

## 風力発電システムの最新技術

Latest Technologies for Wind Turbine Systems

谷山 賀浩 TANIYAMA Yoshihiro 山田 敏雅 YAMADA Toshimasa 小笠原 憲人 OGASAWARA Kento

風力発電システム事業は、脱炭素社会を支える有力な再生可能エネルギー（以下、再エネと略記）の一つとして、単機容量の増大や、IoT（Internet of Things）技術の採用による予防保全などの技術革新が進んでいる。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、2010年の風力システム事業への参入以来、主に国内に建設する風車そのものについて、国内法規や規程の遵守に向けた改良と一部部品の国産化を行ってきた。また、大規模CFD（Computational Fluid Dynamics）解析や風況解析を用いて複雑地形での風況評価・診断を高精度に行う技術や、狭い敷地で施工可能なシングルブレード工法のための独自装置の開発、火力・水力発電システムで培った回転機技術や制御技術を基に、風車の性能向上や系統親和性の向上を図ってきた。これらの技術を取り入れた風車の建設や稼働を通して、我が国の環境に適した日本型風車の実現を目指した着実な開発を進めている。

Technological innovations have been progressing in the field of wind turbine systems, one of the renewable energy systems aimed at achieving a decarbonized society. Among these innovations is increased single-unit capacity, as well as preventive maintenance through analysis of data collected from Internet of Things (IoT) devices.

Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation has been promoting wind power generation business activities, mainly in Japan, since entering the market in 2010. We have been continuously working on the improvement of wind turbine generators (WTGs) in compliance with domestic regulations and guidelines as well as on the domestic production of several WTG components. We have also developed and introduced various techniques, as follows: (1) development of a technique for precise evaluation and diagnosis of wind conditions, even in mountainous areas with complex terrain, employing both large-scale computational fluid dynamics (CFD) analysis and wind resource analysis software; (2) development of proprietary equipment to achieve a method for single-blade construction at small worksites; and (3) enhancement of the performance of WTGs and their compatibility with power systems based on rotating machine technologies and control technologies cultivated through our thermal and hydroelectric power generation businesses. We are steadily working toward the realization of WTGs appropriate to the Japanese environment based on knowledge accumulated through construction and operation using these techniques.

### 1. まえがき

東芝エネルギーシステムズ(株)は、2010年に風力システム事業へ参入して以来、国内に建設する風車では、風車そのものについて、国内法規や規程を遵守するための改良と、一部部品の国産化を進めてきた。また、その一方で、火力・水力システム事業で培った回転機技術や制御技術を基にした、風車の性能向上や系統親和性の向上に向けた研究開発も進めている。

ここでは、これらの中から特筆すべき最新技術について、述べる。

### 2. 風況解析手法の高度化と風況診断技術

国内では、山岳地域への風車建設も多く、このような場合、風況解析を用いて複雑地形での風況評価・診断をより高精度に行うことがポイントとなる。当社は、大規模CFD解析に加え、業界標準の風況解析ソフトウェアを多用し、それぞれの特性を評価・把握することで着目すべき指標に合致した手法を選択し、より信頼性の高い診断を行っている。また、地形模型を用いた風洞試験やサイトでの実風況計測結果から、これら解析手法の評価精度の向上や診断指標の拡充など、風況解析技術の高度化も推進している。この章では、その代表的な技術について述べる。

## 2.1 地形に起因した乱流の評価

図1は、業界標準の風況解析ソフトウェア<sup>(注1)</sup>であるMASCOT<sup>(1)</sup>とRIAM-COMPACT<sup>(2)</sup>を用いて解析したもので、複雑地形を構成する単体の山岳形状を対象とした結果のうち、風速の平均値分布を示している。いずれも、山岳頂上付近から流れが剥離し、後流側で流れの様相が大きく変化する同様の傾向が得られている。また、いずれも平均風速や乱れの標準偏差が同じ形状モデルを用いた風洞試験結果と高い精度で一致し、複雑地形における年間平均風速や風車設計の妥当性などの事業性評価に有用であることが確認できた。MASCOTは、年間平均風速や風車設計の妥当性など、事業性を短時間で評価することに適している。一方、乱流場や異常気象時などの非定常的な条件下における風車健全性や複数風車間の相互干渉などの評価については、非定常LES (Large Eddy Simulation) 解析手法をベースとするRIAM-COMPACTに注目している。当社は、陸上での風車設置適地の減少や洋上大規模ウインドファームの増加に備えるのに加え、更に異常気象時の風車健全性の評価を目的に、非定常の風況解析の信頼性向上を目指し、国立大学法人九州大学 応用力学研究所 新エネルギー力学部門 風工学分野とRIAM-COMPACTを対象とした共同研究

