

# 波力発電システム用動力伝達系の研究

## Studies on the Power Transmission for the Ocean Wave Energy Converter

渡部 富治

Tomiji WATABE

Former Prof. of Muroran I.T., 5-23-3, Misono, Noboribetsu, 059-0036, JAPAN

Ocean Wave Energy Conversion (OWEC) depends on the antenna principle to generate electricity from the ocean waves via resonant motion of a body. For this reason, the Power Transmission (PT) of OWEC should have been studied more because of the PT makes the resonance difficult under the preferable operation. PT must drive generator in such a high speed excited from ultra slow motion of the waves. This is the matter that the wave power conversion has delayed to enter into the practical stage. This paper clarifies the reasons and shows a solution.

Key words: ocean wave, energy conversion, antenna, resonance, power transmission,

### 1. はじめに

波力発電は、高エネルギー密度の海面が世界に分布し、魅力的ながら実現がもたらされている。発電システムの開発に手間取っているからである。システムには、海洋環境に対する安全性と経済性の両立が条件だが、現状は、一層の発電単価低減による経済性改善（“波力エネルギーは高価”・・・の通念を打破すること）が求められている。これには（1）システム経費の低減、（2）発電効率改善、が考えられ、波力発電システムの特殊性から、（2）発電効率改善、について問題提起し、システムに起因する問題点の指摘と解決策について述べたい。

波力発電は、海洋波の運動を可動体の振動運動へ変換することから始まる。アンテナ理論を適用し、可動体の固有振動数を海洋波の周期に合わせ、海洋波で可動体加振をすれば、全波浪エネルギーが可動体の振動エネルギーに変わる。次に、この振動運動を動力変換装置を介して発電機駆動に利用する。この動力変換が、可動体の共振特性に影響を与え、共振状態の消失が発生しやすいのである。その結果、発電効率の大幅な低下が起こる。

この問題は、（1）発電システム、（2）動力変換装置、のそれぞれが関係するので、総合的に検討し対策しないと良い解決にならない。各種の制約があり、それらをクリアした上で解決に至る案は、自ずとある領域内に集約される。こうした条件を実現するには、具体的な装置設計技術の習得に帰着するかと思われる。

### 2. 波力発電原理の基本形

図1は、代表的波力発電装置であるOWC方式の構造を示す。密閉空気室の下側に位置する水塊が、沖からの波浪パワーで上下振動し、室内空気を圧縮/膨張させる。それを大気側にパイプを介してつなげ、管内空気流を利用してタービン発電機駆動をする。高効率発電には、波周期と水塊の固有周期が一致する、共振条件の成立が必要である。水塊に働く力の平衡から、次の運動方程式が書ける。

$$(m_0 + m)\ddot{x} + (N_0 + N)\dot{x} + (K_w + K_a)x = F_0 \sin \omega t \quad (1)$$

$m_0$ : 水塊の質量、 $m$ : 付加水の質量、 $x$ : 水塊の変位、 $N_0$ : 空気によるダンピング係数、

$N$ : 造波ダンピング係数、 $K_w$ : 水塊のばね定数、 $K_a$ : 空気によるばね定数、 $F_0$ : 波力による加振力の振幅

水塊の固有振動数は式(2)になる。

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{(K_w + K_a)}{(m_0 + m)}} \quad (2)$$

水面上の空気室面積:  $A$  に対し、タービンの開口面積:  $a$  の大きさは、0.5~1.0%に選定され、タービンに働

く空気流速はほぼ 100~200 倍に増速される。このため、わずかながら空気室内の空気は圧力上昇が発生し、水塊の固有周期に影響を及ぼす。式 (2) における  $k_a$  が、無視できぬ大きさになるからである。

筆者らの経験から、共振状態を保つための対策には、式 (2) の分子値を下げるだけでは困難であり、合わせて分母値を大きくする必要があると考えている。<sup>(1)</sup>



図 1 OWC 波力発電装置

### 3. 代表的な波力発電装置の例



図 2 オイスター I 型



図 3 I 型を改良したオイスター II 型

図 2 は、クイーンズ大ベルファスト校が研究した装置で、ケーソンなしの倒立形振り子構造をしている。OWC 研究が発展し誕生したシステムという。そして海域運転を経て改良されたものが、図 3 である。オイスター (Oyster converter (Aquamarine Power)) と命名されている。往復水平流を加振源として振り子状物体を駆動する方式は、後述の振り子式 (Pendulum) と同じである。しかし共振運転に伴う厄介な事象が存在している。以下に説明しよう。

