

浮上形振り子式波浪発電システムの研究

古澤彰範*・近藤俣郎**・藤間 聡***・長谷川覚也****

1. はじめに

振り子式波浪エネルギー吸収装置の開発研究は1978年より室蘭工業大学において行われ、高効率な波浪エネルギー吸収装置であることが確認されている。しかしながら、波浪を始めとする自然エネルギーの取得コストが化石燃料などの在来のエネルギー源を上回ることからその実用化は難航している状況にある。従来の振り子式は防波堤併用の水底におかれたケーソンを用いる「着底型」のため、水深が大きいとコスト高になることが予想される。そこでコストを低減させるために、入射波パワーの大きい沖合いにも設置可能な「浮上型」振り子式波浪発電システムを提案する。浮上型とすることで波力を低減し、従来の着底型よりも小規模化及び軽量化が図られ、内水域の海水循環も行えるという利点がある。

本研究は、浮上型振り子式波浪発電システムの一次変換性能（エネルギー吸収性能）を把握することを目的とし、二次元模型実験から検討を行った。さらに境界要素法を用いた入射波エネルギーに対する吸収エネルギーの割合（吸収効率）の推定法を提示し、実験値と比較することで本推定法の妥当性を検討する。

2. 実験水槽及び実験模型設置位置

本実験水槽は長さ24m、幅0.6m、高さ1.0mの二次元水槽で、一端に吸収式不規則波造波システム、他端に消波工を設置している。図-2に示すように実験模型を設置し、一様水深0.6mで実験を行う。この模型はケーソンの設置位置を上下に、振り子の設置位置を前後に変化させることが可能である。入射波高、反射波高、伝達波高を計測するため模型の前方、後方にそれぞれ波高計を三本、二本設置した。また、ケーソン上部に三分力計を設置して水平波力及び鉛直波力の計測を行った。

3. 実験条件及び方法

3.1 水室長実験

従来の着底型の振り子式波浪発電システムは、振り子からケーソン後壁までの距離である水室長 D は約 $1/4$ 波長でエネルギー吸収効率が最大とすることが確認されている。しかし、本実験装置は従来の装置と多少異なるので、同様の特性を示すことを確かめる必要がある。よっ

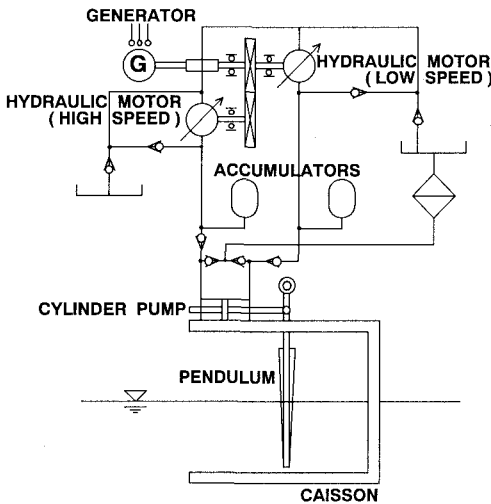


図-1 システムの油圧回路

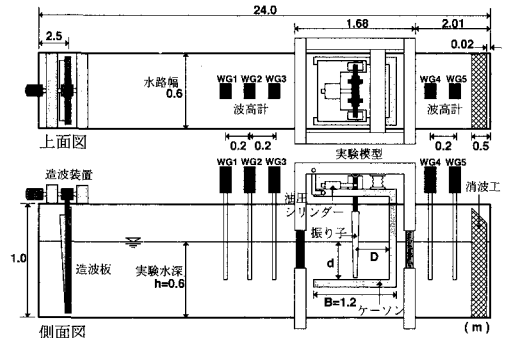


図-2 実験水槽及び実験模型設置位置

* 正会員 工修 前室蘭工業大学大学院 (現 日本テトラポッド(株))
 ** 学生会員 工博 室蘭工業大学教授 建設システム工学科
 *** 正会員 工博 室蘭工業大学助教授 建設システム工学科
 **** 学生会員 室蘭工業大学大学院

