

## 中空構造体を用いた集風装置による風力発電の高効率化

烏谷, 隆  
九州大学応用力学研究所

宮尾, 圭一  
(株) 東芝

茶木田, 浩  
九州大学工学府航空宇宙工学専攻

深町, 信尊  
九州大学応用力学研究所

他

<https://doi.org/10.15017/6768590>

---

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 122, pp.67-71, 2002-02. 九州大学応用力学研究所  
バージョン :  
権利関係 :

# 中空構造体を用いた集風装置による風力発電の高効率化

鳥谷 隆\*, 宮尾 圭一†, 茶木田 浩#, 深町 信尊\*, 渡辺 公彦\*, 大屋 裕二\*

(2001年12月28日受理)

Improve the efficiency of a wind-power generation with hollow bodies

KARASUDANI Takashi, MIYAO Keiichi, CHAKIDA Hiroshi  
FUKAMACHI Nobutaka, WATANABE Kimihiko and OHYA Yuji  
E-mail of corresponding author: karasu@riam.kyushu-u.ac.jp

## Abstract

To improve the efficiency of power generation by a wind fan, it is more effective to use high-speed wind. A method collecting wind to get the high-speed wind was experimentally studied. It was found that static pressure of the inside of the hollow bodies with diffuser shape became lower than that of outside. The magnitude of the static pressure difference had the maximum value near the inlet of the diffuser. Approaching wind was accelerated by the pressure difference and its speed near the inlet of the diffuser became about 1.8 times of that apart from the body. We found that the diffuser attached a ring at the rear edged was more effective to get high-speed wind. The maximum power of a wind turbine with the diffuser became 1.8-2.5 times of that without the diffuser.

**Key words:** wind fan, wind acceleration, diffuser, entrainment

## 1. はじめに

風力発電においては発電効率が風速の3乗に比例するため、効率を上げるために風速を増加させることが効果的である。風を加速するためには、何らかの方法で風の集中する領域をつくる必要がある。流の中に置かれた障害物の周辺部では、障害物により排除された風と周辺の風とが合わさるため、風速の増速域が生じることはよく知られた現象である。

本研究では、まず、流体の流れを制御する装置の中で最も基礎的な要素である管状の中空構造体及びドーナツ板状の中空構造体を利用して風を集めることができるか実験的に研究した。中空構造体が開放空間中に配置された場合には、流体は構造体を避けて流れることができるため、閉じている場合とは異なった流力特性を示すと思われる。また、構造体の外部にも流れがあるため、この外部流れと構造体の内部を通ってきた流れが構造体の出口で干渉するため、閉じている場合とは非常に異なった流力特性を示すと思われる。流れのある開放された空間中に置かれた中空構造体が流れに対してどのような影響を与えるのか、中空構造体はどのような流力特性を示すのかを、風洞実験により明らかにする。また、管状の中空構造体と板状の中空構造体を組み合わせることにより、集風効果にどのような影響があるのかを調べる。

次に、このような中空構造体を利用してつくった集風装置が風車の発電効率の向上に実際にどの程度効果があるのかを知るため、風車を集風体の中に設置して出力特性を求める。また、風車の種類を変えることにより、風車の特性の違いにより、効率向上にどのような影響があるかを調べる。

## 2. 拡大管による加速

流れの中に配置する管状中空構造体の形状は Fig. 1 の A, B, C の3つが基本である。A は流れに対し入り口の断面積が出口の断面積より広い形状である (これ以降、縮流型と呼ぶ)。C は A とは逆に入り口が出口より狭い形状である (拡大型)。B は入り口と出口が同じ広さである (中立型)。

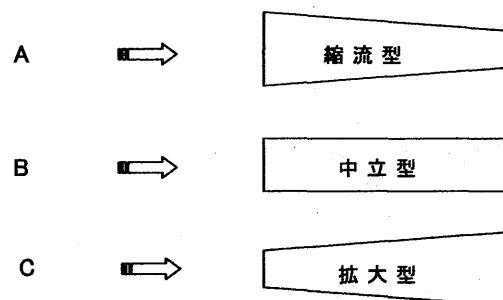


Fig 1. Basic arrangement

\* 九州大学応用力学研究所

† (株) 東芝

# 九州大学工学府航空宇宙工学専攻

管状の中空構造体の形状としていろいろなものがあるが、それらはこの基本形状の変形あるいは組み合わせとみなすことができる。そのため、これらの基本形状の特性を詳細に調べた<sup>1,2)</sup>。中立型は断面が12x12cmで長さが92cmの中空の角柱を用いた。縮流型と拡大型は、Fig. 2に示すように、大きさが12x12cmと24x24cmの正方形断面をもつ、長さ92cmの中空の角錐台をもちいた。二つの切り口の断面積比は4、開き角はおよそ3.7度である。外部の近寄り風速  $U_{\infty}$  を5m/sに設定し、流れ方向の静圧分布と風速分布を測定した。また、流れの様子を観察するためにスモークワイヤー法により流れを可視化した。

