

jh220016

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

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大きく影響する。風車ウェイクを精度良く計算できる Large Eddy Simulation はウィンドファームの発電量や疲労荷重、風況分布などの予測に有効であるが、ファーム全体の解析には計算コストが課題となる。本研究課題では、大規模流体計算と GPU コンピューティングに適した格子ボルツマン法に基づくウィンドファームの解析コードを開発した。風車モデルには高精度なウェイク解析が可能なアクチュエーターラインモデルを導入し、また乱流生成ソフト Turbsim を利用した大気境界層の流入条件を設定した。80 台の風車からなるデンマークの洋上ウィンドファーム Horns Rev 1 に対してシミュレーションを実施して観測データと比較し、ウェイク干渉による後続風車の発電量低下の傾向を再現した。開発コードは 1 ケースあたり TSUBAME3.0 の 8 ノードを利用し約 12 時間で解析を完了できる。

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

東京工業大学 学術国際情報センター

(2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

(3) 共同研究分野

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 計算高速化の助言

野間優希 (九大) : 計算コードの検証計算

馬場将平 (九大) : 大気境界層の計算

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始まっている。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。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 コードの開発を行う。現実的な風況や風車を扱える LBM コードを開発し、高解像度の大規模計算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。

3. 当拠点の公募型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

新規課題であり該当しない。

5. 今年度の研究成果の詳細

本研究課題は 4 半期ごとに以下の内容に取り組む計画を立て、概ね計画通りに研究を実施した。

1Q:格子ボルツマン法に基づく風車計算手法、および大気境界層の流入境界像権の設定方法の開発。

2Q:風車 1 基および 2 基のシミュレーションによるコード検証と大気境界層の条件が風車ウェイクや相互干渉、発電量に与える影響の調査。

3Q:デンマークの洋上ウィンドファーム Horns Rev

1 のシミュレーションによるコード検証とファーム解析に対する格子解像度依存性の確認。

4Q: Horns Rev 1 に対し風況を変えた場合のシミュレーションの実施。

5.1 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

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

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 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 \mathbf{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

$$\mathbf{F}_{2D} = \frac{1}{2} \rho u_{rel}^2 c_a (C_l \mathbf{e}_l + C_d \mathbf{e}_d) \Delta r$$

と計算する。 \mathbf{e}_l と \mathbf{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 \mathbf{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 $\mathbf{F}\Delta t/2$ 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。申請時は大気境界層の作成に乱流スパイクの利用を考えていたが、指定した平均風速と乱流強度になるスパイクの設定が困難であった。そこで、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、格子ボルツマン法の流入境界条件を設定することで大気境界層の条件を指定可能にした。TurbSim により 2 次元空間における変動風の速度プロファイルの時系列を生成し、速度をもとに局所平衡状態の速度分布関数を計算して流入境界面の各格子点に与える。TurbSim で作成された速度プロファイルの格子幅と時間刻み幅は格子ボルツマン法よりも粗いため、時空間で線形補間を行い格子ボルツマン法の計算格子に速度データを与える。

5.2 実行性能測定

東京工業大学の TSUBAME3.0 において弱スケールリングを測定した。GPUには Tesla P100を用い、1 ノードあたり 4MPI プロセスと 4GPU を割り当てた。スケールリングは 16GPU から 256GPU で評価した。1 ノード・4GPU あたり風車 1 台、 $512 \times 512 \times 1024$ 格子を割り当てた。

弱スケールリングの結果を図 1 に示す。64 ノード 256GPU, 171 億格子点まで性能向上し、並列化効率率は 50%ほどである。実行時間の内訳を確認すると、アクチュエーターマーカーとの相互作用計算を含む衝突過程の計算 (赤)、アクチュエーターマーカーの時間発展の計算 (オレンジ)の時間が GPU 数の増加に伴い長くなっている。これら 2つの処理の時間がアクチュエーターマーカー数 (風車の台数) に応じて長くなるためである。スケールリングを改善、大規模計算での計算効率の改善には、アクチュエーターマーカーの効率的な探索手法の実装が必要であり、今後の課題である。

