

# ケーソンと浮体を用いた ボールねじ式波力発電装置の研究

A Study on the Ball Screw-Type Wave Power Generator System Using a Caisson and a Floating Body

木村 学<sup>\*1</sup>  
Manabu KIMURA

大亦 紹一郎<sup>\*2</sup>  
Kenichiro OHMATA

## Abstract

To obtain electric power from wave energy, the authors propose the ball screw-type wave power generator system using a caisson and a floating body. This system is composed of a caisson, a floating body, a ball screw, one-way clutches, flywheels and generators. A vertical wave force acting on the floating body in the caisson is converted into the fairly smooth one-way rotations of the flywheels and the generators. A small-scale model using two 6V-3.2W generators and rectangular prismatic floating body of 0.5m wide and 0.81m long was made, and the tank test was carried out using a wave tank of 8.3m long, 0.8m wide and 1.6m deep. The experimental results were compared with the calculated ones. The output of the assumed 50kW plant when it was subject to a sinusoidal wave and a measured wave was also calculated using a continuous system simulation language. The experimental and calculated results showed the validity of the system.

**Key words :** Wave energy, Wave power generator, Ball screw, Float, Caisson, Wave tank test

## 1. まえがき

自然エネルギー利用の一つとして、波浪エネルギーを利用した発電システムが世界各国で研究開発されてきたが、現在では、空気室と空気タービンを用いた方式が主流になっている<sup>[1]-[3]</sup>。

一方、著者らは、直線運動を回転運動に効率よく変換するボールねじに着目し、波力によって生じた受圧板の直線運動をボールねじを用いて効率よく発電機の回転運動に変換する方式の、ボールねじ式波力発電装置を提案した。このボールねじ式波力発電装置には、受圧板に作用する水平方向の波力を直接ボールねじに伝える直接式<sup>[4]</sup>と、浮体に作用する上下方向の波力をリンク機構を介してボールねじに伝える浮体式<sup>[5]</sup>があるが、いずれも横方向の強度に問題がある。

本論文では、横力を受けないように浮体とボールねじ式波力発電装置をケーソン内に収めた固定式波力発電装置を提案し、小規模実験モデルを試作して水槽実験を行い、その出力特性を計算結果と比較する。さら

に、50kW級の実用プラントを想定してシミュレーションを行い、本発電装置の有効性を検討する。

## 2. 波力発電装置の構造

本研究で提案するボールねじ式波力発電装置の概念図を図1に示す。ケーソン⑩内で形成される重複波の上下運動によって生じた浮体⑨の上下運動が、ブレケット⑥に組み込まれたボールナット⑦に伝達され、このボールナットとかみ合っているねじ軸⑧の往復回転運動に変換される。ねじ軸の上端部には、平歯車を兼ねた二つのはずみ車②, ②'が一方向クラッチ①を介して取り付けられており、各はすみ車の歯は発電機軸に取り付けられた小歯車とかみ合って発電機③, ③'を回転させる。二つの一方向クラッチがつながる回転の向きは逆になっているので、二つのはすみ車はお互いに逆向きに一方向回転をし続けることになる。

## 3. 理論解析

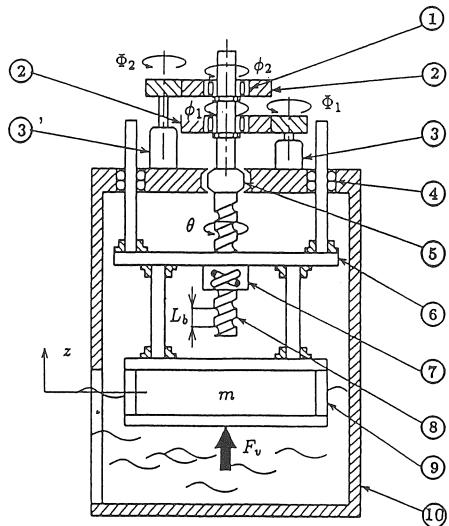
### 3.1 浮体に働く上下方向の力

直方体形状をもつ浮体が正弦波状の重複波を受けて上下運動するとき、浮体に作用する上下方向の力  $F_y$  は式(1)によって表される<sup>[6]</sup>。この力は、静力学的復元力、

\*原稿受付 平成6年2月7日

\*1 会員 オリンパス光学工業(株) (〒399-04 長野県上伊那郡辰野町伊那富6666)

