

浮体式風力発電用基盤浮体に関する模型実験

AN EXPERIMENTAL STUDY OF FLOATING WIND POWER SYSTEM

矢後清和¹・大川豊²・日根野元裕³・高野幸⁴・砂原俊之⁵Kiyokazu YAGO, Yutaka OHKAWA, Motohiro HINENO, Osamu TAKANO,
Shunji SUNAHARA

- ¹ 正会員 (独)海上技術安全研究所 海洋開発研究領域 (〒181-0004 東京都三鷹市新川 6-38-1)
² 工修 (独)海上技術安全研究所 海洋開発研究領域 (〒181-0004 東京都三鷹市新川 6-38-1)
³ 工博 (株)三井造船昭島研究所 事業推進部 (〒196-0012 東京都昭島市つつじが丘1-1-50)
⁴ 工修 (株)三井造船昭島研究所 技術統括部 (〒196-0012 東京都昭島市つつじが丘1-1-50)
⁵ 工博 東海大学 海洋学部 船舶海洋工学科 (〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸3-20-1)

A floating wind turbine platform concept is developing for accessing the higher winds out at sea, and converting wind energy efficiently to hydrogen, methane and electricity.

This paper describes the experimental results on dynamic responses of a base floating structure. The box-girder type floating structure mounted two 5MW wind turbines is proposed as a concept.

Polyester mooring rope and vertical loading anchor are applied in mooring system. Tank tests were carried out. Response amplitude operators of motions and its mooring forces were measured in NMRI basin. And other, the motion responses and mooring forces are calculated by the potential theory with the aim of verification. Fin stabilizers are installed under the keel of hull girders for reduction of motion.

Key Words : Wind Power, Deep Water, Floating, Methane, Hydrogen, Alternative Energy

1. 緒言

地球温暖化を始めとする環境問題や石油供給量の減耗が社会問題としてクローズアップされる中、新たなエネルギーシステムやその供給シナリオを模索する動きが世界的に活発になってきている。特に、CO₂排出量などの環境面で優れるとされる風力発電、太陽光発電などの自然エネルギーに対する関心は高いものがあり、欧米の一部では風力発電の大規模開発が進められつつある。

風力発電はエネルギー密度が低いと、実効を得るには大型風車を広範囲に展開する必要がある。このため、広大な海洋空間を利用する必要があり、欧州では沿岸20～30kmの広大な浅海域を利用した着床式大型風車の展開が進められている。

我が国は山岳地形が多く風車立地に適する区域が限定される上、沿岸海底地形が急峻で着床式に適する海域も多くは見込めない。こうした背景を受け、本研究などでは水深100～200mの沖合に係留展開できる浮体式風力発電装置を提案して、浮体工法に関する技術基盤開発の取り組みを進めている^{1), 2)}。

今回の発表では格子型基盤浮体を取り上げ、波浪応答に関する模型実験と数値解析結果との比較を行い、波浪中における動揺特性や係留特性を中心に、従来の線形計算の適用性に関する検証を行った。

これまでの研究^{3), 4), 5)}から、提案浮体は横波中の

Rollが比較的大きい事が認められているため、動揺低減のため減揺フィンの効果について調査した。

2. 全体システム

(1) コンセプト

全体コンセプトの概要を図-1に示す。

風力発電で得た電力は、直接電力として使用する方法以外に、水素またはメタン（天然ガスの主成分）などの化学燃料に改質することを提案する。これにより風の変動による供給不安定の問題を解消でき、エネルギー蓄積も可能となる。

