

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

大山 巧¹・嶋田健司²・石原 孟³・ファバンフック⁴
宮川昌宏⁵・助川博之⁶・鈴木英之⁷

洋上風力発電のための浮体式構造物として、建設コスト低減のための軽量化を図ったセミサブ形式の構造物を考案し、数値解析および模型実験により波浪動揺特性を検討した。本浮体構造物では、係留システムおよび静水圧による復元剛性を極力小さく抑え、各運動モードの固有周期を長周期に設定することにより、波浪動揺量の低減化が図られている。数値解析では通常のグリーン関数法から求められる線形流体力とともに非線形減衰力を考慮したモデルを開発し、模型実験結果との比較から動揺特性の再現性を検証した。さらに、実機に対する動揺解析の結果から、暴風時の安全性および定格時の発電安定性を検討した。

1. はじめに

様々な自然エネルギー利用法の中で、近年、急激に実用化が進んでいるのは風力発電であり、2004 年度末における我が国の導入量は 93 万 kW に達している。しかし、高効率で利便性の高い適地が減少していることなどから、陸上での風力発電の新規導入は困難になりつつある。風力発電の開発を先駆的に行ってきた欧州では、すでに洋上での風力発電が実用化されており、2010 年で 300 万 kW (経済産業省資源エネルギー庁, 2001) の導入を目指している我が国においても洋上風力発電の実現化が強く望まれている。

欧州に比べて我が国の沿岸域は、わずかな離岸距離でも水深が深くなるところが多い。このため、欧州のような着定基礎の洋上設置には限界があり、ウィンドファームとしての平面的な広がりを持たせるためには、浮体式構造物にならざるを得ないと考えられる。

浮体式の洋上風力発電に関する技術検討は、これまでも数多く行われてきており、様々な構造物が提案されてきた (日本機械工業連合会・日本海洋開発産業協会, 2002)。浮体式構造物の実現化に向けて特に重要となるポイントは、建設コストが低く抑えられること、高い発電効率を維持するために波浪や風による動揺量が小さい構造物であることである。このような背景から、軽量化を図ったセミサブ式の浮体構造物を新たに考案した。本研究では、この浮体構造物の波浪動揺特性を予測するための数値解析モデルとして、非線形減衰力を考慮したモデルを開発し、模型実験による検証を行うとともに、実機に対する解析結果から暴風時の係留安全性および定格時の発電

安定性について検討した。

2. 構造物の特徴

図-1 に本研究で対象としたセミサブ浮体を示す。風車は定格出力 2.4 MW (ローター直径: 92 m, ハブ高さ: 70 m) を 3 基搭載している。本浮体構造物は、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とケーブル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・コンクリート合成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。また、連結部材と中央浮体はケーブル構造で接続されており、円弧状の連結部材に作用する水平外力によって生じる曲げモーメントを減

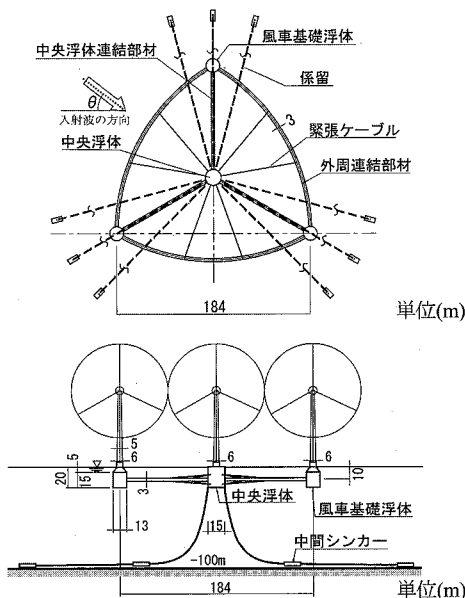


図-1 洋上風力発電用の軽量セミサブ浮体

- 1 正会員 工博 清水建設 (株) 技術研究所, グループ長
- 2 正会員 工博 清水建設 (株) 技術研究所, 主任研究員
- 3 正会員 工博 東京大学大学院工学系研究科総合研究機構, 助教授
- 4 学生会員 工修 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻
- 5 正会員 清水建設 (株) 土木技術本部設計部, グループ長
- 6 正会員 工修 東京電力 (株) 技術開発研究所, 主任
- 7 工博 東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻, 教授

じる効果を期待している。

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 100 m 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 s 以上となっている。

