

## MIE 型翼端小翼(Mie ベーン)付水平軸風車の性能と 翼アスペクト比, 翼枚数, レイノルズ数の関係\*

清水 幸丸\*<sup>1</sup>, Edmond ISMAILI\*<sup>2</sup>  
鎌田 泰成\*<sup>1</sup>, 前田 太佳夫\*<sup>1</sup>

### Relationships between Performance of HAWT with Mie Type Tip Vane (Mie Vane) and Blade Aspect Ratio, Number of Blades and Reynolds Number

Yukimaru SHIMIZU, Edmond ISMAILI,  
Yasunari KAMADA\*<sup>3</sup> and Takao MAEDA

\*<sup>3</sup> Department of Mechanical Engineering, Mie University, 1515 Kamihama, Tsu-shi, Mie, 514-8507 Japan

In this paper the relationships between power augmentation of the HAWT due to Mie type tip vane application and other factors influencing the efficiency of a wind turbine such as blade aspect ratio, number of blades, blade pitch angle and Reynolds number are investigated. Experiments have been carried out in a large scale wind tunnel. Rotor models used are respectively 2 and 3 blades wind turbines and 4 sets of blades with different aspect ratio have been experimented. For an existing rotor without Mie vane, a maximum power augmentation about 14.5%, due to Mie vane application, is achieved. The relationships between power augmentation by Mie vane and the above factors are investigated. It is found that the application of Mie vane is more efficient in case of rotors with small aspect ratio and for low wind speeds. Surface oil-film and surface tuft visualization methods are used to detect the flow patterns at the blade tip. Attaching Mie vane, improved flow around blade tip is evidenced.

**Key Words:** Fluid Machinery, Horizontal Axis Wind Turbine, Tip Vane Wind Turbine, Power Augmentation, Flow Visualization

#### 1. 緒 言

著者らの研究結果<sup>(1)~(6)</sup>によると三重大学型翼端小翼(以後 Mie ベーンと呼ぶ)は, 10~15%もの水平軸風車の増出力効果があることが示されている。これまでの研究結果により, Mie ベーンの形状, 回転面に対する Mie ベーン取付角および翼平面形状の影響に関して詳細な検討がなされ, 与えられた翼端翼弦に対する Mie ベーン最適形状を明らかにしている<sup>(1)~(3)</sup>。さらに, Mie ベーン増出力効果が得られる理由について, 流れの可視化, 速度分布測定および圧力分布測定から詳細な検討がなされている。流れの可視化により Mie ベーンによる翼端渦抑制効果, 風車後流の拡大効果が示されている<sup>(3)</sup>。風車後流の流速測定および翼面圧力分布測定により, Mie ベーン付風車の場合には Mie ベーンなし風車に比べて翼周りの循環量が翼端近傍まで大きく維持されていることが示されている<sup>(4)~(6)</sup>。しかし, 最近の著者らの研究過程で風車翼のアスペクト比によっては 4~5%しか, 増出力効果がな

いことも見つけられた。また 2 枚翼風車および 3 枚翼風車に Mie ベーンを適用した場合, 増出力効果が異なることも明らかになってきた。これらの点に注目し, Mie ベーン増出力効果と風車翼アスペクト比, 翼枚数, さらにレイノルズ数の影響等を実験的に詳細に調べた。その結果, 興味ある結果を得たので報告する。

#### 2. おもな記号

AR: 翼アスペクト比

c: 局所翼弦長 mm

$c_{tip}$ : 翼端翼弦長 mm

$C_P$ : 出力係数  $= \frac{T\Omega}{0.5\rho U^3 \pi R^2}$

$C_{Pmax}$ : 最大出力係数

D: 翼車直径 m

N: 翼枚数

$P_{aug}$ : 出力増加率

r: 半径位置 m

R: 翼車半径 m

Re: レイノルズ数  $= c_{tip} R \Omega / \nu$

T: 翼車トルク N·m

U: 流入風速 m/s

\* 原稿受付 2002年3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。

E-mail: kamada@mach.mie-u.ac.jp

- $\alpha$ : 迎え角  $^{\circ}$
- $\gamma$ : Mie ベーン取付角 (Mie ベーン中心線と回転面のなす角)  $^{\circ}$
- $\delta$ : 翼ねじり角  $^{\circ}$
- $\lambda$ : 周速比  $=R\Omega/U$
- $\theta$ : 翼端設定ピッチ角 (翼端翼弦線と回転面のなす角)  $^{\circ}$
- $\rho$ : 空気密度  $\text{kg/m}^3$
- $\Omega$ : 角速度  $\text{rad/s}$
- $\nu$ : 動粘度  $\text{m}^2/\text{s}$

3. 実験装置および方法

3.1 実験装置 図1は, 実験に使用する大型風洞設備を示す。風洞は, 吹出し口径3.6 mの単路回流形である。表1に風洞の諸元を示す。

図2は, 測定部の詳細を示す。供試風車は, 風洞吹出し口下流1.5 mに設置されている。供試風車には, トルク計, 回転計および可変速発電機が取付けてある。風車出力は, 翼車トルクおよび回転速度から求める。翼車回転数は, 可変速発電機の発電量制御により最大900 rpmまで設定可能である。風速は翼車上流1Dに設置されたピトー管で測定する。実験風速は, 6 m/sを中心に最大9 m/sである。

