

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ための 新しい評価スケールの提案*1

New Assessment Scales for Evaluating the Degree of Risk of Wind Turbine Yaw System Caused by Terrain-Induced Turbulence

○川島 泰史*2, 内田 孝紀*3, 古賀 和宏*4, 山下晃太*5, 田中啓太*6, 永岩慶一郎*7, 江頭博志*8

Yasushi KAWASHIMA, Takanori UCHIDA, Kazuhiro KOGA, Kota YAMASHITA, Keita TANAKA, Keiichiro NAGAIWA,
and Hiroshi EGASHIRA

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^{1) 5)}。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するため、保守や運用のための安全管理に寄与する必要があることが高精度な数値風況面からの故障分析手法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、風車ブレード強度へ最も影響を与える風向を特定した³⁾。今回は風車ブレード歪みとナセル加速度(振動)データについて分析し、風車ブレード強度へ最も影響を与える風向において加速度(振動)が大きくなっていることを確認した。また、加速度(振動)が大きかった方位において、ヨー稼働時のヨーアクチュエータ駆動電流計測も含めて行った。これらの、実測データから特定された風向を対象に、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)を実施した。特に、本報では、地形性乱流影響の大きかった東風の、3次元的な気流構造に着目し、実測データとの相関性を考察した。最後に、数値風況シミュレーションによる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ための評価指標について提案を行う。

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)。

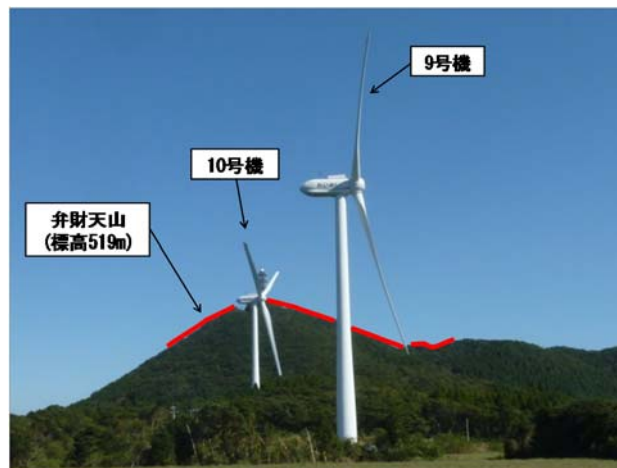


図1 現場の写真(著者が2019年10月9日撮影)

3. ナセル加速度計測データ解析 (実測データ解析)

2015年11月3日0時~2016年3月17日7時の期間におけるサンプリング周期0.02Sで計測したブレード歪み及びナセル加速度Xのデータを使用して、風車ブレード強度へ最も影響を与える東風と、東風に対して明確な差異が確認された北風のナセル加速度Xについて解析を行った結果、東風のナセル加速度Xの値は、北風に対して大きいことが示された(図2、3参照)。なお、東風と北風の風車ブレードDEL(疲労等価荷重)解析結果などは、文献³⁾を参照して頂きたい。

*1 令和元年12月5日「第41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㈱(〒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㈱(〒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㈱(〒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 会員、西日本技術開発㈱(〒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 : k-tanaka@wjec.co.jp)

*7 非会員、岡野バルブ製造株式会社(〒800-8601北九州市門司区中町1番14号、連絡先 : kei-nagaiwa@okano-valve.co.jp)

*8 非会員、岡野バルブ製造株式会社(〒800-8601北九州市門司区中町1番14号、連絡先 : h-egashira@okano-valve.co.jp)

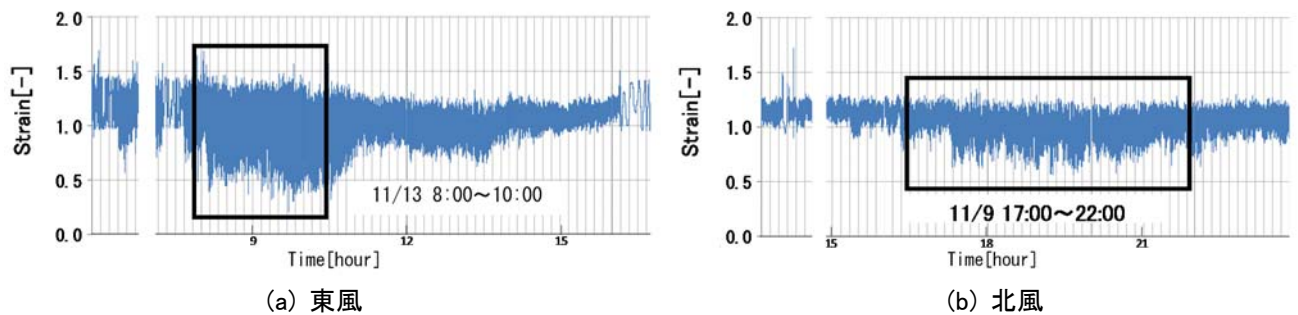


図2 ブレード歪みデータ比較(風速9m/s程度時)[実測データ(0.02秒値)、2015年]

