

洋上風力発電システム実証研究の現状と将来展望

石原 孟

東京大学大学院 工学系研究科

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 2011¹⁾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開発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

第 41 回 海洋工学パネル

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。

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 年には 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 箇所の大規模ウ

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。

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動し、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



図 1 世界初の商業洋上ウインドファーム

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	稼動年
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

第 41 回 海洋工学パネル

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. 洋上風力発電設備の支持構造物

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下にして、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⁸⁾。

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



図2 世界最大級の5MW風車

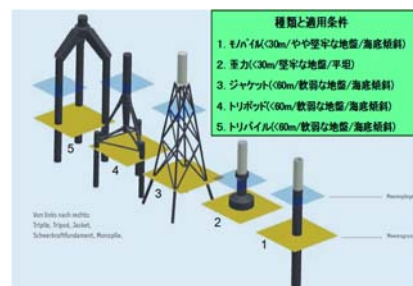


図3 着床式洋上風力発電設備支持物の構造形式⁹⁾

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。

表 2 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。

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。

4. 洋上風力発電システムの実証研究

欧州と異なり、日本では海底地盤条件と水深変化が複雑な上、暴風、高波浪、地震等の自然環境条件が大変厳しい。今後日本における大規模の洋上風力発電所を実現させるためには、安全性、信頼性、経済性の高い洋上風力発電設備支持構造物の開発は不可欠であり、またその構造設計のための自然環境条件および荷重の評価手法を確立する必要がある。

図 5 には、わが国における洋上風力発電に関する研究課題を示す。海上風の観測、風車と支持構造

表 2 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		

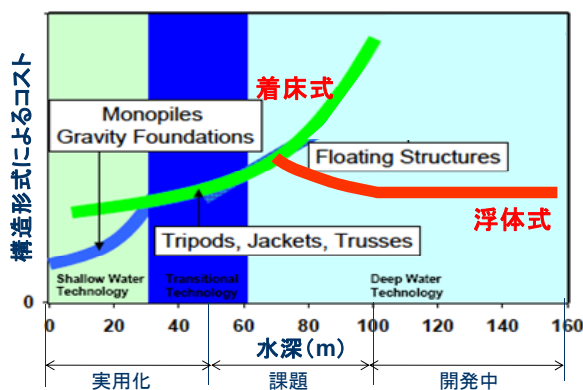


図 4 支持物コストの水深による変化

第 41 回 海洋工学パネル

物の連成振動予測，基礎構造の研究開発，疲労照査技術，遠隔監視制御と故障予知診断システムの開発等が挙げられている。

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 3 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。以下，NEDO における洋上風力発電等技術研究開発を紹介し，詳細については文献 10，11，12 を参照されたい。

4.1 洋上における自然環境条件の評価

洋上風力発電設備支持物に作用する暴風時の最大風荷重および発電時の疲労荷重を正確に評価する

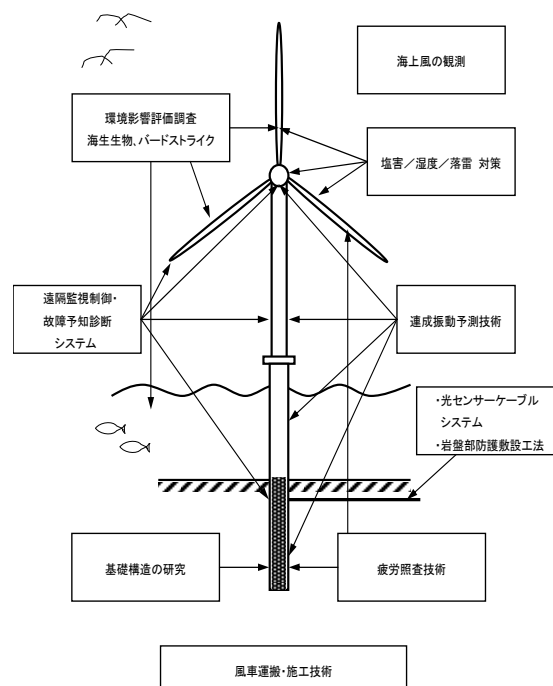


図 5 洋上風力発電に関する研究課題⁹⁾

表 3 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に係る基礎調査
2011	浮体式洋上風力発電 FS 調査

