

波力発電装置「海明」による実海域実験報告

海洋科学技術センター	石井 進一
緑星社（元海洋科学技術センター）	益田 善雄
海洋科学技術センター	正会員 宮崎 武晃
同上	工藤 君明
同上	正会員 堀田 平
同上	鷺尾 幸久
同上	続 辰之介

1. はじめに

地球全表面の75%は海洋であり、その表面には太陽エネルギーを起因とする波浪が発生し、沿岸に押し寄せてくる。この波浪は、時として我々の生活に甚大な障害を及ぼすことがあり、これを防ぐ工夫が、古くから研究されてきた。一方、風エネルギーを風車で他の動力エネルギーに変換して利用するように、再生可能な自然エネルギーである波エネルギーを有効に利用して、我々の生活に貢献するエネルギーに変換する技術の研究開発が各所で進められている。とりわけ、イギリス、ノルウェーなどにおける研究は盛んであり、エネルギー小国である我国でもこれまでに幾つかのテストプラントが設置されるなど、その動きは活発である。

海洋科学技術センターにおいても、いわゆる“石油ショック”が起きた昭和50年頃より波エネルギーを利用して発電を行う“波力発電”の研究開発を行ない、昭和53、54年度には、浮体形式の波力発電装置である「海明」を用いて、山形県鶴岡市由良の沖合において、第1期の実海域実験を行なった¹⁾²⁾。その結果、本方式の装置による波力発電の可能性と装置の安全性が確認されたが、発電効率が低く、発電コストが高いという欠点を抱えていた。その後、それらの改良を目指し、各要素技術の研究を行なっていたが、昭和60年度において、それらを実証することを目的に、同海域において第2期の実海域実験を行なった。そこで本報では、装置および実験結果の概要を紹介することとする。

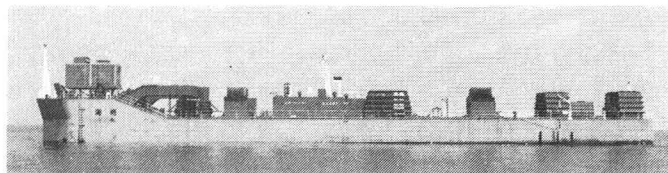


写真1 「海明」全景

2. 海域および海象

2. 1 実験海域

「海明」は第一期実験と同海域の図1に示す山形県鶴岡市由良沖約3kmの水深約40mの地点に、昭和60年7月に係留され、同年9月より翌年3月にかけて計測が行なわれた。

この海域における潮流は最大1kt程度であり、また潮汐の高さは大潮で0.6m程度、小潮で0.3m程度である。

2. 2 波浪

日本海沿岸域の海象は季節風の関係から、夏季は静穏であるが、冬季は波高が高くなる。計測は波高の高い冬季間に行なわれたが、その間の波浪状況として1/3有義波の波高周期別出現度数分布を表1に示す。なお、期間中の1/3有義波高は約1.6m、平均波周期は約7.4sec、最大波高は8.6mであった。これより、実験海域における波エネルギーの平均値は、約9.5kw/mであった。

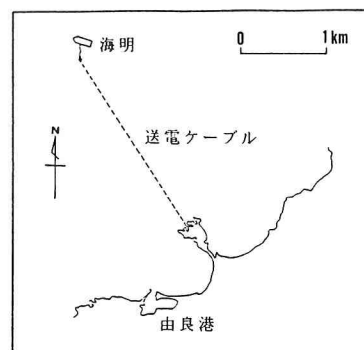


図1 実験海域

3. 波力発電装置「海明」

3. 1 発電の原理

「海明」は振動水柱型と呼ばれるアテニューエーター型浮体方式の波力発電装置であり、大規模な電力供給源として任意の海域で任意の規模で設置することが可能であることを特徴としている。

波エネルギーを吸収するメカニズムは、図2に示すように波の入射により空気室内の水柱が応答して上下することにより空気室内の空気圧力の変動が生じる。即ち、波エネルギーが空気エネルギーに変換されたことになり、これを一次変換と称する。次に、この空気圧力で空気タービン発電機を回して発電し、空気エネルギーを電気エネルギーに変換する二次変換を行う。このようなメカニズムの空気室が浮体長手方向に連なり、浮体室と合わせ、全体として船型の浮体構造をしている。そして、装置に加わる波浪漂流力、風力を強めて、係留力を低減さ

