

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420115

研究課題名(和文) 水平軸風車における可変速・翼ピッチ制御運転の最適化に関する研究

研究課題名(英文) Study on control optimization of rotor speed and blade pitch for horizontal axis wind turbine

研究代表者

長谷川 豊 (Hasegawa, Yutaka)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20198732

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、水平軸風車への流入風速変化に伴い発生する風車の出力変動につき、風車運転制御により変動振幅を低減することを旨とする。この目標を達成するため、主に以下の研究を実施した。

1. 自然風下で運転制御する風車を模擬する数値解析モデルを構築すると共に、実験結果との比較によりモデルの妥当性を検証した。
2. 風車への瞬時流入風条件を推定する手法を上記解析モデルに基づき確立し、得られた流入風速推定値を用いて、風車出力変動を低減するための運転制御方法を構築した。

研究成果の概要(英文)：The present study researches the output fluctuation of horizontal axis wind turbines due to the variation of inflow wind velocity, and aims at decreasing the fluctuation amplitude by controlling their rotor speed and/or their blade pitch. In order to achieve the target we have conducted the following researches.

1. We have constructed a numerical analysis model which can simulate the behavior of the wind turbine running in the natural wind, and confirmed its validity by comparing the calculated results with the measurements.
2. We have constructed an estimation scheme of instantaneous wind velocity flowing into the turbine rotor, and developed an control procedure which can reduce the fluctuation amplitude of the turbine output.

研究分野：機械工学

キーワード：流体機械 風力発電 風車運転制御 数値解析 モデル実験

1. 研究開始当初の背景

次世代の10~20MW級超大型風力タービンでは、空力、重力に基づく励振周波数が構造系の固有振動数を上回るため、タービン設計・開発には柔構造設計手法の確立が不可欠であり、そのための要素技術として流体・構造連成解析ツールの構築は必須である。

しかし、現状の変動荷重解析ツールにおいては、流体系と構造系との厳密な連成解析が行われていない。例えば翼空力負荷に及ぼす翼振動・翼変位の影響は空力弾性係数、空力減衰係数と呼ばれる経験定数として考慮されているに過ぎず、その定数も中型風車を対象とした実験により得られた値であるため、その妥当性に疑問が呈されている。

一方、風力エネルギー利用の促進を図るためには大型風車の出力変動をより小さくし、システムへの連系負荷を低減する必要がある。しかしながら風車への流入風速・風向は様々な時間スケールで絶えず変動するため、風車出力変動の低減にはその時間スケールに合わせた対応方法が求められる。

比較的長い時間スケールの風速変動には、例えば電池を用いた電力貯蔵が考えられるが、短い時間スケールの変動に対しては、キャパシタの利用と併せて、風車ロータの運転制御が必要となる。現在の大型水平軸風車では、風車翼のピッチ角およびロータ回転速度を調整することにより出力制御を行うものが多く、この制御方法の最適化により、短い時間スケールの出力変動をある程度まで抑制することが期待される。風車翼ピッチ角制御ならびにロータ回転速度制御を行う際には、ロータ空力性能の過渡応答特性が問題となる。

本研究では、大型風車単機の出力変動につき、風車運転制御を行うことにより変動振幅を低減することを目指し、次節に示す要素技術の開発を数値解析ならびに実験により行うことを目的とする。

2. 研究の目的

本研究は、大型水平軸風車を対象とし、風車への流入風条件(風速・風向)の変化に伴い発生する風車単機の出力変動につき、風車運転制御を行うことにより出力変動振幅を低減することを目指し、必要となる以下の要素技術 ~ の開発を数値解析ならびに実験により行うことを目的とする。

自然流入風下で運転制御する風力発電設備に関する各種物理現象を分析し、これを基に風力発電設備の数値解析モデルを構築すると共に、解析モデルの妥当性を検証する。

具体的には、以下の2項目を達成することを目指す。

-1 風車流体系と構造系との連成解析モデルの構築:ロータ翼とナセル、マストを含むタービン構造系モデルとタービン周り流れ場解析モデルにつき、連成解析モデル

を構築する。

-2 風車制御に伴う風車ロータ空力性能の過渡応答特性の解析:ロータ回転速度ならびに翼ピッチ角制御に伴い生じる風車ロータ空力性能の過渡応答特性を数値解析に基づき推定すると共に、モデル実験により検証する。

