

令和元年6月4日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06909

研究課題名(和文) 浮体型振り子式波力発電装置の発電効率改善に関する研究

研究課題名(英文) Research on Improvement of Generating Efficiency in a Floating Pendulum Wave Energy Converter

研究代表者

村上 天元 (MURAKAMI, Tengen)

佐賀大学・海洋エネルギー研究センター・准教授

研究者番号：90611278

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：浮体型振り子式波力発電装置に搭載するPower take-offシステムとして、ラジアルピストンポンプ、油圧ブリッジ回路、アキシヤルピストンポンプおよび発電機で構成される油圧式動力取出し装置を試作し、波を模擬した電圧信号によって振り子軸を強制回転させた陸上実験により基本性能を把握した。また、渦法を用いた数値シミュレーションを実施し、既往のポテンシャル理論と境界要素法をベースとした数値解析コードの精度向上を試みた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、固定式、浮体式にかかわらず可動物体型波力発電装置において、安全で、高効率なPower take-offシステムが提案されている。本研究では、ピストン・シリンダーを複数有する油圧装置を採用し、大波浪時でも高いエネルギー変換効率と安定運転を可能とするシステムとその制御法の開発を目的としており、本油圧式Power take-offシステムは、様々な可動物体型の標準的な二次変換装置となり得るものであり、海洋再生可能エネルギーの導入促進に寄与する。

研究成果の概要(英文)：As a power take-off system in a floating pendulum wave energy converter, a hydraulic system composed of a radial piston pump, hydraulic bridge circuit, axial piston pump and generator was prepared. The simulated test that the pendulum shaft rotates due to the input voltage signal was carried out. As a result, the fundamental performance of this power take-off system was clarified. Besides, the numerical simulation using the vortex method was conducted to improve the analysis precision of a previous simulation code based on potential theory and boundary element method.

研究分野：工学

キーワード：波力発電 振り子式 油圧 Power take-offシステム 渦法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

化石燃料の枯渇や地球温暖化が危惧され、再生エネルギーとしての自然エネルギーが注目されている今日、自然エネルギーの一つである波浪エネルギーを利用して発電する波力発電システムの開発が世界各所で進められ、欧州を中心に一大ブームになっている。英国のオークニー諸島での波力発電実証海域(EMEC)の開発、IEC(International Electrotechnical Commission)での波力発電装置の発電性能評価法や設計法の標準化等、装置の実用化を目指した動きは益々活発化している。スペイン Mutriku 港の海岸設置型の振動水柱型装置等、一部、実用化された装置も現れているものの、現在の波力発電装置の開発段階は商用化前夜と位置付けられている。

波力発電装置は、可動物体型、振動水柱型、越波型に大別できるが、この内、波浪中の可動物体の運動エネルギーを油圧エネルギーに変換した後、油圧モータを回転させて発電する等の可動物体型は、エネルギーの変換過程が少なく、高効率で大型化も可能な装置として有望視され、現在、様々なコンセプトに基づく装置が提案され、開発が行われている。

申請者らは、渡部によって提案された浮体型の振り子式波力発電装置(図1)の実用化を目指した研究を実施してきた。この装置は、近藤らによって、高効率装置として提案された“沿岸固定式の振り子式波力発電装置”の課題であった建設場所の制約があること、装置建設費の約70%はケーソンコストであること、の解決を目指して提案された浮体型装置である。近藤らは、二次変換装置として、ロータリーベーンポンプを用いた油圧システムを提案したが、“油の装置外部への漏れと海水の装置内部への侵入を防ぐシール対策”が解決されず、沿岸固定式の振り子式装置は未だ実用化されていない。

