

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 28 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560172

研究課題名（和文）低レイノルズ数回転翼の流れ解明

研究課題名（英文）Flow analysis of low Reynolds number rotating blade

研究代表者

鎌田 泰成（KAMADA YASUNARI）

三重大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：60262987

研究成果の概要（和文）：

風車回転翼の翼面近傍流れを実験的に明らかにした。翼根付近の翼素の場合、流れは大きな半径方向速度成分を持ち、翼面の圧力分布は二次元翼特性から求められる負圧より低くなる。翼面上の境界層内の速度分布は翼前縁付近で平板上の層流境界層内の速度分布に近く、翼前縁付近から中央部で乱流境界層へ遷移していることを明らかにした。測定速度から算出した翼面圧力分布と圧力測定翼により測定した翼面圧力分布は概ね一致した。

研究成果の概要（英文）：

Detail velocity distribution on a wind turbine rotor is investigated experimentally. In a case of inboard, the flow on the blade have strong span-wise component. The measured surface pressure of rotor shows stronger suction pressure than that of two dimensional section tests. The boundary layer on rotor shows the laminar flow on the leading edge and it changes to turbulent at mid chord. The pressure distribution calculated from measured velocity agreed well to the measured pressure distribution.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：翼面境界層，低レイノルズ数，風車回転翼，速度分布，風洞実験

## 1. 研究開始当初の背景

現在の大規模集中型のエネルギー供給システムは、エネルギー密度の高い化石燃料の発見により創りあげられた。化石燃料の枯渇、地球温暖化問題が大きく取り上げられ、将来のエネルギー供給は化石燃料に依存しないものに変化するの明らかである。そこで再生型自然エネルギーが注目される。しかし、再生型自然エネルギーは、日々の太陽からの

エネルギー供給に基づくため、地球上で多少の偏りはあるものの広く分散し、変動を持つ。未来永劫に持続的発展を行うためには、エネルギー密度が低く変動する再生型エネルギーによる供給システムの構築が必要不可欠である。

現在、もっとも注目されている再生型自然エネルギーは風力発電である。系統接続される大型風力タービン 1,000～2,400kW クラ

スの導入が急ピッチに進められている。しかし、大型風車の現在の事業採算性から 30m 高度における年平均風速は 6m/s 以上の地点に導入が限られ、洋上風力への展開についても活発に研究が進められている。一方小型風車の導入は、小学校や公的機関における啓蒙活動用として急速に伸びている。小型風車は、単機あたりの出力が小さく大型風車のような系統連携には不適であり、エネルギー源として考えられていない。離島、山岳地などの一部独立電源などでエネルギー利用されるのみである。しかし、バイオマス発電や燃料電池など再生型自然エネルギーをバッファできるシステムが実用化される場合、小規模に分散している再生型自然エネルギーはエネルギー源として十分に活躍できる。

小型であるため、従来の大型で培った技術により容易に実現できると楽観的に考えられているが、エネルギー源として小型風車を活用するためには大きな技術的チャレンジが必要である。小型風車の実用化における課題は、出力性能および信頼性の向上である。空気力学的観点から大型風力と小型風力を比べた場合、もっとも大きな違いは風車周囲を取り巻く流れのレイノルズ数である。大型風車の場合、大直径のロータであるため風車翼の翼弦長が大きくレイノルズ数は  $10^6$  程度になるが、小型風車の場合、 $10^5$  程度と 1 オーダー小さくなる。大型風車で成功している風車専用翼(1)は、 $10^6$  程度のレイノルズ数を対象に開発されており低いレイノルズ数では極端に性能が低下する。この性能低下の主な要因は低レイノルズ数領域の境界層に依存する。さらに、風車翼に生ずる空気力学的変動は、風に含まれる風速の変動および風向変動によりもたらされる。小型風車のハブ高さは大型に比べ低く、風車の受ける風は、地表面への設置層の影響を受けており、大きな乱れを含んでいる。風向変動に伴う空気力学的変動は、翼の回転角度位置により変化する。風力タービンの最適回転数は、ロータの大小に関わらず翼先端速度により決まる。小型風車の最適回転数は大きく、空気力学的な変動周期は短く、翼断面周囲の流れは高い非定常性を示す。レイノルズ数の低下に基づく翼性能の悪化、短い変動周期による流れの非定常性は小型風車の性能を大きく低下させる。また、これまで風車の大型化でこれらの問題を回避してきたため、これら問題の解明は進んでいない。

