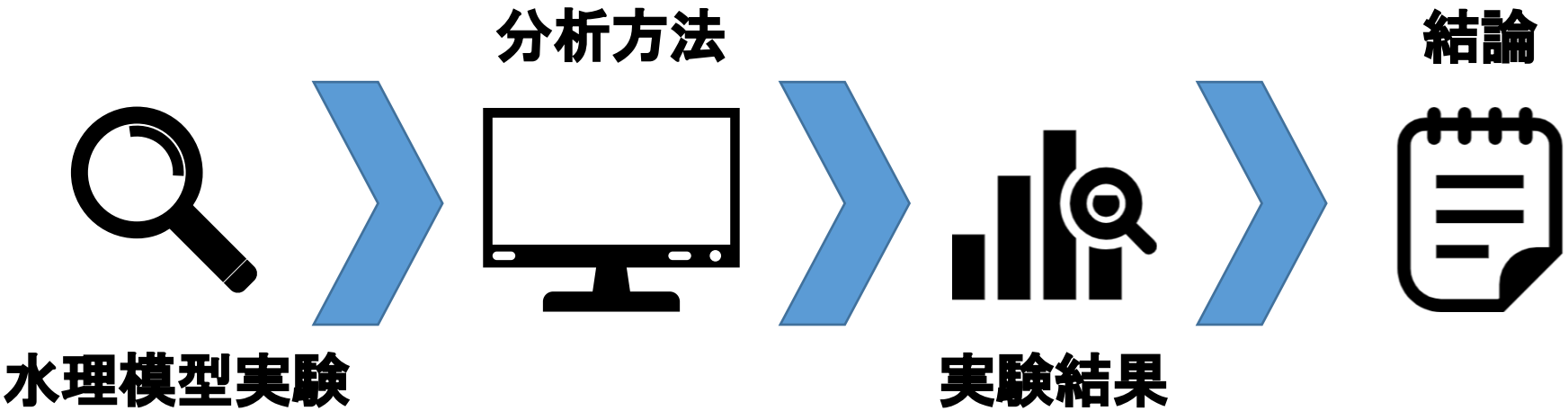
規則波における反射壁を活用した下部ヒンジ型WECのパラメトリック設計に向けた基礎実験

と波エネルギーの吸収能力向上させる新型WECの提案

名古屋大学　趙　容桓

MAKE NEW STANDARDS.
東海国立大学機構
名古屋大学

発表概要



再生エネルギー

地球温暖化

国際情勢の不安定さ

2050カーボンニュートラル

再生可能エネルギーの必要性

温室効果ガス排出なし

エネルギー自給率の上昇

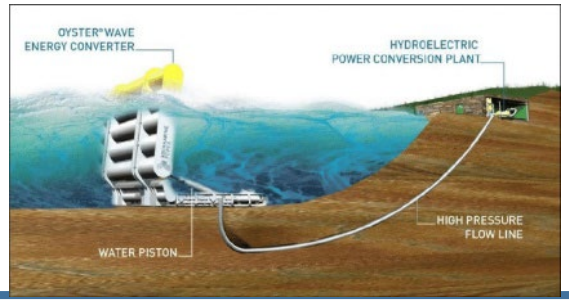
波力発電

利点

- 長時間発電
- 需要に近い位置での発電
- 波エネルギー密度高い
- 日本は海に囲まれている

課題

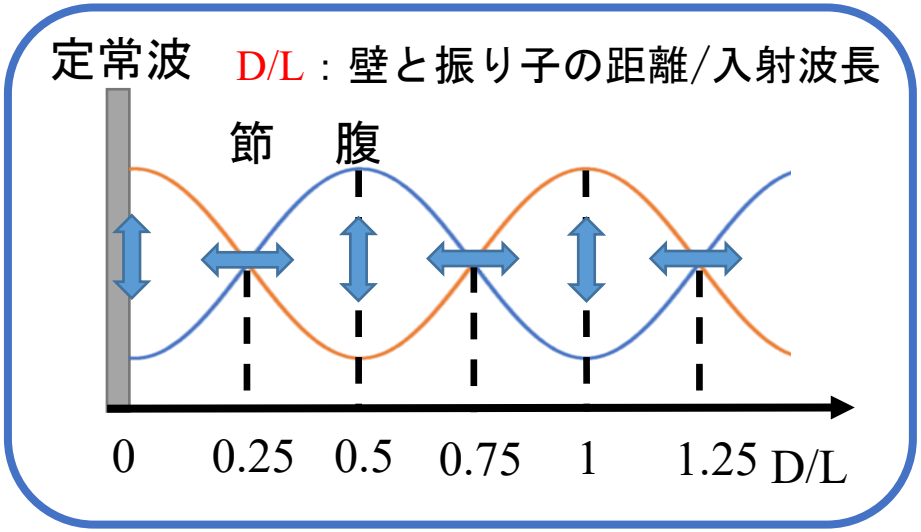
- 設置，メンテナンスコスト高い
- 日本近海で**波エネルギー小さい**
- 開発が遅れている



Oyster800：波力発電の実用化例
https://inhabitat.com/files/oysterpower4.jpg

波力発電の効率向上

平塚波力発電所
http://www.city.hiratsuka.kanagawa.jp/common/200068745.pdf



森本・水谷（2013）

節で効率極大，腹で極小
発電抵抗が大きい

趙ら（2020）

複数の運動パターン
D/L = 0.32付近で効率極大

課題

- D/Lの範囲が限られている
- 周期を変化させることでD/Lを変化させている
- 発電機の影響が強い
- 反射壁の有無による比較がなされていない
- 三次元性の検討はされていない

研究目的

海岸構造物の活用による波力発電技術の構築に先立って，

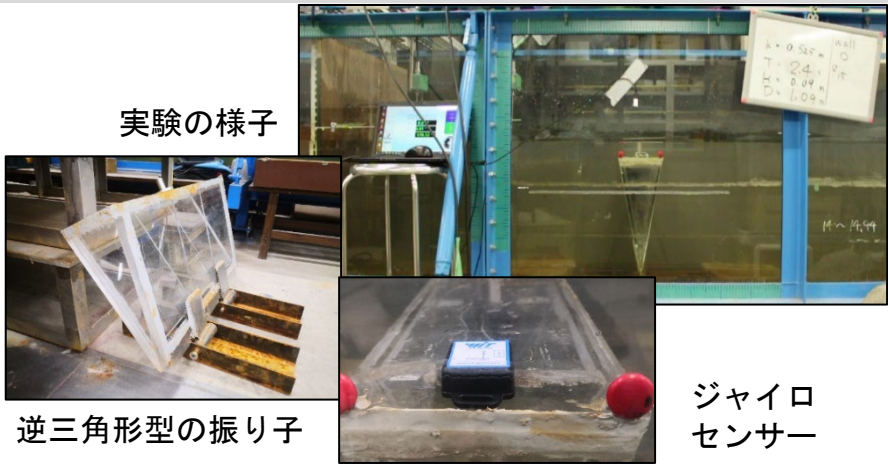
- **断面二次元**水理模型実験における振り子（発電装置）の発電特性
  - 設置水深，波高，周期による振り子の回転特性
  - 壁有無の影響，固有周期と入射波周期の関係，振り子の設置位置の影響（定常波の節，腹；D/L）
- **平面三次元**水理模型実験における振り子の発電特性
  - 振り子の設置角度，壁有無の影響，D/L
- **数値解析**による振り子の共振効果
  - 最大発電効率と共振の関係

