

**傾斜形波動ポンプの性能向上に関する研究\***  
(第1報, 傾斜形ダブルアクティング波動ポンプのフロートおよび  
波高変換装置の性能に及ぼす影響)

川口勝之\*<sup>1</sup>, 植木弘信\*<sup>1</sup>, 湯田健二\*<sup>2</sup>  
相楽和男\*<sup>3</sup>, 森山 功\*<sup>3</sup>

**Research and Development of Inclined Wave-Energy Pump (I)**  
(Effect of Floats and Wave Converters of Inclined Double-Acting Pumps  
on Flow Characteristics)

Katsuyuki KAWAGUTY, Hironobu UEKI, Kenji YUDA,  
Kazuo SAGARA and Isao MORIYAMA

A newly developed, inclined double-acting wave energy pump which can be designed effectively to inclined beach bottoms and the variation of wave periods has been experimentally investigated. In order to improve the pump performance the reciprocating moving parts, a pair of float-pistons have to be tuned with wave periods and take advantage of horizontal forces of the waves, which provides an idea of variable geometry. The pump, with variable axis angle, is operated in double-action mode in which water is pressurized by both up and down motions of the float-pistons. Model test pumps with rectangular and cylindrical floats were tested to determine the effect of the pump axis angle ( $\theta$ ), wave period ( $T_w$ ) and some kinds of horizontal wave energy converters with an inclined plate. It is shown in this paper that an optimum pump axis angle exists in terms of the pump performance, and the combination of the cylindrical type float with the inclined wave energy converter results in increased pump efficiency on a large scale.

**Key Words:** Inclined Double-Acting Wave Energy Pump, Ocean Wave Energy Conversion, Efficiency Improvement, Horizontal Wave Force, Wave Energy Converter

## 1. 緒 言

地球環境問題を解決する一つの手段として, そこに存在する材料や分散形エネルギーを利用して, 環境と生態系と技術の調和を図ることはきわめて重要<sup>(1)</sup>である。

著者らは海洋食物の生産や, その有機物を浄化してリサイクルを実現する高生産海域造成システムを提案するとともに, その動力源として波浪エネルギーをフロートピストン系の上下運動に変換し, 直結されたピストンの上昇・下降の両行程で海水のくみ上げを行う, ダブルアクティング波動ポンプを開発<sup>(1)-(4)</sup>している。

また, 波動ポンプのケーソンを浮体式とした場合の波とフロートピストンの運動の位相差を考慮した特性試験<sup>(1)(5)</sup>, ならびにそのモデル解析法<sup>(6)</sup>を報告している。これらの波動ポンプにおいては, シリンダが垂直

に設置されており, フロートピストンの動きは鉛直方向に制限され, 水平方向の波力を利用していないことになる。波の鉛直方向の力に加えて, 水平方向の力をポンプ作用に変換することができれば, ポンプ効率も増大し, また, 砂浜等の傾斜海底に有利に適用されることになる。さらに, 傾斜の角度により, 波周期に同調した往復運動系を設計することも可能である。

本研究では, フロートピストンが波浪中で鉛直ならびに水平方向にも動揺できるように, シリンダを傾けうるダブルアクティング波動ポンプを新たに開発<sup>(7)</sup>し, シリンダ傾斜角, フロート形状, 噴水, 斜板を有する波高変換装置<sup>(8)(9)</sup>などが, ポンプ性能に及ぼす影響を実験的に調査したので報告する。

## 2. おもな記号

$A$ : フロート水線面積  
 $D$ : フロート長さ  
 $d$ : 波高変換装置水深  
 $g$ : 重力の加速度  
 $H$ : 揚程  
 $H_w$ : 波高

\* 原稿受付 1996年5月10日。

\*<sup>1</sup> 正員, 長崎大学工学部(〒852 長崎市文教町1-14)。

\*<sup>2</sup> 長崎大学大学院。

\*<sup>3</sup> 正員, 三菱設計(株)(〒850 長崎市飽の浦町1-1)。

- $h$ : 水深  
 $k$ : 波数  $=2\pi/L_w$   
 $L_w$ : 波長  
 $Q$ : 吐出し流量  
 $t$ : 時間  
 $\alpha$ : 波高変換装置傾斜角  
 $\rho$ : 水の密度  
 $\eta$ : ポンプ効率  
 $\omega$ : 波の角周波数

