

令和 2 年 9 月 16 日現在

機関番号：57101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06175

研究課題名（和文）抗力型風車高出力化のための集風ケーシング偏流装置の最適化

研究課題名（英文）Optimization of wind collector device with flow deflectors for the performance improvement of drag type vertical axis wind turbine

研究代表者

谷野 忠和 (Tanino, Tadakazu)

久留米工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：70352367

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,700,000 円

研究成果の概要（和文）：クロスフロー風車高出力化のための集風体の小型化および風向変化に対する出力改善効果の安定性向上を検討した。従来の集風体は前縁部の剥離流れの増速効果を利用する偏流板Aと羽根車旋回に不利な風を利用する偏流板Bから成る。小型化の検討では、偏流板幅を従来の2/3とし、断面形状を円弧翼と平板で比較した。円弧翼が高い出力改善効果を示し、特に集風体の向きが風向きとずれても平板よりも性能低下が小さくその優位性が示された。出力改善効果はこれまでと同程度である。また、風向変化時の出力改善効果の低下を考慮し、偏流板Bを2枚とした偏流板3枚の集風体を2種検討し、一方は3枚により風向変化への安定性が明らかに向上した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、クロスフロー風車を複数枚の偏流板で構成した集風体により高出力化を図るものである。これまで検討した集風体は構成する偏流板は断面形状が平板で2枚としたが、集風体の小型化の検討から、寸法をこれまでの2/3とし断面形状を円弧翼として平板形状と比較した。円弧翼の方が出力改善効果は良好であった。また、風向変化時の集風体の出力改善効果の低下を考慮し、偏流板を3枚構成とした集風体を検討し、2枚の場合に比べ、風向変化時の出力低下が小さく安定性向上が示された。本研究結果より、提案する集風体付風車の小型化、風向変化時の安定性に対する最適形状の指針が得られ、地産地消型風力発電の普及への寄与が期待できる。

研究成果の概要（英文）：This study is on the improvement of the wind collector to improve the performance of a cross-flow wind turbine considering downsizing the wind collector and improving the stability of the performance improvement effect against changes in the wind direction. In our previous study, the wind collector consists of two flow deflectors which improve flow environment of wind turbine.

For downsizing the wind collector, the width of the flow deflector was set to 2/3 of the conventional width and the cross-sectional shapes were compared between the circular arc blade and flat plate. The former showed higher performance improvement effect not only at design condition but also in case that the direction of the wind collector was deviated from the wind direction. And the performance improvement effect is about the same as in previous study.

In addition, the number of flow deflectors, two and three were compared. the three flow deflectors can improve the stability against changes in wind direction.

研究分野：工学

キーワード：再生可能エネルギー 抗力型風車 垂直軸風車 高出力化 集風体 実用化

1. 研究開始当初の背景

風力エネルギーについては、現在も浮体式洋上風力発電の実証試験をはじめ大規模発電を中心に活発に研究が行われている。一方、多様な再生可能エネルギー利用の観点から、都市部におけるスマートグリッドの実証事業など、エネルギーの局所利用が進めば、中・小型風車の利用も十分に期待でき、安全性や性能の向上は不可欠である。

以上のような背景から、これまでに申請者らは、小規模風力発電用風車として、クロスフロー風車の有効利用に着目し、ビルなどの構造物端壁部で生じる剥離流れを利用する方法を提案<sup>1)</sup>し、構造物端壁部近傍に設置したクロスフロー風車に偏流板を付加することで、風車に適した剥離流れに改善することができ、出力性能が1.5倍(低風速時では約2倍)近く向上することを明らかにした。

さらに、前述の研究成果を踏まえ、一樣流れでも構造物端壁部の流れと同様なクロスフロー風車に適した流れを実現する方法として、図1に示す2枚の偏流板で構成された集風体(ケーシング)を考案した<sup>2)</sup>。

