



# 洋上風力発電実用化に向けた これまでの取組

石原 孟

東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 教授

## 世界と日本の風力発電の現状

2016年末に世界の風力発電設備容量は前年比5400万kW増の4億8680万kWに達しており、風力発電機1基で約2000kWの発電能力があることを考えると、2016年に新設した風車の数は約2万4340基になる<sup>(1)</sup>。一方、2016年に世界の洋上風力発電設備容量は前年比222万kW増の1438万kWに達し、その約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始めている<sup>(1)</sup>。欧州風力発電協会の報告によると、2020年代の前半に欧州における洋上風力発電の年間投資額が陸上風力発電投資額を超える見通しである。

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風力発電所である。2013年に運開した世界最大級の洋上風力発電所London Arrayの設備容量は63万kWに達している。

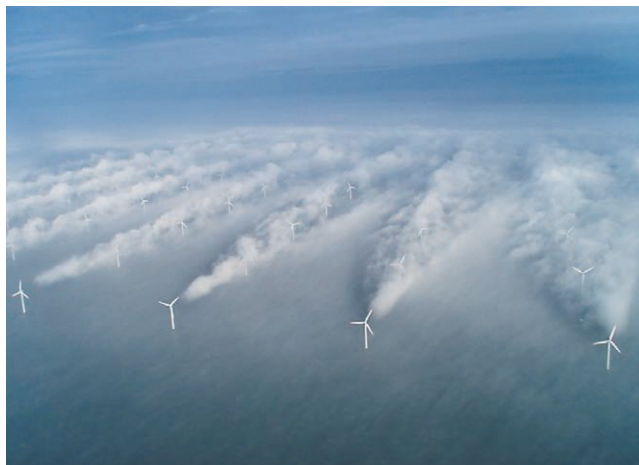


図1 デンマークのHorns Rev洋上風力発電所<sup>(2)</sup>

洋上風力発電所大規模化の要因の一つは、コスト面からの要請である。近年欧州の大規模洋上風力発電は入札が主流であり、採算性を上げるためには規模の効果が重要である。2016年6月にデンマークの風力発電最大手Dong Energyが72.2ユーロ/MWh (8.1円/kWh) でオランダのBorssele洋上風力発電所 (70万kW) を落札した<sup>(3)</sup>。また同年11月にスウェーデンの電力会社Vattenfallがバルト海上に建設するKriegers Flak洋上風力発電所 (60万kW) を49.9ユーロ/MWh (5.7円/kWh) で落札した<sup>(4)</sup>。さらにデンマークの風力発電最大手のDong Energyは2017年4月にドイツ政府の入札で0ユーロ/MWh (市場価格との差額の補助) で落札し、政府からの補助金を得なくても、売電だけで事業が成り立つ世界初の洋上風力発電所となる<sup>(5)</sup>。いま洋上風力発電は他の電源と比較しても価格競争力のある電源となっている。

わが国においても風力発電の導入が進んでおり、2016年度末の設備容量は338万kW、総設置基数2203基に達した。1基当たりの平均設備容量も毎年増加しており、風車の大型化が進んでいる。最近完成した新青山高原風力発電所の総出力は8万kW、国内最大規模の施設となっている。一方、わが国の洋上風力発電所は2004年4月1日に建設された瀬棚洋上風力発電所が初めてである。この洋上風力発電所は600kWの風車2基が海岸から約700m離れた水深13mの瀬棚港内に建設されている。また同年山形県酒田市にサミット風力発電所が建設され、2000kWの風車5基が水深4mの水路内に設置された。さらに2009年及び2012年に茨城県神栖市にウィンド・パワーかみす第1と第2洋上風力発電所 (図2) が建設され、2000kWの風車15基が堤防から40-50m沖に建設されている。このように、わが国に建設されている洋上風力発電所は欧州に比べ、その規模が小さく、海岸までの距離も短い。今後本格的な洋上風力発電所を建設するために、洋上風力発電所の計画、設計、施工、維持管理に関する様々な研究開発を行う必要がある。

