

直列配置された2機の小型風車の相互干渉特性

平野 公孝 (工学部), 菊地 正憲 (工学部)
御手洗正文 (農学部), 木下 統 (農学部)



要旨

小型風車を使って十分な発電量を得ようとする場合、複数の小型風車を配置する必要がある。しかし、近接して設置された複数の風車の特性は、未解明の現状にある。そこで本研究では、はじめに風車下流域の流速を、熱線流速計を用いて三次元的に測定し、下流に設置された風車に流入する流れの特徴を明らかにした。続いて、実際に2機の小型風車を直列に配置する場合について、風車間距離が相互の風車の特性に与える影響を実験的に解析した。その結果、風車下流域には風車直径の3~4倍の下流位置に乱れ強さの強くなる領域が存在することを明らかにした。更に、下流側小型風車の特性は、風車間距離により変化し、特に、低風速運転時において上流側風車の影響が強いことが示された。

1. 緒言

近年、地球環境の深刻化、化石エネルギーの枯渇問題に伴い代替エネルギーの積極的な開発が進められている。特に、風力発電はクリーンで枯渇することの無い身近な再生可能エネルギーとして注目されている。小型風車は、建設適地の制限をあまり受けない、大型風車に比べ環境への負荷が少ないなどの利点を持つが、小型風車を使って十分な電力を得ようとする場合、複数の小型風車を設置する必要がある。しかし、複数の風車の設置状態に関する研究はほとんどなされていない現状である。

そこで本研究では、風車下流域の流れ場の平均速度、乱れ強さなどの特徴を、熱線流速計を用いて三次元的に測定することにより、下流に設置された風車に流入する流れの特長を明らかにする。更に、実際に2機の小型風車の相互干渉問題として、最も基本的な配置として風車を直列に配置した場合について、風車間距離が相互の風車の特性に与える影響を明らかにすることを目的とする。

2. 風車の特性

2.1 主な記号

D	: 風車直径(m)	$A = \pi D^2/4$: 受風面積(m ²)
L	: 風車間距離(m)	U, V, W	: x, y, z 各軸方向速度(m/s)
ρ	: 空気密度(kg/m ³)	U_∞	: 無限上流の風速(m/s)
n	: 風車回転数(rpm)	T	: 風車トルク(Nm)
E	: 出力電圧(V)	R	: 負荷抵抗値(Ω)
λ	: 周速比	P_T	: 軸出力(風車のトルクによる出力)(W)
C_T	: トルク係数	P_G	: 発電出力(W)
C_P	: パワー係数	η	: 風車効率

2.2 風車の性能評価に用いられる特性係数

風車の性能評価に用いられる特性係数は、下記のように定義される。

2.2.1 周速比 (λ : tip speed ratio)

周速比 λ は、風車のブレード先端速度 V_R と流入風速 U_∞ との比として、式(1)のように定義される。

$$V_R = \frac{2n\pi}{60} \cdot \frac{D}{2} \quad (\text{m/s}), \quad \lambda = \frac{V_R}{U_\infty} = \frac{\pi D}{U_\infty} \cdot \frac{n}{60} \dots\dots\dots(1)$$

2.2.2 トルク係数(C_T : Torque coefficient)

風車のトルク T は、揚力型風車の場合ブレードの回転面において発生する揚力成分によるモーメントである。トルク係数 C_T は、式(2)で与えられる。

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A \frac{D}{2}} = \frac{4T}{\rho U_\infty^2 AD} \dots\dots\dots(2)$$

2.2.3 パワー係数(C_p : Power coefficient)

風より風車を利用して単位時間あたりに取り出すことのできるパワーの割合はパワー係数 C_p と呼ばれ、式(3)で定義される。

$$P_T = T \cdot \frac{2n\pi}{60} \quad (\text{W}), \quad C_p = \frac{P_T}{\frac{1}{2} \rho A U_\infty^3} \dots\dots\dots(3)$$

2.2.4 風車効率(η : Efficiency of wind turbine)

発電機などを含めた風車全体の性能を評価する指標として、風車効率 η は式(4)のように定義される。

$$P_G = \frac{E^2}{R} \quad (\text{W}), \quad \eta = \frac{P_G}{\frac{1}{2} \rho A U_\infty^3} \times 100 (\%) \dots\dots\dots(4)$$

