

■特集

三菱重工業の風力発電 —洋上風車への取り組み—

三菱重工業（株）風車事業部 長田 勇、長沼 二巳

1. 世界の風力発電

世界の風力発電は、2008年の金融不安や競合するガス燃料価格の低下により、新設計画の見送りや繰り延べが発生した。この結果、図1に示すように、2010年単年度ベースの導入量は39GWとなり、初めて前年並に留まった。しかしながら、2010年末には全世界の累積では約200GWの大台に乗り、今後も従来と同様に堅実な増加が見込まれている。電気エネルギーに占める風力発電の地位は、ますます確固たるものとなりつつある。

2010年における風力発電市場の特徴として、中国市場と洋上風車市場の伸張が挙げられる。図2に示すように、米国市場の減速の影響もあり、中国国内へ設置された風車の世界全体に占める割合は48%と圧倒的な規模に成長した。また、図3に示すように、中国国内市場の伸張と同調した中国風車メーカーの伸張が著しく、世界のトップ10の内4社（2位、4位、7位、10位）を占めた。今後、中国国内市場の飽和による導入量の伸びの減速が見込まれるため、中国風車メーカーの海外進出がまもなく顕著になると予想される。

今後の世界の風車市場を予想するためには、中国市場及び中国風車メーカーの動向を特に注視していく必要がある。

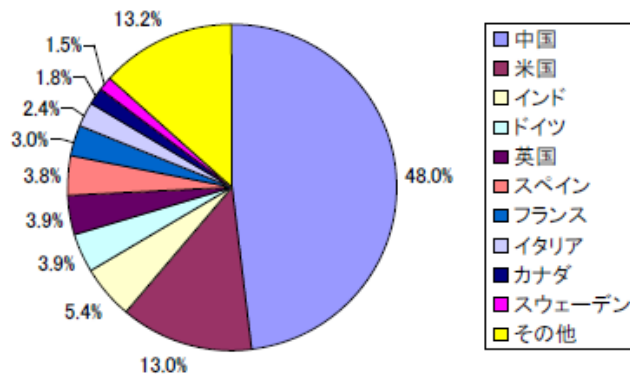


図2 各国の風力発電導入量（2010年）¹⁾

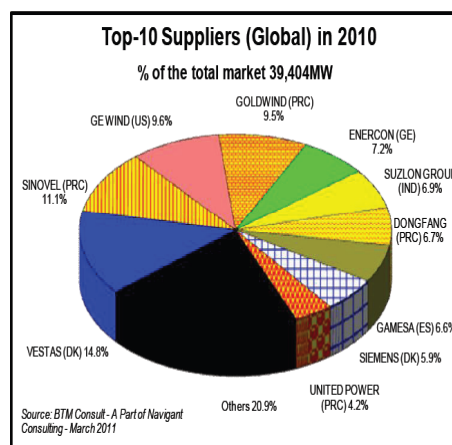


図3 世界の風車メーカートップ10（2010年）¹⁾

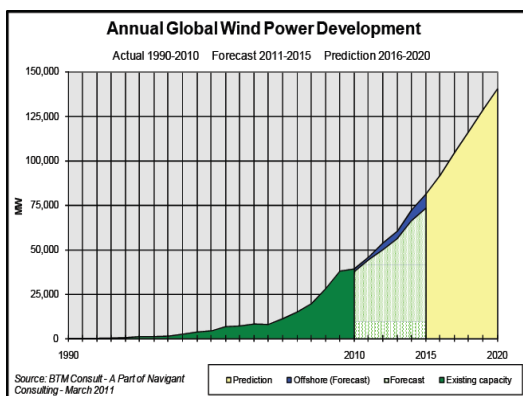


図1 世界の累積導入量と新規導入量（2010年）¹⁾

2. 洋上風車市場

洋上風車の2010年末における累積導入量は3.6GWと風車全体の内1.8%を占めるに過ぎないが、今後の市場の伸びや技術的ハイエンドに位置するため現在最も注目されている分野である。2010年の単年度導入量は、1.4GWと前年比2倍であり、ヨーロッパ風車市場の約13%を占める。洋上ウィンドファームを建設したヨーロッパ4カ国（ベルギー、デンマーク、ドイツ、イギリス）においては、風車導入量全体の37%が洋上風車であった。今後の洋上風車は、図4に示すように2020年には約75GWまで導入が進み、そのうち80%はヨーロッパが占めると予想