図3は, 4種類の供試翼のねじり角および翼弦長分布を示す。表2は供試翼の諸元を示す。翼はNACA 4418翼型をもつテーパねじり翼である。翼アスペクト比ARの影響を検討するため, 半径方向のねじり角および翼弦長分布は4種類の翼について同一である。なお, ねじり角は, 周速比約5.5で最適値をもつように設計されている。翼アスペクト比は, 6.15, 6.89, 7.64および8.42の4種類であり, それぞれ翼端

Table 1 Specification of wind tunnel

Maximum wind speed	35m/s
Wind non-uniformity	<0.5%
Turbulence level	<0.5%
Fan power	400kW
Measurement volume	$\phi 3.6 \times 4.5 \text{ m}$

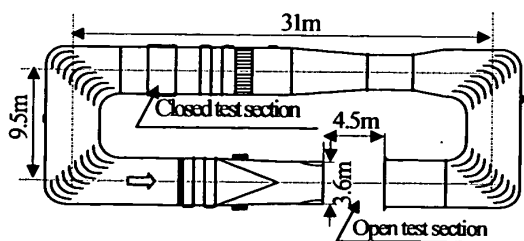


Fig. 1 Overall schematic drawing of wind tunnel

半径が異なる。

図4はMieベーンの形状を示す。Mieベーンの形状は, 従来の研究結果<sup>(1)-(3)</sup>に基づき決定された。Mieベーン横方向(翼弦に直角方向)長さC+D+Eは80 mm, 縦方向長さは翼端翼弦長の80%である。なお, Mieベーン取付角は $\gamma=0^{\circ}$ とする。

3.2 翼面流れの可視化方法 Mieベーンの出力増加と流れの関係を明らかにするため, 油膜法およびタフト法を用いた翼面流れの可視化を行う。流れの可視化では, アスペクト比AR=6.15および8.42の翼を使用し, 風速は5~9 m/sまで変化させる。油膜法

Table 2 Specifications of wind turbine blades

Planform of blade	Taper - Twisted blade			
	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4
Blade length [m]	0.500	0.550	0.600	0.650
Tip chord length [m]	0.067	0.065	0.063	0.060
Aspect ratio, AR	6.15	6.89	7.64	8.42
Twist angle [ $^{\circ}$ ]	20	20	20	20
Rotor radius [m]	0.563	0.613	0.663	0.713

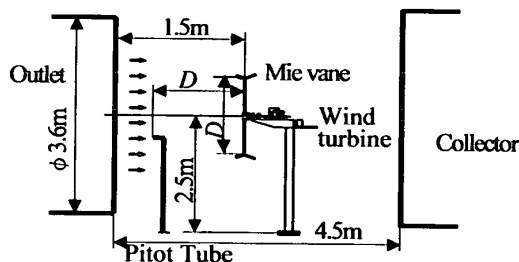
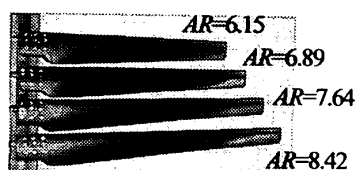
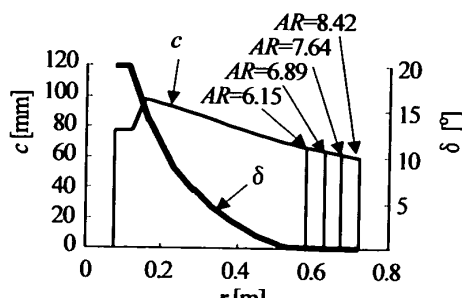


Fig. 2 Schematic drawing of test section



(a)



(b)

Fig. 3 Planform configuration of test blades

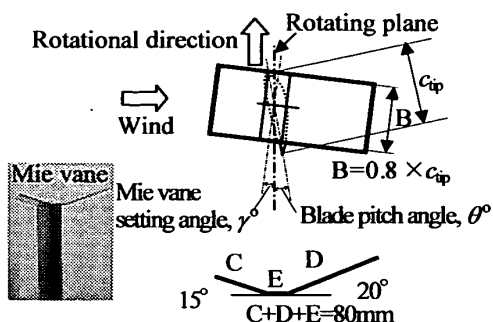


Fig. 4 Schematic drawing of the Mie vane

では, オレイン酸および軽油に白色素として酸化チタンを混ぜた液を翼端負圧面および Mie ベーンに塗布する。最適周速比で約 5 min 運転し, 翼面の油が揮発した後, 風車を停止させ油膜模様を撮影する。タフト法では, 全長 7 mm のタフトを, 翼端負圧面および Mie ベーンに取り付け, 最適周速比で運転しタフトの挙動を撮影する。なお, 照明には, 翼車回転に同期するストロボライトを使用し, 20 s 露出し撮影する。

