

可動受波板式波力発電装置の エネルギー変換効率に関する研究

関西電力(株)総合技術研究所 主任研究員 玉置春夫
 関西電力(株)総合技術研究所 構築研究室 阿部 守
 ○前関西電力(株)総合技術研究所 副所長 正会員 阿河俊夫
 (現関西電力(株)人事部附 近畿コンクリート工業(株)開発部長)

1. はじめに

波のエネルギーを利用して発電を行う波力発電装置は、既に各種の形式の装置が考案され、一部には実証試験も行われているが^{1)、2)、3)、4)}、それらはいずれも比較的高波浪の地点を対象としたものである。

本研究は比較的静穏な海域において、将来実規模の波力発電を実施することを前提として、最もエネルギー変換効率の良い波力発電を開発する事を目的として行っているものである。

本研究で可動受波板型を取り上げた理由として、

- ・空気式を用いるものは潮位が大きくなると空気漏れによる性能低下を起こすのに比べ、可動受波板型では受波板の大部分が水中にあるため性能変化が少ないこと。
- ・空気タービンに比べ、小波高時にも発電可能と推定されること。
- ・エネルギーの二次変換に用いられる油圧機器が市場の汎用品であり、効率と信頼性の点で十分満足できるものが入手可能である。

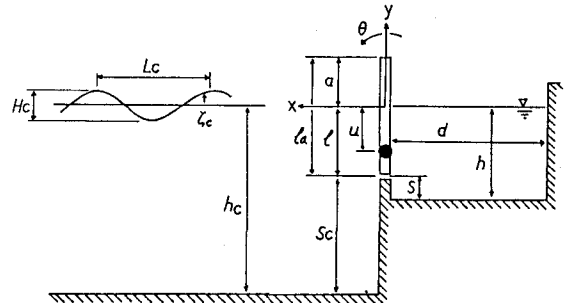
等実用面でも有利と判断したためである。

可動受波板を用いる波エネルギー吸収装置の性能は主に

- ・受波板の長さヒンジの位置
- ・受波板後部の水室奥行き
- ・負荷の大きさ

に依存される。

これらの装置各部がエネルギー変換効率に与える影響を把握するため、理論計算を及び模型実験にて検討した結果について報告するものである。



図ー1 2次元モデル

表ー1 運動方程式の係数と波エネルギー変換効率の表示式

2. 理論計算

図ー1に示す2次元モデルについて、浅野⁵⁾の方法に従い、フラップの運動方程式の係数や波エネルギー変換効率の計算式を求めた。結果を表ー1に示す。

なお、ヒンジが水面より上にある場合のuは負の値となる。入射波の波高Hcと波長Lcは水深hcに対応するもので、水室の水深hに対応する値はそれぞれHとLである。各部寸法と波長の比をとる場合はLを用いる。波周期Tは水深に関係なく一定であるが、波数は水深hc、hに対応してそれぞれkoc=2π/Lc、ko=2π/Lになる。2次元計算であるが、受波板の幅は単位幅でなくBとしている。

表ー1の中の記号の意味は次のようになっている。

- Io : 受波板の慣性モーメント
 I : 付加水の慣性モーメント
 No : 負荷係数
 N : 受波板の造波減水係数
 Ko : 受波板の復元モーメント係数
 K : 水室の水による復元モーメント係数
 M : 波の強制モーメント振幅

