に対する格子ボルツマン法の高速度化や 2024 年度から運用が開始した TSUBAME4.0 での複数 GPU 並列化、TSUBAME4.0 上での計算結果可視化について助言をいただくことで、LBM コードの計算性能の向上が期待できる。

本研究課題において高レイノルズ数の気液二相流 LBM の計算安定性を改善し、移動境界条件を導入することが最重要の課題である。青木尊之氏は気液二相流の大規模 CFD 計算の最先端の研究者であり、課題参加者の日本原子力研究開発機構・Yos Sitompul 氏と大阪公立大・金田昌之氏は気液二相流 LBM の研究者である。激しい気液二相流や複雑物体境界を含む二相流に対する LBM の知見を有しているため、助言をいただく。

### 4. 前年度までに得られた研究成果の概要

新規課題であるため、該当なし。

### 5. 今年度の研究成果の詳細

基本的な LBM は速度分布関数と支配方程式を密度ベースとしているため、気液二相流の 1000 倍近い密度比では計算不安定になる。そこで、本研究課題では、2017 年に Fakhari ら<sup>(3)</sup>により開発され、2021 年に Wei ら<sup>(2)</sup>により 3 次元の激しい気液二相流へ適用された速度ベースの格子ボルツマン法を用いて気液二相流と浮体の連成解析コードの研究開発を行う。速度分布関数の 0 次モーメントを無次圧力とした分布関数を利用することで、高密度比の二相流を安定化させる手法である。界面捕獲手法にはフェーズフィールド法を用いる。Wei らは CG 分野に格子ボルツマン法を適用した研究であり、工学的なベンチマークにより定量的に計算精度を評価することが重要である。

#### ① 複数 GPU 実装

二相流 LBM のシングル GPU コードの開発は課題開始以前に概ね完了していた。東京

科学大学の GPU スーパーコンピュータ TSUBAME4.0 の稼働開始に合わせ、LBM コードの複数 GPU 実装を行った。

複数 GPU 並列化には、デバイスメモリ上で従属変数の並びが連続する z 軸方向に対する 1 次元の領域分割法を採用した。TSUBAME4.0 に搭載されている NVIDIA H100 のメモリ容量は 94 GB と大容量であり、1 台の GPU で 1 億格子点以上の計算が可能である。10 億格子規模の計算を数 GPU で可能であり、多数のプロセッサによる並列計算に適す 2 次元や 3 次元の領域分割法は必要ないと考えた。Flat MPI により 1 ノードに 4 つの MPI プロセスを割り当て、各 MPI プロセスが 1 台の GPU により一つの小領域の計算を担当する。

GPU 間の通信には OpenMPI+NVIDIA HPC SDK 環境で CUDA 対応の MPI ライブラリを利用する。GPU Direct による GPU 間の直接通信が可能である。Isend と Irecv の MPI サブルーチンにデバイスメモリのポインタを直接渡すことができ、明示的に GPU-CPU 間通信を書く必要をなくした。

TSUBAME4.0 にて弱・強スケーリングを測定した。弱スケーリングでは 1GPU あたりの格子点数を  $512^3$  とし、1GPU から 64GPU までの性能を評価した。64GPU での総格子点数は約 86 億である。弱スケーリングの結果を図 1 に示す。赤色はノード内 (4GPU まで)、青色は複数ノードの結果を示し、点線は理想的なスケーリングを示す。1GPU では GPU 間通信がないためノード内の弱スケーリングは少し低下している。並列化効率は 1GPU から 4GPU で 83% である。複数ノードでは良好なスケーリングで 8GPU から 64GPU の並列化効率は 90% である。

強スケーリングの結果を図 2 に示す。並列数に応じて、総格子点数が  $512 \times 512 \times 512$  (赤色) と  $512 \times 512 \times 4096$  (青色) の 2 ケースを設定した。強スケーリングも良好な結

