

## 200kWレンズ風車及びそのマルチロータシステムの空 力性能に関する数値解析

吉川, 雅己

九州大学大学院総合理工学府総合理工学専攻機械・システム理工学メジャー

<https://hdl.handle.net/2324/7178755>

---

出版情報：九州大学, 2023, 修士, 修士  
バージョン：  
権利関係：



# 200kW レンズ風車及びそのマルチロータシステムの空力性能に関する数値解析

九州大学大学院 総合理工学府 総合理工学専攻 機械・システム理工学メジャー  
海洋環境エネルギー工学研究室 吉川 雅己

## 1. 緒言

レンズ風車はつばとディフューザからなる集風体（レンズ）をブレード周囲に取り付けた風車である。つばから渦が発生することでレンズ後方が低圧となり、ロータ面で大きな増速効果が得られ、発電効率が向上する。先行研究では縮小模型による風洞実験や模型スケールでの CFD シミュレーション、小型レンズ風車での野外実験などが行われてきた<sup>1)</sup>。当研究室では、200 kW 中型レンズ風車及びその 2 基マルチロータシステムの実用開発のプロジェクトが進められている。小型風車での実験や CFD の結果は、200 kW 中型機とレイノルズ数が異なる。実機スケールでのシミュレーションにより、レイノルズ数の影響を調査する必要がある。

本研究では、CFD により 200 kW 中型レンズ風車、及びその 2 基マルチロータシステムの出力や抗力などの空力性能を評価することを目的とする。レンズ風車近傍の格子解像度の依存性の確認する。模型スケールと実機スケールでの計算結果の比較によりスケール効果を明らかにする。

## 2. 数値計算手法

### (1) 格子ボルツマン法

空力解析には、流体を格子点上で並進・衝突する仮想粒子と仮定し、仮想粒子の速度分布関数の時間発展方程式を解く格子ボルツマン法を用いる。各計算格子上に割り当てられた速度分布関数の時間発展を、流体粒子の衝突と並進から

$$f_{\alpha}(\mathbf{x} + \mathbf{c}_{\alpha}\Delta t, t + \Delta t) = f_{\alpha}(\mathbf{x}, t) + \Omega_{\alpha}(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

と計算する。添字 $\alpha$ は分布関数の方向で $\mathbf{c}_{\alpha} \in \{-c, 0, c\}^D$ 、 $\mathbf{c}$ は離散化粒子速度、 $D$ は空間次元数である。衝突項 $\Omega_{\alpha}(\mathbf{x}, t)$ には高レイノルズ数流れに対して高精度かつ安定性のあるキュムラントモデル<sup>2)</sup>を用いる。

### (2) Actuator Line (ACL) Model

ロータのモデル化に各ブレードを点群で表現する Actuator Line Model を用いる。ACL の各マーカー粒子に加わる流体力は以下の式で計算する。

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

$\mathbf{e}_l$ と $\mathbf{e}_d$ はそれぞれ抗力と揚力が作用する方向を示す単位ベクトル、 $C_a$ は翼弦長、 $\Delta r$ はマーカー粒子間隔である。ブレードの抗力係数 $C_d(\alpha, Re)$ と揚力係数 $C_l(\alpha, Re)$ は QBlade (XFOIL) に翼型データとレイノルズ数を与え、取得する。ブレードに作用する力にガウシアンフィルタをかけ、流体側に体積力として付与する。

### (3) 適合細分化格子法

レンズ風車の計算精度の向上には、レンズ風車近傍の解像度を上げる必要がある。そこで、図 1 に示すように木データ構造に基づく適合細分化格子を導入してレンズ・ロータ面・ナセル近傍に格子を集中させ、計算精度と計算効率の両立を図る。

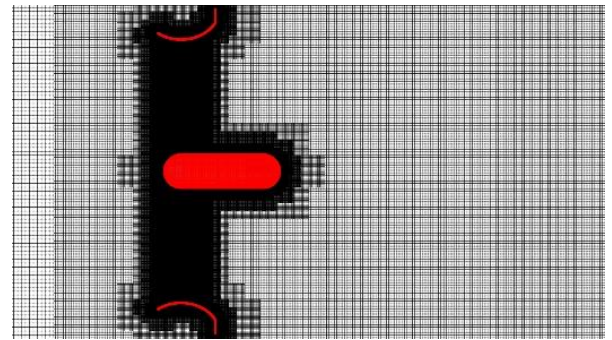


図 1 レンズ風車近傍の計算格子

## 3. 単基レンズ風車

### 3.1 計算条件

ロータ直径 $D = 21$  m の 200 kW レンズ風車の定格風速 $U_0 = 11$  m/s、周速比 3.6 を計算する。レンズ形状は Ci タイプと Cii タイプのつば 3%、5% である。計算領域は $32D \times 32D \times 64D$ と設定し、レンズ風車近傍の最小格子幅を $\Delta x = D/256, D/512, D/1024$ の 3 パターンとし、格子解像度の依存性について調査する。格子数はそれぞれ 7700 万、1 億 2900 万、4 億 2500 万である。

風車の出力を評価するパワー係数 $C_p$ は以下の式で表される。

$$C_p = \frac{T_r \cdot \omega}{\frac{1}{2} \rho U_0^3 A} \quad (3)$$

$T_r$ はトルクの時間平均値,  $\omega$ はロータ角速度,  $\rho$ は空気の密度,  $A$ はロータ直径を基準とした受風面積である.