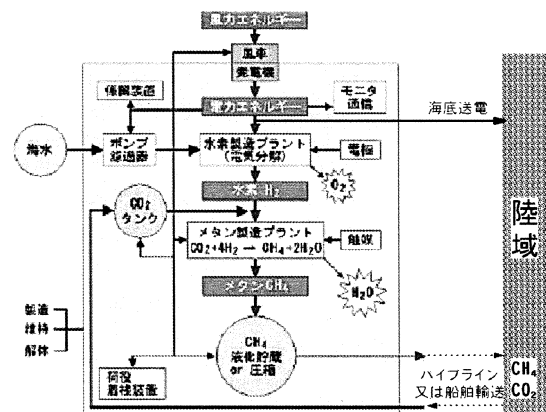


図-1 全体システムのコンセプト

(2) 設置海域と設計条件

設置海域は、エネルギー輸送に負担が少なく浮体係留に有利な条件を考え、沿岸から10km程度、水深100～200mを仮定する。表-1は日本周辺の水深データ（J-EGG500ver.99-06）より500m以浅の面積を求めた結果であるが100～200mの面積が最も大きいことがわかる。

対象海域における設計条件を考える。波浪条件は、海上技術安全研究所の気象海象データベース「北太平洋の風と波」を使用して、浮体供用期間30年、再現期間60年と設定し、波高波長頻度を基に統計解析を行い確率分布より最大波浪条件を設定した。

また、風車は風速13～14m/s前後で定格運転に達し、25m/sより高い風速域では運転を停止する。こうした風車の機能面からの風速条件を基本に、別途設計条件を設定する事とする。具体的には、表-2に示すように運転時風速条件に対して、S-M-B法による波浪予測曲線を用いて波浪条件を求めた。この際、吹続時間は12時間と仮定した。

流速条件は周辺海域の観測資料等に基き決定した。対象海域は黒潮の影響を受ける海域が含まれ、最大4ノット近くになるが、係留への負担から、そうした海域は避ける事として2ノットを設計条件とした。

表-1 水深別面積の試算結果（水深500m以浅）

水深 (m)	面積 (km ²)	比率 (%)	累積面積 (km ²)	累積比率 (%)
0-10	22,030	0.49	22,015	0.49
10-20	17,428	0.39	39,440	0.88
20-30	14,004	0.31	53,444	1.20
30-40	15,131	0.34	68,575	1.54
40-50	14,038	0.31	82,612	1.85
50-60	14,836	0.33	97,448	2.18
60-70	14,215	0.32	111,662	2.50
70-80	14,892	0.33	126,554	2.84
80-90	16,655	0.37	143,207	3.21
90-100	34,740	0.78	177,944	3.99
100-200	219,966	4.93	397,885	8.91
200-300	57,540	1.29	455,421	10.20
300-400	46,898	1.05	544,038	12.19
400-500	41,742	0.94	585,760	13.12
海域全体*	4,463,702	100.00	4,463,702	100.00

注) 海域全体の値は領海とEEZを併せた管轄海域について

表-2 設計条件

条件		暴風時	発電稼働時	
			定格時	カットアウト前
波	T _{H1/3}	15sec	7.2sec	9.8sec
	H _{1/3}	12.5m	3.0m	6.8m
風速		50m/s	14m/s	25m/s
流速		2.0knot		
水深		200m		

(3) 浮体式風力発電施設

本研究では、図-2および表-3に示すような、矩形断面を持つBOXガードを格子状に配置した構造の基盤浮体上に2機の5MW風力発電装置を搭載した施設

設を考える。浮体幅、断面寸法の変化により動揺特性を設置海域の波浪特性に応じて最適化することができ、シンプルな構造のため経済性に優れると考えられる。

係留は合成繊維索によるトート係留である。索は公称直径200mmのテトロン系ロープであり、図-3に示す伸び-変位特性を持つ。12条の索を図-4のように配置する。近年、海底石油掘削施設などで採用され、大水深でも船上から投げ込み可能なアンカー（Vertical Loading Anchor）とともに、設置が容易で経済性に優れる工法として注目される。

