

## 浮体型振り子式波力発電装置の負荷特性に関する研究

村上 天元<sup>\*1</sup>, 今井 康貴<sup>\*1</sup>, 永田 修一<sup>\*1</sup>

### A Study on Load Characteristics of Floating Type Pendulum Wave Energy Converter

Tengen MURAKAMI<sup>\*1</sup>, Yasutaka IMAI<sup>\*1</sup> and Shuichi NAGATA<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> Institute of Ocean Energy, Saga University  
1-48, Hirao, Kubara-aza, Yamashiro-cho, Imari-shi, Saga, 849-4256, Japan

A floating type pendulum wave energy converter (FPWEC) with a rotary vane pump as the power take-off system was proposed by Watabe et al. in 1998. They showed that this device had high energy conversion efficiency. In the previous research, the authors conducted 2D wave tank tests in regular waves to evaluate the generating efficiency of FPWEC with a power take-off system composed of pulleys, belts and a generator. As a result, the influence of the electrical load on the generating efficiency was shown. Continuously, the load characteristics of FPWEC are pursued experimentally by using the servo motors to change the damping coefficient in this paper. In a later part of this paper, the motions of the model with the servo motors are compared with that of the case with the same power take-off system as the previous research. From the above experiment, it may be concluded that the maximum primary conversion efficiency is achieved as high as 98% at the optimal load.

**Key Words** : Pendulum, Wave Energy Converter, Floating Type, Load Characteristics, Primary Conversion Efficiency

## 1. 結 言

波力発電システム<sup>(1)</sup>において、振り子式波力発電装置はエネルギー変換過程が少なく、発電効率が低いことが示されている。渡部<sup>(2)</sup>は沿岸固定式の振り子式波力発電装置を提案し、この装置の一次変換効率は最大で82%となることを示し、二次変換装置としてロータリーベーンポンプを開発している。このロータリーベーンポンプは、回転トルクを油圧に変換する装置であり、この装置と発電機を組み合わせることで、二次変換効率が68~74%となること、および発電効率は40~60%程度であることを示している。一方、沿岸固定式は建設コストの約70%がケーソンコストであることや建設場所の制約があることなどの難点がある。この沿岸固定式の難点を解決する手法として、渡部<sup>(2)</sup>は沖合に設置する浮体型装置を提案して、波浪エネルギーから振り子の吸収エネルギーへの変換効率（一次変換効率）に関する予備的な実験を行っている。浮体型装置は、波高の高い沖合に設置するため発電量の増加が見込めること、装置を造船所で短期間に建造できることから、初期コストを大きく低減できることなどの利点がある。

浮体型振り子式波力発電装置に関して、著者ら<sup>(3)</sup>は二次変換装置としてプーリとベルトによる増速機構を用いた発電ユニット、また、これを模擬したダンピングを段階的に変化させるトルクダンパーの2種類を取り付けたモデルを用いた水槽実験を行い、発電効率の最大値26%および一次変換効率の最大値80%を得た。近年、Parkら<sup>(4)</sup>も電動モータを搭載した振り子式波力発電装置の一次変換効率を実験的に求めているが、回転速度に比例したトルクダンピングの精度が不十分である。また、Namら<sup>(5)</sup>は、高次境界要素法を用いて規則波および不規則波中での、浮体のサージ、ヒープおよびピッチの縦運動を計算し、実験値と比較している。しかしながら、この計算では一次変換効率に関する計算値と実験値の比較は行われていない。

本研究では、浮体型振り子式波力発電装置の発電効率をさらに高めるために、装置のエネルギー吸収特性の可

\* 原稿受付 2014年07月31日

<sup>\*1</sup> 佐賀大学海洋エネルギー研究センター (〒849-4256 伊万里市山代町久原字平尾1-48)  
E-mail: murakami@ioes.saga-u.ac.jp

性能を明らかにすることを目的としている。具体的には、実機の負荷特性を模擬することができるサーボモータを装備した浮体型振り子式波力発電装置模型を製作し、二次元水槽実験を行い、一次変換効率および浮体の運動を求めた。さらに、プーリとベルトによる増速機構を有する二次変換装置を搭載して発電効率を求めた。

