

■ 技術報告

沿岸固定型振り子式波力発電装置

An Experimental Study on Electric Power System Driven by Pendulum Type Wave Engine

渡部 富治*・近藤 倣郎**・高木 又男***
Tomiji Watabe Hideo Kondoh Matao Takagi

1. はじめに

ここで述べる波力発電装置は、いままで発表された各種の波力発電方式には見られなかった原理に基づいている¹⁾。シンプルで安全性や経済性にもすぐれているから、将来の実用化に適した方式の一つと考えている。数年前から室蘭工大と日立造船が協力して研究を進めてきた。今まで、数種のモデルによる水槽実験が行われ²⁾、引続き室蘭港外における現地実験を計画なので、これらについて報告する。

2. 本波力発電装置の構造と特長

この構造例として、一列に配置されたケーソン（沖に向けた開口部をもつ）の一部を図-1に示す。この開口部に入った沖からの波が壁で反射・逆進するため、後続の入射波と重なり定常波をつくる。この節部で波エネルギーのすべてが、水平往復流の運動エネルギーに変ることを利用し、これで振り子（受波板つき）を加振すれば、「波力」→「振り子揺動」へのエネルギー変換が行われる。さらに油圧システムを介して発電機を運転し電力へ変換するシステムである。

この装置の特長はつぎにまとめられる。

- (1) 海岸付近の海底より構築するので安全性が高い。
- (2) 無公害で有用な防波施設として兼用でき、かつ消波効果も大きい。
- (3) 海中には受波板があるだけで、装置の建設・維持ともに少い費用で済む。
- (4) 波力エネルギーの取得効率が高い。
- (5) 以上のことから、取得エネルギー経済の面ですぐれる。

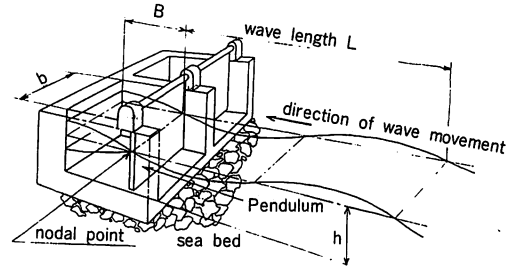


図-1 Caisson

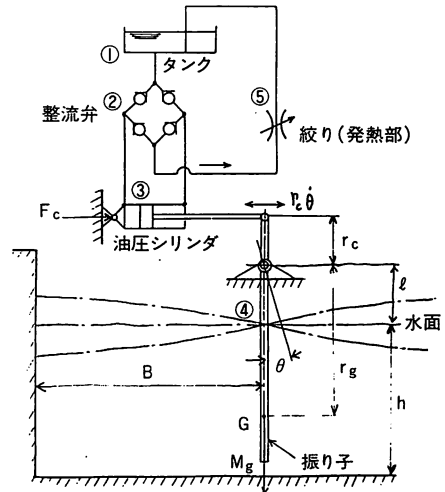


図-2 熱エネルギー変換用回路例

3. 特性

ケーソン内の定常波動を微小振幅の規則波から生じたものと見なした場合、図-2の油圧回路の組合せは、効率よく波力エネルギーを吸収する目的に合っている。

図-2では、壁からの距離Bの位置に釣り下げられた振り子④が揺動し油圧シリンダ③を駆動する。油圧シリンダ③は整流弁②を介し、タンク①から絞り弁⑤へ向けて油を押し出す。絞り弁を通過する際油のもつ圧力エネルギーは熱に変る。すなわち、吸収された波力

* 室蘭工業大学第2部機械工学科教授
〒050 室蘭市水元町27-1

** 室蘭工業大学土木工学科教授

*** 日立造船株式会社技術研究所流体研究室長

エネルギーは油の温度上昇に費やされる。

この回路で、油圧シリンダによって振り子に加えられる負荷モーメントの大きさは、振り子の揺動速度にほぼ比例する。このような速度比例負荷が働くときの振り子運動は、ばね・質量系の線型強制振動におけるそれと類似する。

