

水平軸風車後流の風洞実験とフィールド実験*

前田 太佳夫^{*1}, 金 原 裕 介^{*2}, 柿 永 勉^{*2}Wind Tunnel and Field Experiments on Wake Behind Horizontal
Axial Wind TurbineTakao MAEDA^{*3}, Yusuke KINPAPA and Tsutomu KAKINAGA^{*3} Department of Mechanical Engineering, Mie University,
1515 Kamihama-cho, Tsu-shi, Mie, 514-8507 Japan

Measurement results of the wake velocity profile behind 0.6 m-diameter wind turbine in wind tunnel and 10 m-diameter wind turbine in the field are shown. The development of wind turbine wake was observed with the use of particle image velocimetry for wind tunnel measurement. From the results of wind tunnel measurement, the wake was expanded from the position where the tip vortex was almost dissipated. The wake velocity behind field wind turbine was recovered in shorter distance than those for the turbine in wind tunnel measurement. The wake area was sifted toward radial direction related to wind turbine rotational direction. The wake velocity at lower half area below rotor axis was not much recovered by the effect of tower compared to those at upper half area above rotor axis.

Key Words: Fluid Machinery, Wind Mill, Wake, Velocity Distribution, PIV

1. 緒 言

近年, わが国においても, 1箇所に複数の風車を設置する集合形風力発電所が多く見られるようになってきた。風車を1箇所に集中的に建設する場合には, 上流側風車の後流内に下流側風車が入ることによる出力低下を避けるように配置し, 各風車の出力が低下しないように考慮することが重要な課題である。わが国に比べて有効利用可能な平坦な地面積が大きい欧米等では, 風車設置間隔も卓越風向と直角方向に $5D$ (D : 風車直径), 卓越風向方向に $10D$ と余裕のある設置が可能である。しかし, わが国においては, 風況の良好な地点は, 起伏の大きい山岳地や丘陵地に多く, 広い面積を確保することは困難な環境にある。このような状況において, 経済性が高い発電を行うためには, 限られた面積内に上流側風車の後流によって引き起こされる風車相互干渉を抑えて多数の風車を設置するための指針が必要である。

これまで, 風車後流についての研究は, 観察の容易

な風洞実験や特定の機種の設定を対象としたフィールド実験がなされてきている^{(1)~(4)}。しかし, 風車後流は, 風車運転中の発生出力によって異なり, 風洞実験とフィールド実験の運転条件を対応させた検討結果はない。

本研究では風洞実験とフィールド実験における風車運転条件を対応させて後流を測定し, 後流構造を解明することを目的としている。そのため風洞でのマイクロ風車の後流測定により後流の発達に関する考察を行い, フィールドにおける中形風車の後流測定により実際の風車設置にかかわる指針を得たので報告する。

2. おもな記号

D : 風車直径 m

n : 風車回転数 rpm

R : 風車半径 m

u : 無次元 x 方向速度 [式(1)]

U : 風車がない状態での x 方向速度 m/s

U_0 : 風車回転面から $1D$ 上流での主流風速 m/s

U_w : 後流の x 方向速度 m/s

ν : xy 平面内での無次元速度

x : 風車回転面からの下流方向距離 m

y : 風車回転軸からの半径方向距離 m

* 原稿受付 2004年5月18日。

*¹ 正員, 三重大学工学部 (〒514-8507 津市上浜町1515)。

*² 学生員, 三重大学大学院工学研究科。

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

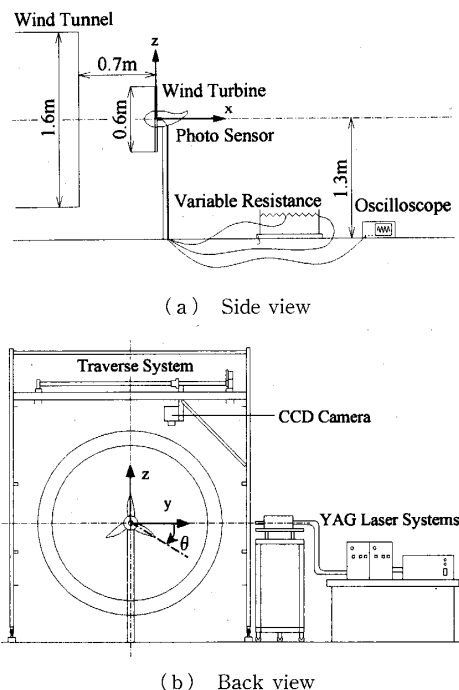


Fig. 1 Wind tunnel experimental setup

- z : 風車回転軸からの鉛直方向距離 m
 δ : y 方向への無次元速度欠損 [式(2)]
 θ : y 軸から測定した風車翼の回転位置 $^{\circ}$

3. 実験装置および方法

3.1 風洞による後流速度分布測定 図1(a), (b)に風洞実験装置の全体図を示す。本実験で用いた風洞は吹出し口径1.6mの開放形風洞である。主流風速は風車回転面から上流側1Dにピトー管を設置して測定した。風洞実験で用いた風車は直径 $D=0.6$ mの3枚翼アップウィンド形水平軸風車(以降、風洞風車と記述する)である。翼形は翼根部から翼端部までNACA 4412翼形である。30%半径位置での弦長91 mmおよび翼端弦長42 mmのテーパねじり翼である。翼端から翼根までのねじり角は 18° である。風車タワーとして直径49 mmの鋼管を用いた。回転方向は上流から風車を見て時計回りである。風車ナセルには回転数検出と翼回転位置検出のセンサおよび直流発電機が取り付けられており、発電機負荷として可変抵抗器を用いた。この負荷抵抗を調整することにより発電量を制御し風車回転数を変化させることができる。

