LDV による風車ロータまわりの流れ計測*

筒井 康賢^{*1}, 松宮 輝^{*1}, 水町 長生^{*2}

LDV Measurements of a Flow Field around a Wind Turbine

Yasukata TSUTSUI, Hikaru MATSUMIYA, and Nagao MIZUMACHI

The instantaneous flow distributions around a propeller-type 0.8 m diameter, two-bladed rotor in a wind tunnel were measured using a 2-color 4-beam LDV system. The axial and tangential velocity components were measured at 110 points on the horizontal plane which includes the rotor axis. The axial and radial components were measured on a vertical plane. All axial, tangential and radial components were composed from these data. Especially, we measured instantaneous velocity distributions on a rotor plane where due to the bashing rotor, the velocity could not be measured by using a conventional anemometer such as a hotwire anemometer or a pitot tube. On the plane, the measured data showed the axial velocity component increased gradually after a blade passed, and decreased suddenly with the next passing blade. The calculated results from a simplified vortex model showed that the sudden decrement with the passing blade was almost induced by the bound vortex on that blade.

Key Words: Wind Turbine, Laser Doppler Velocimeter, Fluid Dynamics, Flow Measurements, Energy

1. 序 論

風車による風力エネルギー利用は、自然エネルギーの中でも太陽光エネルギーの利用等とともに有力視され、世界各地のメガワット機の開発、米国カリフォルニア州のウインドファームなどでの利用が進められ、国内でも 100 kW 機、300 kW 機が建設され、1 MW 級機の開発が計画されている。

しかし、風車技術は古くてかつ新しい技術であり、流体工学の分野に限っても、風車ブレード先端の効率から見た最適形状、騒音面から見た最適形状、自然風中の空力加重の精密予測^{(1)~(4)}など、低コスト、低騒音、高効率の風車の開発に向けた検討課題はまだ残されている⁽⁵⁾。

著者らは、このような背景を踏まえ、一様流中の風車ロータまわりの流れの基礎研究に立ち戻り、レーザドップラ流速計(LDV)を用いた流れの計測を行った。すなわち非接触計測が可能な LDV により、従来のピトー管、熱線風速計等では計測できなかったロータ回転面内まで含めた詳細な流れの計測を行った。またこ

れらの実験結果より明らかになったロータまわりの複雑な流れについて解析的に検討を行った。

2. 記 号

x, r, θ : 流れ方向, 半径方向, 周方向の座標

U_0 : 風車前方一様流速

u : x 方向速度成分

v : r 方向速度成分

w : θ 方向速度成分

R : 風車ロータ半径

c : ブレード弦長

β : ブレードねじり角

Γ : ブレードまわりの循環

λ : 速度比 $= R\omega/U_0$

ϕ : ブレード回転角

ω : 風車回転角速度

添 字

s : スプリング状後流渦による誘導速度

c : リング状後流渦による誘導速度

b : ブレード束縛渦による誘導速度

3. 実験装置および方法

3.1 供試風洞と風車模型 実験装置の全体図を

* 昭和 63 年 4 月 1 日 第 65 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 62 年 10 月 5 日。

^{*1} 正員、工業技術院機械技術研究所(〒305 つくば市並木 1-2)。

^{*2} 正員、千葉工業大学(〒275 習志野市津田沼 2-17-1)。

図1に示す。供試風洞は吹出し口 1400×1400 mmで、最大 50 m/sの風速が得られる回流式であり、今回は開放式テストセクションを用いた。風車模型は外径 800 mm、内径 104 mm、2枚ブレードロータを持ち、ブレードの翼形はNACA 4415、弦長は先端で 40 mm、根元で 99 mm、各断面の $1/4$ 弦長点は半径方向に同一直線上にある。ブレードの設計揚力係数は 0.75 であり、図2に弦長分布、ねじり角分布、設計点⁽⁶⁾での軸流速度分布を示す。

