

センサ搭載ブレードの製造・取付工事

SENSOR EQUIPPED BLADE MANUFACTURING AND INSTALLATION

秋元 恭平* 山本 佳宏* 小川 路加* 川端 浩和** 小垣 哲也**
 Kyohei Akimoto Yoshihiro Yamamoto Ruka Ogawa Hirokazu Kawabata Tetsuya Kogaki

1. はじめに

国立研究開発法人産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター（以下、産総研）では、福島再生可能エネルギー研究所最先端・拠点化支援事業「風力発電の維持管理等の技術開発・人材育成拠点の形成」において、「ブレード表面流れの理解とブレード性能向上」に取り組んでいる。また、同センター内の既設の風車（当社製 KWT300）を構成している 3本のブレード性能を評価するため、圧力や、流れ、振動、ひずみの計測システムを搭載したブレードと交換し、運転試験を行うことで、開発したデバイスがブレード性能に与える影響と、回転中のブレード性能を評価する計画である。

本稿では、産総研より発注いただいた、センサ搭載ブレードの製造および取付工事について報告する。

2. センサ搭載ブレードについて

産総研では、これまでに風車ブレードのオペレーション・メンテナンス（O&M）用デバイスに関する研究開発を行ってきた。例えば、過去に実施したプラズマアクチュエータや、エロージョン保護シートの実証試験¹⁾²⁾では、これらのデバイスが実機風車に与える空力的影響を調査してきた。しかし、実機風車で計測可能な領域は制限されるため、デバイスの効果を評価する指標は、風向風速や発電電力量、ひずみ、加速度に限られ、ブレードの空力性能変化を間接的な指標を用いて評価するのにとどまっている。そのため、ブレード O&M デバイスが生み出す空力現象は、十分に理解できていないのが現状である。ブレード O&M デバイスの空力現象を理解するためには、各種デバイスが生み出す流れの変化や、翼面への影響など、直接的な指標を用いて評価することが望ましい。そこで、ブレード周りの流体現象を計測可能な各種センサを搭載したブレードを新たに製作し、実機運用することで、ブレード O&M デバイスが風車ブレードに与える影響を直接的に評価することを目的としている。ブレードにセンサを搭載して実機計測を行う過去の研究は、時系列順に Kamada ら³⁾（流入角、表面圧力、ひずみ）、Troldborg ら⁴⁾（流入角、表面圧力、ひずみ）、Wu ら⁵⁾（流入角、表面圧力）などが知られており、これらと同様の計測を行いつつ、境界層計測などの新しい計

測メニューを実施可能とすることを目標とした。

3. センサ搭載ブレードの製造

ブレードにセンサを搭載するためには、センサや計測機器の取付け部分に十分な強度が必要となる。そのため、既存のブレードを改造するのではなく、ブレードを新規製作し、ブレードの製作段階でブレード内にセンサ（あるいはセンサの固定治具）を搭載しつつ、ブレード内部に補強を行った。内部補強設計は、3D-FEM 解析で補強積層などの妥当性を確認した。なお、センサを搭載したブレードはセンサや補強治具類などの影響で、既設搭載済み 2 本のブレードとの重量バランスが大きく異なり、その偏載荷重が風車主軸などに疲労荷重として蓄積されるため、センサ搭載ブレード取付工事時に、現場で錘を挿入し、重量の差は±0.5%、慣性モーメントの差は±0.1%以内に収まるように調整を行った。搭載したセンサおよび計測メニューを以下に示す。

3.1 翼面圧力計測

風車運転中の動的な翼面圧力を計測するために、 $r/R=0.52, 0.68, 0.93$ （ r ：ロータ半径位置、 R ：ブレード半径）には各断面 48 点（前縁、後縁、負圧面 23 点、正圧面 23 点）の圧力孔を設けた。ブレード内部には写真-1 に示すように製造段階で翼断面に垂直な方向にステンレスチューブを埋め込み、圧力スキャナと接続するための圧力配管を接続した。圧力計測時の応答時間遅れを最小化するため、圧力チューブの長さは 2m に統一した。なお、後述する他の圧力計測に使用する圧力チューブもすべて長さは統一した。

