

風洞実験による風車相互干渉の基礎的研究*

(乱れ強度の異なる二つの流れ模型を用いた場合)

清水 幸丸^{*1}, 横田 健^{*2}, 前田 太佳夫^{*1}
安立 和弘^{*2}, 本間 秀一郎^{*2}, 中野 美和^{*2}

Experimental Study for Mutual Interference between Two Horizontal Axial Wind Turbines (In Case of Wind Tunnel Tests for Two Kinds of Artificially Generated Flow Patterns)

Yukimaru SHIMIZU^{*3}, Takeshi YOKOTA, Takao MAEDA,
Kazuhiro ADACHI, Shuichiro HOMMA and Miwa NAKANO

^{*3} Department of Mechanical Engineering, Mie University,
1515 Kamihama-cho, Tsu-shi, Mie, 514-8507 Japan

The mutual interference of plural wind turbines becomes important when many wind turbines are located in large-scale wind farm. Several papers have analyzed the problems of mutual interference among plural wind turbines. However, the effects of boundary layer profile and turbulence in wind for mutual interference of plural horizontal axis wind turbines (HAWTs) are still unknown enough. In order to solve such problems, extensive experiments were performed in a large-scale wind tunnel. The paper describes the following points, (1) experimental analysis of wake behind HAWT for two different flow patterns, (2) relationships between HAWT performances and two different flow patterns, (3) detailed investigation for mutual interference between two HAWTs, through wind tunnel testing for two kinds of artificial flow patterns.

Key Words: Fluid Machinery, Wind Mill, Turbulent Flow, Wake, Mountain Area, Horizontal Axis Wind Turbine, Mutual Interference, Complex Terrain

1. 緒 論

最近, わが国においても, 20 000~50 000 kW クラスの集合形風力発電所が見られるようになってきた. 1 箇所に 1 500 kW 機(翼車直径 66~70 m, 高さ 70~80 m)が 20~30 本設置されるという状況にある. このような大形機を 1 箇所に集中的に建設する場合には, 風車相互の干渉によって, 各風車の年間出力がなるべく低下しないように, 風車相互の間隔をどのようにとるか重要な課題である.

大形の集合形風力発電所はヨーロッパ, 米国等で多数見られるが, 日本に比べ有効利用可能な平坦地面積が大きいので, 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, 日本においては, 風が強く, しかも広大な平坦地という場所は少なく, 起伏の大きい山域や丘陵地帯を利用する機会が多くなる. このような複雑地形の土地の有効利用に当たっては, 地形形成状況, 風向分布等を綿密に調査し, 建設

予定地域から最も経済性が高く, 多量の発電量を得ることが必要である.

これまでにも, 風車配列方法についての研究は文献(1)~(8)に見られるようにある程度進んでいる. これらの研究は, おもに平坦地に数十本~数百本を並べる際の知見を与えている. 著者らの本論文では日本で多く見られるような風車高さに相当する, あるいはそれ以上の凹凸の激しい複雑地形に数十本大形風車を設置する場合を想定している. 複雑地形には, 幾何学的に一定間隔で配置することが難しくなる. 本研究では風車間隔を条件によって変えながら数十本配置する場合どのような判定基準に基づいて風車を配置したらよいか, 基本的な考え方を提供することを目的としている. また, 平坦地上での風特性と比べると, 複雑地形上では風速変動や速度分布の不均一が生じ, これらは風車後流の形成に大きく影響していると思われる. そのため, 本研究では複雑地形上の風車後流を解明する第一歩として, 乱れや速度分布の不均一性が風車後流に与える影響を検討することも目的としている.

著者らは, 風車配列方法について, 基礎的な知見を得るため大形風洞を用いて次のような実験的研究を試みた. (1) 風洞内に代表的な二つの流れ模型, すな

* 原稿受付 2003 年 1 月 6 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.

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

わち、粗面乱流境界層流れと乱れの小さい滑面境界層流れを作り、(2) これら二つの流れ形状に対する水平軸風車後流の実験的解析、(3) 二つの流れ模型によって流れ形状および乱れ強度を変化させた場合の風車性能の変化の考察、および、(4) 二つの流れ形状における2台の風車の相互干渉についての実験的検討、すなわち、上流側風車配列の下流側風車への影響についての検討を行った。以上の研究によって、興味のある結果を得たので、ここに発表する。

