

令和 5 年 6 月 2 7 日現在

機関番号：3 2 2 0 1

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：2 0 K 1 4 9 6 5

研究課題名（和文）共振点追従型振動水柱波力発電装置に関する研究

研究課題名（英文）Research on Resonance Point Tracking Oscillating Water Column Wave Energy Converter

研究代表者

飯野 光政（Iino, Mitumasa）

足利大学・工学部・講師

研究者番号：6 0 7 8 1 9 6 1

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では従来の振動水柱型波力発電にない、水柱の運動方向が途中で変化する「共振点追従型振動水柱波力発電」を提案する。研究成果として、途中で傾斜角度と断面積の変化する振動水柱の運動方程式を導出し、運動方程式に基づく共振周期の推定式を提案し、傾斜角度や断面積、水深により変化する共振周期を10%以内の精度で予測することができた。また、途中で傾斜部を有する共振点追従型振動水柱波力発電は従来の垂直型波力発電と比較して、同じ水深でも共振周期を30%以上長周期化すること、傾斜部分に水面が達しない場合は垂直型と同様の共振周期になるという、水柱の水位により共振周期が急激に変化する性質を持つことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の振動水柱型波力発電は設計水深における一意の共振特性を想定して設計されていたが、水位により急激に共振周期の変化する共振点追従型波力発電においては、たとえば潮位の変化を事前に取得すれば、その環境に合わせた設計最適化も可能である。つまり、本研究は波力発電の効率向上の新たな検討の方向性を示すものでもある。この成果により、振動水柱型波力発電の効率向上や低コスト化が期待され、さらには波力エネルギーの実用化により脱炭素社会の構築に対しても有意義である。

研究成果の概要（英文）：This research proposes a novel concept for oscillating water column wave energy converter "Resonance Point Tracking Oscillating Water Column Wave Energy Converter," in which the direction of the water column's motion changes midway. As a result, the equation of motion of the oscillating water column, whose inclination angle and cross-sectional area changes, is derived. And an estimation formula for the resonance period based on the equation. It has been possible to predict the resonance period, which changes according to the inclination angle, cross-sectional area, and water depth, with an accuracy of within 10%. Furthermore, it has been revealed that the Resonance Point Tracking Oscillating Water Column Wave Energy Converter can lengthen the resonance period by more than 30% even at the same water depth compared to traditional vertical wave power generation, however the water surface does not reach the inclined part, it has the same resonance period as the vertical type.

研究分野：機械工学

キーワード：波力発電 振動水柱型波力発電 水槽実験 一次変換部 振動工学 海洋エネルギー 振動水柱型 運動方程式

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1．研究開始当初の背景

各種波力発電方式の中でも、波の振動を空気流に変換し、空気タービン発電機を回転させる振動水柱型波力発電は、海中に可動部品を持たないことから信頼性に優れ、わが国においても多くの実績を有する。これら振動水柱型装置の一次変換部は、入射波の周期と水柱の上下運動の共振周期が一致した場合に波から空気へのエネルギー変換効率が最大となる。これまでの研究において本研究代表者らは振動水柱を傾斜させることで共振周期の長周期化が可能であることを明らかにし、従来と同じ水柱の体積で長周期の波での効率を高めることに成功している。一方で共振周期以外での効率低下からシステム全体の積算発電出力が低くなる課題があった。水柱の振動特性についてはこれまで多くの研究が行われており、その中で共振周期を複数にすることで共振周期以外の効率を改善する方法も研究されている。具体的にはプロジェクティングウォールと呼ばれる側壁を設置する、あるいは階段状の地形に装置を設置する方法などの研究が行われているが、結果として大規模な工事が必要となりコスト増を招く恐れがある。

### 2．研究の目的

本研究では振動水柱型波力発電の一次変換部の共振周期を変化させる方式として新しく「共振点追従型振動水柱波力発電」を提案する。従来の振動水柱型波力発電は垂直または傾斜した上下運動を利用する方式がほとんどであるが、本提案では途中で水柱の傾斜角が変化し、運動方向が変化する振動水柱形状を提案し、その共振周期が波高や傾斜角、水深などにより、どのように変化するかを明らかにし、その変化を定量的に予測できる力学モデルを構築することを目的とする。

