

波 動 ポ ン プ の 開 発

——規則波による揚水量について——

木 村 晴 保*・藤 田 喜 英**

1. ま え が き

本波動ポンプは、以下の説明から分るように原理・構造がともに簡単なうえに、外部からの動力をいっさい使用することなく、波のエネルギーのみによって海水を波頂高よりも充分に高いところへ給水することができるポンプである。それゆえその応用範囲は広く、水産面への主なものとしては

- ① 自動浮沈式いけすへの給水
- ② 漁場への給水
- ③ 漁場内水塊の鉛直混合

などが考えられる¹⁾。

ここでは、まず波動ポンプの原理について説明し、次に自動浮沈式いけす²⁾を対象とした波動ポンプの揚水量を推算する基本式を提起し、規則波による模型実験でその適合性を検討する。

2. 原 理

波動ポンプの原理は円筒内水塊の振動特性を応用したものである。すなわち両端開放の円筒を図-1に示すように、海面に垂直に固定したのち、内水面を外水面よりも上昇させ、その拘束力を解けば、内水面は外水面を中心に上下に振動しながらやがて静止する。その固有周期 T_0 は水面下に存在する円筒の長さ l (浸水長)でほぼ決まり、(8)式で近似できる。

減衰係数が小さい振動系の場合には、固有周期に近い周期の外力が作用すると振動振幅は非常に大きくなるこ

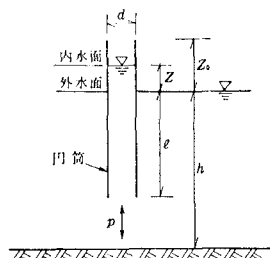


図-1 波動ポンプの原理

とから、この場合の円筒内水塊の振動系についても同様の現象が予想できる。

実際、円筒下端面に固有周期と同一周期の波圧を作用させると、円筒内水塊は作用した波圧水頭（波圧を水柱高で表示した値）の振動振幅の10倍以上も振動した³⁾。このことは、水深が50mで波高1m、周期10secの波が存在する海域に $l=25$ mの円筒を鉛直に固定すると円筒内水塊はその振動振幅がほぼ4mにもなり、円筒内水面の水位は最高時には平均海面よりも2mも高くなる。いまここで、円筒上端の高さを平均海面上1.5mとしておけば、水塊の一部は上端から越流する。この越流水をホース等で導けば波頂高(0.5m)よりも充分に高いところへ給水することができる。

3. 基 本 式

(1) 揚程と揚水量

揚程と揚水量は相互に関連し、これらはまたポンプの構造、設置方法及び波の特性の関数である。ここでは次の4つの仮定の下で解析を進めた。

仮定1: ポンプは鉛直に固定されていて波によって動揺しない。

仮定2: 水塊共振用円筒(図-2参照、以下単に円筒と呼ぶ)内の断面流速分布は円筒側面のごく近傍を除き一様である。

仮定3: 円筒下端断面に働く波圧分布は断面内で一様である。

仮定4: 越流端の高さ z_0 よりも高く上昇した円筒内水塊はすべて円筒外部へ越流する。

円筒内水塊の運動基本式は次式で近似できる。

$\zeta \leq \zeta_0$ のとき

$$\frac{d}{d\tau} \{ (1 + \zeta) \dot{\zeta} \} + 2 \frac{m}{n} (1 + \zeta) \dot{\zeta} + \frac{1}{2} f |\dot{\zeta}| \dot{\zeta} + \zeta = P \quad (1)$$

$\zeta > \zeta_0$ のとき

$$\frac{d}{d\tau} \{ (1 + \zeta_0) \dot{\zeta} \} + 2 \frac{m}{n} (1 + \zeta_0) \dot{\zeta} + \frac{1}{2} f |\dot{\zeta}| \dot{\zeta} + \zeta_0 = P \quad (2)$$

ただし

$$\begin{aligned} \zeta &= z/l; \quad \zeta_0 = z_0/l; \quad \dot{\zeta} = d\zeta/d\tau \\ m &= 2\mu/(\rho\pi d); \quad n = \sqrt{g/l}; \quad \tau = nt \end{aligned}$$

* 正会員 農博 農林省農業土木試験場

** 東海大学生(現秋山工務店)

$P=p/(\rho g l)$ (p : 円筒下端での波圧)

g : 重力加速度; μ : 海水の粘性係数

ε : 円筒内側面での境界層の厚さ

f : 円筒下端での流出入損失係数

揚程 z_0 は静水面から越流端までの高さとし、次式で与える。

$$z_0 = l \zeta_0 \dots\dots\dots (3)$$

揚水量 Q は (2) 式の ζ を用いて次式を得る。

$$Q = \frac{Al}{t} \int_0^{nt} \zeta d\tau \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 A : 円筒の断面積; t : 波の作用時間

