

沿い波型遊水室群内で稼動する浮体式波力発電装置の力学検討

羽田野袈裟義^{*1}, 長瀬吉行^{*2}, 李万元^{*2}

Study on the Dynamics of Wave Energy Converters working in the Water Chambers Array aligned in the Direction of Wave Propagation

Kesayoshi HADANO^{*1}, Yoshiyuki NAGASE^{*2} and Wanyuan LI^{*2}

^{*1}Department of Civil and Environmental Engineering, Yamaguchi University
2-16-1 Tokiwadai, Ube, Yamaguchi, 755-8611, Japan

^{*2}Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University
2-16-1 Tokiwadai, Ube, Yamaguchi, 755-8611, Japan

Abstract

Wave energy is one of the most promising renewable energies. Practical use of wave energy conversion technology requires that the following conditions are all satisfied at some acceptable level: (1) durability against wave load, (2) workability in setting and maintenance, (3) high performance of energy gain, and (4) reduction of total cost. In order to meet these conditions, the authors have proposed a float-type WECs each of which consists of a float, rack & pinion, ratchet mechanism and electric generator, and works by utilizing gentle vertical motion of the water in a chamber of the chambers array laid along the direction of the wave propagation. The layout of the chambers array is accomplished by laying chambers array in the cross shore direction in the near shore, which makes it possible to lay multiple WEC devices and therefore to gain a lot of energy from limited length of the shore line. The present paper gives the dynamics model of the above mentioned WEC system, and the results of the calculations supposing the practical use. The calculation covers both time series of the vertical motion of the float, tension of the shaft of rack & pinion, torque required to turn the generator, and the occurred electric power including the sum of the multiple WECs, and the time averaged energy gain.

Key words : WEC, Dynamics Model, Energy Gain Evaluation, Float-Rack & Pinion, Vertical Motion of the Water, Chambers Array, Wave Propagation Direction

1. 緒 言

波エネルギーは有望な再生可能エネルギーの一つである。波力発電は離島での小規模ティール発電の非効率による化石燃料の大量消費と二酸化炭素の大量排出を抑制する効果が大いに期待されている。波力発電の実用化に向けて世界中の国々、特に先進諸国を中心に活発に研究開発がなされている(永田(2009),NEDO(2014))。しかしながら、未だに決め手となるシステムが実現されていない。これは、波力発電の実用化に必要な条件を満足するシステム、すなわち装置の波荷重に対する耐久性、設置や維持補修の容易性、高いエネルギー獲得能力、トータルコストの縮減の4条件が全て一定以上のレベルにあるシステムが未だ登場していないことによる。著者らは、このような要件を満足するシステムとして、波の進行方向に沿って連続配置された遊水室群(以下、沿い波型遊水室群と呼ぶ)の中の一つ一つの遊水室の中に、フロート、ラック・ピニオン、ラチェット機構、発電機から構成される波力発電装置を配置し、遊水室内の穏やかな水塊上下動を利用して波力発電装置を稼動するシステムを提案している(Hadano et.al(2017))。この方式は、限られた海岸線延長の条件で多数の波力発電装置を稼動させることができ、したがって大量のエネルギーを獲得できる。さらに船舶航行への影響を極力抑えることができる。

原稿受付 2017年7月31日

^{*1} 山口大学工学部 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

^{*2} 山口大学大学院理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail of corresponding author: khadano@yamaguchi-u.ac.jp

本研究は、著者らが提案した前記の構成の波力発電装置の稼動に関する力学モデルを示すと共に、エネルギー変換に関する基本的情報として、関係する物理量の時系列変化を見積もると共に、波の1サイクル間の時間平均の発生電力や装置主要部位への最大作用力の波高や波周期への依存の状態、複数連続配置の場合の合計発生電力の時系列変化などを見積もっている。

2. 本提案の波力発電装置の基本構成と配置形態

図1は、沿い波型遊水室群の個々の遊水室の中に配置された本提案の波力発電装置の基本構成を示す。沿い波型遊水室群を構成する個々の遊水室の水平寸法が水面波の波長の1/10程度以下であれば、遊水室内の水塊は波の到来によりほぼ一様に穏やかに上下動する。この水塊上下動は、図1に示すフロート、ラック・ピニオン、ラチェット機構、発電機から構成される波力発電装置の稼動に適した運動である。

