

jh230039

格子ボルツマン法に基づく洋上ウィンドファームの高性能シミュレーションコードの開発

渡辺 勢也 (九州大学)

概要

多数の風車から構成される洋上ウィンドファームの発電量には大気境界層の条件や風車ウェイクの相互干渉が影響する。本研究課題は jh220016 の継続課題であり、昨年度開発した格子ボルツマン法と GPU によるウィンドファームの CFD コードの高速化と高精度化を本課題で実施した。EsoTwist アルゴリズムによる格子ボルツマン法の GPU 実装と風車近傍探索の導入により単一ノードの計算は 2.5 倍、256GPU を用いた大規模計算では 4 倍程度の高速化を達成した。ウィンドファームの運転状況を模擬するため風車回転数とブレードピッチ角の制御モデルを導入し、制御なしの状態よりも観測データに近い発電量の予測結果が得られた。大気境界層の乱流場から乱れ成分のみを保存し、時間変化させる一様流に乱れ成分を与えることで風向の時間変化に対応できることを確認した。80 台の風車からなる洋上ウィンドファームに対して、開発したコードは 20GPU を用いて 14 億格子点の計算を約 9 時間で完了できた。

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
東京工業大学 学術国際情報センター

計算高速化の助言

吉川雅己 (九大) : 計算コードの検証計算
岩佐光泰 (九大) : ポスト処理

(2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

(3) 共同研究分野 (HPCI 資源利用課題のみ)

超大規模数値計算系応用分野

(4) 参加研究者の役割分担

渡辺勢也 (九大) : コード開発, ウィンドファームの計算

青木尊之 (東工大) : GPU, 大規模計算の助言

胡長洪 (九大) : 解析条件の選定, 結果の考察

小野寺直幸 (日本原子力研究開発機構) : 大気境界層計算の助言

長谷川雄太 (日本原子力研究開発機構) : GPU

2. 研究の目的と意義

洋上に多数の風車を設置する大規模洋上ウィンドファームの建設が欧州を中心にすすめられている。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域の風車に影響し発電量を低下させる。そのため、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。風車から発生する非定常な乱流を計算可能な LES (Large Eddy Simulation) による高精度予測が期待さ

れているが、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ため、低解像度計算では乱流散逸が大きく、ウエ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。ナビエ・ストークス方程式を解く一般的な流体計算手法 (NS ソルバー) では、流体の非圧縮性を満たすために解く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。

本研究課題では上述の NS ソルバーの計算コストの課題を解決するため、圧力ポアソン方程式を解く必要がなく大規模計算に適した格子ボルツマン法 (LBM) に基づくウィンドファームの LES コードを開発することを研究計画全体の目的とする。高解像度の大規模 LES により洋上ウィンドファームの発電量予測性能の大幅な向上を目的とする。

本課題は jh220016 の継続課題である。昨年度は、LBM による風車計算手法と洋上風況計算手法の開発を目的とし、

- ブレードだけでなく風車のハブやナセル、タワーなどの構造物をモデル化可能な計算手法の開発。
- 大気境界層の平均風速と乱流強度を指定できる流入境界条件の設定方法の開発。

に取り組み、洋上ウィンドファームの複数 GPU 解析コードを作成した。東京工業大学 TSUBAME3.0 を利用し、洋上ウィンドファーム全域に対する LES を実現し、解析と観測データの比較検証を行った。その中で、風車の運転状態の再現が発電量予測に重要であることがわかった。また、現実の風は風向が時間変化するため、それに対応する必要があると考えた。

2023 年度では、ウィンドファームの運転状況を模擬するための風車制御モデルの導入

と、流入境界条件の風向の時間変化の導入に関して中心的に研究を進め、開発する CFD コードの高精度化を目的とする。風況の時間変化の再現にはより長い物理時間のシミュレーションが必要になるため、格子ボルツマン法コードの高速化を行う。

