

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14976

研究課題名（和文）モデルベース強化学習による波力発電装置の高効率化

研究課題名（英文）Maximizing Output Power for Wave Energy Converter Using Model-Based Reinforcement Learning

研究代表者

梅田 隼 (Umeda, Jun)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：30757563

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：リニア発電機を搭載したポイントアブソーバ型波力発電装置を対象に不規則波中で運動変位や制御力が制約された中でも発電電力量を最大化するインピーダンス制御のパラメータ最適化手法を開発した。パラメータ最適化には波力発電装置の数式モデルが必要であるため、数式モデルに誤差が存在するときに最大限の性能を発揮することができない。この誤差が存在するときでも、同等の性能を出すことができるように、計測データから数式モデルを学習し、学習したモデルでインピーダンス制御のパラメータを最適化する手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

数式モデルに基づいたインピーダンス制御のパラメータ最適化手法は周波数領域の計算であり、異なり時間領域の計算を行う必要がないため、計算時間が短く、波力発電装置の試設計時には有用である。一方で、開発したパラメータ最適化手法は数式モデルの誤差によって、最大限の性能を発揮することができない。本研究で開発した、計測データから学習したモデルでインピーダンス制御のパラメータを最適化する手法は実環境に合わせた最適化でき、自由減衰試験などのモデル同定試験が容易ではない実機などでは有効な手段である。また、モデルの誤差がない場合は等価であり、数式モデルに基づいたパラメータ最適化手法の欠点を補うものである。

研究成果の概要（英文）：This study developed an optimization technique for the impedance control parameters to maximize the amount of power generated by a point-absorber wave energy converter equipped with a linear generator, even in irregular waves where the motion displacement and control force are constrained. Because the parameter optimization technique requires a mathematical model of the wave energy converter, it cannot maximize the performance of the technique when there are errors in the mathematical model. To achieve equivalent performance even in the presence of such errors, we developed a method for learning a mathematical model from the measurement data and optimizing the impedance control parameters using the learned model.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：波力発電装置 モデル学習 最適制御

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

海洋に囲まれた我が国で、海洋再生可能エネルギーの 1 つである波力は新たなエネルギー源として期待できる。海洋波からエネルギーを取り出す装置は波力発電装置と呼ばれ、英語表記の Wave Energy Converter の頭文字を取り WEC と略記することが多い。WEC の実用化に向けた研究が欧州を中心に行われており、多くのコンセプトの WEC が提案されている。その中で図 1 のポイントアブソーバ型 WEC は、日本の波状況、占有する海域面積や装置の耐久性の点から我が国の海域に適した形式の 1 つと考えられる。応募者の研究グループは、リニアモータを応用したリニア発電機を搭載したポイントアブソーバ型 WEC の研究を行っており、その中で WEC の力学的性質を考慮し、変動する波に合わせて発電機を能動的に制御するフィード・フォワード同調制御技術を開発してきた<sup>1)</sup>。その制御技術では、ポイントアブソーバ型 WEC の可動浮体の変位量に上下限の制約や制御力の上限などを考慮することが可能であるが、ポイントアブソーバ型 WEC に入射する将来の波を予測する必要があり、波予測は容易ではない<sup>2)</sup>。

波予測を必要としない制御技術としてはインピーダンス制御がある。インピーダンス制御では WEC のもつ減衰と剛性を変化させることで、運動と波の位相差を操作し、発電電力量を最大化することができる。しかし、この制御技術は周波数領域で規則波に対して有効であり、様々な波成分が含まれる不規則波に対して十分に最適化されているといえない。また、発電電力量を増加させるとともに、変位、制御力などを制限値以下で動作させることが実用上望まれるが、この手法では不規則波中で制限を考慮できないという問題がある<sup>3)</sup>。

