

波動ポンプの揚水能力に関する研究

今井 貫爾*・吉田 幸三**・岩瀬 浩二***・高橋 俊彦****

1. はじめに

現在までの海洋及び沿岸構造物は厳しい波浪条件から重要構造物を守るといふ見地から建造されてきたが、今後は、無限に存在する波浪エネルギーを能動的に利用する方向での検討も必要になってくるものと思われる。この立場に立って、波のエネルギーを用いて海水を汲み上げる波動ポンプを考案した¹⁾。波動ポンプは、海水揚水発電や養魚池への給水、さらに海水交換等に利用できる能力を有している。現在考えている波動ポンプは主として防波堤や護岸等に付属して建造するものであるが、立地可能性の検討のためには、揚水能力を事前に把握しておく必要がある。このため、水理模型実験により揚水能力の検討を行った。また、新しく開発した揚水量理論解析法の計算結果と比較することにより、解析法の適用性に関しても考察した。

2. 波動ポンプの原理

波動ポンプの構造を図-1に示す。外海に面した部分に開口部を有する矩形のケーソンの内部に鉛直運動のみを行うように拘束された矩形フロートが浮かんでいる。フロートの中心部には円筒形の空洞(外管)を設け、外管内に給水管のパイプ(内管)を挿入し、ケーソンの上部で内管が固定されている。また、フロートに固定した外管の下端と給水管の内管の下端には上向きにのみ開く弁が取り付けられている。なお、内管と外管との隙間には適当なシールが施されている。

波動ポンプは、波浪によるケーソン内のフロートの上下運動を利用して、フロート底部と給水管に取付けられた弁により海水を汲み上げるものである。フロート下降時に外弁が開き、フロート内に海水を給水し、フロート上昇時には、外弁が閉じ、内弁が開いてフロート内の海水を押し上げる。この運動を繰り返すことにより波運動がある限り揚水し続けるものである。

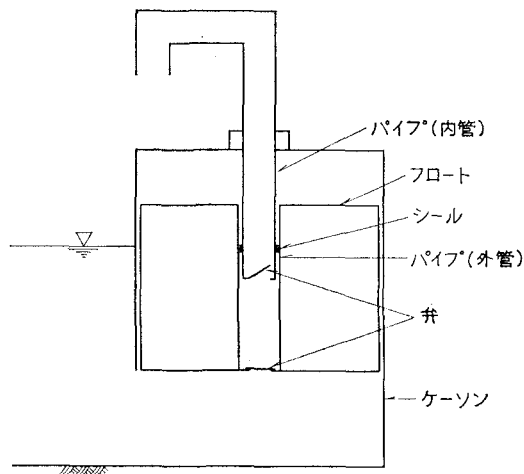


図-1 波動ポンプの構造

3. 数値解析法の概要

波動ポンプの揚水能力を算定するために、揚水量解析プログラムを開発した。フロートの変位を計算し、それを用いてポンプから出力される流量を計算するものである。以下にその概要を示す。なお解析で対象とする波動ポンプのモデルは、図-1に示す通りである。

フロートの鉛直変位を z とすると、 z は次のフロートに関する運動方程式を解くことによって求められる。

$$(M_0 + M_A + m)\ddot{z} + c\dot{z} + c'(\dot{z})^2 + Kz + S + F(z, \dot{z}) = F_0 \sin \omega t \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 M_0 : フロート質量

M_A : フロート動揺に伴う付加質量

m : 揚水流加速に伴う付加質量

c : フロート動揺に伴う造波減衰力係数

c' : 管路の流体摩擦抵抗係数

K : 浮力による復元力

S : 揚水圧による力

$F(z, \dot{z})$: フロートとケーソン内壁、内管とフロート固定外管の間の摩擦力

F_0 : 波強制力

ω : 入射波の角周波数 ($=2\pi/T$)

* 正会員 Ph. D. 鹿島建設(株) 技術研究所

** 正会員 工 修 鹿島建設(株) 海洋開発室

*** 正会員 鹿島建設(株) 技術研究所

**** 正会員 理 修 鹿島建設(株) 情報システム部

z : フロートの鉛直変化 (上向きに正で, 静水時を 0 とする)

t : 経過時間

$\cdot$: 時間による微分

ただし, 管内の流れはフロートが上向きに運動する時のみ生じるので, m, c', S は $\dot{z} > 0$ の時, 正の一定値をとり, $\dot{z} \leq 0$ の時は 0 とする。

