

せん断流中に置かれた直線翼垂直軸風車の性能に関する風洞実験 Wind Tunnel Experiments on Performance of Vertical-Axis Wind Turbine with Straight Blades in Shear Flow

若狭 光洋*¹ 木綿 隆弘*² 河野 孝昭*³
Mitsuhiro WAKASA Takahiro KIWATA Takaaki KONO

*¹ Graduate Student of Natural Science and Technology, Kanazawa University, Kakuma-machi,
Kanazawa-shi, Ishikawa, 920-1192, Japan

Fax: +81-76-234-4746, E-mail: wakasa@ryuko.ms.t.kanazawa-u.ac.jp

*² Professor, Kanazawa University

*³ Assistant Professor, Kanazawa University

Abstract

The performance of the vertical-axis wind turbine with straight blades in a shear flow was investigated in an open circuit-type wind tunnel. The wind turbine had a variable-pitch angle mechanism. The diameter and height of wind turbine were 880mm and 800mm, respectively. The number of straight blades with a NACA0018 airfoil section was three. Two-dimensional shear flow was generated by using three types of porous flat plates. The effects of the location and the strength of shear flow to the rotor on the performances of the vertical-axis wind turbine with fixed and variable-pitch straight blades were found. When the porous plate installed at the backward side, the maximum apparent power coefficient for the porous plate of $\Phi = 0.49$ and 0.60 is higher than the case with no plate. The tip speed ratio of the maximum apparent power coefficient also shifted to the lower side of TSR as shielding coefficients Φ increases.

キーワード：垂直軸風車，直線翼，せん断流，性能，風洞

Key Words：Vertical Axis Wind Turbine, Straight Blade, Shear Flow, Performance, Wind Tunnel

1. 緒論

近年，地球温暖化ガスの1つである二酸化炭素を排出しないクリーンな自然エネルギーの1つである風力エネルギーを利用した風力発電が注目されている。災害時には，既存の電力網に頼らない独立電源としての小形風力発電への期待も高まっている。ストレートダリウス風車とも呼ばれている直線翼垂直軸風車は，発電機等を地上付近に設置することが出来るため，メンテナンス性にも優れている⁽¹⁾。しかし，直線翼垂直軸風車はプロペラ風車に比べて，起動特性や出力係数に劣る欠点がある。木綿らはこれらの欠点を改善するため，風車の回転力によって翼を四節リンク機構で揺動させる可変ピッチ式の直線翼垂直軸風車を開発し，振れ角等が起動特性や出力特性に及ぼす影響を明らかにした⁽²⁾。

また，風力エネルギーは風速の3乗に比例するため，より大きな風車出力を得るには風速が高い場所に風車

を設置する必要がある。中田らは道路用防風フェンス上部に生じる増速流を利用して風力発電を行うため，クロスフロー風車をフェンス上部に設置し，運転手への強風時の注意喚起用LEDの電光掲示板の電源として活用する研究を行っている⁽³⁾。防風フェンス上部と同様な増速現象は建築物角部付近にも発生しており，ビル風を利用する風力発電の研究も行われている⁽⁴⁾。小形風車による風力発電システムを都市部に導入するためには，この増速した風を有効に利用して適切な位置に風車を設置するのが有効である。しかし，この増速流は速度勾配を有するせん断流であると共に，その増速割合は構造物の形状等によっても異なる。

ビル屋上に風車を設置する際の吹き上がり風の角度が垂直軸風車の出力に及ぼす影響に関して，一様流に対して風車回転軸を傾けた風洞実験を，Ferreiraらは直線翼垂直軸風車⁽⁵⁾，本橋らはサボニウス風車⁽⁶⁾の場合について行っている。しかし，実際の構造物近傍のように速度勾配を有するせん断流中の速度場に直線翼垂直軸風車を置いた場合の出力に与える影響は明らかにされていない。そこで本研究では，風洞ノズル出口に多孔板を設置してせん断流を形成させ，速度勾配の強さや位置が直線翼垂直軸風車の性能に与える影響を調べる。そして，固定ピッチ及び可変ピッチ式の直線翼垂

*1 金沢大学大学院自然科学研究科機械科学専攻 大学院生
(〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: wakasa@ryuko.ms.t.kanazawa-u.ac.jp

*2 金沢大学理工研究域教授

*3 金沢大学理工研究域助教

(原稿受付：2014年12月1日)

直軸風車を構造物等の周辺のせん断流中に設置する際の最適な位置について検討した。

2. 実験装置及び方法

2.1 風洞実験装置

実験装置概略図を図1に示す。実験は開放式測定部[断面寸法が横 1250mm(L_y)×縦 1250mm(L_z)×長さ 2000mm(L_x)]を有する回流型風洞装置で行い、風車を縮流洞出口から $x = 850\text{mm}$ の位置に設置した。多孔板を設置していない測定部断面での風速 $U = 10\text{m/s}$ における一様流の速度分布の非一様性は $\pm 1.0\%$ 以下、乱れ強

