

急勾配地形における風車ウェイク干渉の 高精度乱流シミュレーション手法の開発

九州大学 応用力学研究所
渡辺勢也

研究実施体制

2025年度 萌芽型研究課題(JHPCN-Q)

課題名 : 急勾配地形における風車ウェイク干渉の高精度乱流シミュレーション手法の開発

利用資源 : 玄海 ノードグループB



2026年度 JHPCN課題 課題番号 : jh260010

課題名 : 複雑地形を考慮したウィンドファーム風況のリアルタイムシミュレーション

利用資源 : 玄海 ノードグループB

代表者	渡辺 勢也	九州大学
副代表者	小野寺 直幸	プロメテック・ソフトウェア
課題参加者	胡 長洪	九州大学
	内田 孝紀	九州大学
	Yousef Hussein	九州大学
	大滝 健希	九州大学
	長谷川 雄太	プロメテック・ソフトウェア

目次

2025年度 萌芽型研究課題(JHPCN-Q)

課題名 : 急勾配地形における風車ウェイク干涉の高精度乱流シミュレーション手法の開発

利用資源 : 玄海 ノードグループB

■ 研究背景と目的

■ 計算手法

■ 成果① : 2基風車のウェイク相互干涉の計算精度評価

Yousef Hussein, Seiya Watanabe, Changhong Hu; Evaluation of an actuator-line model in a lattice Boltzmann solver for wake interaction between two in-line wind turbines. *Physics of Fluids*, 38 (1) 015145 (2026).

■ 成果② : 急勾配孤立丘の風況解析と風洞実験との比較

Yousef Hussein, Seiya Watanabe, Changhong Hu, Takanori Uchida; A Mesh Sensitivity Study of Lattice Boltzmann Simulations for the Flow over a Three-Dimensional Hill. (Under Review)

■ まとめと今後の計画

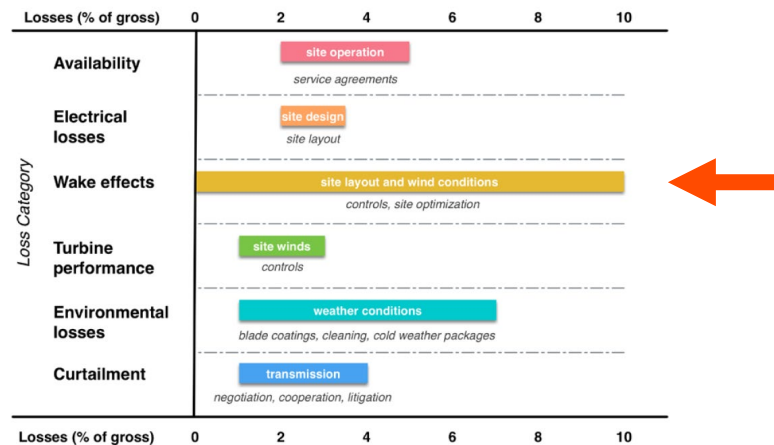
ウェイク影響

発電量損失 (~10%)

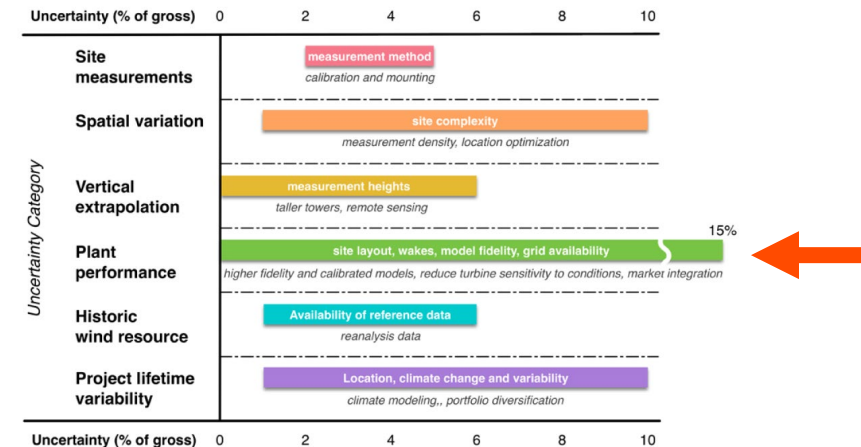
発電予測の不確実性 (~15%)



ウィンドファームにおけるウェイク^[1]



ウィンドファームの発電損失要因^[2]



発電量予測の不確実性^[2]

[1] Hasager, C. B., Rasmussen, L., Peña, A., Jensen, L. E., & Réthoré, P. E., "Wind farm wake: The Horns Rev photo case". Energies, 6(2), 696–716, 2013.

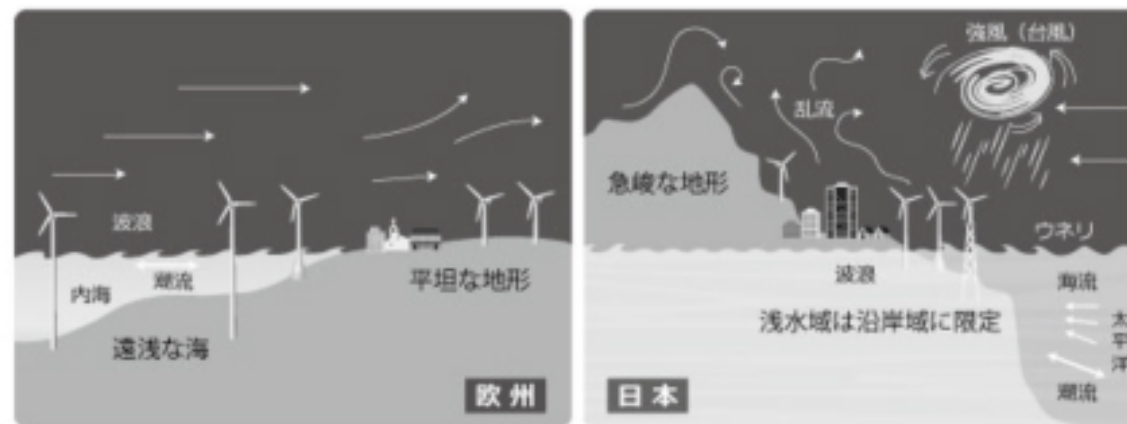
[2] A. Clifton, A. Smith, and M. Fields, "Wind Plant Preconstruction Energy Estimates: Current Practice and Opportunities," National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, Tech. Rep. NREL/TP-5000-64744, 2016.