### 3. 実験装置および方法

**3.1 傾斜形ダブルアクティング波動ポンプ** 供試波動ポンプおよび円筒、矩形フロートを図1に示す。ポンプ全長は865 mm, シリンダ内径は50 mmφである。傾斜形波動ポンプでは, シリンダ軸を鉛直方向に設置した状態から傾斜させることができる。傾斜形波動ポンプは, フロートピストン上昇時に, 吐出しボール弁 A, Dが開き, シリンダ上部室の中を吐出すると同時に, シリンダ下部室に水を吸入する。このとき, 弁 B および C は閉じられ, 吐出し流の逆流を防ぐ。フロートピストンの下降時には, 弁 B および弁 C が開き, シリンダ下部室の水を吐出すると同時に, シリンダ上部室に水を吸入する。このとき, 弁 A およ

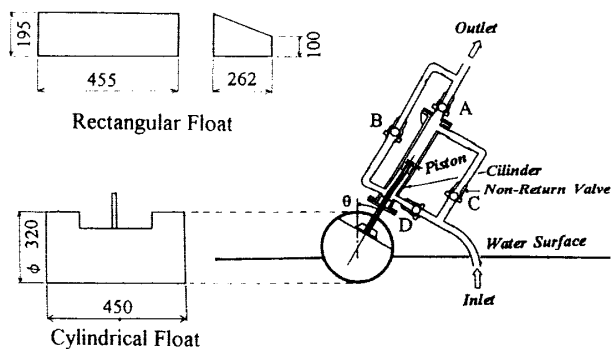


Fig. 1 Wave energy pump with inclined cylinder

び弁 D は閉じられ, 吐出し流の逆流を防ぐ。このように供試ポンプでは, フロートの上昇・下降の両行程で連続的に吸入と吐出しを行うダブルアクティング形である。

**3.2 実験装置および方法** 本実験では波の水平方向成分の力を受けやすい角度を探すため, シリンダ角度を  $\theta=0^\circ$  から  $40^\circ$  まで傾斜させた。また, ポンプ高さを調節することで, シリンダ傾斜によるフロートの喫水面積が変化しないようにした。また, 矩形形フロートの場合, 入射波に対するフロート直立面の角度が変わらないように, 取付軸にくさびを入れて調節した。

円筒形フロートの質量は, 9.3, 13.5 kg および 18.0 kg である。図2に供試造波水槽と傾斜形波動ポンプの取付状態を示す。造波水槽は, 長さ26 m, 幅1.5 m, 深さ1 m であり, 造波水槽の中央部にポンプのケーソンを固定し, 波高  $H_w$  を0.115 m とし, 周期  $T_w$  を2 s から3 s, 揚程を0.75 m から2.0 m まで変化させた。実際の海岸線などでみられる, 波峰付近が巻き込まれるような形で砕けながら進行する波を対象として, 傾斜板と水平板から成る波高変換装置を設置した。供試波動ポンプの下側水深下に設置されている波高変換装置を用い, 傾斜板角度  $\alpha$ , 水平板水深  $d$  がポンプ性能に及ぼす影響を調査する。本実験では, 傾斜板角度を  $15^\circ$  と  $30^\circ$ , 水平板の水深を0.3, 0.4 m に変化させて実験を行った。これは, 実際の水域の海辺斜面を想定すると同時に, 波動ポンプの没水部に直接設備して, 水粒子のオービタルモーションを変化させ, フロートに作用する波力の水平方向成分を増加させることも想定している。

流量は容積法により測定し, 波高およびフロートピストンの変位を磁歪式リニア変位センサで測定した。

波峰1 m 当たりの波のエネルギー伝達率  $\bar{W}^{(10)}$  とポンプ出力  $W$  を用いれば, 波動ポンプ効率  $\eta$  は, 次式