表 1 1/3有義波 出現頻度分布

波高 (m) 周期	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
0 ~ 3		3	3									
~ 4	18	3			2	1						
~ 5	15	22	7						1			
~ 6	27	47	78	10								
~ 7	5	31	67	94	54	19	3					
~ 8	9	15	30	24	28	51	35	16				
~ 9	5	16	20	9	13	6	14	13	6	2		
~10	9	26	22	38	19	16	8	4	3		1	
~11	17	10	13	17	18	12	8	2	1			1
~12	13	11	7	4	2					2	2	
~13	10	6	1	1	1				1		1	
~14	2						1					
~15	3	1			1							
~16	1											

せるため、また、装置自体の波浪中運動とりわけピッチングを利用して波エネルギー吸収効率を高めるため、波進行方向に装置の長手方向が常に追従するような係留方式を採用し設置した。このような型式をアテニユエータ型と称する。

3. 2 構造および発電装置

3. 2. 1 浮体構造

浮体は、図3に示すように、13の空気室と4つの浮力室から成っており、その諸元は長さ80m、幅12m、喫水2.2m、排水量約600tである。各空気室には、図4に示すように、空気タービン発電機などが取り付けられるか、もしくは、甲板上に“ノズル孔”が開けられている。各々が相当するノズル比（開口面積／空気面積）を表2に示す。

3. 2. 2 発電装置

「海明」は、図4中に示すように空気タービン発電機として、タンデム・ウエルズ・タービン1基、4枚弁方式衝動型タービン3基および米国式タービン1基の5基を備えている。

(1) タンデム・ウエルズ・タービン

昭和58年度に山形県鶴岡市三瀬の岩礁に固定された「沿岸固定式波力発電装置」に設置された空気タービン発電機であり、直径約1.3m、NACA0021; 16枚翼の空気タービンが定格出力40kw、定格回転数1792rpmの発電機の両側に取り付けられた、無弁式空気タービンである⁴⁾。空気タービン発電機を写真2に示す。

(2) 4枚弁方式衝動型タービン

衝動型タービンは一方向の空気中でのみ運転されるため、図5に示すような整流用の弁箱が必要とされ、「海明」には写真3に示すような弁箱が使用された。使用されたタービンは、直径1.4m、ヒドロナリウム製の横軸形軸流式衝動タービンであり、発電機は定格出力125kwの横軸円筒回転界磁形交流同期発電機である。このタービンが、7、12、13号室に取付けられた。

