

レンズ風車のウエイク特性について

九州大学・応用力学研究所・再生可能流体エネルギー研究センター 内田 孝紀

1. はじめに

我々の研究室では、風力エネルギー、太陽光エネルギーなどの有効利用に関する研究を行っている。風力研究の一つの大きな特色は、風エネルギーを集中させて発電効率を飛躍的に高めた新しいタイプの風力発電システムの開発(レンズ風車と名付けた)とそのクラスタ化(マルチレンズ風車)である¹⁾。現在では、実用化のフェーズに移行している(<https://riamwind.co.jp/>)。本報では、レンズ風車のウエイク特性について数値シミュレーションの結果を中心に紹介する。

2. 研究方法

レンズ風車(図1を参照)に関する研究では、これまで理論、風洞実験、数値シミュレーション、野外実証試験と幅広くかつ総合的に実施してきた。ここでは、紙面の都合上、数値シミュレーションの結果(流れ場の可視化)を中心にレンズ風車のウエイク特性を紹介する。

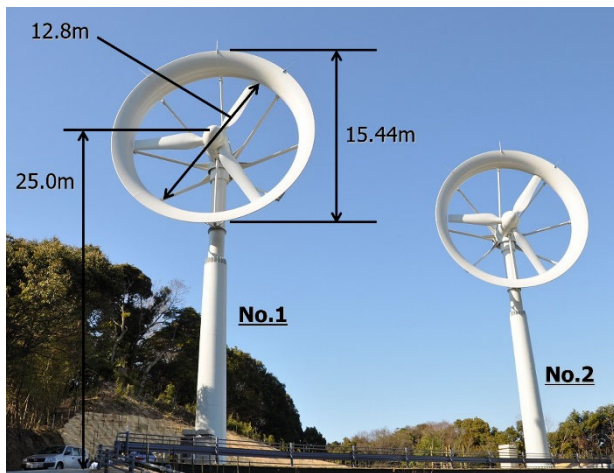


図1 70kW レンズ風車, 九大伊都キャンパス

一般的に、風車の運転に伴い、その下流領域には速度の欠損と、その時間・空間変動(乱流強度の増加)が形成される(図2を参照)。これらの流動現象は風車ウエイクと呼ばれる。複数の大型風車群から構成される洋上の大規模ウインドファームにおいては、風車ウエイクが下流側に位置する風車の発電量低下や、風車内外の故障などを引き起こす可能性がある。よって、上流側に位置する風車群が形成する風車ウエイクの影響を正しく評価し、風車間の離隔距離を適切に決定す

ることが不可欠である。これは小型風車の場合においても同様である。

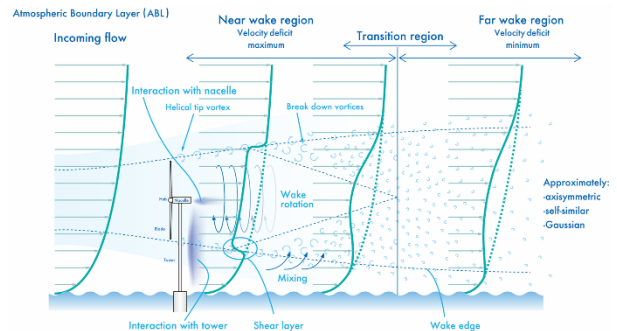


図2 風車ウエイク内の気流構造の模式図(内田作成)

本研究における数値計算手法について説明する。デカルト座標系の不等間隔スタガード格子に基づき、数値計算手法には差分法を用いる。速度場と圧力場のカップリングアルゴリズムには、Eulerの1次陽解法を基礎とした部分段階法を採用する。圧力に関するPoisson方程式については、SOR法(Successive Over Relaxation method)により緩和計算する。空間項の離散化に関して、対流項には補間法による4次精度中心差分に4階微分の数値粘性項を付加した3次精度風上差分を用いる。ここで、数値粘性項の重みは0.5とし、その影響は十分に小さくした。一般に使用される3次精度風上差分のKawamura-Kuwaharaスキームでは3.0である。残りの全ての空間項には2次精度中心差分を適用した。本研究では、計算安定性に優れ、かつ壁面減衰関数を必要としない混合時間スケールSGSモデルを採用した。SGSモデルにおける3方向の陽的フィルタ操作には、Simpson則を適用した。

