

# 風力発電システムを支える制御技術

## Advanced Control Technologies for Wind Turbine Generation Systems

大迫 俊樹      田中 元史      松田 寿

■ OSAKO Toshiki      ■ TANAKA Motofumi      ■ MATSUDA Hisashi

風力発電システムは、出力電力が風況に大きく影響を受けるなかで、高発電量の確保と、系統安定の維持が求められる。

東芝は、この要求に応えるため、プラズマ気流制御や、ウインドファーム制御、蓄電池併設型制御など、風力発電システム全体の改良を進めている。

Wind turbine generation systems are operated under constantly changing wind conditions, necessitating various functions and performance characteristics to achieve high reliability, high energy production, high grid stability, and the most advantageous specifications to meet the needs of the market concerned.

To meet these requirements and achieve comprehensive cost reductions, Toshiba is developing the following advanced technologies: (1) a plasma aerodynamic control technology to increase power generation efficiency by controlling plasma-induced airflow on the blades; (2) a wind farm control technology to optimize the total power generation of the wind farm by controlling the output of each wind turbine; and (3) a wind turbine control system with hybrid battery systems incorporating two types of batteries to suppress power fluctuations in the wind farm.

### 1 まえがき

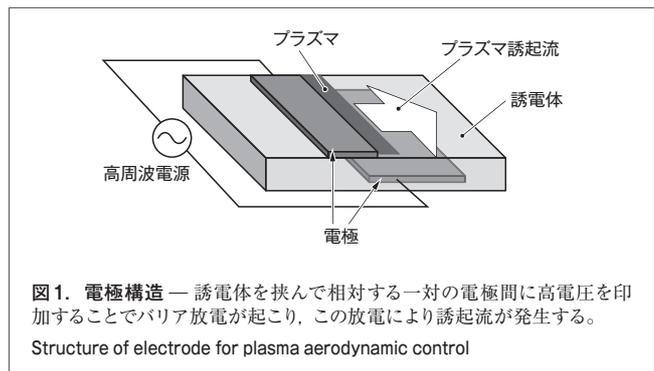
風力発電システムが受ける風況は、絶えず変動し、時には過酷なふるまいをする。このような環境下で、風力発電システムには、高信頼性や高発電量の確保など様々な機能と性能が要求される。そこで東芝は、これらの要求に応えるため、風力発電システムを支える様々な技術を開発している。ここでは、これまでの成果として、プラズマ気流制御、ウインドファーム制御、及び蓄電池併設型制御システムについて述べる。

### 2 プラズマ気流制御

#### 2.1 背景

わが国のような風速・風向変動の激しい地域で発電効率を上げるには、ロータの可変速制御及びヨー制御をいかに速く行うかが重要であるが、部品の摩耗防止や慣性による応答遅れにより実際にはそれほど高速の制御は実現できない。これを解決するため、翼面に空力制御デバイスを設置してエネルギー変換効率を向上させる、スマートロータ技術が検討されている。

プラズマ気流制御は、単純な構造の電極を翼面に設置することで、駆動部なしでアクティブに翼の空気力学的特性を改善できる技術として注目を集めている。当社はこの技術を風車翼に適用してエネルギー変換効率の向上を図るため、独立行政法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA)、国立大学法人東京大学、公立大学法人首都大学東京、及び国立大学法人三

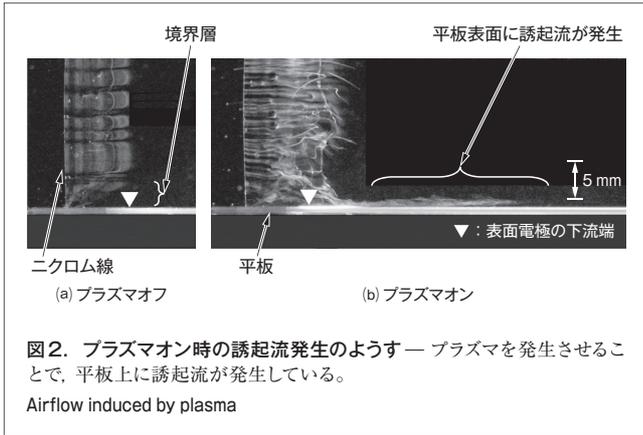


重大学 (以下、三重大と略記) と連携して独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の先導研究を受託し、実機風車の流体条件に対して有効なプラズマの制御方法や、風車実機への具体的な適用方法を検討してきた。