表-1 水室長実験の実験条件

対象	規則波
周期	$T=1.4$ sec
h/L	0.22
波高	$H=10.0$ cm
喫水	$d=45.0$ cm ($d/h=0.75$)
水室長	$D=0.5306, 0.6038, 0.6761, 0.7474, 0.8177$ (1.2s) (1.3s) (1.4s) (1.5s) (1.6s)

()内はDがL/4に相当する周期

表-2 負荷実験の実験条件

対象	規則波, 不規則波
周期	$T=1.0, 1.2, 1.4, 1.6$ sec
h/L	0.39, 0.28, 0.22, 0.18
波高	$H=7.5, 10.0$ cm
喫水	$d=45.0, 60.0$ cm, ($d/h=0.75, 1.00$)

て、本研究ではまずエネルギー吸収効率が最大となる水室長を決定する実験を行った。その手法は、波浪条件は一定としてケーソン内における振り子の位置を変化させ、各位置におけるエネルギー吸収効率を比較して水室長を決定する。実験条件を表-1に示す。

3.2 負荷実験

3.1で決定した水室長の条件で実験を行い、本研究の主要目的である浮上型振り子式波浪発電システムのエネルギー吸収性能を把握することを目的とする。

本システムのエネルギー吸収機構は、シリンダーに抵抗(負荷)を与え、それによって生ずるシリンダー反力とシリンダー変位との積が吸収エネルギーとなるものである。実験では大小8ケースの負荷をシリンダーに与えることで本システムのエネルギー吸収特性を調べることとした。実験条件は表-2に示す通りである。さらに、本システムにおけるエネルギー吸収効率は、反射率と密接な関係があると推測できるのでそれについても検討し、同時にケーソンに作用する水平波力及び鉛直波力を三分力計を用いて測定し検討を行う。

4. 吸収効率及び負荷比の算出方法

吸収効率(変換効率)は、振り子や油圧シリンダーを含めた一次変換システムの平均取得パワー W_s 、入射波パワー W_I として次式のように定義する。

$$\nu = \frac{W_s}{W_I} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、平均取得パワー W_s は、計測した油圧シリンダー部の反力 F とピストンの移動変位 x を用いると、次のように表される。

$$W_s = \frac{1}{t} \sum_{s=1}^n \left\{ \frac{F_s + F_{s+1}}{2} (x_s - x_{s-1}) \right\} \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 t : サンプリング時間、 n : データ収集数を表す。また、入射波パワー W_I は次式を用いる。

$$W_I = E_R c_g B_p = \frac{1}{8} w_0 H^2 c_g B_p \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 E_R : 規則波の単位面積当たりの全エネルギー、 c_g : 群速度、 B_p : 振り子の幅、 w_0 : 単位体積重量、 H : 波高である。

さらに、振り子の属性に関する負荷減衰モーメント係数 N_0 及び振り子に作用する流体力に関する造波減衰モーメント係数 N は次式で求められる。

$$N_0 = \frac{1}{t_0} \sum_{s=1}^n \left\{ \frac{(F_s + F_{s+1}) \cdot r_N^2 (t_s - t_{s-1})^2}{2(x_s - x_{s-1})} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

$$N = - \frac{2\rho\omega B_p (k_{a0} z_0 \sinh k_{a0} d + \cosh k_{a0} d - 1)}{k_{a0}^3 (k_{a0} d + \sinh k_{a0} d \cosh k_{a0} d)} \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 r_N : 振り子の支点からシリンダーまでの距離、 t_0 : 計測時間、 ρ : 水の単位体積重量、 ω : 角周波数、 z_0 : 振り子の支点から水面までの距離、 d : 喫水深であり、 k_{a0} は次式から求まる固有値である。

$$\omega^2 = g k_{a0} \tanh k_{a0} d \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 g は重力加速度である。

