

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24561058

研究課題名(和文) 風力発電システムにおける風況および風車性能予測統合による運転制御方法の構築

研究課題名(英文) Study on Wind Turbine Integration System of Performance Prediction and Wind Forecast

研究代表者

天久 和正 (AMEKU, Kazumasa)

琉球大学・工学部・准教授

研究者番号：40284955

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：2次元数値流体計算(CFD)と翼素運動量理論(BEM)を組み合わせた風車性能予測コードの開発を行い、風洞実験結果と比較し、その精度を検証した。久米島の気象観測所データを用いて風況を調べ、100kW風車発電特性を示した。また、風況予測CFDコードには粗さを考慮した乱流モデルを用い、丘陵まわりの風洞実験結果と比べ、精度を検証した。最多風向の北風で久米島風車設置域をシミュレートした。

3次元風車解析CFDコードには低レイノルズ数型乱流モデルを用い、2枚翼および3枚翼風車の風洞実験結果と比較し、精度を検証した。さらに、乱流モデル無しの計算を試みることで、はく離の影響による性能低下の要因が確認できた。

研究成果の概要(英文)：Wind turbine performance was predicted by both codes of a 2D-CFD and a BEM and verified a precision in comparison with experiments of a wind tunnel. Wind conditions in Kumejima Island were analyzed using metrological station data and characteristics of a 100kW rated turbine were shown. A CFD code of wind forecast adopted a turbulence model with surface roughness and was verified a precision in comparison with experiments of a wind tunnel study over a hill. Most frequent direction condition, north wind case, was simulated in Kumejima Island.

A 3D-CFD code of performance prediction adopted a low Reynolds number turbulence model and was compared with experiments of wind turbines having two or three blades. Furthermore, the CFD code without a turbulence model was verified a precision in small time increment and was confirmed effects of separation phenomena which influenced lift and drag forces.

研究分野：流体工学

キーワード：流体工学 流体機械 数値流体力学 自然エネルギーの利用 風力エネルギー 風力発電

1. 研究開始当初の背景

NEDO 研究プロジェクトにより、ウィンドファーム等の風況精査や気象予報に基づく数値シミュレーションが多く実施されている。多くのデータの蓄積やシミュレーション技術の発展により、全体的な予測精度は向上しているが局所的な風況予測に限界がある。

研究代表者は小型風車に適した翼形の開発や試作小型風車の屋外実験を行ってきた。この間、小型風車に LQG (Linear Quadratic Gaussian) 制御を組み込み、強風下で安定した出力を得るための研究を行った。

研究分担者は数値流体計算 (CFD) コードを独自開発しており、境界条件の重要性を実感している。CFD による風況予測の研究を概観すると妥当な境界条件が与えられている例はほとんどなく、これは非常に難しい課題であり、将来にわたっても完全には解決できないものと考えている。実用的な観点からは、地形や地域の風特性を把握し、妥当なモデルを構築できるかに尽きるであろう。また、自然エネルギー全般にいえることであるが、時々刻々変化し、変動幅の大きな入力から効率的で安定にエネルギーを取り出すことは難しい。このためには、よりシンプルで効果的な制御方法の構築が必要であり、これらが着想に至った経緯である。

2. 研究の目的

風車設置場所の風況予測は風況計測や数値シミュレーションを利用して行われているが、現状では予測が難しいといえる。最も大きな要因は解析における境界条件にあり、数値解析における風の流入、流出および上空の境界条件を適切に設定することが困難であることに起因している。

本研究では広域の風況予測ではなく、局所域の予測を行うため、風車周辺に設置した風速計の情報や風車情報 (出力、回転数、風車に設置された風速計など) から風況を予測するシステムを構築することを試みる。また、これらの予測と風車特性を考慮した最適な制御方法についても検討を行い、安全で高効率な運転システムの構築を図る。さらに、浮体式洋上風力発電では浮体動揺の影響を考慮する必要がある。適切な制御方法の確立に向けて、風況、風車特性および浮体動揺を組み入れた総合的な解析システムの構築、解析システムの評価検証を行う。

3. 研究の方法

本研究では風車設置域の風況を予測するための風況予測用 CFD コードの開発を行う。また、風況と風車情報の関連を把握するため、既存の計算コードを予測精度の向上と複雑形状に対応できるように改良しながら、風車用 CFD コードの開発を行う。