この章では、プラズマ気流制御の原理、これまで実施してきた風洞実験結果、及び三重大 30 kW 風車を用いたフィールド実験結果について述べる。

#### 2.2 原理

プラズマ気流制御に用いる電極の構造を図1に示す。誘電体を挟んで設置された2枚の薄い金属電極間に、交番高電圧を印加すると、表面側の金属電極近傍の空気が電離して誘電体バリア放電が起こる。この際、生じたイオンが電界から受ける体積力により周辺の中性気体が流動し、電極表面に沿ってプラズマ誘起流と呼ばれる噴流が発生する。図2は、風速 0.5 m/s の一様流中に置いた平板上でプラズマ誘起流を発生



させ、平板に垂直な方向の速度分布をスモークワイヤ法で可視化したものである<sup>(1)</sup>。プラズマ誘起流は非常に薄く、平板境界層の速度分布を変化させることができることがわかる。

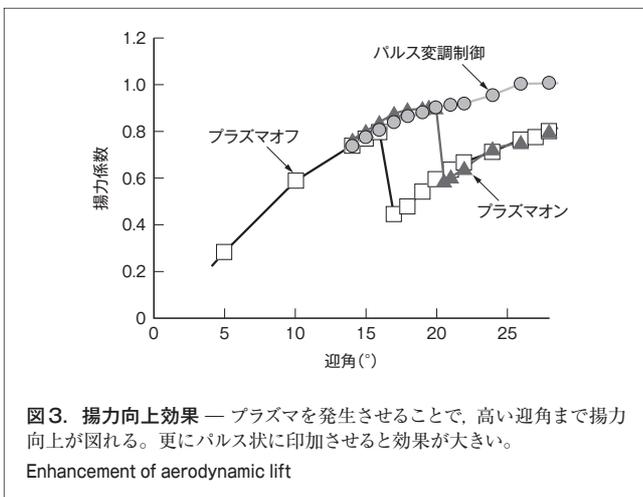
この誘起流により境界層を加速したり、かく乱したりすることで、流体機器の空気力学的特性をアクティブに制御できる。

この技術は、(1)非常に薄い噴流を誘起できるので境界層に直接影響を与えることができる、(2)電氣的制御のため時定数の短い制御が可能である、(3)故障の原因となる機械的駆動部を持たない、(4)デバイスを薄く作れるため流体機器表面への実装に適している、などの特長を備えている。そのため、各種流体機器の高効率化及び差別化に対して、ブレークスルー的な役割を果たす可能性を秘めている。

### 2.3 風洞実験による揚力向上効果の検証

この技術は、物体周りの流れに適用することで、種々の空気力学的特性への効果が期待できるが、当社は、もっとも代表的な効果として揚力向上効果に注目している。

この技術を翼に応用し、揚力向上効果を測定した結果を図3に示す。前縁に電極を設置した翼弦長90 mmの翼を用いて風速20 m/s (レイノルズ数 $1.2 \times 10^5$ に相当)の風洞実験により確認したものである。プラズマオンでは、プラズマオフに



比べてより高い迎角まで失速しないことがわかる。

更に、電圧にパルス変調を加えて断続的に駆動することにより、一定電圧印加時(図3のプラズマオン)に比べて失速角以上での揚力係数を大幅に改善できた。

この揚力向上効果の風車への適用を判断するために、翼弦長180 mmの2次元翼を用いた高速域での風洞実験を実施し、大型風車の周速に匹敵する風速70 m/s (=250 km/h)でも揚力が向上することを確認した<sup>(2)</sup>。

また、3次元動的流れの環境下に置かれる回転翼への適用のために、水平軸のロータ直径1.56 mの小型風車を用いた風洞実験を行った。風速が急変した場合に発生する失速回転状況にプラズマを適用することで、風車の回転数を大幅に増大できることを確認した<sup>(3)</sup>。

これらの結果から、プラズマ気流制御による揚力向上効果が実際の風車でも適用可能と判断された。そこで、変動する実際の風況での効果を確認するため、次節で述べるフィールド実験を実施した。

### 2.4 30 kW風車を用いたフィールド実験<sup>(4)</sup>

実験には、三重大学が保有する農場内に設置されている30 kW フィールド風車を用いた(図4)。供試風車はロータ直径9.4 m、ハブ高さ13.38 mで、可変ピッチ機構とヨー駆動機構を持つ3枚翼のアップウインド型水平軸風車である。

