

チップベーンによる水平軸風車の回転数制御に関する研究*

清水 幸丸*¹, 松村 真次*²

Rotation Speed Control of Horizontal Axis Wind Turbine by Tip Vane

Yukimaru SHIMIZU and Shinji MATSUMURA

The paper describes about the rotation speed control of horizontal axis wind turbine by tip vane. Tip vane has the excellent ability to improve the performance of horizontal axis wind turbine. Also, we found that the rotation speed of wind turbine is controlled by the change of sweep angle of tip vane. The relationships among the sweep angle of tip vane, the change of wind speed and the rotor speed are investigated. As the results, the method to keep the constant rotor speed by means of electro-mechanical apparatus is developed, when wind speed changed.

Key Words: Fluid machine, Horizontal axis wind turbine, Tip vane wind turbine, Rotation speed control by tip vane, Sweep angle control, Braking effect of tip vane

1. 結 言

著者らは、独自の考えによるチップベーンを用いて水平軸風車の出力増大を試み⁽¹⁾⁽²⁾、前報⁽³⁾までに等弦長翼風車およびテーパー翼風車において実験的に成功したことを報告した。著者らは、過去の実験により、チップベーンは出力増加装置としてのみならず、チップベーン SWEEP 角 Λ (図4参照)を変化させることによって、ブレーキ効果を持たすこともできることを見いだした。そこで本報では、チップベーン SWEEP 角 Λ をステッピングモータを用いコンピュータコントロールすることによって、変動する風速中において回転数(出力)を一定に保つ制御を試みた。その結果、チップベーンの SWEEP 角制御によって、小さい風速変動においては回転数を一定に保つことが可能であり、大きな風速変動に対しては、主翼のピッチ角制御が必要になることを明らかにした。

2. 主な記号および定義式

U : 流入風速 m/s

R : 翼車半径 m

T : 発生トルク N・m

Ω : 角速度 rad/s

ρ : 空気密度 kg/m³

Λ : チップベーン SWEEP 角 (図4) deg

ζ : 翼ピッチ角 (図4) °

ξ : 風車傾き角 (図5) °

λ : 風速比 $= R\Omega/U$

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

3. 実験装置および方法

図1にこの実験に用いた風洞および風車全体図を示す。風車は2枚翼でロータ面は風洞出口1.2m下流に位置している。風車ナセル内部は二段軸になっており、ギア⑤によって1:1に連結されている。下段軸には左端よりタコジェネレータ⑦、トルクメータ⑧、そして負荷として電磁ブレーキ⑨が取り付けられている。電磁ブレーキは手動により負荷を変化させることができる。上段軸は中空になっており、右端に設置されたスリップリング⑥によってステッピングモータ④に信号を送る。ステッピングモータはボス部に取付けられており、シャフトによって連結されているチップベーン

* 原稿受付 平成3年5月9日。

*¹ 正員、三重大学工学部 (〒514 津市上浜町 1515)。

*² 学生員、三重大学工学部。

③の SWEEP 角を変化させる。表 1 に実験に使用した翼の諸元を示す。NACA 4412 断面のテーパねじり翼で、材質は主にバルサで硬化剤により強化しクリア塗装が施されており、内部の中空ステンレスパイプにチップペーン連結用のシャフトが通してある。タワーは⑩部で手動により回転可能で風車を風向に対し傾けることができる。風速計⑨はロータ面からみて 80 cm 前方、20 cm 右側、回転軸から 10 cm 下方にセットされている。図 2 に供試チップペーンの定義図、表 2 に諸元を示す。材質は 1 mm 厚のステンレスで、本制御実験では過去の増出力実験において比較的性能がよく、コンパクトな $V(8 * 5.4)$ 形チップペーン ($C+D+E=8$ cm, $B=5.4$ cm) を用いた。図 3 には、本実験のデ

