

# 風洞実験等を活用した次世代風力発電技術の研究開発

阿部 裕幸\*, 小垣 哲也\*\*

## Research and Development of Next-Generation Wind Turbine Generation Technology using Wind Tunnel Experiments and Other Techniques.

Hiroyuki ABE and Tetsuya KOGAKI

### 1. 緒 論

地球温暖化対策, エネルギーセキュリティの確保といった観点から, 風力発電の重要性が国際的にも認識されて久しい。日本における風車設備容量は 2013 年に 2,670MW (267 万 kW) を超え, 着実に風力開発が進められている。また, 世界全体における風車設備容量は, 2013 年に 318.1 GW (3,181 億 kW) を超え, 国際的にも急速に導入が進んでいる。特にヨーロッパでは, 2007 年以降, 単年に新たに導入された発電手段として, 風力発電がガス火力発電を抜き, 最も導入が進んだ発電手段となっている。従って, 風力は国際的には単に新エネルギーの中核としてだけでなく, 全発電手段の中核の一つとして位置付けられつつある。

このような風力発電の急速な発展は, 現在の大型風車の主流である 3 枚翼水平軸型風車技術が, 平坦地の陸上風車としては一程度の完成の域に達し, 欧米の風車設置条件においてある一定の信頼性・安全性が確保されたことに起因する。これにより, 補助金, あるいは国内でも 2012 年 7 月から開始された再生可能エネルギーの固定価格買取制度等の導入インセンティブをもとにして, 風力発電事業が健全に実施できる土壌が確保されてきた。しかし, 導入インセンティブなしでも風力発電事業が自活できるようにさらに低コスト化を図ると共に, 将来的に風力発電をさらに発展させるためには, さらに次世代の風力発電に関する研究開発が必要であるというのが, 国際的な認識である。

こうした背景のもと, 平成 20～24 年度にかけて実施された次世代風力発電技術研究開発 (基礎・応用技術研究開発) 事業内において, 主として風洞実験を活用して実施された研究開発内容について紹介する。

### 2. 複雑地形高乱流特性に関する研究開発

#### 2.1 概要

風力発電において, そのエネルギー源である風の時間・空間分布を把握することは, 今後の風力発電技術の普及・進展を考える上で重要である。欧米のような平坦地形で偏西風など風力発電導入に比較的平易な地域に比べ, 日本をはじめとするアジアモンスーン地域では風の変動特性, 地形の複雑さなど解決しなければいけない問題が多い。このうち複雑地形, 風車後流の空間風速分布を解析する方法として, 風洞試験および数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 技術が挙げられる。本報告では, 特に風洞実験技術に着目して述べる。これらの技術は, 平地においては実用的な段階にあるといえる。ところが, 風車後流の影響や複雑地形に対する風洞試験としては, いまだ十分な水準にあるとはいえない。そこで本事業においては, 複雑地形を対象とした風洞技術および CFD シミュレーション技術の高度化を測った。また, 実際の複雑地形として, 本研究開発事業内で別途実フィールドにおいて信頼性の高い風速計測を実施した鹿児島県いちき串木野市の北緯 31°47'42"47, 東経 130°14'05"79 を計測点とする半径 4.9km の円内の領域を対象とした風洞実験を実施した。

#### 2.2 風洞実験手法の高度化

##### 2.2.1 乱流境界層の生成

風洞実験において主流の乱流状態を制御する方法としては上流に格子などの抵抗体を設置し, それらの後流に発生する乱流を利用する受動的な方法, または格子から任意の速度で噴流を吹く, あるいは格子状に設置された構造体を任意に偏向させて乱流を能動的に制御する方法が挙げられる。本研究では壁面乱流境界層厚さを制御する簡易な方法として境界層平板前縁部の近寄り流れの入射角を利用する受動的な方法を行った。近寄り流れは入射角により前縁剥離をするが, このときの乱れ強さにより, 指数則に従う速度分布と境界層厚さをある程度制御することができる。通常, 境界層平板前縁部への近寄り流れは, 剥離を起こさずに平板上に平行な層流境界層を導入する。このために風洞測定部出口において境界層平

