

PS-17 Kane 型運動方程式を用いた浮体式ポイントアブソーバー型 波力発電装置の定式化と波浪中運動評価

海洋先端技術系 * 谷口 友基、梅田 隼

1. はじめに

海洋由来の再生可能エネルギーの中でも波力は、地域偏在性が少ない特徴を持ち、離島や分散型エネルギーニーズを持つ地域における内燃力発電の代替電源等としての利活用が期待されている¹⁾。

波力発電装置 (Wave Energy Converter: WEC) は、海洋波から効率良くエネルギーを取り出す設備であり、波エネルギーの変換方法で様々な形式が存在する。ここでは、浮体式ポイントアブソーバー型波力発電装置 (以下、FPAWEC) を対象とする。FPAWEC は、可動浮体とスパーの相対運動を利用して波エネルギーを取り出す。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るため運動拘束がある。拘束条件を持つ多体系のモデル化には機構解析ソフトを用いることが多い。しかし、機構解析ソフトを用いると系の運動方程式は得られず、運動方程式に基づき系の構成要素の連成影響等を考察することは出来ない。

本論文では、仮想パワーの原理に基づく Kane の方程式²⁾を用いて、運動拘束を持つ FPAWEC の縦運動 (前後, 上下, 縦揺れ, 及び可動浮体の相対運動) を対象とした運動方程式 (以下, 縦運動方程式) を拘束力のモデル化を介さず導出する。また、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。

2. Kane の方程式を用いた定式化

本論文で用いる 2 つの座標系を図-1 に示す。座標系 O -XYZ は、静止水面上に原点を持つ空間固定座標系 (以下, $\{O\}$) とする。座標系 G_s - X_s - Y_s - Z_s は、スパー重心 (G_s) に原点を持つ物体固定座標系 (以下, $\{B\}$) とする。

FPAWEC には、例えば、可動浮体の $\{B\}$ から見た速度ベクトルの X_s 軸方向成分は 0 という運動拘束、可動浮体とスパーの縦揺れ角は等しいという配位拘束がある。拘束条件を持つ系の定式化に Kane の方程式を用いる一般的な利点は以下の通りである。

- 対象とする系に運動拘束, 配位拘束のどちらを含む場合にも直接適用できる。
- ラグランジュ関数の導出を介さず運動方程式が得られる。
- 一般化座標, 一般化速度を適切に選択することで簡潔に運動方程式を得られる。
- 簡潔な運動方程式を用いることで数値計算コードをコンパクトに記述できる。

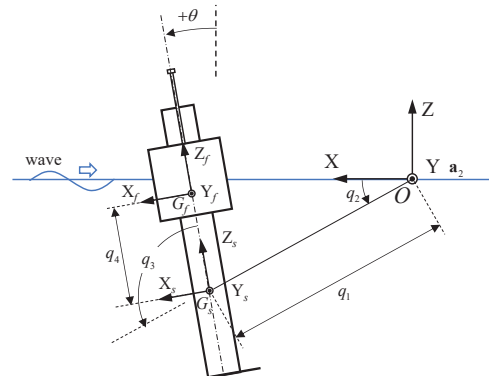


図-1 座標系

FPAWEC の一般化力 (U_r), 一般化慣性力 (U_r^*) に対して式(2.1)に示す Kane の方程式²⁾が成り立つ。

$$U_r + U_r^* = 0 \quad (r=1, 2, \dots, 7) \quad (2.1)$$

U_r 及び U_r^* を求め、縦揺れ ($r=2$), 可動浮体の相対運動 ($r=4$), 前後揺れ ($r=5$), 及び上下揺れ ($r=7$) の結果を取り出せば、FPAWEC の縦運動方程式は、それぞれ式(2.2)~(2.5)で表される。