EQUATION OF MOTION	$(I_o + I) \ddot{\theta} + (N_o + N) \dot{\theta} + (K_o + K) \theta = M \cdot \sin(\omega t)$
I	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\rho B \omega_n^2}{k_{n0}^2 X_{n0}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\rho B \omega_n^2}{k_{n0}^2 \tanh(k_{n0} d) X_{n0}} - \frac{2\rho B \omega_n^2}{k_{n0}^2 \tanh(k_{n0} d) X_{n0}} + \frac{\rho g B \cdot L^2 \cdot (2u - L)^2}{4 d \omega^2}$
N	$\frac{2\rho B \omega_n^2}{k_{n0}^2 X_{n0}}$
K	$\frac{\rho g B \cdot L^2 \cdot (2u - L)^2}{4 d}$
M	$\frac{-\rho B \omega_n^2 Y_{n0}}{k_{n0}^2 \sinh(k_{n0} R_c)} \cdot H_c$
Y _{n0}	$k_{n0} \cdot u \cdot \sin(k_{n0} R_c) + k_{n0} \cdot (L - u) \cdot \sin(k_{n0} S_c) + \cos(k_{n0} R_c) - \cos(k_{n0} S_c)$
X _{n0}	$\sin(k_{n0} R_c) \cdot \cos(k_{n0} R_c) + k_{n0} R_c$
Y _n	$k_{n0} \cdot u \cdot \sinh(k_{n0} R) + k_{n0} \cdot (L - u) \cdot \sinh(k_{n0} S) - \cosh(k_{n0} R) + \cosh(k_{n0} S)$
X _n	$\sinh(k_{n0} R) \cdot \cosh(k_{n0} R) + k_{n0} R$
Y _n	$k_{n0} \cdot u \cdot \sin(k_{n0} R) + k_{n0} \cdot (L - u) \cdot \sin(k_{n0} S) + \cos(k_{n0} R) - \cos(k_{n0} S)$
X _n	$\sin(k_{n0} R) \cdot \cos(k_{n0} R) + k_{n0} R$
AMPLITUDE θ_o	$\sqrt{\frac{M^2}{(I_o + I)^2 (\omega_n^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 (N_o + N)^2}}$
EFFICIENCY η	$\frac{4 \omega_n^2 \cdot N \cdot N}{(I_o + I)^2 (\omega_n^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 (N_o + N)^2}$

ρ : 水の密度
 g : 重力加速度
 ω : 波の円周波数

$$\omega = g \cdot k_{nc} \cdot \tanh(k_{nc} R_c) = g \cdot k_o \cdot \tanh(k_o R) \\ = -g \cdot k_{nc} \cdot \tan(k_{nc} R_c) = -g \cdot k_o \cdot \tan(k_o R)$$

ω_o : 受波板系の固有円周波数 $\sqrt{(K_o + K) / (I_o + I)}$

波エネルギー変換効率 (η) の式から明らかのように、最大変換効率 $\eta = 1$ となるのは入射波の周期と受波板系の固有周期が一致 ($\omega = \omega_o$) かつ、負荷係数が造波減水係数と等しい ($N_o = N$) ときに得られる。

以後の計算では特にことわらないかぎり $N_o / N = 1$ とする。

図-2 にヒンジ位置を変えた場合の計算例を示す。これから分かるようにヒンジの位置が水底あるいは水面にあるときに最大効率を得られる。ヒンジが受波板の中央付近に近づくにつれて復元モーメントが極端に小さくなり同調点が波周期から大幅にずれて効率が急激に下がる。

例えば、図-3 は潮位が変化した場合、ヒンジの位置によりエネルギー変換効率がどのような影響をうけるかを示したものである。これから、中間にヒンジのある方式は潮位が変化した場合の効率低下が大きく、実用上のぞましくないのが分かる。

したがって、受波板形式の波力発電装置では受波板のヒンジ形式は上部または下部にするのがよい。

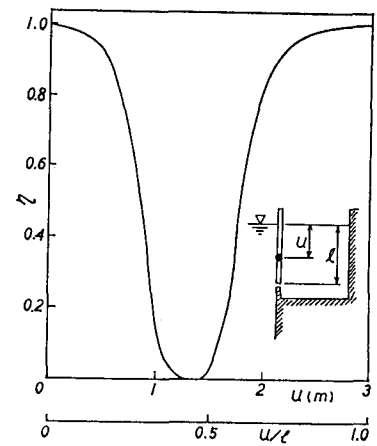


図-2 ヒンジの上下位置による効率変化
 $(T = 4 \text{ s}, h = 3.5 \text{ m}, S = 0.5 \text{ m}, S_c = 1.0 \text{ m})$

