

チップペーンによる水平軸風車の増出力に関する研究*

(第1報, チップペーン形状と性能の関係)

清水 幸丸^{*1}, 吉川 孝哉^{*2}, 松村 真次^{*2}

Power Augmentation Effects of Horizontal Axis Wind Turbine by Tip Vane (1st report, Relationships between turbine performance and configuration of tip vanes)

Yukimaru SHIMIZU, Takaya YOSHIKAWA, and Shinji MATSUMURA

Output of horizontal axis wind turbine is improved by tip vane. The maximum improved value of tip vane turbine is 1.25 times larger than non-tip vane turbine output. The paper describes the relationships between turbine performance and configuration of tip vanes. Many tip vanes were used to improved the performance. It is found that V and S type tip vanes are vey useful to improve the performance. Also, dimensions of V and S type vanes were investigated in details.

Key Words: Fluid machine, Horizontal axis wind turbine, Tip vane wind turbine, Performance output coefficient, Augmentation of output, Configuration of tip vane

1. 緒 言

水平軸風車の翼端にチップペーン(小翼)を取付けることによって風車出力を増大させようとする考えはデルフト工科大学の Von Holten らのグループによって提案されすでに 10 年近くたっている。チップペーンによる増出力は理論的^{(1)~(3)}には証明されているが、実際の風車に用いると障害のほうが大きくいまだ注目すべき成果は上がっていない。著者らは過去の研究を整理しつつ独自の考えでチップペーンによる水平軸風車の増出力に挑戦した。その結果チップペーンなし翼に比べて 1.2~1.25 倍に達する出力増大を達成することに成功した。著者らの独自の考えは(1)翼端での誘導渦の発生をできるだけ抑制し誘導抵抗を減少させる。(2)チップペーンによるディフューザ効果を最大限助長し、風車周囲前方の気流をできるだけ多く回転面内に引き込む。(3)翼車通過後はなるべく渦流を発生させないように拡大させ減速させる。この考え方は Von Holten らの提案する翼端小翼による揚力発生によって風車の回転力を増大させるという考えとは異なる

が、翼端小翼によって出力を増大させるという観点からは共通点があると考えられる。なお、本報告では主に開発されたチップペーンの性能とそれに関連する種々パラメータとの関係を論じた。なぜそうなるかについての検討は紙面の都合上、独立して続報⁽⁴⁾とした。

2. 主な記号および定義式

U : 流入風速 m/s

R : 翼の半径 m

T : 発生トルク N·m

Ω : 角速度 rad/s

ρ : 空気密度 kg/m³

ϕ : 周速比

γ : チップペーン取付角(図 6) °

θ : 主流方向と回転軸のなす角(図 7) °

C_p : 出力係数

C_{pI} : 出力係数比 I (本文中で説明)

C_{pII} : 出力係数比 II (本文中で説明)

周速比: $\phi = R\Omega/U$

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

* 平成元年 10 月 14 日 第 67 期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成元年 2 月 27 日。

^{*1} 正員、三重大学工学部 (〒514 津市上浜町 1515)。

^{*2} 准員、三重大学工学部。

3. 実験装置および方法

図1は実験に用いた風洞を示す。チップペーン付き水平軸風車の翼車直径は1.160 m ϕ で風洞出口下流1.2 mに設置されている。風車下流の影響を避けるために風車設置点から下流側へ4.6 m以上の直線距離を設けた。図2はナセル内部の詳細を示す。二段軸になっておりギヤ比は2:1である。翼車取付軸は中空で一方の端に⑥スリッピングを取付け、翼に働く力を測定する場合に使用した。⑧にはトルク計が設置され、負荷としては⑨電磁ブレーキを用いた。図3の写真はチップペーンを取付けた実験用水平軸風車、および翼端に取付けられたチップペーンの一部を示す。表1には供試風車ブレードの諸元を示す。

翼のねじり角分布は $\delta = \tan^{-1} \frac{300}{573 \times 2\pi \times r_x} [\text{rad}]$ で表される。 $r_x [\text{m}]$ は翼根からの距離である。

本研究では多種類のチップペーンを試作し、風車性能に及ぼす影響を調べた。図4には主な供試チップペーンの写真を示す。このような多種類のチップペーンはでたらめに作られたものではなく一つの系統性を持っている。著者らはこれまで試みられてきた形状をもとにいくつかの試行錯誤を重ね、V形とS形状が増出力に有効なチップペーン形状の一例であることをみつけ出した。図5にはその定義図を示す。チップペー