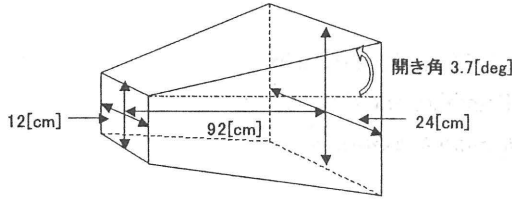


Fig.2 A truncated pyramid for the experiment

モデルの中心軸上で測定した静圧差と風速の分布をそれぞれ Fig. 3, Fig. 4に示す。静圧差の分布はモデルから上流方向におよそ2m離れた位置での静圧との差を示している。また、x軸の原点0はモデルの入り口であり、下流方向に向かって正の値をとっている。モデルの長さ  $L(=92\text{cm})$  で規格化している。

Fig.5,6,7は流れの様子をスモークワイヤー法により可視化したものである。

これらの結果から、次のことが解る。開放された空間中に置かれているため、モデルの入り口と出口で静圧は周囲の流体の静圧と同じにならなければならない。実際、Fig. 3の静圧差の分布を見ると、入り口と出口の近傍で静圧差はほぼゼロになっている。静圧差は角錐台内部では常に、縮流型では正圧になっており、拡大型では負圧になっている。また、正圧あるいは負圧の程度は入り口から30~40mmの位置で最大値をとり出口に向かって次第にゼロになっていく。この圧力分布に対応して風速は周辺の風速に対して、縮流型では入り口付近で非常に遅くなり、出口に向かうにつれて徐々に回復していく。拡大型では入り口付近で急激に加速され速くなり、出口に向かって遅くなっていく。また、最大風速は周辺風速のおよそ1.8倍に達している。

Fig.6,7の流れの様子をみると、縮流型では入り口の前方で外側に排除されるように大きく湾曲している、一方、拡大型では回りの流体が入り口に吸い込まれるようにロート状に流れ込んでいる。拡大型の構造体で入り口から30~40mmの位置で最大風速をとるのは、入り口で流れが剥離し実質的にそのあたりの断面積が最小になるためであると思われる。

縮流型の場合、出口に向かって狭くなるため、流れに対して障害となり入り口部の静圧が上昇する。また、静圧差は出口付近でゼロになるため、構造体内部では負圧になる領域はなく構造体内部において流速が近寄り風速より速くなる領域はないことが解る。拡大型において速度が増加するメカニズムには、以下に示す2つの効果が考えられる。

- ① 造体内部で中心流が拡大領域の流体を取り込み連行する効果。
- ② 造体の出口部で拡大領域の遅い流れを周辺の速い流れが連行する効果。

まず①については、入口から入った流れが、断面の拡大している領域の流体を連行作用(エントレイメント)により取り込む。そのため、出口部での流出量は入口での流速が自由流風速のままであると仮定した場合よりも増大する