\*2 会員 明治大学理工学部 (〒214 川崎市多摩区東三田1-1-1)



1.One-way clutch 2.Flywheel 1 2'.Flywheel 2  
 3.Generator 1 3'.Generator 2 4.Ball bushing  
 5.Thrust bearing 6.Bracket 7.Ball nut  
 8.Ball screw 9.Floating 10.Caisson

図1 ポールねじ式波力発電装置の概念図

減衰力および表面波によって励起される力の和である。

$$F_v = -\rho g B L z - \frac{\pi^2 \rho g}{4\omega^2} c \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \bar{A}^2 L \dot{z} + \frac{4\rho g a B}{k} \sin\left(\frac{kL}{2}\right) \cos(\omega t) \quad (1)$$

ここで、 $z$ は浮体の変位、 $\rho$ は海水の密度、 $g$ は重力加速度、 $h$ は水深、 $a$ は波の振幅、 $k$ は波数、 $c$ は波速、 $\omega$ は波の角振動数、 $\bar{A}$ は波と浮体の振幅比(実験的に定まる定数)であり、 $B, L$ はそれぞれ浮体の幅、長さである。

### 3.2 運動方程式

浮体の変位を $z$ 、ポールねじの回転角を $\theta$ 、はずみ車1,2の回転角を $\phi_1, \phi_2$ 、発電機1,2の回転角を $\Phi_1, \Phi_2$ 、はずみ車と発電機のギヤ比を $r$ とし、発電機1,2の発電制動トルク $T_1, T_2$ は、

$$T_1 = A_1 \dot{\Phi}_1 + B_1 = A_1 r \dot{\phi}_1 + B_1 \\ T_2 = A_2 \dot{\Phi}_2 + B_2 = A_2 r \dot{\phi}_2 + B_2$$

で与えられると仮定すると、浮体に上下方向の波力 $F_v$ が作用するときの浮体および二つのはずみ車の運動方程式は、次の三つの場合に分けられる。

1) はずみ車1のクラッチがつながっているとき

$$(\dot{\phi}_1 = \dot{\theta}, \dot{\phi}_2 < \dot{\theta})$$

$$(m + \beta^2 J_1) \ddot{z} + \beta r (\beta r A_1 \dot{z} + B_1) + M_b \text{sign}(\dot{z}) = F_v$$

$$J_2 \ddot{\phi}_2 + r(r A_2 \dot{\phi}_2 - B_2) = 0$$

$$\dot{\phi}_1 = \dot{\theta} = \beta \dot{z}$$

$$\text{ただし, } \beta = 2\pi/L_b$$

2) はずみ車2のクラッチがつながっているとき

$$(\dot{\phi}_1 > \dot{\theta}, \dot{\phi}_2 = \dot{\theta})$$

$$(m + \beta^2 J_2) \ddot{z} + \beta r (\beta r A_2 \dot{z} - B_2) + M_b \text{sign}(\dot{z}) = F_v$$

$$J_1 \ddot{\phi}_1 + r(r A_1 \dot{\phi}_1 + B_1) = 0$$

$$\dot{\phi}_2 = \dot{\theta} = \beta \dot{z}$$

3) 両方のクラッチが切れているとき ( $\dot{\phi}_1 > \dot{\theta}, \dot{\phi}_2 < \dot{\theta}$ )

$$m \ddot{z} + M_b \text{sign}(\dot{z}) = F_v$$

$$J_1 \ddot{\phi}_1 + r(r A_1 \dot{\phi}_1 + B_1) = 0$$

$$J_2 \ddot{\phi}_2 + r(r A_2 \dot{\phi}_2 - B_2) = 0$$

ここで、 $m$ は浮体(ブラケット、ガイド軸を含む)の質量、 $J_1, J_2$ ははずみ車1,2の慣性モーメント、 $A_1, A_2$ は発電機1,2の発電制動トルク係数、 $B_1, B_2$ は発電機1,2の損失トルク、 $L_b$ はポールねじのリード、 $M_b$ はガイド軸、ポールねじなどによる摩擦力を示す。

波の上下運動によって、1)~3)の場合が交互に繰り返されるため、その解を解析的に求めることは困難であるので、ここでは連続系シミュレーション言語(FACOM SLCS V)を用いて三つの場合の運動方程式をプログラムし、数値計算を行った。

