

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：17301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870531

研究課題名(和文)パラメトリック振子による波動発電方式のエネルギー変換効率の解明

研究課題名(英文)Energy conversion efficiency of a wave-powered pendulum generator

研究代表者

横井 裕一(YOKOI, Yuichi)

長崎大学・工学研究科・助教

研究者番号：80610469

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：パラメトリック振子の非線形特性を応用した振子型波力発電方式の確立を目指し、その理論的なエネルギー変換効率を解明するとともに、造波水路実験において初めて発電を確認することに成功した。エネルギー変換効率の導出により、効率が最大となるような波と振子の回転運動の関係を突き止めることができた。また造波水路実験用の実験機の設計、製作を通して、振子型波力発電機の振子の回転軸の設計方針を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：To establish wave-powered pendulum generators, which use nonlinear characteristics of a parametric pendulum, the energy conversion efficiency was theoretically clarified and the power generation was experimentally confirmed in a wave flume. Rotational motion of the pendulum generator was shown to maximize the energy conversion efficiency for a wave condition. A design guideline of the wave-powered pendulum generators was shown by the design and construction of a prototype and the experiment.

研究分野：非線形動力学

キーワード：パラメトリック振子 波力発電 回転運動 エネルギー変換

1. 研究開始当初の背景

地球規模でエネルギー問題が深刻化する中、国内にほとんどエネルギー資源を持たず、その供給の大部分を国外からの輸入に依存する日本にとって、高度な技術力を活かしたエネルギー分野の研究開発が最重要課題である。一方、エネルギー問題の根本的な解決には、半永久的に利用可能なエネルギー源の創出が求められる。このような課題に対し、近年、欧州において海洋エネルギーを利用しようとする動きが加速している。この観点に立つと、海洋国家である日本は海洋エネルギーを最大限に利用できるエネルギー資源大国と言える。日本の沿岸における波力エネルギーの総計は約 3,600 万 kW (参考：原子力発電所 1 基の発電量は約 100 万 kW) にも及び、沖合を利用できればこの数値はさらに大きくなる。本研究で対象とする海洋エネルギーの 1 つである波動の運動エネルギーの収集は、種々のエネルギー開発研究の中で、エネルギーの安定供給の観点から、新しいエネルギー源の創出及び拡大に繋がる研究に位置付けることができる。言うまでもなく太陽光並びに風力による発電が注目され実用化されてきているものの、天候あるいは気候変動、今後表面化するかもしれない既存発電方式による健康被害、さらには災害への予防策となるエネルギー源の多様化は無視できない。

波力エネルギーの 1 つである波動の運動エネルギーの収集に関して、研究代表者はパラメトリック機械振子の回転運動を介して、波動の運動エネルギーを発電機による電気エネルギーに変換する方式を研究してきた。パラメトリック振子とはその回転軸が上下方向に励振された振り子のことであり、その非線形特性から、持続する振動や回転などの運動を発現する。パラメトリック振子が 1 次元方向の振動から回転を生み出す機構であることに着目し、図 1 に示すような海洋上の浮体に設置した機械振子をパラメトリック振子と見なすことにより、波動の上下振動で励振された振り子の回転運動をエネルギー収集に活用する方式を検討してきた。

研究開始当初、この振り子型波力発電方式に対して、研究代表者の他にも欧州のいくつかの研究グループが研究を行っているものの、そのエネルギー変換効率は解明されていなかった。理論的なエネルギー変換効率は、発電方式の評価指数となるため、今後の研究開発を推進する上で、その解明は必要不可欠であった。また、水波の振動に対する機械振子の回転運動は実験的に確認されていたもの

