

# 未来に向けた振子式波力発電装置の検討

渡部 富治<sup>\*1</sup>, Prasanna Gunawardane<sup>\*2</sup>

## Study on the practical Pendulor for the near future

Tomiji WATABE<sup>\*1</sup>

Prasanna GUNAWARDANE<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup>T-Wave Consultant, Noboribetsu, Hokkaido, Japan

<sup>\*2</sup>Dept. of Mechanical Engineering, University of Peradeniya, Sri Lanka

### Abstract

Pendulor is a moving body type wave energy converter of efficient conversion with a caisson. Beside it, a simple Pendulor of no caisson installed in Tohoku Japan. The authors tried it to compare with the original one. The study concluded that the Pendulor with no caisson can do the same performance of the original one, if the no caisson type added with a mighty spring which recovers the resonant operation completely. The study discovered an attractive technology for cost saving of the wave energy.

**Key Words** : wave energy conversion, Pendulor, caisson, travelling wave, standing wave

## 1. 緒 言

波力発電の普及には、生産電力のコスト低減が課題である。そのため、発電装置の改良と、発電効率の向上が、永年のテーマになっている。振子式は、海洋波の波動性に注目し、能率的な波力発電の前提として、電波通信工学のアンテナ原理を手本にした。水室内で、二つの海洋波が干渉して定常波になり、この定常波中に振子を吊り下げ、定常波と振子の相互作用で生まれる共振現象を利用する。振子式波力発電装置（室蘭工大が Pendulor と命名）である。関係するパラメータを適切に選定すれば、極めて優れた発電効率を実現する。しかしそれが裏目に出て、嵐に遭遇した場合は極端な過大パワー状態になり、装置保護が容易でない。

これまで各種の研究が試みられたが、中には、振子式本来の原理を越え、水室不要（したがって、定常波不用）の振子式が提案されている<sup>(1)</sup>、<sup>(2)</sup>。振子式（オリジナル）の水室は、①入射波を反射させ、定常波に変換させるために使う反射壁（入射波に対して作用）の目的と、②振子系振動における復元ばね機能を担当している。その結果、**振子発電が採用するアンテナ原理（共振運転）**が、ほとんど無修正で実現することを学んだ。この成果が、振子式研究を牽引する、パワーになっている。

新提案の**ケーソン無振り子式**は、この思想に反するもの。水室排除に伴う機能消失を、他の手段に変え果たして回復できるか？ 筆者らは、チャンスと捉え、**ケーソンの有り・無**にかかわらず、原点に戻って考察し、その中から、未来への新しい波力発電の可能性を検討することにした。そして、ケーソン不在の簡素化を強調した共振運転に対する実用性を探り、その具体的考察結果を設計図にしてみた。この経過を報告する。（内容の一部は、特許出願を予定している。）

## 2. 本来の振子式波力発電装置に対する再検討

図1は振り式（オリジナル）の構造を示す。水室を備えたケーソンが、解放部を沖に向け、海洋波（進行波）を飲み込む姿勢で、海底に固定されている。水室に入った波は正面の壁まで進んで反転（反射）し、沖に帰る。その際、後続の波（水室に向かう）と重なりあい、定常波に変化する。定常波が壁からバックした1/4波長のところは、入射波が持つ全エネルギーが、水平往復流の運動エネルギーに変化している。この場所に平板つき振子を吊り下げ、水平往復流の力で平板を押し引きし、振り運動を起こす。この運動は、油圧変速機を介して、高速定常回転に変換され、発電機駆動のため使用される。ここで、振子の固有振動数が、水平往復流の振動数と一致すれば共振状態になり、ほぼ、波の全エネルギーが発電機駆動に利用される、最適運転になる。

しかし波力発電は、海洋波の波動エネルギーを対象にするから、海洋波の特性に支配される難しさがある。共振運転は、その一つだが、その場合位相問題も関係する。

振り式は、位相問題に関し、独自の関係にあることに触れよう。振子を、波動エネルギーで効率良く駆動するには、①波力の方向と②振り運動の方向が一致する必要がある。波と振子が共振状態になると、波力の向きと、振り運動の方向とは、一致する。したが、振動数一致の調整（共振のため）で、同時に位相一致状態（位相調性は不必要）になる。実用には大変都合良い。さらに、ケーソンを使用する振り式は、共振条件に対しても都合良い特性を備えている（後述）。

