

チップペーン付き水平軸風車翼端周囲の流速分布*

清水 幸丸^{*1}, 今村 博^{*2}
松村 真次^{*3}, Gerard van BUSSEL^{*4}

Velocity distribution around the tip vane of HAWT blade

Yukimaru SHIMIZU, Hiroshi IMAMURA,
Shinji MATSUMURA and Gerard van BUSSEL

Power augmentation of HAWT with tip vane has been achieved at Mie University. This reason are mainly considered due to the reduction of the tip vortex and the diffuser effect by the tip vane. However, these effects has not been verified quantitatively. To get the detailed structure of the wake of a rotor model with tip vane, the near wake measurements have been performed. In these measurements, a three dimensional hot wire probe was used to measure the three velocity components: axial, radial and tangential component. The result of measurements revealed the preceding effects of the tip vane. Some other phenomena of the tip vane have been verified.

Key Words: Fluid machinery, Horizontal axis wind turbine, Tip vane, Wake, Tip vortex, Circulation, Velocity distribution, Hot wire anemometer

1. 緒 言

水平軸風車翼端に適切な翼端板, すなわちチップペーンを取付けることによって風車出力が著しく増加することが, これまでの著者らの研究^{(1)~(3)}によって明らかになっている。著者らが考える, あるいは実証したチップペーンの主な効果は以下のとおりである。

- (1) 翼端渦の発生を軽減し誘導抵抗を減少させる。
- (2) ディフューザ効果により風車回転面に多くの気流を引き込み, 入力エネルギーを増加させる。
- (3) 取付角を変化させることによりロータの回転数制御が行える⁽⁴⁾。

(1), (2)の効果は過去の研究で, 表面タフト法や流動パラフィンを用いたミスト法などの可視化⁽³⁾によって定性的には確認されたが, 定量的な測定値は得ていなかった。本研究では, 動的特性に優れ瞬時速度

変動計測に有効な熱線風速計を使用し, 三線熱線プローブにより風車後流および翼端付近の流速の軸, 半径および周方向の3速度成分を測定した。測定結果はチップペーンによる効果(1), (2)を示した。

2. 主な記号と座標系

図1に測定座標系を示す。翼が水平状態のときを基準としてある。風車回転中心を座標原点とする。

R : 風車半径

r : 翼根からの距離

U : u, v, w の合成速度

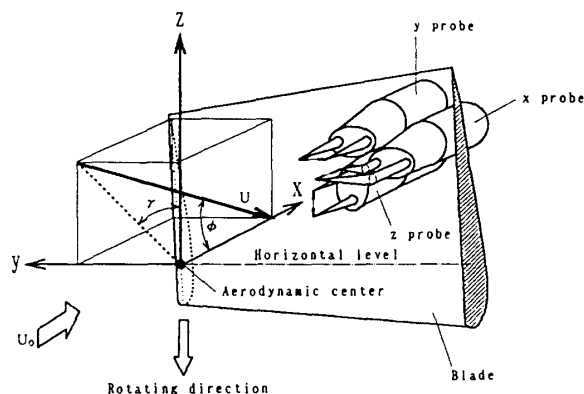


図1 測定座標系およびプローブ形状

* 平成3年8月28日 流体工学部門講演会において講演, 原稿受付 平成4年6月22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} 准員, 三菱自動車工業(株)(〒520-32 滋賀県甲賀郡甲西町小砂町2-1)。

^{*4} デルフト工科大学(Stevinweg 1, 2628 CN Delft, The Netherlands)。

U_0 : 風車前方一様流速度

u : x 方向速度成分

Δu : 翼の通過による u の変動量 (図 6)

v : y 方向速度成分

w : z 方向速度成分

Δw : 翼の通過による w の変動量 (図 6)

x : 軸方向座標

y : 半径方向座標

z : 周方向座標

Γ : 翼周りの循環

λ : 周速比 $= \frac{R\omega}{U_0}$

ω : 風車回転角速度

添 字

x, y, z : x, y, z 方向成分

3. 実験装置および方法

3.1 供試風洞と風車 図 2 に実験装置を示す。風洞は吹出し口 $\phi 1800$ mm で最大風速 15 m/s の開放形で、乱れ強度は 1.8% である。風車直径は $\phi 1158$ mm で、供試風車翼は FX 74-CL 6-140 翼断面を持つ。

