

波力発電装置“海明”の研究開発

宮崎武晃*・益田善雄**・長崎作治***

1. はじめに

波力エネルギー利用については約100年前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。

波力エネルギーを大規模に利用することを目的とした各種模型実験を行い、この結果に基づき大型波力発電装置“海明”を製作し、昭和53年度日本海において第一次海上実験を実施した。本文は、これまでの研究経過と装置の概要および海上実験の結果を示したものである。

2. 波力発電システム

“海明”は図-1で示すように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、この空気

流でタービンを回す発電方式とした。

“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、図-2の船型形状とし、その船長が波長の1.2倍のとき波エネルギーの吸収効率がよい。

発電電力は海底ケーブルにより送電されるので、“海明”の運動を限定した係留技術が特に必要となった。

3. 実験装置

(1) “海明”本体

日本海北部、冬季間の海上実験を考慮し、強度、安定性を検討した後、図-2に示す、長さ80m、幅12m、高さ7.8m、で内部に4個の浮力室と22個の空気室を配置し、3台のタービン発電機と艀装品を含め重量581tとなった。

(2) 弁箱

空気室内で発生した往復空気流は図-3に示す整流弁2種により、空気の流れがタービンに対し常に一方方向に流れるようにし、この整流弁の開閉は弁箱内外の空気圧差により開閉する機構であり、弁板は軽く強度があるFRP(強化プラスチック)材とした。

(3) 空気タービン

変動する空気流から効率よくエネルギーを取り出すため、タービン翼の型、翼の枚数等の異なる4種類について模型実験を行い、効率曲線のフラットなタービンを製作した。材質は腐食を考慮し、耐食性アルミニウム合金とした。

(4) 発電機

波と発電出力の関係を把握することが、実験目的の1つであり、また海上で長期間無人で発電するため、全閉型ブラシレス同期発電機を用いた。なお発電出力は模型実験から推定すると、平均波高3m、周期6秒の波で、125kwが得られる。

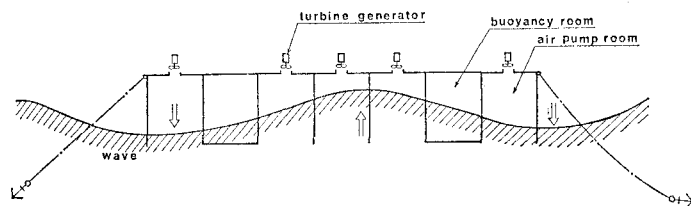


図-1 波力発電の原理

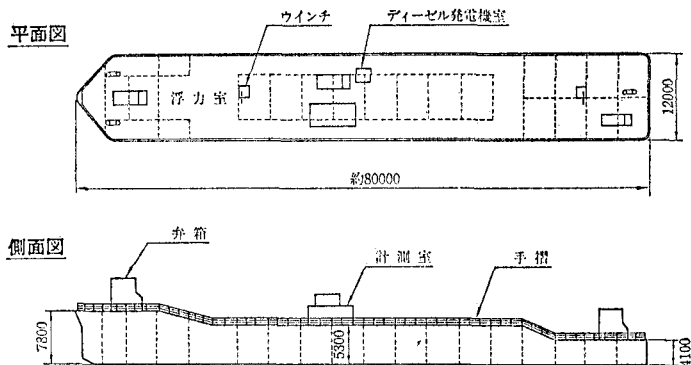
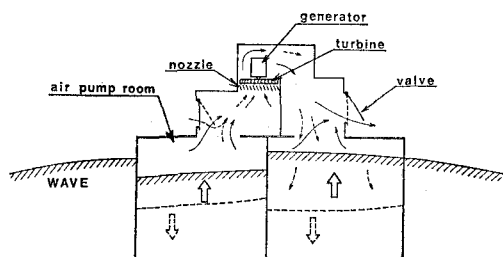