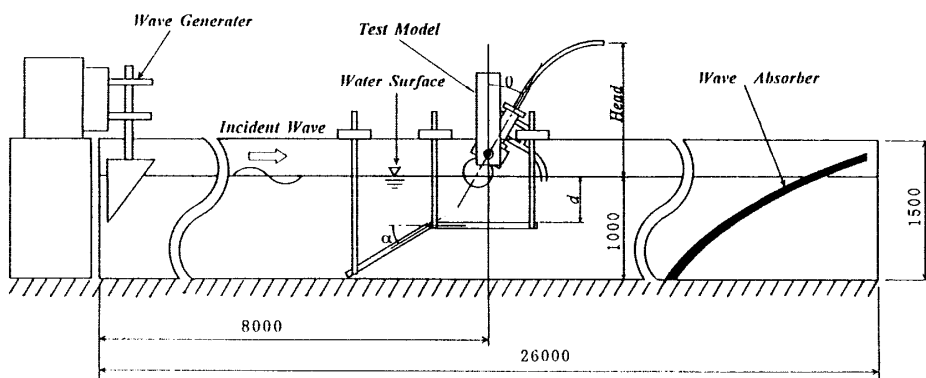


Fig. 2 Situation of performance test

で表される,

$$\eta = \frac{W}{WD} = \frac{\rho g Q H}{\frac{\rho g H_w^2}{8} \cdot \frac{\omega}{k} \cdot \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right\} \cdot D} \dots\dots\dots (1)$$

4. 実験結果および考察

4.1 フロート質量の性能に及ぼす影響 円筒フロート質量を9.3, 13.5 kg および 18.5 kg と変化させ、ポンプ軸の角度を0° から40° に変化させたときの流量-揚程特性を図3, 4に示す。図3, 4の丸, 四角, 三角は波周期を示す。フロート質量およびポンプ角より、波周期応答特性が複雑に変化するが、いずれの角度においても9.3 kg のフロートピストンは軽すぎ、18.0 kg では重すぎ、13.5 kg 程度が最も性能がよい。フロートピストンの上昇行程では、軽いほうが有利であるが、下降行程では、軽すぎると波からフロートが離れ波に追従しなくなり、流量が急減する現象がみら

れる。さらに、重すぎてフロートの喫水が深くなると、波の粒子運動から受ける力が弱くなり最適値が表れる。13.5 kg のフロートピストンにおける、円筒形フロートと矩形形フロートの特性比較を図5に示す。円筒形フロートのほうが矩形形フロートに比較して、2倍以上の流量特性が得られている。これは、円筒形フロートの水線面積が矩形形フロートの約1.2倍であること、矩形形フロートでは波周期やポンプ傾斜角によってはフロートが没水してしまい、フロートの上にかかる波の力が抵抗となって、フロートが上昇するとき、ストロークを制限してしまうからである。

4.2 ポンプ角度による周期特性の比較 特性が最も良好なフロート質量13.5 kg の場合について、ポンプ傾斜角0° から40° として円筒フロートの特性曲線を波周期別に示すと、図6~8のようになる。波周期  $T_w=2s$  の場合には、ポンプ角度0° から20° まで、ほとんど同じ流量が得られているのに対し、2.5 s の場合には、ポンプを傾斜させることにより、ポンプ性

