

419 貫流型風車の模型実験による性能特性の研究

Experimental Study on Aerodynamic Characters of Cross Flow Type of Wind Turbine combined with Outer Static Guide Vane.

山田 亜弥 (室蘭工大)
 小林 浩二 (スズキ (株))
 今 紀衛 (今組 (株))

正 岸浪 紘機 (室蘭工大)
 正 鈴木 淳 (室蘭工大)
 正 今野 哲弥 (株) SMEX)

Aya YAMADA*, Koki KISHINAMI*, Kouji KOBAYASHI*,
 Jun SUZUKI*, Norihei KON** and Tetuya KONNO***.

* Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto-cho, Muroran 050-8585

** Head, Kon Co., Ltd., 2-4-12 Kohoku-cho, Muroran 050-0063

*** Chief Designer, SMEX Co., Ltd., 12-Nakamachi, Muroran 050-0087

Vertical axial cross flow type of wind turbines by means of the momentum exchange of fluid flow are considered to have superior characters in comparison with the conventional propeller type of HAWT, especially in combined with outer static guide vanes. Expected merits are to operate for all directions of the wind without the mechanism of yaw drive systems, and to have a considerable strong starting torque, which lead to simple structures and low costs.

From a view point of above aspect, aerodynamic performance characteristics of the cross flow type of wind turbine combined with outer static guide vanes were studied experimentally by small scale model under the condition of open-type wind tunnel with max. wind stream velocity 4.5m/s and outlet duct's dia. 0.88m ϕ . The free stream velocity was regulated from 0.8 to 4.5 m/s by a 1200 mm dia. two blades propeller driven by a 400 W controlled induction motor. The mechanism of the cross flow model in this experiment are involved the rotor with 0.32m ϕ dia. and 0.3m wide comprised of flat plate blades and advanced blades modified to attaching the 10mm curved front corner, as a parameter of pitch angle θ_b, θ_r and blade/vane numbers Z_b, Z_r . The aerodynamics characteristics of the turbine obtained by experiment were discussed and correlated by the tip speed ratio and power and torque coefficients C_p, C_q for various parameter combinations.

Key Word: Vertical Axial Cross Flow Type of Wind Turbine, Flat Plate Blade and Guide Vane.

1. 緒言

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の一つと考えられている。

中でも風力エネルギーは、三次元空間の大きな潜在力を有するものとして現在、大規模・積極的な利用が始められている。その変換機的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ている。その一つに風方向追従機構の不用な全方位性縦型貫流式風車があり、外部案内羽根を設置することで、構造が簡易、かつ安全で増風速による出力向上効果などが期待される。

本研究では、外案内羽根付き縦型貫流式多翼風車に注目し、定常風速条件での模型実験を行い空力性能および出力特性を測定して、エネルギー式から解析的な検討を加えて、関与する諸パラメータの及ぼす影響を検討・考察するものである。

