

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号

特許第7467012号
(P7467012)

(45)発行日 令和6年4月15日(2024. 4. 15)

(24)登録日 令和6年4月5日(2024. 4. 5)

(51)Int. Cl. F I
F 0 3 D 17/00 (2016. 01) F 0 3 D 17/00
G 0 1 W 1/00 (2006. 01) G 0 1 W 1/00 A

請求項の数 4 (全 18 頁)

(21)出願番号	特願2020-192360(P2020-192360)	(73)特許権者	594162308 西日本技術開発株式会社 福岡県福岡市中央区渡辺通一丁目1番1号
(22)出願日	令和2年11月19日(2020. 11. 19)	(74)代理人	100116573 弁理士 羽立 幸司
(65)公開番号	特開2022-81060(P2022-81060A)	(72)発明者	内田 孝紀 福岡県宗像市光岡377番地10 株式会社リアムコンパクト内
(43)公開日	令和4年5月31日(2022. 5. 31)	(72)発明者	小川 智 福岡県福岡市中央区渡辺通一丁目1番1号 西日本技術開発株式会社内
審査請求日	令和4年6月21日(2022. 6. 21)	(72)発明者	古賀 和宏 福岡県福岡市中央区渡辺通一丁目1番1号 西日本技術開発株式会社内

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 評価装置、評価方法、及び、評価方法を実現するためのプログラム

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

風車を設置する候補地点における風の地形性乱流により生じると予想されるブレード以外の構成機器へ与える疲労蓄積状況を予測して評価するための評価装置であって、

前記候補地点を含む候補空間における風速の境界入力条件を記憶する境界入力条件記憶手段と、

前記境界入力条件の下でのシミュレーション演算である前記候補空間に含まれる風車のハブ高さの評価点における三方向の前記風速の標準偏差を演算する手段であって、風の風向方向と同じ方向である主流方向の風速の標準偏差成分値、前記主流方向に対して直交横方向である主流直交方向の風速の標準偏差成分値並びに前記主流方向に対して鉛直上方向である鉛直方向の風速の標準偏差成分値を演算する標準偏差演算手段と、

前記標準偏差演算手段が演算した前記候補空間に含まれる前記評価点における前記三方向のそれぞれの前記風速の標準偏差成分値と、前記境界入力条件記憶手段が記憶する前記風速の境界入力条件とを用いて、前記風速の境界入力条件に対する前記三方向のそれぞれの前記風速の標準偏差成分の比を演算し、前記候補地点に設置された場合の前記ブレード以外の構成機器へ与える疲労蓄積状況を予測して評価する評価指標として前記演算した比の合成値を演算する評価指標演算手段と、

前記評価指標として演算した比の合成値が評価基準値を超える場合に、前記候補地点に設置した場合の前記ブレード以外の構成機器に疲労蓄積が進んで不具合が一定期間内に発生する可能性が高いと判定する判定手段を備える、評価装置。

【請求項 2】

前記ブレード以外の構成機器は、ヨーシステムである、請求項 1 記載の評価装置。

【請求項 3】

風車を設置する候補地点における風の地形性乱流により生じると予想されるブレード以外の構成機器へ与える疲労蓄積状況を予測して評価するための評価方法であって、

前記ブレード以外の構成機器はヨーシステムであり、

境界入力条件記憶手段が前記候補地点を含む候補空間における風速の境界入力条件を記憶しており、

標準偏差演算手段が、前記境界入力条件の下でのシミュレーション演算である前記候補空間に含まれる風車のハブ高さの評価点における三方向の前記風速の標準偏差を演算するステップであって、風の風向方向と同じ方向である主流方向の標準偏差成分値、前記主流方向に対して直交横方向である主流直交方向の標準偏差成分値並びに前記主流方向に対して鉛直上方向である鉛直方向の標準偏差成分値を演算するステップと、

10

評価指標演算手段が、前記標準偏差演算手段が演算した前記候補空間に含まれる前記評価点における前記三方向のそれぞれの前記風速の標準偏差成分値と、前記境界入力条件記憶手段が記憶する前記風速の境界入力条件とを用いて、前記風速の境界入力条件に対する前記三方向のそれぞれの前記風速の標準偏差成分の比を演算し、前記候補地点に設置された場合の前記ヨーシステムへ与える疲労蓄積状況を予測して評価する評価指標として前記演算した比の合成値を演算するステップと、

判定手段が、前記評価指標として演算した比の合成値が評価基準値を超える場合に、前記候補地点に設置した場合の前記ヨーシステムに疲労蓄積が進んで不具合が一定期間内に発生する可能性が高いと判定するステップとを含む、評価方法。

20

【請求項 4】

コンピュータにおいて、請求項 3 記載の評価方法を実現するためのプログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、評価装置、評価方法、及び、評価方法を実現するためのプログラムに関し、特に、風車を設置する候補地点における風力エネルギーによる自然エネルギーの乱流により生じると予想される構成機器への影響を予測して評価するための評価装置等に関する。

30

【背景技術】

【0002】

近年の風力発電設備の増加に伴い、山岳部等の複雑な地形上に建設された風力発電所において、風車のブレード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 500 kW 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が実施された。この様に国の風力発電設備に対する公共の安全を確保及び環境保全を図ることから安全規制が強化される中、発明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。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とされている。このような状況を受け、本願出願人は、既に、特許文献 1 の技術を提案している。

40

【0003】

この特許文献 1 で提案した技術は、風力エネルギーはブレードを通して入力されることから、ブレードの疲労荷重評価は風車構造強度の評価を行う上では極めて重要であるという視点から提案した技術であり、具体的には以下の内容である。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等を計測し、得られた計測データに基づいて詳細な風車ブレード DEL (疲労等価荷重) データ解析を実施し、風車ブレード強度へ最も影響を与える風向を特定したものであった。

【先行技術文献】

50

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開2018-91328号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

ところで、ブレードを用いたプロペラ式風力発電所である風車は、ブレード・ロータ軸・ハブを含むロータ系、動力伝達軸・増速機を含む伝達系、発電機・電力変換装置・変圧器・系統連系保護装置を含む電気系、出力制御・ヨー制御・ブレーキ装置・風向風速計・運転監視装置を含む運転・制御系、ナセル（伝達軸・増速機・発電機等を収納する部分）・タワー・タワーを支える基礎を含む支持・構造系のように、種々の構成から成り立っている。

10

【0006】

ここで、風車に働く風の力を説明する。風車に働く風の力としては、ブレードに加わるブレード歪みに加えて、風力発電所である風車を構成する構成機器にもブレードに生じる波形から伝搬し繰り返し応力が加わっていることが分かってきた。この繰り返し応力は、引っ張りと圧縮のスラスト力である。このような力が加わる中で、風車制御方式も、ブレードの角度を制御するピッチ制御の他、ナセルを旋回させて風向に追従させるヨー制御が必要になっている。ここで、ヨーシステムは、ヨー歯車を用いて方位制御（ヨー制御）するシステムである。

20

【0007】

しかしながら、上記特許文献1の技術は、ブレードへの疲労荷重評価に注目してはいるものの、風力発電所の他の構成機器、具体的にはヨーシステムなどへの故障等の影響を評価するものではなかった。