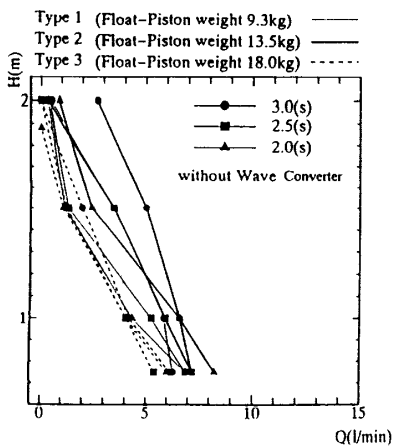


Fig. 3 Pump performance with cylindrical float pump angle 0°

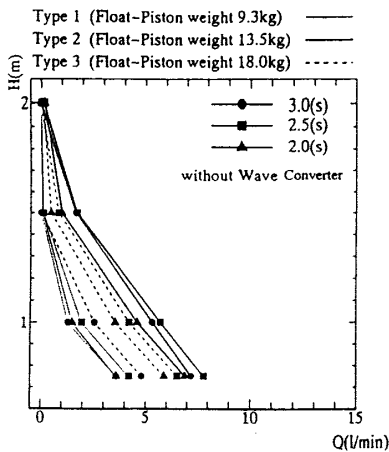


Fig. 4 Pump performance cylindrical float pump angle 30°

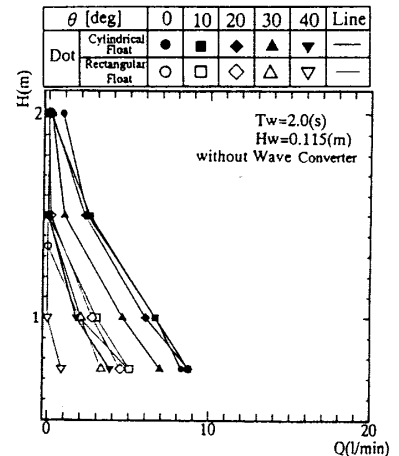


Fig. 5 Performance of wave energy pump

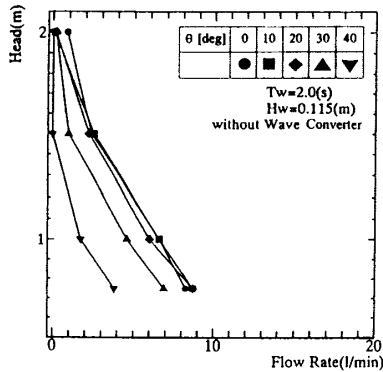


Fig. 6 Performance of wave energy pump for various cylinder angle  $\theta$  ( $T_w=20s$ )

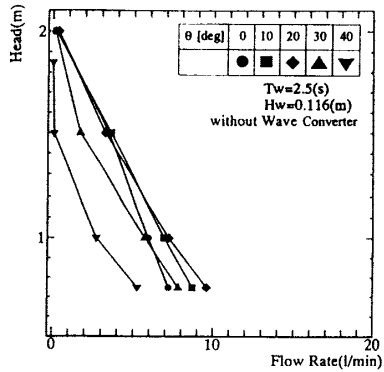


Fig. 7 Performance of wave energy pump for various cylinder angle  $\theta$  ( $T_w=2.5s$ )

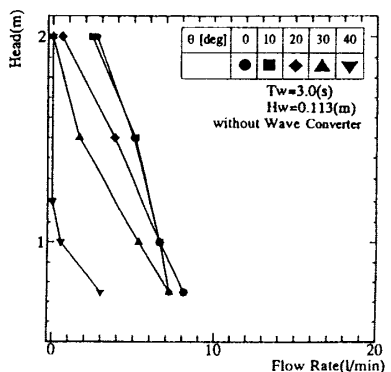


Fig. 8 Performance of wave energy pump for various cylinder angle  $\theta$  ( $T_w=30s$ )

