

山口大学大学院 学生会員	○濱田	朗久
建設技術研究所 正会員	種浦	圭輔
山口大学大学院 フェロー会員	羽田野	袈裟義
関東地方整備局 正会員	米山	治男
長崎総合科学大学 非会員	池上	国広
東京大学 非会員	中野	公彦
山口大学大学院 学生会員	Pallav	Koirala

1. はじめに

本研究室は、図-1 に示すプリー・ワイヤ・フロートから構成される可動物体型波力発電装置を開発中である。水面変動によりフロートが上下運動し、その運動がワイヤを通してプリーの反転反復運動として伝わる仕組みである。そして、その運動はラチェット機構により一方向の回転運動に変換され、変速機により増速して発電機を回す仕組みとなっている。

本研究では、本方式の波力発電システムの力学モデルを構築した。特に稼働状態のフロートの運動方程式には、フロートと流体の相互作用力の評価を行った。その力学モデルによって各物理量を検討し、さらに共振解析を行い、本システムの固有周期を算出した。

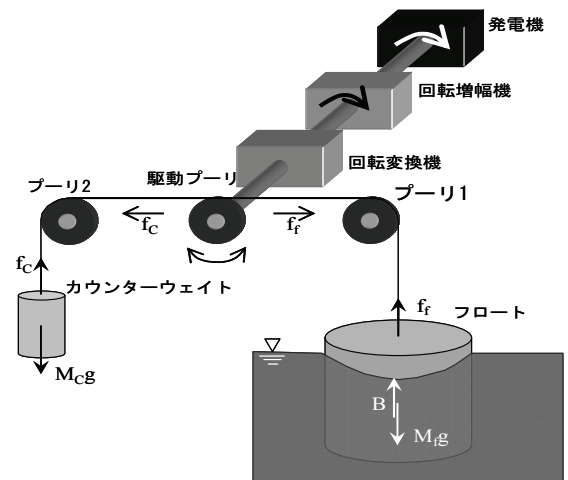


図-1 本システムの波力発電装置の模式図

2. 力学モデル

力学モデルは、無負荷・静止状態でのフロート・カウンターウェイトの釣合式、稼働状態におけるフロートの運動方程式、発電機関連の力学、回転体の運動方程式により構成される。

2. 1 無負荷・静止状態での釣り合い

フロート直径を D_f 、フロートとカウンターウェイトの質量をそれぞれ M_f と M_c 、この状態のフロートの喫水深を h とおくと次式の関係が成り立つ。

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

ここで ρ_w は海水の密度、 g は重力加速度である。

2. 2 稼働状態のフロートの運動方程式

水面変動がないものと考え、フロートの自由振動の方程式は式(2)で与えた。

$$M_f \frac{d^2 x_f}{dt^2} = f_f + \frac{1}{4} \pi D_f^2 \rho_w (h - x_f) g - M_f g \quad (2)$$

ここで、フロートの上昇量を x_f 、フロートをつるしたワイヤの張力を f_f としている。

(1) ラディエーション流体力の導入

まず、無負荷・静止状態での釣合式(1)、稼働状態の運動方程式(2)より、式(3)を導出する。

$$M_f \frac{d^2 x_f}{dt^2} = f_f - \frac{1}{4} \pi \rho_w D_f^2 g x_f - M_c g \quad (3)$$

次に、波強制力 F_w 、付加質量 M_a および造波減衰力 $C dx_f/dt$ を導入すると、次式ようになる。

$$(M_f + M_a) \frac{d^2 x_f}{dt^2} + C \frac{dx_f}{dt} + \frac{1}{4} \pi D_f^2 \rho_w g x_f + M_c g - f_f = F_w \frac{H}{2} \quad (4)$$

2. 3 回転体の運動方程式

回転体の運動方程式は、駆動プーリの無負荷・静止状態からの回転角を θ として次式で与えられる。

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} + C' \frac{d\theta}{dt} = \tau + (f_c - f_f) R_m \quad (5)$$

回転体の運動方程式(5)、ここでは省略するが、カウンタウエイトの運動方程式から式(6)が与えられる。

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} + C' \frac{d\theta}{dt} = \tau + (M_c \frac{d^2 x_c}{dt^2} + M_c g - f_f) R_m \quad (6)$$