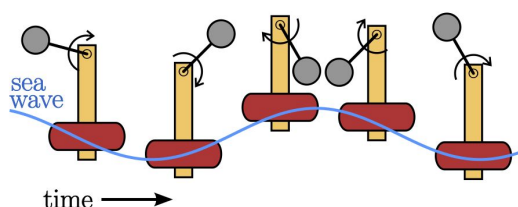


図 1：振り子型波力発電の概念図

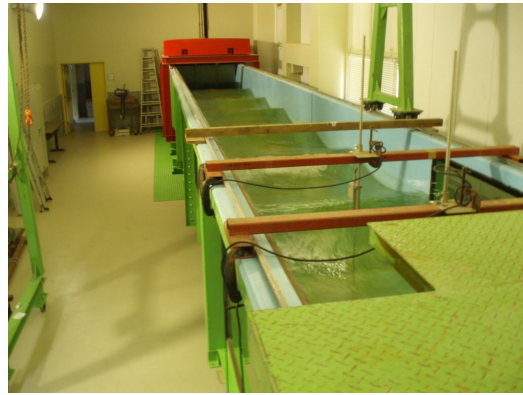


図 2：多目的二次元水槽

の、発電は確認されていなかった。

2. 研究の目的

本申請研究の目的は、本研究で提案している振り子型波力発電方式のエネルギー変換効率を理論的に解明することと、水波に対する発電運動を実験的に確認することである。

3. 研究の方法

(1) 水波に対する発電運動の実証

研究代表者が所属する長崎大学にある造波水路(図 2：多目的二次元水槽)に設置可能な浮体式振り子型波力発電実験機を設計、製作して発電運動を計測した。装置の設計及び製作では、参考にできる研究成果はほとんどないため、機構を理想化したプロトタイプを用いた予備実験を行い、その問題点や改善点を見出し、実験機の設計に反映させることとした。

(2) エネルギー変換効率の理論的検討

波のエネルギー伝達率などは理論的に明らかにされているが、波と浮体の相互作用におけるエネルギー変換に関する理論的検討は残念ながら行われていない。本発電方式と同様に、流体と機械の相互作用におけるエネルギー変換を利用する風力発電におけるエネルギー変換効率の理論と、「浮体工学」における波の運動とエネルギーに関する理論を参考にして、本発電方式のエネルギー変換効率を導出した。

4. 研究成果

研究期間は 3 年間であり、平成 25 年度では主に、造波水路試験のための実験機の設計を行った。設計に際し、実験機のプロトタイプを準備して予備実験を行うことにより、形状の問題点を見出し、設計に反映させることができた。続いて平成 26 年度は、設計を基に実験装置を製作し、造波水路での発電運動の実証実験を行い、発電を確認することができた。最終年となる平成 27 年度では主に、

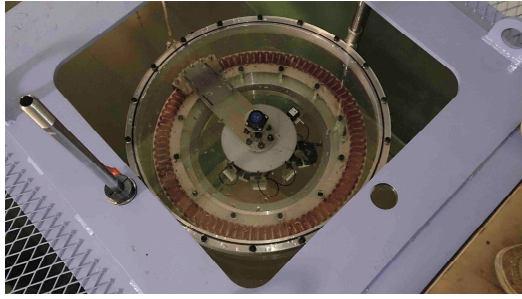


図 3：振子型波力発電実験機

理論的なエネルギー変換効率の導出に成功した。

(1) 水波に対する発電運動の実証

プロトタイプ実験機による予備実験により、振子が鉛直面内で回転するような機構の場合、波に対して姿勢を維持しつつ回転させることが非常に困難であることが分かった。浮体を大きくすると姿勢維持は容易であるが、回転に必要な波を適切に受けることができなくなる。そこで、回転面を傾けることで姿勢を維持しつつ回転できるように図 3 に示す実験機を製作した。回転面の角度に対する回転運動の特性を実験した結果、水平面にしてしまうとパラメトリック振子としての特性を失い、回転を維持できなくなることを確認している。そのため、回転面の角度が発電運動において重要なパラメータとなりうることを突き止めた。

また、発電運動を確認したものの、発電電圧は非常に小さいものであり、安定した発電には至っていない。これは実験機を発電運動の確認に特化して製作したことが原因である。単相発電機としたため、回転を始動あるいは維持するための制御を行うことができない仕様となっている。これは今後の改善点である。

