

# 格子ボルツマン法を用いた風車ウェイクシミュレーションの計算精度評価

Evaluation of computational accuracy of wind turbine wake simulation using lattice Boltzmann method

倉永拓明<sup>1)</sup>, 渡辺勢也<sup>2)</sup>, 胡長洪<sup>3)</sup>

Hiroaki Kuranaga, Seiya Watanabe and Changhong Hu

1)九州大学大学院総合理工学府 (816-8580 福岡県春日市春日公園6-1, E-mail: kuranaga.hiroaki.997@s.kyushu-u.ac.jp)

2)九州大学応用力学研究所 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1, E-mail: swatanebe@riam.kyushu-u.ac.jp)

3)九州大学応用力学研究所 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1, E-mail: hu@riam.kyushu-u.ac.jp)

The computational accuracy of a wind turbine wake simulation using the lattice Boltzmann method and the actuator line wind turbine model is evaluated by comparing it with wind tunnel experiments from previous studies. We investigate the effect of grid resolution on wake velocity deficit and turbulent kinetic energy. The turbine support structures such as nacelles and towers have a strong influence on the wake.

**Key Words :** Wind turbine, Wake simulation, Lattice Boltzmann Method, Actuator line model

## 1. 研究背景と目的

欧洲を中心に洋上風力発電ファームの導入が進められている。多くの風車が群となる風車ファームにおいて、風向きによっては風車が縦並びになる状況が想定できる。このような状況下で風車のウェイクは後続風車に影響するため、シミュレーションによるウェイクの予測、理解が重要である。

高速流体シミュレーションが可能である格子ボルツマン法は新しいCFD手法として注目されている。格子ボルツマン法を風車ウェイク計算に適用した先行研究もあるが、ブレード以外のナセル・タワーはモデル化されていない。本研究では、ナセル・タワーを考慮できる格子ボルツマン法に基づく風車ウェイクのシミュレーション手法の開発を進めている。本研究では、提案手法の風車ウェイク計算精度を、特にナセルやタワーの影響を再現できるかに注目し、先行研究の風洞実験<sup>[2]</sup>との比較により調査する。

## 2. 計算手法

格子ボルツマン法は、ナビエ・ストークス方程式を解くのではなく、流体を仮想的な流体粒子の集団として、その集団の速度分布関数 $f$ の時間発展方程式を計算する手法である。

速度分布関数 $f$ の時間発展方程式は

$$f_a(x + \xi_a, \Delta t, t + \Delta t) = \frac{1}{\tau} f_a^{eq}(x, t) + (1 - \frac{1}{\tau}) f_a(x, t) \quad (1)$$

であり、添字 $a$ は速度分布関数の方向を示す。また、添字 $eq$ は局所平衡状態の速度分布関数を表し、 $\xi$ は速度分布関数の速度である。

風車ブレードのモデルには、各ブレードを点群で表現する Actuator Line モデルを用いる。各点はブレード断面の翼型を表現し、ブレードの形状、翼弦長、ピッチ角のデータを保持する。各点に加わる流体力は、仰角に対するブレードの抗力係数 $C_d$ と揚力係数 $C_l$ を用いて

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

と計算する。 $e_l$ と $e_d$ はそれぞれ揚力と抗力が作用する方向を示す単位ベクトル、 $c_a$ は翼弦長、 $\Delta r$ は粒子間隔である。ブレードに加わる接線力とスラスト力を、流体が受ける反力をとして外力項として付加する。

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 次精度で扱うことができる Interpolated bounce-back 法を用いる。格子点から壁までの距離を $q$ として、 $q$ の値が $0 < q/\Delta x \leq 0.5$ の場合は式(1)を、 $0.5 < q/\Delta x \leq 1.0$ の場合は式(2)を用いて壁で跳ね返る分布関数を計算する。

$$f_a(x, t + \Delta t) = 2q f_{\bar{a}}(x_F, t) + (1 - 2q) f_{\bar{a}}(x + \xi_a \Delta t, t) \quad (3)$$

$$f_a(x, t + \Delta t) = \frac{1}{2q} f_{\bar{a}}(x, t) + \frac{2q - 1}{2q} f_a(x, t) \quad (4)$$