### 4. 50kW級仮想プラントのシミュレーション

本波力発電装置の50kW級プラントを想定し、浮体に正弦波および実測波が作用したときの出力特性をデジタルシミュレーションによって調べた。シミュレーションに用いた波力発電装置の諸元を表1に示す。シミュレーションは、以下の仮定を設け、望ましい $A_1, A_2$ および $J_1, J_2$ の値を求めた。

- (1) 発電機の損失トルク $B_1, B_2$ および摩擦力 $M_b$ を零とし( $B_1 = B_2 = 0, M_b = 0$ )、また、 $A_1 = A_2, J_1 = J_2$ とする。
- (2) ケーソン内の波高および周期はケーソン外のもとの等しいとする。
- (3) 発電機は600rpm以上で発電を開始する。
- (4) 浮体の変位は±500mm以内であること。

表1 発電プラントの1ユニット(25kW級)の諸元

	Width $B$	2800 mm
Floating body	Length $L$	2500 mm
	Thickness $D$	1500 mm
	Mass $m$	3500 kg
Ball screw	Lead $L_b$	32 mm
	Diameter $d_0$	250 mm
Gear	Gear ratio $r$	5

(5) 表1の25kW級ユニットを二つ並べて使用する。

(6) 出力は次式の機械的平均出力を用いて計算する。

$$P = \frac{10^{-3}}{T} \int_{t_0}^{T+t_0} (T_1 \dot{\Phi}_1 + T_2 \dot{\Phi}_2) dt \quad (2)$$

(7) 効率  $\eta$  は発電機の効率を考慮しない機械的効率とする。

$$\eta = \frac{P}{B H^2 T} \times 100 \quad (\%) \quad (3)$$

$$\begin{cases} T : \text{波の周期} \\ H : \text{波高} \\ B : \text{浮体の幅} \end{cases}$$

(8) 定常状態での発電機回転数の変動率  $\epsilon$  を30(%)と制限する直接利用タイプAと制限しない蓄電タイプBを想定する。変動率は次式を用いて計算する。

$$\epsilon = \frac{N_{max} - N_{min}}{N_{mean}} \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

$$\begin{cases} N_{max} : \text{最大回転数} \\ N_{min} : \text{最小回転数} \\ N_{mean} : \text{平均回転数} \end{cases}$$

#### 4.1 正弦波によるシミュレーション結果

最初に、浮体に作用する波が、山形県酒田港で観測された1991年の月別の有義波高と有義周期<sup>[7]</sup>をもつ正弦波であると仮定して、月別に出力と効率をシミュレーションによって求めた。タイプBの場合の1ユニット当たりのシミュレーション結果を図2に示す。図2から、効率は25~45%で、出力が高くなるほど低下することがわかる。また、出力が一番大きくなる

1月の場合(有義波高=2.32m、有義周期=7.2秒)について、タイプA,Bの1ユニット当たりのシミュレーション結果を表2に示す。これらの結果は、上の八つの仮定のもとで、最も大きな出力が得られた場合である。表2において、 $N_1, N_2$ は、発電機1,2の回転数を表す。表2から、各タイプの場合とも2ユニットで50kWを達成していることがわかる。

#### 4.2 実測波によるシミュレーション結果

次に、山形県鶴岡市の由良沖約3kmの海域で測定された実測波<sup>[8]</sup>を用いて本波力発電装置の出力特性をシミュレートした。実測波の有義周期は7.13秒、有義波

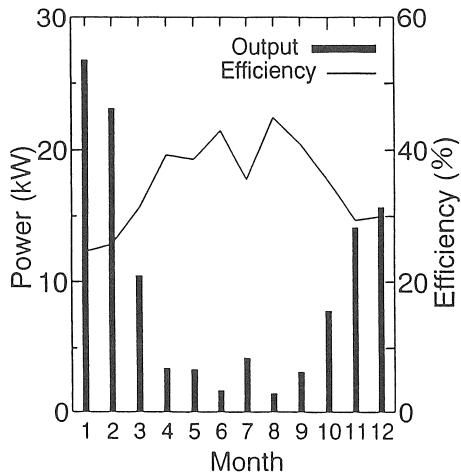
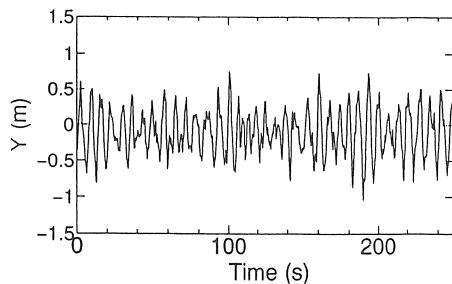