ータ入力系および制御信号出力系のブロック線図を示す。簡易風速計から風速、タコジェネレータから風車回転数、トルクメータから発生トルクの測定データを DC 1 V 以下の信号に変換し A-D 変換機を介してパーソナルコンピュータで処理する。処理データは記録と同時に風車回転数制御プログラムに入力され、PPI ボードを通してステッピングモータへ必要な信号を出力させる。その信号は駆動装置で演算、増幅してから並列に配線されているステッピングモータを駆動させる。駆動装置へはステッピングモータ駆動用の DC 12 V と演算 IC 用の DC 5 V 電源が接続されている。

4. チップペーンのブレーキ効果と制御方式

チップペーンは図 4 に示すごとく、その取付角の一つ SWEEP 角 Λ を変化させることができる。後述の図 11 にチップペーン SWEEP 角 Λ と風車性能の関係を示す。前報までに述べたように $\Lambda=0^\circ$ においては、チップペーンなし風車に比べ出力が増加することが明らかである（チップペーンによる水平軸風車の増出力効果）。しかし、 Λ を大きくしていくと図 11 のごとく出力が低下していく。つまり Λ を大きく変化させると風車に大きくブレーキがかかり（または緩まり）、小さく変化させると小さなブレーキがかかる（または緩まる）ことがわかる。この SWEEP 角の変化による風車回転力への影響を用いて、変動する風速に対し風車回転数

表 1 翼諸元

airfoil section	NACA4412
plane form of blade	taper twisted blade
material	wood+stainless
length of blade	0.480 (m)
tip chord length	0.068 (m)
aspect ratio	5.714
taper ratio	0.083
radius of rotor blade	0.590 (m)

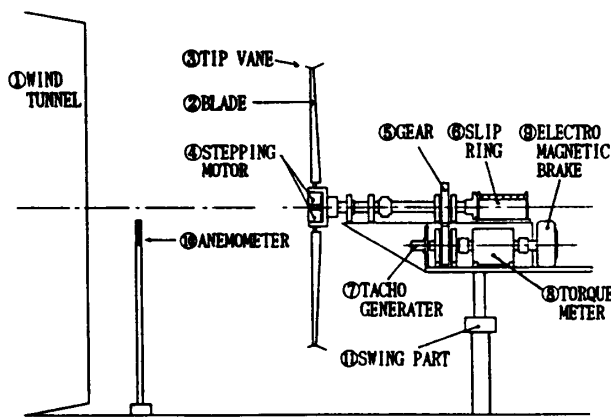


図 1 実験装置全体図

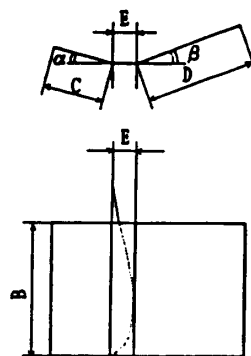


表 2 チップペーン諸元

Type	$V(8*5.4)$
$A(C+D+E)$	8.0 (cm)
B	5.4 (cm)
C	2.5 (cm)
D	4.5 (cm)
E	1.0 (cm)
α	15 (deg)
β	20 (deg)
Material	Stainless

