

学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 公募型共同研究 2022年度採択課題
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

九州大学 応用力学研究所

渡辺勢也

共同研究に関する情報

(1)共同研究拠点：東京工業大学 学術国際情報センター TSUBAME3.0

(2)共同研究分野：超大規模数値計算系応用分野

(3)研究グループ

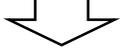
代表者	渡辺 勢也	(九州大学)
副代表者	青木 尊之	(東京工業大学)
課題参加者	胡 長洪	(九州大学)
	小野寺 直幸	(日本原子力研究開発機構)
	長谷川 雄太	(日本原子力研究開発機構)
	野間 優希	(九州大学)
	馬場 将平	(九州大学)

研究背景

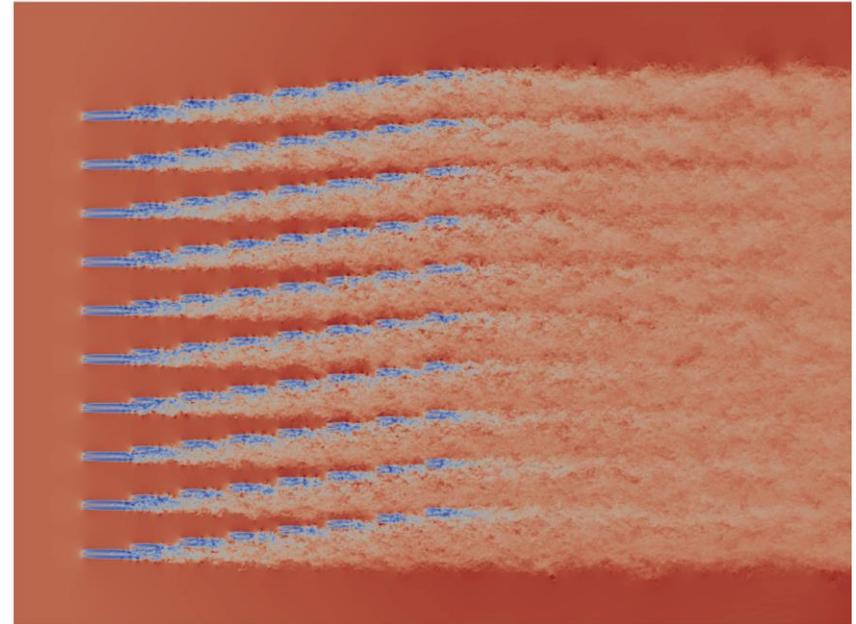
大規模洋上ウィンドファームの発電量には、風車ウェイク（後流）の相互干渉が大きく影響

CFDシミュレーションによる発電量予測

風車ウェイクの乱流場を解く必要があり、
広域なファーム全体に対して高解像度
メッシュが必要



大規模流体シミュレーションが有効



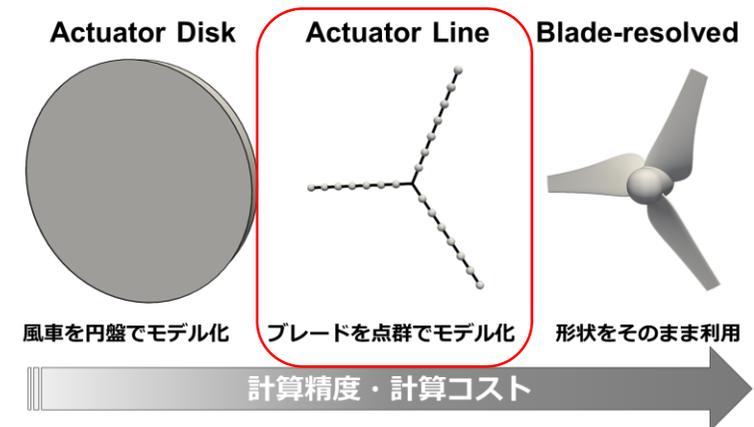
洋上ウィンドファームHorns Rev 1のテスト計算
(計算領域10 km × 7.5 km ・ 2 m格子 ・ 19億格子点)