ンの前縁反り角を α 、後縁反り角を β とする。V形は上流(前縁)側および下流(後縁)側のペーンがともに半径外側方向に開いており($\alpha \geq 0^\circ$, $\beta \geq 0^\circ$)、S形は上流側ペーンが内側を向いた($\alpha < 0^\circ$)状態で下流側は外側に開いた($\beta \geq 0^\circ$)状態になる。チップペーン形状と性能の関係について概略を述べると次のようになる。

(1) チップペーンの縦横寸法(B , $C+D+E$) (図5)によって性能は異なる。

(2) チップペーンの反り角 α , β (図5)によって性能は影響を受ける。

(3) 前縁長さ C と後縁長さ D の比 (図5)によって性能は変化する。

(4) チップペーン取付角 γ (図6)によって性能は変化する。

(5) 翼車回転面傾き角 θ (図7)によって性能は変化する。

表2には供試チップペーンの寸法を示す。以下の考察では上記(1)~(5)に基づいて実験結果を詳細に述べる。

表1 風車翼諸元

plane form of blade	equi-chord length twisted blade
material	wood
weight(kg)	0.350
length of blade(m)	0.500
tip chord length(m)	0.100
aspect ratio	5.000
taper ratio	0
airfoil section	FX74C16140

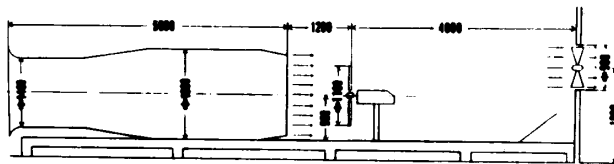


図1 実験装置全体図

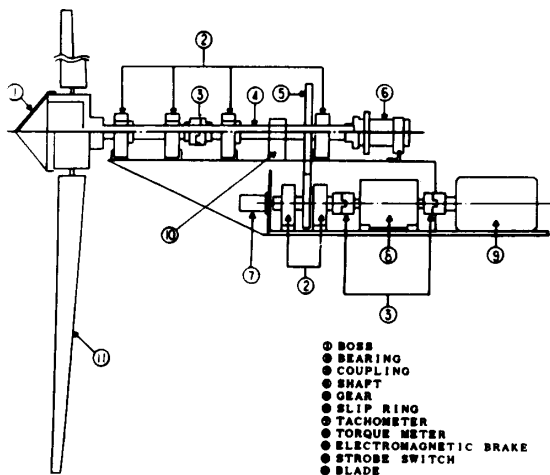


図2 ナセル内部構造図

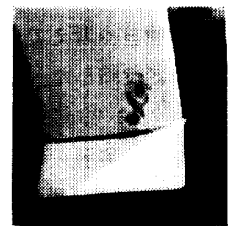
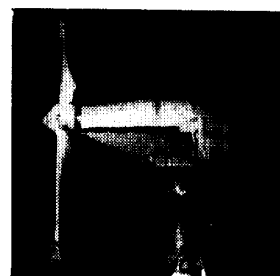


