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

谷口 友基*,藤原 敏文*,梅田 隼*,二村 正*

Real-Time Optimal Control of Point Absorber Type Wave Energy Converter with Onshore Bench Test System

by

TANIGUCHI Tomoki, FUJIWARA Toshifumi, UMEDA Jun, and NIMURA Tadashi

Abstract

In this study, we created an onshore bench test system consisting of two linear shaft motors to emulate the heave motion, the control force, and the power generation of a point absorber type wave energy converter with different control strategies. Two conventional control strategies – resistive load control and approximate complex-conjugate control with considering the copper loss – and a real-time optimal control, that is, the nonlinear model predictive control (NMPC), were implemented in the onshore bench test system. The measured motion of the system and control force showed good agreement with those calculated ones in irregular waves conditions. The NMPC completed the optimal calculations within 50 ms in the tests performed in this study. We verified that the calculation iteration number of the NMPC increased as the control input approached the input constraints from the onshore bench tests.

目 次

目	次	17
1.	まえがき	18
2.	陸上試験装置	19
3.	波力発電装置のモデル化	20
	3.1 波力発電装置	20
	3.2 PAWEC に働く力のモデル化	21
	3.2.1 波浪強制力	
	3.2.2 ラディエイション流体力	22
4.	NMPC による制御力のモデル化	
	4.1 PAWEC の状態方程式	
	4.2 NMPC の制約条件	
	4.3 NMPC の評価関数	
5.	実装試験結果	
6.	まとめ	27
謝	辞	27
参	考文献	27

1. まえがき

波力発電装置(以下,WECと略記)は、海洋波から効率よくエネルギーを回収するため、波浪エネルギー一次 変換装置(Point Absorber 型 WEC の場合は可動浮体)の運動が制御される.これまでにインピーダンスマッチン グに基づく制御法(reactive control or complex-conjugate control),可動浮体の運動速度とその位相を制御する制御 法(latching control)等¹⁾が提案され、1980年代以降、主に海外での実証試験²⁾に適用されてきた.しかし、これ らの制御法は制御対象の制約条件(可動浮体の変位制限,アクチュエータの入力制限等)を考慮することが難し い.そこで、制御対象の制約条件も考慮した最適制御法の1種にモデル予測制御(Model Predictive Control,以下, MPCと略記)と呼ばれる制御法があり、近年 WEC への適用例も報告されている³⁻⁶.

WECの波浪中の運動,制御力,及び作用する荷重は,同じ波条件でも実装する制御法により異なる.WECに 設けられる制約条件に違反することは,WECの破損等となりうるため,WECの安全性能と発電性能を検証する ためには,制御法を実装した状態で水槽試験等を行う必要がある.しかし,水槽の造波性能等の制約から,想定 する全ての波条件で試験を行えない場合もある.また,数値計算だけでは水槽模型等に実装する制御法の事前検 証としては不十分な場合もある.具体例を挙げると,MPC等の計算負荷が高い制御法の実装を試みる場合は,制 御周期以内に演算が完了するかの検証も必要となる.

本論文では、数値計算による検証と水槽試験による検証を補完する手段として開発した、WECを対象とした陸 上試験装置(以下,本装置と略記)を紹介する.本装置でモデル化するWECは、Point Absorber型WEC(以下, PAWECと略記)であり、発現機構としてリニア式発電機構(以下,リニア式 PTOと略記)を搭載した架空のWEC の1/20 模型である.本装置の妥当性を検証するため、波浪中を想定した運動、制御力、及び発電性能を計測し、 数値計算結果と比較した.また、非線形モデル予測制御(以下,NMPCと略記)を実装した際の実時間制御を検 証した結果についても報告する.

2. 陸上試験装置

本装置は、リニアシャフトモーター(以下、LSMと略記)が2台(日本パルスモーター株式会社製S250X及びSLP35)、サーボアンプが2台(Panasonic株式会社製MDDLT45SF)、及び高速演算処理装置が1台(株式会社エー・アンド・デイ社製DSPAD5436, CPU: Intel Core i7-610E, W×H×L: 324.5×169×235.5 mm)で構成される. LSMは、電機子内部にコイルユニットを持ち、永久磁石が積層されたシャフトが電機子を貫通している。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し⁷、電流を適切に制御することで任意の推力を発生させる。リニアシャフトモーターの動作原理は、リニア式 PTO と同じであり、より実機に近い状態での検討を行うため、リニアシャフトモーター2台を直列に結合した装置とした。