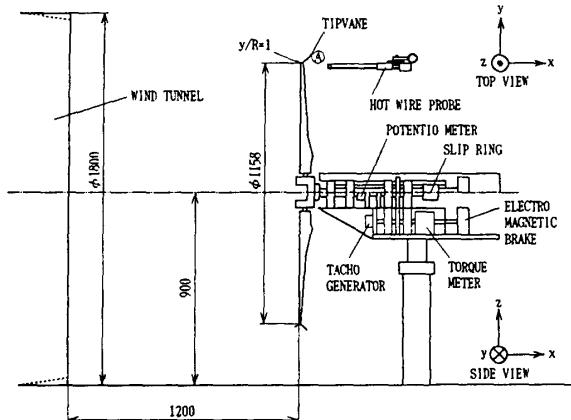


図 2 実験装置

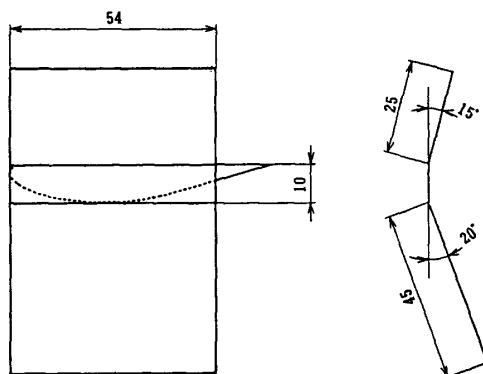


図 3 供試チップペーン形状

つテーパねじり翼で翼枚数は 2。ねじり角度は文献 (1), (2) に詳述されている。

風車は風洞出口下流 1.2 m に設置されている。また風車後流への影響を避けるために風車設置点から下流側へ 4.6 m の直線距離を設けた。

本研究では過去の実験において増出力に有効であった図 3 に定義される V 形チップペーンを用いた。

図 4 に出力係数 C_p と周速比 λ の関係を示す。チップペーンなし翼と比較してチップペーン付き風車の場合最高効率で 15% の増加となっている⁽³⁾。

3.2 熱線 熱線プローブは軸方向、半径方向、周方向の各速度成分の測定用に図 1 に示す形状とした。各プローブの間隔は 3 mm で、熱線は $\phi 5 \mu\text{m}$ のタングステン線の中央部を 1 mm 残して両端を銅めっきしたものを使用した。

3.3 実験方法 測定に際しては、風車下流側に熱線プローブを設置し、風速 $U_0 = 5.0$ m/s、周速比 $\lambda = 5$ におけるチップペーン付きおよびチップペーンなし風車の後流の各速度成分の測定を行った。 $\lambda = 5$ は図 4 に示されるように供試風車最高効率点である。このときの翼先端での弦長に対するレイノルズ数は約 1.3×10^5 となる。

翼位置の検出にはポテンシオメータを使用した。

3 台の熱線風速計とポテンシオメータからの計 4 個の出力を A-D コンバータを通し、サンプリング周波数 2.8 kHz で逐次抽出しコンピュータに入力した。この場合、データは 3° ごとに取り込まれる。

