

制御アルゴリズムとコリオリ力を考慮した風車後流の LES 解析*

Large eddy simulation of wind turbine wakes considering control algorithm and Coriolis force

宋 雲鵬** 錢 国偉** 石原 孟**
Yun-Peng SONG Guo-Wei QIAN Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

風車間のピッチ制御とヨー制御を統合化した運転によるウインドファーム制御は10年以上研究されてきたが、最近ではウェイクステアリングが最も良い選択肢であることが示されている¹⁾。しかし、実地試験における高いコストと安全面の問題から、検証の不足が現状である。既往研究では、準定常状態な風車後流モデルを用いて評価されており、リアルタイムでの制御や風車の動的な挙動を考慮することが出来ない問題がある。また、風車ロータの数値予測に広く用いられている Actuator Disk Model (ADM)は、風車のブレードの形状およびその回転による動的効果を考慮することが出来ないと言われている²⁾。さらに、コリオリ力の影響も考慮する必要があるが、コリオリ力に関するこれまでの研究は検証が不十分である。

そこで、本研究では、まず Actuator Line Model (ALM)を用いた数値風車モデルと制御アルゴリズムを統合する。次に、風車模型の後流を ALM を用いて予測し、実験と比較し、精度検証を行う。最後に、コリオリ力を考慮し、銚子で観測した変動風速と風向を用いて、開発されたシミュレーターの予測精度の検証を行う。

2.1 数値モデル

2.1 支配方程式

本研究では、数値流体解析手法として LES を用いた。非圧縮流体の Navier-Stokes 方程式に対して空間フィルタをかけることにより次式が得られる。

$$\frac{\partial \rho \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \right) - \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_{rot,i} + f_{cor,i} \quad (2)$$

ここで、 \tilde{u}_i 、 \tilde{p} はフィルタ平均化された速度と圧力であり、 ρ は空気密度、 μ は粘性係数を表す。 $f_{rot,i}$ は

風車のロータが流れ場にもたらす外力を再現するためのソース項である。 $f_{cor,i}$ は地球の自転がもたらすコリオリ力を示す。コリオリ力は次式により計算される：

$$f_{cor,i} = -2\varepsilon_{ijk}\Omega_j\tilde{u}_k \quad (3)$$

$$\Omega_j = \omega \begin{bmatrix} 0 \\ \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで、 ε_{ijk} はレビ・チビタの記号である。 Ω_j は地球の回転角速度ベクトル、 ω は地球の自転速度 ($\sim 2.95 \times 10^{-5}$ rad/s)であり、 φ は緯度である。

2.2 ロータモデル

本解析では ALM を用いて、風車のブレードの回転運動が乱流場に及ぼす影響を再現した。このモデルでは、計算格子に離散化された3本の回転する線として風車ブレードを表現し、翼素理論に基づき抗力と揚力から計算される。図1(a)はALMにおける回転要素の軸系を示す。ロータ中心からの距離が r 、幅 dr をもった翼素に作用する流体力と風速の関係を図1(b)に示す。

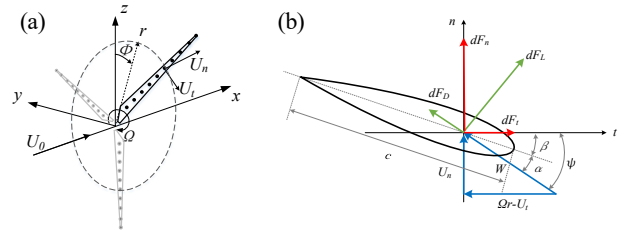


図1 ALMモデルの模式図。(a)ロータと回転要素の軸系、(b)断面のブレード要素に作用する速度と力

2.3 風車の制御モデル

本研究では、Yamaguchi, Yousefi と Ishihara³⁾により提案された制御ロジックを風車制御に用いた。本制御では発電機トルクは発電機回転数の関数として与えられる。定格出力までの制御は、発電効率が最大となるように、発電機トルク Q は次式に示すようにロータ回転数の関数として制御される。

$$Q = k_{opt}\Omega_f^2 \quad (5)$$

*第43回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演
**会員 東京大学工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区 7-3-1

$$k_{opt} = \frac{\pi \rho R^5 C_{p_{opt}}}{2r^3 \lambda_{opt}^3 \eta_M} \quad (6)$$

