

浮体式波力エネルギー変換の力学

羽田野 袈裟義¹・種浦 圭輔²・渡邊 誠²・中野 公彦³・斉藤 俊⁴・松浦 正己⁵

¹フェロー会員 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail : khadano@yamaguchi-u.ac.jp

²学生会員 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)

³山口大学助教授 工学部機械工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

⁴山口大学教授 工学部機械工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

⁵三菱重工業(株)長崎研究所 主席研究員 (〒851-0392 長崎市深堀町 5-717-1)

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つるべ式構成の波力エネルギー変換システムの力学モデルを提示している。計算では、フロートの喫水状態を時々刻々調べ、フロートの一部没水、全没水及び宙吊りに応じて計算式を使い分けている。また、水槽実験により力学モデルの検証を行い、フロートがローリングを起こさない場合にはエネルギー利得の実験と計算が良好に一致することを確認した。次いで、実稼動を想定して諸量の計算を行い、フロートの喫水状態により発電量、ワイヤ張力などの力学量の時系列変化に違いが出ることを明らかにすると共に、種々の波高と周期の組合せに対してエネルギー利得の評価を試みている。

Key Words : *wave energy utilization, movable body-type, wire-float-counterweight, wire tensile force, mechanical dynamics model*

1. はじめに

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^{1)・2)}、あるいは天然ガスや燃料電池など種々の新エネルギーの研究開発が鋭意進められている。自然エネルギーは不安定で人間のコントロール下におくことが難しく、このことが実用化への大きな障害になっている。それでもグリーン制度の導入など、自然エネルギー利用の社会環境が次第に整備され、自然エネルギーの開発には追い風が吹いている。

自然エネルギーは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が進み前述のように電力会社がこれを優先的に買い取る仕組みができた。一方、波力については活発な研究開発にも拘らず、コストと耐久性を両立する方法が確立されていない。しかし、波力は太陽光の直接利用や風力に比べて安定性などの面で大変有利である。これは、海の波が風により発生して風のない海域までエネルギーを輸送すること、風は絶えず何処かの海域で吹いていること、そして水の密度が空気に比べて遥かに大きいことなどによる。また、日本海側では暖房用エネルギーの需要期に波エネルギーが大きく^{3)・4)}、タイムリーに優れた魅力的なエネルギーである。欧米や豪州で

最近再び精力的な取組みが行なわれている（例えばYahoo「波力エネルギー」）のに対し、海洋国の日本で取組みが低調なことは大変残念である。日本の海岸には平均して約3500万kW（1990年時点での日本の総発電量の約1/3）の波エネルギーが供給されている^{3)・4)}ことを考えると、一刻も早い波力エネルギー利用の実用化が望まれる。

波力エネルギー変換技術の主要な方式は振動水柱型と可動物体型である^{4)~7)}。振動水柱型は、空気室をもち、波により空気室内に水面変動と圧力変動をつくって空気室内外の圧力差によりタービンを回して発電する。この方式は可動物をもたないため構造強度上の問題は少ないが、コスト特に空気室のコストがネックとなっている。可動物体型は、水面近くに置かれた物体が波の作用により運動することを動力として取り込むが、構造強度の問題が指摘されている。

著者らは、プーリ・ワイヤ・フロート・カウンタウェイト・ラチェット機構から構成される、つるべ式の波力エネルギー変換装置⁸⁾を開発中である。この方式は、可動物体型に属するが、ワイヤの使用によりエネルギーを取り込む可動物と動力を変換・伝達する機械部分とを構造的に分離しており、フレキシブルなワイヤの張力だけで動力を伝達する部分を有する。このため、構造強度上の主要な問題を解決すると共に設置や維持管理を格段

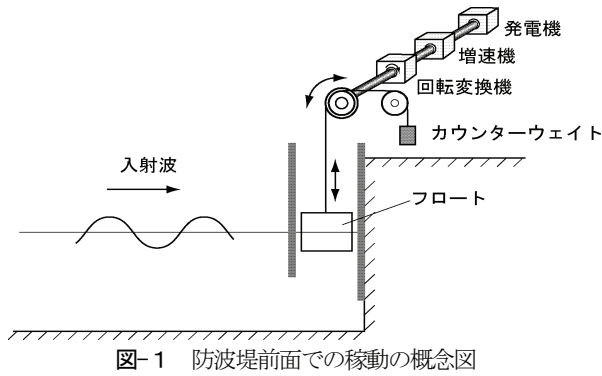


図-1 防波堤前面での移動の概念図

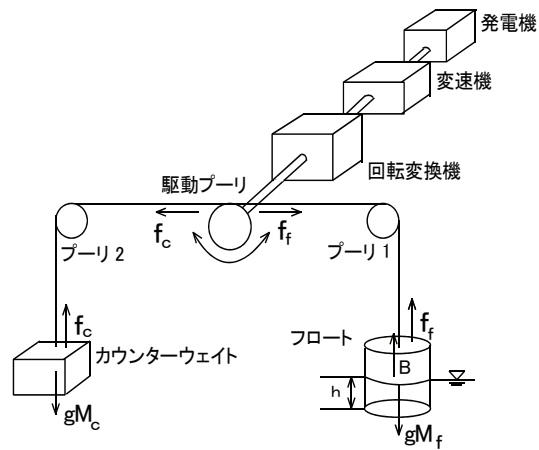


図-2 動力変換の全体のシステム

に容易にしている。また、このつるべ式構成の波力エネルギー変換要素を複数連結させると、ラチェット機構の作用により個々のフロート・カウンターウェイトの組は水面波により不揃いな上下運動をしながら協力して発電機を回すことになる。これは3人漕ぎの自転車と同じような理屈である。本方式は、構造が簡単で既設構造物への設置や維持管理が容易なため、低コストが見込まれる。また、主要な web サイトに紹介されており、注目度の高いシステムであると理解している。

本方式を図-1のように防波堤の前面^{9)~14)}や大型浮体の外周部¹⁵⁾に配置した遊水室内に設置すれば実用化が可能と見られている。また、上部が開口のスリット式ケーソン防波堤が数多く設置されており、この形式の防波堤の遊水室で本方式の装置を稼動すれば低コストですみ、実用化は時間の問題と見られている。

本方式のシステムに対して斉藤らは機械力学モデルによる発生電力の検討を行っている¹⁶⁾。しかしながら、その検討では個々の構成要素の力学に主眼が置かれ、また実機の見積もりも不十分であった。大木¹⁷⁾や羽田野ら¹⁸⁾は装置の全体構成に主眼を置いたモデルを示した。しかしながら、エネルギー利得が水面変動と同一の振動数をもつ正弦関数であるとの仮定に基づいており、諸量の時系列を求めることは不可能であった。

本研究では、斉藤らと同様の基礎式の構成とし、フロートの喫水状態を反映して諸量の時系列を表現する計算モデルを示し、実験水槽で行った大型模型実験の結果を用いてモデルの検証を行なうと共に、実稼動を想定して主要な力学量の評価を行なっている。特に、フロートの喫水状態の効果に重点を置いて検討している。本研究はその一部を文献²⁰⁾に発表しているが、本研究では水槽実験により計算モデルの検証を行なっている。

2. 機械力学モデルとその計算方法

(1) 機械力学モデル

本システムの構成を図-2に示す。機械力学モデルは、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り合い式、発電機稼動状態におけるフロート・駆動プーリー間の動力学により構成される。なお、本システムを図-1に示すような防波堤前面や大型浮体外周部に設けた遊水室内の水面上下動を利用して稼動することを想定しているため、浮体に作用する水平方向の流体力は考えない。

計算は、フロートとカウンターウェイトの慣性を考慮し、時々刻々フロートの喫水状態（一部没水状態、宙吊り状態、全没水状態）を場合分けして行った。計算は水面下降時のみエネルギー変換する場合について行なう。特に、フロートの喫水状態の差異が発電状態およびワイヤ張力など力学諸量の変動に及ぼす効果を重点的に検討している。

a) 発電機関連の力学

発電機が駆動プーリーに及ぼす反時計方向のトルクを τ 、発電機に発生する電流を i 、発生電圧を e 、駆動プーリーの反時計方向の回転角を θ とすると、次式で与えられる。

$$\tau = -Gk_t i \tag{1}$$

$$e = Gk_e \dot{\theta} \tag{2}$$

ここで、 G はギア比、 k_t はトルク係数、 k_e は誘導発電係数である。また、水面下降時にのみ発電する場合、水面下降時には式(1)と(2)は $\tau > 0$ 、 $e = Gk_e \cdot \dot{\theta}$ となり、水面上昇時にはそれぞれ $\tau = 0$ 、 $e = 0$ となる。

b) 無負荷・静止状態での釣り合い

本方式は、フロートの喫水状態がフロートとカウンターウェイトの釣り合い状態から相違する分がエネルギー変換の動力となる。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 、この時のフロートの喫水深を h とおくと、次式が得られる。

$$M_c g + \frac{1}{4} \pi d_f^2 \rho_w h g = M_f g \tag{3}$$

ここで、 ρ_w は海水の密度、 g は重力加速度である。

c) 稼動状態でのフロートの運動方程式

フロートの高さを H_f , 静止無負荷状態からのフロートの上昇量を x_f , 水面上昇量 x_w , フロートに連結されたワイヤ張力を f_f とすると, フロートの運動方程式は式(4)で与えられる. 前述のように, 時々刻々フロートが一部没水 ($0 \leq h + x_w - x_f \leq H_f$) , 全没水 ($h + x_w - x_f > H_f$) , および宙吊り ($h + x_w - x_f < 0$) の3形態のいずれであるかにより場合分けし, 対応する式を採用する.