第 41 回 海洋工学パネル

ためには、洋上風力発電設備の設置場所の周辺地形を考慮した年最大風速の非超過確率分布および風速の出現頻度を精度よく求める必要がある。

図 6 には、銚子から南に 3.5km 離れた洋上風況観測タワーの設置予定地点における風速の鉛直分布の一例を示す。南から風が吹く場合には風速の鉛直分布のべき指数は 0.1 であり、典型的な海上風の特徴を示すが、北から風が吹く場合には、風速の鉛直分布は陸の影響を受け、大きく欠損している。陸の影響は風速分布の断面図からもはっきりと確認できる。大規模洋上ウインドファームの開発を考える際には、このような海上風の空間的な変化を考慮する必要があり、海上風の観測技術とともに、海上風の予測技術の高度化も必要である。

日本は混合気候であるため、台風と台風以外（以下非台風と呼ぶ）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る。日本近海では年間平均 28 個の台風が発生し、その 1 割程度が上陸するが、顕著な台風の発生は稀であり、また台風の進路をたまたま外れた気象官署では大きな風速が観測されることがあり得る。さらに洋上風力発電所の設置場所は気象官署から離れている可能性もあり、数値解析により台風時と非台風時における設計風速の評価を行う必要がある。図 7 には台風シミュレーションとメソスケール気象シミュレーションにより求めた実証研究地点における年最大風速の非超過確率の分布の一例を示す。欧州と異なり、日本では年最大風速の 50 年再現期待値は台風によって規定されていることが分かる。

4.2 洋上風力発電設備支持物の荷重評価

洋上風力発電設備支持物に作用する主要な荷重は、風荷重、波荷重および地震荷重がある。日本は地震国であり、洋上風力発電設備支持物の耐震設計が重要である。洋上風力発電設備支持物は陸上のそれと異なり、地震の揺れに伴う水中基礎の付加質量および基礎の滑りによる非線形ばねの効果を考慮する必要がある。また洋上風力発電設備支持物の場合には風による疲労荷重に加え、波による疲労荷重も加算される。

図 8 には陸上風車に作用する疲労荷重と橋、ヘリコプター、飛行機および自転車に作用する疲労荷重との比較を示し、風力発電設備における疲労荷重の重要性が分かる。洋上風力発電設備支持物の場合には支持物の構造形式によって疲労荷重が支配的な荷重になることがある。さらに洋上風力発電設備支持物は水深の増加に伴い、支持構造物の剛性または変形が問題になることもある。

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

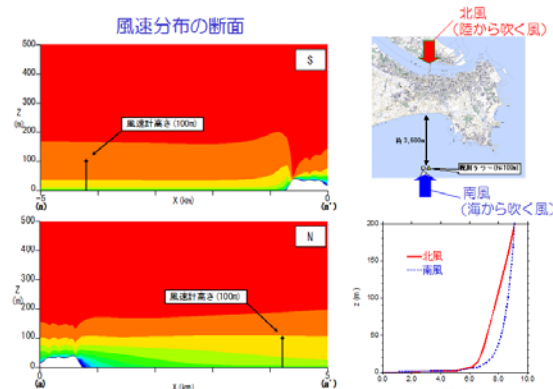


図 6 実証研究地点における洋上風速の鉛直分布¹¹⁾

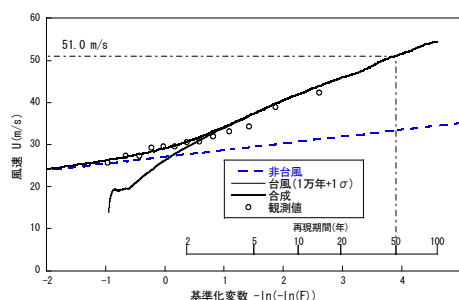


図 7 実証研究地点における成因別年最大風速¹¹⁾

第 41 回 海洋工学パネル

に受ける。図 9 には暴風・波浪同時作用時におけるタワー基部と基礎基部の最大曲げモーメントを示す。また比較するため、暴風と波浪が単独作用する場合におけるタワー基部と基礎基部の最大曲げモーメントおよびその単純和も示した。50 年に一度発生する暴風と波浪の時系列波形を作成し、時刻歴応答解析によりタワー基部と基礎基部における暴風波浪時の最大荷重を求めた。図 9 から分かるように、タワー基部では風荷重が支配的であるが、基礎基部では風荷重より波荷重が大きいことが分かる。また、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。

4.3 洋上風力発電設備支持物の構造設計

洋上風力発電設備支持物の構造設計は陸上のそれと基本的に同じである。図 10 には、発電時、暴風波浪時、レベル 1 地震荷重時におけるタワー、フランジ、ボルト、開口部、アンカーボルトの照査結果を示す。この図から、無次元高さ 0.23 での耐力が小さくなっていることが分かる。これはボルト強度が他の部分に比べ、相対的に小さいことによるものである。

