

浮体式洋上風力発電に関する研究*

その2 軽量セミサブ型浮体の開発

A Study of Floating Offshore Wind Turbine Systems Part II Development of a Lightweight Semi-submersible Floating Platform

石原 孟** ファバンフック** 助川 博之** 嶋田 健司*** 大山 巧*** 宮川 昌宏***

Takeshi ISHIHARA** Pham Van PHUC** Hiroyuki SUKEGAWA** Kenji SHIMADA*** Takumi OHYAMA*** Masahiro MIYAGAWA***

1. はじめに

近年、陸上風力発電は、立地制限等により導入拡大が困難になりつつあることから、浮体式風力発電の実現が強く望まれている。これまでに提案された風力発電用の浮体構造としてセミサブ型¹⁾、ポンツーン型²⁾、スパー型³⁾が挙げられる。この内セミサブ型浮体は波浪荷重が小さく、建設コストが低く抑えられる可能性が高い構造形式であり、海象条件が厳しい沖合での設置にも適している。しかしセミサブ型に関する研究の例はポンツーン型やスパー型に関する研究に比べ少ない。

図1には今回提案した軽量セミサブ型浮体を示す。構造はRC造の基礎浮体と鋼管製の連結部材およびそれらを緊張するケーブルから構成される。連結部材は水平の波浪荷重に対して主として軸力を抵抗するようになっている。また係留系には中間シンカー付きのカテナリー係留を採用し、固有周期を波の有義波周期よりも長く設定することにより波浪動揺の低減を図っている。

本研究ではこのセミサブ型浮体の動揺特性及び風車と浮体の相互作用を評価するために、剛体模型を作成し、変動風水洞を用いて風波動揺実験を実施した。更に、風車と浮体の相互作用を考慮した浮体動揺予測プログラムを開発し、浮体の風波動揺実験の結果と比較することにより、解析コードの予測精度の検証を行った。

2. 風水洞実験

実験は(独)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。模型浮体はフルードの相似則^{4),5)}に基づく実験の1/150スケールを想定したアクリル製剛体模型を用いた。表1には実機と模型の諸元の比較を示す。実機のスケールダウンモデルと模型の実現値の間で多少のちがいが見られるが、これは模型の連結部材断面を正方形断面にしたこと、および風車基礎浮体の直径がやや大きくなったことによるものである。なお、波による浮体動揺特性を把握するため

に、風車のロータ重量はナセルの集中重量として考慮した。また、浮体と風車との相互作用を評価するために、風車ロータの効果については、稼働時においてストラス係数0.33に相当する円板、暴風時においてフェザリング状態の横風に相当する等価面積を模擬した板により考慮した。係留は暴風時の定常外力が作用した時のバネ剛性をスケールダウンした水平線形バネで再現した(図2)。入射波高は模型の上流側に設置した抵抗線式波高計により計測した。また浮体に作用する流体力の特性を把握するため、張力計(日章工業)を用い、係留力を計測した。浮体の動揺は中央基礎浮体上に設置したターゲットの動きを3台のCCDカメラにより投影し、画像解析処理(ディテクト:DIPP-Motion)によって6自由度の変位に変換することにより計測した。計測時間は60s、サンプリング周波数は変位計測についてはカメラ機能制約で20Hz、その他は1kHzとした。水槽の制約を考慮し、水深1.5m、周期0.6~3.0sと波高2, 4, 8cmで規則波実験を実施した。更に、風の影響を把握するために、稼働時において風速2m/s、暴風時において風速4, 6m/sとして実験を行った。なお今回の実験は図2に示すような係留状態であるため、対称性により以下ではサージ、ヒーブおよびピッチについて示す。また結果はすべてフーリエ展開により造波周期に対応する成分で整理した。なお、自由振動から求めた模型の固有周期は2.73s(サージ)、2.92s(ヒーブ)と2.73s(ピッチ)である。実験結果の詳細については、数値解析結果とともに4節で紹介する。

