

## クロスフロー風車の高性能化に関する研究\*

### (ガイドベーン付リングディフューザによる出力増強方法について)

清水幸丸\*<sup>1</sup>, 高田 実\*<sup>2</sup>, 坂田 甚作\*<sup>3</sup>

## Development of a High-Performance Cross-Flow Wind Turbine (On the Effects of Ring-Diffusers and Multiple-Guide Vanes on the Power Augmentation for a Cross-Flow Wind Turbine)

Yukimaru SHIMIZU, Minoru TAKADA and Jinsaku SAKATA

The purpose of this study is to determine experimentally the effect of multiple guide-vanes and ring diffusers on the power augmentation for a Cross-Flow wind turbine. Wind tunnel experiments have been carried out for various parameters including the number of the blades of the Cross-Flow rotor, pitch angle, and the configuration of the ring diffusers and guide-vanes. The optimal configuration of the guide-vanes and the rotor is determined. Comparative studies have been undertaken with reference to relevant previous investigations to determine the  $C_p$  of the Cross-Flow wind turbine with the ring diffusers and the guide-vanes. On the basis of the wind tunnel tests, a field experimental Cross-Flow wind turbine has been developed and tested. The results of the field tests are compared to those of the wind tunnel tests and discussed in details.

**Key Words:** Fluid Machinery, Wind Mill, Cross-Flow Rotor, Ring Diffuser, Guide-Vane

### 1. 緒 言

著者らは、強風況下でメンテナンスフリーで運用できるマイクロ風力発電風車の開発研究を行っている<sup>(1)(2)</sup>。クロスフロー風車は、低回転・高トルク風車であり、自己起動性に優れ、構造がシンプルなので、運用風速も広く、安全性に優れる。しかしながら、単体での出力係数は最大で10%と低い。クロスフロー風車の実用化には、出力改善とともに、時間稼働率向上が重要である。したがって、あらゆる風、すなわち風向・風速の変化に対して高効率のクロスフロー風車の開発が待たれる。このような研究として、赤羽<sup>(3)</sup>、一色<sup>(4)</sup>、Sivapalanら<sup>(5)</sup>の研究があるが、効率その他不明な点が多い。

本研究では、ガイドベーンをもつリングディフューザ付クロスフロー風車について研究し、出力改善と時間稼働率向上にある程度成功したので、その詳細を報告する。また、これまでの他研究者の結果を再検討し、出力係数が大幅に異なる理由を明らかにした。さら

に、本研究の風洞実験で得られた結果に基づいて製作されたフィールド実証機結果と風洞実験結果を比較検討し、実証機でも同程度の出力係数が得られることを明らかにした。以下詳述する。

### 2. 記 号

$R$ : ロータ半径

$n$ : ロータブレード枚数

$\theta$ : ロータブレードピッチ角(図2参照)

$D_{\text{ring}}$ : リングディフューザ直径

$h$ : ロータ天板・底板とリングディフューザとの間隔(高さ方向)(図3参照)

$N$ : ガイドベーン枚数

$L$ : ガイドベーン長さ(図4参照)

$\gamma$ : ガイドベーン角度(図4参照)

$\phi$ : 風向(主流風向とガイドベーンのなす角度)(図4参照)

$b$ : ロータとガイドベーンとの間隔(半径方向)(図4参照)

$A$ : 主流に対するロータ投影面積

$V_{\infty}$ : 主流風速

$\omega$ : ロータ回転角速度

$\lambda$ : 周速比  $= R\omega/V_{\infty}$

\* 原稿受付 1997年11月6日。

\*<sup>1</sup> 正員, 三重大学工学部(☎514-8507 津市上浜町1515)。

\*<sup>2</sup> 正員, 三重大学大学院。

\*<sup>3</sup> 北陸電力(株)地域総合研究所(☎930-0848 富山市久方町2-54)。

$T$ : トルク  
 $\rho$ : 空気密度  
 $\nu$ : 動粘性係数

$$C_P: \text{出力係数} = \frac{T\omega}{1/2\rho AV_\infty^3}$$

$$C_Q: \text{トルク係数} = \frac{T}{1/2\rho AV_\infty^2 R}$$

3. 実験装置および手法

3.1 風洞実験装置および方法 図1には風洞内に設置した実験装置を示す。①リングディフューザ、②供試クロスフローロータ、③回転計、④トルク計、⑤誘導発電機、⑥Göttingen形標準ピトー管、⑦開放形風洞(直径1.8 m)である。風洞実験においては、インバータにより負荷用誘導発電機を制御し、各周速比におけるトルクおよび回転数を計測した。実験における主流風速は10 m/s一定とした。

