

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：57101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420846

研究課題名(和文)都市環境型 制御フリー集風ケーシング付高出力垂直軸風車の実用化

研究課題名(英文)A study for practical use of cross-flow wind turbine with wind collector applicable in urban area

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・准教授

研究者番号：70352367

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：クロスフロー風車の高出力化を目的に、機械的風向制御が不要な2つの偏流板で構成した集風ケーシングを考案した。本研究では、2つの偏流板を付加した風車を対象に、実用化に向けてスケールアップを中心に検討を行った。基準の風車と、風車外径、風車翼とも相似にスケールアップした風車と、翼の寸法は変えず枚数を増やし風車外径をスケールアップした風車の計3種類の風車について、出力性能実験と数値解析を実施し、出力性能および流れ場を考察した結果、偏流板付クロスフロー風車のスケールアップは翼寸法が偏流板よりも小さくなるようにする方法が良いことが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Our study aims to improve the performance of cross-flow wind turbine by using two flow deflectors(FDs) as wind collector that improve the ambient wind environment of the wind turbine.

In this study, to investigate the influence of upscaling of the wind turbine with FDs, three types of wind turbine models were examined, one was the base model with 114 mm diameter and 12 blades and the other two were upscaled 1.5 times in diameter. Each upscaled model has different blade airfoil size and the number of blades. One upscaled model was similarly upscaled and the other had 19 blades the airfoil size of which was same as that of base model. The influence of difference in upscaling of the wind turbine with FDs on the performance and flow field was considered through the results of performance test and 2D numerical analysis.

As a result, with FDs, the upscaling method to keep the blade airfoil size smaller than the size of FDs was better to get high performance improvement effect of FDs.

研究分野：工学

キーワード：風力エネルギー クロスフロー風車 垂直軸風車 高出力化 再生可能エネルギー 集風ケーシング

1. 研究開始当初の背景

2011年3月に発生した東日本大地震による福島原子力発電所の事故により、原子力利用の縮小によるコスト増大が、大規模な風力や太陽光などの再生可能エネルギーがコスト的に競合可能な状況を作り出している。さらに、今後スマートグリッドなどの抜本的な電力網の改革が実現すれば中・小規模のエネルギー利用技術も有効な手段となり得る。

風力においても、中・小型風車の利用は十分に期待され、その普及に向けた中・小型風車の高性能化は重要である。特に、スマートグリッドのような分散型電力網では、都市部でも利用可能な中・小型発電設備の需要が期待される。このような都市部などの環境に適用できる風力エネルギーの利用技術として、起動特性に優れ、低回転・低騒音であるクロスフロー風車などに代表される垂直軸抗力型の中・小型風車の活用は有効である。さらに、風向・風速が不安定な厳しい風況となる都市部での利用であれば、なおさらプロペラ型風車に比べ、垂直軸抗力型風車の利用は有利であり、これらの風車の研究・開発の意義は十分にある。

以上のような背景から、申請者らはこれまでに、中・小型風車、特に垂直軸抗力型風車であるクロスフロー風車を用いて、ビルなどの構造物近傍で生じるはく離流れを有効に利用したクロスフロー風車の高出力利用に関する研究を実施してきた。その中で、偏流板(流入条件および周辺流れの改善)を導入し、構造物近傍の流れを風車に適した流れに改善し、出力性能が飛躍的に向上(最高出力点で15~40%向上)することを示した。特に、低風速域の環境であれば、偏流板の効果は高く、約2倍出力が向上した¹⁾。

さらに、これらの研究成果を踏まえ、現在、一樣流れ内に設置したクロスフロー風車でも同様に高い性能が得られる方法として、図1に示すような2枚の偏流板と尾翼で構成した非常に簡単な構造で機械制御フリーの集風ケーシングを考案し、クロスフロー風車の高出力化を目的として、小型供試風車による風洞実験を中心とした研究を行っている。