4. 研究成果

(1) 風況予測

① 久米島の風況データと風車特性の解析

2 次元 CFD コードと翼素運動量理論 (BEM) 計算コードを用いて直径 2.4m の水平軸風車

について性能解析を行った。まず、風車ブレードに採用されている 4 つの翼型について、CFD コードで性能予測を行い揚力係数と抗力係数を実験結果と比較し精度を検証した。次に、得られた広い迎角範囲の翼型性能データを用いて、BEM コードで風車性能を計算した。風車性能の計算結果と風洞実験結果を比較したところ、低回転数で翼失速域における低周速比域では、計算結果は実験よりも大きな出力係数であったが、迎角が小さくはく離が起こらない高周速比域では、最大出力係数で良い一致がみられた。

また、台風襲来の多い沖縄県久米島にて実証試験を行っている 100kW 風車を対象として研究を進めた。実証試験風車の性能予測として、まず、翼型性能データを元に各運転時におけるブレード上の流入速度分布や作用力分布などを調べた。風況解析では、島内 2 か所の気象観測所データ 3 年間について、風速・風向頻度分布、突風率などと台風襲来時の様子を調べた。さらに、実証試験場の夏季と冬季について、ナセル上の風速データを用いながら風車発電特性を示した。

② 風況予測用 CFD コードの開発

風況や風車性能予測を目的に、高精度で処理速度の速い計算コードの開発および予測精度の検証を行っている。CFD コードは非圧縮粘性流体を対象とし、Collocated Grid による有限体積法で構成、連続の式を満たすために SIMPLE アルゴリズムを用いた圧力補正を行っている。対流項は数値流束が 3 次精度風上補間となる QUICK スキーム、これ以外の項は 2 次精度中心差分で離散化している。Spalart-Allmaras 乱流モデルを用い、実風況下の予測には壁面境界条件として粗さを考慮した壁法則を適用している。なお、解析は計算処理時間が短い定常計算で実施している。

③ 数値流体計算による風況予測

丘陵まわりの風況 石原らにより実施された風洞実験結果⁽¹⁾をシミュレートすることにより数値解析の精度を検証した。これにより、丘陵まわりの速度分布は実験結果を良く模擬していることが確認できた。風洞実験は主流速度 5.8m/s、丘高さ 0.04m で、丘陵無し境界層厚さ 0.34m を代表長さとするレイノルズ数は 1.4×10^5 と低いため、滑面として扱い、壁法則を用いずに解析を行っている。

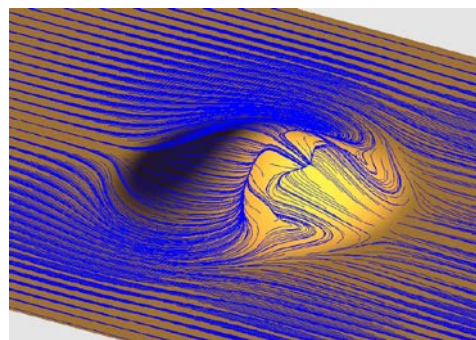


図 1 丘陵まわりの流れ

丘陵背面の斜面には1対の渦が形成され、3次元的な流れであることから下流に進むにつれ、縦渦に変化していることがわかる。なお、実フィールドでの解析はレイノルズ数が高く、 $y^+ < 1$ における壁面上の第一格子点までの距離は0.01m以下となる。これは周囲の構造物や樹木の高さと比較すると非常に小さな値であり、滑面としての扱いが意味をなさないことは明白である。

久米島の風況 以上の検証を踏まえて、風車が設置されている久米島本島東側に位置する離島の風況予測を実施した。上空や周囲の風速、地上の凹凸は直接計測できず、これら境界条件を予測または仮定して解析せざるを得ない。本研究では地形が風況にどのような影響を及ぼすか、定性的に把握することを目的に単純な境界条件で解析を行っている。すなわち、流入風や上空の風は一律とし、海上で自然に境界層が発達する状況について計算を行っている。久米島は面積59.53km²で最も高い宇江城岳でも標高310mと低く、平坦な地形となっている。また、50mメッシュ地形図から計算格子を生成していることもあり、格子上の地形は非常に平坦である。図2は年間を通して最多風向となる北風の風速分布と流線を表している。風車の設置域付近は風向、風速の変化が少ないと推測される。

