

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02053

研究課題名(和文) 地形起因の大気乱流が風車の構造強度・疲労寿命に与える影響の実機検証研究

研究課題名(英文) A verification study of the effects of topographically-induced atmospheric turbulence on the structural strength and fatigue life of wind turbines

研究代表者

内田 孝紀 (Uchida, Takanori)

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：90325481

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：2011年3月11日に発生した東日本大震災や、2012年7月から施工される再生可能エネルギーの固定価格買い取り制度(FIT)を受け、風力発電に大きな注目が集まっている。本研究では、非定常乱流場の解析が可能な流体工学CFDモデルRIAM-COMPACTを用いて、複雑地形上の風況解析を実施し、乱流が風車に影響を与えるメカニズムを明らかにした。さらに、風車相互の干渉でウィンドファーム全体の発電電力量が低下しないよう、その離隔距離を決めることは極めて重要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一連の研究成果に基づいて、地形性乱流が大型風車のブレードに与える2種類の新しい定量化指標を提案することに成功しました。この指標を有効に活用することで、風車の「重大事故」を未然に防ぎ、洋上および陸上の大規模風力発電の適切な普及・拡大に大きく貢献することが期待されます。

研究成果の概要(英文)：It is highly important in Japan to choose a good site for wind turbines, because the spatial distribution of wind speed is quite complicated over steep complex terrain. We have been developing the unsteady numerical model called the RIAM-COMPACT (Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Computational Prediction of Airflow over Complex Terrain). The RIAM-COMPACT is based on the LES (Large-Eddy Simulation). In the present paper, the reproduction method of airflows over steep complex terrain using RIAM-COMPACT CFD model. In addition, we carried out the large-eddy simulation (LES) of the wake generated behind the wind lens turbine (WLT) under optimal tip speed ratio.

研究分野：風工学

キーワード：風力発電 数値流体力学 乱流モデル 大気乱流 複雑地形 風車ウエイク

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

風力エネルギーの有効利用に関心が集まる中、風車の適地は海岸地区から山間部に移動しており、複雑地形上に風車を建設せざるを得ない状況にある。最近では、風車近傍の僅かな地形の凹凸や地表粗度の急変が作り出す風の乱れ(地形乱流)が原因で、①風車の発電成績が計画段階よりも著しく悪い、②風車の故障が多発する、などの事例が新聞などで数多く報道されて問題になっている。

### 2. 研究の目的

本研究では、そのメカニズムを数値シミュレーションで再現し解明する。これらの問題解決に向け、独自に開発予定の地形データ構築法で風車周辺の土地造成状況を精緻に再現する。また、散発的に存在する樹木などの地表粗度の影響も考慮する。野外観測データと比較し、風車に対するウィンドリスクの定量化と視覚化を試みる。本テーマは風力発電分野では、初の試みであり、早急に解決すべき課題である。現在の風力発電分野では、風車立地後の発電量低下や風車内外の故障に繋がる地形乱流の発生メカニズム、それらの3次元的な挙動、風車に対する定量的な影響(リスク)はほとんど解明されておらず、コンピュータシミュレーションで調査する技術も見当たらない。

本研究開発を遂行すれば、地形乱流に起因した風車トラブル(発電量低下や風車内外の故障など)の原因が明らかになる。同時に、その閾値(安全か否かの基準値)も明らかになる。こうした知見は、風力発電の学術的進歩に大きく貢献するばかりでなく、風力発電の産業界にも極めて大きなインパクトを与える。具体的には、既に建設された風車を有する自治体や事業者には、地形乱流に起因した風車トラブルの原因究明とその回避策の提案で貢献できる。売電による財源確保を掲げる自治体や事業者にとっては、風車の新規地点の探査や建築確認申請に必要な設計風速の高精度な評価が可能になる。さらに、今回の知見が風車建設後の維持・管理システムに反映されれば、効率的な風車(ウィンドファーム)の運用にも繋がる。一方、環境との共生も重要である。野鳥が風車に巻き込まれる、いわゆるバードストライクは最重要検討課題である。最近になり、野鳥の飛来ルートは局所的な風の道であることが分かってきた。本成果を利用すれば、この風の道を事前に可視化でき、バードストライクの回避に寄与できる。