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 GPU と非常に相性が良いため、GPU スパコンの利用が適している。研究副代表者の東工大・青木教授は GPU コンピューティングの第一人者であり、JHPCN の枠組みを使い、格子ボルツマン法のマルチ GPU コードの開発と TSUBAME での大規模計算に関して助言をいただいた。課題参加者である日本原子力研究開発機構の小野寺直幸氏と長谷川雄太氏は、2017 年度から JHPCN の枠組みを利用して格子ボルツマン法による都市風況解析コード CityLBM の開発を進め、大気境界層の計算に関して非常に多くのノウハウを蓄積している。ウィンドファームの LES で重要となる大気境界層の流入境界条件の設定に協力していただいた。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

昨年度は格子ボルツマン法に基づく風車計算手法の開発、および大気境界層の流入境界条件について研究を行った。開発した手法を 80 基の風車から構成されるデンマークの洋上ウィンドファーム Horns Rev 1 に適用し、観測データと比較した。

4.1 計算手法

格子ボルツマン法は流体を仮想粒子の集合体と仮定し、速度方向に離散化されたボルツマン方程式を解く手法である。速度分布関数 f_{ijk} の時間発展方程式は

$$f_{ijk}(\mathbf{x} + \boldsymbol{\xi}_{ijk}\Delta t, t + \Delta t) = f_{ijk}(\mathbf{x}, t) + \Omega_{ijk}$$

である。添字 ijk は速度分布関数の速度方向で $(i, j, k) \in \{-1, 0, 1\}^3$, Ω_{ijk} は衝突項である。速度モデルには 3 次元 27 速度モデルを利用し、

離散速度離散 ξ_{ijk} を格子幅 Δx と時間刻み Δt から定義される $c = \Delta x / \Delta t$ を用いて $\xi_{ijk} = (ic, jc, kc)^T$ と定義する. 高レイノルズ数の乱流計算を安定かつ高精度に行うため, 衝突項にキュムラントモデルを用いる.

タービンのモデルとして各ブレードを点群で表現するアクチュエーターラインモデルを用いる. 各マーカー粒子に加わる流体力は, 流体とブレードの局所的な相対速度 u_{rel} と迎え角で決定され, 抗力係数 C_d と揚力係数 C_l を用いて

$$F_{2D} = \frac{1}{2} \rho u_{rel}^2 c_a (C_l e_l + C_d e_d) \Delta r$$

と計算する. e_l と e_d はそれぞれ揚力と抗力の方向を示す単位ベクトル, c_a は翼弦長, Δr はマーカー間隔である. 抗力係数と揚力係数は翼型のデータを用いてレイノルズ数と迎え角に対して値を事前に計算し, 参照テーブルを作成しておく. マーカーに作用する力にガウシアンフィルタをかけた力を流体側に体積力として与える. ガウシアンフィルタをかけた力をすべてのマーカーに対して総和することで, 各格子点に作用する体積力 F が計算される. 衝突項前の1次モーメントに対して体積力を $F\Delta t/2$ 加えることで, 体積力を格子ボルツマン法に導入する.

風車のブレード以外の構造物であるナセルやタワーの境界条件として, 格子点の間に位置する壁を2次精度で扱える Interpolated bounce-back 法を用いる.

ウィンドファームの発電量には大気境界層の状態が大きく影響する. アメリカの NREL (National Renewable Energy Laboratory) によって開発された乱流場生成ソフトウェア TurbSim を利用し大気境界層の乱流速度場を生成し, 格子ボルツマン法の流入境界条件に与える方法を提案した. Turbsim により計算された速度を局所平衡状態の速度分布関数に変換して流入境界面の各格子点に与える.

4.2 ウィンドファームのシミュレーション

デンマークの洋上ウィンドファーム Horns Rev1 を構成する 80 台の Vestas V80 風車に対するシミュレーションを実施し, 観測データとの風車発電量の比較による開発手法の検証を実施した. 計算領域は 9600 m×9000 m×300 m とし, 格子解像度は 2.5m とした. 格子点数は 16.6 億であり, 32GPU を用いて 21 万ステップ (物理時間で 2000 秒相当) の計算を 12.5 時間で実行した. 計算結果の一例として, 風向 270°での主流方向速度分布を図 1 に示す.

