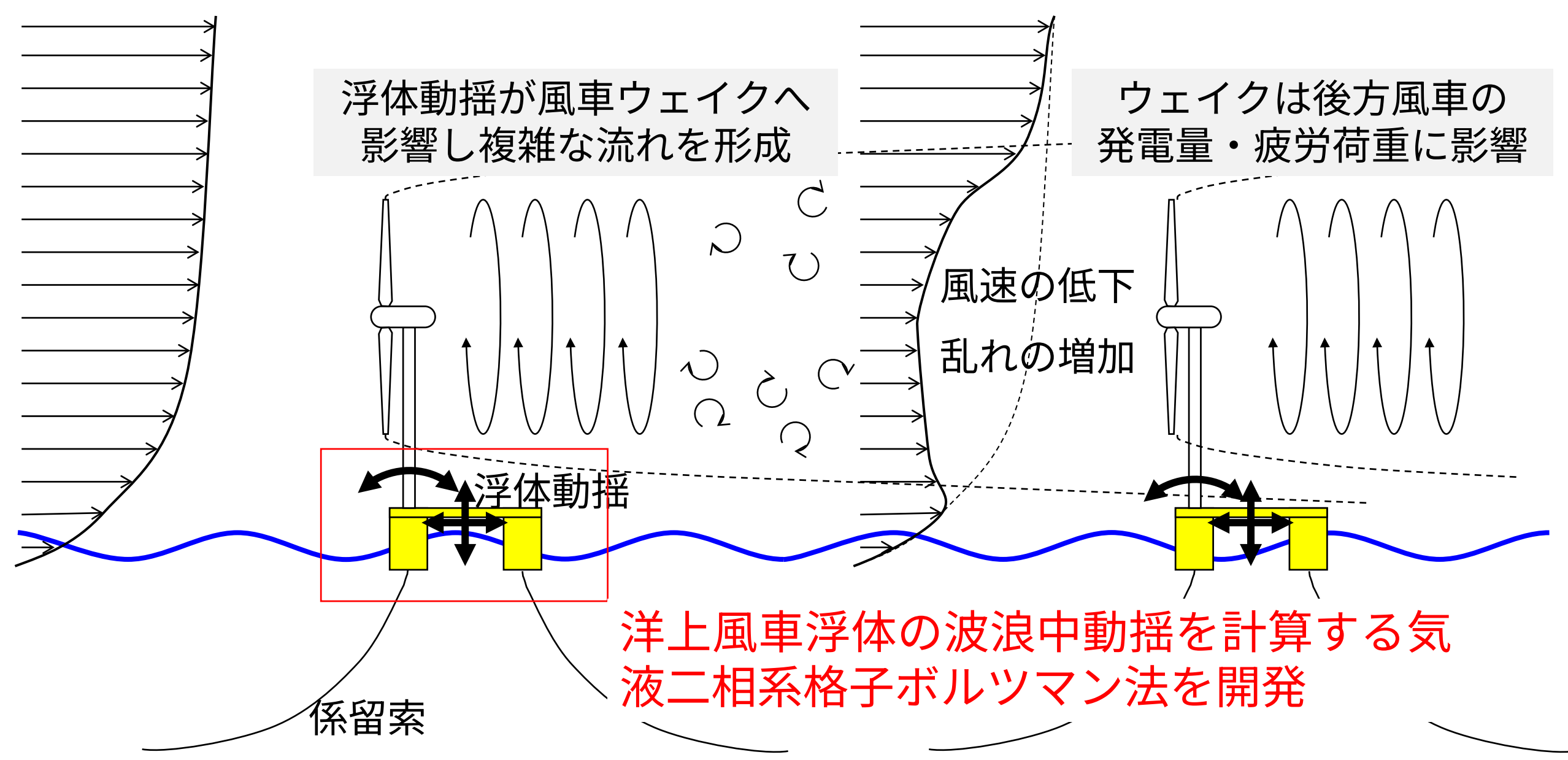


渡辺勢也 (九州大学 応用力学研究所)

