

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：17301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011～2012

課題番号：23860039

研究課題名（和文） パラメトリック振子による波動エネルギーのスキャベンジング
に関する力学的機構研究課題名（英文） Dynamic mechanism of parametric pendulum
for wave energy scavenging

研究代表者

横井 裕一（YOKOI YUICHI）

長崎大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：80610469

研究成果の概要（和文）：パラメトリック振子による波動エネルギーのスキャベンジング方式の確立を目指し、スキャベンジングの対象となる励振の条件を検討した。これまでの単一周波数励振から実際の波動に近い複数周波数励振あるいは波動データに基づいて構成した励振に変更し、変換運動の発現を実証するとともに、その励振パラメータへの依存性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Waveform to be scavenged was studied in the wave energy scavenging by parametric pendulum. We verified that the pendulum can rotate under a multifrequency excitation or an excitation based on the measured sea wave data. In addition, the dependence of rotation on the excitation was clarified numerically and experimentally.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：パラメトリック振子、エネルギー・スキャベンジング、波動、回転

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輸入に頼る日本にとって、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。

海洋エネルギーの1つである波動の運動エネルギーのスキャベンジングに関して、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いた。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等の運動を発現する。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装置であることに着目し、図1に示すような海洋上のフロート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、

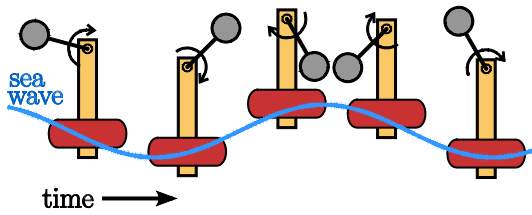


図 1. パラメトリック振子による波動エネルギーのスカベンジングの概念図

波動の微小振動で励振された振子の回転運動をエネルギー・スカベンジングに活用する方式を検討してきた。

研究開始当初、パラメトリック振子による波動エネルギーのスカベンジング応用に関する研究では、波動は理想的かつ単純な正弦波であると仮定されていた。この仮定は研究の立ち上げ段階においてその全容や妥当性を把握する際には必要であるが、実用化を目指す上で取り除くべきものであった。

2. 研究の目的

スカベンジングの対象になる波動が単純な正弦波よりも複雑な波形である場合を検討することにより、パラメトリック振子によるエネルギー・スカベンジング方式が実現可能な波動の条件を解明することを目指す。これにより、実際の海洋の状況における提案方式の妥当性の確認、並びに海洋の波動データから、提案方式に適した海域の特定に繋がる。

3. 研究の方法

(1) 複数周波数励振

スカベンジングの対象となる波動（励振）を、周波数が異なる 2 つの正弦波の重ね合わせで近似する。依然として実際の波形と乖離があるものの、波動の条件を解明するためには、波形が複雑になるほど解析と理解が困難になることが想像されるため、まずこの場合の励振を検討する。この波形は基本となる正弦波に、それと周波数が異なる正弦波を重畳することにより構成されるため、重畳する正弦波をどのように選定するかがポイントとなる。パラメトリック振子はほぼ周期的な励振に対して回転を維持できることから、提案手法において、励振は時間に関して周期性を有しているものに限られる。これを踏まえると、対象となる励振はその周期性からフーリエ級数展開が可能であり、基本調波と主要な高調波の重ね合わせで構成できる。また既存の波動データにおける主要な高調波成分は低次のものに限られる。そこで本研究では、対象となる励振として、基本となる正弦波に、第 2 次高調波、あるいは第 3 次高調波を重ね合わせた波形を用いる。

(2) 波動データに基づく励振と分岐現象

実際の海洋の波動データを取得し、それに基づいて波動の波形を再現する。波動データに関する情報は参考文献等からも収集可能であるが加工された周波数スペクトル分布等であるため、実際に海洋の波動を計測することで未加工のデータを用意する。実際の波動は時間経過に伴いその周波数成分が変化するため、ウェーブレット変換を用いた解析が有効である。しかし本研究では、対象となる励振を時間に関して周期的なものに限定しているため、波動データ中から適当な時間領域を抽出し、フーリエ変換することで、主要な周波数成分の情報を取得する。得られた主要な周波数成分を合成することで対象となる励振を構成する。またデータを取得した海域では、周波数成分の分布は類似していることが想定される。そこで、励振振幅や位相等のパラメータに関する分岐現象を詳細に検討することで、類似した周波数励振を取り扱う。

4. 研究成果

研究期間は 2 年間であり、平成 23 年度では主に、周波数が異なる 2 つの正弦波の重ね合わせにより生成した複数周波数励振に対して、パラメトリック振子に発現する周期的な回転運動を数値的に解明し、機械振子実験装置を構築して数値計算結果を実験的に検証した。続いて平成 24 年度は、取得した波動データに基づいて構成した励振に対して、持続する回転運動の発現を実験的に検証した。さらに励振パラメータに関する分岐現象を検討した。それらの詳細を以下に述べる。

