

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15223

研究課題名(和文) 浮体式波力発電装置の実時間最適制御法の開発

研究課題名(英文) Real-Time Optimization Control of a Floating Type Wave Energy Converter

研究代表者

谷口 友基 (Taniguchi, Tomoki)

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：80586678

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：浮体式ポイントアブソーバー型波力発電装置(FPAWEC)を対象に、C/GMRES法を援用する非線形モデル予測制御(NMPC)を適用し、制御周期50msでの実時間制御を確認した。

まず、1自由度系ポイントアブソーバー型波力発電装置(PAWEC)を対象に、発電機構単独試験、発電機構を組み込んだ水槽試験を行い、NMPCの基本特性を把握し、他の制御法と運動性能及び発電性能を比較した。FPAWECは可動浮体とスパーが並進ジョイントで結合された多体系である。運動拘束があるため、Kaneの方程式を用いて縦運動方程式を導出し、連成項を一部簡略化することでNMPCを適用可能とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本近海は欧米に比べて波パワーが小さい。また、遠浅の海域も少なく、海洋再生エネルギーを効率よく取得するには、沖合に展開可能な浮体式施設の活用が望ましい。

本研究では、先行研究では1自由度系PAWECへの適用に留まっていたNMPCをFPAWECに適用し、水槽試験にて制御周期50msでの実時間制御を確認すると共に、他の制御法を実装した場合と運動性能及び発電性能を比較した。2浮体系となるFPAWECにもNMPCの様な制約条件付最適化手法が適用可能であることを実験的に示した点は学術的意義がある。また、本研究成果は、沖合利用可能で高効率な浮体式波力発電施設の開発に資するため、社会的意義もあると思われる。

研究成果の概要(英文)：We applied a nonlinear model predictive control (NMPC) which incorporates the continuous GMRES method to a floating-point-absorber type wave energy converter (FPAWEC), and evaluated motions and power production performance by model tests. The sampling time of the tests was 50 milliseconds. We investigated fundamental characteristics of the NMPC by an onshore test bench, which was constructed by a power take-off module of the FPAWEC model. The performance of the NMPC was also assessed by 1-Dof PAWEC model test. Since the FPAWEC has a prismatic joint to connect a float and a spar; the FPAWEC has motion constraints, equations of motion of the FPAWEC were derived by the Kane's equation, which uses the principle of virtual power. The NMPC was implemented on the FPAWEC model, and motions and power production performance were compared with other control strategy, the resistive load control, and the approximate complex-conjugate control with considering the copper loss.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：波力発電装置 非線形モデル予測制御 実時間制御

1. 研究開始当初の背景

波パワーを電力に変換する波力発電装置（以下、WEC と略記）には多様な形態があり、現在も新しいコンセプトが毎年発案されている。研究開始当初、波パワーの豊富な英国を中心に、幾つかの先行的な WEC の実証研究が展開されており、また、米国では西海岸、ハワイ州等に賦存する大きな波パワーの利活用を指向したフィージビリティスタディ等が展開されていた。

WEC は波エネルギー1 次変換装置を持ち、この制御法は WEC の発電性能及び安全性能に大きく影響する。波エネルギー1 次変換装置には物理的な制約条件（例えば、可動範囲、運転速度制限等）があり、WEC は制約条件を満たしながら発電電力の最大化を実現する必要がある。そこで、制約条件を考慮した最適化手法の 1 種であるモデル予測制御（以下、MPC と略記）が WEC の制御法として有望視され、実証研究に供された WEC を対象にした数値計算による MPC の有用性の検証が行われ、水槽模型を用いた実装試験による MPC の実時間制御の検証が始まりつつあった。

多くの先行研究は、1 自由度系の WEC を対象とし、MPC を 2 次計画問題として定式化して最適制御力を得る手法（以下、MPC-QP と略記）をとっていた。我が国は、欧米よりも平均波パワーが小さく、漁業を中心とした沿岸部の水域利用も活発である。洋上風力発電施設と同様に、波力発電施設も高い波パワーが得られる沖合を目指し、浮体式 WEC の開発が進むと思われる。そのため、多体系となる浮体式 WEC にも適用可能な MPC が開発されれば、WEC 等の海洋再生可能エネルギーを利用する発電装置の普及に資すると考え本研究課題を開始した。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、多自由度を持つ機械系を対象とした MPC による実時間制御法を開発することである。その適用例として、リニア式発電機構（以下、リニア式 PTO と略記）を搭載した浮体式ポイントアブソーバー型 WEC（以下、FPAWEC と略記）を扱った。

