

浮体式洋上風力発電の実用化に向けて

東京大学
東京大学
東京電力(株)
東京電力(株)
清水建設(株)
鹿島建設(株)

石原 孟
鈴木 英之
福本 幸成
助川 博之
大山 巧
土谷 学

1. はじめに

日本の風力発電の導入量は 2005 年末に 115 万 kW に達した。2003 年から 2005 年の 3 年間の新規導入量の伸び率は 33.6% で、年平均 22 万 kW が導入されてきた。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なると考えられる。

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。以下に、本研究のコンセプトおよび実用化へ向けた取組みを紹介する。

2. 本研究のコンセプト

浮体式洋上システムの実用化への課題として大きく風況、浮体、風車の 3 つに分けることが出来る。以下に本研究の課題および浮体構造の概要について説明する。

2.1 研究課題

洋上風力を考える上で、まず克服すべき課題として挙げられることは洋上風況の特性把握である。具体的には、

- ・ 風速、風向、乱れの評価および発電量の予測
- ・ 風車の配置によるウエイクの影響評価
- ・ 気象シミュレーションによる最適地の評価

が挙げられる。また浮体式を考える上では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、

- ・ 軽量化した風力発電用浮体の開発
- ・ 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
- ・ 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。更に浮体式洋上風車の設計のために、

- ・ ウエイクによる風車の影響(構造、疲労)評価
- ・ 浮体の動揺による風車への影響評価

が挙げられる。今回は、上記の 3 つの研究課題のうち洋上風況と浮体構造についての研究成果を紹介する。

2.2 浮体構造

(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。

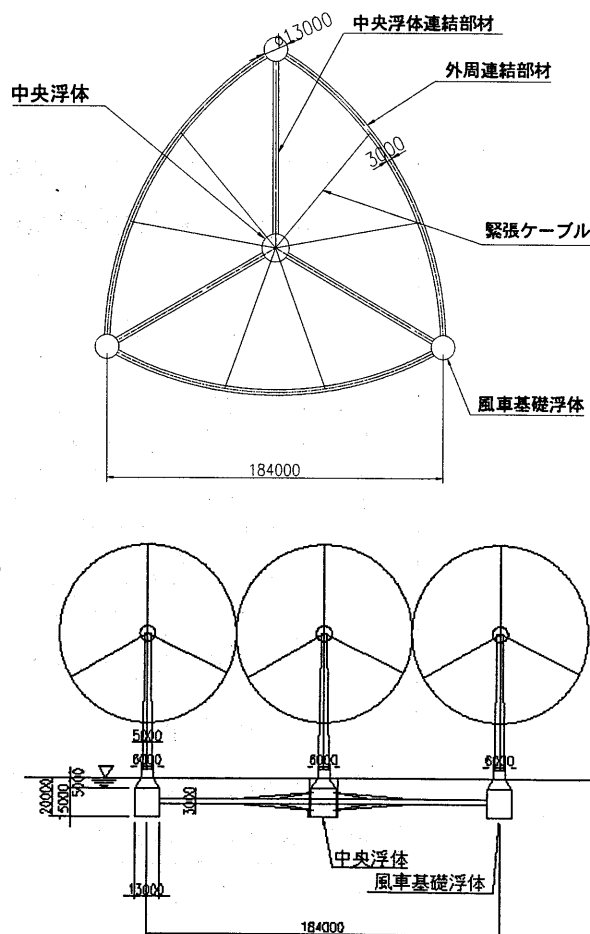


図 1 セミサブ型浮体式洋上風力発電システム

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。

(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. 洋上風況観測と予測

洋上における風況の特徴としては、陸上と比較して強い風速、低い乱れ強度が挙げられる。本研究では実際に洋上において観測を行うことにより洋上風況の特徴を明らかにした。まず、2004年9月から2005年8月までの1年間、福島県磐城沖ガス田における風況の観測を行い、洋上における風況を明らかにするとともに、洋上における年間発電量を推定した。また、提案した浮体式風力発電設備を用いた場合に後流により発電量の損失を推定した。最後に、メソスケール気象モデル RAMS を用い、洋上風速を予測し、観測値と比較することによりメソスケール気象モデルにおける洋上風速の予測精度を検証した。

