

急拡大する洋上風力発電の現状と将来展望

東京大学 大学院工学系研究科

石原 孟

1. はじめに

2011年7月5日に国連環境計画とブルームバーグ・ニューエナジーファイナンス社が発行した *Global Trends in Renewable Energy Investment 2011*¹⁾には、2010年の再生可能エネルギーへの投資額は2110億ドル(80円/ドル換算で約17兆円)で前年比32%増加という驚異的な結果が報告された。昨年設置された新規発電設備に占める再生可能エネルギーの割合は34%、中でも風力発電への新規投資は最も多く、950億ドル(80円/ドル換算で約7.6兆円)に達した。

2010年末に世界の風力発電設備容量は1億9439万kW²⁾、年成長率は30%に達している。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³⁾。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」と「国家洋上風力戦略」を発表した⁴⁾。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という明確な国家目標を示すと共に、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を指定し、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ための具体策も示された。

本稿では、急拡大する世界の洋上風力発電の現状とその研究開発を紹介すると共に、日本における洋上風力発電の将来展望と導入促進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。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⁵⁾。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、風車の大型化とウイ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。また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。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(Middelgrundten洋上風力発電所)を示す⁶⁾。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。2014年には1600万kW、さらに2020年に4000万kWに達すると予想される。表1には欧州における上位10個所の大規模ウインドファームの一覧を示し、ウインドファームの最

大規模は年々大きくなっていることが分かる。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。

表 1 欧州における大規模ウインドファームの一覧

発電所名	出力(MW)	設置国	稼働年
Thanet	300	イギリス	2010
Horns Rev II	209	デンマーク	2009
Rødsand II	207	デンマーク	2010
Lynn and Inner Dowsing	194	イギリス	2008
Robin Rigg (Solway Firth)	180	イギリス	2010
Gunfleet Sands	172	イギリス	2010
Nysted (Rødsand I)	166	デンマーク	2003
Bligh Bank (Belwind)	165	ベルギー	2010
Horns Rev I	160	デンマーク	2002
Princess Amalia	120	オランダ	2008

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⁶⁾ (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

デンマークは長い間欧州における洋上風力発電を牽引してきた。しかし、2010 年にイギリスでは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。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。

イギリスの変化は 2000 年初頭から始まっている。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 兆円に上り、送電網の整備だけでも 2 兆円に達する。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⁷⁾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定した。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る場合には、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。

洋上風力発電の可能性に注目しているのは欧米だけではなく、中国は 2020 年に 3000 万 kW、韓国は 2019 年までに 250 万 kW の導入目標を掲げている。米国のパイクリサーチ社の調査⁸⁾によると、2011 年末に世界の洋上風力発電は 400 万 kW 程度であるが、2017 年には 7100 万 kW、約 17 倍に増加し、その中でも中国の洋上風力発電市場が、欧州の洋上風力発電市場とともに 2017 年までの世界市場を牽引すると予測している。

3. 洋上風力発電における研究開発

洋上風力発電は急速に拡大している一方、いくつかの課題も抱えている。その一つは高コストの問題である。洋上風力発電は陸上風力発電に比べ、コストが 2 倍高く

なる場合がある。これは、風況が同じである場合に、洋上風力発電では支持構造物、施工、送電および維持管理の費用が陸上に比べ高いことによる。洋上風力発電のコストを低減するために、5-10MWの大型風車の採用と大規模な開発が求められている。洋上風力発電における長期的な目標としては、発電コストを現在の半分以上にして、2030年に10セント/kWh（80円/ドル換算、8円/kWh）に近づけることである⁹⁾。

そのために、支持構造物の最適化によるコスト低減が不可欠である。図3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⁹⁾。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。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。

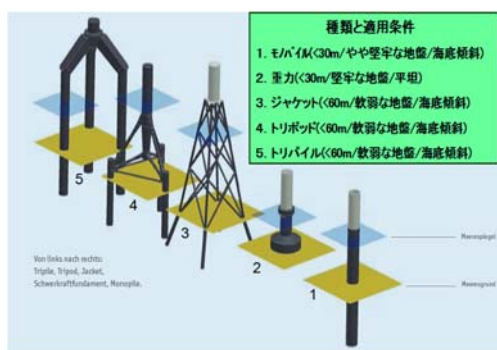


図3 着床式洋上風力発電設備支持物の構造形式⁹⁾

表1には各種支持物の構造形式の分類を示す。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。このように各種構造形式の最適化により、様々な水深に適した支持構造物が開発され、洋上風力発電のコスト低減にも貢献している。

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4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。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。特に、水深100-200mの範囲においては浮体式のコストは水深に依存しない。この特徴は大規模洋上風力発電所を建設する際には大変重要である。例えば、ローター直径126mの5MW風車から構成される100万kWの洋上風力発電所に必要な風車の数は200基、海域面積(10×8D=10.08km)は約10km×20kmである。このような広い海域では、水深が大きく変化する。浮体式基礎を採用した場合にはこのような水深の変化を吸収でき、ウインドファームの最適化が容易となる。水深50m-100mの範囲では両形式とも高いため、今後の課題となる。

