

深層水活用型海洋肥沃化装置の動揺性能に関する 実験的研究

正員 小林 英一* 大江 清登**
 正員 和田 洋二郎* 正員 福嶋 祐二*
 正員 宮部 宏彰*** 正員 大内 一之****

An Experimental Study on Dynamic Characteristics of Deep Ocean Water Upwelling Floating Structure for Eutrophication

by Eiichi Kobayashi, *Member* Kiyoto Oe
 Yojiro Wada, *Member* Yuhji Fukushima, *Member*
 Hiroaki Miyabe, *Member* Kazuyuki Ouchi, *Member*

Summary

The Marino Forum 21 started an R&D project in fiscal 2000 with grants from the Japanese Ministry of Agriculture, Forestry, and Fishery to develop the equipment for the eutrophication of the sea by upwelling deep ocean water, sending into euphotic zone and increasing phytoplankton.

First, some concepts of moored floating structure with a riser pipe for deep ocean water upwelling at the water depth of 500m were investigated and evaluated by computer runs. Second, based on the investigation, basic design of the structure was undertaken. Next, scaled model tests were carried out in an experimental tank at several wave conditions in order to evaluate dynamic response of motion of the structure, mooring force and riser pipe stress. Finally, based on this experiment, possibility of the structure and validity of the computation were verified.

1. 緒言

海洋深層水は水深 200m 程度以深の海水で、この水深域では光合成が行われないため無機栄養塩が豊富にあるという特徴を有している。この深層水は海洋深部を緩やかに流れているが、自然に表層に湧き上がり有光層に送り込まれる湧昇域では好漁場になりやすいといわれている。

(社)マリノフォーラム 21 ではこの深層水を汲み上げ有光層に放出して植物プランクトンを増加させることにより、海洋を肥沃化させ漁場創成を狙う水産庁プロジェクト「深層水活用型漁場造成技術開発」を平成 12 年度から 5 ヶ年計画でスタートさせた。本プロジェクトでは深層水を汲み上げ有光層に放出する装置の設計・製作を行い、実海域に設置しその効果を把握することが計画されている。

本報告ではまずこのプロジェクトの一環として実施した、水深 500m 程度の海域において揚水管を垂下した係留躯体から深層水を機械的に汲み上げる装置の基本的なコンセプトの検討及び基本計画を示す。次にこの装置の相似模型による水槽試験を実施し動揺性能、係留力、管応力などについて予測計算ツールの精度検証を行うとともに成立性の検証についての検討結果について言及する。

本報告ではまずこのプロジェクトの一環として実施した、水深 500m 程度の海域において揚水管を垂下した係留躯体から深層水を機械的に汲み上げる装置の基本的なコンセプトの検討及び基本計画を示す。次にこの装置の相似模型による水槽試験を実施し動揺性能、係留力、管応力などについて予測計算ツールの精度検証を行うとともに成立性の検証についての検討結果について言及する。

2. 躯体の初期設計

海洋肥沃化装置の開発では、技術的実現性と経済性からのフィージビリティスタディを行い、実現可能なシス

* 三菱重工業 (株) 長崎研究所
 ** 三菱重工業 (株) 本社船舶技術部
 *** 石川島播磨重工業 (株) 船舶海洋技術統括部
 **** (株) 大内海洋コンサルタント

テムを抽出した。装置の設置を想定した海域における気象・海象条件の中で、その機能を十分に発揮する躯体形式として没水型躯体が選択された。ここでは気象・海象条件を設定し、それに適合する躯体形式の選定等、基本設計について概説する^{1),2)}。

2.1 気象・海象条件

躯体の設計にあたって、気象・海象条件を設定するためには海洋肥沃化装置の設置海域を想定する必要がある。設置海域は肥沃化装置としての機能を十分に発揮できる海域が望ましいが、これは設置する海域の地形、水質、深層水汲み上げ量に大きく依存する。したがって、複数の想定された設置海域について、設計に必要な波浪や水深、海流等の他に、水温分布、栄養塩分布についても資料調査と現地調査を実施した。

こうした調査の結果、相模湾中央部の相模海丘の頂上、水深約450m付近が設置場所の第1候補として選定された。

本計画が実証実験として位置付けられることから、耐用年数を10年と定め、躯体部分の構造と材料、ライザーの強度、係留装置の安全性等を耐用年数とあわせて評価し、躯体構造の設計条件をTable 1にまとめた。

特に波浪条件は、想定海域において再現期間20年程度であり、構造設計上も十分な必要限界を与えている。

2.2 躯体形式の選定

没水型、半没水型、ポンツーン型の3種類のコンセプトから本装置に適した躯体形式として7種類の構造を考案した。さらに各々の躯体形式に対して、基本性能、操作性、運用の利便性、コストなどを評価項目とした比較検討の結果から最適形状として没水型を採用することとした。

この型式を採用することにより水線面積が小さくでき、また、鋼製のライザーにより重心が低くなるため、メタセンターが大きくなることなどから、波浪中で極めて優れた動揺性能が期待できる。こうした設計検討を通じて設定された躯体の主要寸法をTable 2に示す。

2.3 一般配置

本装置は深層水を汲み上げ、表層水と混合して放流し、密度流拡散の原理を利用して海洋温度差発電(OTEC)を利用することを想定している。

躯体の一般配置図をFig. 1に示す。躯体は躯体部分とライザーで構成され、躯体の上部から、制御室、表層水取水管、上部機関室、インペラ、下部機関室、バラストタンク、固定バラスト室のように配置され、表層水と

Table 1 Environmental conditions

Significant wave height	10m
Mean wave period	14s
Design wind velocity	50m/s
Residual current velocity	0.2m/s
Current	0.1m/s
Wind drift	0.5m/s
Durability	10years

Table 2 Principal particulars of the floating structure

Height	About 60m
Breadth	30m
Displacement	5,750t
Internal diameter of riser	2.50m
Length of riser	About 400m

深層水が適度に混ぜ合わされた混合水はインペラにより放射状に接続される放水口から放流される。

水面貫通部は表層水を取水するため管状とし、この表層水取水管の上には、制御室を備え、本装置による海洋肥沃化効果をモニターし種々のデータを送受信するための機器が装備される。躯体の中心部には表層水と深層水を引き込むインペラを配置し、これを挟んで上下に機関室を設けた構造とした。深層水取水のためのライザーが機関室を貫通して、インペラ部吸入口へ接続される。また、OTEC等の機器類は上下の機関室に配置される。