図2 1ユニット当たりの月別出力と効率

図3 実測波形( $H_{1/3} = 1.08m, T_{1/3} = 7.13s$ )表2 1ユニット当たりのシミュレーション結果( $H = 2.32m, T = 7.2s$ )

Type	$A_1, A_2$ (N · m · s/rad)	$J_1, J_2$ (kg · m <sup>2</sup> )	z (mm)		$N_1, N_2$ (rpm)		P (kW)	$\eta$ (%)	$\epsilon$ (%)
			max	min	max	min			
A	0.17	60	497	-496	3025	2268	25.58	23.57	28.6
B	0.19	20	497	-498	3669	1388	26.71	24.62	90.2

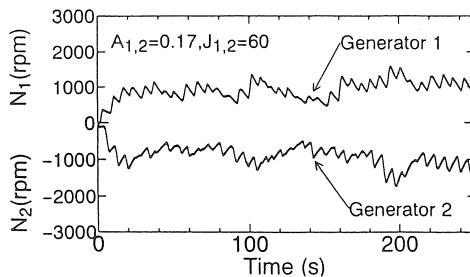


図4 発電機の回転数(実測波を受ける場合)

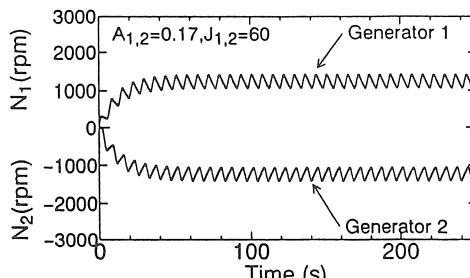


図5 発電機の回転数(正弦波を受ける場合)

高は 1.08m である。シミュレーションにはタイプ A の諸元を用い、また、比較のため周期 7.13 秒、波高 1.08m の正弦波を受けた場合のシミュレーションも行った。

シミュレーションに用いた実測波形を図3に、この実測波を受けたときの発電機1,2の回転数を図4に示し、正弦波を受けたときの発電機1,2の回転数を図5に示す。図4、図5よりわかるように、実測波と正弦波を受けたときの各発電機の回転数は、傾向においては多

少の違いがみられるが、定常状態での最大回転数は似た値を示している。このことから、プラント設計において入射波を有義波高と有義周期をもつ正弦波と仮定してシミュレーションを行っても妥当であるといえる。

## 5. 水槽実験

### 5.1 試作した実験モデル

試作した小規模実験モデルを図6に示し、その諸元を表3に示す。ケーンの大きさは高さ 1710mm、奥行き 1020mm、幅 740mm である。ポールねじには軸径 25mm、リード 10mm の研削ねじを用い、浮体は直方体形状の発泡スチロールをアルミニウムアングルで囲ったものである。はずみ車は発電機を駆動する役目を兼ねており、歯数 100 の平歯車に厚さの異なる三種類の円板を取り付けることによって慣性モーメントの影響を調べた。発電機には自転車用発電機 (6V-3.2W) を使用し、発電機軸には歯数 20 の平歯車を取り付け、はずみ車を兼ねた平歯車とかみ合うようにした。

実験モデルに使用した発電機の出力特性を調べるために、発電機に DC6V-3W の豆電球を接続し、この発電機にトルクメータを介してモータを取り付け、モータの回転数とトルクの関係を測定した。実験結果を図7に示す。図7において、■・●はそれぞれ発電機1,2の測定値を示し、実線および破線は実験データを最小自乗法を用いて一次式に近似した結果である。

図7より、発電制動トルクは、発電機回転数の一次関数であり、よって機械的出力は回転数の二乗に比例することがわかる。

表3 水槽実験の諸元

Floating body	Width $B$	500 mm
	Length $L$	810 mm
	Thickness $D$	250 mm
	Mass $m$	23.9 kg
Ball screw	Lead $L_b$	10 mm
	Friction $M_b$	24.04 N
	Stroke	400 mm
Flywheel	Moment of inertia $J_1, J_2$	① $1.333 \times 10^{-2} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ ② $2.531 \times 10^{-2} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ ③ $4.426 \times 10^{-2} \text{kg} \cdot \text{m}^2$
Generator 1	Braking coefficient $A_1$	$1.906 \times 10^{-4} \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$
	Frictional loss $B_1$	$1.698 \times 10^{-2} \text{N} \cdot \text{m}$
Generator 2	Braking coefficient $A_2$	$1.669 \times 10^{-4} \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$
	Frictional loss $B_2$	$1.415 \times 10^{-2} \text{N} \cdot \text{m}$
Gear	Gear ratio $r$	5

