

5 MW洋上風車および 2 MW浮体式洋上風車の技術開発

佐伯 満
Saeaki Mitsuru

飛永 育男
Tobinaga Ikuo

杉野 淳一
Sugino Junichi

白石 崇
Shiraishi Takashi

日立は、日本の丘陵地に適合した2 MWダウンウィンド方式風車を開発しており、累計受注台数137基に達している。2010年には国内初の外洋に設置された着床式洋上風車7基が運転を開始し、2013年には8基を増設した。この経験を生かし、現在、5 MWの洋上向けダウンウィンド方式風車を開発中である。なお、福島洋上風力

コンソーシアムのメンバーとして経済産業省の委託事業「福島復興・浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業」向けに1基、環境省「浮体式洋上風力発電実証事業」向けに受託者グループの一員として1基の2 MWダウンウィンド風車を搭載している。

1. はじめに

世界の発展と引き換えに拡大する環境問題に対する対策として、世界でさまざまな再生可能エネルギーが開発、実用化されている。中でも風力発電は、その出力の大きさとコストが、従来の化石燃料や原子力を用いた発電方式に比較し得る水準に到達しており、黎(れい)明期に盛んであった欧州だけでなく、世界中の至る所に導入が進み、大型化・高度化の発展を遂げている。

日立は2003年から2 MWダウンウィンド方式風車「HTW2.0-80」の開発に着手し、「SUBARU22/100」を用いてアップウィンドとダウンウィンド方式の相違を定量的に評価している¹⁾。また、2010年からは国内初の外洋に設置された着床式洋上風車7基が運転しており²⁾、2013年には8基増設し運転を開始した。この経験を生かし、現在、5 MWの洋上向けダウンウィンド方式風車「HTW5.0-126」を開発中である。

海洋国家であるわが国は広大な海を周囲に有しており、海洋の風力ポテンシャルは陸上をはるかに上回っている。しかし、海洋に風車を導入するには、基礎を海底に固定しない浮体構造物に風車を搭載して安定的な発電をすることが求められる。日立製作所はHTW2.0-80を経済産業省「福島復興・浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業」向けに1基、環境省「浮体式洋上風力発電実証事業」向けに1基を搭載し、実証試験を行うことで、浮体式洋上風力発

電の可能性の実証をめざしている。

ここでは、HTW5.0-126のコンセプトと特徴、浮体式風車と着床式風車との相違、および2つの浮体式風力発電設備の概要と実証状況について述べる。

2. 5 MWダウンウィンド洋上風力発電機HTW5.0-126

日立は、洋上風力発電システムの大型化ニーズに対応するため、5 MWダウンウィンド洋上風力発電機HTW5.0-126実証機を茨城県神栖市沿岸に建設する予定である。

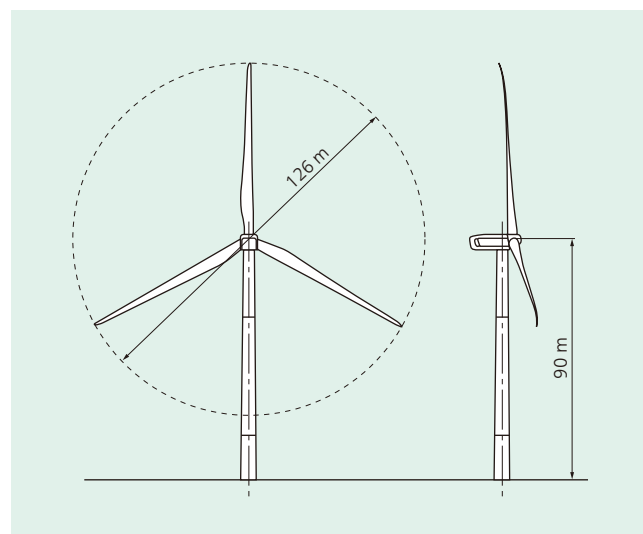


図1 | HTW5.0-126の外観図

瞬時風速70 m/s以上に耐えられる仕様としてロータ径は126 mとした。

表1 | HTW5.0-126の仕様

陸上の系統と接続する海底ケーブルの経済性を考え、出力電圧は33 kVとした。

項目	仕様
定格出力	5,000 kW
ロータ直径	126 m
ハブ高さ	90 m以上
ブレード枚数	3
ロータ位置	ダウンウィンド
チルト角	-8°
コーニング角	5°
出力制御	ピッチ・可変速
ブレーキ	ブレードフェザー(独立ピッチ)
ヨー制御	通常運転時：アクティブヨー 暴風停電時：フリーヨー
回転速度	6.4~12.7 (min ⁻¹)
増速比	約1:40
発電機種別	永久磁石同期発電機
PCS方式	フルコンバータ
風車出力端電圧	33,000 V
カットイン風速	4 m/s
カットアウト風速	25 m/s

