

# 非定常乱流モデルLESによる地形性乱流診断と 風車安全管理への応用

川島 泰史\* 内田 孝紀\*\*

(2017年7月31日受理)

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

Yasushi KAWASHIMA and Takanori UCHIDA

E-mail of corresponding author: [y-kawashima@wjec.co.jp](mailto:y-kawashima@wjec.co.jp)

### Abstract

With the growth in the number of wind powered generator facilities in recent years, such facilities built on complex terrain such as mountainous areas have seen increase in accidents such as damage of turbine blades. In face of the recent growth in the number of wind turbine accidents, the national government has reinforced its safety regulations on wind power generation facilities.

This research was conducted in cooperation with Kyudenko New Energy Co., Ltd., to measure deformation on wind turbine blades and gather actual data on wind conditions for Wind Turbine #10 of the Kushikino Reimei Wind Farm (in operation since Nov. 2012), in Kushikino, Kagoshima Prefecture. Based on the gathered measurement data, the wind direction that most impacted the structural strength of the turbine was identified, and the data was analyzed in detail. To examine into the failure analysis method based on numerical wind loads, numerical wind simulation based on large-eddy simulation (numerical wind diagnosis) was conducted for the wind directions that have been identified. The research focused especially on the 3D air flow structure and wind load characteristics of east wind, which showed the largest impact from terrain-induced turbulence and north wind that showed the least impact and studied the correlation with actual measurement data.

Lastly, a proposal is presented on application on wind turbine safety management based on numerical wind simulation with attention to the requirements in the structural strength of the wind turbine.

**Key words :** *Complex terrain, Terrain-induced turbulence, LES, Safety management*

## 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。定期安全管理審査制度の概要は、電気事業法第55条第1項で定める電気工作物を設置するものは、定期事業者検査を行い、その結果を記録・保存することが義務付けられている。検査対象部位は、ブレード・タワーなどで、部位毎にボルトナット検査などを実施する必要がある。また、その定期事業者検査の実施に係る組織、検査の方法、工程管理等について、登録安全管理審査機関による定期安全管理審査を受審することが義務付けられている。

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>。本研究では、九電工新エネルギー(株)の協力の下、鹿児島県串木野れいめい風力発電所(平成24年11月より運転を開始)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た。得られた計測データから風車構造強度へ最も影響を与えた風向を特定し、詳細なデータ解析を行った。次に、数値風況面からの故障分析手法の検討のため、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と影響の小さかった北風の、3次元的な気流構造とその風況特性に着目し、実測データとの相関性を考察した。

最後に、風車構造強度条件を考慮した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、本研究では図1に示す鹿児島県いちき串木野市羽島地区に位置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)を対象とした。本風力発電所には、日立製作所製2MW風車が10基設置されている。特に、東側に位置する弁財天山(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風車10号機に着目した(図2, 図3, 表1参照)。

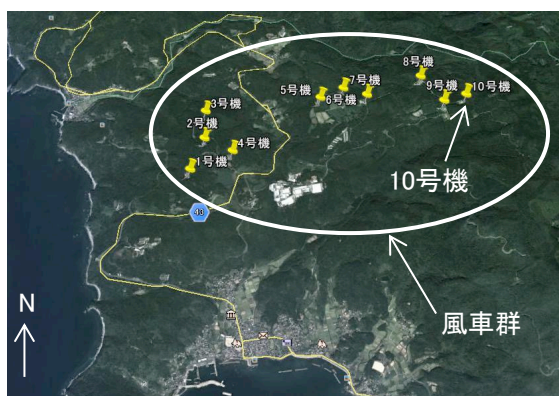


図1 串木野れいめい風力発電所周辺の位置 (Google Earthによる)



図3 弁財天山(標高519m)と10号機の位置関係 (Google Earthによる)

表1 弁財天山(標高519m)と10号機の位置関係

風車No.	標高	ブレード先端高度	離隔距離
10号機	418m	518m	約300m

## 3. 風車疲労荷重データ解析(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(図4参照)。

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(表2、図5参照)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6参照)。

東風及び北風以外のDEL(疲労等価荷重)解析結果などは、文献<sup>5)</sup>を参照して頂きたい。

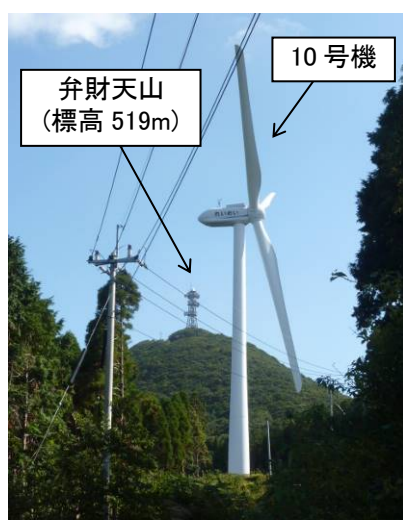


図2 現場の写真 (著者が2015年10月28日撮影)

