

波力発電装置「海明」の発電性能について

海洋科学技術センター 正会員 堀田 平
同上 正会員 宮崎 武晃
同上 鷺尾 幸久
同上 石井 進一

1. はじめに

我が国は、四面を海に取り囲まれており、海岸線の総延長は約5,200km、200海里内の海域の総面積は、国土面積の1.2倍を越える規模となっている。我が国にとって、この海域を開発し、効率的に利用することができれば、その効果は計り知れないものがある。海洋には、我々の生活に貢献することが期待できる自然エネルギー、生物・鉱物資源および空間が膨大に存在しており、これを有効に利用することは極めて重要であり、そのためには政策的、経済的な動向に左右されない確固たる研究開発が必要である。

海洋に存在する自然エネルギーには、波力、潮汐、潮流、温度差、濃度差、バイオマスに加えて、洋上風、太陽光などがあるが、海洋科学技術センターにおいては、離島などへの電力供給を行なう比較的小規模な装置として波力発電装置に着目し、浮体式の波力発電装置「海明」を用いた実海域実験など行ない、これに関する研究開発を進めて来た。とりわけ、浮体式波力発電装置の技術的可能性を確認するための第一期実験が昭和53、54年度に行なわれ¹⁾、その経験を踏まえて波力発電の実用化に対する資料を得ることを目的に昭和60年度に第二期実験が実施された²⁾³⁾。また、「海明」のような浮体式波力発電装置を設置海域の条件に合わせて最適な設計、建造、設置、稼働させたときの波力発電コストの試算を行なった⁴⁾。本報においては、前報⁵⁾における概要の紹介に加え、「海明」の発電性能と本方式の最適型装置による発電コストについて報告する。

2. 浮体式波力発電装置「海明」

「海明」は、振動水柱型空気タービン方式と呼ばれる方式で波エネルギーを電気エネルギーに変換している。これは、底の無い箱を水面に伏せ、その上部に開口を設けてそこに空気タービンを取り付ける方式である。この原理は、波によって箱の中の水面が上下して開口部を出入りする空気流を励起させ、それにより空気タービンを回転させるというものである。「海明」はこのような空気室がその長手方向に13室並び、それに浮力区画を加えた、全長80m、幅12mの、図1示す大型の浮体式波力発電装置であり、図2のように係留されている⁶⁾。

「海明」上には、図1に示すように、タンデムウェルズタービン（定格出力60kW）1台、衝動型タービン（同125kW）3台、米国式タービン（同125kW）1台の合計5台の空気タービン・発電機が搭載されている。また、それらが搭載されていない空気室には開口（ノズル）が開けられており、空気タービンを含めたノズル比を表1に示す。なお、このノズル比が空気室内の振動水柱の運動に及ぼす負荷となる。

「海明」のような浮体式の波力発電装置は、沖合の大きな波エネルギーを吸収し、また任意の規模の電力供給設備とすることができ、離島のようにエネルギー供給が困難な沿岸域への電力供給に適した装置である。

