

洋上風況の観測結果と洋上風力発電システムの 研究開発状況について

OBSERVATION OF OFFSHORE WIND CLIMATE AND DEVELOPMENT OF OFFSHORE WIND POWER GENERATION SYSTEMS

福本幸成¹・池谷毅²・安野浩一朗³・大山巧⁴・石原孟⁵・鈴木英之⁶
Yukinari FUKUMOTO, Tsuyoshi IKEYA, Koichirou ANNO, Takumi OHYAMA,
Takeshi ISHIHARA, Hideyuki SUZUKI

¹正会員 工修 東京電力株式会社 技術開発研究所 (〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎八幡4-1)

²フェロー会員 工博 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目9-1)

³正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

⁴正会員 工博 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4-7)

⁵正会員 工博 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

⁶工博 東京大学大学院新領域創成科学研究科 海洋技術環境学専攻 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

In order to be sure there is vast offshore wind energy potential on the Japanese coastal areas, we observed offshore wind climate on the Pacific Ocean near Fukushima pref. And to use the energy, we developed offshore wind power generation systems. At first, this paper presents the observation result that shows wind climate characteristics are good for wind turbines as well in Europe. Also, we developed two types of offshore wind power generation systems, one is installed on seabed and another is floated on water. And both can be safe from Japanese severe natural conditions.

Key Words : Offshore Wind Power, Offshore wind climate, Caisson, Spar-buoy, Semi-sub

1. はじめに

洋上は、風速が大きく、乱れ強度が小さいなど風力発電にとって好条件が期待される¹⁾。

洋上風力発電の導入にあたっては、洋上の風況特性を把握する必要がある。本論文では、まず、福島県東沖合での風況観測結果について述べ、観測によって、日本の沿岸においても風力発電の好条件が確認されたことを述べる。

また、欧州で実用化されている着底式洋上風力発電と、日本沿岸の大水深でも適用可能な浮体式洋上風力発電の技術的な成立性を確認した結果を述べ、日本における今後の洋上風力発電の開発の展望について考察する。

2. 洋上風況の観測

(1) 観測方法

風況観測位置は、図-1に示す福島県の東沖合37kmの太平洋上にある洋上の天然ガス田プラットフォームである。掘削やぐらの最頂部、海面高さ94mに光ファイバー方式の防爆型風向風速計を設置し、2004年10月から2006年9月の2年間にわたり観測した。観測データは、天然ガス田プラットフォームの居住区画に設置したデータロガーに、サンプリング間隔2秒で記録し、毎日1回、10分統計処理値を携帯電話のメールによって自動送信した。

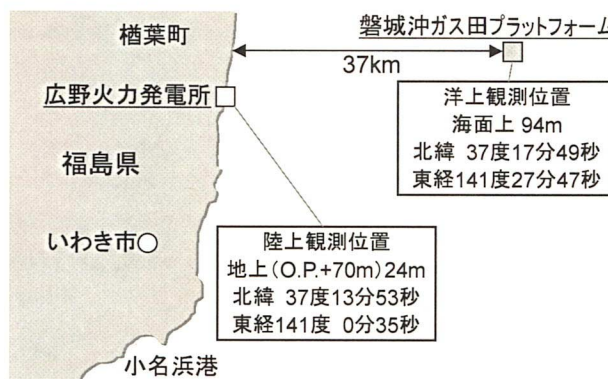


図-1 観測位置

(2) 観測結果

a) 風速

2年間の観測の結果、年平均風速は7.4m/s、年平均風力エネルギー密度は562W/m²となった。大型風車のハブ高さ80mに換算（べき指数 $\alpha=0.1$ ）した場合でも7.3m/sが見込まれる。風力発電の適地条件として、風車のハブ高さにおける年平均風速6m/sが目安とされている²⁾。風力エネルギーは、風速の3乗に比例するため、本観測地点の風力エネルギーは適地条件の目安の約1.8倍であることがわかった。

月平均風速の変化を図-2に示す。月平均風速は、概ね寒候期（10月～3月）に高く、暖候期（4月～9月）に低い。図-2には約40km離れた陸上側（広野火力発電所構内、観測高さ地上高24m、べき指数 $\alpha=0.15$ でハブ高さ80mに換算）の値も併記する。