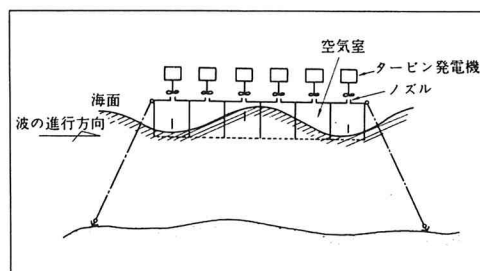


図2 発電の原理

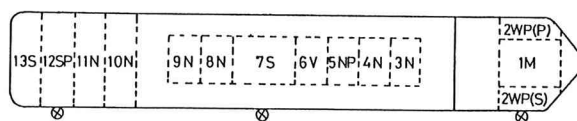


図3 「海明」空気室配置図

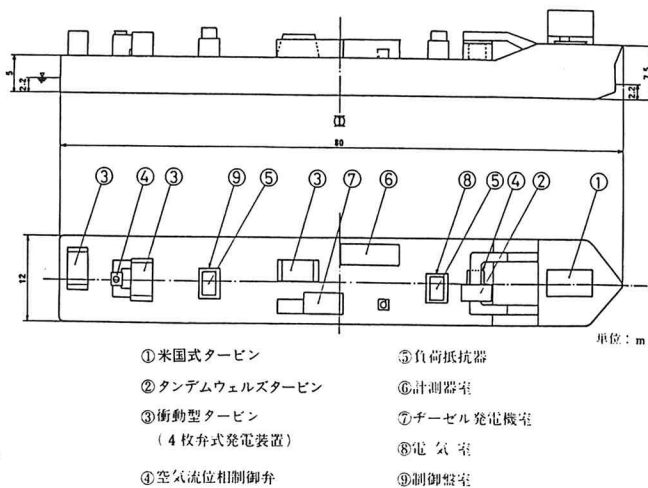


図4 「海明」船上装置配置図

表2 各空気室のノズル比

空気室番号	1	2	3	4	5	6	7
ノズル比	1/131	1/146	1/157	1/157	1/157	1/20	1/146
空気室番号	8	9	10	11	12	13	
ノズル比	1/157	1/157	1/146	1/146	1/146	1/146	

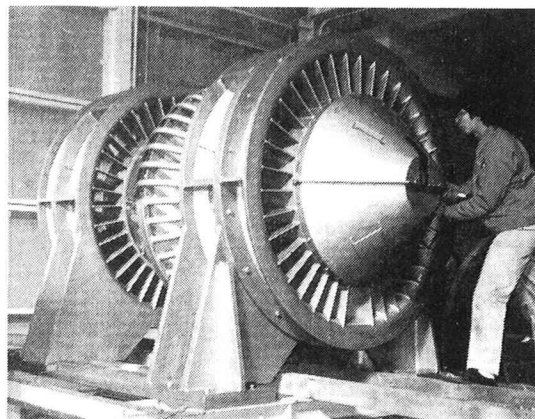


写真2 タンデム・ウエルズ・タービン

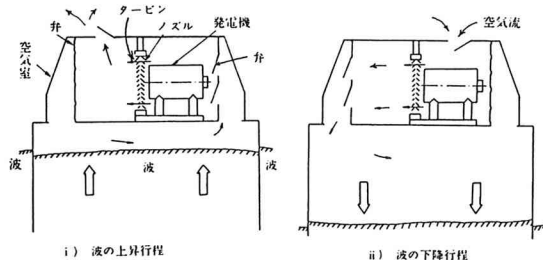


図5 4枚弁方式発電装置の原理



写真2 4枚弁方式発電装置の弁箱

3. 3 係留および送電ケーブル

3. 3. 1 係留

「海明」を係留するにあたっては、船首位置をできるだけ固定するため、船首部は95mm、76mmを各々2本ずつ、合計4本の係留鎖を、図6に示すように、約60度の間隔で敷設した。そして、各々の係留ラインの先端は2本のラインに分岐し、更にその先端には5~20tの錨が取り付けられている。一方、船尾は波向きに追従して振廻ることができるように、一本の中間フロート付きの76mm係留鎖で係留されている。⁵⁾

3. 3. 2 送電ケーブル⁶⁾

図1中にも示すように、送電ケーブルは陸上から約2.6kmに亘って敷設された。この送電ケーブルには、耐キンク性、耐食性、耐薬品性、耐屈曲疲労性に優れ軽量であるFRP鎧装線が使用された。その断面を図7に示す。

3. 4 計測およびデータ収集

計測は、海象・気象、船体動揺および方位、係留鎖張力、空気室内圧力変動、船体各位置における相対波高、空気室内波高、タービン発電機の回転数、電圧、電流、発電出力など約80の項目について行なった。それらの計測データは、24チャンネルずつ6モードに分けられ、テレメータにより1モードについて19分間ずつ順番に送られて来る。それを陸上基地で受信し、アナログ記録計でモニターすると同時に、コンピュータにより0.5秒間隔でAD変換し、収録された。

3. 5 維持・管理

計測期間中においては、テレメータ装置の不調、塩害による発電機制御盤のトラブル、4枚弁方式衝動型タービンの弁板の交換作業などの小さなトラブルは時折発生したものの、全体システムの運転が危険になるような状況は発生しなかった。

4. 出力および船体運動

4. 1 空気出力

波エネルギーは、まず一次変換として、空気タービンもしくはノズル孔から流入、流出する空気流の持つエネルギーに変換されるが、その変換効率として1/20模型を用いた規則波中水槽実験で得られた結果を図8に示す。⁷⁾ 図中の横軸は空気室番号、縦軸は船体長さと同じ長さの波の持つエネルギーに対する各空気室の空気出力の比（波エネルギー吸収長さ比）、奥行き軸は