そこで研究代表者は、小型風車の空気力学的設計には回転翼境界層の把握が必要であると考え、回転翼に埋め込まれた LDV により回転中の境界層の一部を明らかにした実績のあるフランス地中海大学でこれらの測定手法 (2) について共同で実験を行った。地中海大学での経験および議論を踏まえ、三

重大学にて静止系に固定された LDV によってもこのような測定が可能であると考えた。本研究では、静止系に固定した LDV による回転翼境界層の計測技術を確立し、境界層の流れ状態を把握する。計測により得られた結果は、既存の圧力分布の結果を含めて非定常、低レイノルズ数回転翼の流れ状態を明らかにしたいと考えた。

## 2. 研究の目的

本研究では、翼面近傍の速度分布計測から、非定常、低レイノルズ数の翼面境界層を考察する。また、回転翼の中心付近は、2次元流れにおける失速角よりも大きな迎え角まで揚力を発生することが知られている。この理由は、翼面の境界層内の流れが遠心力の影響を受けるためであると推測されているが、速度分布計測から明らかにされた例はない。この理由を回転中の翼面の流れ状態の観察から明らかにする。静止状態での流れ状態、および回転状態での流れを比較することにより、小型風車回転翼の作動について考察する。

## 3. 研究の方法

低レイノルズ数における翼の性能は翼負圧面に形成される層流剥離泡に大きく依存する。このような翼面境界層について速度分布測定から明らかにする。実験は三重大学ベンチャービジネスラボラトリーの大型風洞設備 (口径 3.6m, 乱れ強度 1.5%以下) を用いて行う。供試風車は、ロータ直径 2.4m であり翼面境界層の測定が可能である。2次元レーザドップラ流速計は、測定体積を通過する粒子速度を 2 成分について計測できる。LDV と精密な位置決めを可能にするステージの組み合わせにより、境界層内部に流れ状態を明らかにできる。翼面形状はレーザ変位計を使用し高精度で把握しておく。非回転状態の境界層測定は、三重大学エネルギー環境工学実験棟内の回流型風洞を用いて行う。風洞は出口寸法  $0.65 \times 0.65$ m で最大風速 50m/s である。本風洞のノズル部分および計測断面を変更して、さらに乱流格子を設置可能にし、乱れ強度 0.25%~1.5% を実現してある。

風車翼の作動状態は、静止状態および回転状態で異なる。これは風車翼の半径位置により変化する周速に応じて流れの速度および角度が異なることおよび回転に伴う遠心力の有無による。したがって、翼面境界層状態は、回転時および非回転時についてレイノルズ数を一致させて測定を行い比較する。供試翼の各半径断面は、一般的な発電用風車の翼と同様、最適に配置された複数の翼型をもつ。このため半径方向に 4 種類の翼断面について検討を行う。またレイノルズ数の影響を考察するため、風洞風速および翼車回転速度を可能な限り変化させて計測をおこなう。回転

時には、翼半径方向の流れ成分の発生が予測される。計測に基づき得られた半径方向速度を考慮し、非回転時の翼は翼前縁での入射角が一致するように流れに対して傾斜を付ける。この測定結果を考察することで、流れの傾斜によりは生じる現象と遠心力に基づき生じる現象を、考察する。なお、翼面境界層は、翼素に流入する流れの乱れ強度に敏感に影響されると考えられる。

#### 4. 研究成果

##### (1) ロータ翼周りの速度分布

LDVにより測定を行った  $r/R=0.7$  と  $r/R=0.3$  における翼面近傍の速度分布を、三次元の合成速分と半径方向速度成分を用いてそれぞれ考察する。

図1および2は、最適運転状態である周速比  $\lambda=5.2$  での半径位置  $r/R=0.7$  におけるロータ翼周りの速度分布である。図の左側が前縁、右側が後縁であり、負圧面上の流れを示している。図3は、三次元合成相対速度  $U_{3D}$  を幾何学的流入風速  $U_{ref}$  で無次元化した  $U_{3D}/U_{ref}$  のコンター図である。図の中のプロットは  $U_{3D}/U_{ref}$  の絶対値によって色分けされている。図1より前縁から流入した流れは、翼面近傍で  $x/c=0.4$  付近までは  $1.3 < U_{3D}/U_{ref} < 1.8$  の速度を持つ。  $x/c=0.2$  より下流では流れは減速するが、流れは剥離せずに付着したまま後縁へ向かう。図2は、翼幅方向速度  $w_0$  を幾何学的流入風速  $U_{ref}$  で無次元化した無次元翼幅方向速度  $w_0/U_{ref}$  のプロット図である。ここで、  $w_0$  は周方向速度  $v$  と半径方向速度  $w$  から求めた翼幅方向（翼断面に直交）の速度成分で、翼幅方向外向きを正の値としてある。図より、