図2 ウィンド・パワーかみす第2洋上風力発電所<sup>(6)</sup>

## 風力発電の大型化の歴史

風力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170m、定格出力は当時の50kWから現在の9500kWに増え、過去30数年間に風車ローターの直径は約11倍、定格出力は190倍に増えている。図3には現在世界最大級の7000kW風車を示す。風車ローターの直径は167m、タワーは105m、風車ブレードの先端の高さは189m、高層ビルの高さにもなる。

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、送電ケーブルのコスト、メンテナンス費用

図3 世界最大級の7000kW洋上風車<sup>(7)</sup>

を大きく低減できるため、発電単価を低減させる効果が期待できる。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が期待されている。前述したBorssele洋上風力発電所の採算達成には8MW風車が必須であり、ドイツの洋上風力発電所では出力13～15MWの風車が必要となる。

## 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。また大都市では風が弱いが、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。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、欧州においては約30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、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、2016年末に世界で1438万kWの洋上風力発電が導入されている。欧州では2020年までに2350万kW、2030年までに6650万kWの洋上風力を開発するというロードマップが発表され、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。

洋上風力発電建設の動きは、欧州ではなくアジアでも始まっている。アジアにおいて最も進んでいるのは台湾である。台湾政府は2030年までに400万kW洋上風力を開発する計画を発表している。この計画は国際的にも高く評価され、2兆円を見込んでいた投資に対して、合計1.8兆台湾ドル(約6兆7000億円)の投資申請が来ている。台湾と中国本土の間にある台湾海峡は、世界的に見ても風の強い海域であり、年平均風速は10m/sに達している。

一方、わが国では洋上風力発電の導入促進のために、2013年に洋上風力発電の固定価格の買取区分が新設された。また2016年7月1日に施行する改正港湾法で、港湾への洋上風力



発電施設の導入円滑化を後押ししている。認定した事業は20年間で可能になる。全国の港湾で商業ベースの着床式洋上風力発電の導入計画が始まっている。

## 洋上風力発電の研究開発

これまでにわが国の洋上風力発電等技術研究開発は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) を中心に行われてきた<sup>(8)</sup>。表1にはNEDOで行われている洋上風力発電等技術研究開発の一覧を示す。2009年から実施してきたわが国初の外洋における洋上風況観測システムおよび洋上風力発電システム実証研究で大きな成果が得られている。図4には2013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。本実証研究では、銚子沖の波浪の厳しい海域と、北九州市沖の台風の影響を強く受ける海域において洋上風況観測タワーおよび基礎部の設計・施工技術を開発するとともに、稼動後は洋上風況観測タワーの運転保守や観測データ解析手法等の研究開発も実施した。本実証研究の技術内容に関する詳細情報については文献9を参照されたい。



図4 銚子沖国内初外洋上の洋上風力発電所

本実証研究で得られた成果や知識を広く共有するため、国内外の学会、一般向けセミナー、展示会等様々な場で発表を行ってきた。またIEC (国際電気標準会議) などの国際標準に提案した。本実証研究の成果や知識を広く発信することにより、我が国の洋上風力発電技術のさらなる発展や国際競争力の向上に貢献することを期待している。本実証研究に関する詳細な情報および得られた成果は、新エネルギー・産業技術総合開発機構のホームページに掲載している<sup>(8)</sup>。

2011年度からは、洋上ウィンドファームフィージビリティスタディーも開始し、今後の大量導入が期待される国内洋上

ウィンドファームにおける事業性及び実現可能性を評価すると共に、洋上ウィンドファームの開発における様々な課題を検討してきた。さらにわが国の周辺海域においては急峻な海底地形が多く、着床式風力発電のみならず浮体式風力発電の導入を早期に実現する必要がある。2011年度には様々な浮体式洋上風力発電の形式を体系的に整理し、技術的な課題等を取りまとめると共に、2014年度から浮体式洋上風力発電実証研究が開始した。

最近では、洋上風況マップの研究開発を行い、高精度のシミュレーションから得られる風況情報に加え、水深、海底地質等の自然環境情報、港湾区域、航路等の社会環境情報など、洋上風力発電を計画する上で必要な種々の情報を一元化したマップを作成・公開し、洋上風力発電の事業化を検討する際の有効なツールとして期待されている。さらに、日本で開発された風力発電技術を国際展開するために、日本型洋上風車の台湾における実証前調査事業も開始された。