2. 4 発電機関連の力学

発電機が駆動プーリを反時計方向にねじるトルクを τ とすると、駆動プーリの反時計方向の回転角 θ の1階微分の式を得る。さらに発電機に発生する電流 i 、発生電圧 e より、その派生的な式として、式(7)を得る。

そして発生電力 P_G は式(8)により与えられる。

$$\tau = -\frac{G^2}{r} k_\tau k_e \frac{d\theta}{dt} \quad (7), \quad P_G = r \cdot i^2 = r \left(\frac{-G k_e}{r} \cdot \frac{d\theta}{dt} \right)^2 \quad (8)$$

ここで、 G はギア比、 k_τ はトルク係数、 k_e は誘導発電係数、 r は負荷抵抗である。

また、フロートの上昇量 x_f 、カウンタウエイトの上昇量 x_c と駆動プーリの回転角 θ には次の関係がある。

$$x_f = R_m \theta, \quad x_c = -R_m \theta \quad (9)$$

2. 5 計算に用いる式

以上に示した基礎式の組み合わせにより、駆動プーリの回転角 θ を支配する式が次式で与えられる。

$$\left\{ \frac{I}{R_m} + (M_f + M_c + M_a) R_m \right\} \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{1}{R_m} (C R_m^2 + C' + \frac{G^2}{\gamma} k_\tau k_e) \frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{4} \pi D_f^2 \rho_w g R_m \theta = F_w \cdot \frac{H}{2} \quad (10)$$

式(10)を所定の波と初期条件に対して解き、 θ の時系列を求めると、時々刻々の $\dot{\theta}$ 、 $\ddot{\theta}$ が得られ発生電力など力学諸量の時系列を求めることができる。

2. 6 計算条件

フロートおよび装置の諸元は表-1 のようにする。波強制力は規則波として式(11)、初期条件は式(12)により与えられる。

$$F_w = A \cos(\omega t + \phi) \quad (11), \quad \theta(0) = \frac{H}{2R_m}, \quad \dot{\theta}(0) = 0 \quad (12)$$

ここで、 H は波高、 A は波強制力の振幅、 ω は波の角振動数、 ϕ は位相差である。

3. モデルの検証

前章で示した力学モデルを検証するため、2004 年に行った大型模型装置の水槽実験の結果と比較する。水槽の水深は 3.2m である。フロートの諸元は、表-1 のように設定した。その他の諸元は駆動プーリの半径 R_m は 0.18(m)、カウンタウエイト質量 M_c は 1500(kg) とギア比 G は 41.36 である。実験では、フロート上下動、ワイヤ張力などを測定した。波の条件は表-2 に示す。まず、機械系の粘性減衰係数 C' を評価した。評価方法は、実験結果からワイヤ張力とワイヤの走行速度(フロート昇降速度)の積で求めた仕事率の時系列を

求め、その時間平均とモデル計算で得られる仕事率の時間平均から粘性減衰係数を同定した。その際、各波浪条件に対する付加質量、造波減衰力は、三次元特異点分布法によって算出した。その結果を表-2 に示す。その結果、同定された粘性減衰係数は1406(N.m.s)程度であった。

これにより、力学モデルによって種々の物理量を評価できる。ここでは仕事率の時系列を示す。図-2 は表-2 の実験番号①の場合の実験値とモデルによる計算値を比較したものである。図より、モデル計算による時系列変化は実験値の時系列変化に先行しているが、全体的に、計算値の再現性は妥当であると言える。

表-1 水槽実験の場合のフロート諸元

フロートの諸元								
半径(m)	高さ(m)	比重	質量(t)	喫水率	喫水(m)	K G(m)	排水重量(kN)	ウェイト重量(kN)
1.00	0.70	0.75	1.640	0.66	0.46	0.35	14.602	1.470
重心			メタセーター高さ		復元力(kN/m)	慣性モーメント		
X(m)	Y(m)	Z(m)	GM-x(m)	GM-y(m)		I x(t*m ²)	I y(t*m ²)	I z(t*m ²)
0	0	-0.113	0.422	0.422	31.56	4.769E-01	4.769E-01	8.199E-01