なお, 本システムを図-1に示すように遊水室内の水面上下動を利用して稼動する場合, フロートと水との間で, フロートと水との相対速度に起因する力と, フロートや水の加速度運動に起因する力が及ぼしあう. 前者はふつう相対速度の二乗に比例するとして現され, 後者は物体が押しつけた水の質量と物体の加速度に比例するとして現される.

以上を考慮したフロート上下動に関する式は, 抗力係数 C_D および仮想質量係数 C_M を用いて式(4)のように与えられる.

(i) フロートが一部没水状態の時

$$M_f \frac{d^2 x_f}{dt^2} = f_f + \frac{1}{4} \pi d_f^2 \rho_w (h + x_w - x_f) g - M_f g + \frac{1}{8} C_D \rho_w \times \left[\frac{dx_w}{dt} - \frac{dx_f}{dt} \left(\frac{dx_w}{dt} - \frac{dx_f}{dt} \right) \right] \pi d_f^2 - \frac{1}{4} C_M d_f^2 \rho_w (h + x_w - x_f) \frac{d^2 x_f}{dt^2} \quad (4a)$$

上式の右辺の第1項はワイヤ張力, 第2項はフロートに作用する浮力, 第3項はフロートに作用する重力, 第4項は水とフロートの相対運動によりフロートが受ける力, そして第5項はフロートや水の加速度運動に伴う慣性力としてフロートが受ける上向きの力を示す.

(ii) フロートが全没水状態の時

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

この式の右辺の意味は式(4a)と同様である.

(iii) フロートが宙吊り状態の時

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

d) 回転体の運動方程式

駆動プーリの無負荷・静止状態からの回転角を θ とすると,

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

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.

また, フロート下降時のみ発電機を稼動させる場合は, 式(5)は常に $\tau \geq 0$ になる. カウンタウェイト側の張力 f_c は, カウンタウェイト上昇の加速度 \ddot{x}_c を考慮すると次式のように与えられる.

$$f_c = M_c (g + \ddot{x}_c) \quad (6)$$

(2) 計算式の誘導

以上で得られた基礎式を組み合わせ, 駆動プーリの回転角を支配する式を導き, これを解くことにより諸量の時系列を求める方法を示す.

a) ワイヤ張力の消去

式(4)と式(5)よりワイヤ張力 f_f を消去する.

(i) フロートが一部没水状態の時

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} + C \frac{d\theta}{dt} = \tau + f_c R_m + \left(\frac{\rho g \pi}{4} d_f^2 (h + x_w - x_f) - M_f g - M_f \frac{d^2 x_f}{dt^2} \right) R_m + \left(\frac{1}{8} C_D \rho_w \left[\frac{dx_w}{dt} - \frac{dx_f}{dt} \left(\frac{dx_w}{dt} - \frac{dx_f}{dt} \right) \right] \pi d_f^2 - \frac{1}{4} C_M d_f^2 \rho_w (h + x_w - x_f) \frac{d^2 x_f}{dt^2} \right) R_m \quad (7a)$$

(ii) フロートが全没水状態の時

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} + C \frac{d\theta}{dt} = \tau + f_c R_m + \left(\frac{\rho g \pi}{4} d_f^2 H_f - M_f g - M_f \frac{d^2 x_f}{dt^2} \right) R_m + \left(\frac{1}{8} C_D \rho_w \left[\frac{dx_w}{dt} - \frac{dx_f}{dt} \left(\frac{dx_w}{dt} - \frac{dx_f}{dt} \right) \right] \pi d_f^2 - \frac{1}{4} C_M d_f^2 \rho_w H_f \frac{d^2 x_f}{dt^2} \right) R_m \quad (7b)$$

(iii) フロートが宙吊り状態の時

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} + C \frac{d\theta}{dt} = \tau + f_c R_m - \left(M_f g + M_f \frac{d^2 x_f}{dt^2} \right) R_m \quad (7c)$$

ここで, フロート上昇量は次式で表される.

$$x_f = R_m \theta \quad (8)$$

これを用いて, 式(7)中の x_f を θ で表現する.

b) 発電機諸量との結合

式(1), (2)と $e = i \cdot r$ より, トルク τ は次式のように表される.

$$\tau = -\frac{G^2}{r} k_r k_e \frac{d\theta}{dt} \quad (9)$$

ここで, r は内部抵抗である. 式(9)を式(7)に代入すると, 最終的に θ の支配方程式を得る.

(i) フロートが一部没水状態の時

$$\left(\frac{1}{R_m} + (M_f + M_c) R_m + \frac{\rho_w \pi C_M d_f^2}{4} (h + x_w - R_m \theta) R_m \right) \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{1}{R_m} \left(C + \frac{G^2 k_r k_e}{r} \right) \frac{d\theta}{dt} + \frac{\rho g \pi}{4} d_f^2 R_m \theta = \frac{\rho g \pi}{4} d_f^2 x_w$$

$$+\frac{1}{8}\rho_w\pi C_D d_f^2 \left| \frac{dx_w}{dt} - R_m \frac{d\theta}{dt} \right| \left(\frac{dx_w}{dt} - R_m \frac{d\theta}{dt} \right) \quad (10a)$$

(ii) フロートが全没水状態の時

$$\left(\frac{I}{R_m} + (M_c + M_f)R_m^2 + \frac{\rho_w\pi C_M d_f^2 H_f}{4} R_m \right) \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{1}{R_m} \cdot \left(C + \frac{G^2}{r} k_i k_e \right) \frac{d\theta}{dt} = \frac{\rho g \pi}{4} d_f^2 H_f + (M_c - M_f)g + \frac{1}{8}\rho_w\pi C_D d_f^2 \left| \frac{dx_w}{dt} - R_m \frac{d\theta}{dt} \right| \left(\frac{dx_w}{dt} - R_m \frac{d\theta}{dt} \right) \quad (10b)$$

(iii) フロートが宙吊り状態の時

$$\left(\frac{I}{R_m} + (M_c + M_f)R_m \right) \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{1}{R_m} \cdot \left(C + \frac{G^2}{r} k_i k_e \right) \frac{d\theta}{dt} = (M_c - M_f)g \quad (10c)$$

これら式(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 $\dot{\theta}$ や $\ddot{\theta}$ 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。発生電力は、

$$P_G = r \cdot i^2 = r \left(\frac{-Gk_e}{r} \dot{\theta} \right)^2 \quad (11)$$

で与えられる。

抗力係数 C_D や仮想質量係数 C_M に関しては、円柱周りの振動流などの問題について詳細な検討が加えられ、これらがレイノルズ数やKC数の関数となることが明らかにされている¹⁹⁾。しかしながら、ここで対象とする問題では、フロートが水面の表面近くに一部没水状態または少しのかぶりで水没した状態で運動し、既往の研究と問題設定が異なるので、流体力係数 C_D と C_M のレイノルズ数やKC数への依存関係に関する既往の知見を利用することは適当でない。そのため、以下では基本問題として、水とフロートの相対運動による相互作用力を無視して計算する。すなわち、水の上下動は単にフロートに位置エネルギーを与えるだけの作用をするものとして取り扱い、式中の C_D と C_M をゼロとおいた場合の計算を行う。

c) 初期条件

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、発電機が稼動するものとする。代表的な初期時刻として、水面が最高位、最低位、ゼロアップクロス、ゼロダウンクロスの4つが考えられるが、水面下降時のみ発電する構成では、最低位やゼロアップクロス時を初期時刻とすると、水面が下降を始めるまでは発電ゼロが続き力学の問題として妙味に欠ける。そこでこれ以外の初期条件が適切である。また定常な水面波で発電機の稼

動を開始するとき、解は初期の過渡的なものから定常的なものへと変化していく。ここでは、水面最高時を初期時刻とする場合について計算を行った。この場合、水面変動は式(12)、初期条件は式(13)となる。

$$x_w = \frac{H}{2} \cos \left(\frac{2\pi}{T} t \right) \quad (12)$$

$$\theta(0) = \frac{H}{2R_m}, \quad \dot{\theta}(0) = 0 \quad (13)$$

3. 水槽実験による検証

(1) 実験装置と方法

前章で示した機械力学モデルを検証するため、大型模型装置を製作して水槽実験を行なった。実験は、三菱重工業(株)長崎研究所の耐航性能試験水槽(平均水深3.2m、幅30m、長さ160m)で行った。実験に用いた水槽を図-3に示す。実験は、図の多方向造波装置の対岸の消波装置を設置した場所に装置を据えて水槽の中にフロートを浮かべ、波がフロートに直接作用する状態で行った。図の水色の部分が水を張った部分で、実験は図中水色の右端の消波装置の前方に張り出した架台の上に波力エネルギー変換装置を設置して行なった。図-4と5は水槽の架台に波力エネルギー変換装置を据えつけた状態を示す。図-4の下が側面図で上が平面図である。フロートを支える張り出し部を支柱で支えている。