3. 抗力による減衰効果を考慮した動揺解析モデル

(1) グリーン関数法

浮体に作用する流体力のうち、波強制力、付加質量、造波減衰係数の評価には、線形ポテンシャル理論に基づくグリーン関数法を適用した。グリーン関数の計算に際しては、Wehausen ら (1960) の原形を直接取り扱うと計算精度が悪化することから、収束性の高い級数形に変換した計算方法 (日本造船学会, 2003; Seto, 1991, 1992) を適用した。

グリーン関数法の基本検証を行うために、直方体浮体を対象とした高山ら (1980) の模型実験との比較を行った。図-2 には、Sway, Heave, Roll の動揺特性の比較例を示す。図中、 B は浮体の幅、 λ と H_0 は入射波の波長と波高である。これらの図からわかるように、本解析結果は実験結果を良好に再現している。また、ポンツーン浮体については、線形ポテンシャル理論に基づく拡張緩勾配方程式モデル (大山ら, 1996) の解析結果とほぼ完全に一致することも確かめている。

(2) 非線形減衰力のモデル化

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。

$$\Delta F_D = \frac{1}{2} \rho C_D D |u_I - U_s| (u_I - U_s) \Delta l \dots \dots (1)$$

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_I : 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 (1) 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 (日本建築学会,

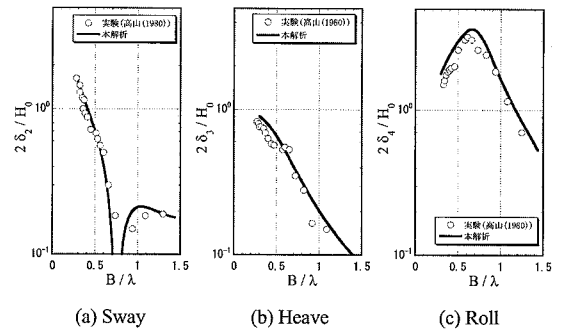


図-2 高山らの実験 (1980) に関する動揺特性の比較

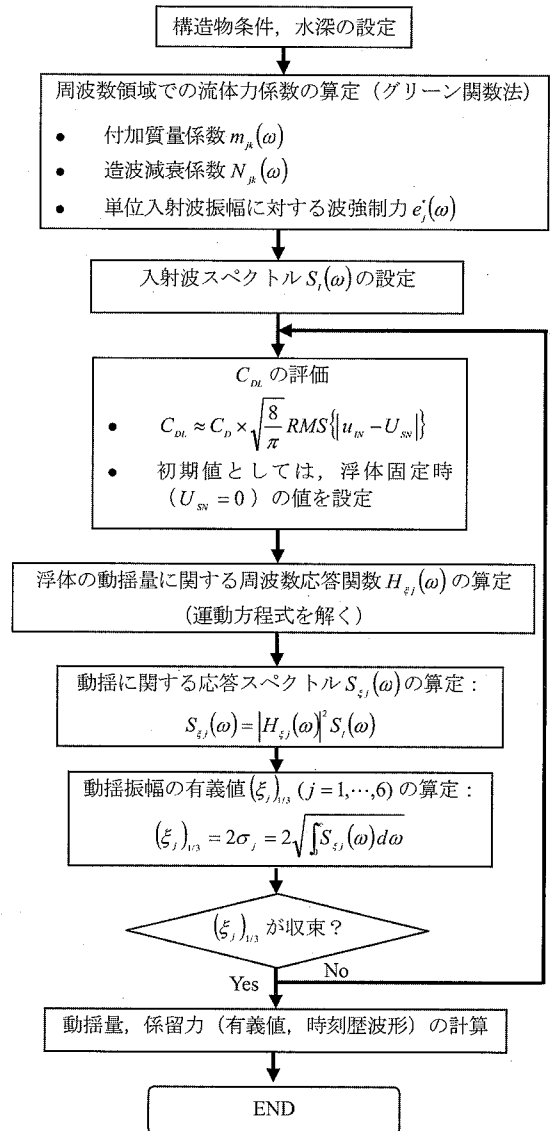


図-3 周波数領域の動揺解析のフロー

1990).

$$\Delta F_D \approx \frac{1}{2} \rho C_{DL} D (u_I - U_s) \Delta t \dots \dots \dots (2)$$

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

$$\text{不規則波の場合} : C_{DL} \approx C_D \times \sqrt{\frac{8}{\pi}} \text{RMS}\{|u_I - U_s|\} \dots (4)$$

