

PRESS RELEASE (2019/7/18)

地形性乱流が大型風車ブレードに与える新しい定量化指標を提案 — 洋上および陸上の大規模風力発電の普及・拡大に期待 —

九州大学応用力学研究所の内田孝紀准教授は、株式会社九電工の協力の下、西日本技術開発株式会社と共同研究を実施し、地形性乱流が大型風車の羽(ブレード)に与える新しい定量化指標を提案することに成功しました。本研究で対象となった鹿児島県の串木野れいめい風力発電所には、出力2MWの商用大型風車が10基設置されており、東風が発生した際に10号機風車に風況起因の発電停止が多発することが確認されました。そこで、10号機をターゲット風車にし、実測データや数値風況シミュレーションの結果を詳細に分析した結果、10号機風車の東側(直線距離で約300m)に位置する弁財天山(標高519m)に起因した地形性乱流の影響であることが分かりました。

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。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ことを示しました。もう一つは、荷重に関する定量化指標(疲労損傷評価指標)であり、Uchida-Kawashimaスケール2(便宜上、U-Kスケール2)と名付けました。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風況データを抽出し、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ました。我々が「産学連携」で一丸となって取り組む今回の共同研究は、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。

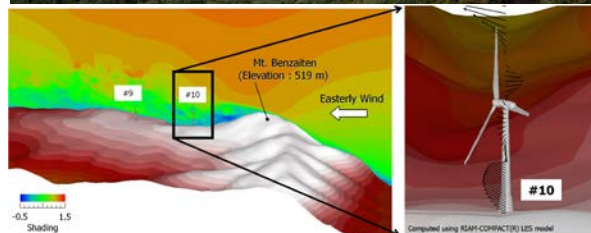
本研究成果は2019年7月8日(月)(日本時間)に国際学術雑誌「energies」に掲載されました。また、本研究は文部科学省 科研費 基盤研究(B)17H02053の支援も受けました。

研究者からひとこと：

今後、陸上・洋上の大規模風力発電を安全・安心に普及・拡大させるために、数値風況診断技術RIAM-COMPACT(リアムコンパクト)を「コア技術」とし、風車メーカー、風力事業者、コンサルティング会社など一丸になり、地形起因の大気乱流が風車または風車群に与える影響の解明を目指します。



内田孝紀 准教授



(参考図) 本研究で対象にした風力発電所(提供:株式会社九電工)と数値風況シミュレーション(RIAM-COMPACT)の一例

【お問い合わせ】 応用力学研究所 准教授 内田 孝紀(うちだ たかのり)
電話:092-583-7776 FAX:092-583-7779
Mail: takanori@riam.kyushu-u.ac.jp

別紙

【本研究の概要】

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、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・研究を行いました。

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す。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、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）。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時です。

