

波力発電装置「海明」の研究開発(3)

——海上実験と水槽実験間の関係と解析——

宮崎 武晃*・益田 善雄**・長崎 作治***

1. 緒 言

波エネルギーを大規模に電気エネルギーへ交換し取出すことを目的とした波力発電装置「海明」の研究開発を実施した。「海明」は長さ 80 m, 幅 12 m, 重量約 820 t の大型浮体構造物であり, 本体の内部には底が海水中に開いた多くの空気室を持ち, ここで波エネルギーは空気のエネルギへ変換され空気タービンを回し直結されている発電機で発電する, 図-1 に「海明」の全体配置図を示す。

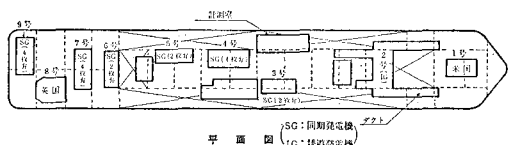


図-1 「海明」全体配置図

「海明」は昭和 53 年 8 月より 55 年 4 月までの間 2 回にわたり, 日本海の山形県鶴岡市由良港沖約 3 km の水深 40 m の海上に錨鎖にて係留され波エネルギーを捕捉し発電した。

第一次海上実験は 53 年 8 月より 54 年 4 月まで, 「海明」上に 3 組の発電装置を搭載し実施された¹⁾。第二次海上実験は各種の改良, 計測システムの強化を計り, 「海明」上に 8 組の発電装置を搭載し実施され²⁾, 短期間ではあるが 1 台の発電機の発電電力を陸上の電力系統へ供給する実験も試みた。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, 日本を軸にイギリス, アメリカ, カナダ, アイルランドの 5 ケ国共同研究として実施され, 特にイギリスは 1 組の発電装置を自国で製作し「海明」に取り付け実験した。

2. 全体システム

「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, 安定性を検討し鋼板構造で 4 個の独立した浮力室と多数の空気室を持つ。空気室面積は船首部の 3 室を除いて 26.4 m² であり, 上部の弁箱装置の構造によりこれらの空気室を独立に使う場合と, 2 室を合せて使用する場合に別れる。

空気室で発生する往復空気流は弁箱装置により一方向流へ整流されタービンへ送られる。2 枚弁式は 2 つの空気室を対に用い, 各々水面の上がり又は下がり行程でタービンを回転させるように 2 組の弁が動作する。すなわち各空気室にとっては半行程の利用となる。これに対して 4 枚弁式は 2 つの空気室を合せて用い 4 組の弁にて, 水面の上下両行程でタービンを回転させる方式である。両方式ともに空気室面積は等しい。

この他, 変動空気圧を平滑化する為空気溜方式进行試験した。これは 4 個の離れた空気室から出る位相のずれた空気圧を 1 度大きな部屋の中に集め圧力変動を小さくしタービンを回転させるもので, 「海明」では両側の浮力室をそれぞれ正圧, 負圧を貯える空気溜室と兼用して使用した。

使用した空気タービンは模型実験の結果から変動する空気流に対して効果的に動作するよう効率曲線のフラットな直径 1.4 m の耐蝕アルミ合金のタービンを製作した。

発電機は海上のきびしい条件に耐えるように全閉型の発電機を設計製作した。陸上送電実験に使用された 1 台は誘導発電機でありこれ以外の 7 台は交流同期発電機で, 発電電力は全て本体上に装備した負荷抵抗器により消費され, この間の電圧, 電流値を計測した。

係留システムは船体への風波の作用力をできるだけ小さくする為本体前面部(船首部)が風波に向く係留方式とし, 本体前部より 4 本の錨鎖による係留としたが, 発電した電力の一部を陸上へ送電するケーブルの関係から振れ回りの角度を約 120° に制限する為本体後部に中間ブイを持つ鎖を 1 本敷設した。実験海域の風波の主方位が西北西の為北西及び西方向の係留鎖は直径 95 mm の鎖を使用し, 他は 76 mm 鎖とした。

「海明」は無人で長期間運転される為, 計測システムは信頼のおける装置とした。データは無線により陸上基

* 正会員 理修 海洋科学技術センター海洋利用技術部

** 研究主幹 海洋科学技術センター海洋利用技術部

*** 正会員 東海大学教授 海洋学部海洋土木工学科

地に伝送され解析、記録されたが、同時に発電装置の監視及びコマンド用にも使えるシステムとした。

陸上送電に関して一般の電力系統へ送電する為、「海明」側及び陸上側に十分な安全対策を試し一般電力系への影響のないように考慮した。

3. 実海域波浪

実験海域の由良は日本海の北東部に位置し西に約 1 000 km, 北西に約 700 km の対岸距離を持ち、夏季は穏やかであるが、冬季は西又は北西の強い季節風が吹く為、夏の穏やかな時期に全ての実験準備を終え厳しい冬に備えた。