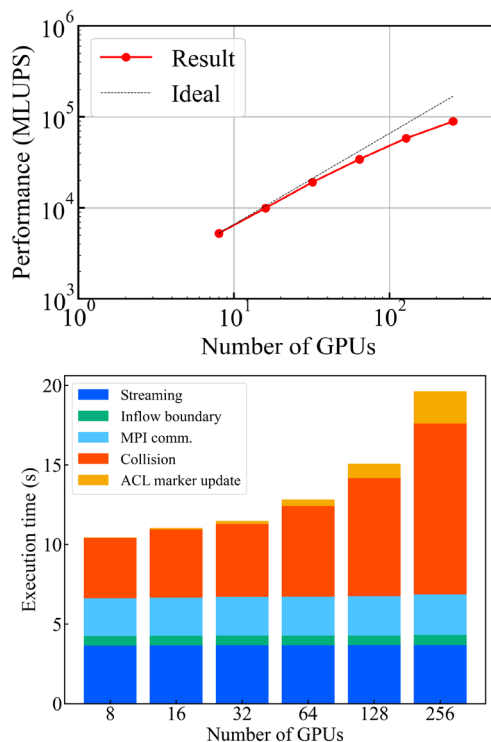


図 1 弱スケールリング (上) と実行時間の内訳 (下)

5.3 単基風車の解析

デンマークの洋上ウィンドファーム 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、発電量とウェイクに対する格子解像度の依存性を確認した。

まず、乱れのない風の流入条件における風車の発電量を観測値と比較した。計算領域を $1200 \text{ m} \times 300 \text{ m} \times 300 \text{ m}$, 格子幅を 4 m, 3 m, 2 m, 1 m, 0.5m の 5 つの条件を設定し、格子解像度の依存性を確認した。風速は 5, 7.5, 10, 12.5 m/s の 4 ケースとした。発電量の計算結果を図 2 に示す。黒線が風速に対する風車発電量の観測値(1)であり、プロットが格子ボルツマン法の計算結果である。格子解像度が細かいほうが観測値に近く、計算結果は 2 m 格子でおおよそ収束することが確認できた。

次に、風車ウェイクへの格子解像度依存性を評価した。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、ウェイクへの変動風の影響を調べた。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 4 m と 0.5 m でウェイクの乱れが大きく異なっている。

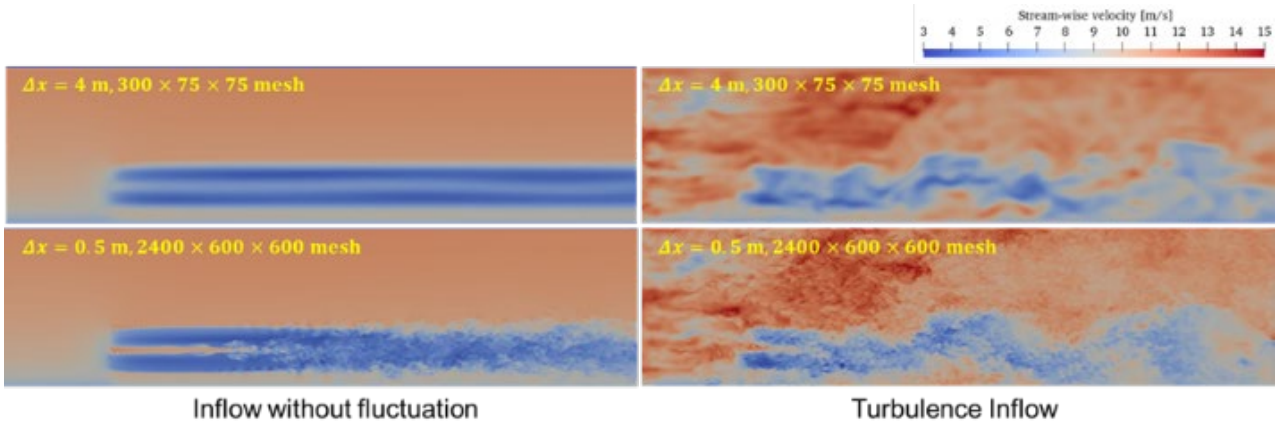


図 3 単機タービンのウェイク速度プロファイル (左：乱れなし流入条件 右：変動風流入条件)

