

沖合浮体式波力装置「マイティーホエール」実海域実験 その1 実験システム概要及び係留設置工事

鷲尾 幸久*¹ 大澤 弘敬*¹
永田 良典*¹ 藤井 文則*¹
古山 裕喜*² 藤田 俊助*¹

海洋科学技術センターでは、平成10年9月10日より沖合浮体式波力装置「マイティーホエール」プロトタイプによる実海域実験を三重県度会郡南勢町五ヶ所湾沖合において開始した。プロトタイプは、幅30m、長さ50m、排水量4,380 tonの浮体式振動水柱型空気タービン方式の波力発電装置である。浮体の波上側に水線面積80m²の空気室3室を装備している。各空気室には、タンデム型ウェルズタービンを採用したタービン発電機を装備し、合計の最大発電能力は110kWである。浮体構造及び係留システムは実験海域における50年再現期間での自然環境条件により設計・建造を行った。平成10年5月末に本体の建造を終了し、6月18日より曳航作業を含めた実験海域への係留設置工事を開始し、7月13日に終了した。その後、各搭載機器の調整作業を行い、実験を開始した。本報は、実海域実験の第1報として、実験システムの概要及び係留設置工事について報告する。

キーワード：波浪エネルギー、波力装置、振動水柱、再生可能エネルギー

The Offshore Floating Type Wave Power Device "Mighty Whale" Open Sea Tests; Part1 : An overview of the experimental system and the mooring operations

Yukihisa WASHIO *³ Hiroyuki OSAWA *³
Yoshinori NAGATA *³ Fuminori FUJII *³
Hiroki FURUYAMA *⁴ Shunsuke FUJITA *³

Japan Marine Science and Technology Center (JAMSTEC) began open-sea tests on the prototype of the offshore floating type wave power device "Mighty Whale" on the 10th of September 1998, at the offing of Gokasho Bay, Nansei Town, Watarai District, Mie Prefecture.

The prototype is a floating type wave power device based on the oscillating water column (OWC) principle, and is equipped with air turbines. The prototype dimensions are 30m width X 50m length, with a displacement of 4,380 tons. The device has three OWC chambers with an area 80m² each, distributed breadth-wise and facing the predominant wave direction. Each chamber has a turbogenerator system based on a tandem-type Wells air turbine. The maximum total power output is 110 kW.

The design conditions for the prototype were chosen to be those resulting from a once-in-50 years storm.

Prototype construction was completed by the end of May 1998. Following construction, the prototype was towed to the test location, and final positioning and mooring operations were completed by the 13th of July 1998. The open sea tests began on the 10th of September, after all the adjustments on the measurement system were completed.

This paper presents an overview of the experimental system, and provides an outline of the mooring operations.

Key Words : wave energy, wave power device, oscillating water column, renewable energy

- * 1 海洋技術研究部
- * 2 企画部
- * 3 Marine Technology Development
- * 4 Planning Department

1 はじめに

「マイティーホエール」は、主に波の上下運動を利用して波エネルギーを効率良く吸収してこれを電気エネルギーに変換するだけでなく、圧縮空気を造り、それを利用することにより海域環境の改善などに役立てると共に、入射してくる波を消波し、装置後方の海域を静穏化して養殖漁場等海洋空間の創造に貢献する機能が期待されている振動水柱型空気タービン方式の沖合浮体式波力装置である。

海洋科学技術センターでは、プロジェクト研究「海洋エネルギー利用技術の研究開発」のテーマとして、昭和62年より「マイティーホエール」の研究開発を開始し(ただし昭和62～63年度はターミネータ型波力装置として研究開発)、現在までの研究成果を実用に結び付けるための実海域実験の実施を目的に、平成8年度より「マイティーホエール」プロトタイプ建造を開始した。「プロトタイプ」は平成10年5月に建造を完了、同年7月に実験実施海域である三重県南勢町五ヶ所湾湾口沖合に係留設置された。設置後、各搭載機器の調整を行い、同年9月10日に実験開始式を行い、上記機能・安全性及び経済性を評価するため、約2年間の実海域実験を開始した¹⁾。

本報告は、沖合浮体式波力装置「マイティーホエール」実海域実験の第1報として、実験システムの概要及び係留設置工事について報告する。



写真1 沖合浮体式波力装置「マイティーホエール」
Photo 1 Offshore Floating Type Wave Power Device "Mighty Whale"

2 沖合浮体式波力装置「マイティーホエール」の概要²⁾

沖合浮体式波力装置「マイティーホエール」は、写真1に示すように波エネルギーを吸収する空気室が装置の前面(波上側)に入射波の波峰と平行に複数個設置されており、その後方は装置の波浪中の動揺を抑えるためのスロープを持つ「鯨」のような外観をした浮体式海洋構造物であり、6条の係留索により係留される。各空気室は、図1の作動原理図に示すように、波を取り入れるために水面下が波の入射方向に開放されている。さらに、空気室の上にはノズルと呼ばれる開孔があり、この上に空気タービン・発電機が搭載される。波の入射により空気室の水面が上下し、これにより空気室上のノズルを通過する高速の往復空気流が発生する。この空気流を利用して、空気タービン及びそれに接続する発電機を駆動することによりエネルギーを取り出す機構になっており、振動水柱型空気タービン方式と呼ばれる。

3 実験システム

3.1 「マイティーホエール」プロトタイプ

3.1.1 開発経緯

「マイティーホエール」プロトタイプについては、本研究開発が開始された昭和62年度から5年後の平成3年度にそれまでの基本的な水槽実験結果及び理論検討結果よ

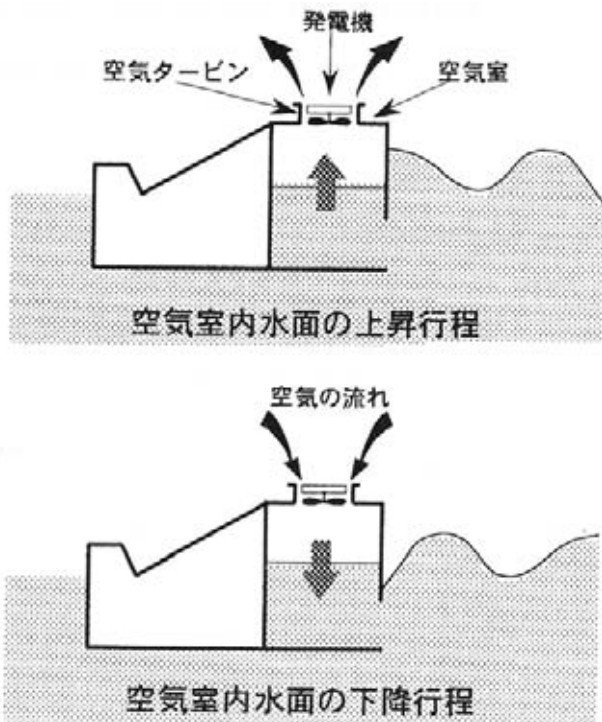


図1 作動原理図
Fig. 1 Operating Principal

り基本設計を実施し、長さ60m、幅30mの浮体を開発した。これに対し建造コスト削減の観点から、さらに検討を行い、同一の波条件において波エネルギーから空気エネルギーへの1次変換効率が60m浮体とほぼ同じ性能を示す長さ50m、幅30mの浮体を開発し、実海域実験用プロトタイプの基本形状とした。これを基に平成7年度に実海域実験用プロトタイプの詳細設計を実施した。

3.1.2 設計条件

(1) 自然環境条件³⁾

プロトタイプの設計のための自然環境条件を設定するに当たり、自然環境条件の再現期間すなわち、甚大な被害をおよぼす非常に大きな台風及び低気圧が襲来する可能性が考えられる期間について検討した。自然環境条件の再現期間は、構造物の重要度、建造費、維持・管理費及び社会的条件等を十分に考慮して設定する必要がある。本装置は、沿岸海域に設置されるため社会的な影響は大きい。このような社会影響を考慮すると、本装置の自然環境条件設定のための再現期間は、近接する港湾・漁港施設及び構造物の設計のための再現期間と同等以上で考える必要がある。一般に、港湾・漁港施設及び構造物の再現期間は50年(50年に1回襲来する可能性のある大きな台風等を想定)としている場合が多く、従って本装置の再現期間も50年とした。

自然環境条件を表1に示す。なお、各環境条件は以下に示す方法で求めた。

表1 自然環境条件
Table 1 Environmental Parameters

定常風速	(10 分間平均風速)	36.4 m/sec
	(1 分間平均風速)	42.2 m/sec
	(1 時間平均風速)	34.2 m/sec
潮流		1.2 m/sec
最大有義波高	H _{1/3} max	8.0 m
最大有義波周期	T _{1/3} max	10~15 sec
設置水深		40.0 m
潮位		
H.W.L		1.859 m
L.W.L		0.029 m

① 風速

風速の推算は、設置予定海域の五ヶ所湾湾口部の風速観測データが少ないため、最も近い気象観測所である潮岬の過去44年間(1950年~1993年)のデータを用いて、風の50年再現期待値を推算した。

なお、潮岬は紀伊半島最南端の外洋に面し、台風の進路に当たるため、内陸部に位置する五ヶ所湾の風速は潮岬の風速より小さく、係留システムの設計に対し安全側になるものと考え、潮岬の風速を代用した。

② 波浪

波浪の推算は、風速と同様に、設置予定海域の波浪観測データが少ないため、潮岬の過去44年間(1950年~1993年)のデータとT. Savilleの方法による吹送距離

$$\frac{gH_{1/3}}{U_{10}^2} = 0.3 \left[1 - \left\{ 0.004 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{1/2} \right\}^{-2} \right] \dots \dots (1)$$

$$\frac{gT_{1/3}}{2\pi U_{10}^2} = 1.37 \left[1 - \left\{ 1 + 0.008 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{1/3} \right\}^{-5} \right] \dots (2)$$

