円筒型波動ポンプの増幅特性と数理モデルの適用性について

Amplifying Characteristic of Wave Activated Pump and Applicability of Its Mathematical Model

村上啓介¹・後藤俊紀²・真木大介³

Keisuke MURAKAMI, Toshiki GOTO and Daisuke MAKI

This study investigates the amplifying characteristic of a wave activated pump through a series of hydraulic experiments. The wave activated pump consists of some vertical columns set in front of a vertical wall. This study confirms that the pump amplifies the wave motion effectively under irregular wave conditions as well as regular wave conditions. The magnitude of a maximum amplification factor depends on a distance between a seabed and the bottom end of the column. A mathematical model is proposed in this study in order to evaluate the amplifying characteristic of the wave activated pump. The model estimates the maximum amplification factor and a resonance period in good accuracy.

1. はじめに

海洋エネルギーを再生可能エネルギーとして利用するための技術開発が、様々な視点で進められている (NEDO, 2014)。そのうち、波エネルギーに関しては、その総量は国土全周で約3,600万Kwとも見積もられ (高橋ら, 1989)、賦存量の規模と地理的要件から、効率的に波エネルギーを抽出するための技術開発が古くから進められてきた。

波エネルギーを抽出する技術は、水面や水中の物体を波の力で動揺させ、その運動エネルギーを電気エネルギーとして取り出す可動物体型 (例えば、近藤ら, 1987; 羽田野ら, 2006)、水面付近に空気室を設け、波の上下運動に伴って生じる室内の空気流を電気エネルギーに変換する振動水柱型 (例えば、石井ら, 1985; 安澤ら, 2011)、平均水位より高い位置に波の力で海水をくみ上げ、そこで得られる位置エネルギーを電気エネルギーとして取り出す越波型 (例えば、志岐ら, 1988; 真鍋ら, 2011) に大別される。

それらのうち、振動水柱型は、波力発電ケーソンの実証試験が実施される等 (例えば、鷺尾ら2000)、技術的課題の解決が進んだ方式の一つである。ただし、構造規模が大きいことや、設置個所の選定が難しいことから、既存の商業発電システムと比べて経済的競争力は依然として低い。また、波力エネルギーの利用に関しては、波エネルギーの変動性や不規則性、施設の耐波安定性や施工性等も実用化に至らない理由となっている。

波力エネルギーの利用を考える際、対象となる海域が外洋に面した場では、施設の設置場所の選定や耐波安定

性が課題となる。他方、対象海域が内湾等になると、構造物の耐波安定性の課題は軽減するが、波浪は相対的に穏やかになり、波エネルギーの賦存量は小さくなる。

本研究では、小振幅の波に対して効率的に波エネルギーを抽出するシステムの開発を目的に、半没水した円筒管 (上下端は開口) を直立壁前面に設置し、その内部で波運動を増幅させるシステム (波動ポンプ) を考える。具体的には、多数の円筒管を既設防波堤等の前面に配置し、円筒管内部の水塊の運動を増幅させることにより波エネルギーを効率的に取り出すことを想定している。

波動ポンプは、その揚水能力に着目した研究事例は散見されるが (例えば、木村ら, 1977, 1979; 今井ら, 1988)、円筒管の増幅特性は十分に検討されているとは言えず、増幅メカニズムの詳細を検討するための数理モデルも見あたらない。本研究では、円筒管型波動ポンプの増幅特性を水理実験で明らかにするとともに、増幅特性を評価するための簡易な数理モデルを提案し、その適用性を検証することを目的とした。

