

可動体型波力発電装置の耐久性に関する考察

渡部富治*1, 鈴木憲男*2

Considerations on the survivability of Ocean Wave Power Converter

Tomiji WATABE*1 and Norio SUZUKI*2

*1 T-Wave C.V., 5-23-3, Misono, Noboribetsu, 059-0036

*2 Singapore Coach Washing Machine PTE Co. Ltd. 6-3-5, 6-Jou, Toyo-oka, Asahikawa, 078-8236

Mechanical Moving type wave energy conversion is expected to be more practical than the OWC for the commercial application because of its much higher conversion efficiency. But there is a problem that the system has no enough survivability caused by its physical construction. The power take-off of the system is the important matter. In order to solve the problem, it studied the power take-off with mechanical dynamics and then here proposed practical counter ideas.

Key Words: Ocean wave, energy conversion, mechanical moving type, survivability

1) はじめに

波力発電の実用化では装置の耐久性が重要課題とされ、早くから OWC 方式が期待されてきた。しかし低発電効率が壁になり、実用化目前で足踏みしている⁽¹⁾。

そこで OWC に代わるものとして機械可動型の発電方式に関心が集まりつつある。(Pendulor や Pelamis がよい例)。OWC に比較し 300% 程度の高効率だからである。しかし実用化に先行して耐久性問題を解決しておかねばならない。「第一の手法」は、嵐時の大波浪対策＝入力制御である。「第二の手法」は、出力機構に集中する過大外力対策＝疲労破損の防止である。Pendulor および Pelamis を例に研究した。

2) 可動体型波力発電の振動モデル

波力発電装置は、波の加振力で振動する運動体を利用している。アンテナ原理を応用したもの。その振動モデル(Pendulor)は図1に示され、1個の質量を2個のばねで支えた「ばね・質量振動体」に対し、波の加振力を加え振動させ、その運動エネルギーを2個のダンパーで吸収し、その1個(mechanical damper)が発電機になる。強制振動下における「ばね・質量振動系」である。ばねには、機械的なもの、海水運動によるものがある。質量には、機械可動体の質量と、付加水の質量が合成されている。

波力発電効率が最高になる運転条件(最適)は次に示される。

- (1) 「ばね・質量振動系」の固有振動数を波浪振動数に一致させること。(共振条件)
- (2) 2個のダンパーのダンピング係数を一致させること。(インピーダンスマッチ条件)

実用機上で最適条件を実現させるには、いくつかの注

意が欠かせない。その代表的なものが出力機構(mechanical damper)であり、弾性変形を最小にする配慮が求められる。このため衝撃吸収機能が犠牲になって、耐久性低下を生じやすい⁽²⁾。

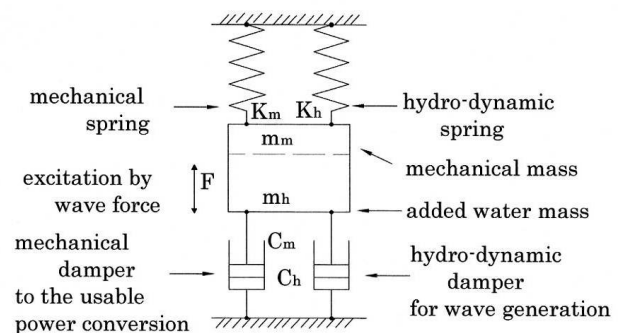


図1 可動体型波力発電の振動モデル

なお OWC 波力発電の振動モデルは、図2に示すように、運動質量(水塊)は空気ばねを介して発電機(mechanical damper)を駆動している。衝撃吸収機能が優先しアンテナ原理からの逸脱を招いている⁽³⁾。