供試翼は半径4.7 mのテーパねじり翼であり、翼端から翼根までのねじり角は約12.15°である。この翼の先端から4 mまでの前縁部分に表面電極エッジ部分がくるように電極を設置した。電極は、ポリイミド系複合樹脂を誘電体に用い、この誘電体をサンドイッチするように対向する2枚の金属電極を取り付けた。3枚翼で合計12 mの電極に5.5 kVの電圧をパルス変調制御で印加した。風車の条件として、回転数一定、ピッチ角及びナセル方位は固定とした。プラズマ気流制御の効果を把握するため1分ごとにプラズマオンとオフを繰り返して実験



し、30分間のデータセットを風況の許す範囲で取得した。

風速とロータトルクの関係、プラズマオン時とオフ時の両ケースについて図5に示す。風車に回転数一定の制限があり、高風速帯域では近年の商用風車が採用している可変速制御状態とは異なり、翼の迎角が理想状態から外れるため、剥離が起きやすい状況となるが、剥離の生じにくい風速帯域である5～7 m/sでも、プラズマによりトルクが増大していることがわかった。実線は翼素モデルを用いて解析により求めたものであるが、解析と実測が良好に一致することも確認できた。

トルクから求めた出力電力の変化を、プラズマオン時とオフ時それぞれについて図6に示す。平均出力電力は、オフ時で1.71 kW、オン時で2.28 kWであり、出力電力の増加が見込めることがわかった。

商用風車の可変速制御でも、大きな慣性モーメントを持つロータの回転数を、風変動の時定数で制御することは不可能なため、実際には周速比は一定ではなく変動している。したがって、理想の迎角条件で稼働してはならず剥離が起きやすい状況にある。また、風向も実風況では絶えず変動しており、理想の迎角条件からずれているのが現状である。これらから、

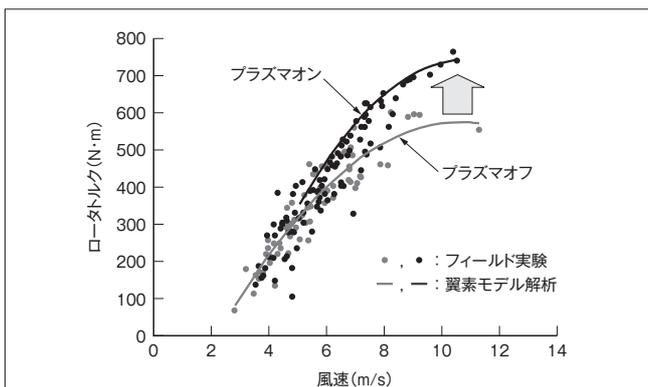


図5. トルクに対するプラズマ気流制御効果 — フィールド実験を行ってプラズマ気流制御がロータのトルク向上に効果があることを確認した。  
Improvement of torque by plasma aerodynamic control

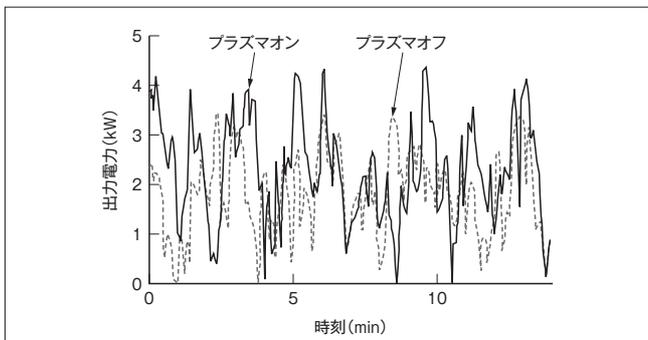


図6. 出力電力に対するプラズマ気流制御効果 — フィールド実験を行ってプラズマ気流制御が出力向上に効果があることを確認した。  
Improvement of power output by plasma aerodynamic control

商用風車でもプラズマ気流制御による時間平均の出力向上は期待できる。

現在 MW 級の商用機での有効性を確認するためフィールド実験の準備を進めている。また、電源や電極の耐候性と耐環境性の向上、及び製品化に向けた低コスト化、製造方法、実装方法の検討も計画している。

