

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560208

研究課題名(和文) 柔軟シートフラッタを利用した風力発電のための基礎研究

研究課題名(英文) Basic Study of a new wind power generation utilizing the flexible sheet flutter

研究代表者

横田 和彦 (YOKOTA, Kazuhiko)

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号：70260635

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：旗発電は、旗のハタメキを利用して電力を作り出す新しいタイプの風力発電であり、レジャー、被災時、非常時などの発電で使用できると考えています。研究の最終目標は旗発電を実用化することですが、本研究では、その第一段階です。まず、風洞を用いて、風速、旗の材質、発電機を変えて実験を行ない、旗発電の基礎データを得ました。また設計法を開発する為にいくつかの解析方法を試しました。解析結果によって、実験結果を定性的に説明することができました。従って、この解析法を用いることによって、必要電力量や風速データに応じて、条件に適した旗発電装置を概要設計する事ができる様になりました。

研究成果の概要(英文)：A flagmill is one of new type wind power generators utilizing a flutter of a flag. It can be used for outdoor leisure, at disaster areas and in emergencies. The present study is the first step to realize the flagmill. Some experiments are carried out to obtain fundamental data of a flag flutter, and some analytical methods are examined to develop the design method of the flagmill. The experimental data were obtained for characteristics of the flutter and power generation. The analytical results agree reasonably well with the ones. The analytical method can be used as a design tool for the flagmill.

研究分野：流体工学

科研費の分科・細目：流体機械

キーワード：風力発電 フラッタ

1. 研究開始当初の背景

申請当時(2010年秋),エネルギー源の多様化が注目されており,中でも自然エネルギーとして,水力発電,太陽光発電などが活発に研究開発されていた.それまでの大型発電だけではなく,マイクロ水車,ピコ水車,携帯太陽電池などの小型,超小型発電などは,電力源分散の観点から注目されていた.

その中で風力発電としては,フラッタを利用した発電が新しい発電携帯として注目されていた.

但し,それまでも,柔軟シートフラッタを利用した発電は存在していた.但し,表面に圧電素子(変形させると起電力が生じる物質)を貼付け,シートの変形を圧電素子の起電力として取り出す形式のものであった.この方法で得られる電力はマイクロワットオーダーと,非常に低いものであった.これは,小さなLED電球を点灯させることが出来る程度の小さな発電電力であった.

そこで,申請者は,シートフラッタ発電,すなわち,旗発電(flagmill)を実用化するためには,より大きな発電電力を実現出来る発電方式を考案することが必要と考え,新規の発電方式を提案するとともに,その発電の流体力学的特性,発電特性を調査することにした.

本申請の発電方式は,シートを取り付けてある軸を回転支持し,これに発電機の軸を取り付けたものである.これにより,シートがバタバタと振動を生じると,軸が右左へと回転振動する.この回転振動が発電機を回転振動させる結果として,発電するという形式のものである.この方式により,数百マイクロワットの発電電力を得ることが出来,圧電素子方式に比べて2桁以上の発電電力を実現出来ることが判明した.

2. 研究の目的

本申請では,当該の発電方式の実用化を目標として,その基礎となる次の事項を目的とした.

(1)フラッタ特性の解明

フラッタ特性とは,
フラッタ限界流速
流速を上げて行くとき(変化させて行くとき)フラッタを開始(終了)する流速
フラッタ周波数
フラッタを生じているときの振動数
フラッタモード
フラッタ発生時の振動の形態
の3つである.

(2)旗発電特性の解明

発電特性とは,フラッタを生じているときの,発電(起)電圧 V ,発電(起)電流 I ,発電(起)電力 E の時間変化と,フラッタとの関係のことである.ただし,本研究で全て

の関係を調査したところ,非常ではあっても, $V=IR$ の関係,すなわち, $E=V^2/R=RI^2$ の関係が瞬間瞬間に成立していることを確かめた.よって,発電電圧,発電電流,発電電力を,別々に区別して論じる必要は無.したがって,研究の途中からは,発電特性としては発電電力のみを対象とした.

(3)解析法,設計法の確立

旗発電の特性を表現出来る解析法を確立し,旗発電の特性把握と設計指針の確立を行なう.具体的には,線形解析コードを開発し,実験と比較検討することによって,コードの信頼性を確保することである.これによって,そのコードを用いて,実験での確認が困難な特性について,より広い範囲での特性把握が可能になり,その特性から,旗発電の設計指針を得ることが出来る.