データは 10 回転分を取り込み、1 周期 (1 回転) 分に位相平均した。

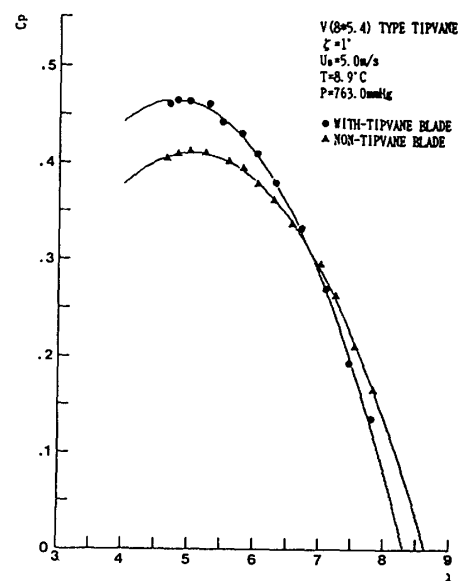


図 4 供試風車性能曲線

図5は軸速度成分の代表的な図である。実線は文献(6)から比較のため引用した。翼形や実験条件は異なるが、定性的な一致を示している。

4. 実験結果と考察

4.1 平均瞬時計測データの比較 図6および図7は各速度成分の瞬時値の位相平均を示している。

図6にチップペーンなし翼での各平均瞬間変動軸速度成分を示す。図6(a)は回転面直後 $x/R=0.05$, 図6(b)は $x/R=0.12$ の値を示す。破線, 実線, 一点鎖線はそれぞれ $y/R=1.00, 0.91, 0.74$ の位置での値である。

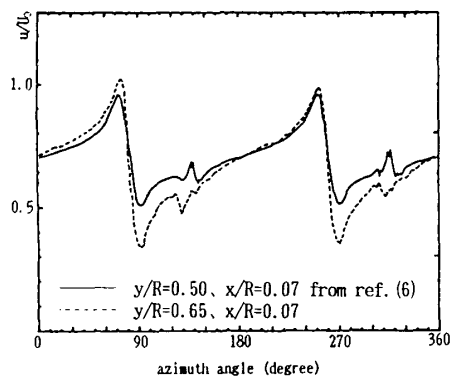


図5 翼の通過による速度変動(軸方向)

