

洋上風力発電の最新技術と将来展望

東京大学 石原 孟

1. はじめに

2010 年末に世界の風力発電設備容量は 1 億 9439 万 kW¹⁾に達している。いま世界での風力発電への新規投資は、全発電設備への新規投資の 5 分の 1 を占め、5 兆円産業となっている。日本においても風力発電の導入は進んでおり、2011 年初めに風力発電の設備容量は 230 万 kW に達し、風車設置数も 1742 基を超えている。一方、陸上の平野部においては風力発電の適地が減少し、山岳部ではアクセス道路整備などのコスト負担が増加していることから、今後風力発電の導入拡大には長い海岸線を生かした洋上風力発電の導入が期待されている。

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の建設を始めている。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²⁾。

本稿では、洋上風力発電の現状を紹介すると共に、洋上風力発電設備支持物の構造形式、洋上風力発電の技術開発、洋上風力発電の将来展望、今後期待される政策について概説する。

2. 洋上風力発電の現状

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。また敷地の制限も少なく、大規模風力発電所を建設でき、陸上に比べ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。

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。また 1991 年にデンマークに建設された Vindeby 洋上風力発電所 (定格出力 450kW の風車 11 基) は世界初の洋上ウインドファームである。図 1 には 2000 年にデンマークに建設された世界初の本格的な商業洋上ウインドファーム (Middelgrunden 洋上風力発電所) を示す³⁾。2000kW の風車 20 基が海岸から 2km 地点に建設され、世界一美しい洋上風力発電所と言われている。その 2 年後の 2002 年には Horns Rev 洋上風力発電所がデンマークに建設され、2000kW の風車 80 基が海岸から 14~20km の地点に設置された。こ

れは世界初の本格的な大規模洋上ウインドファームである。



図 1 世界初の商業洋上ウインドファーム

2010 年に欧州における洋上風力発電の設備容量は 296 万 kW に達し、51%の年成長率を記録した。現在建設中の洋上風力発電は 300 万 kW、また計画中の洋上風力発電は 1900 万 kW に上る。現在建設中の世界最大級の洋上風力発電所 London Array の設備容量は 68 万 kW に達している。

このように欧州における洋上風力発電所の規模の増大とともに、風車のサイズと定格出力も大きくなっている。過去 20 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。現在最大級風車の定格出力は 5000kW、直径は 126m に達する³⁾ (図 2)。風車の大型化に伴い、風車ローターに流入する風速が大きくなり、より多くの風力エネルギーが得られるとともに、風車に作用する風荷重も大きくなり、それを低減するための空力制御やアクティブ制御に関する研究も盛んに行われている。



図 2 世界最大級の 5MW 風車

一方、わが国では2004年4月1日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、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、2000kWの風車5基が水深4mの水路内に設置された。さらに2009年に茨城県神栖市に建設された神栖洋上風力発電所(図3)では、2000kWの風車7基が堤防から40-50m沖に建設されている。



図3 神栖洋上風力発電所

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。今後本格的な洋上風力発電所の建設に向けて、洋上風力発電設備支持物の特徴、構造設計および運搬施工方法について検討する必要がある。

3. 洋上風力発電設備支持物の構造形式

陸上風力発電に比べ、洋上風力発電では建設費における支持構造物の割合が高く、海底地盤、水深、自然環境条件によって費用対効果の高い構造形式を考える必要がある。図4には着床式洋上風力発電設備支持物の構造形式を示し、図中の1~5はそれぞれモノパイル、重力式、ジャケット、トリポッド、トリパイルを示す⁴⁾。

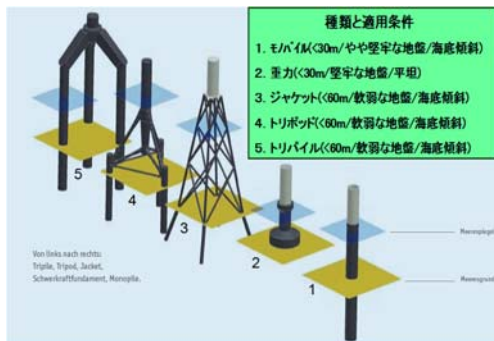


図4 着床式洋上風力発電設備支持物の構造形式⁴⁾

モノパイルは、構造的にシンプルであり、設計・施工上の問題は少ないが、大型風車および大水深に適用できない。また海底工事がなくコストが安価な反面、大径のパイルを打つための大型油圧ハンマや大型作業

