土木学会 平成 22 年度全国大会
研究討論会　研－08　資料

洋上風力発電技術の現状と将来展望

座　　長　勝地　弘　横浜国立大学
話題提供者　石原　孟　東京大学
吉岡　健　電源開発(株)
吉田　茂雄　富士重工業(株)
宇都宮智昭　京都大学
嶋田　健司　清水建設(株)
土谷　学　鹿島建設(株)

日　　時　平成 22 年 9 月 1 日（水）16:15～18:15
場　　所　北海道大学 札幌キャンパス
教　　室　N302

構造工学委員会

風力発電設備の動的解析と構造設計小委員会

＜プログラム＞

〈資料〉

趣旨説明　勝地　弘　…　1
（横浜国立大学）

第１部　洋上風力発電技術の現状と課題

１．洋上風力発電の現状とその技術開発　石原　孟　…　3
（東京大学）

２．着床式洋上風力発電設備における新しい支持構造形式の提案　吉岡　健　…　11
（電源開発）

３．着床式洋上風力発電設備の動的解析技術　吉田 茂雄　…　15
（富士重工業）

第２部　洋上風力発電技術の将来展望

４．浮体式洋上風力発電の将来展望　宇都宮 智昭　…　19
（京都大学）

５．浮体式洋上風力発電支持物の構造最適化　嶋田 健司　…　23
（清水建設）

６．大規模洋上風力発電所の建設に向けて　土谷　学　…　27
（鹿島建設）

まとめ　勝地　弘
（横浜国立大学）

研究討論会の趣旨説明

横浜国立大学大学院工学研究院　正会員　勝地　弘

１．はじめに

構造工学委員会「風力発電設備の動的解析と構造設計小委員会」（委員長：石原孟東京大学教授）（以下，小委員会）は，2008 年 1 月に活動を開始し，これまで約2年半の活動を行ってきた. 本小委員会は，大学，風力発電事業者，電力会社，設計会社，メーカー，建設会社などからなる約 40 名の委員で構成されており，台風と地震の作用を強く受ける地域に適した風力発電設備のあり方及びその構造設計方法を検討すると共に，①風力発電設備の動的解析，②風力発電設備の運転に伴う疲労荷重の評価，③洋上風力発電に向けた新しい支持構造の設計方法の検討等を行っている.

本小委員会は，構造工学委員会「風力発電設備耐風設計小委員会」（2004 年 9 月～2007 年 10 月，委員長：石原孟東京大学教授）の活動を引き継いだものであり，前小委員会では 2007 年 11 月に暴風時・地震時における風車タワー・基礎に作用する荷重と支持物の構造強度に関する算定手法を定めた「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」（以下，指針）を刊行し，講習会を実施した．また，2005 年全国大会において,「風車の安全性を検証する　－耐風安全性の検証と設計への提言－」と題した研究討論会を実施し，風力発電支持構造物設計における問題点，指針への取り組みなどに関して話題提供を行った.

その後，国内において風力発電設備の耐風・耐震安全性に対する社会的な認知が深まり，わが国特有の自然環境条件に適した日本型風車の開発や洋上風力発電導入に関する機運も高まってきた. また, 2007 年 6 月 20 日には建築基準法が改正され，風力発 電設備支持物が該当する工作物の確認申請の手続きが変更され，ハブ高さが 60m を超える風力発電設備は支持構造の安全性を確認するために指定性能評価機関による評価と大臣認定を受けることが必要となった. さらに風車発電時のロータ回転に起因する変動荷重は，風力発電設備に大きな繰り返し荷重をもたらすため，疲労荷重が支持構造物の安全性に及ぼす影響を評価するニーズが高まってきた.

このような状況を鑑み，風力発電設備の動的解析と構造設計の高度化を行うとともに，現指針に盛り込まれなかったいわゆるレベル 2 地震動や運転時荷重などに対する設計法を確立し，指針の改定を行うことを目的として，2008 年 1 月に本小委員会が設置された.

２．研究討論会の趣旨

2020 年までに温室ガス 25%削減の政府目標を達成するため，洋上風力発電の積極的な導入は不可欠と考えられる．また，欧州では 2020 年度までに 4000 万 kW の導入目標を掲げ，洋上風力発電を積極的に推進している．わが国では陸上における風力発電適地の減少に伴い，賦存量の多い洋上風力発電が注目されており，NEDO の風力発電ロードマップには 2020 年度までに風力発電導入量の約 4 割を洋上風力発電で賄うことが示されるとともに，それを実現するための洋上風力発電技術開発が開始されている.

本小委員会では，当初レベル 2 地震動，風車発電時荷重に対する設計法を確立し，指針の改訂を行うことを目的とし，並行して洋上風力発電の現状と課題をとりまとめることとしていたが，海象条件の影響を受ける防波堤内への風力発電設備の建設が既に行われていることから，海岸近傍に風力発電設備を設置する場合の波力の算定方法について指針の改訂版に盛り込むこととした．またわが国の洋上風力発電の導入拡大を支援するために検討されてきた洋上風力発電設備の支持構造，設計法など指針の改訂版に盛り込まれない内容については，今回研究討論会を開催し，話題提供することとした.

具体的には，洋上風力発電技術開発の現状，大規模な洋上風力発電所を建設するために必要な外部環

キーワード　洋上風力発電，研究討論会，風力発電設備支持物構造設計指針・同解説の改定
連絡先　〒240-8501　横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5　横浜国立大学工学研究院人もの空間のシステム分野　045-339-4243

境条件の評価，着床式洋上風力発電システムの動的解析と支持物の構造設計，浮体式洋上風力発電の現状と構造最適化，大規模洋上風力発電所建設のための施工技術等に関する最新研究成果と技術課題を示すと共に，洋上風力発電技術の将来を展望する．研究討論会のプログラムは表１に示す.

表１　研究討論会のプログラム

趣旨説明
第１部　洋上風力発電技術の現状と課題
　１．洋上風力発電の現状とその技術開発
　　①国内外の洋上風力発電の現状，②国内外の技術開発の現状
　２．着床式洋上風力発電設備における新しい支持構造形式の提案
　　①電源開発が実施された NEDO 洋上風力発電実証研究 F/S 調査の紹介，②ハイブリッド重力式基礎の提案
　３．着床式洋上風力発電設備の動的解析技術
　　①着床式洋上風力発電設備の動的解析技術の現状，②風車と基礎の相互作用を考慮した動的解析の実例紹介
第２部　洋上風力発電技術の将来展望
　４．浮体式洋上風力発電の将来展望
　　①世界と日本における浮体式洋上風力発電の現状，②浮体式洋上風力発電技術開発の実例紹介
　５．浮体式洋上風力発電支持物の構造最適化
　　①東京大学・東京電力・清水建設・五洋建設の共同研究で行われた浮体式洋上風力発電技術開発の紹介，②支持物の構造最適化
　６．大規模洋上風力発電所の建設に向けて
　　①東京電力・東京大学・鹿島建設の共同研究で行われた洋上風況観測と NEDO 洋上風力発電実証研究 F/S 調査の紹介，②大規模洋上風力発電所建設のための施工技術
まとめ

３．今後の予定

小委員会では，レベル 2 地震動，風車発電時の風荷重に対する構造設計法，海岸近傍に風力発電設備を設置する場合の波力の算定方法などを新たに改訂される指針に盛り込むこととしており，現指針と同じように例題による計算例を示すこととしている．風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 2010 年版目次（案）は表２に示す通りである.

表２　風力発電設備支持物構造設計指針改定版目次

I 総則・設計方針	第 1 章　総則 第 2 章　設計の流れ
II 荷重評価	第 3 章　設計風速の評価 第 4 章　風荷重の評価 第 5 章　地震荷重の評価 第 6 章　その他の荷重の評価
III 構造計算	第 7 章　タワーの構造計算 第 8 章　ペデスタルの構造計算 第 9 章　基礎の構造計算
IV 設計・解析例	第 10 章　指針による設計例 第 11 章　数値計算による解析例
V 関連法規･参考資料	第 12 章　関連法規および基準 第 13 章　参考資料

指針の改定版は，2010 年末に刊行予定であり，刊行後に講習会を開く予定としている．また本研究討論会の内容は次期小委員会において風力発電設備支持物構造設計指針・同解説の洋上編としてまとめる予定である.

研究討論会の趣旨にも説明したように，欧州では 2020 年度までに 4000 万 kW の導入目標を掲げ，洋上風力発電を積極的に推進している．一方，わが国では NEDO 新エネルギー･産業技術総合開発機構が平成 21 年度から洋上風況観測システム実証研究，平成 22 度から洋上風力発電実証研究が開始された．これらの実証研究では，洋上風況観測タワーおよび洋上風力発電設備を外洋に設置し，洋上における気象・海象等洋上風力発電システムの設計・施工に必要なデータを取得すると共に，風・波浪・地震等の外力に対する風力発電設備およびその支持構造物の応答を計測し，洋上風力発電設備およびその支持構造物の安全性・信頼性・経済性を明らかにする予定である.

本研究討論会並びに本小委員会の活動は，今後わが国における洋上風力発電の導入拡大の一助になればと期待している.

洋上風力発電の現状とその技術開発

東京大学大学院工学系研究科　正会員　　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わ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。

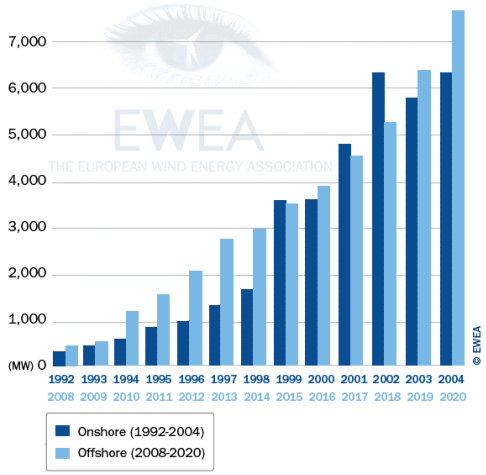


図 1　2020 年までの欧州の洋上風力発電導入量の予測[3)]

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

キーワード　洋上風力発電、支持物の構造形式、自然環境条件と荷重の評価、構造設計、運搬施工
東京大学大学院工学系研究科　社会基盤学専攻　　Email：ishihara@bridge.t.u-tokyo.ac.jp

（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。

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]。

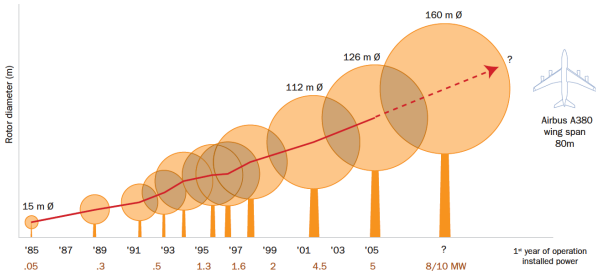


図 5　風車の定格出力とローター直径の変遷[8]

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 4 m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で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。

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。

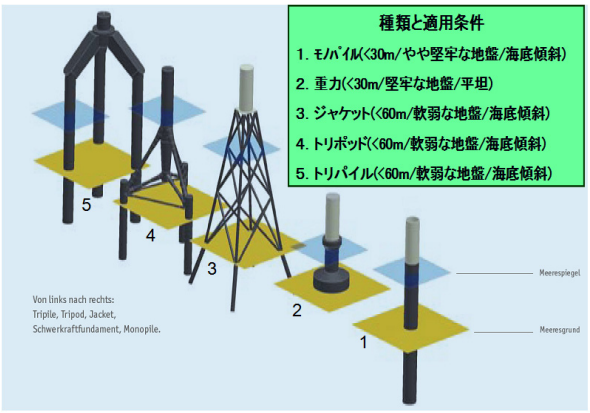


図８　着床式洋上風力発電設備支持物の構造形式[11)]

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、またトリパイルとﾄﾞ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、ﾄﾞルフィンは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。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 ﾄﾞルフィン	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。

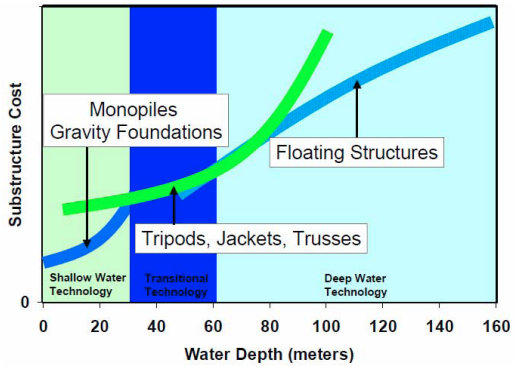


図9　支持構造コストの水深による変化[5]

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外部条件および荷重の評価手法を確立する必要がある。

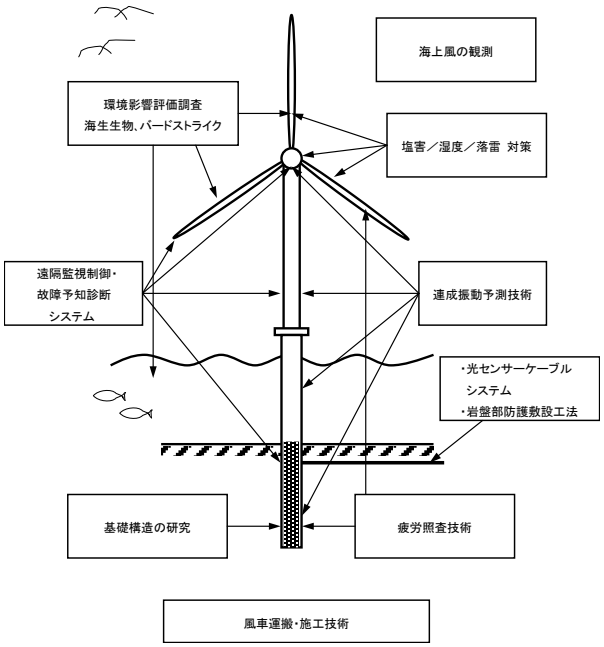


図10　洋上風力発電に関する研究課題[5]

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。

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、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。