3.1 風況観測

風況観測は、福島県楢葉町沖 37km にある洋上の天然ガス掘削設備の海面からの高さ 92m の掘削檣の頂上に風向風速計（海面上 94m）を設置して行った。（図 2）。表 2 に洋上観測システムの仕様を示す。天然ガス掘削設備上では、防爆型電機機器の使用が義務付けられているため、風向やプロペラの回転数を光信号で検出する光ファイバー形式の風車型風向風速計を採用した。データはサンプリング間隔2秒で取得し、10分平均値、10分最大値、10分最小

値および標準偏差をデータロガーに記録し、毎日1回、携帯電話通信網を利用して陸上に送信した。

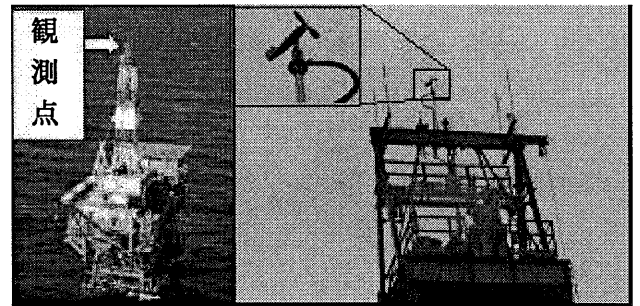
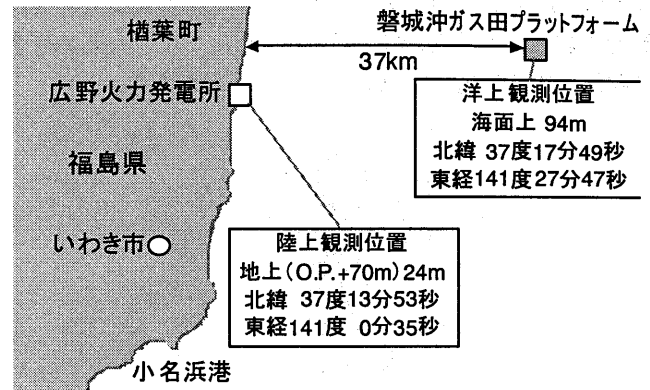


図 2 風況観測位置と計測状況

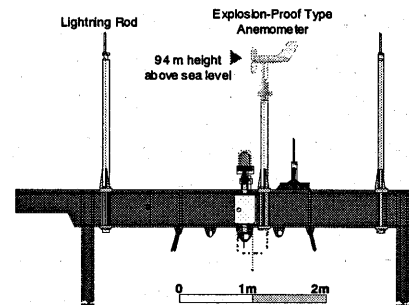


図 3 風向風速計

表 2 洋上観測システムの仕様

風向風速計	メーカー	小笠原計器製作所
	形式	風車型風向風速計 WS-7671
	検出方式	7心光ファイバー方式
	風向	全方位 0~540 度方式
データロガー	風速	0~60 m/s
	メーカー	NRG Systems
	形式	SYMPHONIE / 2000-J
	サンプリング間隔	2 秒
取得データ		10 分間平均風速, 風向
		10 分間最大風速, 最小風速
		10 分間風速標準偏差

図 4 に観測された風速から求めた年間の風配図および

風速階級別出現頻度を示す。主風向は大きく北北東から西北西にかけての北風を中心とした風向と、南風を中心とした風向があることがわかる。東風はほとんど観測されない。風速階級別の出現頻度を見ると、10m/sを超える風が頻繁に観測されており、平均風速が高いことがわかる。

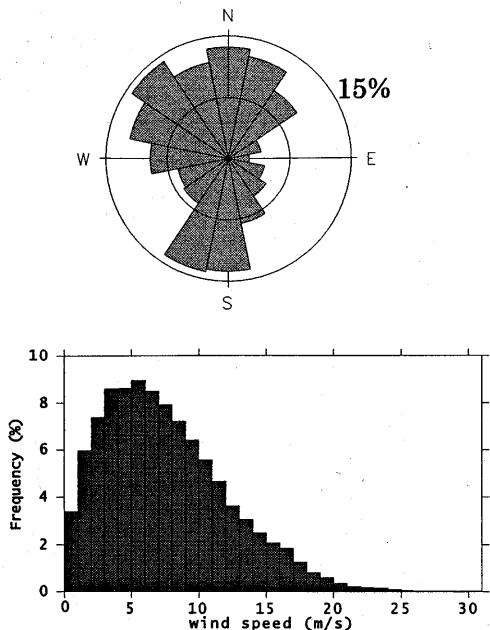


図4 風配図および風速階級別出現頻度

洋上における風は平均風速が高いのみならず、乱れ強度も小さい。図5には今回観測した洋上における乱れ強度と同時期の陸上(広野火力発電所)において観測された乱れ強度を比較したものを示す。洋上では陸上に比べ、全体的に乱れ強度が小さいことがわかる。また、冬季には比較的乱れ強度が高いことがわかった。