【0008】

そこで、本発明は、風車ブレード歪みとスラスト力を計測できるナセル加速度（振動）との関係に着目し、ブレード以外の風力発電所の他の構成機器、具体的にはヨーシステムなどへの故障等の影響を評価する評価システム等を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0009】

本発明の第1の観点では、風車を設置する候補地点における風力エネルギーの乱流により生じると予想される構成機器へ与える疲労蓄積状況を予測して評価するための評価装置であって、前記候補地点を含む候補空間における前記風力エネルギーの境界入力条件を記憶する境界入力条件記憶手段と、前記境界入力条件の下で、前記候補空間における前記風力エネルギーの変化を演算するシミュレーション手段と、前記シミュレーション手段が演算した前記候補空間における前記風力エネルギーの変化と、前記境界入力条件記憶手段が記憶する前記境界入力条件とを用いて、前記候補地点に設置された場合の前記構成機器へ与える疲労蓄積状況を予測して評価する評価指標を演算する評価指標演算手段と、前記評価指標が評価基準値を超える場合に、前記候補地点に設置した場合の前記構成機器に疲労蓄積が進んで不具合が一定期間内に発生する可能性が高いと判定する判定手段を備えるものである。

30

40

【0010】

本発明の第2の観点では、第1の観点において、前記構成機器は、ヨーシステムであり、前記判定手段は、ブレード歪み変動とナセル加速度との関係性及び前記ナセル加速度とヨーシステムのヨーアクチュエータの電流値との関係性について、風向別にその大小を相関させ、前記ブレード歪み変動が前記ヨーシステムへの疲労蓄積を増加させて、前記不具合が一定期間内に発生する可能性が高いと判定することを特徴とする、ものである。

【0011】

本発明の第3の観点では、第2の観点において、前記評価指標は、前記候補空間に含まれる評価点における主流方向、主流直交方向及び鉛直方向の三方向についての乱流評価指

50

標の合成値である。

【0012】

本発明の第4の観点では、第3の観点において、前記自然エネルギーの変化は、前記自然エネルギーが変化する速さであり、前記境界入力条件は、前記候補空間の境界の一部又は全部における前記自然エネルギーの変化の最大の速さを含み、前記評価点における前記自然エネルギーの変化の速さの標準偏差を演算する標準偏差演算手段を備え、前記評価指標演算手段は、前記評価指標を、前記評価点における主流方向、主流直交方向及び鉛直方向の三方向についての前記標準偏差の前記最大の速さに対する比を演算し、その合成値として演算する、ものである。

【0013】

本発明の第5の観点では、第4の観点において、前記評価基準値は、0.2である。

【0014】

本発明の第6の観点では、第2の観点において、前記評価指標は、ブレードの先端が動く軌跡上の左右端における主流方向の速度圧を用いた風荷重評価指標である。

【0015】

本発明の第7の観点では、第6の観点において、前記評価基準値は、0.6である。

【0016】

本発明の第8の観点では、風車を設置する候補地点における自然エネルギーの乱流により生じると予想される構成機器への疲労蓄積状況を予測して評価するための評価方法であって、前記構成機器は、ヨーシステムであり、境界入力条件記憶手段が前記候補地点を含む候補空間における前記自然エネルギーの境界入力条件を記憶しており、シミュレーション手段が前記境界入力条件の下で前記候補空間における前記自然エネルギーの変化を演算しており、判定手段が、前記シミュレーション手段が演算した前記候補空間における前記自然エネルギーの変化と、前記境界入力条件記憶手段が記憶する前記境界入力条件とを用いて、前記候補地点に設置された場合の前記構成機器へ与える疲労蓄積状況を予測して評価する評価指標を演算するステップと、判定手段が、前記評価指標が評価基準値を超える場合に、前記候補地点に設置した場合の前記構成機器に疲労蓄積が進んで不具合が一定期間内に発生する可能性が高いと判定するステップとを含み、前記判定するステップにおいて、前記判定手段は、ブレード歪み変動とナセル加速度との関係性及び前記ナセル加速度とヨーシステムのヨーアクチュエータの電流値との関係性について、風向別にその大小を相関させ、前記ブレード歪み変動が前記ヨーシステムへの疲労蓄積を発生させて、前記不具合が一定期間内に発生する可能性が高いと判定することを特徴とする、ものである。

【0017】

本発明の第9の観点は、コンピュータにおいて、第8の観点到記載の評価方法を実現するためのプログラムである。

【発明の効果】

【0018】

本発明の各観点によれば、風車ブレード歪みとスラスト力を計測できるナセル加速度（振動）との関係に着目したことにより、ブレード以外の風力発電所である風車の構成機器に与える疲労蓄積を予測して評価できる。特に、ブレード歪み変動とナセル加速度との関係性及びナセル加速度とヨーシステムのヨーアクチュエータの電流値との関係性について、風向別にその大小を相関させ、ブレード歪み変動がヨーシステムへの疲労蓄積を増加させて、不具合が一定期間内に発生する可能性が高いと判定することにより、風車の構成機器の一つであるヨーシステムに生じる疲労蓄積を予測して評価できる。

【図面の簡単な説明】

【0019】

【図1】本願発明の実施の形態の一例に係る評価装置の構成の一例を示すブロック図である。

【図2】図1の評価装置の動作の一例を示すフロー図である。

【図3】実験として得られた串木野れいめい風力発電所の概要を説明する図である。

10

20

30

40

50

【図4】ナセル加速度計測データ解析として得られた実測データ解析の結果であって、ブレード歪みデータ比較（風速9 m / s程度時）[実測データ（0.02秒値、2015年）を示した図である。

【図5】ナセル加速度計測データ解析として得られた実測データ解析の結果であって、加速度×データ比較（風速9 m / s程度時）[実測データ（0.02秒値、2015年）を示した図である。

【図6】超音波風向風速計による気流解析を示す図であって、東風時と北風時の風向時系列データを比較する図である。

【図7】超音波風向風速計による気流解析を示す図であって、東風時と北風時の三方向風向時系列データを比較する図である。

【図8】ヨークチュエータ電流計測データ解析として得られた実測データ解析の結果であって、東風（期間：2019年10月24日0時～10月25日0時）についての計測電流及びE値、風況条件の時系列の推移（実測データ）を示した図である。

【図9】ヨークチュエータ電流計測データ解析として得られた実測データ解析の結果であって、北風（期間：2020年1月31日～2月1日0時）についての計測電流及びE値、風況条件の時系列の推移（実測データ）を示した図である。

【図10】東風の風況シミュレーション条件の概要を示した図である。

【図11】風車10号機に進入する主流方向（x）風速の分布（瞬間場）を示した図である。

【図12】RIAM-COMPACTを用いたブレード左右端にかかる風速差を計算した結果を示す図である。

【図13】RIAM-COMPACTを用いたブレード左右端にかかる風荷重差を計算した結果を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0020】

以下、図面を参照して、本発明の実施例について述べる。なお、本発明の実施の形態は、以下の実施例に限定されるものではない。

【0021】

まず、本願発明の前提の技術内容を説明する。特開2018-91328号で提案された乱流評価装置は、自然エネルギーとして風を使って発電する風力発電装置（風車）を候補地点に設置してよいか否かを判定するものであった。ここで、以下の説明で出てくる、候補空間は、風車を設置する空間であるとする。候補空間の最も高い場所は、風車の最も高い箇所（通常、ブレード先端高さである。）の標高となる。評価点は、風車のハブ高さであるとする。