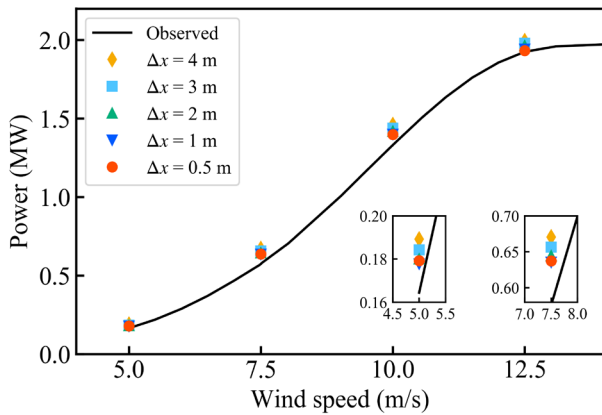
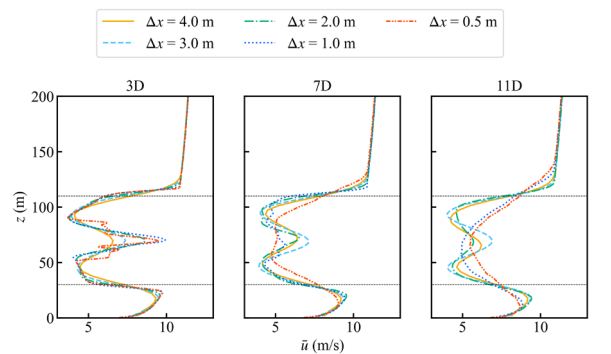


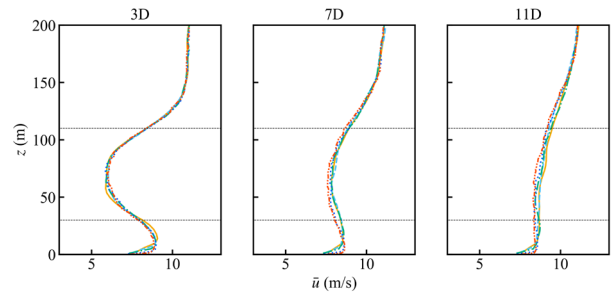
図 2 風車発電量に対する格子解像度依存

一方、変動風では、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 4 m 格子と 0.5 m 格子で同じ傾向である。図 4 に時間平均した主流速度の鉛直プロファイルを示す。グラフタイトルはロータ面からの距離を示す。乱れなしでは格子解像度を細かくするほどウェイクの速度回復が早くなる傾向があり、これは翼端渦の崩壊が高解像度計算ほど早まるためである。変動風の場合、平均速度場には格子解像度はほぼ影響せず、4 m と 0.5 m 格子でよく一致したプロファイルが得られている。また、乱れありのほうが速度の回復が早いことがわかる。

ナセルやタワーの影響を確認するため、風速 10 m/s の条件において構造物を考慮した計算を行い、ブレードのみの結果と比較した。流入風に乱れなしとありの場合のウェイクの鉛直プロファイルを図 5 に示す。乱れなしの場合、タワーなどの構造物はウェイクに大きく影響し、構造物があるほどウェイクの速度回復が早い。変動風では、構造物のウェイクへの影響は小さいことがわかった。