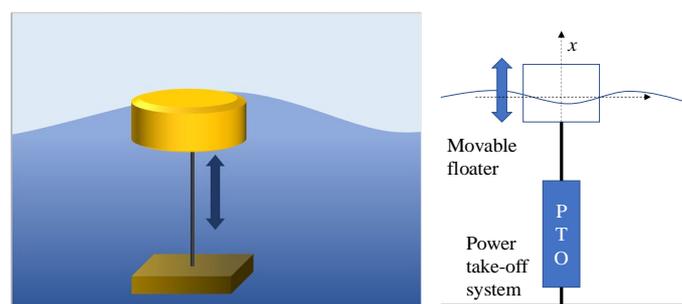


図 1 ポイントアブソーバ型 WEC の概要図

フィード・フォワード同調制御やインピーダンス制御などの制御技術では、ポイントアブソーバ型 WEC の運動を数式で表すモデル化が必要であるが、様々な要因により実物と数式モデルとの差（モデル化誤差）が生じて、想定した発電性能は得られない。また、模型では基礎試験によりモデル同定が可能だが、実海域のフルスケールの WEC へ実装する際には、モデル同定は容易でない。また、フルスケールの WEC ではモデル同定しても経年劣化でさらに誤差が生じることも考えられる。モデル同定を制御に自動的に反映されることも望まれる。したがって、実モデルの変化に制御モデルが対応して制御性能を改善できることはポイントアブソーバ型 WEC の実用化に重要な技術である。

### 2. 研究の目的

リニア発電機を搭載したポイントアブソーバ型 WEC を対象に不規則波中で運動変位や制御力が制約された中でも発電電力量を最大化する制御技術を開発する。フィード・フォワード同調制御と異なり、インピーダンス制御を用いるため、入射する波の予測を必要とせずに、不規則波中で運動変位が制約された中でも発電電力量を最大化する。

このインピーダンス制御に基づいた制御技術は数式で表すモデル化が必要であるため、モデル化誤差が存在するときに最大限の性能を発揮することができない。そこで、制御モデルをもちいないまま、制御モデルを同定し、同時に制御性能を改善できる制御法を開発する。開発したインピーダンス制御の最適化結果が等価であることを確認する。

### 3. 研究の方法

#### (1) パワースペクトルを用いた不規則波中のインピーダンス制御の最適化

有義波高や有義波周期が同じ海象条件が数十分から数時間継続し、確率的に定常状態とみなせることが多い。そこで、平均発電電力と可動浮体の上下揺れの最大値を統計的に予測し、予測値を制限以下となるように平均発電電力を最大化する制御法を提案した。まず、最適制御問題の目的関数である平均発電電力を、可動浮体の上下揺れのパワースペクトルの 0 次と 2 次モーメントで表せることを示した。次に、可動浮体の上下揺れのパワースペクトルの 0 次と 2 次モー

ントで表した平均発電電力と、線形重ね合わせの原理に基づいたエネルギースペクトル法による応答の短期予測と組み合わせることで、変位制限を考慮してインピーダンス制御のパラメータを最適化する制御（以後、PS 制御と表記）を提案した。

### (2) 学習によるインピーダンス制御の最適化

PS 制御では可動浮体の運動の周波数応答関数が必要であるが、理論計算で求めた周波数応答関数にモデル化誤差が存在し、実スケールの WEC では周波数応答関数を得ることが容易でない。モデル化誤差がある場合でもインピーダンス制御が最大限の性能を発揮するために、制御モデルを用いないインピーダンス制御のパラメータ最適化手法を開発した。

まず、モデル化誤差の影響を調査するために、事前に把握するのが難しい機械摩擦をモデル化誤差として与えた状態で発電シミュレーションを実施した。WEC の運動モデルのパラメータに実験で計測した機械摩擦を加えたモデル化誤差がある条件下でインピーダンス制御のパラメータを最適化した際に、モデル化誤差がインピーダンス制御のパラメータと平均電力に与える影響を調査した。さらに、ベイズ最適化によりインピーダンス制御のパラメータを実験的に最適化する方法を開発した。

ベイズ最適化の手法でも変位の制約条件を考慮する必要がある。そこで、変位の制約条件をペナルティ関数で表現し、最適化の目的関数に含めることで考慮した。改良した手法を不規則波条件下において適用し、制約条件を考慮しながら発電電力を最大化することが可能であることを確認した。