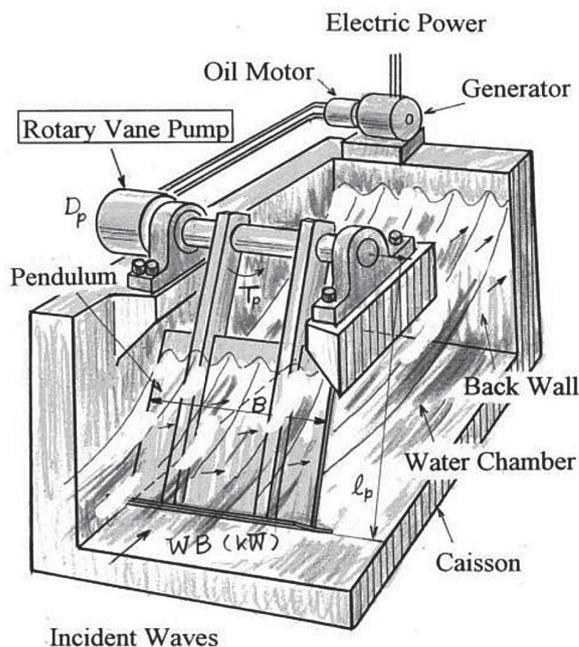


Fig. 1, Ocean Wave Energy Converter: Pendulum (Original type, Muroran I.T. Japan)

● 振り式波力発電装置（オリジナル）の特性<sup>(3)</sup>（図1）

これは、波と同周期で振り運動する振り板表面を境界にして、 $X$ （進行波移動の水平方向）の振り面上の  $X$  成分流速＝振り面  $X$  成分速度とみなし、入射波速度ポテンシャルを求め、それから波による振子に働くモーメントその他を明らかにしたもの。こうして明らかにした振子の運動方程式が、式（1）に示される<sup>(3)</sup>。振り軸に、波による正弦波状駆動モーメント（右辺）が働き、負荷モーメント（左辺）は、①（角加速度に比例する負荷）、②（角速度に比例する付加）、および ③（角変位に比例する付加）から成立している。

$$(I_0 + I)\ddot{\theta} + (N_0 + N)\dot{\theta} + (K_0 + K)\theta = M_0 \sin \omega t \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $I_0$ : 振り子の慣性モーメント、 $I$ : 付加水による慣性モーメント、 $N_0$ : 油圧ポンプ駆動によるダンピング、 $N$ : 造波によるダンピング、 $K_0$ : 振り子による復元ばね、 $K$ : 水室内水による復元ばね、 $\theta$ : 振り子の傾斜角、 $M_0$ : 振り子に働く加振モーメントの振幅  
 $I$ : 付加水による慣性モーメントは、式(2)に示される。

$$I = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\rho B Y_n^2}{k_n^4 X_n} \left( 1 + \frac{1}{\tanh k_n d} \right) + \rho B \left\{ \frac{-2Y_0^2}{k_0^4 X_0 \tan k_0 d} + \frac{gh^2(l+h/2)^2}{\omega^2 d} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$N$ : 造波によるダンピングは、式(3)による。

$$N = \frac{2\rho B Y_0^2 \omega}{k_0^4 X_0} \dots\dots\dots (3)$$

$$X_0 = \sinh k_0 h \cosh k_0 h + k_0 h \dots\dots\dots (4)$$

$$Y_0 = k_0 l \sinh k_0 h + \cosh k_0 h - 1 \dots\dots\dots (5)$$

$$X_n = \sin k_n h \cos k_n h + k_n h \dots\dots\dots (6)$$

$$Y_n = k_n l \sin k_n h - \cos k_n h + 1 \dots\dots\dots (7)$$

$M_0$ : 振り子に働く加振モーメントの振幅は、式(8)で示される。

$$M_0 = \frac{-\rho B Y_0 \omega^2 H}{k_0^3 \sinh k_0 h} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $H$ : 波高、波数:  $k_0, k_n$  には、それぞれ次式の関係がある。  $g$ : 重力加速度

$$\omega^2 = gk_0 \tanh k_0 h \dots\dots\dots, \quad \omega^2 = -gk_n \tan k_n h \dots\dots\dots (9)$$

$K_0$ : 振り子による復元ばね定数は式(10)で示される。

$$K_0 = l_g m g \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $l_g$ : 振り子の支持点と重心点との距離、 $m$ : 振り子質量。

$K$ : 水室内水による復元ばね定数は式(11)で示される。

$$K = \frac{\rho g B h^2 (l+h/2)^2}{d} \dots\dots\dots (11)$$

式(1)の解は、式(12)になる。

$$\theta = (A_0^2 + B_0^2)^{1/2} \sin(\omega t - \varepsilon) \dots\dots\dots (12)$$

$$A_0 = \frac{-\omega(N_0 + N)}{(I_0 + I)^2 (\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 (N_0 + N)^2} M_0 \dots\dots\dots (13)$$

$$B_0 = \frac{(I_0 + I)^2 (\omega_0^2 - \omega^2)}{(I_0 + I)^2 (\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 (N_0 + N)^2} M_0 \dots\dots\dots (14)$$

$$\text{位相遅れ: } \varepsilon, \quad \varepsilon = \tan^{-1} A_0/B_0 \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\text{振り子の固有円振動数: } \omega_0, \quad \omega_0 = \sqrt{(K_0 + K)/(I_0 + I)} \quad \dots\dots\dots (16)$$