Figs. 1,2 に本装置の写真と概略図を示し, Table 1 に LSM の諸元を示す.本装置は 2 台の LSM を接続治具を介 して接続している. S250X はシャフトが駆動し, SLP35 は電機子が駆動する. S250X のシャフトは,転がり軸受 けで支持されている.一方, SLP35 の電機子は,リニアガイドを介してレール上に設置されている.リニアガイ ドは鋼球が転がる転動溝を持ち,大きな荷重を支持出来るものの接触面積の増加により転がり軸受けより摩擦抵 抗が大きい.

高速演算処理装置は、リニアエンコーダー(RSF Elektronik Ges.m.b.H.社製 MS 15.74)を用いて計測した LSM の位置情報を基に速度、加速度を演算する.また、PAWEC に働く時間領域の波浪強制力、制御力、ラディエイション流体力、及び復原力を計算する MATLAB/Simulink モデルを実行すると共に、必要な推力指令値をサーボアンプに伝送する.制御力以外の演算処理は 10 ms 毎に行った.一方、制御力に関する演算処理は 50 ms 毎に実行し、新しい制御力が決定するまでは 1 期前の値に固定した.

本装置の駆動部は、S250X のシャフト、SLP35 の電機子、及び接続治具であり、これらの合計質量を PAWEC の可動浮体の質量と一致させた. 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、ラディエイション流体力、及び復原力を発生させるとともに、後述する 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. なお、PAWEC は水中に存在する想定である が、可動浮体に働く摩擦、造渦減衰力等の流体の粘性に起因する力はモデル化していない.



Fig. 1 Photo of the onshore bench test system.



Fig. 2 Schematic view of the onshore bench test system.

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	4.40
Rated force	Ν	140	185
Thrust coefficient	N/A	58	68
Armature winding resistance per phase	Ω	3.75	3.60

Table 1 Specifications of the S250X and SLP35 shaft motors.

本装置を一定速度で運動させ,S250Xの可動部及びSLP35の可動部の摩擦抵抗を計測した結果をFig.3に示 す.Fig.3には、参考文献⁸に従い推定したSLP35の可動部に働く摩擦抵抗推定結果も示す.S250Xのストロー ク(最大片振幅155mm)はSLP35(同700mm)より短いため、S250Xの高速域の摩擦抵抗は計測出来ていない. S250XとSLP35の運動速度範囲は、それぞれ0.01~0.3 m/s、0.01~1.0 m/s である.Fig.3よりS250Xの摩擦抵抗 はSLP35に比べて十分小さいことが分かる.一方、SLP35の可動部に働く摩擦抵抗は、PAWECの可動浮体に働 く外力と同程度の大きさを持つため摩擦抵抗が存在すると本装置の運動を妨げる.そこで、SLP35には、Fig.3の 摩擦抵抗推定結果を用いて本装置の運動速度に応じた摩擦補正力を加えた.



Fig. 3 Measured and estimated friction forces of the linear shaft motors.

3. 波力発電装置のモデル化

3.1 波力発電装置

本論文では Fig. 4 に示すような 1 自由度系の PAWEC を想定する. PAWEC モデルは想定実機の約 1/20 縮尺模型とする.可動浮体 (Fig. 4 中の Float)は、Table 2 に示す諸元を持つ中空円筒体であり、スパー (Fig. 4 中の Spar)が可動浮体を貫通している.可動浮体の周波数領域における付加質量、造波減衰力係数、及び単位入射波当たりの波浪強制力は 3 次元境界要素法に基づく商用数値計算コード WAMIT® version 7.0%を用いて計算した.



Fig. 4 Schematic views of the point absorber type WEC.

Item	Symbol	Value
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

Table 2 Principal particulars of the model float (model scale 1/20).

可動浮体の運動方程式を(1)式に示す.(1)式中の z, F_e , F_g , 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.上付きドットは時間微分を示す.

$$m_{f}\ddot{z}(t) = F_{e}(t) + F_{g}(t) + F_{r}(t) + F_{s}(t)$$
(1)

3.2 PAWEC に働く力のモデル化

本装置を用いて制御法を実装した PAWEC の波浪中の運動を再現するため,(1)式中の右辺の各項を MATLAB/Simulink でモデル化した.ここでは、不規則波中における $F_e(t)$ と Fr(t)のモデル化を記載し、 F_g は4章 に記載する.