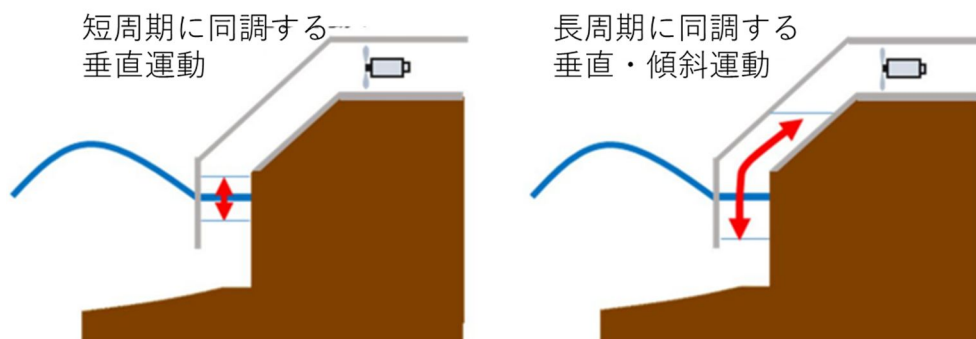


図 1 共振点追従型波力発電の概念（左図の垂直運動では短周期の波で共振、右図に示す傾斜運動が入ることで長周期の波で共振する）

### 3．研究の方法

#### 共振点追従型振動水柱波力発電の動力学モデルの構築

これまで研究者らの開発してきた動力学モデルを発展させ、共振点追従型振動水柱波力発電の動力学モデルを構築し、理論的に共振点変化が生じることを推定する。これまでのモデルでは図に示すように傾斜した状態をモデル化していた。本研究ではこのモデルを拡張し、途中で傾斜部がある場合に、水柱の運動方向に沿った一次元の運動の運動方程式を導出し、動力学解析が可能なモデルを構築する。

方法としては水柱の運動方向に沿った非定常ベルヌーイ式を用い、水柱の運動方向が変わることによって変化するポテンシャルエネルギーの変化や途中で傾斜することで生じる断面積の変化を加味した非定常の 1 次元運動方程式を導出する。

#### 水槽試験による共振点変化の検証

水槽実験により共振点追従振動水柱波力発電の共振周期が水柱の運動と水柱の形状により変化することを明らかにする。

具体的には途中で傾斜角が異なる振動水柱模型を複数作成し、入射波高による共振周期の変化と傾斜角度と水深（水柱の長さ、傾斜部分の比率）の違いによる共振周期の変化を造波実験と自由振動実験により検証する。

水槽は足利大学造波水槽（幅 70cm、最大水深 70cm）を利用し、造波実験では波高 5cm、周期 0.5 秒から 3 秒までの水柱の運動とエネルギー変換効率を評価し、自由振動実験では、真空ポンプにより水柱の水位を上昇させ、固有振動周期を計測する。

#### 水槽試験と動力学モデルの比較検証

非線形の微分方程式として得られる の動力学モデルを単純化して求めた共振周期推定式との結果を比較し、共振点追従型振動水柱波力発電の形状により、垂直型の振動水柱では生じないような、傾斜部を持つことによる共振周期の急激な変化が理論的に予測されたとおりであることを検証する。