### (3) 学習モデルによるインピーダンス制御の最適化

一方で、ベイズ最適化を用いた学習によるインピーダンス制御の最適化は学習用データが少なくても最適化可能であるが、同じ波条件で学習による最適化をする必要があり、異なる波条件に対しては適用できない可能性がある。そこで、計測データから運動モデルを学習して、学習したモデルを使って制御を最適化する手法を開発した。水槽試験で制御状態の波力発電装置の運動を計測し、計測データを用いてガウス過程回帰を作成し、制御入力を考慮した上下変位の回帰モデルの構築を行った。回帰モデルの学習用には図 2 波力発電装置模型の外観図 2 および

表 1 に示した水槽試験模型の水槽試験を実施し、制御状態での運動を計測した。この回帰モデルを用いる手法を用いて学習時および学習時とは異なる波条件でインピーダンス制御のパラメータの最適化を行い、PS 制御の最適化結果と等価であることを確認した。

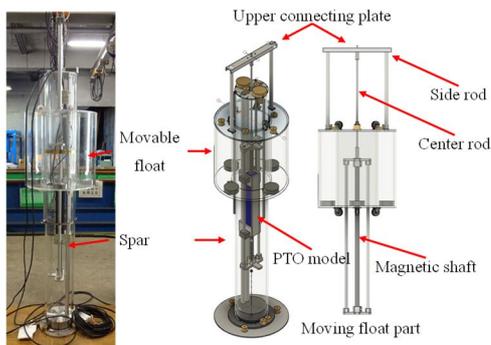


図 2 波力発電装置模型の外観

表 1 波力発電装置模型の主要目

Item	Value
Outer diameter of movable floater	0.40m
Inner diameter of movable floater	0.20m
Draft of movable floater	0.20m
Maximum stroke of movable floater	0.15m
Rated force of linear shaft motor	140N
Thrust coefficient of linear shaft motor	58N/A
Armature winding resistance per phase linear shaft motor	3.75Ω

## 4. 研究成果

### (1) パワースペクトルを用いた不規則波中でのインピーダンス制御の最適化

PS 制御を適用した状態で不規則波中の発電電力シミュレーションを行った結果を図 3 に示す。左図がエネルギー吸収幅、右図が最大変位である。変位制限を超えた領域は黒で表示する。PS 制御では変位制限の条件に達しない波条件まで、最大変位は波高に対して線形で、エネルギー吸収幅は一定である。変位制限に達する波高が 0.2 m から、最大変位に非線形性が現れ、エネルギー吸収幅が低下する。開発した手法は周波数領域の計算でフィード・フォワード同調制御と異なり時間領域の計算を行う必要がないため、計算時間が短く、波力発電装置の試設計時には特に有用である。

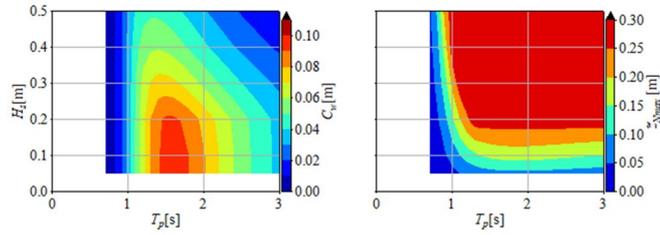


図 3 エネルギー吸収幅と最大変位

(2) 学習によるインピーダンス制御の最適化

モデル化誤差がある条件で得られた規則波中の平均発電電力を図 4 に示す．横軸は波周期，縦軸が平均電力である．モデル化誤差が 0 の場合，規則波中の理論的最適解である銅損考慮同調制御(ACL) <sup>3)</sup>と一致する．モデル化誤差を 0 にした ACL w/o modeling errors は正しい減衰係数を使用しているため，平均電力が最も高い．モデル化誤差がある状態でパラメータを最適化した ACL w/ modeling errors が最も低い平均電力となった．モデル化誤差により例えば， $T_w = 1.00$  s で 45% 程度， $T_w = 1.50$  s で 20% 程度低下した．ベイズ最適化を用いた Bayesian opt. はモデル化誤差の影響を受けないため ACL w/o modeling errors と同等の平均電力を得た．このようにモデル化誤差がある状態でインピーダンス制御のパラメータを最適化した場合，想定した発電性能は得られないが，ベイズ最適化を用いることでモデル化誤差の影響を受けずにパラメータを最適化できる．