図-2 全体配置図

* 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



图—3 弃箱

(5) 係 留

係留に関しては“海明”の 1/10, 1/20 模型を製作し、実験海域で予想される波を規則波および不規則波により、係留方法をいろいろ変えて水槽実験を行った。

水槽実験によれば“海明”本体の縦揺れは一般船舶の場合と異なり相当低い周波数にならないと応答が1.0に近づかない特性をもつが、上下揺れ、前後揺れについては特に違いはない。

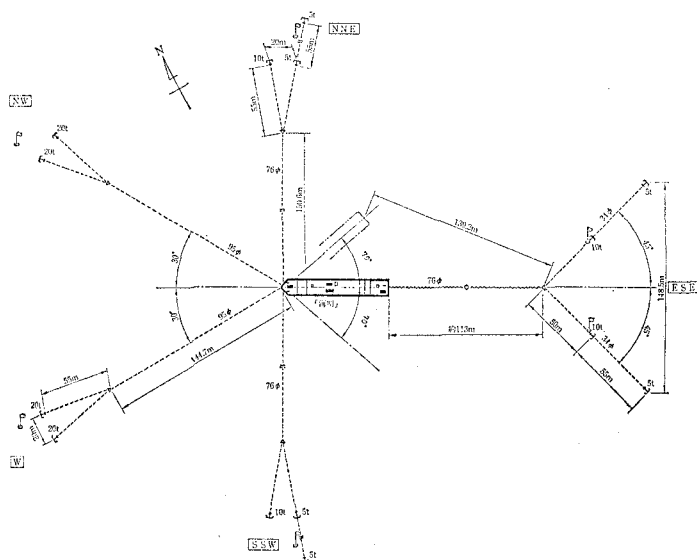


図-4 係留システム

1/10 模型においては係留鎖の長さを水深の 5 倍と 3.5 倍, 1/20 模型では 2.5 倍と条件を変え, 錨部, 船首部および船尾部の鎖の張力を測定した. 不規則波中の錨部の最大張力は規則波中の約 7 倍と大きくなったが, これは波周期と浮体の前後揺れ周期が同調しさらに大きく前後揺れが生じたことによるものと思われる. この最大張力を実機に換算すると有義波高 6.0m に対し最大張力は約 360t (鎖長=2.5×水深) となる.

鎖の安全および錨の軽減を計るため、係留ラインは海底をほう距離を長くとりスラックな係留とし、図-4に示されるように破断力 920 t の 95 mm 径鎖 2 ライン、76 mm 径鎖 3 ライン。錨はクイックホールド型 20 t 4 個、10 t 4 個および 5 t 6 個を使用した。

4. 海上実験および結果

昭和 53 年 8 月より 8 箇月間にわたり、山形県鶴岡市由良沖 3.5km において“海明”上に 3 台のタービン発電機を搭載し実験を行った。

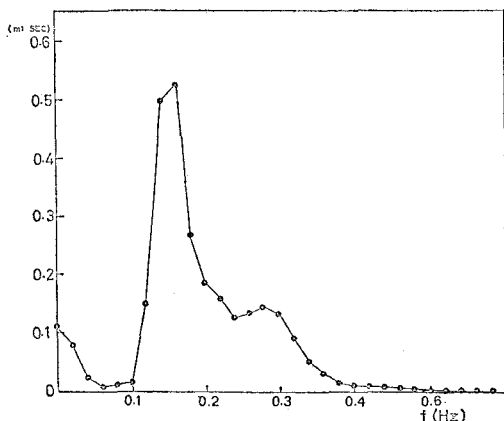
水深 40m における前方 4 点、後方 1 点の係留は“海明”が最も風波の強い方向を常に向き、作用波力が最小となると共に送電ケーブルに対しても“海明”の振れ回りを限定することができ、十分に目的を達することができた。