本稿は、JWEA 協会誌 (Vol. 35 通巻 97 (2011年)) からの転載したものである。

される。アジアでは中国（10.1GW in 2015）や韓国（2.5GW in 2019）において本格導入が見込まれる。

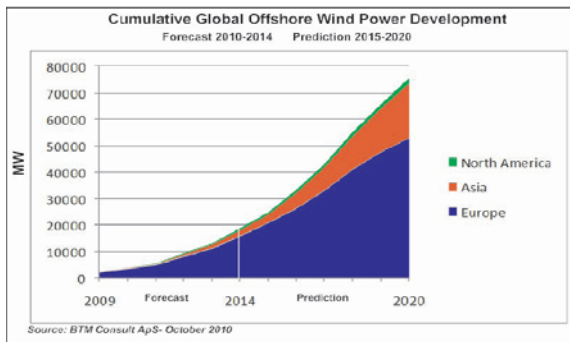


図4 洋上風力発電の導入予想 2)

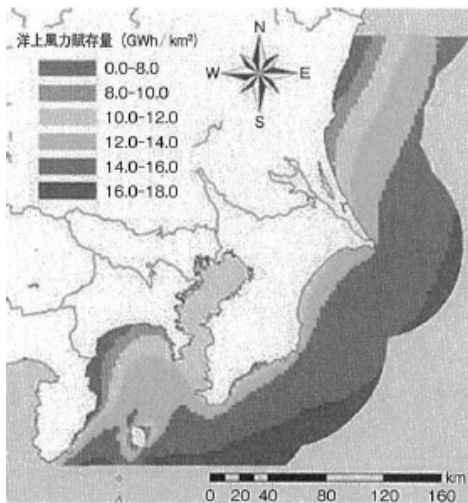


図5 関東沿岸洋上風力賦存量 3)

我が国では、関東地区沿岸 50km を対象とした洋上風力の賦存量が、東京電力の年間発電量とほぼ等しいという試算が示されている。この賦存量は、着床式洋上風車に加えて、浮体式洋上風車の実用化も必要とされるものだが、我が国での風力発電の将来性を示しているといえる。

図6に洋上風車の大型化の状況を示す。2 MW クラスまでは、陸上風車の大型化を取り入れる形で進み、3 MW 以上の大型機は洋上風車としてのニーズから開発・導入が進められている。洋上風車は、基礎や支持構造物の占める割合が大きい為、大型化することで経済性が良くなる。また、風車へのアクセスの制約から、メンテナンスや補修に要する費用割合が非常に高く、信頼性の高が求められる。今後の本格的洋上風力発電の成熟に向かって、より経済的で信頼性の高い風車の開発が必須であり、風車メーカー各社がしのぎを削っている状況である。図6に示す青の折れ線は増速機付き風車を、赤の折れ線はPMSG ダイレクトドライブ式風車を示しており、黄色は浮体式風車の動向を示す。信頼性の観点から PMSG ダイレクトドライブ式風車（増速機レス）が洋上風車としては関心を集めており、ナセルの軽量化に成功した Siemens が先頭をはしり、GE-Wind 他多くの新規参入を目論む風車メーカーがこれに続いている。一方、図中には示されていないが、最近 Vestas は低コスト化と実現性を重視した中速増速機付 7MW 洋上風車の開発を公表しており、増速機付きと増速機レスの両タイプの競合は更に続くと思われる。