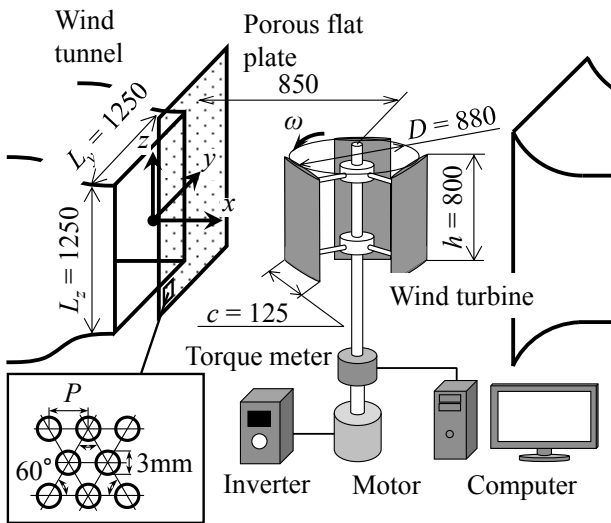


Fig.1 Experimental apparatus

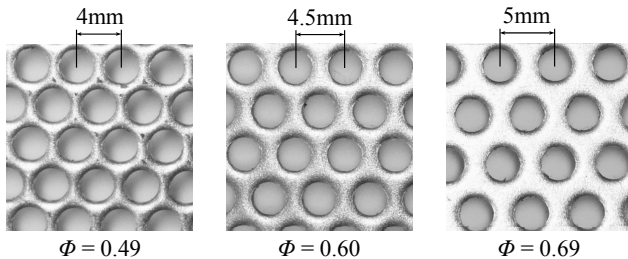


Fig.2 Porous flat plate

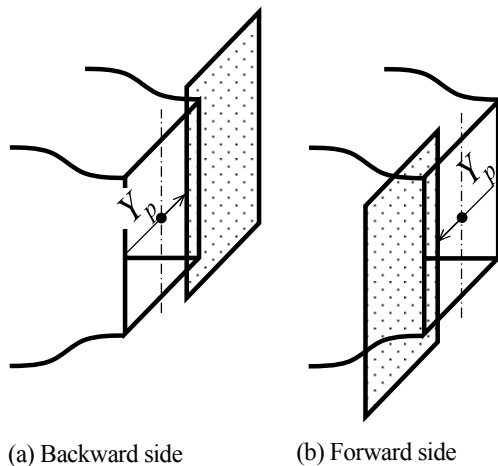


Fig.3 Porous flat plate position

さは 0.5% 以下であった。なお、座標の原点を縮流洞出口中央とし、 x , y , z の方向は図1のように取った。

本実験では2次元的速度分布を持つせん断流を形成させるために、図2のような多孔板を縮流洞出口に設置した。多孔板には直径 3mm の円孔が 60 度千鳥型で配置されており、せん断流の速度差を変更するためにフェンスの遮蔽率は $\Phi = (\text{フェンス面積} - \text{開孔部面積}) / \text{フェンス面積} = 0.49$ ($P = 4\text{mm}$), 0.60 ($P = 4.5\text{mm}$), 0.69 ($P = 5\text{mm}$) と 3 種類変化させた。図3に多孔板の y 方向の設置位置を示す。せん断流の形成位置を変更するために風車の回転軸に対する多孔板の先端位置(y 座標)を示す閉塞位置を $\Psi (=Y_p / D)$ とし、 ± 0.28 , ± 0.14 , 0 と変化させた。また、せん断流の勾配方向を変えるために、図3, 4のように多孔板で縮流洞出口を塞ぐ領域を、ブレードの回転方向と風の向きが対向する場合をブレード戻り側(Backward side), 向きが同一の場合をブレード進み側(Forward side)と定義する。

2.2 供試風車と実験方法

供試風車は、図1に示すようなロータ直径 $D = 880\text{mm}$ 、高さ $h = 800\text{mm}$ 、翼枚数 $N = 3$ 枚の可変ピッチ式の直線翼垂直軸風車⁽⁷⁾⁽⁸⁾である。NACA0018 翼型のブレードはアルミ製で、翼弦長 $c = 125\text{mm}$ であり、風車のソリディティ $\sigma = [Nc / \pi D] = 0.136$ である。風車回転方向は風車上面から見て反時計回り(CCW)とした。本風車の翼は、可変ピッチ機構により風車回転時に翼前縁側の節である P_1 を回転中心として揺動する。 P_1 は翼前縁から 30mm 離れた位置であり、 P_2 は翼前縁から 69mm 離れているため、翼部リンク長さ l_c は 39mm となる。 OP_1 間のリンク長さ $l_s = 410\text{mm}$

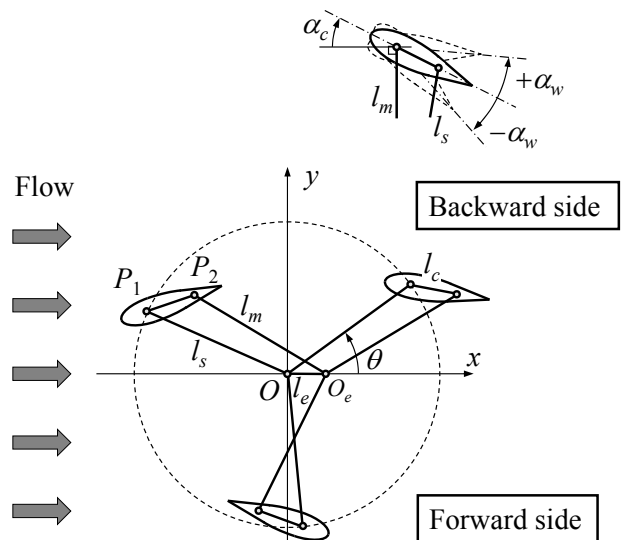


Fig.4 Variable-pitch mechanism

を変えることで翼取付け角 α_c を変えることができ、さらに OO_e 間のリンク長さ l_e を変えることでピッチ角 α_w を風車運転時でも任意に変えることが可能なシステムとなっている⁽⁷⁾。本研究では、 $\alpha_w = \pm 0^\circ (l_e = 0\text{mm})$ の固定ピッチ風車と $\alpha_w = \pm 11^\circ (l_e = 8\text{mm})$ の可変ピッチ風車で実験を行った。これら α_w と α_c の値は一樣流で行われた先行研究⁽⁸⁾で、高い効率が得られた値を選択した。