**10号機の概要**  
 メーカー: 日立製作所  
 型式: HTW2.0-80  
 定格出力: 2,000kW  
 風車の高さ: 60m (地面~ハブ中心)  
 翼(ブレード)の直径: 80m  
 IEC 設計風速(疲労): I A

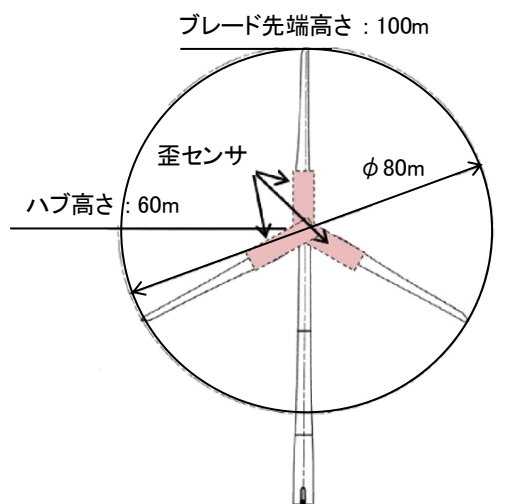


図4 風車10号機のブレード歪計測位置

表2 出現率および方位別平均風速、ハブ高さ60m  
(解析対象期間:2015年11月13日0時~2016年3月17日7時)

地上高	項目	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	計
60m	出現率(%)	22.5	13.8	5.6	4.0	4.4	3.6	7.5	4.3	3.0	2.2	1.2	0.9	1.3	1.8	12.6	11.2	100.0
	平均風速(m/s)	6.1	5.8	4.8	4.1	4.5	4.7	6.7	6.0	5.1	5.0	5.0	3.0	4.6	5.0	9.2	6.6	6.1

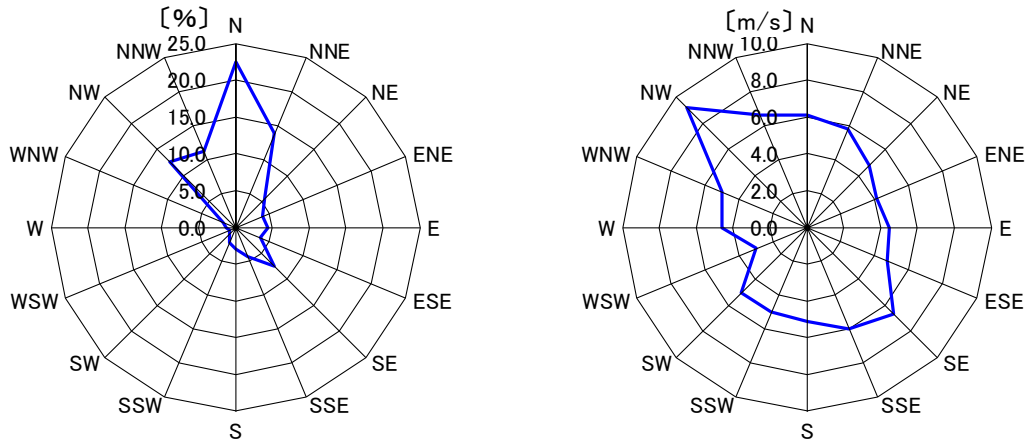
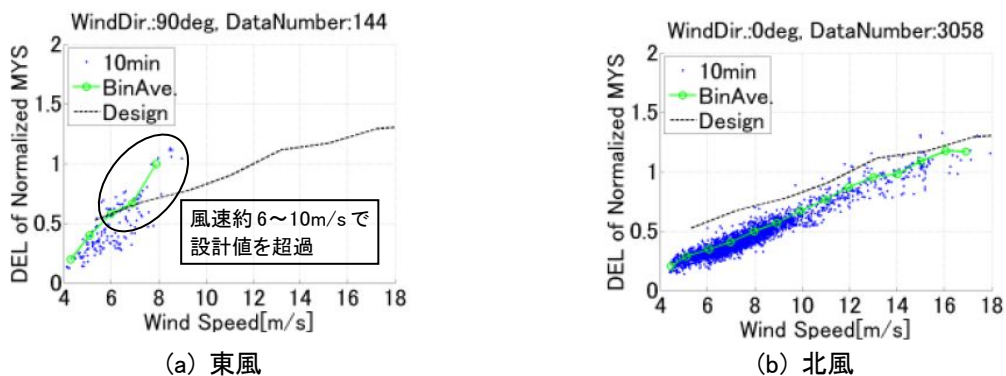