保守点検時(メンテナンス状態)にはバラスト水を排水し、放水口デッキ下まで浮上して通船のアクセスを容易にする。躯体の設置工事や躯体の現地への曳航を容易

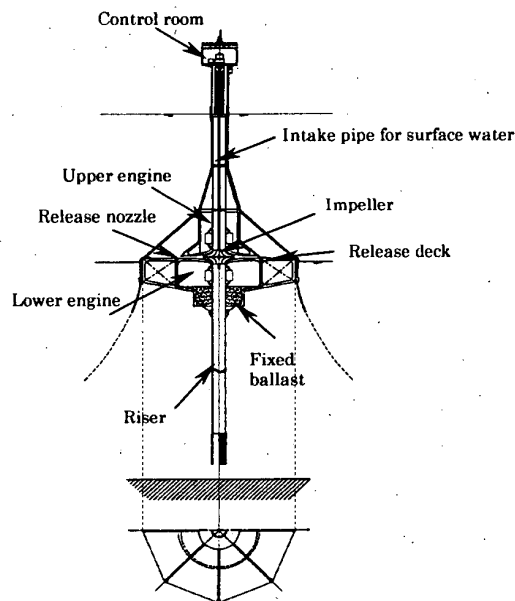


Fig.1 General arrangement of the floating structure

にするため、躯体は固定バラストにより、単体でも直立を保つようにした。

3. 躯体の係留系に関する初期検討

躯体システムの係留系としては種々の方式が考えられるが、本装置の係留方式を選定するに際しては、以下に示す条件を考慮し、最も一般的で実績が多いカテナリー係留方式を選定した。

- (1) 水深 500m の海域へも適用可能である
- (2) 係留系の製作コストが安い
- (3) 設置作業が比較的容易で、設置コストが安い
- (4) 躯体の動揺は、ある程度は許容できる
- (5) 設置後の保守管理が比較的容易である

本章では、カテナリー係留方式を対象として設計外乱条件下での躯体システムの動揺及び係留力を理論計算により求め、躯体形状や係留方式の本システムへの適用性に関する見通しを得るための初期検討を行った。

3.1 躯体単独時の動揺性能

係留系を含む躯体システムの応答について検討する前に、まず、基本となる躯体単体時（係留系なし）の動揺性能について検討した。条件としては実際の運用を想定したオペレーション状態と保守・点検を行う場合のメンテナンス状態とした。

躯体単独時の Heave, Roll (波の進行方向を含む面内での回転運動) の規則波中応答関数を Fig. 2, 3 に示す。横軸は波周期、縦軸は波振幅 1 m 当たりの動揺振幅を表している。Fig. 2 は オペレーション状態, Fig. 3 はメンテナンス状態の結果である。

ライザーの影響を把握するため、“ライザーなし”、“ライザー付き”（剛体と仮定）の結果を比較している。これらの結果により本躯体はオペレーション状態において、上下動、横揺れともに小さく、良好な性能を有していることが分かる。またライザーが受ける潮流力によって平均的な傾斜を生じると予想されるが、Rolling に及ぼすライザー抵抗の影響は非常に大きく、ライザーを装備することによって応答が非常に小さく抑えられることが分かる。

3.2 係留チェーンに関する検討

係留時の躯体の応答を計算するため、Table 3 に示す 3 種類の係留チェーンを仮定した。各ケースにおけるチェーン 1 本当当たりの係留特性を Fig. 5~8 に示す。又各図に示す特性の定義を Fig. 4 に示す。

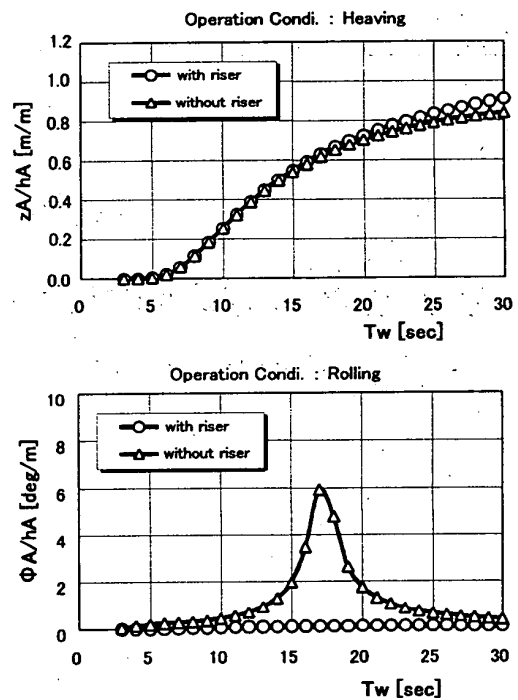


Fig.2 Response in regular waves without mooring lines(operating draft)

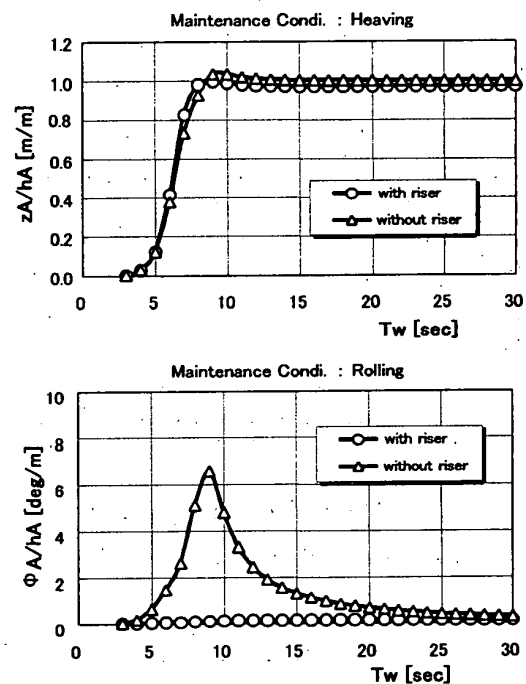


Fig.3 Response in regular waves without mooring lines(maintenance draft)

