

411 縦軸型貫流式風車の全方位性案内羽根の性能特性に関する実験的研究

Experimental Study on Optimized Guide Vanes of Vertical Axis Type of Cross Flow Wind Turbines

谷口二郎, 後藤孝太郎, 岸浪紘機, 今紀衛, ヒムサール・アンバリタ, 鈴木淳 (室蘭工業大学)

Jiro Taniguchi*, koutarou Gotou*, Kouki Kishinami*, Norihei Kon**, Himsar Anbarita*, Jun Suzuki*
*Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto-cho, Muroran 050-8585

In this paper, aerodynamic characteristics of the cross flow type of wind turbine were studied experimentally by using sub-scale model, considering the effect of guide vanes and its arrangement. The aerodynamics characteristics of the turbine for wind flow direction were discussed by reference to the power and the torque coefficients correlation of tip speed ratio for various combinations of approaching optimized guide vanes number and optimal configuration.

Keywords: Vertical Axis Type of Cross Flow Wind Turbine, Guide Vanes Number, Wind Direction Characteristics

1. 結論

自然エネルギーは環境に与えるインパクトが小さくかつ持続可能なものとして、未来の共生・循環社会において基軸となるエネルギー源の一つと考えられている。中でも風力エネルギーは古来から諸機械の駆動力として使われ、現在は三次元空間の大きな潜在力を有するクリーンエネルギーとして大きな可能性を有し積極的に利用される方向にある。その変換機の主流は翼型の特性を利用したプロペラ型風力タービンであるが、規模に応じて諸種の方式が考えられ、そのひとつに風方向追従機構の不用な低速回転強トルク型の全方位性縦型貫流式風車⁽¹⁾がある。しかし、最適案内羽根の形状、枚数、風方向の方位性など不明な点が多い。

本研究では、一部明らかにされた全方位対象型3枚案内羽根に加えフラップ付4,5枚全方位対応対称型案内羽根を試作し、さらに出力性能において優れるが方位性に劣る3枚対称案内羽根に対してフラップ/補助翼を付加した縦軸型貫流式風車の実験を実施して、案内羽根枚数とフラップ角について風の指向性に対する最適性を追求し、出力特性を調べた結果を報告する。

2. 実験装置および研究モデル

本実験に使用した装置の全体図を Fig. 1 に示す。開放型風洞には 750W 三相交流モータで駆動される径 1.2 [mφ] の二枚翼プロペラと 4 [mmφ] コアのハニカム整流板、一辺が 60 [mm] の格子状の整流板が設置され、モータ回転制御用インバータにより風速が調整される。受風面と送風部の距離は 800 [mm] であり、受風面における風速はほぼ全域で一様である。測定部は風車軸にトルク検出器・回転数検出器・逆トルク負荷を発生するトルクモータが接続されている。

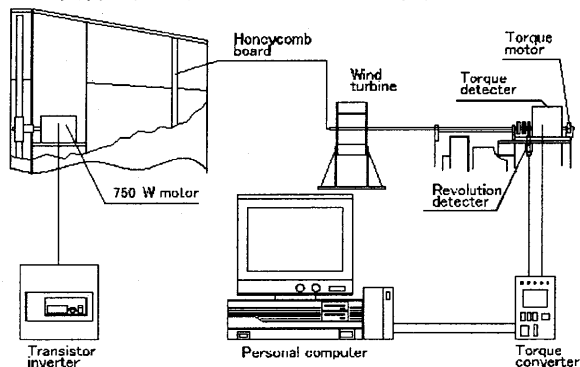


Fig.1 Experimental apparatus and measurement system

フラップ付対称型 5, 4, 3 枚案内羽根 Fig.2~4 は本垂直縦軸型貫流式風車の案内羽根の概要で、①半径 470mm の案内羽根は幅 $w=300$ [mm], 厚さ $t=1$ [mm], 長さは $l=260$ [mm] でフラップ②は長さ 100 [mm] で共に鉄板製である。今年度は対称案内羽根を 3~5 枚までとして、案内羽根とフラップの取り付け角は (β) とし半径 370mm のヒンジ部で連結する。径 320mm の動翼はすべて 30 枚の曲板で、取り付け角を 30 [deg] とし、厚さ $t=0.5$ [mm], 長さ 40 [mm], 曲率半径 $r=38$ [mm] のアル