図5 出現率(%) [左]・方位別平均風速(m/s) [右]、ハブ高さ60m  
(解析対象期間:2015年11月13日0時~2016年3月17日7時)



(a) 東風

(b) 北風

図6 DEL(疲労等価荷重)[ブレードフラップ曲げ MYS]比較  
(解析対象期間:2015年11月13日0時~2016年3月17日7時)

#### 4. ナセル風速・風向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 DEL 解析結果と 3 次元的な気流性状の関係を評価するため、風車 10 号機のデータ収録期間 2015 年 11 月 3 日 0 時~2016 年 3 月 17 日 7 時に対して、12 方位別に 10 分間の風速・風向・風速標準偏差データを解析した。紙面の都合上、ここでは表 3 に示す北風および東風の風速標準偏差および乱流強度の解析結果のみを図 7 および図 8 に示す。なお、本研究では発電開始風速を考慮し、風速 4m/s 以上に対応する各種データを解析対象とした。

表3 風向の設定範囲およびデータサンプリング数

	風向の設定範囲	データサンプリング数
		10分間
北風	345° ~ 15°	4,036
東風	75° ~ 105°	496

注) 対象データ: 発電開始風速4m/s以上

一連のデータ解析の結果、図7および図8に示すように、風速10m/s以下の東風の風速標準偏差およびこれに対応する乱流強度の値は、北風に対して非常に大きいことが示された。また、東風の乱流強度は10m/s以下の風速階級においては、IEC乱流強度カテゴリーA<sup>6)</sup>を超える数値が数多く確認された(図8参照)。第3章で既に表示したように、DEL解析結果では10分平均風速9m/s程度において、東風は北風の2倍程度(表4、図9参照)の値を示していた。今回の実測データ解析により、DELと風速標準偏差の関連性が極めて高いことが初めて明らかになった。

風車 10 号機を対象とした 2 方位(北および東)のブレード歪みデータの変動幅、風速標準偏差および乱流強度の差異については、図 2 および図 3 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)の影響と推察された。

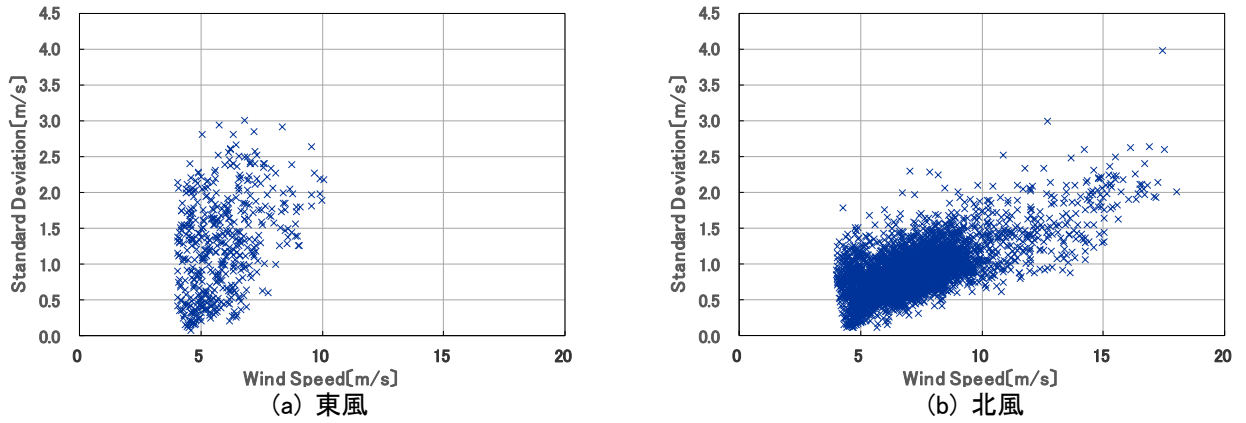


図7 10号機風向別標準偏差の分布比較  
 [実測データ(10分間値)、ハブ高さ60m、2015年11月3日0時~2016年3月17日7時]