船等が必要である。これまでに国内においては神栖洋上風力発電所がモノパイル支持構造を採用したが、その施工は陸上クレーンにより行われている。

重力式は、海底地盤が比較的良好な場所に適する構造であり、軟弱地盤には適せず、海底面の平坦度を確認するために詳細な海底調査およびマウンドの製作が必要であり、また製作のための陸上ヤードおよび設置のための大型運搬船が必要である。

ジャケットはモノパイルに比べ剛な構造であり、地盤からの影響および波浪等の外力を受けにくく、また鋼管杭で支持する構造形式のため、水深が深く軟弱な地盤条件においてその優位性を発揮する。石油ガスプラットフォーム等で多くの実績を有するが、構造が複雑であり、施工に特殊技術が必要である。

以上から分かるように、洋上風力発電設備支持物はモノパイル、重力式、ジャケットの3つの基本形式があり、他の構造形式はこの3つの基本形式の発展形またはハイブリッドと言える。例えば、PC重力式は従来のRC重力式の発展形であり、またトリパイルとドルフィンとはモノパイルの発展形である。トリパイルは3本のパイルを使用し、ドルフィンとは4本または8本のパイルを採用している。一方、トリポッドは、モノパイルとジャケットのハイブリッドであり、またハイブリッド重力式はジャケットと重力式のハイブリッドである。表1には各種支持物の構造形式の分類を示す。

表1 洋上風力発電設備支持物の構造形式の分類

基本形	モノパイル	重力式	ジャケット
発展形	トリパイル ドルフィン	PC 重力式	小型ジャケット
	トリポッド ハイブリッド重力式		

図5には洋上風力発電設備支持物コストの水深による変化を示す⁴⁾。モノパイルおよび重力式は水深30m以下、ジャケット、トリポッドおよびトリパイルは30mから60mの範囲に適用できる。水深60m以上になると、着床式のコストが高くなり、浮体式が優位になる。

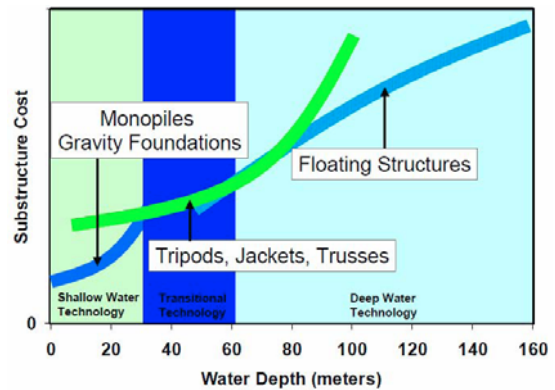


図5 支持物コストの水深による変化⁴⁾

4. 洋上風力発電の技術開発

日本では、欧州と異なり、海底地盤条件と水深変化

産業と環境, pp.35-41, 2011.6

が複雑な上、暴風、高波浪、地震等の自然環境条件が大変厳しい。例えば、日本は混合気候であるため、台風と台風以外の気象現象に起因する風に分けて成因別極値風速を評価する必要があり、北海道を除き、殆どの地域の年最大風速の50年再現期待値は、台風によって規定されている。また陸上に設置される風力発電設備に比べ、洋上に設置される風力発電設備は暴風と波浪の作用を同時に受ける。風荷重と波荷重の最大値から単純和により求めた暴風波浪時の最大値は、暴風と波浪が同時に作用した時に求めた最大値より大きく、風荷重と波荷重の組み合わせを考えると、風荷重と波荷重の相関を考慮することにより、最大荷重を低減させることが可能であることが分かる⁵⁾。さらに洋上風力発電所建設の際に用いる施工方法はプロジェクトの成否を左右する。欧州で実施された実証研究では、天候の影響で実証機が予定通りに設置出来なかったことが起きている。わが国の外洋においてもうねりが卓越するため、設備の運搬・施工の稼働率の向上および海上での作業時間の短縮が重要な研究課題となっている。設計・運搬・施工の問題を総合的に解決するため、近年洋上風力発電システムの統合設計の試みが行われた。



