



特集



最近の風力発電の進歩

着床式洋上風力発電の実証研究 ～ NEDO洋上風力発電実証研究 ～

Empirical Research of Bottom Mounted Offshore Wind Turbine

福本幸成*1 石原 孟*2 大窪一正*3 林田宏二*4

Yukinari FUKUMOTO, Takeshi ISHIHARA, Kazumasa OHKUBO, Koji HAYASHIDA

1. はじめに¹⁾

着床式洋上風力発電の歴史は、1990年のスウェーデンのNogersund洋上風力発電所(定格出力:220kW, 離岸距離:250m, 基礎:トリポッド式)に始まり、現在では2000年のデンマークのMiddelgrunden洋上風力発電所(定格出力:2000kW×20基, 離岸距離:2km, 基礎形式:重力式)や2003年のデンマークのNysted洋上風力発電所(定格:2300kW×72基, 離岸距離9km, 基礎形式:重力式, 図1参照)など、飛躍的な風力発電機の定格出力増加と併せて大規模な洋上風力発電所が次々と計画・建設されている。さらに洋上用として定格出力5000kW超の風力発電機もリリースされており、今後も洋上風力発電所の規模は益々増大する傾向にある。

我が国においては、2004年の瀬棚洋上風力発電所(定格出力:600kW×2基)やサミットウインドパワー酒田発電所(定格出力:2000kW×5基)が港内・水路内に建設され、2009年にはウインド・パワーかみす(定格出力:2000kW×7基, 図2参照)が外洋に面した堤防の40～50m沖に、欧州の洋上風力発電所で良く用いられるモノパイル式の基礎形式を採用して、建設されている。

ただし、これらの洋上風力発電所は全て沿岸洋上風力発電所であり、構造設計や施工方法に対する考え方は陸上風力発電所に近いと言え、今後我が国において、より沖合いにて本格的な洋上風力発電所を展開していくためには、我が国の洋上特性を十分に考慮した設計手法や施工方法を検討する必要がある。

そこで、独立行政法人新エネルギー産業技術総合開発機構(以下、NEDO)では、洋上風力発電に関する研究テーマを立ち上げて、2010年より「洋上風力発電等技術研究開発 洋上風力発電システム実証研究」について、東京電力株式会社と共同研究業務を実施している。

本稿では、本研究業務(以下、NEDOプロジェクト)の概要および検討している構造設計および施工方法等について紹介する。



図1 Nysted洋上風力発電所



図2 ウインド・パワーかみす

*1 東京電力株式会社 技術開発研究所 洋上風力発電技術グループ マネージャー
Manager, Offshore Wind Power Generation Technology Group, Research & Development Center, Tokyo Electric Power Company
*2 東京大学大学院 工学研究科 社会基盤学専攻 教授
Professor, Department of Civil Engineering, The University of Tokyo
*3 鹿島技術研究所 都市防災・風環境グループ 研究員
Research Engineer, Disaster Prevention and Wind Engineering Group, Kajima Technical Research Institute
*4 鹿島建設株式会社 東京土木支店 東電洋上風力発電工事事務所 工事課長
Manager, Tokyo Civil Engineering Branch, Kajima corporation

2. NEDO プロジェクト概要

本プロジェクト (H22～H25 年度) は、「我が国の厳しい気象・海象条件などに適合し、信頼性が高く、運転保守コストを低減させた洋上風力発電システムを確立すること」を目的として、千葉県銚子沖合約 3km の海域を建設地点 (図 3 参照) として、構造設計および施工方法の検討を行ったうえで、洋上風力発電実証試験機を建設し、各種研究用観測を実施するものである。

風力発電設備の構成としては、風力発電機・基礎・附帯設備 (昇降設備・系統連携設備等) となるが、そのうち、本プロジェクトで用いる風力発電機と基礎の概要について以下に示す。

【風力発電機】

三菱重工業社製の MWT92/2.4 (定格出力: 2400kW, ローター径: 92m, ハブ高さ: 平均海面 M.S.L. +80m) をベースとして、耐塩害仕様としての対策を施した洋上専用の実証試験機を採用する。また、タワー内には風車の動的応答解析モデルの高度化を目的として加振機を設置する。