#### 4．研究成果

本研究で得られた各項目の成果を以下に記載する。

##### 共振点追従型振動水柱波力発電の動力学モデルの構築

途中で傾斜部を持つ波力発電装置の動力学モデルとして、図に示す途中で断面積と傾斜部が変化し、水深 $h_{in}$ に開口部を有する振動水柱型波力発電を想定する。

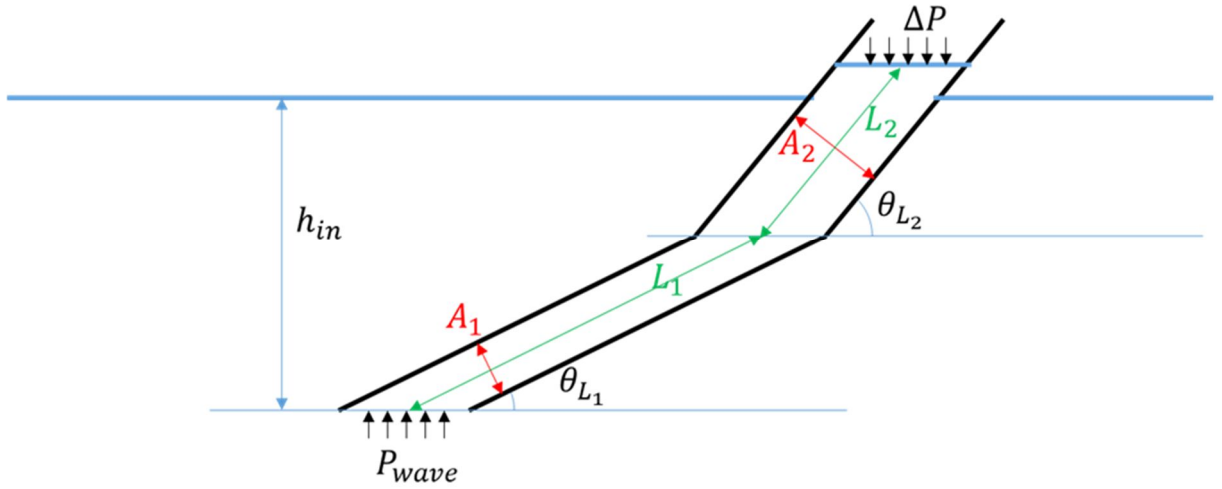


図 2 共振点追従型振動水柱の動力学モデル図

水柱の入り口における静水圧 $P_{wave}$ の変動成分を $\hat{P}_{wave}$ 、管路の圧力損失を $P_{loss}$ として、水柱の入り口部分から出口部分まで、管路に沿った経路 $L_1, L_2$ に沿って非定常ベルヌーイ式を積分することで、次式に示す非定常運動方程式を得ることができた。

$$\rho \left( \frac{A_2}{A_1} A_2 L_1 + A_2 (L_2 + x) \right) \frac{d^2 x}{dt^2} + \rho A_2 \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 = (\hat{P}_{wave} - \Delta P) A_2 - \rho g A_2 x \sin \theta_{L_2} - \frac{1}{2g} \left( 1 - \frac{A_2^2}{A_1^2} \right) \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 - P_{loss} A_2$$

#### 水槽試験による共振点変化の検証

水槽実験では図に示す垂直部のうえに傾斜部を取り付けた模型に対して、波高による共振周期の変化を評価した。条件としては水面上 1 c m から傾斜部が始まる状態に設置し、波高 2 c m、5 c m、7 c m の 3 条件の造波実験を行った。評価の結果、図 3 に示すように従来の垂直型と比較して、波高が高くなるほど長周期での効率がわずかに向上することが確認でき、共振周期も 0.1 秒程度長周期化した。性能に与える影響はわずかであることが確認され、その結果、本研究では波高よりも水位変化の影響を重点的に検討する方向とした。

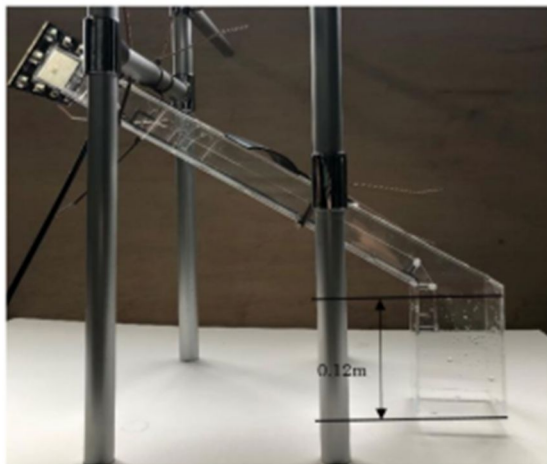


図 3 共振点追従型振動水柱模型

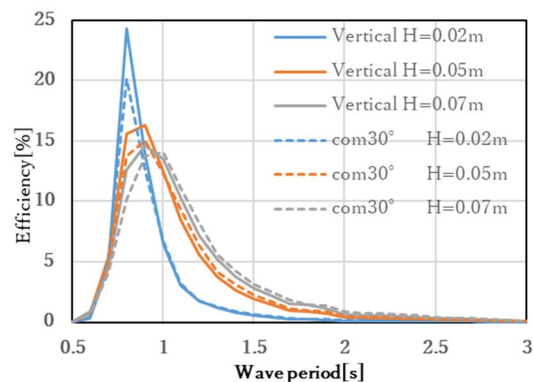


図 4 垂直型振動水柱と比較した効率の評価結果（Vertical:垂直型 com30°:共振点追従型）

水位変化の影響の評価としては、途中で傾斜部を有する図に示す形状に対して自由振動実験を行った。自由振動実験は水位を上げた後に減衰振動波形を計測し、その減衰波形から固有周期を同定するものである。結果として i. 断面積変化が大きいほど共振周期が長周期化すること、ii. 傾斜部が増えれば増えるほど共振周期が長周期化すること、iii. 垂直型と比較すると、同じ水柱の水深でも傾斜部を有する場合には共振周期が長周期化することの 3 点を明らかにすることができた。