## 2. 実験装置

### 2・1 供試体模型

図1は供試体模型の概略図を示す。模型は、振り子板、水室底面、水室側面、水室後壁、減揺板、浮力体、バラスト、サーボモータおよびアルミフレームで構成されている。浮体の全長は1340 mmであり、全長の波上側1/2を振り子水室、波下側を遊水部とし、減揺板は水室後壁から665 mmの位置に設置し、入射波をスムーズに振り子水室に導くため、振り子水室のみを波上側に5 mm延長した。浮体の喫水 $d$ は216 mmである。また、図2に示すように振り子板中央部から波下側40 mmの位置と水室後壁中央部から波上側40 mmの位置の2箇所波高計を設置した。

### 2・2 実験装置配置

図3は二次元水槽内における供試体模型、波高計等の配置図を示す。水槽の両端には吸収式の造波装置が設置してあり、透過側の造波機は波の吸収のみに用いた。波は図の右側から左側に進行する。水槽の全長は18.5 m、水深は1.0 mである。模型は、水槽中央部に緩係留されており、波上側係留索の先には検力計が設置してある。また、模型を平衡状態に保つために、波下側はナイロン糸を用いて初期張力1 Nで引っ張った。なお、振り子板は、図4に示すように水室後壁から $P=0.650$  mの位置を基準とし、 $P=0.490$  mおよび $P=0.325$  mの位置に変更して実験を行った。計測範囲は、波長 $\lambda$ を水室長さ $L$ で除した値が0.6~7.0の範囲とし、入射波は波高0.015 mの規則波である。浮体動揺はMVTec社製画像解析プログラムHALCONにより計測した。