さらに、負荷比は N_0/N で求められる。

5. 実験結果及び考察

5.1 水室長実験

実験結果を、図-3, 4に示す。エネルギー吸収率は、水室長を入射波の1/4波長の長さ設定した場合に最も高い値を示した。したがって、本システムも水室長を入射波の1/4波長に設定することで、最も高いエネルギー吸収率を得られるものと考えられる。一方、反射率はエネルギー吸収率の結果とほぼ逆の関係を示しており、高いエネルギー吸収率が得られれば反射率を低下させることができる。よって後に行う負荷実験では、水室長を入射波の1/4波長に設定して実験を行うものとする。

5.2 負荷実験

負荷実験は、規則波と不規則波についておこなわれた。結果は双方ともほぼ同様の傾向を示したので、ここでは規則波の結果のみについて考察する。

a) エネルギー吸収効率

実験結果を図-5, 6に示す。最大効率の値は、振り子板の波に接する面積の大きい $d/h=1.0$ の方が高くなるように思えるが、実際は両喫水ともほとんど変わらず、 $T=1.2, 1.4$ (s)で他の周期より高く60~70%となっている。この結果より、浮上型でもエネルギー吸収効率の

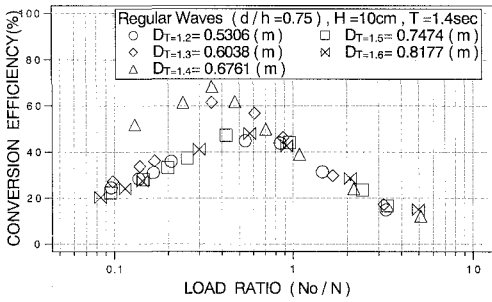


図-3 水室長実験の吸収効率

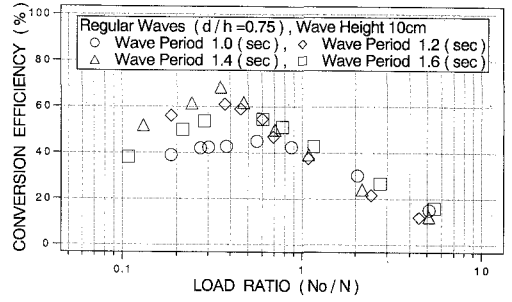


図-5 負荷実験の吸収効率 (d/h=0.75)

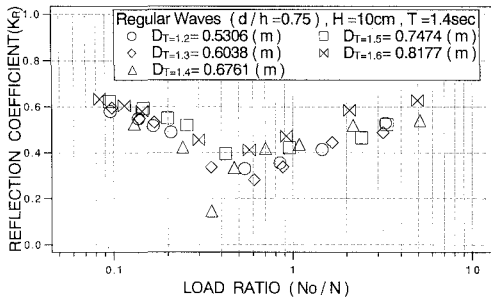


図-4 水室長実験の反射率

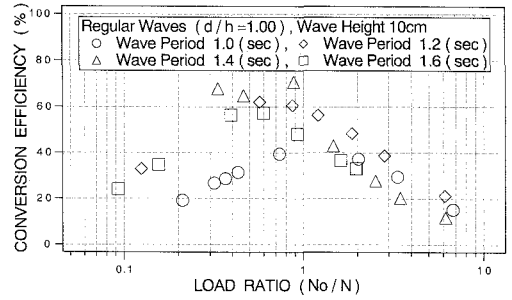


図-6 負荷実験の吸収効率 (d/h=1.00)