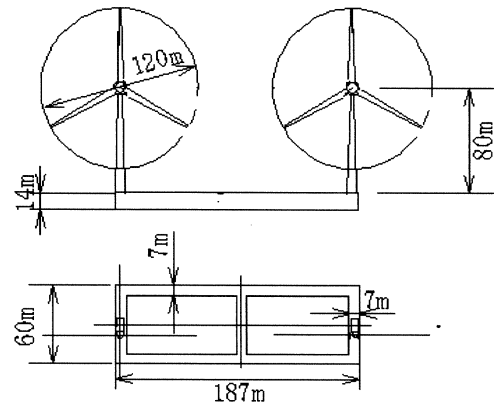


図-2 浮体式風力発電ユニットの概要

表-3 浮体式風力発電ユニットの主要目（）内は模型

形式	BOXガード格子構造	
浮体	長さ	187m (189cm)
	幅	60m (60cm)
	型深	14m (14cm)
	喫水	4m (4cm)
	排水容積	14,336m ³ (14,336cm ³)
風力発電装置	定格出力	5MW
	風車直径	120m
	ハブ高さ（デッキ上）	80m
	カットイン風速	4m/s
	定格風速	14m/s
	カットアウト風速	25m/s
	重量	タワー除 3,185kN タワー含 5,635kN

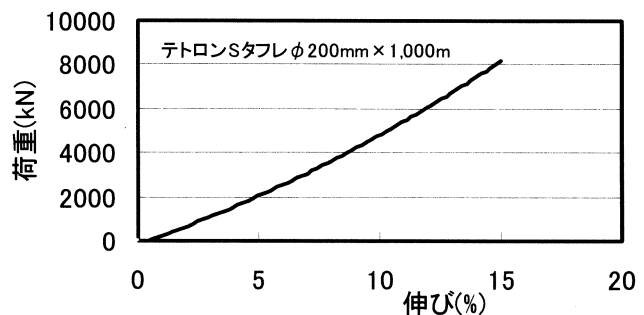


図-3 合成繊維係留索の伸び-荷重特性

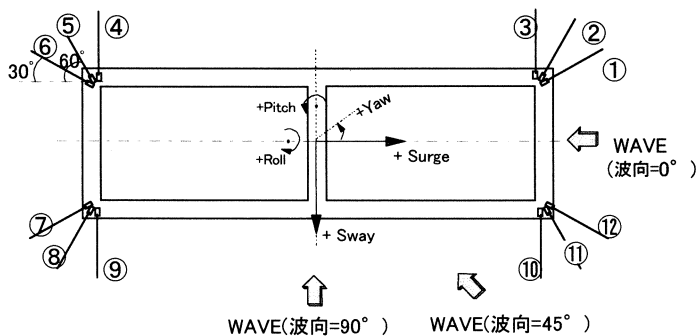


図-4 係留索の配置

(4) ウィンドファームの規模

図-5は、ウィンドファーム構想の一例である。送電またはパイプラインによるエネルギー輸送コストを、一般的に用いられている現状の機器設備を考慮して試算した結果、200MWを1単位とする場合が経済効率がよいという結果を得た。この結果に基づく構想配置図である。

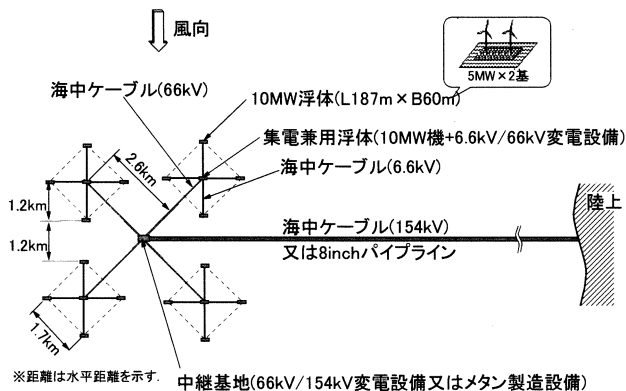


図-5 ウィンドファームの構想例

(5) 燃料製造システムと製造能力

燃料製造システムの概要を図-6に示す。図中には各段階での変換効率と生成量などを記している。風車の設備利用率（年間発電量/風車能力100%で運転した場合の年発電量）は40%と仮定した。