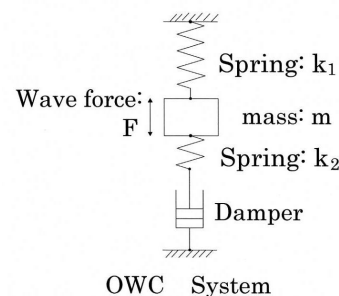


図2 OWC 波力発電の振動モデル

3) 可動体型波力発電の機構と課題

可動体型波力発電では、周期＝6～10 sec の可動体振動を、静油圧変速機(Hydro-Static power Transmission: HST)を介して回転数＝1500 rpm クラスの定常回転に変換し、その回転運動を使い発電機駆動をしている。HSTは油圧ポンプと油圧モータから構成され、波力発電では、油圧ポンプにシリンダポンプまたはロータリベーンポンプ、油圧モータにアキシシャルピストンポンプが使用される。これはゆっくりした可動体振動がポンプを往復動方向に駆動し、ポンプから吐出した油をモータに送り発電機駆動するもの。波力発電の条件に対し、現状では最適の変速特性を備えているものと言える。図3に可動体型波力発電の回路例を示す。

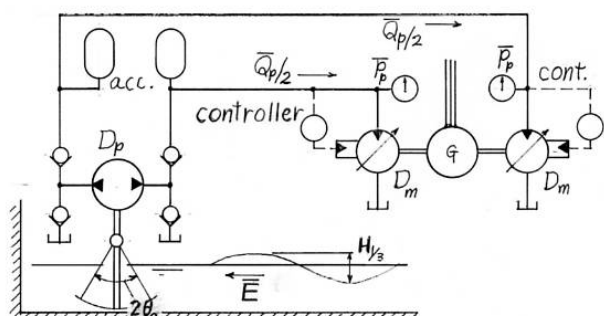


図3 可動体型波力発電の回路例

油圧ポンプの駆動部（可動体の出力部）の運動は「超低速・大作用力」の組み合わせである。運動伝達部に「リンク・ピン」などの機構が含まれる時は、その伝達機構に働く外力も強大になることから、機構部の疲労破損や摩耗損傷を招きやすい。特にシリンダポンプ採用時に発生しやすいのだが、シリンダポンプ単体はすぐれた長所があるだけに、十分注意しなくてはならない。

このように、可動体型波力発電は、耐久性低下を伴いやすい。可動体が直接波力により駆動されるから損傷するのではなく、出力部構造にその原因が存在しているのである。連結ピン部にガタが存在すると衝撃が増大するから、ピンの摩耗防止は重要であり、かつ技術的にも容易でないことが知られている。また衝撃緩和のためのクッションは、可動体振動の位相遅れ増加を伴うから、発電効率低下を招く⁽²⁾。好ましくない。

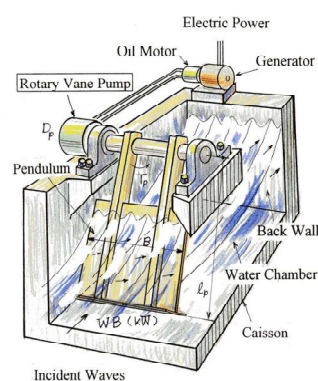
次に具体例を取り上げ、解決策を含めて詳しく検討しよう。

4) Pendolor の例

図4にPendolorの構造を示す。沖に向け開口した水室を備えたケーソンを母体とし、水室内に海洋波を導き定常波に変え、その節部に発生する水平振動流で平板つき振り子を駆動している。振り子運動がロータリベーンポンプの駆動源となり、油圧ポンプを介して発電機を回転させる。共振およびインピーダンスマッチ条件の下で、発電効率≒40%の特性を示す。

Pendolor 研究は、図5のシリンダポンプを使用する方式からスタートしたのだが、上側に図示したようなさまざまなトラブルを経験した。原因は前述の出力部における極めて大きい外力であり、油圧メーカー製ポンプも、この外力が繰り返し作用する環境の下では強度不足と判定された。下側の図に示すポンプは、強度を向上させたもので、設計・製作を室蘭工大と永沢機械が担当した。耐久性は満足できたが、図示のように物々しい形状である⁽⁴⁾。

図4はシリンダポンプに代わりロータリベーンポンプを採用した。ポンプは振り子軸の左端に直結しており、振り子運動がポンプロータに直接伝わる（カップリングはない）。この結果、出力部における衝撃発生原因が完全に取り除かれ、疲労破損や摩耗損傷が生じないのである。海域運転を通して、Pendolorにおける耐久性改善の効果的手法であることを立証した⁽⁵⁾。