図6 BARD 5M 風車とトリパイル支持構造物

例えば、Bard Engineering 社の場合⁶⁾には、風車、支持構造物、施工に関する統合設計を行い、自社開発した5MW風車とトリパイル支持構造物を合わせて、自社製の風車据付用船 WINDLIFT-I を用いて施工する。WINDLIFT-I の許容吊上げ荷重は500tonであるため、風車ナセル、パイル、トランジションピース等の部品の重量は全て500ton以下に抑えている。風車と支持構造物はそれぞれドイツのCuxhavenとEmdenの港で製造するとともに、港から出荷されてから水深40m、離岸距離87kmの洋上にそれぞれ48時間で据付することが可能である。

以上のように、わが国の気象・海象条件は欧州と異なることから、欧州での事例をそのまま適用することはリスクが大きい。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。さらに環境・景観などの社会的制約も不明確である。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（以下 NEDO という）は2006年から洋上風力発電等技術研究開発を開始した。

表2 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	洋上ウインドファーム・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

表2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NEDOは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実証研究を開始した。この研究では、わが国の外洋における気象・海象などの自然環境条件を解明し、暴風・波浪・地震等の外力を受ける時の洋上風力発電システムの挙動を明らかにするとともに、わが国の自然環境条件に適した洋上風力発電システムおよびその施工方法を確立することを目指している。

本実証研究から得られた成果は5MW以上の大型洋上風車とその支持構造物の開発、洋上風力発電システム設計に関する国際基準の作成に活用される。また2011年度からは、洋上ウイ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イ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、洋上ウインドファームの開発における様々な課題を検討する。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あり、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年度には現在検討されている様々な浮体式洋上風力発電について、体系的に整理し、それらの特徴や技術的な課題等を取りまとめると共に、実証研究の実施項目と実現可能性を評価する。

5. 洋上風力発電の将来展望

NEDOの調査によると、風速7m/s以上、離岸距離30km、水深200mまでの洋上風力発電の賦存量は、約12億kWに達し、水深50-200mの範囲の賦存量は水深50mまでの賦存量の4倍以上である⁷⁾。着床式洋上風力発電の適応限界水深と考えられる50mまでの賦存量は約2億1000万kWであると試算されている。設置可能海域内の5%が利用可能とした場合には約1000万kWの設備容量が確保できる。さらに浮体式洋上風力発電が実用化されれば、水深200mまで設置可能海域

となり、利用可能率を4%とすると4800万kWの設備容量が確保されることになる。洋上風力発電所の設備利用率と原子力発電所の稼働率をそれぞれ30%と80%と仮定した場合には、4800万kWの洋上風力発電設備は、100万kWの原子力発電所18基分に相当する。

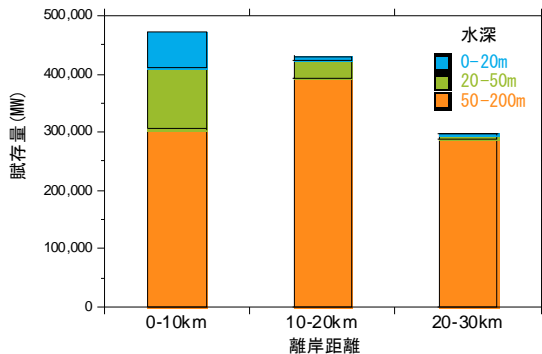


図7 日本沿岸における洋上風力賦存量

図7には日本沿岸における洋上風力賦存量を示す。この図から、海岸から離れるにつれ、水深50m以下の海域が急速に減少しており、より深い水深の海域に建設が可能な浮体式基礎構造を用いる必要があることが分かる。浮体式基礎構造に関する研究開発はすでいくつかの研究機関で行われ、セミサブ型、スパーブイ型、TLP型の浮体構造が提案され、実用化に向けた研究開発が進められている。図8には浮体式洋上風力発電システムの完成予想図⁸⁾を示す。



図8 浮体式洋上風力発電システムの完成予想図

洋上風力発電の可能性について世界中の多くの国が注目している。日本と同じ海洋国家であるイギリスでは2010年に世界最大の設備容量を誇るThanet洋上風力発電所が稼働し、洋上風力発電の設備容量も134万kWに達した。2007年にイギリス政府は2020年までに3300万kWの洋上風力を開発するという野心的な目標を発表した。事業規模は約13兆円に上る。この計画では2020年までに7000基以上の洋上風車を設置し、英国の全消費電力の3分の1を賄う。イギリスの洋上風力開発は、「ラウンド1」、「ラウンド2」、「ラウンド3」の3段階に分けて進められている。ラウンド1では開発海域は海岸線に比較的近くかつ水深の浅い場所が選ばれているが、ラウンド3は海岸線から離れ、より水深の深い場所へ移動している。ラウンド3の最も遠い