2. 実験装置および測定方法

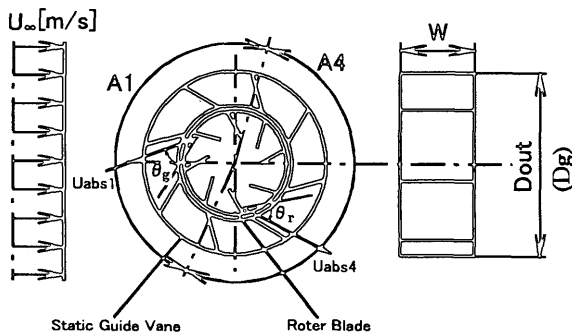


Fig.1 Physical Model of Cross Flow Rotor

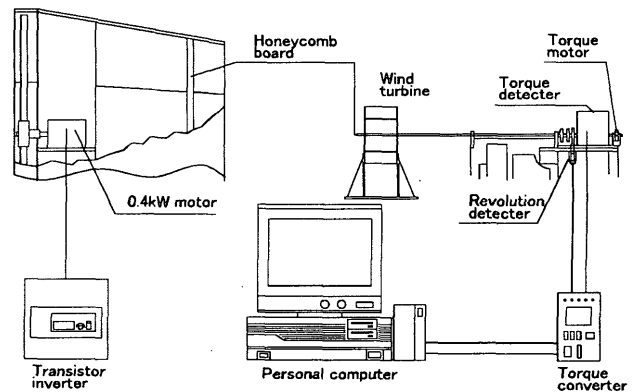


Fig.2 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

本実験で使用する縦型貫流式多翼風車の物理モデルを Fig. 1 に示す。本研究での貫流式風車は外案内羽根部と羽根車部（ローター部）で構成されている。Fig.1において、案内羽根における空気流入口部と流出口部の面積比をそれぞれ A_1 , A_4 とするが、後述の拡大比 $F1=A_4/A_1$ の関係に対応するもので、実験的には A_1, A_2 は外案内羽根の 1~2 セクションに対応する。外案内羽根の適切な増速効果と減速効果により、入口部・出口部の全域で出力が期待できる。従って、基本的には外案内羽根が A_1 と A_4 の領域の入口段と出口段の空気流の運動量交換による 2 段落タービン出力機と考えられる。

本実験に使用した装置の全体図を Fig.2 に示す。開放型風洞には 400W 三相交流モータで駆動される径 1.2m ϕ の二枚翼プロペラと 4mm ϕ コアのハニカム整流板が設置され、モータ回転制御用インバータで風速が調整される。また受風面と

送風部の距離は 800mm であり、風速 4.5m/s までの流れはタフト法により層流であり、受風面における風速はほぼ全域で一様である。測定部は測定軸にトルク検出器・回転数検出器・逆トルクを発生するトルクモータが接続されている。トルク及び回転数はトルクコンバータにより測定され、電圧に変換されたトルクと回転数は A/D 変換し計算機に記録する。

Fig.3 は本縦型貫流式多翼風車の概要であり、外案内羽根部と動翼ローター部の翼は半径方向に対して $60^\circ \cdot 45^\circ \cdot 30^\circ$ の設置角度にすることが出来る。翼設置枚数は 4 枚と 8 枚の 2 通りである。また、外案内羽根は平板翼を使用し、回転ローター部の動翼は Fig.4 に示す如く、単純化した平板動翼と前縁部円弧付き平板動翼の二種を適用する。平板動翼の幅は 60mm と 80mm を、円弧付き平板動翼の幅は 80mm をそれぞれ用意した。定常風速条件下の出力・トルク特性は、風速 2.5m/s・3.0m/s・4.0m/s・4.5m/s、外案内羽根と動翼の枚数がそれぞれ 4・8 枚、設置角度がそれぞれ $60^\circ \cdot 45^\circ \cdot 30^\circ$ (外案内羽根の設置角度は常にローター部動翼の角度以上の条件より、角度の組み合わせは 6 通り) の設定条件で負荷をかけ、ローター部の回転が止まるまでの各回転数におけるトルクを 0.1 秒ごとに 2 秒間ずつ測定・記録した。