【基礎】

外洋の高波浪域の岩盤地盤上に設置される風車基礎として、高い耐波浪性、急速施工性、耐久性、メンテナンスフリー性、アクセサビリティを有する PRC 構造を採用した重力式ケーソン基礎とする (図 4、図 8 参照)。

建設後には、風車の動的応答や基礎に作用する波圧・基礎部材応力の測定等を実施する。

また、本プロジェクトとは別に「風況観測システム実証研究」として、同海域 (風力発電設備の西側に約 300m 離れた地点) に洋上風況観測タワー (タワー高さ: M.S.L. +100m) を建設し、洋上特有の風況特性を把握するための長期観測を実施する計画となっている。本タワーでは、M.S.L. +90m までの高さについては、三杯式風速計、矢羽根式風向計および超音波風速計を用いた風況観測を実施するとともに、さらに高々度の風況を把握するためのドップラーライダーを用いた国内初の長期観測を実施するほか、温湿度計、気圧計、雨量計等を用いた各種観測を併せて実施する予定である。(建設イメージについては図 4 参照)

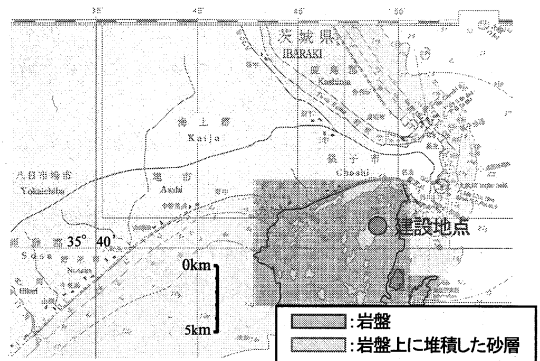


図 3 建設予定地点

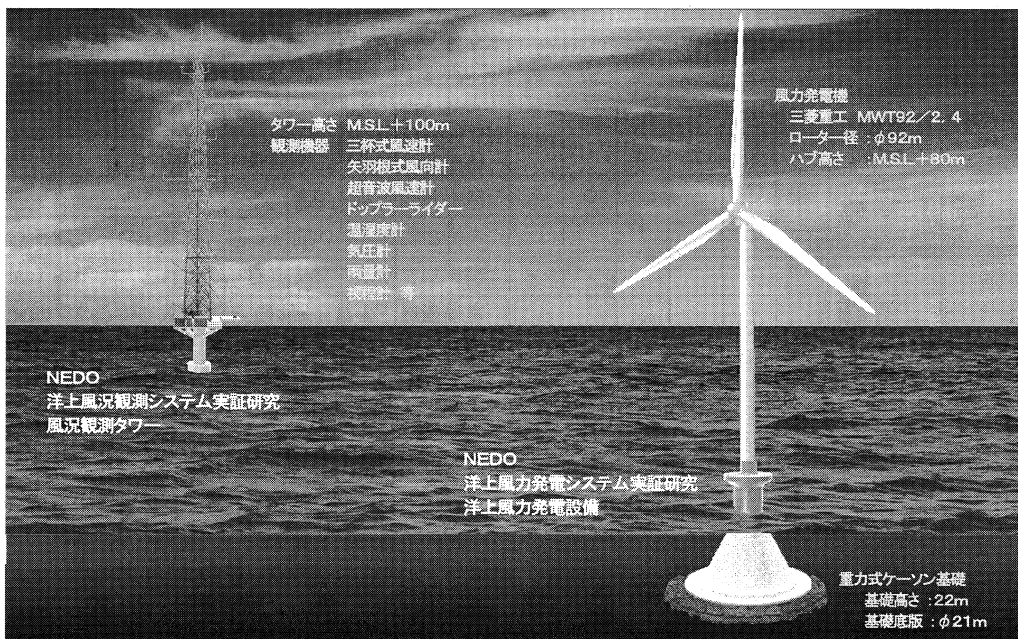


図 4 NEDO プロジェクト建設イメージ (洋上風車実証試験機・風況観測タワー)

3. 構造設計

本プロジェクトで建設する洋上風力発電機は、洋上に建設される構造物であるが、陸上風車と同様に「60m 超の工作物」として、大臣認定の取得が義務づけられた。(風況観測タワーも同様)