4組のフロート・カウンタウェイトを連結した波力装置の全景を図-6に示す。装置はフロート・カウンタウェイトを任意の組数とすることができ、実験では2組のモデルを用い、駆動プーリにワイヤを数回巻きかけて図の右手の水面に浮かべたフロートに連結している。各駆動プーリに隣接するドラム状のものはラチェット機構を内蔵する遊星歯車であり、一本の出力軸に連結されている。この構成により、不揃いに上下動する複数のフロート・カウンタウェイトの組から水面変動の動力を取り出し、協力して出力軸を回すようになっている。これは、ラチェット機構のなせる業である。この装置では、出力軸の回転はどの位置でも同一速度であり、後段に行くほどトルクが加算される仕組みである。また、この構成では水面が上昇する時も下降する時もエネルギー変換することができる。しかし、水面上昇時と下降時では駆動トルクが異なり、駆動トルクがエネルギー変換に要するトルクに比べて小さいと、ワイヤがたるむ事態がおこり危険である。このため、水面が下降するときのみエネルギー変換を行なうようにラチェット機構の利かせ方を変更している。また、連結の最後段の部分でむき出しの歯車を使って増速している。

水槽内に発生させる波浪は、造波機の能力の制約から、周期/波高の組み合わせとして、1.8秒/0.32m、

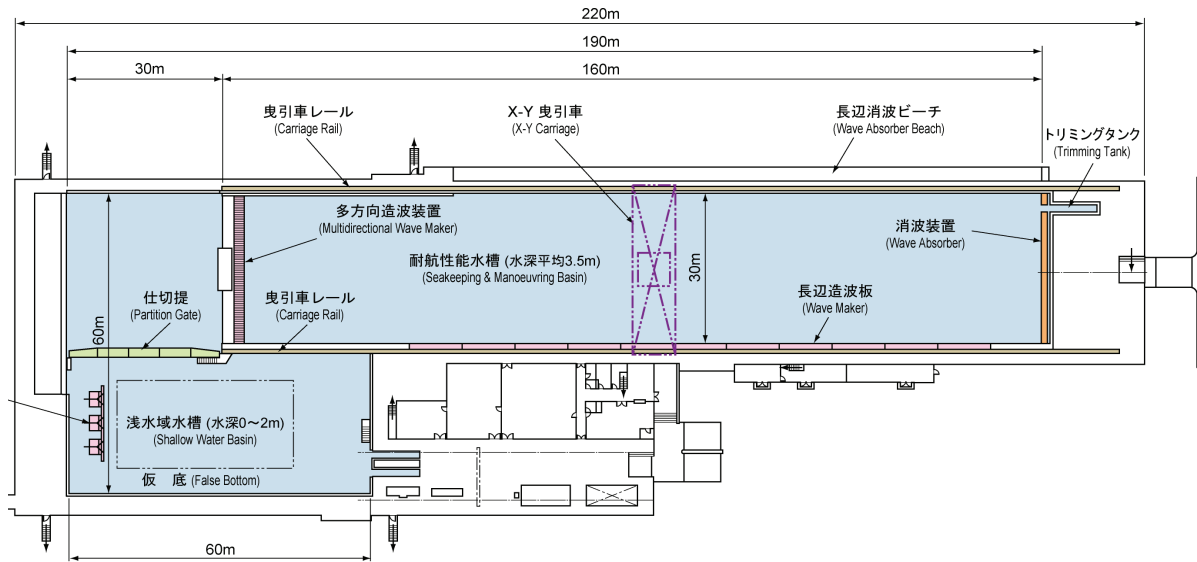


図-3 実験に用いた水槽の平面図

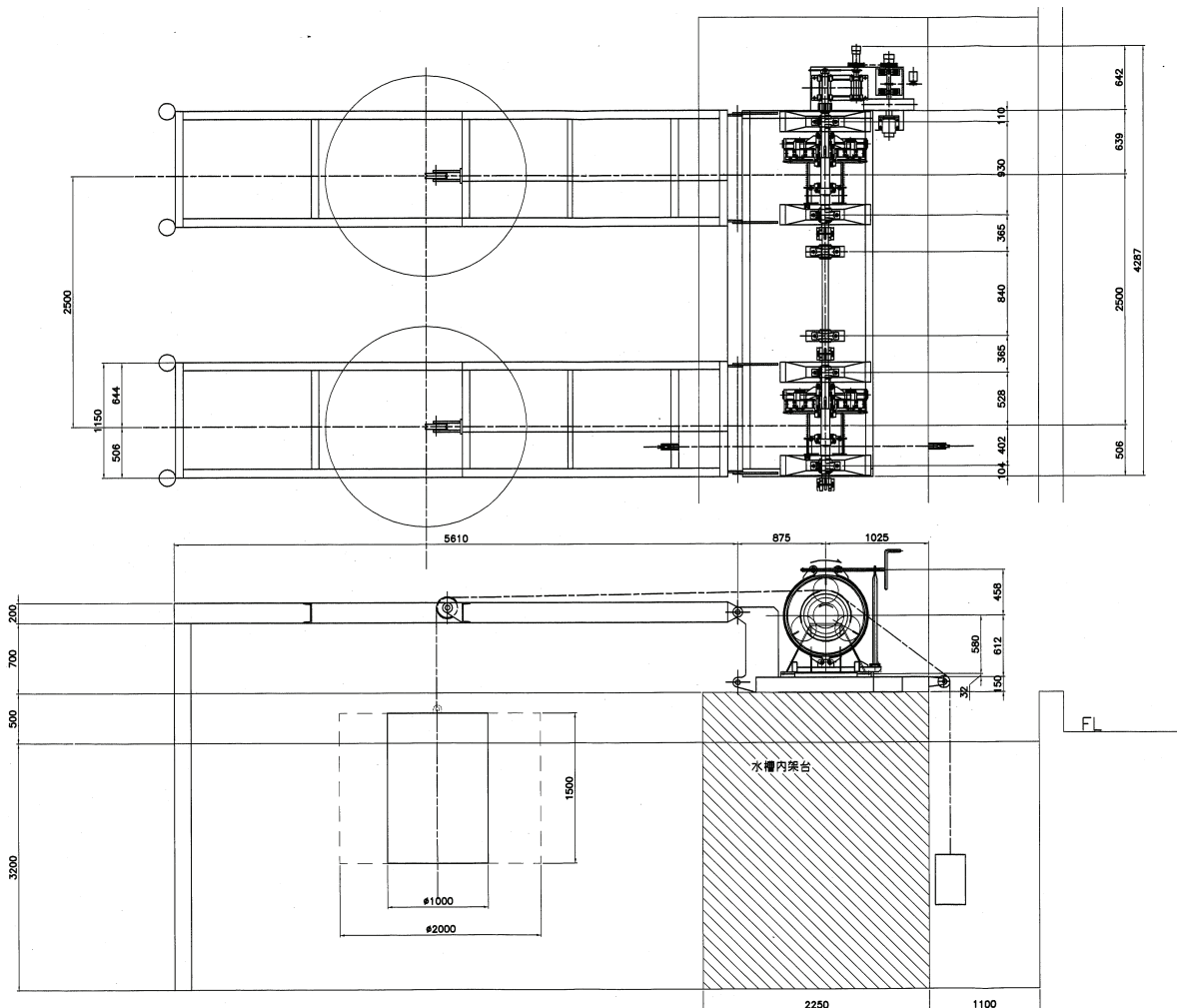


図-4 装置を架台に設置した状態の図

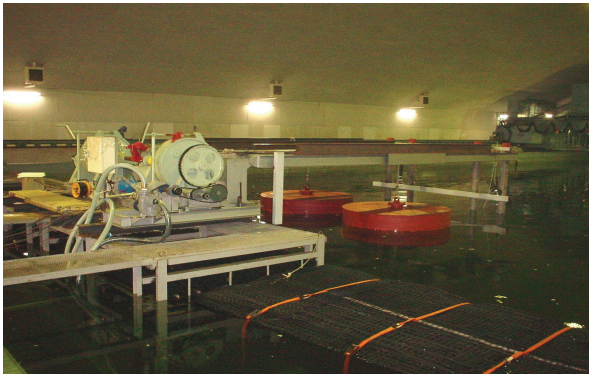


図-5 実験時の写真



図-6 4組モデルの装置の全景写真

2.0秒/0.25m, 3.0秒/0.14m, 3.5秒/0.24m, 4.0秒/0.27m, 4.5秒/0.15m, 5.0秒/0.10mとした。実験では、一組のフロート・カウンタウエイトをクラッチ・オンにして水面変位、フロート上下動、ワイヤ張力、トルクなどを測定した。実験で用いた装置諸元は、表-1の通りである。