ところが, 現時点では, フロートとケーソン内壁, 内管とフロート固定外管の間の摩擦力を評価する方法が明確でないため, ここでは $F(z, \dot{z})$ を十分小さいと仮定して, これを無視した次式により, フロートの鉛直変位 z を求める。

$$(M_0 + M_A + m)\ddot{z} + c\dot{z} + c'(\dot{z})^2 + Kz + S = F_0 \sin \omega t \dots\dots\dots (2)$$

(2) 式において, m, c', S に関する項は管内の流れ解析 (ベイヌーイの式) によって求められるもので, それぞれ加速度水頭, 速度水頭, ピエゾ水頭に対応する。また, M_A, c, F_0 に関する項はフロートを上下動のみを行う矩形浮体と考え, 流体力・波強制力の解析を行うことによって算定される。ここでは, 2 次元矩形浮体の波による運動を解析する領域分割法²⁾に基いて計算している。流体領域はフロートの下の領域とケーソンの前方の領域の二つに分割し, ケーソンの後壁が存在するものとして計算している。

(2) 式によってフロートの鉛直変位 z が求まればポンプの理論揚水量は次式で計算される。

$$Q = \eta a / T \dots\dots\dots (3)$$

ここで, Q : 揚水量

η : (2) 式で計算されるフロート変位の全振幅

a : フロート固定外管の断面積

T : 入射波の周期

ただし, (3) 式では弁がフロートの運動に完全に追従して開閉し, また弁からの漏水は無いと仮定している。

4. 水理模型実験

波動ポンプの揚水能力を検討するとともに, 前述した解析法を適用性を検討するために水理模型実験を行った。

(1) 実験概要

実験は, 鹿島建設技術研究所水理実験棟の中型水路 (幅 0.7 m, 高さ 1.5 m, 長さ 60 m) を用いて行った。モデルは実機の 1/15 の縮尺を想定している。摩擦力は十分小さく, 重力が波によるフロートの運動と管内の流れを支配していると考えられるので, フルードの相似則に従うものとした。以下では, 模型における数値を用いることにする。実験に用いた波動ポンプ模型を図-2 に示す。模型は, 塩化ビニール製のケーソンの内部にアク

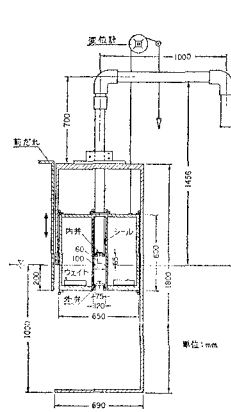


図-2 波動ポンプ模型

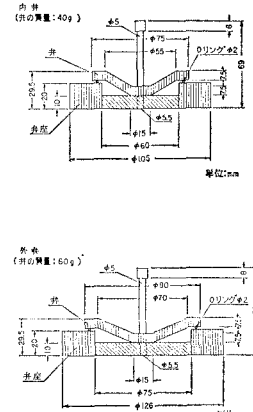


図-3 弁の形状

リル製のフロートと給水管を取付けたものである。フロートは高さ 60 cm, 長さ 65 cm, 幅 65 cm で, バラストを調整することにより吃水を変化させられる。給水管はケーソン上部で固定しており, 揚程は 146 cm とした。波は, 図の左から入射し, フロートは横揺れと回転を拘束されているため鉛直方向にのみ運動する。フロートとケーソンの間の摩擦を軽減するためベアリングをフロート側に取付けた。給水管とフロートの間のシールはネオプレンゴム製の輪 (O リング) を給水管に巻き付けることによって行った。給水管 (内管) の内径は 10 cm であり, フロートに固定した外管の内径は 12 cm である。

フロートの底部と給水管の下端には逆円錐型のアクリル製円盤が中心の軸に沿って上下運動する方式の弁を取付けた。図-3 に内弁と外弁の形状を示す。弁座には, ネオプレンゴム製の O リングを取付けて漏水の防止を行った。内弁と外弁の弁体重量はそれぞれ 40 g と 60 g とし, ストローク (弁体の上下動の距離) は両方とも 5.1 cm とした。内弁と外弁の弁座孔径は, それぞれ 6 cm と 7.5 cm とした。

模型の水路への設置状況を図-4 に示す。模型は, 造波板から 40 m 離れた地点に設置し, フラップ式の造波板により規則波を入射して実験を行った。

実験項目を表-1 に示す。波動ポンプの揚水量は主に波浪条件や潮汐, フロートの重量等によって変化すると考えられる。そこで, 実験は, 波高, 周期, 水深, フロート吃水を数段階に変化させて行った。フロートの変位はプーリー式変位計により測定した。揚水量はポンプの