まず、風力による電力で海水を電解して水素を得る。次に、水素にCO₂を反応させメタンに改質する。水の電解には直接電解法⁶⁾もあるが、現状ではアルカリ水電解が効率の点で有利である。この場合、海水を一度淡水化する必要がある。水素とCO₂の反応は発熱反応であり、メタン化の際、水素燃焼熱の約20%相当の発熱がある⁷⁾。これを蒸気タービンで回収し電力に変える。また、メタン化の際に発生するH₂Oは水素製造に必要な淡水の約半分に相当するので、これも回収する。1隻の年間発電量は3,504万kW・hとなり、上述のようなエネルギーロスの低減を図ると1,653tonのメタンが製造できる。これは自動車燃料に換算するとガソリン約2,600kLに匹敵する。

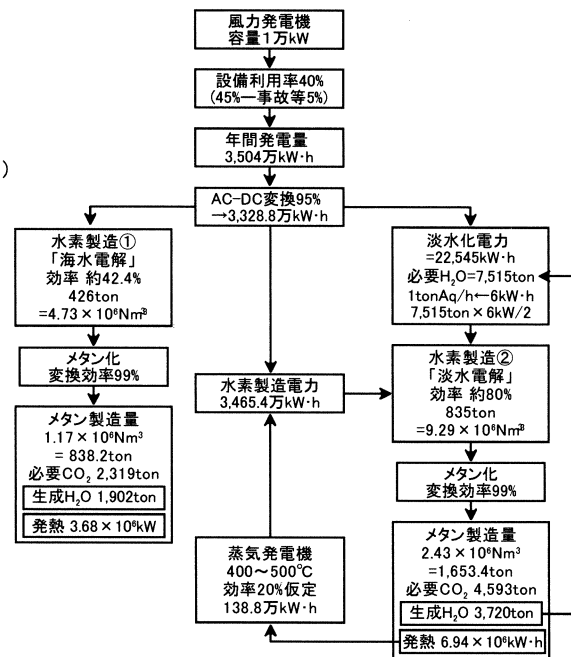


図-6 燃料製造システムの概要

3. 模型実験

(1) 実験の目的と実験施設

波浪応答の検証を目的に模型水槽実験を実施した。実験は規則波中における基本特性実験と係留状態で実海象下を模擬した不規則波中係留実験の2種類に大別でき、2実験とも数値計算の妥当性を検証する事を目的に行った。規則波中実験には海上技術安全研究所の海洋構造物試験水槽（長40m×幅27m×実験時水深1.5m）を、不規則波中実験には、同深海水槽（直径15m×実験時水深5m）を用いた。海洋構造物試験水槽は精度の高い造波装置を有し、動揺等の周波数応答関数の精密計測に適している。深海水槽は円形水槽周囲に多分割造波装置を有しており、任意の不規則波を起こすことができる。

(2) 供試模型

供試模型の概要を図-7に示す。縮尺1/100の弾性模型であり、アルミ板で曲げ剛性を調整して、その下部に浮力を受け持つ発泡ポリエチレンを貼付して幾何形状を合わせている。格子構造の剛性はアルミ板が受け持っており、発泡ポリエチレンの剛性は無視する。風車タワーは均一なアルミパイプで模擬したが、剛性を合わせることはせずほぼ剛体と見なせる模型とした。各部の質量のみ実機と相似にしておき、全体重心高、慣性性能等はほぼ一致させている。また、事前の計算で横波中のRoll振幅が比較的大きいことがわかったため、動揺低減効果を試行する目的で、一部ケースで両舷にフィン（図-7斜線部）を取り付けている（図-7斜線部）。フィンは効果を強調させて見るため多少大きめとして、各ガーダ両舷に実機相当で3mづつ突き出している。