制御対象とする可変速フルピッチ制御水平軸風車の実験システムを設計・製作する。風車出力変動を低減するための風車運転制御アルゴリズムを構築する。

3. 研究の方法

前章に挙げた要素技術 ~ を開発するための研究方法について、以下に示す。

-1 風車流体系・構造系連成解析モデルの構築

風車の大型化に伴い風車構造系の固有振動数が低下し、ロータ翼に働く卓越加振周波数(ロータ回転周波数とその翼枚数倍の周波数)に近づくため、風車構造系における共振現象発生の危険性も増大する。以下には、水平軸風車のロータ翼周り流れの空力系とロータ翼構造系を弱連成させた構造負荷解析モデルを説明する。

水平軸風車ロータ翼に働く構造負荷を解析するため、流体解析にパネル法を構造振動解析にマルチ・ボディ・ダイナミクス法を採用し、両者を弱連成させる。

パネル法では翼表面を矩形パネルに分割し、パネル要素が持つ空気力学的効果を渦格子パネルにより表す。風車タワーが及ぼす影響を考慮するために、タワー周りに非粘性流れを仮定し、翼周り流れと同様にパネル法に基づきタワー表面に矩形渦パネルを配する。ただし、タワーに作用する抗力に関連するタワー上流での減速を考慮するために、タワー中心軸上に湧き出し分布を追加した。

マルチ・ボディ・ダイナミクス法では、各ロータ翼を n 個のボディ(剛体)に分割し、各ボディをヒンジ(弾性・減衰効果を有する)で連結させることにより、エッジ(ロータ回転)方向とフラップ(ロータ軸)方向の翼振動を考慮する。

翼振動が翼周り流れ場に及ぼす影響は、翼変位に基づくロータ翼渦格子パネルの変形及び、翼振動速度に基づく翼に対する流入風の相対速度の変化として考慮する。また、振動解析においては空力解析により得られる空力負荷に加えて、重力、回転に伴う遠心力、コリオリ力を外力として考慮する。解析対象には、NREL S809 翼型を持つ2枚翼風車を用いる。ロータ半径は $R=5.029$ m、回転速度は71.63 rpm である。

-2 制御に伴う空力過渡特性の解析方法

本解析では、空間的・時間的に均一な流入風がロータ回転面に垂直に流入する条件において、ステップ状に翼ピッチ角およびロー

タ回転速度を変えた際の風車ロータ空力負荷の応答特性を風車後流の誘導速度との関係で調べる。

風車の空力負荷解析には加速度ポテンシャル理論に基づく非粘性モデルを使用した。本モデルは非定常三次元非粘性流れ場を比較的低い計算負荷で解析可能である。動的失速を含む翼周りの非定常粘性流れの影響は2次元翼型空力データならびに ONERA モデルに基づき考慮した。なお、本課題に関して解析対象とした風車はデンマークの Tjæreborg 風車で、3枚翼を持つアップウインド型フルピッチ翼ロータで、出力 2MW のロータ半径 $R=30.56\text{m}$ の風車である。

モデル実験風車システムの設計・製作

本研究項目は、翼ピッチ角とロータ回転速度の両方が制御可能な小型水平軸風車のモデル実験装置を設計・製作し、で構築する解析モデルの妥当性を検証するためのフィールド試験に供することが目的である。モデル実験装置の主な仕様を表1に示す。

表1 モデル実験風車の仕様

Blade number	$N_B=2$
Rotor radius	$R=0.600\text{[m]}$
Rout cut-off	$0.300R\text{[m]}$
Hub height	$h_{hub}=3.0\text{[m]}$
Chord length	$c=0.100\text{[m]}$
Preset angle	$\theta_{pre}=0.0^\circ$
Blade profile	NACA2412
Hub radius	$R_{hub}=0.125\text{[m]}$