ミ板を使用している。風洞出口風速 3.85 [m/s], 5.0 [m/s] で実験を行った。測定は無負荷時の最高回転数に合わせた後、負荷トルクを与えて、風車回転が止まるまでトルクと回転数の測定を行い、トルクコンバータにより A/D 変換し PC に収納される。 θ は風向角で、外案内羽根保持部の改良により $\theta=+40^\circ$ から -40° までの風方向に対する実験が可能となった。

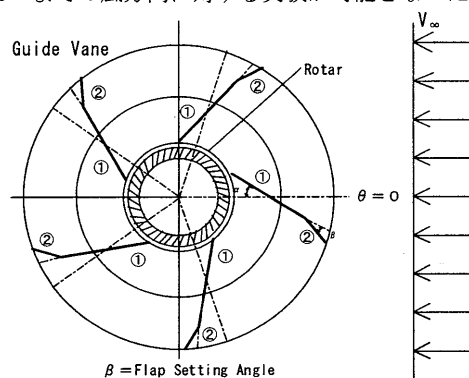


Fig.2 5 Guide Vanes with Flaps and Dimension

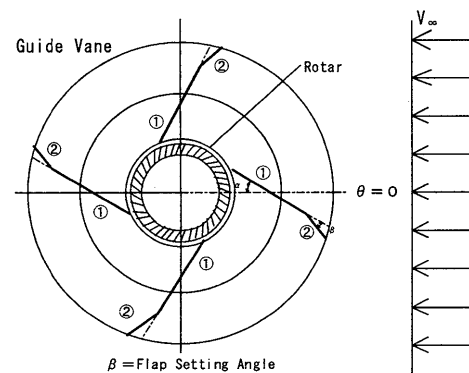


Fig.3 4 Guide Vanes with Flaps and Dimension

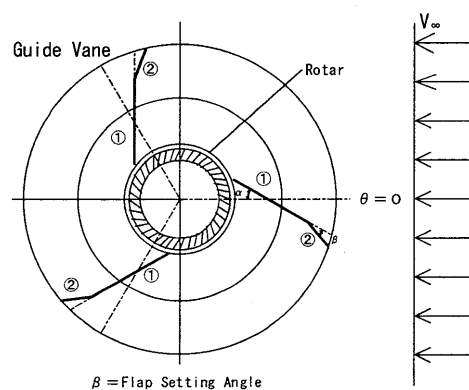


Fig.4 3 Guide Vanes with Flaps and Dimension

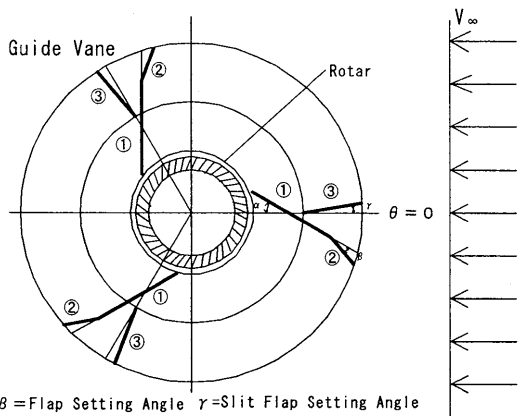


Fig.5 3 Guide Vanes with Slit Flaps and Dimension

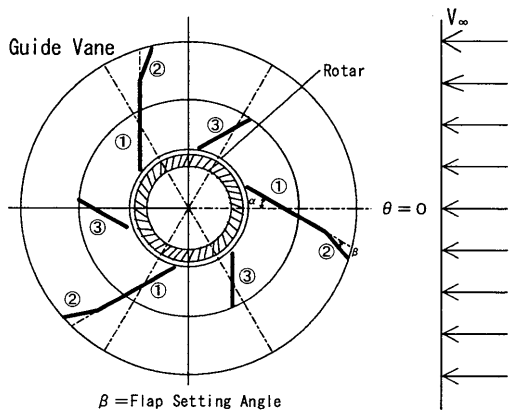


Fig.6 3 Guide Vanes with Inner Sub-vanes and Dimension

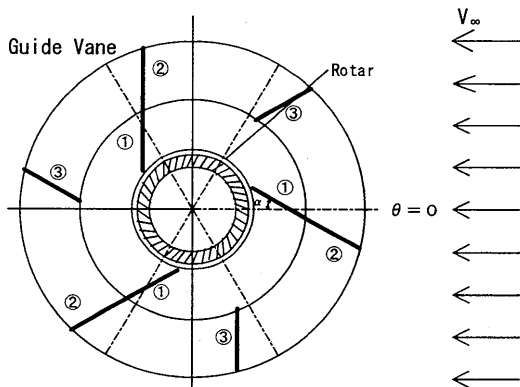


Fig.7 3 Guide Vanes with Outer Sub-vanes and Dimension

対称型 3 枚案内羽根の風指向性改善

3 枚対称案内羽根は出力性能は最高となるが風向により性能が激落する欠点があることが判明している。この欠点を改善するため、第一案は長さ 100mm の隙間フラップによる指向性改善として Fig. 5 に示す案内羽根形状を考えた。図中、可変フラップ角を β [deg]、隙間フラップ角を γ として、風向 $\theta = 40 \sim -40$ [deg] まで 10 [deg] 毎測定する。第 2 案は 3 枚案内羽根の特性を失わずに小さな副案内羽根を増設する準 6 枚案内羽根方式とするもので、小翼案内羽根設置を内側と外側の 2 方式として、Fig. 6 はローター部に小型案内羽根を設置した場合の案内羽根とフラップ②の取り付け配置を示す。同様に Fig. 7 は外側に小型案内羽根を取り付けた場合の案内羽根の配置図である。