3.2.1 波浪強制力

不規則波中の F_eは,不規則波が(2)式に示す JONSWAP 型のスペクトル¹⁰⁾を持つとし,(4)式に従い計算した. なお,(2)式中の g, H_{m0}, f_p,及びγは,それぞれ重力加速度,有義波高,ピーク波周波数,及びスペクトルのピー ク増大率のパラメータを示す.本論文では,有義波周期(T_s)とピーク波周期(T_p)の関係は(3)式とし,γは 3.3 とした.(4)式中の E_e(ω), φは,それぞれ WAMIT で求めた単位振幅波に対する波浪強制力の複素振幅,及び 0~ 2πまでのランダム位相である.不規則波中試験の試験時間及び数値計算時間は,実機スケールで約2時間に相当 する約27分30秒間とした.本研究では,1つの高速演算処理装置で最適化演算,及び全ての力のモデル化を行っ ている.演算負荷低減のため成分波の周波数分割数を200個とし,ピーク波周波数の成分波が持つエネルギーを 基準とし,ピーク波周波数を中心に各成分波の汚っエネルギーが同程度になるように周波数を分割した.Fig.5に 示す通り,設定した不規則波スペクトルと高速演算処理装置で生成した波形のスペクトル解析結果は,ピーク波 周波数付近を中心にほぼ一致する.一方,周波数の高い側の裾では,高速演算処理装置で生成した成分波の周波 数分割幅が大きくなった結果,スペクトル解析結果に振動が見られた.

$$S(f) = \frac{\alpha_{js}g^{2}}{(2\pi)^{4}} f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{f_{p}}{f}\right)^{4}\right] \gamma^{\Gamma}, \quad \Gamma = \exp\left[-\left(\frac{f_{p}}{\sqrt{2}\sigma}\right)^{2}\right], \quad \sigma = \begin{cases} 0.07 & f \le f_{p} \\ 0.09 & f > f_{p} \end{cases}$$

$$\alpha_{js} = \frac{H_{m0}^{2}}{16\int_{0}^{\infty}S^{*}(f)df}, \quad S^{*}(f) = \frac{g^{2}}{(2\pi)^{4}} f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{f_{p}}{f}\right)^{4}\right] \gamma^{\Gamma}$$
(2)

 $T_{p} = 1.05T_{s}$

(3)

$$F_{e}(t) = \operatorname{Re}\left[R_{f}\sum_{j=1}^{N}E_{e}(\omega_{j})e^{i(\omega_{j}t+\phi_{j})}\sqrt{2S(\omega_{j})d\omega_{j}}\right]$$

$$R_{f} = \begin{cases} 0.5\left(1+\cos\left(\pi+\frac{\pi t}{30}\right)\right), & t \leq 30\\ 1, & t > 30 \end{cases}$$

$$(4)$$

15

Fig. 5 Comparison of the targeted and measured wave spectrums, $H_{m0} = 0.05$ m, $T_s = 1.68$ s, and $\gamma = 3.3$.

f[Hz]

0.2

3.2.2 ラディエイション流体力

不規則波中の F, は、ラディエイション流体力に対するメモリー影響関数(K,)を考慮した(5)式で与える.(5)式 以降、太字とした変数はベクトル又は行列を示す.

(5)式中の $m_{33}(\infty)$ は、周波数が無限大での可動浮体の付加質量である.ここでは t = 0 秒以前で可動浮体は静止 していると仮定する.(5)式の畳み込み積分項を $\dot{z}(t)$ を入力とする線形時不変システムの出力として(6)式で近似す る.特異値分解法を用いるシステム同定¹¹⁾により得られた 3 次の線形時不変システムの係数行列 A_r , B_r 及び C_r を(7)式に示す.x_rは状態ベクトル,yは出力を示す.なお、線形時不変システムの次数は、WAMIT により求めた 付加質量と造波減衰力係数を用いて得られる Kr と、推定した線形時不変システムのインパルス応答の決定係数 (*Gof*) が 0.95 以上となるまで線形時不変システムの次数を増加させることで決定した.

 u_r はシステムへの入力であり $\dot{z}(t)$ である.線形時不変システムのインパルス応答関数と K_r の比較を示した Fig. 6 より、(6)式による近似が良好であることが分かる.