3. 研究の方法

(1)風洞実験

研究目的の(1)(2)を調べる為に,まず風洞実験を実施した.

実験パラメータは,流速である.流速依存を調査する為に,流速を上げて行く実験と,下げて行く実験を行なった.そして,複数のシートの材質,長さ,幅,厚さで実験を行なった.

実験では,シートの支持棒よりレーザ変位計により50mm下流のシート変位を非常計測した.これにより,フラッタ限界流速の検知およびそれ以上の電力におけるフラッタ周波数を把握出来る.また,同時に,高速目で撮影を行い,それを画像解析することで,シートの振動形態を抽出し,フラッタモードを特定した.更に,支持棒に連結された発電機からの起電流,起電圧を非常計測し,これらを掛け合わせるにより発電機電力を算出した.

(2)線形解析

線形解析の1つ目は,非粘性流体方程式と梁の振動方程式を用いて,線形安定解析を行なった.パラメータは,シート慣性力と流体慣性力の比である質量比 μ と,シート曲げ剛性力と流体力の比である剛性比,シート張力と流体力の比である無次元張力 c_f ,シート減衰力と発電起電力の和と流体力の比である減衰係数 c_t である.実験のフラッタ限界において,結果をこれらのパラメータで整理し,安定解析との比較検討を行なった.

4. 研究成果

(1)フラッタ限界

図1に,フラッタ限界における質量比と剛性比の関係を示す.プロットは実験結果であり,実線,破線は安定解析結果である.

ここで, μ は質量比と呼ばれ, $\mu = t/aL$ (t :密度, a :流体密度, L :シート長さ, L :シート長さ,)で与えられる.質量比はシー

ト慣性力と流体慣性力の比を表しており、小さい程、流体に対して相対的に軽いシートであることを意味する。

一方、 β は剛性比と呼ばれ、 $\beta = EI / U^2 L^3$ (EI :シート剛性、 ρ_a :流体密度、 U :流速)で与えられる。剛性比はシートの曲げ剛性と流体動圧との比を表しており、小さい程シートが曲がりやすいこと、あるいは流体力(流速)が大きいことを意味する。

実験ではプロットの、解析では実線、破線の、右下がフラッタ発生領域、左上がフラッタ非発生領域である。

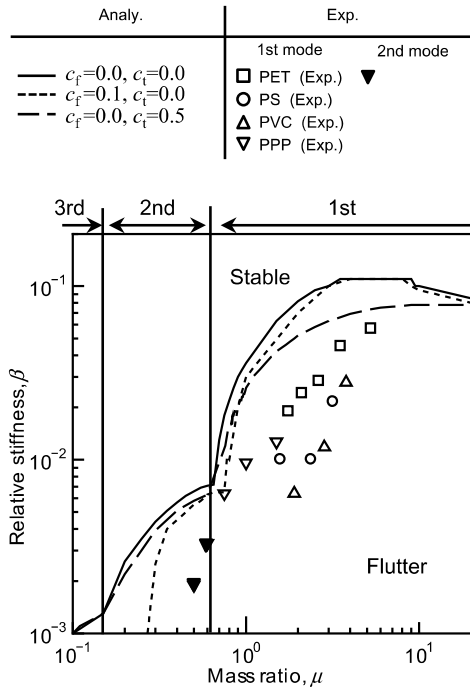


図 1

まず、実験結果と解析結果を比較すると、定量的な違いは見られるものの、解析結果は、実験結果の右上がりの傾向を捉えている。また、 $\mu \geq 0.65$ では1次モードフラッタとなり、 $0.13 \leq \mu \leq 0.65$ では2次モードフラッタとなるという傾向も、実験と解析は一致している。ここで、解析ではフラッタ限界において、 $\mu \leq 0.13$ の領域で、3次モードが見られたが、実験ではフラッタ限界において3次モードフラッタは発生しなかった。ただし、後に図5において説明する様に、フラッタ限界以上の流速においては、3次モードフラッタが発生した。

次に、表面摩擦係数 c_f を与えると、実線は短破線へと変化する。図から明らかに、解析の安定限界が実験に近づいており、解析結果の妥当性を示している。安定性の観点から見ると、安定限界が右下へ移動していることは、フラッタ発生領域が小さくなることを示しており、表面摩擦はフラッタを安定化させる効果を持つことを示しており、これも理に合った変化と言える。