2. 水理模型実験による円筒管の増幅特性の検討

(1) 水理模型実験の方法

実験には、図-1に示す長さ15m、幅0.4m、高さ0.6mの二次元造波水槽を用いた。水路内の水深は $h_0=0.4$ mとし、

図-1 実験の概略図

1 正会員 博(工) 宮崎大学准教授
2 学生会員 宮崎大学大学院工研究科
3 正会員 修(工) 宮崎大学工学部

造波板から12mの位置に不透過の直立壁を設け、その前面に塩ビ製の円筒管を鉛直に固定した。実験の模型縮尺は1/20程度を想定し、円筒管の内径は $d=0.075\text{m}$ とした。本研究では、円筒管の上端と下端を開口した条件での実験（以下、[実験A]と呼ぶ）と、円筒管上端の開口部にノズルを設けて空気流を絞った条件の実験（以下、[実験B]と呼ぶ）を行なった。

円筒管内の水面は、その下端開口部における流体運動に応じて共振する。共振の程度は、円筒管の下端と水路底面の間の距離（以下、下端クリアランスと呼ぶ）に依存すると考え、下端クリアランスを $W=0.01\sim 0.04\text{m}$ の範囲で変えて実験を行なった。

[実験A]は、規則波と不規則波について行なった。規則波実験では、入射波高は $H_0=0.05\text{m}$ とし、入射波周期を $T=0.8\text{秒}\sim 2.2\text{秒}$ の範囲で0.1秒毎に変えた条件で水面波を造波した。円筒管内の水面は、特定の入射波周期に応じて共振するが、その程度は円筒管内の流体運動に伴うエネルギー損失に依存する。そこで、入射波の周期を共振周期に設定し（本実験条件では $T=1.3\text{秒}$ ）、入射波高を $H_0=0.05\text{m}\sim 0.1\text{m}$ の範囲で変えた実験を行ない、入射波高が増幅特性に与える影響を検討した。

不規則波を用いた実験では、規則波実験の結果を踏まえ、有義波周期は共振周期に設定し（本実験条件では $T_{1/3}=1.3\text{秒}$ ）、有義波高が $H_{1/3}=0.05\text{m}$ と 0.08m の場合について計測を行なった。図-2は、目標スペクトル（ブレッダ・シュナイダー・光易型）と造波スペクトルを比較したものである。実験波のスペクトルが目標スペクトルと概ね一致していることが確認できる。

[実験B]では、円筒管の上端開口部に蓋を設け、その中央に円形孔を設けてノズルとした。ノズル比（ノズル断面積/円筒管内径断面積で定義）は5%、10%、15%、20%の4種類とし、下端クリアランスが $W=0.03$ と 0.04m の場合について計測を行なった。実験波は、波高が $H_0=0.05\text{m}$ の規則波とし、ノズル比が5%と15%の場合は、入射波周期を $T=0.8\text{秒}\sim 2.2\text{秒}$ の範囲において0.1秒間隔で

変え水面波を造波した。また、ノズル比が10%と20%の場合は、入射波周期を共振周期（本実験条件では $T=1.3\text{秒}$ ）に設定して最大増幅率を計測した。

(2) 円筒管の増幅特性

図-3は、規則波に対する円筒管の増幅特性を示したものである。増幅率は、入射波高に対する円筒管内の波高比で定義している。図中の各プロットは円筒管の下端クリアランスが異なる場合の結果を示している。

円筒管は、その固有周期で増幅率が最大となる周波数特性を持ち、そのピーク値（最大増幅率）は下端クリアランスによって異なる。本実験で下端クリアランスが最も小さい $W/h_0=0.025$ を除けば、円筒管内の波高は入射波高の7～8倍程度に増幅されている。一方、下端クリアランスが $W/h_0=0.025$ では、最大増幅率は大きく低下する結果となった。これは、円筒管の下端開口部における水塊の流入・流出に伴う損失が卓越したためと考えられる。

図-3に示すように、円筒管の固有周期に応じて管内水面は増幅する。木村ら（1977）は、円筒管の固有周期をその没水長に関係付けて示しているが、付加質量の効果を含まないため、その関係式から求めた固有周期は実験による固有周期を若干過小評価する（村上ら、2013）。

図-4は、最大増幅率に対する入射波高の影響を示したものである。入射波高の増大に伴い、円筒管の下端開口

図-3 波動ポンプの増幅特性(規則波)