**3.3 Mie ベーン付風車の出力係数の定義** Mie ベーン付風車の出力係数は, Mie ベーン装着による半径の増加分  $dR (=10 \text{ mm})$  を加えた回転半径による回転面積に基づき次のように求める<sup>(4)</sup>。

$$C_p = \frac{T\Omega}{\frac{1}{2}\rho\pi(R+dR)^2U^3} \dots\dots\dots (1)$$

4. 実験結果および考察

**4.1 供試風車の性能** 図 5 は供試風車の出力係数  $C_p$  と周速比  $\lambda$  の関係を示す。図 5 には比較のため, 他研究者の 2 種類の結果<sup>(7)(8)</sup> および異なる風洞で行った著者らの結果<sup>(2)</sup> を示す。本実験結果は, 記号  $\Delta$  ● で 3 枚翼 ( $N=3$ ) 風車および 2 枚翼 ( $N=2$ ) 風車を示す。図 5 は, Mie ベーンなし翼, アスペクト比  $AR=6.15$ , ピッチ角  $\theta=0^\circ$  の結果を示す。3 枚翼風車の場合, 本実験結果の  $C_{pmax}$  は, 文献(7)に比べ若干高く,  $\lambda$  はほぼ等しい。2 枚翼風車の場合, 本実験結果の  $C_{pmax}$  は, 文献(8)の結果とほぼ等しく,  $\lambda$  は若干小さくなる。本実験結果は, 他研究者の実験結果と類似である。

**4.2 Mie ベーン付風車の性能とピッチ角  $\theta$  およびアスペクト比  $AR$  の関係** Mie ベーンによる出力増加を検討するために, 出力増加率  $P_{aug}$  を定義する。

$$P_{aug} = \frac{\text{Mie ベーン付風車 } C_{pmax} - \text{なし風車 } C_{pmax}}{\text{Mie ベーンなし風車 } C_{pmax}} \times 100 [\%] \dots\dots\dots (2)$$

図 6 を用いて,  $P_{aug}$  を説明する。図は 2 枚翼,  $\theta=0^\circ$  および  $-2^\circ$  で Mie ベーン付およびなし翼の  $C_p$  と  $\lambda$  の関係を示す。  $\theta=0^\circ$  の場合, Mie ベーン付風車は,  $C_{pmax}=0.469, \lambda=5.42$ , Mie ベーンなし風車は,  $C_{pmax}=0.431, \lambda=5.5$  である。これより  $P_{aug}=8.75\% [=((0.469-0.431)/0.431) \times 100]$  になる。  $\theta=-2^\circ$  については図 6 中に示す。

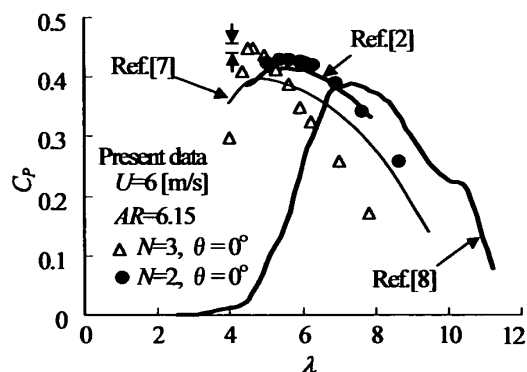
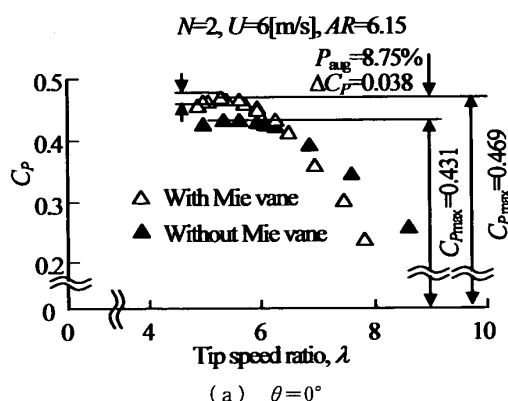
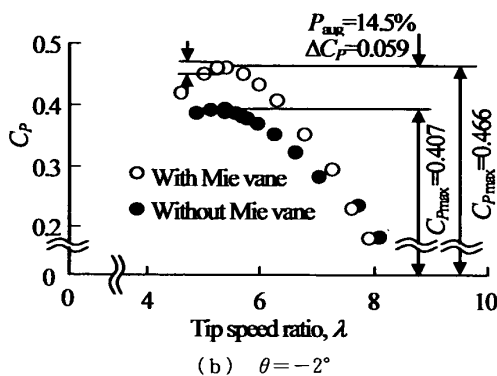


Fig. 5 Relationships between power coefficient and tip speed ratio for various rotor configurations (Uncertainty in  $C_p=0.448 \pm 0.007$ , in  $\lambda=4.27 \pm 0.01$ )



(a)  $\theta=0^\circ$



(b)  $\theta=-2^\circ$

Fig. 6 Typical power curves for rotor with and without Mie vane (Uncertainty in  $C_p=0.466 \pm 0.007$ , in  $\lambda=5.42 \pm 0.01$ )

