

# 耐波壁を有する振子式波パワー吸収装置の水理特性について

谷野賢二\*・水野雄三\*・遠藤宣世\*\*  
梅沢信敏\*\*\*・高橋哲美\*

## 1. 緒 言

化石燃料の燃焼にともない大気中に蓄積される、いわゆる、温室効果ガスによる地球規模の環境問題が深刻化する中、自然エネルギーはクリーンで、しかも再成可能なエネルギー源としてその有効的活用が再認識され始めている。これまで、自然エネルギー活用についてはコストパフォーマンスの悪さが実用化の阻害要因と考えられてきたが、地球環境の保全に必要な経費も含めてコストを議論すべきだ、との指摘（近藤ら、1991）に見られるように、新たなパラダイムで自然エネルギーの活用を検討する必要があると考えられる。自然エネルギー活用の観点から、著者らは波エネルギーに着目し、振子式波エネルギー変換装置（渡部ら、1982）を内蔵する防波堤の実用化について検討を行ってきた（梅沢ら、1991）。

波エネルギーは海洋温度差、潮位差エネルギーと並んで、海洋エネルギーの中で最も利用の可能性の高いエネルギーとして期待されているが、密度が薄く、しかも変動性が大きいという欠点がある。この欠点は、とりまなおさず変換装置の機械部の容量（定格）や強度の設定を難しくしている。通常、機械はその定格付近で運転されることが望ましく、過大な設計は不経済であるばかりでなく、機械の性能も十分生かすことができない。

こうしたことから、本文では、異常波浪時などの過大な入力への対応を機械の容量や強度を大きくするのではなく、防波堤構造によって行う方法について検討したので報告する。

## 2. 振子式波パワー吸収装置の概要

振子式波パワー吸収装置（Pendulum-type Wave Power Converting System, PEWCOS）は、図-1に示すように、ケーソン前壁の代わりに取り付けられた平板（振子）が波浪に誘起されて運動し、その運動方向に対応して接続されたシリンダー及び油圧回路を介して波パワーを油圧パワーに変換する方式であり、これまで増毛港や

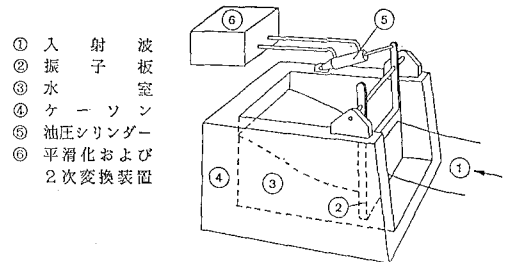


図-1 振子式波パワー吸収装置

室蘭港において実証実験が行われてきている（近藤、1985）。振子式は、比較的小さな波でもエネルギーを取り出すことが可能で、他の波エネルギー吸収方式と比べて、トップレベルのエネルギー吸収効率を有している。これまでの各種検討結果から本システムを実用化に結びつけていくための主要な課題として荒天時対策が挙げられる。

油圧モータ、発電機など、二次変換の機械部は定格付近で最大効率が得られるように設計されている。したがって、定格を荒天時の波浪条件に合わせるのとは得策でない。そこで、荒天時における装置保護の為に過負荷に対して、ピークカットをする必要がある。

その方法として、①機械的な対策と、②入力そのものの制限が挙げられる。①として、油圧回路ではリリーフ弁を設けて過剰な圧力を解放するのが一般的である。一方、こうした措置は振子板の運動の増大をもたらすので、ストッパーなどによって動きを制限する必要がある。しかし、動きの制限は衝撃荷重の繰返し作用をもたらすといった問題が新たに生じる。②については、設計波以上の波が振子板に入射しないように防波堤ケーソンの形状を工夫する方法と防波堤の前方に潜堤などを設置して波高の高い波を選択的に砕波減衰させる方法の2つが考えられる。ここでは、前者の方に着目して振子板前面部に耐波壁を設け、過剰な入射波をカットするのに有効な耐波壁形状について検討を行うこととする。