振れ回りの大きい浮体構造物と海底を結ぶ海中ケーブルの技術はケーブルの構造、敷設方式共に確立した技術がない。そこで“海明”の水槽実験を通じて海中ケーブルの試験も実施した。この結果 FRP 鎧装特殊ケーブルを製作し“海明”の動揺移動から受ける引張り、捩れ、曲げの外力による絶縁の低下、海底との摩擦による鎧装材の試験を行い、比較のため一般に使われている鉄線鎧装ケーブルも試験した。この結果、鉄線鎧装ケーブルはキックが発生し、鎧装材も摩耗した。FRP ケーブルはキックもなく鎧装材の摩耗も少なく絶縁も良好であった。

本実験は自然条件のきびしい環境下での実験であるため、本体の装置のみならず、計測システムも安全で信頼性のある保守の容易なシステムとし“海明”はすべて無人化とし、計測データは無線テレメータにより陸上へ送信され記録された。

波の観測はブイ式波高計と船舶式波高計で行い、船舶式波高計は実験全期間、連続観測を行った。

実験期間中の最大波高 8.8m は 12 月 3 日風速約 20 m/s の風が 20 時間程吹いた時である。参考までに図—5 に 9 月



図—5 波スペクトル

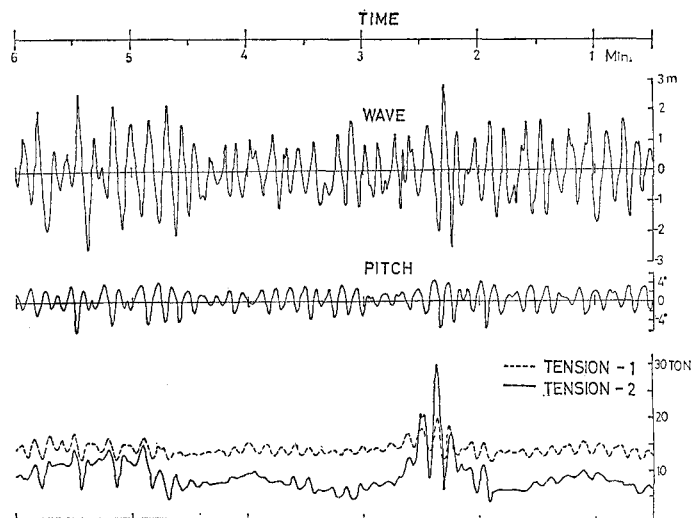


図-6 張力の記録例

12日の波スペクトルの解析を示す。これによると波周期は5.5~8.0秒間に広く分布しており、特に6.7~7.1秒でエネルギー密度が卓越した。この周期は“海明”のエネルギー吸収設計周期 6.0~6.8秒より少し長かった。

“海明”の5本の係留ラインのうちNWとW方向のラインには張力計を取り付け張力を計測した。記録の1例を図-6に示す。

最大張力は、最大波高 8.8m (有義波高 6.3m) 時 NW ライン 52.5t, W ライン 44t であり、鎖の破断力 (920t) に対し十分安全となる。

次に“海明”に作用する波高と係留力の理論計算値と実測値の比較を行ってみる。

浮体に作用する波漂流力は一般に(1)式で示されている。

$$F = 1/2 \rho g \zeta_R^2 (1/2 H_s)^2 B \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 F : 波漂流力、 ρ : 海水の密度、 ζ_R : 漂流力係数、 H_s : 有義波高、 B : 船幅。なお ζ_R は長形浮体の波長と船長が等しいときの水槽実験値 0.75 を用いた。

図-7に示すように波向と係留ライン方向に対し次式

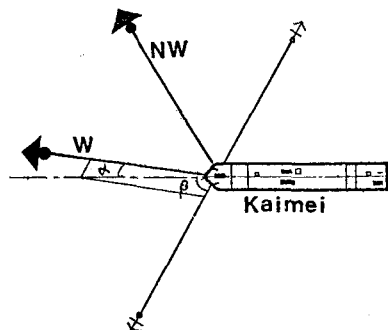


図-7 船首と係留ライン方位

が成立するから W ラインの水平張力が求まる。

$$F_W = F \cos \alpha - F \sin \alpha / \tan(\alpha + \beta) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\alpha + \beta = 60^\circ$$

