

洋上風力発電の現状と展望

石原 孟

東京大学

 洋上風力発電, ウィンドファーム, 賦存量, ロードマップ

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kW⁽¹⁾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1/5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が進んでおり、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。図1に示すように、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、ヨーロッパにおける洋上風力発電の現状を紹介するとともに、洋上風力発電所の建設における自然環境

条件、荷重の評価、構造設計、運搬・施工に関する技術課題を明らかにし、日本における洋上風力発電の将来展望を概説する。

2. ヨーロッパにおける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などの環境問題が少ないという利点がある。さらに道路など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、ヨーロッパにおいては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)は世界初の洋上ウィンドファームである。図2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ィンドファーム(Middelgrundten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～

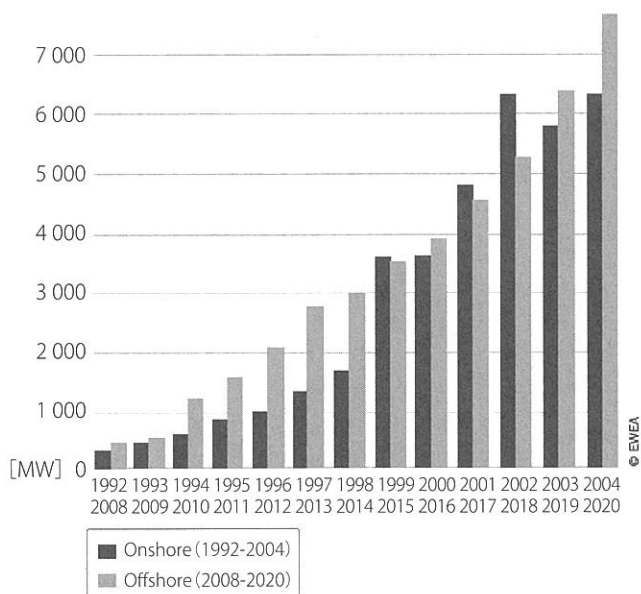


図1 ヨーロッパの洋上風力発電導入量の予測⁽²⁾



図2 世界初の商業洋上ウィンドファーム⁽³⁾

表1 ヨーロッパ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

20 km 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。

2010年にヨーロッパ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。表1にはヨーロッパにおける上位10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。

このようにヨーロッパ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3)。風車の大型化に伴い、風車ロータ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。

デンマークは長い間ヨーロッパ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ともに、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、イギリスの全消費電力の1/3を賄う。

イギリスの洋上風力開発は、「ラウンド1」、「ラウンド

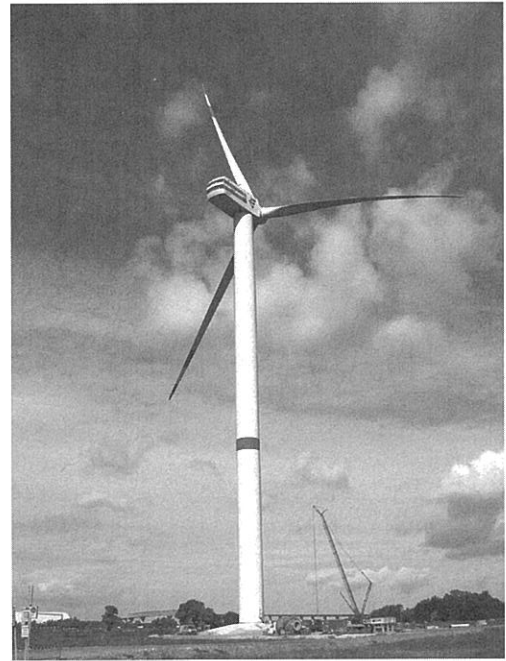


図3 世界最大級の5 MW 風車⁽³⁾

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。

イギリスでは、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、イギリス国王の不動産・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)社の許可が必要である。つまり、北海の海底油田の鉦区と同じように、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を初め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までの開発が計画どお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。

3. 日本の洋上風力発電と技術開発

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、600 kWの風車2基が海岸から約700 m離れた水深13 m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、2000 kWの風車5基が水深4 m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では、2000 kWの風車7基が堤防から40～50 m沖に建設されたが、基礎および風車本体の工事は陸上クレーンにより行われた。このように、これまでに我が国に建設されている洋上風力発電所のすべては沿岸洋上風力発電所であり、今後本格的な洋上風力発電所を建設するために、大型洋上風車の開発、洋上風力発電設備支持構造物の設計・運搬・施工ならびに洋上風力発電所の維持管理等に関する技術開発が不可欠である。