振り子式波力発電装置 Pendolor（室蘭工大 Pat. No. 2539742）

図4 Pendolor の構造

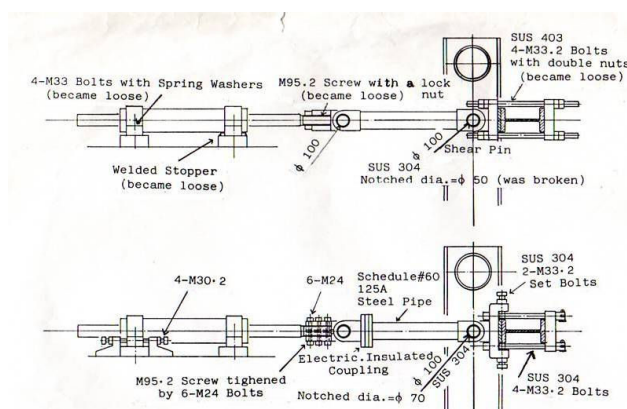


図5 シリンダポンプのトラブルと対策例（室蘭）

5) Pelamis の例

図6に見られるように、Pelamisは細長い円筒形浮体を海洋波の進行方向に向け4台直線状に連結した構造である。3か所の連結部には短円筒が介在し、各円筒形浮体と短円筒とがヒンジ結合している。海洋波が浮体軸中心線に沿いながら進行すると、浮体はヒンジ部で曲がり海蛇のような運動を行う。ヒンジ部にはシリンダポンプ

が備えられており、海蛇運動を回転運動に変換し発電機を回転させる。円筒直径=3.5m、全長=150m で、定格出力=750kW である⁽⁶⁾。

大波時に働く浮体への外力は、ある値以上にはならない。嵐時の過大入力防止され、耐久性が損なわれることはないのである。問題はヒンジ部における出力構造に潜んでおり、次にこの問題に触れよう。

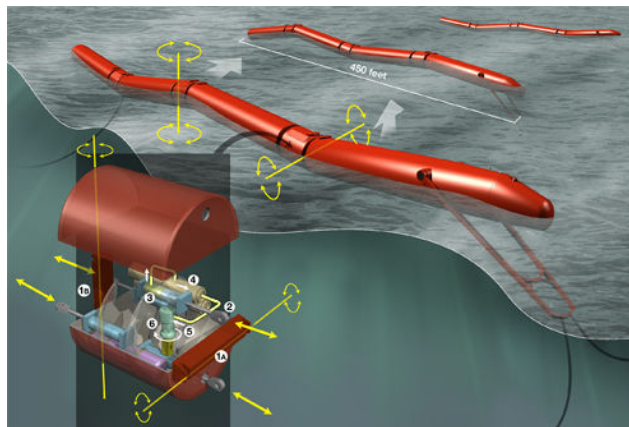


図6 Pelamis の構造

ヒンジ部構造を図7に示す。左側の短円筒（内部に2台のシリンダポンプがある）に対し、右側から円筒形浮体がその左端部でヒンジ結合している。浮体はピン中心0の周りで揺動運動し、それにより2台のシリンダポンプ（単動シリンダ）を駆動する。図示記号を用いてヒンジピンに働く反力： F_{c1} を求める。 F_{c1} はシリンダ軸力 F_1 で与えられ大きさが等しい。 F_1 はシリンダへの入力 E_1 から求められる。

$$F_{c1} = F_1 \quad (1)$$

$$E_1 = F_1 v = A_1 p r \omega = Q_1 p / \eta_1 \quad (2)$$

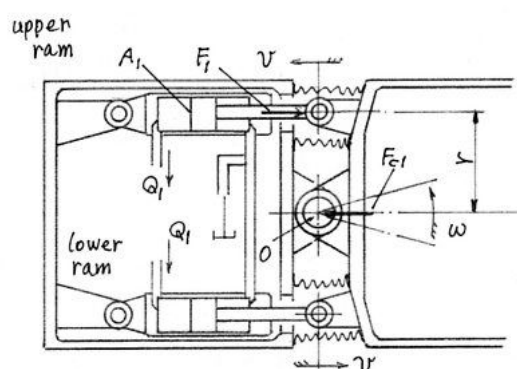


図7 Pelamis の出力部

$E_1=125\text{kW}$ 、 $v \approx 0.5\text{m/s}$ なので、 $F_{c1} \approx 250\text{kN}$ が予想できる。ピン部がジャーナルベアリング構造のときは、ベアリング回転数 $\approx 0 \sim 0.4\text{rad/s}$ を考慮するとベアリング条件が極めて苛酷であることが判明する。苛酷さの指標