から、一般に認知されている(1)式及び(2)式に示すS-M-B法(Sverdrup-Munk-Bretshneider法)を用いて行った。

ここで、g:重力加速度、H_{1/3}:有義波高、U₁₀:海上10m高さにおける10分間平均風速、F:吹送距離、T_{1/3}:有義波周期である。

③ 潮流

潮流は、潮流速が最大となる台風発生時期に限定し、五ヶ所湾海象調査・流況調査の流況観測結果の最大値と、吹送流を考慮して推算した。その結果、潮流速は0.6m/s、吹送流速は0.56m/sとなり、設計潮流速として1.2m/sとした。なお、吹送流は設計風速と五ヶ所湾の緯度より推算した。

(2) 適用規則・規格

プロトタイプは推進器を持たず、係留・設置される浮体式構造物であるが、係留される際にも本装置が自ら積極的な位置保持を行うための装置は装備されない。また、計測データの回収や浮体の点検整備時を除いて基本的に無人運転となることから“船舶”の扱いは受けず、したがって船舶安全法の適用からは除外される。このため、本装置はブイとしての取り扱いとなり、衝突防止等の安全確保の面から航路標識法が適用され、本法に則した標識灯等の装備が義務付けられた。また、通常の船舶や海洋構造物が事故等の対処のための保険を掛ける際に必要となる船級登録は、本装置には必要ない。ただし、浮体の設計上、類似の海洋構造物が入級する際に適用される「日本海事協会(NK)鋼船規則P編 海洋構造物及び作業船等」に準拠することとし、設計審査及び建造検査をNKに委託して実施した。このP編は、「貨物の輸送を主目的とせず、特定の作業に従事する鋼製の浮遊式構造物または、特定の海域において長期間或いは半永久的に着底または係留される構造物」の入級登録に際し適用されるものである。

建造にあたり適用する船級以外の各規格としては、以下のとおりとした。

- JIS (日本工業規格)
- JEC (電気学会電気規格調査会標準規格)
- JEM (日本電気工業会標準規格)
- SBA (蓄電池協会規格)

上記規定以外については、海洋科学技術センターの標準もしくは製作メーカーの標準によるものとした。

さらに、係留チェーンについてはNKの認定証書を取得したものをを使用した。

3.1.3 本体構造⁴⁾

浮体本体は波エネルギーを吸収する空気室3室、浮体前後部及び左右の浮力タンク、浮体後部のフィン及びこれらをつなぐ構造部からなる。浮体本体の一般配置図を図2に、また、主要寸法を表2に示す。

浮体前部甲板には機械室を設け、その中にタービン発電機3台、ディーゼル式補助発電機1台、蓄電池1式及び空気圧縮機1台を配置している。また、前部中央の浮体内部に計測室及び制御室を設け、計測システム機器

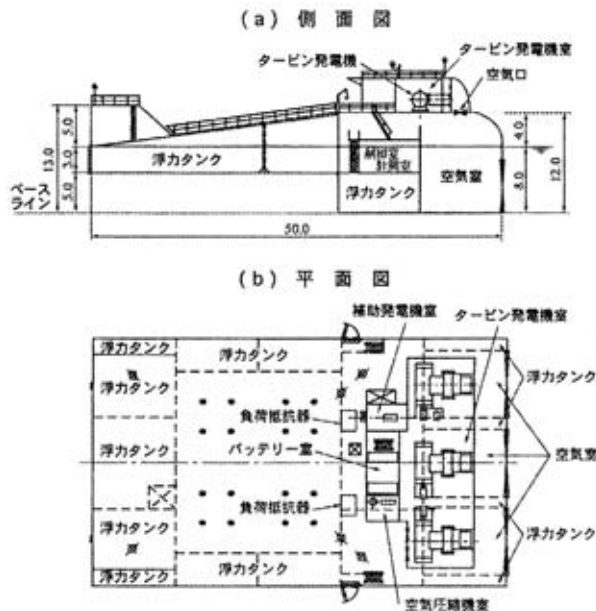


図2 一般配置図
Fig. 2 General arrangement

表2 プロトタイプ的主要寸法
Table 2 Principal Particulars of prototype

長さ (Lm)	50.0m	
幅 (Bm)	30.0m	
型深さ (Dm)	12.0m	
計画喫水 (dm)	8.0m	
空気室	長さLm×幅Bm×高さHm 10.0m×8.0m×12.0m 3室	
排水量	4,380ton	
総荷重量	1,290ton	
	浮体鋼構造重量	1,121ton
	浮体積装重量	84ton
	タービン発電機	80ton
	電気・計装	5ton
浮力タンク容積	5,580m ³	
	No.1 浮力タンク(浮体前部)	3490m ³
	No.2 浮力タンク(浮体後部)	1950m ³
	および中央部左右舷	
	No.3 浮力タンク(後部フィン)	140m ³

及びタービン発電システムの制御機器を配置している。計測室には夏季の室内温度上昇防止と除湿を目的として空調機を1台設置している。前後部浮力タンクをつなぐ甲板部(スロープ部)には開孔を設け、甲板上の空気が水面変動に合わせて流出入できるようにしている。

本体構造の設計にあたっては、表3に示すように波高/波長の比が1/10の砕波限界に近い波浪のもとでの曲げ、振り、水中部変動圧力等の波浪外力を3次元特異点分布方法他により求め、これを外力条件とした構造解析を行って本体構造強度の検討を行った。図3に縦波中におけるプロトタイプの曲げモーメント及び剪断力の計算結果の1例を示す。この結果を用い各部の発生応力を計算し、部材強度が許容応力以下であることを確認した。表4には構造解析計算による各部の発生応力を示す。

本体各部には耐用年数5年の塗装を行い、浮体側面と正面には鯨の図柄を施した。浮体底部及び外板の喫水7.5mより下方、空気室内部及び浮力タンク内部はタールエポキシ塗料を塗装し、甲板、機械室頂部及び外壁、No.3浮力タンク外面やその他外板の喫水7.5mより上方の海面より浮上している部分には、エポキシ系船底錆止め塗

表3 構造解析のための波浪条件
Table 3 Wave condition for structural analysis

波周期	4秒~16秒の範囲
波高	波長の1/10、但し16mを越えないものとする
波方向	浮体本体の正面から真横方向までの90度の範囲
風荷重	考慮せず

表4 構造解析による発生応力
Table 4 Stress by structural analysis

	縦波中曲げ			横波中曲げ			斜め波中曲げ			変動水圧		
	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③
A.E(乗降尾)	-	-	-	0.92	-0.53	*	-	-	-	-	-	-
FR.1/2	3.04	-1.68	4.20	1.83	1.00	1.54	0.78	0.40	0.65	16.19	8.79	17.90
FR.1	0.92	-0.44	*	1.04	-0.58	*	2.75	-1.25	*	5.16	2.53	*
FR.1 1/2	1.43	0.64	1.96	0.31	-0.1	0.41	0.26	-0.13	0.29	12.00	-6.43	7.85
FR.2	3.25	1.59	4.60	0.33	-0.13	0.44	0.61	-0.33	0.51	6.47	3.53	5.22
FR.2 1/2	2.03	1.06	2.80	0.30	-0.15	0.41	0.96	0.46	0.81	20.11	-10.90	14.70
FR.3	0.91	0.51	*	1.42	-0.81	*	-	-	-	7.44	3.96	*
FR.3 1/2	10.58	5.28	10.07	6.89	3.96	5.30	0.66	0.26	0.80	18.96	9.33	18.38
FR.4	0.72	0.41	*	0.97	-0.55	*	1.73	-1.00	*	-	-	-
FR.4 1/2	4.92	-2.73	3.95	0.40	-0.17	0.40	1.85	-0.93	3.31	11.06	-2.58	2.88
F.E(船首)	-	-	-	0.49	0.15	*	3.82	1.58	*	19.42	-9.47	*
船体外板	1.47	-0.58	*	0.54	-0.31	*	5.50	3.18	*	-	-	-
船底外板	0.92	0.32	*	0.98	-0.36	*	6.16	2.98	*	8.58	-	-
DNM.BOTTOM	0.86	0.75	*	0.89	0.40	*	4.30	-2.33	*	8.81	4.36	*
上甲板	1.40	0.75	*	0.89	0.40	*	4.30	-2.33	*	8.81	-4.93	*

- ① : 最大等価応力 (kg/mm²) 最大値 20.11 < 許容値 21.60
- ② : 最大剪断応力 (kg/mm²) 最大値 -10.90 < 許容値 12.73
- ③ : 最大軸応力 (kg/mm²) 最大値 18.38 < 許容値 19.20
- * : 皮板の軸応力のため省略
- : モデルの拘束部分のため省略

