

地形性乱流が風車ブレード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

九州大学応用力学研究所 風工学分野 内田 孝紀

1. はじめに

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ある。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 基設置されている(図 1 を参照)。本研究では、東風が発生した際の 10 号機をターゲット風車にし、地形起因の大気乱流が風車ブレードに与える影響について詳細に調査・研究を行った[1]。

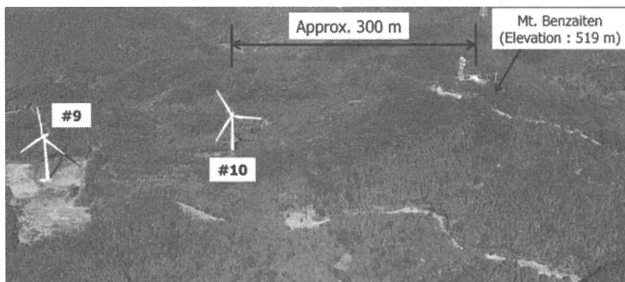


図 1 弁財天山(標高 519m)と 10 号機風車の位置関係

2. 実測データ計測システムの概要

風力エネルギーは風車ブレードを通して入力されるため、ブレード根元で Flapwise Bending と Flapwise Vibration の挙動を監視することは、風車全体の耐久性評価を行う上で極めて重要である。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 を参照)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、ナセル方位角、ピッチ角、発電機回転速度、PCS システム有効電力、アジマス角、ナセル前後方向加速度など 8 項目)を同期計測するシステムを構築した。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た(図 2 を参照)。実計測を実施した期間は、2015 年 11 月 3 日 0 時~2016 年 3 月 17 日 7 時である。

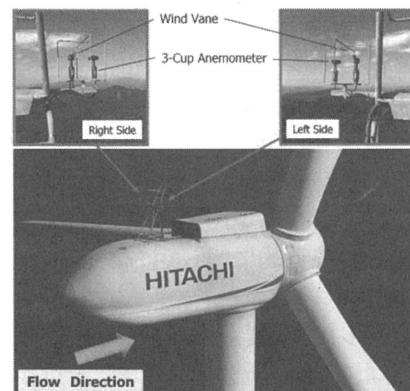
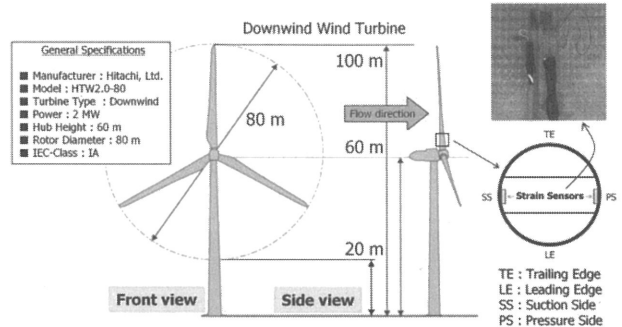


図 2 風車の概要

3. RIAM-COMPACT による数値風況診断の概要

図 3 には、数値風況診断モデル RIAM-COMPACT (リアムコンパクト)に入力する計算格子データを示す。図 4 には流入風速プロファイルを、図 5 には RIAM-COMPACT における代表スケールを示す。特に、 U_{in} は流入境界面での最大標高位置における風速であり、後述する式(1)にも使用している。図 6 には、数値風況シミュレーションの結果を示す。風車 10 号機の上流