図-2 入射波スペクトルと目標スペクトルの比較

図-4 最大増幅率に対する入射波高の影響

(a) $H_{1/3} = 0.05\text{m}$ (b) $H_{1/3} = 0.08\text{m}$

図-5 波動ポンプの増幅特性(不規則波)

部近傍の流速が増大し、水塊の流入・流出に伴うエネルギー損失によって増幅率が低下傾向を示している。また、下端クリアランスが水深の10%前後になると、最大増幅率の低下特性は類似したものになっている。

不規則波に対する円筒管の増幅特性を図-5に示す。不規則波に対する増幅率は、入射波スペクトルに対する円筒管内の波高スペクトル比で定義している。図-5(a)に示す有義波高が $H_{1/3}=0.05\text{m}$ の場合、 $W/h_0=0.025$ の場合を除くと、最大増幅率は8~9.5程度の値を示している。有義波周期に円筒管の固有周期を一致させることにより、円筒管内の水面が効果的に増幅されることが確認できる。なお、図-5(a)と(b)の比較より、入射波高が大きくなると規則波の場合と同様に最大増幅率は低下する。

次節で述べるが、円筒管の下端開口部での流入・流出に伴う損失は、下端クリアランスが $W/h_0=0.075$ 程度になると極めて小さくなる。また、水深に対する円筒管の没水長が短くなると最大増幅率は低下する傾向を示す。図-3~図-5に示した結果を踏まえると、円筒管は、その没水長を設計波の周期に応じて $W/h_0=0.075\sim0.1$ 程度に設定することで高い増幅機能を発揮することが推察される。

3. 数理モデルの適用性

(1) 数理モデルの概要

[実験A]では、円筒管内の流体運動に対する抗力として、下端開口部での周期的な流入・流出に伴う損失（以下、流入損失と呼ぶ）と円筒管壁面での摩擦損失が考えられる。また、[実験B]では、上記に加えてノズル部での縮流損失を考える必要がある。本研究では、円筒管内の流体運動を、円筒管の下端開口部における圧力変動を外力とする単振動に置き換え、上記の各損失と付加質量を考慮した次式に示す数理モデルを考える。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left\{ (l_0 + \alpha|v|)v \right\} + g v + \left\{ \frac{f}{2} \frac{(l_0 + y)}{d} + \frac{f_0}{2} + \frac{\beta}{2\varepsilon} \right\} |v|v \\ = g H_0 \frac{\cosh k(z_1 + h)}{\cosh kh} \sin \sigma t \end{aligned} \quad \cdots (1)$$

ここで、 y は円筒管内の静水位を原点とした水面位置、 v は円筒管内の平均流速、 l_0 は円筒管の没水長、 α は付加質量係数を表す。また、 k は入射波の波数、 σ は角周波数、 z_1 は円筒管下端の水深を表している。

式(1)では、 f を摩擦損失係数、 f_0 を流入損失係数とし、円筒管内の平均流速の二乗に比例した摩擦損失と流入損失が生じると仮定した。また、円筒管の上端に設けるノズルに関しては、 ε をノズル比、 β をノズル損失係数として縮流損失を考慮している。ここで、ノズル部での縮流損失は、厳密には空気流の圧縮性を考慮して取り扱われるべきであるが、本研究では簡易なモデル式として圧縮性は考慮せず、円筒管内の気相部の体積変化に伴うノズル流速の二乗に比例した損失を仮定した。

式(1)は4次精度のルンゲクッタ法で解き、不規則波に対しては入射波スペクトルを適当な周波数幅に分割して計算した。

(2) 規則波及び不規則波に対する数理モデルの適合性

図-6は、規則波の実験結果と式(1)から求めた計算結果を比較したものである。図中には計算に用いた各損失係数と付加質量係数の値を示している。円筒管の摩擦損失係数は、塩ビ管の代表的な値として $f=0.03$ とし、数値計算から得られる最大増幅率とその周期が実験値と一致するように流入損失係数と付加質量係数を調整した。