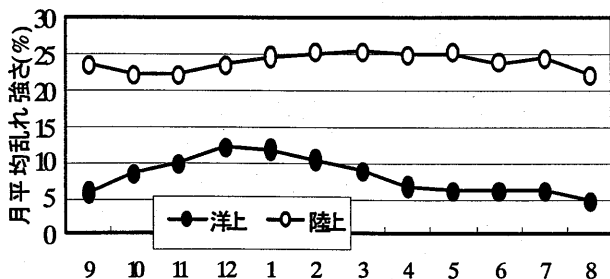


図5 陸上と洋上における月平均乱れ強度

観測された風況から、実際にこの場所において風力発電設備を建設した場合の年間の設備利用率を推定した。ここでは、ロータ直径92m、定格出力2.4MWの風車を仮定し、年間の風速階級別出現頻度より設備利用率を算出した。この結果観測地点における年間の設備利用率は35.1%となり、極めて高い設備利用率が期待できることがわかった。

3.2 風車後流の影響

本研究で考案したセミサブ型浮体は、風車同士が近接しているため、風向と浮体の方向によっては後流(ウェイク)の影響を大きく受けると考えられる。

そこで、観測された年間の風況を仮定した場合、浮体の方向を変化させ、後流による発電量の損失がどの程度あるかを検討した。図6に浮体の方向の定義を示す。3基の風車のうち2基が東西に一直列となりその北側に残り1基の風車が位置する状態を0度とし、角度が増えるに従い、浮体を反時計回りに回転させる。120度回転した時点で浮体の向きは0度と一致するため、浮体の角度としては0度~120度のみを考える。後流の影響を考慮するモデルとしてはKatic et al.によって提案されたモデルを用いた。

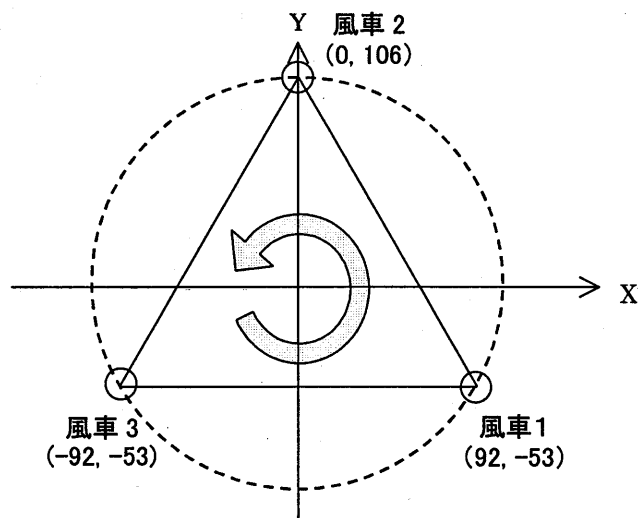


図6 風車位置座標

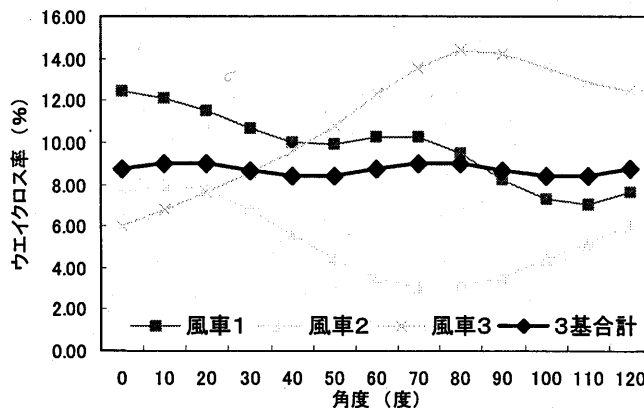


図7 3基風車浮体の方向別ウェイクロス率

図7に浮体の方向別のウェイクロス率を示す。個々の風車のウェイクロス率は浮体の方向により大きく変化するが、3基の合計は角度によるウェイクロス率はそれほどなく、約8%という結果となった。

