

P I V計測による  
後縁に切欠きのある翼型を用いた垂直軸型風車周りの  
風車効率に影響する流れの研究

2017年 1月

千葉大学大学院工学研究科

人工システム科学専攻機械系コース

本多 正明

(千葉大学審査学位論文)

P I V計測による  
後縁に切欠きのある翼型を用いた垂直軸型風車周りの  
風車効率に影響する流れの研究

2017年 1月

千葉大学大学院工学研究科

人工システム科学専攻機械系コース

本多 正明

# 目 次

## 第1章 緒言

1.1 第1章の内容	1
1.2 研究背景	1
1.3 既往研究	2
1.3.1 垂直軸型風車に関する既往研究	2
1.3.2 PIV計測および垂直軸型風車周りの流れの計測に関する既往研究	4
1.4 研究の目的	5
1.5 研究手法	6
1.6 本論文の概要	6
1.7 第1章 参考文献	7

## 第2章 コンディショナル・サンプリング PIV 法

2.1 第2章の緒言	11
2.2 PIV測定法	11
2.3 ハイブリッド・ステレオ PIV測定法	13
2.4 コンディショナル・サンプリング法	17
2.5 第2章 参考文献	18

## 第3章 後縁に切欠きのある翼型を用いた垂直軸型風車の性能の計算による検討

3.1 第3章の緒言	27
3.2 抗力型と揚力型の垂直軸型風車の作動原理	27
3.2.1 抗力型（パドル型風車）の作動原理	27
3.2.2 揚力型の風車（ジャイロミル型風車）の作動原理	28
3.2.3 抗力型と揚力型の風車の特性の比較	30
3.3 抗力型、揚力型の特性を併せ持つ垂直軸型風車	30
3.3.1 ハイブリッドブレードの原理	30

3.3.2	ハイブリッドブレード翼型の空力性能	30
3.3.3	ハイブリッドブレードを用いた垂直軸型風車の形状の特徴と性能	31
3.4	ハイブリッドブレードを用いた垂直軸型風車の性能	32
3.4.1	性能の検討に用いる翼型の空力特性	32
3.4.2	ブレードが発生する接線力の計算	32
3.4.3	接線力の計算結果の検討	34
3.5	第3章のまとめ	39
3.5	第3章 参考文献	40
第4章 実験方法		
4.1	第4章の緒言	47
4.2	実験装置	47
4.2.1	回流水槽及び模型	47
4.2.2	計測装置	48
4.3	PIV 及びステレオ PIV による速度場解析	49
4.4	実験条件及び座標系の定義	49
4.5	第4章 参考文献	49
第5章 風車周りの流れのコンディショナル・サンプリング PIV 計測		
5.1	第5章の緒言	56
5.2	実験	56
5.2.1	実験条件	56
5.2.2	実験結果	57
5.3	考察	60
5.3.1	風車周りの流れ	60
5.3.2	ブレード周辺の流れとブレードの発生する接線力への影響	61
5.3.3	パワー係数への影響	67

5.3.4	圧力分布による接線力の検討	68
5.4	第5章のまとめ	69
5.5	第5章 参考文献	70
第6章	風車ブレード翼端周りの流れの コンディショナル・サンプリング・ステレオ PIV 計測	
6.1	第6章の緒言	83
6.2	実験	83
6.2.1	実験条件	83
6.2.2	実験結果	84
6.3	実験結果の解析	84
6.3.1	実験結果の解析方法	84
6.3.2	実験結果の解析結果	85
6.4	考 察	88
6.5	第6章のまとめ	90
6.6	第6章 参考文献	90
第7章	結論	
7.1	概要	99
7.2	各章のまとめ	99
7.2.1	第3章のまとめ	99
7.2.2	第5章のまとめ	100
7.2.3	第6章のまとめ	101
7.3	総結論	102
謝辞		104

## 第1章 緒言

### 1.1 第1章の内容

第1章では、本研究における背景、既往研究、目的、研究手法及び本論文の構成の概要について述べる。

### 1.2 研究背景

近年、大きな環境問題となっているものの1つに地球温暖化問題がある。これは、大気中の二酸化炭素等の温室効果ガスの増加し地球大気の色度が高くなる問題である。二酸化炭素の主たる排出源は、エネルギーとして用いる化石燃料等の燃焼によるものである。18世紀半ばに起こった産業革命以降さらには発展途上国における近年の経済発展に伴い、人類のエネルギーの消費量は急激に増え続け二酸化炭素の排出量も増え続けている。地球温暖化の対策として温室効果ガスの排出量削減が京都議定書でとり決められ、さらなる削減への取り組みが検討されている。最も大きな温室効果ガス排出源となっているのは化石燃料等を燃焼することによる二酸化炭素の排出であるため化石燃料等の燃焼を削減することが最も重要とされており、そのために化石燃料に依存しないエネルギー源の開発、普及が必要となっている。

埋蔵資源である化石燃料等の枯渇性エネルギーに対し、自然界の営みにより再生される自然エネルギーを再生可能エネルギーといい、太陽光、バイオマス、風力、水力等がこれにあたる。再生可能エネルギーは、二酸化炭素を排出しない（あるいは全環境的に排出量を増やさない）エネルギー源として注目されている。その1つである風力発電は太陽光発電と並んで有力なクリーンエネルギーとして期待されている。

現在、風力発電機は数千kWの大型のものから数十W程度の小型まで実用化されているが、風力発電の発電量としては大型の発電機が主流である。大型のものは建設費用に対する発電電力量が大きく結果として発電コストは低くなるが、費用対効果を十分に高めるためには気象条件（風の条件）が良好である地域である必要があり、さらに安全性や騒音の問題から建設地が限られてしまう。これに対し、ビルや市街地など電力を消費する場所

で比較的小さな発電機を数多く設置することによって送電のコストや電力ロスを少しでもさげて効率的に電力を確保しようとする考え方がある。このような設置場所では必ずしも常に適切な風速の風が得られずまた風向も安定しないため、十分な電力を得ることが難しく設置費用に対する発電電力量は小さく発電コストは高くなる。このため、小型の風力発電機はこれまであまり普及していない[1-1]。このように風の条件が最適ではない電力を消費する場所に数多くの発電機を設置する新たな考え方の風力発電システムの実現には、低い風速から効率よく発電でき風向の変化に対応できる風力発電機の開発が必要とされる。

## 1.3 既往研究

### 1.3.1 垂直軸型風車に関する既往研究

風力発電用の風車は、風車の回転軸の方向により水平軸型、垂直軸型の2つのタイプに分類することができる。水平軸型では翼の軸線は水平に取付けられているもので、代表的なものを Fig.1-1 に示す。大型風力発電機として一般的なものは、プロペラタイプである。プロペラタイプは、効率がよく、大型化が容易であり、プロペラピッチを変更することにより回転数を制御することができ、発電用に適している。欠点としては、発電機、伝達機構さらに制御機構等の重量物を高所にあるナセル内に設置しなければならず、さらにプロペラ回転面を常に変化する風の方向に向ける必要があり、プロペラと重量物を含むナセル全体を回転する機構と制御するシステムが必要となる。また、プロペラ先端の速度が大きくと騒音が大きい。垂直軸型の風車の代表的なものを Fig.1-2 に示す。垂直軸タイプは複数の翼の軸線は縦に取付けられており、全ての方向の風が利用できる風向の依存性がない。このため、機構が簡易となり、また発電機等の重量物は地上に設置できる。また、通常このタイプの翼（ブレード）はスパン方向に一様な断面をしておりスパン方向に断面が変化するプロペラ式のブレードに比べて製造が容易である。しかし、一般的にプロペラタイプと比較して低風速域での効率が劣り、また自己起動時に十分なトルクを得られず起動風速が高い。さらに、効率を保つためには風速に応じた回転数とする必要があり、風車の回転数は常に風速によって変動するため、発電機の出力（電圧、電流、周波数）が風速に伴って

変動する。この出力を、使用できる電力に保つ発電周波数等の制御が困難である。[1-1]

垂直軸型ではさらに抗力型、揚力型の2つのタイプに分類できる。抗力型は主に翼で作用する抗力により回転トルクを得るもので、代表的なものとしてパドルタイプ、Savoniusタイプは[1-2]がある。抗力型では低い回転速度で高いトルクを発生させるため、揚力型と比較し効率は低いが生動トルクを得やすく起動風速が低い。また、騒音が小さい。Savoniusタイプの効率は約12%から15%である。揚力型は、主に翼に作用している揚力により回転トルクを得るものである。代表的なものとしてジャイロミルタイプ、Darrieusタイプ[1-3]がある。効率を良くするためには、翼の回転する全周にわたり揚力が発生することが必要で、このためには周速度を風速以上となり、周速度が大きいほど効率が高くなる。風速が大きい場合、周速度（回転数）が高いため発電用に適しているが、自己起動するためのトルクを得ることは難しく風速が低い場合は回転始動が困難である。

垂直型風車の最大の特徴は、風向に依存しないことである。垂直型風車は、水平軸型風車（プロペラ型はその1種類）のように常に風の方向に向けないと回転モーメントが著しく低下し、性能を発揮できない風車に比較して、風向が常に変化し安定しない風の中で使用する風力発電機用風車として有効である。地形、建物、可動体等のように複雑な渦等が発生した乱れた空気の流れの風下においても回転を続け、性能を発揮することができるため、人の居住地など電力を消費する場所に近接した場所に設置することにより風力発電の新たな可能性が期待できる。

このように風力発電機の風車として望ましい多くの特性を持ちながら、現在、垂直軸型の風車を使用した風力発電機がほとんど実用化されていないのは、抗力型では効率が低く、揚力型では「起動風速が高い」と「微・低風速域での効率が低い」ことがその最大の理由である。揚力型垂直軸風車に関しては、ダリウス型風車のように、風速の大きな場所で使用することを目的とした風力発電機以外に、微・低風速域で使用する実用的な風車はこれまでほとんど存在していなかった。また、近年、抗力型垂直軸風車に関しては実用的なマイクロ風力発電機に使用され始めてきたが、中風速域以上の風に対しての性能が低いため、マイクロ風力発電機以上の大きさの風力発電機にはほとんど使用されていない。そ



ここで、抗力型、揚力型がそれぞれ持つ利点を併せ持つ（低風速で起動し効率が高い）新しいタイプの垂直軸型風車の開発が期待され、垂直軸型の揚力型の風車に関する起動風速の改善、低風速域での性能改善に関する研究開発が世界各国で多く行われて来た。

このような状況の中、野口は、揚力型の起動特性の改善のため揚力型風車に用いるブレードに通常の翼型の下面後縁側を切り欠いた翼型を持つハイブリッドブレードを用いることを考案した[1-4]。このブレードを用いた垂直軸型風車は、従来の揚力型風車に比べて起動風速が改善し低風速において発電が可能となったため、風の弱い条件においてより多くの電力量が得られることが実機の風洞試験により確認された [1-5]。しかし、定格出力が得られるような大きい風速の状況においては揚力型風車に比べて効率が低いことも明らかとなった。また、発電時の周速比（風速に対する風車の周速度の比）は通常の揚力型では 3.0 から 5.0 である[1-1]のに対し、ハイブリッドブレードを用いた風車では 0.8 から 1.2 と小さいことが風洞試験結果から明らかとなっている[1-5]。発電時の周速比が純粋な抗力型よりは大きく通常の揚力型よりは小さいことから抗力と揚力両方を利用しトルクを得ていると考えられる。しかし、実際に抗力と揚力のどちらからどの程度のトルクを得ているか、また、切欠きを設けたことによる抗力の増加による発電中における効果については、これまで研究はされておらず確認されていない。

一方、通常の揚力型の風車については様々な研究がなされ、発電中の周速比における性能に関しては設計手法が確立されつつある[1-6]。しかし、風車の停止状態から加速段階にある周速比が小さい状況（ハイブリッドブレードを用いた風車の発電時の周速比の状況）に置ける性能に関しては、回転するブレードの相対速度及び迎角の変化が大きく[1-7]剥離を伴う流れとなる事もあり[1-6]、この状況における性能の設計手法は確立されていない。

### 1.3.2 PIV 計測および垂直軸型風車周りの流れの計測に関する既往研究

流体中の物体周囲の流体速度の計測手段として、多点速度 2 成分の PIV（Particle Image Velocimetry：粒子画像計測法）計測が用いられるようになった [1-8][1-9]。また、近年では 3 次元速度を計測するステレオ PIV も広く使われるようになってきた[1-10] [1-11]。

また、運動している物体に対する PIV 計測には、物体の挙動によりサンプリングを行なうコンディショナル・サンプリング法が必要不可欠である。Hu らは、空気中の円柱の周囲流れの測定においてコンディショナル・サンプリング法としてホットワイヤ測定による信号をトリガとする相平均 PIV 法を提案し周囲流れの構造解析を行った[1-12]。

垂直軸型風車（通常の揚力型）への PIV 計測の適用としては、風車の周辺や風下側の伴流を計測した例がある[1-13] [1-14]。回転する風車内部を含む風車周りの流れを PIV により計測するためには、風車の回転位置が一定の位置にある時にレーザーシートを放射しなければならない、コンディショナル・サンプリングの手法が必要となる。Fujisawa らは、回転する風車の 1 枚のブレードに注目しそのブレード周りの流れをコンディショナル・サンプリング 2D-PIV により計測した[1-15]。PIV 以外の手法による垂直軸型風車周りの流れの計測では、PTV(Particle Tracking Velocimetry)により抗力型風車周りの速度場を計測しその結果から圧力分布を求めブレードに発生するトルクを検討した例[1-16]や、LDV(Laser Doppler Velocimetry)により揚力型風車周りの速度分布を計測した例[1-17] [1-18]がある。

垂直軸型風車における風車性能に影響を与えるブレード翼端に発生する渦に関する研究については、コンディショナル・サンプリングステレオ PIV を用いて揚力型風車についてブレード翼端で発生した渦を含む風車周り及びその後流側の流れを計測した例[1-14]やブレード翼端の渦の発生箇所から渦の移動する流れを計測した例があり[1-19]、通常の揚力型風車の発電時の周速比が比較的大きい(2.0 以上)条件において渦の存在は知られている。しかしハイブリッドブレードを用いた風車の発電時のような小さい周速比における翼端渦の研究例はない。

#### 1.4 研究の目的

以上の背景を踏まえて、本研究ではハイブリッドブレードを用いた風力発電機用風車の周囲の流れを計測することにより、風車の出力に影響のある風車周りの流れの状況を調べ、さらに発電中の同型の風車が抗力と揚力のどちらからどの程度のトルクを得ているか、また、切欠きを設けたことによる抗力の増加による発電中における効果を確認し、通常の揚

力型風車との出力（トルク）発生状況の違いを明確にし、同型風車の性能の特徴の要因を調べることを目的とする。

本研究において、流れの計測には PIV 計測を用いるが、コンディショナル・サンプリング手法を用いる必要がある。このためのコンディショナル・サンプリング装置及びこれを用いる計測システムを構築する。

さらに、構築した計測システムにステレオ PIV 計測を応用し、ブレード翼端における 3次元流れを計測することにより、翼端渦の発生源など風車の出力へ影響を与える可能性のある流れを調べることを目的とする。

## 1.5 研究手法

本研究では、垂直軸型風車周りの流れを計測するために、回流水槽を用いた模型実験を実施する。

回流水槽の計測部に風車模型を設置、風車模型をモータの駆動により一定の速度で回転させ、回流水槽の主流速度と風車ブレードの周速度の比「周速比」を変えて、風車周りの流れを計測する。

風力発電機用風車の周囲の流れを計測する手法として、コンディショナル・サンプリング PIV 計測（2D速度の計測）及びコンディショナル・サンプリング・ステレオ PIV 計測（3D速度の計測）を用いる。PIV 計測の速度算出にはグレーレベルの相関係数法[1-20]を用い、ステレオ PIV 計測の速度算出（粒子の位置の特定）にはハイブリッド・ステレオ PIV を用いる。[1-21]。コンディショナル・サンプリング装置は、筆者らが開発したものである[1-22]。

## 1.6 本論文の概要

以下に、本論文を構成する各章の内容を述べる。

第1章は、本研究における背景、既往研究、目的及び研究手法について述べた。さらに本論文の概要について述べる。

第2章は、本研究の実験における計測で用いたコンディショナル・サンプリング PIV 計測法及びコンディショナル・サンプリング・ステレオ PIV 計測法について、2次元の速度場を計測する PIV 測定法、3次元の速度場を計測するハイブリッド・ステレオ PIV 測定法の原理について説明し、さらに PIV 計測で用いるコンディショナル・サンプリングの手法の開発について述べる。

第3章は、抗力型垂直軸型風車及び揚力型垂直軸型風車の作動原理について説明し、低い風速から効率よく作動することが可能となる風力発電機用のハイブリッドブレードの基本設計コンセプト及び原理について述べ、ハイブリッドブレードを用いた風車の特性について計算により検討する。

第4章は、本研究において用いる実験方法について、実験装置、コンディショナル・サンプリング装置を含む PIV 及びステレオ PIV 計測システム、実験条件及び座標系の定義について述べる。

第5章は、コンディショナル・サンプリング PIV 計測を用いて、回流水槽の計測部に設置した風車模型周りの流れを計測する。その計測結果から、出力に影響のある風車周りの流れの状況を調べ、さらに計測した速度場から回転するブレードの迎え角及び相対速度の変化を求め、ブレードの発生するトルクへの風車周囲の流れによる影響、トルクの発生要因及び、ハイブリッドブレードの効果を調べる。

第6章では、コンディショナル・サンプリング・ステレオ PIV 計測を用いて、回流水槽の計測部に設置した風車模型のブレード翼端周りの流れの3D速度場を計測し、垂直軸型風車の性能に影響する要因の一つである風車のブレード翼端に発生する翼端渦の発生源の状況について、風車の周速比に対する変化を調べる。

第7章は、結論であり、本研究の成果を統括する。

## 1.7 第1章 参考文献

- [1-1] 風力発電導入ガイドブック（改訂第8版），独立行政法人 新エネルギー・産業技術開発機構, (2005).

- [1-2] Paraschivoiu, I., Wind turbine design-with emphasis on Darrieus concept, Polytechnic International Press, (2002).
- [1-3] Ogawa, T., Theoretical study on the flow about Savonius rotor, *J. Fluids Eng.* Vol. 106, (1984), pp.85–101.
- [1-4] 野口常夫, 日本国特許第 3451085 号, (2003).
- [1-5] 野口常夫, 武居昌宏, 石井進, “垂直軸型風力発電機の開発と翼端渦の流れの計測”, *噴流工学*, Vol. 25, No. 3 (2009), pp. 4-12.
- [1-6] 関和市, 牛山泉, 垂直軸風車, パワー社, (2008).
- [1-7] Scheurich, F., Fletcher, T.M. and Brown, R.E., Simulating the aerodynamic performance and wake dynamics of a vertical-axis wind turbine, *Journal of Wind Energy*, Vol. 14, No. 2 (2011), pp. 159-177.
- [1-8] Wu, J. and Sheridan, J., The wake of an orbiting cylinder, *Journal of Fluids and Structures*, Vol.11, (1997), pp.617-626.
- [1-9] Fujisawa, N., Ikemoto, K. and Nagaya, K., Vortex shedding resonance from a rotationally oscillating cylinder, *Journal of Fluids and Structures*, Vol.12, (1998), pp.1041-1053.
- [1-10] Adamczyk, A. A., and Rimai, L., Reconstruction of a 3-dimensional flow field from orthogonal views of seed track video images, *Experiments in Fluids*, Vol. 6, (1988), pp380-386.
- [1-11] Prasad, A.K. and Jensen, K., Scheimpflug stereocamera for particle image velocimetry in liquid flows, *Applied optics*, Vol. 34 (1995), pp7092-7099.
- [1-12] Hu, C. J., Zhou, Y. and Dalton, C., Effects of the corner radius on the near wake of a square prism, *Experiments in Fluids*, Vol.40, No.1, (2006), pp.106-118.
- [1-13] Shigetomi, A., Murai, Y., Tasaka, Y. and Takeda, Y., Interactive flow field around two Savonius turbines, *Renewable Energy*, Vol. 36, (2011), pp536-545.
- [1-14] Tescione, G., Ragni, D., He, C., Simão Ferreira, C. J. and van Bussel, G. J. W., Near wake flow analysis of a vertical axis wind turbine by stereoscopic particle image velocimetry,

- Renewable Energy*, Vol. 70, (2014), pp47-61.
- [1-15] Fujisawa, N. and Shibuya, S., Observation of dynamic stall on darrieus wind turbine blades, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 89, (2001), pp. 29-36.
- [1-16] Murai, Y., Nakada, T., Suzuki, T. and Yamamoto, F., Particle tracking velocimetry applied to estimate the pressure field around a Savonius turbine, *Measurement Science and Technology*, Vol. 18, No.8, (2007), pp491-503.
- [1-17] 李慶安, 前田太佳夫, 鎌田泰成, 村田淳介, 川端俊亮, 古河和馬, 小垣哲也, 直線翼垂直軸風車周りの流れに及ぼす翼枚数の影響, *日本機械学会論文集*, Vol.80, No.816, (2014a), DOI: 10.1299/transjsme.2014fe0223.
- [1-18] Li, Q., Maeda, T., Kamada, Y., Murata, J., Kawabata, T. and Kogaki, T., Study on flow around straight-bladed vertical axis wind turbine under low tip speed ratio, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol.9, No.3, (2014b) , DOI: 10.1299/2014jst0051.
- [1-19] Hofemann, C., Simão Ferreira, C., Dixon, K., van Bussel, G., van Kuik, G. and Scarano, F., 3D stereo PIV study of tip vortex evolution on a VAWT, EWEC 2008-European Wind Energy Conference, Brussels, (2008).
- [1-20] Utami, T. and Blackwelder, R., A cross correlation technique for velocity field extraction from particulate visualization, *Exp. in Fluids*, Vol.10, (1991), pp.213-223.
- [1-21] Doh D.H., Hwang T.G. and Saga T., 3D-PTV measurements of the wake of a sphere, *Measurement Science and Technology*, Vol.15, (2004), pp.1059-1066.
- [1-22] Honda, M., Noguchi, T., Doh, D., H., Takei, M. and Ishii, S., “Conditional Sampling Stereoscopic PIV Measurement around the blade of the vertical axis wind turbine”, *Journal of JSEM*, Vol. 10, Special Issue, (2010), pp. 73-78.

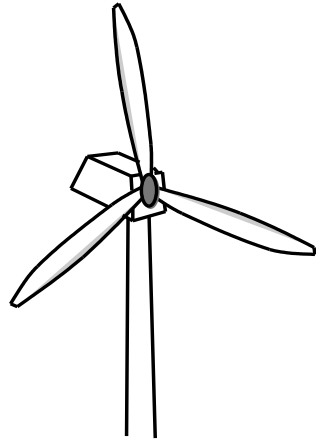


Fig.1-1 Horizontal axis windmills (Propeller type) [1-1]

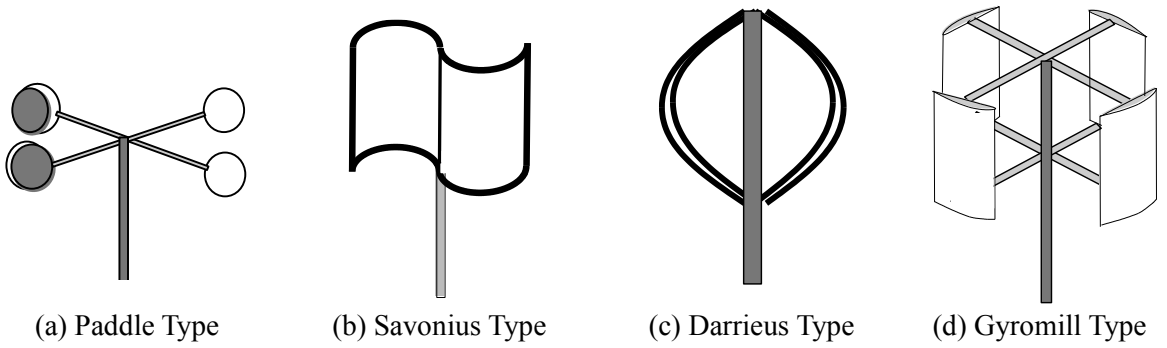


Fig.1-2 Vertical axis windmills [1-1]

## 第2章 コンディショナル・サンプリング PIV 法

### 2.1 第2章の緒言

本研究において、回転する風車周りの流れを計測する手法として、コンディショナル・サンプリング PIV (Particle Image Velocimetry : 粒子画像計測法) 計測法 (第4章の実験) 及びコンディショナル・サンプリング・ステレオ PIV 計測法 (第5章の実験) を用いる。

流体中の物体周囲の流体速度の計測手段として、多点速度 2 成分の PIV 計測が用いられるようになった。Wu らは自転する円柱の PIV 計測[2-1]を行ない、円柱後流の特徴を解析した。Fujisawa らは、公転する円柱の PIV 計測[2-2]を行ない圧力分布測定結果と比較解析を行なった。また、近年では 3 次元速度を計測するステレオ PIV も広く使われるようになってきた[2-3] [2-4]。例えば Doh は静止球体の周囲の流れのステレオ測定を行い[2-5]、Wu らは自転する球体の PIV 計測[2-6]を行い、Fujisawa らは公転する球体の PIV 計測[2-7]を行った。

運動している物体に対する PIV 計測には、物体の挙動によりサンプリングを行なうコンディショナル・サンプリング法が必要不可欠である。Hu らは、空気中の円柱の周囲流れの測定においてコンディショナル・サンプリング法としてホットワイヤ測定による信号をトリガとする相平均 PIV 法を提案し周囲流れの構造解析を行った[2-8]。また、Fujisawa らは回転する風車の 1 枚のブレードに注目しそのブレード周りの流れをコンディショナル・サンプリング PIV により計測した[2-9]。

本章では、本研究において風車周りの 2 次元速度場の計測に用いる PIV 測定法 (グレーレベル相関係数法) 及びブレード翼端の 3 次元速度場の計測に用いたハイブリッド・ステレオ PIV 測定法 (10 パラメータ法) について説明し、さらに筆者らが開発したコンディショナル・サンプリングの手法について述べる。

### 2.2 PIV 測定法

Fig.2-1 に PIV 計測の原理の模式図を示す。トレーサ粒子(tracer particle)を混入した流体の計測面に対して 2 回 (時刻  $t$  と時刻  $t+\Delta t$ ) 瞬間的にレーザなどの光をシート状に照射し CCD



カメラ等で撮影する。2つの撮影画像からトレーサ粒子の移動量を求め、移動量と撮影の時間間隔からトレーサ粒子の移動速度を計算し流体の速度分布を求める [2-10]。

Fig.5-2 に基本的な PIV システムの構成例を示す。まず、あらかじめ流体中にトレーサ粒子を混入しておくか、トレーサ粒子を発生、供給する装置を必要とする。トレーサ粒子には通常比重が流体と近い微小な粒子を用いる。計測面の照明はレーザなどをシート状に照明し流れ場を2次的に光切断して可視化する。代表的な例では、小型のダブルパルス Nd:YAG レーザと光シートを形成するための光学レンズ系で構成され、計測面内のトレーサ粒子が瞬間的に2時刻連続して照明される。照明されたトレーサ粒子の画像は CCD カメラなどで撮影され、コンピュータの画像メモリ上に2時刻の画像として別々に記録される。照明の発光とカメラ撮影の同期にはシンクナイザーなどの同期装置が用いられる。画像メモリに記録されたトレーサ粒子画像は、高速演算機能をもつコンピュータなどの画像解析プログラムで解析され、速度分布が算出される。算出された速度分布から、後処理プログラムで誤ベクトルが除去され、最終的な瞬時の速度分布が求められる。

PIV の流速測定は、流れの可視化に用いられるトレーサ粒子が微小時間  $\Delta t$  に移動する距離を何らかの画像計測アルゴリズムで求め、その移動距離を  $\Delta t$  で除して流速を間接測定することである。Fig.2-3 はその概念図を示す。左図は時刻  $t$  における粒子画像の輝度値パターン、右図は時刻  $t+\Delta t$  における輝度値パターンである。画像計測で移動量ベクトル  $(\Delta X, \Delta Y)$  が得られると、撮像画像面と計測対象の物理平面の変換係数を  $k$  とすると、

$$(u, v) = k \left( \frac{\Delta X}{\Delta t}, \frac{\Delta Y}{\Delta t} \right) \quad (2-1)$$

より、速度ベクトル  $(u, v)$  を求めることができる [2-11]。

本研究で用いた PIV 計測では、この移動量ベクトル  $(\Delta X, \Delta Y)$  の計算に輝度値パターンを追跡するグレーレベル相関係数法 [2-12] を用いた。Fig.2-4 に、グレーレベル相関係数法による輝度値パターン移動量検出の概略図を示す。速度場を計測する計測面の画像には複数の計測点が設定され、第1画像の各計測点を中心に  $N \times N$  (pixel) の検査領域が設定される。検査の対象となる1検査点 A に対し第2画像の同じ検査点 A を中心とし  $N_s \times N_s$  (pixel) の探査す

る範囲である探査領域が設定され、検査領域と同サイズの候補領域  $N \times N$ (pixel)の中心を探査領域内で移動し第 1 画像の検査領域のグレーレベルパターンに最も近い候補領域 (2 つの領域間の相関係数の最も高い値をもつ領域) を求める。

2 つの領域間の相関係数  $C [g(x_2, y_2) | f(x_1, y_1)]$  は 下記の相関関係の式(2-2)によって計算される。ここで、 $f(x_1, y_1)$  は第 1 画像の検査領域のグレーレベルパターン、 $g(x_2, y_2)$  は第 2 画像の探査領域のグレーレベルパターンであり、 $x_1, y_1, x_2$  及び  $y_2$  は各グレーレベルパターンの  $x$  及び  $y$  方向のピクセル番号である。また、 $\bar{f}$  及び  $\bar{g}$  はそれぞれの領域のグレーレベル平均値を示す。

$$C[g(x_2, y_2) | f(x_1, y_1)] = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (f(i, j) - \bar{f})(g(i, j) - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (f(i, j) - \bar{f})^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (g(i, j) - \bar{g})^2}} \quad (2-2)$$

### 2.3 ハイブリッド・ステレオ PIV 測定法

ステレオ PIV 法では 2 台のカメラで同時に撮影するが、その 2 台のカメラ設置法による測定誤差が生じる。Fig.2-5 にカメラの設置例を示す。(a)はカメラを撮影対象に対し水平にした場合、(b)はカメラを撮影対象に対し仰角をつけた場合である。カメラを撮影対象に対し水平にした場合に比べ、仰角をつけた場合、撮影範囲は広くなり、また Fig.2-6 に示す通り外側方向 (カメラから手前-奥側の方向) に対し測定誤差を小さくすることができる。また、精度を向上させるためにカメラのレンズ収差および屈折の誤差を補正する必要があるが、この補正の方法として Doh らは「10 パラメータ法」[2-13]を提唱し、また、カメラに仰角をつける設置法と 10 パラメータ法を組み合わせた PIV 測定法をハイブリッド・ステレオ PIV と呼んでいる。本研究における流れの計測では、誤差を最小にするためハイブリッド・ステレオ PIV 法を用いた。

実際に測定対象のある物体座標系  $(X, Y, Z)$  とカメラで撮影した画像座標系  $(x, y)$  の関係図を Fig.2-7 に示す。測定対象である粒子の位置は、物体座標系では  $\mathbf{P}(X_m, Y_m, Z_m)$ 、画像座標系では  $\mathbf{P}'(x_c, y_c)$  と表す。「10 パラメータ法」用いる 10 個のパラメータは、6 つの外部パ

ラメータ  $\alpha, \beta, \gamma, dis, M_x$  及び  $M_y$  と、4つの内部パラメータ  $c_x, c_y, k_1$  及び  $k_2$  である。 $\alpha, \beta$  及び  $\gamma$  は Fig.2-8 に示す物体座標系  $(X, Y, Z)$  に対する画像座標系  $(x, y)$  の回転を表す。 $dis$  は Fig.2-7 に示す物体座標系の原点  $\mathbf{O}(0, 0, 0)$  とカメラ視点  $\mathbf{F}(X_0, Y_0, Z_0)$  の間の距離を示し、 $M_x$  及び  $M_y$  はカメラ視点  $\mathbf{F}$  の物体座標系  $X, Y$  成分である。 $c_x$  及び  $c_y$  は画像主点  $\mathbf{V}$  (画像座標における原点  $\mathbf{O}$  の対象位置) の画像座標系  $x, y$  成分である。 $k_1$  及び  $k_2$  はレンズひずみ係数である。物体座標系における粒子位置  $\mathbf{P}(X_m, Y_m, Z_m)$  を画像座標系  $\mathbf{P}'(x_c, y_c)$  で表すと、

$$\begin{aligned} x_c - \Delta x &= c_x \frac{X_m - M_x}{\sqrt{dis^2 - M_x^2 - M_y^2 - Z_m^2}} \\ y_c - \Delta y &= c_y \frac{Y_m - M_y}{\sqrt{dis^2 - M_x^2 - M_y^2 - Z_m^2}} \end{aligned} \quad (2-3)$$

となる。ここで  $\Delta x$  と  $\Delta y$  は、

$$\begin{aligned} \Delta x &= \frac{x_c}{r} (k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ \Delta y &= \frac{y_c}{r} (k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ r &= \sqrt{x_c^2 + y_c^2} \end{aligned} \quad (2-4)$$

である。式(2-3)の左辺を右辺に移項し、 $G_x$  と  $G_y$  で表す。

$$\begin{aligned} G_x &= c_x \frac{X_m - M_x}{\sqrt{dis^2 - M_x^2 - M_y^2 - Z_m^2}} - (x_c - \Delta x) \\ G_y &= c_y \frac{Y_m - M_y}{\sqrt{dis^2 - M_x^2 - M_y^2 - Z_m^2}} - (y_c - \Delta y) \end{aligned} \quad (2-5)$$

ここで 20 個の較正点を配置したキャリブレーション板を計測面に置き、各較正点の物体座標  $\mathbf{P}(X_m, Y_m, Z_m)$  を光学距離計で高精度に測定、さらに各カメラでキャリブレーション板を撮影し各較正点の画像座標系座標  $\mathbf{P}'(x_c, y_c)$  を求め、式(2-5)から最小二乗法を用いて各パラメータを求める。Fig.2-9 にキャリブレーション板の画像、Fig.2-10 に 10 パラメータにより補正した画像の例を示す。

ここで式(2-3)を変形し  $X_m, Y_m$  及び  $Z_m$  を表すと、

$$\begin{aligned}
X_m &= \frac{x_c - \Delta x}{c_x} e + M_x \\
Y_m &= \frac{y_c - \Delta y}{c_y} e + M_y \\
Z_m &= d - e \\
e &= \sqrt{dis^2 - M_x^2 - M_y^2} - Z_m \\
d &= \sqrt{dis^2 - M_x^2 - M_y^2}
\end{aligned} \tag{2-6}$$

となる。

一方、カメラ座標系から求めた物体座標の粒子位置  $\mathbf{P}(X_m, Y_m, Z_m)$  と物体座標系の三次元位置  $(X, Y, Z)$  の変換行列を  $\mathbf{M}_M$  とおき、

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} &= \mathbf{M}_M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \\
\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} &= \mathbf{M}_M^{-1} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2-7}$$

となる。ここで  $\mathbf{M}_M$  は

$$\mathbf{M}_M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2-8}$$

となる回転変換を示す行列である。ここで  $\mathbf{M}_M^{-1}$  の各要素を  $b_{11} \sim b_{33}$  で表し

$$\mathbf{M}_M^{-1} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \tag{2-9}$$

とすると、 $(X, Y, Z)$  は

$$\begin{aligned}
X &= \left( b_{11} \frac{x_c - \Delta x}{c_x} + b_{12} \frac{y_c - \Delta y}{c_y} - b_{13} \right) e + (b_{11} M_x + b_{12} M_y + b_{13} d) \\
Y &= \left( b_{21} \frac{x_c - \Delta x}{c_x} + b_{22} \frac{y_c - \Delta y}{c_y} - b_{23} \right) e + (b_{21} M_x + b_{22} M_y + b_{23} d) \\
Z &= \left( b_{31} \frac{x_c - \Delta x}{c_x} + b_{32} \frac{y_c - \Delta y}{c_y} - b_{33} \right) e + (b_{31} M_x + b_{32} M_y + b_{33} d)
\end{aligned} \tag{2-10}$$