(a) 乱れなしの流入条件



(b) 変動風の流入条件

図 4 風車ウェイクの平均風速の鉛直プロファイル。タイトルは風車からの距離を示す。

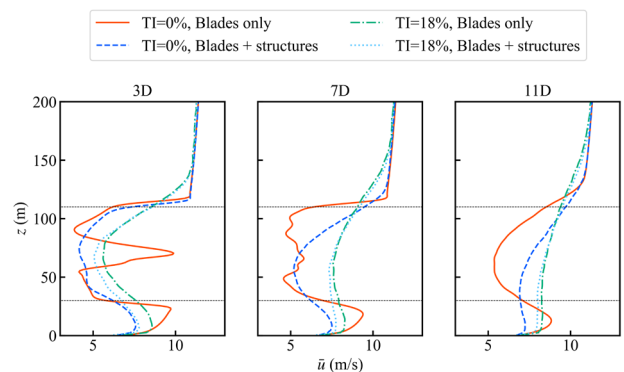


図 5 平均風速プロファイルへの風車構造物の影響

5.4 2 基風車の解析

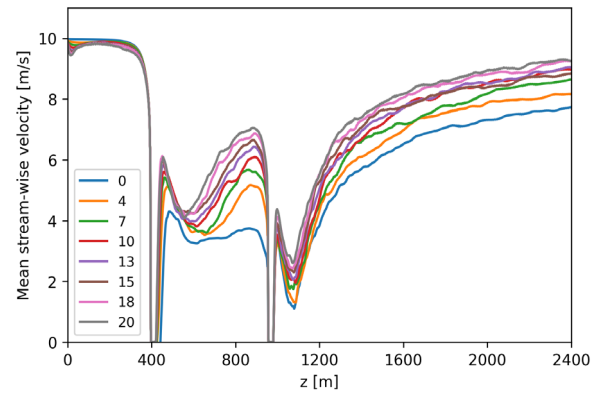
2 台の風車を縦列に並べたシミュレーションを行い、後方風車への前方風車のウェイク影響を調査した。大気境界層の条件は、乱流強度を 0% から 20% の範囲で 8 ケース、大気境界層の速度シアを洋上風（ベキ指数 1/10）、陸上風（ベキ指数 1/4）、シアなしの 3 ケースとした。2 基の風車の間隔は 560m と 800m（ロータ直径を D として、それぞれの 7D と 10D）の 2 ケースとした。計算領域を 2400 m×300 m×300 m、格子解像度は 1 m とした。ハブ高さでの平均風速は 10 m/s とした。

風車間隔を 560 m (7D) とした場合のハブ高さの時間平均風速の水平分布を図 6 に示す。1 台目の風車は 400 m, 2 台目の風車は 960 m に位置している。乱流強度が高いほど、1 台目と 2 台目の両方でウェイクの速度回復が早い。ウェイクの乱れが大きく、外部流れとより混合するためである。速度シアが大きい陸上風のほうが、ウェイクの速度回復に対して乱流強度が大きく影響する。また、1 台目よりも 2 台目の風車のウェイクのほうが、速度回復が速いことがわかる。

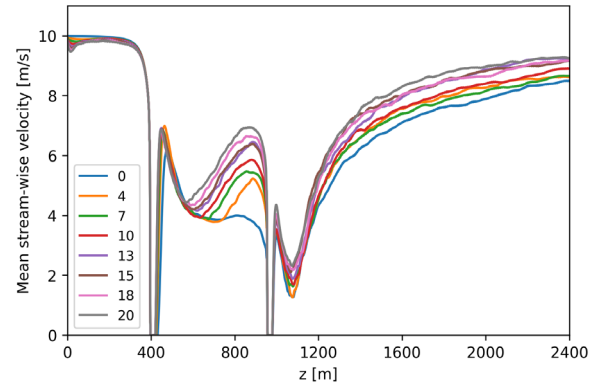
前方の風車、風車間隔 7D と 10D の場合の後方風車の発電量（時間平均トルク）を図 7 に示す。前方風車の発電量は乱流強度に影響されないが、速度シアが小さいほど地表付近の風速が上がるため発電量は高くなる。後流風車の発電量は、風車間隔が離れている 10D の場合のほうが大きい。また、大気境界層の乱流強度の増加に伴い発電量は大きくなる傾向があり、これは図 6 に示したように乱流強度が高いほど速度回復が速いためである。さらに乱流強度が低い場合は後続の風車の発電量に速度シアは影響するが、高い乱流強度では速度シアの影響は小さいことが明らかになった。