ここで、 Ω_f は発電機回転数、 ρ は空気密度、 R はロータ半径、 $C_{p_{opt}}$ は最適収束比、 η_M は発電機効率、 r は増速機のギア比である。また、定格以上の領域では、風車はピッチ制御を用いて発電機の回転数と出力が一定となるように運転する。ブレードのピッチ角 θ は、次式のようにPI制御により与える。

$$\theta_{R3} = \kappa(K_p e(t) + K_I u_I(t)) \quad (7)$$

ここで、 K_p は比例ゲイン、 K_I は積分ゲインである。これらのゲインの値はYoshida⁴⁾の研究に基づき決定している。

時間とともに風向が変化する場合、可能な限り風力エネルギーを獲得するよう風車を風向に正対させるためのヨーシステムが必要である。本研究では、Fleming⁵⁾により提案されたヨーレート制御を用いた(図2)。

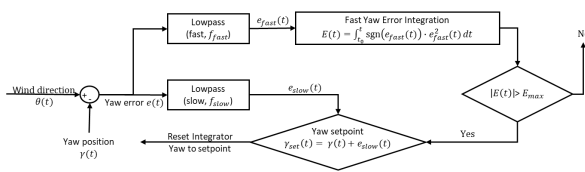


図2 実装したヨー制御のブロック線図

2.4 風車のコンフィグレーション

風車モデルとしては、模型風車と商業風車を対象とした。模型風車は風洞実験で利用された三菱重工製MWT-1000の1/100スケールモデル、ロータ径0.57m、ハブ高さ0.7mである。商業風車は、銚子沖のロータ径92m、ハブ高さ80mの2.4MWアップウィンド洋上風車である。

3. 模型風車の後流と荷重の予測

3.1 数値解析の概要

図3に示すように、計算領域は流れ方向22D、流れ直角方向4.4D、高さ3.2Dとした。ここで、 D はロータ径である。風車モデルは径間方向の中心にあり、スパイヤから10Dの位置に設定している。風車ロータ領域($x = -0.25D \sim 0.25D$ & $y = -0.75D \sim 0.75D$)、構造メッシュによる $D/64$ の均一な間隔に分割されている。時間ステップサイズはロータ翼端が時間ステップ毎にメッシュ

要素以上に移動しないように設定した。

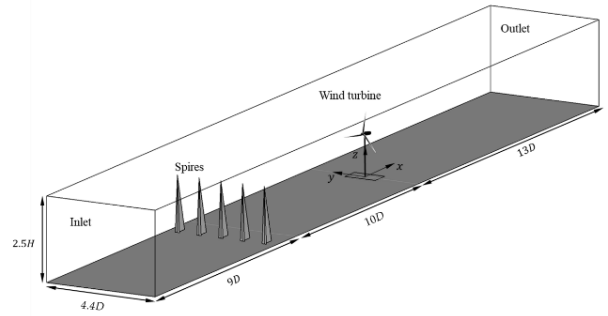


図3 風車モデルを導入した数値流体解析領域

3.2. 風洞実験による検証

図4には、風車後流における平均風速と乱流強度の解析結果を示す。ADM-RとALMによる結果が両方も風洞実験の結果とよく一致しており、構築した数値風洞及び数値風車モデルが高い精度を有することを示した。

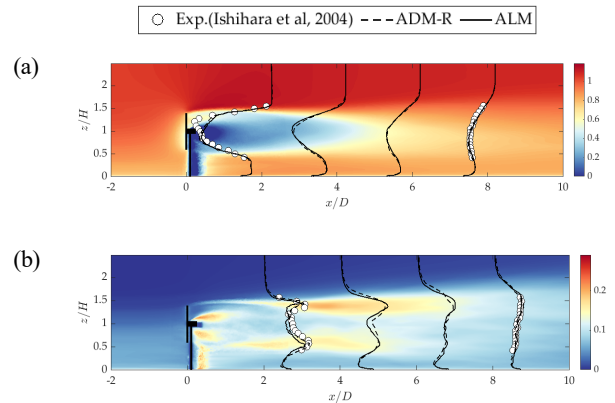


図4 (a)無次元平均風速と(b)乱流強度の鉛直分布

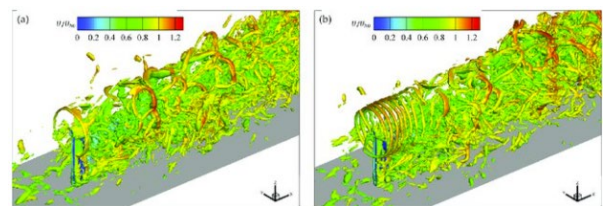


図5 風車後流における3次元渦構造

(a) ADM-R, (b) ALM

また、図5には、ロータの周辺及び下流において流れ場の瞬間的な3次元挙動を可視化している。ADM-Rシミュレーションでは近傍後流領域においてロータ円盤の端からリング状の渦が剥がれている。一方、ALMモデルでは、回転するブレードから発生している渦を良く再現している、ロータの約1D下流の範囲では、