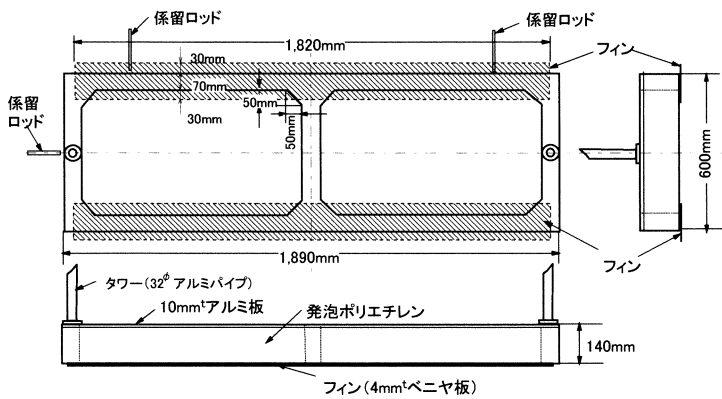


図-7 供試模型

表-4 実験の種類と波浪条件

規則波	波向： 0, 45, 90°	波高：2, 4, 6, 8m	波周期：6~22秒
不規則波	波向： 0, 45, 90°	不規則波浪（3種類）： ①定格, ②カットアウト, ③暴風時相当	

(3) 実験の種類と方法

実験時の種類と波浪条件を表-4にまとめて示す。

規則波中実験は、図-7中に示すように長辺方向2箇所、短辺1箇所にユニバーサルジョイントを付けた1m長のロッドを付け係留している。すなわち、Sway, Surge, Yawを拘束し、他の動揺モードは自由として計測している。動揺計測は、精度の得られるトートワイヤー法により動揺変位を計測した。トートワイヤー法は、浮体両舷各5箇所から水槽底に鉛直に極細ワイヤーを張り、一端にポテンシオメーターを取り付けて各点上下変位を計測するものである。

不規則波中実験は、係留時の長周期動揺と係留力の計測が主目的であるため、図-4を模擬した係留を行いSway, Surge, Yawの拘束は解いている。計測用ワイヤー等の影響を排除するため、動揺計測には浮体上のマーカーをカメラで追跡する非接触動揺計測装置を用いた。係留力はアンカー部に中性浮力にした張力計を配置して計測した。係留索には、実係留索の比重に近く軸剛性の高いケブラーを用い、先端に係留反力特性を相似に合わせたゴムを付けた。反力特性は「荷重-伸び曲線」の5~15%伸び区間を線形化して合わせた。係留索の長さは実機1000mに対し約700m相当と短い、反力特性は相似である。但し、係留角は約5°急角度になっている。波浪は一方不規則波（Long crested wave）とし、波スペクトルにはJONSWAP型を適用した。

4. 実験結果

(1) 規則波中の動揺応答特性

図-8は横波中における動揺の周波数応答関数である。フィンの効果を比較して示す。Heave振幅(Z_a)は波振幅(ζ_a)、Roll振幅(ϕ_a)、Pitch振幅(θ_a)は