日本特有の課題

- 洋上風力に期待が集まりつつも、平地が少ない日本では山岳地域への風車設置が主流である。
- 洋上であっても沿岸部は急峻な地形が多く、地形が洋上風況に及ぼす影響は無視できない。



大洞山（おおほらやま）ウィンドファーム^[3]



欧州および日本における風況のイメージ^[4]

[3] 一般社団法人大月町観光協会 <https://otsuki-kanko.jp/tourism/content3>

[4] 海域の風況をどのように調査するのか？【後編】-洋上風力発電の事業性を検討するために-, DOWAエコジャーナル <https://www.dowa-ecoj.jp/naruhodo/2015/20150901.html>

研究目的

従来モデルの限界とCFDの必要性

- 急勾配地形では気流の剥離が生じるため、簡易なウェイクモデルでは予測精度が不十分。
- 高精度な予測には CFD（数値流体力学）による解析が不可欠である。

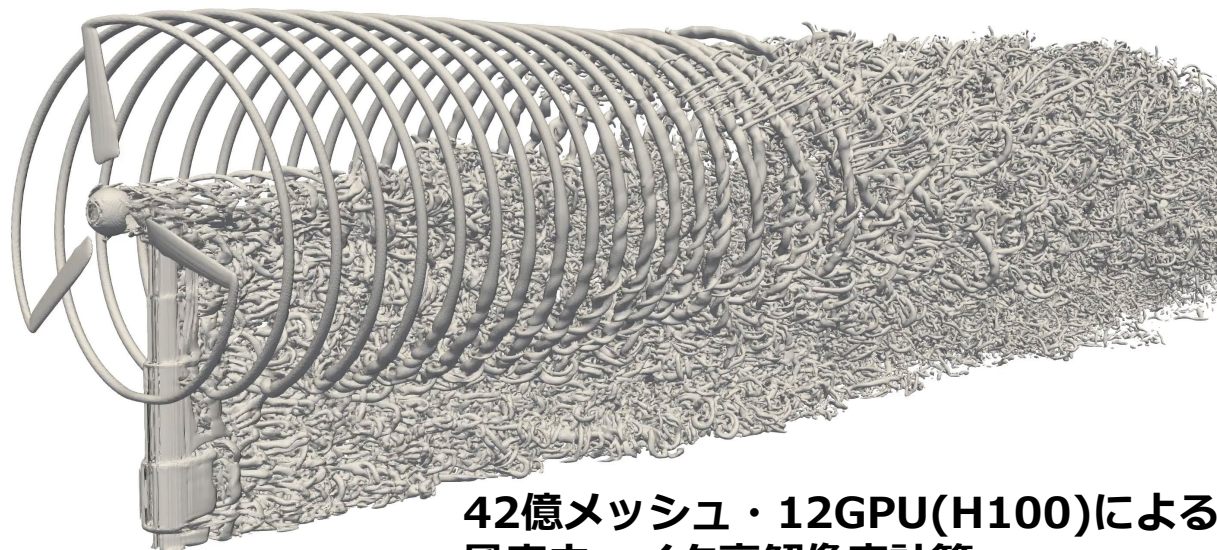
研究目的

地形影響を考慮した風車ウェイクの高精度な非定常乱流シミュレーション手法の開発

独自ソルバー

- 格子ボルツマン法による流体解析
- マルチGPU計算 (C++, CUDA, MPI)

➡ **大規模 or 超高速**



42億メッシュ・12GPU(H100)による
風車ウェイク高解像度計算

計算手法

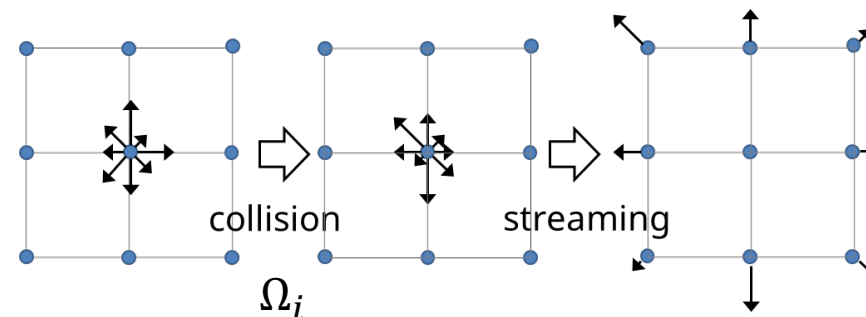
格子ボルツマン法 (LBM)

速度分布関数 f_i の時間発展

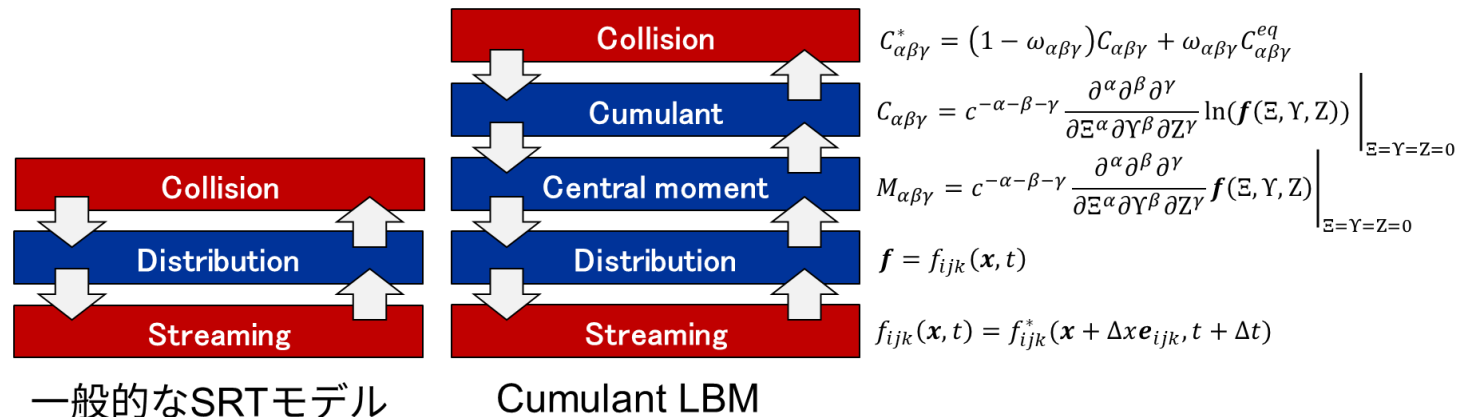
$$f_i(\mathbf{x} + \xi_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(\mathbf{x}, t) + \Omega_i$$

流体のマクロ量

$$\rho(\mathbf{x}, t) = \sum_i f_i(\mathbf{x}, t) \quad \rho \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \sum_i \xi_i f_i(\mathbf{x}, t) + \frac{\mathbf{G}}{2} \Delta t$$