本研究では、MEL翼を対象にアクチュエータラインモデルを用いたラージエディシミュレーションを実施した。アクチュエータラインモデルでは、風車ブレードが回転することで発生する接線力とスラスト力を、流体が受ける主流方向(x)および回転方向(θ)の反力として、Navier-Stokes方程式に外力項として付加する。本研究では、デカルト座標系を採用しているため、 θ 成分の力は、主流直交方向(y)および鉛直方向(z)に分解して与えた。このモデル化の最大の利点は、風車が存在することによ

単なる抵抗体としての速度の減速効果だけではなく、風車ブレードの回転に起因した旋回効果を考慮できる点にある。また、任意の半径位置(翼根からの距離)における翼弦長、揚力係数、抗力係数、迎角のデータさえ入力すれば、種々の種類の風車背後に形成されるウエイクを再現できる。本研究では、最適周速比4.0を計算対象とした(図3を参照、横軸は周速比、縦軸はパワー係数)。本研究ではハブ、ナセル、集風体を全て含んだ風車全体解析を行うため、風車周辺には十分な格子解像度を確保した。速度の境界条件に関して、流入境界面には一様流入速度を与え、側方境界面と上部および下部境界面には滑り条件、流出境界面には対流型流出条件を与えた。風車のハブ、ナセル、集風体は矩形格子近似法で再現し、そこに含まれる格子点に流速ゼロの条件を与えた。ブレード直径に基づいたレイノルズ数は 10^4 とした。