※KG:浮体底から重心までの距離
※メタセーター高さ: 重心位置とメタセーターとの距離

表-2 水槽実験の条件での流体力評価

波浪条件			付加質量 Ma(kN s ² /m)	造波減衰力の係数 C (kN s/m)
実験番号1	波高(m)	0.27	1.979	1.103
	周期(s)	4		
実験番号2	波高(m)	0.24	1.852	1.251
	周期(s)	3.5		

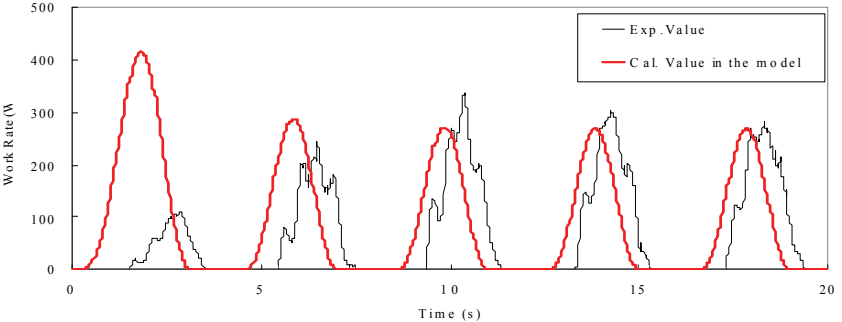


図-2 実験とモデルの計算による仕事率の時系列
(実験番号①の場合)

4. 共振特性の理論解析

式(10)は造波減衰、機械ロスおよびエネルギー変換を減衰項とする減衰振動の式であり、駆動プーリの回転角に関する方程式であるが、回転角はワイヤの移動量を介して、フロート上下動と関係づけることができる。このフロート上下動の共振を考える場合、通常の質点の場合と異なり、フロート変位は固定座標ではなく、水面変位との相対座標で検討する。この状況を図-3 に示す。

まず図-3 より、式(10)に水面変動を考慮すると以下のような式になる。

$$\left(\frac{I}{R_m^2} + (M_f + M_c + M_a)\right) \left(R_m \frac{d^2\theta}{dt^2}\right) + \left(C + \frac{1}{R_m^2} C' + \frac{1}{R_m^2} \frac{G^2}{r} k_\tau k_e\right) \left(R_m \frac{d\theta}{dt} - \dot{x}_w\right) + \frac{1}{4} \pi D_f^2 \rho_w g (R_m \theta - x_w) = F_w \cdot \frac{H}{2} \quad (13)$$

この設定で、質点の水位に対する相対変位は、式(14)により与えられる。

$$z = R_m \theta - x_w \quad (14)$$

この式より、駆動プーリ回転角 θ は、次のように表現される。

$$\theta = \frac{1}{R_m} (z + x_w) \quad (15)$$

式(10)に θ を代入し、さらに整理すると次式が得られる。

$$\left(\frac{I}{R_m^2} + (M_f + M_c + M_a)\right) \frac{d^2z}{dt^2} + \frac{1}{R_m^2} \cdot \left(C \cdot R_m^2 + C' + \frac{G^2}{r} k_\tau k_e\right) \frac{dz}{dt} + \frac{1}{4} \pi D_f^2 \rho_w g z = F_w \cdot \frac{H}{2} - \left(\frac{I}{R_m^2} + (M_f + M_c + M_a)\right) \frac{d^2x_w}{dt^2} \quad (16)$$

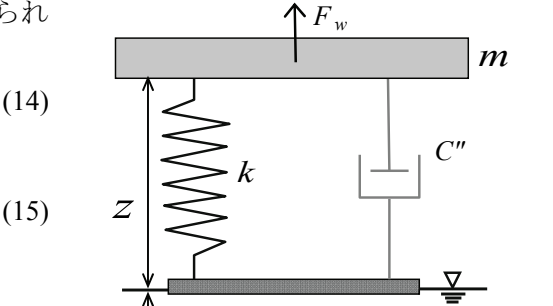


図-3 エネルギー変換システム
の共振解析モデル

この式を用いて、フロート上下動の共振特性を検討する。

4. 1 固有振動数と応答倍率

システムの不減衰固有振動数 ω_n と減衰比 ζ はそれぞれ次のように求められる。

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{\rho_w g \pi D_f^2}{4 \left\{ \frac{I}{R_m^2} + (M_c + M_f + M_a) \right\}}} \quad (17), \quad \zeta = \frac{C''}{2\sqrt{mk}} = \frac{\left(C \cdot R_m^2 + C' + \frac{G^2 k_e k_r}{r} \right)}{2\sqrt{\left(I \cdot R_m^2 + (M_c + M_f + M_a) R_m^4 \right) \frac{\rho_w g \pi D_f^2}{4}}} \quad (18)$$

