

浮遊型ボールねじ式波力発電装置の出力特性 (ダブルタイプの場合)

Output Characteristics of Floaing Type Wave Power Generation System
Using Ball Screws(In the Case of the Double Type System)

水谷富親^{*1} 松岡太一^{*2} 土屋一雄^{*3} 大亦絢一郎^{*3}
Tomichika MIZUTANI Taichi MATHUOKA Kazuo TSUCHIYA Kenichirou OHMATA

Abstract

In the previous paper, the authors proposed the single type of floating-type wave energy conversion system consisting of a floating body and a wave energy conversion cylinder using a ball screw. The single type system utilizes only the heaving motion of the floating body.

In this paper, the authors propose the double type of floating-type wave energy conversion system which uses two wave energy conversion cylinders. The double type system utilizes both the heaving and pitching motions of the floating body. The output characteristics of the double type system were calculated within the range of wave periods 2 sec to 10 sec, and compared with those for the single type system. A small-scale experimental model was made, and tank tests were carried out using a wave tank. The experinental results are compared with the calculated results, and the validity of the calculations are susbstantiated.

Key Words : Wave Energy, Wave power generator, Floating type, Ball screw, Double type

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の研究が数多くの国で行われてきたが、現在では、固定式、浮遊式とも空気室と空気タービンを用いた方式が主流となっている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。一方で、著者らは、波力によって受圧板に生じる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固定式波力発電装置⁽⁴⁾⁽⁵⁾、および浮体と円筒状本体（内部にボールねじ式発電機構を有する）の相対運動を利用するシングルタイプの浮遊式波力発電装置⁽⁶⁾⁽⁷⁾を提案し、小規模モデルによる水槽実験と数値シミュレーションによってそれらの出力特性を確かめてきた。

本報告では、波力発電装置の効率向上を目指して、1個の浮体と2個の本体を用いたダブルタイプの浮遊式波力発電装置を提案する。シングルタイプは、浮体の上下運動のみを利用するのに対し、ダブルタイプは浮体の上下運動とピッキング運動の両方を利用する。数値シミュレーションによって周期2~10秒の正弦波状表面波を受ける波力発電装置の出力特性を調べ、実際の海洋波を受けた場合の出力特性と比較、検討を行った。また、小規模実験モデルを用いた水槽実験によってシミュレーションの正しさを確かめた。

原稿受付(1999年6月23日)

*1会員 明治大学大学院
(〒214-8571 川崎市多摩区東三田1-1-1)

*2学生 明治大学大学院
*3会員 明治大学理工学部

2. 波力発電装置の構造

ダブルタイプの浮遊型ボールねじ式波力発電装置の外観を図1に示す。本波力発電装置は、長方形浮体の前後部に円筒状の波力発電装置本体を吊り下げた構造である。波力発電装置本体（以下、単に本体と呼ぶ）は図2に示すよ

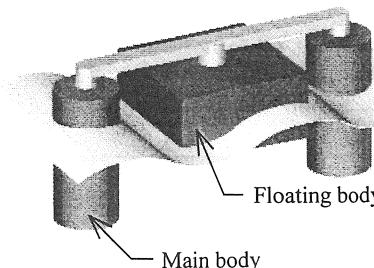


図1 波力発電装置外観

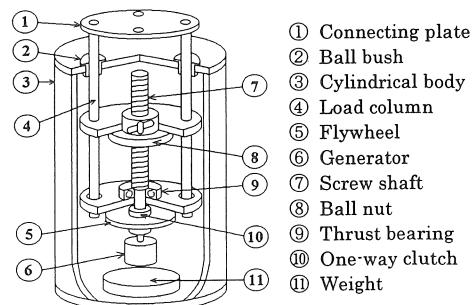


図2 発電装置本体

うに、浮体と連結するための連結板①、円筒状パイプ③、ロードコラム④、ボールねじ軸⑦、ボールナット⑧、一方向クラッチ⑩、はずみ車⑤、発電機⑥および重錘⑪からなっている。