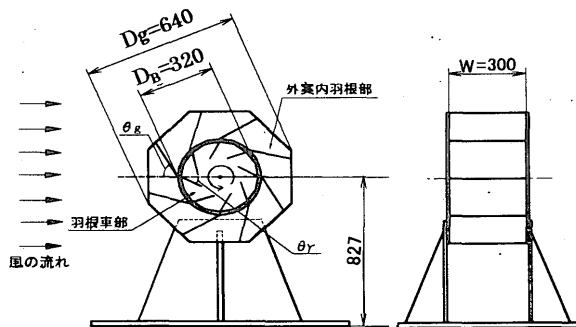


Fig.3 Outline of Cross Flow Wind Turbine

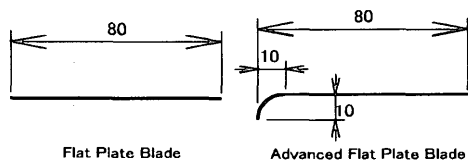


Fig.4 Rotor Blade employed Experiments

3. 実験結果の検討・考察

出力 L [W]、トルク Q [N·m] は出力、トルク係数 C_q 、 C_p 、さらに回転数 N [rpm] は風速 V_∞ [m/s] に対する先端周速度の比として以下の様に無次元化する。但し、 ρ は空気密度 [kg/m³]、図 3 に示す如く D_B はローター部の直径 [m]、 W は動翼の幅 [m] である。

$$C_p = \frac{2L}{\rho D_B W V_\infty^3} \quad C_q = \frac{Q}{0.25 \rho V_\infty^2 D_B^2 W} \quad \lambda = \frac{\pi D_B N}{60 V_\infty} \quad (1)$$

また、外案内羽根の取付け角度を (θ_g)・回転ローター部の動翼の角度設定を (θ_r) とする。

3.1 動翼部が平板動翼の場合

Fig.5 は、動翼が平板翼における本貫流型風車の入口・出口 2 段階の、理想化された速度解析図である。(U_{abs} = 絶対速度 [m/s]、 ω = 相対速度 [m/s]、 U_{circum} = 回転周速度 [m/s]) これより、高回転時において、入口段は風エネルギーを良く

吸収し、高出力となるが、出口段では ω_3 が衝突状態となり、エネルギー吸収が良好とならない。しかし、低回転時には出口段でこの弊害が低減し、入口と出口の全段階でのエネルギー吸収による C_p の向上が予測される。即ち、低速回転型風車となる。

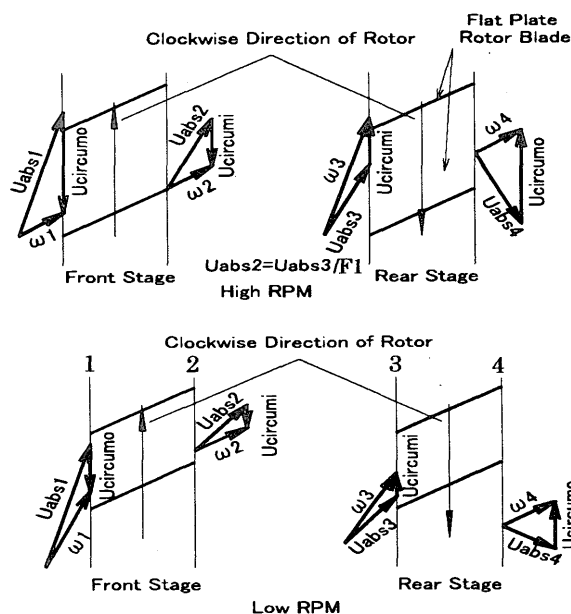


Fig.5 Velocity Vector Diagram at Front and Rear Stages

本風車の効率 C_p 及び流管拡大比 F_1 の考察

本風車において重要と考えられる貫流する空気量を規定する通過効率 η_{pass} は、風速 V_∞ のもとで入り口段 1 案内羽根部に実際に流入する空気量 ma [kg/s] と内部抵抗を無視した場合に通過する空気量 ma_{ther} [kg/s] の比として定義する。