\* (独)産業技術総合研究所(〒305-8564 茨城県つくば市並木 1-2-1, E-mail: abe.hiroyuki@aist.go.jp)

\*\* (独)産業技術総合研究所(〒963-0298 福島県郡山市待池台 2-2-9, E-mail: kogaki.t@aist.go.jp)

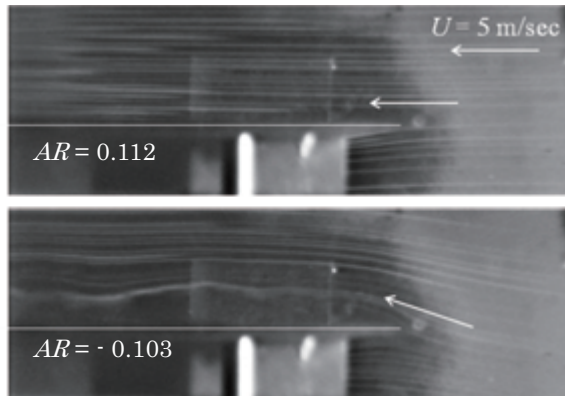


Fig.1 Flow visualization of flat plate boundary layer

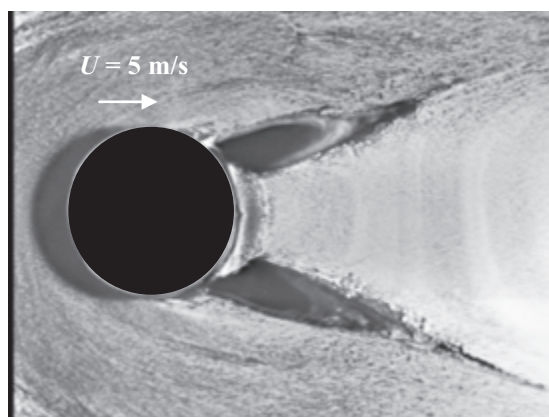


Fig.2 Flow visualization around a column

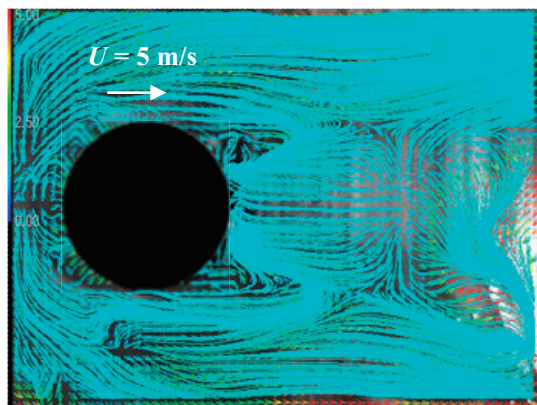


Fig.3 Stream line around a column

板により仕切られた上下の空間に対して圧力抵抗が等しくなるように抵抗体を設置する．例えば測定部出口に設置したシャッターの開閉により抵抗バランスを取るのも一つであろう．本方法は、この圧力バランスを利用して近寄り流れに前縁への入射角を与え小規模な剥離流れを発生させることで乱流境界層を生成する．図1は、境界層平板に流入する流れをスモークワイヤー法で可視化した結果である．このように流れに擾乱を与える際に気を

付けなければならないことは、十分様な乱れであることであり、あまり大きな剥離は適さない．実際には前縁部に楕形のプレート貼り付けたり、または平板上に網を設置して様な乱れとなるように調整した．

