

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630399

研究課題名(和文) 波エネルギーで発電して走る揺れない船

研究課題名(英文) Motion-controlled ship with wave energy harvester

研究代表者

北澤 大輔 (Kitazawa, Daisuke)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：30345128

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)：波エネルギーを吸収して、乗り心地を向上させた船を開発した。船は、フロート、サスペンション機構、キャビンから構成され、最大電力点追跡法によってエネルギー吸収量を最大化し、スカイフック制御によってキャビンの動揺を抑制した。フロートの運動をストリップ法によって計算した後、得られた流体パラメータを用いて、最大電力点追跡法とスカイフック制御を含む制御プログラムを開発した。規則波を想定して、波エネルギー吸収や動揺制御のための抵抗値等のパラメータを計算した。これらのパラメータを用いて、水槽模型実験を実施したところ、エネルギー吸収量やキャビンの運動に関して、シミュレーション結果と概ね同様の結果が得られた。

研究成果の概要(英文)：A motion-controlled ship with absorbing wave energy was developed. The ship consists of floats, a cabin, and suspensions. Absorption of wave energy was maximized by maximum power point tracking method, and the motion of the cabin was controlled by a skyhook control. The motion of floats was calculated by a strip method. Using the calculated hydrodynamic parameters, a control program including the maximum power point tracking method and the skyhook control was developed. Parameters such as resistance values for wave energy absorption and motion control were determined assuming the regular waves. The results of water tank testing agreed well with those of simulation using the control program for wave energy absorption and the motion of the cabin.

研究分野：海洋流体力学

キーワード：波エネルギー 動揺制御 フロート キャビン スカイフック 最大電力点追跡法

### 1. 研究開始当初の背景

小型船は少し高い波浪下で運航が不能となるため、船体動揺の制御が長年の課題となっている。船体の動揺をフィン等で抑制する方法もあるが、動力を必要とする。一方、省エネルギーの必要性のもと、波エネルギーを利用して進む船も開発されたが、乗り心地は向上されていない。したがって、波エネルギーを吸収するとともに、乗り心地を向上する小型船の開発が求められている。

### 2. 研究の目的

本研究では、乗り心地の向上と波エネルギーの利用を両立させる小型船を開発する。小型船は主船体（キャビン）とそれを支えるフロートからなり、両者の間の相対運動を利用して発電機を駆動する。波エネルギーを電気エネルギーに変換することで、キャビンの動揺を制御し、得られた電気エネルギーを船の推進力に利用する。また、キャビンの運動データを用いて、モーターによるキャビンの動揺制御を行う。キャビン・フロートの動揺特性（振動系）と発電制御の関係を数値解析や水槽模型実験によって明らかにして、船の用途に応じてシステムの最適化を図る。

### 3. 研究の方法

#### (1) シミュレーションツールの開発

シミュレーションツールは、フロートへの流体力を計算するツール、フロートとキャビンの2体運動を計算するツール、波エネルギーを吸収したり、動揺を制御するための電気回路の計算ツールからなる。船の力学モデルについては、ストリップ法を用いた数値シミュレーションを実施し、主要な流体力係数 $w$ 求めた。また、フロートとキャビンの2体運動については、MATLABにおいて、運動方程式を解いた。さらに、電気回路については、LTSpiceを用いたシミュレーションを実施した。

まず、波エネルギーの吸収においては、フロートに入射する波エネルギーを抵抗制御によって吸収するのみでは、吸収量が小さい。そこで、入射波の周波数とフロートとキャビンの運動の周波数が近い値となるように、インピーダンスを調整した。実際には、太陽光発電等で使用されている最大電力点追跡法（MPPT: Maximum Power Point Tracking）を用いて、波エネルギー吸収量を最大化できるようにした。これを実現するための回路の例を図1に示す。

キャビンの動揺制御においては、スカイフック制御を採用した。キャビンには、前後、左右に計4個の加速度計が取り付けられる。加速度計の値を積分した速度値を用いて、速度が0となるようにモーターを制御し、キャビンの動揺を抑制する。すなわち、キャビンは空間に固定された状態となる。

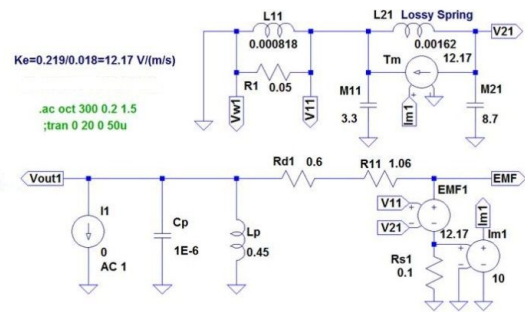


図1 最大電力点追跡法のための電気回路

#### (2) 水槽模型実験

本研究で対象とする実船は、長さ8m程度を想定しているが、水槽模型実験では、縮尺比1/5の1.6mの模型を製作して、実験を行った。

フロートとキャビンは、バネやサスペンション機構によってつながれている。バネは、前後の左右に1本ずつ、計4本が取り付けられている（図2）。バネの隣には、バネの長さを制御するためのラック&ピニオン機構、およびそれを駆動するためのモーター/発電機が設置されている。