### 3. 研究の方法

本研究では、先端的数値風況予測モデルRIAM-COMPACT(リアムコンパクト)をコア技術に、下記に示す研究開発を実施し、風車立地後の発電量低下や風車内外の故障に繋がる地形性乱流の力学的発生メカニズム、風車ブレードの回転に伴う乱気流の力学的発生メカニズム、それらが風車構造強度(疲労荷重)に与える影響を、実際に稼働している山間部の大型風力発電所において実証した。

### 4. 研究成果

本研究で対象にしたのは、2012年11月より運転を開始した鹿児島県の串木野れいめい風力発電所です。串木野れいめい風力発電所には、日立製作所製の2MW商用大型風車(ハブ高さ60m、ブレード直径80m)が10基設置されています(図1)。本研究では、ターゲット風車である10号機風車のブレード3枚の根元(ルート部:ハブ接合面から約1.3mの位置、図2)に2種類の電気式の歪ゲージを設置し、この測定値と風車運転基本情報(ナセル風向、ナセル風速など8項目)を同期計測するシステムを構築しました。このシステムを用いて、実測データを50Hz(0.02間隔、1秒間に50回)にて収集しました。ナセル風向およびナセル風速の実測データは、風車ナセル上に設置されている風車制御用の風向センサーおよび風速センサー2セットの平均値を使用しました(図2)。

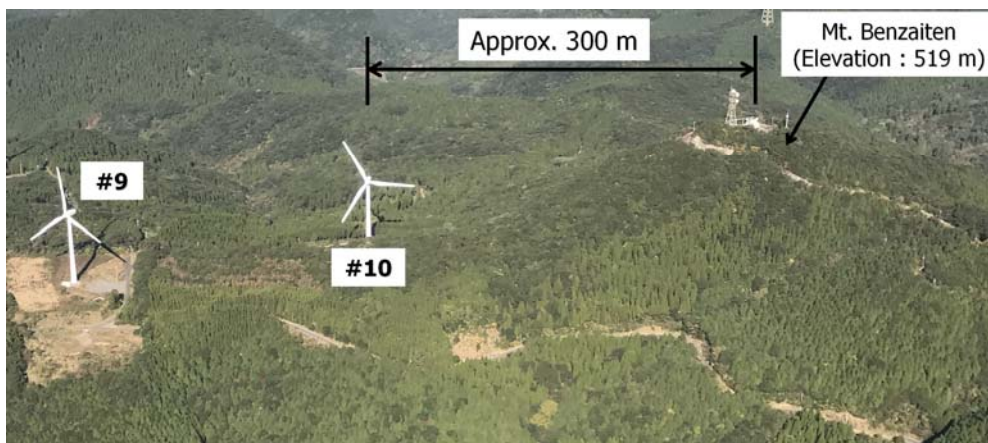


図1. 弁財天山(標高519m)と10号機風車の位置関係.

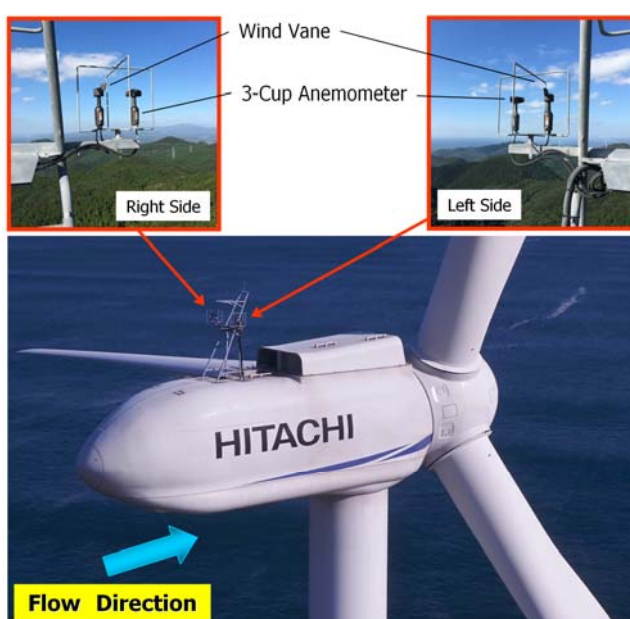


図2. 風車の概要.

