

ふりこ型波力発電装置の最適システムに関する実験的研究

関西電力株式会社総合技術研究所 副所長 阿河俊夫
同 上 構築研究室 藤田修一

1. はじめに

関西電力では、新エネルギーに関する各種の研究を実施しているが、その一環として波力エネルギーについても研究を行っている。この研究の目的は、入射する波のエネルギーをどの程度まで電気エネルギーとして吸収できるかを把握するもので、そのために実海域にプロトタイプの実験機を設置することを検討している。

波エネルギーの変換システムについては、従来から各所で種々の形式の変換システムについて研究が行われ、理論的解析、実験等の報告がなされているが、ここでは、小波浪に対して比較的能量吸収効率が良いと考えられる機械式変換システムをプロトタイプ機として採用することを前提として事前に検討すべき項目のうち、水理模型実験を行って検討した結果について報告するものである。

2. ふりこ型波力発電装置について

機械式波力変換システムのうち、ふりこ型波力発電装置は渡部・近藤¹⁾らによって考案されたもので、沖合に向けて開口した水室を持つケーソン内にふりこを設置し、沖合からの入射波を水室内へ導入し、後室からの反射で定常波に変え、これによっておこるふりこの振動を油圧シリンダーに伝え、油圧機器により発電装置を駆動するシステムであり、室蘭港外に実験プラントが設置されていると共に、水室の寸法、ふりこの大きさ、動き等から定まるエネルギー変換の基本的特性についても既に報告が行なわれている。

これによると、ふりこ型波力発電装置の波力エネルギー吸収効率 η は

$$\eta = \frac{\text{油圧シリンダーが吸収したパワー } E_p}{\text{ふりこに入射した波力パワー } W} = \eta_i \cdot \eta_k \quad (1)$$

いま水深 h = 一定、入射波は微小振幅の規則波とみなした場合、 η_i および η_k は次のようになる。

$$\eta_i = \frac{N}{(\Sigma I)^2 \cdot (\omega_s^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 (N + N_o)^2} \cdot \frac{8 \rho \omega Y}{k_o^4 X_o} \quad (2)$$

$$\eta_k = \frac{\cos(-\tan^{-1} N \omega / k \epsilon r^2)}{\sqrt{1 + (N \omega / k \epsilon r^2)^2}} \quad (3)$$

ここで、 ΣI : ふりこの付加水を含んだ慣性モーメント、 N : 負荷係数、 N_o : 造波ダンピング係数、 ρ : 水の密度、 ω : 入射波の角振動数、 k : シリンダーのばね定数 $= F_c / x_c$ 、 r : ふりこ支点からシリンダー駆動点までの距離。

$$\omega_o = \sqrt{K / \Sigma I} \quad (4)$$

ただし、 K はふりこ系の復元係数。

$$X_o = \sinh(k_o h) \cdot \cosh(k_o h) + k_o h \quad (5)$$

$$Y_o = k_c \cdot a \cdot \sinh(k_o h) + \cosh(k_o h) + 1 \quad (6)$$

ただし、 k_o は $k_o \tanh(k_o h) = \omega^2 / g$ の関数で示される波数 (g : 重力の加速度) であり、 a : ふりこ支点から水面までの距離である。

この場合、ふりこは正弦波状揺動運動を行い、その運動方程式は次に示される。

$$\Sigma I \ddot{\theta} + (N + N_o) \dot{\theta} + K \theta = \frac{4 \rho \omega^2 Y_o}{k_o^4 X_o} \sin \omega t \quad (7)$$

ただし、 t : 時間

次の条件がすべて満足されるとき η は最高となる。

(1) ふりこを $d/L = 0.25$ の位置に設置する。ただし d : 水室長 (図-1)、 L : 入射波の波長

(2) ふりこ系の固有角振動数 ω_0 を入射波のそれに等しくする。 $\omega_0 = \omega$

(3) $N=N_0=(2\rho\omega Y_0^2)/(k_0^4 X_0)$ にセットする。

(4) $k_e = \infty$ に近づける。

以上がすべて満足されると、 $n_i = n_k = 1$ となり $n = 1$ が得られる。²⁾

とされている。

一方、当社において現在検討中のふりこ型波力発電装置のプロトタイプ機の構造は図-1に示すようなものであり、設置予定海域の波浪出現頻度は表-1に示すとおりである。

この海域に入射する波を最も効率良く吸収できるプロトタイプ機を設計するためには、年間を通算して出現頻度の高い波浪を設計対象波浪(標準波浪)として選定する必要がある、ここでは、周期は $T = 3.5\text{sec.}$ から $T = 6.5\text{sec.}$ であり、平均的には $T = 5\text{sec.}$ となる。

