

# ステアリング制御時における風車の挙動と後流の現地観測と数値予測\*

Field measurement and numerical simulation on the dynamic behavior and wake flow of wind turbine during wake steering control

銭 国偉\*\* 船橋 茂久\*\*\* 小垣 哲也\*\*\*\* 石原 孟\*\*  
Guo-Wei QIAN Shigehisa FUNABASHI Tetsuya KOGAKI Takeshi ISHIHARA

## 1. はじめに

ウィンドファーム (WF) 風下に位置する風車が風上の風車の後流に入ると出力が減少するが、近年では、ウェイクステアリング制御と呼ばれる風車のヨーを制御し後流を偏向することで総発電量を増加させることができる<sup>1)</sup>と知られている。しかし、ウィンドファーム制御には現地試験による検証が不可欠であるが、その実施が様々な困難を伴う<sup>2)</sup>。Qian et al.<sup>3)</sup>は風速風向が変動する実風況下で通常制御時の風車後流と発電量を高精度で予測する風車シミュレータを開発したが、ウェイクステアリング制御時の検証を行っていない。

そこで、本研究では、実風車にウェイクステアリング制御を実装し、ナセルに設置した超音波風速計とナセルライダーを用いて風車位置および後流内における乱流場を計測すると共に、風車の制御信号と発電出力の時系列データを収集する。また、アクチュエータラインモデル (ALM) と制御アルゴリズムを実装した風車シミュレータを用いて、ウェイクステアリング制御時における風車の挙動と後流を予測し、実測値と比較することにより精度検証を行う。

## 2. 現地観測

### 2.1 ウェイクステアリング制御の実験概要

本研究では、山形県に位置する日立製作所が所有する新たちかわ風力発電所 1 号風車を対象とした (図 1)。対象風車は定格出力 2.5MW (1990kW 未満で運転) のアップウインドタイプ風車 HTW2.5U-100 であり、ローター直径  $D$  は 100m, ハブ高さは 80m である。対象風車の WNW 方向 (9 月における主風向である ESE の反対側) 4D 離れた位置には、同様の型式である風車が位置すると想定した。本実験では、WF 全体の発電量向上アルゴリズムに基づき、対象風車に対してヨー制御指令値を与え、対象風車と仮想風車からなる WF 全

体の発電量が向上するように制御を行った。

図 2 に示すように、対象風車のハブ高さにおける流入風はナセル上の超音波風速計により計測した。ナセル風速・風向、風車ローター回転数、ピッチ角度、ナセル方位及び発電出力は 1 Hz 同時サンプリングを行い、SCADA より収集した。また、ナセル後方には産業技術総合研究所が所有するナセルライダーを設置し、風車後流における乱流場を計測した。観測期間は 2021 年 7 月 30 日から 2021 年 9 月 30 日の約 2 月間とした。ナセル搭載ライダーを用いた風車後流の計測は 2021 年 8 月 20 日～2021 年 9 月 30 日まで行った。

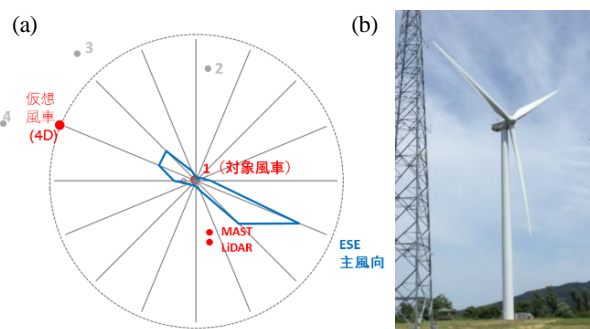


図 1 (a)風配図と風車、鉛直 LiDAR 及び観測塔の配置 (b)対象風車

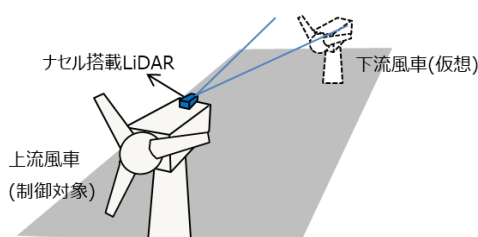


図 2 ウェイクステアリング制御と風車後流計測のイメージ

### 2.2 ナセル風速計による入流風の計測

図 3 には、ナセル上の超音波風速計の設置位置と IEC61400-12-6<sup>4)</sup> によるナセル風向風速計の設置要件に関する寸法を示す。本実験にて設置したナセル風速計は IEC に示す青い範囲内にあり、要求事項を満たしていることが分かる。