表1 NEDOの洋上風力発電等技術研究開発の一覧

年度	研究開発テーマ
2006	洋上風力発電導入のための洋上風況精査に係わる調査
2006	洋上風力発電導入のための技術的課題に関する調査
2007	洋上風力発電FS調査に係わる先行調査
2008	洋上風力発電実証研究F/S評価
2009	洋上風況観測システム実証研究
2010	洋上風力発電システム実証研究
2011	超大型風力発電システム技術研究開発
2011	洋上ウィンドファーム・フィージビリティスタディー
2011	浮体式洋上風力発電FS調査
2013	地域共存型洋上ウィンドファーム基礎調査
2013	着床式洋上ウィンドファーム開発支援事業
2013	洋上風況観測技術研究開発
2014	次世代浮体式洋上風力発電システムの実証
2015	洋上風況マップ
2016	日本型洋上風車の台湾における実証前調査事業
2017	低コスト施工技術調査研究

## 浮体式洋上風力発電への期待

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8年前から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ィ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。

そこで、東日本大震災で甚大な被害を受けた福島県の復興のために、2012年に経済産業省による福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業が開始された<sup>(10)</sup>。福島県沖合20kmに浮体式サブステーション(変電所)及び出力2MW、5MW、7MWの浮体式洋上風力発電設備3基で構成される実証施設が設置された(図5)。2013年にサブステーション及び2MW浮体式洋上風力発電設備、2015年に7MW浮体式洋上風力発電設備、2016年9月に5MW浮体式洋上風力発電設備を設置して全施設が完成した。浮体式洋上ウィンドファームの実証研究は世界初の取り組みである。また、浮体式の洋上サブステーションの開発も世界初である。

福島県沖合の実証研究では、世界最大級の7000kW風車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、浮体式洋上ウィ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10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、実証研究を実施している。



図5 福島沖世界初の浮体式洋上ウィンドファーム<sup>(7)</sup>

このように、わが国は浮体式洋上風力発電において先進的な取り組みを推進し、世界に先駆けて浮体式洋上ウィンドファームの技術を開発した。これらの浮体式洋上風力発電の技術は世界的に発展可能な技術であり、浅海域が少ないわが国においては特に重要な技術である。現在、欧州でも浮体式洋上ウィンドファーム建設の計画が進み始めている。一方、わが国においても世界のトップランナーとしての位置を維持するため、コスト低減のための更なる技術開発を始めている。速い潮流や台風襲来等、世界で最も厳しい我が国の海洋環境においても低コストで設備製作、施工、維持管理に関する技術を確立できれば、競争力の高い洋上風力発電産業として海外へ展開していくことも可能になる。浮体式洋上風力発電に係る様々な分野の技術力を結集し、これまでの先駆的な取り組みにより蓄積した技術を着実に発展させることが大切である。

これまでの実証研究から多くの知見が得られたが、わが国の洋上風力発電はまだ緒に就いたばかりである。今後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。これまで海洋土木で培った高い技術力とノウハウを活かし、わが国の洋上風力発電の導入拡大並びに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) GWEC : GLOBAL WIND STATISTICS 2016, <http://www.gwec.net/>
- (2) EWEA : Oceans of Opportunity, 2009, <http://www.ewea.org/>
- (3) Recharge: Field open for 8MW giants as Dong mulls Borssele options, 2016
- (4) WINDPOWER OFFSHORE : Vattenfall wins Kriegers Flak with €49.9/MWh bid, 2016
- (5) offshoreWIND.biz : DONG Secures German Offshore Wind Trifecta, Places Two Zero Bids, 2017
- (6) ウィンド・パワーかみす 第2洋上風力発電所, <http://www.komatsuzaki.co.jp/windpower/kamisu2.php>
- (7) 福島洋上風力コンソーシアムホームページ : <http://www.fukushima-forward.jp/>
- (8) 新エネルギー・産業技術総合開発機ホームページ : <http://www.nedo.go.jp/fuusha/index.html>
- (9) 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.
- (10) 石原孟 : わが国の洋上風力発電実証研究の全体像, 日本風力エネルギー学会誌, Vol.37, No.2, pp.134-136, 2013.