構造検討するための設計外力については、基本的には陸上風車の検討方法がベースとなるが、洋上特有の外力を考慮する必要がある。本設計では、建築基準法(以下、告示)を基本として、国内における海洋構造物に関する設計基準や、洋上風力発電設備の国際規格である IEC61400-3³⁾や DNV-OS-J101⁴⁾を参考に荷重設定および構造検討を行った。

3.1 荷重設定の特徴

本設計で用いた応力の組み合わせを表1に示す。

洋上特有の荷重としては、波浪荷重のほか、海潮流および吹送流による荷重、および地震時に発生する構造物周りの水の動水圧による荷重を考慮している。

風荷重については、通常の建築物の設計とは異なり、陸上風車と同様に、50年再現期間相当の暴風時の風荷重以外に、発電中の最大風荷重(平均最大荷重値およびピーク荷重値)についても検討を行っている。

ただし、今回は建設地点が洋上であるために告示では基準風速 V_0 が設定されていないために、本設計では台風

シミュレーションおよびメソスケール気象シミュレーション、局所風況予測モデル(MASCOT)^{5),6)}を用いて建設地点における年最大風速の非超過確率分布および風速の出現頻度を求め、「洋上における基準風速」を算定したうえで、告示に準拠して風荷重の算定を行った。

日本は混合気候であるために、気象現象に起因する風を、台風と非台風に分けて成因別極値風速を評価する必要がある。また、日本近海では年間平均28個の台風が発生し、そのうち1割程度が上陸しているが、顕著な台風の発生は稀であり、台風の進路から外れた気象官署では大きな風速が観測されないこともある。また、建設場所が気象官署から離れている可能性もあり、必ずしも、気象官署での観測データを利用できるとは限らない。このため、シミュレーションによる洋上での設計風速の評価手法およびその予測精度は非常に重要となる。

今回用いたシミュレーションによって求めた建設地点、M.S.L.+100mでの年最大風速の非超過確率の分布を図5に示す。これより、欧州とは異なり、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。

また、台風シミュレーションによって求めた建設地点における風速の鉛直分布の一例を図6に示す。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性を示すが、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ており、洋上とい

表1 洋上風車における応力の組み合わせ

力の種類	荷重および外力について想定する状態	応力の組合せ															
		固定 G	積載 P	積雪 S	風 Wn	風 Wg	風 We	風 We-red	風 Wm	波 Ha	波 Hb	波 Hb-red	水流 Oc	地震 (L1) K1	地震 (L2) K2	L1時動水圧 kw1	L2時動水圧 kw2
長期に生じる力	発電時平均風荷重最大時	○	○		○								○				
短期に生じる力	積雪時	○	○	○	○								○				
	発電時最大風荷重時	○	○			○							○				
	暴風時	○	○					○					○				
	波浪時	○	○					○			○		○				
極めて稀に発生する地震動により生じる力	地震時(レベル1)	○	○						○	○			○	○		○	
	地震時(レベル2)	○	○						○	○			○	○			○

G : 固定荷重によって生じる力

P : 積載荷重によって生じる力

S : 積雪荷重によって生じる力

Wn : 発電時の平均風荷重の最大時に生じる力

Wg : 発電時のピーク風荷重によって生じる力

We : 暴風時風荷重によって生じる力

We-red : 暴風時風荷重によって生じる力(低減値)

Wm : 発電時の年平均風荷重によって生じる力

Ha : 年平均波浪によって生じる力

Hb : 暴風時波浪によって生じる力

Hb-red : 暴風時波浪によって生じる力(低減値)