図1に示す2枚の偏流板はそれぞれ、風向に対して風車翼が順方向に移動する側を偏流板A、羽根車上流側かつ風車翼が風上方向に移動する側を偏流板Bと呼ぶ。偏流板Aでは、前縁部の剥離流れにより風車側への増速流れを誘起し、羽根車の旋回をアシストさせ、もう一方の偏流板Bでは、羽根車の旋回を妨げる流れを遮り、その一部を羽根車の旋回に利用する。また、図1の右下に示すように、集風体の端板は軸受けを介して風車軸に固定され、集風体は羽根車とは独立して軸周りに旋回可能な、機械的制御が不要な構造である。これまでに実施した小型供試風車模型を用いた風洞試験や数値流れ解析結果<sup>2)</sup>から、2枚の平板形状の偏流板の付加により、風車の出力性能はピーク値で50%近く向上し、起動特性も明らかに良くなることを確認した。

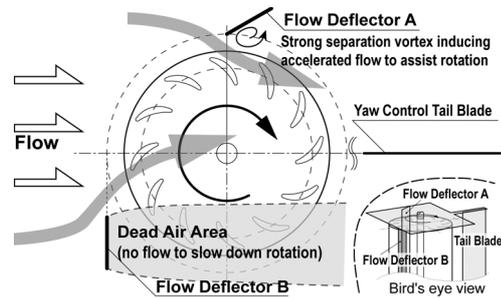


図1 集風体付風車の概略

2. 研究の目的

本研究は、都市環境でも利用可能な低回転・低騒音である抗力型(クロスフロー)風車の高出力化を目的とし、申請課題では、提案する集風体について、集風体を構成する偏流板の形状および配置を、

- ① 集風体の小型化(集風体を含めた受風面積の低減) および、
  - ② 風向変化時の風向きと集風体の向き(姿勢)とにずれが生じた場合の集風体の出力性能改善効果の低下の低減、すなわち、風向変化に対する安定性の向上
- を目的に検討し、最適化を図る。

① 集風体の小型化の検討について、図1に示したように、これまで集風体を構成する偏流板は2枚とし、その断面形状は簡単な平板形状であった。また、偏流板長さ(幅)は、羽根車代表直径に対して約29%であった。本検討では図2に示すように、偏流板長さを約19%と従来の2/3とし、その代わりに断面形状を羽根車の翼型と同じ円弧翼を検討した。

円弧翼形状を用いたのは、偏流板を縮小した分、偏流板Aは、羽根車側への流れ込み効果の低下が考えられ、反りを持たせることで、その低減を図っている。また、偏流板Bは、流れに垂直に配置するため、直前までに流れは減速される。遮る流れの一部を羽根車旋回に利用するには、この減速は好ましくなく、円弧翼に変更することで、上流側での減速を抑えつつ、風の一部が羽根車側へ流入することを期待している。

② 集風体の風向変化に対する出力性能改善効果の安定性向上に関して、図1の集風体配置と流入方向との関係を基準(0度)とし、偏流板2枚の集風体で平板寸法を2/3として、これまでに数値解析(CFD)により検討したところ、集風体が風向きに対して、風車軸中心に±15度傾くと出力性能が明らかに低下した。これらの結果から、傾いた場合の流れ場の改善効果への影響が大きい偏流板Bについて、その枚数を2枚に増やし、計3枚の偏流板で構成した集風体の検討を行った。

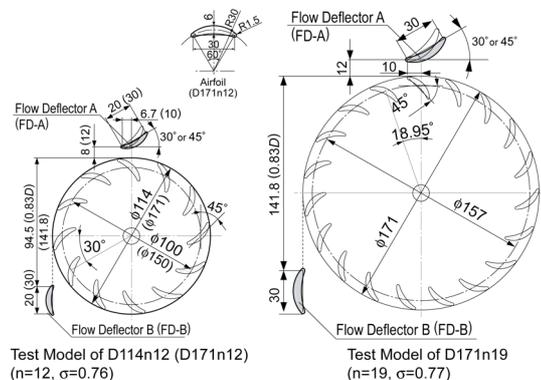


図2 集風体付風車の形状および寸法 (D114n12,D171n12 および D171n19)

