

ダリウス風車における動的失速現象の可視化と画像解析に関する研究*

藤沢 延行^{*1}, 渋谷 賢志^{*2}, 高野 剛^{*1}Visualization and Image Analysis of Dynamic Stall Phenomenon
for a Darrieus Wind TurbineNobuyuki FUJISAWA^{*3}, Satoshi SHIBUYA and Tsuyoshi TAKANO^{*3} Niigata University, Dept. Mechanical and Production Engineering,
8050 Ikarashi 2, Niigata, 950-2181 Japan

The flow field around a Darrieus wind turbine is studied by flow visualization and PIV measurement in a rotating frame of reference to understand the unsteady nature of dynamic stall appearing at low tip-speed ratios. The qualitative nature of the dynamic stall observed by the flow visualization using dye injection technique is quantitatively reproduced in the instantaneous velocity distributions around the blade measured by PIV technique. These results indicate that two pairs of stall vortices are generated in one cycle of the turbine rotation and they grow in size as the tip-speed ratio decreases. The mechanism of the dynamic stall is found to be due to the flow separation over the suction side of the blade followed by the generation of in-flow motion from the pressure side to the suction side of the blade through the trailing edge.

Key Words: Flow Measurements, Flow Visualization, Windmill, Dynamic Stall, Digital Image Processing, Wake, Fluid Machinery

1. 緒 言

ダリウス風車は大型の垂直軸型揚力風車として知られており、プロペラ風車と並んで高効率の風力発電用風車として利用されている。この種の風車では、垂直軸型であることから風向制御が不必要であり、水平軸風車より構造が簡単になることが特徴である。しかしながら、ダリウス風車の空気力学的現象は、ブレードの回転中に周期的に失速が現れる非定常性を有するため、むしろ複雑である。特に、定格運転時（周速比 5 付近⁽¹⁾）より小さい低周速比での運転においては、ブレードに対する主流の入射角がかなり大幅に変動するため、ダリウス風車特有の動的失速現象⁽²⁾が見られる。このとき、ブレードに加わる流体力の変動^{(3)・(4)}、トルクや出力の変動⁽⁵⁾、そしてこれらに対するヒステリシス現象⁽⁶⁾などが現れる。このような動的失速現象の解明は、風車ブレードにおける流体関連振動や騒音の発生にも強く関わりを持つことからダリウス風車の設計上重要であるが、その流れ場に関する研究はあまり行われていない。これは、このような複雑な非定常現象を定量的に計測する手法が十分に確立されていないことによるものと思われる。これに対し、非接

触かつ同時多点計測が可能である P I V 法による流れの計測手法は有効な手段を提供すると考えられる。

ダリウス風車に発生する動的失速現象に関する過去の研究としては、レーザ流速計による平均速度分布の測定⁽⁷⁾、染料による流れの可視化^{(7)・(8)}、そして、P I V 法による位相平均速度場のフィールド計測⁽⁸⁾が報告されている。これらの実験結果は、主として動的失速渦形成後の風車内ならびに風車後流での渦対の発達過程に注目しており、失速渦の発達経路や失速渦の大きさについて明らかにした。しかしながら、これまでの手法では速度計測における時間・空間分解能が十分でないため、失速渦の発生するブレード近傍での渦形成過程までは明らかにできない。これを明らかにするには、ブレード近傍の流れ場を拡大観察する方法⁽⁹⁾は有効であるが、その代償として失速渦の時系列的变化が観察できない。したがって、ダリウス風車における動的失速渦の発生と成長を同時に把握するには、ブレードに追従して流れ場を移動観測する方法について検討し、時系列的にブレード近傍の流れ場を考察する必要がある。

本研究は、ダリウス風車のブレード移動に同期してカメラを移動することによって、ブレード周りの流れ場を時系列的に観測する方法を示し、それによってダリウス風車のブレードから発生する動的失速現象の詳細の流れの可視化と P I V 計測から明らかにすることを目的とする。