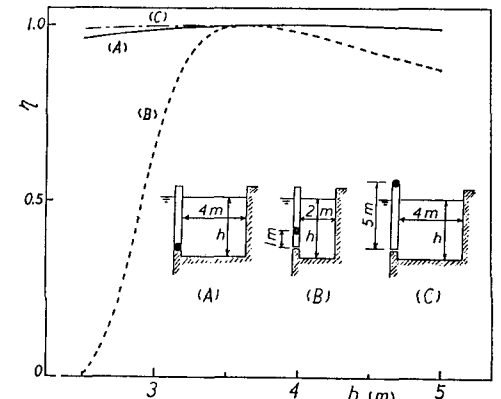


図-3 潮位変化による効率変化
 $(T = 4 \text{ s}, S = 0.5 \text{ m}, S_c = 1.0 \text{ m})$

3. 模型実験

2. の理論計算により、ヒンジは上部か下部にあるのが望ましいと言う結果を踏まえて、この二つの形式についての良否を模型実験により検討した。

模型縮尺は $s = 1/5$ とし、受波板の幅は実規模の 5 m とした。図-4 に下部ヒンジの模型概要図を示す。

波の 1 周期 T (s) の間に吸収するエネルギーは、軸トルク Q と受波板の回転角速度 $\dot{\theta}$ から

$$\int_0^T Q \cdot \dot{\theta} \cdot dt$$

として求め、入射波のエネルギーとの比を取って波エネルギー変換効率とした。

実験時の負荷係数は、吸収したエネルギーと線形負荷 $N_o \dot{\theta}$ による仕事が等しいと置いた式

$$\int_0^T Q \cdot \dot{\theta} \cdot dt = \int_0^T N_o \cdot \dot{\theta} \cdot \dot{\theta} \cdot dt$$

から等価線形負荷係数という形で N_o を求める。

図-5 に上部と下部ヒンジについて、実験で求めた等価線形負荷係数と造波減衰係数の比 N_o / N ベースでの比較を示す。これから、 N_o / N が 1 よりかなり小さい 0.5 から 0.8 で η が最大になる傾向が分かる。

この理由の 1 つとして、負荷が大きくなると受波板系の固有周期が変化して同調状態からずれることが考えられる。

上部と下部ヒンジの比較については、この結果から分かるように下部ヒンジの方が高い効率を得られる。

図-6 は下部ヒンジにおいて実験で求めた受波板の動揺振幅を理論値と比較したものである。この結果から実験値は理論値の約 80 % 程度である。

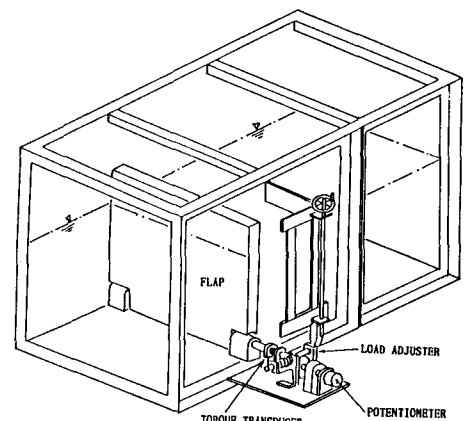


図-4 下部ヒンジ式波エネルギー変換装置の模型概要図

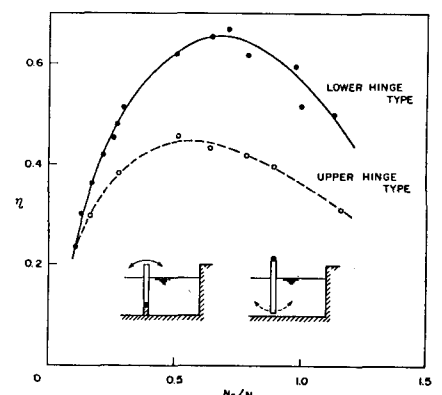


図-5 負荷係数比と効率の関係
 $(T = 5 \text{ s}, a = 2.1 \text{ m}, h = 3.6 \text{ m}, d/L = 0.25)$