3. 無次元化一般化表示

本実験で得られた結果は以下の無次元化処理で整理してある。ここで出力 L [W] は出力係数 C_p 、トルク Q [N·m] はトルク係数 C_q 、回転数 N [rpm] は風速 V_∞ [m/s] に対する先端周速度の比 λ として以下に無次元化する。（ ρ は空気密度 [kg/m³]、 D_B は羽根車の直径 [m]、 W は羽根車の幅 [m]）

$$C_p = \frac{2L}{\rho D_B W V_\infty^3} \quad C_q = \frac{Q}{0.25 \rho V_\infty^2 D_B^2 W} \quad \lambda = \frac{\pi D_B N}{60 V_\infty}$$

4. 実験結果および考察

対称型 3, 4, 5 枚案内羽根の出力特性 Fig. 2~4 に示す対称型 3, 4, 5 枚案内羽根条件に対して風向指向角 θ を 10 [deg] 毎に変化させて最適性を解明するために、フラップ角 β [deg] を $0, 10, 20$ [deg] で風速 $V_\infty = 3.85, 5.05$ [m/s] の 2 条件で実験・計測を行った。案内羽根 5 枚条件で良好な出力効率が得られた $V_\infty = 5.05$ [m/s]、 $\beta = 20^\circ$ での出力と回転数の関係を Fig. 8 に示す。最も出力性能が得られる風向角 $\theta = 10$ [deg] で $C_{p,max} = 0.156$ であり決して高い効率を得られてはいない。しかし最も低い $\theta = -20$ [deg] では 0.083 を得ている。つまりこの案内羽根形状では風方向角 θ [deg] による性能差が 2 倍以下に抑えられている。この形式の 5 枚案内羽根は風向変化に強い形状であるといえる。尚、図中に案内羽根をはずした場合の出力特性 C_p を実線で示すが、案内羽根の設置による性能向上は 2.3 倍以上となっている。

