

水平軸風車周囲の流れ状態と風車性能に関する研究*

(翼に適切なねじれ角を与えた場合とねじりなしの場合の比較)

清水 幸丸**, 中村 俊祐***
Yukimaru SHIMIZU, Syunsuke NAKAMURA

Key Words: Fluid Machine, Horizontal Shaft Wind Turbine, Flow Pattern around the Turbine, Characteristics, Twisted Blades, Straight Blades

1. ま え が き

著者らは、これまでにねじりのない直線翼を用いて水平軸風車の諸特性と風車周囲の速度分布の関係を研究してきた⁽¹⁾⁽²⁾。これまでの経験から、翼の出力効率を高めるためには翼に適切なねじりを与えたらよいということが明らかになっているが、実際使用されている水平軸風車⁽⁵⁾⁽⁶⁾では必ずしもねじりをつけられておらず、翼にねじりがある場合とない場合について、何がどのように異なるのか不明な点が多い。そこで本報では翼に適切なねじりを与えた場合について風車周囲の速度分布を実測し、ねじりなし翼の場合と比べ、両者の流れ状態がどのように異なるのか、また、流れ状態の違いが風車特性にどのような影響をおよぼすかを検討した。また、水平軸風車はしばしば斜風中で運転する場合が生じるが、このような場合風車周囲の流れがどのようになり、その結果出力特性がどのように変化するか興味ある問題なので実験的に解明することを試みた。この場合も、ねじり翼およびねじりなし翼の比較を行った。以上の研究の結果、種々の興味ある事実が明らかになった。

2. 主 な 記 号

D : 翼車直径 $= 2r_t$
 L : 翼車出力 $=$ トルク \times 角速度
 M' : 翼車後流に生じる無次元の角運動量流量
 [式(5)]
 r : 翼車の半径位置
 r_t : 翼車外半径
 u : 翼車回転面に垂直な速度

U : 主流速度

Z : 翼の枚数

C_l, C_{lN} : 出力係数 [詳細は式(1), (2)で定義]

C_t, C_{tN} : トルク係数 [詳細は式(3), (4)で定義]

V_x, V_y, V_z : 図2に示した座標の速度成分

α : ピッチ角 (図3)

α'' : 翼のねじれ角度 (図3)

β_1, β_2 : 回転翼の入口および出口角 (図11)

θ : 回転面の傾き角 (図1)

ϕ : 回転中の翼の迎え角 (図3)

ϕ : 翼先端の周速比 $= \Omega r_t / U$

Ω : 翼車の角速度

3. 定 義 式

風車の出力係数は次の2種類で定義した。その1は翼車回転面を流れに垂直な面に投影した面積、図1の A_θ 、を通過する流れの運動エネルギーを入力とする場合、ただし、 $\theta \neq 90^\circ$

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U^3 \pi r_t^2 \cos \theta} \dots\dots\dots (1)$$

その2は回転面が傾いても、翼車に対する入力是不変とする場合、

$$C_{lN} = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U^3 \pi r_t^2} \dots\dots\dots (2)$$

トルク係数も出力係数と同様その1とその2に対応する係数を定める。

$$C_t = C_l / \phi \dots\dots\dots (3)$$

$$C_{tN} = C_{lN} / \phi \dots\dots\dots (4)$$

風車後流に発生する一方向旋回流の強度を定めるため無次元角運動量流量を用いた。

* 昭和59年11月4日 北陸信越支部北陸地方(富山)講演会において講演、原稿受付 昭和59年6月8日。

** 正員、三重大学工学部 (〒514 津市上浜町)。

*** 准員、富士電機(株) (〒210 川崎市川崎区田辺新田)。

$$M' = \frac{\int_{r_i}^{r_t} \rho \pi V_u V_z r^2 dr}{\rho \pi U^2 r_i^3} \quad \dots\dots\dots (5)$$

回転中の翼の迎え角は次のように求められる (図3).

$$\varphi = \alpha - \tan^{-1} \left(\phi \times \frac{r}{r_i} \right) + \alpha'' \quad \dots\dots\dots (6)$$

4. 実験の装置および方法

実験には前報⁽¹⁾の図1および図2と同様の装置を用いた。簡単に述べると、風車直径は1mφ、風洞吹出し口は八角形で対辺間距離は1.45m、風車は吹出し口から約1.5Dの位置に設置してある。風車回転面は、気流に対して任意の角度で傾けることができる。傾き