注：略語説明 PCS (Power Conditioning System)

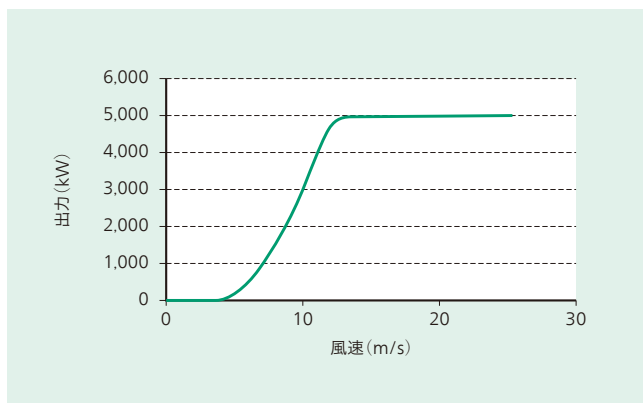


図2 | HTW5.0-126のパワーカーブ

容量は基礎コストが最も安価なモノパイル方式を標準とし5 MWとした。

HTW5.0-126実証機の外観図を図1に、仕様を表1に、パワーカーブを図2に示す。

日本および近隣アジア地域は欧州の北海などと比べると平均風速は6 m/s~8 m/sと低く台風通過時は70 m/sを超えるような瞬間風速に見舞われる。

HTW5.0-126の仕様はこのような条件で経済性、高信頼性、耐環境性および将来の拡張性を考慮して決定した。容量は基礎コストが最も安価なモノパイル方式[単一杭(くい)方式]で設置可能な最大容量の風車として、5 MWを選定した。タワーヘッド重量を低減するため2段増速機の採用が考えられる。タワーヘッド重量は350 tを目標としている。ナセルの構造を図3に示す。

2.1 ダウンウィンド型風車の特徴

HTW5.0-126の大きな特徴は、ロータを風下に位置したダウンウィンド方式をとっていることである。ロータが

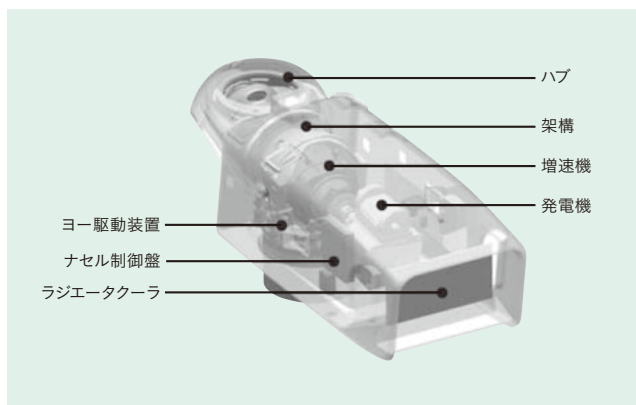


図3 | ナセルの構造

ナセル軽量化と信頼性向上のため2段増速機を採用した。

風下側にあることにより、日本のように台風が多い環境で、万が一、系統が停電を起こした場合でも高い信頼性を確保することが可能になる³⁾。

また、風車の大型化に伴い翼は長尺になり、その変形量も増大するが、翼が風下側に位置することで、変形によってタワーと衝突するリスクもないため、翼の長尺化に対する制約も少なく、ロータの大口径化に適している。さらに、ダウンウィンド型風車は、強風時には風速が上がるに従いブレードとタワーのクリアランスが拡大する。これはアップウィンド型が高風速時にブレード・タワー間クリアランスが減少する方向に向かうのに比べて、ブレードとタワーが接触するポテンシャルを軽減できるため、安全面での強みとなる⁴⁾。