\*第 43 回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

\*\*会員 東京大学大学院工学系研究科

\*\*\*会員 日立製作所

\*\*\*\*会員 産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究所

ナセル風速計により計測した風況を検証するため、風車近傍に位置する鉛直 LiDAR の 80m で計測された風況との相関を求めた。対象とする観測データは、2021 年 5 月～6 月の風車発電時におけるデータを用いた。図 4 に、鉛直 LiDAR とナセル風速計の風速、風向の 10 分値の時系列データの比較を示す。また、図 5 には両計測器のデータの相関を示す。風速の精度評価指標（傾き 1.00, 決定係数  $R^2=0.97$ ）において、傾きと決定係数は両方とも基準を満足する結果となっている。風向は精度評価指標（傾き 0.99, 切片  $3.6^\circ$ , 決定係数  $R^2=0.98$ ）の基準を満足している。従って、ナセル風速計より計測された風速・風向・乱流強度は流入風としてウェイクステアリング制御を実施できる。

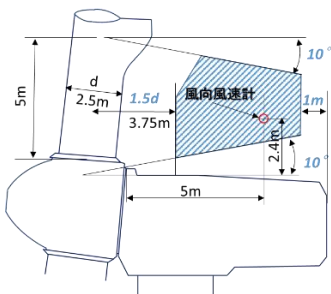


図 3 ナセル風向風速計の設置位置と IEC による設置要件

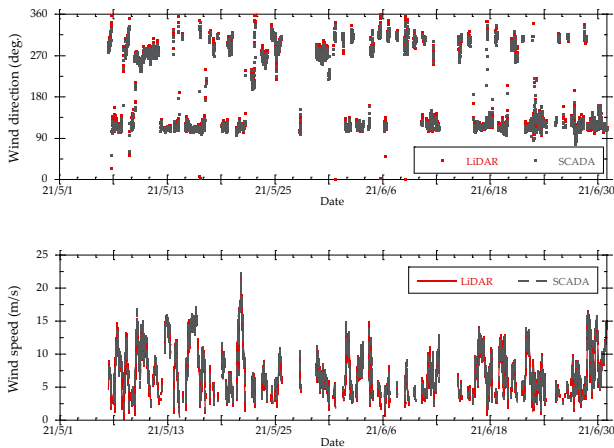


図 4 ナセル風速計と LiDAR の風速・風向時系列の比較

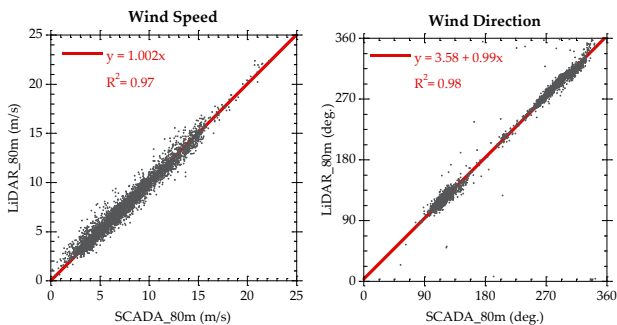


図 5 ナセル風速計と鉛直 LiDAR の風速・風向の相関

### 2.3 ナセル搭載 LiDAR による後流の計測

ナセル搭載ライダー「Windcube Nacelle」はハブ高さにて下流方向へ 2 本の計測ビームを照射する。2 ビームの左右開き角  $15^\circ$  であり、それぞれの視線方向には 55m~550m 距離を 55m 間隔で同時合計 20 点（10 位置  $\times$  2）の視線方向風速を得る。風車後流における風速は一樣ではないため、左右ビームの視線方向風速  $u_{r1}$ ,  $u_{r2}$  を用いて以下の式(1)によりそれぞれの位置における風速  $U_1$ ,  $U_2$  を算出する（図 6）。各ビームの走査時間は約 1 s であり、各計測位置における視線風速データの更新周期は 0.5Hz である。