\* 正会員 工修 北海道開発局開発土木研究所

\*\* 北海道開発局開発土木研究所

\*\*\* 正会員 北海道開発局港湾部空港課

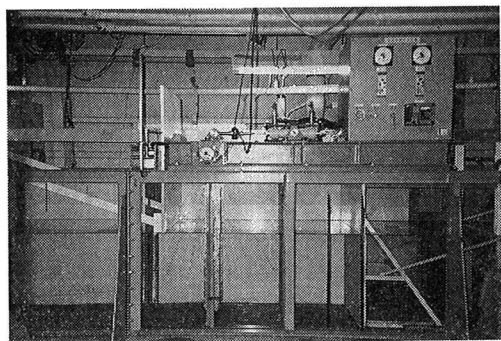


写真-1 波パワー吸収装置模型

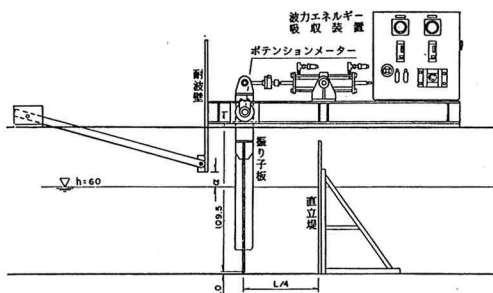


図-2 模型形状(水平床, 耐波壁)

### 3. 実 験

#### (1) 実験装置

実験は、一端に波面検出型反射波吸収式造波装置を有するガラス張りの2次元造波水路(長さ 24m, 高さ 1m, 幅 0.8m)において実施した。写真-1に実験に使用した装置の模型を示す。振子板には油圧シリンダーが接続されており、また、振子板に対する負荷を自由に設定できるように油圧回路には絞り弁を設けてある。振子板の全反力は振子と油圧シリンダーの間に取り付けたロードセルによって計測し、振子の回転角の測定はポテンシオメーターを使用して行った。

海底地形は水平床の場合と、1/15の勾配および堤体基礎マウンド(捨石+ケーソン底版厚: 現地換算 2.8m)がある場合の2種類とし、モルタルで制作した。

実験断面を図-2、図-3に示す。図には、振子前面に耐波壁のある場合が示されており、以降では、耐波壁を除いたものを「基本型」と呼ぶことにする。

#### (2) 実験方法

実験は、基本型および耐波壁付きについて、規則波を作用させて、油圧の負荷を絞り弁で種々に変化させた場合の振子板回転角、全反力および波形を測定した。水平床の基本型については不規則波実験も併せて行った。耐波壁付きについては、耐波壁下端の静水面からの鉛直距離を入射波高  $H_I$  の  $-0.5 \sim +1.0$  (倍静水面より下方を正) まで変化させた。水平床では振子板から耐波壁までの距離 ( $l$ ) を変えた実験も行った。

測定データはサンプリング周波数 20Hz でデジタルデータレコーダ (DR-F1) に収録した後、キャリブレーション補正、各種解析をパソコンを用いて行った。なお、反射率の測定、解析は入・反射波分離推定法(合田, 1976)により行った。

### 4. 実験結果と考察

#### (1) 基本型の効率と反射率

基本型の効率に対する理論解析は、2次元については

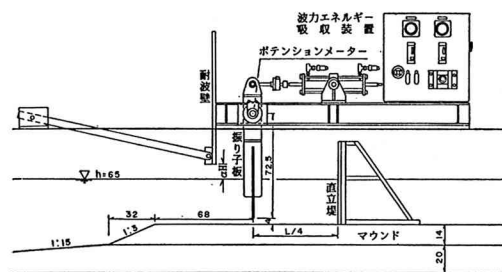


図-3 模型形状(基礎マウンド, 耐波壁)