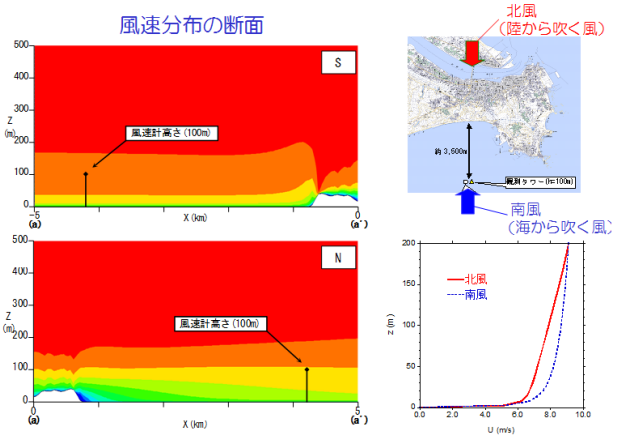


図11　実証研究地点における洋上風速の鉛直分布[12]

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。

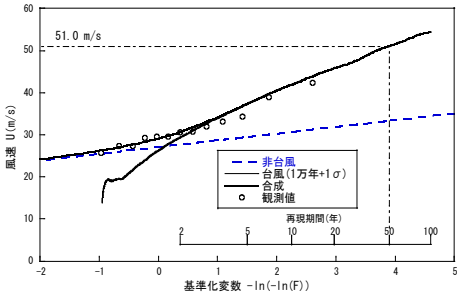


図 12 実証研究地点における成因別年最大風速 [12)]

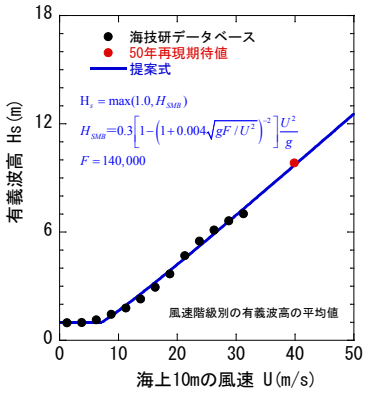


図 13 有義波高の風速による変化 [12)]

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際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。

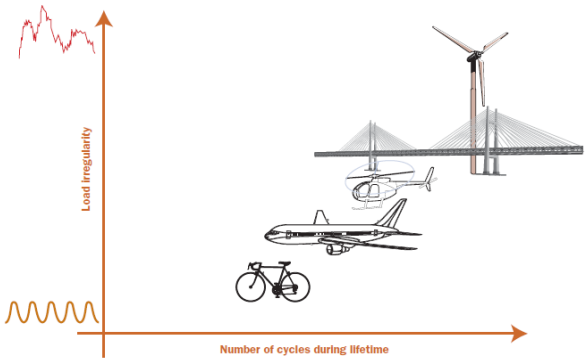
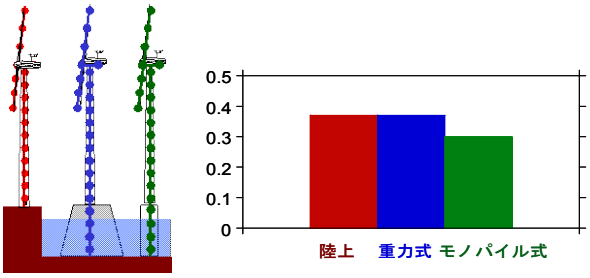


図 14　風車に作用する疲労荷重の比較 [3)]

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。

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。



(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)]

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きに、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。

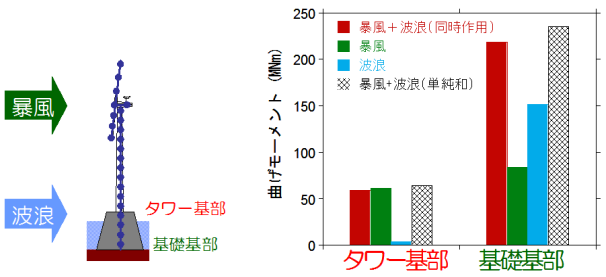


図 16　タワーと基礎に作用する風荷重と波荷重 [12)]

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。

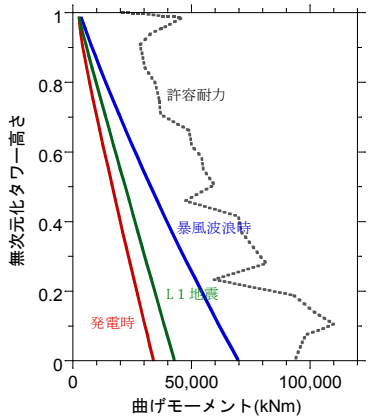
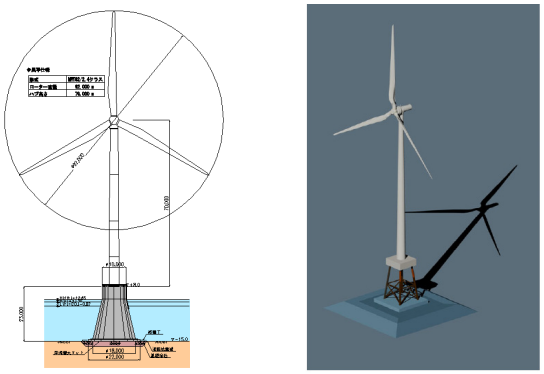


図 17　稀に発生する荷重と許容耐力との関係 [12)]



(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

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。

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)]

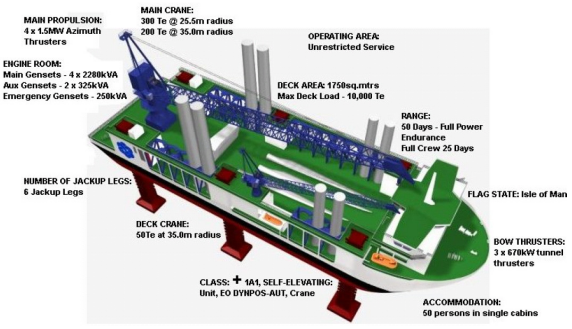


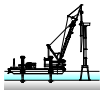
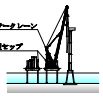
図 20　洋上大型風車建設用専用船 [15)]

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 年から新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）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り、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/

着床式洋上風力発電設備における新しい支持構造形式の提案

電源開発（株）水力エンジニアリング部　　正会員　　吉岡　　健

１．はじめに

地球温暖化防止に向け，CO_2 排出削減を目指した再生可能エネルギーの活用が世界的に進められる中，近年，高い賦存量が見込まれる洋上風力発電が着目されている[1)]．特に，2020 年までに温室効果ガス 25%削減のわが国政府目標を達成するためには，欧州で実績のある着床式洋上風力の開発・推進が有力な手段の一つと考えられる．このような状況の中，(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）による「洋上風力発電等技術研究開発」が平成 20 年度より開始された．本報告では，平成 20 年度に電源開発（株）（以下，J-POWER）が受託した「洋上風力発電実証研究 F/S 調査」の概要と，その中で提案した新しい支持構造形式について述べる．なお，本 F/S 調査の詳細については，文献 2)を参照されたい．

２．NEDO 事業計画と F/S 概要

NEDO による「洋上風力発電等技術研究開発」は，以下に示すとおり 3 段階の項目に分かれている．

(1) 洋上風力発電実証研究 F/S 調査（平成 20 年度）

実証試験候補海域において，海域調査と実証研究設備の全体設計を実施し，洋上風力発電導入に対する社会的制約を明らかにするとともに，実証研究の実現可能性を評価する．

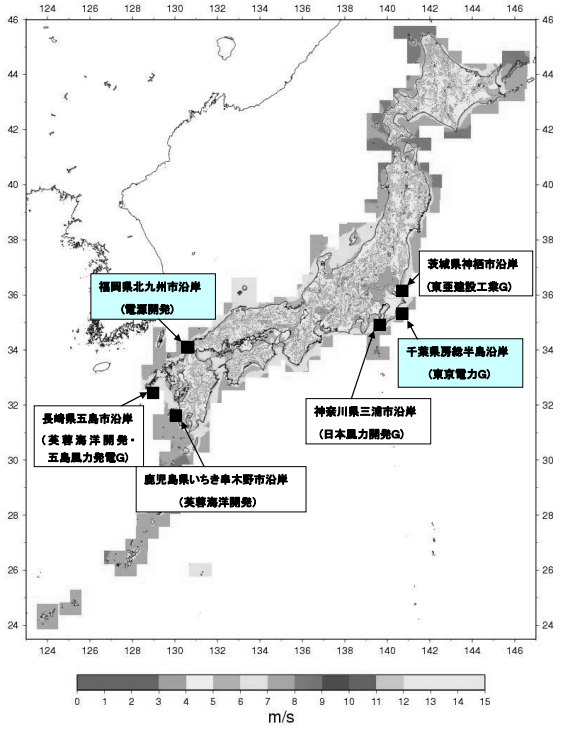
(2) 洋上風況観測システム実証研究（平成 21～25 年度）

洋上に風況観測タワーを設置し，洋上における気象・海象等，洋上風力発電システム等の構築に必要なデータを把握すると共に，環境影響に関する調査を実施する．

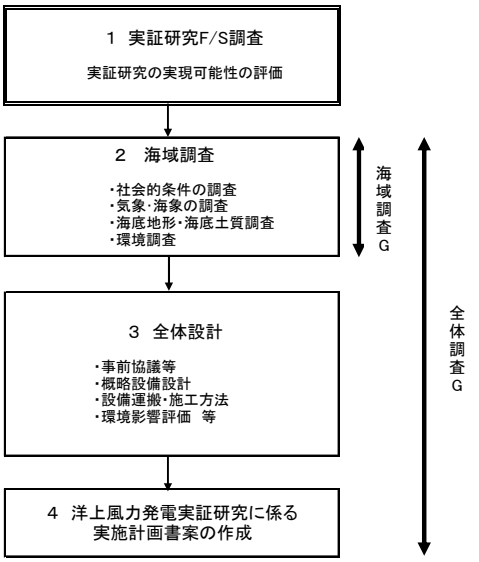
(3) 洋上風力発電システム実証研究（平成 22～25 年度）

洋上に風力発電設備を設置し，外力に対する応答を計測することにより，風車の安全性・信頼性・経済性を明らかにし，洋上風力発電ガイドラインを作成する．

このうち，F/S 調査は**図－1** に示した 6 海域において実施され，当社および東京電力グループは全体調査グループとして，海域調査，全体設計（風力発電設備および観測設備各 1 基），実証研究実施計画書案の作成を行った（**図－2** 参照）．調査内容は，別途設置された「洋上風力発電実証研究 F/S 実行委員会」（委員長：牛山泉足利工業大学学長）にて審議された．



図－1　候補海域（コンターは年平均風速）[3)]



図－2　F/S 調査の検討フロー[3)]

キーワード　洋上風力発電，着床式，支持構造

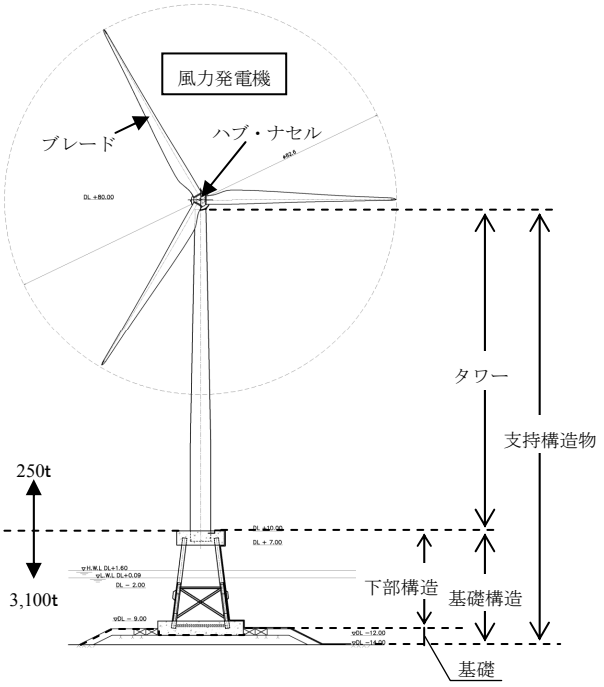
連絡先　〒104-8165　東京都中央区銀座 6-15-1　電源開発（株）水力エンジニアリング部　土木技術室　03-3546-3222

3．J-POWER の F/S 調査概要

F/S 調査時に検討対象とした風力発電機仕様を**表－1**に, 着床式風力発電設備全体構造を**図－3**に示す. 風力発電機は日本製鋼所（株）製の J82 とし，ハブ高さは将来の発電機大型化を見据えて 80m とした.

表－1　風力発電機仕様

形式		J82-2.0
定格出力		2,000kW
ロータ直径		82.6m
ハブ高さ		65/80m
定格風速		12m/sec
カットイン風速		3m/sec
カットアウト風速		25m/sec
設計平均風速		8.5m/sec(Ⅱ)
耐風速		70m/sec
風車クラス	疲労荷重	Ⅱ
	極値風速	Ⅰ
風力設備形式		水平軸プロペラ型 ダイレクトギアレスドライブ
発電機形式		永久磁石　多極同期発電機 AC-DC-AC フルコンバータ
出力制御		ピッチ制御
ヨー制御		アクティブヨー/フリーヨー機能付



図－3　着床式風力発電設備全体構造

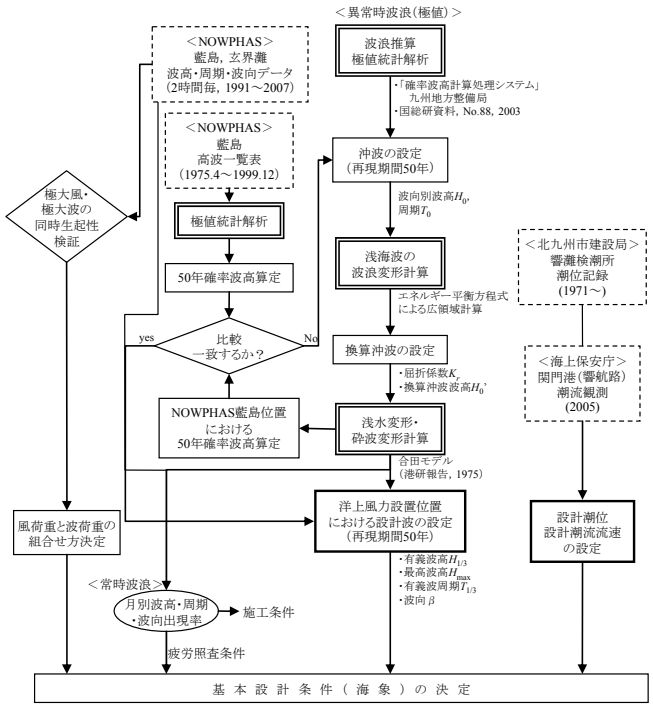
海域調査の結果得られた基礎構造の主要設計条件を**表－2** に示す. 考慮する設計状態は支配的と考えられる暴風波浪時とし，再現期間 50 年の設計風速(V_{ref}=51.6m/s)に基づく本体荷重を基礎構造の上端に作用させた．なお設計風速は，国土交通省港湾局より全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)のうち近郊の藍島，玄界灘における風観測データを受領し，その極値統計解析結果と建築基準法の値を比較した上で設定している．水深および地盤条件は海上保安庁「海の基本図」他より推定し，設定した.