風車はカップリングを介してトルク計(TEAC 製, TQ-AR5N), 及び回転制御用モータ(MITSUBISHI 社製, gm-s 2.2kW)に接続されており、風車の回転数 n をデジタルタコメータ(小野測器製, HT-5500)で計測してインバーターで変化させ、各周速比 $\lambda (= D\omega/2U_{ave})$ におけるトルク T を計測し、風車出力を算出した。ここで $\omega (= 2\pi n/60)$ は角速度である。平均風速 $U_{ave} (= \int_{-D/2}^{D/2} u dy / D)$ は、風車を設置しない状態で風車直径と同じ幅の $y = -440 \sim 440\text{mm}$ の $x = 100\text{mm}$ における速度分布を 20mm 間隔で積分して求めた断面平均風速である。風車出力をせん断流の平均風速 U_{ave} の一樣な風が持っているエネルギー P_A で無次元化した出力係数 $C_{pA} [= T\omega / 0.5\rho h D U_{ave}^3 (= P/P_A)]$ 及び、せん断流の非一樣な風が持っているエネルギー P_I で無次元化した出力係数 $C_{pI} [= T\omega / \int_{-D/2}^{D/2} 0.5\rho h u^3 dy (= P/P_I)]$ で風車性能を評価した。

ここで ρ は空気密度である。なお、機械損失による影響を除去するために、あらかじめブレードを取り外し軸とアームのみの状態で回転させてトルク損失値を測定し、風車出力を補正した。トルク損失値は周速比 λ によって変化し、 $\lambda = 0.1 \sim 2.4$ (回転数 $n = 36 \sim 416$

min^{-1}) において約 $0.1 \sim 1.0\text{Nm}$ の範囲で変化しており、平均トルクの約 $0\% \sim 50\%$ である。

風速分布は自動トラバース装置に取り付けられた X 形プローブ(日本カノマックス製, 0252R-T5)を用いて測定した。定温度型熱線流速計(日本カノマックス製, MODEL1010 CTA ANEMOMETER, MODEL1013 LINEARIZER)により得られた風速の電圧信号は AD 変換器を介し、サンプリング周波数 10kHz 、サンプリング数 4 万点のデータを取得し、時間平均値などを求めた。

3. 実験結果及び考察

3.1 測定断面内での速度分布

図 5 に風車及び多孔板を設置しない場合の測定断面内の時間平均速度ベクトルを示す。測定断面は $x = 100, 500, 1000\text{mm}$, $y = 250, 0, -250\text{mm}$ とし、 z 方向は $z = -625 \sim 375\text{mm}$ まで 20mm 間隔で測定を行った。なお、図中には風車を設置する位置を円筒で示してある。 $x = 100\text{mm}$ 断面ではほぼ一樣な速度分布になっている。下流の $x = 500\text{mm}$ と 1000mm 断面では、静止している周囲流体との間に混合が進んで一樣な速度分布となっている範囲が減少しているが、風車を設置する領域ではまだ一樣な速度分布を維持している。

図 6 に遮蔽率 $\Phi = 0.60$ の多孔板を閉塞位置 $\Psi = 0$ でブレード進み側に設置した場合の時間平均速度ベクトルを示す。測定断面は $x = 100, 500, 1000\text{mm}$, y 方向は $y = -500 \sim 500\text{mm}$ まで 20mm 間隔、 $z = -250, 0, 250\text{mm}$ とした。 $x = 100\text{mm}$ 断面では多孔板によってせ

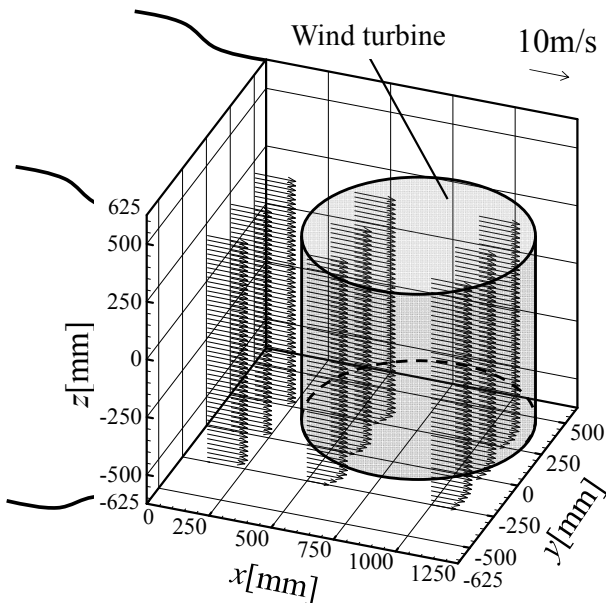


Fig.5 Distributions of velocity vectors for no porous plate

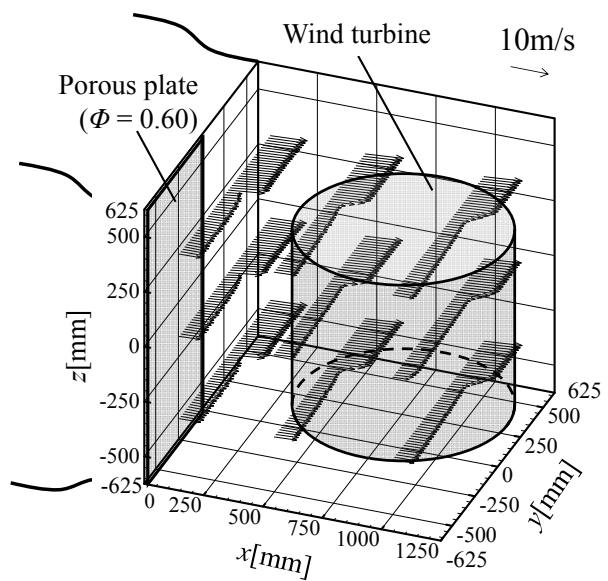
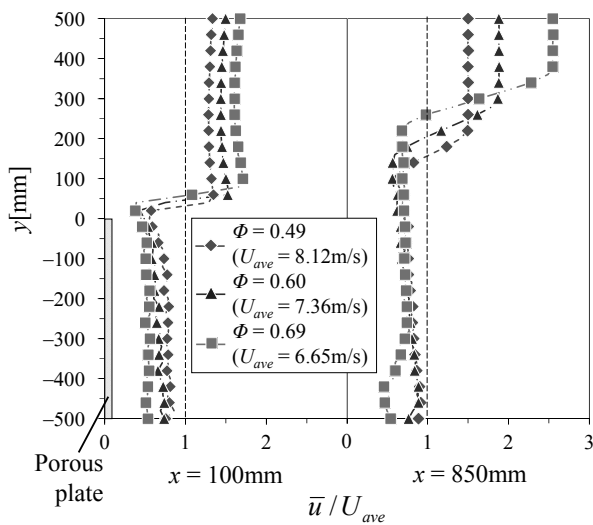
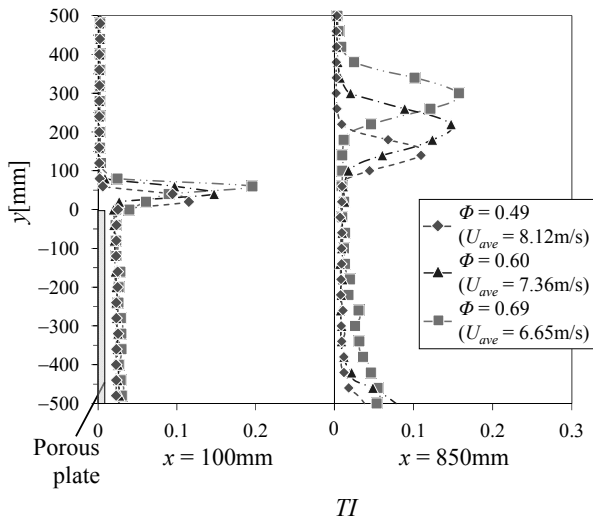