座標系は図1(a), (b)に示すとおり、風車回転面からの主流方向距離を x とする。風車回転中心から半径方向への距離は y とし、風車を真後ろから見て回転中心より右側を正とする。風車回転中心から鉛直方向への距離は z とし、回転中心より上側を正とする。

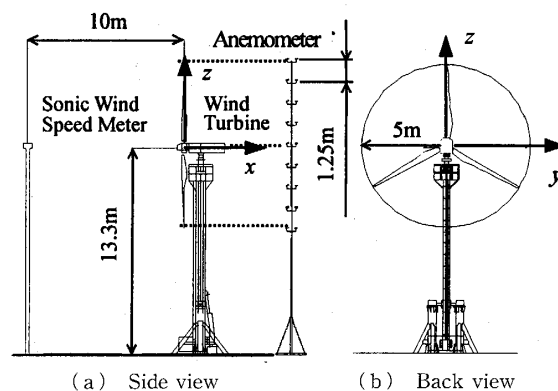


Fig. 2 Field wind turbine

実験は供試風車を図1に示した位置に設置し、ヨー角を固定し主流風速 $U_0=6$ m/sにおいて風車回転数 $n=500$ rpmにおいて風車後流の x 方向速度を全圧管により測定した。

全圧管による後流速度分布の測定範囲は、下流方向には風車回転面から600 mm間隔で3 600 mmまでの計6点、半径方向には40 mm間隔で回転軸から左右にそれぞれ600 mmまでの計31点、鉛直方向には75 mm間隔で回転軸から上下にそれぞれ300 mmまでの計9点である。

3.2 風洞による後流速度ベクトル測定 本実験では粒子画像流速計(以降、PIVと記述する)を用いて風車後流内の xy 平面における二次元速度ベクトルを測定した。図1(b)にPIV実験装置の配置図を示す。主流風速は $U_0=6$ m/sに設定し、風車回転数は $n=500$ rpmとした。トレーサは粒径 $2\sim3\ \mu\text{m}$ のエアゾルを風洞ファン上流から注入し、風車回転面に均一にシーディングされるようにした。PIVによって取得される1画像当たりの大きさは x 方向幅120 mm $\times y$ 方向幅90 mmであり、これを複数枚合成することによって風車後流のベクトル分布を作成した。測定範囲は、 x 方向には風車回転面より後方600 mmから1 200 mmまでの範囲を150 mm間隔で測定し、1 200 mmから2 400 mmまでの範囲を600 mm間隔で測定し、合計7点で測定を行った。 y 方向へは回転軸を中心として90 mm間隔で移動させ左右それぞれ525 mmまでの計17点で測定を行った。各測定点では翼が水平位置にあるときを回転角度 $\theta=0^{\circ}$ として、ここから 20° ごとに $\theta=120^{\circ}$ まで同期サンプリングし、各回転角度ごとに25枚の画像を撮影し、その平均をその測定位置でのベクトル図とした。

3.3 フィールド風車による後流速度分布測定

図2にフィールド風車の概容を示す。本風車は地上高3 mにおいて起倒式であり、翼車直径 $D=10$ m、回転

軸高さ 13.3 m の 3 枚翼アップウィンド形水平軸風車である。翼形は翼根部に DU 91-W 2-250 翼形, 翼中間部に DU 93-W-210 翼形, および翼端部に NACA 63-618 翼形を用いている。30%半径位置での弦長 533 mm および翼端弦長 107 mm のテーパねじり翼である。翼端から翼根までのねじり角は 12° である。風車タワーは直径 460 mm の鋼管である。回転方向は上流から風車を見て反時計回りであり, 風洞風車とは回転方向が反対となる。風車回転数はインバータを用いて任意に設定できる。

本フィールド風車実験装置では風車に流入する速度を調べるため, 風車位置から見て主風向である北西方向に超音波流速計を設置してある。超音波流速計は風車の上流 10 m に設置されており, プローブの位置が風車回転軸高さになるように設置してある。

後流速度分布の測定には, 供試風車のヨー角を, 北を基準 0° として, 卓越風向 303° (西北西) の方位に固定し, 風車回転数 $n=80$ rpm で運転し, 3 杯式風速計および矢羽根式風向計を用いて, 1 s ごとにサンプリングしたデータの 1 min 平均値を記録した。

前述の風洞実験と同様に, 座標系は図 2 に示すとおり, 風車回転面からの主流方向距離を x , 風車を真後ろから見て右側を正とした風車回転中心から半径方向への距離を y , 上側を正とした風車回転中心からの鉛直方向距離を z とする。

フィールド風車後流の測定は, 風車回転面上端から下端の範囲を測定できるように 1.25 m 間隔で 9 組の風速計および風向計を鉛直ポールに取付け, このポールの位置を移動することにより行った。測定位置は, x 方向には風車回転面から 10 m 間隔で 60 m までの 6 点を測定した。 y 方向には, 風車回転中心から 2.5 m 間隔で左右それぞれ 7.5 m までの範囲の計 7 点で測定を行った。なお, $x=10$ m および 50 m の地点では $y=-7.5$ m の位置に障害物が存在し, 測定が不可能であったためこの地点での y 方向の測定は 6 点となっている。