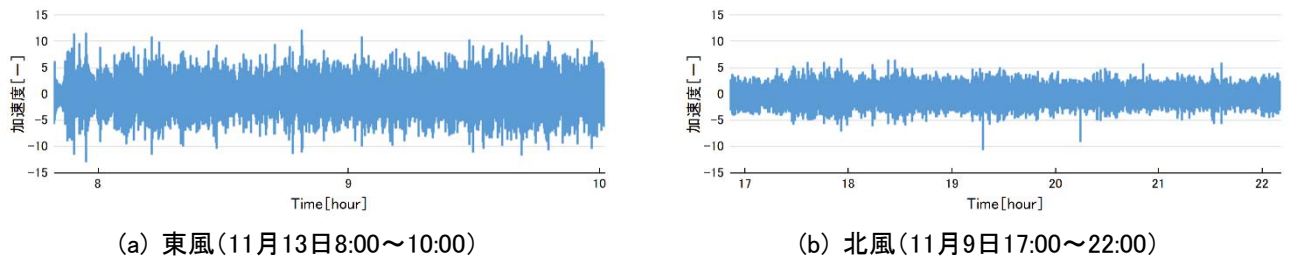


図3 加速度Xデータ比較(風速9m/s程度時)[実測データ(0.02秒値)、2015年]

4. 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。そのため、本研究では風車10号機ナセル内の、ヨーアクチュエータ動作時にヨーアクチュエータ4機(右前方・後方、左前方・後方)の駆動電流値を自動計測が可能な、岡野バルブ製造(株)製VQ-ORCL装置を設置し計測した。計測期間の2019年10月9日～2019年10月27日、2020年1月29日～2020年2月25日において、ヨーアクチュエータ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、3章において明確な差異が確認された東風と北風に主眼を置いて議論を進める。また、本報では4機のアクチュエータ駆動電流値に差異がなかったことから、右後方の値を評価値とした。

ヨーアクチュエータの健全度指標については、乱流による非定常状態下の設備健全度を示す必要があることから、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(周波数データのオーバーオール値)として捉えることによって、駆動時間内の総エネルギー量として考えることができる。本解析ではヨーアクチュエータ駆動時に計測された電流変動値の合計エネルギー量は、フーリエ変換によって周波数軸に変換された振幅値の積和として表わすことができる。このため、この理論を利用することにより、単位周波数あたりのエネルギー量として標準化できるエネルギー量(以下「E値」呼称)を用いた(式(4.1)参照)。

$$\sum_{n=0}^{N-1} |y_n|^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |Y_n|^2 \quad (4.1)$$

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

本報での、データ解析ポイントは、東風時の場合、計測期間で最もE値が大きかった2019年10月24日2時24分と、同等の風速であった北風の場合の2020年1月31日22時27分の風向、風速、E値を表1に示す。また、その前後の時間のE値、風況条件の時系列推移を図4に示す。

東風と北風の比較解析の結果、東風時の方が北風時より明らかに高いE値となった。この結果、地形性乱流の影響により、ブレードに大きな歪み変動が発生し、これに連動してナセル加速度Xの値が大きくなり、ヨーアクチュエータ電流値にも差異が発生していることが推察される。このような地形性乱流の発生と、起動回数に比例、又は増加により風車ヨーシステムの故障リスクに大きな影響を与えると考えられる。

表1 風向、風速、E値[実測データ]