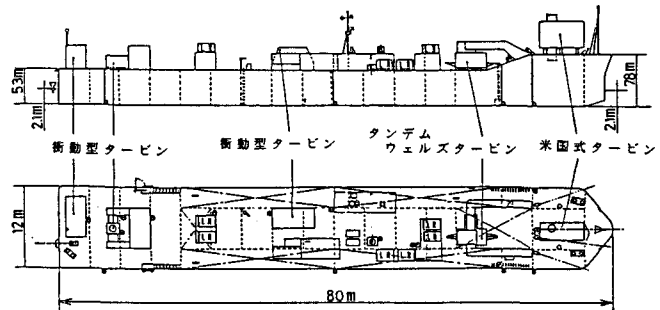


図1 波力発電装置「海明」の概略図

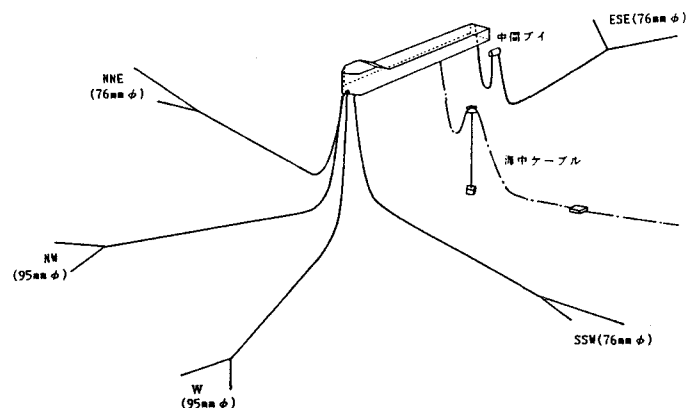


図2 「海明」の係留システム

表1 「海明」各空気室のノズル比

空気室番号	空気室面積 (m^2)	タービン流路面積 (m^2)	開口面積 (m^2)	ノズル比
1M	46.8	0.59	0.170	1/280
2WP	41.6	1.24	0.206	1/202
3N	26.4	--	0.158	1/167
4N	26.4	--	0.158	1/167
5N	26.4	--	0.158	1/167
6U	26.4	--	1.56	1/17
7S	52.8	0.86	0.17	1/310
8N	26.4	--	0.158	1/167
9N	26.4	--	0.158	1/167
10N	52.8	--	0.316	1/167
11N	52.8	--	0.316	1/167
12SP (9-12) 間 (12-13)	52.8	0.86	0.17	1/310
		--	0.503	1/105
13S	52.8	0.86	0.17	1/310

波高 (m) (sec) 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
	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
0~3		0.3	0.3									
~4	1.5	0.3			0.2	0.1						
~5	1.3	1.9	0.6						0.1			
~6	2.3	4.0	6.7	0.9								
~7	0.4	2.7	5.7	8.0	4.6	1.6	0.3					
~8	0.8	1.3	2.6	2.1	2.4	4.4	3.0	1.4				
~9	0.4	1.4	1.7	0.8	1.1	0.5	1.2	1.1	0.5	0.2		
~10	0.8	2.2	1.9	3.3	1.6	1.4	0.7	0.3	0.3		0.1	
~11	1.5	0.9	1.1	1.5	1.5	1.0	0.7	0.2	0.1		0.1	
~12	1.1	0.9	0.6	0.3	0.2				0.2	0.2		
~13	0.9	0.5	0.1	0.1	0.1				0.1		0.1	
~14	0.2							0.1				
~15	0.3	0.1			0.1							
~16	0.1											

図3 実験海域の有義波浪の出現確率 (%)

3. 計測結果

3.1 実験海域および波浪

実験は、山形県鶴岡市由良の沖合約3kmの水深約40mの海域において、昭和60年9月より翌年3月までの間、行なわれた。実験期間中に計測されたこの海域における1/3有義波の出現確率分布を図3に示す。なお、期間中の

1/3有義波の平均値は波高約1.6m、周期約7.4秒であり、平均波エネルギーは約12.8kW/mであった。また最大波高は9.5mを記録した。

一方、代表的な有義波浪時 ($H_s=2.3\text{m}$, $T_s=7.8\text{sec}$) における波浪および浮体の動揺のパワースペクトラムを図4に示す。