Pendulum の運動方程式は、式 (3) で示される。

$$(I_0 + I)\ddot{\theta} + (N_0 + N)\dot{\theta} + (K_0 + K)\theta = M_0 \sin \alpha t \quad \dots\dots (3)$$

$I_0$ : 軸上の振り子の慣性モーメント,  $I$ : 付加水の慣性モーメント,  $N_0$ : HST に起因するダンピングモーメント,  $N$ : 造波に起因するダンピングモーメント,  $\theta$ : 振り子の変位角,  $K_0$ : 振り子によるばね定数,  $K$ : 水室内の水によるばね定数,  $M_0$ : 波の加振モーメント,  $\omega$ : 波の円振動数。

振り子の固有円振動数:  $\omega_0 = \omega$  に調節するときは、振り子は波に共振し、かつ  $N_0 = N$  にすれば、入射した波

エネルギーは100%振子系の揺動エネルギーに変換される。Pendulorは、専用の直結型油圧変速機を使用し、振子運動を高速定常回転に変換した後、発電機を駆動する。ケーソンの水室内で定常波を作り利用するので、式(3)形の共振状態が、単純な基本形のシステムで成立してしまう。人為的作為の余地が少なくかつ必要ないのが特徴である。なお振子系の固有円振動数： $\omega_0$ は、式(4)で示される。

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{(K_0 + K)}{(I_0 + I)}} \quad (4)$$

図2のOysterはケーソンを使用しない。したがって水室によるばね作用や、水塊効果はない。共振特性を生み出すには、大きな付加水に見合った大きなばね定数を備えたばねを用意することになる。図2では、振子を、強力な浮力が働く倒立形とすることにより、見事に実現している。図3は、図2より浮力が大きい構造に改造し「ばね定数の増大」を図ったと見受けられる。振子運動でシリンダーポンプ(清水)を駆動し、その高圧水でペルトン水車発電機(陸上に設置)を駆動している。(2)(3)

ここでシリンダーポンプは、極めて単純構造をした機器であり、古くから親しまれている。反面、その長所が相手側にはなじまず、時には周辺のトラブル源にもなりうる。少し検討してみよう。

図4は、市販油圧シリンダーの運動部質量(シリンダー定格推力に対する値)を示したものである。同じ推力を、回転型電動機とねじ棒機構を組み合わせる場合(電動リニアアクチュエータの一例)の質量が図4中に示されている(電動機の慣性モーメント値は、ねじ棒上の質量に換算)。図示のように、油圧シリンダーの質量は、電動式の1/100倍の水準である。例えば、図2のOysterは振子とシリンダーポンプが組み合わされているが、シリンダー(質量小)駆動による式(4)中の $I_0$ 増加は無視できる。この結果Oysterは、容易に共振運転を保つことになる。

しかしOysterが、振子軸回転速度を機械的な増速手段で昇速して発電機駆動するのなら、図4の電動アクチュエータ相当の質量になり、この影響は到底無視できない。結果として、システムの固有円振動数： $\omega_0$ は、共振条件を逸脱することになる。

リニアモーションのシリンダーを振子軸の回転運動と結びつけるため、Oysterはピンおよびリンクの組み合わせ機構を利用している。問題はピンである。速度・荷重条件から、ピンは転がり軸受支持する以外は不可能かと思われる。図3のOysterは、大型の転がり軸受を採用し、海水から遮断した密閉構造であることが推測できる。海水中に精密部品がある構造は、保守・点検に要する負担が少なくない。おそらく軸受には電気腐食対策もなされているに違いない。(4)

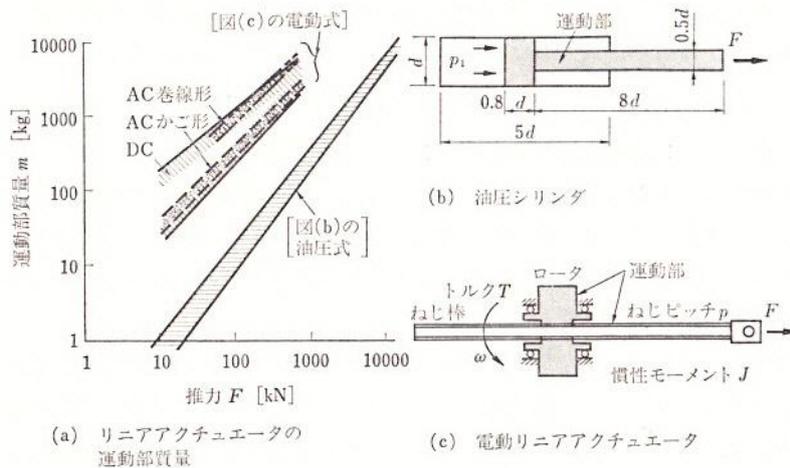


図 4 シリンダーの運動部質量<sup>(5)</sup>

#### 4. 波力発電システムにおける動力伝達系の作用

発電機速度と波浪速度との間は大きく隔たっている。例えば、Pendulorが増速歯車を使って両者を組み合わせるときを、図5を参照し考えてみたい。振子側をI軸、発電機側をII軸とし、図の記号を使用する。