図 7(a) の左右に 2 枚翼および 3 枚翼風車の  $C_{pmax}$

と  $\theta$  の関係を示す。風速は  $U=6$  m/s,  $AR$  は代表例として 6.15 および 8.42 を選んだ。左図より, 2 枚翼風車  $AR=6.15$  の場合, 最適  $\theta$  は, Mie ベーン付翼  $0^\circ$ , なし翼  $2^\circ$  である。Mie ベーンを翼端に装着することで若干最適  $\theta$  は小さくなる。 $AR=8.42$  の場合, Mie ベーン付翼およびなし翼ともに最適  $\theta$  は,  $0^\circ$  である。右図より, 3 枚翼風車の場合, いずれの  $AR$  においても最適  $\theta$  は約  $2^\circ$  程度であり 2 枚翼に比べて若干大きくなる。

図 7(b)の左右に, 2 枚翼および 3 枚翼風車の Mie ベーン装着による出力増加率  $P_{aug}$  と  $\theta$  の関係を示す。図 7(b)は,  $U=6$  m/s,  $AR=6.15, 6.89, 7.64$  および 8.42 の結果を示す。左図より 2 枚翼風車の場合,  $P_{aug}$  は,  $\theta$  を小さくするに従い大きくなる。また  $P_{aug}$  は  $AR$  を小さくするに従い大きくなる。最大の  $P_{aug}$  は,  $\theta=2^\circ$ ,  $AR=6.15$  における 14.5% である。右図より 3 枚翼風車の場合,  $P_{aug}$  の変化は, ピッチ角

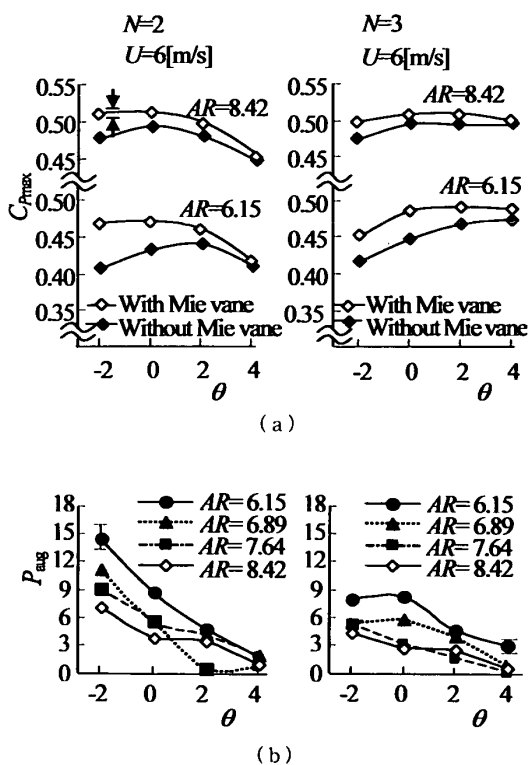


Fig. 7 (a) Relationships between maximum power coefficient and pitch angle  
(b) Relationships between power augmentation and pitch angle for different aspect ratio  
(Uncertainty in  $C_P=0.515 \pm 0.007$ , in  $P_{aug}=14.5\% \pm 1.6\%$ , in  $\theta = \pm 0.1^\circ$ )

\*\*1 過去の研究<sup>(9)</sup>によれば Mie ベーンは, 翼端渦の放出位置を主翼翼端から小翼端へ移動させ, 主翼翼端まで十分に循環を発達させる。その結果(Mie ベーン装着によって)主翼翼端まで十分な揚力発生が可能になる。その分翼車出力が大きくなると説明されている。

$0 \sim 4^\circ$  の範囲で 2 枚翼と同様な傾向を示す。 $P_{aug}$  が  $\theta$  の減少に従い大きくなる理由は次のように考えられる。一般的に Mie ベーンなし翼の翼端渦は, 翼端付近の迎え角の増加に従い強くなることが予想される。さらに翼端の迎え角は, 同一  $\lambda$  に対し  $\theta$  の減少に従い大きくなる [文献(9), 190 ページ, 式(2.6)参照]。したがって,  $\theta$  の減少に従い Mie ベーンによる翼端渦放出抑止効果\*\*1 が大きくなり, Mie ベーン装着による出力増加が顕著になると考えられる。なお Mie ベーン付およびなし翼の翼端周囲流れについては, 図 9 の流れの可視化結果を用いて詳述する。

図 8(a)は, 2 枚翼および 3 枚翼風車の  $C_{Pmax}$  と  $AR$  の関係を示す。図 8(a)は, Mie ベーン付およびなし翼,  $U=6$  m/s,  $\theta=0^\circ$  の結果を示す。図 8(a)より,  $C_{Pmax}$  は, Mie ベーン付およびなし翼, いずれの翼枚数の風車についても,  $AR$  を大きくするに従い増加することがわかる。この現象は, 非回転翼の流体力学における有限翼の誘導抗力がアスペクト比に反比例する<sup>(10)</sup> という事実と強い相関がある。また翼枚数で比較すると, 3 枚翼風車の  $C_{Pmax}$  は, 2 枚翼に比べいずれの  $AR$  においても大きくなる。

