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

村上 啓介¹・岡本 英久²・真木 大介³

¹正会員 宮崎大学准教授 工学教育研究部 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

E-mail: keisuke@cc.miyazaki-u.ac.jp

²学生会員 名古屋大学 大学院工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: tsc911u@ student.miyazaki-u.ac.jp

³正会員 宮崎大学 工学部教育研究支援技術センター (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

E-mail: maki@cc.miyazaki-u.ac.jp

地球温暖化や平均海面の上昇が現実のものとなりつつある現在、自然エネルギーを利用した発電技術の開発に再び関心が集まっている。本研究は、小振幅の波に対して波エネルギーを効率的に取り出すことができる波力発電システムの開発を念頭に、半没水した円筒管（波動ポンプ）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を着想し、円筒管内部の波運動の増幅特性を水理模型実験で明らかにすることを目的に実施した。このシステムは、内湾等の比較的静穏な海域において、円筒管を既設防波堤の前面に多数配置し、円筒管内部の波運動を増幅させることにより管の上端開口部で効率的に空気流を発生させることを想定している。また、本研究では、円筒管内部の浮体の運動エネルギーを利用した発電方法の開発も念頭に、円筒管内部に設置した浮体の運動特性を水理模型実験により検討した。

Key Words : *Natural energy, wave power, wave activated pump, curtain wall-type barrier, wave amplification*

1. はじめに

太陽光や太陽熱、あるいは風力や地熱等の自然エネルギーを利用した発電技術の開発が進められてきた¹⁾。また、海洋分野では、波力や潮流、海洋温度差等から電気エネルギーを取り出す技術開発も進められている²⁾。

我が国は世界でも有数の海岸線延長を有し、海岸に來襲する波エネルギーは国土全周で約3,600万kWと見積もられ、相当なエネルギーが潜在する³⁾。この波エネルギーを獲得する方法として、(1) 水面や水中の構造物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方法⁴⁾、(2) 水面付近に空気室を設け、波の上下運動に伴って室内の空気が圧縮と膨張を繰り返すことにより発生する空気流を電気エネルギーに変換する方法⁵⁾、(3) 平均水位より高い位置に海水を波の力でくみ上げ、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方法⁶⁾、等が考えられ、様々な形式の発電システムが試されてきた。

その中で、水柱振動方式を用いた波力発電ケーソンによる発電方法は、我が国で実証試験が行われ、技術的課

題の解決が進んだシステムの一つである。一方で、構造規模が大きいことから、既存の発電システムと比して経済的競争力が課題として残されている。波力発電ケーソン以外の発電方法に関しても、波エネルギーの変動性や不規則性、耐波安定性等が技術開発上の課題として残されている。

波エネルギーの変動の幅は極めて大きい。一方で、波エネルギーを有効に取り出すことができる波の範囲は限られる。本研究は、小振幅の波に対して有効に波エネルギーを取り出すことができる波力発電システムの開発を念頭に、半没水した円筒管（波動ポンプ⁷⁾）を直立壁前面に多数設置し、その内部で波運動を増幅させることでエネルギーを取り出すシステムを着想し、円筒管内部の波運動の増幅特性を水理模型実験で明らかにすることを目的とする。波動ポンプに関する既往の研究は、主にその揚水能力に着目したものであり^{例えば、7)8)9)}、円筒管内部の波運動の増幅特性に関する知見は十分とは言えない。

このシステムは、内湾等の比較的静穏な海域において、多数の円筒管を既設防波堤の前面に配置し、各円筒管内部の波運動を増幅させることにより管の上端開口部で効

率的に空気流を発生させることを想定している。また、本研究では、円筒管内部の浮体の運動エネルギーを利用した発電方法の開発を念頭に、円筒管内部の浮体の運動特性を水理模型実験により検討する。