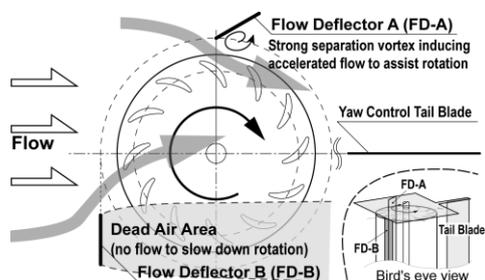


図1 二偏流板ケーシング付風車の概略

ケーシングを構成する2枚の偏流板は、図1に示すように、風向きと順方向に風車翼が回転する側に配置するものを偏流板A(図中FD-A)とし、風上に向かって風車翼が回転す

る側に配置するものを偏流板B(図中FD-B)と呼ぶ。偏流板Aは、流れに対してある角度に傾けることにより、前縁部に強いはく離渦を生じさせ、その前縁部を回り込むように誘起された風車側への偏流および増速効果により、風車の旋回力を向上させる作用がある。一方、偏流板Bは、風車旋回の妨げとなる風の流入をなくし、加えて、遮った流れの一部を風車側へ流入させ、本来マイナスに作用する流れを、逆にプラスに作用する流れとして有効に利用する。これらにより風車の高出力化を目指している。これまでに小型試験において、2枚の平板形状の偏流板を付加することで、クロスフロー風車の出力性能が最大点において40~50%向上し、起動特性も明らかに高くなることを確認した²⁾。

2. 研究の目的

本研究は、前述の通り、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、先に述べたこれまでの成果を踏まえ、2枚の偏流板と尾翼で構成した集風ケーシングを付加したクロスフロー風車の実用化に向けた研究を行う。すなわち、これまでの研究では、代表直径114mmの小型供試風車を用いた検討であったため、実用化に向けたスケールアップを中心とした検討を行う。そのために、クロスフロー風車をスケールアップした供試風車による風洞実験(EFD)および、同じ風車を解析対象とした数値計算(CFD)を実施し、流れ場と出力性能の評価を行う。

クロスフロー風車のスケールアップについては、風車外径に加え、翼枚数および翼寸法を含めれば、そのスケールアップの方法は、①風車外径とともに風車翼も相似にスケールアップする方法と、②翼寸法は変えずに翼枚数を増やし風車外径をスケールアップする方法とが考えられる。そのため、先に述べた代表直径114mmの小型供試風車を基準に、代表直径が1.5倍(代表直径171mm)のスケールアップの方法(翼寸法、翼枚数)が異なる2種類の風車を新たに加え検討した。これら3種類のクロスフロー風車を対象に、風洞実験による出力性能試験およびオープンソースCFDを用いた流れ解析を実施し、スケールアップの違いと偏流板の効果と関係を明らかにし、集風ケーシング付クロスフロー風車の実用化、すなわち、スケールアップにおける指針を得ることを目的とする。

なお、当初、風車のスケールアップは、基準となる風車の2~3倍の大きさのものを検討していたが、実験設備環境が変更となり、3Dプリンタで製作した羽根車の強度的な問題から、前述の通り1.5倍のスケールアップ風車で検討を行った。また、スケールアップの検討に伴い、実用的な規模の集風ケーシング付風車を視野に入れて、風車性能と風車直径を代表長さとするレイノルズ数の関係の把握を計画していたが、後述の研究成果に示

すように、2枚の偏流板を付加した場合と付加しない場合とでは、スケールアップと出力性能との関係が異なる傾向を示し、加えてスケールアップの方法の違いによってもその関係が異なることが明らかとなっている。

