

サボニウス風車の出力特性の改善 Improvement of Output Characteristics of Savonius Wind Turbine

長澤 忠延 Tadanobu Nagasawa 池田 敏彦 Toshihiko Ikeda*¹
飯尾昭一郎 Shouichiro Iio*¹ 杉本 圭亮 Keisuke Sugimoto*²

Abstract: This paper describes an experimental study on improvement in output characteristics of Savonius wind turbine using guide vanes around the turbine rotor. One or two flat or curved vanes are used in this experiment. When one guide vane is properly placed in front of the turbine rotor, the maximum wind turbine output increased to about 1.2 times compared with that without guide vane. Furthermore, when two guide vanes are properly placed around the rotor, wind turbine output increased about 1.4 times compared with that without guide vane. To know the reason why such increase of the turbine output occurs, flow visualization was done about those flows. These results of the flow visualization showed that one guide vane placed in front of the returning side of the rotor blade blocks the flow to the rotor, and another vane placed near the forward going rotor blade deflects flow to the rotor. The former vane decreases counter force to the blade and the latter one concentrates flow to the rotor, as the result wind turbine torque increases.

Key words: Wind Turbine, Guide Vane, Savonius Rotor, Flow Visualization

1. 緒言

風力エネルギーは二酸化炭素を排出しないクリーンなものとして近年その活用の要求が増してきている。風力エネルギーの利用方法としては、風車により電気的エネルギーに変換して使用するのが一般的である。大型では効率の高い揚力型のプロペラ風車が広く用いられているが、小規模なものではこれ以外に抗力型の風車等もその特徴を活かして利用されている。本研究で対象とするサボニウス風車は抗力型の代表的なものであり、低速回転・高トルク型の特徴を活かし製品化されている。しかし、サボニウス風車は効率が低いという大きな欠点があるため、その改善の試みがなされてきた。改善方法として、風車ロータ自体の性能を改善しようとする研究^{(1)~(4)}と、風車ロータの周囲の付帯部品により出力を増大させる研究⁽⁵⁾⁽⁶⁾がある。本研究は後者の方法により風車出力特性を改善しようとするものである。

Sivasegaram らは、サボニウス風車の周りにロータ状の風の導入ダクトを設置し、風車出力の増大を図っている⁽⁶⁾が、ダクト形状が大きく、風向が定まっ

ている状況でしか利用できないという欠点がある。小川ら⁽⁶⁾は、風車の周りに送風機などで用いられるディフューザと同形状の案内羽根や、偏向板を取り付けて出力特性の向上を図っており、最大で24%の出力増加が得られている。本研究では、1枚ないし2枚の案内羽根をロータの周囲に設置し、それらの取り付け位置および角度を変化させ、出力が増加する条件を探した結果、最大で約43%の出力増加を得ることができたので、その結果について報告する。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

図1に実験装置の概略を示す。実験には、ゲッチンゲン型風洞（吹き出し口600×600mm）を使用した。流れが二次元的になるように設置された2枚の平行な側板（1000×660mm）の間に風車と案内羽根が置かれている。図2に風車出力を求めるために制動を加えるヒステリシスブレーキと風車ロータとの接続状態を示す。

1 信州大学工学部環境機能工学科

2 富士電機システムズ株式会社

2・2 風車ロータ

図3に風車ロータの形状を示す。風車ブレードは2枚の円板で挟み一体としている。ロータは直径 $D=158\text{mm}$ 、高さ $H=240\text{mm}$ 、ブレード直径 $D_B=84\text{mm}$ 、ブレード厚さ $t=2\text{mm}$ 、オーバーラップ部の寸法 $a=14\text{mm}$ である。オーバーラップ比 $a/D_B=0.16$ である。

2・3 案内羽根とその取り付け条件の設定

本実験で用いた案内羽根の形状を図4に、その取り付け条件を図5に示す。本実験では平板を1種類、曲板を2種類用いた。案内羽根の長さは風車ロータの高さ H に等しくし、幅は $D/2$ とした。羽根の厚さは 2mm である。曲板1, 2の曲率半径はそれぞれ $R=70, 45\text{mm}$ とした。案内羽根の取り付け条件としてはいろいろなものが考えられるが、ここでは将来的に風向変化に対応できる案内羽根機構を可能にするため、ロータ回転軸を中心とする円周上に案内羽根を配置する方法を採用した。案内羽根を配置する円の半径 G はロータ直径と等しくした。案内羽根の取り付け位置は図中の角度 θ で定義し、取り付け角度は ϕ で定義した。2枚の案内羽根は θ, ϕ に添え字1, 2を付けて区別した。なお、 θ および ϕ は流れ方向を 0° とし、時計回りを正とした。また、曲板については弦が流れ方向に平行で、かつ弧が下に凸である状態を 0° とした。風車ロータの回転角度は α で定義し、ブレードの直径を結ぶ線が流れ方向と一致した状態を 0° とした。したがって、図5の状態は $\alpha=90^\circ$ である。 α も時計回りを正とした。