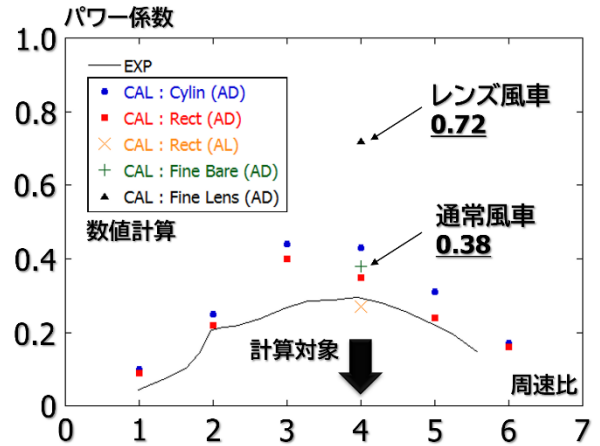


図3 通常風車に対するレンズ風車の発電性能

3. 計算結果

図4には、Near wake regionにおける風車ウエイク

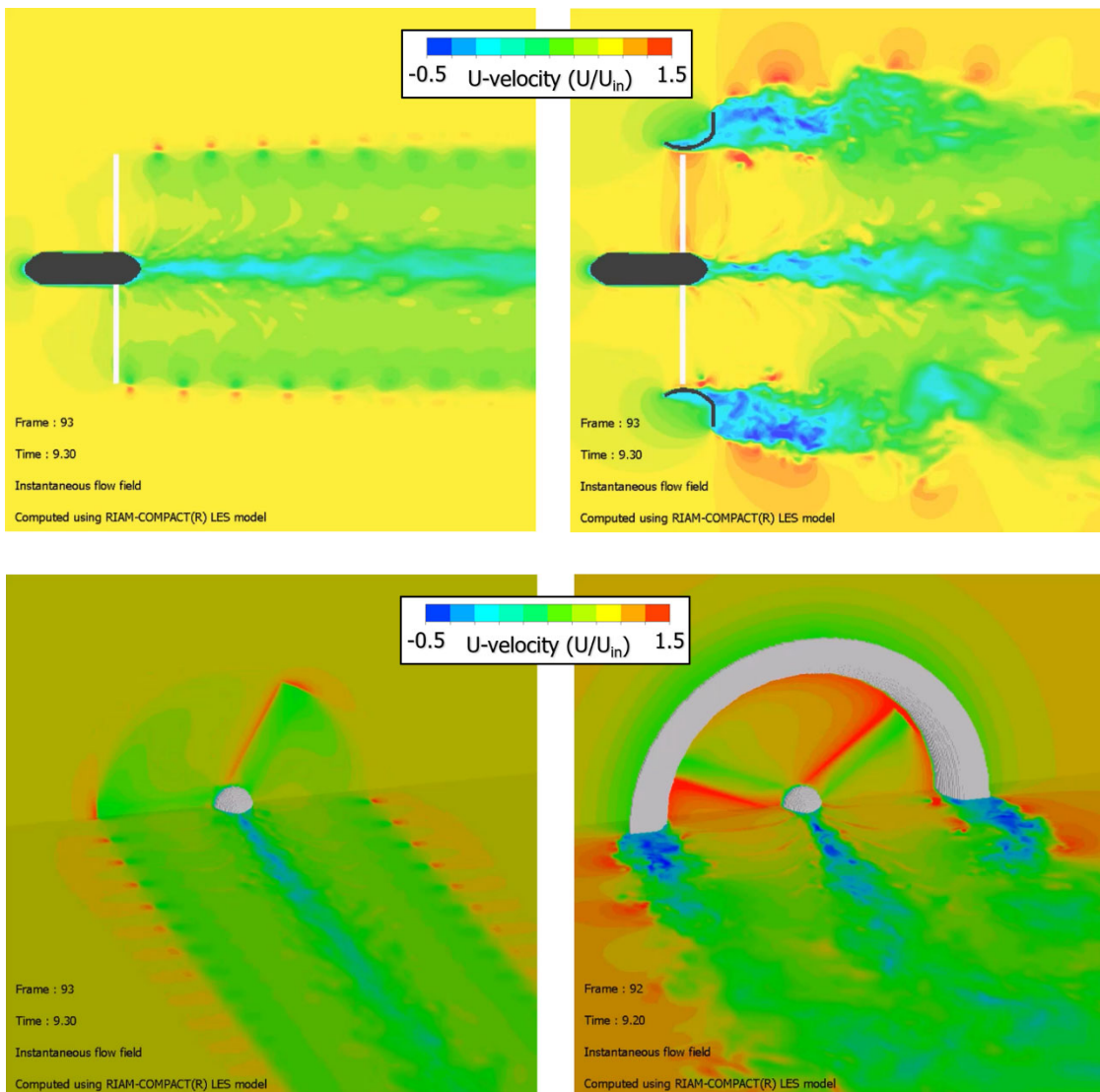
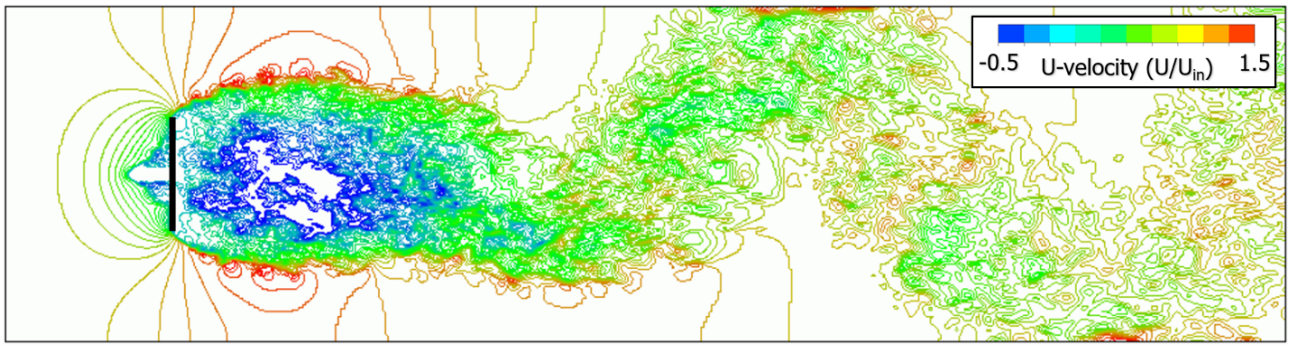
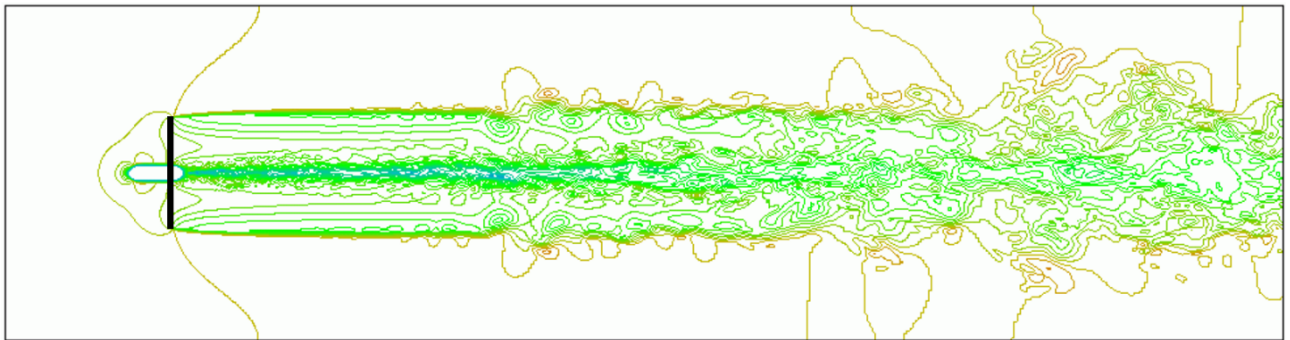


