

# 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\*1

## Large-eddy simulation of airflow over complex terrain and application to the wind turbine safety management

○川島 泰史\*2, 内田 孝紀\*3, 伊藤 芳樹\*4, 清木 荘一郎\*5, 近藤 勝俊\*6, 古賀 和宏\*7

Yasushi KAWASHIMA, Takanori UCHIDA, Yoshiki ITO, Soichiro KIYOKI, Katsutoshi KONDO, and Kazuhiro KOGA

### 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を実施した。

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)~3)</sup>。今後、日本国内の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高精度な数値風況面からの故障分析手法の確立が必要である。

このような状況を受け、我々の研究グループでは、「実地形版RIAM-COMPACTソフトウェアによる精密な数値風況シミュレーション(数値風況診断)」を実施している<sup>1)</sup>。また、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、風車構造強度へ最も影響を与える風向を特定した<sup>4)</sup>。本研究では、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風車安全管理への応用についても提案を行う。

### 2. 串木野れいめい風力発電所の概要

九電工新エネルギー(株)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)を通過する際に発生する風の乱れ(地形性乱流)の影響が懸念される10号機を研究対象風車とした(図1参照)。

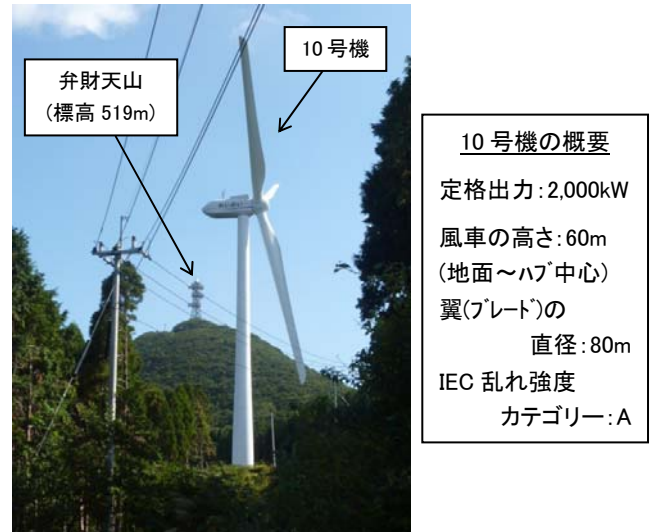


図1 現場の写真

(著者が2015年10月28日撮影)

### 3. 風力発電所疲労荷重データ解析<sup>4)</sup> (実測データ解析)

風車はブレードを通して風エネルギーが入力されることから、ブレード根元の強度評価(ブレードの曲げ荷重評価)は、風車構造強度の評価上、極めて重要である。そのため、本研究では風車10号機のブレード[ブレード3本の根元(ルート部:ハブ接合面から約1.3m)]に電気式歪センサーを設置した。

2015年11月3日0時~2016年3月17日7時において、風車メーカーの協力の下、風車10号機のブレード歪み実測データに基づきDEL[疲労等価荷重(ブレード曲げ)]を解析した結果、東風の際に、風速約6~10m/sの場合、設計値を超えていることが分った。一方で、計測期間で最も出現率の高かった北風の場合は、風速4m/s以上の全風速階級で設計値を下回り、東風と比較してブレード歪みデータに基づくDELに明確な差異があることが確認された(図2参照)。

12方位別の風車ブレードDEL(疲労等価荷重)解析結果などは、文献<sup>4)</sup>を参照して頂きたい。

\*1 平成30年12月5日「第40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)

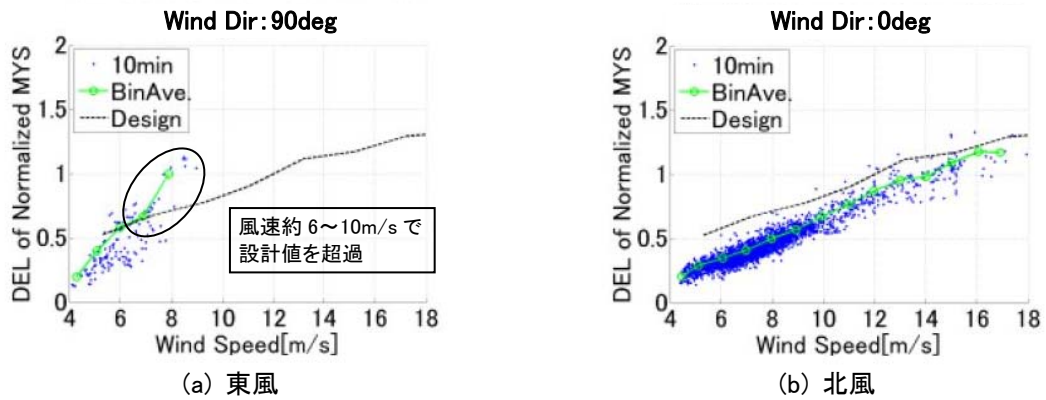
\*3 会員、九州大学応用力学研究所(〒816-8580春日市春日公園6-1、連絡先: takanori@riam.kyushu-u.ac.jp)