各行の発電量を観測データ⁽¹⁾と比較した結果を図 2 に示す. 観測データと比較するため, 先頭行のタービンの発電量を基準とし, 発電量を無次元化している. シミュレーションは観測データの傾向を概ね捉えているが, 後続風車の発電量が観測と異なる結果となった. この原因として, シミュレーションではすべての風車で同じ回転速度とブレードのピッチ角を設定していることが考えられる. 実際の風車の運転のように, 回転数とピッチ角度の制御の実装と検証を今年度課題の主要な目的とした.

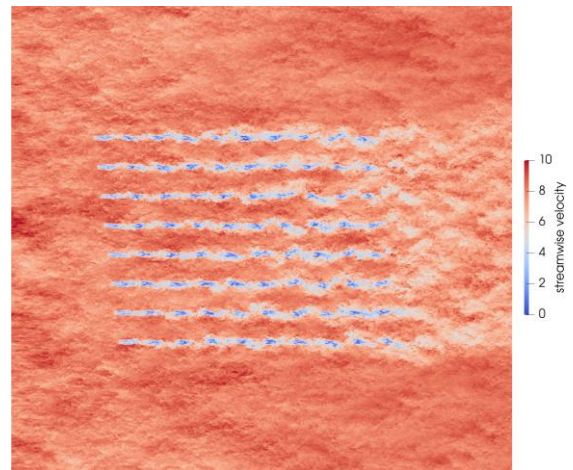


図 1 昨年度実施したウィンドファームのシミュレーション結果の一例

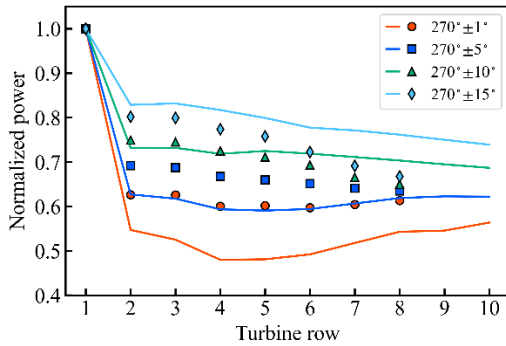


図 2 ウィンドファーム発電量のシミュレーション (実線) と文献 (1) の観測データ (プロット) の比較

5. 今年度の研究成果の詳細

今年度は以下 4 つの内容に対して、概ね計画通りに研究を実施した。

- ① GPU に適した LBM 実装による高効率な計算と省メモリの両立。
- ② 風車回転数とブレードのピッチ角の制御モデル導入による発電量予測精度の向上。
- ③ 乱流流入境界条件の平均風速と風向の時間変化への対応。
- ④ 洋上ウィンドファーム観測データとの比較による発電量予測精度の評価。

5.1 CFD コードの高速化

高速化のため、格子ボルツマン法の並進過程の処理に EsoTwist アルゴリズム⁽²⁾ (図 3) を導入した。図中の色付きの矢印は中心セルの速度分布関数を示し、EsoTwist では隣接格子点に分散されて速度分布関数が保持される。奇数タイムステップと偶数タイムステップで各格子点が読み書きする分布関数の方向を変えることで、並進過程における分布関数の移動が処理される。これにより、隣接参照のメモリアクセス競合が解消され、並進過程と衝突過程の計算をひとつのカーネル関数で実行可能になり、昨年度実装したスワップ処理による実装に比べて速度分布関数へのメモリアクセス回数が半分になる。一般的な並進過程の実装である Push や Pull ではア

クセス競合を防ぐために 2 つの速度分布関数用のバッファが必要であるが、EsoTwist では 1 つのバッファでアクセス競合を回避でき、メモリ使用量が半分になるメリットもある。

