

## 海底固定型振り子式波力発電用油圧動力変換システムの 規則波シミュレーション

今井 康貴<sup>\*1</sup>, 永田 修一<sup>\*1</sup>, 村上 天元<sup>\*1</sup>, 石田 茂資<sup>\*1</sup>

### Simulation of hydraulic power conversion system for pendulum wave energy converter in regular waves

Yasutaka IMAI<sup>\*1</sup>, Shuichi NAGATA<sup>\*1</sup>, Tengen MURAKAMI<sup>\*1</sup> and Shigesuke ISHIDA<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> Institute of ocean energy, Saga University  
Honjo 1, Saga 8408502, Japan

#### Abstract

Hydraulic systems have been applied as a power take-off device in wave energy converter because the systems have high robustness and controllability under severe load conditions. To maximize power generation, optimization of the combination of pendulum dimensions, hydraulic parts and generator is required under various sea states. Moreover, from the viewpoint of grid connection, maximization of output power and smoothing have to be satisfied simultaneously. In this research, to optimize the pendulum wave energy converter, the power conversion simulation which considered from the wave to the generator rotation was created.

**Key words** : Wave energy converter, Hydraulic PTO, Matlab, Simulink, Pendulum

## 1. 緒 言

固定式振り子型波力発電装置は没水した振り子を波パワーで揺動し、その動力で発電機を駆動する。空中に回転軸をもつタイプは室蘭工大<sup>1)</sup>、東大<sup>2)</sup>などで開発され、海底に回転軸をもつタイプはフィンランド AW-Energy 社の WaveRoller<sup>3)</sup>や英国 Oyster<sup>4)</sup>などで開発された。

これら装置には動力取出し装置として油圧駆動装置が採用され、研究や実用化が進められている。油圧システムは厳しい荷重条件下において高い堅牢性と制御性を持つため、近年、波力発電装置の動力取出し装置として採用され、研究や実用化が進められている<sup>5)7)</sup>。ただし、海象は海域により変化するため、発電量を最大化するための振り子寸法、油圧部品、発電機の組み合わせ最適化をはかる必要がある。また、系統連系から見れば出力電力を最大化すると同時に平滑化する必要がある。そこで本研究では振り子式波力発電装置の要素最適化をはかるため、波から発電機回転までを考慮した動力変換シミュレーションを作成した。

## 2. 動力変換システム

幅 5m、高さ 4.5m、奥行 0.5m の振り子が水深 5m の海底に設置された場合を想定する。図 1 に海底固定型振り子式波力発電装置の概念を示す。振り子板の回転中心にある動力取り出し装置(Power Take-off: PTO)は、入射波から振り子板が受ける動力を取り出し、振り子回転数をギヤボックスで増速し油圧回路に伝達する。振り子は水深 5m の水平な海底に設置し、回転軸を海底上 0.5m に持つとする。振り子板は厚さ 1cm の鋼板で製作を考えた。振り子の質量は 4251 kg、回転軸まわりの慣性モーメントは 32439 kg m<sup>2</sup> である。

---

原稿受付 2019 年 8 月 2 日

<sup>\*1</sup> 所属機関 (〒840-8502 佐賀市本庄町 1)

E-mail of corresponding author: imaiy@cc.saga-u.ac.jp

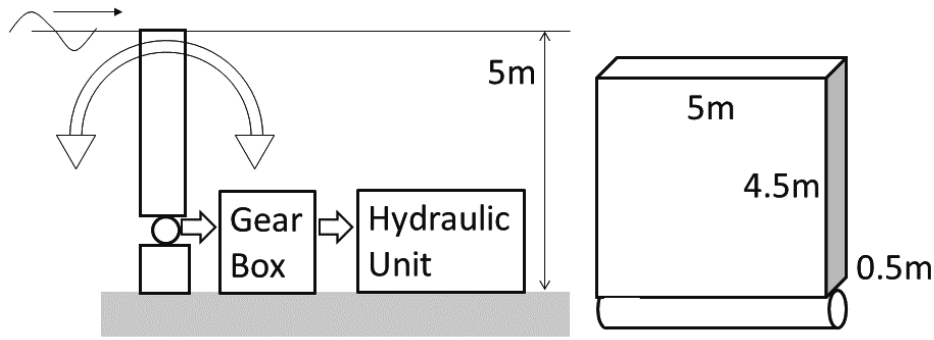


Figure 1 Concept of bottom fixed pendulum wave energy converter (left) and dimension of pendulum (right)