また、発電によりシート振動に加えられる減衰と構造減衰の和である無次元全減衰係数 c_t を与えると、実線は長破線へ変化する。長破線は、 $\mu \leq 4$ では、 μ が大きい程、右(下)への移動量大きい、すなわち、安定化の効果が大きく、より実験に近づく。

以上のことから、フラッタ限界に関しては、解析は、実験を定性的に捉えることが出来ていると言える。

(2)フラッタ周波数

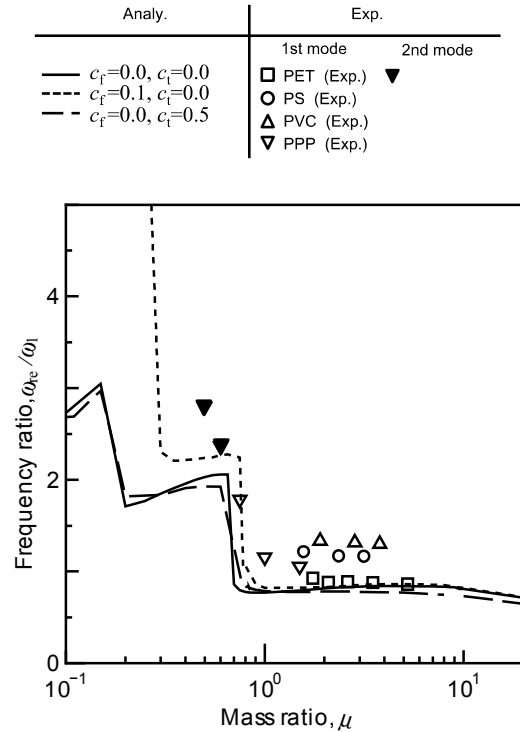


図 2

図2に、フラッタ限界における質量比とフラッタ周波数比の関係を示す。ただし、 ω_1 はシートを梁と見なしたときの真空中の梁の固有振動数である。また線やプロットの意味は図1と同様である。

図2から、1次モードについては、定量的に一致している。一方、2次モードについては定量的に余り一致しているとは言えないが、 $\mu \approx 0.65$ 付近の周波数の飛びは1次モードから2次モードへのモード遷移を捉えており、定性的な傾向は捉えられていると言える。なお更に細かく見ると、解析ではモード遷移は明瞭であったが、実験ではやや曖昧であった。

(3)フラッタモード(形態)

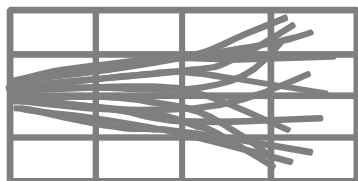
図3に、 $\mu=1.5, \beta=0.0023$ の場合のフラッタモードを示す。図3(a)は、高速ビデオカメラ撮影画像の1枚の画像から瞬時のシート形状を、フラッタの1周期にわたって読み取ったものを1枚の図に重ねたものである。

一方、図3(b)は、ある μ と β の組に対して

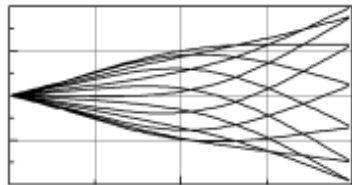
実験と同様の図を作成した上で、 μ と β を変化させてフラッタモードを調査し、実験と類似のフラッタモードが得られる μ と β の組を決定したものである。このとき、質量比と剛性比はそれぞれ $\mu=0.8$, $\beta=0.009$ であった。ここで、本研究における解析は線形解析であるため、シートの振幅は振幅比としてのみ求め、振幅の絶対値は求まらない。そこで、図3(b)では、実験と類似の形状となる様に縦軸の大きさを調節した。したがって、図3(b)の縦軸の大きさ、すなわち、振幅には物理的な意味は無い。

ここで、実験と解析で質量比と剛性比の数値が異なるが、その理由は以下の様なものである。すなわち、図1から分かる様に、実験と解析はフラッタ限界における μ と β は、定量的には異なる。したがって、その当然の結果として、同様のフラッタモードが得られる解析の μ と β (図3(b))は、実験の μ と β (図3(a))の μ と β とは、定量的には異なる値となると言う訳である。

ただし、図3の様に、実験と類似のフラッタモードの解析解が存在することは自明ではない。逆に言えば、図3の様に、類似のフラッタモードが存在することは、解析の定性的妥当性を示していることになる。



(a) Experiment, $\mu=1.5$, $\beta=0.0023$.



(b) Analysis, $\mu=0.8$, $\beta=0.009$.