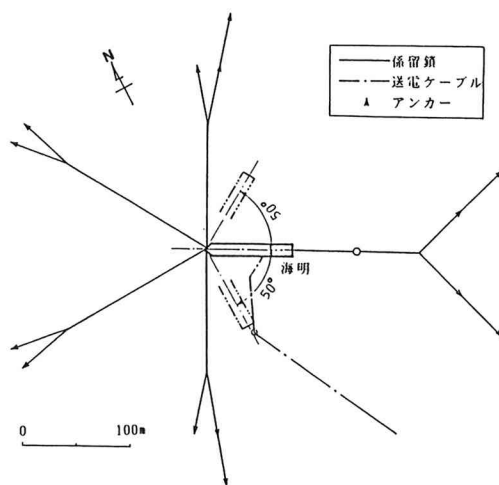


図6 「海明」係留システム

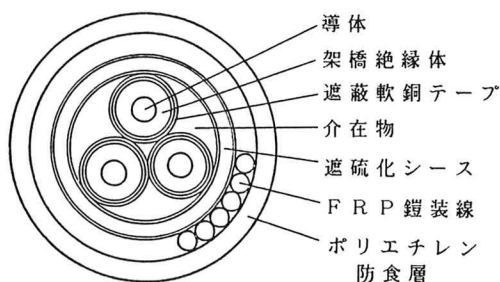


図7 送電ケーブル断面図

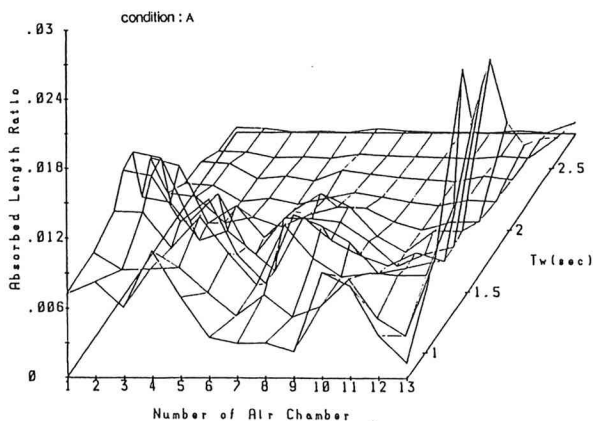


図8 規則波中1/20模型試験による

「海明」波エネルギー吸収特性

模型スケールの波周期である。

一方、今回の実海域実験にて得られた空気出力特性として、比圧力特性を図9に示す。図中の縦軸は空気室内圧力変動のピーク値の1/3有義値を1/3有義波高で除した値、すなわち比圧力である。また、 H_s は有義波高、 T_s は有義周期である。

これらより、「海明」型の装置は、船首部、船尾部および船体中央部の空気室の空気出力が高く、また模型と実機の波エネルギー吸収特性には相関があることが確認された。

ちなみに、1/20模型実験によって得られた規則波中および不規則波中における「海明」全体の総合空気出力特性を図10に示す⁸⁾。図中の縦軸は、前述した波エネルギー吸収長さ比であり、横軸は波周期である。なお、不規則波の周期として、ここでは平均波周期を用いて整理してある。これより、「海明」設置海域における波浪の平均波周期は5～6秒であるから、波エネルギー吸収長さ比は約0.12が得られ、したがって「海明」の総合空気出力は約90kwとなる。

4. 2 発電出力

一次変換により得られる空気流のエネルギーは、二次変換として電気エネルギーに変換される。

搭載した5基の空気タービン発電機のうち、船首の2号空気室に搭載したタンデム・ウエルズ・タービンと船尾の13号空気室に搭載した4枚弁方式衝動タービンの1/3有義波高に対する平均発電出力の関係をそれぞれ図11および図12に示す。

タンデム・ウエルズ・タービンに取り付けられた発電機は同期発電機であり、負荷調整は、発電出力200V一定のもとで、あらかじめ設定されていたタービン回転数に応じて電流値が段階的に切り替わることによって行なわれる。一方、衝動型タービンに取り付けられた発電機は誘導発電機であり、タービンの回転数に応じて電流、電圧が変動する。

