特集

最近の風力発電の進歩

大型風車の技術開発と風工学（国内最大級 2.4MW の開発）

R&D of Large Wind Turbine and Wind Engineering

本田明弘^{*1}

刈込 界^{*2}

林 義之^{*3}

Akihiro HONDA, Kai KARIKOMI, Yoshiyuki HAYASHI

1. まえがき

風車は大気の流れをエネルギーに変換する機械であり、歴史的には紀元前から灌漑などに用いられてきた。その後19世紀後半に発電機を積んだ近代風車が登場し、1970年代の石油ショックで石油価格の高騰を迎え、欧米で定格出力が数MWに達する試験機がテストされた。しかしながら、その後石油価格の安定とともに一旦沈静化していった。

その後約40年を経過し、再生エネルギーのひとつとして風力発電が注目を集め、欧州を中心に商用風車の大型化が急激に進みつつある。¹⁾

2. 大型風車の技術開発

2010年において、各メーカーが商品化済の大型機としては、陸上用では定格出力2~3MW、洋上用では定格出力3~6MW機である。100m級のタワーに100m規模のロータが設置する為に、最高到達点は150~200mに達するものもあるが、一方で、商用風車では発電事業の採算性に基づく需要が必要であり、コストを含め技術開発が進められている。

大型風車は大別して陸上(Onshore)用と洋上(Offshore)用に分類され、一般的には後者の方が輸送制限などの制約条件が緩和できるために大きい容量の風車が建設できる可能性を有するが、外力や環境条件も大きく異なる為に、リスクに関する検討事項は多くなる。

2.1 欧州市場と技術開発

オランダをはじめ、古くから風車の技術開発の歴史を有しており、2009年の年間市場規模は約10GWである。メーカーとしてはVestas, SIEMENSなど、デンマーク、ドイツなどの多くの欧州メーカーがM&Aを繰り返しながら存続している。EU全体として、「2020年までに20%を再生可能エネルギーでまかなう」長期目標を達成する

図1. 1 風車の大型化

*1 三菱重工業株式会社 技術本部 長崎研究所 流体研究室 主席研究員
Research Manager, Fluid Dynamics Lab, Nagasaki R&D Center, Mitsubishi Heavy Industries, Co. Ltd.
*2 三菱重工業株式会社 技術本部 長崎研究所 流体研究室 主任研究員
Senior Researcher, Fluid Dynamics Lab, Nagasaki R&D Center, Mitsubishi Heavy Industries, Co. Ltd.
*3 三菱重工業株式会社 原動機事業本部 再生エネルギー事業部 風車事業ユニット 技術開発課 主任技師
Senior Engineer, Wind Energy Business Unit, Mitsubishi Heavy Industries, Co. Ltd.

為、ECN(Energy Research Center of the Netherland), TU Delft, Risoe-DTU などの研究機関が研究を繰り広げている。

その中でも単機で 10~20MW の洋上風車を対象にした‘UPWIND’はその代表的なもので、Risoe-DTU が中心となった 2006 年から 2011 年までの 5 年プロジェクトで、40 もの産官学の組織が以下のテーマに関して分担して進行している。

- metrology
- transmission and conversion
- smart rotor blades and rotor control
- aerodynamics and aeroelastics
- foundations and support structures
- control systems
- remote sensing

風車の技術開発は、流体、材料・強度、制御などの要素技術が有機的に複合されて行われ、このほかにも風力発電を重要な産業と位置づけて、種々の国家プロジェクトが進行している。

2. 2 米国市場と技術開発

2009 年の年間市場規模は約 10GW であり、現在では GE, CLIPPER などの米国メーカーも生産を行っているほか、欧州メーカー・アジアメーカーも米国内での生産を開始し、雇用創出の効果も期待されている。「2030 年までにエネルギーの 20%を風力でまかなう」計画が、2008 年に米国エネルギー庁 (DOE: Department of Energy) から発表され、導入を促進する各種制度の整備が行われている。また技術開発は、NREL (National Renewable Energy Laboratory), SANDIA (Sandia National Laboratory)などが中心になり、WindPACT や LWST (Low Wind Speed Technology)などの先行的な国家プロジェクトで経済的な観点から風車の大型化に先鞭をつけ、現在も大型風車に関して以下のテーマの技術開発がおこなわれている。

- System Performance Improvement
- Advanced Rotors
- Increasing Gearbox Reliability
- Advanced Tower Concepts
- Design Standards

さらに、欧州に遅れてはいるものの、洋上特有の技術開発プロジェクトも、浮体式を含めて種々の形式に対する検討が進行している。

2. 3 アジアでの市場と技術開発

アジア全体での 2009 年の導入量は、ヨーロッパ、北米を抜いて世界でトップに躍り出た。これは中国の 2009 年の年間市場規模である 13.8GW が牽引している。メーカーとしては SINOVEL, Goldwind などが、政府支援の強力な資金力に基づき欧州メーカーとの技術提携により巨大化を成し遂げている。

またインドでは 2009 年に 1.3GW の導入実績があり、Suzlon が国産メーカーとして生産量を伸ばしているほか、2009 年にはドイツの RePOWER 社を買収するなど、急激に伸張している。

