

浮体式洋上風力発電施設のトラススパーク・ セミサブ型浮体の構造特性に関する研究

CHARACTERISTICS OF TRUSS SPAR AND SEMI-SUBMERSIBLE FLOATING STRUCTURES FOR OFFSHORE WIND POWER GENERATION

安野浩一朗¹・国元将生²・関本恒浩³・福本幸成⁴・鈴木英之⁵・飯島一博⁶
Koichirou ANNO, Masaki KUNIMOTO, Tsunehiro, SEKIMOTO, Yukinari FUKUMOTO,
Hideyuki SUZUKI and Kazuhiro IJIMA

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

²五洋建設(株) 土木設計部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

³フェロー 工博 五洋建設(株) 技術研究所 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

⁴正会員 東京電力(株) 技術開発研究所 (〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)

⁵工博 東京大学大学院教授 工学系研究科 環境海洋工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

⁶工博 大阪大学 工学系研究科 地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

The coastal areas of Japan are estimated to have vast offshore wind energy potential. In order to use large quantities of offshore wind energy, developing a floating body for offshore wind power generation applicable to deep sea areas. Several researches have been made to meet the requirements.

In this study, we proposed truss spar and semi-submersible bodies, they have a long track expand about deep water drilling rig operation results. And solved the response and stress characteristics of the floating bodies. And the optimum floating body size and the mooring facilities were determined by the analysis systems.

Key Words : Wind power generation, semi-submersible body, truss spar

1. はじめに

環境への負荷が小さく、採算性の期待できるエネルギーとして風力発電が注目されており、近年では、陸上域における適地の減少に伴い、発電効率の良好な洋上への展開に向けた研究が推し進められつつある。しかしながら、我が国の海底地形は沿岸から遠ざかるにつれて急激に水深が増すため、実績のある着底式の洋上風力発電施設は不向きであり、浮体式の方が有利となってくる。また、2007年末にイタリアにおいて浮体式風力発電機の現地試験機が建設されるなど、浮体式洋上風力発電の導入に向けた検討が加速されつつある¹⁾。

このような背景の中、著者ら²⁾も、材料費の安いコンクリートを用いたRC製スパーク型浮体を提案し、風水洞実験による浮体の動揺特性を評価するとともに、動揺特性に対するグリーン関数法を用いた動揺解析手法の適用性を示した。また、波浪に対するHeave共振を回避するための手段として上部細型の

二段円筒型浮体を提案し、その優位性の検討や成立可能な浮体構造の提案を行った。

本研究では、さらなる浮体規模の縮小を推進して、経済性に優れた構造を抽出する目的の下、欧州等での石油掘削施設において実績の豊富な、トラススパーク型およびセミサブ型(1基搭載型)の2つの浮体構造形式を提案した。そして、動揺解析により最適浮体形状の検討を行うとともに、各部材剛性を考慮した構造解析により、応力特性を解明し、作用応力の検討を行い実現可能な最適浮体構造形式の抽出を行った。

2. 動揺解析手法および流力弾性応答解析手法の概要

(1) 動揺解析手法

動揺解析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た。風力、潮流力は速度の2乗に

比例する抗力として評価した。係留力はカテナリー理論により算定した。また、検討の際の外力条件は、波・風の不規則性を考慮し、不規則波としてブレッグ・シュナイダー・光易型スペクトルを、不規則風としてダベンポートのスペクトルを用いた。

上記の力を考慮して、浮体の運動方程式を数値積分することにより、動揺量や係留索張力を時系列的に評価した。ここで、不規則波に対する解析を行う場合の付加質量、造波減衰係数の算定は、有義波周期に対して行った。なお、本解析手法は、二段円筒型浮体を対象とした風水洞実験結果の再現計算により、適用性の確認を行っている²⁾。

(2) 流力弾性応答解析手法

構造特性の評価は、メガフロート等の大型浮体構造モデルに用いられる流力弾性応答解析手法の1つである VODAC³⁾ (Very Large Floating Structure Oriented Dynamic Analysis Code) を用いて、動揺応答を考慮した各部への作用応力特性の評価を行った。VODACは、波浪中での弾性応答解析に加えて、浮体の変位も含めた動的圧力分布の計算や波漂流力における定常成分と鉛直軸周りモーメントの計算等を行う。また、潮流力などの定常荷重は静的構造解析コードを用いて行う。さらに、計算時間を短縮するための工夫として、構造部分については、sub-structure法を動的問題に拡張し、流体部分については複数の要素浮体を1つのまとまりとみなすgroup bodyの概念を導入したものである。なお、本検討では簡便に表現できる、弾性支床上の梁モデルを用いて応答特性を支配する主要な設計パラメータの抽出を行った。式(1)に運動方程式を示す。

$$m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + C_v \frac{\partial w}{\partial t} + EI_0 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + k_c w = F \quad (1)$$