値に変化はなく、浮上型振り子式波浪発電システムも着底型に全く劣らない有効な波エネルギー変換装置であることが確認できた。

b) 反射率, 伝達率

図-7 に、負荷実験における反射率, 伝達率の結果を示す。反射率はエネルギー吸収効率と相対的な関係を示しており、吸収効率がピークをとるときに反射率が小さい値をとる。喫水比 d/h で比較すると、両喫水比とも最小の反射率は 0.3 前後であり喫水比による差はなかった。したがって、本システムは最大吸収効率を得る負荷をシリンダーに与えることにより反射率を低減できるものと推定できる。波がケーソン下部を通して生ずる伝達率は、負荷比に関係なく 0.1 前後の値を示している。また周期で比較すると長周期側ほど伝達率は大きくなる傾向にあり、水底における水粒子速度の大小が起因しているものと考えられる。したがって、浮上型についても、防波堤として十分機能するものと推定できる。

c) 波力

実験結果を図-8, 9 に示す。浮上型にする主な理由の一つは水平波力を低減することである。しかし、同時に浮上型とすることにより鉛直波力が増加することが懸念された。よってこの両者について検討する。まず水平波力を喫水で比較すると、 $d/h=0.75$ の方が最大で 20% 程度小さい値を示し、浮上型とすることで水平波力は低減された。一方、鉛直波力は喫水の相違による顕著な差は

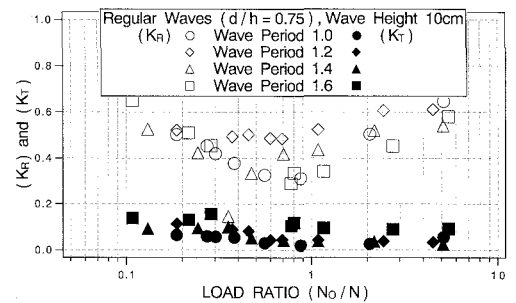


図-7 負荷実験の反射率, 伝達率 (d/h=0.75)

みられず浮上型としても着底型に対して大きな値を示すことはないものと推定される。

6. 解析方法

6.1 解析モデル

本研究で用いる解析モデル及び座標系を図-10 に示す。計算に使用する装置の寸法は本実験模型と同様の値であり、水室長は入射波の 1/4 波長として計算する。また水深は一定とする。波動の解析では、振り子板より沖側の水域(外域)と振り子板とケーソンに囲まれた水域(内域)に分けて行う。

6.2 外域の速度ポテンシャル

外域の速度ポテンシャルは微小振幅波の仮定により、入射波, 振り子板を固定したときの散乱波及び振り子が

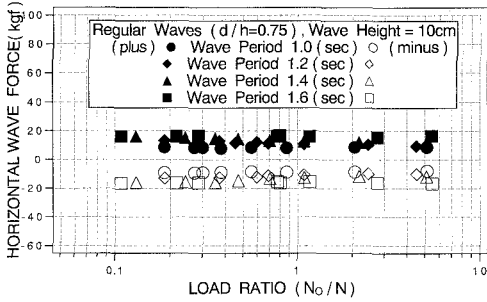


図-8 負荷実験の水平波力 (d/h=0.75)

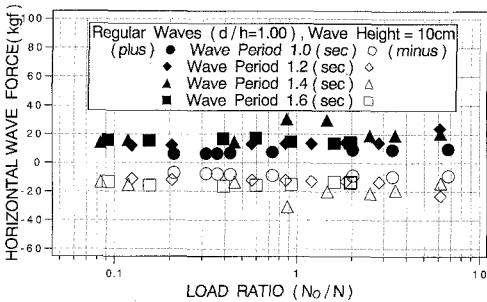


図-9 負荷実験の水平波力 (d/h=1.00)

動揺することによって生ずる発散波の速度ポテンシャルの和として、次のように表せる。

$$\nabla^2 \phi_0 = \nabla^2 \phi_a = \nabla^2 \phi_r = 0 \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 ϕ_0 , ϕ_a , ϕ_r はそれぞれ入射波、振り子板を固定したときの散乱波、振り子が動揺することによって生ずる発散波の速度ポテンシャルを示す。また、自由水面、水底、ケーソン底面の条件を満足する入射波の速度ポテンシャルは次のように表すことができる。

$$\phi_0 = \phi'_0 \frac{\cosh k_0(z+h)}{\cosh k_0 h} e^{-i(k_0 x - \omega t)}, \quad x = -\infty \sim (D-B) \dots\dots (8)$$

$$\phi_a = \phi'_a \frac{\cosh k_{a0}(z+d)}{\cosh k_{a0} d} e^{-i(k_{a0} x - \omega t)}, \quad x = (D-B) \sim 0, z = -d \sim 0 \dots\dots (9)$$