図-8の Catenary 曲線は次のようになる。

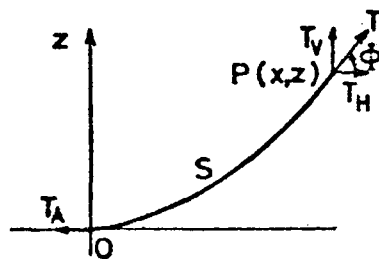


図-8 Catenary 曲線

$$S = T_0 / w \{ \sinh (wX / T_0) \} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$Z = T_0 / w \{ \cosh (wX / T_0) - 1 \} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$T_V = Sw \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$T = \sqrt{T_H^2 + T_V^2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

S : 鎖の長さ、 w : 鎖の単位長さ重量 (171.8 kg/m)

Z : 水深 (40m)

ここで表-1の有義波高、船首方位に対し上式を用い張力 T を求め、実測値と比較すると表-1のようになる。

表-1 実測値および計算値

No.	日 時	実 測 値				計算値
		波高 H_s (m)	船首方位	風 向	W張力 (t)	W張力 (t)
1	2, Dec. 12:00	3.7	242°	242°	20.0	14.2
2	20:00	5.9	247°	240°	24.0	27.8
3	3, Dec. 04:00	6.3	260°	270°	26.5	37.3
4	12:00	3.7	277°	307°	21.5	17.8

“海明”には3台の発電装置を前部(1号機)、中部(2号機)、後部(3号機)の3箇所に搭載している。

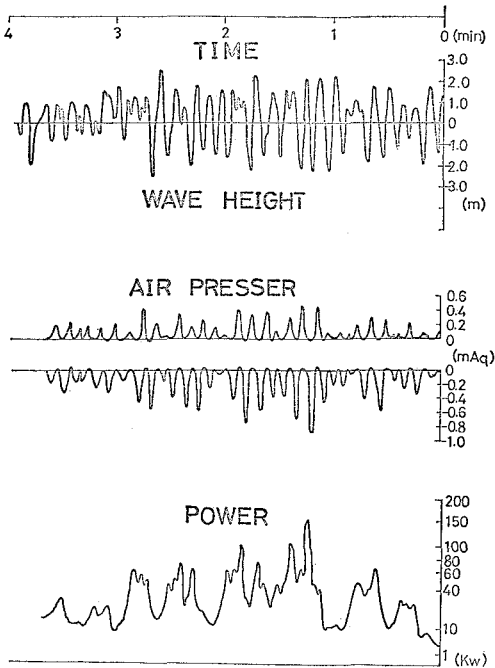


図-9 発電出力の記録例

図-9 に同時刻における波、空気圧、発電出力の記録例を示す。

1号機と3号機発電機の取付位置は70m離れているが発電出力に大きな差異は見られない。しかし2号機は他に比べ約30%の出力低下が確認された。発電機の発電開始回転数650rpmとしたため、実際に有義波高で1.3mの波高以下では発電出力は0となった。発電機1台あたり、瞬間出力150kw以上得られたが、平均出力は20~30kw程度であった。発電出力の変化は個々の波でなく10~30秒周期で大きく変動するが、これは入力波の特性とタービン発電機の特性によるものと思われる。

5. おわりに

今回の海上実験は安全を優先して実験に取り組んだ。このためすべての装置について異常は認められることなく、多くの記録を得ることができた。ただ本実験期間は例年に比べて波が穏やかで、当初期待していたほど総発電出力が得られなかった。今後さらに、0.8~1.3m程度の波についても十分発電できるようにすること、弁箱の改良による出力の向上と平滑化について努力することが必要である。