

波力発電装置「海明」の研究開発（2）

宮崎 武晃*・益田 善雄**・長崎 作治***

1. 緒 言

波エネルギー利用については古くから試みられてきたが、成功した例は日本の空気タービン方式による灯浮標のみである。近年のエネルギー危機以来、代替エネルギーの1つとして波力エネルギーを考え、日本や英国の数種のアイデアが核となり波力発電の研究が始められた。

海洋科学技術センターでは、波エネルギーを大規模に電気エネルギーへ交換し取り出す事を目的とし、波力発電装置

「海明」の研究開発を開始した。「海明」は大型浮体構造物であり、山形県由良港沖の外海に錨鎖にて係留され波エネルギーを捕捉し発電するシステムである。

第一海上実験は53年8月より54年4月まで、「海明」本体上に3組の発電装置を搭載し実施され多くの成果を得た¹⁾。その後、各種の改良、発電装置の増設、計測システムの強化を計り、54年8月より第二次海上実験を実施し、多くの貴重なデータを取得したので結果を明らかにし今後の波力発電の研究と実用化に役立てる。なお第二次海上実験はIEA（国際エネルギー機関）のプロジェクト研究として採択され、日本を軸にアメリカ、イギリス、カナダ、アイルランドの5ヶ国共同研究として実施された。

2. 本体装置

「海明」本体は浮力室と多くの空気室からなり、空気室内の水面は波の通過によりピストン運動し、上部のノズルから高速空気を出入させる。この空気流の方向をタービンに対して常に一定となるように制御する弁箱装置が本体上に乗る。

「海明」本体は、模型実験の結果から風波の作用力が小さく、波エネルギーを十分吸収できる船型形状とし、日本海北部の冬季間の海上実験を考慮し、強度、安定性

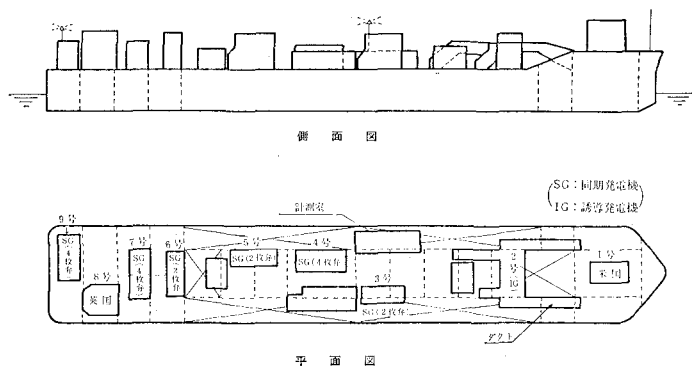


図-1 全体配置図

を検討した後、図-1に示す、長さ80cm、幅12cm、高さ7.8cmで内部に4個の浮力室と17個の空気室を配置した。全体重量は、8台のタービン発電機と艀装品を含め820tとなった。

発電装置は第一実験で使用した波面の片サイクルのみ仕事をする2枚弁方式3台に加え、長周期波に対して出力が増大する波面の上下両サイクル共に仕事をする4枚弁方式3台と、空気出力の平滑をねらったダンパータンク4枚弁方式1台、これに英国製4枚弁方式1台の計8台にて実験が行なわれた。同時に無弁方式のアメリカービンも実験する予定であったが、製作の遅れから実験することはできなかった。

空気タービンおよび発電機は、第一次「海明」実験で使用した装置とほぼ同じであるが、重心を下げることを考慮し横置きとした。又、小さな波からも発電するように改良した。

3. 海上実験

昭和54年9月より昭和55年4月まで8カ月間に渡り、第1次実験と同じ山形県鶴岡市由良沖の約3kmにおいて、前回と同じ係留装置を使い実験を行なった。

同海域は水深40mで、係留用鎖の長さは水深の5～6倍の長さとし、No.2発電機の発電電力は海底ケーブルにより陸上配電系統へ送電される為、「海明」の運動を限定した係留技術が特に必要となり前方4点、後方1点のスプレッド係留とし、船首が固定され船尾が約118°