Table 3 Specification of mooring chains

		Case 1	Case 2	Case 3
Chain dia. [mm]		76	76	56
Length [m]		1,100	1,375	1,375
Weight in water [kg/m]		110.0		59.7
Breaking load [tonf]	Type 1	219		124
	Type 2	307		174
	Type 3	438		248

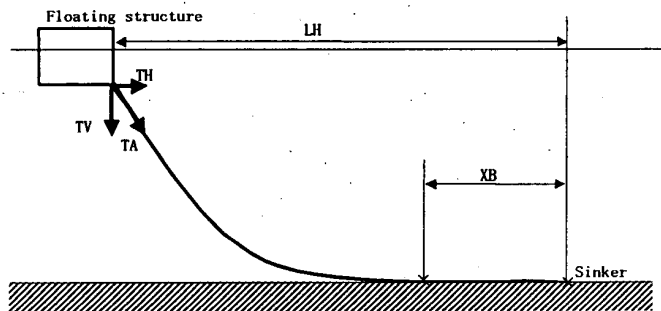


Fig.4 Definition of mooring characteristics

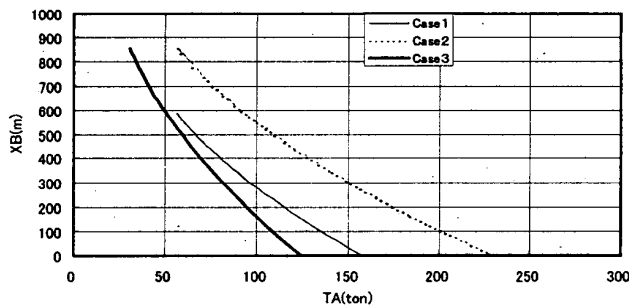


Fig.8 Mooring characteristics
(length of chain on the sea bed)

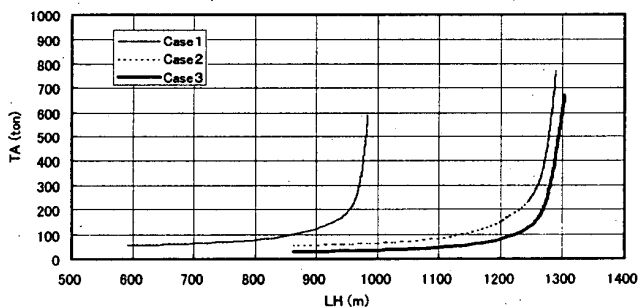


Fig.5 Mooring characteristics (tension)

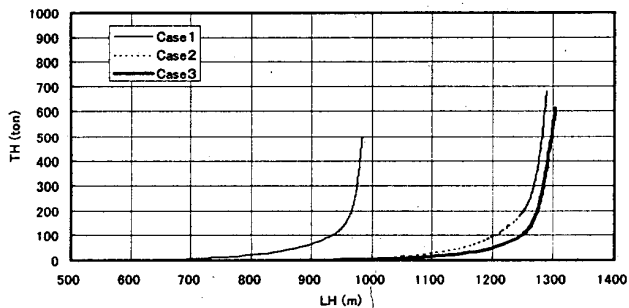


Fig.6 Mooring characteristics
(horizontal component of tension)

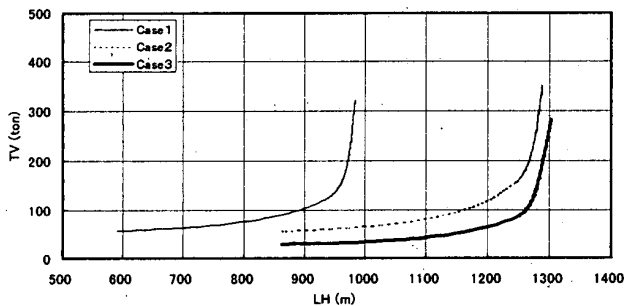


Fig.7 Mooring characteristics
(vertical component of tension)

ここで、躯体システムの投影面積を約1,600m²（躯体400m²、ライザー1,200m²）、余裕を考慮して潮流速度を2kn（水深方向に一様分布）と仮定して躯体システムが受ける潮流力を89ton（定常力、C_D=1.0と仮定）とし、チェーンの平均作動点を計算した。Fig.5~8より求めた係留要目をTable 4に示す。

いずれのケースもXBが正值となりチェーンは緊張状態ではなくカタナリーを形成している。ケース2ではチェーン長に余裕があり過ぎることや、コスト・ハンドリング・躯体の排水量等を考慮すると係留系は軽い方がよいと考えられるため、以後の検討においてはケース3に示す56mm径のチェーンを選択した。

Table 4 Mooring particulars for 3 cases of chain

	Chain Dia.	LH[m]	TV[ton]	TA[ton]	XB[m]
Case1	76mm	920	115	150	30
Case2	76mm	1195	115	150	305
Case3	56mm	1240	80	120	40

4. 水槽試験

波浪外乱下における躯体システムの動揺・応力・係留特性などの設計データを取得し、設計に使用する理論計算法を検証するため、躯体・ライザ・係留から構成される全体システムの波浪中での水槽試験を実施した。

4.1 試験配置および計測項目

躯体運動及びライザー挙動を実験的に把握するため、ライザー管の模型を装備した躯体・ライザー管・係留索の縮尺比1/72.2の模型を使用した。ライザー模型は、作用する流体力、曲げ剛性を実機と合わせるためFig.9に示すように縮尺比の5乗で曲げ剛性を合わせたアルミ丸棒に実機と同じ直径に相当する直径のFRP製パイプ

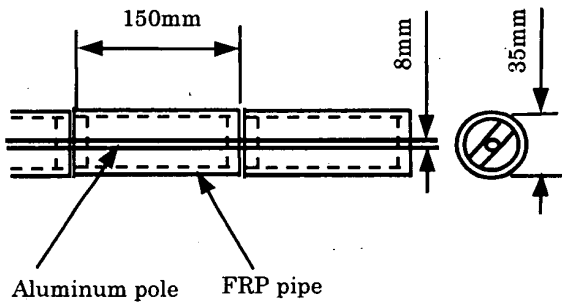


Fig. 9 Construction of riser tube model used in the experiments

を、これが剛性を持たないよう一定間隔で隙間を設けて取り付けた。また水中重量を合わせるため円筒管内に浮力材を固定した。

試験状態を Table 5 に示す。試験は三菱重工業(株)長崎研究所/推進性能水槽において実施した。試験配置および計測項目を Fig. 10~12 に示す。また、躯体運動の定義を Fig. 13, 各状態における波浪条件を Table 6 に示す。