研究手法（断面二次元実験）

1. 自由振動実験

水深 h = 0.425/0.475/0.525 mの3ケース

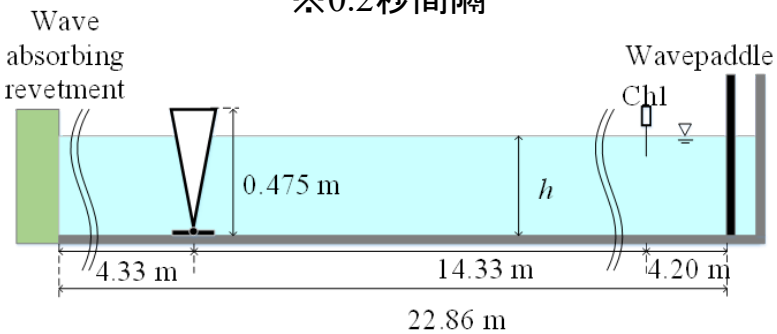
振り子の高さより，低い/同じ/高い



2. 壁なし造波実験

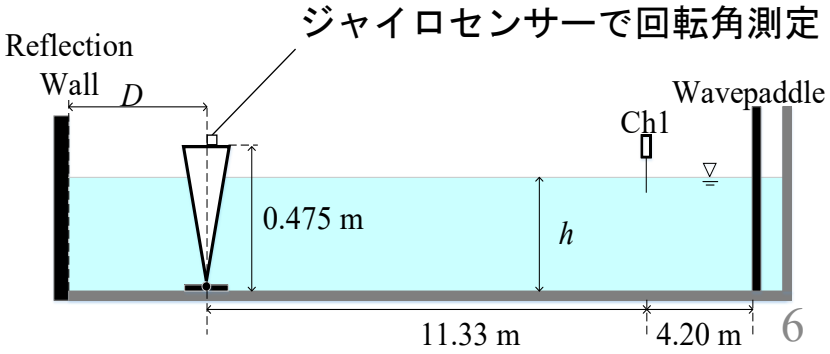
水深h (m)	周期T (s)	波高H (m)
0.425	1.0 ~ 4.0	0.09
0.425	1.0 ~ 4.0	0.12
0.525	1.0 ~ 4.0	0.09

※0.2秒間隔



3. 壁あり造波実験

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



研究手法（平面三次元実験）

1. 自由振動実験

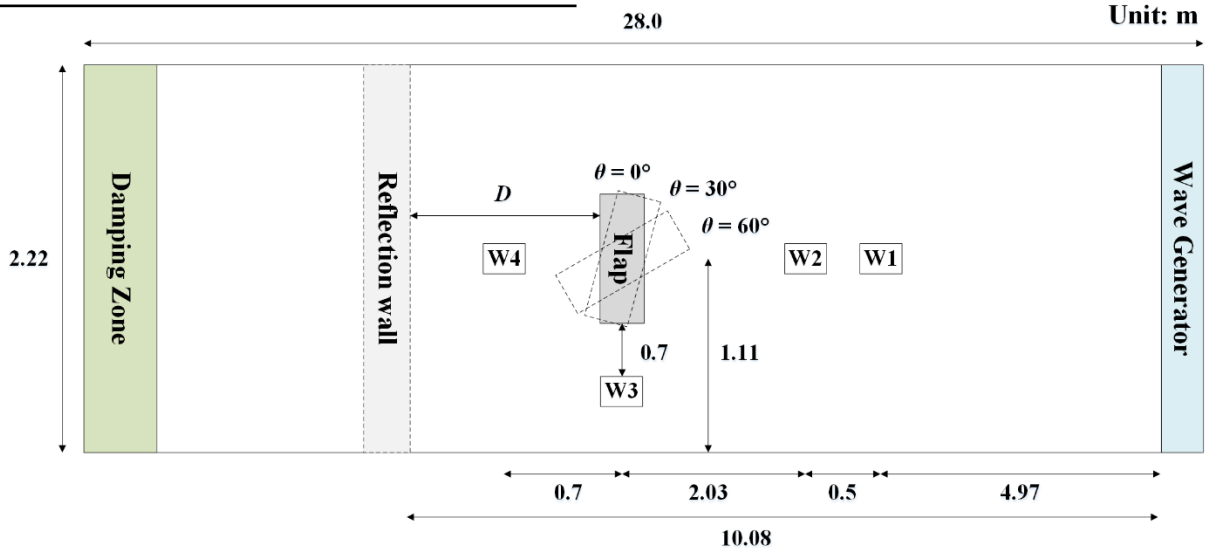
水深 $h = 0.425$，振り子の高さより低い

2. 壁なし造波実験

h (m)	T (s)	H (m)	角度θ (°)
0.425	1.0 ~ 3.0 (0.2秒間隔)	0.09	0, 30, 60
	1.0 ~ 3.0 (0.4秒間隔)	0.02	0

3. 壁あり造波実験

h (m)	T (s)	H (m)	θ (°)
0.425	1.4, 1.8, 2.4	0.02	0, 30



発電量・発電効率の算定

東海国立大学機構 名古屋大学

$I = 1.27\ \mathrm{kg}\cdot m^2$
$K_{0.425} = 8.63\ N\cdot m$
$K_{0.525} = 27.88\ N\cdot m$
$m = 10.98\ \mathrm{kg}$

1 波力モーメント

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

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

$C_{PTO} = 0$ とし，実験から得られたφ_{amp}を代入，F_{max}を算出

2 効率最大となるC_{PTO}，回転角の減衰率

$$E = \frac{C_{PTO}{\varphi_{amp}}^2\omega^2}{2P_W W}$$

1で得られたF_{max}を用いてC_{PTO}を変化させ，Eが最大となるC_{PTO}と実験値からの回転角の減衰率を求める

→ 壁なし時の効率

3 壁あり時効率

壁ありの場合の回転角の実験値に減衰率を掛け合わせ求めた最大回転角φ_{amp}をEの式に代入

→ 壁あり時の効率

※水深・周期ごと

計算から算出

I : 慣性モーメント $[\mathrm{kg}\cdot m^2 = N\cdot m\cdot s^2]$
K: 復元力$[N\cdot m]$
P_W: 入射波エネルギー[W/m=kg·m^2/s^3/m]
ω:周波数[/s]
W: 振り子の幅 [m]

実験値

φ: 回転角度[rad.]