Fig.6 Distributions of velocity vectors for the porous plate of $\Phi = 0.60$ installed at the forward side of $\Psi = 0$



(a) Distributions of velocity

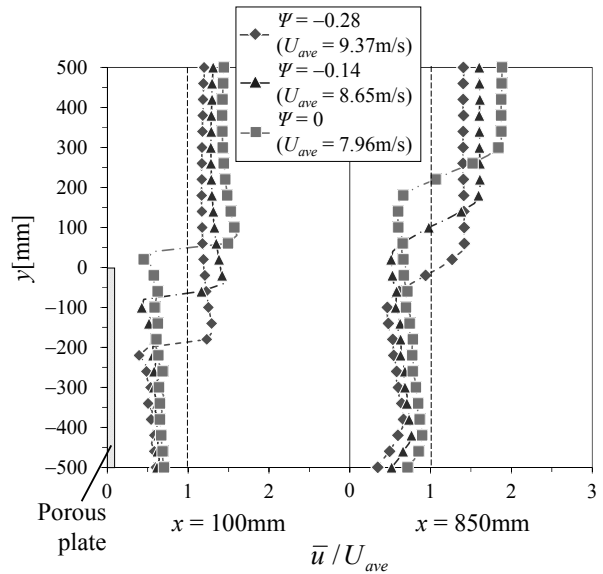


(b) Distributions of turbulence intensity

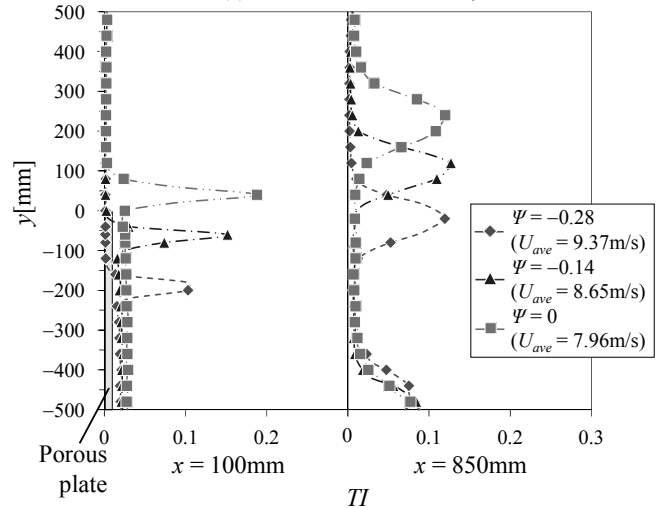
Fig.7 Distributions for the porous plate at the forward side of $\Psi = 0$

ん断流が2次元的に形成されている。 $x = 1000\text{mm}$ の下流断面では混合層の幅が大きくなるが、2次元的なせん断流が維持されている。

図7(a)に多孔板を閉塞位置 $\Psi = 0$ でブレード進み側に設置し、遮蔽率 $\Phi = 0.49, 0.60, 0.69$ とした場合の x 方向の時間平均速度 \bar{u} / U_{ave} の $z = 0$ 断面における分布を示す。 $x = 100\text{mm}$ 断面では遮蔽率の違いが多孔板が存在する領域の速度に現れているが、多孔板が存在しない側では遮蔽率の違いによる速度の差は小さい。 $x = 850\text{mm}$ 断面では、速度が変化する位置が、 $\Phi = 0.69$ の多孔板が最も y 座標が大きい位置になっている。これは、多孔板角部から剥離した流れが、遮蔽率の大きい場合にはさらに y 方向の速度成分が増加するためである。また、図7(b)は x 方向速度の乱流強度 TI の分布である。多孔板が存在する位置での乱流強度は $x =$



(a) Distributions of velocity



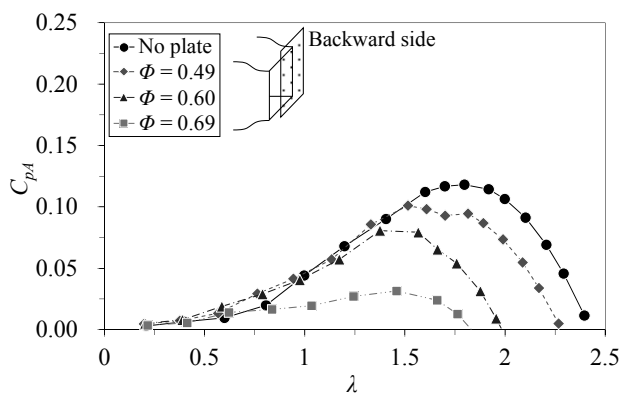
(b) Distributions of turbulence intensity