油圧システムの概念を図 2 に示す。寄せ波と引き波でアクチュエータからの作動油送出方向が逆転し、そのまま油圧ポンプに送ると発電機が逆転する。それを防止するため、チェックバルブを組み合わせたブリッジ回路を通して整流し、油圧モータおよび発電機を常に一方方向に駆動する。また、波動による脈動を防止するためアキュムレータ（蓄圧器）を用いる。

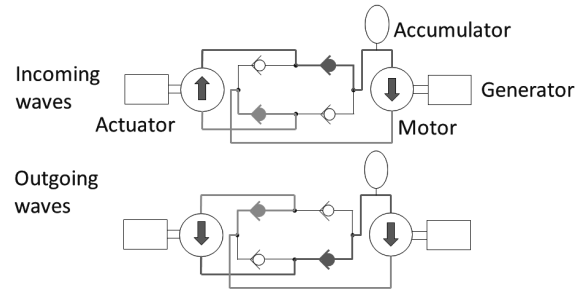


Figure 2 Hydraulic energy conversion system

### 2・1 振り子の動力変換

周波数領域における回転軸まわりの運動方程式は次式で表される。

$$I\ddot{\theta} = F_{ex} + F_{rad} + F_{PTO} \quad (1)$$

$I$  は回転軸まわりの慣性モーメント、 $F_{ex}$  は波強制力、 $F_{rad}$  はラディエーション力、 $F_{PTO}$  は PTO による反力である。カミンス方程式の畳み込み積分を用いて自由表面メモリ影響を考慮したラディエーション項を次式で表す。

$$F_{rad}(t) = -A_{\infty}\ddot{\theta} - \int_0^t K_{\tau}(t-\tau)\dot{\theta}(\tau)d\tau \quad (2)$$

$A_{\infty}$  は無限周波数の付加慣性モーメント、 $K_{\tau}$  はメモリ影響関数であり、周波数領域で求められる造波ダンピング  $B(\omega)$  を持ちいて次式で表される。

$$K_{\tau}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} B(\omega) \cos(\omega t) d\omega \quad (3)$$

波強制力は単一周期の規則波の場合には次式になる。

$$F_{exc}(t) = \Re \left[ R_f \frac{H}{2} F_{exc}(\omega) e^{i\omega t} \right] \quad (4)$$

$R_f$  はランプ関数,  $H$  は入射波の波高,  $F_{exc}$  は複素数で表した波強制力ベクトルである.  $\Re$  は複素数の実部をとることを表す. 不規則波の場合, 規則波成分の線形重ね合わせで水面変位を表す. 各規則波成分は波スペクトル  $S(\omega)$  から求める. 波強制力は次式で定義する.

$$F_{exc}(t) = \Re \left[ R_f \int_0^{\infty} F_{exc}(\omega_t) e^{i(\omega_t t + \phi)} \sqrt{2S(\omega_t)} d\omega_t \right] \quad (5)$$

波強制力のインパルス応答関数は次式で定義する.

$$K_i(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_{ex}(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (6)$$

FPTO は次式で表される.

$$F_{PTO}(t) = -C\dot{\theta} - K\theta \quad (7)$$

$C$  は PTO の減衰係数,  $K$  はバネ定数であり, 設置海域において吸収動力を最大化させるように決める必要がある. 本研究では規則波の場合を想定し, 以下のように決定した. 入射波の動力変換効率は入射波動力  $W_1$  に対する吸収動力  $W_2$  の比とする.

$$\eta = \frac{W_2}{W_1} \quad (8)$$

入射波の動力は次式で定義される.

$$W_1 = \frac{\rho g H^2 B C}{16} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (9)$$