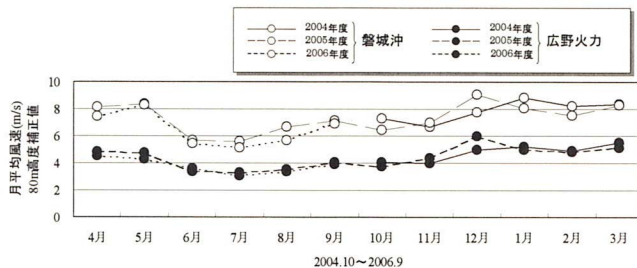


図-2 月平均風速の変化

b) 乱れ強さ

乱れ強さの年平均値は10.5%であった。一般に平坦な陸上での乱れ強さは15%程度³⁾であり、洋上は、乱れの小さい風況で、風車機器の耐久性の観点から、良好な環境であることがわかった。

月平均乱れ強さの変化を図-3に示す。暖候期の月平均乱れ強さは、7～10%と小さく、寒候期の月平均乱れ強さは11～14%と比較的大きくなった。図-3には約40km離れた陸上側（広野火力発電所構内、観測高さ地上高24m）の値も併記する。

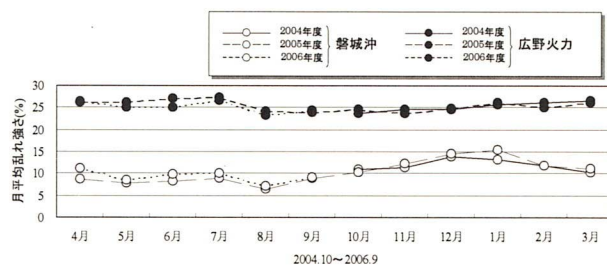


図-3 月平均乱れ強さの変化

風力発電システムの国際規格IEC61400-1⁴⁾では、風力発電システムの安全性能を確認するための種々の風速・風向特性が規定されている。この中の、洋上を含む乱れ強さの小さい地域に適用されるCategory-Cで規定された乱れ強さの90%非超過値と、今回の観測で得られた乱れ強さを各風速階級内で対数正規分布に近似して得た「観測の90%非超過値」

とを、図-4に比較する。

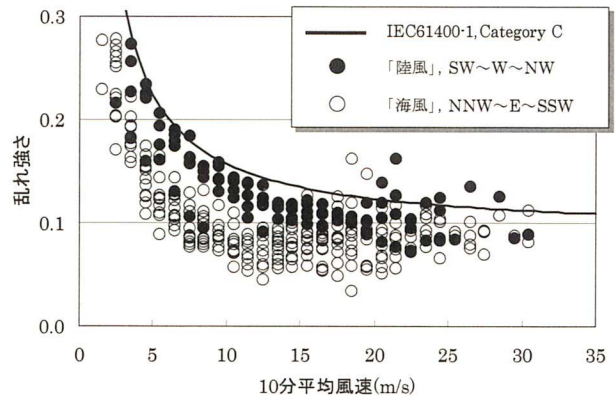


図-4 乱れ強さのIEC規格との比較

図-4より、観測で得られた乱れ強さの90%非超過値は、全風速域でIEC規格をおおむね下回っていることがわかった。特に発生頻度の高い低風速域でIEC規格との差が大きい。

このことから、観測地点における乱れ強さは、IEC規格が対象としている欧州の、陸上に近い北海やバルト海における乱れ強さに比べて小さいことがわかった。また、福島県側の陸地から吹く「陸風」（＝SW～W～NW）（●）は比較的乱れ強さが大きく、IEC規格に近いのに対して、それ以外の風向（「海風」）の乱れ強さ（○）は比較的小さく、IEC規格よりも小さいことがわかった。

3. 着底式洋上風力発電システムの開発

(1) 我が国での着底式洋上発電導入への課題

我が国では、欧州にみられるような、本格的な洋上風力発電システムは実現していない。これには、社会の関心、制度の違いなど様々な理由があるが、技術的には欧州とは海域の自然条件、利用状況が大きく異なる点が主要な理由であると思われる。欧州の初期のウィンドファームの立地場所は、風が強いものの静穏な浅海域であったが、我が国沿岸においてはこうした条件の海域は、様々な目的のために既に高度に利用されており、洋上風力発電装置を設置する余地が残されていない。それゆえ、我が国での大規模な洋上風力発電システムを実現していくことを考えると、比較的水深が大きく外洋に面した、波浪条件が厳しい海域を想定せざるを得ない。