Fig.8 Distributions for the porous plate of $\Phi = 0.60$ at the forward side

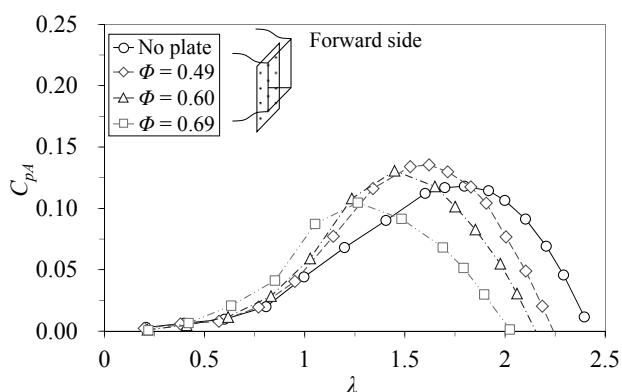
100mm では $TI = 0.012 \sim 0.026$ と多孔板が存在しない位置よりも少し増加する。また、多孔板端部では剥離した流れにより乱流強度が大きく増加する。

図8(a)に遮蔽率 $\Phi = 0.60$ の多孔板を、閉塞位置 $\Psi = 0, -0.14, -0.28$ でブレード進み側に設置した場合の x 方向の時間平均速度 \bar{u} / U_{ave} の $z = 0$ 断面における分布を示す。 $x = 100\text{mm}$ 断面では、閉塞位置の変化、つまり多孔板の位置の変化に伴って増速する y 座標の領域が変化している。図8(b)は乱流強度 TI の分布である。速度分布と同様、多孔板の位置の変化に対応して乱流強度の大きな位置も変化していることが分かる。

図示していないが、多孔板をブレード戻り側に設置した場合は、いずれのケースにおいても、速度分布はブレード進み側の分布を反転した分布になったことを確認している。なお、Castroの研究によると、本実験



(a) Backward side



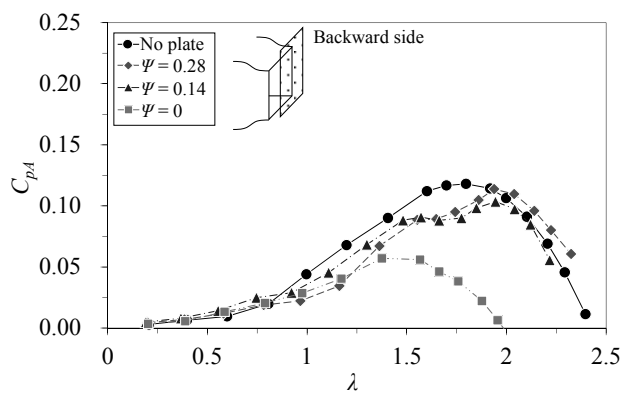
(b) Forward side

Fig.9 Effects of the power coefficients C_{pA} on the shielding coefficient Φ of the porous plate for the fixed-pitch wind turbine ($\Psi = 0$)

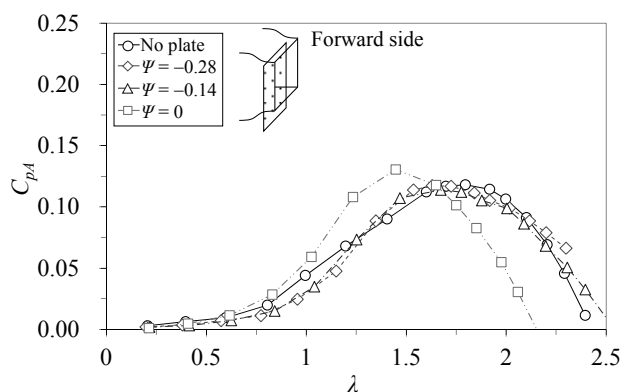
に使用した遮蔽率の多孔板後流には逆流領域が存在しないことが示されている⁽⁹⁾。

3.2 固定ピッチ風車におけるせん断流中の風車出力

図 9 に多孔板を閉塞位置 $\Psi = 0$ の位置に設置し、遮蔽率 $\Phi = 0.49, 0.60, 0.69$ と変化させた場合の固定ピッチ風車における出力係数 C_{pA} を周速比 λ に対して示す。多孔板を設置しない場合の最大出力係数は $C_{pAmax} \approx 0.12$ に対して、図 9(a) のように多孔板をブレード戻り側に設置した場合、 $\Phi = 0.49$ で $C_{pAmax} \approx 0.10$ 、 $\Phi = 0.69$ で $C_{pAmax} \approx 0.025$ となり、遮蔽率 Φ の増加に伴い出力係数 C_{pA} は低下している。一方、図 9(b) のよう多孔板をブレード進み側に設置した場合、 $\Phi = 0.49$ の時、最大出力係数 $C_{pAmax} \approx 0.13$ と多孔板がない一様流の場合よりも増加している。これらの出力係数の増減は、直線翼垂直軸風車のブレードがどのアジマス角 θ でトルクを発生しているかに関係している。つまり、本風車のような直線翼垂直軸風車は、 $\theta = 180^\circ$ 付近で最大のトルクが発生することより⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、多孔板を設置することで、このアジマス角付近におけるブレードに流入する風速



(a) Backward side



(b) Forward side

Fig.10 Effects of the power coefficients C_{pA} on the installation position Ψ of the porous plate for the fixed-pitch wind turbine ($\Phi = 0.60$)

