



貫流型風車の空力特性と性能向上に関する実験的基礎研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 北海道開発技術センター 公開日: 2012-08-30 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 岸浪, 紘機, 鈴木, 淳, 戸倉, 郁夫, 花島, 直彦, 今, 紀衛, 大野, 祥嗣, 勇田, 敏男, 加藤, 英人 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/1612

貫流型風車の空力特性と性能向上に関する実験的基礎研究

その他（別言語等） のタイトル	Experimental Study in Aerodynamic Characters and Improvement in Performance of Cross Flow Type of Wind Turbine
著者	岸浪 紘機, 鈴木 淳, 戸倉 郁夫, 花島 直彦, 今 紀衛, 大野 祥嗣, 勇田 敏男, 加藤 英人
雑誌名	寒地技術論文・報告集
巻	20
ページ	442-449
発行年	2004
URL	http://hdl.handle.net/10258/1612

岸 浪 紘 機 (室蘭工業大学)
 鈴木 淳 (〃)
 戸倉 郁 夫 (〃)
 花 島 直 彦 (〃)
 今 紀 衛 (株今組)
 大 野 祥 嗣 (〃)
 勇 田 敏 男 (東京電機大学)
 加 藤 英 人 (株矢作産業)

Experimental Study in Aerodynamic Characters and Improvement in Performance of Cross Flow Type of Wind Turbine

K. Kishinami (Muroran Institute of Technology)
 J. Suzuki (〃)
 I. Tokura (〃)
 N. Hanajima (〃)
 N. Kon (Kon Gumi L.T.D.)
 S. Ono (〃)
 T. Yuta (Tokyo Denki University)
 H. Kato (Yanagi Ind. L.T.D.)

COLD
 REGION
 TECHNOLOGY
 CONFERENCE 2004



1. 緒論

風力・太陽光などに代表される再生・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、未来エネルギー供給体制の基軸の一つとなるエネルギー源と考えられている。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漸く市民権を得て現在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高回転・高出力型の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⁽¹⁾が在る。低速回転・強トルク型としての特性を有する本形式の風車は構造簡易にして安全で、

外部案内羽根の設置による出力向上効果等の利点^{(2),(3)}があり、さらに山間部の多い寒冷地において巻き込み・渦流を伴う風状況に対して追従性が優れているが、動翼の最適形状(設置角度、枚数、翼幅)など不明の点が多い⁽⁴⁾。

本論ではこれまで外案内羽根付き縦型貫流式多翼風車の実験・研究を行ってきたが、特に動翼の最適化に注目して平板翼と曲板翼の2組を用意し、その枚数とその最適寸法について解析的な検討を加え、定常風速条件での実験から空力特性を解明して、関与する因子の出力性能に及ぼす影響を検討・考察した結果を報告する。

2. 実験装置および測定方法

本実験で使用する縦型貫流式多翼風車の物理モデルと作動媒体空気の流線分布を 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(動翼)の2要素で構成されている。本貫流式風車作動因子は、案内羽根の枚数を Z_g 、その長さ L_g 、取り付け角 θ_{in} 、動翼プ

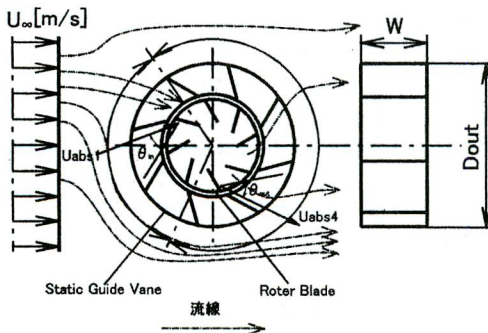


Fig.1 Physical Model of Cross Flow Type of Wind Turbine

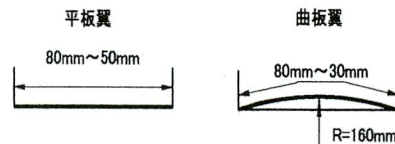


Fig. 2 Blade Pattern used in Rotor

岸 浪 紘 機 室蘭工業大学工学部(室蘭市水元町 27-1, Tel.0143-46-5302, Fax.0143-46-5314)
 今 紀 衛 (株)今組 (室蘭市港北町 2-4-12, Tel.0143-55-7136, Fax.143-55-4113)