こうした制約条件から、着底式洋上風力発電システムを我が国に実現させていく場合、台風などの気象・海象条件、複雑な海底地盤条件、地震条件などの過酷な自然条件を克服することが必要となり、以下に示す技術課題を解決することが求められる。

a) 気象条件の把握

我が国周辺海域は、台風や低気圧の来襲により、他の地域にはみられない複雑な時空間変動を示すこ

とが予想される。しかしながら、洋上風の風況、風速分布、乱流特性などについては、必ずしも十分把握されているわけではない。

b) 海象条件の把握と波力評価方法の検討

基礎が受け持つ主要外力は、風車やタワーに作用する風力と基礎に作用する波力である。外力としては、両者は同じ程度の大きさとなることが多く、風と波浪の発生特性を把握することが重要となる。基礎の形式、形状に応じて、精度良く波力を評価する方法も課題である。

c) 地震の影響の評価

我が国に建設される構造物の場合、地震の影響は不可避である。洋上風力発電施設は、いわば年中風や波の存在する場所に建設されるため、地震の影響を考える上で、風力、波力と荷重の組合せ方法が設計上の課題となる。

d) 構造物疲労検討

風力発電の支持構造物は、長期間にわたり、繰り返し回数の非常に多い変動外力を受けることとなる。よって、疲労に対する詳細な検討が必須となる。構造物の供用期間中の風力、波力の確率的な発生状況の予測、精度の高い動的応答解析が求められる。

e) 耐久性の検討

洋上風力発電システムは、海水の作用をうけるため、耐久性上厳しい環境に曝される。海洋環境において、長期耐久性にすぐれる機器、構造物が求められる。

f) 施工方法

洋上風力発電に適した海域は、年間を通して風速が大きい場所となる。これは、洋上での施工性の観点からすると、稼働日数が限定されることとなる。海上作業を短縮する施工法や稼働日数を確保できる施工法を確立することが課題となる。

(2) 波力評価方法の検討

上記の種々の課題に対して、着底式の洋上風力発電施設の早期の実現をめざし、いくつかの課題に対しては研究開発を実施してきた。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⁵⁾、また衝撃碎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がそれである。以下に波力の評価方法に関する研究の概要を示す。

写真-1 は、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。基礎は、上部斜面式軸対称形状としている。写真からわかるように、洋上風力発電システムの重力式基礎は、波長に比べて、構造物の径が小さく、小口径部材として以下のモリソン式(1)を使った波力評価が適している。

$$dF = \frac{1}{2} \rho C_D u |u| (2R) dz + \rho C_M \frac{du}{dt} (\pi R^2) dz \quad (1)$$

ここに、 dF ：基礎の単位高さあたりに作用する力（断面波力）、 C_D ：抗力係数、 C_M ：慣性力係数、 ρ ：密度、 u ：流速、 R ：基礎直径である。抗力

係数は、円形断面に対する $C_D = 1.0$ を用いる。一方、慣性力係数は、線形回折波理論から求められる値（図-5）を用いている。図-6 に水平波力最大時の断面波力の実験値とモリソン式による評価値を比較して示す。流速の評価を、線形波理論（Airy wave）に基づく場合と非線形波理論（S.F.M.）に基づく場合を示している。線形理論では、過大評価になるが、非線形理論に基づくとは、若干大きめの評価となるが、断面波力の分布を良好に再現することができる。