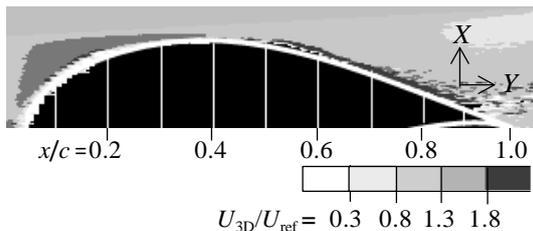


図1 翼周りの速度分布( $r/R=0.7$ )

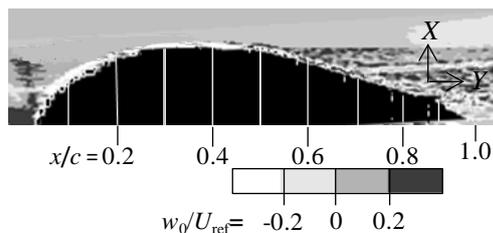


図2 翼周りのスパン方向速度の分布 ( $r/R=0.7$ )

流れは翼前縁で翼幅方向外向きの速度を持つ。図の翼前縁から  $x/c=0.4$  付近の翼周りでは  $0 < w_0/U_{ref} < 0.2$  の速度が発生している。また、  $x/c=0.6$  以降の翼周りの  $w_0$  は、翼表面の極近傍において値の大きさに開きが見られ、流れは乱れていると考えられる。以上より半径位置  $r/R=0.7$  における翼周囲の流れは、前縁後縁に若干の翼幅方向成分を持つが、おおむね二次元的な流れであるといえる。

図3および4は、半径位置  $r/R=0.7$  より翼根側の  $r/R=0.3$  ( $\lambda=5.2$ ) におけるロータ翼周りの速度分布である。図3は、無次元三次元合成相対速度  $U_{3D}/U_{ref}$  のプロット図である。図4より、翼面上の流れは、前縁から  $x/c=0.3$  の間で  $U_{3D}/U_{ref}=1.8$  まで増速している。これは  $r/R=0.7$  の流れよりも高い値である。逆圧力勾配により、  $x/c=0.3$  から下流では流れが減速していく。また、  $x/c=0.7$  付近から後縁にかけての黒で塗りつぶされている領域では速度データが十分には取得できなかった。これは、翼面流れの剥離により、測定点を通るトレーサ粒子が少なくなり、速度が測定されなかったためと考えられる。図4は、無次元翼幅方向  $w_0/U_{ref}$  のプロット図である。図より、前縁から  $x/c=0.2$  以降の翼周りの翼幅方向速度は、  $w_0/U_{ref} > 0.2$  であり、流れは強い三次元性を示す。

以上より、  $r/R=0.3$  ( $\lambda=5.2$ ) の翼面上速度は主流方向と周方向の速度成分のみから成る二次元速度より大きくなる。そのため、翼面の負圧は二次元翼特性から求められる負圧より低いと考えられる。

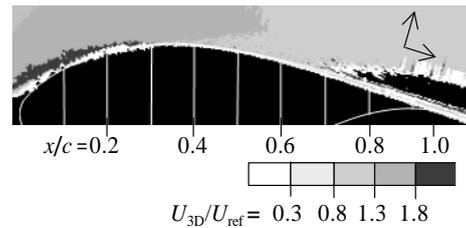


図3 翼周りの速度の分布( $r/R=0.3$ )

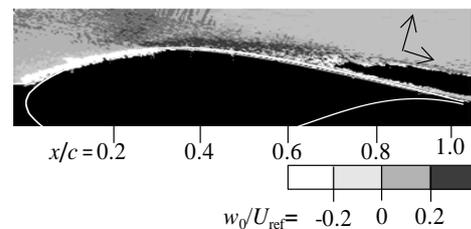


図4 翼周りのスパン方向速度の分布 ( $r/R=0.3$ )

(2) ロータ翼面上の境界層速度分布

図5は翼面境界層の速度分布を示す。図の線は実験値および平板の境界層と同様に考えた場合の速度分布を示す。平板の境界層はよどみ点からの距離を代表長さとして予測したものである。図より  $x/c=0.3$  の速度分布はおおむね層流境界層に一致している。また  $x/c=0.5$  の分布は乱流境界層に一致している。小型風車の場合、運転時の翼面境界層は2つの境界層を有することがわかる。