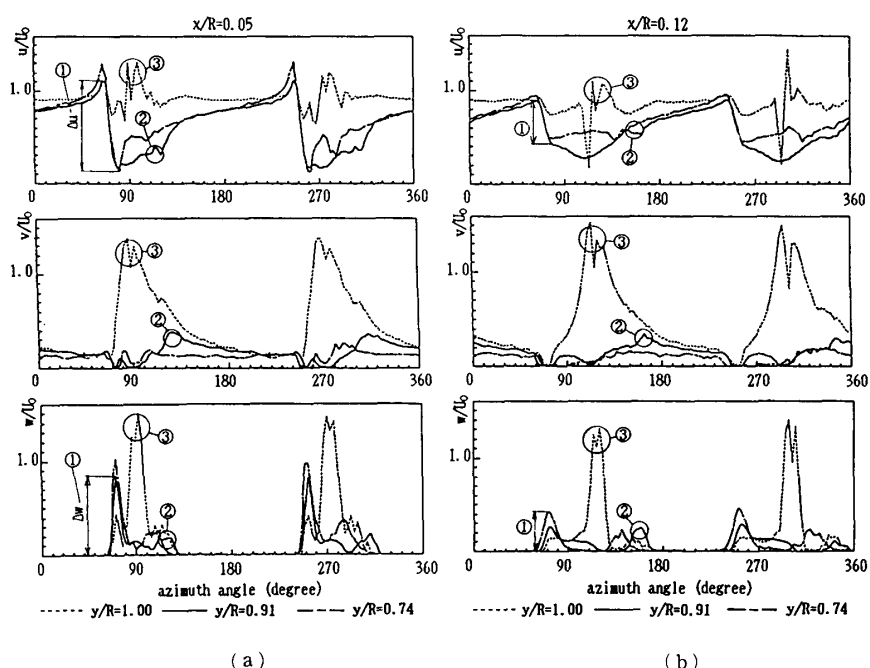


図6 チップペーンなし翼の各速度成分

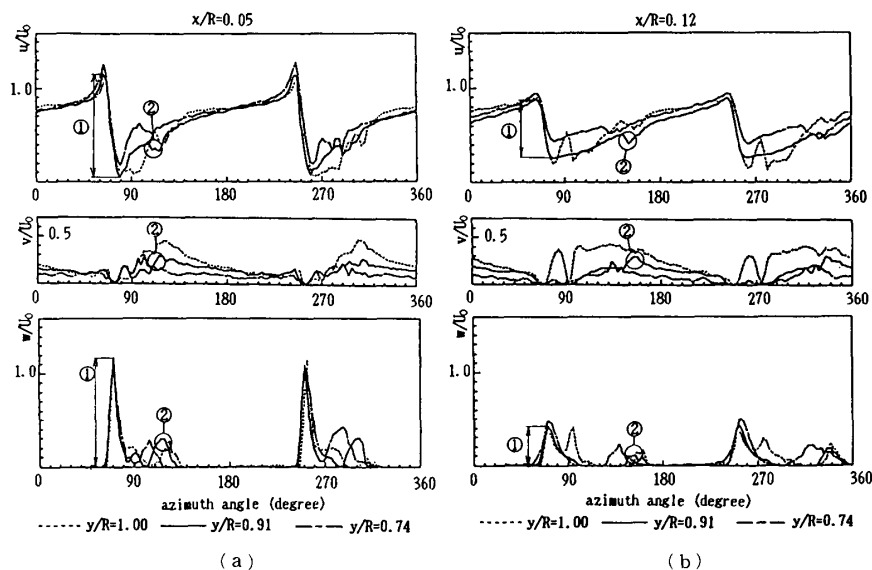


図7 チップペーン付き翼の各速度成分

また図でアジマス角 $90, 270^\circ$ が翼通過位置である。図 6 からチップペーンなし翼では次の三つの特徴が挙げられる。

(1) 翼の半径方向 ($y/R < 1$) で翼の通過と一致する u, w の急激な速度変動①が見られる。 u は翼の接近に伴い序々に増加し、翼が通過した瞬間急激に減少しその後再び増加を始める。 w は翼が通過した瞬間急激な増加をする。この速度変動①のアジマス角に対する発生箇所は軸方向のプロープの位置に関係なく一定である。またその大きさ $\Delta u, \Delta w$ は翼車回転面からの距離が離れるほど、また翼端へ向かうほど減少している。この変動①は翼周りの循環の誘導速度によるものである⁽⁵⁾⁽⁶⁾。循環は固定渦であるためその影響は常に同じ位置に表れる。

(2) 翼の半径方向 ($y/R < 1$) では循環による速度変動①の後、 u, v, w 共に風速の乱れる領域②が見られるが、これが検出されるときのアジマス角はプロープの軸方向の位置と共に変化する。この乱れ②は翼車回転面からの距離の増加に伴いより大きいアジマス角、すなわちより遅れた時間で表れている。この乱れ②は翼後縁から放出される渦シートによるものである。渦シートは乱流状態であり、そのため 3 成分にわたってその影響が現れている。

(3) 翼端付近 ($y/R \approx 1$) では、循環による速度変動①の後に u, v, w の突出した速度変動③が確認される。この変動③は翼のより内側の半径方向 ($y/R < 1$) では見られず、翼端付近に限定されている。また(2)の渦シートの場合と同様にその出現位置が軸方向に対して遅れている。この速度変動③は循環による速度変動①が翼端では小さな値しか示していないことを考慮に入れると、翼端渦によるものと考えられる。

図 7 はチップペーン付き翼の各速度成分を示す。測定位置は図 6 と同様である。翼端 ($y/R \approx 1$) でチップペーンなし翼で見られた翼端渦に起因する局所的な速度変動③が見られず、代わりに翼の通過による速度変動①がかなりの大きさを示す。少なくともチップペーン設置域: $0 < x/R < 0.073$ では、翼端渦による速度変動③は見られない。この理由は図 9～11 の考察で詳述するが、チップペーンにより翼周りの循環が翼端まで強く残る結果と推定される。

図 8 はチップペーン後縁後方の各速度成分である。実線が $x/R=0.09, y/R=1.02$ (チップペーン内側)、破線が $x/R=0.09, y/R=1.03$ (チップペーン外側) を示す(図 2 の④)。循環による速度変動①の後に、チップペーンなし翼で、翼端で確認された翼端渦による速度変動③と同様な特徴④がここで確認される。チップペ

ーン後縁で渦が発生していると推定される。これは自由渦の放出位置がチップペーン後縁に変移していることの証左と言えよう。

チップペーンなし翼で見られる前述の(1), (2)の特徴はチップペーン付き翼でも同様である。

4.2 翼の通過による速度変動の比較 図 9, 10 はそれぞれ $\Delta u, \Delta w$ の分布を半径方向に対して示してある。

図 9 よりチップペーンなし翼では $y/R=0.9$ から $y/R=1$ (翼端)にかけて Δu が減少している。これに対し、チップペーン付き翼では $0 < x/R < 0.073, y/R < 1$ の領域では Δu の減少はない。しかも翼端近くでは増加の傾向を示す。 $x/R > 0.073$ の領域(チップペーン後縁後方)では $y/R=1$ あたりから Δu は減少しているが、その減少のこう配はチップペーンなし翼の場合とは違い急激である。またチップペーン付き翼のほうが Δu の値が大きい。