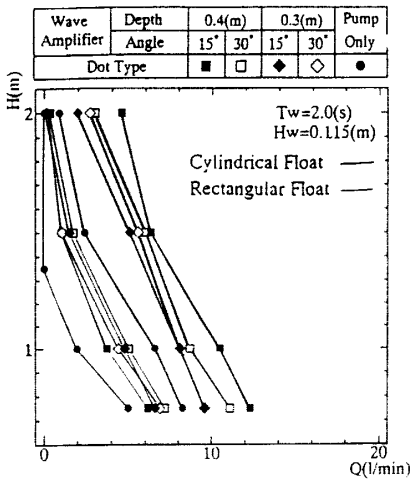


Fig. 9 Performance of wave energy pump pump angle 0°

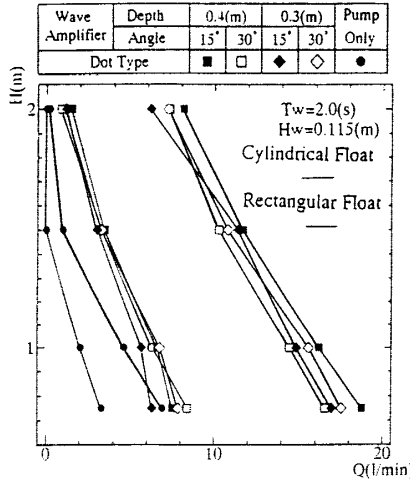


Fig. 10 Performance of wave energy pump pump angle 30°

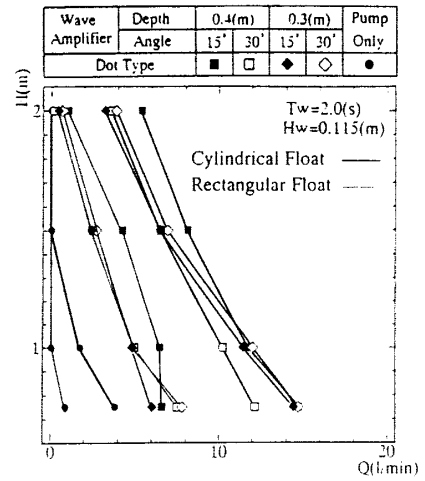


Fig. 11 Performance of wave energy pump pump angle 40°

能の向上がみられる。波周期が3sの場合、ポンプ角0°と10°では、ほとんど差がみられない。いずれの周期でもポンプ角が30, 40°と大きくなるにつれて、急激な性能低下がみられる。これは、波変換装置がなく鉛直方向の波強制力に比較して、水平方向の波強制力が小さいためと考えられる。また、シリンダを傾斜させることでシリンダとピストン間およびピストンロッドとブッシュ間の摩擦力も大きくなる。

斜板による波高変換装置をつけた場合と、つけない場合における、円筒形と矩形フロートのポンプ角度特性を図9~11に示す。波高変換装置付きの場合、いずれの角度においても円筒形フロートは矩形フロートに比較して、流量は2~3倍に増加している。各波周期においても同様の傾向がみられる。また、波高変換装置をつけない場合(図9~11中の黒丸)と比較すると流量が大幅に増加していることがわかる。当然のことながら、ポンプ傾斜角をつけたほうが特性の改善が著しい。全体的に波高変換装置の水深 \$d=0.4\$ m、傾斜角 \$\alpha=15^\circ\$ の成績が最も良好である。\$\theta=0^\circ\$ (図9)では、円筒フロートは各揚程において (\$d=0.3\$ m, \$\alpha=30^\circ\$), (\$d=0.4\$ m, \$\alpha=30^\circ\$), (\$d=0.4\$ m, \$\alpha=15^\circ\$) の順に流量が多くなっている。\$\theta=10^\circ\$ でもこの傾向は変わらないが、\$\theta=20^\circ\$ では、大幅に流量が増加しているものの、波高変換装置による顕著な差は認められていない。\$\theta=30^\circ\$ (図10)の円筒フロートは、低揚程域ではすべてのパラメータの吐出し流量は増加しているものの、高揚程域では (\$d=0.3\$ m, \$\alpha=15^\circ\$) の吐出し流量減少がみられる。\$\theta=40^\circ\$ (図11)の場合では、\$\theta=0^\circ\$ (図9)よりは流量は多いものの、\$\theta=10\sim30^\circ\$ と比較すると全体的にかなり減少している。また、波高変換装置

