

浮体の2自由度運動を考慮した波力発電装置の力学

羽田野袈裟義^{*1}, Pallav Koirala^{*1}, 中野公彦^{*2}, 種浦圭輔^{*1}

Dynamics of Wave Power Generator Considering 2-Degree Freedom Motion of Float

Kesayoshi HADANO^{*3}, Pallav Koirala, Kimihiko NAKANO
and Keisuke TANEURA

^{*3} Yamaguchi Univ. Dept. of Civil Engineering
2-16-1, Tokiwadai Ube city, Yamaguchi, 755-8611 Japan

Dynamics model has been proposed for the float-counterweight type wave energy converter which takes into account the vertical and horizontal forces on the energy extracting float. The model consists of the equation of the generator, force balance at stationary free state, equation of the float motion in operation, and the equation for the driving pulley motion. Second order simultaneous differential equations for the vertical and horizontal displacement of the float have been obtained as the equations to be solved. Components of the flow force have been evaluated from the linear progressive wave theory. Examination of the model using the experimental data shows that the model underestimates the heaving and surge, overestimates the wire tension, and gives relatively good agreement to energy gain.

Key Words : heave, surge, mechanical work rate, float, counterweight, wire tensile force

1. 緒 言

近年地球温暖化などの環境問題が深刻化しており、化石燃料に頼らない、再生可能エネルギー開発が望まれている。このことから当研究グループでは Fig.1 に示す、プーリ、ワイヤ、浮体、カウンタウエイト、ラチェット機構から構成される浮体式波力発電装置を開発中である。これまでの研究において、本方式の波力発電システムの稼働に関して、フロートの運動を1自由度(heave)のみを考慮し、力学モデルを提示している¹⁾。このモデルは、発電機関連の力学、無負荷静止状態の浮体・

カウンタウエイトの釣合式、稼働状態の浮体の運動方程式、および回転体の力学から構成されるものである。このモデルは水槽実験の結果を程よく再現することが確かめられた。

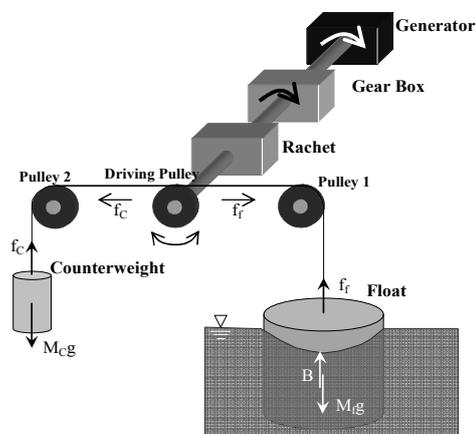


Fig. 1 Schematic of wave power generator

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

^{*2} 東京大学生産技術研究所.

E-mail: k.tane@yamaguchi-u.ac.jp

しかし防波堤に装置を設置する場合、波の条件によっては、浮体が前後に大きく揺れ、防波堤に接触すると懸念されていた。したがって、浮体前後揺れ (surge) を加えた 2 自由度運動を考慮する装置の力学モデルを構築し、1 自由度モデルとの比較を行った。

2. 浮体の 1 自由度力学モデル

浮体運動の 1 自由度力学モデルは、発電機関連の力学、回転体の運動方程式、無負荷・静止状態での浮体・カウンタウエイトの釣合式、可動状態での浮体の運動方程式から構成されている。これらを式(1)~(6)に示す。浮体、カウンタウエイトの慣性を考慮し、浮体が一部没水、宙吊り、全没水の 3 つの状態に場合分けをして計算を行ったが、浮体が急激な水位変動によって上昇する場合、ワイヤが急に弛緩したのち、緊張するといった非常に危険な状態が起こる。したがって、浮体が下降したときのみ発電するよう工夫し、一部没水状態を維持できる場合で検討した。

$$\tau = -Gk_{\tau}i \quad (1), \quad e = Gk_e \frac{d\theta}{dt} \quad (2)$$

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + C \frac{d\theta}{dt} = \tau + (f_c - f_f)R_m \quad (3)$$