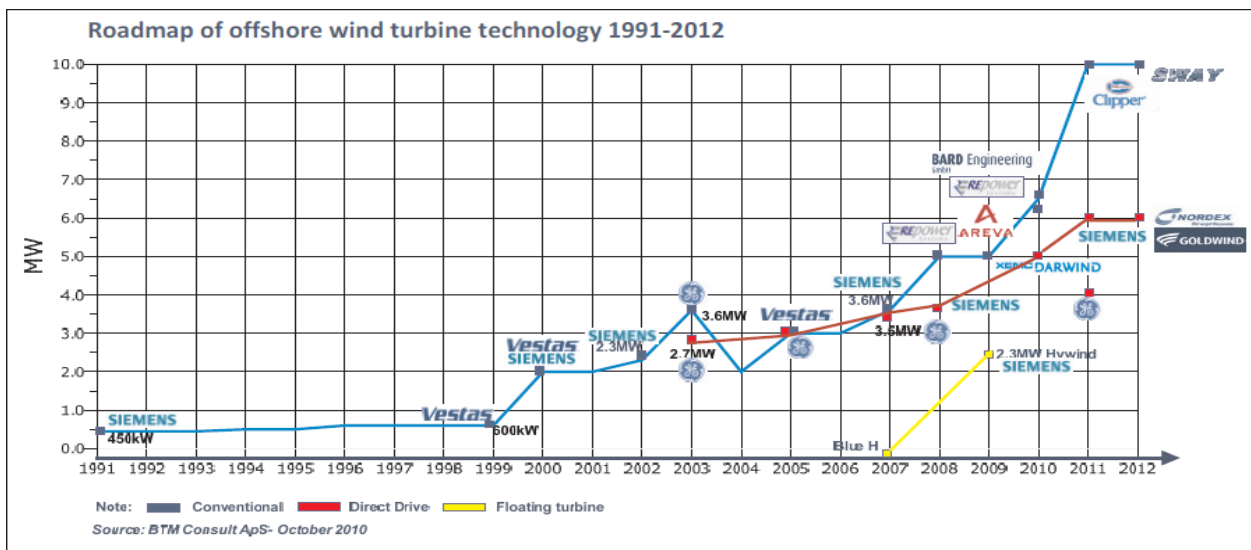


図6 洋上風車の大型化の歩み 2)

3. 三菱の洋上風車への取り組み

三菱重工業は、英国洋上風車 Round 3 への参入を目指して事業体制を強化しており、その取り組みの一旦を紹介する。

(1) 洋上風車の開発概要

洋上風車が必要とする大型化と信頼性向上に対して、技術的課題は多い。三菱重工業は従来の方式に替わり、2010 年末に買収した英アルテミス社の所有する油圧ドライブ技術を使った革新的なドライブトレインを持つ超大型風車の開発を行い、英国洋上プロジェクト Round 3 (2015-2020 年に 32GW) に参入する。油圧ドライブは、油圧ポンプと油圧モータとこれを連結する油圧配管とが基本構成となり、増速機を使用した場合に比べて、軽量化、コンパクト化、メンテナンス性の向上が図れる。

開発は、日本 (長崎) と英国 (エジンバラ)、ドイツ (ハンブルグ) の 3 箇所において、それぞれの地域的特性を生かし、また緊密に連携を取りながら進める。

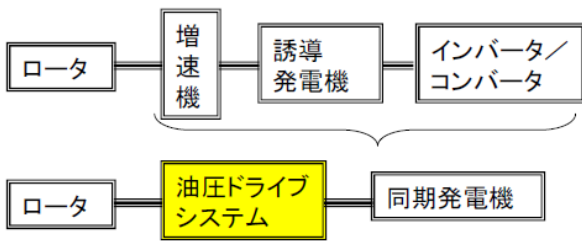


図7 ドライブトレインの比較
(上：従来式、下：油圧式)

(2) タワーのアクティブ制振

風工学で一般的なアクティブ制振制御を、大型風車に適用してタワーに働く主風向方向の荷重を軽減する。風車では、タワー上部にセンサーを設置し、その情報を元に翼のピッチ角をタワー変位が相殺されるように微小制御する。以下にその概要を説明する。⁴⁾

風車は一種の搭状構造物とみなすことができ、頂上部にマスが集中していること、タワーは単純な筒状 (鋼管) であり、内部に桁や梁がないこと、また風の変動に起因した不規則変動荷重とロータの回転に起因した周期的変動荷重が作用することなどが特徴として挙げられる。これらの特徴から風車の振動系を図 8 に示すように単純にモデル化することができる。