未知のパラメータ

C_{PTO}: PTO(Power Takeoff)ダンピング$[N\cdot m\cdot s]$
F: 波力モーメント $[N\cdot m]$

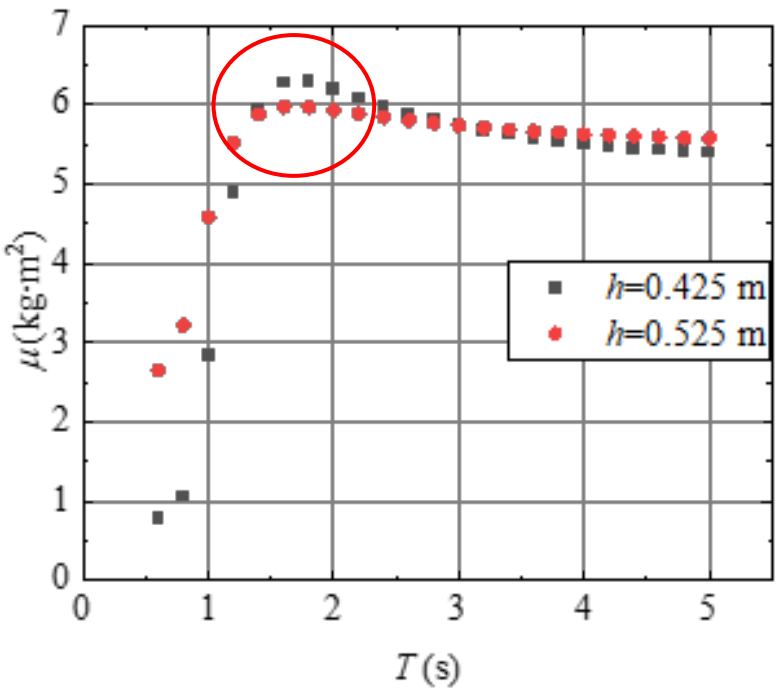
Aqwaから算出

μ: 付加慣性モーメント$[N\cdot m\cdot s^2]$
C : 造波ダンピング$[N\cdot m\cdot s]$

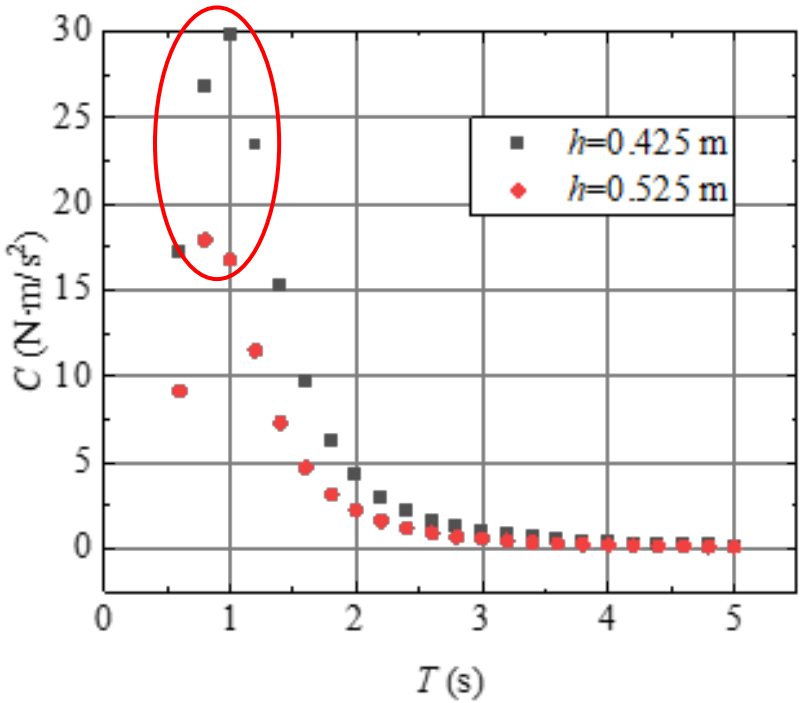
Aqwa

Ansys社製，境界要素法を用いて
流体中の諸量を計算可能なソフトウェア

入射波周期によるμとCの特性



付加水による慣性モーメントμ

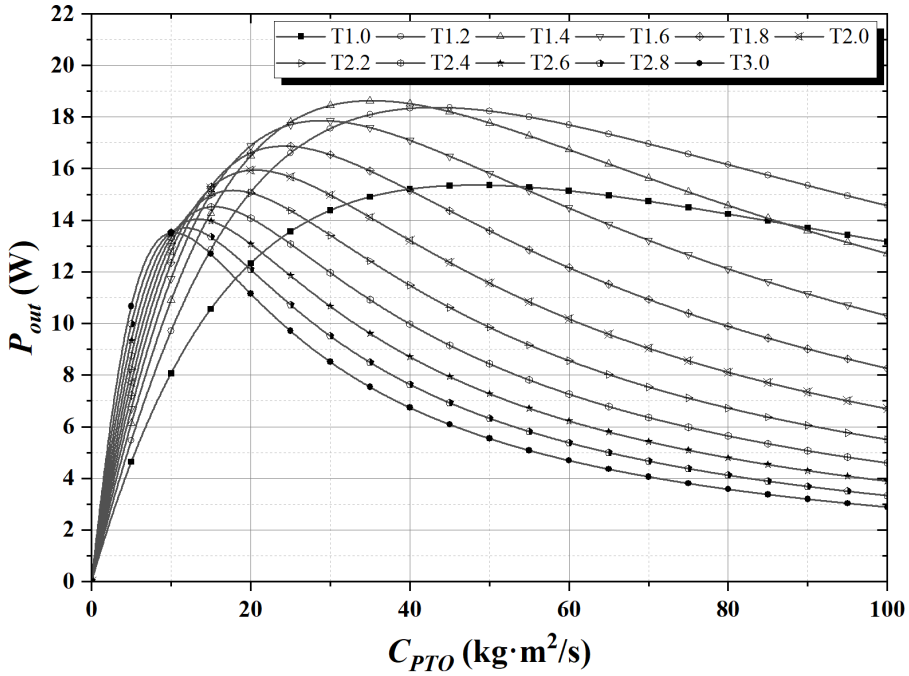


造波ダンピングC

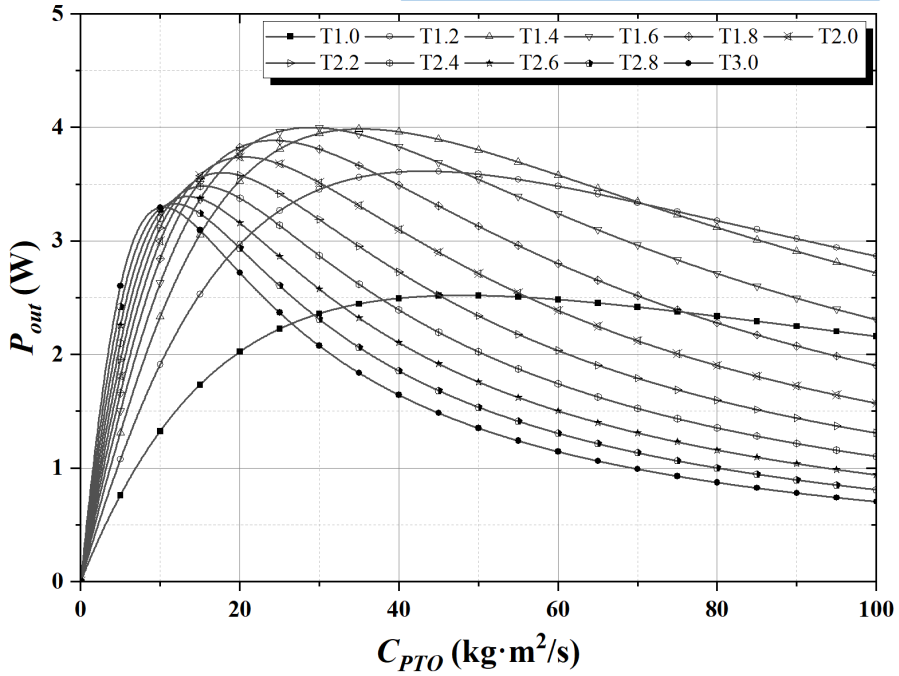
- μは周期とともに増加し，$T = 1.6$ sで最大値をとった後，緩やかに減少．水深による変化は小さい．
- Cは，$T = 0.8, 1.0$ sにおいて最大り，その後急激に減少．振り子が潜水状態の方が減少する傾向．

C_{PTO} と P_{out} の関係

$$P_{out} = C_{PTO}\varphi_{amp}{}^2\omega^2$$



$h = 0.425$ m, $T = 2.4$ s, $H = 0.09$ m, $\theta = 0°$



$h = 0.425$ m, $T = 2.4$ s, $H = 0.09$ m, $\theta = 60°$

- 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，**C_{PTO} の増加**に伴い発電量も増える一方で**<u>回転角が減少</u>**するためである．
- 振り子の**<u>設置角が大きくなる</u>**と**<u>発電量は小さく</u>**なり，最大発電量となる入射波周期が $T = 1.4$ s （θ = 0, 30°）から 1.6 s（θ = 60°）に大きくなるものの，発電量が最大となる C_{PTO} は変化しない．

実験結果（断面二次元）

- 自由振動実験

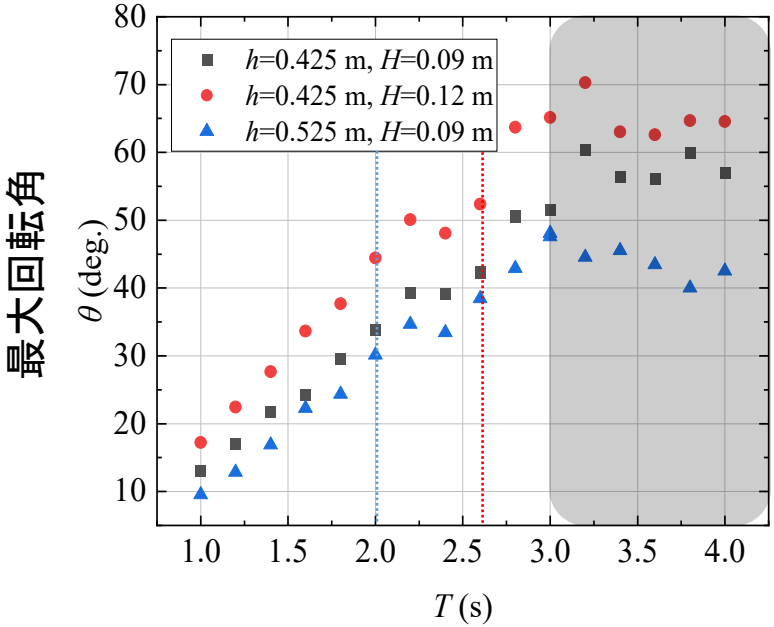
h (m)	固有周期 T_0 (s)
0.425	5.21 (2.61)
0.475	4.79 (2.40)
0.525	4.17 (2.09)