\*4 会員、(株)ソニック(〒190-0012東京都立川市曙町1-18-2 一清ビル、連絡先: yoshiki-ito@u-sonic.co.jp)

\*5 会員、(株)日立製作所(〒317-0056茨城県日立市国分町1-1-1、連絡先: soichiro.kiyoki.ga@hitachi.com)

\*6 会員、(株)日立製作所(〒101-8608東京都千代田区外神田1-18-13 秋葉原タビル、連絡先: katsutoshi.kondo.zy@hitachi.com)

\*7 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)



(a) 東風 (b) 北風  
 図2 方位別 DEL(疲労等価荷重)[ブレードフラップ曲げ MYS]比較<sup>4)</sup>  
 (解析対象期間:2015年11月3日0時~2016年3月17日7時)

#### 4. 超音波風向風速計による気流場解析 (実測データ解析)

次に、実測データによる 3 次元的な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、新たに設置した(株)ソニック製 3 次元超音波風向風速計(図 3 参照)データ収録期間 2016 年 12 月 13 日 12 時~2017 年 3 月 27 日 23 時(サンプリング周期 10Hz)に対して、16 方位別に 10 分間の風速・風向・風速標準偏差・乱流強度データを解析した。ここでは、第 3 章において明確な差異が確認された東風に主眼を置いて議論を進める。東風の発生した風速 8m/s 程度の風速標準偏差および乱流強度の解析結果を表 1 に示す。



図3 超音波風向風速計(SAT-900)の設置状況  
 (著者が 2016 年 12 月 13 日撮影)

表 1 に示す結果から、風車 10 号機のハブ高さに進入する現地風条件の三方向[u(主方向)、v(横方向)、w(上方向)]について、u、v、w 全ての風速標準偏差が大きいことが分った。

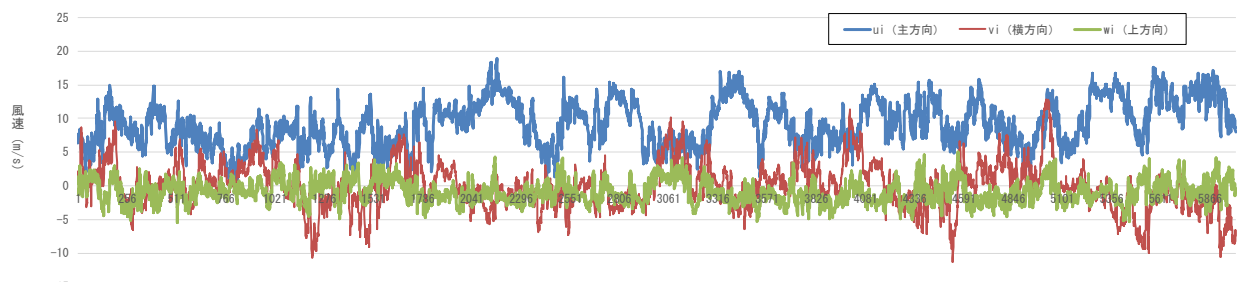


図4 東風の風速 3 成分比較(サンプリング周期 10Hz)  
 (解析対象期間:2017年3月20日15時から10分間値)

表1 東風の風速標準偏差および乱流強度

	平均風速(m/s)	風速標準偏差(m/s)	乱流強度
u	9.16	3.34	0.36
v	-0.03	3.43	0.37
w	-0.93	1.64	0.18

注)解析時間は、2017年3月20日15時から10分間値

図 4 には、表 1 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。解析の結果、東風の wi(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。また、ui(主方向瞬間風速)、vi(横方向瞬間風速)の解析結果から、東風の場合、非定常な風向変動が発生していることも分った。これら、一連の解析結果から、時々刻々と変動する吹き上げ、吹き下げの状況や非定常な風向変動は風車構成機器の疲労蓄積を助長させているものと推測される。

