浮体式波力発電装置の共振特性*

種浦圭輔^{*1}, 中野公彦^{*2}
Pallav KOIRALA^{*1}, 羽田野 袈裟義^{*1}On the Resonance Characteristics of the Float Type Wave Power
Generation DeviceKeisuke TANEURA^{*3}, Kimihiko NAKANO,
Pallav KOIRALA and Kesayoshi HADANO^{*3} Department of Civil Engineering, Yamaguchi University,
2-16-1 Tokiwadai, Ube-shi, Yamaguchi, 755-8611 Japan

This paper examines the resonance characteristics of the wave power generation device, which consists of pulley(s), wire(s), floats(s), counterweight(s) and ratchet mechanism. The resonance analysis model introduces the relative displacement between the water level and the float's position into the dynamics model for the system in operation. The equations of the natural frequency, the ratio of the frequency of water wave to that of the natural frequency, the damping ratio and magnification ratio have also been given. Moreover, the behaviors of the average occurred electric power and maximum wire tension have been examined for wave periods around the natural period of the system. The relationship between the natural period of the system and the float dimensions, especially the float's diameter/height ratio, has been examined. As an example, the annual average occurred electric power and energy conversion efficiency have been evaluated for the system with natural period near dominant wave period when it operates off Kobe port where the annual wave period varies in a relatively narrow range.

Key Words: Marine Structures, Ocean Engineering, Forced Vibration, Optimal Design, Alternative Energy

1. 結 言

化石燃料の枯渇や地球温暖化などの問題から新エネルギーの開発が切望されており、太陽光や風力や小型水力などの自然エネルギーの研究開発が鋭意進められている。自然エネルギーは1970年代のオイルショックを機に活発に研究されるようになった。その結果、風力や太陽光の直接利用については実用化されている。一方波力については賦存量が大きく安定性に優れている⁽¹⁾にも関わらず、未だ決定版がなく商業ベースに至っていない。特に日本では、波力が新エネルギーに指定されていないことなどのため実用化に至っていない。

しかし、2007年6月6日発行のNEDO海外レポート1001号の「潮力・波力発電の技術開発の最新動向」⁽²⁾によると、世界の波力発電技術の研究開発は盛んに行われている。英国では、Pelamis Wave Power社(旧Ocean

Power Delivery社, スコットランド)が2006年に商業規模のPelamis波力発電装置^{(3),(4)}を3基(1基750 kW)ポルトガルに出荷し、現在試運転段階であるとの報告がある。その仕組みは、ヒンジで繋がれた複数のシリンダ形状の浮体が蛇のように動き、隣り合うシリンダ間の相対運動を油圧エネルギーに変換するものである。またこの装置の運動は主に浮力(水面変位)によっておこり波の運動エネルギーにはあまり関係しないことから、共振現象を利用して効率的な運転が行われるように工夫されている。また、アイルランドのOcean Energy社は、OE Buoy⁽⁵⁾の技術開発を行っており、最大で2MWが見込まれる実物大の装置の試験が行われている。その原理は従来の振動水柱型波力発電装置と同様であるが、後ろ曲げダクト形状の船体であり、その船体の運動がダクト内の水の運動を水表面の運動に比べて増大するように工夫されている。

著者らはプリー・ワイヤ・フロート・カウンタウェイト・ラチェット機構から構成される浮体式波力エネルギー変換装置(可動物体型)⁽⁶⁾を開発中である。この方式は、柔構造であるワイヤの使用により可動物体

* 原稿受付 2009年4月20日。

^{*1} 山口大学大学院理工学研究科(☎755-8611 宇部市常盤台2-16-1)。^{*2} 正員, 東京大学生産技術研究所(☎153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)。

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

型の課題であった構造強度の問題の主要部分を解決している。またエネルギーを取り込む可動物体（フロート）と動力を変換・伝達する機械部分とを構造的に分離しており、設置や維持補修を容易にしている。

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する力学モデルを提示している⁽⁶⁾。このモデルは、発電機関連の力学、無負荷・静止状態のフロート・カウンタウェイトの釣合式、稼働状態のフロートの運動方程式、および回転体の力学から構成される。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。また、モデル計算により波の周期が装置の固有周期に近い場合に共振する状況が示唆された。この共振に関しては、Pelamisが浮体動揺の共振を利用した稼働を行う方式⁽³⁾を提案していることは前述のとおりである。

