

# 長期的な安全運用を目的とした風車維持管理支援に関わる研究(その1) Research related to wind turbine maintenance management support for long-term safe operation (Part 1)\*<sup>1</sup>

○川島 泰史\*<sup>2</sup>, 内田 孝紀\*<sup>3</sup>, 古賀 和宏\*<sup>4</sup>, 山下 晃太\*<sup>5</sup>, 永井 利昌\*<sup>6</sup>

Yasushi KAWASHIMA, Takanori UCHIDA, Kazuhiro KOGA, Kota YAMASHITA, Toshimasa NAGAI

## 1. 緒言

近年の風力発電設備の増加に伴い、山岳部などの複雑地形上に建設された風力発電所において、風車ブレードの破損等の事故が増加傾向にある。こうした近年の風車事故の増加傾向を受けて、国は事故防止対策の検討を行い、平成29年4月1日より、単機出力500kW以上の風力発電設備を設置する発電所にも定期安全管理審査制度を導入する電気事業法の改正が実施された。

この様に国の風力発電設備に対する安全規制が強化される中、著者らの最近の研究から、風車の事故に対して、地形性乱流が強く関係していることが指摘されている<sup>1)~5)</sup>。今後、山岳部などの複雑地形に設置された風車の事故や故障を低減し、長期的な安全運用を目的として風況診断技術や計測技術を活用した高精度な風車維持管理支援技術の確立が急務である。

このような状況を受け、我々の研究グループでは、これまでに鹿児島県串木野れいめい風力発電所の風車10号機を対象として、風車ブレードの歪みや実風況データ等を計測し、得られた計測データに基づいて詳細な風車ブレードDEL(疲労等価荷重)データ解析を実施し、地形の凹凸により直接的に生成される地形性乱流により風車ブレード強度へ最も影響を与える風向を特定した<sup>3)</sup>。今回は風車10号機のヨー稼働時の風車9号機のウエイク影響について調査するため、風車10号機のナセル上に新たに設置した超音波風向風速計による計測とヨーアクチュエータ駆動電流を同期計測し、得られたデータについて分析した。風車9号機のウエイク影響を特定するため風車10号機のヨーアクチュエータ駆動電流計測は風車9号機のウエイク影響を直接的に受けている場合とウエイク影響を受けない場合について分析を行った。

特に本報では、9号機ウエイク影響の大きい南西風の3次元的な気流構造に着目し、ヨーアクチュエータ駆動電流との関係性を考察した。

最後にラージ・エディ・シミュレーション(LES)に基づいた数値風況シミュレーション(数値風況診断)を実施し、風況診断と計測技術を活用した風車ウエイク影響に対するヨーシステムの維持管理支援に向けた取組みについて紹介する。

## 2. 研究対象風車の概要

(株)九電工殿及び(株)設備保守センター殿の協力の下、串木野れいめい風力発電所(平成24年11月より運転開始)において、東側にある弁財天山(標高519m)を通過し発生する風の乱れ(地形性乱流)の影響が懸念され運転開始後約5年でヨーアクチュエータ、ピニオンギアの破損が発生した10号機を研究対象風車とした(図1参照)。

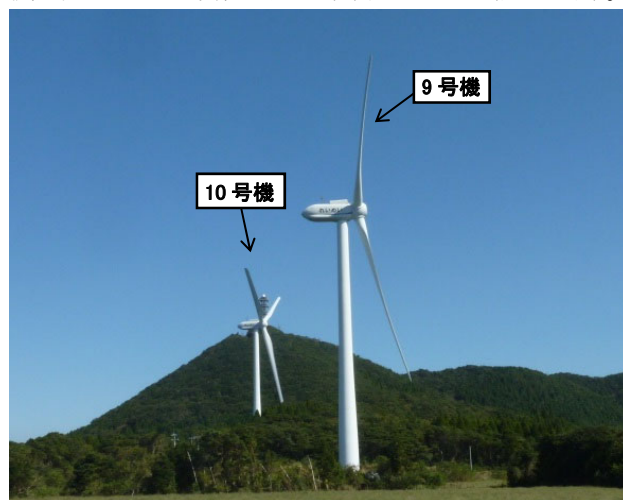


図1 現場の写真(著者が2019年10月9日撮影)