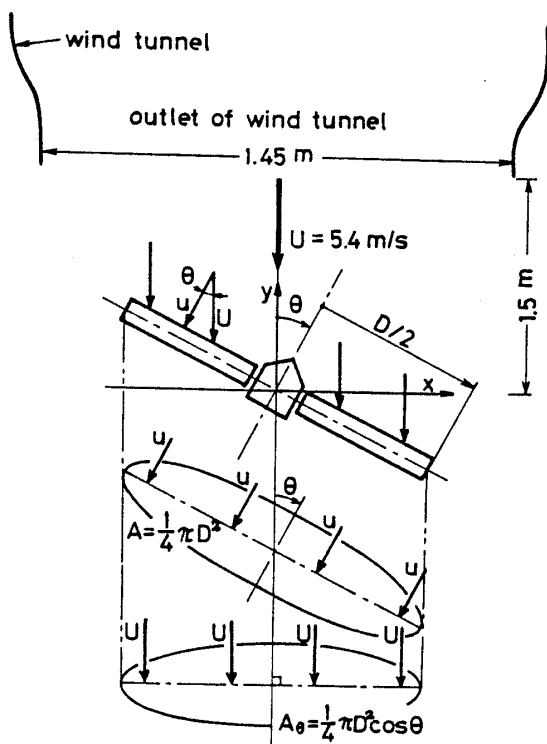


図1 風車および風洞と座標系、翼車の投影面積の定義

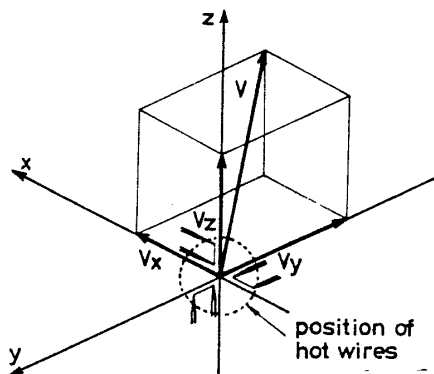


図2 熱線風速計の配置と座標系

角の定義は図1に示す。風車には2枚の翼を用い、翼断面形状はNACA 0012で適切なねじれ角を与えた等弦長翼および前報で用いたねじりなし等弦長翼の2種類である。図3には翼形状および翼のねじれ角を示す。ねじれ角は最大出力時に翼端から1/2以上の半径位置で迎え角が10°から12°の範囲に入るようにし、さらに軸近くでは翼の強度上の問題を考慮し、ねじれ角を小さめに設計した。NACA 0012翼形の揚力係数および抗力係数は文献(3)の462ページに記されているので省略する。本研究では、翼にねじりを与えた場合の風車周囲の流れ状態の変化と風車特性の関係を解明するため速度分布を測定した。測定では、3本の熱線(定温度形熱線風速計、5μタングステン線使用)を図2に示すように配置し、x, y, zの3方向の速度成分を同時に測定した。また、表面タフト法を用いて回転中の翼表面の流れ状態を可視化した。実験に際しては、タフトの遠心力の影響を極力さけるため木綿しゅう糸を十分もみほぐし、ふわふわの状態にして使用した。風車出力の測定には前報の図1と同様の装置を用い、トルク、回転数を測定した。その際、軸系の損失トルクはあらかじめ検定し求めた。実験風速は5~6 m/sの範囲で一定にして行った。

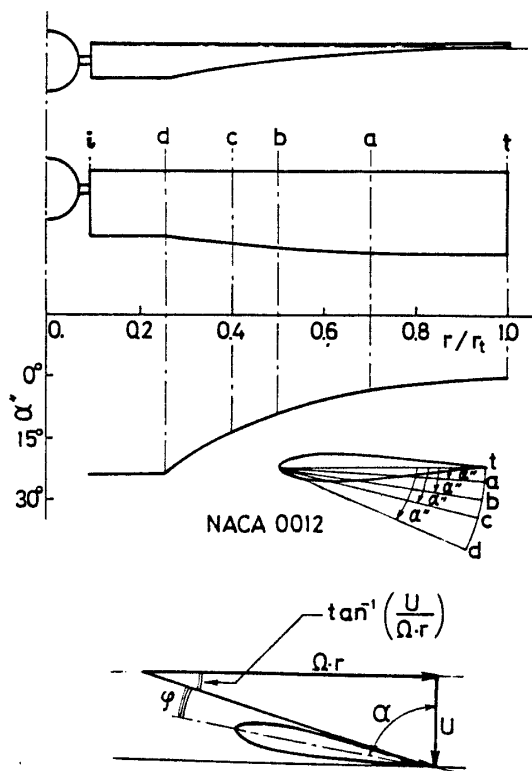


図3 供試ねじり翼の詳細図およびピッチ角α、迎え角φと回転翼の相対速度の関係

5. 実験結果と考察

5.1 ねじり翼を用いた場合の風車周囲および翼面上の流れ

前報では、ねじりのない等弦長翼をもつ水平軸風車周囲の速度分布と性能の関係を検討した。その後の著者らの研究によれば、風車周囲の流れおよび特性は、翼にねじりがある場合とない場合では相当異なることが明らかになった。風車の運転条件は最大出力の場合や無負荷の走り放し状態など多様に変化するが、それぞれの運転条件においてどのような流れ状態になるか知ることは、風車を高性能かつ安全に運転する観点からきわめて重要である。まず、最大出力係数を示す場合の流れを検討する。図4には、風車が最大出力係数を示す場合の速度分布を示す。回転面は、上から $\theta=0$ （正面向き）、 30° および 60° に傾け、斜風の場合も記載した。図4中実線は等弦長ねじり翼の場合、破線は比較のため記入したねじりなし等弦長翼の結果である。図4(a)、 $\theta=0^\circ$ の場合、ねじり翼使用の場合には、風車後方の速度が翼端から半径の半分ぐら