* 原稿受付 1999年2月16日。

^{*1} 正員, 新潟大学工学部(〒950 2181 新潟市五十嵐2の町8050)。^{*2} 学生員, 新潟大学大学院自然科学研究科学生。

E-mail: fujisawa@eng.niigata-u.ac.jp

2. 実験装置および方法

2.1 供試風車 図1に供試ダリウス風車の横断面図を示す。風車は、直径80mmの端板に直線1枚ブレードを固定した構造である。ここに、ブレード半径は $R=30\text{mm}$ 、ブレード幅 $H=135\text{mm}$ 、ブレード長さ $L=10\text{mm}$ で、ブレード形状はNACA0018である。ここに、ブレードのアスペクト比は13.5であり、ブレード中央付近では、端板の影響は無視できると考えられる⁽⁷⁾。実験は、既報⁽⁸⁾に示した回流水槽実験装置を用いて行った。ただし測定部は、断面積 $150\times 150\text{mm}^2$ の正方形断面であり、供試風車は測定部入口の下流450mmの位置に水平に設置した。実験は、断面平均流速 $U=50\text{mm/s}$ の一樣流中に行ったが、それは風車直径を基準としたレイノルズ数 $Re(=2RU/\nu)=3\times 10^3$ に相当する(ν :動粘度)。このレイノルズ数は、実機($Re=10^5\sim 10^7$)と比べかなり小さいが、風車周りの流れはブレード形状や周速比に強く支配されることから、実機時に近い流れ場が再現されると推定する。ここに、風車は測定部側壁に取り付けたステッピングモータで駆動され、任意の周速比で安定した風車回転が得られる。ただし、使用したステッピングモータは、マイクロステップ機能を有しており、1パルスの入力に対し最小で 0.075° の回転が可能であり、風車に十分滑らかな回転を与えることができる。

2.2 流れの可視化 ダリウス風車周りの流れ場を注入流脈法で可視化観察した。可視化は、エタノールで比重調整したロードミンBを水で200倍に薄めた溶液をトレーサとして用い、それを楕状ノズル⁽⁹⁾から注入する。ただし、本実験で用いた楕状ノズルには、33本の枝管が3mm間隔で設けられており、各枝管の内径は0.3mmである。可視化実験は、この楕状ノズルを風車の上流200mmに設置し、風車ブレード近傍に形成される相対流れ場を以下に示す移動計測システムで観測する。ただし、光源としてはストロボスコープを用い、可視化観察はモノクロ CCDカメラ(空間分解能 725×492)で1/60秒の時間分解能で行った。

2.3 非定常速度場計測システム 本実験に使用した速度場計測システムは、図2に示すように、モノクロ CCDカメラ、カメラ駆動用のステッピングモータ、フレームグラバ、パーソナルコンピュータから構成されている。このシステムは、ある設定されたブレード回転角になると、風車軸に取り付けられたフォトセンサからトリガ信号を発生するが、この信号がカメラ回転用ステッピングモータのコントローラに入力されると、カメラは風車ブレードと同じ角速度で回転を始め、

ブレード回転に追従した撮影を開始する。同時にこのトリガ信号は、スクリーンカウンタにも入力され、トリガ信号発生後の経過時間に相当するカメラの垂直同期信号数をカメラの映像上に数字で書き込み、ビデオレコーダに収録される。ただし、垂直同期信号間の時間間隔は1/60秒である。したがって、映像から読み取れるブレード角度 θ は、その時間間隔に対応した不確かさを有しており、それは周速比 $\lambda(=R\omega/U)=2$ では $\pm 1.6^\circ$ 程度である(ω :角速度)。さらに、その映像はフレームグラバでデジタル画像化(空間分解能 512×512 ピクセル)され速度解析に用いられる。また、カメラから発生する垂直同期信号がパーソナルコンピュータのADコンバータに入力されると、カメラ回転後に発生した垂直同期信号の前後において、3msの間隔で光源であるストロボスコープが発光するようにDAコンバータから出力パルスが発生する。ただし、発光する2台のストロボスコープは、光ファイバーを通して1枚のシリンダリカルレンズに導かれ、テストセクションには厚さ5mmのシート光が形成される。このようなフォトセンサのトリガ信号の発生に始まる