### 3. 研究の方法

#### 3. 1 供試風車および出力性能試験

供試風車は、図 2 左に示す代表直径 114mm、翼枚数 12 枚のクロスフロー風車(以後、D114n12) および、図 2 左および右に示す直径 1.5 倍の弦節比(翼弦長/翼ピッチ)が等しく翼寸法・翼枚数が異なる 2 種類の、計 3 種類である。供試風車は全て軸方向長さ 250mm である。図 2 に示す通り、翼断面形状は、D114n12 では翼弦長 22mm、半径 20mm の中心反り線に翼厚分布を持つ円弧翼である。直径 1.5 倍風車は、図 2 左の D171n12 は、D114n12 を相似に 1.5 倍とし、D171n19(図 2 右)は、翼寸法は D114n12 と等しく、翼枚数を 19 枚に増やした風車である。

集風体を構成する 2 枚の偏流板について、図 2 に示す通り偏流板寸法(幅)は、D114n12 と D171n12 では、羽根車翼寸法と同じであるが、D171n19 では 1.5 倍である。風が紙面左側から水平に流入するとして、図 2 に示す偏流板の配置を基準配置とする。すなわち、偏流板 A (FD-A) は、図中に示す位置に風向に対して 30°または 45°傾けて配置し、偏流板 B (FD-B) は、実受風面積を約 83%確保した位置に、風向に対して垂直に配置した。

また、風向変化に対する集風体の安定性向上を目的に、偏流板を 3 枚として検討した各偏流板の基準配置を図 3 に示す。供試羽根車は D171n12 と D171n19 であり、偏流板 A の傾きは出力性能改善効果が高い 45°のみとした。

図 3 に示す通り、2 枚に増やした偏流板 B は 2 種類の配置を検討した。偏流板 B の下流側偏流板は、集風体が時計回り(+側)に傾いた場合を想定し同じ位置とした。これに対し、もう一方の上流側に位置する偏流板は、図 (a)、(b) に示す通り、前後 2 枚の偏流板の間隔が異なる。すなわち、下流側偏流板に対し、上流側偏流板は、風車軸中心の傾き角がそれぞれ 10°および 20°となる位置とした。

風向変化を考慮した、集風体(偏流板一式)の風向きに対する傾き角(風車軸中心)の条件は、基準配置を 0°として、±20°の範囲を 5°間隔で計 9 通りとした。なお、傾き角の正負は、風車軸中心に時計回りが正である。また、前述した偏流板 2 枚についても、比較のため、同じ傾き角条件の実験等を実施した。

次に、出力性能試験法について述べる。出力性能試験には、図 4 に示す出口部断面寸法が 680×680mm の簡易吐成型風洞送風機を用いた。供試風車は、風車の回転軸中心が、風洞出口端より下流 500mm の位置となるように設置した。風車軸にはトルク・回転検出器(小野測器製 SS-050, MP-981)および回転制御用モータ(山洋電気製 P50B 05020DXS00)が接続された。

出力性能試験の入口風速の設定には、図 4 の風洞出口部に固定したピトー管を用い、デジタル微差圧計(サヤマトレーディング製 マノエース 140)にて測定した。出力性能試験の入口設定風速は 6m/s とした。出力性能の評価には、回転数と風車軸出力それぞれを入口風速と風車受風面積で無次元化した周速比  $\lambda$  およびパワー係数  $C_p$  を用いた。

$$\text{周速比: } \lambda = \frac{r\omega}{V_\infty}$$

$$\text{パワー係数: } C_p = \frac{T \cdot \omega}{1/2 \rho V_\infty^3 A}$$

ここで、 $r$ : 羽根車代表半径[m],  $\omega$ : 回転角速度[rad/s],  $V_\infty$ : 入口風速[m/s],  $T$ : トルク[Nm],  $\rho$ : 空気密度[kg/m<sup>3</sup>],  $A$ : 受風面積(D×L)[m<sup>2</sup>].