## 5.2 波力の測定

最初に、実験モデルのはずみ車と発電機を取り外し、波動水槽を用いて浮体が受ける波の上下方向の力を測定をした。実験装置を図8に示す。浮体を支持している四本のガイド軸には四個のコイルばねが取り付けられており、このコイルばねのたわみ量を容量型変位計で測定して波力を求めた。コイルばねのばね定数は、ばね一マス系の固有周期が波動水槽の可変周期範囲(1.56~2.5秒)よりも十分小さくなるように、19.2kN/mと38.4kN/mの二種類を使用した。

水深1050mm、周期1.90秒での波力の時刻歴波形を図9に示す(二種類のはねから求めた波力はほぼ同じ値を示した)。図9において、実線は実験値を、破線は

シミュレーション値を示す。なお、シミュレーションに使用した波形はケーソン内で測定したものである。実験値とシミュレーション値は似た傾向を示すため、波力の式がある程度正しいことが確かめられた。

## 5.3 出力実験

次に、規則波を与えて本波力発電装置の出力特性を調べた。実験装置の概要を図10に示す。ケーソン開口部の高さ $H_D$ は、 $H_D$ を四種類変化させて波力を測定した結果より、 $H_D=1000\text{mm}$ とした。測定は造波開始時

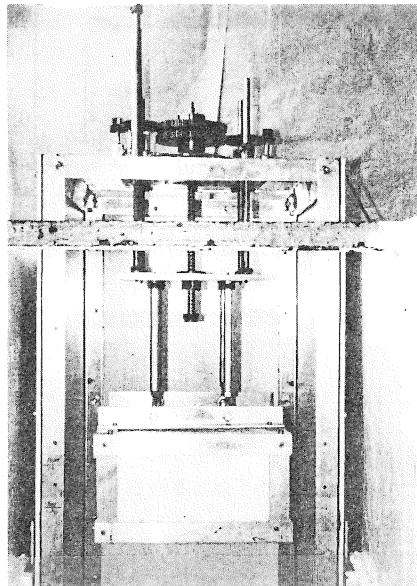


図6 ボールねじ式波力発電実験モデル

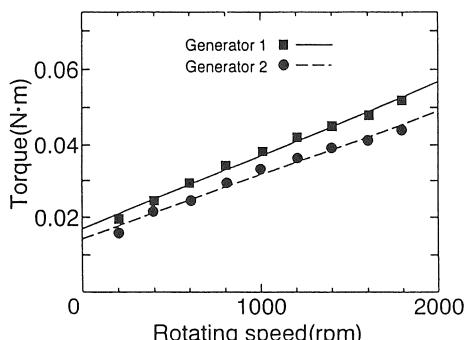


図7 発電機回転数とトルクの関係

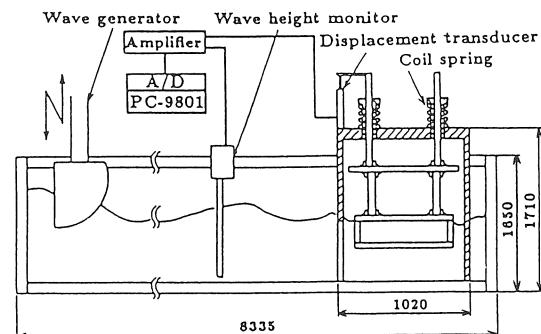


図8 波力測定の実験装置図

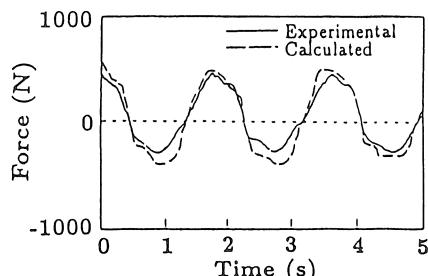


図9 波力の時刻歴波形

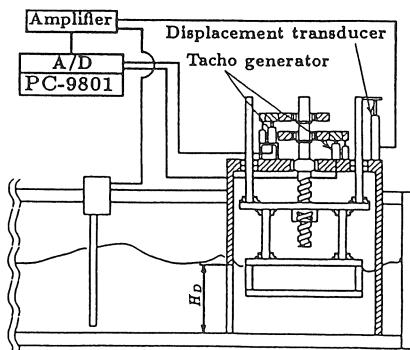


図10 発電実験の装置図

から行い、各発電機の回転数はタコシエネレータで、波高は二極容量型波高計で計測し、A/D 変換を行ってパーソナルコンピュータに取り込んだ。