### 3 ウィンドファーム制御システム

風車の出力は風況の変動を受けて常に変動する。複数台の風車から成るウィンドファームの出力は、規模によっては系統にとって無視できなくなり、常に需給バランスをとって電力安定化の制御をしている系統に対して、連系ができなくなるおそれがある。これを回避するために、電力系統側の要求に応じて、ファーム全体の出力が最適になるように、個々の風車に対して、その運転状況に合わせて出力配分する制御が有効である。

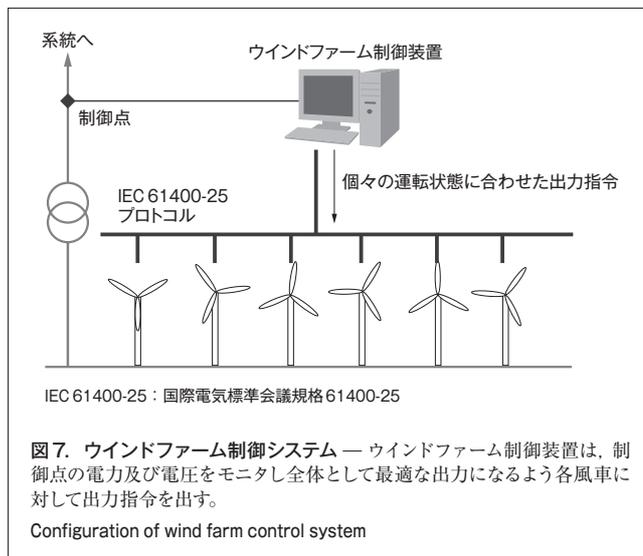


図7. ウィンドファーム制御システム — ウィンドファーム制御装置は、制御点の電力及び電圧をモニタし全体として最適な出力になるよう各風車に対して出力指令を出す。

Configuration of wind farm control system

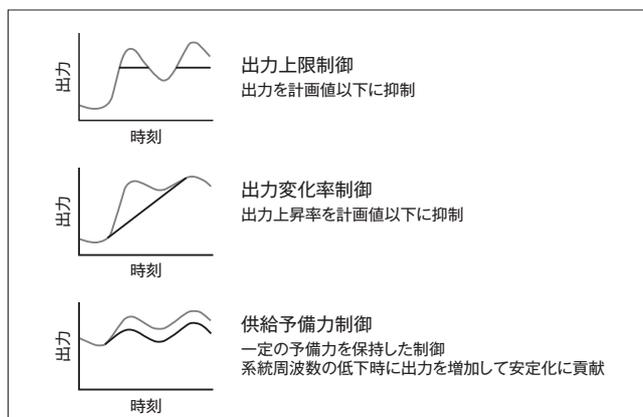


図8. ウィンドファーム制御機能 — 有効電力制御として、出力上限制御や、出力変化率制御、供給予備力制御を行う。

Wind farm control schemes

ウインドファーム制御のシステム構成図を図7に示す。連系点の送電出力を制御点としてウインドファーム制御装置が時々刻々と変動する電力及び電圧をモニタし、個々の風車に対して出力指令を出す。個々の風車はこの指令値に基づき制御を行う。

制御方法として、無効電力制御や電圧制御のほか、図8に示すように、有効電力を制御することで系統の負担を軽減できるような方法が検討されている。

## 4 蓄電池併設型制御システム

3章と同様に出力を安定させる方式として、蓄電池併設型制御システムがある。

当社は、図9に示すような特性の異なる2種の蓄電池を組み合わせたハイブリッド型システムの検討を行っている。低周波の脈動に対して安価で大容量の電力を蓄電できる鉛蓄電池を、高周波の脈動に対して高速に反応して電力の充放電ができるリチウム電池である当社のSCiB™を使用することにより、この制御システム全体の導入コストを最小化できる。また、充