図 8 に示すタワー頂上部のマス (翼・ハブ・ナセルの重量) の運動方程式は次の (1) 式とな

る。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f \quad \dots (1)$$

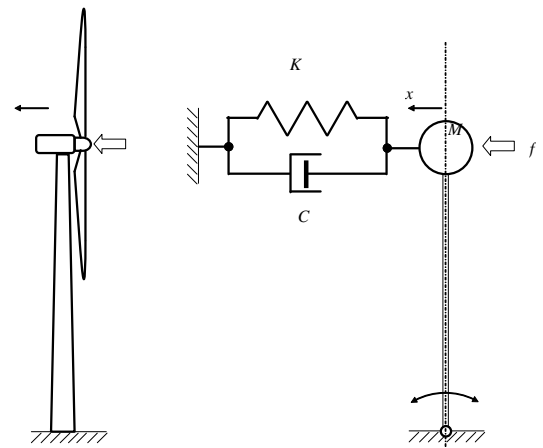


図8 風車タワーの概略モデル

ここで x はタワー頂上部のマスの変位、 M はマスの質量、 C は粘性減衰係数、 K はタワーの曲げ剛性そして f はマスに作用するスラスト力 (風がロータ面を通過する際に生じる力であり、風の変動に応じて不規則に変動する) である。ここで、次の (2) 式のようにマスの移動速度に比例するスラスト力

$$\Delta f = -k_v \dot{x} \quad \dots (2)$$

をマスに与えることができると仮定すると、(1) 式は次の (3) 式ようになる。

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx &= f + \Delta f \\ &= f - k_v \dot{x} \quad \dots (3) \end{aligned}$$

$$M\ddot{x} + (C + k_v)\dot{x} + Kx = f$$

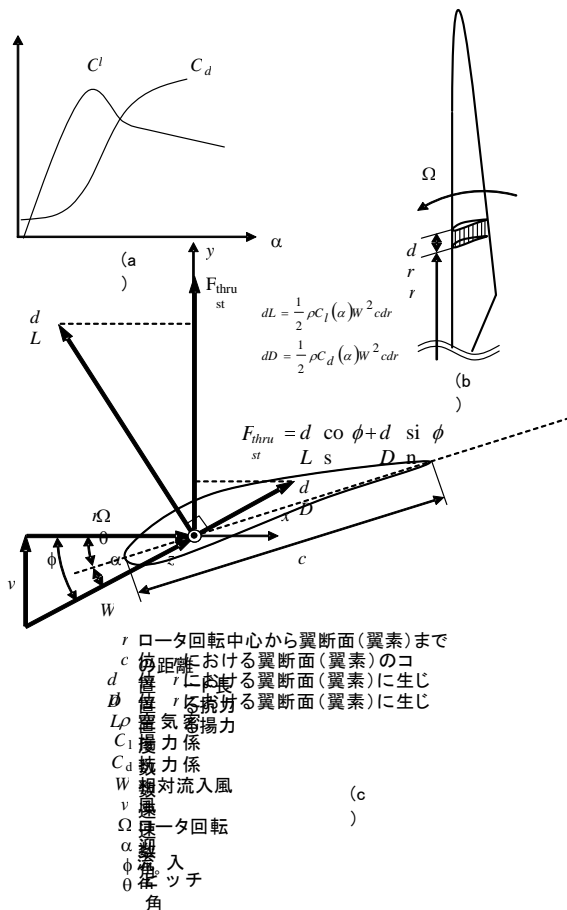
(3) 式から、(2) 式のスラスト力をマスに付加することで見かけ上、粘性減衰係数が k_v だけ増加することがわかる。このようなスラスト力は、図 9 に示すように翼の迎角 (実際の操作量はピッチ角) を調整することで生成・制御することができる。すなわち、図 9 に示すようにスラスト力 F_{th} と翼の迎角 (ピッチ角) の関係を次の (4) 式のように仮定する。

$$F_{th} = F_{th}(\theta, \Omega, v) \quad \dots (4)$$

ここで θ は翼のピッチ角、 Ω はロータの回転速度、そして v は風速である。各パラメータの変化に対するスラスト力の変化は次の (5) 式で表すことができる。

図9 翼の迎角とスラスト力

$$dF_{th} = \left(\frac{\partial F_{th}}{\partial \theta} \right)_{\Omega, v} d\theta + \left(\frac{\partial F_{th}}{\partial \Omega} \right)_{\theta, v} d\Omega + \left(\frac{\partial F_{th}}{\partial v} \right)_{\theta, \Omega} dv \quad \dots (5)$$