これにくらべてわが国の 2009 年の年間市場規模は 0.2GW ときわめて小さく、種々の制度的な対策が検討されている。また輸出に関しても、為替の大幅な変動などの要因で厳しい状況にあるものの、技術開発の歴史では欧米に引けをとらず、市場の大きな地域へと展開できる素地はある。

その一例として、日本における風の特徴としては大きく以下の 2 点が挙げられる。

・台風常襲地域にある…これは、台湾、香港などの中国南部にも共通するほか、他にも熱帯性低気圧が発生するインド、オーストラリア北部のサイクロン、北米のメキシコ湾岸にも共通する。この影響は極値的な風速が高くなる一方で、発電を行う常時の風速との比率が大きい。

・地形の起伏が激しい…陸上の風車に関しては、その設置場所が山岳部にあることが多く、風車の受ける風の特徴は複雑になる。

これらの特性は、後述する風車の安全性に関わる国際規格には十分反映されておらず、今後見直しが行われるものと考えられる。

一方で、風車の仕様で対応した例として、2006 年に市場投入した定格出力が国内最大級である 2.4MW の風車 (MWT92/2.4) があり、以下の特徴を有している。

① 50 年に一度の extreme 風速 (V_{50}) と、発電に大きな影響を及ぼす常時の平均風速 (V_{ave}) を独立に設定し、国際認証機関 (GL : Germanischer Lloyd 社) から認証を受けている。

② 荷重の軽減策として、暴風時にナセルが風下側に滑動する「Smart Yaw」の実用化を行った。²⁾

また、風車のロータ径は大きな発電量を確保する為に、95m, 100m, 102m と延伸された機種も登場している。

その後、いくつかのメーカーでも①に関しては同様な仕様での風車を投入している。

3. 風工学の役割

風からエネルギーを享受する風車が急激に大型化する中で、大規模構造物の風による被害を経験してきた風工学の果たすべき役割は少なくない。

近年の風車においては、カットイン風速から発電を開始し、定格風速までは風速の増加とともにロータの回転数を変化して最大の発電効率を維持して発電出力を増大する。さらに定格風速を超えた時には翼のピッチ角を変化させたり、失速を生じさせたりして、発電出力を一定に保つように制御する。その後カットアウト風速を超えた場合には、発電は行わず強風に耐える構造となる。

すなわち、風車の回転数・形状は風速域により異なる為に、暴風状態に加えて発電を行う低風速をも対象にして安全性を検証する必要がある。

3. 1 風車の規格と設計荷重

風車の導入促進には、機器の量産に基づく低コストでの機器提供が必須であり、その為に風の条件をカテゴリ化した国際規格が整備されている。代表的な IEC61400-1 において、風車クラスはハブ高さでの再現期間 50 年に対応する 10 分間平均風速 V_{ref} および乱れ強さ I_{ref} により表 3. 1 のように定義され、設計荷重は表 3. 2 に基づき設定される。

表 3. 1 風車クラスの基本パラメータ。

風車クラス	I	II	III	S
V_{ref} (m/s)	50	42.5	37.5	設計者 判断
A $I_{ref}(\cdot)$	0.16			
B $I_{ref}(\cdot)$	0.14			
C $I_{ref}(\cdot)$	0.12			

表 3. 2 風車の国際規格における設計荷重ケース(Design Load Case)

設計状態	IEC61400-1 ed.3(2005)				
	DLC	風条件	その他の条件	解析法	部分安全係数
1) 発電時	1.1	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	For extrapolation of extreme events	U	N
	1.2	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		F	*
	1.3	ETM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		U	N
	1.4	ECD $V_{hub} = V_r - 2m/s, V_r, V_r + 2m/s$		U	N
	1.5	EWS $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		U	N
2) 発電中の故障時	2.1	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Control system fault or loss of electrical network	U	N
	2.2	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Protection system or preceding internal electrical fault	U	A
	2.3	EOG $V_{hub} = V_r \pm 2m/s$ and V_{out}	External or internal electrical fault including loss of electrical network	U	A
	2.4	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Control, protection, or electrical system fault including loss of electrical network	F	*
3) 起動時	3.1	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		F	*
	3.2	EOG $V_{hub} = V_r \pm 2m/s$ and V_{out}		U	N
	3.3	EDC $V_{hub} = V_r \pm 2m/s$ and V_{out}		U	N
4) 正常停止	4.1	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		F	*
	4.2	EOG $V_{hub} = V_r \pm 2m/s$ and V_{out}		U	N
5) 緊急停止	5.1	NTM $V_{hub} = V_r \pm 2m/s$ and V_{out}		U	N
6) 休止時	6.1	EWM 50-year recurrence period		U	N
	6.2	EWM 50-year recurrence period	Loss of electrical network connection	U	A
	6.3	EWM 1-year recurrence period	Extreme yaw misalignment	U	N
	6.4	NTM $V_{hub} < 0.7V_{ref}$		F	*
7) 休止中の故障時	7.1	EWM 1-year recurrence period		U	A
8) 輸送、メンテ時	8.1	NTM V_{maint} to be stated by the manufacturer		U	T
	8.2	EWM 1-year recurrence period		U	A