表－2　基礎構造の主要設計条件

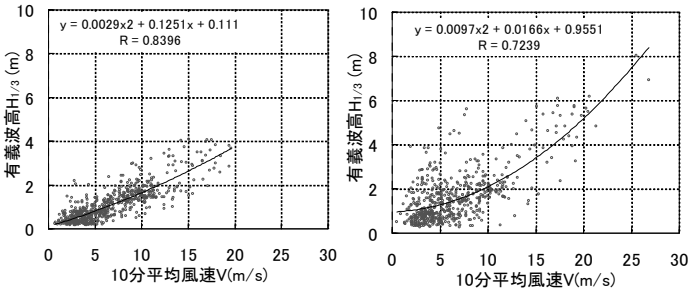
項目	内容
暴風時 本体荷重	風力発電機・タワー荷重（D.L.+10.0m 位置）: 水平力 H_{LD}=908kN，鉛直力 V_{LD} =2,493 kN，モーメント M_{LD}=49,932 kN･m
水深	D.L.－14m
設計潮位	H.W.L.＝D.L.+1.60m，L.W.L.＝D.L.+0.09m
設計波	有義波高 $H_{1/3}$=6.7m，最高波高 H_{max} =10.7m, 有義波周期 $T_{1/3}$=12s（再現期間 50 年）
風と波の 同時生起	極大風（V_{e50}）と極大波（H_{max}）が同時かつ同一方向に作用すると考える.
設計海潮流	V=0.5m/s（≒1 ノット）
地盤条件	▼DL-14m 堆積層（砂，砂礫）　γt=18kN/m³, γsat=20 kN/m³, N＝10, c＝0 kN/m², ϕ=35°　14m ▼DL-28m 岩盤（岩種不明）　γt=22 kN/m³, γsat=22 kN/m³, N＝50, c＝300 kN/m², ϕ=0°
共振点条件	$f_r < f_0 < f_b$ （soft-stiff 条件） f_0: タワー及び基礎を含めた全体の固有振動数 f_r: ロータの回転振動数＝定格回転数（19rpm）／60×1.15＝**0.364 (Hz)** f_b：翼の通過振動数＝カットイン回転数（8.5rpm）／60×3×0.95＝**0.40 (Hz)**

海象条件については, **図－4** に示す海象調査フローに基づき設定した．まず，高田ら [4]にも示されている「確率波高計算処理システム」（国土交通省九州地方整備局）より沖波を設定する．次に，エネルギー平衡方程式による浅海波の波浪変形計算より屈折係数を評価し，換算沖波波高とする．さらに，合田 [5] の浅水・砕波変形計算より候補位置における設計波（再現期間 50 年）を決定する．なお，本検討の妥当性については，近郊の NOWPHAS 藍島での波浪観測データに基づく極値統計解析結果より検証済である. また，ここで示した設計波の設定フローは，改定予定の「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」に示される内容と基本的に整合するものである.

洋上風力発電設備支持構造の設計においては，風



図－4　海象調査フロー



a)藍島　　b) 玄界灘

図－5　風速と波高の相関出現分布

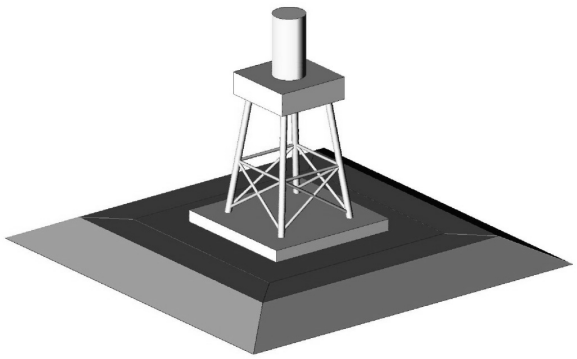
（1996～2007 年データ, 国土交通省港湾局より受領）

と波の同時生起性，言い換えれば風荷重と波荷重の組合わせ方が極めて重要である．そこで，前述の NOWPHAS 藍島および玄界灘における風観測，波観測データに基づき，暴風・高波作用の相関出現特性を調べた（**図－5**）．図より玄界灘よりも藍島の方が相関性が高いことが分かる．これは風波が卓越する海域であることが要因と考えられ，うねりが来襲する海域では相関性が低くなるものと考えられる．候補海域は藍島に近いことから，設計条件としては保守側の観点から，極大風と極大波が同時かつ同一方向に作用すると考えることとした．これについては実証研究課題として，現在，他の NOWPHAS 観測地点も含めた検証を行っているところである．最終的には，IEC61400-3[6]に示される組合せの再現期間や低減風速，低減波高に代わって，日本周辺海域に適した組合せ方法を提案できればよいと考えている．

共振点条件は疲労による影響を避けるために GL Guideline[7]に準拠して設定したものであり，全体の一次固有振動数をロータの回転振動数と翼の通過振動数の間に入れることによって共振を避ける，いわゆる soft-stiff 条件である．

４．ハイブリッド重力式基礎の提案

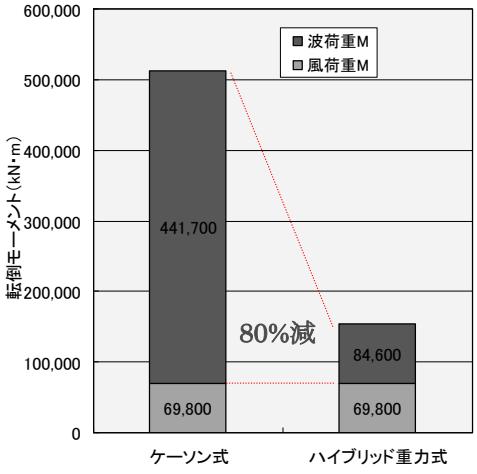
まず 1 次選定として，実績のある重力式（ケーソン式），杭式（モノパイル式，組杭式，ジャケット式）について比較検討を行った．その結果，杭式の場合は，実証計画地点の地盤条件では岩盤削孔に多大な費用と工期が必要となるため，重力式（ケーソン式）が経済性の観点から優位であるとの結論に達した．しかしながら，ケーソン式は作用波力が大きくその分所要重量も大きくなり不合理であること，ケーソン据付後中詰め砂投入までの施工時安定性に不安があること等，改善すべき要素がある．そこで 2 次選定として，重力式の主に経済面における利点とジャケット式の主に構造安全性・施工性における利点を生かした, ハイブリッド重力式を考案した. これは，捨石マウンド上に底版コンクリートと一体化したジャケットを設置する構造である．ハイブリッド重力式の 3 次元イメージを**図－6** に示すとともに, 以下ではその優位性について述べる．



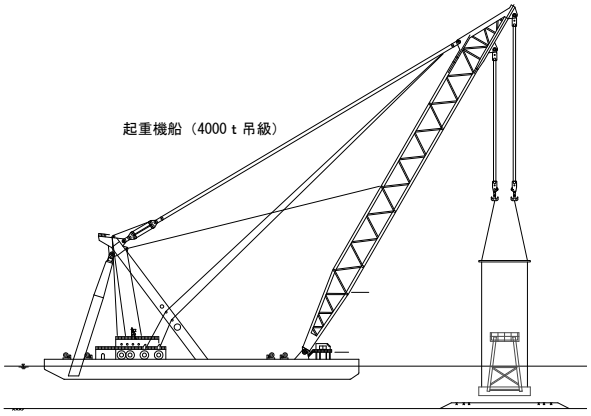
図－6　ハイブリッド重力式　3 次元イメージ

まず，構造安全性については，水中部を骨組部材による透過構造とすることにより，ケーソン式と比べて作用波力を大幅に低減することができる（**図－7** 参照）．また，水中部を組杭ではなく，支管（ブレース材）を有するジャケット構造とすることによって，高いモーメント荷重を軸圧縮力に変換することがで

きる．その上で，主管（レグ材）を充填鋼管コンクリート（CFT）とすることにより，変換した軸圧縮力をコンクリートの軸圧縮耐力で抵抗することができ，3～4 割程度の鋼管断面縮減が可能となる．さらに CFT の場合，主管と支管の各点部のパンチングシアー耐力および疲労強度向上が期待できる．また，ジャケット部材の剛性を調整することにより，共振点条件を満足させることができる．

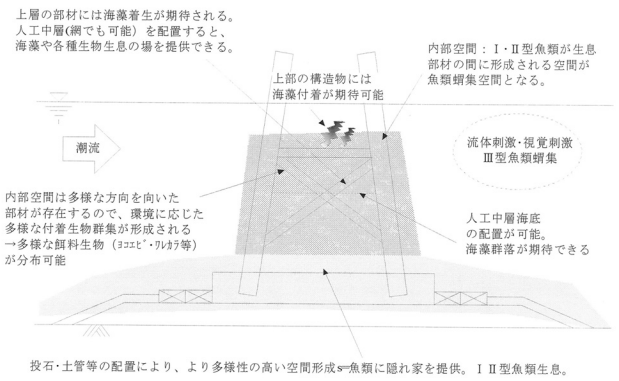


図－7　転倒モーメントの比較



図－8　下部構造の据付状況

施工性については**図－8** に示すように，捨石マウンド築造後，プレキャストで底版コンリートと一体化したジャケットを 4,000t 吊級の起重機船にて据付けることにより，海上作業量を最小化することができる．経済性については，水深 14m の候補海域ではケーソン式と同等であるが，将来的なウィンドファームへの展開を見込み，水深 30m で比較した場合ではケーソン式よりも経済的になると考えられる．



図－9　想定される魚礁効果

最後に環境影響のひとつの魚礁効果に関しては，**図－9** に示すように捨石マウンド部，ジャケット部それぞれに効果が見込まれ，他形式に比べて最も魚礁効果が高いと考えられる．これについては，実証研究時の環境影響調査により確認することとしている．

５．おわりに

昨年度当社は，（独）港湾空港技術研究所および伊藤忠テクノソリューションズ（株）との共同研究として，洋上風況観測システム実証研究を受託した．現在，観測設備用支持構造として今回提案したハイブリッド重力式基礎の詳細検討を実施しているところである．

参考文献

1) 一般社団法人　日本風力発電協会：風力発電の賦存量とポテンシャルおよびこれに基づく長期導入目標とロードマップの算定（Ver.1.1），2010.
2) NEDO：平成 20 年度 洋上風力発電実証研究 F/S 調査報告書，2009.
3) NEDO：平成 20 年度 洋上風力発電実証研究 F/S 評価報告書，2009.
4) 高田悦子，諸星一信，平石哲也，永井紀彦，竹村慎治：我が国沿岸の波浪外力の分布（海象外力検討調査），国土技術政策総合研究所資料，No.88，2003.
5) 合田良実：浅海域における波浪の砕波変形，港湾技術研究所報告，Vol.14，No.3，pp.59-106，1975.
6) International Electrotechnical Commission : Wind turbines - Part 3, Design requirements for offshore wind turbines, IEC 61400-3, 2009.
7) Germanischer Lloyd, Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines, Edition 2005.

着床式洋上風力発電設備の動的解析技術

富士重工業株式会社　非会員　○吉田 茂雄
株式会社熊谷組　正会員　大本 晋士郎

1. 背景

風力発電は，1980 年代より，陸上を中心に着実に導入が進んできた．近年，大規模ウィンドファームに必要な好風況で広大な敷地が得られ，輸送・設置上の制約が少ない洋上への導入が，欧州を中心に急速に進んでいる[1].

本稿では，ウィンド・パワーかみす（Fig 1）を例に着床式洋上風車の発電時の動的解析事例を紹介する．

Fig 1 ウィンド・パワーかみす

2. 解析法概要

2.1 解析法

洋上風車の設計において想定すべき条件は，波・風，ならびに，風車の状態（正常/故障，発電/待機/起動/停止），電力系統の条件（正常/停電）の組み合わせで設計基準・ガイドライン[2][3][4]において規定されている．

これには膨大な動的解析が必要であるため，本研究では，BLADED[5]を用いた．これにより，各種変動風モデル，不規則波力，翼素運動量理論による空力計算，ロータ，タワー，ドライブトレインの弾性・構造減衰，ならびに，ピッチ制御・発電機トルク制御など，洋上風車の基本的な特性を考慮した荷重計算を行うことができる．

同手法において，風荷重は，翼素運動量理論を用いている．これは，生産性に優れた方法で，風車に動的シミュレーションにおいて一般的に使用されているものである．

また，波荷重は Morison 式を用いる．なお，同ソフトでは解析できない衝撃砕波力については，個別に解析した．

2.2 風車・基礎

一般的な可変速ピッチ制御の風車の場合，低風速域においては，ピッチ角は固定で周速比（ロータ半径×回転角速度/風速）が概ね一定になるように発電機トルクを制御する．また，定格風速を超える高風速域においては，出力が一定（定格出力）にて，回転速度が一定になるようにピッチ制御を行う．コントローラは風車の動特性ならびに疲労荷重に影響を与えるため，実機の制御を適切にモデル化する必要がある[6].

一般に，洋上風車は基礎からの実質的な高さが高くなるため，動特性に対する基礎の支持条件の影響が大きくなる．本研究では，基礎の支持モデルとして，捩りバネと水平バネを組み合わせたスウェイ・ロックモデルを適用した[7].

3. 解析条件

3.1 サイト

本研究で検討したウィンド・パワー・いばらき社のウィンド・パワーかみす（Fig 1）は，茨城県神栖市の沿岸部にあり，沿岸から約 40m，水深約 5m の位置に，240m の間隔で 7 機の風車が設置されている．これまでの国内設置例は，いずれもドルフィン基礎を適用した防波堤の内側にあるサイトであるのに対して，モノパイル基礎を適用した外洋サイトである点が，特徴的である[8][9].

3.2 風車・基礎モデル

風車の設置状況をFig 2に示す．基礎は直径 3.5m のモノパイルで，海床から風車基部までが 8m，タワー高さが 57m

キーワード　洋上風車，動的解析
連絡先　〒320-8564　栃木県宇都宮市陽南 1-1-11

である.