図-3には、不規則波に対する浮体構造物の動揺を求めるための解析フローを示す。まず、グリーン関数法により、周波数領域で線形流体力係数を求めておく。ここで、波強制力については単位入射波振幅に対する値を求めておけばよい。次に、式(4)の C_{DL} の初期値として $U_s=0$ (構造物が運動しない場合)に対する値を用いて、6自由度の浮体の運動方程式を周波数領域で解き、単位入射波振幅に対する動揺量、すなわち応答関数を求める。与えられた入射波スペクトルと応答関数から、6自由度動揺量の分散を求め、各部材要素ごとに式(4)の C_{DL} を評価し、動揺量を再計算する。以上の手順を解析結果が収束するまで繰り返す。

4. 模型実験

(1) 実験の概要

実験は(独法)海上技術安全研究所の変動風水洞(水槽部長さ17.6m×幅3m×水深1.5m, 造波装置:フラップ式)で実施した。模型浮体は実機の1/150スケールを想定したアクリル製剛体模型である。ただし模型製作上の理由から、連結部材を正方形断面(実機は円断面)とし、連結部材と中央浮体を繋ぐケーブルは取り付けしていない。表-1に模型の主な諸元を示す。

図-4には設置状況と計測方法の概略を示す。実験は波向きが -90° (図-1)の場合について行った。係留系には水平線形バネを用い、実機において暴風時の定常外力が作用したときの係留剛性に近いバネ定数を設定した。浮体の動揺は中央浮体上に設置した合計4個のターゲットの動きを3台のCCDカメラにより撮影し、画像解析処理により6自由度の変位に変換することで計測した。水深は1.5mで一定とし、入射波高2, 4, 8cmの3ケースの規則波を対象として、周期を0.6sから3.0sに変化させた。計測結果はすべてフーリエ展開により入射波周期の成分で整理した。

(2) 解析結果との比較

グリーン関数法による解析では、浮体の没水表面を合計1918要素に分割した。また、これとは別に構造物を394軸部材要素に分割し、式(2)に基づいて抗力を評価した。抗力係数 C_D は正方形断面の連結部材では2.0、中央・基礎浮体では1.0とした。

図-5, 6, 7に、各運動モード(Sway, Heave, Roll)

表-1 模型の主な諸元

	実機のスケールダウン (1/150)	模型	備考
排水量(t)	0.486×10^{-2}	0.554×10^{-2}	風車基礎浮体の直径 モデル: $\phi_{1/150} = 0.0867$ m 模型: $\phi = 0.0900$ m
慣性モーメント I_{xx}, I_{yy} (t・m ²)	0.77×10^{-3}	0.862×10^{-3}	
重心(m)	0.060	0.048	静水面からの深さ
メタセンター 高さ(m)	0.171	0.171	
水線面積(m ²)	0.377×10^{-2}	0.377×10^{-2}	
バネ定数(kN/m)	0.196×10^{-1}	0.147×10^{-1}	

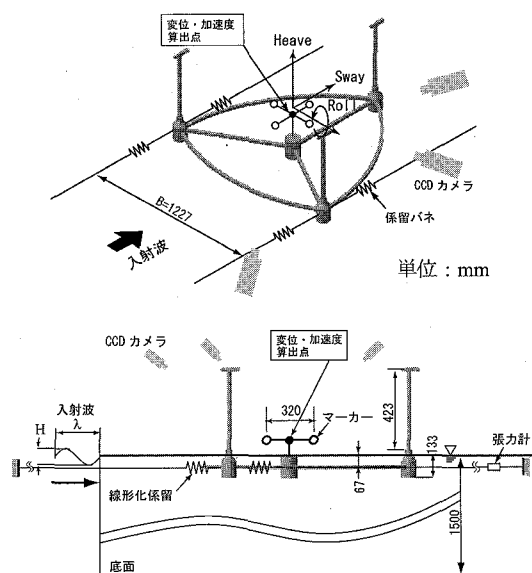


図-4 計測方法の概略図

の動揺振幅、中央浮体の応答加速度、係留張力の周期特性の比較を示す。各図には抗力を無視した通常のグリーン関数法による結果($C_D=0$)も示してある。各運動モードの固有周期は2.5s~2.7s(実機:30s~33s)の範囲にあり、1s以下の短周期帯で現れる複数のピークは、風車基礎浮体、中央浮体、連結部材に作用する波強制力の位相干渉によるものである。これらの図からわかるように、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