3・2 レーザドップラ流速計 出力 3 WのArイオンレーザの波長 514.5 nm(緑色)と 488.0 nm(青色)の2色のビームより、2カラー4ビームを構成し、風車胴体等でビームが遮られて計測できない部分がないように、後方散乱方式で二次元計測を行った。半径方向成分と周方向成分を計測する緑色の2ビームには、それぞれプラグセルを入れ、シフト周波数を 40 MHzからわずかずつシフトして、2ビーム間に所定の周波数差を与えるデュアルセルオペレーションを採用した。測定点の移動は、 $600 \times 600 \times 600$ mmの可動範囲を持つ2ミラー式のトラバース装置を用いて行った。

風車回転軸を含む鉛直面上で軸方向成分と半径方向成分を計測し、同じく回転軸を含む水平面上で軸方向成分と周方向成分を計測し、合わせて三次元成分を求めた。ブレード回転位置は、風車回転軸後端に取付けたロータリエンコーダからの 300 PPRのパルス信号を、ブレードが水平位置で発生するゼロパルス信号で毎回リセットしながら計数して求め、カウンタ式処理器からのデータレディ信号でラッチし、同処理器のデータとともに同時にパソコンに取り込みデータ処理した。

3・3 LDVのシード 可視化用煙風洞用煙発生器からの軽油のミストをシードとした。風洞のノズル上流セトリングチャンバ内の整流網手前に、 65 mm間隔で $\phi 3$ mmの穴を開けた外径 26 mmの長さ 3.7 mの塩化ビニルのパイプを、鉛直面内を計測するときには鉛直に、水平面内で計測するときには水平に設置し、風洞内に煙を送り込んだ。

3・4 LDVの校正 本研究のLDV光学系では拡大率 3.75 のビームエキスパンダを用いているので、レンズを出たビームの径は約 10 mmと大きく、ビーム交差角を測定することは容易ではない。そこで直径 500 mmの亚克力製回転円盤の表面に直接焦点を当て、計測時と同様に後方散乱方式でビート周波数を計測し、焦点面の速度との校正値を求めた。

3・5 計測点 ブレードの $1/4$ 弦長点を $x=0$ mm、回転軸を $r=0$ mmと定義し、 x を下流方向に正

とし、軸方向 $x=-160, -120, -80, -40, 0, 40, 80, 160, 200$ mm、半径方向 $r=90, 120, 160, 200, 240, 280, 320, 360, 400, 440, 480$ mmの基盤目状の 110 点を、回転軸を含む鉛直面と、水平面上で計測した。

3・6 風車模型の運転 モータの界磁に直流定電圧電源を結び、電機子に他の直流定電圧電源と可変抵抗器を並列につなげてモータリングと風車運転ができるように設定し回転数を制御した。運転は周速比 $\lambda=6$ 、 $r/R=0.75$ でのピッチ角 5 度の設計点で、周速を約 100 m/sに一定に保って行った。この時のブレード先

図1 実験装置全体構成図

図2 ブレード平面形、ねじり角、設計点軸流速度分布

図3 瞬時データ ($x/R=-0.1, r/R=0.7$)

端での弦長に対するレイノルズ数は、約 2.7×10^5 となる。

4. 流れ場の実験結果と考察

4.1 瞬時計測データ 軸方向位置 $x=40$ mm, 半径方向位置 $r=280$ mm の鉛直面上の定点で計測した軸方向速度成分 u と半径速度方向成分 v の瞬時データを、横軸を計測時のロータの回転位置にとり図3に示す。同図には軸方向成分と半径方向成分の計測値が各々4300点プロットされている。回転角 $\psi=0$ は、ブレードが水平位置にあることを示している。

