

PS-21 並進動揺型波力発電装置の出力最大化制御に関する検討

海洋利用水中技術系 * 藤原敏文、谷口友基、梅田隼、後藤博樹（宇都宮大）、井上俊司

1. はじめに

波力発電装置を高効率化する制御法の一つとして、能動的に駆動力を与えて制御する同調制御法（以下、共振制御）等が知られている¹⁾。しかし、発電機構（以下、PTO(Power Take-Off)）での損失があるため、波との同調現象を利用した単純な共振制御では発電量を最大化できないことが知られている。すなわち、機械的な損失の他、PTO での発熱等に伴う損失（銅損）を考慮に入れて、最適な制御を実現することが必要である。本研究では、図-1 に示すようなフロータとスパーからなる並進動揺型波力発電装置を対象として模型試験を実施した。リニアモータをPTO 模型として使用し、代表的な数種の制御法の出力利得の差異を把握すると共に、シミュレーション計算も行い、数値計算法の有効性を確認したので報告する²⁾。

2. 制御法

例えば波力発電装置フロータの上下運動の方程式は、次式で表される。

$$M_f \ddot{z} = F_R + F_E + F_S + F_{PTO} \quad (1)$$

ここで、 M_f 、 z 、 F_R 、 F_E 、 F_S 、 F_{PTO} は、フロータ質量、変位、ラディエーション力、波強制力、復原力、PTO 制御力である。このような方程式を基本として、以下の3種の制御法の発電出力を模型試験で再現すると共に数値計算で求めることにした¹⁾²⁾。

2.1 抵抗制御 (RLC, Resistive Load Control)

運動速度比例した成分のみでPTOを調整する制御法である。制御力は(2)式で与えられる。式中の B_{33} 、 x_i 、 m 、 C_{33} 、 ω は、それぞれフロータの造波減衰力係数、内部リアクタンス、付加質量、復原力係数、円周波数である。

$$\begin{aligned} F_{PTO}(t) &= -Cg_{RL} \dot{z}(t) \\ Cg_{RL}(\omega) &= \sqrt{B_{33}(\omega)^2 + x_i^2(\omega)} \\ x_i(\omega) &= \omega(M_f + m(\omega)) - C_{33} / \omega \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 共振制御 (ACC, Approximate Complex-conjugate Control)

発電装置に規則的な起振力が入力される事を前提とし、能動的に駆動力を与え、波と共振させる制御（以下、ACC）である。PTOによる銅損は考慮していない。加える制御力は、(3)式で与えられる。実際には、PTOの作動限界を超えることになり作動制限の制約を満足しながら出力を最大化するよう繰り返し計算によって、制御変数（ Cg_{ACC} 、 Kg_{ACC} ）を求

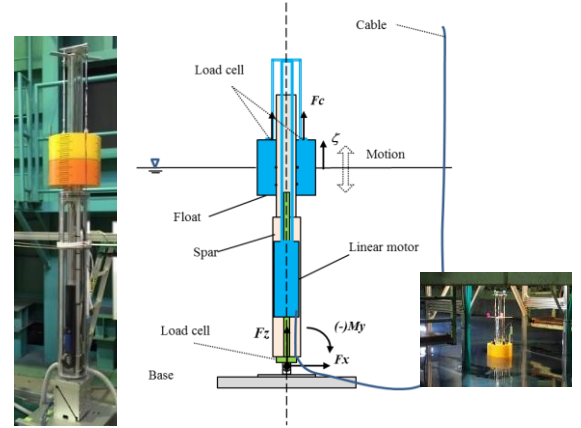


図-1 共試模型

表-1 模型主要目 (1/20 モデル)

	Item and symbol	Unit	Actual scale	Model scale
Float	Outer diameter: OD_f	m	7.00	0.350
	Inner diameter: ID_f	m	2.28	0.114
	Depth: D_f	m	6.00	0.300
	Draft: d_f	m	3.00	0.150
	Mass: M_f	kg	103,200	12.9
Spar	Upper diameter: D_{up}	m	2.00	0.100
	Lower diameter: D_{low}	m	4.32	0.216
	Draft: d_s	m	32.2	1.61
	Mass: M_s	kg	376,800	47.1

めている。

$$\begin{aligned} F_{PTO}(t) &= -Cg_{ACC} \dot{z}(t) - Kg_{ACC} z(t) \\ Cg_{ACC} &= B_{33}(\omega) \\ Kg_{ACC} &= \omega x_i(\omega) = \omega^2(M_f + m(\omega)) - C_{33} \end{aligned} \quad (3)$$

2.3 出力最大制御 (ACL, Acc with considering the Copper Loss)

ACC 制御法の制御変数を決定する際に、PTO の銅損を考慮し、出力から銅損を差し引いた正味発電量を最大化する制御法である。 K_T 、 R は、それぞれリニアモータの推力定数、抵抗である。

$$\begin{aligned} F_{PTO}(t) &= -Cg_{ACL} \dot{z}(t) - Kg_{ACL} z(t) \\ Cg_{ACL} &= \frac{B_{33}(\omega) + 2\delta(B_{33}(\omega)^2 + x_i^2(\omega))}{4\delta^2(B_{33}(\omega)^2 + x_i^2(\omega)) + 4\delta B_{33}(\omega) + 1} \\ Kg_{ACL} &= \frac{\omega x_i(\omega)}{4\delta^2(B_{33}(\omega)^2 + x_i^2(\omega)) + 4\delta B_{33}(\omega) + 1} \\ \delta &= \frac{R}{K_T^2} \end{aligned} \quad (4)$$