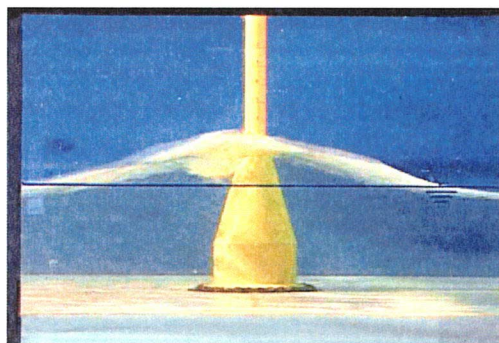


写真-1 重力式基礎に作用する波力実験

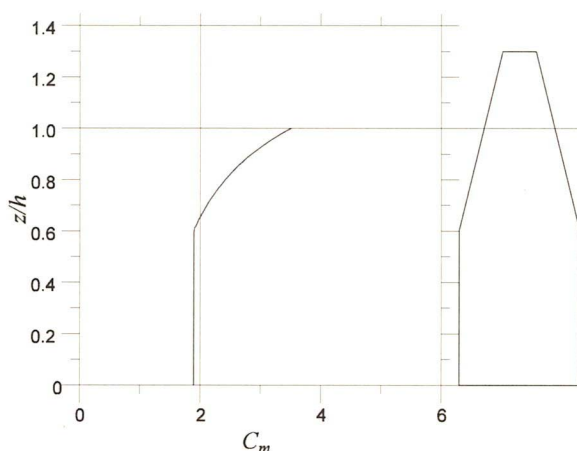


図-5 慣性力係数の分布

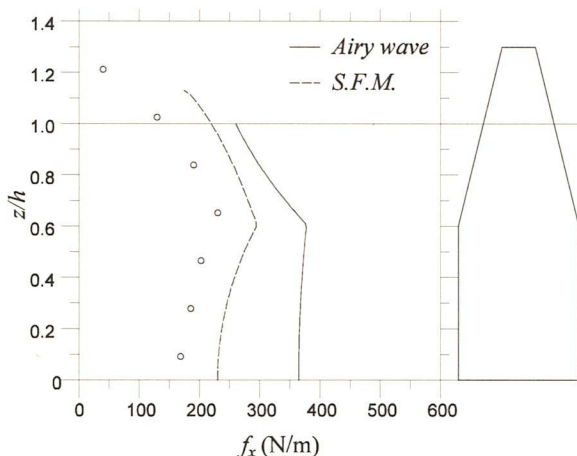


図-6 水平波力最大時の断面波力の分布

4. 浮体式洋上風力発電システムの開発

(1) 鉄筋コンクリート製スパー型の検討

a) 概要

浮体式洋上風力発電システムの浮体の1つとしてスパー型浮体が挙げられる。スパー型浮体は、重心位置を下側に設定し、メタセンター高を大きくすることによって浮体の安定性を確保する形式であり、石油生産施設において実績が豊富である。本研究では、構造材料を安価な鉄筋コンクリートとしたスパー型浮体⁶⁾を考案し、定格出力2.4MW（ローター直径：92m、ハブ高さ：70m）を1基搭載して、浮体全体系の動揺特性の把握を行うとともに、最適形状の検討を行った。

b) 動揺特性の把握

波と風による浮体の動揺特性を把握するため、(独)海上技術安全研究所の風水洞を用いた実験を行った。風水洞は幅3m、風洞部長さ15m、高さ2m、水槽部長さ17.6m、深さ1.5mであり、フルードの相似則に従い縮尺1/150で実施した。

図-7に実験装置の模式図を示す。ローターに作用する風荷重（定常）は風車の運転状態毎に想定される水平荷重を模擬した多孔円盤を用いて模擬した。

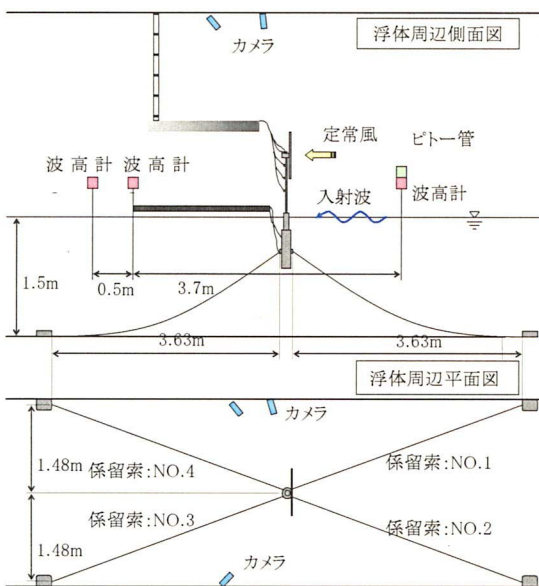


図-7 実験装置の模式図

また、動揺解析手法は流体力のうち波強制力、付加質量、造波減衰係数は線形ポテンシャル理論に基づくグリーン関数法で算定し、風力、海流力は速度の2乗に比例する抗力として評価した。式(2)に海流力の算出方法を示す。

$$F_{cu} = \frac{1}{2} \rho_w C_{CD} S_c |u - u'| (u - u') \quad (2)$$

F_{cu} : 海流力, ρ_w : 海水の密度, C_{CD} : 抗力係数, S_c : 受流面積, u : 水粒子速度, u' : 浮体の移動速

度である。

図-8および図-9に波・風（定常風）・潮流作用下の定格時の実験と解析の応答の比較結果を示す。図より、Heave, Pitchともに実験結果と解析結果は良好な対応を示している。ただし、Heaveの共振周期付近(35s)における解析結果は非常に大きな値を示し、実験結果と対応しないが、粘性減衰を考慮することで実験結果を概ね再現できる。波周期24秒以上でPitchの実験値応答が大きくなっているのは、定常風のわずかな変動に起因して長周期動揺が発生したためである。