本実験装置の翼ピッチ角は、ロータハブに設置したステッピングモータと傘歯車により2枚翼を同期制御し、同モータへの電力、制御信号の供給はスリップリングを介して行う。ピッチ角の制御速度は最大 5deg/sec である。ロータ回転速度の制御加速度は最大 200rpm/sec である。

フィールド実験を実施することにより翼ピッチ角制御ならびに回転速度制御に伴うロータ過渡特性を測定し、各種モデル解析の妥当性検証に利用した。

出力変動を低減する風車運転制御アルゴリズムの構築

本研究では、水平軸風車ロータの出力トルクならびに運転条件（ロータ回転速度、翼ピッチ角）をモニタすることにより、風車ロータへの瞬時流入風速を推定する方法を構築した上で、得られた流入風速推定値に基づき風車出力変動を翼ピッチ角制御に基づき低減する方法を検討した。

風車への乱流流入風の時系列データを数値モデル（Veers モデル）により与え、風車ロータ出力トルクの時系列データを加速度ポテンシャル法に基づく空力特性解析により計算する。得られた出力トルクの時系列データと風車運転条件から、風車への流入風を

推定するために、風速一定の条件で調べた風速 - 出力トルクの相関マップを利用する。

実際の風車への流入風は乱流であるため、時間的・空間的に風速は変動する。従って、ロータへの瞬時流入風速の真値は、ロータ面全体を通過する瞬時のエネルギー流束の3乗根から求めた。一方、流入風速推定値は、出力トルクの時間平均値を利用し、風速 - 出力トルクの相関マップより算出する。

翼ピッチ角制御のアルゴリズムは、風速推定に用いる風速 - 出力トルクの相関マップを用いると共に、翼ピッチ角制御時に出力トルクに現れる過渡応答の時定数を用いることにより、PID 制御アルゴリズムを構築し、制御に伴う出力変動低減効果を調べた。

4. 研究成果

前章に挙げた研究方法に基づき研究を実施した結果、得られた研究成果を以下に示す。

-1 風車流体系 - 構造系連成解析モデルの構築：連成解析を実施し、得られた結果を本項に示す。なお、ロータ翼根部に働く翼負荷に関しては、ロータ翼に生じている流体力によるモーメントを翼幅方向にわたって積分したものである空力負荷と、ヒンジスプリングにおけるたわみ角とバネ定数の積として定義される構造負荷の2つに区別して考えることとする。