2・4 実験方法と風車出力

まず案内羽根1枚の場合について取り付け位置 θ を 15° ずつ、取り付け角度 ϕ を 30° ずつ変化させて出力を測定した。案内羽根2枚の場合についても同様に、2枚の案内羽根の種々の取り付け条件を組合わせて出力測定を行った。風速は $U_0=11\text{m/s}$ (一定)とした。ヒステリシスブレーキにより風車回転軸に負荷を加え、その反力をアームを介して電子秤で測定してトルクを求め、回転数を光電式タコメータで測定することで風車出力 P を求めた。風車出力を無次元化した出力係数 C_p と周速比 λ は次のように定義した。

$$C_p = 2P / \rho A U_0^3$$

$$\lambda = V_i / U_0$$

ρ は空気密度、 A は受風面積($D \times H$)、 V_i は風車ロータ先端周速である。

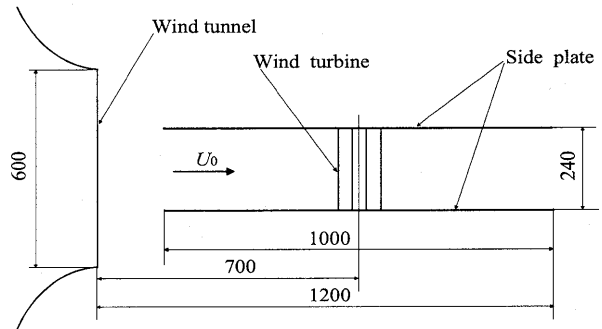


Fig.1 Experimental setup

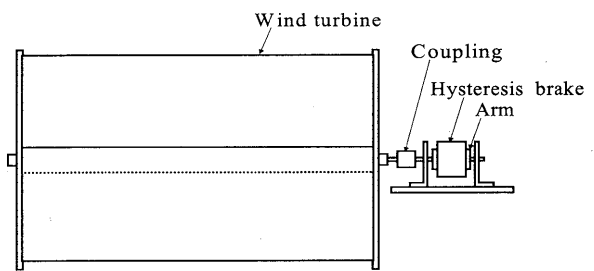
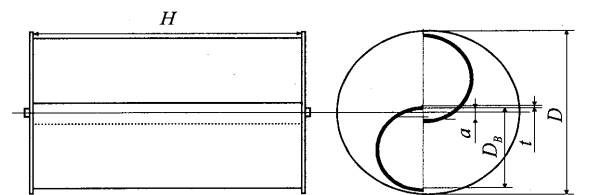


Fig.2 Wind turbine and power take-out



Diameter of wind turbine: $D=158$ Diameter of blade: $D_B=84$
 Thickness of blade: $t=2$ Overlap ratio: $a/D_B=0.16$
 Height of wind turbine: $H=240$

Fig.3 Configuration of wind turbine

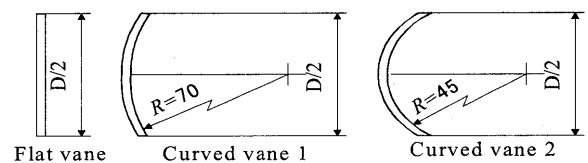


Fig.4 Configuration of guide vanes

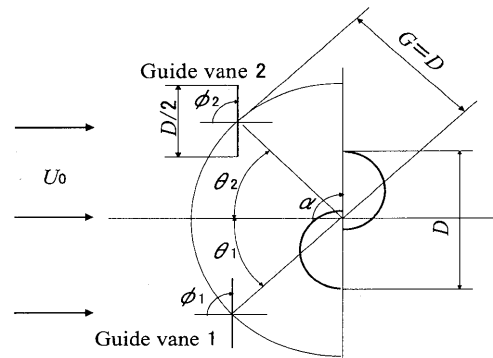


Fig.5 Setting of guide vanes

2.5 可視化実験

出力特性と風車まわり流れとの関連を調べるために、スモークワイヤ法により可視化を行った。風車の上流で鉛直に張ったニクロム抵抗線に流動パラフィン塗布し、電流を流し加熱して発生した白煙をトレーサとして利用した。照明にはハロゲンライトを用い、モノクロ CCD カメラにより撮影した。カメラのシャッターは風車回転と同期をとっており、その際のシャッタースピードは 1/250sec とした。風車回転角度 α については、 $\alpha=0, 45, 90, 135^\circ$ の 4 条件とした。また、風速は $U_0=4\text{m/s}$ とし、風車回転数を制御することによって C_p が最大値をとる $\lambda \approx 1$ 付近の流れの可視化を行った。