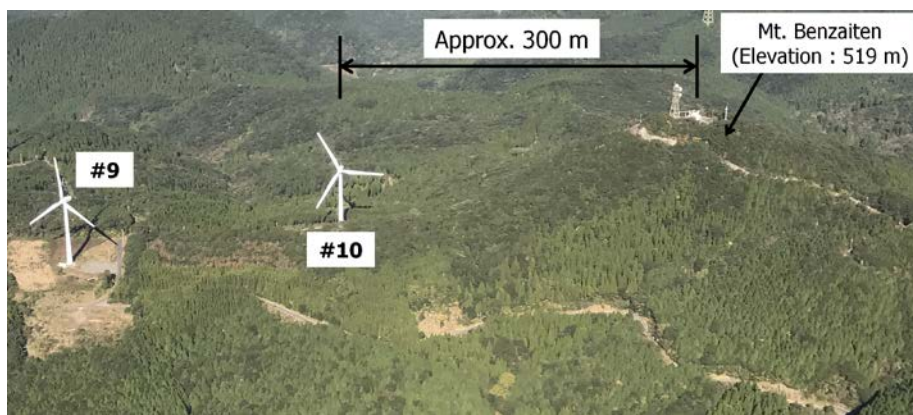


図1. 弁財天山（標高519m）と10号機風車の位置関係。

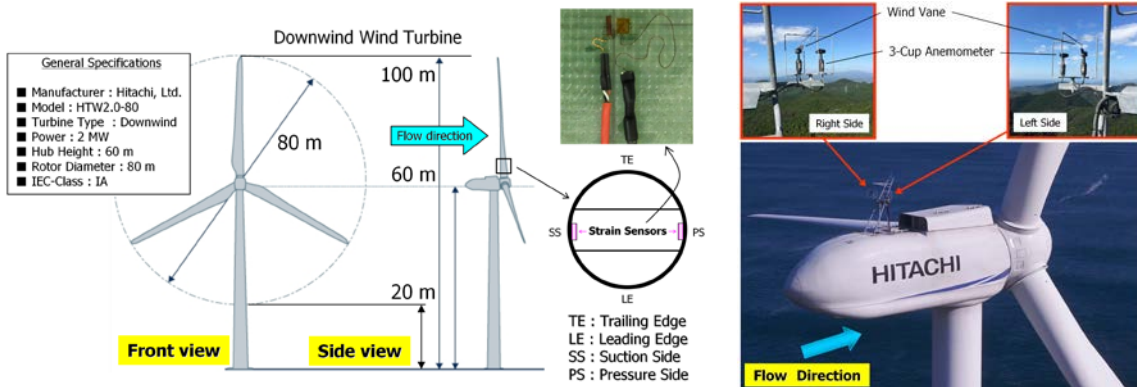


図2. 風車の概要。

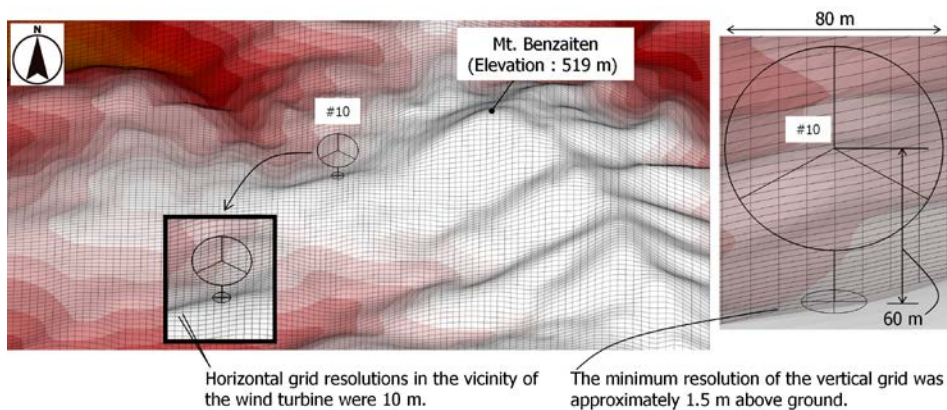


図3. 計算格子。

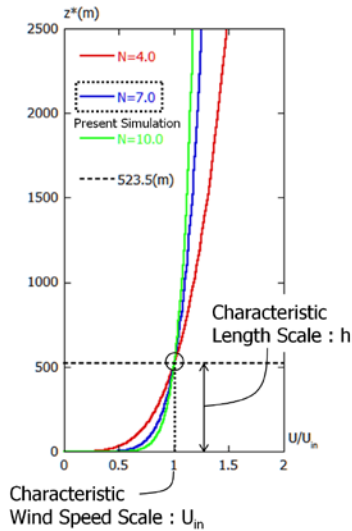


図4. 流入条件.

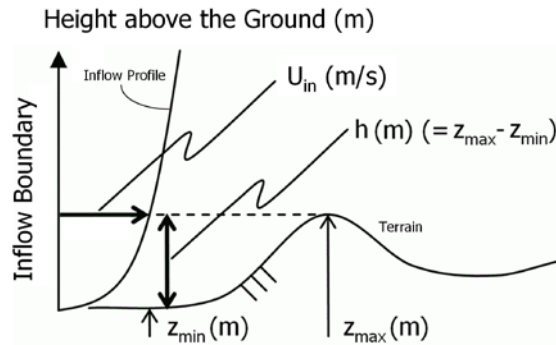


図5. 2種類の代表スケール.

