

特集

## 国内で初めての風車の耐風設計指針策定を目指して Wind-resistant Design Code for Wind Turbine Structures

石原 孟\*<sup>1</sup>, 勝地 弘\*<sup>2</sup>, 嶋田健司\*<sup>3</sup>, 土谷 学\*<sup>4</sup>  
Takeshi ISHIHARA, Hiroshi KATSUCHI, Kenji SHIMADA and Manabu TSUCHIYA

### 1. はじめに

近年、新エネルギーの導入促進により風力発電設備がかなりのスピードで増えつつけている。その一方で、図-1に示すような風力発電設備の被害、特に強風による被害が多く報告されている<sup>1), 2)</sup>。代表的な台風被害としては、1999年台風18号による鹿児島県笠沙町での風車タワーの座屈、2002年台風16号による沖縄県宮古島での風車基礎の崩壊、2003年台風14号による沖縄県宮古島での風車タワーの座屈、基礎の崩壊、ブレードの破損、2004年台風16号による高知県梶原町の風車の破損と基礎の割裂、佐賀県鎮西町での風車の出火などが上げられる。被害風車の規模は1999年の250kW機から2004年の2,000kW機に年々大きくなっている。風車の大型化は風車の発電効率とコストなどを考えた場合に、その増大傾向は今後も続くと思われ。しかし、2,000kWクラスの風車はブレードの先端までの高さが120mにも達し、その耐風安全性は重要である。

これまでの風力発電設備の耐風設計の検討方法は、海外で作成された規・基準類をそのまま適用したり、土木、建築、電気、機械分野の設計指針をそのまま適用した 경우가多く、風力発電設備固有の特性の配慮や我が国特有の強風環境という点では十分とは言えない。このような状況を踏まえ、従来から各工学分野で個別に培われていた耐風設計に関する考え方を統一

し、風力発電設備に適した合理的な設計手法の提案が望まれている。

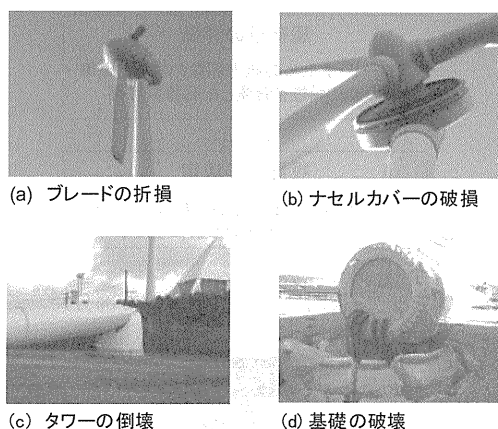


図-1 風力発電設備の台風被害

このような問題を解決するべく、平成16年9月に土木学会・構造工学委員会内に「風力発電設備耐風設計小委員会」が設置され、活動を始めた。本小委員会は、まず風力発電設備における耐風設計手法の現状を分析し、従来の耐風設計の問題点を明らかにした上で、暴風時の風荷重の設定方法やタワー、基礎等の風車各部位の設計方法などに関する提案を行うと共に、具体的な設計例を提示することを目的としている(図-2参照)。なお、当初は検討対象を耐風設計に絞る、耐

\*1 東京大学大学院工学系研究科総合研究機構, 助教授  
Associate Professor, University of Tokyo

\*2 横浜国立大学大学院工学研究院人もの空間のシステム分野, 助教授  
Associate Professor, Yokohama National University

\*3 清水建設技術研究所流体解析グループ, 主任研究員  
Senior Research Engineer, Shimizu Corporation

\*4 鹿島建設環境本部新エネルギーグループ, 課長  
Manager, Kajima Corporation

風設計指針として取りまとめる予定であったが、その後の委員会の議論で、耐風設計のみでは構造設計には不十分であること、日本では耐震設計が不可避であることから、耐風・耐震設計を含んだ風力発電設備支持物構造設計指針・同解説の策定を目指すこととした。これまでに、耐風設計の部分が概ね完成し、今後耐震設計の部分を取りまとめる予定である。