キュムラントモデル^[5]：分布関数を統計量キュムラントに変換し，計算安定性と乱流の計算精度を向上



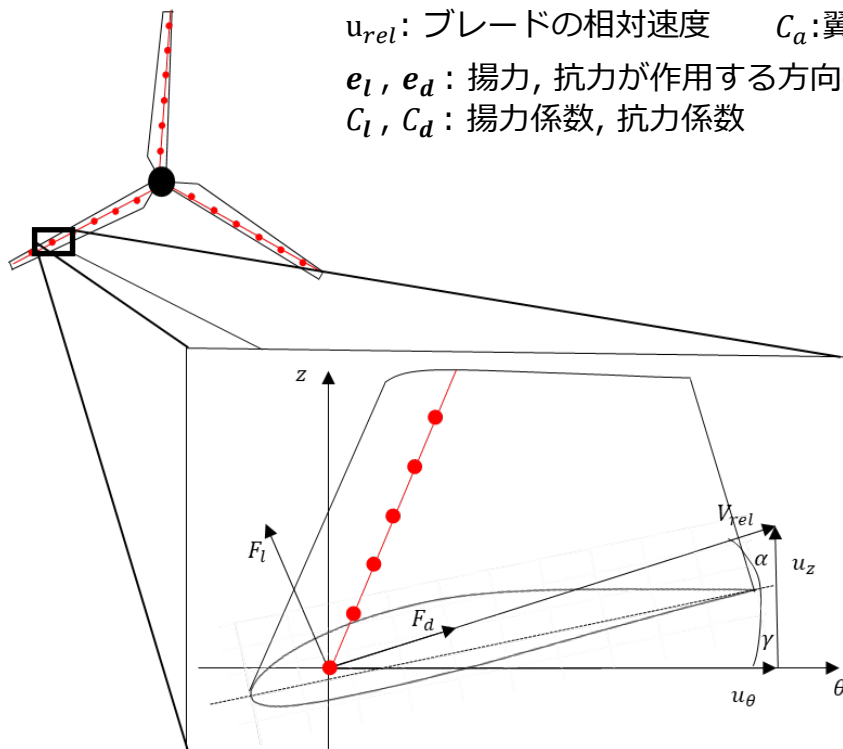
[5] Geier, M., Schönherr, M., Pasquali, A., & Krafczyk, M. The cumulant lattice Boltzmann equation in three dimensions: Theory and validation. Computers & Mathematics with Applications, 70(4), 507-547 (2015).

アクチュエータライン風車モデル

マーカー粒子に加わる力

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

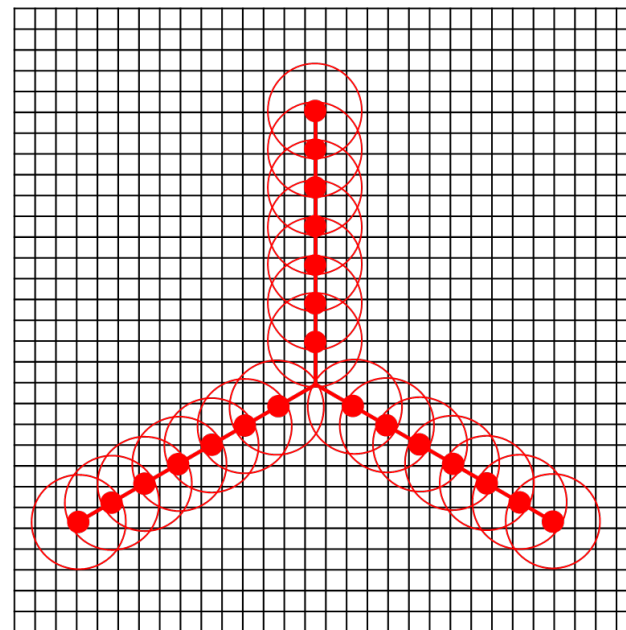
u_{rel} : ブレードの相対速度 C_a : 翼弦長 Δr : 点の間隔
 $\mathbf{e}_l, \mathbf{e}_d$: 揚力, 抗力が作用する方向の単位ベクトル
 C_l, C_d : 揚力係数, 抗力係数



格子点に与える体積力

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \sum_i^{N_p} \frac{1}{\frac{3}{\pi^2} \varepsilon^3} e^{-\left(\frac{d_i(\mathbf{x})}{\varepsilon}\right)^2} \mathbf{F}_{2D,i}$$

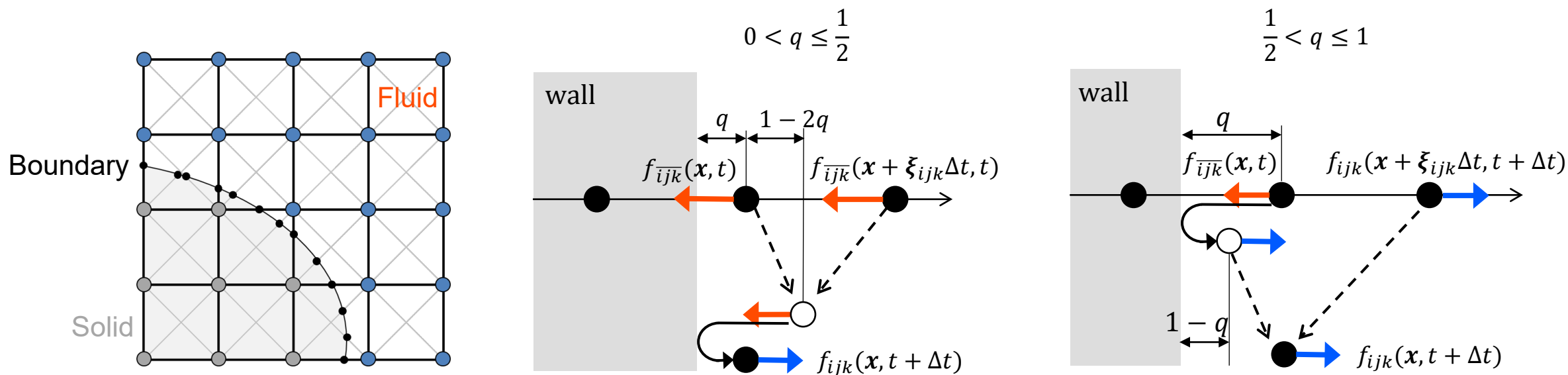
d : 粒子 i と格子点 $(\mathbf{x})$ の距離
 ε : ガウシアンフィルタの影響半径のパラメータ



地形の境界条件

- 直交格子に沿わない壁面を空間 2 次精度で表現できるInterpolated Bounce-Back法を導入。

$$f_{ijk}(\mathbf{x}, t + \Delta t) = \begin{cases} 2qf_{\overline{ijk}}(\mathbf{x}, t) + (1 - 2q)f_{\overline{ijk}}(\mathbf{x} + \xi_{ijk}\Delta t, t) & \left(0 < q \leq \frac{1}{2}\right) \\ \frac{1}{2q}f_{\overline{ijk}}(\mathbf{x}, t) + \frac{(2q - 1)}{2q}f_{ijk}(\mathbf{x}, t) & \left(\frac{1}{2} < q \leq 1\right) \end{cases}$$