$\rho$  は密度,  $g$  は重力加速度,  $H$  は波高,  $C$  は位相速度,  $k$  は波数,  $h$  は水深である. また,  $B$  は装置幅である. 一方,  $W_2$  は次式で表される.

$$W_2 = \frac{1}{T} \int_0^T T_{rq} \dot{\theta} dt \quad (10)$$

波高  $H=0.5\text{m}$ , 周期  $T=10$  秒の規則波中における振り子の変換効率を図 3 に示す.  $C$  (横軸),  $K$  (縦軸) の組み合わせにおける (8) を計算した. 図 3 から変換効率の高い  $K=1\text{e}6 [\text{Nm/rad}]$ ,  $C=1\text{e}6 [\text{Nms/rad}]$  を選択した.

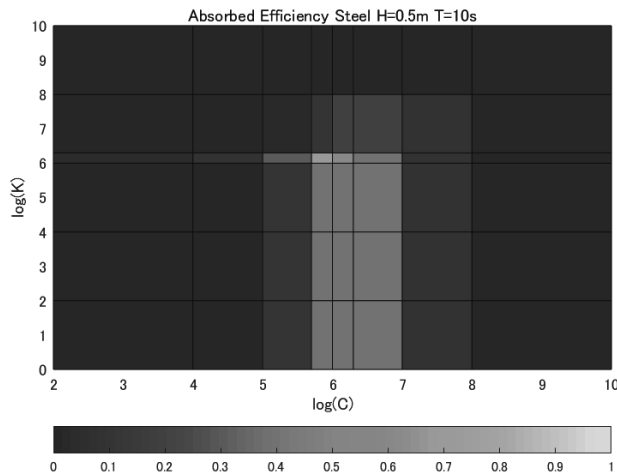


Figure 3 Absorbed efficiency in regular wave

$K=1e6[Nm/rad]$ ,  $C=1e6[Nms/rad]$ を選択した場合, 波高 0.5~4.0m, 周期 4~16 秒の入射波における変換効率を図 4 に示す. は短波長側が高効率, 長波長側が比較的低効率になる. また, 図 5 に振り子が吸収する動力を示す.