波浪観測は 4 種の波高計により実施され、観測値の標準としてオランダ製ウェーブライダーの値を用いた。ウェーブライダーの値と日本で広く使用されている超音波式波高計の合致度を図-2 に $H_{1/3}$ の値で比較し示すが、

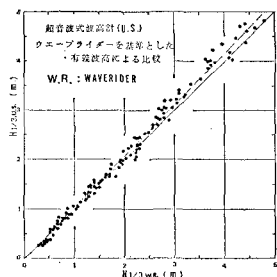


図-2 波高計の比較

波高が高くなるに従い少々ずれるが全体に良く一致している³⁾。

図-3 に第 2 次海上実験中 (55 年 2 月はケーブルの故障により欠測) の波を FFT 法により求めた $H_{1/3}$ と T_p の頻度分布を示す。1 測定点は 3 時間のうちの 20 分間のデータを解析した値であり、最も発生頻度の多い波は波高 ($H_{1/3}$) 1 m, 周期 (T_p) 6.5 秒の波であった。

一般に波力発電装置は発電と波周期は深い関係があり、ここではスペクトルのモーメントを用いて求めた

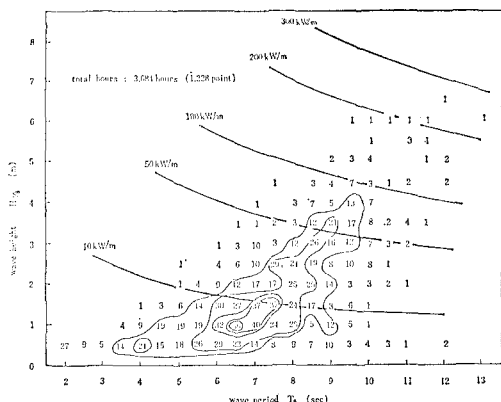


図-3 発生波頻度分布

ローアップクロスの平均周期 T_{02} に着目する。 T_{02} は (1) 式

$$T_{02} = 2\pi\sqrt{m_0/m_2} \dots\dots\dots (1)$$

で表わされる。Pierson-Moskowitz 型スペクトルでは $T_{02} = 0.7104T_p$ であるが、「海明」実験では図-4 に示すように $T_{02} = 0.62T_p$ の値を得た。

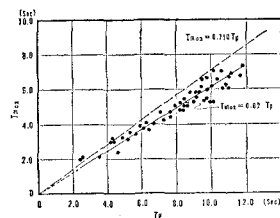


図-4 T_p と T_{02} の比較

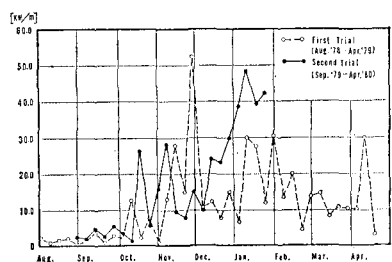


図-5 波エネルギーの年比較

図-5 に 1 週間を単位として単位幅当りの波エネルギーの平均値を求め、第 1 次実験と第 2 次実験を比較して示す。ここで波エネルギー P は (2) 式を使い求めたものであり、

$$P = (\rho g^3 / 64\pi) H_{1/3}^3 T_p \dots\dots\dots (2)$$

ここで ρ は海水の密度である。年により波エネルギーが異なるが、特に第 1 次実験の年は異常気象であり 11 月末に大きな波が発生したが、全般に低く観測期間中の波エネルギーの平均値は 11 kW/m であった。第 2 次実験について調べると、総時間数は 3 684 時間であり (2) 式を用いて総波エネルギー量を求めると約 73 MWh/m と大きい。又図-3 と (2) 式から周期別波エネルギー出現頻度を図-6 に示す。ここで縦軸は総波エネルギー量 73 MWh/m を 100% として示す。これによると周期 (T_p) 9 秒が波エネルギー量が最も多いことがわかる。

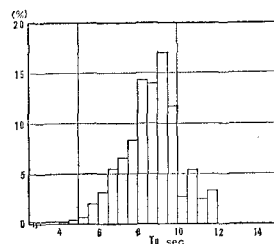


図-6 周期別波エネルギー頻度分布

最大波高は54年10月19日と55年1月31日に10mを記録した。

4. 船体動揺

「海明」は浮体構造物である為波浪により本体の運動が起こるが、発電出力と本体運動は関係があり、本体が波面と同位相で運動すると本体内部の空気室へ作用する波は相対的に小さくなる。又本体が波と逆位相で運動するならば相対的に波は高くなり出力の向上に寄与する。