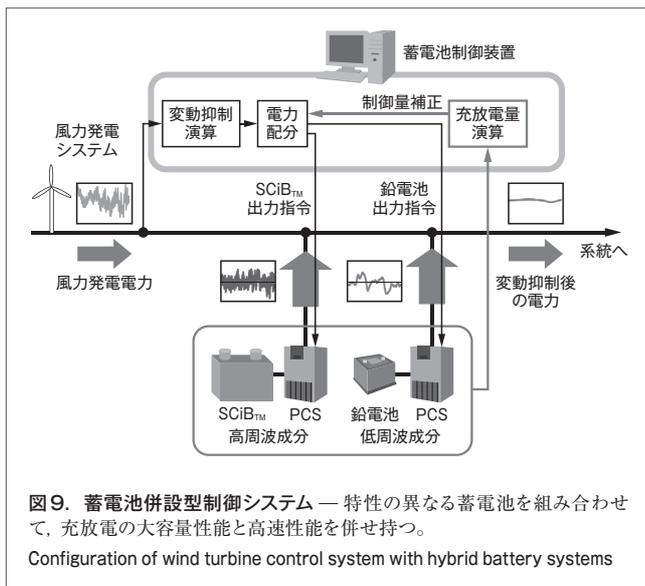


図9. 蓄電池併設型制御システム — 特性の異なる蓄電池を組み合わせて、充放電の大容量性能と高速性能を併せ持つ。

Configuration of wind turbine control system with hybrid battery systems

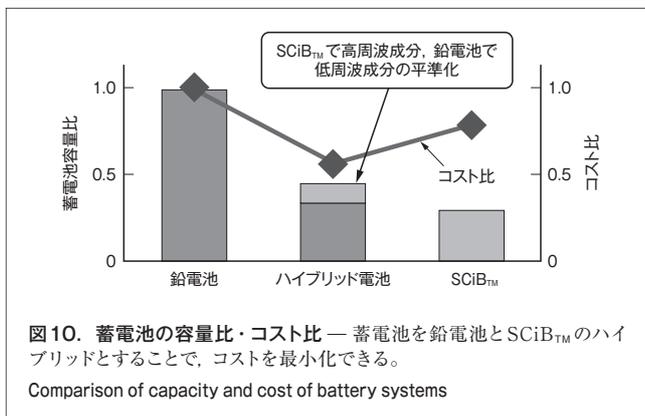


図10. 蓄電池の容量比・コスト比 — 蓄電池を鉛電池とSCiB™のハイブリッドとすることで、コストを最小化できる。

Comparison of capacity and cost of battery systems

放電量・回数を最小化する制御方法によって蓄電池の寿命を延ばし、運用コストを下げることも可能となる。蓄電池の制御には個々のパワーコンディショナ（PCS）とは別に系統全体の必要充放電量を算定し、それぞれの蓄電池に対して充放電の指令を出す蓄電池制御装置を施設する。

鉛電池又はSCiB™をそれぞれ単独で使用したケースと、二つの蓄電池を組み合わせたケースを比較して、必要な蓄電池容量とコストを図10に示す。ハイブリッドの場合、鉛電池単独に比べて約50%、SCiB™単独に比べて約30%のコスト低減を見込める。

## 5 あとがき

風力発電システムにおいて、絶えず変動する風況に対し安定的に高い出力電力を得るための制御技術について述べた。今後も、風力発電システムの発電効率や安定性の向上に関する制御技術を研究、開発し、風力発電事業の発展を通して電力安定供給に寄与していく。

プラズマ気流制御の成果の一部は、NEDOの先導研究「動的流れ場に対するプラズマ気流制御最適化の研究開発」に基づき得られたものである。

## 文献

- 田中元史 他. バリア放電による翼面流れの剥離抑制効果. 電気学会論文誌A. 128, 4, 2008, p.235-241.
- 松田 寿 他. "NACA0015 翼前縁剥離流れ制御に関する大型風洞試験". 第40回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集. 釧路, 2012-10. C-15.
- Matsuda, H. et al. "Experimental Study on Plasma Aerodynamic Control for Improving Wind Turbine Performance". Asian Congress on Gas Turbines 2012. Shanghai, China, 2012-08. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Science et al. ACGT2012-1058.
- Tanaka, M. et al. "Field Test of Plasma Aerodynamic Controlled Wind Turbine". Europe's Premier Wind Energy Association Event 2013 (EWEA2013). Vienna, Austria, 2013-02, EWEA. Presentation ID 585.



大迫 俊樹 OSAKO Toshiki

電力システム社 火力・水力事業部 風力・エネルギーサービス部 参事。風力発電事業に従事。  
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



田中 元史 TANAKA Motofumi

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 環境・水システム開発部主務。プラズマ応用機器の研究・開発に従事。電気学会、日本風力エネルギー学会会員。  
Power and Industrial Systems Research and Development Center



松田 寿 MATSUDA Hisashi

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 回転機器開発部主査。流体応用機器の研究・開発に従事。日本機械学会、日本ガスタービン学会、日本流体学会会員。  
Power and Industrial Systems Research and Development Center