風車は富士重工業製 SUBARU80/2.0[10]である. これは, ロータ直径 80m の 3 枚翼のダウンウィンドロータを持つ定格出力 2MW の風車である. 風速が概ね 13m/s を超えると, 定格出力 2MW で発電するが, その際, ロータ速度 17.5r/min に対応する約 0.3Hz ならびにブレード通過周波数約 0.9Hz, ならびにその高調波成分が加振周波数となる.

地盤条件と基礎の形状から, 基礎の支持条件を 1.17e+9N/m の水平バネで模擬した.

タワーの振動として, 前後・左右の各方向について 2 次モードまでを考慮した. 1 次/2 次の固有振動数は, 剛基礎時の 0.38Hz/2.61Hz に対して, 各々0.36Hz/2.40Hz と, 若干低下している.

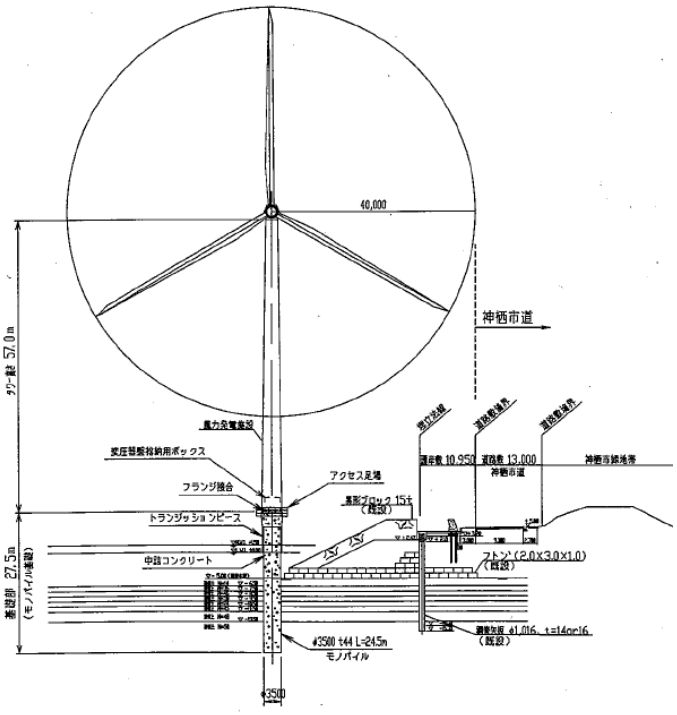


Fig 2 風車・基礎概要

3.3 風・波の条件

波高は鹿島港 NOWPHAS（沖合 2.3km, 水深 24m, 1972～1999 年）のデータに Rayleigh 分布を想定して設定した. また, 周期については, 波高ごとの最大頻度となる周期を線形近似により設定した.

風と波の出現確率はそれらの組み合わせとなるが, 本研究では, 風速にも Rayleigh 分布を仮定し, 波高は累積確率が風速と同値となる値を設定した（Fig 4）.

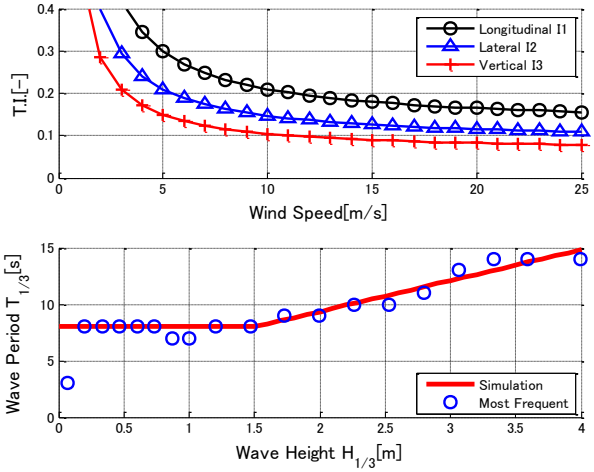


Fig 3 風の乱流強度と有義波周期

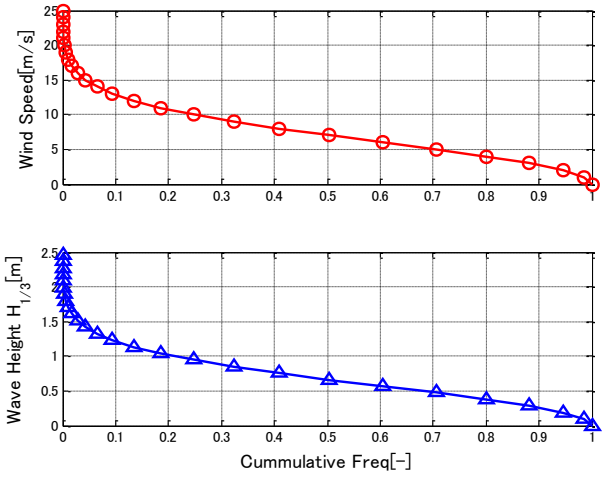


Fig 4 有義波高と風速の累積確率密度

解析条件を以下に示す.

1)有義波高・有義波周期：Fig 3, Fig 4（平均 0.71m）
2)波モデル：Pierson-Moskovitz
3)平均風向・波向：60deg（海岸に垂直）
4)平均ウィンドシア指数係数：0.2
5)乱流強度： Fig 3（IEC A 乱流）
6)乱流モデル： von Karman
7)平均風速：5～25m/s（2m/s 刻み）
8)解析時間：各 600s

4. 解析結果

4.1 シミュレーション結果

標準状態（Nominal）に加えて, 波なし（noWave）を,

さらに，剛基礎（RigidBase）を解析した．

風速 13m/s と 25m/s の風速，ロータ速度，ピッチ角をFig 5とFig 6に示す．条件による差は極めて小さく，図からは識別できない．基礎の海床部，ならびに，タワー基部の曲げモーメントのパワースペクトル密度（PSD）をFig 7とFig 8に示す．基礎において，波の周波数に該当する 0.1Hz 付近で若干の差があるが，全般的な影響は僅少である．

剛基礎の場合と比較すると，2 次曲げモードの固有振動数成分が低目にシフトしているほか，ブレード通過周波数 0.9Hz 付近の成分が若干低下している．

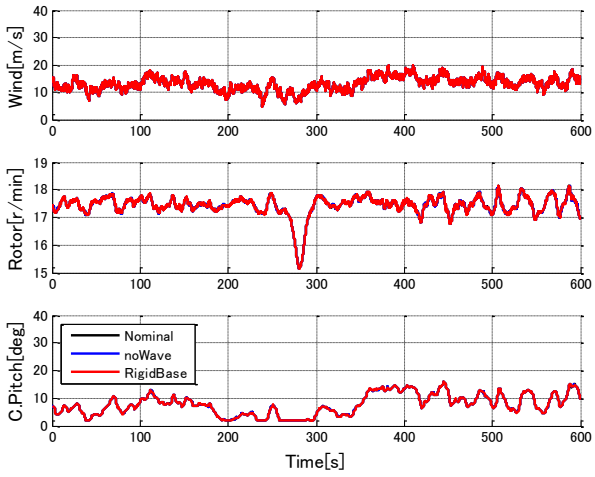


Fig 5 ハブ風速，ロータ速度，ピッチ角（13m/s）

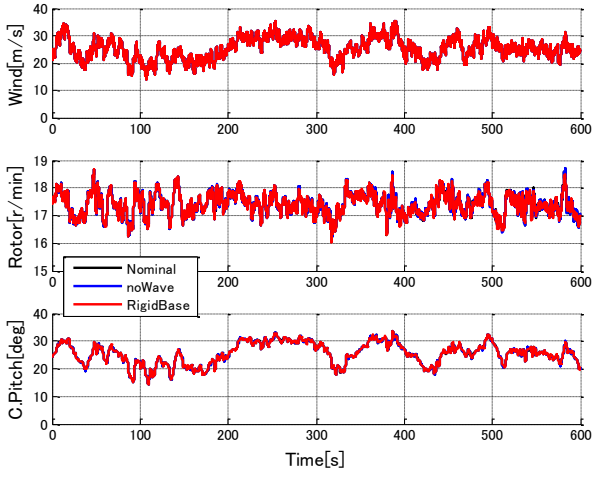


Fig 6 ハブ風速，ロータ速度，ピッチ角（25m/s）

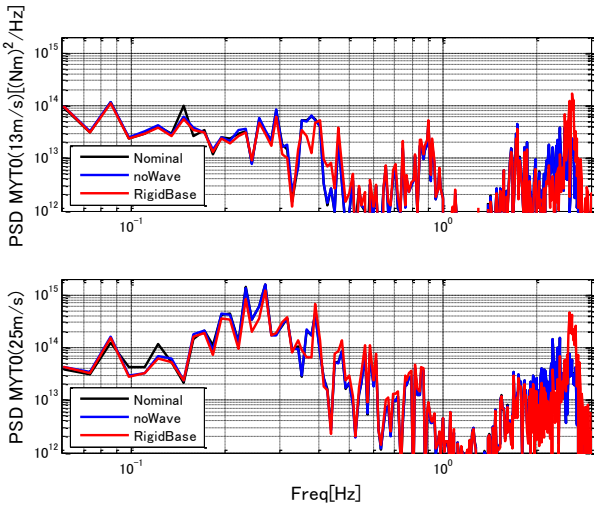


Fig 7 基礎海床部曲げ PSD（13m/s, 25m/s）

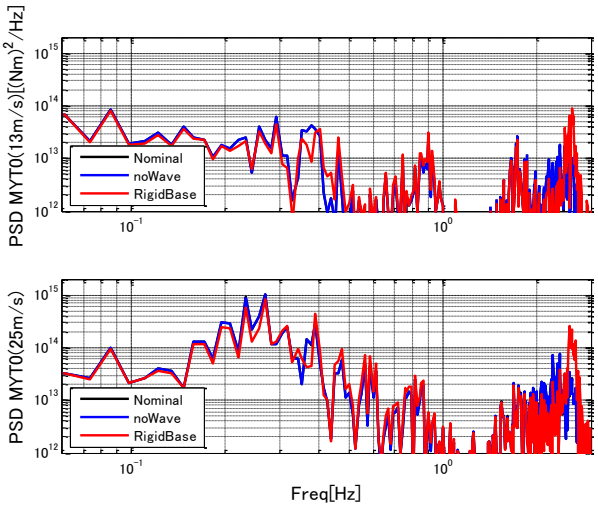


Fig 8 タワー基部曲げ PSD（13m/s, 25m/s）

4.2 疲労ダメージ等価荷重

設計寿命中の疲労荷重の指標として疲労ダメージ等価荷重（Damage Equivalent Load; DEL）を計算した．これは材料に応じてSN 曲線の傾斜m（ここではm=4）を指定し，設定した基準サイクル数 Nref（ここでは 2e+8）においてダメージの和が 1 になる荷重である．

曲げモーメントの DEL とダメージ（Dam）比をFig 9に示す．波の影響は DEL にもほとんどみられない．また，剛基礎の場合と比較すると，頂部付近で若干増加している一方，基部付近では減少している．

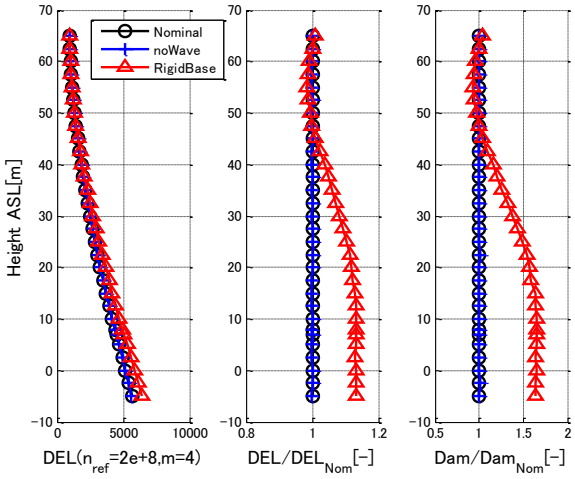


Fig 9 DEL とダメージ

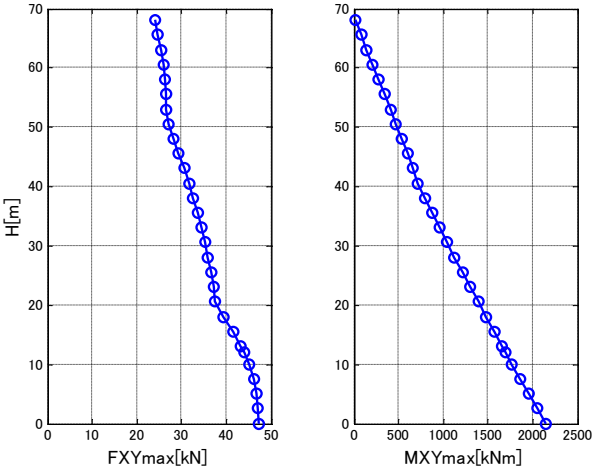


Fig 11 衝撃砕波力包絡線

4.3 衝撃砕波力

本解析に使用した BLADED では扱えない衝撃砕波力について，個別に解析を実施した．

当サイトでは，波ならびに海底の影響により，海底から 10.9m の位置に 209kN の衝撃砕波力 Fin を 0.19s 間を受ける．代表的な断面の変位ΔX，加速度 a，曲げモーメント MY の荷重時歴をFig 10に，高さ H に対する荷重包絡線を Fig 11示す．基礎海床部の曲げで 2,200kNm 程度である．発電時の最大平均風荷重が約 19,000kNm（平均風速 13m/s）であり，これと比較しても著しく低く，問題になるレベルではない．

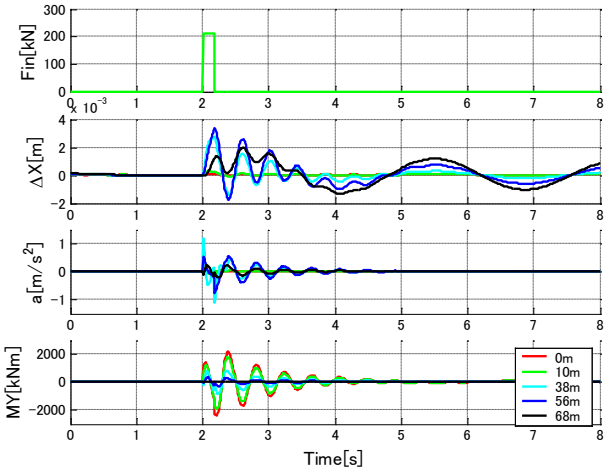


Fig 10 衝撃砕波力解析結果

5. まとめ

(1)ウィンド・パワーかみす（水深約 5m）の発電中の荷重において，波荷重の影響は僅少であった．ただし，水深がより深くなる場合には，波荷重の影響は増加傾向になる．

(2)基礎の条件により固有振動数，振動モードが変化し，風車の特性ならびに疲労荷重に影響を与えるので適切に評価する必要がある．

6. 参考文献

[1] European Wind Energy Association, Oceans of Opportunity, Offshore Wind Energy Factsheet, 2009.
[2] International Electrotechnical Commission, Wind Turbines – Part 3: Design Requirements for Offshore Wind Turbines, IEC61400-3, ed.1, 2009.
[3] Germanischer Lloyd WindEnergie , Guidelines for the Certification of Offshore Wind Turbines, 2005.
[4] Det Norske Veritas, Design of Offshore Wind Turbine Structures, DNV-OS-J101, 2004.
[5] Garrad Hassan and Partners, GH Bladed Theory Manual, 2008.
[6] 吉田，風車支持物の空力弾性シミュレーションのための可変速・ピッチ制御パラメータ，風力エネルギー，Vol.33, No.4, 2010, pp.104-111.
[7] Twidell, J. and Gaudiosi, G., et al., Offshore Wind Power, Multi-Science Publishing, 2009.
[8] ウィンド・パワー・いばらき，ウィンド・パワーかみすホームページ，http://www.komatsuzaki.co.jp/windpower/kamisu.html, 2010
[9] 青木，神栖モノパイル洋上風車の建設，第 31 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.120-133, 2009.
[10] 富士重工業, SUBARU80/2.0 パンフレット, 2010.