図 10 は Δw の分布図である。 Δw も Δu も同様の傾向を示すが、チップペーン付き翼は $0 < x/R < 0.073$ ではほぼ一定である。これに対しチップペーンなし翼では図 9 と同様に翼端にかけて減少している。

4.3 循環 Γ の比較 循環による誘導速度の影響は、渦糸を無限渦とし二次的な取扱いをすると、ビ

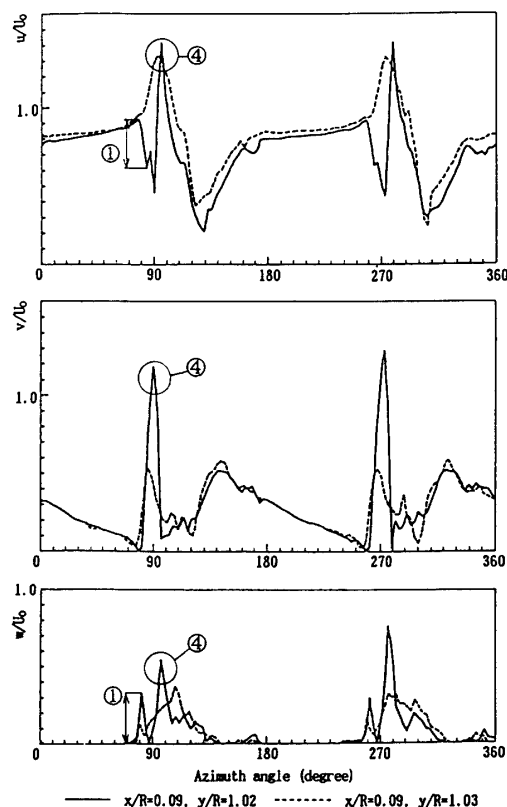


図 8 チップペーン後縁④での各速度成分

オ・サバールの法則から次式で示されるように、循環 Γ に比例し、軸方向距離 x に逆比例する形で現れる。

$$\Delta U_{x,z} = \frac{\Gamma}{2\pi x} \dots\dots\dots (1)$$

各々の半径位置 r における x 軸方向の測定間隔と、翼の通過による速度の変動量の変化量を求めることに
より、式(1)から循環 Γ を次式で表すことができる。

$$\Gamma = 2\pi \left[\frac{\partial(1/\Delta U_{x,z})}{\partial x} \right]^{-1} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\Delta U_{x,z}$ は ΔU_x が Δu を表し、 ΔU_z が Δw を表す。式(2)は Γ はこう配 $\partial(1/U_{x,y})/\partial x$ の逆数に比例することを示す。

実際に翼周りの流れを熱線風速計で測定するとその速度成分には式(2)で表される循環に翼端渦やチップペーンの影響が含まれるが、ここでは式(2)と Δu または Δw を単純に用いた見掛け上の循環を示すことにする。図 11 で \blacksquare, \square は Δu から、 \blacklozenge, \diamond は Δw から求めた値である。

まず Δu から求めた Γ 分布について考察する。チップペーンなし翼では翼端に近づくにつれ Γ が減少し

ている。しかし翼端でその値は零とはなっていない。これは Γ を求める際に渦糸を無限渦としたからである。これに対し、チップペーン付き翼では翼の内側ではチップペーンなし翼との差異はほとんどないが、翼端にかけてチップペーン付き翼の Γ は徐々に増加し、翼端付近でいったんピークを迎えて翼端で減少している。この理由として翼端近くでのチップペーン周りの渦糸の影響が考えられる。この影響を正確に取り入れた方法で Γ を求めないと、正しい意味の循環 Γ を求めることはできない。しかし後述の風車後流の速度分布測定結果(図 12~15)や文献(3)の可視化写真結果とを総合して翼周りの循環の発達状態を推察すると、