* 正会員 理修 海洋科学技術センター海洋利用技術部

** 海洋科学技術センター海洋利用技術部研究主幹

*** 正会員 東海大学教授 海洋学部海洋土木工学科

振れ回る方式とした。

第二次海上実験では次の項目について主に検討された。① 実験海域の波エネルギー、② 係留の安全性、③ 本体装置の運動、④ 空気室への作用波と空気出力、⑤ 空気室の位置による出力の差異、⑥ 各タービン・発電機の特性と出力、⑦ 空気整流方式による出力比較、⑧ ダンパータンクによる出力平滑効果、⑨ 陸上配電系統への送電と問題点、と、検討事項は多岐にわたっている。このため計測項目も 82 点と増加し、全てのデータはモード切換えを持つ 27 チャンネル無線テレメータにより送信され、陸上本部にて受信され記録および解析処理された。

（1）実海域波浪

波の観測は第 1 次実験で使用したブイ式波高計、船舶式波高計に加え、データウェル社（オランダ）のウェーブライダーと海底設置式超音波波高計を装備し使用した。

ブイ式とウェーブライダーは球形ブイ中に加速度計を入れ、上下加速度を 2 回積分して波高とする方式である。

波高値は、波長の短い船舶式波高計がわずかに小さな値を示す。それ以外は、4 種ともほぼ同じ波形とスペクトルを示した。特に超音波式とウェーブライダーは極めて良く一致している。ウェーブライダーの記録から、通常の有義波処理法で計算した場合の有義波高を $H_{z1/3}$ とし、また FFT 法を使い（1）式、（2）式の関係から求めた有義波高 $H_{1/3}$ の両方を比較する。

ここでエネルギースペクトル $E(f)$ と水位変動 $\bar{\eta}(t)$ が与えられたときの全パワー E は次式で与えられる²⁾。

$$E = \int_0^{\infty} E(f) df = \bar{\eta}^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

このパワー E と有義波高 $H_{1/3}$ について次式を使用する。

$$H_{1/3} = 4.00\sqrt{E} \quad \dots\dots\dots (2)$$

図-2 より $H_{z1/3}$ と $H_{1/3}$ の関係は $H_{1/3} = 1.05H_{z1/3}$ となり、逆に（2）式を修正すると $H_{1/3} = 3.8\sqrt{E}$ となり、これまでの実測値の報告³⁾の値 3.8 が日本海においても言える。

（2）係留力

係留力は第 1 次テストに比べ第 2 次テストでは装置の重量の増加と風圧面積の増加により、第 1 次の最大張力 54.5 t に比べ 84.4 t と大きくなった。

図-3 にそのとき「海明」に作用した波（船舶式波高計の記録）と張力の記録を示す。この時の風向 283°、平均風速 16.7 m/s、有義波高 $H_{1/3} = 6.1$ m、最大波高 9.8 m であり、図-4 にそのときのパワースペクトルを示す。図-3 の解析より、係留力は 104 秒の長周期変動と 7.7 秒の変動が含まれており、短周期は同時刻の「海明」の縦揺れ周期と一致し、また長周期は前後揺れ周期