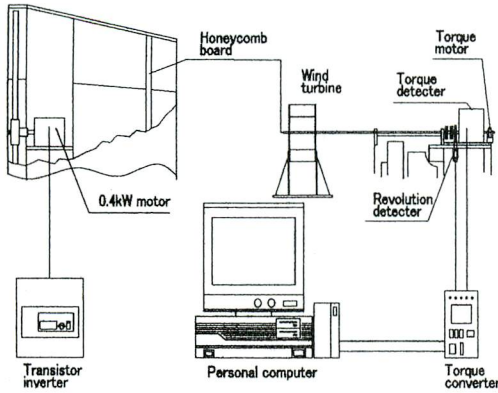


Fig. 3 Experimental Apparatus and Measurement System

レードの枚数 Z_b , その長さを L_b , 取り付け角 θ_b の 6 種となり、入口段と出口段の 2 段落タービン機と考えることも出来る。図中には、実験時風速流線の状態を鎖線で示すが、一部の条件を除いて空気流は入口段部では一箇所の案内羽根部から入り、出口段部では 2 箇所の案内羽根部から流出することが認められる。

Fig.3 には本実験装置の全体図を示す。主要なる装置である開放型風洞は 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で構成され、モータ回転制御用インバータにより風速が調整される。また風車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。風車回転軸に接続された測定部は、図示の如くトルク検出器・回転数検出器・擬似負荷をあたえるトルクモータから構成されている。トルク及び回転数データはトルクコンバータを介してアナログ/デジタル変換され、パソコンに収納される。Fig.4 は本縦型貫流式多翼風車と風洞に対する配列位

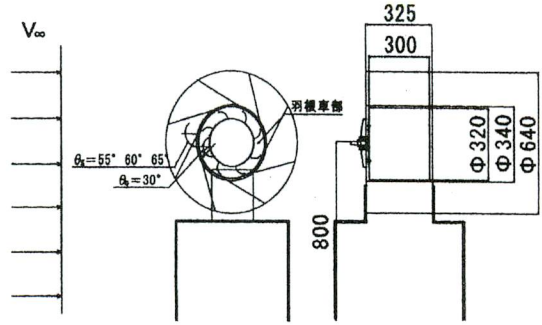


Fig. 4 Experimental Model for Cross Flow Type of Wind Turbine

置の概要であり、外案内羽根部と羽根動翼部の径は夫々 $D_B=320\text{mm}$ 、 $D_G=640\text{mm}$ で、風車幅 $W=600\text{mm}$ である。外案内羽根は幅 $w=300\text{[mm]}$ 、厚さ $t=1.6\text{[mm]}$ であり、長さは $l=180\text{[mm]}$ である。角度 θ_{in} を 55[deg] 、 60[deg] 、 65[deg] とすることができる。風車動翼は全て取り付け角 θ_b 30[deg] としている。動翼は 8 枚、16 枚、30 枚を用意しており、8 枚動翼では厚さ $t=1.5\text{[mm]}$ 、長さ $l=70\text{[mm]}$ 、曲率半径 $R=120\text{[mm]}$ 、16 枚動翼では厚さ $t=1.5\text{[mm]}$ 、長さ $l=50\text{[mm]}$ 、曲率半径 $R=100\text{[mm]}$ 、30 枚動翼では厚さ $t=0.5\text{[mm]}$ 、長さ $l=40\text{[mm]}$ 、曲率半径 $R=38\text{[mm]}$ のアルミ板を使用している。風速は 3.9[m/s] 、 4.5[m/s] で実験を実施した。本論では、主に外案内羽根の設置角度 θ_{in} を 60[deg] とし、長さが $l=180\text{[mm]}$ の場合、動翼が 8 枚、16 枚、30 枚の実験を行う。