揚水量を (4) 式から推算するには、前もって (1)、(2) 式の係数 m と f を与えなければならない。次にこれについて述べる。

(2) 係数 m と f の与え方

a. 境界層理論から係数 m を推算する

境界層理論によれば、振動流体での境界層の厚さ δ (表皮効果の厚さ⁴⁾) は

$$\delta = \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}} \dots\dots\dots (5)$$

ただし

ν : 流体の動粘性係数; ω : 角振動数

いま、 $\varepsilon = \delta$ とおけば m/n は次式となる。

$$\frac{m}{n} = \frac{2\sqrt{\pi}}{d} \sqrt{\frac{\nu l}{gT}} \dots\dots\dots (6)$$

ただし

T : 波の周期

b. 管路における流入と流出損失係数から f を推算する

例えば、下端形状が円筒形では、流入損失係数は $1.0^{(5)}$ 、流出損失係数も 1.0 とみなしうることから、両者の平均として $f=1.0$ を得る。

下端形状がベルマウスでは、流入損失係数は $0.1^{(6)}$ 、流出損失係数は明確ではないが 1.0 と仮定すれば、 $f=0.55$ を得る。

c. 自由振動の実測値から m と f を推算する

この手法については文献 (3) に詳述されているので結果のみを記す。

$$\frac{\pi}{2} \frac{m}{n} + \frac{1}{3} f A_i = B_i \quad (i \geq 2 \text{ の整数}) \dots\dots\dots (7)$$

ただし

$$A_i = \frac{a_1^2 + 2(a_2^2 + a_3^2 + \dots + a_i^2) + a_{i+1}^2}{|a_1| + 2(|a_2| + |a_3| + \dots + |a_i|) + |a_{i+1}|}$$

$$B_i = \frac{|a_1| - |a_{i+1}|}{|a_1| + 2(|a_2| + |a_3| + \dots + |a_i|) + |a_{i+1}|}$$

$$a_i = (\zeta_i - \zeta_{i+1})/2$$

ζ_i : 自由振動で $\zeta=0$ となる i 番目の ζ の値

すなわち、自由振動の水面振動記録から、 ζ_i を読み取り、 A_i 、 B_i を求めたのち、 A_i を横軸、 B_i を縦軸と

して (A_i 、 B_i) をプロットすれば、(7) 式から分るように、その勾配が $1/3f$ 、縦軸との接点 B_i の値が $\pi/2 \cdot m/n$ となる。

(3) 固有周期

固有周期 T_0 の近似式は、(1) 式で $P=0$; $m=0$; $f=0$; $\zeta \ll 1.0$ とすることにより次式を得る。

$$T_0 = 2\pi \sqrt{l/g} \dots\dots\dots (8)$$

4. 実験と考察

(1) 実験装置

造波水槽は、水槽規模が長さ $25\text{ m} \times$ 幅 $1.5\text{ m} \times$ 水深 2.5 m 、造波機はフラター式の 2 次元深水波用造波水槽を使用した。

波動ポンプは、直径 $7.34\text{ cm} \times$ 全長 $57.5 \sim 132.5\text{ cm}$ の透明アクリル製で、その円筒下端の形状は円筒形、ベルマウス及び円錐形の 3 種類である (図-4 の図中参照)。

(2) 揚水量

揚水量の測定は図-2 に示す方法で行なった。すなわち波動ポンプを所定の高さに鉛直に固定し、越流水を真空ポンプで揚水量測定装置に吸引し、越流水が定常状態となったのち、 1 l ないし 2 l 吸引するに要した時間を実測し、揚水量に換算した。