である Sommerfeld number: S を試算すると次のようになる⁽⁷⁾。

$$S = (\eta_{oil} \omega_{pin} / p_m) (r_{pin} / C_r)^2 \approx 0 \sim 0.02 \quad (3)$$

ここで、 η_{oil} : 潤滑油粘度、 ω_{pin} : ピン回転数、 p_m : ピンみかけ面圧、 r_{pin} : ピン半径、 C_r : ピンの半径隙間

式(3)の数値: $S < 0.05$ は、ベアリング摺動面が境界潤滑状態内にあることを示している。したがって摩耗損傷は避けられないだろう。

(注: 750kW Pelamis 2 台は、ポルトガル海面で 2007 年 10 月より商業発電を開始している。上述の検討結果を参照するとき、その成り行きに少なからぬ関心を寄せざるを得ない。)

この対策法として図8の改良案を提案する。

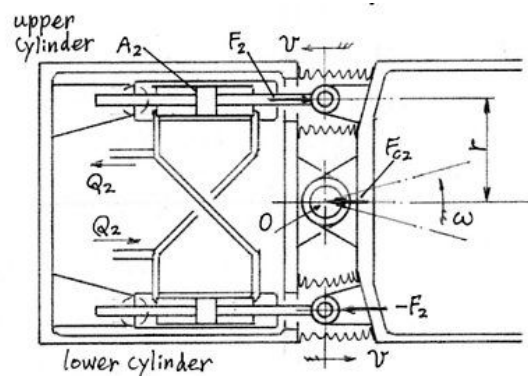


図8 改良型 Pelamis の出力部 (案)

図8の基本構造は、先の図7を踏襲している。ただし、シリンダポンプが「単動シリンダ」から「複動シリンダ」に入れ変わっている。

複動シリンダはストローク方向に関係なくポンプ作用をするので、単動より小径のシリンダで同一仕事量が処理できる。また2台のポンプは、ピン中心0の周りの揺動運動に対し、反力が相殺するからピンへの負担がドラスティックに減少する。図8のように、ダブルロッド型シリンダを採用すれば、ピン中心0に働く外力: $F_{c2} = 0$ も可能になる。結果として、図7のピン摩耗問題が解消する。(ただし、ロッド部の油漏れに対し特別な配慮が必要)。図9は、このような油漏れ対策が施されたシリンダポンプの実例である⁽⁸⁾。たとえロッド部で油漏れが生じても、その油は外部に流出することなくポケット部内に回収されタンクへ戻る。

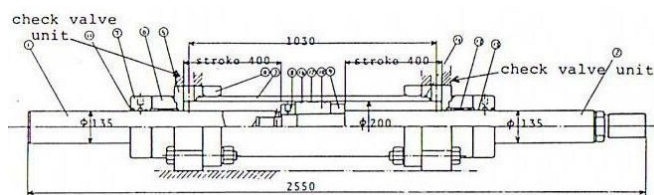


図9 Double Rod Cylinder-Pump (for Pendolor)

6) 検討結果と考察

Pendulor および Pelamis の例では、出力部に耐久性低下の原因が存在していた。海洋波の特性を考慮すれば、出力部に働く外力は大変大きくなり、ベアリング部の潤滑条件は、ジャーナルベアリングで処理できる限界を超えている。今回は、構造的な手法で外力相殺を行い、解決したが、この手法が採用しにくい場合もある。本質的には、高負荷容量ローラベアリングで処置すべき領域である。

ローラベアリングは海水腐食や電食を極端に嫌う。防水・防食対策が極めて大切になり、かつ実施は容易でない。採用候補から外すべきだろう。このような事情を考慮すると、そもそもシリンダポンプはあきらめ、ロータリベーンポンプ採用による新展開が図れないだろうか・・・？ さらに考察を進めよう。