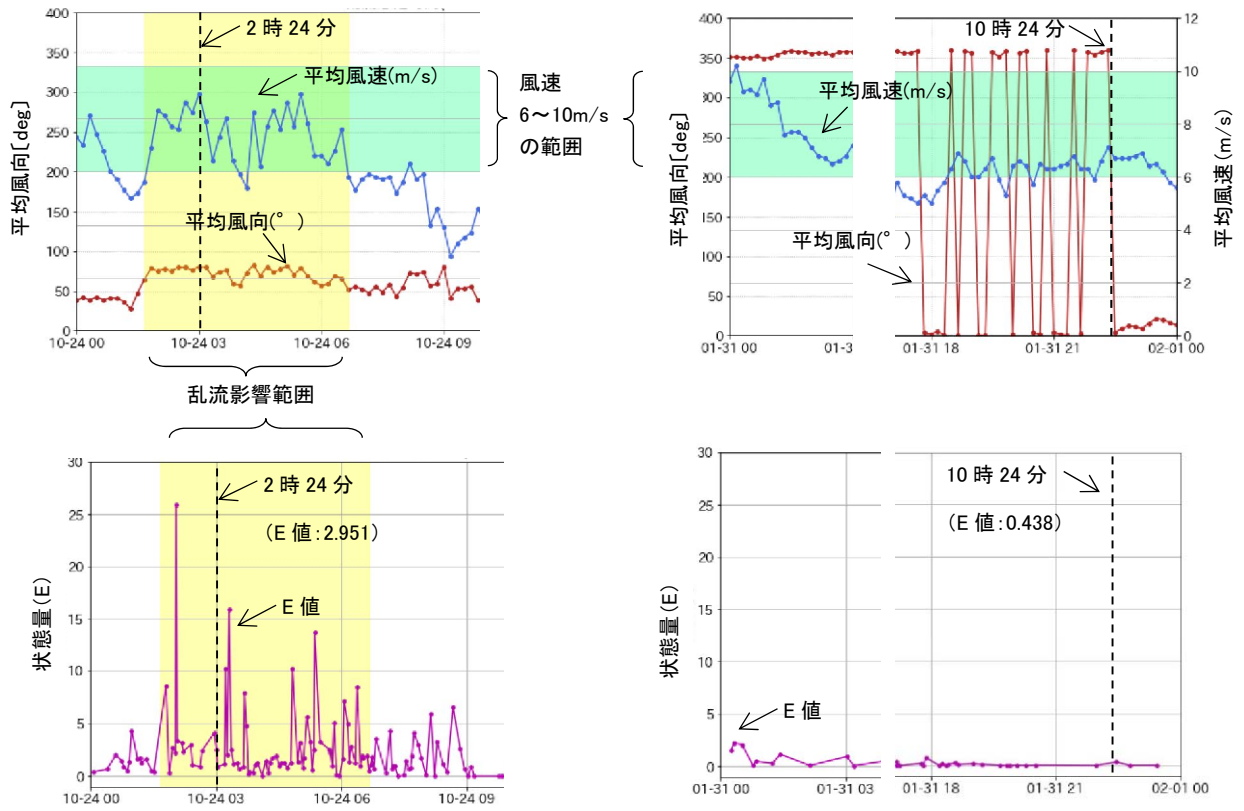
解析方位	日時	風向(°)	風速(m/s)	E値
東風	2019/10/24 2:24	80	7.6	2.951
北風	2020/1/31 22:27	4	6.7	0.438

5. 数値風況シミュレーションの概要

本研究では、4章でのヨーアクチュエータ電流値分析結果を踏まえ、ヨーア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、地形性乱流の影響が大きいと推察された東風と第3章および第4章で差異が確認された北風の計2方位を対象に数値風況シミュレーションを実施した。

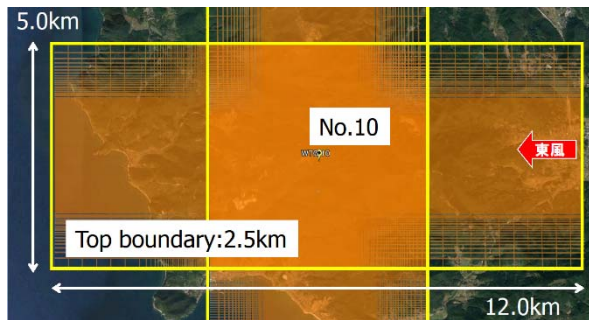
数値風況シミュレーションでは、実地形版RIAM-COMPACTを用いた。

図5に示すように、東風の場合の風況シミュレーション



(a) 東風(期間:2019年10月24日0時~10月24日9時) (b) 北風(期間:2020年1月31日~2月1日0時)
 図4 計測電流およびE値、風況条件の時系列の推移[実測データ]

条件を設定した。地形標高データは、国土地理院の空間解像度10mの標高データを用いた。なお、北風の場合も、東風の場合と同じ条件である。



- ・メッシュ数:496×201×81点(約800万点)
- ・流入風速分布:N=7.0に従うべき乗則分布
- ・水平方向の最小メッシュ幅:約10.0m(不等間隔)
- ・鉛直方向の最小メッシュ幅:約1.5m(不等間隔)

図5 東風の風況シミュレーション条件の概要

6. 計算結果の考察

図6には風車10号機に進入する主流方向風速の分布(瞬間場)を示す。この図を観察すると、東風が吹いた場合、10号機の上流に位置する弁財天山から剥離流(地形性乱流)が形成され、10号機風車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。