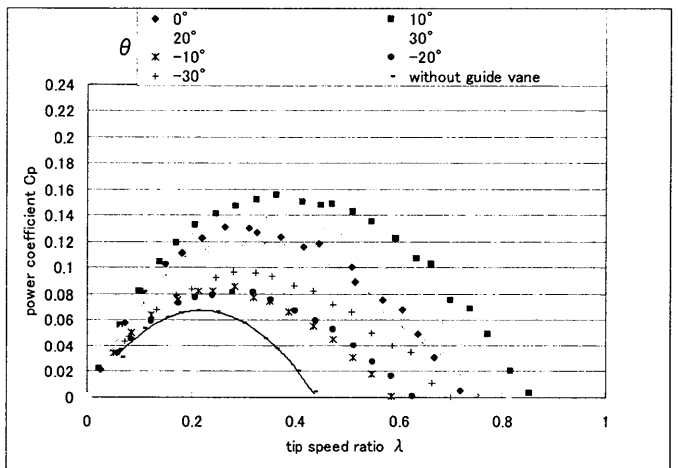


Fig.8 Power Coefficient C_p of 5 Vanes for Wind Direction ($V_\infty = 5.05$ [m/s], $\beta = 20^\circ$)

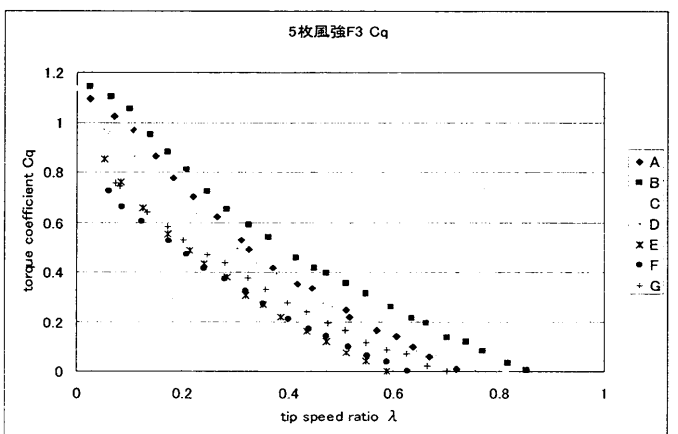


Fig.9 Torque Coefficient C_q of 5 Vanes for Wind Direction ($V_\infty = 5.05$ [m/s], $\beta = 10^\circ$)

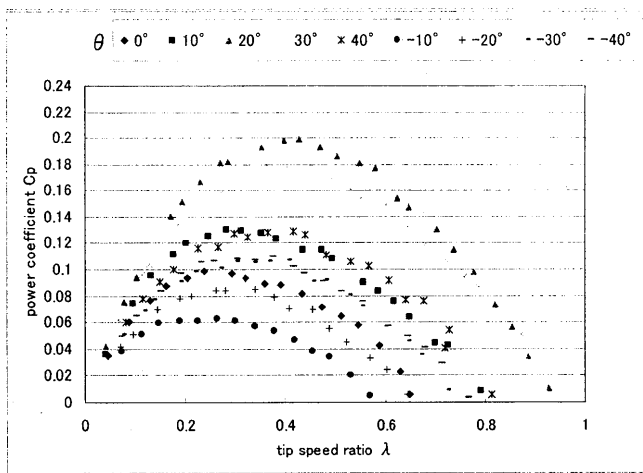


Fig.10 power coefficient C_p of 4 Vanes for Wind Direction ($V_\infty=5.05[m/s]$, $\beta=10^\circ$)

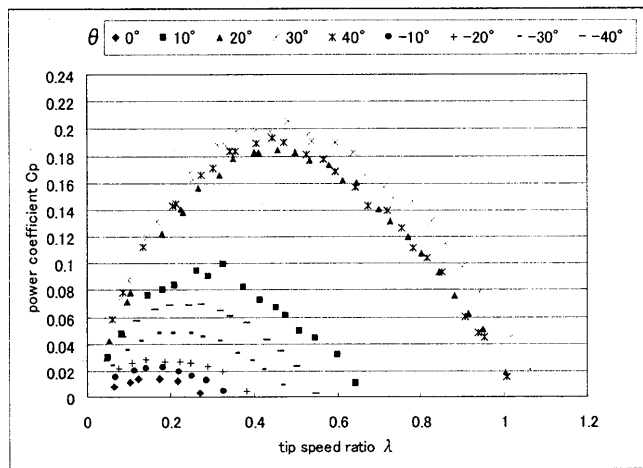


Fig.11 Power Coefficient C_p of 3 Vanes for Wind Direction ($V_\infty=5.05[m/s]$, $\beta=10^\circ$)