(3) ロータ翼面の圧力分布

図6は、流れの3次元性の強い翼根付近の翼面圧力分布を示す。図中の記号は、圧力計測装置による結果および速度分布に基づく計算値を示す。なお運転周速比は最適値である5.2である。図より、翼面の前縁付近は大きな負圧を発生しており、翼根翼素は、十分な揚力発生を示す。ここで3次元の速度分布に基づく圧力計算値は翼の前縁から中腹にかけて圧力計測値と一致している。一方2次元の速度分布による圧力分布は、計測値よりも小さくなる。翼根付近の翼素は3次元性の

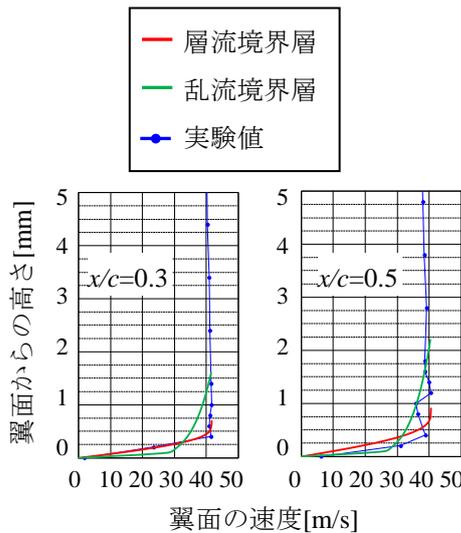


図5 翼面境界層の速度分布

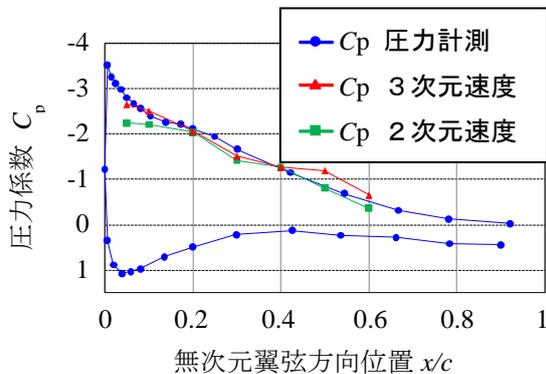


図6  $\lambda=5.2$  の圧力分布 ( $r/R=0.3$ )

強い流れにより作動していることがわかる。このため、風車翼設計に一般的に用いられる2次元流れの仮定とは異なる流れ下で運転されている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計5件)

- (1) 鎌田泰成, 前田太佳夫, 村田淳介, 鈴木大樹, 加賀則光, LDVを用いた水平軸風車翼面上流れの解明, ターボ機械協会第67回総会講演会, 2012/5/25, 東京大学.
- (2) Yasunari KAMADA, Junsuke MURATA, Takao MAEDA, Norimitsu KAGA, Daiki SUZUKI and Takuma YOSHIDA, "Elucidation of Blade Surface Flow of Horizontal Axis Wind Turbine by LDV", International Symposium for Sustainability by Engineering at MIU [IS2 EMU 2011], BP-12, pp176-178 (2011. 12/2), 三重大学.
- (3) 鎌田泰成, 前田太佳夫, 村田淳介, 松田聡志, マチューチボ, 加賀則光, "水平軸風車の翼面近傍流れに関する研究", 日本機械学会2010年度年次大会, pp121-122 (2010/9/5-8), 名古屋大学.
- (4) Yasunari KAMADA, Takao MAEDA, Junsuke MURATA, Satoshi MATSUDA, Naohiro OKADA, Thibault Mathieu, "DEVELOPMENT OF BOUNDARY LAYER MEASUREMENT SYSTEM ON ROTOR BLADE OF HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE BY LDV" RENEWABLE ENERGY 2010 Proceeding, No. P-Wd-24, CD-ROM, p. 4, (2010/6/27-7/2), Pacifico Yokohama
- (5) 鎌田泰成, 村田淳介, 前田太佳夫, 松田聡志, 岡田尚浩, "水平軸風車翼面境界層の計測", 第62回ターボ機械学会名古屋講演会, pp1-6, 2009/9/25, 名古屋大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鎌田 泰成 (KAMADA YASUNARI)  
 三重大学・大学院工学研究科・准教授  
 研究者番号: 60262987

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3)連携研究者

前田 太佳夫 (MAEDA TAKAO)

三重大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80238865

村田 淳介 (MURATA JUNSUKE)

三重大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：40402515