

1. 研究の目的

2020年には菅内閣総理大臣所信表明演説にて2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指すことを宣言しており、その必要性は増しているといえる。その一つである海洋エネルギーを利用した発電装置の中でも、近海に設置することでコスト削減が可能な波力発電装置は、防波堤等の海岸構造物を活用し入射波に加えて背後の反射波エネルギーを回収することで、エネルギー回収効率の向上が見込まれる。2020年平塚波力発電所において反射壁を活用した振り子型波力発電装置の実証実験が行われているものの、背後構造物を設置した際の波力発電装置の実験的検討は限られている。

本研究では、背後構造物の有無による下部固定型の逆三角形型振り子式発電装置の発電性能評価を目的とした断面二次元水理模型実験を実施した。振り子の回転運動の不規則性を最小化するため、規則波における発電機未設置時の背後構造物を想定した直壁の反射壁を採用した。振り子の回転に伴う発電量と発電効率は、発電機未設置時の実験結果を基に振り子の運動方程式を用いて算定し、反射壁の有無による発電性能を評価した。

2. 水理模型実験

(1) 実験条件

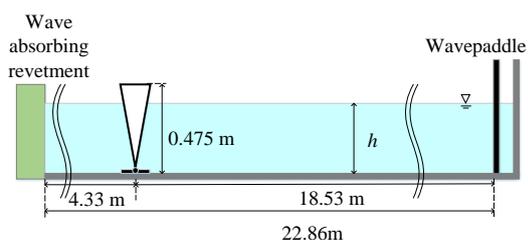
逆三角形型振り子の固有回転特性を調べるため、静水状態にて鉛直方向から 30° 程度まで倒したのちに自由に回転させる自由振動実験を行った。振り子上部が常に水面上に露出される水深 $h = 0.425$ m（振り子の高さ：0.475 m）と振り子が水中に完全に沈んだ状態である0.525 mの場合には8回、振り子高さと同じ水深0.475 mの場合には2回実験を行い、初期位置から反対方向の最大回転時までの時間（半周期）を求め2倍することでその水深の固有周期とみなした。振り子の形状は、逆三角形振り子である。続いて、反射壁なしの表-1に示す条件にて名古屋大学の片面ガラス張り鋼製造水路（長さ：30 m、幅：0.7 m、高さ：0.9 m）を用いて水理模型実験を行った。周期は0.2 s間隔で変化させた。初期水深は $h = 0.425, 0.525$ mの2種類とし、波が振り子上部を越波する入射波高 $H = 0.12$ mと越波しない $H = 0.09$ mの条件で振り子の回転特性を検討した。反射壁を設置したケースでは、表-2に示す条件にて実験を行った。図-1に水理実験の概略図を示す。振り子の回転角は、振り子上部に張り付けたジャイロセンサー（WitMotion製：WT901BLECL）を用いて計測し（サンプリング周波数：50 Hz）、振り子の岸沖側に設置した波高計から水面変動を計測した。反射壁を設置したケースでは、反射壁と振り子の間の距離 D (m) と入射波条件が

表-1 反射壁なしの実験条件

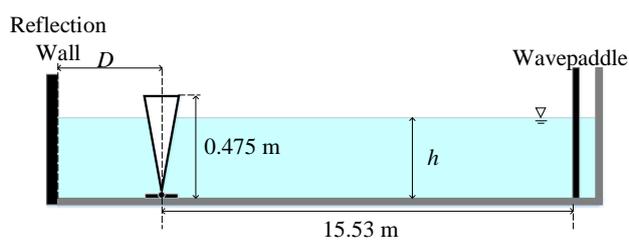
水深 h (m)	周期 T (s)	波高 H (m)
0.425	1.0 ~ 4.0	0.09
0.425	1.0 ~ 4.0	0.12
0.525	1.0 ~ 4.0	0.09

表-2 反射壁ありの実験条件

水深 h (m)	周期 T (s)	波高 H (m)
0.425	1.8, 2.4, 3.0	0.09
0.525	1.8, 2.4, 3.0, 3.2	0.09



(a) 反射壁なし



(b) 反射壁あり

図-1 水理模型実験の概略図

ら微小振幅波理論で算出した波長 L (m) の比である D/L を一定の周期において壁の位置を調整して変化させた。振り子 (横幅 : 0.68 m) と水槽側面間のクリアランスは、振り子の左右にそれぞれ0.01 m程度であるため、クリアランスによる振り子の回転挙動に及ぼす影響は小さいと考えられる。