が増加また減少、かつ流入角度も変化することによって風車出力が増加・減少したと言える。

図 10 に遮蔽率 $\Phi = 0.60$ の多孔板を閉塞位置 $\Psi = \pm 0.28, \pm 0.14, 0$ で変化させた場合の出力係数 C_{pA} を示す。図 10(a) のように多孔板をブレード戻り側に設置した場合、風車を覆う領域が最も大きい遮蔽位置が $\Psi = 0$ では C_{pA} が大きく低下している。閉塞位置 $\Psi = 0.14, 0.28$ と風車を覆う領域が少なくなると、 $\lambda = 1.5 \sim 2$ で C_{pA} が一旦少し低下しているが、多孔板がない場合に近い。一方、図 10(b) のよう多孔板をブレード進み側に設置した場合、最大出力係数は遮蔽位置が $\Psi = 0$ で最も大きくなるが、遮蔽位置が $\Psi = -0.14, -0.28$ と風車を覆う領域が少なくなってもほとんど低下していない。

3.3 可変ピッチ風車におけるせん断流中の風車出力

図 11 に多孔板を閉塞位置 $\Psi = 0$ で設置し、遮蔽率 Φ を $0.49, 0.60, 0.69$ と変化させた場合の可変ピッチ風車における出力係数 C_{pA} を周速比 λ に対して示す。一様流中の可変ピッチ風車の最大出力係数は、 $C_{pAmax} \approx 0.21$ と固定ピッチ風車の最大出力係数 $C_{pAmax} \approx 0.12$ に比べて大きくなる。図 11(a) のように多孔板をブレード

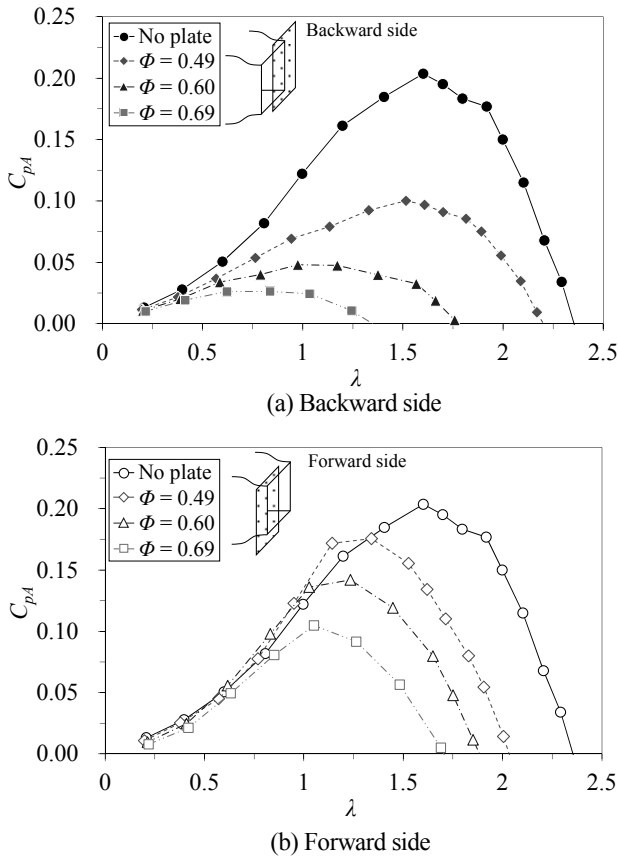


Fig.11 Effects of the power coefficients C_{pA} on the shielding coefficient Φ of the porous plate for the variable-pitch wind turbine ($\Psi = 0$)

戻り側に設置した場合、遮蔽率 Φ の増加に伴い、出力係数 C_{pA} は大きく低下する。一方、図 11(b) のように多孔板をブレード進み側に設置した場合、出力係数の低下は多孔板をブレード戻り側に設置した場合よりも小さい。また、出力係数 C_{pA} が最大となる周速比は、多孔板をブレード進み側に設置した場合と同様に、低周速比側へ移動している。この現象は、固定ピッチ風車においても見られており、横軸の周速比を算出する際に U_{ave} を用いているためである。

図 12(a) に遮蔽率 $\Phi = 0.60$ の多孔板をブレード戻り側に設置し、閉塞位置 Ψ を 0, 0.14, 0.28 と変化した場合の可変ピッチ風車における出力係数 C_{pA} を示す。閉塞位置 $\Psi = 0$ の出力係数 C_{pA} が最も低下するが、 $\Psi = 0.28$ の出力係数 C_{pA} は多孔板がない場合よりも高周速比側で増加している。これは、固定ピッチの結果と同様、多孔板を設置することでブレードに流入する風速と流入角度が変化したためと考えられる。また、図 12(b) に多孔板をブレード進み側に設置し、閉塞位置 Ψ を -0.28, -0.14, 0 と変化した場合の可変ピッチ風車における出力係数 C_{pA} を示す。閉塞位置 $\Psi = 0$ の出力係数 C_{pA} は、 $\lambda > 1.0$ で最も低下するが、多孔板をブレード

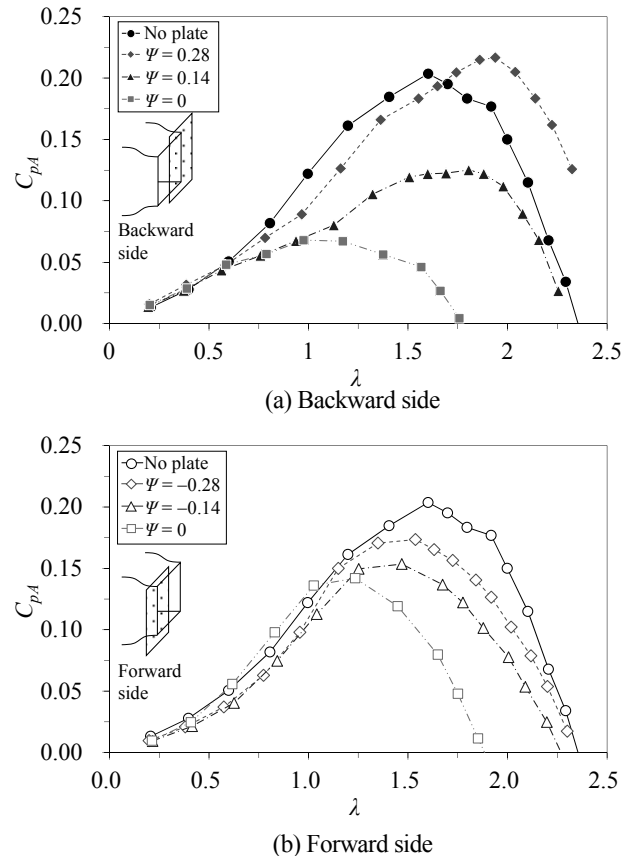


Fig.12 Effects of the power coefficients C_{pA} on the installation position Ψ of the porous plate for the variable-pitch wind turbine ($\Phi = 0.60$)