3. 実験結果

3.1 案内羽根 1 枚の場合

案内羽根を取り付けない場合の出力特性を、案内羽根を付けた風車の特性との比較の対象とするため、出力特性を示す図の中に実線で示している。本実験で用いた風車ロータの案内羽根を付けないときの出

す。図 6-(a)の取り付け条件においては、 $\phi_1=150^\circ$ で C_p が最大値 0.175 をとった。図 6-(b)の取り付け条件においては、 $\phi_1=90^\circ$ で C_p が最大値 0.187 をとっている。

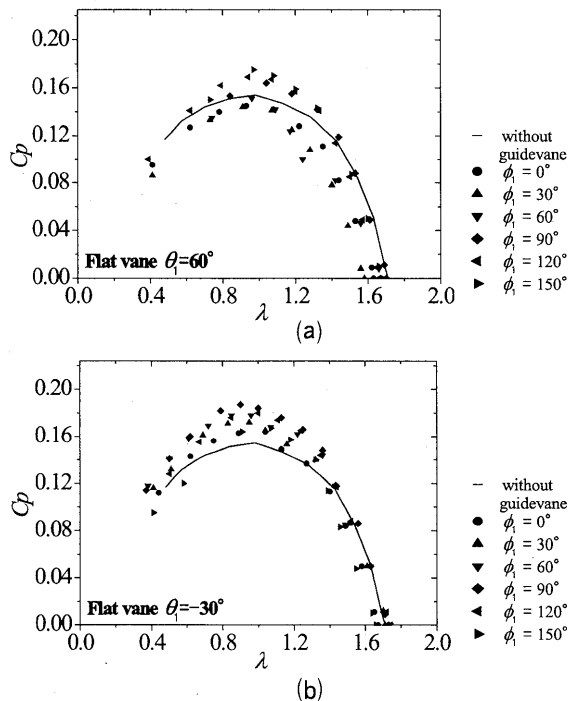


Fig.6 Characteristic of power output

力特性は $\lambda=1$ 近辺で最大値 $C_p=0.154$ をとっており、一般的なサボニウス風車特性と一致している。平板を 1 枚取り付けただけの場合の出力特性を図 6 に示