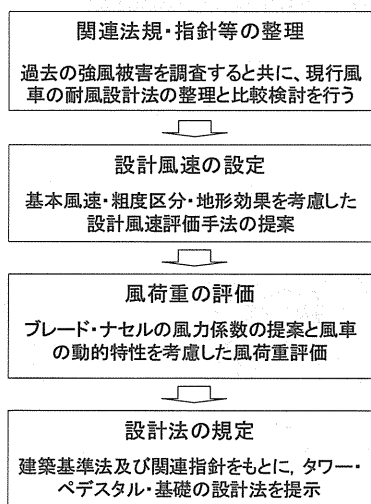


図-2 検討のフロー(耐風設計部分)

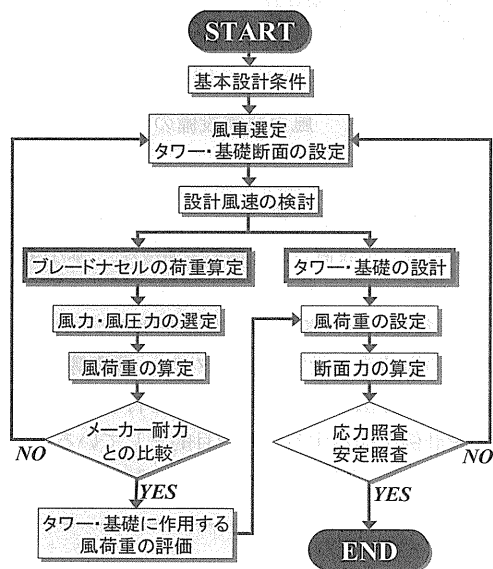


図-3 耐風設計のフロー

なお、風力発電設備を設置する場合には、風車、発電機部分は製品としてメーカーから購入し、設置者がタワー、基礎を構築するのが通常であることから、こ

こでの設計指針はタワー、基礎の風力発電設備支持物を直接の対象としている。ただし、支持物への風荷重を算定するためには、風車本体(ブレード、ナセル)の風荷重を算定する必要があることから、本指針でこれらの風荷重を算定するための手法も提案している(図-3参照)。

## 2. 委員会の概要

本小委員会は、風車の導入と建設を担当する電力会社、風力事業者、建設会社の実務者、風車の製造及び販売を行う国内メーカーと代理店の技術者、そして大学、研究機関の研究者から構成されている。平成17年11月現在、委員35名、オブザーバー8名で活動を行っている。また、活動を機動的に行うため、3つのWG(風力発電システムWG、設計風速・風荷重WG、タワー・基礎WG)を設置し、指針の素案をWGで検討した後、全体委員会で議論する体制をとっている。

平成16年9月に第1回委員会を開催した後、約2ヶ月毎に委員会を開催するとともに(平成17年12月現在、計7回の委員会を開催)、その間に各WGを開催し、精力的に活動を行っている。また平成17年9月7日に早稲田大学で開かれた土木学会年次学術講演会にて研究討論会を開催し、小委員会の活動を紹介すると共に、風車の導入、建設、製造を担当する電力会社、風力発電事業者、建設会社、国内風車メーカー並びに大学、研究機関から6名の方にお願ひし、風車の安全性の検証と風車の耐風安全性設計への提言を行った。検討会の講演題目は以下に示すとおりである。

1. 2004年の台風被害から風車の安全性を検証する 小松崎勇一(ユーラスエナジー)
2. 風車のタワー座屈と基礎崩壊のメカニズムを迫る 松尾豊史(電力中央研究所)
3. 風車倒壊時の風速と風荷重を推定する 石原孟(東京大学)
4. 風車の耐風設計の流れと関連法規を考える 土谷学(鹿島建設)
5. 風車の空気力特性と風荷重を評価する 本田明弘(三菱重工業)
6. 風車タワー・ペデスタルの応力を照査する 勝地弘(横浜国立大学)
7. 風車基礎の応力を照査する 篠崎友利(電源開発)