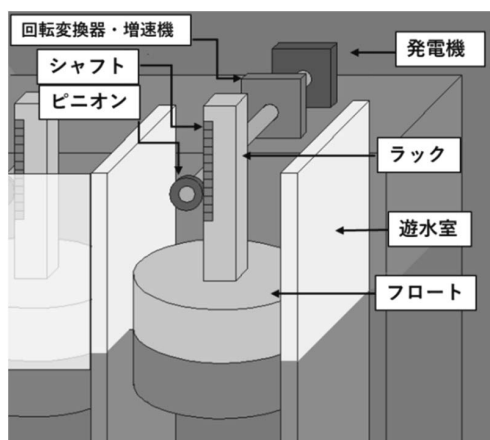


図1 波力発電装置の構成

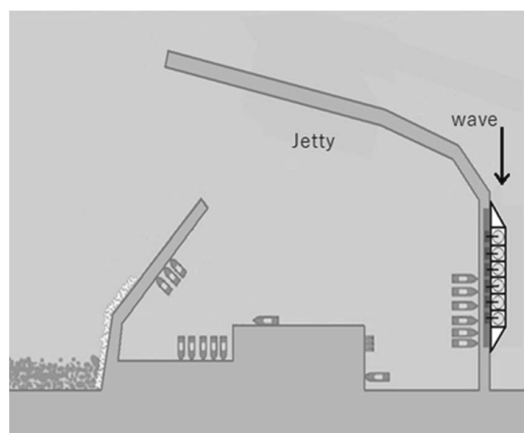


図2 沿い波型遊水室群の配置例

図2は、沿い波型遊水室群の配置の一例である。沖から押し寄せる波は、多くの沿岸域で見られる等深線の形態、すなわち等深線が海岸線に沿うようにならぶ場合、波は海底地形の影響を受けて屈折し、浅海域では岸沖方向に進行する。この配置形態のメリットは前章で述べたとおりである。なお、図2では防波堤の一部の岸沖方向に沿う区間に設置した場合を示しているが、遊水室群は下部開口の枠体の連続したものを製作して沿岸域に岸沖方向に設置し、その上に図1に示した波力発電装置を載せる形態でもよい。この形態の方が図2の形態に比べて遊水室群の設置の自由度が大きく現場作業に適しているといえる。また、エネルギーの流れの概念図を図3に示す。この図から、波エネルギーが変換されることにより波のエネルギーが海岸に近づくにつれて減少する状況が理解される。

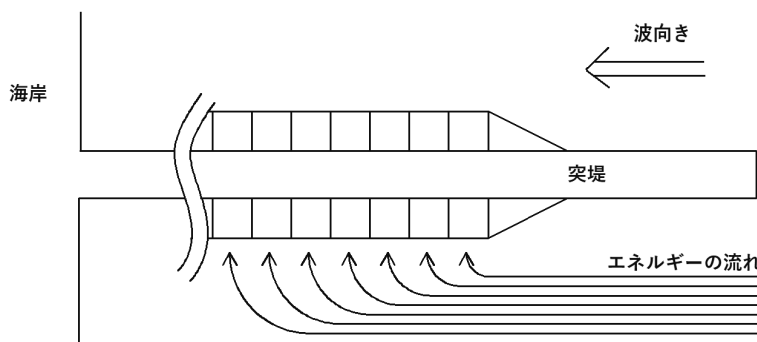


図3 波のエネルギーの流れの概念図

3. 力学モデルの構成と計算式の導出

3・1 力学モデルの構成

力学モデルは、無負荷静止状態においてフロートに作用する力の釣合、装置稼動状態におけるフロート上下動の運動方程式、回転体の運動方程式、そして発電機関連の物理により構成される。これらを順に述べる。

(1) 無負荷静止状態のフロートの釣合式

装置が無負荷静止状態においては図3に示すようにフロートに作用する重力と浮力が等しい。フロートが直径 d_f の円柱で、フロートの質量が M_f 、この状態の喫水深が h 、水の密度が ρ 、重力加速度が g であるとする、力の釣合は次式で表わされる。

$$M_f g = \rho g h \frac{\pi d_f^2}{4} \quad (1)$$

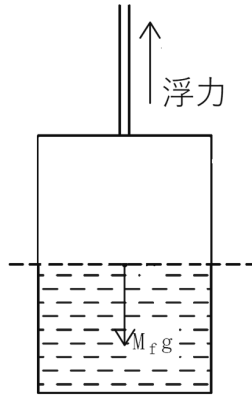


図3 無負荷静止状態

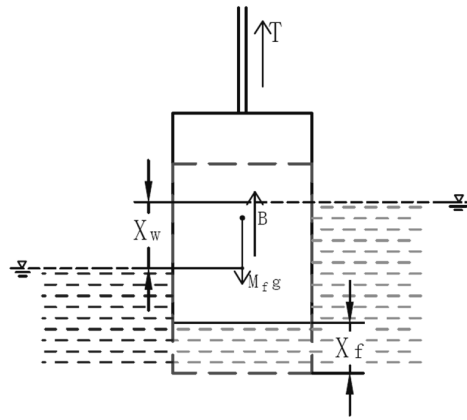


図4 稼動状態の図

(2) 稼動状態のフロート上下動の運動方程式

図4は水面が x_w だけ上昇し、フロートが x_f だけ上昇した状態で加速度運動していてラック・ピニオンのラックに張力 T が作用している状態を示す。このときのフロートの運動方程式は、フロートの全高を H_f として、次のように与えられる。

(i) フロートが一部没水状態

$$M_f \frac{d^2 x_f}{dt^2} = \rho g (h + x_w - x_f) \frac{\pi d_f^2}{4} - M_f g + T \quad (2)$$