成果①

2基風車のウェイク相互干渉の計算精度評価

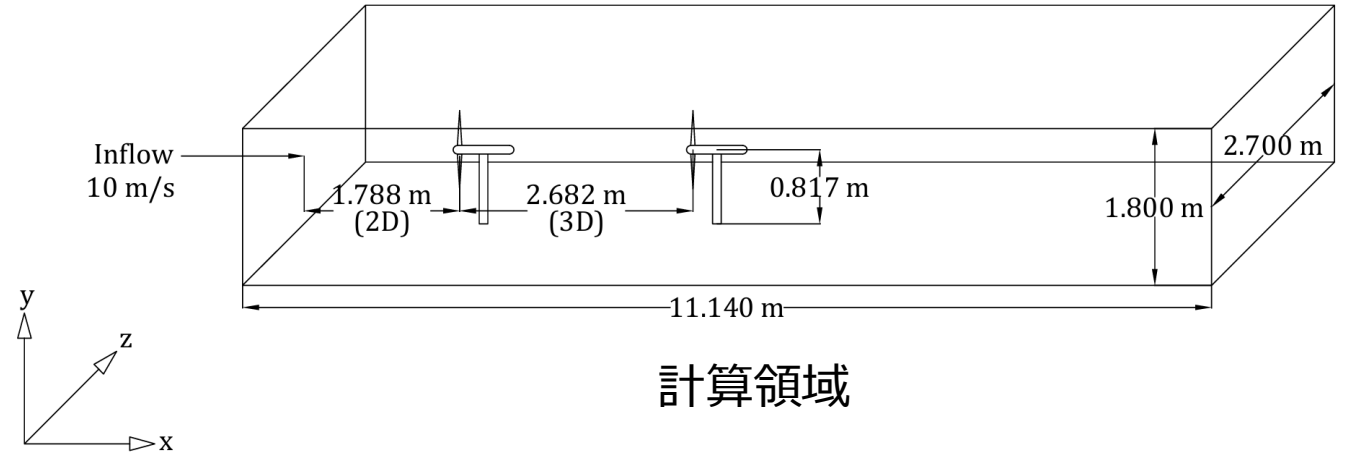
Yousef Hussein, Seiya Watanabe, Changhong Hu; Evaluation of an actuator-line model in a lattice Boltzmann solver for wake interaction between two in-line wind turbines. *Physics of Fluids*, 38 (1) 015145 (2026).

NTNU Blind Test 2

- 下流タービンのウェイクの平均風速と乱流運動エネルギーを実験と比較。
- 格子収束性を評価。



風洞実験写真^[6]



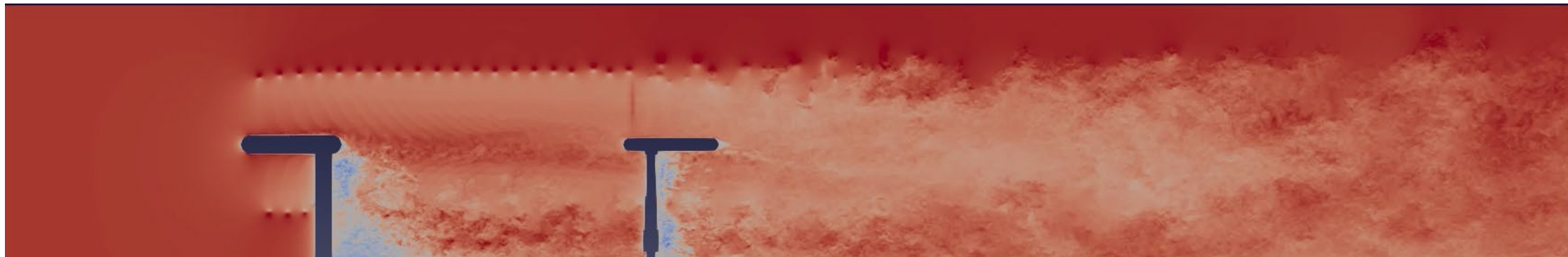
格子解像度と格子点数

Δx (mm)	$D_2/\Delta x$	Grid points	Δt (μs)	GPU数
14.0	64	$796 \times 129 \times 193$	21.0	1GPU
7.00	128	$1592 \times 258 \times 386$	10.5	1GPU
3.50	256	$3184 \times 516 \times 772$	5.24	4GPU
2.33	384	$4781 \times 773 \times 1159$	3.50	12GPU

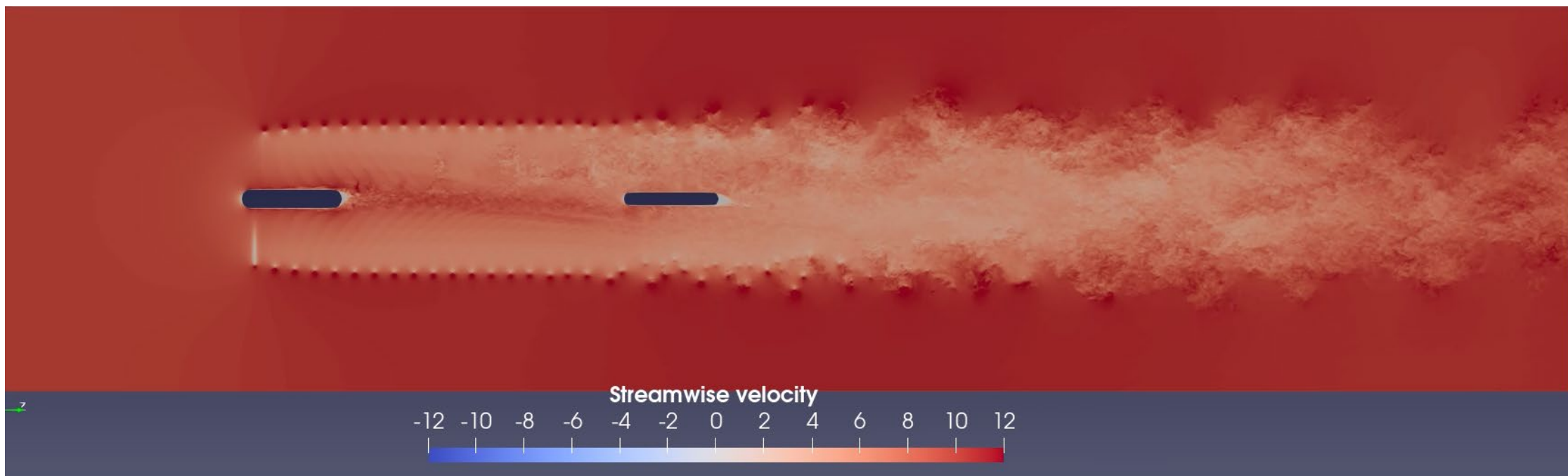
[6] Fabio Pierella, Per-Åge Krogstad, Lars Sætran, Blind Test 2 calculations for two in-line model wind turbines where the downstream turbine operates at various rotational speeds, Renewable Energy, 70, 62-77 (2014)