図-6に示すように、式(1)で計算した円筒管の共振特性は実験結果と良好に一致している。下端クリアランスが $W/h_0=0.05\sim0.1$ では、流入損失係数の値は0や0.1と小さく、水塊の流入・流出に伴う損失の寄与が小さいことを示している。一方、下端クリアランスが狭くなると、その寄与は増加している。

円筒管内の流体運動に伴う付加質量は、円筒管の共振周期に影響する。図-6に示すように、付加質量係数を

図-6 数理モデル式の適合性(規則波)

図-9 不規則波に対するモデル式の適合性

図-7 流出入のともなう損失係数に対する波高の影響

(a) $W/h_0=0.1$

図-8 数理モデル式の適合性(不規則波)

(b) $W/h_0=0.075$

図-10 ノズル比に対する増幅特性(規則波)

$\alpha=0.2\sim0.3$ とすることで、数値計算から得られる共振周期は実験結果と良好に一致している。なお、木村ら(1977)の式から求めた共振周期は実験結果を過小評価する傾向があり、固有周期を求める際に付加質量を考慮する必要があることが確認できる。

入射波高の増大に伴い下端開口部における流出入損失が増大して最大増幅率は低下する。図-7は、入射波高と流出入損失係数の関係を示したものである。入射波高の増大に伴い、流出入損失の効果が大きくなり、損失係数の値は直線的に増加している。なお、下端クリアランスが $W/h_0=0.075$, $W/h_0=0.1$ では、波高に対する損失係数の特

性は類似しており、 $W/h_0=0.05$ に比べて水底面の影響が小さいためと考えられる。

図-8は、不規則波の実験結果と計算結果を比較したものである。不規則波に対しては、入射波スペクトルを適当な周波数幅に分割し(ここでは100分割)、各周波数成分に対して式(1)を適用して円筒管内の水位変動を計算した。その際、各損失係数と付加質量係数は、有義波相当の規則波で得られた結果を適用した。

下端クリアランスが $W/h_0=0.075$ と 0.1 の場合、計算結果は最大増幅率を若干過小評価し、ピーク周波数が僅か

に高周波側に現れる傾向を示しているが、計算結果は実験結果と概ね一致している。一方、下端クリアランスが $W/h_0=0.025$ と 0.05 では、規則波と同じ流出入損失係数を用いた計算結果は実験結果を過大評価してしまう。

下端クリアランスが $W/h_0=0.025$ と 0.05 において、数値計算結果が実験結果と一致するように流出入損失係数を調整した結果を図-9に示す。規則波で用いた流出入損失係数よりも大きな値を設定することで、計算値は実験値と概ね一致する結果を示した。

(3) 増幅特性に対するノズルの影響とモデルの適合性

図-10は、規則波実験から得られた増幅特性と式(1)から求めた計算結果を比較したものである。流出入損失係数、摩擦損失係数、および付加質量係数は図-6と同じ値を用い、計算から求めた最大増幅率が実験値と一致するようにノズル損失係数 β を調整した。

ノズル比が小さくなるに従い最大増幅率は低下し、ノズル損失係数を $\beta=0.1\sim 0.15$ とすることで計算値は実験値と良好に一致している。本研究は、簡易なモデル式として空気流の圧縮性は考慮せず、円筒管内の気相部の体積変化に伴う空気流速の二乗に比例した損失を仮定した。このような簡易なモデルではあるが、ノズル損失係数を適切に与えることで円筒管の増幅特性をある程度の精度で推定することができる。ただし、円筒管内の圧力変動等を詳細に検討する場合には、気相部について圧縮性を考慮したモデルが必要になる。

4. おわりに

円筒管は、その固有周期に応じて管内水面振動を選択的に増幅させる特性を持ち、最大増幅率は下端クリアランスに依存する。下端クリアランスが狭くなると、円筒管の下端開口部における流出入損失が増大し、最大増幅率は低下する。