ここで $f_{\bar{a}}$ は $f_a$ と反対向きの速度を持つ分布関数である。

## 3. 計算条件

計算領域は図 1 に示すようにスパン方向(x 軸)に 2.71 m、鉛直方向(y 軸)に 1.801 m、主流方向(z 軸)に 14.81 m であり、流入面から 3.66 m の位置に風車(NTNU rotor model)を設置した。流入面から風速 10 m/s の風を流入させた。ローターの直径 $D$ は 0.894 m、ハブの高さは 0.817 m である。ローター回転速度は、流入風速とブレードの先端速度の比(TSR)で 6 とした。格子ボルツマン法の解析時間は 25 秒である。格子解像度は x-y-z 方向全て等間隔で、 $D/32, D/64, D/96, D/128, D/160$  の 5 つの条件で計算し、格子解像度の影響を調べる。また、ナセルとタワーの有無を変更し、ウェイクの渦構造、速度分布、乱流運動エネルギーを比較する。

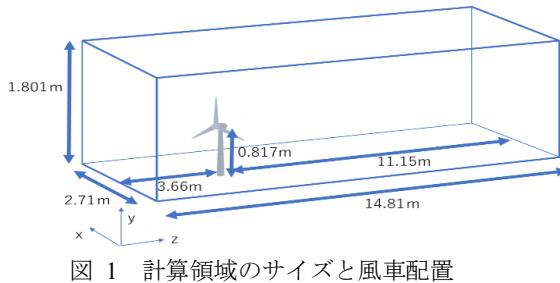


図 1 計算領域のサイズと風車配置

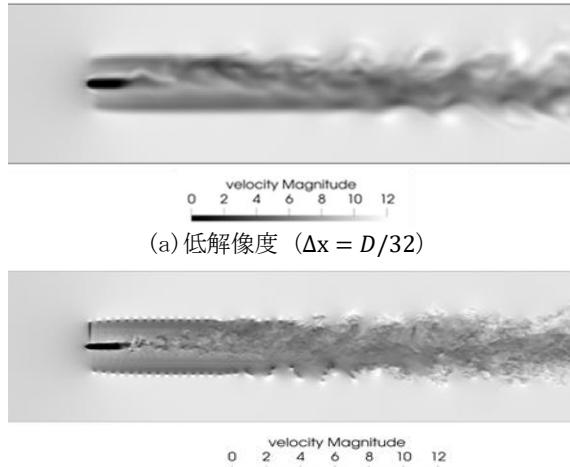


図 2 ハブ高さにおける 2 次元速度分布

#### 4. 結果と考察

##### (1) 実験結果との比較

ナセルとタワーの両方を考慮した計算結果を風洞実験<sup>[2]</sup>と比較する。

シミュレーションで得られたハブ高さにおける風車後流の速度分布を図 2 に示す。ナセルからウェイクが非対称に発生し、その結果ウェイクの遠方場においてもウェイクの乱れが非対称になっている。高解像度では翼端渦を捉えられているが、低解像度では翼端後ろで速度変動は小さくなっていて翼端渦のらせん構造を表現できていない。

風車から  $1D, 5D$  後方の 2 地点で風車後流の測定を行い、ナセル高さでの平均後流速度欠損率と乱流運動エネルギー分布を風洞実験と比較する。その結果をそれぞれ図 3、図 4 に示す。平均後流速度欠損率は格子解像度に関わらず実験に近い計算結果が得られた。 $1D$  後方では実験とシミュレーションの両方で見られる速度欠損のピークの中心からのズレは、ナセルウェイクの影響と考えられる。乱流運動エネルギーは、特に風車近傍で解像度によって精度が大きく変化した。これは、低解像度の計算では翼端渦を解像できず、翼端後方の乱れが起らなかったためである。格子解像度  $D/128, D/160$  で速度欠損率と乱流運動エネルギーの両方が実験とよく一致した結果が得られることがわかった。