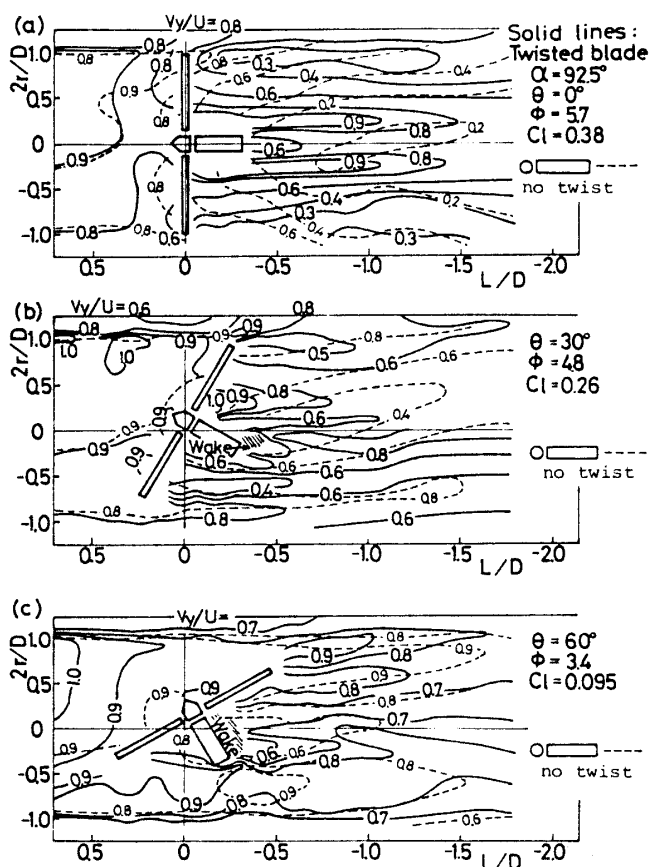


図4 最大出力係数時の風車周囲の軸速度分布〔ねじり翼（実線）とねじりなし翼（破線）の比較、回転面の傾き角変化〕

翼車中心部の回転軸近傍では、流速はほとんど減速されず $V_x/U=0.8\sim 0.9$ と高い速度を示す。このような速度分布が生じる理由を検討する。図5には最大出力係数を示すピッチ角 $\alpha=92.5^\circ$ 、 $\phi=5.8$ を中心にその前後のピッチ角 85° 、 90° 、 95° での最大出力時の迎え角分布を示す。なお、図5の迎え角分布は翼面上の流れが準二次元的であるという仮定のもとに求めたものであり、実際の流れとは多少異なるが、十分考察の目安になると考えられる。 $\alpha=92.5^\circ$ の場合、迎え角は翼半径比が $1>r/r_t\geq 0.4$ の範囲では $9\leq\phi\leq 12^\circ$ の間にあり、翼は十分な揚力を発生する状態にある。中心部に近づき $r/r_t\leq 0.4$ では迎え角は急減少し、 $r/r_t=0.2$ では $\phi=0^\circ$ になる。したがって、翼車中心に近い翼根部では翼は無作用の状態に近くなる。また、 $r/r_t\leq 0.09$ の範囲には翼は存在しない。したがって、気流は翼車中心部をほとんど抵抗を受けない状態で通過し、上流と下流間の減速はほとんど行われぬ。これに対して、図5中破線で示すねじりなし翼の場合は速度分布の傾向は大きく異なり、翼車下流の流れは半径外側に広がる傾向を示し、回転軸近傍では速度は $V_x/U=0.2\sim 0.4$ と大幅に減速され、半径外側に進むにつれて翼車上下流の減速割合は小さくなる。この傾向はねじり翼の場合と相当異なる点であり注目すべき現象である。図4(b)は回転面を $\theta=30^\circ$ に傾けた場合である。実線のねじり翼の流れの特徴は、翼車上下流間の減速割合が全体的に小さくなり、回転軸近傍にみられた高速領域は回転面の後退した側に移動する。回転面両外端の減速割合は $V_x/U=0.4\sim 0.6$ 程度で、前方に突出た回転面側のほうが流速の減速割合は大きくなる。また、全体的に流れは回転面に沿った方向に傾く傾向

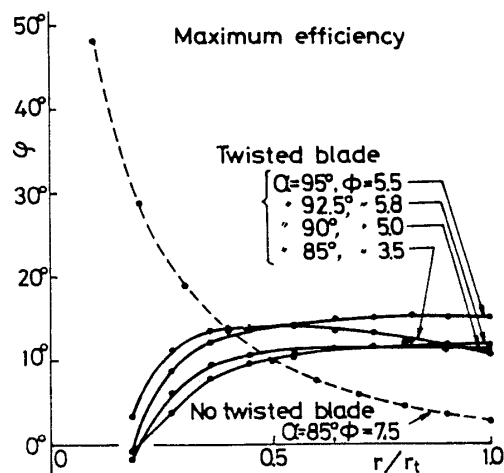


図5 最大出力係数時の回転中の翼の迎え角分布（流れは準二次元と仮定、ねじり翼とねじりなし翼の比較）

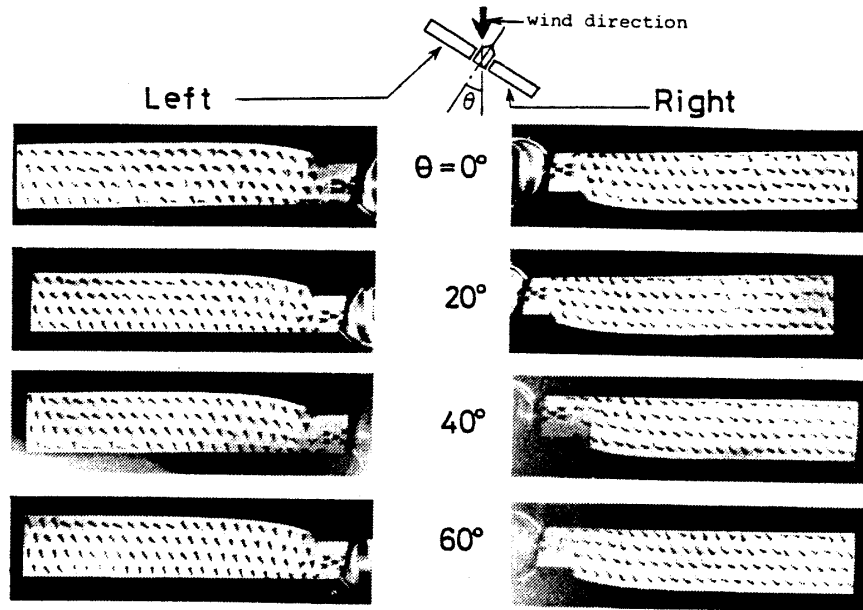
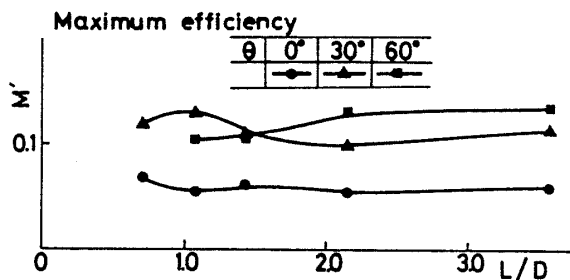
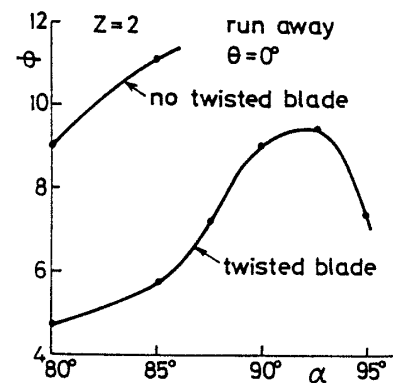


