

# 日本風力エネルギー学会 論文集

平成29年8月 第41巻 第2号 (通巻 第122号)

## 目 次

### 論 文

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)

川島泰史、内田孝紀、清木荘一郎、近藤勝俊……………17

# Journal of Wind Energy, JWEA

---

Vol.41 No.2 (Serial No.122) August 2017

---

## CONTENTS

### Technical Paper

A research of the effects of terrain-induced turbulence on the wind turbines fatigue load (Large-eddy simulation of airflow over complex terrain)

Yasushi KAWASHIMA, Takanori UCHIDA, Soichiro KIYOKI, Katsutoshi KONDO .....17

# 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)

A research of the effects of terrain-induced turbulence  
on the wind turbines fatigue load  
(Large-eddy simulation of airflow over complex terrain)

川島 泰史<sup>\*1</sup>                      内田 孝紀<sup>\*2</sup>                      清木 荘一郎<sup>\*3</sup>                      近藤 勝俊<sup>\*4</sup>  
Yasushi KAWASHIMA              Takanori UCHIDA              Soichiro KIYOKI              Katsutoshi KONDO

<sup>\*1</sup> Group Manager, Renewable Energy Group, WEST JAPAN ENGINEERING CONSULTANTS, INC. Denki Bldg. Kyosokan, 7F, 1-82, 2-Chome Watanabe-dori, Chuo-ku, Fukuoka, 810-0004, Japan.  
<sup>\*2</sup> Associate Professor, Research Institute for Applied Mechanics (RIAM), Kyushu University  
<sup>\*3</sup> Engineer, Wind Turbine Generator System Department, Natural Energy Generation Systems Production Division, Power Business Unit, Hitachi, Ltd., 1-1, Shirogane-cho 1-chome, Hitachi-shi Ibaraki-ken, 316-0035, Japan.  
<sup>\*4</sup> Engineer, Wind Turbine Business Department, Renewable Energy Solutions Division, Power Business Unit, Hitachi, Ltd., Akihabara Daibiru Building, 18-13, Soto-Kanda 1-chome, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8608, Japan.

## Abstract

Recently, the problem of the availability factor being lower than that originally anticipated has become manifest with wind power stations built on complex terrains. In other words, troubles have occurred such as an extreme decrease in the generation output, failures of components inside and outside wind turbines like yaw motors and yaw gears, and cracking on wind turbine blades. As one of the causes of the occurrence of these troubles, the effects of wind turbulence (terrain-induced turbulence) is pointed out. In this study, we investigated and studied the effects of terrain-induced turbulence on the structural strength of wind turbines through the measurement of strains in wind turbine blades and of wind condition data in order to establish a method of optimum arrangement of wind turbines based on numerical wind condition data with the conditions of structural strength of wind turbines taken into consideration. The investigation and study were conducted on wind turbine 10 of the Kushikino Reimei Wind Power Station in cooperation with Kyudenko New Energy Corporation (commissioned in November 2012). Following this, we conducted numerical wind condition simulation (diagnosis of terrain-induced turbulence) of the effects of the properties of air flow on the structural strength of wind turbines from the viewpoint of numerical wind conditions, by using an actual terrain version of RIAM-COMPACT based on large eddy simulation (LES), and we successfully reproduced the characteristics of wind conditions and the structure of three-dimensional air flow. These results, to be reported below, have enabled us to determine the threshold values for the quantitative optimum arrangement plan on the basis of the actual terrain version of RIAM-COMPACT.