【0022】

特開2018-91328号で提案された乱流評価指標は、「乱流評価指標 = σ （ハブ高さ風速標準偏差）/ U_{in} （境界風速）」であり、シミュレーションにおいて用いる境界入力条件を参照して、境界風速換算値として得られるものである。そのため、特開2018-91328号で提案された乱流評価装置は、境界入力条件の下でのシミュレーションにより得られた風のデータを利用して、境界入力条件を加味した乱流評価指標により、候補地点における乱流の評価をすることができるものであった。これにより、風力発電の事業者は、シミュレーションを利用して、候補地点に風車を設置した状態を想定して、候補地点に風車を設置してよいか否かを判断することができるものであった。

【0023】

このように、特開2018-91328号で提案された乱流評価指標は、候補地点に風車を設置する空間を評価することができるものであった。さらに、各風向によっても高精度に評価できるため、風力発電事業者にとって、例えば、故障の危険性がある風向を事前に知り、その風向のときには発電を止めて故障を回避し、他の風向のときは発電することなどの適切な発電制御を行うことにより、故障による停止を回避して、効率よく電気を得ることができるものであった。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 4 】

以下で説明する評価装置は、風車を設置する候補地点における風力エネルギーの乱流により生じると予想される構成機器へ与える疲労蓄積状況を予測して評価するための評価装置である。この評価において、実施例 1 では「乱流評価指標 3 成分合成」を用いることをポイントにしており、実施例 2 では「ブレード左右差の速度圧」を用いることをポイントにしている。「乱流評価指標 3 成分合成」又は「ブレード左右差の速度圧」を用いることにより、風車ヨーシステムのヨーアクチュエータ、ピニオンギアの故障リスク分析を行うことが可能になっている。

【 実施例 1 】

【 0 0 2 5 】

図 1 は、本願発明の実施の形態の一例に係る評価装置の構成の一例を示すブロック図である。図 2 は、図 1 の評価装置の動作の一例を示すフロー図である。図 1 及び図 2 を参照して、評価装置の構成及び動作の一例を説明する。

【 0 0 2 6 】

図 1 を参照して、評価装置 1 は、地形データ記憶部 3 と、境界入力条件記憶部 5（本願請求項の「境界入力条件記憶手段」の一例）と、基準値記憶部 7 と、評価指標記憶部 9 と、シミュレーション部 11（本願請求項の「シミュレーション手段」の一例）と、制御部 12 と、標準偏差演算部 13 と、評価指標演算部 15（本願請求項の「評価指標演算手段」の一例）と、判定部 17（本願請求項の「判定手段」の一例）と、出力部 19 とを備える。評価指標演算部 15 は、乱流評価指標合成部 16 を備える。

【 0 0 2 7 】

地形データ記憶部 3 は、候補地点を含む地域の地形を特定するための地形データを記憶する。境界入力条件記憶部 5 は、境界入力条件を記憶する。本実施例では、境界入力条件には、境界風速が含まれるとする。ここで、境界風速は、風車のブレード先端高さの標高での最大風速であるとする。以下では、境界風速は 10 m / s とする。基準値記憶部 7 は、判断処理の基準値を記憶する。本実施例では、判定基準値と評価基準値を記憶する。評価指標記憶部 9 は、評価指標演算部 15 が演算した各風向の乱流評価指標と、評価点における主流方向、主流直交方向及び鉛直方向の三方向についての乱流評価指標の合成値である評価指標を記憶する。

【 0 0 2 8 】

図 2 を参照して、図 1 の評価装置 1 の各構成の動作の一例を説明する。

【 0 0 2 9 】

まず、シミュレーション部 11 は、境界入力条件記憶部 5 が記憶する境界入力条件の下で、地形データ記憶部 3 が記憶する地形データを参照して、評価期間での評価点（ハブ高さ）における風のデータを得る（ステップ S T 1）。

【 0 0 3 0 】

次に、制御部 12 は、例えば 45° で分割して、東（東を中心に 45° の範囲から吹く風。以下同様。）、南東、南、南西、西、北西、北、北東の 8 つに分割するように、風向を複数に分割し、さらに、評価点における主流方向、主流直交方向及び鉛直方向の三方向である上下を加えて 3 次元的に分割して、その一つを選択する（ステップ S T 2）。

【 0 0 3 1 】

制御部 12 は、シミュレーション部 11 が得た風のデータにおける風向を利用して、ステップ S T 2 で設定された風向の風の風速の経時的データを得る（ステップ S T 3）。ステップ S T 3 で得た風速の経時的データは、一つ又は複数の期間のものとする。連続する期間に属する風のデータを、「風速群」という。期間を分ける基準は、例えば、他の風向から設定された風向になり他の風向に変わるまでを一つの風速群としたり、同じ風向であっても風速が所定値未満から所定値以上となって所定値未満になるまでを一つの風速群としたり、それらを組み合わせるとしてよい。

【 0 0 3 2 】

制御部 12 は、一つの風速群を選択する（ステップ S T 4）。そして、選択した風速群

10

20

30

40

50

での単位時間の平均風速が、判定基準値を超えるか否かを判断する（ステップST5）。本実施例では、単位時間は10分間であり、判定基準値は9.0 m/sである。単位時間の平均風速が判定基準値を超えるならば、ステップST6に進む。単位時間の平均風速が判定基準値を超えないならば、ステップST8に進む。

【0033】

ステップST6において、標準偏差演算部13は、ハブ高さにおける風速の標準偏差を演算する。そして、評価指標演算部15は、標準偏差演算部13が演算した風速の標準偏差と、境界入力条件記憶部5が記憶する境界速度を用いて、候補地点における乱流評価指標を演算する（ステップST7）。制御部12は、全ての風速群に対して処理を行ったか否かを判断する（ステップST8）。処理を行っていない風速群があるならば、ステップST4に戻り、処理を行っていない一つの風速群を選択する。制御部12は、全ての風速群に対して処理を行ったならば、評価点における主流方向（x）のu成分、主流直交方向（y）のv成分及び鉛直方向（z）のw成分の三方向の風向の全てについて処理が行われたかを判断する（ステップST9）。処理が行われていればステップST10に進み、処理が行われていなければ、ステップST2に戻る。

10

【0034】

ステップST10において、評価指標演算部15の乱流評価指標合成部16は、評価点における主流方向（x）のu成分、主流直交方向（y）のv成分及び鉛直方向（z）のw成分の三方向の乱流評価指標の合成値を演算する。ステップST11において、判定部17は、ステップST10で得られた合成値が評価基準値を超えるか否かを判定する。ここで、評価基準値は、0.2である。判定部17は、三方向の乱流評価指標の合成値である評価指標が評価基準値を超えないならば、ステップST13に進む。判定部17は、三方向の乱流評価指標の合成値である評価指標が評価基準値を超えるならば、候補地点における風の乱流が大きく構成機器へ与える疲労蓄積状況が大きく一定期間内に故障等の不具合が発生する可能性が高いと予測する。ここで、構成機器の具体的なものとしてはヨーシステムであり、具体的な不具合としてヨーアクチュエータ、ピニオンギアの故障や事故に対して注意を要することを表すものを評価基準値とし、上記の0.2を採用している。ステップST12では、出力部19は、三方向の乱流評価指標の合成値である評価指標が評価基準値を超えたことを出力し、構成機器へ与える疲労蓄積状況が大きく一定期間内に故障等の不具合が発生する可能性が高いと予測した結果が出たことを出力する。