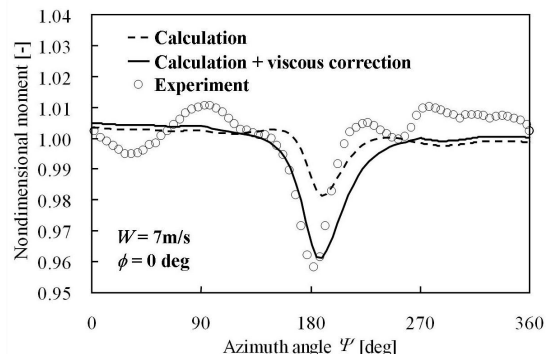


図1 翼根部に働くフラップ方向モーメント変動成分の比較結果

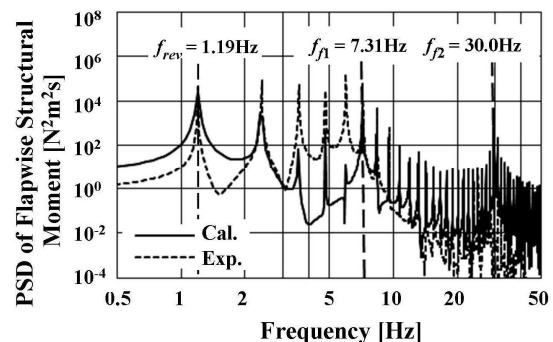


図2 翼根部におけるフラップ方向構造負荷モーメントのパワースペクトル密度の比較結果（NREL 風洞風車）

平均風速 $W=5$ m/s, ロータ面への流入偏差角 $\phi=0^\circ$, 乱流強度を $TI=\sigma/W=0$ (σ : 風速変動の標準偏差) とした一様流入風に対するフラップ方向の空力負荷変動について, 解析結果と実験結果を比較して図1に示す. 図中の破線と実線はそれぞれ非粘性モデル解析, ならびに粘性補正を加えた解析の結果である. 風車翼がタワー上流を通過するアジマス角 ($\psi=180^\circ$) 近傍において空力負荷が減少する様子は, 粘性補正を加えることにより実験結果により近づく.

構造負荷変動に関する連成解析結果の妥当性を検証するために, 翼根部におけるフラップ方向構造負荷モーメントのパワースペクトル密度を図2に示し, 実験結果と比較する. ここで, フラップ方向はロータ軸方向である. 計算条件として, ヨー偏差角を $\phi=30^\circ$, 流入風速を $W=7$ m/s, 乱流強度を $TI=0$ とした. 図2からフラップ方向モーメントについて, 翼回転周波数 $f_{rev}=1.19$ Hz とその高調波周波数にスペクトルピークが見られる. さらにフラップ方向の固有振動数 ($f_{f1}=7.31$ Hz, $f_{f2}=30.0$ Hz) 付近においてもスペクトルにピークが確認できる. 図2において実験値と解析値が比較的良く一致していることから, 解析モデルの妥当性が確認できる.

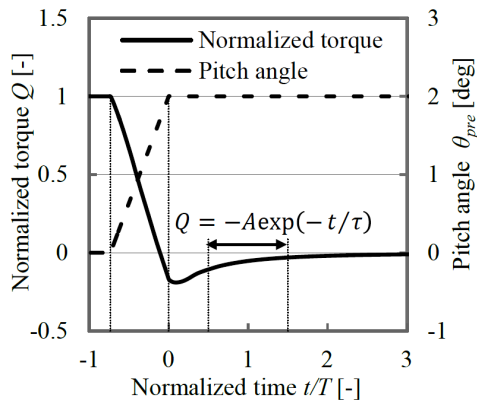


図3 ピッチ角制御時の正規化されたトルク過渡応答の一例

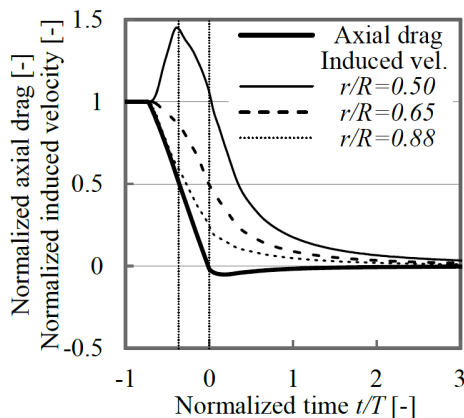


図4 ピッチ角制御時の正規化された軸推力と誘導速度の過渡応答 ($\lambda=5$)

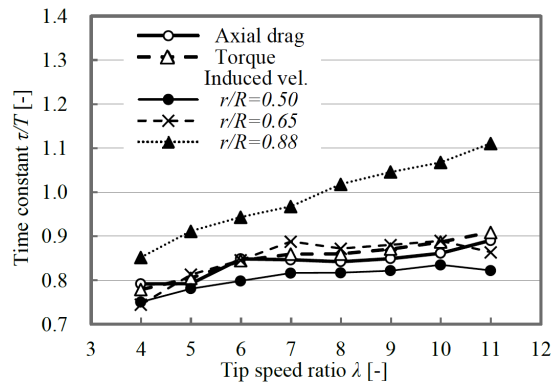


図5 ピッチ角制御時の空力過渡特性の時定数と周速比の関係

-2 制御に伴う空力過渡特性の解析方法:
上流風速 W とロータ回転角速度 Ω を一定に保ち, 翼端ピッチ角 θ_{pre} を時刻 t に対し次の通り制御した結果について示す.