2.3 試験風車

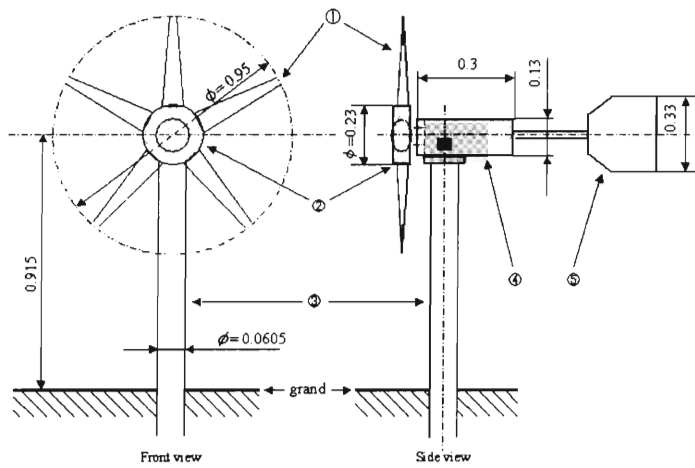
本実験は、宮崎大学工学部の大型乱流風洞装置を用いて行われた。試験風車は、市販されている小型風車(MWG-50 : 松村機械製作所製)である。

Fig.1 に風車の寸法および各部の名称を示す。

3. 風車後流の速度場の測定

3.1 実験装置および方法

Fig.2 に本実験装置の概略図を示す。本実験装置は、測定対象である試験風車、三次元熱線流速計、トラバース装置、大型風洞装置により構成されている。測定座標系は、Fig.3 のように定義される。 L を風車から流速を測定する垂直断面(y - z 断面)までの距離とする。Fig.4 に示すように、試験風車は強風対策としてヨーイング機構を備えている。そこで流速測定は、 $L/D=1.0\sim 7.0$ の間で y - z 断面($140 \times 150\text{cm}$)と x - y 断面($560 \times 140\text{cm}$)について、ヨー角なし及びヨー角ありの2種類について行われた。また、実験は、一定風速 8.0m/s の下で各速度成分 U , V , W の測定が行われ、この各速度成分より、風車後流の速度ベクトル、



- ①ブレード：風車の羽根
(特に先端部分をティップと呼ぶ)
- ②ハブ：風車の発電機の部分
- ③タワー：風車を支える支柱
- ④ボックス：得変換機などを内蔵した部分
- ⑤尾翼：風車の尾翼

風車直径 $D=0.95\text{m}$
 ハブ直径 $d=0.23\text{m}$

Fig.1 The wind turbine (MWG-50)

乱れ強さ，レイノルズ応力が求められた。
 なお，乱れ強さ，レイノルズ応力はそれぞれ式(5)，(6)のように定義される。

$$\text{乱れ強さ } T = \sqrt{u_i^2 + v_i^2 + w_i^2} \dots\dots\dots(5)$$

$$\text{ただし, } U = \bar{U} + U', \quad u_i = \sqrt{U'^2} / U_\infty$$

$$V = \bar{V} + V', \quad v_i = \sqrt{V'^2} / U_\infty$$

$$W = \bar{W} + W', \quad w_i = \sqrt{W'^2} / U_\infty$$

レイノルズ応力

$$\tau_i = -\rho \overline{U'V'} = -\rho(\overline{UV} - \bar{U} \cdot \bar{V}) \dots\dots\dots(6)$$

なお，実験中の試験風車の運転状態は，回転数 $n=1300\text{rpm}$ ，トルク係数 $C_T=0.025$ ，パワー係数 $C_p=0.19$ ，風車効率 $\eta=12\%$ である。ただし，ヨー角なしの場合は $\theta=0^\circ$ であるが，ヨー角ありの場合は $\theta=25^\circ$ である。

3.2 実験結果および考察

3.2.1 速度ベクトル

Fig.5, 6 は $y-z$ 断面における風車後流の速度ベクトル分布図である。ただし，Fig.5 はヨー角なしの場合，Fig.6 はヨー角ありの場合である。図中の大小二つの一点鎖線で示される