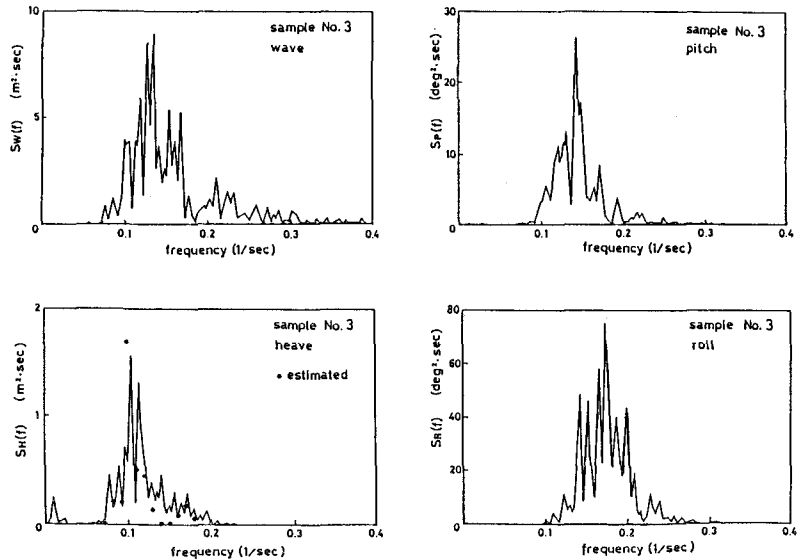


図4 波浪および運動のパワースペクトラム (例)

3.2 浮体運動

浮体運動のパワースペクトラムは図4中に示したが、このうち Heavingの図中に示すプロットは「海明」1/20モデルによる模型実験⁷⁾によって得られた Heaving応答関数を波浪のパワースペクトラムに線形重ね合わせた推定値である。これより、実機スケールと模型スケールの実験結果には相関関係が成り立つことが確認された。

一方、Rollingの成分が少なからず現れていることから、「海明」は必ずしも完全なアテニュエーター型装置(浮体の長手方向を波の進行方向と一致させるタイプの浮体式波力発電装置)として機能していなかったことが観測された。

3.3 空気出力

空気室内の圧力変動を計測することにより、各空気室における一次変換効率すなわち波パワーから空気パワーへの変換効率を求めることができる²⁾。空気室の一例として、船尾空気室(13S)における有義波高に対する空気圧力変動の有義値を図5に、同様にして得られた各空気室の空気圧力変動値から求められた空気パワーの有義波高に対する特性を図6に、また各波高における空気室位置による空気パワーの分布を図7に示す。なお、図6および図7に示す空気室番号は、図7中に略図で示した各空気室を示す。

図6に示した各空気室の空気出力を総計すると図8のような特性が得られ、「海明」の空気出力は概ね波高に比例することが確認された。また、これらのデータを用いて一次変換効率(波エネルギー吸収効率)を求めると当海域における卓越波浪付近すなわち「海明」の吸収効率特性のピーク値付近においては約11%となっていた。これは、1/20縮尺模型を用いた水槽実験⁷⁾によって得られた値とほぼ等しく、これより実海域実験結果は模型実験によって得られたデータを用いて推定できることが確認された。

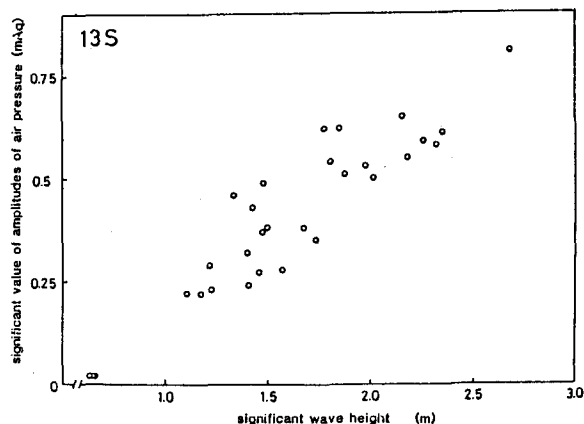


図5 空気出力特性 (13S空気室)