速度比例負荷特性を保ちながら発電機を一定速度で運転することも困難ではない³⁾。

3.1 理論特性⁴⁾

水深 h 一定の図-2のシステムが、一定周期の入射波で駆動され単位振幅で揺動しているとみなした場合の運動方程式はつぎに示される。

$$\Sigma I \ddot{\theta} + (N+N_1) \dot{\theta} + K\theta = \frac{4\rho\omega^2 Y_0^2}{k_0^4 X_0} \sin\omega t \quad \dots\dots(1)$$

ただし $X_0 = \sinh k_0 h \cdot \cosh k_0 h + k_0 h \quad \dots\dots(2)$

$Y_0 = k_0 \ell \sinh k_0 h + \cosh k_0 h - 1 \quad \dots\dots(3)$

ここで ΣI : 振り子の付加水を含んだ慣性モーメント, N : 負荷係数, N_1 : 造波ダンピング係数, K : 復元係数, ρ : 水の密度, ω : 入射波の角振動数, ℓ および θ は図-2参照, k_0 : $k_0 \tanh k_0 h = \omega^2 / g$ の関係で示される波数

図-2の油圧シリンダで吸収するパワー E_m は

$$E_m = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi} N \dot{\theta}^2 dt$$

$$= \frac{N}{(\Sigma I)^2 (\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 (N+N_1)^2} \frac{8\rho^2 \omega^6 Y_0^4}{k_0^8 X_0^2} \quad \dots\dots(4)$$

ただし $\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{\Sigma I}} \quad \dots\dots(5)$

入射波の単位幅当りパワー W は

$$W = \frac{1}{8} \rho g a^2 C_g = \frac{\rho \omega^3 Y_0^2}{k_0^4 X_0} \quad \dots\dots(6)$$

ここでは g : 重力の加速度, a : 波高, C_g : 入射波の群速度である。波力エネルギーの吸収効率 η を E_m / W で定義すれば、 η は次式で示される。

$$\eta = \frac{N}{(\Sigma I)^2 (\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 (N+N_1)^2} \frac{8\rho\omega^3 Y_0^2}{k_0^4 X_0} \quad \dots\dots(7)$$

波の周期に共振するよう振り子を製作し、油圧シリンダによる負荷の大きさを、造波ダンピングによる負荷の値に等しく設定すれば、吸収効率 η は最大になる。式(7)に $\omega = \omega_0$, $N = N_1$ を代入すれば

$$\eta_{max} = \frac{N_1}{\omega^2 (2N_1)^2} \frac{8\rho\omega^3 Y_0^2}{k_0^4 X_0} = 1 \quad \dots\dots(8)$$

