

# ラジエーターファンを活用した小型風車の性能特性に及ぼす 風車上流の縮小管・拡大管の効果

平野 公孝<sup>1)</sup>・菊地 正憲<sup>1)</sup>・弓削 俊夫<sup>2)</sup>・大川 直康<sup>3)</sup>・加治屋 豪<sup>3)</sup>

## Effects of Nozzles and Diffusers at Upstream of a Small Wind Turbine on the Characteristics of the Wind Turbine

HIRANO Kimitaka, KIKUCHI Masanori, YUGE Toshio, OOKAWA Naoyasu, KAJIYA Takeshi

### Abstract

Thought a radiator-fan of cars had not been designed as a wind turbine, the fan is used as a small wind turbine with the 30cm diameter. Two ways of mounting of the wind turbine impeller are regular-pitch and reverse-pitch types. The characteristics of the wind turbine in a uniform flow are measured. The efficiency of the wind turbine at the regular pitch type is about 12% under the wind velocity 15m/s. In order to improve the efficiency of the wind turbine, nozzles and diffusers are set in the upstream of the small wind turbine. Effects of these nozzles and diffusers on the wind turbine performance are investigated experimentally. Nozzles do not make the wind velocity increase at downstream of the nozzles. As diffusers make the wind velocity increase only near the axis of the diffuser, the efficiency of the wind turbine is not improved with the diffusers.

### Key Words:

Small wind turbine, Efficiency of wind turbine, Electric power generation, Nozzle, Diffuser

## 1. はじめに

近年、地球環境の深刻化、化石エネルギーの枯渇問題に伴い代替エネルギーの積極的な開発が進められている。特に、風力発電はクリーンで枯渇することの無い身近な再生可能エネルギーとして注目されている。小型風車は、建設適地の制限をあまり受けない、大型風車に比べ環境への負荷が少ないなどの利点を持つ。しかし、風車の発電量は受風面積に比例するために、小型風車を使って十分な電力を得ることは困難となっている。

この問題の改善のために、風車の発電量は風速の3乗に比例する性質を利用し、小型風車に流入する

風速を増加させる工夫が必要となる。その工夫の一つとして、風車の上流側に縮小管または拡大管を設置して、これら管路系の“気流のレンズ効果”による流れの集中化と増速化を目指す研究もなされている<sup>1)</sup>。

そこで本論文では、以下のことを明らかにすることを目的とする。

- (1)自動車で使用されているラジエーターファンを小型風車として活用した場合に、その風車特性を実験的に計測する。
- (2)この小型風車の出力を向上させることを目指して、縮小管と拡大管を風車上流に設置した場合に、これらが小型風車の発電量や効率などの特性に及ぼす効果を分析する。

1) 機械システム工学科教授  
2) 機械システム工学科技官  
3) 機械システム工学科4年

## 2. 風車の特性と試験風車

## 2.1 風車特性

風車の性能評価に用いられる特性係数は、下記のように定義される。ただし、主な記号は、 $D$ ：風車の直径 (m),  $A = \pi D^2/4$ ：受風面積(m<sup>2</sup>),  $\rho$ ：空気密度 (kg/m<sup>3</sup>),  $U_\infty$ ：風車への流入風速 (m/s),  $n$ ：風車の回転数 (rpm),  $E$ ：風車の出力電圧 (V),  $R$ ：負荷抵抗値 ( $\Omega$ ),  $P_G$ ：風車の発電量 (W),  $\eta$ ：風車効率などである。

### (1) 発電量 $P_G$

試験風車の総合的な効率の評価を行うため、風から風車を取り出した最終的なエネルギー量は、発電量  $P_G$  として次式で定義される。

$$P_G = \frac{E^2}{R} \text{ (W)}$$

### (2) 風車効率 $\eta$

発電機などを含めた風車全体の性能を評価する指標として、風車効率  $\eta$  は次式で定義される。

$$\eta = \frac{P_G}{\frac{1}{2} \rho A U_\infty^3} \times 100 \text{ (%)}$$

## 2.2 試験風車

実験で使用された試験風車を図2.1に示す。風車の羽根車はトヨタ自動車のスターレットに使用されたデンソー製ラジエターの冷却ファンであり、風車の発電機はラジエターの直流モーターである。直径のきわめて小さい風車を得るために、このファンを小型風車として転用した。図2.2に風車の寸法および各部の名称を示す。風車直径  $D$  は、30cm である。