4.2 各角度位置での平均 図4～6は各角度位置で平均した半径位置 $r/R=0.7$ での軸方向速度成分 u , 半径方向速度成分 v , 周方向速度成分 w のブレード回転位置による変化を、軸方向位置 $x/R=-0.4$ から 0.5 まで示している。各角度での平均は $\psi=0 \sim \pi$, $\psi=\pi \sim 2\pi$ を加算し、 u については、水平面内の計測データを $\pi/2$ だけずらして鉛直面内の計測データと加算平均して示している。また w についても $\pi/2$ だけずらしてあたかも鉛直面で計測したかのように表示してある。図4の u はロータ前方の $x/R=-0.4$ では、平均値で前方一様流速 U_0 の82%に既に減速されている。 x/R がさらに大きくなるに従いさらに減速され、 $x/R=0.5$ では50%に減速される。ロータ面 ($x/R=0$) 近くでは、ロータが近づくと u は増大し、ロータが通過すると ($\psi=\pi/2, \psi=3\pi/2$) 急激に減少し、再度増加を始める。これに対し図5の v の変化は相対的に小さい。図6の w はロータ通過時、ロータ前方では増大し、後方では減少する。図4～6中 $x/R=0$ でデータが途切れている部分はレーザビームがブレードに当たり計測できない領域である。

図7～9は $r/R=1.2$ のロータ外径より外側の場合である。図7の u は $x/R=-0.4$ では、 $r/R=0.8$ の場合と同様に一様流より減速しているが、 $x/R=0.3, 0.4, 0.5$ では逆にわずかであるが増速している。図8の v には、ロータ後方では渦の影響と思われるうねりが見える。図9の w はほとんど零である。

図10～12はピトー管や熱線風速計では計測できないロータ回転面 ($x/R=0$) での u, v, w の変化を示す。図10の u は、 $r/R=0.4, 0.6, 0.8$ では図4 ($r/R=0.7$) $x/R=0$ と同様にロータが近づくと従い、急激に増加し、通過後ステップ状に減少し再度増加している。しかし $r/R=1.0$ では、 $\psi=\pi/2, \psi=3\pi/2$ 近くで、凸状になっている。図11では、半径が $r/R=1.0$ に近づくに従い、 v が大きくなっている。 $r/R=0.8$ では、 v は u の30%程度になっている。 $r/R=1.0$ ではブレードが

図4 軸流速度の変動 ($r/R=0.7$)

図5 半径方向速度成分の変動 ($r/R=0.7$)

図6 周方向速度成分の変動 ($r/R=0.7$)

図 7 軸流速度の変動 ($r/R=1.2$) 図 8 半径方向速度成分の変動 ($r/R=1.2$) 図 9 周方向速度成分の変動 ($r/R=1.2$)

近づくに従い、 v は減少し、ブレード通過でステップ状に増大している。

4.3 単純渦モデルによる考察 図 2 に示したように、本実験に用いたロータは、 $r/R > 0.5$ では、軸流速度分布はほぼ一樣になるように設計されているので、翼まわりの循環もほぼ一樣と考えられる。そこでブレードを一つの集中渦とし、根元と先端部で後流に渦が吐き出されるモデル⁽⁷⁾⁽⁸⁾を考えた。ただし後流渦は、無限長のスプリング状渦とするのではなく、図 13

図 10 軸流速度の変動 ($x/R=0$) 図 11 半径方向速度成分の変動 ($x/R=0$) 図 12 周方向速度成分の変動 ($x/R=0$)

のように有限長のスプリング状渦とそれに続くリング状の渦で表し、全体の長さを半径の5倍で打ち切って、ブレードの循環とともに Biot-Savart の法則⁽⁹⁾より誘導速度を計算した。

本風車は設計点で運転されているので、理想風車に近く、後流渦は一樣流 U_0 と理想風車の十分後方で減速された速度 $1/3 U_0$ との平均値 $2/3 U_0$ で旋回がなく輸送されるとした。循環は十分後方で速度が $1/3 U_0$ となるように求めた。図 14 にはスプリング状渦の巻数の影響を示しているが1巻以上では、差はほとんどなく1巻で計算した。