図2には、供試クロスフローロータおよびブレード

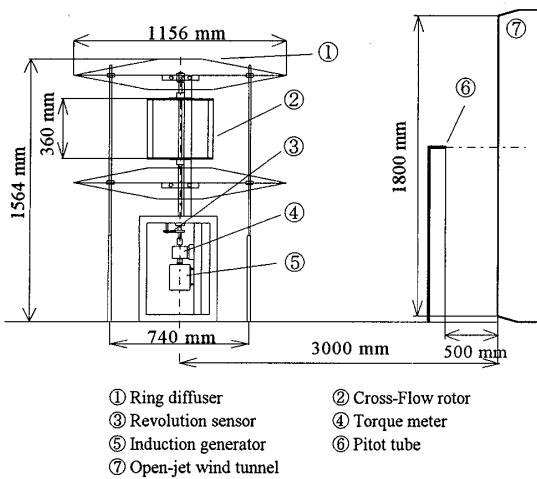


Fig. 1 Experimental equipment

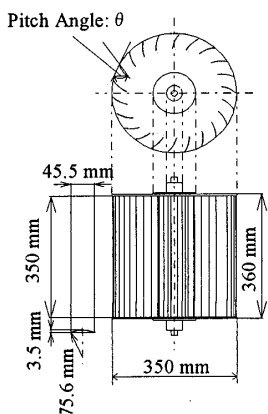


Fig. 2 Cross-flow rotor and blades

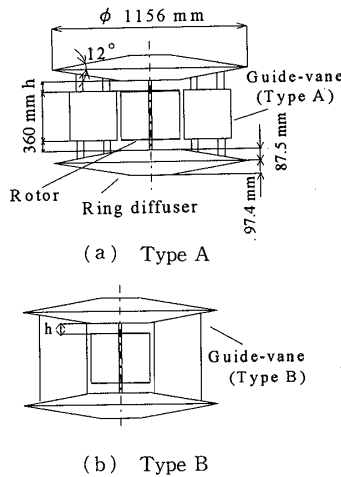


Fig. 3 Configuration of the ring diffusers

の形状を示す。ロータ直径350 mm、高さ360 mm、ロータの天板・底板は5 mm厚アルミニウム製、またブレードは1 mm厚アルミニウム製円弧翼(弦長45.5 mm、曲率半径75.6 mm)である。ブレード数  $n$  を6~45枚、ピッチ角  $\theta$  を20~120°の範囲で変化させた。ロータのアスペクト比(ロータ直径と高さの比)等の形状パラメータは、数多く存在する。これらパラメータと風車性能の関係については文献(6)等で相当明らかにされているので、それらの結果を参照し、設計に用いた。

図3(a), (b)には、本研究で用いたリングディフューザ形状を示す。リングディフューザ(直径  $D_{ring} = 1156$  mm)内にガイドベーン(0.8 mm厚ブリキ製平板)を設置する。ガイドベーン設定方法は、Type AおよびType Bの2種類について検討した。Type Aは、ガイドベーンをロータ高さと同しくし、リングディフューザとガイドベーンの間にすきま  $h$  を保つ。Type Bは、ロータとガイドベーンの間にすきま  $h$  を保ち、リングディフューザとガイドベーンの間にはすきまを設けない。詳細は後に図6で述べるが、Type Aのリングディフューザが高い性能を示す。したがって、本論文では、Type Aのガイドベーンを用いた場合の結果を中心に述べる。

図4には、代表例として、リングディフューザにガイドベーンを6枚設置した場合を示す。ガイドベーン枚数  $N$ 、角度  $\gamma$ 、長さ  $L$ 、および風向  $\phi$  の関係を詳細に検討した。なお、ロータとガイドベーンとの間隔  $b$  は、著者らの研究結果<sup>(1)</sup>を基に  $0.1R$  一定とした。