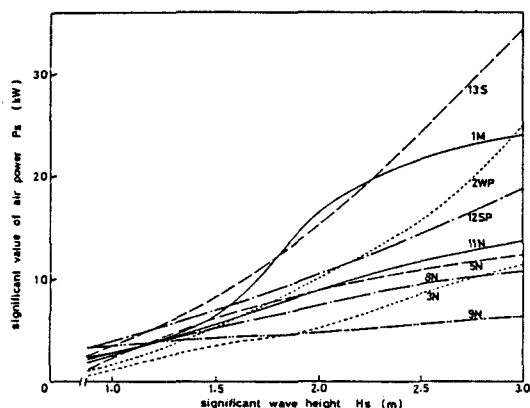


図6 各空気室の空気出力特性

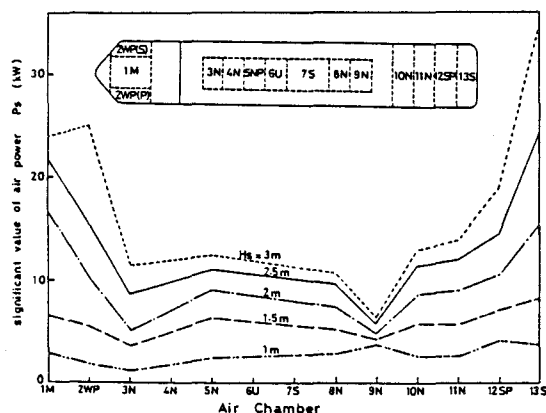


図7 「海明」空気出力分布特性

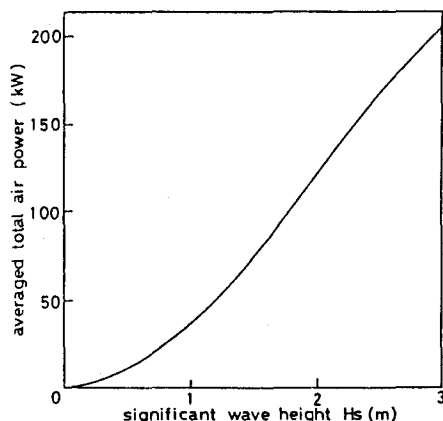


図8 総合空気出力特性

3. 4 発電出力

2WPの空気室に搭載されたタンデムウェルズタービン、12SPおよび13Sに搭載された衝動型タービンの有義波高に対する発電出力の特性を図9～図11に、また、それらに7Sに搭載された衝動型タービンおよび1Mに搭載された米国式タービンの発電出力を加えた総計5基の空気タービン・発電機による総合発電出力特性を図12に示す。

タンデムウェルズタービンは、直径約1.3mのNACA0021、16枚翼のローターを定格出力60kWの同期発電機の両側に取り付けた形式のものであり、沿岸固定式波力発電装置⁸⁾にも搭載された実績を有している。「海明」においては、浮体上で無人運転されることから安全側で負荷制御運転が行なわれたため、必ずしも効率的な発電運転は行なっておらず、図9に示したような発電出力特性となった。

一方、衝動型タービンは往復する空気流に対して整流弁機構を必要とするが、搭載した空気室の空気出力が大きいことから、本実験においては比較的に発電量が大きく、第一期実験¹⁾と同様に、その発電出力はほぼ波高の二乗に比例して増加することが確認された。

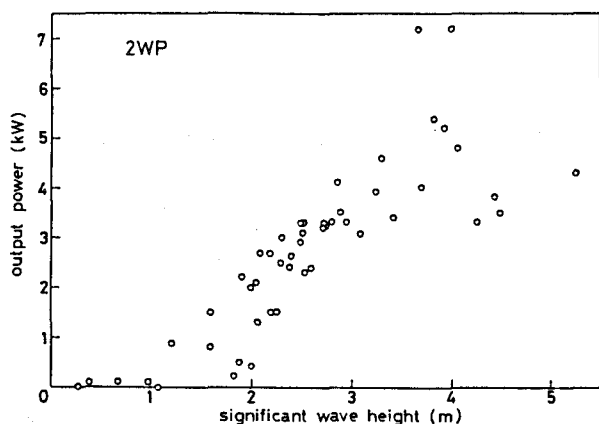


図9 発電出力特性 (タンデムウェルズタービン)