(2) 発電量と発電効率の算出

実験条件における振り子の運動方程式は以下の式(1)のように表される。

$$(I + \mu)\ddot{\varphi} + (C_{PTO} + C)\dot{\varphi} + K\varphi = F \quad (1)$$

ここで、 I は振り子の形状による慣性モーメント ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)、 μ は付加水による慣性モーメント ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)、 φ は振り子の回転角 (rad)、 C_{PTO} は発電 (PTO : Power takeoff) ダンピング ($\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)、 C は造波ダンピング ($\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)、 K は振り子の浮力と重力の合成モーメントで表される復元モーメント ($\text{N}\cdot\text{m}$)、 F は振り子に作用する波力によるモーメント ($\text{N}\cdot\text{m}$) である。振り子の回転角は静水面に対して鉛直方向からの回転角の変化量であり、岸方向への回転を正、沖方向への回転を負とする。振り子は十分に薄い、振り子の回転角と水面変動が微小、水面の振動と振り子の運動の位相が一致する、振り子の運動エネルギーはすべて電気エネルギーに変換されると仮定すると計算から最大回転角 φ_{amp} (rad.)、発電量 P_{out} (W)、発電効率 E を以下の式(2)、(3)、(4)により算出できる。

$$\varphi_{amp} = \frac{F_{max}}{\sqrt{[K - (I + \mu)\omega^2]^2 + [(C + C_{PTO})\omega]^2}} \quad (2)$$

$$P_{out} = \frac{C_{PTO}\varphi_{amp}^2\omega^2}{2} \quad (3)$$

$$E = \frac{C_{PTO}\varphi_{amp}^2\omega^2}{2P_w W} \quad (4)$$

ここで、 ω は入射波の角振動数、 F_{max} は振り子に作用する最大の波力モーメント、 P_w は一周期、単位幅当たりの入射波エネルギー (W/m)、 W は振り子の幅 (m)、 P_{out} は入射波周期一周期分の発電量を周期で平均した値である。発電効率 E は、式(3)の発電量を振り子の受ける入射波エネルギーで割ったものであり、入射波エネルギーに対する発電量の比を効率と定義している。入射波エネルギーは微小振幅波理論より以下の式(5)を用いて計算した。

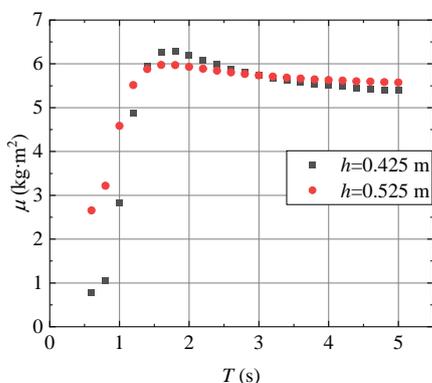
$$P_w = \frac{1}{16}\rho g H^2 \frac{L}{T} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh}\right) \quad (5)$$

ここで、 ρ は水の密度 (kg/m^3)、 g は重力加速度 (m/s^2)、 H は入射波高 (m)、 L は入射波の波長 (m)、 T は入射波周期 (s)、 k は波数 (1/m)、 h は水深 (m) である。

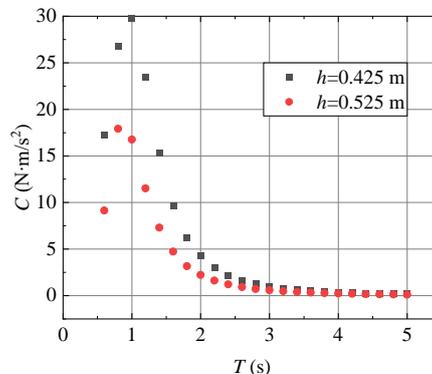
発電量と発電効率の算出にあたって式(1)~(4)中の各パラメータの値が必要となる。振り子の慣性モーメント I と復元力 K は振り子の物理量から算出できる。表-3に算出した I 、 K 、振り子の質量 m を示す。振り子の最大回転角 φ_{amp} はジャイロセンサーの計測値から得られる。反射壁がない場合の付加水による慣性モーメント μ と造波ダンピング C については、Ansys Student 2020 R2の流体力学的回折の解析プログラムを利用して算出した。このプログラムでは振り子のモデルを作成することで有限要素モデルにより規則波を作用させた際の振り子の動的応答を解析する。数値解析から得られた入射波周期による μ と C を図-2に示す。付加水による慣性モーメント μ は周期とともに増加し $T=1.6$ sで最大値をとった後、緩やかに減少す

