

令和 6 年 4 月 23 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14181

研究課題名（和文）洋上ウィンドファームの発電量予測のための高性能CFDツールの開発

研究課題名（英文）Development of a high performance CFD tool for power output prediction of offshore wind farms

研究代表者

渡辺 勢也（Watanabe, Seiya）

九州大学・応用力学研究所・助教

研究者番号：80871540

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：洋上ウィンドファームの発電量評価には、各風車が形成するウェイクの相互干渉を正しく予測することが重要である。本研究では、格子ボルツマン法を利用した洋上ウィンドファーム流れの高性能CFDツールの開発を行った。アクチュエータライン風車モデルと大気境界層流入モデルを格子ボルツマン法を導入し、大規模な乱流シミュレーションを可能にした。先行研究の風洞実験との比較により、提案した計算手法は十分な精度でウェイクの速度分布や発電量を評価できることを確認した。複数GPUを用いた大規模並列計算により洋上ウィンドファームの解析を実施し、観測データの発電量とよく一致した予測結果を得られることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で実施した格子ボルツマン法による洋上ウィンドファームの非定常乱流シミュレーションは、ウィンドファームの発電量だけでなく、各風車に加わる疲労荷重の評価にも有効であり、風車の寿命やメンテナンス時期を予測することへ利用でき、洋上ウィンドファームの経済性評価に重要なデータを取得できる。格子ボルツマン法をレイノルズ数の高い大型風車のウェイク乱流に適用可能であることを本研究で示した。また、波による風車の動揺を考慮することで、日本での導入が期待される浮体式の洋上ウィンドファームの解析に対して開発したCFDツールは応用可能であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Predicting the interaction of the wakes formed by each wind turbine is important for evaluating the amount of electricity generated by offshore wind farms. In this study, we developed a high-performance CFD tool for offshore wind farm flow simulations using the lattice Boltzmann method. An actuator line model and an atmospheric boundary layer inflow model are introduced into the lattice Boltzmann method. Comparison with wind tunnel experiments in previous studies confirms that the proposed simulation model can evaluate wake velocity distribution and power generation with enough accuracy. We performed a large-scale parallel computation using multiple GPUs to analyze an offshore wind farm, and confirmed that the predicted results agree with the observed power generation.

研究分野：流体工学

キーワード：洋上ウィンドファーム 風車ウェイク CFD 格子ボルツマン法 GPU

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2050年カーボンニュートラルの実現に向け、大型風車による大規模洋上ウィンドファームが近い将来に実現される見通しである。洋上は風況が良く、土地や景観・騒音の成約がないため、大型風車を導入できるメリットがある。一方、建設コストや維持管理費が高くなるため、風車の発電量などの経済性を設計段階で高度に予測することが重要である。風車の下流域には、風車の回転によりウェイク（後流）が形成され、平均風速の減少と乱流強度の増加が起こる。ウィンドファームは多数の風車から構成されるため、上流側の風車ウェイクが後流側の風車に影響し発電量を低下させる。ウィンドファームの発電量評価には、各風車が形成するウェイクが後続の風車に与える影響を精度よく評価することが重要な課題である。

数値流体力学（CFD）特に非定常の乱流計算に適したLES（Large Eddy Simulation）による洋上ウィンドファームの流れの予測が期待されている。大規模洋上ウィンドファームの設置面積は数十平方キロメートルにもなり、風車は数百メートル離れて配置される。そのため、低解像度LESでは乱流散逸が大きく、風車ウェイクの乱れが消失してしまう。風車間にも高解像度メッシュが必要で、広域なファーム全体の解析には膨大な計算リソースが必要である。これまで、風車CFDにはナビエ・ストークス方程式を解く手法が一般的に利用され、流体の非圧縮性を満たすために圧力ポアソン方程式を半陰解法で解く。しかし、計算規模の増加に伴う圧力ポアソン方程式の収束性の悪化により、大規模計算では計算効率が著しく低下する。そのため大規模なLESを高効率に実行する新しい流体計算手法が必要である。

