

複雑地形上の風車ウエイクのLES*1

Large-Eddy Simulation of Wake Flow behind the Wind Turbine Generator in Complex Terrain

○内田 孝紀*2, 大屋 裕二*2

Takanori UCHIDA and Yuji OHYA

1. 緒言

我々の研究グループでは、RIAM-COMPACT®(リアムコンパクト)と称する数値風況予測技術を開発している¹⁾。現在では、九州電力グループの西日本技術開発(株)、(株)環境GIS研究所、(株)FSコンサルティングと開発コンソーシアムを作り、「実地形版RIAM-COMPACT®ソフトウェア」と名付け、(株)産学連携機構九州(九大TLO)の協力を受け、業界標準モデルの一つとして広く普及に努めている。国内の風力事業者最大手の(株)ユーラスエナジーホールディングス、電源開発(株)、日本風力開発(株)、エコ・パワー(株)、ミツウロコグリーンエネルギー(株)を含め、多数の導入実績を有する。

現在、RIAM-COMPACT®の高精度化に向けた研究開発を行っているが、その中でも特に、風車間の相互干渉の影響を評価するための後流モデル(ウエイクモデル)の開発を進めている。これまでに、アクチュエータディスクモデルやアクチュエータラインモデルを用いて、風車ウエイクの気流性状の再現と把握を進めてきた^{2, 3)}。

日本のオンショア(陸上)風力発電では、山岳地域に大型風車を複数台集中的に建設せざるを得ない状況になりつつあり、風車相互の干渉でウインドファーム全体の電力量が低下しないよう、その離隔距離を決めるウエイクモデルの開発は最重要検討課題である。一方、今後ますます注目を集めることが予想されるオフショア(洋上)風力発電においても、風車の離隔距離の問題は顕在化してくると考えられる。本研究の最終目的は、高精度なウエイクモデルを構築し、これを数値風況予測技術RIAM-COMPACT®に実装することである。

本研究では、アクチュエータラインモデルを用いた風車ウエイクの再現例を紹介する。

2. 数値計算手法

2.1 流体力学CFDモデル

本研究では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(有限)差分法を用いる。LESのSGSモデルには、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モデルを採用する。陽的フィルタ操作にはシンプソン則を適用する。速度場と圧力場のカップリングアルゴリズムには、オイラー陽解法を基礎とした部分段階法を採用する。圧力に関するポアソン方程式はSOR法により緩和計算して算出する。空間項の離散化に関して、対流項は補間法による4次精度中心差分を基礎とし、4階微分の数値粘性項を付加した修正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次精度風上差分の河村・桑原スキームの値は3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。

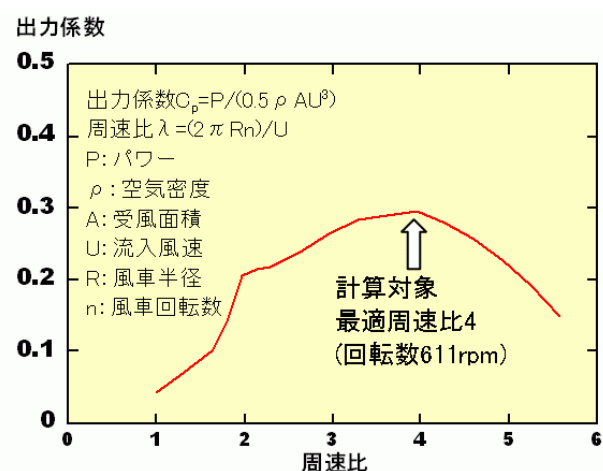


図1 本研究で対象にした風車の周速比と出力係数の関係、風洞実験の結果

*1 平成23年11月30日「第33回風力エネルギー利用シンポジウム」にて講演

*2 会員、九州大学応用力学研究所(〒816-8580春日市春日公園6-1, 連絡先 : takanori@riam.kyushu-u.ac.jp)