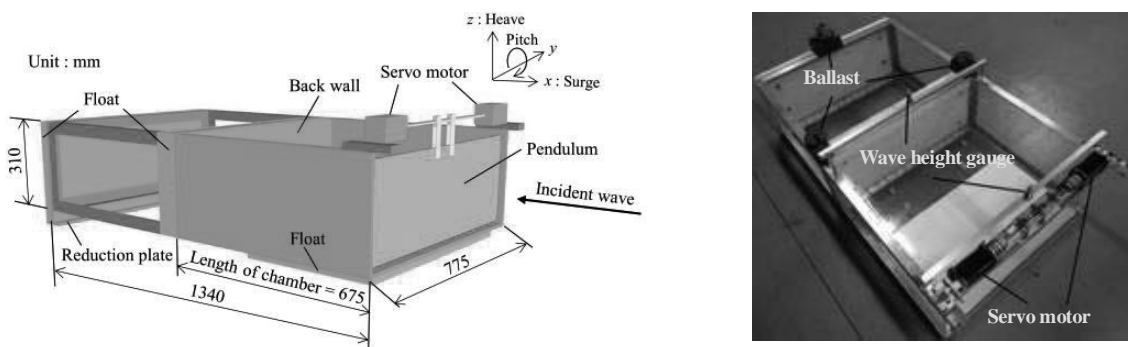


Fig. 1 Experimental model with servo motors

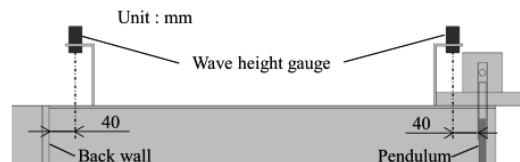


Fig. 2 Configuration of wave height gauges

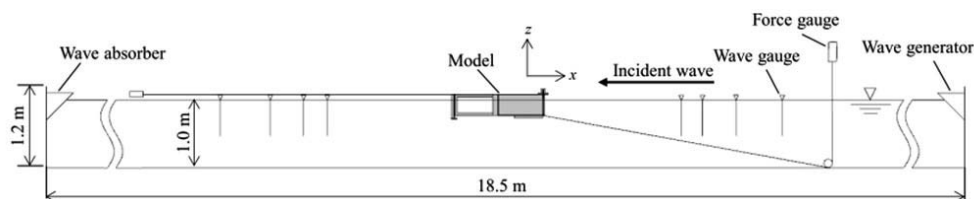


Fig. 3 Experimental equipment configuration in wave tank

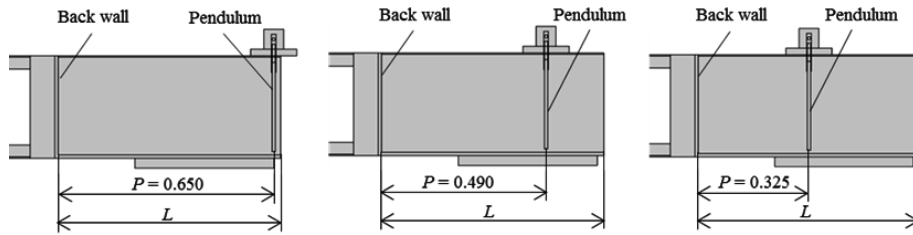


Fig. 4 Location of pendulum

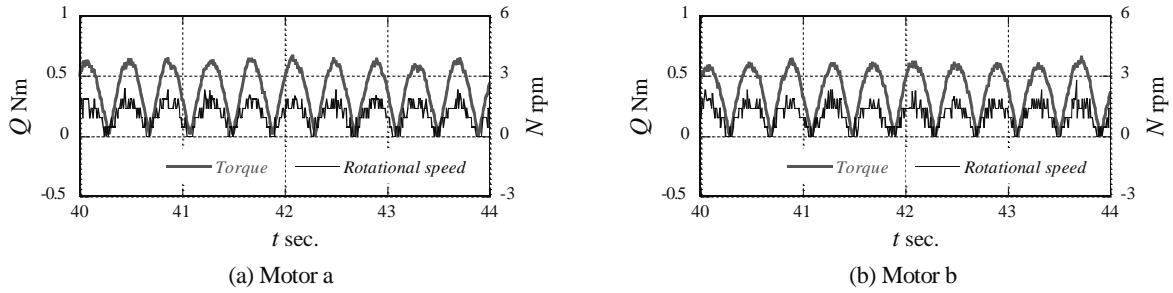


Fig. 5 Torque and rotational speed of pendulum shaft

### 3. 一次変換実験結果

#### 3・1 一次変換効率

図5は実験で得られた振り子軸のトルク  $Q$  および回転速度  $N$  の時間変化を示し、(a) および (b) はそれぞれ振り子軸両端に設置したサーボモータを表す。本実験では、振り子軸の回転速度を 1 msec.毎に計測し、減衰係数  $C_p (= Q/\omega : \text{Nm} \cdot \text{s/rad.}, \omega : \text{角速度})$  が既定値となるようにトルク制御を行った。入射波エネルギー  $E_{in}$ 、取得エネルギー  $E_{out}$  および一次変換効率  $\eta_1$  は、以下の式 (1)、式 (2) および式 (3) で与えられる。

$$E_{in} = \frac{\pi}{2kT} B \left( \frac{H}{2} \right)^2 \rho g \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (1)$$

$$E_{out} = \frac{1}{T} \int_0^T P_{out}(t) dt \quad (2)$$

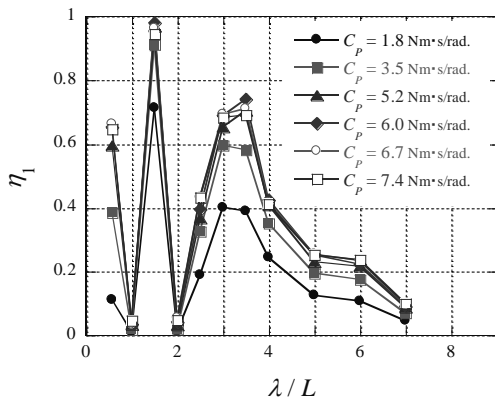
$$\eta_1 = E_{out} / E_{in} \quad (3)$$

ここで、 $B (=0.735 \text{ m})$  は振り子板幅、 $H$  は入射波波高、 $T$  は波周期、 $k$  は波数、 $\rho$  は密度、 $g$  は重力加速度、 $h$  は水深、 $P_{out} (= Q\omega)$  は出力を表す。