浮体の上下・ピッキング運動と本体の上下運動によって生じる浮体と本体の間の相対直線運動は、ボールねじと一方向クラッチによって効率よくはずみ車⑤の一方向回転運動に変換され、はずみ車に直結された発電機によって電力に変換される仕組みである。

3. 運動方程式

3.1 本体と浮体に働く上下方向波力および回転モーメント

図3に示す円筒状本体および図4に示す直方体状浮体に正弦波状表面波が作用したときの本体と浮体に働く上下方向波力 F_1, F_2 は、McCormick の一般式⁽⁸⁾より次式のように求められる。

$$F_1 = -\frac{4}{3} C_1 \rho \pi R^3 \ddot{Z}_1 - \rho \pi g R^2 Z_1 - \frac{\rho \pi^2 g^2}{4\omega^3} R A_1 \dot{Z}_1 + \rho \pi g R^2 a (1 + \exp(-KL_1)) \cos \omega t \quad \dots(1)$$

$$F_2 = -\frac{1}{8} C_2 \rho \pi B^2 W \ddot{Z}_2 - \rho g B W Z_2 - \frac{\rho \pi^2 g^2}{8\omega^3} W A_2^2 \dot{Z}_2 + \rho g B W a (1 + \exp(-KH_1)) \cos \omega t \quad \dots(2)$$

式(1)、(2)において第1項は流体の慣性反力、第2項は浮力、第3項は減衰力、第4項は表面波によって励起される力を表す。また、直方体状浮体にピッキング運動を与える回転モーメントは、次式で与えられる。

$$M_2 = -\frac{1}{96} C_2 \rho \pi B^2 W^3 \ddot{\alpha}_2 - \frac{1}{12} \rho g B W^3 \alpha_2 - \frac{\rho \pi^2 g^2}{96\omega^3} W^3 A_2^2 \dot{\alpha}_2 + \frac{1}{12} \rho g B W^3 K a (1 + \exp(-KH_1)) \sin \omega t \quad \dots(3)$$

ここで、

Z_1, Z_2 =本体および浮体の上下変位

α_2 =浮体のピッキング運動による角変位

ρ =水の密度

g =重力加速度

a =表面波の振幅

ω =表面波の角振動数

$K=2\pi/\lambda$ (λ :波長)=波数

A_1, A_2 =波の振幅と本体および浮体の上下振幅の比

(実験的に定める)

C_1, C_2 =本体および浮体の付加質量係数(本体および浮体の形状・寸法比によって定まる⁽⁸⁾)

また、 R, L はそれぞれ円筒の半径および長さ、 B, W, H はそれぞれ浮体の幅、奥行きおよび高さを示し、 L_1, H_1 は、それぞれ本体および浮体の喫水部の高さを示す。

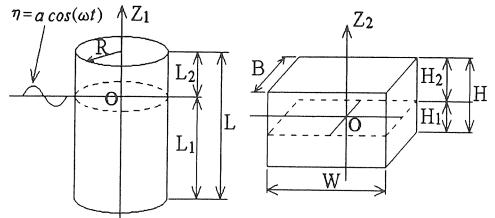


図3 円筒状本体

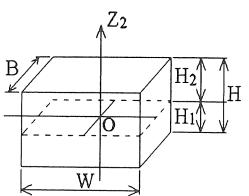


図4 直方体状浮体

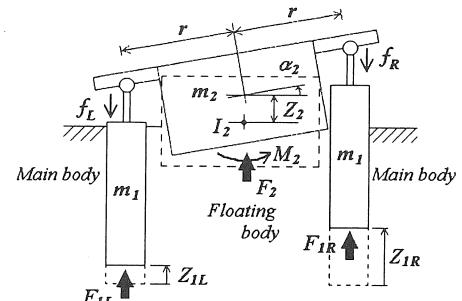


図5 解析モデル

式(1)～(3)は、水が非圧縮性・非粘性で、海の波は二次元的であり、海流速度は零であると仮定して求めたものである。

3.2 波力発電装置の運動方程式

本波力発電装置の解析モデルを図5に示す。図5において、 f 、 Z_1 、 F_1 はそれぞれ抵抗力、上下方向の変位、波力を示し、添字 R 、 L は、右側本体、左側本体を意味する。また、 r 、 α_2 は、それぞれ浮体の重心から本体取付け点までの距離、回転角度を示す。発電機の制動トルクが