さらに、ダウンウィンドの安定性は、浮体式洋上風力発電においても有望であり、後述する2つの浮体式洋上風力発電においても、大きな効果を発揮している。

2.2 信頼性向上施策

洋上風車は陸上風車に比べアクセス性が悪く、洋上風車の生涯経済性を向上するためには陸上風車に比べ稼働率を向上する必要がある⁵⁾、より高い信頼性が要求される。HTW5.0-126は洋上専用機種として各種の高信頼性施策を採用、または採用を検討中である。ここに主な内容を説明する。

(1) 中速ギヤドライブ方式

増速機および発電機の不具合ポテンシャルを低減するために並行ギヤをなくし、増速比を約1:40に抑えた増速機と、極数36の永久磁石同期発電機を組み合わせた中速ギヤドライブ方式を採用することが考えられる。

(2) 2軸受外輪駆動方式

HTW5.0-126のドライブシステムは、風車の大型化に伴う荷重増加を吸収するために2軸受外輪駆動方式の採用を検討中である(図4参照)。固定主軸と回転主軸の2つの

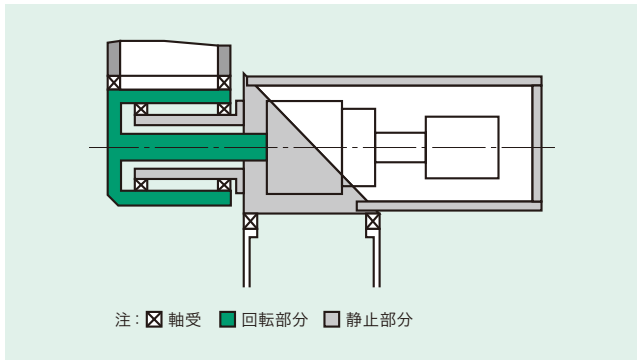


図4 | 2軸受外輪駆動方式

固定主軸と回転主軸の2つの主軸が、ロータの荷重を分離して下流に流す。

主軸が、ロータの荷重を分離して下流に流すシステムである。この構造により、増速機にはロータのトルク成分以外の荷重を限りなく低減した純度の高いトルク荷重を伝達できるため、増速機の信頼性を向上することができる。また、トルク以外の荷重を受け持つ固定主軸は、それ自体は回転しないため疲労荷重を低減でき、構造体の信頼性を向上している。

(3) パッシブ冷却方式

HTW5.0-126はダウンウィンド方式を採用しているため、ナセル先端部が風に対して最上流部に位置する。この特徴を生かしてパッシブ(ファンレス)冷却システムを採用した。冷却に必要な風量を得るため重要なナセル形状は流体解析を活用して決定した(図5参照)。