本研究では、著者らの波力発電システムについて、前報⁽⁶⁾と同様の力学モデルを用いて共振特性を検討する。簡単のため、ここでは抗力係数と仮想質量係数を無視して解析している。解析では、時々刻々のフロート位置と水との相対座標を用い、波の作用で稼働状態にあるフロートの上下動の振幅と波による水面上下動にともなうフロートの静的な上下動の振幅との比で共振現象を評価している。また実機を想定し、この比や発生電力などを波の周期と固有周期の関係で調べている。さらに特定のプロート比重に対して、フロートの高さ／直径比の効果を検討している。このほかモデル計算として、既往の波浪観測データを用いて、年間発生電力の評価を行っている。

2. 理論の構成

本システムのモデルを図1に示す。前述の通り力学モデルは、発電機関連の力学、無負荷・静止状態でのフロート・カウンタウェイトの釣合式、発電機稼働状態におけるフロートの運動方程式、回転体の運動方程式により構成される。ここでは、本装置稼働の力学モデルと共振特性の解析モデルを示す。

2・1 力学モデル⁽⁶⁾

2・1・1 発電機関連の力学 図1において、駆動プーリが発電機を時計方向にねじり反作用として、発電機が駆動プーリを反時計方向にねじりトルクを τ 、発電機に発生する電流を i 、発生電圧を e 、駆動プーリの反時計方向の回転角を θ とすると次式の関係が成り立つ。

$$\tau = -Gk_e i \quad (1)$$

$$e = Gk_e \frac{d\theta}{dt} \quad (2)$$

ここで、 G はギア比、 k_e はトルク係数、 k_e は誘導発電機係数である。また派生的な関係式として、 τ は式(3)、そして発生電力 P_G は式(4)により与えられる。

$$\tau = -\frac{G^2}{r} k_e \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

$$P_G = r \cdot i^2 = r \left(\frac{-Gk_e}{r} \frac{d\theta}{dt} \right)^2 \quad (4)$$

ここで、 r は負荷抵抗であり、この抵抗で消費される電力を可能発電量とする。また内部抵抗の影響は無視する。

2・1・2 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。

$$M_c g + \frac{1}{4} \pi D_f^2 \rho_w h g = M_f g \quad (5)$$

ここで ρ_w は海水の密度、 g は重力加速度である。

Fig. 1 Schematic figure of the system

2・1・3 稼働状態でのフロートの運動方程式 フロートの高さを H_f 、無負荷・静止状態からのフロートの上昇量を x_f 、水面の上昇量を x_w 、フロートをつるしたワイヤの張力を f_f として、フロート上下動の運動方程式は式(6)で与えられる。

$$\begin{aligned} M_f \frac{d^2 x_f}{dt^2} = & f_f + \frac{1}{4} \pi D_f^2 \rho_w (h + x_w - x_f) g - M_f g \\ & + \frac{1}{8} C_D \rho_w \left| \frac{dx_w}{dt} - \frac{dx_f}{dt} \right| \left(\frac{dx_w}{dt} - \frac{dx_f}{dt} \right) \pi D_f^2 \\ & - \frac{1}{4} C_M D_f^2 \rho_w (h + x_w - x_f) \frac{d^2 x_f}{dt^2} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで C_D と C_M はそれぞれ抗力係数と仮想質量係数である。なお、場合によってはフロートが宙吊り状態や全没水状態になるが、この装置稼働としてはフロートが一部没水を維持する状態が望ましくその状態での稼働を想定している。この場合についてのみ式を示している。また、以下ではこの場合のみを取り扱う。

2・1・4 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。

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + C \frac{d\theta}{dt} = \tau + (f_c - f_f) R_m \quad (7)$$