(2) 実験結果

実験機の稼働結果を簡単に述べると、周期3秒以下では来襲波によりフロートが著しいピッチングを起こし、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なわれた波浪条件は、3.5秒/0.24m, 4.0秒/0.27mの条件である。これらの実験条件と時間平均の仕事率を表-2に示すが、対応する波のエネルギーはそれぞれ662W (331W/m×2m) および462W (231W/m×2m) であり平均効率それぞれ12.1%および12.8%であった。本実験ではフロートに波が直接作用する状況で行ったが、図-1に示すように防波堤前面の遊水室内で稼働する場合には遊水室内の水面上下動の増幅のためより高い効率が見込まれる。

また、これらの実験で得られた水面変動、フロート上下動（いずれも静止時からの上昇を正）、およびワイヤ張力の時系列を図-7に示す。図には水面上下動に少し遅れてフロートが上下動する状況が示されている。また、ワイヤ張力は、（フロート上昇）－（水面上昇量）の値にほぼ対応して変化し、これが負値となる時間帯ではワイヤ張力がゼロに近い値を示す。このことは、フロート

表-1 実験時の装置諸元

フロート	比重 ρ (kg/m ³)	745.7
	高さ H_f (m)	0.7
	直径 D_f (m)	2
	喫水率	0.5714
カウンタウエイト	質量 M_c (kg)	1680
駆動プーリ	半径 R_m (m)	0.18
ギア	ギア比 G	41.36

表-2 平均仕事率の実験値

実験番号	波高	周期	平均仕事率
	H(m)	T(秒)	($\int F \cdot Z \cdot dt$)/T (W)
1	0.27	4.0	80.5
2	0.24	3.5	59.4

上昇量が水面上昇量より大きいとワイヤ張力が生じ、有意のエネルギー変換が行なわれることを意味している。

次に、機械系の粘性減衰係数 C を評価した。その結果を図-8に示す。実験データからワイヤ張力とワイヤの走行速度（またはフロート昇降速度）の積で求めた仕事率の時系列を求め、その時間平均と計算で得られる仕事率の時間平均から最適の粘性減衰係数を求めた。図-8にはその結果を実験番号1と実験番号2について示す。図より、本実験で用いた装置の機械系の粘性減衰係数は仕事率から評価すると1470(N・m・s)程度であることが分る。

次に、図-9～11は実験番号1および実験番号2の波浪条件に対する仕事率、フロート上下動、およびワイヤ張力の時系列の実験値と計算値を比較したものである。なお、水面上下動の実験値において第1波目は波高が小さく次第に増加して第3波目以降からはほぼ定常な波となった。また波形は正確には正弦波でなかった。このため、第4波目の波形を用いて水面波形（式(12)中の x_w ）に係数を掛けて正弦波の修正波として近似した。修正の係数は、水面上昇量の実験値を式(12)の計算値で除した比を式(12)の x_w 値の3次式または4次式として1サイクルを位相0度から360度まで4分割し、各分割区間ごとに近似した。その際、式(12)の x_w の絶対値が極端に小さいデータは除外した。図-9に示された仕事率の結果は以下のようなものである。実験番号1と2とも計算値の時系列変化は実験値の時系列変化に先行している。これは、計算において付加質量に伴う慣性項としてフロートに作用する流体力を考慮しなかったことが影響していると見られる。また、仕事率の値は第1波と2波では割合小さい値となっているが、これは装置の系全体が静止状態から始まる一種の強制振動のため、装置の全体系の定常運動にいたるのに2周期程度の時間を要している状況を反映していると見てよい。仕事率の計算値は第1波で大きな値を示すことは、図-10において第1波でフロートが大きく下降し、これに伴ない図-11のようにワイヤ張力が大きくなり、このためフロート上下動速度とワイヤ張力の積が第1波で大きく、第2波目以降ではほぼ一定の大き

さで変動することと対応する。

図-10のフロート上下動に関しては計算が過小評価し、一方ワイヤ張力に対しては過大評価となっている。この原因として、今回の計算でフロートと水の相対運動による作用力を無視したことが挙げられる。また、力学モデルは単純に上下動する部分にフロートを浮かべて装置を稼動することを想定しているのに対して実験は波が浮体に直接作用する状況で行われたことも原因していると考えられるべきである。今後これらの効果を取り込んだ計算を行ない、モデルの精度を高めることが必要である。

また、フロート上下動の実験結果は比較的滑らかな変動を示すが、ワイヤ張力は最初にピークがありこれに続いていくつかの山をもつ激しい変動が生じている。この特徴的なワイヤ張力の変動の原因として、フロートが上昇する時間帯にワイヤがわずかにたるんでいてフロートが上昇から下降に転じる際にワイヤが急に張る状況が生じたことが考えられる。このような状況は大変危険で避けなければならない。これを回避するためには、緩衝要素を挿入することが適切である。例えばテンションプーリとバネを組み合わせた要素をワイヤ経路の途中に配置しておき、ワイヤ張力やエネルギー変換が過大となる時間帯のエネルギーを一時的にバネに吸収させ、ワイヤが緩みエネルギー変換が殆んど行われなくなる時間帯にこのエネルギーを開放して実質のワイヤ経路長を長くし張力を一定以上に保ってエネルギー変換することができる。これは、装置の所要支持力を小さくすると共に発電機の容量を小さくすることができるため装置の寿命やコストの面で有効である。

4. フロート喫水状態の効果^{20), 21)}

前章では水槽実験によりモデルの検証を行った。その結果は発生電力、ワイヤ張力、フロート上下動を統一的に再現するには至っていないが、計算がこれらに対して一応の目安を与えていると理解してよいであろう。ここで、モデル計算により稼動時におけるフロート喫水状態の効果を検討する。なお、前章で用いた実験装置はむき出しの歯車を持つもので、歯面の錆が大きな機械ロスを生むという難点がある。このため、計算は以前の現地実験で用いた装置¹⁸⁾を想定して行なった。現地実験で用いた回転変換機の構成を図-12に示す。図の上は平面図で下が側面図である。駆動プーリに巻き掛けられたワイヤが両サイドの自由プーリを経由してフロートとカウンタウェイトを吊るしている。駆動プーリは回転軸と固結しており、回転変換機内で歯車およびスプロケット・チェーンがラチェット機構を介して出力軸(図の長い回転軸)に一方向回転の動力を伝える。出力軸は他の回転変換機の出力軸と連結するため長くしている。この回転変換機