上式から $(\partial F_{th} / \partial \theta)$ が大きく変化しない範囲であれば、スラスト力と翼のピッチ角の関係は線形とみなし得る。実際はわずかな (1.0° くらい) 翼ピッチ角の変化でタワー制振に必要なスラスト力が得られるので、(2)式と(5)式から、マスの移動に応じて翼のピッチ角を次の(6)式のように変化させればタワー振動系に減衰を付加することができる。

$$d\theta = -\frac{1}{\left(\frac{\partial F_{th}}{\partial \theta}\right)_{\Omega, v}} k_v \dot{x} \quad \dots \quad (6)$$

減衰を適切な値に調整すれば、特にタワーの固有振動数付近における振動を抑制することができる。これが風車でのタワー制振の原理であり、1 MW 機 MWT-1000A で実証され、2.4 MW 機 MWT92/2.4 で本格的に実用化されて、洋上風車へも適用する予定である。

(3) 風車内塩分濃度計測結果と塩害対策

洋上風車では、ナセルやタワー内の塩分や結露によって電気部品の腐食・短絡や鋼材の錆びなどが発生する。塩分は図 10 に示すように、波浪に伴い海塩粒子として生成され、風に乗って風車へ運ばれる。

洋上風車の設計に先だって、洋上環境に近い沿岸部に建設された横浜市金沢区の 2.4 MW 試験

風車内の塩分濃度を計測し、参考データとした。塩分計測は、東大辻川教授、物質・材料研究機構篠原、東京海洋大元田助教授らが開発した ACM (Atmospheric Corrosion Monitor) センサー⁵⁾を使って行った。センサーの構造は図 11 に示す通りで、Ag-Fe から成るセンサーである。2つの異種金属を互いに絶縁した状態で樹脂中に埋め込み、両者の端部を環境中へ露出させると、溶液中では勿論、大気又は室内環境でも比較的高い湿度条件が出来ると、両金間を水膜が連結するので腐食電流が流れる。この電流は金属の腐食速度に対応するので、センサーとして使える。

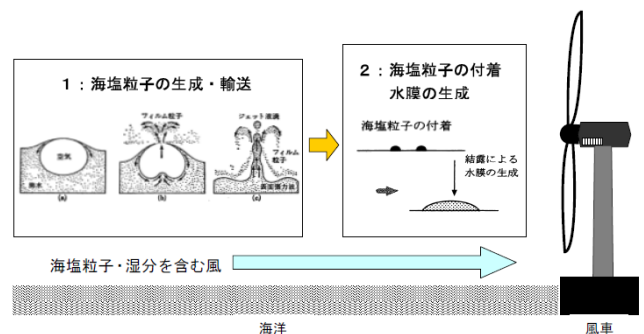


図 10 海塩粒子の生成と風車への到達

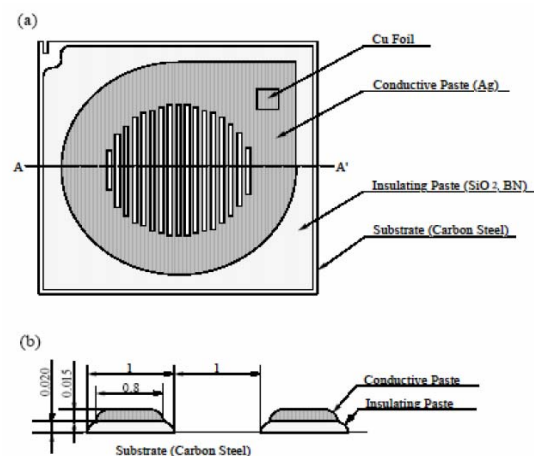


図 11 ACM センサーの構造⁵⁾

計測結果を図 12 に示す。横軸の A~0 は J (風向風速計) を除きナセル内各計測場所を示す。ナセル内では、吸気ルーバ (記号 A)、ルーバ近くの G0 ファン吸気口 (記号 N) では高い塩分濃度 ($800 \sim 200 \text{ mg/m}^2$) を示したが、その他のナセル内では塩分濃度は低い ($10 \sim 20 \text{ mg/m}^2$ 以下) ことが解った。本風車では、塩害に起因するトラブルは発生していないので、洋上風車でも同様なナセル内環境を実現すれば良いと考えられる。国プロ洋上風車実証機では、ナセル吸気