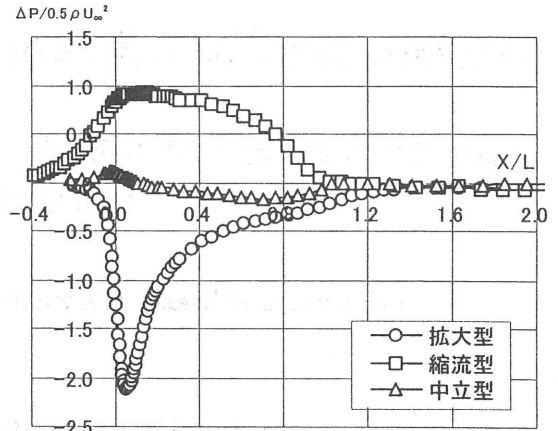


Fig.3 Distribution of the static pressure difference

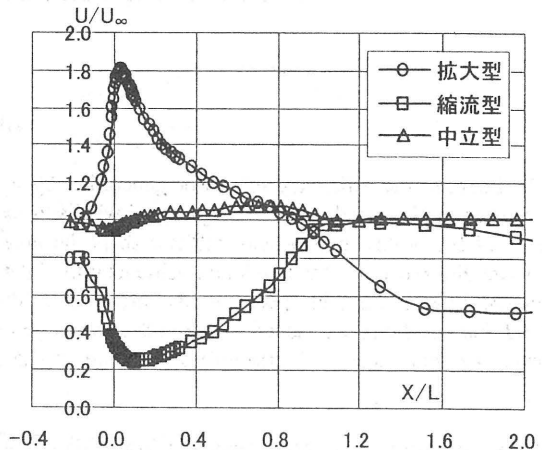


Fig.4 Distribution of wind speed

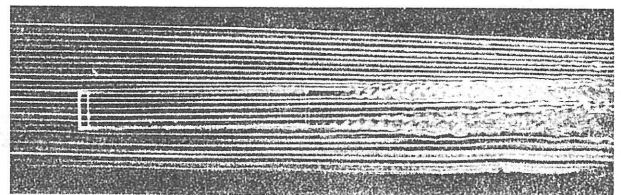


Fig.5 Flow pattern for neutral type

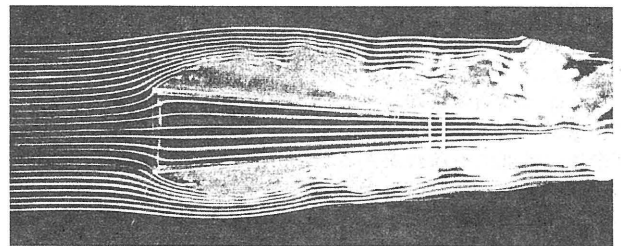


Fig. 6 Flow pattern for contraction type

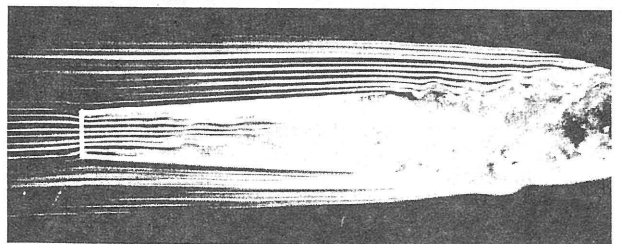


Fig. 7 Flow pattern for diffuser type

(この現象は噴流の実験により確かめられている)<sup>3)</sup>。このため、構造体内部は低圧となり、流れは吸い込まれ加速される。次に②については、構造体の出口部において拡大領域部分の流体の流れは遅くなっている。構造体周囲の流れは速いため、この遅い流体を連行してゆく。このため構造体の出口付近は低圧になり、この低圧部に向かって流体が流れ込むため流速が加速される<sup>4)</sup>。以上の2つの効果により、拡大型の入口付近では風速が加速されるものと思われる。Fig.8はこの機構を模式的に示したものである。流れの様子を可視化したFig.7の写真によく対応していることが解る。集風のために風車を包み込む中空構造体の基本形状は、拡大型の形状が有効であることという結論を得た。

構造体内部に生じる低圧を利用して入り口から効果的に風を取り込むためには開き角が重要である。最適な開き角を求めるため、拡大型模型の開き角度を変化させ、それぞれの角度での最高風速  $U_{max}$  を求めた。その結果を Fig.9 に示す。用いた模型の形状は、長さ ( $L=60\text{cm}$ ) と入口断面の間口長さ ( $D=40\text{cm}$ ) を固定して、開き角度を  $2^\circ$ 、 $4^\circ$ 、 $6^\circ$ 、 $8^\circ$  と変化させた。Fig.9 から、開き角度と最大風速の関には、極大値が存在することがわかる。その極大値をとるときに角度が、加速効果をもっとも大きくなる最適な角度と言える。図から判断して、その値は  $4^\circ$  付近であると考えられる。この値は断面形状が円形状の拡大管に対しても最適であることを実験により確認した。以後の実験では、拡大管の開き角度は  $4^\circ$  に設定している。