本解析結果を踏まえ、風車構成機器疲労蓄積の評価を行う上で、まずは、乱流評価指標[ $\sigma u$ (風速標準偏差)/U(流入境界面風速=10m/s)]を確認することが重要であると考えられる(表2参照)。

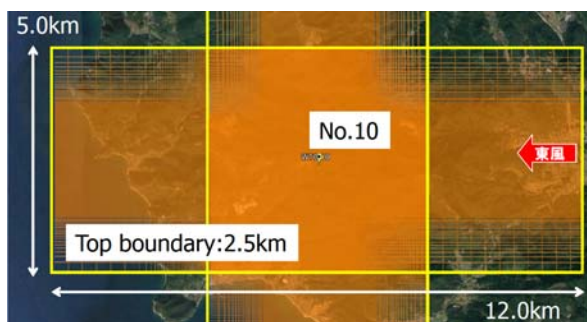
風車 10 号機を対象とした東方位の 3 方向の風速標準偏差および乱流強度の発生については、図 1 に示す 10 号機東側(78deg 方向)約 300m に位置する弁財天山(標高 519m)の影響と推察される。

## 5. 数値風況シミュレーション条件の概要

本研究では、風車構成機器の疲労蓄積に影響を与える風況特性を定量的に評価するため、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<sup>1-3)</sup>。

図4に示すように、東風の場合の風況シミュレーション条件を設定した。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、北風の場合のシミュレーション条件についても、東風の場合と同じである。



- ・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4 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

ここでは、東風の場合に地形性乱流の影響を大きく受けていると推測された風車10号機に主眼を置いて考察を行う。併せて、東風と比較してDELと風速標準偏差が小さかった北風との比較についても考察する。

図5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。

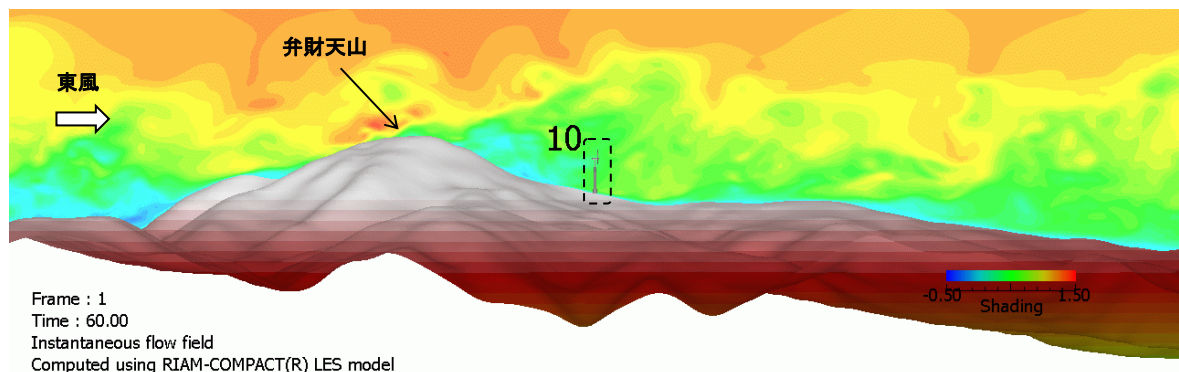


図5 東風時、10号機風車の受ける主流方向(x)の風速分布(瞬間場)

図6は、東風時と北風時の風車10号機立地点における標準偏差3成分の鉛直分布を示す。横軸に示す各標準偏差は流入境界面の最大標高位置における風速  $U$  ( $=10\text{m/s}$ )で正規化している。x方向成分については、文献<sup>3)</sup>で示された、乱流評価指標の値(0.2)を表示している。

本研究では、地形の凹凸を発生起源として生成された地形性乱流の気流変動のみを評価するため、流入気流が有する変動成分(風の息)は考慮していない。図6を観察すると、東風時の標準偏差のx方向成分はブレード受風面のハブ中心から上端で非常に大きな値を示しているのが分かる。