先に述べたように、これまでに耐風設計の部分が概ね完成し、今後は耐震設計の部分を取りまとめる予定である。これらの成果を合わせた風力発電設備支持物構造設計指針・同解説を平成 18 年 11 月頃までには完成させ、講習会を予定している。また、取りまとめた指針は、土木学会より平成 19 年初頭に出版する予定としている。

### 3. 検討の概要

先に述べたようにこれまで約1年あまりの間、各 WG、全体委員会を頻繁に開催し、精力的に活動を行ってきた。以下にこれまでに取りまとめられた主な成果について紹介する。

#### 3.1 風力発電システム WG

風力発電システム WG では、風力発電設備を導入するにあたっての関連法規及び指針等の整理を行うことを目的としている。主な関連法規、指針類としては、法規としての建築基準法、電気事業法、国際規格としての IEC61400-1<sup>3)</sup>、GL - Germanischer Lloyd<sup>4)</sup>があり、支持物に対するものとして建築基準法<sup>5)</sup>や土木学会及び日本建築学会の指針類、さらに風力発電設備に対するマニュアル類として風力発電規程（日本電気協会）、風力発電システムの設計マニュアル(NEDO)、洋上風力発電システムの技術マニュアル(沿岸開発技術研究センター)などがある。検討の結果、欧州規格(IEC)との設計条件(停電など)の違い、ナセルの風荷重規定(ピーク風圧係数)が存在しないこと、建築基準法の粗度区分の指定とガスト影響係数は風車の立地条件や風車の構造特性と不整合であることなどが問題点として指摘された。

なお、法規・指針類に関しては、本特集で別途解説されているので、詳しくはそちらを参照頂きたい。さらに、本 WG では、風力発電設備についての基礎知識や用語の解説と定義、風力発電設備の事故事例の整理、耐風設計において必要となるメーカー別、機種別の風車諸元のとりにまとめも行っている。

#### 3.2 設計風速・風荷重 WG

設計風速・風荷重 WG では、風力発電設備への設計風速と支持物の設計における風荷重評価法を検討することを目的としている。

設計風速については建築基準法により規定された基本風速(図-4 参照)をベースに地表面粗度の変化、

地形などによる増速の評価方法の提案、風荷重評価に必要な乱れの評価式の提示、数値流体解析 CFD による設計風速と乱れの評価手法の提案(図-5 参照および本特集の別途解説を参照)を行っている。

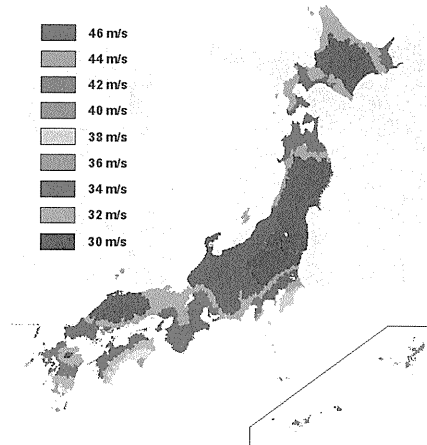
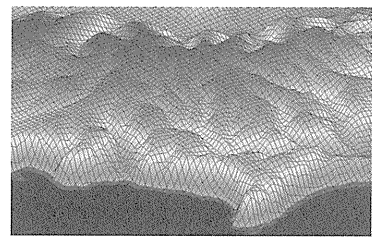
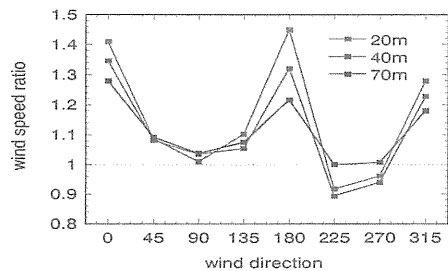