これに対し、1浮体に2基の風車を搭載する場合には結果は大きく異なる。図8に2基の風車による浮体を用いた場合の浮体の方向別のウェイクによる損失を示す。3基の場合と異なり2基の合計を考慮した場合でも浮体の方向により大きな影響を与えることがわかる。これは前節で述べた

ように磐城沖における主風向が大きく北風と南風であるためであると考えられる。ウエイクによる影響が最も少ない配置(角度)では、2基の合計のウエイクロス率は約2%と3基に比べかなり小さくなる結果となった。

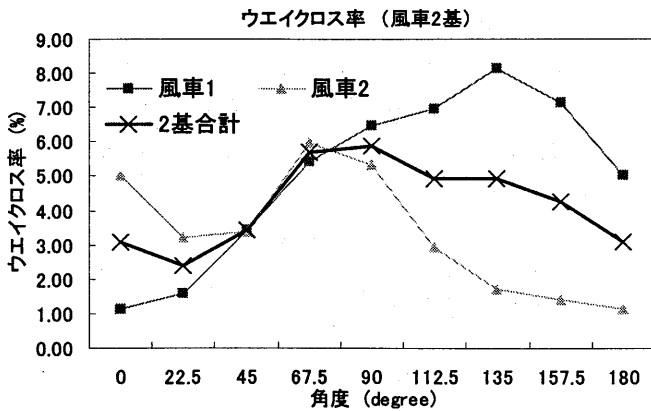


図8 2基風車浮体の方向別ウエイクロス率

3.3 気象モデルによる洋上風況の推定

本研究では風況を計算するためのメソスケール気象モデルとして、RAMSを使用した。RAMSは非静水圧力学方程式を基礎とし、メソスケールの気象現象に支配的な影響を与える放射過程、雲、土壌のモデルが組み込まれている。地表面の境界条件としては、大気の流れと地面の放射吸収量に影響を与える地形、熱と力学的な境界条件を与える土地利用、海水面温度を与える。本研究では地形としては国土地理院の50mメッシュ数値地図、土地利用としては国土交通省による国土数値情報、海水面温度としては全球1度グリッドの気候値を用いた。

地形のない洋上が本研究の対象であるため、最小水平分解能は2kmとした。メソスケールの現象を適切に再現させるため、二重にネスティングさせた格子を用い、双方向に計算結果を反映させながら計算を行った。本研究で用いた計算領域を図に示す。外側のグリッド1は関東平野と周辺の山岳地域を含む領域とし、水平解像度を10kmとした。水平解像度2kmである内側のグリッド2は本研究で対象とする領域であり、風況観測地点を含むように設定した(図9)。地表面、海表面付近の風速の鉛直プロファイルを正しく再現できるよう地表面付近の最小格子間隔を20mとし、上空では最大1000mの格子間隔を用い、計算領域の高さは25kmとした。計算対象期間は、観測期間と同様の2004年シミュレーションを行った。雲や降雨の大気水象のモデルとしては、計算時間と精度のバランスを考慮し、雲のみを再現し降水過程を再現しないモデルを用いた。地表面の境界条件として国土地理院の50mメッシュ数値地図、国土交通省による国土数値情報「KS-202-1」、全球1度グリッドの海水面温度の気候値を用いた。