### 2. 研究の目的

大規模CFDを高効率に実行する方法として、近年、格子ボルツマン法が注目されている。格子ボルツマン法は速度空間で離散化したボルツマン方程式を解く計算手法であり、大規模計算のボトルネックとなる圧力ポアソン方程式を解く必要がない。そのうえ、計算アルゴリズムがシンプルで並列化しやすく、最近のスーパーコンピュータで利用されるGPU（Graphics Processing Unit）などの最新アーキテクチャと相性がよい。

本研究の目的は、風車ウェイクと後続の風車との相互作用を十分に計算できるアクチュエータラインモデルと格子ボルツマン法に基づくCFDツールを開発し、大規模洋上ウィンドファームの発電量予測性能を大幅に向上させることである。格子ボルツマン法は位相空間上で疑似粒子の統計的な振る舞いを計算するメソスコピックな計算手法であるため、速度や圧力などのマクロ量を直接解くNSソルバーと大きく異なる。アクチュエータ風車モデルや大気乱流モデルが格子ボルツマン法の計算で直接利用できるかについて明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1) アクチュエータライン風車モデルの格子ボルツマン法への実装と検証

風車ウェイクの非定常な流れを計算可能なアクチュエータラインモデルを格子ボルツマン法に実装する。ナセルやタワーなどの風車構造物にはInterpolated Bounce-Back法で滑りなし境界条件を与える。最適な周速比で運転するように回転数とブレードピッチ角を空力トルクに応じて制御する。開発したコードは先行研究の風洞実験、Vestas 2MW風車およびNREL 5MW風車の観測データとの比較により検証する。

#### (2) 大気境界層乱流のモデリング

ウィンドファームに流入する大気乱流を表現するため、格子ボルツマン法の流入境界条件に乱流場を与える。乱流場はNRELで開発されたソフトウェアであるTurbSimを利用する。

#### (3) 大規模GPU並列計算による洋上ウィンドファームの解析

観測データが整理されており、先行研究でもCFDが実施されているデンマークの洋上風力発電施設Horns Rev 1を対象にシミュレーションを実施し、開発したCFDツールの精度評価を行う。計算には東京工業大学のGPUスパコンTSUBAME3.0を利用する。

### 4. 研究成果

(1) 風車ウェイクのベンチマークテストであるNTNU Blind Test1[1]を実施し、風洞実験と結果を比較した。計算メッシュ解像度の影響を評価するため、ロータ直径に対して、32点、64点、96点、128点、160点の5ケースを実施した。計算された後流の速度分布と渦構造を図1に示す。翼端渦が崩壊し、ウェイクが乱流化している様子が確認できる。計算結果と実験結果[1]の比較を図2に示す。ロータ面からロータ直径の5倍の距離離れた位置での平均速度欠損と乱流運動エネルギーの水平分布である。低解像度でもウェイク速度欠損と乱流運動エネルギーの両方を十分に再現できていることがわかる。