表-3 計算に用いた諸元 ($K_{0.425}$: 水深 0.425 m 時の復元モーメント, $K_{0.525}$: 水深 0.525 m 時の復元モーメント, m : 振り子の質量)

I ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	$K_{0.425}$ ($\text{N}\cdot\text{m}$)	$K_{0.525}$ ($\text{N}\cdot\text{m}$)	m (kg)
1.2683	8.6263	27.8830	10.9780



(a) 付加水による慣性モーメント μ



(b) 造波ダンピング C

図-2 入射波周期による μ と C の特性

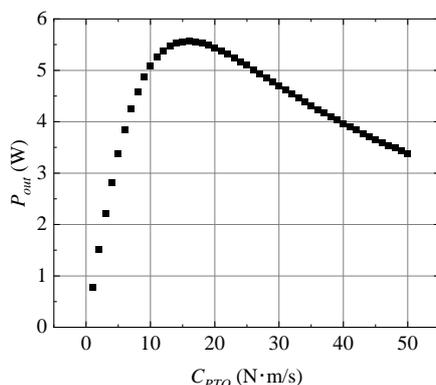


図-3 C_{PTO} と P_{out} の関係 ($h = 0.425$ m, $T = 2.4$ s, $H = 0.09$ m)

る。一方、造波ダンピング C は $T = 0.8, 1.0$ s において最大となり、その後急激に減少する傾向がある。 μ と C が最大となる波の周期が異なる原因は、逆三角形である振り子の形状の影響が起因したと考えられる。また、 μ は水深による変化は小さいものの、 C の最大値はは振り子が潜水状態の方が減少することが確認できる。最後に、実験では発電機が未設置であったため、 C_{PTO} を 0 として式(2)により波力モーメント F_{max} を各ケースで計測した振り子の回転角 φ_{amp} を代入することで求めた。反射壁がない場合の振り子の回転運動による発電量は、 C_{PTO} の値を任意に設定することで算出した。まず、同波浪条件における K, C, F_{max} は等しいと仮定し、 C_{PTO} によって変化する振り子の回転角 φ_{amp} を式(2)により計算した。その後、式(3)、(4)により発電量と発電効率を計算し、発電効率が最大となる C_{PTO} を決定した。図-3に C_{PTO} と発電量 P_{out} の関係の例を図示する。 C_{PTO} が大きくなるに従い P_{out} も大きくなり最大値をとった後比較的緩やかに減少する傾向がある。これは、 C_{PTO} の増加に伴い発電量も増える一方で C_{PTO} によって回転角が減少するためである。

一方、反射壁がある場合、反射壁からの反射波によって付加水による慣性モーメント μ と造波ダンピング C が変化するものの、上述した解析プログラムでは、反射壁の影響を考慮することができない。そのため、反射壁があるケースでは、 C_{PTO} による φ_{amp} の減衰率を同一の水深、波浪条件で等しいとみなし、同一波浪条件における反射壁がないケースで計算した減衰率を反射壁があるケースで計測した振り子の回転