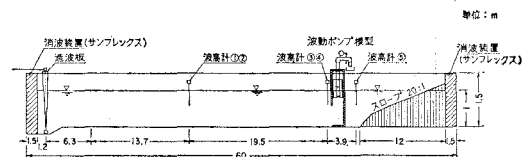


図-4 模型のセットアップ

表-1 実験項目

項目	概念図	実験目的
①自由浮体動揺実験		ケーソン式、前垂れ式、透過式の3つの状態でのフロート単体の場合の波浪による動揺特性を把握する。
②拘束浮体動揺実験		フロート内管を取付け、Oリングの本数を変化させることにより、シール部分の摩擦がフロートの動揺に与える影響を検討する。
③ケーソン式(前垂れ無し)波動ポンプ揚水実験		前垂れ無しの波動ポンプに規則波を入射し、フロート変位と揚水量を測定し、種々の条件が揚水量に与える影響を把握する。
④弁作動時間測定実験		内弁と外弁及びフロート変位を実測し、2つの弁がフロートの運動に追従しているか否かを検討する。
⑤弁改良実験		弁のリフト及び比置を変化させることにより、追従性の良い弁を実験的に選定する。

吐出口から出る流量を計測升で受け、その重量より測定した。

(2) 実験結果及び考察

実験では多くのデータが得られたが、ここでは表-1に示した実験項目に沿って代表的な実験結果を紹介する。

図-5に自由浮体(実験項目①)及びOリングによる拘束浮体の動揺実験(実験項目②)の結果を示す。水深が1m、フロート吃水20cm、前だれなしで波高が10cmの場合であり、縦軸にフロートの鉛直変位を入射波高で無次元化した値をとり、横軸に波周期をとっている。

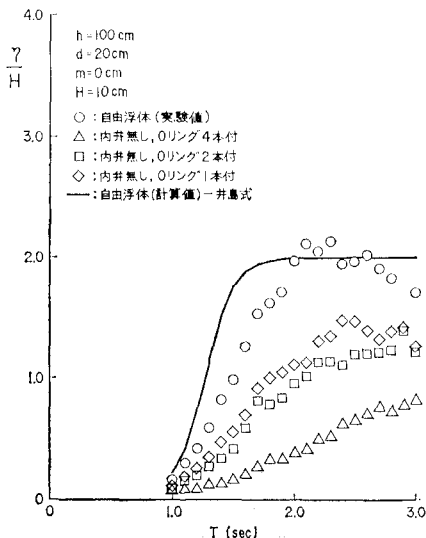


図-5 自由浮体・拘束浮体の変位

る。図中、実線が自由浮体に関する領域分割法による計算値(式(2))において m , c' , S に関する項を除いた運動方程式から求められる変位)であり、○印が自由浮体の実験値である。◇, □, △印は拘束しているOリングの本数をそれぞれ1本, 2本, 4本に変化させた場合の実験値である。これより以下の事項が明らかになった。

- ①自由浮体の場合は実験値と計算値は比較的良く合っている。しかし、波周期が短い場合には計算値を下回る傾向がある。
- ②Oリングの本数が少なくなる程、フロートの変位が大きくなり、シール部の摩擦力が軽減されていると考えられる。

図-6に波動ポンプの揚水実験におけるフロートの変位の実験値と計算値(式(2))を示す。縦軸にフロート変位をとり、横軸に波周期をとり、実線が前述した解析手法の式(2)から計算された値であり、破線が実験値であり、入射波の波高別に示している。これにより以下のことがわかる。

- ①実験によるフロート変位の周期特性の傾向は計算値と定性的に合っている。
- ②実験値は計算値の概ね70~80%程度である。
- ③実験値が計算値を下回るのは種々の摩擦が起因していると考えられる。特に、図-5から判断してOリングによるシール部の摩擦が主な原因であると考えられる。

図-6と同じ実験条件の場合に対応する波動ポンプの揚水実験結果を図-7に示す。縦軸にポンプ流量を、横軸に波周期をとり、入射波高別に示している。実線が計算値(式(2)と式(3))であり、破線が実験値である。これより以下の事がわかる。

- ①ポンプ揚水量は計算値を大きく下回る。
- ②ポンプ揚水量の実験値は計算値の概ね40~50%程度である。
- ③実験による揚水量の周期特性の傾向は計算値と定性的に合っている。