3. 研究の方法

3.1 供試風車および出力性能試験

図2に出力性能試験に供試した代表直径 $D=114\text{mm}$ 、翼枚数 $n=12$ 枚のクロスフロー風車（以後、D114n12）の概略図を示す。風洞試験に用いた供試風車は軸方向長さ $L=250\text{mm}$ である。図2に示す通り、翼断面形状は、翼弦長 20mm 、半径 20mm の中心反り線上に翼厚分布を持たせた円弧翼とした。また、図3にD114n12風車およびスケールアップの検討に用いた代表直径1.5倍 ($D=171\text{mm}$) とした2種類の供試風車、ならびに、各風車に付加した2つの偏流板A、Bの配置を示す。なお、偏流板の形状は、図1に示した平板形状ではなく、風車翼と同じ円弧翼形状とした。これは、風車翼と偏流板の各寸法の大小関係と風車性能との関係を考察するのに便利のためでもある。

左図は、基準のD114n12風車および、これを相似に1.5倍とした翼枚数12枚の風車（以後、D171n12）であり、括弧内の値はD171n12を示している。右図は、翼寸法とソリディティ ($\sigma=0.76$) をD114n12と等しくし、翼枚数を19枚に増やし、風車寸法を1.5倍とした風車（以後、D171n19）である。

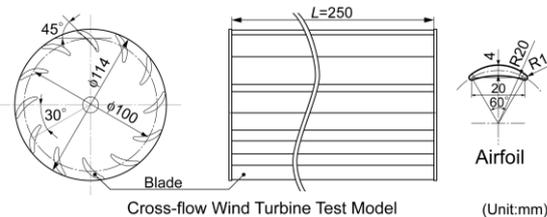


図2 供試クロスフロー風車 (D114n12)

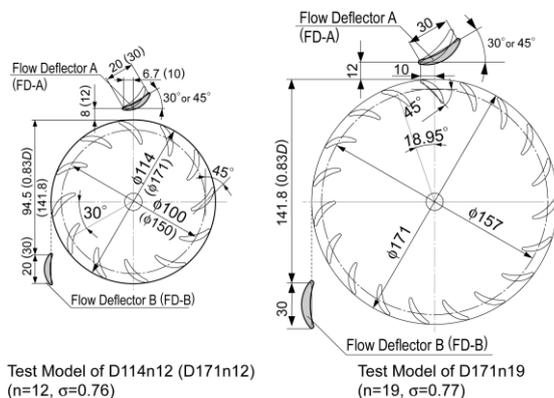


図3 偏流板クロスフロー風車 (D114n12, D171n12 および D171n19)

風車に付加する2つの偏流板について、D114n12の偏流板寸法は、図2に示した風車

翼寸法と同じである。各偏流板の位置は、これまでの検討^{1), 3)}から、基準の配置として、偏流板A(FD-A)は、図中に示す位置に風向に対して 30° 傾けて配置し、偏流板B(FD-B)は、図の風車下部への風の流入が羽根車の旋回を妨げるため、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。なお、偏流板Aについては、出力性能試験のみ、傾き 30° に加え、 45° についても検討した。

これまで供試してきた代表直径114mmの小型供試クロスフロー風車に加え、スケールアップの検討として、3Dプリンタ(Stratasys製 Dimension SST768)で製作可能かつ出力性能試験に供試可能な風車直径を1.5倍とした2種類の供試風車および、それらに付加する2つの偏流板を出力性能試験用に作成した。

次に、出力性能試験について述べる。出力性能試験には、図4に示す出口部断面寸法が $680\text{mm} \times 680\text{mm}$ の簡易吐出型風洞送風機を用いた。供試風車および偏流板は、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配置した。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)を接続した。