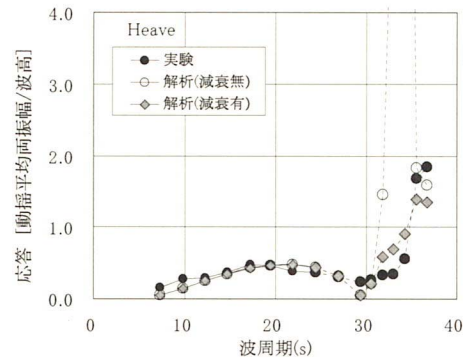


図-8 Heaveの応答特性

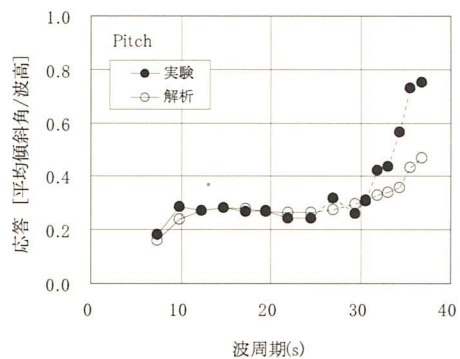


図-9 Pitchの応答特性

以上から、本動揺解析手法は抗力係数（回転時のブレードにおいてはスラスト係数）を適切に設定することで、最適な浮体寸法や係留条件の決定のために、スパー型浮体の動揺特性をほぼ十分な精度で再現できることがわかった⁷⁾。

c) 最適形状の検討

最適形状の検討のための制約条件を表-1に示す。定格運転時の平均傾斜角を5°以下と設定したのは、5°を超える傾斜によって風車の出力低下を防ぐためである⁸⁾。

表-1 制約条件

定格運転時	平均傾斜角5度以下
カットアウト時	ナセルの加速度最大値200gal以下
暴風時	ブレードが没水しない
	係留索張力が破断強度の1/3以下

動揺解析による最適浮体形状の検討および部材応力照査結果に基づく構造設計を行い、最適形状を検討した。検討における係留方法は、チェーンを用いた4点係留とした。図-10に最適な浮体形状の諸元を示す。

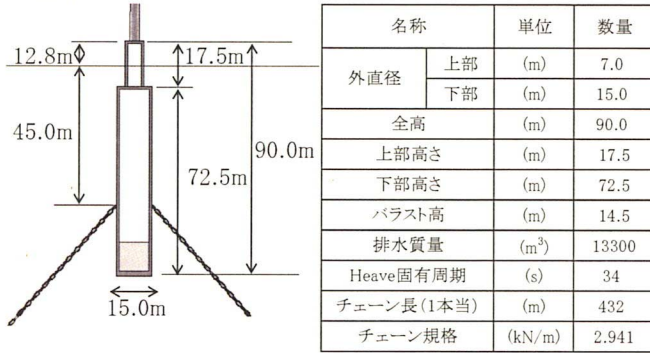


図-10 最適浮体形状検討結果

(2) 軽量セミサブ型浮体の検討

a) 概要

セミサブ型浮体は、浮体の大部分を海中に没水させることで、波力を受けにくくして動揺を低減させた浮体である。図-11に本研究で考案した軽量セミサブ型浮体の概念図を示す。風車は前述のスパ型と同様、定格出力2.4MWとし、これを3基搭載している。本浮体構造は、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連結部材と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。浮体は鋼構造を想定しており、連結部材はコンクリートバラストにて中立状態の重量としている。