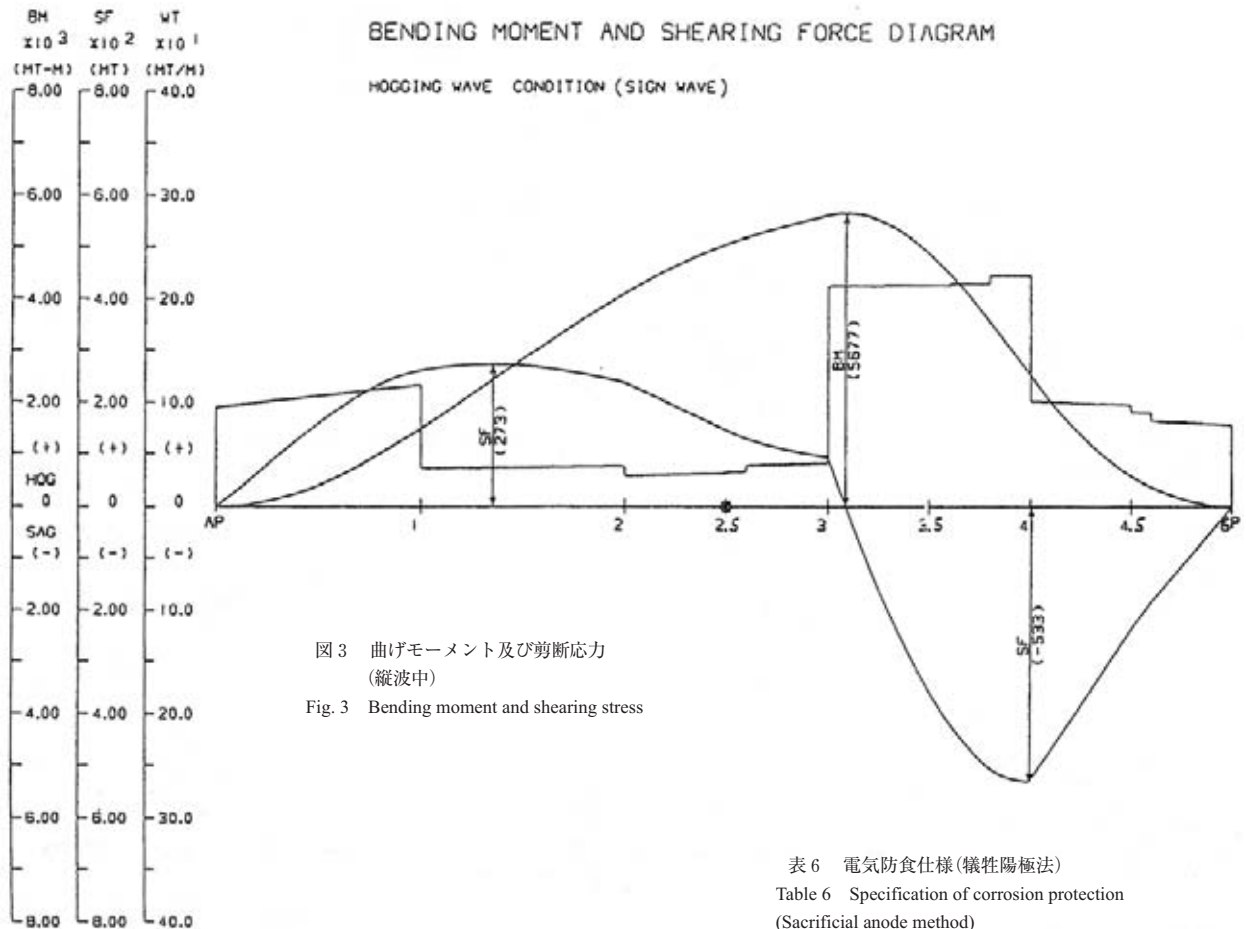


図3 曲げモーメント及び剪断応力 (縦波中)
Fig. 3 Bending moment and shearing stress

表5 塗装仕様
Table 5 Specification of painting

塗 装 箇 所	ショップ プライマ	塗料選別および塗装回数				
		1	2	3	4	5
外 板	船底	TE	TE			
	船側外板 *1	IEP	IE			
	船側外板 *2	EAC	ETP	ETP		
空気室内面	IEP	IE	IE			
甲 板	甲板	EAC	ETP	ETP		
	甲板下基盤部	IEP	IE	IE		
	機械室頂部	EAC	ETP	ETP		
	機械室外壁	IEP	EAC	ETP	ETP	

注 : 1) *1 喫水7.5mより下方 *2 喫水7.5mより上方
2) 没水部は電気防食を併用
3) 標準乾燥塗膜 (エタロン/COAT)
EAC 125
ETP 50
TE 150
4) IEP:無機亜鉛プライマ
EAC:エポキシ系船底錆止塗料
ETP:エポキシ系外舷塗料
TE:チールエポキシ塗料

料及びエポキシ系外舷塗料を塗装した。また、浮体内部は主として油性系錆止め塗料と仕上げ塗料を塗装した。表5に塗装仕様を示す。さらに外板水中部、空気室内部及び浮力タンクの注水レベル下に鋼材表面の腐食を防止するため、防食用の犠牲陽極(耐用年数5年)を取付けた。表6に電気防食仕様を示す。本体構造の耐用年数は塗装及び犠牲陽極の適正な管理のもとで15年である。

表6 電気防食仕様(犠牲陽極法)
Table 6 Specification of corrosion protection (Sacrificial anode method)

方 式	
防食方式	流電陽極方式(塗装と併用)
防食電流密度	15mA/m ² : 外板 50mA/m ² : 空気室 5mA/m ² : 浮力タンク内の注水レベルより下方
アノード	
アノード材質	アルミニウム合金
アノード耐用年数	5年
取り付け方法	溶接
発生電流	1.06A
寸 法	64/89×89×1,060
質 量	正味 19.0kg/個 総量 22.7kg/個
外板及び空気室	
区 画	防食面積 (m ²) アノード数 (個)
外 板	2,150 36
空気室 (3室)	1,200 57
浮力タンク	
区 画	防食面積 (m ²) アノード数 (個)
No.1浮力タンク	1,590 12
No.1浮力タンク	1,590 12
No.1浮力タンク	1,770 14
No.2浮力タンク	1,240 8
No.2浮力タンク	1,240 8
No.2浮力タンク	490 4

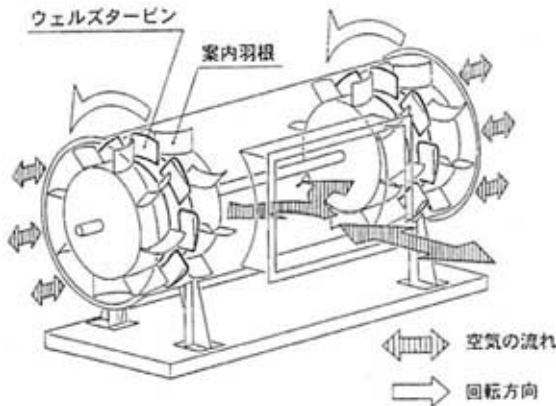


図4 タンデム式ウェルズタービンの構造
Fig. 4 Schematic of tandem-type Wells turbine

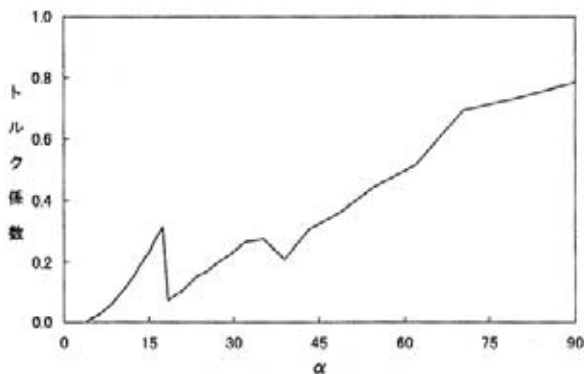


図5 タービントルク係数
Fig. 5 Turbine torque coefficient

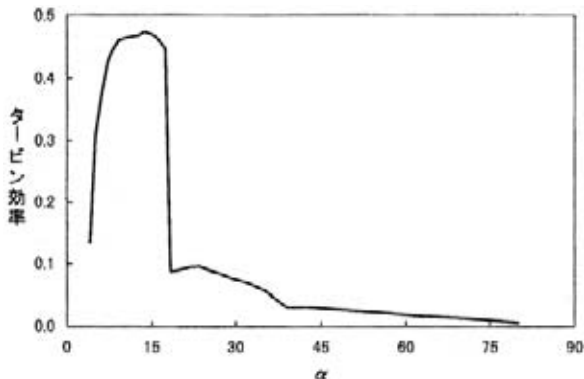


図6 タービン効率
Fig. 6 Turbine efficiency

表7 タービンの諸元
Table 7 Specification of turbines

ウェルズタービン装置：3式	
定格出力	30kW 900rpm時
最大回転数	2000rpm
タービン構成	1軸当たりタービン2式によるタンデム構成(ガイドベーン付き)
タービン翼形状	NACA0021 (8枚翼)
タービン外径	1700mm
ハブ径	1200mm
材質	耐食アルミニウム合金
重量	約480kg/枚

表8 主要機器の仕様
Table 8 Specification of principal apparatus

安全弁：3台	
電動昇降式	
発電機：4式	
定格出力	30kW×2台 900rpm以上 900rpm以下は低減出力 50kW 1200rpm以上 1200rpm以下は低減出力 10kW 900rpm以上 900rpm以下は低減出力 注) 50kW,10kW 発電機は電氣的切換により使用し、2台同時使用は行わない。
発電範囲	500~2000rpm
発電機方式	三相交流かご形誘導発電機
交流直流変換装置	PWM整流器 (PWM: Pulse Width Modulationの略)
直流出力電圧	DC300V
負荷給電用インバータ装置：2式	
入力電圧	DC260~320V
出力	20kVA AC200V 3相 60Hz
運転方式	2台並列運転
無停電電源装置：1式	
入力	AC200V 3相 60Hz
出力	10kVA AC100V 単相 60Hz
運転方式	停電時商用からバッテリーへ無断切換
バッテリー保持時間	10分間
空気圧縮機用インバータ装置：1式	
入力電圧	DC260~320V
出力	11kW AC200V 3相
周波数	0~60Hz
バッテリー：1式	
形状	陰極吸収式シール型据置式鉛蓄電池
容量	500AH
浮動充電電圧	DC296V (132セル)
補助発電装置：1式	
形状	ディーゼル駆動式交流発電機
出力容量	20kW
出力電圧	DC294V±15% (3相環ブリッジ回路による整流後)
始動方式	専用バッテリーによる電気式
使用燃料	軽油 (JIS2号相当)
負荷抵抗器：2式	
構造	屋外自己冷却式グリッド抵抗器
容量	1号抵抗器 45kW 2号抵抗器 65kW
制御	1号抵抗器は無段階制御 2号抵抗器は順次投入解列制御