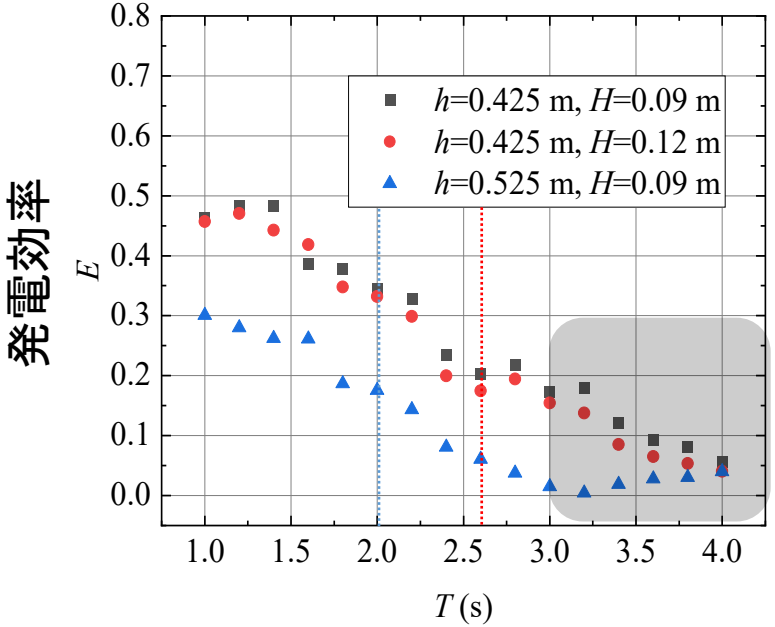
水深が深くなるほど固有周期が短い

抵抗の増加の影響よりも

浮力増加の影響が大きい

- 反射壁なし





実験結果（断面二次元）

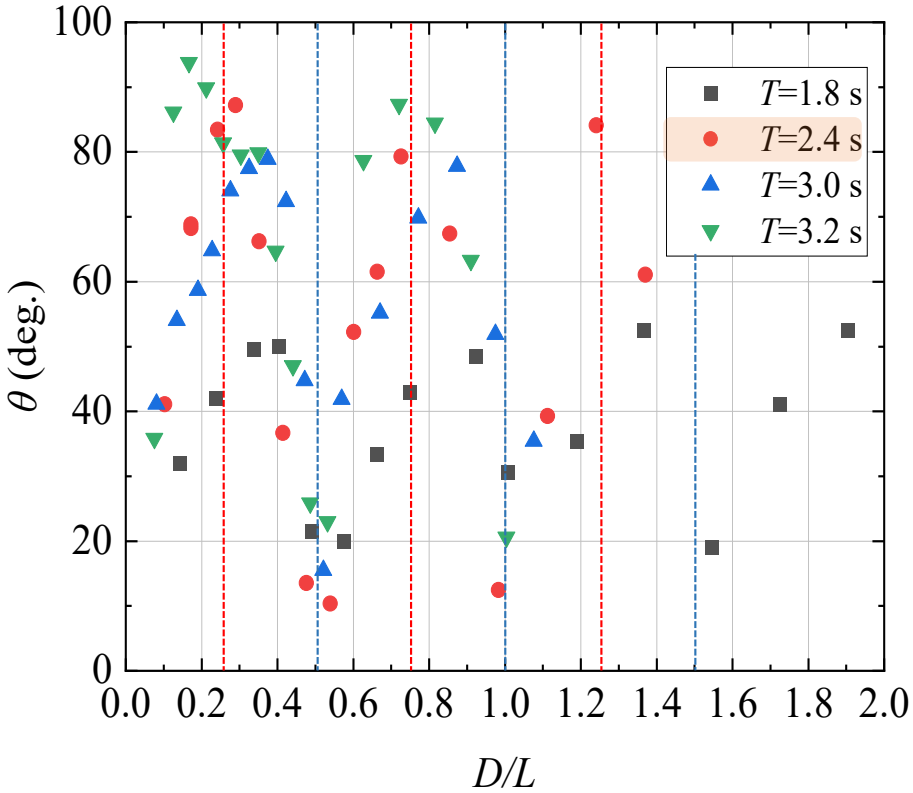
h (m)	固有周期 T_0 (s)
0.425	5.21 (2.61)
0.475	4.79 (2.40)
0.525	4.17 (2.09)

- 反射壁あり（h = 0.425 m）

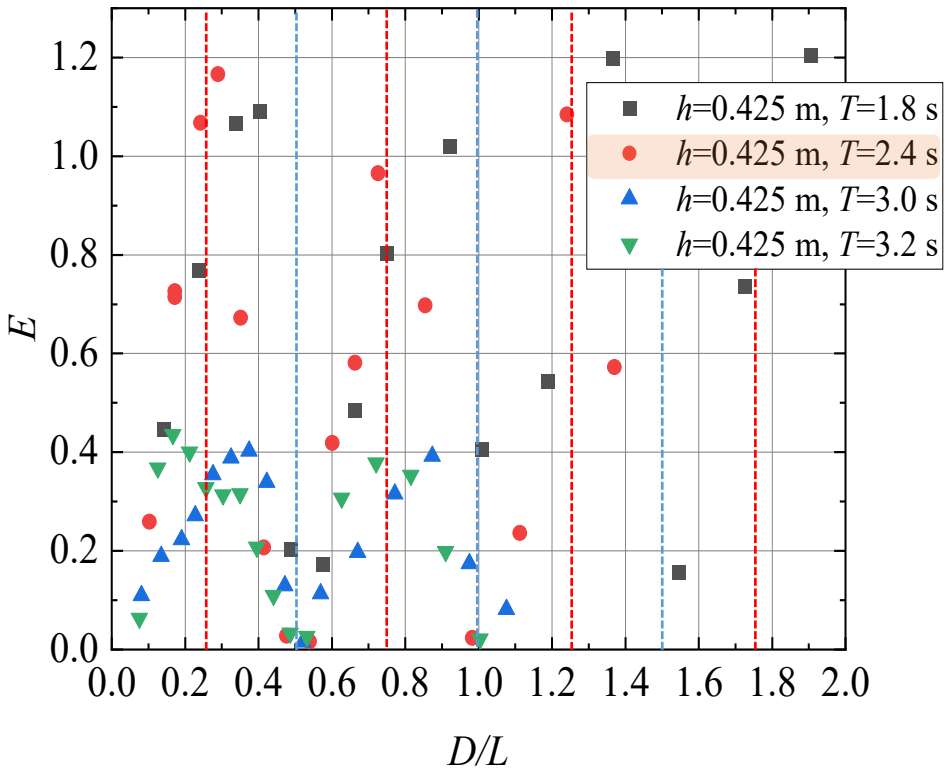
------- 節の位置（D/L = (2n-1)/4）

------- 腹の位置（D/L = 2n/4）

最大回転角



発電効率



実験結果（断面二次元）

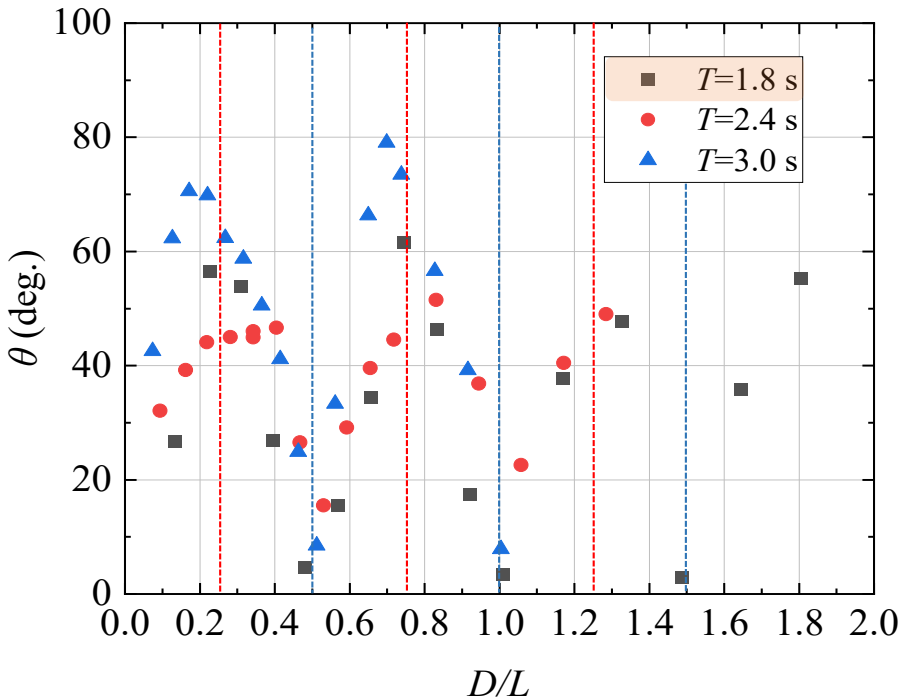
h (m)	固有周期 T_0 (s)
0.425	5.21 (2.61)
0.475	4.79 (2.40)
0.525	4.17 (2.09)