20

30

【0035】

ステップST12に続き、制御部12は、全ての風向に対して処理を行ったか否かを判断する（ステップST13）。全ての風向に対して処理を行っていないならば、ステップST2に戻り、処理を行っていない一つの風向を選択する。全ての風向に対して処理を行ったならば、図2の処理を終了する。

【0036】

図3～図10を参照して、発明者らが行った実験を説明する。

【0037】

図3は、実験として得られた串木野れいめい風力発電所の概要を説明する図である。図示された写真は、2019年10月9日に撮影されたものである。

40

【0038】

株式会社九電工及び株式会社設備保守センターの協力の下、鹿児島県いちき串木野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）において、東側にある弁財天山（標高519m）を通過し発生する風の乱れ（地形性乱流）の影響が懸念され運転開始後約5年でヨーアクチュエータ、ピニオンギアの破損が発生した10号機を研究対象風車とした。

【0039】

[ナセル加速度計測データ解析（実測データ解析）]

図4は、ナセル加速度計測データ解析として得られた実測データ解析の結果であって、ブレード歪みデータ比較（風速9m/s程度時）[実測データ（0.02秒値、2015

50

年]を示した図である。図4(a)は東風についてのデータであり、図4(b)は北風についてのデータである。図5は、ナセル加速度計測データ解析として得られた実測データ解析の結果であって、加速度×データ比較(風速9m/s程度時)[実測データ(0.02秒値、2015年)]を示した図である。図5(a)は東風(11月13日8:00~10:00)についてのデータであり、図5(b)は北風(11月9日17:00~22:00)についてのデータである。

【0040】

2015年11月3日0時~2016年11月17日7時の期間におけるサンプリング周期0.02Sで計測したブレード歪み及びナセル加速度×のデータを使用して、風車ブレード強度へ最も影響を与える東風と、東風に対して、明確な差異が確認された北風についてナセル加速度×について解析を行った結果、東風のナセル加速度×の値は、北風に対して大きいことが示された。

10

【0041】

[超音波風向風速計による気流解析]

次に、超音波風向風速計による気流解析の結果を説明する。風車に入力される三次元の気流性状を解析するため、風車10号機のナセル上に、新たに三次元超音波風向風速計を設置し、風速・風向・風速標準偏差・乱流強度を解析した(10Hz:1秒間に10回の計測)。計測期間は、2016年12月13日12時~2017年3月27日23時とした。表1に示すように、風速9m/s程度において、風車10号機に進入する現地風条件の三方向[u(主方向)、v(横方向)、w(上方向)]において、u、v、w全ての風速標準偏差及び乱流強度は、北風の値に対して、東風の値が大きい事が確認された。

20

【0042】

【表1】

	発生日時	成分	平均風速(m/s)	風速標準偏差(m/s)	乱流強度
東風	2017年3月 20日 15時00分~ 10分	u	9.16	3.34	0.36
		v	-0.03	3.43	0.37
		w	-0.93	1.64	0.18
北風	2017年1月 11日 16時00分~ 10分	u	8.54	1.86	0.22
		v	-0.25	1.83	0.21
		w	1.38	1.08	0.13

【0043】

図6は、超音波風向風速計による気流解析を示す図であって、東風時と北風時の風向時系列データを比較する図である。図6(a)は、東風時(2017年3月20日15時00分~15時10分)のデータであり、図6(b)は、北風時(2017年1月11日16時00分~16時10分)のデータである。図7は、超音波風向風速計による気流解析を示す図であって、東風時と北風時の三方向風向時系列データを比較する図である。図7(a)は、東風時(2017年3月20日15時00分~15時10分)のデータであり、図7(b)は、北風時(2017年1月11日16時00分~16時10分)のデータである。

40

【0044】

以上のデータからは、以下の解析結果が得られた。風速と風速標準偏差の傾きが大きい場合に、ブレード疲労蓄積も大きくなることが実測結果により示された。東風時と北風時

50

、風速 9 m / s 程度において、風車ブレード D E L (疲労等価荷重)、風速標準偏差及び乱流強度に明確な差異が確認された。東風時の三次元的に時々刻々と変動する気流性状の場合、ブレード以外の風車構成機器の疲労蓄積を助長させているものと推測された。なお、風車 10 号機を対象とした 2 方位 (東方位および北方位) の風速標準偏差および風車ブレード D E L (疲労等価荷重) の差異については、10 号機東側 (78 deg 方向) 約 300 m に位置する弁財天山 (標高 519 m) の影響と推察される。

【 0 0 4 5 】

[ヨーアクチュエータ電流計測データ解析 (実測データ解析)]

ナセル方位を風向に追従させるヨーシステムにおいて、ヨーアクチュエータはヨーモータを駆動させるために極めて重要である。そのため、風車 10 号機ナセル内の、ヨーアクチュエータ動作時にヨーアクチュエータ 4 機 (右前方・後方、左前方・後方) の駆動電流値を自動計測が可能な装置を設置し計測した。計測期間の 2019 年 10 月 9 日 ~ 2019 年 10 月 27 日、2020 年 1 月 29 日 ~ 2020 年 2 月 25 日において、風車 10 号機のヨーアクチュエータ相電流実測データに基づき地形性乱流が風車ヨーシステムに与える影響を評価した。ここでは、上記した明確な差異が確認された東風と北風に主眼を置いて議論を進める。また、4 機のアクチュエータ駆動電流値に差異がなかったことから、右後方の値を評価値とした。ヨーアクチュエータの健全度指標については、乱流による非定常状態下の設備健全度を示す必要があることから、ヨーアクチュエータ稼働時の負荷変化に伴う電流の変動値をエネルギー等価値 (周波数データのオーバーオール値) として捉えることによって、駆動時間内の総エネルギー量として考えることができる。本解析ではヨーアクチュエータ駆動時に計測された電流変動値の合計エネルギー量は、フーリエ変換によって周波数軸に変換された振幅値の積和として表わすことができる。このため、この理論を利用することにより、単位周波数あたりのエネルギー量として標準化できるエネルギー量 (以下「E 値」呼称) を用いた。この E 値について少し補足する。数 1 に示した式は、パーセバルの定理であり、交流電流値を定量化する手法として用いた。ここで、一般的には、パーセバルの定理は騒音値の算定を行う場合に使用され、計測された測定レベルを各周波数帯域で合成 (総和) し、定量化するものである。設備の状態監視、健全性を表す指標としてのメリットとして、以下の点があることから採用した。まず、非定常性の強い時間信号をフーリエ変換することによって、その分析周波数帯域全体の合成パワーとして表現でき、画一的な絶対値判定が可能という点がある。次に、サンプリング周波数と算出方式が同一であれば、機種やメーカーが違ってほぼ同じ結果を得ることができる点 (標準化された指標として用いることが可能) がある。このような判断から、E 値を用いて、2019 年、2020 年に計測したヨーモータの電流 (負荷) を評価することとした。