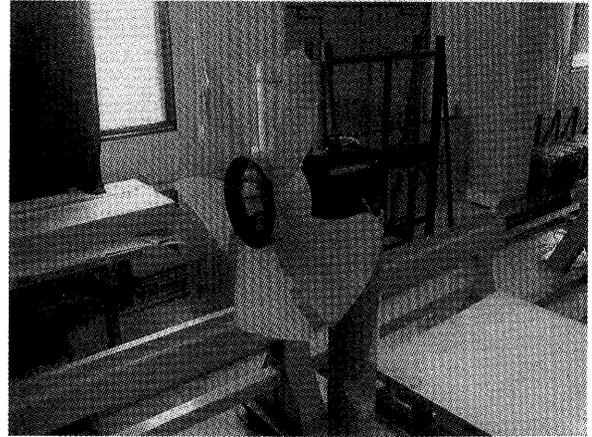
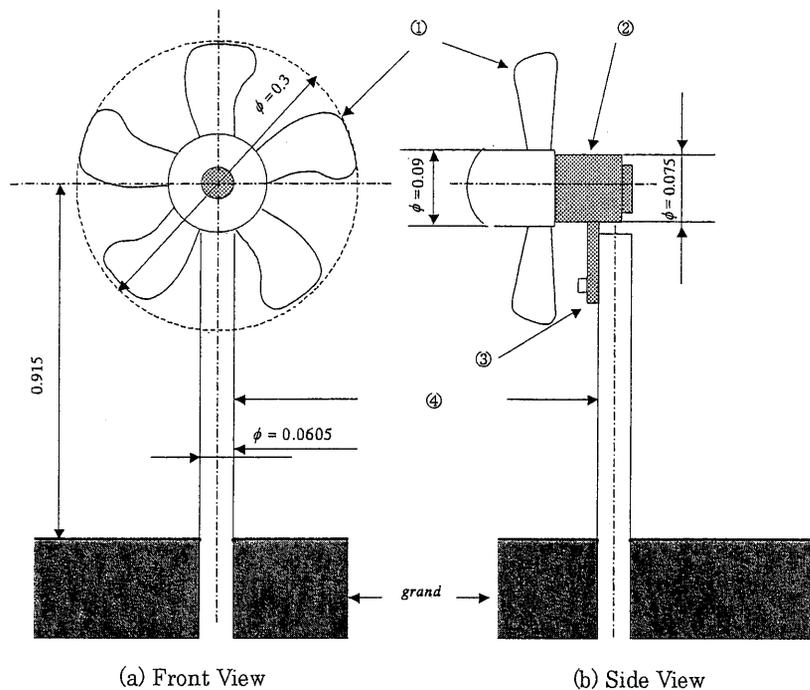


図2.1 順ピッチで取り付けられた試験風車



- ①ブレード : 風車の羽根 ( $D=30\text{cm}$ )
- ②モーター : 冷却ファン用直流モーター (デンソー)
- ③固定金具 : 風車と支柱を支える金具
- ④タワー : 試験風車を支える支柱

図 2.2 風車各部の寸法と名称 (寸法の単位 : m)