フィールド実験と風洞実験の結果を比較するに際して, フィールド実験における測定データの信頼性は, 各測定点における測定時間に影響されるとともに, 測定時の風向変動にも大きく影響されると考えられ, 風が風車回転面に垂直に流入するときのデータを取得することが必要となる。このため, 風車上流の超音波流速計の風向を常時観測し, 上流風が風車回転面に対し 16 方位の半値として $\pm 11^\circ$ の風向変動を許容範囲とした。また, 風速についてもフィールド実験においては再現性がないため, 一般的な風況精査での風速幅

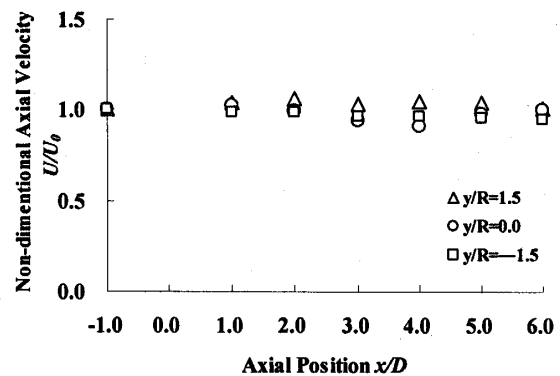


Fig.3 Velocity profile in wind tunnel without wind turbine

± 0.5 m/s の半値として, 上流風の変動が ± 0.25 m/s 以内のデータを許容範囲とした。これら風向と風速の許容範囲内の上流風が 1 min 以上連続して取得されるまで測定を行った。なお, 実験時の風速変化は 3~10 m/s の範囲であった。

4. 実験結果の整理方法

4.1 速度の無次元化 本実験で用いた風洞は開放形風洞である。流れ方向への風速の減衰を考慮するため, あらかじめ各測定位置において風車を設置していない状態での速度分布測定を行った。図 3 に風車がない状態での x 方向速度を, 上流 $x/D=-1$ の速度に対する比で示す。速度不均一は $x/D=4$ の断面で最も大きく, 上流 $x/D=-1$ の速度に対する断面平均速度の減少率は 3% である。測定部下流方向への速度減少の影響を排除するために, 測定位置での後流の x 方向速度 U_w を風車がない状態での測定位置の x 方向速度 U で無次元化した速度を u とし, 次式で定義する。

$$u = \frac{U_w}{U} \dots\dots\dots (1)$$

一方, 本実験で用いたフィールド風車は起倒することが可能であるため, 後流測定位置において風車を倒して風車の影響をなくした状態での x 方向速度 U に対する風車を設置した場合の x 方向速度 U_w の比を式 (1) によって無次元化し, x 方向速度 u とした。なお, フィールド実験の場合, 速度こう配のある境界層内に風車があり, また, 風速は時間的に一定ではないため, U および U_w の測定値を, 同時刻の上流の超音波流速計での風速と比較することにより補正した。

4.2 速度欠損 風車後流を定量的に評価するために, y 方向に微小幅 Δy をとり, 各微小幅内における主流と後流の速度差 $(U-U_w)$ を算出し, $(U-U_w)\Delta y$ を測定断面にわたって加算することで, 後

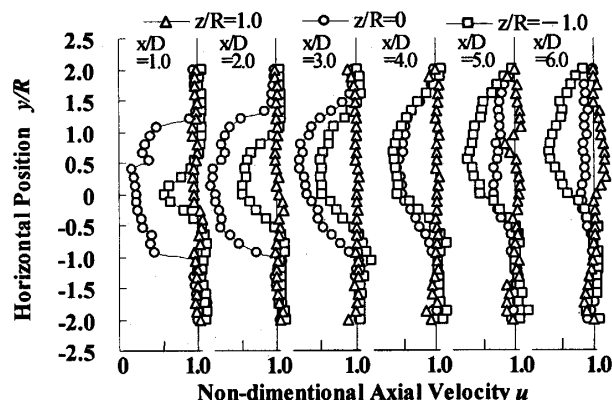


Fig. 4 Horizontal wake profile in wind tunnel measurement

流内の高さ z における速度欠損を求めた。本実験では各後流側定位置での速度を無次元化しているため、速度欠損 δ も無次元値を用いて次式により定義した。

$$\delta = \sum_{i=1}^k \left(\frac{U - U_w}{U} \right)_i A \left(\frac{y}{R} \right) \dots\dots\dots (2)$$

ここで添字 i は後流測定位置を表し、 $i=1$ は y の負方向の端位置、 $i=k$ は y の正方向の端位置を表す。速度欠損 δ は、風洞実験もフィールド実験も同じ定義式(2)によって計算したが、両実験は y 方向への測定数と測定範囲が異なるため、 k の値は異なる。

4.3 風洞実験とフィールド実験の対応 風車後流に影響を与える要因としてはレイノルズ数、主流の乱れ強さ、流入風の空間的速度分布形状など多くある。定常な風洞実験と非定常なフィールド実験においてこれらを一致させることは困難であり、本研究では風車後流に影響を与える最も大きな要因は風車が風から吸収するエネルギーと考えた。風車後流の速度分布は風車出力によって大きく異なる。そこで本実験では、フィールド風車と風洞風車の後流の速度分布を比較するために、流入風が有するエネルギー量に対する風車出力が、両実験において同程度となるように試みた。風車へ流入する風が有するエネルギー P_0 は、主流風速 U_0 を用いて次式で求められる。

