

風車に関する風洞実験 — 水平軸大型風力発電機 —

本田 明弘^{*}, 平井 滋登^{**}, 刈込 界^{***}, 深見 浩司^{***}

Wind tunnel test for Wind Turbines — Large Scale Horizontal Axis Wind Turbines —

Akihiro HONDA, Shigeto HIRAI, Kai KARIKOMI, Koji FUKAMI

1. 緒 論

風車に関しては、性能・荷重・騒音などの実証試験が行われるのが一般的であるが、その開発段階で風洞実験やシミュレーションが行われることも多い。

その種類も、小型／大型、発電用／灌漑用、揚力型／抗力型など種々存在し、技術的なポイントもそれぞれにより異なる。ここでは発電用として現在主流の揚力を利用した大型風車に関連した風洞実験に関して紹介する。

下図は、新機種の実証目的で建設された、ロータ径95m、定格出力2.4MWの発電用風車である。



Fig.1 Wind turbine certification test at Yokohama.

2. 検討項目

2.1 風況

特に日本において風車の設置される地点は、地形の起伏が激しい状況にある場合が多い。このときに風車に作用する風の特徴を把握することは、風車の設置計画や、メンテナンスに影響を及ぼすために、重要な検討項目である。



Fig.2 Wind turbines at mountaneous region.

2.2 翼の空力特性

風車に求められる、高性能／低荷重／低騒音の特性を達成するためには、翼型や種々のデバイスを開発する必要がある。また長期間の運転に伴い翼の前縁部に生じるエロージョン¹⁾の性能／騒音への影響も重要である。



Fig.3 Rotor blade leading edge erosion.¹⁾

* 三菱重工業(株) 技術統括本部 長崎研究所 ターボ機械研究室 (〒851-0392 長崎市深堀町 5-717-1, E-mail : akihiro_honda@mhi.co.jp)

** 三菱重工業(株) 長崎研究所 流体研究室

*** 三菱重工業(株) 長崎研究所 ターボ機械研究室

2.3 ロータの空力特性

三次元ロータの発電性能は、風速と発電出力との関係で示されるが、設計曲線と実測結果が異なる場合には、事業運営に影響を及ぼすために、風車メーカーとして重要な検討項目である。下図は、気流の乱れが及ぼす例²⁾を示すが、風況とあわせて重要であることが判る。

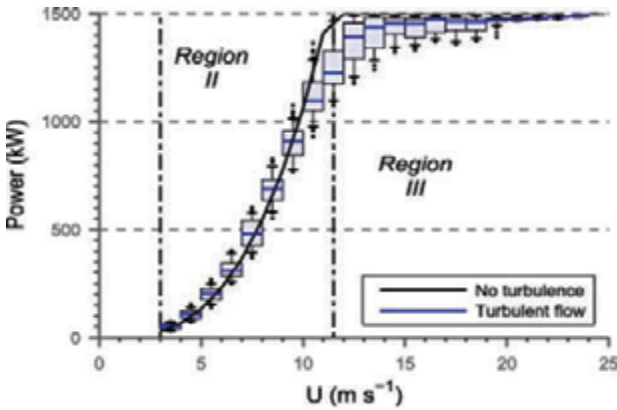


Fig.4 Power curve of wind turbine measured at site.²⁾

また、下図には風車のロータ面における騒音の発生レベルの可視化結果³⁾を示すが、これらの風車から発生する騒音は、環境面から重要な項目である。



Fig.5 Visualised Noise source of wind turbines.³⁾

3. 検討方法と風洞実験の位置づけ

前章の検討項目の検討方法に関して、以下に一般的な解釈を述べる。

3.1 実機を用いた計測

実機による計測はレイノルズ数など実験/シミュレーションでの検討でカバーしきれない項目の確認として重要であるが、通常計測できる項目は発電性能、荷重などに限定される。Fig.6は、ブレード表面に作用する圧力、ブレードの上流における流速を計測し、設計時における仮定と比較したプロジェクト⁴⁾であり、センサーそのものも開発要素のある特殊事例である。



Fig.6 Rotor blade pressure measurement.⁴⁾

左図はブレードの前縁にピトー管を設置した状況、右図はブレード表面の圧力孔である。

3.2 シミュレーション

風車の風況、ロータの空力、騒音、ナセル内部の冷却設計、などにおいても、近年では種々のシミュレーションが頻繁に用いられる。

ただし、本稿では詳細は述べないが、これらの利用には、実験などとの複合的な方法での検証を行い、長所を最大限に利用することが必要である。

3.3 風洞実験

風車に用いる翼の二次元模型を用いた風洞実験を実施してきた代表的な風洞を下表に示す。なお、DTU(2016)は、2016年に完成予定の設備である。

Table 1 Wind tunnels used for wind turbine airfoils.