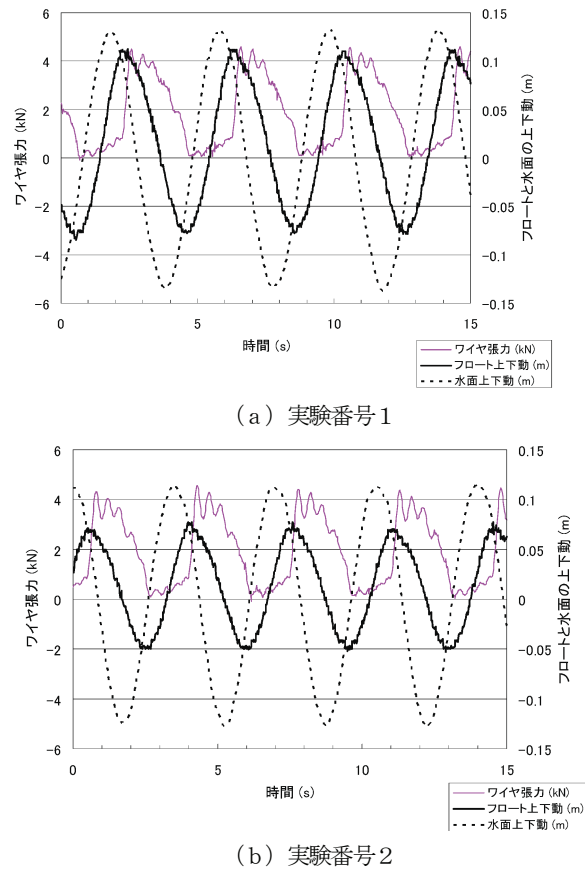


図-7 フロート上下動とワイヤ張力の時系列

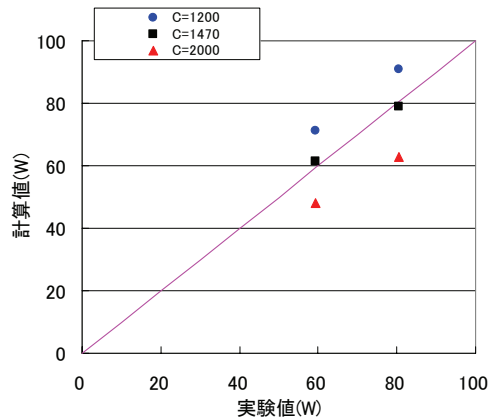
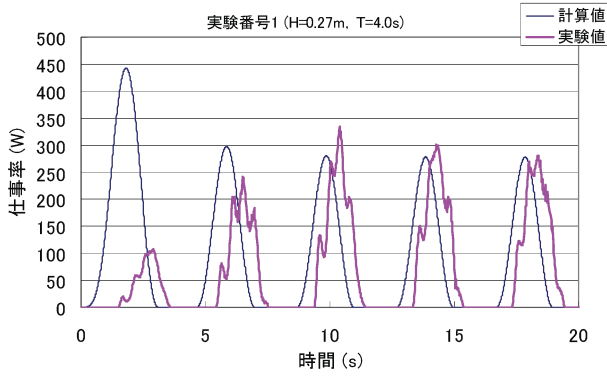
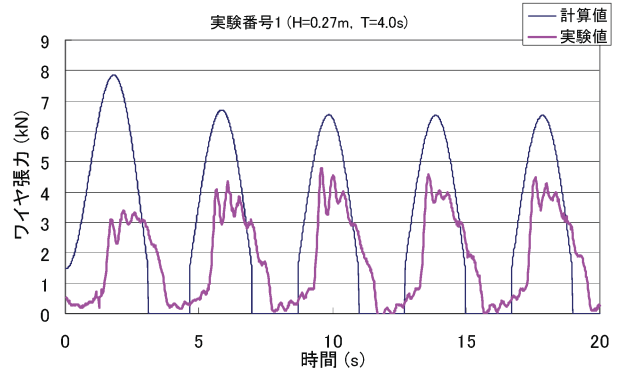


図-8 粘性減衰係数Cの決定

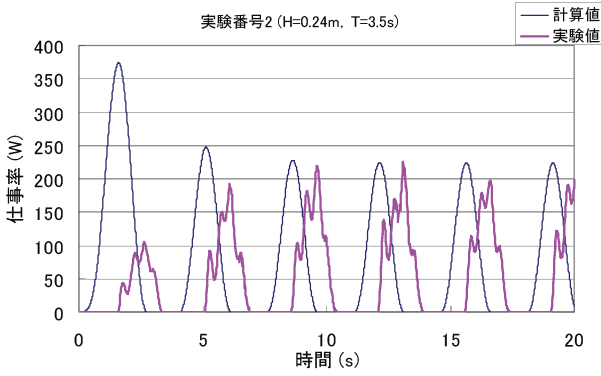
は機械部分がケーシングされており、防滴性能を持つため歯面に錆が出ることによる機械ロスが問題となる可能性はない。したがって、海上で使用するのはこのタイプを考えている。そこで、駆動プーリから発電機までの諸元を図-12の装置の値に設定し、発電機、フロートおよびカウンタウェイトを実機で想定される値¹⁸⁾にして計算した。すなわち、駆動プーリ半径 $R_m = 0.14$ m, 慣性モーメント $0.123 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 機械系の減衰係数 $C = 567 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$, 発電機の誘導発電係数 $k_e = 0.135$ (V/rpm), トルク係数 $k_t = 1.2838$ (N·m/A), 内部抵抗 $r = 0.26$ (Ω)に設定した。フロート直径2m, 高さ2mとし、波高, 喫水率を表-3の



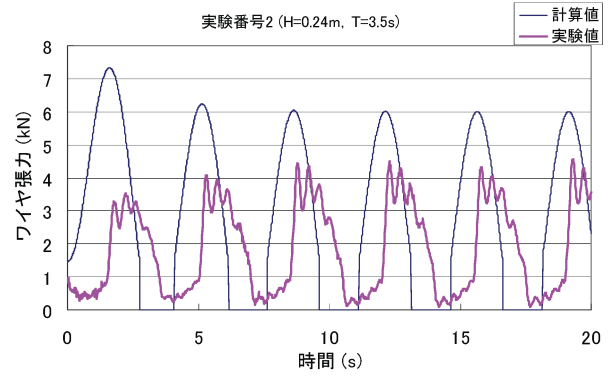
(a) 実験番号1



(a) 実験番号1



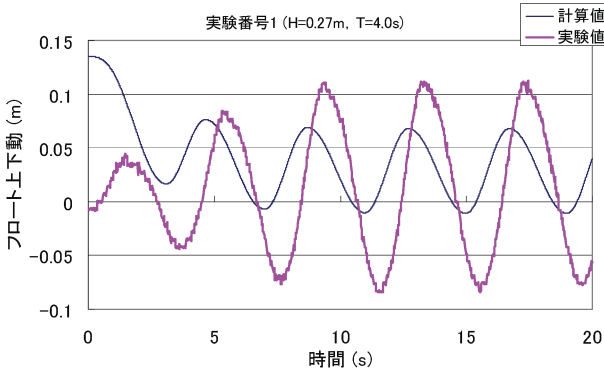
(b) 実験番号2



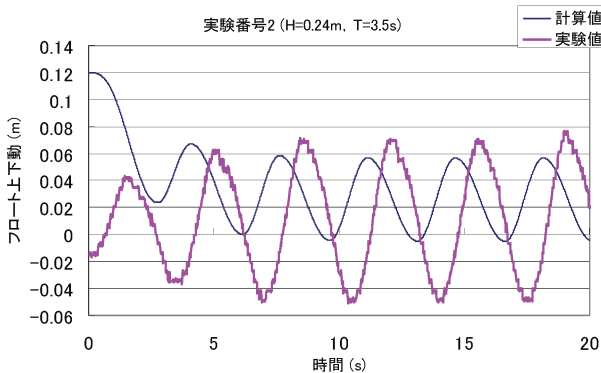
(b) 実験番号2

図-9 仕事率の実験値と計算値の時系列の比較

図-11 ワイヤ張力の実験値と計算値の時系列の比較



(a) 実験番号1



(b) 実験番号2

図-10 フロート上下動の実験値と計算値の時系列の比較

ように設定して、水面下降時のみエネルギー変換する場合の計算を行った。フロートの比重 1.1、波の周期を 3 秒に固定し、無負荷・静止時のフロート喫水率を 0.5 と 0.8、波高を 1m と 1.5m としたときの諸量の変化をみた。計算結果を要約すると、水面下降速度が大きいときにワイヤ張力やトルクが急激に変化してフロートが宙吊りとなるケースが生じる。これは、(フロート重量-浮力-カウンターウェイト重量) で表されるフロートを下げようとする力がエネルギー変換に要するトルク負荷に抗してフロートとカウンターウェイトを加速する力が不十分でフロートの下降が水面の下降に追従できないときに起こる。

もう一つのケースであるフロートが全没水する状態は、(カウンターウェイト重量+浮力-フロート重量) で表されるフロートを上げようとする力がフロートとカウンターウェイトを加速するに十分でなく、上昇するフロートが上昇する水面に追い抜かれる状態で起こる。

ケース1：図-13はケース1(波高1.0m, 周期3秒, 無負荷・静止時のフロート喫水率0.5)の計算結果で、発生電力, トルク, ワイヤ張力, フロート上昇量の時系列を示す。このケースの諸量変化の特徴を述べると次のようである。

まず、発電量, フロート上下動, ワイヤ張力, トルクの変動はいずれも、第1波または第2波で大きな変動を示した後はほぼ定常的な変動を示す。図は示さないが、

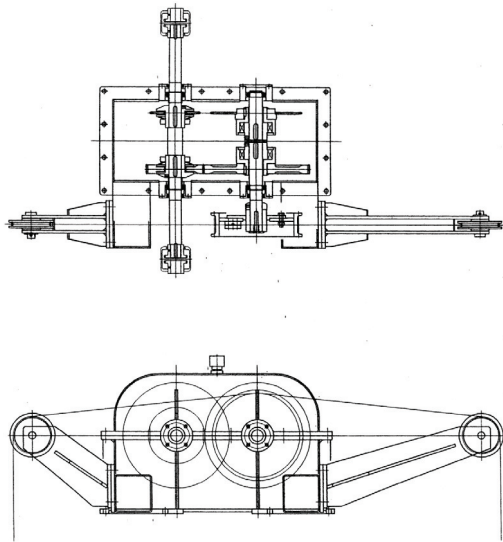


図-12 ケーシングした回転変換機²²⁾

表-3 計算条件

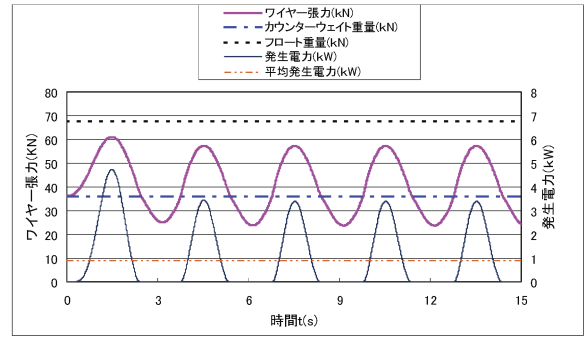
ケース	比重	M_f (kg)	M_c (kg)	喫水率	波高(m)	周期(s)
1)	1.1	6911.5	3691.4	0.5	1	3
2)	1.1	6911.5	3691.4	0.5	1.5	3
3)	1.1	6911.5	1759.3	0.8	1	3