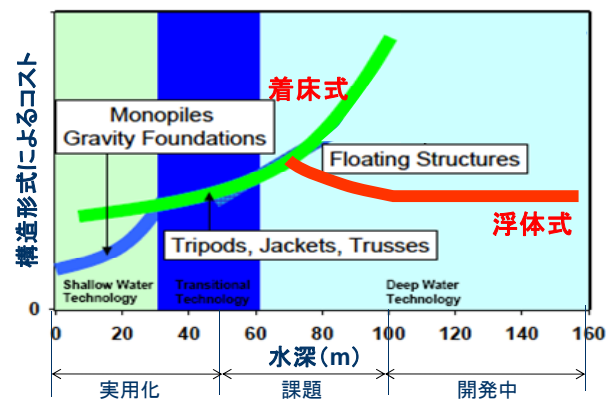


図4 支持物コストの水深による変化

洋上風力発電所建設の際に用いる施工方法もプロジェクトの成否を左右し、建設コストに大きな影響を与える。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。例えば、Bard Engineering社

の場合¹⁰⁾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 WINDLIFTI を用いて施工する (図 5)。WINDLIFTI 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。



図 5 BARD 5M 風車とトリパイル支持構造物

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。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、実証試験に向けた検討を開始する予定である。

4. 洋上風力発電の将来展望と導入促進策

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¹¹⁾。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、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。洋上風力開発は 2020 年に再生可能エネルギーによる電力供給を 20% とする政府目標に大きく貢献する可能性を秘めている。

図 6 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 型の浮体式基礎構造が提案され、実用化に向けた研究開発が進められている。現在浮体式洋上風力発電はまだ開発段階にあ

るが、その技術は既に海底石油・ガスの分野で使われているため、実証試験を早急に実施し、洋上風力発電分野における日本の優位性を確立することが重要である。

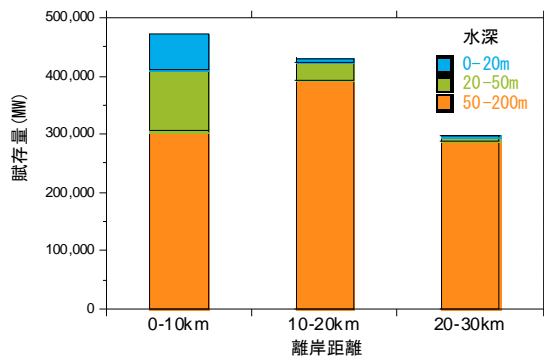


図6 日本沿岸における洋上風力賦存量

洋上風力発電を普及させていくために、研究開発の他に、政策も重要である。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い取り制度であり、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、その半数以上が2005年以後に実施されたものである¹²⁾。固定価格買い取り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。中国に固定価格買い取り制度が導入されたのは2005年、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¹²⁾。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¹³⁾。

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な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。

最後に系統連系の問題である。スペインの供給電力は日本の約1/3であるが、風力発電の設備容量は、日本の約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く、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にもかかわらず、風力発電の大量導入に成功している。ス

ペインの経験は日本としても大いに参考になる¹³⁾。

5. 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、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。

2011年3月にスペインにおける風力発電は発電量全体の21%を占め、原子力発電の同19%を抜いて第1位の電源となった¹³⁾。一方、日本では、東日本大震災の後に電力供給不足が深刻な社会問題となっている。この問題を解決するために、日本風力エネルギー学会が果たすべく役割が極めて大きいと思われる。これまで風力開発で培った高い技術力とノウハウを活かし、陸上風力の大量導入と世界をリードする洋上風力開発に挑戦していくことにより、地球温暖化、エネルギー安全保障、経済発展、いわゆる3E問題の解決に貢献していきたい。

参考文献

- 1) UNEP and Bloomberg new energy finance : Global Trends in Renewable Energy Investment 2011, 2011.
- 2) GWEC : <http://www.gwec.net/>
- 3) EWEA : Oceans of Opportunity, <http://www.ewea.org/>
- 4) Salazar : Chu Announce Major Offshore Wind Initiatives, <http://www.energy.gov/news/10053.htm>, 2010.
- 5) 石原孟: 地理情報システムを利用した洋上風力賦存量の評価, 電気評論, pp.39-43, 2010.
- 6) 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.
- 7) The Crown Estate : <http://www.thecrownestate.co.uk/>
- 8) Pike Research : Offshore Wind Power: Market Opportunities and Challenges, Technology Issues, Key Industry Players, and Global Capacity and Production Revenue Forecasts, 2011.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 石原孟: 「風力発電大国」の実像 ~その背景に電力系統制御への挑戦~, 日経エレクトロニクス, 2011.