シミュレーション結果（高解像度D/384）

Side
view

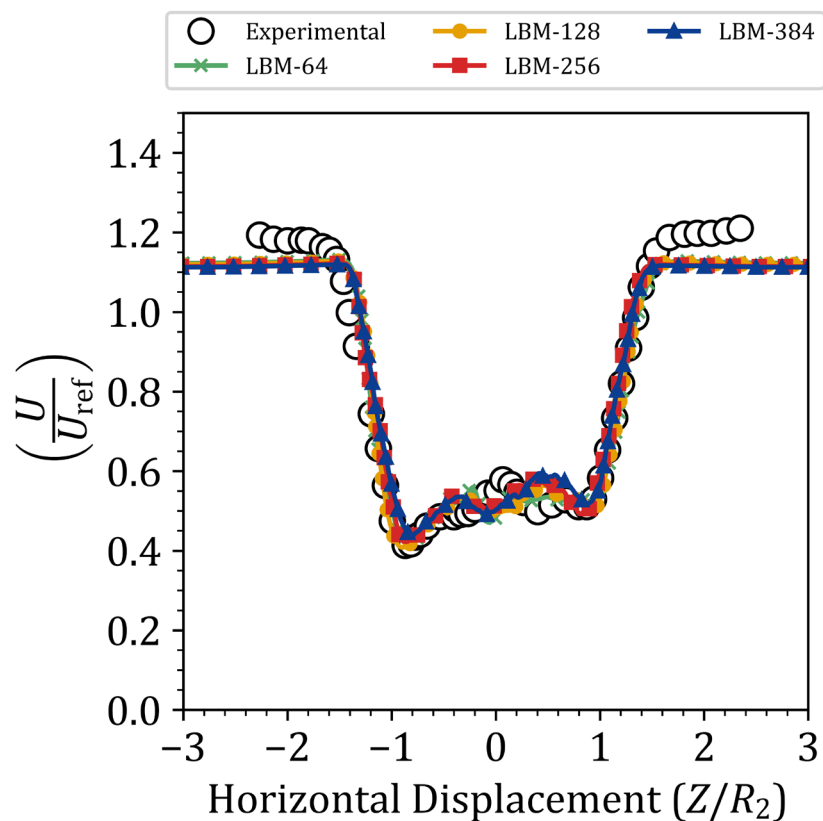


Top
view

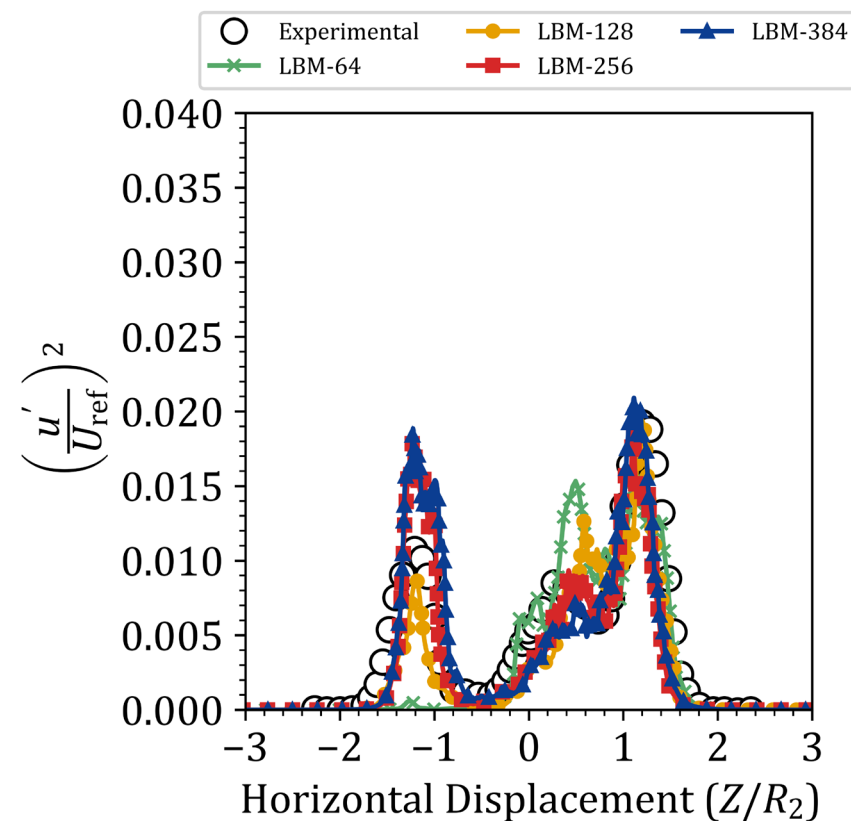


ウェイクの格子収束性

- **平均風速**：どの解像度でも実験値と良くあっている。
- **乱流エネルギー**：低解像度(D/64)ではピーク値を再現できていないが、ほかの解像度は実験を再現した。