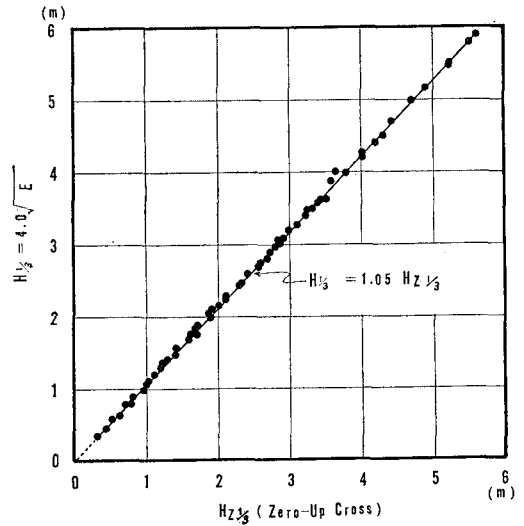


図-2 有義波高比較

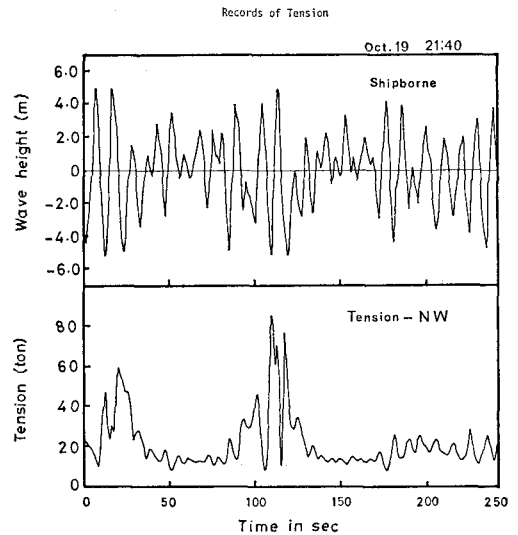


図-3 張力の記録

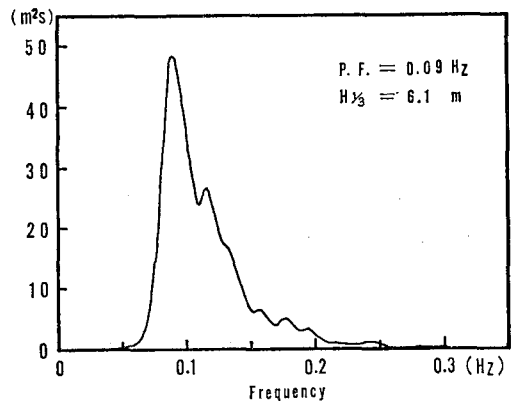


図-4 パワースペクトル

と同じと思われる。

使用した係留用鎖は直径 95 mm 使用荷重 650 t, 2 ラインと, 直径 76 mm 使用荷重 307 t, 3 ラインであり, 84.4 t の張力は 95 mm ラインに加わっており安全性は十分である。

(3) 相対波高

「海明」は浮体構造物であるため, 波により船体運動をする。波と共に運動しては空気室への作用波は相対的に小さくなる。この空気室へ作用する空気室外側の波高を相対波高と呼び, 船首, 中央, 船尾, の各両舷と空気室内部に, センサーを取付け観測を行なった。

計測の結果を図-5 に示す。ここで相対波高比とは「海明」の前方約 200 m に敷設したウェーブライダーの波高との比を取ったものであり, 波高が高くなると相対波高比は 0.5~0.4 と小さくなり特に船中央では波高の 0.3 と小さくなる。このことは空気室内部へ作用する波高も小さいものと考えられ, 発電出力の低下となる。

ここで 1 例として外部波高, 相対波高, 空気室内部波高の有義値を比較する。いま, $H_{1/3}=2.2$ m の波が「海明」に作用し, 左舷および右舷の相対波高は各々 1.5 m, 1.0 m で, この平均値 1.25 m が空気室へ作用したと考えられる。空気室の内部波高は 1.0 m と観測されたため, 波エネルギーは波高の 2 乗に比例すると仮定し, 外部波の持つエネルギーの約 20% が内部波高として作用したと考えられる。この値はかなり低い値であり, この

原因は, このときのスペクトルピーク周期の値が 8.33 秒であり最も高効率を得られる波周期の約 1.28 倍と長周期であり, 「海明」が縦揺れおよび上下揺れを起こすためである。

(4) 発電出力

1) 整流方式による発電出力の差異

「海明」上では 2 種類の整流方式により, 空気室内で発生した空気流をタービンに対して一方向より流れるようにした 2 枚弁方式と 4 枚弁方式, 図-6 がある。2 枚

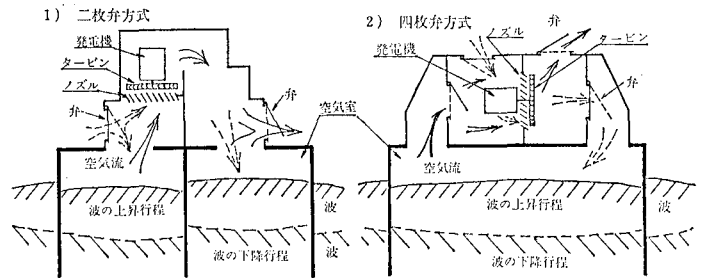


図-6 整流方式

弁方式は 4 枚弁方式に比べ弁の数を半分に減らす事ができる特徴があるが, 水槽実験より長周期波では 4 枚弁方式が出力が大きい結果が得られたので, 実海域にて比較してみる。