申請者らは、この浮体型の振り子式波力発電装置の基本的な性能を把握するために、小型模型(図2)を用いた水槽実験を行い、Power take-off システムのダンピング特性をサーボモータで模擬し、ダンピング特性を変化させた装置の波浪中動揺実験を行い、この装置の一次変換効率(波パワーから振り子運動への変換効率)の最大値が98%と非常に高いことを確認した。また、油圧システムの小規模な模型化は難しいため、プーリとベルトによる増速機構と発電機で構成されるダイレクトドライブ型の二次変換装置を製作し、水槽実験により、装置の発電特性を調べた。さらに、申請者らは、この装置の一次変換性能評価のために、流体解析に、完全流体の渦なし理論に基づく境界要素法を用いる手法で一次変換効率に関する計算を行い、実験結果と比較したが、その一致度は十分とはいえず、Power take-off システムでのエネルギー吸収の厳密な評価が必要な波力発電装置の計算では、流体は粘性流体として考え、浮体端部から発生する渦による流体ダンピングも正確に評価する必要があることがわかった。

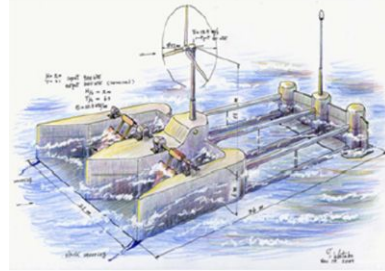


図1 浮体型振り子式波力発電装置

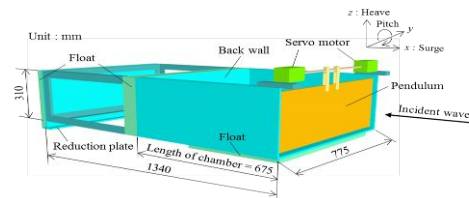


図2 小型模型

2. 研究の目的

近年、韓国でも申請者と同じ形式の浮体型の振り子式波力発電装置の模型に関する一次変換性能評価実験[Parkら(2014)]等が行われているが、Power take-off システムを含めた発電実験は未だ報告されていない。このような背景から、本研究では、優れた可能性を秘めている浮体型振り子式波力発電装置の実用化を目指して、高効率・高信頼性の油圧システムに基づく二次変換装置の開発と、流体の粘性影響を考慮できる流体解析法を用いて、浮体形状、係留系、発電性能を含めた装置全体の最適設計が可能な数値シミュレーション手法の開発を目的としている。

本研究で開発する二次変換装置は、ラジアル式ピストンポンプ、アキシアル式ピストンポンプ、アキュムレータ、油圧回路、発電機で構成される。ラジアル式ピストンポンプは、高圧型で大波浪時にも安全で、低速性能が良く、シールは長寿命という利点を持つため、本システムは、様々な可動物体型波力発電装置の標準的な二次変換装置となり得るものである。本研究では、図3に示す二次変換装置を忠実に再現した模型を制作し、波を模擬した入力信号による陸上実験を行い、提案したシステムの発電性能を検証する。

数値解析においては、渦法を用い、不規則波中での浮

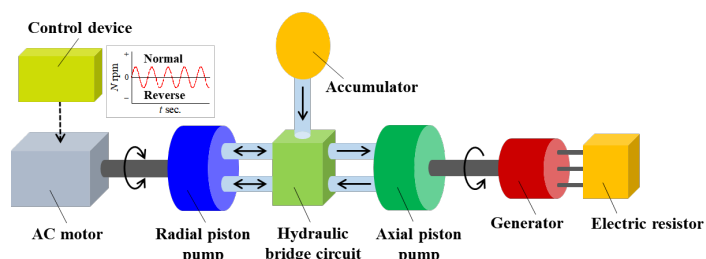


図3 油圧システム

体・振り子・油圧システム特性を考慮した装置の挙動、発電性能を評価できる数値シミュレーションソフトを開発する。申請者は、既に、波浪中の単一浮体の波浪中挙動を、渦法を用いて計算する2次元計算法を開発している(Okubo, Nagata, Imai(2014))。この方法は、自由表面条件を含む、流れ関数と渦度で表した粘性流体中にある浮体の波浪中動揺問題を、渦法を用いて解くもので、渦度の拡散計算に Core-Spreading 法を用い、浮体に働く圧力計算に粘性流体を対象にした積分方程式を用いる。この手法を、浮体と振り子の2体問題である“浮体型振り子式波力発電装置”に適用する。