キーワード：複雑地形，地形性乱流，LES  
Key Words：Complex terrain, Terrain-induced turbulence, LES

## 1. はじめに

最近になり，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，稼働率が当初の予想を下回る，すなわち，発電出力が著しく低下している風車や，風車内外の故障（例えば，ヨーモーターやヨーギアの故障，風車ブレードのクラック発生など）の問題が顕在化している．上記の発生メカニズムの1つとして，風車直近の僅かな地形起伏の変化が起源となり，そこから発生する風の乱れ（地形性乱流）の影響が指摘されている<sup>1)~3)</sup>．

今後，日本国内の陸上風車の場合，適地を求めて，さらに山岳部などの複雑地形に風車建設が進められることが予想される．よって，風車事故や故障を低減する高精度な風車配置評価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，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た．得られた計測データに基づいて風車構造強度へ最も影響を与える風向を特定し，詳細なデータ解析を実施した．次に，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

\*1 西日本技術開発(株) 火力技術部 技術調査グループ 課長  
(〒810-0004 福岡市中央区渡辺通 2-1-82 電気ビル共創館 7F)  
E-mail:y-kawashima@wjec.co.jp

\*2 九州大学応用力学研究所 准教授

\*3 (株)日立製作所

\*4 (株)日立製作所

(原稿受付：2017年3月27日)

値風況診断)を行った。特に、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最適配置計画法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 Fig. 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(Fig. 2, Fig. 3, Table 1参照)。

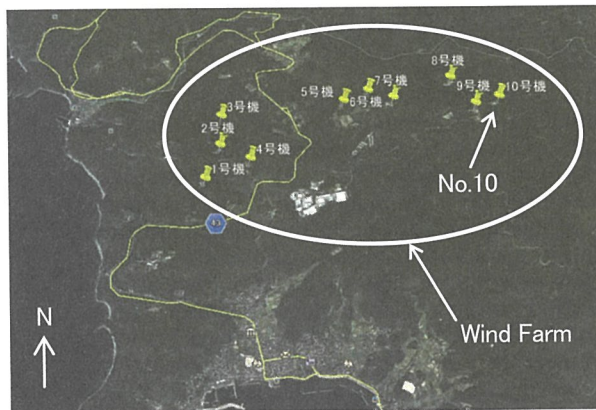


Fig. 1 Map of the area around Kushikino Reimei Wind Power Station (Google Earth)

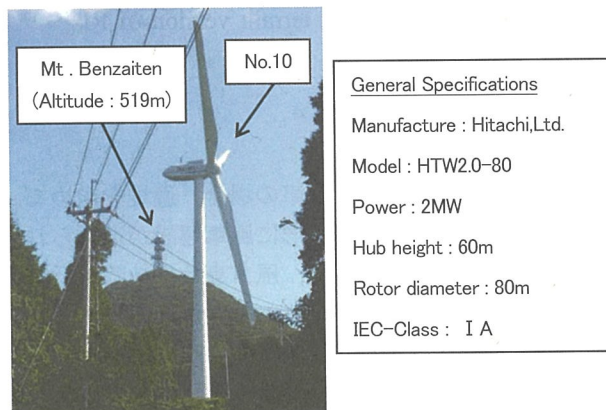


Fig. 2 Photo of No. 10 wind turbine

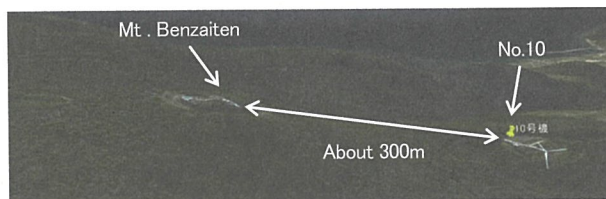


Fig. 3 Positional relationship between Mt. Benzaiten (Altitude : 519m) and No. 10 wind turbine (Google Earth)

Table 1 Positional relationship between Mt. Benzaiten (Altitude : 519m) and No. 10 wind turbine

Wind turbine No.	Altitude	Blade tip height	Offset distance from wind turbine
10	418m	518m	About 300m