ここに、 $w(x,t)$:運動モード、 m :浮体質量(付加質量含む)、 C_v :粘性減衰係数(線形化抗力係数)、 EI_0 :単位幅当りの剛性、 k_c :バネ定数(係留系等)、 F :外力(本検討では、波力、波漂流力、風力および潮流力を対象)をそれぞれ示している。なお、本解析手法は複数の浮体式空港を対象とした水理模型実験の結果の再現計算により、その適用性が確認されている⁴⁾。

3. 動揺解析による最適浮体形状の検討

(1) 検討条件

表-1に検討に用いた外力条件を示す。外力条件は関東地方の20km程度沖合の太平洋上の地点を想定した。なお、表-1中の平均風速は水面からの高さ10mの位置における平均風速を示している。表-2に制約条件を示す。制約条件は定格出力2.4MW級の風車を想定して設定した。制約条件としては、これまでの検討では、定格時の平均傾斜角を10°としていたが、発電効率低下の回避および発電機器の安全性確保の

観点から、5°として設定の見直しを行った。また、暴風時における上下変位の制約も、着底式洋上風力発電施設において提案されている条件⁵⁾をもとに変更した。

表-1 外力条件

	有義波高	周期	平均風速	潮流
定格時	3.9m	7.4s	12.5m/s	1.85m/s
カットアウト時	7.1m	9.8s	25.0m/s	
暴風時	12.0m	13.4s	50.0m/s	

表-2 制約条件

定格時	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0.2g以下 (g:重力加速度)
暴風時	ブレードが没水しない(ナセルの鉛直下向き変位にクリアランス長(22m)を考慮) ⁵⁾
係留索張力	チェーンの破断強度の1/3以下

風荷重は、抗力係数および受風面積を用いて算出し、稼動状態に応じたスラスト・抗力係数を適宜設定した。したがって、風車の回転に伴う浮体への作用力は本検討において考慮していない。

(2) 浮体寸法および係留条件の検討方法

検討方法は、まず、最適な浮体寸法の決定のために、水面周りの風荷重によるモーメント、潮流力によるモーメントおよび浮体の静的復元モーメントとの釣り合いから、浮体の傾斜角が5°以下となる浮体構造形式を決定した。次に、動揺解析により、制約条件を満たすことを確認した。最後に、流力弾性応答解析により各部材の応力照査を行った。静的復元モーメントの算出時には、複数の条件を満たす候補のうち、コスト削減の観点から、浮体質量が最も軽くなる浮体寸法を最適案とした。

係留方法は動的応答を拘束しないチェーンによるカテナリー係留とし、動揺解析により、①チェーンの浮体側取付位置、②チェーン長、③チェーン単位長さ重量、④シンカー設置位置を決定した。決定の際には、上田・白石⁶⁾の提案した方法を参考にし、動揺解析により制約条件を満たす範囲で、係留索がもっとも短くなる条件を最適な係留条件とした。本検討における最適浮体形状の検討は、動的傾斜(Pitch, Roll)を重力と浮力による復元でこにより抑え、定常変位を係留系により抑制する方式である。

(3) 最適浮体検討結果(二段円筒型浮体)

動揺解析により最終的に決定した二段円筒型浮体の最適寸法および係留条件を図-1に示す。なお、図-1は、筆者ら¹⁾の研究において提案した形状をベースに、制約条件の見直しに伴い再検討した結果である。その結果、全高は90.0m、排水量は13,300m³となり、浮体の安定性能の向上に伴い浮体規模が大きくなった。なお、動揺解析の結果では、