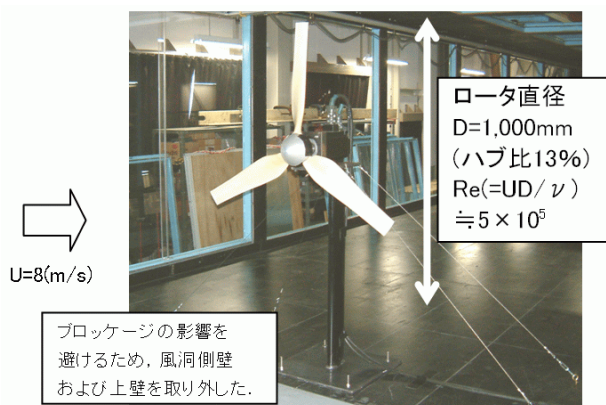


図2 風車模型の概観図

2.2 風車のモデル化

回転する風車に関して、そのモデル化には翼素理論に基づいたアクチュエータラインモデル⁴⁾を用いた。アクチュエータラインモデルでは、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および回転方向の反力として、ナビエ・ストークス方程式に外力項として付加する。つまり、物体としての壁面境界条件は無い。このモデル化の最大の利点は、風車が存在することによる単なる抵抗体としての減速効果だけではなく、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、種々の風車背後に形成されるウエイクを再現できる。使用した翼形状は、MEL翼をベースに翼根を厚翼に修正したものである。この風車の性能曲線を図1に示す。本研究では、最適周速比4を計算対象とした(図1に矢印で表示)。図2には、風洞実験で使用した風車模型の概観図を示す。

2.3 計算の諸条件

風洞実験の条件設定を数値シミュレーションで忠実に再現するため、スピナ、ナセル、タワーの形状を矩形格子近似法で全て再現した。格子点数は約4,000万メッシュである。本研究では、スピナ形状を再現するため、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、上方および下方境界面には水平風速成分の鉛直方向勾配がゼロ、鉛直風速成分をゼロとする滑り条件、側方境界面には水平風速成分と鉛直風速成分の主流直交方向勾配がゼロ、水平風速成分をゼロとする滑り条件、流出境界面には対流型流出条件を課す。流入境界断面には、ベキ指数4に従う速度プロファイルを与える。ス

ピナはそこに含まれる格子点に流速ゼロの条件を与えた。圧力の境界条件は全ての境界面でノイマン条件とした。ロータ直径Dと一様流入風速Uに基づいたReynolds数は $Re=(UD/\nu)=2 \times 10^4$ とした。時間刻みは $\Delta t=2 \times 10^{-3}D/U$ とした。

3. 計算結果例

風車単体の場合に関して、圧力のラプラシアン等の等値面図を図3に示す。この図から、風車背後にはブレードの回転に伴うTip Vortexが形成されているのが明確に分かる。また、5Dを過ぎる辺りから、Tip Vortexは急速にその構造が崩れている。

風車が2台存在する場合に関して、圧力のラプラシアン等の等値面図を図4に示す。本研究では、風車の離隔距離を5Dとした。下流側の風車に注目すると、上流側の風車から形成されるTip Vortexの影響を明確に受けている。すなわち、上流側の風車で見られるような渦構造は観察されない。

最後に、図5には複雑地形上に設置された場合の風車ウエイクの流れの可視化を示す。複雑地形を過ぎる乱れた気流が風車に進入している様子が再現されている。風車背後にはTip Vortexの存在が確認されるものの、地形からの剥離流の影響により、その構造を急速に崩れている。

4. 結言

本研究では、流体工学モデルRIAM-COMPACT[®]とアクチュエータラインモデルを用いて、風車ウエイクの再現を試みた。今後、より定量的な考察を進める予定である。

参考文献

- 1) T. Uchida and Y. Ohya, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Vol.96, pp.2121-2138, 2008
- 2) 内田孝紀, 大屋裕二, 杉谷賢一郎, 第19回風工学シンポジウム論文集, pp.187-192, 2006
- 3) 内田孝紀, 大屋裕二, 第21回風工学シンポジウム論文集, pp.233-238, 2010
- 4) Sumner, J et al., Review: CFD in Wind Energy: The Virtual, Multiscale Wind Tunnel. Energies, Vol.3, pp.989-1013, 2010