なお、本報告では出力係数  $C_P$  を求める際、過去の研究<sup>(1)~(7)</sup>で多く使われている評価方法に基づいて、受風面積は翼車投影面積  $A (=0.35 \text{ m} \times 0.36 \text{ m})$  を用いた。

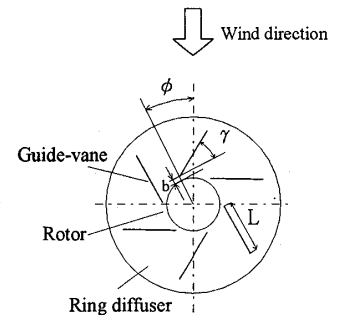


Fig. 4 Configuration of guide-vanes set on the ring diffuser

**3.2 フィールド実験と風洞実験結果の比較** 風洞実験の結果に基づいて、後述の図 11 に示すフィールド実験用クロスフロー風車を製作し、強風況下の海岸線において実証実験を行った。その結果を風洞実験結果と比較検討した。

**4. 結果および考察**

**4.1 リングディフューザ付クロスフロー風車の形状と性能の関係**

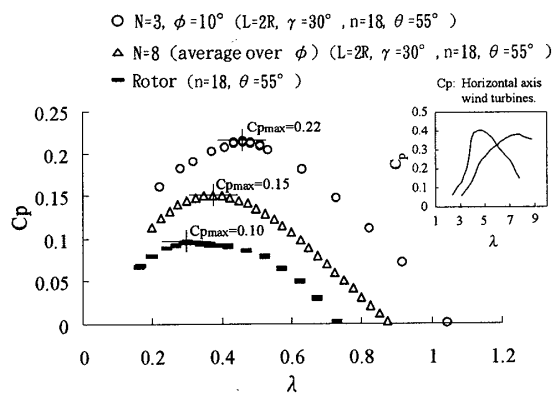
**4.1.1 リングディフューザ付クロスフロー風車の性能(クロスフロー風車と水平軸風車の出力およびトルク係数の比較)** 図 5(a), (b)には、リングディフューザ付クロスフロー風車の出力係数  $C_p$  およびトルク係数  $C_Q$  と周速比  $\lambda$  の関係を示す。ここでは、代表例として、最大の出力係数が得られたガイドベーン数  $N=3$ ,  $\phi=10^\circ$  での結果(○印), 全風向に対する平均出力が最大となる  $N=8$  の結果(△印)を示す。詳細については図 7 で再度述べる。比較のため、ロータ単体の値も一印にて示す。  $N=3$  では、風速比  $\lambda=0.45$  で、最大出力係数  $C_{pmax}=0.22$  となる。また、 $N=8$  では、 $\lambda=0.38$  で  $C_{pmax}=0.15$  である。これらを、ロー

タ単体の  $C_{pmax}=0.10$  と比較すると、それぞれの形状で、出力は 2.2 倍および 1.5 倍ほど改善されることがわかる。この結果を、図 5 中の小図に併記した代表的水平軸風車の特性と比較すると、クロスフロー風車の特徴は以下のように記される。(1)単体での  $C_{pmax}$  は、水平軸風車の  $C_{pmax}$  の 1/4 程度と極めて低い。しかし、リングディフューザ等を用いると、最大で水平軸風車の  $C_{pmax}$  の 1/2 程度にまで改善される。(2)最適周速比( $C_{pmax}$  での周速比)は  $\lambda=0.40$  付近であり、水平軸風車の場合( $\lambda=4 \sim 8$ )の 1/10~1/20 である。したがって、高風速下でも回転数が低く、寿命が長くなり、かつ安全性が高いと推察される。(3)起動時のトルク係数  $C_Q$  が極めて高いため、低風速より回転する。

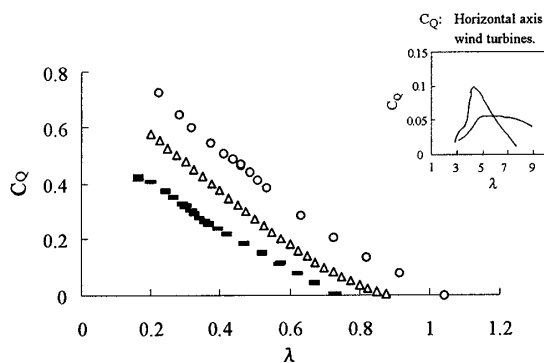
**4.1.2 出力係数とリングディフューザおよびガイドベーン数  $N$ , 設定角度  $\gamma$  および長さ  $L$  の関係**