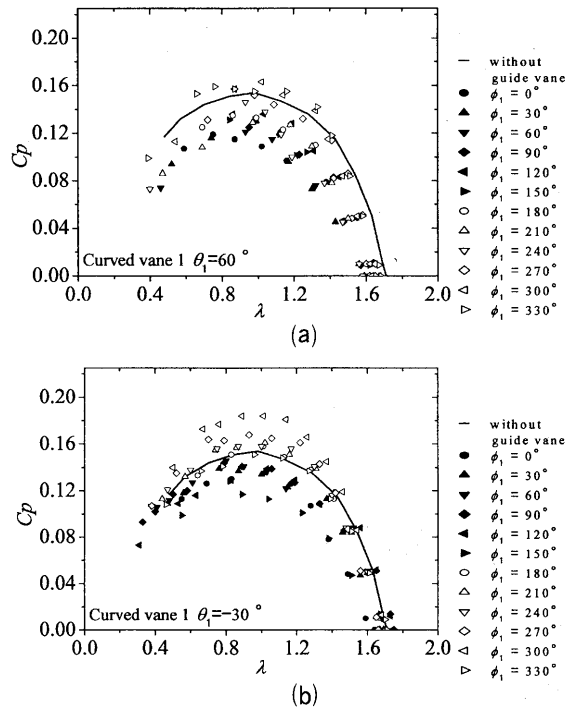


Fig.7 Characteristic of power output

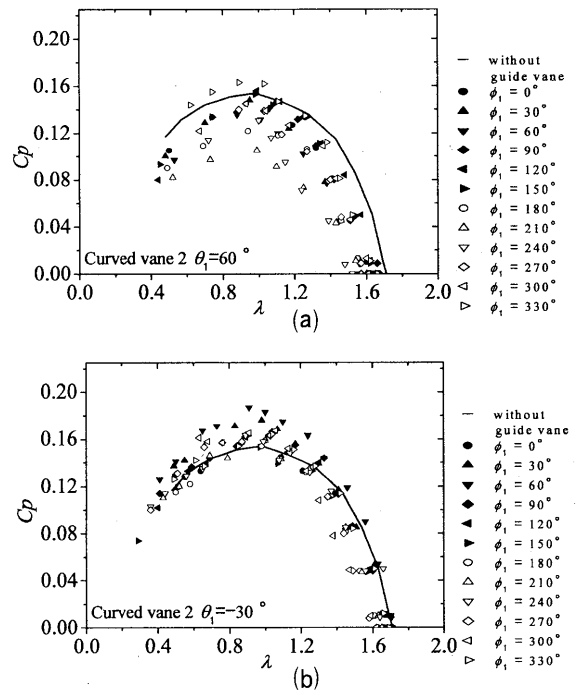


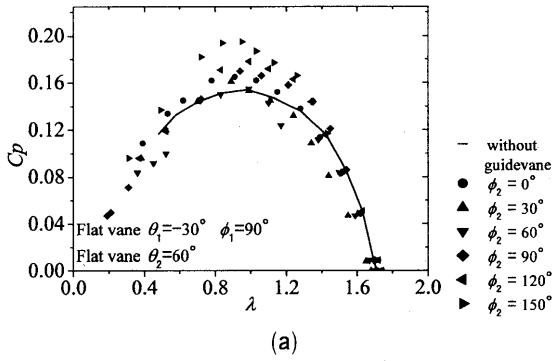
Fig.8 Characteristic of power output

次に案内羽根の形状が出力特性に与える影響を調べるため図 4 に示した曲板 1 と曲板 2 の 2 種類の案内羽根を用いて実験を行った。その結果を図 7, 図

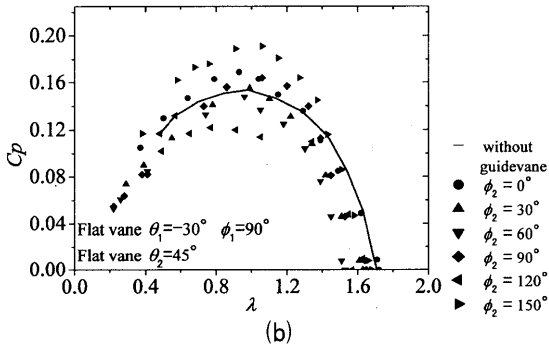
8に示す。図6～図8に示した出力特性を比較すると、案内羽根を円弧状にすることによる特性への影響があることがわかる。

平板では対称性のため、取付角度 ϕ は $0^\circ \sim 180^\circ$ 変化させればよかったが、曲面にすることで、 ϕ は $0^\circ \sim 360^\circ$ 変化させる必要が生じた。このため、曲板では出力低下を招く条件が多く出現してい

る。特に曲率の大きい曲板2ではこの傾向が顕著で、図8(a)に見られるように、ほとんどの条件で案内羽根をつけないときよりも出力が低下している。しかし、曲率の小さい曲板1の場合には、 λ の広い範囲で平板より若干大きな出力の得られる条件の存在することが、図7(b)よりわかる。

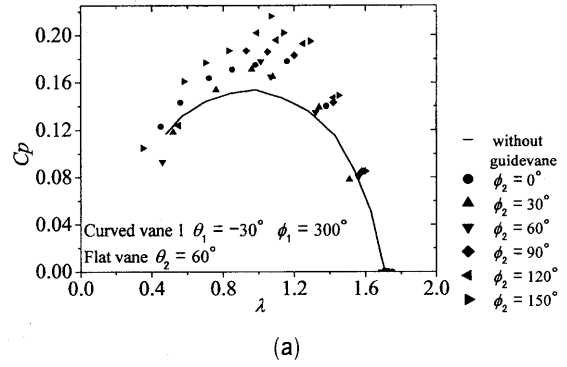


(a)

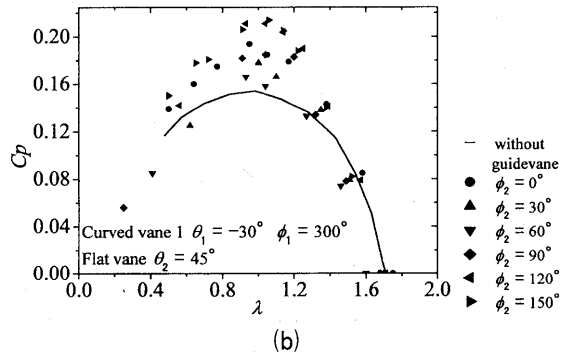


(b)