(ii) フロートが全没水状態

$$M_f \frac{d^2 x_f}{dt^2} = \rho g H_f \frac{\pi d_f^2}{4} - M_f g + T \quad (3)$$

(iii) フロートが宙吊り状態

$$M_f \frac{d^2 x_f}{dt^2} = -M_f g + T \quad (4)$$

式(2)の右边において、 $x_w - x_f$ の項がフロートに発電の駆動力を与えることを付記する。

(3) 回転体の力学

ピニオンの無負荷・静止時からの回転角（反時計回りを正）を θ 、ピニオンの半径を R_p 、回転系全体の回転慣性をピニオンの回転角加速度で表現した慣性モーメントを I 、ピニオンが発電機を回すのに必要なトルクを τ 、機械系の粘性減衰係数を C とする。ラック張力が $T > 0$ のとき、ラック張力はピニオンを時計回りに回転させ、発電機はピニオンを反時計回りに回転させる。したがって回転体の運動方程式は、

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = -C \frac{d\theta}{dt} + \tau - R_p T \quad (5)$$

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + C \frac{d\theta}{dt} = \tau - R_p T \quad (6)$$

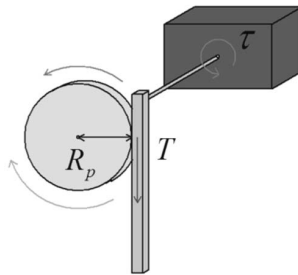


図5 回転体に作用するモーメント

(4) 発電機関連の物理

発電機のトルク係数を k_τ 、誘導電圧係数を k_e 、発生電流を i 、発生電圧を e とすると、発電機の量に添え字 G を用いると、発電機軸のトルクは $\tau_G = k_\tau i$ であり、ギア比（回転速度増速比）を G とすると増速前のピニオンのトルク τ は $\tau = G\tau_G$ であるから、

$$\tau = Gk_\tau i \quad (7)$$

また発電機の発生電圧は発電機の回転角速度を $\dot{\theta}_G$ として $e = k_e \dot{\theta}_G$ 、また $\dot{\theta}_G = G\dot{\theta}$ であるから、

$$e = k_e \dot{\theta}_G = Gk_e \dot{\theta} \quad (8)$$

$\dot{\theta}$ は正負をとりうるが、間欠稼動の場合に、発電機にはラチェットで変換後の一定の向きへの回転が与えられるから、力学的にはこの向きへの回転だけ意味をもつ。一方、常時稼動の場合には $|\dot{\theta}|$ が意味をもつ。なお、ギア比（回転速度増速比）は $G > 1$ である。

3・2 計算式の導出

最終的な計算式は、ピニオンの回転角変位に関する2階常微分方程式で、フロートの喫水状態に応じたフロートの運動方程式に対応して次式で与えられる。

(i) フロートが一部没水状態 $[0 \leq h + x_w - x_f \leq H_f]$

$$\left(\frac{I}{R_p} + M_f R_p \right) \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{1}{R_p} \left(C - \frac{G^2}{r} k_\tau k_e \right) \frac{d\theta}{dt} + \rho g \frac{\pi d_f^2}{4} R_p \theta = \rho g \frac{\pi d_f^2}{4} x_w \quad (9)$$

(ii) フロートが全没水状態 $[h + x_w - x_f > H_f]$

$$\left(\frac{I}{R_p} + M_f R_p\right) \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{1}{R_p} \left(C - \frac{G^2}{r} k_\tau k_e\right) \frac{d\theta}{dt} = \rho g \frac{\pi d_f^2}{4} H_f - M_f g \quad (10)$$

(iii) フロートが宙吊り状態 [$h+x_w-x_f < 0$]

$$\left(\frac{I}{R_\theta} + M_f R_\theta\right) \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{1}{R_\theta} \left(C - \frac{G^2 k_\tau k_e}{r}\right) \frac{d\theta}{dt} = -M_f g \quad (11)$$

計算では時々刻々 $h+x_w-x_f$ の値に応じた計算式を用いて計算する．ここでこれらの微分方程式の型を確認しておく．式(9)は強制減衰振動である．また，式(10)と(11)の左辺は2次までとったテイラー級数近似と同形であり，式(10)の右辺は正，式(11)の右辺は負である．したがってフロートが全没水のときは θ が単調増加して一部没水へと向かい，フロートが宙ぶりのときは θ が単調減少して一部没水へと向かうことがわかる．

計算の初期条件は，波の峰がフロート差し掛かった時にクラッチ・オンするものとして次式で与える．

$$\theta(0) = \frac{H}{2R_p}, \quad \dot{\theta}(0) = 0 \quad (12)$$

水面波形 x_w には次式の波高漸増型の正弦波を考える

$$x_w = \tanh(t) \times \frac{H}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \quad (13)$$