3. 研究の方法

申請者らのグループはこれまで、浮体型振り子式波力発電装置について、二次元水槽を用いた模型実験、および完全流体の渦無し理論に基づいた境界要素法を用いた数値解析を実施した。模型実験では、実機 Power take-off システムの、任意の負荷特性を模擬できるサーボモータを搭載した模型を製作し、図4に示すように、最適負荷の場合、一次変換効率の最大値98%が得られることを明らかにした(図4の η_1 は一次変換効率、 C_p は振り子軸の減衰係数、 λ は波長、 L は水室長さを表す)。

また、風力発電用小型発電機とプーリとベルトを用いたダイレクトドライブ型の二次変換装置を搭載した浮体型振り子式波力発電装置模型を用いて、発電効率が最大で26%の結果を得ている。この値は実用化に対しては十分とは言えず、さらなる高効率化が必要とされる。振り子式波力発電装置は、振り子軸の回転速度が数rpmに対して、発電機軸の回転速度は数百rpmと増速比を極めて大きくしなければならず、また、振り子板の揺動を発電機軸の一方向回転に変換するシステムを必要とし、このことが二次変換効率の向上を困難なものにしている。小型の浮体モデルに搭載する二次変換装置としては、ギア方式が簡便で適当と思われるが、高い耐久性が求められる実機の二次変換装置には適さない。

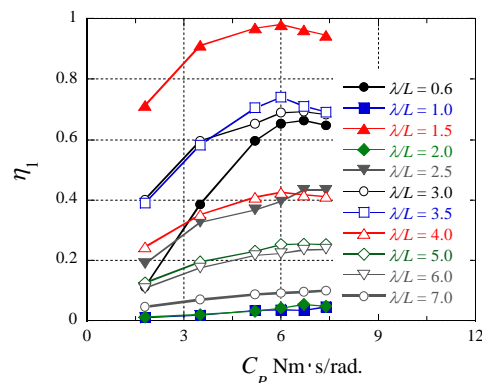


図4 一次変換効率

現在、高効率で堅牢な二次変換装置として、油圧システムが最も有効であると考えられるが、渡部(2009)が提案しているロータリーベーンポンプは油の漏れが多く、これが効率低下の要因となるので、油の漏れを極力抑えて、振り子軸の高いトルクを効率的に発電機に伝達可能なピストン式油圧ポンプを組み込んだ、波力発電装置に適した新しい油圧システムを独自に開発する必要がある。

二次変換装置に組み込むピストン式油圧ポンプとしては、図5に示すラジアル型とアキシャル型があり、波のエネルギーを一旦斜板あるいはカムの回転エネルギーに変換して、複数のピストンを駆動し、油圧エネルギーに変換するので、欧州の可動物体型波力発電装置 Pelamis のようにピストン・シリンダのヒンジ部分が壊れることはない。

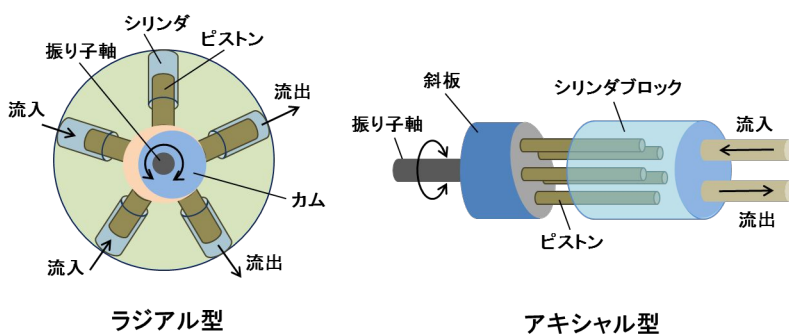


図5 ピストン式油圧ポンプ

数値解析においては、通常、浮体構造物の波浪中挙動解析に用いられる“流体解析に境界要素法を用いる解析コード”を開発し、模型実験

結果と比較することにより、解析コードの妥当性を確認している。しかしながら、開発した解析コードでは、流体解析部分は完全流体の渦無し理論に基づいているため、浮体壁と振り子板で囲まれた水室内の流体粘性ダンピングを水面条件にレーリーの仮想摩擦を導入することにより、近似的に考慮している。このため、浮体壁等から発生する渦の拡散によるエネルギーロスの正確な評価が必要となる波力発電装置の設計ツールとしては、完全とは言えない。そこで本研究では、申請者らが新規に提案して、有効性を確かめている“渦法による非線形波浪中の浮体運動計算法”を本問題に適用して、まず、浮体と振り子の運動の時系列と一次変換性能を評価できる2次元数値シミュレーション手法を開発する。粘性流体を対象とした、この計算法は、浮体表面からの渦の発生と拡散を正確に考慮できるため、水室内の流体ダンピングを正確に評価できる。