【 0 0 4 6 】

【 数 1 】

$$\sum_{n=0}^{N-1} |y_n|^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |Y_n|^2$$

y_n : 電流データの振幅値

Y_n : FFT で求められるスペクトル値

【 0 0 4 7 】

データ解析のポイントとして、東風時の場合、計測期間で最も E 値が大きかった 2019 年 10 月 24 日 2 時 24 分と、同等の風速であった北風の場合の 2020 年 1 月 31 日 22 時 27 分の風向、風速、E 値を表 2 に示す。

【 0 0 4 8 】

【表 2】

解析方位	日時	風向(°)	風速(m/s)	E値
東風	2019/10/24 2:24	80	7.6	2.951
北風	2020/1/31 22:27	4	6.7	0.438

【0049】

図8は、ヨーアクチュエータ電流計測データ解析として得られた実測データ解析の結果で、東風（期間：2019年10月24日0時～10月25日0時）についての計測電流及びE値、風況条件の時系列の推移（実測データ）を示した図である。図8（a）は平均風向を示し、図8（b）は状態量を示す。図9は、ヨーアクチュエータ電流計測データ解析として得られた実測データ解析の結果であって、北風（期間：2020年1月31日～2月1日0時）についての計測電流及びE値、風況条件の時系列の推移（実測データ）を示した図である。図9（a）は平均風向を示し、図9（b）は状態量を示す。

【0050】

図8及び図9には、表2に表した時間のその前後の時間の計測電流およびE値、風況条件の時系列推移を示しており、東風と北風の比較解析の結果、東風時の方が北風時より明らかに高いE値となった。この結果、地形性乱流の影響により、ブレードに大きな歪み変動が発生し、これに連動してナセル加速度Xの値が大きくなり、ヨーアクチュエータ電流値にも差異が発生していることが推察された。このような地形性乱流の発生は、起動回数に比例又は増加により風車ヨーシステムの故障リスクに大きな影響を与えらる。

【0051】

[数値風況シミュレーション条件の概要]

図10は、東風の風況シミュレーション条件の概要を示した図である。メッシュ数は496×201×81点（約800万点）とし、流入風速分布はN=7.0に従うべき乗則分布とし、水平方向の最小メッシュ幅は約10.0m（不等間隔）とし、鉛直方向の最小メッシュ幅は約1.5m（不等間隔）としている。

【0052】

上記したヨーアクチュエータ電流値分析結果を踏まえ、ヨーアクチュエータ、ピニオンギアの破損に影響を与える風況特性を定量的に評価する必要があるため、地形性乱流の影響が大きいと推察された東風と上記したように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、実地形版RIAM-COMPACTを用いた。図10に示すように、東風の場合の風況シミュレーション条件を設定した。地形標高データは、国土地理院の空間解像度10mの標高データを用いた。なお、北風の場合も、東風の場合と同じ条件である。

【0053】

[計算結果の考察]

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る東風と、北風についても考察する。図11には風車10号機に進入する主流方向（x）風速の分布（瞬間場）を示す。この図を観察すると、東風が吹いた場合、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、10号機風車はこの影響を強く受けていることがRIAM-COMPACTの解析結果からも明らかになった。ここでは、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（風の流入変動）は考慮していない。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

20

30

40

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おり、ここでは、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成分の合成を活用した風車ヨーシステムに与える危険度の判定の評価指標について提案する。

【0054】

表3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（地上高60m）の乱流評価指標3成分の合成を示す。東風の場合、乱流評価指標3成分の合成値は0.23となっている。一方で北風の場合、乱流評価指標3成分は0.16と小さくなっている。また、表4及び表5に示したように、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ている。そして、東風時、風車10号機地点では非定常な風向変動が繰り返し生じたことにより、ヨーアクチュエータ、ピニオンギアの破損の主要因となったと考えられる。なお、表6に示すように、乱流評価指標を用いることにより、その場の乱流影響と風車ブレードDEL（疲労等価荷重）の大小関係を確認できることが期待される。

10

【0055】

【表3】

風向	風速標準偏差(m/s)／流入境界面風速
	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)成分の合成値
東風	0.23
北風	0.16

注) 乱流評価指標 = σu (風車ハブ高さ風速標準偏差) / U (流入境界面風速 = 10m/s)

【0056】

【表4】

風向	風速標準偏差(m/s)／流入境界面風速		
	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	0.25	0.21	0.20
北風	0.17	0.14	0.14

【0057】

【表 5】

	超音波風向風速計 乱流強度〔風速標準偏差(m/s)〕		
	(u)	(v)	(w)
東風	0.36[3.34]	0.37[3.43]	0.18[1.64]
北風	0.22[1.86]	0.21[1.83]	0.13[1.08]

【 0 0 5 8 】

【表 6】

	乱流評価指標	風速標準偏差 (m/s)	DEL(ブレード曲げ) 〔無次元〕
	主流方向(x)の (u)成分		
東風	0.25	2.3	2.03
北風	0.17	1.3	0.99

注) 乱流評価指標= σu (風車ハブ高さ風速標準偏差)/
U(流入境界面風速=10m/s)

【 0 0 5 9 】

〔風車ヨーシステム危険度判定への応用〕

上記した超音波風向風速計による風速3成分の計測結果から東風時の場合、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が示された。また、実測データ解析結果と風況シミュレーション結果(乱流評価指標3成分の合成)にも強い相関性が確認された(表1~表6参照)。これにより、図11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、風車ヨーシステムのヨーピニオンギアの破損を誘発させたと推測される。この推測に基づき、ブレード歪み変動とナセル加速度との関係性及びナセル加速度とヨーシステムのヨーアクチュエータの電流値との関係について、風向別にその大小を相関させ、ブレード歪み変動がヨーシステムへの疲労蓄積を増加させて、不具合が一定期間内に発生する可能性が高いと判定することとしている。複雑地形上に建設された風車ヨーシステムの危険度を判定する目的で、数値風況シミュレーション結果から乱流評価指標3成分の合成値が0.2を超える場合を破損リスク大、0.2以内の場合、破損リスク小と定義する。この指標は地形性乱流が与える影響は風車および風車ヨーシステムの保守・運転を結びつける数値であると考えられる。

30

40

【 0 0 6 0 】

以下、実施例1のポイントを整理して説明する。鹿児島県いちき串木野市羽島地区に位置する株式会社九電工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)が起源となる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る。このような気流性状は、風車ヨーシステムのヨーピニオンギアの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成分合成」を用いることが、風車ヨーシステムのヨーピニオンギア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義務付けられている。このため、山岳部などの複雑地形上に建設された風車の新規立地点では、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並びに長期安定運転に大きく貢献できるものと考えられる。

【実施例2】

【0061】

以下では、「乱流評価指標3成分合成」に代えて、ブレード左右端の風速（U成分）の変動に着目し、風車ヨーシステムに与える危険度を判定する新しい指標である風荷重評価指標についての実施例について説明する。