## 3. 風車ブレード歪データ解析(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(Fig. 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10号機のブレード歪み実測データを解析した結果、2015年11月13日においてブレード歪み変動が最も大きいことが分かった。この結果を受け、風車メーカーの協力の下、疲労荷重への影響に関して風車運転データとブレード歪み計測データをさらに解析した結果、9時40分から10分間の東風時(10分平均風速9.1m/s)においてDEL[疲労等価荷重(ブレード曲げ)]が2.03(同じ気流性状の風が継続して発生した場合5.88年で設計荷重に達する)となることが確認された(Fig. 6参照)。

本研究では、DELが最も大きい値を示した東風と、その他の方位の比較を行った。計測期間で出現率の最も高かった北風(Table 2, Fig. 5参照)を対象として、ブレード歪み計測データおよびDELの比較を行った。その結果、平均9m/s程度の風が発生した時間帯において、北風時のDELは0.95程度となり、東風と比較してブレード歪みデータの変動幅およびDELに明確な差異があることが確認された(Fig. 7, Table 4参照)。

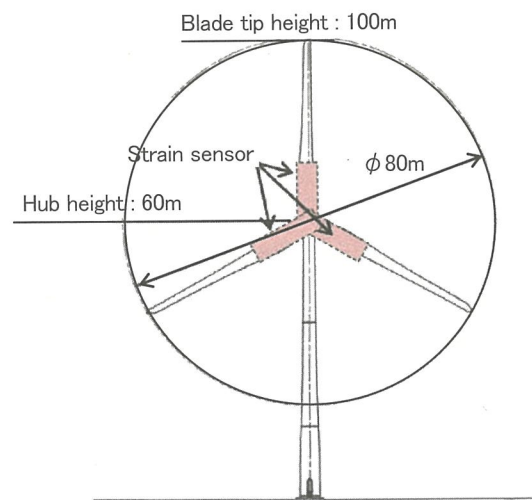


Fig. 4 Blade strain measurement positions, No. 10 wind turbine

Table 2 Frequency distribution and average wind speed at a hub height (= 60m)  
(Analysis period : 2015.11.13, 0:00 ~ 2016.3.17, 7:00)

height	item	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	total
60m	Frequency distribution (%)	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
	Average wind speed (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

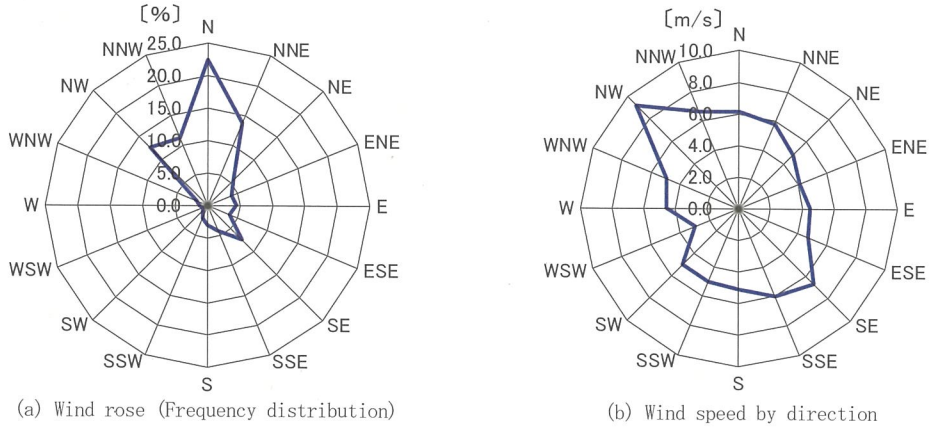


Fig.5 Frequency distribution (%) [left] and average wind speed (m/s) [right] at a hub height (= 60m)  
(Analysis period : 2015.11.13, 0:00 ~ 2016.3.17, 7:00)