- 反射壁あり（h = 0.525 m）

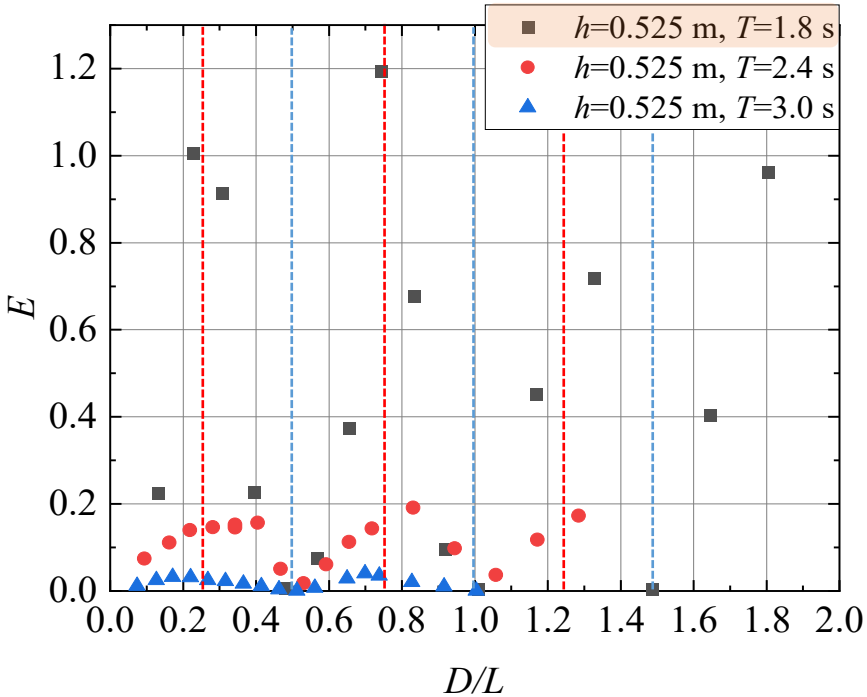
------- 節の位置（D/L = (2n-1)/4）

------- 腹の位置（D/L = 2n/4）

最大回転角



発電効率

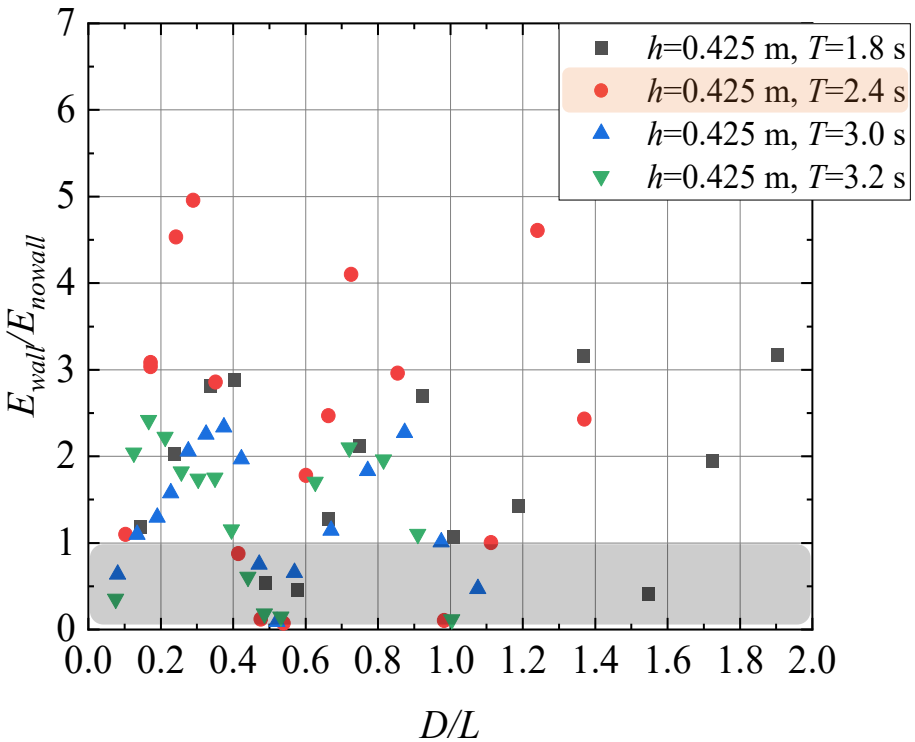


実験結果（断面二次元）

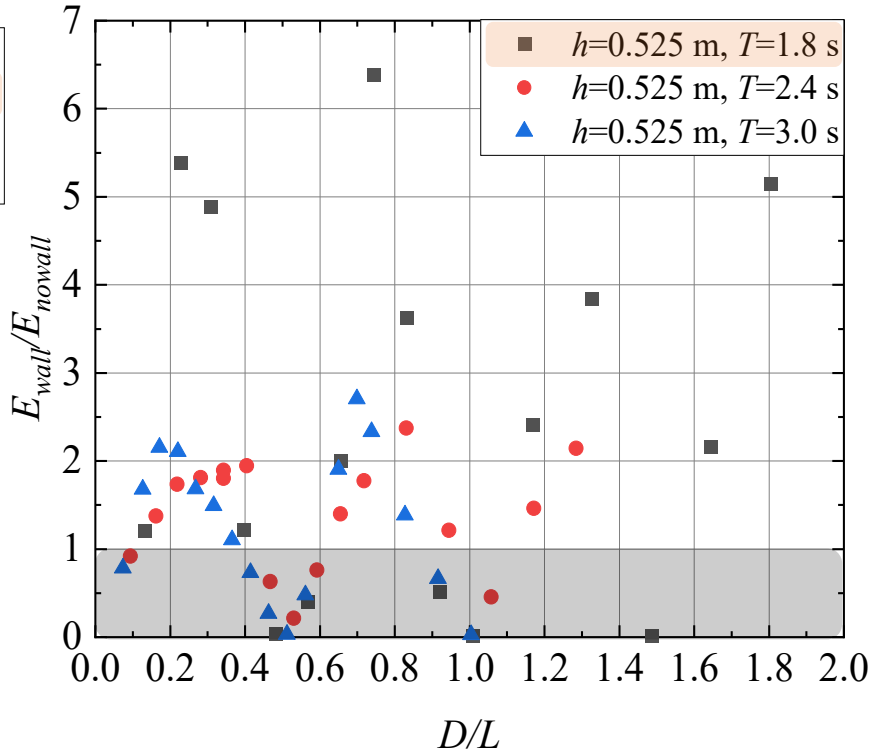
- 反射壁有無による比較

水深 h (m)	固有周期T_0 (s)
0.425	5.21 (2.61)
0.525	4.17 (2.09)

h = 0.425 m



h = 0.525 m

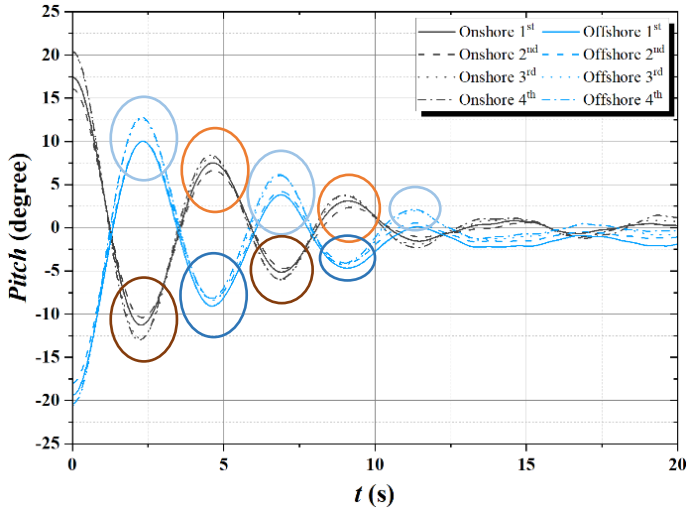


- 固有周期に近い波周期で著しく効率が上昇.
- 節の位置では最低で2倍，最大で6倍以上に効率が上昇.
- 腹の位置では効率減少.