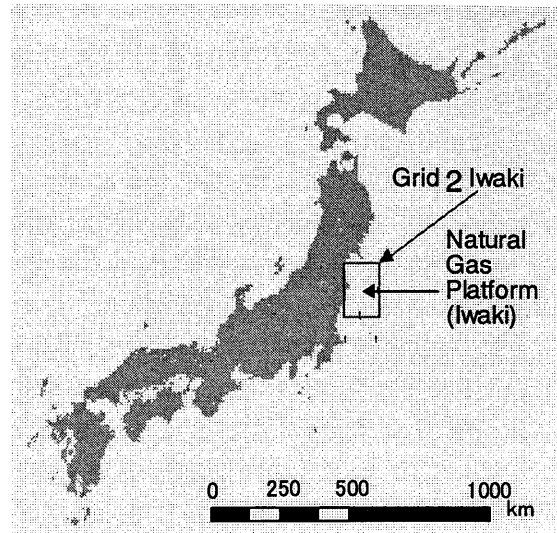


図9 対象領域

磐城沖の観測値および解析値の日および月平均風速の比較を図10, 11に示す。この結果より観測値とメソスケール気象モデルによる予測値はほとんど一致していることがわかる。観測された年平均風速は7.46m/s、メソスケール気象モデルにより予測された年平均風速は7.04m/sであり、予測誤差は5.6%である。このことから、メソスケール気象モデルにより、洋上の風力発電量を精度よく推定することが可能であることがわかる。

メソスケール気象モデルは年平均風速のみならず、月別の平均風速も高精度に予測可能である。図は磐城沖における月平均風速を示したものである。磐城沖における風速は冬季から春季(1月から5月まで)に高く、夏季に低いが、メソスケール気象モデルはこの傾向を精度よく予測することが可能である。

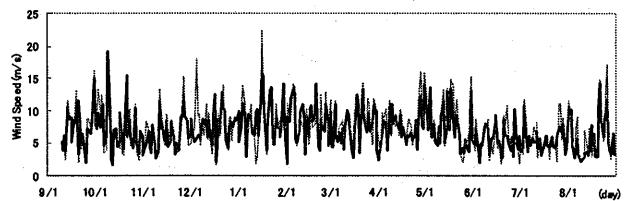


図10 磐城沖プラットフォームにおける日平均風速

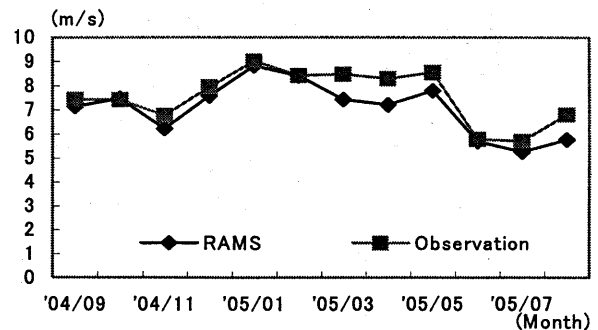


図11 磐城沖プラットフォームにおける月平均風速

4. 浮体構造の水理実験と動揺解析

4.1 水理実験

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を用いた。図 12 に模型実験の概要, 図 13 に浮体模型の写真, 表 3 に実機と模型の諸元の比較を示す。実機のスケール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, これは模型製作上の問題で, 模型では連絡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 14)。

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。

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。

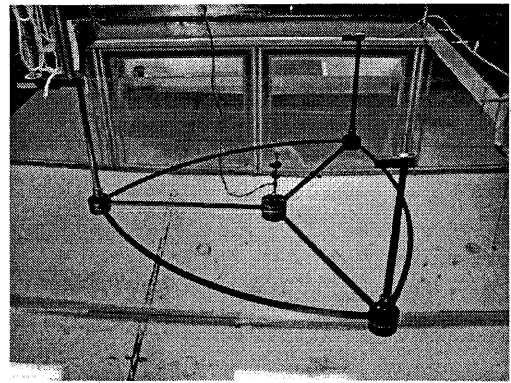


図 13 模型の写真

表 3 実機と模型の諸元の比較

	実機の スケールダウン (1/150)	模型	備考
排水量(m ³)	4.858	5.521 5.540*	風車基礎浮体 (アクリルの加工の精度 誤差)
重量(kg)	4.932	5.426	
慣性モーメント (kgm ²)	0.770	0.847	*計測による値
重心(cm)	-6.0	-4.8	模型製作の制限による