$$U_2 + U_2^* = 0 \Leftrightarrow -(I_{s2} + I_{f2} + m_f q_4^2) \ddot{u}_2 - m_f q_4 \ddot{u}_5 + T_{s2} + T_{f2} + q_4 (F_{f1} \cos \theta - F_{f3} \sin \theta + F_{f1vis}) - m_f q_4 (u_2 u_7 + 2u_2 u_4) + T_{s2vis} + T_{f2vis} = 0 \quad (2.2)$$

$$U_4 + U_4^* = 0 \Leftrightarrow -m_f (\ddot{u}_4 + \ddot{u}_7) + F_{f1} \sin \theta + F_{f3} \cos \theta + F_g + m_f (q_4 u_2^2 + u_2 u_5) + F_{f3vis} + F_{fmech} = 0 \quad (2.3)$$

$$U_5 + U_5^* = 0 \Leftrightarrow -(m_s + m_f) \ddot{u}_5 - m_f q_4 \ddot{u}_2 + (F_{s1} + F_{f1}) \cos \theta - (F_{f3} + F_{s3}) \sin \theta - 2m_f u_2 u_4 - (m_s + m_f) u_2 u_7 + F_{s1vis} + F_{f1vis} = 0 \quad (2.4)$$

$$U_7 + U_7^* = 0 \Leftrightarrow -(m_s + m_f) \ddot{u}_7 - m_f \ddot{u}_4 + (F_{s3} + F_{f3}) \cos \theta + (F_{s1} + F_{f1}) \sin \theta + m_f q_4 u_2^2 + (m_s + m_f) u_2 u_5 + F_{s3vis} + F_{f3vis} = 0 \quad (2.5)$$

式中の m_f , I_{fz} , m_s , 及び I_{sz} は, それぞれ可動浮体の質量, 慣性モーメント, スパーの質量, 及び慣性モーメントを示す. q_4 は可動浮体とスパーの重心間距離であり, u_r は r 番目の一般化速度を示す. T_{s2} 及び T_{f2} は, それぞれスパー及び可動浮体の縦揺れモーメント (波浪強制力, ラディエーション流体力, 復原力, 係留力, 定常波漂流力, 及び2次の波力によるモーメントの和) を示し, F_{s1} 及び F_{f1} は, それぞれスパー及び可動浮体に働く前後力 (波浪強制力, ラディエーション流体力, 係留力, 定常波漂流力, 及び2次の波力の X 方向成分の和) を示す. F_{s3} 及び F_{f3} は, それぞれスパー及び可動浮体に働く上下力 (波浪強制力, ラディエーション流体力, 復原力, 定常波漂流力, 及び2次の波力の Z 方向成分の和) を示す. また, 添え字に vis と表記したものは各方向の粘性減衰力を示し, 添え字に $mech$ と表記したものは発電機構模型の摩擦力を示している. これらを見ると, 例えば縦揺れ方程式 (式(2.2)) に表れる前後力の影響, 前後揺れ方程式 (式(2.4)) に表れる縦揺れ速度の影響等を検討できる.

3. 波浪中運動評価

可動浮体の制御をしない状態 (以下, UC), 制御状態として抵抗制御 (以下, RLC) 及び出力最大化制御 (以下, ACL) を試行した. なお, 2 浮体系となる FPAWEC に適用する RLC 及び ACL の制御ゲインは, 可動浮体及びスパーがそれぞれ上下方向にのみ運動すると仮定して求めている.

図-2 及び図-3 に規則波中における実験結果と計算結果の比較を示す. これらのグラフの横軸は入射波周期 (T) である. 縦軸の ζ_a は入射波振幅である. また, 可動浮体の上下揺れ固有周期を T_{nf} と表記する. 図 2 に示す可動浮体の相対運動 (z_{rel}) の計算結果は, UC の状態で $T = 1.2$ s 付近で振幅比をわずかに過小評価するが, 実験結果の傾向を捉える. また, 制御状態 (RLC 及び ACL) の振幅比の計算結果も実験結果を捉えている. 縦揺れ振幅角 (θ_{amp}) の比較を図 3 に示す. 制御状態の実験結果を見ると, θ_{amp} は UC と同程度でピークが UC よりも短周期側にシフトしているが, 計算結果もこのシフトを捉えている.