となる。また、カメラ視点  $\mathbf{F}(X_0, Y_0, Z_0)$  は、

$$\begin{aligned}
X_0 &= b_{11} M_x + b_{12} M_y + b_{13} d \\
Y_0 &= b_{21} M_x + b_{22} M_y + b_{23} d \\
Z_0 &= b_{31} M_x + b_{32} M_y + b_{33} d
\end{aligned} \tag{2-11}$$

であり、式(2-10)は媒介変数を  $e$  で表したカメラ視点  $\mathbf{F}(X_0, Y_0, Z_0)$  と粒子を通る 1 つの直線方程式であり、媒介変数  $e$  の係数を  $a_x, a_y, a_z$  で表すと

$$(X, Y, Z) = (a_x e + X_0, a_y e + Y_0, a_z e + Z_0) \tag{2-12}$$

となる。これは、1 個の粒子に対する 1 台のカメラからの直線方程式である。2 台のカメラ A 及び B それぞれ 2 つの直線方程式  $\mathbf{A}(X_A, Y_A, Z_A)$  及び  $\mathbf{B}(X_B, Y_B, Z_B)$  は、

$$\begin{aligned}
(X_A, Y_A, Z_A) &= (a_{xA} e_A + X_{0A}, a_{yA} e_A + Y_{0A}, a_{zA} e_A + Z_{0A}) \\
(X_B, Y_B, Z_B) &= (a_{xB} e_B + X_{0B}, a_{yB} e_B + Y_{0B}, a_{zB} e_B + Z_{0B})
\end{aligned} \tag{2-13}$$

と表され、3 次元座標位置はこの 2 つの直線の交点である。  $e_A, e_B$  を最小二乗法によって求め、それぞれのカメラによる物体座標系の粒子位置  $(X_A, Y_A, Z_A)$  及び  $(X_B, Y_B, Z_B)$  を求める。物体座標系の粒子の 3 次元位置  $\mathbf{P}(X, Y, Z)$  は、2 台のカメラ A および B の粒子位置を用いて、

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left\{ \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} \right\} \tag{2-14}$$

となる。[2-14]

## 2.4 コンディショナル・サンプリング法

2.2 項及び 2.3 項で説明した PIV 測定法及びステレオ PIV 測定法では、通常数十回から数百回計測しその平均値を計測結果とする。このため運動する物体周りの流れを計測する場合、対象となる物体が特定の位置及び特定の姿勢などの状況である時に繰り返し PIV 画像を取得する必要がある。物体の位置や姿勢を検出し、PIV 計測システムへ画像取得のタイミングを出力するコンディショナル・サンプリングの手法が開発された。

筆者らの開発したコンディショナル・サンプリング・システムについて述べる。

管路を利用した空気搬送システムにおいて物体を搬送する場合、搬送物体の管内壁衝突による品質低下や搬送効率の問題があり[2-15]。特に棒状物体を搬送する場合、棒状物体の長軸が流路方向へ配向させることが課題となっており、筆者らは、空気搬送管路内の旋回流中で移動する棒状物体周りの流れについて、コンディショナル・サンプリング・ステレオ PIV 計測法で計測した[2-16] [2-17]。

実験装置を Fig.2-11 に示す。無色透明の亚克力製の鉛直管の上下に鉛直管の接線方向にノズルを取りつけ、上部ノズルからサクシヨンプローアーにより空気を吸引し、鉛直管内に旋回流を発生する。この鉛直管内の旋回流によりポリスチレン製の棒状物体を搬送し、その棒状物体の周りの空気の流れをステレオ PIV 計測法により計測する。

この場合、棒状物体が PIV 計測面を通過することに加えて棒状物体が配向しているか配向していないかを検出し、ステレオ PIV 計測システムに PIV 画像取得のタイミングを出力する必要がある。Fig.2-12(a)に棒状物体が配向している状態、Fig.2-12(b)に配向していない状態を示す。

棒状物体の PIV 計測面通過と配向性を検出するために、Fig.2-13 に示すように 4 つのセンサーから構成されるセンサーユニットをレーザーシートに対向するように設置した。Fig.2-13(b)に示したように棒状物体が 4 つのセンサー全てに反応した時、棒状物体は垂直に起立し、配向性を示しながら旋回していることを意味する。これは、センサーユニットの長さが、棒状物体の長さにほぼ相当するためである。また、Fig.2-13(b)に示したように反応したセンサーが 3 つ以下である時、棒状物体は配向性を示さずに旋回していることを意味

する。

この研究の結果、コンディショナル・サンプリング・ステレオ PIV 計測法により計測した速度分布から、配向している場合の棒状物体周りの流れの特徴や、速度分布をウェーブレット解析により空間周波数に分析した結果から配向している場合の流れと配向していない場合の流れの特徴の違いが明らかとなったとともに、コンディショナル・サンプリングの手法が確立された。

## 2.5 第 2 章 参考文献

- [2-1] Wu, J. and Sheridan, J., The wake of an orbiting cylinder, *Journal of Fluids and Structures*, Vol.11, (1997), pp.617-626.
- [2-2] Fujisawa, N., Ikemoto, K. and Nagaya, K., Vortex shedding resonance from a rotationally oscillating cylinder, *Journal of Fluids and Structures*, Vol.12, (1998), pp.1041-1053.
- [2-3] Adamczyk, A. A. and Rimai, L., Reconstruction of a 3-dimensional flow field from orthogonal views of seed track video images, *Experiments in Fluids*, Vol.6, (1988), pp.380-386.
- [2-4] Prasad, A. K. and Jensen, K., Scheimpflug stereocamera for particle image velocimetry in liquid flows, *Applied optics*, Vol.34, (1995), pp.7092-7099.
- [2-5] Doh, D.H., Hwang, T.G. and Saga, T., 3D-PTV measurements of the wake of a sphere, *Measurement Science and Technology*, Vol.15, (2004), pp.1059-1066.
- [2-6] Wu, J. and Sheridan, J., The wake of an orbiting cylinder, *Journal of Fluids and Structures*, Vol.11, (1997), pp.617-626.
- [2-7] Fujisawa, N., Ikemoto, K. and Nagaya, K., Vortex shedding resonance from a rotationally oscillating cylinder, *Journal of Fluids and Structures*, Vol.12, (1998), pp.1041-1053.
- [2-8] Hu, C. J., Zhou, Y. and Dalton, C., Effects of the corner radius on the near wake of a square prism, *Experiments in Fluids*, Vol.40, No.1, (2006), pp.106-118.
- [2-9] Fujisawa, N. and Shibuya, S., Observation of dynamic stall on darrieus wind turbine blades,

- Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 89, (2001), pp. 29-36.
- [2-10] 木村一郎, 植村知正, 奥野武俊, 可視化情報計測, 近代科学社 (2001)
- [2-11] (社)可視化情報学会 著, PIV ハンドブック, 森北出版株式会社 (2002)
- [2-12] Utami, T. and Blackwelder, R., A cross correlation technique for velocity field extraction from particulate visualization, *Exp. in Fluids*, Vol.10, (1991), pp.213-223.
- [2-13] Doh, D. H., Him, D. H., Cho, K. R., Cho, Y. B., Saga, T. and Kobayashi, T., Development of GA based 3D-PTV technique, *Journal. of Visualization*, Vol.5, (2002), pp.243-254.
- [2-14] Doh D.H., Hwang T.G. and Saga T., 3D-PTV measurements of the wake of a sphere, *Measurement Science and Technology*, Vol.15, (2004), pp.1059-1066.
- [2-15] 越智光昭, 武居昌宏, 水平管内固気二相流における最小輸送流速, *日本機械学会論文集 B 編*, Vol.62, No.600, (1996), pp.2978-2985.
- [2-16] Honda, M., Noguchi, T., Doh, D. H., Takei, M. and Ishii, S., Conditional Sampling Stereoscopic-PIV Measurement around Rotating and Revolving Cylinder in Internal Swirly Flow Generated by Tangential Suction Jet, *Journal of the Japan Society for Experimental Mechanics*, Vol.11, (2011), pp.41-46.
- [2-17] 本多正明, 野口常夫, 都徳照, 武居昌宏, 石井進, 接線方向噴流による管内旋回流中の棒状物体周囲流れの空間周波数解析, *噴流工学*, Vol.26, No.3, (2010), pp.19-27.



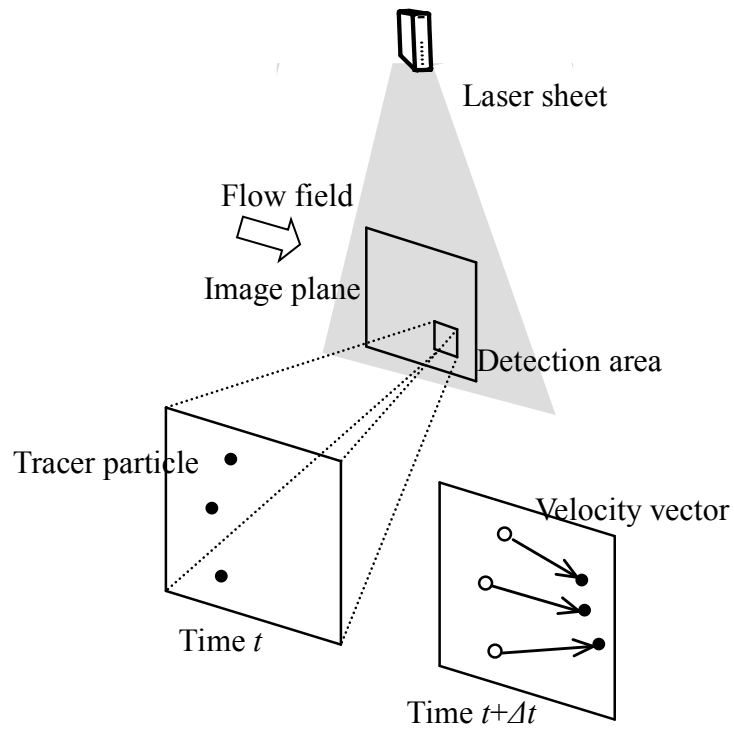


Fig.2-1 Theory of PIV

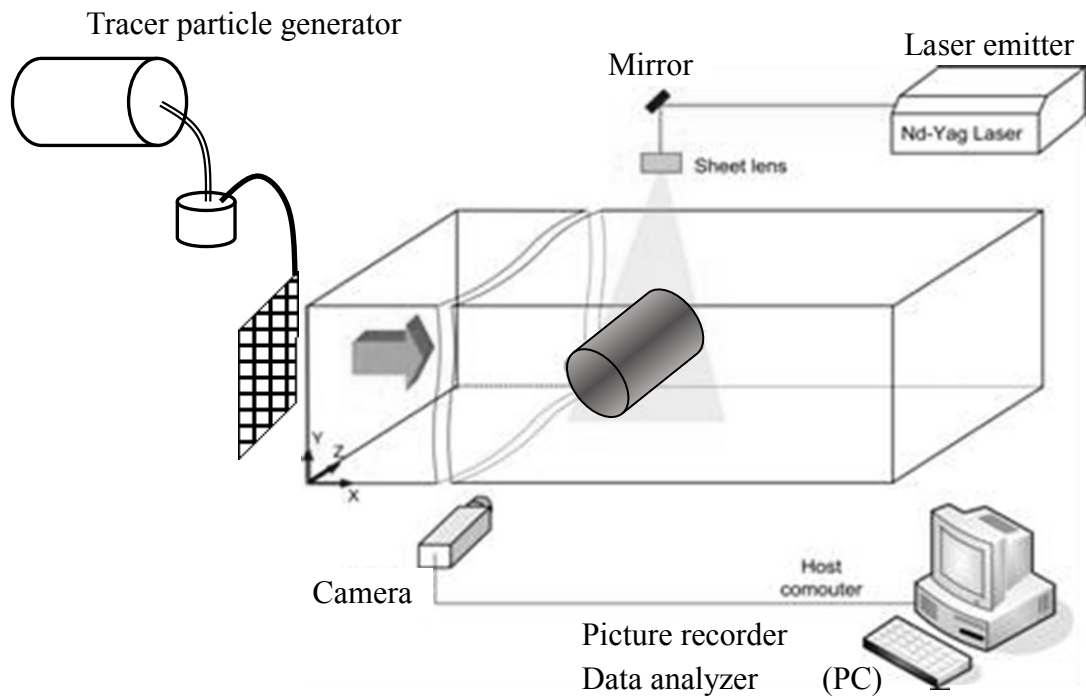


Fig.2-2 Outline and component of PIV system

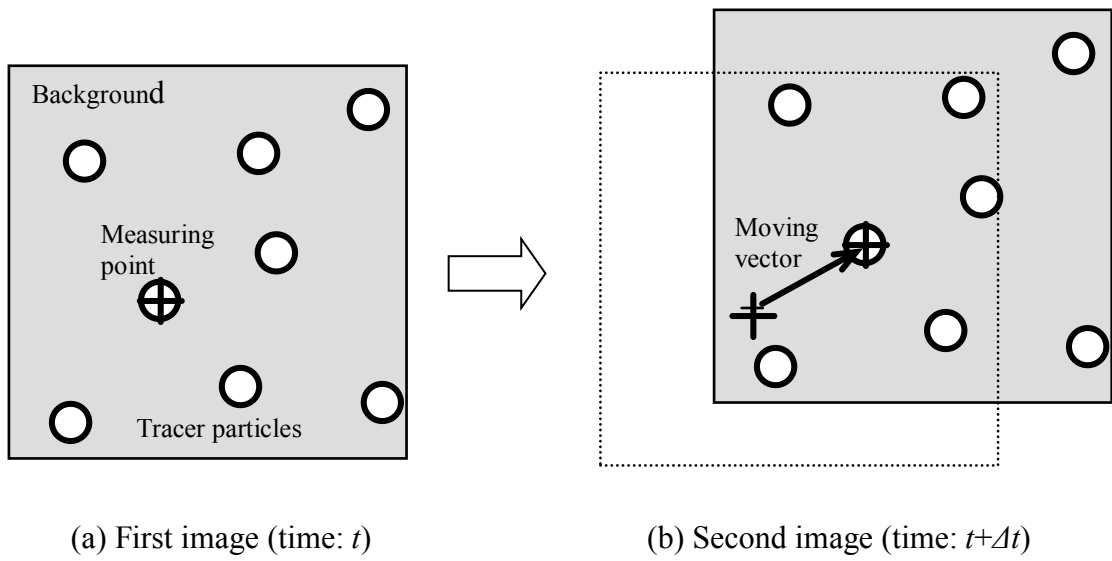


Fig.2-3 Image correlation method and particle trace method

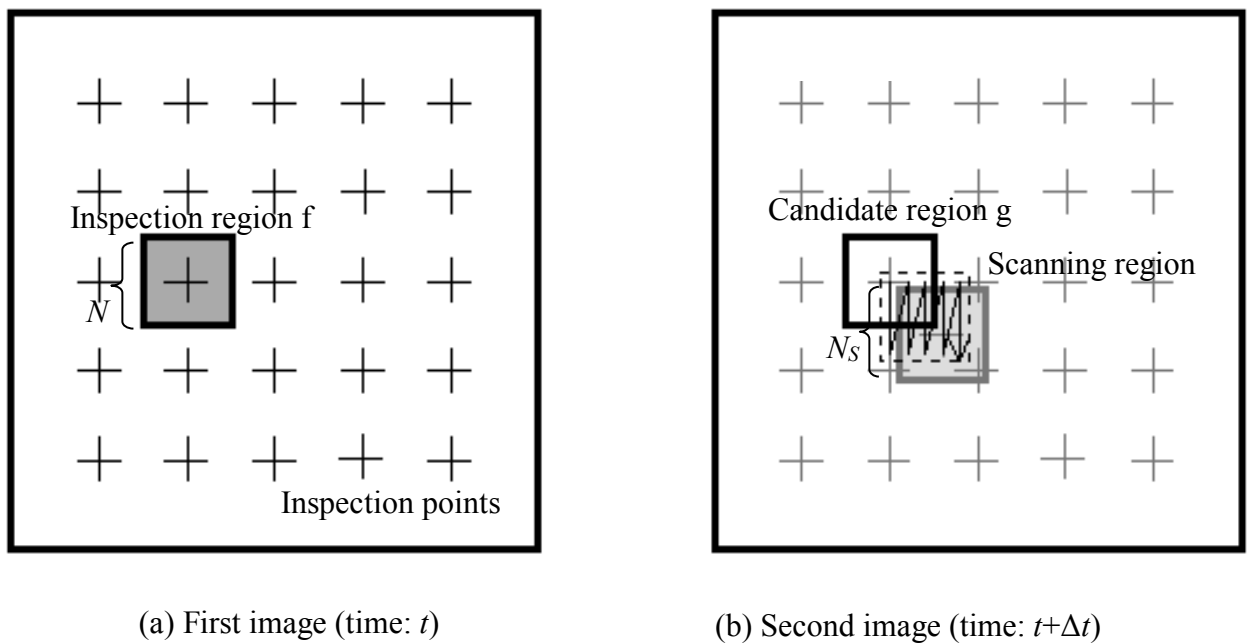


Fig.2-4 Gray level cross-correlation method

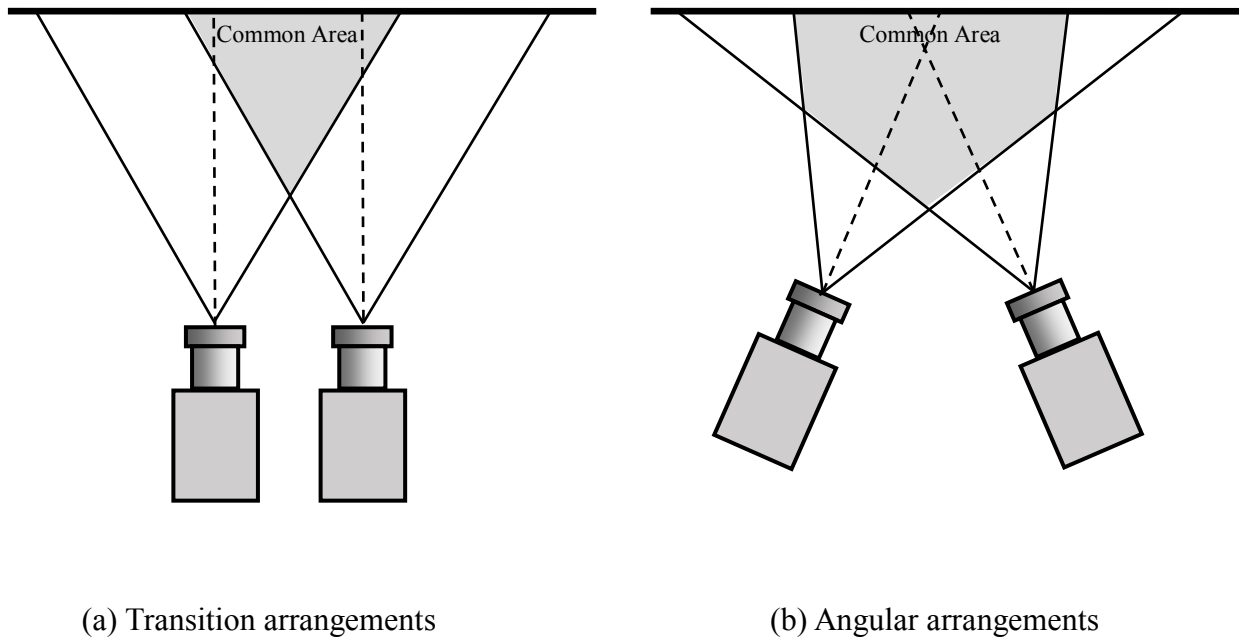


Fig.2-5 Camera arrangements

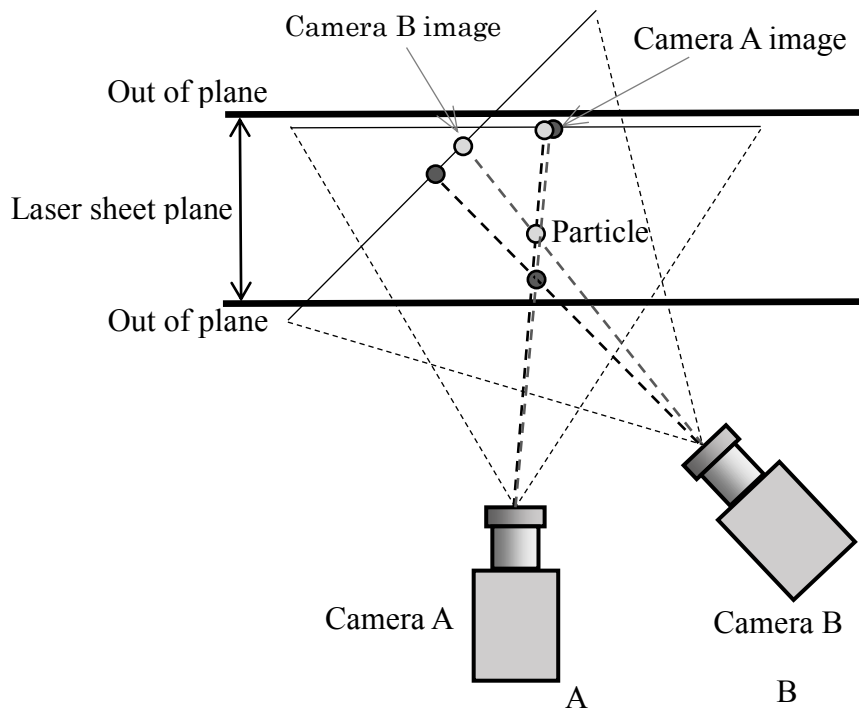


Fig.2-6 Cause of uncertainties bigger onto the out-of-plane direction

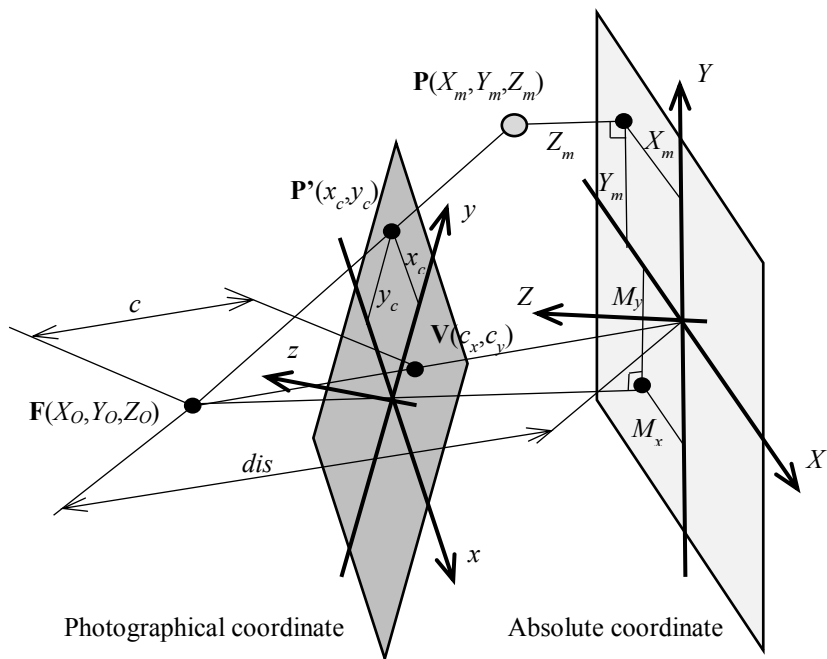


Fig.2-7 Camera parameters on the absolute coordinate and the photographic coordinate

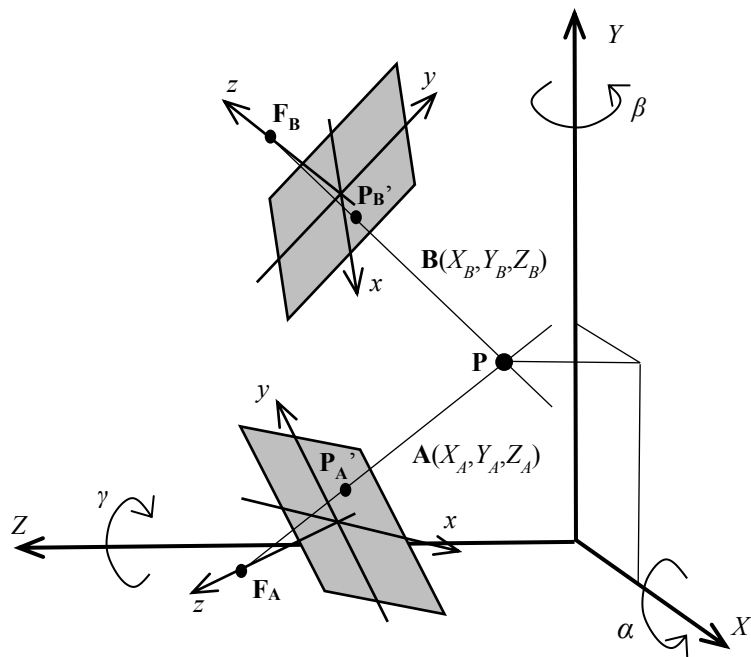
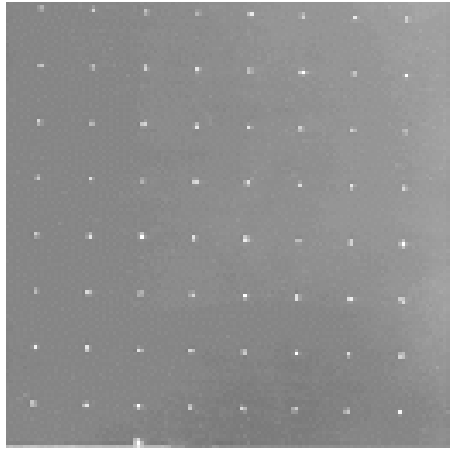
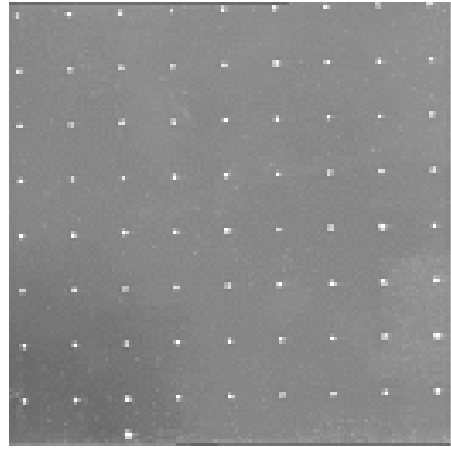


Fig.2-8 Photographical coordinate of Camera A & B

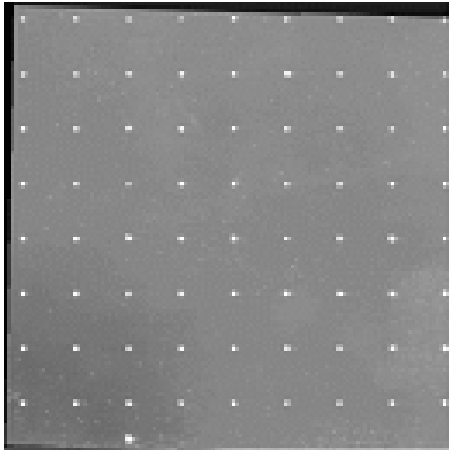


(a) Camera A

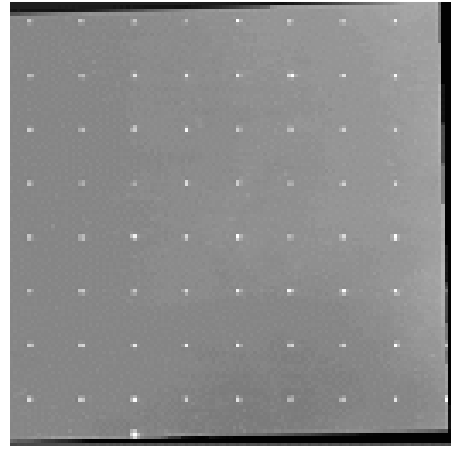


(b) Camera B

Fig.2-9 Calibrator image before transformation



(a) Camera A



(b) Camera B

Fig.2-10 Calibrator image after transformation

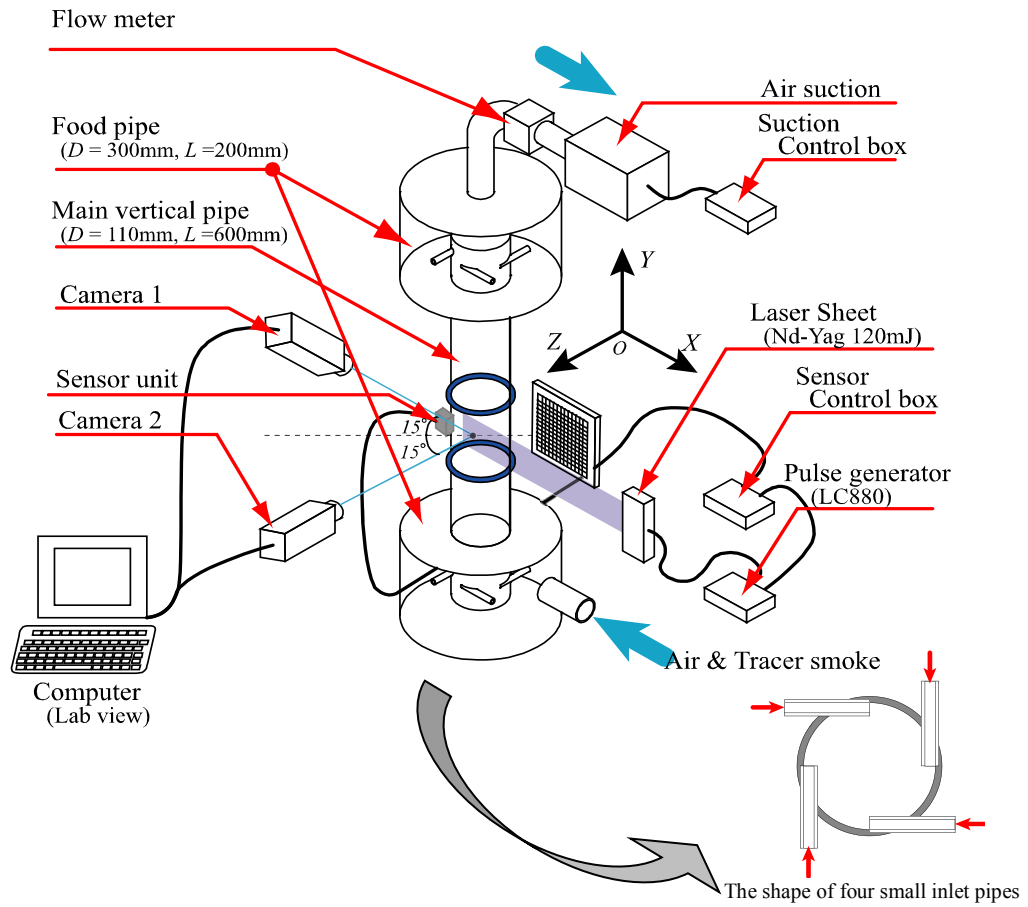


Fig.2-11 Experimental equipment of the pneumatic conveyance system

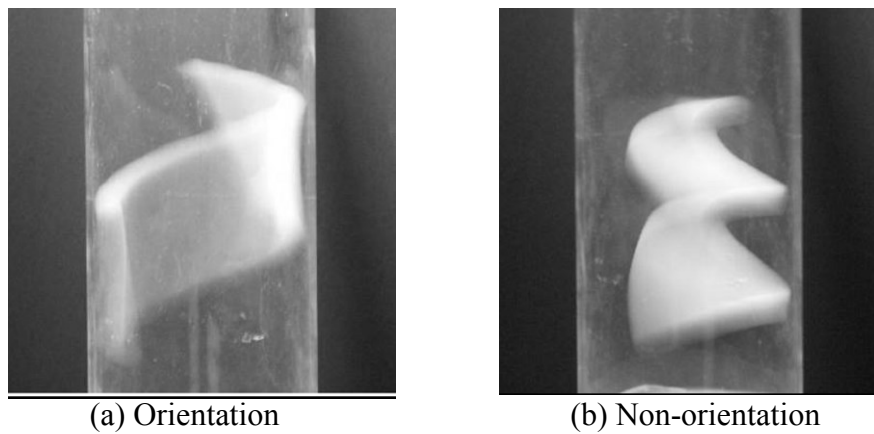


Fig.2-12 Pneumatic conveyance of cylindrical material

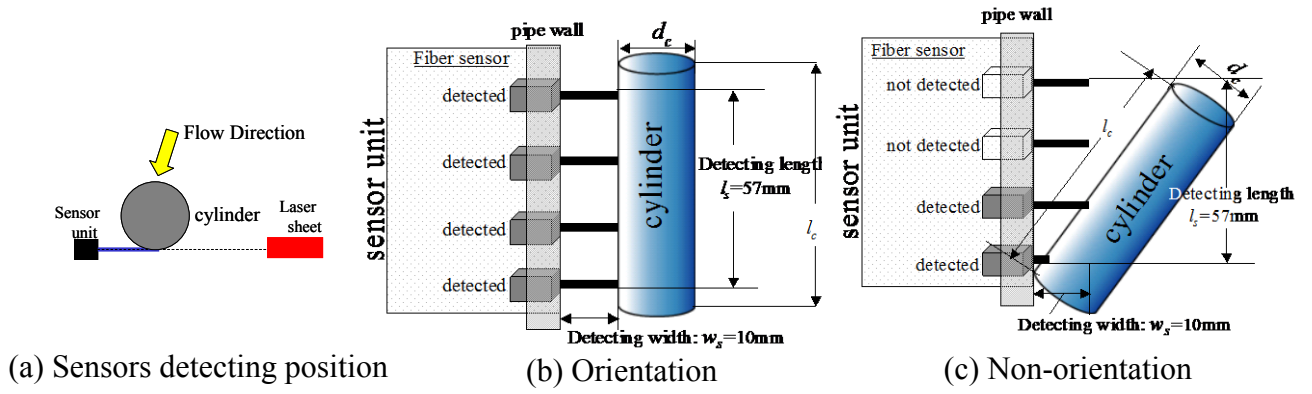


Fig.2-13 Conditional sampling method

## 第3章 後縁に切欠きのある翼型を用いた垂直軸型風車の性能の計算による検討

### 3.1 第3章の緒言

揚力型の起動特性の改善のため考案された揚力型風車に用いるブレードに通常の翼型の下面後縁側に切欠きのある翼型を持つハイブリッドブレード[3-1]に関しては、その翼型の特性は明らかにされており[3-2]、このブレードを用いた垂直軸型風車では従来の揚力型風車に比べて起動風速が改善し低風速において発電が可能となり、風の弱い条件においてより多くの電力量が得られることが実機の風洞試験により確認されている [3-3]。これらの研究による翼型の特性や実機の発電時周速比から、ハイブリッドブレードを用いた風車は抗力と揚力両方を利用しトルクを得ていると考えられている。しかし、実際に抗力と揚力のどちらからどの程度のトルクを得ているか、また、切欠きを設けたことによる抗力の増加による発電中における効果について、これまで確認されていない。

この章では、抗力型と揚力型の垂直軸型風車の作動原理から、抗力型、揚力型の特性を併せ持つ垂直軸型風車用ハイブリッドブレードの原理と特性を説明し、この翼型を用いた垂直軸型風車の特性について述べる。さらに、ハイブリッドブレードを用いた風車の性能を翼型の空力性能から計算により検討し、その問題点について議論する。

### 3.2 抗力型と揚力型の垂直軸型風車の作動原理

#### 3.2.1 抗力型（パドル型風車）の作動原理[3-4]

Fig.3-1 に回転運動を継続している抗力型の風車において、風車と翼の抗力の関係を示し、回転モーメントが生ずる原理を示す。抗力型風車の翼はその形状により、風上に向かうパドル3（風を前方から受ける）の抗力  $D_3$  に対し風下に向かうパドル1（風を後方から受ける）の抗力  $D_1$  が大きい。また、回転中の風車の場合、パドル2、パドル3において回転方向と逆方向に抗力が働く。これらの抗力の差によりトルク

$$T_R = (D_1 - D_2 - D_3 - D_4) l_a \quad (3-1)$$

が得られる。各パドルに発生する抗力は風速が同じでも回転数により変化する。回転数が



0 の場合、トルクにプラスとなるパドル 1 の抗力  $D_1$  は最も大きく、他のパドルの抗力  $D_2$ ,  $D_3$ ,  $D_4$  は最小となるため、得られる回転トルク  $T_R$  も最大となる。回転数が増加すると  $D_1$  は小さく他の翼の抗力  $D_2$ ,  $D_3$ ,  $D_4$  は大きくなりトルクは小さくなる。