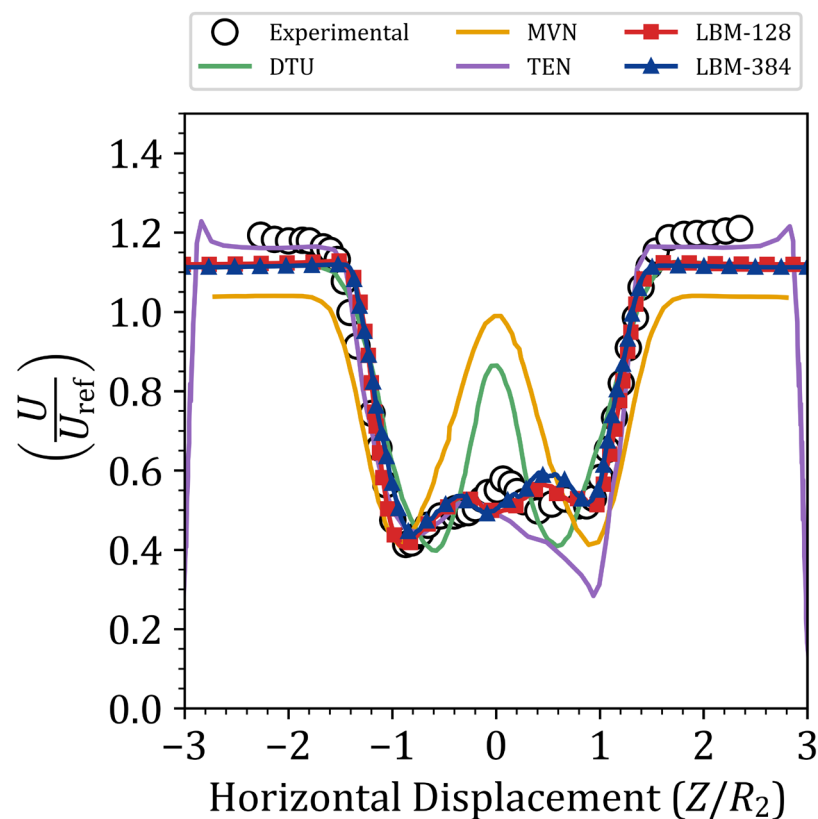
平均風速



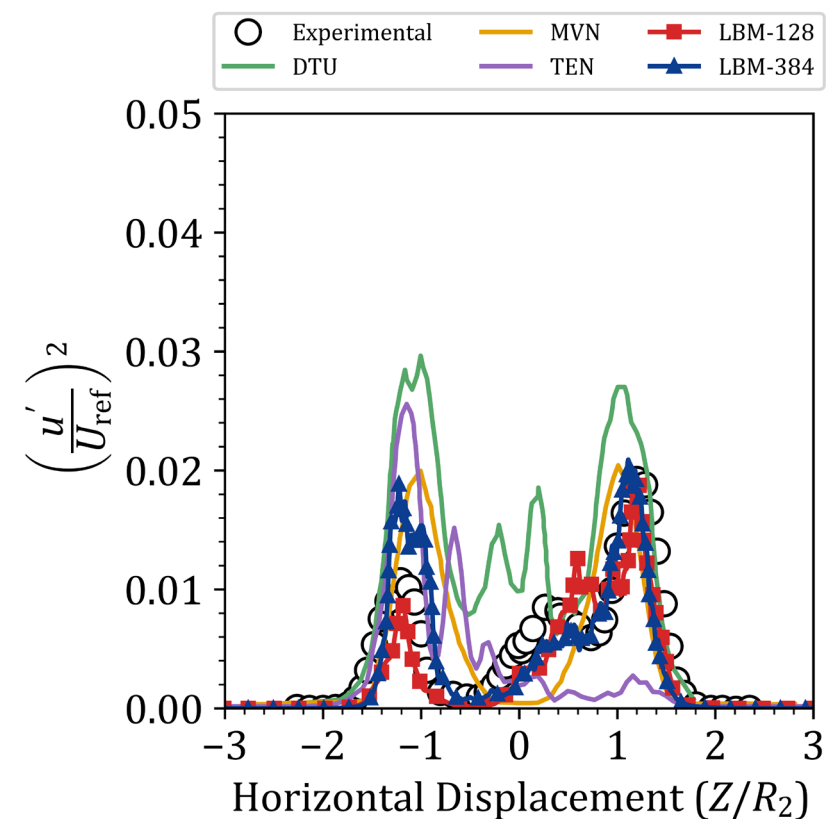
乱流運動エネルギーの主流成分

他のCFD先行研究との比較

平均風速と乱流エネルギーの両方で提案手法（赤と青）は実験値を最も良く再現している。



平均風速



乱流運動エネルギーの主流成分

成果②

急勾配孤立丘の風況解析と風洞実験との比較

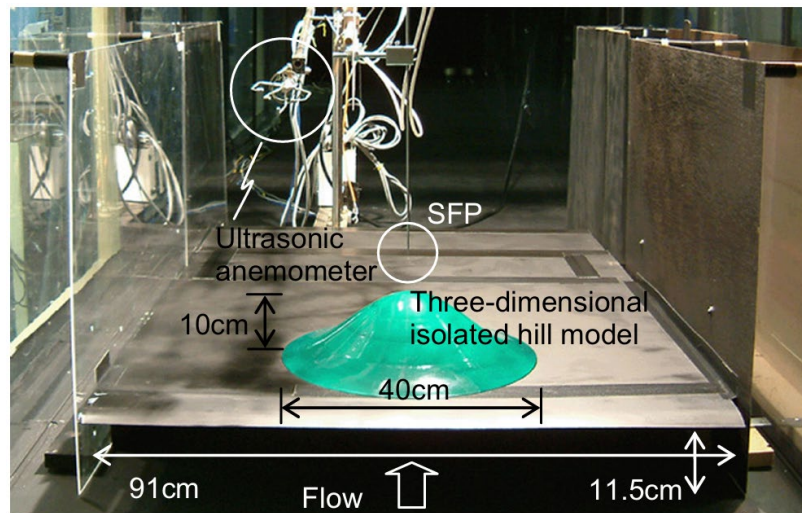
Yousef Hussein, Seiya Watanabe, Changhong Hu, Takanori Uchida; A Mesh Sensitivity Study of Lattice Boltzmann Simulations for the Flow over a Three-Dimensional Hill. (Under Review)