Fig.9 Characteristic of power output

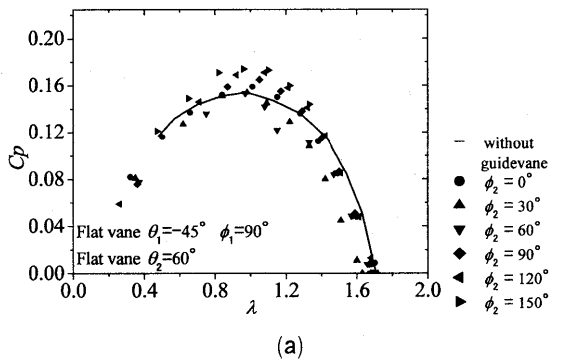


(a)

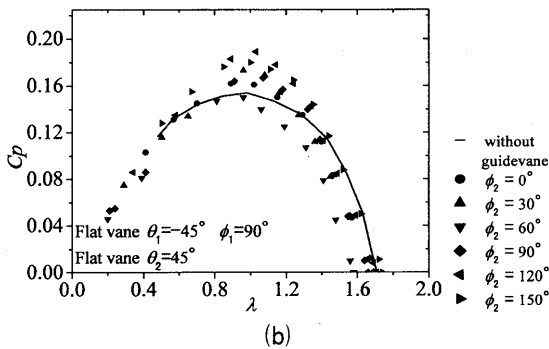


(b)

Fig.11 Characteristic of power output

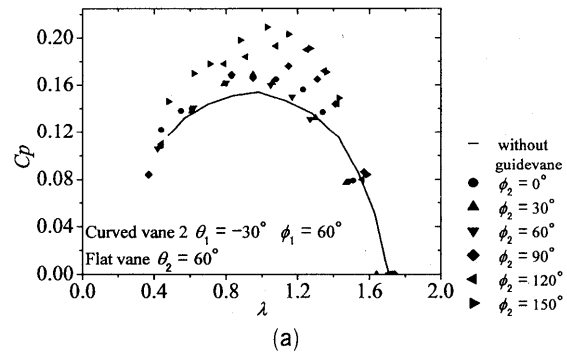


(a)

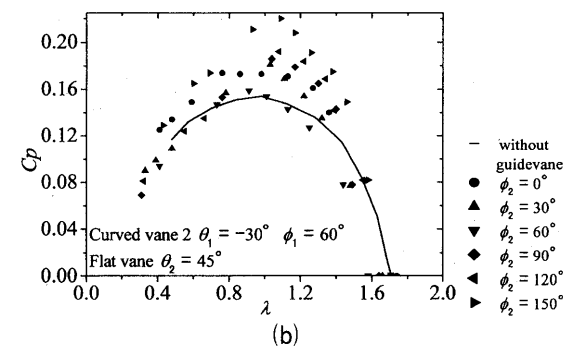


(b)

Fig.10 Characteristic of power output



(a)



(b)

Fig.12 Characteristic of power output

3・2 案内羽根 2 枚の場合

案内羽根 1 枚の場合には、平板、曲板のそれぞれについて行った実験結果から、出力増加率の最大は 21.4% であり、これまで成されていた研究⁶⁾と同程度の改善効果しか得られないことがわかった。そこでさらなる出力増加を目指すため、案内羽根を 2 枚設置して実験をおこなった。案内羽根を 2 枚にすると、案内羽根の設定条件は非常に多くなるため、次のようにして出力が増加する条件を探した。すなわち、一枚目の案内羽根は、1 枚のみで出力が大きかった条件に設定し、その状態に二枚目の案内羽根をいろいろな条件で組み合わせるという方法である。このようにして行った実験結果を図 9～図 12 に示す。

図 9 に一枚目の案内羽根条件 $\theta_1 = -30^\circ$, $\phi_1 = 90^\circ$ に、二枚目の案内羽根を $\theta_2 = 60^\circ$ または $\theta_2 = 45^\circ$ の各々の位置に取り付け、 ϕ_2 を変化させたときの特性を示した。同様に、図 10 には、 $\theta_1 = -45^\circ$, $\phi_1 = 90^\circ$ の条件で $\theta_2 = 60^\circ$ または $\theta_2 = 45^\circ$ に二枚目の案内羽根をつけて ϕ_2 を変化させた場合の特性を示した。図 9, 図 10 から案内羽根が 2 枚とも平板の組み合わせでは、得られた最大出力は $C_p = 0.195$ であり、増加率は 27% であった。