水深 1050mm で、はずみ車①および③を用いたときの波の周期と発電機 1 の回転数の関係を図 11 に示す。図 11 には、各周期における波高の値も示されている。図 11 より、はずみ車の慣性モーメントを小さくすると発電機の最大回転数が大きくなるが、回転数変動幅も大きくなることがわかる。

図 12 は、はずみ車③を使用し、水深 1050mm で、周期 1.90 秒の規則波を与えたときの発電機 1,2 の回転数の時刻歴波形を示している。シミュレーションは、ケソン内に測定した波形およびケソン外で測定した波高をもつ正弦波について行った。図 12 よりケソン内の波形を用いて計算したシミュレーション結果は実験結果に近い値を示しており、シミュレーションの正しさが確認された。また、ケソン外の波高をもつ正弦波と仮定して計算した場合は実験値より 40% 程度大きな値となる。

図 13(a)～(c) は、それぞれはずみ車①、②および③を用い、水深 1050mm、周期 1.90 秒の規則波を与えたときの出力波形を示している。また、図 13(d) は図 13(c) と同条件でのシミュレーション結果である。これらの図で、 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_{tot}$  はそれぞれ発電機 1,2 の出力および二

つの発電機の合計出力を表す。図 13 から、はずみ車の慣性モーメントが小さくなると出力が大きくなるが出力の変動幅も大きくなること、二つの発電機の出力を加え合わせると変動幅が小さくなること、およびシミュレーション結果は実験結果より 30% 程度大きな値になるが、似た傾向を示していることがわかる。また、各はずみ車を使用した場合の出力、効率および変動率を表 4 に示す。表 4 内の  $\epsilon_{P_{tot}}$  は合計出力の変動率を表す。表 4 からわかるように、はずみ車①を用いると効率は約 66 % となり、本波力発電装置は有効であるといえる。

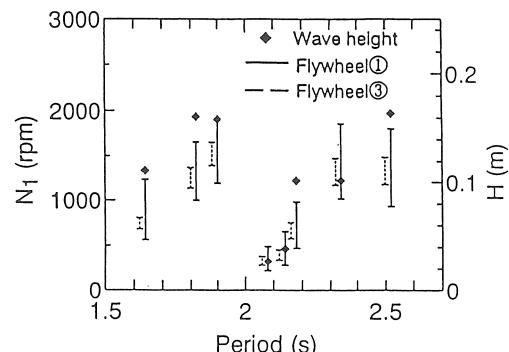


図 11 発電機 1 の回転数範囲

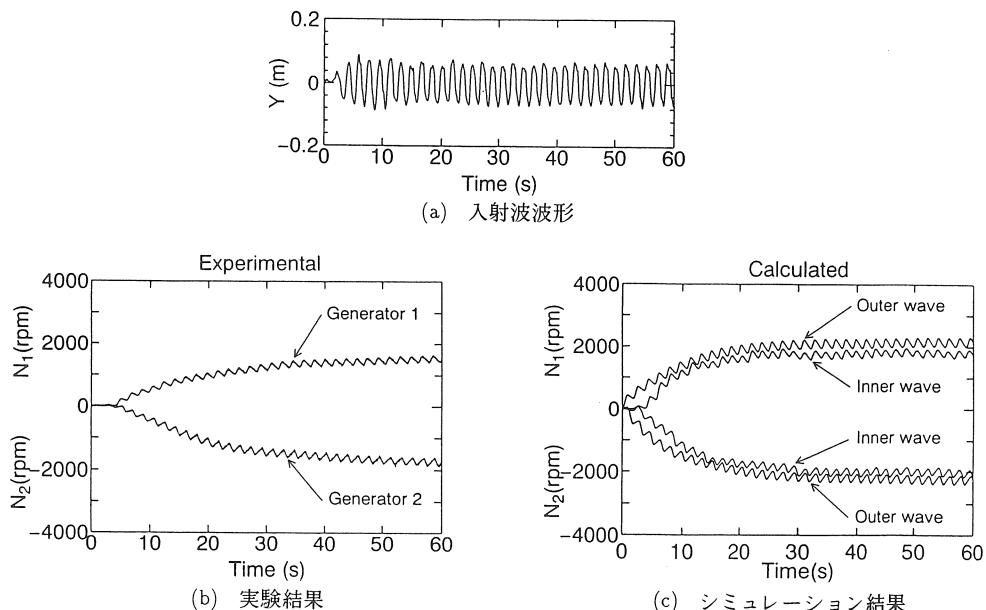


図 12 発電機回転数の時刻歴波形 (はずみ車③)