10

【0062】

まず、構成について説明する。実施例2では、図1の構成において、標準偏差演算部13は不要であり、評価指標演算部15は乱流評価指数合成部16を備えずに風荷重評価指標を演算するものに代わり、評価指標記憶部9も風荷重評価指標を記憶するものに代わり、基準値記憶部7も乱流評価指標3成分合成に対する基準値に代えて風荷重評価指標に対する基準値を記憶するものに代わることになる。動作は、図2の処理ではなく、シミュレーションして、風荷重指標を求め、風荷重指標が基準値を超えたか否かが判断され、超える場合には超えたことが出力されるとともに破損リスク大ということも出力される処理となる。

20

【0063】

風荷重指標について説明する。風荷重は、風圧力×受圧面積で求められる。風圧力は、速度圧 q (N/m^2) × 風力係数 C_f で求められる。速度圧 q は、 $0.6 \times E \times V_0^2$ で求められる。ここで、速度圧 q について説明する。風圧力は空気の運動エネルギーによって生じる。 $1m^3$ の空気の質量を m とし、速度 v とすると、 $(1/2)mv^2$ が空気の運動エネルギーになり、 m は約 $1.2kg$ なので、 $(1/2) \times 1.2kg \times v^2$ であり、 $0.6v^2$ となり、速度圧 q は、上記となる。ここで、 E は、高さと同環境で決まる係数である。このように、速度圧が風速 (m/s) の2乗に比例する。このことを踏まえ、ナセル風向風速計で計測されたハブ中心の風速から、ブレード左右端の風速を予測し、左右端の風荷重の相対比較を行うため、便宜上、 v^2 (風速の2乗) で算定を行うものとする。

30

【0064】

図12は、RIAM-COMPACTを用いたブレード左右端にかかる風速差を計算した結果を示す図である。図13は、RIAM-COMPACTを用いたブレード左右端にかかる風荷重差を計算した結果を示す図である。

【0065】

表7に示すように、「標準偏差」、「平均」、「最大値」の全ての値において、東風が北風を上回った。また、図11及び図12に示すように、東風の場合、風車ブレード左右端に大きな風の乱れが生じている。

40

【0066】

【表 7】

北風		東風	
標準偏差	0.059	標準偏差	0.105
平均	0.046	平均	0.066
最大	0.499	最大	0.965

【0067】

風荷重指標についての評価基準値は、下記の式から、0.6とした。なお、計算値は0.53になるが、耐用年数20年（FIT期間）後も風車が使用されることを考慮し、耐用年数+ の使用期間を考慮してラウンドアップした値をとり、0.6とした。

【0068】

【数2】

$$0.066(\text{東風時の平均荷重}) \times \frac{20(\text{耐用年数})}{5(\text{破損までの年数})} \times 2(\text{安全率}) \div 0.6$$

【0069】

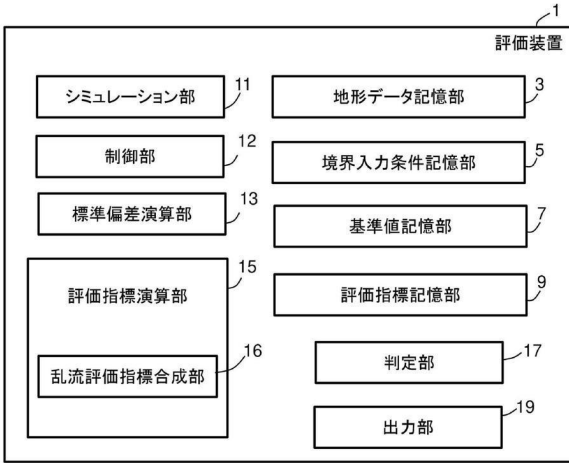
このような「風荷重指標」を評価指標に用いても、「乱流評価指標3成分合成」を評価指標に用いた場合と同様に、風車ヨーシステムの不具合、具体的にはヨーピニオンギアの故障リスクが大きいことが示すことができる。

【符号の説明】

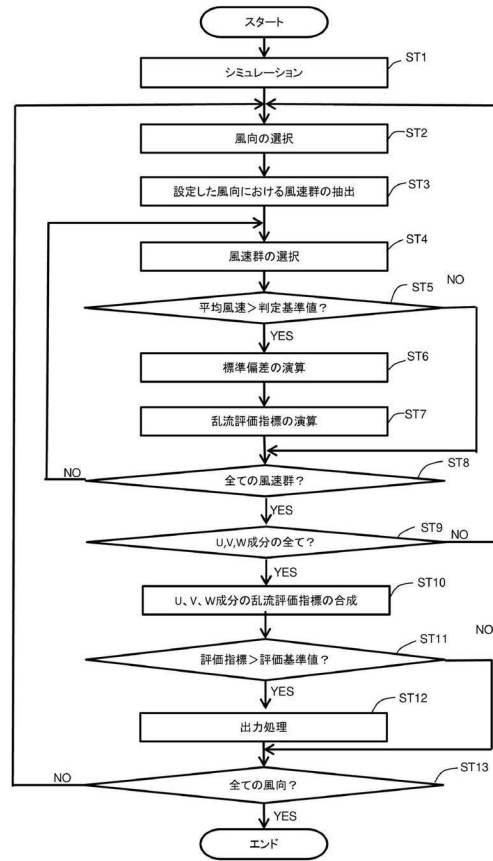
【0070】

1・・・評価装置、5・・・境界入力条件記憶部、11・・・シミュレーション部、15・・・評価指標演算部、16・・・乱流評価指数合成部、17・・・判定部

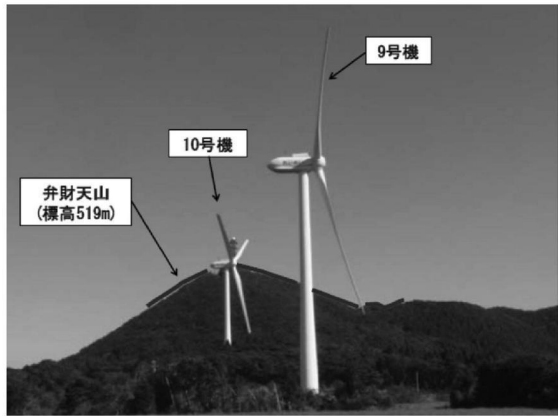
【 図 1 】



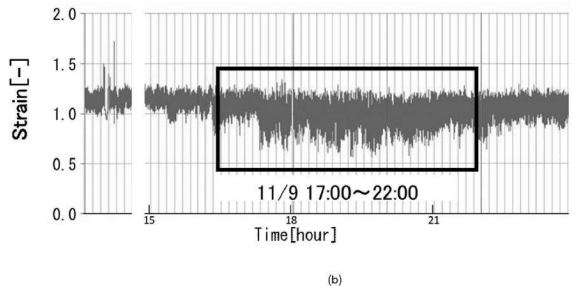
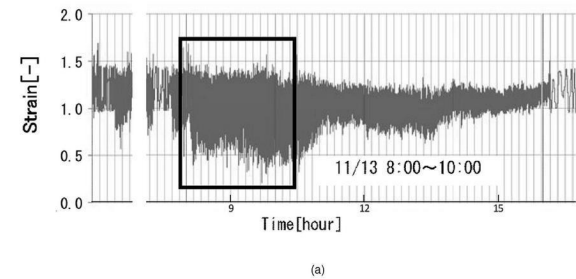
【 図 2 】