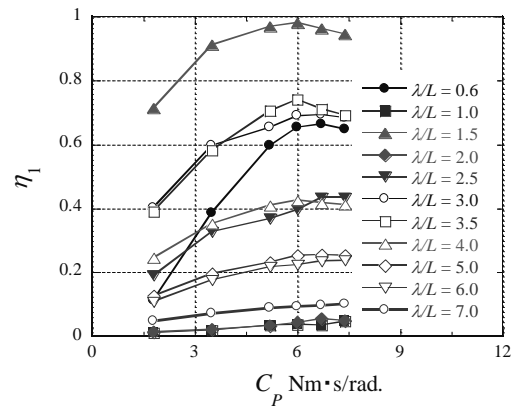
図6および図7は一次変換効率を示し、図6は波長  $\lambda/L$  による変化、図7は減衰係数  $C_p$  による変化を示す。また、(a) は振り子板位置  $P=0.650 \text{ m}$  の場合、(b) は  $P=0.490 \text{ m}$  の場合、(c) は  $P=0.325 \text{ m}$  の場合を示す。図7において振り子板位置  $P$  および  $\lambda/L$  によらず  $C_p$  が  $1.8 \text{ Nm} \cdot \text{s/rad.}$  から  $5.2 \text{ Nm} \cdot \text{s/rad.}$  へ増加するにつれて一次変換効率は単調増加した。 $P=0.650 \text{ m}$  の場合、減衰係数  $C_p = 6.0 \text{ Nm} \cdot \text{s/rad.}$  および  $\lambda/L = 1.5$  において一次変換効率の最大値  $0.98$  が得られた。また、 $P=0.490 \text{ m}$  の場合は、 $C_p = 5.2 \text{ Nm} \cdot \text{s/rad.}$  および  $\lambda/L = 3.0$  において最大の一次変換効率  $0.91$  が得られ、 $P=0.325 \text{ m}$  の場合は、 $C_p = 5.2 \text{ Nm} \cdot \text{s/rad.}$  および  $\lambda/L = 2.5$  において最大の一次変換効率  $0.90$  が得られた。

#### 3・2 水室内水位

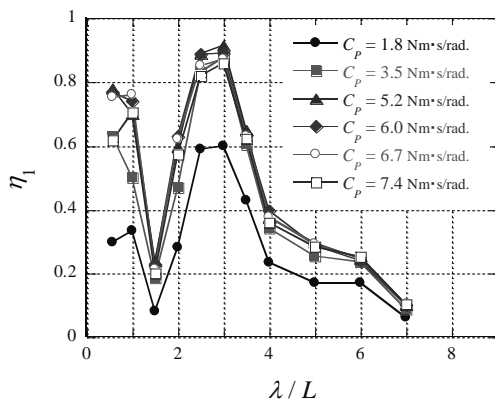
図8は水室内水位の時間変化を示し、 $\zeta_1$  は振り子板から  $40 \text{ mm}$  波下側の水位、 $\zeta_2$  は後壁から  $40 \text{ mm}$  波上側の水位を表し、それぞれ入射波振幅  $\zeta_i$  で無次元化した。図8 (a) の  $P=0.650 \text{ m}$  の場合、 $\lambda/L = 1.5$  における  $\zeta_1$  の振幅