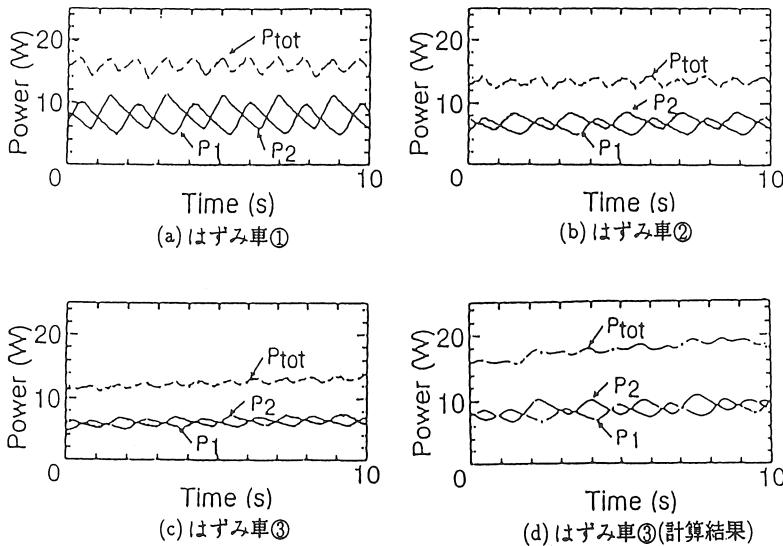


図13 出力波形(機械的出力)

表4 出力と効率 ( $H=0.16m, T=1.90s$ )

	Flywheel①	Flywheel②	Flywheel③
$ P_{tot} _{mean}$ (W)	16.03	13.61	13.29
$ P_{tot} _{max}$ (W)	18.66	15.49	13.62
$ P_{tot} _{min}$ (W)	15.66	13.24	12.85
$\epsilon_{P_{tot}}$ (%)	17.48	15.66	5.82
$\eta$ (%)	65.91	55.96	54.65

## 6.まとめ

本論文の結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 小規模モデルを用いた水槽実験による波力測定結果および出力測定結果は、シミュレーション結果と似た傾向を示し、理論解析の正しさが確かめられた。
- (2) 水槽実験の結果、変動の少ない出力が得られ、また、波力変換効率は最大で約66%となった。
- (3) シミュレーションより仮想した実用プラントは、正弦波を受けると約25~45%の変換効率で約3~53kWの出力が得られることがわかった。
- (4) 本波力発電装置は、出力が小さいときほど効率が良くなるので、中小の波を対象とした小型波

力発電装置として適している。

終わりに、実験モデルの製作にご協力いただいた明治大学理工学部講師・下田博一先生ならびに黒田精工(株)に謝意を表する。

## 参考文献

- [1] 中田・大根田ほか:防波堤を利用した波力発電装置の現地実験結果,土木学会,6-17,(1992),135.
- [2] 瀬戸口・金子ほか:波浪エネルギー利用装置開発の現状,機械の研究,42-8,(1990),877.
- [3] MIYAZAKI,T,WASHIO,Y:Performance of the Floating Energy Converter Mighty Whale,Proceeding of International Symposium on Ocean Energy Development,(1993-8),197,Hokkaido,Japan.
- [4] 大亦・下田ほか:ボールねじを用いた波力発電装置,第1回波浪エネルギー利用シンポジウム,(1984-11),359.
- [5] 大亦・望月:浮体型ボールねじ式波力発電装置の研究,第3回波浪エネルギー利用シンポジウム,(1991-1),27.
- [6] McCormick,M.E:Ocean Engineering Wave Mechanics,(1973),112,John Wiley & Sons.
- [7] 永井・菅原ほか:全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS),運輸省港湾技術研究所,No.745,(1993-3),97.
- [8] 海洋科学技術センター:波力発電装置「海明」第II期計画研究報告書,(1986-3),105.