これは，緩やかなクラッチ・オンを計算で再現するものである．

以上により θ の時系列が計算され，その結果から実際に必要な量の瞬時値が得られる．

$$\text{発生電力} \quad P_G = r \times i^2 = r \left(\frac{G k_e \dot{\theta}}{r}\right)^2$$

$$\text{フロート変位 } x_f : x_f = R_p \theta$$

$$\text{発電トルク } \tau : \tau = \frac{G^2}{r} k_\tau k_e \frac{d\theta}{dt}$$

$$\text{シャフト軸力} : T = -\frac{1}{R_p} \left[I \frac{d^2\theta}{dt^2} + C \frac{d\theta}{dt} - \frac{G^2}{r} k_e k_\tau \frac{d\theta}{dt} \right]$$

3・3 系統連係への供給回路の概要

本提案の波力発電装置では交流発電機で発電しそれを直流に変換して昇圧した後に系統に送ることが現実的である．発電機から系統までの回路の概念図を図6に示す．

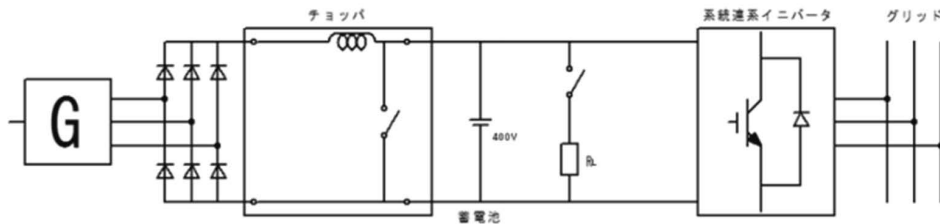


図6 発電機から系統までの回路の概念図

4. モデル計算とその結果

4.1 計算条件の設定

(1) 発電機について

2次変換装置である発電機としてさしあたり(株)スカイ電子の永久磁石式アキシャル・アウトローター形コアレス構造の3相交流発電機SKY-HG600(300rpmで約10kW)を想定した。その発電機の誘導発電係数 k_e は図7のようである。

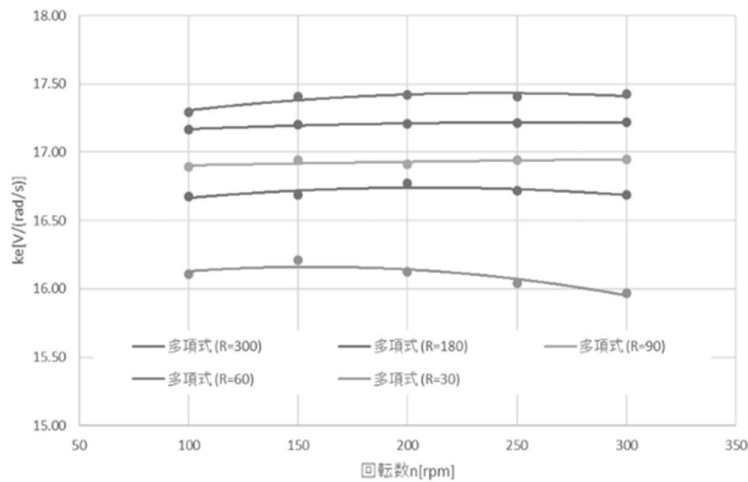


図7 発電機SKY-HG600の k_e の回転数と負荷抵抗による変化

以下では負荷抵抗20Ωと60Ωについて計算を行なった。これらの負荷抵抗に対する k_e , k_t および回転系の慣性モーメントは次のようである。

- 負荷抵抗 20Ω : 誘導発電係数 $k_e=15.69\text{V}/(\text{rad/s})$, トルク係数 $k_t=20.2\text{N}\cdot\text{m}/\text{A}$
- 負荷抵抗 60Ω : 誘導発電係数 $k_e=16.5\text{V}/(\text{rad/s})$, トルク係数 $k_t=22.54\text{N}\cdot\text{m}/\text{A}$
- 回転系全体の慣性モーメント : $I=1.235\text{kg}\cdot\text{m}^2$

(2) 波力発電装置の諸元

計算条件は現地での稼働を想定して設定した。水深10mの場に周期4秒の波が生じているとき波長が約25mとなる。そこで遊水室を一边2.5mの正方形と考え、この中に直径2m, 高さ3mのフロートをもつ装置を配置すると仮定した。また、常時稼働する場合と、フロートが降下する時間帯のみ稼働する間欠稼働する場合の2通りの計算を行なった。これらの稼働に適するようにフロートの比重を、常時稼働で0.5, 間欠稼働で0.9に設定した。設定した装置諸元を表1に示す。

表1 想定した装置ユニットの諸元

		Symbol(unit)	
float	mass	M_f (kg)	4830
	diameter	D_f (m)	2
	height	H_f (m)	3
pinion	radius	R_p (m)	0.18
	mass moment of inertia	I ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	1.235
gear	ratio	G	30
generator	torque coefficient	K_t ($\text{N}\cdot\text{m}/\text{A}$)	20.25, 22.5
	load resistance	r (Ω)	20, 60
machine	viscous damping coefficient	C ($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$)	1470

