

# PS-14 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

海洋先端技術系 \* 梅田 隼

## 1. はじめに

波力発電装置の形式の1つである図-1の並進動揺型(ポイントアブソーバー型ともいう)は、波による可動浮体の運動を発電機構へ伝達することで発電する。海洋波は様々な周波数をもった波が含まれるが、一般的に可動浮体の上下揺れの周波数応答は狭域であるため、同調点付近以外の波が卓越する場合、電力量が低下する。広範な波条件下で波エネルギーを多く回収するために様々な制御の開発が行われてきた<sup>1-4)</sup>。

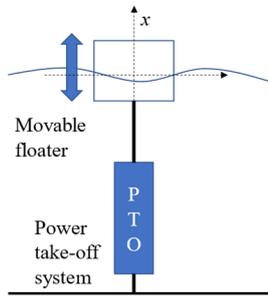


図-1 並進動揺型波力発電装置

代表的な制御であるインピーダンス制御やモデル予測制御は、波力発電装置の運動モデルに基づいて行うため、運動モデルのパラメータ推定が重要となる<sup>1-4)</sup>。運動モデルに必要な流体力は理論計算で推定できる。一方で、発電機構による機械摩擦や粘性流体力の推定は難しいため、事前の数値計算では考慮されることが多く、モデル化誤差となる。このモデル化誤差により制御性能が低下する。

本研究では、波力発電装置の運動モデルのパラメータにモデル化誤差を含む条件下でインピーダンス制御を適用したときの平均電力を調査する。また、パラメータにモデル化誤差を含む条件下でも、制御性能が低下しない制御としてベイズ最適化を用いた方法を検討する<sup>5)</sup>。

## 2. 波力発電装置の制御モデル

可動浮体の運動を式(2.1)の周波数 $(\omega)$ 領域の1自由度運動方程式で表す。

$$[-\omega^2(m + A(\omega)) + j\omega B(\omega) + C]X(\omega) = F_{ext}(\omega) + F_{pto}(\omega) \quad (2.1)$$

ここで、 $m$ はフロータの質量、 $A(\omega)$ は付加質量、 $X(\omega)$ はフロータ変位、 $j$ は虚数単位、 $B(\omega)$ は減衰力係数、 $C$ は復原力係数、 $F_{ext}(\omega)$ は波強制力、 $F_{pto}(\omega)$ は発電機の制御力である。

変位・速度フィードバック力指令型のインピーダンス制御では、 $F_{pto}(\omega)$ は式(2.2)となる。

$$F_{pto}(\omega) = -j\omega K_1 X - K_2 X \quad (2.2)$$

ここで、 $K_1, K_2$ は、速度と変位に対する制御変数である。

式(2.2)を式(2.1)に代入すると、 $K_1, K_2$ は減衰力係数および復原力係数と考えることができる。入射波に応じて、得られる電力量を最大化するように $K_1, K_2$ を変更する。

Approximate complex-conjugate control with considering copper loss (ACL)は規則波中で得られる電力量を最大化する制御方式である<sup>1)</sup>。ACLに基づいて電力量を最大化する最適な $K_1, K_2$ は式(2.3) — 式(2.6)で得られる。

$$K_1 = \frac{B(\omega) + 2\delta(B^2(\omega) + X_m^2(\omega))}{4\delta^2(B^2(\omega) + X_m^2(\omega)) + 4\delta B(\omega) + 1} \quad (2.3)$$

$$K_2 = \frac{\omega X_m(\omega)}{4\delta^2(B^2(\omega) + X_m^2(\omega)) + 4\delta B(\omega) + 1} \quad (2.4)$$

$$X_m(\omega) = \omega(m + A(\omega)) - \frac{C}{\omega} \quad (2.5)$$

$$\delta = \frac{R}{K_t^2} \quad (2.6)$$

ここで、 $X_m$ は機械リアクタンス、 $R$ および $K_t$ は発電機の巻線抵抗および推力係数である。

波力発電装置の $X(\omega)$ と $B(\omega)$ にモデル化誤差を含む場合、式(2.3) — 式(2.6)で得られた制御変数は最適でない。本研究では、正しい $B(\omega)$ を用いて決定した制御変数と、モデル化誤差を含む $B(\omega)$ を用いて決定した制御変数を比較した。

さらに、ベイズ最適化により、モデル化誤差を含む状態でも制御変数を最適化する。ベイズ最適化はブラックボックス最適化で使われる最適化手法のひとつである<sup>6,7)</sup>。制御変数を与えた場合の平均電力が観測できるが、運動モデルおよび目的関数はモデル化誤差等により正しく推定できない。平均電力の目的関数を確率モデルで近似して推定することで平均電力を最大化する最適な制御変数を探索した<sup>5)</sup>。

## 3. 数値計算による検討

### 3.1 比較する3つの方法

規則波中で3つの方法を比較した。1つめ(ACL w/ modeling errors)は式(2.3) — 式(2.6)の計算時にモデル化誤差を含む状態である。モデル化誤差には水槽試験模型の自由減衰試験で取得した機械摩擦や粘性流体力の減衰力成分を与えた。2つめ(ACL w/o modeling errors)は、モデル化誤差を含まない状態で計算した場合である。モデル化誤差を含まないので、このときが理論値である。3つめ(Bayesian opt.)はベイズ最適化によって $K_1, K_2$ を最適化した場合である。ACL with modeling errorsの $K_1, K_2$ を初期値として、10回試行して最