表1 串木野れいめい風力発電所の概要

	1号機~10号機
風車メーカー、出力	日立製作所 HTW2.0-80
風車の高さ(地面~ハブ中心)	60m
翼(ブレード)の直径	80m

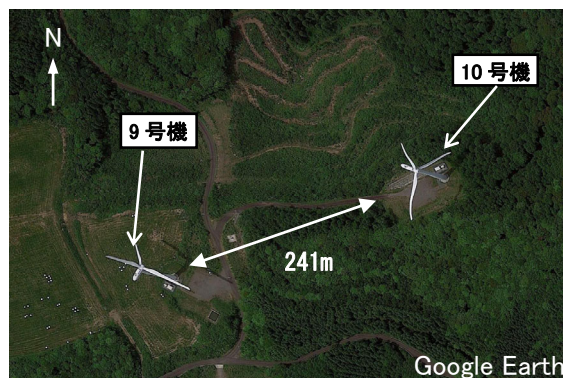


図2 9号機と10号機の関係(Google Earthによる)

\*1 令和4年12月2日「第44回風力エネルギー利用シンポジウム」にて講演

\*2 会員、西日本技術開発(株)(〒810-0004福岡市中央区渡辺通2-1-82 電気ビル共創館7F、連絡先: y-kawashima@wjec.co.jp)

\*3 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)

\*4 会員、西日本技術開発(株)(〒810-0004福岡市中央区渡辺通2-1-82 電気ビル共創館7F、連絡先: kaz-koga@wjec.co.jp)

\*5 会員、西日本技術開発(株)(〒810-0004福岡市中央区渡辺通2-1-82 電気ビル共創館7F、連絡先: ko-yamashita@wjec.co.jp)

\*6 非会員、(株)設備保守センター(〒810-0011福岡市中央区高砂2-10-1 九電工グループビル7F、連絡先: nagai@setubi-hosyu.co.jp)

### 3. ヨーアクチュエータ電流計測データ解析 (実測データ解析)

ナセル方位を風向に追従させるヨーシステムにおいて、ヨーアクチュエータはヨーモータを駆動させるために極めて重要な機器である。そこで、本研究では風車10号機ナセル内に配置されたヨーアクチュエータ4機(右前方・後方、左前方・後方)に対し、当該電動機の駆動電流値を、岡野バルブ製造(株)製の計測装置「VQ-ORCL」を用いて計測を行った。また、計測期間の2020年11月19日～2021年1月9日(サンプリング周期0.001秒)において、ヨーアクチュエータの駆動電流実測データに基づき、地形性乱流が風車ヨーシステムに与える影響を評価した。ここでは、ヨーシステムが作動中に電動機の定格電流13.8Aを超えた点に主眼を置いて議論を進める。また、本報では4機のヨーアクチュエータ駆動電流値に差異がなかったことから、左前方の値を評価値とした。

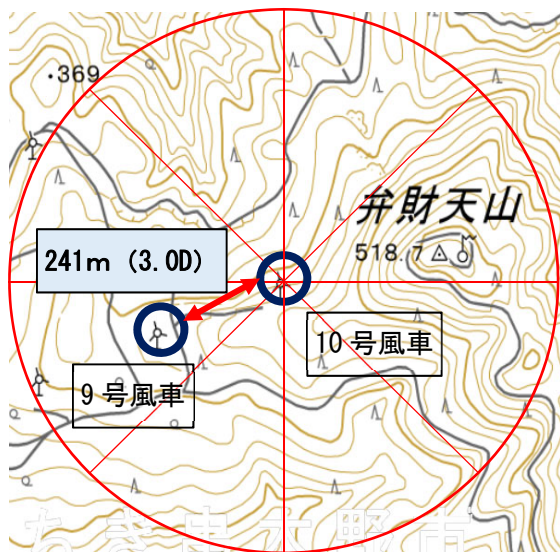
ヨーアクチュエータの健全度を測るにあたっては、乱流による非定常条件下の設備状態を定量的に表す必要がある。そこで、ヨーアクチュエータ稼働時の負荷変化に伴う電流の変動値をエネルギー等価値として捉えることにより、駆動時間内の総エネルギー量の近似値を求めた。ここでは、ヨーアクチュエータ駆動時に計測された時間軸の電流変動値を、フーリエ変換によって周波数軸に変換することで、振幅値の積和として表し、単位周波数あたりのエネルギー量として標準化した(以下「E値」と呼ぶ) (式(3.1)参照)。