研究目的

一般的なウィンドファーム全域の解析

- 風車を円盤と仮定するActuator Diskモデルを利用
- 直径に対して10メッシュ以下の低解像度で計算

より高精度なActuator Line モデル (ACLモデル) の導入には、風車直径・ウェイクに対して細かいメッシュ必要



研究目的

大規模流体シミュレーションに適した格子ボルツマン法とGPUスパコンを利用することで、ファーム全域に対するACLシミュレーションを実現し、発電量予測性能の向上を目指す

- ブレードだけでなく、風車のナセルやタワーなどの構造物をモデル化できるActuator Line – Interpolated Bounce-backモデルの開発
- 大気境界層の平均風速と乱流強度を指定できる変動風の流入境界条件の設定
- デンマークの洋上ウィンドファームHorns Rev 1の格子ボルツマン法解析と計測データの比較検証
- 変動風の条件がファームの発電量、風車ウェイクの乱流特性、タービン荷重に与える影響の調査

キウムラント型格子ボルツマン法

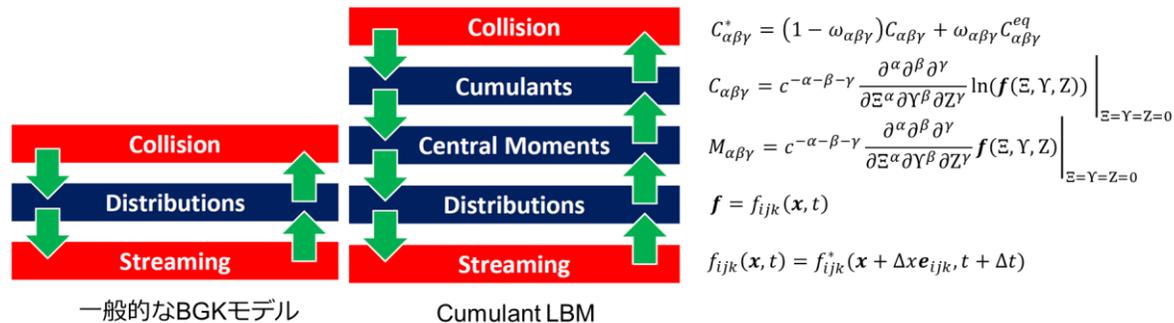
- ボルツマン方程式を速度方向で離散化し, 速度分布関数の時間発展を計算
- 完全な陽解法でありアルゴリズムがシンプルなため, 大規模並列計算に適した手法

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

流体の密度と速度

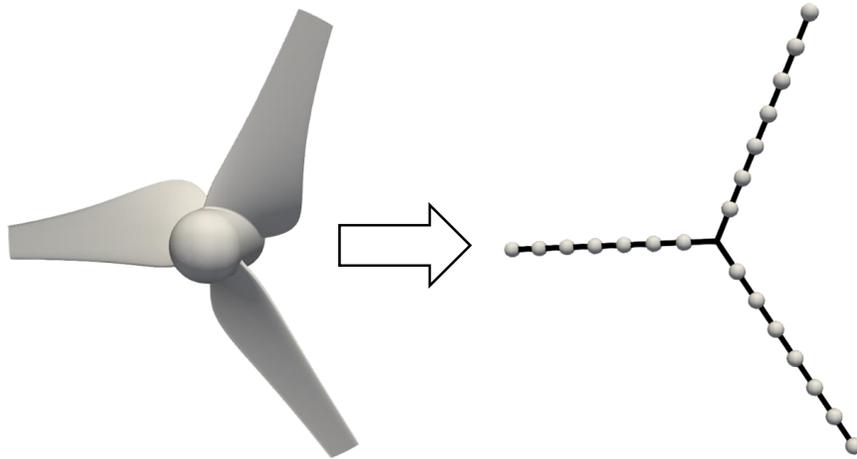
$$\rho(\mathbf{x}, t) = \sum_{i,j,k=-1}^1 f_{ijk}(\mathbf{x}, t) \quad \rho \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \sum_{i,j,k=-1}^1 \xi_{ijk} f_{ijk}(\mathbf{x}, t)$$

キウムラントモデル* : 分布関数を統計量キウムラントに変換して計算することで数値粘性を導入



*Geier, M., Schönherr, M., Pasquali, A., & Krafczyk, M. The cumulant lattice Boltzmann equation in three dimensions: Theory and validation. Computers & Mathematics with Applications, 70(4), 507-547 (2015).