(1) 躯体動揺

光学式非接触運動計測装置を使用し、躯体模型に取り付けたターゲット(発泡材カラーボール)を自動追跡して計測した。

(2) 加速度

躯体上部に歪みゲージ式加速度計を取付け、上下および前後方向加速度を計測した。

(3) 索張力

歪ゲージ式の小型軽量張力計を躯体と係留索の間に取付け、張力を計測した。

(4) ライザー管の曲げモーメント

躯体とライザー管の接合部およびシミュレーション結果から予想された変位・応力の大きい個所に歪ゲージを貼り付けライザーに作用する応力を計測した。

(5) ライザー管の水中挙動

ライザー管の挙動を水中カメラにて撮影した。

試験では、合計で実機1時間相当(模型で約430sec)になるように3回の計測を行った。各々の計測では同じ波スペクトルを使用するが、各成分波の位相(乱数)を変更することにより異なった出会い波となるようにした。

Table 6 Wave conditions in the experiments

Condition	Waves		
Operation	Irregular waves	Significant wave height	10m. Mean wave period 14sec
	Regular waves	Wave height	5m. Wave period 14sec
Maintenance	Irregular waves	Significant wave height	1.5m. Mean wave period 6sec
Light	Irregular waves	Significant wave height	1m. Mean wave period 6sec. 8sec

(Full scale values)

Table 5 Conditions and particulars of floating structure in the experiments

Scale : 72.2

Item	Full scale	Model scale
Depth of water	460 m	6.375 m
Riser		
Length	410 m	5.682 m
Diameter	2.545 m	0.0353 m
Internal diameter	2.500 m	0.0346 m
Weight in water	1.220 ton/m	0.229 kg/m
Elastic coefficient E	2.000E+06 kg/cm ²	2.704E+04 kg/cm ²
Bending rigidity EI	2.837E+06 ton·m ²	1.415E+04 kg·cm ²
Mooring line (60mmΦ chain)		
Length	900 m	12.473 m
Weight in water	68.55 kg/m	0.01284 kg/m
Horizontal length LH	600 m	8.315 m

Floating structure and riser (operation)		
Displacement Δa	5,784 ton	15.02 kg
Draft d*	450.0 m	6.236 m
Diameter	30.0 m	0.416 m
GM	18.6 m	0.258 m
KG*	397.7 m	5.511 m
Initial tension TA	38 ton	0.099 kg

Floating structure and riser (maintenance)		
Displacement Δa	3,960 ton	10.28 kg
Draft d*	419.2 m	5.810 m
Diameter	30.0 m	0.416 m
GM	34.4 m	0.476 m
KG*	388.7 m	5.386 m
Initial tension TA	42 ton	0.109 kg

Floating structure (light)		
Displacement Δa	3,000 ton	7.79 kg
Draft d**	7.7 m	0.107 m
Diameter	30.0 m	0.416 m
GM	14.3 m	0.198 m
KG**	6.0 m	0.083 m
Initial tension TA	42 ton	0.109 kg