$$F_{r}(t) = -m_{33}(\infty)\ddot{z}(t) - \int_{0}^{t} K_{r}(t-\tau)\dot{z}(\tau)d\tau$$
(5)

$$\dot{\mathbf{x}}_{r}(t) = \mathbf{A}_{r}\mathbf{x}_{r}(t) + \mathbf{B}_{r}u_{r}(t)$$

$$\mathbf{x}_{r}(0) = \mathbf{0}$$

$$y_{r} = \mathbf{C}_{r}\mathbf{x}_{r}(t) \approx \int_{0}^{t} K_{r}(t-\tau)\dot{z}(\tau)d\tau$$
(6)

$$\mathbf{A}_{r} = \begin{bmatrix} A_{r11} & A_{r12} & A_{r13} \\ A_{r21} & A_{r22} & A_{r23} \\ A_{r31} & A_{r32} & A_{r33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3.44 & 4.71 & 3.73 \\ -4.71 & -0.0114 & -0.175 \\ -3.73 & -0.175 & -6.65 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_{r} = \begin{bmatrix} B_{r11} \\ B_{r21} \\ B_{r31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0442 \\ -0.00245 \\ -0.0210 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_{r} = \begin{bmatrix} C_{r11} & C_{r12} & C_{r13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.884 & 0.0489 & 0.422 \end{bmatrix}$$
(7)



Fig. 6 Comparison of the impulse response function, K_r , and estimated result by Eq. (6).

4. NMPC による制御力のモデル化

本論文で用いる NMPC は、最適制御入力自体が状態量ベクトル $\mathbf{x}(t)$ を通じて時間依存であることを利用し、最 適制御の時間変化を追跡する数値解法^{12,13}である.本論文で用いる NMPC の詳細は参考文献¹³⁾を参照されたい. 本論文の NMPC では、高速演算処理装置の演算速度を踏まえた試行錯誤の結果、評価区間、評価区間の分割数、 F_{g} を決定する最大繰り返し計算数、及び制御周期をそれぞれ、0.5 s、50 分割、200 回、及び 50 ms とした.

WEC に働く波浪強制力は直接計測が難しい.近年では1方向不規則波中ではあるが,WEC に働く現在の波浪 強制力の推定法,将来の波浪強制力の予測法^{14)~10}がいくつか提案されている.本論文では,本装置を用いてWEC の波浪中の運動等を再現することを主目的とするため,外力として与える将来の波浪強制力は評価区間で既知と した.

4.1 PAWEC の状態方程式

状態ベクトル(**x**)及び入力ベクトル(**u**)を(8)式とする.**u**の要素 *u*₂, *u*₃は後述する不等式拘束条件を等式拘束 条件に変換する際に用いるダミー変数である.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} z & \dot{z} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}, \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} F_g & u_2 & u_3 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(8)

不規則波中における可動浮体の状態方程式は、(8)式の状態ベクトル(x)に x,を加えた拡張状態ベクトルを用いて(9)式で表す.

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{1} \ \dot{x}_{2} \ \dot{x}_{r1} \ \dot{x}_{r2} \ \dot{x}_{r3} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} x_{2} \\ \frac{1}{m_{f} + m_{33}(\infty)} \{F_{e} + u_{1} - (C_{r_{11}}x_{r_{1}} + C_{r_{12}}x_{r_{2}} + C_{r_{13}}x_{r_{3}}) - C_{33}x_{1} \} \\ A_{r_{11}}x_{r_{1}} + A_{r_{12}}x_{r_{2}} + A_{r_{13}}x_{r_{3}} + B_{r_{11}}x_{2} \\ A_{r_{21}}x_{r_{1}} + A_{r_{22}}x_{r_{2}} + A_{r_{23}}x_{r_{3}} + B_{r_{21}}x_{2} \\ A_{r_{31}}x_{r_{1}} + A_{r_{32}}x_{r_{2}} + A_{r_{33}}x_{r_{3}} + B_{r_{31}}x_{2} \end{bmatrix}$$
(9)

4.2 NMPC の制約条件

可動浮体の変位(z)及び制御力(F_g)に(10)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¹²⁾.なお、(10)式では(8)式に示す通り $z \in x_1$ 、 $F_g \in u_1$ と変換している.

