

称号及び氏名 博士（工学） 梅田 隼

学位授与の日付 2024 年 9 月 23 日

論文名 「ポイントアブソーバー型波力発電装置のモデルベース
およびデータ駆動型リアクティブ制御に関する研究」

論文審査委員 主査 片山 徹
副査 橋本 博公
副査 中谷 直樹
副査 藤原 敏文（（国研）海上・港湾・航空技術研究所）
副査 谷口 友基

論文要旨

持続可能な社会発展を実現するため、環境に負荷をかけずに多くのエネルギーを得ることは世界的に重要な課題である。再生可能エネルギーである風力発電や太陽光発電の開発が進む中、世界的規模の課題に対して、その他のクリーンエネルギーの可能性を模索することも重要であり、地球表面積の約 7 割を占める海がもつ波力・潮流・海流・海洋温度差などの海洋エネルギーの可能性は大きい。これら海洋エネルギーはそれぞれ特色をもっているが、波エネルギーは他の海洋エネルギーに比べて国内で幅広く分布しており、離島部などでは電源構成のおよそ 9 割を占める内燃力発電にかわる新たなエネルギー源として期待できる。波エネルギーを利用する波力発電装置には様々な形式があり、ポイントアブソーバー型波力発電装置は占有する海域面積が小さいため、複雑な海岸地形を持つ日本の沿岸域に適した形式の 1 つと考えられ、国内で実証事業が行われたが、いまだ実用化には至っていない。

ポイントアブソーバー型波力発電装置の実用化に向けた課題はいくつかあるが、波高や波周期や入射方向が様々に変化する波の中で発電効率が大きく低下することは大きな課題の 1 つである。この波の変化に対して発電効率を最大化するために、ポイントアブソーバー型波力発電装置の制御に関する研究が精力的に行われ、リアクティブ制御やモデル予測制御など

が開発された。波力発電装置の制御では、機構や発電システムの制限から可動範囲や最大出力などの物理的制約条件の考慮が必要であるが、波による外力の予測を行うことで制約条件を考慮する場合、その制御は因果律を満たさない。実証事業では、制約条件を考慮せずにリアクティブ制御を適用し、荒天時には発電ブレーキへの切替えや波力発電装置の運転を停止するといった方法が採用されているが、この方法では発電効率が低下するため、因果律を満たす形で制約条件を考慮しかつ実装が容易なリアクティブ制御を開発することが重要である。制御対象を数理モデル化してそのモデルに基づいて制御を行うモデルベース制御は、所望の制御性能を実現しやすい一方で、数理モデルと実システムには必ずモデル化誤差が存在するため、実システムに対してモデルベース制御の性能は想定より低く、実システムの経年劣化でさらに低下する欠点がある。そこで、実システムで計測したデータに基づくデータ駆動型制御を用いることで、モデル化誤差に対処できると考えたが、データ駆動型制御では制約条件をどのように考慮するかに加えて、学習コスト、学習結果の収束性、学習中に制御が不安定にならないかなど別の課題がある。さらにモデルベース制御とデータ駆動型制御を組み合わせ、相互補完することを考えたが、その組合せについては十分検討されておらず、補完するためにはそれぞれの長所と短所を把握する必要がある。このような背景のもと、ポイントアブソーバー型波力発電装置を対象に、制約条件を考慮できるモデルベースおよびデータ駆動型のリアクティブ制御を開発し、これらの有効性および長所と短所を明らかにすることが本研究の目的である。

第1章では本研究の背景と目的を示すとともに、研究概要について述べた。

第2章では制約条件を考慮できるモデルベースのリアクティブ制御を開発し、数値シミュレーションと水槽模型試験で有効性を検証した。時間領域で定義される不規則波中の平均電気出力を上下変位パワースペクトル密度の0次と2次モーメントを使って定式化できることを示した。そして、変位と制御力の最大振幅はレイリー分布を仮定することで、その最大期待値を推定することができる。これらを組み合わせて、波力発電装置の制約条件を考慮して不規則中の平均電気出力を最大化するリアクティブ制御を開発した。数値シミュレーションと水槽模型試験で開発した制御を既存の制御と比較し、有効性を検証した。これらの結果から、制約条件を考慮すべき波条件において、開発した制御は制約条件を満たしつつ発電効率を最大化する最適制御となることを確認した。

第3章ではベイズ最適化を用いたデータ駆動型リアクティブ制御を開発し、数値シミュレーションで有効性を検証した。減衰係数にモデル化誤差を仮定して、規則波中の運動シミュレーションを行った。モデル化誤差を含む状態ではモデルベース制御では最適制御とならない。一方で、観測した電気出力からベイズ最適化を用いてリアクティブ制御のパラメータを最適化することで、モデル化誤差が含まれる場合でも最適制御と一致することを確認した。不規則波中の運動シミュレーションでは変位制約条件下の検証を行った。変位制約条件下ではベイズ最適化の最適化結果は第2章の最適化結果と概ね一致することを確認した。一方で、波高が大きくなるにしたがって、第2章の最適化結果と差が大きくなる傾向がみられ、この原因は大波高で制約条件の影響が大きくなるにしたがい、厳格に制約を満たすことが難しくなるためであった。また、学習時と異なる条件に対しては再度学習を行う必要があり、これは学習時間の増加以外に学習時に制御が不安定となる制御条件を選び、設備の故障などの深刻な影響を与える可能性があることがわかった。

