

軽量セミサブ型浮体を用いた風力発電の研究

東京大学 石原 孟
 東京大学 ファン バン フック
 東京大学 鈴木 英之
 東京電力(株) 助川 博之
 清水建設(株) 大山 巧

1. はじめに

日本の風力発電の導入量は 2006 年末に約 150 万 kW に達した。一方で、導入量の急速な拡大により、風力発電の適地の減少や電力系統の周波数問題などにより、今後の更なる導入拡大への障害となりつつある。このような状況は、風力の開発が世界で最も進んでいる欧州についても当てはまり、既に欧州では洋上風力発電の開発が始まっている。日本においても今後の風力発電拡大には、洋上風力発電を推進することが重要な要因と考えられる。

こうした中、東京大学と東京電力は、関東地方の太平洋沿岸に存在する膨大な風力エネルギーの利用を目的として浮体式洋上風力発電に関する共同研究を開始した。洋上風力を考える上で、合理的な浮体基礎構造の提案が重要である。そのためには、①軽量化した風力発電用浮体の開発、②喫水位置と波の影響を考慮し、製造・運搬・設置が円滑に実施でき、かつ動揺制御装置を必要としないで復元力のある浮体構造の開発、③数値解析による浮体動揺、構造強度などを評価できるツールの開発と予測精度の向上が不可欠である。本研究ではまず軽量セミサブ型浮体の開発状況を紹介する。そして浮体全体を弾性体とした多質点応答解析コードを開発し、弾性模型の水槽実験の結果と比較のことで、解析コードの予測精度を明らかにする。

2. 軽量セミサブ型浮体の開発

2.1 概要

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と知られている。図1に今回提案するセミサブ浮体を示す。構造は RC 造の基礎浮体と鋼管製の連絡部材およびそれらを緊張するケーブルから構成される。連絡部材は水平の波浪荷重に対しては緊張ケーブルにより主として軸力で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で波浪動揺の低減を図っている点に特徴がある。

このセミサブ型浮体は、三角形の中央に浮体、外周連結部材により結合された三角形の各頂点に風車を設置する構造形式で、各風車の離隔は $2D$ (D は風車ローター直径) としている。この浮体構造の施工方法として陸上ヤードで部

分的に製作した後、静穏な洋上ヤードにて構築する方法と、特定の海洋ドックにて一括して製作する方法の2つについて検討している。

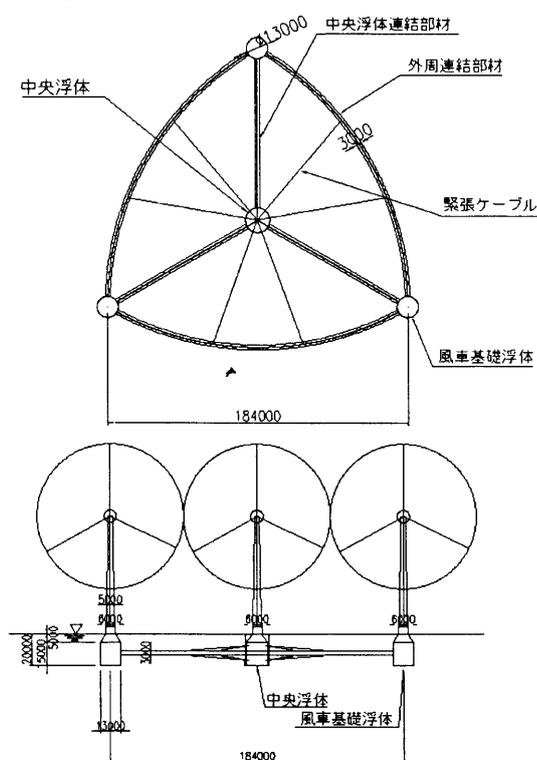


図1 セミサブ型浮体式洋上風力発電システム

2.2 設計条件

今回、想定した風車は定格出力 2.4MW/基である。設計条件のうち、海象条件は表 1 に示すとおりである。この条件における浮体の動揺特性を実験および解析にて検討していく。

表1 海象条件

ケース名	波浪		風速 V(m/s)	潮流速 (m/s)
	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)		
常時	2.0	5.4	7.6	1.0
定格時	3.9	7.4	14	1.0
カットアウト時	7.1	9.8	25	1.0
暴風時	12.0	13.4	50	1.0

