

蓄力機能を有するつるべ式波力発電装置の力学検討

山口大学大学院 学生会員 ○松岡克弥, Pallav Koirala, 高橋真
山口大学大学院 フェロー会員 羽田野袈裟義 正会員 種浦圭輔

1. はじめに

近年、地球温暖化が深刻な問題となり、化石燃料に変わるエネルギーが求められる中、太陽光・風力等を利用した自然エネルギーの研究が盛んに行われている。本研究では、フロート・カウンターウエイトを利用したつるべ式波力発電装置を開発中である。問題点として、フロート上昇時にワイヤーがたるむ現象が過去の実験現場で指摘されていた。この現象を解消する方法として本研究では、従来の機械力学モデルに基づいて新たに「蓄力機能を有する弾性体(以降、テンションプーリと称する)」の効果を取り入れた力学モデルでモデル計算を行い、テンションプーリの基礎的な評価を実施した。

2. つるべ式波力発電装置

2.1 つるべ式動力変換システムの概要

構造はプーリ・ワイヤー・フロート・カウンターウエイト・回転変換機から構成される。水面変動によりフロートが上下運動し、ワイヤーを通して駆動プーリに伝達される。その運動を回転変換機で一方向の回転に変換し、変速機で増速して発電機を回すシステムである。また、来襲する波浪や装置の条件によっては、「フロート下降時のみ発電するシステム」と「常時発電するシステム」に切り替えが可能である。図-1に、つるべ式動力変換システムの概要図を示す。

2.2 機械力学モデル

本システムの機械力学モデルは、発電機関連の力学、無負荷・静止状態での釣り合い式、発電機稼働状態におけるフロート・駆動プーリ間の動力学により構成される。これらの力学諸量や基礎式を組合せ、最終的なモデル計算式は以下のようになる。

$$\left[\frac{I}{R_m} + (M_c + M_f)R_m + \left\{ \frac{\rho_w C_M \pi d_f^2}{4} (h + x_w - R_m \theta) \right\} R_m \right] \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{1}{R_m} \left(C + \frac{G}{r} k_t k_c \right) \frac{d\theta}{dt} + \frac{\rho_w g \pi}{4} d_f^2 R_m \theta = \frac{\rho_w g \pi}{4} d_f^2 x_w + \frac{1}{8} \rho_w \pi C_D d_f^2 \left| \frac{dx_w}{dt} \right| - R_m \frac{d\theta}{dt} \left(\frac{dx_w}{dt} - R_m \frac{d\theta}{dt} \right) \quad (1)$$

ここで、 ρ_w は海水の密度、 M_c はカウンターウエイトの質量、 M_f はフロートの質量、 d_f はフロートの直径、 h はフロート喫水深、 x_w は水面静止位置からの上昇量、 x_f はフロート重心静止位置からの上昇量、 f_f はフロートに連結したワイヤー張力、 G はギア比、 k_t はトルク係数、 k_c は

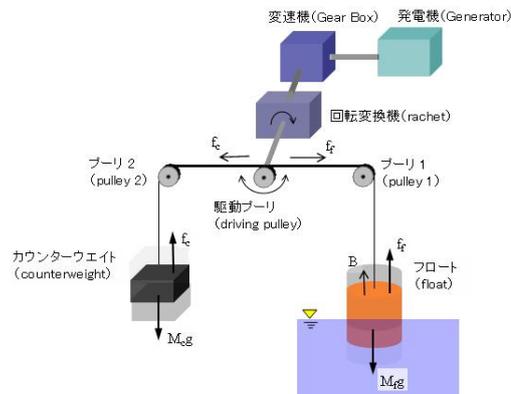


図-1 つるべ式動力変換システムの概要図

誘導発電係数、 r は発電機の内部抵抗、 C_D は抗力係数、 C_M は仮想質量係数である。式(1)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、発生電力やワイヤー張力などの力学諸量の時系列を求めることができる。

3. テンションプーリの導入

3.1 導入背景・効果

基本形態のつるべ式波力装置は、水面上昇時にワイヤーが緩んだ後、水面下降に転じた時にワイヤー張力が急激に過大となる事態が生じ、大変危険で装置の稼働に支障をきたす。この問題を解決するため、駆動プーリとフロート間のワイヤー経路中に「テンションプーリ」を設置し、バネの利用で水面上昇時に緩んだワイヤーを張り、水面下降時の過大なワイヤー張力を抑える。また、発生電力の大きい時間帯にエネルギーの一部を貯蓄し、発生電力が小さい時間帯に貯蓄されたエネルギーを開放する。これにより、発生電力の平滑化と装置の安全性、小容量化・経費削減を目指す。

3.2 テンションプーリ導入後の機械力学モデル

(1) 蓄力エネルギーを開放する力 T_s

図-2より、鉛直方向に作用する力は次式で与えられる。また、水平方向の力は無視できる。

$$F_v : T_s = f_1 \sin \alpha_1 + f_2 \sin \alpha_2 \quad (2)$$

ここで、 α_1, α_2 はテンションプーリの回転角、 f_1, f_2 はフロートに連結されたワイヤー張力 f_f と等しい。ワイヤー移動長 l_1, l_2 とワイヤー減少量 $\Delta l_1, \Delta l_2$ の関係は次のようになる。

$$l_1 + \Delta l_1 = l_1 + \frac{1}{2} \frac{y^2}{l_1} \quad (3) \quad l_2 + \Delta l_2 = l_2 + \frac{1}{2} \frac{y^2}{l_2} \quad (4)$$

式(2)に式(3), (4)を代入し整理すると, 蓄力エネルギーを開放する力 T_s は以下の式となる.

$$T_s = f_1 \frac{y}{l_1 \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{y}{l_1} \right)^2 \right\}} + f_2 \frac{y}{l_2 \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{y}{l_2} \right)^2 \right\}} \quad (5)$$

(2) 平衡点 y の誘導

フックの法則より, 式(5)は以下の関係となる.

$$T_s = k(y_0 - y) \quad (6)$$

この関係を用い, 平衡点 y は次式で与えられる.

$$y = \frac{k}{\frac{f_1}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{y}{l_1} \right)^2} + \frac{f_2}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{y}{l_2} \right)^2} + k} y_0 \quad (7)$$

ここで, k はバネ定数, y_0 はバネの自然長である.