N o.	Name		Cross Section	Wind Speed	Volume (m ³ /s)
1	NASA LTPT	US	0.91mx 2.29m	170m/s	354
2	DNW NMB	DE	3.25mx 2.8m	90m/s	819
3	LM	DK	1.35mx 2.7m	105m/s	383
4	DTU (2016)	DK	2.2mx 3.3m	105m/s	762
5	TUDelft	NL	1.25mx 1.8m	120m/s	270
6	MHI	JP	10m x 3m	28m/s	840

航空分野を含めた多目的な風洞設備のほかに、No. 3~5は風車に特化した新しい風洞の利用も近年の傾向である。

また下表には、風車ロータの三次元模型を用いた風洞実験を実施実績のある代表的な風洞の一覧を示す。

Table 2 Wind tunnels used for 3D test of wind turbines.

N o.	Name		Cross Section	Wind Speed	Volume (m ³ /s)
1	NASA Ames	US	24.4mx 36.6m	50m/s	44,652
2	DNW LLF	DE	9.5mx 9.5m	62m/s	5,596
3	CSTB	FR	14mx6m	80m/s	6,720
4	Politecnico di Milano	IT	13.8mx 3.8m	16m/s	839
5	MHI	JP	10mx3m 6mx5m	28m/s 20m/s	840

ここでは航空、シビル関係の多目的での大型風洞が用いられている。

4. 風洞実験の例

4.1 風況調査

風車に作用する風の特徴を把握するには、近年では種々のシミュレーションによる地形の影響把握が実用的に用いられている。これらのシミュレーションの妥当性を実証するには現地での観測が有意義であるが、観測地点数や観測高さなどの面で制約を受ける場合が多く、中間的な意味合いでの地形模型による風洞実験を実施する場合がある^{5), 6)}。図7には、文献⁶⁾において対象とした現地および模型を示す。

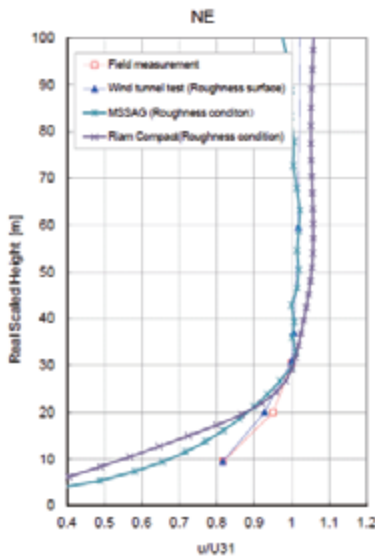


Fig.7 Site and wind tunnel test model of topography.⁶⁾

地形模型模型においては、適切な表面粗度によって実測地と良好に整合が取れて、数値シミュレーションとの比較として用いる。

4.2 翼素の空力特性評価

風車の翼に採用する翼型は、航空機などの翼に比べて翼厚比(翼厚/翼弦長)が大きく、新たな翼型を開発する際にはCFDなどによる事前検討の後に、風洞実験による確認が実施される^{7), 8)}。またそのほかにも、エロージョンなどによる性能劣化、微小デバイスによる空力制御などの目的で実施されることもある。

特に揚力型の風車翼の特性を把握するには、レイノルズ数による影響が重要であり、試験の難易度も高い。

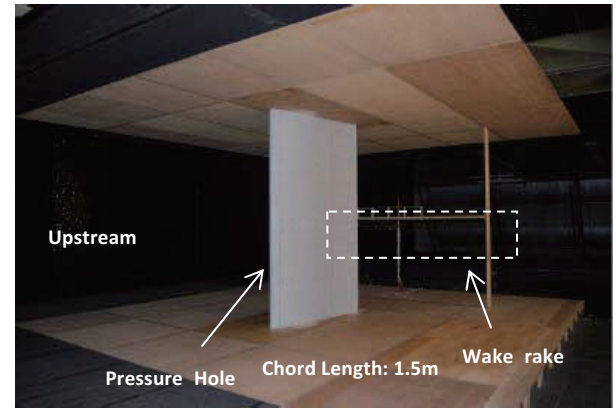


Fig.8 Set-up of wind tunnel test of 2D airfoil.⁸⁾

空気力の計測では、模型に作用する力を直接計測する場合もあるが、模型表面での圧力を計測する方法に加え、特に小さな抗力成分の計測精度を確保するために Wake Rake を用いた後流での動圧分布を積分して流体力を計測する事も多い。