規則波に対する円筒管の増幅特性は、式(1)に示したモデル式において、各損失係数と付加質量係数を適切に設定することで精度よく推定できる。下端クリアランスによっては流出入損失の考慮が重要となる。また、共振周期の推定に関しては付加質量を考慮する必要がある。

不規則波に対しては、円筒管の下端クリアランスが比較的大きい場合は、有義波相当の規則波と同じ流出入損失係数を用いることで円筒管の増幅特性を十分な精度で推定できる。一方、下端クリアランスが小さくなると、有義波相当の規則波と同じ流出入損失係数を用いると、数値計算結果は過大評価となる。

円筒管の下端開口部における流出入損失は、下端クリアランスが $W/h_0=0.075$ より大きくなると極めて小さくなる。円筒管は、水深に対する没水長が短くなると最大増幅率は低下する傾向を持つことから、下端クリアランスを設計波の周期に応じて $W/h_0=0.075\sim 0.1$ 程度に設定することで高い増幅機能が得られる。

円筒管上端にノズルを設けて空気流を縮流させる場合、ノズル比が小さくなると最大増幅率は低下する傾向を示す。本研究で示したモデル式は、空気圧縮性を考慮していない簡易式ではあるが、円筒管内の気層部の体積変化に伴うノズル流速の二乗に比例した損失を考慮することで、円筒管の増幅特性が推定できることを確認した。

参考文献

- 石井進一・益田善雄・宮崎武晃・工藤君明・堀田 平・鷺尾幸久 (1985)：沿岸固定式空気タービン波力発電装置の発電運転試験報告, JAMSTEC 試験研究報告, 第14号, pp.55-79.
- 今井貫爾・吉田幸三・岩瀬浩二・高橋俊彦 (1988)：波動ポンプの揚水能力に関する研究, 第35回海岸工学講演会論文集, pp.832-836.
- 木村晴保・藤田喜英 (1977)：波動ポンプの開発—規則波による揚水量について, 第24回海岸工学講演会論文集, pp.620-624.
- 木村晴保 (1979)：不規則波による波動ポンプの揚水量について, 第26回海岸工学講演会論文集, pp.664-667.
- 近藤淑朗・谷野賢二・渡部富治・奥田教海・松田敏彦・土手康彦 (1987)：室蘭工大における波エネルギー利用研究の総括, 室蘭工大研究報告, 第37号, pp.251-261.
- 志岐 明・福井敏治・吉田 茂・白井俊輔 (1988)：波エネルギー装置「波動ポンプ」の実用化検討について, 海洋開発論文集, 第4巻, pp.289-294.
- 高橋重雄・安達 崇 (1989)：日本周辺の波パワーとその利用に関する一考察, 第36回海岸工学講演会論文集, pp.874-878.
- 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2014)：NEDO再生可能エネルギー技術白書 (第2版) 第6章, pp.1-84.
- 羽田野袈裟義・種浦圭輔・渡邊 誠・中野公彦・佐藤 俊・松浦正巳 (2006)：浮体式波力エネルギー変換の力学, 土木学会論文誌B, Vol.62, No.3, pp.270-283.
- 真鍋安弘・佐々木淳・除 乃丹 (2011)：越波型波エネルギー利用装置浮島渚 (円錐形状浮体) の小規模海域実験, 第22回海洋工学シンポジウム, OE22-045.
- 村上啓介・岡本英久・真木大介 (2013)：波動ポンプを活用した波エネルギーの効率的な抽出に関する研究, 土木学会論文誌B3 (海洋開発), Vol.69, No.2, pp.197-1102.
- 安澤幸隆・奥村義隆・長島知宏・中尾圭輔 (2011)：マルチカム型発電浮体の開発に関する研究, 第22回海洋工学シンポジウム, OE22-110.
- 鷺尾幸久・大澤弘敬・永田良典・藤井文則・古山裕喜・藤田俊助 (2000)：沖合浮体式波力装置「マイティーホエール」実海域試験 その1 実験システム概要及び係留設置工事, JAMSTEC 試験研究報告, 第40号, pp.1-17.