図3 チップペーン付き風車およびチップペーンの一部

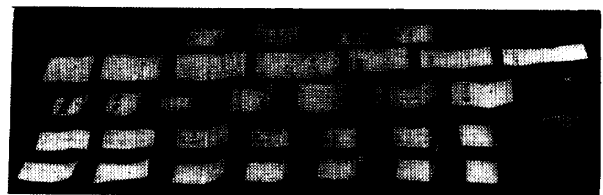


図4 主な供試チップペーンの写真

4. 実験結果と考察

4.1 チップペーン縦横寸法比と風車性能の関係

図8には、v形チップペーンの各種縦横寸法と風車性能の関係を示す。図8(1)には、縦横寸法を変えた場合の出力係数と周速比の代表的な結果が示されている。チップペーンの横方向(翼弦に直角方向)長さ $C+D+E$ は6, 8, 10 cm, 縦方向長さ B は6, 8, 10, 12 cmに変化させた。最大出力係数は0.43で $v(10 \times 10)$, $v(10 \times 8)$ 形チップペーンで得られる。 $v(8 \times 8)$, $v(8 \times 10)$ 形チップペーンは、これよりわずかに0.01低くなる。続いて $v(8 \times 6)$, $v(8 \times 12)$ 形チップペーンと順次値は低下する。図8(2)には、図8(1)において、同一周速比に対するチップペーン付き風車の出力係数値をチップペーンなしの出力係数値で割った値、出力係数比 $I C_p$ と周速比の関係を示す。 $I C_p$ の最大値は、 $v(10 \times 10)$ および $v(10 \times 8)$ 形チップペーンの場合1.25に達する。この1.25という値は、チップペーンを付けることによって、25%の出力係数増加が生じたことを意味する。 $v(8 \times 8)$ および $v(8 \times 10)$ 形チップペーンでは、1.23になる。

図9には、S形チップペーン(図5参照)の出力係数 C_p [図9(1)] および出力係数比 $I C_p$ [図9(2)] を示す。図9(1)よりS形チップペーンの最大出力係数は、

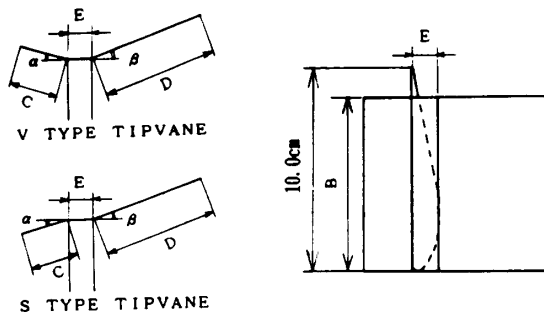


図5 供試チップペーンの定義図

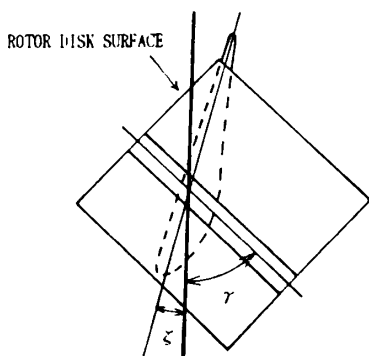


図6 翼ピッチ角 ζ およびチップペーン取付角 γ の定義図

表2 供試チップペーンの寸法表

	v (A*B)	s (A*B)
A (=C+D+E)	6~10cm	8~14cm
B	6~12cm	8~10cm
α	0~90°	-30~0°
β	0~90°	"
D/C	0.56~3.67	"
γ	0~90°	0°

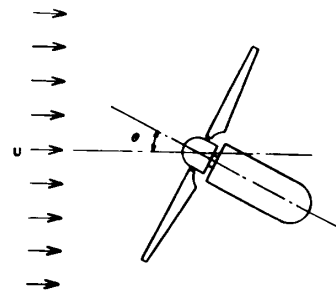
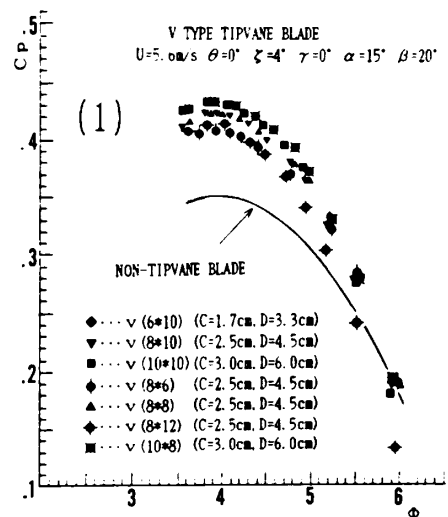
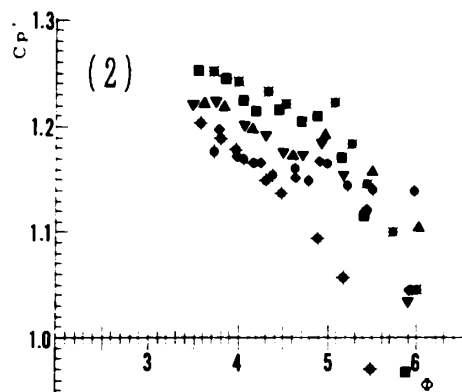