$$\sum_{n=0}^{N-1} |y_n|^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |Y_n|^2 \quad (3.1)$$

$y_n$ : 電流データの振幅値

$Y_n$ : FFT で求められるスペクトル値

10号機のナセル方位角におけるE値の分布(ヨーモータの定格電流を超えたもの)を図4に示す。当該分布図から、データは西側に偏っていることが分かる。また、E値が高い値を示すのは南西よりの方位であることが確



注) ・D : ロータ直径 (80m)  
・10号機を基準として9号機の方位角約250deg

図3 10号風車と9号風車の位置関係

認された。この結果に、10号機に隣接した配置にあるその他の風車の後流ウエイクの影響を重ねて評価した結果、風車9号機による影響が大きいことが推察された(図3、4参照)。

計測期間中に最も大きなE値を示した南西時(方位南242.6deg)の場合の2020年12月30日4時49分00秒から39秒までの駆動電流実測データを示す(図5参照)。風車10号機では、E値が最大となった際にナセル方位は反時計方向に約1.0deg、動作時間は14秒であったことを確認した。合わせて比較のため、計測値が定格電流を超えた場合で、E値が最小となった時系列の推移を図6に示す。

ここで、電動機における定格電流とは、管理上の推奨値を指しており、これを一時的に超えたからといって実用上問題になるようなことではないものの、図5のように短時間内に繰返し定格電流を超える様な場合やその積み重ねが、電動機の故障を誘引する原因となり、結果的にヨーシステムの疲労寿命に影響を与えることが予想される。

風車10号機のE値が最大となった2020年12月30日4時40分～4時50分のSCADAデータ(10分値)の風速、風向、ナセル方位角のデータを表2に示す。

SCADAデータの風速を確認すると、9号機に対して風車10号機の風速には明確な差異が確認された。

表2 SCADA データ(10分値)

時刻	要素	9号機	10号機
2020年 12月30日 4時40分	風速(m/s)	21.0	13.9
	風向(deg)	282.8	242.1
	ナセル方位角(deg)	278.9	249.5
2020年 12月30日 4時50分	風速(m/s)	20.5	14.5
	風向(deg)	285.2	242.6
	ナセル方位角(deg)	285.0	233.7

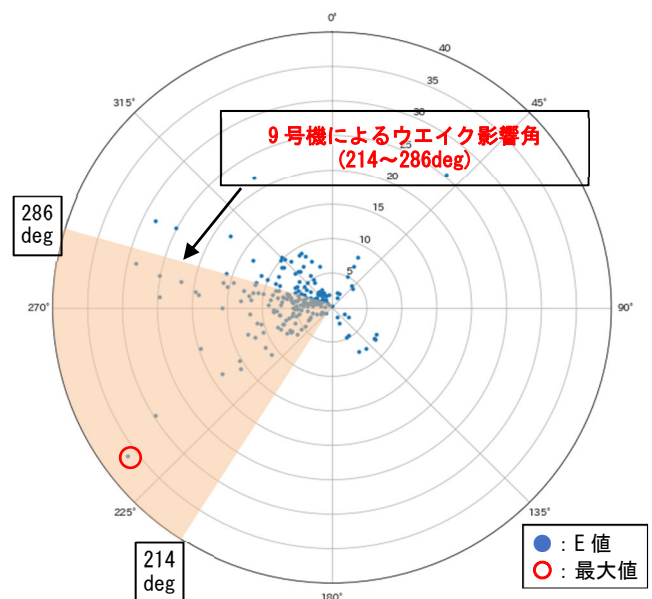


図4 10号機を中心とした9号機ウエイク影響角とE値分布図(定格電流超)