定格時における傾斜角の制約で構造が決定された。この結果を受け、本研究では浮体構造の縮小化を図るべく、新たな構造形式の抽出を行うこととした。

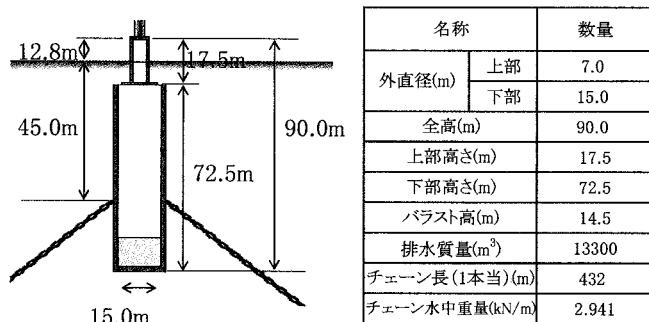


図-1 最適浮体形状検討結果（二段円筒型浮体）

(4) 新型浮体構造形式の抽出

排水量を低減可能な浮体構造形式を抽出するためには、復元てこの原理におけるアーム長を増加させる必要がある。すなわち、メタセンター高および水線面二次モーメントを増加させることである。既往の浮体構造物は、スパー型などの重心位置を下方に設定してメタセンター高を大きくとる形式と、セミサブ型や大型基盤浮体などの水線面二次モーメントを大きくとる形との2タイプに概ね分類できる。

本検討では、それら2つの諸元をそれぞれ増加させた構造形式について最適化を図ることとした。

図-2にメタセンター高の増加する構造形式であるトラススパー型浮体の最適化結果を示す。

トラススパー型は、北海での石油掘削施設を参考に今回新たに提案した形式である。構造のメリットは、浮体中間部にトラス部を設けて下部浮体に高重量となるバラストコンクリート部を設けることで、浮心位置を上昇させ、二段円筒型よりもメタセンター高を効率的に増加できることである。また、没水部の投影面積が小さくなるため、波力および波漂流力が低減され、動揺安定性も向上する。これにより、二段円筒型浮体よりも約30パーセント排水量を低減できることとなった。

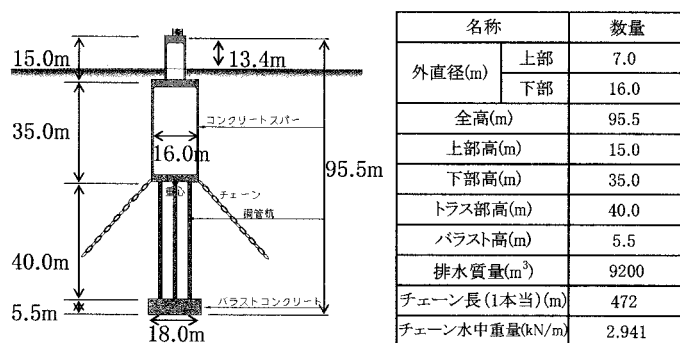


図-2 最適浮体形状検討結果（トラススパー型）

図-3に水線面二次モーメントを大きくする構造形式であるセミサブ型浮体に対し最適化を行った結果を示す。検討においては、施工や外力作用方向の変動に対する動揺安定度の対称性を考慮して、4コラムおよび4点係留を基本とした。排水量低減の観点からでは、各コラム中心位置の配置を浮体中立軸から30m程度とし、コラム外直径を11.0mとすることが最適となった。排水量は、トラススパー型よりもさらに縮小することが可能となった。

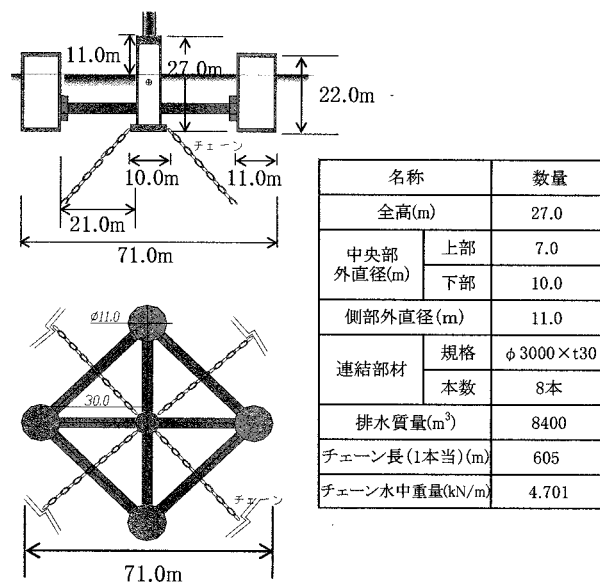


図-3 最適浮体形状検討結果（セミサブ型）

セミサブ型については、排水量を小さくできるものの、HEAVE方向の固有周期が外力周期に近くなる傾向にある。図-4に、両浮体の定格時におけるHEAVEの周波数応答を示す。なお、周波数毎の波の振幅で除して表している。応答のピーク周期が顕著となるのは、トラススパー型で27.8sに対し、セミサブ型は10.4sと波周期に近接しているため、復元剛性を減じることによる固有周期の長周期化などの別途対策が要される。