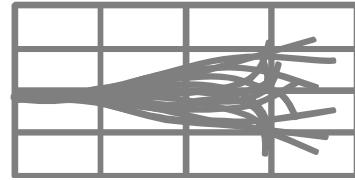
図3 Flutter mode.

続いて、図4(a)に、実験において、図3の条件から流速を増加させて行って、高次モードへのモード遷移が生じた後のフラッタモードを示す。その時の質量比、剛性比はそれぞれ $\mu=1.5$, $\beta=0.0020$ であった。

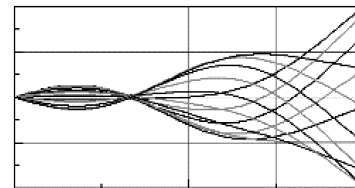
また、図4(b)は、解析において、実験と類似のフラッタモードが得られる μ と β の組を探索して得た解析である。図の描き方は図3(b)と同様である。

図4でも実験に類似のフラッタモードを同定することが出来ている。また、図3(a)と図4(a)から、実験において、 μ を一定に保ったまま、 β を下げて行く(すなわち流速を上げて行く)と、モードが高次に遷移することが分かる。一方、図3(b)と図4(c)を比較する

と、解析においても、 μ を一定に保ったまま、 β を下げて行く(すなわち流速を上げて行く)と、モードが高次に遷移している。したがって、フラッタモード、およびモード遷移についても、解析は実験を定性的に表現出来ていると言える。



(a) Experiment, $\mu=1.5$, $\beta=0.0020$,



(b) Analysis, $\mu=0.8$, $\beta=0.006$.

図4 Flutter higher mode of Fig.3.

(4)フラッタ限界以外でのフラッタ挙動
まず β を、

$$\frac{1}{\sqrt{\beta}} = \frac{U}{\sqrt{EI L^3 / r}}$$

を変形すれば、この $1/\sqrt{\beta}$ は無次元流速を意味する。

図5に、 $1/\sqrt{\beta}$ に対する振動数比の変化を示す。図中のAは1次モードから2次モードへの、Bは2次モードから3次モードへのモード遷移したことを意味している。

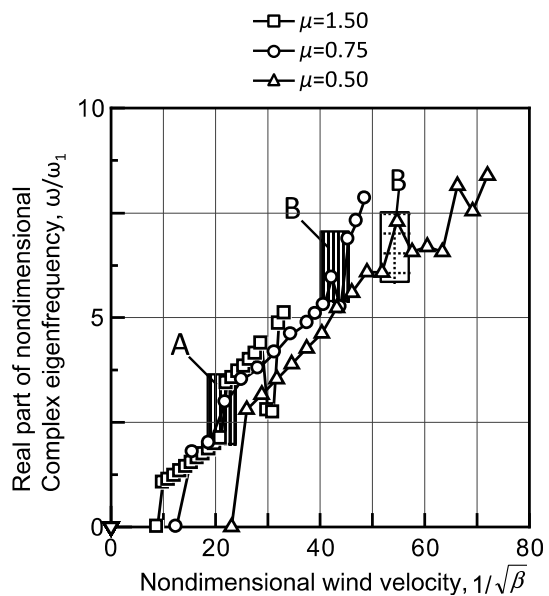


図5

図2～4では、フラッタ限界に沿って1次モードから2次モード、3次モードへと遷移することを述べた。一方、図5は、フラッタ限界に沿わず、流速を上げて行った場合についての図である。そして、図5はが、この場合でも1次モードから2次モードへの遷移が生じることを示している。

また、各モードにおいて、無次元流速に対して振動比はほぼ直線的に増加すること、モード遷移時に比較的大きな振動数比に飛びが生じることが分かる。これは発電を行わない場合のシートフラッタの特性と同じであり、本研究で扱った程度の発電電力ではシートフラッタの特性に余り影響しないことが分かった。ただし、これは、発電がシートフラッタ特性に影響を与えないことを意味しない。図1で示した様に、大きな発電電力ではフラッタに影響が生じることが判明しているため、飽くまで、本研究で扱った発電電力での結論であることに注意されたい。ただ単に、支持棒に発電機を取り付けるだけでなく、増速ギヤ等を用いて、発電電力を大きく出来たとすれば、無次元全減衰係数 c_t が大きく変化するのであるから、図1を参照すれば、発電がフラッタ特性に影響することは明らかである。