$$T = C_m \dot{\phi} + T_0 \quad \dots(4)$$

の形で与えられると仮定すると、一方向クラッチがつながっているときの抵抗力 f は次式で与えられる。

$$f = \beta(C_m \dot{\phi} + T_0 + I \ddot{\phi}) \quad \dots(5)$$

ここで、 $\dot{\phi}$ は発電機の回転速度、 C_m 、 T_0 は発電機の発電制動トルク係数および損失トルク、 I ははずみ車の慣性モーメントを表し、 $\beta = 2\pi/L_B$ (L_B :ボールねじのリード) を表す。浮体と本体の相対変位 u を用いて f を書き換えると

$$\left. \begin{aligned} f_L &= \beta(\beta C_m \dot{u}_L + T_0 + \beta I \ddot{u}_L) \\ f_R &= \beta(\beta C_m \dot{u}_R + T_0 + \beta I \ddot{u}_R) \end{aligned} \right\} \quad \dots(6)$$

ここで、 $u_L = Z_2 - r \alpha_2 - Z_{1L}$ 、 $u_R = Z_2 + r \alpha_2 - Z_{1R}$ である。

浮体と本体が正弦波状表面波を受けたとき、浮体は上下運動とピッキング運動を行うのに対し、本体は上下運動のみを行うと仮定し、ボールねじの回転速度を θ とすると、それぞれの運動方程式は次の四つの場合に分けられる。

- 1) 左右本体の一方向クラッチが共につながっているとき($\phi_L = \theta_L, \phi_R = \theta_R$)

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{Z}_{1L} &= F_{1L} + f_L, \quad m_1 \ddot{Z}_{1R} = F_{1R} + f_R \\
 m_2 \ddot{Z}_2 &= F_2 - f_L - f_R \\
 I_2 \ddot{\alpha}_2 &= M_2 + (f_L - f_R)r \\
 \dot{\phi}_L = \dot{\theta}_L &= \beta \dot{u}_L, \quad \dot{\phi}_R = \dot{\theta}_R = \beta \dot{u}_R
 \end{aligned} \quad \cdots(7)$$

2) 左側本体の一方向クラッチのみがつながっているとき ($\dot{\phi}_L = \dot{\theta}_L, \dot{\phi}_R > \dot{\theta}_R$)

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{Z}_{1L} &= F_{1L} + f_L, \quad m_1 \ddot{Z}_{1R} = F_{1R} \\
 m_2 \ddot{Z}_2 &= F_2 - f_L, \quad I_2 \ddot{\alpha}_2 = M_2 + rf_L
 \end{aligned} \quad \cdots(8)$$

$$\dot{\phi}_L = \dot{\theta}_L = \beta \dot{u}_L, \quad I \ddot{\phi}_R = -C_m \dot{\phi}_R - T_0$$

3) 右側本体の一方向クラッチのみがつながっているとき ($\dot{\phi}_L > \dot{\theta}_L, \dot{\phi}_R = \dot{\theta}_R$)

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{Z}_{1L} &= F_{1L}, \quad m_1 \ddot{Z}_{1R} = F_{1R} + f_R \\
 m_2 \ddot{Z}_2 &= F_2 - f_R, \quad I_2 \ddot{\alpha}_2 = M_2 - rf_R
 \end{aligned} \quad \cdots(9)$$

$$I \ddot{\phi}_L = -C_m \dot{\phi}_L - T_0, \quad \dot{\phi}_R = \dot{\theta}_R = \beta \dot{u}_R$$

4) 左右本体の一方向クラッチが共に切れているとき ($\dot{\phi}_L > \dot{\theta}_L, \dot{\phi}_R > \dot{\theta}_R$)