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

研究背景

- 日本の周辺海域は水深が深いので、海に浮かべた構造物(浮体)に風車を設置する「浮体式洋上風力発電」が再生可能エネルギーとして期待されている。
- 多数の風車から構成されるウィンドファームでは、上流側の風車ウェイクが後流側の風車の発電量と疲労荷重に影響する。
- 浮体式風車のウェイクには浮体動揺が強く影響し複雑な流れが形成されるため、数値流体シミュレーションによるウェイクの予測と理解が必要である。
- 浮体式風車シミュレーションには、気液界面・乱流・浮体・風車の連成解析が必要である。



研究実施体制

代表者	渡辺 勢也	(九州大学)
副代表者	青木 尊之	(東京工業大学)
共同研究者	胡 長洪	(九州大学)
共同研究者	金田 昌之	(大阪公立大学)
共同研究者	Yos Sitompul	(日本原子力研究開発機構)
共同研究者	柿本 耀	(九州大学)

研究計画

二相系格子ボルツマン法と浮体の連成解析手法のコード開発を行い、以下の4つのシミュレーションを通して開発手法の計算安定性と計算精度を評価する。

Q1: 障害物を含むダムブレイク流れ

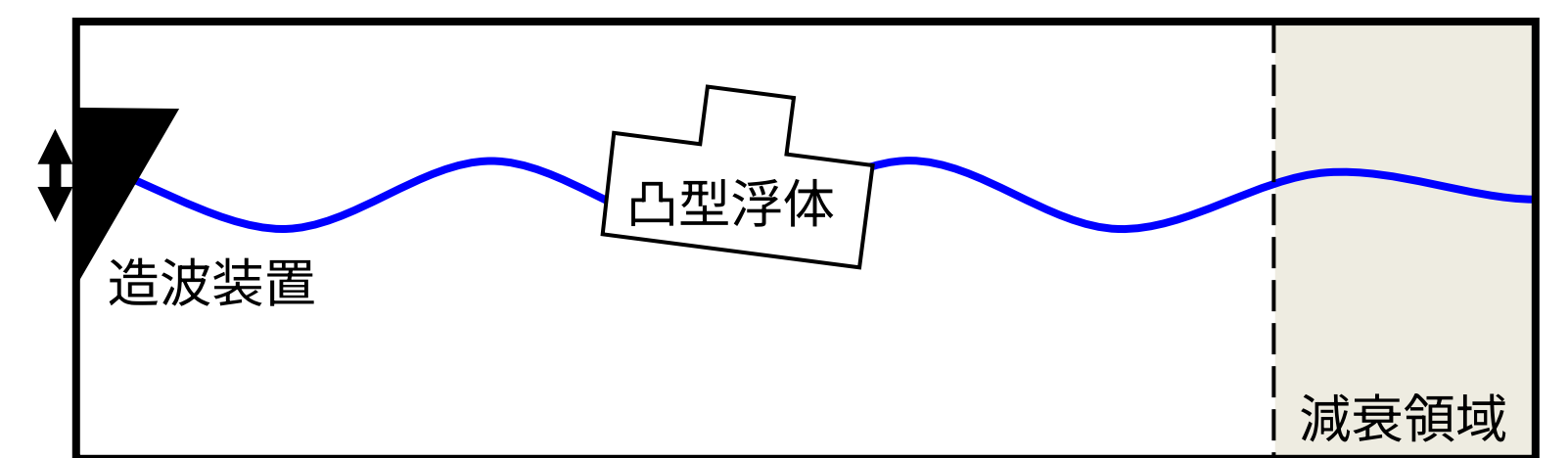
- 二相系格子ボルツマン法コードのTSUBAME4.0での動作確認と、複数GPU並列化を行う。
- 複雑形状の物体を扱えるBounce-back境界条件を実装する。
- 実際の水と空気の物性値を用いた障害物を含むダムブレイク流れで、計算安定性と計算精度を評価する。

Q2: 数値造波水槽の構築と波の伝播

- 移動境界問題に適用するBounce-back境界条件を実装する。
- 波浪条件下で浮体の動揺をシミュレーションするために、数値造波水槽のモデリングを行う。
- プランジャー型造波装置による造波と波の伝播の計算精度を評価する。