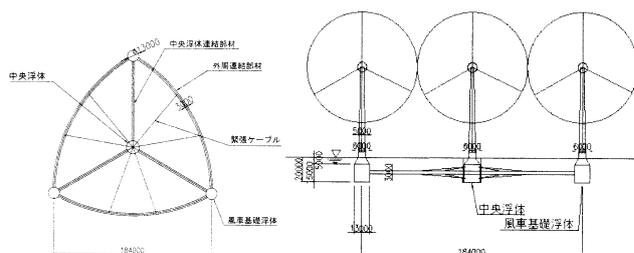


図1 洋上風力発電用セミサブ浮体

* 平成18年11月22日第28回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演
** 東京大学大学院 工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区弥生2-11-16
*** 清水建設株式会社

表 1 浮体模型の構造諸元

	スケールダ ウンモデル (1/150)	模型	備考
排水量(m ³)	4.858	5.521 5.540*	風車基礎浮体のスケール ダウンモデルの直径は
重量(kg)	4.932	5.426	8.67cm, 模型の直径は
慣性モーメント (kgm ²)	0.770	0.847	9cm *計測による値
重心(cm)	-6.0	-4.8	模型製作の制限による

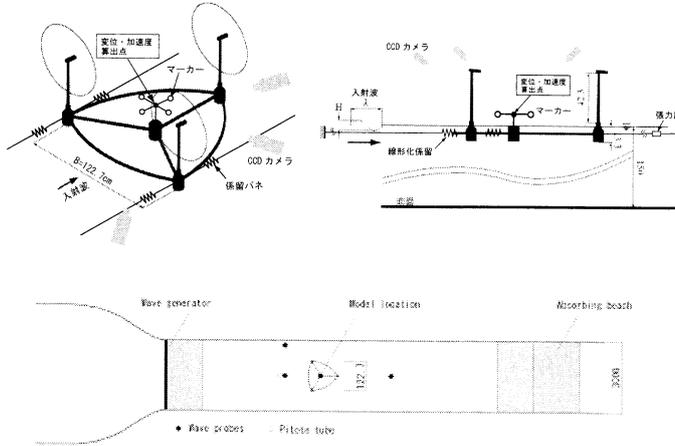


図 2 計測システムの概略図



(a)稼働時 (b)暴風時

図 3 浮体模型

3. 数値解析モデル

3.1. 解析モデルの概要

浮体動揺解析^{4),6),7)}は、主にグリーン関数法(ポテンシャル理論)を用いる方法と、モリソン式を適用する方法がある。前者では、流体の速度ポテンシャルが存在するとして、線形流体力の仮定に基づいて周波数領域で境界値問題を解く手法であり、浮体の形状、大きさの影響、浮体による波の変形を考慮することができ、船舶工学や石油開発分野でよく使われている。一方、後者は土木工学の分野において、主に杭に作用する流体力の算定法として用いられ、構造物による波の変形が無視できると仮定しているため、構造物スケールが波長に比べて十分小さいことを前提としている。この手法の利点としては、流体力が水粒子と浮体構造の相対速度により表現され、流体の粘性影響を抗力の形で考慮できる上、時間領域で解くことにより非線形係留力、空気力による減衰効果、非静水圧による復元力を容易に取り入

れることができる。本研究ではモリソン式を適用する方法に基づく数値解析モデルを開発した。

一般に、波浪・風による浮体構造物の動揺を求めるための運動方程式は次式のように表される。

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{F\} \quad (1)$$

$$\{F\} = \{F_G\} + \{F_R\} + \{F_E\} + \{F_W\} \quad (2)$$

ここで、 $[M]$ は質量マトリックス、 $[C]$ は減衰マトリックス、 $[K]$ は要素剛性マトリックス、 $\{F\}$ は各節点での外力ベクトル、 $\{X\}$ は節点変位ベクトルである。また、 $\{F_G\}$ は係留力、 $\{F_R\}$ は水圧による復元力、 $\{F_E\}$ は動的流体力、 $\{F_W\}$ は空気力である。

(a) 係留力のモデル化

係留バネ⁷⁾は非線形のカテナリー曲線で表されるが、潮流力による定常外力が支配であると仮定し、カテナリー曲線を算出し、微小変位理論により線形バネに換算した。係留力は次式で表される。

$$\{F_G\} = -[K_G]\{X\} \quad (3)$$

ここで、 $[K_G]$ は線形バネ係数である。

(b) 復元力のモデル化

水圧による復元力⁷⁾は微小変位理論により次式のように線形化することができる。

$$\{F_R\} = -[K_R]\{X\} \quad (4)$$

$$[K_R] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\rho_w g A_w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -W \times GM_X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -W \times GM_Y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで、 $[K_R]$ は水圧による復元力係数、 ρ_w は海水の密度、 g は重力の加速度、 A_w は水線面の面積、 W は浮体の重量、 GM_X と GM_Y はそれぞれ X 方向と Y 方向のメタセンター高さである。