この他、曲板翼の他に動翼部を工作の簡易化の観点から平板とした場合、翼枚数の最適化のため大翼 8 枚と小翼 8 枚の 16 枚動翼組合せ実験を行った。Fig.2 にローター部動翼に用いた曲板翼と平板翼を示す。平板動翼の場合は幅 50mm から 80mm までの大型動翼各 8 枚、幅 40mm から 50mm までの小型

動翼 8 枚、計 16 枚あるいは 8 枚の翼設置枚数としてある。曲率 $R=160\text{mm}$ の曲板動翼の場合は幅 40mm から 80mm までの大型翼 8 枚、幅 30mm から 80mm まで曲板小翼が各 8 枚と同様にした。この場合の定常風速条件下の出力・トルク測定実験は、風速 $4.0\text{m/s} \sim 3.0\text{m/s}$ のもとでおこなった。全体として、外案内羽根は枚数 8 枚、ローター動翼部の枚数は 8 枚、16 枚の 2 パターンの組合せで、トルクモーターで擬似負荷を与え、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 10 秒間ずつ測定・記録した。

3. 実験結果の検討・考察

出力 $L[\text{W}]$ は出力係数 C_p 、トルク $Q[\text{N}\cdot\text{m}]$ はトルク係数 C_q 、回転数 $N[\text{rpm}]$ は風速 $V_\infty[\text{m/s}]$ に対する先端周速度の比 λ として、以下の関係で無次元化する。 ρ は空気密度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、 D_B はローター羽根車の直径 $[\text{m}]$ 、 W は羽根車の幅 $[\text{m}]$ である。

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

(1)、(2)、(3)

3.1 曲板動翼翼の場合に対する速度ベクトル解析による翼幅、曲率の影響

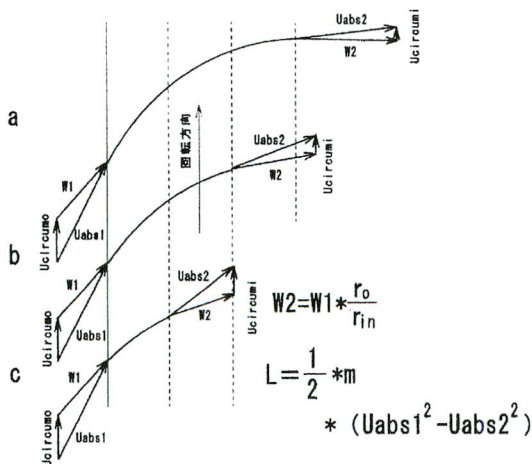


Fig. 5 Velocity Vector by Blade Width

Fig.5 は曲板翼の翼幅の効果についての速度ベクトル解析図である。図中の添字 abs は絶対速度、 W は相対速度を示し、 U_{cir} は各位置の周速度を表す。角速度 ω の動翼は外径、内径をそれぞれ r_o 、 r_i とすると、周速度はそれぞれ、 $U_{cir o} = r_o \times \omega$ 、 $U_{cir i} = r_i \times \omega$ で示され、動翼外内部で連続条件にあるものとしている。本風車の出力 L は動翼部の入口、出口の絶対速度のエネルギー差に、その間を流れる流量の積として出力が表される。入口の絶対速度を U_{abs1} 、出口の絶対速度を U_{abs2} 、動翼部を流れる作動流体流量を $m [\text{kg/s}]$ とすると、

$$L = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (U_{abs1}^2 - U_{abs2}^2) \quad (4)$$

上式は、線図上速度エネルギーの吸収が良くとも通過流量 m が小さい場合、出力の低減を示唆する。ここで、 a 、 b 、 c は動翼幅を大、中、小とした場合であり、図より、翼幅が広い a の場合、外内半径比 r_o/r_i が大きくなり $W2$ も増大する。従って、 U_{abs2} も増大し U_{abs1} と U_{abs2} の差がなく、この翼部のエネルギー吸収が小さいことになる。中翼幅 b の場合でも略同様である。ここでは小翼幅 c の場合がエネルギー吸収が最も大きく、最も高出力になることが予測される。