設計指標は揚力・抗力係数と迎角との関係であり、翼形状とこれらの関係を見る上で圧力分布は重要である。

Fig.9 には表面近傍の流速分布を熱線流速計で計測した境界層の排除厚を迎角との関係で示し、翼から発生する空力騒音を推定するための指標に用いられる。

図中シミュレーション(CFX)をあわせて表示しているが、MHI-F18 の排除厚が他の翼型に比べて小さく、発生騒音は小さいと期待され、その後の実測にて実証された。

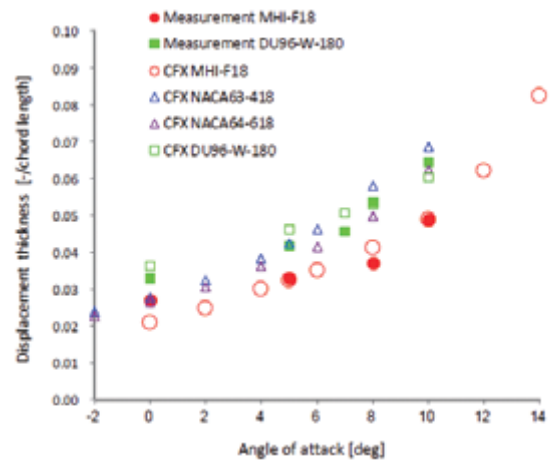


Fig.9 Displacement thickness of airfoils.⁸⁾

4.3 ロータの空力評価

回転するロータの空力特性を評価するために風洞実験を実施する場合がある。^{9),10),11),12)}



Fig.10 Wind tunnel test model of 3D rotor.¹²⁾

ロータを回転する実験を実施する場合、通常は下式のストローハル数を実機と相似にして、可能な限り回転数を上げて試験を行う事が多い。

$$St = \frac{f \cdot D}{V} \quad (1)$$

$$\frac{V_p}{V_m} \cdot \frac{f_m}{f_p} = \frac{D_p}{D_m} = n \quad (2)$$

ここで、 St : ストローハル数、 f : 振動数 (回転数)、 D : 代表長、 V : 流速、 n : 幾何学的縮尺を示し、サフィックスの p : 実機、 m : 模型を表す。

下図には、風向偏差による模型のパワー係数とスラスト係数の変化を示す。 C_p の最大が0.3程度であり、実風車と比較すると小さい値を示す。

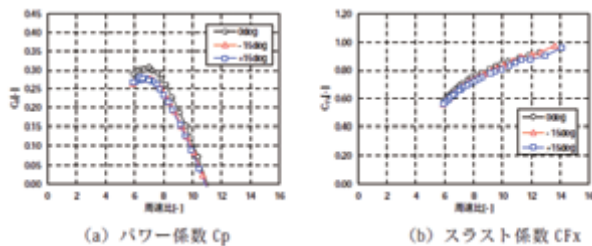


Fig.11 Power and thrust coefficient due to yaw angle.¹²⁾

この原因としては、実機の翼のレイノルズ数よりも一桁程度低いレイノルズ数となるためである。

また、開放断面および閉鎖断面を有する風洞におけるブロッケージの影響に関して、古典的なMaskel法、回転するロータを様なディスクとしてモデル化し、パワー係数・スラスト係数に関する補正方法も提案¹³⁾されている。

(1) 浮体風車を対象とした実験

最近では、浮体上に設置された風車の実験において波浪と風の双方を作用させる場合^{14), 15)}がある。

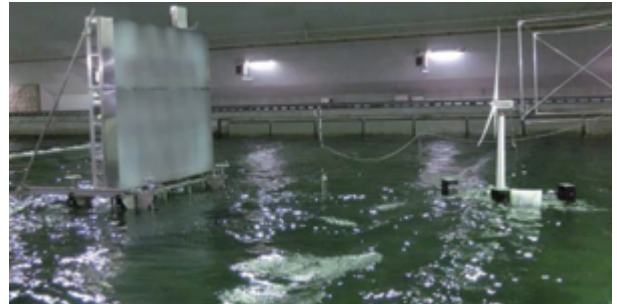


Fig.12 Tank test of floating wind turbine with FAN.¹⁵⁾

この場合、波浪の相似則から式(1)のストローハル数に加えて下式のフルード数(Fr 数)を相似にする必要があり、回転数の倍率は幾何学的縮尺 n の平方根で求められる。