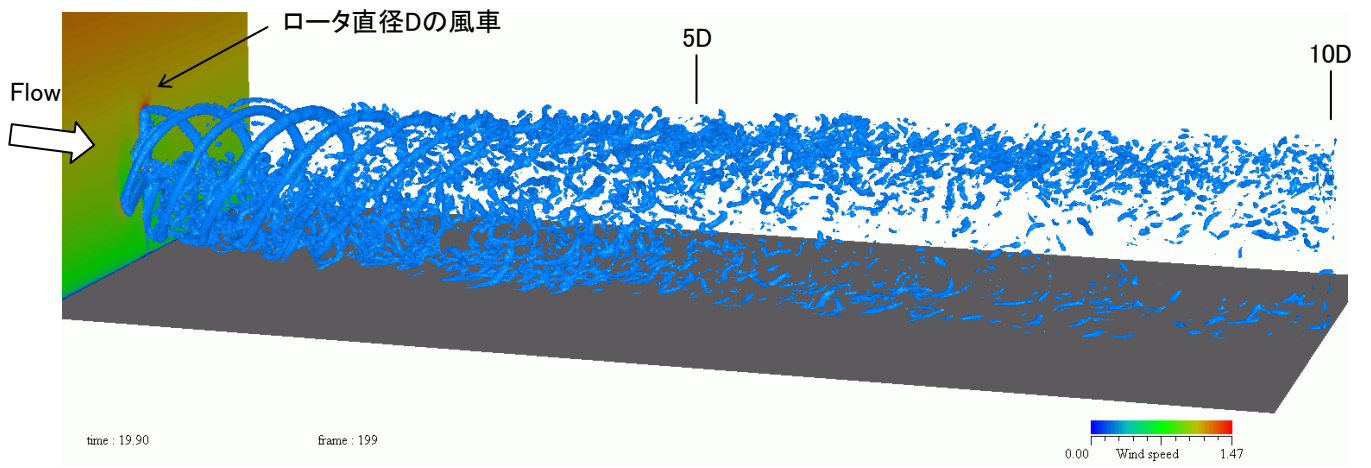
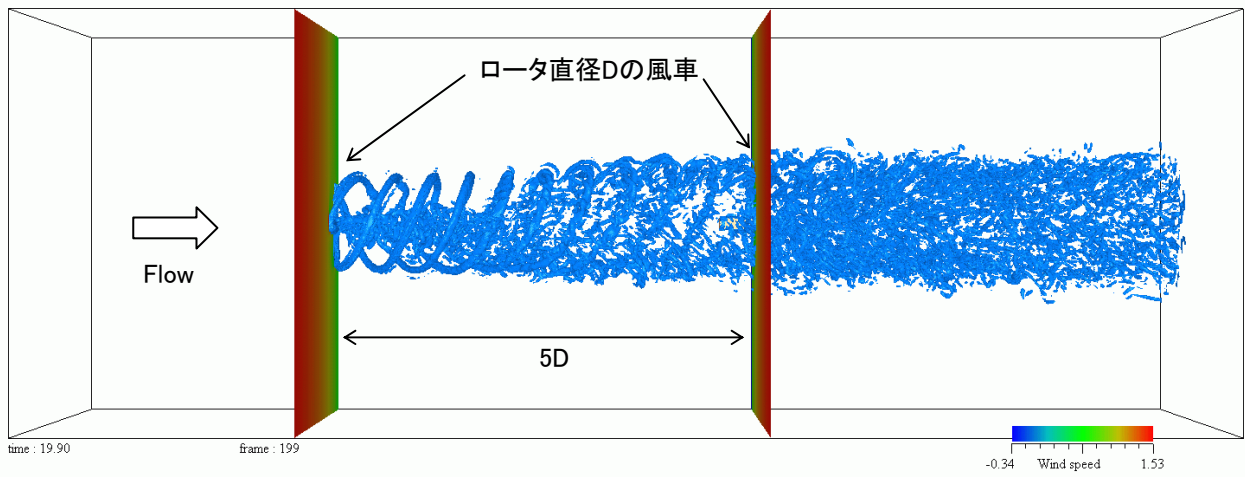
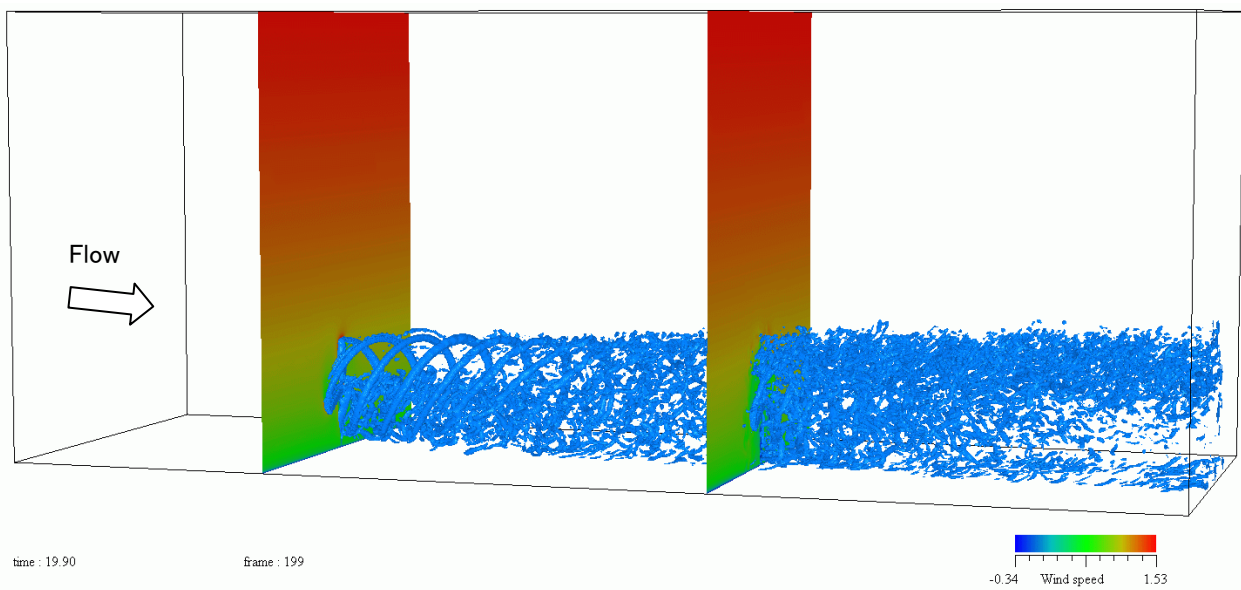