図 6 には、ガイドベーンの設定角度  $\gamma$  および枚数  $N$  に対するクロスフロー風車の最大出力係数  $C_{pmax}$  の変化を示す。 $C_{pmax}$  は、ガイドベーン数によらず、 $\gamma=30 \sim 60^\circ$  で最大になる。また、 $\gamma=0^\circ$  では傾向が異なり、ガイドベーン数が多いほど  $C_{pmax}$  は小さくなる。これは、ガイドベーンが多いほど、ロータへの流入風が遮へいされるためである。Type A と Type B(図 3)とを比較すると、Type A が高い性能を示す。この理由は、Type A の場合には、すきまを設けることによりリングディフューザ内部への流入量が増加し、結果としてロータを通過する流量も増加したためと考えられる。また、ロータとリングディフューザとのすきま  $h$ (図 3)は、本実験の結果によると、 $h=75 \text{ mm}$  で最も高い出力係数を示した。したがって、以下では、 $h=75 \text{ mm}$  について議論する。

図 7(a)~(d)には、ガイドベーン数  $N$  を 8, 6, 4, 3 とした場合の、風向  $\phi$  に対する  $C_{pmax}$  の変化を示す。○印, □印は、それぞれ、ガイドベーン長  $L=R$



(a) Power coefficient



(b) Torque coefficient

Fig. 5 Performance of the ring diffuser power augmentation systems

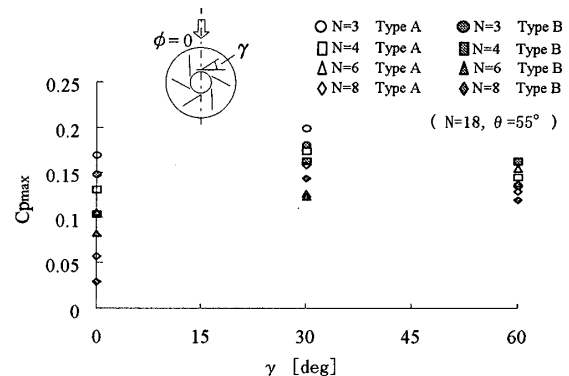


Fig. 6 Optimal guide-vane setting angles

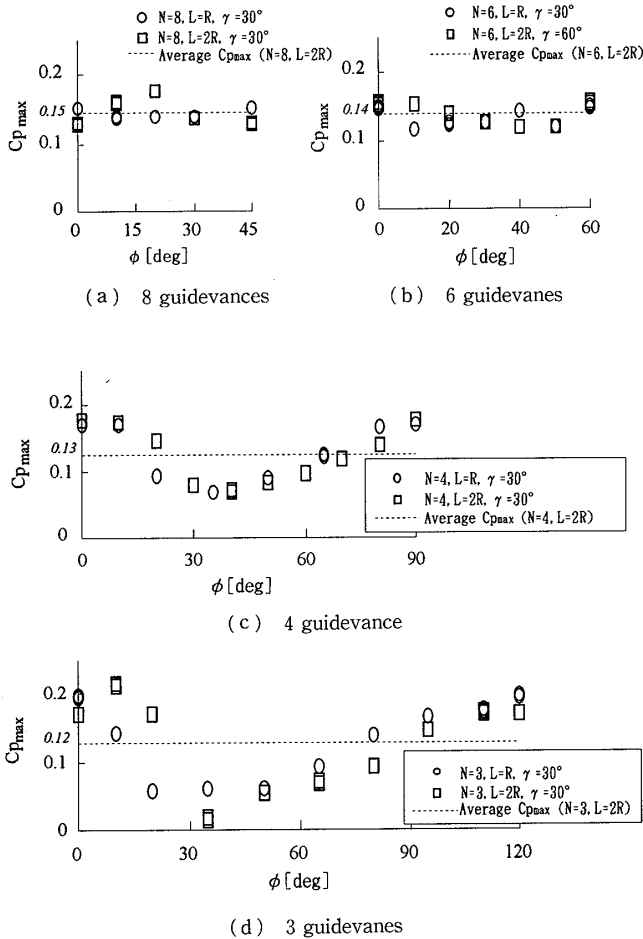


Fig. 7 Direction dependence of the ring diffuser systems

および  $L=2R$  での結果である。  $C_{Pmax}$  は、ガイドベーン数が少ないほど  $\phi$  に対する変化が大きくなる。すなわち、  $N=3$  の場合には、  $C_{Pmax}$  は  $0.22(\phi=10^\circ)$  から  $0.02(\phi=35^\circ)$  まで変化し、変動幅は大きくなる。これに対し、  $N=6$  および  $N=8$  では、全風向に対して変動は小さく、全風向型の特性を示す。平均  $C_{Pmax}$  は、  $N=8$  において最も大きくなり、  $C_{Pmax}=0.15$  になる。