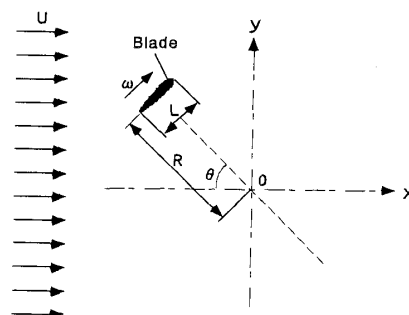


Fig. 1 Cross section of Darrieus wind turbine

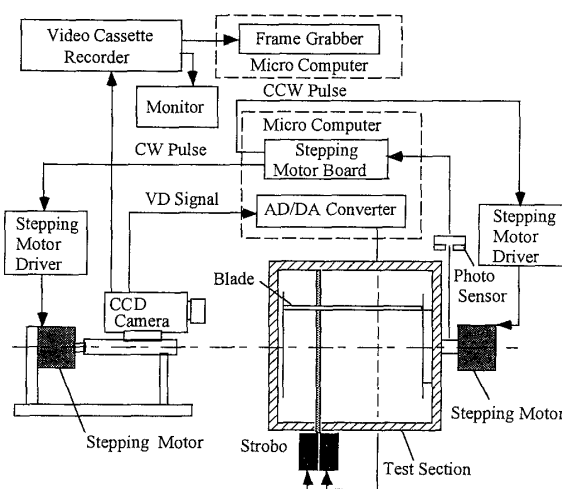


Fig. 2 Experimental test section and imaging system

メラのフィールド信号、ストロボの発光、ステッピングモータの駆動のタイミングチャートは図3に示すとおりである。

2.4 速度解析 速度場解析のための流れの可視化は、作動流体である水道水中に平均粒径 $30\mu\text{m}$ 程度の球形トレーサ粒子（塩化ビニリデン共重合物、比重1.0）を混入して行った。ここに、トレーサ粒子の流れに対する追従性は、本実験の失速渦の時間スケールが 10msec 以上であることを考慮すると、十分であると考えられる⁽¹⁰⁾。図4にダリウス風車ブレード周りの流れ場を可視化し、それを回転カメラから撮影して得られたサンプル画像を示す。ただし、実験条件は周速比 $\lambda=2$ でブレード角 $\theta=0^\circ$ 付近である。このようなフレーム画像 (512×512 画素) を2枚のフィールド画像 (512×256 画素) に分割し、さらに補間して求めた画像 (512×512 画素) に対し輝度差累積法に基づく濃度相関法⁽¹¹⁾を適用して速度ベクトルを求めた。ただし、前処理として、ブレード画像の除去ならびに粒子画像の輝度分布をガンマ変換によって処理し、平均輝度をヒストグラムの中央値付近に修正した。これらの前処理は、エラーベクトルを減らす上で有効である。