図 2 供試チップペーンの定義図

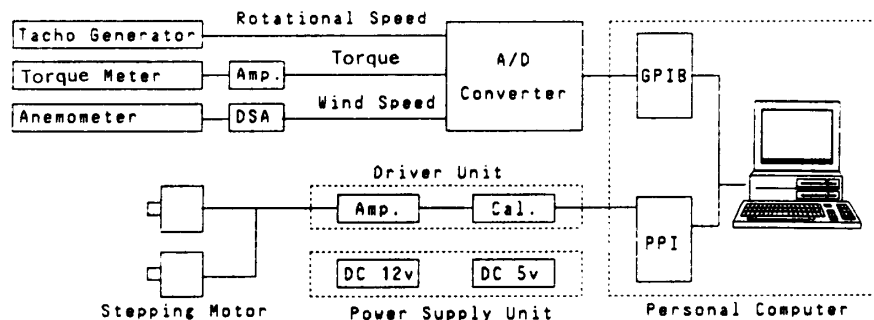


図 3 データ入力系および出力系のブロック線図

* DSA : Dynamic Strain Amplifier
Cal.: Circuit of Calculation Part

を一定に保つ制御を試みた。制御量, つまりチップペーン SWEEP 角変化量は制御目標回転数 [N_{aim} [rpm]: 本実験においては 380 rpm に設定した] と実際の風車回転数との差 R_e と, その時間変化量 A_c (角加速度) をもとに決定する。そのために, 前回の制御のときに取り込んだ風車回転数 [N_{i-1} [rpm]] と, 今回取り込んだ風車回転数 [N_i [rpm]] を用いて R_e と A_c を求める。ここで, 前回の風車回転数の取込みから今回の風車回転数の取込みに要する時間, つまり回転数取込みサンプリングタイム T_{smp} [s] は, 約 0.25 s である。 R_e と A_c の計算式は, 以下のように定義した。

$$R_e \text{ [rpm]} = N_i - N_{aim}$$

$$A_c \text{ [rpm/s]} = (N_i - N_{i-1}) / T_{smp}$$

R_e および A_c をより理解しやすくするため, それぞれ rpm, rpm/s という単位を用いた。制御量を考えるに当たり, まず風車の回転数変化を単純に単位時間ごとに考えてみる。ある任意の時間 t の目標回転数との差を $R_{e,t}$, そのときの時間変化量 (角加速度) を A_c とすると, 単位時間後の目標回転数との差 $R_{e,t+1}$ は以下のようなになる。

$$R_{e,t+1} = R_{e,t} + A_c$$

この関係式をもとに, 制御量を考える。

$R_{e,t} + A_c = 0$ となるときは単位時間後の目標回転数との差 $R_{e,t+1}$ は零となり, 制御を行わなくても, すなわち SWEEP 角を変化させなくても目標回転数に達することになる。

$R_{e,t} + A_c > 0$ のときは単位時間後には目標回転数を上回ってしまうので, ブレーキを掛ける。すなわち SWEEP 角をより大きくする必要がある。

$R_{e,t} + A_c < 0$ のときは逆に下回ってしまうので, ブレーキを緩める。すなわち SWEEP 角をより小さくする必要がある。

実際には A_c は常に変化しており, また, 回転数を取り込んでから次の回転数を取り込むまでの間に制御を行うため, 風車の運動はこのとおりにはない。そこでこの考えを基本として, 著者らは翼車の回転数制御をデジタル的に行うため, 翼車の角速度変化値 A_c と SWEEP 角 Λ の関係を図 6 に示すような形式で表し, 利用した。図 6 の関係は実験的に求めた。以下にその制御に必要な R_e, A_c および Λ の関係を説明する。

$5 < |R_e + A_c| \leq 15 \cdots \Lambda = 0.9^\circ$ 変化の弱ブレーキをかける (または緩める)。

$15 < |R_e + A_c| \cdots \Lambda = 3.6^\circ$ 変化の強ブレーキをかける (または緩める)。

$|R_e + A_c| \leq 5 \cdots$ 慣性力によって風車が目標回転数を大きく通過してしまうことを避けるため, 無制御 (Λ を変化させない) 領域を設けた。

図 7 に本制御実験のために作成したコンピュータプログラムのフローチャートを示す。上記したように, 風車回転数 (風速およびトルクも共に) を約 0.25 s 間隔で取り込み, その間にあらかじめ入力しておいた制御目標回転数を用いて R_e と A_c を計算し, 制御量を判断して, ステッピングモータへ信号を送りチップペ