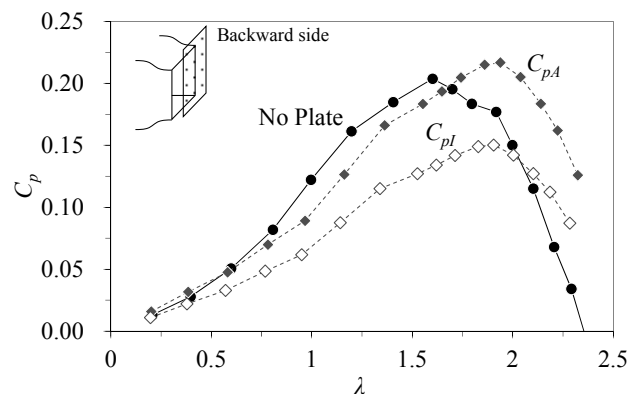


Fig. 13 Comparison of the power coefficients C_{pA} and C_{pI} installed at the backward side of $\Psi = 0$ for the porous plate of $\Phi = 0.60$

戻り側に設置した $\Psi = 0$ の出力係数よりも大きい。

アジマス角 $\theta = 180^\circ$ における一様流中での相対流入風に対する翼の迎え角は、最適周速比の $\lambda = 1.6$ の場合、可変ピッチ風車の場合は -17° であるのに対して、固定ピッチ風車の場合は -29° である。風車回転面の $x = 500\text{mm}$ 断面における $\Phi = 0.60$ の多孔板によって剥離・増速した流れは、 x 軸に対して、多孔板をブレード戻り側・進み側に設置する場所によって、角度が約

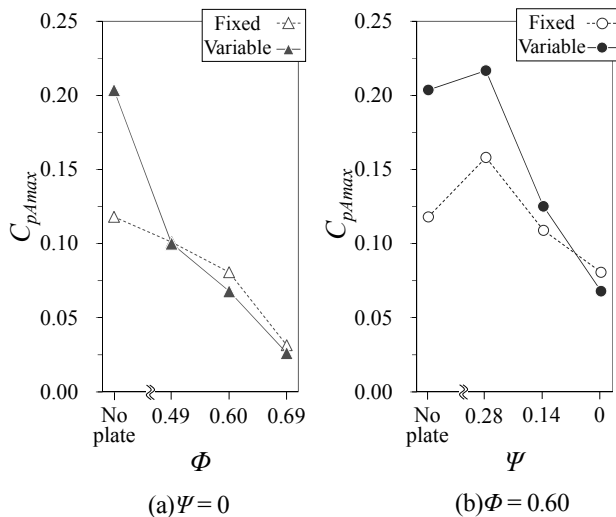


Fig. 14 Variations of the maximum power coefficients C_{pAmax} for the porous plate installed at the backward side

5°上下する。したがって、翼が風車にトルクを発生させるような角度で風が流入するか否かで、風車出力が増減すると言える。

3.4 出力係数の算出方法による違い

図13に閉塞位置が $\Psi = 0.28$ を例として可変ピッチ風車における出力を、せん断流を断面での平均風速の様な風が持っているエネルギーとして求めた出力係数 C_{pA} と、非一様な風が持っているエネルギーとして求めた出力係数 C_{pI} を比較したものを示す。 C_{pI} は C_{pA} より小さくなる。つまり、風が持っているエネルギーを一樣な流れとして計算した P_A と非一様性を考慮して計算した P_I を比較すると、 $\Psi = 0.28$ の場合の P_I は P_A より約 1.4 倍大きい値になる。したがって、風車に流入する直前の風速分布を考慮して算出した出力係数は必ずしも増加しているとは言えないが、構造物から離れた風車上流の様な風速から算出した出力係数は大幅に増加する。

3.5 固定ピッチと可変ピッチ風車の最大出力係数の比較

図14は多孔板をブレード戻り側に設置した場合の固定ピッチ及び可変ピッチ風車における最大出力係数 C_{pAmax} である。図14(a)は多孔板を閉塞位置 $\Psi = 0$ で設置し、遮蔽率 Φ を 0.49, 0.60, 0.69 と変化させた場合の最大出力係数 C_{pAmax} である。 $\Phi = 0.49$ の多孔板を設置した場合、固定ピッチと可変ピッチの C_{pAmax} はほぼ同じ値となった。遮蔽率 Φ を変化させた場合、固定ピッチ及び可変ピッチ風車ともに遮蔽率 Φ の増加に伴い、 C_{pAmax} は大きく低下する。また、図14(b)は遮蔽率 $\Phi = 0.60$ の多孔板を閉塞位置 $\Psi = 0.28, 0.14, 0$ と変

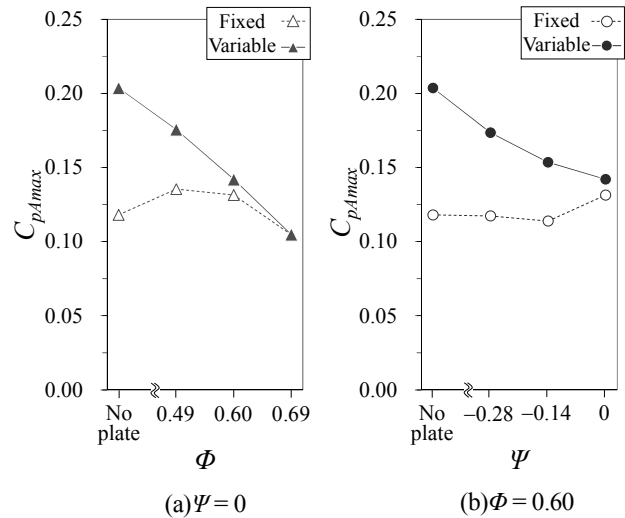


Fig. 15 Variations of the maximum power coefficients C_{pAmax} for the porous plate installed at the forward side