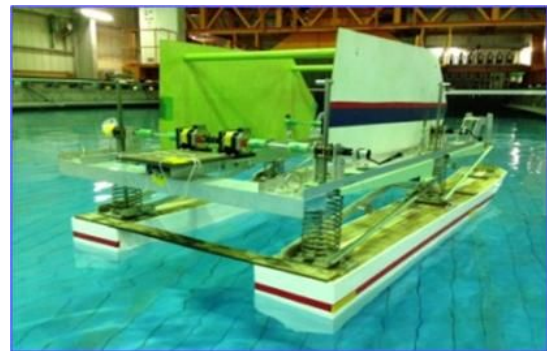


図2 実験で使用した小型船の模型

キャビンは、フロートに対して6つの運動の自由度を有している。波エネルギーの吸収に寄与するのは、上下揺れ、縦揺れ、横揺れであるため、これらの運動はスムーズに行われなければならない。一方、前後揺れ、左右揺れ、船首揺れについては、運動を規制しなければならないため、フロートとキャビンの間には3次元のワットリンク、ロールビーム付パンタグラフによって抑制した。

モーターと発電機の制御機構としては、直線運動を回転運動に変換するラック&ピニオン機構を用いた。入射波によってフロートが揺れ、バネを介してキャビンが揺れると、フロートとキャビンの間に相対運動が生まれるため、下端がフロートに固定されたラックはキャビンを通して上下する。この際に、ピニオンが回転し、発電機を回して発電する。一方、加速度センサーの値を見ながら動揺を

抑制したい場合は、モーターを回してピニオンを回転させ、ピニオンが固定されているキャビンと、ラックの下端が固定されているフロートとの距離を制御することができる。

フロートについては、流体力の解析を容易にするために、単純な線形の排水量型のフロートとした。

制御系については、シミュレーションツールの開発において設計した電気回路を実装した。(1)で述べたように、インピーダンス整合をとって入射波とフロート、キャビンの振動系とを共振させることにより、最大の波エネルギーを吸収できるようにした。ただし、内部での銅損等が存在するため、最大電力点追跡法によって、最大の電力を得るためのパラメータ値をあらかじめ設定した。また、4箇所に設置されているモーター・発電機の隣に、加速度計を設置した。加速度計から得られる信号を積分し、速度を産出した。速度が0となるように回路の抵抗や静電容量を調整し、モータを制御した。この機構によって、キャビンが空間に固定(スカイフック)されるようになる。

#### 4. 研究成果

##### (1) シミュレーション

排水量型のフロートの形状を入力して、ストリップ法を用いて流体力係数を計算した。これらを MATLAB による 2 体運動の計算や、LTSpice による電気回路の計算に用いた。小型船模型の諸元や入力波の情報を用いて、制御系のシミュレーションを実施した。波エネルギー吸収を最大にする場合、スカイフックによる動揺制御を行う場合、両者を同時に行う場合、波エネルギー吸収やスカイフック制御を行わない場合のそれぞれの場合において、演算回路の比例、積分の各ゲインなどの値をシミュレーションによって求めた。

##### (2) 水槽模型実験

まず、陸上での加振実験を行った。フロートを台上で機械的に上下加振させ、キャビンの運動や波エネルギー吸収量などのデータを得た。模型では、モーター・発電機の回路の内部抵抗、ラック&ピニオンの機械摩擦などが発生し、シミュレーション結果と陸上加振実験の結果とはいくつかの違いが見られた。そこで、演算回路の比例、積分の各ゲインなどのパラメータ値の調整を行った。

次に、小型船模型を用いて、東京大学生産技術研究所附属海洋工学水槽(長さ 50m、幅 10m、深さ 5m)で実験を行った。フロートやキャビンの運動を許容しながら、小型船模型を曳引台車に固定し、静止している場合と前進速度  $1.5 \text{ m s}^{-1}$  で走行している場合において、様々な周期、波高の規則波を与えて、フロートとキャビンの相対変位や発電量などを計測した。

波エネルギー吸収の代表的な結果として、前進速度  $1.5 \text{ m s}^{-1}$  のときの波エネルギーの

吸収特性を示す(図3)。横軸は波周波数、縦軸は波エネルギーの吸収量をフロート幅に入る波エネルギーで割った値である。回路の抵抗をパラメータとして変化させているが、パラメータを適宜調整することによって、最大でフロート幅に入る波エネルギーの1.5倍程度の波エネルギーを吸収できる様子が見られた。