3.3 機械力学モデルから算出される力学量

(1) 装置稼動時における平衡点の変動比較

図-3 は水面・フロート変位とバネ平衡点の時系列を, 図-4 はバネ定数が異なる平衡点振幅とワイヤー長の変化量を示す. バネ定数 $k=1\text{kN/m}$ の時, 最も平衡点振幅が大きい. これは, 波高 $H=1\text{m}$, 周期 $T=4\text{s}$ の波浪条件とバネ伸縮が一致したためである. また, バネ定数 $k=5\text{kN/m}$ の時, 最もワイヤー長の変化量が大きいことから, 発生電力の増加が見込まれる.

(2) テンションプーリ導入後の平均発生電力

図-5 はテンションプーリ導入後の各波高での平均発生電力 (周期 $T=4\text{s}$), 図-6 は各周期での平均発生電力 (波高 $H=2\text{m}$) の一例を示す. 波高 H が $0.5\sim 1\text{m}$ の時, ほぼ変化が見られないが, 波高 H が 1.5m 以上になると, テンションプーリ導入後の平均発生電力が上がり, 波高 3m では約 13kW 増加した. また各周期別に見てみると, 周期 $T=4\text{s}\sim 5\text{s}$ の範囲で, テンションプーリ導入後の平均発生電力が増加している. これは, 本システムの固有周期と波の周期, さらにバネの振幅が一致していると考えられる.

4. まとめ

テンションプーリの効果を取り入れたモデル計算の結果, 大きな電力獲得にはワイヤー長の変化量が大きいことが必要不可欠であり, その場合適当なバネ定数が存在することが分かった. また, 波高 H が大きいこと, ある範囲における波の周期が本システムの固有周期と一致すると, テンションプーリの効果が高く, 発生電力の増加が見込まれることが確認された.

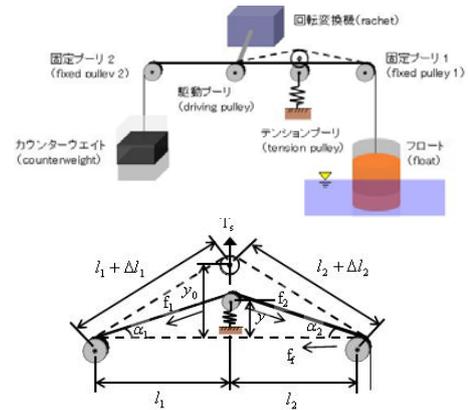


図-2 テンションプーリの実施形態と力学図

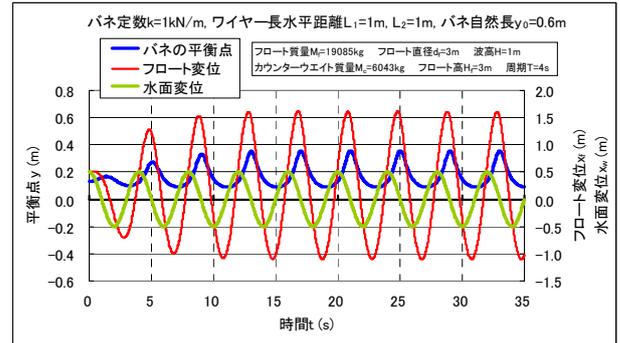


図-3 水面・フロート変位と平衡点の時系列

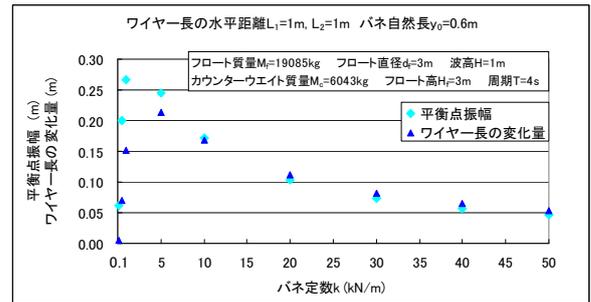


図-4 平衡点振幅とワイヤー長の時系列変化

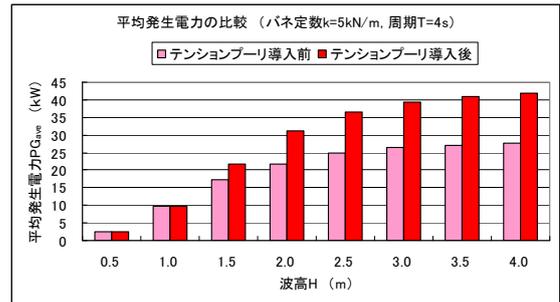


図-5 各波高での平均発生電力の比較

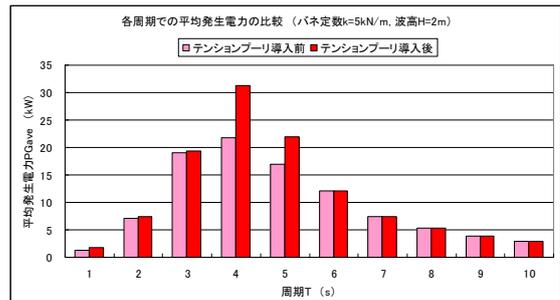


図-6 各周期での平均発生電力の比較