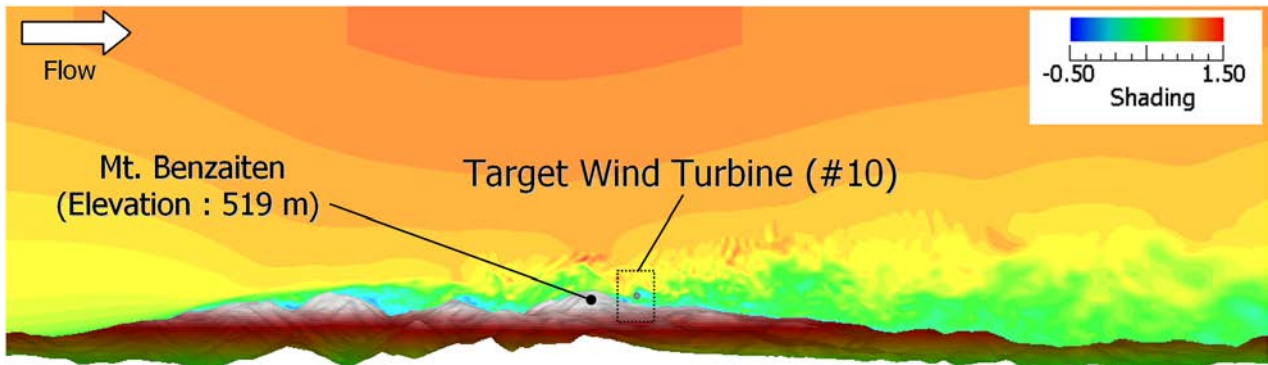


図6. 風車10号機を通る鉛直断面内の主流方向速度成分の分布, 瞬間場, 東風.

図3には、内田准教授が開発している数値風況診断技術RIAM-COMPACT(リアムコンパクト)に入力する計算格子データを示します。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します。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)にも使用しています。図6には、数値風況シミュレーションの結果を示します。風車10号機の上流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りました。

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))。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す。

「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ました。

今回、研究対象とした風車のIECクラス(※1)は最大スペックのIAです。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します。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(※2)のクラスAの包絡線を超える場合があります(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ます。本研究サイトの風車10号機も運転後の約5年という短時間でヨーモータ(yaw motor)(※3)などの故障が頻発しました。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ました。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ります。

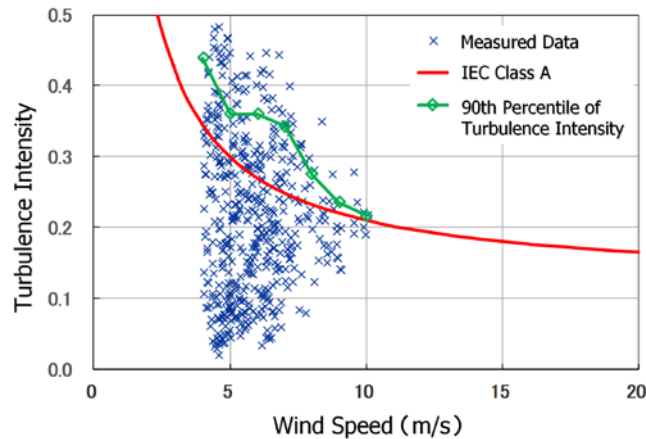


図7. 乱流強度と10分平均ナセル風速との関係, 地上高60m, 2015年11月3日0時~2016年3月17日7時.

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(※4)。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に示します。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す。また、黒色のシンボルは空力弾性解析ソフトウェアBladed(※5)を用いて算出した設計値です。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りました。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りました。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りました。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取れ、両者を回帰直線で近似可能であることを示しました。図9にはナセル風速とDELの回帰直線を改めて示します。ここで、赤色の実線で示す北風の結果を「Low-Turbulence Flow Case」、青色のシンボルで示す東風の結果を「High-Turbulence Flow Case」と定義しました。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ました。同図には、図9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シンボルで記載しています。