を進めている。この共同研究の中で得られた成果を、以下に説明する。

実地形では、大小の山岳形状が幾重にもランダムに重なり、山岳頂上付近の剥離流れも互いに干渉、影響を及ぼし合う。その様子を的確に捉えるため、実地形のモデルを用いた風洞試験の様子を図2に、RIAM-COMPACTによる風況の解析結果を図3に示す。

図4に、解析手法の改善前後の結果と実測の風速分布の比較を示す。改善前は、風車の受風面である高度40～



図2. 実地形のモデルを用いた風洞試験

実地形では、大小の山岳形状が重なり、山岳頂上付近の剥離流れも互いに干渉、影響を及ぼし合う。その様子を的確に捉えるため、実地形のモデルを用いて風車設置地点の風況を評価する。

Wind tunnel experiment using complex terrain model

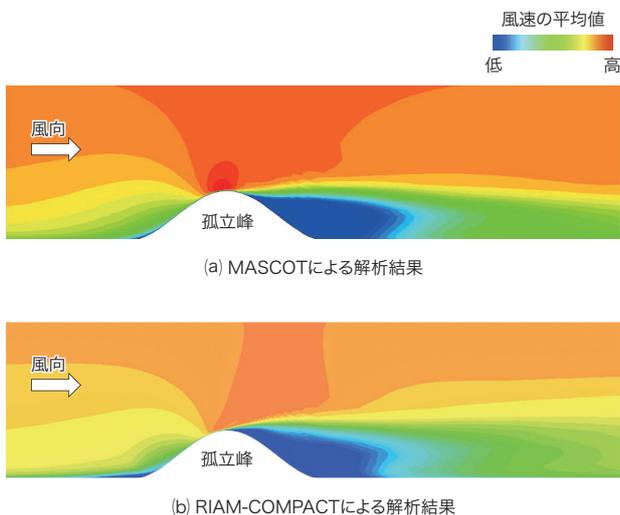


図1. 風況解析ソフトウェアの比較評価例

単純な孤立峰地形を対象とした解析結果であり、いずれも同じ形状モデルを用いた風洞試験結果と高い精度で一致し、事業性評価に有用であることが確認できた。

Example of comparative evaluation by wind resource analysis software

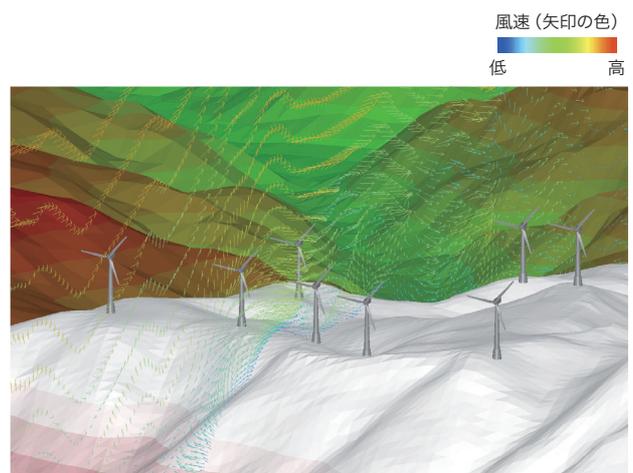


図3. 実サイトの風況解析結果

RIAM-COMPACTを用いた非定常解析により、地形に起因した風の乱れを再現している。

Result of wind resource analysis at actual wind farm

(注1) 広域地形における風向・風速を解析し、風車発電量の予測や風車設置位置の検討などで、ウインドファーム開発を支援するソフトウェア。

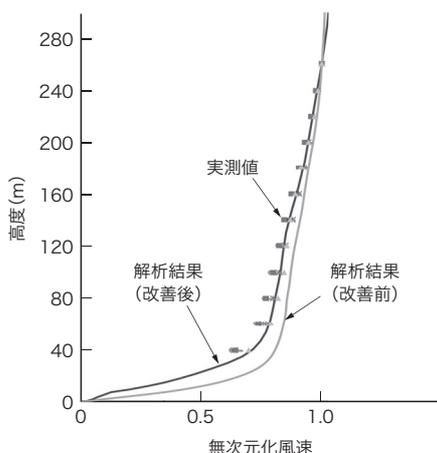


図4. 風況の実測と解析結果の比較

風洞試験の結果を受けて解析パラメーターをチューニングすることで、高精度な風速の解析結果が得られた。

Comparison of results of measurement and analysis of wind speed at wind farm

120 m付近での差異が大きかったが、風洞試験の結果を受けて解析パラメーターをチューニングした結果、改善後の風速分布を得ることができ、誤差を数%以下に収めることに成功した。