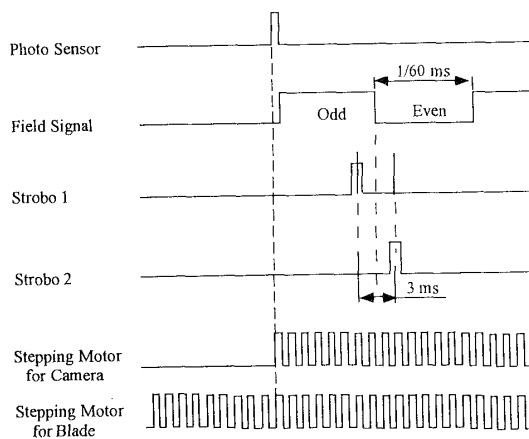


Fig. 3 Time chart

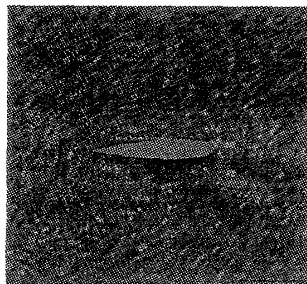
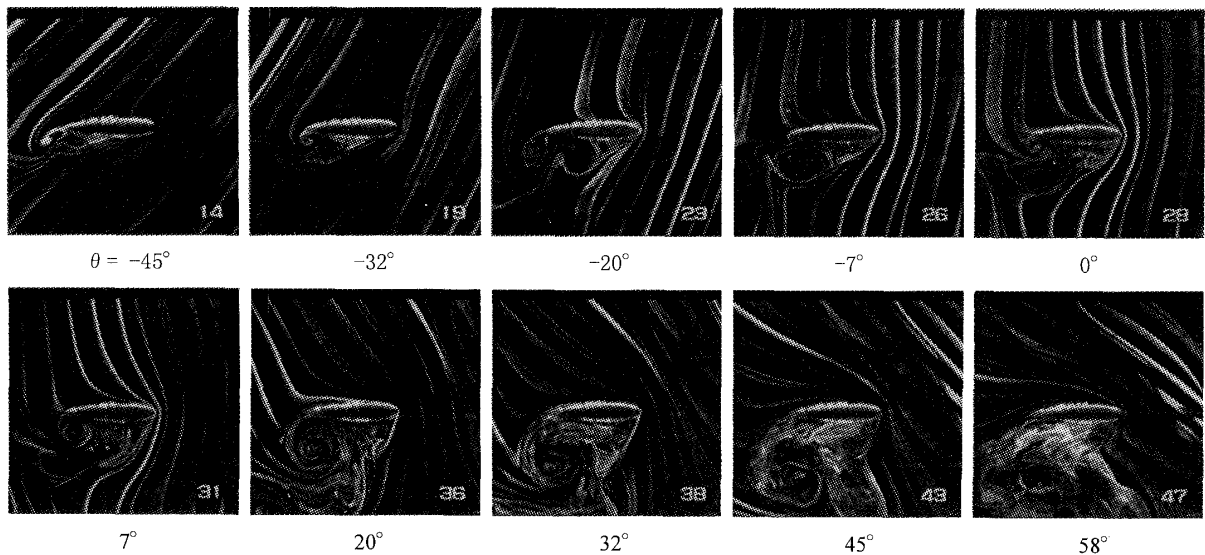


Fig. 4 Sample image visualized by tracer method

関連計算では、マトリックスサイズを 30×30 ピクセル、探索領域を 46×46 ピクセル、マトリックス移動量を 8 ピクセルで行い 60×60 の格子点における速度ベクトルを算出し、さらに重みを付けて近傍ベクトルを空間平均して 20×20 の速度ベクトルを得た。なお、エラーベクトルは、ブレード下側の渦領域に多少見られたが、全ベクトルに対する割合は概略 5%程度であった。ここに、エラーベクトルの判定は、関連計算の直後、当該速度ベクトルの周囲 8 ベクトルとの比較⁽⁸⁾により決定し、エラーの場合には周囲の平均ベクトルで置き換える処理を施した。本実験の関連計算における平均移動量は約 6 ピクセルであり、最大相関位置の不確かさを ± 0.5 ピクセルと考えると、 $\pm 8\%$ 程度の不確かさが速度計測上現れるが、近傍ベクトルとの空間平均を考慮すると、最終的に得られた速度ベクトルは $\pm 4\%$ 程度の精度と推定される。