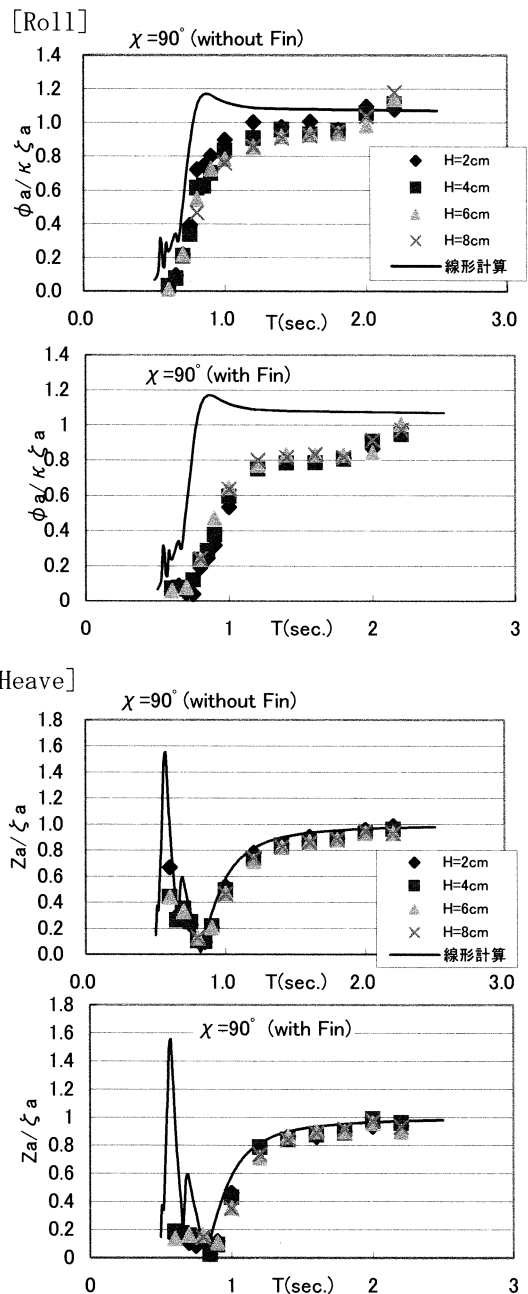


図-8 横波中の周波数応答関数
(減揺フィンの効果の比較)

波傾斜($\kappa \zeta_a$)で無次元化している。ここで κ は波数である。横軸の周期は模型スケールで示しており、縮尺1/100をフルードの相似則に当てはめると実機の周期は10倍となる。線形計算結果はポテンシャル理論（特異点分布法）に基づく流体力を用い、浮体を剛体と仮定して求めた。この計算では高次減衰力などの非線形効果は考慮していない。Rollはフィンの有無によらず計算値より低い値を示し、フィンのある方がより大きな減衰効果が現れている。これは、粘性減衰力の影響と考えられ、対象浮体のような矩形断面を持つ構造では、矩形コーナーからの放渦による減衰効果がフィンにより増幅されると見る事が出来る。フィン付ではRollについて20%以上の減衰が見られる。