浮体式洋上風力発電の将来展望

京都大学大学院工学研究科　正会員　　宇都宮智昭

１．はじめに

欧州を中心として，着床式洋上風力発電の大規模導入が進んでいるが，水深50m程度までが着床式洋上風力発電の経済的な適用範囲と考えられている．それ以上の大水深域においては，風車を浮体基礎上に設置する浮体式が着床式に比べて経済的に有利になると考えられており，国内外においてその開発が進められている．特に，離岸距離数kmで水深50m以深となることが多いわが国周辺海域への設置を考えると，浮体式の開発が急務である．ここでは，まず国内外における浮体式洋上風力発電の現状と設計基準類の整備状況について述べた後，京都大学，戸田建設(株)，日本ヒューム(株)，佐世保重工業(株)の4者で共同実施した洋上風力発電用ハイブリッドスパーの1/10モデルによる実海域実験の概要を紹介する．

２．世界と日本における浮体式洋上風力発電の現状

世界中で，様々な浮体式洋上風力発電に関するコンセプトが出されているが，浮体基礎の形式別に分類すると，①スパー型，②TLP（張力脚）型，③セミサブ型，④ポンツーン型，のおおむね4種類に分けることができる．以下，それぞれの概要を述べる．

（1）スパー型

重心を常に浮心の下とすることで静的安定性を確保する構造で，Deep Draft Floater(DDF)の一種である．現在，ノルウェーで実海域実証実験がおこなわれているHywind[1]は，その代表的なものである（図1）．

図1　Hywind（www.statoil.com）

（2）TLP（張力脚）型

張力脚（Tension Leg）により浮体を緊張係留するもので，2007年12月に世界で最初に浮体式洋上風力発電の実証実験がおこなわれたBlue H[2]はこのタイプとなる（図2）．また，国内においては三井造船(株)がTLP型洋上風力発電用プラットフォームの概念設計を実施している[3]．

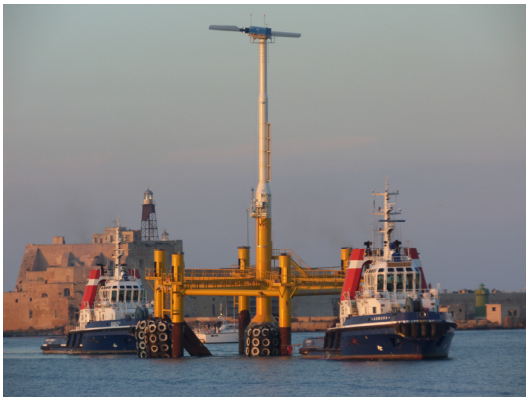


図2　BlueH（www.bluehgroup.com）

（3）セミサブ型

デッキ部，カラム部，ロワーハル部から構成される浮体において，水線面積の縮小，ならびに，カラム部およびロワーハル部に作用する波力の位相差の利用により動揺の低減を図るもので，例えばカラムの1つに風車を搭載する図3に示すようなコンセプトが提案されている[4]．また，国内においては石原らが3本のカラムそれぞれに風車を搭載するコンセプトを提案している[5]．

図3　WindFloat（www.principlepowerinc.com）

キーワード　浮体式洋上風力発電，実海域実験，設計基準
連絡先　〒615-8540　京都市西京区京都大学桂　京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻　075-383-3161

(4)ポンツーン型

(独)海上技術安全研究所において図4に示す格子型ポンツーンのコンセプトが検討されている[6]. 内湾・湖沼等の, 静穏域への設置に適した構造と考えられる.

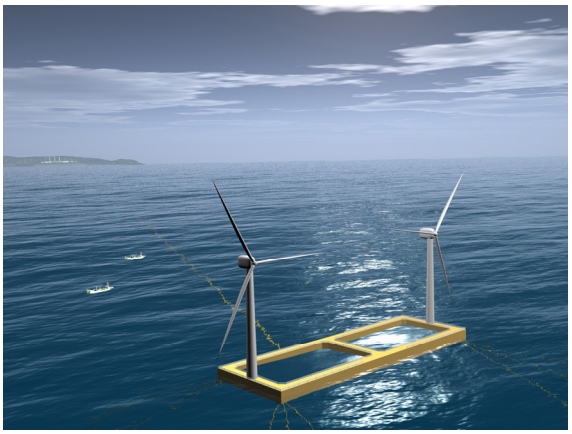


図4　格子型ポンツーン(www.nmri.go.jp)

そのほか, スパー型浮体を1本の張力脚で係留するコンセプト[7], 等が提案されている. 今後, 実海域実証実験により実際の性能・コストを把握し, 採算性を評価した上で, 実用化に結びつけていくことが重要と考えられる.

３．浮体式洋上風力発電施設の設計基準

洋上風力発電施設に関しては, GL[8], IEC[9], DNV[10]が設計基準・規格をそれぞれ定めているが, これらは着床式を対象としており, 浮体式にそのまま適用することはできない. 浮体式に関しては, DNVがOS-J101[10]を補足するためのガイドライン[11), 12)]を発行しており, 現時点では, 世界的にみてもこれが唯一の, 浮体式洋上風力発電施設を対象とした設計基準と考えられる.

本ガイドラインにはいくつかの注目すべき特徴があるが, 例えば, 1)事故限界状態(ALS)に対する検討を新たに規定, 2)浮体・タワー・風車の設計外力として50年再現期待値の使用を規定する一方, 係留系の設計外力としては100年再現期待値の使用を規定, 3)波浪スペクトルとして, JONSWAPスペクトルでなく, 周期20～25秒のうねり成分も含む波浪スペクトルを用いることを規定, 4)動揺シミュレーションにおいて, 最低3～6時間の継続時間とすることを規定, 5)風車制御(ブレードのピッチ角制御等)の浮体動揺への影響を考慮することを規定, 等があげられる. いずれも, 従来のOS-J101からより厳しい方向(応答が大きくなる方向)への変更・追加であり, 注意が必要である.

４．ハイブリッドスパーの実証実験概要

2節で述べたとおり, これまで浮体式洋上風力発電に関する様々なコンセプトが提案されているものの, 実際の事業化に向けては, コストの大幅な低減が最大の課題となっている. このため, 浮体基礎の製作コストの低減を目標として, 単純な円筒形状で, 工場での大量生産可能なプレキャストコンクリート製セグメントを浮体函体主要部に用い, 上部を鋼製とするハイブリッドスパー構造を新たに開発した. 図5に2MWのダウンウィンド型風車を搭載した想定実機のイメージ図を示す. なお, Hywindも同様なスパー型であるが, 函体は全鋼製となっている[1)].

既に, 想定実機の1/22.5スケールモデルを用いた水槽実験は実施済みであった[13)]が, 本コンセプトの成立性に関して, ハイブリッドスパーの製作性や海域上での施工性も含めて実証するため, 想定実機の1/10スケールモデルを用いた実証実験を京都大学, 戸田建設(株), 日本ヒューム(株), 佐世保重工業(株)の4者で共同実施した[14), 15)]. 以下, その概要について紹介する.

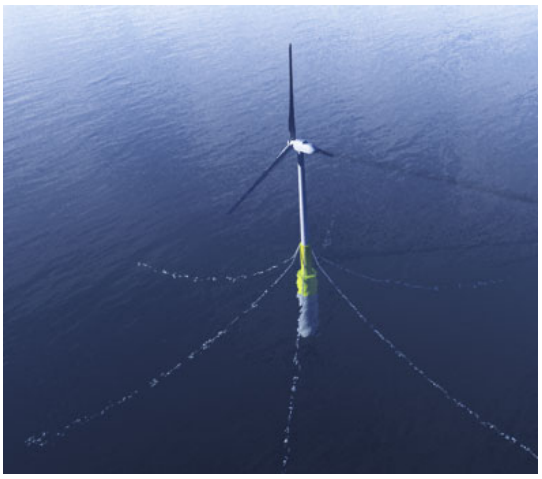


図5　想定実機

(1)実験概要

実験期間は, 平成21年8月26日～9月10日である. 実験浮体の設置場所は, 図6に示す佐世保重工業(株)佐世保造船所の蛇島南岸壁西端の沖合, 約30mの洋上である. 設置箇所における水深は干潮時において約10m, 実験期間を通じた潮位差は2.51mであった.

図7に実験モデルの概要および主要寸法を, 図8に実験の実施状況を示す. 搭載した風力発電機はA-WINGインターナショナル㈱製(定格出力1kW)である. 計測項目は, タワー位置での風向・風速, 風力発電機の出力電圧および電流, タワー内部の基部に設置したジャイロセンサーによる浮体動揺, 沖側のアンカーチェーンに設置

した張力計によるチェーン張力，PC鋼棒およびタワーに貼付したひずみゲージによるひずみ(計16ch)，浮体下方の海底に設置した水圧式メモリー波高計による水圧となっている．

図6　実験モデルの設置場所

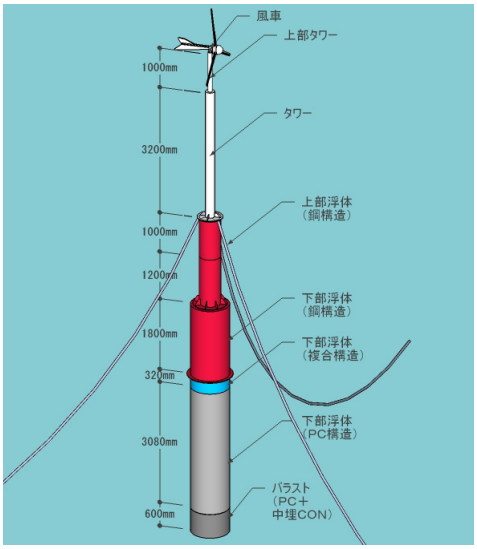


図7　実験モデルの概要・主要寸法

図8　実験の実施状況

(2) 実験結果

風速とハブ位置における風荷重の関係を図9に示す．ばらつきは大きいが，図中の実線は式(1)においてスラスト係数C_Tを1.5としたときの値で，風荷重の上限値を評価可能である．

$$\vec{F}_{wind} = \frac{1}{8} C_T \rho \pi D^2 \left|\vec{U} - \vec{u}_{hub}\right| \left(\vec{U} - \vec{u}_{hub}\right) \qquad (1)$$

風荷重を式(1)で評価し，さらに波荷重をモリソン式で評価した時の浮体応答の実測値と解析値を比較したものを図10～図13に示す．また，パワースペクトルから評価した応答の有義値を表1に示す．Pitch応答およびアンカーチェーンの張力については，解析値は実験値とよくあっている．Yaw角速度およびRoll応答の一致度がよくないが，重心の偏心影響が今回の解析では考慮できていないことが原因のひとつと考えられる．また，表2に，自由振動実験から得られた固有周期と減衰係数を示す．

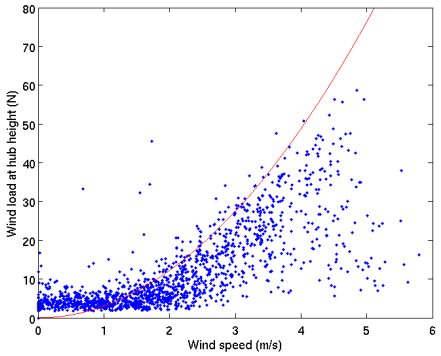


図9　風速と風荷重（ハブ位置）の関係

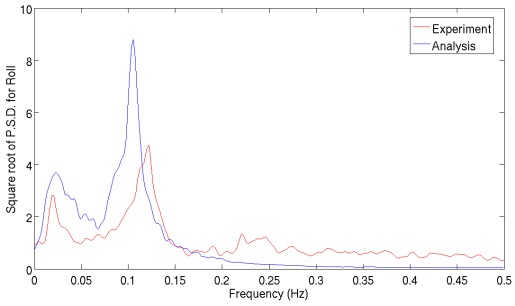


図10　Roll運動のパワースペクトル

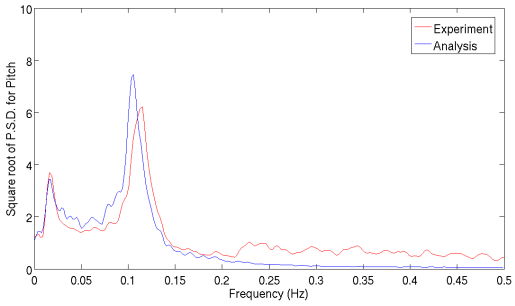


図11　Pitch運動のパワースペクトル

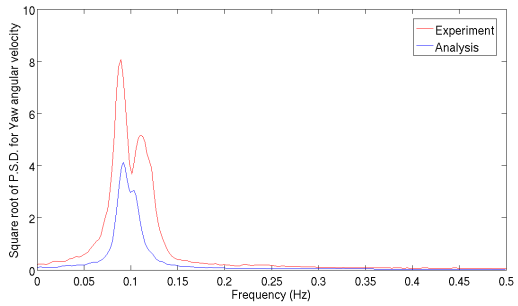


図12　Yaw角速度のパワースペクトル

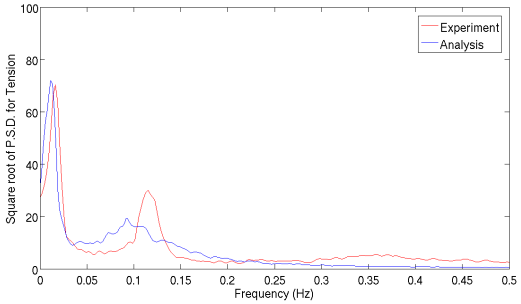


図13　アンカーチェーン張力のパワースペクトル

表1　応答の有義値

	実験値	解析値	解析/実験
Roll (deg.)	1.91	2.65	1.39
Pitch (deg.)	2.29	2.30	1.00
Yaw velocity (deg./s)	2.41	1.09	0.45
Tension (N)	19.1	18.6	0.97