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{Z}_{1L} &= F_{1L}, \quad m_1 \ddot{Z}_{1R} = F_{1R} \\
 m_2 \ddot{Z}_2 &= F_2, \quad I_2 \ddot{\alpha}_2 = M_2
 \end{aligned} \quad \cdots(10)$$

$$I \ddot{\phi}_L = -C_m \dot{\phi}_L - T_0, \quad I \ddot{\phi}_R = -C_m \dot{\phi}_R - T_0$$

1)~4)において、 m_1 =左右本体の質量、 m_2 =浮体の質量、 I_2 =浮体の重心に関する慣性モーメントを表す。

また、波の入力パワー W_i 、発電装置の出力 W_a 、効率 η の計算は、次式を用いて行った。

$$W_i = h^2 T_n B \quad [kW] \quad \cdots(11)$$

$$W_a = \frac{10^{-3}}{T_n} \int_{T_n}^{T_n+T_s} (T_L \dot{\phi}_L + T_R \dot{\phi}_R) dt \quad [kW] \quad \cdots(12)$$

$$\eta = \frac{W_a}{W_i} \times 100 \quad [\%] \quad \cdots(13)$$

ここで、 h =波高 [m]、 $T_n=(2\pi/\omega)$ =周期 [sec]

T_L, T_R =左右発電機の制動トルク [Nm]

4. 1kW 級仮想プラントの数値シミュレーション

4.1 正弦波によるシミュレーション結果

1kW 級のダブルタイプ波力発電装置を想定して数値シミュレーションを行った。この仮想プラントの諸元を表1に示す。浮体と各本体が単独で運動する場合を考えると、本体の上下方向の固有周期と浮体の上下・ピッキング方向の固有周期は、それぞれ 3.0, 5.0, 7.6 秒となる。静水時において、本体の喫水部の高さは $L_1=3L/4$ であり、浮体の喫水部の高さは $H_1=H/3$ であると仮定した。また、 A_1, A_2 は、後述の実験モデルと同じ値($A_1=0.9, A_2=0.7$)をとると仮定した。式(1)~(13)を連続系シミュレーション言語(FUJITSU SLCS5)を用いてプログラムし、4 次の固定間隔ルンゲ・クッタの倍精度積分法を用いてシミュレーションを行った。その際、初期条件は時間 $t=0$ で本体と浮体が静止しているものとし、1)~4)の場合のいずれかに切り替ったときの初期条件は、その前の場合の最終値とした。

シミュレーションに用いた波は、図 6 に示すような周期 T_n と波高 h の関係⁽⁹⁾をもつ正弦波である。

シミュレーションは、同じ諸元をもつダブルタイプとシングルタイプの場合について行われた。シングルタイプは、図 7 に示すように、発電装置本体を二つとも浮体の重心位置に取り付けた場合 ($r=0$ の場合) に相当する。

計算結果を図 8(a), (b)に示す。図 8(a)において、実線はダブルタイプの左側本体発電機の出力を表し、破線はシングルタイプの発電機 1 台当りの出力を表す。図 8(a)から、ダブルタイプの場合は、波の周期が約 3~7 秒の間で共振が生じ、出力が大きくなることがわかる。この周期範囲における平均出力は約 2kW で、シングルタイプと比べて約 1.6 倍となる。また、最大出力は周期 4.2 秒のときに生じ約 7kW であり、このときの効率は約 69% である。図 8(b)は、ダブルタイプの場合について、発電機制動トルク係数 C_m を変化させたときの出力特性を示したものである。図 8(b)から、制動トルク係数は $C_m=0.2 \text{ Nms/rad}$ 程度が最適であることがわかる。

表 1 仮想プラントの諸元

| | | | |
|---------------|--------------------------------|-------|--|
| Main body | Diameter | 2R | 1 m |
| | Height | L | 2 m |
| | Total mass | m_1 | 1200 kg |
| Ball screw | Lead | L_B | 32 mm |
| Flywheel | Moment of inertia I | | 0.2 kgm ² |
| Generator | Breaking Coeff. C _m | | 0.01 Nms/rad 0.20 Nms/rad 0.25 Nms/rad |
| | Friction loss | T_0 | 0 Nm |
| Floating body | Length | W | 3 m |
| | Width | B | 6 m |
| | Height | H | 5.8 m |
| | Total mass | m_2 | 40000 kg |
| | Moment of inertia I_2 | | $142 \times 10^5 \text{ kgm}^2$ |
| | Distance | r | 5 m |