となり、この場合は入射波の全エネルギーが油圧シリンダに吸収される。

3.2 実験結果

室蘭港南外防波堤の前方には、昭和55年3月図-3に示すテストプラントが設置され、サボニウス水車を

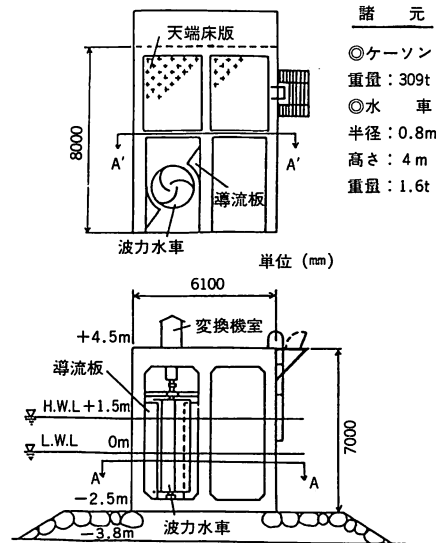


図-3 室蘭工大テストプラント

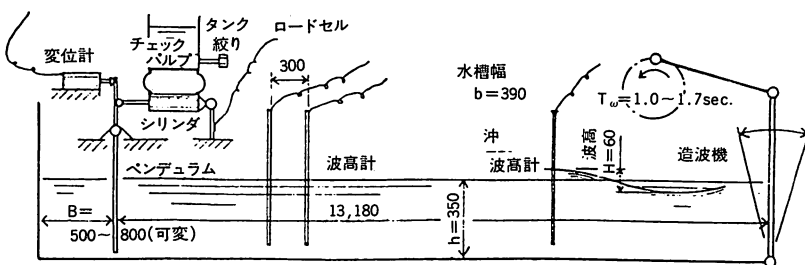


図-4 実験装置

いた実験が既に行われた⁵⁾。同様に将来振り子式についても現地実験することを想定し、その前段階としてテストプラント用ケーソンの $1/10$ スケールモデルを製作した。そして現地の波浪データを参考に条件設定して室内実験を行った。図-4はこの場合の実験装置である。

図-4では、幅390、水深350、長さ13,500mmの水槽右端で、周期 $2\pi/\omega = 1.0 \sim 1.7$ sec、波高60mmの波をつくり、これを入射波として左端の振り子を加振する。振り子には図-2と同方式の油圧回路が組合わせられ、これでエネルギーを吸収する。

実験の手順として、周期と波高を計測して入力パワー W を求め、振り子の揺動角 θ と油圧シリンダの反力 F_c を測定して機械的に変換された取得エネルギーを求め、この両者の値から波力エネルギー吸収効率 η を見出した。

流出絞りで負荷されたシリンダ反力 F_c は、クーロン摩擦力 F_0 と絞り部の動圧による力との和になる。

$$F_c = F_0 + \beta (r_c \dot{\theta})^2 \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$\text{ただし } \beta = \frac{1}{2} \frac{A_p^3 \rho}{(c_d a_d)^2} \quad \dots\dots\dots(10)$$

ここで、 r_c ：図-2参照、 A_p ：シリンダの受圧面積、 c_d ：絞りの流量係数、 a_d ：絞りの開口面積。したがって実験装置での取得エネルギー E_m はつきに示される。

$$E_m = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_c r_c \dot{\theta} dt \quad \dots\dots\dots(11)$$

この装置による実験結果の代表例が図-5～7で、これらは、 $F_0 \doteq 1.0$ kgf、 $\beta = 0.5 \sim 5.0$ kgf \cdot s²/cm² また振り子の空中での固有周期 $T_p = 1.3$ secの場合のものである。

図-5は、 $T_w = 2\pi/\omega = T_p$ の下で、振り子位置(振り子からケーソン壁までの距離 B ……ただし図では無次

元量 B/L ：波長……で示す)をパラメータとして、 β を変えた場合である。 $\beta = 0$ では η が最小で、 β と共に η が上昇する。ただし $\beta = 2.5$ kgf \cdot s²/cm²付近で $\eta = \max$ 、となりそれからは再び低下する。また β = 一定では $B/L = 0.25$ (定常波の節位置)付近が $\eta = \max$ 、となる。

図-6は、 $\beta = 2.0$ kgf \cdot s²/cm²一定の下で $T_w = 2\pi/\omega$ をパラメータとして B/L を変えた場合である。 η は振り子が節位置にある $B/L = 0.25$ をピークに、その前後で低下する。また $T_w = 1.3$ secのとき高い η がえられその前後では低下する。

図-7は図-6と同一条件であるが、パラメータを B にしてある。 β および B を一定にして波長 L (すなわち周期 T_w)が変る場合で、将来の実用機において、 β および B を一定にして設置したところへ、いろいろの波長の入射波があった場合に相当する。 η は B/L に対しピーク値をもつ曲線で示され、そのピーク点およびピーク値は B の大きさによって異なる。この原因は、定常波に対する振り子の共振の度合の違いによると思われる。

今回の実験では、 $B/L \doteq 0.25$ 、 $\beta \doteq 2.5$ kgf \cdot s²/cm²、 $T_w \doteq 1.3$ secのあたりで最高効率がえられ、その値は $\eta_{\max} \doteq 82\%$ であった。これを、吸収エネルギーにおいて等価となる速度比例負荷に換算するとき、その大きさは実験条件下での造波ダンピング係数のそれとほぼ等しいことが確認されている。