最適化運転の条件は、(1) 共振 と (2) インピーダンスマッチである。従って、

$$\omega_0 = \omega \quad \dots\dots\dots (17), \quad N_0 = N \quad \dots\dots\dots (18)$$

式 (17) および (18) を成立させる条件については後で述べる。

ここで、振り子式波力発電装置の **効率:  $\eta$ =(発電出力:  $\dot{W}$ )/(入射波入力:  $\dot{E}$ )** について検討する。

幅:  $B$ 、水深:  $h$  の水路に入る、(周期  $T$  秒間) の入射波エネルギー:  $E$  は、有義波の波高:  $H$ 、有義波の周期:  $T$  の規則波とみなすとき、式(19)により示される。この考え方は、装置容量を決定する上での一法で、実海域運転がスムーズに行われるため導入したもの。繰り返すと、式 (19) を基準に装置容量を選定すると、その結果は、実海域運転に対し、その装置は適切な水準に落ち着く。

$$E = \frac{1}{4} TB \left( \frac{H}{2} \right)^2 \rho g \frac{\omega}{k_0} \left( 1 + \frac{2k_0 h}{\sinh 2k_0 h} \right) \quad \dots\dots\dots (19)$$

式 (19) のエネルギーが振り子により吸収され、油圧ポンプを駆動する機械エネルギーになる。周期  $T$  秒間に変換されたエネルギー:  $W$  は、式 (20) で示される。

$$W = \frac{1}{2} N_0 \omega^2 (A_0^2 + B_0^2) T \quad \dots\dots\dots (20)$$

振り子によるエネルギー変換効率:  $\eta$  は、次式に示される。

$$\eta = \frac{W}{E} = \frac{4\omega^2 N_0 N}{(I_0 + I)^2 (\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 (N_0 + N)^2} \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$\text{ここで、最適化条件: } \omega_0 = \omega \quad \dots\dots (17), \quad N_0 = N \quad \dots\dots (18)$$

が成立するときは、式 (21) は、 $\eta = 1$  になり、入射波エネルギーはすべて油圧ポンプ駆動に使用され、最適条件と呼ばれる。

最適化条件の下では、

$$A_0 = M_0/2\omega N \quad (22), \quad B_0 = 0 \quad (23), \quad \varepsilon = \pi/2 \quad (24)$$

になる。位相遅れ:  $\varepsilon = \pi/2$  になるから、波力の向きと振り子運動の方向が、完全に一致する。このときの振り子の振れ角:  $\theta$  は、式 (25) で示され、その振幅:  $\theta_0$  は、式 (26) に示される。また、無負荷運転のときの振幅は、式 (26) の2倍になる。

$$\theta = \frac{-M_0}{2\omega N} \cos \omega t \quad (25), \quad \theta_0 = \frac{k_0 X_0 H}{4Y_0 \sinh k_0 h} \quad (26)$$

振り子式 (オリジナル) を、スリランカ沿岸用に検討した一例が、図2、250kW 振り子式発電装置である。2セットの装置を並列運転する方式にしてある。<sup>(4)</sup> スリランカは、電力不足が深刻であるが、波浪エネルギーには恵まれている。安定した特性の波が、年間を通して沿岸に到達し、嵐の心配も不要と聞いている。波浪による深刻な沿岸浸食に苦しめられているが、波力発電を普及させれば、沿岸浸食防止対策になるので、一石二鳥の効果になる。是非とも実現すべきテーマである。スリランカの事情にマッチした方式のものを開発し、かつ自国で製造するようになれば、近隣諸国に向けた新しいマーケットの開発にも貢献するにちがいない。日本生まれの技術であるから、新興国向け技術援助対象テーマとしても実現したい。

振り子式は油圧変速機に特長がある。室蘭工大は、専用のベーンポンプを発明している。しかし、この製造には新技術が使用され、先進国でも容易でない。早く、この難関克服の手段を見つける必要がある。<sup>6)</sup>