Q3: 凸型浮体の波浪中動揺

- 気液二相流と剛体運動の連成を行う。
- 波浪中における凸型浮体の運動と浮体近傍の気液界面の形状を過去の水槽実験やCFDと比較し、計算精度を検証する。



Q4: 洋上風車用浮体の波浪中動揺

- 典型的なセミサブ型洋上風力発電用浮体の波浪中動揺シミュレーションを行い、エンジニアリングモデルや先行研究の実験・CFDと比較し、開発手法の計算精度を検証する。
- 縮小模型スケールと実機スケールの計算を実施し、高レイノルズ数流れに対する計算安定性と計算精度を評価する。

研究目的

浮体式洋上風車の波浪中動揺と風車ウェイクを高精度に再現できるシミュレーション手法を開発する。

- 過去2年間のJHPCN研究課題で、GPU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は、風車ウェイクの度乱流計算に有効であることを確認した。
- 格子ボルツマン法を浮体式洋上風車の計算に適用するため、気液二相流モデルへの変更と浮体と流体の連成解析の実装を行う。
- 2年間の研究計画で、2024年度は、風車計算部分を除いて、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を中心に開発を進める。



二相系格子ボルツマン法

フェーズフィールド法

- 気液界面は各相の存在を表すフェーズフィールド変数 ϕ により表現される。
- 物性値は気液界面で滑らかに変化する。

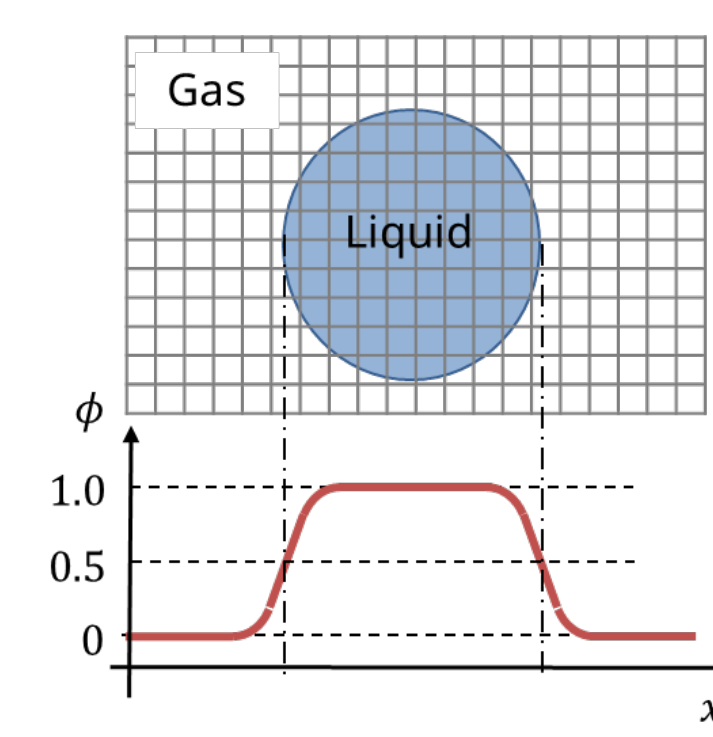
保存型Allen-Cahn方程式

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \mathbf{u}) = \nabla \cdot \left[M \left(\nabla \phi - \frac{4}{\xi} \phi (1 - \phi) \mathbf{n} \right) \right]$$

W : 界面幅 M : 界面モビリティ

密度 $\rho(\mathbf{x}, t) = \rho_L + (\rho_H - \rho_L)\phi(\mathbf{x}, t)$

動粘度 $\frac{1}{\nu(\mathbf{x}, t)} = \frac{1}{\nu_L} + \left(\frac{1}{\nu_H} - \frac{1}{\nu_L} \right) \phi(\mathbf{x}, t)$



速度ベース格子ボルツマン法(1)(2)

- 速度分布関数 g_i の総和(0次モーメント)を無次元圧力 p^* と定義する。
- 速度分布関数 g_i の1次モーメントを流体の速度 \mathbf{u} と定義する。
- 衝突モデルには計算安定性の高いCentral-moment MRTを採用する。