表2　固有周期と減衰係数

	固有周期	減衰係数
Surge	58.8s	0.029
Heave	8.93s	0.012
Roll	8.47s	0.030
Yaw	12.0s	0.019

５．まとめと今後の展望

1/10スケールモデルによる実証実験により，ハイブリッドスパーの基本的な成立性は実証された．ただし，実際の浮体式洋上風力発電施設の応答においては，風車の制御（ピッチ角制御）等が浮体応答に複雑に影響するため，これをも考慮した流力・空力・弾性・制御を一体とした解析が必要となる．Yoshidaら[16]は，風車制御を考慮した上でそのような解析を実施しており，コーニング角を有するダウンウィンド型風車が，スパー型浮体に搭載する上で優れた性質を示すことを明らかにしている．

今後，さらにスケールアップしたモデルに対して実海域実証実験を行い，実際の性能とコストを明らかにすることが必要である．

参考文献

1) StatoilHydro : Hywind – Facts, 2009 (www.statoil.com)
2) Blue H Technologies BV : Launch of the first ever floating wind turbine, press release, 2007 (www.bluehgroup.com)
3) 鈴木宏始，他：洋上風力発電用TLP型浮体の開発，三井造船技報，No. 198，19-26，2009
4) Roddier, D., et al. : Windfloat: A floating foundation for offshore wind turbines. Part I: Design basis and qualification process, Proc. 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Honolulu, USA, OMAE2009-79229, 2009
5) 石原孟，他：浮体式洋上風力発電に関する研究　その2 軽量セミサブ浮体の開発，第28回風力エネルギー利用シンポジウム，2006
6) 大川豊，他：浮体式洋上風力発電による輸送用代替燃料創出に資する研究，平成17年度運輸分野における基礎的研究推進制度研究成果報告書，2006
7) SWAY A/S : Changing the future of wind power (www.sway.no)
8) Germanischer Lloyd : Guideline for the certification of offshore wind turbines, GL Wind 2005
9) IEC : International Standard, Wind turbines – Part 3: Design requirements for offshore wind turbines, IEC61400-3, 2009
10) Det Norske Veritas : Design of offshore wind turbine structures, DNV-OS-J101, 2007
11) Det Norske Veritas : Guideline for offshore floating wind turbine structures, Reg No. 129G6V8-7, 2009
12) Ronold K.O., et al. : Guideline for offshore floating wind turbine structures, Proc. 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Shanghai, China, OMAE2010-20344, 2010
13) 宇都宮智昭，他：洋上風力発電用スパー型浮体の波浪応答実験と解析，海洋開発論文集，第25巻，pp.13-18，2009
14) 宇都宮智昭，他：洋上風力発電用ハイブリッドスパーの1/10モデルによる実海域実証実験，第31回風力エネルギー利用シンポジウム，2009
15) Utsunomiya, T., et al. : On sea experiment of a hybrid spar for floating offshore wind turbine using 1/10 scale model, Proc. 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Shanghai, China, OMAE2010-20730, 2010
16) Yoshida, S., Utsunomiya, T. : Yawing characteristics of spar-type floating downwind turbine, Proceeding of Renewable Energy 2010, June 27-July 2, Yokohama, Japan, P-Wd-20, 2010

浮体式洋上風力発電支持物の構造最適化

清水建設（株）技術研究所　正会員　嶋田健司

１．はじめに

浮体式洋上風力発電プラットフォームの特徴として，一般にアクセスが困難な遠隔海域に設置されること，風と波という絶えず変動する荷重に曝されること，厳しい海象がゆえに施工期間が著しく限定されることが挙げられ，その他の土木構造物に比較しても設計条件が厳しい．その上で，発電効率を最大化しつつ，経済性に優れた支持構造物の設計が求められ，満たすべき制約が多い．本稿では，著者がこれまでに携わったセミサブ浮体の提案例[1~4]を例にとり，以下に示すような洋上風力発電のための支持構造物が備えるべき性能と，その最適化を具体的に紹介する．

- 暴風時の対波浪動揺性能
- 最適喫水（構造最適化）
- より大型の風車導入にも対応できる構造形式
- 施工性
- スケールメリット

２．暴風時の対波浪動揺性能と経済性を兼ね備えた風車3基搭載型セミサブ型浮体

（1）暴風時の対波浪動揺性能

風車3基搭載型セミサブ浮体では定格出力2.4MW（ローター直径：92m，ハブ高さ：70m）の風車を3基搭載している．浮体構造は，風車基礎浮体3基と中央浮体1基，および各浮体を連結する梁部材から構成されている．係留システムとしては，中央浮体から3方向のチェーン係留とし，各方向3本ずつの9点係留としている．風車基礎浮体は鋼構造を想定しており，その浮力で風車の重量を支える．連結部材は鋼構造であり水中部に位置するため浮力が生じないようにコンクリートバラストにて中立状態の重量としている．　一方，波浪動揺量の低減のため，6自由度運動に対する復元剛性を低くして固有周期の長周期化を図っている．具体的には，まず，係留システムとして中間シンカー方式を導入し，水平面内の運動モード（Surge，Sway，Yaw）に対する係留剛性を低く設定した．また，風車基礎浮体の水線面積を没水部の断面よりも小さくし，Heave，Roll，Pitch運動における復元剛性を低減させた．これらの工夫により，水深100mを想定した場合の固有周期はいずれの運動モードについても25秒以上となっている．

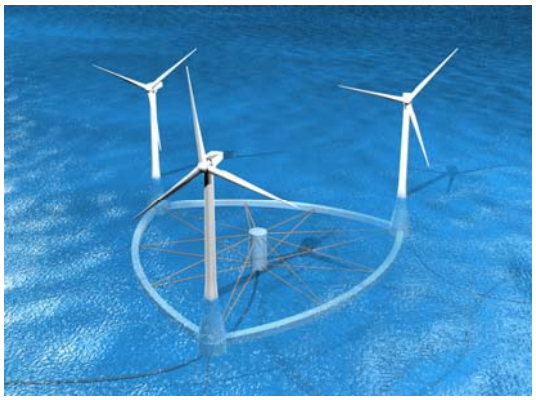
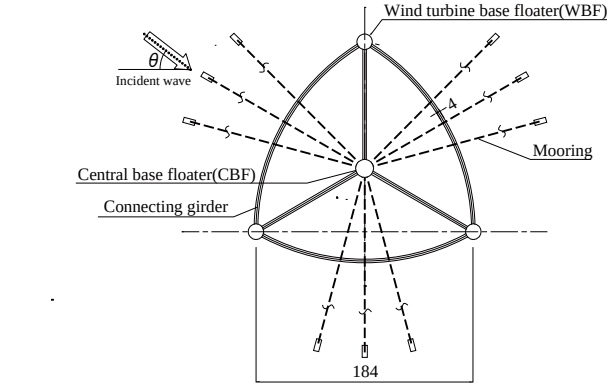


図1　風車3基搭載型セミサブ浮体[1)]



(m)	Model A	Model B
D_1	ϕ6	ϕ5.5
D_2	ϕ13	ϕ10
H_1	20	35
H_2	15	10
H_3	5	10
H_4	10	30

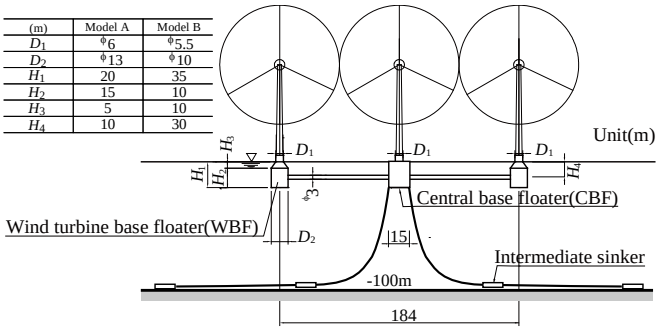
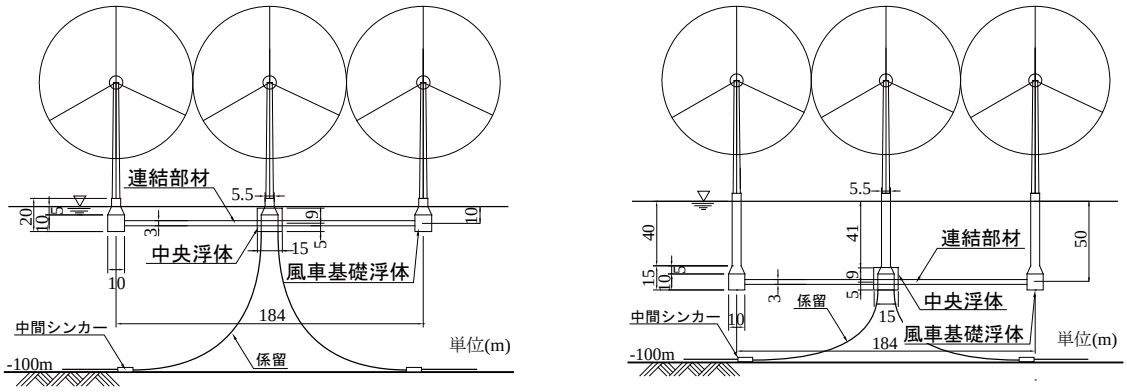


図2　波浪動揺に対する安定性を追求した風車3基搭載型セミサブ浮体[1)]

キーワード　浮体式洋上浮力発電，セミサブ浮体，テンションレグプラットフォーム
連絡先　〒135-8530　東京都江東区越中島3-4-17　清水建設（株）技術研究所　03-3820-6897



a) 喫水が浅い(10m)場合　　b) 喫水が深い(50m)場合

図 3 連結部材の喫水深の違いの例 [2)]

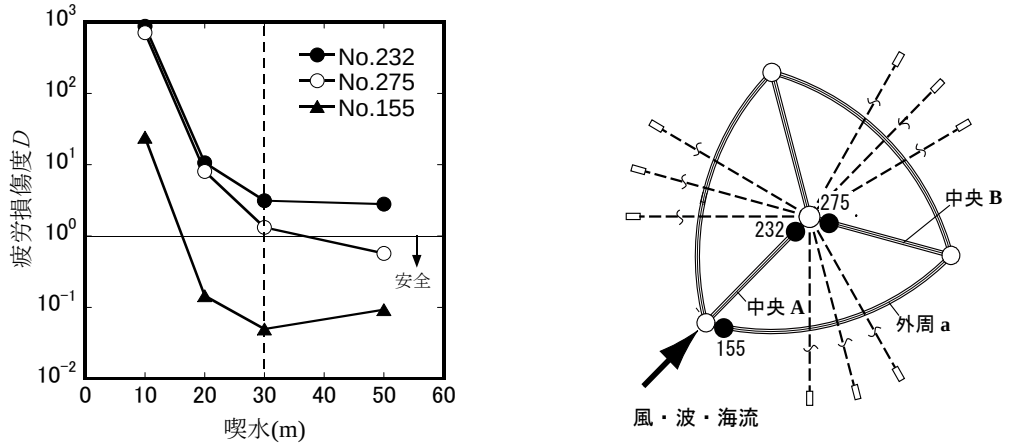


図 4 喫水深による連結部材の疲労損傷度の変化 [2)]

(2)最適喫水(構造最適化)

一般にセミサブ浮体では，喫水深が浅い場合(図3a)には連結部材に作用する波浪荷重が大きくなるため，頑強な構造とする必要が生じる．一方，喫水深を深くする(図3b)と波浪荷重は小さくなるが， 風車基礎浮体の部材量が増加するとともに風車基礎浮体に作用する波浪荷重に対応した変動モーメントが大きくなる．すなわち，連結部材については経済的に優れた喫水深が存在することになる．そこで，風車3基搭載案に対して，連結部材の喫水深をファクターとして，水平部材の疲労損傷度を検討した[2)]．図4に示すとおり，疲労損傷度は喫水深により大きく変化し， 30m程度の喫水が全体的に最も疲労損傷度を小さく抑えられることが確認された．

3．より大型の風車導入にも対応でき，施工性を追求した風車1基搭載型セミサブ型浮体

浮体式洋上風力発電は海上における安定した風況により陸上風力発電に比較し高い設備利用率が期待できる．また立地制約も少ないことが予想されるため，超大型風車の導入による大規模な発電が可能である．しかし，上述した風車3基搭載案のみならず，一般に1基の浮体上に複数基の風車を搭載する案では，より大型の風車の導入に際して，風車間距離が短く制限されることにより発電に関してウェイクロスが生じることが懸念される．

そこで，新たに提案したのが風車1基搭載案(図5)である．風車は上述の風車を1基搭載している．本浮体構造は，サブフローター3基と中央浮体1基，および各浮体を連結する梁部材から構成する点，係留システムとして中間シンカー方式を導入している点は風車3基搭載型浮体と同様である(図6)．

風車1基搭載案の特徴は，復元力を得るサブフローター部分を直径の異なる上下二段のカラムで構成することで，施工時の安定性と，設置海域上での風車稼働中における動的安定性の双方に対する構造安定化対策を

図っている点にある. 図7には本浮体構造の施工手順を示す. 本浮体構造は, 完成形では喫水20mであるが, 風車を搭載した状態で喫水9m程度である. したがって, ほとんどの部分をドライドックにて製作し, バラストコンクリートを静穏な洋上ヤードにて打設するものとした. ドックから浮体を曳きだす際には下部カラムで復元力を確保する(図7a). その後, 艤装ヤードにてバラストコンクリートを打設し(図7b)所定の喫水深とした後曳航する(図7c). 設置後は径が小さい上部カラムで復元力を小さく抑え, 長周期化を図る.