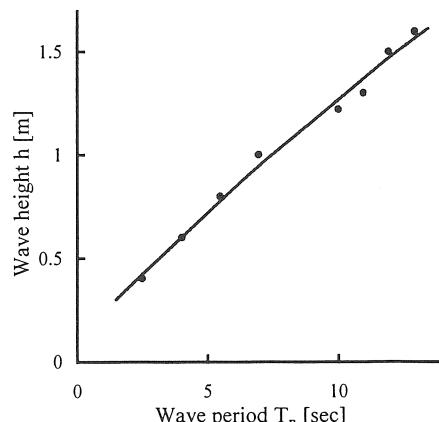


図 6 波の周期 T_n と波高 h の関係

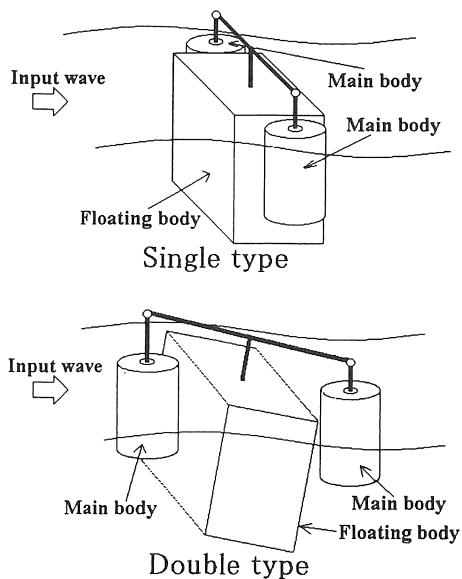


図 7 ダブルタイプとシングルタイプの比較

4.2 実測波によるシミュレーション結果

次に、石廊崎近くの湾内で計測した実測波を用いてダブルタイプ仮想プラントの出力特性をシミュレートした。実測波の有義周期は 3.75 秒、有義波高は 56cm である。また比較のために、仮想プラントが周期 3.75 秒、波高 56cm の相当正弦波を受けた場合のシミュレーションも行った。

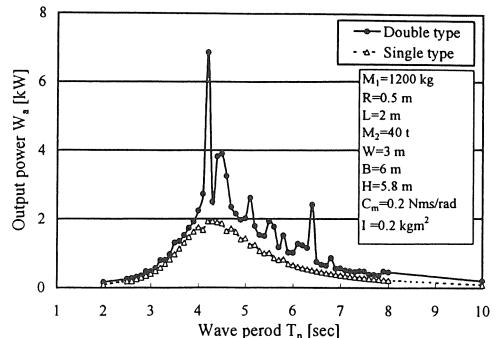
シミュレーションに用いた実測波形を図 9 に示し、この実測波および相当正弦波を受けたときの右側本体のボールねじ軸回転数を図 10 に示す。また、実測波と相当正弦波を受けたときの右側本体発電機の平均回転数、最大回転数、および左右本体発電機の合計平均出力と平均効率をまとめて表 2 に示す。

図 10 および表 2 より、周期と波高が有義周期および有義波高と同じ値の相当正弦波による数値シミュレーション結果は、実測波によるシミュレーション結果とほぼ一致し、正弦波によるシミュレーションの有効性が確認された。

5. 水槽実験

5.1 実験装置

試作したダブルタイプの水槽実験モデルの構造、寸法を図 11 に示し、その諸元を表 3 に示す。本体には、外径 120mm、内径 100mm、長さ 1m のアクリル製円筒④が用いられている。浮体と本体間の相対運動をボールねじに伝えるロードコラム①は、ロッドエンド⑫を介して連結棒②に固定されており、本体にピッキング運動が起こらないようになっている。円筒内部にはリード 8mm のボールねじ⑥、発電機に相当する磁気ダンパー、および 3kg の重錘⑬が