個々の翼端渦がらなるせん構造が分かりやすく可視化されている。周辺の乱れの混合効果により遠方後流領域における ADM-R と ALM による渦の成長はほぼ同様な特徴を示す。そこではロータから発生した組織的な渦構造はロータ直径の数倍の後流域において小さなスケールの渦へと崩壊していく。近傍後流域に見られたロータ回転数の 3 倍の周波数 (3P frequency) は ADM-R で見られないが, ALM により求めたスラスト力は図 6 に示す FAST の結果とよく一致した。

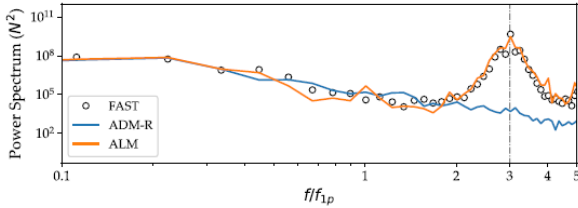


図 6 ADM-R, ALM, FAST から得られたスラスト力のパワースペクトルの比較

4. 実風車の制御と後流の予測

4.1 現地観測の概要

本研究で用いた現地観測データは千葉県銚子市の沖合 3.5 km に位置する銚子洋上風力発電所から収集している。風車の詳細は 2.4 節に紹介した。図 7 に示すように、観測塔は風車の東方 285 m に位置する。観測塔の高さは 95m であり、10m 間隔で高さ 20m から 90m の間に風速計と風向計が設置されている。また、平均海水面から 15m の高さのプラットフォームの上にドップラスキャンングライダー(WindCube100S) が設置されている。

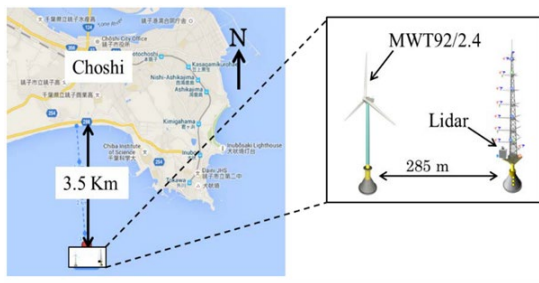


図 7 銚子洋上風力発電所

2016 年 9 月 28 日 16:00 から 23:00 の観測塔により計測した 80m での風速と風向は開発した数値解析コードの検証用に用いた(図 8)。

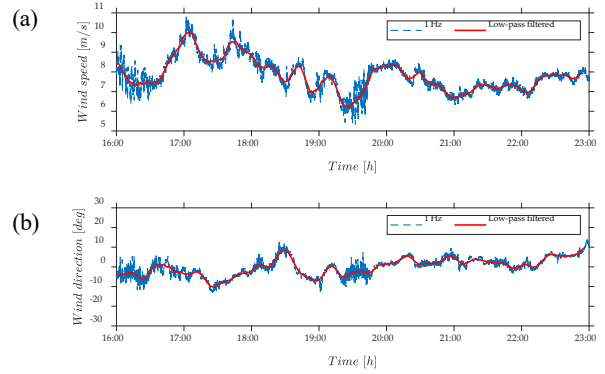


図 8 観測塔により計測された風車ハブ高さ 80m における(a)風速と(b)風向の時系列

4.2 SCADA データによる検証

図 9 はロータ回転数, ピッチ角, ナセル方位, 発電出力 10 分値の時刻歴データを示す。予測値は観測値と一致しており, 制御信号や発電出力を含む実機風車の運転状態を本研究で開発された風車シミュレーターにより良く再現した。