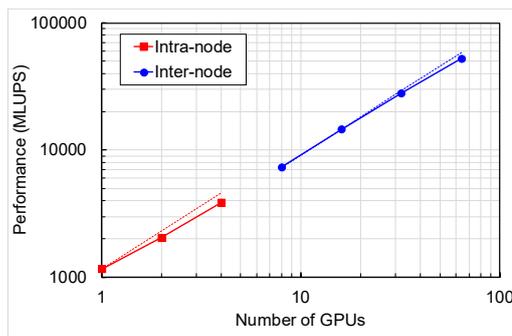


図 1 弱スケーリングの結果

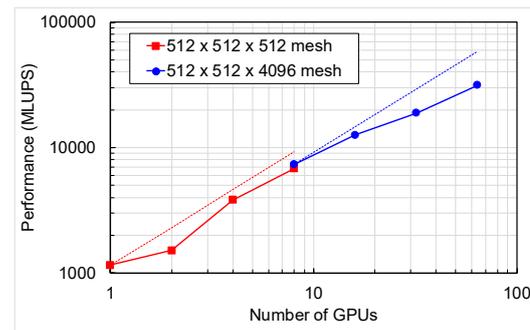


図 2 強スケーリングの結果

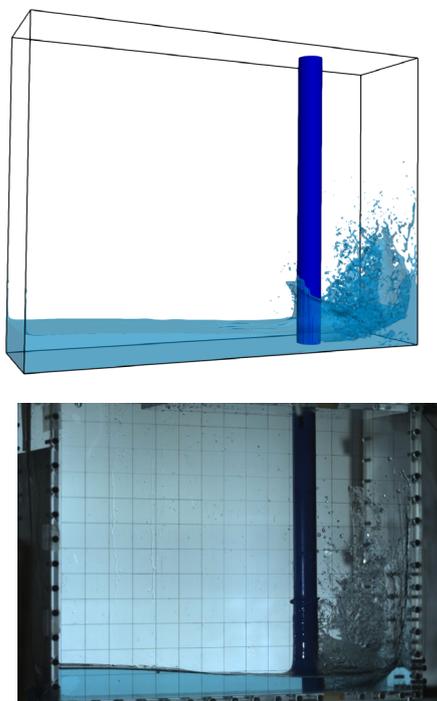
果であり、1GPU から 8GPU の並列化効率は 73%、8GPU から 64GPU では 54% であった。NVIDIA H100 はメモリ容量が 94 GB と大きく、TSUBAME3.0 の NVIDIA P100 に比べて強スケーリングの始点において GPU あたりの格子点数を多く設定できる。そのため、プロセス数を増やしても GPU あたりで扱える格子点数が多くなり、相対的に通信コストが小さくなるため、計算の速い LBM でも良い強スケーリングが得られたと考える。

## ②複雑形状物体の境界条件の実装とダムブレイクベンチマークでの精度検証

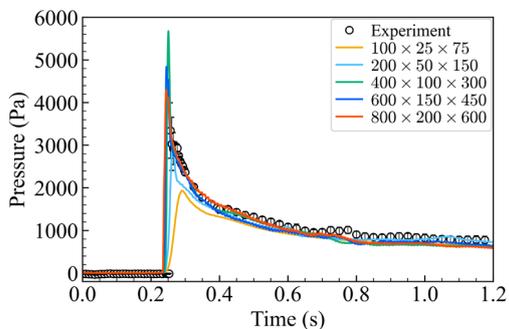
申請者はこれまでの单相流の LBM に関する研究では、Interpolated Bounce-back 法という空間 2 次精度で格子に沿わない物体を扱える境界条件を格子ボルツマン法で利用してきた。課題申請時は Interpolated Bounce-back 法を二相流 LBM にも導入予定であったが、高レイノルズ数の二相流では計算が不安定になることがダムブレイク流れの検証で明らかになった。代わりとして、Hybrid Bounce-back 法の実装を行い、これは局所平衡状態の

分布関数を **Bounce-back** で計算された分布関数に 10%ほど混ぜることで安定化させる境界条件手法である。

障害物を含むダムブレイク流れのベンチマーク問題として、課題代表者が所属する九州大学応用力学研究所で過去に行われた円柱障害物が設置された水槽でのダムブレイク<sup>(4)(5)</sup>, Kleefsmann ら<sup>(6)</sup>による角形の障害物が設置された水槽でのダムブレイクの2つの問題を選択し、計算安定性と計算精度を評価した。それぞれの水槽サイズは  $0.8\text{ m} \times 0.2\text{ m} \times 0.6\text{ m}$  と  $3.22\text{ m} \times 1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$  である。



