

着床式洋上風力発電技術の現状と課題

東京大学 大学院工学系研究科
石原 孟

1. はじめに

2010年初めに世界の風力発電設備容量は1億5851万kWに達し、過去13年間の平均成長率は28%に及んでいる。このような高い成長率はエネルギー開発の歴史上に類のないことである。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も進んでおり、2010年初めに風力発電の設備容量は218万kWに達し、風車設置数も1680基を超えている。しかし、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活かした洋上風力発電の導入が期待されている。

欧州では大規模洋上風力発電所が既に建設されており、各種の洋上風力発電設備支持構造物も提案されている¹⁾、²⁾。一方、日本では、欧州に比べ、台風襲来に伴う暴風、高波浪、そして地震などの自然環境条件が厳しく、欧州の事例をそのままが国に適用することはできない。従って、日本における厳しい自然環境条件に耐え、安全性、信頼性、経済性の高い洋上風力発電システムの開発は不可欠である。

本稿では、欧州および日本における着床式洋上風力発電の現状を紹介し、現在洋上風力発電所によく用いられている支持物の構造形式およびその特徴と適用範囲を示すとともに、洋上風力発電所の建設における自然環境条件と荷重の評価、構造設計、運搬・施工の検討例を紹介し、着床式洋上風力発電における技術課題を明らかにする。

2. 洋上風力発電の現状

欧州連合は、2020年までに温暖化ガスを1990年比で20%減らす目標を掲げ、次々と大規模な洋上風力発電所の建設を始めている。図1には、欧州風力発電協会が2009年に発表した欧州における将来の洋上風力発電導入見込量を示す。2020年までに4000万kWの洋上風力を開発し、EU全体の電力需要の3.6%を賄う目標を設定している。この図には欧州における陸上風力発電の導入実績を併記しており、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点が興味深い。図2にはドイツにおける洋上風力発電の取り組み状況を示す。北

海だけでも30カ所のプロジェクトが示され、多くのプロジェクトは既に建設の許認可が下りており、現在建設またはその準備を行っている。

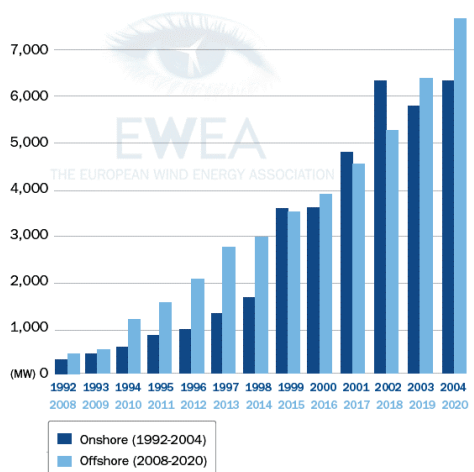


図1 2020年までの欧州の洋上風力発電導入量の予測³⁾



図2 ドイツにおける洋上風力発電プロジェクト⁴⁾

欧州における着床式洋上風力発電の研究開発はいまから20年前に遡る。1990年にスウェーデンの洋上に設置された一基の定格出力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。風車は水深6m、離岸距離250mの場所に建設され、トリポッドと呼ばれる支持構造(図8を参照)が採用されている⁵⁾。その翌年の1991年に定格出力450kWの11基の風車(Vindeby洋上風力発電所)がデンマークに建設され、これは世界初の洋上ウインドファームである。風車は水深2~5m、離岸距離1.5kmの地点に設置され、重力

式と呼ばれる支持構造（図 8 を参照）が採用されている⁵⁾。



図3 世界初の商業洋上ウインドファーム¹⁾



図4 大規模洋上ウインドファーム⁷⁾

図3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¹⁾。2000kW の風車 20 基は水深 3～6m、海岸から 2km 地点に建設され、重力式支持構造（図 8 を参照）が採用されている¹⁾ ⁶⁾。図4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、モノパイルと呼ばれる支持構造（図 8 を参照）が採用されている⁷⁾。この洋上風力発電所は世界初の大規模洋上ウインドファームであり、そこから多くの研究成果が得られている。