このように抗力型の風車では、パドルが出力に寄与できるトルクを発生するのは風下に向かっている時だけであり、風上に向かっているときは出力を低下するトルクを発生している。このため、抗力型の風車は揚力型の風車に比べて効率は低い。また、回転数が大きくなるほど得られるトルク  $T_R$  が小さくなり、パドル型のような抗力のみでトルクを発生している場合、風車出力（トルクと回転数の積に比例）が最大となる周速比は 0.33 未満であり、揚力型の風車に比べて回転数は低い。

起動特性に関しては、風速が 0 m/s から徐々に増加すると、各パドルの抗力差によるトルク  $T_R$  が大きくなり、摩擦抗力等による風車の回転起動に必要なトルクに達した時、風車は回転を始め起動する。この時の風速を起動風速と呼んでいる。抗力型風車は回転数 0 のときトルク  $T_R$  が最大となるため、揚力型風車に比べて起動風速は低い。一般的にこれまでの抗力型の風車の起動風速は 1~3 m/s とされている[5-5]。

### 3.2.2 揚力型の風車（ジャイロミル型風車）の作動原理[3-4]

Fig.3-2 に回転運動を継続している揚力型の風車において、ブレードの各位置においてブレードに働く空気力（揚力と抗力）の回転方向成分力の関係を示し、トルクが生ずる原理を示す。

ブレードに当たる相対風の速度  $V_{rb}$  の速度  $V_W$  と風車の回転周速度による相対風  $V_R$  の合成によって得られる。

$$V_{rb} = V_W + V_R \quad (3-2)$$

迎角  $\alpha_B$  は、相対風  $V_{rb}$  レード（方向は  $V_R$  に等しい）のなす角度である。

$$\alpha_B = \angle(V_W, V_R) \quad (3-3)$$

相対風によりブレードに発生する空気力  $R$  の接線方向成分  $T_{Bn}$  ( $n=1\sim 4$ ) がトルク  $T_R$  を発生する。

$$T_R = (|T_{B1}| - |T_{B2}| - |T_{B3}| - |T_{B4}|) l_a \quad (3-4)$$

ここで、接線方向成分  $T_{Bn}$  で回転方向となっているのは空気力  $R$  の揚力成分  $L$  であり、抗力成分  $D$  は反回転方向となる。従って、ブレードに発生する空気力  $R$  の接線方向成分  $T_{Bn}$  が回転方向を向きトルク  $T_R$  の増加に寄与するためには、空気力  $R$  の揚力成分  $L$  が抗力成分  $D$  より十分に大きい必要があり、この条件となるには迎角  $\alpha$  が一定の範囲にある必要がある。迎角  $\alpha$  が小さくなると  $L$ ,  $D$  共に小さくなるが小さすぎると  $D$  より  $L$  のほうが小さくなってしまう。また、迎角  $\alpha_B$  が大きくなると  $D$  より  $L$  の方が大きくなるが、失速迎角を超えると、 $L$  が小さくなり  $D$  が大きくなる。迎角  $\alpha$  が小さい時は  $D$  が小さいため損失も小さいが、失速迎角を超えている時は  $D$  が大きく損失も大きくなる。各ブレードが全周にわたって失速せず、発生する空気力  $R$  がトルク  $T_R$  の増加に寄与するためには、ブレードの迎角  $\alpha_B$  を失速迎角より小さく保つ必要があり、そのためには周速比（回転数）が十分に大きい必要がある。

揚力型の風車では周速比が十分大きい場合、各ブレードがほぼ全周にわたり揚力を発生し発電に寄与できるトルクを発生するため、抗力型の風車に比べて効率は高い。また、抗力型の風車に比べて最大出力を得ることができる周速比は大きい。

揚力型風車において、回転が停止している状態において起動時に得られるトルクは、揚力によるトルクはほぼ 0 に近く、ほとんど抗力型と同じブレードの抗力差による回転モーメントしか得られない。従来の揚力型風車のブレードの翼型の形状では、翼の前縁側から風を受ける場合の形状抗力と後縁側から風を受ける場合の形状抗力の抗力差は小さく、それにより生じる回転モーメントは小さい。このため、風車の回転起動に必要な回転モーメントを得るためには大きな風速が必要となり、抗力型に比べて起動風速は大きくなる。一般的に従来の揚力型の風車の起動風速は 5~8 m/s とされている[3-5]。

さらに、実際の風車において発電に利用する場合、発電機の起動や発電に必要な回転モーメント以上の回転モーメントを発生し周速比が 1 以上まで達するためには、ある程度以上の風速が必要となる。特に、起動風速付近で十分に回転が加速しない場合は、揚力による回転モーメントはほぼ 0 に近く、ほとんど抗力型と同じブレードの抗力差による回転モ

ーメントしか得られない。従って風速が小さい条件においては、十分な周速比まで加速することはできず抗力型に比べて効率は低くなる。

### 3.2.3 抗力型と揚力型の風車の特性の比較

抗力型と揚力型の風車の特性について比較してまとめると下記の通りとなる。

- |                |        |        |
|----------------|--------|--------|
| ① 起動風速；        | 抗力型（小） | 揚力型（大） |
| ② 周速比が小さい時の効率； | 抗力型（大） | 揚力型（小） |
| ③ 周速比が大きい時の効率； | 抗力型（小） | 揚力型（大） |

十分な風速が得られる場合、効率の良い揚力型の風車の方が有利であるが、低風速の条件下においては起動風速が小さく効率の良い周速比が小さくそこまで達するのに有利な抗力型の風車の方が発電に有利であると言える。

## 3.3 抗力型、揚力型の特性を併せ持つ垂直軸型風車

### 3.3.1 ハイブリッドブレードの原理

従来の翼型の翼を使用した揚力型の風車では、抗力型の風車と比較して起動風速が高く、微・低風速域での効率が低い。揚力型の風車の最大の欠点である高い起動風速を低くするためには、微・低風速域において起動に必要な回転モーメントを生じさせる事が必要であり、翼の前縁からの風による形状抗力と、後縁からの風による形状抗力差を大きくする事が必要である。

このため、Fig.3-3 に示す従来の揚力型風車に用いられたブレード翼型の「下面後縁側を切欠いた翼型」が考案された[3-1] [3-3]。この「下面後縁側の切欠き」によりブレードの後縁側からの風による形状抗力が増加し、起動風速が小さくなりかつ周速比が小さい状況下で相対風を後縁側から受けるブレードが発生する抗力によるトルクが増加する。

### 3.3.2 ハイブリッドブレード翼型の空力特性

ハイブリッドブレード翼型を発明した野口らは、この翼型の空力特性を調べるため、切

欠きがない翼型と切欠きがある翼型について風洞実験により翼表面の圧力分布を計測し、それらの空力性能を比較する実験を行った[3-2]。その結果、前縁から相対風が当たる迎え角  $\alpha_B=0^\circ$  では抗力係数の増加は 0.03 であり一方、後縁から相対風が当たる迎え角  $\alpha_B=180^\circ$  付近で抗力係数が 0.13 程度増加し、この翼型を垂直軸型風車に使用することが有効であることが確認された。

### 3.3.3 ハイブリッドブレードを用いた垂直軸型風車の形状の特徴と性能

ハイブリッドブレードを用いた垂直軸型風車の形状については、ブレードの翼型の特徴に加えて風車ブレード回転面の面積に対するブレードの総面積の比であるソリディティの大きさに特徴がある。通常の高揚力型風車のソリディティは 0.1 から 0.2 である[3-4]が、ハイブリッドブレードを用いた垂直軸型風車では 0.3 から 0.4 である[3-3]。

野口らは、切欠きがない翼型、切欠きがある翼型それぞれのブレードを用いた風力発電機の実機を風洞実験に供し、その起動特性と発電出力を比較することによって、ハイブリッドブレードの実用性について確認した[3-3]。この結果、通常の高揚力型翼型のブレードを用いた風力発電機では起動風速が 4.55m/s、風速 6m/s 以上で発電できたのに対し、ハイブリッドブレードを用いた風力発電機では起動風速が 1.17m/s、風速 4m/s 以上で発電が可能となった。この実験結果の起動風速や発電出力の数値には、発電機や風車構造などの要因が含まれていることを留意する必要があるが、風力発電機にハイブリッドブレードを用いることにより起動特性が改善し、風速が低い状況では、より多くの電力量が得られることが確認できた。

また、この風洞実験による、風力発電機の風車の周速比は、0.8~1.2 程度であり、この値は高揚力型風車の周速比 0.3 程度と高揚力型風車の周速比 3~5 の間となる。この周速比は、高揚力型の風車ではあり得ない回転数を示し、通常の高揚力型風車の最適周速比としては低すぎる値である。

### 3.4 ハイブリッドブレードを用いた垂直軸型風車の性能

#### 3.4.1 性能の検討に用いる翼型の空力特性

本研究で用いるハイブリッドブレード翼型の空力特性（迎え角  $\alpha_B$ —揚力係数  $C_L$ , 抗力係数  $C_D$ ）には、野口らの実験[3-2]により得られた Fig.3-4 に示す空力特性データを用いる。この空力特性データは、Riegels の実験結果（NACA0012 の迎え角  $0^\circ \sim 360^\circ$  の範囲のデータ）[3-6]に野口らの行った風洞実験結果による抗力の変化分を加えることによって得られた。(a)は迎え角  $\alpha_B$  に対する揚力係数  $C_L$  及び抗力係数  $C_D$ 、(b)は(a)から求めた迎え角  $\alpha_B$  に対する接線力係数の変化であり、青色線のデータは揚力による接線力  $C_{TL}$ 、赤色線は抗力による接線力  $C_{TD}$ 、黒色線は両者の合計  $C_T$  である。接線力は発電に有効なトルクを発生する方向を正とする。

この図より発電量を減少する接線力（負の接線力）を発生する迎え角  $\alpha_B$  の範囲は、 $-20^\circ \sim -60^\circ$ ,  $-5^\circ \sim 5^\circ$ ,  $20^\circ \sim 60^\circ$  である。また、迎え角  $-90^\circ \sim 90^\circ$  において発生する正のトルクは揚力に起因し、迎え角  $-90^\circ \sim -180^\circ$  及び迎え角  $90^\circ \sim 180^\circ$  において発生する正のトルクは抗力に起因するものであり、迎え角  $150^\circ \sim 180^\circ$  の範囲ではハイブリッドブレード翼型の切欠きにより抗力に起因するトルクを増加する効果がある。

#### 3.4.2 ブレードが発生する接線力の計算

ハイブリッドブレードを用いた風車の性能を検討するため、他のブレードの干渉や伴流の影響を全く受けない一様流中[3-4]で回転する1枚のブレードを仮定し、そのブレードに発生する接線力を翼型の空力特性から計算し議論する。

垂直軸型風車の性能の大きな要因である周速比  $J$  は、主流速度とブレードの周速度  $v_s$  の比であり

$$J = \frac{v_s}{V} \quad (3-5)$$

であらわされる。主流速度  $V$  の一様流中を周速度  $v_s$  で回転するブレードの迎え角  $\alpha_B$  及び相対速度  $v_{rb}$  を Fig.3-5 に示す。ブレードの回転位置  $\theta$  は一番上流側にある位置を  $0$  とし、

ブレード回転方向を正とする。ブレードの迎え角  $\alpha_B$  は、風車内側方向を正とする。ブレードの迎え角  $\alpha_B$  は、ブレードの回転位置  $\theta$  に対し、

$$\begin{aligned}\alpha_B &= -\tan^{-1} \frac{V \cos \theta}{v_s - V \sin \theta} \\ &= -\tan^{-1} \frac{\cos \theta}{J - \sin \theta}\end{aligned}\tag{3-6}$$

である。相対速度比  $v_{rb}$  は、

$$v_{rb} = \sqrt{V^2 + v_s^2 - 2Vv_s \sin \theta}\tag{3-7}$$

であり、相対速度比  $v_{rb}/V$  は、

$$\frac{v_{rb}}{V} = \sqrt{1 + J^2 - 2J \sin \theta}\tag{3-8}$$

である。

また、迎え角  $\alpha_B$  の時の揚力  $L$ 、抗力  $D$  と接線力  $T$  の関係について Fig.3-6 に示す。接線力係数  $C_T$  は、揚力成分による接線力係数  $C_{TL}$  と抗力成分による接線力係数  $C_{TD}$  の和である。

$$C_T = C_{TL} + C_{TD}\tag{3-9}$$

揚力成分による接線力係数  $C_{TL}$  及び抗力成分による接線力係数  $C_{TD}$  は、

$$C_{TL} = C_L \sin \alpha_B\tag{3-10}$$

$$C_{TD} = -C_D \cos \alpha_B\tag{3-11}$$

となる。ここで接線力係数  $C_T$  はブレードの空力特性によるものでその無次元化は個々のブレードの相対速度によるものであるが、その相対速度はブレードの回転位置  $\theta$  により変化する。そこで、ブレードの回転位置  $\theta$  による接線力の変化を議論するため、個々のブレードに発生する接線力の無次元化に無次元化に主流速度とブレード1枚の面積を用いた風車ブレード接線力係数  $C_{Tb}$  を定義する。風車ブレード接線力係数  $C_{Tb}$  は接線力係数  $C_T$  に主流速度  $V$  とブレードの相対速度  $v_{rb}$  の比（相対速度比  $v_{rb}/V$ ）の二乗をかけたものとなる。

$$C_{Tb} = \left( \frac{v_{rb}}{V} \right)^2 C_T\tag{3-12}$$

回転位置  $\theta=0^\circ \sim 360^\circ$  全周の風車ブレード接線力係数  $C_{Tb}$  の平均値の値が正であれば主流中を回転するブレードが発電に有効なトルクを発生し、負である場合はブレードが発電に有効なトルクを発生せずエネルギーを消費していることを示す。

### 3.4.3 接線力の計算結果の検討

本論文において垂直軸型風車の性能の大きな要因となっている周速比  $J$  の標本値として  $J=0.5, 1.0, 1.5$  及び  $2.0$  の4つを用いる。

周速比  $J=0.5$  における接線力の計算結果を Fig.3-7 に示す。Fig.3-7 において、(a)はブレードの回転位置  $\theta$  によるブレードの迎え角  $\alpha_B$  の変化、(b)は相対速度  $v_{rb}$ 、(c)は揚力係数  $C_L$  (青線) 及び抗力係数  $C_D$  (赤線)、(d)は揚力成分による接線力係数  $C_{TL}$  (青線)、抗力成分による接線力係数  $C_{TD}$  (赤線) 及び両者の和である接線力係数  $C_T$  (黒線)、(e)は風車ブレード接線力係数  $C_{Tb}$  である。また、周速比  $J=1.0, 1.5, 2.0$  における接線力の計算結果を同様にそれぞれ Fig.3-8, Fig.3-9, Fig.3-10 に示す。

#### (1) 周速比 $J=0.5$ (Fig.3-7 参照)

ブレードの周速度が主流速度より遅いため、迎え角  $\alpha_B$  (a)が大きく変化する。回転位置  $\theta$  が  $360^\circ$  一周する間に主流のブレードからの相対方向が一周する。迎え角が大きく変化するため、揚力係数  $C_L$  及び抗力係数  $C_D$  (c)も大きく変化する。特に、迎え角が  $\alpha=0^\circ$  及び  $\alpha=180^\circ$  ( $-180^\circ$ )となる回転位置  $\theta=90^\circ$  及び  $\theta=270^\circ$  付近では揚力係数  $C_L$  の変化率が非常に大きい。回転位置  $\theta=30^\circ \sim 150^\circ$  で、迎え角  $\alpha$  は  $+90^\circ$  以上 ( $-90^\circ$  以下) であり、ブレードの後縁側から主流を受けている。

相対速度比  $v_{rb}/V$  (b)は、後縁から主流を受ける回転位置  $\theta=90^\circ$  にて最小  $v_{rb}/V=0.5$ 、前縁から主流を受ける回転位置  $\theta=270^\circ$  にて最大  $v_{rb}/V=1.5$  となる。

揚力成分による接線力係数  $C_{TL}$  及び抗力成分による接線力係数  $C_{TD}$ (d)両者は正負相反して大きく変化するが、そのわずかの差が接線力係数  $C_T$  の値(d)の変化となっている。回転位置  $\theta=320^\circ$  ( $-40^\circ$ ) $\sim 160^\circ$  において正の接線力となっているが、接線力係数の成分に注目すると、回転位置  $\theta=320^\circ$  ( $-40^\circ$ ) $\sim 30^\circ$  では揚力成分よるものであるのに対し、 $\theta=30^\circ \sim 160^\circ$

では抗力成分によるものである。それ以外の回転位置  $\theta=320^\circ$  ( $-40^\circ$ ) $\sim 30^\circ$  では、揚力成分による接線力係数が正の値、抗力成分による接線力係数が負の値となっており、両者の大小により接線力の正負が決まる。回転位置  $\theta=160^\circ \sim 250^\circ$  及び回転位置  $\theta=280^\circ \sim 320^\circ$  における接線力の値は負、回転位置  $\theta=250^\circ \sim 280^\circ$  の間において接線力は正負大きく変化する。回転位置  $\theta=90^\circ$  及び  $\theta=270^\circ$  付近では揚力係数  $C_L$  の変化率が非常に大きいため、接線力も正負大きく変化する。

以上のことから、周速比  $J=0.5$  のケースにおいては、回転位置  $\theta=30^\circ \sim 160^\circ$  で抗力により正の接線力を得ているが、その他の回転位置で発生している正の接線力は揚力によるものである。

トルク発生の変化を表す風車ブレード接線力係数  $C_{Tb}$  (e)は、接線力係数  $C_T$  に対し相対速度の小さい回転角位置  $\theta=90^\circ$  付近では縮小され、相対速度の大きい回転角位置  $\theta=270^\circ$  付近では増大される。このため、正の接線力を継続して発生している回転位置  $\theta=320^\circ$  ( $-40^\circ$ ) $\sim 160^\circ$  の区間における風車ブレード接線力係数の値に対し、接線力が正負大きく変化する回転位置  $\theta=160^\circ \sim 320^\circ$  における値の方が大きくなる。特に主流下流側の回転位置  $\theta=160^\circ \sim 250^\circ$  では広い範囲で負の風車ブレード接線力係数の値が大きく、損失がもっとも大きい領域である。回転位置  $\theta=0^\circ \sim 360^\circ$  全周の風車ブレード接線力係数の平均値  $C_{Tb(ave.)}$  は約  $-0.002$  である。全周の風車ブレード接線力係数の平均値が負の値となることは、主流中を回転するブレードが発電に有効なトルクを発生していないことを示す。

## (2) 周速比 $J=1.0$ (Fig.3-8 参照)

ブレードの周速度は主流速度と等しく、迎え角  $\alpha_B$  (a)は周速比  $J$  が 1.0 未満のケースとは異なり  $-90^\circ \sim +90^\circ$  の範囲で変化する。回転位置  $\theta=90^\circ$  において迎え角  $\alpha$  が  $-90^\circ$  から  $+90^\circ$  へ不連続に変化する。これは、回転位置  $\theta=90^\circ$  より手前では相対流がブレードの上面（風車の外側面）から当たるのに対し回転位置  $\theta=90^\circ$  より後では相対流がブレードの下面（風車の内側面）から当たるためである。回転位置  $\theta=90^\circ$  においては、相対流は 0 となっている。 $J$  が 1.0 未満のケースのように相対流を後縁側から受けることはないが、迎え角  $\alpha_B$  が  $-90^\circ \sim +90^\circ$  の範囲で変化するため、揚力係数  $C_L$  及び抗力係数  $C_D$  (c)も大きく変化する。



特に、迎え角の変化が不連続である回転位置  $\theta=90^\circ$  では揚力係数  $C_L$  変化も不連続であり、迎え角が  $\alpha_B=0^\circ$  となる回転位置  $\theta=270^\circ$  付近では揚力係数  $C_L$  の変化率が非常に大きい。

相対速度比  $v_{rb}/V$  (b)は、後縁から主流を受ける回転位置  $\theta=90^\circ$  にて最小  $v_{rb}/V=0.0$ 、前縁から主流を受ける回転位置  $\theta=270^\circ$  にて最大  $v_{rb}/V=2.0$  となり、相対速度比の変化は  $J=0.5$  のケースに比べて大きい。

回転位置  $\theta=0^\circ \sim 360^\circ$  全周にわたり揚力成分による接線力係数  $C_{TL}(d)$ は正值、抗力成分による接線力係数  $C_{TD}(d)$ は負値であり、両者のわずかの差が接線力係数  $C_T$  の値(d)の変化となっている。従って、周速比  $J=1.0$  のケースにおいて発生している正の接線力は揚力によるものである。接線力係数の値は、回転位置  $\theta=340^\circ (-20^\circ) \sim 110^\circ$  において正、回転位置  $\theta=110^\circ \sim 240^\circ$  において負、回転位置  $\theta=240^\circ \sim 260^\circ$  の間においては正負大きく変化、回転位置  $\theta=240^\circ \sim 340^\circ$  においては負である。回転位置  $\theta=270^\circ$  付近では周速比  $J=0.5$  のケースと同様に揚力係数  $C_L$  の変化率が非常に大きいため、接線力も正負大きく変化する。全体として、接線力係数の値が正となる範囲は周速比  $J=0.5$  のケースに比べて狭い。

相対速度の変化が周速比  $J=0.5$  のケースに比べて大きいため、トルク発生の変化を表す風車ブレード接線力係数  $C_{Tb}$  (e)の接線力係数  $C_T$  に対する縮小増大の比率は周速比  $J=0.5$  のケースに比べて大きい。正の接線力を継続して発生している回転位置  $\theta=340^\circ (-20^\circ) \sim 110^\circ$  の区間における風車ブレード接線力係数の値に対し、接線力が正負大きく変化する回転位置  $\theta=110^\circ \sim 340^\circ$  における値の方が大きい。特に主流下流側の回転位置  $\theta=110^\circ \sim 240^\circ$  では広い範囲で負の風車ブレード接線力係数の値が大きく、損失がもっとも大きい領域である。回転位置  $\theta=0^\circ \sim 360^\circ$  全周の風車ブレード接線力係数の平均値  $C_{Tb(ave.)}$ は約-0.047 である。平均値の値が負であることは主流中を回転するブレードが発電に有効なトルクを発生していないことを示し、その負の値が周速比  $J=0.5$  のケースに比べて大きいことはエネルギーをより消費し悪化していることを示す。

### (3) 周速比 $J=1.5$ (Fig.3-9 参照)

ブレードの周速度は主流速度より大きく、迎え角  $\alpha_B$  (a)は周速比  $J=1.0$  のケースより狭い範囲  $-42^\circ \sim +42^\circ$  で変化する。周速比  $J=1.0$  のケースであったような不連続な変化はない。

迎え角の変化の範囲が周速比  $J=1.0$  のケースより狭いため、揚力係数  $C_L$  及び抗力係数  $C_D$  (c) の変化の範囲も周速比  $J=1.0$  のケースより狭い。迎え角が  $\alpha_B=0^\circ$  となる回転位置  $\theta=90^\circ$  及び  $\theta=270^\circ$  付近では揚力係数  $C_L$  の変化率が非常に大きい。

相対速度比  $v_{rb}/V$  (b) は、ブレードの周速度が主流と同方向となる回転位置  $\theta=90^\circ$  にて最小  $v_{rb}/V=0.5$ 、周速度が主流と反対方向となる回転位置  $\theta=270^\circ$  にて最大  $v_{rb}/V=2.5$  となり、相対速度比の変化は  $J=1.0$  のケースよりさらに大きい。

周速比  $J=1.0$  のケースと同様に、回転位置  $\theta=0^\circ \sim 360^\circ$  全周にわたり揚力成分による接線力係数  $C_{TL}(d)$  は正值、抗力成分による接線力係数  $C_{TD}(d)$  は負値であり、両者のわずかの差が接線力係数  $C_T$  の値(d)の変化となっている。このケースにおいても、発生している正の接線力は揚力によるものである。接線力係数の値は、迎え角が  $\alpha=0^\circ$  付近で変化する回転位置  $\theta=90^\circ$  及び  $\theta=270^\circ$  付近で、揚力係数  $C_L$  の変化率が非常に大きいため、接線力も正負大きく変化する。これらの接線力が大きく変化している範囲外で接線力が正の値となるのは、回転位置  $\theta=10^\circ \sim 60^\circ$  の範囲だけであり、接線力係数の値が正となる範囲は周速比  $J=1.0$  のケースに比べてさらに狭くなる。

相対速度の変化は周速比  $J=1.0$  ケースと同様に 2.0 の幅があるが最大値が 2.5 と大きくなり、トルク発生の変化を表す風車ブレード接線力係数  $C_{Tb}$  (e) の接線力係数  $C_T$  に対する増大の比率が大きくなる。正の接線力を継続して発生している回転位置  $\theta=10^\circ \sim 60^\circ$  の範囲及び接線係数が大きく変化している回転位置  $\theta=90^\circ$  付近の風車ブレード接線力係数は縮小され、その他の領域では拡大され特に回転位置  $\theta=270^\circ$  付近の風車ブレード接線力係数は非常に大きく変化する。特に主流下流側の回転位置  $\theta=100^\circ \sim 230^\circ$  では広い範囲で負の風車ブレード接線力係数の値が大きく、損失がもっとも大きい領域である。回転位置  $\theta=0^\circ \sim 360^\circ$  全周の風車ブレード接線力係数の平均値は、約 -0.083 であり、周速比  $J=1.0$  のケースに比べてさらに大きくエネルギーをより消費し悪化していることを示す。

#### (4) 周速比 $J=2.0$ (Fig.3-10 参照)

ブレードの周速度はさらに大きくなり、迎え角  $\alpha_B$  (a) は周速比  $J=1.5$  のケースよりさらに狭い範囲  $-30^\circ \sim +30^\circ$  で変化している。迎え角の変化の範囲及び揚力係数  $C_L$  及び抗力係数

$C_D$  (c)の変化の範囲も周速比  $J=1.5$  のケースより狭い。周速比  $J=1.5$  のケースと同様に、迎え角が  $\alpha_B=0^\circ$  となる回転位置  $\theta=90^\circ$  及び  $\theta=270^\circ$  付近では揚力係数  $C_L$  の変化率が非常に大きい。

相対速度比  $v_{rb}/V$  (b)の最大値は  $J=1.5$  のケースよりさらに大きく、ブレードの周速度が主流と同方向となる回転位置  $\theta=90^\circ$  にて最小  $v_{rb}/V=1.0$ 、周速度が主流と反対方向となる回転位置  $\theta=270^\circ$  にて最大  $v_{rb}/V=3.0$  となる。

周速比  $J=1.0, 1.5$  のケースと同様に、回転位置  $\theta=0^\circ \sim 360^\circ$  全周にわたり揚力成分による接線力係数  $C_{TL}(d)$  は正值、抗力成分による接線力係数  $C_{TD}(d)$  は負値であり、両者のわずかの差が接線力係数  $C_T$  の値(d)の変化となっている。接線力係数の値については、迎え角が  $\alpha_B=0^\circ$  付近で変化する回転位置  $\theta=90^\circ$  及び  $\theta=270^\circ$  付近で、揚力係数  $C_L$  の変化率が非常に大きいため接線力も正負大きく変化し、この部分で接線力が正の値となっている範囲があるが、その他の範囲では接線力は負の値である。接線力係数の値が正となる範囲は非常に狭い。回転位置  $\theta=0^\circ \sim 360^\circ$  全周の風車ブレード接線力係数の平均値  $C_{Tb(ave.)}$  は約-0.099 であり、周速比  $J=1.5$  のケースに比べてさらに悪化している。

##### (5) パワー係数 $C_P$

(1)から(4)の計算結果から、回転位置  $\theta=0^\circ \sim 360^\circ$  全周の風車ブレード接線力係数の平均値はすべて負の値となっており、一様流中において周速比が  $J=0.5 \sim 2.0$  のケースではブレードが発電に有効なトルクを発生していないことが明らかとなった。ここで、風車の発電能力で議論するため周速比によるパワー係数の変化を計算により求めた。パワー係数  $C_P$  は次式で表される風車の効率を表す係数である。

$$P_{WM} = \frac{1}{2} \rho V^3 S C_P \quad (3-13)$$

ここで、 $P_{WM}$  は風車の出力、 $\rho$  は空気密度、 $V$  は風速、 $S$  は風車の受風面積を表す。また、パワー係数  $C_P$  と風車ブレード接線力係数の平均値  $C_{Tb(ave.)}$  との関係は次式で表される。

$$C_P = J \frac{S_{bT}}{S} C_{Tb(ave.)} \quad (3-12)$$

$S_{bT}$  は全てのブレードの面積の合計である。 $S_{bT}/S$  を4章で説明する本研究で用いる実験模型を想定した値としパワー係数  $C_P$  を計算した結果を Fig.3-11 に示す。横軸は周速比、縦軸

は全周の風車ブレード接線力係数の平均値である。また、図中にプロットした○印はハイブリッドブレードを用いた風力発電機の実機の風洞試験結果[3-3]から推測した周速比  $J$  とパワー係数  $C_p$  である。

周速比  $J=0.5\sim 2.7$  の範囲でパワー係数の値は負であり、発電することも回転加速することも不可能である。この計算結果は、ハイブリッドブレードを用いた実用の風力発電機風車の周速比が  $J=0.8\sim 1.2$  であること、及び風洞試験の結果（図中○印）とも整合しない。実用の風車の周速比が  $J=0.8\sim 1.2$  であるならば、風車が起動し加速するまでを考慮し、少なくともその周速比以下の条件で全周のパワー係数  $C_p$  の値は正でなければならない。

この計算結果と実用の風車の周速比の不整合は、ブレードの発生する接線力の計算において一様流中で回転する1枚のブレードを仮定したため、他のブレードの干渉や伴流の影響が考慮されていないためと考えられる。特に、周速比  $J=0.5, 1.0$  のケースにおける計算結果で大きな負の接線力を発生していた主流の下流側にあるブレードでは、大きく干渉や伴流の影響を受けると考えられる。

### 3.5 第3章のまとめ

ハイブリッドブレードを用いた風車の性能を検討するため、他のブレードの干渉や伴流の影響を全く受けない一様流中で回転する1枚のブレードを仮定し、そのブレードに発生する接線力をハイブリッドブレードの翼型の空力特性から計算した。

周速比  $J$  の条件  $J=0.5, 1.0, 1.5$  及び  $2.0$  の4つのケースについて、回転位置  $\theta=0^\circ\sim 360^\circ$  の変化に対する、接線力係数、その成分構成（揚力成分によるものか抗力成分によるものか）及びトルク発生の変化を表す風車ブレード接線力係数の変化を調べ、接線力の発生について次のことが明らかとなった。

- (1)  $J=0.5$  のケースにおいて、回転位置  $\theta=30^\circ\sim 160^\circ$  で抗力成分による接線力を発生するが、他のケースにおいて抗力成分による接線力を発生しない。
- (2)  $J=0.5$  及び  $1.0$  のケースにおいて主流上流側からブレードが主流速度と同方向に動く領域である回転位置  $\theta=340^\circ (-20^\circ)\sim 110^\circ$ 、 $J=2.0$  のケースにおいてブレードが主流

速度と同方向に動く領域である回転位置  $\theta=10^\circ \sim 60^\circ$  で正の接線力を発生する。 $J=2.0$  のケースにおいては、主流上流側の領域で正の接線力を発生しない。

- (3) いずれのケースにおいても、迎え角が  $0^\circ$  付近で変化する回転位置  $\theta=270^\circ$  付近では揚力が大きく変化するため、接線力も正負に大きく変化する。
- (4) いずれのケースにおいても、(3)項の回転位置  $\theta=270^\circ$  付近の接線力も大きく変化する領域の前後に、大きな負の接線力を発生している領域がある。
- (5) いずれのケースにおいても、全周の風車ブレード接線力係数の平均値は負の値となる。

また、周速比条件による風車のパワー係数の変化を検討した結果、一様流中における周速比と接線力の発生について次のことが明らかとなった。

- (6) 周速比  $J=0.5 \sim 2.7$  の範囲では、風車のパワー係数の値は負であり、発電および回転加速とも不可能である。
- (7) この計算結果は、ハイブリッドブレードを用いた実用の風力発電機風車の周速比が  $J=0.8 \sim 1.2$  であることと整合しない。
- (8) この計算結果と実用の風車の周速比の不整合は、ブレードの発生する接線力の計算において一様流中で回転する1枚のブレードを仮定したため、他のブレードの干渉や伴流の影響が考慮されていないためと考えられる。

### 3.6 第3章 参考文献

- [3-1] 野口常夫, 日本国特許第 3451085 号, (2003).
- [3-2] 江口正一, 石井進, 平本政昭, 野口常夫, 平野孝典, 藤本一郎, 風車用切欠き翼の空力特性に関する研究, 第33回ガスタービン定期講演会, A-17, (2005).
- [3-3] 野口常夫, 武居昌宏, 石井進, “垂直軸型風力発電機の開発と翼端渦の流れの計測”, 噴流工学, Vol. 25, No. 3 (2009), pp. 4-12.
- [3-4] 関和市, 牛山泉, 垂直軸風車, パワー社, (2008).
- [3-5] 風力発電導入ガイドブック (改訂第8版), 独立行政法人 新エネルギー・産業技術開発機構, (2005).
- [3-6] Riegels, F. W., Aerofoil Sections, Butterworths, (1961)