図7 翼車回転面傾き角 θ の定義図



(1) v形チップペーンの各種縦横寸法と出力係数 C_p の関係



(2) v形チップペーンの各種縦横寸法と出力係数比 $I C_p$ の関係

図8

0.43~0.44 になる。この値は、V 形チップペーンの最大値とほぼ等しい。 C_p が高い値を示すのは、s(14 * 10), s(14 * 8) 形チップペーン、続いて、s(12 * 8), s(12 * 10) 形チップペーンになる。チップペーン長さ D (図5) を長くすると、高い出力係数を示す。しかし、あまり D を長くすると、遠心力のためペーンが反ってしまい、さらに振動を伴って強度上不都合を生じる。図9(2)の出力係数比 I C_p をみると、最大値は 1.27 になる。チップペーンなしに対して 27 % の出力増がみられる。この値は、V 形チップペーンの最大値をわずかなではあるが上回る。

4・2 チップペーンの前縁長さ C および後縁長さ D と風車性能の関係 4・1 節の図8および図9では V 形および S 形チップペーンについて、性能の高い特定の寸法を選び実験結果を示した。本節ではチップペ

ーンの前縁長さ C と後縁長さ D の長さ比、 D/C (ただし $C+D=$ 一定) によって出力係数がどの程度影響を受けるか検討する。図10に示すようにチップペーン長さ $C+D$ が一定であっても、 C と D の比を変化させるとチップペーンを含めた風車外径寸法は変化する。本節では二つの出力係数比 C_p , C_p' を用いて性能に対する C と D の影響を検討する。それらの定義は次のようになる。

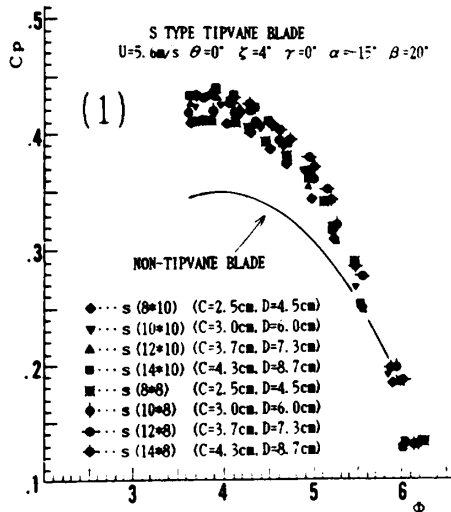
$$C_p = \frac{\text{チップペーン付き風車の出力係数}}{\text{[風車入力面積を } \pi R^2 \text{ とする場合]}} \quad (1)$$

$$C_p' = \frac{\text{チップペーン付き風車の出力係数}}{\text{[風車入力面積を } \pi(R+dR)^2 \text{ とする場合]}} \quad (2)$$

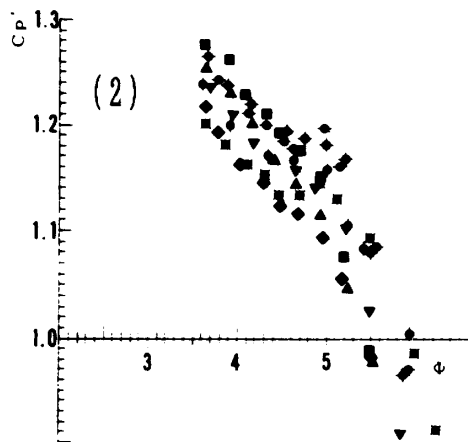
ここで dR はチップペーンによる翼車最大外径の増大を表す。したがって dR は図10(2)のように $C \sin \alpha > D \sin \beta$ の場合には $dR = C \sin \alpha$ 、図10(3)のように $D \sin \beta > C \sin \alpha$ の場合には $dR = D \sin \beta$ となる。

図11(1)には代表例として v(8 * 8) 形チップペーンを選んで出力係数比 I C_p を示した。 $C+D=7$ cm 一定に保ち、 C と D の長さを $(C, D)=(1.5, 5.5)$ cm, $(2.5, 4.5)$ cm, $(3.5, 3.5)$ cm, $(4.5, 2.5)$ cm に変化させた。 $\alpha=15^\circ$, $\beta=20^\circ$ である。出力係数比 I C_p の値は▲印(1.5, 5.5 cm)が最大になる。続いて、■印(2.5, 4.5 cm)で、◆印(4.5, 2.5 cm)のように前縁が長く後縁が短い場合はチップペーン出力係数はあまり良くならない。