また、浮体の係留について取り付け位置、取り付け方法、係留索の種類、アンカー方式についての検討なども行っている。

3. 弾性模型を用いた浮体構造の水理実験

これまでに提案された浮体^{1),2)}は太い部材を用いた構造が多く、浮体を剛体と見なすことができる。本研究で提案した浮体はコスト削減の観点から細い部材を採用しているため、その弾性変形を無視することができない。

実験は(独)海上技術安全研究所³⁾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⁾に基づく実機の 1/150 スケールを想定したアクリル製剛体模型および弾性模型を作成した。弾性体模型ではアクリル角柱(幅 10mm)を用い、連絡部材の曲げ剛性を考慮した。連絡部材の剛性へ影響を及ぼさないために、スポンジ(E4188, 無吸水性, 比重 0.12, 硬度7度)を用い、連絡部材に不連続に囲んで、連絡部材の形状を再現した。浮力と重力とのバランスを調整するために、黄銅板の重りを採用した。

表 2 には実機の 1/150 スケールダウンモデルと弾性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、風車基礎浮体の直径がやや大きくなったこと、幅 10mmアクリル製角柱を用いたことによるものである。

表 2 浮体模型の構造諸元⁶⁾

	スケールダウンモデル (1/150)	弾性体模型	備考
排水量(dm ³)	4.855	5.521	風車基礎浮体のスケールダウンモデルの直径は 8.67cm, 模型の直径は 9cm *計測による値
重量(kg)	4.935	5.426 5.540*	
慣性モーメント(kg ² m ²)	0.770	0.858 0.930*	
セタセンタ GM(m)	0.189	0.152 0.155*	
連絡部材の曲げモーメント EI(Nm ²)	1.111	2.670	模型製作の制限による

図 2 に模型実験の概要、図 3 に浮体模型の写真、なお風車のローター重量はナセルの集中重量として考慮した。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にて再現した(図 4)。

入射波高は模型の上流側に設置した容量線式波高計

で計測した。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)により 6 自由度の変位に変換することで計測した。計測時間は 60s, サンプル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。