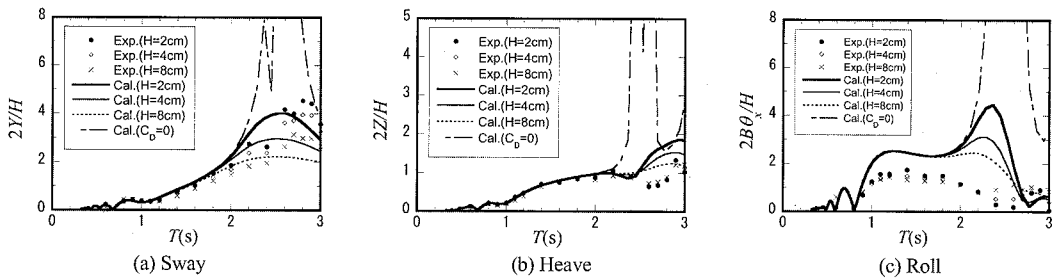


図-5 動揺変位量の周期特性に関する比較

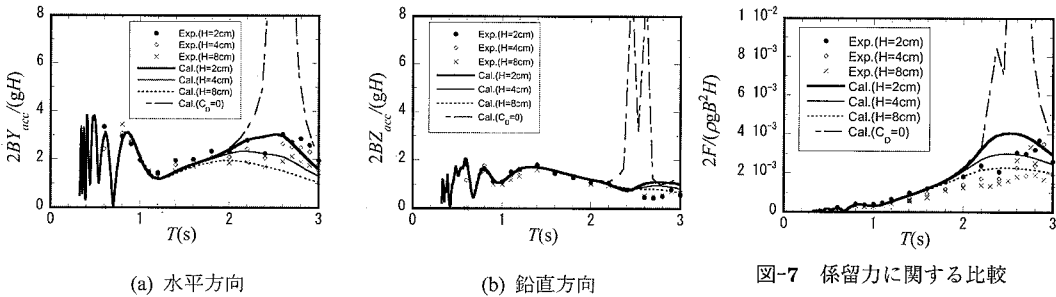


図-6 応答加速度に関する比較

図-7 係留力に関する比較

結果に差異が見られ、実験結果には固有周期でのピークがほとんど現れていない。時系列波形を調べてみると、Sway や Heave がほぼ正弦波的な応答となっているのに対して、固有周期付近の Roll の波形は入射波高が 2cm の場合でも高周波を含む非線形性の強い応答となっていることが確認された。これについては、模型の弾性変形の影響、風車基礎浮体の水線面積の変化による復元力特性の非線形性、風車基礎浮体の上下運動に対する減衰効果の過小評価など複数の原因が考えられ、現在検討を進めている。以上のように、本解析モデルは、Roll の動揺量を若干過大に推定しているものの、渦による減衰効果を含めて実験結果の再現性はほぼ良好であると考えられる。

参考のため、非線形減衰項の等価線形化に伴う収束計算に関して、Sway の固有周期付近での解の収束状況を図-8 に示す。図中の縦軸は、1,000 回目の結果との相対誤差であり、入射波高が 2 cm と 8 cm の場合の結果を示している。後者の方が非線形性の影響が強く現れるため、同一の許容誤差に対応する収束回数は多くなるが、150 回程度の繰り返し計算で収束誤差は 1% 未満となることがわかる。なお各運動モードとも固有周期から離れた周期帯域では非線形減衰の影響は小さく、収束解を得るための繰り返し計算数は非常に少なくなる。

5. 実機の安全性検討

設置水深 100 m を想定した実機を対象に、不規則波

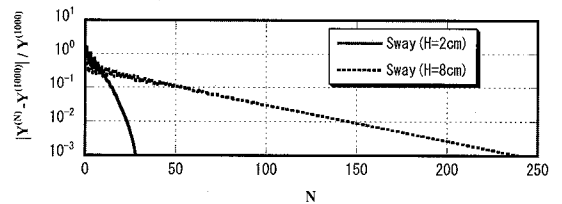


図-8 解の収束状況の例 (T=2.5s, Sway)

に対する動揺解析を行った。海象条件としては、表-2 に示される暴風時と定格時（風車の定格風速時に対応した波浪条件）の 2 ケースを設定し、前者については係留系の安全性、後者については傾斜角の観点から風車性能の安定性を検討した。

本検討では、まず、定常外力である潮流力、風力および波漂流力を推定し、その結果を用いて、中間シンカー付きチェーン係留におけるカタナリー計算を行うことにより、動揺解析を行う上での係留剛性を評価した。波向き（定義は図-1 参照）としては、構造物の対称性を考慮して、30°、60°、90° の 3 ケースとし、潮流と風の向きは 90° で一定とした。

図-9 には、暴風時で波向き 90° の場合の入射波および動揺応答スペクトルを示す。各モードの固有周期は有義波周期よりかなり長いので、応答スペクトルにおける最低周波数のピークは入射波スペクトルのピークよりも低周波数に現れる。表-3 に、各海象条件に対する動揺量（有義値）を示す。暴風時の係留力は、定常外力によ