図-7 に 2 枚弁方式と 4 枚弁方式の発電出力の差異を示す。

これによると波周期が長くなるに従って両者の発電出力の差は大きくなり, 4 枚弁方式は長周期の波に対して有利である事を実証している。

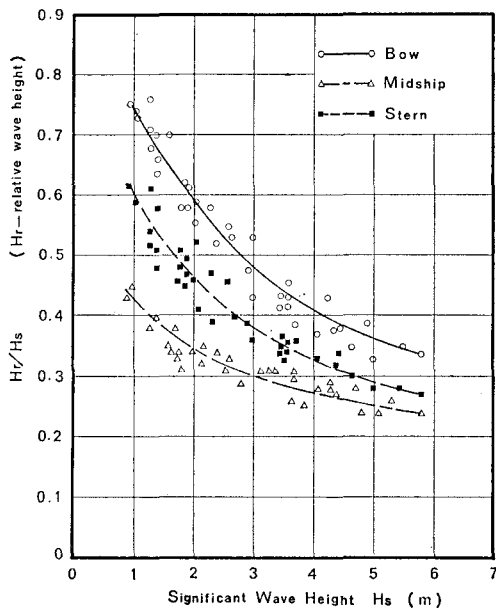


図-5 相対波高比

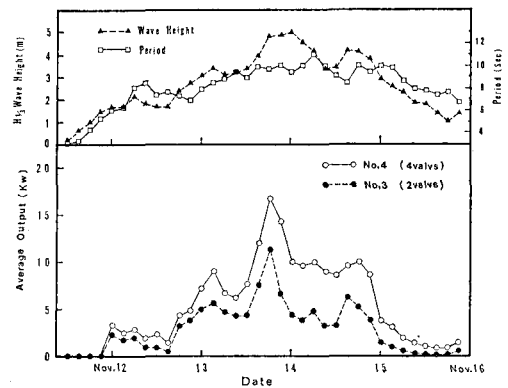


図-7 発電出力の比較

2) 発電出力の変動

発電出力は波高の変化と共に変動するが, その変化は個々の波によるものではなく, 波のグループ波あるいは波の包絡線の変化に近い。図-8 に No. 9 発電機の発電出力変動例を示す。この時の最大出力は 290 kW を示すが, このときの 19 分間の平均出力は 50 kW とピー

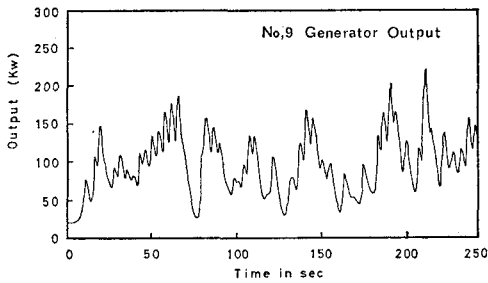


図-8 No. 9 発電出力

ク出力値の約 1/6 と低い。この様に最大出力と平均出力に大きな差があるため、機械の設計は困難であり、十分安全を持つ設計とするか、またはピーク出力をカットする工夫が必要である。

3) 陸上配電線への送電試験

No. 2 誘導発電機の発電出力を海底ケーブルを通して陸上の配電線へ送電する事を目的とした。また、この

表-1 No. 2, No. 9 発電出力比較

1/3 有義波高 (m)		0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
No. 2 誘導発電機	最大出力 (kW)	20.0	35.0	66.0	95.0	125.0	150.0	シャ断 器作動
	平均出力 (kW)	3.0	5.4	10.4	14.7	20.0	25.0	
No. 9 同期発電機	最大出力 (kW)	5.0	20.0	60.4	110.0	160.0	220.0	300.0
	平均出力 (kW)	0.5	2.0	7.5	17.5	26.0	35.0	50.0

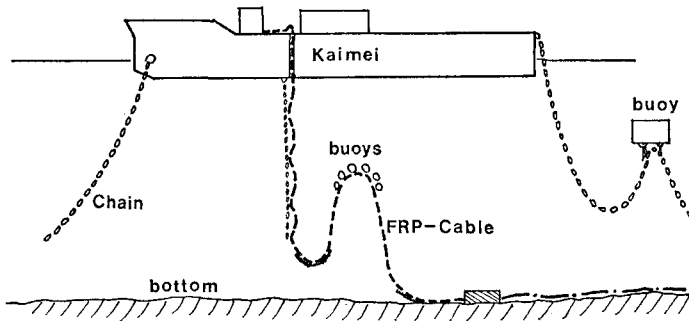


図-9 送電ケーブルの敷設方式

No. 2 発電装置は空気出力の平滑化を試みたダンパータンク式によるものであり、3 個の空気室を使い 1 台のタービン発電機を動かすが、3 個の空気室とタービンの間に約 400 m² の容積を持つダンパータンク（「海明」の浮力室を利用）2 室を使い正圧、負圧を貯え、平滑化して入力の変動を減らす試みである。整流方式は原理的には 4 枚弁方式であり 200 枚の弁を内部に持つ大きな装置である。