Actuator Lineモデル

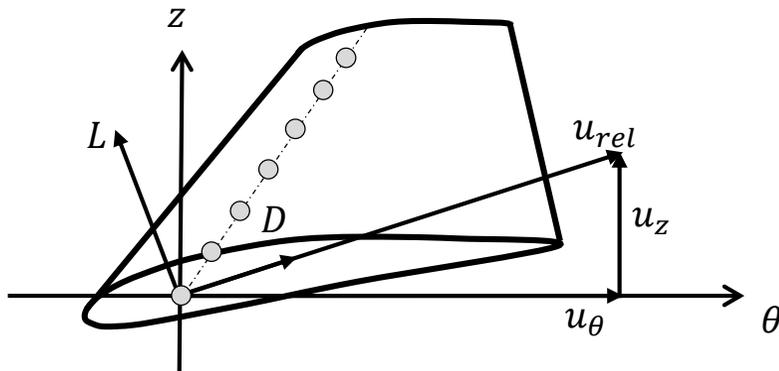


- ブレードをマーカー粒子でモデル化
- 事前に準備する翼型の空力特性 (C_d, C_l) に基づき流体力を算出
- ガウシアンフィルタをかけ, 流体側に体積力を与える

マーカー粒子に加わる力

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

u_{rel} : ブレードの相対速度 C_a : 翼弦長 Δr : 点の間隔
 $\mathbf{e}_l, \mathbf{e}_d$: 揚力, 抗力が作用する方向の単位ベクトル
 C_l, C_d : 揚力係数, 抗力係数



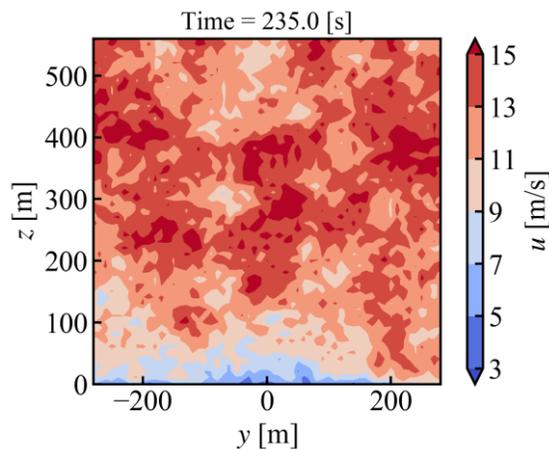
ガウシアンフィルタ

$$\eta = \frac{1}{3} \frac{1}{\pi^2 \varepsilon^3} e^{-\left(\frac{d}{\varepsilon}\right)^2}$$