* from riser bottom
** from structure bottom

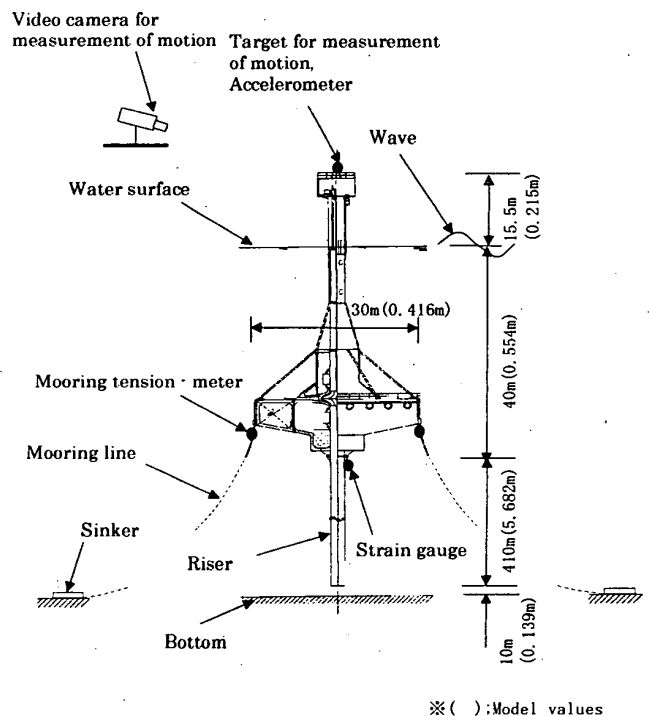


Fig. 10 Measured items and arrangement of apparatus

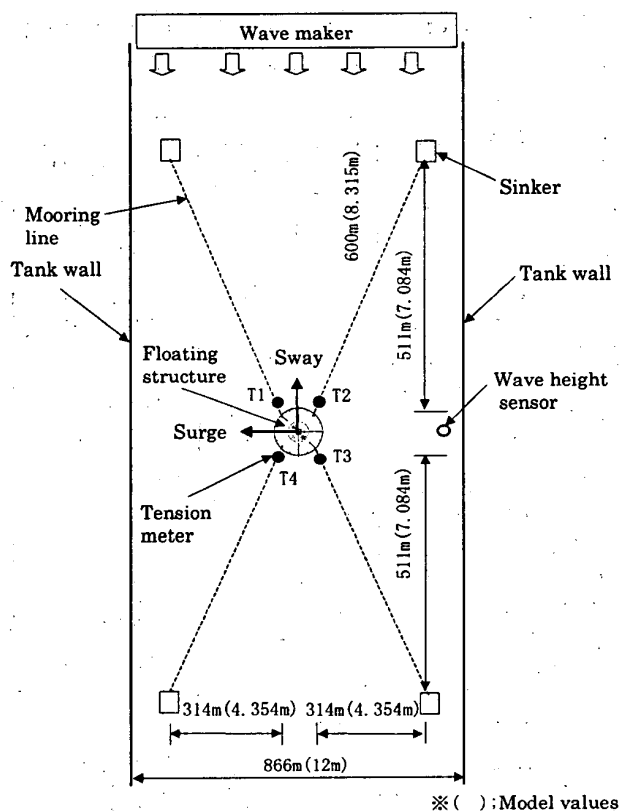


Fig.11 Arrangement of floating system in the experiments

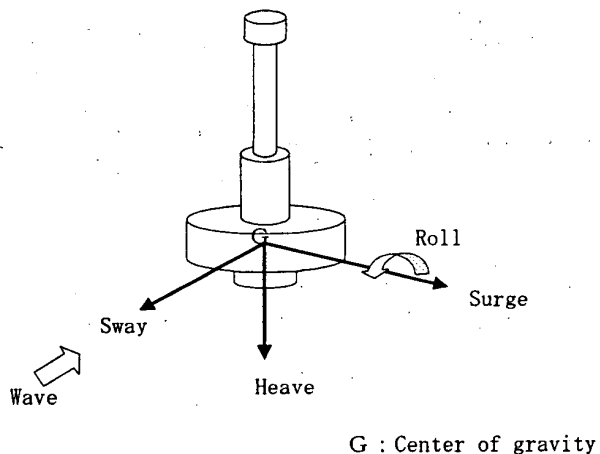


Fig.13 Definition of motion

4.2 実験結果

オペレーション状態, メンテナンス状態, 設置状態 (軽荷状態) についての解析結果を Table 7~9 に示す。解析では計測データの極値を整理し, 有義値・最大値としてまとめた。実験状況を Fig.14 に示す。

Table 7 Results of experiment at operation condition

[Irregular wave]

Item	Unit	Mean value	Crest		Trough		Double amp.	
			Significant values	Max values	Significant values	Max values	Significant values	Max values
Sway	m	-2.4	4.9	8.9	-4.9	-9.0	8.9	17.7
Heave	m	0.1	2.5	4.8	-2.4	-4.4	4.8	9.0
Roll	deg	-0.1	2.0	3.3	-2.2	-4.1	3.9	6.1
Lateral Acc.	G	0.000	0.113	0.190	-0.113	-0.201	0.215	0.391
Vertical Acc.	G	-0.001	0.041	0.070	-0.037	-0.063	0.074	0.132
Moment 1	ton·m	-14	1,272	1,955	-1,325	-2,407	2,483	3,873
Moment 2	ton·m	-48	1,010	1,475	-1,101	-1,714	2,063	3,008
Moment 3	ton·m	-29	1,454	1,957	-1,552	-2,272	2,886	4,014
Tension 1	ton	0.5	3.4	8.6	-3.4	-7.0	6.3	15.6
Tension 2	ton	0.1	3.0	5.7	-3.0	-6.0	5.7	10.9

[Regular wave]

Item	Unit	Mean value	Double amp.
Sway	m	-1.7	3.4
Heave	m	0.1	2.4
Roll	deg	-0.2	2.6
Lateral Acc.	G	0.002	0.086
Vertical Acc.	G	0.000	0.042
Moment 1	ton·m	-1	1,285
Moment 2	ton·m	-55	1,794
Moment 3	ton·m	-36	2,626
Tension 1	ton	0.4	3.2
Tension 2	ton	0.4	2.4

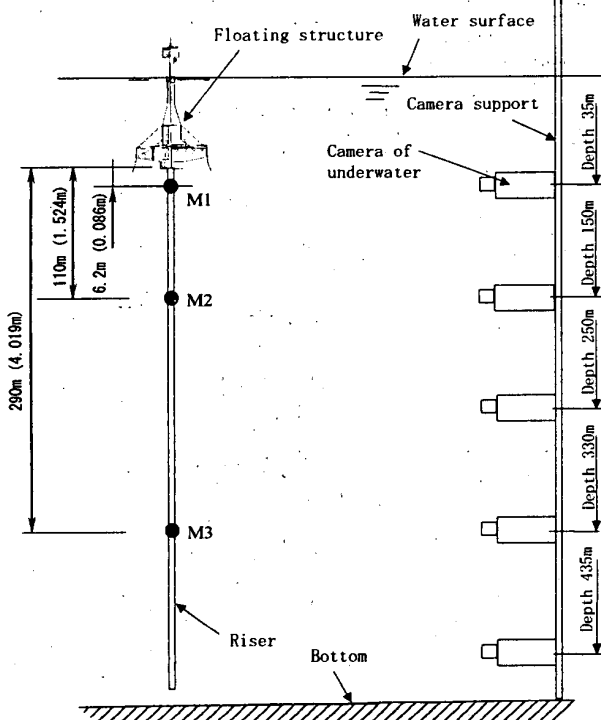


Fig.12 Arrangement of apparatus for the measurement of riser tube response

Table 8 Results of experiment at maintenance condition

[Irregular wave]

Item	Unit	Mean value	Crest		Trough		Double amp	
			Significant values	Max values	Significant values	Max values	Significant values	Max values
Sway	m	-3.6	1.2	4.1	-1.5	-4.4	2.2	4.9
Heave	m	0.1	0.4	0.9	-0.4	-0.7	0.8	1.4
Roll	deg	1.5	2.8	5.2	-2.6	-4.3	4.5	7.9
Lateral Acc.	G	0.003	0.074	0.129	-0.074	-0.148	0.146	0.252
Vertical Acc.	G	0.000	0.033	0.050	-0.031	-0.053	0.052	0.121
Moment 1	ton·m	-182	502	1,091	-494	-1,005	964	1,813
Moment 2	ton·m	-46	197	347	-225	-383	402	693
Moment 3	ton·m	-13	524	1,030	-554	-1,147	1,072	2,177
Tension 1	ton	0.9	1.9	3.5	-2.0	-3.9	3.7	6.1
Tension 2	ton	-0.1	1.7	2.9	-1.8	-3.4	3.2	5.4

Table 9 Results of experiment at light condition

[Irregular wave] (Mean wave period : 8sec)