図-4 基本風速マップ<sup>5)</sup>



(a) 3次元地形コンター



(b)風速別風速比

図-5 CFDによる複雑地形上の風速の解析例<sup>7)</sup>

一方、空気力に関しては風力発電設備の支持物(タワー、基礎)を設計するために必要となるブレード、ナセルおよびタワーの風力係数と、ナセル外装材の耐風性検討に必要なピーク風圧力係数の検討も行っている。ブレードに関しては実際の風車に採用されているブレードの空力データをもとに標準的なブレ

ードモデルの風力係数を定めている。またナセルに関しては矩形および卵形の形状を設定し(図-6参照)、風洞実験によって得られた実験結果をもとに新たに風力係数や風圧係数を提案することとした。

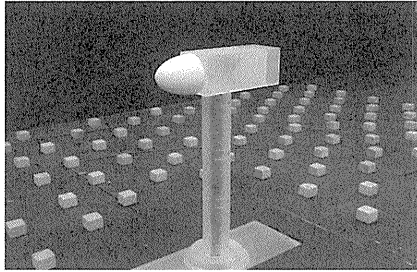


図-6 ナセルの風洞実験状況<sup>8)</sup>

風力発電設備の支持物(タワー、基礎)に作用する風荷重を評価するために、風荷重条件(ストール制御、ピッチ制御別)の設定、風荷重算定に必要な風車諸元(ブレード、ナセル、タワー)のとりまとめ、風車の固有振動数及び構造減衰を考慮した風車の風荷重算定式の提案を行っている。また本WGで提案した風荷重算定式の妥当性を検証するために、実風車から得られた現地観測データとの比較検討も行っている(図-7参照)。

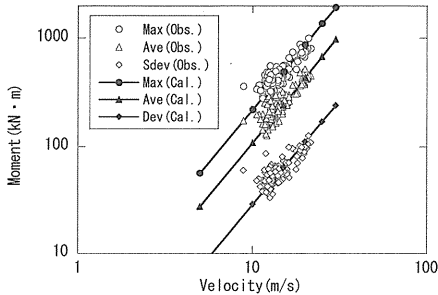


図-7 実風車を対象とした風応答解析例<sup>7)</sup>

### 3.3 タワー・基礎WG

図-1に示したように、風力発電設備の破損事例としてはタワー開口部での座屈、基礎(特にタワー定着部)の破壊が目立っていることから、これらの部分での安全性が確保されつつ、全体として合理的な設計手法の構築を目指して検討が行われた。

タワー開口部の設計法では、開口部近傍での応力集中の検討をFEM解析などで行い、安全で合理的な設計法の提案を行っている。また、実際に台風時に倒壊した風力発電設備タワーの検証解析とも比較検証を

行った。タワーと基礎の定着部(ここではペDESTALと称する)に関しても、コーン破壊を防止するための強度算定式の提案などを行っている。また、これらの提案された指針式を使った設計例題を提示することで、指針を使用する人の理解向上に努めている。