本研究では、一連の研究成果に基づいて、地形性乱流が大型風車のブレードに与える2種類の新しい定量化指標を提案することに成功しました。一つは、風況に関する定量化指標(乱流評価指標)であり、Uchida-Kawashimaスケール1(便宜上、U-Kスケール1)と名付けました(式(1))。

「Uchida-Kawashimaスケール1:乱流評価指標(Turbulence Evaluation Index)」

$$U\text{-K Scale}_1 = \frac{\sigma_u}{U_{in}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2}}{U_{in}}$$

(1)

本研究では、風車10号機の風車ブレード3枚の根元に電気式の歪センサーを設置し、歪変動の時系列データに基づいて疲労等価荷重(DEL:Damage Equivalent Load)を算出しました。本研究では、実測値により算出した2種類の回帰直線、すなわち、「Low-Turbulence Flow Case」としての北風の結果、「High-Turbulence Flow Case」としての東風の結果、Bladedにより算出した設計値

に基づいて、荷重に関する定量化指標(疲労損傷評価指標)としてUchida-Kawashimaスケール2(便宜上、U-K スケール2)を定義しました(式(2))。

### 「Uchida-Kawashimaスケール2:疲労損傷評価指標(Fatigue Damage Evaluation Index)」

$$U-K \text{ Scale}_2 = \frac{\sum_{i=1}^n DEL_{Proposal}}{\sum_{i=1}^n DEL_{Design}}$$

(2)

#### 【U-Kスケールの運用方法の提案と今後の課題】

本研究において、風況に関する指標であるU-Kスケール1の数値がしきい値「0.2」以下であれば地形性乱流を軽減させることが可能であることを示しました。さらに、荷重に関する指標であるU-Kスケール2の数値がしきい値「1.0」以下であることを加味することで、従来手法よりも高精度な風車配置計画が可能であることを示しました。図3には、本研究にて提案した2種類の一般化手法(U-Kスケール1、U-Kスケール2)を活用した風車配置計画のフローチャートの一例を示します。風車の最適配置計画では、卓越風向において発電量を最大化し、かつ風車の故障を最小化することが望ましいことから、図3に示すフローチャートは計画サイトにおける2～3の卓越風向に適用すれば、その効果は極めて大きいと考えられます。また、既設風車サイトにおいても、古くなった風車の建替えを行い、風力発電能力の増強や発電効率の向上を行う、いわゆるリパワーリングや風況観測ポールの建設時にも適用可能です。

本研究では、「Low-Turbulence Flow Case」としての北風の回帰直線と、「High-Turbulence Flow Case」としての東風の結果のみを示しましたが、他の風向においても同様にナセル風速と疲労等価荷重(DEL)の回帰直線を既に導出しており、今後、これらを考慮して全方位を対象にしてターゲット風車である風車10号機のブレードに与える経年蓄積の影響を定量的に評価する予定です。加えて、風車10号機が他の風車のウエイクの影響を受けている風向もあることから、風車ウエイクの影響に注目した解析も進める予定です。

今後、本研究で示した実証研究をさらに発展させ、洋上および陸上を問わず、風車群の発電出力を最大化し、かつ風車を構成する主要部位である主軸(main shaft)や増速機(gearbox)などに関して、地形性乱流や風車ウエイクに起因した疲労損傷(fatigue damage)や疲労寿命(fatigue life)などを正確に把握し予測するための高度なマイクロサイティング手法の開発を目指します。我々が「産学連携」で一丸となって取り組む一連の共同研究は、風車の「重大事故」を未然に防ぎ、洋上および陸上の大規模風力発電の適切な普及・拡大に大きく貢献することが期待されます。