## 2.2.2 限界流線の可視化

壁面近傍の流れの可視化手法の一つとして油膜法がある．例えば、灯油に着色用の黒煙粉と分散剤のオレイン酸を適度に混合させ、これを刷毛等でモデル表面や壁面に塗布する．十分流れの中に置かれた壁面上には黒煙粉の移動により模様が描かれるが、この模様が落ち着いて固定されたところで写真撮影し、模様から流れ場を推察する．図2は、油膜法を用いて風速5m/secで壁面に置かれた円筒を上部から撮影した模様を示す．図の円筒背後左右には黒煙粉の溜まりが見られるが、これらは円筒左右に発生した剥離渦により形成されたものである．その下流には薄く白い模様が現れているが、何を表現しているのか解釈するのは難しい．図3は、油膜を塗布してから油膜模様が落ち着くまでの様子をビデオに取り、その動画を粒子画像流速測定法（PIV）の解析方法である濃淡画像計測により限界流線を求めた結果である．松村ら<sup>(1)</sup>は艦首まわりの流れを例に同様な方法を提案し、油膜法を用いた壁面摩擦応力分布計測法の有効性を示している．本解析でも図に示される流線より流れの様相が明確にされ、鞍部、節部、焦点、分流、合流等が把握出来ることで円筒後流の逆流域等の詳細が明らかになった．

流れの計測手段としては、熱線風速計やレーザ計測等があるが、いずれも壁面近傍の複雑な流れ場に対しては計測が困難な面がある．このような可視化技術は、流れ計測の補完的な手法として有用である．

## 2.3 地形モデルの風洞実験

### 2.3.1 円錐モデル

地形乱流の生成を調べることを目的に単純地形モデルとしてベル型<sup>(2)</sup>及び円錐型に関して研究を進めてきたが、今回は円錐型を取り上げ、その後流場に現れる剥離渦の挙動と特性について調べた風洞実験<sup>(3),(4)</sup>について紹介する．図4は、風洞測定部内に設置された円錐モデルである．円錐後流場の計測では、アルミニウムの削り出しの表面を艶消し黒で塗装したものを使用し、剥離流れに伴う圧力変動を計測する際には、図5に示すアクリル製を用い、表面には半導体圧力センサーを直付けした．

円錐モデル後流場の時間平均速度分布は、3次元レーザードップラー流速計（LDV）を使用した．但し、この場合速度分布を詳細に調べるため条件を制約し、円錐形状を  $h = 60 \text{ mm}$ ,  $w = 60 \text{ mm}$  ( $h/w = 1.0$ ) の1種類、主流速度  $5.0 \text{ m/sec}$ , 乱流境界層厚さ  $60 \text{ mm}$  の条件で、水平断面を計測した．図6は、計測結果の例として壁面から  $z = 10 \text{ mm}$  の高さにおける  $x-y$  断面内の時間平均速度成分  $u$  と  $v$  の分布、及びそれらから得られた流線を示す．ここで  $u$  は流れ方向  $x$  の速度成分、 $v$  はスパン方向  $y$  の速度成分である．