また強制振動による相対変位 z の振幅を x_0 , 水面変動 x_w の振幅を x_{stat} とすると、これらの比は式(19)となる。

$$\frac{x_0}{x_{stat}} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2}} \quad (19)$$

これが変位応答倍率である。

5. 共振特性の数値的検討

5. 1 フロート変位による検討

ここでは、実海域に本システムを設置することを想定し、表-3のような大型の装置諸元に対して、共振特性の数値的検討を行った。図-4は波周期による応答倍率の変化を、表-3の諸元に対して、フロートに作用する付加質量力と造波減衰力を考慮した場合と無視した場合の双方について表している。フロートに作用する付加質量力と造波減衰力は各波周期に対して評価している。図より、装置の不減衰固有周期 $2\pi/\omega_n$ は、フロートに作用する力を考慮した場合と無視した場合でそれぞれ4.2秒と3.8秒であり、流体力を考慮した場合の方が長いことがわかる。また、応答倍率 x_0/x_{stat} は、不減衰固有周期 $2\pi/\omega_n$ で最大となるが、その最大値はフロートに作用する流体力を無視した場合の方が考慮した場合より大きい。

6. まとめ

今回、フロートと流体の相互作用力の評価方法を導入した可動物体型波力発電装置の実機稼動を想定した力学モデルを提示した。水槽実験による力学モデルの検証の結果はワイヤの走行速度とワイヤ張力の積である仕事率において、一定の評価ができたが、ワイヤ張力、フロート上下動に関しては定量的な評価には至らなかった。

また、実海域に本システムを設置することを想定した装置諸元において、流体とフロートの相互作用力を考慮した場合と無視した場合の双方の共振周期を求めた。共振周期は流体力を考慮した場合の方が長いことがわかる。変位応答倍率 x_0/x_{stat} の最大値はフロートに作用する流体力を無視した場合の方が考慮した場合より大きい。この方法によって、種々の諸元に対して、装置の固有周期を算出することができる。

表-3 フロートおよび装置の諸元

フロート比重	ρ_f / ρ_w	0.9
フロート喫水率		0.6
フロート質量 (t)	M_f	19.085
フロート直径 (m)	d_f	3.000
フロート高さ (m)	l	3.000
カウンターウェイト質量 (t)	M_c	6.044
駆動プーリ半径 (m)	R_m	0.420
慣性モーメント ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	I	10.002
ギア比	G	14
誘導電圧係数 (V/rpm)	k_e	0.135
トルク定数 (Nm/A)	k_τ	1.284
負荷抵抗 (Ω)	r	0.260
水の密度 (kg/m^3)	ρ	1025
機械系の粘性減衰係数 ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$)	C'	567

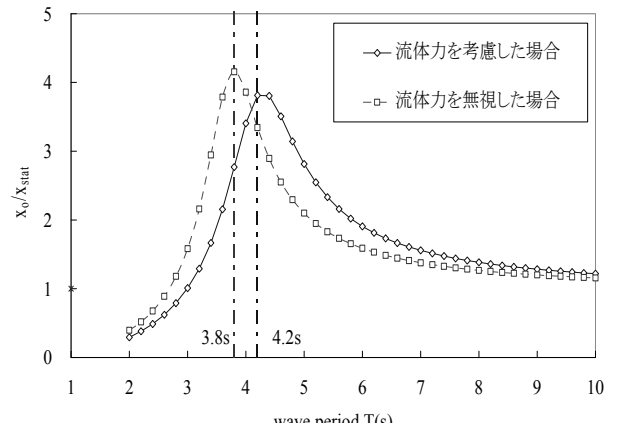


図-4 流体力考慮の有無による応答倍率の違い