(2) エネルギー変換効率の理論的検討

提案する振子型波力発電方式のエネルギー変換効率を理論的に解明した。その導出過程の概要を以下に述べる。

振子型波力発電方式では、まず波エネルギーを浮体の運動エネルギーに変換し、振子の回転運動によって電気エネルギーとして取り出す。他の発電方式と同様に、負荷側(電力変換)制御することによって、回転運動を維持しながら出力電力を最大にすることができると考えられる。ここで、機械振子(パラメトリック振子)におけるエネルギー変換は、発生しうる損失が摩擦や空気抵抗などによるものだけであるから、高効率である。さらに回転型発電機の効率は永久磁石発電機を採用すれば 90%程度が見込まれる。ゆえに変換効率を左右するのは、波エネルギーから浮体の運動エネルギーへの変換係数となる。

理論的な変換係数を導出するために、微小振幅波理論を採用した。以下に用いた仮定を

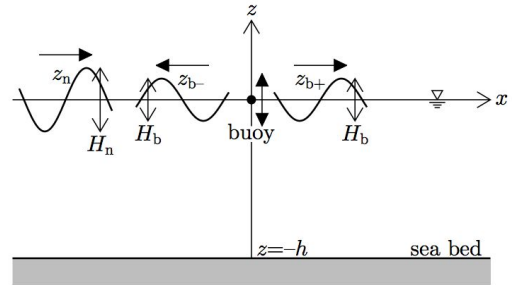


図 4：波パラメータと境界条件

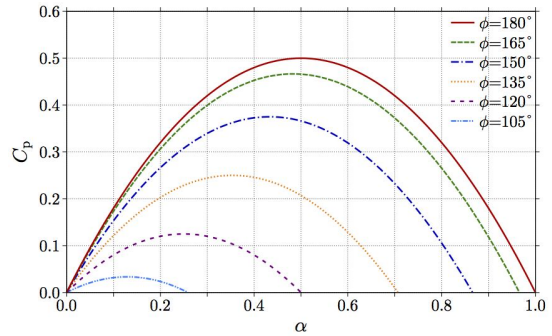


図 5：変換係数

まとめる。

- 水は完全流体である。
- 自由表面での表面張力と地球の自転によるコリオリの力の効果は無視する。
- 水面での圧力は一様かつ一定である。
- 水底は水平な固定床とし、不透過である。
- 波高は波長に比べて非常に小さい。
- 波は波形を変えずに伝播する。
- 波は静止状態からなんらかの原因で発生するものとする。
- 波峰線は十分長く、現象は 2 次元である。
- 浮体の運動は波と同周期で鉛直方向のみの 1 次元振動とし、その運動により浮体位置で対称な進行波が発生する。

また波パラメータと境界条件を図 4 に示す。一般的に一方向に進行する波によるエネルギー伝達率は、その波高 H 、群速度を C_g 、水の密度 ρ 、重力加速度を g とすると、

$$W = \frac{1}{8} \rho g H^2 C_g \quad (1)$$

で与えられ、得られるパワーは、

$$P = W \left\{ -2 \frac{H_b}{H_n} \cos \phi - 2 \left(\frac{H_b}{H_n} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

で与えられる。ただし、 ϕ は波の位相差である。 $\alpha = H_b/H_n$ とすると、求める変換係数は、

$$C_p = -2\alpha \cos \phi - 2\alpha^2 \quad (3)$$

と書ける。振幅比 α と位相 ϕ に対する変換係数 C_p を図 5 に示す。これより変換係数の最大値は 0.5 であることが確かめられる。

風力発電では、同様の理論的検討により、そのエネルギー変換効率は 75% であることが知られているが、実際の発電効率はその半

分の40%程度である。この結果を鑑みると、振子型波力発電方式のエネルギー変換効率は20%~30%程度であることが予測される。

これらの結果により、本申請研究が目指す振子型波力発電方式の実証と理論的なエネルギー変換効率の解明を達成することができた。これにより、本発電方式の研究開発の拡大発展が期待できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

横井 裕二, 樋口 剛, 引原 隆士, パラメトリック振子によるエネルギー変換の振動発電応用, 日本AEM学会誌, Vol. 24, No. 1, pp. 14-21, 2016 [査読無].