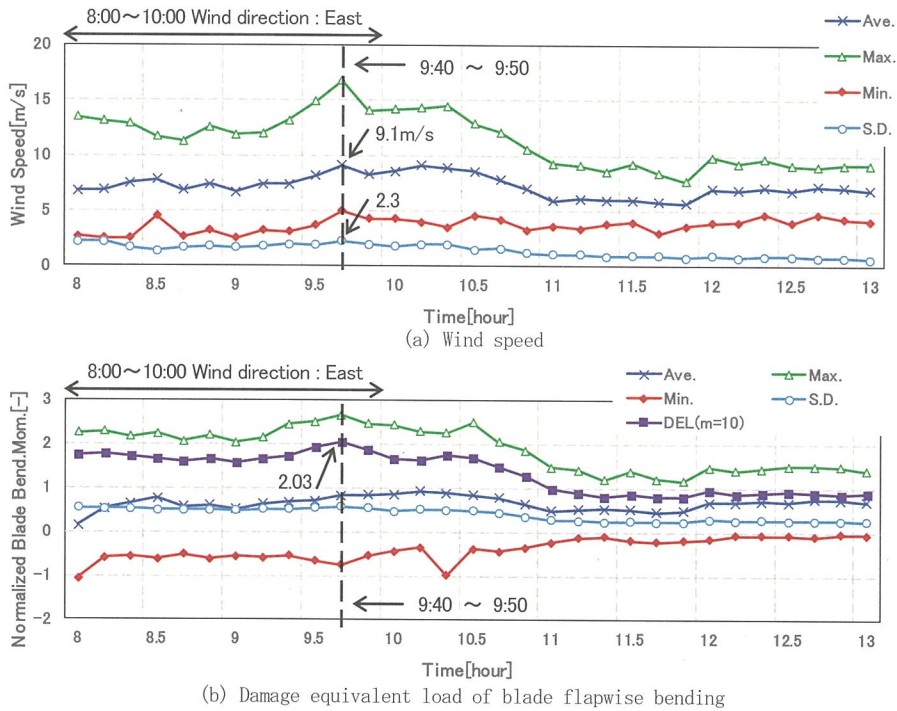


Fig.6 Time series data (Interval : 10 minutes, Analysis period : 2015.11.13, 8:00 ~ 13:00)

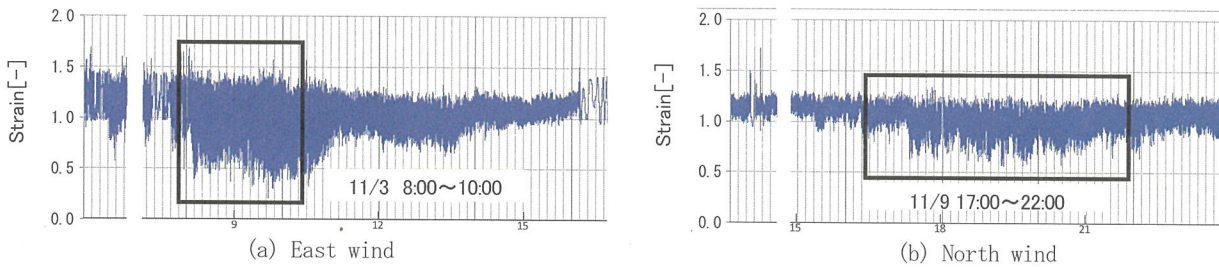


Fig.7 Blade strain data (Blade flapwise bending data) in the case of two wind directions  
(Interval : 0.02 second, Average wind speed : 9m/s)

#### 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、16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Table 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Fig. 8およびFig. 9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。

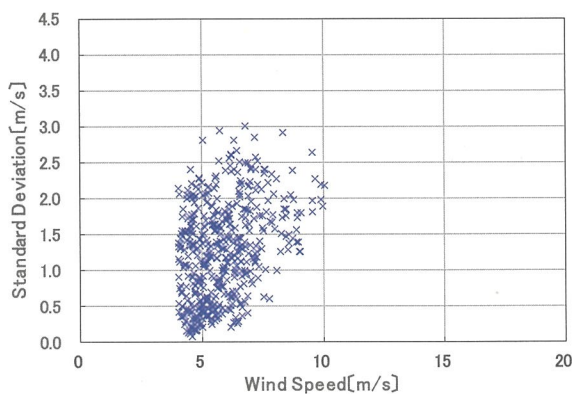
Table 3 Wind direction range and data number