ガイドベーン長  $L=R$  と  $L=2R$  の結果を比較すると、  $C_{Pmax}$  は、ほぼ同様の傾向を示す。全風向平均値を比較すると、  $L=2R$  の場合(点線)がわずかに上回る。図7(d)で、  $L=R$  の場合に、  $\phi=10 \sim 20^\circ$  付近において  $C_{Pmax}$  は相当小さくなるが、これは、ガイドベーン長が短く、またその間隔も広いため、回転に対して抵抗となる流入成分を十分に減少できないことが原因であると考えられる。

**4.1.3** ロータブレード数  $n$  およびピッチ角  $\theta$  とリングディフューザ付クロスフロー風車性能の関係  
図8には、ブレードピッチ角  $\theta$  に対するリングディフューザ付クロスフロー風車の最大出力係数  $C_{Pmax}$  を

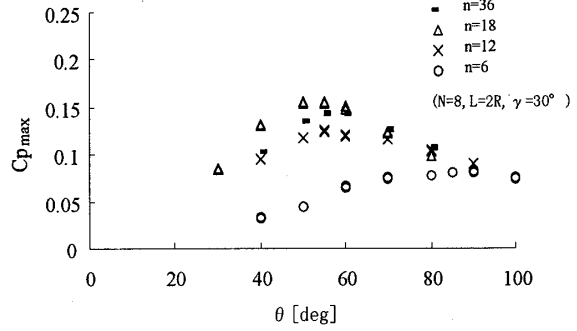


Fig. 8 Change in the optimal pitch angles for the ring-diffuser system as the number of the blades increases from 6 to 36

示す。ブレード数  $n=12 \sim 36$  では、  $C_{Pmax}$  は  $\theta=55^\circ$  で最大となる。  $n=6$  の場合には、最適ピッチ角 ( $C_{Pmax}$  を示すピッチ角) は  $85 \sim 90^\circ$  と特異な傾向を示す。これはブレード数が少ない場合のロータ単体の特性に準ずる [文献(1)]。ブレード数の変化に対し、  $n=18$  の場合に  $C_{Pmax}$  は最大値をとる。したがって、本研究では、  $n=18$ 、  $\theta=55^\circ$  のロータをおもに用いる。

**4.2** リングディフューザ付クロスフロー風車の性能と遮へい効果(近寄り速度)の関係(本実験結果と他研究者結果の相違点の解明)  
赤羽<sup>(3)</sup>、一色ら<sup>(4)</sup>は、ガイドベーンおよびリングディフューザを用いて、クロスフロー風車の性能が  $C_{Pmax}=0.30 \sim 0.40$  になると報告している。これらは、本研究の結果と一致しない。この理由は、実験風速に対する、実験装置の遮へい効果による風速の低下(近寄り速度の低下)の影響によると考えられる。本節では、遮へい効果を定量化し、過去の研究結果を再整理した。