### 2.3 風車の羽根の取り付け方

試験風車はラジエーターファンを活用した小型風車であるので、実験において風車羽根車は図2.3に示す二種類（逆ピッチ風車、順ピッチ風車）の方法で取り付けられた。

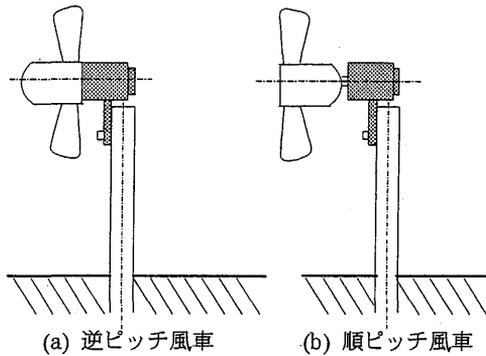


図 2.3 風車の羽根車の取り付け方

ファンのブレードは風を効率的に送り出すためにねじられている。このため、図2.3(a)のようなファンの取り付け方は、風車の立場から見ると逆のねじりとなるため、逆ピッチ風車と呼ぶことにする。一方、図2.3(b)のようにブレードの前面と後面を逆に取り付けた場合を、風車の立場から順ピッチ風車と記すことにする。

## 3. 実験装置および実験方法

### 3.1 実験装置の概略

風車の性能試験に使用した実験装置の概略図を図3.1示す。小型風車は、宮崎大学に設置されている大型乱流風洞の測定部に置かれている。ただし、

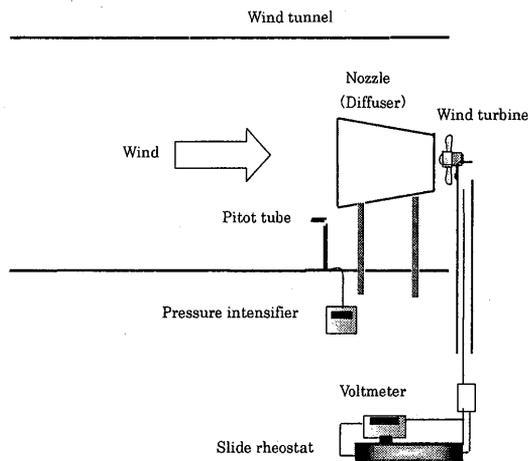


図3.1 縮小管(拡大管)付き風車の実験装置の概略と測定系

風車の置かれている部分の測定部壁面は取り除かれ、開放型の測定部となっている。

### 3.2 測定システムと実験方法

本実験の測定対象は、風車への流入風速  $U_\infty$ 、風車の回転数  $n$ 、風車の出力電圧  $E$ 、電力を消費する摺動抵抗器の抵抗値  $R$  である。

主な物理量の計測方法は、以下である。

- ①流入風速：空気の流入速度は、ピトー管から得られる動圧をデジタルマノメーターにより計測し求められる。
- ②風車の回転数：本研究では光ファイバセンサを回転計として使用しており、その出力は反射光の on, off に対応した0または1の2値関数である。この1から0に降りる時刻から次の1から0に降りる時刻までを風車の周期と定義し、周期の逆数をこの時刻における風車の周波数とした。これの平均値として回転数が測定される。
- ③出力電圧：発電された電流は直流であり、計測された電圧は全て正の値である。発電された電流は電圧を落としてパソコンに取り込まれ、計算する際に校正値をかけて実際の電圧を求める。この電圧の総和を総データ数で割り、平均の出力電圧とした。

実験方法の概略は、はじめに摺動抵抗器の抵抗値を設定し、次いで大型乱流風洞により決められた流速を持つ気流を発生させる。このときに、風車の回転数および出力電圧を測定する。風車への流入風速は、1m/s 刻みで風速 7m/s~16m/s までの範囲で与えられる。また、発電回路の抵抗値は、5Ω, 10Ω, 20Ω, 30Ωと変化させられる。

### 3.3 実験データの再現性の確認

風車特性の測定実験の再現性を確認するための資料の一例として、順ピッチ風車の発電出力と流入

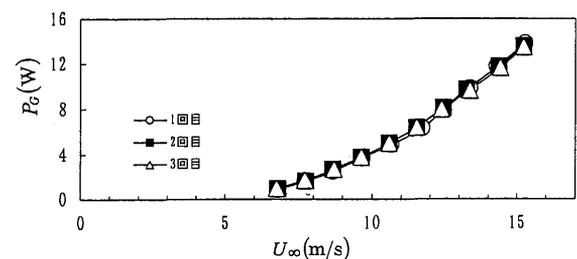


図3.2 発電出力の計測実験の再現性

風速との関係を図 3.2 に示す。3 回の実験結果はきわめて良く一致しており、実験の再現性は十分確保されていると判断できる。また、この小型風車が発電を開始する風速は、約 7m/s であることも示されている。