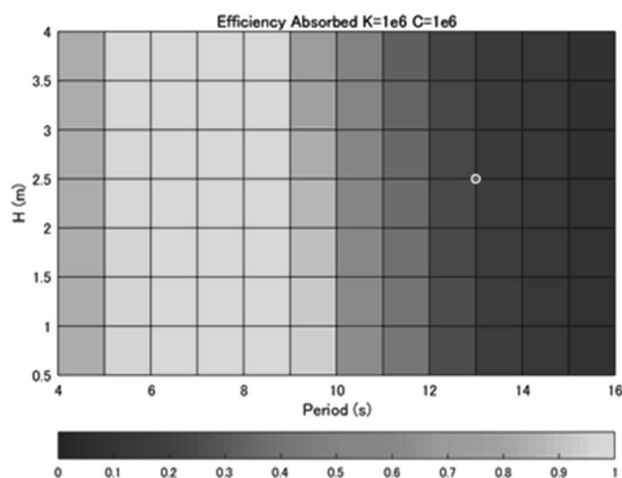


Figure 4 Absorbed efficiency in various wave conditions

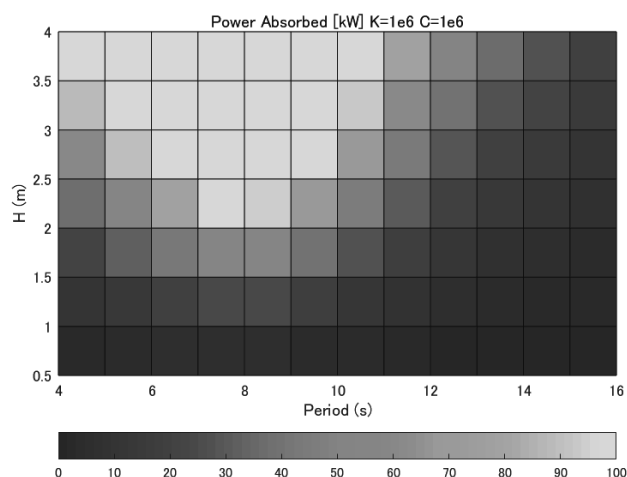


Figure 5 Absorbed power in various wave conditions

## 2・2 油圧動力変換のモデル化

想定する水深 5m の海域は波高 1m 以下であり, 図 5 の 10kW 以下の部分に該当すると考えられる. そこで出力 3.3kW の発電機を駆動することを想定して油圧動力変換システムを検討した. 図 6 にシステム概念, 表 1 に要素の仕様を示す. また, これらを組み合わせた実験回路を図 7 に, 油圧回路を図 8 に示す.

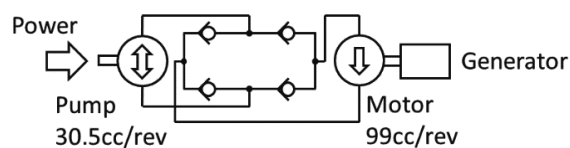


Figure 6 Concept of hydraulic conversion system

Table 1 Specification of hydraulic elements

Parts	Type (manufacturer)	Specification
Hydraulic pump	MRF-03H (Mitsubishi Heavy Industries)	30.9cc/rev, 14MPa
Hydraulic motor	ME100 (Eaton)	99cc/rev
Generator	SKY-MG450 (Sky denshi)	3.3kW/300rpm, 15 Ohm, 48pole
Accumulator	NH-A21MP-LL5-AAC (Nippon Accumulator)	5.0L, 3.5MPa N2
Servo motor	HG-JR15K1M (Mitsubishi electric)	7.3kW/1000rpm

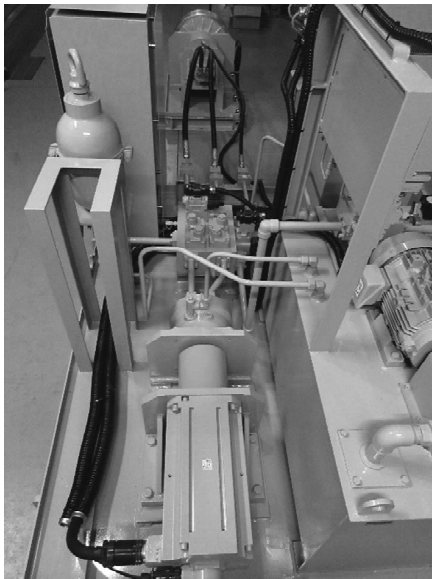


Figure 7 Experiment facility

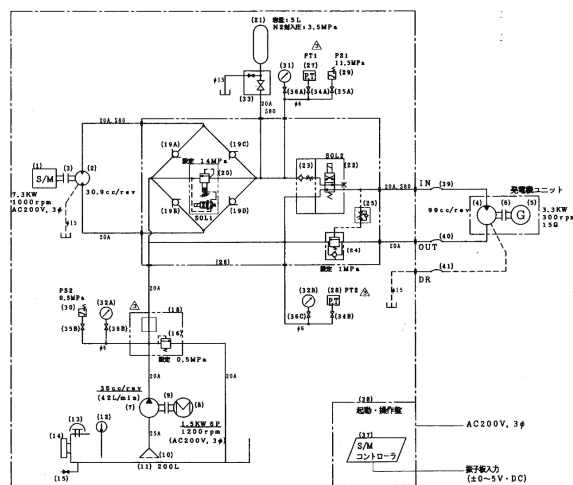


Figure 8 Hydraulic circuit

また、変換効率の向上を目指した要素の選定のため、油圧変換部の Simulink シミュレータを作成した。図 9 に油圧変換部のモデルを示す。モデルの検証を行うため、シミュレーションと実験の油圧モータ前後の差圧を比較した。入力回転数を振幅 1000rpm, 周期 6 秒で正弦的に変化させたシミュレーションと実験の結果を図 10 に示す。シミュレーションの差圧が実験値より 1MPa 高いが、全般的な傾向は合致した。