4. 研究成果

図6は本研究で試作した油圧式 Power take-off システムを示す。このシステムは、主に AC サ

ーボモータ、ラジアルピストンポンプ、油圧ブリッジ回路、アキシャルピストンポンプ、発電機および電気抵抗器で構成される。まず、波を模擬した電圧信号によって AC サーボモータが振り子軸を強制回転させて、振り子軸の回転により高圧油がラジアルピストンポンプ

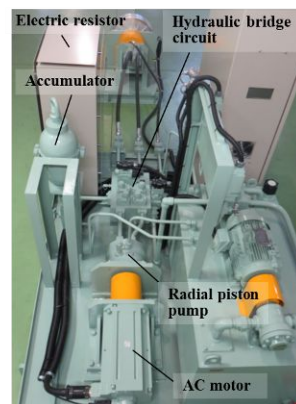
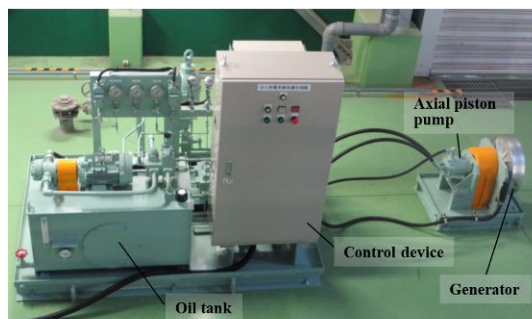


図 6 油圧式 Power take-off システム

から油圧ブリッジ回路を経て、アキシャルピストンポンプへと送られる。なお、ラジアルピストンポンプと油圧ブリッジ回路との間の油の流れは振り子軸の正転・逆転に伴って往復流となるが、この往復流は油圧ブリッジ回路で一方向流れとなり、油圧ブリッジ回路から送り出された油がアキシャルピストンポンプおよび発電機を一方向回転させる。本実験の計測項目は、振り子軸トルク、振り子軸回転速度、油圧ブリッジ回路からアキシャルピストンポンプへの油の供給圧力、アキシャルピストンポンプから油圧ブリッジ回路への油の戻り圧力、発電機出力電圧および発電機出力電流である。モータへの回転速度指令には規則波を想定した正弦波の電圧信号を用い、この信号を 1V, 2V, 3V, 4V, 5V に変更することにより、振り子軸の回転速度振幅を 200rpm, 400rpm, 600rpm, 800rpm, 1000rpm の 5 通りに変更して実験を行った。その結果を図 7 に示す。図 7 は波周期 10sec. を想定した場合の本システムのエネルギー変換効率であり、図に示すように最大 49% の値を得た。また、電圧信号の周期を 6sec., 8sec., 10sec., 12sec., 14sec. に変更して、本油圧システムのエネルギー変換効率に及ぼす波周期の影響を検討した(図 8)。