#### 4. 管路なし風車の諸特性の実験結果

後述のような風車上流域に縮小管または拡大管の管路を設置しない場合の風車を、管路なし風車と表示する。この管路なし風車の特性の計測結果を以下に示す。図 4.1 には出力電圧、図 4.2 には回転数、図 4.3 には発電量、また図 4.4 には風車効率に及ぼす流入風速の影響をそれぞれ示す。これらの各図の (a) には逆ピッチ風車、(b) には順ピッチ風車に関する結果を示す。更に、各図面には、負荷抵抗として 5Ω、10Ω、20Ω、30Ω に設定された場合の曲線がそれぞれ示されている。

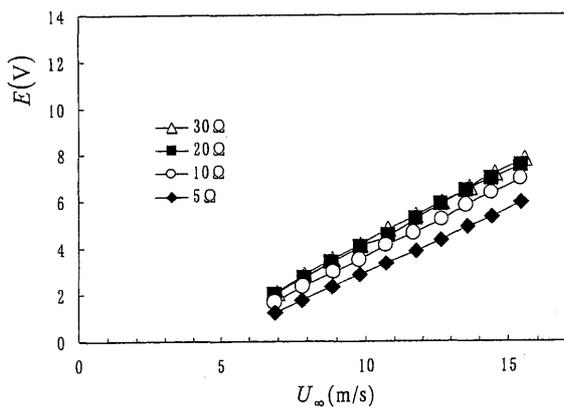
図 4.1 の出力電圧、および図 4.2 の回転数は、流入風速の増大と共にほぼ直線的に増加していること

が示されている。一方、図 4.3 の発電量は、流入風速と共にほぼ 3 乗に比例して増加している。順ピッチ風車の発電量は、当然ながら逆ピッチ風車に比べて大幅に増加している。また、負荷抵抗が減少すると発電量も増加していることが確認できる。ラジエーターファンの転用であっても、順ピッチ風車は約 15m/s の風速の下で 13W 程度の発電量を作り出せることが確認できた。

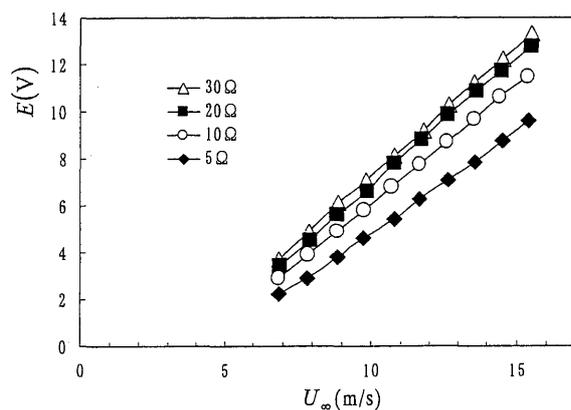
図 4.4 の風車効率では、順ピッチ風車の場合には風速が約 11m/s で最大効率となり、その後は効率が少し減少する。負荷抵抗が 5Ω では、風速約 15m/s で効率は 12% 程度となり、10Ω では約 11m/s の風速で 9% の効率となる。一方、逆ピッチ風車の場合には、流入風速が約 10m/s を越えると効率はほぼ一定となる。負荷抵抗が 5Ω では、効率は 5% である。