Item	Unit	Mean value	Crest		Trough		Double amp	
			Significant values	Max values	Significant values	Max values	Significant values	Max values
Sway	m	-0.9	0.7	1.5	-0.6	-1.5	1.1	2.4
Heave	m	-0.1	0.5	1.0	-0.6	-1.0	1.1	2.0
Roll	deg	-0.0	2.3	4.4	-2.3	-4.0	4.5	7.3
Lateral Acc.	G	0.000	0.042	0.074	-0.044	-0.062	0.083	0.129
Vertical Acc.	G	-0.001	0.028	0.045	-0.029	-0.054	0.054	0.085
Tension 1	ton	0.5	2.4	4.1	-2.4	-3.7	4.6	7.7
Tension 2	ton	0.4	2.0	3.1	-2.0	-3.6	3.7	5.9

[Irregular wave] (Mean wave period : 6sec)

Item	Unit	Mean value	Crest		Trough		Double amp	
			Significant values	Max values	Significant values	Max values	Significant values	Max values
Sway	m	-3.6	2.8	3.5	-3.4	-4.4	5.1	7.5
Heave	m	-0.1	0.5	0.9	-0.5	-0.8	1.0	1.6
Roll	deg	0.9	3.1	5.2	-3.1	-4.9	5.9	8.6
Lateral Acc.	G	-0.001	0.068	0.104	-0.066	-0.098	0.132	0.197
Vertical Acc.	G	-0.002	0.033	0.051	-0.034	-0.052	0.065	0.096
Tension 1	ton	0.7	3.4	5.4	-3.4	-5.7	6.7	10.3
Tension 2	ton	0.1	2.3	3.9	-2.4	-3.9	4.6	7.7

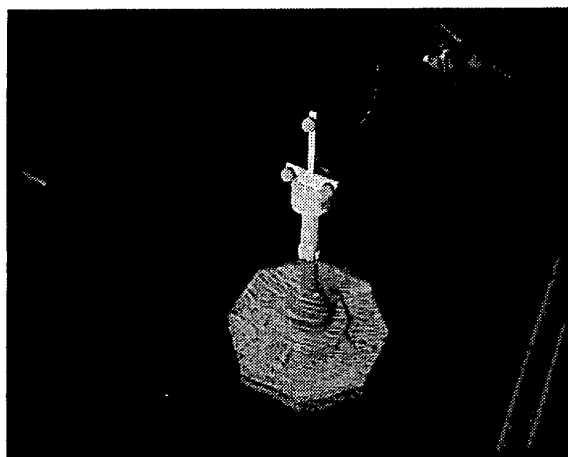


Fig.14 System model under measurement in irregular waves (operation condition)

実験結果によれば、オペレーション状態の設計波浪条件である有義波高 10m, 平均波周期 14sec において左右揺れは平均値-2.4m を中心に最大±9m, 横揺れは平均値 0° を中心に±4° 程度, 曲げモーメントはライザー取り付け部で最大 2400ton·m (応力複振幅 22.3kg/mm²), 係留力は平均張力(38ton)+9ton, -7ton 程度となった。

また、メンテナンス状態では設計波浪条件の有義波高 1.5m, 平均波周期 6sec において左右揺れが平均値-3.6m を中心に約±4m 程度, 横揺れは±5° 程度, 曲げモーメントはライザー中央よりやや下部 (M3) および躯体取り付け部 (M1) で 1100ton 程度, 係留力は平均張力 42ton±4ton 程度となった。さらにライザーが付いていない有義波高 1m, 平均波周期 6sec 及び 8sec の設置状態において左右揺れ±4m, 横揺れ±4° 程度となることがあり動揺がやや大きく作業時に注意を要すると思われる。

4.3 計算結果との比較

水槽試験の目的の一つは設計に使用している計算手法を検証することである。本節では、水槽試験と同じ条件にて実施した理論計算結果と水槽試験結果を比較し、計算結果の推定精度を評価して手法の妥当性について検討した。

本システムでは躯体に比べて係留系の規模が相対的に大きく、躯体の動揺に及ぼす係留系の動的挙動の影響を無視できないと考えられたため、係留系を 3 次元ランブドマス法³⁾にてモデル化し、躯体～チェーンの連成挙動として解析した。

不規則波中での躯体の動揺および係留力の最大値について、計算結果と実験結果を比較して Fig. 15, 16 に示す。図中、横軸は平均波周期を表し、○, △, □印は計算結果, ●, ▲, ■印は試験結果を表している。左右揺れ, 横揺れで平均波周期 14sec のときに計算結果の方が運動が小さいのは、躯体とライザー管を一体の剛体とみなし計算を行ったためと思われる。

躯体動揺およびチェーン軸力の計算値と実験値は比較的良好に対応しており、検討に使用する手法が妥当であると言える。

規則波中でのライザー管の挙動について、水深方向の変位分布を比較した結果を Fig. 17 に示す。また、この時の曲げモーメントの振幅を Fig. 18, Table 10 に示す。有限要素法⁴⁾による計算は、オペレーション状態、波高 5m, 周期 14sec の条件を対象に実施した。

また、計算では水槽試験で計測した躯体の動揺を用いてライザー上端の変位を合成し、この変位を強制変位として与えた。変位分布, 曲げモーメントともに計算結果と実験結果はよく対応していると言える。

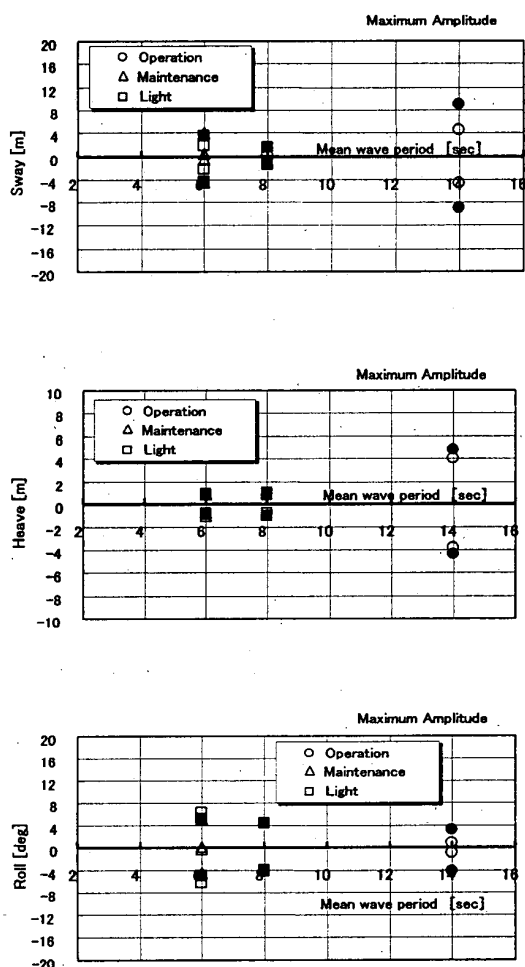


Fig.15 Comparison of calculated and measured responses in irregular waves (maximum amplitude of motion)