3. 水槽試験および数値計算

3.1 水槽試験

試験は、当所の動揺試験水槽（50×8×4.5m）で実施した。模型の写真と座標系を図-1に示す。また、模型の主要目を表-1に示す。波のエネルギーを受け上下に運動するフロータと架台（図中Base）に固定されたスパーの2要素で構成される。スパーの縦・横運動は起こらないよう架台との付け根で拘束した（他の試験では、自由状態も実施）。スパー内部にはPTOとしてDunkermotoren GmbH製リアモータ³⁾が取り付けられている。模型は、想定実機の1/20縮尺である。

3.2 数値計算

米国のNREL（National Renewable Energy Laboratory）およびSandia National Laboratoriesが共同開発した波力発電装置対応数値計算コードWEC-Sim⁴⁾にリアモータの物理モデルとハードストップ物理モデルを加えて数値計算を行った。

4. 水槽試験および数値計算結果

図-2に規則波中でのフロータの上下揺れ、上下力、リアモータによる発電出力（P）、銅損分を考慮に入れた正味発電出力（P'）について、計測結果と数値計算結果を比較して示す。Pはリアモータに対する推力と移動速度を掛け合わせて求めている。入射波の波高（H_w）は約100mmとした。各制御法の制御変数は、波周期毎に異なる最適値としている。模型試験による計測結果と数値計算結果は、全ての制御法で定性的、定量的に十分な一致が見られた。

ACCはPを最大化させるので、波周期1.12sを除けばPの値は他の制御法よりも大きくなるが、同時に銅損（PC）も大きくなるため、P'（PとPCの差分）の結果を見ると、波周期2s付近より長周期側では負の値となり、発電装置としては機能していないことが分かる。ACLはP'を最大化する方策であるため、ほぼ全ての周期で他の制御法よりも正味発電量が大きくなる。

これらの結果から、規則波中においてP'を最大化するACLは、正味発電量の最大化を実現するだけでなく、装置安全性の観点からも重要となる上下方向荷重についてもACCの様に過大な負荷を生じない制御法であることが分かった。

5. まとめ

本研究では、並進動揺型波力発電装置を対象に、実物のリアモータを発電機模型として搭載させ、3種の制御法（抵抗制御、共振制御、出力最大制御）の出力の差異を模型試験および数値計算により示した。模型試験結果と数値計算結果は良好に一致し、出力最大制御の有効性を定量的にも明らかにした。この制御法を利用することで広範な海象条件でより多くの電力を得ることが可能である。また、本研究で開発した数値計算ツールは、今後、新たな実機波力発電装置を検討する上で活用することができる。

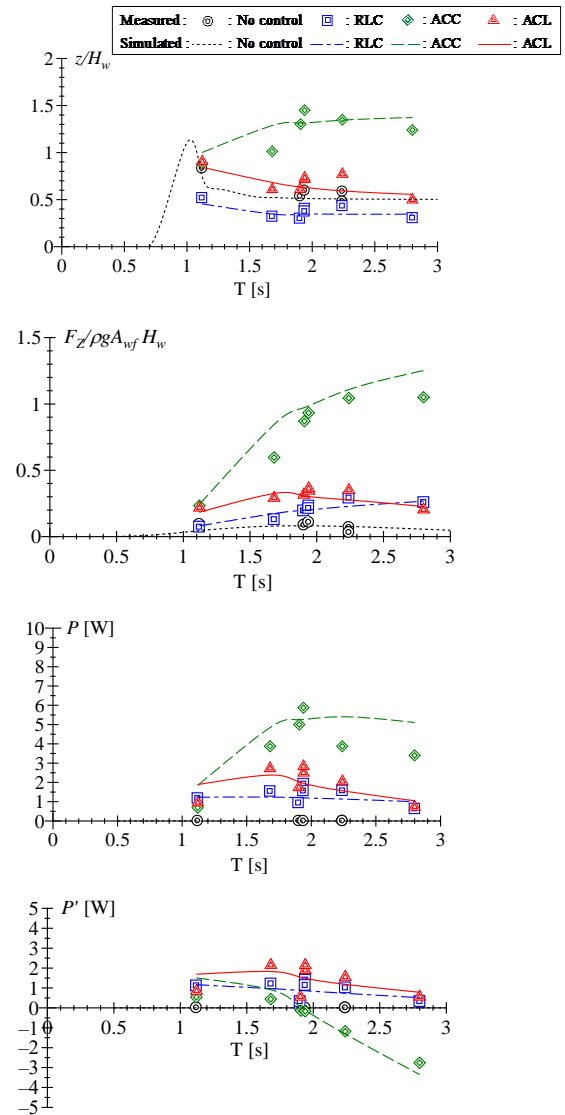


図-2 フロータ上下動・上下力、発電量、正味発電出力の試験結果と数値計算結果の比較

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託事業「次世代海洋エネルギー発電技術研究開発」の一環として得られた成果である。関係者の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Falnes, J. : Ocean Waves and Oscillating System, Cambridge University Press, 2002.
- 2) Taniguchi, T. et al. : Experimental and Numerical Study on Point Absorber Type Wave Energy Converter with Linear Generator, OMAE2017.
- 3) Dunkermotoren GmbH : <http://www.dunkermotoren.com/>.
- 4) Ruehl, K. et al. : Preliminary Verification and Validation of WEC-Sim, an Open-Source Wave Energy Converter Design Tool, OMAE2014.