浅野(1980)が、3次元については谷野(1984)がそれぞれ行っている。2次元については次式で効率  $\lambda$  が求められる。

$$\lambda = \frac{N}{I^2(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2(N_1 + N)^2} \frac{8\rho^2\omega^6 Y_0^4}{k_0^8 X_0^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $I$ : 振子の慣性モーメントと造波による付加慣性モーメントの和、 $N$ ,  $N_1$ : 角速度に比例した負荷及び造波モーメント係数、 $k_0$ : 波数、 $\rho$ : 水の密度、 $\omega$ : 振子板の角周波数、 $\omega_0$ : 水中での振子の固有角周波数であり、 $X_0$ ,  $Y_0$  は次式で示される。

$$\left. \begin{aligned} Y_0 &= k_0 l \sinh(k_0 h) + \cosh(k_0 h) - 1 \\ X_0 &= \sinh(k_0 h) \cdot \cosh(k_0 h) + k_0 h \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $l$ : 振子支点から水面までの距離である。(1)式で  $\lambda$  が最大になるのは  $\omega_0 = \omega$ , かつ、 $N = N_1$  のときである。

振子板への規則波及び不規則波の入射パワー  $W_I$ ,  $W_I'$  は次のように表される。

$$W_I = (1/8) \rho g B_0 H_I^2 C_g \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$W_I' = \rho g B_0 \int_0^\infty C_g S_{\eta\eta}(f) df \quad \dots\dots\dots (4)$$

吸収パワー  $W_P$ , 効率  $\lambda$  は次式で表される。

$$W_P = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} M(t) \cdot v(t) dt \quad (5)$$

$$\lambda = W_P / W_I \quad (6)$$

ここに、 $g$ ：重力加速度、 $C_g$ ：入射波の群速度、 $B_0$ ：振子板の幅、 $S_{\eta\eta}(f)$ ：波高のパワースペクトル密度、 $T_0$ ：計測時間、 $M(t)$ ：ピストンに作用するトルク、 $v(t)$ ：振子の各速度である。

基本型の吸収・反射特性の一例を図-4及び図-5に示す。図には理論値が合わせて示されている。横軸の負荷比  $\beta_N$  は、振子の負荷モーメント係数  $N$  と振子の造波モーメント係数  $N_1$  との比 ( $N/N_1$ ) であり、 $N_1$  は次式で表される。

$$N_1 = (2\rho B_0 Y_0^2 \omega) / (k_0^4 X_0) \quad (7)$$

不規則波における  $N_1$  は  $T_{L/3}$  に対する値を用いた。 $N$  は振子の角速度  $\omega$  とトルク  $M$  が比例するものとして、実測データから最小二乗法により算定した。今回の実験では、 $\beta_N < 1.0$  において相関係数  $r > 0.90$  であり、ほぼこの条件を満足しているものと考えられる。これら

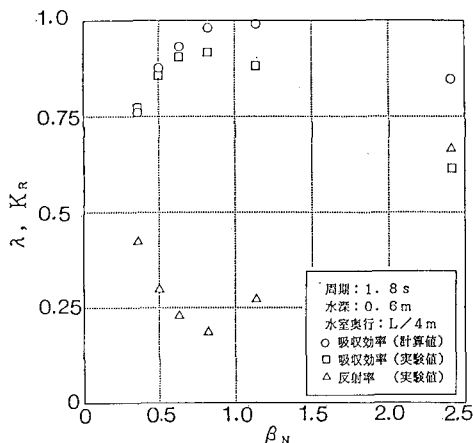


図-4 基本型の性能(規則波)