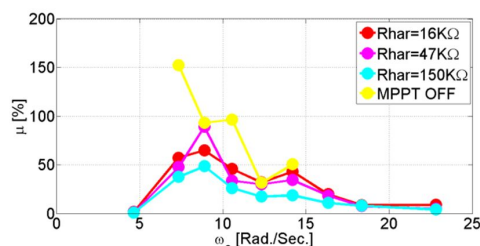


図3 波エネルギー吸収特性

一方、乗り心地に関する代表的な結果として、前進速度  $1.5 \text{ m s}^{-1}$  のときの上下揺れの無次元値の特性を示す(図4)。制御を行わない場合は上下揺れが大きくなっているが、抵抗値を変化させて制御を行うことによって、上下揺れが半分程度まで抑制されている様子が見られる。

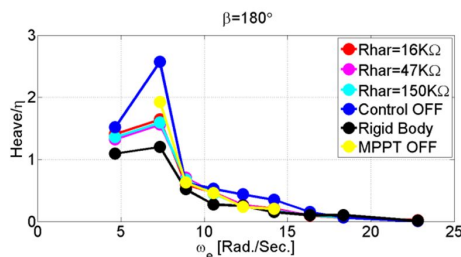


図4 上下揺れの特性

##### (3) 結言

本研究では、乗り心地の向上と波エネルギーの利用を両立させる小型船の開発を目指して、制御系を含んだシミュレーションツールの開発と水槽模型実験を行った。陸上での加振実験によって、制御系シミュレーションに含まれる設定パラメータの調整を行った後、水槽模型実験を行い、シミュレーションツールの検証を行った。回路の内部抵抗や機械摩擦があり、いくらかの差は認められたものの、シミュレーション結果と水槽模型実験結果は概ね対応していた。波エネルギーの吸収については、前進速度  $1.5 \text{ m s}^{-1}$  のとき、抵抗値パラメータを適宜調整することによって、最大でフロート幅に入る波エネルギーの1.5倍程度の波エネルギーを吸収できる様子が見られた。また、乗り心地の向上については、制御を行わない場合に比べて、上下揺れが半分程度まで抑制されている様子が見られた。

本研究は、乗り心地の向上と波エネルギーの利用を両立させる小型船の基本的なコン

セプトを提示したものである。今後は、小型船模型の大型化やそれに伴う機構部品の検討などが課題として挙げられる。将来的には、海洋再生可能エネルギー施設のメンテナンス船、養殖業の給餌船、プレジャーボートなどのための揺れにくい船、エネルギー削減が喫緊の課題となっている漁船等のための波エネルギー吸収船、および波エネルギー吸収と乗り心地向上の割合を変化させることができる多用途な船などに広く応用されることが期待される。

#### 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3件)

Jialin Han, Teruo Maeda, Takeshi Kinoshita, Daisuke Kitazawa, Research on a Motion-Controlled Ship by Harvesting Wave Energy -Based on a Semi-Active Control System-. Proceedings of the 6th East Asia Workshop for Marine Environment and Energy, 査読なし, J10 (CD-ROM), 2013, 23pp.

Jialin Han, Teruo Maeda, Takeshi Kinoshita, Daisuke Kitazawa, Towing test and analysis of a motion controlled small ship with wave energy converters -by means of an electrical generator-. Proceedings of the International Symposium on Marine and Offshore Renewable Energy, 査読なし, S7-4 (CD-ROM), 2013, 6pp.

Jialin Han, Teruo Maeda, Takeshi Kinoshita, Daisuke Kitazawa, Towing Test and Motion Analysis of a Motion-Controlled Ship - Based on an Application of Skyhook Theory. Proceedings of the 12th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, 査読あり, 2015, 10pp.

##### [学会発表](計7件)

Jialin Han, Research on oscillation control boat with ocean wave energy converter. 平成24年度日本船舶海洋工学会秋季講演会ポスター発表, 2013

Jialin Han, Research on a Motion-Controlled Ship by Harvesting Wave Energy -Based on a Semi-Active Control System-. The 6th East Asia Workshop for Marine Environment and Energy, 2013.

Jialin Han, Towing test and analysis of a motion controlled small ship with wave energy converters -by means of an electrical generator-. The

International Symposium on Marine and Offshore Renewable Energy, 2013, Jialin Han, Teruo Maeda, Takeshi Kinoshita, Daisuke Kitazawa (2014): Towing test and analysis of a motion controlled small ship with wave energy converters -by means of an electrical generator-. Proceedings of workshop on aquacultural technology, 174-183. Daisuke Kitazawa, Analysis of a motion-controlled ship for wave energy harvesting. - Based on an application of MPPT-, 平成27年度日本船舶海洋工学会春季講演会, 2015. Jialin Han, Towing Test and Motion Analysis of a Motion-Controlled Ship - Based on an Application of Skyhook Theory. The 12th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, 2015. Jialin Han, General introduction of a novel wave harmonizer. Program of international platform on ocean energy for young researcher, 2016.

##### [図書](計0件)

##### [産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

##### [その他]

ホームページ:

<http://mefe.iis.u-tokyo.ac.jp/index.html>

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

北澤 大輔 (KITAZAWA, Daisuke)  
東京大学・生産技術研究所・准教授  
研究者番号: 30345128

##### (2)研究協力者

韓 佳琳 (HAN, Jialin)