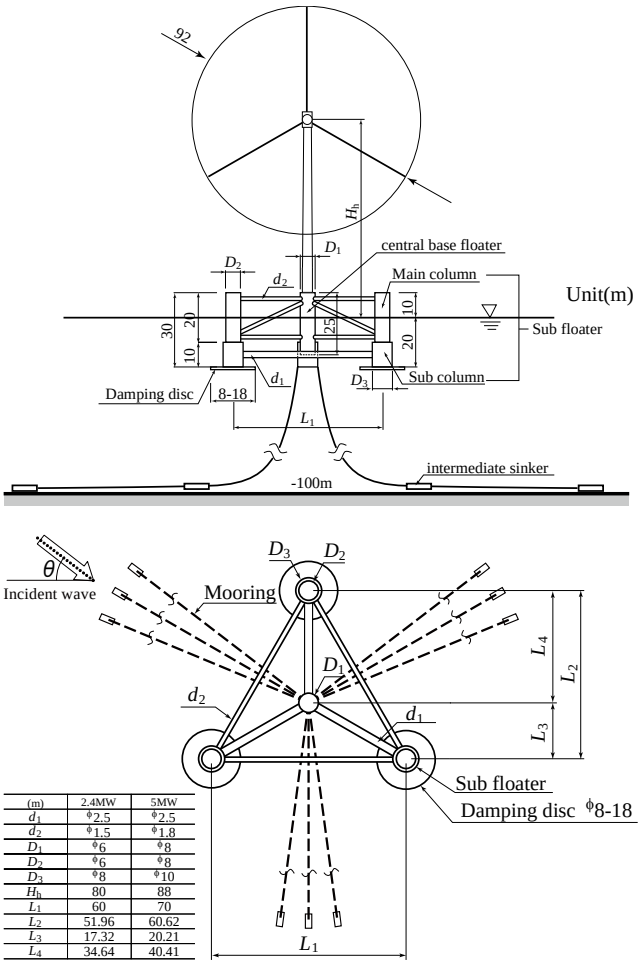
図5 風車1基搭載型セミサブ浮体[3)]

4. スケールメリットの検討

浮体式洋上風力発電では全体コストの中で浮体建設コストが占める割合が大きい. そこで, 本節では現状普及している中では最大級の2.4MW風車と, 近い将来普及するであろう5MWとを搭載したセミサブ型浮体の建設コストを試算し, 浮体式洋上風力発電のセミサブ浮体の経済性におけるスケールメリットついて検討を行なった結果を示す.

図8には浮体構造の建設コストの試算結果を示す. 同図には, コストの内訳を浮体構造, 係留システム, 施工ドック, 曳航・設置および総建設コスト(風車本体は含まない)について示す. 同図には比較のため, 2.4MW風車3基案浮体の風車1基分の値も示す. なお各コストの内訳は2.4MW×1基案の総建設コストで基準化して示している.

2.4MW×1基案と同3基案とを比較すると1基案は3基案に比較して約10%程度のコストアップとなっているが, 既に述べたように3基案ではウェイクロスによる発電量の



(m)	2.4MW	5MW
d_1	ϕ2.5	ϕ2.5
d_2	ϕ1.5	ϕ1.8
D_1	ϕ6	ϕ8
D_2	ϕ6	ϕ8
D_3	ϕ8	ϕ10
H_b	80	88
L_1	60	70
L_2	51.96	60.62
L_3	17.32	20.21
L_4	34.64	40.41

図 6 現実的な施工性を追求した風車 1 基搭載型セミサブ浮体 [3)]

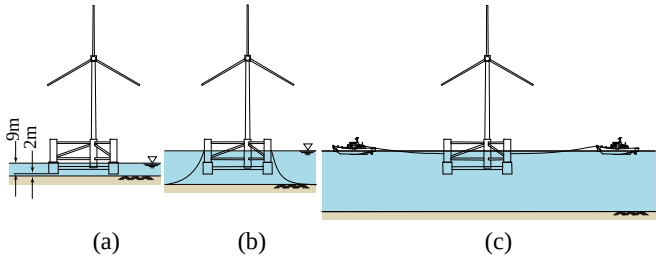


図 7 施工手順 [3)] (a) ドライドックからの引き出し, (b) 艤装ヤードにおいて仮係留状態にてバラストコンクリートの打設 (c) 曳航

低下の可能性があるので発電量あたりの建設コストは1基案の方が向上することが予想される. なおコストアップの要因は主として係留システムに要する費用が増加したことによるものである. ドックの費用に若干の差があるのは検討したドックの設備の差によるものである.

風車1基案について5MW用の浮体と2.4MW用の浮体を比較すると, 設備容量が5.0/2.4＝2.08倍となるのに

対して，コストアップは1.52倍で，設備容量あたりに換算すると27%のコストダウンとなり，風車規模が大きくなると設備容量当たりの建設コストを低く抑えられる可能性があることが分かった．

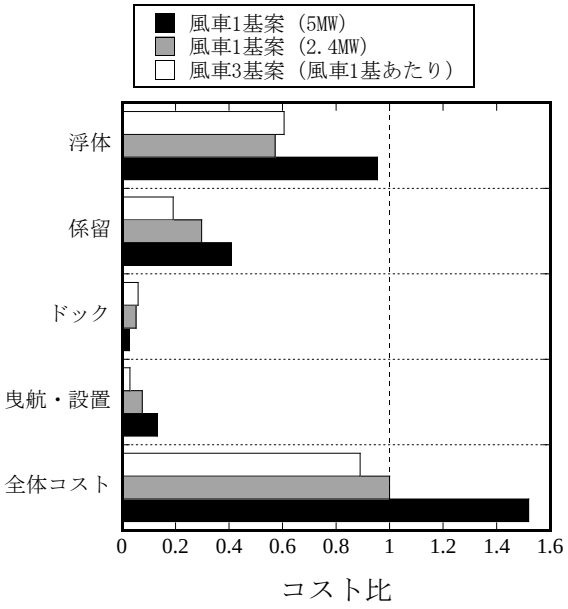


図8 浮体構造形式と搭載する風車設備容量による建設コストの比較（コストの内訳は2.4MW風車1基搭載案の全体コストで基準化）[3)]

５．さらに安定した動揺性能の浮体の選択肢

また，我が国の周辺海域は海象条件が厳しく，搭載する風車についてもなんらかの配慮が望まれるところであるが，ミニテンションレグプラットフォーム（Tension Leg Platform）[4)]は特に波によるロールやピッチ運動が穏やかな動揺性能を達成でき，陸上形式の風車を最小の修正で設置することを可能としうるレベルの動揺性能を達成できると考えられる．また先に述べた二例は，係留方式に関してはチェーンを用いた緩係留方式を採用している．ミニTLPは設置占有面積の面で緩係留方式に比べて有利であると考えられる．

一方で，ミニTLPでは生命線であるテンドンに大きな張力が生ずるため，係留の安全性には特に配慮が求められる．また，大きな重量のアンカーを敷設すること必要となるため，緩係留方式に比較して施工方法に関しても工夫が必要となる．さらに，張力調整等，緩係留方式の浮体にはない難しさがあり，これらに現実的なコストの範囲でどう対処するかが，この方式の浮体を実現化する上での鍵となると考えられる．

図9 波浪動揺に対してより安定なミニテンションレグプラットフォーム[4)]

６．あとがき

本稿で示した検討例はあくまで初期のコンセプト段階での検討であり，実施設計にあたってはさらに詳細な解析的および実験的な検討を要する．また，本稿で述べた内容は，浮体式洋上風力発電支持構造物の作成者サイドからの最適構造の提案である．しかし，性能を論じる上では，風車メーカーサイドからの要求性能が明示されることが不可欠であるが，そのための検討はまだ緒についたばかりのようである．今後の開発では両者間の緊密な連携が望まれる．

最後に本稿で紹介した開発例は，東京大学，東京電力（株），清水建設（株）（第2～4節）および五洋建設（株）（第5節）の共同研究によるものであることを付記する．

参考文献

1) 大山巧，嶋田健司，石原孟，ファバンフック，宮川昌宏，助川博之，鈴木英之：洋上風力発電のための軽量セミサブ浮体構造物の波浪動揺特性，海岸工学論文集，No. 53(2)，pp. 806-810，2006

2) 嶋田健司，宮川昌宏，大山巧，難波治之，石原孟，助川博之：洋上風力発電のためのセミサブ浮体の構造最適化について，海岸工学論文集，Vol.34，No.2 211-214，2007

3) 嶋田健司，宮川昌宏，大山巧，助川博之，石原孟：洋上風力発電のための風車 1 基搭載型セミサブ浮体の構造最適化と経済性におけるスケールメリットついて，第21回海洋工学シンポジウム，OES21-134，2009

4) Shimada, K. Miyakawa, M., Ohyama, T., Ishihara, T., Fukumoto, Y., Anno, K., Okada, H. and Moriya, Y.：Preliminary study on optimum design of a tension leg platform for the offshore wind generated energy system, Proceedings of Renewable Energy 2010, O-WdOc-2, 2010

大規模洋上風力発電所の建設に向けて

鹿島建設(株)　非会員　土谷　学

１．はじめに

二酸化炭素排出量の25%削減に向けて，風況の良い洋上風力発電の導入がその1つの方策として期待されている。(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(以下NEDO)では，平成18年度から洋上風力発電の導入に向けての基礎調査やF/S先行調査が実施され，更に平成22年度においては，洋上風力発電システム実証研究が開始される。

このような状況に先駆け，東京大学，東京電力及び鹿島建設の3者による共同研究として，6年前から福島県の東沖合約40kmの太平洋上にある磐城沖天然ガス田プラットフォームを利用して，十分に高い高度での風況を2年間にわたって連続観測し，洋上の風況特性を実測によって確認した。以下では，その観測概要とその結果を基にした発電量予測結果を報告する。また，NEDOのF/S調査や実証研究など，大規模洋上風力発電所の建設に向けての取り組みを紹介する。

２．洋上風況観測

(1) 観測概要

観測位置は，図1に示す福島県の東沖合約40kmの太平洋上にある磐城沖天然ガス田プラットフォームである。プラットフォームと風向風速計を図2に示す。観測場所の制限から，風向風速計には，防爆型を採用した。観測システムの仕様を表1に示す。

観測データの一例として，2005年1月の10分間の平均風速，平均風向の推移を図3に示す。

以下では，主として2004年10月～2005年9月の1年間の観測結果について，その概要を示す。

(2) 平均風速と風力エネルギー密度（図4）

全観測期間における平均風速は7.4m/sであった。大型風車のハブ高さ70m～80mに換算（べき指数α=0.1）した平均風速は，7.2m/s～7.3m/sが見込まれる。

月平均風速は，概ね12月～5月の冬季から春季に高く，6月～11月の夏季から秋季に低い傾向を示している。

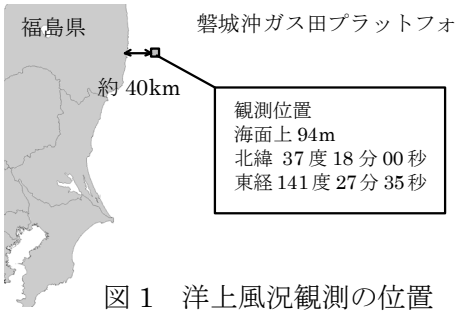


図１　洋上風況観測の位置

図２　ガス田プラットフォームと風向風速計

表１　洋上風況観測システムの概要

風向風速計	メーカー	小笠原計器製作所
	形式	風車型風向風速計 WS-7671
	検出方式	7心光ファイバー方式
	風向	16 方位方式
	風速	0～60 m/s
ロガーA	ﾒｰｶｰ / 形式	NRG Systems / SYMPHONIE
	測定間隔	2 秒
	取得データ	風速及び風向の 10 分間統計値
	観測期間	2004 年 10 月～2006 年 9 月
ロガーB	ﾒｰｶｰ / 形式	omron / ZR-MDR10
	測定間隔	1 秒
	取得データ	風速及び風向の時刻歴データ
	観測期間	2005 年 12 月～2006 年 9 月

キーワード　洋上風力発電，風況観測，着床式基礎
連　絡　先　〒107-8348 東京都港区赤坂 6-5-11　鹿島建設株式会社 環境本部 新エネルギーグループ　03-5544-0750

月別では，1月の平均風速が最も高く8.5m/sであり，最も低いのは7月の5.4m/sであった。月別の風力エネルギー密度の最大値は1月の957W/m²，最小値は6月の258W/m²であった。また，年間の風力エネルギー密度は562W/m²である。

(3) 風向出現頻度（図5）

年間の風向出現頻度は，概ね南北方向の頻度が高いと言えるが，この図からは定まった卓越風向を見出すことが難しい。風力エネルギー密度においても同様の傾向を示している。風向出現頻度分布を寒候期（10月～3月）と暖候期（4月～9月）に分けた場合，それぞれ特徴的な風向頻度特性を示し，寒候期には北西（NW）寄りの風が多く出現し，陸側から吹く風が卓越している。一方，暖候期には南北軸方向の風向出現頻度が高く，海岸線に沿って吹く海風が卓越している。

(4) 乱れ強さ（図6）

乱れ強さの年平均値は10.5%であった。風力発電システムの国際規格IEC61400-1[1)]における乱れ強さの分類で，洋上を含む乱れ強さの小さい地域に適用されるCategory-Cと本観測結果の比較では，陸風，海風とも，概ねIEC規格のCategory-Cを下回っていることがわかる。また，海風の乱れ強さは，陸風の乱れ強さと比較して，更に小さい特性を示している。観測地点における乱れ強さは，IEC規格が対象とする洋上風況特性を十分に下回っており，乱れ強さの観点から風車への悪影響が少ない良好な環境であることを確認した。