	Wind direction ranges	Data number
		10 minutes average
North wind	$0^\circ \pm 15^\circ$	4,036
East wind	$90^\circ \pm 15^\circ$	496

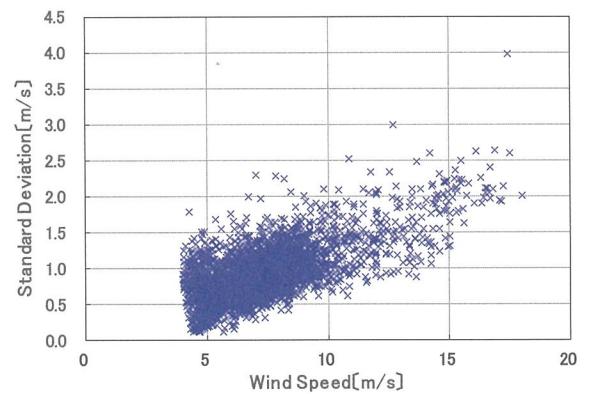
Note) Target data: more than 4m/s (Cut-in wind speed)

一連のデータ解析の結果、Fig. 8およびFig. 9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>4)</sup>を超える数値が数多く確認された (Fig. 9参照)。第3章で既に示したように、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 (Table 4参照) 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、Fig. 2およびFig. 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。

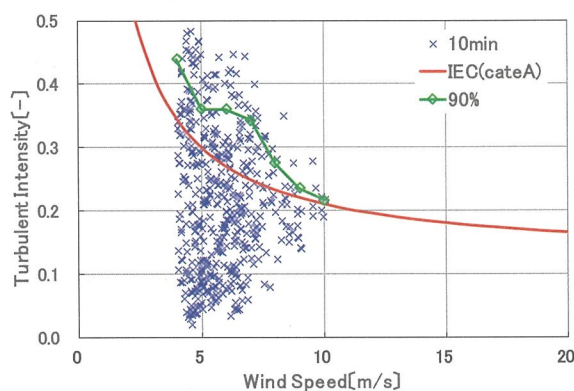


(a) East wind

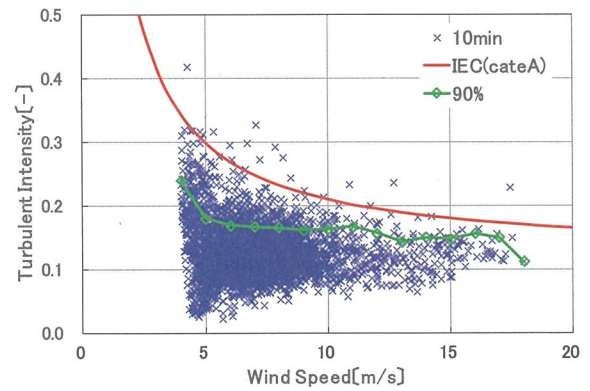


(b) North wind

Fig. 8 Standard deviation distribution in the case of two wind directions at a hub height (= 60m)  
(Interval : 10 minutes, Analysis period : 2015. 11. 3, 0:00 ~ 2016. 3. 17, 7:00)



(a) East wind



(b) North wind

Fig. 9 Turbulence intensity distribution in the case of two wind directions at a hub height (= 60m)  
(Interval : 10 minutes, Analysis period : 2015. 11. 3, 0:00 ~ 2016. 3. 17, 7:00)

## 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5.0~6.0 m/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>7)</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>8)</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>9)</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>10)</sup>を用い、モデル係数は0.1とした (式(3)~式(8))。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