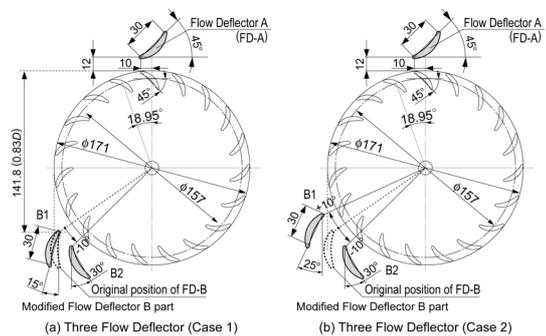


図 3 3 枚偏流板付風車(D171n19)の寸法・配置

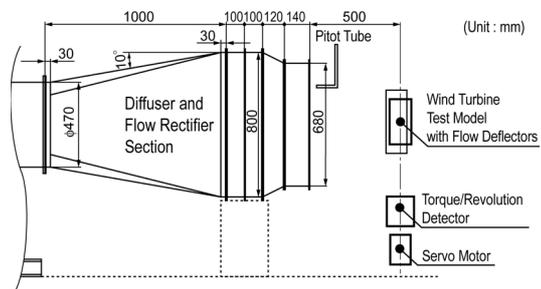


図 4 出力性能試験装置の概略図

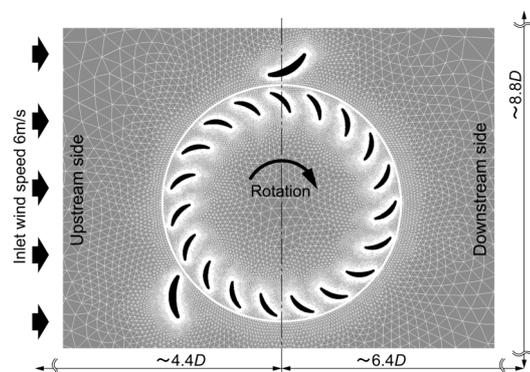


図 5 偏流板付風車近傍の計算格子 (D171n19, 偏流板 2 枚 (FD-A30°))

### 3. 2 数値解析方法および解析条件

前節の出力性能試験で実施した偏流板付風車(D171)それぞれを対象に、汎用流体解析ソフトウェア OpenFOAM Ver.1.6-ext を用い数値流れ解析を実施した。解析コードは非圧縮性乱流解析コード `pimpleDyMFoam` を用いた。クロスフロー風車は、その形状から二次元性が高く二次元流れ解析とし、乱流モデルは、剥離流れに有効とされる  $k-\omega$  SST モデルを用いた。図5に計算格子の例を示す。非構造格子を用い、羽根車および偏流板近傍のみ細かく、その他は計算機性能の制限から比較的荒い格子とした。全格子数は偏流板付風車で約8万、風車単体で約6.7万セルである。

解析する風車の作動条件は、これまでに風洞実験で得られた出力性能曲線において、パワー係数が最大点付近となる周速比  $\lambda=0.497$  (D171 風車: 333rpm) と  $\lambda=0.249$  および  $\lambda=0$  (静止状態) である。また、集風体の傾き角は、出力性能実験と同様の  $\pm 20^\circ$  の範囲である。

## 4. 研究成果

### 4. 1 出力性能の比較(偏流板形状・枚数)

図2に示したD171n19の風車単体および偏流板2枚(FD-A,  $45^\circ$ )を付加した風車を代表例として、出力性能試験結果を図6に示す。図は円弧翼(CA,  $\circ$  ( $0^\circ$ ),  $\bullet$  ( $+10^\circ$ ))および平板(FP,  $\square$  ( $0^\circ$ ),  $\blacksquare$  ( $+10^\circ$ ))の偏流板付風車と、風車単体(一)の計5条件の出力性能曲線を比較している。また、横軸は周速比  $\lambda$ 、縦軸はパワー係数  $C_p$  である。