2. 水理模型実験の方法

実験には、図-1(a)に示す長さ15m、幅0.6m、高さ1.2mの二次元不規則造波水槽を用いた。水深は $h_0=0.6\text{m}$ とし、造波板から約11mの位置に防波堤を模した不透過の直立壁を設置し、その前面に内径 d の塩ビ製の円筒管を水底面から W の高さに固定した。円筒管の上下端は開放されており、上端から越水することがない範囲で実験波の条件を決めた。実験の模型縮尺は1/20を想定し、円筒管内径を $d=0.1, 0.15, 0.2\text{m}$ 、水底面からの距離（クリアランス）を $W=0.05, 0.1, 0.15, 0.2\text{m}$ に変えて実験を行った。

本研究では、円筒管内部の波運動の増幅特性を検討する目的から、規則波を用いた実験と不規則波を用いた実験を行った。規則波を用いた実験の入射波高は $H_0=5\text{cm}$ とし、入射波周期を $T_0=0.8\text{秒}$ から 2.2秒 の範囲で変えた。また、不規則波実験では、ブレッドシュナイダー・光易型スペクトルを目標スペクトルとして造波した。その際の有義波高は $H_{1/3}=4\text{cm}$ 、有義波周期は $T_{1/3}=1.4\text{秒}$ と 1.8秒 の2種類とした。

実験は3つのシリーズについて行った。シリーズ1では、入射波高（ $Ch1$ ）、直立壁前面の波高（ $Ch2$ ）と円筒管内部の波高（ $Ch3$ ）を計測し、円筒管の増幅特性を検討した。検討は、規則波と不規則波について行った。図-2に目標スペクトルと実際に造波して得られたスペクトル

図-2 入射波のパワースペクトル

を示している。造波スペクトルのピーク値は目標スペクトルを若干下回るが、造波スペクトルの形状は目標スペクトルを概ね満足している。なお、シリーズ1では、シリーズ2で検討する懸垂板は設置されていない。

シリーズ2では、円筒管を防護する目的と、円筒管の増幅特性を向上させる目的で、直立壁の前方に懸垂板を設置し、懸垂板が円筒管の増幅特性に与える影響を検討した。検討は、シリーズ1と同様に規則波と不規則波について行った。懸垂板は、直立壁から $B=0.2, 0.4\text{m}$ 、水底面からの高さ（クリアランス） $W'=0.2, 0.4\text{m}$ のそれぞれの組み合わせの位置に設置した。

シリーズ3では、図-1(b)に示すように、円筒管の内部に設置した浮体の運動特性を検討した。浮体の運動は、円筒管上部に取り付けた赤外線変位センサーで計測した。円筒管の内径は $d=0.1\text{m}$ 、浮体の外径は $d'=0.09\text{m}$ （管内壁とのクリアランスは 5mm ）、高さ $s=0.11\text{m}$ である。浮体は鉛直ガイドに沿ってベアリングを介して上下に運動し、浮体と鉛直ガイド間の抵抗は無視できる程度に小さい。

3. 円筒管内の波運動の増幅特性

(1) 円筒管の増幅特性

波動ポンプに関する既往の研究は、主にその揚水能力に着目したもので、円筒管内部の波運動の増幅特性に関しする知見は少ない。ここでは、懸垂板がない場合について、規則波と不規則波に対する円筒管内部の水面の増幅特性について述べる。

図-3は、規則波に対する円筒管の増幅特性を、入射波振幅（ $Ch1$ ）に対する円筒管内部の水面振幅（ $Ch3$ ）の比で示したものである。各プロットは円筒管の内径の違い（ d/l ； l は円筒管の没水長で $l=h_0-W$ ）を表している。円筒管の増幅率には周波数特性があり、円筒管の増幅率の固有周期に応じて選択的に増幅する特性を示している。木村ら⁷⁾によれば、損失等を考慮しない場合の波動ポンプの固有周期は次式で与えられる。