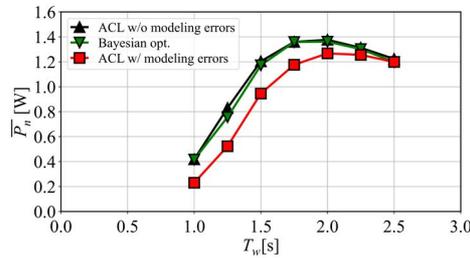


図 4 モデル化誤差がある条件での規則波中の平均発電電力の比較

次に不規則波中で学習によるインピーダンス制御の最適化を行い，発電電力を求めた結果を図 5 に示す，最適化したインピーダンス制御のパラメータの  $K_1, K_2$  を図 6 に示す．学習によるインピーダンス制御の最適化は PS 制御(PS opt.)と一致した．不規則波中でもベイズ最適化を用いることでモデル化誤差の影響を受けずにパラメータを最適化できる．また，ACL とは異なり，運動変位が制約された場合でも PS 制御と同等の制御性能があることを確認した．

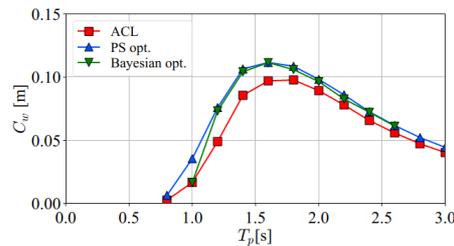


図 5 不規則波中のエネルギー吸収幅の比較

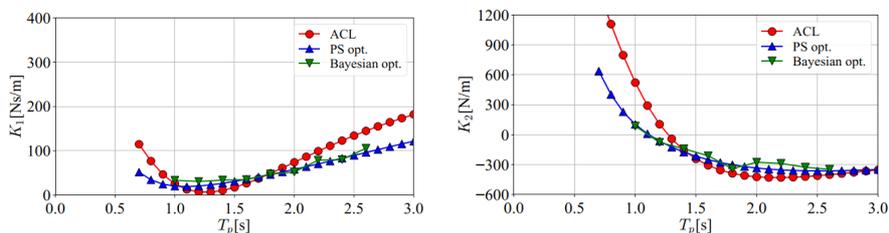


図 6 インピーダンス制御のパラメータの比較

### (3) 学習モデルによるインピーダンス制御の最適化

計測データから運動モデルを学習して、この学習モデルを使って制御パラメータを最適化する手法の結果を示す。まず、計測データから学習した運動モデルの精度を確認した。計測した可動浮体の変位とガウス過程回帰モデルの時系列シミュレーション結果の一例を図 7 に示す。波条件は有義波高 0.1m、ピーク波周期 2.21s である。変位の極値について完全に一致するわけではないが、いずれの場合でも極値となる時間は一致しており、傾向を表すことができている。有義波高 0.1m に対して RMSE は 0.006m 以下で波高に対して 6%以下と十分な精度である。

数式モデルは精度を向上できる可能性があるが、予め自由減衰試験などを実施して減衰力係数を得るなどのシステム同定をする必要がある。一方で、本研究で取り組んだガウス過程回帰を用いたモデル化では運動の計測結果から直接変位と速度を推定できる。自由減衰試験などのモデル同定試験が容易ではない実機などでは有効な手段である。

