

## 風力発電のいま ～風力発電は土木技術がつくる～

東京大学 石原 孟

### 世界と日本の風力発電の現状

2012 年末に世界の風力発電設備容量は前年比 4470 万 kW (19%) 増の 2 億 8250 万 kW に達しており、風力発電機 1 基で約 2000 kW の発電能力があることを考えると、2012 年に新設した風車の数は約 2 万 2350 基になる。一方、2012 年に新設された洋上風力発電所の設備容量は 130 万 kW、その 90% が欧州の洋上に設置されている。欧州の風力発電はいま陸上から洋上に移行していることが分かる。また洋上風力発電の導入拡大のために、欧州風力発電協会は、2020 年までに 4000 万 kW、2030 年までに 1 億 5000 万 kW の洋上風力を開発するという野心的な目標を掲げ、次々と大規模洋上風力発電所が建設されている<sup>(1)</sup>。かつての陸上風力発電のようにいま洋上風力発電の普及が始まっている。

図 1 には 2002 年にデンマークに建設された Horns Rev 洋上風力発電所を示す。2000kW の風車 80 基は水深 6～12m、海岸から 14～20km の地点に建設されている。この洋上風力発電所は世界初の大規模洋上ウインドファームである。2013 年に稼働予定の世界最大級の洋上風力発電所 London Array の設備容量は原子発電所規模の 63 万 kW に達し、今後 100 万 kW に拡張する予定である。



図 1 デンマークの Horns Rev 洋上風力発電所<sup>(1)</sup>

わが国においても風力発電の導入が進んでおり、2011 年度末には設備容量 250 万 kW、総設置基数 1870 基に達した。設備容量を設置基数で割って見ると、1 基当たりの平均設備容量は増加傾向にあり、風車の大型化が進んでいることが分かる。図 2 には

電源開発の郡山布引高原風力発電所を示す。この風力発電所は山岳地帯に建設され、その総出力は 6 万 5980 kW の大規模施設となっている。このように、わが国における風力発電の導入は 1990 年代後半から拡大し、国内における風力発電産業も形成されつつある。

しかし、わが国の地形条件と気象条件は欧州と大きく異なり、山岳地帯における複雑な気流に起因する風力発電量予測精度の低下や台風襲来に伴う風力発電設備の被害も発生している。また風力エネルギーの地域偏在性は、陸上の風力開発の適地不足問題も引き起こしており、わが国における風力発電の更なる導入拡大のためにはこれらの問題解決は不可欠であり、土木技術者の活躍が大いに期待されている。



図 2 郡山布引高原風力発電所 (電源開発提供)

### 風力発電の大型化の歴史

一般に、風は地上より上空の方が強くなるため、風車は高い程、発電量は増加する。さらに発電量は風車ローターの面積に比例するため、ローターを大きくする程、取得エネルギーは増大する。現在、陸上で多く用いられている風車の大きさは、定格出力は 2000kW、タワーの高さは 60～80m、ローターの直径は 80～90m になる。風車ローターの直径は 1985 年の 15m から現在の 126m、定格出力は当時の 50kW から現在の 5000kW に増え、過去 20 数年間に風車ローターの直径は約 10 倍、定格出力は 100 倍に増えている。図 3 には現在世界最大級の 5000kW 風車を示す。風車ローターの直径は 126m、タワーは 100m、風車ブレードの先端の高さは 165m、高層ビ

ルの高さにもなる。写真の右下に写っているのは筆者であり、風車の大きさを容易に想像できる。



図3 世界最大級の5000kW風車

風車の重量がローター直径の3乗に比例するのに対して、取得エネルギーはローター直径の2乗に比例することから、風車のコストは直径の3/2乗に比例して増加する。つまり、単純に風車を大型化するだけでは、風車本体のコストが低下しないことが分かる。風車の大型化によりコストを低減するためには構造の比強度を向上させ重量を低減させることや、風車を制御することにより空力荷重を低減させる等の技術開発が必要である。実際近年風車の大型化は、炭素繊維を使ったブレード重量（風車の翼）の低減やブレードのピッチ制御による空力荷重の低減により実現している。風車の大型化によって、風車を支える支持構造物のコスト、建設費、送電ケーブルコスト、メンテナンス費用を大きく低減することができるため、発電単価を低減させることができる。特に洋上風力発電の場合は、これらのコストは風力発電システムの全体コストに占める割合が70%に達するため、風車の大型化による全体コストの削減を期待し、世界各国は大型風車の開発に鎬を削っている。