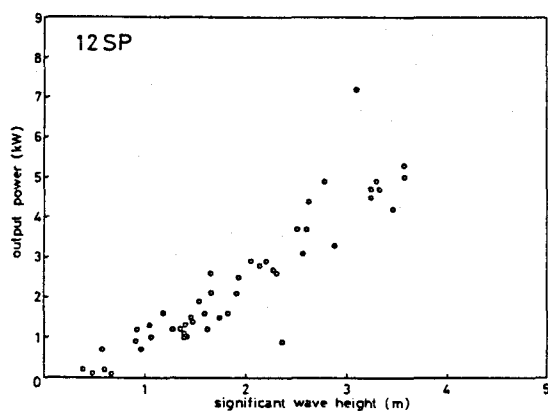


図10 発電出力特性 (衝動型タービン-12SP)

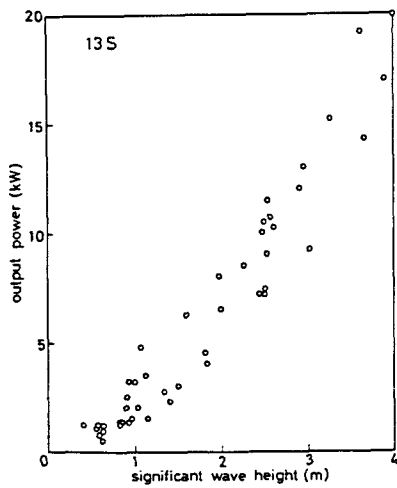


図11 発電出力特性（衝動型タービンー135 S）

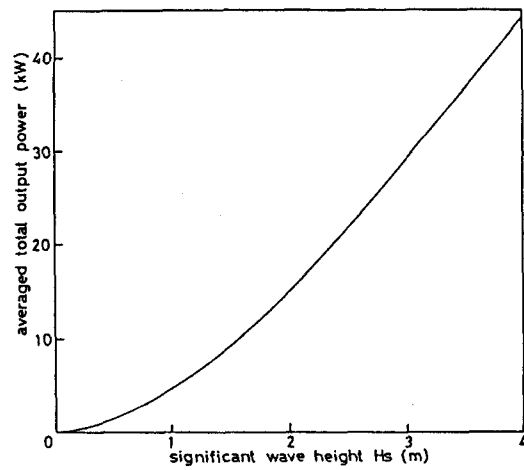


図12 総合発電出力特性

3.5 係留力

船首部に張られた4本の係留鎖に加わる張力を測定したが、それらのうち最も大きな値を呈するWラインの有義波高に対する各計測時間（10分間）における最大係留ライン張力の関係を図13に示す。

なお、本係留ラインは、呼び径95mmφ、第4種のチェーンとその先端に取り付けられた2個の20ton アンカーから構成されており、チェーンの破断荷重は834tonである。従って、本実験においては十分に安全であったことが確認された。

3.6 装置の耐久性

実験終了後、浮体、係留チェーン、空気タービン・発電機および送電ケーブルについて、劣化および破損を調べるための点検調査を実施した。その結果、各部ともに欠陥、強度および性能の劣化は見られなかった。とりわけ、浮体の構造部材については、波浪中において受けた繰返し荷重による疲労を調べるため、「海明」右舷側外板の4箇所から試験片を切出して疲労試験を行なった。その結果、図14に示すようなS-N曲線が得られた。これらより、最も疲労を受けていた浮体中央部についても、疲労を受けていない素材に比べてさほど差はなく、十分な耐久性があることが確認された。