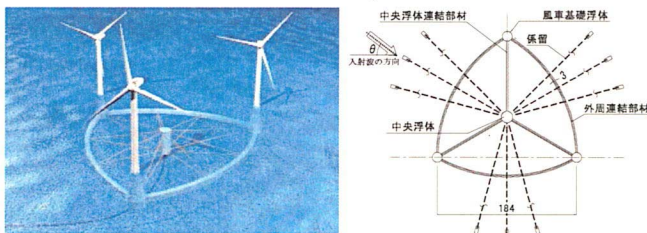


図-11 最適浮体形状の検討結果

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25s以上となっている。

b) 動揺解析法の開発

グリーン関数を用いた通常の動揺解析モデルでは、減衰のメカニズムとして造波減衰力のみが考慮され

ている。しかし、本セミサブ構造のように小口径部材を多く含む構造では、渦による抗力の効果が支配的になると考えられる。モリソン式を用いれば、各構造部材に作用する抗力は、以下のように表される。

$$\Delta F_D = \frac{1}{2} \rho C_D D |u_t - U_s| (u_t - U_s) \Delta l \quad (3)$$

ここに、 ΔF_D : 長さ Δl の部材に作用する抗力の部材直交方向成分、 ρ : 海水の密度、 C_D : 抗力係数、 D : 部材の断面に関する代表長さ、 u_t : 水粒子速度の部材直交方向成分、 U_s : 部材の運動速度の部材直交方向成分である。モデルのベースとなっているグリーン関数法は周波数領域の解析法であり調和振動を仮定していることから、ここでは式(3)を直接用いるのではなく、以下のように等価線形化して扱うこととした⁹⁾。

$$\Delta F_D \approx \frac{1}{2} \rho C_{DL} D (u_t - U_s) \Delta l \quad (4)$$

$$\text{規則波の場合: } C_{DL} = C_D \times \frac{8}{3\pi} \text{MAX}\{|u_t - U_s|\} \quad (5)$$

$$\text{不規則波の場合: } C_{DL} \approx C_D \times \sqrt{\frac{8}{\pi}} \text{RMS}\{|u_t - U_s|\} \quad (6)$$

本モデルの検証と浮体の動揺特性の把握のため、スパ型と同様に、(独)海上技術安全研究所の風水洞にて、線形係留による水理模型実験を行った。図-12に各運動モードの動揺振幅を示す。本解析結果は、Sway および Heave 運動について実験結果と良い一致を示している。特に、Sway については、入射波高による差異が固有周期付近で明確に現れており、実験から得られた特性が比較的良好に再現されている。これに対して、抗力を無視した解析は、いずれの運動モードについても固有周期付近の応答値をかなり過大に評価していることから、本浮体構造の場合、造波減衰に比べて抗力による減衰効果が支配的であることがわかる。一方、固有周期付近のRollについては実験と解析の結果に差異が見られる。これは、主として水槽の長周期領域での副振動の影響と考えられる。

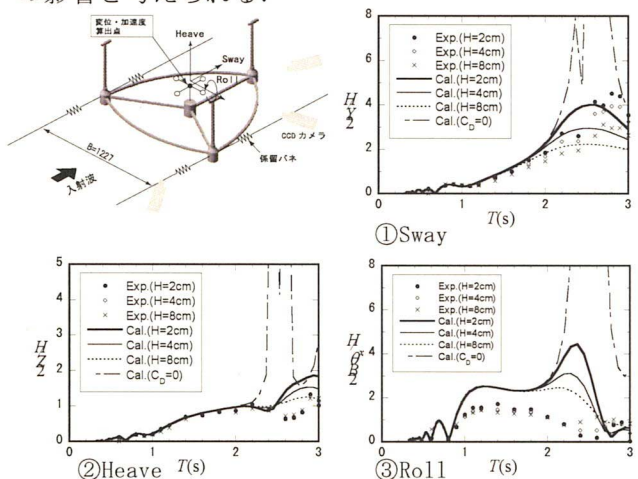


図-12 浮体動揺解析法の水理実験による検証

c) 最適形状(最適喫水)の検討

本セミサブ浮体構造において、連結部材の喫水深

が浅い場合（図-13①）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-13②）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位置が存在することになる。そこで、連結部材の喫水深をファクターとして、スパー浮体と同様の制約条件と疲労損傷に対する安全性を確保し、経済性に優れた浮体構造を検討した¹⁰⁾。図-14に示すとおり、疲労損傷度は喫水深により大きく変化し、直径3m、肉厚30mmの鋼管を基本部材とした本検討の浮体では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。