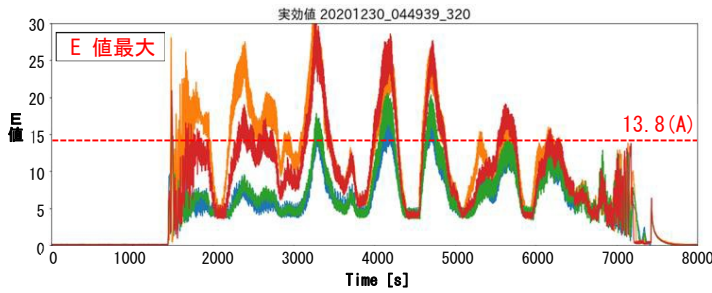


図5 E 値(最大)の時系列推移データ  
(計測期間:2020年12月30日4時49分00秒~39秒)

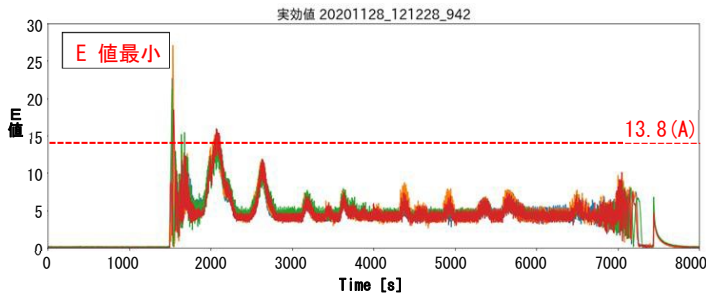


図6 E 値(最小)の時系列推移データ  
(計測期間:2020年11月28日12時12分00秒~28秒)

#### 4. 超音波風向風速計計測データ解析 (実測データ解析)

実測データによる気流性状の関係を評価するため、風車10号機のナセル上に、新たに㈱ソニック製3次元超音波風向風速計を設置し、ヨークチュエータ駆動電流と同期計測を行った。計測は2020年11月19日~2021年1月9日(サンプリング周期0.25秒)に対して16方位別に風速・風向・風速標準偏差他について解析した。ここでは3章においてE値が最大となり、9号機ウエイク影響が推察された南西時、2020年12月30日4時49分00秒~39秒の計測データに主眼を置いて議論を進める。

ヨーが動作した時間は14秒(2020年12月30日4時49分10秒~24秒)で、その間に風車10号機のハブ高さに進入した三方向[ $U_i$ (主方向)、 $V_i$ (横方向)、 $W_i$ (上下方向)]については、 $U$ 、 $V$ 、 $W$ の風速標準偏差が大きいことが分った(表2参照)。

表2 南西風の平均風速、標準偏差及び乱流強度

	平均風速(m/s)	風速標準偏差(m/s)	乱流強度
U	11.04	3.40	0.31
V	0.07	4.84	69.14
W	5.52	1.87	0.34

図7には、図5に示す同時刻の風速のデータを用いて解析した結果を示す。南西風の $U_i$ (主方向瞬間風速)、 $V_i$ (横方向瞬間風速)の解析結果から非定常な風向変動が発生していることが分った。また、南西風の $V_i$ (鉛直方向瞬間風速)は、吹き上げ、吹き下げの風が時々刻々発生していることが分った。これら一連の解析結果から、時々刻々と変動する非定常な風向変動や時々

刻々と変動する吹き上げ、吹き下げの状況は風車ヨーのアクチュエータ駆動時の電流が起動・停止を繰り返す様な不規則な波形となっていることから、風車ヨーシステムが時間的、空間的に非定常な風荷重の変化の中、機械的ストレスを連続で受けていることが分った(図5、図7参照)。空間的に非定常な風速変動とヨークチュエータ駆動時、9号機ウエイク影響角の範囲内でE値が過負荷を超える頻度が高かったことから、風車ヨーシステムが機械的にウエイクの影響を強く受けている可能性が示された。