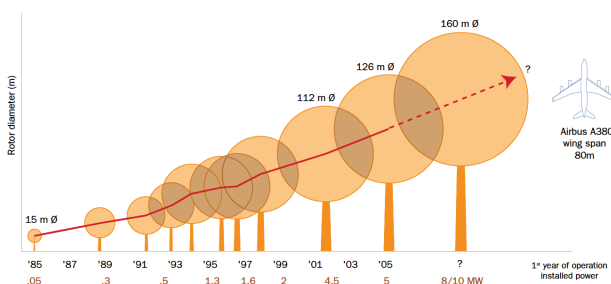


図5 風車の定格出力とローター直径の変遷⁸⁾

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。図5に示すように過去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¹⁶⁾。

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、発電効率も向上されている。2006年に英国に建設された Beatrice 洋上風力発電所は、世界最大級の洋上風車を採用している。定格出力 5000kW の 2 基の風車は、水深 45m、離岸距離 25km 地点に設置され、ジャケットと呼ばれる支持構造（図 8 を参照）が採用されている¹⁶⁾。

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（図 6）、2 台の VESTAS 600kW の風車は海岸から約 700m 離れた水深 13m の瀬棚港内に建設された。ドルフィンと呼ばれる支持構造が採用され、施工は有脚昇降式海洋作業台により行われた。



図6 瀬棚洋上風力発電所⁹⁾

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、5 台の VESTAS 2000kW の風車が水深 4m の水路内に設置され、基礎及び風車本体の工事は陸上クレーンにより行われた。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 7）では、7 台の FHI 2000kW の風車が堤防から 40・50m 沖に建設され、欧州の洋上風力発電所によく使われているモノパイル式の支持構造が採用されたが、基礎及び風車本体の工事は陸上クレーンにより行われた。



図7 神栖洋上風力発電所¹⁰⁾

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。本章では欧州および国内における代表的な洋上風力発電所に採用されている支持物の構造形式について紹介し、各種支持物の特徴および適用範囲を明らかにする。

図8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。

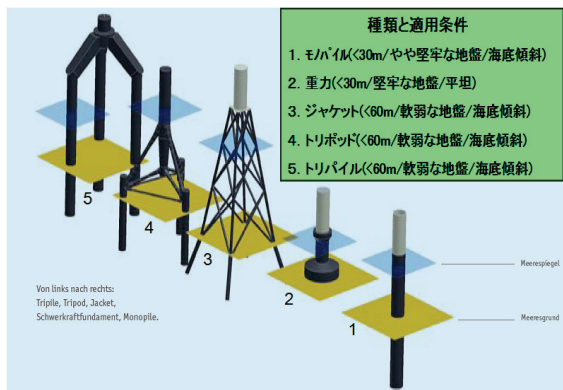


図8 着床式洋上風力発電設備支持物の構造形式¹⁾

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、ドルフィンには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
ハイブリッド	トリポッド ハイブリッド重力式		

図9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⁵⁾。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。

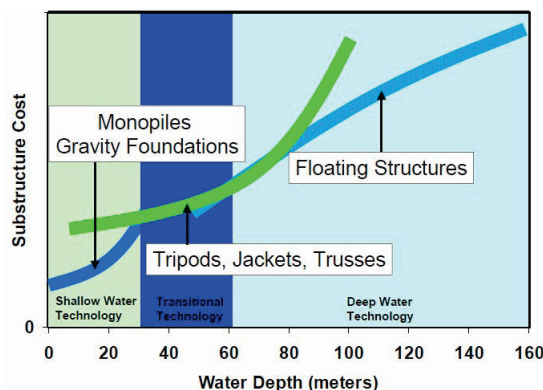


図9 支持構造コストの水深による変化⁵⁾

4. 洋上風力発電設備支持物の構造設計

第1章にも述べたように、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10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。