昨年度のコードでは、風車ブレードを構成するアクチュエータマーカークの近傍探索時間が、風車台数の増加に伴い長くなり弱スケールリングの悪化が確認された。そこで、マーカークの近傍探索手法を導入することで、風車の台数が増えた場合での近傍マーカーク探索時間の増加を抑えた。また、演算と通信のオーバーラップにより通信時間のオーバーヘッドを削減した。

これらの高速化の効果を弱スケールリングで評価した。その結果を図 4 に示す。小規模計算の場合は 2.5 倍ほど、256GPU を用いた大規模計算では 4 倍程度の高速化を達成した。高速化後の弱スケールリングは 4GPU から 256GPU で並列化効率率 84% であり、高速化前の 55% から大きく改善できた。

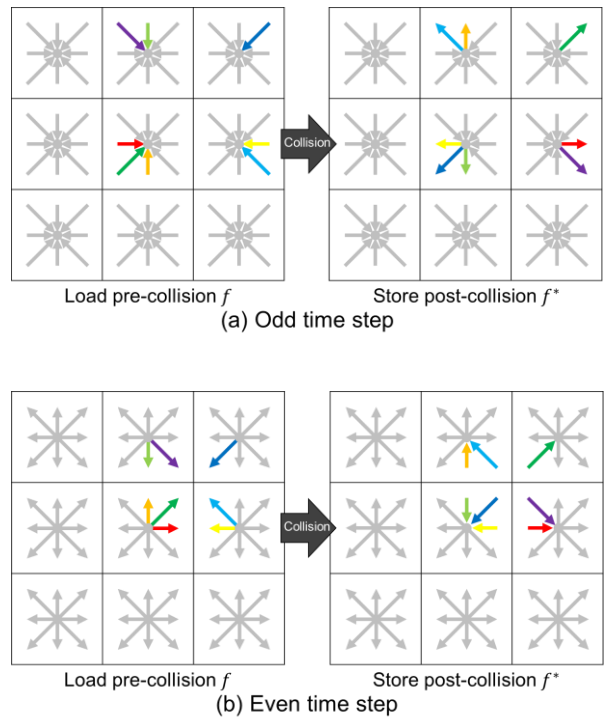
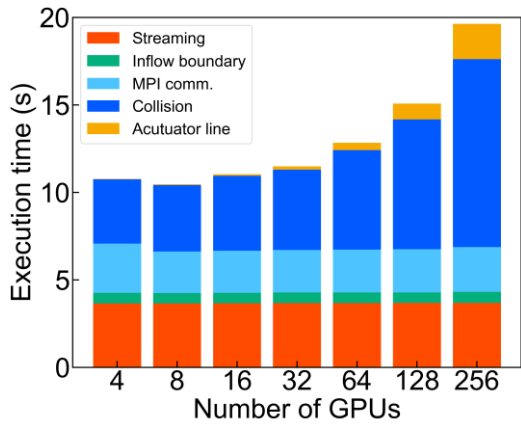
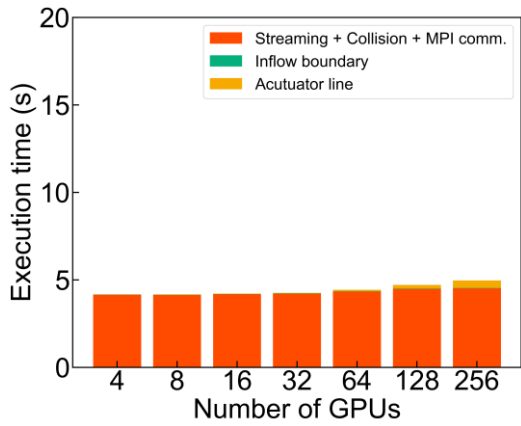


図 3 EsoTwist アルゴリズム



(a) 高速化前



(b) 高速化後

図 4 弱スケーリングによる高速化の評価

5.2 風車の回転数・ピッチ角制御

前方風車のウェイクの影響を受ける後流域風車の発電量の予測精度の改善のため、風車の回転数とピッチ角の動的制御を導入した。最適な周速比 λ_{opt} （ブレード先端速度と風速の比）で運転するように、発電機トルクを調整する方法を導入した。発電機トルク T_g をロータ回転数 Ω から

$$T_g = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_{p_{opt}}}{\lambda_{opt}^3} \Omega^2$$