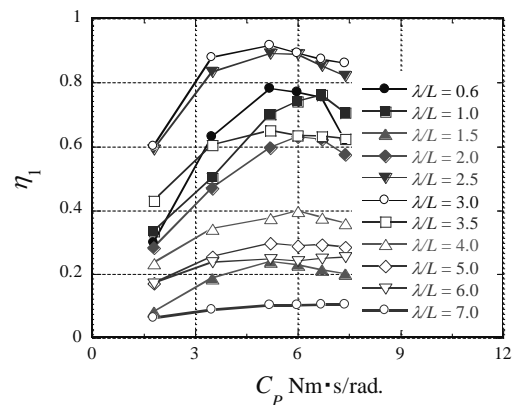
(a)  $P = 0.650$  m



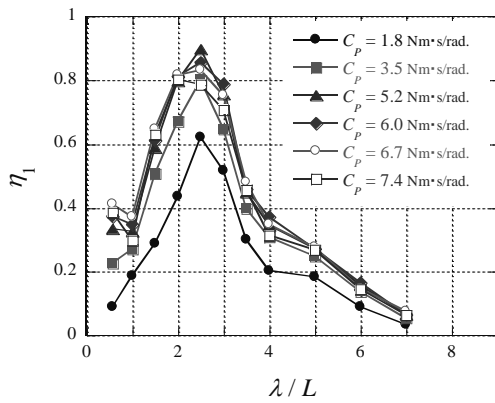
(a)  $P = 0.650$  m



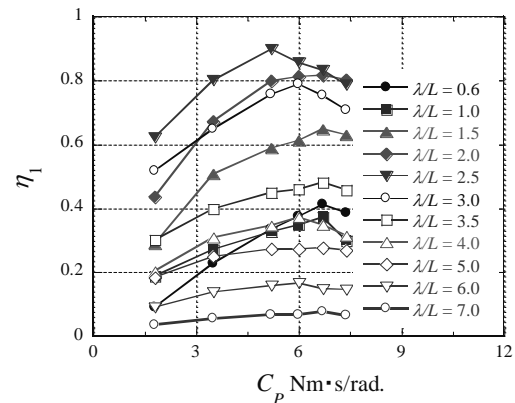
(b)  $P = 0.490$  m



(b)  $P = 0.490$  m



(c)  $P = 0.325$  m



(c)  $P = 0.325$  m

Fig. 6 Changes in primary conversion efficiency due to wave length

Fig. 7 Changes in primary conversion efficiency due to damping coefficient

が  $\lambda/L = 2.0$  の場合と比べて極めて小さくなっている。このことから、 $\lambda/L = 1.5$  では Second mode の定在波、すなわち図 9 (b) に示すように波長が  $P = 0.650$  m の 4/3 倍の波の節部と振り子板位置がほぼ一致しているものと推測でき、このことが極めて高い一次変換効率を得られる要因である。一方、 $\lambda/L = 2.0$  では振り子板位置に定在波の腹部があるものと考えられる。また、 $P = 0.650$  m の場合、 $\lambda/L = 3.5$  においても  $\zeta_1$  の振幅は小さい。これは後述の First mode の定在波の発生を意味している。図 8 (b) の  $P = 0.490$  m の場合は  $\lambda/L = 3.0$ 、(c) の  $P = 0.325$  m の場合は  $\lambda/L = 2.5$  において  $\zeta_1$  の振幅は小さい。これは First mode の定在波、すなわち図 9 (a) に示すように振り子板と後壁との距離  $P$  の 4 倍の波長の波の節部と振り子板位置が一致していることを意味しており、これが高い効率を得られる要因である。また、振り子板位置  $P = 0.650$  m が 0.490 m および 0.325 m へと後壁に近づくにつれて、First