図6で明らかなように、偏流板付風車は、いずれも風車単体に対し、パワー係数( $C_p$ )が明らかに高い。平板と円弧翼では、基準配置( $0^\circ$ )ではわずかであるが円弧翼が周速比の広い範囲で  $C_p$  が高く、傾き角 $+10^\circ$ ではさらに  $C_p$  が高い。円弧翼の偏流板では、最も良い条件でパワー係数は最大点付近で50%以上向上した。また、全ての偏流板付風車で  $C_p$  が正となる周速比の範囲も広がっている。

次に、偏流板3枚を付加した風車の出力性能試験結果を図7に示す。図6と同様、偏流板形状および傾き角( $0^\circ$ および $+10^\circ$ )条件の比較である。図3に示した2種類のうち高い出力性能を示した図3(b)の風車の結果である。

偏流板3枚を付加した場合も2枚の場合と同様に、風車単体に対して明らかに出力性能が向上した。また、図6の偏流板2枚と比較して、パワー係数  $C_p$  が高い値で推移している。平板と円弧翼の比較では、 $0^\circ$ では低周速比側から最大出力点付近まで円弧翼の方が  $C_p$  はわずかに高く、 $+10^\circ$ でさらに円弧翼が優位な結果となった。傾き角については、出力性能が良いのは、偏流板2枚では $+10^\circ$ で、3枚では $0^\circ$ であった。また、風車単体と比較して、3枚の偏流板により、パワー係数の最大値は最も良い条件で約60%向上した。

図6,7の結果から、偏流板形状は円弧翼と平板では、円弧翼の方が出力性能は高く、また、過去の研究で得られた<sup>2)</sup>幅1.5倍の偏流板2枚の場合の出力性能改善効果(最大出力点付近で1.4~1.5倍)と比較しても、ほぼ同等であり、円弧翼形状が小型化に有利であると言える。さらに、偏流板を3枚にすることで、さらなる出力性能の向上が期待できる。

次に、風向変化の影響を考慮して計3枚とした偏流板の効果をも、偏流板2枚の結果と比較して図8に示す。図8は全ての傾き角条件の各出力性能曲線の最大値  $C_{p_{max}}$  を、横軸に傾き角を

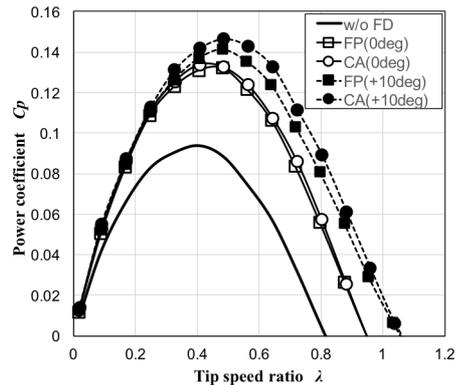


図6 偏流板(2枚)付風車の出力性能曲線(偏流板形状, 傾き角条件の比較, D171n19)

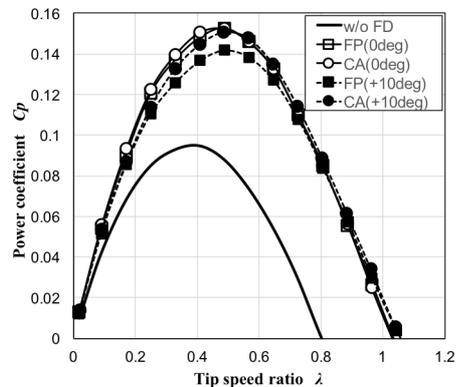


図7 偏流板(3枚)付風車の出力性能曲線(偏流板形状, 傾き角条件の比較, D171n19)