この場合のトルク特性を Fig.9 に与えるが、出力の増減に応じてトルクも相似的に追従しており、全ての風向角において低速回転強トルクとなることを示している。

次に案内羽根 4 枚の実験で最も良好な効率が得られた風速 $V_\infty=5.05[m/s]$, $\beta=10[deg]$ での出力特性を Fig.10 に示す。最大効率が得られている風向角 $\theta=20[deg]$ で $C_{p,max}=0.198$ 倍を得ている。これは 5 枚案内羽根条件より出力が 25%程度増加しており、受風面積の 25%増によるものと考えられる。図示の如く、逆風向角 $\theta=-20[deg]$ では $C_p=0.062$ と低出力性能となる。しかし、この方向角以外では上記の 5 枚案内羽根の性能に匹敵していることが認められる。4 枚案内羽根条件は風方向角 $\theta[deg]$ による性能差が約 3 倍になっているが、特定の風方向角 $\theta[deg]$ ではかなり高効率出力が得られているので、定方向性風を有する地域ではバランスのよい案内羽根形状であると考えられる。

次に、案内羽根 3 枚で最も高性能が得られた $V_\infty=5.05[m/s]$, $\beta=10[deg]$ での出力特性を Fig.7 に示す。最高効率が得られている風向角 $\theta=30[deg]$ で $C_{p,max}=0.205$ と最も高い高効率を得ている。しかし、 $\theta=0[deg]$ では 0.014 しか得ることができず、広い風向角域で劣性能となっている。3 枚案内羽根は出力上好ましい風方向による性能差は 10 倍以上となり実用上大きな問題となる。何らかの補助案内羽根を設置することによって劣風向角での劣性能を向上させることが必要となる。

対称型 3 枚案内羽根の風指向性改善による出力特性

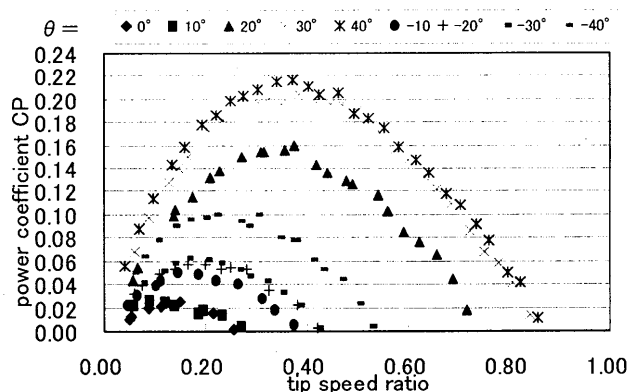


Fig.12 Power Coefficient C_p of 3 Guide Vanes with Slit Flaps for wind direction ($V_\infty=5.05[m/s]$, $\beta=0[deg]$, $\gamma=10[deg]$)

Fig.5 に示す対称型 3 枚案内羽根に隙間フラップを設置した場合の風向角による出力係数 C_p と無次元回転数の関係を Fig.12 に与える。図より、風速 $5.05[m/s]$, $\beta=0[deg]$, $\gamma=10[deg]$, 風向 $\theta=40[deg]$ の条件で $C_{p,max}=0.217$ となり、逆に風向 $\theta=0[deg]$ で $C_{p,max}=0.024$ となることが判る。風向角度条件により最大出力性能が得られるが、広い風向角において大幅に出力低下が起こり、風の指向性はこれまでのモデルで最低となる。しかし、高出力を最低 3 方向から得られ、Fig.11 に示す対称型 3 枚案内羽根の出力特性に酷似した結果となっている。