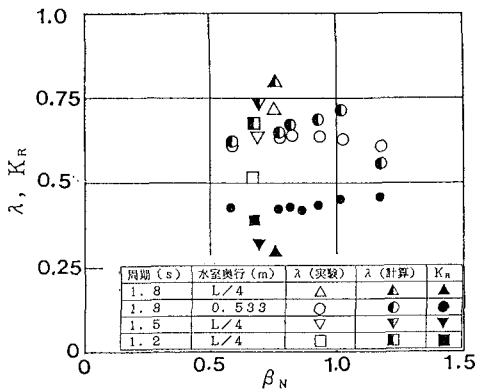


図-5 基本型の性能(不規則波)

の図から、振子式が波パワー吸収装置として優れた方式であることがわかる。 $\beta_N$  が大きくなると理論値との差が大きくなる。これは、油圧が増大するにしたがい、油圧回路のパイプが内圧で弾性変形を生じているためと考えられる。波の反射率  $K_R$  は吸収パワーの増加にともない低下しており、消波効果も高くなることがわかる。

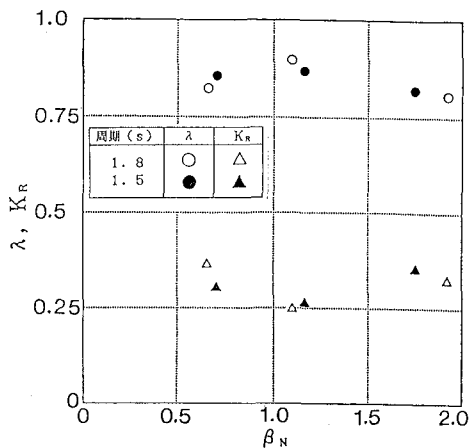


図-6 基本型の性能(規則波・基礎マウンド付き)

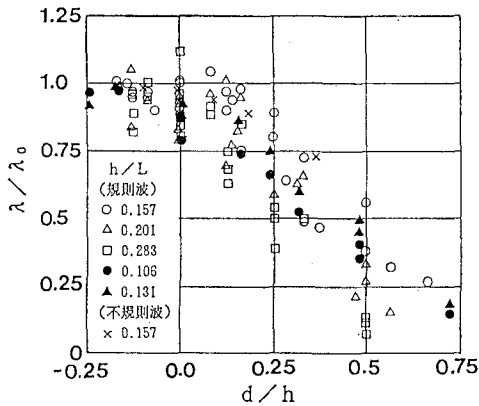
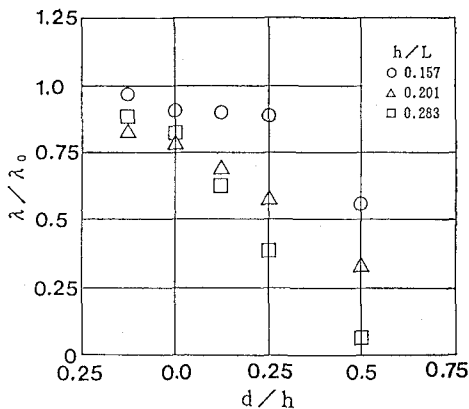
## (2) 海底勾配と基礎マウンドの影響

海底勾配と基礎マウンドの影響を見積るために、入射波パワーとして、これらの影響を受けない沖側の水深で算定した値を用い、振子の吸収効率を調べた。ケーソン設置水深及び基礎マウンド天端水深と沖側水深  $h_1$  (=65 cm) の比はそれぞれ 0.62 および 0.48 である。結果を図-6に示す。この結果より効率の最大値は、各実験条件の範囲において、0.8 以上と高い値を示した。このことから、吸収効率に与える基礎マウンドの影響は小さいと推測される。

## (3) 耐波壁によるピークカット効果

図-7 はパラメータとして  $h/L$  をとり、横軸に水深  $h$  と静水面から耐波壁下端の没水水深  $d$  の比、 $d/h$ 、縦軸に吸収効率をとって整理したものである。実験周期は 1.2~1.8 s であり、現地の周期に換算すると  $T=5.4 \sim 8.0$  s に相当する。同図には基礎マウンドがある場合もあわせて示している(図中の黒印)。ただし、水深は基礎マウンド天端水深をとって整理した。これは、耐波壁直下の波パワーの伝達可能水深を取ったものとみることができる。