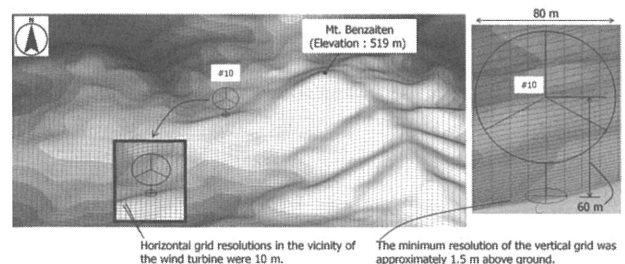


図 3 計算格子

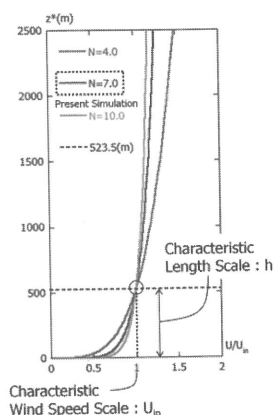


図4 流入条件

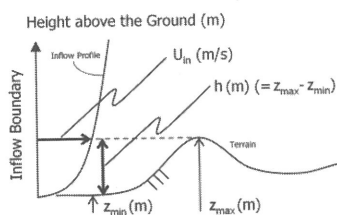


図5 2種類の代表スケール

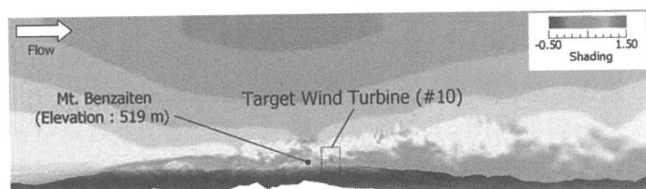


図6 風車10号機を通る鉛直断面内の主流方向速度成分の分布、瞬間場、東風の場合

に位置する弁財天山(標高 519m)から剥離流(地形性乱流)が形成され、風車10号機はこの影響を直接的に受けていることが視覚的に明らかになった。

4. U-Kスケール1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)と名付けた(式(1))。U-Kスケール1は、風車ハブ高さ位置で評価した風速の標準偏差を、流入境界面の最大標高位置における風速 U_{in} で正規化した数値である。

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

$$U-K\ Scale_1 = \frac{\sigma_u}{U_{in}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2}}{U_{in}} \quad (1)$$

本研究において、U-Kスケール1のしきい値を「0.2」とし、本指標が流入風速の高度方向の分布形状、水平方向の格子解像度、計算方位に依存しない一般化指標であることを示した。

今回、研究対象とした風車のIECクラスは最大スペックのIAである。よって、我々が提案するU-Kスケール1において、「0.2」を超えた場合、IECクラスII以下の機種はさらに注意を要する。山岳地形が約7割を占める日本国内ではIECクラスIAの風車を導入したとしても、IECの乱流カテゴリーのクラスAの包絡線を超える場合があり(図7)、その出現頻度が少なくても風車の発電量や疲労に大きな影響を与える。本研究サイトの風車10号機も運開後の約5年という短時間でヨーモータなどの故障が頻発した。このような状況を受け、U-Kスケール1はIECの乱流カテゴリーと区別し、実測データとの比較を前提とした独自指標として確立した。U-Kスケール1は地形性乱流に起因した発電量低下や風車内外の故障に関する課題解決の指針として極めて有効なツールとなる。

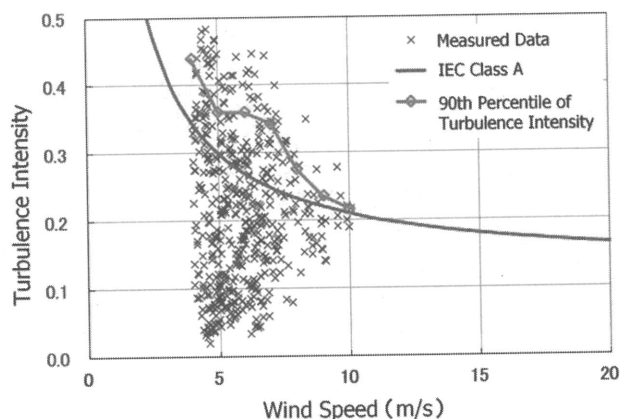


図7 乱流強度と10分平均ナセル風速との関係、風車10号機、2015年11月3日0時～2016年3月17日7時

5. U-Kスケール2の概要

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)を算出した。データ計測期間である2015年11月3日0時～2016年3月17日7時に対して、4m/s以上の風車運転時でのナセル風速および疲労等価荷重(DEL)をプロットした結果(10分間隔の数値)を図8に示す。図中の赤色のシンボルが北風の結果であり、青色のシンボルが東風の結果である。また、黒色のシンボルは空力弾性解析ソフトウェア Bladed を用いて算出した設計値である。この結果より、東風の場合には、風速が約6～10m/sにおいて設計値を上回る結果となった。弁財天山(標高 519m)から形成される地形性乱流に起因し、風車10号機のブレードは設計値を超えた風荷重を受けていることが明らかになった。一方、上記のデータ計測期間で最も出現頻度が高い風向である北風の場合