Y. Yokoi, T. Higuchi, Y. Miyamoto, General formulation of winding factor for fractional-slot concentrated winding design, IET Electric Power Applications, Vol. 10, No. 4, pp. 231-239, 2016 [査読有].

DOI: 10.1049/iet-epa.2015.0092

Y. Yokoi, T. Higuchi, Stator design of alternate slot winding for reducing torque pulsation with magnet designs in surface-mounted permanent magnet motors, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 51, No. 6, 8202911, 2015 [査読有].

DOI: 10.1109/TMAG.2015.2394771

Y. Yokoi, T. Higuchi, Selective elimination of EMF harmonics with stepped skewing for ripple torque reduction in surface-mounted permanent magnet motors, IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 3, No. 6, pp. 463-469, 2014 [査読有].

DOI: 10.1541/ieejia.3.463

T. Higuchi, D. Yamaguchi, T. Abe, Y. Yokoi, Characteristics of a 4-phase segment type switched reluctance motor, Journal of ICEMS, Vol. 3, No. 3, pp. 235-240, 2014 [査読有].

URL: <http://www.jicems.org/LTKPSWeb/pub/pubregistrationview.aspx?ppseq=246&from=pubissue.aspx%3fpuseq%3d68>

T. Higuchi, Y. Yokoi, T. Abe, K. Sakimura, Design analysis of a novel synchronous generator for wind power generation, machines, Vol. 2014, No. 2, pp. 202-218, 2014 [査読有].

DOI: 10.3390/machines2030202

[学会発表](計8件)【本人登壇分のみ】

Y. Yokoi, T. Higuchi, A study on load characteristics of vibration energy

harvester using parametrically excited pendulum, The 37th International Telecommunications Energy Conference, 2015年10月21日, スイスホテル(大阪府・大阪市).

横井 裕二, 樋口 剛, セグメント構造スイッチトリラクタンスモータの集中巻構成に関する検討, 電気学会回転機研究会, 2014年10月30日, 大阪府立大学I-site なんば(大阪府・大阪市).

横井 裕二, 樋口 剛, 表面磁石同期電動機の磁石配置によるリップルトルクの低減に関する数値的検討, 第26回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2014年5月22日, アイーナ 岩手県民情報交流センター(岩手県・盛岡市).

Y. Yokoi, T. Higuchi, A new stepped skewing method for ripple torque reduction in surface-mounted permanent magnet synchronous motors, INTERMAG 2014 IEEE International Magnetics Conference, 2014年5月8日, ドレスデン(ドイツ).

Y. Yokoi, T. Higuchi, T. Hikiyama, An influence of second harmonic excitation on rotation in parametric pendulum, 2013 International Symposium on Non-linear Theory and its Applications, 2013年9月9日, サンタフェ(アメリカ).

T. Higuchi, Y. Yokoi, Novel synchronous generator for wind power generation, 2013 International Symposium on Non-linear Theory and its Applications, 2013年9月9日, サンタフェ(アメリカ).

Y. Yokoi, T. Higuchi, Rotation disturbed by second harmonic excitation in parametrically excited pendulum, Nonlinear Dynamics in Engineering: Modelling, Analysis and Applications, Aberdeen, 2013年8月22日, アバディーン(イギリス・スコットランド).

横井 裕二, 樋口 剛, 不等間隔スロット巻線を施した表面磁石同期電動機の脈動トルクに関する検討, 電気学会モータドライブ/回転機合同研究会, 2013年7月11日, 電気学会 会議室(東京都・千代田区).

[産業財産権]

出願状況(計1件)

名称: 同期電動機および同期発電機

発明者: 横井 裕二, 樋口 剛

権利者: 長崎大学

種類: 特許

番号: 特願 2016-049378

出願年月日: 2016年3月14日

国内外の別: 国内

[その他]

(受賞)

システム制御情報学会 2013 年度学会賞
論文賞, 2014 年 5 月: 横井 裕一, 引原
隆士, パラメトリック振子の周期回転へ
の始動制御, システム制御情報学会論文
誌, Vol. 24, No. 3, pp. 54-60, 2011.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

横井 裕一 (YOKOI, Yuichi)

長崎大学・工学研究科・助教

研究者番号 : 80610469