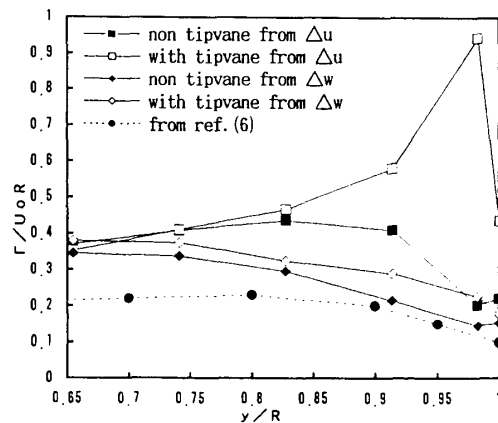


図 11 循環 Γ 分布

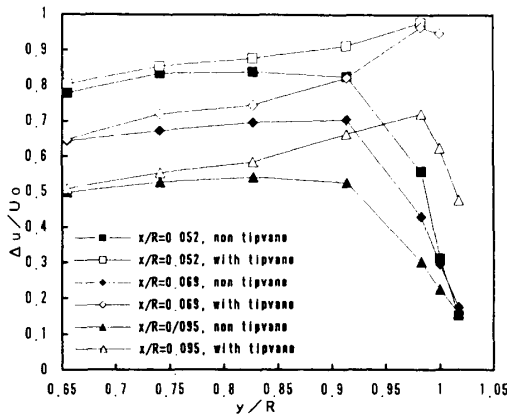


図 9 翼の通過による速度変動量(Δu)分布

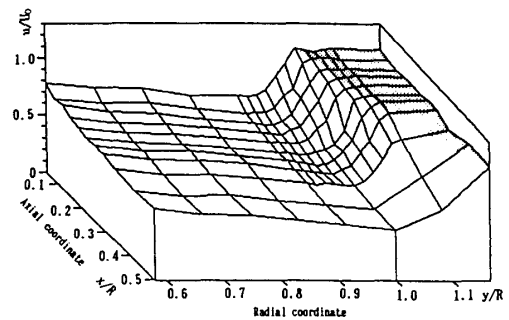


図 12 チップペーンなし翼の平均軸速度分布

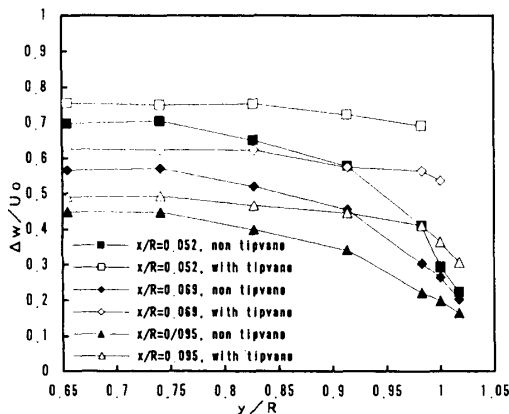


図 10 翼の通過による速度変動量(Δw)分布

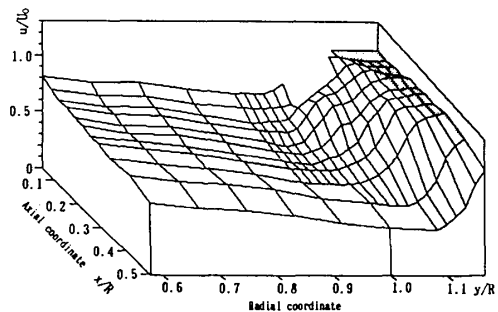


図 13 チップペーン付き翼の平均軸速度分布

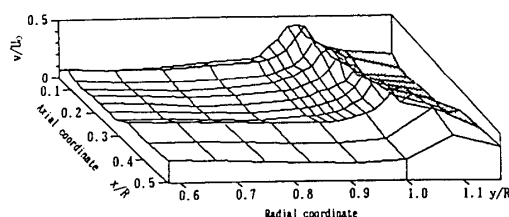


図 14 チップペーンなし翼の平均半径速度分布

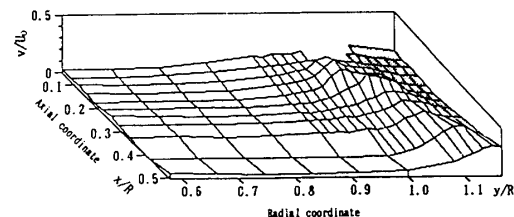


図 15 チップペーン付き翼の平均半径速度分布

チップペーン付き翼のほうが翼端まで循環が大きく形成されているように思われる。

Δw から求めた Γ の場合、チップペーン付きおよびなし翼共に翼端に向かって減少しているが、定量的にはチップペーン付き翼のほうが大きい。

本来、同一の値となるべき Δu および Δw から求めた循環量が、翼端では特に異なっている。この理由は、翼端では翼端渦のため流れは三次元的であるにもかかわらず、ここでは渦系を無限渦とし、二次元的な仮定を行い循環量を求めたためである。これを解決するためには、ビオ・サバルの法則を三次元的に適用する必要がある。

4・4 風車回転面後流の速度分布状態について

図 12, 13 は u 、図 14, 15 は v の各測定点での時間平均速度分布図である。チップペーン付き翼の図でデータが途切れている部分は、チップペーンの形状のためプローブを設置できず計測できなかった箇所である。

図 12 と図 13 には軸方向速度成分を示す。翼端の外側では風速比 u/U_0 はほぼ 1.0 であるが、翼の内側では測定範囲で平均して 70% まで流速が減速している。また後流の境界が軸方向に対して翼端の外側へ拡大している。これに対し図 12 のチップペーン付き翼では、流速の減速率はチップペーンなし翼とほとんど変わらないが、後流の境界がより外側へ拡大している。半径方向に対し後流の境界がなだらかなこう配を示しているのは、翼端における流れの状態が非定常であるためと考えられる。後流が不安定であるためその時間平均値はある程度の広がりを持つことになる。