区域は海岸線から195km、最も深い区域は平均水深50mとなっている。これまでの洋上風力発電プロジェクトに比べ、ラウンド3は大きなチャレンジと言える。

英国では、洋上風力発電設備を設置する大陸棚の所有権は王室にあるため、その利用に当たって、英国国王の不動産・海域の資産管理を行う政府系特殊法人のクラウン・エステート(The Crown Estate)社⁹⁾の許可が必要である。つまり、北海の海底油田の鉱区と同じように、風力発電事業者が区域のリース料を支払って、洋上風力発電事業を行うこととなる。最初の入札が約10年前の2001年4月に行われ、18区域の開発を決定し、現在North Hoyleをはじめ10区域が完成している。その後、2003年にラウンド2の入札が行われ、15区域の開発が決定された。ラウンド2の計画は合計710万kWの設備容量を誇り、既に14の区域において発電と送電が始まっている。そして2010年1月にラウンド3の開発事業者が入札で決まった。9区域の合計設備容量は3200万kWに達している。

ラウンド1から3までの開発が計画通りにすべて実行された場合には、イギリスにおける洋上発電の設備容量は4060万kWに達する。さらにスコットランド政府が計画する640万kWを合わせると合計4700万kWとなる。今イギリスは世界中の風力発電企業の研究施設や製造拠点を集積し、風力発電事業を国の一大産業として発展させると共に、世界の洋上風力発電市場を牽引する国となっている。

一方、アメリカでは2011年2月7日に内務省とエネルギー省が共同で「洋上風力促進計画」(Offshore Wind Initiatives)と「国家洋上風力戦略」(National Offshore Wind Strategy)を発表した¹⁰⁾。この計画はアメリカ史上初の洋上風力に関する省庁横断的な計画であり、アメリカにおける雇用創出、クリーンエネルギー未来の構築および21世紀技術分野での圧倒的な競争力の確立を目的としている。エネルギー省DOE(Department of Energy)は国家洋上風力戦略に基づき、2030年までに5400万kWの洋上風力発電を導入し、1520万世帯に電力を供給する。また内務省DOI(Department of Interior)は中部大西洋の沖合にある4つの「風力エネルギー開発海域」(Wind Energy Areas)を指定すると共に、指定された海域で共同の環境調査の実施、大規模開発計画の立案および承認手続きの迅速化により、アメリカにおける洋上風力産業の育成と洋上風力発電の開発を促進する。開発海域は、大西洋、太平洋およびメキシコ湾岸など、連邦や州が所有権を持つ沖合海域の開発も含まれる。図9には中部大西洋沖合に指定された4つの「風力エネルギー開発海域」を示す。海域面積の合計は3124km²、東京都の面積の1.4倍に達する。

内務省海洋エネルギー管理・規制・執行局(Bureau of Ocean Energy Management, Regulation and Enforcement)は、2011年末か2012年初めに中部大西洋のこれらの海域をリースする予定である。また開発海域毎の包括的な環境影響評価を実施するために、風力発電事業者と連携し、積極的かつ確実に環境影響評価を実施する

産業と環境, pp.35-41, 2011.6

予定である。今回の計画は、オバマ政権における海洋再生可能エネルギー開発促進政策の一環であり、州・地方当局・連邦政府との協力関係の向上、新しい風力発電技術と試験設備の開発、洋上風力開発のための優先海域の決定と早期の環境影響評価の実施を目指している。