3.1.4 タービン・発電機システム⁵⁾

波エネルギーから変換された空気エネルギーを電気エネルギーに変換する2次変換装置として、各空気室上に空気タービン及び発電機を搭載する。タービンに流れる空気流の方向は水面の動きに応じて変化するため、空気タービンには往復空気流中で常に一方に回転するウェルズタービンを採用している。ウェルズタービンは空気流の方向に推力を発生するため、図4に示すように同軸

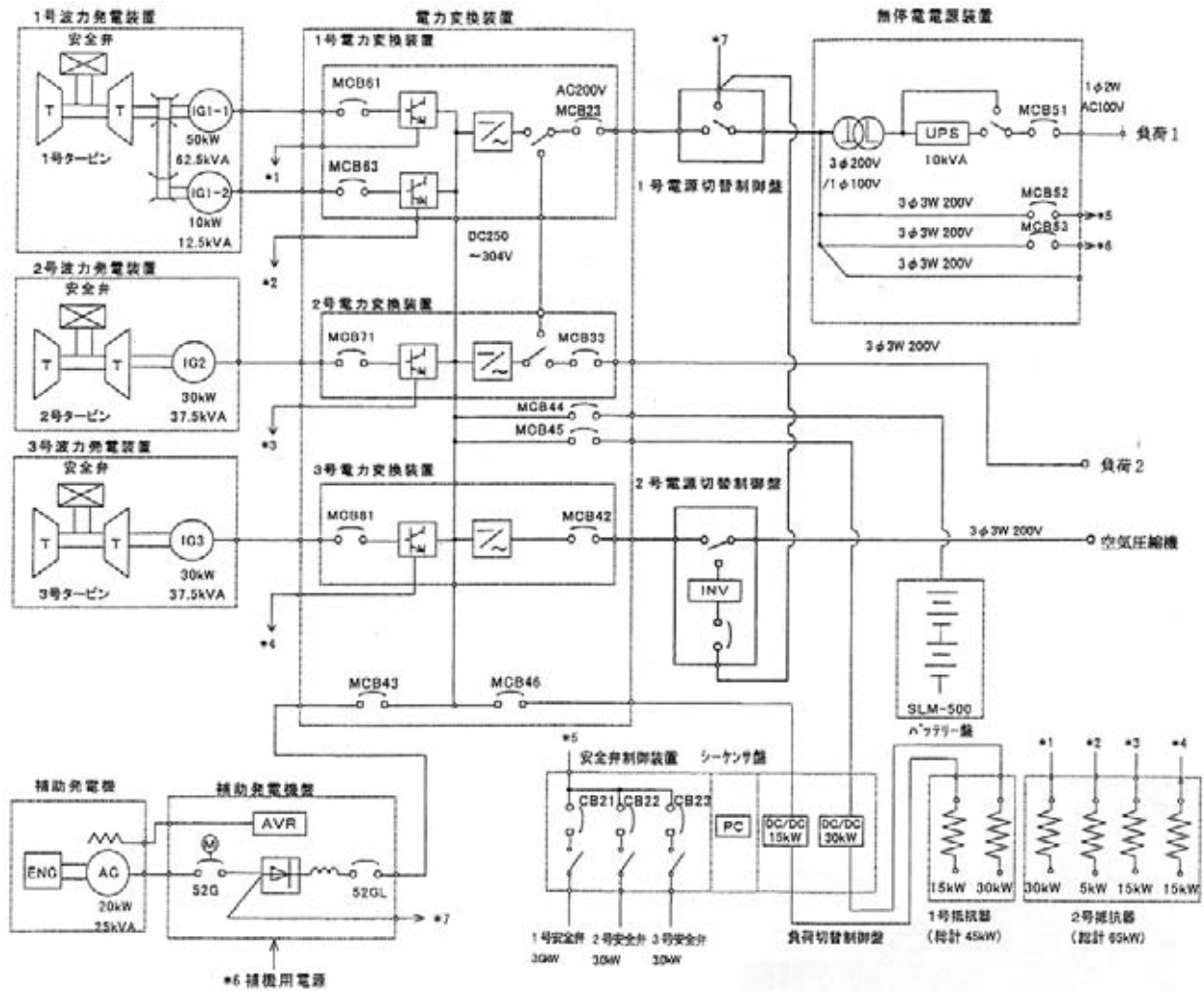


図7 電源システム系統図
Fig. 7 One-line diagram of power circuit of prototype

上に二つのタービンをタンデムに配置し、空気室から空気流を2方向に分岐してタービンに空気流を流すことにより、二つのタービンから発生する推力をキャンセルし、軸受けの軸方向に力が掛からないような構造としている。

プロトタイプに採用したウェルズタービンは案内羽根付8枚翼であり、表7にはその諸元を示す。また、図5及び図6には佐賀大学所有の往復流の発生が可能な風洞実験設備において行った模型実験により得られた同型タービンのトルク係数及び効率を示す。図6より、本タービンの最大効率は迎角15°近傍において約47%であることがわかる。タービン軸にはトルク計測器を介して発電機が取り付けられている。発電機容量は、1号タービンには写真2に示すように50kW発電機が直結され、さらにベルト駆動により10kW発電機を駆動できる並列システムとなっており、波の状況に応じて電氣的に発電機を選択が可能である。また、2号タービン、3号タービンには30kW発電機が直結されている。

本システムでは商用電源との関係がないため、補助発電機装置とバッテリーが装備されており、波力発電時は波力発電機により負荷へ給電しながらバッテリーを充電し、波力発電不可能時はバッテリーより給電し、不足分



写真2 NO.1タービン・発電機システム (50kW + 10kW)
Photo 2 No. 1 turbine and generator system (50kW + 10kW)

については補助発電機を運転し負荷へ給電することとしている。タービンの回転速度は波の高さ、周期により変動するため、発電機の出力を一旦交流から直流に変換するDCリンク方式を採用し、直流回路にバッテリーを接

続している。さらに、インバータにより直流から一定周波数・一定電圧の交流に変換して負荷に給電する。

タービンと空気室の間には安全弁があり、発電不可能な荒天時（波浪が高く、タービン・発電機が危険回転状態となる）には安全弁を遮断し機器の保護を行う。

これらの運転制御は通常自動的に行われるが、陸上からの無線遠隔操作による制御も可能である。

図7には、タービン・発電機による電源系統図を示す。表8には、タービンを除く主要機器の仕様を示す。

3.1.5 空気圧縮機システム

海域実験では波エネルギーの多目的利用を想定して、発電電力により空気圧縮機を作動し圧縮空気の生成量を計測する。このため写真3に示すように機械室船尾側に空気圧縮機室を設け空気圧縮機を1台設置している。空気圧縮機には市販の空冷式オイルレスコンプレッサーを用い、生成した圧縮空気は一旦空気槽に貯めた後、外気に放出すると同時に放出流量を計測して生成量を把握する。表9には、空気圧縮機の諸元を示す。本システムは発電量に応じて陸上からの遠隔操作指令により起動させることができる。



写真3 空気圧縮機
Photo 3 Air compressor

表9 空気圧縮機の諸元
Table 9 Specification of air compressor

空気圧縮機	種類	汎用空冷式 オイルレスコンプレッサー
	定格出力	7.5kW
	最高圧力	約7kgf/cm ²
	作動電圧	AC200V

3.1.6 自沈装置

実験実施時において、万が一係留ラインが破断するか、もしくは走錨により本体が漂流し、船舶、漁業施設及び港湾施設等に被害をおよぼす事態が想定される場合には、陸上側（陸上計測基地及び海洋科学技術センター横須賀本部）からの無線遠隔操作にて作動させることのできる自沈装置を装備する。本装置は、指令信号により図8に

示す各浮力タンクへの注水バルブが開き、浮力タンクへ注水することにより約1時間で本体を自沈させることができる。

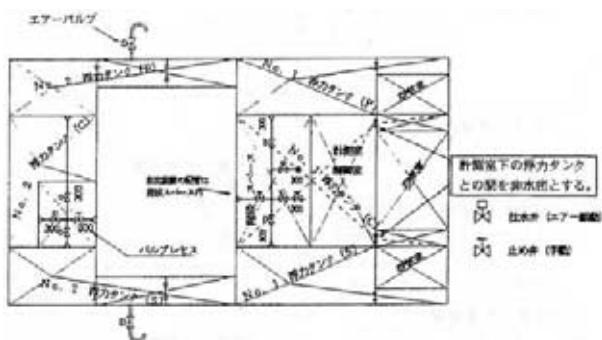


図8 自沈装置用バルブ配置図
Fig. 8 Valve arrangement for self-sinking system

3.1.7 計測・監視システム

海域実験における計測・監視システムは図9に示す構成である。「マイティーホエール」本体には、浮体位置、動揺、係留力、空気室内外の水位や気象・海象の計測を行うとともに、搭載しているタービン発電機システム、空気圧縮機システムなどの状態監視を行うための浮体上総合管理システムを搭載している。計測インターバルは、毎正時をはさみ前後10分間の20分間計測であり、サンプリングタイムは0.1秒である。表10には主な計測項目及び計測機器を示す。

計測データは、基本的に浮体上でデータ解析・保存を行うが、安全対策及び搭載機器の作動状態監視のために、一部のデータは30秒に1回、陸上計測本部に無線電送される。さらに、陸上計測本部と海洋科学技術センター横須賀本部とは電話回線によりつながっており、横須賀本部において同データを同時刻に見ることが可能である。また、陸上計測本部及び横須賀本部からは、波力発電機の容量選択指令をはじめとし、補助発電機の発停など所定の搭載機器の操作を無線遠隔操作により行うことができる。