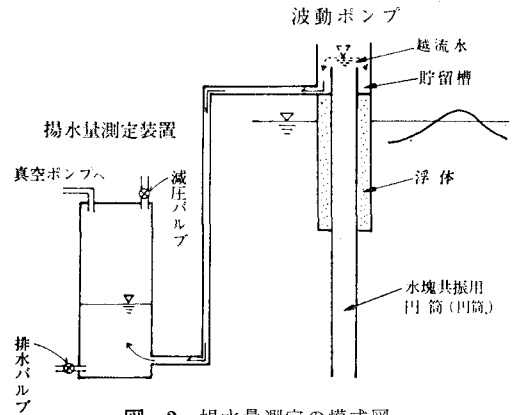


図-2 揚水量測定の様式図

図-3 は揚水量の実測結果の 1 例で、これより次のことが言える。

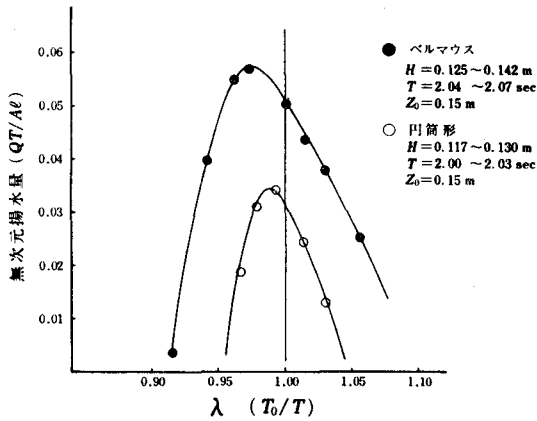
① 無次元揚水量 ((9) 式) は $\lambda (T_0/T, T_0$: 固有周期) と円筒下端の形状 (流出入損失係数) の関数である。

② 無次元揚水量が最大となる λ の値は 1.0 ではなくて、 1.0 よりもやや小さい。この傾向は下端形状が円筒形よりもベルマウスの方が顕著である。

③ ② は、揚水量を最大とする λ は揚程が高くなるにつれて 1.0 に漸近することを示唆している。

(3) 固有周期

固有周期は (2) で指摘したように波動ポンプの特性



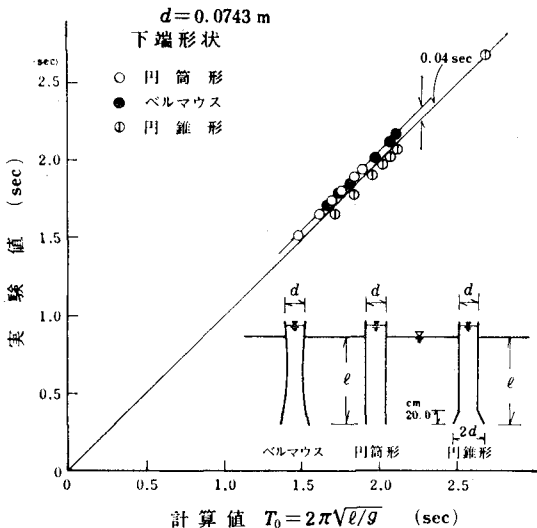
規則波による揚水量とλの相関図

図—3 規則波による揚水量とλの相関図

(揚程, 揚水量) を表わす重要な因子である。

図—4 は (8) 式と実験値とを比較したもので、実験は図—2 に示す波動ポンプの上端を密閉することにより真空ポンプで円筒内水位を越流端まで吸い上げたのち、密閉を解き水塊を自由振動させ、その変動水位を容量式波高計で測定した。

これによると、円筒形とベルマウスでは実験値の方が計算値よりも 0.04 sec 大きいのに対し、円錐形では逆に小さく、周期が長くなると実験値は計算値よりも大きくなるような傾向がみられる。



図—4 固有周期の実験値と計算値の比較

* ベルマウスは高水頭用 (昭38年度水理公式集 p.146)

(4) 係数 m と f について

表—1 に示す m/n と f の値は、3.(2) で記述した各種算定法で求めたものである。

表—1 各種算定法による m/n と f の値
(円筒直径 $d=7.34$ cm)

下 端 形 状	円 筒 形	ベルマウス	円 錐 形
実 浸 水 長 ℓ (cm)	29.5	115.8	42.5
実測固有周期 T_0 (sec)	1.76	2.25	1.38
m/n	(6) 式	0.0077	0.0109
	(7) 式	0.0128 (0.0124)	0.00174 (0.0174)
	(7) 式	1.66 (1.61)	1.60 (1.60)
	(6) 式	1.11 (1.12)	1.63 (1.35)
f	3(2)b	1.0	1.0
	(7) 式	1.03 (1.18)	0.84 (0.88)
	(7) 式	1.03 (1.18)	0.84 (0.88)
	3(2)b	0.56 (0.60)	0.46 (0.62)

注 () は ℓ に $\ell = \left(\frac{T_0}{2\pi}\right)^2 g$ を使用

* 水理公式集 (S. 46) P. 246

漸近 漸近
(0.17 + 0.005) / 2 + 1.0 × (1/4)² = 0.15

表—1 で (7) 式欄の () 付で示した m/n と f の値は、自由振動の実測値 (固有周期と減衰振動振幅) を用いて (7) 式から推算した値で、最も信頼できる値である。