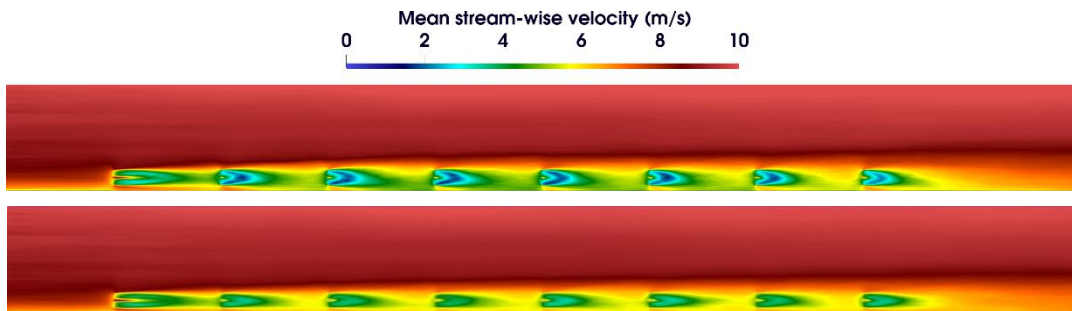


図 5 8 基風車の平均速度場の計算結果. 制御なし（上）と制御あり（下）の比較.

と設定する。ここで、 $C_{p_{opt}}$ は最適周速比でのパワー係数（発電効率）である。発電機トルク T_g と空力トルク T_a の差分から、ロータ回転速度の時間発展は、

$$I\dot{\Omega} + B\Omega = T_a - T_g$$

を時間積分することで計算される。ピッチ角制御には、ロータ回転速度を関数とする制御テーブルを用いた。

風車制御の影響を評価するため洋上ウィンドファーム 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、観測データと比較した。計算領域を 5160 m×560 m×560 m と設定し、格子幅は 1 m, 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。

速度分布と時間平均速度の制御なし（上）と制御あり（上）の計算結果を図 5 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 6 は各風車の回転速度の時間平均値を示す。最適運転制御により 2 基目以降の風車の回転数は初期の 16.1RPM から約 11RPM に抑えられた。図 7 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。シミュレーションでは風向を固定しているため、風向きが 1 度以内の観測データを利用した。回転数とピッチ角の制御により、観測データとよく一致した結果が得られることがわかった。

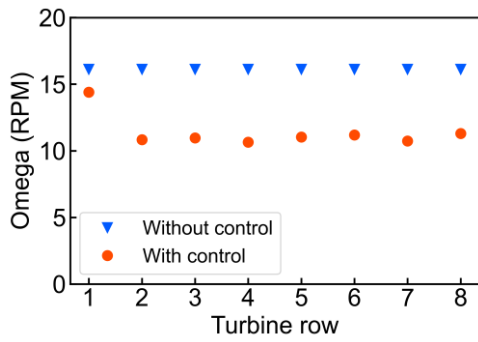


図 6 各風車のロータ回転速度の時間平均値

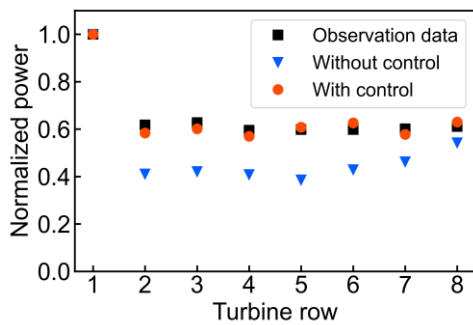


図 7 後流域風車の発電量の計算と観測データ⁽¹⁾の比較

5.3 風向変動

乱流生成ソフトウェア Turbsim で作られた大気境界層の速度プロファイルから、速度シアを考慮した時間平均速度を減算し、乱流の変動成分の時系列データを作成する。時間変動する乱れなしの流入風速に変動成分を加算した風速分布を流入境界に与え、風向が時間変化する流入風を再現した。