$$\eta_{pass} = ma / ma_{ther} \quad (2)$$

本風車の出力 N [w] は前後の空気流のエネルギー差として、

$$N = ma (U_{abs1}^2 - U_{abs4}^2) / 2 \quad (3)$$

$$\text{ここで、} ma = \pi D_g W \rho V_\infty \eta_{pass} / Z \quad (4)$$

動翼部断面を受風部とした風の有するエネルギー E_w は、

$$E_w = \rho D_B W V_\infty^3 / 2 \quad (5)$$

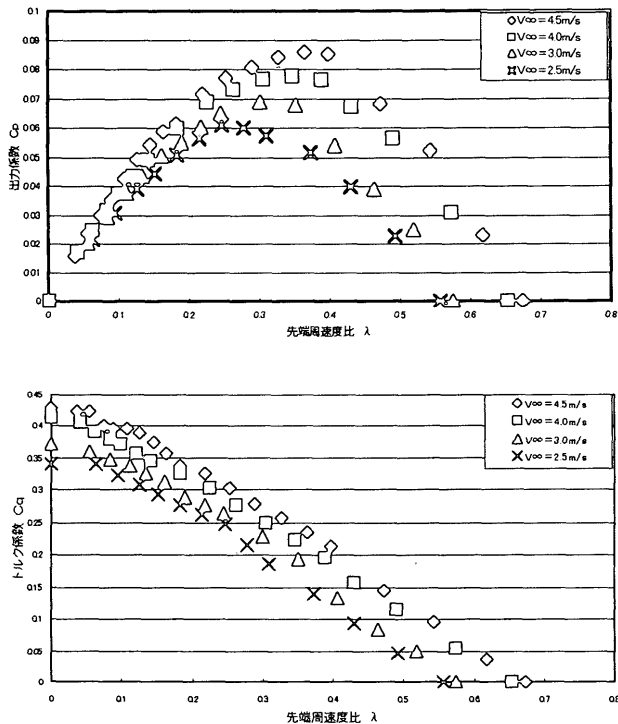
理論成績係数 $C_p = N / E_w$ の関係に上式を導入して、第一段入り口速度 $U_{abs1} = \eta_{pass} V_\infty (D_{out} / D_{in})_g$ の関係を考慮すれば、本貫流型風車において、各入口段、出口段部の速度ベクトルエネルギー解析と通過効率 η_{pass} から与えられる成績係数 C_p の関係は以下の関係で与えられる。

$$C_p = \frac{\pi}{Z} \left[\left(\frac{D_{out}}{D_B} \right)^2 \cdot \eta_{pass}^3 - \eta_{pass} \cdot \left(\frac{U_{abs4}}{V_\infty} \right)^2 \right] \quad (6)$$

ここで、入り口段絶対速度 U_{abs1} と速度ベクトルから与えられる出口段絶対速度 U_{abs4} において入り口・出口段部での質量釣り合いより 2-3 間での流管拡大係数 F_1 が算定される。従って、2-3 間では、 $U_{abs3} = U_{abs2} / F_1$ だけ減速することになる。

本貫流型風車の性能は翼の取り付けピッチ角、翼の枚数、翼幅に依存して、さらに上述の因子の総括因子たる通過効率 η_{pass} に大きく影響されるものと考えられる。

Fig.6 は本条件で最高性能を示した外案内羽根の枚数、動翼数が 8 枚、それぞれの設置角が 60° 、 30° の条件における、成績係数 C_p とトルク係数 C_q の特性図である。横軸は先端周



(Guide Vane: $Z_g=8, \theta_g=60^\circ$, Rotor Blade: $Z_B=8, \theta_r=30^\circ, l=60\text{mm}$)

Fig.6 Aero Dynamic Characteristics C_p, C_q

速度比 λ として、同一風速条件では $\lambda=0.25\sim 0.4$ で最大成績係数となり、回転が増加すれば Fig.5 に述べたように、急激に出力性能が低下している。そして、風速の増加と共に案内羽根部のラム効果で増風速となり、出力性能が向上することを示している。図下図のトルク特性は低回転になる程トルク増となり、起動時最大トルクを示す典型的な低速回転強トルク型風車であることを示している。ここでは、風速が増加する程、成績、トルク係数が共に増加する傾向が見られる。風速が 4.5m/s 以上の場合でも効率が増加することが予測されるが、縦形貫流式多翼型風車は構造的な面から高速回転になれば ω_3 (ブレーキ流れ) の増加があり、先に述べた通過効率が低減して (高風速下のダクト系に対応) ある程度の高風速では飽和効率となることが予測される。