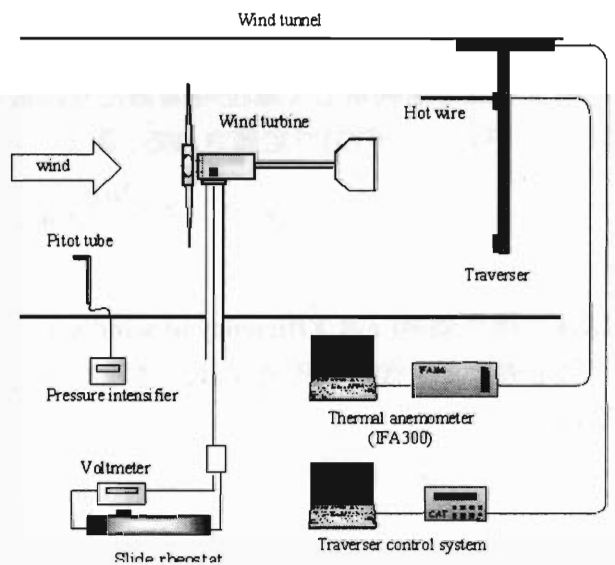


Fig.2 Measurement system of the velocity in the wake of the wind turbine

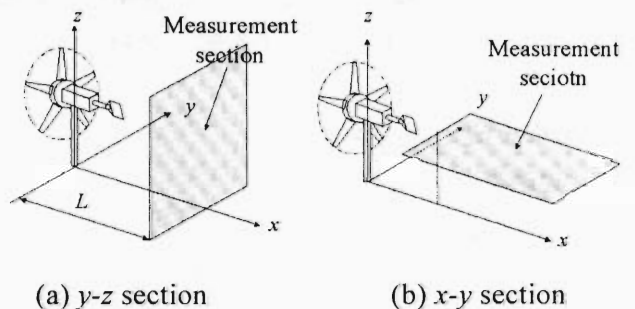


Fig.3 Measurement section

円は、それぞれティップ及びハブの風車後流への投影図を表している。また、 z 軸方向の一点鎖線はタワー中心を表している。これらは風車下流から上流を見たときの図面である。このため、Fig.6 及び Fig.8 に描かれているように、ヨー角を有する場合には、円ではなく、楕円の形状として描かれている。

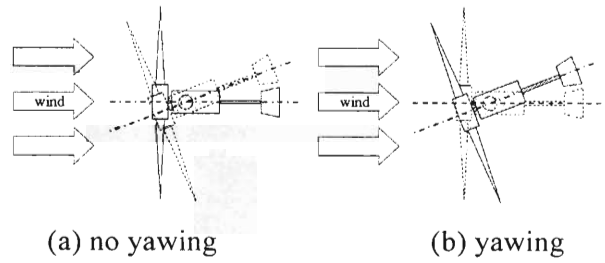


Fig.4 Yaw motion

$L/D=1.0$ (Fig.5(a), Fig.6(a))において風車の回転方向と反対向きの風車中心に向かう旋回流がみられ、特にハブのやや外側の部分に強い旋回流が見られた。ヨー角なしの場合、下