遮へい効果の定量化には、以下の方法を用いた。実験装置を風洞吹出し口より  $3000 \text{ mm}$  (約  $2.6 D_{ring}$ ) 下流側に設置し、主流風速一定のもとで、装置の上流側各位置における風速(近寄り速度)をピトー管を用いて実測した。実験風速を  $V_x$  (風速測定位置:  $X$ ) とすると、遮へい効果を考慮した風車性能を表す係数は、次のように算出される。

$$\lambda' = (V_x/V_\infty) \times \lambda \dots \dots \dots (1)$$

$$C_q' = (V_x/V_\infty)^2 \times C_q \dots \dots \dots (2)$$

$$C_p' = (V_x/V_\infty)^3 \times C_p \dots \dots \dots (3)$$

ここで、  $V_\infty$  は主流風速、  $\lambda$ 、  $C_p$ 、  $C_q$  は  $V_x$  を基準とした遮へい効果修正前の値、  $\lambda'$ 、  $C_p'$ 、  $C_q'$  は  $V_\infty$  を基準とした修正後の値である。

図9には、近寄り速度の実測結果を示す。測定風速は風洞吹出し口より  $500 \text{ mm}$  位置において  $10 \text{ m/s}$  と

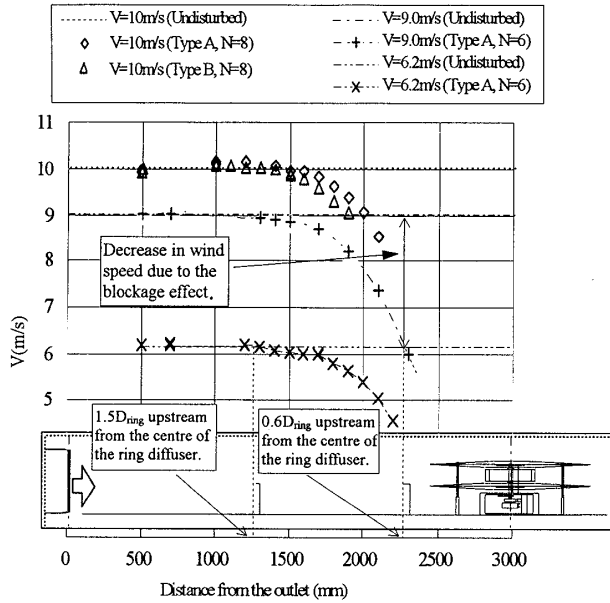


Fig. 9 Decrease in the wind speed due to the blockage effect caused by the experimental system in the wind tunnel

した。Type A(◇印)と Type B(△印)を比較すると、Type Bの場合に近寄り速度の低下が大きいの、また、吹出し口より 500 mm 位置での風速は、遮へい効果の影響を受けていない。

赤羽<sup>(3)</sup>の実験における遮へい効果の影響を定量化するため、レイノルズ数を合せて、近寄り速度を測定した。すなわち、 $V_1 D_1 / \nu_1 = V_2 D_2 / \nu_2$  より、

$$V_2 = V_1 D_1 / D_2 \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $D$  は代表長さ、また、 $\nu_1 = \nu_2$  と仮定した。代表長さをリングディフューザ直径 [文献(3)では円形平板直径] とする。文献(3)の実験条件では、 $V_1 = 18$  m/s、 $D_1 = 400$  mm である。風速測定位置は明らかでないが、装置図より、装置中心より  $0.6 \sim 1.5 D_1$  上流側と推察される。式(4)より、本クロスフロー風車装置 ( $D_2 = D_{ring} = 1156$  mm) を用いてレイノルズ数を一致させると、風速  $V_2 = 6.2$  m/s になる。したがって、本クロスフロー風車装置を用い、装置中心より  $0.6 D_{ring}$  および  $1.5 D_{ring}$  上流側における風速を  $V_2 = 6.2$  m/s とすることにより、装置上流の近寄り速度の変化を検討する。図9には、装置中心より  $0.6 D_{ring}$  上流側の近寄り速度が  $6.2$  m/s の場合を+印で、 $1.5 D_{ring}$  上流の速度が  $6.2$  m/s の場合を×印で示す。+印および×印は本測定値である。 $0.6 D_{ring}$  上流で  $6.2$  m/s の場合は、風洞吹出し口より  $500$  mm で  $V_\infty = 9.0$  m/s となる。 $1.5 D_{ring}$  上流で  $6.2$  m/s の場合は、風洞吹出し口より  $500$  mm で、 $V_\infty = 6.2$  m/s となる。+印の場合、 $V_x / V_\infty = 6.2 / 9.0 = 0.69$ 、×印では  $V_x / V_\infty = 6.2 / 6.2 = 1.0$