図-7に示すように最大効率の得られる水室奥行き寸法と波長の比 d/L は理論と実験で一致する。実験で得られる効率は理論値より低く、その低下の割合は負荷が大きいくほど大きくなっている。

入射波の周期が与えられた場合、理論計算上は水室水深や受波板のヒンジ位置などに関係無く、受波板系が入射波に同調するように d/L を選ぶのが効率上望ましい。しかし、実際は理論で考慮されていない軸摩擦や機構上のロスがあり、受波板と水室の最適寸法があると考えられる。

そこで、上部ヒンジ型については水深と軸心高さを変えた実験を、下部ヒンジ型については水深を変えた実験を行った。その結果を図-8に示す。これから上部ヒンジ型では水深4m付近最適点が、下部ヒンジ型では水深3.5m近くに最適点のあることが分かる。 N_0/N の最適値はケースにより多少異なるが、0.7として大きな間違いはない。

4. 波エネルギー変換効率

波力発電装置の水室寸法を可変にし、受波板系を入射波に対して常に同調させるというアイデアは、エネルギー変換効率上は最も望ましいが 実際の機構が難しい、採用されたという例は聞かない。通常は年間のエネルギー変換量が最大になるような寸法に固定することになる。したがって設計波以外の波では効率が低下する。

図-9に規則波、図-10に不規則波中でのエネルギー変換効率を示す。

2つの図から、不規則波中の効率は最大値が規則波中の60%程度になっていることがわかる。

ここで用いた不規則波はピアソン・モスコビッツ型で、係数はブレットシュナイダー・光易のものである。即ち

$$S(\omega) = 0.257 \cdot H_v^2 \cdot \left(\frac{2\pi}{T_v}\right)^4 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp \left[-1.03 \cdot \left(\frac{2\pi}{T_v}\right)^4 \cdot \omega^{-4} \right]$$

規則波中の効率と不規則波のスペクトラムから、次式で不規則波中の効率を推定し実験値と比較してみた。

$$\eta = \int_0^\infty S(\omega) \cdot \frac{2\pi}{\omega} \cdot \eta(\omega) \cdot d\omega \bigg/ \int_0^\infty S(\omega) \cdot \frac{2\pi}{\omega} \cdot d\omega$$

結果を図-11に示す。波周期の長いところで実験値がかなり悪くなっているのは、過度現象の影響が大きいくように見受けられる。即ち、規則波中の実験では、波が入射して受波板が動き始めた初期の段階のデータには過度的な現象が含まれているので解析から取り除いているが、不規則波中の現象は、この過度現象を含んだ応答の積み重ねで成り立っている。

もう一つの問題点は、波高に対するエネルギー変換効率の非線形性である。図-11の例では、有義波高0.2mの不規則波中の効率を求めるために波高0.2mの規則波中の効率を用いているが、同じ波高でのデータを用いることに確たる根拠はなく、異なる波高での効率を用いれば、不規則波中の効率の推定値も異なる。

波周期の短いところで実験値の方がややよい理由を図-12で説明する。規則波中の実験は、水室奥行きと波長の比 d/L が0.5以下でしか行っていないため、不規則波中の効率を推定する際に $d/L > 0.5$ で $\eta(\omega) = 0$ としたが、実際は図-12に点線で示すように $d/L > 0.5$ でも効率は0ではないで、この部分が実験値に寄与したと思われる。

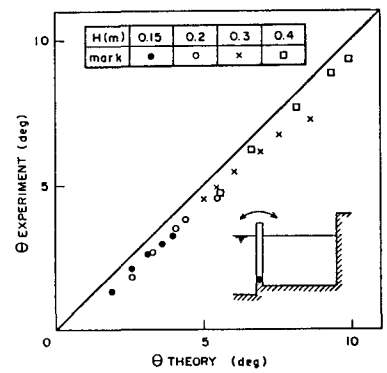


図-6 下部ヒンジにおける実験値と理論値との動揺角の比較
($T = 5$ s, $a = 0.8$ m, $h = 3.5$ m, $d/L = 0.25$)