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)」

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

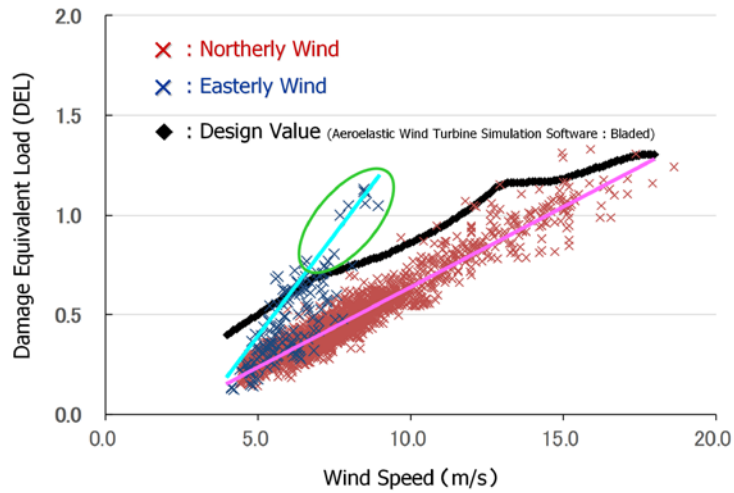


図8. ナセル風速と疲労等価荷重 (DEL) との関係, 地上高60m.

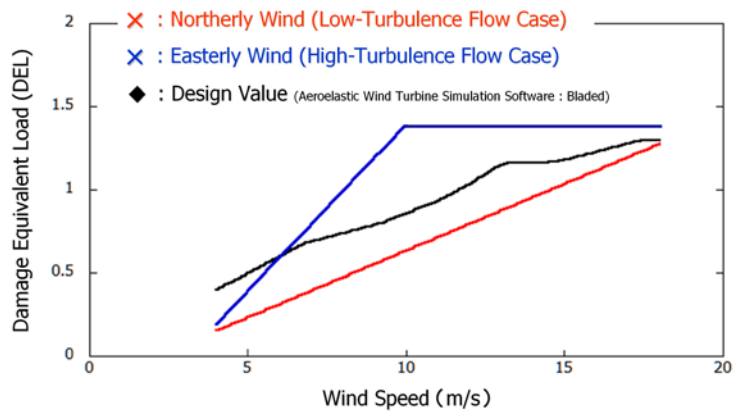


図9. 回帰直線と疲労等価荷重 (DEL) との関係, 地上高60m.

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 (※6) の比となります。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」

ということになります。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ました。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%) でした。その結果、北風の場合には、

$$U-Kスケール2 = 「0.86」 < 「1.0」 \quad (\text{設計以内})$$

となりました。これに対し、東風の場合には、

$$U-Kスケール2 = 「1.60」 > 「1.0」 \quad (\text{設計以上})$$

となり、設計値を超えていることが示されました。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りました。

【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を進める予定です。

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) (※7)や増速機(gearbox) (※8)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。