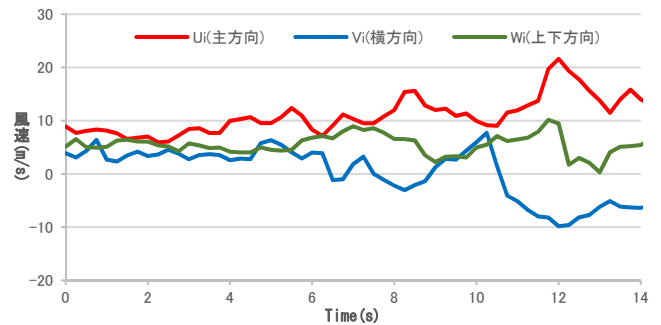


図7 南西風の風速3成分時系列推移データ  
(サンプリング周期:0.25秒)

(解析対象時間:2020年12月30日4時49分10秒~24秒)

#### 5. 風車ウエイクシミュレーション計算結果の概要

本研究では、3章でのヨークチュエータ電流値解析結果及び4章での風速の3成分の解析結果を踏まえ、ヨークチュエータピニオンギアの破損に影響を与える風況特性を定量的に評価する必要があるため、9号風車のウエイク影響を大きく受けている可能性が示唆された南西風を対象に風車ウエイクシミュレーションを実施した。

風車ウエイクシミュレーションではRIAM-COMPACTを用いた。

本研究では、風車ブレードの回転影響はCFDポータルディスク・ウエイクモデル<sup>6)</sup>を用いた。

図8には、風車9号機ウエイクシミュレーションの結果を示す。風車9号機の下流側の風車10号機地点では、時間的・空間的に非定常な風速・風向変動が形成され、風車10号機のヨーシステムはこの影響を強く受けていることがRIAM-COMPACTの解析結果からも明らかになった。

#### 6. 風車ヨーシステム維持管理支援の取組み

風車ヨーシステムに地形性乱流の与える影響評価の提案について文献<sup>4)</sup>に示す。

文献<sup>4)</sup>では東風時の場合、地形性乱流が要因となって風車10号機地点において水平断面内(ヨー方向)および鉛直断面内の気流の時間的・空間的な変動が大きいことが示された。また、今回、西北西風時の実測データ解析結果と風況シミュレーション結果から風車ウエイク影響と考えられるヨークチュエータ駆動電流の過負荷や気流性状の乱れが確認された。今回のヨークチュエー

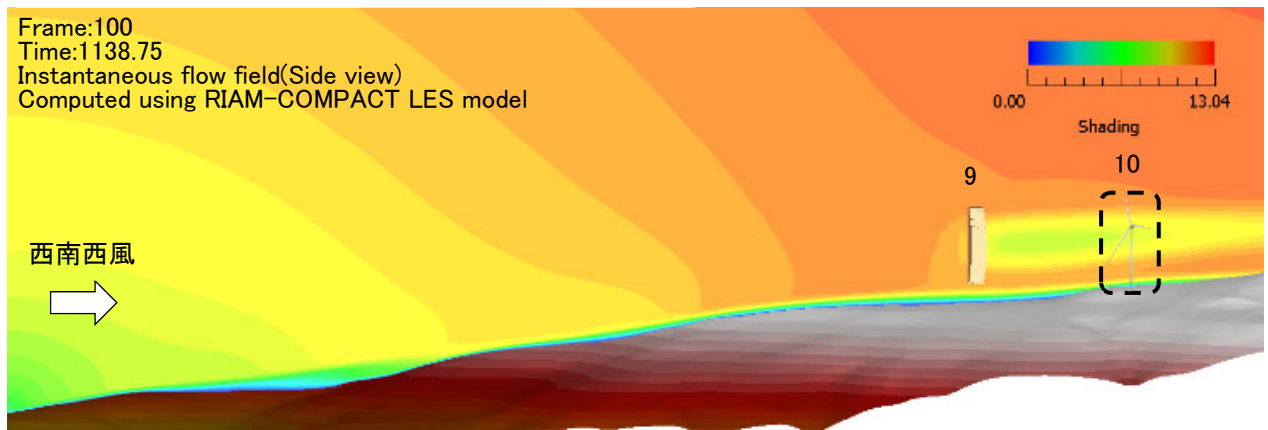


図8 西南西時、風車10号機の受ける主流方向(X)の風速分布(瞬間場)