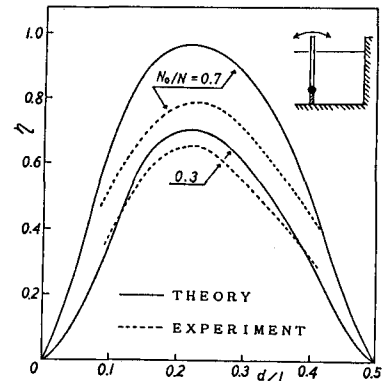


図-7 下部ヒンジにおける実験値と理論値との比較
($T = 4$ s, $H = 0.5$ m, $h = 3.6$ m, $S = 0.4$ m)

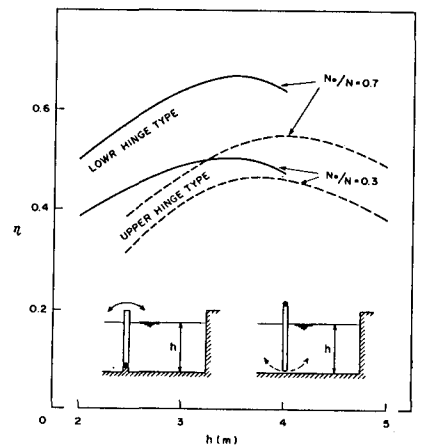


図-8 水室の最適水深
($T = 4$ s, $H = 0.2$ m, $S = 0.4$ m, $d/L = 0.25$)

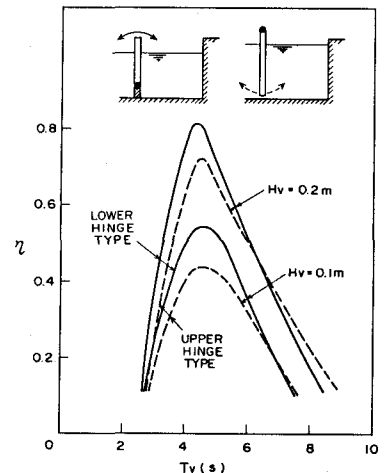


図-9 規則波中でのエネルギー変換効率
($d = 5$ m, $h = 3.5$ m, $S = 0.4$ m)

以上の模型実験の結果から、規則波中、不規則波中とも下部ヒンジ型の方がやや優れている。これは、上部ヒンジ型の場合、受波板の動きが大きくなると、板の下端と水底との隙間が大きくなって理論の仮定とずれるのに比べ、下部ヒンジ型ではそのようなことが無いことも理由の一つと考えられる。

波が斜めから入射した場合の効率を、正面波での効率を基準にとって図-13に示す。これから、入射角 30° を超えると効率が急激に下がっており、装置を設置する際には、現地の波の入射方向にも注意を払う必要がある。

5. 水室奥行き寸法の最適値

可動受波板型の波エネルギー変換装置の場合、水室奥行き寸法比 d/L の最適値は 0.25 であることが従来から言われている。しかし、図-9では設計波周期4秒の装置の効率のピークが長周期側にずれており、 d/L が 0.25 より小さいところで最大効率が得られたことを示している。

このような傾向を詳しく調べるため、水深や受波板長さなど、波エネルギー変換効率に関係する各種パラメータを変えて理論計算を行った。

パラメータとして、水室奥行き d 、水室水深 h 、敷居高さ s 、受波板前方の水深 h_c を変化させた。負荷係数比 N_o / N は 1 とする。下部ヒンジ式の場合、水上部の長さ a は理論上は性能に影響しない。

上部ヒンジ式の水上部のヒンジ高さ a が性能に影響するので、この値を変えた計算を行った。

上部ヒンジ式の標準状態は $a = 0.5 \text{ m}$ 、 $h = 4 \text{ m}$ 、 $S = 0.5 \text{ m}$ 、 $S_c = 1.0 \text{ m}$ とし、

下部ヒンジ式の標準状態は $h = 3.5 \text{ m}$ 、 $S = 0.5 \text{ m}$ 、 $S_c = 1.0 \text{ m}$ とする。