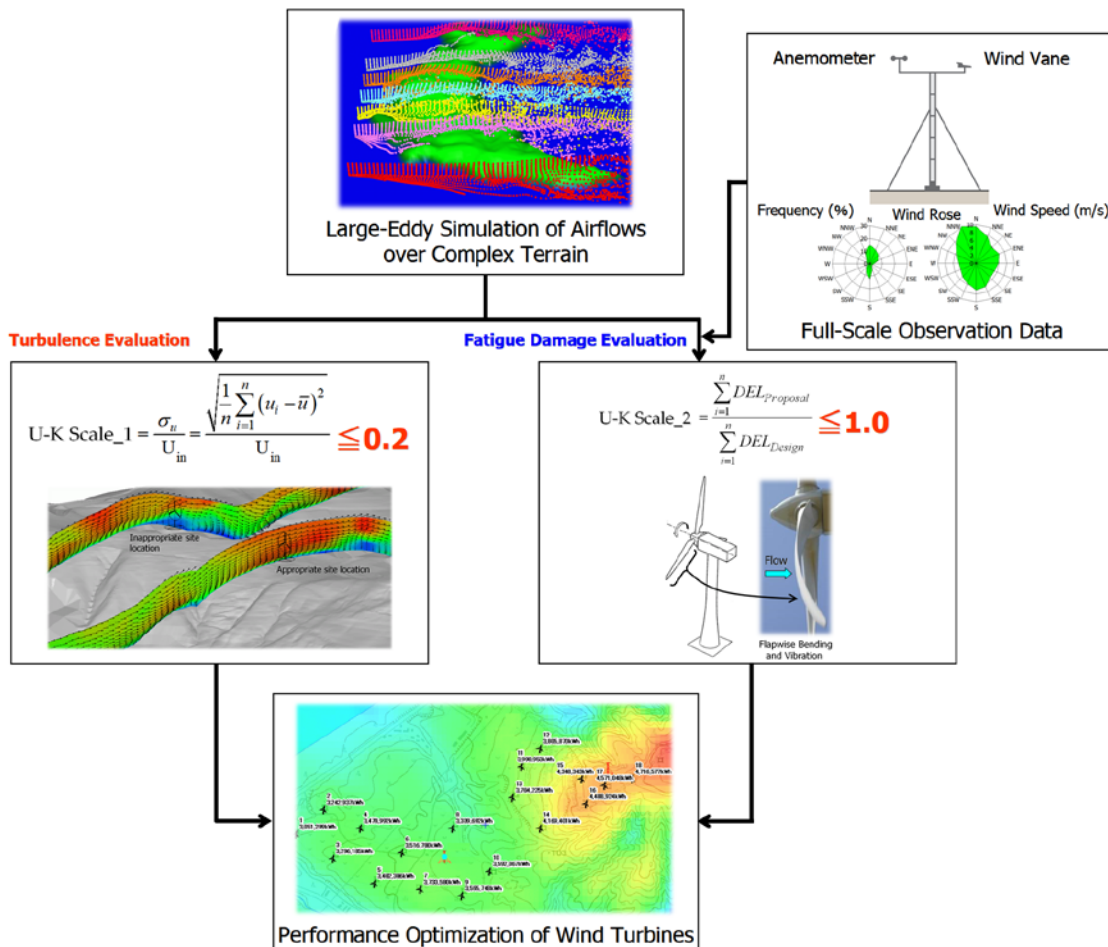


図10. U-Kスケールに基づいたウィンドファームの風車配置計画の一例.

【論文情報】

雑誌名	energies (2019年7月8日オンライン掲載)
論文名	New Assessment Scales for Evaluating the Degree of Risk of Wind Turbine Blade Damage Caused by Terrain-Induced Turbulence
著者名	Takanori Uchida and Yasushi Kawashima
DOI	https://doi.org/10.3390/en12132624

【用語解説】

※1：国際電気標準会議(International Electrotechnical Commission、IEC)が制定する国際規格

風車は世界中に導入されており、風車クラスは世界で統一されています。国際電気標準会議(IEC)が発行している風車の設計製造の基準になる国際標準「IEC 61400-1」では、風速および乱流特性に応じて風車クラスは9種類(IA, IB, IC, IIA~IIIC)に分類されています。2019年2月8日には、日本提案の「台風 Class」($V_{ref}=57\text{m/s}$, V_{ref} は今後50年以内に再現する可能性がある極限の10分平均風速を予測したもので、「極値風速」とも呼ばれます)を含む、「IEC 61400-1」の最新版「IEC61400-1 4th Edition」が発行されました。1994年に初版、1999年に第2版、2005年に第3版、今回が第4版(4th Edition)です。

Wind Turbine Class	T (Typhoon)			I (High Wind)	II (Medium Wind)	III (Low Wind)	S	Meaning
V_{e50} (m/s) ※a	70.0			70.0	59.5	52.5		Survival
V_{ref} (m/s) ※b	57.0			50.0	42.5	37.5		Wind Speed
V_{ave} (m/s) ※c	10.0	8.5	7.5	10.0	8.5	7.5		Performance and Fatigue
I_{ref} ※d	A+			0.18			Values specified by the designer	Fatigue
	A (High Turbulence)			0.16				
	B (Medium Turbulence)			0.14				
	C (Low Turbulence)			0.12				

※a V_{e50} , Extreme wind speed at hub height (3-second gust, 50-year recurrence period).

※b V_{ref} , Reference wind speed at hub height (10-minute average, 50-year recurrence period).