3.2 境界層計測

翼面法線方向の速度プロファイルを取得するために、境界層プローブが取り付け可能な機構を $r/R=0.68, 0.93$ の負圧面に設けた。同断面には、フランジ状の金属治具を製造段階で埋め込み、治具周辺を補強した。写真-2 に、境界層プローブの取付け口を示す。

* 環境インフラ本部 環境インフラ部

** 国立研究開発法人 産業技術総合研究所

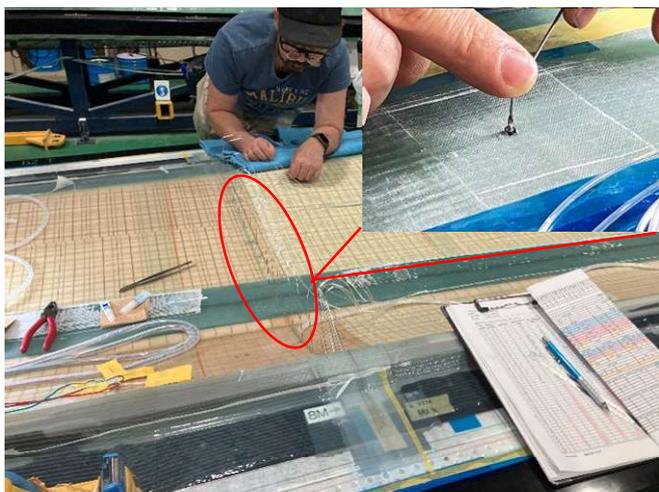


写真-1 翼面圧力孔ステンレスチューブ

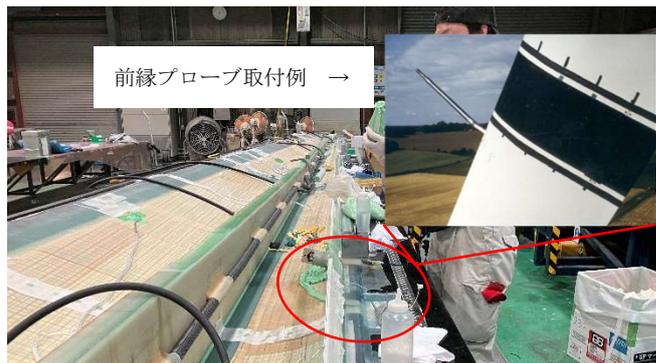
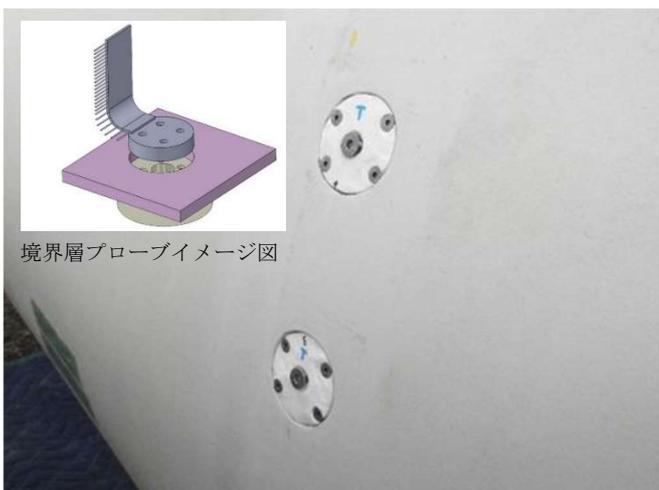


写真-3 前縁のプロープ取付口製作



境界層プローブイメージ図

写真-2 境界層プローブ取付け口



写真-4 アクセスハッチ（開口時）

3.3 前縁計測

翼面圧力や、境界層計測を行う翼断面について、流入角を計測するために、 $r/R=0.32, 0.54, 0.71, 0.96$ の前縁位置には多孔ピトー管が取り付け可能な機構を設けた。ブレードの前縁位置は、負圧面、静圧面の接着位置に近いので、境界層プローブよりも強固な補強を行った。写真-3は、前縁のピトー管取付け口である。機構の内部には、ピトー管接続用の圧力チューブが収納してあり、計測開始時に多孔ピトー管と接続する。