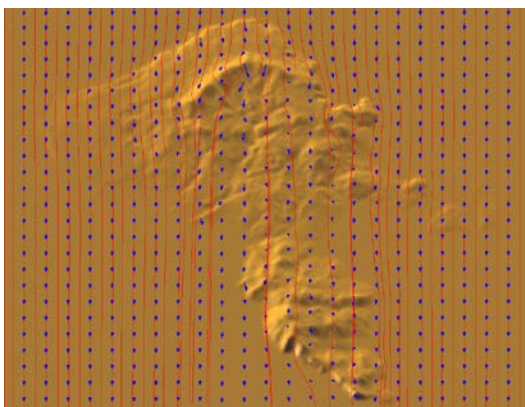


図2 久米島の最多風向(北風)における風況

(2) 風車特性解析用CFDコードの開発

① 水平軸風車用数値流体計算コードの開発

基本的なCFDコードの構成は風況予測用と同様である。違いは乱流モデルとして、Launder-Sharmaの低レイノルズ数型 $k-\epsilon$ モデルを導入している点である。また、解析は計算処理時間が短い定常計算および時間に対し2次精度後退差分となる非定常計算で実施している。

② 数値流体計算による風車特性の解析

既存の実験結果との比較による計算精度の検証および風車特性の解明を目的として開発したCFDコードによる解析を実施した。

2枚翼風車 デルフト工科大学による風車実験⁽²⁾を解析対象として、開発した計算コードの検証を実施している。図3~5は風が風車回転面に垂直に流入するヨー角0°の特性を定常計算した結果を示している。風車特性

は周速比 λ 、出力係数 C_p 、スラスト係数 C_a 、

$$U_{tip} = R\omega, \quad \lambda = \frac{U_{tip}}{V_a},$$

$$C_p = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho V_a^3 \pi R^2}, \quad C_a = \frac{F_a}{\frac{1}{2}\rho V_a^2 \pi R^2} \quad (1)$$

により表される。ここで、翼端周速 U_{tip} 、風速 V_a 、トルク T 、スラスト F_a 、空気の密度 ρ である。また、風車の世界では、これまでに効率を定義し、それについての議論は成されてきていないようである。出力係数 C_p は効率に対応するものであるが、分母の受風面積や風速の扱い方により、最大値は1とは限らず、1以上の値をとることもできる。これは、他のターボ機械との性能比較を効率という概念で捉え辛くしている。そこで、本研究では新たに次のように効率 η を定義した。

$$\eta = \frac{T\omega}{F_a V_a} = \frac{C_p}{C_a} \quad (2)$$

上式の分母は無風状態の中で風車を速度 V_a で移動させるための動力を表しており、分子はそのときの風車出力で通常と同様に0~1の値をとる効率が表現されている。これにより、他のターボ機械との性能評価が可能となり、それらの知見を活用しやすくなっている。

図3は出力係数 C_p に対する周速比の影響を表している。接線力は揚力とともに抗力の影響を強く受け、揚力と比較すると1割以下程度の小さな力になる。このため、数値計算のみならず、実験においても大きな誤差が生じやすい。実験結果は周速比 $\lambda=6$ 以下で失速域となり、これ以上が運転域となっており、この領域では開発した数値計算コードにより、実験結果を良好に予測できている。

図4はスラスト係数 C_a を表している。スラストはほぼ揚力と一致し、抗力の影響が少ない。さらに、揚力係数は単独翼の計算結果から分かるようにポテンシャル計算でさえ、実験値と比較して1割ほど大きくなる程度であるため、数値解析による高精度な推定結果が期待できる。このような理由から、スラスト係数 C_a の数値流体計算結果は全域に亘り実験結果と良好な一致を示している。