実験結果（平面三次元）

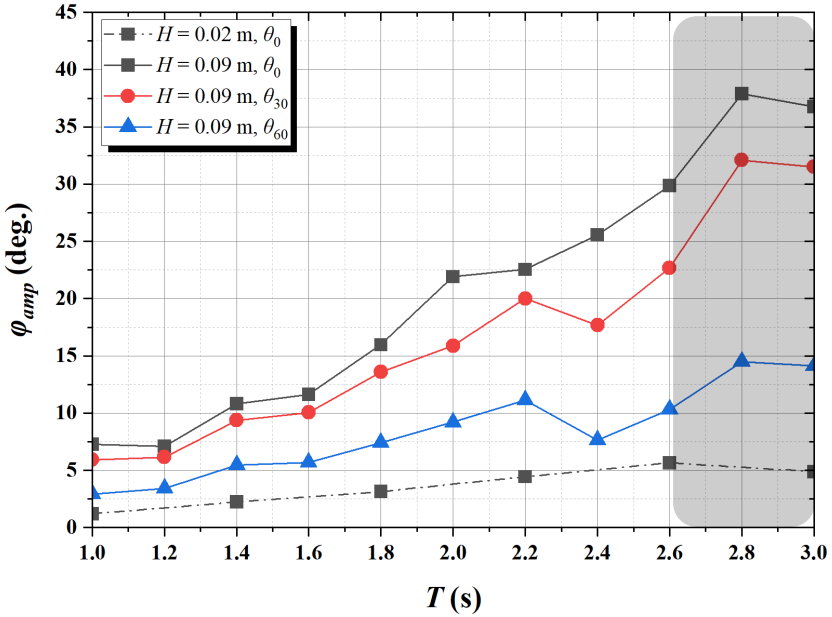
- 自由振動実験

h (m)	固有周期 T_0 (s)
0.425（二次元）	5.21 (2.61)
0.425（三次元）	4.52

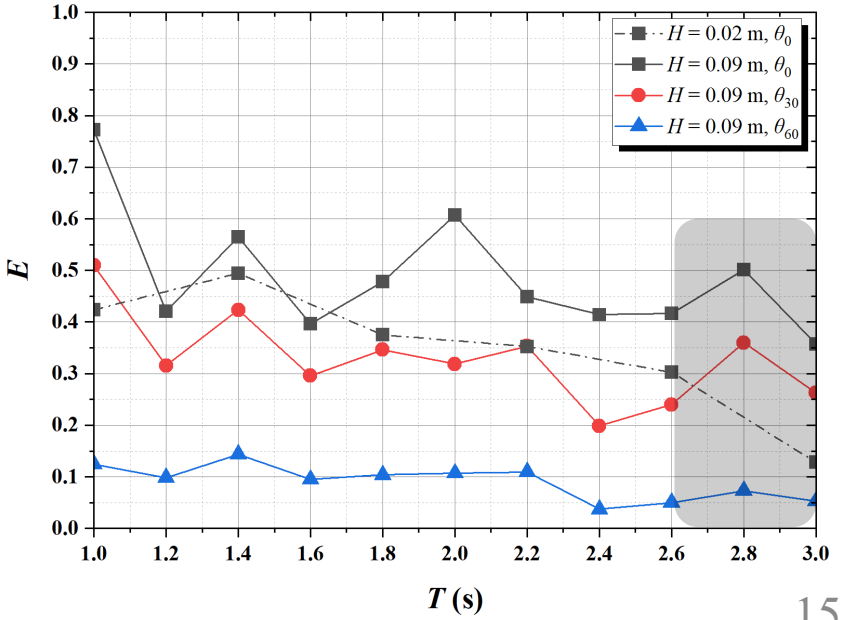


- 反射壁なし

最大回転振幅

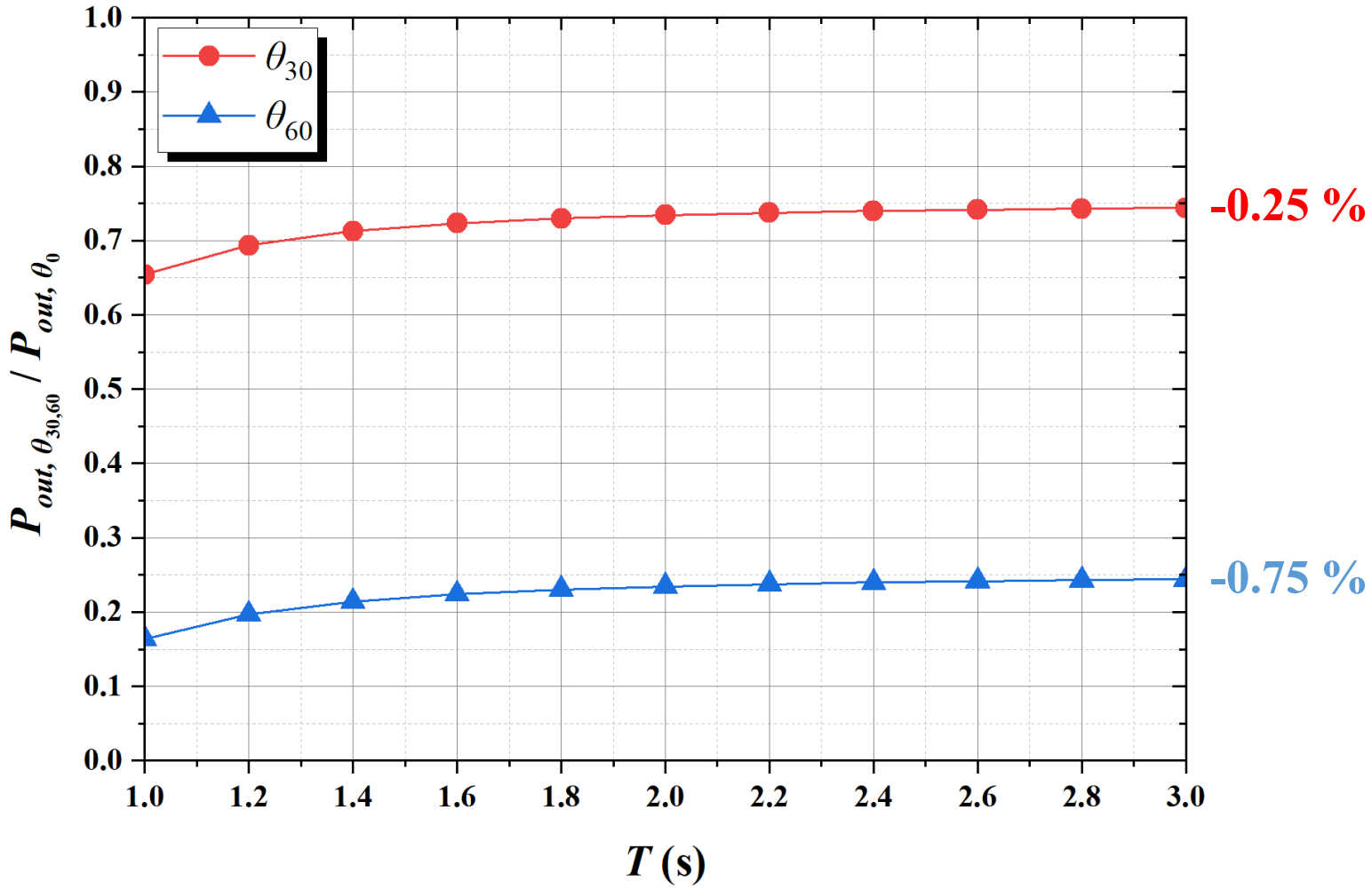


発電効率

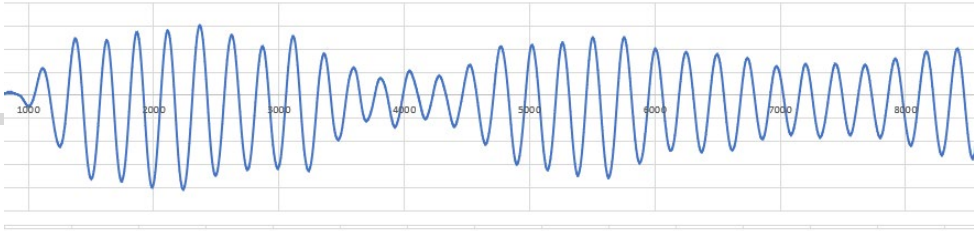


実験結果（平面三次元）

- 設置角度による発電量比



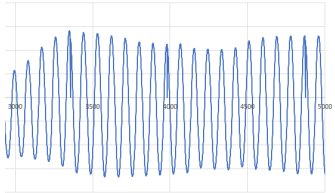
実験結果（平面三次元）



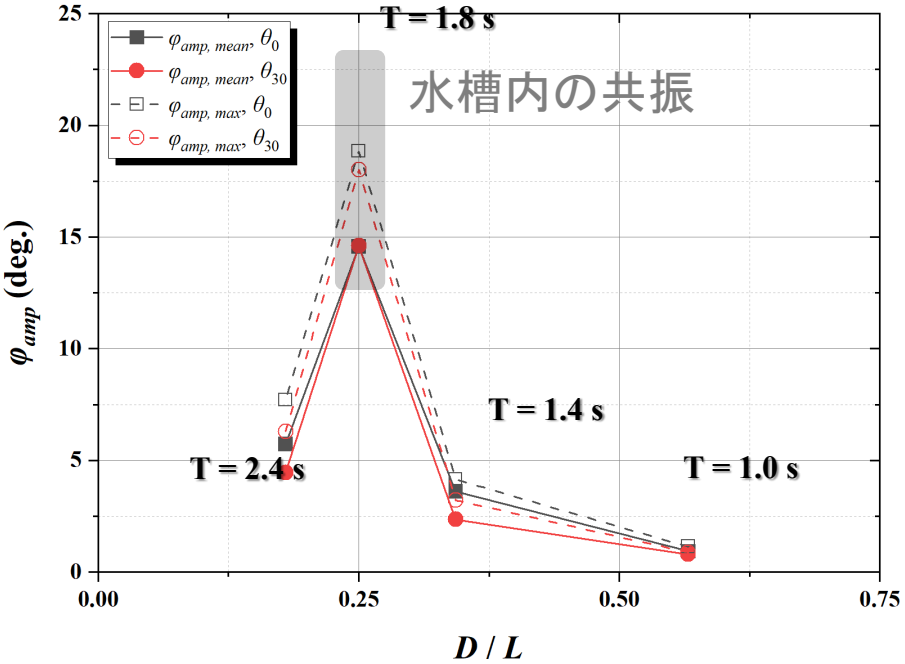
- 反射壁あり

（H = 0.02 m, h = 0.425 m, D/L = T1.8 sの節の位置）

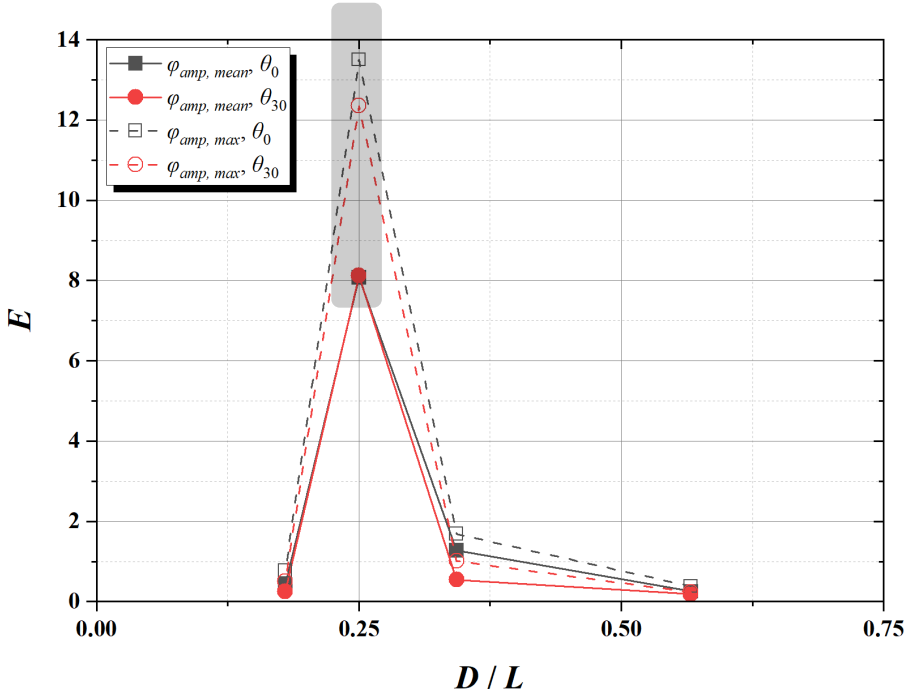
回転角度の変動