##### (2) タワーの有無を考慮した解析結果の比較

タワーやナセルのウェイクへの影響を調べるために、ナセル無・タワー無、ナセル有・タワー無、ナセル有・タワー有

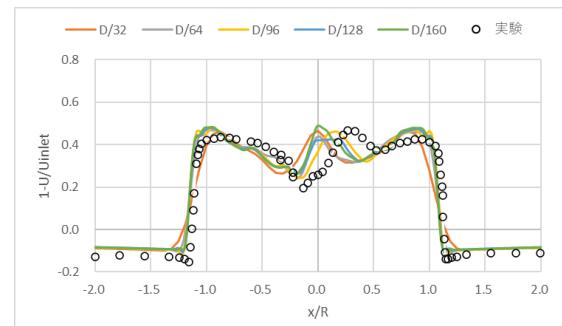
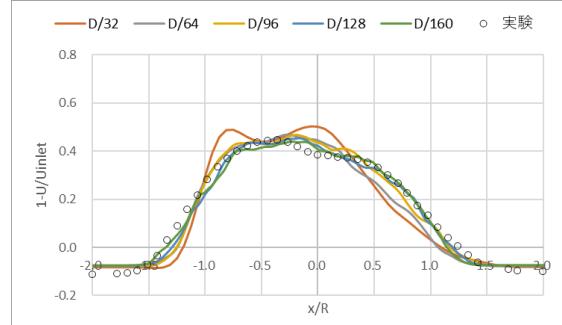
(a)  $z = 1D$ (b)  $z = 5D$ 

図 3 ハブ高さにおける平均後流速度欠損率

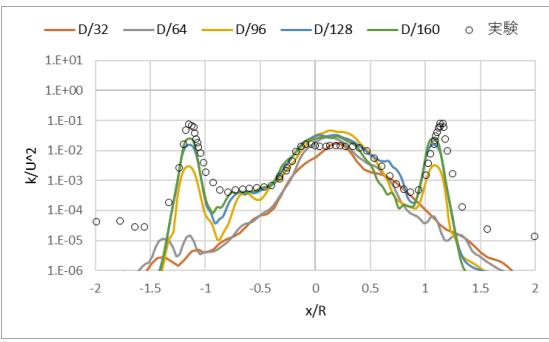
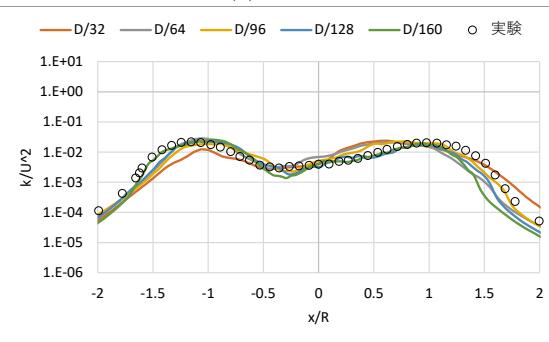
(a)  $z = 1D$ (b)  $z = 5D$ 

図 4 ハブ高さにおける乱流運動エネルギー分布

の 3 ケースを比較した。横から見た渦の 3 次元可視化を図 5 に、上から見た可視化を図 6 に示す。タワーを考慮していない 2 つのケースでは、スパン方向( $x$  軸)、鉛直方向( $y$  軸)とともにウェイクはほぼ対称的に発達している。タワーがある場合はスパン方向( $x$  軸)、鉛直方向( $y$  軸)とともにウェイクが非対称に発達することがわかった。タワーからは複雑な乱流構造をもつウェイクが発生していて、それ

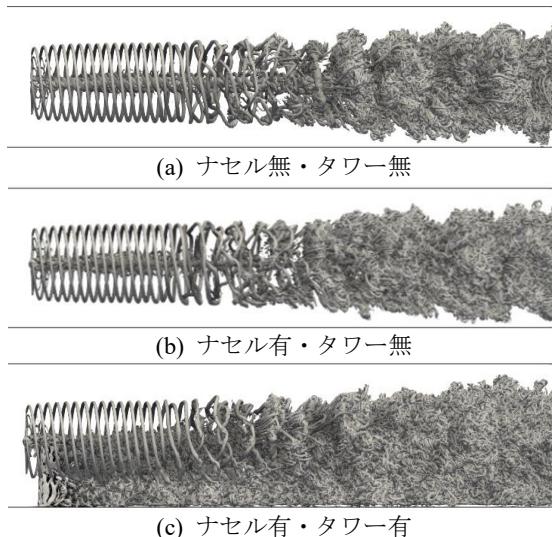


図 5 ナセルとタワーのウェイクへの影響. 横からの渦構造の可視化.