### 風力開発における土木技術の役割

風力発電所を建設する際には、風力発電設備の配置計画、土木設備の設計・施工及び風力発電設備の保守・運用が重要である。

風力発電設備の規模や配置を計画する際には、地形に起因する局所的な風況の変化を十分に考慮するため、3次元気流解析技術等を駆使して最適なレイアウト検討を行う必要がある。風力発電量は風速の3乗に比例することから、小さな風速の予測誤差が大きな風力発電量の予測誤差につながる。特にわが国では急峻な地形上における複雑な流れ場にも適用できる非線形風況予測モデルの開発が重要である。

図4には気象学分野の天気予報技術と風工学分野の局所風況予測技術とを融合することにより、任意地点での風速・風向を予測する非線形風況予測モデルの例を示す<sup>(2)</sup>。この例では風観測をすることなしに、風況予測並びに風力発電適地の決定が可能であり、従来の風観測に比べ、所要時間を大幅に短縮できる。また年平均風速の予測誤差は従来モデルの1/3以下、数パーセントに抑えることが可能である。

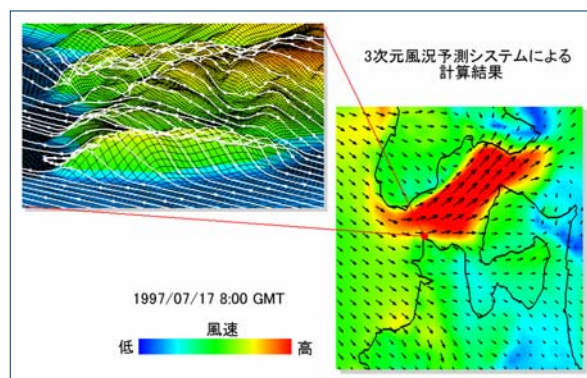


図4 急峻地形上の局所風況予測の例<sup>(2)</sup>

風力発電所はより多く発電するために、風況のよい海岸付近や山頂に設置されることが多い。このような風況のよい場所は台風の時にも風が強く、高い耐風性能が要求される。しかし、近年風力発電設備の増加に伴い、風力発電設備の被害も報告されるようになった。このような状況を鑑み、2004年9月、土木学会に「風力発電設備耐風設計小委員会」が設置され、風車の導入と建設を担当する電力会社、風力発電事業者、建設会社の実務者、風車の製造・販売を行う国内メーカーと代理店の技術者、そして大学・研究機関の研究者からなる委員が3年間の活動を経て、「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」を策定し、2007年末に土木学会から刊行し、さらに2010年末に改定版を刊行した。本指針は、風力発電設備支持物の構造設計方法を具体的に示した国内外で初めての指針であり、その活用により、風力発電設備支持物の安全性と信頼性の向上に大きく貢献した。また本指針は昨年韓国語に翻訳・出版され、今年是中国語にも翻訳・出版される予定である。現在土木学会「洋上風力発電設備構造設計小委員会」では「洋上風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」を策定しており、2013年度に完成し、出版される予定である。

洋上風車の基礎の重さは2000tを超える。昨春秋に完成した銚子沖の洋上風車の基礎は底面の直径が21m、重量が約2300tの三角ラスコのような形状

をしたコンクリート製の構造物である。日本にある最大級の全施回式起重機船は1600tまでしか吊り下げられないため、基礎を半分水没させ、浮力と起重機により吊り下げる工法を採用した。船が安定する一瞬を狙って基礎を降ろさなければならないこの難工事は土木技術者の匠の技によって実現した<sup>3)</sup>。