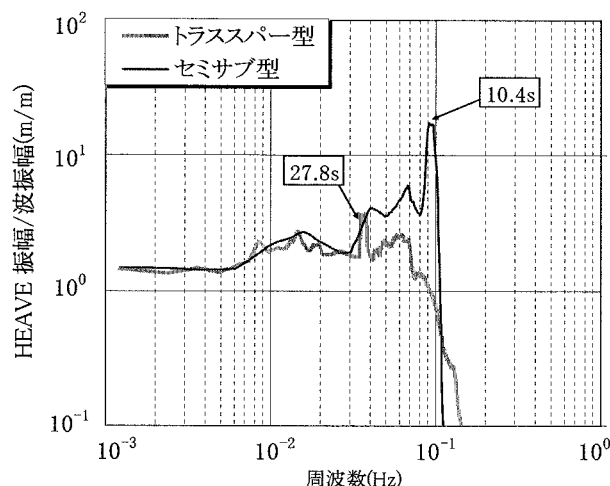


図-4 定格時のHEAVE方向動揺応答

その後、セミサブ型については波との共振を回避できる構造形式の抽出を試みたが、排水量が大幅に増加する傾向にあった。したがって、共振対策については今後、別途案を検討することとし（例えば係留系による対策）、先に提案した形式(図-3)を次項におけるVODACによる検討対象とした。なお、本構造のような、水線面周りのモーメントにより復元力を確保する浮体構造における固有周期の長周期化は、スパー型に比べ容易でない。長周期化させるためには水線面積を減じる必要があるため、代わりにコラム位置を中立軸から長くしなければならなくなり、浮体規模の増加につながるからである。セミサブ型は逆にコラムの中立軸からの距離を十分に確保し、その代わり各コラム上に風車を設置する複数機搭載型の形式とする方が経済的となる可能性はある。

係留チェーンについては、外力の作用方向を変化させた複数の条件下での解析を通じて、トラススパー型の場合は、配置高さをほぼ浮体重心位置（上部とトラスとの接合端部）とすることが最適位置となった。なお、セミサブ型については経済性および施工性を考慮し、チェーン設置位置を中央部下端と定めて検証を行っている。セミサブ型のチェーン水中重量がトラススパーよりも大きくなった要因は、波漂流力がトラススパー型よりも大きくなるためと考えられる。表-3に動揺解析の結果を示す。

表-3 動揺解析結果

構造形式	状態	傾斜角 (deg)	ナセル 加速度(G)	上下変位 (m)	チェーン張 力(kN)
		平均値	最大値		
トラススパー型	定格時	3.13	0.08	-2.45	756
	暴風時	4.02	0.34	-9.88	2881
	カットアウト時	1.91	0.18	-4.40	1760
セミサブ型	定格時	4.83	0.15	-5.60	2214
	暴風時	7.82	0.46	-10.14	4392
	カットアウト時	4.34	0.20	-5.54	2505

4. VODACによる構造解析

(1) トラススパー型の応力応答特性

本検討では、妥当性が確認されている流弾性応答解析手法により応力解析を行い、想定海域における浮体の強度要件に関して、トラススパー型とセミサブ型を対象に照査を行った。なお、本検討においては、想定される破壊モードを降伏と座屈とし、最大応力に対する部材強度との比較により構造成立性の検証を行った。図-5にトラススパー型に対する各稼動状態の最大曲げモーメント分布図を示す。