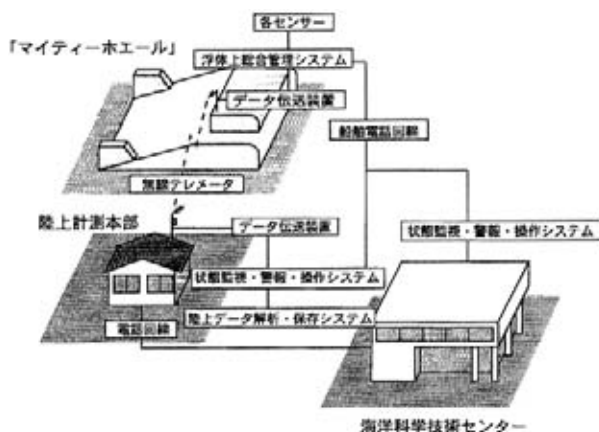


図9 計測・監視システム
Fig. 9 Schematic of measurement and control system

表10 浮体上計測項目及び計測機器
Table 10 Onboard measurement items and instruments

計測項目	計測範囲	計測器	設置場所	計測点数
浮体関係				
浮体位置	座標	DGPS	計測室、アンテナポスト	1
浮体動揺	ヨー : ±180deg ロール : ±45deg 加速度(ヒープ、サーチ、スウェー) : ±2G	磁気方位センサ (MASS-50) 光ファイバジャイロ (JCS7401) 3軸加速度計	アンテナポスト 計測室 計測室	各1 各1
係留力	400tonf	検力計(C-0414A)	係留取付点 (甲板上)	6
空気室外水位	波高 : 12.5m 周期 : ~15sec	容量式波高計(CW-2-010)	浮体両舷側	2
空気室水位	波高 : 12m 周期 : ~15sec	容量式波高計(CW-2-010)	空気室側壁	3
空気室圧力	2~-1kgf/cm ²	歪ゲージ式圧力変換器 (PG-2KU)	タービン発電機室	3
風向/風速	風向 : 360deg 風速 : 1~60m/sec	プロベラ式風向風速計 (N162D)	アンテナポスト	1
騒音	約 30~130db	精密騒音計(NL-14)	空気圧縮機室右舷外壁	1
タービン発電機				
電圧計	0~300V	デジタルマルチメータ、253120	制御室	3
電力計	0~60kW	(同上共通)	制御室	3
送電電流	0~40kW×2	(同上共通)	制御室	3
	0~150A			3
	0~100A×2			3
タービン回転数	0~3000rpm	磁気式回転検出器	制御室	3
タービン差圧	±1mAq	歪ゲージ式差圧計	制御室	3
タービントルク	±100kg-m	電磁式トルク検出器	制御室	6
安全弁開/閉/半開	ON/OFF	リミットSW	制御室	3
積算電力量	0~40000Wh		制御室	
補助発電機				
発電電力	0~30kW	デジタルマルチメータ、253502	制御室	1
燃料油面低下(IHI)	ON/OFF	レベルスイッチ	燃料タンク	1
インバータ/バッテリー				
交流出力電圧	0~300V	デジタルマルチメータ、253502	制御室	3
交流出力電流(電力)	0~100A×3	(同上共通)	制御室	3
バッテリー電圧	0~350V (DC)	デジタルマルチメータ、253401	制御室	1
UPS				
UPS出力電圧	0~150V (DC)	デジタルマルチメータ、253401	制御室	1
空気圧縮機				
空気槽圧	0~10kgf/cm ²	圧力トランスミッタ	空気圧縮機室	1
空気放出流量	0.1~1.0 m ³ /min	オリフィス流量計(=圧力トランスミッタ)	空気圧縮機室	1
吐出温度/	ON/OFF	圧縮機スタートパネルに内蔵	空気圧縮機室	1
空調機				
計測室温度	ON/OFF	温度スイッチ	計測室	1
自沈装置				
自沈弁用空気槽圧	0~10kgf/cm ²	圧力トランスミッタ	空気圧縮機室	1
その他				
入射波高・波向	波高 : 0~20m 波向 : 360deg	超音波及び水圧式 (並列) 電磁流向流速計	マティール前方約100m 海底	1
透過波高・波向	波高 : 0~20m 波向 : 360deg	超音波及び水圧式 (並列) 電磁流向流速計	マティール後方約50m 海底	1
風向・風速	風向 : 360deg 風速 : 1~60m/sec	プロベラ式風向風速計 (N162D)	陸上計測基地	1
気温	-200~+100℃	白金測温抵抗体	陸上計測基地	1
気圧	800~1060hPa	シリコン静電容量圧力型	陸上計測基地	1

3.1.8 係留システム⁶⁾

係留システムは、弛緩係留方法を採用した。係留索の破断強度は、日本海事協会鋼船規則P編検査要領の規定に従い、表1に示した自然環境条件により発生する最大張力（異常荷重状態）において全率2.0以上を確保する強度とした。また、アンカーの滑動安全率は浮体式防波堤設計・施行マニュアルに従って1.2とした。

プロトタイプを設置海域は水深が約40mと浅いため、係留索の初期張力を下げて波浪中動揺時においても索の弾力性を保持させる必要がある。一方、弛緩係留では長周期運動が大きくなるため、その影響を設計の中で考慮しておく必要がある。このことから、浮体本体の長周期運動を含めた水平最大変位の位置でも特性カーブに弾力性が残り、浮体の上下動による張力の立ち上がりが小さ

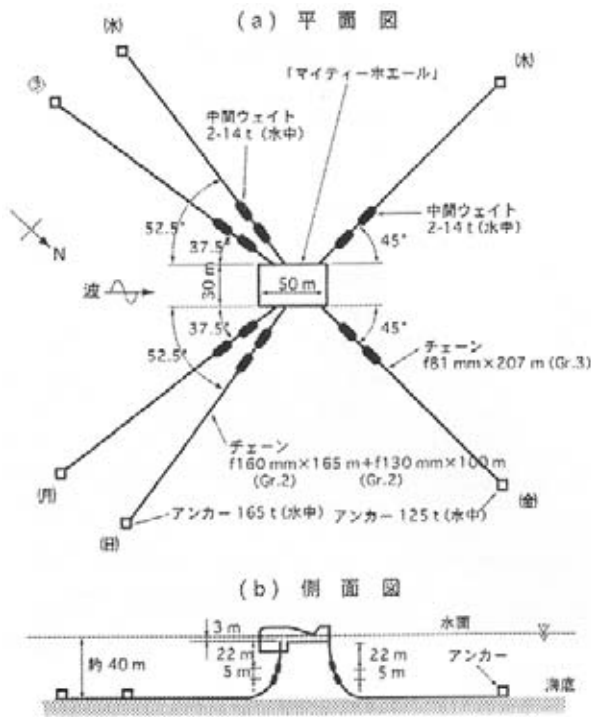


図10 係留システム

Fig. 10 Schematic of mooring system

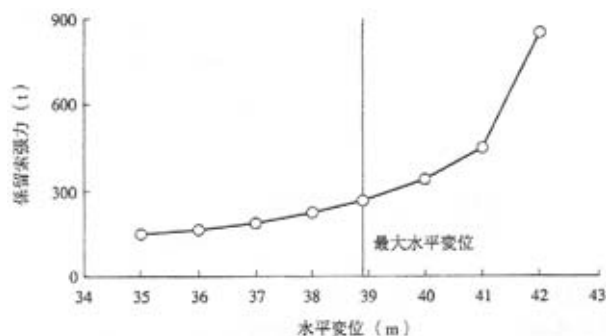


図11 係留索特性

Fig. 11 Characteristics of mooring line

くなることを念頭に、図10に示す6点弛緩係留システムとした。係留索は沖側にφ160mmのスタッドレス2種チェーンと130mmスタッド付き2種チェーン100mを繋ぎあわせて1本とした物を4本、陸側にφ81mmのスタッド付き3種チェーン207mを2本の合計6本である。本係留システムの特徴としては風・潮流・波漂流力に伴う定常変位を低減して索の弾力性を確保するため、沖側チェーンは強度/重量比を抑えてサイズの大きな2種チェーンとし、さらに懸垂部のチェーン重量を増加するため各係留チェーンには水中重量14tonの中間ウェイトを浮体と海底の間に取付けることとした。この係留索の構成により、図11に示すように浮体の長周期動揺を含めた最大水平変位の位置でも係留索特性カーブに弾力性を残すことができ、浮体の上下動の影響を抑えることが可能となった。中間ウェイトは鋳鋼製で、取付け部の索の摩耗を防ぐため、半割ウェイトをチェーンに横抱きに取り付けるインライン方式を採用した。写真4に中間ウェイトを示す。アンカーは設置工事の容易さからコンクリート製重量アンカー（シンカー）を採用し、把駐力を高めるために底面に直径φ700mm鋼管パイプ10本による爪付きとした。写真5にアンカーを示す。表11には係留索の仕様を示す。



写真4 中間ウェイト(水中重量14t)

Photo 4 Intermediate weight (14 ton in water)

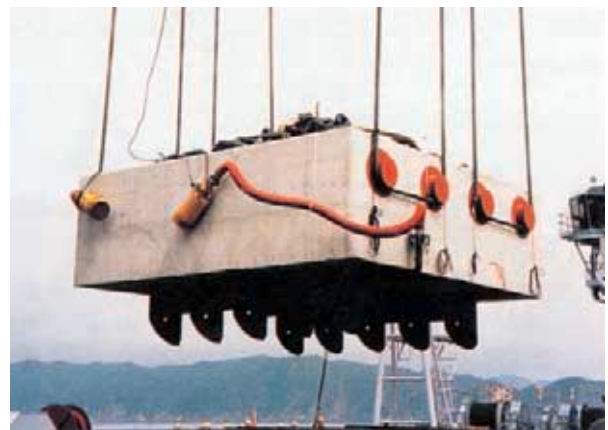


写真5 コンクリートアンカー(水中重量165t)

Photo 5 Concrete anchor (165 ton in water)