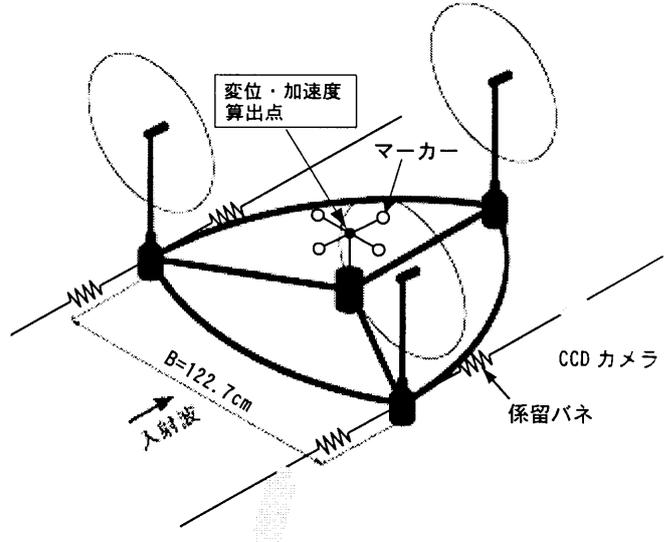


図 2 模型実験の概要

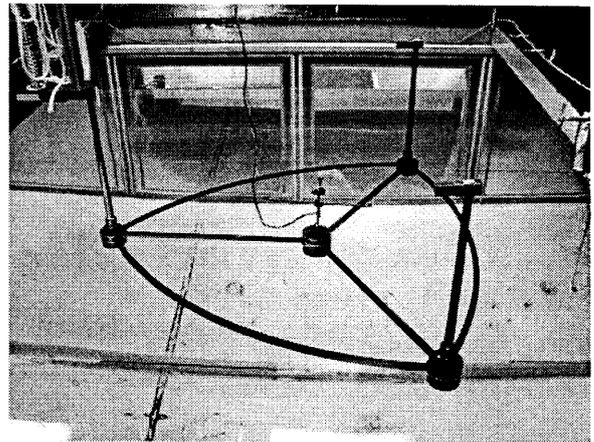


図 3 模型の写真

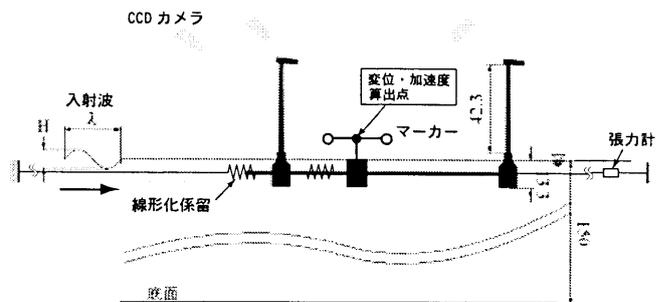


図 4 計測の概略図

水槽の制約を考慮し、水深 1.5m、周期 0.6～3.0sと波高 2～15cmで規則波実験を実施した。なお今回の実験は図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、ヒープ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、計測から求められた模型の固有周期は 2.73s (サージ)、2.92s (ヒープ)と 2.73s (ピッチ)である。実験結果は、次節で紹介する。

4. 解析モデル

浮体式洋上風力発電設備の設計においては浮体の動揺量と弾性応答を評価することが重要である。従来の石油開発分野では浮体の応答解析手法は、主に「二段階解析法」⁵⁾と「弾性応答解析法」⁴⁾に分けられる。二段階解析法は、部材の変形が応答に与える影響が微小であると考えられる場合に用いられる。この手法では、まず構造全体を剛体と仮定し、動揺解析を行い、その結果を用いて、構造の各部材に作用する力を算出する。次に得られた力を節点外力として浮体に作用させ準静的な弾性解析を行うことにより、部材の応力を求める。この手法は、船舶工学の分野で開発された動揺解析プログラムと汎用の構造解析プログラムを用いることができるという利点がある。一方、弾性応答解析法は最初から構造を弾性体としてモデル化し、流体力の導入や多質点応答解析を行うことにより、浮体の動揺量と部材の応力を同時に求めることができる。図1に示すような変形しやすい浮体構造に対しては弾性応答解析を用いることが望まれる。

4.1 解析モデルの概要

一般に、波浪・風による建造物の応答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、 $\{F_R\}$ は水圧による復原力、 $\{F_E\}$ は流体力、 $\{F_W\}$ は空気力である。

(a) 係留の復原力のモデル化⁷⁾

係留バネ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、カテナリー曲線から微小変位理論により線形バネを算出した。係留の復原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) 静水圧による復原力のモデル化⁷⁾

静水圧による復原力は微小変位理論により式(4)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、 $[K_R]$ は静水圧による復原力係数、 ρ_w は流体の密度、 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) 流体力のモデル化⁷⁾

モリソン式は、もともと海底に固定されている鉛直の杭に作用する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。移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_w 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項は流体による抗力で、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を表せることが分かる。断面形状が円柱の場合には $C_M = 2.0$ と $C_D = 1.17$ の一定値⁷⁾として使用することが多いが、部材表面の粗度、レイノルズ数とクーリガン・カーペンター数 K_c の関数⁸⁾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。

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

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

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

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

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

ここで、 F_D は抗力、 F_L は揚力、 F_M はモーメント、 ρ は空気の密度、 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。

4.2 数値解析手法

浮体の応答を予測するために、運動方程式(1)を時間領域で解く多質点応答解析コードを開発した。数値積分はNewmark-beta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。

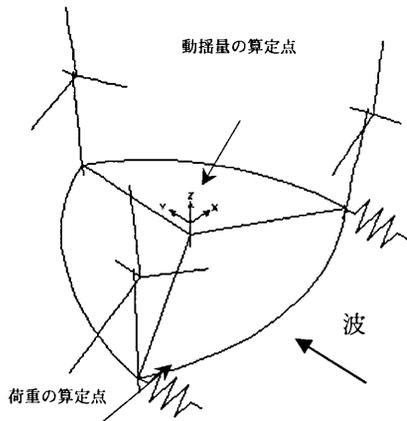


図5 解析モデル

本研究で開発された解析コードの予測精度を検証するため、弾性模型を対象に解析モデルを作成し、固有値解析と波高 $H = 2\text{cm}, 8\text{cm}$ の弾性応答解析を行った。図5には風車と浮体を含めた解析モデルを示す。ここで、流体による質量係数と抗力係数はクーリガン・カーペンター数 K_c の関数として文献8により定めた値を採用した。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。