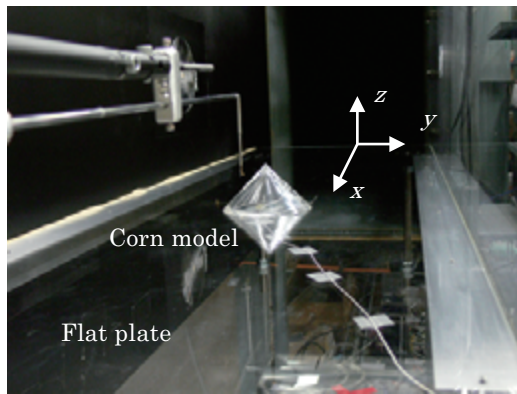


Fig.4 Corn model in wind tunnel

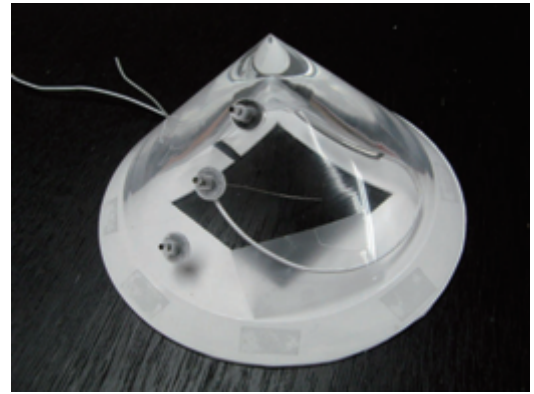
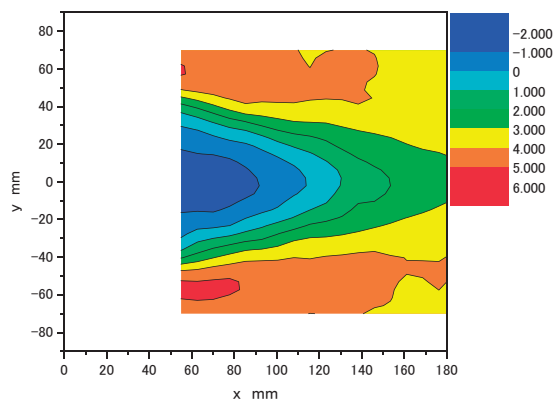
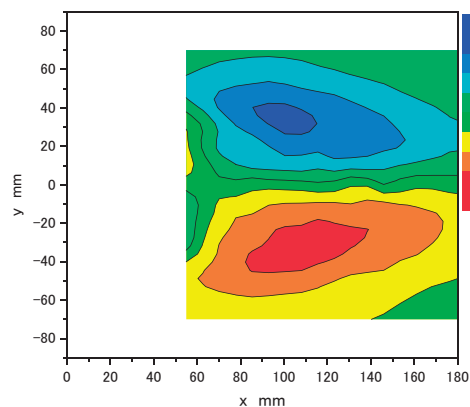


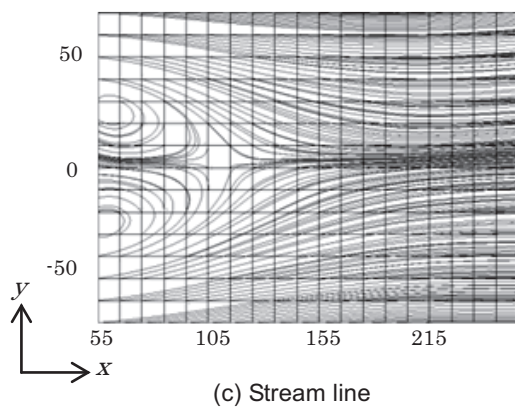
Fig.5 Corn model mounted pressure sensors



(a) Velocity of u component



(b) Velocity of v component



(c) Stream line

Fig.6 Result of wind tunnel experiment

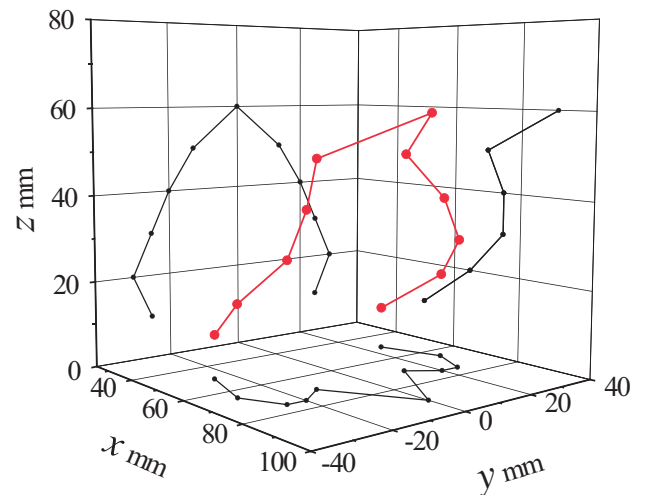


Fig.7 Arch vortex

両図より後流場の逆流域と1対の剥離渦の存在が認められる。図7は、渦度分布より渦中心を求め3次元で表示したものである。これらの実験結果から円錐後流場に現れるアーチ渦と円錐周りに形成される馬蹄渦との関係を考察できるようになる。

図8は、図5に示した様に円錐の側面、稜線上に直径1.6mmの静圧孔を設け、半導体圧力センサーを直接設置し、剥離に伴う周期的な変動信号をトリガーとして主流速度  $U = 5.0\text{m/sec}$ 、乱流境界層厚さ  $60\text{mm}$  の条件でI型熱線プローブを用いて計測した円錐後流場の変動周期を位相平均した結果である。図より円錐の両側で計測した流れ場は位相が反転していることが明らかであり、周期的な変動が交互に現れていることがわかる。このことからアーチ渦の根元である壁面付近では円錐から放出される交番渦により周期的に振れる非定常な流れ場が存在すると考えられる。このように周期的な流れ場の場合は、位相平均処理を行うことで非定常な流れ場の様子を覗くことができるようになる。