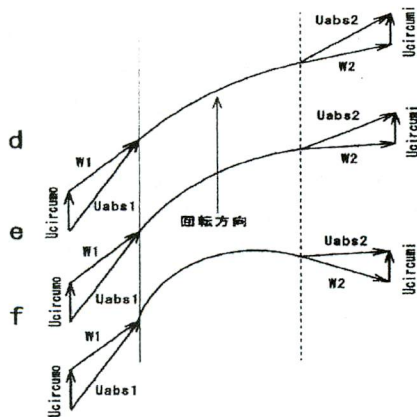


Fig. 6 Velocity Vector by Blade Curvature

Fig.6 は局率一定とした曲板翼の曲率半径の影響についての速度ベクトル解析図である。図中の d, e, f 大、中、小の曲率条件で同一流量の仮定として W2 は変わらない。しかし、曲率により W2 の放出角度に差が表れ、Uabs2 が一番小さくなるのは g の条件である。したがって、曲率半径が小さい g の場合、他よりエネルギー吸収が大きいことになる。従って、通過流量同一条件では、翼幅が短く、曲率半径が小さい動翼のエネルギー吸収（出力）L がより大きくなるものと考えられる。

3.2 曲板動翼部に対する翼枚数増加（小翼追加）対策の場合の入口、出口段全体の速度ベクトル

出口段入口部で風速流量が1/2となる時の面積比率とベクトル水平成分

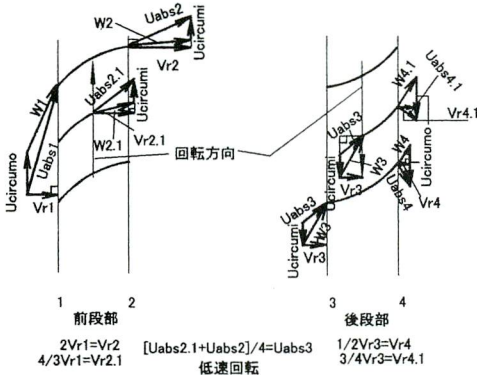


Fig. 7 Velocity Vector for Curved Rotor Blade at In-and Outlet

本風車の特性を2段落タービンとして径方向の通過面積と質量条件を考慮した速度ベクトルから検討してみる。Fig.7は、動翼が曲板翼の場合における本貫流型風車の入口・出口2段部の、速度ベクトル解析図である。先と同様に図中の添字 a, b, s は絶対速度、W は相対速度を示し、Ucir は各位置の回転速度を表す。図中には、曲板動翼 8 枚の間に小動翼 8 枚を入れた場合を表している。

実験から前段部入口部は案内羽根の 1 セクションからのみ流入し、後段部の案内出口部では極低速回転の場合を除いて 2 セクションから流出する。これより、後段部にこの質量保存則（後段部入口速度が前段部出口速度の半分）を適用すれば、図中の前段部における動翼の出口速度は、その方向も大きな問題となるが後段部入口部において、速度が半減する。速度解析図より低速回転時の前段部では、大翼はある程度エネルギー吸収し、小翼は相当のエネルギー吸収をすることになる。しかし、出口部からの放出が 2 セクションとなる（流管拡大）後段部入口速度は半減とする連続条件を考慮した単純な仮定下において、出口段ではほとんどエネルギー吸収は認められない。また、高速回転時では前段部の曲板大動翼はかなりのエネルギーを吸収し、小動翼はさらなるエネルギー吸収をしている。その 1/2 に減速した後段入口部においては、高速回転の場合、全体としてエネルギー吸収は認められず出力にほとんど寄与しないことになる。結局、①風車出力の大部分は前段部に依存し、②小翼ほどエネルギーを吸収すること、更に③風速近くの回転周速度では殆んど出力しないこと、④エネルギー吸収が良くても内部流動抵抗が増加すれば動翼通過空気量が低減して出力が低下すること等が本解析から予測される。

平板翼は曲面翼の場合に比べて動翼部のエネルギー吸収が劣るが、平板動翼の内部流動抵抗が減少する結果、作動媒体の通過流量が増加してトータルとして出力性能はさほど変わらず、先の場合と同様の推論が導かれる。実際、強い曲面大翼での実験結果は内部流動抵抗増により線図上の効率が良くとも逆に出力性能がかなり低下する事が実験的に認められる。