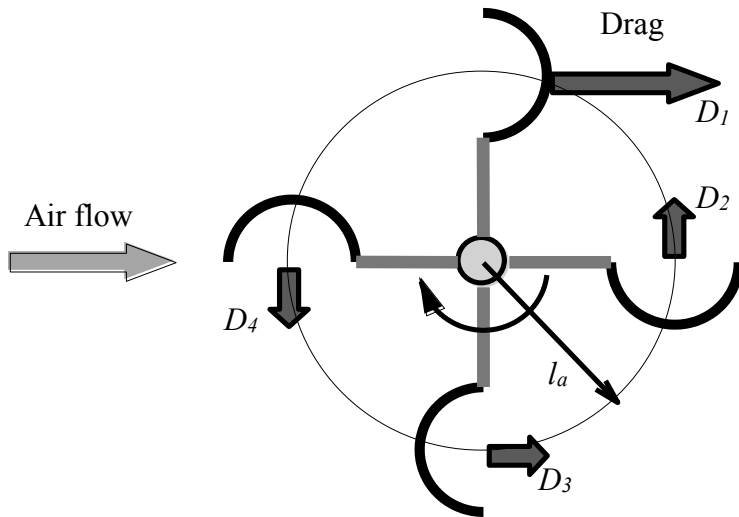


Fig.3-1 Theory of drag type windmill

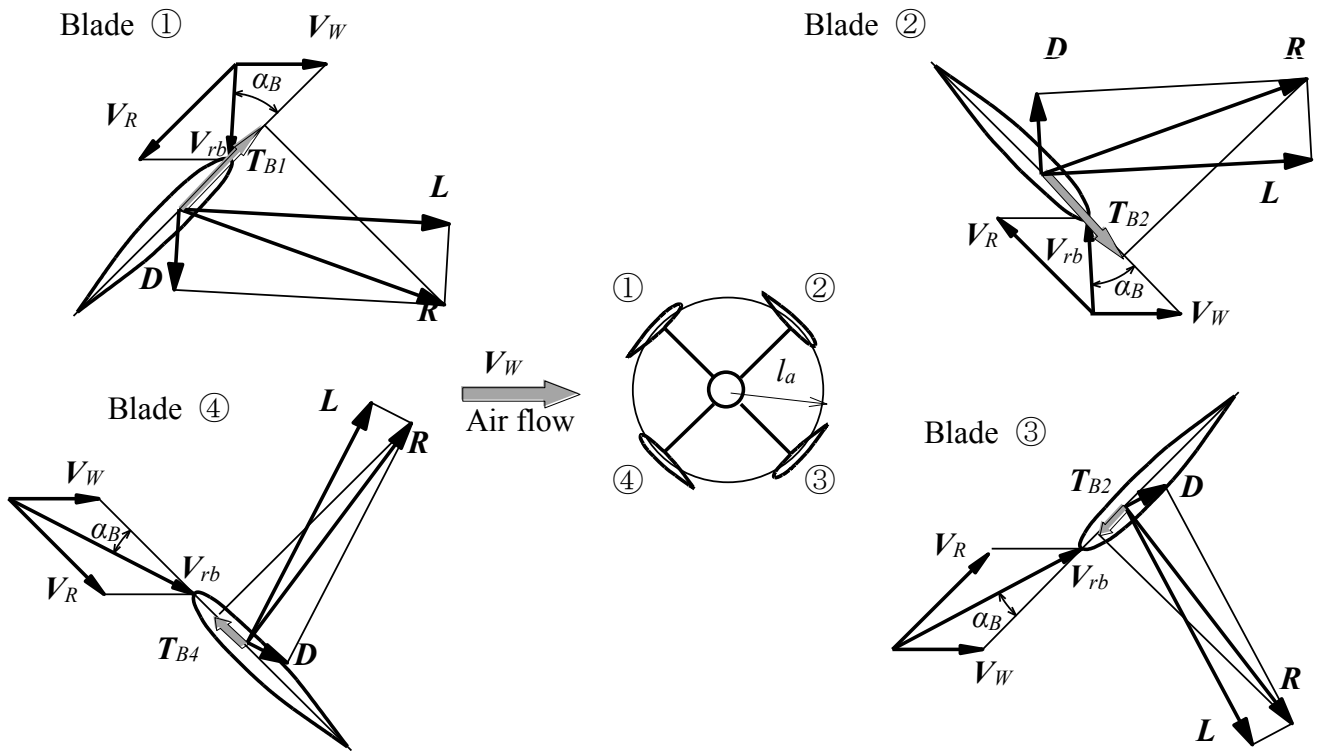


Fig.3-2 Theory of lift type windmill

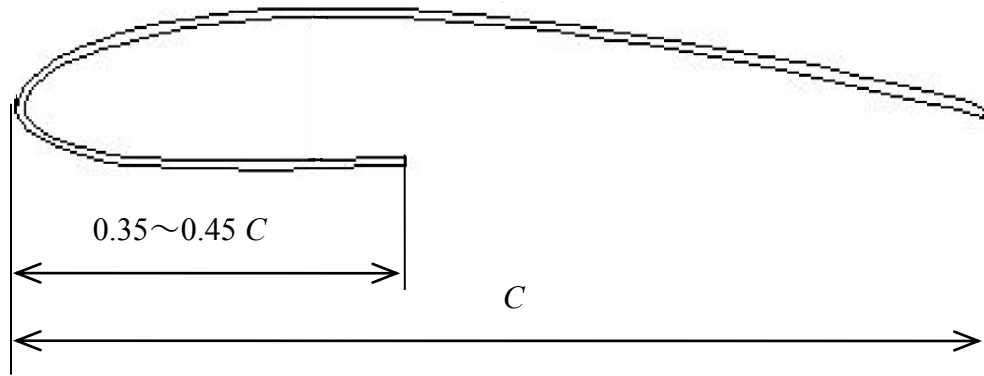
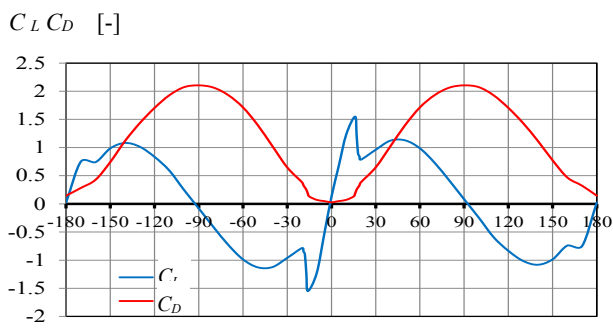
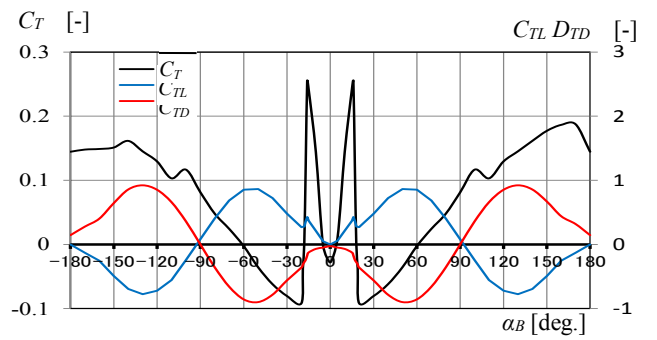


Fig.3-3 Wing section of hybrid blade for new vertical axis wind turbine



(a) Coefficient of Lift and Drag



(b) Coefficient of Tangential Force

Fig.3-4 Aerodynamic characteristic of hybrid blade [3-2]

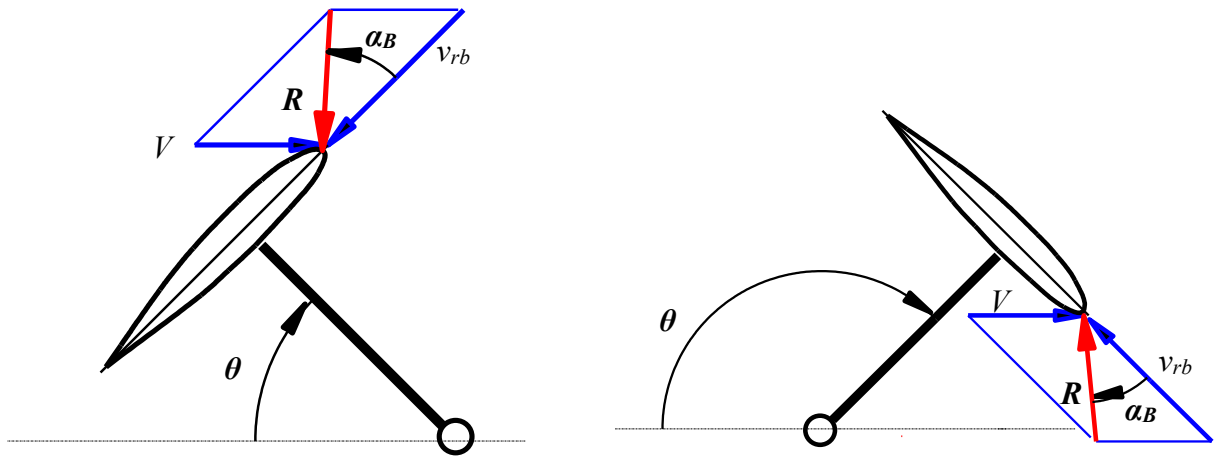


Fig.3-5 Angle of attack and reference air speed of lift type vertical axis wind turbine

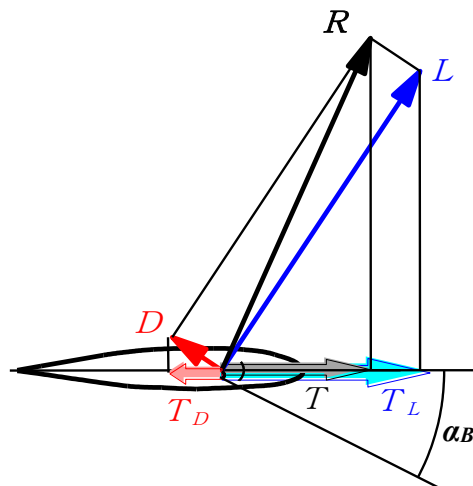


Fig.3-6 Tangential force of lift type vertical axis wind turbine blade



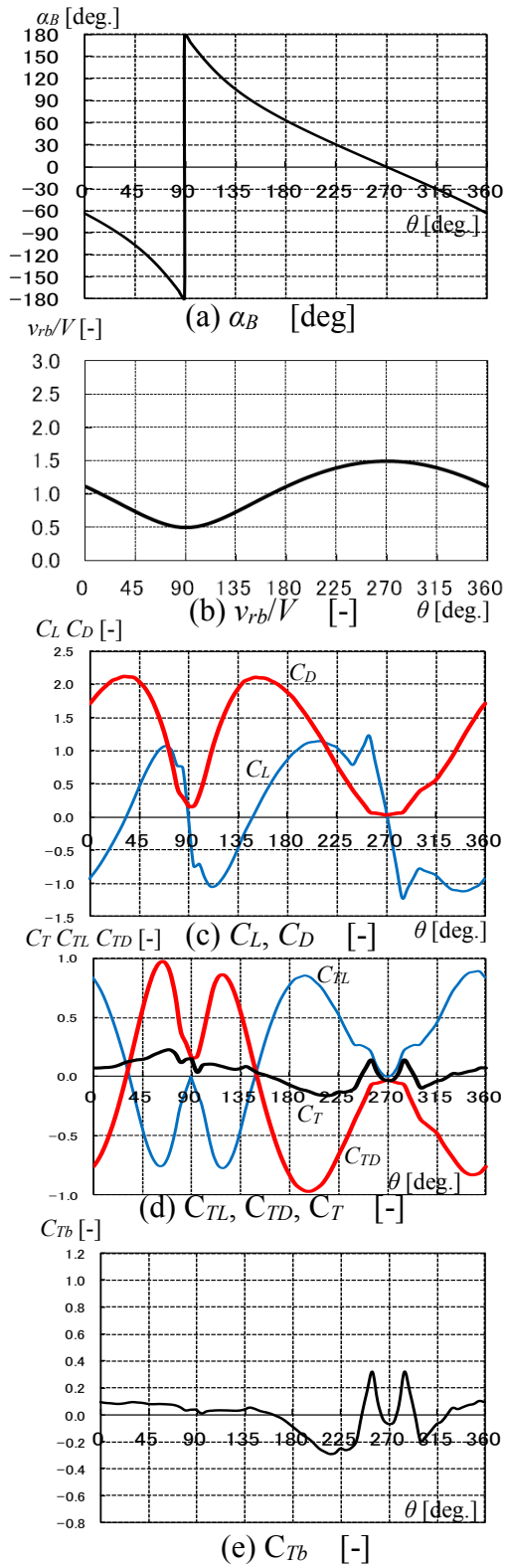


Fig.3-7 Tangential force generated by blade  
( $J = 0.5$ )

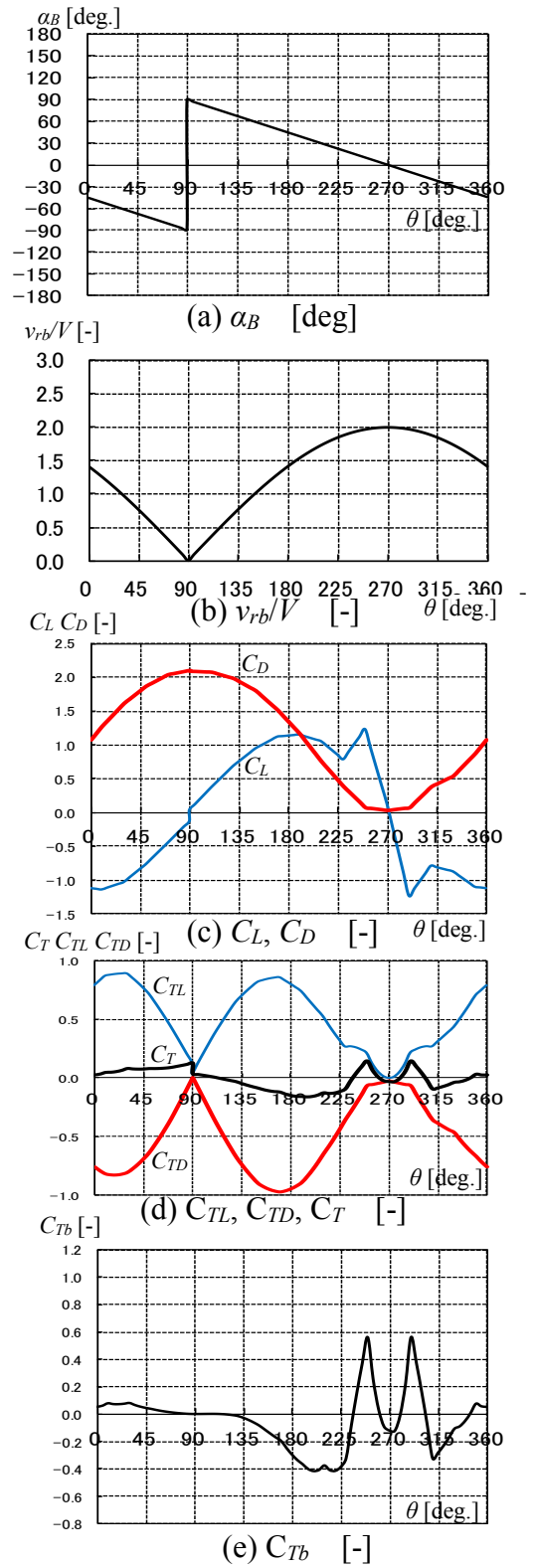


Fig.3-8 Tangential force generated by blade  
( $J = 1.0$ )

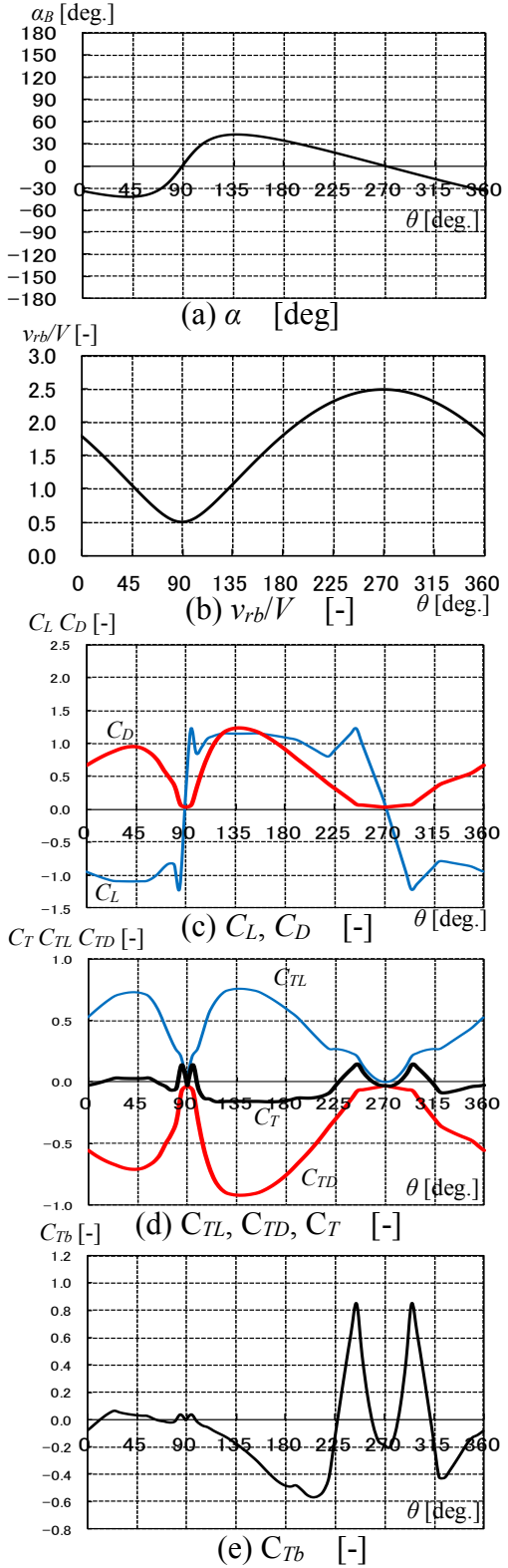


Fig.3-9 Tangential force generated by blade ( $J = 1.5$ )

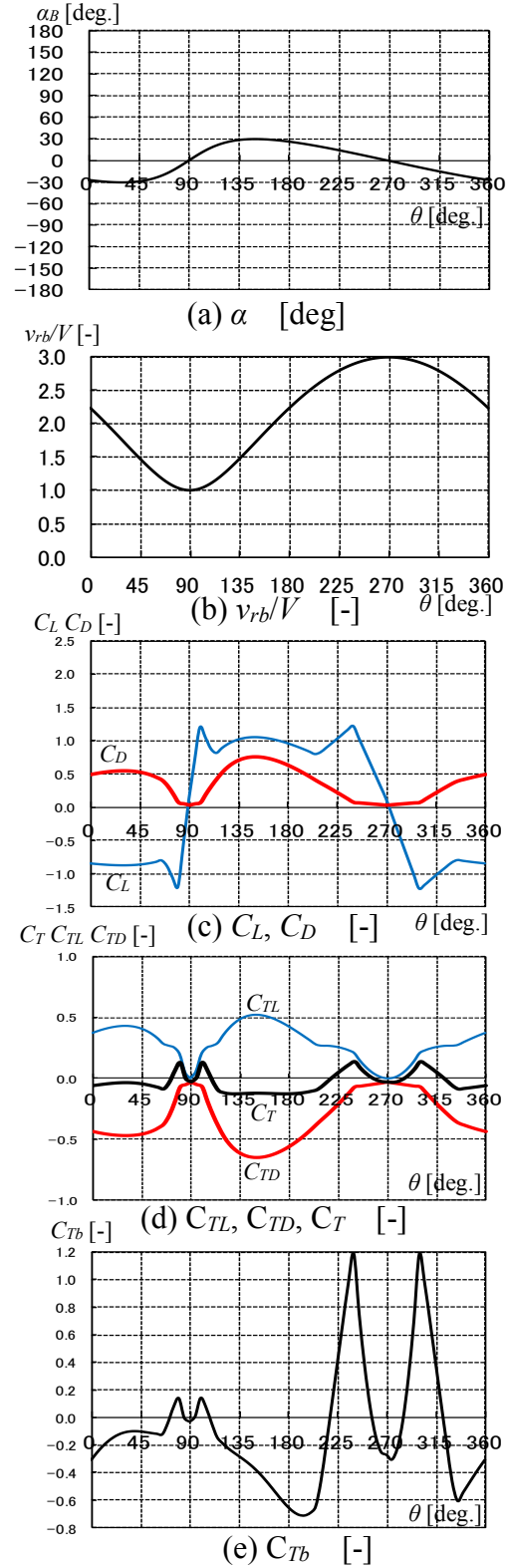


Fig.3-10 Tangential force generated by blade ( $J = 2.0$ )

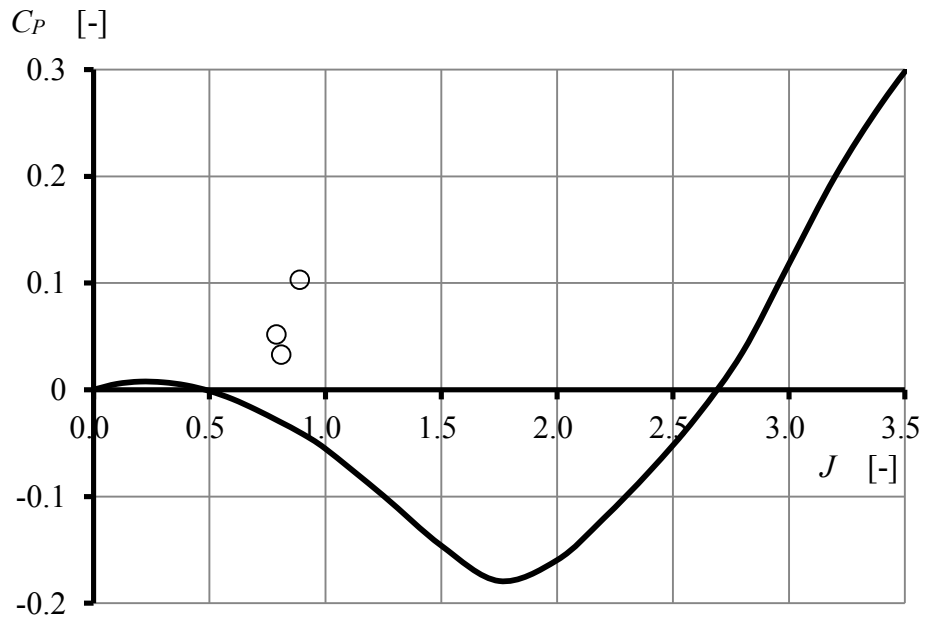


Fig.3-11 Power coefficient alternation by tip speed ratio

## 第4章 実験方法

### 4.1 第4章の緒言

垂直軸型風車（サボニウス型、ダリウス型）周りの流れの研究に回流水槽を用いた例は数多くある[4-1] [4-2]。また、PIV計測の適用としては、サボニウス型で風車内部の流れを含む周辺の流れ計測した例[4-3] [4-4]や、ダリウス型において風車周りの流れを計測した例[4-5]やコンディショナル・サンプリング手法を用いて回転する風車の1枚のブレードに注目しそのブレード周りの流れを計測した例がある[4-6] [4-7]。これらの風車周りの流れの可視化の研究において、風車性能の要因となる条件の一つである周速比を決定する風車回転数を所定の回転数で一定とするため風車をモータなどで駆動する手法は、多くの例で採用されている[4-2] [4-3] [4-4] [4-5] [4-6] [4-7]。

本研究では垂直軸型風車周りの流れを研究する手法として、回流水槽の計測部にモータにより回転駆動する水車模型を設置し、その周りの流れをコンディショナル・サンプリング PIV 及びステレオ PIV により計測する実験方法を用いる。

この章では、本研究で用いる実験方法について、実験装置（回流水槽、風車模型、計測装置）、PIV 及びステレオ PIV による速度場解析方法、実験条件及び座標系の定義を説明する。

### 4.2 実験装置[4-8] [4-9]

#### 4.2.1 回流水槽及び模型

Fig.4-1 に示す回流水槽の計測部に Fig.4-2 に示す通り風車模型を設置する。回流水槽の計測部は  $0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m} \times 1.2\text{ m}$  であり、側面及び底面は壁で拘束されているが上面は開放している。風車模型は、軸位置を計測部上流端より  $250\text{ mm}$  とし風車部が計測部断面の中央位置となる位置に回転軸を水平に設置する。

風車模型を Fig.4-3 に示す。風車部は、回転直径  $102\text{ mm}$  で、 $1.5\text{ mm}$  厚の亚克力板で製作した長さ  $146\text{ mm}$  翼弦長  $30\text{ mm}$  のハイブリッドブレード4枚からなる。風車模型の計測部断面積に対する閉塞率は  $14.5\%$ （ソリディティ  $0.37$  を考慮すると  $6.2\%$ ）である。計

測部上面が開放しており閉空間ではないため閉塞による壁面効果の補正はしない。風車は、回転軸に歯車を介し接続したモータにより一定の回転数で回転される。

#### 4.2.2 計測装置

コンディショナル・サンプリング・ステレオ PIV 計測システムを Fig.4-4 及び制御ダイアグラムを Fig.4-5 に示す。コンディショナル・サンプリング・ステレオ PIV 計測システムは、デジタルカメラ(Kodak, ES1.0, 30 Hz, 1008×1018 pixels)、Nd-Yag レーザー、コンディショナル・サンプリング装置、ロジックコントローラー(Labsmith, LC880)及び制御コンピュータからなる。2次元の PIV 計測では、図に示した2台のデジタルカメラのうち1台のみ使用する。ロジックコントローラーは、PIV 計測システムの各装置を制御しコンディショナル・サンプリング装置の出力と同調させる機能を持つ。ロジックコントローラーが、コンディショナル・サンプリング装置の出力を受信し各装置を制御する制御タイミング・ダイアグラムを Fig.4-6 に示す。コンディショナル・サンプリング装置の出力を受信後、 $\Delta t$ の間隔でレーザー射出を2回行い、各レーザー照射時間内に  $\Delta t$ の間隔でカメラのシャッターを2回切る。制御コンピュータから計測開始の信号を受けたロジックコントローラーはこの一連の撮影動作を繰り返す。撮影時間間隔  $\Delta t$ については周速比条件によって変えるが、その値を Table 4-1 に示す。回流水槽内の水に混入する PIV 計測のためのトレーサー粒子については、水の比重に近いナイロン粒子（直径：250  $\mu\text{m}$ ， 比重：1.02）を用いる。

風車の特定した回転位置を検出するコンディショナル・サンプリング装置[4-1] [4-2]を fig.4-7 に示す。風車の回転位置を示すスロットを切ったアルミ板製のスロット板を、風車の回転軸に取り付け、風車が特定した回転位置に達するとこのスロットをフォトマイクロセンサー(OMRON EE-SX670)が検出し信号を出力する。サンプリングする風車の回転角の変更は、スロット板の風車回転軸への取付け角度を変更することにより行う。

### 4.3 PIV 及びステレオ PIV による速度場解析[4-8] [4-9]

2次元の PIV 計測では1ケースで64回撮影を行い、それぞれの解像度  $1008 \times 1018$  pixels の PIV 画像からグレーレベルの相関係数法[4-10]により  $40 \times 35$  個の検出窓( $36 \times 36$ pix., 24pix.間隔)における PIV 速度を求め、撮影毎にエラーベクトルを検出しそれを除去補完した瞬時データを作成する。この各瞬時データには乱流などによる速度変化の瞬時成分が含まれており、64 個の瞬時データ平均し速度場データとする。

ステレオ PIV 計測では1ケースで400回撮影を行い、それぞれの解像度  $1008 \times 1018$  pixels の PIV 画像からハイブリッド・ステレオ PIV 測定法 (10 パラメータ法) [4-11]により  $40 \times 40$  の PIV 速度を求める。この各瞬時データには乱流などによる速度変化の瞬時成分が含まれており、400 回計測した速度データを平均し速度場データとする。

### 4.4 実験条件及び座標系の定義[4-8] [4-9]

座標系については Fig.4-2 及び Fig.4-8 に示す通り、主流の方向を  $X$ 、垂直方向を  $Y$ 、主流に直角な風車の回転軸方向を  $Z$  とし、原点を回転軸中心上のブレードの長さ方向中央部とする。 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向の速度成分をそれぞれ  $u$ 、 $v$ 、 $w$  とする。ブレードの回転円周上の位置を表す回転位置 (位相)  $\theta$  については、Fig.4-8 に示す通り主流の一番上流側にある位置を  $\theta=0^\circ$  とし、風車の回転方向を正と定義する。

実験時の主流流速  $V$  は、回流水槽の主流がもっとも安定して流れる  $0.4$  m/s とする。実験時のレイノルズ数は、代表長さを風車模型の直径  $0.1$  m とし  $Re=4.0 \times 10^4$  であるのに対し、実用の風力発電機の風車のレイノルズ数は、直径  $1.2$  m とし風速  $1.0 \sim 6.0$  m/s において  $Re=8.2 \times 10^4 \sim 4.9 \times 10^5$  となる。

周速比  $J$  ( $J= v_s / V$ :  $v_s$  はブレードの周速度) を  $J=0.5$ 、 $J=1.0$ 、 $J=1.5$  及び  $J=2.0$  の4条件とする。 $J$  は風車模型の回転数を調整することにより設定するが、各周速比の条件における回転数については Table4-1 に示す。

### 4.5 第4章 参考文献

[4-1] 横溝利男他, 太田元一, ブレードにスプリットのあるサボニウス風車の特性, 日本

- 機械学会論文集(B 編), Vol.59, No.568, (1993), pp154-160.
- [4-2] 奥林豊保, 鹿毛一之, 石松克也, 濱川洋充, サボニウス風車まわりの流れの可視化, *可視化情報*, Vol.15, No2, (1995), pp239-242.
- [4-3] 藤沢延行, 田口洋和, 佐藤毅, 植村知正, 長屋幸助, 井開重男, ダリウス風車における条件抽出法によるサボニウス風車内部流れ場の画像計測, *日本機械学会論文集(B 編)*, Vol.59, No.567, (1993), pp217-222.
- [4-4] 藤沢延行, 渋谷賢志, 高野剛, 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, *日本機械学会論文集(B 編)*, Vol.65, No.638, (1999), pp138-143.
- [4-5] 田中太, 川口清司, 富岡政裕, 川島佳一郎, 整流ガイドを有するダリウス型風車周り圧力場の推定, *ターボ機械*, Vol.36, No.8, (2008), pp26-34.
- [4-6] 藤沢延行, 堀陽一, 流れの可視化と画像解析によるダリウス風車周りの流れ場に関する研究, *日本機械学会論文集(B 編)*, Vol.63, No.606, (1997), pp234-239.
- [4-7] Fujisawa, N. and Shibuya, S., Observation of dynamic stall on darrieus wind turbine blades, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 89, (2001), pp. 29-36.
- [4-8] 本多正明, 武居昌宏, 都徳照, 後縁に切欠きのある翼型を用いた垂直軸型風車周りの流れの P I V による計測, *日本機械学会論文集*, Vol.82 , No.843, (2016), DOI: 10.1299/transjsme.16-00241.
- [4-9] Honda, M., Noguchi, T., Doh, D., H., Takei, M., and Ishii, S., “Conditional Sampling Stereoscopic PIV Measurement around the Blade of the Vertical Axis Wind Turbine”, *Journal of JSEM*, Vol. 10, Special Issue (2010), pp. 73-78.
- [4-10] Utami, T. and Blackwelder, R., A cross correlation technique for velocity field extraction from particulate visualization, *Exp. in Fluids*, Vol.10 (1991), pp.213-223.
- [4-11] Doh, D. H., Hwang, T. G. and Saga, T., 3D-PTV Measurements of the Wake of a Sphere, *Measurement Science and Technology*, Vol.15 (2004), pp.1059-1066.