2.3 HTW5.0-126開発スケジュール

HTW5.0-126実証機は2014年夏の建設に向けて製作中である。パワートレインはナセル組み立てに先行し、工場内でフルパワー試験を実施中である。

フルパワー試験の概要を図6に示す。変動トルク、アライメント偏差を与えフルパワーの挙動を計測中である。フルパワー試験の状況を図7に示す。

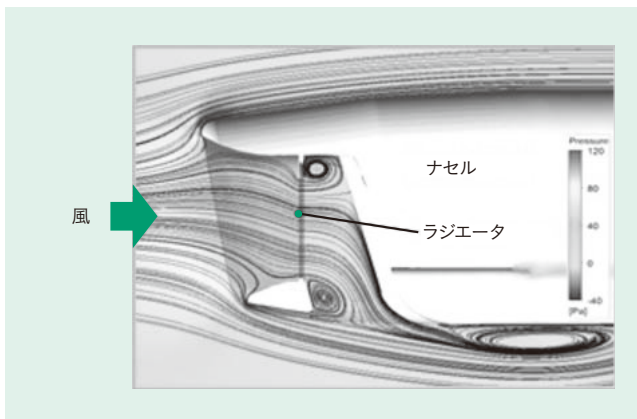


図5 | ナセル周りの流体シミュレーション

ナセル形状を決定するために行った、ラジエータを流れる空気のシミュレーション結果例を示す。

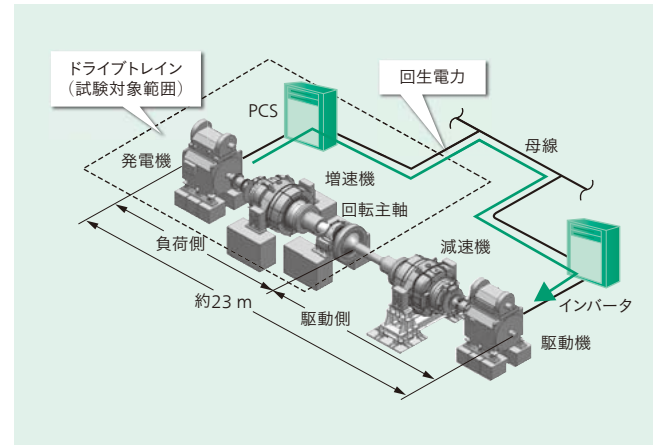


図6 | ドライブトレインのフルパワー試験

パワートレインを2セット設置し、電力再生運転で試験を実施した。

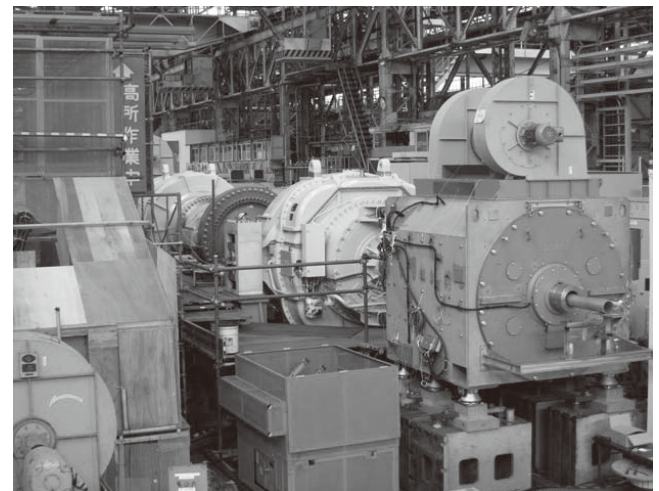


図7 | フルパワー試験の状況

変動トルク、アライメント偏差を与えてフルパワーの挙動を計測中である。

3. 福島復興・浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業

3.1 福島沖浮体プロジェクトの概要

丸紅株式会社(プロジェクトインテグレータ)、日立製作所など10の企業と東京大学(テクニカルアドバイザー)で構成する福島洋上風力コンソーシアムは、2012年3月に経済産業省から「福島復興・浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業」を受託した。コンソーシアムはそれぞれが持つ知見や技術を生かした役割を持ち、福島県沖に世界初の浮体式洋上ウィンドファームを建設し、安全性・信頼性・経済性の評価など実証試験を行うプロジェクトを推進している⁶⁾。日立製作所は、洋上変電所への変電システムを納めるとともに、三井造船株式会社のセミサブ式浮体へHTW2.0-80風車を浮体用に改造して納入した。セミサブ式浮体は、造船所ドックにおいて陸上とほぼ同じ環境で風車を組み立て、長距離を曳(えい)航して設置位置まで移動でき、浮体の安定性が高いという特長を有している(図8参照)。



図8 | 福島沖浮体風車の全景

セミサブ浮体の上に搭載された2,000 kWダウンウィンド風車 (HTW2.0-80) の全景を示す (写真提供: 福島洋上風力コンソーシアム)。

3.2 浮体用強化タワー

設計段階において、風車と浮体の連成解析を行い、傾斜の影響による静荷重および疲労荷重増大を満足するタワー設計を行った。タワー曲げモーメント増大と浮体中央の柱(センターカラム)の直径と合わせるために、タワー最下部直径はHTW2.0-80において最大の5 mである。ダウンウィンド風車はタワーを通過した風をロータが受けるため(タワーシャドウ), なるべく細いタワーとする必要がある。これらの課題となる(1)強度確保, (2)重量低減, (3)タワーシャドウによる形状制限を満足させるために、この浮体向けタワーには溶接止端部に加工を施す疲労強度向上策を行うことが考えられる。風車タワーは溶接構造用鋼の鋼板を筒状に丸め、それらを完全溶け込み溶接でつなぎ合わせて製造する。これにより、3つの条件を満足することが可能である。