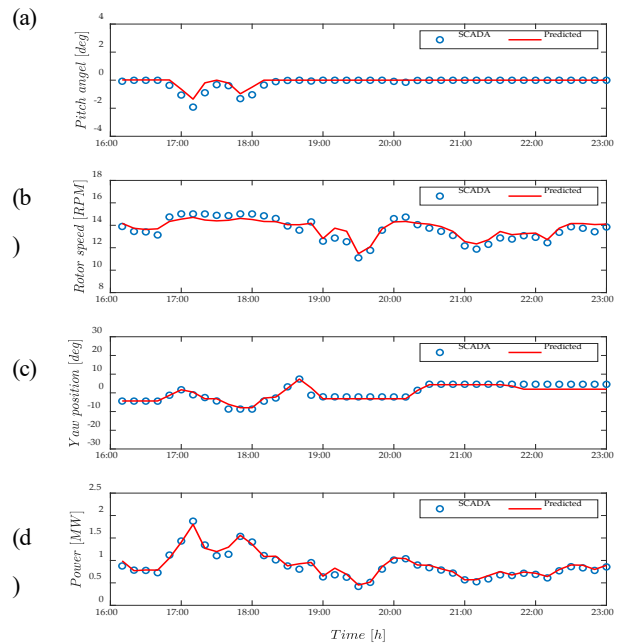


図 9 予測された(a)ロータ回転数, (b)ピッチ角, (c)ナセル方位, (d)発電出力と SCADA の時系列データとの比較

4.3 スキャンングライダー観測による検証

LES シミュレーションから得られた風車ハブ高さにおける平均風速のコンターを図 10 に示す。風車後流の遠方領域ではわずかに時計回りに偏向していること

を確認できる。詳細検証のため、 $x=1D$ および $6D$ の位置における速度欠損のプロファイルを抽出し、スキャニングライターのよる計測結果との比較を図 5 に示す。ウェイクモデル²⁾ による予測結果もプロットした。本研究で開発した風車シミュレーターは、スキャニングライターにより観測された風速と一致しており、ウェイクモデルでは捉えられなかった風車後流近傍の 2 つのピークおよび遠方後流域のコリオリ力による偏向をよく再現した。

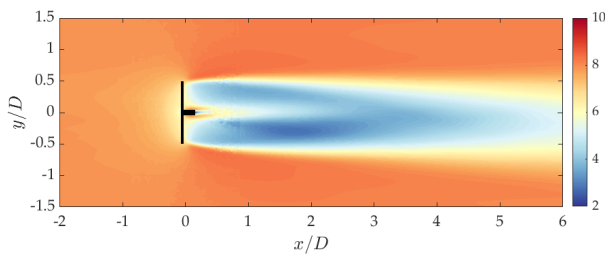


図 10 ハブ高さにおける平均風速の水平分布

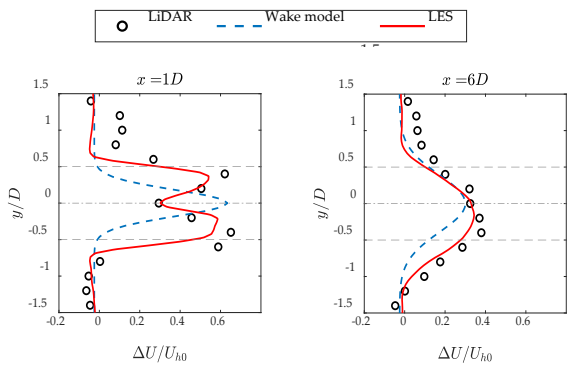


図 11 ハブ高さにおける無次元風速欠損の分布

5. まとめ

本研究では、風車の制御アルゴリズムを LES に実装し、回転ブレードの効果を再現するために ALM モデルを用いた。開発された LES コードは風洞及び現地観測から得られた風車後流を予測し、以下の結論が得られた。：

1. 風車のトルク、ピッチ及びヨーの制御を考慮した ALM を用い風車のシミュレーター開発した。変動風速と風向を用いた 2 つのベンチマークを実施し、予測されたスラスト及びトルク力は FAST から得られた予測結果と良く一致した。
2. 予測された風車模型の後流内の平均風速と乱流強度は、風洞実験から得られた値と良い一致を示した。遠方のウェイク領域では流れ場へのブレード

回転の影響を無視できるが、近傍においては、その影響が顕著であることを流れの可視化とスペクトル解析により示した。

3. 洋上実証サイトの実機風車を対象に本研究で開発された LES コードを用いて、数値シミュレーションを実施し、予測された風車制御と発電出力の時系列データは SCADA データと良い一致を示した。変動風速・風向とコリオリ力を考慮して予測された風車後流の平均風速はスキャニングライターの観測値とも良い一致を示した。

謝辞

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務「洋上風況観測システム技術の開発」で得られた観測データの提供を受けた。ここで、関係者の様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Bechmann, A., Sørensen, N.N., 2010. Hybrid RANS/LES method for wind flow over complex terrain. *Wind Energy* 13, 36–50.
- 2) Ishihara, T. & Qian, G.-W. A new Gaussian-based analytical wake model for wind turbines considering ambient turbulence intensities and thrust coefficient effects. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 177, 2018.
- 3) Yamaguchi, A., Yousefi, I. & Ishihara, T. Reduction in the fluctuating load on wind turbines by using a combined nacelle acceleration feedback and lidar-based feedforward control. *Energies* 13, 2020.
- 4) Yoshida, S., 2011. Variable speed-variable pitch controllers for aero-servo-elastic simulations of wind turbine support structures. *Journal of fluid science and technology*, 6(3), pp.300-312.
- 5) Fleming, P.A., Scholbrock, A.K., Jehu, A., Davoust, S., Osler, E., Wright, A.D. and Clifton, A., 2014, June. Field-test results using a nacelle-mounted lidar for improving wind turbine power capture by reducing yaw misalignment. In *Journal of Physics: Conference Series*