

PS-9 非線形モデル予測制御による波力発電装置の 高効率化と実装試験

海洋先端技術系 * 谷口 友基, 二村 正, 藤原 敏文

1. はじめに

波力発電装置の1種である Point Absorber 型 WEC (以下, PAWEC と略記) は, 波長に比べて小さい直径の可動浮体を持ち, 海洋波から効率よくエネルギーを取り出すため, 可動浮体の運動制御が行われる. これまで様々な制御法が提案され, 近年では, 制御対象の制約条件も考慮すると同時に, 発電電力最大化を行うモデル予測制御を適用することで, 従来制御法よりも波力発電装置の高効率化¹⁾を実現することが報告されている. 但し, モデル予測制御を PAWEC に適用する場合, 制御周期内(先行研究では 50~100 ms 程度)に 2 点境界値問題を解き, 実時間制御が可能であることも検証する必要があるが, 一般的に, モデル予測制御は計算負荷が大きく, 実時間制御は難しい.

本研究では, PAWEC に働く外力及び制御力を 2 台のリニアシャフトモータを用いて発生させ, 制御法を実装した状態の PAWEC の波浪中の運動を再現する陸上試験装置を開発し, 非線形モデル予測制御(以下, NMPC と略記)を採用した PAWEC の実時間制御を検証した結果について報告する.

2. 陸上試験装置

陸上試験装置(以下, 本装置と略記)は, リニアシャフトモータ 2 台(日本パルスモーター株式会社製 S250X 及び SLP35), サーボアンプ 2 台, 及び制御器 1 台で構成される. シャフトの永久磁石によって生じる磁束とコイルに流れる電流との電磁気的作用によって推力を生み出す. 図-1 に本装置の写真を示し, 表-1 にリニアシャフトモータの諸元を示す. 2 台のリニアシャフトモータは接続治具を介して接続されており, S250X は約 1/20 程度の PAWEC 水槽試験模型に搭載可能な大きさである. S250X は PAWEC の制御力を発生させる. 一方, SLP35 は PAWEC に働く波浪強制力, 復原力, 及びラディエーション流体力を発生させるとともに, SLP35 の可動部とレール間に働く摩擦力を打ち消す力(以下, 摩擦補正力という)を発生させる. 摩擦補正力は, 一定速度で SLP35 を運転させて計測した摩擦力を基に摩擦カモデルを構築し, 本装置の運転速度に応じた摩擦力推定結果を加えた.

実験では, S250X の可動部, 接続治具, 及び SLP35 の可動部の合計質量を PAWEC の可動浮体の質量と一致させて本装置を運転させることで, PAWEC の波浪中運動を模擬させる. なお, PAWEC の可動浮体に働く造渦減衰力等, 流体の粘性に起因する力はモデル化していない.

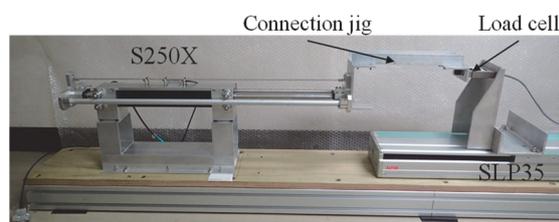


図-1 陸上試験装置

表-1 リニアシャフトモータの諸元

Item	Unit	S250X	SLP35
Length	m	0.80	1.72
Stroke	m	0.31	1.40
Pole pitch	mm	90	120
Weight of moving part	kg	4.15	4.4
Rated force	N	140	185
Thrust coefficient	N/A	58	68
Armature winding resistance per phase	Ω	3.75	3.6

3. 波力発電装置の制御モデル

3.1 波力発電装置モデル

本論文では, 1 自由度系のリニア式発電機構(以下, リニア式 PTO と略記)を搭載した PAWEC を想定する. PAWEC 模型は想定実機の約 1/20 縮尺とする. 可動浮体は, 表-2 に示した諸元を持つ中空円筒体であり, ラディエーション流体力及び波浪強制力は WAMIT® version 7.0²⁾を用いて計算した.

表-2 PAWEC 可動浮体の諸元

Item	Symbol	Model scale
Mass	m_f	18.8 kg
Outer diameter	D_{out}	0.40 m
Inner diameter	D_{in}	0.20 m
Height	H_{float}	0.40 m
Draft	d_f	0.20 m
Restoring coefficient	C_{33}	924.5 N/m
Heave natural period	T_n	1.07 s

規則波における可動浮体の運動方程式を(3.1)式に示す. なお, (3.1)式中の z , F_e , F_b , F_r , 及び F_s は, それぞれ可動浮体の変位, 波浪強制力, リニア式 PTO の制御力, ラディエ

イション流体力, 及び復原力を示す. また, 上付きドットは時間微分を示す.