$$\begin{cases} \theta_{pre} = 0 \text{ deg} & \text{for } t \leq -2 \text{ sec} \\ \theta_{pre} = t \text{ deg} & \text{for } -2 \leq t \leq 0 \text{ sec} \\ \theta_{pre} = 2 \text{ deg} & \text{for } 0 \leq t \text{ sec} \end{cases} \quad (1)$$

瞬時のロータトルクを q , ピッチ角を $\theta_{pre}=0^\circ$, 2° で一定に保った定常運転時のトルクをそれぞれ q_1, q_2 とし, 次式によりトルク変動を正規化して Q と定義する.

$$Q = \frac{q - q_2}{q_1 - q_2} \quad (2)$$

周速比 $\lambda=R\Omega/W=5$ における正規化したトルクのピッチ角制御に伴う過渡特性を図3に示す. 図中に示す通り, 制御終了後の $t/T=0.5 \sim 1.5$ (T はロータ回転周期) の範囲で, トルク変動に対して次式で定義する近似曲線を求め, 時定数 τ を定義した.

$$Q = -A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (3)$$

図4には, 図3と同一条件で得られた軸方向推力とロータ面上での誘導速度の過渡特性を示し, 図5には, トルク, 軸方向推力, 誘導速度につき周速比の違い ($\lambda=4 \sim 11$) に伴うそれぞれの時定数の変化を示した.

ロータ面上の誘導速度は半径位置によりピッチ角制御時の過渡応答が異なり, 時定数も広い範囲に分布する. しかし, トルクと軸方向推力に大きな影響を及ぼす翼端側 ($r/R=0.65 \sim 0.88$) では式(3)が比較的良い近似を示すため, 風車後流の慣性効果はおおよそ一次遅れ系で評価できるものと考えられる.

トルクと軸方向推力は制御終了時の前後でオーバーシュートが発生するが, 誘導速度と翼ピッチ角の時間変化に伴う相対流入角と迎え角の時間変化より, その発生機構を説明することができる. その結果, 両者の時定数はほぼ一致し, $r/R=0.65$ での誘導速度と近い値を取っている.

いずれの空力特性量の時定数も, 周速比が

大きい程（風速が小さい程）大きくなるが、これは、風車後流の渦構造の非定常効果（後流慣性効果）に伴う影響であり、風速が小さい程、制御時に発生した後流渦が風車ロータから下流へ離れる速度が遅く、長時間影響が継続するためである。

モデル風車実験システムによる実験

構築したモデル風車実験システムを建物屋上に設置し、自然風況下において風車制御が水平軸風車の空力過渡応答に及ぼす影響を調べた。風車ロータは誘導電動機により駆動させ、瞬時流入風速と駆動トルクと回転数を計測した。風速・風向は絶えず変動するため、ピン法により風速・風速毎の条件に弁別し、回転速度変化に対するトルク過渡応答特性をアンサンブル平均により求めた。

流入風速 $V=1\sim 5\text{m/s}$ の条件で、ロータ回転速度を 400rpm から 500rpm に 0.5 秒ならびに 1 秒間で加速させた場合のロータ空力トルク過渡特性における時定数を調べた。その結果、大型風車に対するピッチ角制御時の過渡特性解析と同様に、風速の増加と共に時定数が減少することが分かった。

出力変動を低減する風車運転制御アルゴリズムの構築

本項目では、風車ロータへの瞬時流入風速を推定する方法の確立と出力変動を低減するアルゴリズムの構築を目指している。制御対象とした風車は、Tjæreborg 風車である。

風速推定には、風速 - ロータトルクの相関マップを用いた。風速を推定する時刻を t とした場合、マップ利用時の出力トルクには、瞬時トルク $Q(t)$ もしくは、 $t-\tau_0\sim t$ の時間内における時間平均トルク $\bar{Q}(t, \tau_0)$ を用いて、推定風速 $V_{est}(t)$ を算出した。