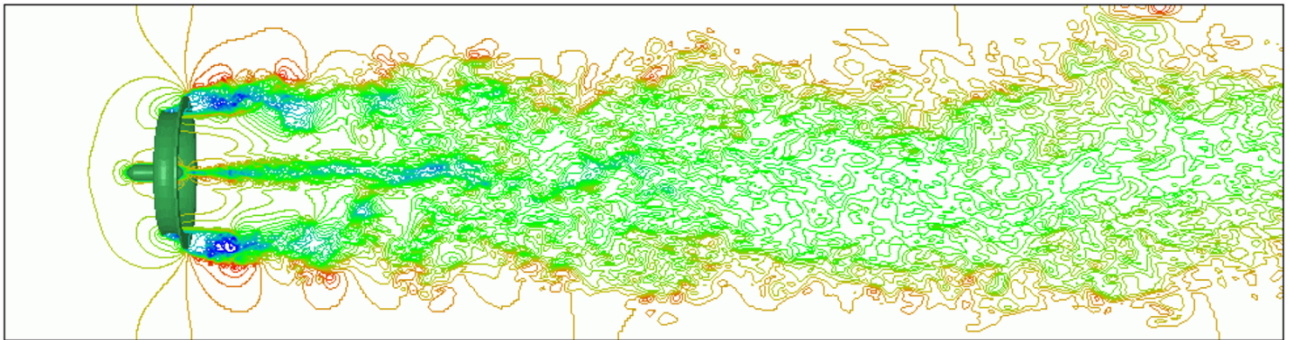
図4 Near wake regionにおける風車ウエイク, 瞬間場, 左:通常風車, 右:レンズ風車