5.5 ウィンドファームへの解像度依存性検証

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格子解像度 4 m, 3 m, 2 m, 1.5 m の 4 ケース実施し、発電量とその時間変動に対する格子解像度の依存性を確認した。計算領域は



(a) 陸上風（ベキ指数 1/4）



(b) 洋上風（ベキ指数 1/10）

図 6 2 基風車のウェイク。ハブ高さ主流方向速度への乱流強度と速度シアの影響。

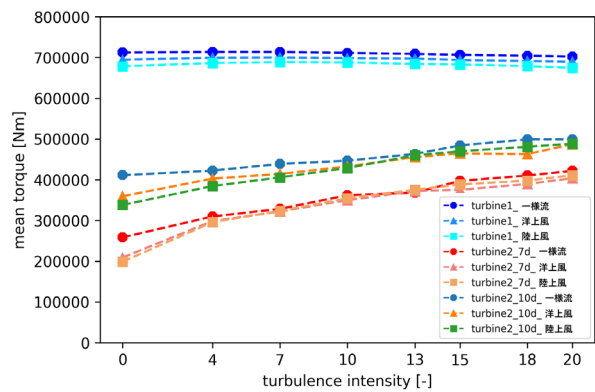


図 7 2 基風車発電量への大気境界層の影響

9600 m×5600 m×300m である。格子点数は 1.5m 解像度で約 47 億であり、128GPU を用いて 35 万ステップの計算を 19 時間で実行した。風向は図 8 に示す 270 度とした。主流方向に対するタービンの設置間隔は 560 m (7D) である。風速は 8 m/s, 乱流強度は 8%, 速度シアは洋上風（ベキ指数 1/10）と設定した。なお、タービンのサポート構造は考

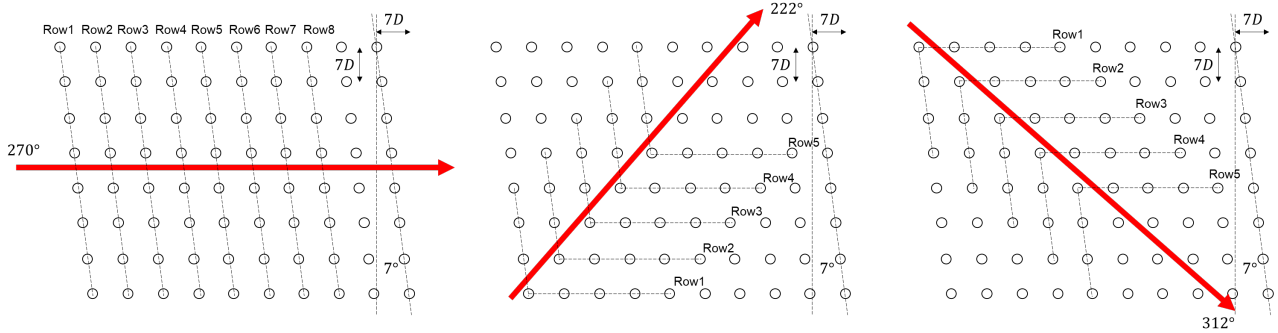


図 8 洋上ウィンドファーム HornsRev1 の風車配置と風向き，Turbine row の定義。

慮していない。

各行のタービンの発電量の平均値を図 9 に示す。低解像度の 4 m メッシュ，3 m メッシュの計算では 5 行目までのタービンの発電量が高解像度 1.5m の結果と異なっている。2 m と 1.5 m メッシュの計算結果はほぼ同じ値を示している。図 2 の単基風車の結果と合わせ，2 m 解像度（ロータ直径に対して 40 メッシュ）で発電量の計算結果は収束すると考えられる。また，発電量の時間変化の標準偏差を図 10 に示す。標準偏差に対しても 2 m と 1.5m メッシュの計算結果はほぼ同じである。