一方、図 11 に示すような新しい形式の支持構造物が採用された場合には、風車タワーと支持物の接合部および支持物と基礎の接合部の応力が複雑になり、室内実験および FEM 解析により構造設計を行うと共に、実証研究を通じて、支持構造物の接合部に作用する応力および支持構造物全体の変形を直接計測し、室内実験および FEM 解析から得られた応力と変形を比較することにより、これらの予測手法の精度を検証する必要がある。

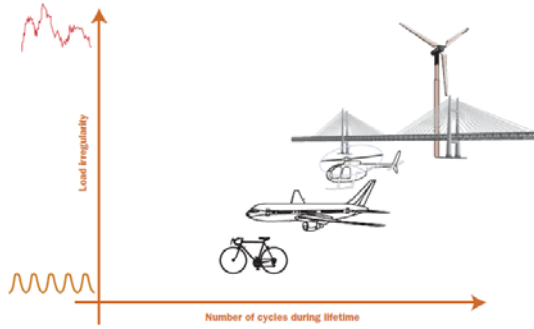


図 8 風車に作用する疲労荷重の比較¹³⁾

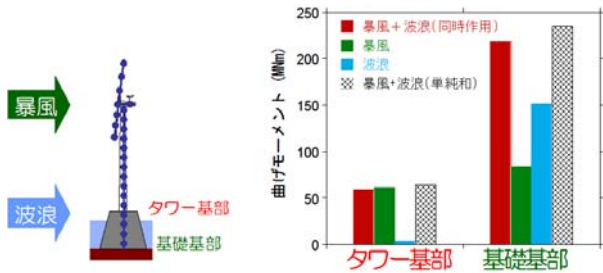


図 9 タワーと基礎に作用する風荷重と波荷重¹¹⁾

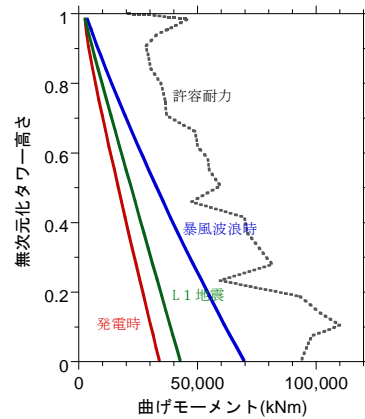
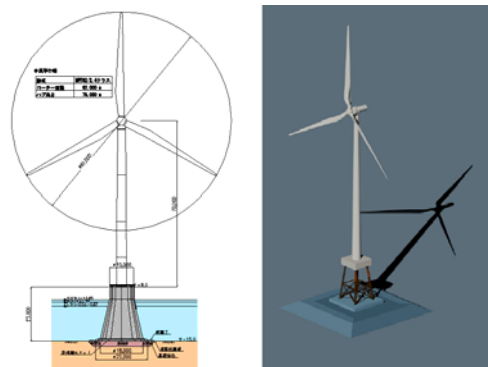


図 10 稀に発生する荷重と許容耐力との関係¹¹⁾



(a) PC 重力式¹¹⁾ (b) ハイブリッド重力式¹²⁾

図 11 新しい形式の支持構造物

4.4 洋上風力発電システムの施工方法

洋上風力発電設備の支持物の構造形式によらず、洋上風力発電所の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いという事態が起きている。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。

洋上風力発電設備支持構造物の設置と風車組立における運搬・施工は、クレーン船による支持構造物の吊り運搬と沈設および自己昇降式作業台船(Self Elevating Platform, 以下セップと呼ぶ)による風車組立の二つのステップによって行われ、また作業船によって3つの方法がある。欧州では、台船を水面上に上昇させて波浪や潮流による影響を受けにくくする自己昇降型船を用い、デッキ上にクローラクレーンを搭載し工事を行うことが多い。図12には、自己昇降型船(ハーフセップ)による洋上風車の組立状況を示し、また図13には、セップとクローラクレーンを組合せた洋上大型風車建設用専用船を示す。

図 14 にはフローティングクレーンを利用した洋上風車の一体施工状況を示す。海上での作業時間を短縮するため、あらかじめ陸上で一体化した風車をシェアレグで吊り、そのまま現地へ輸送した。風車の影が緩やかな海面に反映している状況(図 14)から分かるように、この工法は海象が緩やかでないとなしにくい。