この値を上記基本特性に代入すると最も効率の良い装置の諸元が選定できることになる。

(1)項に対しては、 $T = 5\text{sec.}$ を水深10m程度における波長に換算すると $L = 36.56\text{m}$ となり、最適水室長 $d = 0.25L$ から 9.1m が得られるが、(2)項以下の項目に対しては別途水理模型実験を行って決定する必要があるものと思われる。

表-1 波浪出現頻度

波高(m)	3.0	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	合計
0.025	.0402	.0589	.0598	.0835	.0592	.0377	.0208	.3400
0.050	.0298	.0433	.0438	.0467	.0438	.0277	.0153	.2500
0.100	.0189	.0277	.0280	.0299	.0279	.0177	.0098	.1500
0.150	.0118	.0173	.0175	.0187	.0174	.0111	.0061	.1000
0.200	.0083	.0121	.0123	.0131	.0122	.0078	.0043	.0700
0.250	.0047	.0069	.0070	.0075	.0070	.0044	.0024	.0400
0.300	.0024	.0038	.0038	.0037	.0035	.0022	.0012	.0200
0.350	.0012	.0017	.0018	.0019	.0017	.0011	.0008	.0100
0.375	.0012	.0017	.0018	.0019	.0017	.0011	.0008	.0100
合計	.1183	.1732	.1753	.1869	.1742	.1109	.0612	1.000

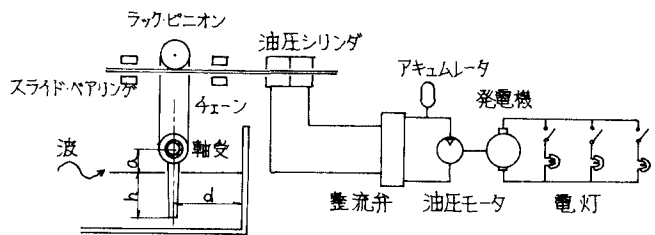


図-1 ふりこ型波力発電システム概要図

3. 水理模型実験の概要

水理模型実験は、当社総合技術研究所構内に設置してある水深1m、幅1m、長さ約50mの規則波、不規則波発生装置を持った2次元造波水槽(図-2)内に、図-3に示すように、幅980mm、最大高さ600mmのふりこを備えた、縮尺1/5の波力エネルギー吸収装置のシステム模型を設置し、これに造波装置から波高1~10cm、周期1.34~4.02sec.の規則波を入射させてエネルギー吸収効率 n が下記の項目をパラメーターとしてどのような関連を持つか、を把握することを目的として実施した。

- (1) d/L の変化
- (2) a と h の寸法
- (3) システムにかかる負荷の大きさ
- (4) 入射波浪(波高、周期)

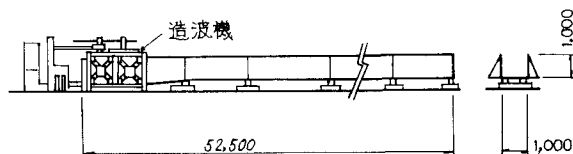


図-2 2次元造波水槽概要図(単位:mm)

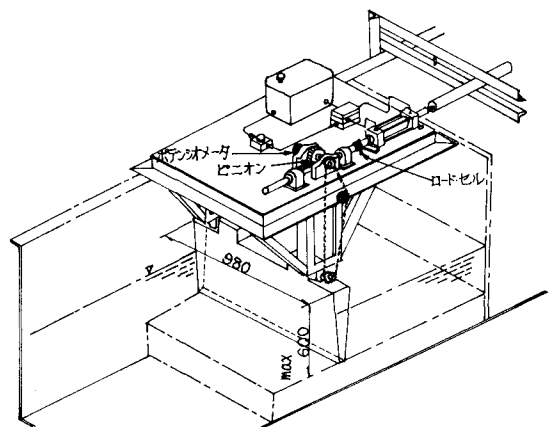


図-3 模型全体組立図(単位:mm)

前述のように、エネルギー吸収効率 n を把握するためには、入射エネルギー W とシステムによる吸収エネルギー E を求める必要がある。入射エネルギー W は、入射波高 H 、入射波周期 T を測定し $(1/2)H^2T$ により求め、吸収エネルギー E は、システムの負荷による消費エネルギー P に置き換えて求めた。周期 T における消費エネルギー P は、

$$P = \int_0^T N \cdot r \cdot \dot{\theta} dt$$

ここで、 N :負荷、 θ :ふりこの回転角、 r :ピニオンの半径として求めることができる。

実験では、 N はロードセルにより計測し、 θ はポテンシオメータにより計測したが、 θ と N は 1/100秒間隔で A/D 変換して計算機に取り込み、ふりこ板の角速度 $\dot{\theta}$ は θ を数値微分して求めた。