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 U_0^3 \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 ρ は空気密度、 R は風車半径である。

風車出力 P の値については、風洞風車は直流発電機式であるが、ナセル内部にトルク計を取付けることができないため、発電機単体にトルク計を取付けた予備実験により風車回転数に対する風車トルク Q の関係を求め、後流側定時にはトルク計を取り外して風車回転数 n から風車出力 $P = \pi n Q / 30$ を求めた。一方、フィールド風車については、発電機軸に取付けられた

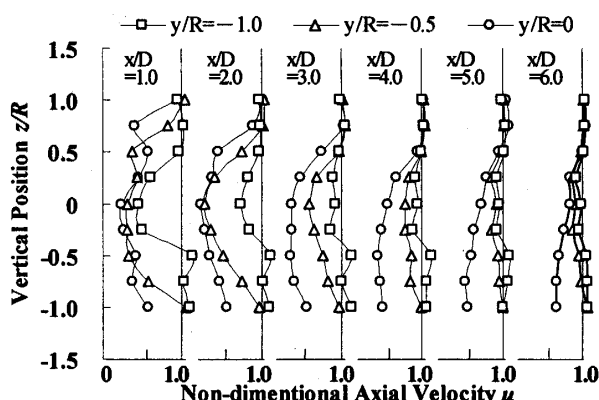


Fig. 5 Vertical wake profile in wind tunnel measurement

トルク計の出力 Q と風車回転数 n から、風車出力 $P = \pi n Q / 30$ を算出した。

風洞実験においては、流入風が有するエネルギー P_0 と風車出力 P の比が $P_0/P = 0.36$ であったため、フィールド実験においても 1 min 平均値として、 $P_0/P = 0.36 \pm 0.01$ の範囲内のデータのみを採用し、風洞実験とフィールド実験において、風車出力が定量的に対応した状態の後流速度分布を比較した。

5. 実験結果および考察

5.1 風洞風車の後流速度分布 図4に風洞実験による x 方向速度の水平分布を示す。回転面下端高さ位置 $z/R = -1.0$ のとき、 $x/D = 1$ の位置における y 方向の減速域は $-0.5 \leq y/R \leq 0.6$ となっており、半径方向の減速域は比較的小さい。この減速領域は下流になるにしたがって拡大し、 $x/D = 6$ では $-0.6 \leq y/R \leq 2.0$ まで拡大している。また、下流になるにしたがい後流の中心位置が $y/R > 0$ の方向へ移行していくことがわかる。

回転軸高さの $z/R = 0$ では、 $x/D = 1$ の位置において風速減少域は $-1.0 \leq y/R \leq 1.2$ の範囲であり、回転中心 $y/R = 0$ においては主流風速の約 20% 程度まで減少しているが、その減少の程度は下流になるにつれて緩やかになり、 $x/D = 6$ で主風速の約 80% 以上まで回復している。風車後流の影響範囲は下流になるにしたがって風車回転中心より $y/R > 0$ の方向へ減少域の移行が見られるが、その移行の程度は、 $z/R = -1.0$ のときと比べ小さい。

回転面上端高さ位置 $z/R = 1.0$ においては、 $x/D = 1$ の位置においても速度の減少は見られず、さらなる下流の位置でも速度減少は見られなかった。なお、 $x/D = 6.0$ の位置で、 $z/R = 1.0$ の速度が $0 \leq y/R \leq 1.5$ の領域で加速しているのは、後流渦が $y/R > 0$ の方向

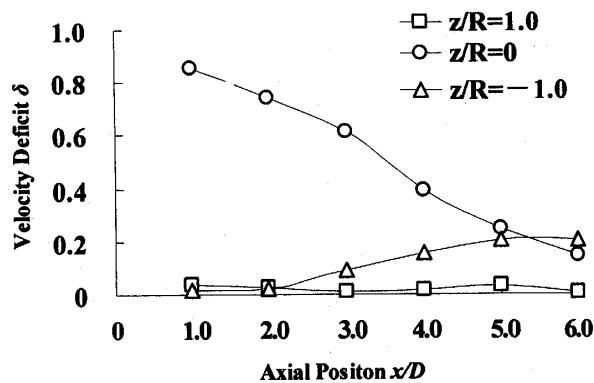


Fig. 6 Velocity deficit in wind tunnel measurement

へ移行することに伴う主流との干渉が原因であると思われる。

以上のことから、翼の回転が時計回りのアップウィンド形風車の場合、風車後流は正の y 方向に移行していき、その移行の程度は風車回転軸高さよりも低い位置で大きくなると考えられる。

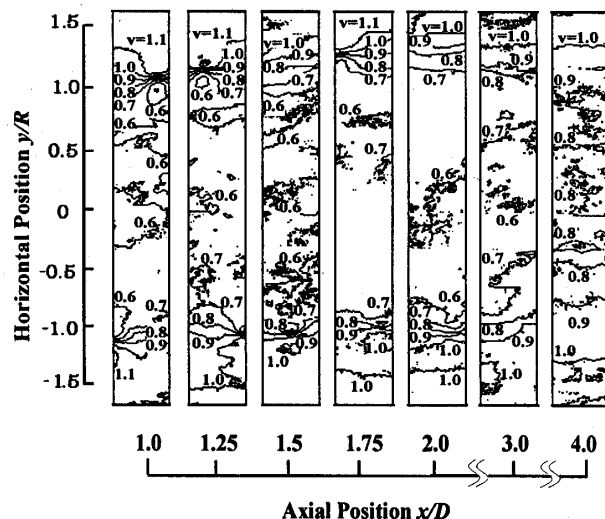
図5に風洞実験による x 方向速度の鉛直分布を示す。翼端位置である $y/R = -1.0$ の半径位置では、 $z/R = 1.0$ と $z/R = -1.0$ の高さの後流速度は主流風速と近い値 $u \approx 1.0$ となり、風速の減少範囲は最大でも $x/D = 1$ の $-0.5 \leq z/R \leq 0.5$ であり、 x/D が増加するほど $u \approx 1.0$ の領域が半径内側へ拡大している。