#### 5. 管路付き風車の性能特性

小型風車の性能を向上させるために、風車上流域に縮小管または拡大管を設置する考えは種々提案さ

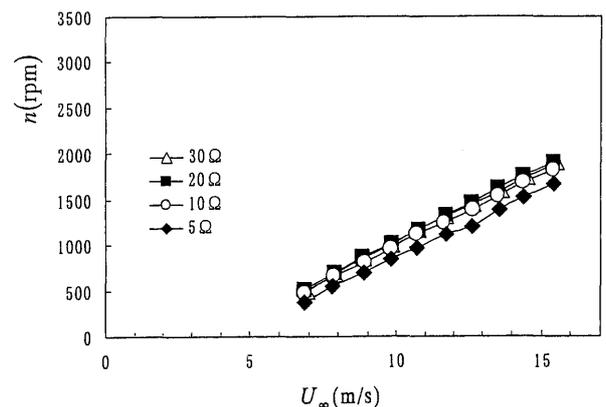


(a) 逆ピッチ風車

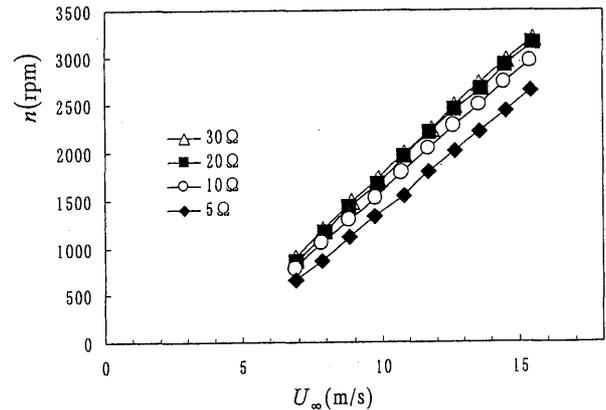


(b) 順ピッチ風車

図 4.1 小型風車の出力電圧

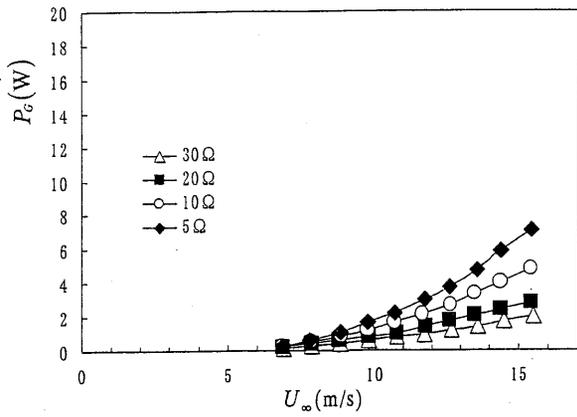


(a) 逆ピッチ風車

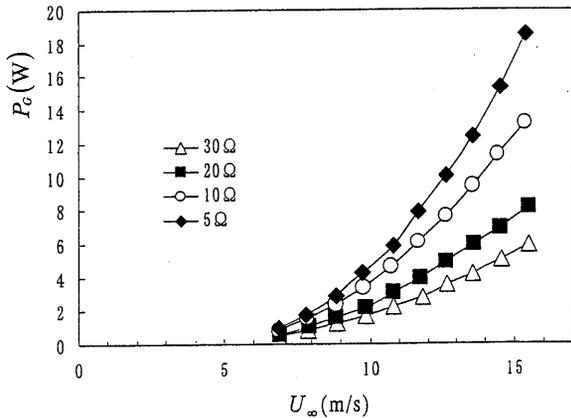


(b) 順ピッチ風車

図 4.2 小型風車の回転数

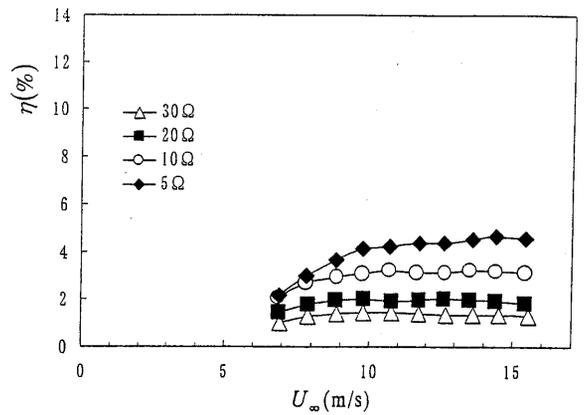


(a) 逆ピッチ風車

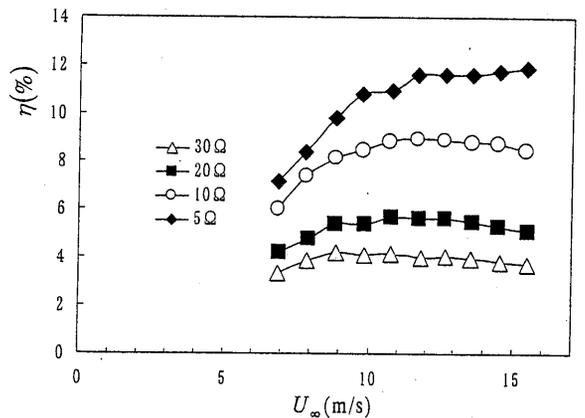


(b) 順ピッチ風車

図4.3 小型風車の発電量



(a) 逆ピッチ風車



(b) 順ピッチ風車

図4.4 風車効率

されている。しかし、これら管路が風車特性の改善に及ぼす具体的な効果については、ほとんど報告されていない。

本節では、はじめに縮小管または拡大管の下流域の流れ場を測定し、次いでこの流れ場に小型風車が設置された場合の風車特性を実験的に明らかにする。

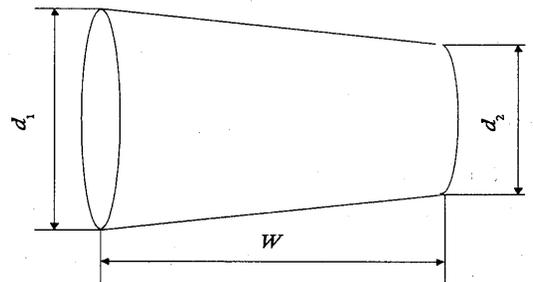
### 5.1 管路形状

図5.1に、本研究で使用する縮小管または拡大管の形状を示す。縮小管と拡大管は、入口と出口を入れ替えたものである。

縮小管の縮小率  $a$  と拡大管の拡大率  $b$  は、それぞれ管路の入口面積と出口面積の比として次式で定義される。

$$\text{縮小率: } a = (d_2/d_1)^2, \quad \text{拡大率: } b = (d_1/d_2)^2$$

縮小管（拡大管）は4種類作成されたが、本論文では以下の縮小管（拡大管）の結果のみを示す。