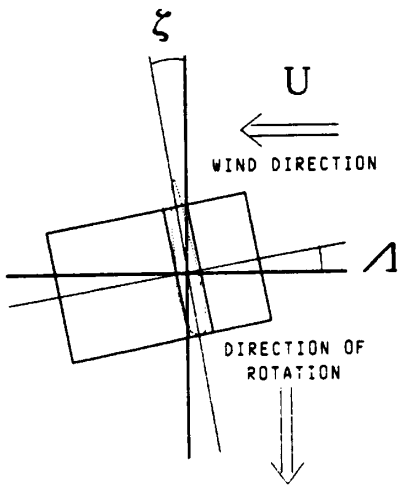


図 4 翼ピッチ角 ξ およびチップペーン SWEEP 角 Λ の定義図

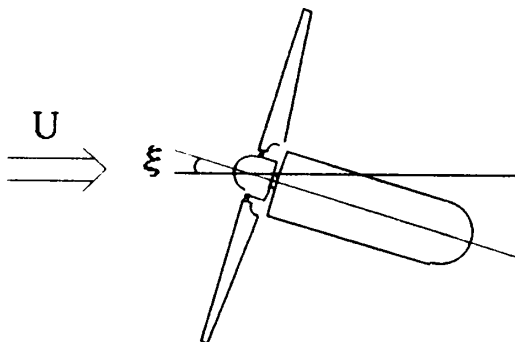


図 5 風車傾き角 ξ の定義図

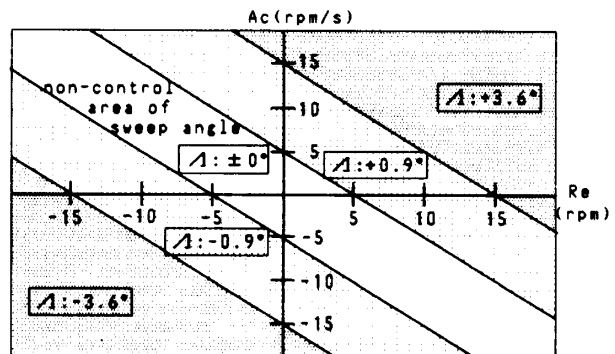


図 6 チップペーン SWEEP 角 Λ 制御領域図

ーン SWEEP 角を変化させて風車回転数制御を行う。

5. 実験結果および考察

5.1 チップペーン SWEEP 角 Λ 変化による風車回転数制御 電磁ブレーキ(負荷)を一定に保ち、風速を変動させチップペーン SWEEP 角 Λ を変化させることによって、回転数を一定に保つ(定出力)制御を試みた。図8にチップペーン SWEEP 角変化による制御を行わなかった場合、図9に制御を行った場合の風速 U の変動に対する風車回転数 N 、チップペーン SWEEP 角 Λ 、トルク T 、性能 C_p を示す。制御を行わなかった場合、回転数は風速が約 1 m/s 上昇すると、200 rpm 以上上昇するのがわかる。しかし、SWEEP 角変化による制御を行うとほとんど回転数変動がなくなる。風速が上昇または下降している過程においても、 ± 20 rpm 以内の変動しか起こらず、風速が一定となると目標回転数にすぐさま落ち着く。しかし、風速がある程度以上上昇(この実験においては 5.9 m/s 以上)すると、SWEEP 角によるブレーキ効果が最大、つまり $\Lambda=90^\circ$ になっても、回転数が目標回転数を上回ってしまう領域がおとずれる。そこで、ある程度以上の風速変化に対しては、例えば翼ピッチ角コントロールなどを含む制御が必要となってくる。本実験に用いた風車には、翼ピッチ角 (ζ : 図4参照) を自動的

にコントロールする機能を持ち合せていないため、翼ピッチ角を手動でセットし直しながら実験を行った。図10はピッチ角 ζ を 9° に設定したときの SWEEP 角による制御の結果である。 $\zeta=1^\circ$ では制御できなかった 5.9 m/s 以上の風速変化に対しても回転数を下げる制御が可能となった。図12にピッチ角を 9° に設定したときの風車性能曲線を示す。ここでピッチ角 ζ