3.4 アクセスハッチ

$r/R=0.41, 0.61, 0.83$ の負圧面側には測定機器が設置可能なハッチを設けた。写真-4は、ハッチ部を撮影したものである。ハッチは最大約 300mm 四方の開口部となるため、空力的な悪影響を最小化するために負圧面に設け、ブレードの型に沿って GFRP で製作した。ハッチ内部に圧力計測時の圧力スケヤナを設置するほか、ブレードに内蔵したセンサ類のメンテナンス時に利用する。

3.5 ひずみ計測

ブレードのルート部以外の部分の局所的なひずみや、フラップ、エッジ方向モーメント分布を計測するために、写真-5に示すようにブレードの半径方向 5 断面 ($r/R= 0.18, 0.35, 0.58, 0.74, 0.90$) に、ひずみゲージを設置した。各ひずみゲージは、3ヶ所に設けられたハッチに設置されたデータロガーに接続される。

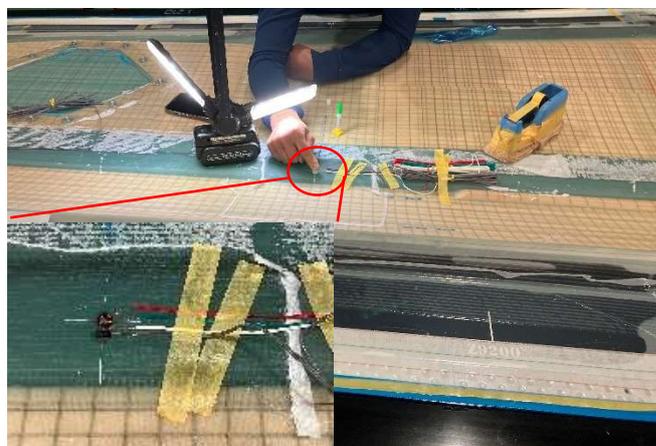


写真-5 ひずみゲージ取付け

3.6 加速度計測

流入風の非一様性や、ブレードの空力デバイス有無によって、3本のブレードで加速度のアンバランスが生じることが考えられるため、3本のブレードのルート部には**写真-6**に示すように加速度センサを設けた。また、加速度センサのシグナルを基にしてブレードのアジマス角を計測する。

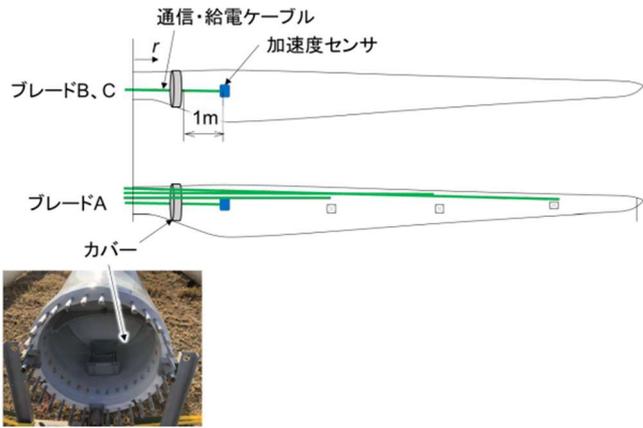


写真-6 加速度計配置

3.7 エロージョンテストセクション

$0.8 < r/R < 1.0$ の前縁部には、**写真-7**に示すように幅150mm、深さ2mmの溝を設けた。この領域は、エロージョン保護材の性能テストセクションとして利用する。例えば、エロージョン保護シートを溝に貼り付け、長期間運転することで材料の損傷状態を観察することを検討している。また、損傷を模擬したアタッチメントを溝にはめ込むことで、損傷が生み出す空力現象を観察することも想定している。 $r/R = 0.78$ の前縁部に **写真-2**と同じ金属治具と、可視化カメラ用の電源・通信ケーブルを内蔵した。この位置では、可視化用のカメラを取り付け、ブレードに衝突する液滴形状を撮影することを予定している。