また日本では、ヨーロッパと異なり、海底地盤条件と水深変化が複雑な上、暴風、高波浪、地震など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別極値風速を評価する必要があり、北海道を除き、ほとん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合せを考える時に、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。ヨーロッパで実施された実証研究では、天候の影響で実証機が予定どおりに設置できなかったことが起きている。我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⁽⁴⁾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5 MW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500 tであるため、風車ナセル、パイル、トランジションピースなどの部品の重量はすべて500 t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40 m、離岸距離87 km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、我が国の気象・海象条件はヨーロッパと異なることから、ヨーロッパでの事例をそのまま適用することはリスクが大きい。また我が国における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、経済性に関するさまざまな課題がある。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）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は我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。図4に洋上風力発電実証研究設備完成予想図を示す。この研究では、我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・地震など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、我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

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

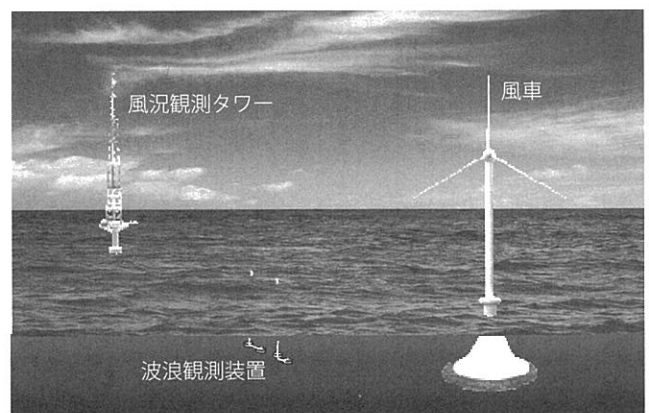


図4 洋上風力発電実証研究設備完成予想図⁽⁵⁾

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5 MW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および実現可能性を評価するとともに、洋上ウインドファームの開発におけるさまざまな課題を検討する。さらに我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さまざま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などを取りまとめるとともに、実証研究の実施項目と実現可能性を評価する。

4. 日本の洋上風力発電の将来展望

NEDOの調査によると、風速7 m/s以上、離岸距離30 km、水深200 mまでの洋上風力発電の賦存量は、約120万 MWに達し、水深50～200 mの範囲の賦存量は水深50 mまでの賦存量の4倍以上であることが分かった⁽⁶⁾。着床式洋上風力発電の適応限界水深と考えられる50 mまでの賦存量（設置可能面積）は約21万 MW（約2万 km²）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200 mまでを設置可能海域とした場合の利用可能率を3%とすると、3600万 kWの設備容量が確保されることになる。

図5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50 m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既に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6には浮体式洋上風力発電システムの完成予想図⁽⁷⁾を示す。

図7はNEDOの風力発電ロードマップ検討分科会報告書に示された我が国における風力発電導入量の予測である。この報告書⁽⁸⁾によると、我が国の風力発電導入量は、2020年度と2030年度までにそれぞれ1000万 kWと2000万 kWと予測され、2010年度以後の風力開発は、陸上風力に併行して、洋上風力の開発も開始される。2010年度から2020年度までには、陸上と洋上の導入量はそれ