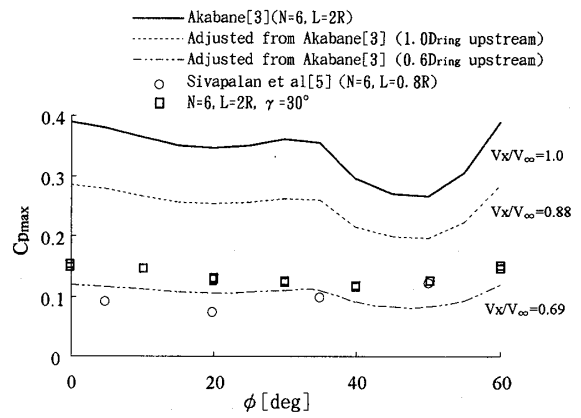


Fig. 10 Comparison of  $C_{Pmax}$  taking the blockage effect into account

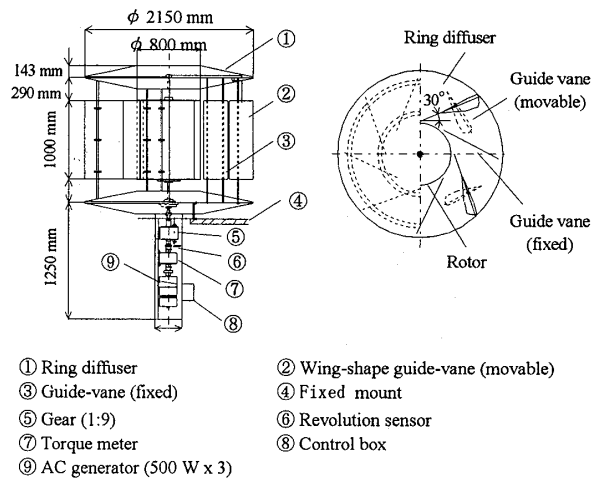


Fig. 11 Experimental set-up for the field test

になる。+印および×印の値から内挿して、クロスフロー装置中心より  $1.0 D_{ring}$  上流での値を求めると、 $V_x / V_\infty = 0.88$  になる。これら近寄り速度修正値を用いて赤羽の  $C_p - \phi$  の関係を修正すると、図10中の、実線(赤羽の実験値、 $V_x / V_\infty = 1.0$ )、点線 ( $V_x / V_\infty = 0.88$ , 内挿値)、二点鎖線 ( $V_x / V_\infty = 0.69$ ) で示ようになる。本研究結果(□印)と比較すると、赤羽の結果は、入力速度をクロスフロー風車中心より上流約  $0.6 D_{ring}$  で測定し、入力速度を低く見積もった結果と同様になると推定される。○印には、Sivapalan ら<sup>(5)</sup>の結果を示す。遮へい効果は考慮済みであると考えられ<sup>(7)</sup>、本研究の結果と同様の傾向を示す。絶対値が低いのは、ロータ性能の影響と考えられる。一方、一色ら<sup>(4)</sup>の実験では、風速測定位置は明らかでないが、装置図より、実験装置に近接していると考えられる。ガイドベーン数12枚、測定風速15 m/s、さらに供試ロータが風洞直径に匹敵するほど大きいことなどから、遮へい効果の影響は大きいと考えられ、実際の  $C_{Pmax}$  は報告され

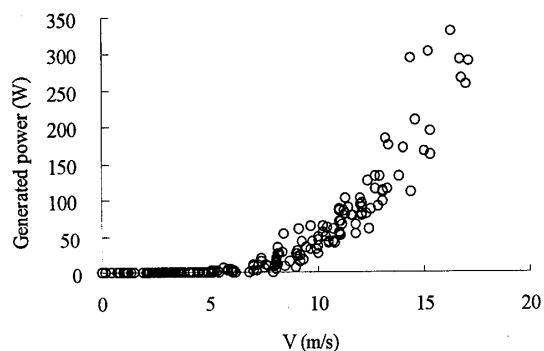


Fig. 12 Generated electric power

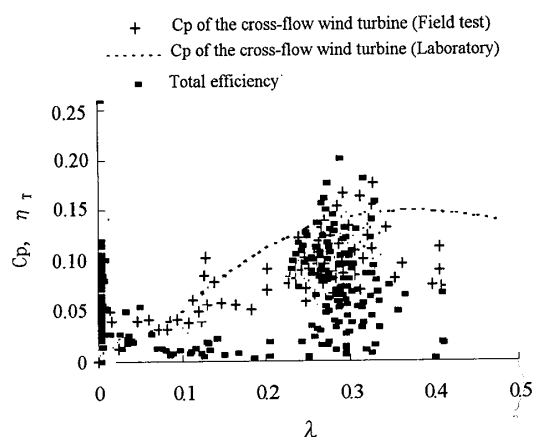


Fig. 13 Power characteristics on the field test compared with the result at the laboratory