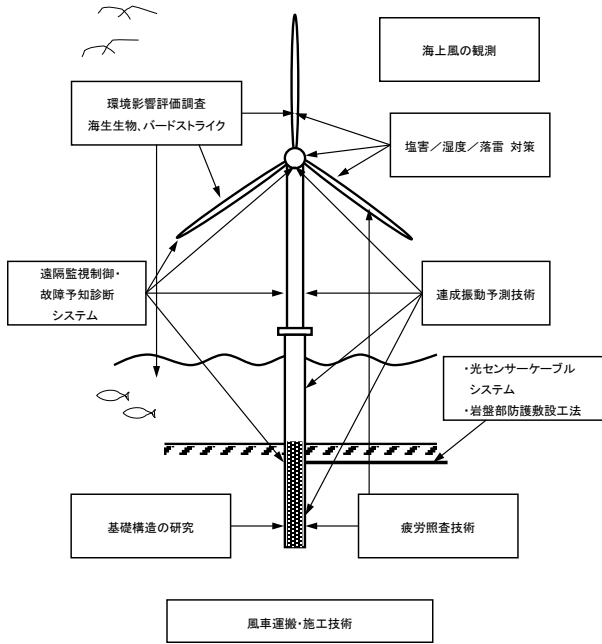


図10 洋上風力発電に関する研究課題⁵⁾

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11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る。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ないことがあり得る。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12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。

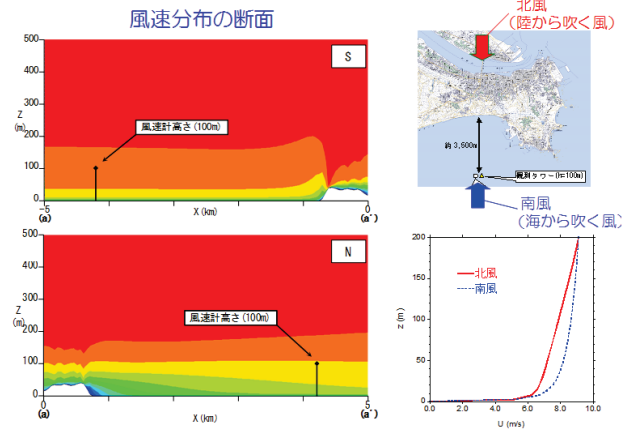


図11 実証研究地点における洋上風速の鉛直分布¹²⁾

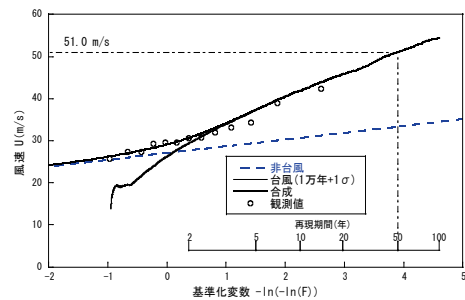


図12 実証研究地点における成因別年最大風速¹²⁾

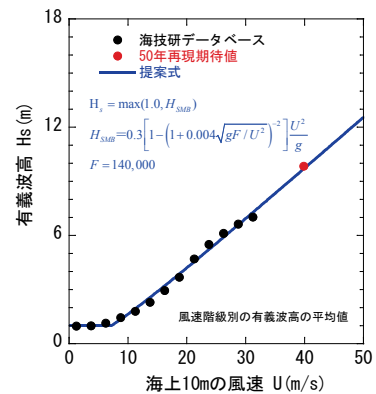


図13 有義波高の風速による変化¹²⁾

日本では、年最大風速の50年再現期待値だけではなく、年最大有義波高と有義波周期の50年再現期待値も台風によって規定されている。また太平洋の沿岸ではうねりの影響を強く受ける。図13には、1994～2004年の10年間の波浪推算結果（海上安全技術研究所のデータベース）から求めた有義波高と風速の関係を示す。図中の提案式は、SMB法による風速 U と有義波高 H_{SMB} との関係を求めたものである。ここで、 F は吹送距離、 g は重力加速度を表す。観測データに最もよく一致するように吹送距離 F を140kmと設定し、図中に実線で示した。この