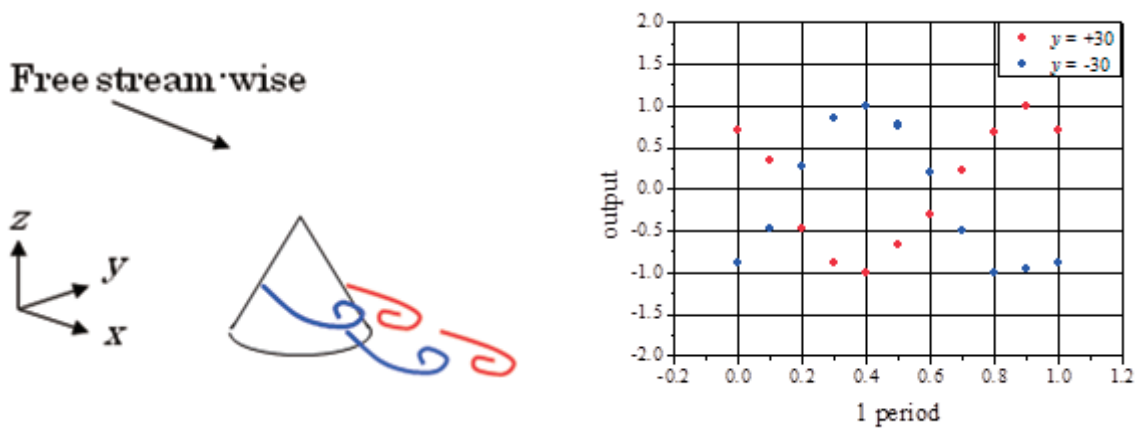
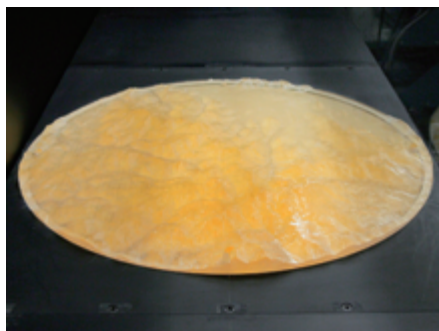
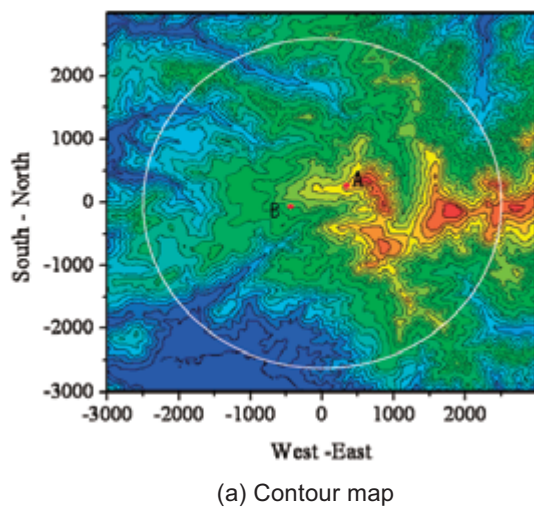


Fig.8 Phase averaged velocity signal



(b) Terrain model by rapid prototyping



(c) Terrain model by NC machining

Fig.9 Terrain model

### 2.3.2 実地形モデル

図 9(b)は、国土地理院の 50m メッシュデータから制作された縮尺 2 万分の 1、直径 490mm の予備実験用地形モデルである。制作方法は、液体樹脂をレーザで硬化させながら積み上げることで複雑形状に対応出来る光造形法を用いた。この時の速度分布計測は、I 型境界層用プローブによる熱線風速計を用い、流れの定性的な様子を把握することができた。