図-14と図-15は上部ヒンジ式の計算結果であり、図-16と図-17は下部ヒンジ式の計算結果である。

理論計算の結果を、効率が最大となる d/L に注目して整理し図-18と図-19に示す。理論計算では、受波板近傍の進行しない波、いわゆる局所波、の影響を入れた場合と入れない場合の比較も行っているが、上部ヒンジ式、下部ヒンジ式とも局所波を除いた場合、 $d/L = 0.25$ で最大効率が得られている。局所波は、受波板に作用する水の付加慣性モーメントを増す方向に働くので、結果として受波板系の固有周期が長くなり、波長の長いところ、即ち、 d/L が 0.25 より小さいところで入射波と同調し最大効率が得られることになる。

上部ヒンジの場合、局所波の影響は水底の形には関係無く、効率が最大となる d/L は今回の計算例ではおよそ 0.2 となった。

下部ヒンジの場合、局所波の影響は水底の形により異なっており、水底が平らであれば局所波の影響がほとんどない。

この理由は次のとおりである。入射波の波粒子の動きは、水面で大きく水底で小さいが、上部ヒンジ式の受波板の動きは逆に、水面で小さくて水底で大きい。したがって、局所波がもともと大きくて各種パラメータを変えてもあまり変化せず、ほぼ $d/L = 0.2$ で最大効率が得られる。下部ヒンジ式で水底が水平の場合は、同じ理屈で、水粒子の動きと受波板の動きに大差が無いため、局所波も小さく、

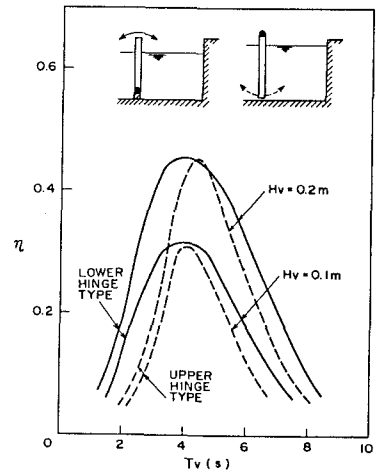


図-10 不規則波中でのエネルギー変換効率
($d = 5.0 \text{ m}$ 、 $h = 3.5 \text{ m}$ 、 $S = 0.4 \text{ m}$)

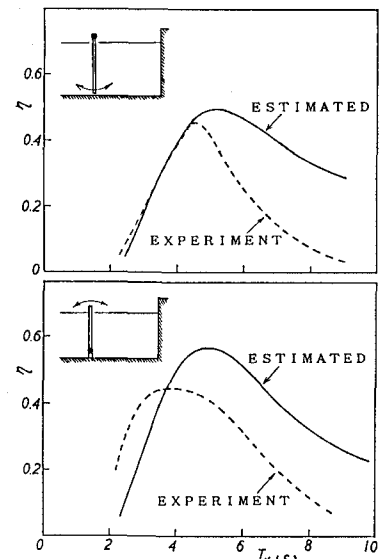


図-11 不規則波中での実験効率と理論値の比較 ($H_v = 0.2 \text{ m}$)