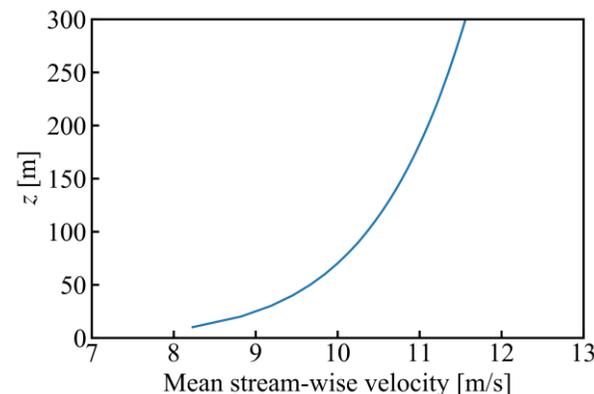
d : 各点と格子間の距離
 ε : ガウシアンフィルタの影響半径のパラメータ

大気乱流の流入境界条件

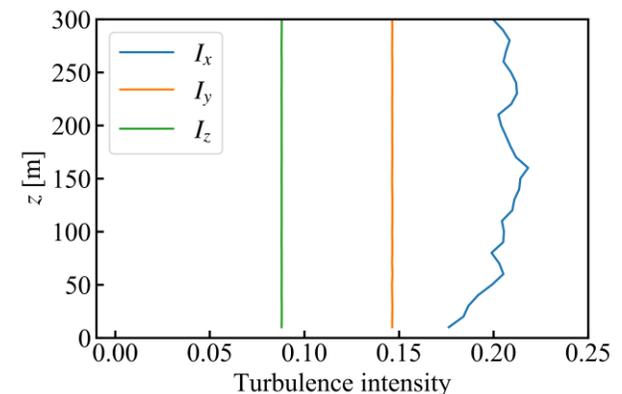
- NREL (National Renewable Energy Laboratory) によって開発された変動風作成ソフト TurbSim* (OSS) を利用
- 指定した平均風速分布, 乱流強度 (例えばIEC基準の風など) の変動風を作成可能
- 2次元断面での乱流場の時系列を出力 → 格子ボルツマン計算の流入境界条件に設定



TurbSimで作成された乱流場



対数則に基づく平均風速分布



鉛直乱流強度分布

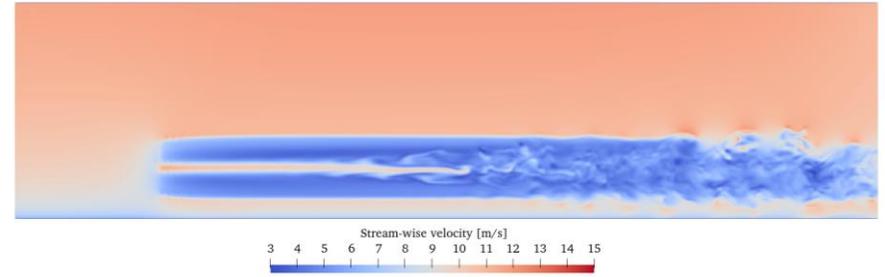
* <https://www.nrel.gov/wind/nwtc/turbsim.html>