4・2 計算結果

(1) 諸量の時間変化

図8は常時稼働と間欠稼働（フロート下降時のみ稼働）の両方のケースについて、負荷抵抗 20Ω と 60Ω の場合について計算して得られたフロート上昇量、発生電力、ラック張力、およびピニオン・トルクの時間変化を示す。

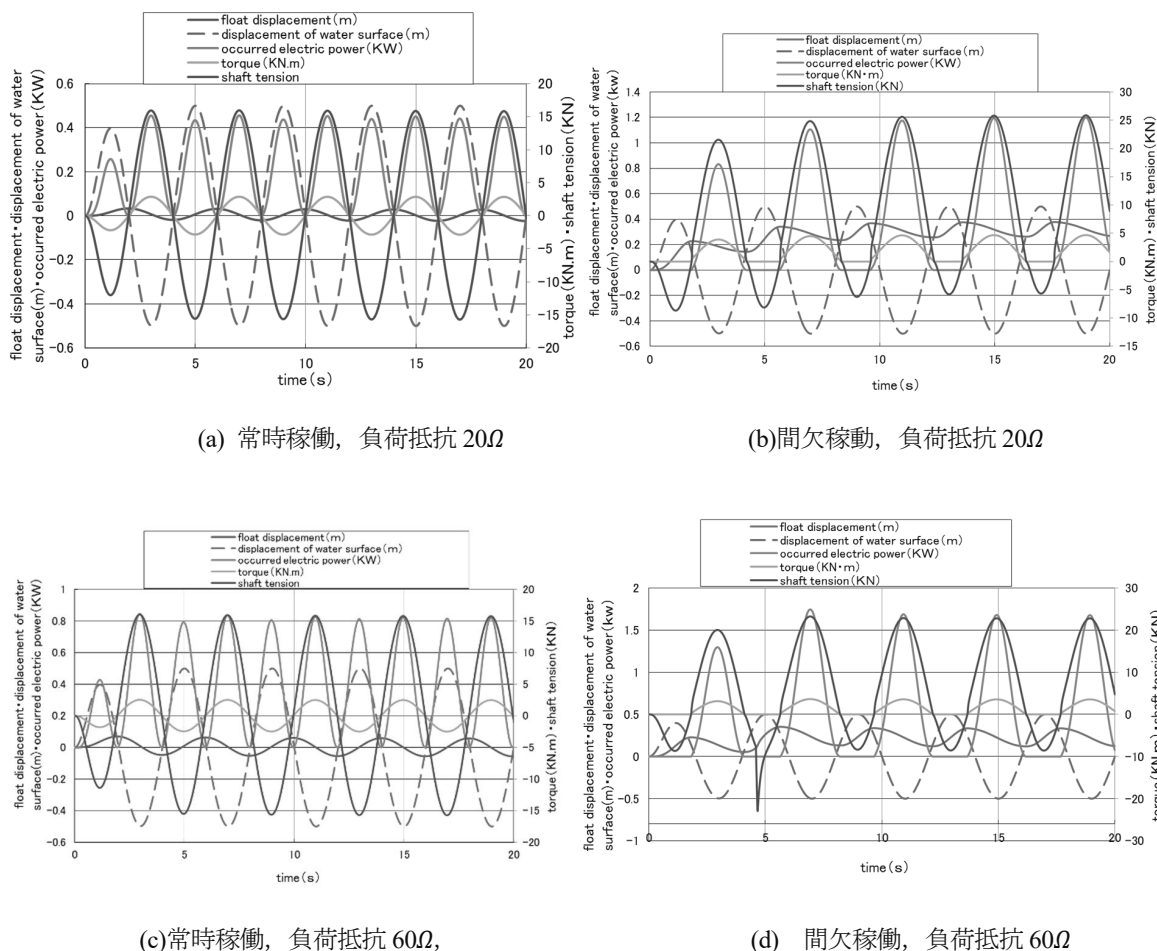


図8 フロート変位、発生電力、ラック張力、ピニオン・トルクの時間変化

図8から次のことが読み取れる。

常時稼働：

- フロート上下動は、水面上下動から約 $1/4$ 周期遅れて上下動を繰り返す。その大きさは負荷抵抗 20Ω の場合で水面上下動の大きさの約 $1/20$ 、負荷抵抗 60Ω の場合で水面上下動の大きさの約 $1/10$ である。
- ラック張力は、水面変位とほぼ逆位相で変動を繰り返す。すなわち、水表面が平均水面より上昇している時間帯は圧縮力、水表面が平均水面より下降している時間帯は張力となる。
- ピニオン・トルクは、水表面が平均水面より上昇している時間帯は負、水表面が平均水面より下降している時間帯は正となる変動を繰り返す。
- 発生電力は、正弦波にバイアスがかった形に似ており最小値がゼロとなる変動を繰り返す。最大値となる時刻は水面が峰または谷となる時刻とほぼ一致する。

間欠稼働：

- フロート変位は正値を保って変動し、フロート変位の最大値は水面変位の最大値の約 $60\sim 70\%$ である。フロートは最高点から下がる時は比較的ゆっくり下がり、最低点から上昇するときは急に上昇する。

- (b) ラック張力は, 水面が最低となる時とほぼ同時に最大値を取り, 水面が最高となる時に殆どゼロとなる.
- (c) ピニオン・トルクは, 水面変位のピーク時を中心とするある時間帯で正の一定値, そしてそれ以外に時間帯でそれより大きい正值で変動する. これが最大となる時刻はラック張力最大の時刻とほぼ一致する.
- (d) 発生電力は, 水面変位が正にある時間帯でゼロ, それ以外に時間帯では正值をとるような変動を繰り返す. この変動はラック張力およびピニオン・トルクの変動と似ている.