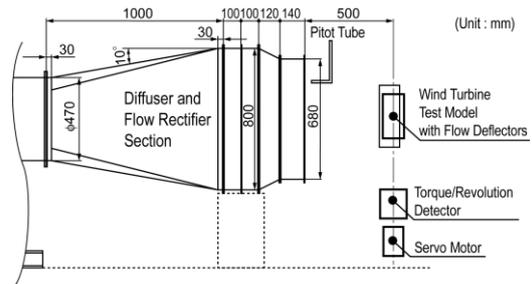


図4 出力性能試験装置の概略図

出力性能試験の入口風速の設定には、図4に示す風洞送風機出口部に固定したピトー管を用い、デジタル微差圧計(サヤマレーディング製 マノエース 140)にて差圧を測定した。出力性能試験では、入口設定風速を 6m/s とし、風車回転数を無負荷状態付近から徐々に下げ、逐次トルク・回転数を計測した。また、予備実験として軸摩擦トルクを測定し、出力性能試験の風車トルクを補正した。出力性能の評価には、回転数と風車出力それぞれを、入口風速および風車受風面積で無次元化した周速比 λ 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 : 風車代表半径[m]、 ω : 回転角速度[rad/s]、 V_∞ : 入口風速[m/s]、 T : 風車トルク[Nm]、 ρ : 空気密度[kg/m³]、 A : 受風面積($D \times L$)[m²]である。

3.2 数値解析方法および解析条件

3種類のクロスフロー風車単体および図3に示した偏流板付風車(偏流板Aは 30° の場

合のみ) 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 を用いて数値流れ解析を実施した。解析コードは、風車など回転体を解析可能な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、はく離流れに有効な *k- ω SST* モデルを用いた。図 5 に計算格子の例を示す。図に示す通り非構造格子を用い、羽根車および偏流板近傍のみ細かく、それら以外は計算機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 万セル、風車単体で約 6.7 万セルである。

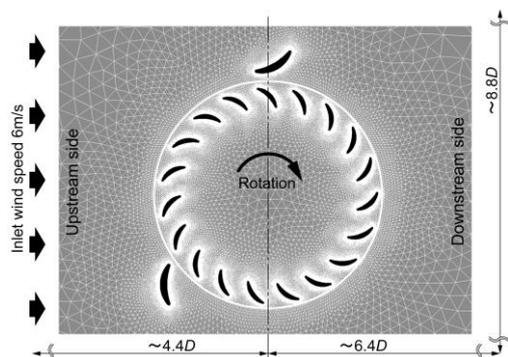


図 5 風車近傍の計算格子(D171n12)

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 $\lambda=0.497$ (D114 風車 : 500rpm, D171 風車 : 333rpm) とした。また、入口設定風速は風洞実験と同じ 6m/s である。

4. 研究成果

4. 1 出力性能特性

クロスフロー風車単体および 2 つの偏流板 A, B を付加した風車 (以後、偏流板付風車) を対象に実施した風洞実験による出力性能曲線を図 6 に示す。横軸は周速比 λ 、縦軸はパワー係数 C_p である。図 3 に示した 3 種類の各風車について、風車単体 (●) と、偏流板 A30° (□) および偏流板 A45° (▲) の偏流板付風車の計 3 条件の出力性能曲線を比較している。図中の出力性能曲線はそれぞれ、破線は D114n12, 一点鎖線は D171n12, 実線は D171n19 である。また、図中には後述する数値解析結果 (D171n12, D171n19 の風車単体および偏流板付風車 (偏流板 A30°)) から求めたパワー係数 (*印) も示している。

図 6 で明らかなように、2 つの偏流板 A, B を付加した風車は、いずれも風車単体に比べて出力性能が明らかに高い。風車単体に対して偏流板付加の効果が最も高い D171n19 ではパワー係数は最大点付近で約 45% 向上した。また、全ての偏流板付風車において出力が正となる周速比の範囲は広がり、風車単体よりもパワー係数が高い値で推移している。