### 3.2 格子解像度依存性

各レンズ形状における格子解像度ごとのパワー係数と抗力係数の比較を図2に示す. Ci タイプでは $C_p$ と $C_d^*$ の両方で格子収束が確認できる. 一方, Cii タイプは $\Delta x = D/1024$ までパワー係数の収束性が見られず, さらに高解像度格子に対する調査が必要と考える.

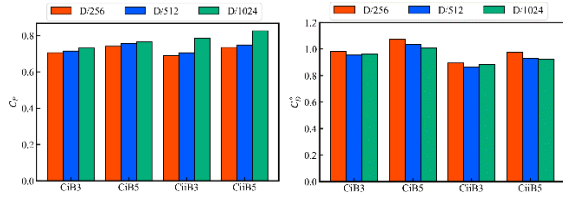


図2 各レンズ形状に対する格子解像度依存性

### 3.3 模型スケール計算結果との比較

模型スケールの計算は, ロータ直径 $D = 1$  m, 流速 $U_0 = 6$  m/s, 周速比は3.6で行った. レンズ形状はCi タイプとCii タイプのつば3%, 7.5%である. 表1に模型スケールとのパワー係数の比較を示す. 実機スケールでは模型スケールに比べ, 高いパワー係数を示した. 実機スケールのブレードの MEL 翼型の抗力係数が模型スケールより小さくなっていることが要因と考える.

表1 模型スケールとのパワー係数の比較

|            | CiB3  | CiB7.5 | CiiB3 | CiiB7.5 |
|------------|-------|--------|-------|---------|
| Exp-scale  | 0.683 | 0.723  | 0.739 | 0.808   |
| Full-scale | 0.731 | 0.758  | 0.786 | 0.854   |

## 4. 2基マルチレンズ風車

### 4.1 計算条件

ロータ直径 $D = 21$  mの2基のレンズ風車から構成されるマルチロータシステムの計算を行う. レンズ形状はCi タイプとCii タイプのつば7.5%である. 2基マルチレンズ風車の風車間距離が出力に与える影響を調査するため, 風車間距離を $s$ , レンズ直径を $D_{brim}$ とし,  $s/D_{brim} = 0.0$ から1.0の範囲で離間距離を変えて計算を行う. 流速 $U_0 = 11$  m/s, 周速比は4.0である. レンズ風車近傍の最小格子幅を20.5 mm ( $\Delta x = D/1024$ ) とする.

単基でのパワー係数を $C_{p0}$ , 2基マルチ時の各レンズ風車のパワー係数を $C_{pi}$  ( $i = 1, 2$ )として, パワー係数増加率を以下の式で算出する.

$$\Delta C_{pi} = \frac{C_{pi}}{C_{p0}} - 1 \quad (4)$$

### 4.2 風車離間距離のパワー係数増加率への影響

2基マルチレンズ風車の各風車のパワー係数増加率の平均値を図3に示す. 模型スケールでは $s/D_{brim} = 0.2$ , 実機スケールでは $s/D_{brim} = 0.15$ においてパワー係数増加率が最大となった. 実機スケールでの最大のパワー係数増加率は, CiB7.5で2.95%, CiiB7.5で4.94%である. すなわち, 2基マルチにすることで, 2台のシングル風車より発電効率が高くなる.  $s/D_{brim} = 0.2$ 付近に2基マルチレンズ風車の最適な風車間距離があると考えられる.

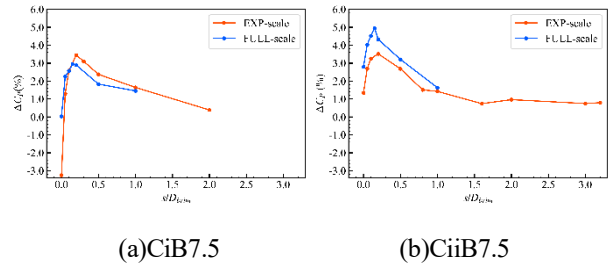


図3 模型スケールとのパワー係数増加率の比較

## 5. 結言

格子ボルツマン法を用いたCFDシミュレーションにより, 模型スケールとフルスケールのレンズ風車の空力性能を評価した. 格子解像度のパワー係数への依存性は, 特にCiiタイプで大きく, レンズ近傍に $\Delta x = D/1024$ 以上の高解像度格子での計算が必要である. 実機スケールでは模型スケールに比べて, 高いパワー係数が確認された. 実機スケールの計算結果から, マルチロータ化することで, 風車のパワー係数が増加し, システム全体の出力向上することを確認できた.

### 参考文献

- 1) Yuji Ohya and Koichi Watanabe. A new approach toward power output enhancement using multirotor systems with shrouded wind Turbines. ASME. *J. Energy Resour. Technol.*, 141(5), 1-10, 2019
- 2) Martin Geier, Martin Schönherr, Andrea Pasquali, and Manfred Krafczyk. The cumulant lattice Boltzmann equation in three dimensions: Theory and validation. *Computers & Mathematics with Applications*, 70(4), pp. 507 – 547, 2015.