しかし、より良い平滑化には現在のダンパー室では容積が不足しており、約 2 倍の容積が必要と計算される。

誘導発電機による発電出力の系統への接続実験は、当初、技術的に検討すべき問題が数点あり、接続時のラッ

シュ電流、出力変動に伴う系統電圧への影響、切断時の自己励磁現象など問題であったが、いずれも許容限界を大きく下廻り問題とならなかった。

表-1 に 1 月 14 日～1 月 31 日間における有義波高別発電出力を No. 9 の同期発電機と対比して示す。同期間には過大波による発電出力の変動に伴う一般配電系統への影響を防ぐため、最大出力を 150 kW に制限し、それ以上の出力発生では遮断機を落とすと共に、弁箱の安全弁を開き空気圧を逃がす安全策を講じた。しかし、実際には 150 kW 程度ではほとんど系統への影響は無く、最大出力の設定値を上げてても良い事となった。

なお誘導発電機は発電機特性から、電圧 200 V 一定、回転機 600 rpm、周波数 50 サイクル一定であり、電流値のみが変動する。陸上への送電は 図-9 に示す FRP 特殊外鍍ケーブルと中間ブイ方式の組合せにより船上で電圧を 6000 V へ昇圧し陸上へ送電した。誘導発電機による発電は予想通り、同期発電機に比べ変動周期は大きい。この原因は、誘導発電機は一定速度で回転するため、同期発電機のように入力に従って回転速度を変え、タービン発電機の慣性力を利用し、発電出力を長周期変動とすることができない。しかし電圧一定という利点を備えており、容易に系統へ電力を供給することができる。

4) 有義波高別発電出力

図-10 に有義波高に対する各発電機の平均出力を示す。このグラフでは、発電出力は位置による差と発電方式による差を含んでおり全体の傾向を示すものとなっている。残念ながら No. 1 発電機が搭載されてないが、No. 1 発電機の空気出力は一般に No. 9 発電機より高いため、No. 1 発電機の発電出力は No. 9 発電機よりも大きいものと思われる。

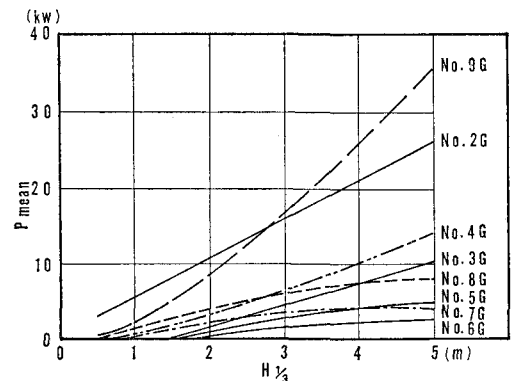


図-10 出力比較

No. 5 発電機, No. 6 発電機, No. 7 発電機は空気出力が低くタービン発電機とのマッチングが悪かったため出力が低かったが, 今後, 空気出力とタービンのマッチングおよび空気室と浮力室の配置について検討する必要がある。

4. 結 論

2 年間にわたる海上実験は大きなトラブルもなく終了することができた。この間、波から大きなエネルギーを取り出すことの成功と本体装置および係留の安全性を確認、発電出力の向上、出力の平滑、陸上配電系統への送電と、当初の目的を達成した。

今後は、取得データをより厳密に解析し、発電出力を増大するための本体、空気室形状の改良、タービン発電機の再検討、出力平滑化の研究等続け、より実用的な波力発電装置の完成を目標とする。

本研究は海洋科学技術センターを中心に、多くの人々の協力のもと実施されたものであり、ここに関係者の方々に心より感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 宮崎武晃・益田善雄・長崎作治: 第 26 回海岸工学講演会論文集, 1979, pp. 660~663.
- 2) 光易 恒: 第 17 回海岸工学講演会論文集, 1970, pp. 1~7.
- 3) Goda, Y.: "A Review on Statistical Interpretation of Wave Data", Rep. of Port and Harbour Res. Inst., Vol. 18, No. 1, 1979, pp. 5~32.
- 4) Masuda, Y.: "Wave Power Electric Generation Study in Japan", International Symposium on "Wave and Tidal Energy", 1978, pp. 85~92.
- 5) Miyazaki, T.: "Test on the Wave Power Generator Kaimei", OTC 3689, 12th, Offshore Technology Conference, 1980.