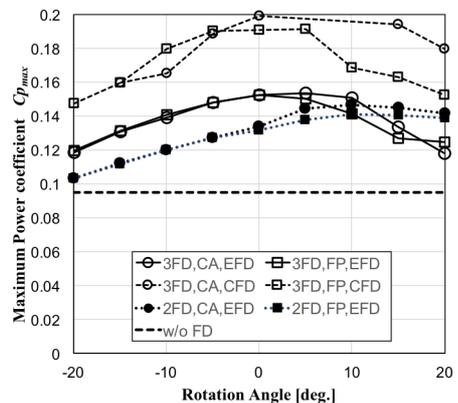


図8 偏流板付風車の最大パワー係数の比較(偏流板枚数, 傾き角条件の比較, D171n19)

取り比較した結果である。また、数値解析(CFD,  $\lambda=0.497$ )の結果も示している。CFD結果は、二次元解析であり機械摩擦等の影響が全くなく、実験(EFD)に比べ値は高い。

実験の偏流板3枚と2枚の比較から、3枚では、 $C_{p_{max}}$ が高い傾き角の範囲が明らかに広い。また、各枚数で円弧翼(CA)と平板(FP)を比べると、いずれも円弧翼の方が高い $C_{p_{max}}$ を示す傾き角の範囲が広く(偏流板3枚で、 $0^\circ\sim+15^\circ$ , 2枚で、 $0^\circ\sim+20^\circ$ )、傾き角が正側で円弧翼の効果が大きい。また、図8に示した偏流板3枚のCFD結果は、円弧翼と平板との関係では実験と同様の傾向を示している。

#### 4. 2 流れ場の比較(CFD結果, 偏流板枚数)

図9にD171n19の偏流板付風車(傾き角 $0^\circ$ )の流線および流速分布を示す。図9(a)は偏流板2枚(FD-A $30^\circ$ )、図9(b)は偏流板3枚(FD-A $45^\circ$ )である。いずれも偏流板Aでは、羽根車側の増速流れが示され、偏流板Bでは遮られた風の一部が羽根車上半部へ流入し、偏流板B下流では翼が低い流速域を上流側へ旋回し、各偏流板の流れ場改善効果が確認できる。

また、偏流板Bの1枚(図(a))と2枚(図(b))を比較すると、明らかに上流側の減速域(黄色線)が偏流板Bを2枚として図(b)のように配置することで減少し、羽根車上半部へ流入する風の減速を低減できている。加えて、偏流板Aの傾きは $45^\circ$ (FD-A $45^\circ$ )の方が、羽根車側への増速効果が大きい。

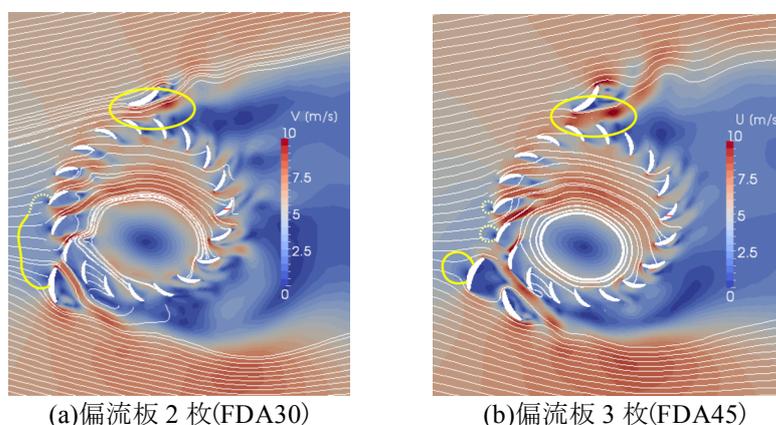


図9 流線および流速分布(CFD, D171n19)