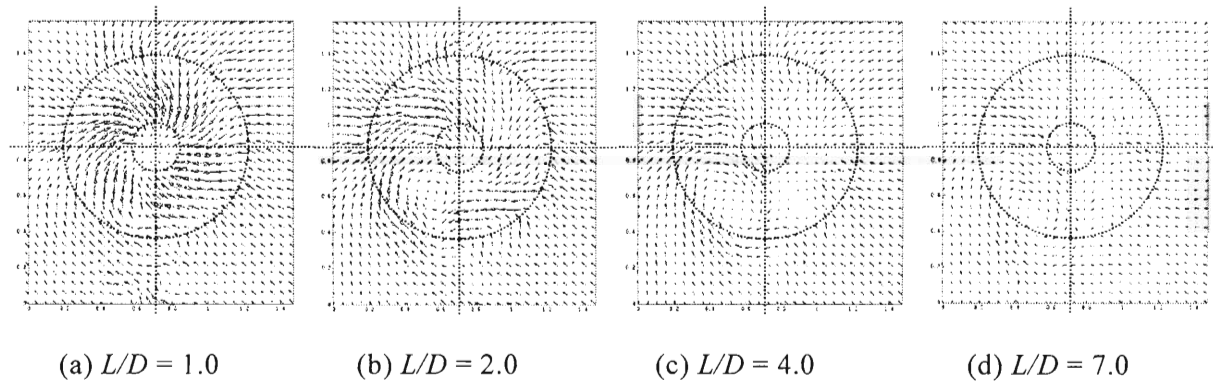


Fig.5 Vectors of velocity on y - z section of the windturbine without yawing

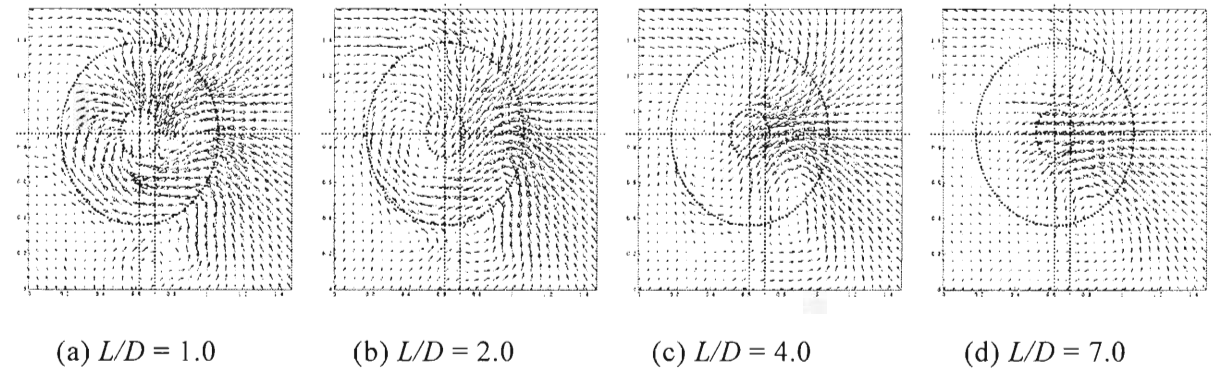
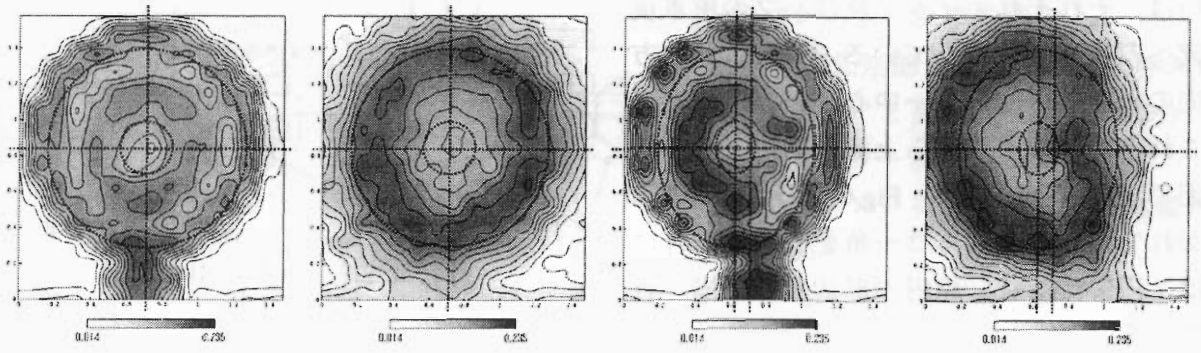


Fig.6 Vectors of velocity on y - z section of the windturbine with yawing

流に行くにしたがって全体的に旋回流が弱まっていくが、ヨー角ありの場合、 y 軸方向の流れが強く、上下に局所的な旋回流が存在している。また Fig.9 よりヨー角がある場合の方が、ヨー角がない場合に比べ速度欠損の回復が進んでいない。

3.2.2 乱れ強さ T

Fig.7, 8 は、 $L/D=1.0$ 及び $L/D=4.0$ の y - z 断面における乱れ強さの分布である。ただし、Fig.7 はヨーイングなし、Fig.8 はヨーイングありの場合である。 $L/D=1.0$ (Fig.7(a), Fig.8(a))においてティップの外側とブレードの根元の部分に乱れの強い領域が存在する 2 重の同心円状の分布になっている。ティップ部分では翼端渦が発生し乱れ強さ T が強くなっていると考えられる。Fig.10 では風車下流に向かうに従い、ティップとハブの外側に見られた強い乱れの領域がいったん弱くなるが、 $L/D=3.0\sim 4.5$ において一層強い乱れの領域が現れ、