(2) 平均発生電力, 最大ラック張力, 最大ピニオン・トルクの波高・周期への依存状態

次に, 装置の設置計画や設計に関係する量として, 平均発生電力, 最大ラック張力, 最大ピニオン・トルクが波高や波周期によりどのように変化するかを計算により見積もった. 図9~11はそれぞれ平均発生電力, 最大ラック張力, 最大ピニオン・トルクを負荷抵抗 60Ω の場合について, 常時稼働と間欠稼働の両方について見積もった結果を示す.

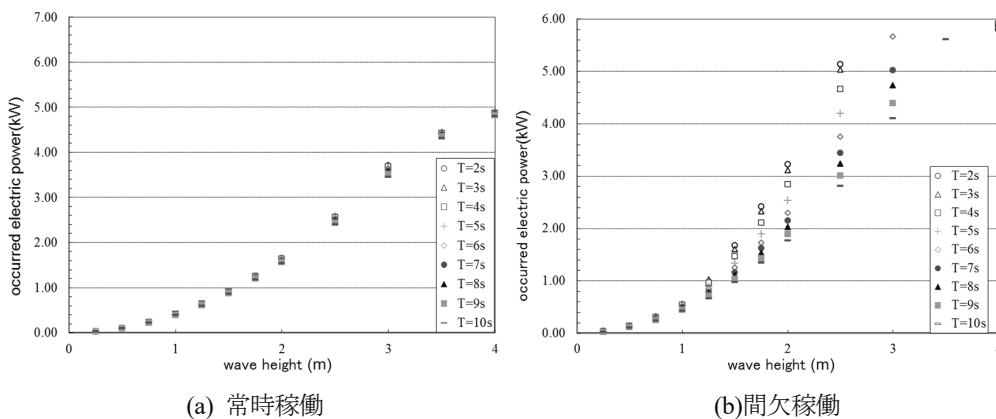


図9 平均発生電力の波高と波周期への依存の見積もり (負荷抵抗 60Ω)

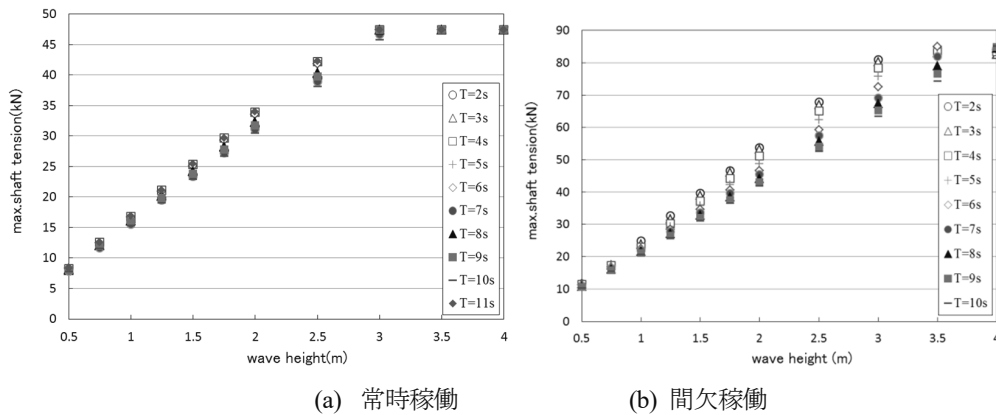


図10 最大ラック張力の波高と波周期への依存の見積もり (負荷抵抗 60Ω)

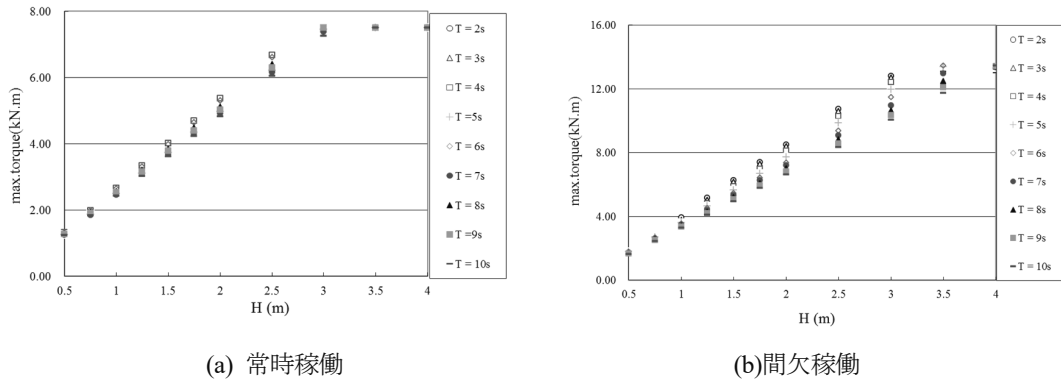


図 11 最大ピニオン・トルクの波高と波周期への依存の見積もり (負荷抵抗 60Ω)

これらの図から次のことがいえる.