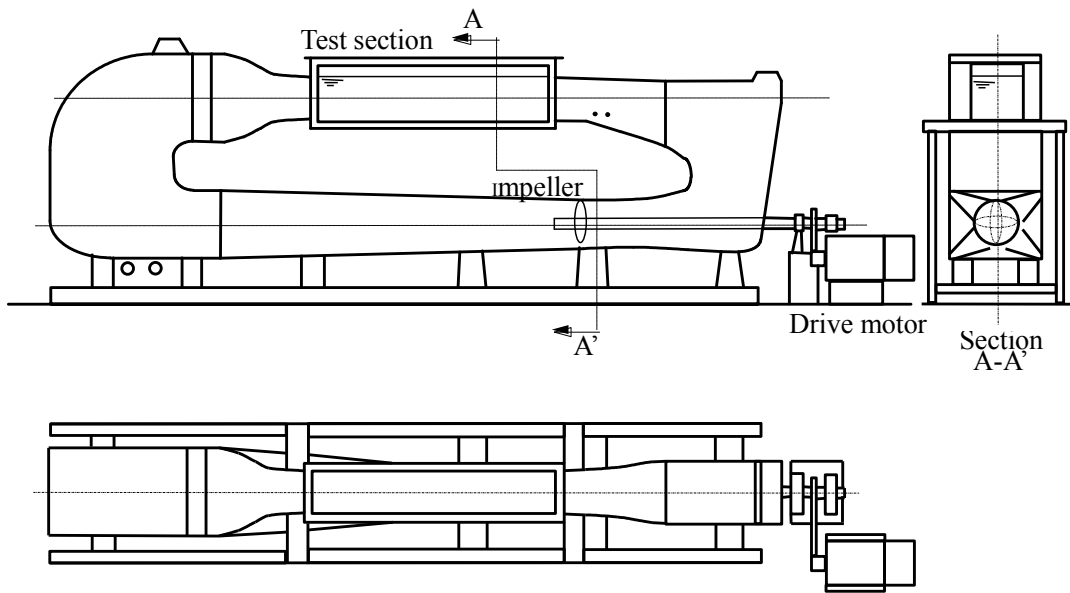


Fig.4-1 Circular current water channel

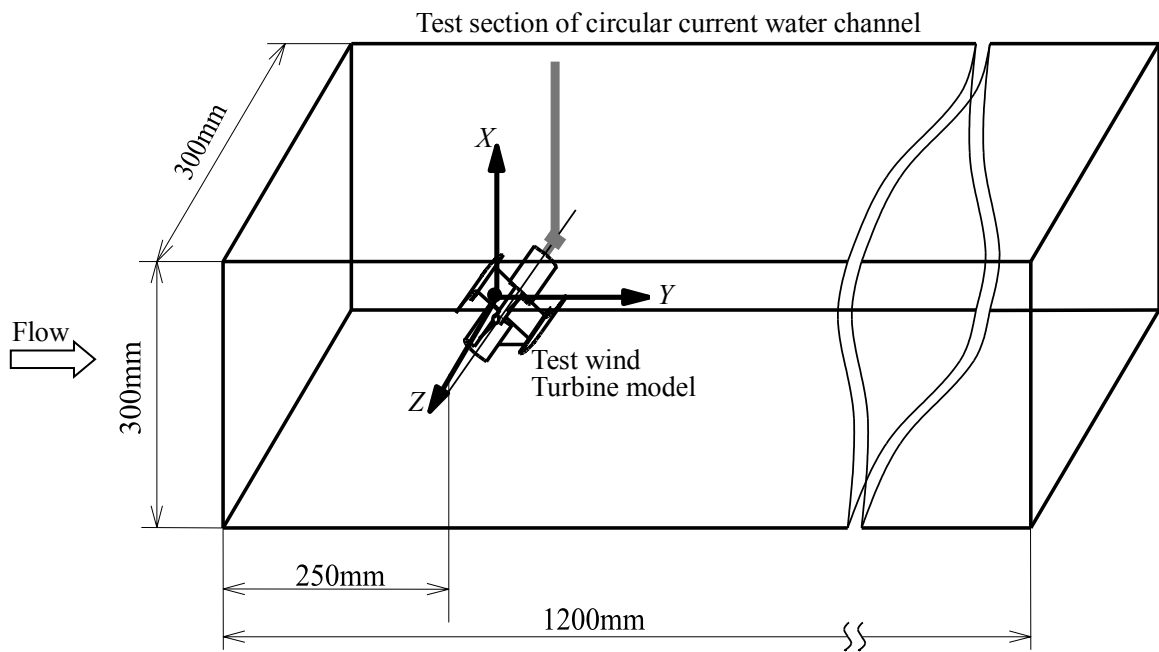


Fig.4-2 Installation of the turbine model



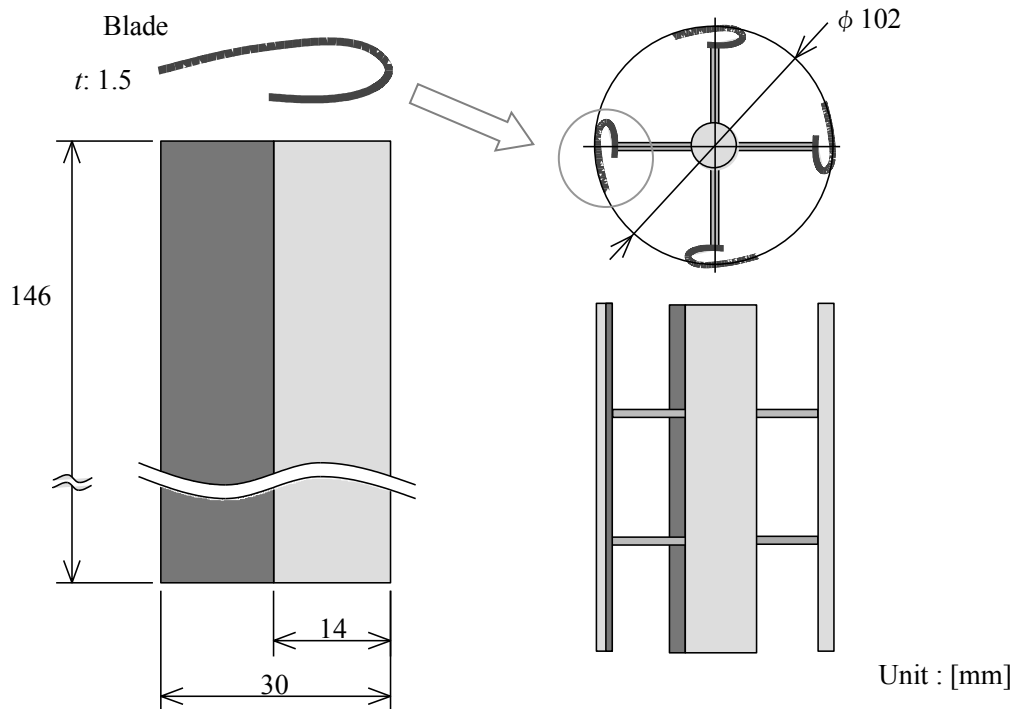


Fig.4-3 Specifications of the turbine model

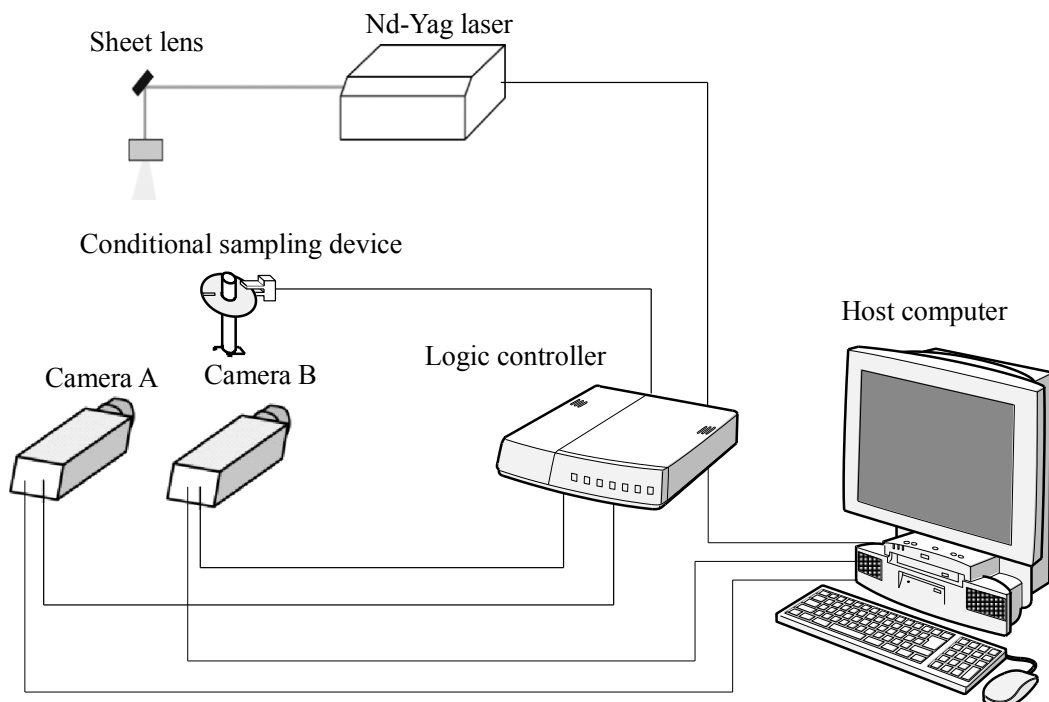


Fig.4-4 Conditional sampling PIV system

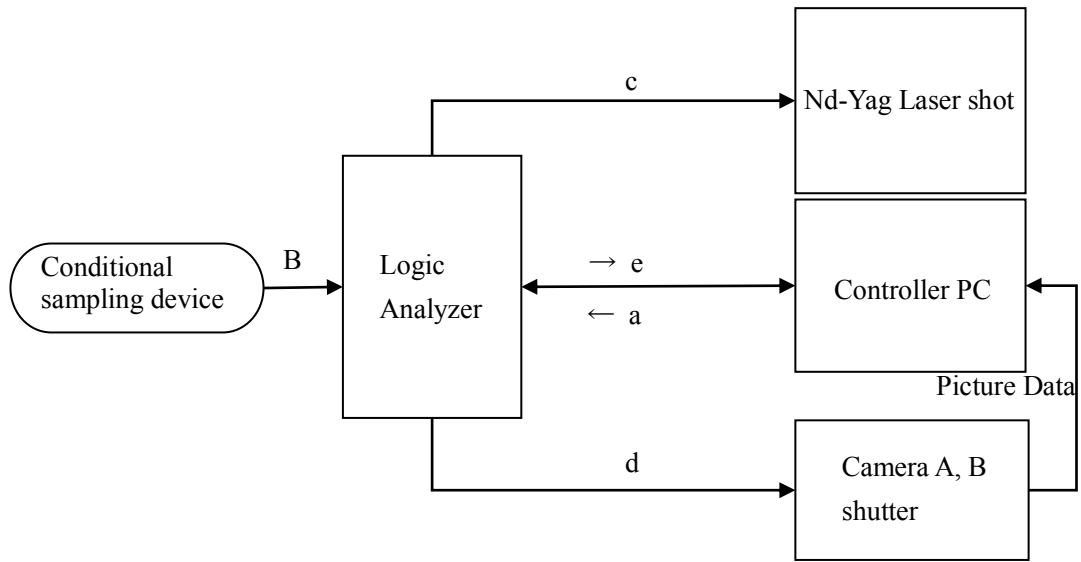


Fig.4-5 Control diagram of the conditional

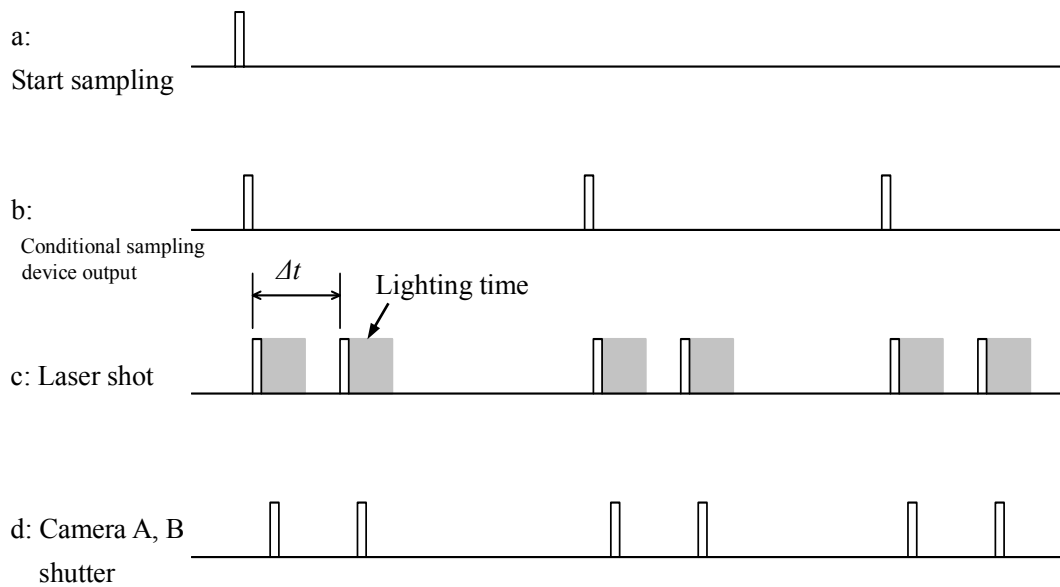


Fig.4-6 Conditional sampling PIV timing diagram

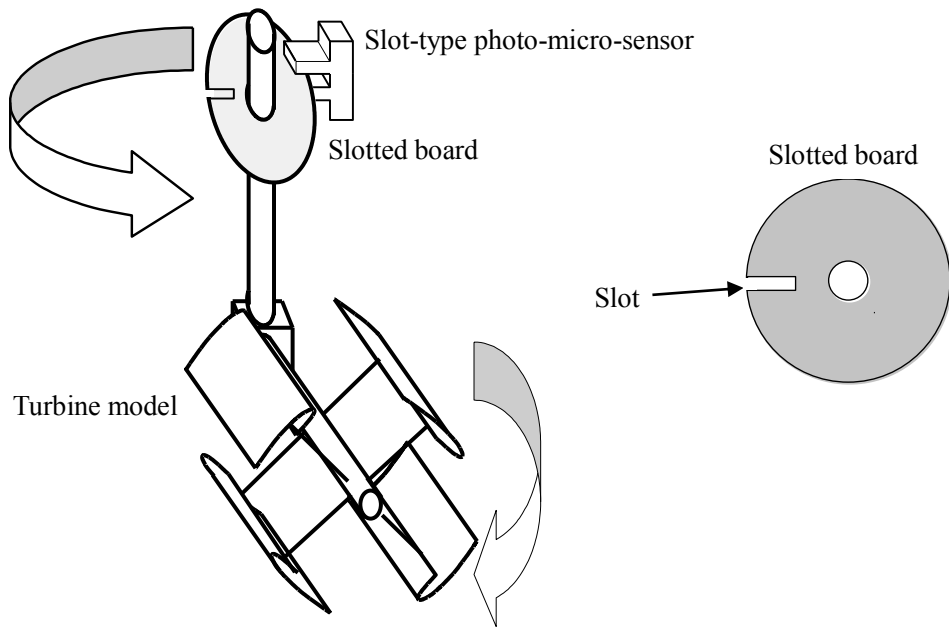


Fig.4-7 Conditional sampling device



Fig.4-8 Definitions of angular point

Table 4-1 Condition of tip speed ratio and  $\Delta t$

Tip Speed Ratio $J(-)$	Circumferential Speed $v_s$ (m/s)	Revolution Speed $n$ (rpm)	Interval of Images Shot $\Delta t$ ( $\mu$ s)
0.5	0.2	36.7	1000
1.0	0.4	73.5	800
1.5	0.6	110.2	600
2.0	0.8	146.9	400

## 第5章 風車周りの流れのコンディショナル・サンプリング PIV 計測

### 5.1 第5章の緒言

第3章において行った計算によるハイブリッドブレードを用いた風車の性能の検討により、風車周りの流れが風車の発生する出力に影響を与えていると考えられる。通常の揚力型の風車における研究においても相対速度及び迎角の変動が大きく剥離などを伴う風車周りの流れについては予測が難しく、風洞実験により回転する風車内部を含む風車周りの流れの平均速度分布を計測することによる研究[5-1] [5-2]がされている。

この章では、ハイブリッドブレードを用いた垂直軸型風車模型周りの流れの速度場をコンディショナル・サンプリング PIV により計測し、風車の効率に影響する流れを明らかにする。また、計測した速度場から各ブレードの各回転位置における迎え角及び相対速度を求めることにより、風車周囲の流れによる風車ブレードの発生する接線力への影響について検討し、ハイブリッドブレードを用いた風車が抗力と揚力のどちらからどの程度のトルクを得ているか、また、切欠きを設けたことによる抗力の増加による発電中における効果を確認し、通常の揚力型風車との出力（トルク）発生状況の違いを明確とし、ハイブリッドブレードを用いた風車性能の特徴の要因について議論する。

### 5.2 実験[5-3]

#### 5.2.1 実験条件

この章の実験において、PIV 計測面は、X-Y 面で風車の回転軸(原点  $X = 0, Y = 0$ )を中心に風車断面全体を含む  $192 \text{ mm} \times 192 \text{ mm}$  の範囲で、Z 位置は原点( $Z = 0$ ) であり、2次元のコンディショナル・サンプリング PIV 計測により計測する。1 pixel は  $0.19 \text{ mm}$  となり、PIV 検査窓の大きさは  $6.8 \text{ mm} \times 6.8 \text{ mm}$  ( $4.5 \text{ mm}$  間隔)である。計測面の Z 位置がブレードの長さ方向の中央であることから計測面に垂直な Z 方向の速度は平均で 0 である。

計測する回転位相  $\theta$  の条件については、一番上流側( $\theta = 0^\circ$ )にあるブレードの回転位置  $\theta_{bl}$  が、 $\theta_{bl} = 0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ$  にある時の位相 4 条件とする。これにより、4 枚それぞれのブレードの回転位置が全周を 16 等分  $22.5^\circ$  毎にある状況を計測できる。

## 5.2.2 実験結果[5-3]

実験により計測した各回転位相の条件毎に 64 回速度場を流線で表現したものを周速比  $J=0.5$  のケースについて Fig.4-9,  $J=1.0$  について Fig.4-10,  $J=1.5$  について Fig.4-11,  $J=2.0$  について Fig.4-12 に示す。各図の(a1), (a2), (a3), (a4)はそれぞれ回転位相  $\theta_{bl}=0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ$  の結果である。主流は、図の左から右方向に流れている。流線の色は速度の大きさを表し青色は速度が小さいこと、赤色は速度が大きいことを示す。カラーバーの最小値は 0m/s、最大値は 0.66 m/s であり、主流速度(0.4 m/s)は黄緑色である。風車模型の軸及び 4 枚のブレードの位置を白色の点及び曲線で示す。また、各図の(b1), (b2), (b3), (b4)は各計測点毎に回転位相の条件毎に 64 回計測した瞬時速度場から次式により求めた乱流運動エネルギー  $TKE$  の分布を示し、それぞれ回転位相  $\theta_{bl}=0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ$  におけるものである。

$$TKE = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^{64} \sqrt{d_u^2 + d_v^2} \times \frac{1}{64} \times 100[\%]$$
$$d_u = u - \bar{u}$$
$$d_v = v - \bar{v}$$
(5-1)

ここで  $u, v$  は各計測点の瞬時計測速度の  $X$  方向成分及び  $Y$  方向成分、 $\bar{u}, \bar{v}$  は各計測点における 64 回計測した瞬時速度場の平均速度の  $X$  方向成分及び  $Y$  方向成分である。本研究においては  $TKE$  を速度の変動の大きさの指標として用いる。

### (1) 周速比 $J=0.5$ (Fig.5-1 参照)

上流側から流れてくる主流は風車に到達する前に中心を境に上下に若干方向を変える。図の風车上側（ブレードの周速度方向が主流速度方向と一致する側、以下「風车上側」とする。）の流れでは、速度が主流より大きくなっている部分がある。図の風車下側（ブレードの周速度方向が主流速度方向と反対となる側、以下「風車下側」とする。）の流れは主流とほぼ同じ速度であるが、流れの方向は上側の流れに比べて大きく風車外側（図の下方向）へ曲げられている。風車より主流下流側では、風車の後ろ側となる領域でその上下の領域に比べて速度が小さい。

風車の内部において、上流からブレードの間を通過して流入した流れが主流下流側で流出する部分で大きくブレード周速度方向（図の下方方向）に曲げられている。風車中心から主流下流側では速度が小さい  $0.1 \text{ m/s}$  以下の領域がある。図(a1)の回転位置  $\theta=0^\circ$  にあるブレードの後縁部付近の風車内側面で渦が発生し、図(a2)の回転位置  $\theta=22.5^\circ$  にあるブレードにかけて風車内側面で渦の領域が大きくなり、図(a3)の回転位置  $\theta=45^\circ$  及び図(a4)の回転位置  $\theta=67.5^\circ$  のブレード内側面から離れ下流側に移動し、さらに図(a1)から図(a2)では渦が回転位置  $\theta=90^\circ$  と  $270^\circ$  のブレードの間及びを通過し風車の外側に出る。

図(b1)の回転位置  $\theta=0^\circ$  にあるブレードの後縁部付近の風車内側面に流線の変動の大きい部分があり、図(b2)の回転位置  $\theta=22.5^\circ$  のブレードと  $\theta=292.5^\circ$  にあるブレードの間、図(b3)の回転位置  $\theta=45^\circ$  のブレードの風車内側、図(b4)の回転軸上流部に領域を拡大しながら移動する。この流線の変動の大きい領域は前述の渦の外周付近に位置する。また、図(b4)の回転位置  $\theta=337.5^\circ$  のブレード風車内側面の風車内部に流入する流れが曲げられている部分に変動の大きい部分があり渦の発生の基となっている。図(b1)の回転位置  $\theta=90^\circ$  にあるブレードの後縁部付近の風車外側面、図(b2)の回転位置  $\theta=202.5^\circ$  のブレードと  $\theta=292.5^\circ$  にあるブレードの間、図(b3)の回転位置  $\theta=225^\circ$  のブレードの前縁風車外側、図(b4)の回転位置  $\theta=247.5^\circ$  のブレードの後縁風車外側の風車内側から外へ流れが流出している部分及び図の風車上側の風車より下流部分の流れの速度が大きくなっている部分に流線の変動の大きい部分がある。

## (2) 周速比 $J=1.0$ (Fig.5-2 参照)

周速比  $J=0.5$  における流れと同様に上流側から流れてくる主流は風車に到達する前に中心を境に上下に若干方向を変え、風車上側の流れにはその速度が主流より大きくなっている部分があり、風車下側の流れは主流とほぼ同じ速度で流れの方向は上側の流れに比べて大きく風車外側（図の下方方向）へ曲げられている。風車より主流下流側の流れでは、その上下の領域に比べて速度が小さい領域があり周速比  $J=0.5$  と比べてその領域は大きく、領域内の流れは大きくブレードの周速度方向へ曲げられている。

風車の内部では、周速比  $J=0.5$  における流れと比較し速度が小さい  $0.1 \text{ m/s}$  以下の領域は拡大し、風車の図上側のブレードの周速度方向が主流方向と一致している領域を除く風車内部ほぼ全体で速度が小さくなっている。風車内部では、2つの渦が発生している。一つは、図(a2)の回転位置  $\theta=22.5^\circ$  にあるブレード後縁付近の風車内側面で渦が発生し、図(a3)の回転位置  $\theta=45^\circ$  のブレードから図(a4)の  $\theta=67.5^\circ$ 、図(a1)の  $\theta=90^\circ$ 、図(a2)の  $\theta=112.5^\circ$ 、図(a3)の  $\theta=135^\circ$ 、図(a4)の  $\theta=157.5^\circ$  それぞれのブレードの風車内側面付近を移動し、図(a1)の回転位置  $\theta=180^\circ$  にあるブレードでは消滅している。もう一つの渦は、図(a1)の回転位置  $\theta=270^\circ$  のブレードの前縁より離れた上流側で渦が発生し、図(a2)の回転位置  $\theta=292.5^\circ$  のブレードの前縁よりさらに離れた位置に移動し、次の図(a3)では消滅している。

図(b1)(b2)(b3)(b4)より、周速比  $J=0.5$  の計測結果と同じく渦の外周付近、風車内部に流入する流れが曲げられている部分、風車内側から外へ流れが流出している部分及び図の風車上側の風車より下流部分の流れの速度が大きくなっている部分に流線の変動の大きい部分がある。

### (3) 周速比 $J=1.5$ (Fig.5-3 参照) 及び周速比 $J=2.0$ (Fig.5-4 参照)

周速比  $J=0.5, 1.0$  における流れと同様に、上流側から流れた主流は風車に到達する前に中心を境に上下に方向が変わり、その方向変化の大きさは周速比  $J=0.5, 1.0$  より大きい。風車上側の流れにおいてその速度が主流より大きくなっている部分があるが、その領域は風車の上側、風車の最前部から直径の  $1/4$  程度後方から下流側ほぼ全域で周速比  $J=0.5$  及び  $J=1.0$  における流れ比べて大きい。風車下側の流れは、周速比  $J=0.5$  及び  $J=1.0$  における流れと比べてさらに大きく風車外側（図の下側）へ曲げられている。風車の主流下流側の流れは、回転位置  $\theta=90^\circ$  と  $\theta=270^\circ$  にあるブレード（図(a1)）の間を通過し風車内部から流れ出ている箇所より図下側の流れが大きくブレードの周速度方向へ曲げられている。風車の主流下流側の回転面付近ではブレードの周速度方向に沿った流れとなっており、ブレード回転面から半径方向外側へ距離が大きくなるほど速度は小さく下流側には  $0.1 \text{ m/s}$  以下の領域がある。



風車の内部では、図上側の流れは主流とほぼ同じ方向に流れているが、それより下側の領域では速度が小さくまた主流方向とは逆方向に流れており、風車軸より図下側の領域では周速比  $J=1.5$  における流れと比べて周速比  $J=2.0$  における流れの方がこの逆流の速度は大きい。この風車内部の主流下流側から上流側への流れは風車の最上流側から風車直径の  $1/4$  程度下流位置付近で図の上下に分かれ、図上側へ向かう流れは風車内部上側の主流と同方向の流れに合流し、図下側へ向かう流れは下側のブレードの間から風車外部へ出て風車外側（図の下側）へ曲げられた主流と合流する。図(a2)の回転位置  $\theta=22.5^\circ$  にあるブレードの後縁位置で渦が発生しているが、図(a3)の回転位置  $\theta=45^\circ$  にあるブレードでは消滅している。

流線の変動の大きい領域は、周速比  $J=0.5$  及び  $J=1.0$  の計測結果と同じく渦の外周付近、風車内部に流入する流れが曲げられている部分、風車内側から外へ流れが流出している部分及び図の風車上側の風車より下流部分の流れの速度が大きくなっている領域にある。

## 5.3 考 察

### 5.3.1 風車周りの流れ[5-3]

風車の主流上流側の領域で中心を境に上下に若干方向を変えているのは、上流側から流れた主流すべてが回転する風車の内部を通過することができず、通過できない分の流れが風車の側面へ流れ込むためである。風車上側のブレードの周速度方向が主流方向と一致している流れにある主流の速度がより大きくなっている部分は、風車ブレードに伴って流れる伴流が風車前面からの流れと合流することにより発生している。また、風車ブレードの伴流は、周速比  $J=1.0$  において見られる風車下流側の流れがブレードの周速度方向へ曲げられている状況や、周速比  $J=1.5$  及び  $J=2.0$  において見られる風車下流側の回転位置  $\theta=135^\circ \sim 270^\circ$  にあるブレード周りで見られるブレードの周速度方向に沿った流れを引き起こしている。風車下側の流れが方向は風車上側の流れに比べて大きく風車外側（図の下方向）へ曲げられているのは、下側のブレード間から流出した流れと風車後ろ側のブレードの周速度方向に沿った流れが、風車の図下側の流れに合流し風車の外側に押し出すため

である。周速比  $J$  が大きいほど、これらの傾向は強くなる。

各周速比の条件において主流上流側の回転位置  $\theta=0^\circ$  あるいは  $\theta=22.5^\circ$  にあるブレードの後縁部付近の風車内側面で発生する渦は、主流がブレードにより流れが妨げられブレードの後縁側を回り込み剥離することにより発生するものであり、風車内部の流れに乗って移動し、風車の主流下流側で渦の起源となるブレード自身及びその前のブレード周りの流れに干渉している。

周速比  $J=1.5$  及び  $J=2.0$  において見られる風車内部の主流とは逆方向の流れは、風車の回転が大きいと、ブレード及びその伴流により風車内部への主流の流れが妨げられ、その分ブレードの周速度方向の伴流の影響が大きくなることにより引き起こされる。

### 5.3.2 ブレード周辺の流れとブレードの発生する接線力への影響[5-3]

風車周りの流れの変化が回転するブレードが発生する接線力に与える影響を数値的に検討するため、ブレード周辺の流れの速度の大きさ及び方向の変化を数値で示す必要がある。本研究では Fig.5-5 に示す回転軸を中心に半径  $R=60\sim 50$  mm の領域 A (ブレードの外側)、半径  $R=50\sim 40$  mm の領域 B (ほぼブレードの翼厚の範囲)、半径  $R=40\sim 30$  mm の領域 C (ブレードの内側) の 3 領域内でブレード回転角に沿って回転位置  $\theta$  の  $\pm 15^\circ$  の内にある全ての計測点における速度の平均値をブレードに対するその領域の速度の代表値とし、周速比条件毎にその平均速度の大きさ及び方向の回転位置  $\theta$  に対する変化を求めた。ここで各領域の厚さ 10 mm はブレードの翼厚、回転角の  $\pm 15^\circ$  の範囲は翼弦の大きさに相当する。平均速度は Fig.5-6 に示す大きさ  $v_m$  及び方向  $\varphi_m$  であらわす。平均方向  $\varphi_m$  は、主流速度の方向 (左から右方向) を  $0^\circ$  とし上方向 ( $X$  の  $+$  方向) を正、上方向 ( $X$  の  $-$  方向) を負と定義する。

周速比  $J=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$  の各条件について Fig.5-7 に、回転角に対する平均速度の大きさ  $v_m$  を(-a)及び方向  $\varphi_m$  の変化(-b)を示す。横軸はブレード回転角  $\theta$ 、縦軸はそれぞれ平均速度  $v_m$ 、平均方向  $\varphi_m$  である。それぞれの図で赤色のデータは領域 A、緑色は領域 B、青色は領域 C、黒色は全領域の平均値である。また、(-a) 平均速度の図中にある黄色の直線は主流

速度を表し、(-b) 方向の図中にある黄色の直線はブレードの回転に沿う方向を表す。回転角  $45^\circ$  毎に平均速度を求めた領域におけるデータの最大値及び最小値をエラーバーとして示す。また、平均速度を求めた各領域内の各計測点における計測データの標準偏差の最大値及び最小値を Table5-1 に示す。

各図(-a)の平均速度の変化は全ての周速比の条件において、回転位置  $\theta=0^\circ$  付近において速度が主流より小さく、回転位置が大きくなるほど大きくなりブレードの周速度方向が主流方向と一致している回転位置  $\theta=90^\circ$  付近で最大となった後小さくなり主流速度より小さくなる。回転位置  $\theta=90^\circ$  付近における速度は領域 A,B,C の順で大きく、領域 A における最大速度は主流速度より大きく、領域 C における最大速度は主流速度に達しない。全領域の平均速度は領域 B の速度に近い。領域 C における速度が小さいのは、3.1 項に述べた回転する風車の内部を通過する流れの量が少ないためである。

回転位置  $\theta=90^\circ$  付近では、流れの速度がブレードの周速度より小さい周速比が小さい条件において抗力による接線力を発生している。抗力による接線力を発生している周速比が小さい条件においてこの領域の速度が大きくなると抗力による接線力が大きくなる。Table5-2 に各領域及び全領域平均において回転位置  $\theta=90^\circ$  付近の平均速度の大きさの最大値を各周速比の条件毎に示す。回転位置  $\theta=90^\circ$  付近における平均速度の最大値は、領域 A では主流速度より大きく周速比  $J=1.5$  で最も大きく周速比  $J=2.0, J=1.0, J=0.5$  の順で小さくなる。領域 B でも主流速度より大きく周速比  $J=1.0$  で最も大きく周速比  $J=1.5, J=0.5, J=2.0$  の順で小さくなる。転位置  $\theta=90^\circ$  付近で主流速度より速度が大きくなるのはブレードの回転に起因するものであるが、領域 A 及び領域 B においてこの最大値と周速比（ブレードの回転速度に比例）に相関はない。領域 C では平均速度の最大値は周速比  $J=0.5$ , と  $J=1.0$  で等しくそれ  $J=1.0$  以上では周速比が大きいほど小さい。全領域平均の最大速度は周速比によらず主流速度の 1.0 倍から 1.14 倍である。これは、この領域における速度増加の原因が、ブレードの伴流の速度より 5.3.1 項に述べた回転する風車の内部を通過できず風車の側面へ流れ込む流れの量による要因が大きいことを示している。また、この領域における速度増加は、揚力型風車周りの速度分布を計測した Li らの実験結果( $J=1.03$ ) [5-1] と比べて大き

い。本研究で用いる風車のソリディティ（風車外周面の面積に対する全ブレード面積の比）が通常の揚力型より大きく、回転する風車の内部を通過する流れの量が少なくなり風車側面へ流れ込む量が増え、この流れがブレードの伴流が合流することにより速度増加が大きくなるためである。

全ての周速比条件において速度の変化が  $\theta=90^\circ$  付近で最大となった後小さくなり、風車の主流下流側の部分である回転位置  $\theta=150^\circ \sim 240^\circ$  の間で極小となる。極小となる回転位置付近では周速比  $J=0.5$  において各領域の速度の差はなく、その他の周速比の条件では領域 A,B は同じ速度であるが領域 C は他の領域の速度より小さい。ここでの速度の極小値は全領域の平均値で約  $0.1\text{m/s}$  である。

各図(-b)の流れの方向の変化について、周速比  $J=0.5$  においては全回転位置を通して  $+20^\circ$  から  $-45^\circ$  の間であるが、周速比  $J=1.0$  においては領域 C を除き特に回転位置  $\theta=90^\circ$  から  $270^\circ$  にかけて方向変化の最大は  $-45^\circ$  でその流れはブレードの回転に沿った方向に近くなっている。この方向変化の傾向は周速比が大きくなるほど顕著であり、周速比  $J=1.5$  及び  $J=2.0$  においては全回転位置を通して流れの方向はブレードの周速度方向に沿った方向へ変化し、特に回転位置  $\theta=90^\circ$  から  $270^\circ$  では周速比  $J=2.0$  の領域 C を除いてブレードの回転に沿った方向とほぼ一致する。この流れのブレードの回転に沿う方向変化は、揚力型風車周りの速度分布を計測した李らの実験結果 ( $J= 1.39, 1.68, 1.78, 2.19$ ) [2-3]及び ( $J= 0.64, 1.03, 1.27$ ) [2-2]では見られない。本研究で用いる風車のソリディティが通常の揚力型より大きく、ブレードの伴流の流量が大きいためである。また風車内側の流れについては、ブレード後縁の切欠き部分の抗力増による伴流の増加がこの流れの方向変化の傾向を大きくする一因となっている。

特に風車の主流下流側となる回転位置範囲においては平均速度が小さく、また流れの方向がブレードの周速度方向に沿う方向へ変化していることにより、ブレードとブレードに対する相対流の角度（迎角）が小さくなり、これがこの範囲で発生するブレードの接線力に影響する。

これらの速度の大きさ及び方向の変化により回転するブレードが発生する接線力への影

響を検討するため、Fig.5-7において黒色で示した全領域の平均速度の大きさ及び方向の流れ（以下「計測結果の流れ」とする。）の中を各周速比でブレードが回転した場合のブレード相対流の迎角及び相対速度比（対主流）を計算し、全領域が主流速度で一定となっている一様流（以下「一様流」とする。）中におけるブレード相対速度[5-4]の迎角及び相対速度比を計算した結果と比較する。

Fig.5-8に、各周速比条件における迎角および相対速度比を示す。各図の横軸は回転位置 $\theta$ 、縦軸はそれぞれ迎角、相対速度比である。迎角は相対流がブレードの翼弦に対し風車の内側から相対する方向を正とする。それぞれの図で赤色線（図中”Measured”）のデータは計測結果の流れ中の迎角と相対速度比の変化、青色線（図中”Calculated”）のデータは3.4.2項で求めた一様流中の迎角と相対速度比の変化である。また、迎角の図中に黄色で塗りつぶした範囲は、3.4.1項で示したハイブリッドブレードの空力特性において負の接線力を発生する迎角の範囲を示す。

回転位置 $\theta=90^\circ$ 付近での流速の増による影響により、周速比 $J=0.5$ （Fig.5-8 (1)）において計測結果の流れ中のブレードが回転位置 $\theta=90^\circ$ にある時の相対速度比は一様流中に対し0.05大きい。この時迎角は $180^\circ$ 前後であり抗力による発電に有効な接線力を発生しており、回転位置 $\theta=90^\circ$ 付近での流速の増加はこの正の接線力を増加する効果がある。周速比 $J=1.0$ （Fig.5-8 (2)）において、一様流中では迎角は $90^\circ$ 以下でブレードが回転位置 $\theta=90^\circ$ にある時相対速度比は0であるが、計測結果流れ中では回転位置 $\theta=90^\circ$ 付近での流速の増による影響によりこの位置での迎角を $180^\circ$ まで大きくなり相対速度比が0.2以上となる。これにより一様流中では発生しない抗力による正の接線力を発生する効果がある。また、この時ハイブリッドブレードの翼型の切欠による接線力増が得られる迎角 $150^\circ\sim 180^\circ$ の範囲となる回転位置があり、ハイブリッドブレードの効果が有効となる。周速比 $J=1.5$ （Fig.5-8 (3)）及び $J=2.0$ （Fig.5-8 (4)）においては、全体に迎角は小さく抗力による正の接線力は発生しない。以上の結果より、ブレードの周速度方向が主流方向と一致している回転位置 $\theta=90^\circ$ 付近での流速の増による影響により周速比 $J=0.5\sim 1.0$ において抗力による正の接線力は大きくなり、ハイブリッドブレードの効果も大きくなる。

風車の主流下流側の部分での流れの速度の減少及びブレード周速度方向に沿う方向変化の影響により、周速比  $J=0.5$  において計測結果の流れ中ではブレードが回転位置  $\theta=220^\circ$  以下では一様流中の時に対し迎角が小さく特に  $\theta=130^\circ \sim 200^\circ$  付近でその差が大きくこの時相対速度も小さい。この迎角の減少により負の接線力を発生する回転位置範囲が一様流中の  $\theta=185^\circ \sim 240^\circ$  から計測結果流れ中では  $\theta=140^\circ \sim 265^\circ$  へ増加し、揚力に起因する正の接線力が減少する。周速比  $J=1.0$  でもこの影響を受ける回転位置の範囲 ( $\theta=110^\circ \sim 250^\circ$ ) において一様流中の時に対し計測結果流れ中の迎角、相対速度とも小さい。これにより、負の接線力を発生する回転位置範囲が一様流中においての  $\theta=160^\circ \sim 230^\circ$  から計測結果流れ中では  $\theta=120^\circ \sim 135^\circ$  へと減少し、揚力に起因する正の接線力が増加する。周速比  $J=1.5$  及び  $J=2.0$  においては回転位置  $\theta=135^\circ$  以上にある時一様流中の時に対し計測結果流れ中の迎角は小さく、負の接線力を発生する迎角が  $-20^\circ \sim -60^\circ$  及び  $20^\circ \sim 60^\circ$  となる回転位置の範囲は小さくなり、迎角が  $-5^\circ \sim 5^\circ$  となる回転位置の範囲が大きくなる。一方、風車の主流上流側部分からブレードの周速度方向が主流方向と一致している位置にわたる回転位置が  $\theta=135^\circ$  より小さい範囲ではブレード周速度方向に沿う方向変化の影響により一様流中の時に対し計測結果流れ中の方が負の接線力を発生する迎角が  $-20^\circ \sim -60^\circ$  及び  $20^\circ \sim 60^\circ$  となる回転位置の範囲が小さくなり、この回転位置範囲での正の接線力は増加する。以上の結果より、風車の主流下流側の部分での流速の減及びブレード周速度方向に沿う方向変化の影響により、揚力による正の接線力が周速比  $J=0.5$  では減少し、周速比  $J=1.0$  においては増加する。周速比  $J=1.5$  及び  $J=2.0$  においては、揚力による正の接線力が増加する回転位置範囲と減少する回転位置範囲がある。

また、周速比  $J=1.5$  及び  $J=2.0$  における回転位置  $\theta=180^\circ \sim 360^\circ$  範囲における迎角の値は  $\pm 5^\circ$  の範囲内である。Fig.5-8 (3)及び(4)の迎え角の図中に示す紫色の線は、回転位置  $\theta=90^\circ \sim 270^\circ$  において流れの方向のブレードの周速度方向に沿った方向へ変化がないと仮定した ( $\varphi_m=0^\circ$  とする) 場合の迎角の変化を示し、通常の揚力型風車による迎角の変化を推定したものである。

この流れの方向変化により迎角は約  $10^\circ$  減少しているが、この結果は揚力型風車周りの

速度分布を計測した李らの実験結果( $J=1.39, 1.68, 1.78, 2.19$ )(李他, 2014a)[5-2]で  $10^\circ \sim 20^\circ$  まで変化していることと一致する。風車の主流下流側から回転方向に沿って上流側へ向かう回転位置範囲の領域において、李らの実験でも見られた流れの速度が小さくなっていることに加え李らの実験では現れず本研究において明らかとなったブレード周速度方向に沿った方向へ変化している流れが迎角を小さくする影響を与えていることを示している。また、これによりこの領域で発生する揚力による接線力が減少している。

Fig.5-8 の迎角及び相対速度比の変化から各周速比条件におけるブレードの発生する接線力を求めた結果を Fig.5-9 に示す[5-6]。各図の横軸は回転位置  $\theta$ 、縦軸は接線力係数であり、それぞれの上の図において黒色線は接線力係数  $C_T$ 、青色線は接線力係数の揚力による成分  $C_{TL}$ 、赤色線は抗力による成分  $C_{TL}$  であり、下の図は 3.4.2 項において定義した  $C_{Tb}$  を表し赤色線（図中”Measured”）の Fig.5-8 の迎角及び相対速度比による  $C_{Tb}$ 、青色線（図中”Calculated”）のデータは 3.4.2 項で求めた一様流中による  $C_{Tb}$  である。

周速比  $J=0.5$  (Fig.5-9 (1)) では、回転位置  $\theta=90^\circ$  付近で抗力による接線力が増加しており、 $\theta=130^\circ$  付近では揚力による接線力が低下している。 $\theta=130^\circ \sim 230^\circ$  付近では相対速度及び迎角の減少により接線力が負であるが一様流中に比べて増加(負値の減少)している。全周の風車ブレード接線力係数の平均値  $C_{Tb(ave.)}$  は、一様流中においては負値であった(3.4.3 項)が、計測結果によれば約+0.016 となる。また、正の接線力を発生している部分の抗力に起因する接線力の比率は約 56%、揚力に起因する接線力は 44% である。