タ駆動電流計測の結果から、ヨーシステムが過負荷となるE値の分布は東側よりも西側に偏っていることも分かった。一方で、東風時にはアラーム発報により風車が停止する頻度が高かったことから、東側の分布が少ないことが明らかになった。つまり、風車ヨーシステムが稼働しない場合にはE値が観測されないことを予め考慮しておく必要がある。いずれにしても、風車ヨーシステムが稼働する頻度が多いほど、また、稼働時に地形性乱流や風車ウエイクの影響により稼働時に受けるストレスが大きいほど、機械的応力変動によって疲労の蓄積は促進されることから、風況診断とE値の監視及び可視化は風車ヨーシステム管理にとって有効な手段と考える。

## 7. 結 言

串木野れいめい風力発電所の風車10号機を対象に、実測データ解析および数値風況シミュレーションを実施した。その結果、西南西風が発生した場合、風車10号機の上流(西南西方位)に位置する風車9号機のウエイク干渉による乱れが発生し、風車10号機はその影響を直接的に受けている。このような気流性状は、風車ヨーシステムのヨーピニオンギアの故障リスクが大きいことが示された。

一連の定性的かつ定量的な考察を通じて、RIAM-COMPACTを用いた風況診断やE値の計測を行うことが、風車ヨーシステムのヨーピニオンギアの故障リスク分析を行うために有意であることが確認された。

国の定期事業者検査においては、事故防止のため、ブレードやタワーなどの検査対象部位毎に細かな検査などの実施が義務付けられている。このため、山岳部などの複雑地形上に建設された地点では、気流性状を詳細に把握が可能な風況診断技術や高精度な計測技術を活用した状態監視を行うことが、風力発電設備の予防保全並びに長期安定運転に大きく貢献できるものと考えられる。今後、風車構成機器の疲労強度や寿命などを把握・予測するため、RIAM-COMPACTを用いて解析された3次元風況データと風車内部機器の状態を計測出来る特殊計測器との関係性を明らかにし長期的な安全運用を目的とした風車維持管理手法の確立を目指すべ

く事業者側の視点に立った研究を進めていきたい。

## 謝 辞

本報告で対象とした串木野れいめい風力発電所地点において、実測データ計測のため(株)九電工殿及び(株)設備保守センター殿に協力して頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 内田孝紀、大屋裕二、LES技術を用いたウィンドファーム風況診断—熊本県阿蘇車帰風力発電所を例として—、土木学会論文集A2(応用力学、Vol.67、特集号)、2011
- 2) T.Uchida and Y.Ohya, Latest Developments in Numerical Wind Synopsis Prediction Using the RIAM-COMPACT® CFD Model-Design Wind Speed Evaluation and Wind Risk (Terrain-Induced Turbulence) Diagnostics in Japan, *Energies*, 4(3), pp.458-474, 2011
- 3) 清木荘一郎、内田孝紀他3名:地形乱流が風車構造強度に与える影響に関する研究(その3:複雑地形での疲労荷重に対する実測評価および予測技術開発)、日本風力エネルギー学会主催、第38回風力エネルギー利用シンポジウム、pp.459-462、2016
- 4) T.Uchida and Y.Kawashima, New Assessment Scales for Evaluating the Degree of Risk of Wind Turbine Blade Damage Caused by Terrain-Induced Turbulence, *energies* 2019,12
- 5) 川島泰史、内田孝紀他5名:「地形性乱流」が風車ヨーシステムに与える危険度を判定する新しい評価スケールの提案、日本風力エネルギー学会主催、第42回風力エネルギー利用シンポジウム、B3-4、2020
- 6) Takanori UCHIDA, Tadasuke YOSHIDA, Masaki INUI and Yoshihiro TANIYAMA, Doppler Lidar Investigations of Wind Turbine Near-Wakes and LES Modeling with New Porous Disc Approach, *Energies* 2021, 14(8), 2101