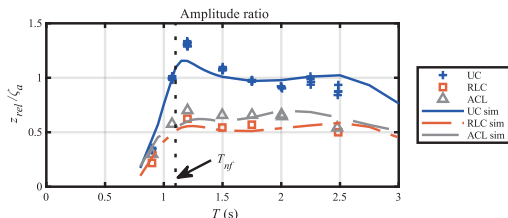


図-2 可動浮体相対運動の振幅比

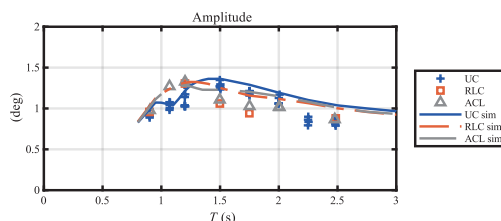


図-3 FPAWEC の縦揺れ振幅角

不規則波中における実験結果と計算結果の比較を図 4 に示す. 不規則波は JONSWAP 型スペクトル ($\gamma=1.0$) をもち, 有義波高 0.1 m, 有義波周期 1.68 s とした.

図-4 に示した z_{rel} の有義値の比較結果を見ると, 実験結果は UC に比べて制御状態で小さくなり, 計算結果もこの減少傾向を捉えている. UC におけるパワースペクトル密度 (以下, PSD) の比較結果から, 計算結果はピーク波周波数 (f_p) から可動浮体の上下揺れ固有周波数 (f_{pm}) の周波数帯で実験結果を過小評価しており, この結果, UC の有義値の計算結果は実験結果をやや過小評価している. 一方, ACL の PSD は実験結果と計算結果でよく一致している.

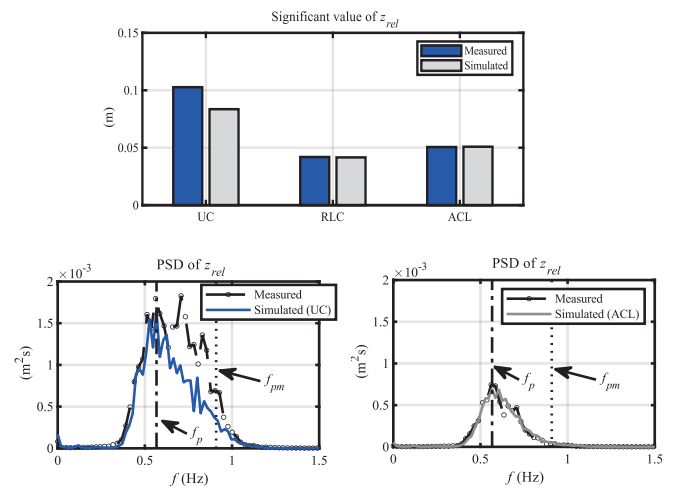


図-4 可動浮体相対運動の有義値とパワースペクトル密度

4. まとめ

運動拘束を有する FPAWEC の縦運動方程式を Kane の方程式に基づき導出し, 波浪中の水槽試験結果と運動評価結果を比較することで以下の知見を得た.

- Kane の方程式を用いることで, 可動浮体とスパーの拘束力をモデル化することなく, FPAWEC の制御状態を含めた縦運動を定式化できる. これにより, 運動方程式が簡潔になり, 計算時間の短縮等が期待できる.
- Kane の方程式に基づく FPAWEC の縦運動方程式を用いることで, 規則波中, 及び不規則波中の制御状態を含めた波浪中運動評価を十分な精度で行うことができる.

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.

参考文献

- 1) 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): 離島地域等における海洋エネルギー発電技術利用に関する検討, NEDO, 2017.
- 2) Kane, T. R., and Levinson, D. A.: Dynamics - Theory and Applications, McGraw-Hill Book Company, 1985.