2. おもな記号

C_p : 風車出力係数 $= W / (0.5 \rho U_\infty^3 \pi r^2)$

D : 風車直径 $= 2R (= 0.6 \text{ m})$

H : 床面からの高さ m

HAWT: Horizontal Axis Wind Turbine (水平軸風車)

r : 風車の半径位置 m

R : 風車半径 $(= 0.3 \text{ m})$

v_θ : 風車後流の周速度 m/s

u : 局所軸速度 m/s

u_r : 風車半径位置 r における軸速度 m/s

u_{\min} : 風車後流内の最小軸速度 m/s

Δu : $U_\infty - u_{\min}$ m/s

U_∞ : 風洞内の主流軸速度 m/s

W : 風車出力 W

W_{rB} : 半径 r の位置に置かれた B 風車の出力 W

$W_{B \max}$: 主流風速 8 m/s での B 風車の出力 W

σ : 風速の標準偏差

$$= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (u_i - U_\infty)^2} \text{ [m/s]}$$

λ : 風速比 $= R\omega / U_\infty$

3. 実験装置および方法

3.1 風洞実験装置概要 図1には、本実験で用いた循環形大形風洞装置を示す。風洞吹出し口は直径 3.6 m の円形で、吸込口は $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ の正方形である。吹出し口と吸込口の距離は 4.5 m で、図2に示すよう

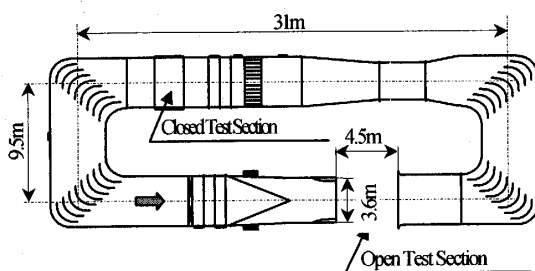


Fig. 1 Overall schematic drawing of the wind tunnel

に吸込口から、さらに 3 m ほど中へ入ってテスト模型を置くことができる。風洞吹出し口速度分布は均一である。風車流入風速は、吹出し口に設置された標準ピトー管で測定する。本実験では、図2に示すように直径 0.6 m 、最大出力 200 W の水平軸風車を A, B 2 台用い干渉実験を行った。実験に用いられる風車は 1500 kW 級風車直径 66 m に比べ $1/100$ と小さいので、必ずしも相似性は保証されないが、水平軸風車相互干渉の基本特性は定性的に説明され则认为している。実験レイノルズ数は翼端周速で考えた場合 6.9×10^4 、翼車直径で考えた場合 3.4×10^5 になる。

風車出力の測定は図3に示す方法を用いた。発電機は可変速度回転で発生電力は電熱線で熱に変換される。負荷抵抗を変化させて出力を変化させる。

3.2 風車干渉実験方法 図2に示すように風洞の吹出し口と吸込口の間に高さ 1.9 m の位置に 2.4 m (横方向) $\times 6 \text{ m}$ (長手方向) のベニヤ板を設置した。ベニヤ板の前縁にははく離が生じないように、さらに、ベニヤ板上の境界層が、二次流れて変形しないように工夫してある。速度分布測定の結果は、比較的滑らかな平板境界層の速度分布になる(図6参照)。

この実験では、平板上に3タイプの流れ状態(a) smooth, (b) rough floor, (c) full turbulenceを

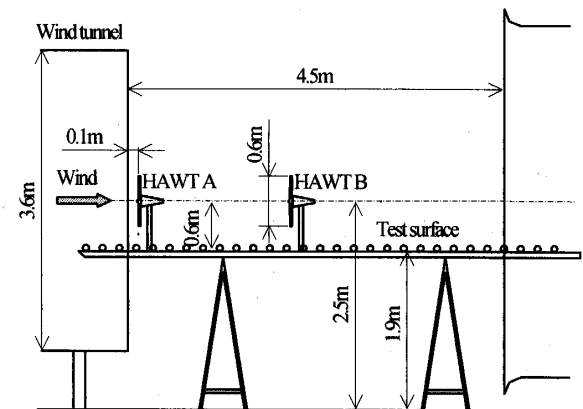


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus in wind tunnel

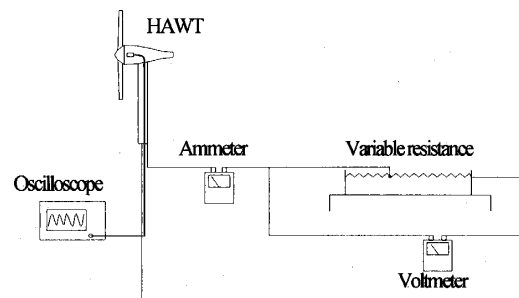


Fig. 3 Power measurement system of small HAWT

作った。図4にその方法を示す。(a)は平板のみの滑面の場合、(b)は平板上に外径50 mmの塩化ビニルパイプを流れに直角方向にパイプ径と同じピッチ間隔で並べた場合、および(c)は(b)と同様な塩化ビニルパイプを並べて粗面を作り、さらに流れに空間的な乱れを作るために外径50 mmの塩化ビニルパイプを高さ2 mで0.40 m間隔に5本立てた場合、すなわち空間的な乱れと粗面の乱れの両者を組合せた流れ状態を作った場合である。なお、風洞の乱れ強度は $\pm 0.5\%$ 以内である。これら(a)および(c)の流れ中に、単独ま