速度分布関数 g の時間発展方程式

$$g_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i \Delta t, t + \Delta t) = g_i(\mathbf{x}, t) + \Omega_i^g(\mathbf{x}, t) + G_i(\mathbf{x}, t)$$

衝突項 (Central-moment MRT)

$$\Omega^g = -M_c^{-1} S_c M_c (g - g^{eq})$$

$$g_i^{eq} = w_i^c \left[1 + \frac{\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u}}{c_s^2} + \frac{(\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u})^2}{2c_s^4} - \frac{\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}}{2c_s^2} \right] + (p^* - 1)w_i^c - \frac{G_i}{2}$$

S_c : 緩和係数行列 M_c : 変換行列 w_i^c : 重み行列 G_i : forcing term

流体に作用する力

$$\mathbf{F} = -p^* c_s^2 \nabla \rho + \nu [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] \nabla \rho + \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_b$$

圧力勾配 粘性力 表面張力 体積力

無次元圧力

$$p^*(\mathbf{x}, t) = \frac{p(\mathbf{x}, t)}{\rho(\mathbf{x}, t)c_s^2} = \sum_{i=0}^{26} g_i(\mathbf{x}, t)$$

流速

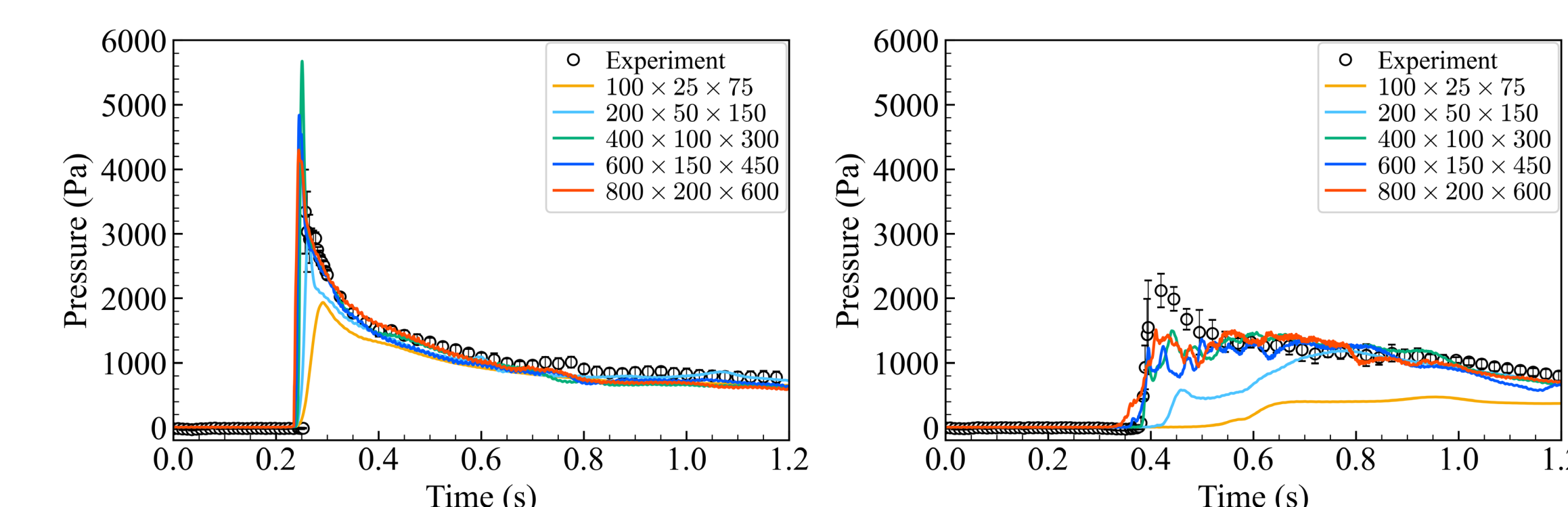
$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \sum_{i=0}^{26} \mathbf{c}_i g_i(\mathbf{x}, t) + \frac{\mathbf{F}(\mathbf{x}, t)}{2}$$