(a)円盤



(b)通常風車



(c)レンズ風車

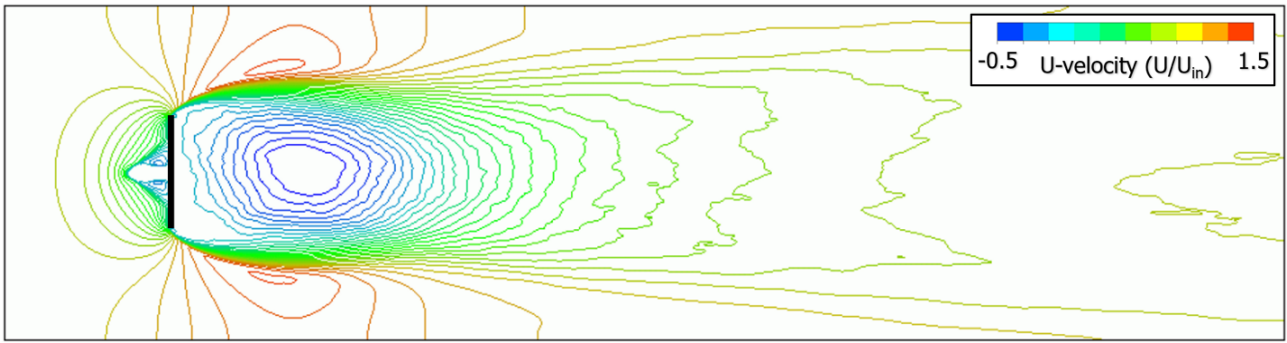
図5 Far wake regionにおける風車ウエイク, 主流方向速度成分の可視化, 瞬間場

の可視化結果(主流方向速度成分の空間分布, 瞬間場)を示す. 図4の左側に示す通常風車の結果では, 翼先端渦の周期的な形成が明確に再現されている. 図4の右側に示すレンズ風車の結果では, 翼先端渦とともに集風体の「つば」からの渦生成が観察される.

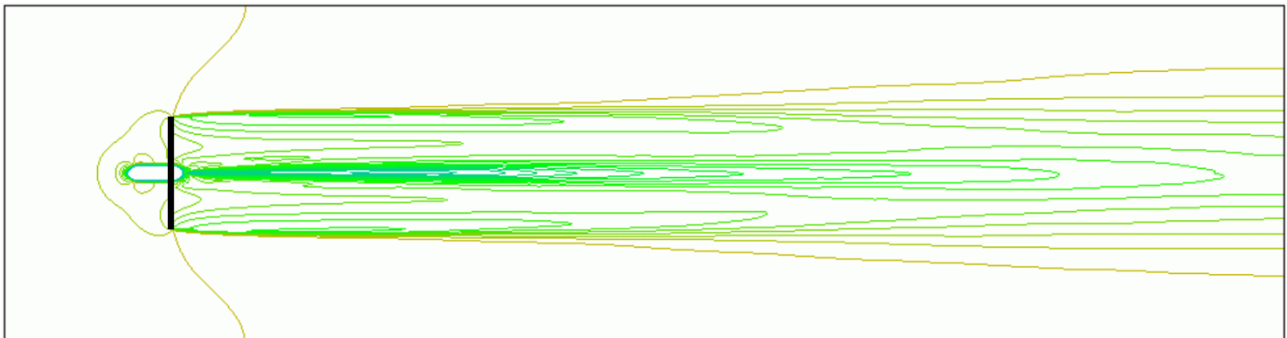
図5には, Far wake regionにおける風車ウエイクの可視化結果(主流方向速度成分の空間分布, 瞬間場)を示す. 比較のため, 円盤の結果も合わせて示している. 図5(a)に示す円盤の場合には, 円盤背後に逆流領域が形成され, ここから大規模渦が周期的に放出されている. その結果として, ウエイクは大きく蛇行している. 図5(b)に示す通常風車の場合には, ブレード直径の約5~6倍下流から翼先端渦の不安定と崩壊が生じて

いる. 図5(c)に示すレンズ風車の場合には, 図5(a)に示す円盤ほどではないものの, 風車のすぐ背後からウエイクの蛇行が発生していることが示された.