表11 係留索仕様
Table 11 Specification of mooring line

	チェーン						中間ウェイト	アンカー
	種類	本数	チェーン直径	長さ	破断強度	水中重量		
沖側	第2種チェーン相当 (スリット無し)	4本	160(mm)	165(m)	816.3(t)	441.5(kg/m)	鑄鉄製インライン方式 14ton(水中) ×2個/索	コンクリートアンカー 165ton(水中) ×1個/索
	第2種チェーン (スリット付き)		130(mm)	130(m)	795.9(t)	323.0(kg/m)		
陸側	第3種チェーン (スリット付き)	2本	81(mm)	207(m)	491.8(t)	125.4(kg/m)	鑄鉄製インライン方式 14ton(水中) ×2個/索	コンクリートアンカー 125ton(水中) ×1個/索



写真6 チェーンストッパー
Photo 6 Chain stopper

係留チェーンは、写真6に示すように、本体に取付けたチェーンパイプの上端部にてチェーンストッパーで根止めすることにより本体に直結する。なお、チェーンストッパーの根止めピンの剪断力をひずみゲージを取り付け計測することにより、実験時の係留力計測を行う。設計した係留システムにおける索強度の安全率の評価は、定常変位、波浪中動揺、長期周期運動を考慮した準静的解析により行った。さらに、大波浪を想定した模型実験と数値シミュレーション解析を行い、表12に示すように、縦波中及び斜波45°において最大張力の発生する沖側No.2又はNo.3の索において、いずれの場合もチェーンの破断強度795.9ton(φ130mmチェーン)に対し、安全率2.0以上が確保できることを確認した。

本係留システムにより係留される浮体が、風・潮流・波の外力により移動する浮体移動量についても検討を行った。外力条件として表13に示す沖側から風・潮流・波が作用する場合(沖側±45°の範囲)及び表14に示す陸側から風・潮流が作用する場合(陸側±90°の範囲)について浮体の重心位置の移動量を求め、さらに浮体の回転(ヨーイング)を考慮し、図12に示す浮体の外端を含めた移動想定範囲を算出した。本図より、浮体の移動想定範囲は浮体幅方向(X軸方向)に±50m、浮体長方向(Y軸方向)に-70m~+75mを考慮しておけば良いと考えられる。

表12 最大索張力と安全率

Table 12 Maximum mooring tension and safety factor

解析法	縦波中(No.2, No.3索)		斜波45度中(No.2, No.3索)	
	最大索張力	安全率	最大索張力	安全率
準静的解析	261.4ton	3.0	284.0ton	2.8
数値シミュレーション	344.7ton	2.3	178.7ton	4.5

(有義波周期1.2秒、有義波高8m)

表13 浮体移動量検討のための外力条件(沖側から作用する場合)

Table 13 Wind, wave and current condition for investigating of drifting range (Onshore condition)

シ-フト	有義波高	有義波周期	風速	潮流
2	0.50 m	2.7 sec	4.8 m/s	0.68 m/s
3	1.25 m	4.3 sec	8.6 m/s	0.75 m/s
4	2.50 m	6.1 sec	14.2 m/s	0.84 m/s
5	4.00 m	7.7 sec	20.4 m/s	0.95 m/s
設計条件	8.00 m	12.0 sec	36.4 m/s	1.20 m/s

表14 浮体移動量検討のための外力条件(陸側から作用する場合)

Table 14 Wind, wave and current condition for investigating of drifting range (Offshore condition)

シ-フト	風速	潮流	有義波高
1	1.6 m/s	0.63 m/s	—
2	3.4 m/s	0.66 m/s	—
3	5.5 m/s	0.69 m/s	—
4	8.0 m/s	0.74 m/s	—
5	10.8 m/s	0.78 m/s	—
6	13.9 m/s	0.84 m/s	—
7	17.2 m/s	0.89 m/s	—
設計条件	36.4 m/s	1.20 m/s	4.4 m

3.2 本体建造の概要

プロトタイプ建造工事は兵庫県にある石川島播磨重工業(株)相生工場のドックで行われた。浮体底部に大きな段差を有する特殊な形状のため、ドック内に建造用の架台を設置し、20ヶに分けて製作した構造ブロックを架台の上で組上げるブロック建造方式を採用した。平成9

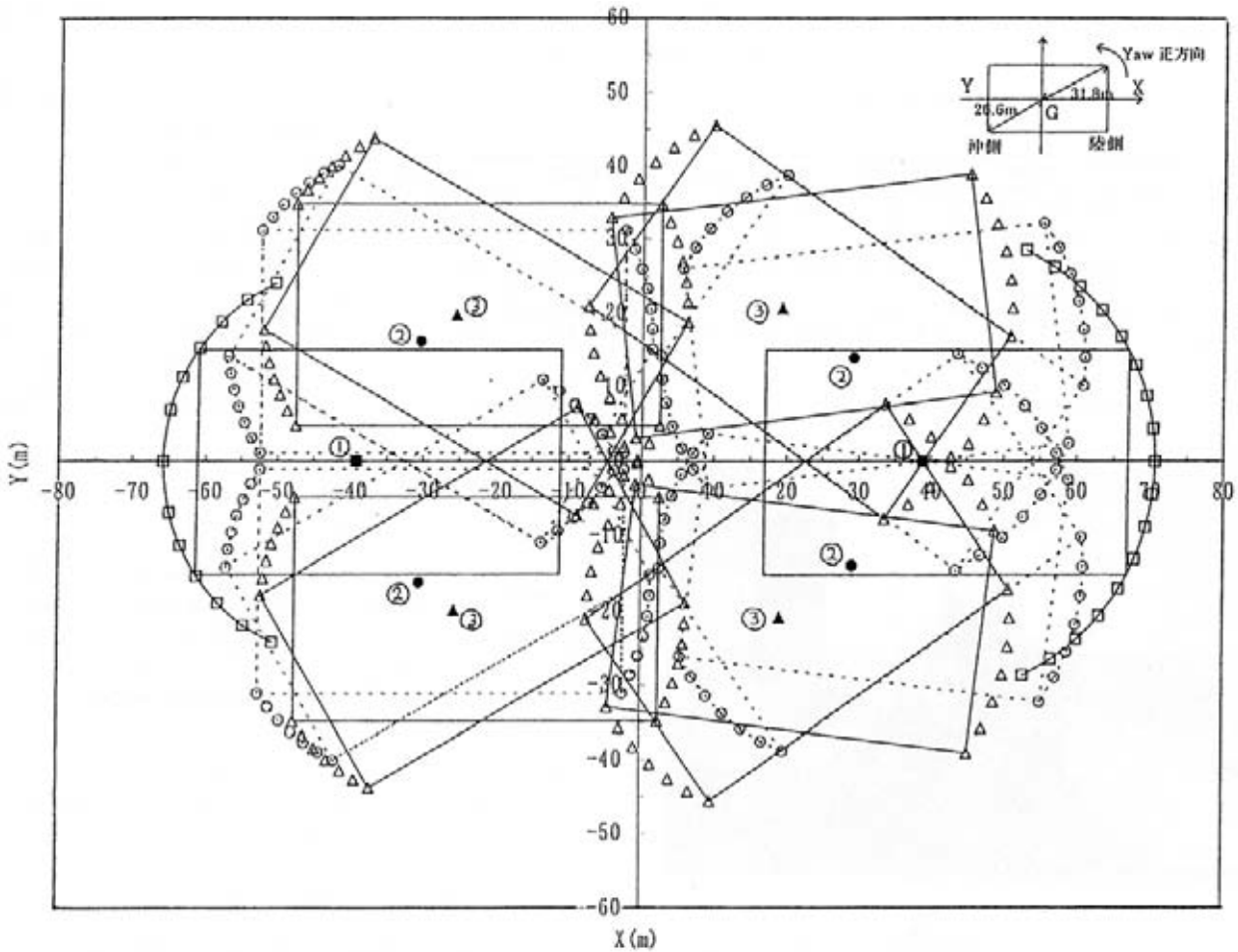


図12 浮体移動範囲
Fig. 12 Drifting range of prototype

年7月18日に加工を開始し、同年12月からタービン発電機等の主要機器の搭載を開始、電線工事の後、平成10年3月に写真7に示すように3,600t吊りフローティングクレーンで吊上げてドック脇の艀装岸壁に着水させた。フローティングクレーンによる着水方式の採用は、前述の特殊形状のためドック注水による進水が困難なことから、本体の軽荷重量が約1,300tと大型フローティングクレーン



写真7 建造ドックからフローティングクレーンによる着水作業
Photo 7 Launching work by floating crane from dock

で吊上げ可能な重量であったことによる。着水後、艀装岸壁で細部の艀装工事及びタービンシステム等の各種試験を行った後、平成10年5月末に本体の工事を完了した。

4 曳航・係留設置工事

4.1 曳航作業

プロトタイプの実験海域までの曳航作業については、図13に示すように建造場所である兵庫県相生から友ヶ島水道、紀伊水道、潮岬沖を經由して三重県五ヶ所湾までの約206浬のルートである。曳航海域の気象海象条件及びプロトタイプ設計時に実施した模型実験から曳航時の抵抗を推定し、使用する曳船馬力数及び曳航方法を決定した。曳船馬力数の算出においては、曳航時の所要推力を100%とした時、全抵抗はその80%、また、100PS当りの推力を1.1tonとした。表15に検討結果を示す。プロトタイプの曳航状態は、曳航時の抵抗低減と針路安定性を考慮して船尾トリム状態での前曳き曳航とした。また、曳航方法については、検討結果及び安全性を考慮して図14に示すように主曳船4,000PS級1隻並びに補助曳船3,000PS級1隻による前後2船曳きとした。ただし、相生～友ヶ島間については3,000PSの側方警戒船を配備し曳