ダムブレイク流れのシミュレーション

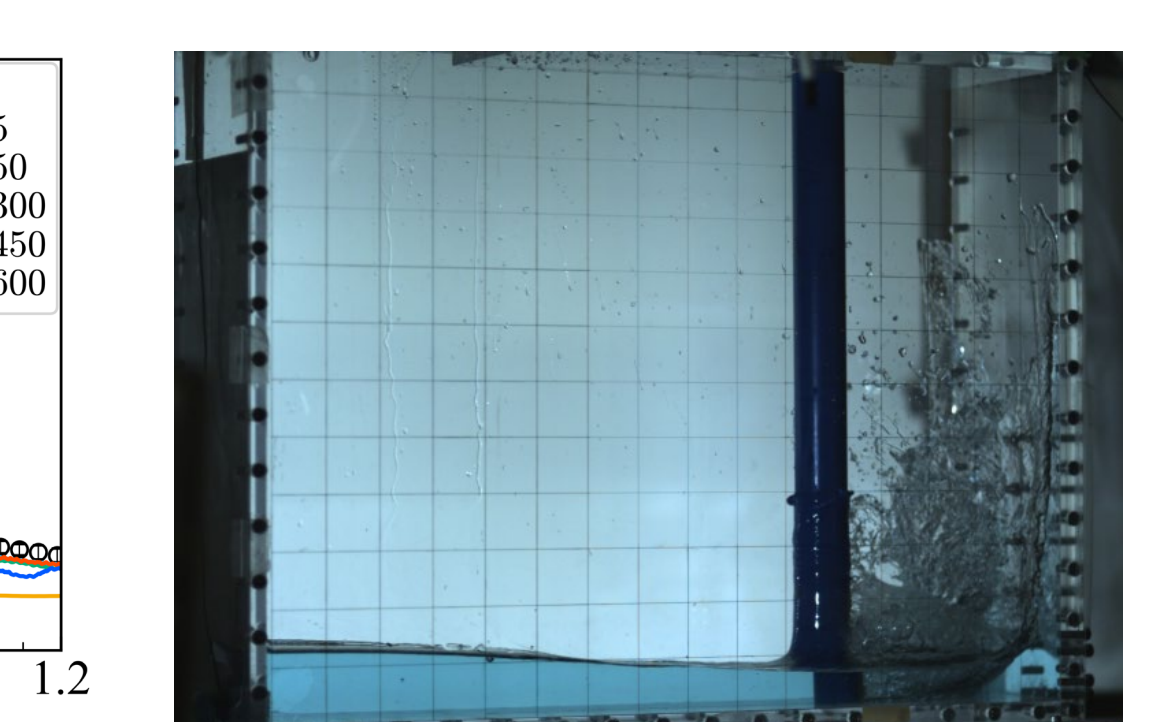
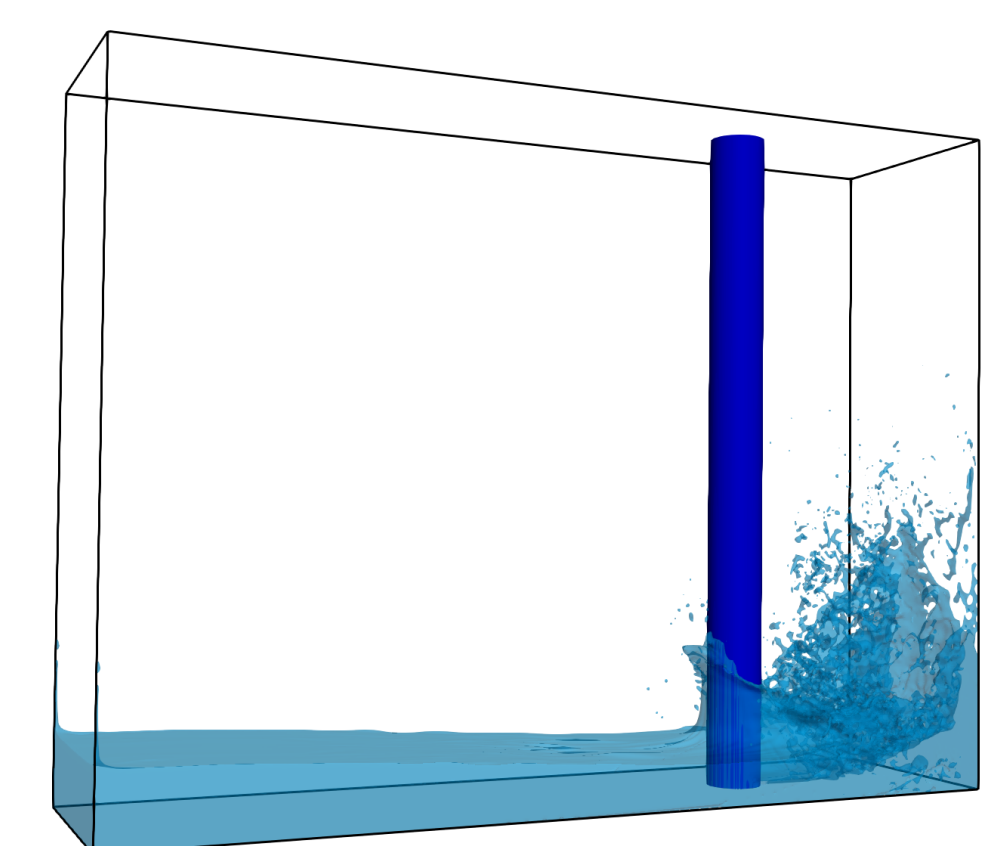
- 進捗状況: 第1Qに予定していたダムブレイク流れの検証計算を実施した。
- 実際の水と空気の物性値を用いた解析により、波浪衝撃圧力が実験と良く合い、速度ベース二相流LBMモデルの計算精度と計算安定性を確認した。