$$U_i = \frac{u_{ri}}{\cos(\gamma + \theta_i)} \quad (1)$$

ここで、 $\gamma$  はナセル方位と風向の偏差（ヨー誤差）、 $\theta_i$  はビームの方位角である。

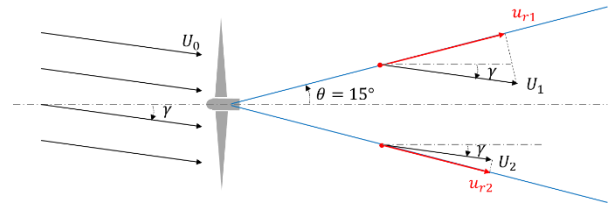


図 6 ナセル LiDAR のビーム配置と風速の算出方法

### 2.4 ウェイクステアリング制御アルゴリズム

ウェイクステアリング制御には最適化に関する繰り返し計算に時間がかかり、実機上オンラインで制御指令値を出すために、事前にヨーオフセットのルックアップテーブル（LUT）を作成する必要がある。本研究では Qian and Ishihara<sup>7)</sup> により開発したウィンドファームの発電量最大化アルゴリズムを用いて、対象風車のヨーオフセットの LUT を作成した。風速 4m/s~10m/s と風向  $92.5^\circ \sim 132.5^\circ$  を制御対象風況とした。また、ルックアップテーブルにおける風向セクターと風速ビームの幅はそれぞれを  $2^\circ$  と 0.5m/s とした。

図 7 にはヨーオフセットの LUT を基づくウェイクステアリング制御アルゴリズムを示す。ウェイクステアリング制御モジュールでは、ローパスフィルタ（1 分移動平均の LPF）により処理したナセル風向・風速を用いてルックアップテーブルの内挿によりヨーオフセットの指令値を求める。ステアリング制御の切り替え（Toggle）は ON にすることにより、ヨーオフセット指令値をナセル風向に加えて風車のヨー制御部に与える、OFF にする場合に通常制御となる。

切り替え ON の時に計測されたナセル風速・風向及

びヨーオフセットの指令値の時刻歴データの一例(2021年9月9日06:45~07:45)を図8に示す。ヨーオフセット指令値は風速・風向の1分移動平均値に応じて変動していることが分かる。その値とルックアップテーブルを図9にて比較した。ステアリング制御適用時に計測されたヨーオフセット指令値はルックアップテーブルから得られた曲線に乗っていることが分かる。