図から、風速 7m/s 以下では有義波高はほぼ一定値の 1m になっていることが分かる。海上施工の稼働率を考える際には、有義波高が 1m 前後の低波高が重要であり、海象条件を推定するには高波高だけではなく、1m 前後の低波高の高精度予測も必要である。

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。

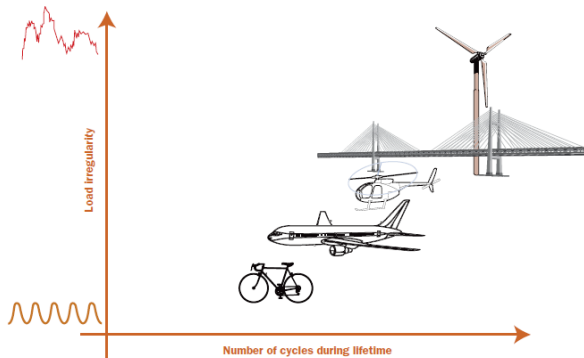
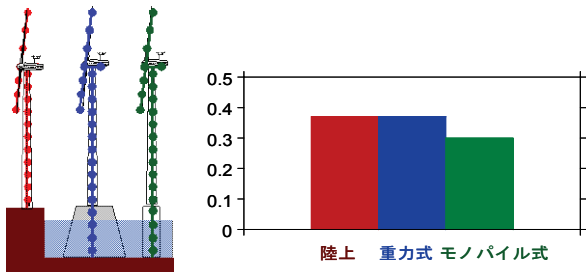


図 14 風車に作用する疲労荷重の比較⁸⁾

図 14 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。



(a) 構造形式 (b) 1次固有振動数
図 15 支持物の構造形式による固有振動数の変化¹²⁾

図 15 には支持物の構造形式による 1 次固有振動数の変化を調べた一例を示す。重力式を採用した場合には風車と支持物全体の振動特性は陸上に設置した場合とほとん

ど変わらないため、陸上用に開発された風車は構造仕様を変更することがなく、洋上に設置することができる。一方、モノパイルを採用した場合にはモノパイルの直径が小さいケースでは 1 次固有振動数が 2 割低下し、陸上用に開発された風車はそのまま使用することができないことが分かる。一般にモノパイル式の支持構造物は水深が 30m 以下に限定され、大型風車を搭載する場合には、剛性の高いジャケット、トリポッドおよびトリパイルを採用する必要がある。

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に受ける。図 16 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 年に一度に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 16 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。

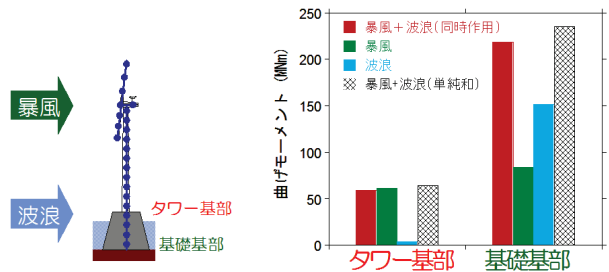


図 16 タワーと基礎に作用する風荷重と波荷重¹²⁾

4.3 洋上風力発電設備の構造設計

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 17 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 18 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变形を直接計測し、室内実験およびFEM解析から得られた応力と变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。

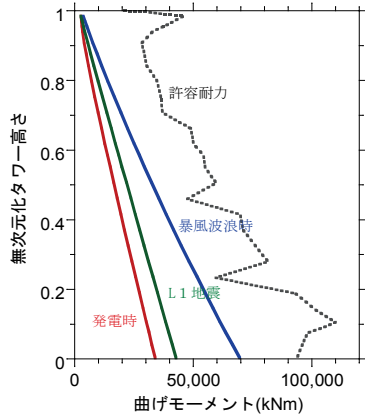
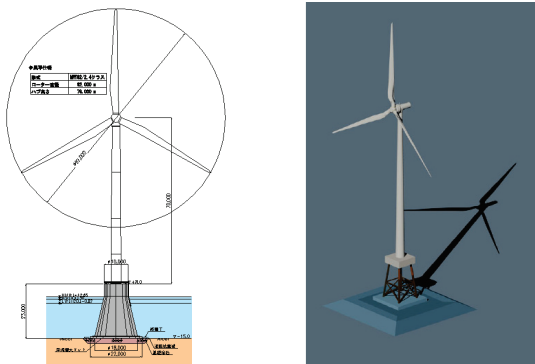