いずれのタービン発電機についても、発電出力は、沿岸固定式波力発電装置においても見られたように、波高にほぼ比例して発電出力が増加しているが、これは負荷の制御法が最適でないためであろう。

4. 3 船体運動

「海明」の波浪中運動の計測例として、有義波高3.5m、有義周期 8.0秒のときの、入射波、ヒービング、ピッチングおよびローリングのスペクトラムを図13～16に示す。

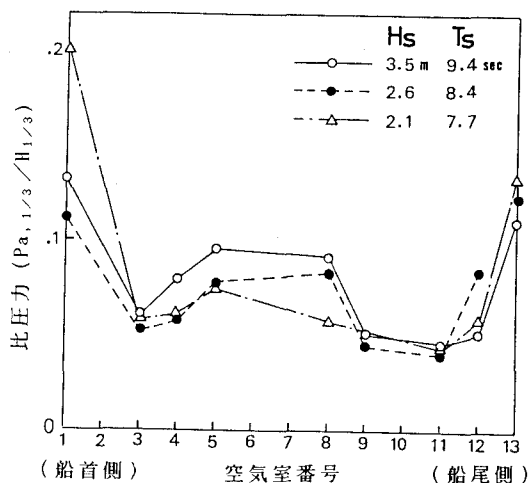


図9 「海明」比圧力特性

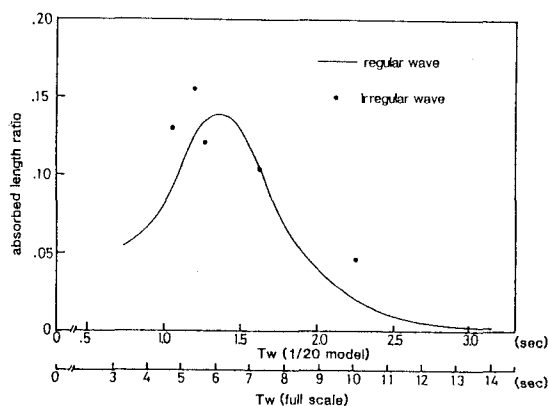


図10 1/20模型による総合空気出力特性

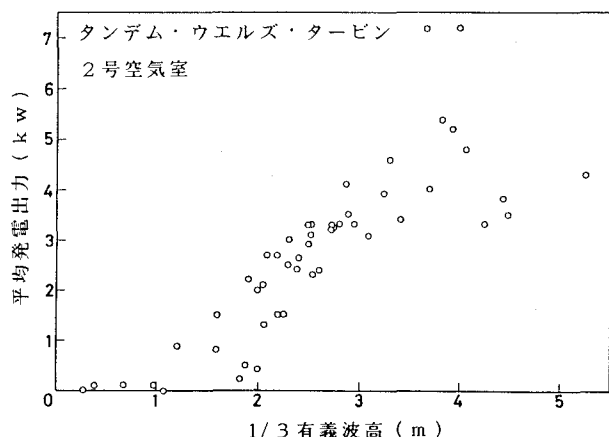


図11 発電出力特性 (1)

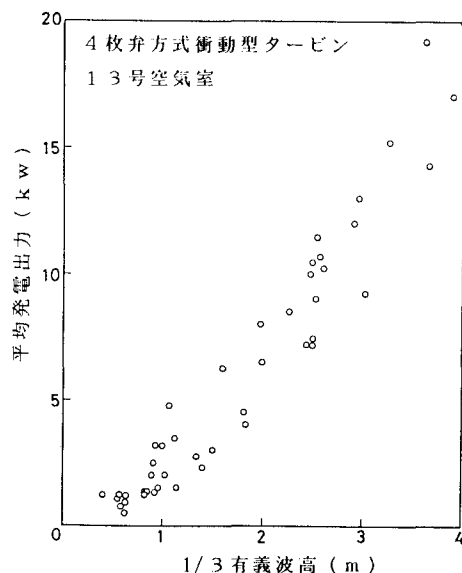


図12 発電出力特性 (2)