## 2. 穴あき平板による加速

狭いところを通り抜ける風が速くなることはよく知られた現象である。この現象を集風装置に利用するため、中央部に穴の空いた円盤を通り抜ける流れがどのように加速されるかを調べた。Fig.10に使用したモデルを示す。Fig.11は流れ方向速度の横断方向分布を示している。値は円盤の後端から直径程度後方の位置における測定値を近寄り風速で規格化したものである。Fig.11から解るように、穴を通る流れは、開口率（全断面積に対する穴の断面積の比率）が0.4程度より小さければ、1.3~1.4倍加速される。この加速現象は、円盤により流れが妨げられるため障害物背後の圧力が低下すること、縁での剥離のため穴の断面積が実質的に小さくなることによる。

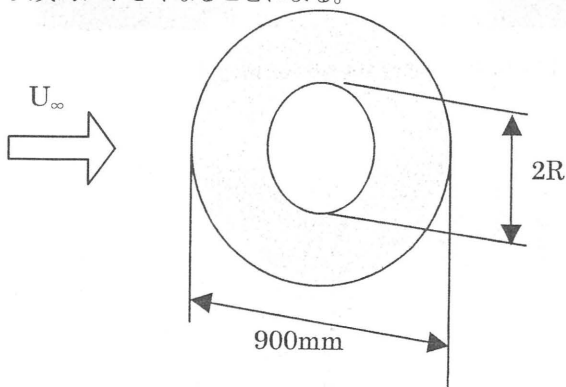


Fig.10 Ring model

## 3. 組み合わせによる加速効果の向上

拡大管と中央部に穴のあいた平板を組み合わせることにより、それぞれの加速効果を取り入れることができる。また、入り口部に案内板（“インレット”）を設けることにより流れ込む時の抵抗を下げることもよにより加速効果を上げることができるため必ずしもよい方向に働くとはいえない。拡大管の長さによる違いと、穴あき平板（“鏝”）と案内板の有無によりどのように最大風速が変化するか