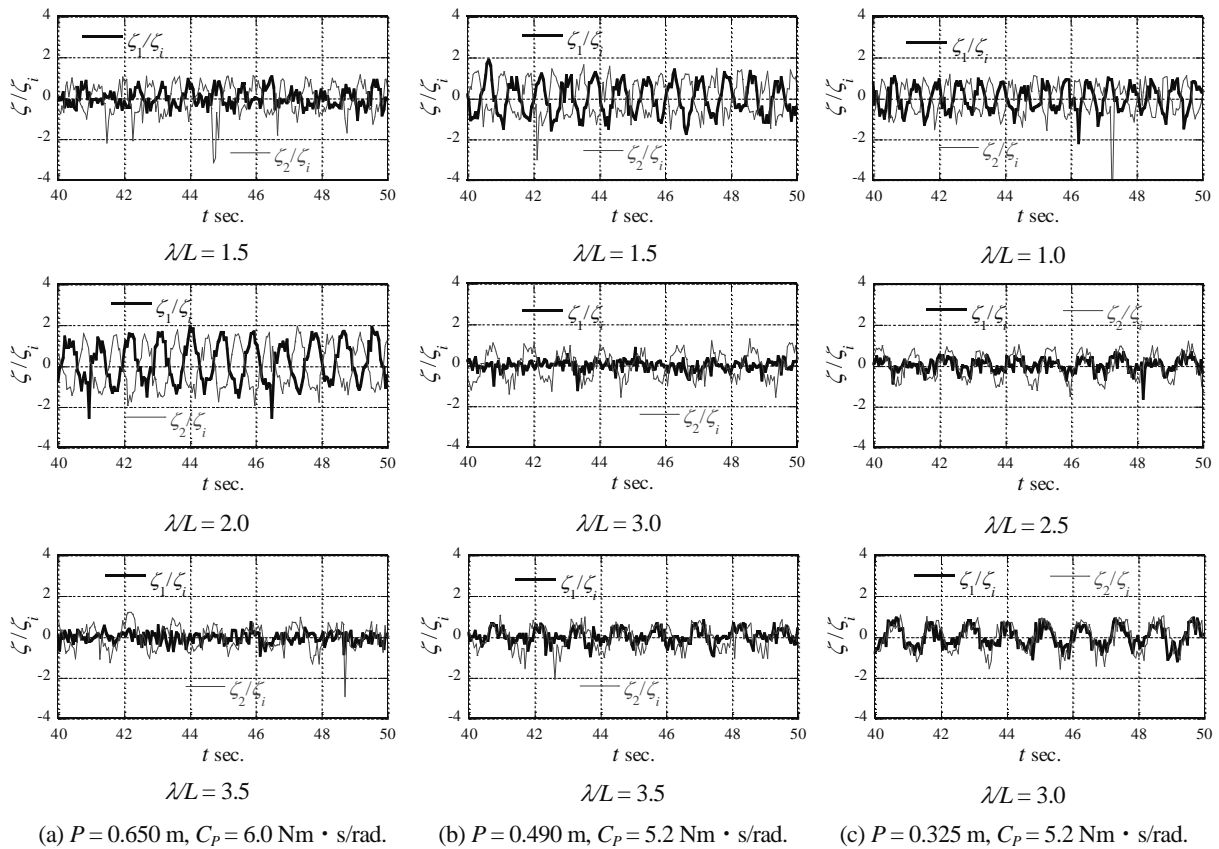


Fig. 8 Water displacement in water chamber

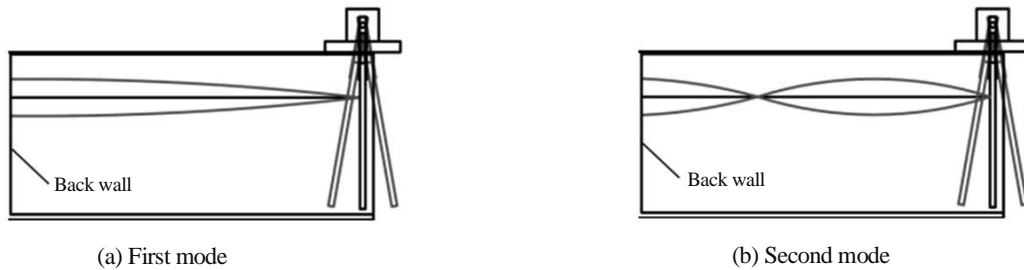


Fig. 9 Standing waves in water chamber

mode の定在波が発生する波長 $\lambda L$  は 3.5, 3.0, 2.5 と減少しており, 同様に Second mode が発生する波長 $\lambda L$  も振り子板と後壁との距離  $P$  の減少に伴って小さくなる.

### 3・3 浮体の動揺

図 10 はサージ方向振幅  $X/\zeta_i$ , ヒープ方向振幅  $Z/\zeta_i$  およびピッチ方向振幅  $\Theta/k\zeta_i$  を示し, (a) が First mode の場合, (b) が Second mode の場合を示す. 図 10 (b) の Second mode の場合, 浮体の動揺は殆ど見られなかった. 一方, 図 10(a) の First mode の場合, 浮体の動揺は振り子板位置  $P$  にかかわらず Second mode の場合より顕著になった. また, First mode の場合,  $C_p$  の増加に伴って浮体の動揺は低減され, 振り子板位置  $P = 0.325$  m の場合に最も動揺は小さくなった. これは,  $P = 0.325$  m の場合において浮体の動揺に起因する渦の発生を最も抑制できることを意味している.