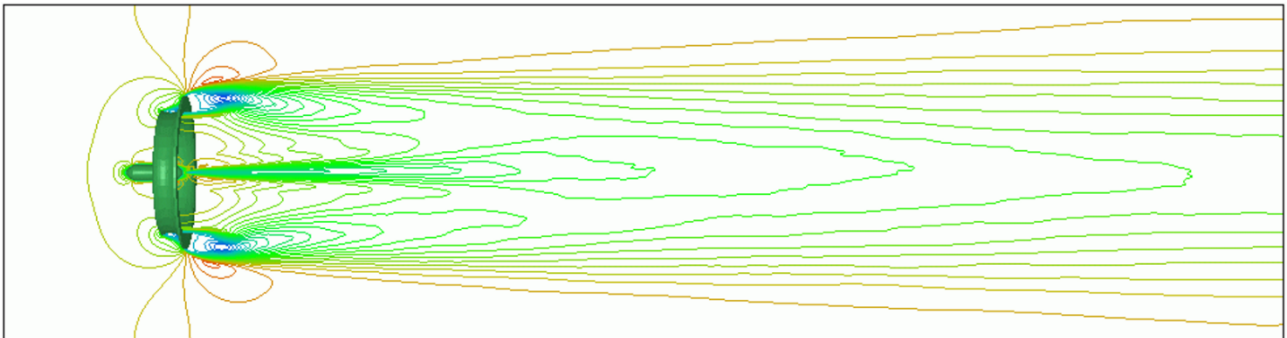
図6には, 図5に対応した時間平均場(無次元時間 $t=100-200$)を示す. 図7には図6から抽出した5D位置(Dはブレード直径)における平均風速分布を示す. 円盤の場合には, 通常風車およびレンズ風車に比べて速度欠損の回復が著しく早い. 通常風車の場合には, 翼先端渦の発生に伴う(翼先端付近での)大きな速度シアとナセル背後の逆流領域の形成が特徴的である. レンズ風車の場合には, 速度欠損量が最も大きくなる結果となった. しかしながら, 通常風車で観察された大きな速度シアは形成されないことも明らかになった.



(a)円盤



(b)通常風車



(c)レンズ風車

図6 Far wake regionにおける風車ウエイク, 主流方向速度成分の可視化, 時間平均場

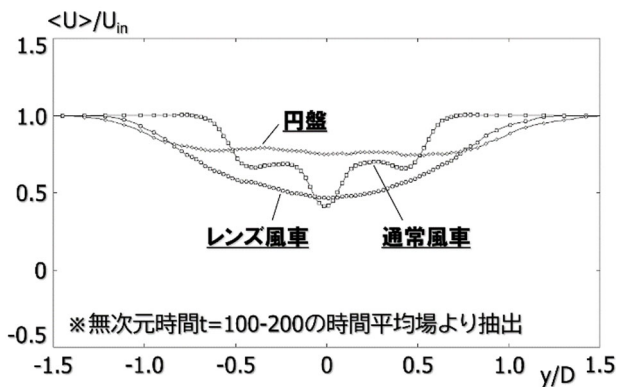


図7 図6から抽出した平均風速分布, 風車の下流5D位置, Dはブレード直径を意味する

4. おわりに

本報では, レンズ風車のウエイク特性について数値シミュレーションの結果(スパコンを用いた大規模LESの結果)を中心に紹介した. 風車ウエイク特性に与える風向変化や流入風の乱流強度の影響を検討した計算結果については, 別の機会に報告したい.

参考文献

- 1) Ohya, Y., Karasudani, T. A Shrouded Wind Turbine Generating High Output Power with Wind-lens Technology. Energies, 3, 634-649, 2010.