デンマークの洋上ウインドファーム Horns Rev1 を構成する 80 台の Vestas V80 風車に対するシミュレーションを実施し、シミュレーション結果と観測データ⁽¹⁾を比較した。図に

示す 270° 、 222° 、 312° の 3 ケースの基準となる風向に対し $\pm 1^\circ$ 、 $\pm 5^\circ$ 、 $\pm 10^\circ$ 、 $\pm 15^\circ$ の 4 つの風向変動を考え、合計で 12 ケースの風向条件でシミュレーションを実施した。風向の時間変動は簡易的に三角波で与えが、実際の風向は規則的な変化ではない。文献(1)の観測データは基準風向からの $\pm 1^\circ$ 、 $\pm 5^\circ$ 、 $\pm 10^\circ$ 、 $\pm 15^\circ$ の 4 つ誤差範囲に入る風向でのデータで平均が取られている。風速は 8 m/s, 乱流強度は 8%, 速度シアは洋上風 (べき指数 1/10) と設定した。また、風車の回転数とブレードピッチ角を最適制御した。計算領域は主流方向 10,000 m, スパン方向 16,000 m, 鉛直方向 560 m と設定した。格子点解像度は 4 m とし、総格子点数は 14 億である。物理時間で 7200 秒までの 48 万タイムステップの計算を、1 ケースあたり 20 GPU を用いて 9 時間で実行した。

例として基準風向 270° で風向変動幅を変えた 4 つのケースの結果を速度場の瞬時値、時間平均風速、各風車の発電量で図 11 に示す。風向変動幅が大きいほどウェイクが蛇行するため、時間平均したウェイクの幅が広がっている。後続風車になるほどウェイクの広がりには小さくなる様子が確認できる。速度欠損は変動幅の増加に伴い小さくなっている。それにより、後続風車の発電量が高くなっている。

各行の発電量を観測データと比較した結果を図 10 に示す。観測データでは、どの風向条件においても下流に位置する風車ほど発電量が低下していく。シミュレーションで

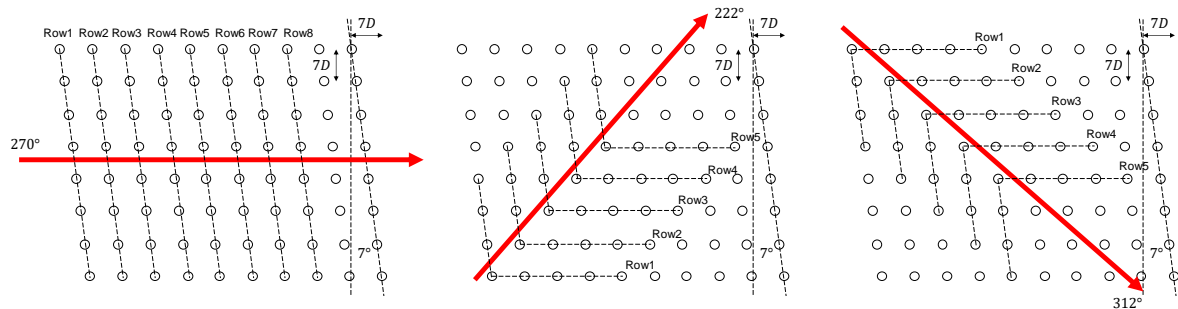
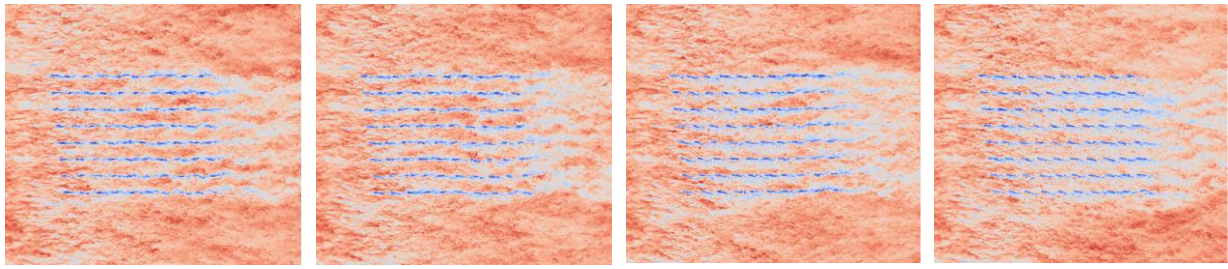
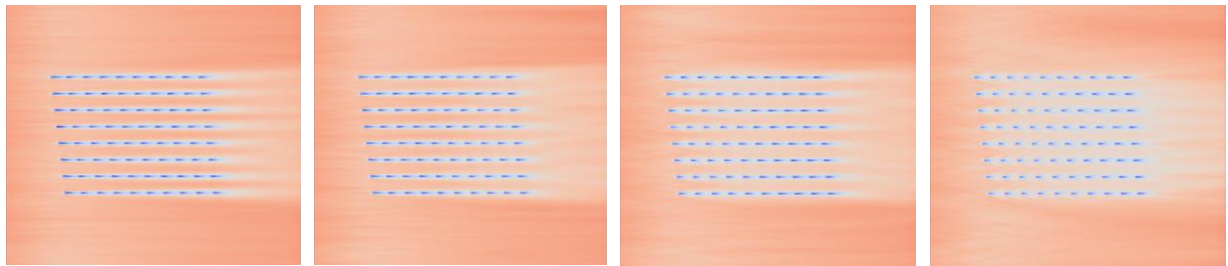