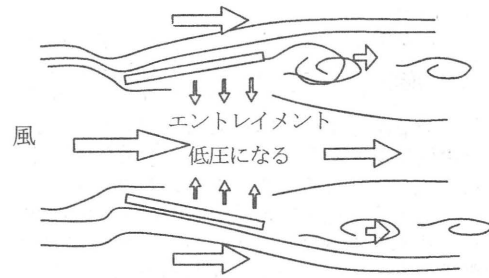


Fig.8 Schematic drawing of the mechanism for the acceleration of wind speed

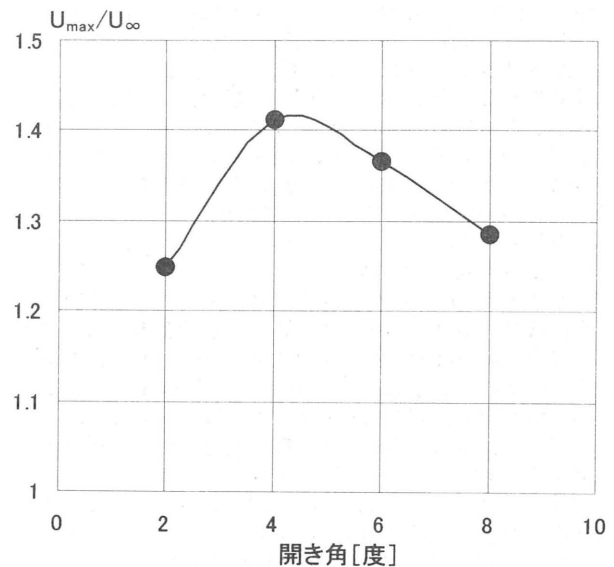


Fig.9 Relation between the diffuser angle and the maximum wind speed

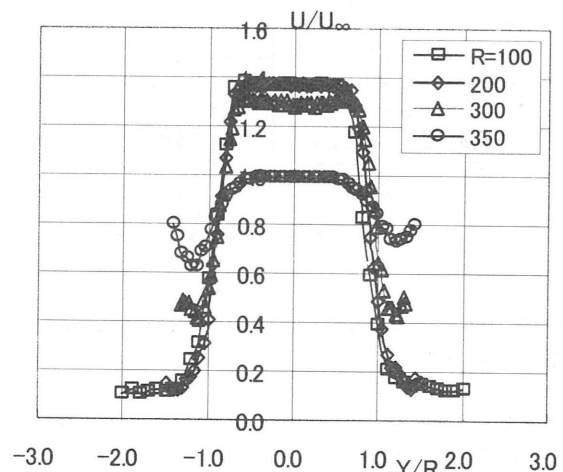


Fig.11 Wind speed through the ring

を Fig.12 に示す。鏝とインレットの効果は拡大管の長さにより非常に異なる。拡大管に鏝を付けることは常によい効果をもたらす。しかし、インレットについては、インレットをつけることは常に加速効果を促すわけではなく口径の2倍程度より短い拡大管に対しては悪影響を及ぼす。拡大管の長さが2倍程度より長いと互いに加速に対してよい効果をもたらす。特に、3倍を越えると単にそれぞれの効果の和ではなく相乗的な加速効果を示す。

#### 4. 発電効率の向上

前節では、中空の構造体を用いることにより、風を集め周辺風速よりも高風速の風を得ることができることを示した。この集風システムが発電効率の向上に役立つことを確かめるため、風車を集風装置の高風速領域に配置して風車の行う仕事率（単位時間あたりの発電量）がどの程度向上するかを調べた。Fig.13はこの計測システムの模式図である。トルクモーターによって抵抗を掛けることにより回転数を変化させ、その時に風車が發生するトルクを測定することによって仕事率を求めた。従って、発電機の効率の違いによる発電効率への影響はなく、翼の効率の差のみが発電効率に影響することになる。測定は2種類の自作の翼および市販の翼の3種類について行った。翼の回転半径は27.5cmである。翼は直径7cmのアルミ製のボス部に取り付け、このボスを直径1.2cmの回転軸に取り付けるようにした。風速は8m/sに設定した。Fig.14は実験の様子を示した写真である。測定時には、壁の影響を抑えるため風洞の天井と左右の壁を外した。集風装置は拡大管として入り口の直径  $D=60\text{cm}$  長さ  $L=75\text{cm}$  開き角度4度のアルミ製の円錐台と円錐台の後端外側に30cm張り出すように付けた円形状の鏝から成っている (Fig.14 参照)。入り口直径に対する長さの比が1.25であるため、インレットは付けていない。風車は入り口に配置した。

風車の性能は、取り込んだ風力エネルギーに対する取り出しうる機械（電気）エネルギーの比（出力係数  $C_p$ ）で表す。出力係数の最大値が大きな風車ほど性能の良い風車であるといえる。風速8m/s、風車の直径0.55mのとき単位時間に風車を通過する風のエネルギーはおおよそ76Wになる。出力の図 (Fig.20) では風車の出力を出力係数ではなく感覚的に把握しやすいワット単位で表している。値を76Wで割ることにより出力係数になる。各風車の出力特性（回転数に対する出力変化）はFig.18にまとめて示す。図中で“+鏝”とあるのは鏝付き円錐台を集風にもちいた時の出力である。

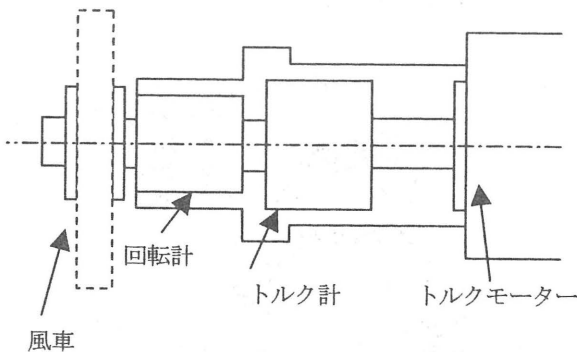


Fig.13 System for measuring the wind-turbine power

##### 4.1 羽子板翼風車

この風車の翼は幅  $5.5 \times 4.5\text{cm}$  長さ  $15\text{cm}$  の台形平板を直径  $1.2\text{cm}$  の円柱に取り付けた形状になっている (Fig.15 参照)。この平板翼の枚数を3、6と変化させて発電性能を調べた。翼の迎角は25度に固定している。風車単体での最大出力係数は0.07~0.14ぐらいになる。このタイプの風車では翼の枚数が多い方ほど最大出力が大きくなる傾向がある。集風装置を用いることにより2~3倍の効率の向上がみられる。

##### 4.2 捻り翼風車

風車の翼は、幅  $6.4 \times 4.5\text{cm}$  長さ  $26\text{cm}$  の台形平板を迎角が翼の取り付け部において20度、先端部において0度になるように捻ったものである (Fig.16 参照)。翼の枚数が