ここで、 $\phi_0 = i g a / \omega$, d : 喫水深, ω : 角周波数, D : 振り子板の回転中心から後壁までの距離, B : ケーソン奥行きを表す。さらに、散乱波及び発散波の速度ポテンシャルは次のように表すことができる。

$$\phi_l = \phi'_{l,0} \frac{\cosh k_0(z+h)}{\cosh k_0 h} e^{i(k_0 x + \omega t)} + \sum_{n=1}^{\infty} \phi'_{l,n} \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} e^{k_n x + i \omega t} \quad x = -\infty \sim (D-B) \dots\dots (10)$$

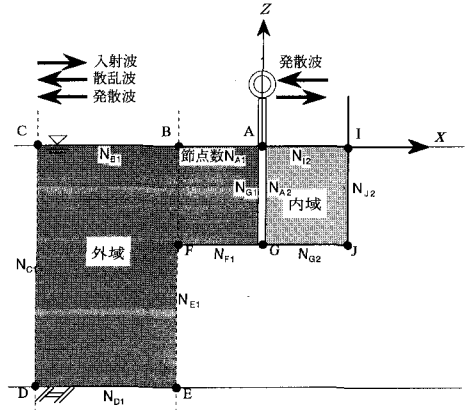


図-10 解析モデル

$$\phi_l = \phi'_{l,0} \frac{\cosh k_{a0}(z+d)}{\cosh k_{a0} d} e^{i(k_{a0} x + \omega t)} + \sum_{n=1}^{\infty} \phi'_{l,n} \frac{\cos k_{an}(z+d)}{\cos k_{an} d} e^{k_{an} x + i \omega t} \quad x = (D-B) \sim 0, z = -d \sim 0 \dots\dots (11)$$

ここで、散乱波と発散波を区別するために、添字の l はそれぞれ d , r とする。また k_0, k_n, k_{a0}, k_{an} は次式を満足する固有値である。 g は重力加速度である。

$$\omega^2 = g k_0 \tanh k_0 h = g k_{a0} \tanh k_{a0} d$$

$$\omega^2 = -g k_n \tan k_n h = -g k_{an} \tan k_{an} d \quad (n=1, 2, 3, \dots) \dots\dots (12)$$

それぞれの振り子表面上での境界条件を次に示す。

$$\frac{\partial \phi_0}{\partial n} = \frac{\partial \phi_a}{\partial n} = 0 \quad \text{on } S \dots\dots (13)$$

$$\frac{\partial \phi_r}{\partial n} = i \omega z_0 \left(1 + \frac{z}{z_0} \right) n_x \quad \text{on } S \dots\dots (14)$$

ここで、 S : 振り子の外側没水面全体, z_0 : 振り子の支点から水面までの距離, n_x : 振り子表面の外向き単位法線ベクトルの x 成分を表す。

6.3 内域の速度ポテンシャル

内域では水の出入りがないと仮定すると、発散波の速度ポテンシャルのみが存在する。その速度ポテンシャルを ϕ'_r とすると次のように表される。

$$\phi'_r = \varphi_{r,0}(x) \frac{\cosh k_{a0}(z+d)}{\cosh k_{a0} d} e^{i \omega t} + \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_{r,n}(x) \frac{\cosh k_{an}(z+d)}{\cosh k_{an} d} e^{i \omega t} \dots\dots (15)$$