孤立丘（Steep Hill）のウェイク

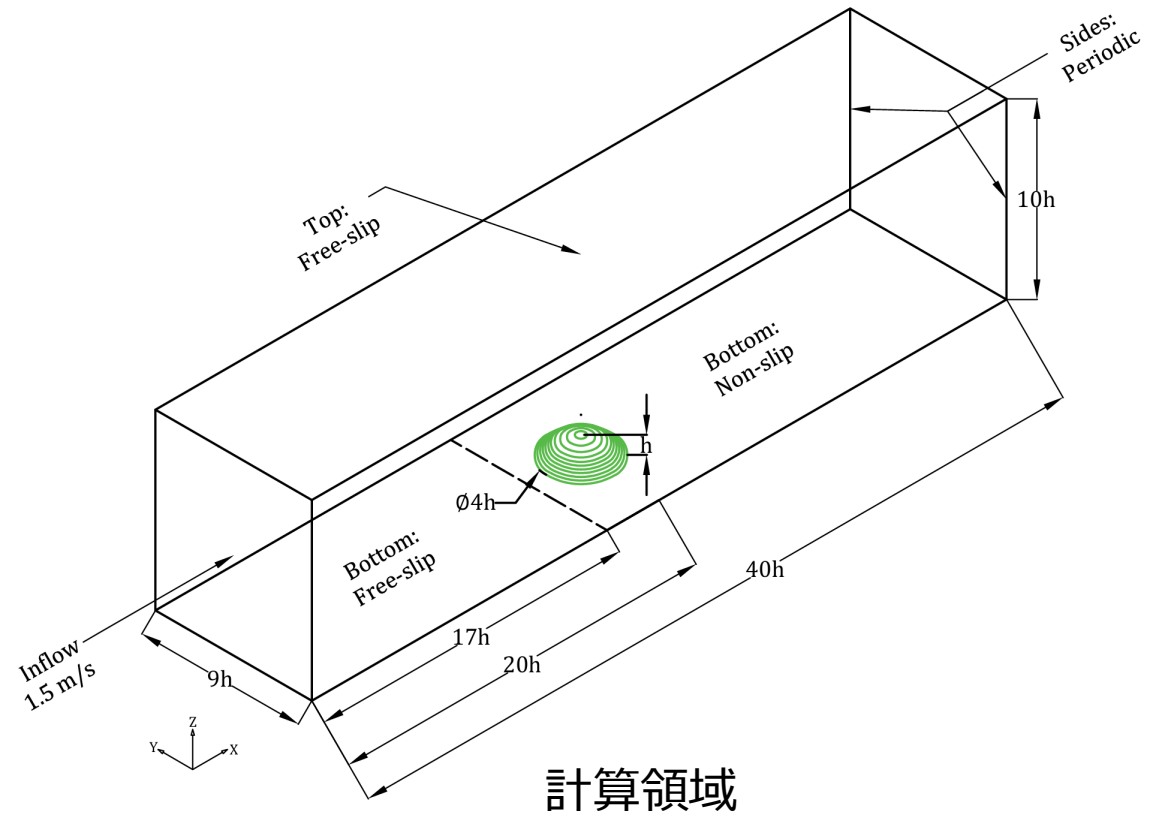
- 孤立丘のウェイクの平均風速と乱流運動エネルギーを風洞実験、RIAM-COMPACTと比較。
- 格子収束性の確認（12mm～2mm）と必要なメッシュ解像度の決定。

孤立丘の形状関数

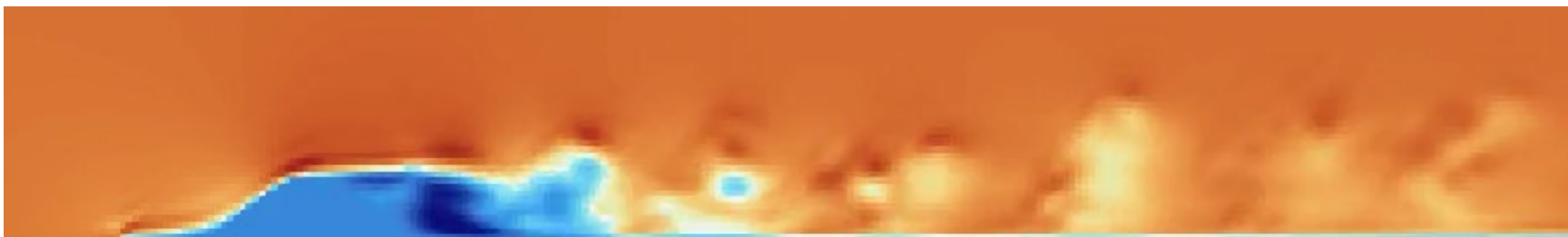
$$z(x, y) = \frac{1}{2}h \times \left[1 + \cos\left(\frac{\pi r}{a}\right) \right], \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}$$



風洞実験写真^[7]