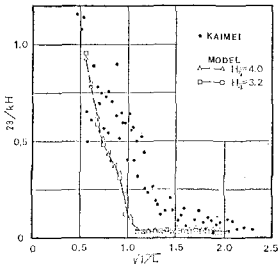


図-7 縦揺れ応答

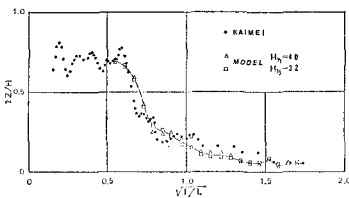


図-8 上下揺れ応答

ここで本体長を l 、波長 L 、波高 H とし 図-7、図-8 に縦揺れ応答、上下揺れ応答の結果を「海明」と相似な 1/20 縮尺の模型実験結果を比較して示す。模型実験に用いた規則波は波傾斜が波長 1.0~6.0 m まで 1/25 としそれ以上では造波機の関係から順次下げてゆく。不規則波スペクトルは海上実験で観測した波スペクトルを使用した。図-7 の縦揺れは両振幅 2θ と波数 k で表わす。「海明」実験と模型実験は $\sqrt{l/L}=1$ の前後で差があり原因を究明中である。図-8 の上下揺れは両振幅 $2Z$ を入射波高 H で除して表わすと両者は良い一致が得られた。 $\sqrt{l/L}$ が 0.75 以下で急に上下揺れは大きくなり 0.5 以下では $2Z/H$ は 0.7 におちつく。「海明」は多くの空気室を持っているが運動は一般の浮体構造物と特別変らない。「海明」の前後の浮力室間の距離は 50.6 m でありこの前後に底の開いた空気室が取付けられ全長 80 m となるがここでは $l=80$ と取った。）

5. 空気出力

「海明」に作用する波と空気出力の関係について「海明」と模型実験を比較して解析する。

1/20 模型実験から本体前部 No. 1 空気室を一例とし

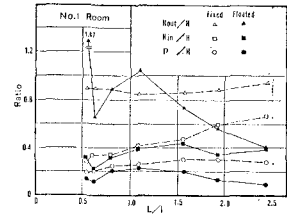


図-9 No. 1 空気室に作用する波高と相対波高、内部波高、空気圧の関係

て規則波中で本体を固定した場合と浮遊した場合の現象を示す。図-9 は空気室外側に取付けた本体を座標とする波高値 H_{out} 、空気室内部の波高 H_{in} および空気室内部の空気圧 p をそれぞれ入射波高 H で除す。横軸は入射波の波長 L を本体長 l で除した。 H_{out}/H では固定状態の場合は一定値を示すが浮遊状態では長波長で本体の運動の影響を受け比は下がる。内部波高は浮遊の場合長波長で外部波高と等しくなる。空気圧は、浮遊では $L/l=1.1$ でピークを示し両側で下がるのがわかる。

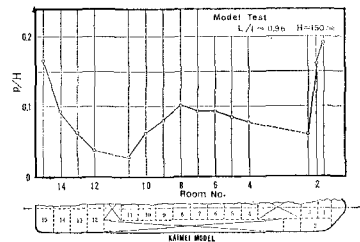


図-10 空気室による圧力分布図

図-10 に「海明」の空気室の圧力分布を一例として模型実験の結果を示す。縦軸は空気圧 p を波高 H で除した値、横軸は空気室の番号を示す。この時の波は $L/l=0.96$ で波高 $H=150$ mm の規則波での結果であり比圧力の高いのは前部、後部、中央部という順であるが、波長によりこの傾向は変り、波長が短い場合は前部、中央部、後部の順であるが、波長が本体長より長くなると後部、前部、中央部の順となる。

図-11 に不規則波中の模型実験と「海明」の空気圧力を比較して示す。不規則波では圧力波形も不規則に変動

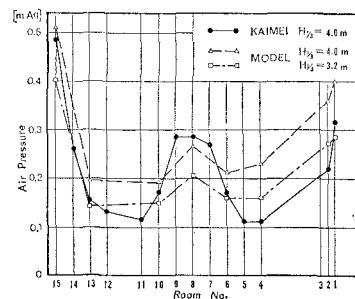


図-11 不規則波中の空気圧力分布の比較

するため波高と同様な処理を加え 1/3 有義圧力として求めた。全体の圧力分布は 図-10 の規則波の結果と一致するが波長が長いと前部に比べ後部の圧力が高い。「海明」実験は傾向として水槽実験と合致するが特に No. 1, 2, 4, 5 の値が低い。この原因は No. 1 の室については未搭載のアメリカの発電装置の設置場所であり、空気室上部に広いノズルを取付けたために圧力が上がらなかったためと思われる。又 No. 2, 4, 5 室は空気溜室と結ばれているため圧力値が低くなったためであろう。