(1) 実験装置の構築

使用した機械振子実験装置を図 2 に示す。本装置は、京都大学の引原隆士教授から貸与していただき使用した。本研究では、複数の正弦波を重ね合わせた励振を用いるため、加振機 (Shaker) に入力する信号を、加算回路を製作して生成している。入力信号に対して、加振機で発生する励振の振幅および位相は、周波数や振子の回転運動の影響等により変化するため、入力信号の調整が必要不可欠である。ここではフィードバック制御の導入が考えられるが、実際の状況にそぐわないため採用していない。

(2) 複数周波数励振に対する回転の検討

周波数が異なる 2 つの正弦波の重ね合わせにより生成した仮定の波動に対して、パラメトリック振子に発現する持続する回転運動を数値的に解明し、実験的に検証した。

パラメトリック振子の数理モデルは既に確立されており、その励振を単一の正弦波から、高調波成分が重畳したものに變更して数

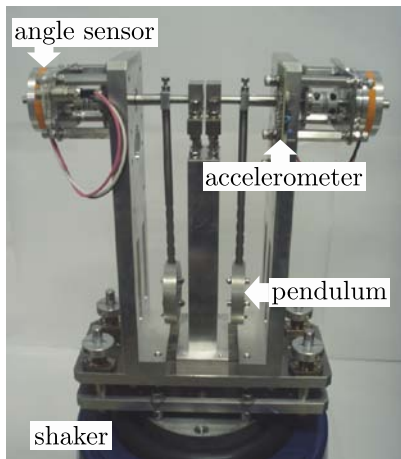


図 2. 機械振子実験装置

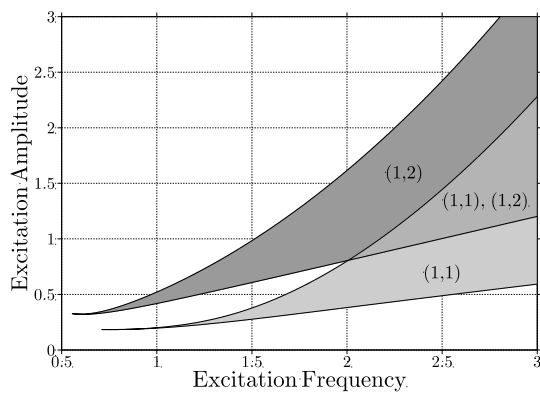
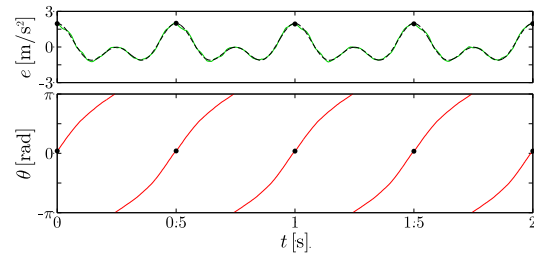


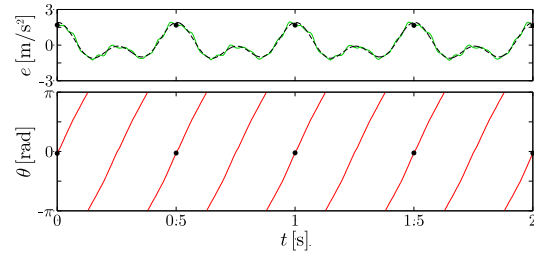
図 3. 回転運動が発現する励振パラメータ

値計算を行い、回転運動の存在を確認した。この回転運動は、単一正弦波の場合と同様、励振の 1 周期に対して一回転する運動である。一方で、単一正弦波の場合には存在が確認されていない、励振の 1 周期に対して二回転以上する回転運動の存在を数値的に明らかにした。第 2 次あるいは第 3 次高調波を含む場合に対して、それぞれ二回転、三回転する回転運動を確認している。これは励振に含まれる各周波数成分と振子との同期として理解される。前者の一回転の運動は、振子が基本調波に同期して回転し、後者の二回転あるいは三回転は、振子が高調波に同期して回転している状態である。数値計算結果の一例として図 3 に、第 2 次高調波を重畳した励振において、基本調波に同期した回転（領域 (1, 1)）と高調波に同期した回転（領域 (1, 2)）が発現する励振パラメータを示す。励振振幅が大きい場合、高調波に同期する回転が発現することが確認できる。

次に、上述の数値計算結果を実験的に検証した。回転運動の発現は振子の初期状態に強く依存する。特に高調波に同期する回転運動は初期状態の条件が厳しい。そのため、初期状態と励振パラメータの両方に対して、適切



(a) 基本調波に同期した回転運動



(b) 高調波に同期した回転運動

図 4. 実験装置で確認された回転運動

な値を探索することが必要となり、実験による確認は困難になる。そこで、数値計算で用いたパラメータを実験装置に対応させることで、励振パラメータを予測し探索範囲を限定した。実験結果の一例として図 4 に、第 2 次高調波を重畳した励振において確認された回転運動を示す。図中、上段は励振振幅、下段は振子の角変位を表している。これにより、複数次高調波励振における回転運動の発現が実証された。