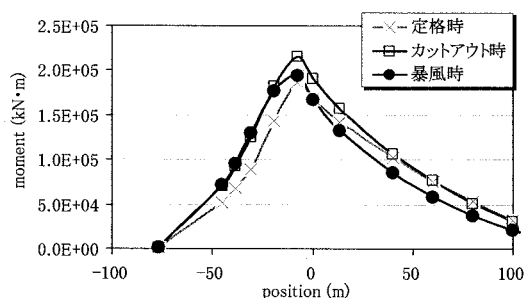


図-5 最大曲げモーメント図

図-5中の横軸はタワー基部を0とし、水面下標高を負として表記している。図-5よりタワー基部付近において応力が集中する傾向を示している。

次に、タワー基部における周波数毎の最大応力値に関する検討を行った。図-6から図-8に検討結果を示す。各図の横軸は入射波の角周波数($=2\pi f$)、縦軸は単位波振幅当たりの応答振幅を表している。なお、本検討対象海域の来襲波浪は概ね0.5rad/s以上である。

各応力応答において、1.0 (rad/s) 付近で一律に応力が極大化をとる傾向を示している。これは浮体動揺の影響ではなく、この周波数でのタワーや風車などによる慣性力が大きいためであると考えられる。仮に、極大値における波高を12m(暴風時)とした場合、片振幅で60MPa程度となり、一般的な鋼材の許容応力160MPaに対して十分小さい値である。トラススパー型は、応力が集中するタワー基部において想定される来襲波浪相当の周期に対し、強度要件を越える特異点の存在は見当たらない。したがって、トラススパー型については、十分強度要件を満足できると考えられる。

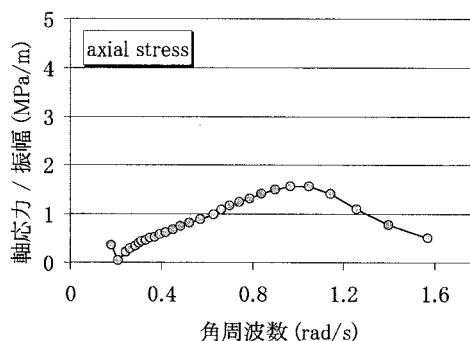


図-6 タワー基部の応力応答（軸力）

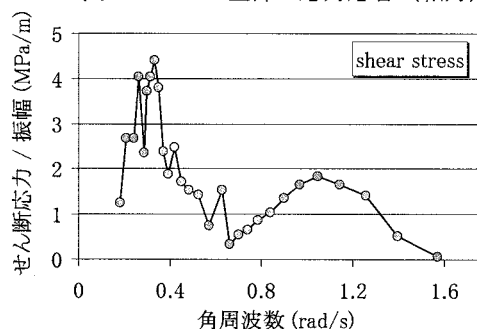


図-7 タワー基部の応力応答（せん断力）

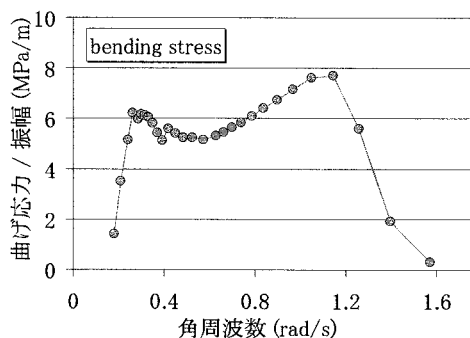


図-8 タワー基部の応力応答（曲げモーメント）

(2) セミサブ型の応力応答特性

トラススパー型と同様の手法を用いて、セミサブ型の応力解析を行った。図-9にセミサブ型の解析モデル図を示す。図中の△印は応力応答評価位置を示す。本検討では応力が集中する可能性が高いと想定される、中央コンクリート製浮体の上部と鋼製水平部材をそれぞれ選んだ。

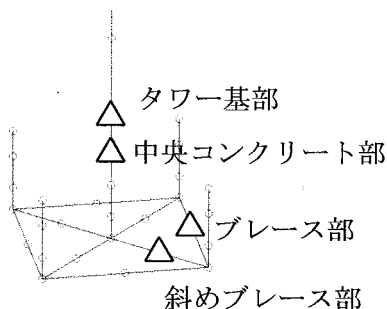


図-9 解析モデルおよび応力評価位置

図-10から図-15に各評価位置における応力応答解析結果を示す。タワー基部および中央コンクリート部の応力応答は、 $\omega=0.3$ 付近にてピークが見られるが、これはPitch同調応答によるタワー部の慣性力によるものであると考えられる。いずれの応答特性もそれぞれの部材での材料の降伏応力を超える程の応答値は見当たらない。