周速比  $J=1.0$  (Fig.5-9 (2)) では、回転位置  $\theta=90^\circ$  付近で抗力による接線力がわずかではあるが発生している。風車の主流後流側である  $\theta=150^\circ \sim 230^\circ$  では一様流中においては負値であったが、計測結果では正值となっており接線力の平均値の増加に寄与している。全周の風車ブレード接線力係数の平均値  $C_{Tb(ave.)}$  は約+0.078 となる。また、正の接線力を発生している箇所では揚力に起因する接線力がそのほとんどであるが、抗力に起因する接線力はその比率 2%程度であるが存在する。

周速比  $J=1.0$  (Fig.5-9 (2)) では、回転位置  $\theta=90^\circ$  付近で抗力による接線力がわずかではあるが発生している。風車の主流後流側である  $\theta=150^\circ \sim 230^\circ$  では一様流中においては負

値であったが、計測結果では正值となっており接線力の平均値の増加に寄与している。全周の風車ブレード接線力係数の平均値  $C_{Tb(ave.)}$  は約+0.078 となる。

周速比  $J=1.5$  (Fig.5-9 (3)) 及び周速比  $J=2.0$  (Fig.5-9 (4)) では、一様流中に比べて計測結果では接線力の変動が縮小している。特に風車の主流後流側である  $\theta=120^\circ \sim 220^\circ$  では一様流中においては大きく負値であったが、計測結果では負値が減少し全周の接線力の平均値は増加する。全周の風車ブレード接線力係数の平均値  $C_{Tb(ave.)}$  は周速比  $J=1.5$  では約+0.010 と正の値であるが、周速比  $J=2.0$  では約-0.004 と負の値となる。

### 5.3.3 パワー係数への影響

5.3.2 で求めた各周速比における全周の風車ブレード接線力係数の平均値  $C_{Tb(ave.)}$  から式 (3-12)により風車のパワー係数  $C_P$  を求め、3.4.3 で計算により求めた一様流中における周速比とパワー係数  $C_P$  との関係との比較を Fig.5-10 に示す。横軸は周速比  $J$ 、縦軸はパワー係数  $C_P$  であり、黒色実線点は一様流中のパワー係数  $C_P$  (図中”Calculated”)、黒色●印点線は実験結果から求めたパワー係数  $C_P$  (図中”Measured”) を示す。さらに、○印はハイブリッドブレードを用いた風力発電機の実機の風洞試験結果[3-3]から推測したパワー係数  $C_P$  である。

計測した全ての周速比条件においてパワー係数  $C_P$  の値は、一様流中に対し計測結果の流れでは増加している。 $J=0.5, 1.0, 1.5$  ではその値は正值であり、 $J=1.0$  において最大となっている。これは、この周速比の条件で風車が有効な出力を出す能力があり、 $J=1.0$  においてその出力が最大であることを示す。この結果は、ハイブリッドブレードを用いた風力発電機の実機の発電時の周速比が  $0.8 \sim 1.0$  であることと矛盾しない。また周速比  $J=0.5$  と  $1.0$  の間の○印風洞試験結果の値より少し高い値となっているが、風洞試験結果の出力が発電機などの機器の損失を含んでいることを考慮すれば妥当な値である。

周速比  $J=0.5, 1.0, 1.5$  においてパワー係数  $C_P$  が正值であることから、 $J=1.5$  間ではスムーズに加速することが可能であり、また 5.3.2 で述べた通り  $J=0.5, 1.0$  では抗力による接線力が発生しており、この間の加速には抗力による接線力が寄与している。Fig.5-10 の  $J=0.5$



の位置にプロットした赤色○印は、切欠きがないと仮定し迎角  $150^\circ \sim 180^\circ$  の範囲における抗力増加がないとした場合の全周の風車ブレード接線力係数の平均値  $C_{Tb(ave.)}$  ( $=-0.004$ ) から求めた風車のパワー係数  $C_p$  であり負の値である。つまり切欠きの抗力増加による接線力増加がない場合、 $J=0.5$  において風車はこの周速比（回転数）を維持することも加速することもできない。

#### 5.3.4 圧力分布による接線力の検討 [5-7]

前項で調べた速度分布のブレードに発生する接線力への変化を確認するため、PIV 計測で計測した速度場から圧力場を計算し、ブレード周りの圧力分布からブレードに発生する接線力を求める。

PIV 計測で計測した速度場から圧力場への計算は、非圧縮流のナビエ・ストークス方程式および連続の式から渦法を用いて導いた

$$\nabla^2 P = -2\rho \left[ \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right) \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \quad (5-2)$$

により、主流の圧力を 0 とした差圧が求まる。[5-8] この式において、それぞれ位置  $(x, y)$  における  $P$  は圧力（場）、 $\rho$  は密度、 $u, v$  は  $X, Y$  方向の速度成分である。

ブレードに発生する接線力は、Fig.5-11 に示すブレード周り（表面から 0.5 mm）に設定したサンプリングポイントにおける圧力分布  $p$  を補間により計算し、この圧力分布  $p$  をブレード表面の法線方向のベクトル  $\mathbf{p}$  としブレード表面で積分することによって得られる力  $\mathbf{F}$  の接線方向成分  $T$  である。本章においては接線力  $T$  を、主流速度  $V$  と 1 枚のブレード面積  $S_b$ （ここでは  $p$  を積分した面積）により無次元化した風車ブレード接線力係数  $C_{Tb}$

$$C_{Tb} = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho V^2 S_b} \quad (5-3)$$

を用いて議論する。切欠きより前縁側のブレード前縁内部の表面の圧力が含まれないため、この方法による風車ブレード接線力係数  $C_{Tb}$  には、切欠きの影響で抗力が増加することによる接線力の増加は含まれない。

風車ブレード接線力係数  $C_{Tb}$  を、各周速比  $J$  のケースにおいて回転位置  $\theta=0^\circ$  から  $337.5^\circ$  まで  $22.5^\circ$  毎 16 箇所 of ブレードについて求めた結果を Fig.5-12 に示す。図中の(a)は周速比  $J=0.5$  のケース、(b)は  $J=1.0$ 、(c)は  $J=1.5$ 、(d)は  $J=2.0$  である。各図の横軸はブレード回転位置、縦軸は風車ブレード接線力係数  $C_{Tb}$  であり、青点は圧力分布から求めた接線力係数（図中”Measured”）、赤線は 3.4.2 項で求めた一様流中における計算値（図中”Calculated”）を示す。

全てのケースにおいて圧力から求めた接線力係数の変化の幅は、一様流中の計算値の変化の幅に対し縮小している。特に一様流中の計算で接線力係数が大きく負となっている回転位置  $\theta=180^\circ$  前後において、圧力分布から求めた接線力係数はほとんど変化していない。これらの結果は、5.3.3 項で検討したこの回転位置における迎角の減少による接線力の絶対値及び変化の縮小することと一致している。

#### 5.4 第5章のまとめ

ハイブリッドブレードを用いた風車周りの速度場を、コンディショナル・サンプリング・PIV を用いて計測し、ブレードの発生する接線力に影響する流れを明らかとし、これらの流れによるブレード迎角及び相対速度の変化が接線力にどのように影響するかを検討した。その結果より次のことが明らかとなった。

- (1) 本風車のソリディティが大きいことにより回転する風車の内部を通過できない流れが増加し、風車の内部を通過できない流れが風車ブレードの伴流と合流することにより、ブレードの周速度方向が主流方向と一致している側の流れの速度が主流速度より大きい。この領域の平均速度の最大は周速比によらず主流速度の 1.0 倍から 1.14 倍である。
- (2) 本風車のソリディティが大きいことにより回転するブレードの伴流が多くなり、ブレード周りの流れの方向は回転するブレードの周速度方向へ変化している。周速比が大きくなるほどこのブレード周速度方向への方向変化は大きくなる。

- (3) (1)項の流れの影響により、周速比  $J=0.5$  から  $J=1.0$  において抗力による接線力が増加し、ハイブリッドブレードの抗力によるより大きな接線力を得る効果も大きくする。
- (4) (2)項の流れの方向の周速度方向へ変化と下流側の領域における流れの速度が低下により、下流側から回転方向に沿って上流側へ向かう回転位置範囲の領域において迎角及び相対速度が小さくなる。特に流れの方向変化の影響は周速比  $J=1.5, 1.0$  で大きく迎角が最大で約  $10^\circ$  減少する。この影響により、揚力による接線力が周速比  $J=0.5, 1.5, 2.0$  において減少し、周速比  $J=1.0$  においては増加する。

さらに、回転するブレード相対流の迎角及び相対速度比及びから回転角全周にわたるブレードが発生する接線力係数の平均値から求めたパワー係数  $C_p$  による検討では、ハイブリッドブレードを用いた風車の発電時の周速比の条件において、一様流中における計算結果では有効な発電できないものが、風車周りの流れの影響により周速比  $J=1.5$  以下では有効な発電が可能であり、その発電効率は周速比  $J=1.0$  付近で最大となることが明らかとなった。また、周速比  $J=0.5$  においてパワー係数  $C_p$  が正值となるのはハイブリッドブレードの切欠きの効果の影響によるものであり、これにより停止状態から発電回転数 ( $J=1.0$  付近) までの加速が可能であることが明らかとなった。

以上のことから、ハイブリッドブレードを用いた風車は、ソリディティを大きくすることによる風車周りの流れの変化により、

- ・ 切欠きの効果を含む抗力による接線力を大きくし、発電回転数までの加速を容易にしている
- ・ 周速比が大きい条件では、ブレードに発生する揚力による接線力が減少し、最大効率となる周速比が通常の揚力型風車より小さい

という性能の特徴の要因が明らかとなった。

## 5.5 第5章 参考文献

- [5-1] Li, Q., Maeda, T., Kamada, Y., Murata, J., Kawabata, T. and Kogaki, T., Study on flow around straight-bladed vertical axis wind turbine under low tip speed ratio, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol.9, No.3 (2014b), DOI: 10.1299/2014jst0051.

- [5-2] 李慶安, 前田太佳夫, 鎌田泰成, 村田淳介, 川端俊亮, 古河和馬, 小垣哲也, 直線翼垂直軸風車周りの流れに及ぼす翼枚数の影響, *日本機械学会論文集*, Vol.80, No.816 (2014a), DOI: 10.1299/transjsme.2014fe0223.
- [5-3] 本多正明, 武居昌宏, 都徳照, 後縁に切欠きのある翼型を用いた垂直軸型風車周りの流れの P I Vによる計測, *日本機械学会論文集*, Vol.82, No.843 (2016 11/25 公開予定), DOI: 10.1299/transjsme.16-00241.
- [5-4] 関和希, 牛山泉, 垂直軸風車, (株)パワー社 (2008).
- [5-5] 江口正一, 石井進, 平木政明, 野口常夫, 平野孝典, 田中美穂, 藤本一郎, 風車用切欠き翼の空力特性に関する研究, 第 33 回ガスタービン定期講演会, A-17 (2005).
- [5-6] 本多正明, 武居昌宏, 都徳照, コンディショナル・サンプリング・P I Vによる風力発電用垂直軸型風車周りの流れの計測, 日本機械学会 2014 年度年次大会, J0510204, 東京, (2014).
- [5-7] 本多正明, 武居昌宏, 都徳照, “コンディショナル・サンプリング P I Vによる風力発電用垂直軸型風車周りの流れの計測”, *日本機械学会論文集 B 編*, Vol.79, No.808 (2013), pp. 2572-2576.
- [5-8] D.H. Doh, G.R. Cho, C.J. Lee, Y.H. Kim<sup>1</sup>, J.E. Choi, and M. Takei, Direct PIV-PTV Algorithm using Affine Transformation and its Application for the Calculation of Pressure Fields, *The 8th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing*, Moscow State University Moscow,(2011).

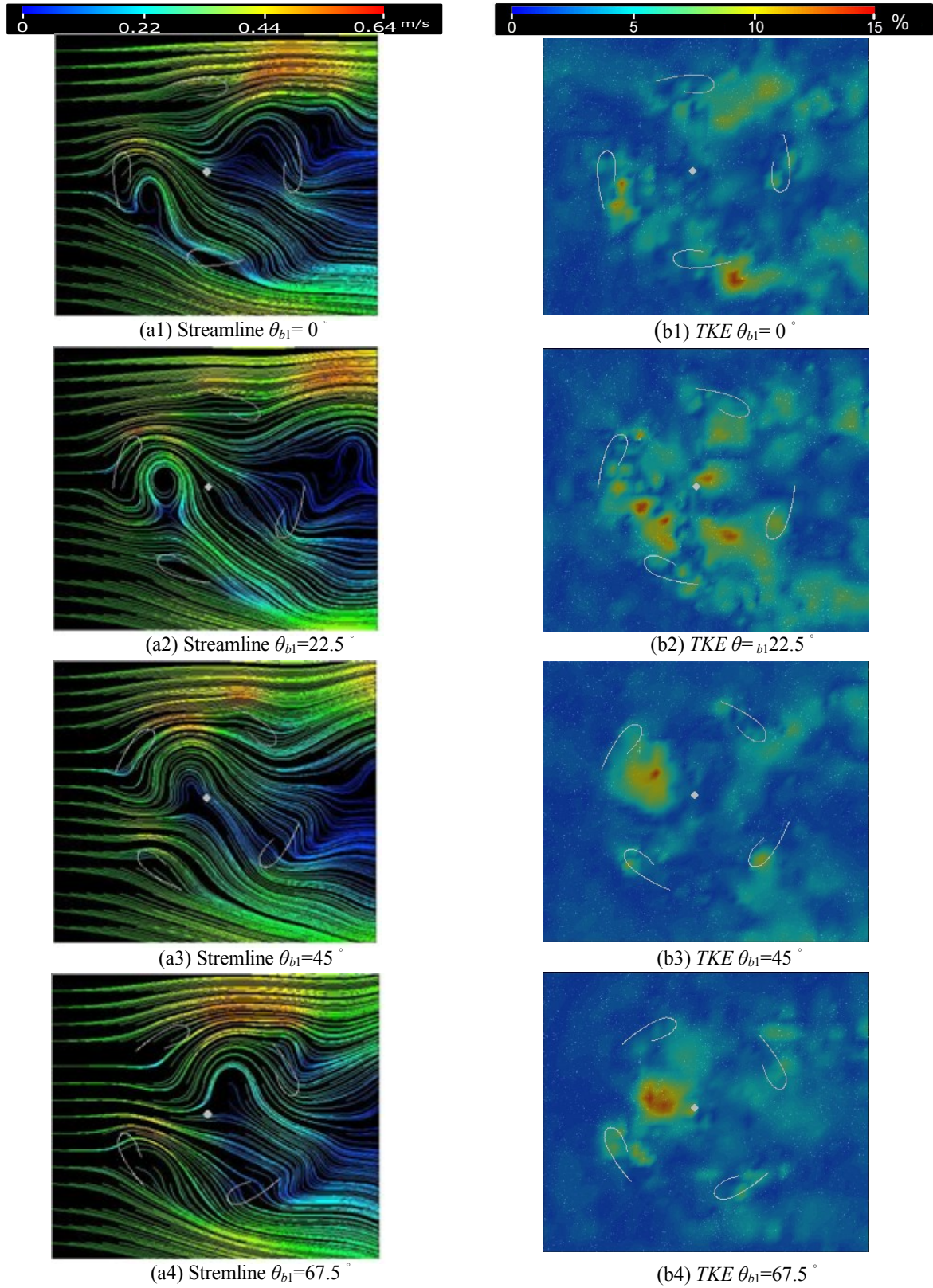


Fig.5-1 The phase-averaging velocity shown by streamlines and TKE at  $[J = 0.5]$ .



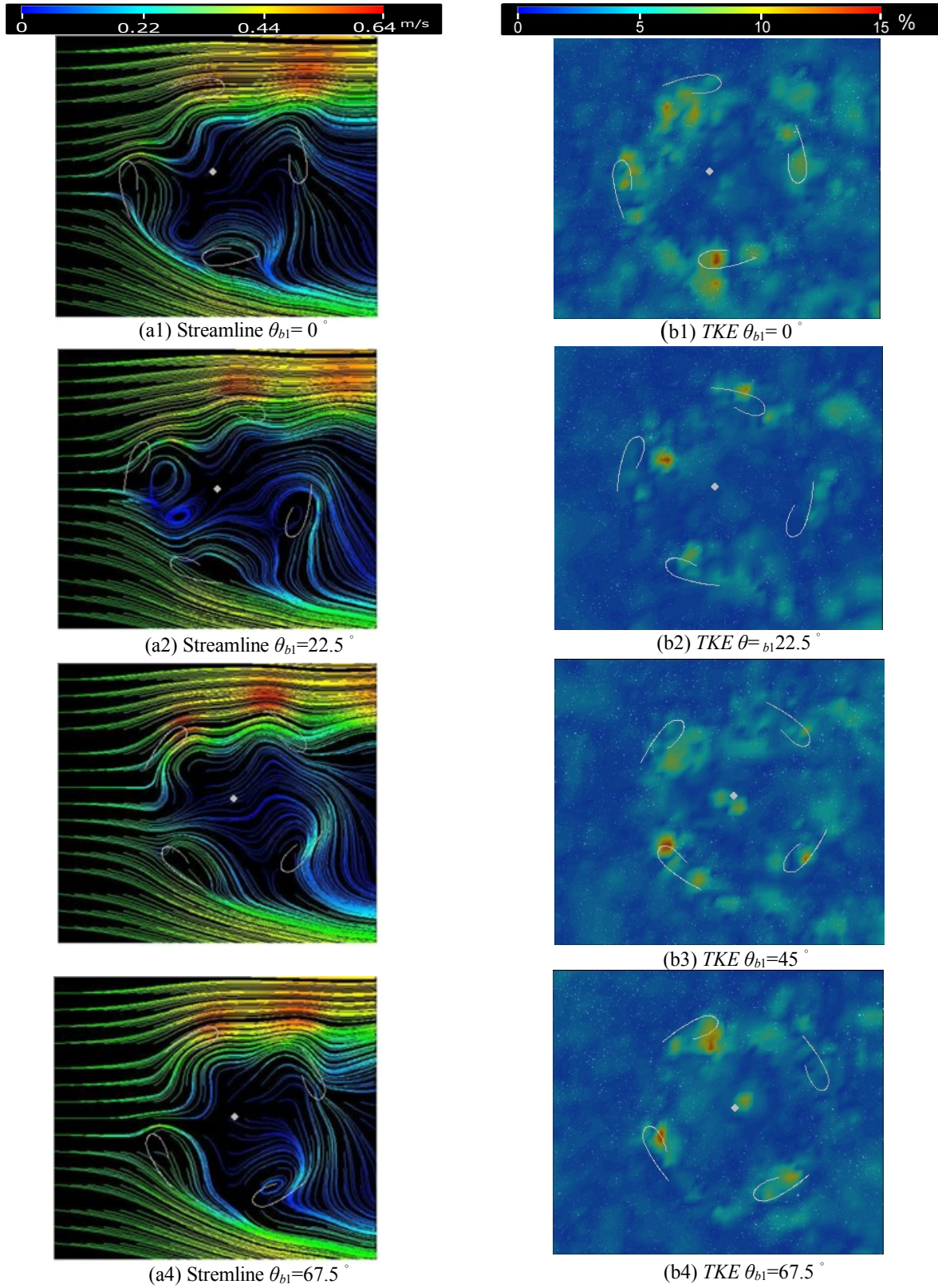


Fig.5-2 The phase-averaging velocity shown by streamlines and TKE at  $[J = 1.0]$ .

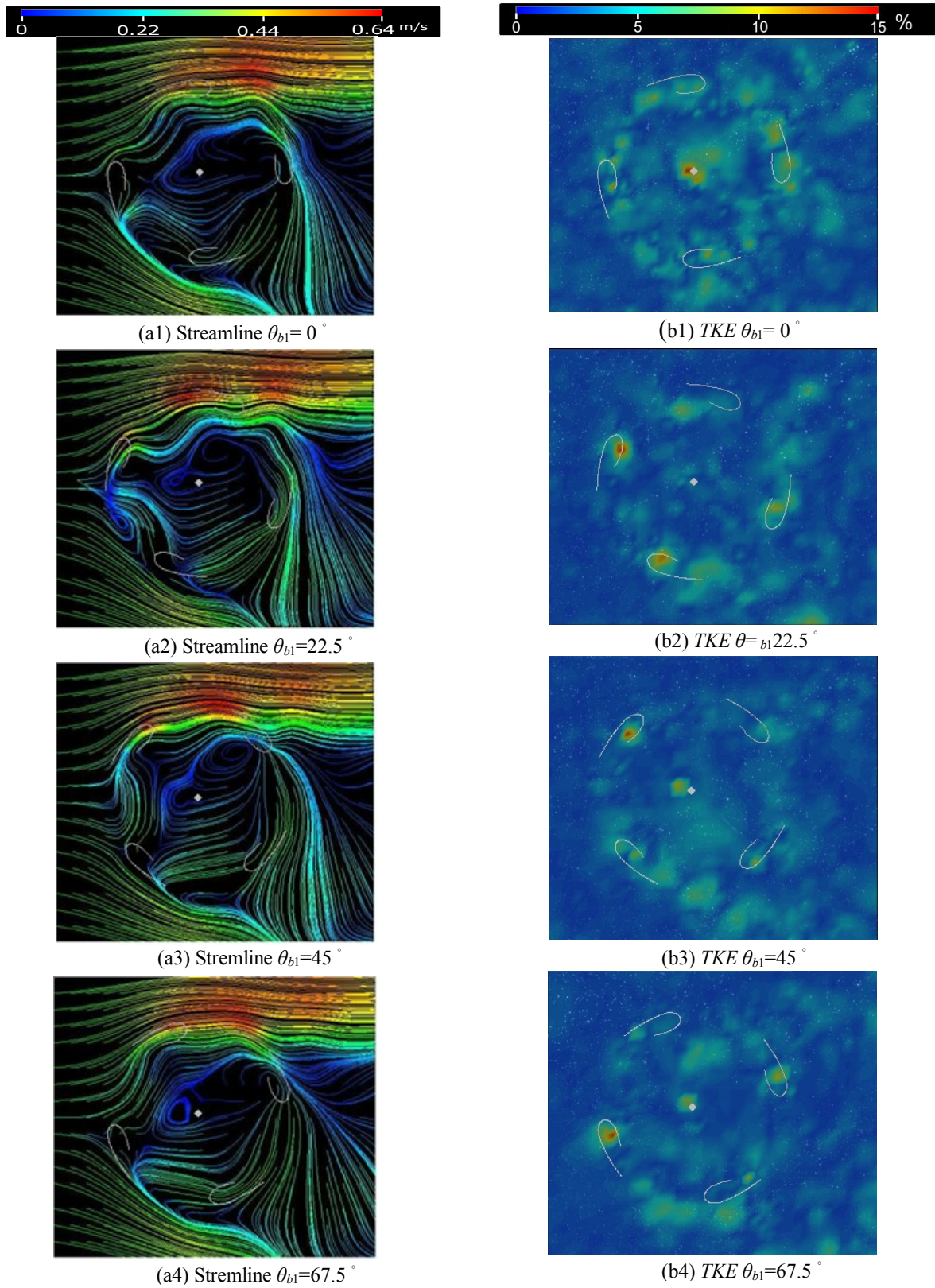


Fig.5-3 The phase-averaging velocity shown by streamlines and TKE at  $[J = 1.5]$ .



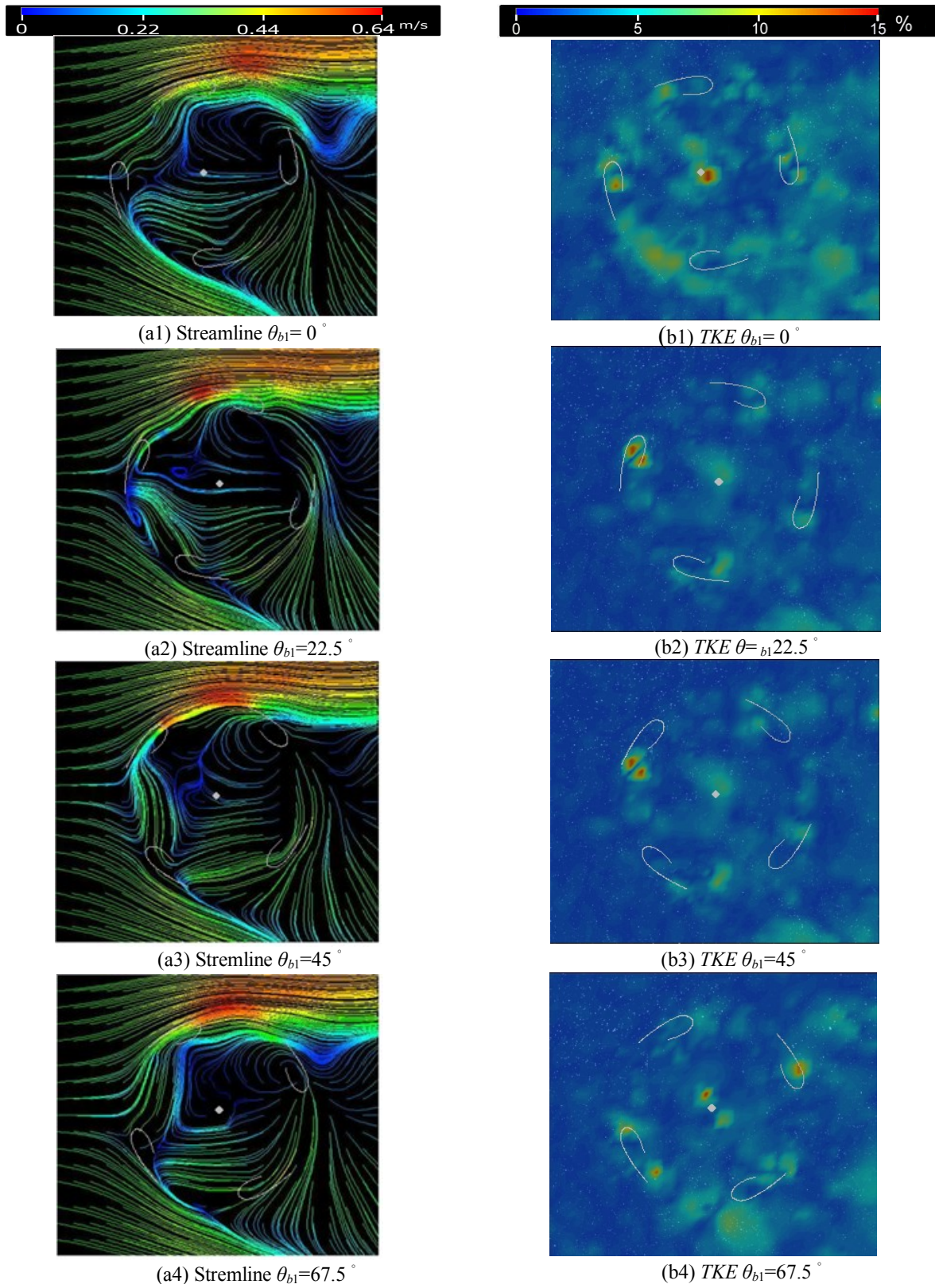


Fig.5-4 The phase-averaging velocity shown by streamlines and TKE at  $[J = 2.0]$ .



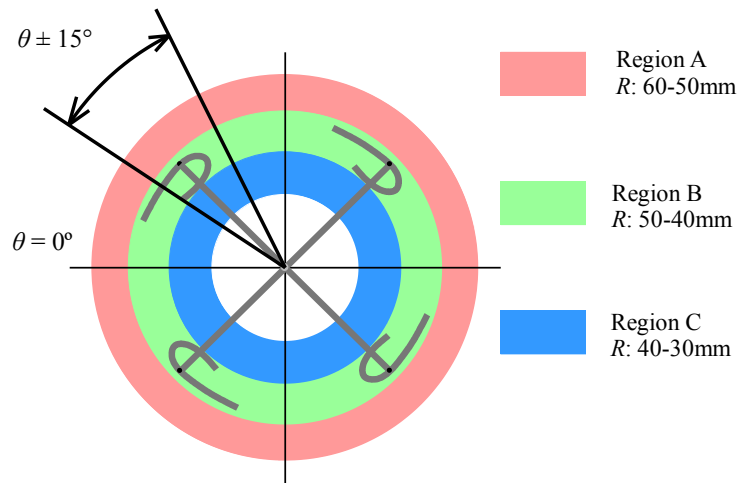


Fig.5-5 Regions of Profiling Velocity Vector Fields

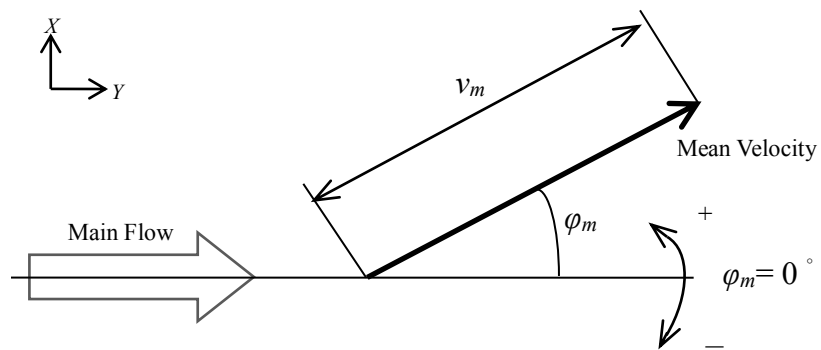


Fig.5-6 Definitions of magnitude  $v_m$  and the direction  $\varphi_m$  of mean velocities

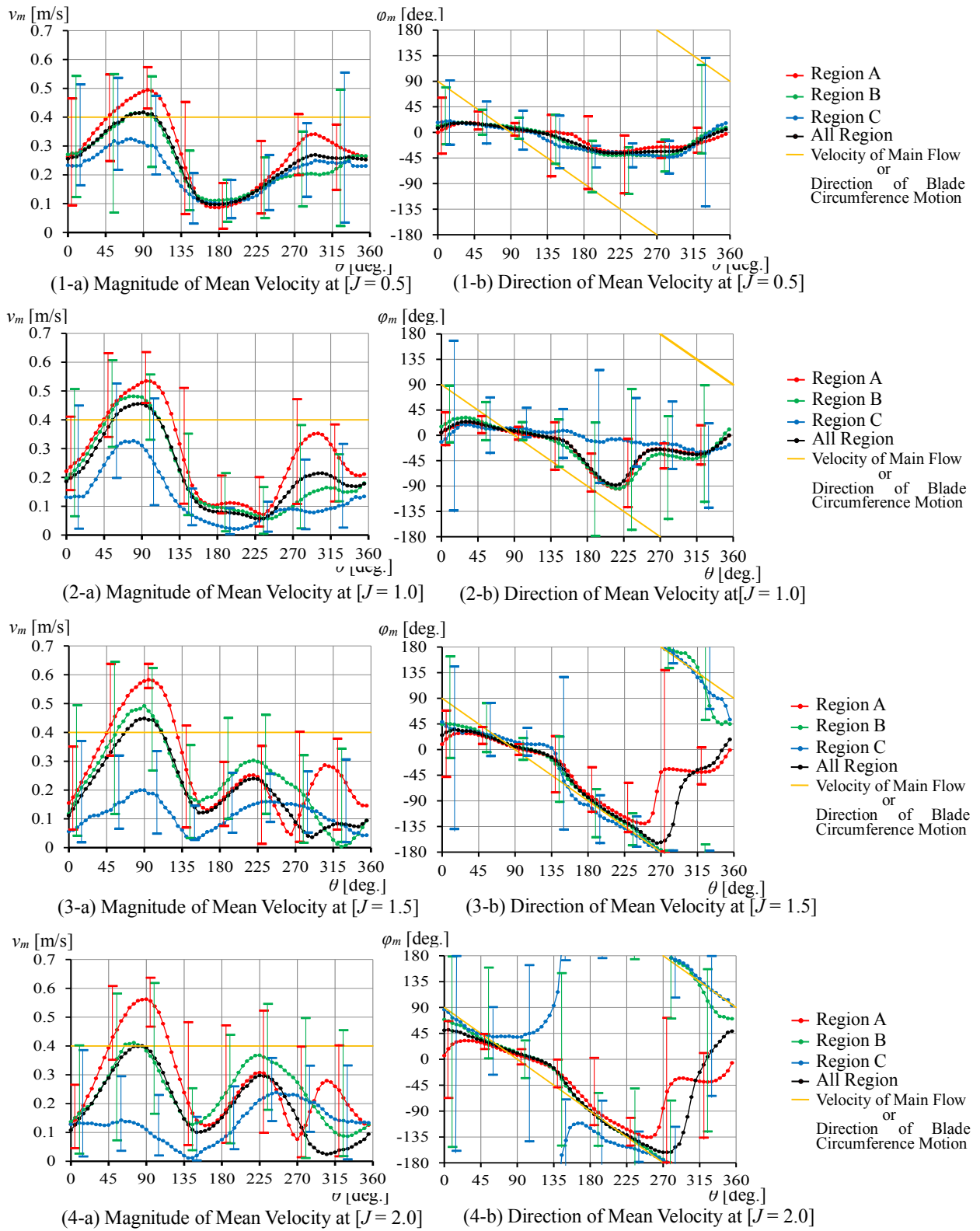


Fig.5-7 Profile of the mean velocity around blades

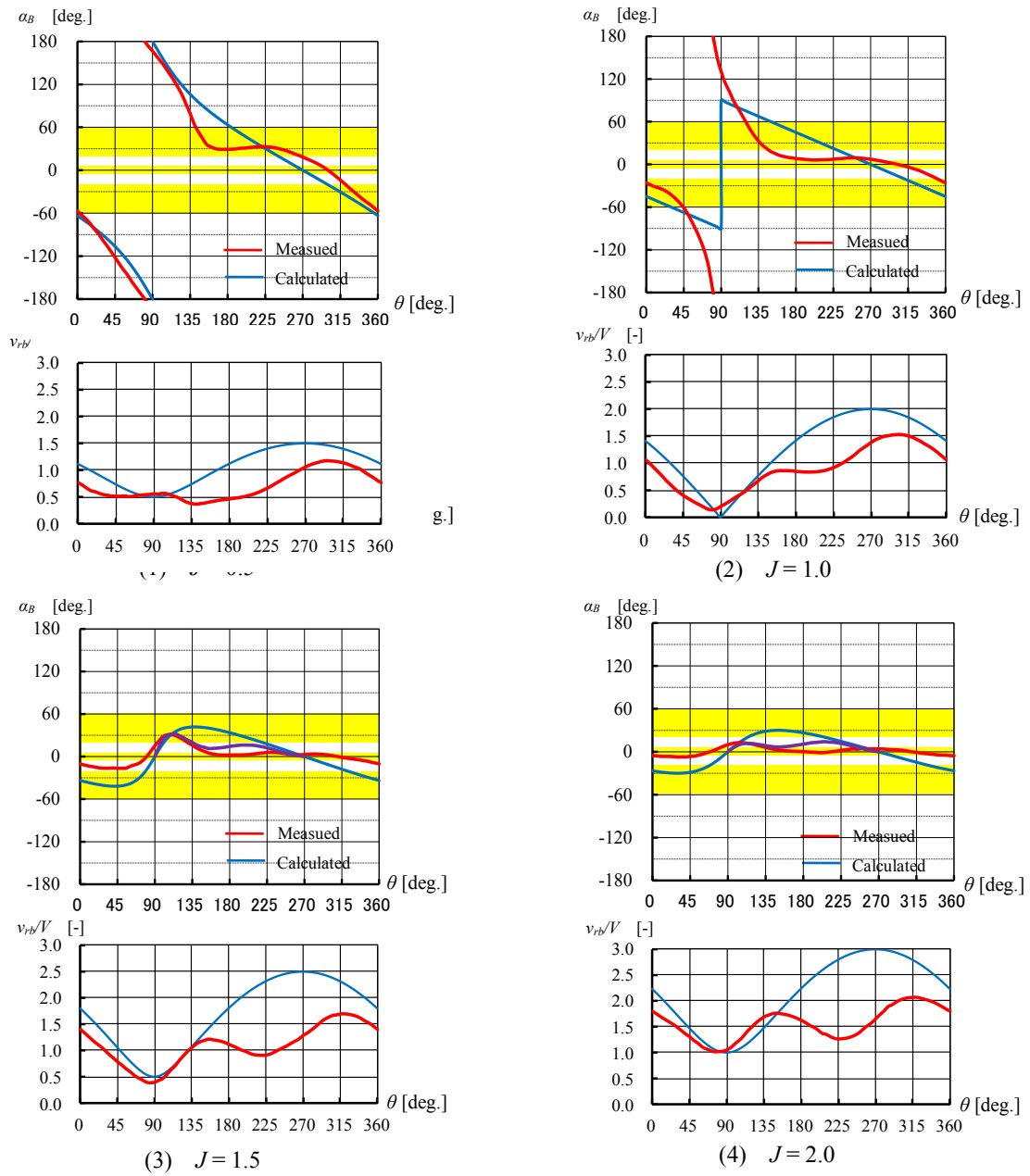


Fig.5-8 Alternation of angle of attack and relative flow speed ratio to the main flow of blades.