円柱に衝突するダムブレイク流れ

- 九州大学で過去に実験を実施した水槽サイズ0.8 m×0.2 m×0.6 mの円柱障害物を含むダムブレイク流れ。
- 速度分布や圧力分布に非物理的な数値振動は発生しておらず、安定した計算が可能であることを確認した。
- 先行研究⁽³⁾の実験と圧力の時系列を比較し、細かいメッシュを用いることで波浪衝撃圧力が実験とよく一致することを確認した。



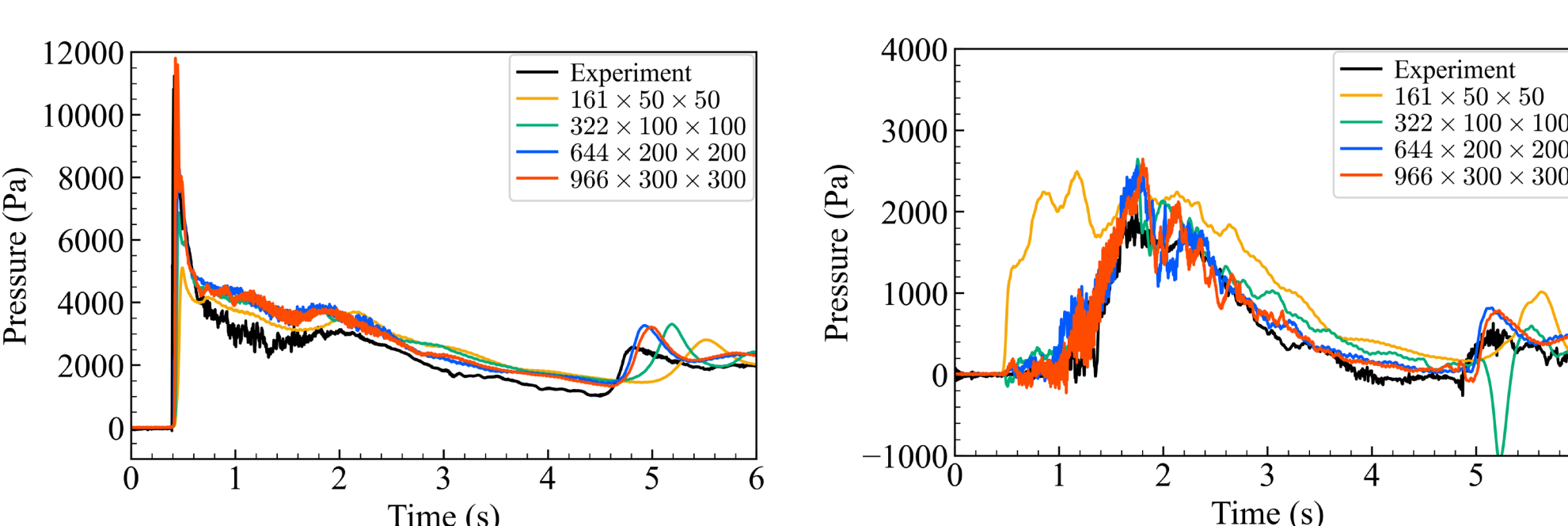
円柱 (左図) と鉛直壁面 (右図) の圧力時系列



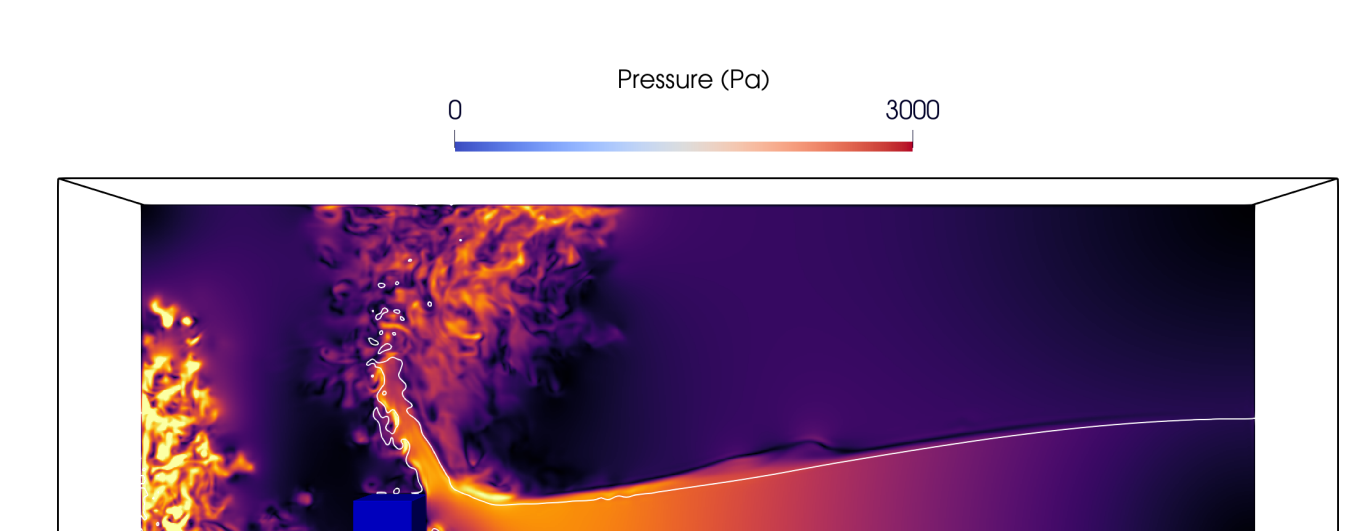
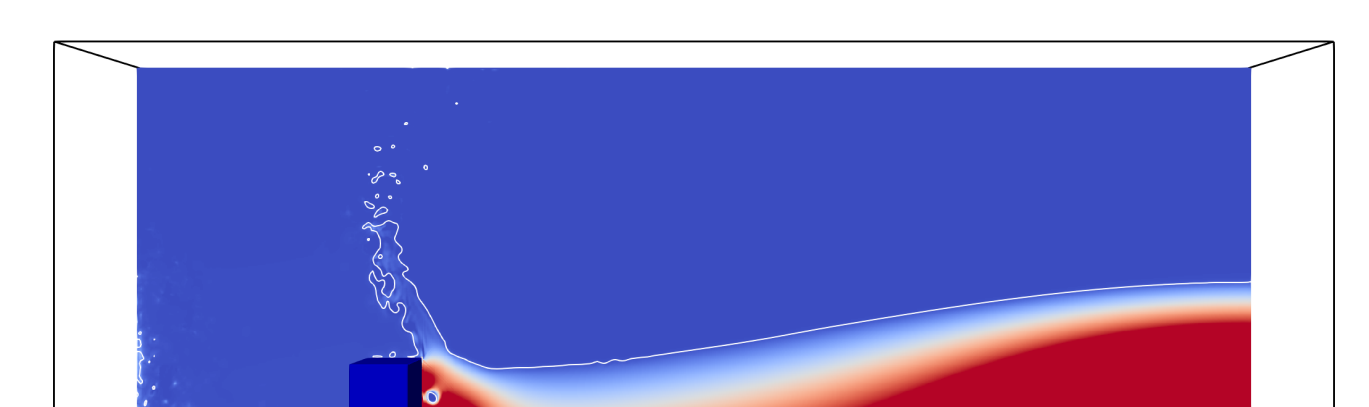