## 4. 発電実験結果

### 4・1 発電実験装置

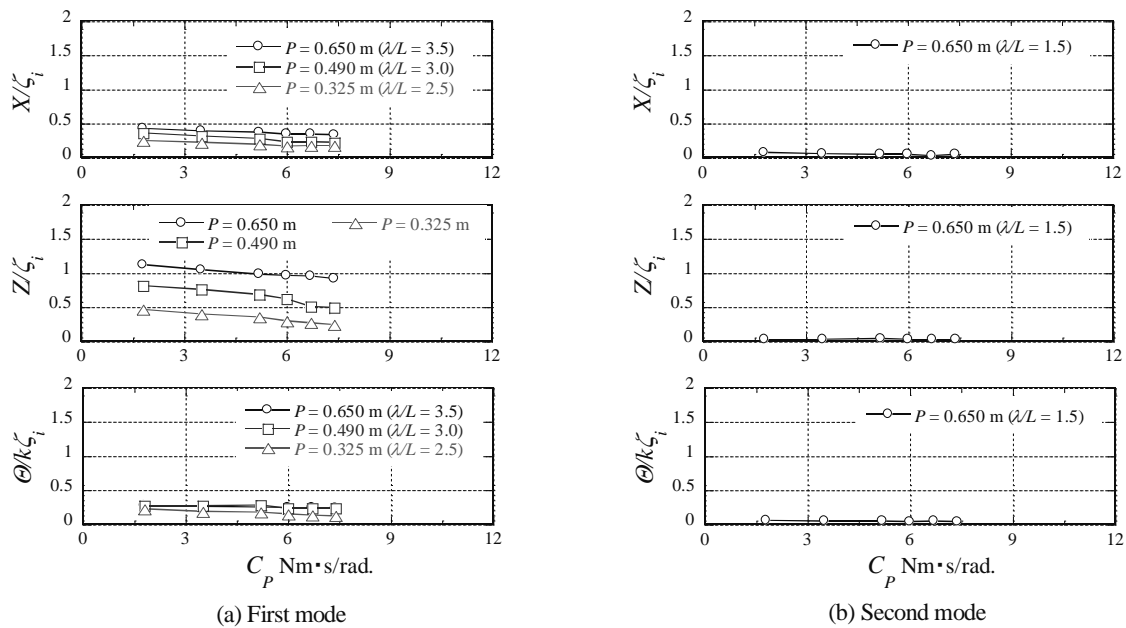


Fig. 10 Motion amplitude of floating body

二次変換装置の最適化が不十分ではあるが, 図 11 に示すベルトとプーリによる増速機構を有するパワーテイクオフシステムを浮体に搭載して発電実験を行った. 振り子軸の回転速度はベルトとプーリによって 28.8 倍に増速される. 発電機には, SKY-denshi 社製 SKY-HR (600 rpm, 出力 36W) を用いた. また, 整流器 (Shindengen 社製 S10VTA60) を用いて発電機からの交流出力を全波整流し, その後セメント抵抗を用いて熱エネルギーに変換した. 本発電実験では, 振り子板位置を  $P = 0.650$  m として, 抵抗  $R$  を  $50 \Omega$ ,  $100 \Omega$ ,  $200 \Omega$ ,  $300 \Omega$  および  $400 \Omega$  に変更した. 発電機出力  $P_{out}$  は式 (4) で与えられる.

$$P_{out} = V^2 / R \tag{4}$$

ここで  $V$  は起電圧を表す.

#### 4・2 発電効率

図 12 および図 13 は発電効率を示し, 図 12 は波長  $\lambda L$  による変化, 図 13 は抵抗  $R$  による変化を示す. 図 12 に示す発電効率は, 図 6 (a) の一次変換効率と比べて極端に小さくなってはいるが, 効率のピークはほぼ同じ波長  $\lambda L$  で表れた. また, 図 13 に示すように抵抗  $R = 300 \Omega$  の場合に最も高い発電効率が得られた.

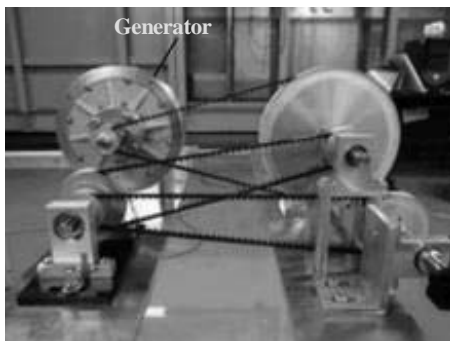


Fig. 11 Power take-off system

#### 4・3 浮体および振り子板の運動

次に, 図 14 はサーボモータおよび発電機を搭載した模型試験において, それぞれ高効率が得られた場合の浮体の運動を比較している. 図 14 から分かるように, サージ, ヒープおよびピッチのいずれにおいても浮体の運動に顕著な違いは見られなかった.

さらに, 図 15 は First mode が発生する  $\lambda L = 3.5$  および Second mode が発生する  $\lambda L = 1.5$  における振り子軸の回転速度  $N$  を示し, (a) がサーボモータの場合, (b) が発電機の場合を示す. 振り子軸の回転速度  $N$  は波 1 周期分を平均した時間平均値であ