※c V_{ave} , Annual average wind speed at hub height (maximum annual average).

※d I_{ref} , Characteristic turbulence intensity at 15 m/s.

表1. 風車クラスの基礎パラメータ.

※2：IECの乱流カテゴリー

正規乱流モデル(Normal Turbulence Model、NTM)と呼ばれ、式(3)で定義されます。式(3)の I_{ref} には、表1に記載している0.16, 0.14, 0.12が入力されます。式(3)の V は風速(m/s)です。これを図に表現したものが図11になります。

$$TI = I_{ref} \left(0.75 + \frac{5.6}{V} \right) \tag{3}$$

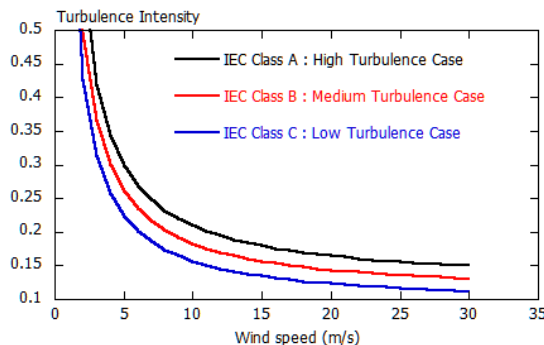
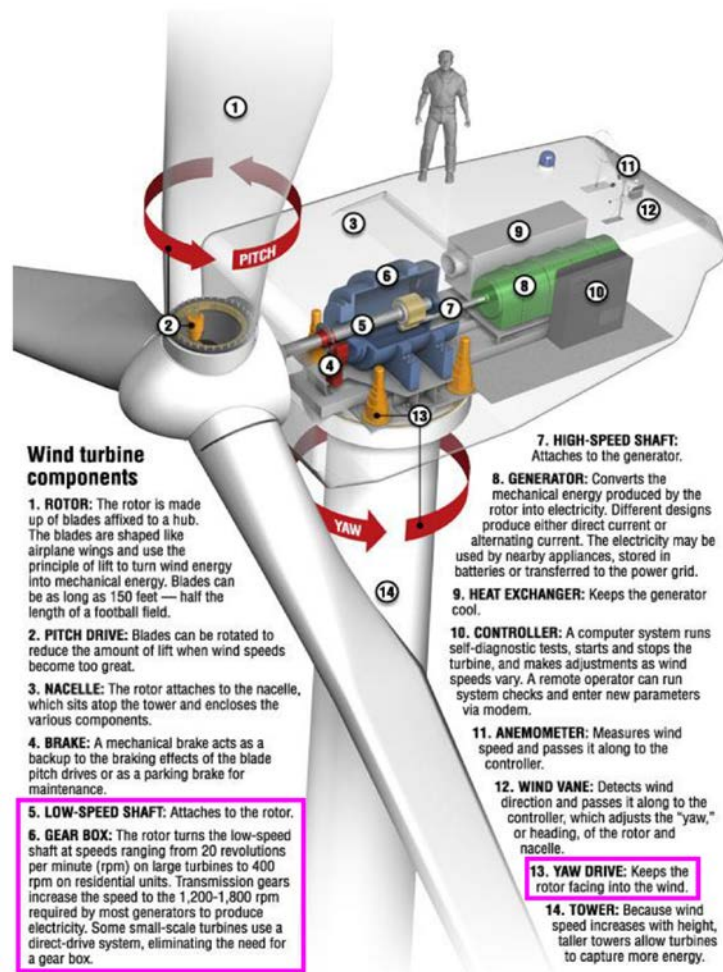


図11. 正規乱流モデル(NTM)と風速との関係.