η が高いところでは波の反射率が低下し、この面からも入射エネルギーの吸収率が確認された。

以上の検討結果から、本方式の発電装置を効率よく運転するための条件はつきにまとめられる。

- (1) 振り子を定常波の節位置に設置する。
- (2) 振り子の固有周期を波の周期に一致させる。
- (3) エネルギー吸収に基づく負荷の大きさは、造波ダンピング抵抗と等価的に等しくする。

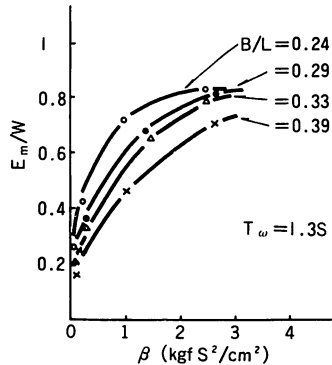


図-5 エネルギー吸収率特性(その1)

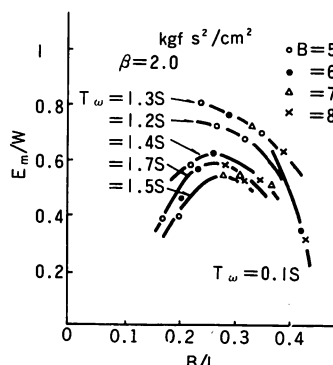


図-6 " (その2)

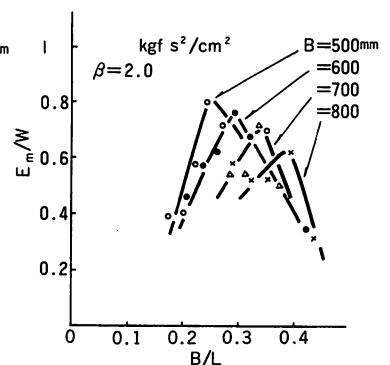


図-7 " (その3)

4. 実用化に対する考察

入射波のパワーレベルは、出現率最高条件を基準に考えると、幅1m当り10~30kW程度が一般であるが⁶⁾、時化などによる異常時のそれは、幅1m当り数百kWにも達することが予想される。この安全対策が第一にあげられる。

つぎに、自然の波の運動から、周波数、電圧、電流の安定した電力を、どのようにして経済的にするかである。これはエネルギー変換の問題になるが、取得エネルギー利用法と関連させて検討する必要がある。

4.1 耐波浪性の向上

耐波浪性を高めるには、波浪強制力の大きさおよび性質を調査してこれに耐える強度をもつようにする考えたと、装置に対して過大な波浪強制力が作用するのを防ぐ考え方があがる。

われわれとしては、この後者の考え方について調査を進めている。この一例を図-8に示す⁷⁾。

図-8は振り子の受波板の大きさを高さ方向に制限した場合である。基準波高より波高が低ければ、波浪強制力のすべてが振り子に働くが、基準高さを越えた波では、越えた部分は受波板を透過してしまい強制力とならない。そればかりか、透過波は振り子運動を妨げる方向の水位変動を生じさせるから、波高の上昇と共に造波ダンピング係数が増加する効果を生むと考えられる。

エネルギー吸収用油圧回路に対する過負荷防止についても考慮が必要である⁸⁾。

4.2 同期運転

本方式ではこれを設置する防波施設の実用上の適正寸法から、発電装置の容量がきめられる。例えば、幅20m程度のケーソン1ブロック内に設置の場合は、1基当り取得パワー20~60kWの振り子3基で1ユニット(出力60~180kWの発電機1台を運転)とするシステムが考えられ、列をなして多数のケーソンが設置される防波堤などにおいては、この程度の小容量機の複数運転となる。したがって、このような場合の電力利用としては電力系統へ並列して運転するのが実際的と思われる^{9,10)}。採用されるのは、例えば誘導発電機であり、これをほぼ同期速度で運転することになる。この場合、発電機入力トルクの制御による間接的な速度制御が可能となり、制御系が著しく簡略化される。