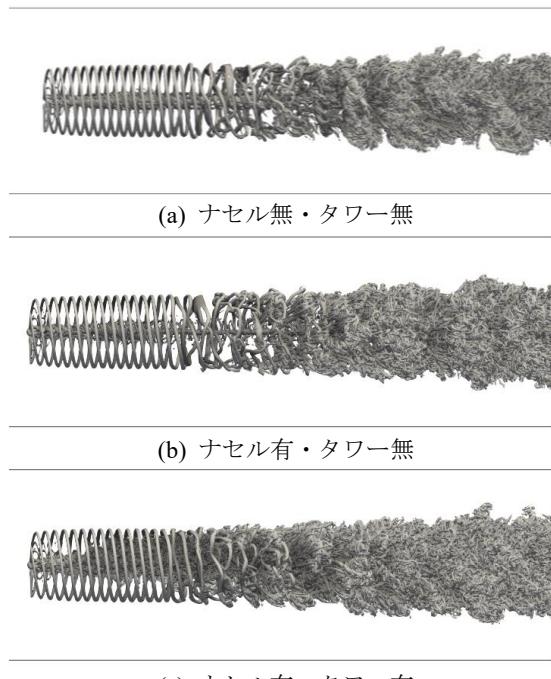


図 6 ナセルとタワーのウェイクへの影響. 上からの渦構造の可視化.

により翼端渦の崩壊がタワー無しの 2 ケースよりも上流側で発生していることが確認できる。

ナセル・タワーの有無の違う 3 ケースにおいて、風車から  $1D, 3D, 5D$  後方の位置の 3 地点での平均後流速度欠損率と、乱流運動エネルギーの比較を図 6, 図 7 に示す。TSR を 6 とし、格子解像度は  $D/160$  とした。ナセルが無い場合はナセル後方の速度欠損は小さい。一方で、ナセルがある場合は、ナセル後方の速度欠損が大きく、ナセルが風車中心にあることで、風が風車の中心を通過しないためであると考える。ナセルを考慮しないと本来はナセルがある部分で非物理的な流れが発生してしまうといえる。タワーの有無に注目した場合、タワー無による 2 ケースではローター中心を境に対称的なプロファイルとなっている。一方で、タワー有の解析では非対称な結果を示した。タワーのすぐ近くをブレードが通過するとき