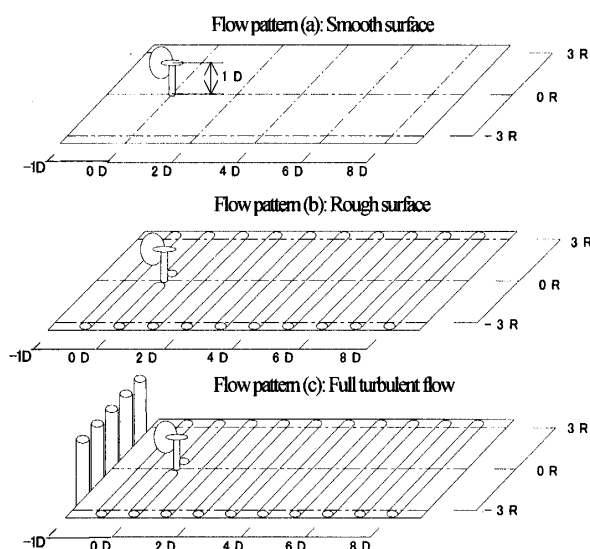


Fig. 4 Roughness setup for three kinds of flow patterns (a), (b) and (c) in wind tunnel

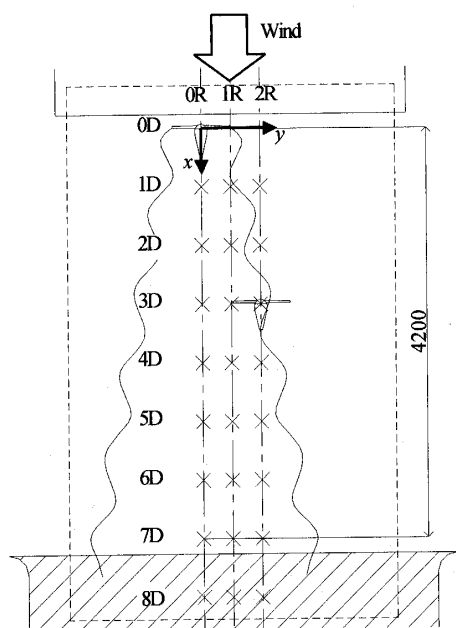


Fig. 5 Definition of setting position of two HAWTs in wind tunnel

たは2台の風車を設置し、流入速度分布と乱れの影響を調べた。図5には、上流側および下流側風車位置を示す。上流側A風車に対して、下流側B風車は、A風車の回転中心0Rから右方向に1R, 2Rと移動させた。さらに下流側流れ方向位置は、1Dから8Dまで変えた。A, B両風車の回転軸高さは、風車直径と等しい1Dである。この実験では風洞内で人工的に乱れ速度場を作るため、広いスペースを作ることができず、実験範囲は狭くなった。しかし、速度分布の測定には焦点距離2 mの二次元レーザ流速計を使用することができるので詳細な速度分布の測定が可能である。

4. 実験結果と考察

4.1 風洞実験で用いた流れ模型の速度分布 図6には風車なし状態で図4に示した(a), (b), (c)流れでの平板中心線上の垂直方向軸速度分布を示す。流れの特徴は、次のようになる。流れ条件(a)で示すベニヤ板平板であれば通常、教科書等に出てくる滑面境界層が得られる。流れ条件が粗面の場合には、境界層が滑面に比べて3倍程度の厚さになる。さらに、(c)のように上流側にポールを立て空間的な乱れを与えると速度分布は相当変形し、乱れも大きくなる。なお、乱れ強度については後述の図9の最上段-1Dのデータを参照されたい。

4.2 単独風車後流について 図7には、流れ条件(a)smooth および(c)full turbulence の中に供試

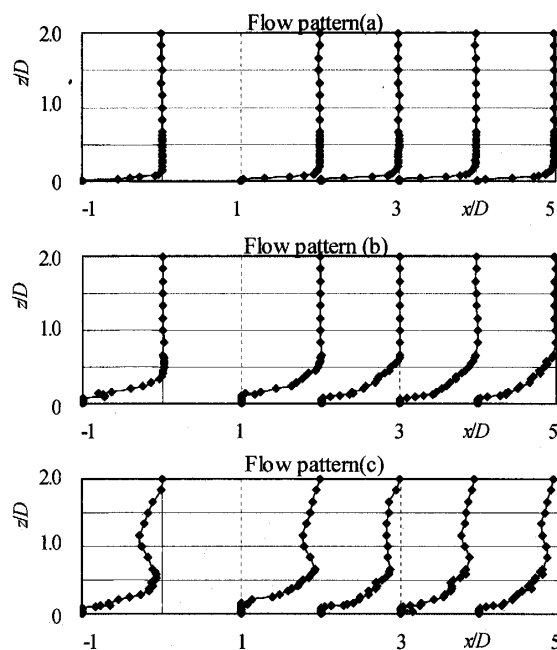


Fig. 6 Three kinds of axial velocity distribution of boundary layer on the base of 3 flow patterns (a), (b) and (c)