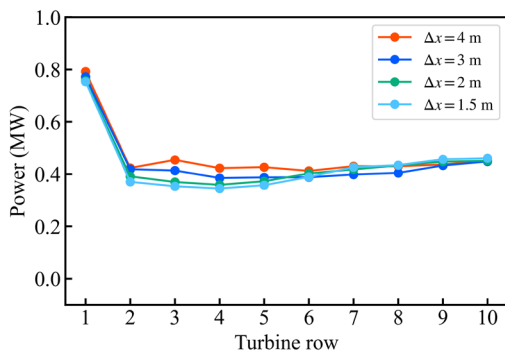


図 9 ウィンドファーム発電量への格子解像度の影響

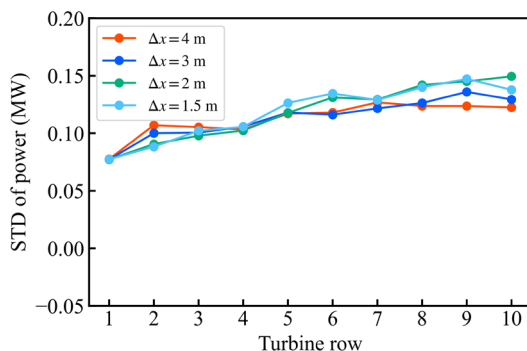


図 10 発電量の時間変動の標準偏差に対する格子解像度の影響

5.6 ウィンドファーム発電量への風向き影響

開発した CFD ツールの検証，およびウィンドファーム発電量への風向き影響を調べるため，ウィンドファームへの風向きを変えたシミュレーションを行い観測結果(2)と比較した。観測データは，図 8 に示す 221°，270°，312°の 3 方向に対し，風向の変動幅が±1°，±5°，±10°，±15°の範囲で発電量が整理されている。開発中の CFD ツールは風向の時間変動を扱えない。そのため，表 1 に示すように，基準風向から±15°範囲で流入風の方角を変えた 51 ケースの計算を実施し，風向変動範囲内の風向での計算結果を平均して観測値と比較した。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。

例として風向 312°，307°，の主流方向速度分布，主流方向速度の時間平均値，各風車の発電量を図 11 に示す。風向きが 5 度違うだけで，後続風車の発電量に大きな差が出ている。先頭風車と同程度の発電量が得られている後続の風車は，前方風車のウェイク領域に位置していないことが速度分布の結果からわかる。

各行の発電量を観測データと比較した結果を図 12 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風向条件が多い。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

表 1 洋上windファームのシミュレーションの風向ケースと観測データと比較のためのデータ平均範囲

Wind direction	Range to average																
	$\pm 15^\circ$				$\pm 10^\circ$				$\pm 5^\circ$				$\pm 1^\circ$				
222	207	209	211	213	215	217	219	221	222	223	225	227	229	231	233	235	237
270	255	257	259	261	263	265	267	269	270	271	273	275	277	279	281	283	285
312	297	299	301	303	305	307	309	311	312	313	315	317	319	321	323	325	327