図5は式(2)で定義した効率 η を示している。一般にターボ機械では、ある程度大きなピッチ角を選定して適切な設定をすることで性能(効率)がより向上する。風車性能の評価において出力係数 C_p は重要な量であるが、エネルギー吸収率を表しているため、エネルギー吸収割合と流体機械としての効率の両方が含まれ、流体機械の性能として把握し辛い。このように、出力係数は効率を意味しているわけではないため、出力係数で単純に他のターボ機械と性能比較することはできない。ここで、図5の効率 η を見てみることにする。数値計算、実験結果ともに周速比が $\lambda=6.8$ 以上では翼端ピッチ角 $\theta_{tip}=2^\circ$ の結果は実験と計算結果で良く一致している。最大効

率は $\eta=50\%$ 前後で通常の流体機械に比較すると効率が低いことがわかる。流体機械として、性能を改善するという点から考えると、この効率を向上させることも必要となる。ここで注意すべき点は、通常の流体機械とは異なり、効率の高い風車が必ずしも高性能な風車とは限らないことである。

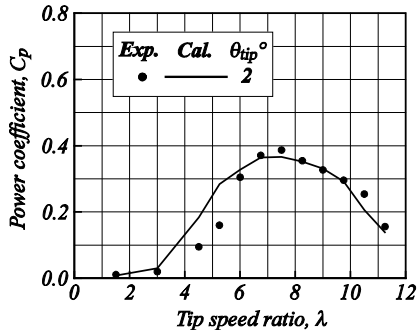


図3 出力係数

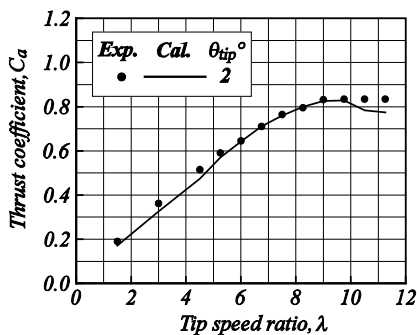


図4 スラスト係数

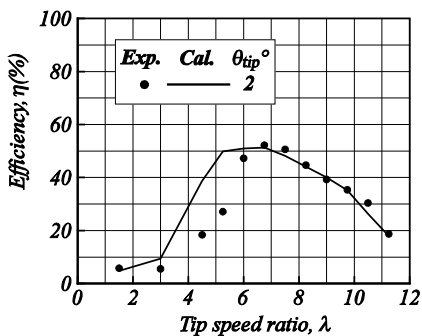


図5 効率

斜め風ではブレードへの流入角が時々刻々変化し、非定常な流れとなるため、風車全周を計算対象とした非定常計算を実施する必要がある。斜め風に関する Haans 等の実験結果⁽³⁾と比較し、予測精度の検証(発表論文⁽⁵⁾)を行った。結果はヨー角の増加につれ、実験と3次元計算の結果にずれが大きく生じるようになってきている。現在のところ、この違いが生じる要因は明らかになっていない。数値計算と実験ともに誤差や実験解析上の制約が内在しているためである。実験上の課題として、直径2mの吹き出し風洞下流に直径1.2mの風車が設置され、計測されている点である。吹き出し口下流は噴流となり、中心付近の一様な速度分布の領域は下流に行くに従い急激に減少する。このため、風洞直径に比較し風車直径が大きすぎる影響も考えられるが未確認である。このため、斜め風特性については更なる検討が必要である。

3枚翼風車 三重大学の風車実験⁽⁴⁾を解析対象として、計算コードの検証を実施している。供試風車は3枚翼、直径2.5mの水平軸型で吹き出し口径3.6mの回流型風洞内に設置、計測されている。実験風速7m/sで、風車半径を代表長さとするレイノルズ数は 6×10^5 となっている。図6は風車羽根車まわりの3次元計算格子であり、全球の1/3を計算領域としている。外部境界となる球の半径Rは羽根車半径の20倍とし、十分に広い計算領域を確保することで自由流中における風車特性の推定を行っている。ここに用いたO-O型格子は翼まわりに多くの格子を配置でき、不必要な箇所への無駄な格子割当てが軽減されるため、利用価値の高い格子配置である。計算に使用した格子は翼まわりに130点、翼幅方向に63点、翼面法線方向に52点であり、総格子点数は425,880点であった。羽根車半径を単位長さにとった翼面法線方向の最小格子幅は 5×10^{-6} であり、 y^+ はすべての計算点で1.0以下に収まっている。格子は代数的格子生成法である Transfinite 補間法を用いて生成している。格子解像度は二次元単独翼(NACA 0012)で検討、翼面上に100点、翼面法線方向に50点程度の少ない格子点数でも十分な計算精度が得られることを確認している。