水平軸風車を図5の0D位置に設置した場合の上流側(-1D)と風車下流1Dから8Dまでの軸速度分布を示す。乱れの大きい流れ(c)の場合、乱れの小さい(a)に比べ4D下流までは、大差ないが、6D、8Dと下流にいくにつれて、その差は大きくなり、乱れの大きい(c)流れのほうが、軸速度分布の均一化は早くなる。

図8には風車下流4Dにおける等軸速度線図と水平面内周速度分布を示す。図8より、流れ(a)の乱れが小さい場合は、等軸速度分布で上下の対称性が少し崩れて、回転中心下側に低速度領域が表れる。その理由は、風車支柱後流の影響が表れてきているためと考えられる。(c)流れの場合、乱れが大きいため、支柱の影響は早く小さくなることわかる。また、(a)流れに比べて、(c)流れでは、無次元速度0.6~0.8の領域

は大きくなる。

図9には、A風車単独の場合に、A風車に流入する流れ(a)および(c)の乱れ強度(最上段-1Dのデータ参照)、および後流の乱れ強度分布の実測値を示す(1Dから4Dのデータ参照)。図9より(a)流れと(c)流れの乱れ強度分布を比較すると、風車上流-1Dでは、(c)流れでは、乱れ強度0.15と大きく、(a)流れでは、0.01程度で小さい。風車下流1Dでは、(a)流れでは、風車後流の影響範囲のみで乱れ強度は、0.05から0.15と高い値を示す。一方、(c)流れでは、大きな乱れ強度0.15をもつ流入流れは回転面を通過すると後流領域を含めて乱れ強度が小さくなり、0.1程度になる。4D下流になると両者の傾向は、相当異なり、(a)流れでは、下流全体で0.05から0.2

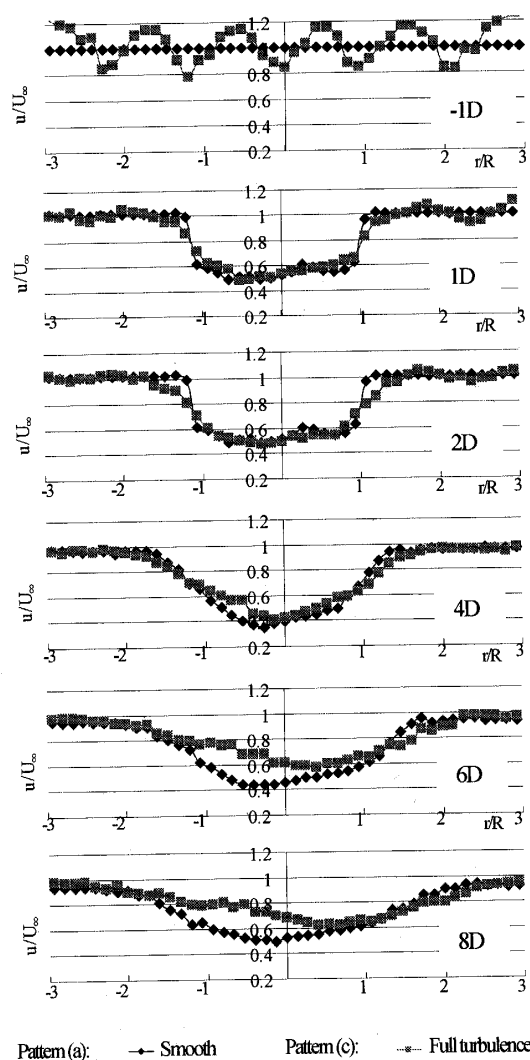


Fig. 7 Horizontal axial velocity distribution for flow pattern (a) and (c) in wake on horizontal surface at rotor center (measured by multi total pressure pitot tubes)