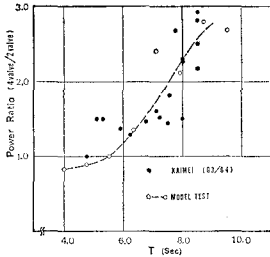


図-12 2枚弁方式と4枚弁方式の出力比較

図-12 に 2 枚弁方式と 4 枚弁方式の模型実験による空気出力の比と「海明」実験から中央部の 3 号機 (2 枚弁) と 4 号機 (4 枚弁) の発電出力の比をとり両者を比較する。模型実験の結果からもわかるとおり、5.5 秒より短周期の波では 2 枚弁の空気出力が高いが、5.5 秒より長周期の波では 4 枚弁が高く 0.8 秒より長周期では空気出力は 2 倍に達する。空気出力 W は (4) 式を基本とし (5) 式から求めた。

$$W=9.8Ap_s v \dots\dots\dots(4)$$

p_s : 静圧, v : 流速, A : 流出面積 (流量係数×面積)。

ここで本実験装置で変動する気体の平均流速の測定は誤差が大きくなる。そこで空気圧が高くないことから非圧縮性という仮定のもと次式が成立する。

$$p_s=p_a=\rho v^2/2, \quad p_a: \text{動圧}, \rho: \text{空気密度}$$

(4) 式は (5) 式で表現されるから空気室内の静圧と流出面積から計算される。

$$W=9.8\sqrt{2}\rho A p_s^{3/2} \dots\dots\dots(5)$$

図-12 の「海明」実験の出力比とは発電出力比であり、全周期に渡り 4 枚弁が出力が高いことを示している。5 秒以下の波周期では実際に発電するまでに致らなかった。この点を考慮すると今後は 4 枚弁式が有利である。

「海明」の波エネルギーから空気出力への変換率は入射波の周期と波高により異なるが、図-13 に 1/20 縮尺模型の規則波実験の結果を示す。ここで入射波のエネルギー幅として本体長 l と等しい (本体の幅の 6.7 倍) と仮定し、各空気圧からの出力は (5) 式で求め合計し全体

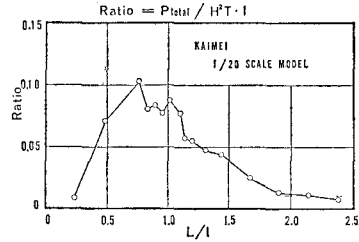


図-13 波エネルギーから空気出力への変換率

の空気出力とし、入射波エネルギーと全体空気出力の比を変換率とし縦軸に、波長/本体長を横軸にとる。水槽波の波傾斜は 1/25 とした。

変換率の最大は $L/l=0.75$ の時で約 0.1 の値を示す。0.05 以上の値が得られるのは L/l が 0.4~1.25 となる。そこで「海明」に適用すると波長 32 m~100 m, 波を深海波と仮定すると波周期は 4.5 秒~8.0 秒に相当し、変換率の最大は波長 60 m (周期 6.2 秒) で得られる。

6. 発電出力

第二次海上実験中、2 月は送電ケーブル故障によりデータ欠測があったが、実験期間中計測した総発電量を計算すると約 52 MWh となり、月別に見ると 1 月が最も大きく約 19 MWh であった。しかしこれらの数値には発電出力が大きいと思われる 1 号機及び陸上送電用 2 号機の出力は加算されていないが残り 7 台の発電機の瞬間最大出力値は約 600 kW を越えた。発電出力の傾向は、波高が高くなると電気出力も増加するが波高の増加に伴い周期も長くなり出力の増加は頭打ちとなる。又 図-14

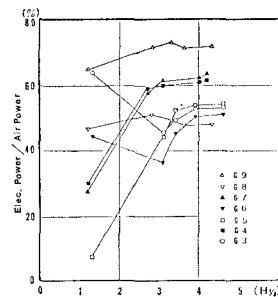


図-14 各発電機の空気出力から発電出力への変換効率

に各発電機の空気出力から発電出力への変換効率を縦軸に、横軸には波高をとり表わす。全般に空気圧力の高い空気室に取付けられた発電装置の効率が高いことがわかる。

陸上送電に用いられた発電機は定格 125 kW (最大 200 kW), AC 200 V の誘導発電機で、発電電力は「海明」上で 6.6 kV へ昇圧され送電ケーブルにより陸上設備を