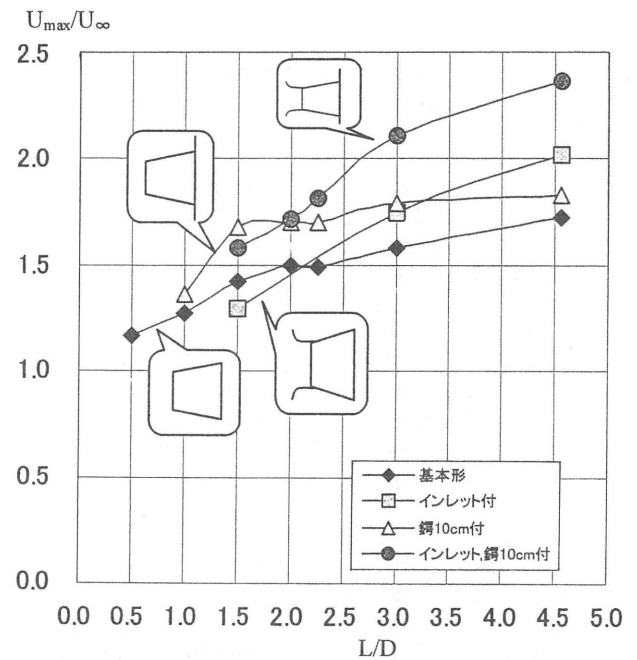


Fig.12 Maximum wind speed for various shapes

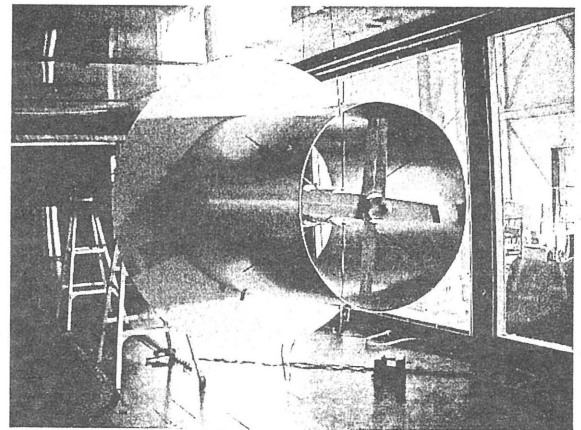


Fig.14 Picture of the power model

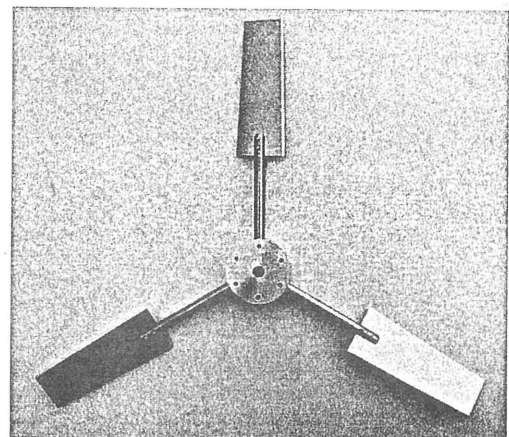


Fig.15 Hagoita-wing fan

4枚の風車の性能を調べた。風車単体での最大出力係数は0.18である。集風装置を用いることにより1.8倍の効率の向上がみられる。前節の平板翼風車と比較すると、最大出力係数の大きな捻り翼風車では効率の向上の割合が小さくなっている。このことは、集風装置による効率の向上が風車単体の性能に依存しており、効率の向上は最大出力係数の小さな風車に対して顕著であることを示している。しかし、高効率な風車に対しても、集風装置が有効であることを示すため、市販の高効率な風車を用いて実験を行ったのでその結果を次節で示す。

#### 4.3 高効率な風車

集風装置を用いると市販の風力発電の効率をどの程度改善する事ができるかを調べた。効率が良いと評判のSouthWest Wind Power社製（日本ではゼファー製として販売されている）の風車を用いた。風車の直径が117cmあるため、先端部を切り落とし、直径が55cmになるようにした（Fig.17参照）。先端部を切り落としていない状態の時の出力係数は0.43あり、このサイズの風車では他に見られないほどよい値を示している。先端部を切り落とし直径が55cmになるようにした時の出力係数は0.34に減少するが、依然としてこの値は数十センチサイズの風車では特筆すべき良い値を示している。集風装置による効率の向上率はおよそ1.8倍であり、性能の良い風車に対してもこの集風装置は有効であるといえる。