$d_1$ : 縮小管入口(拡大管出口)の直径  
 $d_2$ : 縮小管出口(拡大管入口)の直径  
 $W$ : 管路の長さ

図5.1 縮小管（拡大管）の形状

縮小管入口（拡大管出口）の直径は  $d_1 = 467\text{mm}$  あり、縮小管出口（拡大管入口）の直径は  $d_2 = 330\text{mm}$  である。管路の長さは、 $W = 520\text{mm}$  である。この場合には、縮小管の縮小率は  $a = 0.5$  となり、拡大管の拡大率は  $b = 2.0$  となる。

縮小管として用いた場合には、風車の直径が

300mmであり、出口の管壁と翼先端との隙間は15mmとなる。

## 5.2 管路の下流域の流れ

定温度型熱線流速計により縮小管（拡大管）の下流域の主流方向風速  $U$  が、サンプリング周波数500Hz、測定時間8.192s、サンプリングデータ数4,096個のデータに基づいて測定された。ただし、熱線流速計の計測方法の限界として、乱れの強い部分で流れが主流方向から大きく傾く場合には、主流方向速度を正確に測定することがむずかしくなる。今回の計測では、それらのデータを省いた有効データのみを使って主流方向速度の平均値を計算した。

管路出口から流速測定位置までの主流方向の距離を  $L$  とし、風車の直径  $D$  として、 $L/D=0, 0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 1.5$  における主流と直角する各断面内の主流方向速度が測定された。その結果、管路の断面形状は軸対称形であり、各測定断面内の全体的な速度分布もほぼ軸対称状となっている。

以下に、その結果の一部として管路出口位置 ( $L/D=0$ ) における管路中心線の縦方向の位置  $z$  に沿う主流方向風速  $U$  の分布を示す。ここで、管路への流入風速  $U_\infty$  は6m/sである。