(c) 動的流体力のモデル化

モリソン式⁸⁾は、もともと海底に固定されている鉛直の杭に作用する波浪荷重を評価するために提案された式であり、粘性影響による抗力の成分は、造波成分に比べ大きいと仮定している。運動する細長部材にも使えるように修正されたモリソン式は次式により表す。

$$F_E = 0.5 \rho_w C_D D u_r |u_r| + \rho_w [(C_M - 1) \dot{u}_r + \ddot{u}] A \quad (6)$$

$$u_r = u - \dot{X} \quad (7)$$

ここで、 F_E は部材の単位長さには作用する流体力、 ρ は流体密度、 C_D は抗力係数、 C_M は質量係数あるいは慣性力係数、 A は部材面積、 u, \dot{u} は部材に直交する方向の水粒

子の速度と加速度、 \dot{X} は浮体の移動速度の直角成分である。(6)式右辺の第1項は抗力で、浮体部材の移動速度に依存することから、流体力による減衰効果が発生することが分かる。断面形状が円柱の場合には $C_M = 2.0$ と $C_D = 1.17$ 、断面形状が正角柱の場合には $C_M = 2.19$ と $C_D = 2.05$ の一定値^{6),7)}として使用することが多い。またこれらの係数を部材の粗表面、レイノルズ数とクーリガン・カーペンター数 Kc の関数⁹⁾として定義することができる。

(d) 空気力のモデル化

空気力は準定常理論により次式のように表される。

$$\{F_W\} = \{F_D, F_L, F_M\} \quad (8)$$

$$F_D = 0.5\rho d C_D(\alpha) V^2 \quad (9)$$

$$F_L = 0.5\rho d C_L(\alpha) V^2 \quad (10)$$

$$F_M = 0.5\rho d^2 C_M(\alpha) V^2 \quad (11)$$

$$V = U - \dot{X} \quad (12)$$

ここで、 F_D は抗力、 F_L は揚力、 F_M はモーメント、 ρ は空気密度、 d は風車の代表幅、 C_D, C_L, C_M は迎角 α における抗力係数、揚力係数とモーメント係数、 U は風速、 \dot{X} は風車の移動速度、 V は相対風速である。動的流体力と同様に、抗力は風車の移動速度の関数であることから、空力減衰が発生することが分かる。

3.2. 数値解析手法

浮体の動揺量を予測するために、運動方程式を時間領域で解く FEM コードを開発した。数値積分は Newmark- β 法、固有値解析は Subspace Iteration 法を採用した。参照座標系は Total Lagrange で定式化し、構造減衰に Rayleigh 減衰を適用した。また、使用要素は Saint-Venant のねじりを考慮する 6 自由度のビーム要素とする。

4. 解析結果

本研究で開発されたプログラムの予測精度を検証するため、風車と浮体を含めた解析モデルを作成し、固有値解析と動揺解析を行った。図 4 には風車と浮体を含めた全体モデル(全体:186 ノード, 188 要素; 浮体:48 ノード, 50 要素; 風車:47 ノード, 46 要素)を示す。

ここで、浮体の質量係数と抗力係数についてはクーリガン・カーペンター数 Kc の関数として文献 9 により定めた値を採用した。また空気力を算定する際には、タワー、ナセル、ブレードの抗力係数はそれぞれ 0.6, 0.6, 1.3 とした。浮体に作用する 3 成分の水粒子の速度と加速度は線形波理論により求めた。