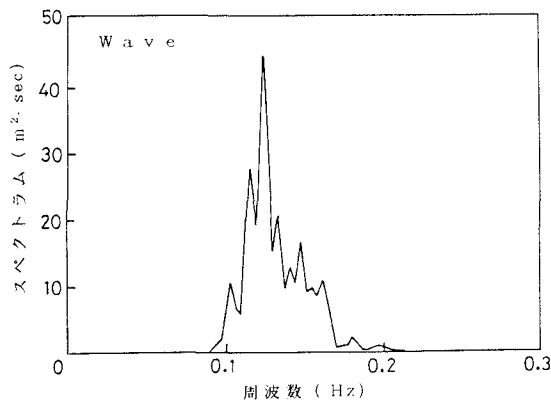


図13 入射波のスペクトラム

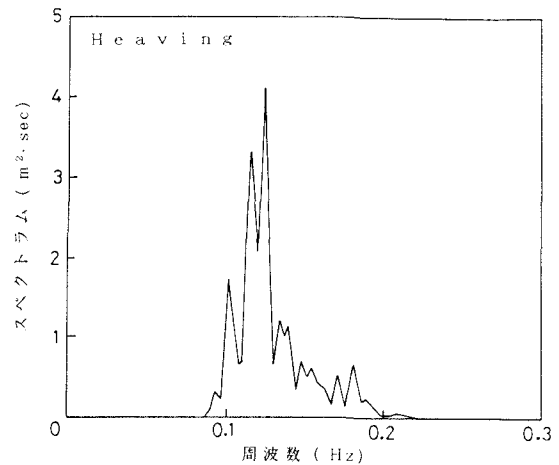


図14 ヒービングのスペクトラム

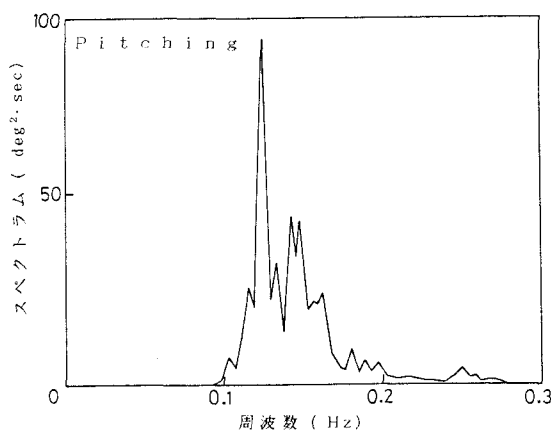


図15 ピッチングのスペクトラム

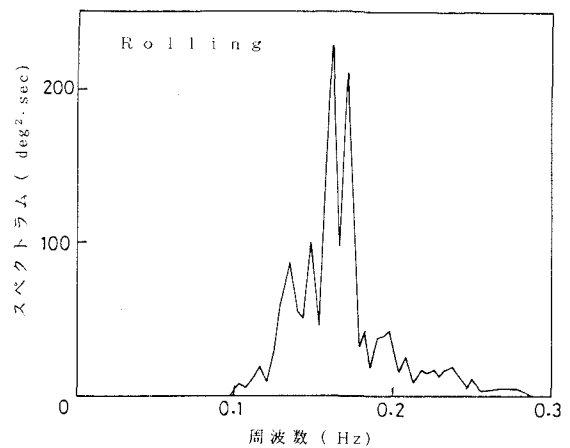


図16 ローリングのスペクトラム

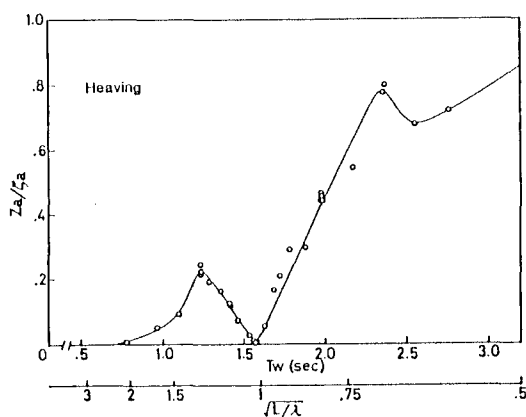


図17 1/20 模型のヒービング応答特性

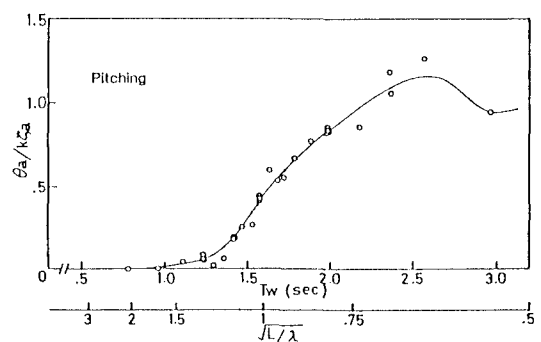


図18 1/20模型のピッチング応答特性

なお、いずれの図もFFT法によつて解析されたものである。

また、1/20模型を用いた規則波中ヒービングおよびピッチング応答特性を図17および図18に示す。図中の T_w は模型スケールの波周期、 L は浮体長さ、 λ は波長、縦軸の z_a はヒービング振幅、 θ_a はピッチング振幅、 ζ_a は入射波振幅、 κ は波数である。

これらより実機についても、不規則波のパワースペクトルと応答関数の線型重ね合わせにより、各成分運動のスペクトラムが得られることが確認された。なお、ローリング運動が少なからず検出されているが実海域の波浪が多方向スペクトル波であることに加え、「海明」が必ずしも波の進行方向に完全に追隨していないことに起因していると考えられる。

5. おわりに

「海明」実験は昭和61年3月に終了したばかりであり、現在までの時点では得られたデータの多くは解析されていない。従って、今後ここに報告した項目以外に、空気タービン発電機効率、空気流位相制御、係留力などについて解析を行ない、同時に検討を進めている最適化装置に関する成果を加えて、本方式の波力発電装置による発電コストの推定を行なう予定である。なお、「海明」は昭和61年6月に、実験海域から撤去されたうえ、以後、タービン発電機などの船上装置が取り外されたうえ、船体各部部材の損傷検査が行なわれた後に、解体されることになる。