ここで、 I と C はそれぞれ回転系全体の回転慣性と機械系の摩擦による減衰を、駆動プーリの回転角加速度と回転角速度を用いて表現するための等価な慣性モーメントと減衰係数である。カウンタウェイトをつるしたワイヤの張力 f_c はカウンタウェイト上昇の加速度を考慮すると次式で与えられる。

$$f_c = M_c \left(g + \frac{d^2 x_c}{dt^2} \right) \quad (8)$$

2・1・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 を支配する式が次のように与えられる。

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{R_m} + (M_c + M_f) R_m + \frac{\rho_w \pi C_M D_f^2}{4} (h + x_w - R_m \theta) R_m \right) \frac{d^2 \theta}{dt^2} \\ & + \frac{1}{R_m} \left(C + \frac{G^2}{r} k_r k_e \right) \frac{d\theta}{dt} + \frac{\rho g \pi}{4} D_f^2 R_m \theta = \frac{\rho g \pi}{4} D_f^2 x_w \\ & + \frac{1}{8} C_D \rho_w \pi D_f^2 \left| \frac{dx_w}{dt} - R_m \frac{d\theta}{dt} \right| \left(\frac{dx_w}{dt} - R_m \frac{d\theta}{dt} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)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 $\dot{\theta}$ と $\ddot{\theta}$ が得られ、発生電力やワイヤ張力、トルク、フロート変位など力学諸量の時系列を求めることができる。抗力係数 C_D や仮想質量係数 C_M に関しては、羽田野ら⁽⁶⁾は、 C_D と C_M をゼロと置き、力学モデルによる計算結果の整合性を確認している。しかしMcCormick⁽⁷⁾によると、半没水している円柱フロートの場合の C_M が与えられている。よって、フロートの諸元から、まず C_M を求め、 C_D を任意に変化させ、フロート変位を比較することは可能である。その結果、本力学モデルにおいて、 C_D と C_M をゼロと置いた場合と、そうでない場合でもフロート変位はあまり大差がないことを確認している⁽⁸⁾。したがって、今回の共振特性の検討も羽田野らを参照して行う。なお、 $C_D \neq 0$ の場合は共振解析が煩雑になるが、 $C_M \neq 0$ の場合はさほど煩雑ではない⁽⁸⁾。

2・1・6 計算条件 最も基本的な波として正弦波を与え、初期時刻($t=0$)までは発電機との連結をクラッチ・オフの状態にフロートが水面波に追従し、 $t=0$ で瞬時にクラッチ・オンの状態になり、発電機が稼働する場合を計算する。この時水面変動は式(10)により、初期条件は式(11)により与えられる。

$$x_w = \frac{H}{2} \cos \left(\frac{2\pi}{T} t \right) \quad (10)$$

$$\theta(0) = \frac{H}{2R_m}, \quad \dot{\theta}(0) = 0 \quad (11)$$

2・2 共振特性の理論解析

2・2・1 共振特性の関係式 前述のように共振特性の解析は、抗力係数 C_D と仮想質量係数 C_M をともにゼロとおいて行う。この場合式(9)は次のようになる。

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{R_m} + (M_c + M_f) R_m \right) \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{1}{R_m} \left(C + \frac{G^2}{r} k_r k_e \right) \frac{d\theta}{dt} \\ & + \frac{\rho g \pi}{4} D_f^2 R_m \theta = \frac{\rho g \pi}{4} D_f^2 x_w \end{aligned} \quad (12)$$

この式は機械ロスとエネルギー変換を減衰項とする減衰振動の式であり、水面変動が強制項となっている⁽⁹⁾。駆動プーリの回転角に関する運動方程式であるが、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。その意味では、フロート上下動に関する式でもある。それはこの式が式(6)から得られていることを考えれば当然のことである。

このフロート上下動の共振を考える場合、通常の質点と異なり、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2に示す。質点が水面において作用している振動強制力の作用下で、水面と相対変位 z で運動している。この z により、ばねと類似の浮力が作用する。

Fig. 2 Model of the resonance analysis for the energy conversion system⁽⁹⁾

この設定で、質点の水位に対する相対変位は、式(13)により与えられる。

$$z = R_m \theta - x_w \quad (13)$$

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。

$$\theta = \frac{1}{R_m} (z + x_w) \quad (14)$$

式(12)に θ を代入し、さらに整理した後、式(10)を代入すると次式が得られる。

$$\left(\frac{I}{R_m^2} + (M_c + M_f) \right) \frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{1}{R_m^2} \left(C + \frac{G^2}{r} k_t k_e \right) \frac{dz}{dt} + \frac{\rho g \pi}{4} D_f^2 z = \left(\frac{I}{R_m^2} + (M_c + M_f) \right) \frac{H}{2} \omega^2 \cos \alpha t + \frac{\left(C + \frac{G^2}{r} k_t k_e \right) H}{R_m^2} \frac{\omega \sin \alpha t}{2} \quad (15)$$