3. 結果および考察

3.1 ブレード周り流れ場の可視化 図5は、本実験の移動計測システムを用いてブレード周りの相対速度場を染料を用いて可視化観察した結果である。ただし、周速比 $\lambda=2$ の場合である。ここでは、ブレード回転角 $\theta=-90^\circ \sim 180^\circ$ における観測結果の中から、動的失速渦の発生と成長に強い関わりを持つ 10 箇所の回転角を選択して示した。ここに、可視化写真の上側が風車外側、下側が風車内側の流れ場に対応しており、ブレードは写真の左から右に向かって進行状態にある。なお参考のため、周速比 $\lambda=2$ におけるブレード角 θ とブレードに対する主流の入射角 α の関係⁽⁶⁾を図6に示した。ただし、この種のブレードにおける静的な失速は $\alpha=11^\circ$ 付近⁽⁶⁾で生ずる。ブレード回転角 $\theta=-45^\circ$ は、この静的な失速角をわずかに越えた入射角 ($\alpha=15^\circ$) に相当する。このとき、風車内側のブレード負圧面側には小さな離領域の発生が見られ、動的失速の発生を示唆する。そのはく離渦流出の直後、 $\theta=-32^\circ$ では風車外側からブレード後縁を通過して風車内側へ巻き込む反時計回りの渦の形成が見られ、先のはく離渦と併せて第一の失速渦対の発生を示す。この巻き込み渦はブレード角の増加とともに渦の大きさを増し ($\theta=-20^\circ$)、ブレード後縁から流出することになる ($\theta=-7^\circ$)。一方、風車内側のブレード負圧面には新たなはく離渦が形成されるが ($\theta=-20^\circ$)、ブレード角度の増大とともにその大きさを拡大する。このとき、 $\theta=-7^\circ$ に見られるように、その拡大効果によって、先に発生した巻き込み渦を後流中に流出させることになる。 $\theta=0^\circ$ 付近になると、第一の失速渦形成と同様

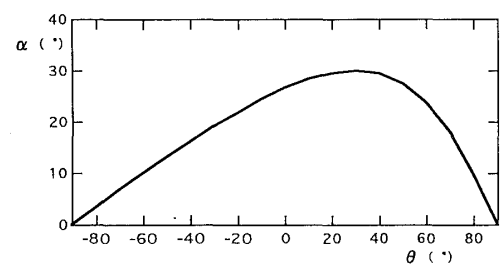
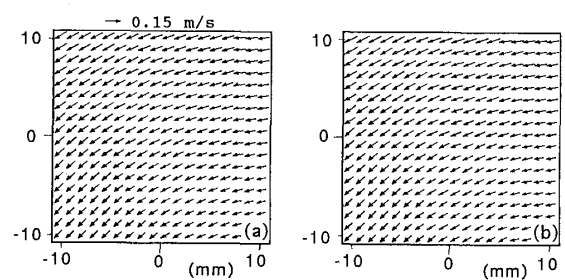
Fig.5 Flow visualization pictures relative to a rotating blade at various blade angles ($\lambda=2$)

に、風車外部からブレード後縁を通して風車内部に向う強い巻き込み渦が認められる。その渦は反時計回りに回転しており、ブレード角の増加とともにその大きさを増し、ブレード負圧面に沿って発達することになる。この巻き込み渦は、ブレード負圧面のはく離渦と共に第二の失速渦対を形成することになる。一方、巻き込み渦はブレード負圧面で大きく成長するが ($\theta=0\sim 20^\circ$)、同時にブレード負圧面のはく離域を前縁付近に圧縮させる。その後、巻き込み渦はブレード角の増加に伴ってブレード面から離脱する ($\theta=45\sim 58^\circ$)。このようにして形成された二つの失速渦対は、既報⁽⁸⁾に示したように風車内部を通して風車下流側に進みながら、さらに大きさを増す。また、巻き込み渦の離脱挙動に伴って、ブレード負圧面の前縁付近のはく離域は拡大傾向を示し、はく離渦が成長する。

3.2 一様流の速度分布測定 ダリウス風車ブレード周りの速度計測に先立って、一様流の流速分布を測定することで移動計測システムの妥当性を確認した。図7は、回転カメラから観測した一様流れ場の速度分布 (ブレード角 $\theta=0^\circ$ に相当) である。ここに、図7(a)は、理想的な一様流速分布が形成されていると仮定した場合の速度ベクトル分布を解析的に求めた結果であり、図7(b)は本実験のPIVシステムを用いて計測した速度分布結果である。ただし、カメラは本実験の周速比 $\lambda=2$ に相当する角速度で回転させた。両者は、速度ベクトルの大きさが4%の精度で一致しており、本計測結果の妥当性を示す。一方、回転カメラで観測される一様流は、予期されるように、撮影される画像の上下位置で回転半径が異なるため、それに伴う回転