最近、石油価格が低落したため、自然エネルギー開発への関心がさめつつある感をうかがうが、研究開発は、時代の波に流されることなく、進めていかなければならない。波力発電装置の研究についても、「海明」はまだその第一歩であり、そこから見出された数多くの問題点を解決し、真の実用化へ結び付ける必要がある。

本報告を終えるにあたり、実験海域の地元関係者として寛大かつ多大な御支援を頂きました波電促進協議会、由良漁協、由良、鶴岡市、山形県の関係各位に、心から御礼申しあげます。また、各種の実験および研究内容につきまして暖かい御指導、御助言を頂きました消波発電システム研究会

同専門部会、係留研究会の委員の方々ならびに関係の諸先生方、諸研究機関の研究者の方々に、更に、本実験を行なうにあたり御協力頂きました関係企業各位に、厚く御礼申しあげます。また、本プロジェクトに御指導、御支援頂きました科学技術庁、海洋科学技術センターの関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 海洋科学技術センター；波力発電装置「海明」の研究に関する総合報告，昭和56年
- 2) 石井 進一ほか；波力発電装置「海明」の海域試験結果と今後の試験計画，第一回波浪エネルギー利用シンポジウム，海洋科学技術センター，昭和59年11月
- 3) 堀田 平ほか；沿岸固定式波力発電装置の発電運転試験，土木学会，第32回海岸工学講演会論文集，昭和61年
- 4) 鷺尾 幸久ほか；タンデム ウエルズ タービンの実機性能試験，第一回波浪エネルギー利用シンポジウム，海洋科学技術センター，昭和59年
- 5) 宮崎 武見ほか；消波発電装置の係留に関する水槽実験，海洋科学技術センター試験研究報告，No. 2，昭和53年
- 6) 鷺尾 幸久ほか；浮体式海洋構造物用送電ケーブルの海中懸垂システムの開発，海洋科学技術センター試験研究報告，No.17，昭和61年
- 7) 宮崎 武見ほか；第二期「海明」模型による水槽試験報告，海洋科学技術センター研究試験報告，No.16，昭和61年
- 8) 宮崎 武見ほか；「海明」模型の水槽実験結果について，海洋科学技術センター第11回研究発表会要旨集，昭和60年