上式右辺の三角関数を合成すると、

$$\left(\frac{I}{R_m^2} + (M_c + M_f) \right) \frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{1}{R_m^2} \left(C + \frac{G^2}{r} k_t k_e \right) \frac{dz}{dt} + \frac{\rho g \pi}{4} D_f^2 z = \sqrt{\left[\left(\frac{I}{R_m^2} + (M_c + M_f) \right) \frac{H}{2} \omega^2 \right]^2 + \left[\frac{H \alpha \left(C + \frac{G^2}{r} k_t k_e \right)}{2 R_m^2} \right]^2} \sin(\alpha t - \phi) \quad (16)$$

ここで、 ϕ は位相差である。この式を用いて、フロート上下動の共振特性を検討する。

2・2・2 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 $\zeta^{(10)}$ はそれぞれ次のように求められる。

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{\rho g \pi D_f^2}{4 \left\{ \frac{I}{R_m^2} + (M_c + M_f) \right\}}} \quad (17)$$

$$\zeta = \frac{C'}{2\sqrt{mk}} = \frac{\left(C + \frac{G^2}{r} k_t k_e \right)}{2 \sqrt{\left(\frac{I}{R_m^2} + (M_c + M_f) \right) R_m^4 \frac{\rho g \pi D_f^2}{4}}} \quad (18)$$

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 に対して静的に上下動するときのフロートの変位振幅 $x_{stat}(=F_0/k)$ 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⁽¹⁰⁾である。

3. 数値的検討

3・1 共振の基本的な性質 共振の基本的性質を調べるために、フロート上下動の応答倍率と発生電力、

そして最大ワイヤ張力と波の周期の関係を調べた。装置の諸元は、共振が存在する減衰比 $\zeta \leq 0.707^{(10)}$ になるように実機を想定し、表1のように設定した。つまり、駆動プーリを大きくし、発電機の諸元は羽田野ら⁽⁶⁾が評価した発電機と同様のものを想定し、ギア比を小さくした。表1中の“Initial submergence ratio”はフロートとカウンタウェイトが無負荷・静止状態でつりあっているときのフロート喫水率であり、本論文では“基準喫水率”と呼ぶことにする。

Table 1 Calculation condition

Float		Driving pulley	
Specific weight	0.9	Mass (kg)	113.4
Mass (t)	19.9	Radius (m)	0.42
Initial submergence ratio	0.6	Generator	
Diameter (m)	3	Gear ratio	10
Height (m)	3	Voltage constant (V/rpm)	0.135
Counterweight		Torque constant (Nm/A)	1.284
Mass (t)	6.04	Load resistance (Ω)	0.26

3・1・1 フロート変位による検討 図3は応答倍率を縦軸に、波の周期を横軸にとった周波数応答⁽⁹⁾である。表1の諸元に対して、式(17)、(18)からシステムの不減衰固有角振動数は $\omega_n = 1.57$ (rad/s)、減衰比は $\zeta = 0.086$ となった。また不減衰固有角振動数を周期に換算すると3.99秒となる。図より、波の周期3.44秒~4.08秒の範囲で応答倍率が3.0以上の値を示しており、この範囲で共振の状態がうかがえる。なお、この図には波高の効果が表れない。

Fig. 3 Relation between x_0/x_{stat} and T for the case of $\omega_n = 1.57$ (rad/s)

3・1・2 発生電力と最大ワイヤ張力による検討

次に、表1の装置を波高0.3mの条件で移動する場合について、平均発生電力と最大ワイヤ張力と波の周期 T との関係を調べた。その結果が図4に示されている。図の左の縦軸は本システムの平均発生電力 P_G (kW)、右の縦軸は最大ワイヤ張力 f_f (kN)を示す。図より、共振周期に近い波の周期3.38~4.14秒で、1.5kW以上を示しており、共振がエネルギー利得に有利であることを示している。最大ワイヤ張力についても、共振周期に近い周期の波で最大ワイヤ張力が大きい、他の波周期帯での値との相対的な大きさは発生電力のそれに比べて小さい。また、2~3秒程度の波の周期の領域で、データの分布曲線に屈曲点が見られる。これについては今後より詳細に検討する必要がある。