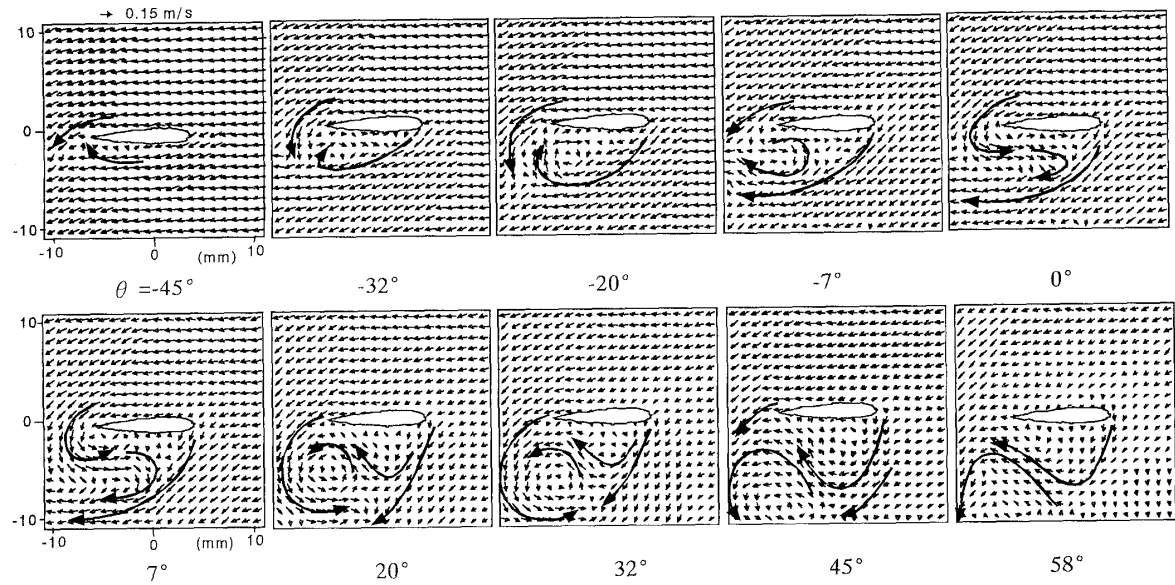
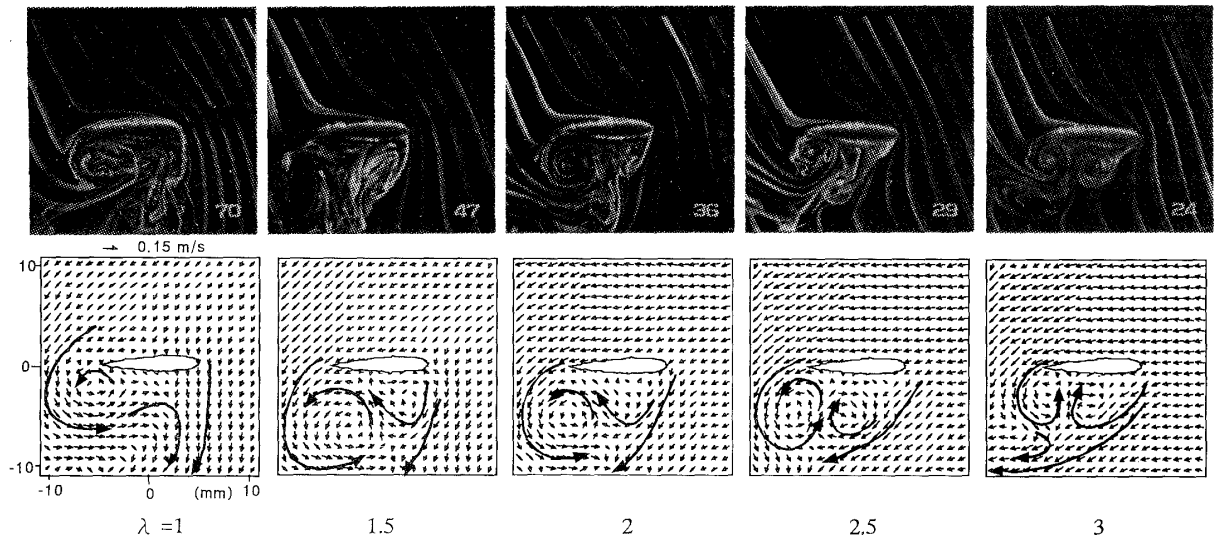
速度が一様流速に重なる。その結果得られる速度ベクトルは、画像の右上では水平左方向を示すが、画像の左下ではより強い下向きの効果を示す流れ場となる。このような傾向は、本実験の他のブレード角においても認められた。