Oc : 海流・潮流・吹送流によって生じる力

K1 : レベル1地震荷重によって生じる力

K2 : レベル2地震荷重によって生じる力

kw1 : レベル1地震時の動水圧によって生じる力

kw2 : レベル2地震時の動水圧によって生じる力

えども、周辺地形の影響による空間的な変化を十分に考慮する必要があることが分かる。

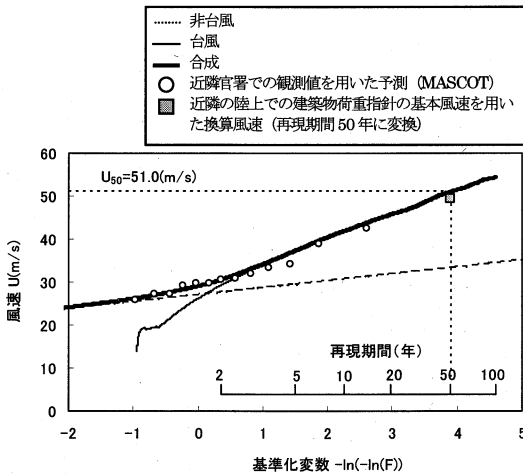


図5 建設地点における成因別年最大風速²⁾

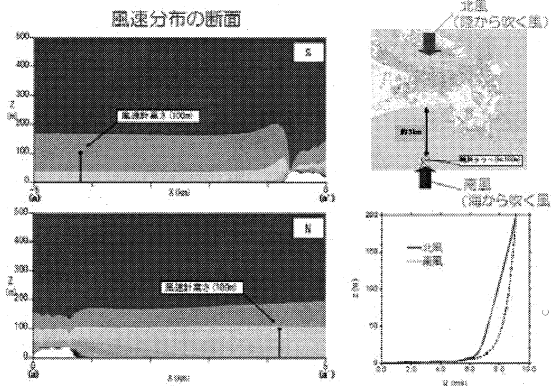


図6 建設地点における洋上風速の鉛直分布²⁾

さらに、洋上では、台風等の暴風時に発生する波浪荷重についても考慮する必要がある。暴風・波浪同時作用時における風車タワー基部と基礎基部の最大曲げモーメントを図7に示す。これより、風車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浪荷重が大きいことが分かる。また図7には、比較のため、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。

これより、風荷重と波浪荷重の最大値から単純和により求めた荷重の最大値は、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、風荷重と波浪荷重の組み合わせを考えると、風荷重と波浪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。

本設計では、作用の非同時性を考慮して片方を低減した荷重を組み合わせ、それぞれ「暴風時」と「波浪時」として荷重の組み合わせケースを設定して構造検討を実施した。

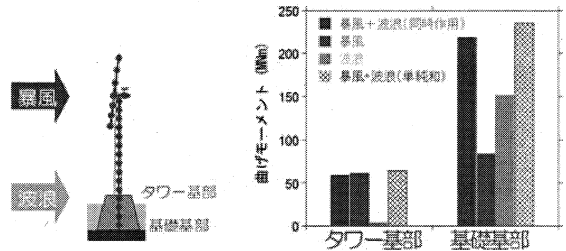


図7 タワーと基礎に作用する風荷重と波浪荷重²⁾

3.2 構造上の特徴

本風力発電設備では、波浪や水流による荷重は全て基礎部に負担するものとして、風車タワー部については通常の陸上風車とほぼ同様の考え方で構造検討を可能としている。

基礎については、一般的に陸上風車基礎ではRC構造が用いられているが、本工物では、前述したとおり、PCとRCを組み合わせたPRC構造の中空式の基礎であることが大きな特徴である。図8に示すように基礎形状は波浪荷重の影響を小さくするために三角フラスコ型としており、輸送時の重量低減のためにPC構造を採用することによって中空式を成立させた。なお、基礎据付時に高比重の中詰材を投入することで、完成後には重力式基礎として機能するようになっている。

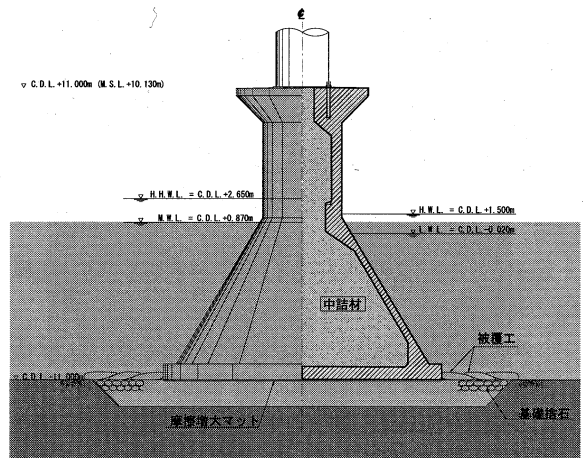
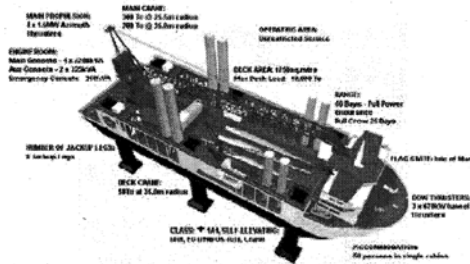