## 陸上から洋上へ

一般に、洋上の風速は強勢で乱れが小さいことから、風力発電に適している。東京、ニューヨークのような大都市では風が弱い、近隣する洋上の風は強く、膨大な風力エネルギー賦存量がある。また陸上に比べ、洋上では景観や騒音等の環境問題が少ないという利点がある。さらに道路等の制約条件を受けないため、大型風車の運搬・設置が容易である。その他、洋上敷地の制限も少なく、大規模風力発電所を建設でき、風車の大型化とウィンドファームの大規模化によるコスト低減が可能である。さらに大電力消費地の近くでは電力系統が強く、大規模洋上風力発電所の系統連系が容易である。

このことから、欧州においては20年前から洋上風力発電の研究開発が行われてきた。1990年にスウェーデンの洋上に設置された1基の定格出力220kWの風車(Nogersund 洋上風力発電所)が洋上風力発電の始まりと言われている。その後、2000年にデンマークに世界初の本格的な商業洋上ウィンドファーム(Middelgrunden 洋上風力発電所)が建設された。これは、2000kWの風車20基が海岸から2km地点に建設されている。その後、欧州を中心に導入が進み、2012年末に世界で540万kWの洋上風力発電が導入されている。イギリスでは2020年までに1800万kWの洋上風力を開発するというロードマップを発表し、現在世界で最も注目されている洋上風力発電の市場となっている。

一方、わが国では2004年4月に国内初の洋上風力発電所である瀬棚洋上風力発電所が完成し、2台の600kWの風車は海岸から約700m離れた水深13mの瀬棚港内に建設された。また同年山形県酒田市に建設されたサミット風力発電所では、5台の2000kWの風車が水深4mの水路内に設置され、基礎及び風車本体の工事は陸上クレーンにより行われた。さらに2009年に茨城県神栖市に建設された神栖洋上風力発電所が完成し、基礎及び風車本体の工事も陸上クレーンにより行われた。このように、これまでにわが国に建設されている洋上風力発電所の全ては沿

岸洋上風力発電所であり、その構造設計および施工方法は陸上風力発電所に近いと言える。

わが国の洋上風力発電の導入拡大が進まない理由の一つはわが国の気象・海象条件が欧州と異なり、欧州での事例をそのまま適用するにはリスクが大きい。またわが国においては外洋での風車設置とメンテナンスの経験がなく、洋上風力発電設備の安全性、信頼性、経済性に関する様々な課題がある。これらの問題を解決するために、新エネルギー・産業技術総合開発機構は2009年からわが国の外洋における初めての洋上風況観測システムおよび洋上風力発電システムの実証研究を開始し、2012度中には北九州市および銚子市の沖合に風況観測タワーおよび洋上風車の実証設備の建設を完了させる予定である。図5には昨年の秋に銚子沖に建設された観測タワーと洋上風車を示す。



図5 銚子沖に建設された観測タワーと洋上風車<sup>4)</sup>

銚子沖は日本でも有数の波のうねりが厳しい海域であり、また北九州市沖は「台風銀座」と呼ばれるほど、台風の影響を受ける海域である。今回の実証研究で得られるデータやノウハウは、今後の洋上風力発電所の設計や運転に利用できる。また今回の洋上風況観測タワーの100m、観測範囲も200mであり、7000kW級風車のブレードの最高点と同じである。そこから収集されるデータは、大型風車の開発にも役立てることができる。今回の実証研究から、今後日本で洋上風力発電が普及していく上での課題も見えてきた。一つは、海洋利用のためのインフラ整備である。洋上風車の基礎やナセルなどを積み出すためには、港湾設備の整備が必要である。また、建設のための大型起重機船や作業船も必要である。これらのインフラは、浮体式洋上風力発電が実用化する際にも必要である。こうしたインフラの整備は正しく土木技術者の役割である。