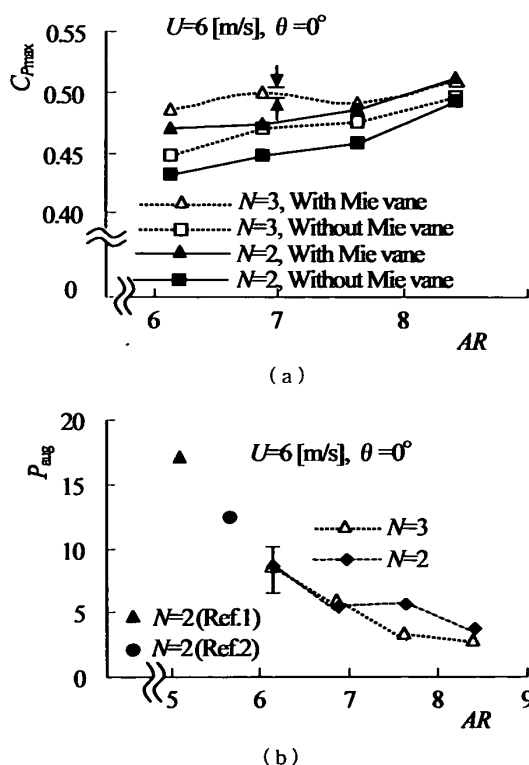


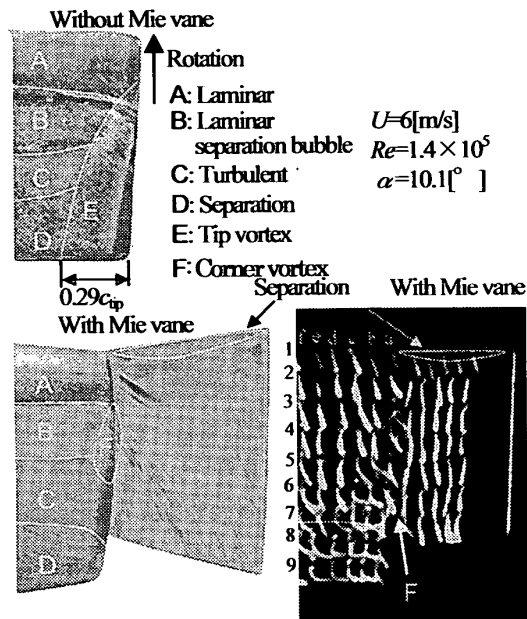
Fig. 8 (a) Relationships between maximum power coefficient and aspect ratio  
(b) Relationships between power augmentation and aspect ratio  
(Uncertainty in  $C_P=0.499 \pm 0.007$ , in  $P_{aug}=8.75\% \pm 1.6\%$ )

なおデータの記述は省略したが, 他の  $\theta$  の実験結果においても同様な傾向が得られた。

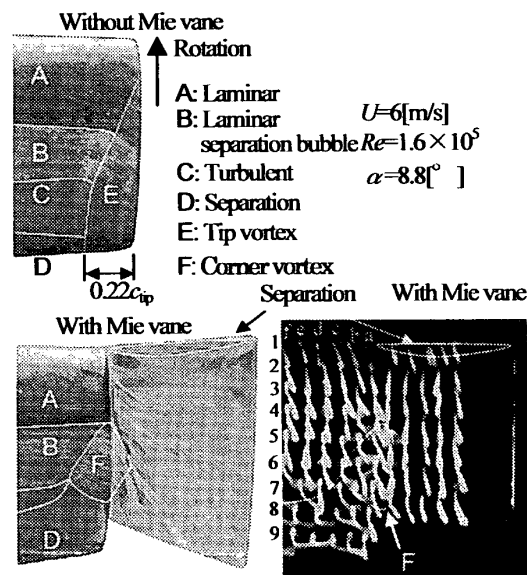
図 8(b) は, 2 枚翼および 3 枚翼風車の  $P_{aug}$  と  $AR$  の関係を示す。図 8(b) は,  $U=6\text{ m/s}$ ,  $\theta=0^\circ$  の結果を示す。また図 8(b) 中には, 従来の実験結果<sup>(1)(2)</sup> も示されている。いずれの翼枚数についても  $P_{aug}$  は,  $AR$  を大きくするに従い減少する。また,  $P_{aug}$  の最大値は  $AR=6.15$  で得られる。文献(1)および文献(2)で用いた 2 枚翼の  $P_{aug}$  と  $AR$  の関係は,  $\theta=0^\circ$  2 枚翼の延長線上にある。