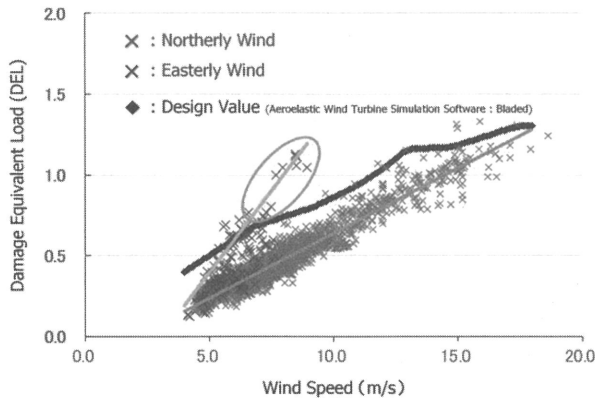


図8 ナセル風速と疲労等価荷重(DEL)との関係、
風車10号機、地上高60m

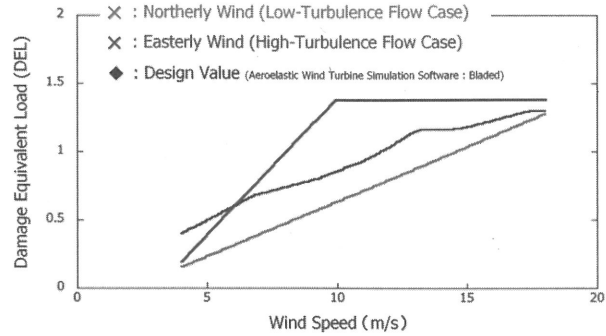


図9 回帰直線と疲労等価荷重(DEL)との関係、
風車10号機、地上高60m

合には、風速 4m/s 以上の全風速階級で設計値を下回る結果となり、風車ブレードは設計値を超えた風荷重をほとんど受けていないことが明らかになった。本研究では、図7から4m/s以上の風車運転時においてナセル風速と疲労等価荷重(DEL)の両者の間に直線的な傾向が見て取れ、両者を回帰直線で近似可能であることを示した。図9にはナセル風速とDELの回帰直線を改めて示す。ここで、赤色の実線で示す北風の結果を「Low-Turbulence Flow Case」、青色の実線で示す東風の結果を「High-Turbulence Flow Case」と定義した。また、東風の場合には風速 10m/s 以上では回帰直線に修正を加えた。同図には、図8と同様、空力弾性解析ソフトウェア Bladed を用いて算出した設計値を黒色の実線で記載している。

本研究では、図9に示す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)を定義した(式(2))。

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

$$U-K\ Scale_2 = \frac{\sum_{i=1}^n DEL_{Proposal}}{\sum_{i=1}^n DEL_{Design}} \quad (2)$$

式(2)の意味は、設計 DEL(Bladed)の積算値に対する実測 DELの積算値の比となる。よって、

U-Kスケール2 > 「1.0」:
設計以上、地形性乱流の影響「大」

U-Kスケール2 ≤ 「1.0」:
設計以内、地形性乱流の影響「小」

ということを意味する。本研究では、2015年4月～2016年3月の1年間の実測データから4m/s以上の風車運転時に対応する北風および東風のデータを抽出し、これと式(2)で定義したU-Kスケール2を用いて、地形性乱流が風車ブレードに与える経年蓄積の影響を定量的に評価した。ここで、北風のデータは7,485個(14.3%)であり、東風のデータは2,342個(4.5%)であった。その結果、北風の場合には、