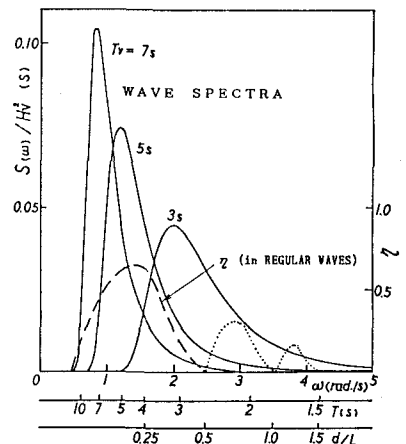


図-12 規則波中効率と波スペクトラム及び不規則波中効率予測

最大効率 η は $d/L = 0.25$ の近くで得られる。

実機の場合、通常、受波板の前方水深は水室水深よりかなり深くなるので、上部ヒンジ式、下部ヒンジ式とも d/L が 0.2 の近くで最大効率が得られると考えてよい。

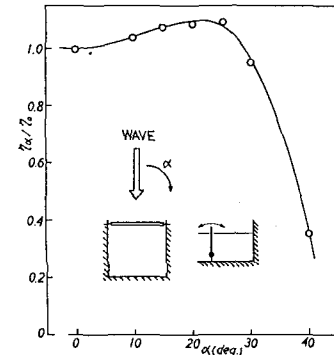


図-13 上部ヒンジによる斜め波中での効率
($T=4\text{ s}$ 、 $H=0.2\text{ m}$ 、 $h=3.5\text{ m}$ 、 $d=5\text{ m}$ 、 $S=0.4\text{ m}$)

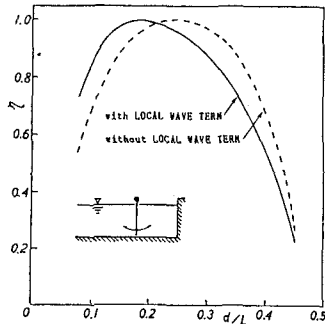


図-14 上部ヒンジによる理論効率に対する局所波の影響
($T=4\text{ s}$ 、 $H=4\text{ m}$ 、 $a=0.5\text{ m}$)

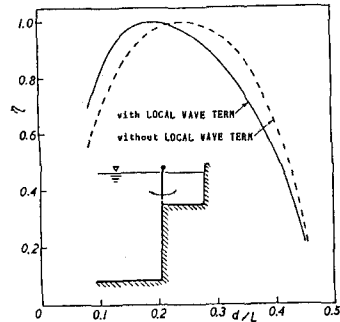


図-15 上部ヒンジによる理論効率に対する局所波の影響
($T=4\text{ s}$ 、 $h=4\text{ m}$ 、 $a=0.5\text{ m}$ 、 $S=0.5\text{ m}$ 、 $Sc=10\text{ m}$)

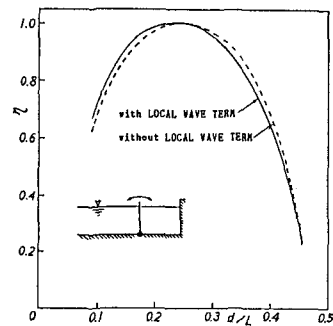


図-16 下部ヒンジによる理論効率に対する局所波の影響
($T=4\text{ s}$ 、 $h=3.5\text{ m}$ 、 $S=0\text{ m}$)

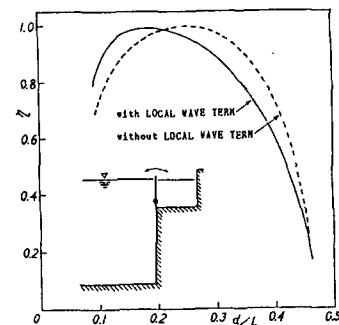


図-17 下部ヒンジによる理論効率に対する局所波の影響
($T=4\text{ s}$ 、 $h=3.5\text{ m}$ 、 $S=0.5\text{ m}$ 、 $Sc=10\text{ m}$)

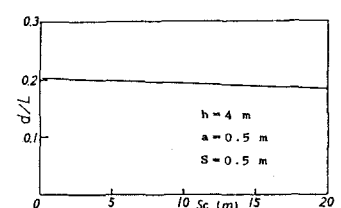
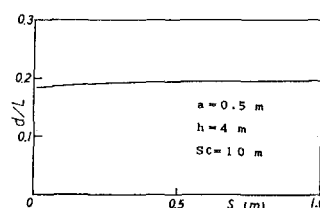
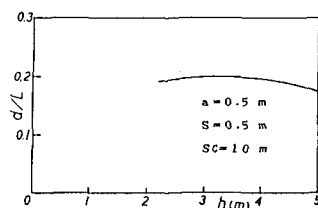