図 11, 12 に平板と曲板の組み合わせについて実験した結果を示す。この実験においては、平板はブレードの進み側上流に設置し、曲板は戻り側上流に設置している。図からわかるように、このような組合

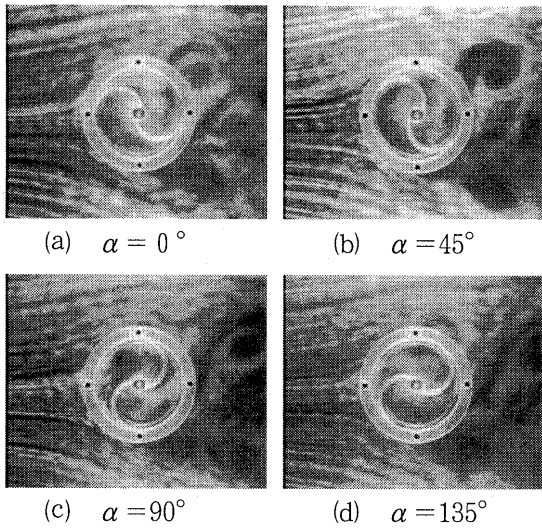


Fig.13 Visualization of flow
(Without guide vane)

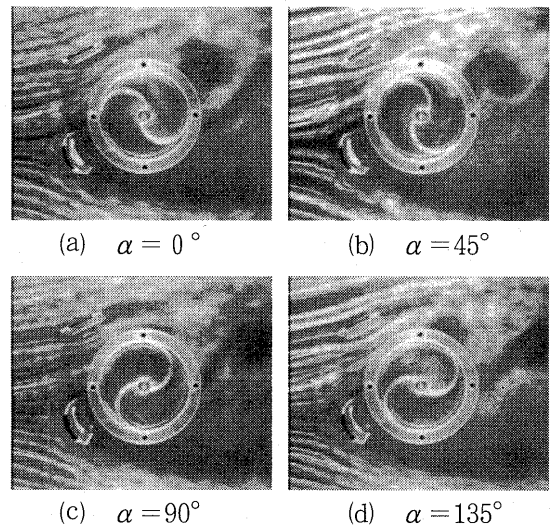


Fig.15 Visualization of flow
(Curved vane $\theta_1 = -30^\circ, \phi_1 = 60^\circ$, Flat vane $\theta_2 = 45^\circ, \phi_2 = 150^\circ$)

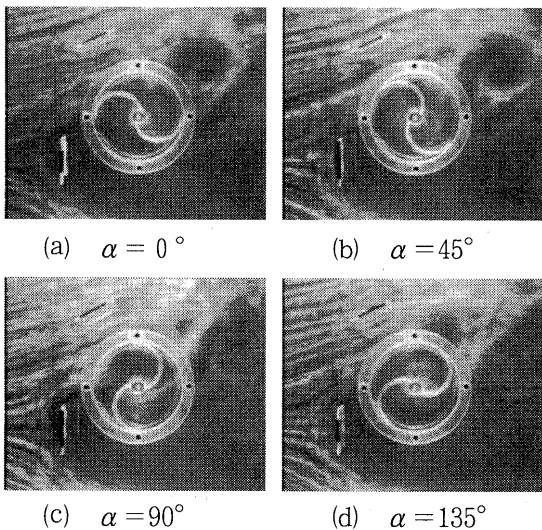


Fig.14 Visualization of flow
(Flat vane $\theta_1 = -30^\circ, \phi_1 = 90^\circ$, Flat vane $\theta_2 = 60^\circ, \phi_2 = 150^\circ$)

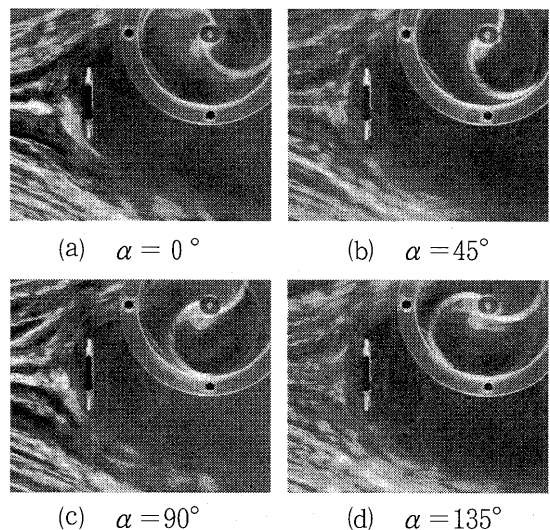


Fig.16 Visualization of flow near the Vane
(Flat vane $\theta_1 = -30^\circ, \phi_1 = 90^\circ$, Flat vane $\theta_2 = 60^\circ, \phi_2 = 150^\circ$)