動揺計算では 0.05 秒刻みを採用し、3200 ステップの解

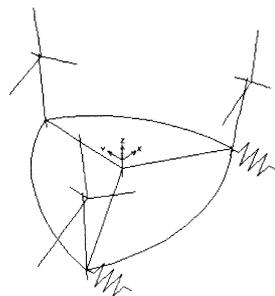


図 4 解析モデル

析を行い、過渡応答が含まれる初期の 2000 ステップを除いた 1200 ステップ、すなわち、60s 間の解析結果を整理し、中央浮体のサージ、ヒープ、ピッチの動揺量を波高で無次元化し、周波数応答関数として求めた。予測精度を評価するために、波の周期 $T=0.1\sim 3.0$ s (0.1s 刻み)、波高 $h=2, 4, 8$ cm の動揺解析を行い、水理実験結果との比較を行った。更に、風速 2m/s (稼働時) と 4m/s (暴風時) での動揺解析を行い、風車ロータに作用する空気力が浮体動揺に与える影響を評価した。

4.1. 固有値解析の結果

浮体の固有周期を明らかにするため、図 4 に示す解析モデルを用い、静水圧による復元力を仮定し、固有値解析を行った。解析から得られたサージ、ヒープ、ピッチの固有周期はそれぞれ 2.81s, 2.94s, 2.32s である。サージとヒープの固有周期は、自由振動から得られた値とほぼ一致したが、ピッチの固有周期は自由振動試験から得られたピッチの固有周期 2.73s より小さくなっている。これは、静水圧を仮定した復元力を用いたことによるものと考えられる。

4.2. 動揺解析の結果

図 5 には動揺解析から得られたサージの周波数応答関数と水理実験から得られたものを示す。サージの固有周期に対応する 2.7s 付近での共振が見られる。また、この近辺での振幅は波高の増大に伴い減少する。これは、波高が大きいと浮体の運動速度が増大し、流体力による減衰が大きくなると考えられる。一方、固有周期から離れると、サージは波高に依存せず、サージと波高の関係が線形であることが分かった。

ヒープ及びピッチ(図を省略)については、固有周期付近での共振はほとんど見られない。ピッチは 1.3s 付近での応答が若干大きい。この領域は入射波の半波長が浮体サイズにほぼ対応しており、上流側浮体と下流側浮体では逆位相の流体力が作用するため、加振モーメントが大きくなったものと考えられる。

本解析では、サージについては実験値とよく一致するが、ヒープとピッチについては固有周期付近では過大に評価している(図 8)。これは本解析に静水圧近似により復元力を求めたことによるものであり、非静水圧による復元力を考慮することにより、ヒープとピッチの予測精度が向上される。この点については後で詳しく説明する。

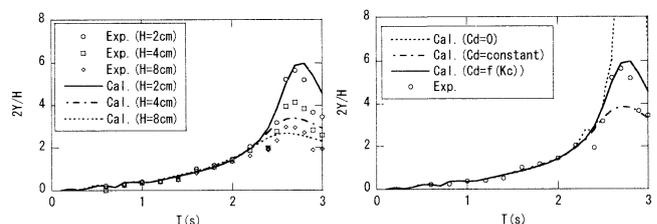


図 5 サージの周波数応答 図 6 抗力によるサージの変化

(a) 流体力による減衰効果

固有周期付近での動揺量を定量的に評価するためには、流体力による減衰効果を正確に求める必要がある。流体力による減衰は抗力係数に大きく依存し、その決め方は解析結果に大きな影響を与える。これまでに、浮体の部材が大きいことから抗力係数を無視した研究例¹⁾や、抗力係数を一定値⁷⁾とした研究例がある。本研究では、抗力係数の効果を明らかにするために、 C_d をゼロ¹⁾、 C_d を一定値^{6),7)}、そして C_d をクーリガン・カーペンター数 K_c の関数⁹⁾とした3つのケースについて解析を行い、サージの解析結果を図6に示した。この図から、抗力係数を無視した解析は固有周期付近での応答を過大に評価し、また抗力係数を一定値とした解析は、サージを過小に評価していることが分かる。抗力係数をクーリガン・カーペンター数の関数とした解析は実験結果とよく一致し、抗力係数が動揺量の評価に与える影響を明らかにした。

(b) 空気力による減衰効果

浮体動揺特性に与える風の影響を明らかにするために、風車と浮体の全体モデルを用い、風速 2m/s(稼働時)と 4m/s(暴風時)の時の解析を行った。図7には、風水洞実験と解析から得られたサージの周波数応答関数を示す。風車稼働時のサージは無風時の値に比べ、共振周期付近での振幅が減少し、風車ロータの抗力による空力減衰効果が確認された。一方、暴風時のサージは風速によらず、殆ど変化しない。これはブレードに起因する空力減衰は流体力による減衰に比べ十分に小さいことによるものである。いずれのケースも数値解析結果が実験と同じ傾向を示す。