$$Fr = \frac{\sqrt{gD}}{V} \quad (3)$$

$$\frac{V_p}{V_m} = \sqrt{\frac{D_p}{D_m}} = \sqrt{n} \quad (4)$$

ここで、 g は重力加速度である。

上記の式(2)、式(4)を図示したものがFig.13であり、式(2)のみを適用する試験では模型縮尺によって求められる実線上の任意の点を取ることができ、模型のレイノルズ数を上げるには小さな風速倍率が好ましい。一方で、式(4)を加える Fr 数を相似条件に加える場合には直線との交点として模型の縮尺に応じて一意的に決まる。

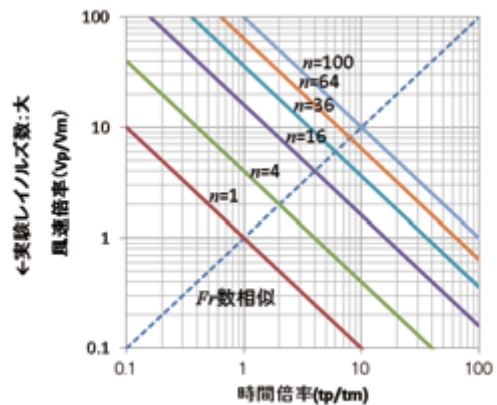


Fig.13 Relation between Time Ratio and Velocity Ratio.

またFig.12に示す水槽での実験では、送風機を用いてロータ模型に局所的な噴流を作用させており、全体にわたり風が作用する実機との相似性など、試験結果の評価には注意を要する点も少なくない。Fig.14は、閉鎖型の風洞の床下に水槽を設置して、発電中の浮体風車を対象にした実験であり、既述の低レイノルズ数において翼の空力特性を模擬するために、翼形状を歪めた特殊な模型翼を用いている。



Fig.14 Wind tunnel test of floating wind turbine.¹⁵⁾

更に、実機において発電出力を制御するために実施するロータの回転数もしくは翼のピッチ角度の制御を、模型でも再現して動的な応答まで評価する試みがなされている。そのためには、前述の翼模型の空力特性に加えて、ロータの回転慣性やピッチ駆動系の応答性状を更に相似に近づける高度な技術が必要になる。

(2) 特殊な気流での実験

風洞で作用させる気流特性は、低乱流・一様乱流・境界層乱流などの基本的な気流はもとより、風車の設計要件に含まれる特殊な気象条件（風速、風向の急変など）を再現する場合もあり、検討事例¹⁶⁾を Fig.15 に紹介する。



Fig.15 Set-up of wind tunnel test in turbulent wind model.

Fig.16 には、上記の気流発生装置を用いて 0.5 秒の間に約 15° の風向変化を発生させ、回転するロータの翼根部で計測したモーメントの時系列変化を、計算値と比較して示す。

風向変化直後の特性は計算値に近いものの、実験における最大値が計算に比べて増大する傾向にある。

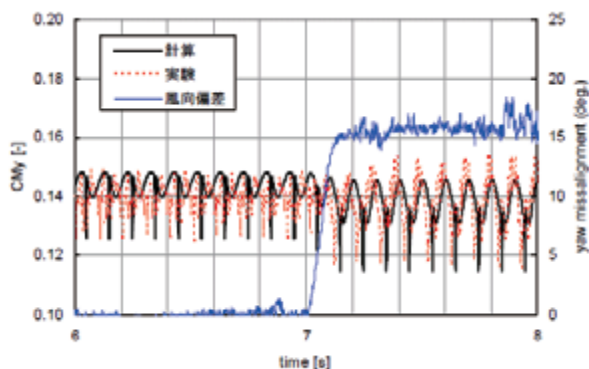


Fig.16 Bending moment acting on the root of blade.¹⁶⁾

(3) 騒音計測実験

下図には回転するロータから発生する騒音を可視化した実験¹⁷⁾を示す。騒音の発生源を捕らえることが可能であり、視覚に訴えることができる。壁面には吸音材が設置され、低騒音用風洞用の付帯設備が必要である。



Fig.17 Wind tunnel test model of 3D rotating rotor.¹⁷⁾

(4) 流れの可視化実験

下図は、風洞内にて回転している風車模型周りの流れを可視化した写真である。



Fig.18 Flow visualisation around the rotating rotor.