せの場合には出力増加が著しい。特に、 $\theta_1 = -30^\circ$, $\phi_1 = 60^\circ$ に $\theta_2 = 45^\circ$ の条件では、 $C_p = 0.22$ が得られ、これは案内羽根の無い場合の 1.43 倍 (43%増) の出力に相当する。

3・3 流れの可視化

風車周りに案内羽根を付けない場合の可視化画像を図 13 に示す。図(a), (b), (c), (d)の画像は風車回転角度 $\alpha = 0, 45, 90, 135^\circ$ のときのものである。風車下流に一对の渦が確認され、この渦は回転の進行に伴い下流に移動していくことがわかる。図 13 (d) ($\alpha = 135^\circ$) では、次の半回転で下流に流れていく渦の形成も見られる。案内羽根 1, 2 の両方に平板を用いて C_p が最大値 0.195 をとる条件 (θ_1, ϕ_1) = $(-30^\circ, 90^\circ)$, (θ_2, ϕ_2) = $(60^\circ, 150^\circ)$ の場合の流れの画像を図 14 に示す。案内羽根 1 によって、戻りブレードへの流れが風車上流で遮られ、風車下流の二つの渦のうち、戻りブレード側の渦はロータ近傍では確認できなくなっている。この案内羽根が流れをブロックする効果により、戻りブレードに作用する流体力が軽減され、出力増大につながっていると考えられる。また、案内羽根 2 の効果について、案内羽根なしの条件での画像と比較すると、図 13 では風車上方に見られる煙のすじがほぼ平行であるのに対し、図 14 では風車と案内羽根 2 の間での流脈線の間隔が密になっていることがわかる。このことから案内羽根 2 の存在により、進み側ブレードへの流速が増していると考えられる。案内羽根 1 として曲板 2 を (θ_1, ϕ_1) = $(-30^\circ, 60^\circ)$ に、案内羽根 2 として平板を (θ_2, ϕ_2) = $(45^\circ, 150^\circ)$ に設置した場合の可視化画像を図 15 に示す。この条件は今回の出力特性実験において最大の出力増加率 43% ($C_p = 0.22$) を得た場合に対応するものである。図 14 と同様に案内羽根 1 がブロック効果、案内羽根 2 が集風と吸い出し効果をもたらしていると推測される。図 15(c), (d)では案内羽根 2 に沿って方向が変化した煙のすじが画像右端まで確認できることから、風車ロータに向かう流れがより有効にロータの回転のために作用していると考えられる。図 14 と図 15 の案内羽根周辺を拡大して撮影した画像を図 16~19 に示す。図 14, 15 の案内羽根 1 周辺の流れの可視化画像を図 16, 17 に示す。図 16 におい

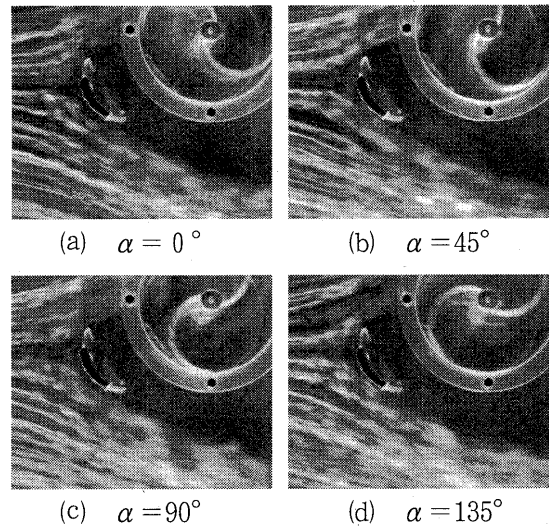


Fig.17 Visualization of flow near the Vane (Flat vane $\theta_1 = -30^\circ, \phi_1 = 60^\circ$, Flat vane $\theta_2 = 45^\circ, \phi_2 = 150^\circ$)