図8 風車基礎

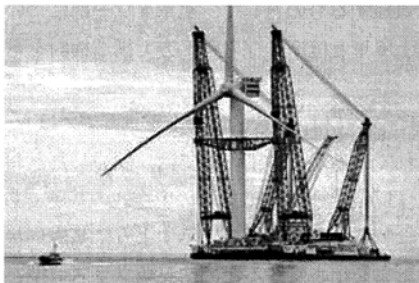
4. 施工方法

洋上での風力発電所建設では、陸上での施工条件とは異なる点が多く、海象条件が最も大きなハードルとなる。

欧州では、図9に示すような洋上風車専用を含む自己昇降式作業台船やフローティングクレーン船（ただし、非常に穏やかな波浪条件下に限る）を用いた施工方法が採用されているが、残念ながら国内には欧州のような洋上風車専用の施工船は存在しないのが現状である。

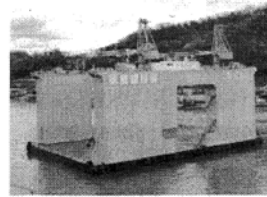


風車専用自己昇降式作業台船⁷⁾



フローティングクレーンによる一括施工⁸⁾

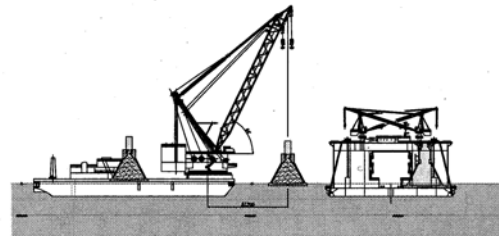
図9 欧州での風車施工



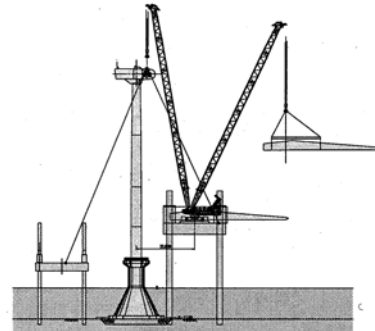
フローティングドック FD
(基礎構築用)



起重機船
(基礎輸送・据付用)



FD→起重機船への基礎載せ替え，基礎据付



SEPによる風車据付
図10 施工方法案

そこで、本プロジェクトではフローティングドック（以下、FD）、起重機船、自己昇降式作業台船（Self Elevating Platform、以下SEP）を駆使して、施工する計画を行った。施工フローとしては、図10に示すようにFD上で中空式のケーソン基礎を構築し、起重機船へ載せ替えて、建設地点までの海上輸送と据付作業を行う。据付作業はSEPを2隻使用して実施する。

5. 最後に

来年度中には、千葉県銚子沖に日本初の本格的洋上風力発電設備が出現する予定である。

地震や台風・波浪等の厳しい外力条件下での設計手法や厳しい海象条件下での施工方法等、本実証研究で得られる様々な知見を、国内での洋上風力発電の普及に寄与することだけに留まらず、広く海外にも発信できるような成果が得られることを期待する。

【参考文献】

- 1) 石原孟：着床式洋上風力発電技術の現状と課題，風力エネルギー，Vol. 34, No. 2, pp. 78-84, 2010.
- 2) NEDO 新エネルギー・産業総合開発機構：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.
- 3) IEC61400-3：Wind turbines-Part3 Design requirements for offshore wind turbines, 2009.
- 4) DNV-OS-J101 Offshore Standard：Design of Offshore Wind Turbine Structures, 2007.
- 5) 石原孟，ホタイホーム，チョンチーリョン，藤野陽三：台風シミュレーションのための混合確率関数と修正直交変換法の提案，第18回風工学シンポジウム論文集，pp. 5-10, 2004.
- 6) 石原孟，山口敦，藤野陽三：複雑地形における局所風況の数値予測と大型風洞実験による検証，土木学会論文集，No. 731/I-63, pp. 195-211, 2003.
- 7) Herman, S. A.：Offshore Wind Farms, Analysis of Transport and Installation Costs, ECN-I-02-002, 122p, 2002.
- 8) Beatrice：http://www.repower.de/