Fig.7 は翼・羽根枚数、取り付け角度など各条件設定において $V_\infty=4.5\text{m/s}$ での最高効率を結んだグラフである。これより案内羽根と動翼の設置角 θ_g と θ_r の差が大きくなる程出力効率が高くなる傾向が見られた。図中より動翼の幅の出力効率に及ぼす影響は、 $Z_g=8, \theta_g=60^\circ$ で動翼が $Z_r=8, \theta_r=30^\circ$ の設定以外、全ての条件において、幅 80mm の羽根の方が 60mm の場合より強くあらわれている。先に述べた、外案内羽根 $Z_g=8, \theta_g=60^\circ$ で動翼 $Z_r=8, \theta_r=30^\circ$ の場合の効率は幅 60mm の方が 80mm より高く、このときの設定条件 ($\theta_g=60^\circ \cdot \theta_r=30^\circ$) は本実験において最も効率が高くなる結果が得られた。また、最適条件における効率が外案内羽根の枚数が 4 枚ではなく 8 枚であることは、ローター出口段から外案内羽根部分に排出される風速が外案内羽根 8 枚の方が逃げやすい、即ち、空気流の通過効率が高くなることを示唆している。これらのことより外案内羽根が 8 枚で角度 60° 、動翼が 8 枚で角度 30° の設定では動翼幅 60mm の方が好性能となっている。同様に外案内羽根の枚数は動翼幅 60mm の場合、8 枚が 4 枚の場合より効率は向上している。

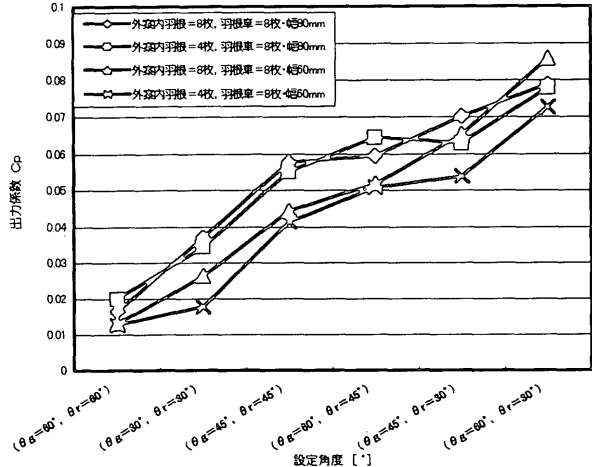
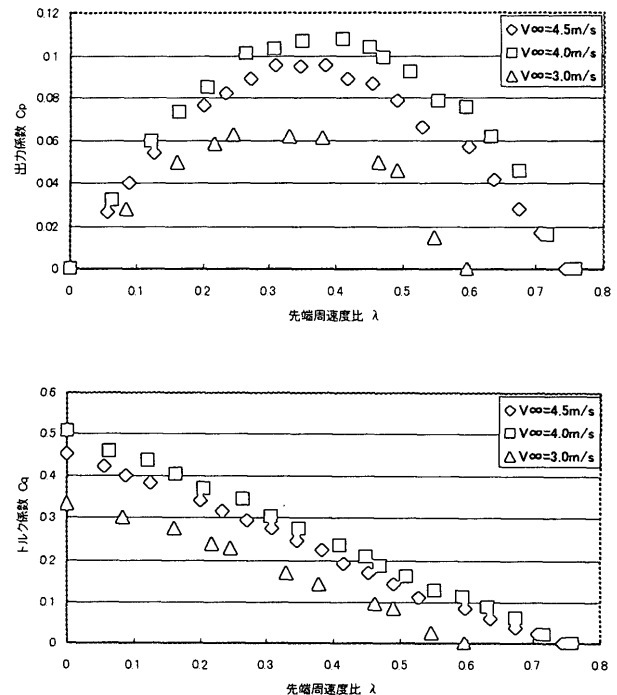