經由して、6.6 kV の一般配電系統に送電された。誘導発電機を配電系統に接続する場合、発電機回転速度を同期速度付近(同期速度の $\pm 10\%$)まで近づけた後接続し運転を開始する。このため波の状況に応じて、空気室内の空気を開放あるいは閉塞し回転数を同期速度へ近づけることを試みた。運転を開始すると回転数はほぼ一定で波の状況により電流値が大きく変動する。風時はモータリング状態となるため逆に電力を消費してしまう。このため配電系統と切る必要が生ずる。

送電試験は東北電力(株)と共同で実施し、送電した際に配電系統へどのような影響を与えるかを調べた結果、発電電力に対して約 10 倍の配電線容量への接続の場合には配電系統に特別な支障をきたすことはなかった。

発電出力は有義波高が約 0.9 m から発電を開始し、3 m 付近で瞬間最大出力が 185 kW に達しており、特性は有義波高の 1.5 乗に比例する傾向を示している。

7. 発電電力量の予測

模型実験から求めた波エネルギーから空気出力への変換率 図-13 と実測した波浪特性から求めた周期別波エネルギー出現頻度、図-6 から「海明」の発電電力量を予測し、実際に実験で得た発電電力量と比較する。

まず 図-2 から $H_{1/3}$ と T_p の関係と ISSC の標準スペクトルを使い 図-6 で得た各周期ごとのエネルギー % を与え規則波成分へ分解して重ね合わせていく。この結果が 図-15 である。この図と模型実験の空気出力への

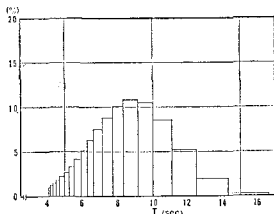


図-15 標準スペクトルを用いた
周期別エネルギー分布

変換率 図-13 を周期について掛け合わせ、合計すると「海明」では 4.6% が空気出力へ変換される。ここで入射波エネルギー幅として本体長 l を取り総波エネルギーを求め総空気出力を求めると 268.6 MWh となる。ここで 図-14 から全発電機の効率を 50% と仮定すると

発電出力は 134.3 MWh となり、ここで実際の発電量と比較するが、実測では 1 号機は未搭載であり又 2 号機は全期間計測していないため、空気圧力の計測値から発電量を推定し発電実績に加えると 97 MWh となり、両者の差は 0.72 であり、この原因について検討中であり、今後より厳密な計算を行い発電出力の推定方式を明確にしてゆく。

8. 結 言

2 ケ年間に渡る海上実験を終了し膨大な量のデータと様々な貴重な経験を積むことができた。実験期間中のトラブルは 2 点あり、第 1 は係留用鎖と海中ケーブルのからみが発生し接続箱からケーブルが抜けてしまった。この原因は鎖、ケーブル共に安全を考え余長を取りすぎたためである。第 2 は空気整流弁の脱落であり、全枚数 468 枚の約 1 割に当たる数を修理したが全てヒンジ部の金属板又はボルトであり FRP 製の板は損傷は受けなかった。他はほぼ設計どおり作動し、将来の波力発電の実用化に供する基本的な資料が得られたと言える。しかしながらまだ多くの不確定な要素が多い。例えば浮体の運動と波エネルギー変換率及び空気出力、これらの間には密接な関係があることは理解できるが、この空気出力に対する最適負荷とこの負荷を与えることによる浮体の運動へ与える影響等種々の検討すべき項目がある。

今後は基本的問題点を明確にすると共に、より発電出力を増大する発電装置の開発を目標に研究を続けていく。

謝 辞： 本論文をまとめるにあたり、貴重な助言、水槽実験を御指導いただいた船舶技術研究所、安藤定雄室長、データ整理及び水槽実験に協力いただいた海洋科学技術センター甲斐源太郎研究主幹、他研究員各位に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 宮崎武晃・益田善雄・長崎作治：波力発電装置「海明」の研究開発、第 26 回海岸工学講演会論文集、pp. 660~663, 1979.
- 2) 宮崎武晃・益田善雄・長崎作治：波力発電装置「海明」の研究開発(2)、第 27 回海岸工学講演会論文集、pp. 114~118, 1980.
- 3) 高橋賢一・甲斐源太郎：4 種波高計の比較について、海洋科学技術センター試験研究報告第 7 号、pp. 41~73, 1981.