$$\begin{cases} -0.15 \le x_1 \le 0.15 \\ -140 \le u_1 \le 140 \end{cases} \Leftrightarrow \mathbf{C}_{eq} = \begin{bmatrix} x_1^2 + u_2^2 - 0.15^2 \\ u_1^2 + u_3^2 - 140^2 \end{bmatrix} = \mathbf{0}$$
(10)

4.3 NMPC の評価関数

PAWEC への機械入力,制御力を加えた時にリニア式 PTO に生じる銅損,及び機械入力と銅損の差分として得られる電力をそれぞれ P_{mech} , P_{loss} ,及び P_{out} とし,(11)~(14)式で定義する⁶.(12)式中の R_s , K_t は,それぞれリニア式 PTO (S250X)の巻線抵抗と推力係数である. P_{out} の時間平均値として平均電力 ($P_{out ave}$)を(14)式で定義する. $P_{out ave}$ は PAWEC が回収するエネルギー量に比例する物理量である.なお,(14)式において,(3)式による緩起動が完了した時刻を T_1 とし, 27 分 30 秒経過する時刻を T_2 とする.

$$P_{mech} = -F_g \dot{z} = -u_1 x_2 \tag{11}$$

$$P_{loss} = R_s \left(\frac{F_g}{K_t}\right)^2 = R_s \left(\frac{u_1}{K_t}\right)^2 \tag{12}$$

$$P_{out} = P_{mech} - P_{loss} \tag{13}$$

$$P_{out \, ave} = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} P_{out} dt \tag{14}$$

*P_{out}*を最大化する(15)式を評価関数(J)とする.(15)式中のQ, Rは対角行列であり,対角要素をそれぞれ,(*q*₁, *q*₂),(*R*₁, *R*₂, *R*₃)とし,これらは全て非負の値とする.また,*t*_fは評価区間長を示す.なお,評価関数にダミー入力(*u*₂及び*u*₃)の1次の項を加えたのは,(10)式がダミー入力に対して2次の項しか含まず,停留条件からダミー入力の符合が決まらず,解の追跡に失敗する場合があるためである¹²⁾.Q,Rの対角要素,ダミー入力の係数(*r*_d, *r*_d₂)は,NMPCの調整係数であり,本論文では,事前に行った数値計算により最適制御が発散しないよう試行錯誤した結果 Table 3 に示す値を用いた.これらの調整係数の合理的な決定法については今後の研究課題としたい.

Case 1 は状態量、ダミー入力に関する係数を大きくすることで制約条件を破綻させないことに重点を置いた. 一方、Case 2 は状態量に関連する係数を 0、ダミー入力に関連する係数も小さくし、Pout の最大化により重点を置いた.

$$J = \int_{t}^{t+t_{f}} L(\mathbf{x}(\tau), \mathbf{u}(\tau)) d\tau \quad where \quad L = -P_{out} + \mathbf{x}^{\mathrm{T}} \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^{\mathrm{T}} \mathbf{R} \mathbf{u} + r_{d1} u_{2} + r_{d2} u_{3}$$
(15)

Tubi	0 0 1 0	1 uno con	0 01 0		101 00		IG 2.
	q_1	q_2	R_I	R_2	R_3	r _{d1}	r_{d2}
Case 1	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.05	0.05
Case 2	0	0	0.001	0.001	0.001	0.005	0.005

Table 3 Parameters of the NMPC for Case 1 and 2.

5. 実装試験結果

PAWECの可動浮体に働く制御力及び外力を2台のLSMに加えることで、本装置により不規則波中における可 動浮体の運動を模擬出来ることを検証する.可動浮体を制御しない状態、NMPCを実装した状態、及び既存の制 御法として、抵抗制御(以下, RLと略記)と出力最大化制御(以下, ACLと略記)^{4,17)}を実装した状態を対象に、 計測結果と Matlab/Simulinkによる数値計算結果を比較した.波条件は Table 4 とした. RL 及び ACL は、単一の 周波数に応じて運動速度及び変位に比例する制御変数をそれぞれ決定する^{4,13)}.本論文では、制御変数を決定す る周波数を入射波のピーク波周波数に置き換えた. 制御法を RL として有義波高 (H_{m0}) を 0.05 m, 有義波周期 (T_s) を 2.46 s とした波条件は,本装置の運動がほ ぼ停止したため計測出来ていない.また,制御法を ACL とし, H_{m0} を 0.1 m とした波条件は, T_s を 1.23 s よりも 長周期に設定すると,最大変位が本装置の構造上の変位制限 (0.16 m)を越えたため中止した.NMPC の調整係 数は, H_{m0} が 0.05 m の場合は Case 2, H_{m0} が 0.1 m の場合は Case 1 とした.