高調波に同期する回転運動が発現することが明らかになったことにより、これまで無視されていた高調波成分に分散したエネルギーをスキューピングの対象とすることが可能となり、エネルギーの抽出量が增大することが期待される。この意味で、高調波に同期する回転運動の発見は意義深い。

(3) 波形データに基づく励振に対する回転と分岐現象の検討

取得した波動データに基づいて生成した励振に対して、持続する回転運動の発現を実験的に検証した。さらに励振パラメータに関する分岐現象を検討した。

まず実際の波動データの取得では、長崎大学水産学部の河端雄毅助教に協力いただいた。取得したデータを基に再構成した励振に対して回転運動が発現することを実験的に確認した。しかしある特定の励振パラメータに限定されるために、パラメータが多少異なる場合の力学を理解する必要が生じた。

そこで、励振パラメータに対する分岐現象を実験的に詳細に検討した。その結果を図 5 に示す。回転運動が発現する励振振幅の範囲は、高調波成分の位相に依存することを確認

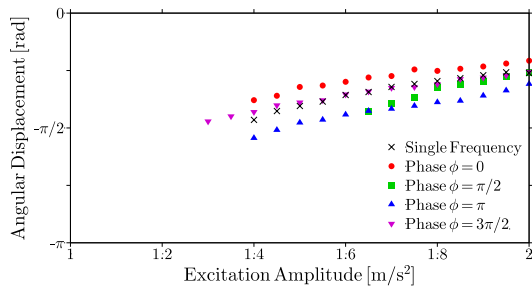


図 5. 励振振幅に関する回転運動の分岐現象

した。このことは、基本調波に同期した回転運動でも高調波成分のエネルギーを抽出できる可能性があることを示唆している。

以上のように、パラメトリック振子による波動エネルギーのスキャベンジング方式において、実際の波動に近い複数周波数励振をスキャベンジング可能であることを明らかにした。今後は、本研究で得られた回転運動が発現する励振パラメータの結果に基づき、より実環境に近い造波水路における水上実験を行う予定である。

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 1 件)

- ① Yuichi Yokoi and Yoshihiko Susuki, “Energy conversion and phase regulation in transient states of frequency entrainment described by van der Pol and phase-locked loop equations,” *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, Vol. E96-A, No. 2, pp. 591-599, February 2013 (査読有り)。

[学会発表] (計 9 件) 【研究代表者登壇分】
(国際会議)

- ① Yuichi Yokoi and Takashi Hikiyama, “Tolerance of delayed feedback control for maintaining periodic rotation,” *IUTAM Symposium on 50 Years of Chaos: Applied and Theoretical*, November 30, 2011, Kyoto, Japan.
- ② Yuichi Yokoi and Tsuyoshi Higuchi, “Pulsating torque reduction of surface-mounted permanent magnet synchronous motor with unequal slot angle,” *The 15th International Conference on Electrical Mechanics and Systems*, October 22, 2012, Sapporo, Japan.

- ③ Yuichi Yokoi and Tsuyoshi Higuchi, “Energy conversion of parametric pendulum under multifrequency excitation,” *International Conference on Renewable Energy Research and Applications*, November 13, 2012, Nagasaki, Japan.

(国内学会・研究会)

- ④ 横井裕一, 樋口剛, “複数周波数励振におけるパラメトリック振子の周期回転”, 平成 23 年電気学会産業応用部門大会, 2011 年 09 月 06 日, 沖縄.
- ⑤ 横井裕一, 樋口剛, “不等スロットピッチにおける巻線係数に関する一検討”, 電気学会回転機研究会, 2011 年 10 月 26 日, 長崎.
- ⑥ 横井裕一, 樋口剛, “複数周波数励振におけるパラメトリック振子の回転に関する一検討”, 電気学会回転機研究会, 2011 年 10 月 27 日, 長崎.
- ⑦ 横井裕一, 樋口剛, “不等間隔スロット配置による表面磁石同期電動機の脈動トルクの低減に関する一検討”, 平成 24 年電気学会産業応用部門大会, 2012 年 08 月 23 日, 千葉.
- ⑧ Yuichi Yokoi and Tsuyoshi Higuchi, “A study on periodic rotation of parametric pendulum with second harmonic vibration,” 電子情報通信学会非線形問題研究会, 2013 年 03 月 14 日, 千葉.
- ⑨ 横井裕一, 樋口剛, “第 2 次高調波重畳パラメトリック励振における回転振子の分岐現象に関する一検討”, 電子情報通信学会 2013 年総合大会, 2013 年 03 月 20 日, 岐阜.

[その他]

(受賞)

- ① 平成 23 年電気学会優秀論文発表賞, 2012 年 03 月 31 日: 横井裕一, “複数周波数励振におけるパラメトリック振子の回転に関する一検討”, 電気学会回転機研究会, 2011 年 10 月 27 日, 長崎.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横井 裕一 (YOKOI YUICHI)

長崎大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 80610469

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し