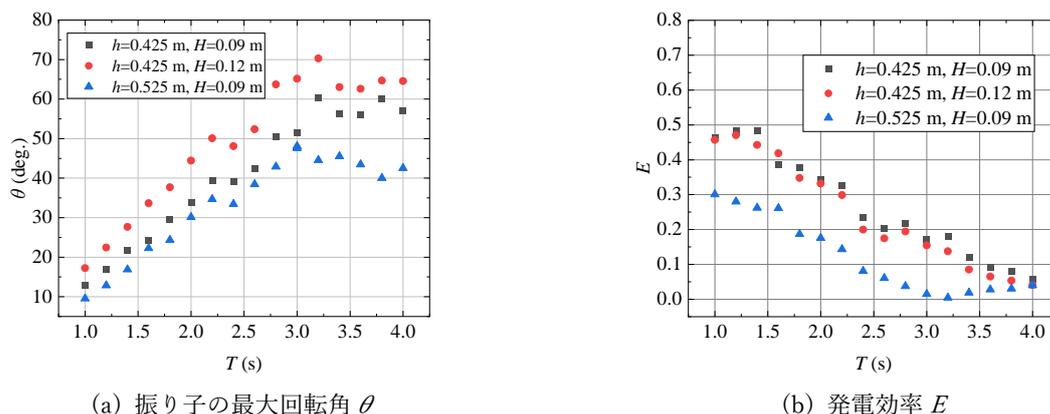


図-4 反射壁未設置時における入射波周期による発電特性

角に掛け合わせることで発電機を取り付けた際の回転角を算出した。その後、反射壁がないケースと同様に発電量と発電効率を計算した。

3. 実験結果

(1) 振り子の発電特性

水深による振り子の固有周期は、5.21 s ($h = 0.425$ m), 4.79 s ($h = 0.475$ m), 4.17 s ($h = 0.525$ m) であり、水深が深くなるほど振り子の固有周期が小さくなる。反射壁の未設置時の入射波周期による振り子の最大回転角 θ (deg.) と発電効率 E の特性を図-4に示す。図-4(a)に示すように、振り子の最大回転角は周期の増加に従い最大となった後に緩やかに減少する。回転角が最大値となる入射波周期は固有周期より小さく、その原因は一定の水深における周期の増加に伴う波の非線形性と振り子の形状が考えられるが、固有周期と下部固定型振り子の回転特性については、さらなる検討が必要である。入射波周期による発電効率の特性は、図-4(b)に示すように、比較的短い $T = 1.0 \sim 1.4$ s の範囲で最大 ($E \approx 0.5$) となり、その後減少する傾向がある。 $h = 0.425$ m における波高が異なるケースについて、振り子上部で越波が生じる $H = 0.12$ m の発電効率は越波が生じない $H = 0.09$ m の結果とほとんど違いが見られないため、本実験における越波による発電効率の減少はわずかであると考えられる。一方、異なる水深での結果を比較すると、 $h = 0.525$ m では $h = 0.425$ m よりも発電効率が低い。水深が振り子より高い場合、運動の大きい水面付近の水粒子を捉えられないため、図-4(a)に示すように振り子の回転角が小さくなることからエネルギー吸収率が低下したと考えられる。そのため、下部固定式発電装置には、発電の効率面から考えると発電装置より低い水深に設置した方が効率向上に有効であると判断される。

(2) 反射壁による発電特性

振り子の背後に反射壁を設置することにより入射波と反射波から壁面全面に定常波が形成される。前述した D/L が 0.25, 0.75, 1.25, 1.75 の位置が定常波の節、 D/L が 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 の位置が定常波の腹の位置にあたる。定常波の節の位置では水粒子の水平方向流速が最大となるため、発電に適した位置であるとされる一方、腹の位置では水粒子は水平方向に運動しないことから発電には適していない。反射壁を設置した際の水深における D/L による振り子の回転角を図-5に示す。同図より、振り子の回転角は節付近で極大、腹付近で極小となり、この傾向は $D/L > 0.60$ においても確認される。また、回転角が極大となる D/L は周期によって異なる傾向が発電機を設置した場合の結果と類似している。この原因として振り子により造波された波と振り子の位相の関係が周期、水深により変化することが考えられるが、より詳細な検討が必要とされる。入射波周期による振り子の最大回転角に着目すると図-2(b)に示すように、周期が短いほど