初期の諸量の変動は常時発電する場合に比べて大きい。発生電力は、正值とゼロを取りながら変動するが、発電量ゼロの時間がある程度の時間持続する。発生電力が最大となる時刻は水面上下動速度が最大となる時刻より少し遅れている。時間平均の発生電力は、0.994kWで常時発電する場合に比べ2割程度小さい。

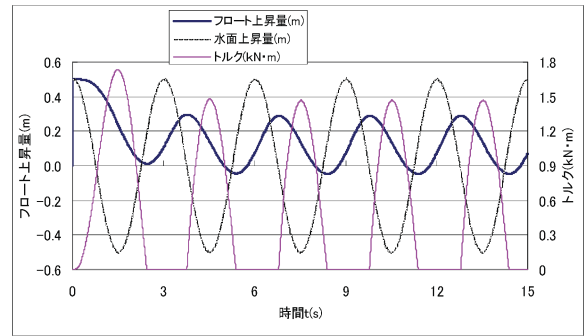
フロート上下運動は、静止水面位置より少し高い位置を中心にはほぼ正弦関数的に変動するが、フロート上下動の振幅は水面変動の振幅より小さい。これは、このシステムではフロート上下動が水面変動に追従できない分の浮力残差がエネルギー変換になっていることを示していると考えてよい。

ワイヤ張力は、カウンタウェイト重量程度の値を中心に変動するが、カウンタウェイト重量プラスアルファの値に正弦関数が重畳したような形で変動している。水面下降時には(ワイヤ張力-カウンタウェイト重量)がエネルギー変換の源となっている。また、フロート下降時のみ発電する場合、水面上昇時にワイヤ張力がカウンタウェイト重量より小さくなる時間があるが、これはカウンタウェイト重量より小さくなる時間があるが、これはカウンタウェイト重量がカウンタウェイトとフロートを加速する際にフロートの上昇速度を水面上昇速度まで加速できていない結果である。

トルクは、発生電力とほぼ同様に正值とゼロで変動し、ゼロの時間がある程度持続する。また、式(1)と(11)から分かるように、発電機のスペックとギア比が与えられた



(a) f_f と P_G の時系列



(b) x_w , x_f および τ の時系列

図-13 ケース1の間欠的発電条件での結果

とき、トルクは発電量の平方根に比例する。

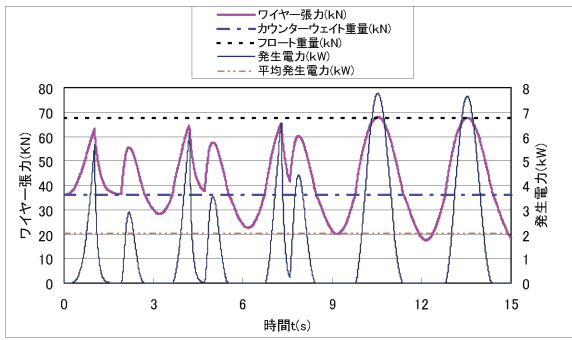
ケース2：次に、ケース2(波高1.5m, 周期3秒, 無負荷・静止時のフロート喫水率0.5)の計算結果を図-14に示す。ケース1との相違は波高を1mから1.5mに増加させたことである。

このケースでは、発生電力、ワイヤ張力、トルクとも最初の3波で不規則な変動を示したのち規則的な変動へと変化する。

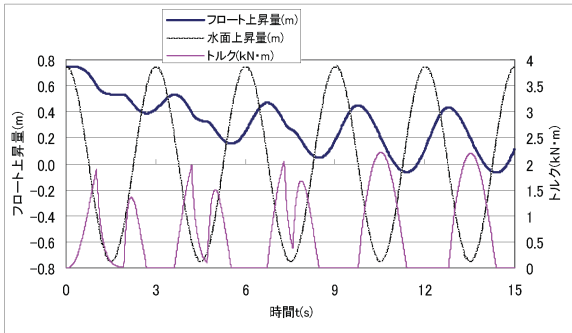
フロート上下動は、1秒から2秒(第1波)、4秒から5秒(第2波)、および7秒あたり(第3波)でフロートが宙吊りになっている。その後は規則的な変動である。規則的な変動の時間帯で、フロート上下動の位相が水面変動の位相より遅れること、初期に比べて変動幅が小さいこと、静止水面位置より高い位置を中心にして変動することはケース1と同様である。

発生電力は、1秒から2秒あたり(第1波)、4秒から5秒あたり(第2波)、および7秒あたり(第3波)で急激に低下し、特に第1波では発生電力ゼロがある程度継続している。これは、フロートが宙吊りになっている時間帯と一致する。このように、フロートの宙吊りは発生電力の点でも好ましくない。時間平均の発生電力は、水面下降時のみの発電で1.811kWである。

ワイヤ張力、トルクともフロートが宙吊りになる時間帯に急激に変動する。これらはフロートが宙吊りを始めた時点から減少し始め、その後一部没水へと移行したときに急増する。宙吊りの時間が長い場合にはトルクは



(a) f_f と P_G の時系列



(b) x_w , x_f および τ の時系列

図-14 ケース2の間欠的発電条件での結果

ゼロまで、そしてワイヤ張力はカウンタウエイト重量まで低下するが、宙吊りの時間が短い場合にはこれらは上記の値までは低下せず、急増を始める。いずれにしても、フロートが宙吊り状態から一部没水状態に移行するときにワイヤ張力とトルクが急激に増加し、動力伝達系に衝撃的な荷重がかかることになり、機器の安全性や寿命の点から避けなければならない。

ケース3：最後に、ケース3（波高1.0m, 周期3秒, 無負荷・静止時のフロート喫水率0.8）の計算結果を図-15に示す。ケース1との相違はフロート喫水率を0.5から0.8に増加させた（カウンタウエイト重量を低下させた）ことである。

このケースでは、発生電力、フロート上下動、ワイヤ張力、トルクとも、第5波まで1波ごとに変動が減少し、発生電力等はケース1に比べて小さい。

まずフロート上下動の状態を述べる。水面下降時のみ発電の場合には、全没水は3秒あたりでは発生せず、第2波以降の6秒、9秒、12秒、15秒あたりで生じている。フロート上下動の振幅は第1波から徐々に減少し、その平均的な位置が低下する。

発生電力は、フロートの全没水が始まると、減少を始め、ゼロになり、全没水が終わると増加し始める。2.5秒、5秒、8秒、11秒、14秒あたりで発生電力がゼロとなり、発生電力ゼロの継続時間は第1波から次第に増加し、発生電力のピークも波のサイクルを追うごとに減少している。

ワイヤ張力は、フロートの全没水が生じるとカウンタウエイト重量に近づき始め、この状態が終了するとカウンタウエイト重量から離れていく。そして、全没水の継続時間が長いと、カウンタウエイト重量と同じ値になっている。トルクは、全没水を生じるとゼロに近づき始め、全没水が終わると再び増加し始める。全没水の継続時間が長いとゼロまで低下する。

5. 発生電力の見積り

ここで、実海域で使用する原型装置の設計に必要な発生電力や装置の主要力学量を評価する。表-4の装置を想定した。装置Aは、前章で示した諸元を使用する。装置Bは、装置Aの駆動プーリの半径を2倍にし、フロートの諸元を一部変化させた。装置Cは、装置Bのギア比を2倍に変化させた。装置Dは、装置Cのフロート直径を1.5倍に変化させた。

その結果として平均発生電力（kW）を表-6に示す。空欄は一部没水以外のフロートの喫水状態や負のワイヤ張力が現れることを示す。また、表-6の各周期においてフロートの一部没水が維持不可能となった波高の空欄を表-5の色で示している。装置AとCではフロートの宙吊りにより一部没水を維持できなくなるケースが多いこと、装置Bで負のワイヤ張力が生じることなどがわかる。

(1) 平均発生電力

表-6からわかるように、装置AとCではフロートが一部没水を維持しうる波高が波の周期の増加と共に漸増するのに対し、装置Bと装置Dではフロートが一部没水を維持できる波高の最大値が周期4秒で最小となっている。また、どの装置も同一波高では周期4秒において発生電力が最大である。よって、装置の固有周期は4秒程度といえる。

また、表-6を解釈する時に注意すべきは、装置は広い範囲の周期と波高に対してフロートが一部没水を維持し、かつ発生電力が大きいことが望ましいことは確かであるが、何処の海岸でも波の周期によって発生しうる波高に限界がある、ことである。各周期で発生しうる最大波高は海岸ごとに過去の波浪データを調べる必要がある。

日本付近の波浪観測データ²³⁾によると、有義波で波の周期と対応する最大波高の組は、3秒/0.5m, 4秒/1.25m, 5秒/1.75m, 6秒/3m, 7秒/4m, 8秒/5m, 9秒/5.5m, 10秒/7mとなっており、表-6から装置Dが推奨される。