(5) 大規模ウインドファームを想定した発電量予測

観測結果を基にして，観測地点周辺における洋上ウインドファームを想定し，発電量予測を実施した。風車は，定格出力2.5MW，ロータ径（D）90m，ハブ高さ80mを仮定した。風車基数は東西10基×南北10基の合計100基とし，隣接風車間隔は，東西及び南北方向10Dの等間隔格子状配置とした。ウインドファーム全体の定格出力は250MW（25万kW）となる。発電量予測には，WAsP（Risø, National Laboratory DTU）を用いた。

年間発電量の予測結果は，約6億7000万kWh（利用可能率90%），設備利用率は31%，平均ウエイクロスは5.7%であった。これは，一般家庭約20万戸分の消費電力に相当する。これらのことから，日本国内においても，洋上は有望な風力発電適地であることがわかる。

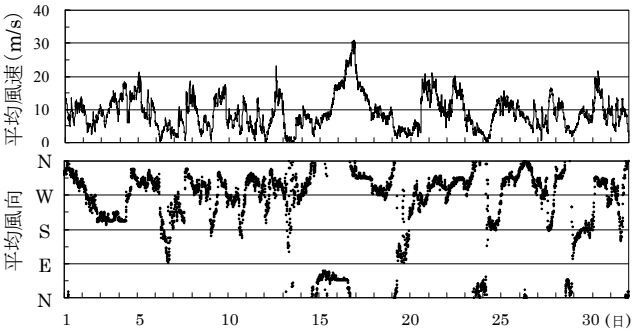


図 3　風向風速観測値の時刻歴波形の一例

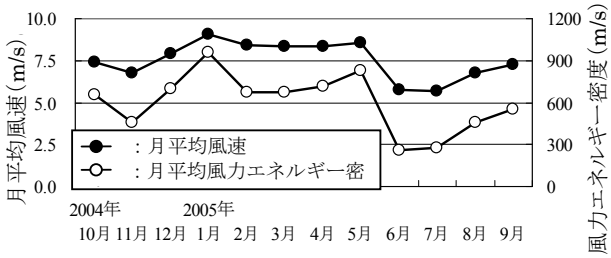
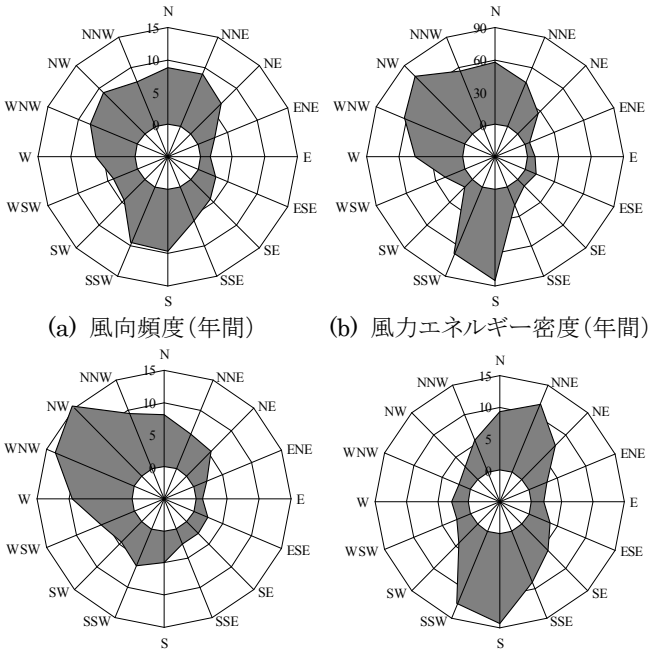


図 4　月平均風速と風力エネルギー密度



(a) 風向頻度（年間）　(b) 風力エネルギー密度（年間）

(c) 風向頻度（寒候期）　(d) 風向頻度（暖候期）

図 5　風向出現頻度分布と風力エネルギー密度分布

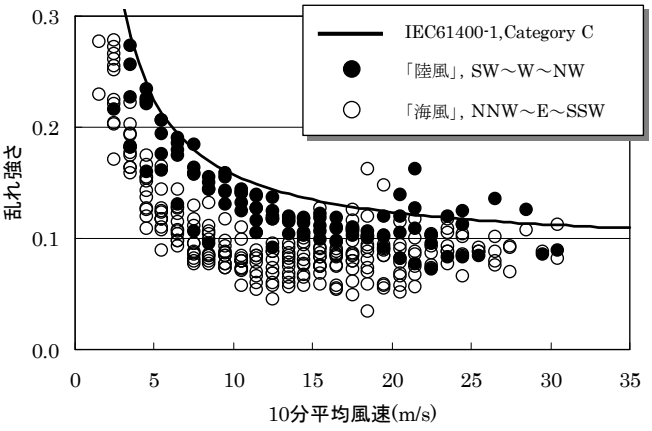


図 6　乱れ強さ（非超過確率 90%値）

３．着床式洋上風力発電の開発

平成20年，東京電力，東京大学及び鹿島建設の3者共同により，着床式洋上風力発電に関する「洋上風力発電実証研究F/S（Feasibility Study）調査」をNEDOから受託し，洋上風力発電の実現可能性の調査を実施した。これら研究において実施された着床式洋上風力発電の開発の状況を紹介する。

（1）実証研究の候補海域

実証研究の候補海域は，千葉県銚子市の沖合を選定した。この海域は，数値シミュレーションによる結果[2)]により，年平均風速が十分に高く，またこの付近は，沖合10kmまで水深20m以浅の遠浅であることが分かっており，洋上風力発電に適した海域であると言える。

（2）着床式基礎の開発と設計

着床式洋上風力発電の早期実現を目指して，自然条件に応じた最適な基礎形式の選定，基礎に作用する波力の評価方法の開発[3)]，衝撃砕波力の確率的な変動特性の把握，波力を受けにくい基礎形状の開発などを行っている。図7は,基礎研究として実施した，重力式洋上風力発電システムの基礎に作用する波力実験の状況である。重力式基礎は,上部斜面式軸対称形状とし，波力を受けにくく安定した基礎形状としている。

実証研究の候補海域においても，海底地盤条件が露岩エリア，または堆積層が数m程度の岩盤エリアであることから，基礎部は，重力式PCケーソン（図8）とした。

設計風速（表2）は，当該地点での風車ハブ高さにおける年平均風速をメソスケール気象モデルRAMS，マイクロスケール気象モデルMASCOT（Micro-wind-climate Analysis System for Complex Terrain）により，50年再現期待値の最大風速を台風シミュレーションにより，また，50年再現期待値の乱れ強度を気流シミュレーションにより，それぞれ推定した値を採用している。

設計波高（表3）は，既往調査資料[4)]を基に，浅水変形と合田の砕波モデルを考慮し，当該地点での50年再現期待値の有義波高，最高波高，波周期を設定した。基礎の耐久性照査に用いる波は，千葉県海象データからレーリー分布を仮定し，港湾基準に則り50年間に10,000回オーダーで作用する波を求め，浅水変形及び合田の砕波モデルを考慮し，有義波高，波周期を設定した。年平均値の有義波高，波周期は，千葉県海象デ

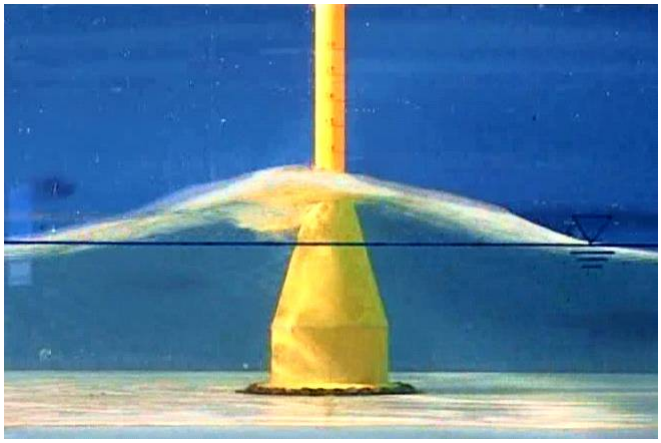


図7　重力式基礎の波力実験

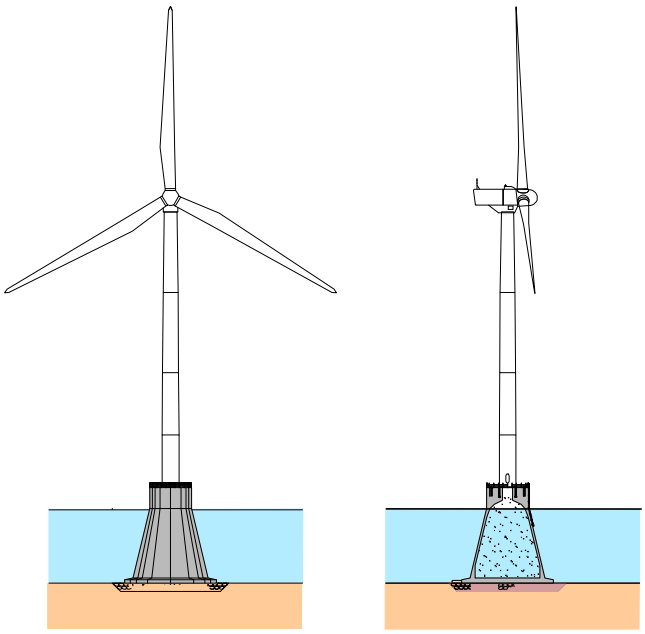


図8　風車基礎の概要

表 2　設計風速

年平均風速	7.5 m/s
最大風速（50 年再現期待値）	49.0 m/s
乱れ強度（50 年再現期待値）	0.12

表 3　設計波高

50年再現期待値	有義波高	9.84 m
	最高波高	13.03 m
	波周期	14.5 s
基礎の耐久性照査に用いる波	有義波高	8.27 m
	波周期	11.9 s
年平均値	有義波高	1.40 m
	波周期	7.5 s

ータを浅水変形及び合田の砕波モデルより設定した。

設計用地震力は，地震動応答解析により評価した。

(3) 施工方法の検討

当該地点は，外洋波浪のうねりが卓越しており，運搬及び施工の稼働率が低く，海上での作業をできる限り短縮化する等，最適な施工方法を検討することが重要である。施工方法は，支持構造物(ケーソン)設置，風車据付，観測タワー設置の3段階に分けて検討した。

支持構造物の設置は，クレーン船による吊り運搬沈設，半潜水状態でクレーン船により吊り運搬，浮上曳航・注水沈設の方法を検討した。

風車据付は，大型自己昇降式作業台船(SEP：Self Elevating Platform)によるブロック架設，大型クレーン船による一括架設，ハーフSEP全旋回クレーン船によるブロック架設，SEP2隻によるブロック架設を検討した。

観測タワー設置は，タワークレーンによる組立，中型SEP上のクレーンによる組立などを検討した。

4．着床式洋上風力発電の実証研究

実証研究F/Sに引き続き，平成21年8月，「洋上風力発電等技術研究開発」の一環として「洋上風況観測システム実証研究」を，東京電力と東京大学の2者共同によりNEDOから受託するとともに，平成22年5月には「洋上風力発電システム実証研究」が東京電力とNEDOとの共同研究として採択され，平成25年度末に至る実証研究が進められている。(図9)

「洋上風況観測システム実証研究」では，風況観測タワーを洋上に設置し，洋上における気象・海象特性を把握するとともに，基礎構造物が環境に与える影響の調査が予定されている。主要な実施項目を以下に示す。

① 洋上の風と波の観測と特徴把握
② 数値シミュレーション手法の検証と高度化
③ 環境影響調査
④ 洋上風況観測システムの設計指針(案)の作成

「洋上風力発電システム実証研究」では，着床式風力発電設備を設置し，設計・施工方法及び運転保守方法などを確立するとともに，洋上の風力発電設備が環境に与える影響についての調査が予定されている。

謝辞

本資料作成では，東京大学殿及び東京電力殿に多大なるご協力を頂きました。謹んで御礼申し上げます。

参考文献

1) International Electrotechnical Commission (IEC), Wind turbines – Part 1 Design requirements, IEC61400-1 Third edition, 2005.8
2) 助川博之，石原孟，山口敦，浮体式洋上風力発電に関する研究(その1)洋上風況観測と洋上風力賦存量の評価. 28回風力エネルギー利用シンポジウム論文集，2006. p.196-199.
3) 池谷毅，福山貴子，稲垣聡，上部斜面式軸対称ケーソンに作用する波力と揚圧力，海洋開発論文集，第22巻，pp.313-318，2006.
4) 千葉県，千葉県東沿岸海岸保全基本計画，平成15年8月

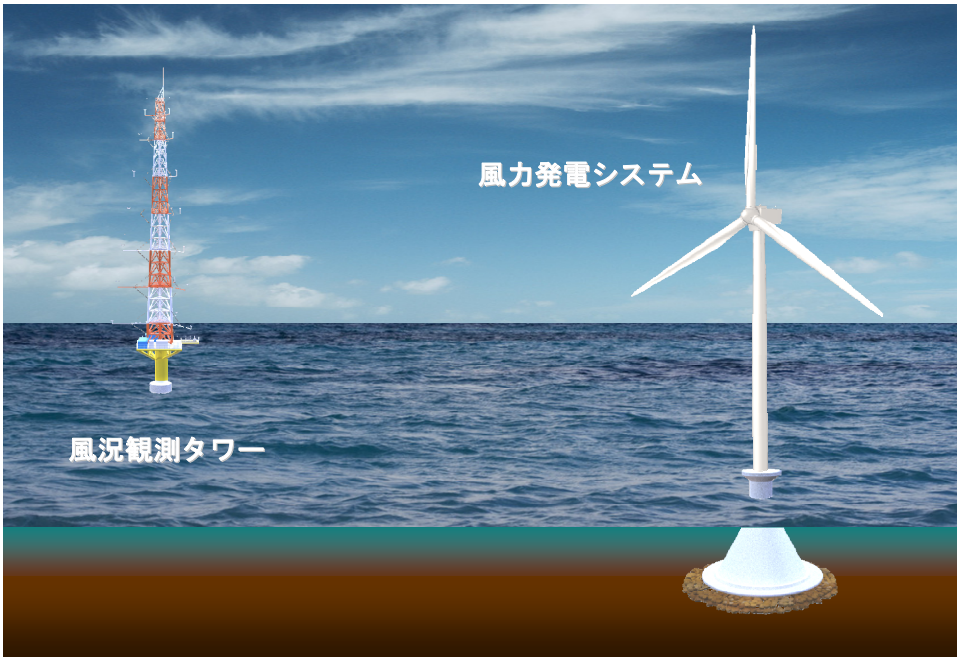


図9　実証研究設備のイメージ