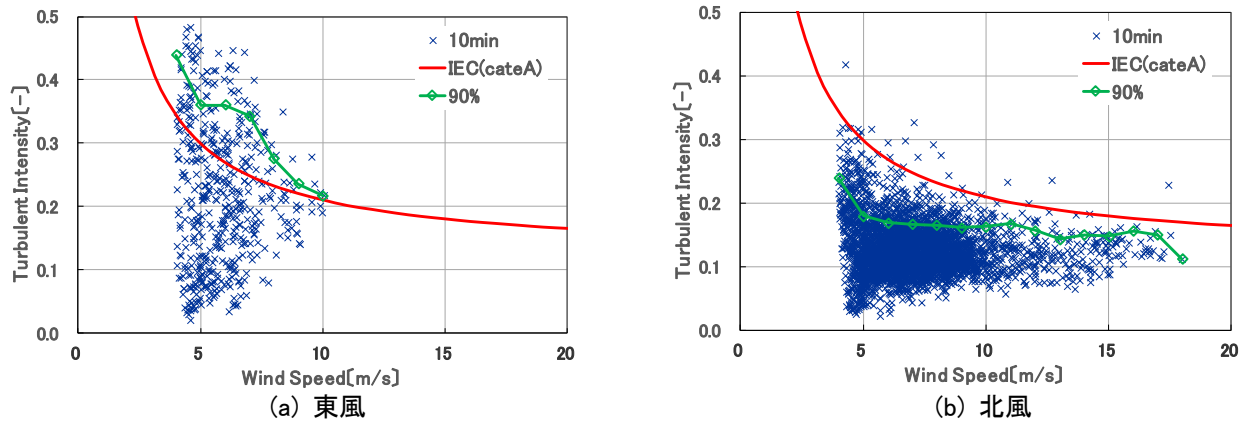


図8 10号機風向別乱流強度の分布比較  
 [実測データ(10分間値)、ハブ高さ60m、2015年11月3日0時~2016年3月17日7時]

表4 実測データ分析及び風況シミュレーション結果(まとめ)

風向	発生日時		平均風速	歪み変動	DEL (ブレード曲げ)	風況シミュレーション結果
						乱流評価指標[境界 風速(10m/s)換算値]
(1) 東風	11/13	9:40~9:50	最大9m/s程度まで上昇 (9.1m/s)	歪み変動大 (振幅大)	2.03	0.24
(2) 北風	11/9	13:30~13:40	最大9m/s程度まで上昇 (9.4m/s)	歪み変動小 (振幅小)	0.99	0.10

注・乱流評価指標 =  $\sigma u$  (ハブ高さ風速標準偏差) /  $U_{in}$  (境界風速 10m/s)

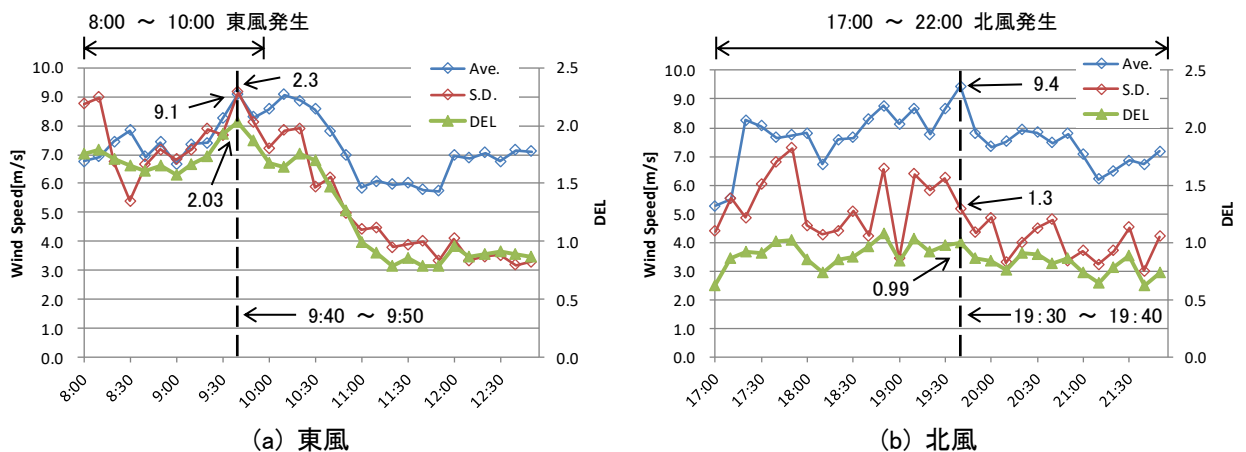


図9 ナセル風速・風速標準偏差及びDEL(10分間値)比較

## 5. 数値風況シミュレーション手法の概要

本研究では、耐久性(ブレード曲げ)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、一般曲線座標系のコロケート格子に基づいた実地形版 RIAM-COMPACT を用いた<sup>1-3)</sup>。ここでコロケート格子とは、計算格子のセル中心に物理速度成分と圧力を定義し、セル界面に反変速度成分にヤコビアンを乗じた変数を定義する格子系である。数値計算法は差分法(FDM; Finite-Difference Method)に基づき、乱流モデルに LES(Large-Eddy Simulation)を採用する。LES では流れ場に空間フィルタを施し、大小様々なスケールの乱流渦を計算格子よりも大きな GS(Grid Scale)成分の渦と、それよりも小さな SGS(Sub-Grid Scale)成分の渦に分離する。GS成分の大規模渦はモデルに頼らず直接数値シミュレーションを行う。一方で、SGS成分の小規模渦が担う、主としてエネルギー消散作用は SGS 応力を物理的考察に基づいてモデル化する。