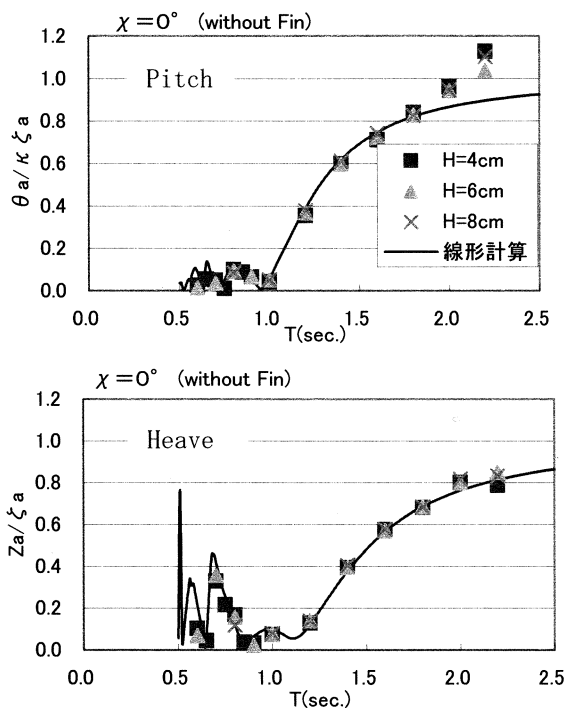


図-9 縦波中の周波数応答関数

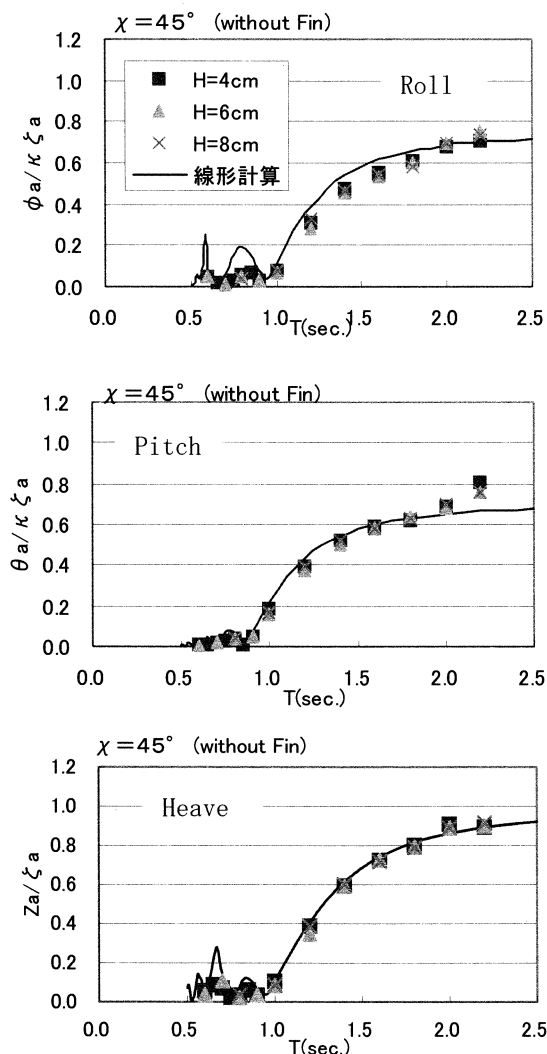


図-10 斜波中の周波数応答関数

Heaveについても、短周期側で顕著な減衰効果が見られ、計算結果で見られる大きなピークは見られない。しかし、その効果も0.8秒以上の周期では失われ、計算とよく一致した応答を示している。

図-9、図-10に縦波中(波向0°)、斜波中(波向45°)の結果を示す。フィンの無いケースであるが、短周期側にある計算のピークは現れず、ピーク付近を除けば良く計算に一致している。係留時においても規則波中で応答関数を計測した。結果は省略するが、係留の影響は小さく、こちらも計算と良い相関を示している。

以上の結果から、ポテンシャル理論を用いた計算結果は粘性減衰影響を考慮する必要があるが、動揺に関しては安全側の評価を得られることがわかった。

(2) 不規則波中の応答特性

不規則波中実験で得られた時系列データをゼロアップクロス法により解析して求めた動揺と係留力の統計値を表-5に示す。横波中、暴風時を模擬したケースの結果である。

表中には、比較のためポテンシャル理論を用いた時間領域計算した結果も示している。この結果はフィン無しのもので、振幅は有義値で、周期はゼロアップクロス周期として、実機に換算して表している。今回の実験の計測時間は約7分であるので、実機で1時間強の評価時間ということになる。係留力に関しては、波下側の係留力計の1部の故障が生じたため、波上側6台に関して示す。

振幅に関しては、実験値と計算値は統計値であることを考えると、良い相関を示しているといえる。しかし、平均周期は実験値の方が、計算より約5秒長い値を示しており、事実、計測された時系列には長周期成分が現れている。これは、高次の漂流力の影響と考えられ、精度を上げるためには、高次成分を考慮する必要があると言う事ができる。

表-5 不規則波中の統計値(横波中：暴風時)

	有義値 (両振幅)		平均周期 (ゼロアップクロス周期)	
	実験	計算	実験	計算
Sway	11.6m	13.8m	19.2s	14.0s
Heave	10.2m	10.0m	14.2s	12.3s
Roll	17.1°	22.8°	9.9s	7.7s
係留力⑦	492.9kN	355.8kN	20.8s	13.7s
係留力⑧	610.3kN	616.5kN	24.1s	13.6s
係留力⑨	609.4kN	720.8kN	24.1s	13.5s
係留力⑩	572.5kN	720.8kN	21.3s	13.5s
係留力⑪	559.2kN	616.5kN	20.7s	13.6s
係留力⑫	344.8kN	355.8kN	17.3s	13.7s

表-6は、減揺フィンの統計値に及ぼす影響を比較して示したものである。フィンの効果により横揺、上下揺が減衰していることがわかるが、係留力は約5倍にまで増加し、左右揺も同程度増加している。横揺、上下揺を抑制した分、反射波が増大し漂流力の増加をもたらしたものと考える事が出来る。減揺効果の大きさと係留力の増加量を比較すれば、減揺フィンは無いことが望ましく、今回研究対象にした格子構造浮体での横波中応答に関しては、動揺と係留に関する最適化をさらに追求する必要がある。