まず、風車単体について、風車のスケールアップに着目して 3 種類の風車を比較すると、

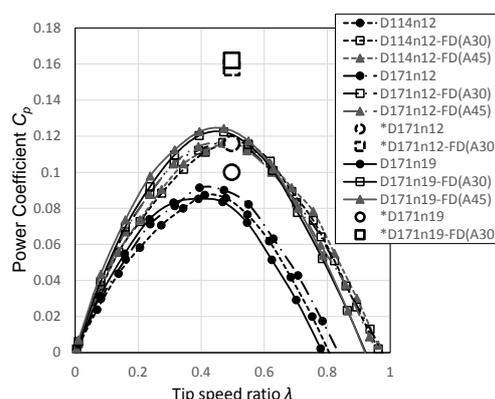


図 6 出力性能特性の比較

パワー係数の最大値は高い順から、D171n12, D114n12, D171n19 となり、風車直径、翼寸法とも 1.5 倍とした D171n12 が最も良い出力性能を示した。また、翼寸法は変えず枚数を増やし、風車直径のみ 1.5 倍とした D171n19 では最大パワー係数は他に比べてわずかに低いが、最大値付近はなだらかに広い分布となり、低周速比側で良好な特性を示した。これらの結果から、検討した寸法の範囲においてクロスフロー風車単体をスケールアップする場合、翼寸法も相似に大きくする方法が、ピーク出力は向上し、有効であると言える。

次に、偏流板付風車について、3 種類の風車を比較すると、上述の風車単体の場合とは異なり、最大パワー係数が最も高いのは D171n19 であり、D171n12 および D114n12 は同程度でやや低い出力性能であった。付加した 2 つの偏流板の効果は、風車単体に対する最大パワー係数が、D171n19 では 1.45 倍、D171n12 では 1.27 倍、D114n12 では 1.33 倍程度となり、D171n19、すなわち、風車翼が偏流板よりも小さく翼枚数が多い条件で、偏流板の出力改善効果が最も高い結果となった。スケールアップ風車に着目し、偏流板付風車と風車単体とを比較すると、D171n19 と D171n12 の出力性能の優劣が逆転した。このことから、風車の羽根車のスケールアップの方法の違いが、偏流板の効果に影響することが分かる。

続いて、出力性能試験結果を踏まえ、スケールアップした 2 種類の風車に対して実施した風車単体および偏流板付風車の数値解析結果によるパワー係数を考察する。図 6 に示す通り、本解析は 2 次元解析であるため、数値解析結果は実験結果よりも全体的にパワー係数が高くなった。ただし、各風車の偏流板付風車と風車単体のパワー係数の大小関係は同様であり、D171n19 (実線記号) の方が D171n12 (破線記号) に比べて 2 つの偏流板による出力改善効果が高くなる結果が得られた。このことは、数値解析結果が 2 つの異なるスケールアップにおける偏流板の効果の違いをある程度捉えていると考えられる。そこで、後述するように流れ場について考察した。

4. 2 流れ場および偏流板に作用する流体力

図7にD171n12の偏流板付風車の流線および流速分布を示す。図に示すように、偏流板Aでは、その前縁部から羽根車側への増速流れが確認できる。一方、偏流板Bでは風の流入が遮られるため、その下流側では風車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。

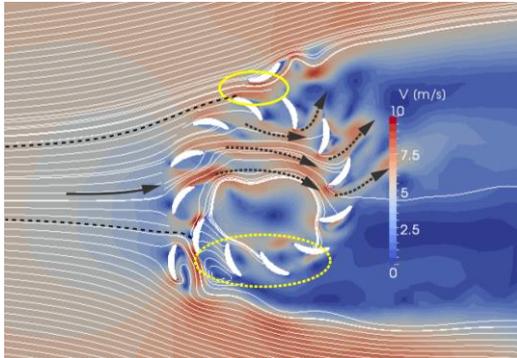


図7 流線および流速分布(D171n12,偏流板付)

図8にD171n12, D171n19の偏流板A近傍の圧力分布を示す。(a),(b)はD171n12,(c),(d)はD171n19の結果であり,(a)と(b),(c)と(d)はそれぞれ連続した時間の異なる分布である。(a),(c)は翼間が偏流板に近く、その後、翼が偏流板に近づいた場合が(b),(d)である。