流れの支配方程式は、フィルタ操作を施した非圧縮流体の連続の式(式(1))とナビエ・ストークス方程式(式(2))である。本研究では、平均風速 5.0~6.0m/s以上の強風場を対象にしているため、大気が有する高度方向の温度成層(大気安定度)の効果は省略した。また風車ウエイクの影響も考慮していない。なお、過去の文献<sup>1-3)</sup>で既に議論しているように、地表面粗度がほぼ一様に分布している場合には、局所的な風に与える影響は地形起伏の方が顕著であるため、本研究では地表面粗度の影響も省略した。計算アルゴリズムは部分段階法(F-S 法)<sup>9)</sup>に準じ、時間進行法はオイラー陽解法に基づく。圧力に関するポアソン方程式は逐次過緩和法(SOR 法)により解く。空間項の離散化は式(2)の対流項を除いてすべて2次精度中心差分とし、対流項は3次精度風上差分とする。ここで、対流項を構成する4次精度中心差分には補間法<sup>10)</sup>を用いる。3次精度風上差分の数値拡散項の重みは、河村-桑原スキームタイプ<sup>11)</sup>の $\alpha=3.0$ に対して $\alpha=0.5$ とし、その影響は十分に小さくする。LESのサブグリッドスケールモデルには、壁面減衰関数を併用した標準スマゴリンスキーモデル<sup>12)</sup>を用い、モデル係数は0.1とした(式(3)~式(8))。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\tau_{ij} \approx \overline{u'_i u'_j} \approx \frac{1}{3} \overline{u'_k u'_k} \delta_{ij} - 2\nu_{SGS} \bar{S}_{ij} \quad (3)$$

$$\nu_{SGS} = (C_s f_s \Delta)^2 |\bar{S}| \quad (4)$$

$$|\bar{S}| = (2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij})^{1/2} \quad (5)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

$$f_s = 1 - \exp(-z^+ / 25) \quad (7)$$

$$\Delta = (h_x h_y h_z)^{1/3} \quad (8)$$

## 6. 数値風況シミュレーション条件の概要

ここでは、数値風況シミュレーションの諸条件を説明する。計算領域は主流方向(x)、主流直交方向(y)、鉛直方向(z)方向に 9.0(x)×8.0(y)×2.5(z) kmの空間を有する。計算領域中の最大標高は523 m、最小標高は0 mである。地形標高データは国土地理院の空間解像度 10mデータを使用した。計算領域の上流側および下流側に付加した袖領域まで含めた格子数は各方向に 301(x)×301(y)×51(z)点の合計約460万点である。x方向およびy方向の格子幅は、それぞれ、30m、26.7mの等間隔分割とし、鉛直方向の最小格子幅は地表面付近に滑らかに引き寄せ、1.6mに設定した。