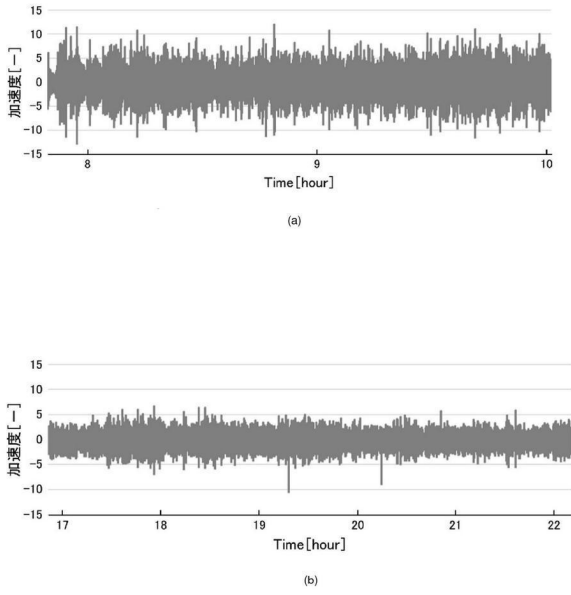
【 図 3 】



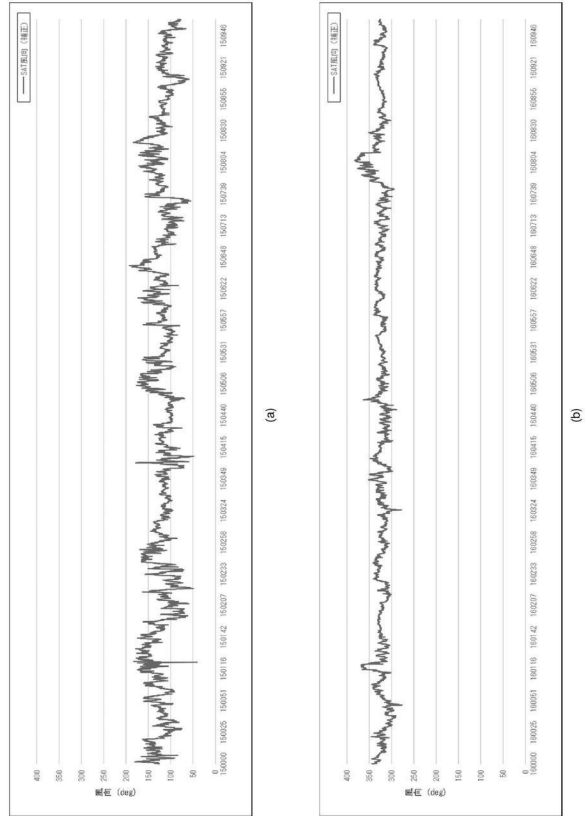
【 図 4 】



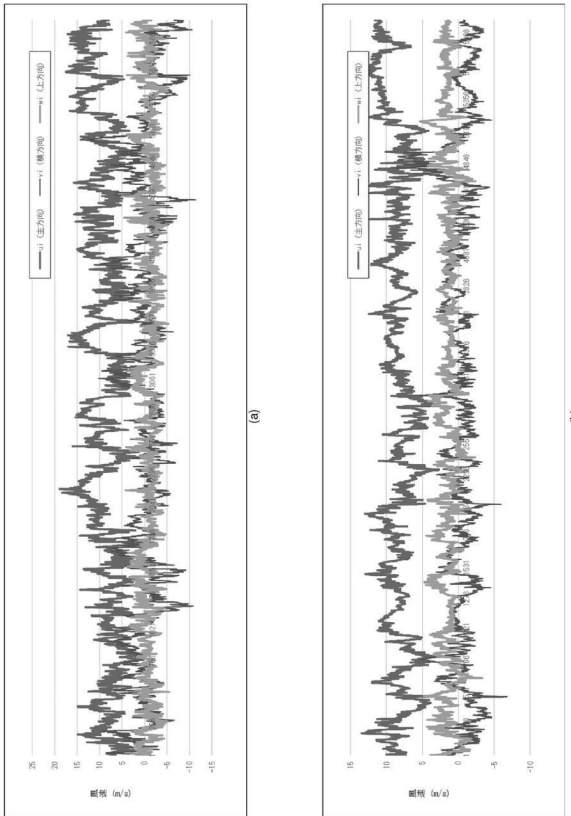
【 図 5 】



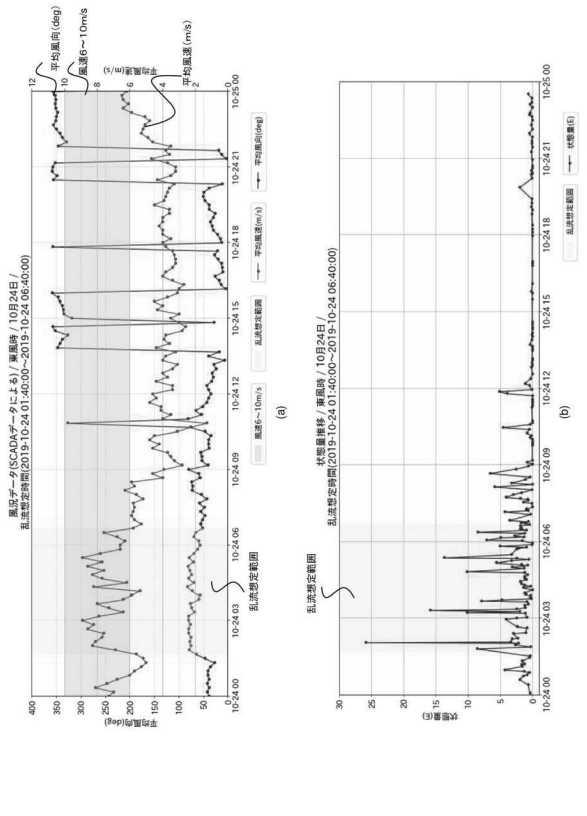
【 図 6 】



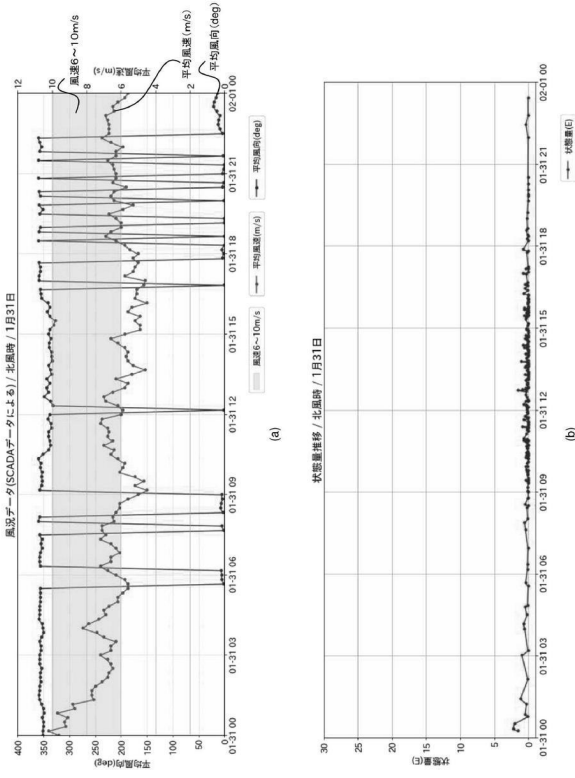
【 図 7 】



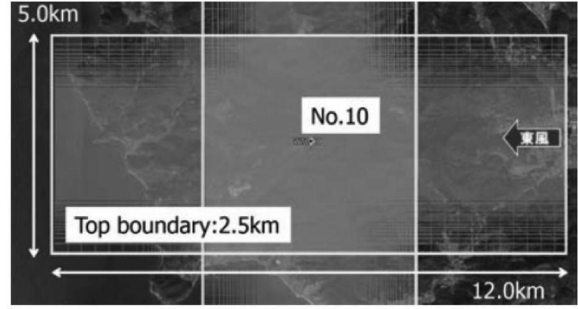
【 図 8 】



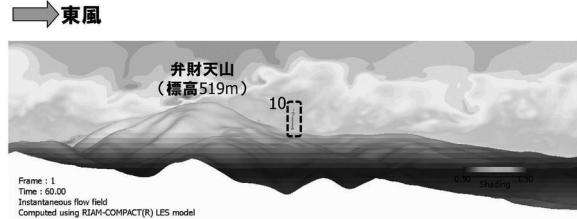
【 図 9 】



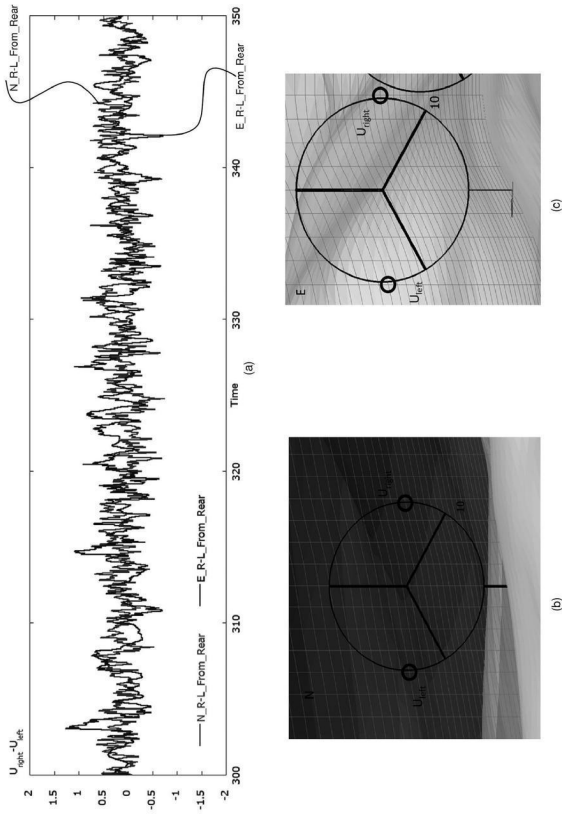
【 図 10 】



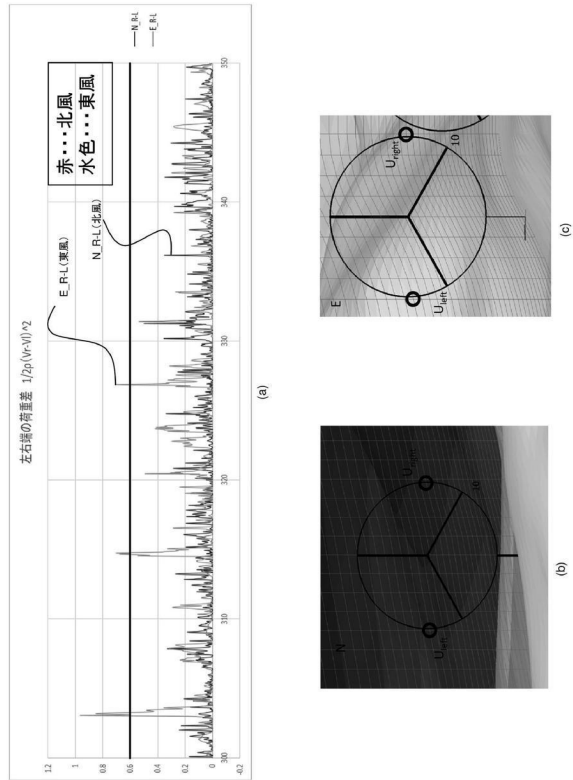
【 図 11 】



【 図 12 】



【 図 13 】



フロントページの続き

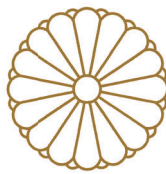
- (72)発明者 川島 泰史
福岡県福岡市中央区渡辺通一丁目1番1号 西日本技術開発株式会社内
- (72)発明者 山下 晃太
福岡県福岡市中央区渡辺通一丁目1番1号 西日本技術開発株式会社内
- (72)発明者 田中 啓太
福岡県福岡市中央区渡辺通一丁目1番1号 西日本技術開発株式会社内

審査官 高吉 統久

- (56)参考文献 米国特許出願公開第2016/0160842 (U.S., A1)
特開2016-217133 (JP, A)
特開2015-045329 (JP, A)
特開2003-035249 (JP, A)
特開2012-189080 (JP, A)
特開2018-091328 (JP, A)