も高い平均電力を与えた $K_1, K_2$ を最適値とした。

### 3. 2 結果

3つの方法を用いて得られた平均電力を図-2に示す。横軸は波周期 $T_w$ 、縦軸は平均電力 $\bar{P}_e$ を表す。モデル化誤差を含まないACL w/o modeling errors は規則波中での理論最大値であり、平均電力が最も高い。モデル化誤差を含む ACL w/ modeling errors での平均電力が最も低い。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。ベイズ最適化により Bayesian opt. はACL w/o modeling errors と同等の平均電力を得た。

3つの方法の $K_1, K_2$ を図-3と図-4に示す。横軸は $T_w$ 、縦軸は $K_1, K_2$ を表す。ACL w/o modeling errors とACL w/ modeling errors の $K_1$ の差は長周期になると減少する。ACL w/o modeling errors とACL w/ modeling errors の $K_2$ の差は一定のままとなった。Bayesian opt. とACL w/o modeling errors の $K_1$ は $T_w = 1.25, 2.50$  sを除き概ね一致している。Bayesian opt. の $K_2$ はACL w/o modeling errors と差が大きい。波周期が長くなると、式(2.5)の $X_m(\omega)$ が負の無限大となるため、式(2.3)と式(2.4)の $B(\omega)$ の影響が相対的に小さくなり、モデル化誤差の影響が小さくなったと推定される。

### 4. まとめ

本研究では、波力発電装置の運動モデルにモデル化誤差を含む条件下でインピーダンス制御を適用したときの平均電力を調査した。さらに、モデル化誤差を含む条件下でも適用できる方法を検討し、以下の結果を得た。

- 減衰係数にモデル化誤差を含むことで、発電平均電力は低下するが、波周期が長くなると、その低下量は小さくなった。
- モデル化誤差を含む条件下でも、ベイズ最適化を用いた方法はモデル化誤差を含まない場合と同等の平均電力を得ることができた。

これらの結果からベイズ最適化を用いたインピーダンス制御は有効であることを確認した。

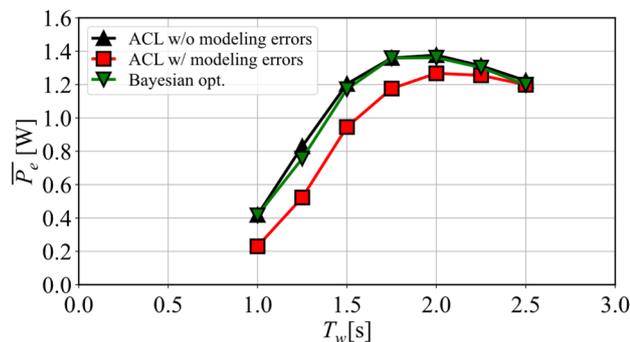


図-2 3つの方法を用いて得られた平均電力

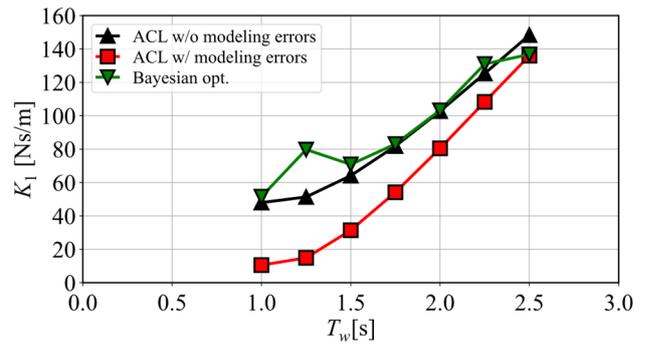


図-3 3つの方法の速度に対する制御変数の比較

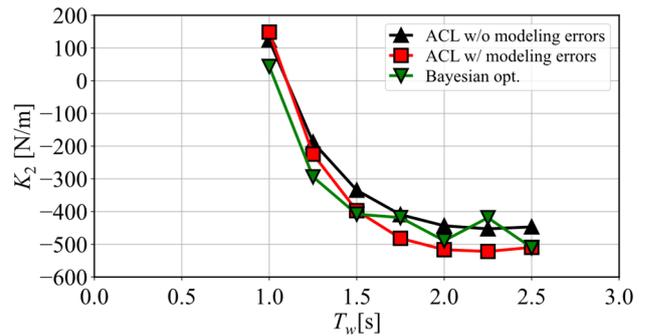


図-4 3つの方法の変位に対する制御変数の比較

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 19K15223 の助成を受けたものです。関係各位に深く感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) De la Villa Jaén, A., García-Santana, A., and El Montoya-Andrade, D.: Maximizing Output Power of Linear Generators for Wave Energy Conversion, International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 24, Issue 6, (2014), pp. 875 - 890.
- 2) 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, 第 28 号(2018), pp. 27 - 36.
- 3) 谷口友基, 藤原敏文, 梅田隼, 二村正, 片山徹: 波力発電装置の陸上試験装置の開発と実時間最適制御法の検証, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 32 号(2020), pp. 99 - 108.
- 4) 下田 隆貴, 古関 隆章: ポイントアブソーバ式波力発電装置の二浮体ヒープ動揺条件下での安定な電気出力最大化制御, 電気学会研究会, LD-16-016(2016), pp. 87 - 92.
- 5) 梅田隼, 谷口友基: 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, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 32 号(2021), pp. 559 - 562.
- 6) 持橋大地, 大羽成征: ガウス過程と機械学習, 講談社 (2019).
- 7) Frazier, Peter I.: A tutorial on Bayesian optimization, arXiv preprint arXiv:1807.02811 (2018).