$y/R = -0.5$ の半径位置では、 $x/D = 1$ において、鉛直方向への風速の減少域が最大となっており、その範囲は $-1.0 \leq z/R \leq 0.75$ で風車直径より若干小さな範囲で風速の減少が見られる。この減速域での風速は下流になるにしたがい回復し、 $x/D = 6$ ではいずれの鉛直位置においても $u \geq 0.9$ と全体的に高い値を示している。

回転軸位置に相当する $y/R = 0$ の半径位置においても、 $x/D = 1$ での風速の減少域は $-1.0 \leq z/R \leq 1.0$ となり、 $y/R = -0.5$ のときと比べ全体的に広く、風車直径程度の範囲となっている。しかし、この $y/R = 0$ の半径位置では、下流方向への風速の回復は遅く、 $z/R > 0$ の領域では $x/D = 6$ において $u \geq 0.8$ と高い値となるが、 $z/R < 0$ の領域においては風速の回復が遅れ、 $u \leq 0.7$ となっている。この $z/R < 0$ の領域において風速の回復が遅れる理由としては風車後流がタワーの影響を受けているためと思われる。

以上のことから、回転軸高さより上部の領域では、風車タワーやナセルの影響が比較的少ないため、回転軸高さより低い位置より後流の回復が早くなると考えられる。

図6に、風車回転軸高さ $z/R = 0$ 、風車回転面上端

Fig. 7 Wake velocity contour at $z/R = 0$

位置 $z/R = 1.0$ および回転面下端位置 $z/R = -1.0$ における各主流位置 x/D での速度欠損 δ を示す。図6から $x/D = 1$ では回転軸高さ $z/R = 0.0$ における速度欠損は $\delta \approx 0.82$ であり、下流の $x/D = 6$ の位置では $\delta \approx 0.16$ まで減少している。回転面上端位置 $z/R = 1.0$ においての速度欠損は x/D がいずれの位置においても $\delta \approx 0$ となっており主流と近い値となっている。回転面下端位置 $z/R = -1.0$ においては、 $x/D \geq 3$ の下流位置において δ は若干増加しており、これはタワーと風車回転による影響と考えられる。

5.2 風洞風車の後流速度ベクトル 図7に $z/R = 0$ の高さにおいて PIV によって測定した後流速度ベクトルから求めた等速度線の全体図を示す。なお、このとき風車翼は $\theta = 0^\circ$ (水平位置) にある。図7中の値 v は xy 平面内の二次元速度ベクトルの絶対値を風車がない状態での x 方向速度 U で無次元化したものである。 $x/D = 1$ では、 $y/R \approx -1.0$ と $y/R \approx 1.2$ の位置に翼端渦と思われる低速域が見られ、その渦の形成されている y/R 位置は $x/D = 1.75$ 付近まではほとんど変わっておらず、 $x/D \geq 2$ において渦の強さが少しずつ弱くなっている。5.1節での後流速度分布の実験結果では $x/D = 1$ において後流の範囲は $z/D = 0$ においては、 $-1.0 \leq y/R \leq 1.2$ の範囲であったが、PIV 測定の結果はその結果とほぼ等しくなった。その両翼端渦のすぐ外側には局所的に風速の増加している領域が見られる。それよりもさらに外側では、主流風速とほぼ一致し、風車後流の影響はほとんど見られない。また両翼端渦の内側は全体的に風速が低下しており、下流に向かうにしたがって、その内側の速度減少域も風速が回復しているのがわかる。以上のことから

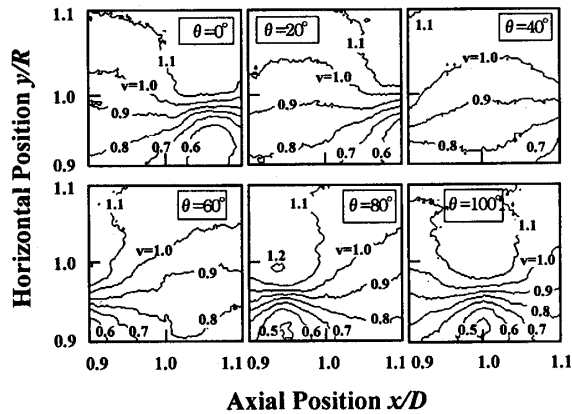


Fig. 8 Wake velocity contour for several azimuth angle ($x/D=1.0$, $y/R=1.0$ and $z/R=0$)