左側は、模型の上流側にオンジナオイルを用いて、ハブを通る鉛直面内の流れをスモークワイヤ法で可視化した写真であり、ロータの切断面、ナセルおよびタワーの後流の流況が見て取れる。

また右側は、翼端から発煙させて回転したもので、ロータ全体の後流の状況が判る。

これらの可視化された情報は数値化され、別途実施されたシミュレーションとの比較などに用いられる。

5. まとめ

以上、風車の風洞実験を中心に実例を交えて紹介したが、近年では先に述べたように実測・シミュレーションとの複合的な使用が一般的である。

風洞実験の長所としては、エッフェルの時代から用いられていたように自然現象の再現が容易であり、物理的な現象を理解しやすい点がある。

一方で、実験では設備・模型・計測技術など、失敗を含む経験による‘質’の確保と、結果の評価もあわせて必要である。

これらの点を十分に認識の上、今後とも技術の向上が進んでゆくものと期待する。

参考文献

-
- 1) http://windssystemsmag.com/media/pdfs/Articles/2012_October/1012_BladeFeature.pdf
- 2) A Clifton¹, L Kilcher¹, J K Lundquist^{1,2} and P Fleming¹, ‘Using machine learning to predict wind turbine power output’, Environ. Res. Lett. 8 (2013)
- 3) J. G. Schepers, et.al., ‘SIROCCO: SILENT ROTORS BY ACOUSTIC OPTIMISATION’, Second International Meeting on Wind Turbine Noise Lyon France, 2007
- 4) Helge Aagaard Madsen, et. Al., ‘The DAN-AERO MW Experiments Final report’, Risø-R-1726(EN), 2010
- 5) 内田・杉谷・大屋, ‘縮尺模型を用いた風洞実験における幾つかの知見’, 応用力学論文集 Vol.11 (2008年8月)
- 6) 飯田, 内田, 今村, 藤尾, 刈込, ‘複雑地形の数値サイトキャリブレーション適用性評価’, 平成24年11月28日第34回風力エネルギー利用シンポジウム
- 7) W. A. Timmer, R. P. J. O. M. van Rooij, ‘Summary of the Delft University Wind Turbine Dedicated Airfoils’,
- 8) 深見, 本田, 黒岩, 林, ‘風車翼の長大化を実現する空力設計* ~高性能・低騒音翼型を適用した風車翼(φ102m)の開発と洋上風車への展開~’, 平成24年11月 第34回風力エネルギー利用シンポジウム (2012)
- 9) 前田, 鎌田, 酒井, 高原, ‘風洞実験による水平軸風車翼周りの流れに関する研究’, 日本機械学会論文集(B編), 71巻701号 (2005-1)
- 10) <http://wind.nrel.gov/amestest/>
- 11) Carlo L. Bottasso, Filippo Campagnolo, Alessandro Croce, Luca Maffeni, ‘Development of a wind tunnel model for supporting research on aero-servo-elasticity and control of wind turbines’, the 13th International Conference on Wind Engineering, Amsterdam, The Netherlands, July 10-15, 2011.
- 12) NEDO, ‘日本型風力発電ガイドライン策定事業台風・乱流対策編(付属書)’, 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2008
- 13) Ryan Elizabeth Fitzgerald, ‘WIND TUNNEL BLOCKAGE CORRECTIONS FOR PROPELLERS’, University of Maryland, College Park, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Masters of Science, 2007
- 14) Heather Rae Martin, ‘DEVELOPMENT OF A SCALE MODEL WIND

TURBINE FOR TESTING OF OFFSHORE FLOATING WIND TURBINE SYSTEMS’, The University of Maine December, 2011

¹⁵⁾ 本田, ‘浮体風車を中心に海外を含めた技術開発, 実用化状況’, 北九州イノベーションギャラリー技術革新講座 「風のエネルギー利用最先端」 2013

¹⁶⁾ Shigeto HIRAI, Akihiro HONDA, Kai KARIKOMI, ‘Wind loads investigations of HAWT with wind tunnel tests and site measurement’, Proc. Of Wind Power Asia, 2008.

¹⁷⁾ <http://www.ecn.nl/nl/units/wind/projecten/sirocco/>