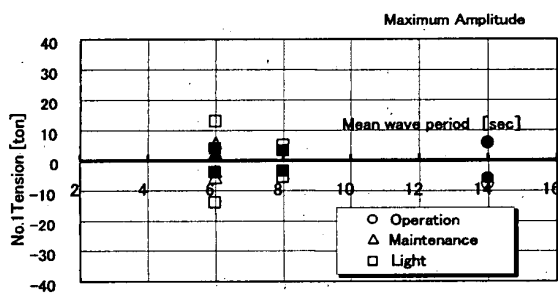


Fig.16 Comparison of calculated and measured responses in irregular waves (maximum amplitude of No.1 tension)

以上、設計に使用する係留躯体およびライザー管の挙動推定法の精度を評価するため、水槽試験対応の計算を実施し、試験結果との比較により計算結果の妥当性について検討した。この結果、両者は比較的良く対応していることが分かった。したがって、本計算法を用いて係留系の基本設計を進めることとした。

Table 10 Amplitude of bending moment on the riser tube in regular waves

	M1	M2	M3
Experiment	643 ton·m	897 ton·m	1,313 ton·m
Calculation	343 ton·m	857 ton·m	1,143 ton·m

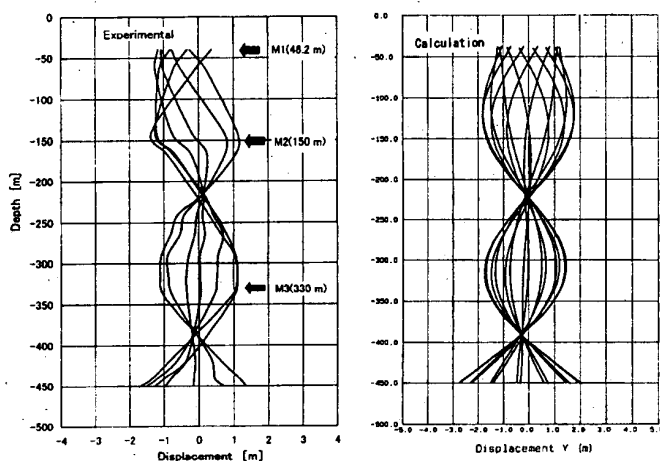


Fig.17 Calculated and measured distribution of horizontal displacement of riser tube

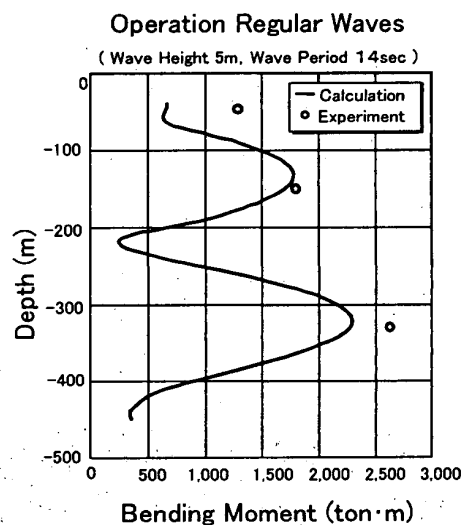


Fig.18 Comparison of calculated and measured response in regular waves (double amplitude of bending moment on the riser tube)

5. 係留系の基本設計

躯体システムの係留方式としてカテナリー係留を選定し、理論計算および水槽試験による外乱下での動揺・係留性能の検討により本システムへの適用性に関する

見通しを得た。本章では、これらの検討結果を踏まえ、設計外乱下での係留性能に及ぼすシンカー位置の影響について理論計算により検討して係留系の基本要目を決定した。

5.1 躯体システムの要目と設計外乱

初期設計の段階では円断面の躯体形状にて検討が進められていたが、搭載機器配置等の詳細検討により八角形状案に設計変更されたため、基本設計ではこの形状を対象とした。理論計算に使用した躯体の主要目を Table 11 に示す。初期検討でも述べたように、外乱条件が厳しいオペレーション状態を対象に諸検討を実施した。

Table 11 Particulars of floating structure for the calculation

Conditon	Operation
Draft d [m]	40.0
Displacement Δ [ton]	5,784

Table 12 Environmental conditions for the calculation

Current	Wind	Irregular waves
1.6 kn (surface) 0 (sea bottom)	50m/sec	Significant wave height 10m Mean wave period 14sec

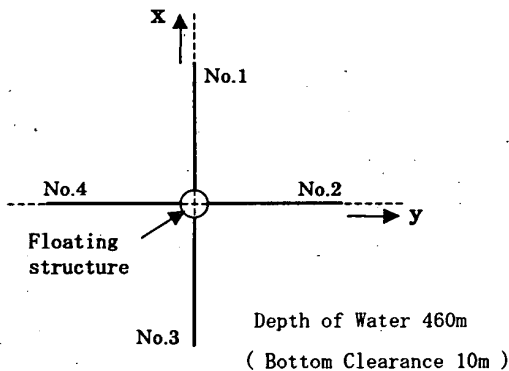


Fig.19 Arrangement of mooring chains

Fig 19 に示すようにコスト削減を目的として本システムの係留系は、4本の係留チェーンにより構成した。本システムの設置海域の水深は460~550mであるが、係留系が最も緩く躯体の移動量が大きくなる水深460mの場合について検討することとした。

係留系の検討に使用する外乱条件は、設置海域での調査結果に基づいて Table 12 のように設定した。

5.2 係留性能の検討

このような躯体の基本仕様に対して係留チェーンの要目を決定するため、以下に示すように、シンカー位置の影響に関する検討を実施した。

初期検討にて示したようにコストやハンドリング・躯体の排水量等を考慮して 56 mm 径のチェーン（ケース3）を選定した。基本設計においても同じ要目のチェーンを用い、シンカー位置を 1,000 m~1,200 m の間で種々変更して時刻歴シミュレーションにより躯体の応答と係留力を求め、シンカー位置の影響について検討した。