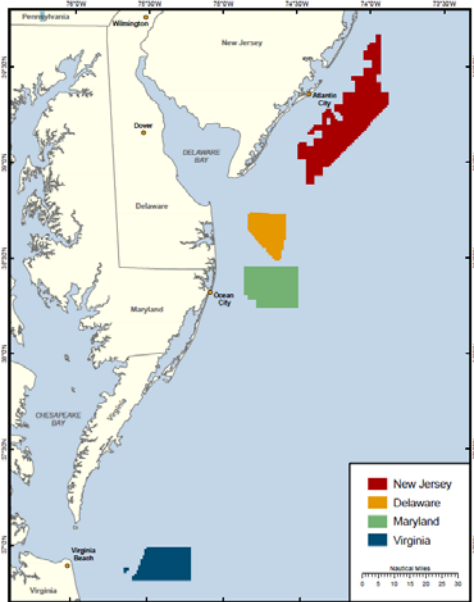


図9 中部大西洋沖合の風力エネルギー開発海域¹⁰⁾

6. 今後期待される政策

洋上風力発電を普及させていくために、研究開発の他に、政策は重要である。

風力発電を普及させるために最も有効な政策は固定価格買取制度であり、ここ数年で多くの国で導入されている。2010年までに少なくとも50カ国に導入されているが、その半分以上が2005年以後に実施されたものである¹¹⁾。固定価格買取制度の成功例としてドイツ、スペイン、中国等が挙げられる。中国に固定価格買取制度が導入されたのは2005年であり、その僅か5年後の2010年に中国は世界一の風力大国となった。2005年以前は中国の風力発電設備容量は日本と殆ど同じであったが、2010年には中国の風力発電設備容量は4229万kWとなり、日本の18.4倍となった。

もう1つ重要な政策は政府目標の制定である。政府目標を制定した国は、2005年の45カ国から2009年までに85カ国以上へと増加した¹¹⁾。例えば、スペインでは風力発電の設備容量は2000年の223万kWから2010年の2068万kWまで約10倍拡大し、さらに2020年までに4500万kWの風力発電を導入する目標を掲げている¹¹⁾。スペインの面積は51万km²（日本比135%）、人口は4412万人（日本比35%）である。また供給電力（260TWh）は日本の約1/3であるが、風力発電の設備容量（2068万kW）は、日本（230万kW）の約9倍である。スペインは、デンマークやドイツと異なり、電力系統の国際連系が弱い上、風力発電適地と電力消

費地域が一致していないという問題も抱えている。スペインの成功例は日本としては大変参考になる。

洋上風力発電の場合には、開発海域の指定なしでは、大規模の開発が不可能であり、イギリス、ドイツなどのヨーロッパの国だけではなく、アメリカも同様な政策を掲げている。日本における排他的経済水域はイギリスよりも広いが、洋上風力発電所の規模および2010年までの導入実績はイギリスの50分の1である。近年のイギリスにおける洋上風力発電の躍進は、2020年までの高い政府目標と開発海域の指定といった国の政策によって支えられていると言える。

7. おわりに

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。今後わが国における洋上風力発電の導入拡大を促進するために、現在NEDOで実施している洋上風力発電等技術研究開発を確実に成功させると共に、固定価格買取制度に関する法律の早期成立、2020年までの洋上風力発電の政府目標の策定および洋上風力開発のための海域指定が強く望まれる。

参考文献

- 1) GWEC : <http://www.gwec.net/>
- 2) EWEA : Oceans of Opportunity, <http://www.ewea.org/>, 2009.
- 3) 欧州洋上風力発電最新事情調査団 : 欧州洋上風力発電最新事情調査報告, 風力エネルギー, Vol.31, No.4, pp.63-76, 2007.
- 4) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 : 平成19年度洋上風力発電実証研究 F/S に係る先行調査報告書, イー・アンド・イー ソリューションズ, 風力エネルギー研究所, ネクストエナジー, 2007.
- 5) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 : 平成20年度洋上風力発電実証研究 F/S 調査 (銚子), 東京電力, 東京大学, 鹿島建設, 2008.
- 6) 2009年欧州洋上風力発電最新事情調査団 : 2009年欧州洋上風力発電最新事情調査報告, 風力エネルギー, Vol.33, No.4, pp.38-45, 2009.
- 7) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 : 平成20年度洋上風力発電実証研究 F/S 評価, イー・アンド・イー ソリューションズ, 2008.
- 8) 石原孟, Muhammad Bilal Waris, 助川博之 : ヒーププレートと非静水圧の効果を考慮した浮体動揺予測モデルの開発, 第31回風力エネルギー利用シンポジウム, pp. 209-212, 2009.
- 9) The Crown Estate : <http://www.thecrownestate.co.uk/>
- 10) Salazar : Chu Announce Major Offshore Wind Initiatives, <http://www.energy.gov/news/10053.htm>, 2010.
- 11) 環境エネルギー政策研究所 (ISEP) 翻訳 : 自然エネルギー世界白書 2010, 2010.