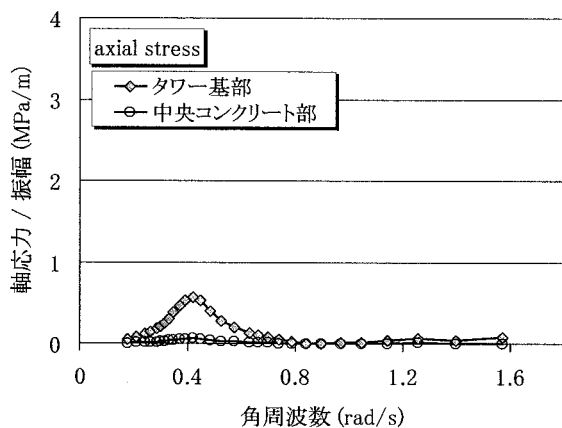


図-10 タワー基部・中央コンクリート部の応力応答 (軸力)

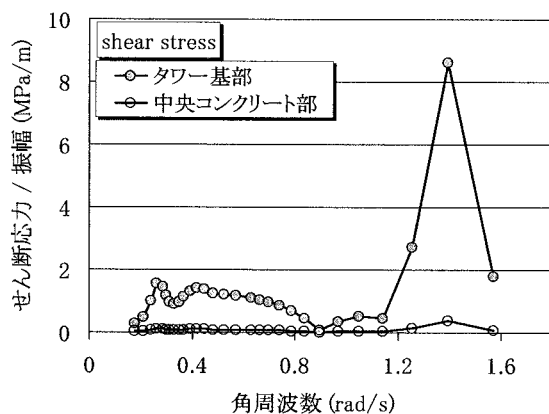


図-11 タワー基部・中央コンクリート部の応力応答 (せん断力)

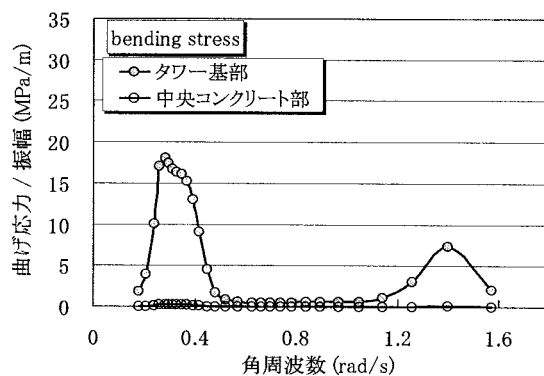


図-12 タワー基部・中央コンクリート部の応力応答 (曲げモーメント)

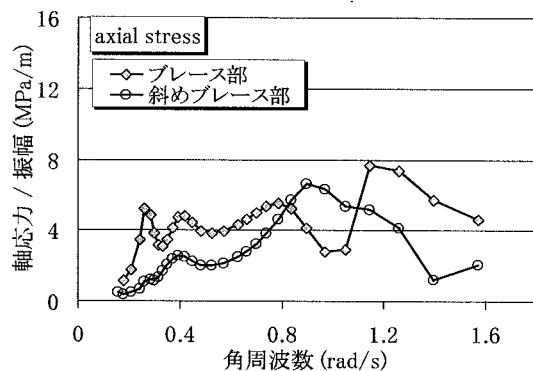


図-13 ブレース部および斜めブレース部の応力応答 (軸力)

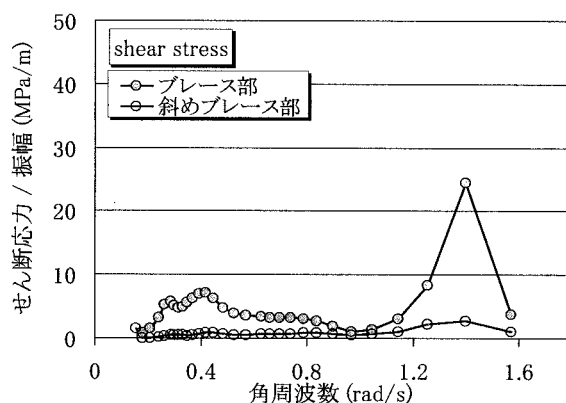


図-14 ブレース部および斜めブレース部の応力応答 (せん断力)