実験の範囲では、 $h/L$  の差は小さいことから、パラメータの効果は顕著ではないが、 $h/L$  が増加するにしたがい、効率は低下している。耐波壁は振子板の前方に設けられた一種のカーテンウォールである。カーテンウォールを伝達してきたパワーが吸収量に寄与するとみる

図-7 耐波壁の効果 ( $l_t=27$  cm)図-8 耐波壁の効果 ( $l_t=54$  cm)

ことができる。したがって、耐波壁による吸収効率の減衰は  $d/h$  を用いて整理することにより、ほぼカーテンウォール型防波堤の伝達波特性（例えば、森平ら、1964）と同様にまとめられる。また、マウンド付きの場合は横軸の分母の水深に基礎マウンド天端水深  $d$  を取ると、水平床の場合とほぼ同様に扱うことができるものと推定される。

図-7 の結果を用いると、例えば吸収パワーを2割カットするためには、 $d/h \approx 0.2$  となるように耐波壁を設計すればよいことになる。また、潮位変動による耐波壁の効果の変化も同様な図から推定することができる。

一方耐波壁設置位置を  $l_t=54.0$  cm と2倍に変えて行った実験結果を整理したものが図-8である。図から、 $h/L$  が大きくなるほどそれぞれの減衰の程度も大きく

なっていることがわかる。各周期に於ける波長と耐波壁設置位置  $l_t$  の比、 $l_t/L$  を整理すると、 $l_t=27.0$  cm の場合は  $0.072 \sim 0.128$  と小さいのに対して  $l_t=54.0$  cm の場合は  $0.143 \sim 0.255$  と大きくなっている。特に、 $T=1.2$  s の場合は  $0.255$  と波長の  $1/4$  となる。そのため、振子板と耐波壁間で顕著な重複波動場が形成され易いことが、効率減衰の著しい原因となっているものと推定される。

## 5. 結 言

以上より、これまで課題とされてきた振子式波パワー吸収装置の荒天時対策について一つの方策を提案することができた。本方策はエネルギー変換部の最適設計を行う上で、堤体設置地点の波浪条件から推定される入射波パワーの過剰分を機械的な制御によらず防波堤の構造によって制御できるのが利点であり、耐久性や安全性の面から有効な方法であると考えられる。また、その際の振子板の設計波力以上をピークカットするための耐波壁形状とそのときの吸収効率のダウンする割合などを適切に見積もることができることを示した。

一方、耐波壁は常に波をカットするので波高が低く、エネルギーが少ない場合には不利となる。こうした欠点を少なくするために、実用化に際しては更に検討が必要である。

## 参 考 文 献

- 浅野誠一 (1980): 岸壁部に設けられた振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2部会資料 SK60-14.
- 梅沢信敏・谷野賢二・平沢充成 (1991): 波エネルギー活用型防波堤の開発に関する研究—北海道沿岸の波パワーと改良型振子式波エネルギー吸収装置の水理実験について—, 第34回北海道開発局技研講演概要集(4), pp. 299-304.
- 近藤俊郎 (1985): 沿岸固定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[試験研究(2)]研究成果報告書.
- 近藤俊郎・渡部富治 (1991): 環境保全効果を考慮した海洋エネルギー利用の経済性評価, 第46回年講.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池 治 (1976): 不規則波実験における入射波の分離推定法, 港研資料, No. 248.
- 森平倫生・柿崎秀作・合田良実 (1964): カーテン防波堤とその特性について, 港研報告, Vol. 3, No. 1.
- 谷野賢二・近藤俊郎・渡部富治 (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)—実海域性能試験—, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 581-585.
- 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)—振子式—, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 486-490.