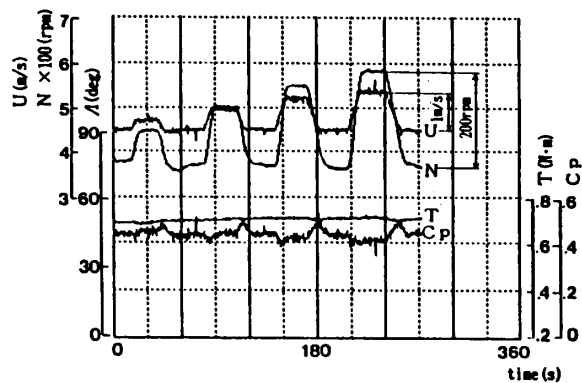


図8 SWEEP 角変化による制御を行わなかった場合の風車の動き (翼ピッチ角 $\zeta=1^\circ$, 風車傾き角 $\xi=0^\circ$)

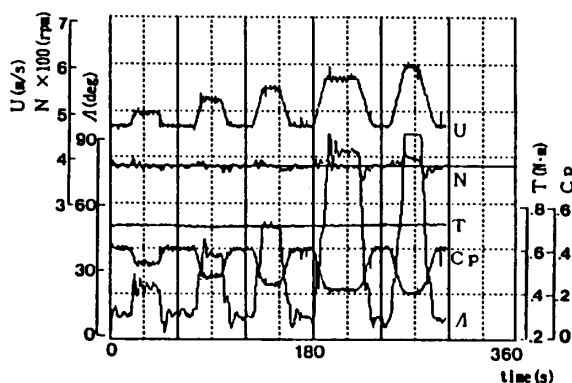


図9 翼ピッチ角 $\zeta=1^\circ$ における SWEEP 角変化による回転数制御実験結果 (風車傾き角 $\xi=0^\circ$)

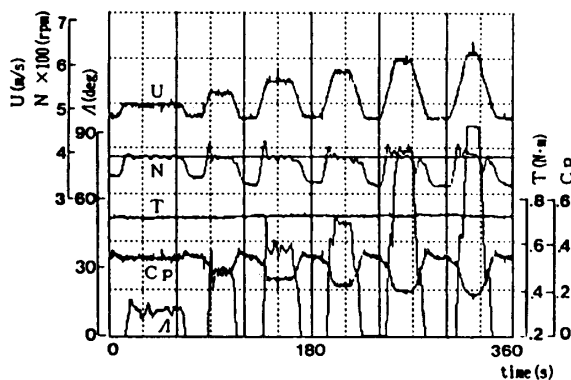


図10 翼ピッチ角 $\zeta=9^\circ$ における SWEEP 角変化による回転数制御実験結果 (風車傾き角 $\xi=0^\circ$)