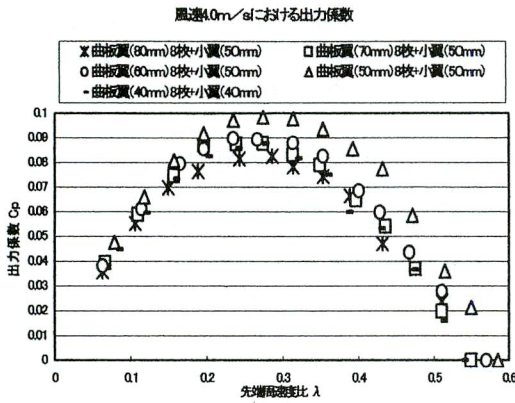


Fig. 8 Power Coefficient C_p for 16 Pieces Curved Blade of Rotor

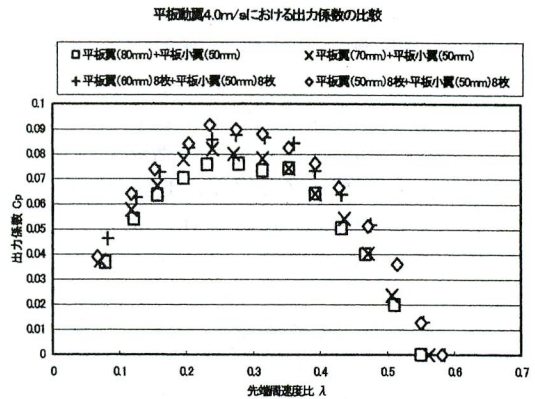


Fig. 9 Power Coefficient C_p for 16 peaces Flat Blade of Rotor

3.3 動翼部が曲板/平板翼の翼枚数増加 (小翼追加) 対策の実験結果

Fig.8 は、風速 4m/s 下、曲面動翼の場合に対して各動翼間に小動翼を加え

た 16 枚の組合せにおける出力特性図である。図より翼幅は動翼・小動翼共に 50mm の組合せが最も高効率となり、40mm の場合は逆に性能が低下する。60mm と 50mm の組合せはそこそこの性能を示している。以上から、動翼枚数 16 枚の場合、翼幅は動翼、小動翼共に同じ幅の 50mm が高出力条件となる。

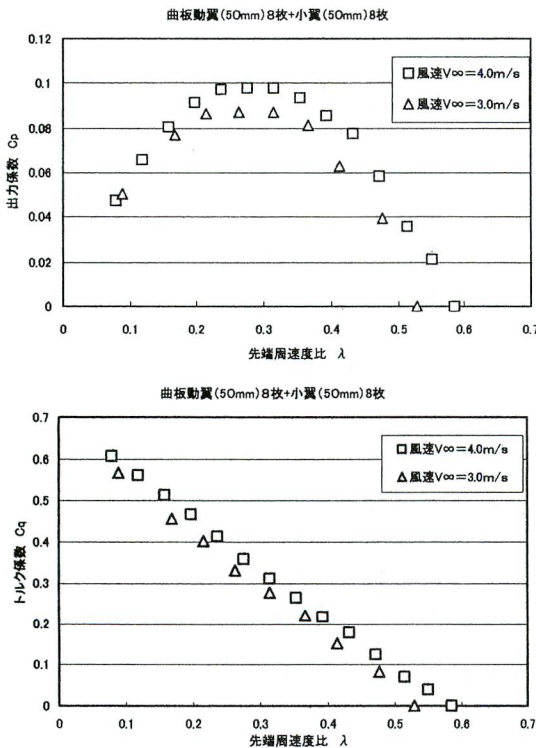


Fig. 10 Output Characteristics depending on V_{∞} for Curved Blade

Fig. 9 は、平板動翼の各翼間に小翼を加えた 16 枚組合せの場合の出力特性図である。図の結果から、短い翼幅は効率がよく、翼幅が大きくなれば出力効率が低下している。16 枚動翼数条件では、曲板翼の場合と同様に 50mm 動翼は最も効率が高くなるが、80mm 動翼では著しく低下する結果が得られた。平板翼でも、曲板翼と同様に大動翼 50mm・小動翼 50mm の組合せが最も良い効率を示す、最大効率は曲面の場合に対して 11%ほど低下している。