次に図11(1)の結果をチップペーン付き風車の外径が $R+dR$ であると考えて出力係数比 II C_p' を用いて整理しなおしてみよう。その結果を図11(2)に示す。上記の▲, ■, ◆印の間には大きな性能差はみられな



(1) s 形チップペーンの各種縦横寸法と出力係数 C_p の関係



(2) s 形チップペーンの各種縦横寸法と出力係数比 I C_p の関係

図 9

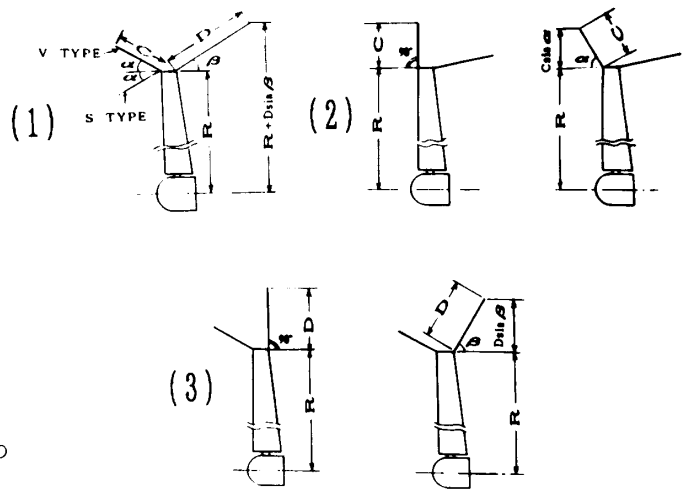


図 10 チップペーン取付けによる風車外径寸法の変化

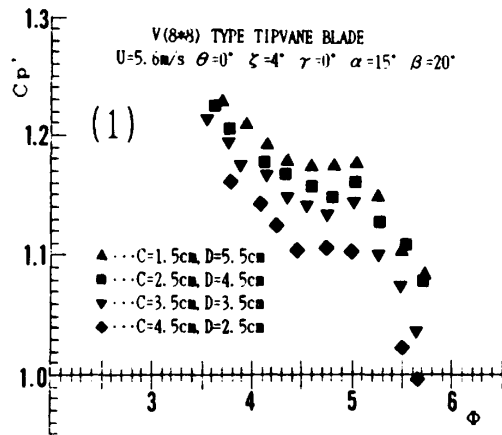
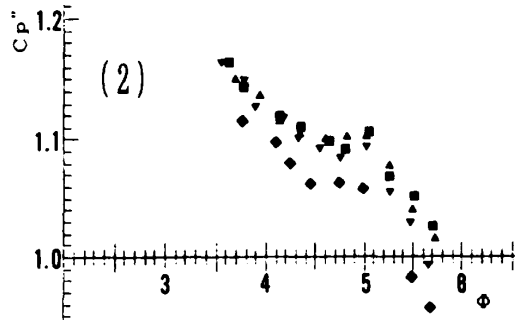
(1) 前縁長さ C および後縁長さ D と出力係数比 I $C_p I$ の関係(2) 前縁長さ C および後縁長さ D と出力係数比 II $C_p II$ の関係

図 11

くなる。この結果にもとづいて $v(8 * 8)$ 形チップペーンでは ($C=2.5$, $D=4.5\text{cm}$) を標準とした。

4.3 チップペーンの前縁および後縁の反り角 α , β と風車性能の関係 チップペーンは図 10(1) に示すごとく前縁側が α , 後縁側が β だけ反っている。 $\alpha \geq 0^\circ$ の場合を V 形チップペーン, $\alpha < 0^\circ$ の場合を S 形チップペーンと呼ぶ。両チップペーンにおいて α および β を変化させると風車性能は変化する。チップペーン の長さ C および D が一定であっても, α および β を変化させるとチップペーンを含めた風車外径寸法は変化する。4.2 節で使った C_p , C_p'' を用いて性能に対する α , β の影響を検討する。