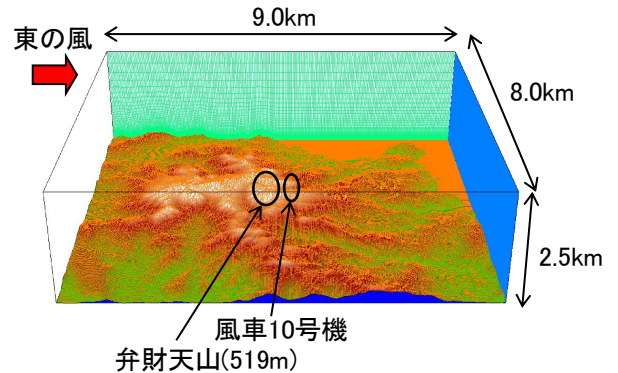


図10 計算領域の鳥瞰図

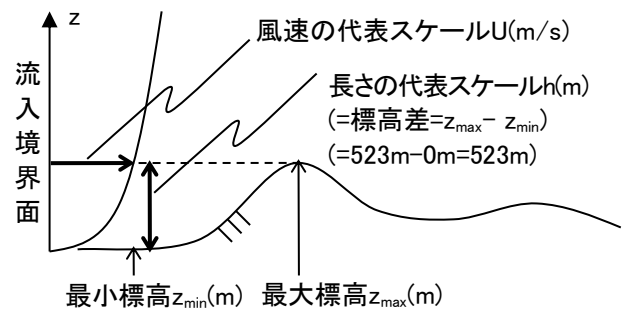


図11 計算における代表スケールの取扱い

本研究における数値風況シミュレーションの境界条件に関して、流入境界面には粗度区分Ⅲ<sup>7)</sup>に従う風速分布

を与えた。なお、本研究では地形の起伏が発生源となる地形性乱流の影響に的を絞った議論を行うため、流入気流の変動は省略した。側方境界面と上方境界面は滑り条件、流出境界面は対流型流出条件とした。地表面には非滑り条件(粘着条件)を課した。式(2)の無次元パラメータ $Re$ はレイノルズ数( $=Uh/\nu$ )であり、文献<sup>9)</sup>を参考にして $Re=10^4$ とした。代表スケールの取扱いは図11に示す通りである。 $h$ は計算領域内の標高差、 $U$ は流入境界面の最大標高位置における風速、 $\nu$ は動粘性係数である。時間刻みは $\Delta t=2 \times 10^{-3}h/U$ とした。なお、北風の場合のシミュレーション条件は、東風の場合と同様である。

## 7. 計算結果と考察

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12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。この図を観察することで、東風が発生した場合、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、風車10号機はこの影響を強く受けていることが視覚的に明らかになった。

図13には、風車10号機の立地点における主流方向(x)の風速(u)に関して、その鉛直分布(瞬間場)の履歴を示す。ここで、風速の鉛直分布は無次元時間100~200において同じ時間間隔で抽出した結果である。図中には風車受風面と流入風速の鉛直分布も併せて示す。図中の風速値は流入境界面の最大標高位置における風速 $U$ で正規化している。縦軸は地上高(m)を示す。このグラフを詳細に観察すると、受風面において風速は時間とともに激しく変動していることが分かる。具体的には、風車立地点における風速の鉛直分布は流入風速分布から著しく逸脱した上、さらに大きく歪んでいる。その結果、極端な速度シアが多数発生している。この様な、極端に大きな速度シアはヨーモータやヨーギアなどの故障にも直結する<sup>1,3)</sup>。

図14および図15には、無次元時間100~200の時間平均(フレーム平均)を施した風況場に基づいて算出した乱流諸量を示す。図14には、主流方向(x)の風速(u)に関して、その鉛直分布を示す(図中の $\langle \rangle$ はフレーム平均を意味する)。図中には10分間(実時間)の平均風速(赤色)も併せて示す。このグラフでは、図13と同様、風速値は流入境界面の最大標高位置における風速 $U$ で正規化している。さらに、各格子点においてフレーム平均値からの正の方向、負の方向への最大変動幅も実線(青色)で表示した。これを詳細に吟味すると、風車10号機の東風の場合、ブレード受風面内では大きな風速の変動幅が発生していることが明確に確認される。これは10号機風車の上流側約300mに位置する標高519mの弁財天山からの剥離流(地形性乱流)の影響である。

図15には、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 $U$ で正規化している。x方向成分については、文献<sup>4)</sup>で示された、乱流評価指標の値(0.2)を実線で表示している。

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15を観察すると、標準偏差のx方向成分はブレード受風面の下方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5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、DELが2.03で乱流評価指標[主流方向(x)の(u)成分]は0.24となっている。一方でDELが0.99となった北風の場合、乱流評価指標は0.10と小さくなっている。表5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5 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)		
	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	0.24	0.20	0.17
北風	0.10	0.11	0.10

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)

次に実測データにより北風時と東風時のアラーム発報回数を分析した結果、東風の場合北風の場合と比較して、「ヨー誤差過大シャットダウン」および「風向風速センサー風向不一致」の風況に起因したアラーム発報が頻発していることが確認された(表6参照)。また同時に、発電停止の頻度が高いことも確認された。この様な起動・停止を繰り返すことは、風車構成機器の故障リスクが高まることになる。これらの結果は、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を示しており、アラーム発報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12~15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