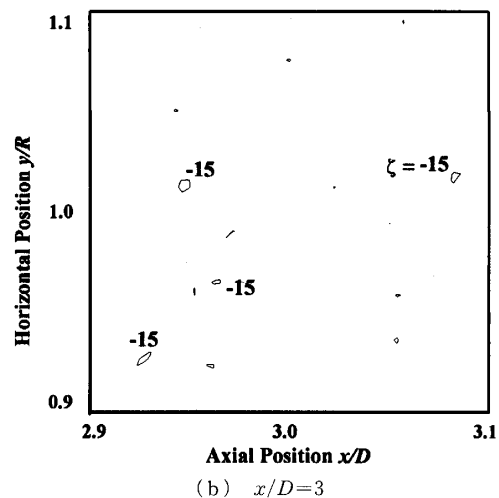
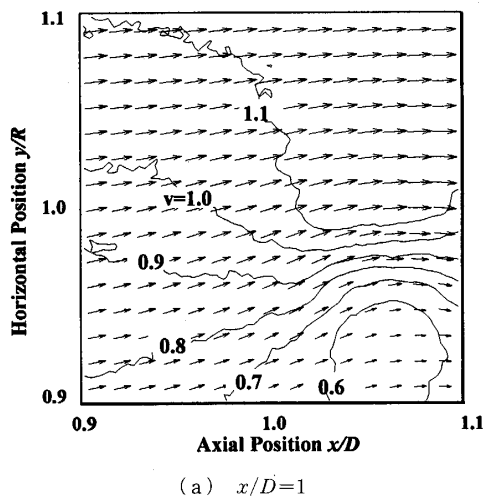
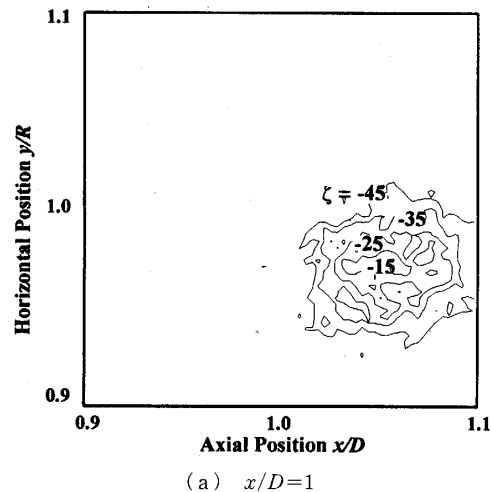


Fig. 10 Vorticity contour at $y/R=1.0$ and $z/R=0$

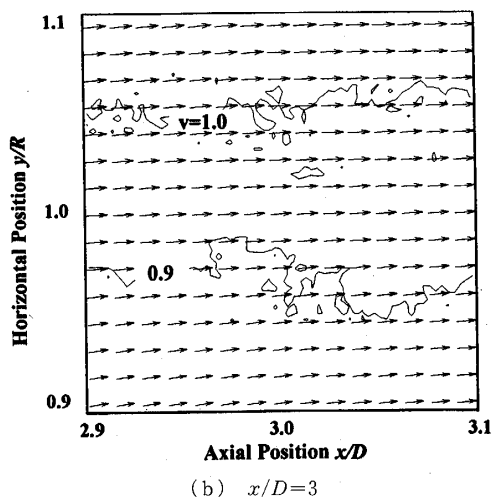


Fig. 9 Detail wake velocity contour at $y/R=1.0$ and $z/R=0$

ら後流の回復は翼端渦の存在に関係していると考えられる。

図8に風車翼の回転角度 θ が変化した場合の $y/R \approx 1.0$ における後流の速度変化を示す。測定位置は下

流位置 $x/D=1$ で高さ $z/R=0$ である。図8からわかるように速度減少域が時間的に下流方向へ移動するとともに少しずつ外側へ移行していることがわかる。

図9(a), (b)には翼端位置に相当する $y/R=1.0$ の半径位置での $x/D=1$ および3における等速度線図および速度ベクトル図の詳細を示す。図9(a)に示すように低速領域は、 $x/D \approx 1.06$ で $y/R \approx 0.92$ において明確に現れているが下流に向かうにつれ徐々に不確かなものとなっていき、図9(b)で示す $x/D=3$ 以降では $y/R \approx 1.0$ において速度こう配が緩やかになる。

図10(a), (b)には $y/R=1.0$ の半径位置での $x/D=1$ および3における xy 面内の渦度 ζ の分布を示す。渦度 ζ の算出に用いた速度は主流風速で無次元化した。図10(a)に示すように渦は、 $x/D \approx 1.06$ で $y/R \approx 0.97$ において明確に現れている。しかし、この渦は下流に向かうにつれ徐々に不確かなものとなっていき、図10(b)に示すように最終的には $x/D=3.0$

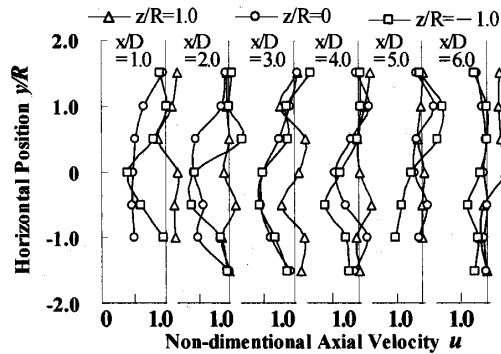


Fig. 11 Horizontal wake profile in field measurement

において渦はほとんど見られなくなる。

図9および図10からわかるように、渦が消える位置が $x/D=3$ 付近であるのに対し、後流が広がり始める位置は $x/D=4$ 付近であるため、翼端渦が周囲流によって拡散し始めるとともに後流が広がり始めると考えられる。