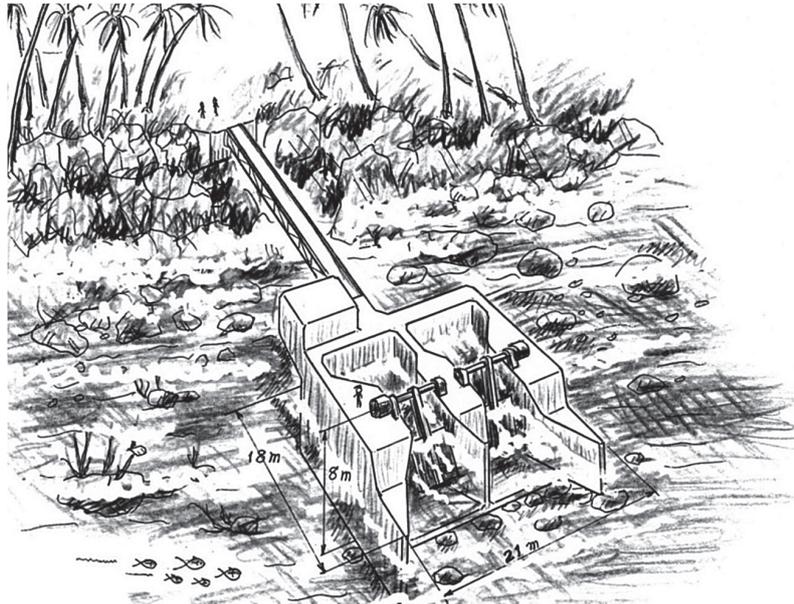


Fig. 2 250kW Pendolor (Original) studied for Sri Lanka coastal use

● 振り子式波力発電装置（オリジナル）のまとめ

以上のように、発電単価を低減するには、最適化条件： $\omega_0 = \omega \dots (17)$ 、 $N_0 = N \dots (18)$ の運転が基本である。この時の $\omega_0$ は、式(16)で示され、構成にかかわるパラメータは、すべて装置の形状などにより定まる値を取り、人為的調性には自由度が不足する。しかし、その場合でも、結果的に無修正のまま、ほぼ最適運転に近い、良好状態に集約することを経験している。その理由は、特性値決定にかかわる要素の中で、付加水の力によるものが圧倒的であることの幸運さからである。その大水塊状付加水の振動特性を柱に、軽量・平板状振子が組み込まれ、複合体として共振運動し、優れた発電効果に貢献している。しかし、特性は、ほとんど付加水で決まってしまう。図2例では、固有振動数を決める特性値 {式(16) 参照} は、ばね： $K$ も慣性モーメント： $I$ も、水側が機械側より（10～20）倍も大きい。  $\omega_0 = \sqrt{(K_0 + K)/(I_0 + I)} \dots (16)$

● 振り子式波力発電装置（オリジナル）に対するコメント

- (1) Pendolor は、機械的振り子構造の装置である。しかし、振り子装置を構成する部品の一部は「水塊」であるという特殊性がある。運転中に付加水の移動が起きやすく、それに伴う振り子特性値が変化する。振り子特性の変化は、共振運動にその影響が及ぶので、発電効率低下を起こすことになる。構造のシンプルさが特長で、それ故に微細さに欠ける。一例として、付加水の水室内流入・流出による運動部質量変化や中立点移動の発生は、振り子運動に対しマイナス影響を及ぼす。改善に向けた対策が必要である。
- (2) 振り子特性値が変化することは、等時性を特長とする振り子装置にとり致命的な弱点である。変化しても、自己修正する機能を高め、実用に支障なくしたい。韓国(KRISO & YOOWON)の図1装置において、この種のトラブルが頻発した。いろいろなことが原因しているが、現在、その調査・対策が不十分で、原因が明らかになっていない。(未発表の一例：3D水槽テスト：1/10 model Pendolor の波浪応答では、予期

に反し非線形運動状に歪んだもの「振子板面でしぶき発生」が観察されている。2D水槽テストは異常なし。) Fig. 3 は、この時の使用モデルの写真である。

- (3) 嵐に対する装置防護対策の重要性。嵐に遭遇した時の振り子式の弱点は、油圧変速機用ポンプ採用が原因になっている。初期採用のシリンダーポンプは、ポンプ駆動部（振子側）に発生衝撃力が大きいため、装置各部に疲労破壊が発生した。対策のため、専用回転型ポンプ（特許）を開発、これに交換した。しかし、本体ストッパー対策（浮体特性を利用して対処する<sup>(4)</sup>）が先送りされたままになっていた。（詳しくは後で触れる）



Fig. 3 1/10 scale model of the 300kW Pendolor (KRISO & YOOWON Korea)

### 3. ケーソン無振り子式の検討と本来の振り子式（オリジナル）との比較

図4は、振り子式（ケーソン無）波力発電装置である。室蘭工大、近藤名誉教授の指導により、戸田建設、新日本製鉄両社が共同で研究した。新型離岸堤 CALMOS, の鋼板製部分に対する電気防食と、警告灯用電源とにするもの。(図1の振り子式が使用したケーソンを除去してある。) 振子と離岸堤上部で軸受支持される回転軸が主要部品になり、構成される。簡素な構造である<sup>(2)</sup>。図4の「ケーソン無振り子式」について、その発電原理を説明する。