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

$$M_f \frac{d^2 x_f}{dt^2} = f_f + \frac{1}{4} \pi d_f^2 \rho_w H_f g - M_f g + \frac{1}{8} C_D \rho_w \times \left| \frac{dx_w}{dt} - \frac{dx_f}{dt} \right| \left(\frac{dx_w}{dt} - \frac{dx_f}{dt} \right) \pi d_f^2 \quad (5)$$

$$- \frac{1}{4} C_M d_f^2 \rho_w H_f \frac{d^2 x_f}{dt^2} \quad (6)$$

$$f_c = M_c \left(g + \frac{d^2 \theta}{dt^2} \right)$$

ここで、 τ : トルク, M_f : 浮体質量, M_c : カウンタウエイト質量, R_m : 駆動プーリの半径, C : 駆動プーリから発電機までの粘性減衰係数,

G : ギア比, k_e : 誘導電圧係数, k_{τ} : トルク係数, r : 発電機の内部抵抗, d_f : 浮体の直径, g : 重力加速度, ρ_w : 海水の密度, H : 波高, I : 駆動プーリの慣性モーメント, H_f : 浮体の高さ, C_D : 抗力係数, C_M : 仮想質量係数, T : 周期である。これらの式から、浮体が一部没水状態時の駆動プーリの回転角 θ に関する支配方程式は式(7)で与えられる。また浮体の変位はFig.2に示す。

$$\left(\frac{I}{R_m} + (M_f + M_c)R_m + \frac{\rho_w \pi C_M d_f^2}{4} (h + x_w - R_m \theta) R_m \right) \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{I}{R_m} \left(C + \frac{G^2 k_{\tau} k_e}{r} \right) \frac{d\theta}{dt} + \frac{\rho_w \pi}{4} d_f^2 R_m \theta = \frac{\rho_w \pi}{4} d_f^2 x_w \quad (7)$$

$$+ \frac{1}{8} \rho_w \pi C_D d_f^2 \left| \frac{dx_w}{dt} - R_m \frac{d\theta}{dt} \right| \left(\frac{dx_w}{dt} - R_m \frac{d\theta}{dt} \right)$$

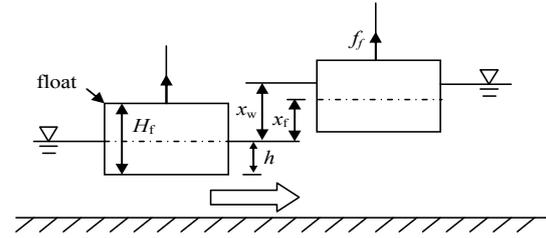


Fig. 2 Float displacement
for 1-degree freedom motion

3. 浮体の 2 自由度力学モデル

浮体の 2 自由度の機械力学モデルも 1 自由度モデルと同様に、発電機関連の力学、回転体の運動方程式、無負荷・静止状態での浮体・カウンタウエイトの釣合式、可動状態での浮体の運動方程式から構成されている。ここでは加速度運動する流体中にある物体に作用する力の項をあらたに取り入れ、鉛直方向、水平方向の浮体の運動方程式を作成した²⁾。

$$F = \frac{1}{2} \rho_w C_D A_p \left| U - \dot{x}_B \right| \left(U - \dot{x}_B \right) - \rho_w V C_a \ddot{x}_B \quad (8)$$

ここで A_p : 物体の流れを受ける方向の面積,
 V : 流体中の物体の体積, U : 流速, x_B : 物体
の位置, x : 流れる方向の位置, C_D : 抵抗係数,
 C_a : 付加質量係数である.

$$\begin{aligned} M_f \ddot{x}_f &= f_f \cos \alpha + \frac{1}{4} \pi d_f^2 \rho_w (h + x_s - x_f) g \\ &- M_f g + \frac{1}{8} C_D \rho_w \left| \dot{x}_w - \dot{x}_f \right| \left(\dot{x}_w - \dot{x}_f \right) \pi d_f^2 \\ &- \frac{1}{4} C_a \pi d_f^2 \rho_w (h + x_s - x_f) \ddot{x}_f \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} M_f \ddot{y}_f &= -f_f \sin \alpha + \frac{1}{4} \pi d_f^2 \rho_w (h + x_s - x_f) g \\ &- M_f g + \frac{1}{8} C_D \rho_w \left| \dot{y}_w - \dot{y}_f \right| \left(\dot{y}_w - \dot{y}_f \right) \pi d_f^2 \\ &- \frac{1}{4} C_a \pi d_f^2 \rho_w (h + x_s - x_f) \ddot{y}_f \end{aligned} \quad (10)$$

ここで浮体の動きの座標設定をする. フロー
ト変位の様子は **Fig.3** に示す.