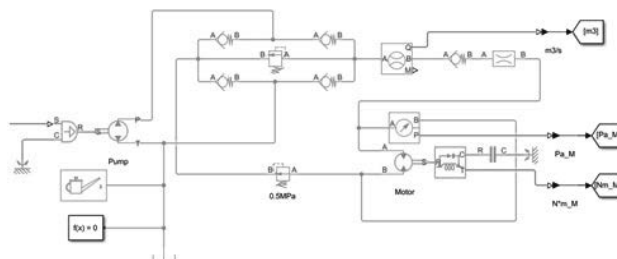


Figure 9 Simulink model of hydraulic power converter

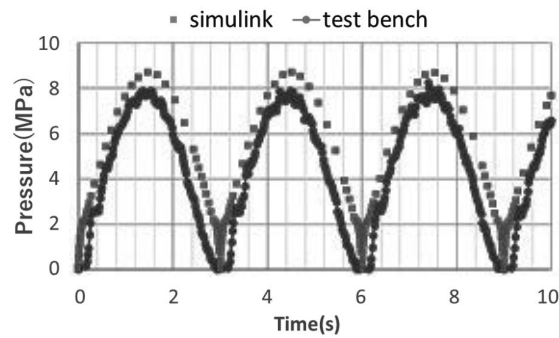


Figure 10 Comparison of pressure of working fluid in hydraulic circuit

### 2・3 振り子と油圧動力変換の結合

2・1 節の振り子部と 2・2 節の油圧変換部を連成させ、規則波から動力変換までのシミュレーションを作成した(図 11). 波高 0.5m, 周期 10 秒の規則波におけるシミュレーション結果を図 12 に示す. 油圧モータ出力は振り子と同位相で変化する. また, 振り子動力が負になる場合にはブリッジ回路が全波整流し正のモータ動力に変換する. モータ出力の変動はそのまま発電機回転数の変動になるため, 回転数平滑化を行うアキュムレータが必要になる.

同じ入射波条件において, 油圧モータ入口にアキュムレータを設置した場合のモータ出力を図 13 に示す. アキュムレータはガス封入型, 全容積  $8 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ , 最小ガス容積  $4 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ , 初期圧力 7MPa とした. 動作開始時はアキュムレータ圧力が油圧回路圧力より高いためアキュムレータは作動油を放出し, 20 秒経過すると出力は一定値に近づく. 表 2 に出力の平均値と標準偏差を示す. アキュムレータを取り付けると出力の平均値は 0.87kW 減少するが, 一方で標準偏差は 1.67kW 減少する. 系統連携を考えると, アキュムレータの設置は必至であるが, その最適な仕様は今後の課題とする.

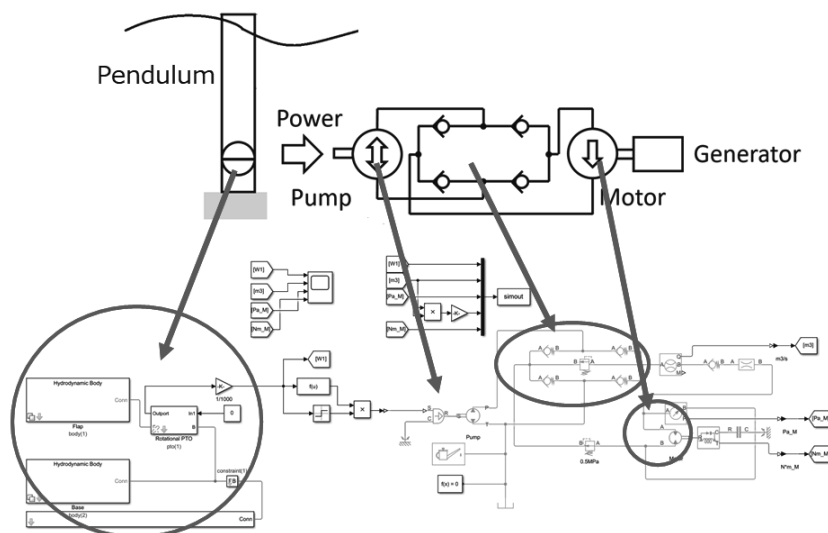
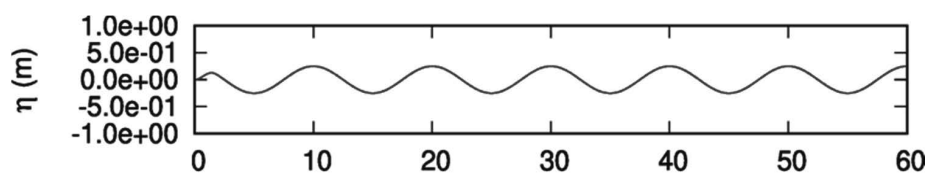