また、上記 (3) のシステムにかかる負荷の大きさの検討に当たっては、ケーソン水室寸法から決まる造波ダンピング係数 N_0 とふりこ板にかかる負荷の大きさ N の比 N/N_0 を変化させて実験を行った。

4. 実験結果

実験は、各種の条件を変化させた 650 ケースについて実施したが、ふりこの負荷の大きさ N を任意に設定することが実験上むづかしかったので、適当な負荷を与え、 N/N_0 で整理し、実験点のパラツキについては、最小 2 乗法を用いた 3 次式により決定した。

整理の一例を図-4 に示す

4-1. d/L による変化について

$N/N_0 = 0.3, 0.5, 0.7$ の 3 ケースについて、 d/L をパラメーターとした η の変化を図-5 に示す。これからわかるように、 N/N_0 が変化しても η の最大値は、 $d/L = 0.25$ の位置にあり、理論的に提案されている最適点と良く一致し、理論の妥当性と共に、このモデルの再現性の良さを確認した。

4-2. a と h の寸法による変化について

a と h の最適な組み合わせを把握するため、波高 $H = 0.2m$ 、周期 $T = 5sec$ の標準波を入射させ、 $d/L = 0.25$ を一定として、 a と h を変化させた実験を行った。この結果、図-6 に示すように h については、実物値で 3.5 ~ 4.0m 程度が最適値となり、 a については、その値が小さいほど η は大きくなった。

4-3. システムにかかる負荷の大きさによる変化について

実物値で $a = 0.75m$ 、 $h = 3.5m$ 、 $d/L = 0.25$ のケースについて、標準波を入射させて、 N/N_0 を変化させた時の η の変化を図-7 に示す。図からわかるように、 $N/N_0 = 0.5$ 付近で最高効率が得られており、その比が非常に小さい場合は、効率が極端に低下するのであまり過小な負荷をかけることは良くない。

4-4. 入射波浪による変化について

標準波により設計されたシステムに、波高・周期の異なる波が入射した場合の η の変化について測定した結果を図-8 に示す。この図からわかるように、波高が特に低くないかぎり、効率は波高の影響をあまり受けない。設計波周期より短い波周期での効率低下は急であるが、長い周期の波に対しては効率の低下は比較的緩やかである。