unit: degree

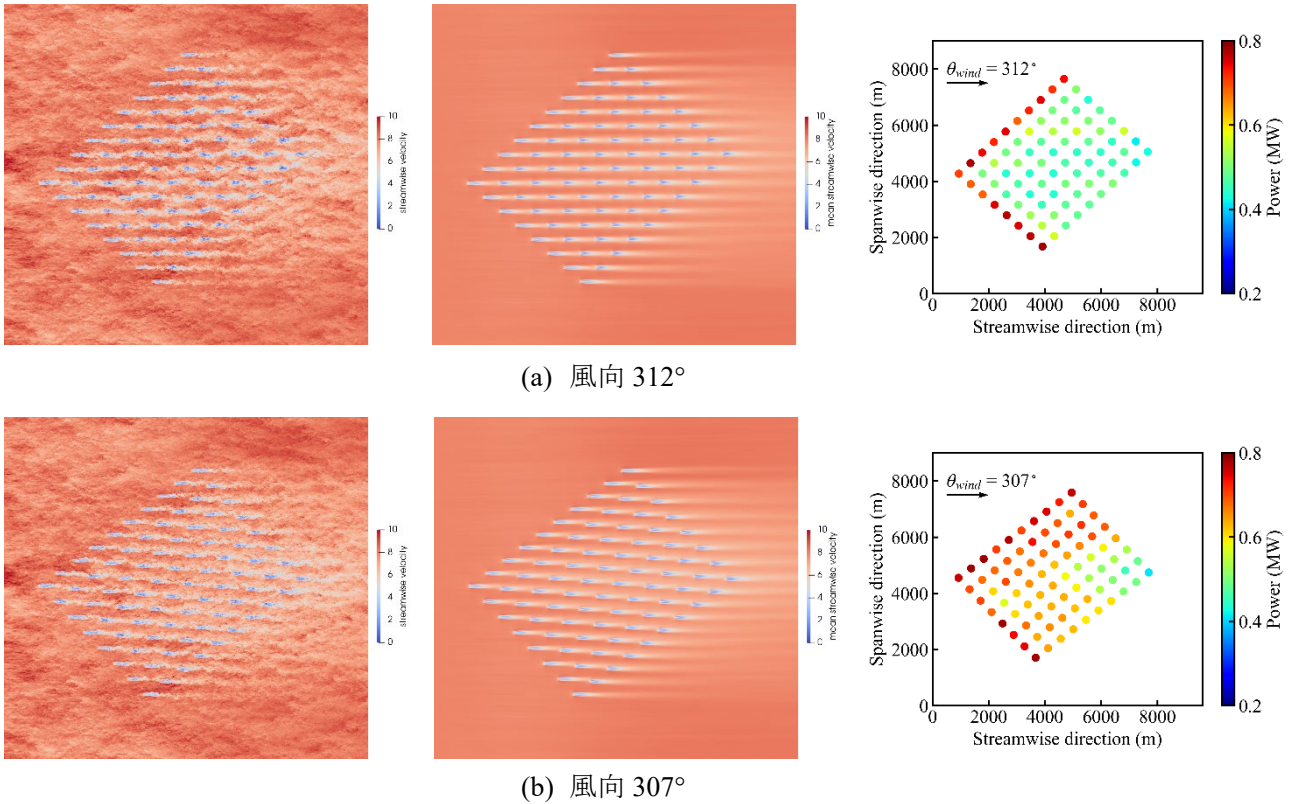


図 11 風向を変えたwindファームのシミュレーション結果

(左から主流方向速度の瞬時値, 主流方向速度の時間平均値, 各風車の発電量の時間平均値)

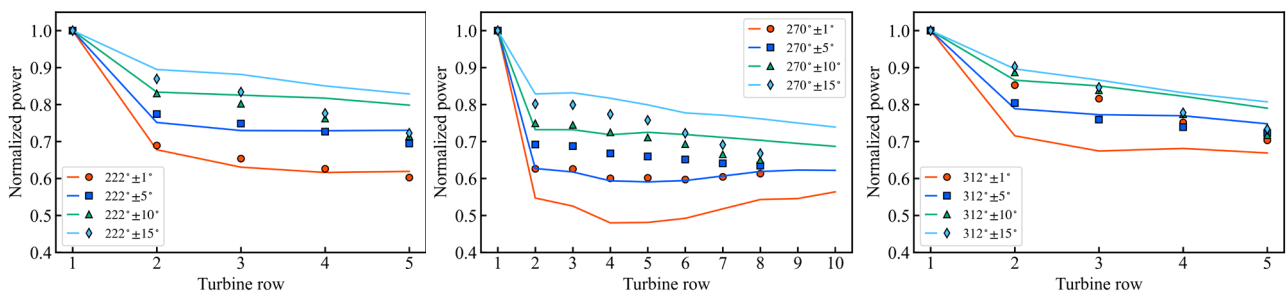


図 12 windファーム発電量の風向の影響. シミュレーション (実線) と文献(2)の観測データ (プロット) を比較.