図3 風車1台の場合, 圧力のラプラシアン等の等値面図, 鳥瞰図

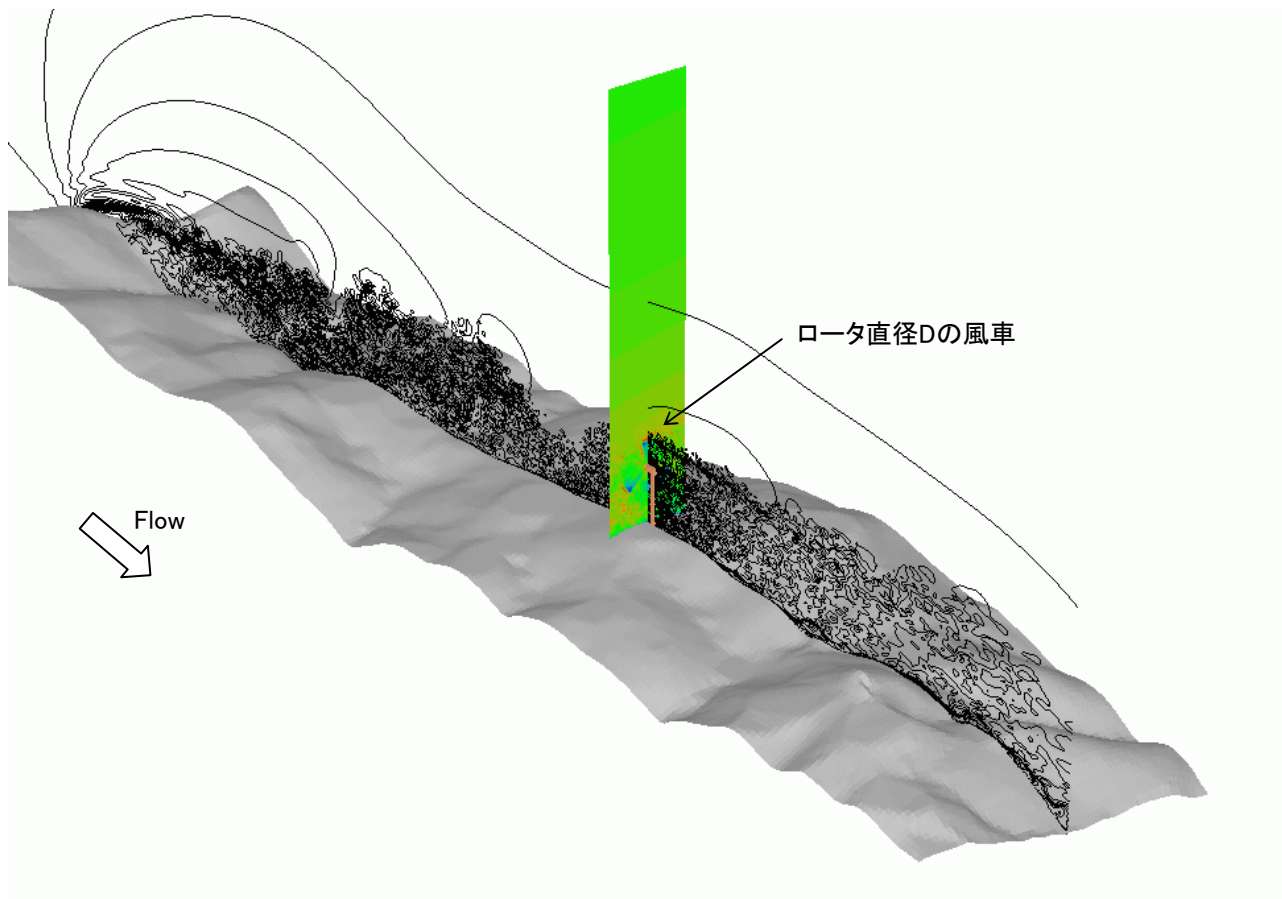


(a)上から見た様子

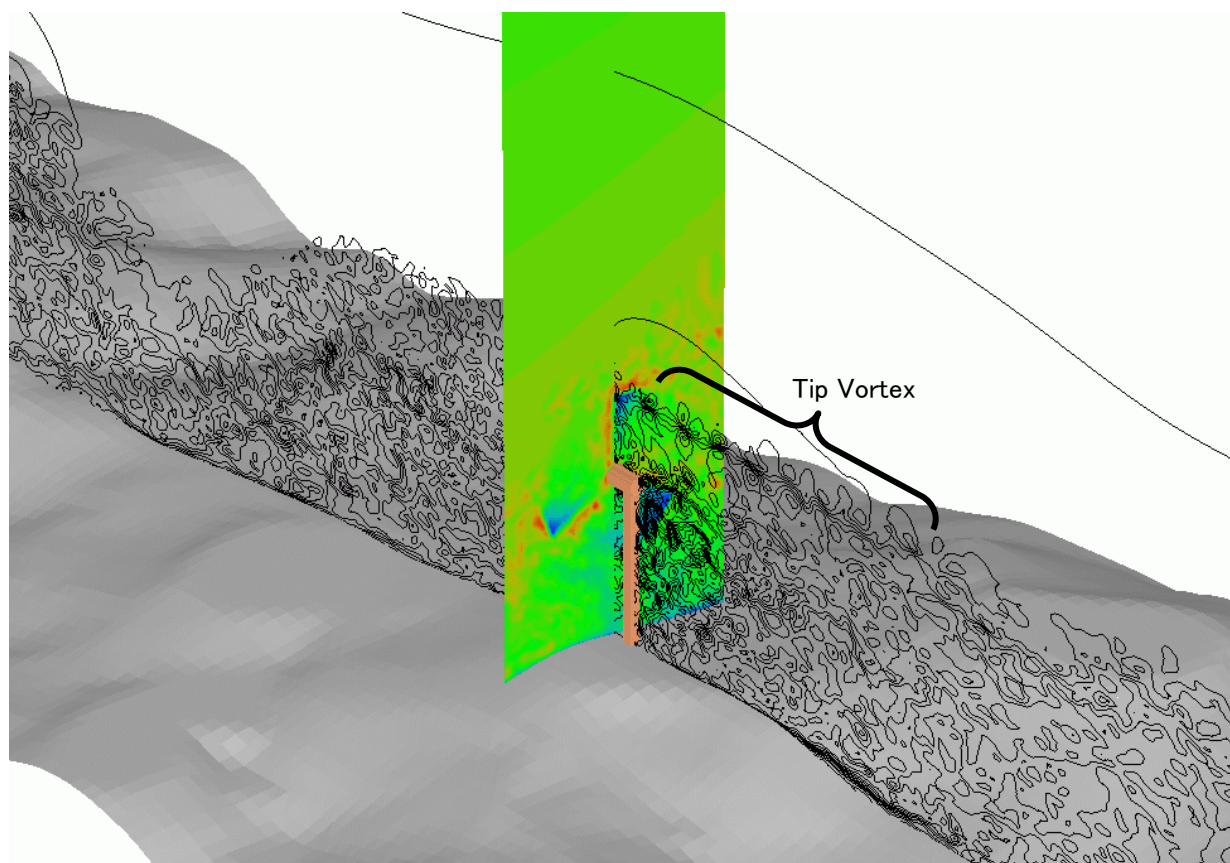


(b)鳥瞰図

図4 風車2台の場合, 圧力のラプラシアン等の等値面図



(a)全体図



(b)拡大図

図5 複雑地形上の風車ウエイクの可視化, 主流方向速度の等値線図