(6) 式及び 3.(2) b から推算した m/n と f の値は、下端の形状によって異なるが、上述の () 付で示した値の

m/n : 1/1.12~1/1.61, f : 1/0.58~1/1.18 倍となった。

5. 揚水量の計算値と実験値の比較

(1) 計 算 法

揚水量の計算値は、ポンプ特性量として揚程 z_0 、固有周期 T_0 及び損失係数 m/n と f を、作用波の特性量として波高 H 、周期 T 及び波長 L を与え、また (1)、(2) 式の右辺の圧力 P は微小振幅波理論で与えて、(1)、(2)、(3) 及び (4) 式から差分法によって求めた。

規則波による揚水量は、(4) 式を波の 1 周期にわたって積分すればよいことから次式となる。

$$Q / \left(\frac{A l}{T} \right) = \int_0^{nT} \xi d\tau \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 $Q / \left(\frac{A l}{T} \right)$ を無次元揚水量と定義する。

無次元揚水量は図—3 及び (1)、(2) 式から分るように λ , m/n , f , $z_0 / \left(\frac{p_0}{w} \right)$ 及び $z_0 / (wl)$ の関数である。ここで p_0 はポンプ下端に働く波圧の半振幅に相当し微小振幅波理論により次式で与える。

$$p_0 = \frac{1}{2} w H \frac{\cosh 2\pi(h-l)/L}{\cosh 2\pi h/L} \dots\dots\dots (10)$$

ここで h : 水深; w : 海水の単位体積重量; H : 波高; L : 波長

(2) 円 筒 形

揚水量に関する実験のうち、下端形状が円筒形のもの

は 78 ケースで、その実験範囲は

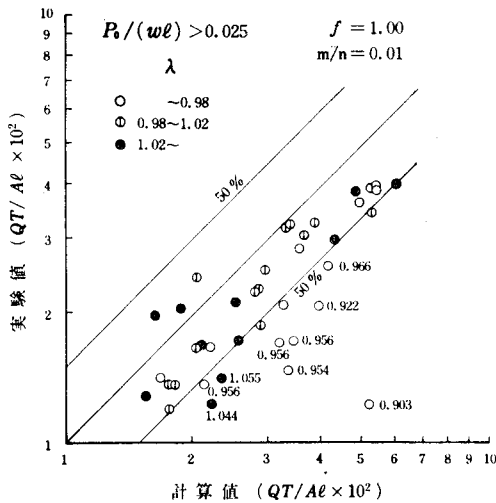
$$\lambda: 0.894 \sim 1.055, \quad z_0 \frac{p_0}{w}: 2.83 \sim 12.84$$

$$p_0/(wl): 0.0074 \sim 0.0527, \quad l: 52.5 \sim 125.0 \text{ cm}$$

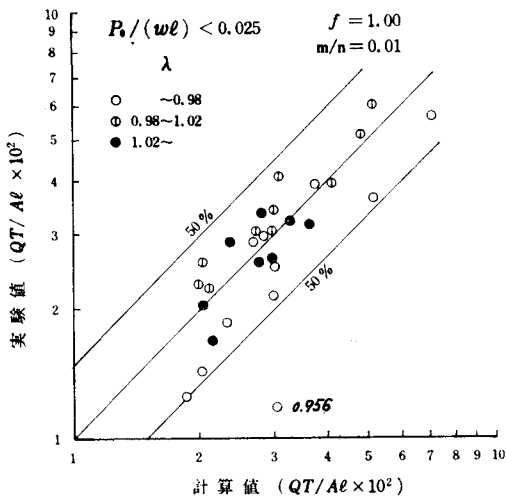
である。

これらに関する無次元揚水量の計算には、 m/n , f は表—1 を参考にして 0.01, 1.0, $\lambda(T_0/T)$ は実測値 (T_0 , T), p_0 は H , T , h , l の実測値を用いて (10) 式で求めた値を使用した。

図—5 は、実験範囲が $p_0/(wl) > 0.025$ の 35 ケースのうち、 $QT/(Al)$ の実験値と実算値がともに 0.01 以下のもの 3 ケース、実験値のみが 0.01 以下のもの 2 ケース及び計算値のみが 0.01 以下のもの 1 ケースを除いた 29 ケースをプロットしたものである。



図—5 無次元揚水量の実験値と計算値の比較
(円筒形)



図—6 無次元揚水量の実験値と計算値の比較
(円筒形)