計算結果動画



10 mm 格子



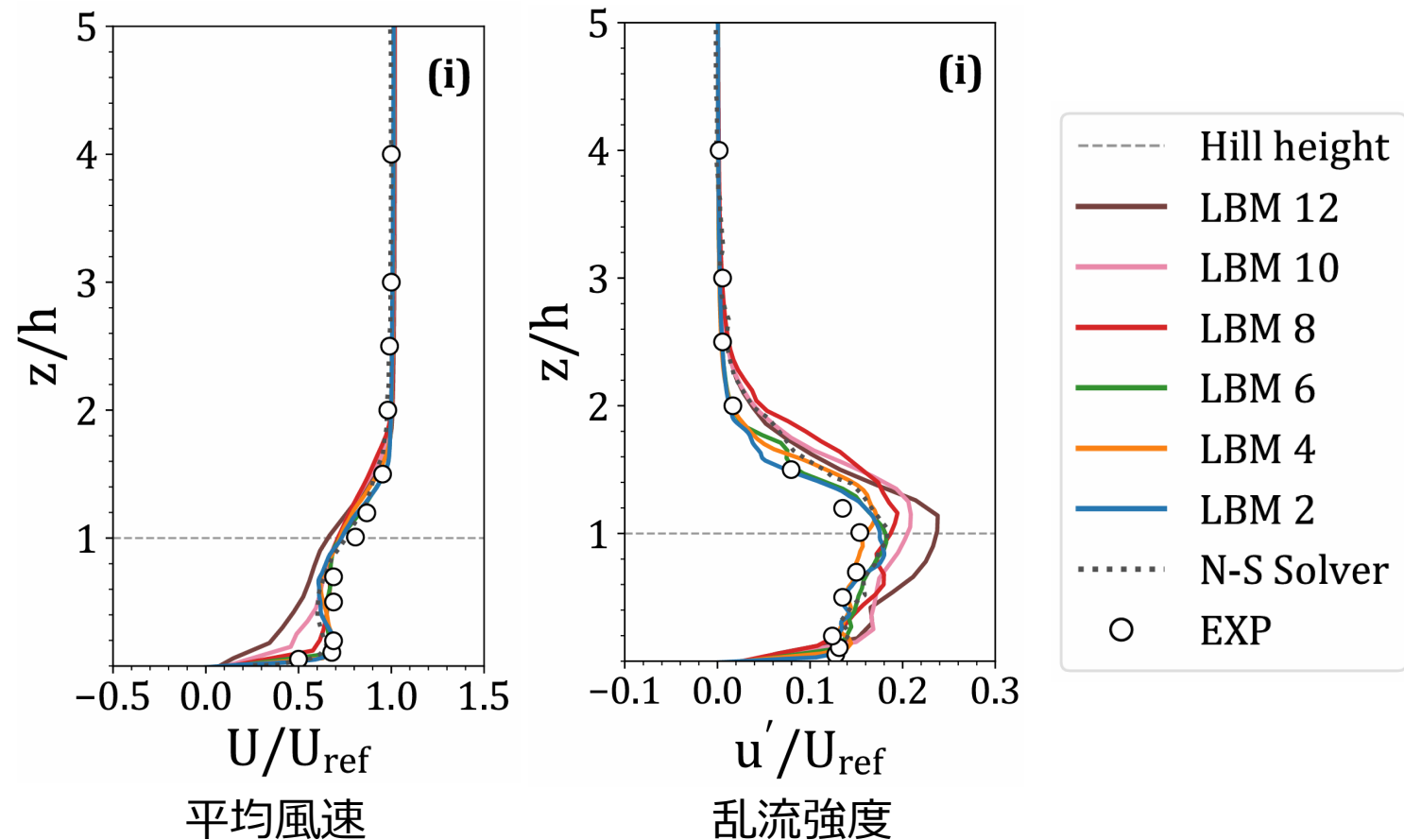
4 mm 格子



2 mm 格子

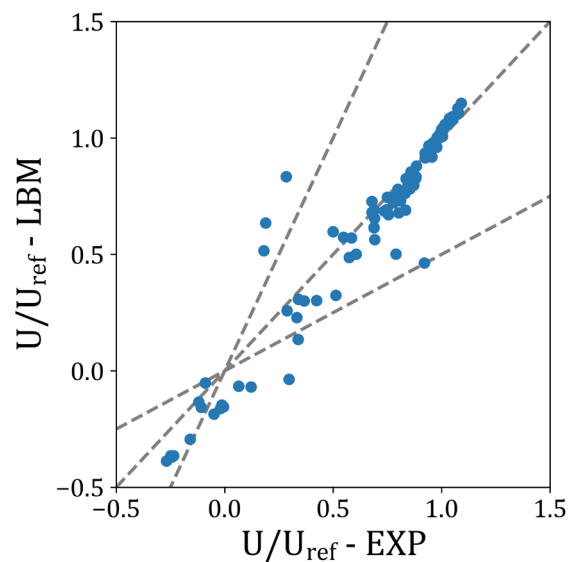
平均風速と乱流強度の比較

- 平均風速と乱流エネルギーの両方で実験値を良く再現している。
- 6mm解像度（LBM 6）で格子収束している。

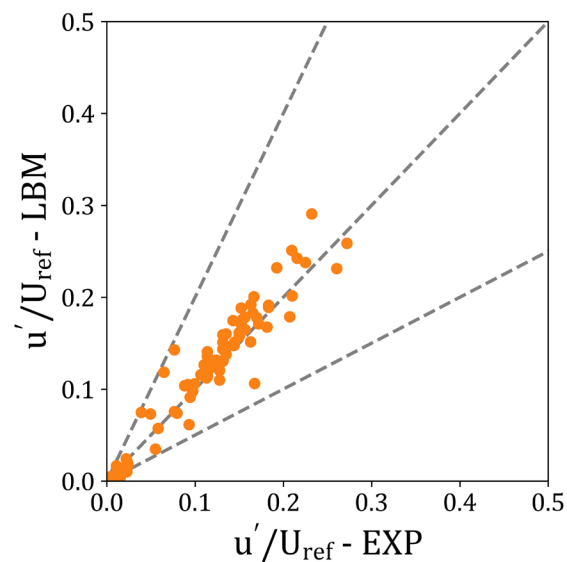


精度評価指標

- 二乗平均平方根誤差（RMSE）、Q hit rate、Factor of 2の指標により精度評価を行った。
- 6mm解像度（丘の高さに対して16メッシュ）で十分な精度と判定した。



平均風速



乱流強度

格子解像度と精度評価指標、RMSE、Q hit rate、FAC 2

Mesh size(mm)	$\left(\frac{U}{U_{ref}}\right)$			$\left(\frac{u'}{U_{ref}}\right)$		
	RMSE	Q	FAC2	RMSE	Q	FAC2
12	0.200	0.672	0.763	0.057	0.496	0.695
10	0.150	0.710	0.832	0.044	0.550	0.779
8	0.158	0.802	0.878	0.036	0.611	0.763
6	0.108	0.817	0.870	0.024	0.802	0.847
4	0.099	0.847	0.916	0.020	0.809	0.885
2	0.110	0.840	0.916	0.017	0.870	0.916

計算時間

- 計算にはNVIDIA H100を1台用いた。
- 6mm解像度、格子点数1658万の計算時間：**0.22時間（13分）**
 - ➡ 孤立丘のみの計算は高速に実施できる。
- 2mm解像度、格子点数4.5億の計算時間：14.7時間
 - ➡ 風車がある場合は高解像度が必要であるが、1日程度で計算ができそう。

格子解像度 (mm)	格子点数	丘高さに対する格子点数 $h/\Delta x$	計算時間 (hours)
12	333 x 75 x 83	8.3	0.02
10	400 x 90 x 100	10.0	0.04
8	500 x 112 x 125	12.5	0.08
6	666 x 150 x 166	16.6	0.22
4	1000 x 225 x 250	25.0	1.00
2	2000 x 450 x 500	50.0	14.7

まとめと今後の計画

まとめと今後の計画

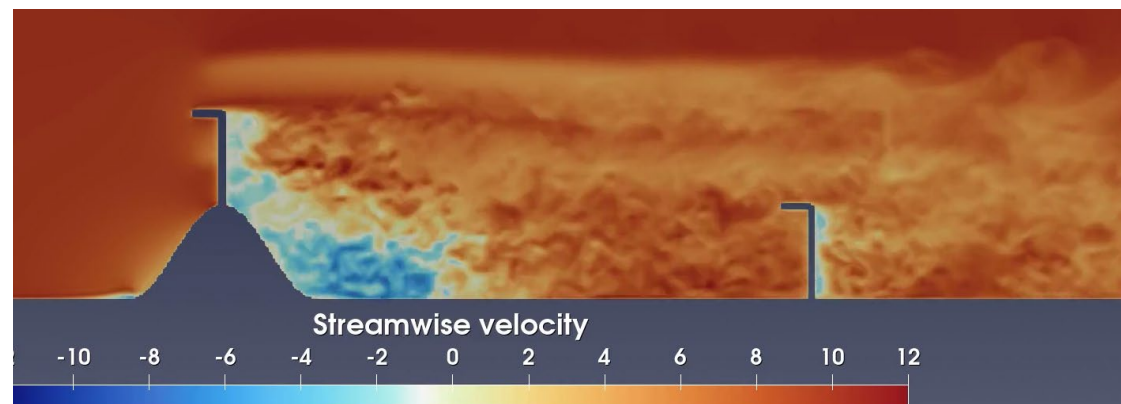
課題名 : 急勾配地形における風車ウェイク干渉の高精度乱流シミュレーション手法の開発



2基風車ウェイク干渉・孤立丘の検証において、提案手法が高精度であることを確認した。

今後の計画

孤立丘における2基風車のウェイク干渉の計算



2026年度 JHPCN課題

- 複雑地形の再現： 標高データから3次元形状を作成し、LBMの壁面境界条件へ設定。
- 現実的な大気乱流： 温度場の移流拡散方程式を連成し、大気安定度を考慮。
- 計算負荷の抑制： 細分化格子法を導入し、地表付近を局所的に高解像度化。