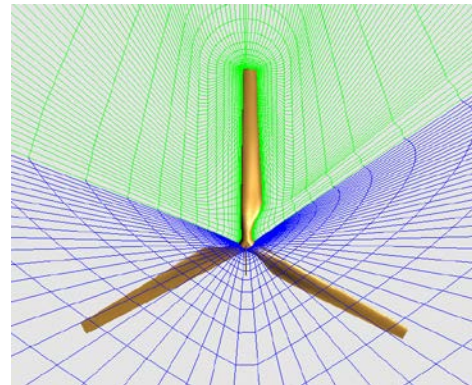


図6 3枚翼風車の計算格子

図7は出力係数と周速比の関係を表している。実験結果は周速比 $\lambda=5.2$ で出力係数が最大(0.43)となり、 $\lambda=4.2$ 以下では失速域に入り、急激な出力低下を示している。また、周速比 $\lambda=5.2$ 以上では周速比の増加につれ、迎角の低下とともに揚力係数が減少するため出力係数が小さくなる特性となっている。周速比 $\lambda=4.2$ 以上の乱流モデルによる計算結果は出力係数が実験結果よりも0.06~0.07程度高く、全体的に実験値を上シフトした特性となっている。このため、周速比に対する出力係数の変化は計算と実験で比較的良好な一致が得られている。これに対し、 $\lambda=4.2$ 以下の失速域では実験と比較して出力係数が緩やかに低下しており、実験結果に見られる急激な出力低下は示されていない。ここで課題となる点は風洞実験のレイノルズ数が小さいため、乱流モデルの影響により剥離が抑制され、実験値よりも高いスラスト係数を算出する可能性があることである。乱流モデルの利用により、

失速が遅れることは良く知られた事実であるため、本研究では失速が助長されることを期待して、乱流モデル無し（層流計算）の非定常計算を試み、その可能性について調べた。高レイノルズ数の流れでは乱流モデルがない場合、解が発散しやすいが、非定常計算で時間刻みを小さくすることにより、安定した計算結果が得られている。ただし、時間刻みの影響は顕著に現れるが、時間刻みが小さくなるにつれて、解は収束してくる。図7～8の非定常計算結果は出力やスラストが安定した後の1回転分の平均値を表している。出力係数は時間刻みが細かくなるにつれて増大し、高周速比では1/8000付近で収束する傾向が見られ、図7の出力係数は高周速比の $\lambda=6, 6.5$ で実験結果に近い値が得られている。これより低周速比である失速付近の $\lambda=4.5\sim 5.5$ では実験値よりもより小さな値を示している。

図8はスラスト係数を表している。失速直後の $\lambda=3.0\sim 4.2$ を除けば、乱流モデルによる定常計算結果は実験結果に比較すると全域にわたって0.09～0.145程度高い値になっている。スラスト係数も出力係数と同様に、計算結果は実験値を上にしフトさせた特性を示しているが、出力係数との違いは周速比の全域にわたり変化の傾向が実験結果と良く一致していることである。前述したように、スラストはほぼ揚力と一致し、抗力の影響が少ない。さらに、揚力係数は小さな剥離であれば、ポテンシャル計算でさえ、実験値との差は1割程度に収まり、数値解析による高精度な推定結果が期待できる。このような理由から、前述したVermeerらの実験との比較ではスラスト係数の数値計算結果は全域にわたり実験結果と良好な一致を示している。前述した図5の結果や図7の分布が良く一致していることを考慮するとスラスト係数に違いが生じる要因について、実験も含めた検討が必要と考えられる。数値計算上の課題は出力係数と同様に計算対象のレイノルズ数が低い点である。この点、乱流モデルなしの数値解析は有用で、乱流モデルの影響で剥離が抑制され、どの程度高いスラスト係数が算出されているかを判断する材料としての活用が可能と考えている。スラスト係数も出力係数と同様に時間刻みが小さくなるにつれて増大し、時間刻みが1/8000回転の結果は実験値と乱流モデルによる定常計算結果の間に位置している。乱流モデルを用いない計算は通常、実現以上以上に剥離が生じやすく、揚力低下、抗力上昇が起きると考えられる。このためスラスト係数は実験結果よりも小さくなると推定されるが、計算からは逆に実験よりも大きな値が得られている。図9～10は乱流モデルの有無による翼面上の流れを高周速比である $\lambda=6$ に描画している。乱流モデルなしの層流計算では正圧、負圧面ともに大きな剥離域が生じており、