(a) $L/D = 1.0$

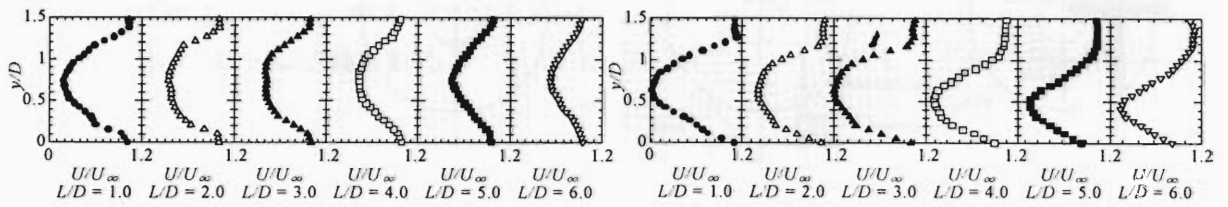
(b) $L/D = 4.0$

Fig.7 Intensity of turbulences on y - z section of the windturbine without yawing

(a) $L/D = 1.0$

(b) $L/D = 4.0$

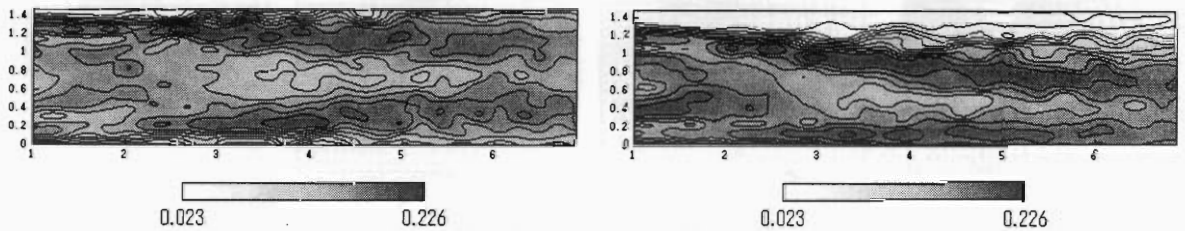
Fig.8 Intensity of turbulences on y - z section of the windturbine with yawing



(a) The windturbine without yawing

(b) The windturbine with yawing

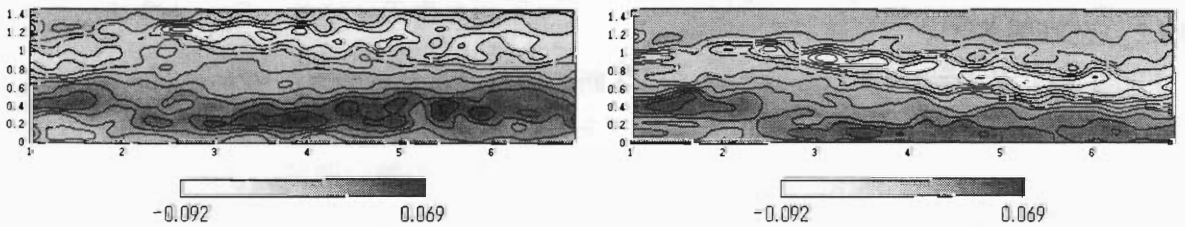
Fig.9 Velocity of U/U_{∞} on x - y section



(a) The windturbine without yawing

(b) The windturbine with yawing

Fig.10 Intensity of tubulences on x - y section



(a) The windturbine without yawing

(b) The windturbine with yawing

Fig.11 Reynolds stress on x - y section

逆に回転中心あたりの乱れ強さは弱くなる。また、ヨー角がある場合の方が、ヨー角がない場合に比べ下流域が強く乱れていることが示された。

3.2.3 レイノルズ応力

レイノルズ応力と速度勾配との積は乱れの生成項を表しているので、Fig.9 において速度勾配の急な領域と、Fig.11 においてレイノルズ応力の強い領域が一致している領域で、乱れ強さ T も大きくなっている (Fig.10)。

4. 2機の風車の相互干渉特性

4.1 実験装置および実験方法

Fig.12 に相互干渉の実験装置を示す。実験装置は、ピトー管、回転計、トルク変換機、大型風洞装置および測定対象である小型風車により構成されており、上流側、下流側の風車をそれぞれ風車1、風車2と呼ぶ。試験風車は Fig.13 のように風洞に設置されている。座標系は風車1のタワーの根元を原点として主流方向に x 軸をとり、風車間距離 L は風車1、風車2のタワーの距離として定義されている。実験は風車間距離 L を変えて、試験風車のカットイン風速である 3m/s から 16m/s まで 1m/s 毎に行った。なお、相互干渉実験はヨー角なし ($\theta=0^\circ$) の状態で行われている。