図5.2は、縮小率0.5の縮小管出口において位置  $z$  に沿う主流方向風速  $U$  の分布である。縮小管出口の速度分布は、ほぼ流入風速  $U_\infty$  と同じ値の一定値を取っている。即ち、縮小管では流れは増速されていないことを示している。通常の管路系では管路断面積を縮小すれば、質量保存の法則から管路内流速は増加することになる。しかし、開かれた空間内に置かれた縮小管の場合には、流体は強制的に縮小管内を流れず、管の外部を流れてしまう。縮小管は流れに対して単なる障害物の役割りを果たすことになる。

一方、図5.3には、拡大率2.0の拡大管出口において管路中心線の縦方向の位置  $z$  に沿う主流方向風速  $U$  の分布を示す。拡大管出口の速度分布の特長は、拡大管出口壁面近傍では、流速が遅くなっている。これは、拡大管入口の管壁で流れがはく離することにより形成されるはく離せん断層が、管壁に再付着せずに拡大管出口まで延びていることを示している。はく離せん断層内の流れは低速であるため、拡大管中心部の流れは拡大管に流入する風速より

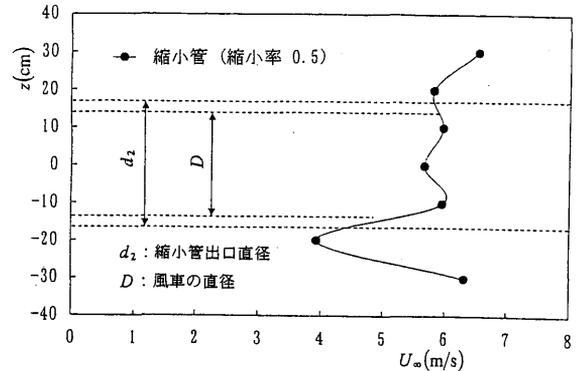


図5.2 縮小管出口における主流方向速度分布

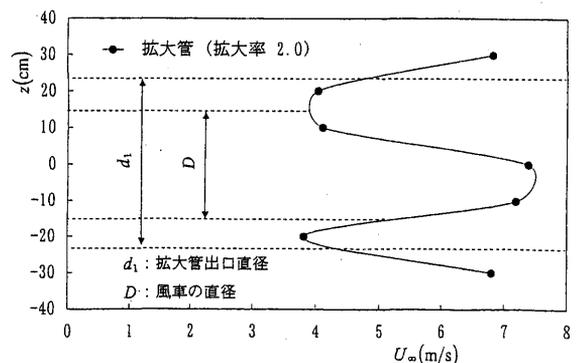


図5.3 拡大管出口における主流方向速度分布

も増速される。管中心部では管路を拡大することにより、むしろ流れの増速効果が得られている。これは、鳥谷らの結果<sup>(1)</sup>と同じである。開空間において管路内を通る流体は、閉空間における“常識”と異なった振る舞いを示すことは、大変興味深い。

## 5.3 管路付き小型風車の特性

小型風車の上流部に縮小管を置いた場合に縮小管付き風車、拡大管を置いた場合を拡大管付き風車と表示する。また、管路を置かない場合には、前述のように管路なし風車とする。

図5.4から図5.7の各図は、拡大付き風車(拡大率2.0)、縮小管付き風車(縮小率0.5)および管路なし風車に関して、それぞれ回転数、出力電圧、発電量および風車効率の流入風速による変化を示す。図5.4と図5.5より、回転数と出力電圧はいずれの風車に対しても流入速度に直線的に変化する。拡大管付き風車の回転数と出力電圧は、他の二つの風車に比べてわずかに小さい値を示している。