$P_{aug}$  が  $AR$  の増加に従い小さくなる理由は, 図 9 の可視化結果から詳述される。

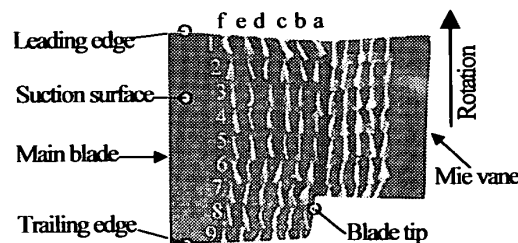
図 9 にはアスペクト比  $AR$  を変化させた場合の風車翼の可視化写真を示す。図 9 中に示された  $\alpha$  は, 翼端周速, 流入風速から幾何学的に求めた相対速度と翼端翼弦線のなす角を示す。左図の下側には, Mie ベーン付翼, 上側には, Mie ベーンなし翼の油膜法による写真, 右図には Mie ベーン付翼のタフト法による写真を示す。図 9(a) は,  $U=6\text{ m/s}$ ,  $AR=6.15$ , (b) は  $AR=8.42$  である。なお図 9(c) は, タフトの動きを理解しやすくするため, 主翼翼端および Mie ベーン上のタフト配置を示す。 $AR=6.15$  の可視化写真について説明する。Mie ベーン付およびなし翼いずれの場合にも, 油膜写真中の A, B, C, D は, それぞれ A: 油膜模様が回転方向の流跡を示す部分, B: 半径方向のしま模様を示す部分(タフト写真との比較より, 半径方向の流れはない), C: 周方向から半径方向へ若干偏る流跡を示す部分, D: 後縁はく離のため壁面に沿って半径方向へ大きく傾いた流跡が見られる部分を表している。これらの領域 A, B, C および D(領域は白細線で示されている)は, それぞれ, 層流, 層流はく離泡(遷移を含む), 乱流およびはく離領域に対応すると考えられる。写真には E: 翼端渦の影響領域(Mie ベーンなし翼), F: コーナ渦の影響領域(Mie ベーン付翼)も白細線で示されている。Mie ベーン付翼の場合, 翼端渦の影響は見られず, 流れは二次元的である。したがって, Mie ベーン付翼は翼端まで十分な揚力を発生していると考えられる<sup>(6)</sup>。Mie ベーン付翼の翼端と Mie ベーン接続部分の流れは複雑なので, タフト法を用いた可視化写真を併用する。タフト写真から, c~f 列 1~5 番のタフトはほぼ周方向を向いており, 滑らかに流れていることがわかる。翼後縁付近のタフトは, 半径方向を向き浮き上がって見えるので, 翼後縁付近の流れははく離していると判断される。翼端と Mie ベーンとのコーナ接続部に注目する。翼端の a 列 1, 2 番のタフトは乱れていないが, 3~5 番のタフト



(a)  $AR=6.15$   $N=2$



(b)  $AR=8.42$   $N=2$



(c) Arrangement of tufts

Fig. 9 Flow visualization on rotating blade with different aspect ratio for  $N=2$ ,  $U=6\text{ m/s}$

トは翼面から立ち上がり, はく離していることがわかる。これはこの部分にコーナ渦が発生しているためと考えられる。コーナ渦の翼弦方向の発生位置は, 油膜写真から層流はく離泡開始点に相当するといえる。Mie ベーン上の1番のタフトは周方向から半径方向へ若干傾斜しており, Mie ベーン前縁は狭い流れのはく離領域をもつといえる。2番以降のタフトは翼端との接続部分を除いて, Mie ベーンに添っている。AR=8.42の翼面の流れはMie ベーン付およびなし翼ともに, AR=6.15の場合と同様領域A~Dで層流, 層流はく離泡(遷移を含む), 乱流, はく離領域になる。翼端の流れは, それぞれMie ベーンなし翼で翼端渦の影響領域(E領域), Mie ベーン付翼でコーナ渦の影響領域(F領域)をもつ。Mie ベーンなし翼AR=8.42のE領域は, AR=6.15に比べ小さく, 翼端損失も小さくなると推察される。Mie ベーン付翼のコーナ接続部の流れに注目すると, AR=8.42のF領域がAR=6.15に比べ2倍程度まで大きくなる。さらに, Mie ベーン上で前縁から同程度の位置にも特殊な油膜模様が見られる。タフト写真から, 翼端のa, b列3番以降のタフトが半径方向を向き激しくばたついている。Mie ベーン上の4番のタフトもばたついている。したがって, AR=8.42のコーナ渦は, AR=6.15に比べて大きく, 翼後縁のD領域まで広がるといえる。AR=8.42の場合, コーナ渦の拡大により翼端の抵抗が増加し, AR=6.15に比べ風車出力を減少させると推察される。したがって, ARの増加に従いコーナ渦による出力低下は大きくなると考えられる。以上の結果から, 図8に示したARの増加に伴う $P_{aug}$ の減少は, Mie ベーン付翼のコーナ渦の拡大による抵抗増加に伴う出力減少とMie ベーンなし翼の翼端損失の減少に伴う出力増大の結果といえる。

なお, 本節ではMie ベーンによる出力増加と翼アスペクト比の関係を検討したが, この結果を別の観点から見ると, Mie ベーンによる出力増加は, Mie ベーンなし翼の翼端を長くした場合に相当する。逆の見方をするとMie ベーンによって通常翼の翼長を短縮できることになる。この事実は風車の小型化に利用できる。Mie ベーンによってどの程度翼長を短縮できるかは, レイノルズ数の影響等もあり, さらにいくつかのデータが必要になるので紙面の都合上, 別報で述べることにする。

**4.3 翼端レイノルズ数と出力増加率の関係** 図10は,  $C_{Pmax}$ ,  $P_{aug}$ と $Re$ の関係を示す。AR=6.15,  $\theta=0^\circ$ , レイノルズ数 $Re$ は, 風速を5 m/sから9 m/sまで変化させて変えた。ただし, 3枚翼では, 発電機