第4章ではガウス過程回帰モデルを使って波力発電装置の運動を予測する方法とその回帰モデルを使って最適な制御を決定するデータ駆動型リアクティブ制御を開発し、水槽模型試験で有効性を検証した。まず、運動を予測する回帰モデルの入力ベクトルを力学的要因から決定し、水槽模型試験の計測データを使って学習した回帰モデルで、上下変位と速度を正確に予測できることを示した。また、学習時の計測データの白色雑音が大きくなっても回帰モデルの予測精度は低下しないことを示した。次に、学習したガウス過程回帰モデルを用いて制御を最適化できるかを水槽模型試験で検証した。ガウス過程回帰モデルを用いた制御では、

計測データを用いた回帰モデルで運動を正確に予測することで最適な制御パラメータを決定することができ、従来のリアクティブ制御と同等の制御結果が得られ、モデル化誤差が大きい場合や運動の数理モデルが時間と共に変化する場合など、従来のリアクティブ制御では最適な制御パラメータが得られない場合に適していることを確かめた。また、ガウス過程回帰モデルを用いた制御は不規則波中の波力発電装置の最大変位と制御力を予測できるため、物理的制約条件を考慮して最適制御ができることを確認した。最後に、学習コストや学習中の不安定性などデータ駆動型制御の課題について考察し、学習コストは第3章で開発した制御より小さく、学習に用いたデータセットの組合せを変えても制御結果はほとんど変化せず使用する学習データに対して依存性が低いことから学習中の制御が不安定になりにくいことを確認した。ただし、開発した制御では物理的な解釈がしやすい線形制御パラメータを用いたリアクティブ制御を採用しているため、その制御性能は制約されることも明らかとなった。

第5章では結論として各章で得られた結果を総括し、開発したモデルベースおよびデータ駆動型リアクティブ制御についてお互いの短所を補完するための指針を含む今後の展望について述べた。

本論文は、ポイントアブソーバー型波力発電装置を対象に、制約条件を考慮したモデルベースおよびデータ駆動型のリアクティブ制御を開発し、これらの有効性および長所と短所を数値シミュレーションと水槽模型試験により明らかにしたものである。

審査結果の要旨

本研究は、ポイントアブソーバー型波力発電装置を対象に、制約条件を考慮できるモデルベースおよびデータ駆動型のリアクティブ制御を開発し、これらの有効性および長所と短所を明らかにしたものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 時間領域で定義される不規則波中の平均電気出力を上下変位パワースペクトル密度の0次と2次モーメントを使って定式化できることを示し、変位と制御力の最大振幅はレイリー分布を仮定することでその最大期待値を推定し、波力発電装置の制約条件を考慮して不規則波中の平均電気出力を最大化するリアクティブ制御を開発し、数値シミュレーションと水槽模型試験で開発した制御を既存の制御と比較することで、開発した制御は制約条件を満たしつつ発電効率を最大化する最適制御となることを示した。
- (2) 減衰係数にモデル化誤差を仮定して、規則波中の運動シミュレーションを行い、モデル化誤差を含む状態ではモデルベース制御では最適制御とならなかったが、観測した電気出力からベイズ最適化を用いてリアクティブ制御のパラメータを最適化することで、モデル化誤差が含まれる場合でも最適制御と一致することを確認した。不規則波中の運動シミュレーションでは変位制約条件下の検証を行い、変位制約条件下ではベイズ最適化の最適化結果は、制約条件を考慮できるモデルベースのリアクティブ制御結果と概ね一致することを確認したが、波高が大きくなるにしたがって両者の差が大きくなる傾向がみられ、この原因は大波高で制約条件の影響が大きくなるにしたがい、厳格に制約を満たすことが難しくなるためであることを示した。また、学習時と異なる条件に対しては再度学習を行う必要があり、これは学習時間の増加以外に学習時に制御が不安定となる制御条件を選び、設備の故障などの深刻な影響を与える可能性があることを示した。
- (3) 運動を予測する回帰モデルの入力ベクトルを力学的要因から決定し、水槽模型試験の

計測データを使って学習した回帰モデルで、上下変位と速度を正確に予測できることを示し、学習時の計測データの白色雑音が大きくなっても回帰モデルの予測精度は低下しないことを示した。また、学習したガウス過程回帰モデルを用いて制御を最適化できるかを水槽模型試験で検証し、計測データを用いた回帰モデルで運動を正確に予測することで最適な制御パラメータを決定することができ、従来のリアクティブ制御と同等の制御結果が得られ、モデル化誤差が大きい場合や運動の数理モデルが時間と共に変化する場合など、従来のリアクティブ制御では最適な制御パラメータが得られない場合に適していることを示した。さらに、この制御は不規則波中の波力発電装置の最大変位と制御力を予測できるため、物理的制約条件を考慮して最適制御ができることを確認した。最後に、学習コストや学習中の不安定性などデータ駆動型制御の課題について考察し、学習コストは回帰モデルを使って最適な制御を決定するデータ駆動型リアクティブ制御より小さく、学習に用いたデータセットの組合せを変えても制御結果はほとんど変化しないことから学習中の制御が不安定になりにくいことを確認したが、物理的な解釈がしやすい線形制御パラメータを用いたリアクティブ制御を採用しているために、その制御性能は制約されることも示した。

以上の諸成果は、ポイントアブソーバー型波力発電装置を対象に、制約条件を考慮したモデルベースおよびデータ駆動型のリアクティブ制御を開発し、これらの有効性および長所と短所を数値シミュレーションと水槽模型試験により明らかにしたものであり、関連分野の学術的・産業的な発展に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。