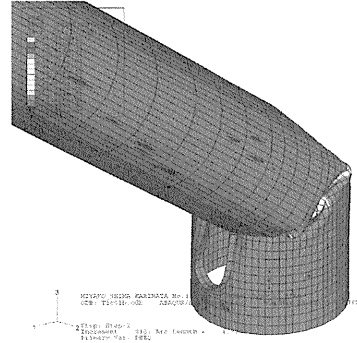


図-8 FEMによるタワーの応力解析例<sup>9)</sup>

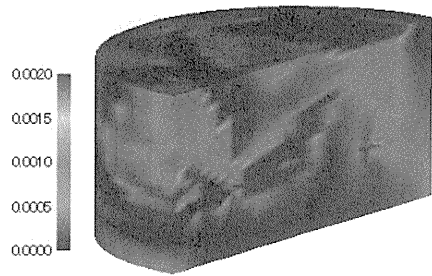


図-9 FEMによる定着部の応力解析例<sup>10)</sup>

## 4. 指針の概要

現在策定中の風力発電設備支持物構造設計指針・解説の目次を表-1に示す。第1章では総則で本指針の概要、適用範囲を述べるとともに、風力発電設備に関する基礎知識、用語などについて記述している。第2章では、国内外の関連法規、基準について述べ、風力発電設備の法的位置づけを明確にしている。第3章では、荷重の種類と組合せ、設計の流れを示している。第4章では、建築基準法に基づく基本風速を示し、設計風速の算出法を示している。第5章では、ブレード、ナセルの空気力係数を示すと共に、風車に作用する風荷重の算出法を提案している。第6章では地震時に風車に作用する地震荷重の評価方法を示し、煙突などの塔状建造物の耐震設計規定に準じる形の指針を纏めている。第7、8、9章ではタワー、ペDESTAL、基礎の強度計算の方法を示している。第10章は、策定

表－1 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説の目次案

目次	内容
第1章 総則	概説, 適用範囲, 基礎知識, 用語, 記号
第2章 関連法規及び基準	電気事業法, 建築基準法, 国際規格, 国内関連指針
第3章 設計の流れ	荷重の種類と組合せ, 設計フロー
第4章 設計風速の評価	基準風速, 粗度区分, 鉛直分布, 地形効果, 乱れ
第5章 風荷重の評価	ブレード, ナセル, タワーの風力係数, 風荷重算定式
第6章 地震荷重の評価	ベースシャフトとベースモーメントの算定式, 鉛直分布
第7章 タワーの強度計算	筒身・フランジ・開口部の強度計算
第8章 ペDESTALの強度計算	定着, 基礎ボルト, アンカーリング
第9章 基礎強度と安定計算	安定計算, 構造計算, 直接基礎, 杭基礎
第10章 指針による設計例	ストール制御・ピッチ制御, 直接基礎・杭基礎,
第11章 数値解析による設計例	CFDによる設計風速解析, FEMによる風荷重, タワー, 基礎の応力解析
第12章 参考資料	許認可手続き, 関連法規条文, 事故事例紹介, 風力発電機リスト

された指針を用いた設計例を提示し, 使用者の便を図ることとしている。また第11章は数値計算による設計例を示し, 本指針の策定において裏付けとなった詳細解析結果について解説している。最後に第12章では参考資料として, 許認可手続きや事故例などを示している。

#### 5. おわりに

以上, 現在策定中の風力発電設備支持物の構造設計指針・同解説について紹介した。既に述べたように当初, 耐風設計指針策定を目的としてスタートした委員会は, 1年を経過し, 当初の目的を概ね達成するに至っている。現在, 短期風荷重の検討に加え, 地震荷重に関して検討を始めたところである。今後, 約1年かけてこれらを検討し, 平成18年秋にはその成果(指針案)に関する講習会を予定している。また, 最終的に風力発電設備支持物構造設計指針・同解説として出版を行う予定である。本委員会の活動内容を紹介したホームページ(図-10参照)を公開中であるので, 是非そちらも一度ご覧頂きたい。

#### 参考文献

- 1) NEDO 技術開発機構:平成16年度風力発電利用率向上調査委員会及び故障・事故調査分科報告書, 2005.
- 2) 石原孟, 山口敦, 藤野陽三:2003年台風14号による風力発電設備の被害とシミュレーションに

よる強風の推定, 土木学会誌, Vol.88, pp.45-48, 2003.