以上のような考えに基づく回路例を図-9に示す。図では、油圧シリンダから吐出される脈動流の変動幅を、

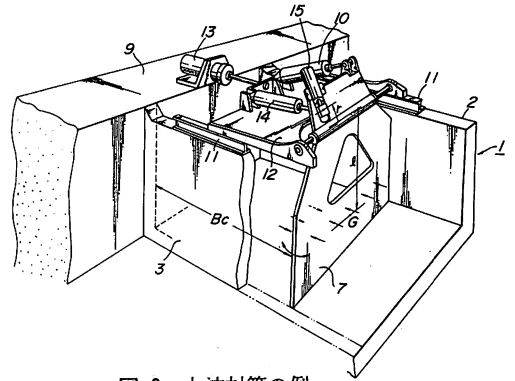


図-8 大波対策の例

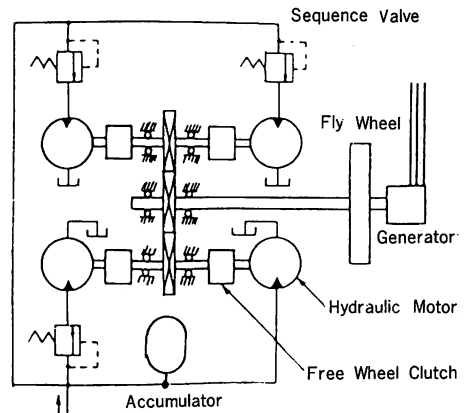


図-9 同期運転回路

まず蓄圧器により小さくする。さらに油圧モータの押しの4容積を制御し、流量変動に関係なく発電機を一定速度で駆動している。

4.3 出力の平滑化

振り子に働く加振力は往復水平流によるものだから、これからえられるパワーには脈動成分が含まれる。

前述のように、1台の発電機を3基の振り子で得たエネルギーで駆動し、かつ複数の発電機が同時運転される場合のトータル出力は、個々の変動が互いに打消し合うためある程度平滑化されよう。しかし、それぞれのユニットは、それ自体で平滑化した出力特性をもつことが最も望ましい。

このような考えから生まれた回路の一例を図-10に示す。図-10では、1台の油圧シリンダから2台の蓄圧器つき油圧モータに対し、交互に圧油を送り込む。油圧モータはそれぞれフリーホイールクラッチを介し発電機を駆動する。

いま蓄圧器の特性として、蓄圧油量 V_a と蓄圧油圧 P_a とが比例するものを用いた場合を考えると、シリンダから吐出する1ストロークの油量が蓄圧器に貯えら

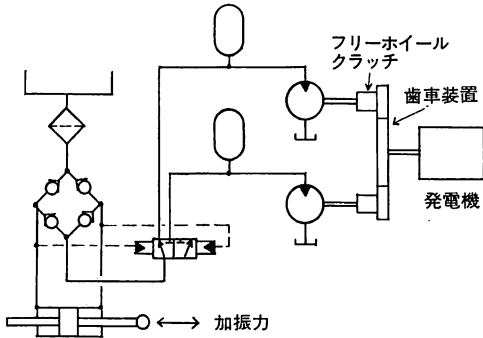


図-10 θ 比例負荷の回路例

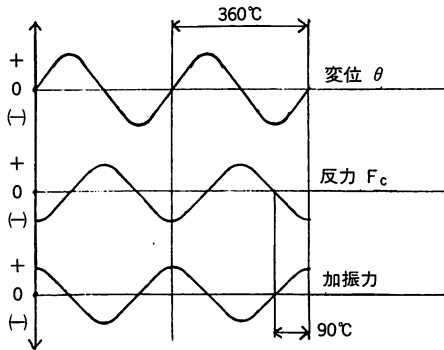


図-11 η_{max} 時の運転状態

れるとみなした場合の吸収エネルギー E_a はつぎに示される。

$$E_a = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} P_a dV_a = \frac{\omega r_c A_p^2 P_a}{2\pi V_a} \times \theta^2 \dots (12)$$

$$\therefore E_a \propto \theta^2, \text{ また式(b)より } W \propto a^2$$

したがって実効として $N = N_1$ が成立つ特性 (P_a/V_a) の蓄圧器を組合せれば、 $\theta \propto a$ の揺動運動の下で高効率のエネルギー吸収が期待できよう。この場合の運転状態を図-11に示す。