図 6 最大出力状態における翼下流面の可視化写真

図 7 最大出力係数時の風車下流に発生する一方
旋回流の強さ (回転面傾き角を変化)

がみられる。破線で示したねじりなし翼の場合は図 4 (a) 同様ねじり翼の場合と逆の傾向を示し、翼車下流の速度は中心部で小さく翼端付近で大きくなる。この場合も全体的な流れは回転面に沿った方向に傾く傾向を示す。図 4 (c) は回転面を 60° まで大きく傾けた場合である。これだけ大きく傾けると翼の作用は弱まり翼車上下流間の流れの減速も小さくなる。また、回転軸付近でみられた高速領域もなくなり、ねじり翼とねじりなし翼の目立った違いはなくなり、全体的にみて速度分布の傾向はほぼ等しくなる。続いて図 6 には翼負圧面の可視化写真を示す。最大出力係数を示すピッチ角 $\alpha = 92.5^\circ$ の場合で表面タフト法を用いた。 $\theta = 0^\circ$ の場合、迎え角が大きく最大揚力を発生している状態であり、左右ともに前縁はく離が生じている。しかし、かなりの領域のタフトは翼回転面付近のひろがり流れのため翼端方向へ若干傾くが、はく離はしない。翼後縁部でのタフトの傾きは相当大きくなる。 $\theta = 20^\circ$ では、まだ前縁はく離もみられ、比較的 $\theta = 0^\circ$ と似た流れ状態になる。 $\theta = 40^\circ$ では、左列の上流側へ突き出たほう

図 8 走り放し状態における周速比とピッチ角の関
係 (ねじり翼とねじりなし翼の比較)

の翼面上の流れは前縁はく離を伴った大きな揚力発生状態になるが、右列の下流側へ後退した翼面上のタフトはほとんど半径外向きになり、揚力の発生は相当低下する。 $\theta = 60^\circ$ まで大きく傾けると、 $\theta = 40^\circ$ に比べタフトは逆に翼弦方向へ傾き一見流れは良好に見えるが、この流れは後図の走り放し状態に近づく結果であり、翼の迎え角は小さく、揚力の発生は小さくなる。無負荷運動時の流れ状態については後図で述べることにする。図 7 には式 (5) より求めた翼車下流の一方旋回流の強さ M' を示す。 $\theta = 0^\circ$ の場合、回転面下流の一方旋回流は最も小さく、 $\theta = 30, 60^\circ$ の場合の約 $1/2$ 程度になる。 $\theta = 60^\circ$ の一方旋回流は以外に強く、風車直径の 2 倍下流において $\theta = 0^\circ$ の場合の M' の 2 倍強になる。なお、風車後方において、直径の 3 倍程度の距離では旋回流強さはほとんど変化せず持続する。

続いて、無負荷運転時の流れを検討する。風車は走り

放し状態, すなわち無負荷状態で一定周速比に達するが, その値は翼のピッチ角および翼のねじり状態によって異なる。図 8 には, 2 種類の翼の走り放し状態における周速比とピッチ角の関係を示す。ねじり翼の走り放し周速比の最大値は $\alpha=92.5^\circ$ で得られ, $\phi=9.4$ になる。この値はねじりなし翼の最大値 11 より小さい。図 9 にはこの場合の風車周囲の速度分布を示す。図 9 より翼車中心部下流の軸方向速度は加速され, 上流側より速くなる。また, 図 10 に示した走り放し時の迎え角分布より, $\alpha=92.5^\circ$ の場合をみると翼端で $\phi=8.5^\circ$ になり, これより中心部に向かって迎え角はゆるやかに減少し, $r/r_t=0.37$ で $\phi=0^\circ$ になる。これ以降は急激に減少し, 迎え角は負になる。このように, 走り放し状態といえども $r/r_t=1$ から $r/r_t=0.31$ の範囲では翼は十分仕事を行っている。しかし, $r/r_t \leq 0.37$ の範囲では翼は逆にポンプ作用を行う。軸流羽根がポンプ作用を行う条件は図 11 に示した速度三角形より V_{y2} (下流側軸速度) $> V_{y1}$ (上流側軸速度) あるいは β_2 (出口角) $> \beta_1$ (入口角) の場合であり, $H_{thm} = (u/g) V_{ym} (\cot \beta_1 - \cot \beta_2)$ なる揚程を生じる。図 9