(a) 実験水槽と模型設置

(b) 円筒管内の浮体模型

図-1 実験装置の概要

$$T_0 = 2\pi \sqrt{l/g} \quad (1)$$

ここで、 g は重力加速度、 l は円筒管の没水長である。

式(1)は、円筒管の固有周期は、その没水長で決まることを表している。図-3においても、円筒管の内径が異なっても増幅特性の違いは小さく、円筒管の固有周期は内径に依存しないことが読み取れる。

図-4は、円筒管の没水長を変えた場合の増幅率を、入射波振幅 (ChI) に対する円筒管内部の水面振幅 ($Ch3$) の比で示したものである。円筒管の増幅特性 (特に、増幅率がピークとなる周期とピーク値) は、円筒管の没水長に応じて異なり、水面振動は円筒管内の水塊の固有周期付近で6~7倍程度に増幅している。

図-3や図-4に示すように、円筒管内部の水面振動は、円筒管の固有周期付近で選択的に増幅されるのに対し、固有周期から外れる周期帯では水面振動は低減し、その低減割合は短周期側で特に著しい。

図-4より、円筒管の没水長が短くなるに従い、円筒管の増幅率がピークを示す相対水深 ($2\pi h_0/L$) は短波長側に移行していることが読み取れる。このことは、円筒管の没水長が短くなるに従い、円筒管の固有周期が短周期側にシフトしていることを意味している。

図-5は、式(1)から求めた固有周期と、本実験で増幅

図-3 円筒管の内径が異なる場合の増幅特性 (規則波)

図-4 円筒管の没水長が異なる場合の増幅特性 (規則波)

図-5 固有周期に関する理論値と実験値の比較 (規則波)

(a) $T_0=1.4$ 秒

(b) $T_0=1.8$ 秒

図-6 円筒管内部の水面変動のパワースペクトル

率がピークとなる周期を比較したものである。実験では、円筒管内部の壁面摩擦や円筒管下端での流出・流入に伴う損失が生じるため、実験から読み取った固有周期は損失を考慮していない理論値に比べて若干長周期になっているが、その差は15%以内である。

図-6は、不規則波に対する円筒管の増幅特性を示したものである。図の上段は有義波周期が $T_0=1.4$ 秒の場合、下段は $T_0=1.8$ 秒の場合の結果である。図-4の規則波の場合と同様に、円筒管下端のクリアランス (W/h_0) が大きくなるに従い、パワースペクトルのピークは短周期側にシフトしており、このピークとなる周期は図-4で増幅率が最大となる周期と概ね一致している。これらの結果から、円筒管は不規則波に対してバンドパスフィルターと

図-7 円筒管下端のクリアランスに対する有義波の増幅率（不規則波）

としての働きを持ち、固有周期を中心に選択的に水面振動を増幅させる特性を持つことがわかる。

図-4で示した規則波に対する結果では、円筒管下端のクリアランスによる増幅率の違いは明確ではないが、不規則波による実験結果では、クリアランスが大きくなると増幅効率が低下する傾向を示している。

図-7は、円筒管下端のクリアランスに対する有義波の増幅率を示したものである。図中のプロットは、入射波の有義波高（ $Ch1$ ）、直立壁前面の有義波高（ $Ch2$ ）、および円筒管内部の有義波高（ $Ch3$ ）の比を示している。入射波に対する円筒管の増幅率はクリアランスが小さい範囲では3.8程度の値を取り、クリアランスが大きくなるに従い有義波の増幅率は低下している。また、直立壁前面の波高に対する円筒管の増幅率は2.6程度で、同様にクリアランスの増加に伴い増幅率は低下傾向を示している。このことから、不規則波に対して高い増幅率を得るためには、下端クリアランスは狭く取ることが有利と考えられる。

(2) 懸垂板が円筒管の増幅特性に与える影響

円筒管を防護する目的と、円筒管の増幅特性を向上させる目的から、直立壁の前方に懸垂板を設置することが考えられる。ここでは、直立壁の前方に懸垂板を設置し、その遊水室内に固定された円筒管の増幅特性を規則波と不規則波について検討する。