(5) 発電特性

図6に、横軸に無次元流速 $1/\sqrt{\beta}$ 、縦軸に無次元発電電力 $e_{e,rms}$ をとったグラフ、すなわち、発電特性を示す。図中のAは図5と同様に、1次モードフラッタから2次モードフラッタへの遷移を示している。

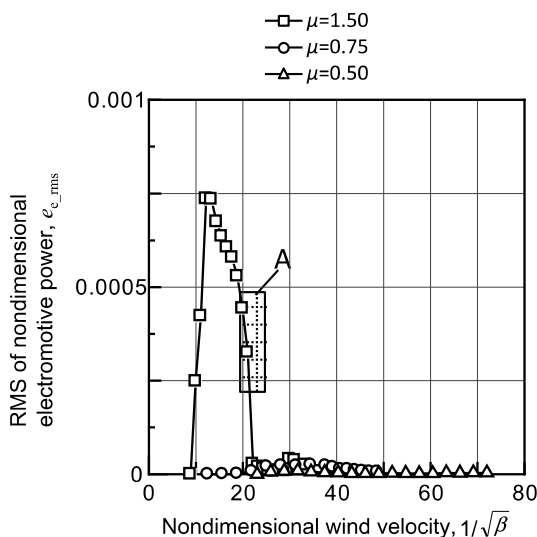


図6

図6から、 $\mu=1.5$ の場合、1次モードでは発電電力が大きい2次モード以上では発電電力が非常に小さくなる、また、 $\mu=0.75, 0.50$ では、分かりにくいだが $1/\sqrt{\beta}=30\sim 40$ 程度に山があり、その領域で発電電力がやや高

くなっている。

ここで、理論線形解析によれば、発電電力は、フラッタ無次元振動数 \hat{q} の2乗と支持棒の回転角 $\hat{\theta}$ の無次元振動振幅 \hat{q} の2乗に比例する。すなわち、

$$e_{e,rms} \propto w^2 \hat{q}^2$$

となるという結果を得た。この式を用いれば、図5から、振動数 \hat{q} は一様に増加しているのであるから、図6の様に、2次以上のモードで発電電力が減少する原因は、振動振幅 \hat{q} にあるものと考えられる。そこで、このことを確かめるために、回転振動振幅特性を調査した。

図7に、横軸に無次元流速 $1/\sqrt{\beta}$ 、縦軸に無次元振動振幅 \hat{q} をとったグラフを示す。図7において、 $\mu=1.5$ のグラフ形状は図6と同様に、1次モードから2次モードに遷移より大きな無次元流速において、回転角振幅が非常に小さくなっていることを示している。

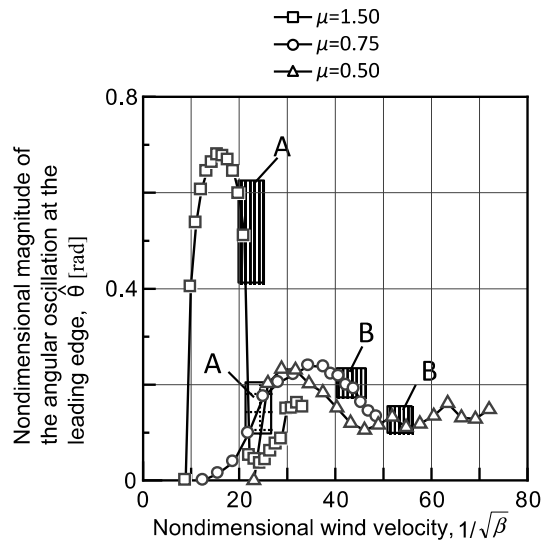


図7

ところで、1次モードの実験結果である図3(a)と、2次モードの実験結果である図4(a)において、左端のシート振幅を見ると、図4の方が図3に比べて、かなり小さくなっていることが分かる。図の左端から、更に左側に支持棒が位置するが、図の左端から支持棒の中心まではかなり近いので、その間のシート形状は直線的であることを確かめた。したがって、図の左端の振幅 y は、すなわち、支持棒の回転角度振幅 $\hat{\theta}$ と $y = \tan \hat{\theta}$ の関係にある。ここで、図3(a)、図4(a)から分かる様に、 $y \ll 1$ 、すなわち、 $\hat{\theta} \ll 1$ であるから、 $y = \hat{\theta}$ となり、図の左端の振幅 y は支持棒の回転角度振幅 $\hat{\theta}$ に等しい。これらのことを考えると、モードの遷移によって、支持棒の回転角振幅が減少し、一方、 $e_{e,rms} \propto w^2 \hat{q}^2$ であるから、その結果として、発電電力が小さくなったものと考えられる。