図 12(1) には $\beta=20^\circ$ 一定に保ち α を -30° から 90° まで図に示したような角度間隔で変化させた場合の出力係数比 I $C_p I$ を示す。 $C_p I$ は $\alpha=-30^\circ$ に比べて $\alpha=90^\circ$ で最も大きくなる。図 10(2) より $\alpha=90^\circ$ とは風車翼半径 R を C だけ長くした状態, すなわち, 外径が $R+C$ になったと考えることができる。そこで図 12(1) の結果をチップペーン付き風車の外径が $R+dR$ (dR : 主に α に注目) であると考えて出力係数比 II $C_p II$ を用いて整理しなおしてみよう。その結果を図 12(2) に示す。結果は相当異なってくる。 $\alpha=15^\circ$ あるいは $\alpha=30^\circ$ の場合に $C_p II$ は最も値は大きくなり, α

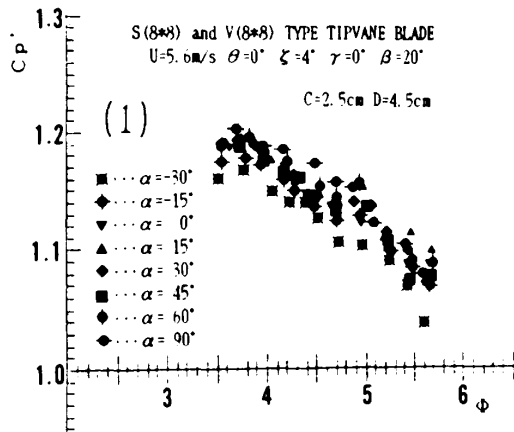
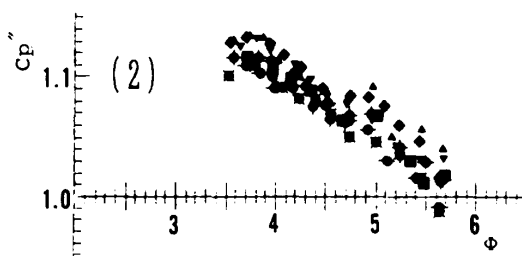
(1) 前縁反り角 α と出力係数比 I $C_p I$ の関係(2) 前縁反り角 α と出力係数比 II $C_p II$ の関係

図 12

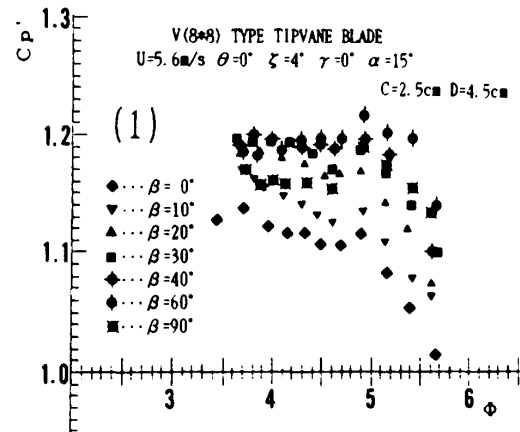
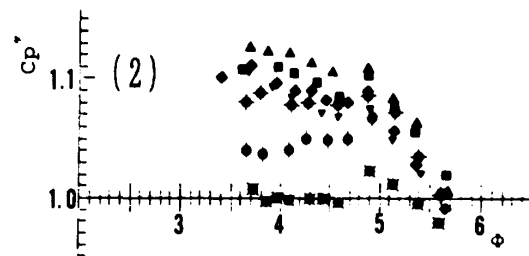
(1) 後縁反り角 β と出力係数比 I $C_p I$ の関係(2) 前縁反り角 β と出力係数比 II $C_p II$ の関係

図 13

$=90^\circ$ の場合は逆に小さくなる。

続いて、チップペーン後縁反り角 β を変化させた場合の風車性能を検討する。図 13(1)では $\alpha=15^\circ$ 一定に保ち β を 0° から 90° まで図 13(1)に示したような角度間隔で変えた。 C_p の値は $\beta=40^\circ$ あるいは 60° の値が最も大きく、 $\beta=0^\circ$ で最も小さくなる。図 13(2)ではチップペーン風車の最大外径を $R+dR$ (dR : 主に β に注目) と考えた出力係数比 II C_p' を示す。この方法でチップペーン風車の出力係数比 II をみると、 $\beta=90^\circ$ の値は $C_p'=1$ になる。 $\beta=60^\circ$ では $C_p'=1.05$ になりチップペーンによる性能改善がほとんどみられなくなる。すなわち図 10(3)を参照しつつ考察すると $\beta=90^\circ$ とは風車翼長さを D だけ長くした場合に相当し、 $\beta=60^\circ$ は $D\sin 60^\circ$ だけ翼長を長くした値に準じると考えられる。