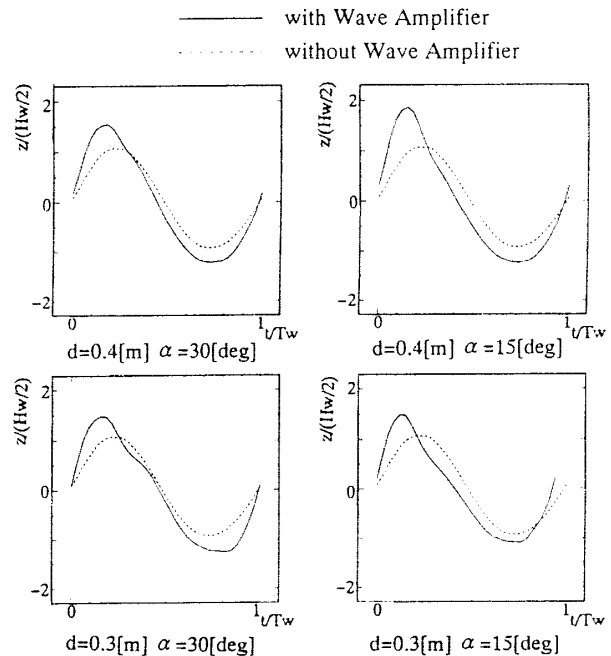


Fig. 12 Time histories of wave displacement (\$T\_w = 2.0\$ s)

による流量特性の差は、2~3 l/min程度で小さい。\$T\_w=2\$ sにおいて、ほとんどの角度で (\$d=0.4\$ m, \$\alpha=15^\circ\$) の性能がよいのは、図12に示される波高変換装置を用いたときに最も波高が増幅される条件と一致している。これは、図12にみられるように、三角波に近くなり、波の振幅が増大し、上下および水平波力が増大したことによる。特に図示されていないが \$T\_w=2.5\$ sでは、(\$d=0.3\$ m, \$\alpha=15^\circ\$) で最も増幅され、\$T\_w=3\$ sで波高変換装置による波高増幅の顕著な差は認められない。

以上みられるように、円筒フロート波動ポンプに波高変換装置を用いポンプ軸の傾きを可変するとき、大幅な性能向上が得られる。波高変換装置により、鉛直方向の波力のみならず、水平方向波力も増加し、その結果、ポンプ傾斜角  $\theta=0^\circ$  よりも  $\theta=10\sim 40^\circ$  において性能が改善され、特に  $\theta=20\sim 30^\circ$  の性能向上が顕著である。波周期が長く  $T_w=3.0\text{s}$  になると、 $\theta=0^\circ$  よりも  $\theta=40^\circ$  の性能は悪くなる。波周期が長くなると鉛直方向波力は大きくなるが、ポンプが傾きすぎているために大きくなった鉛直方向波力を十分利用できないことによる。 $\theta$  が大きくなると水平方向波力を多く受けるからである。また、ポンプを傾けていくと、ピストンとシリンダ間、ピストンロッドとブッシュ間に、フロートピストンの自重が作用して摩擦力が大きくなるためと考えられる。

**4.3 傾斜形波動ポンプの効率の比較** 波高変換装置の有無による傾斜形波動ポンプの効率の変化を図13~15に示す。図13~15には、円筒および矩形フロートの揚程、波周期、およびポンプ傾斜角の影響が整理されている。ポンプ本体のみ(図13)でも、少し傾けたほうが効率がよくなることは興味深い。波周期3sでは、 $\theta=0, 10^\circ$  ではほぼ一定、2.5s以下では $\theta=10^\circ$  が効率が高い。本体のみの場合は、水平波力が小さいのでこの程度となる。揚程によって最高効率を与