先行研究で採用された MPC-QP を FPAWEC に適用する場合、自由度の増加に伴う状態量の増加、並びに、ラディエーション流体力のメモリー影響関数項の近似に用いる状態量の増加により、最適化問題の規模が急拡大し、実時間制御が困難になることが予想された。そこで、本研究課題では、モデル予測制御に特化した数値解法である、離散化された評価区間に対して最適制御入力系列を実時間方向に追跡する C/GMRES 法を採用した非線形モデル予測制御（以下、NMPC と略記）を FPAWEC に適用することを試みた。

3. 研究の方法

（1）陸上試験による検証

本研究課題で用いる NMPC の WEC への適用性を検討するため、まず、リニア式 PTO と同じ動作原理のリニアシャフトモーター（以下、LSM と略記）を 2 台用いて、1 自由度系 PAWEC の制御力と可動浮体に作用する環境外力を模擬する陸上試験装置を開発し、制御器に NMPC を実装することで NMPC の実時間制御の検証を行った。また、陸上試験装置を用いて、様々な海象条件を模擬し、既存の制御法（抵抗制御：RLC、出力最大化制御：ACL）を実装した場合と可動浮体の運動特性と発電特性を比較した。

（2）1 自由度 PAWEC の水槽試験による検証

陸上試験装置による検証だけでは、可動浮体に働く粘性減衰力の影響等、NMPC の内部モデルで再現していない力の影響等が NMPC 実装時の運動特性、発電特性に与える影響は評価できない。そこで、陸上試験装置の LSM を 1 自由度 PAWEC 水槽模型のリニア式 PTO 模型として組み込み、水槽試験にて NMPC の実時間制御の検証と制御性能の検証を行った。水槽試験では、NMPC の内部モデルに含まれる減衰力係数推定誤差、及び外力予測誤差に対する感度解析も行った。

（3）FPAWEC 縦運動方程式の導出と NMPC の実装検証

本研究課題で用いる NMPC を多自由度系となる FPAWEC に適用するためには、FPAWEC の運動方程式が必要となる。FPAWEC の運動機構に着目すると、可動浮体とスパーは並進ジョイントで結合されており、可動浮体とスパーの間に運動拘束がある。ここでは、仮想パワーの原理に基づく Kane の方程式を用いて、FPAWEC の前後、上下、縦揺れ、及び可動浮体の相対運動を対象とした縦運動方程式（以下、縦運動方程式と略記）を拘束力の定式化を介さず導出した。可動浮体を制御しない状態、及び制御法として RLC 及び ACL を適用した状態の水槽試験結果と比較することで、導出した縦運動方程式による波浪中運動評価の妥当性を検証した。FPAWEC に対応した NMPC 内部モデルの構築では、状態量の増加を抑えるため、可動浮体とスパーの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 NMPC 内部モデルを低次元化した。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制御周期 50 ミリ秒の実時間制御が実現できることを確認した。

4. 研究成果

(1) 陸上試験による検証

陸上試験装置の写真と構成図を図 1 に示し、規則波中及び不規則波中模擬試験結果の一例を図 2, 3 に示す. PAWEC の可動浮体は、直径 0.35 m, 内径 0.11 m, 喫水 0.248 m の中空円筒体を想定した. 可動浮体を制御しない状態 (Uncontrolled), NMPC を実装した状態 (Case 1, 2), 及び既存の制御法として RLC と ACL を実装した状態を対象に、計測結果と Matlab/Simulink による計算結果を比較した. 図 2, 3 の計測結果と計算結果の比較から、陸上試験装置を用いることで、様々な制御を実装した状態における可動浮体の運動、発電電力量の傾向を把握できることが分かった. また、陸上試験で NMPC が制御周期 50 ms で制御可能であることを確認した.

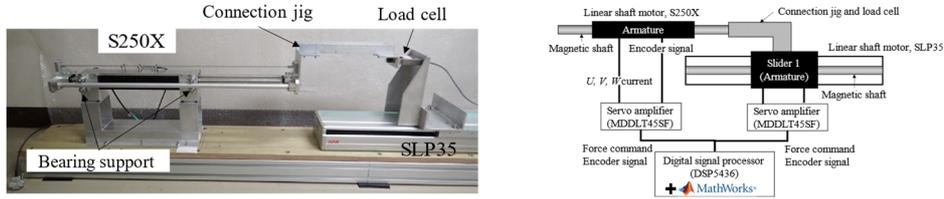


図 1 陸上試験装置 (左: 写真, 右: 構成)