## 日本の躍進を期待して

わが国の周辺海域においては水深の深い場所が多いため、浮体式風力発電の導入を早期に実現する必要がある。商業風車を用いた浮体式洋上風力発電は、ノルウェーやポルトガルで実証研究が始まったばかりである。2009年に開始したノルウェーの Hywind プロジェクトでは Siemens 社の 2300kW 風車搭載のスパイ型浮体式洋上風力発電設備を用い、また、2011年に始まったポルトガルの WindFloat プロジェクトでは Vestas 社の 2000kW 風車搭載のセミサブ型の浮体式洋上風力発電設備を用いている。いずれの実証研究でも浮体式洋上風力発電設備 1 基のみの建設であり、将来大規模浮体式洋上ウインドファームを実現するためにはいくつかの技術的な課題が残されている。



図6 7000kW 浮体式洋上風力発電設備の完成予想図<sup>(5)</sup>

2012年初めに、福島県沖合の海域に世界初の浮体式洋上ウインドファームを建設する実証研究が開始された。福島県沖合の実証研究では、世界最大級の7000 kW 風車(図6)を用いることにより、浮体式洋上風力発電の事業性の検証を可能にし、また世界初の25MVAの浮体式洋上変電設備および66kVの大容量ライザーケーブルを開発することにより、浮体式洋上ウインドファームの建設を可能にする。さらに本実証研究では世界初の浮体式洋上観測システムを構築し、浮体の動揺を考慮した気象・海象の観測手法を確立すると共に、浮体式洋上風力発電の性能評価を可能にする。複数タイプの風車と浮体を用いることにより、各種浮体式洋上風力発電システムの特性および制御効果を明らかにし、腐食および疲労に強い高性能鋼材の開発も行う。現在、丸紅、東京大学、三菱商事、三菱重工業、ジャパンマリンユナイテッド、三井造船、新日鉄住金、日立製作所、古河電気工業、清水建設およびみずほ情報総研の11社からなるコンソーシアムは、経済産業省から委託

を受け、福島県ならびに周辺海域の漁業関係者と共に、オールジャパンの体制で実証研究を進めている。

洋上風力発電は自動車産業型の産業構造を持ち、重工、機械、電気、建設、造船、材料等複数の産業に関連し、世界的に見ても経済・雇用効果の極めて大きい産業である。浮体式洋上風力発電は、世界でもまだ新しい技術であるが、重電、造船、素材等、これまでの日本の誇る技術を強みとして、世界で優位に立っていく可能性がある。洋上風力発電分野でいち早く世界トップレベルの技術を確立できれば、今後成長が予想される世界の洋上風力発電市場でも活躍でき、また裾野の広い風力発電設備の導入拡大は国内産業への波及効果も大きい。

環境省の調査によると、わが国における洋上風力の導入可能量は15億7000万kWであり、太陽光、地熱、中小水力に比べ、圧倒的なポテンシャルを誇る。2009年度の全国10電力会社の総電力設備容量が2億397万kWであることを考えると、洋上風力のポテンシャルがいかに高いかが分かる。わが国の再生可能エネルギーの導入拡大を考える上では、洋上風力発電をどこまで活用出来るかが成功のカギとなる。

洋上風力発電を本格導入するためには、風況・波浪の予測、安全性・経済性の高い支持構造物と施工法の開発、環境影響評価・航行安全性・漁業との共存等の社会受容性問題の解決が不可欠である。かつての大型水力の開発のように、わが国における風力開発には土木が果たすべく役割が大きい。これまでの長大橋や海洋土木で培った高い技術力とノウハウを活かし、洋上風力発電の導入拡大や海洋再生エネルギーの利用に先導的な役割を果たすことを期待したい。

## 参考文献

- (1) EWEA : Oceans of Opportunity, <http://www.ewea.org/>
- (2) 石原孟: 非線形風況予測モデル MASCOT の開発とその実用化, 日本流体力学会誌, 第22巻, 第2号, pp.387-396, 2003.
- (3) 新エネルギー・産業技術総合開発機: 大海原の風をとらえる, ~未来を拓く洋上風力発電プロジェクト~, Focus NEDO, 第47号, 2012.
- (4) 石原孟: 着床式洋上風力発電実証研究の現状と今後の展望, 日本風力エネルギー学会誌, Vol.36, No.2, pp.215-223, 2012.
- (5) 石原孟: 福島沖浮体式洋上ウインドファーム実証研究, 日本風力発電協会誌, 第8号, pp.8-12, 2012.