このように、今後のウインドファームの大型化や洋上風力システムに向け、解析精度を担保する技術開発を進めている。

### 2.2 風車通過後の後流影響評価

複数の風車が設置されるウインドファームでは、後流側に設置された風車において、発電量の低下や風の流れの乱れによる疲労荷重が増大するリスクがある。したがって、2.1項で述べた地形に起因した乱流だけでなく、風車後流の影響も考慮した上で、風車配置を検討することが重要となる。図5に、両視点を考慮した解析例を示す。この手法の検証

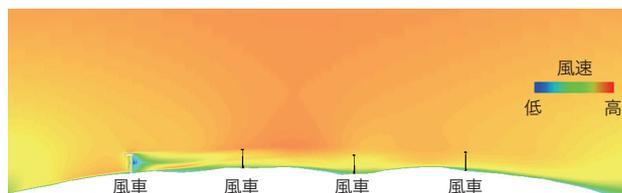


図5. 風車後流を評価する風況解析結果

上流風車を通過後の風の流れの乱れが下流風車へ影響を与えることもあり、地形に起因した乱流だけでなく、風車後流の影響も考慮した上で、風車配置を検討することが重要となる。

Result of wind resource analysis for evaluation of wake flow behind wind turbine

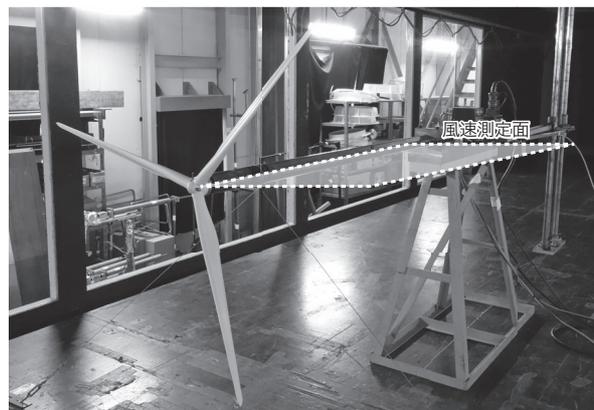


図6. 2 MW風車のスケールモデルを用いた風洞試験

風車を回転させ、後流風速の状態を計測して解析結果を検証することで、評価精度を向上させる。

Wind tunnel experiment using 2 MW wind turbine scale model

として、実風車のスケールモデルによる風洞試験(図6)や大規模流体解析のほか、実風車の後流計測などを実施し、評価精度の向上に努めている。

### 3. 風車状態監視に向けた大規模挙動計測

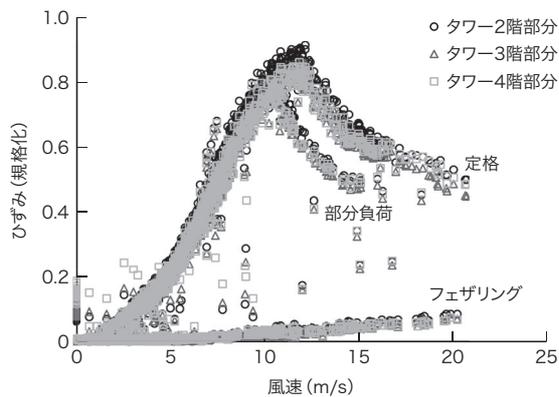
当社は、鹿児島県の長島黒ノ瀬戸風力発電(株)の新長島黒ノ瀬戸風力発電所(図7)に、風車U88E(出力2 MW)を2基納入しているが、国内の複雑地形における風車挙動の把握を目的に、この風車に300個以上のセンサーを設置した大規模計測を2013年から実施している。この計測では、ブレードをはじめとする風車の主要構成品を中心に、ひ