- (a) 平均発生電力, 最大ラック張力, 最大ピニオン・トルクは波高が同じであれば, 間欠稼働の方が常時稼働より大きい. 特に平均発生電力で間欠稼働の方が大きいことは注目に値する.
- (b) 最大ラック張力, 最大ピニオン・トルクは波長の増加にほぼ比例して増大するが, 平均発生電力は波高の増加と共に加速度的に増大する.
- (c) 間欠稼働の場合の波高による諸量の増加は波周期の影響がみられるが, 常時稼働の場合には波周期の影響があまり見られない.
- (d) これらの量の波高による増大は, ある波高を越えると鈍化する.

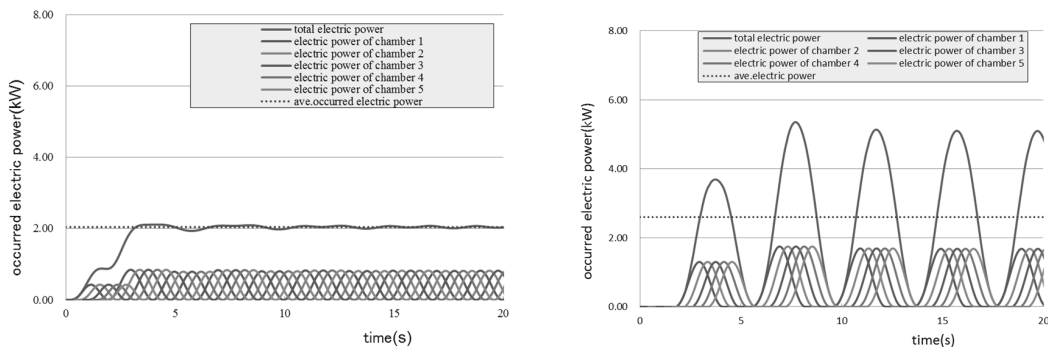
(3)遊水室群内に連続配置した発電装置の合計発生電力の見積もり

本提案の波力発電装置を沿い波型遊水室群内に連続配置した場合の発生電力の評価を行った. ここでは簡単のため, 個々の遊水室内の水面変動はその遊水室の外側での水面変動と同じであり, 互いに他の遊水室の運動とは独立に挙動するものと仮定する.

遊水室群の最も沖から第 $n+1$ 番目の遊水室内の水面変位 (上昇量) x_{wn+1} は, 波速を c , 正方形遊水室の一边を a として次式で与えられる.

$$x_{wn+1} = \tanh(t) \frac{H}{2} \sin\left(t - \frac{na}{c}\right) \tag{14}$$

一辺 2.5m の正方形遊水室群の個々の遊水室内に直径 2m, 高さ 3m のフロートをもつ波力装置が水深 10m の水域に配置されて, 周期 4 秒 (波長約 25m), 波高 1m の波が進行するとき負荷抵抗 20Ω, 60Ω の条件で場合間欠稼働すると常時稼働する場合の両方について見積を行なった. ここでは負荷抵抗 60Ω として 5 個, 10 個, 15 個と連続した遊水室内で稼働するときの発生電力の時系列を計算した結果を示す.