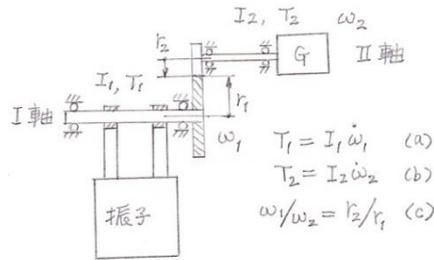


図 5 増速歯車を使用する発電機駆動 (Pendulor)

加速度中に発生する各軸のトルクは、

$$T_1 = I_1 \dot{\omega}_1 \quad , \quad T_2 = I_2 \dot{\omega}_2 \quad , \quad (5)$$

であり、I 軸上では両軸に働くトルクを合わせたトルク： $T$ で駆動する。 $T$ は式(6)になる。

$$T = T_1 + (r_1/r_2)T_2 = \{I_1 + I_2(r_1/r_2)^2\} \dot{\omega}_1 \quad (6)$$

$$\text{ただし} \quad \omega_1 / \omega_2 = r_2 / r_1 \quad (7)$$

注目すべきは、式(6)が示すように、II 軸の慣性モーメントは、I 軸上において歯車比の 2 乗倍値になって加わることである。例えば Pendulor は歯車比>100 だから、 $I_2$  効果は 1 万倍以上に大きくなる。現場での影響は予想を超えた大きさになりやすく、現実には対象外にせざるをえない。(類似環境が原因したトラブルに、都営トロリーバスの事故例がある)

## 5. 動力伝達系が備えてほしい機能

以上に述べた内容は、システムの共振運転が中心になっている。波力発電の経済性を左右する重大な課題は他にもあり、台風に対する耐久性対策は、その代表的なものである。OWC 装置が支持される理由の一つは、空気をエネルギー媒体にすることによる台風時の衝撃緩和効果である。

風力発電は、台風時の入力を制限する**入力制御**が主流になっている。<sup>(6)</sup> この方法によれば、装置強度を法外に高める必要がない。波力発電もこの方法を利用するのが良い。

Oyster は、遠浅沿岸がもつ波浪減衰作用を利用して入力調整し、台風対策をする。<sup>(2, 3)</sup> Pendulor は、浮体に搭載して洋上型発電とし、浮体の波浪応答から入力制御効果を得ている。<sup>(7)</sup>

正常な波浪海象時であっても、波高や波周期は一定値近傍で揺らぐ変動性のものである。システムも動力伝達系も、こうした特性を受け入れなければいけない。この意味で、流体をエネルギー媒体とする空気・油圧変速機は柔軟性があり有利である。空気方式は小容量分野、油圧方式は中～大容量分野に適している。

もろもろの条件を総合すると、動力変換装置 (PT) として採用できる一番手は、油圧変速機かと思われる。先の討論からすれば増速なしの直結駆動である。したがって、ポンプ運転速度は市販ポンプ(回転型)の 1/100～1/1000 相当になる。超低速回転ポンプなので、単位動力当たり装置重量の増加を如何にして克服できるか？ 効率維持のため、内部漏れ流量を (1/100～1/1000) 倍レベルにまで減少させる必要がある。勝算あるのか？ の問題が発生する。次の Pendulor 研究例を対象にして検討したい。

## 6. Hydrostatic power transmission (HST) と Pendulor の組み合わせ

図6が Pendulor である。ケーソンの水室に入った海洋波が定常波に変わり、その節部の水平往復流が振子を駆動する。その振子運動が、HST を介して油圧ポンプ(発電機の代りをする負荷として用意された)を駆動している。最初に、HST 方式(ただしシリンダーポンプ組込み)を採用した。しかし、シリンダー原因の疲労破壊が続き、振子発電用として特別試作した回転型ポンプ(直結)に変更した。その結果、疲労問題が解決できた。そのポ

ンプ開発には少なからぬ苦勞を経験した。独自シール（目的のポンプを可能にした要素技術）を開発し、内部漏れの減少に成功<sup>(8)</sup>したので、今日の発展につながっている。図6の回転ポンプはベーン型であり、高圧回転機分野では単位出力トルク当たりの本体質量が最小ではないかと筆者は思う。ポンプ軸は振り軸と共用なので、ポンプと振子が一体化しており、カップリングなるものがない。現場の据付作業は簡素化し、安全向上、作業時間短縮、保守やり易さ向上に貢献している。