弾性模型を用いて応答解析を行うことにより浮体の弾性変形を含む動揺量と荷重を同時に得られ、弾性応答解析法と一致である。一方、この模型を用いて、剛性の大きい浮体模型を使用すれば、応答解析により得られた動揺量は浮体を剛体と仮定した時の動揺量と一致する。応答解析から得られた構造の各部位に作用する慣性力・外力を節点外力として弾性模型に作用させ、準静的な弾性解析を行えば、二段階解析法により荷重を得られる。本研究では、剛体模型の剛性を弾性体模型の剛性の約100倍程度とした。

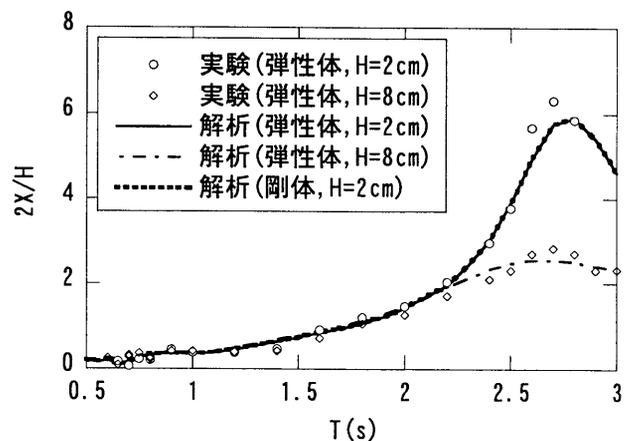
5. 解析結果

5.1 固有値解析の結果

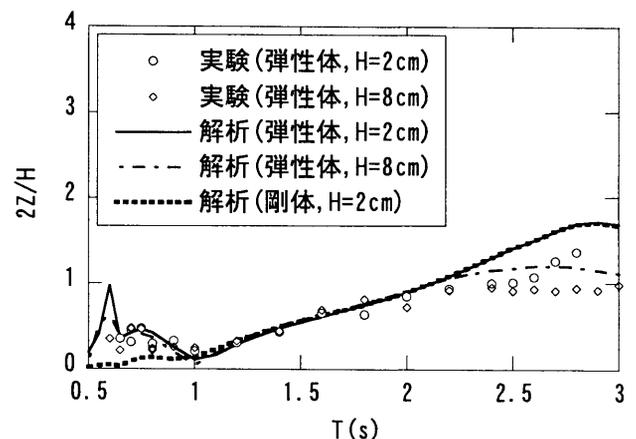
浮体の固有周期を明らかにするために固有値解析を行った。表3には解析結果を示す。弾性体モデルの1, 2, 3次モードの固有周期は剛体浮体を用いた時の値と一致し、これらのモードは係留と静水圧の復原力によるものであることが分かる。一方、固有周期が0.74s, 0.58s, 0.37sと0.35sである高次モードは浮体の面外変形に対応している。

表3 剛体と弾性体モデルの固有周期の比較

モード	剛体/弾性体の固有周期(s)
1	3.06/3.06
2	2.82/2.82
3	2.68/2.69
4	-/0.74
5	-/0.58
6	-/0.37
7	-/0.35



(a)サージ



(b)ヒープ

図6 水槽実験及び応答解析から得られた動揺量の周波数応答関数の比較

5.2 弾性応答解析の結果

図6には弾性模型の水槽実験及び弾性体と剛体モデルの応答解析から得られた浮体中央の周波数応答関数を示す。解析結果は実験値とほぼ一致する。また、弾性体モデルのサージは剛体モデルの値と一致するが、弾性体モデルのヒープは剛体モデルの値に比べ、浮体の弾性変形による固有周期 0.7s 付近に共振によるピークが現れていることが分かる。