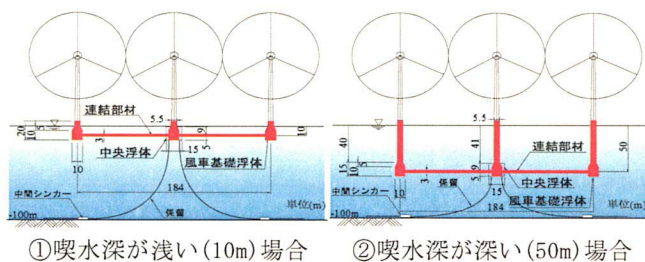


図-13 連結部材の喫水深の違いの例

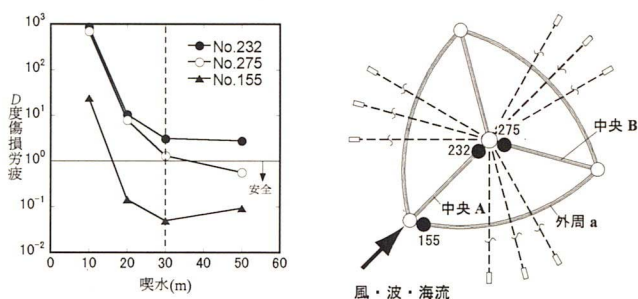


図-14 喫水深による連結部材の疲労損傷度の変化

5. 今後の展望とまとめ

我が国において本格的な洋上風力発電を導入していくためには、欧州よりも厳しい自然条件に適合した構造や設計手法の確立が必要である。このためには、実際の洋上での、自然条件の計測と構造物に作用する外力の計測、設計手法の検証と改良などが必要と思われる。こうした中、去る2008年2月に（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構は、洋上風力発電技術研究開発の計画を公表した¹¹⁾。ここでは、実際の洋上での風と波の観測や着底式洋上風車の実証試験が計画されている。本格的な洋上風力発電の導入に向けて、上記計画の円滑な推進が望まれる。

本論文の内容を以下にまとめる。

1) 福島県沖での2年間の洋上風況の観測により、この地点の年平均風速は80m高さで7.3m/sであり、陸上の風力発電適地の約1.8倍の風力エネルギーが

存在する。また、年平均乱れ強さは10.5%で、陸上に比べ十分に小さく、風車の耐久性に良い環境であることがわかった。

2) 日本の高波浪や大水深に適合した着底式洋上風力発電の実用化のためには、基礎に作用する波力評価手法の確立が必要である。水理模型実験との比較により、非線形な流速評価とモリソン式とを組み合わせる方法で波力評価が可能であることがわかった。

3) Heave 共振を回避できる浮体式洋上風力発電のための、二段円筒型スパー浮体を考案した。また風水洞実験により、その動揺応答特性を評価するとともに、グリーン関数法を用いた動揺解析手法の妥当性を示した。

4) 風車3基搭載可能なセミサブ型浮体を提案し、その動揺特性をグリーン関数モデルに抗力の影響を考慮した動揺解析モデルにより検討を行った。その結果、固有周期を長周期に設定することで波浪動揺量が小さく抑えられること、30mの喫水深が経済的に最適な構造である結論を得た。

参考文献

- 1) NEDO：日本における洋上風力発電の導入可能性調査，1998。
- 2) 清水幸丸：風力発電技術〔改訂版〕，pp. 36，1999。
- 3) NEDO：風力発電導入ガイドブック，pp. 24-26，2005。
- 4) International Electrotechnical Commission (IEC)；Wind turbines -Part 1 Design requirements, IEC61400-1 Third edition 2005-08
- 5) 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。
- 6) 森屋陽一，土屋京助，原基久，福本幸成，鈴木英之：洋上風力発電のためのRC製スパー型浮体に関する研究，日本沿岸域学会検討研究会，講演概要集，No. 19，pp. 212-215，2006。
- 7) 森屋陽一，安野浩一朗，原基久，福本幸成，鈴木英之，藤田圭吾：洋上風力発電のためのRC製二段円筒型浮体の動揺特性，海洋開発論文集，vol. 23，pp. 985-990，2007。
- 8) 鈴木英之，芦田哲郎，榎本一夫，矢後清和，段峰軍：スパー型浮体式洋上風車の最適化に関する研究，土木学会海洋開発シンポジウム（海洋開発論文集），春季講演会，Vol. 21，pp. 1047-1052，2005。
- 9) 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，第53巻，pp. 806-810，2006。
- 10) 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，第54巻，pp. 916-920，2007。
- 11) NEDO. 平成20年度新規/拡充プロジェクト（案）に対する意見募集について - NEDO POST-，2007。