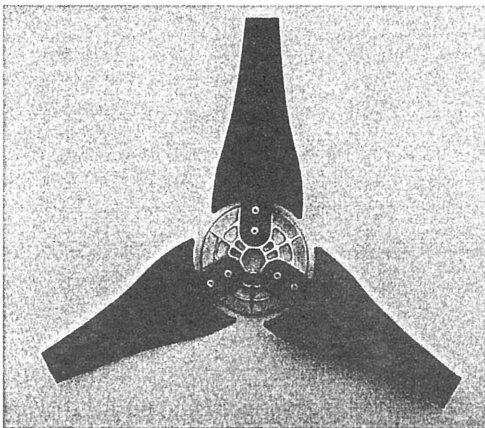


Fig.17 SWWP-wing fan

#### 5 まとめ

風力発電の効率を上げるためには風車に当たる風の速度を増加させることが効果的である。風を集め風速を増加させる集風装置に関する研究を行った。その成果として、以下の結論を得た。

- ① 流れ方向に拡大する中空構造体（拡大管）によって風を集め風速を加速させることができる。
- ② 拡大管の後端外部に鏢状の障害物を設けることにより加速効果はより大きくなる。
- ③ 拡大管と鏢状障害物からなる集風装置によって風力発電の効率を2倍以上向上させることができる。
- ④ 風車の翼形状により効率の向上の程度は大きく異なる。

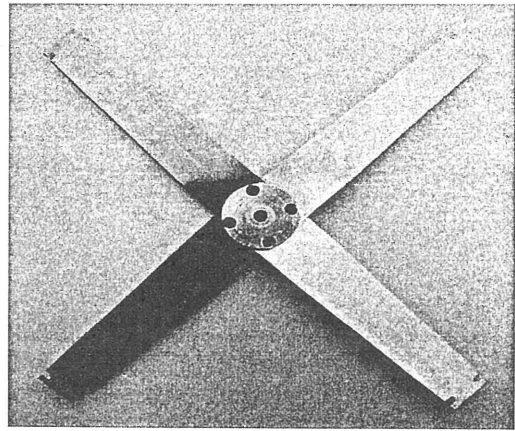


Fig.16 Twisted-plane-wing fan

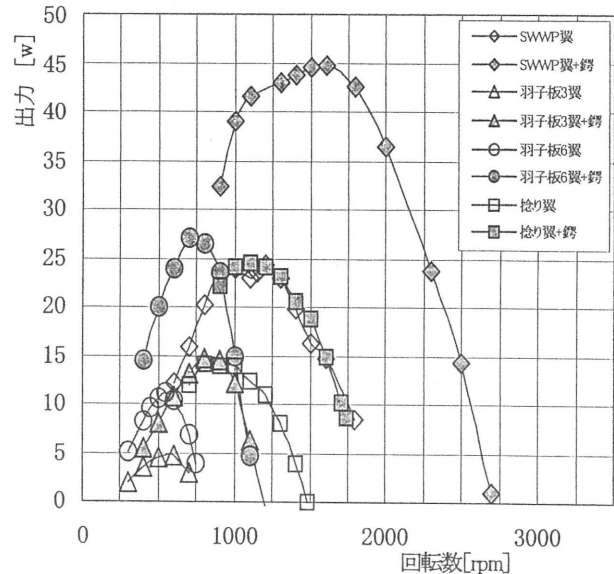


Fig. 18 Power vs. rotational speed of the fan

#### 謝辞

この研究の一部は(株)九州電力および応用力学研究所「研究プロジェクト推進費」の援助で行われました。

#### 参考文献

- 1) 烏谷隆, 深町信尊, 渡辺公彦, 石井幸治, 辰野正和, 大屋裕二: 日本流体力学会年会 2000, 2000, A321
- 2) 宮尾圭一, 烏谷隆, 大屋裕二: 日本航空宇宙力学会西部支部講演会(2000)講演集, 2000, 23
- 3) Pijush K. Kundu: Fluid Mechanics, Chapter12, Academic Press
- 4) 烏谷隆, 深町信尊, 渡辺公彦, 大屋裕二: 日本流体力学会年会 2001, 2001, 587