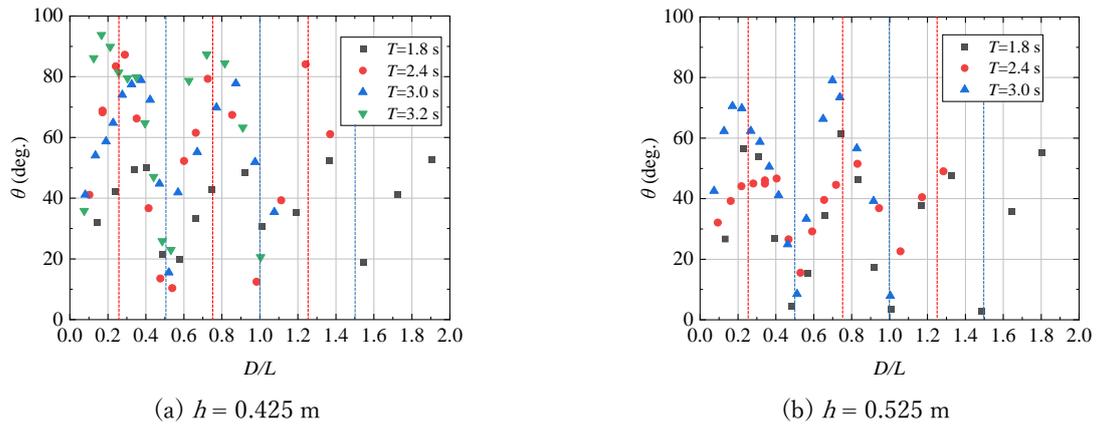


図-5 反射壁設置時の D/L による回転角特性（青い点線：定常波の節，赤い点線：定常波の腹）

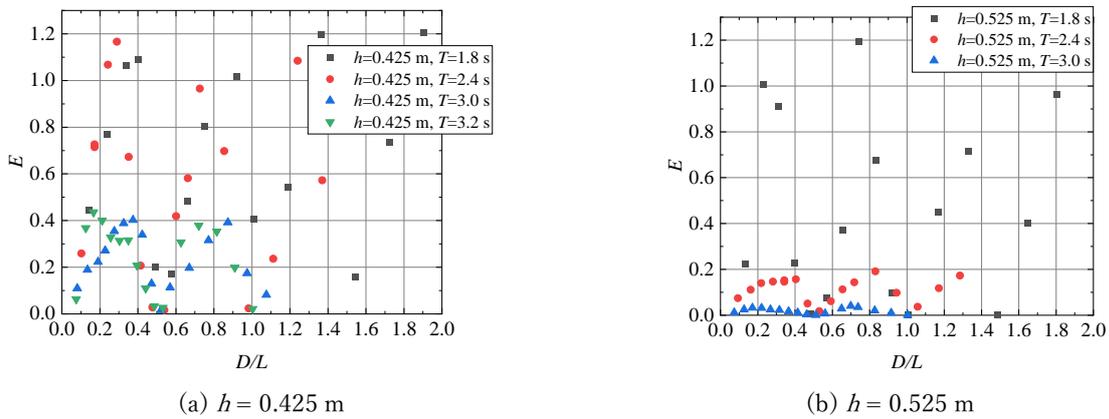


図-6 反射壁設置時の D/L による発電効率

造波ダンピング C は大きくなるため、回転角は小さくなる傾向が図-5からも確認できる。一方、 $h = 0.425$ m の $T = 2.4$ s、 $h = 0.525$ m の $T = 1.8$ s では、 C が大きいものの、この傾向と異なって大きい回転角を示すとともに、回転角が最大となる位置がほぼ節の位置であることがわかる。振り子の固有周期を考えると各水深における固有周期の半周期が 2.61 s ($h = 0.425$ m) と 2.1 s ($h = 0.525$ m) であり、上記の周期に近い。また、反射壁がないケースでは、図-4(a)に示すように、固有周期との関連性が見られなかったため、反射壁がある場合、振り子の挙動は振り子の固有周期の半周期で共振する可能性が示唆される。ただし、本研究では振り子周辺の詳細な波浪場の特性を検討していないため、今後の課題とする。

水深の影響に着目すると、反射壁がないケースと同様に、共振可能性があるケースを除いて水深が振り子より小さい方が同波浪条件に対して回転角が大きくなる傾向が見られる。また、振り子の回転運動については発電装置を設置した場合のような複数のパターンは見られず、腹付近で不規則な動きをした後は滑らかに運動したため、発電機による発電ダンピングや非線形トルク等による振り子の回転変化について追跡研究が求められる。

反射壁設置時の発電効率 E を図-6に示す。図-6(a)より、 $h = 0.425$ m のケースでは、図-5(a)と同様に節の付近で最大発電効率を、腹付近で最小発電効率が確認できる。入射波周期に着目すると周期が短い方が高い発電効率を表す。周期が長くなると反射壁がないケースと同様に、より大きく回転するものの、波エネルギーも大きくなるため、結果的に波エネルギーの回収率が低下したと判断される。反射壁未設置時にも同様な傾向を示したが、水深が深い場合、長い周期において波エネルギーの回収率は著しく低いことがわかる。これは、前述した通り $h = 0.525$ m の場合には振り子上部を通過する波があり、エネルギー回収率がより低下するためである。一方、共振の可能性がある $T = 1.8$ s では水深が振り子より深いものの、発電