5.3 フィールド風車の後流速度分布 図11にフィールド風車後流の x 方向速度の水平分布を鉛直高さ別に示す。回転面下端高さ位置 $z/R=-1.0$ での $x/D=1$ における風速減少域は $-1.0 \leq y/R \leq 0.5$ であり、 $y/R=0.0$ での風速は $u \approx 0.4$ となった。また、下流になるにしたがって回復していく傾向にあり $x/D=6$ の領域では、ほとんどの位置で主流風速と近い値 $u \approx 1.0$ を示している。

回転軸高さ $z/R=0$ での後流は、 $x/D=1$ において $y/R \leq 1.5$ の領域で速度が減少している。この減速域は下流方向に速度が回復していき $x/D=5$ で $u \approx 1.0$ と主流風速に近い値を示した。図4に示した風洞実験と比較するとフィールド実験では $x/D=1$ においてすでに後流は広がる傾向にある。

回転面上端高さ位置 $z/R=1.0$ においては、いずれの x/D の位置においても、速度の値に変動はあるが、ほぼ $u \approx 1.0$ を示している。

また、図11より z/R によらず速度が最も減少している位置は、下流になるにしたがって y/R が負の方向へ移動している。

以上のことからフィールド風車後流は、風車を真後ろから見て回転軸中心より左側、すなわち $y/R < 0$ の方向へ後流中心が移動していくと考えられる。これは本実験における風洞風車とフィールド風車とは回転方向が反対であることを考慮すると、定性的には図4の結果と一致しているものと考えられる。

図12にフィールド風車後流の鉛直方向速度分布を示す。なお、フィールド風車の回転方向は風洞風車の回転方向と反対であるため、図5で示した y/R は負

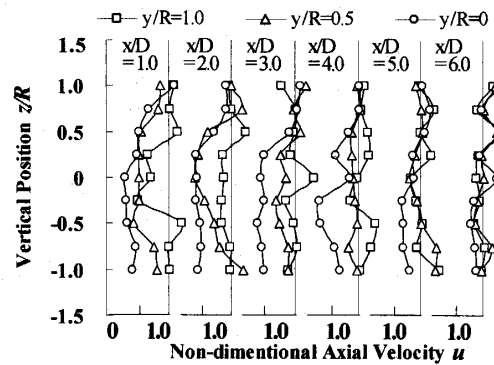


Fig. 12 Vertical wake profile in field measurement

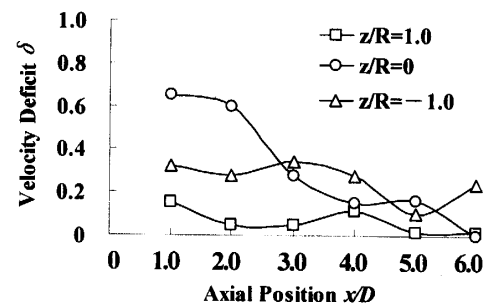


Fig. 13 Velocity deficit in field measurement

の場合を示したが、図12では正の場合を示す。 $y/R=1.0$ では、 $x/D=1$ での速度減少範囲は $-0.5 \leq z/R \leq 0.5$ 程度であり、下流に向かうほど回復し、 $x/D=3$ においてほぼ主流風速まで回復する。

$y/R=0.5$ では、 $x/D=1$ において速度減少範囲が $-1.0 \leq z/R \leq 1.0$ であるが、下流の $x/D \approx 4$ でほぼ主流風速まで回復している。

$y/R=0$ では、 $x/D=1$ において速度減少範囲は $z/R \leq 1.0$ であるが、後流速度は $x/D=5$ の位置において風車回転軸高さより高い $z/R > 0$ では $u \approx 0.9$ まで回復している。しかし回転軸高さより低い $z/R < 0$ ではタワーの影響により速度の回復は遅れ、 $x/D=6$ の位置で回復する。

なお図11および図12において加速する領域があるのは、データ取得の判断に使用した風車上流の超音波流速計と後流測定に使用した風速計との距離に基づく速度の時間的変化、および風車設置地点の地理的条件による速度の空間的変化によるものである。

図13にフィールド実験における風車回転軸高さ $z/R=0$ および回転面上下端位置 $z/R=\pm 1.0$ における速度欠損を示す。図13より $x/D=1$ では回転軸高さ $z/R=0$ における速度欠損は $\delta \approx 0.65$ であり、下流になるにしたがって速度欠損が減少している。回転面上端位置 $z/R=1.0$ においては x/D がいずれの位置においても $\delta \approx 0$ に近い値となっており主流風速に近い

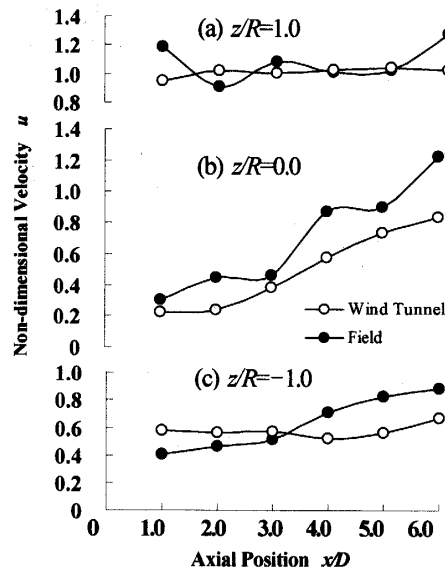


Fig. 14 Comparison of wake profile in wind tunnel measurement and field measurement at $y/R=0$