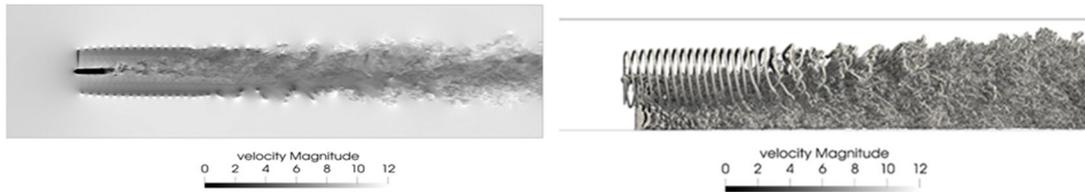


図1 NTNU ロータの後流の速度分布（上面図）と渦構造の可視化（側面図）

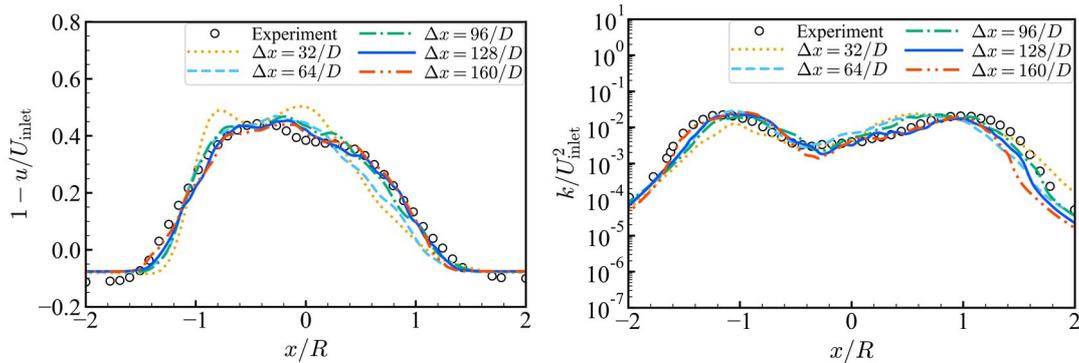


図2 NTNU ロータの後流の平均速度欠損と乱流運動エネルギーの実験[1]との比較

(2) デンマークの洋上windファーム Horns Rev 1 に設置されている風車 Vestas V80 2MW (直径 80m) を計算対象とし、ウェイクに対する流入風の乱流条件の依存性を調べた。乱れなしの風速 10m/s の流入条件、及び乱流強度 18% の変動風の流入条件で計算を実施した。図 3 に乱れなしとありの場合の計算結果の速度プロファイルを示す。乱れなしの流入条件では、格子解像度 4m と 0.5m でウェイクの乱れが大きく異なっている。一方、乱流流入条件では、渦の大きさは格子解像度に大きく依存しているが、ウェイクの大まかな変動は 4m 格子と 0.5m 格子で同じ傾向になることが明らかになった。

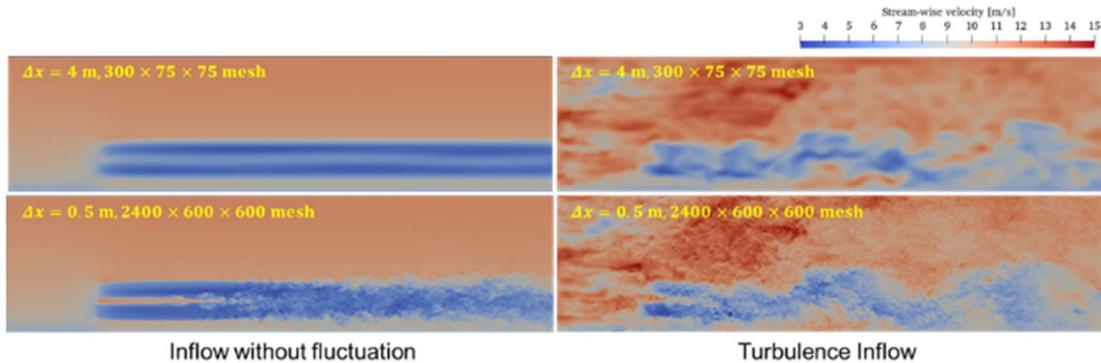


図3 風車ウェイクへの乱流流入条件の影響（左：乱れなし流入 右：乱流流入）

(3) 洋上windファーム Horns Rev1 の一部、風に対し縦列に並んだ 8 機の風車に対してシミュレーションを実施し、観測データ[2]と比較した。アクチュエータラインモデルに導入した回転数制御がウェイクの影響を受ける後続風車の発電量に与える影響を評価した。計算領域を 5160 m×560 m×560 m と設定し、格子幅は 1m、総格子点数は約 16 億である。風速は 8 m/s、流入風の乱流強度は 8% と設定した。時間平均風速の制御なし（上）と制御あり（上）の計算結果を図 4 で比較する。先頭の風車のウェイクは制御ありとなしで大きく変わらない。2 基目以降のウェイクは制御を導入することで速度が増加している。制御を導入したことでロータ過回転が抑えられ、速度欠損が抑えられたと考えられる。図 5 は観測データとシミュレーションで得られた 2 基目以降の風車の発電量の比較である。制御を導入したことで、観測データとよく一致した結果が得られた。

#### 参考文献

- [1] Krogstad, P. Å., and Eriksen, P. E., Renewable energy, 50, 325-333, 2013.
- [2] Barthelmie, R. J. et al., Wind Energy, 12(5), 431-444, 2009.