次に、図7において、 $\mu=1.5$ のグラフ形状

は図6のものと良く似ている。また、 $\mu=0.50$, 0.75 の場合も、 $1/\sqrt{b}=30\sim40$ に山があり、図6と図7で類似の形状であると言える。

これらのことから、図6において、フラッタが1次モードから2次モードへ遷移することによって発電電力が低下したのは、高次へのモード遷移によって、支持棒の回転角振幅が小さくなったことが主因であるものと考えられる。

(6) 旗発電電力を支配するパラメータ

先に述べた様に $e_{e_rms} \propto w^2 \hat{q}^2$ である。そこで、全ての実験結果を $w^2 \hat{q}^2$ と縦軸に e_{e_rms} で整理することを試みる。

図8に、横軸に $w^2 \hat{q}^2$ 、縦軸に e_{e_rms} を採ったグラフを示す。

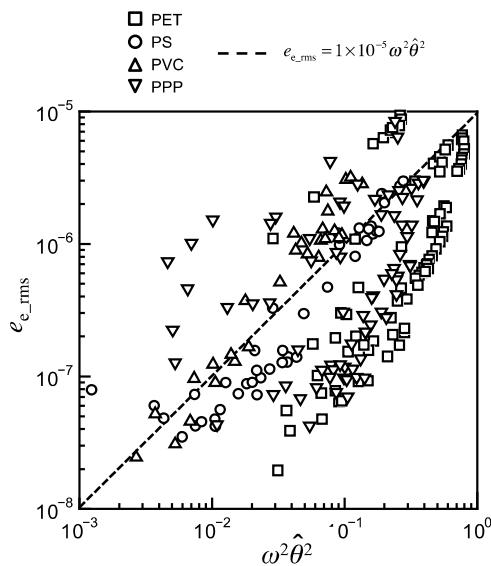


図8

データにバラつきはあるものの、 $w^2 \hat{q}^2$ と e_{e_rms} は、 $e_{e_rms} \propto w^2 \hat{q}^2$ である相関を持っていると近似出来る。

(7) 旗発電設計法

本研究により、旗発電は、ほぼ $e_{e_rms} \propto w^2 \hat{q}^2$ なる関係で近似出来ることが判明した。

この式を用いれば、シートフラッタの周波数を上げること、また、回転角振幅を増加させることを目指せば良いことになる。

まず、前者について、考察すると、例えば図2から μ を下げる事によって、すなわち、軽い(密度の低い)、あるいは、薄いシートを用いる事によって、周波数は増加する。しかしその結果、図1からフラッタ限界の μ が上昇、すなわち、フラッタ限界流速 $1/\sqrt{b}$ が増加するので、小さな流速では発電出来なくなる。これは飽くまで一例であるが、同様に、

旗発電にはトレードオフの関係が数多く存在するので、発電をしたい状況に応じた設計が必要である。

一方、回転振動振幅の方は、シートの根元の剛性を上げると、増やすことが出来ることが判明したので、本研究の発展として、シート剛性を变化させた旗発電について、今後も研究を続けて行く予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計4件)

山中貴央, 姜東赫, 横田和彦, 柔軟シートフラッタ風力発電に対する発電負荷の影響, 日本機械学会関東支部第20期総会講演会, 予稿集 USB, pp.1-2, 2014.3.

市原祐飛, 田口寛, 姜東赫, 横田和彦, 佐藤光太郎, 鋼体・柔軟体シートフラッタによる風力発電特性に関する実験的研究, 日本機械学会関東支部第19期総会講演会, pp.385-386, 2013.3.

田口寛, 姜東赫, 横田和彦, 佐藤光太郎, フラッグミル - 柔軟シートフラッタによる新風力発電, 第90期流体工学部門講演会講演論文集, pp.351-352, 2012.10.

高木茂郎, 田口寛, 姜東赫, 横田和彦, 佐藤光太郎, 柔軟シートフラッタによる発電特性, 日本機械学会関東支部第18期総会講演会, pp.65-66, 2012.3.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横田 和彦 (YOKOTA, Kazuhiko)
青山学院大学・理工学部・教授
研究者番号: 70260635

(2) 研究分担者

佐藤 光太郎 (SATO, Kotaro)
工学院大学・グローバルエンジニアリング学部・教授
研究者番号: 80252625

(3) 連携研究者

なし