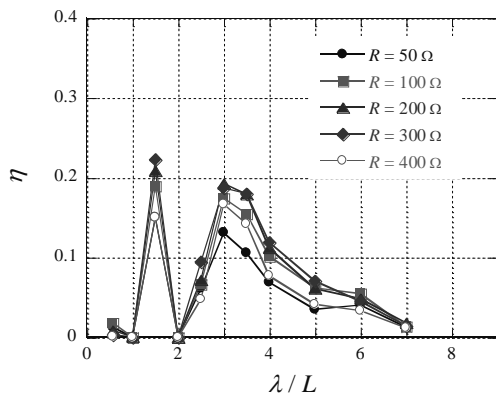


Fig. 12 Changes in generating efficiency due to wave length

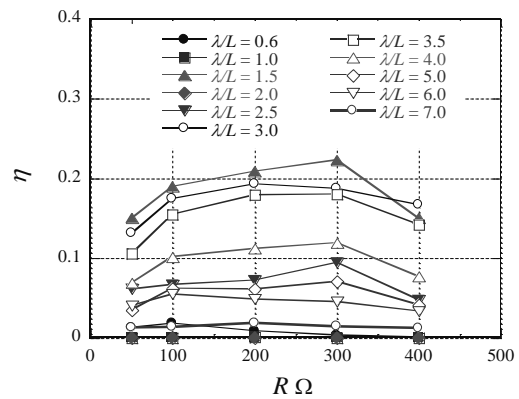


Fig. 13 Changes in generating efficiency due to electric resistor

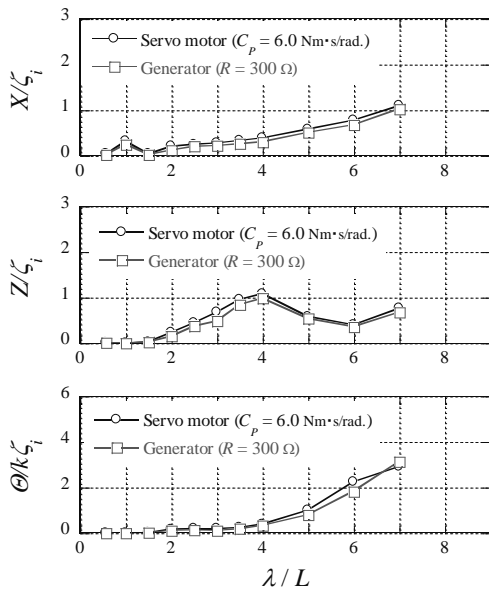
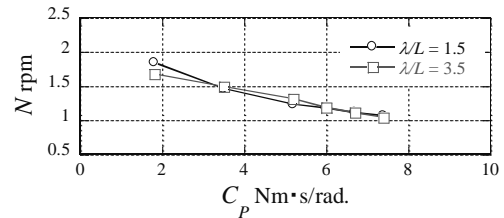
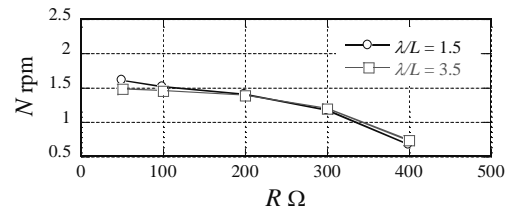


Fig. 14 Comparison between servo motor and generator on motion amplitude



(a) Servo motor



(b) Generator

Fig. 15 Rotational speed of pendulum shaft in first and second modes

る。振り子軸の回転速度  $N$  は、減衰係数  $C_p$  および抵抗  $R$  の増加に伴って減少した。また、最大の一次変換効率を得られた減衰係数  $C_p = 6.0 \text{ Nm} \cdot \text{s/rad.}$  および最大の発電効率を得られた抵抗  $R = 300 \text{ } \Omega$  における振り子軸の回転速度はいずれも約  $1.2 \text{ rpm}$  であった。今後、振り子軸の回転速度が約  $1.2 \text{ rpm}$  と低速であっても高効率を得られるよう二次変換装置を改良する予定である。

## 5. 結 言

本研究は、浮体型振り子式波力発電装置の規則波中における負荷特性を追究し、以下のことを明らかにした。

1. 水室内に Second mode の定在波が発生したときに最大の一次変換効率 98% が得られた。
2. First mode 発生時であっても高い一次変換効率 91% が得られた。
3. First mode 発生時、浮体の動揺は減衰係数の増加に伴って減少する。
4. 高効率を得られるときの振り子軸回転速度は約  $1.2 \text{ rpm}$  であった。

## 文 献

- (1) 渡部富治, “実用化に向かう波力発電”, パワー社(2009).
- (2) Watabe, T., “Utilization of the Ocean Wave Energy”, Fuji Print Press(2008).
- (3) 豊田和隆, 永田修一, 今井康貴, 瀬戸口俊明, 小野圭介, “浮体型振り子式波力発電装置の研究 (第一報) -規則波中発電特性試験”, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol.13, (2010), pp. 67-74.
- (4) Park, J. Y., Shin, S. H., Hong, K. Y. and Kim, S. H., “A Study on the Wave Response and Efficiency of a Pendulum Wave Energy Converter”, *Proceedings of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference*, (2012), pp. 601-606.
- (5) Nam, B. W., Hong, S. Y., Shin, S. H., “A Study on Wave-induced Motion of Floating Pendulum Wave Energy Converter”, *Asian Wave and Tidal Conference Series*, (2012), pp. 124-128.