表4には各種洋上風力発電設備の運搬・施工方法の比較を示す。フローティングクレーンを利用した施工法は、深い海域にも適用できるため拡張性が高く、また風車を陸上で組み立てるため確実性も高いが、海象条件の影響



図 12 自己昇降型船による洋上風車の組立状況¹⁴⁾

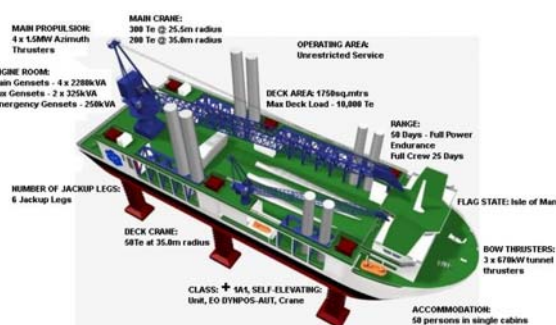
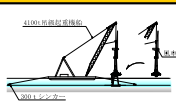

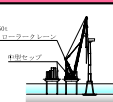


図 13 洋上大型風車建設用専用船¹⁵⁾



図 14 洋上風車の一体施工¹⁶⁾

表 4 洋上風力発電設備の運搬・施工方法の比較¹¹⁾

	CASE1 FC4100t案	CASE2 ハーフセップ案	CASE3 中型SEP案
風車の組立設置			
稼働率	△	△	○
工期	○	○	○
コスト	○	△	◎
確実性	◎	○	△
拡張性	◎	○	△

第 41 回 海洋工学パネル

響を受けやすいため稼働率が懸念される。一方、中型セップを用いた施工法は波浪や潮流による影響を受けにくいいため稼働率が高く、コストも安価であるが、深い海域への拡張は難しい。また従来使用されたハーフセップ (図12) は自己昇降型の船であり、中型セップのように曳航船が不要のため、機動性が高いが、波浪の影響を受けるため稼働率が中型セップより低い。このように、従来の洋上風力発電設備の建設に用いた施工方法にはそれぞれ長所と短所がある。

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¹⁷⁾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 (図 15)。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。



図 15 BARD 5M 風車とトリパイル支持構造物¹⁷⁾

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¹⁸⁾。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%を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、設置可能海域が水深 200m までとなり、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 16 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 17 には浮体式洋上風力発電システムの完成予想図¹⁹⁾を示す。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。

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²⁰⁾。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

第 41 回 海洋工学パネル

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。

もう一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²⁰⁾。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 倍に拡大し, 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。

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²¹⁾。

6. 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は現在 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²¹⁾。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, 洋上風力発電の果たすべき役割が大きい。今後世界をリードする浮体式洋上風力発電に挑戦していきたい。

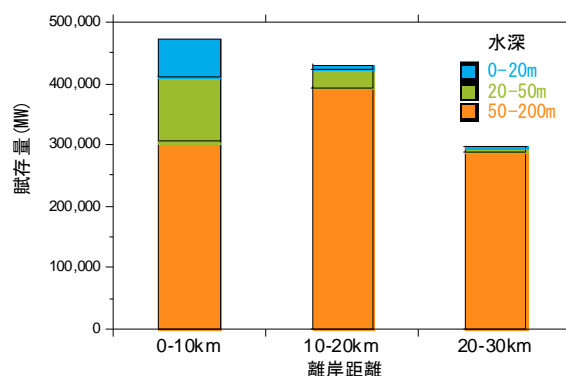


図 16 日本沿岸における洋上風力賦存量



図 17 浮体式洋上風力発電システムの完成予想図¹⁹⁾

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) 石原孟 : 洋上風力発電等実証研究の現状と将来展望、第 32 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp. 72-92, 2010.
- 11) NEDO 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.
- 12) NEDO 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 (北九州), 電源開発, 2008.
- 13) EWEA : Prioritizing Wind Energy Research, Strategic Research Agenda of the Wind Energy Sector, <http://www.ewea.org/>, 2005.
- 14) van Kuik, G., Ummels, B. and Hendriks, R. : Advances in New and Sustainable Energy Conversion and Storage Technologies, Perspectives of Wind Energy, Invited Paper at the IUC Conf. , Dubrovnik, 19p, 2006.
- 15) Herman, S. A. : Offshore Wind Farms, Analysis of Transport and Installation Costs, ECN-I-02-002, 122p, 2002.
- 16) Beatrice : <http://www.repower.de/>
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) 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.