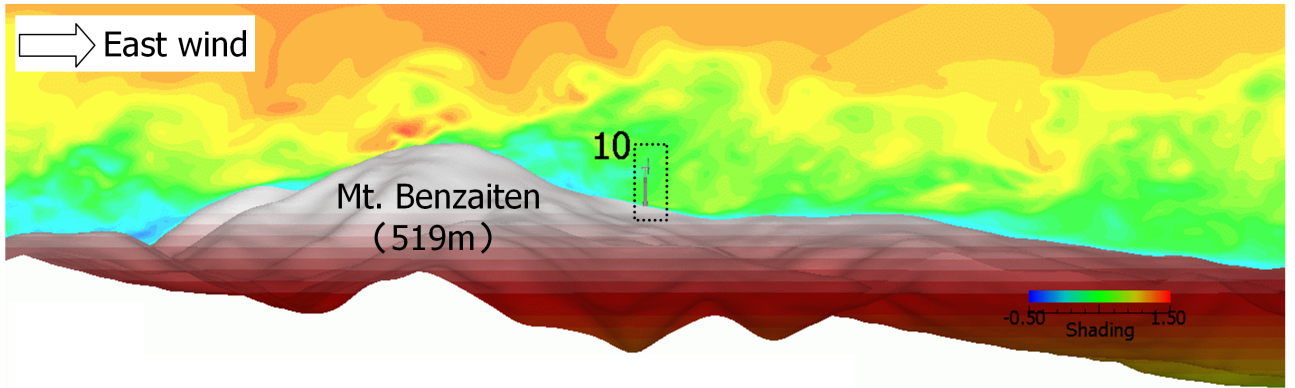


図12 東風時、風車10号機の受ける主流方向(x)の風速分布(瞬間場)

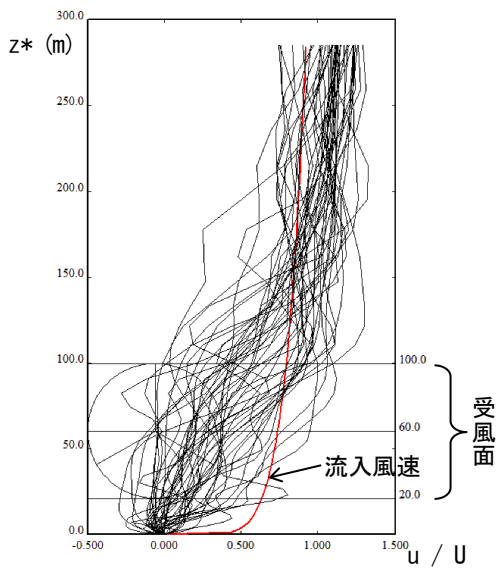


図13 東風時、10号機風車の受ける主流方向(x)の風速成分(u)の変動履歴

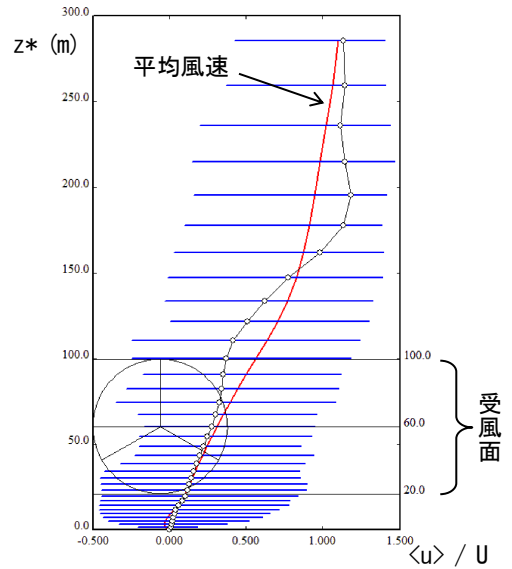
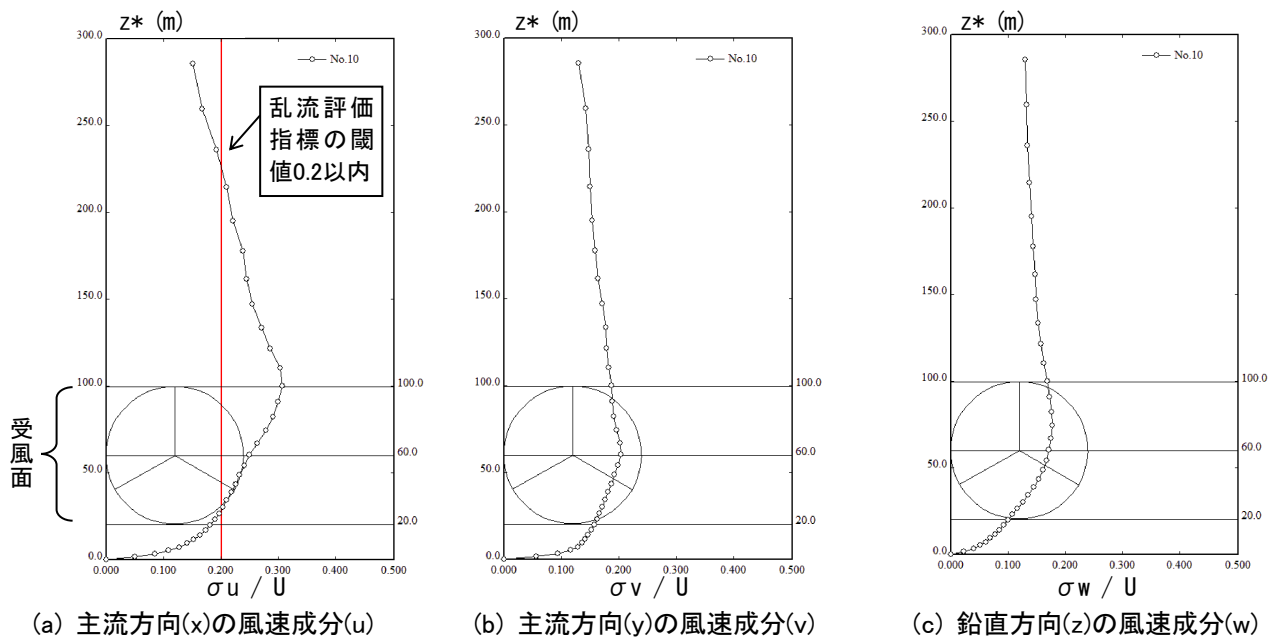