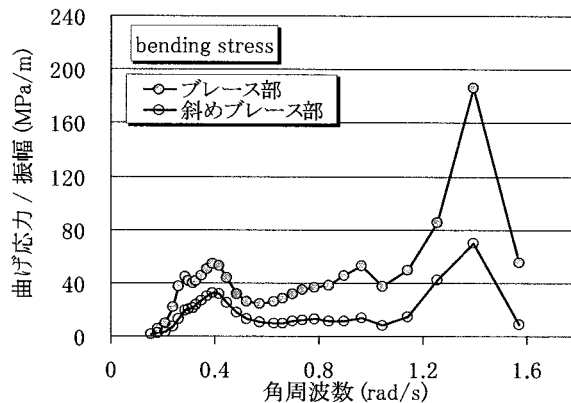


図-15 ブレース部および斜めブレース部の応力応答 (曲げモーメント)

一方、ブレース部および斜めブレース部における応力応答値については、 $\omega=1.2$ 以上において急激な増幅が見られ、応答レベルは鋼材の降伏応力を超過している。ブレースの追加などにより、ブレース部の荷重分散を行う必要があると考えられる。また、 $\omega=1.4$ 付近では、波長とコラム間の距離が2:1程度となっているため、浮体間の荷重が逆位相となる。この現象の発生により、Pitch応答が励起され、部材応力が急激に増加する結果を示したものと考えられる。また、セミサブ型は、トラススパー型に対し、短周期側での応答値が比較的大きいのが目立つ。これは、疲労破壊に対する詳細検討が必要であることを示すものである。本検討の結果、提案したセミサブ型は、ブレース部において部材降伏応力を超える応力が発生していたものの、応力が超過する箇所へのブレースの追加により十分対処できる。タワー基部の応力は強度要件以内を確保できており、風車本体への大幅な構造補強までを要する結果には至らないため、セミサブ型についても、適切な補強方法の構築により、強度要件を満足できると考えられる。

5. 結論

- (1) 2.4MW級の風車を想定した動揺の制約条件を満足する最適浮体形状及び係留条件の検討を行った結果、従来提案された二段円筒型スパー浮体に対し、30%程度の排水量低減を可能とするトラススパー型およびセミサブ型を新たに考案した。
- (2) HEAVE方向の動揺応答解析の結果から、セミサブ型のピーク周波数は10s程度と短くなる傾向を示し、上下運動については、排水量の低減を維持する構造形式とした場合には、波との共振を避けられない可能性が高いことがわかった。共振を避ける構造とするには、水線面積を小さくしつつコラム長を長くする必要が発生するため、構造の肥大化が急激に進む。したがって、セミサブ型の現実

的な構造形式を考える場合、係留系による上下運動の抑制等の別途対策が必要となる。

- (3) トラススパー型およびセミサブ型に関する弾性応答解析を行い、各部の応力特性を明らかにした。その結果、トラススパー型は、タワー基部付近における応力がピーク値をとる傾向を示すことがわかった。また、最大応力値と部材降伏応力の比較により、十分に強度要件を満足することがわかった。動揺安定性および強度要件の観点からは、実現性の高い構造であることを確認した。一方、セミサブ型については、ブレース部における応力値が部材降伏応力を超えており、ブレース材の追加等の対策が必要となる。さきに示したHeave共振の回避とともに、今後、構造形式の見直しや補強案の考案を行う必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 例えば、矢後清和・大川豊・宮島俊樹・石井健一・高野宰：浮体式風力発電の実現可能性に関する総合的評価，海洋開発論文集，第23巻，pp1009-1014，2007。
- 2) 森屋陽一・安野浩一郎・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，第23巻，pp985-990，2007。
- 3) 吉田宏一郎・鈴木英之・加藤俊司・杉本宏憲・加戸正治・森山厚夫・賀田和夫・窪田太・末田明：セミサブメガフロート実用化のための基礎的研究，海洋工学シンポジウム，第16巻，pp235-241，2001。
- 4) 鈴木英之・吉田宏一郎・飯島博・小林顕太郎・長田章秀・船井玲子・綱木啓二・中田桂太郎・小沢晋一・榎本一夫・中條俊樹・久保真一郎・松本乙伸：セミサブメガフロートの波浪中弾性応答特性および解析プログラムVODACの精度に関する研究，海洋工学シンポジウム，第16巻，pp467-474，2001。
- 5) M. Kuhn, Dynamics and Design Optimisation of Offshore Wind Energy Conversion Systems, PhD Thesis, Delft University of Technology, 1999.
- 6) 上田茂・白石悟：カテナリー理論による最適係留鎖の選定法および計算図表，港湾技研資料，No. 379，1981。