値となっている。しかし、回転面下端位置 $z/R=-1.0$ では図 12 に示したタワーの影響により、速度欠損の値は $z/R=1.0$ に比べて大きく、 $\delta \approx 0.3$ となっていることがわかる。

5.4 フィールド風車後流と風洞風車後流の比較

図 14 に風車半径中心位置 $y/R=0$ におけるフィールド実験と風洞実験による後流速度の比較を示す。回転面上端高さ $z/R=1.0$ ではフィールド風車後流も風洞風車後流も同じ程度の値となり、全体的には速度は下流方向へ微増の傾向にあった。

風車回転軸高さ $z/R=0$ では、 $x/D=1$ で風洞風車の無次元風速は $u \approx 0.23$ であるのに対してフィールド風車では $u \approx 0.30$ となっており、比較的近い値を示した。しかし、下流ではその差は大きくなり、 $x/D=6$ においてはフィールド実験と風洞実験の後流風速の差は 0.4 程度となった。両実験とも全体的な傾向として、下流に向かうにしたがって風速は回復していくが、その回復に要する距離は、風車実験よりもフィールド実験のほうが短いことがわかる。

回転面下端高さ $z/R=-1.0$ では、 $x/D \leq 3$ においてフィールド実験では大気境界層の存在により速度が低いため、風洞風車のほうが高い速度となるが、 $x/D \geq 4$ ではフィールド風車の後流風速のほうが高くなる。

図 15 には、フィールド実験と風洞実験における速度欠損の比較を示す。 x/D によらず速度欠損が大きいのは風洞実験であり、また、下流域で風速の回復が遅れている。一方、フィールド実験においては風洞実

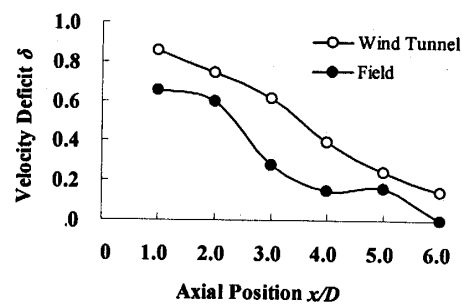


Fig. 15 Comparison of velocity deficit in wind tunnel measurement and field measurement at $z/R=0$

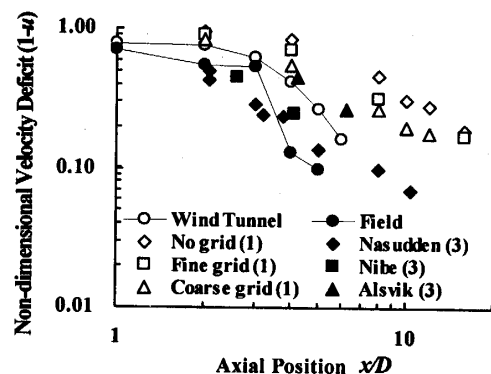


Fig. 16 Comparison of velocity deficit at $y/R=0$ and $z/R=0$

験の結果より速度欠損は小さくなっており、下流域での後流の回復も早くなっており、 $x/D=6$ で $\delta=0$ となっている。以上のことから、風洞実験に比べてフィールド実験での後流のほうが回復するまでの距離は短く、回転軸高さにおいては $x/D=6$ で完全に回復することが明らかとなった。この理由として、風洞実験での流れは比較的乱れが少なく、主流と後流との混合が行われにくいのに対し、フィールド実験における流れは乱れの大きさによる影響以外に風向変動による混合が大きく、後流の回復が早くなると考えられる。

図 16 に本研究の結果と文献(1)による後流の風洞実験結果および文献(3)による後流のフィールド実験結果を比較する。文献(1)による風洞風車は直径 250 mm であり、風洞出口に格子なし、細かい格子あり、粗い格子ありの三とおりについて行った結果である。文献(3)によるフィールド実験は Nasudden (2 MW, 直径 80 m), Nibe (600 kW, 直径 40 m), Alsvik (180 kW, 直径 23 m) において行った結果である。過去の実験結果と比較すると、本研究の風洞実験およびフィールド実験の結果は定性的にはよく一致しており、定量的には速度欠損は本研究のほうが早く低下する、つまり若干速度の回復が早くなっている。

6. 結 言

風車後流の回復を明らかにするため、直径 0.6 m 風車後流の風洞実験および直径 10 m 風車後流のフィールド実験を行い、次のような結果を得た。

(1) 風洞実験においては、後流は翼端渦が消滅した位置から広がり始める。

(2) 風洞実験とフィールド実験における風車後流を比較した場合、フィールド実験のほうが短い距離で後流が回復する。

(3) 風車後流の回復は回転軸より高い位置では早く、タワーの存在する回転軸より低い位置では遅い。

(4) 本研究で行ったフィールド実験では、風車直径の 6 倍の下流位置でタワーの影響が若干残るものの、回転面全体としては後流はほぼ回復する。

文 献

- (1) Vermeulen, P. E. J., *Proc. 3rd Int. Symp. Wind Energy Syst., BHRA Fluid Eng.*, (1980), 431-450.
- (2) Anderson, M. B., ほか 2 名, *Proc. 4th Int. Symp. Wind Energy Syst. BHRA Fluid Eng.*, (1982), 113-135.
- (3) Magnusson, M. and Smedman, A., *Wind Eng.*, 18-3 (1994), 139-152.
- (4) Magnusson, M., *Proc. Euro. Wind Energy Conf.*, (1999), 1150-1152.