本番の実験では、2009 年度に計測開始された鹿児島県いちき串木野市の風計測サイト A 地点と B 地点を対象とした。風洞の実地形モデルは、A 地点と B 地点を結ぶ中点を中心とする半径 2.45 km の円領域を対象であった。図 9(c) に示す実地形モデルの寸法は、縮尺 1 万分の 1、直径 490 mm の円形状とし、10 m メッシュ座標を基にアルミニウムブロックから削り出しで加工している。

モデルに流入する主流は 5 m/sec、速度分布は指数則の  $1/5$  乗から  $1/7$  乗の範囲、乱流境界層厚さ 80 mm で行った。この値を実地形に換算すると 800 m に相当する。計測位置は、A 地点と B 地点の各上流  $x = -25$  mm、下流  $x = 25$  mm までを地形面から垂直方向に速度分布を計測した。この上流、下流の距離は、風車直径  $D = 60$  m とした場合の  $4D$  程度に相当する。主流の風向は、円形の地形モデルを回転させて行った。速度分布計測は、X 型境界層用プローブによる熱線風速計で流れの 3 成分を計測した。水平方向の速度成分より風向、垂直方向の速度成分より吹き上げ・吹き降ろしの影響を考察できる。

図 10 は、計測位置上空における風速を風向に対して表した例である。図 11 は、計測領域の流れ方向を横軸、高さ方向を縦軸とし、その垂直断面内の風速分布を色による等値で表現している。このように地形モデルを用いた風洞実験を行うことで実フィールドの風況をある程度推測できるようになる。最終的には数値計算による風況予測が期待されるが、現状、風洞実験も有効な考察手段であると考えられる。