図 12 および図 13 を要約すると次の結論が得られる。

(1) チップペーンの増出力効果は $\alpha=15\sim 30^\circ$ 、 $\beta=10\sim 30^\circ$ 程度で顕著にみられ、その中でも $\alpha=15^\circ$ 、 $\beta=20^\circ$ が特によい。

(2) β を $60\sim 90^\circ$ まで大きくするとチップペーンの増出力効果はほとんどみられなくなる。 $\alpha=90^\circ$ にした場合も同様に増出力効果は低下する。

4.4 チップペーン取付角 γ と性能の関係 チップペーンを翼端に取付ける場合、図 6 に示すごとく、

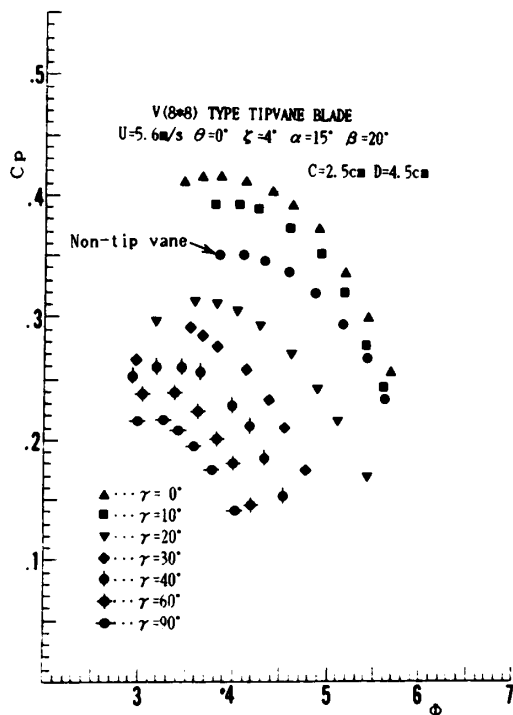


図 14 チップペーン取付角 γ と出力係数 C_p の関係

取付角 γ を種々変化させることができる。図 14 では、取付角 γ を変えた場合の風車出力係数 C_p を示す。

C_p は、 $\gamma=0^\circ$ で最も大きくなり、 γ を大きくするにつれて、図示のごとく値は低下していく。この結果より、

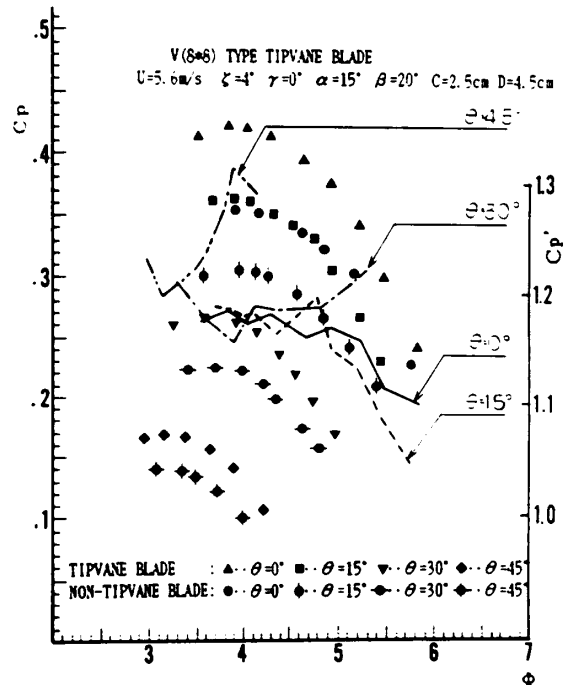


図 15 翼車回転面傾き角 θ と出力係数 C_p および出力係数比 I C_p' の関係、V(8*8)形チップペーンの場合

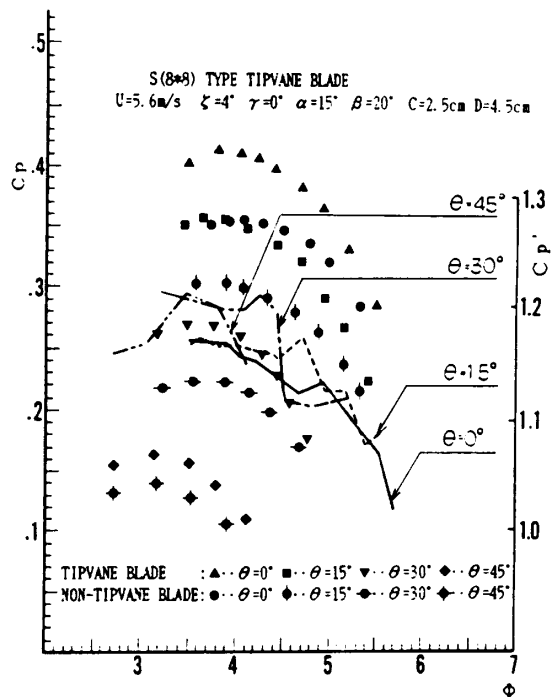


図 16 翼車回転面傾き角 θ と出力係数 C_p および出力係数比 I C_p' の関係、S(8*8)形チップペーンの場合

チップペーンは増出力装置のみならず取付角を変化させることによって、ブレーキ作用を持たすこともできることが明らかになった。すなわち、風速の変動に応じて、風車回転数になるべく一定に保つ一つの手段として、風車翼のピッチ角制御と同様に、チップペーンを用いることができる。

4・5 翼車回転面を流れに対して傾けた場合の風車性能 図15および図16では、翼車回転面を流れに対して傾けた場合にも、前記同様増出力効果があるかどうか検討する。図15には、V形チップペーン、図16には、S形チップペーン風車の出力係数と周速比の関係を示す。さらに、図15, 16には、チップペーン付きとチップペーンなし風車の出力係数比 I/C_p が実線 ($\theta=0^\circ$)、破線 ($\theta=15^\circ$)、一点鎖線 ($\theta=30^\circ$)、二点鎖線 ($\theta=45^\circ$) で示してある。