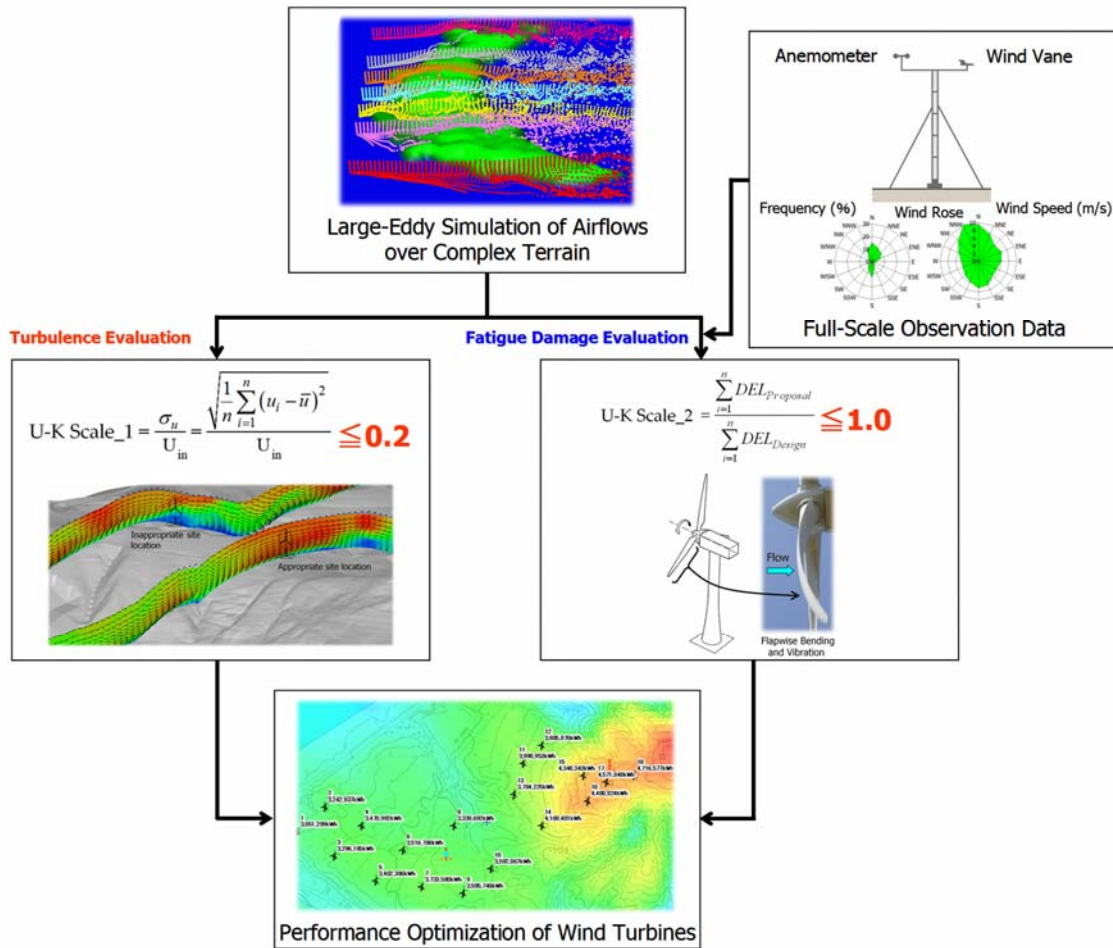


図3. U-Kスケールに基づいたウィンドファームの風車配置計画の一例.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Uchida Takanori	4. 巻 11
2. 論文標題 Numerical Investigation of Terrain-Induced Turbulence in Complex Terrain by Large-Eddy Simulation (LES) Technique	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 2638 ~ 2638
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.3390/en11102638">https://doi.org/10.3390/en11102638</a>	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Uchida Takanori, Li Graham	4. 巻 8
2. 論文標題 Comparison of RANS and LES in the Prediction of Airflow Field over Steep Complex Terrain	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Open Journal of Fluid Dynamics	6. 最初と最後の頁 286 ~ 307
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.4236/ojfd.2018.83018">https://doi.org/10.4236/ojfd.2018.83018</a>	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Uchida Takanori	4. 巻 8
2. 論文標題 Large-Eddy Simulation of Airflow over a Steep, Three-Dimensional Isolated Hill with Multi-GPUs Computing	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Open Journal of Fluid Dynamics	6. 最初と最後の頁 416 ~ 434
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.4236/ojfd.2018.84027">https://doi.org/10.4236/ojfd.2018.84027</a>	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Uchida Takanori	4. 巻 6
2. 論文標題 Design Wind Speed Evaluation Technique in Wind Turbine Installation Point by Using the Meteorological and CFD Models	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Flow Control, Measurement & Visualization	6. 最初と最後の頁 168 ~ 184
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.4236/jfcmv.2018.63014">https://doi.org/10.4236/jfcmv.2018.63014</a>	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Uchida Takanori	4. 巻 6
2. 論文標題 Computational Investigation of the Causes of Wind Turbine Blade Damage at Japan's Wind Farm in Complex Terrain	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Flow Control, Measurement & Visualization	6. 最初と最後の頁 152 ~ 167
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.4236/jfcmv.2018.63013">https://doi.org/10.4236/jfcmv.2018.63013</a>	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Uchida Takanori	4. 巻 11
2. 論文標題 Computational Fluid Dynamics Approach to Predict the Actual Wind Speed over Complex Terrain	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 1694 ~ 1694
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.3390/en11071694">https://doi.org/10.3390/en11071694</a>	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Uchida Takanori	4. 巻 11
2. 論文標題 LES Investigation of Terrain-Induced Turbulence in Complex Terrain and Economic Effects of Wind Turbine Control	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 1530 ~ 1530