(a1) 5 台, 常時稼働

(a2) 5 台, 間欠稼働

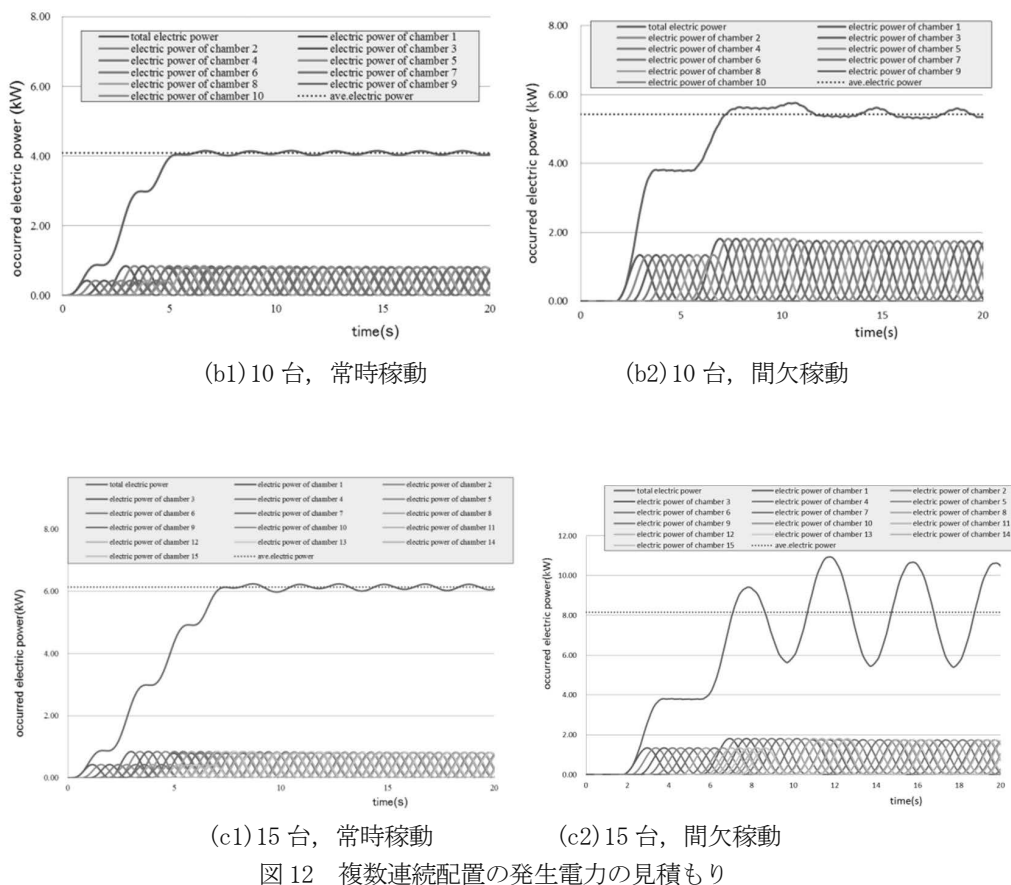


図 12 複数連続配置の発生電力の見積もり

図には個々の遊水室に配置された波力発電装置による発生電力の時系列と合計発生電力の時系列が示されている。図によると、常時稼働の場合の合計発生電力はここで示した全てのケースで平滑化されている。一方、間欠稼働の場合、波力発電装置群が 0.5 波長と 1.5 波長の区間をカバーするケースでは合計発生電力がかなり変動している。したがって、間欠稼働の場合、合計発生電力を平滑化するためには、波力発電装置群を波長の整数倍の区間にわたって連続配置することが必要である。ただし、平滑化が必要かどうかは用途による。平均発生電力を比較すると、間欠稼働では常時稼働の約 1.3 倍の電力が見込まれる。想定した装置で波高 1m、波周期 4 秒の場合、5、10、15 基で常時稼働する場合の合計発生電力はそれぞれ 2.046、4.093、6.139 kW と見込まれる。

5. 結語

以上、波力発電の実用化に求められる要件を満足するシステムとして、沿い波型遊水室内の水塊の穏やかな上下運動を使用しフロート、ラック・ピニオン、ラチェット機構、発電機から構成されるユニットを遊水室群の中の一つ一つの遊水室に配置する構成について力学検討を行い、実用化を想定した基本的な計算を行なった。

本研究を要約すると次のようである。

- (1) 本提案の方式は、浅海域で岸沖方向に遊水室群を並べる形態としたとき、屈折効果が利用でき装置が波の荷重を受けず実現可能である。また、この配置は限られた海岸線延長で大きなエネルギー利得が期待される。
- (2) この装置の稼働に関する力学モデルを示す共に、最終的な計算式について考察を行った。フロートが一部没水の場合、ピニオンの回転角 θ は強制減衰振動の方程式に従うが、フロートが全没水および宙吊りの場合には θ は単調に増加または減少してフロートの一部没水状態に近づく。
- (3) 実海域での稼働を想定した計算を行い、関係する物理諸量の時系列変化の特性、ならびに発生電力の時間平均値およびラック張力とピニオン・トルクのピーク値の波高と周期への依存状態を調べた。

- (4) 複数連続配置した場合の発生電力の時系列の特徴を調べ、特に合計発生電力については、常時稼動の場合には波力発電装置がカバーする区間が波長の0.5, 1.0, 1.5倍で合計発生電力の変動が収まるが、間欠稼動ではこの区間の長さが波長の整数倍であることが必要であることを示した。

本研究で提案した方式は現実的なものと考えられることから、今後この方式の実用化に向けた取組を粘り強く行っていきたい。

謝辞：本研究遂行に当たり佐賀大学海洋エネルギー研究センターより多大なご支援を賜った。また、発電機の物理に関して宇部工業高等専門学校前教授西田克美氏より懇切なご指導を賜った。記して深甚の謝意を表します。

文 献

永田修一,波力発電の動向について, 海洋エネルギー資源国際フォーラム講演資料(2009).

独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構編, NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版(2014), 第6章海洋エネルギー, <http://www.nedo.go.jp/content/100544821.pdf>.

Hadano K., Nagase Y., and Li W., Wave Energy Conversion Utilizing Vertical Motion of Floats put in the Water Chambers Array aligned in the Direction of Wave Propagation Direction, Proc. of ISOPE2017 Conference (2017), pp.113-119.