剥離が層流計算による性能低下の要因であることが確認できる。

以上、乱流モデルなしの計算においても、妥当な結果を取得し得る可能性が示された。本研究では計算格子が粗く、十分に乱流現象が表現されているかなどの物理的な課題は残るものの、実用計算の一つとして、利用価値は高いと考えている。

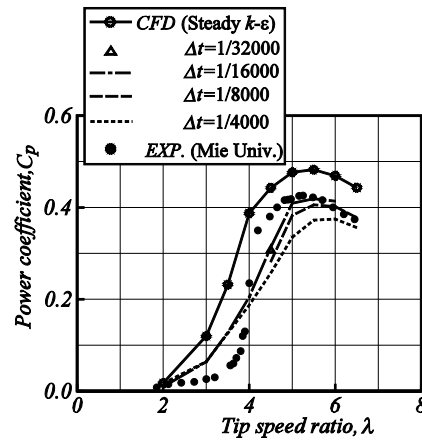


図7 出力係数

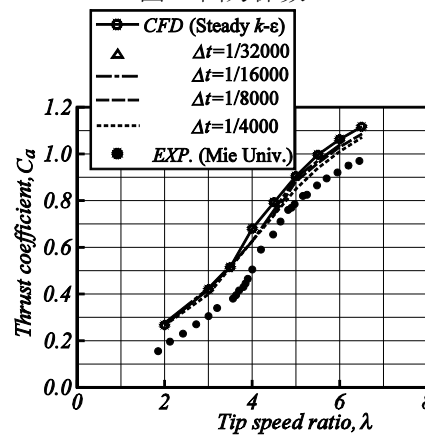
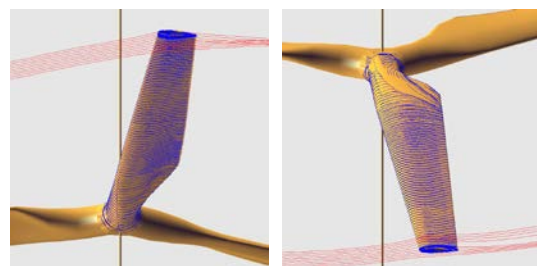
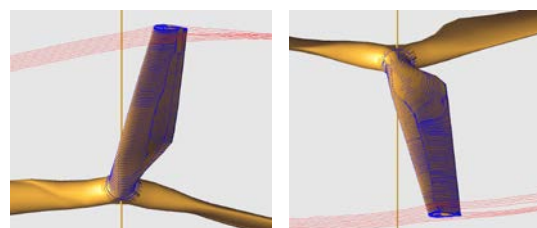


図8 スラスト係数



(a) Pressure side (b) Suction side

図9 乱流モデルによる定常計算



(a) Pressure side (b) Suction side

図10 層流計算による非定常計算

(3) 風車の運転制御方法の開発

定格出力以下と以上の風速により、運転制御方法が異なる。基本的に、定格出力以下の風速では最適周速比(最大出力係数の周速比)で運転され、定格出力以上の風速では可能な限り、定出力運転がなされる。ただし、風速変動のため、完全な定出力運転はできない。このような定出力運転は浮体式洋上風力発電の場合、ネガティブダンピングの状態となり、風車の動揺を増幅し、危険な状態に陥らせる可能性がある。このように、ネガティブダンピングは制御方法により生じる現象で、風車固有の特性でない。通常の状態(例えば迎え角一定で運転)では風速の増加とともにスラストが増加するため正のダンピングとなり動揺は減衰させられる。これに対し、定出力運転ではスラスト×風速がタービン入力となることから、スラストが風速に逆比例して減衰するネガティブダンピングが生じることになる。