6.4 変換効率

振り子によって一周期間に変換される平均機械パワーは次式で表され、入射波パワーで除すことにより変換効率を求める。

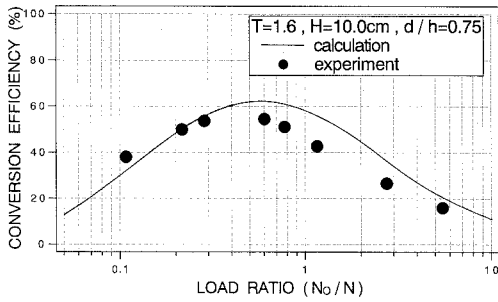


図-11 計算結果

$$W_s = \frac{1}{2} \omega^2 N_0 \theta^2 \dots\dots\dots (16)$$

7. 計算条件及び計算結果

計算結果を図-11に示す。負荷実験では負荷比が0.3～0.8程度で最大効率を得るのに対して、計算結果では0.5前後となり、吸収効率が最大時の負荷比は本解析法を用いて推定することは可能と考えられる。しかし吸収効率は全体的に高い値を示し、実験値を比較的精度よく再現している $T=1.6$ (s) のケースでも最大10%程度の誤差がある。短周期側ではさらに誤差が大きくなる傾向を示した。これらの結果に対する本解析法の問題点として、ケーソン内の節点間隔が波長に対して広いこと、エネルギー損失を考慮していないことが挙げられる。

8. むすび

これらより、以下のようなことが明らかになった。

- (1) 振り子の設置位置をケーソン後壁から1/4波長離すことで高効率なエネルギー吸収が行える。
- (2) 本システムが、最も有効な吸収性能を示す波浪条件は $h/L=0.22$ 前後であり、負荷比は0.3～0.8程度である。また吸収効率は着定型と同等の値を示す。

(3) 本システムが高い吸収性能を示す条件下で反射率を低減できる。伝達率は0.1前後と少なく、防波堤として十分機能すると思われる。

(4) 本システムに作用する水平波力は浮上型とすることにより低減され、着底型と同程度の鉛直波力である。

(5) 現時点におけるエネルギー推定法では十分とはいえ、今後さきの問題点を考慮することで、本解析法が浮上型振り子式波浪発電システムのエネルギー吸収効率の有効な推定法となるとと思われる。

本研究に関し、ご指導下さった元室蘭工業大学 渡部富治教授(機械システム工学科)、共同して実験された松葉賢司君(現東洋建設(株))ならびに機械システム工学科院生、学生の皆様に感謝いたします。

参 考 文 献

- 近藤俊郎 (1985): 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
- 近藤俊郎・谷野賢二・渡部富治・倉内公嘉・松岡 功 (1985): 防波施設に併設する波浪エネルギー吸収装置の研究(4)―取得エネルギー量の推定, 第32回海岸工学論文集, pp. 697-701.
- 近藤俊郎・渡部富治・谷野賢二 (1988): 防波施設に併設する波浪エネルギー吸収装置の研究(5)―システムの最適化, 第35回海岸工学論文集, pp. 842-846.
- 谷野賢二・渡部富治・近藤俊郎 (1984): 防波施設に併設する波浪エネルギー吸収装置の研究(3)―実海域性能実験, 第30回海岸工学論文集, pp. 581-585.
- 谷野賢二 (1992): 振り子式波浪エネルギー変換装置の設計法に関する研究, 開発土木研究所報告第97号, 北海道開発局開発土木研究所, pp. 1-48.
- 渡部富治・近藤俊郎・谷野賢二・竹田英章・黒井昌明 (1982): 防波施設に併設する波浪エネルギー吸収装置の研究(2)―振り子式, 第29回海岸工学論文集, pp. 486-490.
- Furusawa, A., H. Kondo, S. Toma and M. Fujiwara (1993): Uplifting type of pendular wave power converter, Proc. of International Symp. on Ocean Energy Development (Ed. by H. Kondo), pp. 299-306.
- Watabe, T. (1993): Pendular wave power converter-15 years study and future Prospect, ditto., pp. 41-52.