図 10 での破線は、ブレード先端 ($r/R=1.0$) から渦

図 13 単純渦モデル

が吐き出されるとして計算した値であるが、 $r/R=1.0$ での実験値とのずれが大きい。実線は $r/R=0.97$ で渦が吐き出されるとし、後述する渦の膨らみを含めた計算結果であるが、凸状の実験値と良く一致し、渦が先端より内側で吐き出されていることを示している。 $r/R=1.2$ での u の実験値と渦の膨らみのない計算はずれが大きい。渦に膨らみを持たせた結果は、実験値に近づく。膨らみは実験の平均速度ベクトルにあわせてスプリング状渦1巻で、 $1.1R$ に直線的大きくなるようにとった。それより後方のリング状渦の半径は、一定値 $1.1R$ にした。図 4~12 中の実線は上記の計算結果を示している。

図 14 スプリング状渦の巻数の影響

図 15 実験結果との比較 ($x/R=0, R=0.5$)

図 16 実験結果との比較 ($x/R=0, r/R=0.9$)

図 17 渦糸による誘導速度

図 15, 16 は $x/R=0$ での実験値と計算値の比較であり, 計算値はブレードの循環, スプリング状渦, リング状渦の誘導速度を分けて示している。ブレードが近づくと軸方向速度成分が増大し, 通過すると急激に減少する現象は, ブレードの循環とスプリング状後流渦に誘起された結果であることが良くわかる。また内側ほどブレードの循環の寄与が大きいことがわかる。

5. 結 論

非接触計測を特徴とする LDV を用いて, 従来のピトー管や熱線風速計では計測できなかったロータ回転面を含む, 設計点で運転中の風車まわりの流れを計測しその特性を詳細に求め, また単純な渦モデルによる理論的考察を加えて次の結論を得た。

- (1) ロータ回転面内の $r/R < 1$ では軸流速度成分は, ロータが近づくと従い増大し, ロータの通過とともに急激に減少し再度増大するという変化を示す。
- (2) 渦モデルによれば, その速度変動はブレード自身の循環と後流渦の誘導によるもので, 半径が内側ほどブレードの循環の寄与が大きい。
- (3) これらの流れは 1 回転のスプリング状の渦とそれに続くリング状渦で十分に表すことができる。

本研究にあたり, 多大な助力をいただいた当時千葉工業大学学生, 水島秀俊, 篠原久文, 相宮隆行, 清水正司の諸君に感謝の意を表す。

付 録

ブレード束縛渦, スプリング状渦およびリング状渦による誘導速度 $\vec{q}$ は, Biot-Savart の法則⁽⁹⁾

$$d\vec{q} = \frac{x d\vec{s} \times \vec{h}}{4\pi h^3} \quad (1)$$

$$h = |\vec{h}| \quad (2)$$

より求めた。ここに ds は図 17 に示すように渦糸のベ

図 18 後流渦まわりの循環

クトル線要素であり, $\vec{h}$ は ds の位置を始点とし, 観測点 $P(x, r, \theta)$ を終点とするベクトルである。本報では, 渦の強さ κ は一定で, ブレードまわりの循環 Γ に等しいとしている。

理想風車⁽¹⁰⁾では, 十分下流の後流の速度はほぼ $1/3 U_0$ となるが, 本研究での風車は設計点で運転しているので理想風車状態に近く, 十分後方の後流速度は, $1/3 U_0$ で近似できる。そうすると後流渦は, 外側の一様流速度 U_0 と内側の速度 $1/3 U_0$ の平均速度 $2/3 U_0$ で輸送され则认为られる。さらに旋回成分を無視すると n 枚ブレードの場合の渦の間隔は $(2/3) U_0 \cdot (2\pi/\omega)/n$ となる。図 18 のような周回路で一つの渦糸のまわりの循環をとると, $2 \rightarrow 3$, $4 \rightarrow 1$ では循環への寄与がなく, $1 \rightarrow 2$ では速度が U_0 , $3 \rightarrow 4$ では $-1/3 U_0$ であり, 循環はブレードまわりの循環 Γ に等しいことから, Γ は,

$$\begin{aligned} \Gamma &= \left(U_0 - \frac{1}{3} U_0 \right) \cdot \frac{2}{3} U_0 \frac{2\pi}{\omega} \cdot \frac{1}{n} \\ &= \left(\frac{2}{3} U_0 \right)^2 \frac{2\pi}{n\omega} \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