浮体式洋上風力発電運転の安定化にはネガティブダンピングが誘起しない運転制御や風車および浮体特性を築き上げることが重要である。浮体運動に関連した(発表論文(10))研究とこれらの特徴を考慮した制御方法の研究も継続、推進している。

<引用文献>

- ① T. Ishihara, K. Hibi and S. Oikawa, "A wind tunnel study of turbulent flow over a three-dimensional steep hill," J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol.83 pp.95-107, 1999.
 - ② Vermeer, N. J., "Performance measurements on a rotor model with Mie-vanes in the Delft open jet tunnel", IW-91048R, Institute for Wind Energy, Delft University of Technology (1991).
 - ③ Haans, W., Sant, T., van Kuik, G. and van Bussel, G., (2005), Measurement of Tip Vortex Paths in the Wake of a HAWT Under Yawed Flow Conditions, Transactions of ASME, Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 127, November, 456-463.
 - ④ 藤岡秀康, ヨー角・ピッチ角変化に伴う風力タービンロータ特性に関する研究, 三重大学修士論文 (2007).
5. 主な発表論文等
〔雑誌論文〕(計 13 件)
- ① Masami SUZUKI, "CFD Analysis Horizontal Axis Wind Turbine," The 13th Asian International Conference on Fluid Machinery, 査読有, Tokyo, Japan, CDROM, No. AICFM13-170, 2015, pp.1-8
 - ② Masami SUZUKI, "CFD Simulation of Horizontal Axis Wind Turbine Characteristics in Yawed Flow Conditions", Proceedings of the 12th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows

(ISAIF 12), 査読有, Lerici, Italy, CDROM, Paper No. ISAIF12- 071, 2015, pp.1-9

- ③ 鈴木正己, 天久和正, "乱流モデル無利用による水平軸風車特性の数値解析", ターボ機械, 査読有, 43 巻, 6 号, 2015, pp. 367-374
 - ④ 鈴木正己, "BEM と CFD による風車特性と流れ場の比較", 日本流体力学会年会 2015 講演論文集, 査読無, USB, 226, 2015, pp. 1-3
 - ⑤ 鈴木正己, 天久和正, "CFD と BEM による水平軸風車特性の評価", 第 73 回ターボ機械協会講演論文集, 査読無, USB, A09, 2015, pp. 1-6
 - ⑥ Masami SUZUKI, "3D-CFD Simulation and BEM Analysis of Horizontal Axis Wind," The 5th Asian Joint Workshop on Thermo physics and Fluid Science 2014 (5th AJWTF), 査読有, Nagasaki, Japan, CDROM, JP58 (2014-9-24)
 - ⑦ 鈴木正己, 天久和正, "水平軸風車の空力特性に関する数値解析", ターボ機械, 査読有, 42 巻, 6 号, 2014, pp.387-394
 - ⑧ 鈴木正己, "振動水柱型波力発電装置の平均発電量予測", 日本機械学会 2014 年度年次大会 DVD-ROM 論文集, 査読無, J0540103, 2014, pp.1-4
 - ⑨ 鈴木正己, 天久和正, "乱流モデル無利用による水平軸風車特性の数値解析", 第 71 回ターボ機械協会講演論文集, 査読無, USB, C-01, 2014, pp.1-6
 - ⑩ 鈴木正己, "数値計算による水平軸風車の性能予測", 日本機械学会論文集, 査読有, 79 巻, 808 号, B 編, 2013, pp.2557-2561 DOI:http://doi.org/10.1299/kikaib.79.2557
 - ⑪ 鈴木正己, 天久和正 "CFD による水平軸風車特性の実用的な数値解析", 風力エネルギーシンポジウム講演論文集, 査読無, 2013, pp.232-235
 - ⑫ 鈴木正己, "数値計算による水平軸風車の性能予測", 第 18 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, 日本機械学会, 査読無, 2013, pp.211-214
 - ⑬ 鈴木正己, 天久和正, "単一格子による水平軸風車特性の数値解析", 第 69 回ターボ機械協会講演論文集, 査読無, USB, C-6, 2013, pp.1-6
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
天久 和正 (AMEKU, Kazumasa)
琉球大学・工学部・准教授
研究者番号: 40284955
 - (2) 研究分担者
鈴木 正己 (SUZUKI, Masami)
琉球大学・工学部・教授
研究者番号: 30171250