(a) ダブルタイプとシングルタイプの出力特性の比較

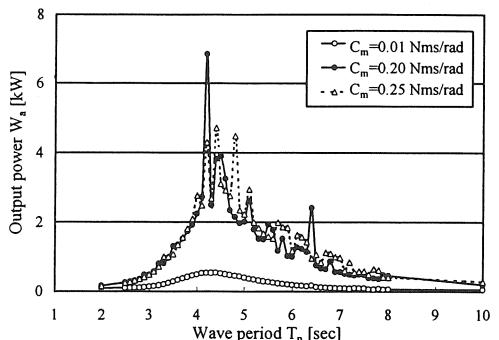
(b) C_m を変えたときの出力特性(ダブルタイプの場合)

図 8 シミュレーション結果

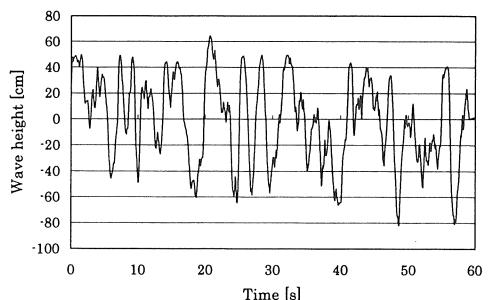


図 9 実測波形

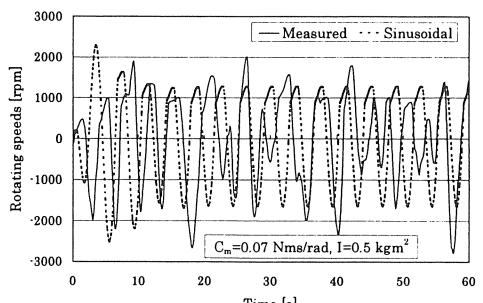


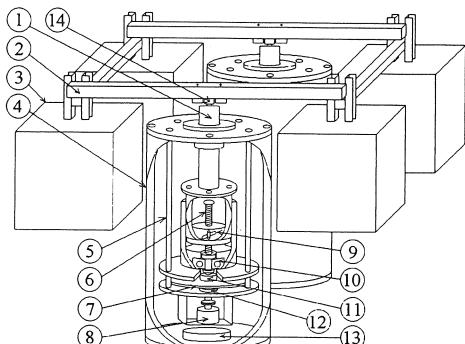
図 10 ボールねじ軸の回転数

表 2 発電機の回転数、出力、効率の関係

| | Measured | Sinusoidal |
|------------------------------|----------|------------|
| Rotating speeds (Ave.) [rpm] | 1106 | 1155 |
| Rotating speeds (Max.) [rpm] | 2015 | 2289 |
| Output (Ave.) [W] | 1902.0 | 2026.4 |
| Efficiency (Ave.) [%] | 27.1 | 28.9 |

収められている。磁気ダンパー(10)は、ボールねじ軸の先端に固定したアルミニウム円板が希土類磁石によって生じた磁束を横切って回転するときに発生する渦電流制動トルクを利用したもので、速度比例型の抵抗力を与える。抵抗力を変化させるためにサマリウム・コバルト系磁石を0.5～3個用いた。

本体の上下運動と浮体の上下およびピッキング運動の固有周期は、それぞれ2.06, 1.07, 1.14秒である。実験モデルを、図12に示すような長さ8.3m、幅0.8m、高さ1.6m、水深1.0mの波動水槽に浮かべ、造波装置により、周期が2.00, 1.90, 1.60, 1.55, 1.38, 1.20秒の正弦波に



- ① Load column ② Connecting rod ③ Floating body
- ④ Cylindrical pipe ⑤ Bracket ⑥ Ball screw
- ⑦ Flywheel ⑧ Tacho generator ⑨ Ball nut
- ⑩ Thrust bearing ⑪ One-way clutch
- ⑫ Magnet ⑬ Weight ⑭ Lod end