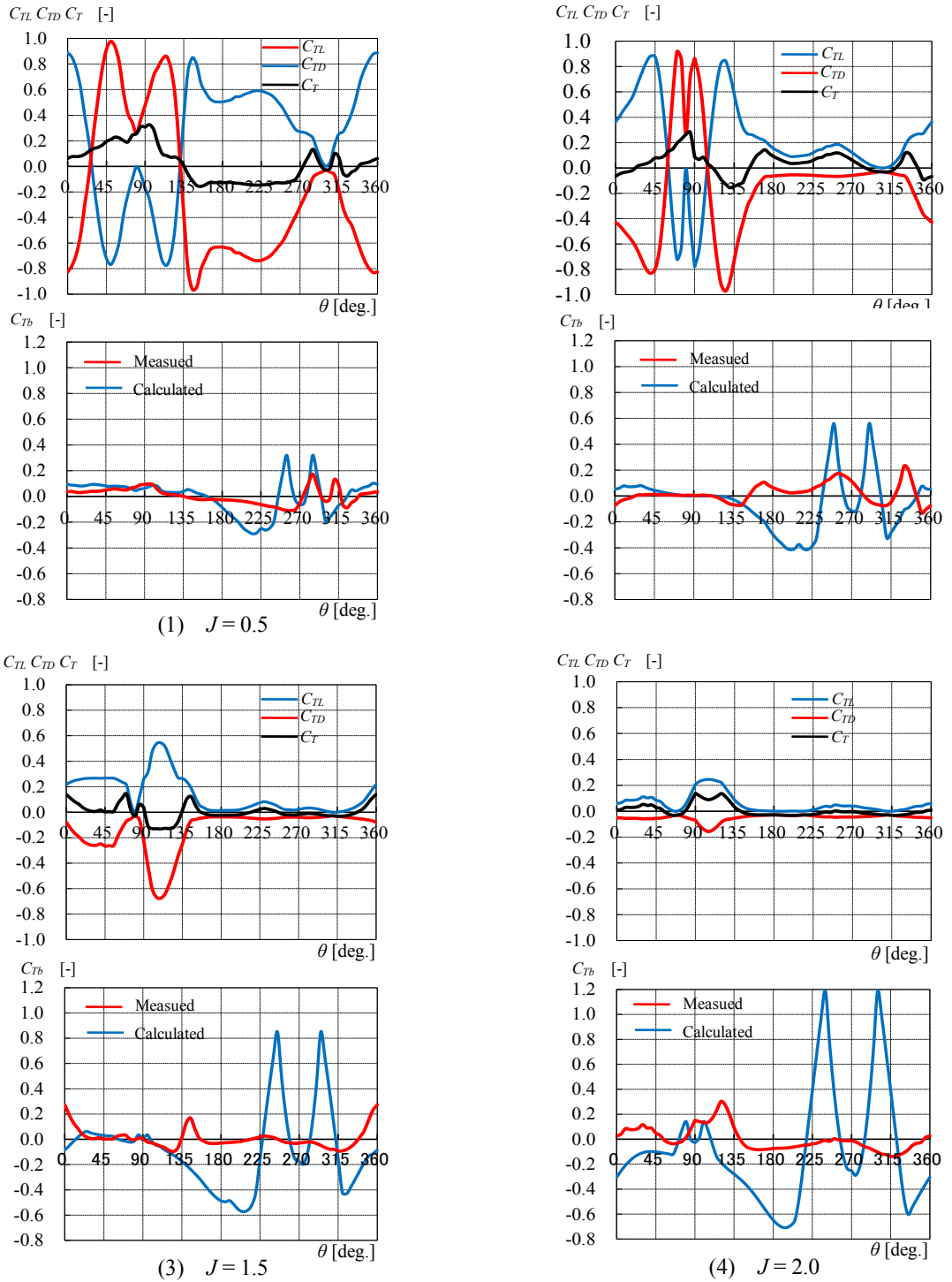


Fig.5-9 Alternation of coefficient of tangential force.

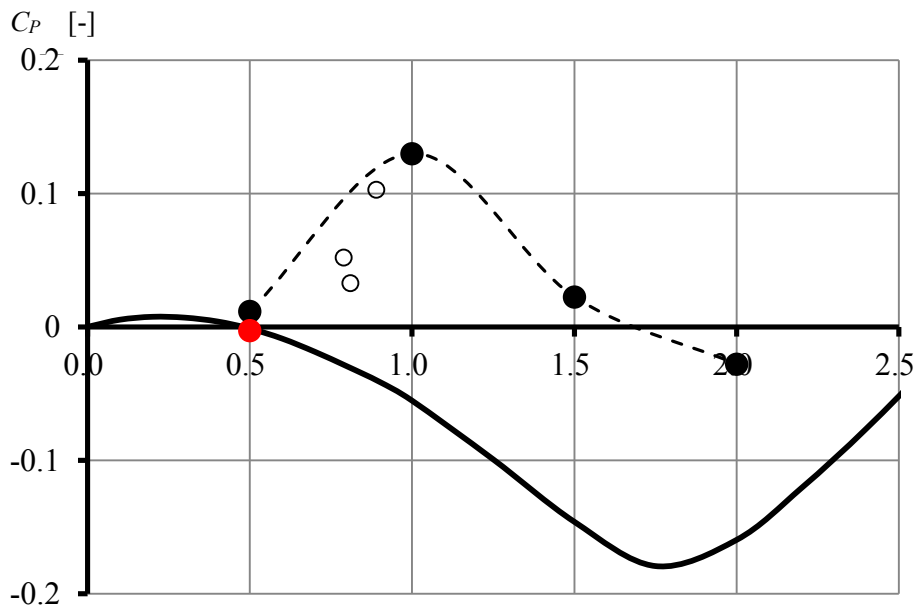


Fig.5-10 Averaged coefficient of tangential force (calculated and measured)

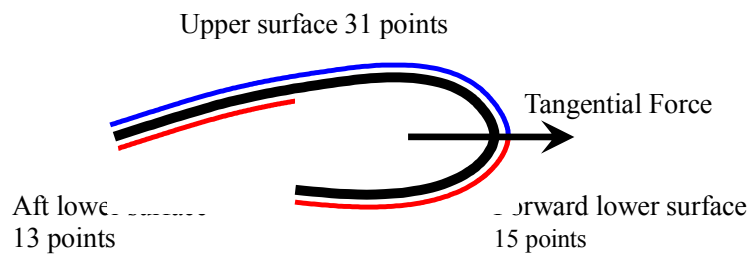


Fig.5-11 Sampling points for the pressure distribution

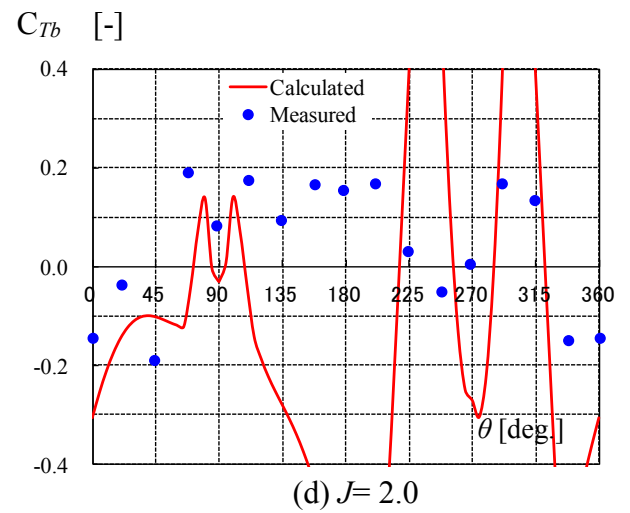
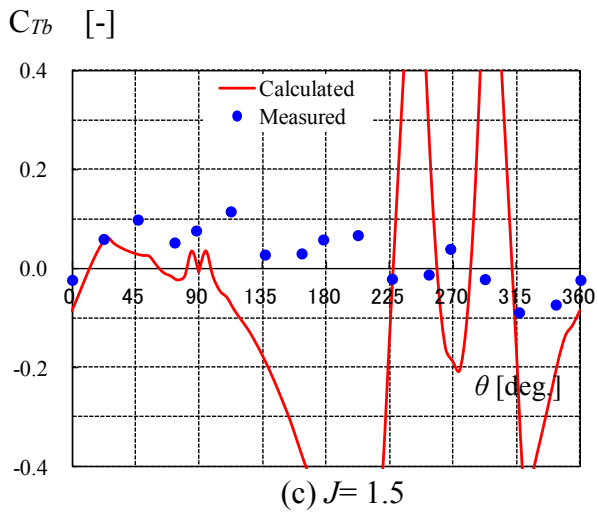
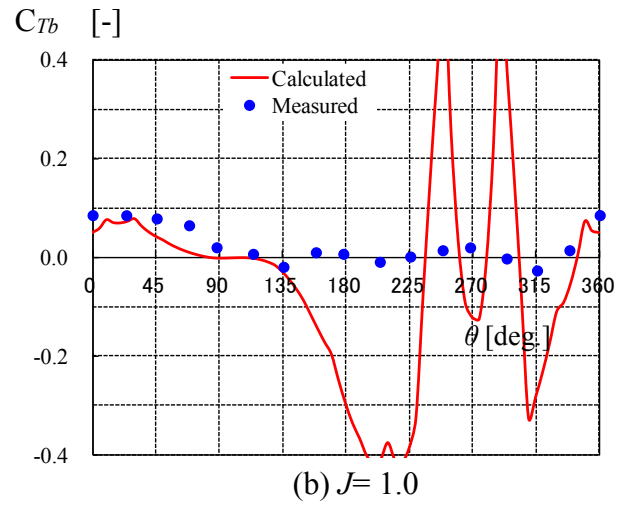
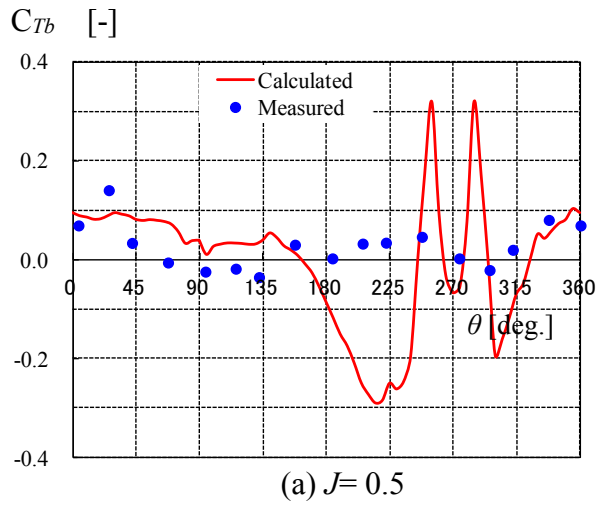


Fig.5-12 Coefficient of tangential force (calculated and measured)

Table 5-1 Maximum standard deviation and minimum standard deviation of magnitude and direction at each measuring point data in Figs. 15 – 18. Condition of tip speed ratio and  $\Delta t$

Tip Speed Ratio $J [-]$	Region A Standard deviation		Region B Standard deviation		Region C Standard deviation	
	Magnitude	Direction	Magnitude	Direction	Magnitude	Direction
	max-min. [m/s]	max-min. [deg.]	max-min. [m/s]	max-min. [deg.]	max-min. [m/s]	max-min. [deg.]
0.5 (Fig. 15)	0.105 - 0.0118	44.0 - 2.81	0.147 - 0.0336	42.9 - 8.04	0.197 - 0.0218	84.8 - 5.54
1.0 (Fig. 16)	0.114 - 0.0150	37.7 - 2.63	0.168 - 0.0195	94.6 - 5.25	0.169 - 0.0908	106 - 6.54
1.5 (Fig. 17)	0.142 - 0.0141	108 - 1.74	0.176 - 0.0170	164 - 2.39	0.124 - 0.0157	186 - 10.1
2.0 (Fig. 18)	0.165 - 0.0282	112 - 3.19	0.193 - 0.0308	178 - 4.95	0.145 - 0.127	193 - 13.5

Table 5-2 Maximum magnitude of mean velocity  $v_{mMax}$  around  $\theta=90$  deg. in each region and the average values of all regions by tip speed ratio.

Tip Speed Ratio $J [-]$	Region A $v_{mMax}$ [m/s]	Region B $v_{mMax}$ [m/s]	Region C $v_{mMax}$ [m/s]	Average all regions $v_{mMax}$ [m/s]
0.5	0.494	0.417	0.325	0.417
1.0	0.535	0.482	0.327	0.456
1.5	0.580	0.492	0.199	0.448
2.0	0.557	0.411	0.128	0.400

## 第6章 風車ブレード翼端周りの流れの コンディショナル・サンプリング・ステレオ PIV 計測

### 6.1 第6章の緒言

垂直軸型風車における風車性能に影響を与えるブレード翼端に発生する渦に関する研究については、コンディショナル・サンプリングステレオ PIV を用いて揚力型風車についてブレード翼端で発生した渦を含む風車周り及びその後流側の流れを計測した例[6-1]やブレード翼端の渦の発生箇所から渦の移動する流れを計測した例があり[6-2]、通常の揚力型風車の発電時の周速比が比較的大きい(2.0 以上)条件において渦の存在は知られている。しかしハイブリッドブレードを用いた風車の発電時のような小さい周速比における翼端渦の研究例はない。

この章では、ハイブリッドブレードを用いた垂直軸型風車において渦の発生源に注目し、ブレード翼端周りの流れの 3D 速度場をコンディショナル・サンプリング・ステレオ PIV により計測し、垂直軸型風車の性能に影響する要因の一つである風車のブレード翼端に発生する翼端渦の発生源となる流れの状況について、風車の周速比に対する変化を調べる。

### 6.2 実験[6-3]

#### 6.2.1 実験条件

本章における実験では、周速比  $J=0.5$  及び  $J=1.0$  において主に接線力を発生しており（第5章結果）流れに対し垂直に動き複雑な渦を発生していることが考えられ、発生した渦が下流側にあるブレードに干渉する可能性があることから、主流上流側のブレードに注目し翼端周りの流れを計測する。計測するブレードの回転位置  $\theta$  は、 $\theta=22.5^\circ, 45^\circ$  とする。

PIV 計測面は、風車の回転軸に垂直な  $X$ - $Y$  面で、 $Z$  位置についてはブレード翼端部 ( $Z=+73$  mm) である。計測範囲を Fig.6-1 に示す。計測範囲は  $40$  mm  $\times$   $40$  mm で、ブレードの回転位置  $\theta=22.5^\circ$  の計測条件では対角 ( $X=-30$  mm,  $Y=0$  mm) - ( $X=-70$  mm,  $Y=+40$  mm)、ブレードの回転位置  $\theta=45^\circ$  の計測条件では対角 ( $X=-65$  mm,  $Y=+50$  mm) - ( $X=-25$  mm,  $Y=+10$  mm) である。



## 6.2.2 実験結果

実験により計測した速度場について、 $u$ - $v$  速度場を流線、 $w$  速度場を背景の色で表現したものを、ブレード回転位置  $\theta=22.5^\circ$  のケースについて Fig.6-2,  $\theta=45^\circ$  について Fig.6-3 に、それぞれの図に周速比  $J=0.5$ ,  $J=1.0$ ,  $J=1.5$  及び  $J=2.0$  の 4 ケースを(a), (b), (c)及び(d)で示す。流線の色は  $u$ - $v$  速度の大きさを表し白色は速度が小さいこと、黒色は速度が大きいことを示し、最小値は 0m/s、最大値は 0.4 m/s である。背景の色は、赤色が正（紙面手前向き方向）、緑色が 0、青色が負（紙面奥向き方向）を表し、カラーインデックスの最小値は-0.4m/s、最大値は 0.4 m/s である。

### (1) 回転位置 $\theta=22.5^\circ$ (Fig.6-2 参照)

$u$ - $v$  速度場の流線は、上流側から流れた主流がブレードによりブロックされ、ブロックされた分の流れがブレード前縁側へ流れ込んでいることを示している。 $w$  速度場では、ブレード上流側面上に正の値となっている領域がある。前縁に近い領域においては周速比  $J=1.0$ , 及び  $J=1.5$  のケースでは  $J=0.5$  及び  $J=2.0$  のケースに比べて正の値が大きい。後縁側の領域において、 $w$  速度が正の値となっている領域は翼表面から少し離れた位置にあり、特に周速比  $J=0.5$  のケースでは  $w$  速度が正の値となっている領域と翼表面上の間に  $w$  速度が負の値となっている領域がある。

### (2) 回転位置 $\theta=45^\circ$ (Fig.6-3 参照)

$u$ - $v$  速度場の流線は、回転位置  $\theta=22.5^\circ$  と同様に、上流側から流れた主流がブレードによりブロックされ、ブロックされた分の流れがブレード前縁側へ流れ込んでいることを示している。 $w$  速度場についても同様に、ブレード上流側面上に正の値となっている領域がある。いずれの周速比の条件においても、領域の大きさや  $w$  速度の値は同様である。

## 6.3 実験結果の解析

### 6.3.1 実験結果の解析方法

6.2.2 項で述べた通り、本章においては周速比  $J=0.5$  及び  $J=1.0$  において主に接線力を発

生しており（第4章結果）さらに流れに対し垂直に動き複雑な渦を発生していることが考えられる主流上流側の回転位置 $\theta$ は、 $\theta=22.5^\circ$ 、 $45^\circ$ にあるブレードに注目し翼端周りの流れを計測した。

さらに、計測したブレード外側面（上流側）の流れに注目し、6.2.3項で得られた結果を定量的に評価するため、Fig.6-4に示す通りサンプリングポイントを設定し、それぞれのサンプリングポイントでの速度を分析する。サンプリングポイントは、ブレード上面の前縁から後縁を29等分し、それらの点から法線とブレード表面上2mm及び5mm上の線との交点それぞれ30点である。サンプリングポイント番号については、後縁側をNo.1、前縁をNo.30と定義する。

各サンプリングポイントにおける3Dの速度は、PIV計測によって得られた速度場から線形補間により求め、それぞれ点での速度ベクトルをブレード表面に平行な接線方向成分 $u_r$ 、ブレード表面に垂直な放線方向成分 $v_r$ 及びX-Y平面に垂直なZ方向成分 $w$ に分解し表した。

### 5.3.2 実験結果の解析結果

実験結果を解析した結果について、それぞれの回転位置条件及び周速比条件における接線方向成分 $u_r$ をFig.6-5、法線方向成分 $v_r$ をFig.6-6及びZ方向成分 $w$ をFig.6-7に示す。それぞれの図内の括弧番号は、(a\_)が回転位置 $\theta=22.5^\circ$ 、(b\_)は回転位置 $\theta=45^\circ$ を表し、(1)、(2)、(3)、(4)はそれぞれ周速比 $J=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ を表す。また、それぞれの図において、縦軸はそれぞれの速度成分の値、横軸はサンプリングポイント番号であり、横軸左端がNo.1後縁、右端がNo.30前縁である。また、黒丸が2mm線上のサンプリングポイント、白丸が5mm線上のサンプリングポイントを表す。

#### (1) 接線方向成分 $u_r$ (Fig.6-5 参照)

接線方向成分は、いずれの回転位置及び周速比のケースにおいても同様な変化のパターンを示し、また、2mm線上及び5mm線上の接線方向成分の値はそれぞれのケースでほぼ同じである。それぞれのケースにおいて、後縁での接線力方向成分の値は $0\sim 0.05$  m/sであ

り、前縁に向かって一定の割合で増加している。回転位置  $\theta=22.5^\circ$  において接線力方向成分の最大値は、周速比  $J=0.5$  のケースで約  $0.4 \text{ m/s}$ 、 $J=1.0$  では約  $0.3 \text{ m/s}$ 、 $J=1.5$  では約  $0.2 \text{ m/s}$ 、 $J=2.0$  では約  $0.15 \text{ m/s}$  である。接線力方向成分の値の傾斜は、周速比が大きいほど小さい。これに対し回転位置  $\theta=45^\circ$  において接線力方向成分の最大値は、周速比  $J=0.5$  のケースで約  $0.4 \text{ m/s}$ 、 $J=1.0$  から  $J=2.0$  のケースではほぼ同じ値で約  $0.15 \text{ m/s}$  である。接線力方向成分の値の傾斜は、周速比  $J=0.5$  のケースで特に大きく、他の周速比  $J=1.0$  から  $J=2.0$  のケースでは同等に小さい。

### (2) 法線方向成分 $v_r$ (Fig.6-6 参照)

法線方向成分は、2mm 線上及び 5mm 線上ともにいずれの回転位置及び周速比のケースにおいても、後縁からサンプリングポイント No. 18 付近まで一定の負の値を示し、その後前縁側で急激に負値が減少する。法線方向成分の値は、いずれのケースにおいても 2mm 線上の負値より 5mm 線上の負値の方が大きい。一定の値で変位している部分の負値について、2mm 線上の負値はいずれのケースにおいてもほぼ同等で約  $-0.05 \text{ m/s}$  である。5mm 線上の一定の値で変位している部分の負値は、回転位置  $\theta=22.5^\circ$  において周速比  $J=0.5$  のケースで約  $-0.2 \text{ m/s}$ 、 $J=1.0$  では約  $-0.15 \text{ m/s}$ 、 $J=1.5$  では約  $-0.1 \text{ m/s}$ 、 $J=2.0$  では約  $-0.05 \text{ m/s}$  であり、一定の値で変位している部分の 2mm 線上の負値と 5mm 線上の負値の差は、周速比が大きいほど小さい。

これに対し、回転位置  $\theta=45^\circ$  における 5mm 線上の一定の値で変位している部分の負値は、周速比  $J=0.5$  のケースで約  $-0.2 \text{ m/s}$ 、 $J=1.0$  から  $J=2.0$  のケースではほぼ同じ値で約  $-0.05 \text{ m/s}$  であり、周速比  $J=0.5$  のケースで特に大きく、他の周速比  $J=1.0$  から  $J=2.0$  のケースでは同等に小さい。

### (3) Z 方向成分 $w$ (Fig.6-7 参照)

回転位置  $\theta=22.5^\circ$  のケースにおいて、5mm 線上の Z 方向成分はいずれの周速比のケースにおいても同等の値と同様のパターンを示している。5mm 線上の Z 方向成分の値は、後縁から前縁へ徐々に増加し、その値は  $0 \sim 0.15 \text{ m/s}$  である。これに対し 2mm 線上の Z 方向成分の値は、周速比の条件によって大きく異なる。周速比  $J=0.5$  のケースにおける 2mm 線上

の Z 方向成分の値は、後縁領域で-0.1 m/s、後縁から前縁に向け徐々に増加しサンプリングポイント No.24 で最大値となり、その後減少する。最大値は、5mm 線上の値に近く約 0.15 m/s である。周速比  $J=1.0$  のケースにおける 2mm 線上の Z 方向成分の値は、後縁領域で-0.05 ~0 m/s、後縁から前縁に向け徐々に増加しサンプリングポイント No.22 で最大値約 0.3 m/s となり、その後減少する。周速比  $J=1.5$  のケースにおける 2mm 線上の Z 方向成分の値は、後縁領域では 0 m/s に近い負値であり、後縁から前縁に向け徐々に増加しサンプリングポイント No.19 で最大値約 0.25 m/s となり、その後減少する。周速比  $J=2.0$  のケースにおける 2mm 線上の Z 方向成分の値は、後縁領域で-0.05~0 m/s、後縁から前縁に向け徐々に増加し前縁付近で最大値約となる。最大値は、5mm 線上の値に近く約 0.15 m/s である。回転位置  $\theta=22.5^\circ$  のケースの後縁領域における 2mm 線上と 5mm 線上の Z 方向成分の値の差は、周速比  $J=0.5$  のケースで最も大きく、周速比が大きいほど小さい。

回転位置  $\theta=45^\circ$  のケースにおいて、2mm 線上及び 5mm 線上の Z 方向成分の変化はいずれの周速比のケースにおいても同様のパターンを示している。Z 方向成分の値は、後縁から前縁に向かって増加し、最大値に達し、その後減少する。Z 方向成分の最大値は、いずれのケースでも同等で約 0.15 m/s であり、最大点の位置を Fig.5-4 のグラフ中に 2mm 線上は▼及び 5mm 線上は▽で示す。最大点のサンプリングポイント番号は、周速比  $J=0.5$  のケースにおいて 2mm 線上は No.16、5mm 線上は No.13、 $J=1.0$  では 2mm 線上は No.10、5mm 線上は No.12、 $J=1.5$  では 2mm 線上は No.12、5mm 線上は No.8、 $J=2.0$  では 2mm 線上は No.13、5mm 線上は No.7 である。2mm 線上の最大点の位置は、いずれのケースにおいても 5mm 線上の最大点の位置より前縁側にある。Z 方向成分の最大点の位置は周速比が大きいほど前縁側へ移動し、2mm 線上と 5mm 線上の最大点の位置の間隔は周速比が大きいほど大きい。後縁領域における 2mm 線上と 5mm 線上の Z 方向成分の値の差は、周速比  $J=0.5$  のケースで約 0.1 m/s、 $J=1.0$  では約 0.05 m/s、 $J=1.5$  及び 2.0 においては差がない。回転位置  $\theta=45^\circ$  のケースの後縁領域における 2mm 線上と 5mm 線上の Z 方向成分の値の差は、周速比  $J=0.5$  のケースで最も大きい。また、2mm 線上の Z 方向成分の値が負となるのは、周速比  $J=0.5$  のケースの後縁領域のみである。

## 6.4 考 察

法線方向成分の値が 5mm 線上の負値より 2mm 線上の負値の方が小さいのは、ブレードが流れの障害となって主流が減速しているためである。これらの減速の量は、回転位置  $\theta=22.5^\circ$  においては周速比が大きいほど小さく、回転位置  $\theta=45^\circ$  においては周速比  $J=0.5$  のケースで他の周速比のケースに比べて特に大きい。一方、接線方向成分の正の値が後縁から前縁に向かって増加しているのは、ブレード表面に沿って前縁方向へ流れる流れが、前縁へ流れるに従い加速していることを示す。また、この接線方向成分の正の値の増加は接線方向成分に他の成分から流れ込んでいることを示し、増加の傾斜は接線方向成分への流れ込みの量に相関する。接線方向成分の値の傾斜は、回転位置  $\theta=22.5^\circ$  においては周速比が大きいほど小さく、回転位置  $\theta=45^\circ$  においては周速比  $J=0.5$  のケースで他の周速比のケースに比べて特に大きい。これらの傾向は法線方向成分の減速量の傾向と同様である。従って、接線方向成分の値の傾斜は、法線方向成分の減速量と相関がある。この接線方向成分と法線方向成分の相関は、ブレードが障害となって減速する法線方向の流れが接線方向に流れ込むことを示している。これについては、Fig.6-2 及び Fig.6-3 に示した  $u-v$  速度場の流線でも明らかである。さらに法線方向成分の減速量及び接線方向成分の値の傾斜は、この領域での法線方向成分への障害の大きさと接線方向への流れ込みの大きさを示している。Fig.6-2 及び Fig.6-3 に示した  $u-v$  速度場の流線とあわせ見ると、この領域での障害の大きさは、法線方向成分の流れの接線方向に流れ込みが上流側から始まるか下流側のブレード外側に近い領域に圧縮されて起こっているかによる。法線方向成分の流れの接線方向への流れ込みが大きく起こっている周速比が小さいケースほどこの流れ込みがサンプリングポイントのあるブレード外側に近い領域で起き始めているが、流れ込みが小さい周速比が大きいケースになるとより上流でこの流れ込みが始まっている。

ブレード翼端において  $Z$  方向成分の値が 0 ではないことは、渦の発生源となっていることを示す。また、その値、変化、2mm 線上の値と 5mm 線上の値の差は、そこで発生している渦の強さを示す。回転位置  $\theta=22.5^\circ$  におけるすべての周速比のケース及び回転位置

$\theta=45^\circ$ における周速比  $J=0.5$  のケースの後縁領域において、5mm 線上の値は正であるが 2mm 線上の値は負である。この領域において、2mm 線上の流れは翼端側からブレード中央方向へととなっており、5mm 線上の流れはブレード中央側から翼端方向へととなっており、翼端渦がこの領域で発生していることを示している。回転位置  $\theta=45^\circ$ における周速比  $J=0.5$  以外のケースにおいて、2mm 線上の Z 方向成分の値は 5mm 線上の値と同様に正であり、ブレード中央側から翼端方向へととなっている。後縁領域における Z 方向成分の 2mm 線上の値と 5mm 線上の値の差は、この領域で発生している渦の強さを示す。回転位置  $\theta=22.5^\circ$  の後縁領域において Z 方向成分の 2mm 線上の値と 5mm 線上の値の差は、周速比  $J=0.5$  のケースで最も大きく、周速比が大きいほど小さい。回転位置  $\theta=45^\circ$  の後縁領域において Z 方向成分の 2mm 線上の値と 5mm 線上の値の差は、周速比  $J=0.5$  のケースで最も大きい。これらの傾向は、法線方向成分へのブレードの障害の大きさと接線方向への流れ込みの大きさを示す接線方向成分の値の傾斜と法線方向成分の減速量の傾向と同様である。従って、後縁領域が発生源となっている渦の強さは、法線方向成分へのブレードの障害の大きさと相関している。また、周速比が大きいほど渦の強さが小さくなる傾向は、通常の揚力型の風車でも確認された [6-2]。

回転位置  $\theta=22.5^\circ$  の後縁領域より前縁側の Z 方向成分の 2mm 線上の最大点周辺領域の値は、いずれの周速比のケースにおいても正である。周速比  $J=1.0$  及び  $J=1.5$  のケースにおいて Z 方向成分の 2mm 線上の最大点の値は同じ位置の 5mm 線上の値より大きい。周速比  $J=0.5$  及び  $J=2.0$  のケースにおける Z 方向成分の 2mm 線上の最大点の値は同じ位置の 5mm 線上の値とほぼ同等である。この領域の流れはブレード中心側から翼端方向への流れであり、渦の発生源となっている。回転位置  $\theta=22.5^\circ$  においてこの領域で発生している渦の強さは、周速比  $J=0.5$  及び  $J=2.0$  のケースより周速比  $J=1.0$  及び  $J=1.5$  のケースのほうが強い。回転位置  $\theta=45^\circ$  において、Z 方向成分の値は正であり、2mm 線上の最大値と 5mm 線上の最大値はほぼ同等である。ブレード翼端でブレード中心側から翼端方向への流れがあり、渦の発生源となっている。この領域で発生している渦の強さは、いずれの周速比のケースにおいてもほぼ同等である。渦の発生源の中心を示す Z 方向成分の値は、周速比が

大きくなると後縁側へ移動する。

## 6.5 第6章のまとめ

コンディショナル・サンプリング・ステレオ PIV を用いて、回流水槽の計測部に設置した風車模型のブレード翼端周りの流れの 3D 速度場を計測した。周速比  $J=0.5$  及び  $J=1.0$  において主に接線力を発生しており（第5章結果）流れに対し垂直に動き複雑な渦を発生していることが考えられ、発生した渦が下流側にあるブレードに干渉する可能性があることから主流上流側のブレードに注目し、回転位置  $\theta=22.5^\circ$  及び  $45^\circ$  のブレードの翼端を計測した。

計測した 3D 速度場からブレード外側面（上流側）のブレード表面上 2mm 及び 5mm 上に設定したサンプリングポイントにおける速度を求め、それぞれ点での速度ベクトルをブレード表面に平行な接線方向成分  $u_r$ 、ブレード表面に垂直な放線方向成分  $v_r$  及び  $X$ - $Y$  平面に垂直な  $Z$  方向成分  $w$  に分解し、調べた結果から次のことが明らかとなった。

- (1) 法線方向成分の流れは、ブレードが障害となり減速され接線方向に流れ込む。
- (2) 翼端では、後縁領域とそれより前縁側の 2カ所で渦の発生源がある。
- (3) 後縁領域が発生源となっている渦の強さは、法線方向成分の減速の大きさと相関し、回転角  $\theta=22.5^\circ$  では周速比が大きいほど小さく、回転角  $\theta=45^\circ$  では周速比  $J=0.5$  のケースで他の周速比のケースに比べて特に大きい。
- (4) 後縁領域より前縁側で発生している渦の強さは、回転角  $\theta=22.5^\circ$  では周速比  $J=1.0, 1.5$  のケースで周速比  $J=0.5, 2.0$  のケースに比べて特に大きく、回転角  $\theta=45^\circ$  では周速比によらずほぼ一定であるが、その渦の中心は周速比が大きくなると後縁側へ移動する。

## 6.6 第6章 参考文献

- [6-1] Tescione, G., Ragni, D., He, C., Simão Ferreira, C. J. and van Bussel, G. J. W., Near wake flow analysis of a vertical axis wind turbine by stereoscopic particle image velocimetry, *Renewable Energy*, Vol. 70, (2014), pp47-61.