4.2 試験風車の基本性能

2機の風車の干渉特性の基準として、単独で運転された場合の試験風車の基本性能を Fig.14 に示す。試験風車の測定誤差は風速 3m/s 時に 11% 、 4m/s 時に 5% と低風速運転時に再現性

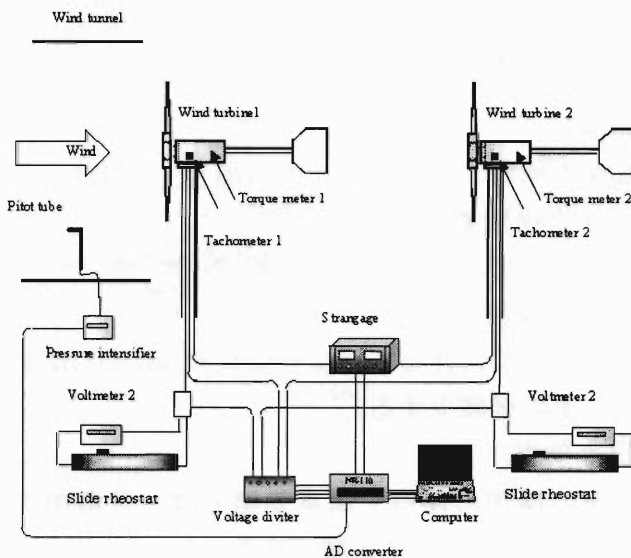


Fig.12 Measurement system of mutual interference

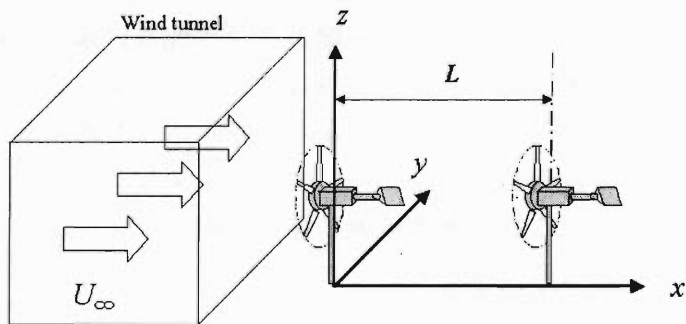


Fig.13 The coordinate system of the wind turbines

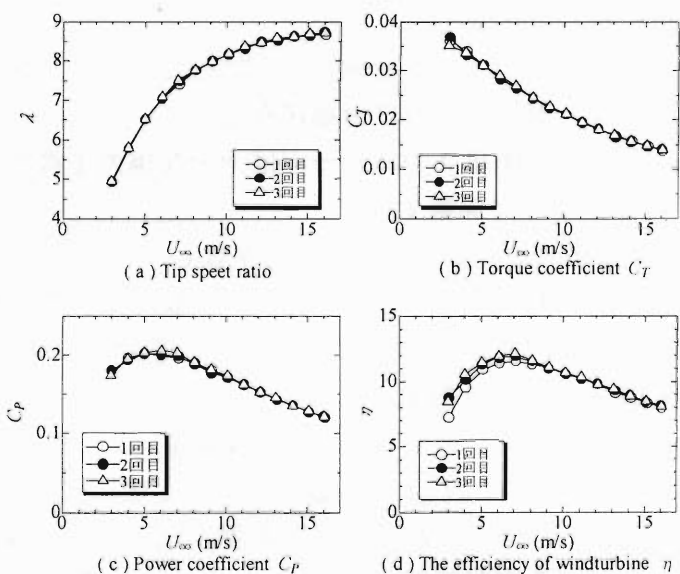


Fig.14 Performance of the wind turbine

が低い。従って、相互干渉特性を議論する場合には、再現性を確保するために、風速 4m/s 以上の風速について実験を行うものとした。

(1) 周速比 λ

風速の増加と共に周速比も増加し、風速 16m/s で一定値 $\lambda = 8.7$ になる。

(2) トルク係数 C_T

風速の増加と共にトルク係数 C_T は、減少する。

(3) パワー係数 C_p

風速の増加に伴ってパワー係数 C_p は一旦増加するが、風速 6.0m/s で最大値 $C_p = 0.2$ をとり、その後減少する。

(4) 風車効率

風速の増加に伴って風車効率 η は一旦増加するが、風速 7.0m/s において最大値 $\eta = 12.2\%$ をとり、その後減少する。

4.3 実験結果および考察

4.3.1 周速比 λ

Fig.15 より、風車 1 において周速比 λ に及ぼす風車間距離 L/D の影響は少ない。一方、風車 2 において風車間距離が十分に大きい場合、単独運転状態とみなすことができ、周速比も、単独運転状態の周速比である $\lambda = 8.6$ に近づかなければならない。しかし実験において、 $L/D = 1.5 \sim 4.0$ の範囲では周速比は風速の増加と共に増加し、その後一定値となった。風車後流の乱れ強さが特に強くなる領域が $L/D = 3.0 \sim 4.0$ 付近に存在していることから考えると、これは風車後流の速度欠損と乱れの状態によるものであり、風車 2 は次のような運転状態にあると考えられる。