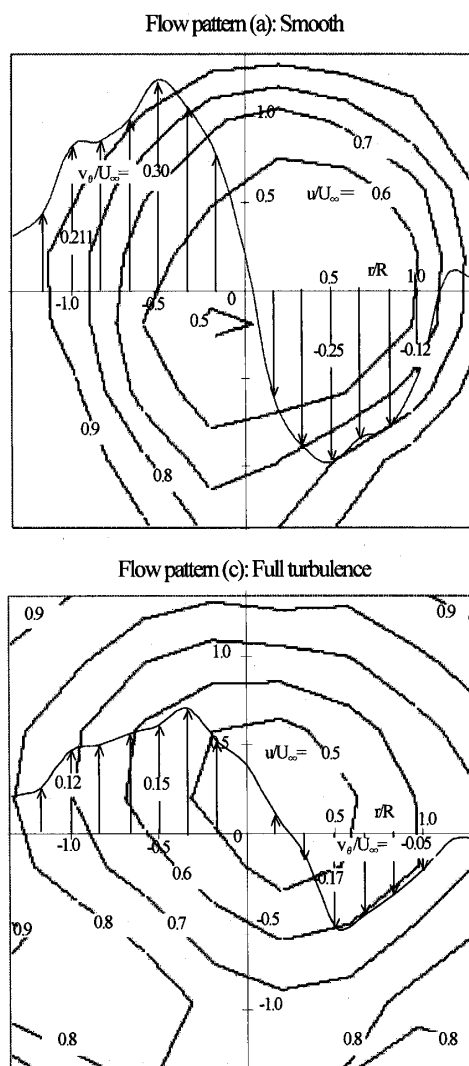


Fig. 8 Equi-axial velocity contour line (u/U_∞) and peripheral velocity distributions (v_θ/U_∞) on rotor downstream 4D in wake for cases of flow patterns (a) and (c)

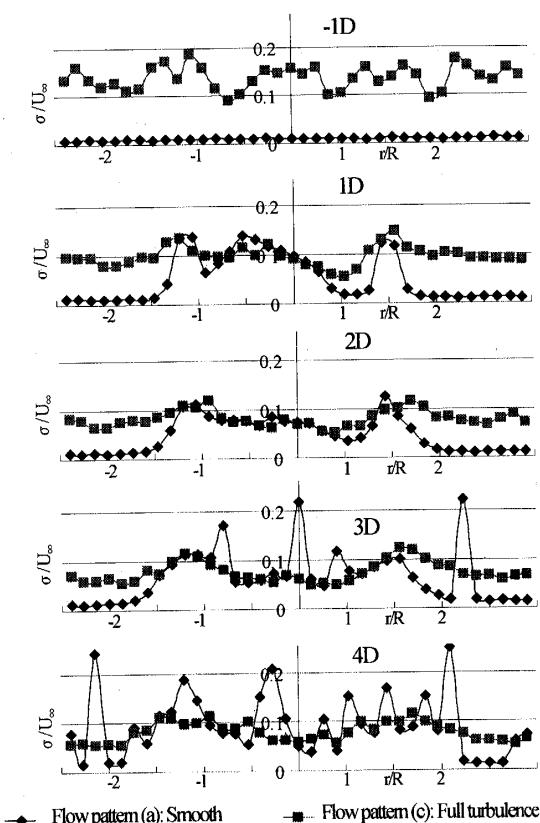


Fig. 9 Turbulence intensities σ/U_∞ in wake on horizontal surface at rotor center (measured by LDV)

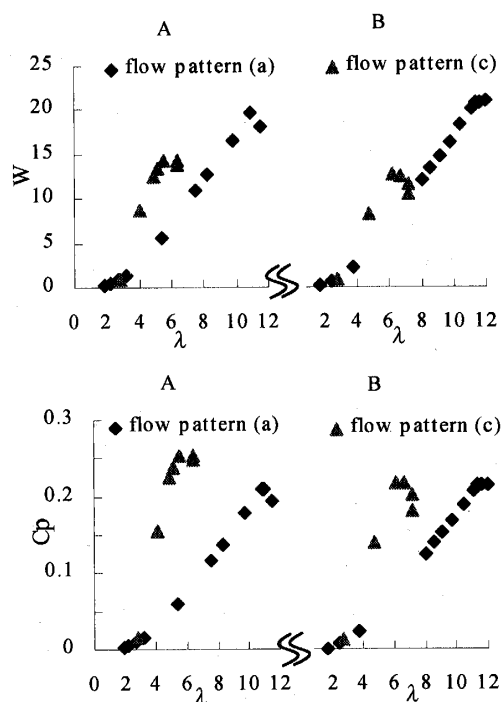


Fig. 10 The effect of flow patterns (a) and (c) and turbulence intensity of flow for output W and output coefficient C_p of test small HAWTs at $U_\infty=8$ m/s