Vestas V80 2MW風車の検証計算

デンマークの洋上ウィンドファームHorns Rev 1に用いられるVestas V80風車（2MW, 80m）1基の解析

風の乱れを考慮していない流入条件

ローター直径に対し80メッシュ（ $\Delta x = 1\text{m}$ ）を用いると発電量と風抵抗が設計値とよく一致



主流速度の計算結果

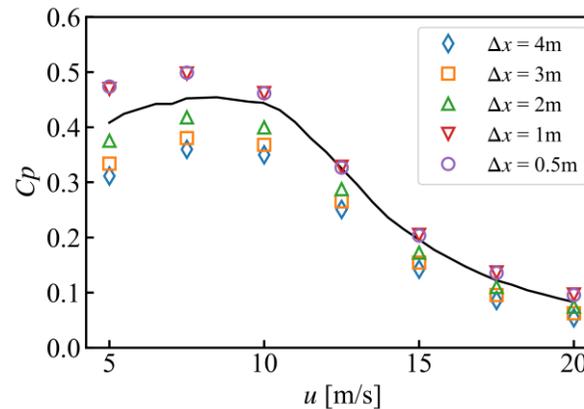
パワー係数

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho AU^3}$$

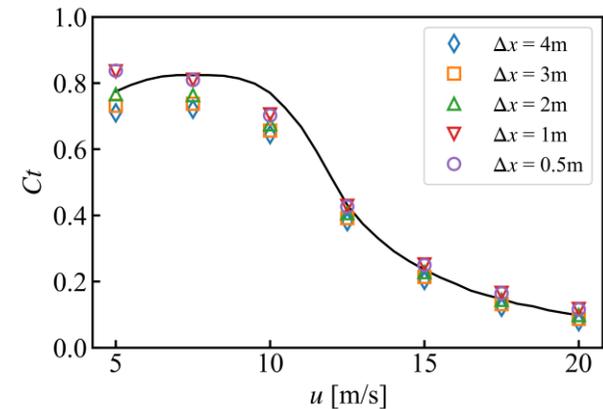
スラスト係数

$$C_t = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho AU^2}$$

P : 発電量, T : スラスト力



流速に対するタービン性能 (C_p)

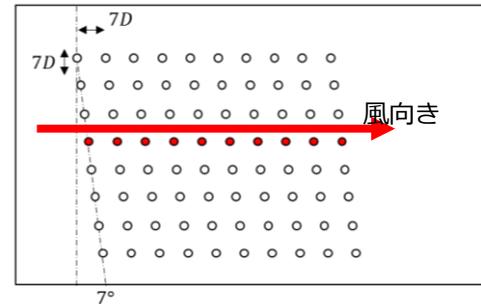


流速に対する風抵抗 (C_t)

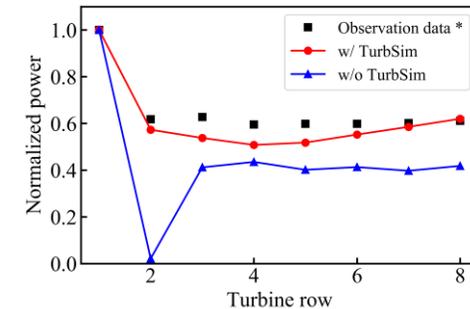
洋上ウィンドファームテスト計算

洋上ウィンドファームの一部（8基）を
乱れありとなしの流入風で解析。
16億メッシュ・48GPU・24時間

TurbSimによる乱れを導入することで、
後方タービンの発電量が観測値に近づく



デンマーク HornsRev1の風車配置

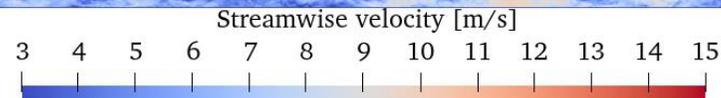
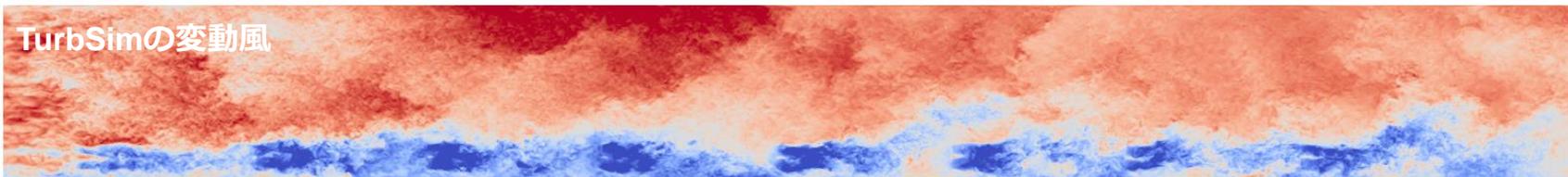


タービン発電量の観測値との比較

乱れなしの流入条件



TurbSimの変動風



今後の研究計画

これまでの進捗状況

- TurbSimソフトウェアで作成した変動風を格子ボルツマン計算の流入境界条件に設定
- Vestas V80 2MW風車の計算による計算モデルの検証と格子解像度の影響の調査
- ウィンドファームの一部（風車8基）のテスト計算で変動風の影響を確認

今後の研究計画

- 変動風流入条件での格子解像度依存性の確認
- 変動風の乱流強度がタービン間相互干渉に与える影響の調査
- 計算コードの高速化と強スケーリングの改善
- 風向きを変えてウィンドファーム全体の解析を行い、観測値との比較