3.3 電力系機器コンテナ

タワー下部に発電した電力を系統周波数に調整するPCS (Power Conditioning System) を設置することが考えられる。そのため系統側には、高圧盤、昇圧変圧器、特別高圧盤などを配置する必要があり、タワー内に配置する案、浮体内に配置する案、浮体甲板上に配置する案などが考えられる。この浮体風車は実証試験機であるが、実証試験後の商用運転も考慮する仕様であったため、これら機器が故障した際にも交換できるように、3つの独立したコンテナに収容した(図9参照)。特別高圧盤と高圧盤の2つのコンテナは、タワーとパイプで接続されているが、タワー内の換気ファンによって空気の循環を行って冷却を行うことが考えられる。一方、昇圧変圧器は塩害対策用塗装を施



図9 | 浮体甲板上的コンテナ

左にあるのは特別高圧盤コンテナ, 中央に高圧盤コンテナ, 右は昇圧変圧器コンテナである (写真提供: 福島洋上風力コンソーシアム)。

すことが考えられ、コンテナ天井にあるファンで直接外気とコンテナ内空気を循環させて冷却させることが考えられる。これらの3つのコンテナは、浮体甲板にボルトで固定することが考えられ、その場合、万が一の故障の際はこのコンテナごとに取り外して交換することができる。

3.4 実証試験

2013年11月以降、風車は安定した発電運転を続け、実証データを蓄積している。特に浮体の安定度は良好である。体感的な揺れが皆無というわけではないが、陸上で実施している通常のメンテナンス作業は問題なく実施可能であることを確認した。発電時のナセルの前後方向傾斜角度を図10に示す。横軸は10分間の平均風速で、縦軸はナセルに設置した傾斜センサーの値である。

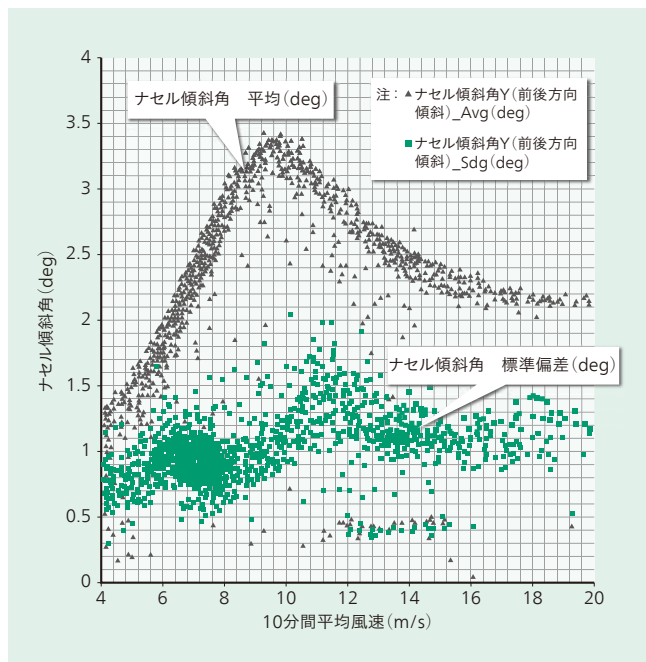


図10 | 10分間の平均風速とナセル傾斜角度

浮体専用にナセル傾斜角センサーを取り付けて計測している。

平均傾斜角はブレードピッチ角度を調整し始める領域まで上昇し、その後減少する傾向を示す。これらのデータを用い、かつ潮流の影響などを考慮した詳細を今後検討する予定である。

実証試験は2015年度末まで継続される予定である。この間にデータを蓄積し、設計へのフィードバックを行って将来的な浮体風車開発に生かす予定である。

4. 環境省浮体式洋上風力発電実証事業

2010年の事前の調査から始まった環境省浮体式洋上風力発電実証事業^{7), 8), 9)}では、戸田建設株式会社を代表とする環境省浮体式洋上風力発電実証事業受託者グループが長崎県の五島列島周辺海域でスパーク型の浮体式洋上風車を建設することになった。浮体式風車は多くの形式が提案されているが、経済性に優れたスパーク型を採用し、特にコンクリート(PC: Prestressed Concrete)部と鋼製部によってハイブリッドすると、より経済性を追求しえる(図11参照)。