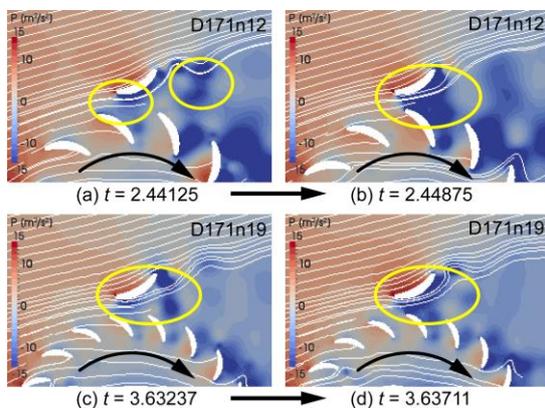


図8 偏流板A周辺の圧力分布の時間変化

偏流板Aの風車側の流れに着目すると、各風車の左右の図における偏流板A近傍の圧力分布の変化(黄線の円内)が、図(a),(b)のD171n12では、図(c),(d)のD171n19に比べて大きく、特にD171n12の図(b)では偏流板と風車翼との間に大きな低圧部がみられる。これらは、翼寸法が相対的に大きく偏流板Aと等しいD171n12の方が、風車翼が偏流板Aよりも小さいD171n19に比べて、風車翼がもたらす流れの変化の影響が大きいことを示している。

次に、D171n12, D171n19の偏流板B近傍の圧力分布を図9に示す。各図(a)~(d)の関係は、図8の場合と同様である。

偏流板B上方の風車上流部(黄線の等高線)や風車内部などにおいても、翼寸法が相対的

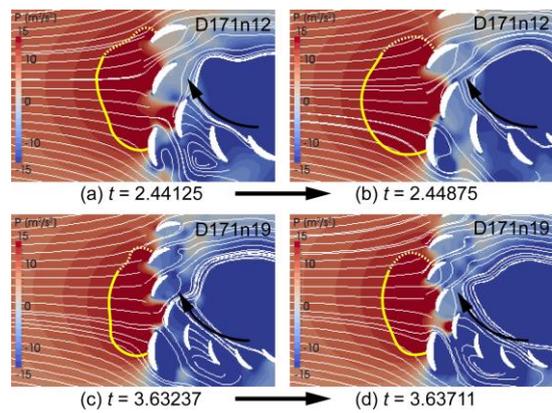


図9 偏流板B周辺の圧力分布の時間変化

に大きいD171n12では、D171n19に比べて、高い圧力を示す領域が大きく、その分布形状の時間変動も大きく現れている。

これら風車翼がもたらす流れの変化の影響を定量的に確認するために、スケールアップした2種類の風車それぞれに付加した偏流板A, Bに作用する偏流板表面の圧力分布から流体力を導出した。ある時間内における各偏流板に作用した流体力の時間変動から求めた流体力の変動幅 ΔF (最大値-最小値)を表1に示す。

表1 偏流板に作用する流体力の変動幅 ΔF

	FD-A	FD-B
D171n12	0.129 N	0.077 N
D171n19	0.073 N	0.036 N

表1の偏流板に作用する流体力の変動幅を偏流板A(FD-A)同士、偏流板B(FD-B)同士と比較すると、偏流板A, Bとも風車翼寸法が相対的に小さいD171n19の偏流板付風車の方が、流体力の変動幅が明らかに小さい。

これらの結果、すなわち、D171n12では、D171n19に比べて風車翼による流れの変化が大きく、その影響が偏流板A, Bへ及んだ結果として、図6の出力性能試験の結果でも示されたように、D171n12では各偏流板の効果が安定せず出力性能が低くなったと言える。逆に、風車翼寸法が偏流板より小さいD171n19では、風車翼通過の流れの変動の影響が小さいため、安定した偏流板の効果を得られたものと考えられる。また、表1における偏流板AとBとの流体力の振幅の大きさの違いから、風車翼通過の流れの変動の影響は、偏流板Aの方が大きい。加えて、図8においても偏流板Aと風車翼との間の圧力分の変化が、D171n12の方がD171n19に比べて大きいことから、偏流板Bよりも偏流板Aの効果が不安定であったと推察される。