図17 稀に発生する荷重と許容耐力との関係¹²⁾



(a) PC重力式¹²⁾ (b) ハイブリッド重力式¹³⁾

図18 新しい形式の支持構造物

5. 洋上風力発電設備の施工方法

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。

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19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20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19 自己昇降型船による洋上風車の組立状況¹⁴⁾

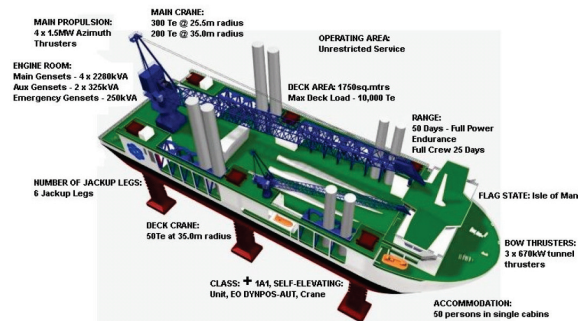


図20 洋上大型風車建設用専用船¹⁵⁾

図21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21) から分かるように、この工法は海象が緩やかでないと成立しにくい。



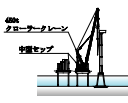


図21 洋上風車の一体施工¹⁶⁾

表2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方法は、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方法は波浪や潮流による影響を受けにく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19) 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。

表2 洋上風力発電設備の運搬・施工方法の比較¹²⁾

	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	◎	○	△

これらの問題を解決するため、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、図22に示すBard Engineering社の場合²⁾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。風車と支持物はそれぞれドイツのCxhavenとEmeden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22 BARD 5.0 風車とトリパイル支持構造物²⁾

今後わが国における大規模洋上風力発電所を建設する際には、現有の施工船の性能を十分に念頭に置き、海底地盤、水深、海象条件に対応できる最適な施工方法を検討すると共に、風車・支持構造物・施工法に関する統合設計の研究開発も不可欠である。

6. まとめ

本稿では、欧州および日本における着床式洋上風力発電の現状を紹介し、現在洋上風力発電所によく用いられている支持物の構造形式およびその特徴と適用範囲を明

らかにした。また、洋上風力発電所における自然環境条件と荷重の評価、構造設計、運搬・施工の実例を紹介し、着床式洋上風力発電における技術課題および研究開発の方向性を述べた。

2009年からNEDO新エネルギー・産業技術総合開発機構は、洋上風況観測システムおよび洋上風力発電実証研究を開始した。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予定である。本実証研究を通じて、本稿で述べた洋上風力発電における技術課題が解決されることを期待する。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) EWEA：Oceans of Opportunity、<http://www.ewea.org/>、2009。
- 4) Ebert Steffen：Wind energy - a German success story、German Wind Energy Association、at the “German Renewable Energy Day”、Chiba、2006。
- 5) NEDO新エネルギー・産業技術総合開発機構：平成19年度洋上風力発電導入のための技術的課題に関する調査報告書、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、日本電機工業会、2007。
- 6) Middelgrunden：<http://www.middelgrunden.dk/>
- 7) Horns Rev：<http://www.hornsrev.dk/>
- 8) EWEA：Prioritizing Wind Energy Research、Strategic Research Agenda of the Wind Energy Sector、<http://www.ewea.org/>、2005。
- 9) 瀬棚風力発電所：<http://www.penta-ocean.co.jp/>
- 10) 神栖風力発電所：<http://www.komatsuzaki.co.jp/>
- 11) NEDO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。
- 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（銚子）、東京電力、東京大学、鹿島建設、2008。
- 13) 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。
- 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/>