この浮体の特徴を生かすためには、単純な構造ながら長い形状であることの課題として、全体の輸送性、施工性、耐久性などを克服する必要がある。

日立製作所が担当する風車本体としても、ベースとなる100 kW風車と2 MW風車の2段階を踏んで実証した。

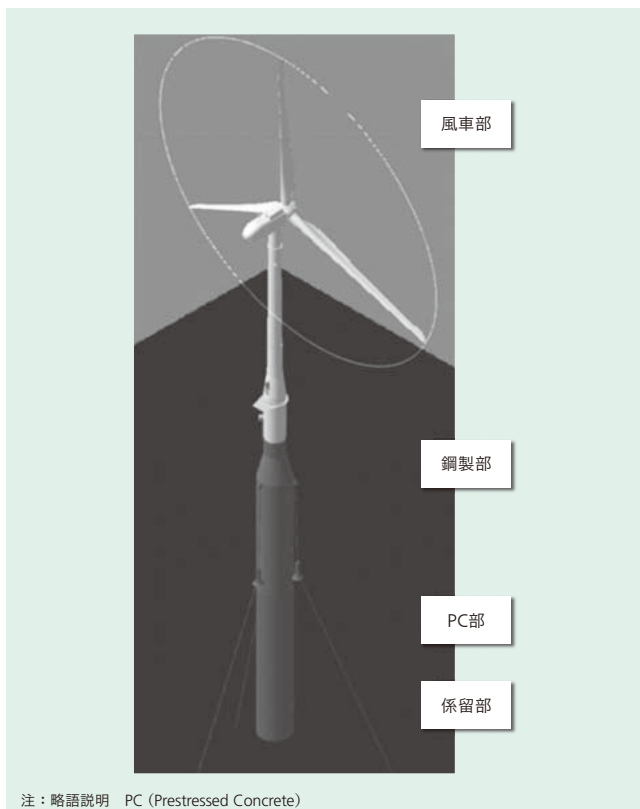


図11 | ハイブリッドスパーク型の構成

オール金属のスパーク型ではなくコンクリートを用いたハイブリッドスパーク型の構成で、PCとはプレストレストコンクリートである。

まず、100 kWの小規模試験機においては、ベースとして伊是名村(沖縄県)が所有していたSUBARU22/100離島仕様を譲り受けた(図12参照)。

この風車は陸上に設置してあったが、離島用であったため、洋上用として転用できる仕様であった。例えば、塩害に対応した塗装やほぼ内部循環だけの冷却システムを備えていた。浮体式に改造するにあたり、これらに加えてロータ形式をダウンウィンド型とし、ブレードのピッチ制御を浮体傾斜動揺ダンピング対応に改造することが考えられる。

2 MW実証機では、さらに浮体式に対応するため、傾斜対策、水漏れ対策・油漏れ対策、湿度対策などを施しえる(図13参照)。

傾斜対策の具体例としては、昇圧変圧器などに船舶規格での傾斜試験を実施している(図14参照)。水漏れ対策の具体例としては、電気機器収納部を2重壁とし、3気圧防水加工を実施することが考えられる。



図12 | 100 kW小規模試験機

浮体の上に離島用の100 kW風車を改造し搭載した小規模試験機を示す。



図13 | 2 MW実証機

浮体の上にオンショアの2 MW風車を改造して搭載した実証機を示す。

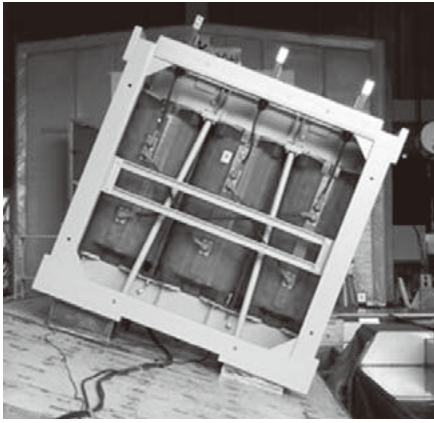


図14 | 昇圧変圧器の傾斜試験

浮体式風車に内蔵するための昇圧変圧器に船舶規定の傾斜試験を実施している。

防水は塩分侵入防止の役割も果たすことができる(図15参照)。さらに、2 MW実証機では独立ピッチ制御を備え、動揺抑制技術を拡張して搭載することが考えられる。

5. おわりに

ここでは、2 MW風車の着床式洋上風車の実績を基に5 MW洋上風車の技術開発状況と福島復興・浮体式ウィンドファーム実証研究事業向け風車、および環境省浮体式洋上風力実証事業向け風車の技術開発状況について述べた。