表-6 不規則波中の統計値（減揺フィンの影響）

有義波高	With Fin			Without Fin		
	3.0m	6.8m	12.5m	3.0m	6.8m	12.5m
Sway (m)	13.0	32.9	25.7	23	7.9	11.6
Heave (m)	0.7	3.4	10.5	1.0	3.8	10.2
Roll (deg)	4.1	13.5	15.9	7.1	15.9	17.1
係留⑦(kN)	621	1200	1077	134	335	493
係留⑧(kN)	909	1613	1397	172	490	610
係留⑨(kN)	809	1582	1341	179	478	609
係留⑩(kN)	768	1699	1279	161	434	573
係留⑪(kN)	787	1709	1322	161	381	559
係留⑫(kN)	468	905	780	119	220	345

5. 結 言

浮体式風力発電の基盤浮体形式として格子構造型浮体を対象に、動揺量と係留力について水槽模型実験による波浪応答特性を計測し、基本応答特性と実海域中での統計量を求めた。

また、これまでの研究から横波中動揺の低減が望まれることが知れており、減揺のためフィンを取り付けた場合の効果について検証した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 規則波中実験で計測された動揺の周波数応答特性はポテンシャル理論で計算した結果と良い相関を示す。但し、横波中の横揺等の一部に粘性減衰力の影響と考えられる応答の低下が見られる。この減衰はフィン取り付け時で顕著であるが、フィンなしの場合でも復原力の小さい横揺れで低減が認められる。
- 2) 不規則波中の計測時系列データを統計処理し、

有義値を求めた。一方、ポテンシャル理論に基づく時間領域計算により求めた統計値と比較した結果、動揺量、係留力の振幅統計値は良い相関を示した。しかし、ゼロアップクロス周期は実験値の方が約5秒も大きい値を示し、実験では長周期動揺成分がある事が確認された。粘性力等に起因する高次の漂流力成分を考慮して精度を上げる必要がある事がわかった。

- 3) 係留時において、係留力に対するフィンの影響が大きい事がわかった。フィンの効果により横揺は $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 程度低減するものの係留力は約5倍も増大する。横波中での動揺と係留力双方に関する最適化をさらに行う必要がある。

謝辞：本研究は、鉄道・運輸機構の「運輸分野における基礎的研究推進制度」のプロジェクトの一環として平成15年度より実施した研究成果の一部である。本研究の機会を与えていただいた関係者の皆様に感謝申し上げます。

また、水深別面積を求めるにあたり、JODC（日本海洋データセンター）からのデータの提供を頂き、海上技術安全研究所流体部門の松沢孝俊氏のご協力を得た事を記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 矢後清和，大川豊，鈴木英之，澤井貴之：浮体式風力発電に関する基礎的検討，第17回海洋工学シンポジウム（日本造船学会），2003.7
- 2) （社）日本機械工業連合会，（社）日本海洋開発産業協会（JOIA）：平成14年度 浮遊式風力発電基地の自然エネルギーの最適輸送技術に関する調査研究報告書，2003.3
- 3) 大川豊，矢後清和，太田真，山田義則，高野宰，関田欣治：代替燃料創出を目指した浮体式風力発電施設に関する基礎的研究，海洋開発論文集，VOL. 20，2004.7
- 4) 矢後清和，大川豊，太田真，中條俊樹，西村洋佑：浮体式風力発電用基盤浮体に関する基礎的研究，第18回海洋工学シンポジウム（日本造船学会），2005.1
- 5) 矢後清和，大川豊，中條俊樹，西村洋佑，日根野元裕，高野宰：浮体式風力発電による代替燃料創出システムの研究，海洋開発論文集，VOL. 21，2005.7
- 6) 橋本功二，山崎倫昭，泉屋宏一，目黒眞作，佐々木昭仁，片桐洋，秋山英二，熊谷直和，幅崎浩樹，川嶋朝日，浅見勝彦：太陽エネルギーと海水電解を利用するグローバル二酸化炭素リサイクル：日本海洋開発産業協会「海洋開発ニュース」，Vol. 28，No. 6，2000.11
- 7) 矢後清和，大川豊，日根野元祐，高野宰，平田宏一：洋上風力発電による代替燃料製造システム（燃料ガス貯蔵のための反応熱の有効利用），第9回スターリングサイクルシンポジウム（日本機械学会），2005.10