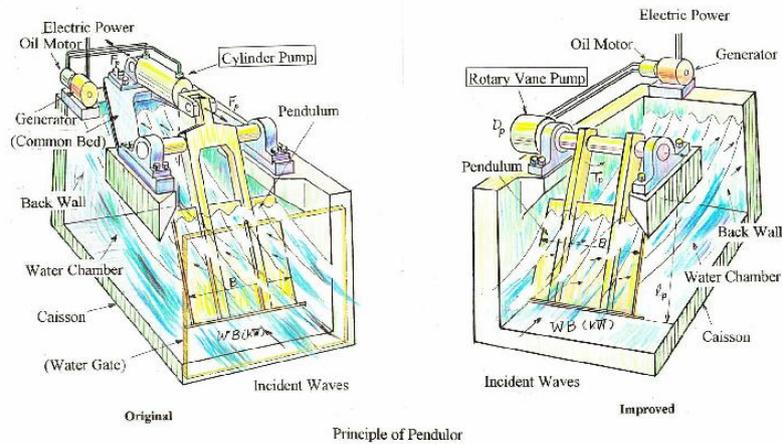


図 6 振り子式装置 (Pendulum, 室蘭工業大学)

図6の回転ポンプは、ロータリ アクチュエーターとしても利用できる。この場合の需要は、すでにポンプより先行している。シール改良が達成されているので、新需要開拓が期待できるであろう。

さらに経済性向上の方策として、室蘭工大は図7の洋上型に挑戦した。これは、コストの70%以上を占めるケーソンを、固定型から浮体型に変更して、目的達成を試みたものである。波浪中で浮体を静止させる必要があり、波浪力のアクティブダンピングを応用したダンパー（ヒープ、サージおよびピッチの3方向）を採用した。<sup>(7)</sup> この効果は、発電効率の向上と浮体の浮き防波堤機能に反映されるので、将来の実用化が期待される。また浮体の波浪応答特性から、台風時の入力制御効果が生まれることを確認できた。<sup>(4)</sup> この種浮体の安定性研究と共に、洋上波力発電の安全性・耐久性向上を図ることは興味ある課題と思われる。

ここで波力発電を対象にした場合のHST用ポンプに触れたい。

HSTが多用される建設機械・船舶・産業機械などが、HSTの小型軽量化を掲げ、その手段として高速化を指向している。高速化はいくつかの障害により阻まれている。(1) 摺動部の潤滑問題、(2) 摺動部を持つ密閉室のシール問題、(3) キャビテーション問題などである。

これらの問題間には、一つが他の問題を誘発させる引き金になることがある。その代表的なものがキャビテーションである。キャビテーションは、単独で潰蝕による破壊をするが、静圧軸受はキャビテーションにより潤滑特性が急激に低下するため、キャビテーション発生は大変恐れられている。

波力発電を対象にした場合のHST用ポンプは、超低速運転なので、キャビテーションが問題になることは先ず

ない。

その代わり、漏れ量を極端に小さくできるシール技術が重要である。押しのけ容積が大きいポンプ(寸法が大きい)を使用するので、ポンプ油圧による部品変形量も大きくなる。その結果、摺動部の隙間寸法も許容値を超えた領域にまで達する。したがって、シールは、こうした条件にも対応しなくてはならない。シールは圧力バランスを利用し、圧力差がある摺動シール隙間の大きさを、最小値であるように自動調整する。したがってシール部品には、仕上がり形状・寸法精度の大切さと、摺動部母体変形に沿って自身も変形する柔軟性が重要である。(8)

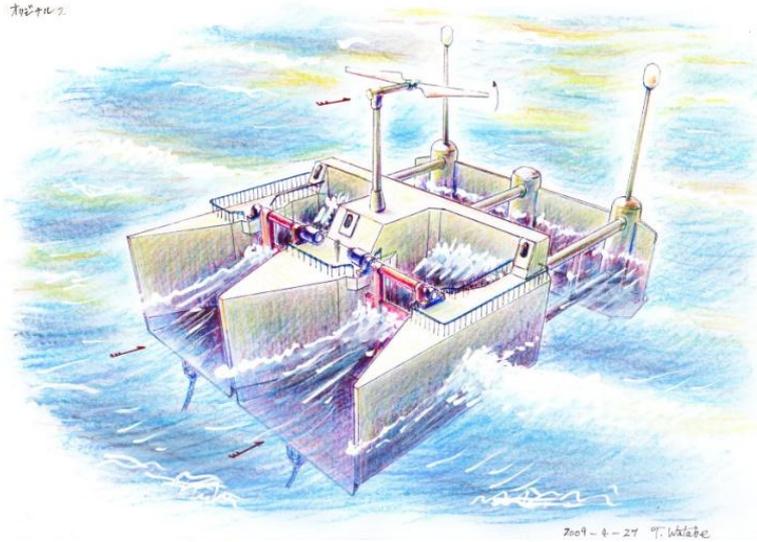


図 7 洋上浮体型波力発電装置 Pendulor (特許 4448972, 渡部) (4)