Table 4 Experimental condi	tions in irregular waves.
Significant wave height, H_{m0} [m]	Significant wave period, T_s [s]
0.05	1.23, 1.45, 1.68, 2.12, 2.46
0.1	1.23, 1.68, 2.12

本装置による運動,制御力,発電電力の計測結果と数値計算結果に関して 1/3 有義値の比較を Figs. 7~9 に示す. 制御法により若干のばらつきが見られるものの,有義値の計測結果と数値計算結果は概ね一致する.



Fig. 7 Significant values of z in irregular waves (left: $H_{m0} = 0.05 \text{ m}$, right: $H_{m0} = 0.1 \text{ m}$).



Fig. 8 Significant values of F_g in irregular waves (left: $H_{m0} = 0.05$ m, right: $H_{m0} = 0.1$ m).



Fig. 9 Significant values of P_{out} in irregular waves, (left: $H_{m0} = 0.05 \text{ m}$, right: $H_{m0} = 0.1 \text{ m}$).

1/3 有義値の一致が良い $H_{m0} = 0.05 \text{ m}$, $T_s = 2.12 \text{ s}$ における上下揺れのパワースペクトル密度 (PSD) の比較結果 (Fig. 10) を見ると, 試行した制御法で PSD も傾向を捉えている. 1/3 有義値の一致が劣る, 制御法を ACL 及び RL とした $T_s = 1.23 \text{ s}$ における上下揺れの PSD を Fig. 11 に示す. $H_{m0} = 0.05 \text{ m}$ の場合 (Fig. 11 左図), 計測結果と 数値計算結果は, ピークを示す周波数は一致するものの, 計測結果の PSD は数値計算結果よりも小さくなる. こ の傾向は, 波浪強制力が増し,本装置の機械的な減衰力による影響が相対的に小さくなる $H_{m0} = 0.1 \text{ m}$ (Fig. 11 右図) とすることで改善が見られた.

上下揺れの時系列に関して、Uncontrolled と NMPC の Case2 を対象に、 $H_{m0} = 0.05 \text{ m}, T_s = 2.12 \text{ s}$ における計測結果と数値計算結果の比較を Fig. 12 に示す. グラフは最大変位となった時刻付近を拡大している. Uncontrolled と NMPC, Case2 の結果とも、計測結果と数値計算結果の最大変位が見られる時刻は一致し、かつ運動の位相情報も よく一致した.



Fig. 10 Comparison of measured and calculated PSDs of z in irregular waves, $H_{m0} = 0.05$ m and $T_s = 2.12$ s.



Fig. 11 PSDs of z for ACL and RL controls in irregular waves, $T_s = 1.23$ s (left: $H_{mo} = 0.05$ m, right: $H_{mo} = 0.1$ m).



Fig. 12 Comparison of time series of z in irregular waves, $H_{m0} = 0.05$ m and $T_s = 2.12$ s (left: Uncontrolled, right: NMPC Case2).

 $P_{out ave}$ に関する計測結果と数値計算結果の比較を Figs. 13, 14 に示す.制御法が NMPC 及び ACL の場合, T_s に対する $P_{out ave}$ の変化の傾向を定性的に捉えているが、制御法が RL の場合, T_s の増加に伴い計測結果と数値計算結果の差が広がる結果となった.

Figs. 7~12 に示す計測結果と数値計算結果の比較から、本装置により可動浮体の制御状態を含めた不規則波中の運動を精度よく模擬出来ていることがわかる.また、本装置の機械的な減衰力の影響を避けるため、本装置の 安全性が保たれる範囲で波高が大きい試験が望ましい.

本装置を用いて発電電力の評価を試みる場合,発電電力の変動量の指標となる 1/3 有義値(Fig.9)は、計測結果と数値計算結果が良く一致し、精度よく評価出来ると思われる.一方、時間平均値(Figs.13,14)は、計測結果と数値計算結果は T_sに対する変化が同じになるものの定量的には一致しない.これは、不規則波の時系列の中で 波高が小さく波浪強制力も小さい場合、本装置の機械的な減衰力の影響が相対的に大きくなり、本装置の運動が 数値計算結果よりも小さくなる傾向があるためと思われる.