外乱方向 90°（チェーン No.2 の方向より受ける状態）における躯体の動揺および係留チェーン張力の計算結果を Fig. 20~21 に示す。これらの結果より次のことが言える。

- ① Fig. 20 に示すように平均移動量（Sway の平均値）はシンカー位置が躯体に近づくにつれて大きくなる。平均傾斜（Roll の平均値）はシンカー位置によらず、約 0.6° で一定である。

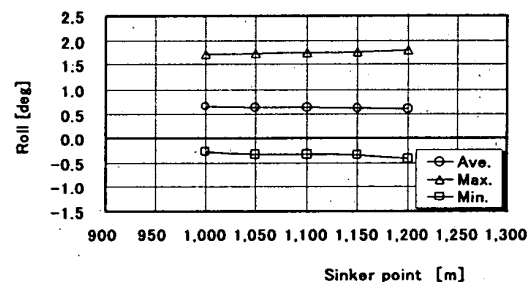
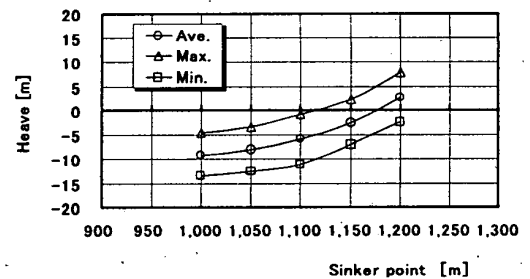
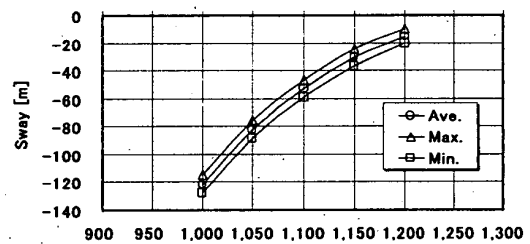


Fig.20 Motions of system under the designed external disturbance for the various sinker position

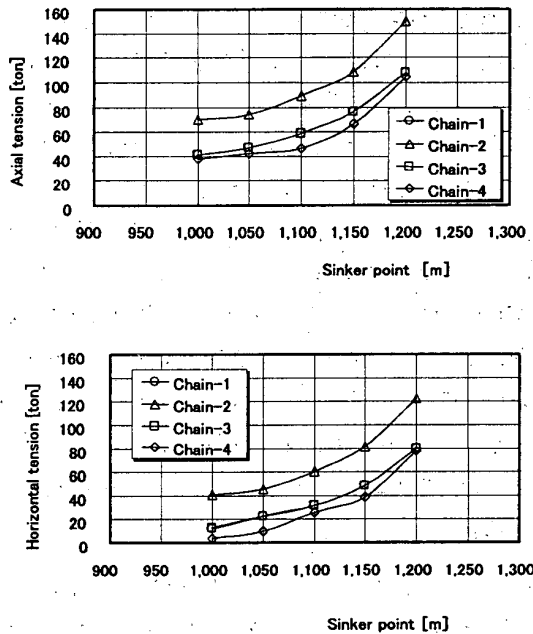


Fig.21 Chain tensions under the designed external disturbance for the various sinker position

- ② 波浪による変動成分はシンカー位置によらず同程度の大きさである。
- ③ Fig. 21 に示すチェーン張力の最大値はシンカー位置が躯体に近づくにつれて小さくなり、シンカー位置が近くなると張力変化率も小さくなる。
- ④ 例えばシンカー位置が 1,150 m の場合、設計外乱下での平均横移動量は約 30 m、最大張力は約 110 ton (静穏時の水平張力は約 30 ton) であり、Table 3 のケース 3 に示す第 3 種チェーン使用時の安全率は約 2.3 となる。

6. 結 言

本研究では深層水を汲み上げ海洋を肥沃化させる係留された躯体装置について動揺特性を実験的に把握評価すると共に予測計算の一致度について検討を行った。この結果次の結論を得た。

- (1) 躯体排水量約 5,800 トン、ライザー管長さ約 400m 深層水汲み上げ装置の波浪中動揺実験の結果有義波高 10m、平均波周期 14sec という厳しい海象条件において、横揺れがほとんど無く良好な動揺性能を有すること、4 本の係留索に作用する軸力変動も 10ton 程度に収まり装置の成立性が確認できた。
- (2) ライザーの弾性模型を用いたこの水槽試験にて最大曲げモーメントが約 2,400ton・m となり当初計画したライザーの許容値を満足していること

が確認できた。

- (3) 動揺についての実験結果は係留系をバネマス系で表現した躯体・係留連成計算結果と良好に一致し計算手法の妥当性が検証された。
- (4) またライザー挙動についても有限要素法による挙動解析結果は実験結果と十分な精度で一致しており適用性が検証された。
- (5) 以上の結果により現在計画されている深層水活用型の海洋肥沃化装置について動揺・係留の面から成立性が確認されると共に現有の計算手法の妥当性が検証された。

謝 辞

本研究は社団法人マリノフォーラム 21 の深層水活用型漁場造成技術開発の一環として実施したものである。

本研究を進めるにあたり、終始貴重な助言を頂いた東京大学教授高橋正征委員長をはじめ運営委員会各位、マリノフォーラム 21 関係者の方々、並びにワーキンググループ各メンバーに対し深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 荻原誠功, 栗島裕治, 宮部宏彰, 大内一之: 「深層水汲み上げ装置の概念設計」, 日本造船学会, 第 16 回海洋工学シンポジウム, 2001 年 7 月
- 2) Seiko Ogiwara, Yuji Awashima, Hiroaki Miyabe, Kazuyuki Ouchi: Conceptual Design of a Deep Ocean Water Upwelling Structure for Development of Fisheries, ISOPE OMS-2001, Sept. 2001
- 3) Yojiro Wada, Yoichi Yamaguchi: Analysis of Dynamic Response of a Moored Tanker and Mooring Lines in a Single Point Mooring System, 7th International Symposium on Practical Design of Ship and Mobile Units (PRADS '98), 1998
- 4) 尾崎雅彦, 安川宏紀: 「水中線状構造の挙動推定法とその応用」, 三菱重工技報 Vol. 30, No.1 1993