(a) 計算と実験の自由界面の比較

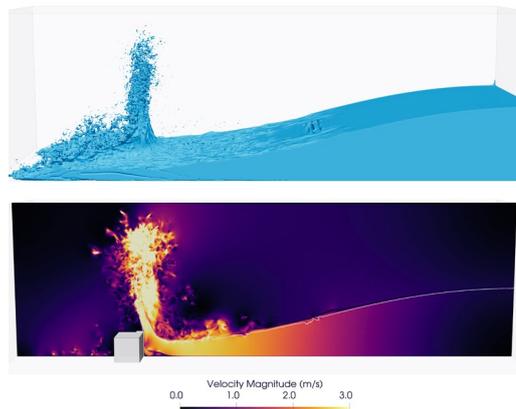


(b) 円柱表面の圧力

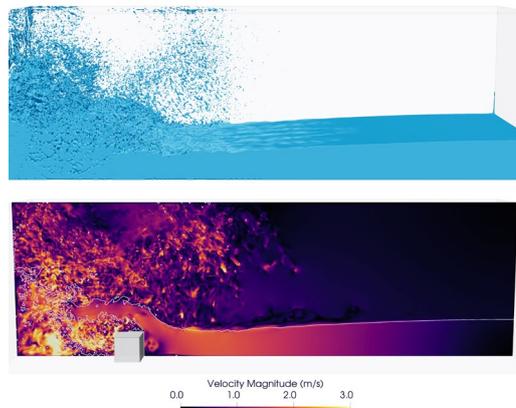
図 3 円柱障害物が設置されたダムブレイクの計算結果

円柱障害物が設置されたダムブレイクの計算結果を図 3 に示す。本研究の二相流解析手法でダムブレイク流れを安定に計算でき、図 3(a)より自由界面の形状が水槽実験と概ね一致することを確認した。図 3(b)は円柱表面の圧力を示す。格子解像度を変えた 5 ケースの計算を行い、格子収束性を調べた結果、このダムブレイク問題に対して1億メッシュ以下の格子で実験と十分に一致した圧力時系列が得られた。最も細かいメッシュの  $800 \times 200 \times 600$ での計算時間は1台の H100 で8時間ほどであり、格子ボルツマン法は高速な二相流計算が可能であることが確認できた。

Kleefsmann ら<sup>(6)</sup>による角形の障害物が設置された水槽でのダムブレイクに対し、メッシュ  $1932 \times 600 \times 600$ を用いた計算結果を図 4 に自由表面と速度場のプロファイルで示す。