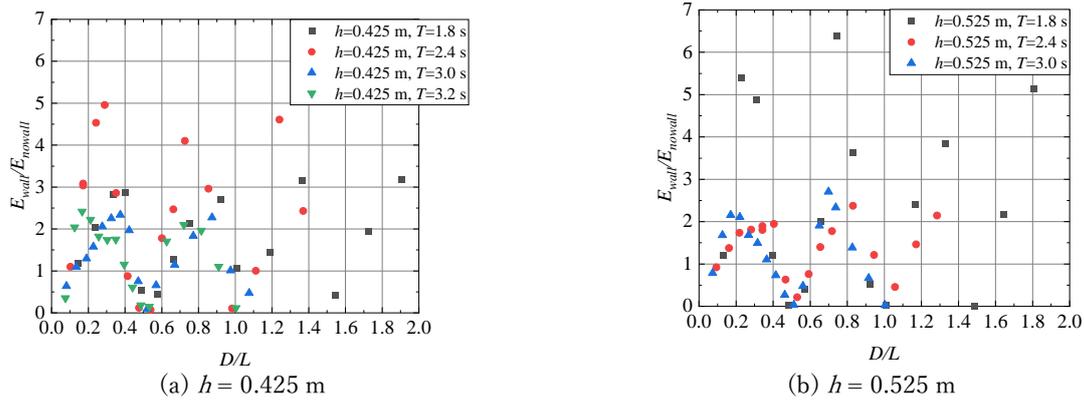


図-7 反射壁有無による発電効率比

効率が1を超過するケースもある。この原因としては、 $h = 0.425$ mのケースも含めて反射壁設置時の発電量と発電効率を算定する際に反射壁がないケースの諸パラメータの適用と C_{PTO} による回転角の変化を壁なしのケースと同率で適用したことによって過大評価された可能性がある。

反射壁の未設置時 (E_{nowall}) に対する設置時 (E_{wall}) の発電効率の比を図-7に示す。図-7(a)に示すように、水深が振り子より低い場合、反射壁を活用することで節付近では2倍（最大5倍程度）以上に発電効率を向上できる一方で腹付近では反射壁未設置時より低くなるのがわかる。図-7(b)の水深が振り子より大きい場合でも同様に発電効率は節付近で2倍（最大6.3倍程度）以上を示した。以上より、反射壁や発電装置の背後構造物の沖側に形成される定常波の腹の位置を避ければ、背後構造物の活用による発電効率の向上効果は有効であることが判明した。

4. 結論

本研究では発電装置を取り付けない振り子の振動実験から線形理論を適用して発電量、発電効率の計算を行った。振動実験では水深、波高、周期、反射壁設置の有無を変化させ、その影響を探った。本研究で得られた結果を以下に示す。

1. 壁なし条件では周期が比較的短いほど、水深が振り子より浅いほど、発電効率が大きくなった。越波による効率の減少は少なかった。
2. 反射壁を設置した場合、水深にかかわらず効率は節付近で増加、腹付近で減少し、周期が短く水深が浅いほど効率が大きい傾向が見られた。
3. 定常波の腹の位置で発電効率が極小となる一方、節の位置付近では効率が極大となった。ただし、極大となる D/L は、波浪条件によって理論上の節の位置と異なる。
4. 反射壁設置時には発電効率が著しく高くなる周期が存在する可能性が示唆された。
5. 背後構造物から形成される定常波の腹の位置を避ければ、背後構造物を活用することで下部固定式波力発電装置の発電性能が向上する可能性が判明した。

5. 今後の予定

市販のリニアモーターを採用した発電機は、発電ダンピング C_{PTO} が小さく、発電量が非常に少ないため、マグネット棒とエナメル線を用いて簡易リニア発電機を制作している。簡易リニア発電機の完成後に、発電機を連結した場合の振り子の挙動特性を検討する。また、振り子の固有周期によって発電効率が大きく上昇することが確認されたため、形状が異なる（固有周期が異なる）振り子における水理実験と波向きを考慮した3次元造波水槽における波力発電特性を検討する予定である。