ている値よりも極めて低くなると推定される。以上の結果より、他研究者の結果が本研究結果と一致しない理由は、風速測定位置が適切でないためと考えられる。

#### 4.3 風洞実験結果とフィールド実験結果の比較

図 11 には、フィールド実証実験装置を示す。風洞実験において最高効率(全風向平均)を示した形状である。実証機は、8枚のガイドベーンをもつが、そのうち4枚のガイドベーンは2分割構造をとる。すなわち、外側の分割部が翼型構造であり、強風下では自己の揚力により取付ばねの引張力に反して、流入部をふさぐ形となり、安全装置として働く。

図 12 には、風速と発電電力  $P$  の関係を示す。図 12 中には、10 min 平均値を示した。風速 3.5 m/s から発電を開始し、高風速まで安定した発電状況を示す。

図 13 には、周速比  $\lambda$  と出力係数  $C_p$  および総合効率  $\eta_T$  との関係を示す。総合効率は以下の式で表される。

$$\eta_T = P / (1/2 \rho A V^3) \dots\dots\dots (5)$$

出力係数は最大で 0.18 を示し、図 7(a) で示した風洞

実験結果に一致する。図 13 中点線で記した風洞実験の出力係数と、フィールド実験での出力係数(+印)を比較する。両者は、比較的良好に一致している。フィールドでの平均  $C_p$  が低くなるのは、実験条件における運用周速比が最適周速比 0.38 よりも、低い領域に集中したためである(実際運用では、高風速での運転を考えている)。一方、総合効率  $\eta_T$  は、平均すると出力係数よりも若干低くなる。これは、低速回転領域において、発電機効率が低いためと考えられる。したがって、クロスフローロータと発電機との増速比を大きくすることにより、低風速での出力を改善できると考えられる。以上の結果より、リングディフューザ付クロスフロー風車の最大出力係数は、フィールドにおいても風洞実験の結果とほぼ同程度になることが検証された。

## 5. 結 言

リングディフューザ付クロスフロー風車の出力改善について研究し、次のような結論を得た。

(1) 水平軸風車(高回転、低トルク、高効率)に対して、クロスフロー風車は、低回転、高トルク、低効率である。この低効率クロスフロー風車の効率をガイドベーン付リングディフューザを適用して 1.5~2 倍に高めた。また、低回転、高トルクの特徴を十分活用し、安全性の高い実用機を開発した。

(2) これまで研究されていなかった、クロスフローロータのブレードピッチ角およびブレード枚数と、ガイドベーン付リングディフューザとの最適な関係を実験的に明らかにした。

(3) これまでの研究者の出力係数に大きな差があったが、その理由を解明し、リングディフューザ付クロスフロー風車の出力係数がいかなるものか明らかにした。

(4) 風洞実験結果に基づいて、フィールド用実証機を製作し、フィールド実証機でも風洞実験結果と同程度の効率が得られることを明らかにした。

## 文 献

- (1) 清水幸丸・ほか 5 名, 流工部門講論集, No. 95-19(1995), 51-52.
- (2) 清水幸丸・ほか 6 名, 機講論, No. 963-1(1996), 171-172.
- (3) 赤羽正彦, 風力エネルギー, 16-1(1992), 11-15.
- (4) Isshiki, N, ほか 3 名, Proc. IECEC, 4(1986), 1236-1246.
- (5) Sivapalan, S. and Sivasegaram, S., Wind Eng., 4-3(1980), 134-144.
- (6) 牛山泉・ほか 2 名, 太陽エネルギー, 20-4(1994), 36-41.
- (7) Sivasegaram, S., Wind Eng., 2-1(1978), 59-69.