Fig. 13 $P_{out ave}$ in irregular waves, $H_{m0} = 0.05$ m.



Fig. 14 $P_{out ave}$ in irregular waves, $H_{m0} = 0.1$ m.

6. まとめ

Point Absorber 型波力発電装置を対象に,外力及び制御力を2台のリニアシャフトモーターを用いて発生させ, 抵抗制御,出力最大化制御,及び非線形モデル予測制御を実装した状態での波浪中の運動を再現する陸上試験装置を開発し,不規則波中の運動模擬試験を行うことで陸上試験装置の妥当性を検証した.また,制御法として非 線形モデル予測制御を実装した場合の実時間制御も検証し,以下の知見を得た.

- 不規則波中模擬試験では、波浪中の運動を精度よく模擬出来る.また、発電電力の時間平均値に関しては制御 法毎の有義波周期に対する変化を定性的に捉えることが出来る.
- ・本論文で構築した非線形モデル予測制御法は、本論文にて開発した陸上試験装置において規則波、及び不規則 波中において制御周期を 50 ms とした実時間制御が可能である.

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.波力発電装置に 対応した非線形モデル予測制御の制御モデル開発では、京都大学大塚敏之教授にご助言を頂きました.また、非 線形モデル予測制御のコードの構築では、The MathWorks GK赤阪大介氏に様々なご協力を頂きました.ここに 謝意を表します.

参考文献

 Falnes, J., 2002, Ocean Waves and Oscillating Systems: Linear Interactions Including Wave-Energy Extraction, Cambridge University Press, Cambridge.

- Budal, K., Falnes, J., Iversen, L.C., Lillebekken, P.M., Oltedal, G., Hals, T., Onshus, T. and Høy, A.S., 1982, The Norwegian Wave-Power Buoy Project, Proc. of the 2nd International Symposium on Wave Energy Utilization, pp.323-324.
- Gieske, P., 2007, Model Predictive Control of a Wave Energy Converter: Archimedes Wave Swing, PhD thesis, Delft University of Technology.
- Hals, J., Falnes, J., and Moan, T., 2011, A Comparison of Selected Strategies for Adaptive Control of Wave Energy Converters, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 133, Issue 3.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 紙屋大輝,後藤博樹,一ノ倉理:波力発電用リニア発電機の制御に関する検討,日本磁気学会論文特集号, 第1巻,第1号(2017), pp.57-60.
- Makkar, C., Dixon, W. E., Sawyer, W. G., and Hu, G., 2005, A New Continuously Differentiable Friction Model for Control Systems Design, Proc. of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics., Vol. 1, pp.600-605.
- 9) WAMIT, Inc.: Wamit® User Manual (version 7.0).
- Hasselman, K., Barnett, T.P., Bouws, E., et al., 1973, Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Technical Report 12, German Hydrographic Institute.
- Taghipour, R., Perez, T., and Moan, T., 2008, Hybrid Frequency-Time Domain Models for Dynamic Response Analysis of Marine Structures, Ocean Engineering, Vol. 35, Issue 7, pp. 685-705.
- 12) 大塚敏之:非線形最適制御入門,コロナ社(2013).
- 13) 大塚敏之(編著),浜松正典,永塚満,他7名(共著):実時間最適化による制御の実応用,コロナ社(2015).
- Fusco, F., and Ringwood, J. V., 2010, Short-Term Wave Forecasting with AR models in Real-Time Optimal Control of Wave Energy Converters. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp.2475–2480.
- Garcia-Abril, M., Paparella, F., and Ringwood, J. V., 2017, Excitation force estimation and forecasting for wave energy applications, IFAC-PapersOnLine, Vol. 50(1), pp.14692–14697.
- Nguyen, H. N., and Tona, P., 2018, Short-term wave force prediction for wave energy converter control. Control Engineering Practice, Vol. 75, pp.26–37
- 17) De la Villa Jaén, A., García-Santana, A., and El Montoya-Andrade, D., 2014, Maximizing Output Power of Linear Generators for Wave Energy Conversion, International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 24, Issue 6, pp.875–890.