Fig. 4 Relation between averaged value P_G , maximum value of f_f and wave period T for the device of Table 1 with $H=0.3$ m

3・2 フロート諸元と固有周期の関係

次にフロート諸元により、固有周期 T_n (s)がどのように変化するか調べる。ここでは円筒型フロートを想定し、フロート直径 D_f 、高さ H_f 、フロート比重、フロートの“基準喫水率”の効果に注目する。前述のように、この喫水率は無負荷・静止状態のフロート・カウンタウェイトの釣合状態の喫水率である。

図5は、表1の機械諸元を有する装置について、フロート質量を14t以下の条件で、フロート比重0.9, 1.0, 1.1, 基準喫水率0.6, 0.7, 0.8, 0.9の組に対して、システムの固有周期 T_n とフロートの形状比 D_f/H_f との関係を示したものである。このフロート比重と喫水率の設定では、フロートの形状比 D_f/H_f が T_n に対して決定的なファクターになることが分かる。図5の関係は、いずれのフロート比重と喫水率の組み合わせに対しても次の式で近似される。

$$T_n = \alpha (D_f / H_f)^{-1/3} \quad (20)$$

ここで α は3.1~3.8程度の値であり、フロート比重と基準喫水率によって変化する。 T_n が式(20)で表現される事情を検討する。式(17)より、 T_n は D_f に反比例する。またフロート質量と密度が一定であることから、 $D_f^2 \times H_f = \text{一定}$ となり、 D_f / H_f は D_f の3乗に比例する。すなわち、 D_f は D_f / H_f の1/3乗に比例する。よって、 T_n は D_f / H_f の1/3乗に反比例することからも分かる。

(a) Float's specific weight 0.9

(b) Float's specific weight 1.0

(c) Float's specific weight 1.1

Fig. 5 Relation between T_n (s) of the system and D_f/H_f ratio of the float for the device of Table 1

ゆえに、波の周期があまり変化しない海域では、システムの固有周期 T_n (s) が卓越周期に近くなるようにフロート諸元 (形状比, 比重, 喫水率) を設定すれば, 共振を利用した効率的なエネルギー変換が可能となる。

3・3 計算例 ここで、兵庫県神戸港沖に本システムを設置すると想定し、神戸港沖の卓越波の周期とシステムの固有周期とが一致する状態で稼働することを考え、その場合のフロート諸元を求めるとともに、種々の装置固有周期 (フロート形状比 D_f/H_f) について想定される年間平均の発生電力とエネルギー変換効率を試算した。

3・3・1 神戸港沖の波浪データ 表2は、(独) 港湾空港技術研究所のナウファス⁽¹¹⁾による神戸港沖の年間の波高と周期の発生分布を示す。観測回数は4345回行われており、波高と周期とも30分の平均値である。波浪観測点は北緯 $34^{\circ}38'50''$ 、東経 $135^{\circ}16'36''$ の海域で水深17mの地点である。水深は水表面から海底面までの距離の平均値より主要4分潮の振幅の和を減じた値である。表中の波高と周期の範囲を示すセル内の数値は、度数分布を%で示している。この観測点の年間平均の波高 H は0.21m, 周期 T は2.95秒である。同様の表を日本海側の海岸や太平洋側の外洋に面した観測点について求めたものと比較すると、周期が比較的狭い範囲に集中している。表3は、表2と同様の波高と周期の階級別の波パワーを示す。なお、表中の値は表2の元データを使って個々の波について波パワーを求め、同表の階級ごとに平均している。