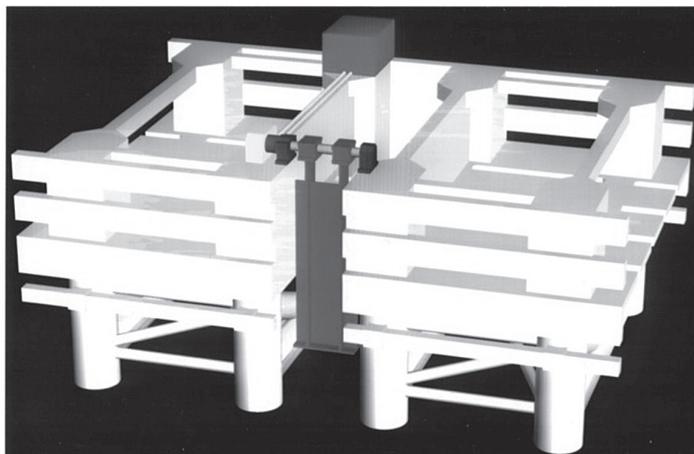


Fig. 4, Simplified Pendolor with no caisson (Toda Civil Eng & Sin Nihon Steel)

● 「ケーソン無振り子式」の発電原理

- (1) 振り子式の波力発電原理は、ケーソンの有無に関係なく、次の条件できまる。①入射波エネルギーで振り子運動する振り子があること。②振り子運動は、波と共振すること。③したがって、振り振動系のばね定数と振動系の慣性モーメントの比が、所定の値であること。④この条件は、何らかの人為的行為により実現するもの。⑤したがって、この成否は、以上の条件をクリアするアイデア誕生にかかっている。
- (2) 「振り子式(ケーソン無)」は、⑥付加水慣性モーメントが振り板両面に働くことになり、その値が、振り子式(オリジナル)に比較し、**2倍**。⑦しかも振り振動系には、付加水によるばねがなく、振り自重によるばねだけ。ばねの効果は、(オリジナル)に比較し、1/(10~20)に減少する。これでは、**共振運転が不可能**である。(筆者らの研究から予測される懸念である。)
- (3) この条件下で取れる手段は、振り振動系に対し、適切な(ばね定数の)ばねを組み込むことである。この検証を、3章~5章の「ケーソン無振り子式」の特性解析~で示そう。

3. ケーソン無振り子式の特性解析

図4 ケーソン無振り子式の運動方程式は、図1 振り子式(オリジナル)と同形の方程式になる。しかし、図4はケーソンが無いので、付加水による項目は数値=0である。この結果、ケーソン無振り子式の運動方程式は、式(27)により示される。

$$(I_0 + 2I)\ddot{\theta} + (N_0 + 2N)\dot{\theta} + (K_0 + K_{sp})\theta = M_3 \sin \omega t \quad \dots \dots \dots (27)$$

ここで、 $I_0$ : 振り子の慣性モーメント、 $I$ : 付加水の慣性モーメント(振り板の正面・裏面に存在する)、 $N_0$ : 油圧ポンプ駆動によるダンピング、 $N$ : 造波によるダンピング(振り板の両面に働く)、 $K_0$ : 振り自重による復元モーメント、 $K_{sp}$ : 浮体ばねによる復元モーメント、 $\theta$ : 振子の角変位、 $M_3$ : 振子に働く波浪モーメント(振幅)

式(27)の特性に関して、いくつか注意すべきことがある。次に列挙する。

- (1) 式(27)に示される負荷モーメントは、①加速度項、②速度項、③変位項の3種類である。これを、④波浪のモーメントにより駆動する。左辺の3項すべての係数が、振り子式(オリジナル)に比較して大変大きい値を取るときにのみ、目的の特性が生まれる。本質的に、小振幅/大トルク運転に適した方式である。しかし、それでは経済性に逆行する装置になってしまう。
- (2) 対策の一つとして、振り子振動体形状を修正し、ソルターダック装置の形状のように、回転振動体に近づけることが考えられる<sup>6)</sup>。そうすれば、付加水慣性モーメントの増大化が避けられよう。
- (3) 振り子の固有円振動数:  $\omega_{01}$  は、式(28)に示す特性になる。

$$\omega_{01}^2 = (K_{sp} + K_0)/(I_0 + 2I) \quad \dots \dots \dots (28)$$

ここで  $K_0$ : 振り子による復元ばね定数、 $N_0$ : 油圧ポンプ駆動によるダンピング、 $I$ : 付加水による慣性モーメント

式(28)から、共振条件  $\omega_{01} = \omega \dots \dots \dots (30)$

を満足するための人為的ばねは、式(29)のばね定数:  $K_{sp}$  に合わせる。

$$K_{sp} = \omega_{01}^2(I_0 + 2I) - K_0 \quad \dots \dots \dots (29)$$

ケーソン無振り子 に対するばねは、式(29)で示すばね定数になる。この実現のため、ばねの構造・機構はどのようなになるか? 次章で検討しよう。

#### 4. 振り子式 (ケーソン無) の発電効率向上の研究

目的の研究に入る前に、ここで、振り子式 (ケーソン有り) の特性を見直す

(ケーソン有り) の固有振動数は式(16)で示され、型どおりの設計で、その装置の固有振動数:  $\omega_0$  は、 $\omega_0 = \omega \cdots \cdots$  (17) を満足することを既に述べた。式(17)は共振運転条件だから、それをパスした振り子装置の発電効率は優れた値になる。

$$\omega_0 = \sqrt{(K_0 + K)/(I_0 + I)} \cdots \cdots (16)$$

これに対し振り子式 (ケーソン無) は、事情が違う。その固有振動数:  $\omega_{01}$  は式(28)で示され、ケーソン無における共振条件 式(30)は、特別な対策をせぬ限り成立しない。理由は、式(28)右辺の分母 (慣性モーメント) が大変大きいのに、分子ばね定数が大変小さい からである。この解決を、以下の手順により行う場合につき説明する。