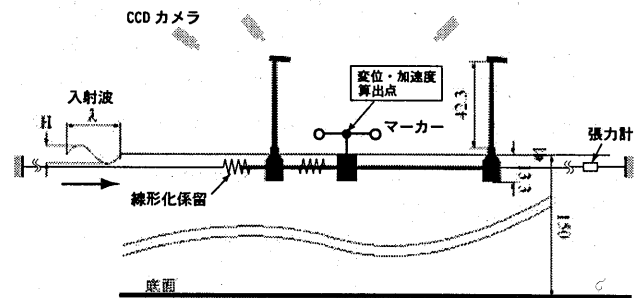


図 14 計測の概略図

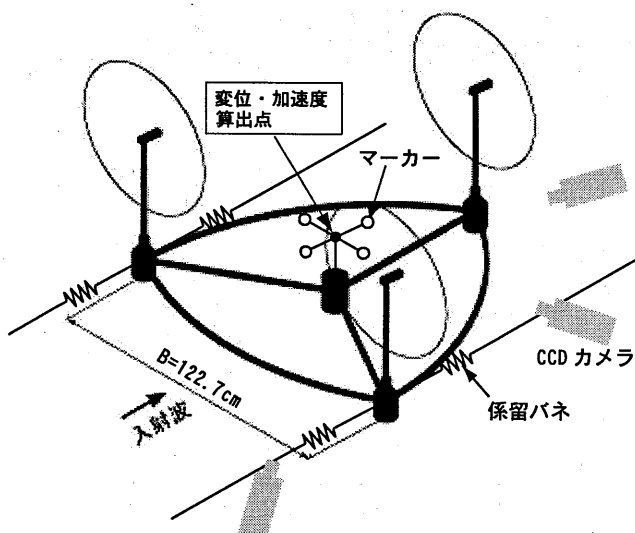


図 12 模型実験の概要

4.2 動揺解析

動揺解析ではグリーン関数法により求められる線形流体力に, 抗力による非線形減衰力を加えることにより浮体動揺量を求めた。式(1)に浮体の運動方程式を表す。

$$\sum_{k=1}^6 [(M_{jk} + m_{jk}) \ddot{\xi}_k + N_{jk} \dot{\xi}_k + C_{jk} \xi_k] + F_{Gj} = E_j \quad (1)$$

ここで, $\xi_k, \dot{\xi}_k, \ddot{\xi}_k$ は k 方向運動の変位, 速度, 加速度, M_{jk} は質量係数あるいは慣性モーメント, m_{jk} はラディエーション力による求められる付加質量係数あるいは付加慣性モーメント, N_{jk} はラディエーション力による求められる造波減衰係数, C_{jk} は静水圧による復元力係数, F_{Gj} は係留力, E_j は波強制力であり, j は 1, 2, ..., 6 である。

従来のグリーン関数法に無視した粘性影響を評価するために, 本研究ではモリソン式に基づく抗力 df_D を次式で近似

し、運動方程式(1)の右辺に加えた。

$$df_D = (1/2) \rho C_{DL} Du^* dl \quad (2)$$

ここで u^* は部材中心位置での相対速度、 D 、 dl は部材の径と長さ、 C_{DL} は等価線形係数として考慮した。 C_{DL} は、規則波の場合は $(8/3\pi) C_D \text{Max}[u^*]$ 、不規則波の場合は $(8/\pi)^{1/2} C_D \text{RMS}[u^*]$ と評価し、 $\text{Max}[u^*]$ (最大相対速度)、 $\text{RMS}[u^*]$ (標準偏差相対速度) は動揺量に関する繰り返し計算により求めた。

解析コードの妥当性を検討するために、水理実験で用いられている剛体セミサブ浮体模型を対象とし、周波数領域での動揺解析を行った。計算では水深 1.5m で、3種類の波高(2cm, 4cm と 8cm)と周期 0.3s~3s とした。なお、本手法と通常のグリーン関数と比較するために、抗力を考慮しない解析結果も示した。

図 15, 16, 17 には各運動モードの動揺振幅、中央浮体の応答加速度、係留張力を波高で無次元化した結果を示す。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。本解析結果は、Surge と Heave については実験値と一致し、Pitch については若干過大に評価していることが分かる。本解析では慣性モーメント、マセンタ高さ及び水線面積について計算値を用いており、今後これらの値を計測により再評価する予定である。各運動モードの固有周期は 2.5s~2.7s の範囲にあり、この付近の解析結果には入射波高により大きく異なっており、非線形減衰の効果が明確に現れている。数値解析結果は実験値を良く再現されており、抗力による減衰効果は本手法により正確に評価されていることがわかる。一方、抗力を無視した解析は固有周期付近の応答値を過大に評価していることから、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分かる。