図14 東風時、10号機風車の受ける主流方向(x)の風速成分(u)の変動



(a) 主流方向(x)の風速成分(u)

(b) 主流方向(y)の風速成分(v)

(c) 鉛直方向(z)の風速成分(w)

図15 東風時、10号機風車の受ける風速3成分の標準偏差

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。

表 6 10号機方位別アラーム発報回数比較  
(分析対象期間:2012年11月~2014年1月)

アラーム項目	10号機			他号機 (平均)
	N	E	全方位	
ヨー誤差過大 シャットダウン	39	560	1,448	530
風向風速センサー 風向不一致	5	146	308	80

注)他号機(平均)は、10号機以外の風車9基分の平均

## 8. おわりに

本研究では、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規定されている。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

本研究を行うに際し、九電新エネルギー(株)には実測データを提供して頂きました。また、(有)イー・ウィンドには、実測データの分析などご協力を頂きました。さらに、本研究は九州大学と西日本技術開発(株)との共同研究(研究タイトル:「風車構造強度条件を考慮した数値風況面からの風車最適配置手法の確立」、研究期間:平

成27年10月13日~平成28年03月19日、研究代表者:内田孝紀)、(研究タイトル:「乱流強度による風車機器故障分析手法の確立」、研究期間:平成28年12月6日~平成29年03月18日、研究代表者:内田孝紀)および、九州大学と(株)日立製作所との共同研究(研究タイトル:「地形性乱流が風車構造強度に与える影響に関する共同研究」、研究期間:平成28年01月08日~平成28年03月31日、研究代表者:内田孝紀)、(研究タイトル:「風車構造強度条件を考慮した数値風況面からの風車最適配置手法の確立」、研究期間:平成28年12月14日~平成29年06月30日、研究代表者:内田孝紀)の支援を受けました。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 内田孝紀, 非定常乱流モデル LES による地形性乱流の数値的再現性, 日本風力エネルギー学会論文集, Vol.39, No.4, 通巻 116, pp.53-60, 2016.
- 2) 内田孝紀, LES による数値風況診断に基づいた風車制御とその経済効果, 日本風力エネルギー学会論文集, Vol.39, No.4, 通巻 116, pp.61-68, 2016.
- 3) 内田孝紀, 太鼓山風力発電所のナセル落下事故に対する数値流体力学的アプローチによる一考察, 日本風力エネルギー学会論文集, Vol.39, No.1, pp.6-13, 2015.
- 4) 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
- 5) 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, 2017
- 6) IEC61400-1 ed3.1:Wind turbines-Part1:Design requirements,2014.
- 7) 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説[2010年版]
- 8) 加藤真規子, 複雑地形上の乱れの構造の風洞内再現, 日本風工学会誌, 第 59 号, pp.89-92, 1994.
- 9) Kim, J. and Moin, P., Application of a Fractional-Step Method to Incompressible Navier-Stokes Equations, *J. Comput. Phys.*, Vol.59, pp.308-323, 1985.
- 10) 梶島岳夫, 乱流の数値シミュレーション改訂版, 養賢堂, 2014.
- 11) Kawamura, T., Takami, H. and Kuwahara, K., Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness, *Fluid Dyn. Res.*, Vol.1, pp.145-162, 1986.
- 12) Smagorinsky J., General Circulation Experiments with the Primitive Equations: I. The Basic Equations., *Mon. Weather Rev.*, Vol.91, pp.99-164, 1963.