3.3 瞬時速度場の計測結果 図8は、図5と同一実験条件下におけるダリウス風車ブレード周りの瞬時相対速度場の画像計測結果である。ブレード角 $\theta=-45^\circ$ 付近の速度場においては、ブレード負圧面側においてわずかにはく離領域が見られ、動的失速の開始を示唆

Fig.6 Variations of incidence angle α with blade angle θ 

(a) Analytical result (b) PIV measurement

Fig.7 Uniform velocity distributions ($\theta=0^\circ$)

Fig. 8 Instantaneous velocity distributions relative to a rotating blade at various blade angles ($\lambda=2$)Fig. 9 Flow visualization and instantaneous velocity distributions relative to a rotating blade at various tip-speed ratios λ

する。しかしながら、可視化結果に見られたようなブレード後縁付近の小さな渦までは速度分布図に認められない。これは、主として本実験のPIVシステムの空間分解能がそのような渦を捕らえるまでは至っていないことを示す。しかしながら、ブレード角が $\theta=-32^\circ$ に増大すると、可視化では風車外側の圧力面からブレード後縁を通して内側の負圧面に巻き込む反時計回りの渦が見られたが、それに対応して巻き込み流の増強の様子が速度ベクトル図に認められる。この増速と巻き込み効果を示す渦は $\theta=-20^\circ$ にも強く見られるが、 $\theta=-7^\circ$ では弱まり、巻き込み渦のブレードからの離脱を示す。これら一連の負圧面でのほく離渦形成とそれに伴う巻き込み渦の発生から離脱までの挙動は可視

化結果と良く対応する。これが、第一の失速渦形成に相当する。一方、 $\theta=-20^\circ$ 付近の負圧面側では時計回りのはく離渦が形成されるが、それはブレード角の増加と共に負圧面側に拡大する($\theta=-7^\circ$)。一方、 $\theta=0^\circ$ の速度ベクトル図では、可視化結果にも見られたようになり強い反時計回りの巻き込み渦が、ブレード後縁を通して圧力面から負圧面に向かって発生する。この巻き込み渦は、負圧面側のはく離域にかなり強く侵入し、負圧面側のはく離渦を下流側に押し退ける効果を示す。同時にこの巻き込み流は負圧面のはく離域をブレード前縁付近に圧縮する効果も併せ持つ。また、この巻き込み渦はブレード角の増加($\theta=20^\circ$)とともに大きさを増すが、 $\theta=45^\circ$ 付近までブレード面に付着

状態を保つ。このように、第二の失速渦対形成に伴う流れ場の変形は、速度ベクトル図から明らかなように、第一の失速渦対の場合よりかなり広範囲に及んでおり、また、速度変化も大きい。このような第二の巻き込み渦の強まるブレード角 ($\theta=20\sim 32^\circ$) では、ブレードに対する主流の入射角がかなり大きくなること (図6) から分かるように、巻き込み渦の増強は入射角増加に伴う負圧面側のはく離域拡大に関連すると考えられる。一方、 $\theta=20\sim 45^\circ$ の結果に見られるように、巻き込み渦の離脱挙動に伴って、ブレード負圧面にはく離渦が再び形成されることが分かる。このはく離渦は、時計回りの回転を示し、 $\theta=90^\circ$ 付近までブレード負圧面に付着形成される。このように、ブレード近傍における渦形成の可視化結果と PIV による速度場解析結果は定性的には良好な一致を示す。しかしながら、ブレードから離れた主流部に見られるように、非定常流では可視化の示す流れ線の方向と速度ベクトルの方向は一致しないため、PIV 計測による速度場測定的重要性を示唆する。ただし、渦中心付近での速度測定では、速度ベクトルの方向変化が大きく測定結果に大きな誤差が入る。このような所では、より高解像度の計測により、測定誤差を小さくすることが課題である。