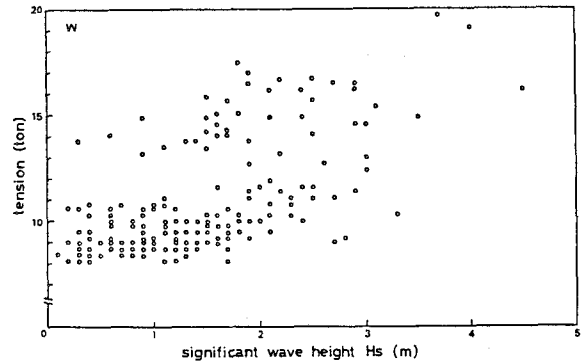


図13 係留ライン張力特性（Wライン）

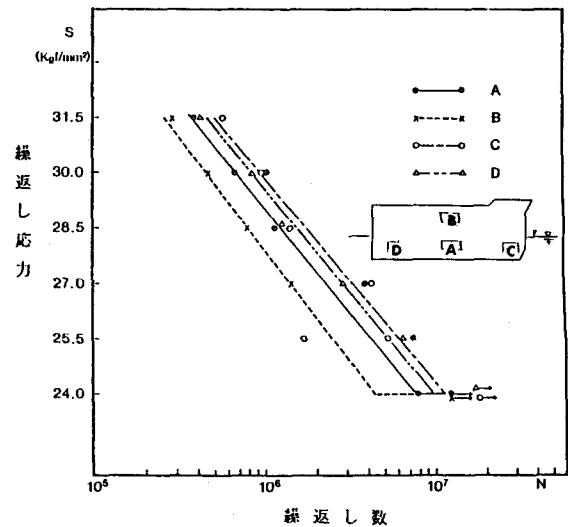


図14 浮体外板の疲労試験結果

4. 最適海明型波力発電装置による発電コスト

前章までに紹介した「海明」は、苛酷な海象下における安全性を最も重要視して設計、建造されたため、波エネルギー吸収性能としては必ずしも優れてはいない。しかし、実海域実験の結果、係留力、構造強度などについては十分に安全であることから、波エネルギー吸収効率をより向上させたタイプの装置とすることは可能である。そこで、このような装置として最適海明型波力発電装置による発電コストを試算するため、設置海域を想定してケーススタディを行なった。

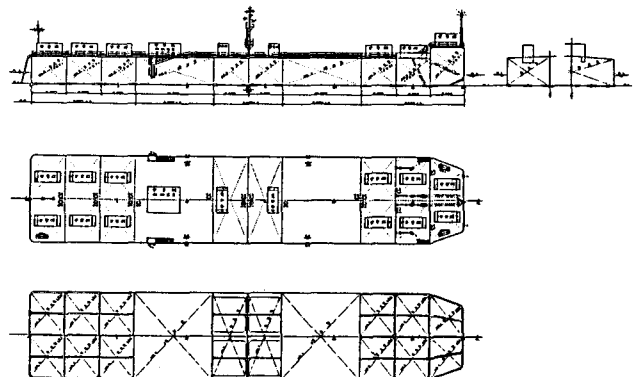


図15 最適海明型波力発電装置

4. 1 最適海明型波力発電装置

海明型すなわちターミネーター方式の浮体式振動水柱型波力発電装置として、最も波エネルギー吸収効率が高い装置として、理論計算結果⁹⁾にもとずいて試設計を行なった。設計された浮体式波力発電装置の一般配置図を図15に示す。また、本装置の波エネルギー吸収効率として、模型実験によって得られた、波長(λ)／浮体長(L)に対する特性を図16に示す。

4. 2 発電装置

空気タービンとしては「海明」に搭載されたタンデムウェルズタービンとし、これと相似な形状とする。ここで、空気室において、振動水柱の運動が最適となるように負荷すなわち空気タービンを決定しなければならない。ちなみに負荷に空気タービンを用いずにノズル(開孔)を用いたときの規則波中における空気出力効率を図17に示す。これより、ノズル比(ノズル面積／空気室面積)が1/100～1/150の状態が最適であることが判る。一方、空気タービンにウェルズタービンを使用したならば、タービン部の流路面積の約1/6がノズル面積に相当する¹⁰⁾。図15に示した最適海明型波力発電装置の空気室面積は約100m²であり、従って本ケースでは、直径3m、定格出力80kWのタンデムウェルズタービンを6基だけ搭載することになる。