Fig.7 Optimizing C_p on Depending Parameter for Flat Plate Blade

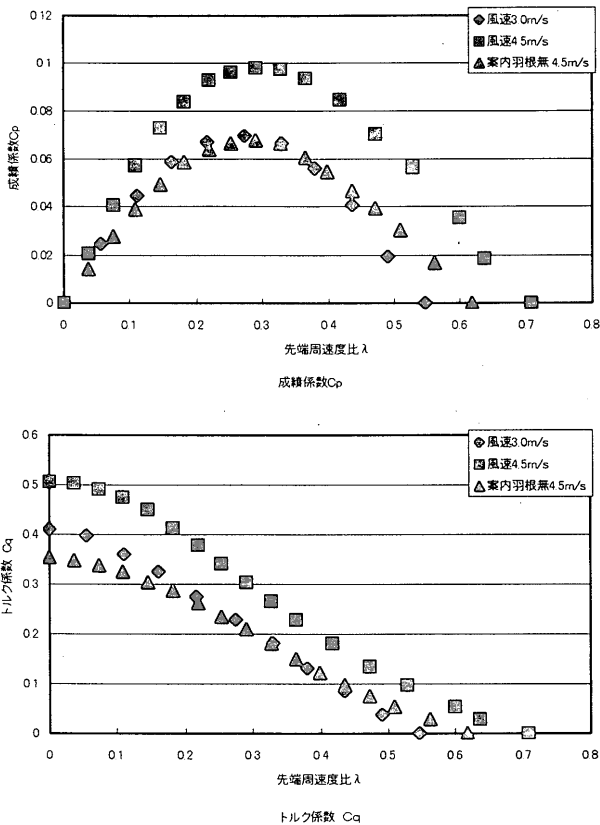
3. 2 動翼部が円弧付き平板動翼の場合

Fig.8 は本条件で最高性能を示した外案内羽根の枚数、動翼数が共に 8 枚、それぞれの設置角が $60^\circ, 45^\circ$ の条件における、成績係数 C_p とトルク係数 C_q の特性図である。同様に、Fig.9 には動翼の取り付け角度を $\theta_r=30^\circ$ と変えた場合の C_p, C_q 特性を示す。全図の C_p, C_q 特性と比較すれば、同一円弧付き平板動翼において、動翼のピッチ角小条件では最高出力点が定入域に移行して、 $\lambda=0.4$ 以上の高回転域で著しく成績係数、トルク係数共に低下する結果を得る。図中には、外案内羽根を外した場合の C_p, C_q の特性結果を与えるが、案内羽根は最高性能点で 50%、高入域で 100%以上の性能向上の役割を担っていることが判明する。



(Guide Vane: $Z_g=8, \theta_g=60^\circ$, Rotor Blade: $Z_B=8, \theta_r=45^\circ, l=80\text{mm}$)

Fig.8 Aero Dynamic Characteristics C_p, C_q



(Guide Vane: $Z_g=8, \theta_g=60^\circ$, Rotor Blade: $Z_B=8, \theta_r=30^\circ, l=80\text{mm}$)

Fig.9 Aero Dynamic Characteristics C_p, C_q

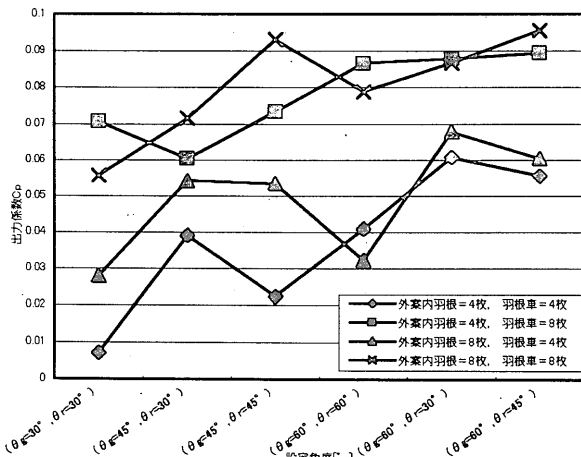


Fig.10 Optimizing C_p on Depending Parameter for Advanced Flat Plate Blade

Fig.10 は動翼部が円弧付き平板動翼の場合の各条件設定において $V_\infty=4.5\text{m/s}$ での最高効率を結んだグラフである。図中、本実験で使用した外案内羽根及び動翼の枚数はそれぞれ4枚と8枚であり、動翼の幅は80mmである。