図 1 0 は新しい発想の出力部のために考案されたロータリベーンポンプである。例えば Pelamis のヒンジピンとして採用すれば、1 台でヒンジ作用とポンプ作用を兼用することができる。また、ポンプ軸から吐出油がとりだせ、配管が合理化される。もちろん前述の耐久性低下問題はない。旧方式に比較し、波力発電装置構造がスマートにまとめられる。したがって、これは可動体型波力発電装置の耐久性向上のために有益な考案かと考えられる⁽⁹⁾。

しかしロータリベーンポンプの技術完成度がまだ十分ではなく、特に内部シール技術の向上が求められている。内部リーク量を減少させ、ポンプ効率の向上（シリンダポンプ並み）を図ることが課題である⁽¹⁰⁾。

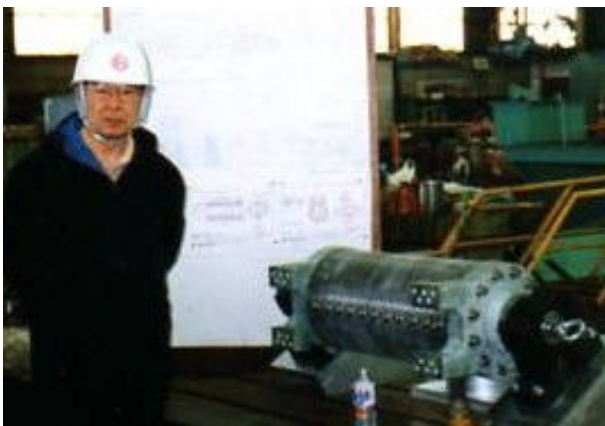


図 1 0 ヒンジピン兼用のロータリベーンポンプ

7) 結 言

以上をまとめると次のように結論される。

- 1) 可動体波力発電は、アンテナ理論をよく再現し高効率である。反面、クッション機能が乏しく衝撃力が大きい。
- 2) OWC は空気室のクッション作用がよく利き、衝撃緩和効果が高い。反面、アンテナ理論から逸れ、発電効率が犠牲になる。

- 3) 可動体波力発電における耐久性低下の原因は、出力部に働く過大な外力と出力部の構造に由来している。
- 4) 可動体ヒンジ部軸受けの潤滑条件は、ジャーナルベアリングの限界を超えることが考えられる。摩耗損傷発生の危険性が大きい。
- 5) 複動シリンダポンプの採用により、可動体ヒンジ部軸受けに働く外力を相殺し、摩耗損傷を防止することができる。
- 6) 特殊構造のロータリベーンポンプにより、ヒンジピンの作用とポンプ作用を兼用させ、波力発電の耐久性向上を図ることが考えられる。
- 7) この実現には、シール性能を改善し、ロータリベーンポンプの効率向上（シリンダポンプ並み）が課題である。

今回の研究の一部には、著者の一人が室蘭工大との共同研究により得た成果が含まれている。記して感謝いたします。

8) 参考資料

- 1) JAMSTEC: 波浪エネルギー利用技術の研究開発—沖合浮体式波力装置「マイティーホエール」の開発、2004年3月
- 2) 渡部富治、近藤一郎、他：沿岸固定型振り子式波力発電装置の研究—システム弾性による効率低下と対策—日機論、54—500、B(昭63)917
- 3) Tomiji WATABE: Utilization of the ocean wave energy, T-Wave, 2008
- 4) 渡部富治、近藤一郎、他：沿岸固定型振り子式波力発電装置の研究—室蘭港外実験プラントの第2次運転—日機論 (B)、Vol. 54, No. 497 (昭63) 136~141
- 5) 渡部富治、近藤一郎、他：特許 No. 2573905、揺動型ベーンポンプ、平成8年10月
- 6) <http://www.oceanpo.com/Pelamis/dehault.html>
The Pelamis wave Energy
- 7) 日本機械学会：機械工学便覧、B1 機械要素設計、トライボロジ 昭60
- 8) 渡部富治、近藤一郎：波力発電、パワー社、2005-10月
- 9) 渡部富治：特許 No. 3218462、波力エネルギー変換装置、平成13年
- 10) 渡部富治、近藤一郎、他：特願平 7-283110、揺動型ベーンポンプのシール構造、平成7年