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

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

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

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

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

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

## 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12.0 (x) × 2.0 (y) × 2.6 (z) kmの空間を有する。但し、計算領域の上流側には人工的な袖領域を設定し、97%の割合で地形の凹凸を平坦地まで減少させた。同様に下流側にも袖領域を付加した。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2,401 (x) × 401 (y) × 101 (z) 点の合計約9,800万点である。x方向およびy方向の格子幅は、5m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、1.5mに設定した。

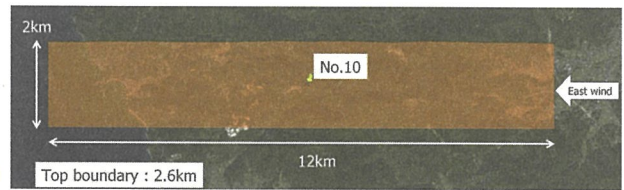


Fig. 10 Computational domain

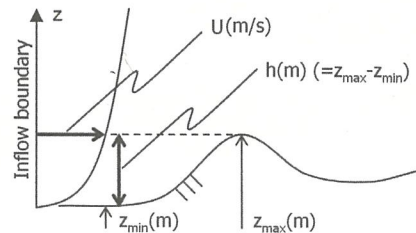


Fig. 11 Characteristic two scales (U and h)

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>5)</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>6)</sup>を参考にして $Re=10^4$ とした。代表スケールの取扱いはFig. 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(風速9m/s程度の実測データ解析)との比較についても考察する。

Fig. 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。

Fig. 13には、東風が発生している際の風車立地点における速度ベクトルの鉛直分布(瞬間場)を示す。Fig. 14には、Fig. 13の時刻に対応した主流方向風速の鉛直分布(瞬間場)を示す。同図には、10分間(実時間)の平均風速(紫線)と、それからの変動振幅(青線)も示す。この図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。

Fig. 15には、風車ハブ高さ(地上高60m)における主流方向(x)の風速成分uの時系列データ(実時間で10分間)を示す。Fig. 15(a)に示す東風の場合、Fig. 15(b)に示す北風の場合と比較して風速の変動幅が大きいことが分かる。また、Fig. 15(a)に示す東風の風速変動には、実時間で6~7秒程度の周期性が存在することも明らかになった。一方、DELが0.95程度となった北風の場合、東風と比較して風速の変動幅は小さく、標準偏差は0.99m/s程度となった(Fig. 15(b)参照)。

本研究では、数値風況シミュレーション結果を活用した風車最適配置計画法を提案する。この目的に対し、数値風況シミュレーション結果より算出される乱流評価指標 $[=\sigma_u$ (風車ハブ高さ風速標準偏差)/ $U$ (流入境界面風速=10m/s)]を新たに定義する。Fig. 15に示す結果から算出した新たな数値指標を、実測データと併せてTable 4に示す。Table 4に着目すると、第4章(実測データ解析)で得られたDELと風速標準偏差との強い相関性が、数値風況シミュレーション結果からも同様に確認される。加えて、Fig. 12~Fig. 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された。