図 11 水槽実験モデル

近い波を実験モデルに与えて左側本体ボールねじ軸の最大回転数を測定した。ボールねじ軸回転数はタコジェネレータを用い、波高は2極容量式波高計を用いて測定した。

5.2 実験結果

ダブルタイプの場合について、希土類磁石の個数を0.5, 1, 2, 3個と変化させたときの波の周期に対する出力特性を図13に示す。図13(a)は周期と波高および平均機械的軸出力の関係を示し、図13(b)は平均効率を示す。図13(a), (b)から、本実験モデルの場合は、磁石1個のときに平均軸出力、平均効率ともに最も大きくなることがわかる。磁石1個のときの平均軸出力と平均効率の最大値は、波の周期1.38秒、波高約10cmのときに生じ、最大出力3.65W、最大効率65.3%が得られた。

また、造波周期1.38秒、波高約10cmの水槽波の実測波形、ならびに磁石1個を用いたシングルタイプおよびダブルタイプの実験時と数値計算時において、造波開始時から80秒間にわたるボールねじ軸回転数の時刻歴波形の実験値と計算値を図14に示す。このときの平均出力、平均効率およびボールねじ軸最大回転数は表4のようになる。これらの計算において、各浮体に働く波力およびモーメントは式(2), (3)を用いて計算し、それらを合計して運動方

表 3 水槽実験用装置諸元

| | | | |
|---------------|-------------------------|-------|---|
| Main body | Diameter | 2R | 120 mm |
| | Length | L | 1 m |
| | Total mass | m_1 | 11 kg |
| Ball screw | Lead | L_B | 8 mm |
| Inertia Plate | Moment of inertia | I | $3.1 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$ |
| Generator | Braking coeff. | C_m | $0.6 \sim 1.4 \times 10^{-3} \text{ Nms/rad}$ |
| | Friction loss | T_0 | 0 Nm |
| Floating Body | Length | W | 400 mm |
| | Width | B | 200 mm |
| | Height | L | 200 mm |
| | Total mass | m_2 | 12 kg |
| | Moment of inertia I_2 | | 1.0 kgm^2 |
| | Distance | r | 430 mm |