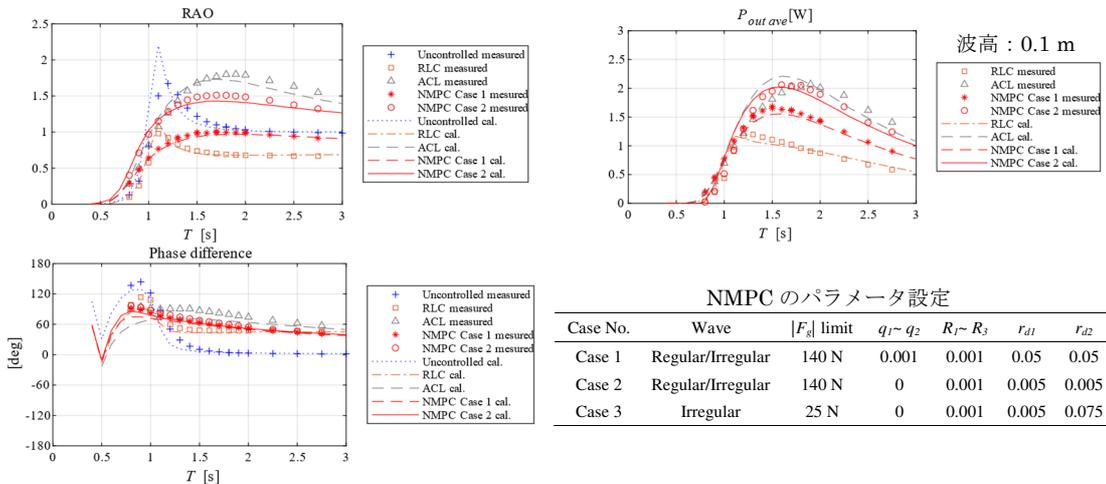


図 2 規則波中模擬試験における可動浮体の運動 (左) と平均発電量 (右上)

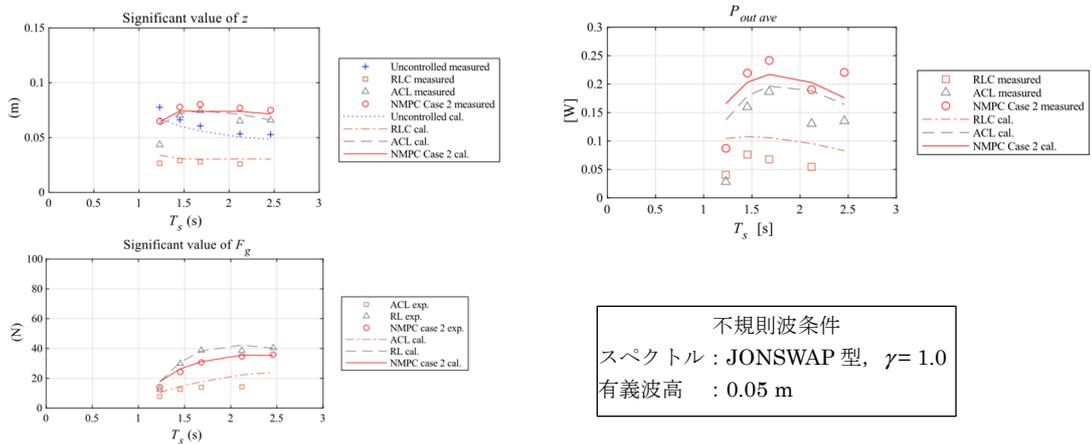


図 3 不規則波中模擬試験における可動浮体の運動 (左上), 制御力 (左下), 平均発電量 (右上)

(2) 1 自由度 PAWEC の水槽試験による検証

水槽模型の概要図, 実験状態図, 諸元を図 4 に示す. 水槽模型は FPAWEC として製作したが、ここではスパー部をフレームに固定することで 1 自由度 PAWEC としている. 計測結果を図 5 に示す. NMPC は水槽模型に実装した状態でも規則波及び不規則波条件において、既存の制御法の 1 つである ACL と同程度の発電性能であることが水槽試験で確認された. また、水槽試験において、制御力の制約条件を厳しく設定しても NMPC は試行した全ての規則波及び不規則波条件で安定した制御を行い、かつ発電性能は RLC よりも優位となった. また、水槽試験でも NMPC が制御周期 50 ms で制御可能であることを確認した.