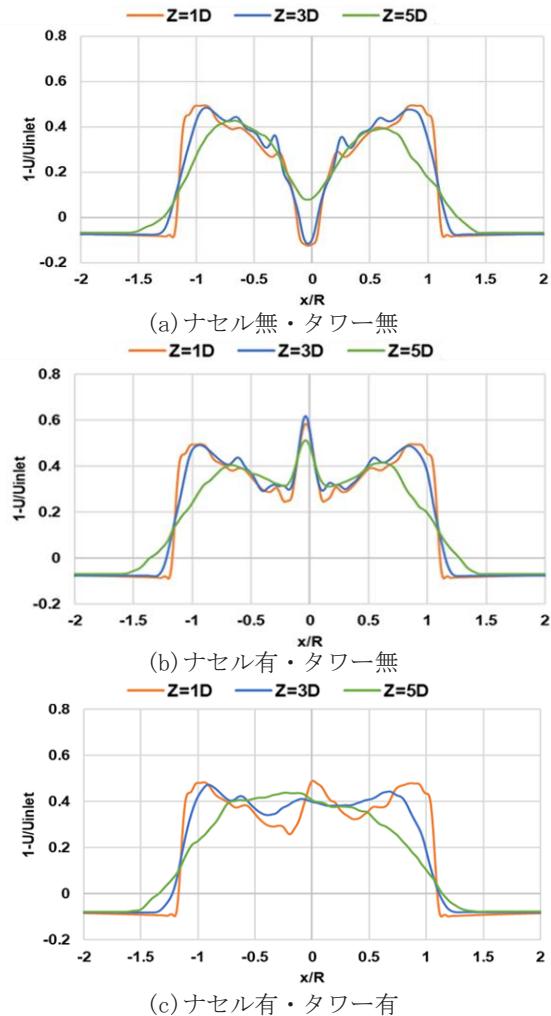


図 7 ハブ高さにおける平均後流速度欠損率

に、ブレードの影響を受けた風がタワーに衝突することで非対称性が生まれると考える。風洞実験でもウェイクは非対称に発達しているため、タワーの有無はウェイクの計算精度に大きく関わるといえる。乱流運動エネルギーの分布は翼端後方ではナセルとタワーの影響は小さいことがわかる。ナセル後方の乱流運動エネルギーはナセルとタワーの存在により、大きく結果がことなっている。

## 5. 結論

格子ボルツマン法の風車後流の計算精度を、先行研究における実験結果と比較し評価した。タワーの有無がウェイクの速度と乱流分布に大きく影響することが分かった。メッシュを細かくするほど実験結果に近づき、風車近傍でも乱流の高い計算精度を得るには、 $D/128$ よりも細かい格子解像度が必要であると分かった。

謝辞：本研究は、JSPS科研費JP22K14181、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点(JHPCN)課題番号jh220016, jh230039から支援を頂いた。計算には東京工業大学学術情報センターのスパコンTSUBAME3.0、九

州大学情報基盤研究開発センター研究用計算機システムの一般利用を利用させて頂いた。記して謝意を表す。

### 参考文献

- [1] Asmuth, H., Olivares-Espinosa, H., and Ivanell, S., Actuator line simulations of wind turbine wakes using the lattice Boltzmann method, *Wind Energy Science*, 5(2), 623-645, 2020.
- [2] Krogstad, P. Å., and Eriksen, P. E., “Blind test” calculations of the performance and wake development for a model wind turbine. *Renewable energy*, 50, 325-333, 2013.

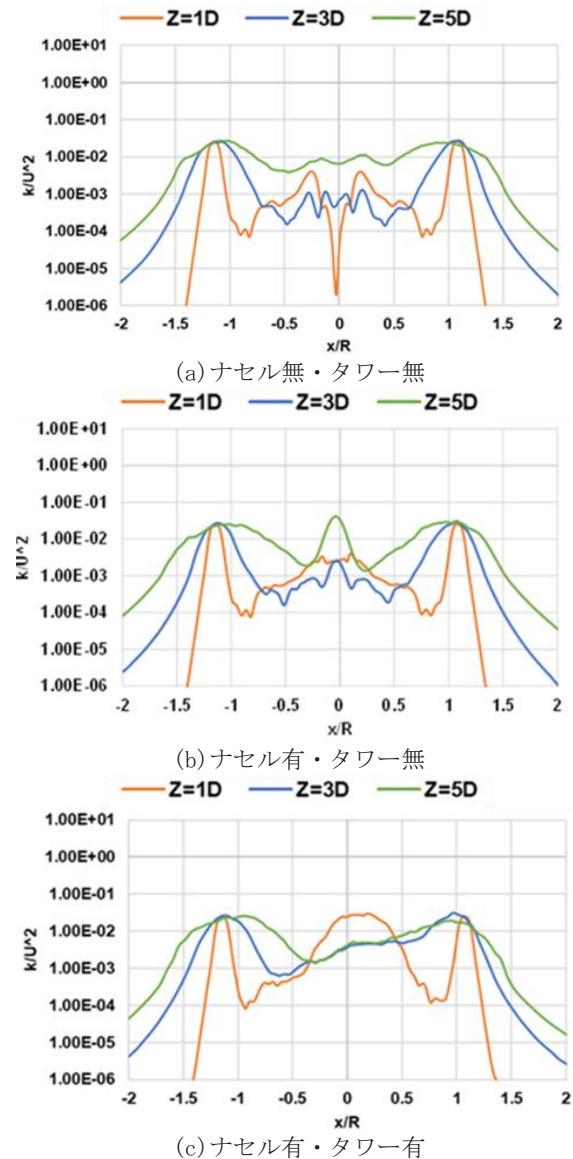


図 8 ハブ高さにおける乱流運動エネルギー