口にはルーバと除塩フィルターを設置し、ナセル内の塩分濃度をモニターする予定である。

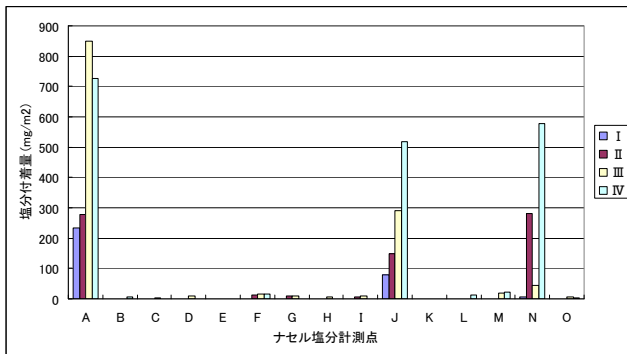


図12 塩分付着量 (ナセル内)
但し、
記号 I : 計測期間 10~12 月
記号 II : 計測期間 1~3 月
記号 III : 計測期間 4~6 月
記号 IV : 計測期間 7~9 月

(4) ブレードエロージョン

洋上風車では騒音の制約が陸上機と比べて緩やかな為、陸上よりもブレードの回転速度を高くして、ブレードを軽量化することが設計上可能である。一方で、ブレードの回転速度を高くすると、雨滴等により前縁のエロージョンが進みやすくなる。洋上風車では、荒天時は海面からの波浪飛沫も多いことから、水滴によるブレードエロージョンを定量的に把握することや、耐エロージョン材の開発が重要となる。これより、ブレード周速とエロージョンの関係を実験的に求めた。

図13に試験装置を示す。供試体を回転ドラムの円周部に取り付け、ドラムの回転速度を変えることで、供試体の周速を変える。水滴は噴霧ノズルから噴射し、ジェット領域より外側に供試体が来るように配置した。液滴径は0.5mmとした。

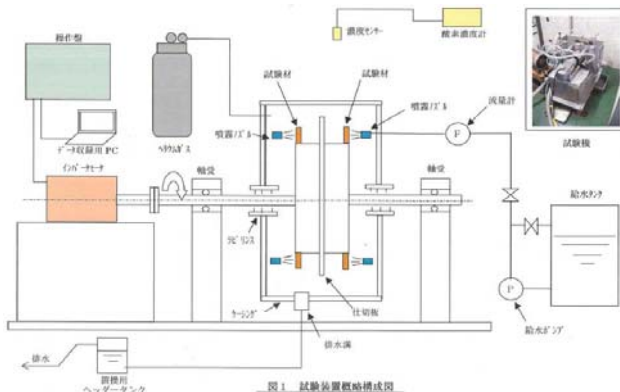


図13 翼エロージョン試験装置

図14にテスト結果の例を示す。本試験によってブレード前縁エロージョンについて周速と暴露時間の相関の定量化が可能となることが示された。国プロ洋上風車実証機では、各種耐エロージョン材の耐久性評価を本試験装置で実施し、成績の良好な材料について実機に装着し、暴露試験を行う予定である。

周速 \ 暴露時間	低速	ベース	高速
短い			
ベース			
長い			

図14 エロージョンテスト結果 (ゲルコート材)

【参考文献】

- (1) World Market Update 2010, BTM ConsultAsP
- (2) Offshore Report 2010, BTM Consult AsP
- (3) 石原、洋上風力発電、日本機械学会誌 2011.4 Vol.114 No.1109
- (4) 若狭強志、井手和成、林 義之、柴田昌明、タワーのアクティブ制振の実機検証、第27回風力エネルギー利用シンポジウム発表論文、2005
<http://www.jfe-tec.co.jp/tech-consul/fushoku16.htm>