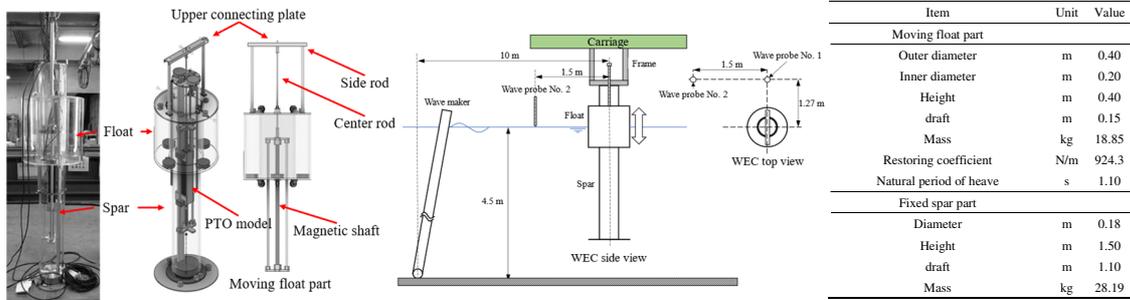
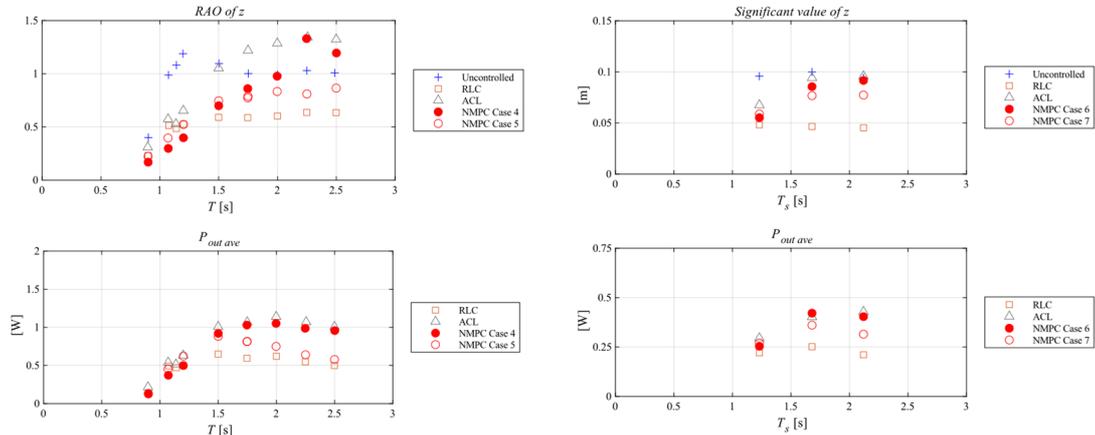


図4 PAWEC水槽模型概略図(左), 実験状態図(中), 水槽模型諸元(右)



NMPCのパラメータ設定

Case No.	Wave	$ F_g $ limit	$q_1 \sim q_2$	$R_1 \sim R_3$	r_{d1}	r_{d2}
Case 4	Regular	140 N	0	0.001	0.0015	0.0015
Case 5	Regular	20 N	0	0.001	0.005	0.005
Case 6	Irregular	140 N	0	0.001	0.0015	0.005
Case 7	Irregular	20 N	0	0.001	0.0015	0.005

図5 可動浮体の運動特性と発電性能(左:規則波中, 右:不規則波中)

(3) FPAWECの運動方程式導出とNMPCの実装検証

Kaneの方程式を用いたFPAWECの上下, 縦揺れ, 及び可動浮体の相対運動の規則波中における計測結果と計算結果の比較を図6に示す. これらの比較結果から, Kaneの方程式を用いることで制御状態を含めたFPAWECの運動を精度よく評価できることが分かる.

図7にNMPCを実装した状態におけるFPAWECの上下揺れ, 可動浮体の相対運動, 制御力振幅, 及び平均発電量を示す. FPAWECの上下揺れ, 可動浮体の相対運動, 制御力の結果には, 別途実施したNMPC内部モデルによる計算結果も示す. NMPCとすると, 入射波の波周期が長い条件で, 可動浮体の相対運動がRLC及びACLよりも小さくなる傾向が見られる. また, 制御力振幅の波周期に対する傾向は, RLC及びACLと同じであることが分かった. NMPCの平均発電量はRLCをわずかに下回る結果となった. 多自由度系にNMPCを拡張する際に内部モデルを低次元化しており, その結果, 内部モデルによる運動推定精度が低下したことがNMPCの発電量低下の主な要因と思われる.