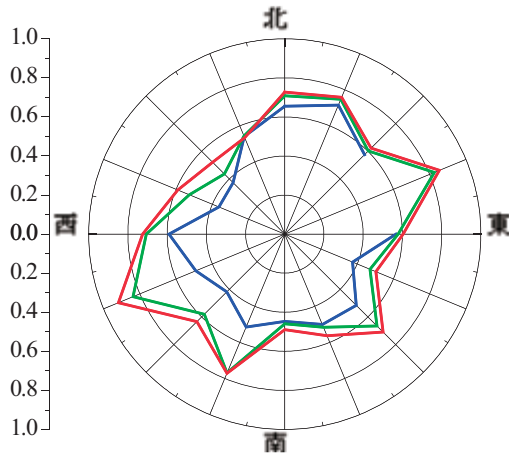


Fig.10 Radar chart of wind speed

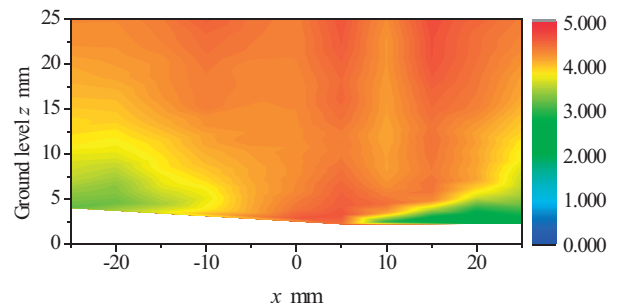


Fig.11 Contour of Wind speed

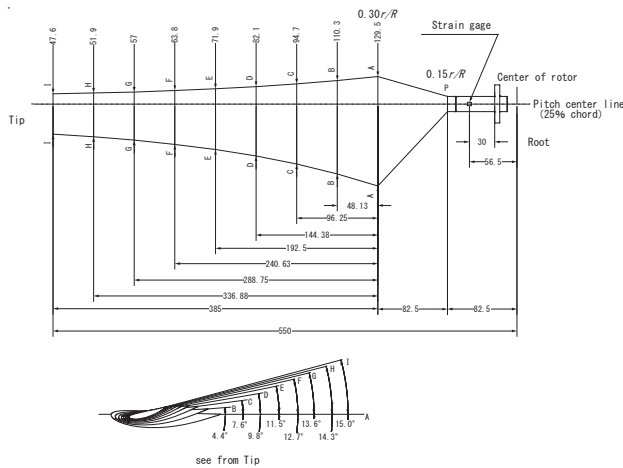


Fig.12 Turbine rotor blade

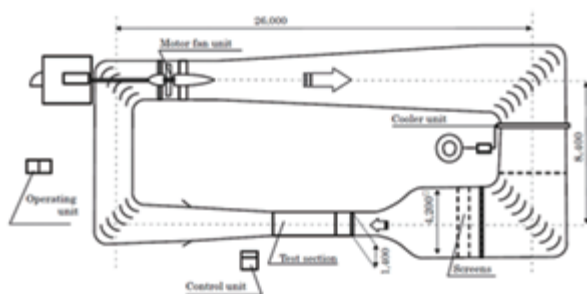


Fig.13 Wind tunnel



Fig.14 Small wind turbine in wind tunnel

### 3. 建物屋上・複雑地形設置小形風車に関する研究開発

#### 3.1 概要

分散電源としての有用性、環境教育・エコ活動教育のシンボルとして、小形風車に対する興味が高まりつつある。特に近年、多くの小形風車が開発され、市場に投入されており、小形風車の存在感がますます向上している。特に、日本は機器の小形化・高性能化技術に優れ、風車分野でも特に小形風車の開発においては国際的に優位に立てる可能性があり、現状でも一部の国内小形風車メーカーは海外へ積極的に展開している。こうした風車メーカーの取り組みを支援するため、小形風車を対象とした固定価格買取制度といった各種の導入支援制度の整備により、国内産業の育成・発展が期待される。

一方、小形風車の設計・開発・製造は、一見容易であると認識されがちであるが、技術的には大形風車よりも難しい側面もある。例えば、大形風車と比較して、小形風車翼は一般的に低いレイノルズ数領域で作動するため、高い効率・性能を達成することが難しい。小形風車は、ビル等の建物の屋上や宅地の庭先に設置されるケースが多いため、住環境から一定の距離が確保される大形風車と比較すると、求められる安全性、信頼性、さらには騒音等の環境性がより厳しい。

本事業においては、小形風車の技術評価方法を確立するため、各種の小形風車の実証試験及び標準化研究を実施した。特に標準化研究として、現状の IEC 国際規格には盛り込まれていないとともに、国内事例の多い建物屋上、及び複雑地形における小形風車の設置・導入に関連する課題として、こうした高乱流の設置環境条件における小形風車に作用する空力荷重等について風洞実験によって評価することにより、建物屋上・複雑地形設置時の小形風車の簡易設計審査基準等の開発に向けた研究開発を実施した。