(a)  $t = 0.6\text{ s}$



(b)  $t = 1.2\text{ s}$

図 4 角形障害物を含むダムブレイクの計算結果（自由界面と速度場）

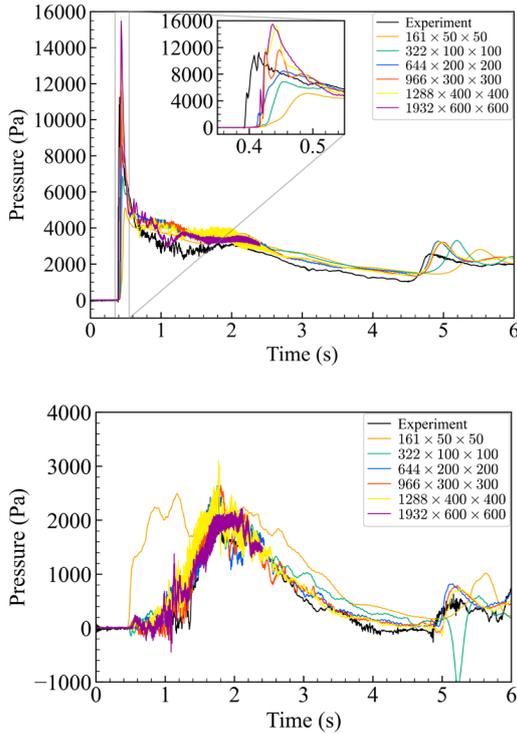


図 5 障害物の側面と上面の圧力時刻歴

高解像度メッシュにより微小な液滴や気泡の発生を捉えていることがわかる。速度場を見ると主に気相側で細かな渦構造が確認できる。また、高解像度になると数値振動が発生し計算不安定となる場合もあるが、そのときはフェーズフィールドの界面モビリティパラメータを小さくすることや、時間刻み幅を小さくすることで解決できることがわかった。図 5 は障害物の側面と上面の波浪衝撃圧力を示す。メッシュ  $644 \times 200 \times 200$  よりも細かい場合は実験とよく一致した結果が確認できる。

### ③ 造波水槽モデリングと波浪伝播シミュレーション

様々な波浪条件下で浮体の動揺をシミュレーションするには、数値造波水槽のモデリングが必要となる。課題申請時は九州大学の大型実験水槽を模擬するため、楔形の物体の上下運動により波を発生するプランジャー型造波装置のモデリングを計画していたが、より低い計算コストで実現するため仮想的な外力

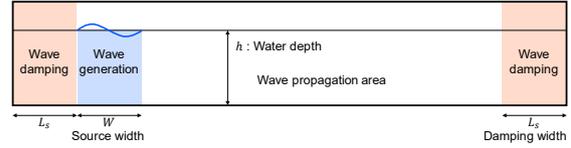


図 6 造波水槽モデル

を流体に加えることで造波する手法を採用した。図 6 に示すように、計算領域に造波領域とダンピング領域を設定し、その領域に外力を与える。

先行研究<sup>(7)</sup>を参考に、造波領域には鉛直方向に

$$S_g = g(2\beta\tilde{x}) \exp(-\beta\tilde{x}) \frac{D}{\omega} \sin(\omega t)$$

$$D = \frac{2\eta(\omega^2 - \alpha_1 g k^4 h^3)}{\omega I_1 k [1 - \alpha(kh)^2]}$$

$$I_1 = \sqrt{\frac{\pi}{\beta}} \exp\left(-\frac{k^2}{4\beta}\right)$$

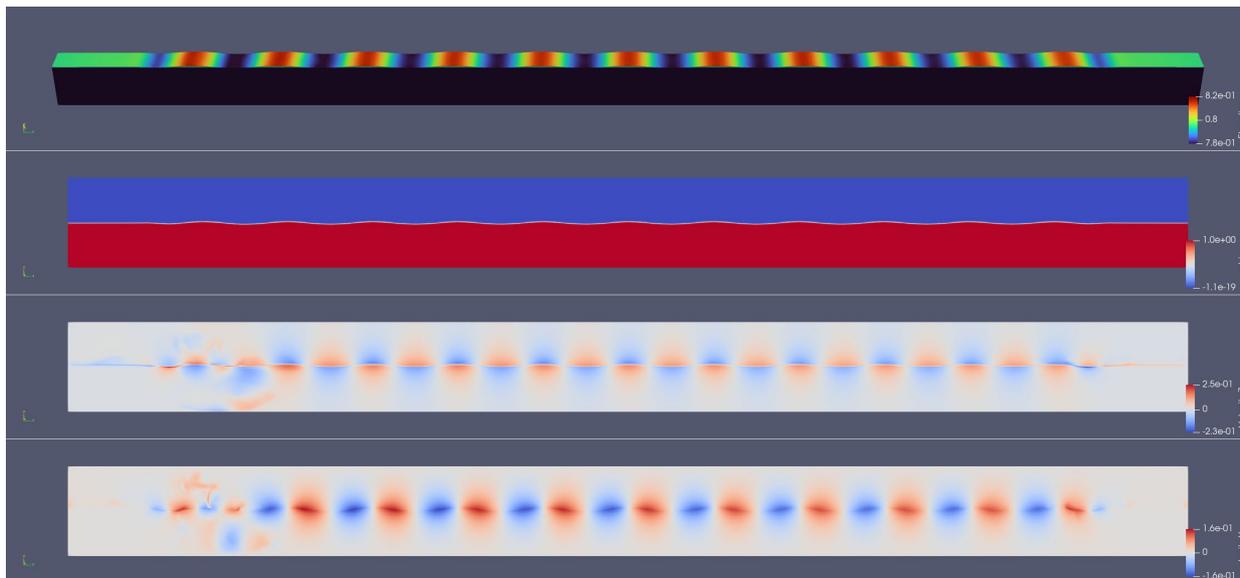
を与える。ここで、 $g$  は重力加速度、 $\tilde{x}$  は造波領域の中央からの距離、 $\omega$  は波の周波数、 $k$  は波数、 $h$  は水深である。係数  $\beta$  は造波領域の幅  $W$  を用いて  $\beta = W/20$  と設定する。係数  $\alpha$  と  $\alpha_1$  には、先行研究に従い  $\alpha = -0.38955$ 、 $\alpha_1 = \alpha + 1/3$  を設定する。