流入風乱流の計算条件として、ロータから十分上流での平均風速を $V_0=5, 10, 15\text{ [m/s]}$ 、乱流強度を $TI=0.1, 0.2$ と設定した。乱流風は 1 時刻毎にロータ面内 216 点において計算し、次式にて実際にロータへ流入する瞬時の断面平均流入風速 V_{ave} を定義した。

$$V_{ave} = \sqrt[3]{\frac{1}{A} \iint_A V^3 dA} \quad (4)$$

ここで、 A は風車ロータ面積、 V は風車ロータ面内の局所瞬時風速である。

流入風条件として与えた断面平均流入風速 V_{ave} と出力トルクから推定した風速 $V_{est}(t)$ を比較した結果、出力トルクを風車ロータ 1/4 回転する間で時間平均して推定風速を求めた場合、推定誤差ならびに風速推定の時間遅れが比較的小さくなることが分かった。

風車出力変動を低減するための翼ピッチ角制御アルゴリズムの構築には、上記で得られた風速推定方法ならびに風速 - 出力トルクの相関マップを用いる。また、翼ピッチ角制御時に出力トルクに現れる過渡応答の時

定数を用いることにより、PID 制御アルゴリズムを構築し、制御に伴う出力変動の標準偏差の低減効果を調べた。

流入風の乱れ強さは $TI=0.12$ の条件であり、風速は定格風速である $W=12\text{m/s}$ と $W=15\text{m/s}$ につき、8 分間の出力変動を調べて変動の標準偏差 σ_D を調査した。その結果、 $W=12\text{m/s}$ の場合には出力変動の標準偏差は翼ピッチ角制御により 62% 減少し、 $W=15\text{m/s}$ の場合には 51% 減少することが分かった。

この結果より、本研究で構築した翼ピッチ角制御アルゴリズムの有効性がある程度まで確認できた。更なる出力変動の低減には、制御アルゴリズムの改善、時定数の最適化に加えて、ロータ回転速度制御の併用が有効であると考えられる。

また、大型風車において風車運転制御は、出力変動の低減のみならず、構造系への疲労負荷の低減にも活用されるべきであり、本研究で得られた成果を基に、風車ロータ翼に働く疲労荷重を低減するための運転制御法を確立したいと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

H. SUZUKI, K. NAGATA, Y. SAKAI, T. HAYASE, Y. HASEGAWA, T. USHIJIMA, Direct Numerical Simulation of Fractal-Generated Turbulence, Fluid Dynamic Research, 査読有, Vol.45, No.6, 2013, 1-23.

H. SUZUKI, K. NAGATA, Y. SAKAI, T. HAYASE, Y. HASEGAWA, T. USHIJIMA, An Attempt to Improve Accuracy of Higher-Order Statistics and Spectra in Direct Numerical Simulation of Incompressible Wall Turbulence by using the Compact Scheme for Viscous Terms, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 査読有, Vol.73, No.6, 2013, 509-522.

F. HARA, Y. HASEGAWA, N. TANIMURA, H. SUZUKI, T. USHIJIMA, Study on Blade Elasticity Influence on Blade Load Characteristics of NREL Turbine, Proceedings of International Symposium on EcoTopia Science 2013, 査読有, ISETS2013, 2013, 1-1.

Y. TANIGUCHI, Y. HASEGAWA, N. TANIMURA, H. SUZUKI, T. USHIJIMA, Numerical Study of Dynamic Inflow Effects on Aerodynamic Response of HAWT Rotor, Proceedings of International Symposium on EcoTopia Science 2013, 査読有, ISETS2013, 2013, 1-1.

織田信一, 長谷川豊, 鈴木博貴, 牛島達夫, 自動車用送風機の電力回生に関する研究(翼型改良による風車性能の向上), 日本機械学会論文集, 査読有, Vol.80,

No.819, 2014, 1-13.