##### ● 振り子式 (ケーソン無) の最適化対策 (図5参照)

- (1) 振り子振動系を、入射波に対し共振するように改良する。最も素直な方法は、式(29)のばね定数を持つ人工ばね (共振運転条件に合わせ設定したもの) を、振り子へ組み込み、振り子系の固有振動数を、共振振動数に一致させる。
- (2) このばねは、ばね定数:  $K_{sp}$  値が大変大きい。図5の特種構造により、限られた空間に収容可能な形状寸法の下で、所定のばね定数:  $K_{sp}$  値を持つばねが実現する。振り軸と一体になって軸心上で回転する1個の浮体に働く浮力を利用したねじりばねである。
- (3) 空洞円筒状浮体の浮力による振り軸トルク (角変位比例) により、ねじりばねになる。
- (4) 浮体ばねが、振り子運動のエネルギー吸収を阻害せぬよう円筒形を選んだ。

以上のように注意しながら検討し、図5に示す浮力ばねを考案した。振り子板が、1本の円筒とこれらを結合する二枚の垂直鉄板から構成された形状である。この振り子で波浪を受けた時は、十分なモーメントが発生し、かつ円筒状浮体1基によるばね定数値  $K_{sp}$  は、所定値に一致する数値が選べるから、波力発電用振り子として最適運転を可能にするものが容易に作れる。

図5の振り子式 (ケーソン無) について、さらに説明を続ける。

- (5) 共振運転成立が発電効率維持条件である。共振は、振り子のばね定数  $K$  と慣性モーメント数  $I$  との比で決まる。 $K$  も  $I$  も、(機械部と水部「付加水」、ただし水は、機械の10倍以上大きい) の合成でできている。機械部は、ケーソンの有無に関係なく同レベルの小値。水部は様子が違う。
- (6) ケーソン有:  $K=1$ ,  $I=1$ , と仮定すると、 $K/I=1$ 。これに対し、ケーソン無:  $K=0.1$ ,  $I=2$ ,  $K/I=0.05$  になる。
- (7) この理由から、ケーソン無は、ケーソン有のばねに比較し、20倍相当のばね定数値ばねの追加が、共振運転実現の条件になる。
- (8) これほど大きいばねを、どうやって作るか? 図5では、振り子支持軸を中心に画く円に沿って移動する浮体が、運動により徐々に水中へ沈むようにし、それに伴う浮力変化により、振り軸上モーメントを変化させる。所定仕様のばね設計が可能である。製作、据付運転にも支障ない。
- (9) 振り板に比較し、円筒状浮体の寸法がかなりの大きさになる。振り子の垂直状アームと円筒浮体外形を、垂直鉄板2枚でつなぐ。振り子運動中の渦発生によるエネルギー損失上昇を避けるよう注意した形状である。
- (10) 図5構造は、海底固定方式であるが、洋上浮体式も考えられる。洋上型では、水室なし条件が、船体部

