

称号及び氏名 博士（工学） 谷口 友基

学位授与の日付 2022年9月23日

論文名 「非線形モデル予測制御によるポイントアブソーバー型
波力発電装置の実時間制御に関する研究」

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

論文要旨

我が国は四方を海に囲まれるため、波エネルギーの地域偏在性が少ない。日本は 6852 の島嶼で構成され、418 ある有人島の内、一般送配電事業者に対してユニバーサルサービス（最終的な電力供給を保証する）が課せられている 87 の離島では、電源構成の約 9 割が内燃力発電で賄われている。そのため、波エネルギー密度が高い沖合に展開でき、安全で高効率な波力発電装置（以下、Wave Energy Converter: WEC と略記）が開発されれば、離島や分散型エネルギーニーズを持つ地域における代替電源、洋上で稼働する様々な機材に対する電源としての利用も期待できる。

WEC は、海洋波から効率よくエネルギーを回収するため、波エネルギー1 次変換装置の運動が制御され、制御の優劣は WEC の発電性能に直接影響を与える。第一次石油危機を契機に WEC の研究開発が本格化した 1970 年代以降、WEC の制御法に関する研究も精力的に行われた。Salter と Nebel は、周波数領域で平均発電電力を最大化する制御力のインピーダンスが満たすべき条件を明らかにし、Budal と Falnes は、ポイントアブソーバー型波力発電装置（以下、Point Absorber type Wave Energy Converter: PAWEC と略記）を対象に、これと等価な可動浮体の運動速度の位相と振幅の条件を明らかにした。しかし、これらの条件は、WEC が

持つ制約条件（可動部の変位制限、制御力の上下限、及び発電設備の出力制限 等）を考慮しておらず、これらの条件を満たす制御力を出力できるアクチュエータや有効電力よりも大きな無効電力のピーク値に対応する発電設備を WEC に搭載することは、WEC の経済性悪化の一因となった。そのため、近年では、制御対象の制約条件を時間領域で考慮する最適制御法の 1 つであるモデル予測制御（以下、Model Predictive Control: MPC と略記）を WEC に適用することが注目されている。既存の研究例では 1 自由度系の WEC を対象とし、制御対象である WEC の状態方程式と制約条件を線形、評価関数を二次形式とすることで二次計画法（Quad Programming: QP）に帰着させる手法（以下、MPC-QP と略記）が多い。MPC は制御周期毎に最適制御問題を解くため計算負荷が高い。模型に実装する場合の制御周期は数十ミリ秒オーダーとなり、水槽試験における MPC のリアルタイム制御（以下、実時間制御と略記）の検証は 1 自由度系でも挑戦的な課題である。さらに、浮体式 WEC を対象に MPC 等の最適制御法を適用する研究例は、多浮体系となることで最適制御問題が複雑化するためか研究例がほとんどなく、浮体式 WEC を対象とした MPC の有用性の確認、及び実時間制御の検証はほとんど行われていない。

本研究では、PAWEC 及び浮体式ポイントアブソーバー型波力発電装置（以下、Floating Point Absorber type Wave Energy Converter: FPAWEC と略記）に、非線形モデル予測制御（以下、Nonlinear Model Predictive Control: NMPC と略記）を適用し、NMPC の実時間制御の成立を検証し、NMPC 実装状態における運動特性、制御力特性、及び発電電力特性を明らかにすることを目的としている。

本論文は 第 1－第 6 章で構成される。

第 1 章では、本研究の背景並びに目的を述べるとともに、研究内容の概要について示す。

第 2 章では、本研究で水槽模型に実装した 3 種の制御法をとりあげる。まず、周波数領域で定式化される抵抗制御（以下、Resistive Load Control: RLC と略記）及び出力最大化制御（以下、Approximate Complex-Conjugate Control with Copper Loss: ACL と略記）について、平均発電電力を最大化する制御係数の求め方を示した。次に、時間領域で定式化される NMPC について、評価区間内の発電電力を最大化する制御力の導出法を示した。本論文で採用した NMPC は、最適制御問題の規模が制御対象の状態量数に依存しないため、多浮体系となり状態量が増える浮体式 WEC に適用する場合に MPC-QP よりも優位となる。また、制御器に冗長性を持たせるために行った最適制御入力値に対する飽和处理等を述べる。

第 3 章では、水槽模型を用いた実装試験の前段階として行った、陸上試験装置の開発と陸上試験装置を用いた制御実装試験についてとりあげる。まず、PAWEC の可動浮体に働く流体力を数値モデルに従い生成することで、可動浮体の制御なし状態における波浪中運動を陸上試験装置で再現できることを確かめた。また、水槽模型への組み込みを念頭に小型陸上試験装置（以下、小型装置と略記）を開発し、第 2 章で述べた RLC、ACL を実装することで、RLC 及び ACL 実装状態における PAWEC 可動浮体の運動特性及び制御力特性を把握した。

第 4 章では、NMPC を PAWEC 模型に実装し、実時間制御の検証を行うとともに、実装状態での運動特性、制御力特性、及び発電電力特性を明らかにする。まず、1 自由度系である PAWEC に NMPC を実装するため最適制御の問題設定を行い、第 3 章で開発した小型装置を用いて、規則波及び不規則波中模擬状態で NMPC の実時間制御が成り立つことを明らかにした。また、本論文で採用した NMPC の制約条件活性化時における実時間制御も検証した。しかし、小型装置の試験では、可動浮体が流体から受ける粘性減衰力、模型固有の撓動抵抗等の影響は考慮できていない。その他にも、可動浮体に働く流体力を生成する装置の撓動抵抗補正力の影響等、本来の物理現象と合致しない力の影響を取り除けない。そこで、小型装置に組み込まれたリニアシャフトモータを搭載した PAWEC 模型を製作し、模型に実装した状態でも NMPC の実時間制御が成立することも確認した。また、規則波及び不規則波中において NMPC 実装状態における可動浮体運動特性、制御力特性、及び発電電力特性を明らかにするとともに、これらを RLC、ACL と比較した。さらに、NMPC 内部モデルのモデル化誤差及び