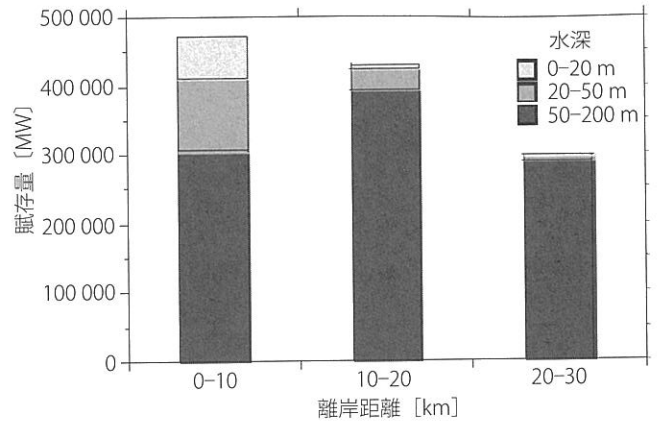


図5 日本沿岸における洋上風力賦存量

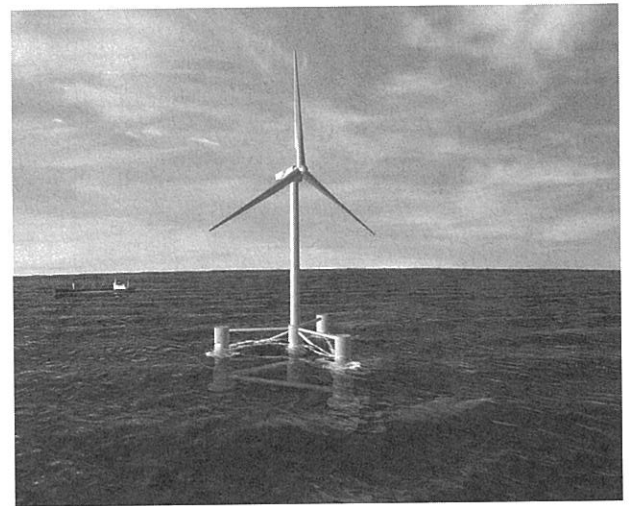


図6 浮体式洋上風力発電システムの完成予想図

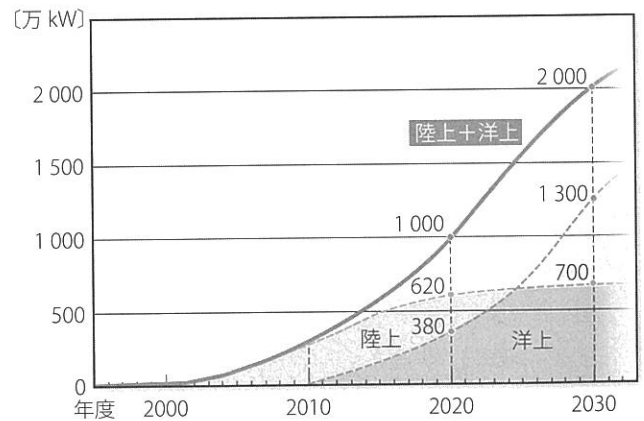


図7 我が国における風力発電導入量の予測

ぞれ320万 kWと380万 kWであるのに対して、2020年度から2030年度までにはそれぞれ80万 kWと920万 kWになり、我が国の風力発電の中で洋上風力発電が果たす役割は今後ますます重要となる。

洋上風力発電を普及させていくために、研究開発のほか

表3 洋上風力発電におけるイギリスと日本との比較

項目	イギリス	日本
排他的経済水域	397万 km ²	447万 km ²
開発海域の指定	あり	なし
洋上ウインドファームの規模	68万 kW	1.4万 kW
2010年までの導入実績	134万 kW	2.5万 kW
2020年までの導入目標	3300万 kW	なし

に、政策面の支援策も講じる必要がある。表3には洋上風力発電におけるイギリスと日本との比較を示す。日本における排他的経済水域はイギリスよりも広いが、洋上ウインドファームの規模および2010年までの導入実績はイギリスの1/50である。この表から、近年イギリスにおける洋上風力発電の躍進は2020年までの高い導入目標と開

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ことが分かる。今後我が国においても洋上風力発電の国家目標および洋上風力開発海域が早期に設定されることが望まれる。

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、材料など複数の産業に関連し、世界的にみても経済・雇用効果の極めて大きい産業である。今後の洋上風力開発においては(社)電気学会が果たすべき役割が大きいのと思われる。これまでに電源開発で培った高い技術力とノウハウを生かし、我が国における洋上風力発電の導入拡大に貢献していくことを期待したい。

文 献

- (1) GWEC: "Global Wind Report 2010", <http://www.gwec.net/> (2010)
- (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) 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)
- (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) 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)
- (7) 石原孟, Muhammad Bilal Waris, 助川博之:「ヒーププレートと非静水

- 圧の効果を検討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)
- (8) 新エネルギー・産業技術総合開発機構:「風力発電ロードマップ検討分科会報告書」 (2005)



石原 孟

いしはら・たけし

1992年東京工業大学大学院博士課程修了。同年清水建設(株)入社。2000年東京大学工学系研究科 助教授。2008年同大学工学系研究科 教授。工学博士。