- [6-2] Hofemann, C., Simão Ferreira, C., Dixon, K., van Bussel, G., van Kuik, G. and Scarano, F., 3D stereo PIV study of tip vortex evolution on a VAWT, EWEC 2008-European Wind Energy Conference, Brussels, (2008).
- [6-3] Honda, M., Noguchi, T., Doh, D., H., Takei, M., and Ishii, S., “Conditional Sampling Stereoscopic PIV Measurement around the Blade of the Vertical Axis Wind Turbine”, *Journal of JSEM*, Vol. 10, Special Issue (2010), pp. 73-78



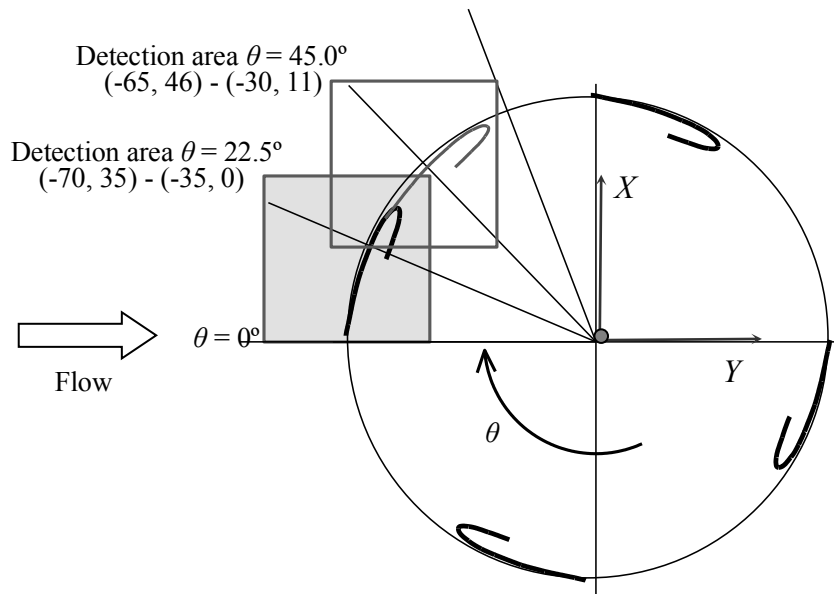


Fig.6-1 PIV detection area

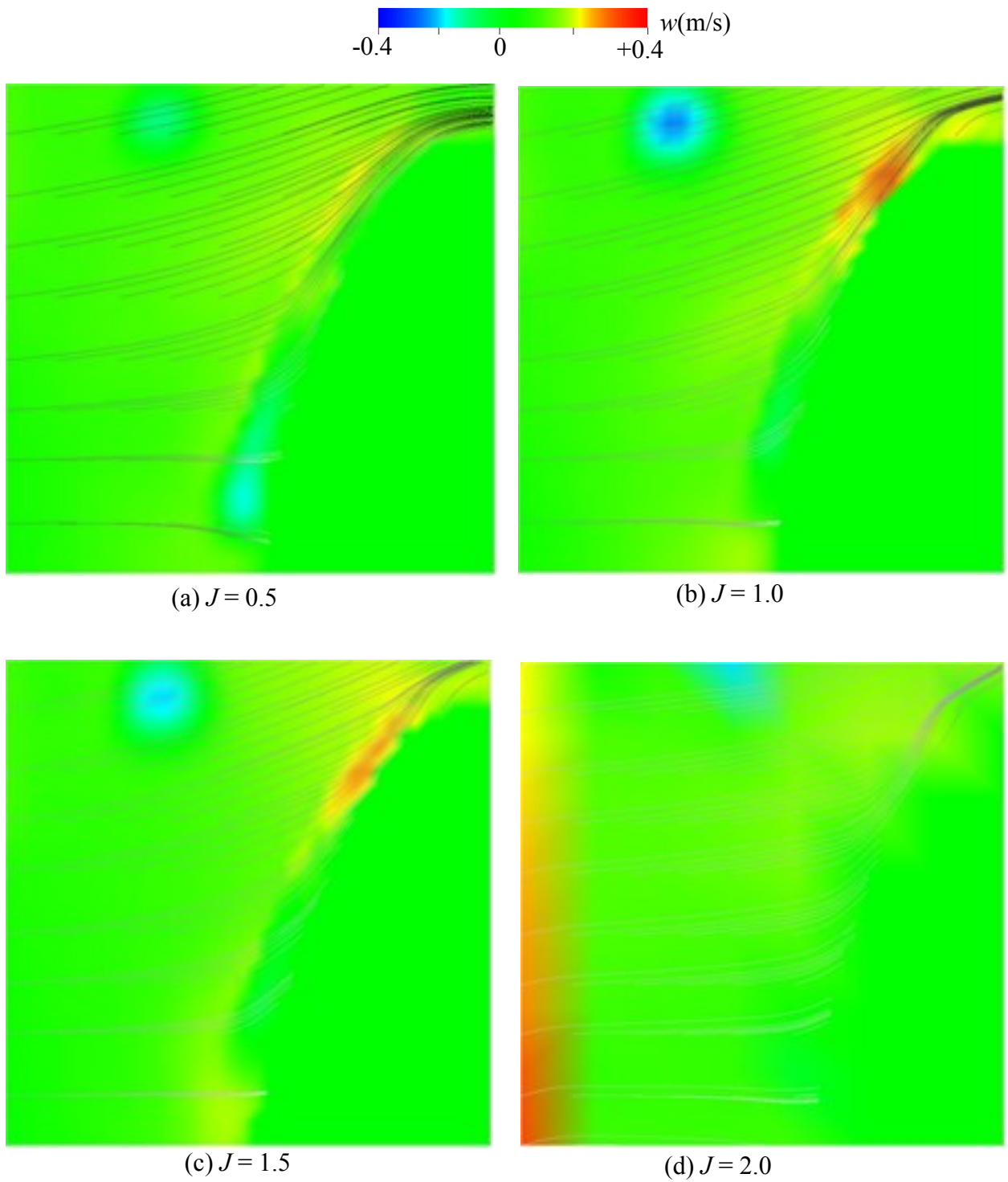


Fig.6-2 Velocity vector field (Streamline,  $\theta=22.5^\circ$ )

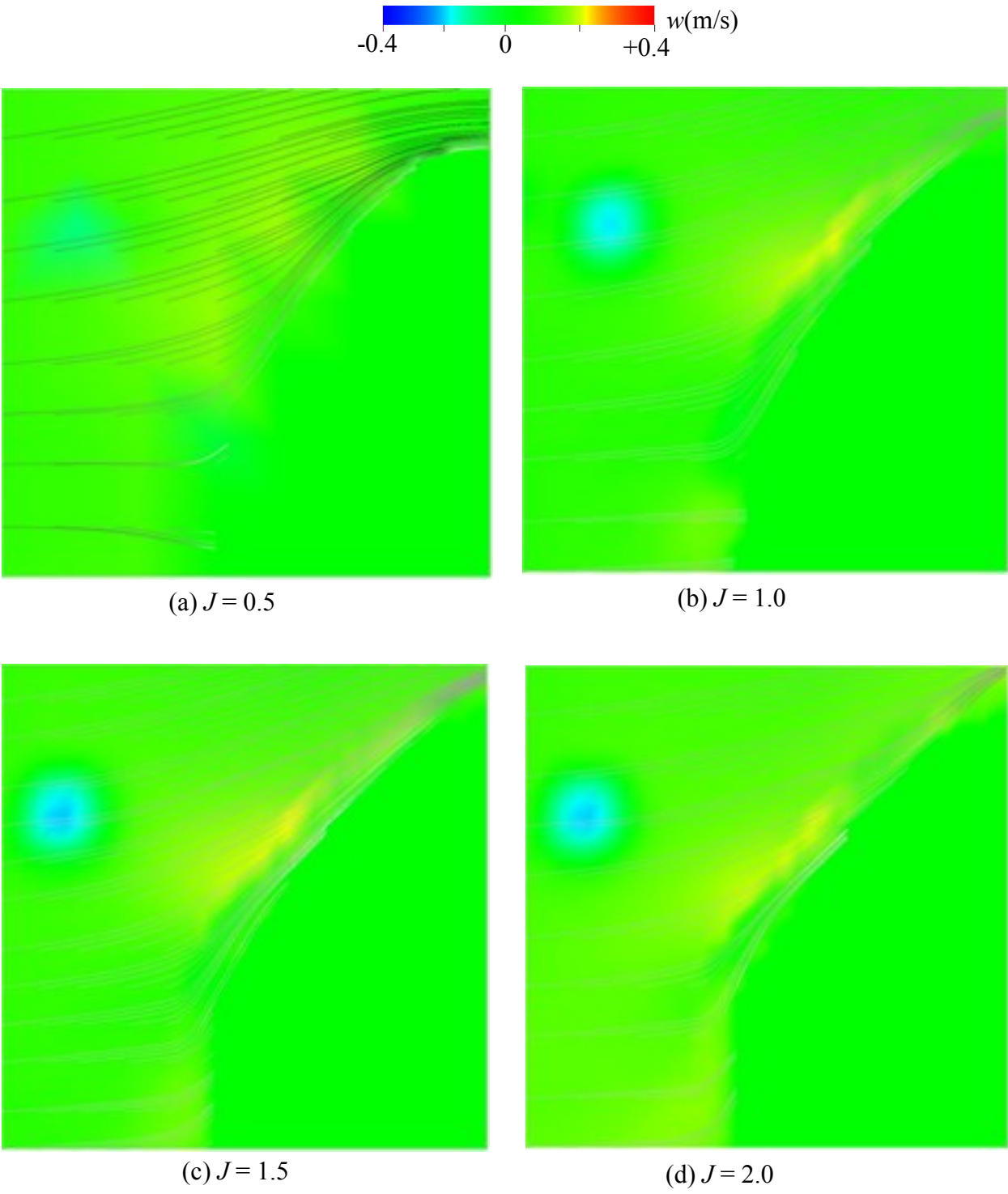


Fig.6-3 Velocity vector field (Streamline,  $\theta=45^\circ$  )

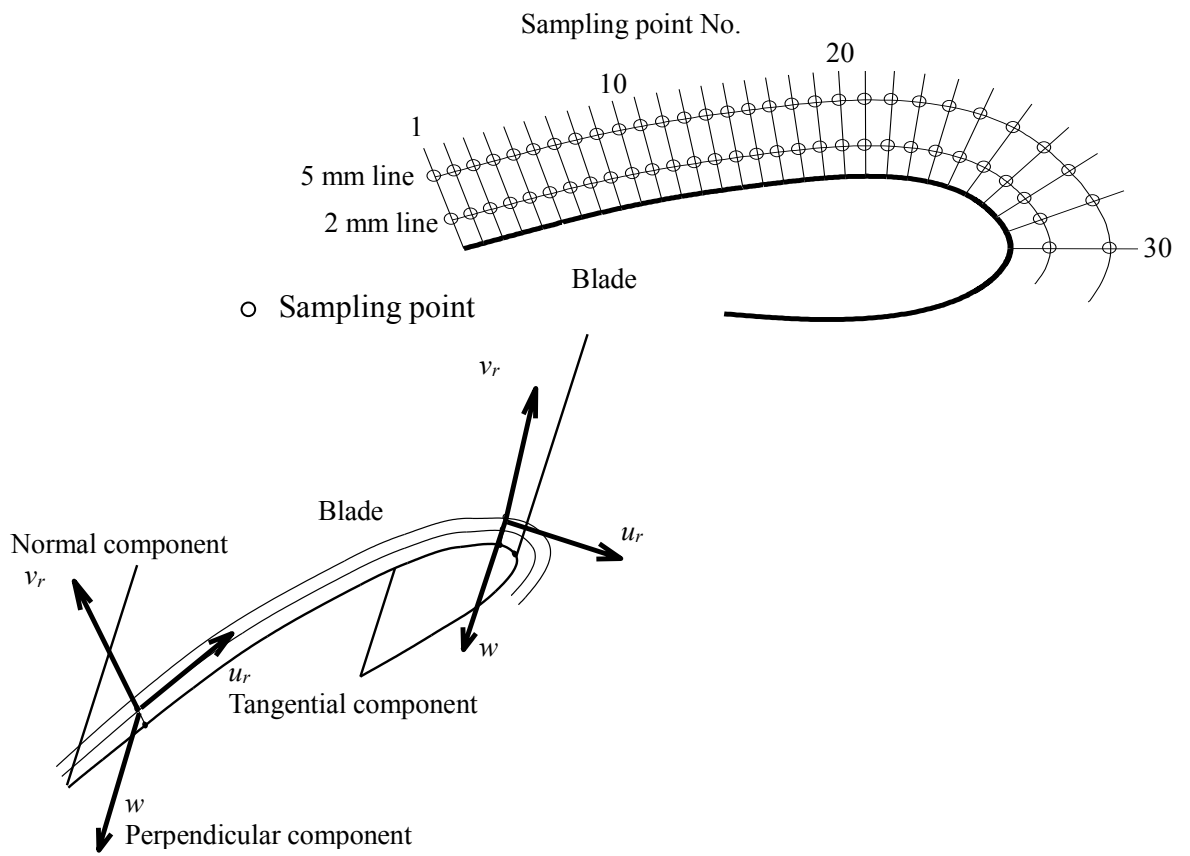


Fig.6-4 Sampling point and velocity components

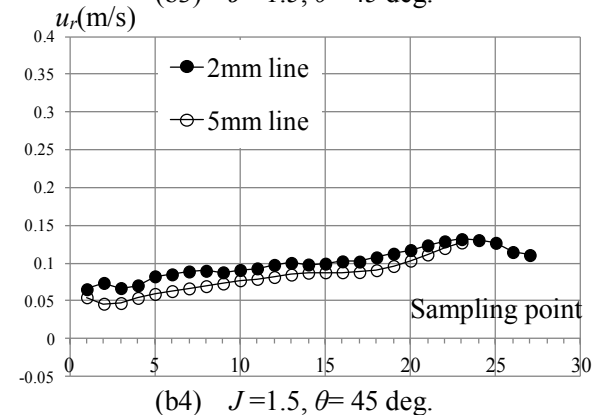
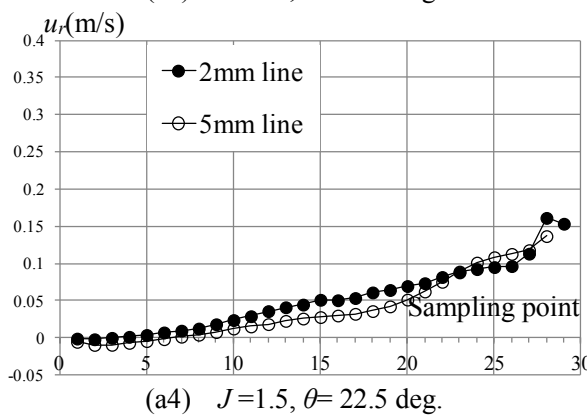
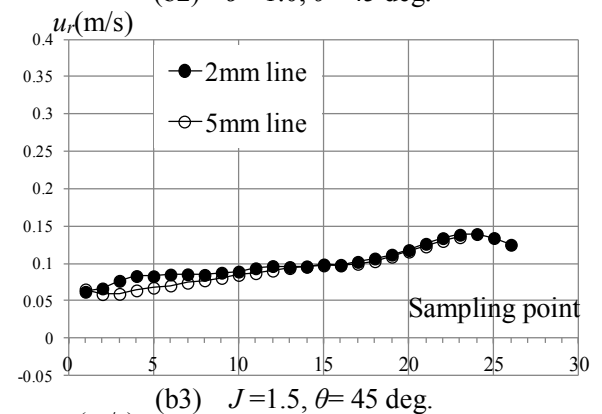
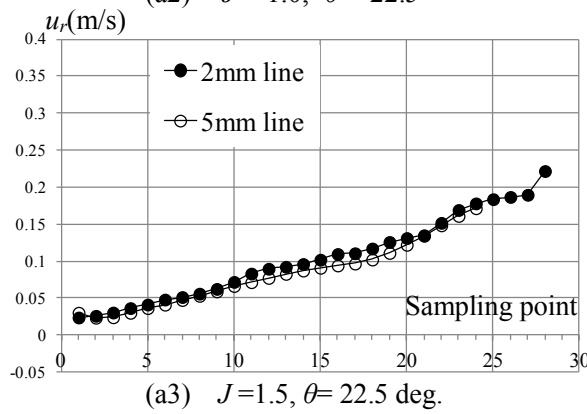
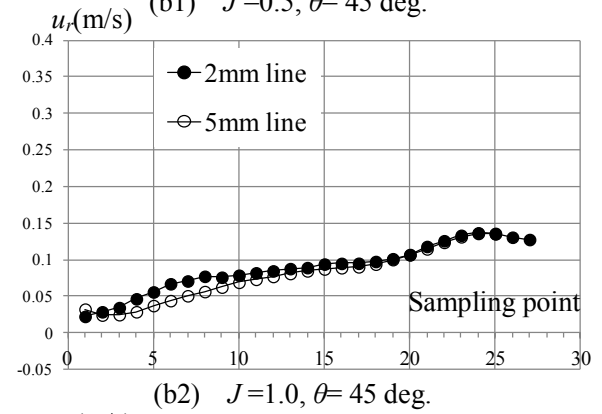
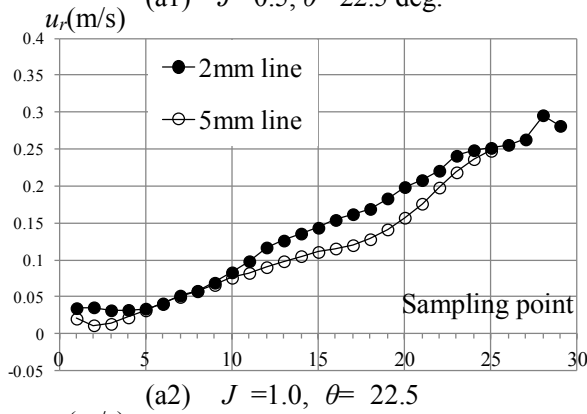
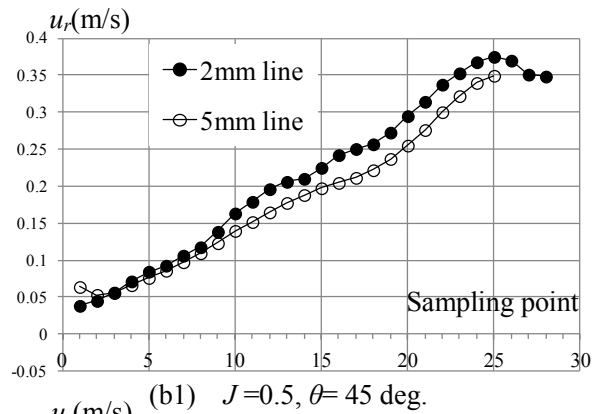
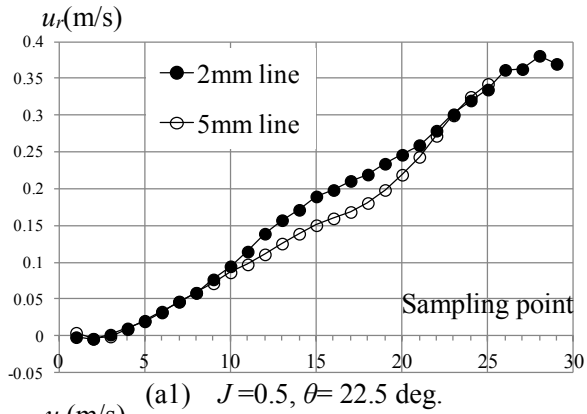
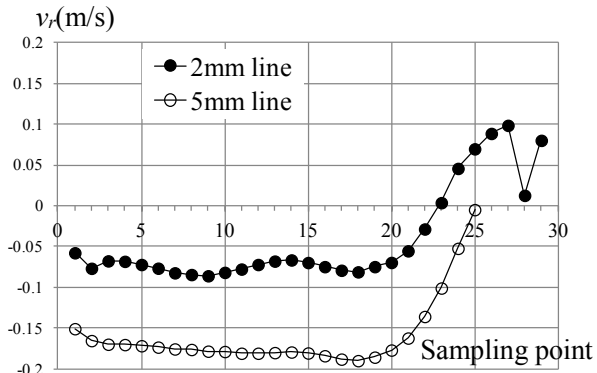
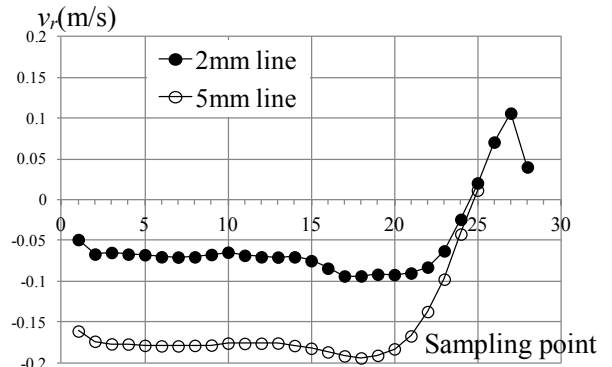


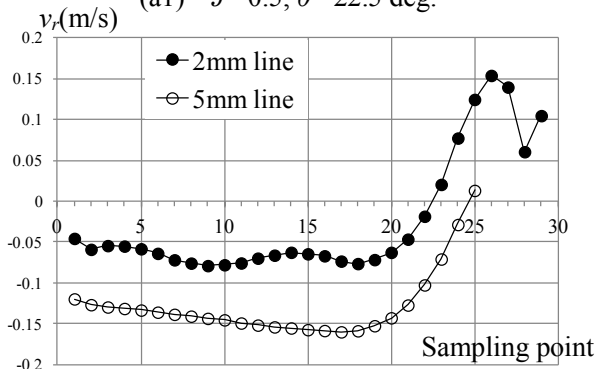
Fig.6-5 Profile of the tangential components  $u_r$



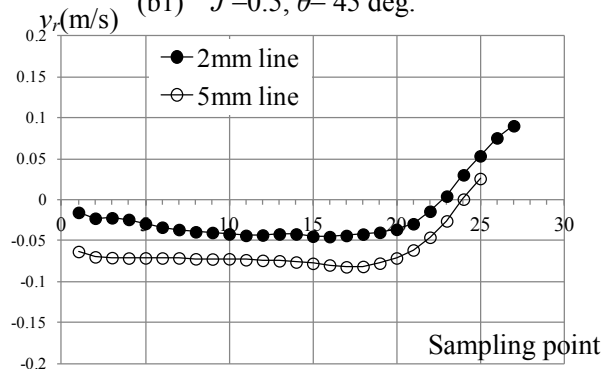
(a1)  $J=0.5, \theta=22.5$  deg.



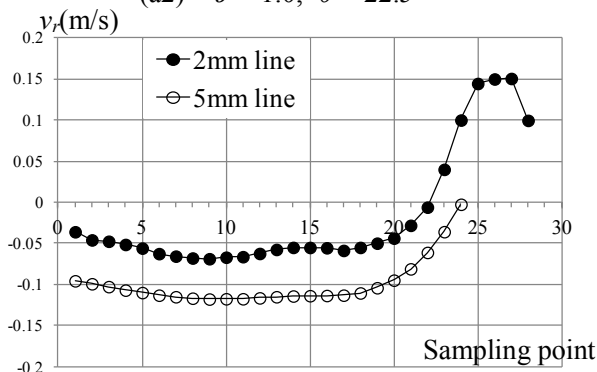
(b1)  $J=0.5, \theta=45$  deg.



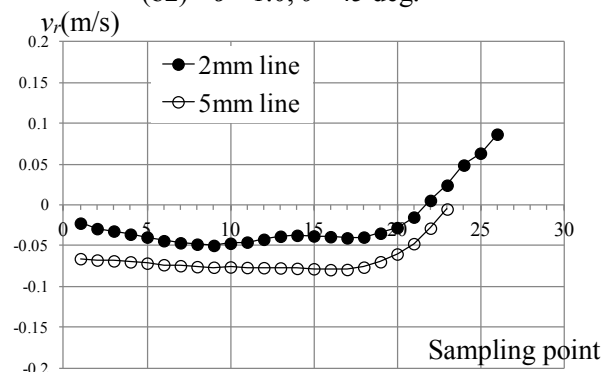
(a2)  $J=1.0, \theta=22.5$



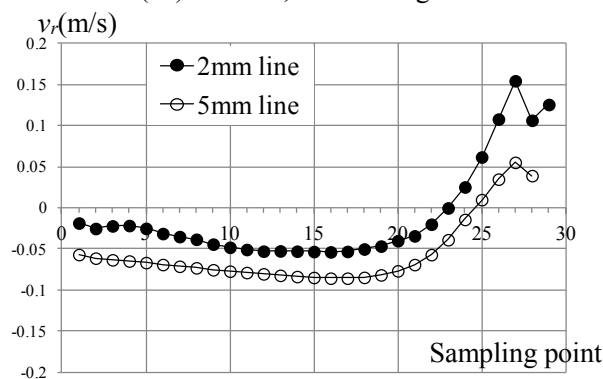
(b2)  $J=1.0, \theta=45$  deg.



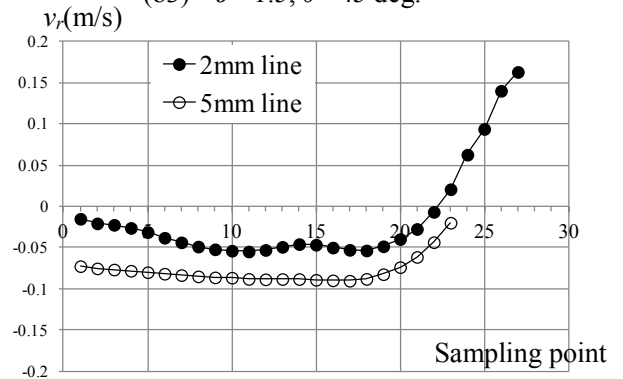
(a3)  $J=1.5, \theta=22.5$  deg.



(b3)  $J=1.5, \theta=45$  deg.



(a4)  $J=1.5, \theta=22.5$  deg.



(b4)  $J=1.5, \theta=45$  deg.

Fig.6-6 Profile of the normal components  $v_r$

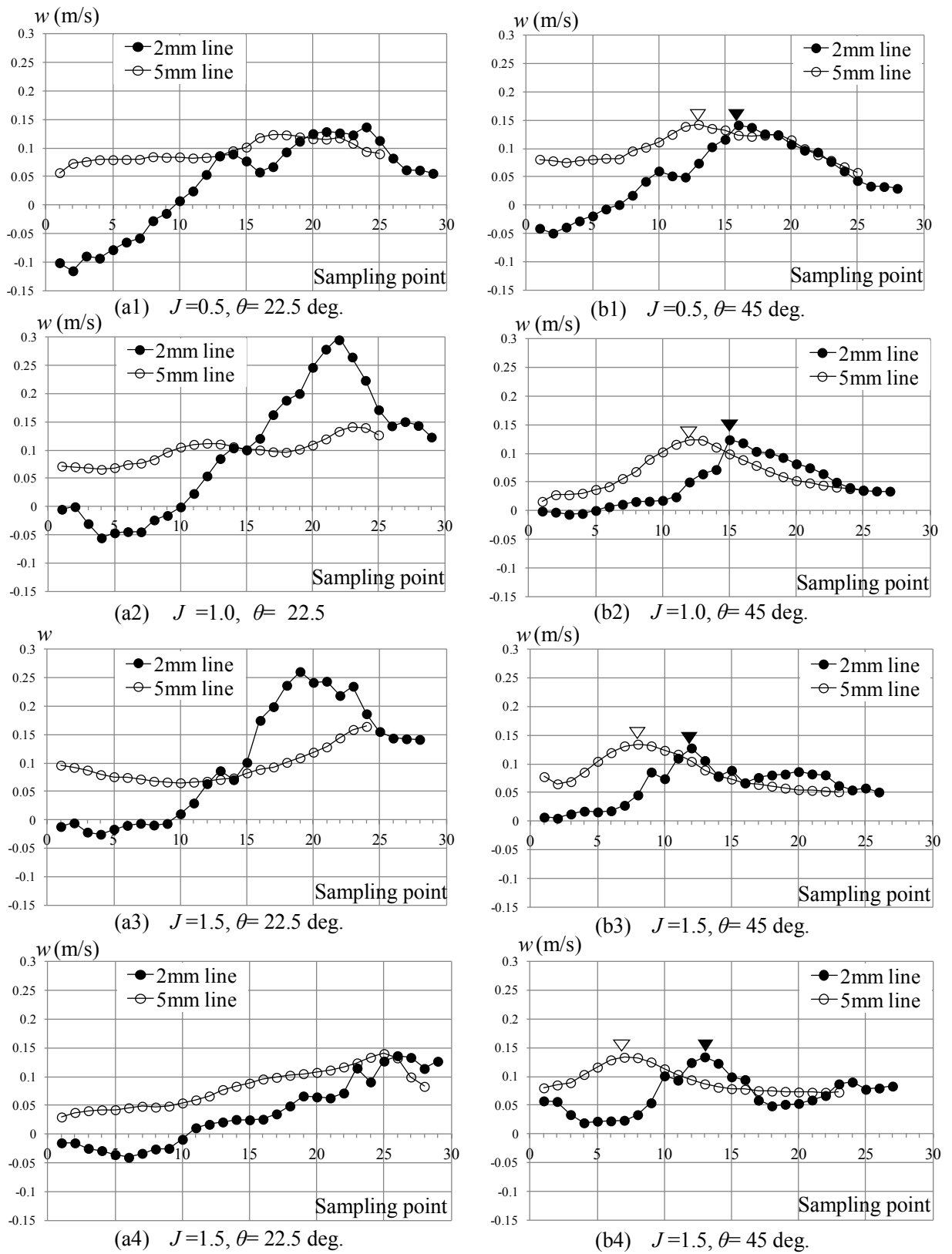


Fig.6-7 Profile of the tangential components  $w$

## 第7章 結論

### 7.1 概要

この章では、本研究の結論を総括する。

### 7.2 各章のまとめ

#### 7.2.1 第3章のまとめ

ハイブリッドブレードを用いた風車の性能を検討するため、他のブレードの干渉や伴流の影響を全く受けない一様流中で回転する1枚のブレードを仮定し、そのブレードに発生する接線力をハイブリッドブレードの翼型の空力特性から計算した。

周速比  $J$  の条件  $J=0.5, 1.0, 1.5$  及び  $2.0$  の4つのケースについて、回転位置  $\theta=0^\circ \sim 360^\circ$  の変化に対する、接線力係数、その成分構成（揚力成分によるものか抗力成分によるものか）及びトルク発生の変化を表す風車ブレード接線力係数の変化を調べ、接線力の発生について次のことが明らかとなった。

- (1-1)  $J=0.5$  のケースにおいて、回転位置  $\theta=30^\circ \sim 160^\circ$  で抗力成分による接線力を発生するが、他のケースにおいて抗力成分による接線力を発生しない。
- (1-2)  $J=0.5$  及び  $1.0$  のケースにおいて主流上流側からブレードが主流速度と同方向に動く領域である回転位置  $\theta=340^\circ (-20^\circ) \sim 110^\circ$ 、 $J=2.0$  のケースにおいてブレードが主流速度と同方向に動く領域である回転位置  $\theta=10^\circ \sim 60^\circ$  で正の接線力を発生する。 $J=2.0$  のケースにおいては、主流上流側の領域で正の接線力を発生しない。
- (1-3) いずれのケースにおいても、迎え角が  $0^\circ$  付近で変化する回転位置  $\theta=270^\circ$  付近では揚力が大きく変化するため、接線力も正負に大きく変化する。
- (1-4) いずれのケースにおいても、(1-3)項の回転位置  $\theta=270^\circ$  付近の接線力も大きく変化する領域の前後に、大きな負の接線力を発生している領域がある。
- (1-5) いずれのケースにおいても、全周の風車ブレード接線力係数の平均値は負の値となる。

また、周速比条件をさらに大きな  $J=5.0$  以下の範囲で、全周の風車ブレード接線力係数



の平均値を調べた結果、一様流中における周速比と接線力の発生について次のことが明らかとなった。

- (1-6) 周速比  $J=0.5\sim 2.7$  の範囲では、全周の風車ブレード接線力係数の平均値の値は負であり、発電に有効なトルクを発生しない。
- (1-7) この計算結果は、ハイブリッドブレードを用いた実用の風力発電機風車の周速比が  $J=0.8\sim 1.2$  であることと整合しない。
- (1-8) この計算結果と実用の風車の周速比の不整合は、ブレードの発生する接線力の計算において一様流中で回転する 1 枚のブレードを仮定したため、他のブレードの干渉や伴流の影響が考慮されていないためと考えられる。

## 7.2.2 第5章のまとめ

ハイブリッドブレードを用いた風車周りの速度場を、コンディショナル・サンプリング・PIV を用いて計測し、ブレードの発生する接線力に影響する流れを明らかとし、これらの流れによるブレード迎角及び相対速度の変化が接線力にどのように影響するかを検討した。その結果より次のことが明らかとなった。

- (1) 本風車のソリディティが大きいことにより回転する風車の内部を通過できない流れが増加し、風車の内部を通過できない流れが風車ブレードの伴流と合流することにより、ブレードの周速度方向が主流方向と一致している側の流れの速度が主流速度より大きい。この領域の平均速度の最大は周速比によらず主流速度の 1.0 倍から 1.14 倍である。
- (2) 本風車のソリディティが大きいことにより回転するブレードの伴流が多くなり、ブレード周りの流れの方向は回転するブレードの周速度方向へ変化している。周速比が大きくなるほどこのブレード周速度方向への方向変化は大きくなる。
- (3) (1)項の流れの影響により、周速比  $J=0.5$  から  $J=1.0$  において抗力による接線力が増加し、ハイブリッドブレードの抗力によるより大きな接線力を得る効果も大きくする。

- (4) (2)項の流れの方向の周速度方向へ変化と下流側の領域における流れの速度が低下により、下流側から回転方向に沿って上流側へ向かう回転位置範囲の領域において迎角及び相対速度が小さくなる。特に流れの方向変化の影響は周速比  $J=1.5, 1.0$  で大きく迎角が最大で約  $10^\circ$  減少する。この影響により、揚力による接線力が周速比  $J=0.5, 1.5, 2.0$  において減少し、周速比  $J=1.0$  においては増加する。

さらに、回転するブレード相対流の迎角及び相対速度比及びから回転角全周にわたるブレードが発生する接線力係数の平均値から求めたパワー係数  $C_p$  による検討では、ハイブリッドブレードを用いた風車の発電時の周速比の条件において、一様流中における計算結果では有効な発電できないものが、風車周りの流れの影響により周速比  $J=1.5$  以下では有効な発電が可能であり、その発電効率は周速比  $J=1.0$  付近で最大となることが明らかとなった。また、周速比  $J=0.5$  においてパワー係数  $C_p$  が正值となるのはハイブリッドブレードの切欠きの効果の影響によるものであり、これにより停止状態から発電回転数 ( $J=1.0$  付近) までの加速が可能であることが明らかとなった。

以上のことから、ハイブリッドブレードを用いた風車は、ソリディティを大きくすることによる風車周りの流れの変化により、

- ・ 切欠きの効果を含む抗力による接線力を大きくし、発電回転数までの加速を容易にしている
- ・ 周速比が大きい条件では、ブレードに発生する揚力による接線力が減少し、最大効率となる周速比が通常の高揚力型風車より小さい

という性能の特徴の要因が明らかとなった。

### 7.2.3 第6章のまとめ

コンディショナル・サンプリング・ステレオ PIV を用いて、回流水槽の計測部に設置した風車模型のブレード翼端周りの流れの 3D 速度場を計測した。周速比  $J=0.5$  及び  $J=1.0$  において主に接線力を発生しており (第4章結果) 流れに対し垂直に動き複雑な渦を発生していることが考えられ、発生した渦が下流側にあるブレードに干渉する可能性があるこ

とから主流上流側のブレードに注目し、回転位置  $\theta=22.5^\circ$  及び  $45^\circ$  のブレードの翼端を計測した。

計測した 3D 速度場からブレード外側面（上流側）のブレード表面上 2mm 及び 5mm 上に設定したサンプリングポイントにおける速度を求め、それぞれ点での速度ベクトルをブレード表面に平行な接線方向成分  $u_r$ 、ブレード表面に垂直な放線方向成分  $v_r$  及び  $X$ - $Y$  平面に垂直な  $Z$  方向成分  $w$  に分解し、調べた結果から次のことが明らかとなった。

- (3-1) 法線方向成分の流れは、ブレードが障害となり減速され接線方向に流れ込む。
- (3-2) 翼端では、後縁領域とそれより前縁側の 2カ所で渦の発生源がある。
- (3-3) 後縁領域が発生源となっている渦の強さは、法線方向成分の減速の大きさと関連し、回転角  $\theta=22.5^\circ$  では周速比が大きいほど小さく、回転角  $\theta=45^\circ$  では周速比  $J=0.5$  のケースで他の周速比のケースに比べて特に大きい。
- (3-4) 後縁領域より前縁側で発生している渦の強さは、回転角  $\theta=22.5^\circ$  では周速比  $J=1.0, 1.5$  のケースで周速比  $J=0.5, 2.0$  のケースに比べて特に大きく、回転角  $\theta=45^\circ$  では周速比によらずほぼ一定であるが、その渦の中心は周速比が大きくなると後縁側へ移動する。

### 7.3 総結論

第 3 章の他のブレードの干渉や伴流の影響を全く受けない一様流中の 1 枚ブレードの計算による風車性能の検討では、ハイブリッドブレードを用いた実用の風力発電機風車の周速比条件において発電に有効な発電ができないという矛盾した結果が得られた。

これに対し、第 5 章のコンディショナル・サンプリング PIV 計測によるハイブリッドブレードを用いた回転する風車周りの流れの計測から、ブレードで発生する接線力に対し影響を与える流れが確認できた。この流れの影響により、周速比  $J=1.5$  以下では有効な発電が可能であり発電の効率は周速比  $J=1.0$  付近で最大となること、この最高効率の周速比までスムーズな加速が可能であることが明らかとなった。このハイブリッドブレードを用いた風車の性能の特徴は、ソリディティを大きくすることによる風車周りの流れの変化によ

り、加速時において切欠きの効果を含む抗力による接線力を大きくすること、周速比が大きい条件では、ブレードに発生する揚力による接線力が減少することによるものであることが明らかとなった。

第6章のコンディショナル・サンプリング・ステレオ PIV 計測によるブレード翼端周りの流れの計測結果から、主流上流側のブレードの翼端において渦の発生となる流れが確認でき、この流れの強さの周速比による変化が明らかとなった。

## 謝 辞

本論文をまとめるにあたり、終始暖かいご指導、ご教示を賜りました千葉大学教授 武居昌宏先生に深甚なる感謝の意を表する次第であります。

本研究は元日本大学生産工学部非常勤講師 故野口常夫先生、千葉大学教授 武居昌宏先生、韓国海洋大学教授 都徳照先生のご指導の基に行ったものであり、長年に亘る先生方の懇切でそして深い洞察に立脚したご指導に対して心から感謝を申し上げます。

さらに、実験においては、種々のご助言、ご協力を賜りました韓国海洋大学教授 都徳照先生、また同研究室の皆様にも厚くお礼を申し上げます。