Fig.10 は本条件で最高性能を示した幅 50mm の同一寸法の曲板動翼 16 枚、外案内羽根の設置角 60° の条件における、風速による出力係数 C_p とトルク係数 C_q の空力特性図を示す。図より、風速 4.0m/s で、出力係数 (C_p)・トルク係数 (C_q) 共に風速 3.0m/s の場合より若干高性能となり、先端周速度比 0.3 前後で最高出力となる。

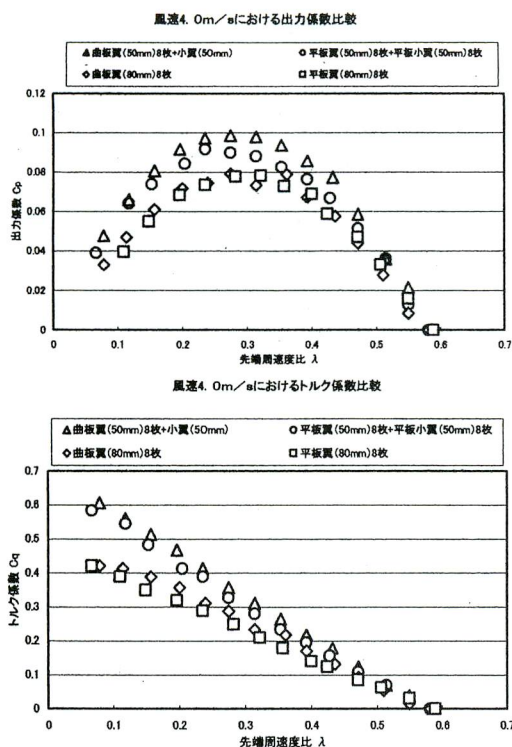


Fig.11 Output Characteristics for Curved and Flat Rotor Blade

Fig.11は、本実験で最高性能を示した曲板翼、平板翼共に50mm翼幅の場合の風速4.0m/sの下での出力・トルク特性を比較して示すものである。先の図と併せ、いずれの場合も先端周速度比 λ が0.25~0.3前後で最大出力となっている。また、 $\lambda=0.25$ において曲板翼と平板翼の出力係数 C_p は、0.01差、約10%の差が見られ、曲板翼が平板翼より高性能である。図中には80mmの8枚動翼の場合を添えるが、16枚の場合に比べて20%~30%ほど出力・トルク共に低下している。本実験では曲板動翼、平板動翼の場合共に大動翼、小動翼共に50mmの組合せが最高性能を示す事から、 $Z=16$ では風車部の半径160mmに対し翼幅50mmなので、半径比率の1/3.2倍前後あたりの無次元翼幅に最適値がある。

貫流式多翼風車は高速回転になれば（風速=動翼回転速度）、各段動翼でエネルギー吸収が出来ず出力が低下する。図示の如く、トルク特性はいずれの場合も低回転になる程トルクが増大し、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。

3.4 平板・曲板動翼部が8枚の場合の出力特性

図は省略するが、風速は4.0m/sの条件下で8枚動翼の場合の平板・曲板動翼に対する空力特性の結果は、動翼枚数8枚の条件では、翼幅の長い方が高効率となり、逆に翼幅が短いほど劣性能となる傾向にあり、80mmの場合が最も高性能である。平板翼・曲板動翼共に80mm同士の比較では最高出力近傍の広回転域でトルク・出力共に曲板動翼の方が良く、高回転域では内部流動性が向上する分平板動翼が優れている。最高性能（曲板動翼80mm）と最悪の効率（曲板動翼40mm）の比較では50%の差があり、翼枚数と翼幅間には重要な関係がある。また、動翼16枚50mmと8枚80mmの最適条件で C_p は0.1から0.08に、20%ほど性能低下している。