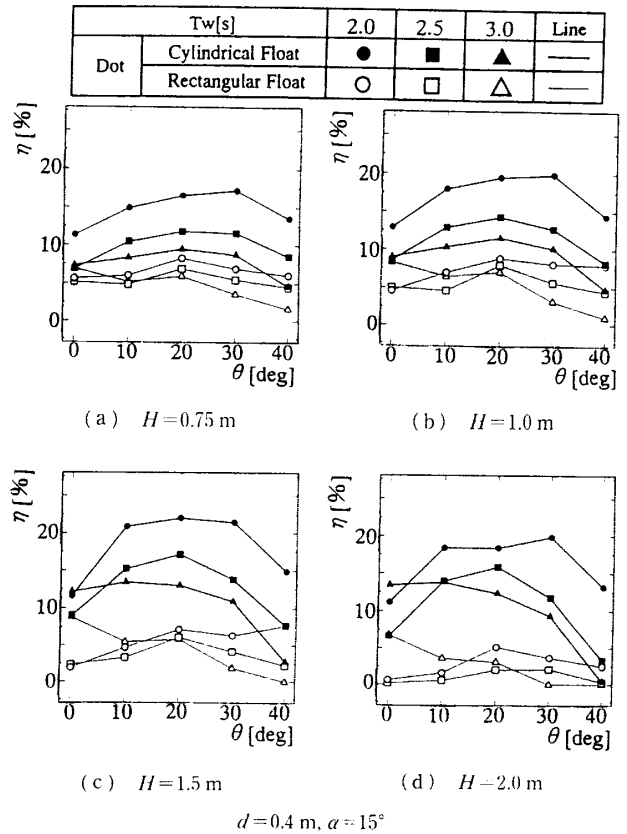


Fig. 14 Efficiency of wave-energy pump

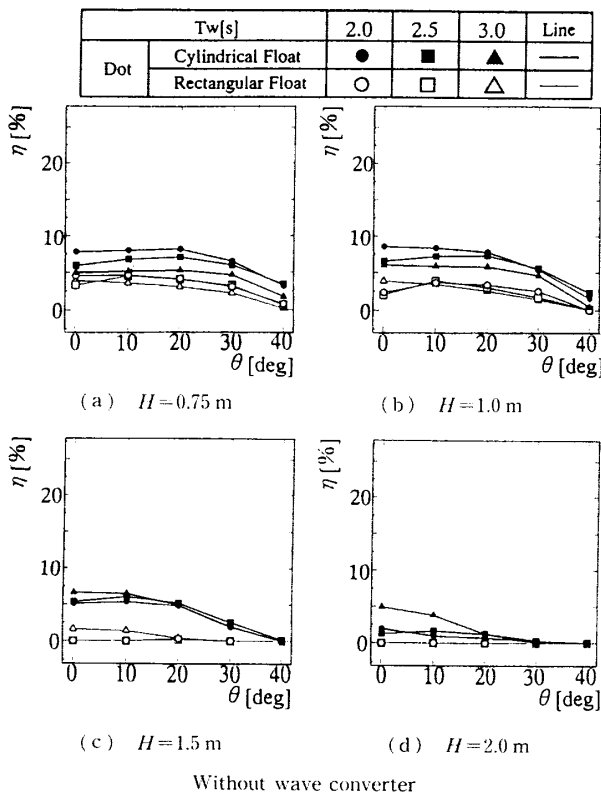


Fig. 13 Efficiency of wave-energy pump

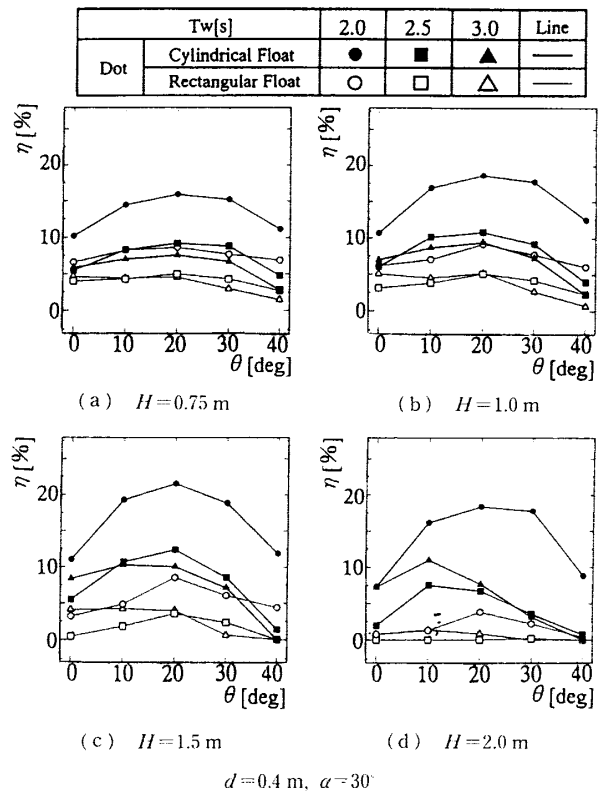


Fig. 15 Efficiency of wave energy pump

える波周期が変わっている。(d=0.4 m,  $\alpha=15^\circ$ )の変換器をつけた場合(図14)では, 全体的に $\theta=20^\circ$ で効率がよく, 周期は $T_w=2.0$ sが最もよい。矩形フロートの場合,  $T_w=3.0$ sでは $\theta=0^\circ$ , 2.5, 2.0sでは,  $\theta=20^\circ$ が効率がよい。矩形フロートでは, 全体的に傾斜の効果小さい。円筒フロートでは全周期において $\theta=20^\circ$ で効率がよい。

全体的に, やはり矩形フロートよりも円筒フロートの効率が大きく差をつけ, その中でも $T_w=2.0$ sでの効率が,  $\theta=20^\circ$ 付近で小形モデルにもかかわらず21~23%という高い値を示している。

## 5. 結 言

ダブルアクティング波動ポンプにおいて, シリンダを傾けることにより, 波の垂直方向力に加えて水平方向力を利用して海水をくみ上げる傾斜形波動ポンプを開発した。フロート形状および喫水を的確に選択することにより, シリンダが垂直に設置された場合に比較して, 高いポンプ性能が得られることが明らかになった。さらに, 実際の海岸線などでみられる, 波峰付近が巻き込まれるような形で砕けながら進行する波を対象として, 傾斜板と水平板から成る波高変換装置を設置した水槽試験を行い, ポンプ特性を実験的に調査検討した結果, 以下のことが明らかとなった。