図-18 上部ヒンジにおける変換効率 $\eta=1$ を得るための水室奥行きと波長の比

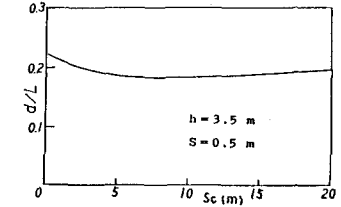
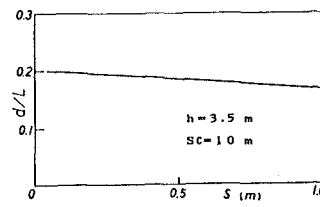
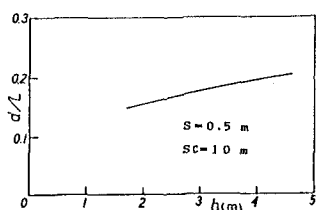


図-19 下部ヒンジにおける変換効率 $\eta=1$ を得るための水室奥行きと波長の比

6、あとがき

可動受波板を用いる波エネルギー変換装置の性能は、主に受波板の長さとしンジの位置、受波板後部の水室奥行き及び装置に加える負荷の大きさに影響される。これらの要目を受波板に働く流体力や波エネルギー変換効率に与える影響を調べるため、各種パラメータを変えた計算を行うための理論計算式を導いた。

理論計算の結果、受波板のしンジは、上部または下部にあるものが波強制モーメントが大きく、潮位変化の影響も受けにくいという望ましい性質を持っていることが分かった。

理論計算では、受波板に働く流体力に受波板近傍の局所波の成分を含めない場合、最大効率は、水室奥行きと波長の比 d/L は 0.25 より小さくなるが、その程度は、各種パラメータの値により異なる。

上部しンジ型、下部しンジ型とも、通常使用される寸法の場合、最大効率の得られる d/L は、従来の定説である 0.25 と異なり、およそ 0.2 であることを理論的、実験的に見いだした。

模型実験は実海域の低波高を考慮し、比較的低い波高で行った結果、 d/L の最適値は模型実験と理論計算で一致した。

理論計算上は水室水深がいくらであっても、 d/L が最適であれば最大効率を得られることになるので、水室水深の最適値は実験で求めるしかない。模型実験の結果、水室水深の最適値として、上部しンジ型で 4 m、下部しンジ型で 3.5 m という値を得た。

不規則波中の波エネルギー変換効率は、規則波中の約 60% 程度におちる。規則波中の波エネルギー変換効率と不規則波中のスペクトルから、不規則波中の波エネルギー変換効率を推定することはある程度可能であるが、現象の非線形性の問題もあり、精度はあまりよくない。

実機としてどのような型式を選ぶかについては、機構上の問題、設置作業上の問題、安全性の問題、メンテナンスの問題なども含め総合的に判断するのが望ましいが、波エネルギー変換効率の上では下部しンジ型が優れている。

沿岸固定可動受波板式の波力発電装置について過去に行われた研究は、著者が知る限りにおいては、受波板の上部にしンジを持つ振り子式についてのみである。

本論文では、理論的検討により、受波板式波力発電装置の要目と波エネルギー変換効率の関係を明らかにし、模型実験で受波板の下部しンジをもつものが効率の上で優っていることを明らかにした。本研究結果を基に今後さらにこの分野の研究を進める所存である。

参 考 文 献

- 1)、石井進一ほか：波力発電装置「海明」の海域試験結果と今後の試験計画、第一回波浪エネルギー利用シンポジウム、海洋科学技術センター、昭和59年11月
- 2)、石井進一ほか：沿岸固定式波力発電装置の発電運転試験報告、海洋科学技術センター試験研究報告書 JAMSTECR、1985
- 3)、Ando A.、et al: On a Flap Type Wave Energy Converter、ECOR International Conference、Vol. 1、1984
- 4)、近藤徹郎ほか：沿岸固定方式による波浪エネルギー利用に関する研究、昭和59年度科学研究費補助金研究成果報告書、昭和60年4月
- 5)、浅野誠一：岸壁部に設けられた振り子式波浪エネルギー回収装置の効率について、日本造船学会水槽委員会第二部会、SK60-14、昭和55