H. SUZUKI, Y. HASEGAWA, Simplified equations for the rotational speed response to inflow velocity variation in fixed-pitch small wind turbine, Fluid Dynamic Research, 査読有, Vol.15510, 2015, 1-15.

N. TANIMURA, Y. HASEGAWA, H. SUZUKI, F. HARA, T. USHIJIMA, Study of tower effects on rotor characteristics of horizontal axis wind turbine, Proceedings of Grand Renewable Energy 2014 International Conference and Exhibition, 査読有, Vol. P-Wd, 1-22, 2014, 1-4.

織田信一, 長谷川豊, 鈴木博貴, 牛島達夫, 自動車用送風機の電力回生に関する研究(高ソリディティ翼による風車性能の向上), 日本機械学会論文集, 査読有, Vol.81, No.827, 2015, 1-12.

織田信一, 長谷川豊, 鈴木博貴, 牛島達夫, 大矢英樹, 自動車用送風機の電力回生に関する研究(高ソリディティ翼による実車での風車出力向上), 日本機械学会論文集, 査読有, Vol.81, No.829, 2015, 1-12.

織田信一, 長谷川豊, 鈴木博貴, 牛島達夫, 大矢英樹, 自動車用送風機の電力回生に関する研究(風車による車両冷却系空気抵抗への影響), 日本機械学会論文集, 査読有, Vol.81, No.830, 2015, 1-12.

〔学会発表〕(計7件)

佐藤良輔, 長谷川豊, 鈴木博貴, 牛島達夫, ウィングストローク風車翼の空力特性に関する研究(運転条件の影響), 第91期日本機械学会流体工学部門講演会, 2013年11月9日~2013年11月10日, 九州大学, 福岡県.

谷村徳之, 長谷川豊, 鈴木博貴, 牛島達夫, タワーが水平軸風車の翼負荷特性に及ぼす影響に関する研究, 第92期日本機械学会流体工学部門講演会, 2014年10月25日~2014年10月26日, 富山大学, 富山.

鈴木博貴, 長谷川豊, 牛島達夫, 負荷一定風車における回転角速度の空力係数特性に起因する発散性/収束性について, 第92期日本機械学会流体工学部門講演会, 2014年10月25日~2014年10月26日, 富山大学, 富山.

鈴木博貴, 長谷川豊, 牛島達夫, 小型富者における空気密度変化に起因する運転周速比変化の定量化に関する基礎検討, 第23回風工学シンポジウム, 2014年12月3日~2014年12月5日, 東京大学, 東京.

鈴木博貴, 長谷川豊, 牛島達夫, 周速比展開を用いた小型風車の風速変化にตอบสนองする回転速度の記述, 日本機械学会東海支部第64期総会・講演会, 2015年3月13日~2015年3月14日, 中部大学, 名

古屋.

H. NAKANO, Y. HASEGAWA, H. SUZUKI, T. USHIJIMA, Study on pitch motion optimization of wing-stroke wind turbine, International Symposium on EcoTopia Science 2015, 2015年11月27日~2015年11月29日, Nagoya University, Nagoya.
久保田一輝, 長谷川豊, 牛島達夫, 鈴木博貴, 水平軸風車後流解析の計算負荷軽減に関する研究, 日本機械学会東海支部第65期総会・講演会, 2015年3月17日~3月18日, 愛知工業大学, 豊田.

〔図書〕(計1件)

長崎正雄, 森竜雄, 長谷川豊, 板谷義紀, 長谷川達也, 梶田信, 成瀬一郎, 森田成昭, 伊藤孝至, 早川直樹, 小島寛樹, 花井正弘, コロナ社, エコトピア科学シリーズ3 環境調和型社会のためのエネルギー科学, 2015, 238頁.

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

該当なし

○取得状況(計0件)

該当なし

〔その他〕

該当なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

長谷川 豊 (HASEGAWA, Yutaka)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 20198732

(2)研究分担者

鈴木 博貴 (SUZUKI, Hiroki)
山口大学・理工学研究科・助教
研究者番号: 10626873

(3)連携研究者

該当なし

(4)研究協力者

該当なし