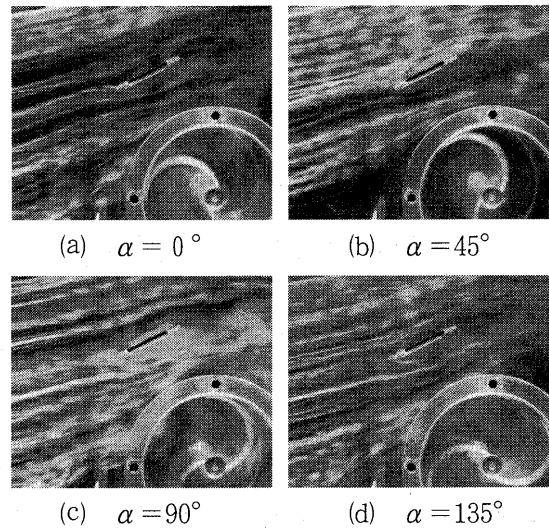


Fig.18 Visualization of flow near the Vane (Flat vane $\theta_1 = -30^\circ, \phi_1 = 60^\circ$, Flat vane $\theta_2 = 90^\circ, \phi_2 = 150^\circ$)

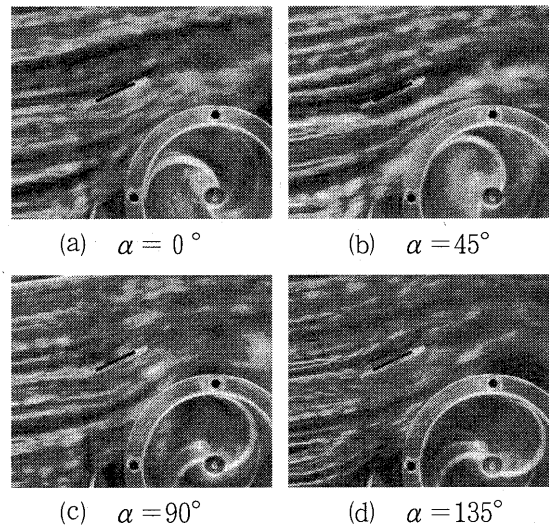


Fig.19 Visualization of flow near the Vane (Flat vane $\theta_1 = -30^\circ, \phi_1 = 60^\circ$, Flat vane $\theta_2 = 45^\circ, \phi_2 = 150^\circ$)

て、平板にあたった流れが急激に方向を変えていることがわかる。これに対して図 17 の場合は、案内羽根の曲面に沿うように滑らかに流れの方向が変わっていることがわかる。図 14, 15 の案内羽根 2 周辺を拡大して撮影した画像を図 18, 19 に示す。図 18 において、流れは案内羽根 2 の傾きに沿って全体的に右上がりになっているのがわかる。これに対して図 19 では、流れが右上がりであるのは案内羽根 2 の周辺のみであり、案内羽根 2 の上流と下流は比較的流れ方向と平行な煙のすじが確認される。これらのことから案内羽根 1 に曲板 2 を用い、案内羽根 2 に平板を用いることで、曲板によるブロック効果と平板による吸出し効果が相互に作用し合い、進みブレードに流れを導く有効な流路が形成され、出力増加をもたらす状態が生み出されたと考えられる。

4. 結 言

サボニウス風車のロータの周囲に案内羽根を配置して出力を増大させることを試みた。その結果、案内羽根の無い場合の出力係数が $C_p=0.154$ であったのに対し、案内羽根 1 枚設置で $C_p=0.187$ 、案内羽根 2 枚設置で $C_p=0.22$ の出力が得られた。案内羽根 2 枚の場合の最大出力は、案内羽根を付けない場合の最大出力の 1.43 倍であった。また、風車周りの流れを可視化した結果、定性的ではあるが、風車の戻りブレードに当たる流れを遮るブロック効果と、進みブレード側の流れを増す集風・吸い出し効果を持つと考えられる流れが見られた。とりわけ、出力増大の大きかった場合には、2 枚の案内羽根がロータの回転力を増すと考えられるような流路を形成している状態が観察された。

今後は風車周りの速度分布の測定を行い、定量的に出力増加のメカニズムを調べていく予定である。

参 考 文 献

- 1) 牛山ほか 2 名, 機論 B, 52-480 (1986), 2973.
- 2) 藤沢ほか 2 名, 機論 B, 53-496 (1987), 3716.
- 3) 藤沢ほか 2 名, 機論 B, 56-531 (1990), 3403.
- 4) 藤沢ほか 2 名, 機論 B, 57-538 (1991), 2013.
- 5) Sivasegaram.S., Wind Eng, 3-1 (1979), 52.
- 6) 小川ほか 2 名, 機論 B, 51-471 (1985), 3516.