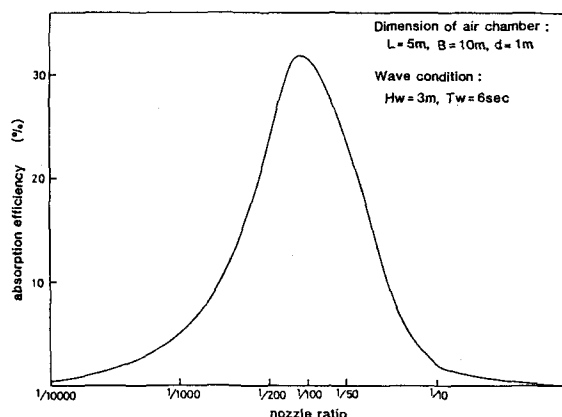


図17 ノズル比に対する波エネルギー吸収効率

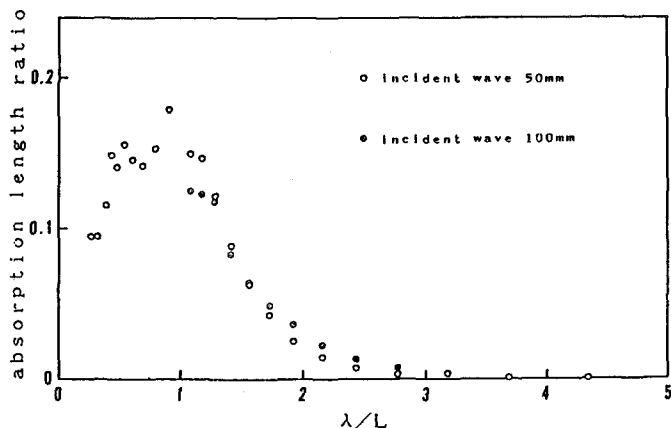


図16 最適海明型波力発電装置の
波エネルギー吸収効率(模型実験結果)

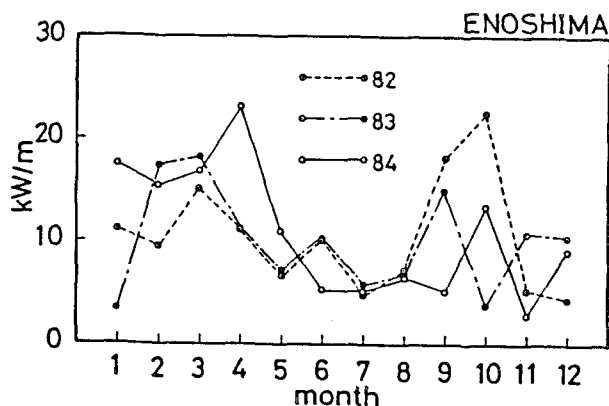


図18 宮城県牡鹿半島沖の波パワーの推移

4. 3 発電コスト

以上に示した最適海明型波力発電装置を東北地方の太平洋沿岸に設置したとして、当海域における波浪データより最適な浮体寸法を求めて試設計を行ない、一方、それによる発電出力を予測して、これらを用いた発電コストの試算を行なった。

宮城県牡鹿半島沖における波浪データ¹¹⁾として波パワーの月間平均値の推移を図17に示す。この年間平均値は約10.8kW/mであり、また年間平均有義波周期は約8.8秒である。

これより、最適な装置の試設計を行なうと、長さが120m、幅24mの浮体を得られ、これに6基の空気タービン・発電機を搭載し、水深約40mの海域に設置したときの一隻あたりの設備費は表2に示すように約5億5千万円となる。これに、耐用年数を35年として、ランニングコストを加え、また金利を6%として35年間