注) 風速 V_{in} : カットイン風速, V_{out} : カットアウト風速, V_r : 定格風速, V_{hub} : ハブ高さでの風速

解析法 U: 終局(Ultimate)解析, F: 疲労(Fatigue)解析

(荷重) 部分安全係数 N: Normal=1.35, A: Abnormal=1.1, T: Transportation=1.5

ただし, DLC1.1 にて発電時の荷重を確率分布から外挿した場合には, N=1.25 でよい。

3. 2 風による荷重とその要因

表3. 2に示す設計荷重の算定を行う際に、疲労荷重および終局荷重の両者を評価する。

(1) 疲労荷重

表3. 2において「F」の記載があるDLCに対して風車の各部位毎に荷重をレインフローカウントして、変動荷重の疲労解析を実施する。このときの風の特性は、NTMおよびNWPの2種類（詳細は後述）であり、風速の頻度分布が大きな影響を有するが、風の乱れ強さ、シェアなども陰に変動荷重に影響を及ぼす。

(2) 終局荷重

表3. 2において「U」の記載があるDLCに対しては、風車の各部位毎に最大および最小荷重を評価する。このときに考慮する風の特性は、NTM, ETM, ECD, EWS, EOG, EDC, EWMの7種類（詳細は後述）であり、風速に関しては50年および1年の再現期間に相当する風速である。また、疲労荷重と同様に、風の乱れ強さなどの特性も陰に影響を及ぼす。

3. 3 風の特性

荷重を支配する風の特性に関して、風車規格でモデル化されている特性を以下に示す。これらを認識して現実のサイトにおける適合性を見極める必要がある。

(1) 参照風速： V_{ref}

50年の再現期間に対応したハブ高さでの10分間平均風速である。風工学では、地域の基本風速に周辺粗度、局所地形の影響を加味して高度補正をした風速である。

内外の耐風設計基準類の比較をしたものを下表に示す。

表3. 3 風速の定義

項目	IEC61400-1	建築物荷重指針・同解説	ASCE7
評価時間	10分間	10分間	3-sec.gust
再現期間	50年	100年（補正可）	50年
べき指数	0.11(EWM) 0.20(NWP)	粗度区分に応じて0.1~0.35	Exposure Category に応じて1/7~1/11.5
備考	風車	建築物	

すなわち、日本国内および風車規格ともに、10分間が評価時間であるが、米国の耐風設計コードであるASCE7では3秒風速が一般的に用いられる。また、べき指数は風車の場合には0.11~0.2を用いるが、これは高度方向の風速分布で翼の回転時に作用する荷重変動を算定する為に用いられ、基本風速をハブ高さに補正する場合には、風工学で用いる数値を用いる方が一般的である。

(2) 極値風速： V_{e50} , V_{e1}

評価時間を10分から3秒程度に補正する場合のガストファクタ（突風率）としては、1.4を用いる。

石崎³⁾は、突風率（G）と乱れ強さ（I），評価時間（T），平均風速の評価時間（ $T_0=600$ 秒）の関係を下式で表している。

$$G=1+I/2 \times \ln(T_0/T)$$

本式に $T_0=3$ 秒を代入すると $G=1+2.65 \times I$ となり、 $G=1.4$ に相当する乱れ強さは $I=0.15$ 程度である。

(3) 風速変動

風車の安全性に関わる国際規格においては、定常乱流としての風の統計量を元に乱数を発生させて作成した時刻歴変化を用いるほか、時刻歴の風向、風速の変化特性をモデル化した波形も用いられる。風速変動の統計量に関して注意を要する項目を以下に記す。

・乱れ強さ：風速変動の標準偏差を平均風速で除した変動係数で定義され、風工学では中立・安定での強風状態を対象にしているのに対して、風車規格では発電時の低風速も含んでバラつきを考慮した非超過確率90%の確率値を風速の関数でモデル化している。

また乱れ強さの成分に関しては、主流方向：水平方向：鉛直方向の比率として、1:0.7:0.5が標準である。

・スペクトル：周波数特性を表すスペクトルに関しては、風車規格では古典的なKaimal(1972)スペクトルと、比較的新しいMann(1994)スペクトルが併記されている。

更に風車独特の風変化の時系列モデルを以下に示す。

EOG: Extreme operating gust（風速変化）

EDC: Extreme direction change（風向変化）

ECD: Extreme coherent gust with direction change（風向および風速変化）

EWS: Extreme wind shear（風速分布の時間変化）

4. 結論

商用風車の大型化に伴い増大するリスクを最小限にするには、風工学の有機的な協力が必要であり、今後の風車開発には不可欠な技術分野と考える。

参考文献

- 1) <http://www.upwind.eu/default.aspx>
- 2) 柴田昌明，林義之，‘設計荷重低減のための新コンセプト’，第25回風力エネルギー利用シンポジウム2003/11/19・20
- 3) 石崎滋雄，‘風の乱れ強さと突風率との関係について’，日本建築学会大会学術講演梗概集，1982.10