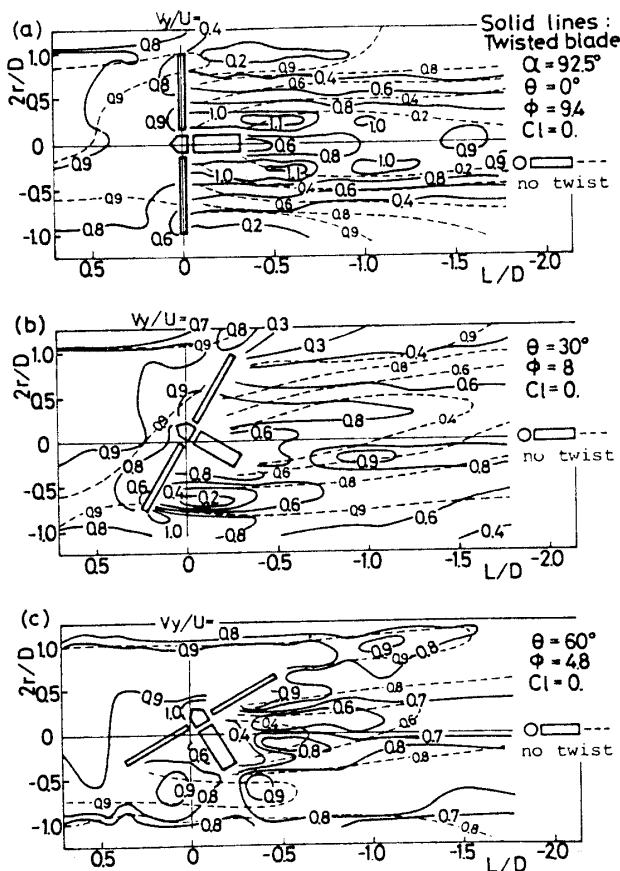


図 9 走り放し状態における風車周囲の軸速度分布 (ねじり (実線) およびねじりなし翼 (破線) の比較, 回転面の傾き角変化)

の速度分布より単純に判断すれば, 走り放し状態の翼車中心部の上下流の軸速度は $V_{y2} > V_{y1}$ になるので, 上記のポンプとしての条件を満足し流入流れを加速する。この結果, 翼端側の半分以上で十分風車としての仕事をするにもかかわらず, 中心部でのポンプ作用によって翼車出力が消費される。このような状態にさらに回転軸系の損失トルクが加わって翼車は一定周速比に達する。図 12 には走り放し状態における可視化写真を示す。 $\theta=0^\circ$ の場合, 図 6 に示した最大出力係数の場合と比べて, 走り放しの場合は迎え角が小さいため前縁はく離は見られないが, 全体的に見てタフトの翼端側への傾きはやや大きくなる。回転面の傾き角 θ が 20° までは $\theta=0^\circ$ の場合と大差はないが, $\theta=40^\circ$ まで傾くと, 上流側へ突出した翼面上 (左列) の流れはほぼ翼弦方向を向き良好な状態を保つが, 下流側の翼面上 (右列) では流れは大きく翼端側へ傾きはく離領域を伴った悪い流れ状態になる。一方, ねじりなし翼の場合

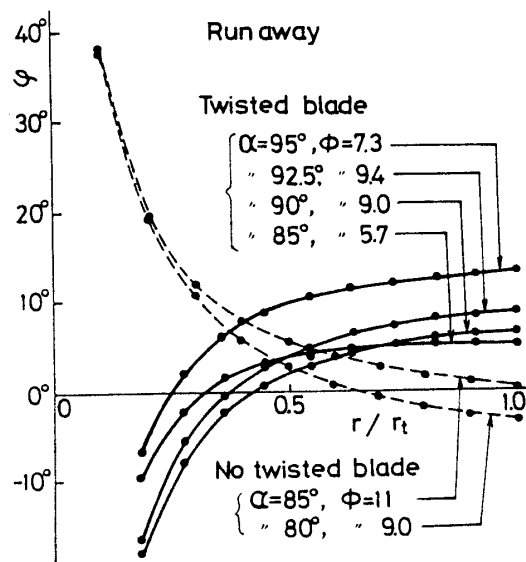
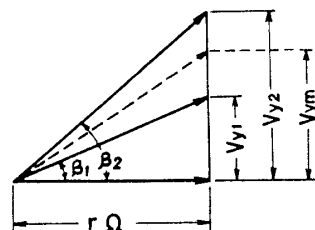


図 10 走り放し状態で回転中の翼の迎え角分布 (流れは準二次元と仮定, ねじり翼とねじりなし翼の比較)



$$H_{thm} = \frac{rQ}{g} V_{ym} (\cot \beta_1 - \cot \beta_2)$$

V_{y1} , V_{y2} and V_{ym} : axial velocities at inlet, outlet and mean value.

$$\cot \beta_1 = \frac{rQ}{V_{y1}}, \cot \beta_2 = \frac{rQ}{V_{y2}}$$

図 11 翼車の一部がポンプ作用を行う場合の速度三角形

は上記の場合と相当異なる。図8より走り放し時の周速比の最大値は $\alpha=85^\circ$ で $\phi=11$ に達する。この状態の迎え角分布は図10に破線で示す。翼端ではほぼ零、これより順次迎え角は増大し、翼の中間の $r/r_t=0.5$ で $\phi=5.5^\circ$ 、 $r/r_t=0.25$ で $\phi=16^\circ$ 、これより中心部に向かって迎え角はさらに大きくなり翼は失速しはじめる。そして、翼根部は完全な失速領域になる。この結果、図9に破線で示した速度分布から明らかなように、失速領域の翼が大きな抵抗となるため回転軸近傍

の流れの通過状態が悪くなり、流れは翼端方向に広がりながら流れる傾向になる(前報¹⁾の図14の可視化写真も参照願いたい)。このような状態での走り放しは翼端部での仕事は比較的小さいが、中心部でのポンプ作用が見られないのでねじり翼に比べ翼の抵抗が小さく、釣り合いに達する周速比は大きくなる。