3.5 曲板動翼枚数30枚とした場合の出力特性

これまでの動翼間に小動翼を設置する増加対策では、等翼幅の小さな多翼型とする場合が最も高性能となることが判明した。Fig.6の速度ベクトル解析で論じたように曲率の小さな翼のほうが高性能となる予測を考慮し、曲率を小さくした30枚動翼（翼幅40mm、曲率半径38mm）を新製し、その実験を行った結果について以下に示す。Fig.12、13は風速4.5[m/s]で外案内羽根の長さが $l=180$ [mm]、外案内羽根の取り付け角度 60 [deg]の条件で動翼枚数による出力・トルク特性を示す。図より動翼が30枚では先端周速度比 $\lambda=0.27$ [-]

のとき出力係数 $C_p = 14 [-]$ まで増加しており、動翼枚数が8枚の時と比べ約59 [%], 16枚の時と比べ約40 [%]上昇している。同様にトルク係数 C_q では動翼枚数が8枚の時と比べ約60 [%], 16枚の時と比べ約45 [%]上昇している。これは速度三角形の考察から、翼幅と曲率半径が小さいことによる効果が得られたと考えられる。特に、最高性能を発揮した30枚の動翼は翼幅40mm、その曲率半径38mmφの条件である。

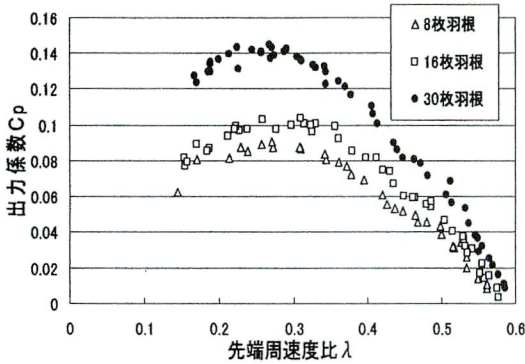


Fig.12 C_p for Rotor Blade Number

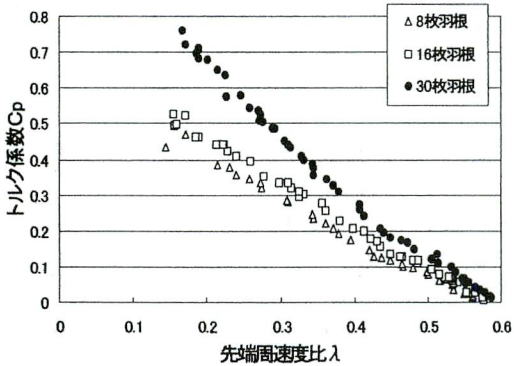


Fig.13 C_q for Rotor Blade Number

3.6 直流発電機とつなぐ場合の問題

本風車の出力を磁石界磁式直流発電機側につないだ場合を Fig.14 に示す。図中、風車出力 $P(W)$ が発電機入力軸 $x-x'$ に回転数 n 、駆動トルク T で入力し、発電機は時計方向回転より、フレミングの右手則により矢印方向の電流

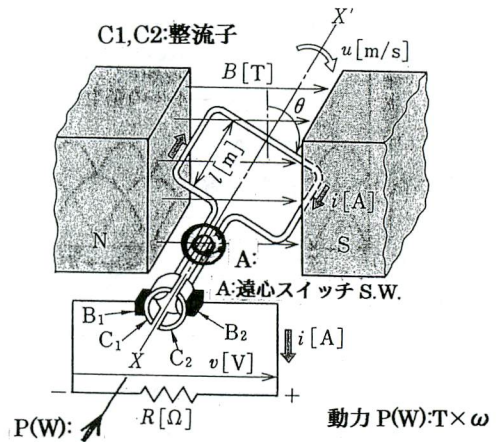


Fig.14 Coupling with D.C Generator

が流れ、起電力 $E(V)$ は、以下の式により定義される(4)。

$$E = \frac{P}{a} \cdot \Phi \cdot Z \cdot \frac{n}{60} = K \cdot \Phi \cdot n \quad (5)$$