今後は2つの浮体式洋上風車の運転データを洋上風車設計に反映していくとともに、HTW5.0-126の実証試験を

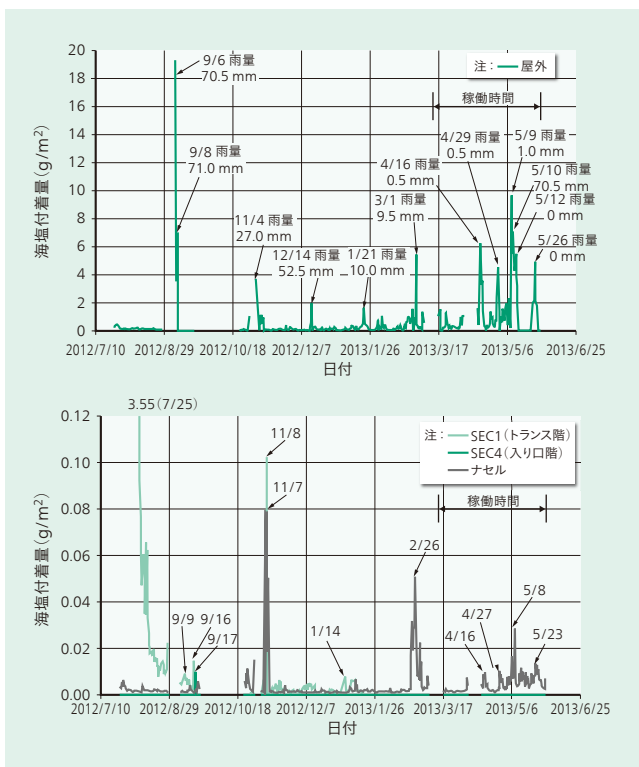


図15 | 塩分の経過グラフ(屋外の100分の1の塩分)

気中塩分を計測する方法は、近年実用化されたばかりであるが、電気室の塩害対策が定量的に評価できた例である。

通して洋上風車の商用化を進め、洋上風力の拡大および地球環境の保全に貢献していきたい。

謝辞

5 MW洋上風力発電機HTW5.0-126の開発においては、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)よりご支援いただき、感謝申し上げます。

福島復興・浮体式ウィンドファーム実証研究事業においてはコンソーシアム各位よりご協力いただいております、お礼申し上げます。

環境省浮体式洋上風力発電実証事業においては受託者グループ各位よりご協力いただいております、お礼申し上げます。

参考文献

- 1) 吉田, 外: 複雑地形における推算精度を向上させる三次元的発電量解析法, 風力エネルギー, Vol.29, No.2, pp.75~83, 日本風力エネルギー協会 (2005)
- 2) 坂本, 外: 大型風力発電システムとスマートグリッド, 日立評論, 93, 8, 550~553 (2011.8)
- 3) 吉田: SUBARU80/2.0 2.0MWダウンウィンド風車の技術開発, JWES/JWEA合同研究発表会 (2011)
- 4) 井上, 外: 洋上ウィンドファーム建設に向けた発電・流通変電システム, 日立評論, 95, 12, 820~823 (2013.12)
- 5) T.Burton, et al.: Wind Energy Handbook, Second Edition, p.663, John Wiley & Sons (2011)
- 6) 石原: 福島沖浮体式洋上ウィンドファーム実証研究の現状と将来展望, 日本風力エネルギー学会誌, Vol.36, No.4, pp.553~556 (2013)
- 7) 平成22年度浮体式洋上風力発電実証事業委託業務成果報告書, 京都大学 (2011)
- 8) 平成23年度浮体式洋上風力発電実証事業委託業務成果報告書, 戸田建設株式会社 (2012)
- 9) 平成24年度浮体式洋上風力発電実証事業委託業務成果報告書, 戸田建設株式会社 (2013)

執筆者紹介



佐伯 満

日立製作所 電力システム社 日立事業所 所属
現在, 風車開発プロジェクトに従事
技術士(電気電子部門)
電気学会会員



飛永 育男

日立製作所 電力システム社 日立事業所 風力発電システム部 所属
現在, 風車の開発業務に従事
日本風力エネルギー学会会員



杉野 淳一

日立製作所 電力システム社 日立事業所 風力発電システム部 所属
現在, 風車の開発業務に従事



白石 崇

日立製作所 電力システム社 日立事業所 風力発電システム部 所属
現在, 風車の開発業務に従事
日本風力エネルギー学会会員