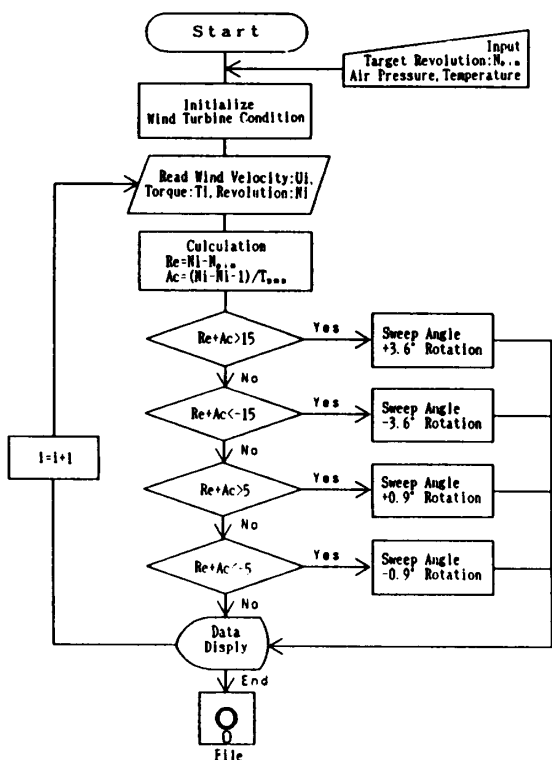


図7 制御プログラムフローチャート

$\xi=1^\circ, 9^\circ$ の結果(図11, 12)を比べると、 $\xi=9^\circ$ は、回転周速比域が全体的に低くなっていることがわかる。おのおのの図に破線で示されているのは、定回転(380 rpm)、定トルク(この場合 $0.7 \text{ N}\cdot\text{m}$)、つまり定出力で風車を運転したときの周速比に対する性能である。また一点鎖線は380 rpmで回転しているときの周速比から割り出した風速を示している。これをみると $\xi=1^\circ$ においては風速が 5.5 m/s 近くまでは380 rpmで回転することができるが、 6 m/s では風車が失速領域に陥ってしまうことがわかる。しかし $\xi=9^\circ$ においては 6 m/s 以上でも380 rpmで回転できることがわかる。ただしこの場合逆に、風速 5 m/s 以下では380 rpmで回転できない。これらのことは実際に制御を行った結果(図9, 10)と比較的一致している。以上のことから、チップペーン SWEEP角による風速変動に対する定回転制御には限界があり 1 m/s 程度の風速変動に対しては、手軽に性能よく制御できるが、ある程度以上の風速変動に対しては、ピッチ角などを併用した制御を行わなければならないことがわかる。

5.2 斜風中でのチップペーン SWEEP角による回転数制御 野外に風車を設置した場合、風は必ずしも翼車面に垂直に流入してくるとは限らない。そこで、斜風中においてもチップペーン SWEEP角 Λ によって回転数がコントロールできるか実験的に検討した。

斜風中においては、主流と翼の回転による相対速度との合成速度および角度が、翼のアジマス角によって変化する。その場合、チップペーンの有無にかかわらず、その傾き角 ξ を大きくしていくと、風車性能が低下し、風車回転領域の周速比も全般的に低下すること、そして、斜風中においてもチップペーンによって風車出力が増大することがわかっている(第1報の4.5節参照)。図13には $\xi=15^\circ$ に設定したときのチップペーン SWEEP角 Λ に対する風車性能の関係を示した。図13より、斜風中でも SWEEP角 Λ を大きくしていくにつれ性能が低下すること、また、 $\xi=0^\circ$ のときよりも Λ の変化に対する周速比の低下が大きく、より出力一定の回転数制御が風車の安定している領域において行えそうであることが予想される。図14~16におのおの $\xi=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ における SWEEP角 Λ による回転数制御の結果を示す。斜風中においても SWEEP角による制御が可能であることがわかる。また、風車傾き角 ξ が大きくなるにつれ、同じ風速の上昇に対し、より小さな SWEEP角の変化で制御ができる。ただし、 $\xi=15^\circ$ において風速が 5.5 m/s 以上になると、回転数が振動したまま収束しなかった(図14:一点鎖線で囲まれた範囲)。これはおそらく図13において、SWEEP角 Λ が 50° から 90° の範囲においては、風車が380 rpmで回転する場合には、翼車自身が失速領域