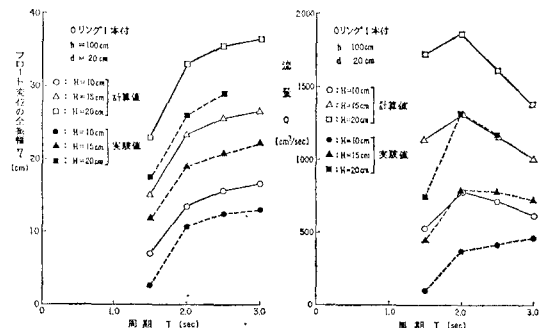


図-6 フロート変位の周期特性 図-7 揚水流量の周期特性

以下の結果により、解析法(式(3))で仮定した理想的な弁の開閉が実際には起っていない可能性があることがわかった。そこで、弁とフロートの運動を計測し、弁の作動状況を観察してフロートの運動との追従性を明らかにするための実験(実験項目④)を行った。

図-8に弁の作動時間測定実験結果の一例を示す。図には同時刻のフロート変位と内弁及び外弁の開閉運動の状況を示している。これより、フロートが最下点にある時、内弁が開いて外弁が閉じ、フロートが最上点にある時、内弁が閉じて外弁が開くという理想的な弁の開閉になっておらず、フロートの変位に比べ弁の反応が遅れていることがわかる。外弁の閉じている時間と、フロートが最下点から最上点に達するまでの時間の比を弁の効率と定義して、実験を行った全てのケースに対する弁の効率を図-9に示す。

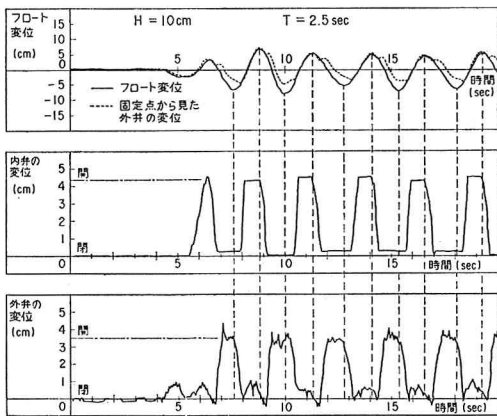


図-8 弁作動時間の測定例

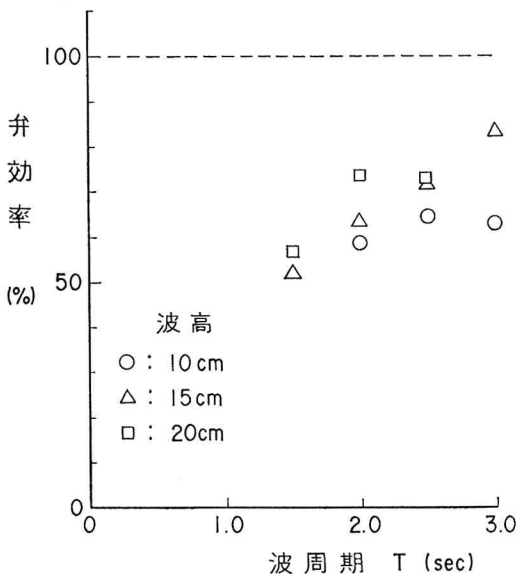


図-9 弁の効率

図-8と図-9より以下のことがわかる。

- ①同じ周期でも波高が大きいくほど弁効率が向上する。
- ②弁効率は周期や波高によってばらつきがあるものの平均的に見て 60~70% 程度である。

②フロート変位よりも揚水量のほうが計算値を大きく下回るのは、弁がフロートの運動にうまく追従しないことが原因と考えられる。

そこで、弁の追従性を高めるために、図-3に示した弁を含めて写真-1に示す5種類の弁について、それぞれの弁のストロークと比重を種々に変化させて実験を行った(実験項目⑤)。

その結果、弁のストロークは弁座孔径の 1/4、比重は 2 程度の時が最も揚水量が大きくなった。この場合の変位と流量の周期特性を図-10、図-11に示す。また、弁効率を図-12に示す。これにより以下の事項が明らかになった。

- ①変位・流量とも実験値は計算値の約 60% である。
- ②弁効率は 90~100% であり、ほぼ理想的な弁である。

最後に実験で得られた揚水流量から、今回の波動ポンプのエネルギー変換効率(単位時間当りに波エネルギーを水の位置エネルギーに変換する効率)を算定した。今回の実験で得られた波動ポンプの効率を図-13に示す。これより以下のことがわかる。