まで大きく乱れ強度が変動する。一方(c)流れでは、乱れは相当収束し、0.05と0.1の間におさまってくる。すなわち、後流乱れの影響は小さくなる。

4.3 単独風車出力性能に及ぼす乱れの影響 図10は2台の水平軸風車A, Bを風速8 m/sのもとで風車出力を変化させて性能試験を行った結果である。A, B両風車とも、(a)流れでは、900 rpm前後で20 Wから21 W程度の出力を得る。一方、(c)流れでは主流風速が低下するため出力は大幅に低下し、A風車では最高で15 W弱、回転数は450 rpm、B風車では最高で13 W、回転数470 rpmと半分程度になる。図の下側には、上述の結果を出力係数 C_p を用いて表した。流れ(c) full turbulenceでは、0.23~0.26、流れ(a)の smooth floor では、0.21~0.23と少し小さくなる。乱れ強度を変えても最大出力係数 $C_{p\max}$ はあまり変わらない。すなわち、上流の粗さ要素の存在により乱れや速度分布の不均一性が大きくても風車性能そのものはあまり変化しないが、乱れが大きいと流れの不均一性が増し風車に流入する流れの回転面内平均速度が低下する。

4.4 風車2台の場合 図11には、上流側A風車に対して下流側B風車を図5に示す配置で設置した場合の無次元出力値 $W_{rB}/W_{B\max}$ を示す。ここで、 W_{rB} は、A風車の後流内の半径位置 r でのB風車の

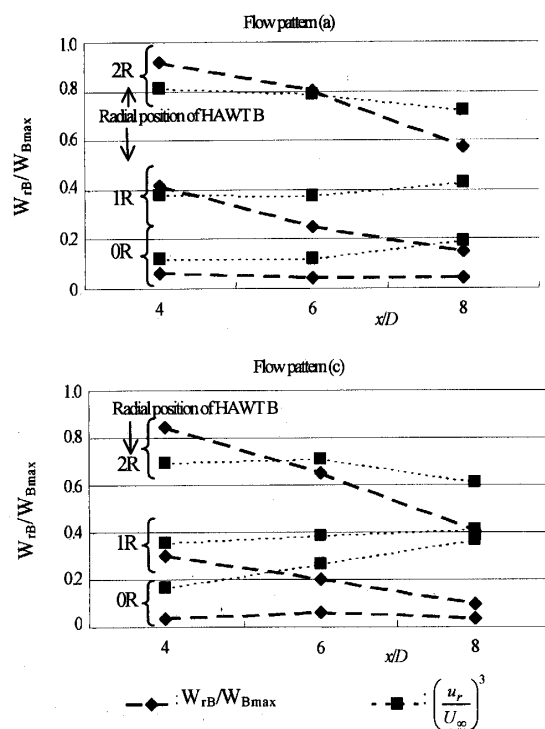


Fig. 11 Comparison of output power ratio $W_{rB}/W_{B\max}$ for HAWT B in wake of HAWT A and 3rd power of wind velocity at rotor center, $(u_r/U_\infty)^3$, at $U_\infty=8$ m/s

出力, $W_{B \max}$ は, $U_\infty=8 \text{ m/s}$ で得られる B 風車の最大出力を表す. $W_{B \max}/W_{B \max}$ の値が干渉の結果出力が低下した割合を示す. まず図 11 の (a) 流れの場合について考察する. 上流側 A 風車の下流, $0R$ 位置に 2 台めの風車を置いた場合, 下流側 B 風車の出力は極端に低下し, 単独風車出力の 5% 程度になる. 半径位置 $1R$ すなわち, 上流側 A 風車の翼端位置に下流側 B 風車の回転軸がくるように設置した場合, $0R$ の場合より多少よくなるがそれでも低下量は大きく, $4D$ で 40%, $6D$ で 25%, $8D$ で 15% まで低下する. 下流に移動するにつれて出力が低下する理由は, 上流側 A 風車の後流領域が下流に進むにつれて拡大し, 低風速領域が広がるためと推定される. 下流側 B 風車を $2R$ 位置, すなわち, 上流側 A 風車の翼端と下流側 B 風車の翼端がちょうど一致する位置に下流側 B 風車を設置した場合, 出力低下率は若干よくなるが, それでも, $4D$ 下流で 91%, $6D$ で 80%, $8D$ で 57% になる. つづいて (c) 流れの場合, (a) 流れに比べて, $1R$, $2R$ 位置では, おおの値は 5~10% ほど小さくなる. $0R$ では, 5% 程度の値まで低下する. 図 12 には風速低下率を示す. 図 12 で示す風速低下率とは A 風車の流入風速 8 m/s で, A 風車の後流内, 流れ方向 $0 \sim 8D$ および半径位置 $0R$, $1R$, $2R$ における後流風速の低下割合を示す. 風車出力は風速の三乗に比例する. 図 12 の風速低下率を三乗した値を図 11 に点線 ■ 印で記入する. この値と実際の出力低下率を以下に比較する. (a) 流れの場合, 半径位置 $2R$ では低下率の三乗の値と風車出力低下の無次元実測値は $6D$ で交わり, $1R$ では約 $4D$ で交わる. $0R$ ではかなり接近した値を示す. (c) 流れの場合も半径位置 $2R$, $1R$ では (a) 流れと類似の傾向を示すが, $0R$ では, (a) 流れに比べて, 若干値の差が大きくなる.