$$\Delta S = S' - S_0 = \sqrt{(H_p - x_f)^2 + y_f^2} - H_p \quad (11)$$

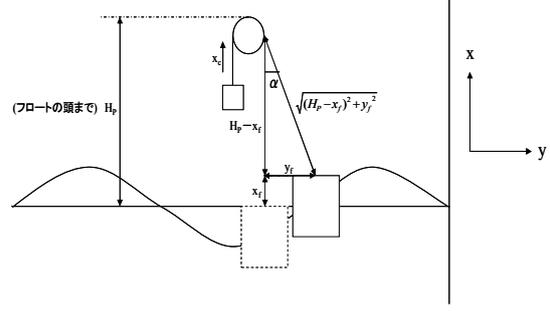
$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{y_f}{H_p - x_f} \right) \quad (12)$$

$$\theta = -\frac{\Delta S}{R_m} = -\frac{1}{R_m} \left[\sqrt{(H_p - x_f)^2 + y_f^2} - H_p \right] \quad (13)$$

$$x_c = \Delta S = \left[\sqrt{(H_p - x_f)^2 + y_f^2} - H_p \right] \quad (14)$$

さらに連立方程式の形をつくり種々の計算を
行う.

$$\begin{aligned} a_1 \frac{d^2 x}{dt^2} + b_1 \frac{d^2 y}{dt^2} &= c_1 \\ a_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + b_2 \frac{d^2 y}{dt^2} &= c_2 \end{aligned} \quad (15)$$



**Fig. 3 Float displacement
for 2-degree freedom motion**

$$a_1 = M_f - \left(M_c + \frac{I}{R_m^2} \right) (H_p - x_f)^2 \left\{ (H_p - x_f)^2 + y_f^2 \right\}^{-1} + \rho \frac{\pi}{4} d_f^2 (h + x_s - x_f) C_a \quad (16)$$

$$b_1 = - \left(M_c + \frac{I}{R_m^2} \right) y_f (H_p - x_f) \left\{ (H_p - x_f)^2 + y_f^2 \right\}^{-1} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} c_1 &= \left(M_c + \frac{I}{R_m^2} \right) \left[\left(\ddot{x}_f^2 + \ddot{y}_f^2 \right) (H_p - x_f) \left\{ (H_p - x_f)^2 + y_f^2 \right\}^{-1} \right] \\ &- \left(M_c + \frac{I}{R_m^2} \right) \left[\left\{ (H_p - x_f) \dot{x}_f - y_f \dot{y}_f \right\}^2 (H_p - x_f) \left\{ (H_p - x_f)^2 + y_f^2 \right\}^{-2} \right] \\ &- \left(\frac{C}{R_m^2} + \frac{G^2 k_r k_e}{R_m^2 r} \right) \left\{ (H_p - x_f) \dot{x}_f - y_f \dot{y}_f \right\} (H_p - x_f) \left\{ (H_p - x_f)^2 + y_f^2 \right\}^{-1} \\ &+ M_c g (H_p - x_f) \left\{ (H_p - x_f)^2 + y_f^2 \right\}^{-1} - M_f g + \frac{1}{4} \pi d_f^2 (h + x_s - x_f) \rho g \\ &+ \frac{1}{8} C_D \rho \pi d_f^2 \left| \dot{x}_w - \dot{x}_f \right| \left(\dot{x}_w - \dot{x}_f \right) \end{aligned} \quad (18)$$

$$a_2 = - \left(M_c + \frac{I}{R_m^2} \right) (H_p - x_f) y_f \left\{ (H_p - x_f)^2 + y_f^2 \right\}^{-1} \quad (19)$$

$$b_2 = M_f + \rho \frac{\pi}{4} d_f^2 (h + x_s - x_f) C_a + \left(M_c + \frac{I}{R_m^2} \right) y_f^2 \left\{ (H_p - x_f)^2 + y_f^2 \right\}^{-1} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} c_2 &= \left(M_c + \frac{I}{R_m^2} \right) \left(\dot{x}_f \dot{y}_f \right) \left\{ (H_p - x_f)^2 + y_f^2 \right\}^{-1} + \left(M_c + \frac{I}{R_m^2} \right) \left\{ (H_p - x_f) \dot{x}_f - y_f \dot{y}_f \right\}^2 \\ &\left\{ (H_p - x_f)^2 + y_f^2 \right\}^{-2} y_f + \left(\frac{C}{R_m^2} + \frac{G^2 k_r k_e}{R_m^2 r} \right) \left\{ (H_p - x_f) \dot{x}_f - y_f \dot{y}_f \right\}^{\frac{3}{2}} y_f \\ &- M_c g \cdot y_f \left\{ (H_p - x_f)^2 + y_f^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} C_D \rho d_f^2 (h + x_s - x_f) \left| \dot{y}_w - \dot{y}_f \right| \left(\dot{y}_w - \dot{y}_f \right) \end{aligned} \quad (21)$$