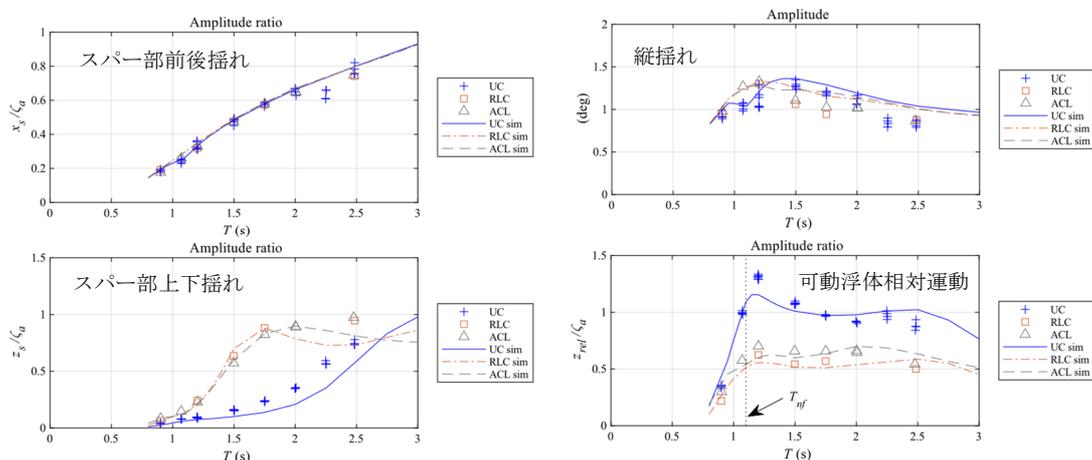


図6 FPAWECの前後, 上下, 縦揺れ, 可動浮体の相対運動評価結果(規則波:波高0.1 m)

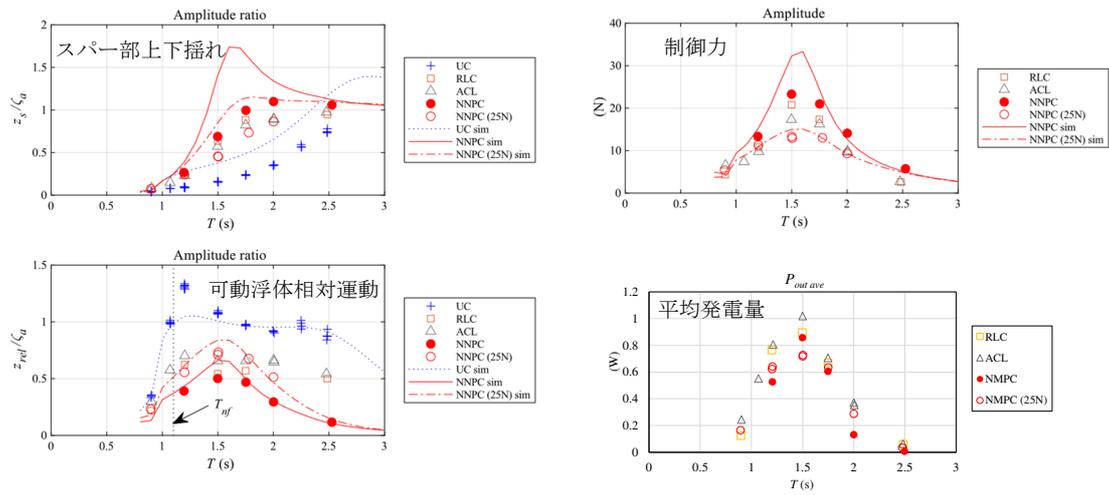


図7 NNPC実装時のFPAWEC運動評価結果及び平均電力量(規則波:波高0.1m)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 3件）

1. 著者名 Taniguchi Tomoki, Fujiwara Toshifumi, Umeda Jun, Nimura Tadashi, Katayama Toru	4. 巻 32
2. 論文標題 Development of an Onshore BenchTest System for a Wave Energy Converter and Verification of a Real-Time OptimalControl	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 99 ~ 108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2534/jjasnaoe.32.99	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 Taniguchi Tomoki, Fujiwara Toshifumi, Umeda Jun, Nimura Tadashi, Katayama Toru	4. 巻 33
2. 論文標題 Validation of Real-Time Nonlinear Model Predictive Control on Point Absorber Type Wave Energy Converter by Tank Test	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 247 ~ 256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2534/jjasnaoe.33.247	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 谷口友基, 藤原敏文, 梅田隼, 二村正	4. 巻 20-3
2. 論文標題 ポイントアブソーバー型波力発電装置の陸上試験装置による実時間最適制御	5. 発行年 2020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 ~ 28
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 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 谷口友基
2. 発表標題 並進動揺型波力発電装置を対象とした実時間最適制御法の水槽模型試験による検証
3. 学会等名 令和4年度日本船舶海洋工学会春季講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022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
---------	---------