U-Kスケール2 = 「0.86」 < 「1.0」(設計以内)

となった。これに対し、東風の場合には、

U-Kスケール2 = 「1.60」 > 「1.0」(設計以上)

となり、設計値を超えていることが示された。また、東風の場合の疲労損傷の積算値は、北方位の約1.9倍となり、この結果からも東風が発生した際には、ターゲット風車である風車10号機のブレードは地形性乱流の影響を直接的に強く受けていることが明らかになった。

6. 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た。図10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 10 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る。また、2 種類の一般化手法は、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ある。

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ある。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ある。

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や増速機などに関して、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す。我々が「産学連携」で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る。

謝 辞

本研究は、株式会社九電工、西日本技術開発株式会社、株式会社日立製作所製の協力を得ました。また、文部科学省 科研費 基盤研究 (B) 17H02053 の支援も受けました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Uchida, T., Kawashima, Y., New Assessment Scales for Evaluating the Degree of Risk of Wind Turbine Blade Damage Caused by Terrain-Induced Turbulence, *Energies*, 12 (13), 2624, 2019.

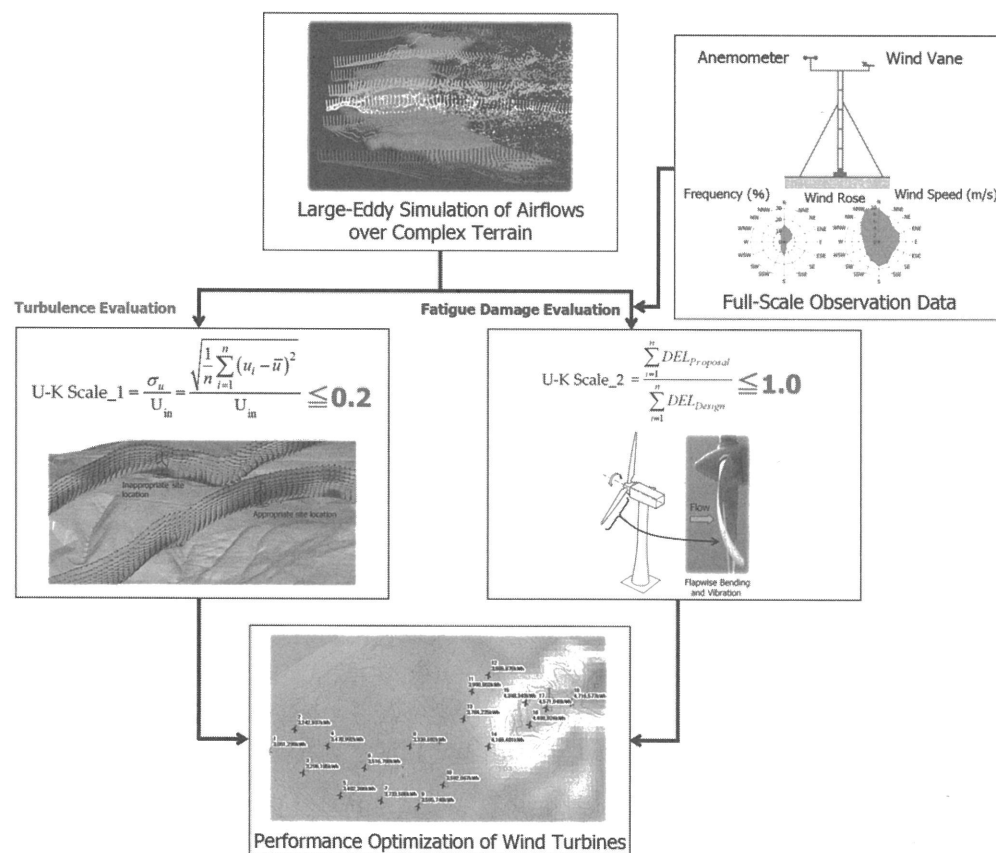


図 10 2 種類の U-K スケールに基づいたウィンドファームの風車配置計画の一例