(1) $1.5 \leq L/D < 4.5$

風車 2 は乱れ強さのやや高い領域で運転されているが、風車 1 の下流に配置されるにしたがって主流の速度欠損が回復し、その結果風車 2 の周速比が増加している。

(2) $4.5 \leq L/D < 8.0$

風車 1 の下流に配置されるにしたがって、風車 2 に流入する主流の速度欠損の回復は進むが、ティップ付近に存在していた乱れ強さの強い領域が風車 2 の回転面全体に広がり、風車 2 のブレードは十分な揚力を得てはいない。

4.3.2 トルク係数 C_T

Fig.16 より、風車 1 のトルク係数 C_T は、全体的に単独運転状態と同じ値となったが、 $L/D = 2.0, 4.8$ 付近で風車 1 のトルク係数はやや高い値となった。一方、風車 2 のトルク係数 C_T は、 L/D の増加に伴って一旦増加するが、 $L/D = 5.0 \sim 8.0$ の範囲で一定値となった。

4.3.3 パワー係数 C_p

Fig.17 より、風車 2 のパワー係数 C_p は、 $1.5 \leq L/D < 5.0$ の範囲では L/D に伴って増加する。しかし、 $L/D \geq 5.0$ の範囲では一定値になる。 $L/D < 3.0$ の場合、風速が大きいほど C_p が大きい。また、 $L/D > 3.0$ の範囲になると、風速が大きいほど風車 2 の C_p が小さくなっており、風車間距離 L/D が C_p に与える影響は、風車 1 に流入する風速により異なることが示された。更に、 $L/D = 7.8$ の位置での風速の変化に対する風車 2 の C_p は、風速 6.0m/s で最大となり、単独運転状態でのパワー係数 C_p (Fig.14(c)) と同じ傾向になっている。