ダンピング領域には減衰力  $S_e$

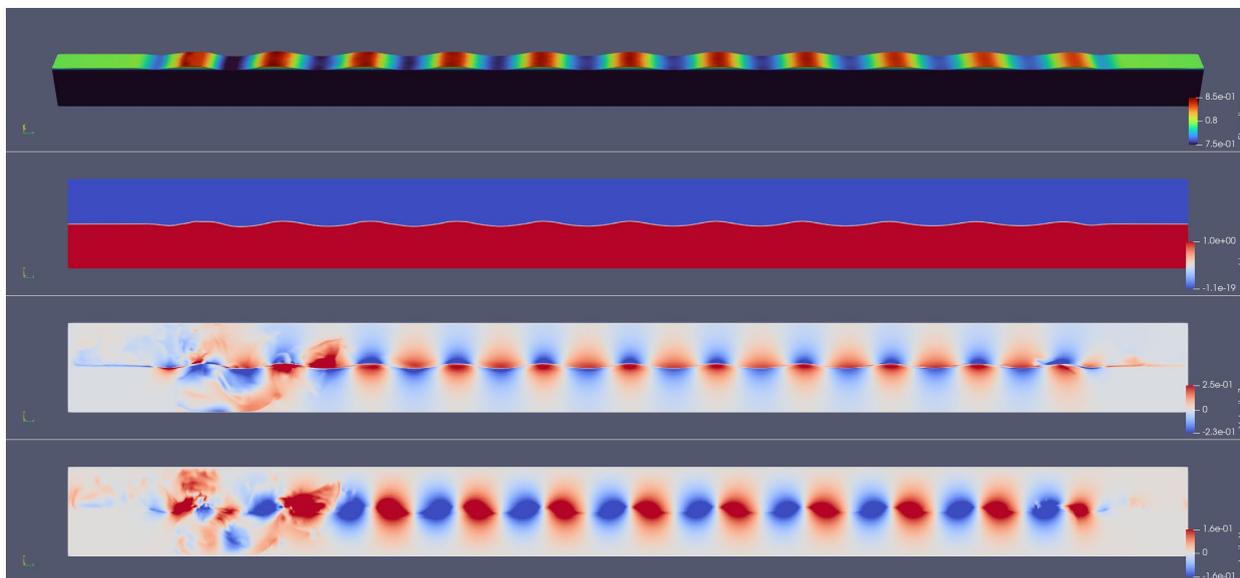
$$S_e = -(C_1 \mathbf{u} + C_2 \mathbf{u} |\mathbf{u}|) \frac{\exp\left[\left|\frac{x-x_0}{L_s}\right|^{n_s}\right] - 1}{e - 1}$$

を与える。 $x_0$  はダンピング領域の開始位置である。パラメータ  $C_1, C_2, n_s$  はトライ・アンド・エラーで調整し、それぞれ 0.02, 0.02, 2 とした。