図7には弾性模型の水槽実験、弾性応答解析法及び二段階解析法から得られた荷重の波周期による変化を示す。ここで、 M_x と M_z は連結部材の根元における水平と鉛直応答により発生した曲げモーメントである。実験の結果では、サージ応答と同様にサージの固有周期 2.82s 付近に M_x の振幅は波高の増大に伴い減少する。固有周期から離れると、 M_x と波高の関係が線形であることが分かる。また、短周期側の荷重 M_x と M_z ともに長周期側の値に比べ、周期が減少するとともに荷重が増加する。これは、加速度応答が波周期の二乗に反比例するため、短周期側の荷重が大きくなることによるものである。

更に、弾性応答解析法の荷重は動揺量と同様に実験の結果とほぼ一致し、浮体の弾性変形による固有周期 0.7s 付近に共振によるピークが現れることを確認できた。一方、二段階解析法による値は M_z は弾性応答解析法と実験の結果と比較し、弾性変形による固有周期の付近では荷重を過小に評価することがわかった。

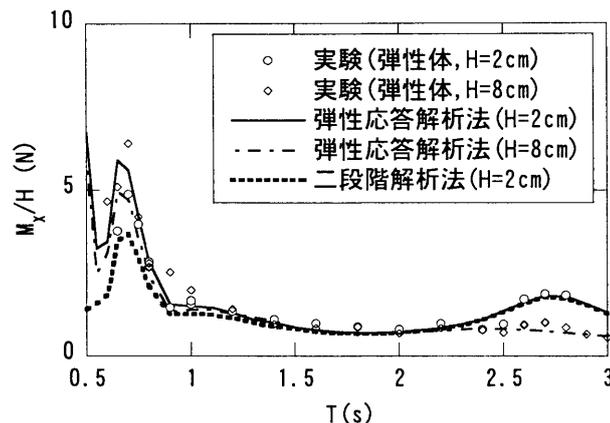
6. まとめ

本研究では、浮体全体を弾性体とした多質点応答解析コードを開発し、弾性模型の水槽実験の結果と比較のことに、解析コードの予測精度を明らかにした。結論は以下に示す。

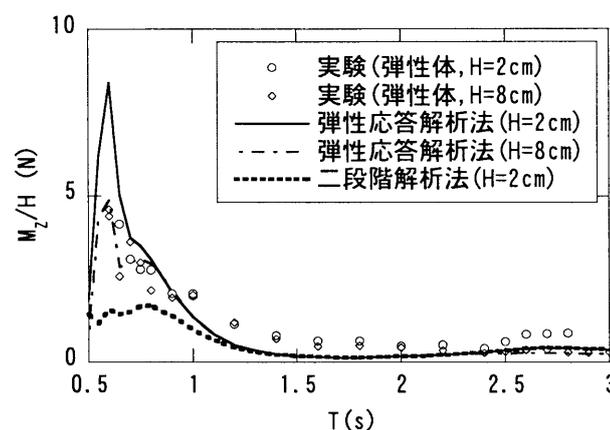
- 1) 浮体式洋上風力発電に用いる浮体構造の動揺特性を把握するために、浮体模型を用いた水理実験を行った。その結果、サージに関しては固有周期付近での応答関数が波高に対して非線形性が認められた。また浮体の弾性変形による固有周期 0.7s 付近に共振によるピークが現れることが確認された。
- 2) 浮体全体を弾性体とした多質点応答解析コードを作成し、軽量セミサブ浮体を対象に、動揺解析を行った。水槽実験の結果と比較することにより、本予測プログラムは動揺量および弾性応答を精度よく予測できることを実証した。
- 3) 二段階解法は非共振領域では弾性変形を予測できるが、共振領域では荷重応答を過小に評価することはわかった。

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ご指導とご助言を賜りました。ここに記して謝意を表します。



(a)水平方向の応答



(b)垂直方向の応答

図7 水槽実験及び応答解析から得られた荷重の波周期による変化

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, 1998.
- 2) 澤井貴之: 大型風車搭載用のスパ-型浮体に関する基礎的研究, 東京大学修士論文, 2003.
- 3) 海上技術安全研究所: <http://www.nmri.go.jp>.
- 4) 吉田宏一郎, 石川邦照: 三次元骨組構造の周期応答, 日本造船学会論文集, 第143号, 1978.
- 5) 片山正敏, 他: 半潜水式海洋構造物の波浪中構造応答解析, 三菱重工技報, 第13巻, 第4号, 1976.
- 6) 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.
- 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) Offshore Standard DNV-OS-J101: Design of offshore wind turbine structures, 2004