(1) 傾斜形波動ポンプにおいては, 矩形フロートよりも円筒フロートのほうが適正であり, ポンプ効率

を大幅に増加させる。しかし, いずれのフロートにおいても最適喫水質量が存在する。

(2) 波変換装置を設備しない場合, 波周期3.0sでは, ポンプ傾斜角 $\theta=0^\circ$ のとき, 波周期2.5sおよび2.0sでは,  $\theta=10^\circ$ で最もポンプ性能がよくなった。

(3) 波高変換器によって, 垂直方向のみならず水平方向波力が増幅され, その結果波周期が短いほど, また, 水深が浅いほどポンプ性能の改善は大きい。

(4) 波変換装置を設置した円筒形フロートでは, ポンプ傾斜角 $\theta=20\sim30^\circ$ で最もポンプ性能がよくなり, 設置しない場合に比較してポンプ効率, はほぼ1~9%から10~20%に増加した。

## 文 献

- (1) 川口勝之, 地球環境システム設計論(改訂増補版), (1996), 259-316, 九州大学出版会。
- (2) 川口勝之・植木弘信, 機講論, No.908-2(1990), 290-293。
- (3) Kawaguty, K. and Ueki, H., *ISOPE*, 1(1991), 356-363。
- (4) Kawaguty, K. and Ueki, H., *ISOPE*, 1(1992), 570-576。
- (5) Kawaguty, K. and Ueki, H., *ISOPE*, 1(1993), 190-197。
- (6) Ueki, H. and Kawaguty, K., *ISOPE*, 1(1994), 371-377。
- (7) 迎慶太・川口勝之・植木弘信, 機講論, No.948-1(1994), 130-133。
- (8) 宮江伸一・ほか1名, 第1回波浪エネルギー利用シンポジウム論文集, 11(1984), 145-154。
- (9) 朝田宏・ほか2名, 第2回波浪エネルギー利用シンポジウム論文集, 6(1987), 191-198。
- (10) 服部昌太郎・ほか2名, 海岸工学, (1991), 16, コロナ社。