Figure 11 Model combining pendulum and power converter



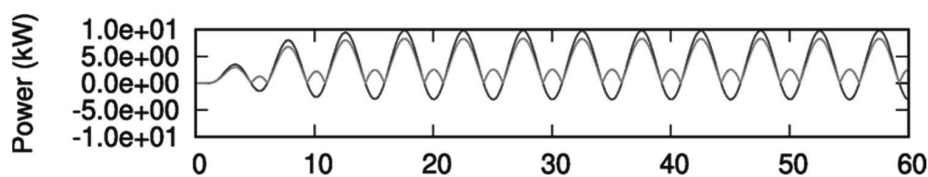


Figure 12 Wave height, output power of pendulum (purple) and output power of hydraulic motor (green) without accumulator

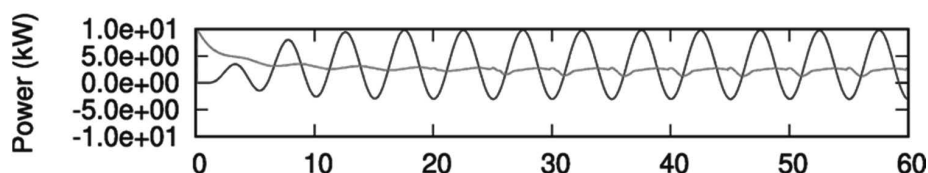


Figure 13 Output power of pendulum (purple) and output power of hydraulic motor (green) with accumulator

Table 2 Output power of hydraulic motor

Output power	Without Accumulator	With Accumulator
Average (kW)	3.64	2.77
Standard deviation (kW)	2.77	1.10

## 7. 結 言

固定振り子型波力発電装置を対象とし、入射波動力から油圧動力変換過程を経て油圧モータ出力される変換シミュレーションを作成した。シミュレーションでは波から振り子および油圧回路までの動力変換過程を連成させた。規則波条件における油圧動力変換をシミュレートし、アキュムレータの有効性を示した。このシミュレーションは、予想される設置海域における装置の最適化に役立つ。今後の課題は、不規則波への拡張と、油圧回路中の圧力スパイクや油撃を防止するためのアキュムレータ仕様の最適化である。

## 文 献

- 近藤淑郎他: 室蘭工業大学における波浪エネルギー利用研究 (1976-86) の総括, 室蘭工業大学研究報告 (理工編), 37 巻, pp251-266, 1987
- 小林豪毅他: 振り子式波力発電装置 (Wave Rudder) の現地実証試験, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 73 巻 2 号 pp.I\_1453-I\_1458, 2017
- T. Maki et. al: WaveRoller load determination from ocean testing, Proc. of the 11th European wave and tidal energy conference, 2015.
- Trevor Whittaker et. al.: The development of Oyster – A shallow water surging wave energy converter, Proc. of the 7th European wave and tidal energy conference, 2007
- R. H. Hansen, M. M. Kramer and E. Vidal: Discrete Displacement Hydraulic Power Take-Off System for the Wavestar Wave Energy Converter, Energies vol. 6, pp.4001-4044, 2013.
- A. R. Plummer and M. Schlotter: Investigating the performance of a hydraulic power take-off, Proc. of the 8th European wave and tidal energy conference, 2009.
- C. J. Cargo, A. R. Plummer, A. J. Hillis and M. Schlotter: Determination of optimal parameters for a hydraulic power take-off unit of a wave energy converter in regular waves, Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, vol.226, pp.98-111, 2012.