## 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工新エネルギー(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い

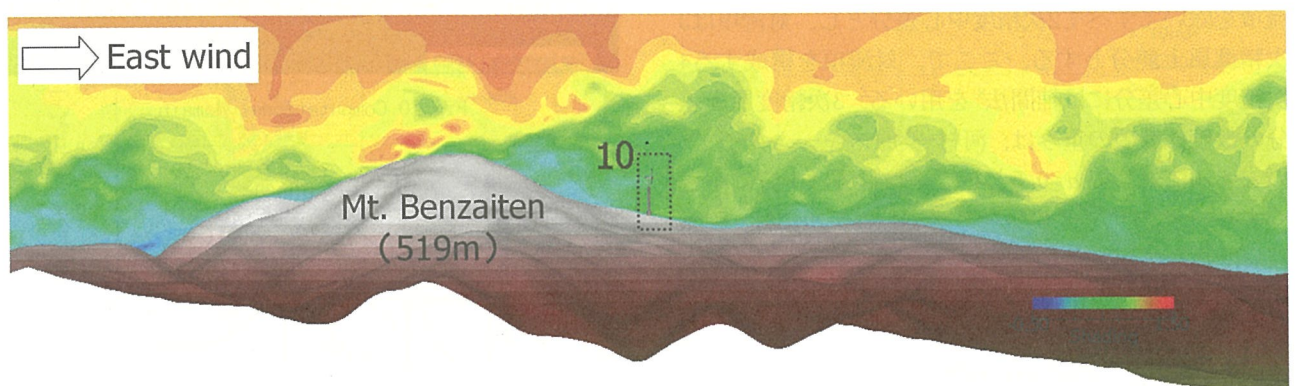


Fig. 12 Distribution of a streamwise wind speed component along vertical cross-sections which include a wind turbine 10, Instantaneous flow field, East wind



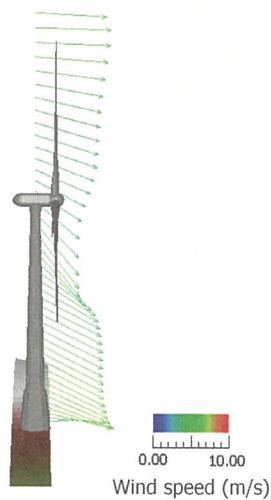


Fig. 13 Wind velocity vectors at a wind turbine No. 10, Instantaneous flow field, East wind

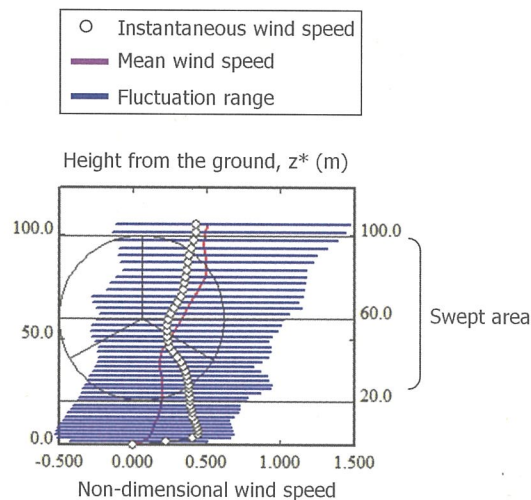
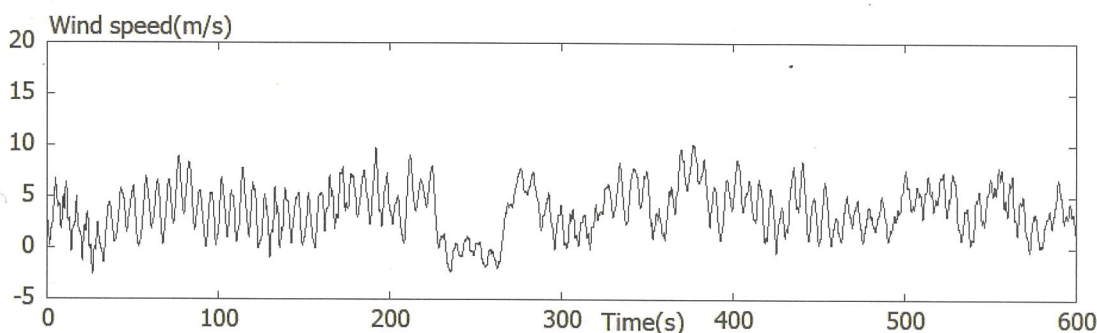
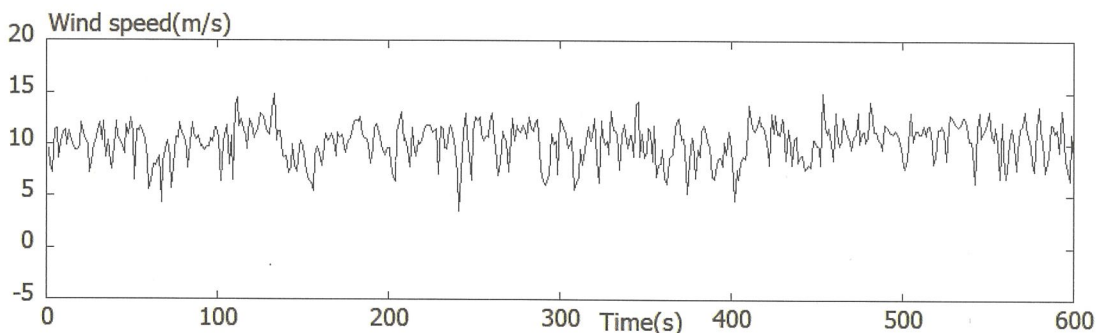