上：三次元
右：二次元



最大回転振幅



発電効率

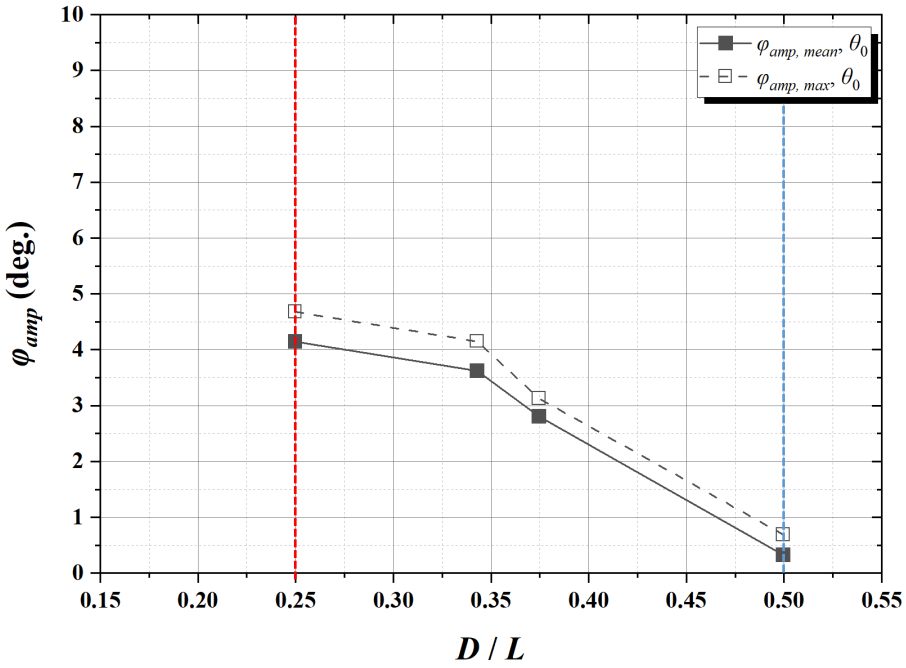


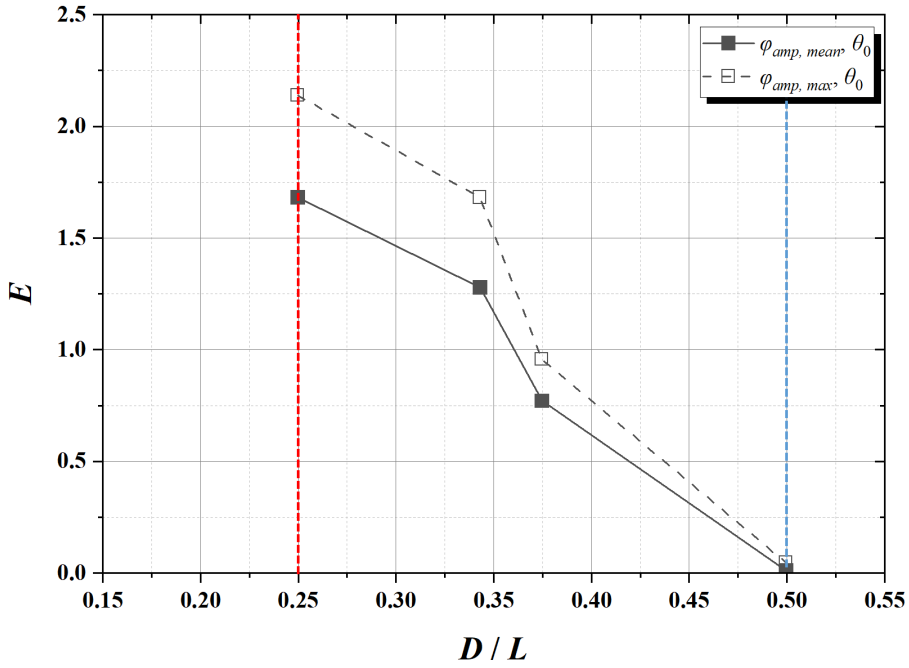
- 造波開始後の10波の後の振り子の回転角から20波分の回転角を対象

実験結果（平面三次元）

- 反射壁あり

（H = 0.02 m, h = 0.425 m, T = 1.4 s）





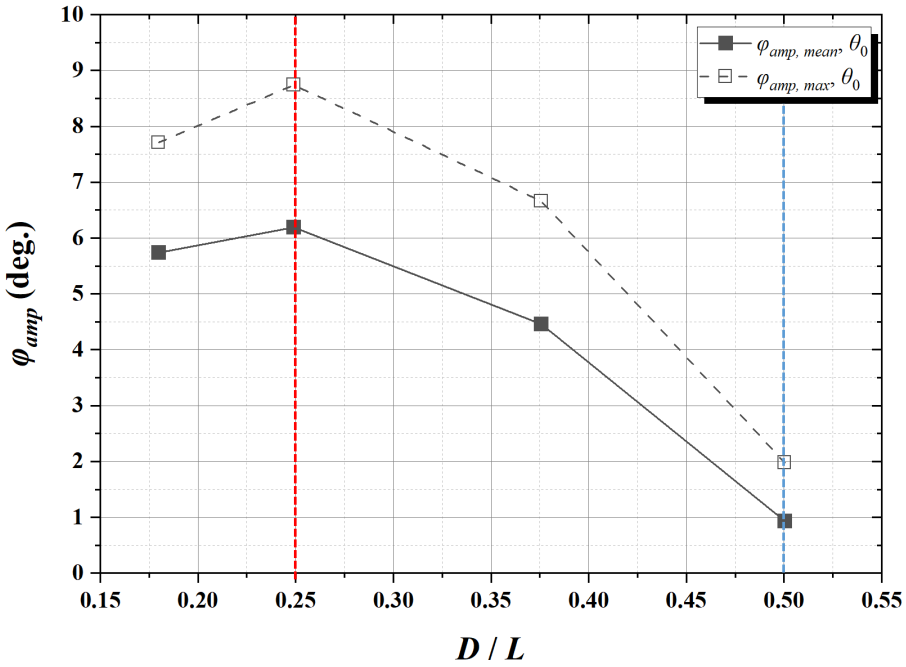
------- 節の位置（D/L = (2n-1)/4）

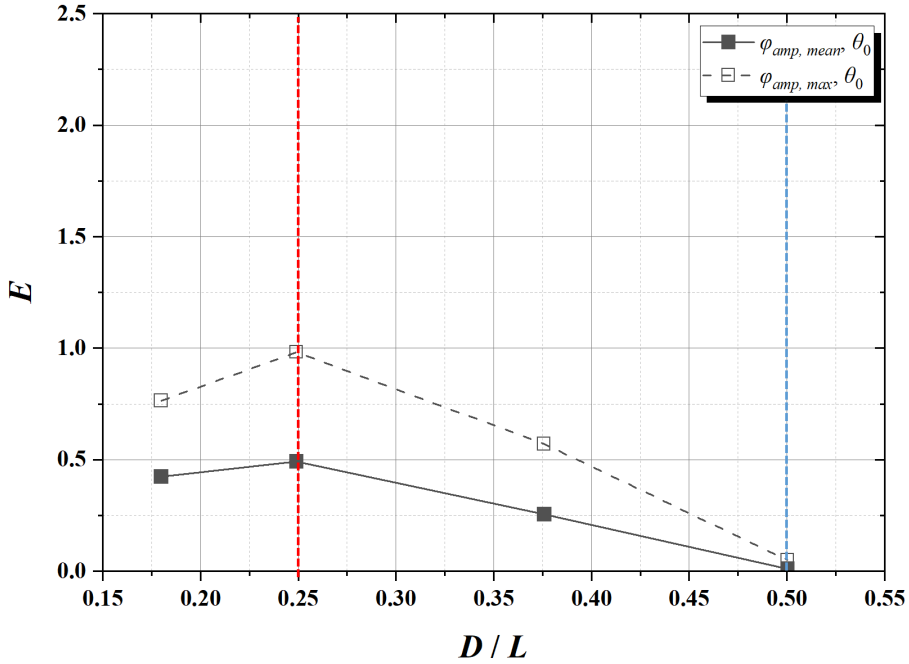
------- 腹の位置（D/L = 2n/4）

実験結果（平面三次元）

- 反射壁あり

（H = 0.02 m, h = 0.425 m, T = 2.4 s）

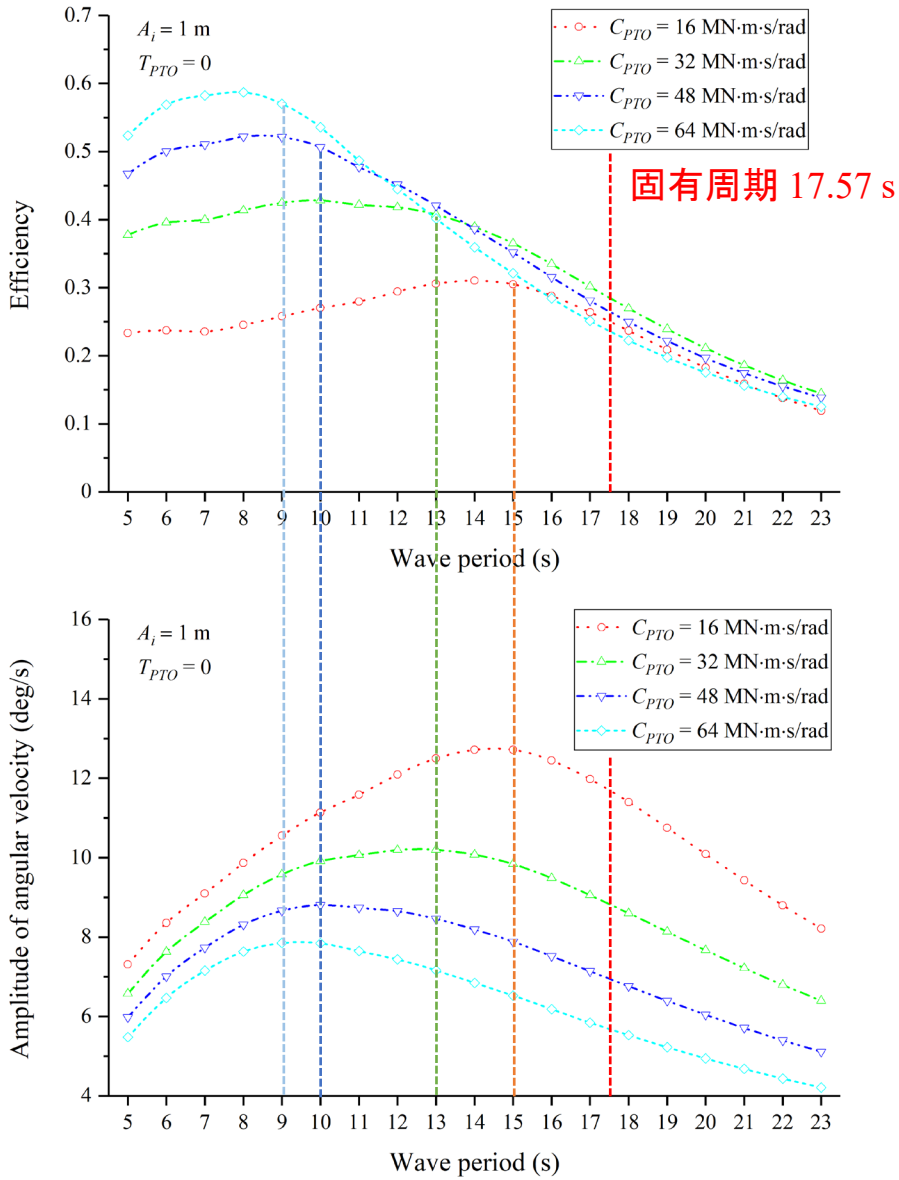




------- 節の位置（D/L = (2n-1)/4）

------- 腹の位置（D/L = 2n/4）

最大効率と振り子の共振



BEMに基づく数値モデル

- 境界要素法（BEM）に基づくOWSCの時間領域動的方程式を修正された波面，復元モーメント，抗力，および摩擦の非線形性を考慮してPythonコードによって計算.
- 摩擦が大きいと，共振状態がなくなる.
- 完全な共振を達成することはできないものの，最大効率が表れる周期は振り子の角速度の振幅が最大となる周期に近くなる.

結論

- 壁なし条件で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り，越波による効率の減少は小さいことが判明.
- 壁あり条件で，水深にかかわらず発電効率は定常波の節付近で増加，腹付近で減少し，周期が短く水深が浅いほど効率が大きくなる.
- 壁あり条件で，振り子の設置角度（波向き）の影響は小さいことが確認.
- 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発電性能が向上する可能性が示唆.
- 最大発電効率は，振り子の最大角速度が発生する入射波周期で表れることが判明.