造波と波浪伝播の検証計算を実施した。計算領域を  $20 \text{ m} \times 0.48 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$  とし、格子解像度は  $4 \text{ mm}$  と設定した。計算メッシュは  $5000 \times 120 \times 400$  である。波高は  $0.04 \text{ m}$  および  $0.08 \text{ m}$  の 2 ケースとし、波の周期は  $1.0 \text{ s}$ 、水深は  $0.8 \text{ m}$  と設定し、30 秒までの造波と波浪伝播を計算した。ダンピング領域の幅は  $L_s = 2.0 \text{ m}$ 、造波領域の幅は波長と同じにし



(a) 波高 0.04 m



(b) 波高 0.08 m

図 7 造波と波浪伝播のシミュレーション結果 (t=30 s)

た.

計算結果を図 7 に示す. 上から順に, 水位で色付した自由界面, 横から見たフェーズフィールド変数 (自由界面), 主流方向速度, 鉛直方向速度である. 波高は 0.04 m では安定した造波が行え, 造波領域の反対側のダンピング領域まで, 波形を保ったまま波が伝播していることを確認した. ダンピング領域で波は減衰し, 反射波の発生を抑えられていることを確認できた. 波高 0.08 m でも造波と波浪伝播の計算はできたが, 造波領域の近くの速度プロファイルが乱れてしまっている.

浮体式風車のシミュレーションを実現するためには, 造波水槽の空気側に流入境界条件を設定する必要がある, 今後は風と波を扱える造波水槽のモデリングを進める予定である.

## 6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

研究課題申請時の研究計画としては, 数値水槽に凸型浮体や風車用の浮体を浮かべ, 波浪中の浮体動揺のシミュレーションを実施する予定であった. 複数 GPU 化し, 大規模計算により格子解像度を細かくしていくと, ダム

ブレイク問題で数値振動が発生することが判明した。LES の陽的な乱流モデルの導入など（数値振動に対してあまり効果はなかったが）、当初は計画していなかったことにも取り組み、数値振動の問題を解決するのに時間を要した。数値振動はフェーズフィールド法のモビリティパラメータと時間刻み幅を小さくすることで発生を抑えられることがわかった。その後、数値水槽モデリングに取り組み、造波領域とダンピング領域に外力を与える方法で、造波と波浪伝播の計算を可能にした。進捗状況の自己評価としては、当初の計画の 60%ほどである。

今後の予定は、造波数値水槽に浮体を浮かべ、波浪中動揺についてシミュレーションを進めていく予定である。また、数値水槽の空気側に流入流速を与え、浮体式風車のシミュレーションを可能にする。NVIDIA H100 は大容量のデバイスメモリがあるため、少ない GPU 数で造波水槽や浮体シミュレーションが可能であるため、2025 年度の JHPCN 継続課題を申請せず、TSUBAME の共同利用で研究を進めていく計画である。

研究業績に関して、ダムブレイクのシミュレーション計算結果を、2025 年 8 月開催の査読付きの国際会議 IWSH2025 にて発表予定である。

### 参考文献

- (1) Sitompul Yos Panagaman and Takayuki Aoki, *J. Comput. Phys.*, 390, 93–120, (2019).
- (2) Wei Li, Yihui Ma, Xiaopei Liu, and Mathieu Desbrun, *ACM Trans. Graph.*, 41, 4, Article 114 (2022).
- (3) Abbas Fakhari, Travis Mitchell, Christopher Leonardi, and Diogo Bolster, *Phys. Rev. E*, 96, 053301 (2017).
- (4) Mohamed M Kamra, Jabir Al Salami, Makoto Sueyoshi, and Changhong Hu, *J. Fluid Struct.*, 86, 185–199 (2019).

- (5) Nik Mohd Izual Bin Nik Ibrahim, PhD thesis, Kyushu University (2018).
- (6) K.M.T. Kleefsman, G. Fekken, A.E.P. Veldman, B. Iwanowski, and B. Buchner, *J. Comput. Phys.*, 206, 1, 363–393 (2005).
- (7) Guangwei Liu, Qinghe Zhang, Jinfeng Zhang, *Comput. Fluids*. 184, 153–164 (2019).

※7. 研究業績はウェブ入力です