図5.6は、管路なし風車の発電量が、拡大管付きおよび縮小管付き風車のそれよりも多少大きな値をとることを示している。更に、図5.7より、拡大

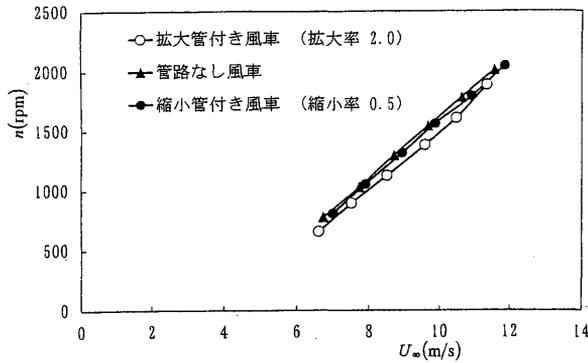


図5.4 管路付き小型風車の回転数

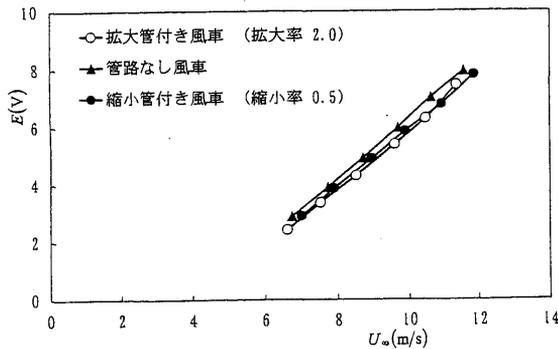


図5.5 管路付き小型風車の出力電圧

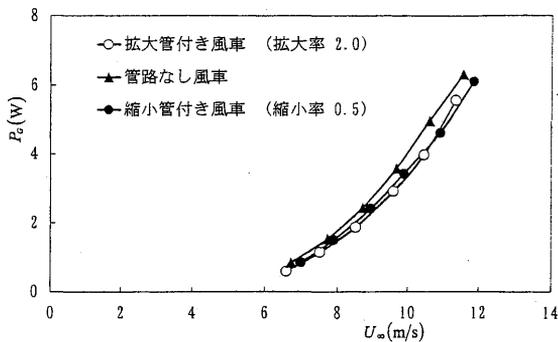


図5.6 管路付き小型風車の発電量

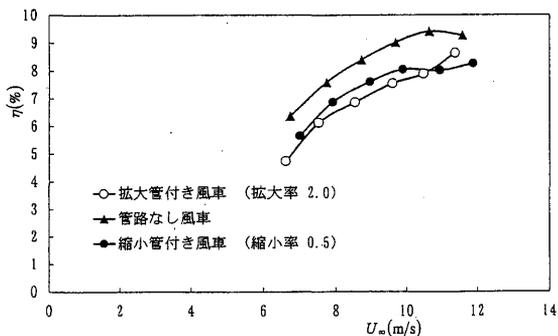


図5.7 管路付き小型風車の風車効率

管付き風車の風車効率は縮小管付き風車の風車効率よりわずかに低くなっている。また、管路なし風

車の風車効率はこれら二種類の風車効率よりも1%程度高くなっている。

従って、図5.2で示したように風車上流に設置した縮小管の下流域に対する増速効果がなく、風車効率はむしろ減少する。一方、図5.3の拡大管下流の速度分布が示すように、拡大管の増速効果が認められるが、この範囲は拡大管の管軸中心部分である。即ち、風車のハブに相当する範囲であり、風車の発電量の増大、更に風車効率の向上には寄与しない。逆に、風車の翼先端部は拡大管の入口端で生じたはく離せん断層の低速領域に存在しており、風車効率を低下させている。このように風車上流部に置かれた縮小管および拡大管は、小型風車の効率向上をもたらさないことが明らかにされた。

## 6. まとめ

本来風車として設計されていない自動車用ラジエーターファンを小型風車として転用し、その性能特性を明らかにした。また、ディフューザやノズルが風車特性に及ぼす効果を調べた。得られた主な結果は、以下である。

- (1) 順ピッチ風車として利用する場合に、風速約15m/s、負荷抵抗5Ωの条件下では風車効率は12%程度になる。
- (2) 逆ピッチ風車として用いる場合には、当然ながら風車効率は約5%の低い段階に留まる。
- (3) 風車上流部に縮小管または拡大管を単純に置いただけでは、管路の増速効果による風車効率の向上は期待できない。

## 参考文献

- (1) 鳥谷, 深町, 他4名, ディフューザーによる増速効果, 日本流体力学会年会2000講演論文集, 2000, 429-430.