表-2 海象条件

波 浪		定格時	暴風時
	$H_{1/3}$ (m)	3.9	12.0
	$T_{1/3}$ (s)	7.4	13.4
風速(m/s)		14.0	50.0
潮流速(m/s)		2.0	

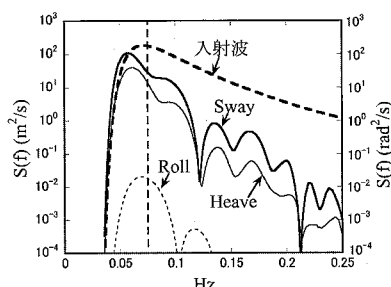


図-9 実機に対する入射波および動揺応答スペクトルの例

る係留力が4,000 kN/本、波浪による変動係留力の最大値(有義値の1.8倍)が3,700 kN/本であり、これらの和(7,700 kN/本)は、破断荷重($\phi 114$ (第3種):8,895 kN)を下回ることが確認された。ただし、さらに大きな安全率を確保するためには、チェーン径を大きくするか、本数を若干増やす必要がある。

定格時の条件に対する浮体の傾斜角は、定常外力による静的傾斜角が 1.2° 、波浪による最大変動傾斜角(有義値の1.8倍)が 0.4° であり、発電効率を維持する上で十分に低い値に抑えられることが確認できた。

6. おわりに

洋上風力発電のための浮体構造として、軽量化および波浪動揺の低減化を図ったセミサブ式浮体を考案し、数値解析と模型実験により動揺特性を検討した。その結果、①通常のグリーン関数法モデルに加え抗力の影響を考慮することにより良好な精度で動揺特性が再現できること、②本浮体構造では各運動モードの固有周期が長周期に設定されているため、波浪動揺量が低く抑えられ、暴風時の係留安全性が確保できるとともに、定格時についても発電効率が維持できる程度に傾斜角は小さいことが明らかとなった。

本浮体構造については、現在、構造的な応力度照査を行っており、連結部材と中央浮体を繋ぐケーブルの効果

表-3 各海象条件に対する動揺量

波 向		定格時			暴風時		
		30°	60°	90°	30°	60°	90°
動揺振幅 (有義値)	Surge(m)	0.27	0.21	0	2.03	1.13	0
	Sway(m)	0.16	0.37	0.31	1.82	2.68	3.46
	Heave(m)	0.17	0.22	0.16	1.88	1.83	1.97
	Roll(deg.)	0.12	0.22	0.22	1.43	2.28	2.69
	Pitch(deg.)	0.21	0.22	0	2.49	1.84	0
	Yaw(deg.)	0.01	0.18	0	0.08	1.19	0

により連結部材と風車基礎浮体の接合部の応力度が緩和されることなどが確認されている。これについては、別の機会に報告する予定である。

謝辞：(独)海上技術安全研究所の矢後清和氏ならびに大川豊氏には実験に関して有益なるご指導を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 大山 巧・土田 充(1996): 拡張緩勾配方程式による港内船舶の動揺解析, 土木学会論文集, No.539, pp. 141-154.
- 経済産業省資源エネルギー庁総合資源エネルギー調査会・総合部会・需要部会(2001): 「今後のエネルギー政策について」報告書, pp. 33.
- (社)日本機械工業連合会・(社)日本海用開発産業協会(2002): 平成13年度 海洋資源・エネルギーを複合的に活用する沖合洋上風力発電等システムの開発調査研究報告書, pp. 40-129.
- (社)日本建築学会(1990): 海洋構造物構造設計指針(浮遊式)・同解説, pp. 110-118.
- (社)日本造船学会海洋工学委員会性能部会編(2003): 実践 浮体の流体力学 前編-動揺問題の数値計算法, pp. 99-158, 成山堂書店.
- 高山知司・永井紀彦・菊池 治・諸石一幸(1980): 大型矩形浮体の波浪中の動揺と係留力に関する研究(第1報) - 模型実験による検討 -, 港湾技術研究所報告, 第19巻第3号, pp. 71-103.
- Seto, H (1991): Efficient evaluation of some singular integrals appearing in multipole expansions in water of finite depth, Trans. of the West-Japan Soc. of Naval Arch., No. 83, pp. 103-113.
- Seto, H (1992): Some expressions of pulsating source potentials in shallow water and their efficient algorithms, Trans. of the West-Japan Soc. of Naval Arch., No. 85, pp. 25-36.
- Wehausen, J. V. and E. V. Laitone (1960): Surface waves, Encyclopedia of Physics, ed. S. Flugge, Vol.9, Fluid Dynamics III, Springer-Verlag.