以上の結果より概略を見れば, 下流側 B 風車の出力は, B 風車回転軸位置における流入風速低下率の三乗に比例するという結論になる.

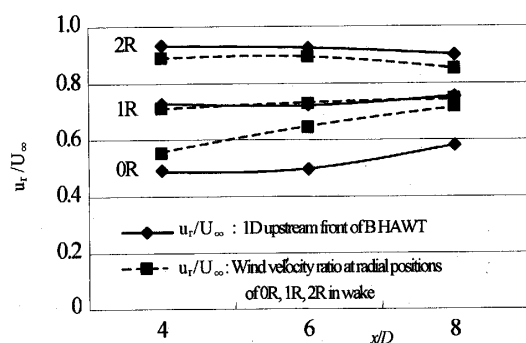


Fig. 12 Reduction of wind speed ratio in wake

4.5 風洞実験での風車後流とフィールドで行われた大形風車後流の比較

水平軸風車後流の $\Delta u/U_\infty$ 変化について, 風洞実験結果とフィールド実験結果を比較検討する. 図 13 には, フィールド実験結果⁽⁵⁾⁽⁸⁾として, Alsvik (スウェーデン, 180 kW, 直径 23 m, 42 rpm, 高さ 31 m) ▲ 印, * 印, Näsudden (スウェーデン, 2 MW, 直径 80 m) ○ 印, Nibe (デンマーク, 600 kW, 直径 40 m, 高さ 50 m) × 印, Orkney (英国, 250 kW, 直径 20 m) ◇ 印, Maglarp △ 印, Goodnoe Hills ■ 印, ○ および ● 印で本風洞実験結果が記述されている. 著者らの行った風洞実験結果 ○ 印は風車直径 D の 4 倍以降の $\Delta u/U_\infty$, すなわち, 後流中心の速度回復こう配は, 他のフィールド実験結果とほぼ等しくなる. しかし, 風車直径 $0D \sim 4D$ のポテンシャルコア領域を含めた“近い後流”と呼ばれる範囲の後流回復傾向は, フィールド実験結果と風洞実験結果は相当異なる. このおもな理由は, 風洞実験で用いた風車は, 直径 0.6 m と小さく風車下流 $4D$ の距離は 2.4 m にすぎない. 一方フィールド風車では, Alsvik 180 kW 風車では 100 m 前後の距離になり, Näsudden 2 MW 風車では, 300 m 以上の距離になる. フィールドでは, $100 \sim 300 \text{ m}$ という距離の間でリチャードソン数で表される大気乱流境界層の安定・不安定条件にも基づく乱流混合現象の影響が極めて大きくなるのに対して, 風洞では, 風洞内供試床面と風車後流の関係に温度差, その他大気乱流混合を促進する要因が入ってくる割合が極めて小さいため, 床面と後流の間の上下方向の混合が小さくなり, $0D \sim 4D$ 間の混合による変

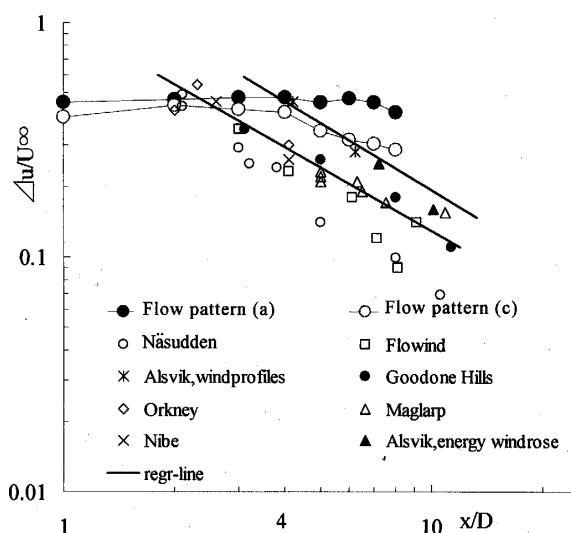


Fig. 13 Comparison of wind speed reduction ratio $\Delta u/U_\infty$ at rotor center in wake of large HAWTs in the field⁽⁵⁾⁽⁸⁾ and those of small HAWT in wind tunnel

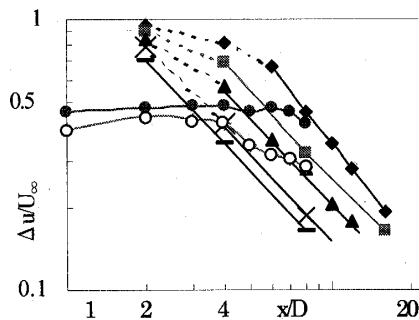


Fig. 14 Comparison of wake flow of small HAWT for various flow condition in wind tunnel in Ref. (3)