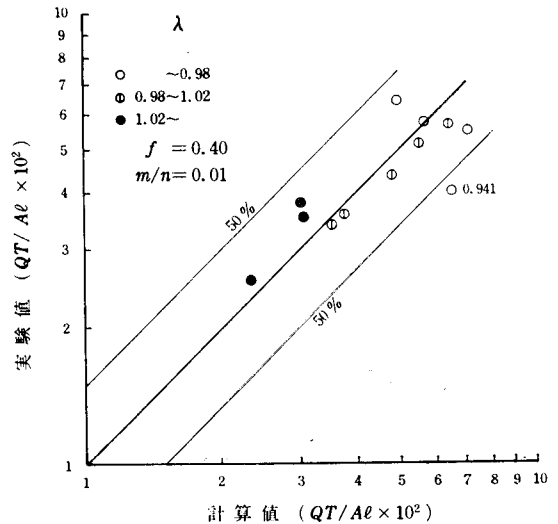
図—6 は、 $p_0/(wl) < 0.025$ の 43 ケースのうち実験値と計算値がともに 0.01 以下のもの 1 ケース、実験値のみが 0.01 以下のもの 1 ケース及び計算値のみが 0.01 以下のもの 1 ケースを除いた 40 ケースをプロットした。

図中で計算値が実験値から $\pm 50\%$ よりも大きくはずれたものについては λ の値を付記した。

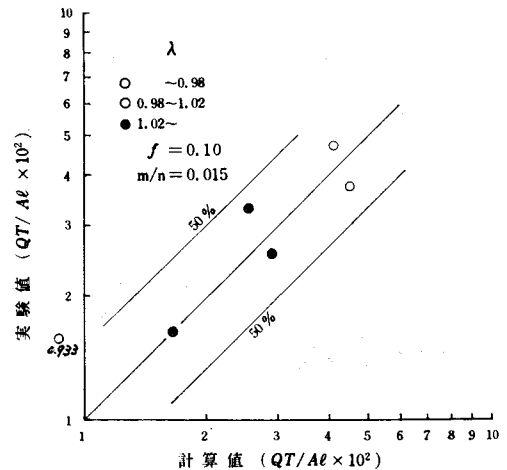
以上のことから ① 無次元揚水量が 0.01 以下のもの及び ② λ が 1.0 より大きくはずれもの (0.96 以下又は 1.04 以上) を除けば計算値はほぼ $\pm 50\%$ の精度で実験値と一致するといえる。

(3) ベルマウスと円錐形

下端形状がベルマウスと、円錐形の場合もそれらの無次元揚水量の計算は円筒形の場合と同じ手法で行なった。



図—7 無次元揚水量の実験値と計算値の比較
(ベルマウス)



図—8 無次元揚水量の実験値と計算値の比較
(円錐形)

各々の実験範囲と実験総数は次のとおり

	λ	$z_0/\frac{p_0}{w}$	$p_0/(wl)$	l (cm)	実 験 ケ ー ス
ベルマウス	0.915	5.05	0.0221	70.0	13
	1.056	6.84	0.0365	110.9	
円錐形	0.933	7.02	0.0201	89.1	6
	1.039	9.68	0.0257	106.3	

計算値の精度は、図一7 と 図一8 に示すように円筒形のものに比べて実験範囲は狭く、実験総数も少ないが、円筒形のそれと同程度といえる。

6. あとがき

規則波による波動ポンプの揚程と揚水量は、(1)，(2) 式で m/n と f に適切な値を与えれば、(3)，(4) 式から $\pm 50\%$ の精度でもって推算することができる (図一5～8 参照)。

m/n と f の与え方は、4.(4) で述べたように、3.(2)

の c が最も適切であるけれども、これには自由振動の実測値を必要とする。原型実験ができなければ、 m/n と f は模型実験で 3.(2) の c から求め、更に 3.(2) の a と b から推算した値を参考にして決める。

不規則波による揚程と揚水量に関しては、(1)，(2) 式の右辺 P を不規則波理論で与え、(3)，(4) 式から推算できると思われるが実験的検証は後日報告したい。

参 考 文 献

- 1) 木村晴保： 波動ポンプ，水産土木 Vol. 13, No. 2, pp. 73～74, 1977.
- 2) 木村晴保： 自動浮沈式いけすの開発，第 23 回海講演文集，pp. 602～606, 1976.
- 3) 木村晴保： 水面に固定された管内の水塊の振動特性，農土場報第12号，pp. 143～154, 1974.
- 4) エリ・ランダウ，イエ・リフシッツ著，竹内均訳： 流体力学 1，東京図書，pp. 94～100, 1970.
- 5) 土木学会編： 水理公式集，pp. 244～246, 1976.
- 6) 前出 5)
- 7) 前出 2)