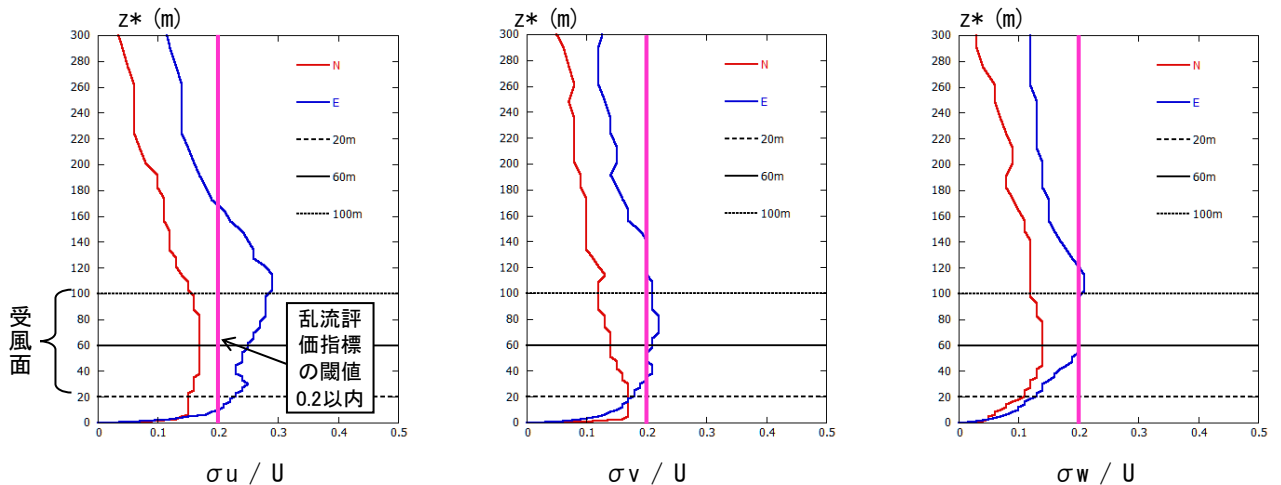
風力発電施設の風条件(乱流)の扱いとして、電気事業法に基づく風力発電施設に関する技術基準を定める省令(風技省令)の第4条で主流方向、主流直交方向、鉛直方向の3方向の乱流を考慮した現地風条件を踏まえて「風圧」を計算することが規定されている。よって、本研究では、数値風況シミュレーションから結果から得られた、乱流評価指標3成分を活用した風車安全管理への応用について提案する。

表2には、東風時および北風時の風車10号機地点におけるハブ中心の乱流評価指標3成分を示す。東風の場合、乱流評価指標[主流方向(x)の(u)成分]は0.24となっている。一方で北風の場合、乱流評価指標は0.10と小さくなっている。表2に着目すると、東風時のy成分もx成分と同程度の大きな値(0.2)を示している。また、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た。

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

風向	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
東風	0.25	0.21	0.20
北風	0.17	0.14	0.14

注) 乱流評価指標 =  $\sigma_u$  (風車ハブ高さ風速標準偏差) /  $U$  (流入境界面風速 = 10m/s)



(a) 主流方向(x)の風速成分(u) (b) 主流直交方向(y)の風速成分(v) (c) 鉛直方向(z)の風速成分(w)

図6 東風時、北風時、10号機風車の受ける風速3成分の乱流評価指標

## 7. 安全管理への応用

東風時において、第4章の実測データ解析の結果(3成分の風速標準偏差)、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)にも強い相関性が確認された。これにより、図5~6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、風車構成機器の金属疲労の蓄積を想定より早く進行させているのではないかと推測された。

従って、複雑地形上に建設された風車の安全管理を目的として、機器故障リスクの大きさを数値風況シミュレーション結果(乱流評価指標3成分)を用いて、事前に気流性状を確認することが重要であると考えられる。

## 8. 結言

鹿児島県いちき串木野市羽島地区に位置する九電新エネルギー(株)が保有する串木野れいめい風力発電所(平成24年11月より運転開始)の風車10号機を対象に、実測データ解析およびラージ・エディ・シミュレーション(LES)に基づいた高解像度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)が起源となり、そこから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おり、このような気流性状は、風車の耐久性への影響と併せて機器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」を用いることが、風車機器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ボルトナット検査などの実施が義務

付けられている。このため、特に山岳部などの複雑地形上に建設された風車立地点では、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や安全管理に繋がると考えられる。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から出力される3次元風況データと風車運転データとの関係性を明らかにし、高度な風車故障分析手法の確立を目指す予定である。

## 謝辞

本研究で対象とした串木野れいめい風力発電所地点において、九電新エネルギー(株)で取得された実測データを使用させて頂きました。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) 川島泰史、内田孝紀: 地形性乱流が風車構造強度に与える影響に関する研究(非定常乱流モデルLESによる地形性乱流診断)、日本風力エネルギー学会論文集、Vol.41、No.2、pp.17-24、2017
- 4) 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