上記のごとく、同じ走り放し状態であっても翼にねじりがある場合とない場合では、風車周囲の流れ状態は相当異なった状態になることは注目すべき現象であ

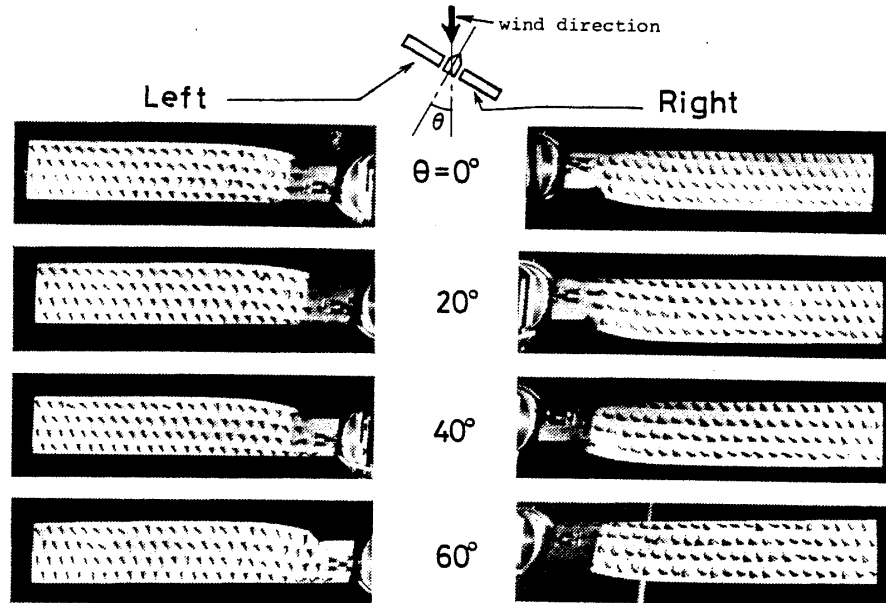


図12 走り放し状態における翼下流面の可視化写真

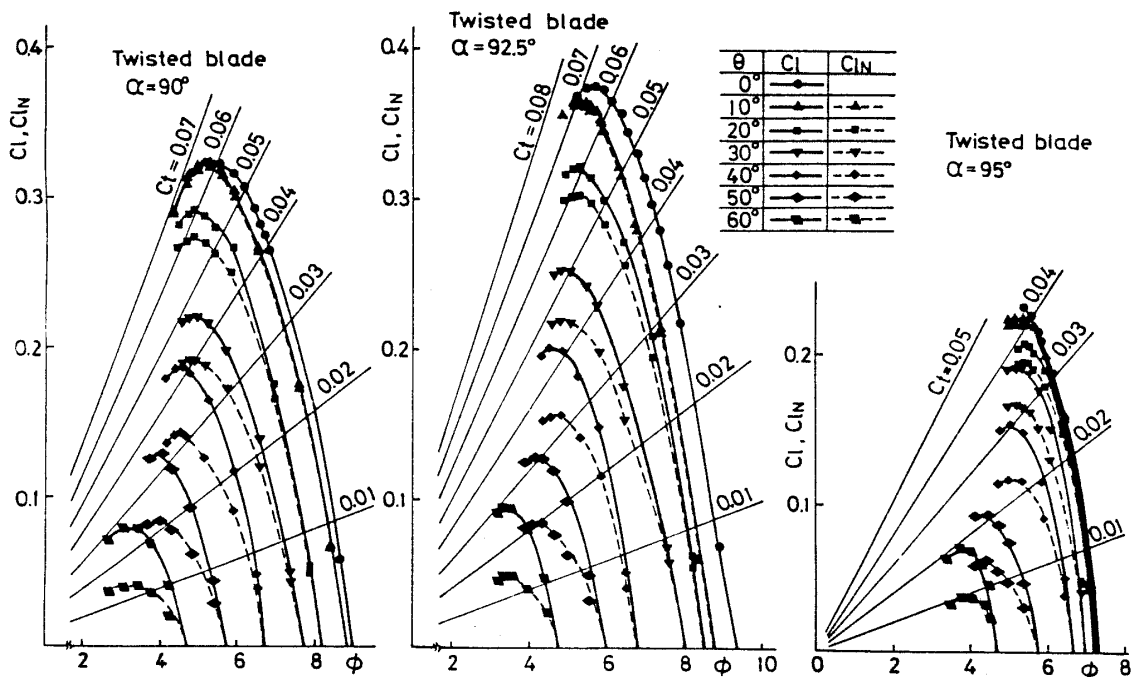


図13 ねじり翼を用いた場合、出力係数(C_l , C_{lw})と周速比の関係(回転面傾き角およびピッチ角を変化)

る。

5.2 斜風中の出力係数と風車翼ねじりの影響

図13には、ねじり翼を用いた場合の出力係数^{*1}と周速比の関係を示す。風車回転面は気流に対して 10° おきに最大 $\theta=60^\circ$ まで傾けた。また図13には細線でトルク係数 C_t が記入してある。斜風中の出力係数およびトルク係数には3章で定義した式(1)、(2)と式(3)、(4)の2種類がある。図13には実線で式(1)、(3)の C_t 、 C_t を、破線で式(2)の C_{tN} を示す。紙面の都合上、ここでは主に C_t 、 C_t を用いて考察する。出力係数はピッチ角 $\alpha=92.5^\circ$ で最大になり、続いて $\alpha=90^\circ$ 、 $\alpha=95^\circ$ の順になる。ピッチ角がいずれの場合も回転面を傾けるにつれて出力係数は低下する。また、トルク係数は周速比が大きくなるにつれて低下する。図14には上図の最大値をピッチ角について示す。最大出力係数 C_{tmax} はピッチ角が $\alpha \leq 85^\circ$ ではほぼ一定にな