最終的に以下の初期条件を与え計算を行う.

$$x_f(0) = 0, \quad \frac{dx_f}{dt}(0) = 0 \quad (22)$$

$$y_f(0) = 0, \quad \frac{dy_f}{dt}(0) = 0 \quad (23)$$

4. 提案したモデルの検証

4.1 実験概要 本実験は三菱重工業(株)長崎研究所の耐航性能水槽(平均水深 3.2m, 幅 30m, 長さ 160m)で行われた。装置緒元は **Table.1** に示す。周期/波高の条件は次のように設定した。周期 3 秒以下では来襲波により浮体が著しいピッチングを起し、エネルギー変換ができなかった。有意のエネルギー変換が行われた波浪条件を **Table.2** に示す。

Table.1 Dimensions of device as experiment

フロート	比重 $\rho(\text{kg/m}^3)$	745.7
	高さ $H_f(\text{m})$	0.7
	直径 $d_f(\text{m})$	2
	喫水率	0.5714
	質量 $M_f(\text{kg})$	1680
カウンターウェイト	質量 $M_c(\text{kg})$	150
駆動プーリ	半径 $R_m(\text{m})$	0.18
ギア	ギア比 G	41.36

Table.2 experiment conditions

実験	波高	周期
	$H(\text{m})$	$T(\text{s})$
1	0.27	4
2	0.24	3.5

4.2 実験値と計算値の比較 Fig. 4 は実験 1 のワイヤ張力の実験値と 1 自由度・2 自由度力学モデルの計算値を比較した図である。この図から 2 自由度の計算値は実験値とは離れているものの、1 自由度の計算値より実験値に近い値を示していることがわかる。

Fig. 5 は実験 1 の仕事率の実験値と 1 自由度・2 自由度機械力学モデルの計算値を比較した図である。1 波目, 2 波目は乱れがあるものの 3 波目以降実験値と近い値を示している。

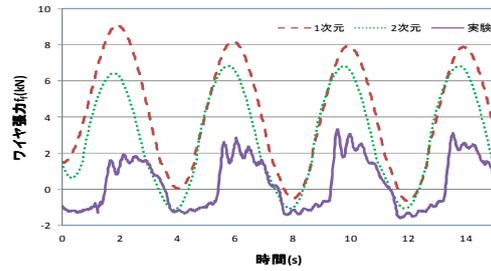


Fig.4 Comparison to wire tensile force for experiment condition 1

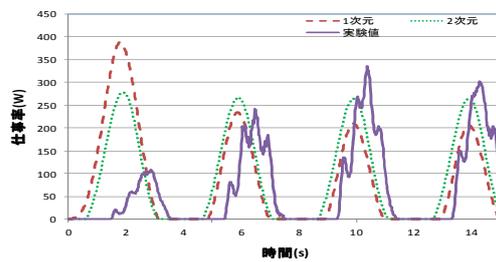


Fig.5 Comparison to work rate for experiment condition 1

5. 実機を想定した計算

発電機, 浮体, カウンターウェイトを実機で想定される値に設定し計算を行った。その時の条件を **Table.3** に示す。

Table.3 calculation conditions

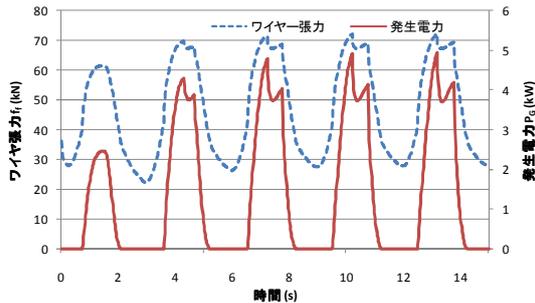
ケース	比重	$M_f(\text{kg})$	$M_c(\text{kg})$	喫水率	波高 (m)	周期 (s)
1)	1.1	6911.5	3691.4	0.5	1	3
2)	1.1	6911.5	3691.4	0.5	1.5	3
3)	1.1	6911.5	1759.3	0.8	1	3