図7. 新長島黒ノ瀬戸風力発電所に設置された風車

出力2 MWの風車2基から成る。風車に300個以上のセンサーを設置し、風車の挙動を評価している。

Wind turbines for Shin-Nagashima Kuronoseto Wind Farm



定格:通常運転時 部分負荷:出力制限運転時

図8. タワーのひずみ量の分析結果

ひずみの傾向やひずみがピークとなる風況など、風況との関連性が確認できる。

Results of strain analyses of wind turbine tower

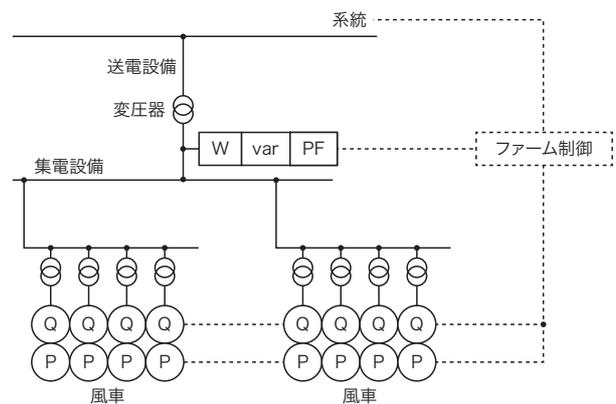
ずみや、加速度、電気特性などを計測するとともに、状態監視システムのアラート基準の構築を行っている。更に、風況ポールやLIDAR (Light Detection and Ranging)での計測データを2章で示した解析手法と融合させて、詳細な挙動分析も進めている。

計測データの一例として、タワーのひずみ量の分析結果を図8に示す。通常運転時では、ひずみは風速の増加とともに増加し、ブレード迎え角を制御して出力を減衰させるピッチ制御の開始以降に減少することが確認できる。また、ひずみはタワーの低層階の方がより大きく、ブレードを回転させて風を逃がす位置にしたフェザリング時は、非常に小さい値となる傾向などが確認できる。このほか、計測により、ブレードのひずみが最も大きくなる長手方向の位置や風況との関連性が明らかになっている。

引き続き、機器の経年劣化を観察し、ビッグデータに裏付けされた、風車稼働条件の詳細な設定などを明らかにし、稼働率向上へつなげていく。

#### 4. ウインドファーム制御の動向

ウインドファーム制御は、図9に示すように、プラント規模での複数風車を統括制御するものである。欧米では既に標準的に搭載されているが、電力市場では、再エネ発電電力が優先的に売電されてきたため、ウインドファーム制御の実運用はまだ途上段階にある。近年では、再エネ電力価格の低下に伴う調整力市場への拡大や、再エネ電源導入の比率が増大した小規模系統での需給バランス・系統安定化の



W : Output Power (発電出力)  
var : Reactive Output Power (無効電力出力)  
PF : Power Factor (力率)  
Q : Reactive Power Resource (無効電力源)  
P : Active Power Resource (有効電力源)

図9. ウインドファーム制御の構成

プラント規模での複数風車を統括制御するものであり、導入が増大した小規模系統での需給バランス・系統安定化のために、実運用が見込まれている。

Schematic diagram of wind farm control system

ために、ウインドファーム制御の実運用が活発になることが見込まれている。再エネ電源導入の比率が現時点では低い国内の電力系統においても、一部の地域では系統容量に対する再エネ電源導入の比率が高くなってきており、風力発電の調整力によって系統に貢献する検討が進められている。

U88Eは、ピッチ制御とフルコンバータタイプのPCS (パワーコンディショナー) の持つ電流制御を備えている。この制御の上位にウインドファーム制御機能を持たせることで、連系点出力で80%/分の調整力を実現できる。

この調整力を用いることで、既存電源である大型発電機が備えているロードリミッター運転や、ガバナーフリー運転、慣性応答、送電電圧制御といった機能に相当する調整力を実現できると期待される。風車は、既存の大型発電機とは異なり、風力発電で一定の出力を持続することが不可能なほか、大型発電機ほどの慣性力も提供できない。しかし一方では、前述のように速い出力変化率を実現できるほか、パワーコンバーターの機能を生かした系統動揺の低減などにも貢献できると考えられる。

#### 5. 僧都ウインドシステムでのシングルブレード工法の採用

国内では、平野部で風車建設を行うにしても、潤沢な工事用敷地の確保が難しい。更に、平野部で風況の良い箇所は減少してきており、今後、風車の立地点は山岳地帯に

移行するが、敷地の面積を確保するのは、森林伐採面積の極小化の観点から厳しい状況となっている。

当社の子会社であるシグマパワー・ジャネックス(株)が、愛媛県愛南町に計画している僧都ウインドシステムのプロジェクトにおいても、山脈の尾根上に風車(U88E)が8基並ぶため、敷地面積の極小化が必要となった。3枚のブレードを、あらかじめ放射状に配してから上架すると、どうしても広範囲な敷地を必要とする。そこで、当社もこのプロジェクトに合わせ、ブレードを1枚ずつ上架するシングルブレード工法の開発を行った。