NMPC に用いる外力予測誤差が PAWEC 可動浮体の運動特性、発電電力特性に与える影響を明らかにした。

第 5 章では、FPAWEC の運動方程式と状態方程式を導出し、NMPC を FPAWEC に適用した際の実時間制御を検証し、運動特性、制御力特性、及び発電電力特性を明らかにする。FPAWEC は、可動浮体とスパーが並進ジョイントで結合されており、可動浮体とスパーの運動に運動拘束がある。本研究では、拘束条件を持つ系の運動方程式導出法の 1 つである、仮想パワーの原理に基づく Kane の方程式を用いて、運動拘束を持つ FPAWEC の運動方程式を導出した。次に、NMPC を FPAWEC に適用するため、最適化問題に適した一般化座標と一般化速度を設定して運動方程式を再定義し、連成流体力係数の大きさに基づき運動への影響が小さい項を無視して FPAWEC の運動推定精度が妥当な範囲で状態方程式を低次元化し、NMPC 内部モデルを構築した。FPAWEC 模型に NMPC を実装し、規則波及び不規則波条件においても実時間制御が成り立つことを確認するとともに、RLC 及び ACL と比較することで NMPC 実装状態での運動特性、制御力特性、及び発電電力特性を明らかにした。

第 6 章では、結論として各章で得られた結果を総括する。

本研究は、制約条件を考慮できる最適制御法の 1 つである NMPC を PAWEC 及び FPAWEC に適用し、実時間制御の成立を検証するとともに、実装状態における発電装置の運動特性、制御力特性、及び発電電力特性を数値計算、陸上試験、及び水槽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、複雑な制約条件を考慮できる最適制御法の 1 つである非線形モデル予測制御（以下、NMPC）を、可動浮体が上下方向にのみ運動するポイントアブソーバー型波力発電装置（以下、PAWEC）及びスパーが前後、上下、縦揺れ方向に運動し、可動浮体がスパーに沿って運動する浮体式 PAWEC（以下、FPAWEC）に適用することを考え、非線形モデル予測制御の状態方程式を構築し、実時間制御の成立を検証するとともに、実装状態における発電装置の運動特性、制御力特性、及び発電電力特性を、数値計算、陸上試験、水槽試験によって明らかにしたものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 水槽模型を用いた実装試験の前段階として、PAWEC 可動浮体に働く流体力を数値モデルに従い生成し、PAWEC 可動浮体の波浪中運動を模擬する小型陸上試験装置（以下、小型装置）を開発した。周波数領域で定式化される抵抗制御（以下、RLC）及び出力最大化制御（以下、ACL）を実装することで、これらの実装状態における PAWEC 可動浮体の運動特性及び制御力特性を明らかにした
- (2) PAWEC に NMPC を実装するための定式化を行い、本研究で開発した小型装置を用いて、規則波及び不規則波中で NMPC の実時間制御が成り立つことを明らかにした。また、NMPC の制約条件活性化時における実時間制御も検証した。しかし、小型装置の試験では、可動浮体が流体から受ける粘性減衰力、水槽模型固有の摺動抵抗等の影響は考慮できない。また、可動浮体に働く流体力を生成する装置の摺動抵抗補正力の影響等の物理現象と合致しない力の影響を取り除けない。そこで、小型装置に組み込まれたリニアシャフトモータを搭載した PAWEC 水槽模型を製作し、この模型に実装した状態でも NMPC の実時間制御が成立することも確認した。また、規則波及び不規則波中において NMPC 実装状態における可動浮体運動特性、制御力特性、及び発電電力特性を明らかにするとともに、RLC 及び ACL の結果と比較した。さらに、NMPC 内部モデルのモデル化誤差と NMPC に用いる外力予測誤差が、PAWEC 可動浮体の運動特性、発電電力特性に与える影響を明らかにした。

- (3) 拘束条件を持つ多体系の運動方程式を導出する手法の 1 つに、仮想パワーの原理に基づく Kane の方程式がある。Kane の方程式を用いて、運動拘束を持つ FPAWEC の運動方程式を導出した。次に、NMPC を FPAWEC に適用するため、最適化問題に適した一般化座標と一般化速度を設定して運動方程式を再定義し、連成流体力係数の大きさに基づき、運動への影響が小さい項を無視して FPAWEC の運動推定精度が妥当な範囲で NMPC の内部モデル（状態方程式）を低次元化した。FPAWEC 水槽模型に NMPC 制御を実装し、規則波及び不規則波条件においても実時間制御が成り立つことを確認するとともに、RLC 及び ACL と比較することで NMPC 実装状態での運動特性、制御力特性、及び発電電力特性を明らかにした。

以上の諸成果は、制約条件を考慮できる最適制御法の 1 つである NMPC を PAWEC 及び FPAWEC に適用し、実時間制御の成立を検証するとともに、実装状態における発電装置の運動特性、制御力特性、及び発電電力特性を数値計算、陸上試験、及び水槽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。