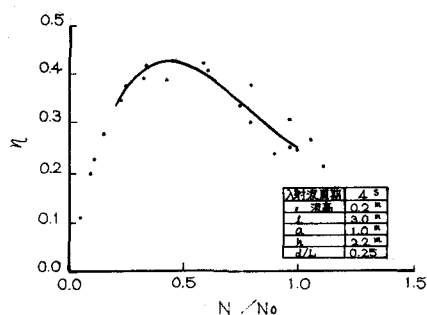


図-4 実験点のパラツキ

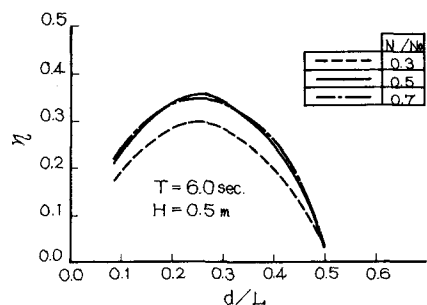


図-5 d/L による波エネルギー吸収効率

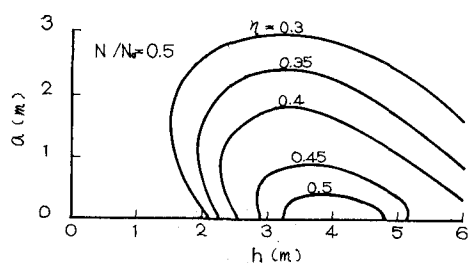


図-6 a と h による等効率分布

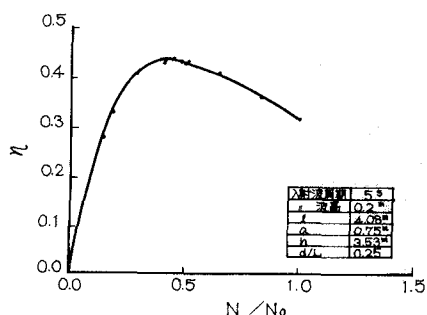


図-7 N/N_0 による波エネルギー吸収効率

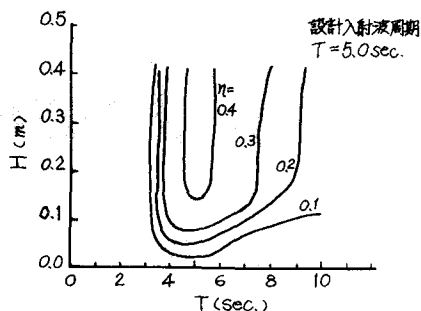


図-8 H と T による等効率分布

5. プロトタイプ機の設計への反映

以上の実験結果を勘案してプロトタイプ機の設計諸元を決定することになるが、 d/L については0.25をとることが、最適であることが決まっているので、設計標準周期を $T=5\text{sec.}$ とする場合、水深をどうするかが1つの問題点となる。水深10m程度であれば波長は前述のように $L=36.56\text{m}$ となるがケーソン室内の水深はこれより浅いので、もっと小さい値である。さらに図-8から設計波周期より短い波が入射した場合のエネルギー変換効率の低下は大きく、設計標準波周期を小さめにとることが得策であるとも考えられる。そこで $T=4\text{sec.}$ を採用すると、水深10m程度の波長は $L=24.65\text{m}$ となり、最適な d は 6.16m となる。ここでは、ケーソンの安定性その他も考慮して 7m を提案している。

軸受けの水面上の高さについては、図-6から小さいほど有利であることがわかっているが、潮位の変動、機械装置としての必要高さ等から、 $a=0.75\text{m}$ 程度は必要であろうと考えられる。

標準波高を 0.2m とすると、 1Kw 程度の発電を期待するためにはふりこの受圧幅を 5m 以上にする必要があり、ここでは 6m とした。

この実験から、負荷は N/N_0 を 0.5 にすることが、最適となっているので図-1に示すように電力負荷を任意に調整できるシステムを考慮する。

以上の条件をまとめてプロトタイプ機の試設計を行った結果を図-9に示す。

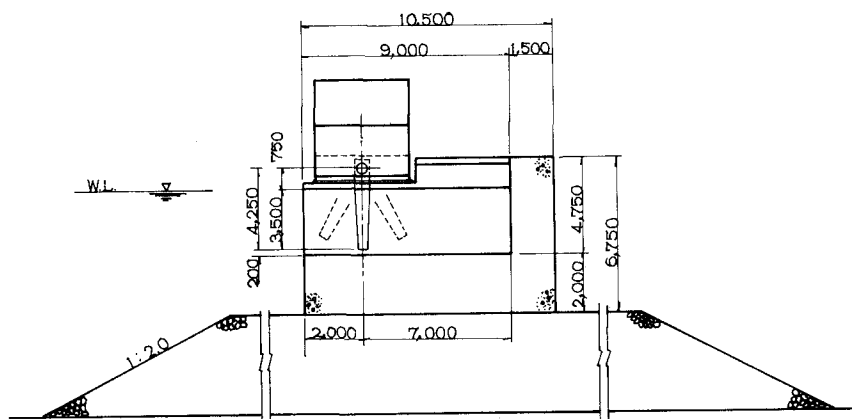


図-9 ふりこ型波力発電装置設計図 (断面図)

6. 今後の課題

ふりこ型波力発電装置について、近藤らが提案している基本特性に従い、2次元造波水槽内に大型水理模型を設置し、規則波を入射させて基礎的実験を行ないプロトタイプ機の設計に反映できる資料を得ることができた。しかし、実海域では、波周期の問題、波浪の不規則性の問題、および入射角度の問題等があり、今後は、この点についても、平面水槽を用いた3次元実験等を行って解明していきたいと考えている。

また、エネルギー吸収装置の機械的問題および軸受けの位置についても、新たな観点から検討が必要であると考えているので、今後機会を見つけて報告したい。

最後に、御指導いただいた室蘭工業大学渡部富治教授・近藤倣郎教授に、紙上をかりて御礼申し上げます。

参考文献

- 1). T.Watabe et al.: U.S.A.Patent No.4400940(1983), U.K.Patent No.2071772(1983) & Canadian Patent No.1164767(1984)
- 2). 渡部富治,他:沿岸固定形ふりこ式波力発電装置の特性,昭和59;第1回波浪エネルギー利用シンポジウム講演集(海洋科学技術センター)