図に示す如く、設定角度の条件により多少の変動があるが、外案内羽根8枚、動翼8枚の設定条件で効率が最も高くなっている。次に高い効率を示す条件は外案内羽根4枚、動翼8枚の設定の場合である。これより動翼部が8枚の方がより安定した運動量交換及び回転を与え、優れていることが認めら

れた。また、取付け角度の性能特性に及ぼす影響は、外案内羽根8枚、動翼8枚の条件では動翼設置角度が平板動翼の場合と異なり、 45° の条件で最も高い効率を示している。これは円弧付き平板動翼の先端が円弧上になっているため、 $\theta_r=45^\circ$ の場合に入り口段部の動翼が受ける相対風速が最適となり、出口段動翼出口円弧部の空気流出角が周方向に傾き反動度を高めて、25%以上の高性能となっている。

従って、高性能条件下の外案内羽根及び動翼設定角度の最適値は $60^\circ \sim 45^\circ$ 中に存在していると思われ、平板動翼の場合とかなり異なる傾向となる。

3.3 平板動翼と円弧付き平板動翼の比較

円弧付き平板動翼の場合、出口段でのエネルギー吸収が著しく改善され（しかし、その分、内部抵抗が増大して通過効率 η_{pass} は低下する）、平板動翼の場合において $\theta_g=45^\circ, \theta_r=45^\circ$ の最悪の出力条件 ($C_p=2\%$) でも相当の成績係数 C_p を示す特徴があり、外案内羽根と動翼のピッチ設定角の最適条件がかなり緩和される結果を得る。特に $\theta_g=60^\circ, \theta_r=45^\circ$ の場合、成績係数 C_p は11%に達しており、円弧付き平板動翼の適合性と高性能を示している。

4 結論

本研究は近年、風追従機構の不要な安全で簡易なことで注目されている縦型貫流式多翼風車について取上げ、ラム効果を考慮した外案内羽根を設置した条件で、関与する諸パラメータの下で実験を行い、貫流型風力タービンの解析的な検討を加えて、その性能特性を明らかにしたものである。

本研究により、以下の結論が得られた。

1. 実験では風速が大きくなる程、外案内羽根のラム効果により、出力性能が向上した。
2. 平板翼の条件に対して得られた外案内羽根と動翼の取付け角 θ_g と θ_r の最適な組み合わせは $\langle 60^\circ \cdot 30^\circ \rangle$ であり、ピッチ角の差が大きくなると効率が向上する。
3. 動翼の枚数は8枚の方が全体的に4枚より高い効率を示した。同様に、最高効率を示した動翼の幅は60mmであった。80mmの動翼も設定条件によって好結果が得られると思われる。また、外案内羽根の最適枚数は4枚から8枚の中にあると思われる。
4. 円弧付き平板動翼の最適条件は $\langle 60^\circ \cdot 45^\circ \rangle$ にあり平板動翼よりも効率が25%程上がる結果が得られた。
5. 外案内羽根はその外径を動翼ローター径の2倍の条件において、出力向上は最高点で50%、高回転域で100%以上となる。

参考文献

- (1) 赤羽正彦, “貫流風車の性能におよぼすガイドベーンの影響について”, 第13回風力エネルギー利用シンポジウム, (1988), P131-134
- (2) 清水幸丸, 「風力発電技術」, パワー社
- (3) 鶴喰, 岸浪他, “寒冷地用風力タービンに関する基礎研究”, 第9回環境工学総合シンポジウム議論, (1999), P426-429