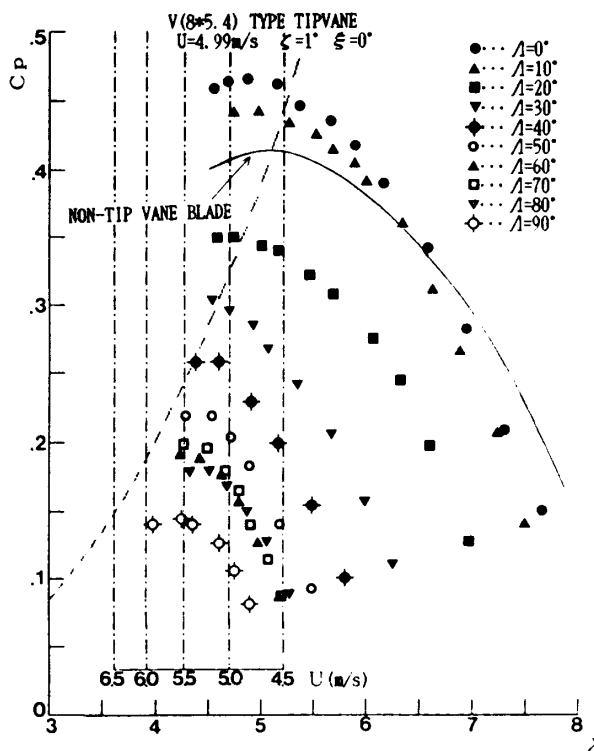


図11 チップペーン SWEEP角 Λ と風車性能の関係 (翼ピッチ角 $\xi=1^\circ$)

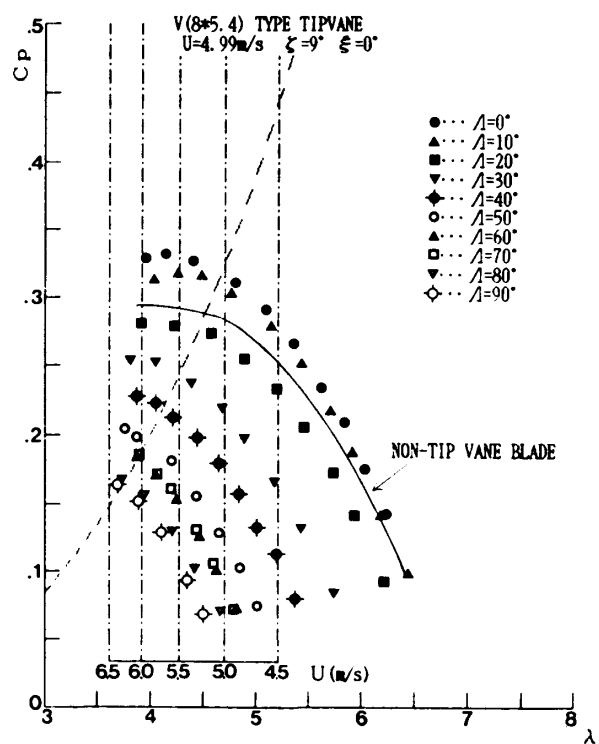


図12 チップペーン SWEEP角 Λ と風車性能の関係 (翼ピッチ角 $\xi=9^\circ$)

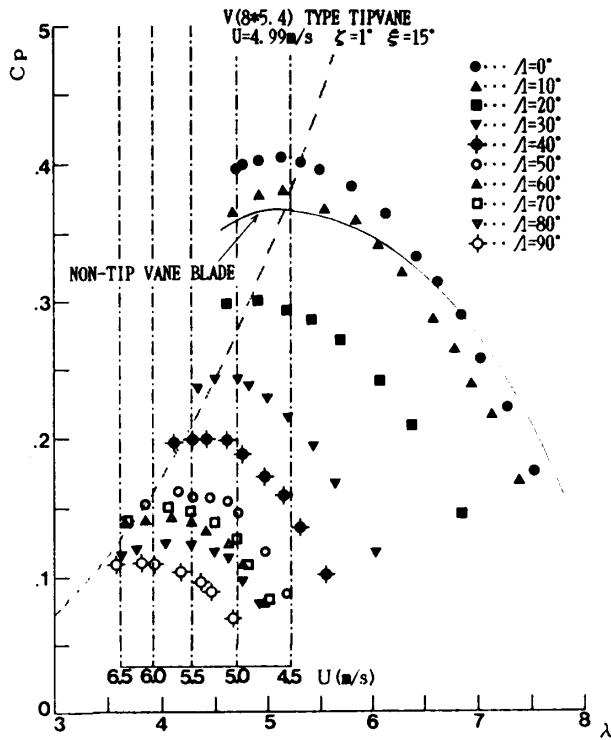


図 13 チップペーン SWEEP 角 Λ と風車性能の関係 (風車傾き角 $\xi=15^\circ$)