Table 1 Symbols for Fig. 14

Authors	Rotor diameter [cm]	Number of blades	Chord length [cm]	Tip speed ratio	Flow description	Symbol
Alfredson, Dahlberg in Ref.(3)	25	2	2.5-3.5	4.6	No grid	◆
					Fine grid	■
					Coarse grid	▲
					Boundary layer ZH=0.7D	×
					Boundary layer ZHH=1D	—
Present experiment	60	3	3.5-9.0	1.8	Flow pattern(a)	●
					Flow pattern(c)	○

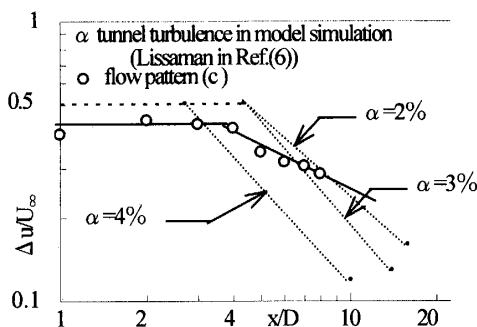


Fig. 15 Comparison of wind tunnel experiment data and model simulation wake velocity deficit

化は小さくなると推定される。図14には、Vermeulenの風洞実験結果⁽³⁾と著者らの実験結果○および●印を比較する。Vermeulenの $ZH=0.7D$ の境界層内流れの後流の傾向と著者らの(c)流れ○印の結果はよく一致する。図15は本実験結果と文献(6)中に示されたLissamanによる風洞乱れと風車後流に関するシミュレーション結果の比較を示す。Lissamanの結果から、風洞乱れが小さい場合には $x/D \leq 4$ において $\Delta u/U_\infty$ 一定の領域が存在し、その領域は風洞乱れが大きくなるとともに減少することがわかる。本実験結果でも $x/D \leq 4$ において $\Delta u/U_\infty$ 一定の領域が存在することから、 $x/D \leq 4$ の範囲も含めてLissamanの結果と傾向がよく一致していることがわかる。図13

に示した風洞実験結果とフィールド実験結果は“近い後流”に相当する $x/D \leq 4$ の範囲で傾向は異なるが、次の推測が可能である。風車を2列に並べる場合、卓越風向がほぼ一定であれば、上流側風車が $3D$ 間隔で配置されていれば、その中間点下流 $3D$ 以内に下流側2列めの風車を配置すれば、2列め風車は、1列め風車の後流に入る割合が少なくなる。

5. 結 論

以上の研究により、おもに次のような結論を得た。

(1) 水平軸風車の出力係数(性能)は、風の乱れの影響をあまり受けない。しかし、乱れが大きいと風車に流入する平均速度が低下するので、その結果出力は低下する。

(2) 上流側風車後流の影響範囲は、下流に向けて後流が拡大するにつれて広がる。また、下流側風車の出力低下率は、下流側風車回転軸位置の速度と上流側風車 $1D$ 上流の流入速度との比の三乗にほぼ比例する。

(3) 風車後流の速度分布回復率は、風車に流入する風の乱れ強度が大きいと大きくなり、すなわち、短い距離で均一になる。一方、乱れが少ない、すなわち、乱れ強度が小さいと、速度分布の回復距離は長くなる。

(4) 水平軸風車後流の最初のポテンシャルコア領域の流れは、風車ハブとブレードの取付状態によって複雑に変化する。しかし、風車後流のポテンシャルコア領域を経過した後の運動量拡散一定の飽和領域の流れは、同一になる。ただし、後流を取り巻く流れの乱れ状態によって、拡散状況は著しく異なってくる。

文 献

- (1) Builtjes, P. J. H., *Proc. 2nd Int. Symp. Wind Energy Syst., BHRA Fluid Eng.*, (1978), 49-58.
- (2) Faxen, T., *Proc. 2nd Int. Symp. Wind Energy Syst., BHRA Fluid Eng.*, (1978), 59-72.
- (3) Vermeulen, P. E. J., *Proc. Third Int. Symp. Wind Energy Syst. BHRA Fluid Eng.*, (1980), 431-450.
- (4) Anderson, M. B., Milborrow, D. J. and Ross, J. N., *Proc. 4th Int. Symp. Wind Energy Syst. BHRA Fluid Eng.*, (1982), 113-135.
- (5) Haines, R. S., et. al., *Proc. Euro. Wind Energy Conf.*, (1986), 453-458.
- (6) Spera, D. A., ed., *Wind Turbine Technol.* ASME Press, (1994), 305-319.
- (7) Magnusson, M. and Smedman, A., *Wind Eng.*, 18-3, (1994), 139-152.
- (8) Magnusson, M., *Proc. Euro. Wind Energy Conf.*, (1999), 1150-1152.