出力係数 C_p は、V形、S形ともに傾き角 θ を大きくするにつれて順次低下していく。一方、 C_p のほうは、両形式ともに、すべての θ に対して1より大きい、すなわち、翼車をどのように傾けても、チップペーンの増出力効果はみられる。しかし、増出力効果の割合は θ によって異なる。図15のV形では、 $\theta=45^\circ$ が最も大きく、 $\theta=0\sim30^\circ$ では、ほぼ同程度の増出力割合になる。図16のS形では、 $\theta=30\sim45^\circ$ で増出力割合は大きく、 $\theta=0\sim15^\circ$ では小さくなる。

5. 結 言

- (1) 種々の形状のチップペーンが考えられるが著

者らが提案するプレート状のチップペーンにおいてはV形およびS形状が増出力装置として有効である。最適形状のチップペーンを用いると等弦長翼においてチップペーンなし風車の1.2~1.25倍の出力増が得られる。

(2) V形およびS形状において翼端の翼弦張に対する縦横寸法比が重要である。

(3) チップペーンの反り角 α , β は重要な要素である。およそ $\alpha=15^\circ$, $\beta=20^\circ$ 程度が最適である。

(4) 翼端におけるチップペーン取付角の風車出力に対する影響はきわめて大きいので、チップペーン角度制御によって出力の増減および回転数一定の制御への応用が考えられる。

(5) チップペーン付き翼は回転面に対する風の流入角 θ が変化してもチップペーンなし翼と比べて高い性能を示す。

文 献

- (1) Th. Van Holten, Windmills with diffuser effect induced by small tip vanes, *Proc. Ins. Symp. Wind Energy Syst.*, Cambrige, U. K. (1976-9).
- (2) Th. Van Holten, *Proc. 2nd. Int. Symp. Wind Energy.*, Tipvane Research at T. U. Delft, Paper F-2, Amsterdam, (1978).
- (3) Van Bussel, G. J. W., *Status Rep. Tipvane Res.*, EWEA Conf., Rome, (1986), 691.
- (4) 本論文集 501 ページ.

討 論

〔質問〕 井 上 雅 弘 (九州大学工学部)

チップペーンを設けることにより、翼に作用する応力やねじりモーメントがどのように変化するのか、実験結果があればお示しいただきたい。

〔回答〕 現在まだ測定していない。今後測定する

予定である。なお、推定ではあるが、現在のところ高性能を示すチップペーンは形状が小さいので、あまり大きな応力やねじりモーメントにならないような気がする。