表-6に対応するエネルギー効率を表-7に示す。表-7中の効率の評価においては、平均波の波高 H と周期 T を式(14)により有義波波高 $H_{1/3}$ と有義波周期 $T_{1/3}$ に換算し²⁴⁾、波のエネルギーは式(15)による波パワー W_p とフロート直径 d_f の積として評価した²⁵⁾。

表-4 装置の諸元

装置	フロート				駆動プーリー		増速機
	比重	基準の喫水率	直径(m)	高さ(m)	半径(m)	質量(kg)	ギヤ比
A	1.1	0.6	2	3	0.14	12.6	10
	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	10
	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	20
	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	20
	フロート質量: 19.09(t) カウンターウェイト質量: 6.04(t)						

表-5 限界時のフロートの喫水状態

	フロートの宙吊り状態が発生する
	フロートの全没水状態が発生する
	フロートの宙吊りと全没水状態の両方が発生する
	フロートは一部没水状態を維持するが、ワイヤ張力が負になる事がある

表-6 様々な波浪条件での平均発生電

(a) 装置Aを用いた場合

H(m) \ L(c)	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	5.298	6.335	5.847	5.362	4.425	3.737	3.279	3.106	2.254
2	3.385	4.054	3.742	3.452	2.852	2.392	2.099	1.988	1.443
1.75	2.592	3.104	2.865	2.627	2.168	1.831	1.607	1.522	1.105
1.5	1.904	2.281	2.105	1.950	1.593	1.345	1.181	1.118	0.811
1.25	1.322	1.584	1.462	1.341	1.106	0.934	0.820	0.777	0.564
1	0.846	1.014	0.935	0.858	0.708	0.598	0.525	0.497	0.361
0.75	0.476	0.570	0.526	0.483	0.398	0.336	0.295	0.280	0.203
0.5	0.212	0.253	0.234	0.214	0.177	0.149	0.131	0.124	0.090
0.25	0.053	0.063	0.058	0.054	0.044	0.037	0.033	0.031	0.023

(b) 装置Bを用いた場合

H(m) \ L(c)	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									

(c) 装置Cを用いた場合

H(m) \ L(c)	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									

(d) 装置Dを用いた場合

H(m) \ L(c)	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									

表-7 様々な波浪条件でのエネルギー利得効率

(a) 装置Aを用いた場合

H(m) \ L(c)	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	0.092	0.082	0.061	0.047	0.033	0.024	0.019	0.016	0.011
2	0.092	0.082	0.061	0.047	0.033	0.024	0.019	0.016	0.011
1.75	0.092	0.082	0.061	0.047	0.033	0.024	0.019	0.016	0.011
1.5	0.092	0.082	0.061	0.047	0.033	0.024	0.019	0.016	0.011
1.25	0.092	0.082	0.061	0.047	0.033	0.024	0.019	0.016	0.011
1	0.092	0.082	0.061	0.047	0.033	0.024	0.019	0.016	0.011
0.75	0.092	0.082	0.061	0.047	0.033	0.024	0.019	0.016	0.011
0.5	0.092	0.082	0.061	0.047	0.033	0.024	0.019	0.016	0.011
0.25	0.092	0.082	0.061	0.047	0.033	0.024	0.019	0.016	0.011

(b) 装置Bを用いた場合

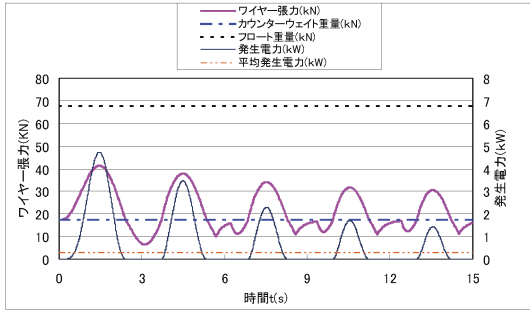
H(m) \ L(c)	3	4	5	6	7	8	9	10	11
10									
9									
8									
7									
6.5									
6									
5.5									
5									
4.5									
4									
3.5									
3									
2.5									
2									
1.75									
1.5									
1.25									
1									
0.75									
0.5									
0.25									

(c) 装置Cを用いた場合

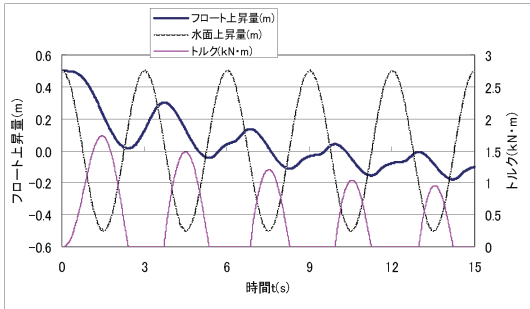
H(m) \ L(c)	3	4	5	6	7	8	9	10	11
10									
9									
8									
7									
6.5									
6									
5.5									
5									
4.5									
4									
3.5									
3									
2.5									
2									
1.75									
1.5									
1.25									
1									
0.75									
0.5									
0.25									

(d) 装置Dを用いた場合

H(m) \ L(c)	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									



(a) f_f と P_G の時系列



(b) x_w, x_f および τ の時系列

図-15 ケース3の間欠的発電条件での結果

$$H_{1/3} = 1.6H, T_{1/3} = 1.2T \quad (14)$$

$$W_p = 0.5H_{1/3}^2 T_{1/3} \quad (\text{kW}) \quad (15)$$

表-7 で特徴的なことは、いずれの装置においても、効率は同一の周期で一定値を示し、その一定値が装置により異なっていることである。この結果に至った原因は次のように考えられる。すなわち、表-6 に示された発電電力は、式 (10a) から示唆されるように波による水面の上下動の状況を反映しており、波のエネルギー E とエネルギーフラックス W_p とで考えるとエネルギー E と深い関係にある。一方、表-7 の効率の計算では、獲得したエネルギーをエネルギーフラックス $W_p = EC_G$ で除しており、群速度 C_G は波の波長、すなわち周期により系統的に変化する。このような事情により表-7 において同一の周期では効率が等しくなると理解される。なお、装置Dでは効率が1を超えて計算されたケースがあり、このことは力学的に考えがたく計算式の不備による可能性が高い。この点を含めて今後より詳細に検討したい。

(2) 平均発生電力および主要力学量

次に、実機として好ましい装置Dを想定し、様々な波浪条件の下で平均発生電力、最大ワイヤ張力、最大トルクを計算し評価した。図-16 ~ 図-18 は、種々の波高と周期の組に対する装置Dの平均発生電力、最大ワイヤ張力、最大トルクを表す。描点は、表-6 で数値が示された条件に対してのみ示している。これらの図表から、装置

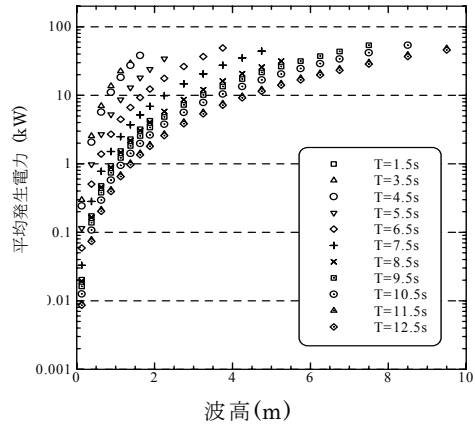


図-16 装置Dの平均発生電力

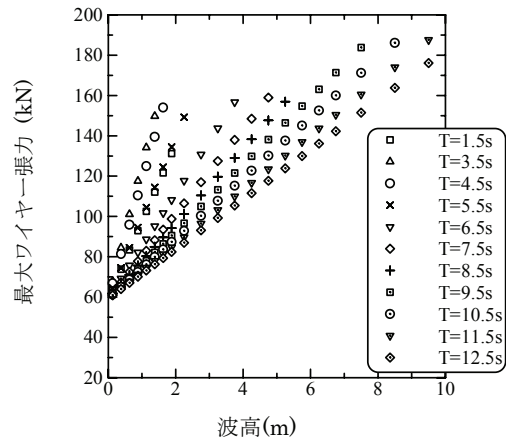


図-17 装置Dの最大ワイヤ張力

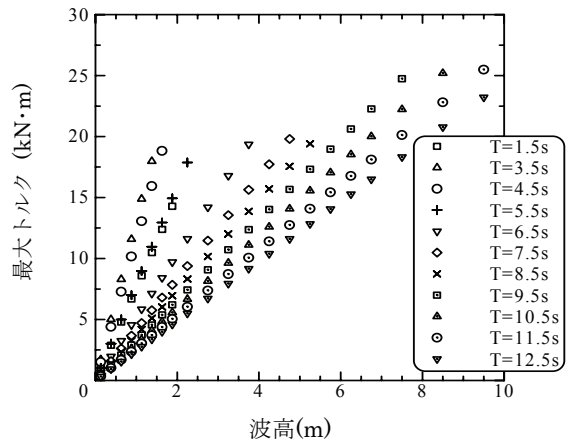


図-18 装置Dの最大トルク

Dでは、比較的頻度の高い波として波高(周期)が0.75m(4s)、1.25m(5s)、2.5m(6s)、3.5m(7s)の時、平均発生電力がそれぞれ10.6kW、14.5kW、28.6kW、28.5kWと見積られる。また、最大ワイヤ張力は波高の一次関数でその比例係数は、装置の固有周期より長い波の周期では、波の周期が長いほど小さい。最大トルクは波高に比例し、その比例係数は最大ワイヤ張力の係数と同様な性質をもつことが分かる。