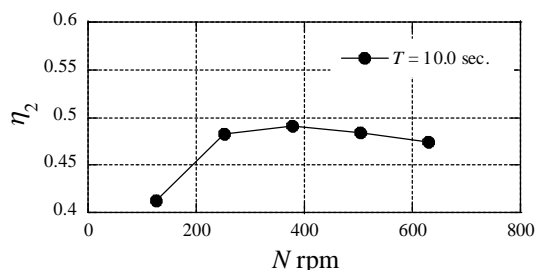


図 7 効率の回転速度振幅による変化

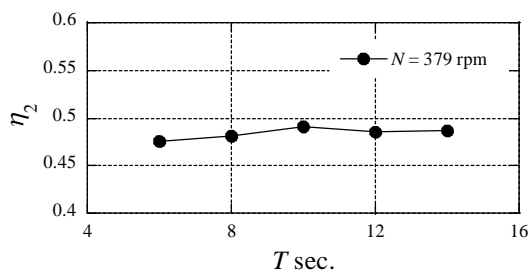
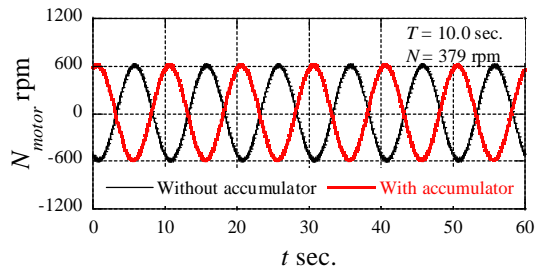


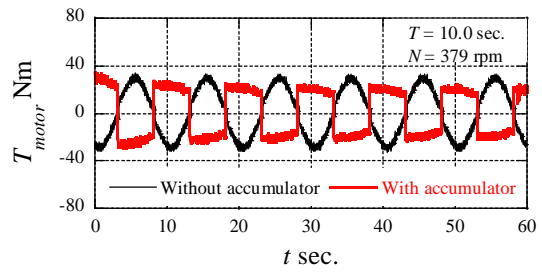
図 8 効率の周期による変化

さらに、アキュムレータがある場合とない場合についての時系列データを得た(図 9)。アキュムレータがある場合、運転開始直後は、サーボモータ側からの油圧とアキュムレータからの油圧で発電するが、時間が経過し、アキュムレータの油圧エネルギーが低下すると、サーボモータ側の油圧エネルギーは、アキュムレータと発電機の両方に供給されることになる。

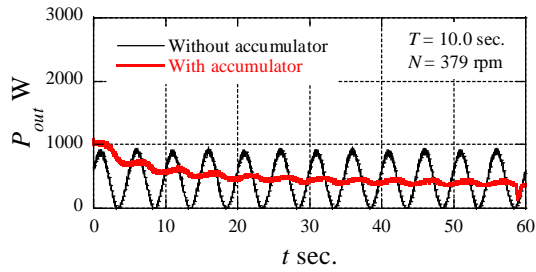
本研究では、以下の浮体型振り子式装置に関する数値シミュレーションも実施した。本研究で対象とする波力発電装置のような角部を有する物体に対して、角部からは、角部の局所流速を用いて流体中に渦を放出するモデルを適用し、物体の滑らかな表面からの渦の生成には、近年提案されている渦度の導入モデルを用いる方法を提案する。流体領域の計算には複素変数境界要素法を用い、その解法に、各節点における速度ポテンシャルおよび流れ関数に関する方程式を連立して解く双量倒置法を適用する。速度ポテンシャルおよび流れ関数の両方の節点式を用いて解くため、片方の節点式を用いる従来の方法より計算精度が向上する。さらに、物体への作用圧力に関する計算精度を向上させるため、粘性流体の基礎式から得られた総エネルギーに関する境界積分方程式を用いる。図 10 は計算境界を表す。2 次元水槽内に浮体型振り子式波力発電装置を設置し、片方の境界から規則波を入射させる。波上側をワイヤで係留し、波下側は緩係留している。また、入射波側の境界に近づく反射波、波下側の境界に近づく透過波を消波するため、境界付近にダンピングレーヤを設けた。渦度導入モデルを図 11 に示す。発電装置の直線部には Vorticity layer モデルを使用し、角部には Vorticity shedding モデルを使用した。図 12 は浮体運動についての計算結果と実験結果の比較を表す。横軸は波長 λ と振り子水室長さ L の比である。 $\lambda/L = 2.0$ より短い波長域では、Surge, Heave, Pitch のいずれも計算結果と実験結果は良好に一致しているが、 $\lambda/L = 2.0$ より長い波長域においては、実験結果と差が生じている。これについては、係留による運動への影響が十分に評価できていないものと考えられる。また、図 13 は一次変換効率の比較を示す。最大の一次変換効率の値は、実験結果が約 98% であるのに対して、計算結果は約 90% であり、渦の影響が過大に評価されているものと考えられる。