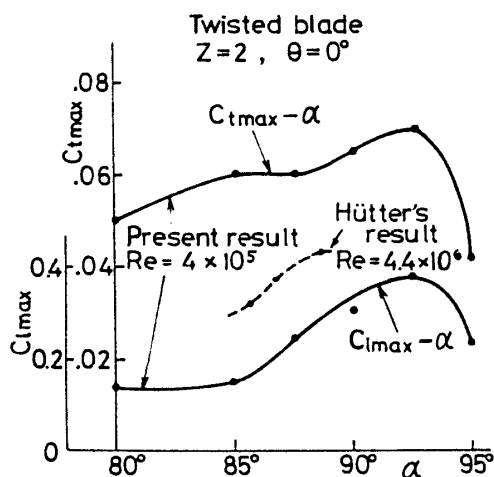


図14 ねじり翼の場合、最大出力係数および最大トルク係数とピッチ角の関係

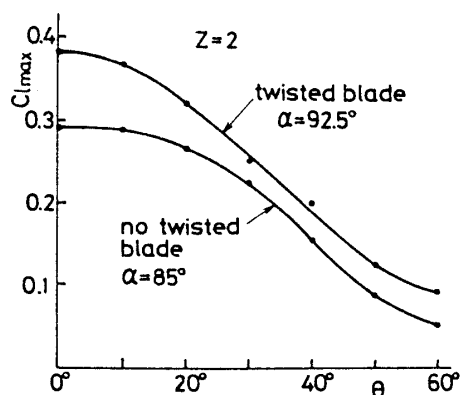


図15 最大出力係数と回転面傾き角の関係 (ねじり翼とねじりなし翼の比較)

*1 出力係数は式(1)、(2)の2種類を用いたが、どちらを主に考えるかは読者の判断にまかせたい。

り、 $85^\circ \leq \alpha \leq 92.5^\circ$ の範囲では漸増し、 $\alpha=92.5^\circ$ で最大になり、以後再び減少する。図14には比較のためHütter⁽⁴⁾のく形翼の結果を示す。Hütterの最大値は0.44と本結果の最大値より約0.06大きい。この差の生じる理由として、Hütterの用いた翼形はFX 63-137のボルツマン翼形であり、本結果はNACA 0012である点、および風車直径はHütterの場合11mφ、本結果は1mφであり、風速6m/sにおけるレイノルズ数は 4.4×10^6 と 4×10^5 で約1けた異なる、などの点が指摘される。また、Hütterの用いた翼にどの程度のねじれ角が与えられているかも不明であり、本結果との正確な比較はむずかしい。このような相違点および不明点はあるが、両者の傾向は類似している。続いてトルク係数を検討する。最大トルク係数 C_{tmax} は $\alpha=92.5^\circ$ で得られ、 $\alpha < 92.5^\circ$ ではゆるやかに、 $\alpha > 92.5^\circ$ では急激に低下する。各ピッチ角で最大トルク係数を示す周速比も $\alpha=92.5^\circ$ で最大になり、その値は $\phi=5.8$ になる。 α がそれより大きくても小さくても周速比は小さくなる。図15には、ねじり翼とねじりなし翼について風車回転面を傾けた場合の最大出力係数の変化を比較する。回転面傾き角 θ の影響はねじりの有無によって多少異なる。ねじり翼では $\theta \leq 10^\circ$ の範囲であれば傾きの影響は少なく、ねじりなし翼では $\theta \leq 20^\circ$ になり、ねじり翼のほうが傾き角の影響は大きくなる。

風車を運転する場合、弱風時には起動特性が問題になる。図16には、風車にブレーキをかけて回転を停止させた状態におけるトルク係数、すなわち、起動トルク係数とピッチ角および回転面の傾き角の関係を示

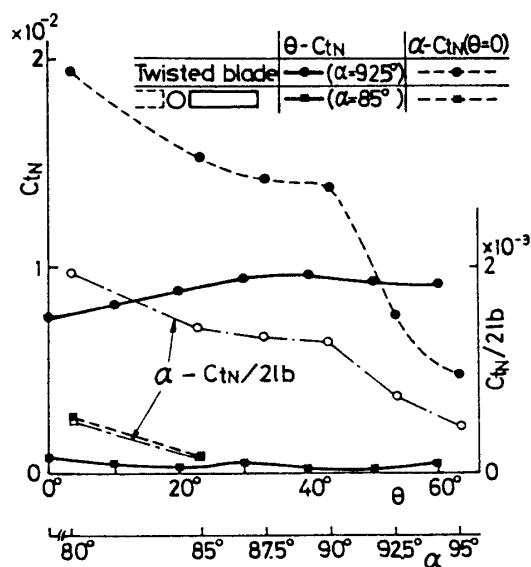


図16 起動トルク係数と回転面傾き角およびピッチ角の関係

す。いずれも翼数は2枚である。破線で示すピッチ角を変えた場合のトルク係数の変化は、ねじり翼の場合 α が 80° から 90° までは比較的ゆるやかに、 90° を超えると急激に減少する。最大出力係数を示す $\alpha=92.5^\circ$ の値は小さくなる。この事実は翼を最大出力係数を示すピッチ角に固定した場合、低風速時の翼車の起動特性が悪くなることを意味する。例えば $\alpha=90^\circ$ と 92.5° では起動時のトルク係数には約2倍の差があり、 $\alpha=90^\circ$ のほうが低風速で回りやすい。しかし、設計点における出力係数は $\alpha=90^\circ$ で $C_{l\max}=0.32$ 、 $\alpha=92.5^\circ$ では $C_{l\max}=0.38$ と約0.06(6%)の差が生じる。このように、翼のピッチ角は風車の運転に大きな影響を及ぼすので実際に風車を製作・運転する場合には慎重な検討を要する。ねじりなし翼では、ねじり翼に比べ起動トルク係数は著しく小さい。起動トルク係数には翼のアスペクト比が影響する。したがって、厳密にはアスペクト比の等しい翼についてねじりの影響を比較すべきであるが、今回の実験では行うことができなかったため、便法として、翼車全体のトルク係数を翼面積で割った値を図16に一点鎖線で記入する。大きさの単位は右軸に示す。この結果も前述の結果同様、ねじり翼の値はねじりなし翼に比べて大きくなる。図16には実線でねじりありとなし両翼について、回転面の傾きを変えた場合の起動トルク係数を示す。各翼のピッチ角はそれぞれ最大出力係数を示す角度である。両翼ともに傾き角を変えてもトルク係数はあまり変わらない。