6. 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つるべ式構成の波力エネルギー変換システムの機械力学モデルを構築し、水槽実験による検証を行なった。また、水面下降時のみエネルギー変換する構成とした場合について、実機を想定した計算を基に稼働時の力学特性について述べると共に波力エネルギー利用の展望を示した。本論文の内容を要約すると次のようである。

- 1) 本提案のつるべ式波力エネルギー変換装置の実機稼働を想定した機械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発生電力、ワイヤ張力、フロート上下動を統一的に定量評価するには至らなかったものの、これらに対して一応の目安を与えることができた。
- 2) 本方式の動力はフロートの喫水状態の無負荷・静止状態からの相違による浮力変化である。
- 3) 稼働時には、フロートが一部没水、全没水、宙吊りの状態が生じうるが、全没水と宙吊りを生じる状態では、一部没水の状態に比べてワイヤ張力やトルクあるいは発生電力の変動が不規則で急激な変動を示し、また平均の発生電力も小さく、好ましくない。
- 4) フロートが一部没水を維持する状態では、フロートは静止水面より高い位置を中心に上下動し、ワイヤ張力はカウンタウェイト重量より大きい値を中心に変動する。

今後はモデルに導入された C_D と C_M の評価を通して力学モデルの精度向上を図る。実験では仕事率をワイヤ張力とワイヤ走行速度で評価したが今後は発電量のデータをとるなどより直接的なデータを取る予定である。また、今回は基本をおさえるため規則波で検討したが、今後はより現実的な不規則波について検討を行なう予定である。具体的には、波形記録をフーリエ級数により表現して式(10)に用いることが考えられる。これを卓越波について繰り返しテストすることが必要であろう。また、実機の設置計画に際しては個々の設置場所について波浪条件を確認しこれに対応する装置諸元を確定していくことが必要である。

また実用化を促進するため、今後は自然エネルギーの宿命である不安定性を問題としない利用技術を多方面と連携して開発していく予定である。具体的には、系統電源が適さない状況での海水淡水化、地下水揚水や海域の水質改善、あるいは供給不安定影響解消のため系統電源等とのハイブリッド、水電気分解による水素の製造・貯蔵などである²⁶⁾・²⁷⁾。その結果として、過疎にあえぐ離島や漁村がエネルギー供給基地として蘇生すると共に、人口や資産・機能が都市に過度に集中するという脆弱な国土利用あるいは経済社会の状態が改善されることを期

待している。

謝辞:本研究にあたり、(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)および中小企業総合事業団(現中小企業基盤整備機構)よりご支援を賜った。下関メカトロ協同組合には多大なご協力を頂いた。日本文理大学 樋田操教授には初期の水槽実験で種々のご支援を賜った。山口大学羽田野研究室の卒研究生、大木協、嘉屋和男、機械工学科斉藤研究室の卒研究生、門脇潤弥、村上尚文、上野いづみの諸氏、日本文理大学樋田研究室の卒研究生には水槽実験やモデル開発で多大のご協力を頂いた。査読者には本研究の深耕を促す貴重なご示唆を賜った。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 清水幸丸編著:「自然エネルギー利用学(改訂版)」, パワー社, 1999.
- 2) TRONIC 風力発電ネットワーク: <http://www.tronc.co.jp/hikakuhyou.html>.
- 3) 高橋重雄:日本周辺における波パワーの特性と波力発電, 港湾技研報告, No.654, 1989.
- 4) 宮崎武晃, 谷野賢二:波浪, 近藤俊郎編著「海洋エネルギー利用技術」, 森北出版, pp.43-94, 1996.
- 5) 瀬戸口俊明:波力発電, 清水幸丸編著「自然エネルギー利用学(改訂版)」, パワー社, pp.161-194, 1999.
- 6) 前田久明, 山下誠也:波浪エネルギー一次変換装置, 「海洋エネルギー利用」特集, 造船学会誌, pp.10-31, 1982.
- 7) 廣瀬学:海洋エネルギー利用の現状と問題点, 月刊エネルギー2002年3月号, pp.90-94, 2002.
- 8) 羽田野袈裟義, 樋田操, 斉藤俊, 尾崎哲二:複数浮体式波力エネルギー変換装置の開発, 水工学論文集, 第42巻, pp.817-822, 1998.
- 9) 中村孝幸, 神野充輝, 西川嘉明, 小野寺孝:渦流れの増大現象を利用した垂下板式の反射波低減工について, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.796-800, 1999.
- 10) 中村孝幸, 中山哲巖, 佐伯信哉, 神野充輝:斜め入射波に対する反射波低減工の効果, 海洋開発論文集, 第19巻, pp.553-557, 2003.
- 11) 中村孝幸, 神野充輝, 西川嘉明, 小野塚孝:不規則波に対する垂下板式反射波低減工の波浪抑制効果について, 海洋開発論文集, 第16巻, pp.1-5, 2000.
- 12) 中村孝幸, 中橋一壽:遊水室型海水交換防波堤の効果室内渦流れを利用する波エネルギー取得について, 海洋開発論文集, 第21巻, pp.547-552, 2005.
- 13) 中村孝幸, 高木伸雄, 中山哲巖, 久保勝太, 飯干富広:平面波浪場における垂下板式反射波低減工の効果について,

- 海岸工学論文集, 第49巻, pp.666-670, 2002.
- 14) 羽田野袈裟義, 嘉屋和男, 樫田操, 佐藤道郎: 波力エネルギーシステムの高出力化に関する研究, 流体力の評価とその応用に関する研究論文集, 第2巻, pp.7-12, 2003.
- 15) 藤崎努: 遊水室に設置する浮体式波力エネルギー変換装置の研究, 平成15年度山口大学卒業論文, 2004.
- 16) 斉藤俊, 村上尚文, 羽田野袈裟義: 浮体式波力エネルギー変換装置の基本性能に関する研究, 日本機械学会, 第9回環境総合工学シンポジウム'99, 講演論文集, pp.348-351, 1999.
- 17) 大木協: 浮体式波力エネルギー変換装置のエネルギー利得の評価, 山口大学修士論文, 2001.
- 18) Hadano, K., Nakano, K., Taneura, K., Ohgi, K. and Koirala, P.: On the occurred electric power of the float type wave generation device, Techno-Ocean2002 Symp., 2002.
- 19) Sarpkaya, T. and Issacson, M.: *Mechanics of wave forces on offshore structure*, Van Northland Reinhold Co., 1981.
- 20) 羽田野袈裟義, 渡邊誠, 種浦圭輔, 中野公彦: 浮体式波力エネルギー変換装置の力学計算について, 流体力の評価とその応用に関する研究論文集, 第3巻, 土木学会水工学委員会基礎水理部会, pp.97-102, 2004.
- 21) 種浦圭輔: 浮体式波力エネルギー変換法の研究, 平成15年度山口大学修士論文, 2004.
- 22) 中田博美: 回転変換機設計図
- 23) 永井紀彦, 佐藤和敏, 菅原一晃: 港湾空港技術研究所資料, No.1017, (独) 港湾空港技術研究所, pp.79-331, 2002.
- 24) 合田良實: 海岸・港湾, 彰国社, 1998.
- 25) 永井紀彦, 渡邊弘, 川口浩二: 港湾技研資料, No.895, 運輸省港湾技術研究所, pp.3-26, 1998.
- 26) 羽田野袈裟義, 斉藤俊, 中野公彦: 可動物体型波力エネルギー変換装置の開発, ハイテクインフォメーション, No.155, 平成15年度産学R&D研究会報告, (財) 中国技術振興センター, 2004.
- 27) 日刊工業新聞: 2004年1月9日版, 2004.
- (2005. 9. 30 受付)

ON THE DYNAMICS OF THE FLOAT TYPE WAVE ENERGY CONVERSION

Kesayoshi HADANO, Keisuke TANEURA, Makoto WATANABE, Kimihiko NAKANO, Takashi SAITO and Masami MATSUURA

Mechanical dynamics model is presented for wave energy conversion system which consists of pulley(s), wire(s), floats(s), counterweight(s) and ratchet mechanism. In the calculation, condition of float submergence is checked every time to select the equations of calculation according to whether float is partly submerged, wholly submerged in the water or hung in the air. The applicability of the model was examined using the data of energy conversion obtained by the water pool experiment, and a good agreement has been obtained. Next, the effect of the float submergence on the time series of the electric power and the physical quantities such as wire tensile force and torque of the shaft has been examined using the calculated results for these quantities. Finally evaluation has been given for these quantities needed in order to give the measure for designing the prototype system.