図 5 水位の影響評価に利用した実験模型



図 6 断面積の影響評価に利用した実験模型

水槽試験と動力学モデルの比較検証

水槽試験と動力学モデルの比較検証を行うに当たって、式の非線形項と非保存力を消去した次式をまず求めた。

$$\rho \left( \frac{A_2}{A_1} A_2 L_1 + A_2 \bar{L}_2 \right) \frac{d^2 x}{dt^2} = -\rho g A_2 x \sin \theta_{L_2}$$

この式から非減衰固有振動周期 $T_0$ を求めると、次式のとおりである。

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{A_2}{A_1} L_1 + \bar{L}_2}{g \sin \theta_{L_2}}}$$

この式の比較検証対象として、垂直部の途中から傾斜部が始まる形状 A（図 5）と水平部の途中から断面積のことなる傾斜部が始まる形状 B（図 6）の二つの形状の模型の自由振動実験を用いた。

形状 A の水深の変化に対する共振周期の変化を図 7 に、形状 B の断面積比（傾斜部/水平部）

による共振周期の変化を表 1 に示す。それぞれ理論式により共振周期の変化がよく捉えられていることが確認できる。

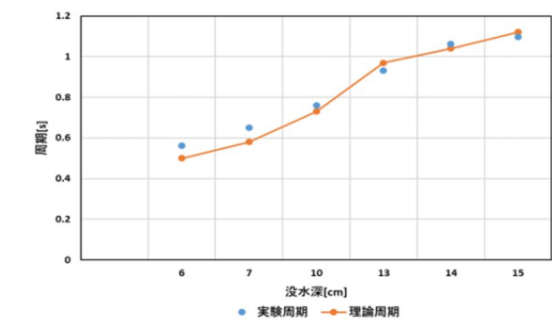


表 1 形状 B の断面積変化率（絞り比）と固有振動周期の関係

| 絞り比[%] | 理論固有周期[s] | 実験固有周期[s] |
|--------|-----------|-----------|
| 25     | 1.55      | 1.49      |
| 50     | 1.79      | 1.78      |
| 75     | 2.01      | 2.03      |

図 7 形状 A の固有振動周期と水柱の水位の関係

以上により、本研究では途中で水柱の角度が変化する「共振点追従型振動水柱波力発電」の動力学モデルを構築し、その共振点の変化特性を実験により評価し、動力学モデルを用いて共振周期の変化を定量的に予測できる手法を確立することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

|  |                      |
|--|----------------------|
| 1. 著者名<br>Iino Mitsumasa, Endo Hisashi   | 4. 巻<br>13           |
| 2. 論文標題<br>Numerical Modelling of Double Slit Caisson Breakwater Integrated Oscillating Water Column Wave Energy Converter with Modal Superposition Method | 5. 発行年<br>2023年      |
| 3. 雑誌名<br>Open Journal of Fluid Dynamics   | 6. 最初と最後の頁<br>92～103 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.4236/ojfd.2023.132007  | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）  | 国際共著<br>-            |

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>何 雪峰, 飯野 光政                           |
| 2. 発表標題<br>二重スリット防波堤を利用した振動水柱波力発電装置の一次変換性能に関する実験 |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会 2021年度年次大会                     |
| 4. 発表年<br>2021年                                  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>遠藤 壽, 飯野 光政                             |
| 2. 発表標題<br>二重スリット防波堤に設置された振動水柱型波力発電の一次変換性能に関する水槽実験 |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会関東学生会第61回学生員卒業研究発表講演会             |
| 4. 発表年<br>2022年                                    |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>共振点追従型振動水柱波力発電の基本原理に関する実験的研究 |
| 2. 発表標題<br>何 雪峰, 飯野 光政                  |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会 関東学生会第60回学生員卒業研究発表講演会 |
| 4. 発表年<br>2021年                         |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|  | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|