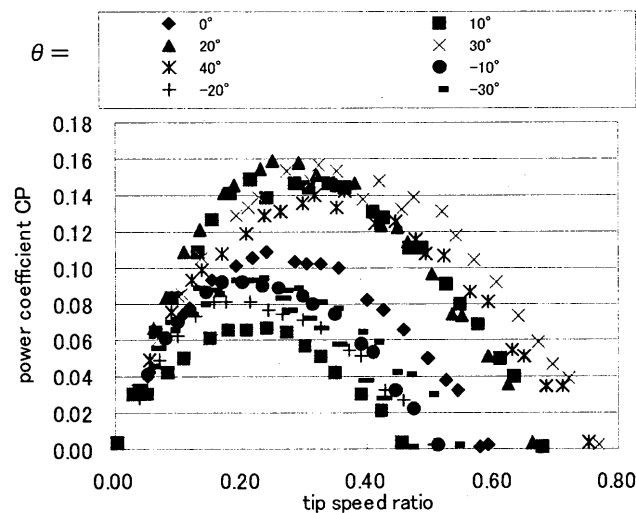


Fig.13 Power Coefficient C_p of 3 Guide Vanes with Inner Sub-guide Vanes for Wind Direction ($V_\infty=5.10[m/s]$, $\beta=0[deg]$)

更なる風方指向性の向上を図るため、小さな長さ 100mm の副翼を (既存の隙間フラップ③) を各案内羽根中間部のローター付近と外側設置の 2 通りを考え、準 6 枚案内はねとして性能向上を図った。小案内羽根はローター付近に設置した場合はフラップ角度 $\beta=0, 10[deg]$ の 2 通り測定し、外側に設置した場合は $\beta=0[deg]$ で固定した。

Fig.13 はローター付近に小型案内羽根を設置した場合 (Fig.6 のモデルに対応)の風速 $5.05[m/s]$ の各風向条件での出力特性の実験結果である。風速 $5.05[m/s]$ において、

フラップ角 $\beta=0[\text{deg}]$, 風向 $\theta=20[\text{deg}]$ の時, $C_{p_{\max}}=0.159$ と, 出力が隙間フラップ付 3 枚案内羽根に比べかなり低下したが, 同条件の風向 $\theta=-20[\text{deg}]$ の時, $C_{p_{\max}}=0.081$ と出力低下を大幅に改善できた. 対称型 4 枚案内羽根の場合よりも最高出力は低下するが広範囲の風向角において出力性能は勝り, 全体として最も風方向性がある案内羽根配置と考えられる. 図中, 線で結んだ最低出力カーブは案内羽根をはずした場合の結果である.

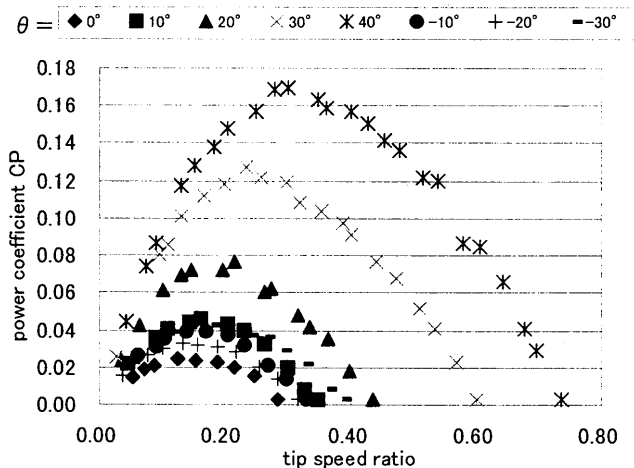


Fig 14 Power Coefficient C_p of 3 Guide Vanes with Outer Sub-guide Vanes for Wind Direction ($V_{\infty}=5.05$ [m/s])