表2 最適海明型波力発電装置の設備費

(1) 浮体本体		216,000千円
(2) タービン・発電機		
① タービン	30,000千円/台、6台/隻	180,000千円
② 発電機		
Ⅰ) 誘導発電機	5,000千円/台、5台/隻	25,000千円
Ⅱ) 同期発電機	10,000千円/台、1台/隻	10,000千円
③ 制御盤	5,000千円/台、6台/隻	30,000千円
④ 保護装置	5,000千円/台、6台/隻	30,000千円
(3) 係留装置		
① チェーン	250m×3本×44千円/m	33,000千円
② アンカー	15ton×3個×200千円/1個	9,000千円
(4) 諸経費		
① エンジニアリング費		
Ⅰ) 電気系統工事費	400千円/台、6台/隻	2,400千円
Ⅱ) システム設計費	2,000千円/隻	2,000千円
② 設置工事費		
Ⅰ) 曳航費	7,500千円/隻	7,500千円
Ⅱ) 係留工事費	8,400千円/隻	8,400千円
合 計		553,300千円

の運用経費を求めると、その総計は表3に示すように約12億円になる。

これに対して発電出力の35年間に亘る総計値は約25 GWh となる。よって、本ケースにおける発電コストとしては約47.4円/kWh が得られた。

5. おわりに

以上に述べたように、「海明」を用いた実海域実験および最適海明型波力発電装置の試設計の成果として、我が国の沿岸域においても、波力発電コストが50円/kWh 以下で発電を行なうことが可能な見通しを得ることができた。

しかし、原子力、火力等の大規模発電に比べればこれでもまだ安価とは言えない。従って、実用装置の建造、設置のためには、これ以上の発電コストの低減化を図れるうえに、波エネルギーを吸収しただけ後方の海域を静穏化でき、今後活発化するであろう海洋開発の進展に寄与するであろう高性能、多目的な波エネルギー利用装置の開発が必要であると考えられる。「海明」の開発によって培われた波エネルギー利用技術を、実用装置として我々の生活に貢献できるレベルに到達させるまで、いま一步、この研究開発に力を注ぐべきである。

最後に、実海域実験の地元関係者として多大な御支援を頂きました波電促進協議会、山形県漁業協同組合由良支所、由良、鶴岡市、山形県の関係各位に、心から御礼申し上げます。また、各種の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、厚く御礼申し上げます。また、本プロジェクトに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致します。

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12月
2) 海洋科学技術センター；波力発電装置「海明」第Ⅱ期計画研究報告書，昭和62年3月
3) 鷺尾幸久，宮崎武晃，堀田 平，工藤君明，石井進一，益田善雄；波力発電装置「海明」の第二期海域実験，第二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62年6月
4) 宮崎武晃，堀田 平，鷺尾幸久，工藤君明，石井進一；海明型波力発電装置の経済性検討，第二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62年6月
5) 石井進一，益田善雄，宮崎武晃，工藤君明，堀田 平，鷺尾幸久，続 辰之介；波力発電装置「海明」による実海域実験報告，第11回海洋開発シンポジウム，土木学会，昭和61年6月
6) 堀田 平，宮崎武晃，鷺尾幸久；浮体式波力発電装置の係留について，海洋科学技術センター試験研究報告，第18号，昭和62年3月
7) 宮崎武晃，堀田 平，鷺尾幸久；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試験研究報告，第16号，1986年
8) 堀田 平，鷺尾幸久，益田善雄，石井進一，宮崎武晃，工藤君明；沿岸固定式波力発電装置の発電運転試験，第32回海岸工学講演会論文集，土木学会，1985年
9) 工藤君明，吉田昭二；海明型波力発電装置の船型に関する研究，第1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，1984年
10) 高橋重雄；波力発電ケーソンの開発，昭和60年度港湾技術研究所講演会講演集，1985年
11) 気象庁；気象庁波浪観測資料，第6～8号，1983～1985年

表3 最適海明型波力発電装置の運用費

(1) 年間運転費		(35年総計)
① 人件費	2,000千円/年	70,000千円
② メインテナンス費		
Ⅰ 点検費	800千円/6台・年	28,000千円
Ⅱ 分解・修理費	4,000千円/台・7年	96,000千円
③ 固定資産税	設備費×0.5%/年	93,275千円
④ 諸費	設備費×0.2%/年	37,310千円
(2) 年間固定費	43,323千円/年	866,468千円
合 計		1,191,053千円