5. まとめ

本研究では、洋上風力開発における課題を示すと共に、いくつかの研究課題について試みた。以下に、その結果を示す。

- 1) 磐城沖ガス田の掘削檣の頂上に風向風速計を設置し、洋上風の特性を明らかにしたと共に、気象モデルにより洋上風速の風向特性と季節変化を精度よく再現し、年平均風速の予測誤差は-5.6%であることが分かった。
- 2) 浮体上に搭載した風車のウエイクを考慮した年間発電量の予測を行い、風車のウエイクロスは 8.35%、3基風車搭載浮体全体の設備利用率は 2.9%低下することが分かった。
- 3) 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。また加速度は短周期側で大きくなることが確認された。
- 4) 洋上風力発電のための軽量セミサブ浮体を対象に、動揺解析を行った。通常のグリーン関数法モデルに加え抗力の影響を考慮した動揺解析では浮体模型を用いた水理実験の結果をよく再現し、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分かった。

今後は、風車のウエイクおよび浮体の動揺を考慮した風車の強度と疲労の評価を行う予定である。

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。

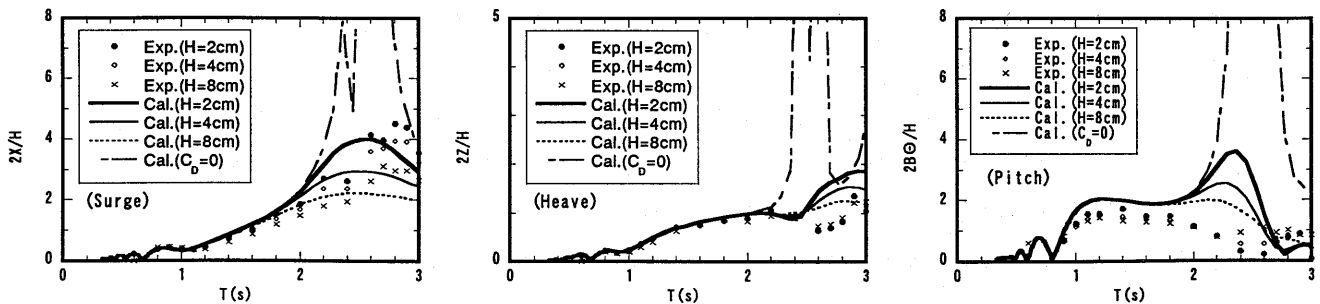


図 15 動揺変位量の周期特性に関する比較

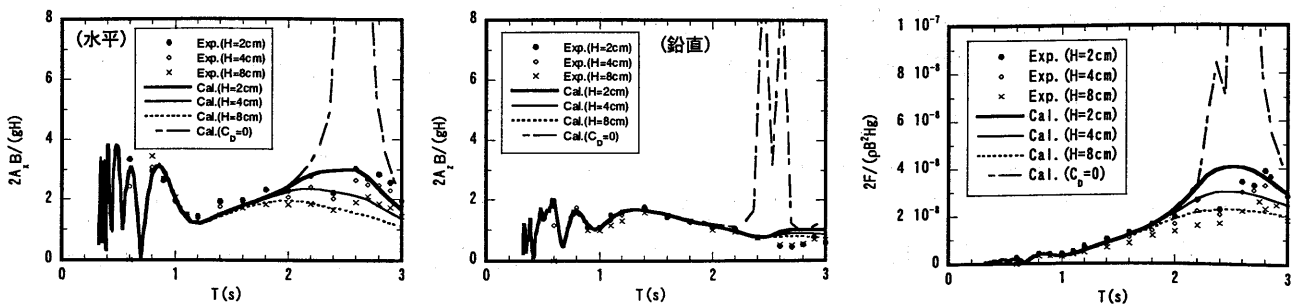


図 16 応答加速度に関する比較

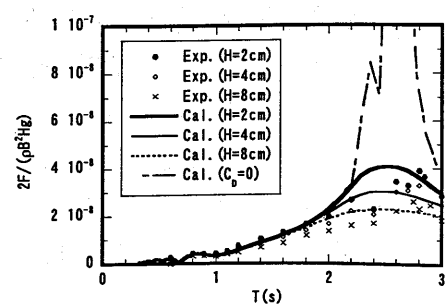


図 17 係留張力に関する比較