図-11では、振り子の変位 θ と油圧シリンダに生ずる反力 F_c との積が吸収エネルギーを表わし、これはそれぞれ加振力に対し -90° 、 $+180^\circ$ の位相を保つように、油圧シリンダと油圧モータとを結ぶ回路の切換えが行われる¹¹⁾。

したがって図-10の回路を用いれば、高率のエネルギー吸収を行いながら、2台の油圧モータは互いに出力変動を補うためそのトータル出力は平滑化される。

この回路を用いた場合の波力エネルギー吸収特性について、室蘭港外の実験プラントによる調査を計画中である。

5. おわりに

沿岸固定型共鳴式の波力発電は実験段階から現地試験段階へと移ったところであり、これから数年間は装置の性能に関する現地データの積重ねが必要となるであろう。

重要な今後の課題として

- (1) 波向による性能：沿岸固定型は線的な配置になるので、波向きによってその性能が異なる。
- (2) 耐久性
- (3) 取得電力の利用：どのように利用するかによりエネルギーコストも決められる。また波力発電に対する行政の一元化や関係法令の整備も必要となるろう。

などがあげられる。

終りに、計画中の現地波力発電実験（室蘭港外）に対し、昭和57年度、岩谷直治記念財団ならびに文部省より研究助成金を受領した。また法政大学須藤教授、日立製作所山岸技師長、小林技師長より有益なご助言をいただいた。また本方式によるプラントを実現された北海道増毛町の英断と北海道開発局の協力に深い敬意を表する¹²⁾。

参 考 文 献

- 1) 近藤, 渡部, 高木; 波力発電の新しい波一固定式共鳴型一 Ocean Age. 昭和57.5
- 2) 渡部, 近藤, 谷野, 浅野; 沿岸固定型振り子式波力発電システムの研究 昭和57年. 春季油空圧講演会講演論文集 昭和57.5
- 3) 渡部; 沿岸固定型振り子式波力発電システムについて 増毛港スリットケーソン実験堤(波力発電)見学会説明資料 昭和56.11
- 4) 浅野; ベンジュラム式波力吸収装置の流体力学的検討 日立造船技術研究所報告書 昭和54.12
- 5) 近藤, 谷野, 高橋, 渡部, 奥田; 防波施設に併設する波浪エネルギー吸収装置の研究一波力水車方式一第28回海岸工学講演会論文集 昭和56.11
- 6) 前田, 木下; 波浪発電, 生産研究 31巻11号 (1979.11)
- 7) 例えば T. Watabe, H. Kondo, K. Okuda, S. Asano; Resonant Type Appartus for Absorbing Wave Energy Arranged at Wave-Breaking Facilities, U.K. Patent Appl. 2071772, 5 March 1980
- 8) 例えば, 渡部, 近藤, 谷野, 松田, 奥田, 浅野; 波力発電方法及び装置, 特願 昭和56-022883
- 9) 益田, 甲斐, 宮崎, 渡会, 平本, 山田; 波力発電船「海明」第二次海上実験, 富士時報, 第53巻, 第7号 昭和55
- 10) 三谷; 系統からみた小水力の運転, 電気計算, 1982, 8月
- 11) 渡部, 近藤, 谷野, 松田, 土手, 高木; 特許出願中
- 12) 日立造船技術研究所; 振り子式波力利用装置, 増毛港スリットケーソン実験堤(波力発電)見学会説明資料 昭和56.11