P : 極数, a : 並列回路数, Φ : 極の磁束
ここで、外部負荷(R)と繋がり、起電力(出力)電機子電流 j_A が流れる。

$$P(w) = T \cdot \frac{\pi n}{30} \quad (\text{外部入力})$$

$$= (K \cdot \Phi \cdot n - Ra \cdot I_A) \cdot I_A = V \cdot I_A \quad (6)$$

V : 端子電圧で発電機機電力 E と電機子の電圧降下 ($Ra \cdot I_A$) の差
従って、外部駆動トルク T

$$T = (K \cdot \Phi \cdot n - Ra \cdot I_A) \cdot I_A \cdot \frac{30}{n \cdot \pi} \quad (7)$$

一般的に、 $K \cdot \Phi \cdot n \gg Ra \cdot I_A$ 、起動電力 E は式(5)より、起動時のトルクは

$$T = \lim_{n \rightarrow 0} T = K \cdot \Phi \cdot \frac{30}{\pi} \cdot I_A \quad (8)$$

ここで、電機子回路が閉じられて抵抗 R が小さな場合、起動時の E が微少でも I_A は大きな値となりトルク T は大きな値となり、ただでさえ起動時のトルクの小さい風車において起動できないことになる。

1. 遠心力 S.W の設置による起動対策

電機子と整流子間に図に示す遠心力式スイッチ S.W を設置すれば、ある回転数以上でリード弁が電機子コイルに

繋がり、発電機として稼動する。本格的にはトランジスタ-TrのSW作用などを利用して作動確実なるものとする必要があるが、起動性を著しく改善するはずである。

2. 蓄電池系を設置する

負荷と二次電池系部の接続部に風圧SWを設置する。風を感知してSWがONとなれば、逆方向の電流が電機子コイルに流れ、左手側によりモーターとして同一回転方向トルクが生成し風車の回転が助長される。風車がある回転以上になれば、起電力が二次電池電圧より大きくなって蓄電となる。

5. 結論

近未来における化石エネルギーの枯渇の予測は、今日の潤沢なるエネルギー使用の時代は束の間のこととする認識を人々に与え、再生エネルギーに主点を置くエネルギー革命の時代の到来を予測させる。

本研究は、小規模向きに適正があるとされる全方位性縦型貫流式風車について、特に動翼形状と枚数の最適化について実験的研究を行ったものである。

本研究より以下の結論が得られた。

1. 本実験での動翼枚数16枚の条件で平板翼、曲板翼ともに動翼幅50mm・小翼50mmの組合せ、また8枚条件では動翼幅80mmの組合せが最適効率となる。従って、風車ローター半径に対する無次元比率は夫々1/3.2、1/2前後に最適値がある。そして、ローター動翼の枚数は16枚の方が、低回転域で著しく性能が向上し、最大効率で動翼8枚の場合より20%ほど高い効率を示した。

2. 小動翼を挿入した16枚動翼の場合、動翼を同一幅の小さいほうが効率が増加する。しかし、小動翼を設置しない8枚の場合は逆に動翼が大きくなるほど、効率も増加する。また、動翼、小動翼共に翼幅を同一にして規則正しく配列した場合の方が高性能となり、平板翼、曲板翼共に同様の結果が得られた。

3. 理論的な背景から動翼部を小曲率とした30枚翼は最大出力係数 $C_p=14\%$ と 40% ほどの性能向上する結果が得られ、本形式風車の性能向上の方向が見出された。

4. 本形式の風車は同一受風面積のプロペラ型風車に比べて出力性能は1/4~1/3程の能力となるが、低回転時のトルクは大きく、特に起動性が著しく優れている。

5. 直流型発電機と風車のカップリングにおける電気的な問題点と対策を述べた。

参考文献

- (1) 赤羽正彦, “貫流風車の性能に及ぼすガイドペ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) 岸浪紘機, 他8名, “貫流型風力タービンの空力特性に関する実験的研究”, 日本機械学会第12回環境工学総合シンポジウム講演論文, (2002), p.509-512.
- (3) Ushiyama Y., Isshiki N., and Chai G., “Design Configuration and Performance Evaluation of Cross Flow Wind Rotor”, Solar Energy, Vol.20, No.4, 1994, pp.36-41.
- (4) 深尾 正, “電気機器入門”, 実教出版