シングルブレード工法を実現するには、ブレードを水平に持ち上げ、ハブと呼ばれるブレード支持構造物に結合させる必要がある。このため、まず、クレーン1基でブレードを水平に上架させるための、つり天秤(てんびん)をU88E用に開発した。この天秤は、図10に示すように、4点でブレードを支える構造で、ブレード重量のほか、風荷重なども考慮して十分な裕度を持つ機械強度で設計をしている。また、施工性を向上させるため、ブレードの取り付け後には、つりひもを支えるピンが遠隔で開放されて、スムーズに天秤から切り離しできる装置を搭載している。

また、ブレードが水平に取り付けできる位置まで、ハブを強制的に回転させる仕組みも必要となる。このために、ナセル内のドライブシャフト後端(発電機背部)に、仮設電源からの電力供給によって駆動力をシャフトへ伝達させるローター回転装置を開発した。この装置は、常設ではないため、取り付け時と取り外し時の作業効率の向上も考慮している。

これらの特殊装置を導入し、現地では2018年7月からブレードの据え付けを開始し、確実にブレードが据え付けられることが確認できている。

今回の経験を基に、より安全なシングルブレード工法の確立に向け、改善していく計画である。

## 6. あとがき

風力システム事業は、脱炭素社会を支える有力な再エネの一つとして、洋上向け単機容量の増大やIoT技術の採用による予防保全など、全世界で技術革新が進んでいる。

当社は、今後も、その一翼を担うべく、今回述べた技術開発をはじめとして、風車そのものや、風車関連の技術開発を進めていく。

## 文 献

- (1) 石原 孟, 非線形風況予測モデルMASCOTの開発とその実用化, ながれ, 2003, 22, 5, p.387-396.
- (2) 内田孝紀, 大屋裕二, 風況予測シミュレータRIAM-COMPACTの開発ー風況精査とリアルタイムシミュレーションー, ながれ, 2003, 22, 5, p.417-428.

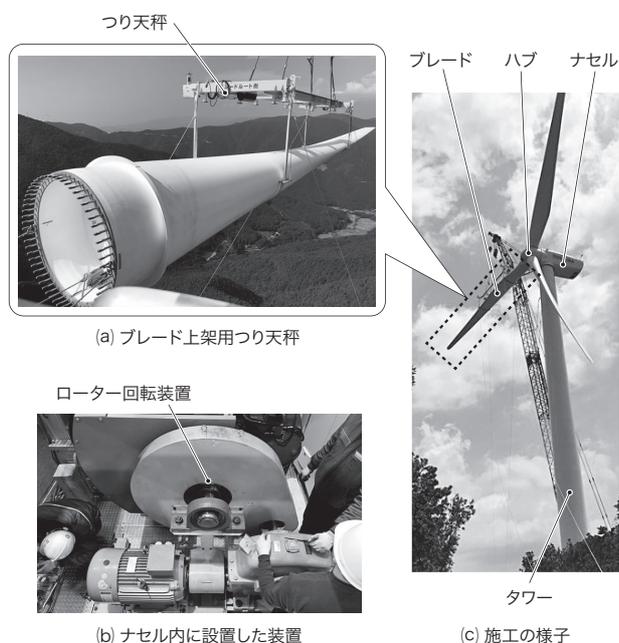


図10. 作業敷地を確保するためのシングルブレード工法

ブレードを水平に取り付けるためにハブを回転させて位置調整を行うローター回転装置や、ハブにブレードを結合させるためにクレーン1基でブレードを水平に上架させるつり天秤を開発した。

Single-blade construction method to minimize worksite area

谷山 賀浩 TANIYAMA Yoshihiro  
東芝エネルギーシステムズ(株)  
エネルギーシステム技術開発センター 回転機器開発部  
日本機械学会会員  
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.

山田 敏雅 YAMADA Toshimasa  
東芝エネルギーシステムズ(株)  
火力・水力事業部  
火力情報制御技術部  
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.

小笠原 憲人 OGASAWARA Kento  
東芝エネルギーシステムズ(株)  
エネルギー・アグリゲーション統括部  
再生可能エネルギー技術部  
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.