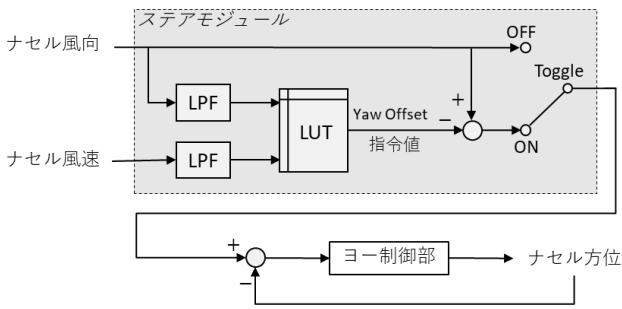


図7 ウェイクステアリング制御アルゴリズム

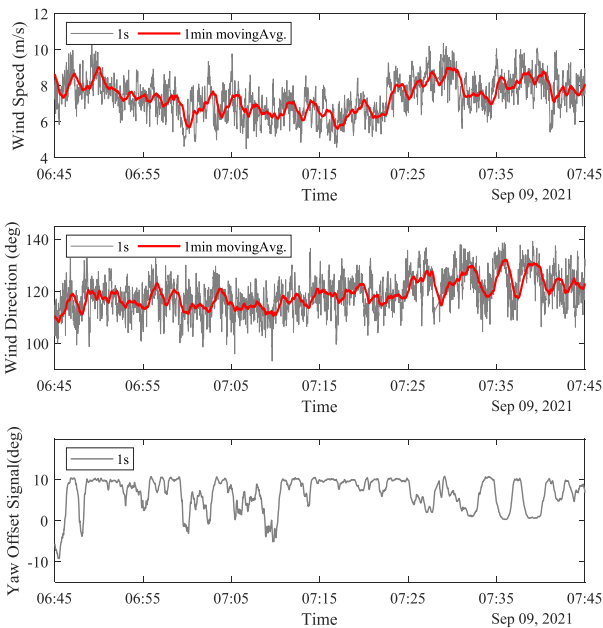


図8 ウェイクステアリング制御時ナセル風速・風向とヨーオフセット指令値の時刻歴データの一例

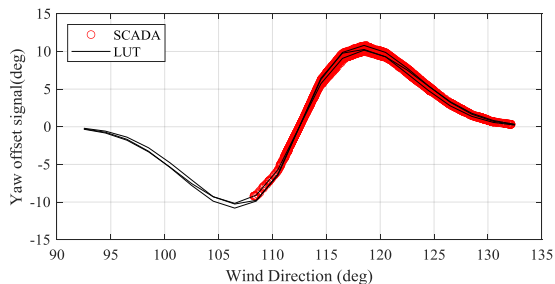


図9 ヨーオフセットの指令値とLUTの値の比較

### 3. 数値予測と実測による検証

#### 3.1 風車モデル

風車ロータに作用する空気力は、アクチュエータラインモデル(ALM)を用いて、モデル化した。このモデルでは、計算格子に離散化された3本の回転する線を用いて風車ブレードを表現し、翼素理論に基づき抗力と揚力を求める。また、Yamaguchi et al.<sup>5)</sup>により提案されたトルク・ピッチ制御ロジック及びFleming et al.<sup>6)</sup>により提案されたヨー制御アルゴリズムを風車制御に用いた。

Qian et al.<sup>5)</sup>と同様に、シミュレーションにより求めた風速別のブレードピッチ角度、ロータ回転数と発電出力は観測データの風速ビンごとの平均値とよく一致し、本研究で構築したブレードの空気力モデル及び風車の制御モデルが実風車に作用する力を再現できることを確認した。

#### 3.2 ステアリング制御の検証

図7示すウェイクステアリング制御アルゴリズムにある実用風車のヨー制御部分は、企業機密であり、入手できない。本研究ではFleming et al.<sup>6)</sup>により提案されたヨー制御ロジックを利用し、制御パラメータは計測されたデータから同定した。同定したパラメータを用いて、図8と同じ期間の風速・風向を対象にシミュレーションを行い、ナセル方位の時系列を図10に示した。予測したナセル方位は実測値と概ね一致した。また、ナセル方位は風向から乖離しており、ステアリング制御による効果をよく再現している。

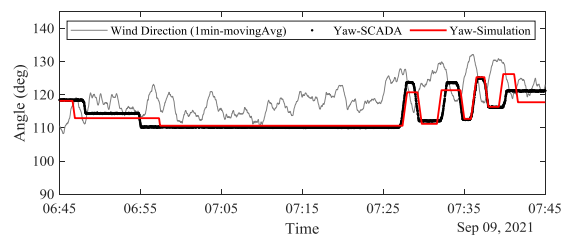


図10 ウェイクステアリング制御時ナセル方位の観測値と予測値の比較

#### 3.3 制御と発電量の予測結果

本研究で構築した数値モデルを用いて、ウェイクステアリング制御時の対象風車運転状況の予測を行った。このシミュレーションでは、図8に示したナセル風速・風向を流入風とした。図11はロータ回転数、ピッ

ち角, ナセル方位, 発電出力の1分値の時刻歴を示す。白丸は予測値を表し, 赤線は風車の SCADA データから得られたデータを表す。図 11 に示す 1 時間においては風車の制御は領域 2 において, ロータ回転数と発電量は風速の変化に従って変化するが, ピッチ角が 0 となり作動していない。また予測値は観測値と一致しており, ステアリング制御時の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数値モデルにより精度良く再現できたことが分かる。