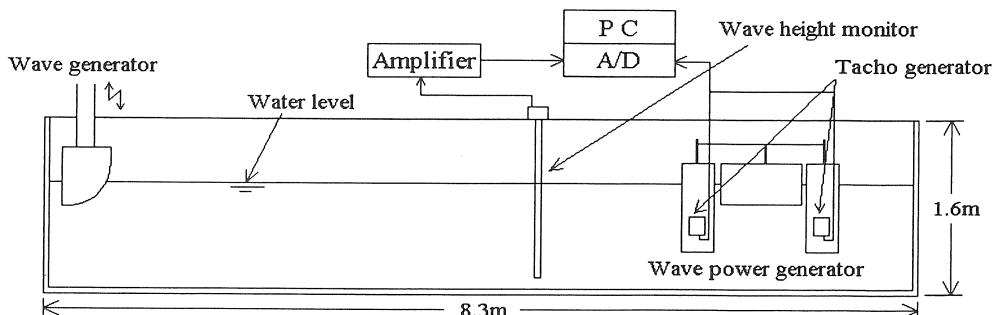


図 12 波動水槽

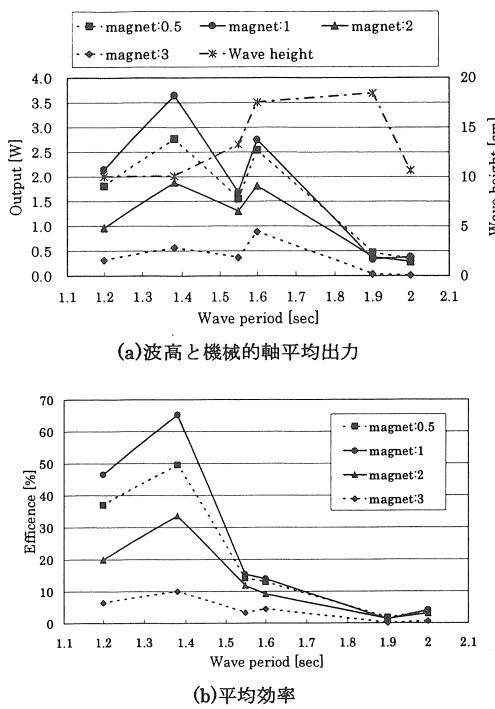


図 13 波の周期に対する出力特性

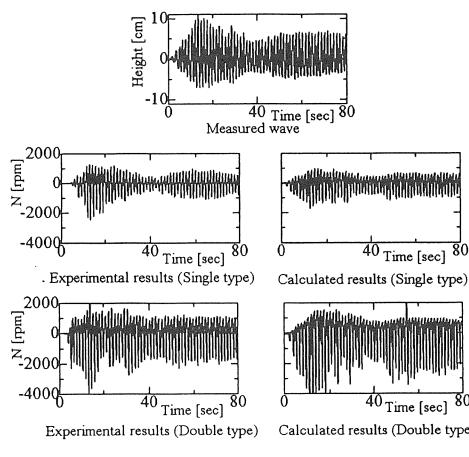


図 14 タイプ別ボールねじ回転数の時刻歴波形

表 4 実験、数値計算時における出力特性

| | Experiment | | Calculation | |
|-------------------------------------|------------|--------|-------------|--------|
| | Single | Double | Single | Double |
| Output power W_a [W] | 1.13 | 3.65 | 1.10 | 3.76 |
| Efficiency [%] | 20.2 | 65.3 | 19.6 | 67.3 |
| Rotating speed _{Max} [rpm] | 863 | 1141 | 677 | 990 |

程式に代入した。図 14 および表 4 からわかるように、実験値と計算値は似たような傾向と値を示しており、計算の正しさが確認された。また、ダブルタイプはシングルタイプの約 3.5 倍の出力および効率を示すことがわかった。

6. まとめ

- 浮体の上下運動のみを利用するシングルタイプに比べて、浮体の上下運動とピッキング運動を利用するダブルタイプの波力発電装置の方が高出力が得られることがわかった。
- 数値計算例に示された条件では、ダブルタイプはシングルタイプに比べ約 1.6 倍の出力が得られた。
- 実測波と相当正弦波によるシミュレーション結果はほぼ一致し、正弦波によるシミュレーションの有効性が確認された。
- 小規模モデルによる水槽実験結果は、計算結果と似たような傾向を示し、計算式の正しさが確認された。
- 小規模モデルによる水槽実験では、ダブルタイプはシングルタイプに比べ約 3 倍の出力が得られた。

参考文献

- (1) Ohno,M., et al.: Interim Report on the Second Stage of Field Experiments on a Wave Power Extracting Caisson in Sakata Port, Proc. Int. Symposium on Ocean Energy Development (1993), 173-182.
- (2) 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(1987), 1-214.
- (3) Miyazaki,T., Washio,Y., Kato,N.: Performance of the Floating Wave Energy Converter Mighty Int. Symposium on Ocean Energy Development(1993), 197-204.
- (4) 大亦絢一郎・望月千尋: 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論文集(1991), 27-35.
- (5) 木村学・大亦絢一郎: ケーンソと浮体を用いたボールねじ式波力発電装置の研究, 太陽エネルギー, 20-24(1994), 29-35.
- (6) 安部貴・大亦絢一郎: 浮遊形ボールねじ式波力発電装置の出力特性, 太陽/風力エネルギー講演論文集(1996), 233-236.
- (7) Kojima,N., Ohmata,K., Abe,T.: A Study of a Wave and Wind Energy Hybrid Conversion System(Part I) Proc. ISOPE-98 Conf., Vol.1 (1998), 134-139.
- (8) McCormick,M.E: Ocean Engineering Wave Mechanics, John Wiley & Son (1973), 112.
- (9) 高橋智晴・佐々木徹也・広瀬宗一: 波浪の関する拠点観測年報(昭和 50 年), 港湾技術料, No.258(1977), 123-125, 343.
- (10) 大亦絢一郎・下田博一・細谷淳: 磁気減衰器付ボールねじ式防振器の特性, 日本機械学会論文集(C 編), 51-471 (1985), 3034-3038.