にどう影響するか?今後の課題である。

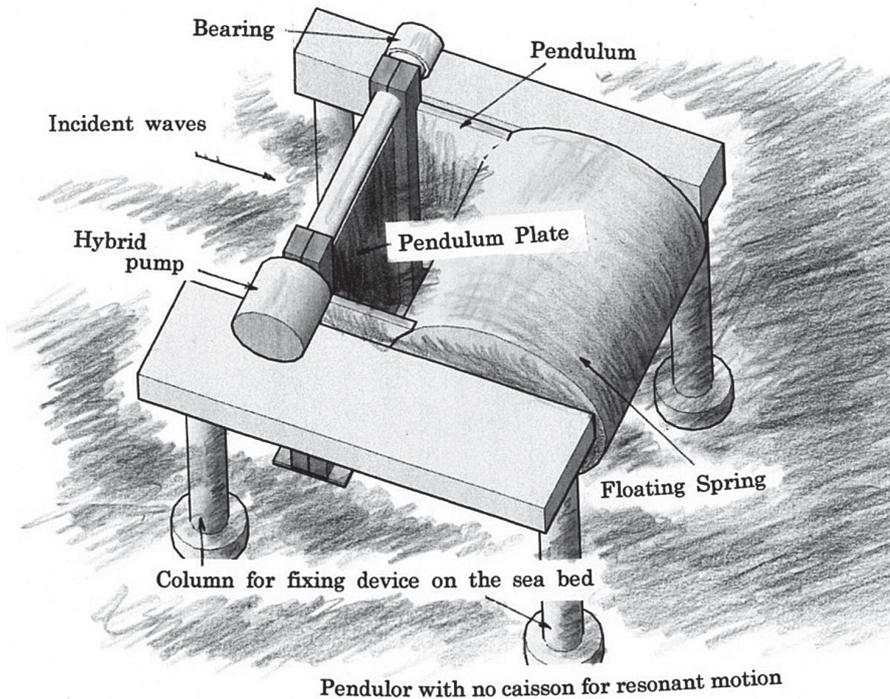


Fig. 5 Pendulum with no caisson designed for resonant operation (with the spring buoys)  
Patent applying

### 5. 振り子式（ケーソン無）の最適化条件とその設計例

振り子式（ケーソン無）に対し、共振運転の可能性を検討し、その具体構造（案）を図5に示した。実現性を検証するため、ここで共振特性の検討を兼ね、300kW 振り子式（ケーソン有り、ただし振り子2台使用）との比較を兼ね、300kW 振り子式（ケーソン無）の設計（例）を示す。ここで対象にした振り子式（ケーソン無、ただし150kW 振り子1台使用）の構造・寸法、使用記号を図6に纏めた。したがって、振り子1台の寸法は、ケーソン有無に関係なく同じ【振り子長さ=7.7m, 幅=5.0m】である。

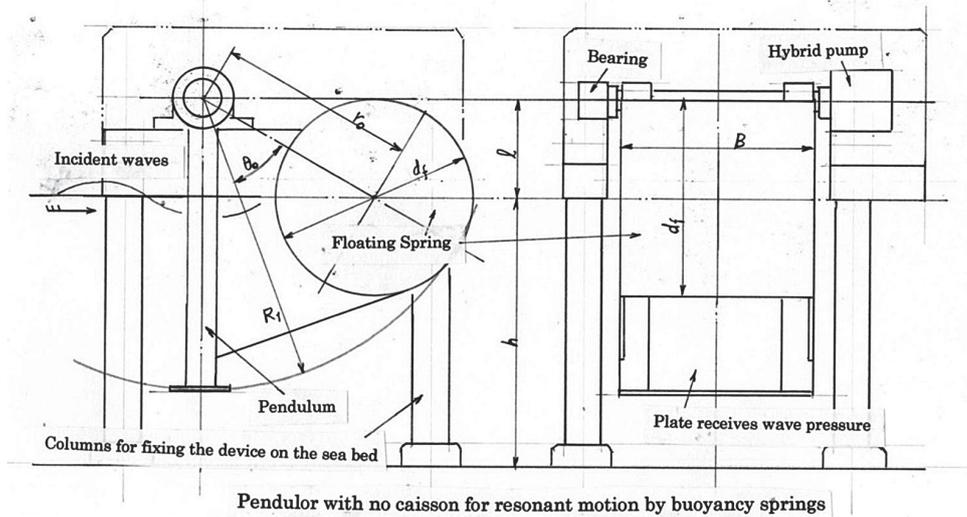


Fig. 6 Nomenclature of the Pendulum with no caisson

共振運転に必要なばね定数  $K_{sp}$  は、式(29)で示されている。  $K_{sp} = \omega_{01}^2(I_0 + 2I) - K_0$  (29)

最初に、300kW 振り子式（ケーソン有り）のパラメータ値を参考に見よう。（表1参照）

Table 1, Parameter value of the 300kW Pendulor with caisson (Original)

(1) $\omega_0$ : resonant frequency = 1.2 radian/sec
(2) $I_0$ : moment of inertia (Pendulum body) = 129 x 10 <sup>3</sup> kg.m <sup>2</sup>
(3) $I$ : moment of inertia (added water) = 2300 x 10 <sup>3</sup> kg.m <sup>2</sup>
(4) $K_0$ : restoring spring constant (Pendulum body) = 252 x 10 <sup>3</sup> Nm
(5) $K$ : restoring spring constant (added water) = 3250 x 10 <sup>3</sup> Nm

表1 記載の、式 (29) のパラメータ値が、表1の値で代用しようと仮定すれば、図6の振り子式（ケーソン無）が必要とするばね定数が推測できる。式(31)

$$K_{sp} = \omega_{01}^2(I_0 + 2I) - K_0 = 1.2^2 \{(129 + 2 \times 2300) - 252\} \times 10^3 \doteq \underline{6400 \times 10^3 \text{ Nm}} \quad (31)$$

これより、図6の振り子式（ケーソン無）に対し、 $\underline{K_{sp} = 6400 \times 10^3 \text{ Nm}}$  の浮体ばね設計を試みる。