と求まる。

文 献

- (1) Nasu, K. and Azuma, A., *Proc. 18th IECEC*, (1983), 1353.
- (2) 清水・片山, 機論, 49-445, B (昭 58), 1869.
- (3) 清水・ほか 3 名, 機論, 53-485, B (昭 62), 114.
- (4) 前川, 機論, 52-480, B (昭 61), 2983.
- (5) 松宮, サンシャインジャーナル, 8-1 (昭 62), 34.
- (6) 山根・ほか 2 名, 航宇誌, 30-345 (昭 57), 566.
- (7) Miller, R. H., *J. Aircraft*, 20-3 (1983), 257.
- (8) Afjeh, A. A., Keith, T. G., *Proc. Wind Power '85*, (1985), 469.
- (9) 例えば, 守屋, 空気力学序論, (昭 41), 177, 培風館.
- (10) Glauert, H. (Durand, W. H. 編), *Aerodynamic Theory*, 4 (1963), 326, Dover.

討 論

〔質問〕 橋 詰 近

〔早稲田大学理工学研究所〕

大変有意義なデータを求められ、また、その解析的試行に対して敬意を表す。以下の二点についてご教示いただきたい。

(1) 風車に付帯するもの、たとえば支柱の存在が気流に与える効果をどのようにお考えか。風速の測定位置、任意の x/R について、 r/R のみで表現されておられるが、十分か。データの平均化処理の妥当性と併せて、お考えをお伺いしたい。

(2) 計算値（モデル化）と実験値との比較において、ひと ω に見る結果が、とくに $\phi = \pi/2$ と $3\pi/2$ （突起部）周辺で著しく差異を示すのに対して、軸方向成分 u のみが良く一致している。このことはどのように了解したら良いのか。ご教示をいただきたい。

〔回答〕 (1) 支柱の影響をなるべく小さくするように、ロータのオーバハング量と支柱半径の比を約 6 にとっているが、ご指摘のとおり、支柱の影響は当然あると考えられる。

今回の実験では、水平面と垂直面の 2 面でしか計測していないので、厳密な議論はできないが、例えば、 $x/R=0.5$, $r/R=0.9$ での水平面と垂直面で計測した軸流速度の各位相平均データの相対誤差は、最大 1.8%、平均値の相対誤差は 0.4% と小さい値である。

平均化処理については、図 3 に示したようなデータ

のばらつきならば、本報のような各位相での単純平均で十分であると考えている。本実験の場合、良好なデータを収集できるか否かは、シードとシード方法に極めて強く依存した。

(2) ご指摘の計算値と実験値の差異は、ブレードを 1 本の揚力線と扱っていることから、ブレード近くでの誘導速度の計算が不十分であることによると考えられる。それは v, w のみならず、 u においても図 4, $x/R = -0.1$ と 0.1 での計算値と実験値の差異にも現れている。

〔質問〕 石 田 洋 治〔航空宇宙技術研究所〕

LDV により風車ロータまわりの流れ場を詳細に測定されたご努力に敬意を表す。貴重なデータとして今後大いに役立つものと思う。

風車のディスクエリアと風洞の測定部断面積の比は約 26% となるが、このぐらいの値になると壁（今の場合は自由大気）干渉の効果がかなり大きくなると考えられるが、渦モデル実験結果との不一致に、この効果が影響していることは考えられないか。

〔回答〕 ご指摘のとおり、壁との干渉効果はあると考えられるが、定量的な評価手法は有していない。しかし図 4～6 では、ロータのごく近くを除いて、渦モデルと実験結果は良く一致しており、両者の差異は、壁との干渉効果よりも、ブレードを 1 本の循環として扱ったことの影響が大きいと考えている。