6. 結 言

以上のような考察の結果次のような結論を得た。

(1) 最大出力係数を示す運転状態で翼車が正面を向いている場合($\theta=0^\circ$)、ねじり翼では翼の半径外側半分で翼の迎え角は最適になり翼車上下流間の減速は十分行われるが、翼車中心部では迎え角は小さく翼がほぼ無作用に近くなるため、減速はあまりなく中心部の速度は高速になる。これに対して、ねじりなし翼では翼車中心部ではく離を起こし、この部分が流れに対して大きな抵抗になるため、中心部の速度は著しく減速し、流れ全体は半径外側に向かって広がり、ねじり

翼の場合と逆の傾向を示す。回転面を傾けていくと両者の差は少なくなり、 $\theta=60^\circ$ では差はほとんどなくなる。

(2) 走り放し状態においては、ねじり翼の場合、翼車の中心部分でポンプ作用が生じるが、ねじりなし翼の場合は生じない。この結果、走り放し時の周速比はねじり翼のほうがねじりなし翼より小さくなる。

(3) ねじり翼では翼先端のピッチ角が 92.5° で最大出力係数0.38を示すが、ねじりなし翼ではピッチ角 85° で0.29程度になり、翼に適切なねじりを与えることにより、翼車出力は大幅に改善されることを改めて確認した。

(4) 翼車回転面を傾けた場合、傾き角に対する出力係数の低下割合は、ねじり翼のほうがねじりなし翼より大きくなる。

(5) 最大出力状態に翼のピッチ角を固定した翼車のもつ起動時のトルク係数は、ねじり翼のほうがねじりなし翼より相当大きくなる。また、ねじり翼の場合、弱風時の翼車の自己起動を容易にするためにはピッチ角は最大出力時のピッチ角より少し小さくするほうがよい。

本研究を行うに当たって、本学 杉野公一教務員および当時卒研 前田和也、辻原外博両君に多大の協力を得た。また、本研究は文部省科学研究費エネルギー特別研究の助成を受けた。合わせてここに謝意を表す。なお、本文中の誤記を指摘してくださった室蘭工業大学 奥田教海教授、富山大学工学部 三上房男教授に謝意を表す。

文 献

- (1) 清水・片山, 機論, 49-445, B (昭58), 1869.
- (2) Shimizu, Y., ほか3名, *Res. Rep. Fac. Eng. Mie Univ.*, 4 (1979), 11.
- (3) Ira H. Abbott and Albert E. von Doenhoff, *Theory of Wing Sections*, (1958), 462, Dover Publications, INC. New York.
- (4) Hütter, U., *Z. Flugwiss.*, 23-12 (1975), 443.
- (5) Pedersen, B. M. and Nielsen, P., *Proc. 3rd Int. Symp. W. E. S.*, (1980-8), 223.
- (6) Dekker, J. W. M., ほか3名, *Proc. 4th Int. Symp. W. E. S.*, (1982-9), 161.

討 論

〔質問〕 三上房男〔富山大学工学部〕

図3によると、翼端のねじれ角 α'' を 0° として分布を定めておられるようであるが、この初期値は諸特性に影響を与え、たとえば、出力係数、起動トルク係数

両者からみても最適値があるのではないか。

〔回答〕 風車翼を設計する場合翼端の最適ピッチ角を中心に考える。この最適ピッチ角は翼の断面形状、翼のねじり状態、すなわち、ねじれ角の与え方によ

で変わる。著者の経験によれば翼端のピッチ角は回転面に平行、すなわち、本論文の定義によればピッチ角 90° 前後で最高効率を得られる。この事実を根拠にピッチ角 90° 、すなわち、 $\alpha''=0^\circ$ より出発し、最大出力時には半径の半分以上で回転中の迎え角が $10\sim 12^\circ$ の間に入るように設計した。実験では、ピッチ角は自由に変えられるのでねじれ角の微妙な違いは十分把握できる。

〔質問〕 牛 山 泉〔足利工業大学〕

水平軸風車の風車翼にねじりを与えた場合と風車が斜風中で回転する場合について、風車翼および風車の前後流の流れを詳細に測定された貴重な研究であり、大変興味深く拝見した。

(1) 貴実験の供試風車では等弦長翼を用いているが、高速プロペラ形風車では先細翼を用いる例が多く、このほうが損失も少ない。したがって、風車翼の平面形状の等弦長と先細の場合では翼周囲の流れの挙動に相違が生ずるものと考えられるが、この点に関する

ご見解を伺いたい。

(2) 貴報では run away を「走り放し状態」としている。通常用いられている「自走状態」または「無拘束回転状態」のほうが適切な術語と考えられるが、いかがか。

〔回答〕 (1) 高速プロペラ形風車に先細翼を用いることは著者も承知している。現在、等弦長翼を中心に平面形状を変えた場合の翼車の性能と周囲の流速分布について研究中であり、まもなく発表を予定している。それらの結果によると、先細翼は回転数が高くなる点が高性能になる大きな理由の一つである。しかし、発生トルクの観点から見ると他の形状もそれなりに特徴があり、利用価値があるように思われる。

(2) 「自走状態」、「無拘束回転状態」、「無負荷運転状態」、「走り放し状態」など、たくさんの表現がある。どれが最も読者に内容をよく伝達するかということだと思うが、いずれでもよいように思える。