PAWEC への機械入力 (P_{mech}), リニア式PTOで制御力を加えた時に生じる銅損 (P_{loss}), 機械入力と銅損の差分として得られる電力 (P_{out}) を(3.2)~(3.4)式で定義する. (3.3)式中の R_s , K_t は, それぞれリニア式PTOの巻線抵抗と推力係数である. また, 時間平均値として平均発電電力を(3.5)で定義する.

$$m_f \ddot{z} = F_e(t) + F_g(t) + F_r(t) + F_s(t) \quad (3.1)$$

$$P_{mech}(t) = -F_g(t)\dot{z} \quad (3.2)$$

$$P_{loss}(t) = R_s \left(\frac{F_g(t)}{K_t} \right)^2 \quad (3.3)$$

$$P_{out}(t) = P_{mech}(t) - P_{loss}(t) \quad (3.4)$$

$$P_{out\ ave} = \frac{1}{T} \int P_{out}(t) dt \quad (3.5)$$

3.2 制御モデル

状態ベクトルを(3.6)式, ダミー入力 (u_3 , u_3) も含めた制御入力を(3.7)式とする. 本論文で構築したNMPCの制御周期は50msとした. NMPCに対して, 可動浮体の変位 (z) 及び制御力 (F_g) に(3.8)式の不等式制約条件を設ける. 不等式制約条件は, ダミー入力を用いて等式制約条件 (C_{eq}) に変換する. 不等式制約条件を等式制約条件に変換した結果を(3.9)式に示す. 評価関数 (J) は, P_{out} を含む(3.10)式とする. (3.10)式中の \mathbf{Q} , \mathbf{R} は対角行列, t_f は評価区間長を示し, 本論文では0.5sとしている. NMPCの詳細は参考文献1)に記載した.

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2]^T = [z \ \dot{z}]^T \quad (3.6)$$

$$\mathbf{u} = [u_1 \ u_2 \ u_3]^T = [F_g \ u_2 \ u_3]^T \quad (3.7)$$

$$\begin{cases} -0.15 \leq x_1 \leq 0.15 \\ -140 \leq u_1 \leq 140 \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\mathbf{C}_{eq} = \begin{bmatrix} x_1^2 + u_2^2 - 0.15^2 \\ u_1^2 + u_3^2 - 140^2 \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (3.9)$$

$$J = \int_t^{t+t_f} L(\mathbf{x}(\tau), \mathbf{u}(\tau)) d\tau$$

where

$$L = - \left(-u_1 x_2 - R_s \left(\frac{u_1}{K_t} \right)^2 \right) + \mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u} + r_{d1} u_2 + r_{d2} u_3 \quad (3.10)$$

4. 実装試験結果

図-2 に本装置による可動浮体の規則波中運動の模擬結果と数値計算の比較を示す. 図-2 には, 制御がない状態 (No control), 抵抗制御 (RL) を実装した結果も参考のため示している. 数値計算ではWAMITにより求めたPAWECの可動浮体のラディエーション流体力及び波浪強制力を用いた. 試行した全ての制御状態において, 本装置の計測結果は数値計算結

果とよく一致していることから, 本装置により可動浮体の制御状態を含めた規則波中の運動が模擬できている. なお, 制御を非線形モデル予測制御 (NMPC) とした全ての試験条件において, 最適化演算は50ms以内で完了した.

図-3 に(3.5)式で定義した平均発電電力 ($P_{out\ ave}$) の計測結果と数値計算結果の比較を示す. NMPCの計測結果及び数値計算結果は, 入射波の波周期が可動浮体の上下揺れ固有周期よりも長い条件において抵抗制御の結果よりも大きく, NMPCを採用することで波力発電装置の高効率化が実現されていることが分かる.

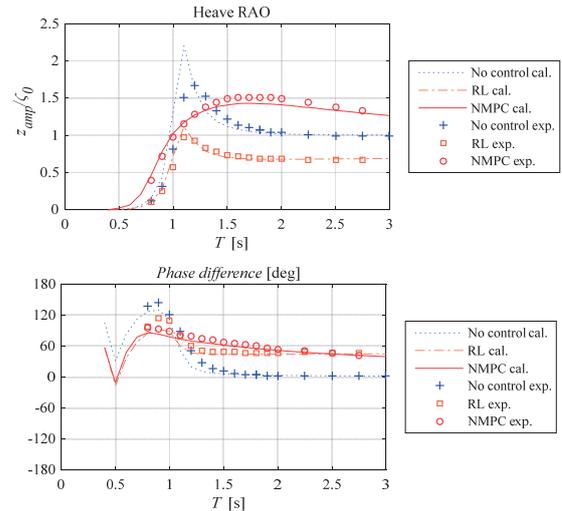


図-2 上下運動模擬結果

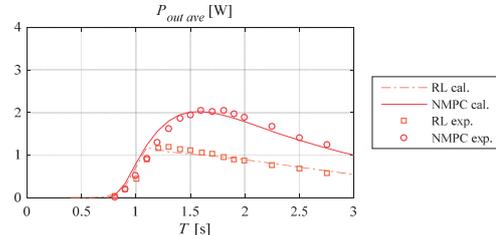


図-3 平均発電電力比較結果

5. まとめ

Point Absorber型波力発電装置を対象とした陸上試験装置を開発した. 本装置を用いて, 波力発電装置の制御状態における規則波中の運動を再現し, 平均発電電力を推定できることを確認すると共に, 非線形モデル予測制御の実時間制御を検証した.

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

- 谷口友基, 藤原敏文, 井上俊司, 大塚敏之: モデル予測制御による波力発電装置の高効率化, 日本船舶海洋工学会論文集, 第29号 (2019), pp. 171-179.
- WAMIT, Inc.: Wamit® User Manual (version 7.0).