以上の結果から、集風ケーシング付クロスフロー風車の実用化の検討として実施したスケールアップに伴う偏流板の効果について、次の結論を得た。

1. 偏流板を付加したクロスフロー風車をス

ケールアップする場合、風車翼が偏流板より小さくなるようにすると、偏流板の効果が高いことが出力性能実験により示された。

2. 偏流板付クロスフロー風車のスケールアップについて、数値解析の流れ場から、風車翼も相似に大きくした場合、偏流板への風車翼通過による流れの変化の影響が大きく、一方、翼枚数は多いが風車翼を偏流板 A よりも小さくした場合、翼が偏流板に及ぼす影響が小さく、偏流板の安定した流れ場改善効果を得られることが確かめられた。
- 1, 2 より、偏流板を持つ集風ケーシング付クロスフロー風車の実用化に向けたスケールアップの指針を得ることができた。

以上のほか、さらなる実用化の検討として、図 1 に示した尾翼について、その形状を平板形状として偏流板に作用する流体力から必要な尾翼寸法を導出し、2 つの偏流板と尾翼で構成した実際的な機械制御フリーのケーシングを製作し、風洞実験にて風車旋回時の挙動を確認した。その結果、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.
- ③ 谷野忠和, 仲尾晋一郎ほか, 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, 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, 448-451.

5. 主な発表論文等 (研究代表者は下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 谷野忠和, 宮國健司, 仲尾晋一郎, オープンソース CFD を活用した二偏流板ケーシング付クロスフロー風車の流れ場および出力性能の評価, 風力エネルギー, 2015, 査読有, Vol.39, No.3, 37-43.
- ② Tadakazu Tanino, Hiroo Murakami, Masayuki Fukuda, Study on Upscaling of Cross-flow Wind Turbine with Two Flow Deflectors as Wind Collector, Proceedings of the Grand Renewable Energy 2018

International Conference and Exhibition, 2018, 査読有, O-We-14-1.

- ③ 谷野忠和, 村上洋大, 福田将之, 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, 風力エネルギー, 2018, 査読有 (投稿中)

[学会発表] (計 6 件)

- ① 谷野忠和, 宮國健司, 松川豊, 堀勉, 数値解析による二偏流板ケーシング付クロスフロー風車の偏流板の静態条件と流れ場の関係, 日本風力エネルギー学会, 第 37 回 風力エネルギー利用シンポジウム, 2015, 351-354.
- ② 谷野忠和, 池田昂平, 内野拓実, 偏流板付クロスフロー風車の実用化に伴うスケールアップに関する予備的検討, 日本機械学会 第 26 回 環境工学総合シンポジウム 2016, 2016, 340-343.
- ③ Tadakazu Tanino, Takeshi Miyaguni, Study of a Casing with Two Flow Deflector Plates for Performance Improvement of a Cross-flow Wind Turbine by CFD Analyses, Proceedings of The 15th World Wind Energy Conference and Exhibition (WWEC 2016 TOKYO), 2016, Abstract 査読有, D-4-5.
- ④ 福田将之, 村上洋大, 谷野忠和, 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, 日本機械学会九州支部 久留米講演会 講演論文集, 2017, No.178-3, 69-70.
- ⑤ 村上洋大, 福田将之, 谷野忠和, 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, 日本機械学会九州支部 久留米講演会 講演論文集, 2017, No.178-3, 71-72.
- ⑥ 谷野忠和, 村上洋大, 福田将之, 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, 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, 2017, 448-451.

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
谷野 忠和 (TADAKAZU TANINO)
久留米工業高等専門学校・機械工学科・准教授
研究者番号 : 70352367
- (2) 分担研究者
なし
- (3) 連携研究者
なし