3.4 周速比の影響 図9は、種々の周速比におけるブレード周りの流れ場の可視化ならびに瞬時相対速度ベクトルの計測結果の一例である。ただし、ここでは第二の失速における巻き込み渦が強く形成されるブレード角 $\theta=20^\circ$ において周速比を $\lambda=1\sim 3$ の範囲で5種類変化させた結果を示す。いずれの周速比の結果においても、ブレード後縁を通過して風車外側から内側に向う巻き込み渦の形成ならびにブレード前縁から負圧面側に発達するはく離渦形成が認められる。したがって、失速渦対の定性的特徴は周速比の影響によってあまり変化しないといえる。しかしながら、周速比が減少すると失速渦対の大きさは増大する傾向にある。これは、周速比の減少に伴ってブレードに対する主流の入射角がかなり増大することが原因である。(ブレード角 $\theta=20^\circ$ では、周速比が 3、2、1 と減少すると、入射角 20° 、 30° 、 55° と増大する。) このことは、速度ベクトル図において主流の方向が周速比の減少とともに下側向きになることから明らかであり、その結果としてブレード負圧面側のはく離域が増大し、それに対応したブレード内外の圧力差からより強い巻き込み渦が発生するものと考えられる。また、このような失速渦に及ぼす周速比の影響は、他のブレード角においても同様に認められた。

4. 結 論

ダリウス風車における動的失速現象を明らかにすることを目的とし、低周速比におけるブレード近傍の相対流れ場を流れの可視化と PIV による画像解析に基づいて比較検討し、以下の結論を得た。

(1) ダリウス風車のブレード運動に同期して近傍流れ場を時系列的に拡大観測する計測システムを構築し、風車の低周速比で現れる動的失速現象の詳細を移動観測する方法を示した。

(2) 移動観測結果から得られた流れ場の可視化ならびに PIV による画像解析結果を考察すると、風車1回転中に2対の失速渦が発生するが、第二の失速渦対の発生に伴う速度場の変化は第一の失速渦対の場合よりかなり大きく、またその渦対はブレードに対する主流の入射角が最大となるブレード角付近で強い増強効果を受ける。

(3) 2対の失速渦対の発生機構は、いずれも風車内側の負圧面におけるはく離渦の形成とブレード後縁を通り圧力面側から負圧面側へ回りこむ巻き込み渦に起因するものであり、これらの渦が次々とブレードから離脱しては発生し、風車後流中では大規模な渦対を形成すると考えられる。

(4) このような失速渦対の生成機構は、周速比の影響をあまり受けないが、周速比の低下に伴い渦の規模は増大し、ブレードに対する主流の入射角の増加の影響を示唆する。

終りに、本実験の遂行において協力された当時群馬大学大学院学生竹内光芳君および新潟大学学部生石川尚朋君に謝意を表す。

文 献

- (1) Klimas, P.C., ASME J. Solar Energy Eng., 104(1982), 102.
- (2) Carr, L.W., J. Aircraft, 25-1(1988), 6.
- (3) Noll, R.B. and Ham, N.D., ASME J. Solar Energy Eng., 104(1982), 96.
- (4) Paraschivoiu, I., J. Energy, 7-6(1983), 610.
- (5) Brahim, M.T. and Paraschivoiu, I., ASME J. Solar Energy Eng., 117(1995), 128.
- (6) Laneville, A. and Vittecoq, P., ASME J. Solar Energy Eng., 108(1986), 140.
- (7) Brochier, G. et al., J. Propulsion, 2-5(1986), 445.
- (8) 藤沢延行, 堀陽一, 機論(B), 63-606 (1997-2), 590.
- (9) Fujisawa, N. and Takeuchi, M., Proc. 2nd Int. Workshop PIV, Fukui, 1997, 91.
- (10) 西野耕一・他3名, 機論(B), 55-510(1989-2), 404.
- (11) 加賀昭和・他2名, 可視化情報, 14-53 (1994-4), 108.