図13 曳航経路
Fig. 13 Towing route

航作業の安全に勤めた。

平成10年7月6日09:00に相生から曳航を開始し、曳航ルート平均3.5ノットのスピードで約2.5日をかけて曳航を行った。

4.2 実験海域

実験海域は、図15に示す三重県度会郡南勢町五ヶ所湾の湾口沖合約1.5km、水深40mの海域であり、地元漁協協議会の設置承認を得て決定した。

本海域の波浪特性については、波向SE～SW（夏期：SE～S 90%以上、冬期：S～SW 85%）で、1/3有義波高1m以下、1/3有義周期5.0～8.0secの波浪が卓越している。当センターが平成8年8月に実施した当該海域1km²の調査及び平成10年1月に実施した0.5km²の調査によれば、その海底地形は北から南へ傾斜しており、勾配は約1/100と緩やかで、水深は調査範囲内において35～44mである。底質はごく一部を除き、砂分が94%以上、土粒子密度2.671～2.713g/cm³の砂質土である。また、その層厚は音波探査の結果では4～6mである⁷⁾。本海域内には、図16に示すように三重県及び(社)マリノフォーラム21により展開されている海洋牧場施設の一部である誘導礁3基が存在する。誘導礁1基当たりの規模は、直径約40m、比高差3～6mであり、最大径1.5m程度の天然石の投げ込みにより構築される投石魚礁である。

4.3 係留設置工事⁸⁾

今回の係留設置工事は、これまで「マイティーホエール」の研究開発のために実施された水槽実験及び理論検討との整合性を確認する目的のため、設計した係留システムを忠実に実海域に再現することが必要であり、設置精度の高い工事が要求された。しかも、使用する係留チェーン及びアンカー等がきわめて大型のものであり、綿密な工事計画と慎重な作業が必要であった。図17に施工フローチャートを示す。

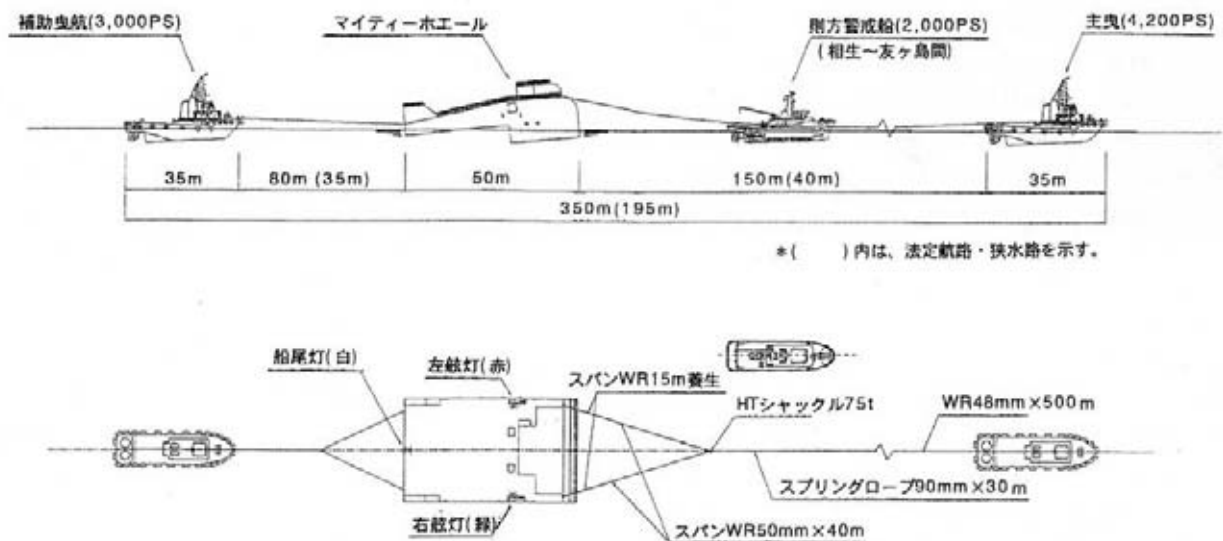


図14 「マイティーホエール」曳航要領図
Fig. 14 Towing arrangement

表 15 曳航力の検討

Table 15 Investigation for towing force

曳航条件	風速 15m/s,有義波高 2.0m,曳航速力 4.0 ノット
全抵抗 R	37.57ton (平水中 17.55ton,風 8.91ton,波浪 7.69ton,曳船・曳航索 3.42ton)
所要推力 T	46.96ton (R/0.8)
必要馬力 BHP	4,300PS (T/(1.1ton/100PS))

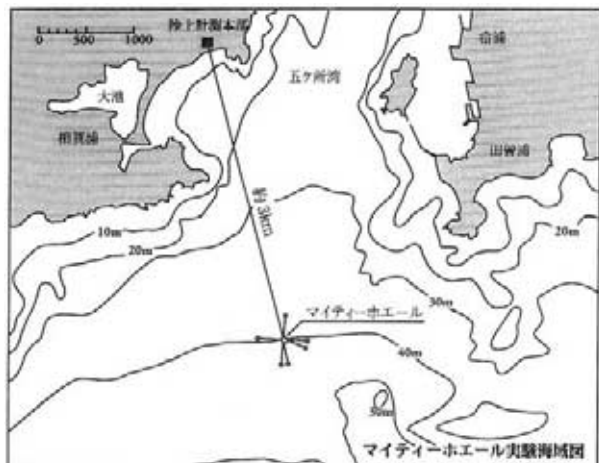


図 15 実験海域

Fig. 15 Location of test site

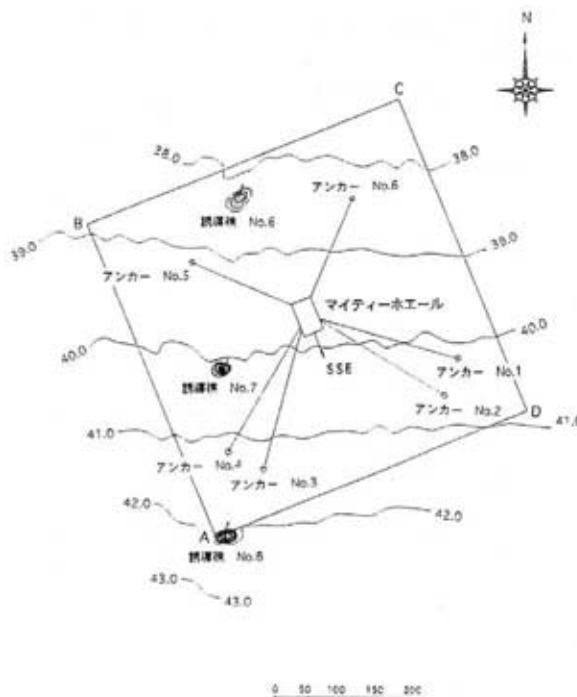


図 16 係留設置工事のための調査海域範囲

Fig. 16 Exploration area for mooring work

プロトタイプ本体の係留に先立ち、係留チェーン、中間ウェイト、アンカーを台船で設置海域まで輸送し、設置海域において1,600ton吊り全旋回クレーン作業船上で連結した上で所定の位置に設置した。今回、大型の全旋回クレーン作業船を選択した理由は以下のとおりである。

- 1) アンカーブロック及びチェーンはそれぞれの場所から別々の台船に搭載され輸送されてくるので、固定式クレーン作業船ではクレーン作業船全面に2隻の台船を係留し、チェーンを積み替えアンカーブロックに連結するのに非常に時間がかかるし、それぞれの作業船が別々の動きになるので危険が予想される。
- 2) 旋回クレーン作業船であれば、台船を風下側に横抱きし、デッキへアンカーブロック及びチェーンを取り込み、デッキ上で連結すれば、広い海域を必要としない上安全である。
- 3) 固定式クレーン作業船でアンカーブロック設置及びチェーン展張は、アンカーブロックとチェーンを同時に吊り、アンカーブロック沈設後、チェーン展張となるが、チェーンにスィベルがないので、潜水士あるいはROVにて着底地点を常時監視し、「縊り」が発生しないような注意が必要となるが、旋回クレーン作業船のデッキ上であれば艀装で解決可能である

アンカーの設置位置は設置海域近傍にある大王埼からのビーコン信号を使用したDGPS (Differential GPS) 測位誘導により設置精度を確保した。設置後の各アンカーからのチェーンの展張は、浮体のセンターラインとミッド

シップの交点を原点とした座標系に対する浮体の各チェーンパイプ出口の座標を決定し、これを展張目標とし、各アンカーとチェーンの連結部がそれぞれの目標に向くようにアンカーを設置点に打設した後、展張を行った。展張した各チェーンの浮体側の先端には引き込み用のリードワイヤーを接続し、さらにワイヤー先端に浮標を取り付けた。図18に各アンカーの設置目標と設置後の誤差を示す。

総てのチェーンの展張が終了した後、「マイティーホエル」本体を設置目標点に進入させ、1,600ton吊りクレーン作業船に横抱き状態でバラスト注水作業及び位置保持を行った。その後、写真8に示すように同クレーン作業船により設置済みのチェーンを接続した引き込み用リードワイヤーにより本体チェーンパイプを通して引き抜いた後に写真9に示すようにチェーンストッパーで根止めした。根止め作業終了後、最終的なバラスト調整を行い、係留作業を終了した。写真10には設置後の「マイティーホエル」を示す。現地における係留・設置工事期間は、平成10年6月18日から7月13日の合計26日間であった。このうち、荒天待機日数は10日であり、本工事における作業効率は約62%であった。