外側に小型案内羽根を取り付けた場合 (Fig. 7) の案内羽根における風速 5.05 [m/s] 時の各風向条件での出力特性の実験結果を Fig. 14 に示す. この準 6 枚案内羽根はフラップ②の角 β を $0[\text{deg}]$ で固定して測定した. 風速 5.05 [m/s] において, 風向 $\theta=40[\text{deg}]$ の時, $C_{p_{\max}}=0.169$ と, ローター付近に小型案内羽根を設置した準 6 枚羽根に比べ, 若干出力は向上したが, 風向 $\theta=0[\text{deg}]$ の時, $C_{p_{\max}}=0.024$ と低減し, 隙間フラップ付 3 枚案内羽根の風向 $\theta=0[\text{deg}]$ の場合と同一結果となった. Fig. 7 より, 出力特性が隙間フラップ付 3 枚案内羽の場合と同じような出力傾向となり, 原型の 3 枚対称型案内羽根の場合よりも劣化している. 従って, この案内羽根形状は出力低下も大きく, 理想的な案内羽根ではないことになる.

5. 結 論

本研究は縦軸型貫流式多翼風車について, 風向き全方向の性能向上のため, 案内羽根の対称性を重視し, 風変動による出力低下を抑える新しい案内羽根形態と形状を実験的に追究し, 性能特性と風向に対する最適指向性明らかにしたものである. ここでは風向指向実験のため, 風向角度可変装置を付設したため案内羽根半径を 470mmR に拡大, 動翼ローター半径 160mmR より, 半径比 2.93 とかなり大きな実験条件下にある.

本実験的研究により, 以下の結論が得られた.

1. 5 枚の案内羽根を全方向対応という条件下の元, 試作した 5 枚の対称型案内羽根は $\theta=20^\circ$ で, これまでの 2 枚案内羽根の最適風向角の値と比べ, 出力係数最大値 $C_{p_{\max}}$ が約 23 [%] 落ちるが, 最低 4 ヶ所において最大値を得ることが可能になった. また $\theta=10^\circ, 30^\circ, -10^\circ$ においても約 60% の減少に抑えることができた.

2. 4 枚の全方向対応対称型案内羽根ではフラップ角度 β を 20° にすることにより, 風の方向変化 (θ の変化) に対し 4 方向で高効率を得られた. 4 枚の全方向対応対称型案内羽根は軸対称になっているため, 16 箇所を高効率を得ることが可能になった.
3. 3 枚案内羽根の場合風方向適正角 $30[\text{deg}]$ 以内で最高の出力特性となるが, それ以外の風方向角での出力低下が著しい.
4. 風の方向が変化しやすい日本の風事情においては, 案内羽根枚数 4 枚, フラップ角度 $\beta=10^\circ$ が最も安定して高出力を得ることができる.
5. 実験的に得られた隙間フラップ付き 3 枚対称型案内羽根の出力特性は約 $C_{p_{\max}} 22\%$ 得られたが, 風方向により最大 90% の出力低下となることがわかり, 風方向性に欠ける案内羽根配置である.
6. 小型案内羽根を案内羽根間のローター付近に取り付けた準 6 枚案内羽根の場合は, 出力低下は最大で 50% まで抑えられ, 今回の実験の中で一番風方向性があり, 将来性のある案内羽根配置である.
7. 小型案内羽根を外側に取り付けた準 6 枚羽根の場合は, ローターにうまく風を流入させることができず, 出力低下が最大 85% となり, 出力, 風方向性共に得られない最悪の案内羽根配置である.
8. これまでの最適風向角に限定した動翼ローターと案内羽根半径比 2.0 での実験結果⁽²⁾ は, 本報の半径比 2.93 に拡大した場合の結果とほとんど変わらないことが判明した.

参考文献

- (1) 鈴木, 岸浪, Himsar A.、今, 勇田, 村松, “垂直縦軸型貫流式風車の空力特性”, 第 28 回風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集, pp. 325-328 (2006-11).
- (2) 岸浪, 鈴木, Himsar A.、今, 村松, “垂直縦軸型風車の空力特性 (新案内羽根の設置による性能向上)”, 太陽/風力エネルギー講演論文集, pp. 407-410 (2005).