図8は、汎用回転型電動機と油圧モータの回転部慣性モーメントを、横軸に定格軸トルク値をとり示したものである。図から、電動機の慣性モーメントは、油圧モータのおよそ100~1000倍である。

波力発電では、波浪パワーの変動に対処する手段として、HST では一定容量型ポンプ（低速）と可変容量型モータ（高速）の組み合わせを使用している。油圧モータは応答性に優れているから、波浪変動に対する応答問題は発生しないと思われる。

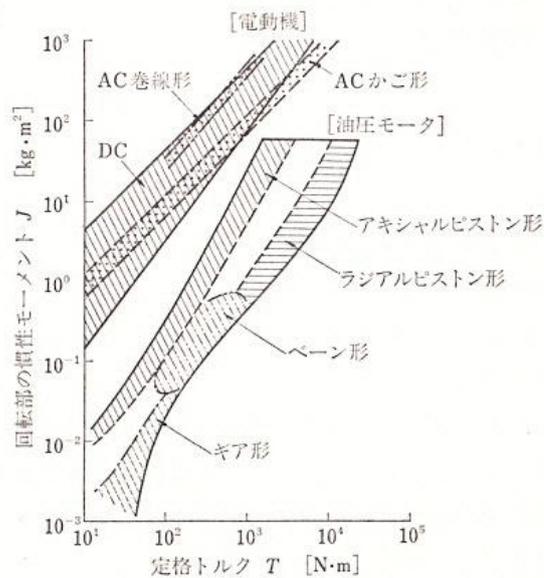


図 8 電動機および油圧ポンプ・モーターの慣性モーメント (5)

## 7. 結言

1) OWC システムは、空気室によるばね作用の影響を小さくし、システムの共振性回復を図ることが、効率改

善の一法である。

- 2) Oyster は、良好な共振性が保たれる構造である。海水中の可動部に対する潤滑・防食対策が大変困難ながら極めて重要である。
- 3) 動力伝達系には昇速機能が必要である。機械的手段で昇速すると、システムの共振性を損なう危険があり、機械的昇速は実用的でない。
- 4) HST は、良好な共振性と昇速機能を備えた動力伝達系である。ただし、ポンプが超低速で運転されるので、運転環境に伴う諸問題を克服しなければ実用にならない。
- 5) 台風対策には風力発電で普及している入力制御が注目されている。Oyster が波浪減衰利用、Pendulor が浮体の波浪応答利用、により入力制御を採用している。
- 6) 波力発電の環境に合う専用のポンプや特殊シールが開発され、発電用 HST の研究が継続されている。

筆者は民間企業に在職中、油圧装置関連の設計・研究に携わっていた。室蘭工大に移籍し、近藤名誉教授との出会いがあり、波力発電の世界に入った。波浪と発電の接点に、たまたま油圧技術があることを直感したが、年月を経た今では、その考えが一層深くなっている。中田 孝先生、石原智男先生、大島康次郎先生、宮本 博先生、前田久明先生、有江幹男先生をはじめ多くの方々のご指導をいただいた。感謝します。

## 8. 参考資料

- (1) 渡部富治、河合秀樹、浦島三朗、“洋上型 200kW 新波力発電装置の特性解析と設計” 日本設計工学会 H22 年度秋季研究発表講演会、2010、10 月。
- (2) A. Henry et al: Advances in the design of the Oyster wave energy converter, 2009.
- (3) D. Collier et al: The construction of Oyster- a near shore surging wave energy converter, 2009.
- (4) T. Watabe: Utilization of the Ocean Wave Energy, Fuji print press, Muroran, 2008.
- (5) H. Funakubo: Actuators for control, Gordon and Breach Science Publishers, 1990.
- (6) 清水幸丸：風力発電技術(改訂版)、パワー社、1999 年 9 月
- (7) 渡部富治：特許 4448972、浮体型波力発電装置、2010 年 1 月
- (8) 渡部富治：特許 3851940、ロータリベーンポンプのシール構造、2006 年 9 月