以上の結果から、クロスフロー風車高出力化のための集風体を構成する偏流板形状・配置の最適化の検討から、次の結論を得た。

1. 偏流板形状について、円弧翼と平板を比較した結果、円弧翼は出力性能改善効果が高く、集風体を小型化する際に有効である。
2. 風向変化に伴う集風体の出力性能改善効果の低下を低減するために、偏流板枚数を2枚から3枚にし、それらの配置を含め検討し比較した結果、流入する風の減速を抑えるように配慮して3枚構成にすれば風車出力は明らかに高く、また、風向と集風体の向きのずれに対しても広い範囲で高出力を維持し有効である。また、最も良い条件で風車単体に比べ約60%出力は向上する。

以上に加え、実用化の検討として、図1に示した尾翼について、数値解析結果をもとに尾翼寸法・配置を決定し、実際的な機械制御なしの集風体を製作し、風洞実験にて風車回転時の挙動を確認し、集風体が安定して風に正対し姿勢を維持できることも確認した。

#### <引用文献>

- ① T.Tanino, et al., Improving Ambient Wind Environments of a Cross-flow Wind Turbine near a Structure by using an Inlet Guide Structure and a Flow Deflector, Journal of Thermal Science, Vol.14, No.3, 2005, 242-248.
- ② Tadakazu Tanino et al., Dual Flow Deflector Casing for Performance Improvement of Cross-flow Wind Turbine, Proceedings of the Grand Renewable Energy 2014 International Conference and Exhibition, 2014, O-Wd-19-3.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 谷野忠和, 村上洋大, 福田将之	4. 巻 42
2. 論文標題 2つの偏流板を有する集風ケーシング付クロスフロー風車のスケールアップに関する研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 風力エネルギー	6. 最初と最後の頁 25-31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 谷野忠和, 原圭佑, 宮國健司
2. 発表標題 揚力型風車とクロスフロー風車を組み合わせたハイブリッド垂直軸風車の可能性に関する予備的検討
3. 学会等名 日本風力エネルギー学会, 第41回 風力エネルギー利用シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷野忠和, 吉元大信, 吉原稜, 宮國健司
2. 発表標題 風向変化の影響を考慮したクロスフロー風車高出力化のための集風体を構成する偏流板配置の改善
3. 学会等名 日本風力エネルギー学会, 第41回 風力エネルギー利用シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷野忠和, 瀬戸航希
2. 発表標題 クロスフロー風車の高出力化のための機械制御フリーな集風ケーシングを構成する姿勢制御用尾翼の設計
3. 学会等名 日本風力エネルギー学会, 第40回 風力エネルギー利用シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 谷野忠和, 吉元大信, 橋本駿太郎
2. 発表標題 カーニーフラップを用いた小型垂直軸揚力型風車の翼のそりおよびピッチ角が出力性能に及ぼす影響に 関する研究
3. 学会等名 日本風力エネルギー学会, 第40回 風力エネルギー利用シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tadakazu Tanino, Hiroo Murakami, Masayuki Fukuda
2. 発表標題 STUDY ON UPSCALING OF CROSS-FLOW WIND TURBINE WITH TWO FLOW DEFLECTORS AS WIND COLLECTOR
3. 学会等名 Grand Renewable Energy 2018 International Conference and Exhibition ( 国際学会 )
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 谷野忠和, 村上洋大, 福田将之
2. 発表標題 2つの偏流板を持つ集風体付クロスフロー風車のスケールアップに関する一検討
3. 学会等名 日本風力エネルギー学会, 第39回 風力エネルギー利用シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福田将之, 村上洋大, 谷野忠和
2. 発表標題 OpenFOAMによるクロスフロー風車の集風ケーシングを構成する偏流板の検討
3. 学会等名 日本機械学会九州支部 久留米講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 村上洋大, 福田将之, 谷野忠和
2. 発表標題 クロスフロー風車高出力化のためのケーシングを構成する偏流板の実験的検討
3. 学会等名 日本機械学会九州支部 久留米講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----