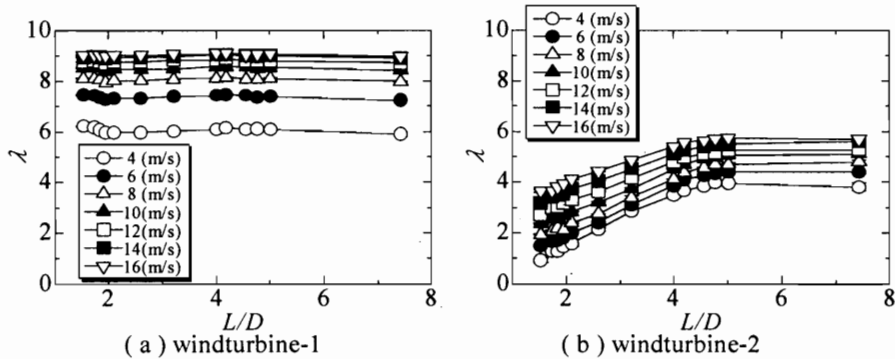


Fig.15 Tip speed ratio λ

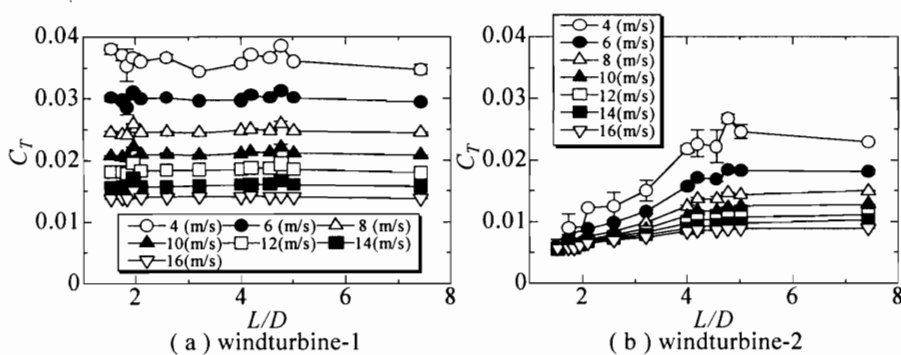


Fig.16 Torque coefficient C_T

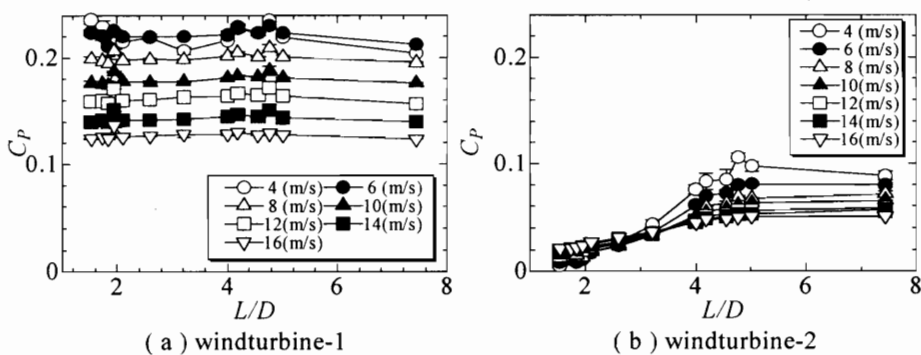


Fig.17 Power coefficient C_P

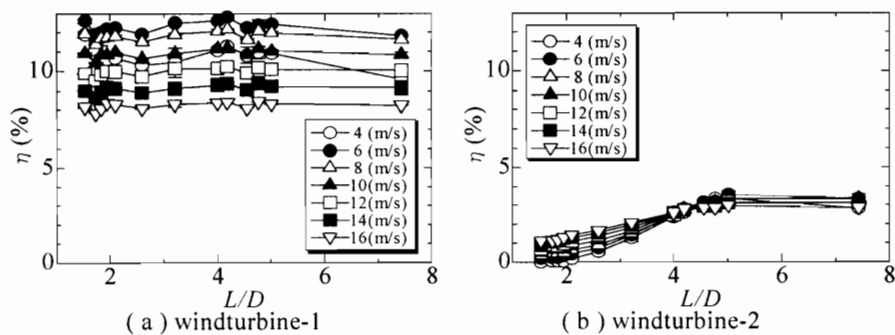


Fig.18 Efficiency of windturbines η

これらのことより、風車2の運転状態は、徐々に風車が単独運転されている状態に漸近していることが示された。

4.3.4 風車効率 η

Fig.18より風車2の風車効率 η は、 $1.5 \leq L/D < 4.5$ の範囲では風車間距離 L/D の増加に伴って増加しており、一方、 $4.5 \leq L/D < 8.0$ の範囲では一定値となり、パワー係数 C_p と同様の傾向をとる。

5. 結言

本実験では、小型風車の下流域の流れ場を三次元計測した。更に、実際に2機の風車を直列に配置した場合について、風車間距離による上流側及び下流側の風車特性の変化を明らかにした。本実験により得られた主な結果は、以下のとおりである。

1. 風車下流域には風車回転とは反対周りの旋回流が存在している。特に、ヨ一角がある場合は、風車を回り込む流れが風車下流域まで強く存在している。
2. 風車後流の乱れ強さの分布は、 $L/D=1.0$ の位置で乱れ強さの強い領域と弱い領域が2重の同心円状に分布しており、一方、 $L/D=3.0 \sim 4.5$ の範囲でティップ部分の乱れ強さが強くなるなどの複雑な変化をしている。
3. 下流に置かれた風車の特性は、風車間距離 L/D の影響を受ける。また風車間距離 L/D の下流側風車特性に与える影響は低風速運転の方が強い。

謝辞

本研究の遂行にあたっては、多方面のご援助をいただきました。試験風車は松村機械製作所様よりご提供いただきました。心からお礼申し上げます。更に、本研究の実験にあたっては、宮崎大学大学院工学研究科機械システム工学専攻2年 渡邊雄樹君、及び、宮崎大学工学部機械システム工学科4年 井伊秀樹君のご協力を得ました。ここに感謝の意を表します。