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.3390/en11061530">https://doi.org/10.3390/en11061530</a>	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Uchida Takanori	4. 巻 11
2. 論文標題 Computational Fluid Dynamics (CFD) Investigation of Wind Turbine Nacelle Separation Accident over Complex Terrain in Japan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 1485 ~ 1485
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.3390/en11061485">https://doi.org/10.3390/en11061485</a>	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takanori UCHIDA	4. 巻 Vol.09
2. 論文標題 High-Resolution Micro-Siting Technique for Large Scale Wind Farm Outside of Japan Using LES Turbulence Model	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Energy and Power Engineering	6. 最初と最後の頁 802, 813
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.4236/epe.2017.912050">https://doi.org/10.4236/epe.2017.912050</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takanori UCHIDA	4. 巻 Vol.09
2. 論文標題 CFD Prediction of the Airflow at a Large-Scale Wind Farm above a Steep,Three-Dimensional Escarpment	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Energy and Power Engineering	6. 最初と最後の頁 829, 842
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.4236/epe.2017.912050">https://doi.org/10.4236/epe.2017.912050</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takanori UCHIDA	4. 巻 Vol.7
2. 論文標題 High-Resolution LES of Terrain-Induced Turbulence around Wind Turbine Generators by Using Turbulent Inflow Boundary Conditions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Open Journal of Fluid Dynamics	6. 最初と最後の頁 511, 524
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.4236/ojfd.2017.74035">https://doi.org/10.4236/ojfd.2017.74035</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takanori UCHIDA	4. 巻 Vol.8
2. 論文標題 Large-Eddy Simulation and Wind Tunnel Experiment of Airflow over Bolund Hill	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Open Journal of Fluid Dynamics	6. 最初と最後の頁 30, 43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.4236/ojfd.2018.81003">https://doi.org/10.4236/ojfd.2018.81003</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -



〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 内田孝紀
2. 発表標題 数値流体シミュレーション技術の鉄道分野における適用 -地形性強風の発生メカニズムの数値的解明とその対策-
3. 学会等名 京都大学 第15回市民防災講座（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 内田孝紀
2. 発表標題 RIAM-COMPACTの高機能化と性能評価
3. 学会等名 第2回ポスト「京」重点課題 シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 内田孝紀
2. 発表標題 九州大学伊都キャンパスの数値風況診断 -椎木講堂から大型レンズ風車まで-
3. 学会等名 九州大学情報基盤研究開発センターシンポジウム 「HPCとIoT -観測・計測系IoTとHPCを繋ぐ-」（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 内田孝紀
2. 発表標題 非定常数値風況診断に基づいた風車の安全管理について
3. 学会等名 風力発電設備の定期安全管理検査制度説明会，九州産業保安監督部電力安全課（招待講演）
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----