図6の構造は、振り子軸が揺れ動く時、その同じ角度で浮体も動く。その垂直移動距離と浮体が排除した水重量との積： $y_F \cdot V_F \cdot \rho \cdot g$  が仕事である。これを、回転角移動距離に置き換えると、 $y_F = r_0 \Delta\theta \cos\theta_0$  になり、ばね定数は次に示される。

$$K_{sp} = \Delta M / (r_0 \Delta\theta \cos\theta_0) = d B r_0^2 \rho g \cos\theta_0 \quad \dots\dots\dots (32) \quad \text{記号は図6参照}$$

ここで、 $d = 5.0\text{m}$ ,  $B = 5.0\text{m}$ ,  $r_0 = 5.2\text{m}$ ,  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ,  $\theta_0 = 30^\circ$  とした場合

$$K_{sp} = 5.2^2 \times 5 \times 5 \times 1000 \times 9.8 \times \cos 30^\circ \doteq \underline{5800 \times 10^3 \text{ Nm}} \quad (33)$$

式(31)の数値計算（例）：式(33)は、共振運転条件ばね定数値の 90% であり、ほぼ一致する。したがって、図6の設計は、本研究目的の振り子式（ケーソン無）の一候補にしたい。式(33)は、 $\underline{K_{sp} = 5800 \times 10^3 \text{ Nm}}$  で式(31)に比較し マイナス 10% であるが、浮体が振り子面の片側にだけ位置するので、この影響による付加水量低下を考慮してのことである。

## 6. 振り子式（ケーソン無）の最適化設計に対するコメント

今回の研究では、たまたま共振条件に合う装置構造が発見でき、幸運であった。これを足掛かりに、実用化に向けての発展を期待したい。ケーソン無によるコスト低減は少なくないであろうから、世界の関心が集まるだろう。既に国外個人が関心を寄せているが、国際共同研究も考えられる。

- (1) 軸になる技術は振り子式だが、（ケーソン無）は、運動部質量と、共振ばねが大変大きくなるから、今後の様相がどう動くか？ 気が抜けない。付加水の挙動がさらに支配的になるであろう。逆に、もっと積極的に付加水利用を考慮すべきかもしれない。
- (2) システムにマッチした油圧変速機の必要性が痛感される。総合的に考え、機械/油圧を複合した Hybrid type が注目されよう。九州地区生産や、スリランカ国内生産の検討を提案したい。

## 7. 結言

以上の研究から次のように結論できる。

- (1) 振り子式は、やはり**(ケーソン有り:オリジナル)**が**基本形**である。ケーソンと機械装置が一体になり、均整が整った発電機能が成立することが、あらためて認識される。(ケーソン無)は、発電システムとしてまだ不完全である。
- (2) **振り子式(オリジナル)**は、**機械と水の複合体**である。運転中、水の特性変化による弊害を減らすことを、課題に取り上げる必要がある。
- (3) **振り子式(ケーソン無)**は、機械と水の複合体において、一層、**水比率が増大した機構**である。人為的な配慮が無いと、振り子式本来の性能が出せない。かつ、この場合の対策は、対象物が大きく、容易ではない。
- (4) **(ケーソン無)**も、**共振運転が基本**である。これに**成功すれば、経済性の良い装置**になると思われる。**成否は、アイデア次第**だろう。若手研究者の奮起が期待される。
- (5) 振り子式は、発電機駆動に対し、一層洗練された油圧変速機との組み合わせが、波力発電未来を決定する。嵐対策を含め、**機械/油圧式複合型 (Mechanical/Hydraulic Hybrid Transmission)**が**出番**を待っている。

振り子式(ケーソン無)に関する**本報告は**、振り子式(ケーソン有り)同等の**優れた発電効率の実現を目的にした研究**である。高価なケーソンが不要になるから、**社会的貢献は少なくない**。長年、電力不足に苦しんだ途上国の方々の夢になる。日本・スリランカ共同研究が実を結ぶことを願っている。**(特許出願を予定している。)**

**振り子式、倒立振り子式(ケーソン無)開発に尽力された、多くの研究者諸氏に、敬意を表します。**

## 8. 参考資料

- (1) 戸田建設、新日本製鉄：新型離岸堤 CALMOS, 新製品説明書、1996
- (2) 16/6/湘南ジャーナル：波力発電の実証実験を目指す。久慈市実験で使用予定発電装置写真、2017
- (3) 浅野誠一、フラップ型波力発電装置の効率、JTTC, SK60-14 報告、Feb. 1980
- (4) Watabe T., Yokouchi H., Gunawardane S. & Dissanayake U., Preliminary study on wave energy utilization in Sri Lanka, ISOPE June, 2001.
- (5) Watabe T., Utilization of the ocean wave energy, Floating Pendulum, p. 85, Fuji Print, Muroran, 2008.
- (6) Joao Cruz, Ocean Wave Energy. , Wave Energy at the University of Edinburgh, Springer, 2012.
- (7) 渡部富治、特願 2015-146204, 風力/波力発電用機械/油圧複合変速機、2015-7-7.