

下部固定型波力発電装置に作用する波向きと回転特性に関する一考察

名古屋大学工学部 学生会員 ○ 山本 建太
 名古屋大学大学院工学研究科 正会員 趙 容垣, 中村 友昭
 名古屋大学大学院工学研究科 フェロー 水谷 法美
 名古屋大学大学院工学研究科 学生会員 佐藤 晴高

1. はじめに

近年、二酸化炭素排出量の増加に伴い地球温暖化が世界的な問題となっている。また、2011年に起きた東日本大地震以降、原子力発電の安全性の課題が露呈したこともあり、安全面の観点からも太陽光や風力、海洋エネルギーなどの再生可能エネルギーを用いた発電が注目を集めている。特に、島国である日本において海洋エネルギーである波力を用いた発電装置の効率を上昇させることは、国内での安定した電力供給につながると考えられている。これまでに二次元水槽での振り子を用いた可動物体型の波力発電装置の発電効率に関する研究が実施されてきたが、実海域に設置する際には波方向が一定であることはほとんどなく、波向きを考慮した振り子の回転特性および発電性能を検討する必要がある。本研究では、発電機の抵抗による影響を切り離し、三次元造波水槽における下部固定型波力発電装置（振り子）に作用する規則波の入射角度による振り子の回転特性を検討する水理模型実験を実施した。

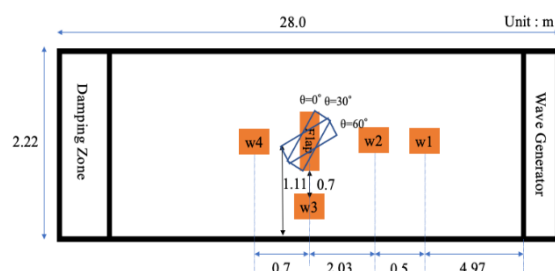


図-1 実験概略図

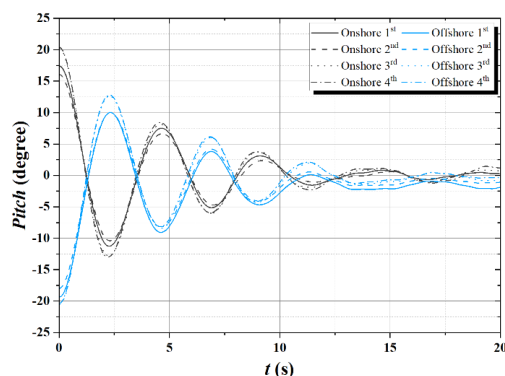


図-2 振り子の自由振動実験

2. 水理模型実験の概要

発電装置は佐藤ら（2021）と同様に逆三角形型振り子を採用した。三次元水槽における振り子の固有周期を調べるために、自由振動実験を行った。この実験では、振り子上部にジャイロセンサーを取り付け、静水状態の水槽に振り子を設置し、鉛直方向から 30° , 24° 程度押し下げることで振り子を振動させた。水深 $h = 0.425$ m の実験条件のもと、振り子を岸方向、沖方向それぞれに対し、各初期角度を 2 ケースずつの計 8 ケースで行った。固有周期は各計測データの峰（最大回転角）から峰、谷（最小回転角）から谷までの時間を求め、平均を取ることで算出した。三次元造波水路で行った実験の概略図を図-1 に示す。同図のように造波板から 7.5 m の位置に振り子を設置した。水深 h は 0.425 m、入射波周期 T を $T = 1.0$ s ~ 3.0 s の間を 0.2 秒間隔で変化させ、波高 H は 0.09 m とした。振り子に作用する波向きの影響は振り子の設置角度を変化させることで実験を実施した。振り子の設置角度は、波進行方向に対して直行する方向を $\theta = 0^\circ$ として $\theta = 30^\circ$, 60° と変化させた。また、振り子の設置角度が 0° のケースでは微小振幅波を想定し、 $H = 0.02$ m, $T = 1.0 \sim 3.0$ s (0.4 s 間隔) で同様の実験を行った。発電量と発電効率は、振り子の運動方程式に基づいて算出した。詳細は佐藤ら（2021）を参考されたい。

3. 振り子の固有周期

平面三次元実験における振り子の固有周期は、図-2 に示すように正常に減衰しながら回転することが確認できる。3 番目以降のピークは、回転角が小さくなるとともに振り子の回転による周囲の波の乱れの影響（減衰効果）が大きくなり、正しいピークを特定できないため、峰と谷の 2 番目までのピークを使用した。その結