の容量不足のため, 8 m/sまでしか実験が行えなかった。いずれの翼枚数においても,  $C_{Pmax}$ はMie ベーン付およびなし翼ともに $Re$ の増加に従い, 大きくなる。Mie ベーン付翼の増加傾向は, なし翼に比べ若干緩やかになる。2枚翼について, さらに詳細に検討する。 $Re=1.2 \times 10^5$ から $1.5 \times 10^5$ までの $C_{Pmax}$ の増加割合は,  $Re=1.5 \times 10^5$ から $1.9 \times 10^5$ の間の増加割合より大きくなる。すなわち,  $Re$ 増加に対する $C_{Pmax}$ の増加割合は, 低いレイノルズ数の範囲で大きく, 高いレイノルズ数の範囲で緩やかになる。図10(b)に示す $P_{aug}$ は $Re$ の増加に従い減少するが, 高いレイノルズ数の範囲で減少割合は緩やかになる。これらの理由は, 次に示す図11の可視化結果から説明される。

図11には, レイノルズ数を変化させた場合のMie ベーン付翼の可視化写真を示す。左図は油膜法, 右図はタフト法による写真を示す。図11(a)~(c)の $Re$ は, それぞれ $1.2 \times 10^5$ ,  $1.5 \times 10^5$ ,  $1.9 \times 10^5$ である。図11(c)のタフト写真には $1.9 \times 10^5$ のピントがずれていたため,  $1.7 \times 10^5$ を用いる。なお図12には, 比較のためMie ベーンなし翼油膜法による可視化写真を示す。図12中の領域A~Fは, 層流, 層流はく離泡

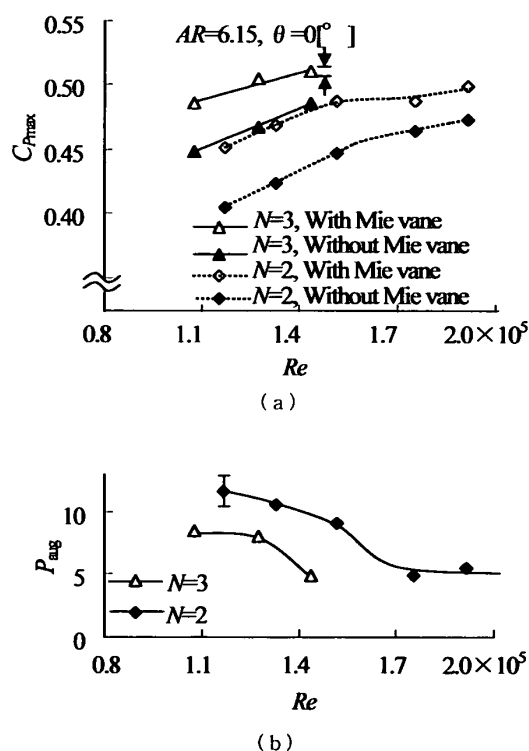


Fig. 10 (a) Relationships between maximum power coefficient and Reynolds number for AR=6.15  
 (b) Relationships between power augmentation and the Reynolds number  
 (Uncertainty in  $C_P=0.515 \pm 0.007$ , in  $P_{aug}=11.6\% \pm 1.6\%$ )

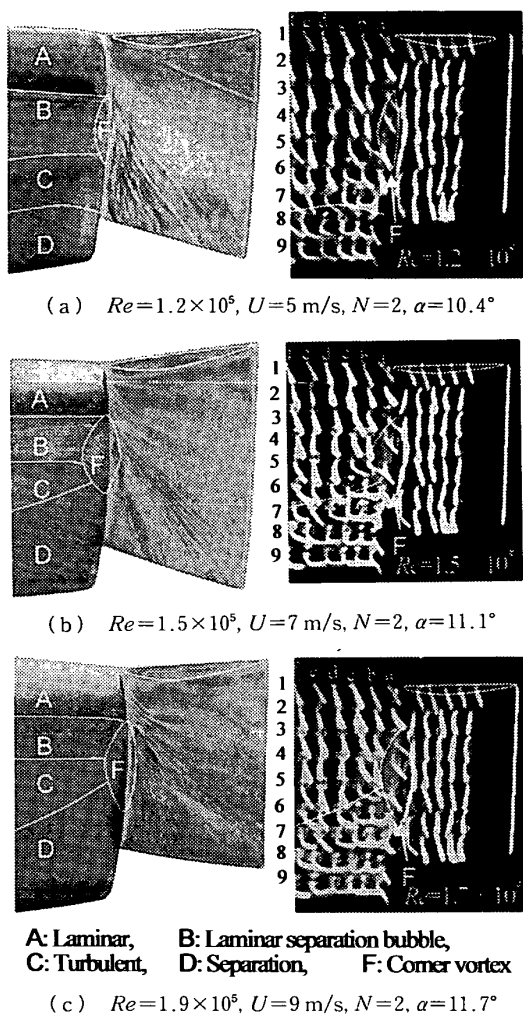


Fig. 11 Flow visualization on rotating blade with Mie vane,  $AR=6.15, N=2$  for different Reynolds number