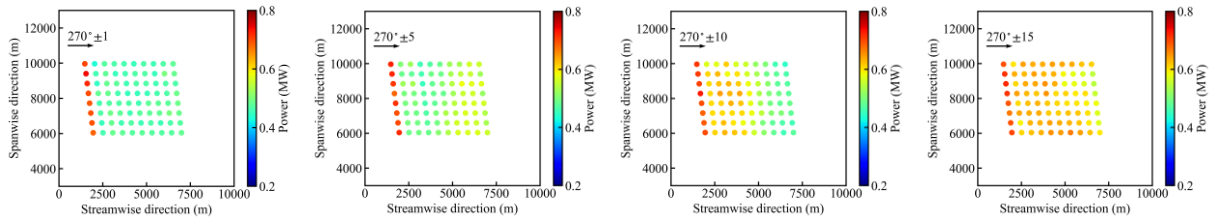
図 8 ウィンドファームの風車レイアウトと基準となる 3 つの風向



(a) 速度プロファイルの瞬時値



(b) 時間平均速度プロファイル



(c) 各風車の発電量

図 9 風向変動を与えたウィンドファームのシミュレーション結果. 左から風向 $270^\circ \pm 1^\circ$, $270^\circ \pm 5^\circ$, $270^\circ \pm 10^\circ$, $270^\circ \pm 15^\circ$.

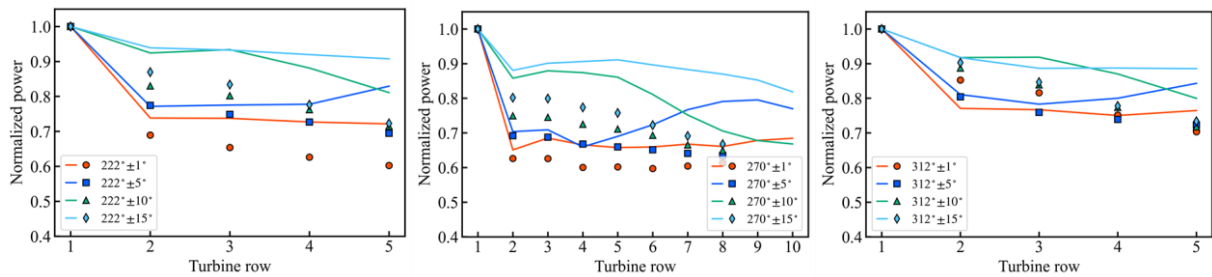


図 10 ウィンドファーム発電量のシミュレーション (実線) と観測データ⁽¹⁾ (プロット) 比較.