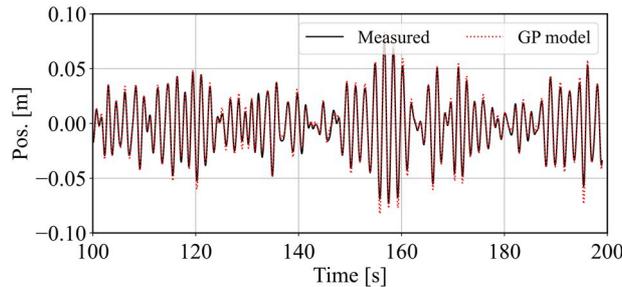


図 7 計測した可動浮体の変位とガウス過程回帰モデルの時系列シミュレーション結果

学習モデルを用いて学習時および学習時とは異なる波条件でインピーダンス制御のパラメータの最適化を行った。2つの波条件で回帰モデルを使って制御パラメータの最適化した結果を図 8 に示す。比較のために、PS 制御(PS opt.)と銅損考慮同調制御(ACL)の結果を合わせて記載している。学習モデルを用いて求めた最適パラメータは概ね PS 制御で求めた最適パラメータと差があるが、発電電力はほぼ一致した。ACL は規則波中の最適値のため、不規則波では、比較した2つの制御戦略より低い。モデルの学習時に教師データで使用した波条件と最適化したい波条件が異なる場合でも最適化が可能である。このように計測データに基づいて構築した運動モデルを用いることで、実環境に合わせた最適制御が可能となる。

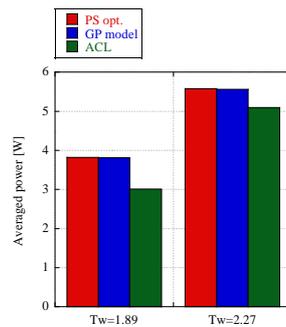


図 8 不規則波中の平均発電電力の比較

### 参考文献

- 1) 梅田 隼, 後藤 博樹, 藤原 敏文, 谷口 友基, 井上 俊司: リニア式波力発電装置のモデル予測制御に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 28, pp. 27-36, 2018.
- 2) Faedo Nicolás, Olaya Sébastien, Ringwood John V.: Optimal control, MPC and MPC-like algorithms for wave energy systems: An overview, IFAC Journal of Systems and Control, Vol. 1, pp. 37-56, 2017.
- 3) Jaén Antonio de la Villa, García-Santana Agustín, Montoya-Andrade Dan El: Maximizing output power of linear generators for wave energy conversion, International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 24(6), pp. 875-890, 2014.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Umeda Jun, Taniguchi Tomoki, Fujiwara Toshifumi	4. 巻 28
2. 論文標題 Development of model-based and model-free reactive control scheme: considering copper loss and movable-floater-displacement constraint for a wave energy converter	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Marine Science and Technology	6. 最初と最後の頁 439 ~ 451
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00773-023-00933-w	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -
1. 著者名 梅田隼、谷口友基	4. 巻 36
2. 論文標題 海域水深と変位制約を考慮した波力発電装置の発電性能評価	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本船舶海洋工学会講演会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 梅田隼, 谷口友基, 宍凱宇, 古関隆章, 藤原敏文	4. 巻 35
2. 論文標題 ガウス過程回帰による 並進動揺型波力発電装置の運動推定の特長	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本船舶海洋工学会講演会論文集	6. 最初と最後の頁 505-517
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス 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 -
1. 著者名 梅田隼	4. 巻 PS-14
2. 論文標題 並進動揺型波力発電装置の ベイズ最適化を用いたインピーダンス制御	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 海上技術安全研究所発表会予稿集	6. 最初と最後の頁 105-106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Umeda Jun, Fujiwara Toshifumi, Taniguchi Tomoki	4. 巻 32
2. 論文標題 Short-term Prediction of Output Power and Constrained Optimal Control for Point-Absorber Type Wave-Energy Converters with Linear Generators	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers	6. 最初と最後の頁 91-98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2534/jjasnaoe.32.91	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 梅田隼、藤原 敏文	4. 巻 20
2. 論文標題 強化学習を利用した波力発電装置の制御	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 海上技術安全研究所報告	6. 最初と最後の頁 17~27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 梅田隼、谷口友基	4. 巻 32
2. 論文標題 モデル化誤差を含む波力発電装置のインピーダンス制御	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本船舶海洋工学会春季講演会	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 梅田隼
2. 発表標題 並進動揺型波力発電装置の ベイズ最適化を用いたインピーダンス制御
3. 学会等名 海上技術安全研究所発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 梅田隼
2. 発表標題 モデル化誤差を含む波力発電装置のインピーダンス制御
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (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