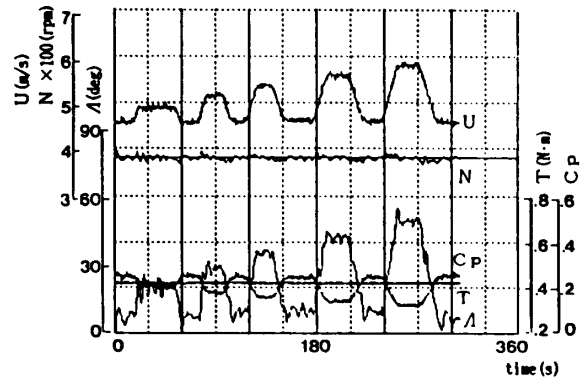


図 15 風車傾き角 $\xi=30^\circ$ における SWEEP 角変化による回転数制御実験結果 (ピッチ角 $\zeta=1^\circ$)

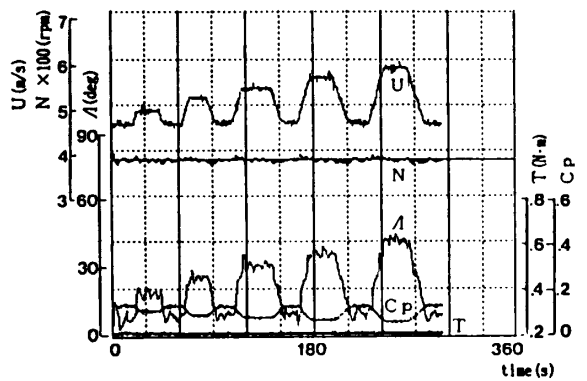


図 16 風車傾き角 $\xi=45^\circ$ における SWEEP 角変化による回転数制御実験結果 (ピッチ角 $\zeta=1^\circ$)

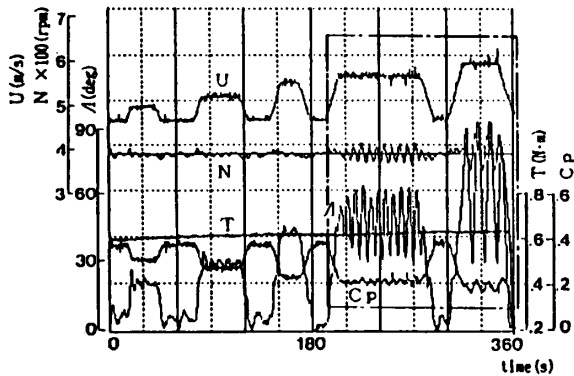


図 14 風車傾き角 $\xi=15^\circ$ における SWEEP 角変化による回転数制御実験結果 (ピッチ角 $\zeta=1^\circ$)

に陥りやすく、非常に不安定である。また、SWEEP 角の変化に対する性能の低下があまりなく、とくに $\Lambda=60^\circ$ と 70° では逆に 70° のほうが性能がよく、このため、SWEEP 角を変化させてもブレーキ効果 (または、アクセル効果) がなかなか得られず、目標回転数を通過してしまうものと思われる。SWEEP 角による回転数制御を実用化するにはこの現象を考慮した制御領域を考える必要がある。また、より高精度な制御を行うた

めに、風速の変動を事前にキャッチし、SWEEP 角をコントロールすることも今後の研究課題になる。

6. 結 言

- (1) チップペーン SWEEP 角をコントロールすることによって風車回転数を一定に制御できる。
- (2) SWEEP 角だけでは制御できない大きな風速変動に対し、翼ピッチ角を組合せることにより制御可能となる。
- (3) 斜風中においても、チップペーン SWEEP 角によって回転数を一定に制御できる。

文 献

- (1) 清水・吉川・松村, 機論, 56-522, B(1989), 495-501.
- (2) 清水・吉川・梶本, 機論, 56-522, B(1989), 502-507.
- (3) 清水・松村・今村, 機論, 57-543, B(1991), 3845.