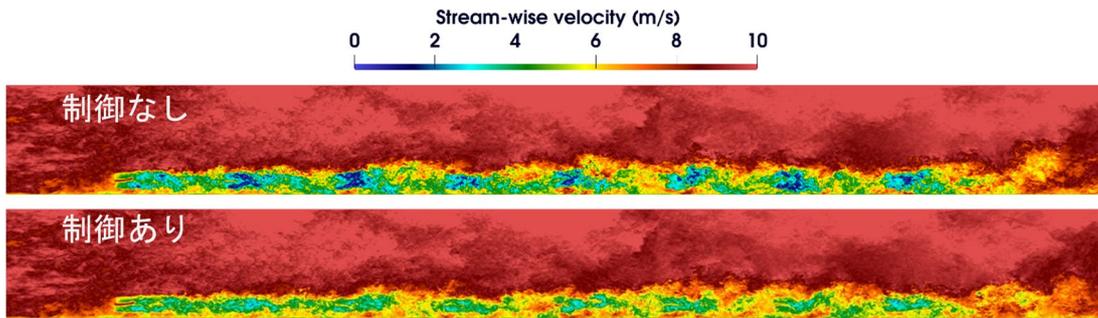


図4 洋上ウィンドファームの風車ウェイク相互干渉のシミュレーション結果。

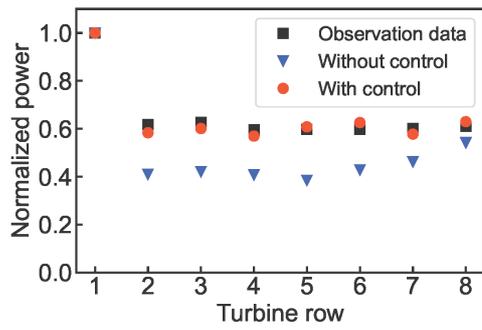


図5 後流域風車の発電量の計算と観測データ[2]の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Seiya Watanabe, Changhong Hu	4. 巻 -
2. 論文標題 Lattice Boltzmann simulation for wake interactions of aligned wind turbines using actuator line model with turbine control	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Watanabe Seiya, Hu Changhong, Aoki Takayuki	4. 巻 1288
2. 論文標題 Coupled Lattice Boltzmann and Discrete Element Simulations of Ship-Ice Interactions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 012015 ~ 012015
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1757-899X/1288/1/012015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Watanabe Seiya, Kawahara Jun, Aoki Takayuki, Sugihara Kenta, Takase Shinsuke, Moriguchi Shuji, Hashimoto Hirotsada	4. 巻 17
2. 論文標題 Free-surface flow simulations with floating objects using lattice Boltzmann method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/19942060.2023.2211143	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Seiya Watanabe, Changhong Hu
2. 発表標題 Development of highly parallel LES code based on the lattice Boltzmann method for wind turbine flows
3. 学会等名 International Workshop on Turbulence, Vorticity Dynamics and Wind Energy（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡辺勢也, 胡長洪
2. 発表標題 格子ボルツマン法に基づく洋上ウィンドファームのLES解析コードの開発
3. 学会等名 日本機械学会第35回計算力学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡辺勢也, 野間優希, 胡長洪
2. 発表標題 つば付きディフューザ風車を用いたマルチロータシステムの格子ボルツマン法による流体シミュレーション
3. 学会等名 第44回風力エネルギー利用シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡辺勢也, 胡長洪
2. 発表標題 格子ボルツマン法による洋上ウィンドファームの大規模シミュレーション
3. 学会等名 第36回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Seiya Watanabe, Changhong Hu
2. 発表標題 Lattice Boltzmann Simulations Using Actuator Line Model for Wind Turbine Flows
3. 学会等名 Grand Renewable Energy 2022 International Conference (GRE2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Seiya Watanabe
2. 発表標題 Numerical Simulation of Wind Farm by Lattice Boltzmann Method
3. 学会等名 The 1st International Symposium on Marine Renewable Energy System Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Seiya Watanabe, Changhong Hu
2. 発表標題 Multi-GPU lattice Boltzmann simulations of wind turbine wakes
3. 学会等名 ADVANCES IN COMPUTATIONAL MECHANICS (ACM 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡辺勢也, 胡長洪
2. 発表標題 格子ボルツマン法による洋上ウィンドファームのラージエディシミュレーション
3. 学会等名 第45回風力エネルギー利用シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡辺勢也, 胡長洪
2. 発表標題 格子ボルツマン法とアクチュエータラインモデルによる風車後流シミュレーション
3. 学会等名 第37回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------