特表2020-502424 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

F03D 17/00
G01W 1/00



特許証
(CERTIFICATE OF PATENT)

特許第7467012号
(PATENT NUMBER)

発明の名称
(TITLE OF THE INVENTION)

評価装置、評価方法、及び、評価方法を実現する
ためのプログラム

特許権者
(PATENTEE)

福岡県福岡市中央区渡辺通一丁目1番1号

西日本技術開発株式会社

発明者
(INVENTOR)

内田 孝紀

(その他別紙記載)

出願番号
(APPLICATION NUMBER)

特願2020-192360

出願日
(FILING DATE)

令和 2年11月19日 (November 19, 2020)

登録日
(REGISTRATION DATE)

令和 6年 4月 5日 (April 5, 2024)

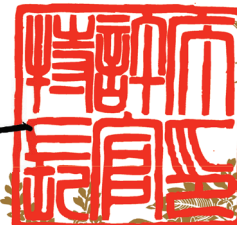
この発明は、特許するものと確定し、特許原簿に登録されたことを証する。

(THIS IS TO CERTIFY THAT THE PATENT IS REGISTERED ON THE REGISTER OF THE JAPAN PATENT OFFICE.)

令和 6年 4月 5日 (April 5, 2024)

特許庁長官
(COMMISSIONER, JAPAN PATENT OFFICE)

濱野 幸一



特許証

(CERTIFICATE OF PATENT)

(続葉 1)

特許第7467012号 (PATENT NUMBER)

特願2020-192360 (APPLICATION NUMBER)

発明者
(INVENTOR)

小川 智

古賀 和宏

川島 泰史

山下 晃太

田中 啓太

[以下余白]