Table 2 Relative occurrence frequency (%) of H & T combination of the wave off Kobe port

								unit: %
$\frac{H(m)}{T(s)}$	~2.0	2.1~3.0	3.1~4.0	4.1~5.0	5.1~6.0	6.1~7.0	7.1~8.0	
1.75~1.99								
1.50~1.74					0.02			
1.25~1.49				0.05				
1.00~1.24				0.05	0.02			
0.75~0.99			0.23	0.21				
0.50~0.74			1.93	0.02				
0.25~0.49		9.30	7.94	0.41	0.07	0.05		
0.00~0.24		61.01	18.23	0.39	0.07			

3・3・2 神戸港沖で稼働する場合の D_f/H_f の決定

ここで、装置を神戸港沖で稼働する場合に有利なフロート形状比 D_f/H_f を求める。まず、この水域の年間平均の波の周期が2.95秒と考える。装置の稼働はフロートが一部没水を維持する条件で行うことが望ましいことを考慮して⁽⁶⁾、フロート比重を0.9、基準喫水率を

0.7とした。この場合、図5より式(20)の $\alpha=3.3$ となり、フロート形状比は $D_f/H_f=1.4$ となる。

3・3・3 神戸港の年間平均の発生電力とエネルギー変換効率

次に前と同様に、フロート比重0.9、基準喫水率0.7の場合について、フロート質量14.5t (フロート体積16.1m³; カウンタウェイト質量2.9t) として、種々のフロート形状比 D_f/H_f について、神戸港沖で稼働する場合の年間平均の発生電力 P_G とエネルギー変換効率 E (%)を算定した。エネルギー変換効率 E は波エネルギーに対する発生電力の比として表わされる。

$$E = \frac{P_G}{\frac{1}{8} \rho_w g H^2 \cdot C_g} \times 100 \quad (21)$$

ここで、 C_g は群速度⁽¹²⁾である。図6はその結果を示したものである。また表4は上記の条件下のフロート形状比と直径と高さを表す。表5は表3の波高と周期の階級に対応して、装置の発生電力を示す。したがって、図6は表5に波の発生頻度の重みをつけて合計して表したものになる。

図より、発生電力はフロート形状比 D_f/H_f が1.4あたりで4.7kWの最大値を示すことが分かる。このことは前節で述べた形状比 D_f/H_f が発生電力の点で妥当であることを示している。またエネルギー変換効率について同様にまとめると、フロート形状比 D_f/H_f が1.0あたりで60%程度のエネルギー変換効率となることが分かる。

Table 3 Wave power (kW/m) for various values of H and T corresponding to Table 2 with the device with dimension indicated in Table 1

$H(m)$	$T(s)$	~2.0	2.1~3.0	3.1~4.0	4.1~5.0	5.1~6.0	6.1~7.0	7.1~8.0
1.75~1.99								
1.50~1.74						11.71		
1.25~1.49					9.32			
1.00~1.24					4.47	6.73		
0.75~0.99				2.50	3.13			
0.50~0.74				1.21	2.36			
0.25~0.49			0.26	0.40	0.48	0.45	0.73	
0.00~0.24			0.08	0.11	0.18	0.21		

Table 4 D_f and H_f value for various values of D_f/H_f ratio for float with dimension indicated in Table 1;

$$M_f=14.5\text{ton and } M_f/(\pi D_f^2 H_f/4)=0.9$$

D_f/H_f	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
D_f (m)	2.2	2.7	3.1	3.5	3.7	3.9	4.2	4.4
H_f (m)	4.4	2.7	2.1	1.7	1.5	1.3	1.2	1.1

Fig. 6 Relation between the annually averaged P_G or conversion efficiency defined by Eq.(20) and D_f/H_f for the device with dimension indicated in Table 1

Table 5 P_G value for values of H and T corresponding to Table 2 used to make Fig.6

		unit: kW						
$H(m)$	$T(s)$	~2.0	2.1~3.0	3.1~4.0	4.1~5.0	5.1~6.0	6.1~7.0	7.1~8.0
1.75~1.99								
1.50~1.74						12.97		
1.25~1.49					12.05			
1.00~1.24					11.41	7.46		
0.75~0.99				9.27	8.13			
0.50~0.74				6.08	5.20			
0.25~0.49			1.74	2.34	1.06	0.41	0.26	
0.00~0.24			0.50	0.65	0.42	0.14		