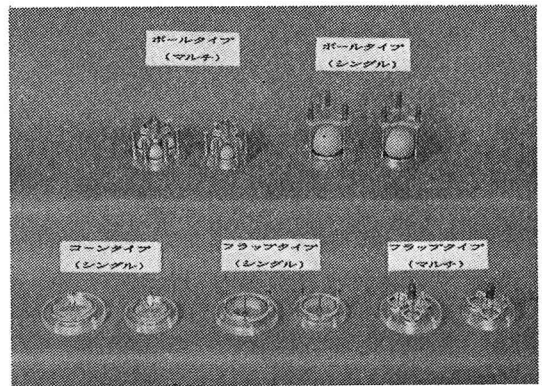


写真-1 各種の弁

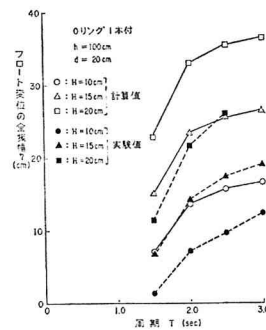


図-10 変位の周期特性

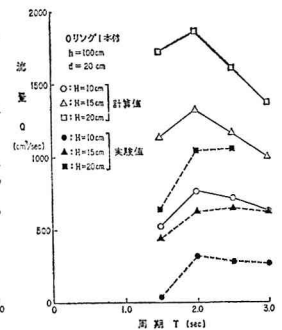


図-11 流量の周期特性

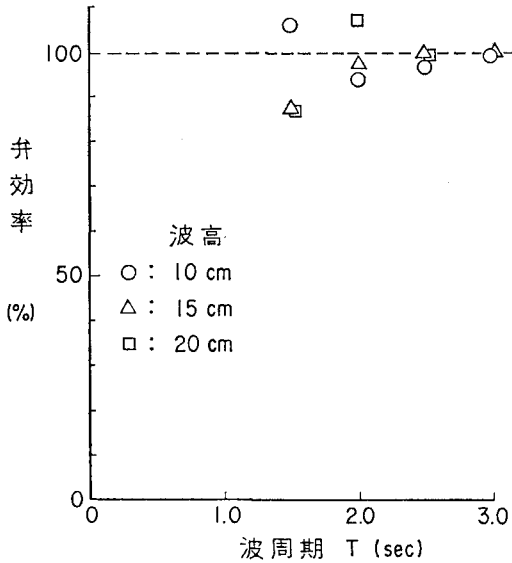


図-12 弁の効率

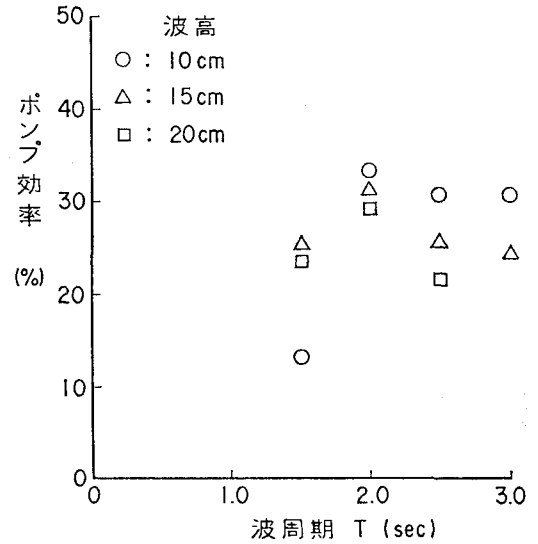


図-13 波動ポンプの効率

- ①波動ポンプの効率は入射波の周期によって変化する。
 ②実験で得られたポンプの効率は平均して約 20~30% である。

5. ま と め

今回行った水理模型実験により以下の事項が明らかになった。

- ①波動ポンプの揚水能力に大きく影響を与える要因はシール部の摩擦と弁の効率である。
 ②弁改良実験より、弁のストロークを弁座口径の 1/4 とし、弁体の比重を 2 程度とすれば、弁効率は 90~100% になりほぼ理想的な弁の開閉が期待できる。
 ③実験で得られた波動ポンプのエネルギー変換効率(波

エネルギーを水の位置エネルギーに変換する効率)はおよそ 20~30% である。

- ④揚水量解析法は今回の実験結果を上回るものの、定性的な傾向の一致は見られた。平均的に実験結果は解析結果のおよそ 60% である。

今後、揚水能力を定量的に算定するためにはシール部の摩擦を考慮した解析法が必要であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 志岐 明・原田 宏: 新しい波エネルギー利用システム「波動ポンプ」の開発, 土木学会第 41 回年次学術講演会講演概要集, 第 2 部, pp. 621~622, 1986.
- 2) 井島武士・田淵幹修・湯村やす: 有限水深の波による矩形浮体の運動と波の変形, 土木学会論文集, 第 202 号, 1972.