※3, 7, 8 : ヨーモーター (yaw motor)、主軸 (main shaft)、増速機 (gearbox)

図12に紫色の実線で囲んでいる部位になります。



Energies 2012, 5(9), 3425-3449; <https://doi.org/10.3390/en5093425>

図12. 大型商用風車の典型的な構成。

※4 : 疲労等価荷重 (Damage Equivalent Load、DEL)

本研究では、風車ブレード歪データを定量的に考察するため、歪みデータからフラップ方向の曲げモーメントの時刻歴データを抽出し、レインフローカウント法 (Rainflow Counting Algorithm) を適用して疲労等価荷重 (Damage Equivalent Load、DEL) を算出しました (式 (4) および図13)。DELは、風力業界において風車の疲労損傷 (fatigue damage) を議論する際、最も一般的に使用される指標です。本研究では、算出したDELは風速12m/sにおける設計値 (空力弾性解析ソフトウェアBladedを用いて算出) により正規化を行いました。

$$DEL = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (F_i^m \cdot n_i)}{N} \right\}^{\frac{1}{m}}$$

(4)

where

F_i is the load of the i -th class of the fatigue load spectrum;

n_i is the number of cycles in the i -th class of the fatigue load spectrum;

N is the equivalent of cycles;

m is the S-N (stress-number of cycles to failure) curve slope for relevant material.

$N = 600$ and $m = 10$ with fiber-reinforced plastic (FRP) blades in this study.

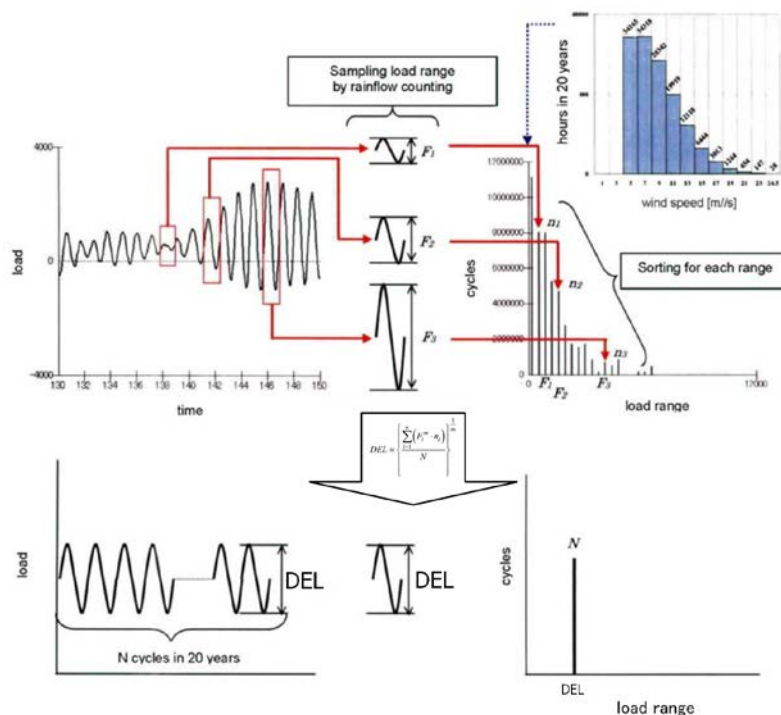


図13. レインフローカウント法と疲労等価荷重 (DEL) の算出のイメージ。

※5：空力弾性解析ソフトウェア「Bladed」

第三者認証機関であるノルウェー・ドイツ船級協会 (Det Norske Veritas Germanischer Lloyd、DNVGL) が開発しているソフトウェアであり、風力発電業界における標準ソフトウェアの一つです。

※6：疲労等価荷重 (Damage Equivalent Load、DEL) の積算

スカラー量であるDELを積算する場合には、DELを算出した m (S-N曲線の傾き) を使い、 m 乗した値の和を取り、それらを $(1/m)$ 乗することで求めることが可能です。例えば、2つのDELを積算する場合は以下に示す式 (5) のように表現されます。

$$DEL_{total} = \left(DEL1^m + DEL2^m \right)^{\frac{1}{m}}$$

(5)

【お問い合わせ先】

【研究全体のお問い合わせ】

応用力学研究所 風工学分野 准教授 内田 孝紀(うちだ たかのり)
 電話: 092-583-7776
 FAX: 092-583-7779
 Mail: takanori@riam.kyushu-u.ac.jp



【西日本技術開発株式会社のお問い合わせ】

火力本部 火力技術部 技術調査グループ 川島 泰史(かわしま やすし)
 電話: 092-713-0516
 FAX: 092-713-6841
 Mail: y-kawashima@wjec.co.jp