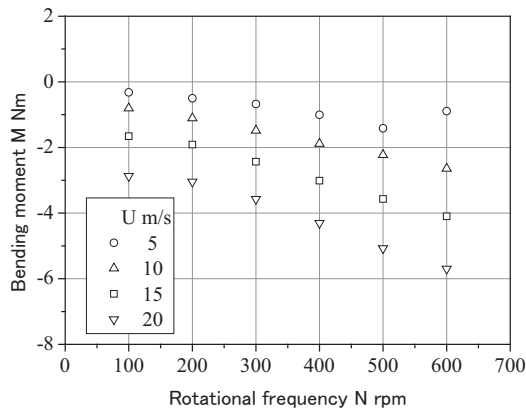


Fig.15 Bending moment

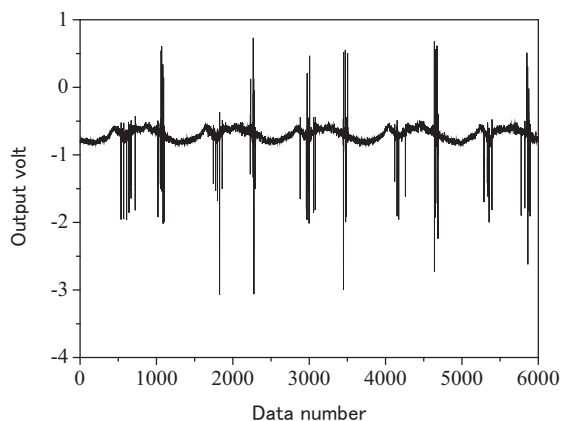


Fig.16 Time series variation of bending moment

### 3.2 小形風車風洞実験方法

風洞実験用の小型風車は定速回転型の2枚翼モデル風車である。翼型には、産業技術総合研究所にて風車専用に開発された MEL012 を用いた。ローター翼は、翼素運動量理論により最大出力を得よう半径方向のねじりおよび翼弦長分布を最適設計し、半径 30% 位置から有効な翼型をなしている。ローター回転数は、内部のサーボモーターにより制御される。ローター翼の幾何形状を図 12 に示す。ローター翼の根本と風車軸には歪ゲージが貼られ、それぞれ曲げモーメントと軸トルクを計測するが、信号はテレメーターシステムにより無線でデータ収集することができる。また風車周りの流れ場は、熱線風速計やピトー管をトラバースすることで計測可能である。風洞は、産業技術総合研究所北サイトに設置された回流式を使用した。測定部入口部は、カートを交換することにより速度成層装置と変動流発生装置を設置することが出来る。図 13 に風洞全体の概要、図 14 に実験風景を示す。

### 3.3 小形風車風洞実験結果

主流速度を 5m/s～20m/s、風車ローター回転数を 100rpm～600rpm まで変えた場合のローター翼に作用

する曲げモーメントの分布を図 15 に示す。データはサンプリング周波数 200Hz、データ数 20000 で 10 秒間取得してから平均値を校正して算出している。図から主流速度の増加とローター回転数の増加に伴いローターが下流に曲げられる様子が認められる。図 16 は、主流風速 10m/s、回転数を 100rpm とした場合のローター翼曲げモーメント相当の出力値をローター回転 5 周期分で時系列表示している。図 15 の平均値だけでは分からないモーメント変動が見られる。またローター回転数が高くなるにつれ変動幅が大きくなる傾向があり、これらのことは風車設計の上限値、共振を検討する上で重要な観点となる。

現在は、トルク計測、ローター翼周りの非定常流れ、翼の捩じれ運動の可視化等も含めた計測手法、データ取得方法について再検討中である。今後も風洞計測の高度化も図りながら簡易設計審査基準策定に向けた試験手法の提案を目指す予定である。

## 4. まとめ

風力発電技術の研究開発に関わる課題である複雑地形における風況予測の基礎研究として単純地形モデル及び実地形モデルの風洞実験を進めてきた。また小型風車の普及を考慮した風洞実験環境を整えてきた。この中で地形モデル実験においては、実験手法として流入する壁面上の乱流境界層制御、及び油膜法による限界流線導出を提案し、非定常計測においては平均値を条件付きで解析する位相平均により剥離との相関が強い流れ場を考察することを示した。また実地形モデル風洞実験は、数値計算結果を保障する役目もあるが、比較的容易に流れ場を考察することが可能であり、複雑地形のような乱流成分の大きな環境に対しての風洞実験の有効性は高いと考えられる。

小型風車の風洞実験は、今後も設計、材料、システムの専門家とも相談しながら計測手法を再考し、より良いデータ収集を進めて行く予定である。

## 参考文献

- 1) 松村ら, 船首部における壁面摩擦応力の画像計測, 可視化情報, Vol.15, suppl. No.2 (1995), pp.113-116.
- 2) Hiroyuki ABE, Tetsuya KOGAKI, Hikaru MATSUMIYA, Kaori KIEDA, Turbulent flow over a three-dimensional bell shape hill, European Wind Energy Conference & Exhibition, Athena/Greece, 2006/02/28.
- 3) 岡本ら, 平面壁上の円すいまわりの流れおよび渦流出に及ぼす頂角の影響, 機械学会論文集 (B 編) 74 巻 737 号, 2008, 49-57.
- 4) 阿部裕幸, 木村茂雄, 小垣 哲也, 風洞実験による円錐地形モデル剥離流れの研究, 第 31 回風力エネルギー利用シンポジウム, (2009.11), pp.169-172.