半径方向速度成分を示す図 14, 15 では共に後流の境界に沿う形で w/U_0 の最大値が移動しているが、この値は図 15 のチップペーン付き翼のほうがチップペーンなし翼に比較しかなり小さい。4・1 節でチップペーン後縁から渦が発生していると考察したが、半径方向の主な成分が翼端渦と考えられるため、また文献 (3) の結果を考慮するとチップペーン後縁からの渦のほうがチップペーンなし翼の翼端渦より小さいと言える。

5. 結 言

三線熱線プローブを用いたチップペーン付き水平軸風車翼端周囲の測定から、チップペーンの効果について以下の結果を得た。

(1) チップペーンは翼端渦を抑え、自由渦の放出位置をチップペーン後縁(下流側)へ変移させる。また自由渦の大きさはチップペーン付き翼のほうが小さい。

(2) 翼周りの循環についてはチップペーン付き翼の場合、翼端においても循環は大きな値で維持されていると推定される。しかしその値を正確に求めるには、導出法の改善およびチップペーン周りの渦系の解析などの必要性がある。

(3) チップペーンはチップペーンなし翼と比較して風車後流を拡大させる。

本研究を進めるにあたり、助言をいただいたデルフト工科大学風力エネルギー研究所の Nord-Jan. Vermeer 氏に感謝の意を表す。

文 献

- (1) 清水・ほか 2 名, 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), 機論, 56-522, B(1990), 495.
- (2) 清水・ほか 2 名, チップペーンによる水平軸風車の増出力に関する研究(続報, 可視化による増出力効果の解明), 機論, 56-522, B(1990), 502.
- (3) 清水・ほか 2 名, 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 3 報, テーパーブレードの場合), 機論, 57-543, B(1991), 3845.
- (4) 清水・松村, チップペーンによる水平軸風車の回転数制御に関する研究, 機論, 58-547, B(1992), 804.
- (5) 筒井・ほか 2 名, LDV による風車ロータまわりの流れ計測, 機論, 54-505, B(1988), 2471.
- (6) Vermeer, N. J. and Van Bussel, G. J. W., Velocity Measurements in the Near Wake of a Model Rotor and Comparison with Theoretical Results, *Proc. 15th Europ. rotat. forum*, Amsterdam(1989), 2001.