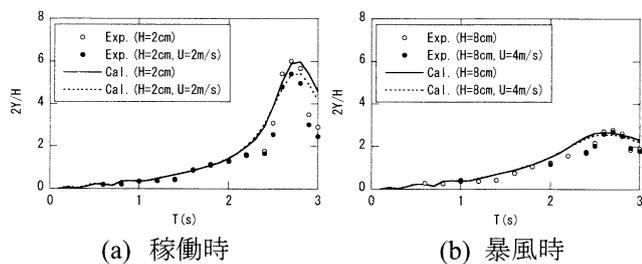


図7 風速によるサージの周波数応答の変化

(c) 非静水圧による復元力の効果

復元力を評価する際には、静水圧近似に基づき復元力係数を線形化することができる。しかし、浮体が水中で大きく運動する際には水線の面積が変化し、復元力係数が大きく変化すると考えられ、非静水圧による効果を評価する必要がある。この効果は、復元力係数を動揺解析とともに更新し、反復計算により取り入れることが可能である。本研究では反復計算に Newton-Raphson 法を用いた。図8には静水圧と非静水圧に基づく計算結果を示し、実験結果も図に併記した。この図から、非静水圧を考慮することにより、ヒープとピッチの実験結果を精度よく再現できることが分かる。

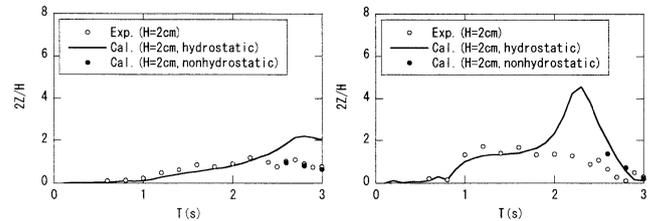


図8 静水圧と非静水圧による予測結果の比較

5. まとめ

本研究では、浮体式洋上風力発電のために開発された軽量セミサブ浮体を対象に風水洞実験および動揺解析を行い、浮体の動揺特性を明らかにし、以下の結論を得た。

1. 提案された浮体は風車稼働時の動揺量が小さく、暴風時において十分に安定であることが確認された。また、無次元サージの値は共振点付近で波高に依存し、波高が大きくなるにつれ、減少することがわかった。
2. 風車稼働時においては、空気力は浮体動揺に影響を与えるが、暴風時においては、これらの影響は殆ど見られない。これは暴風時にブレードに作用する空気力による減衰効果が、流体力による減衰効果に比べ十分に小さいことによるものである。
3. 風車と浮体の相互作用を考慮した浮体動揺予測プログラムを開発し、流体力、空気力による減衰効果や浮体の垂直運動による非静水圧の効果を明らかにしたとともに、風波動揺実験の結果と比較することにより、解析コードの予測精度を検証した。

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

- 1) A. Henderson, M. Patel: Rigid-Body Motion of a floating offshore wind farm, Int. Journal of Ambient Energy, Vol.19, No.3, pp.167-180, 1998.
- 2) 海上技術安全研究所: <http://www.nmri.go.jp/ocean/flwp/summary.html>.
- 3) 澤井貴之: 大型風車搭載用のスパー型浮体に関する基礎的研究, 東京大学修士論文, 2003.
- 4) 日本造船学会 海洋工学委員会性能部会編: 実践浮体の流体力学, 成山堂書店, 2003.
- 5) 高山知司, 永井紀彦, 菊地治, 諸石一幸: 港湾技術研究報告, 第19巻, 第3号, pp.71-103, 1980.
- 6) 日本建築学会: 海洋構造物構造設計指針(浮遊式)・同解説, pp.110-118, 1990.
- 7) 元良誠三, 他: 船体と海洋構造物の運動学, 成山堂書店, 1997.
- 8) T. Sarpkaya and M. Isaacson: Mechanics of wave forces on offshore structures, Van Nostrand Reinhold, 1981.
- 9) Offshore Standard DNV-OS-J101: Design of offshore wind turbine structures, 2004.