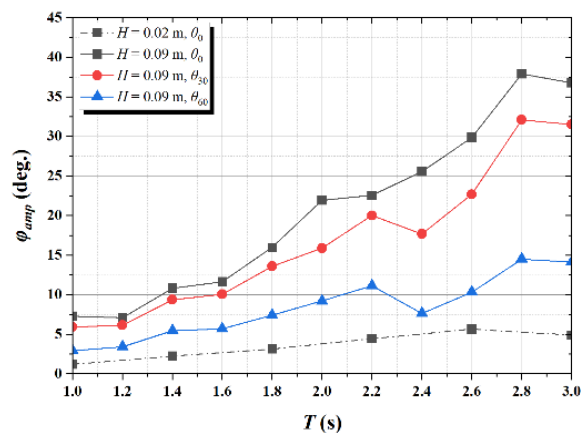
果, $h = 0.425 \text{ m}$ における振り子の固有周期は 4.52 s であり, 二次元実験で求めた固有周期の 5.21 s より短くなった. 二次元実験の場合, 側面が閉鎖されたため, 倒れた振り子が元の位置に戻る際に振り子の前面にあった水が振り子の横に抜けず, 振り子の付加慣性モーメントが大きくなったため, 固有周期が大きくなったと考えられる. そのため, 下部固定型発電装置における固有周期を適切に評価するためには, 三次元水槽による実験が必要であると判断される.

4. 波の入射角度による振り子の発電特性

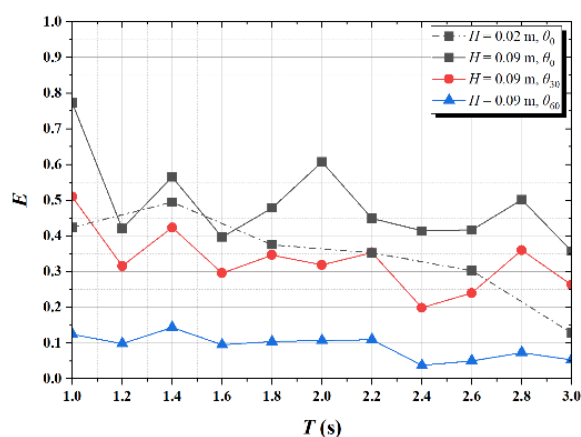
入射波周期による振り子の最大回転角 θ ($^{\circ}$, deg.) と発電効率 E の関係を図-3(a), (b)に示す. 同図のように, 波高, 入射波の入射角度に関係なく周期が大きくなるとともに最大回転振幅も大きくなる傾向が見られる. 振り子の設置角度に着目すると, 設置角が大きくなるにつれて最大回転振幅は減少する. $\theta = 0^{\circ}$ の最大回転振幅を基準に $\theta = 30^{\circ}$ の場合では平均 0.82 倍, $\theta = 60^{\circ}$ の場合では平均 0.42 倍となった. これは, 設置角度が大きくなるにつれて振り子に作用する波力の位相がずれることによるものだと考えられる. $\theta = 0^{\circ}$ の場合, 波高 $H = 0.02, 0.09 \text{ m}$ の結果を周期ごとに最大回転振幅を比較すると, $H = 0.02$ の最大回転振幅が波高比の 0.22 に類似した 0.18 倍となり, 周期に依らず波高比に比例したほぼ同程度の回転振幅の減少率を示した. また, 発電効率に着目すると, 全てのケースで佐藤ら (2012) の二次元実験と同様に周期の増加に伴って発電効率が減少する傾向が見られるものの, $\theta = 60^{\circ}$ のケース (青色) では減少幅が小さくなることから分かる. これは, 設置角度が大きくなるにつれてより広い範囲の位相での波力を同時に受けることになることに加え, 回転角が他のケースと比べて周期 1 s から小さくなっているため, 波エネルギーから評価する発電効率では小さい値を示していると考えられる. また, 本研究に用いた逆三角形振り子において入射波周期 $T = 1.2 \sim 3.0 \text{ s}$ の範囲で平均 0.47 ($\theta = 0^{\circ}$), 0.32 ($\theta = 30^{\circ}$), 0.09 ($\theta = 60^{\circ}$) の効率で発電できる可能性が示された.

5. 結論

本研究では, 下部固定型波力発電装置の設置角度による振り子の回転特性, 発電性能を評価するための三次元水理模型実験を行い, 線形理論に基づいた振り子の運動方程式を用いて発電効率を評価した. その結果, 三次元水槽における振り子の固有周期は二次元水槽の値よりも短くなることが判明し, 二次元水槽における下部固定型発電装置の固有周期の計測には注意する必要性が示唆された. 振り子の設置角度による発電効率の変化では, 二次元実験と同様に周期の増加とともに低下していくことが確認された. ただし, 振り子の設置角度が大きくなるにつれて発電効率の低下率が小さくなった. 今後は振り子の背後遊水域に反射壁を設置した状態で同様の実験を行い, 反射波によって形成される定常波の振り子の挙動への影響及び, 反射壁の幅が振り子の挙動へ与える影響について評価する予定である. 最後になるが, 本研究は, 日本国土開発未来研究財団学術研究助成の補助を受けたことを付記し, 感謝の意を表す.



(a) 振り子の最大回転振幅 $\varphi_{amp}(= 1/2 \theta_{max})$



(b) 発電効率 E

図-3 波周期による回転振幅と発電効率の変化