写真-7 エロージョンテストセクション製作

3.8 応力発光塗料

ブレード表面の塗装面の上には、ブレード全体に産総研・九州センターにおいて開発された応力発光塗料⁹⁾(ML-F2ET10-3、堺化学工業株式会社)を塗布した。同塗料は圧縮・引張等の外力によって材料が発光し、応力分布や破壊に伴う応力の経時的変化等を可視化することが可能である。**写真-8**は、試験体に塗布した応力発光塗料の発光状況を示している。センサ搭載ブレードに応力がかかった場合は、これと同様の緑色の発光が観察される予定である。

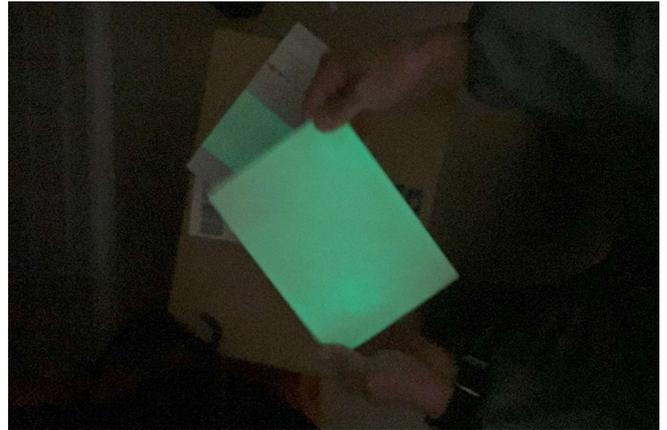


写真-8 応力発光体の発光状況

4. センサ搭載ブレード取付工事

KWT300 センサ搭載ブレード取付工事については、ブレード交換工事の場所が、太陽光発電の研究設備や実証フィールドに近いので、ヤード調整および安全通路の確保について協議を行いながら施工を行った。

まずは、**写真-9**に示すように既設のロータを風車から取り外し、地上でロータのばらし作業を行った。既設ブレード2本については、前述のように重量バランス調整のための錘を追加し、1本は今回製作したセンサブレードと交換した。ロータの地組が完了した後、**写真-10, 11**に示すようにロータを上架し工事は完了した。



写真-9 ロータ地ばらし作業



写真-10 ロータ架設作業



写真-11 工事完了

ドを風車に取付け完了した段階である。

今後は、産総研にて、各種センサの動作テストを行うとともに、ブレード用 O&M 製品の流れ場に与える影響が評価される計画である。

謝辞

国立研究開発法人産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター関係者の皆様には、センサ搭載ブレードの製作から取付工事に至るまで、初期検討から長きにわたってご指導とご協力いただきました。深く感謝申し上げます。

工事期間中は、多くの見学者が来られ、センサ搭載ブレードを取り付けた風車および風車 O&M に対する関心の高さを改めて知ることができました。産総研にて実施される様々な検討および研究成果が風車の O&M に留まらず、日本の風車技術発展に寄与することを期待しています。

参考文献

- 1) Motofumi Tanaka ら：The First Evaluation of Plasma Actuation Control for 300kW Wind Turbine Operated in the Field with its Original Torque Control, WESC2021, 2021.
- 2) 川端浩和ら：エロージョン保護シートが風車ブレードに及ぼす影響，第 42 回風力エネルギー利用シンポジウム，2020.
- 3) Yasunari Kamada ら：Measurement of Unsteady Aerodynamics Load on the Blade of Field Horizontal Axis Wind Turbine, Journal of Fluid Science and Technology, Vol.3, No.3, 2008.
- 4) Niels Trolborg ら：DANAERO MW: Final Report, DTU Wind Energy E-0027, 2013.
- 5) Guangxing Wu ら：Development and Validation of Aerodynamic Measurement on a Horizontal Axis Wind Turbine in the Field, Appl. Sci., 9, 482, 2019.
- 6) 徐超男：応力発光体を用いたセンシング，セラミックス，Vol. 44, No. 3, pp.154-160, 2009.

5. おわりに

本工事では、産総研が目指している、風車ブレードに関する O&M 製品を、発電電力量等の間接的な指標ではなく、ブレード周りの流れ計測といった直接的な指標で評価するため、様々なセンサを搭載したブレードを製作し、実機に搭載した。写真-11 に示した通り、本稿執筆時点ではセンサ搭載ブレード