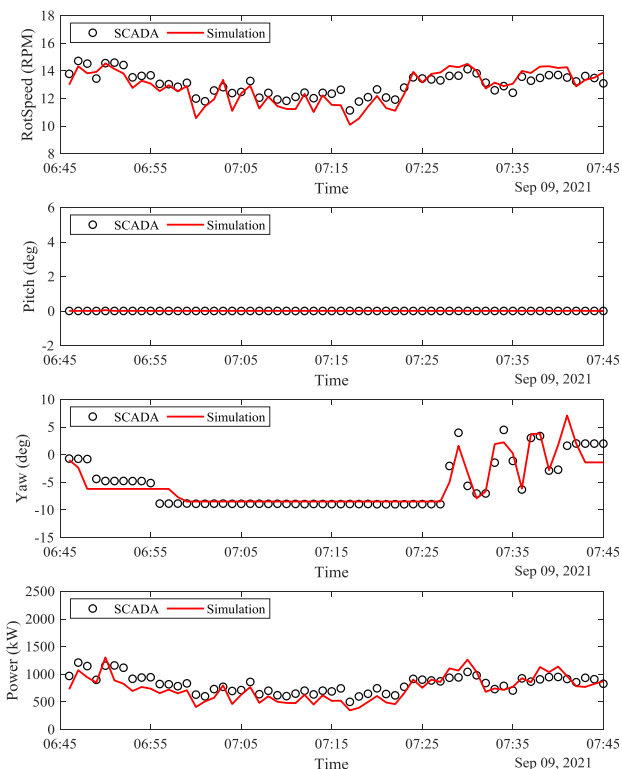


図 11 ステアリング制御時風車制御信号及び発電量の予測値と観測値の比較

### 3.4 後流の予測結果

本研究で構築した制御アルゴリズムを LES コードへ導入し, ウェイクステアリング制御時の対象風車の後流における風速の予測を行った。予測した風速時系列データをナセル LiDAR による実測値と比較した。紙面の上, この部分は講演にて報告する予定である。

### 4. まとめ

本研究では, 実風車にウェイクステアリング制御を実装し, 風車の制御信号と発電出力の時系列データを収集した。また, アクチュエータラインモデル (ALM) と制御アルゴリズムを実装した風車シミュレータを用

いて, ウェイクステアリング制御時における風車の挙動を予測し, 実測データを用いて構築した数値モデルの検証を行い, 以下の結論を得た。

1. ナセル上に設置した超音波風速計により計測した風速・風向は風車近傍の鉛直 LiDAR のデータと良い相関が得られた。ナセル風速計は IEC 61400-12-6<sup>4)</sup> による要求事項を満たすことにより配置されるため, ロータやナセルによる影響の少ない風速を計測でき, ウェイクステアリング制御の入力として利用できることが分かった。
2. 実機風車のヨー制御パラメータを同定することにより, ルックアップテーブルに基づくウェイクステアリング制御アルゴリズムを構築した。構築したアルゴリズムを導入した風車数値モデルを用い, ウェイクステアリング制御時の制御信号や発電出力が精度良く再現できることを示した。本研究で開発した数値モデルによりウェイクステアリング制御を高精度かつ高効率に評価することが可能になった。

### 謝辞

本研究は NEDO の「人工知能技術の風車への社会実装に関する研究開発」から得られた実証データを利用した。ここで, 関係者の皆様に深く感謝申し上げる。

### 参考文献

- (1) Kheirabadi AC, Nagamune R. A quantitative review of wind farm control with the objective of wind farm power maximization. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 192:45e73, 2019
- (2) Van Wingerden J.W., et al. Expert Elicitation on Wind Farm Control. *J. Phys. Conf. Ser.* 1618, 2020
- (3) Qian, G.W., Song, Y.P. and Ishihara, T.: A control-oriented large eddy simulation of wind turbine wake considering effects of Coriolis force and time-varying wind conditions. *Energy*, 239, 2021.
- (4) IEC 61400-12-6: Wind energy generation systems - Part 12-6: Measurement based nacelle transfer function of electricity producing wind turbines, 2021.
- (5) 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*, 13:1e18., 2020.
- (6) Fleming P. A. et al.: Field-test results using a nacelle-mounted lidar for improving wind turbine power capture by reducing yaw misalignment. *J. Phys. Conf. Ser.*, 524:012002, 2014