Fig. 14 Vertical profiles of a streamwise wind speed component at a wind turbine No. 10, East wind



(a) East wind



(b) North wind

Fig. 15 Time-series data of a streamwise wind speed component

Table 4 Measured data analysis and LES simulation results (Summary)

Wind direction	Occurrence		Average wind speed	Blade strain	DEL(Blade flapwise bending)	Simulation results
	Days	Time				Turbulence evaluation index
East wind	11/13	8:00~10:00	about 9m/s	Large fluctuation	2.03	0.236
West wind	11/9	17:00~22:00		Small fluctuation	0.95	0.099

Note) Turbulence evaluation index =  $\sigma_u$  (standard deviation at a hub height) /  $U$  (inlet boundary wind speed (= 10m/s))

ることが示された。

実測データ解析により、平均9m/s程度の風が発生した場合、東風は北風時と比べて、DEL (ブレード曲げ) が約2倍と大きくなっていることが示された。また、数値風況シミュレーション結果に基づき、我々が新たに提案する「乱流評価指標」においても、東風時で0.236、北風時で0.099となり、実測データとほぼ同様な傾向が再現された (Table 4参照)。このことから、ブレード歪み実測データに基づくDEL (ブレード曲げ) の影響と、数値風況シミュレーション結果に基づき算出された「乱流評価指標」に強い相関性があることが明らかになった。また同時に、これまで我々のグループにて風車配置基準として一般的に使用してきた「乱流評価指標0.2以内」がDELを軽減する配置基準として望ましいことも初めて裏付けられた。

一連の定性的かつ定量的な考察を通じて、風車計画段階においてRIAM-COMPACTから出力される「乱流評価指標」を用いることにより、耐久性 (ブレード曲げ) を加味した風車配置計画が可能であることが明らかになった。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、九電工新エネルギー(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)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)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) IEC61400-1 ed3.1:Wind turbines-Part1:Design requirements,2014.
- 5) 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 [2010年版]
- 6) 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.
- 7) 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..
- 8) 梶島岳夫, 乱流の数値シミュレーション改訂版, 養賢堂, 2014.
- 9) 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.
- 10) Smagorinsky J., General Circulation Experiments with the Primitive Equations: I. The Basic Equations., *Mon. Weather Rev.*, Vol.91, pp.99-164, 1963.

## 風力エネルギー学会 論文集

第41巻 第2号

平成29年8月

発行

一般社団法人日本風力エネルギー学会

〒101-0021 東京都千代田区外神田2-13-7

ダイニチ神田ビル4階

Tel : 03 (3526) 3400

Fax : 03 (3526) 3410

HP : <http://www.jwea.or.jp>

E-mail : [info@jwea.or.jp](mailto:info@jwea.or.jp)

印刷所

日本印刷株式会社

〒170-0013 東京都豊島区東池袋4-41-24

Tel : 03 (5911) 8660 (代)

Fax : 03 (3971) 1211

**(禁無断転載)**