4. 結語

以上、プーリ・ワイヤ・フロート・カウンタウェイト・ラチェット機構を組み合わせた浮体式構成の波力発電装置の共振特性を理論的に検討し、特にフロート諸元に注目し、共振現象との関係について検討した。

本論文の内容を要約すると次のようである。

- (1) 力学検討により、本装置の不減衰固有角振動数を得た。
- (2) 特定の装置に対して、時間平均の発生電力と一周期間の最大ワイヤ張力は波の周期によって変化するが、これらの値は波の周期とシステムの固有周期が一致する時ともに最大となる。
- (3) 装置の固有周期は、フロートの形状比 D_f/H_f によって系統的に変化する。
- (4) この解析を神戸港沖の波浪データに適用し、年間平均波高 0.21m, 周期 2.95 秒に対し、年間平均の発生電力 4.7kW, エネルギー変換効率 60%程度が可能であることを推定した。

なお、本研究は、海岸構造物前面または大型浮体の外周部で本装置を稼働する場合、フロートが構造物に

接触することを避けるために、これらの前面に設けた遊水室内で稼働する⁽¹³⁾ことを想定して検討している。

謝 辞

著者らの一連の波力発電研究において、(株)青木建設、(株)きんでん、(財)やまぐち産業振興財団、(財)中国技術振興センター、藤井物産(株)科学技術振興事業団(現科学技術振興機構)、中小企業総合事業団(現中小企業基盤整備機構)、佐賀大学、日本文理大学よりご協力、ご支援を賜った。また、山口大学羽田野研究室の卒研生、高橋真、前田功清の諸氏にはデータ整理でご協力を頂いた。ここに記して深甚の謝意を表します。

文 献

- (1) Takahashi.S. and Adachi,T., Wave Power around Japan from a viewpoint of its utilization, *Technical Note of the Port and Harbor Research Institute*, Ministry of Transport, Japan, No.0654 (1989), pp3-18.
- (2) New Energy and Industrial Technology Development Organization. "NEDO Report No.1001 2007.6.6" (online), available from <<http://www.nedo.go.jp/kankobutsu/report/1001/1001-01.pdf>>, (accessed 2008-06-15)
- (3) Previsic, M., Bedard, R., and Hagerman, G., Offshore Wave Energy Conversion Devices, *Electric Power Research Institute (EPRI) Report No. WP-004-US*, Palo Alto (USA), (2004), pp.26-130.
- (4) Watabe,T. and Kondo,S., Wave Power Generation <from principle to application> (in Japanese), (2005), pp.99-102, Power Ltd.
- (5) Ocean Energy a world of power. "OE Technology" (online), available from <<http://www.oceanenergy.ie/index.html>>, (accessed 2008-03-17).
- (6) Hadano,K., Taneura,K., Watanabe,M., Nakano,K., Saito,T. and Matsuura,M., On the Dynamics of the Float Type Wave Energy Conversion, *Journal of the Japan Society of Civil Engineers*, Series B, Vol.62, No.3 (2006), pp.270-283
- (7) McCormick,M.E., Ocean Wave Energy Conversion, (2007), pp48-49, Dover Publications.
- (8) Hadano,K., Koirala,P., Nakano,K. and Ikegami,K., Refined Model for Float Type Energy Conversion Device, *Proc 17th International Offshore and Polar Engineers. Conf.*, Lisbon (2007), pp 421-427, CD-ROM.
- (9) Kunieda,M., Practical use, Mechanical Vibration (in Japanese), (1999), pp.19-50, Rikogakusha Publishing Co., Ltd.
- (10) Kotsubo,S., A Guide of Construction Vibration (in Japanese), (1995), pp.38-43, Morikita Ltd.
- (11) Port and Airport Research Institute, Marine Information Group. "NOWPHAS" (online), available from <<http://www.pari.go.jp/bsh/ky-skb/kaisho/>>, (accessed 2007-10-30).
- (12) Gouda,Y. and Sato,S., The Coast and Harbor, (in Japanese), (1994), p42, Shokoku. Ltd.
- (13) Nakamura,T., Jinno,M., Nishikawa, Y. and Onozuka, T., Reflection Wave Attenuator of Vertical Barrier Type by the Use of Vortex Flow Enhancement, *Proceedings of Coastal Engineering, Journal of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.46 (1999), pp796-800.