も下流域ほど発電量が低下する傾向であるが、風向変動 $\pm 5^\circ$ では 5 行目以降の風車の発電量が 4 行目よりも高くなり、観測データと違う傾向となった。動画で計算結果を確認すると、ウェイクの蛇行が 5 行目付近で大きくなっており、風速変動を三角波で与えたためと考えられる。また、シミュレーションは発電量を観測データよりも大きく予測している場合が多く、広い計算領域を確保するため

に 4m の粗いメッシュを用いたことが原因として挙げられる。

参考文献

- (1) Barthelmie, R. J. et al., Wind Energy, 12(5), 431–444, 2009.
- (2) Geier, Martin, and Martin Schönherr, Computation, 5(2), 19, 2017.

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

概ね申請時の計画通りに研究を実施し、昨年度の実施内容で課題とされた CFD コードへの風車制御システムの導入、風向の時間変動への対応、コード高速化に付いて取り組んだ。

高速化により 2.5 倍以上の性能向上を達成し、4GPU から 256GPU の弱スケーリングは並列化効率が 55%から 84%に改善した。

風車制御により観測データとより合う発電量予測が可能であることがわかり、アクチュエーターラインモデルへの風車制御の必要性を明確に示し、この内容に関して査読付きの国際会議 TORQUE2024 での口頭発表が採択された。

大気境界層の風向の時間変動を境界条件で対応できるようにしたことで、今後、WRF などの気象モデルの風速と風向を計算境界に与える計算に応用できる。最新の GPU の利用により計算はさらに高速化でき、将来的には、洋上ウィンドファームのリアルタイム風況予測、デジタルツインなどに応用できると考えている。

2024 年度は、継続課題としていないが、日本での導入が期待される浮体式洋上風車に対するシミュレーションモデルの研究開発 (jh240023) に、本研究課題で開発した風車計算モデルを応用する。

また、本研究で開発したアクチュエーターラインと格子ボルツマン法による風車計算モデルに関して、査読付きの国際論文誌への投稿準備をしている。

7. 研究業績

(1) 学術論文 (査読あり)

なし。

(2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)

[1] Seiya Watanabe, Changhong Hu, Lattice Boltzmann simulation for wake interactions of aligned wind turbines

using actuator line model with turbine control, TORQUE2024, Florence, Italy, May, 2024 (発表予定)

[2] Seiya Watanabe, Masaki Yoshikawa, Changhong Hu, CFD simulation of a multi-rotor system using diffuser augmented wind turbines by lattice Boltzmann method, TORQUE2024, Florence, Italy, May, 2024 (発表予定)

(3) 国際会議発表 (査読なし)

[1] Seiya Watanabe, Changhong Hu, Yuki Noma, Masaki Yoshikawa, Aerodynamic Design of Diffuser Augmented Wind Turbines Using 3D CFD Simulation and Bayesian Optimization, Wind Energy Science Conference (WESC) 2023, May, 2023.

[2] Seiya Watanabe, Changhong Hu, Multi-GPU lattice Boltzmann simulations of wind turbine wakes, ACM2023, 2023

(4) 国内会議発表 (査読なし)

[1] 渡辺勢也, 格子ボルツマン法とアクチュエーターラインモデルによる風車後流の LES 解析, 第 74 回 LES 研究会, 2023

[2] 渡辺勢也, 胡長洪, 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, 第 45 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2023

[3] 渡辺勢也, 胡長洪, 格子ボルツマン法とアクチュエーターラインモデルによる風車後流シミュレーション, 第 37 回数値流体力学シンポジウム, 2023

(5) 公開したライブラリなど

なし

(6) その他 (特許, プレスリリース, 著書等)

なし