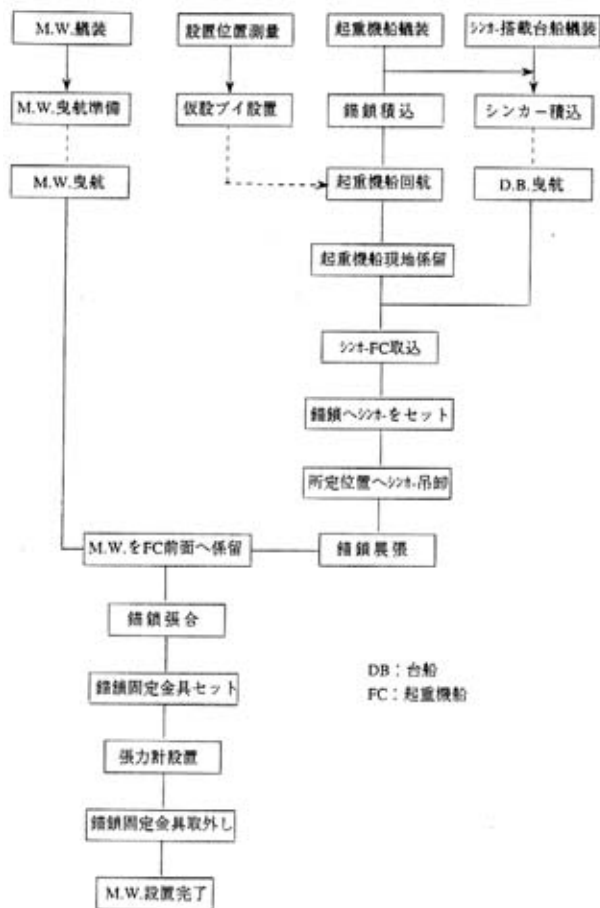


図 17 係留設置作業手順
Fig. 7 Flow chart of mooring work



写真 8 係留設置工事
Photo 8 Mooring work of prototype



写真 9 根止め作業
Photo 9 Chain stopping work

5 実験経過

係留設置工事終了後、核搭載機器の調整作業を行った後、平成 10 年 9 月 10 日より実験を開始した。実験開始後、9 月 15 日から 9 月 23 日にかけて連続的に台風 5, 6, 7, 8 号が実験海域または近傍海域に通過し、図 19 に示すように 1/3 有義波高で約 4~10m を観測した。図 20 には台風 5 号接近時の 3 号発電機 (定格発電容量 30kW) の発電出力及びタービン回転数を示す。台風 6 号が接近した 9 月 18 日以降は本体電源系統及びアンテナポスト等に損傷を受け計測不能となった。これらの損傷については再発防止対策を施し、実験を開始した。

本体没水部及び係留システムについては、台風通過後、点検作業を実施し、いずれも異常が無いことを確認した。

6 おわりに

実海域実験では各種のデータ収集・解析を行い、波力装置を利用した応用技術及び浮体式海洋構造物の安全性、耐波性能などを含め、本装置のより効率的かつ具体的な実用化を目指し、実験を継続する予定である。

最後に、「マイティーホエール」の研究開発を実施するにあたり、多岐にわたりご検討・ご助言いただいた波力利用システム研究会 (委員長: 筑波大学本間琢也名誉



写真 10 実験海域における「マイティーホエール」
Photo 10 "Mighty Whale" on test site

教授)、タービン・圧縮機専門部会 (部会長: 東京大学大学院工学系研究科 荒川忠一教授) ならびに係留システム専門部会 (部会長: 九州大学応用力学研究所 小寺山亘教授) の委員の皆様へ深く感謝いたします。また、三重県庁、南勢町役場、南勢町漁協協議会ならびに地元関係者の方々のご理解、ご支援をいただき、実海域実験が開始できたことに対し深く感謝いたします。さらに、石

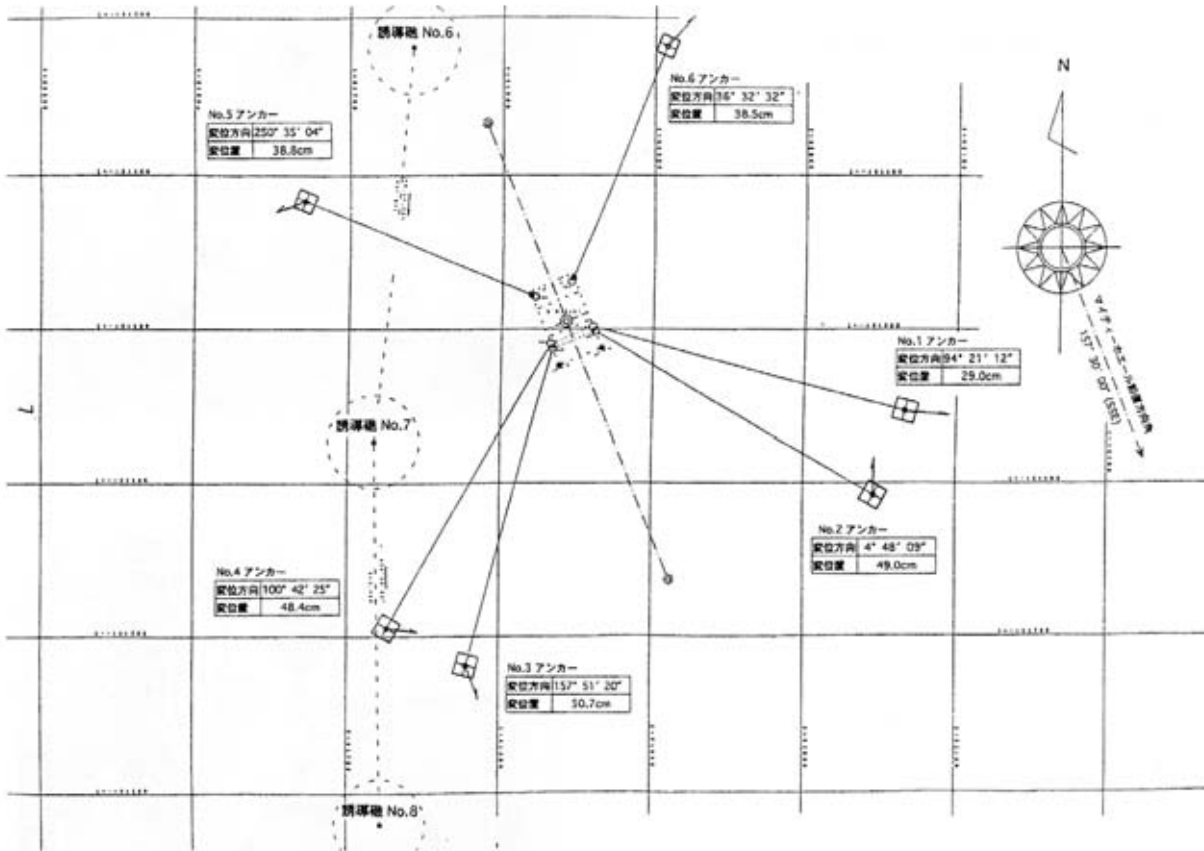


図18 「マイティホール」設置状況
Fig. 18 Mooring condition

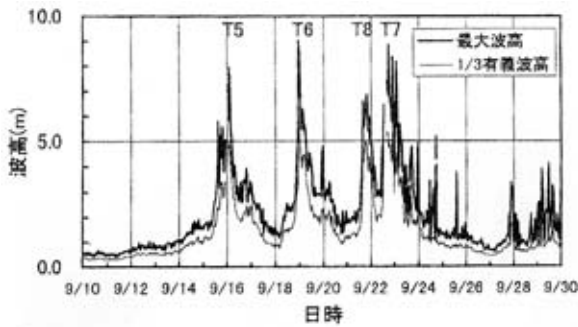


図19 実海域実験における波高経時変化の例 (H10.9.10～9.30)
Fig. 19 Actual example of wave height at open sea test
(September 10 ~ September 30, 1998)

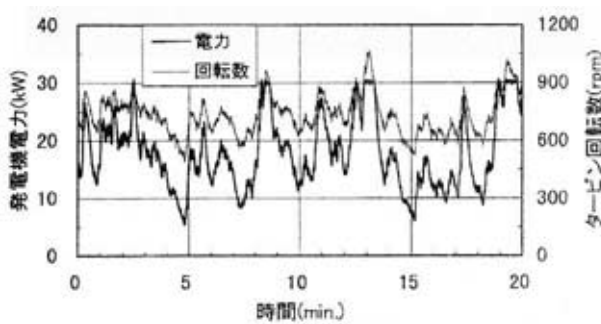


図20 実海域実験における発電出力の例
(H10.9.16 02:50～03:10)
Fig. 20 Actual example of power generation at open sea test
(02:50 ~ 03:10 on September 16, 1998)

川島播磨重工業(株), 富士電機(株), (株)三井造船昭島研究所, 深田サルベージ建設(株)には, 本体の建造及び係留設置工事に際し多大なご協力をいただきましたことを深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 鷺尾幸久, 沖合浮体式波力装置「マイティホール」実海域実験について, 日本造船学会誌, (836) 2-8, (1998) .
- 2) 大澤弘敬, 鷺尾幸久, 今井正明, 岡山修三, 中川寛之, 沖合浮体式波力装置の発電出力の検討, 土木学会海岸工学講演会論文集, (45), 1216-1220, (1998) .
- 3) 大澤弘敬, 永田良典, 宮島省吾, 前田久明, 浅海域における沖合浮体式波力装置の係留システム設計, 日本造船学会論文集, (182), 341-348, (1997) .
- 4) 海洋科学技術センター, 「マイティホール」プロトタイプモデルの建造完成図書(浮体及び全体システム), (1/6), (1998) .
- 5) 鷺尾幸久, 大澤弘敬, 今井正明, 藤田昌孝, 岡山修三, 「マイティホール」のタービン・発電システム, 日本造船学会海岸工学シンポジウム, (14), 55-58, (1998) .
- 6) 大澤弘敬, 鷺尾幸久, 今井正明, 永田良典, 前田久明, 数値シミュレーションによる沖合浮体式波力装置「マイティホール」の係留システムの応答解析,

- 海洋科学技術センター試験研究報告書, (36), 185-198, 1997.
- 7) 海洋科学技術センター, 「マイティーホエール」設置予定海域の調査報告書, (1998) .
- 8) 海洋科学技術センター, マイティーホエール係留・設置工事報告書, (1998) .

(原稿受理：1999年8月6日)