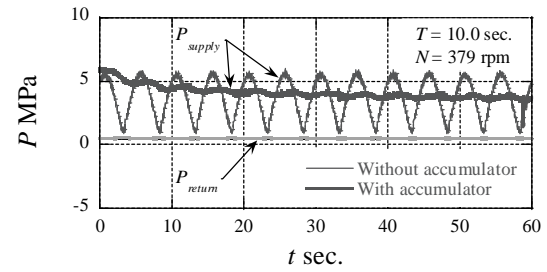
(a) サーボモータの回転速度



(b) サーボモータのトルク



(c) 発電機出力



(d) 油の圧力

図9 アキュムレータがある場合とない場合の運転条件の比較

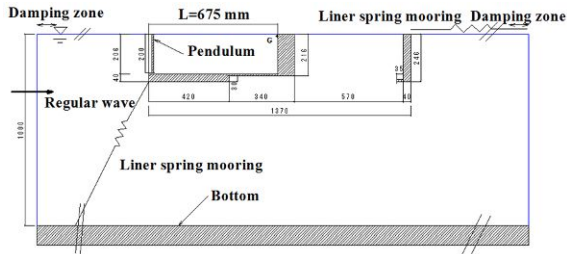


図10 計算領域

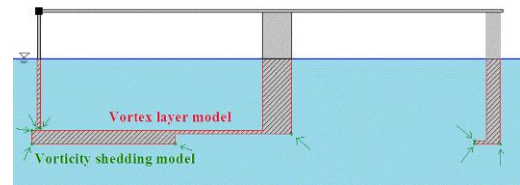


図11 渦度導入モデル

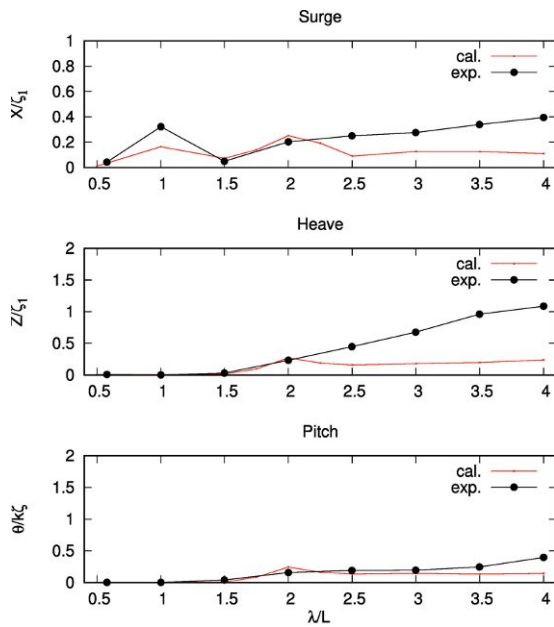


図12 浮体の運動

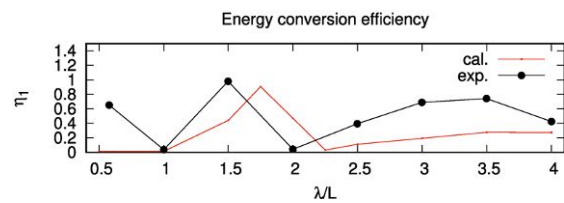


図13 一次変換効率

5 . 主な発表論文等

〔学会発表〕(計2件)

Yasutaka Imai, Control of Hydraulic Power-Take-Off of Wave Energy Converter, The 8th East Asian Workshop for Marine Environment and Energy, 2017

今井康貴, 波力発電装置の油圧式動力取出しシステムに関する研究, 第26回海洋工学シンポジウム, 2017

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：永田 修一

ローマ字氏名：(NAGATA, Shuichi)

所属研究機関名：佐賀大学

部局名：海洋エネルギー研究センター

職名：教授

研究者番号(8桁)：30404205

研究分担者氏名：今井 康貴

ローマ字氏名：(IMAI, Yasutaka)

所属研究機関名：佐賀大学

部局名：海洋エネルギー研究センター

職名：准教授

研究者番号(8桁)：90284231