風力発電施設の風条件(乱流)の扱いとして、電気事

業法に基づく風力発電施設に関する技術基準を定める省令(風技省令)の第4条で主流方向、主流直交方向、鉛直方向の3方向の乱流を考慮した現地風条件を踏まえて「風圧」を計算することが規定されており、本研究では、数値風況シミュレーションの結果から得られた、乱流評価指標3成分の合成値を活用した風車ヨーシステムに与える危険度の判定の評価指標について提案する。

表2には、東風時及び北風時の風車10号機地点におけるハブ中心の乱流評価指標3成分の合成値を示す。東風の場合、乱流評価指標3成分の合成値は0.23となっている。一方で北風の場合、乱流評価指標3成分は0.16と小さくなっている。文献⁴⁾を参照すると、東風の場合、北風の場合と比較して、3成分全てにおいて上回る結果となっている。このことから、東風時、風車10号機地点では非定常な風向変動が繰返し生じたことにより、ヨーアクチュエータピニオンギアの破損の主要因となったと考えられる。

表2 風車10号機地点におけるハブ中心(地上高60m)の乱流評価指標3成分の合成値

	風速標準偏差(m/s)/流入境界面風速* 主流方向(x)の(u)成分+主流直交方向(y)の(v)成分+鉛直方向(z)の(w)成分の合成値
東風	0.23
北風	0.16

注) *流入境界面風速=10m/s

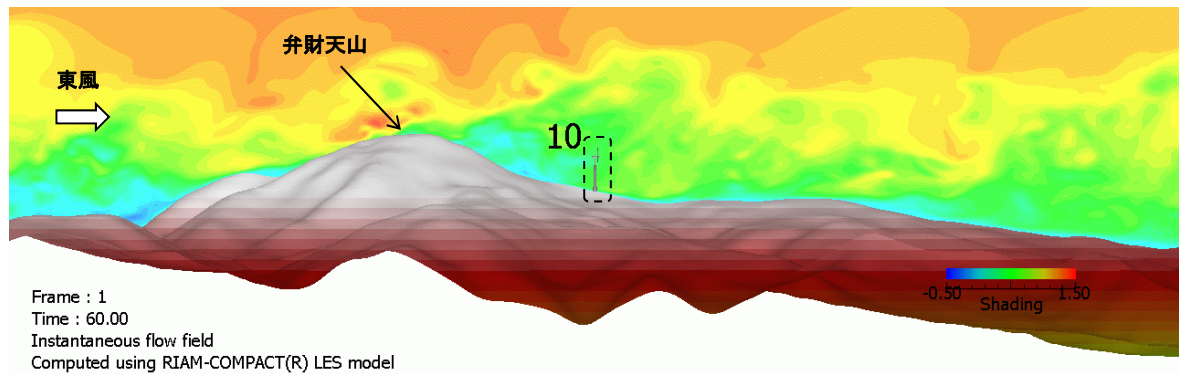


図6 東風時、10号機風車の受ける主流方向(x)の風速分布(瞬間場)

7. 風車ヨーシステム危険度判定指標の提案

文献⁴⁾に示す超音波風向風速計による風速3成分の計測結果から東風時の場合、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、実測データ解析結果と風況シミュレーション結果(乱流評価指標3成分の合成)にも強い相関性が確認された。これにより、図6に示す数値風況シミュレーション結果(複雑地形に起因した地形性乱流)の発生が、風車ヨーシステムのヨーピニオンギアの破損を誘発させたと推測される。本報では複雑地形上に建設された風車ヨーシステムの危険度を判定する目的で、数値風況シミュレーション結果から乱流評価指標3成分の合成値が0.2を超える場合を破損リスク大、0.2以内の場合を破損リスク小と定義する。この指標は地形性乱流が与える影響は風車および風車ヨーシステムの保守・運転を結びつける数値であると考えられる。

8. 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、東風が発生した場合、風車10号機の上流(東方位)に位置する弁財天山(標高519m)が起源となる地形性乱流が発生し、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から出力される「乱流評価指標3成分合成値」を用いることが、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することが、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を計測出来る特殊計測器(岡野バルブ製造(株)製VQ-ORCL装置)や常設計器との関係性を明らかにし風車故障分析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) 川島泰史、内田孝紀他4名:非定常乱流モデルLESによる地形性乱流診断と安全管理への応用、日本風力エネルギー学会主催、第40回風力エネルギー利用シンポジウム、pp.459-462、2018
- 5) 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