Fig. 6 はワイヤ張力, 発生電力, トルク, 浮体上昇量, 水面上昇量の時系列を示す。図よりワイヤ張力, 発生電力とトルクは同様の波形を示していることがわかる。またトルクは浮体が最も下降した時にピークを示している。またそれぞれの物理量に対して、ピーク時に不規則に推移しているが、これはフロートが

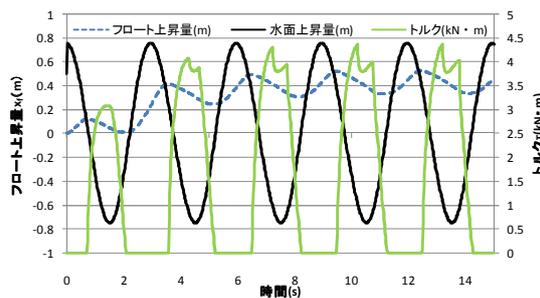
一部没水を維持できずに、全没水を起こした結果である。

6. 平均発生電力の評価

実海域で使用した場合の平均発生電力の算定を行った。装置の諸元は **Table.4** に示す。



(a) Time series of f_f and P_G



(b) Time series of x_w , x_f and τ

Fig.6 Results for case2

Table.4 Dimensions of device

装置	フロート			駆動プーリ		増速機 ギア比
	比重	基準の喫水率	直径(m)	高さ(m)	半径(m)	
A	1.1	0.6	2	3	0.14	12.6
		フロート質量:10.37(t) カウンターウェイト質量:4.57(t)				
B	0.9	0.6	2	3	0.28	50.4
		フロート質量:8.48(t) カウンターウェイト質量:2.69(t)				
C	0.9	0.6	2	3	0.28	50.4
		フロート質量:8.48(t) カウンターウェイト質量:2.69(t)				
D	0.9	0.6	3	3	0.28	50.4
		フロート質量:19.09(t) カウンターウェイト質量:6.04(t)				

Table.5 は装置 D における平均発生電力を 1 自由度・2 自由度力学モデルにおいてそれぞれ示したものである。2 自由度力学モデルは 1 自由度力学モデルと比較してエネルギーを利用可能な範囲が狭いことがわかる。

7. 結語

浮体の 2 自由度運動を考慮した波力発電装置の力学モデルについて以下の事がわかった。

発生電力、ワイヤ張力、浮体の上下動を統一的に定量評価するには至らなかったが、これらに対し一応の目安を与えた。浮体の 1 自由度機械力学モデルと比較して、種々の物理量をより高精度に評価することができた。また、浮体の 2 自由度機械力学モデルは、一部没水が維持できる範囲が狭く高い波高には対応できない。

Table.5

P_G of device (type D) using dynamics model considering degree freedom motions

a) 1 degree freedom motion of float

H(m)	T(s)	3	4	5	6	7	8	9	10	11
10										47.21
9									57.49	37.30
8								50.10	44.01	28.56
7								43.19	37.95	24.63
6.5								38.81	32.34	20.88
6								46.52	30.93	21.77
5.5								38.45	28.56	22.46
5								31.14	20.70	18.19
4.5								37.24	24.61	18.26
4								28.51	18.84	12.52
3.5								41.22	20.95	13.84
3								29.63	14.55	9.61
2.5								37.30	18.32	9.31
2								6.15	4.08	3.59
1.75								28.56	14.03	7.13
1.5								20.98	10.31	5.24
1.25								14.57	7.16	3.64
1								9.33	4.58	2.33
0.75								6.17	3.25	2.98
0.5								2.74	4.73	2.33
0.25								0.69	1.18	0.58
0								0.29	0.15	0.10
										平均発生電力(kW)
										13.158

b) 2 degree freedom motion of float

H(m)	T(s)	3	4	5	6	7	8	9	10	11
10										
9										
8										
7										
6.5										
6										
5.5										
5										
4.5										
4										
3.5										
3										
2.5										
2										
1.75										
1.5										
1.25										
1										
0.75										
0.5										
0.25										
0										
										平均発生電力(kW)
										2.925

参考文献：

- 1) 羽田野袈裟義, 種浦圭輔, 渡邊誠, 中野公彦, 齊藤俊, 松浦正己: 浮体式波力エネルギー変換の力学, 土木学会論文集 B, Vol.62 No.3 pp.270-283, 2006.
- 2) Sarpkara, T. and Issacson, M: Mechanics of wave forces on offshore structure, Van Northland. Reinhold. Co, 1981.