図-8(a)は、直立壁前面から $B/h_0=0.33$ だけ離れた位置に懸垂板を設置した場合の、遊水室の増幅特性（入射波振幅に対する直立壁前面の振幅）を示したものである。また、図-8(b)は、 $B/h_0=0.66$ の場合について同様に示したものである。直立壁の前方に懸垂板を設置すると、遊水室幅と下端開口幅に応じた固有周期で遊水室内の水面が増幅することが知られている¹⁰⁾。本実験においても入射波の相対水深（ $2\pi h_0/L$ ）が0.8～1.0程度で2～3割の増幅が見

(a) $B/h_0=0.33$

(b) $B/h_0=0.66$

図-8 懸垂板による遊水室内の振幅特性の変化（規則波）

図-9 懸垂板の設置によるパワースペクトルの変化

られた。一方、それよりも短周期帯になると、懸垂板による消波効果が顕著になり、遊水室内の振動は減衰する傾向を示している。

図-9は、不規則波が入射した場合の遊水室内のパワースペクトルを、懸垂板がある場合と無い場合について比較したものである。遊水室内の増幅周期が2.0秒程度であることから、懸垂板を設置することで0.5Hz付近にピークが生じるスペクトル形状に変化している。また、スペクトルのピークは1.7倍程度になっており、図-8に示した増幅率と概ね一致している。

(a) $T_{1/3}=1.4$ 秒

(b) $T_{1/3}=1.8$ 秒

図-10 懸垂板がある場合の円筒管内部の水面変動のパワースペクトル

図-11 懸垂板がある場合の円筒管下端のクリアランスに対する有義波の増幅率（不規則波）

図-9に示すように、遊水室内の水面は、遊水室幅や下端開口幅に応じた固有周期で増幅するが、他の周期帯では懸垂板の消波効果が顕著になり水面振動は減衰する。このような特性を持つ遊水室内に円筒管を設置した場合の円筒管の増幅効果について検討を行った。

図-10は、遊水室内に円筒管を設置した場合に円筒管内で生じる水面変動のパワースペクトルを示したものである。図-6に示したスペクトル形状と比較すると、円筒管の没水長に応じた固有周期で選択的に水面を増幅する特性は、懸垂板を設置することで明確ではなくなると

もに、スペクトルのピーク値も低下している。一方、遊水室内の固有周期に近い周波数付近（0.5Hz付近）のスペクトル値が大きくなる傾向が見られ、遊水室の増幅特性が円筒管の増幅特性に影響していることが伺える。この影響は、遊水室の固有周期に近い有義波周期である図-10(b)において、下端クリアランスが大きい場合に顕著に見られる。

このことは、図-11に示す円筒管内の有義波の増幅率にも表れる。図-7との比較より、円筒管内部の有義波の増幅率は、懸垂板を設置することにより3割程度低下している。このことから、懸垂板を設置した場合に不規則波に対して高い増幅率を得るためには、円筒管の下端クリアランスは水深の1割程度に取る必要があると考える。

今後は、遊水室の固有周期と円筒管の固有周期が一致する場合について検討を行い、不規則波浪場において高い増幅率が得られる条件を明らかにする必要がある。

(3) 円筒管内部の浮体の運動特性

円筒管内部の浮体の運動エネルギーを利用した発電方法の開発を念頭に、円筒管内部の浮体の運動特性を水理模型実験により検討した。

図-12は、規則波を作用させた場合の浮体運動の振幅を入射波振幅に対する比で示したものである。図中には

図-12 円筒管内の浮体の運動特性（規則波）

図-13 円筒管内の浮体運動の位相特性（規則波）

図-4で示した円筒管内の増幅率も白抜きのプロットで示している。図より、浮体の運動振幅は水面変動振幅とほぼ同じ値を取っており、浮体が円筒管内部の水面変動に追従して運動していることが読み取れる。