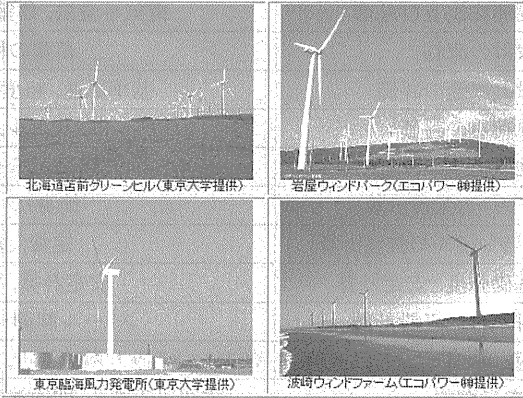
- 3) IEC61400-1: Wind turbine generator systems Part1 : Safety requirements, 1999,2003, 2005.
- 4) Germanischer Lloyd, Rules and Guidelines IV, Industrial Services 1, Guideline for the Certification of Wind Turbines, 2003.
- 5) 2001年版建築物の構造関係技術基準解説書, 工学図書株式会社, 2001.
- 6) 石原孟, 山口敦, 藤野陽三. 複雑地形における局所風況の数値予測と大型風洞実験による検証, 土木学会論文集, No. 731/I-63, pp.195-221, 2003.
- 7) 嶋田健司, 野田博, 石原孟:風力発電機ナセルの耐風設計に関する風洞実験, その1, 風力実験, その2, 風圧実験, 日本風工学会誌, Vol. 30, No. 2, pp. 251-254, 2005.
- 8) 石原孟, ファバンフック, 高原景滋, 銘刈壮宏:風力発電設備の風荷重評価に関する数値的及び理論的研究, その1, 実風車における現地観測と風応答解析, その2, 風向を考慮した風荷重評価式の提案, 日本風工学会誌, Vol.30, No.2, pp.257-258,2005.
- 9) 高原景滋, 銘刈壮宏, 新城文博, 石原孟, 松浦真一:台風14号(マエミー)による宮古島の風力発電設備倒壊等事故について, 風力エネルギー, Vol.28, No.4, pp.40-47, 2004.
- 10) 松尾豊史, 金津努, 高原景滋, 銘刈壮宏:台風14号による風車基礎定着部の破壊挙動に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.27, No.2, pp.1603-1608, 2005.

# 風力発電設備耐風設計小委員会

Task Committee on Wind Resistant Design of Wind Turbine Generator System

- ホーム
- 設置趣意
- 活動予定
- 歴史と記録
- 委員構成

Copyright (C) 2004  
 [風力発電設備耐風設計小委員会]  
 All rights reserved.  
 2004/09/07 Update



## What's New

- 第8回風力発電設備耐風設計小委員会開催予定(2006年2月3日)
- 日本風工学会誌、特集記事(2006年1月号)  
 「国内で初めての風車の耐風設計指針策定を目指して」
- 第7回風力発電設備耐風設計小委員会を開催しました(2005年11月11日)
- 建設工業新聞 本小委員会紹介記事の掲載(2005年10月18日)
- 土木学会年次学術講演会 研究討論会を開催しました(2005年9月7日)  
 「風車の安全性の検証と耐風安全性設計への提言」
- 第6回風力発電設備耐風設計小委員会を開催しました(2005年9月5日)
- 風力発電設備耐風設計小委員会パンフレットの作成(2005年6月3日)
- 第5回風力発電設備耐風設計小委員会を開催しました(2005年6月25日)
- 第4回風力発電設備耐風設計小委員会を開催しました(2005年9月31日)
- 第3回風力発電設備耐風設計小委員会を開催しました(2005年1月27日)
- 第2回風力発電設備耐風設計小委員会を開催しました(2004年11月30日)
- 第1回風力発電設備耐風設計小委員会を開催しました(2004年9月14日)
- 風力発電設備耐風設計小委員会準備会を開催しました(2004年8月19日)  
 小委員会の紹介、議事次第、発表資料などは「履歴と記録」をご参照して下さい

このホームページに関するお問い合わせは...

Copyright (C) 2004 [風力発電設備耐風設計小委員会] All rights reserved.  
 更新日: 2005/12/19

(<http://windeng.t.u-tokyo.ac.jp/TCWRDWT/>)

図-10 風力発電設備耐風設計小委員会のホームページ