レードのピッチ角を設定しているが, 実際の風車の運転では, 風速に合わせて回転数とブレードピッチが適切に制御されている. より予測精度を向上するには, シミュレーションに回転数とブレードピッチの制御を導入する必要がある.

参考文献

(1) Wu, Y. T., & Porté-Agel, F., Renewable Energy, 75, 945–955, 2015.
 (2) Barthelmie, R. J. et al., Wind Energy, 12(5), 431–444, 2009.

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

本研究課題では格子ボルツマン法に基づく風車計算手法を開発し、洋上ウインドファームに対してシミュレーションを実施した。乱流の境界条件の設定方法を変更するなど多少の変更はあったが、概ね申請時の計画通りに研究を実施した。割り当てられた計算資源の約 97%を使用した。

開発した CFD ツールは、80 基の風車から構成される洋上ウインドファーム Horns Rev 1 に対して、高精度なアクチュエーターライン風車モデルを用いた 16 億格子点規模の LES を、8 ノードを利用して約 12 時間で計算を完了した。

学会発表を通して風力の専門家から頂いたアドバイスを、本年度実施したシミュレーションの結果から、予測精度の向上には、回転数とブレードピッチの制御システムのシミュレーションへの導入、風向の時間変動の導入が必要と考える。また、開発した CFD ツールはウインドファームの計算を現実的な時間で実行可能であるが、図 1 の弱スケーリングの結果や、格子ボルツマン法の理論性能と比較するとまだ性能向上の余地がある。2023 年度の継続課題が採択され、制御システムの導入、風向の時間変動、コード高速化を実施する予定である。

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)

なし。

(3) 国際会議発表 (査読なし)

- [1] Seiya Watanabe, Changhong Hu, Development of highly parallel LES code based on the lattice Boltzmann method for wind turbine flows, International Workshop on Turbulence, Vorticity Dynamics and Wind Energy, September, 2022.
- [2] Seiya Watanabe, Changhong Hu, Lattice Boltzmann Simulations Using Actuator Line Model for Wind Turbine Flows, Grand Renewable Energy 2022 International Conference (GRE2022), December,

2022.

- [3] Seiya Watanabe, Numerical Simulation of Wind Farm by Lattice Boltzmann Method, The 1st International Symposium on Marine Renewable Energy System Dynamics, February, 2023.
- [4] 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.

(4) 国内会議発表 (査読なし)

- [1] 野間優希, 渡辺勢也, 胡長洪, 適合細分化格子法を導入した格子ボルツマン法によるレンズ風車の風抵抗評価, 日本計算工学会・第 27 回計算工学講演会, 6 月, 2022.
 - [2] 渡辺勢也, 胡長洪, 格子ボルツマン法に基づく洋上ウインドファームの LES 解析コードの開発, 日本機械学会・第 35 回計算力学講演会, 11 月, 2022.
 - [3] 渡辺勢也, 野間優希, 胡長洪, 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, 一般社団法人日本風力エネルギー学会・第 44 回風力エネルギー利用シンポジウム, 12 月, 2022.
 - [4] 渡辺勢也, 胡長洪, 格子ボルツマン法による洋上ウインドファームの大規模シミュレーション, 日本流体力学学会・第 36 回数値流体力学シンポジウム, 12 月, 2022.
 - [5] 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, 5 月, 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)
- [受賞 1] 野間優希, 渡辺勢也, 胡長洪, 日本計算工学会・第 27 回計算工学講演会グラフィクスアワード特別賞, 6 月, 2022.
 - [受賞 2] 渡辺勢也, 優秀発表賞, 一般社団法人日本風力エネルギー学会・第 44 回風力エネルギー利用シンポジウム, 12 月, 2022.