図-13は、円筒管の外側の水面変動に対する浮体運動の位相を示したものである。入射波周期が長い波に対しては、円筒管内の浮体は円筒管外の水面変動とほぼ同位相で運動するが、入射波周期が短くなるに従い位相差は大きくなり、逆位相で運動していることを確認した。なお、浮体は円筒管内の水面変動に追従して運動するので、円筒管内の水面変動も同様の位相特性を持つことになる。

4. まとめ

小振幅の波に対して効果的に波エネルギーを取り出すことができる波力発電システムの開発を念頭に、鉛直壁前面に設置した半没水の円筒管内部における波運動の増幅特性を水理模型実験で検討し、以下の結果を得た。

(1) 円筒管はバンドパスフィルターの働きを持ち、円筒管の固有周期に応じて管内部の水面を選択的に増幅させる。円筒管の固有周期は管の没水長で概ね決まり、円筒管の没水長が短くなるに従い固有周期は短周期側に移行する。

(2) 遊水室内の水面は、遊水室幅と懸垂板の下端開口幅に応じた周期で増幅する。一方、この固有周期より外れた周期帯では懸垂板の消波効果が顕著になり水面振動は減衰する。

(3) 円筒管内部の有義波の増幅率は、懸垂板を設置することにより3割程度低下した。不規則波に対して高い増幅率を得るためには、円筒管の下端クリアランスは狭く取ることが有利と考えられる。

(4) 円筒管と遊水室の固有周期が異なる場合、円筒管の増幅特性は、遊水室内の増幅特性の影響を受けて低下する場合がある。

(5) 円筒管内の浮体は管内水面の変位に追従して運動し、水面振動と類似の増幅特性を持つことから、浮体の運動エネルギーの活用の可能性を確認した。

本研究では、懸垂板や円筒管に作用する波力について検討はしていない。今後は、構造物の耐波安定性と具体的な発電効率について検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：NEDO 再生可能エネルギー白書～新たなエネルギー社会の実現に向けて、pp.311-364, 2010.
- 2) 高橋重雄：波エネルギー利用への再挑戦，海洋開発論文集，第24巻，pp.7-12, 2008.
- 3) 高橋重雄，安達崇：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, 1989.
- 4) 近藤淑朗：室蘭工大における波エネルギー利用緩急の総括，室蘭工大研究報告，第37号，pp.251-261, 1987.
- 5) 石井進一，益田善雄，宮崎武晃，工藤君明，堀田平：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，1985.
- 6) 志岐明，福井敏治，吉田茂，白井俊輔：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, 1988.
- 7) 木村晴保，藤田喜英：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, 1977.
- 8) 木村晴保：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, 1979.
- 9) 今井貫爾，吉田幸三，岩瀬浩二，高橋俊彦：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, 1988.
- 10) 例えば，中村孝幸，高木伸雄，中山哲敏：ピストンモード波浪共振を利用する低反射・低透過構造の海水交換型防波堤の開発，海岸工学論文集，第49巻，pp.661-665, 2002.

STUDY ON EFFECTIVE WAVE ENERGY EXTRACTION WITH UTILIZING A WAVE ACTIVATED PUMP

Keisuke MURAKAMI, Hidehisa OKAMOTO and Daisuke MAKI

The technical development of utilizing natural energy has been conducting since several decade years ago, because the global warming and the sea level rise are realizing to human beings. In order to facilitate the technology of utilizing wave energy, which is one of the natural energy, this study examines the hydraulic performance of wave activated pump system which is arranged in front of the existing vertical breakwater. This system is expected to amplify wave motion even under calm wave conditions, which are sometimes observed in a bay, in order to expand the effective range of waves which can be used for electronic power generation. A series of hydraulic experiment were conducted in this study to investigate the characteristics of wave amplification in the wave activated pump. The effect of a curtain wall-type barrier, which is installed to protect pump system, on wave amplification were also investigated here.