化させた場合の最大出力係数 C_{pAmax} である。固定ピッチと可変ピッチ風車の両方において $\Psi = 0.28$ で一樣流中よりも C_{pAmax} が増加した。しかし、閉塞位置の増加に伴い C_{pAmax} は低下し、 $\Psi = 0.14, 0$ で固定ピッチと可変ピッチ風車の C_{pAmax} はほぼ同じ値となる。

一方、図15に多孔板をブレード進み側に設置した場合の最大出力係数 C_{pAmax} を示す。図15(a)は多孔板を閉塞位置 $\Psi = 0$ で設置し、遮蔽率 Φ を 0.49, 0.60, 0.69 と変化させた場合の最大出力係数 C_{pAmax} である。遮蔽率 Φ を変化させた場合、固定ピッチ風車における C_{pAmax} は、 $\Phi = 0.49, 0.60$ において、多孔板が無い場合より増加する。一方、風車を可変ピッチとした場合、 C_{pAmax} は多孔板が無い(一樣流中)の場合が最も大きくなり、遮蔽率 Φ の増加に伴い C_{pAmax} は低下する。また、図15(b)は遮蔽率 $\Phi = 0.60$ の多孔板を閉塞位置 $\Psi = -0.28, -0.14, 0$ と変化させた場合の最大出力係数 C_{pAmax} である。固定ピッチ風車の場合、閉塞位置が変化してもあまり変化しない。しかし、可変ピッチ風車の場合、閉塞位置の増加に伴い C_{pAmax} は低下し、 $\Psi = 0$ では固定ピッチの場合と同程度の値となる。

以上の様に、多孔板を $\Psi = 0.28$ で設置風車に流入する風の一部分を遮り、速度差を形成することで直線翼垂直軸風車の出力を増加させる可能性があることを示した。

4. 結論

多孔板によって形成されたせん断流中に直線翼垂直軸風車を設置し、風速分布が風車出力に与える影響を風洞実験により調べ、以下の結果を得た。

- (1) 多孔板をブレード戻り側に設置した場合、固定ピッチ及び可変ピッチ風車の最大出力係数 C_{pAmax} は、閉塞位置 $\Psi = 0.28$ において一様流中の場合よりも増加する。しかし、 Ψ が減少すると C_{pAmax} 値は小さくなり、固定ピッチ風車と可変ピッチ風車の C_{pAmax} 値には差はなくなる。
- (2) 多孔板をブレード進み側に設置した場合、 C_{pAmax} は、 $\Phi = 0.49, 0.60$ の多孔板において、多孔板がない場合よりも増加する。また、 $\Phi = 0.60$ の多孔板において、閉塞位置を変化させても、多孔板をブレード戻り側に設置した場合よりも C_{pAmax} 値の変化は小さい。
- (3) 風車に流入する直前の風速分布を考慮して算出した出力係数 C_{pl} は必ずしも増加しているとは言えないが、構造物から離れた風車上流の様な風速から算出した出力係数 C_{pA} は大幅に増加する。
- 参考文献**
- (1) 関, 牛山, さらなる風を求めて垂直軸風車(基礎・設計から応用まで), パワー社 (2008).
- (2) 木綿, 喜多, 山田, 高田, 小松, 木村, リンク機構による可変ピッチ式直線翼型垂直軸風車の性能に関する研究, 日本機械学会論文集(B 編), Vol.74, No.748(2008), pp.2543-2551.
- (3) 中田, 木綿, 櫃田, 古路, 河野, 道路用フェンス上部に水平に設置したクロスフロー風車の性能(フェンス無孔板領域の影響), 日本風力エネルギー学会誌論文集, Vol. 38, No. 1(2014), pp.1-7.
- (4) 谷野, 仲野, 構造物端壁剥離流れの有孔利用および入口流れ改善によるクロスフロー型風車の出力特性の向上(端壁剥離流れの有効性と端壁部誘導板による入口流れの改善), 日本機械学会論文集(B 編), Vol.73, No.726(2007), pp.588-593.
- (5) Carlos J. Simão Ferreira, Gerard J. W. van Bussel, Gijs A. M. van Kuik, Wind Tunnel Hotwire Measurements, Flow Visualization and Thrust Measurement of a VAWT in Skew, Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 128(2006), pp.487-497.
- (6) 本橋, 原, 岡田, 丹, 傾斜面上のサボニウス型風車の出力に関する一考察, 第33回風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集, 2011, pp.285-287.
- (7) 山田, 木綿, 喜多, 小松, 可変ピッチ式直線翼垂直軸風車における翼の揺動による動力損失, 日本風力エネルギー学会誌論文集, Vol. 32, No. 2(2008), pp.129-134.
- (8) 河野, 東, 木綿, 木村, 小松, 直線翼垂直軸風車の空力騒音に関する風洞実験, 日本機械学会論文集(B 編), Vol.79, No.808(2013), pp.2577-2581.
- (9) Castro, I, Wake characteristics of two-dimensional perforated plates normal to an air-stream. Journal of Fluid Mechanics 46(1971), pp.599-609.
- (10) 長尾, 木綿, 河野, 木村, 小松, 可変ピッチ式直線翼垂直軸風車周りの流れとトルク変動の数値解析, 日本機械学会 第17回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, No.12-11, A102 (2012), pp.5-6.
- (11) 前田, 鎌田, 村田, 川井, 村山, 篠原, 直線翼垂直軸型風車のトルク変動解析, 日本機械学会流体工学部門講演論文集(2009), pp.389-390.