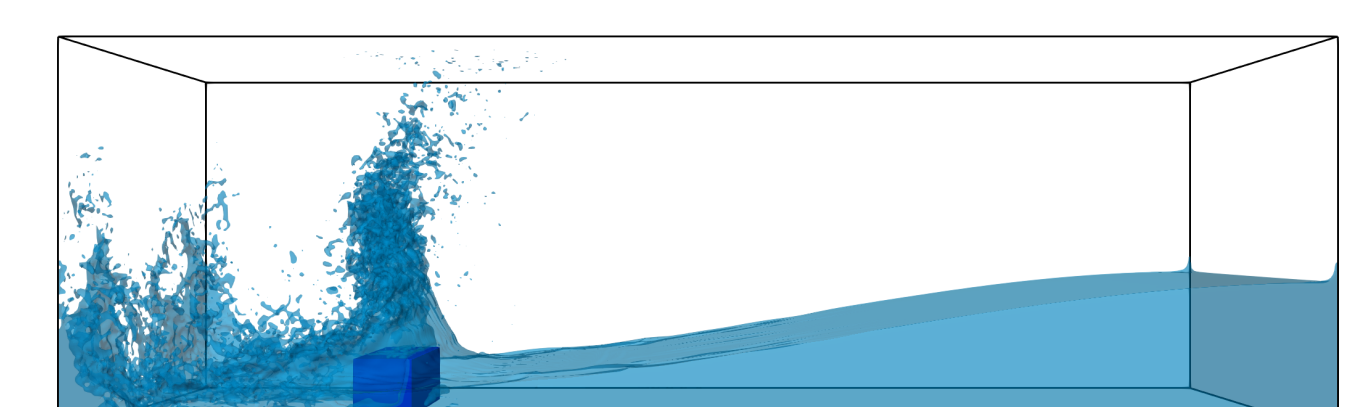
円柱ダムブレイクの計算と実験の比較

角形障害物に衝突するダムブレイク流れ

- 気液二相流のベンチマークである、角形の障害物が設置された水槽 (3.22 m×1.0 m×1.0 m) のダムブレイク流れ。
- 先行研究⁽⁴⁾の実験と圧力の時系列を比較し、定量的に波浪衝撃圧力が実験とよく一致することを確認した。



障害物側面 (左図) と障害物上面 (右図) の圧力時系列



メッシュ966×300×300の計算結果

参考文献

- 1) Abbas Fakhari, Travis Mitchell, Christopher Leonardi, and Diogo Bolster, Phys. Rev. E 96, 053301 (2017)
- 2) Wei Li, Yihui Ma, Xiaopei Liu, and Mathieu Desbrun, ACM Trans. Graph. 41, 4, Article 114 (2022)
- 3) Kamra M Mohamed, Al Salami Jabir, Sueyoshi Makoto and Hu Changhong, J. Fluids Struct., 86, 185-199 (2019)
- 4) Kleefman K. M. T., Fekken, G., Veldman, A. E. P., Iwanowski, B., and Buchner, B. J. Comput. Phys., 206(1), 363-393. (2005)