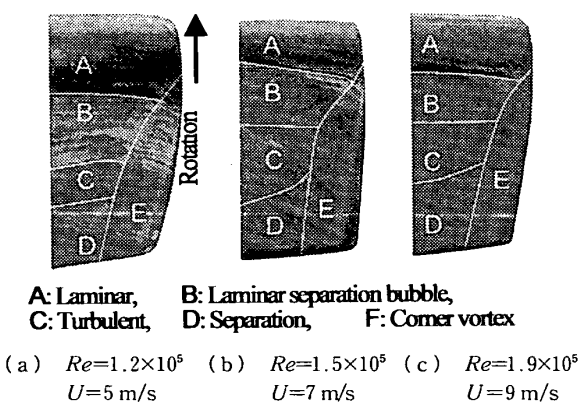


Fig. 12 Flow visualization on rotating blade without Mie vane,  $AR=6.15, N=2$  for different Reynolds number

(遷移を含む), 乱流, はく離, 翼端渦の影響領域, コーナ渦の影響領域を示す. Mie ベーン付翼  $Re=1.2 \times 10^5$  および  $1.5 \times 10^5$  の翼面境界層の各領域を比較する. 油膜写真から  $Re=1.5 \times 10^5$  の層流領域 A および層流はく離泡領域 B は, それぞれ  $1.2 \times 10^5$  に比べ小さくなる. 翼端と Mie ベーンとのコーナ接続部に注目すると, タフト写真から図 12(a)  $Re=1.2 \times 10^5$  の場合, 翼端の a 列 3~5 番のタフトは翼面から立ち上がり, はく離していることがわかる. 図 12(b)  $Re=1.5 \times 10^5$  の場合, 翼端の a 列 3 番以降および c, d 列 5 番以降のタフトは翼面から立ち上がり, はく離していることがわかる.  $Re=1.5 \times 10^5$  のコーナ渦の影響領域は,  $Re=1.2 \times 10^5$  に比べ大きくなり, 後縁のはく離領域と結合し拡大している. 次に  $Re=1.5 \times 10^5$  および  $1.9 \times 10^5$  の翼面流れを比較する. 油膜写真から翼面境界層の各領域 A~D はほぼ等しいといえる. またタフト写真から,  $Re=1.7 \times 10^5$  のコーナ渦の影響領域 F のタフトは,  $Re=1.5 \times 10^5$  に比べ激しくばたついている. しかし, 領域 F の大きさはほぼ等しい.

なお, 図 12 に示す結果から, Mie ベーンなし翼の場合, レイノルズ数増加に伴う境界層の各領域 A~D の変化は, Mie ベーン付翼と同様な傾向を示す. また翼端渦の影響領域 E は,  $Re$  の増加に従い小さくなる.

以上より図 10 に示された低いレイノルズ数 ( $1.2 \times 10^5 \sim 1.5 \times 10^5$ ) の範囲での  $C_{Pmax}$  の増加割合が, 高いレイノルズ数 ( $1.5 \times 10^5 \sim 1.9 \times 10^5$ ) の増加割合に比べ大きくなる理由は, 図 11 に示す可視化写真より, 写真 (a) と (b) の境界層の変化が大きいのと比べ, 写真 (b) と (c) の境界層の変化が小さくなる結果に基づく と推察される.

### 5. 結 言

Mie ベーン増出力効果と風車翼アスペクト比, 翼枚数, レイノルズ数の影響を実験的に検討した結果, 以下の結論を得た.

(1) 翼アスペクト比を変化させた場合, Mie ベーン装着による出力増加率は, 翼アスペクト比を小さくするに従い増加し, 大きくするに従い減少する. 出力増加率の最大値は 2 枚翼  $AR=6.15$  で 14.5% にも達した.

(2) 翼端レイノルズ数を変化させた場合, 各条件での最大出力係数のレイノルズ数増加に伴う増加割合はレイノルズ数がおおよそ  $1.5 \times 10^5$  を境界として異なり, 低いレイノルズ数の範囲で大きく, 高いレイノル

ズ数の範囲で小さくなる。これら Mie ペーン付翼の最大出力係数の増加傾向は, Mie ペーンなし翼に比べ若干緩やかになる。

### 文 献

- (1) Shimizu, Y., ほか 5 名, *Proc. ECWEC'90*, Madrid, Spain, (1990), 279-283.
- (2) Shimizu, Y., ほか 3 名, *Proc. EWEC'91*, Amsterdam, The Netherlands, (1991), 221-225.
- (3) 清水幸丸・ほか 2 名, *機論*, 56-522, B(1990), 502-507.
- (4) Shimizu, Y., ほか 2 名, *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, 116 (1994), 287-292.
- (5) Shimizu, Y., ほか 4 名, *Proc. ISROMAC-8*, Hawaii, USA, 1 (2000), 42-48.
- (6) Shimizu, Y., ほか 3 名, *Trans. ASME, J. Solar Energy Eng.*, 117 (1995), 297-303.
- (7) Zeqiang, L. and Dahlberg, J., *Proc. APWEC '88*, Shanghai, China, (1988), 401-408.
- (8) Vermeer, L. J., *Proc. 2001 ASME Wind Energy Symp.*, AIAA, (2001), Paper No. 2001-0030.
- (9) 清水幸丸, *風力発電技術(改訂版)*, (1999), 190, パワー社.
- (10) Bertin, J. and Smith, M. L., *Aerodyn. Eng.*, (1979), 172, Prentice-hall, Inc.