

可動物体型波力発電装置設計に関する2～3の考察

渡部 富治*

Considerations on Ocean Wave Energy Converter of moving body type

Watabe Tomiji*

T-Wave Voluntary Consultant (retired person of Muroran I.T.)

5-23-3, Misono, Noboribetsu, 059-0036 Japan

The ocean wave has been expected as one of the smart energies distributed worldwide rich. In order to bring it into commercial use, we must study to reduce its conversion cost first. If the wave energy device can work efficiently like as the wind turbine does, the human society should use the wave energy, too. Converter of the moving body type is high efficient as well, but the type seems less survival when it encounters against a storm of which punches the body directly. Despite of the difficulties, the moving body type can be survival as long as it accepts a new technology on the production design of the system. The antenna principle governs the conversion as following to the rule. A HST invented takes the role to drive the generator up to one MW/a unit.

Key Words: Ocean wave energy, converter, moving body type, design, antenna principle, survival.

Pelamis

1. はじめに

波力エネルギーの密度は、風力エネルギー密度より高いなど、波力は実用に有利ないくつかの条件を備えている。実用化が遅れた理由は、波力発電による電力コストが高く、商業化魅力に乏しい方式と評価されたからである。打開には、波力発電効率の飛躍的向上が鍵である。

ちなみに風力発電効率は(約40%)と言われている。代表的な水柱振動型:OWC方式による波力発電効率(約20%)に対し、可動物体型:たとえば振り子式(図1):Pendulumの効率は(40~50%)が期待できるが、嵐に対する耐久性に難点ありと指摘されていた。こうした状況を解決したいと願い、筆者は可動物体型を対象にして耐久性向上研究⁽¹⁾を続けたが、まだ実証機会に恵まれない。(海外は、可動物体型への関心が進行している。)

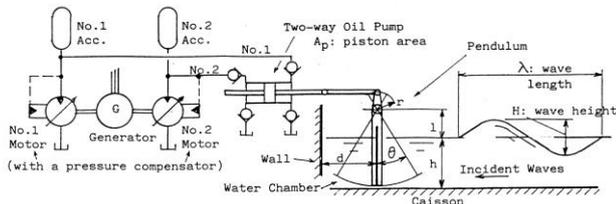


図 1 可動物体型:振り子式 Pendulum の構造

(US Pat. 4400940, 1998 まで)

そこで今回は、①発電理論、②発表済み代表的発電装置構造の見直し、③理論と現実とのギャップ・・・に視

点を広げ、実用期に遭遇しそうな問題点について、具体的な検討・整理を試みた。この結果、“高効率化と高耐久性化”を兼備する波力発電システム開発に役立つ資料としての報告書にまとめた。

2. 波力発電理論

海洋波のパワースペクトルは、成分波の強度が、有義波周期付近に顕著なピークを持つ分布をしている。したがって、海洋波を、ピークパワーと同じ周波数の規則波に近似し、それに置き換えれば、アンテナ理論の適用が可能になり、発電システムの最適化設計が大変容易になる。ただし、システムは線形近似になるから、前もって、①現実の装置構造が持つ非線形性と特性相違を予測することや、②さらに非線形性軽減対策を追加すると、発電効率の向上研究に役立つ。いろいろな発電方式が乱立する中で、波力発電研究に対する、グローバルな状況判断手法として注目したい。

以上の線形近似による可動物体型装置(ここでは Pendulum の場合を例示)の特性は、振り子軸上のモーメント平衡に関する次の運動方程式の解で示される。この式は、電波通信のアンテナによる電波受信の場合と同型である。

$$\sum I\ddot{\theta} + N\dot{\theta} + \sum K\theta \pm T_p = M_o \sin \omega t \dots (1)$$

ここで ΣI :付加水を含む振り子慣性モーメント、 N :造波ダンピング係数、 ΣK :振り子の自重と水室内の海水とによる合成復元モーメント係数、 θ :振り子変位角、 T_p :油圧変速機用ポンプによる負荷トルク、 M_o :海洋波による加振モーメントの半振幅、 ω :海洋波を規則波とみな

した時の円振動数。

式(1)において、振り子系の固有振動数 ω_0 :式(2)が、 $\omega_0 = \omega$ となる時、振り子は海洋波に共振する。共振中の振り子は、海洋波より 90° 位相遅れ状態で運動し、波による加振トルク方向と油圧ポンプの負荷トルク方向が完全対抗の関係になる。これは、波の加振エネルギーを効率よく吸収する必要条件の一つである。

$$\omega_0 = \sqrt{\sum K / \sum I} = \omega \dots\dots\dots (2)$$

ポンプトルク T_p の選定においては、システム効率最大化を出現させるため、①ポンプによるエネルギー吸収量が、②造波ダンピングによるエネルギー消費量と等しくなるように、関係パラメータを組み合わせる。インピーダンスマッチと呼んでいる。

$$E = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} N \dot{\theta}^2 dt = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} T_p \dot{\theta} dt \dots (3)$$

ここで E は、1周期= $(2\pi/\omega)$ の間に消費したり、吸収したりするエネルギー量

式(2)および(3)が成立する時、式(1)の発電装置効率 η は100%になる。よく知られる最適運転条件である(2)。

可動物体型実用機の効率 η は、100%には程遠く、はるか低い実態である。次章で触れることにしよう。

3. 代表的な可動物体型波力発電装置

3. 1 倒立フラップ式 Oyster、(図2 参照)



図 2 倒立フラップ式 Oyster (Queen's Univ. Belfast)

図2の発電装置は、倒立フラップを使用、岸辺波打ち際の往復水流でフラップを加振、倒立振り子運動を起こす。このエネルギーを、水圧ポンプ、水力タービンを介して発電機を駆動、電力生産する。Limpet OWCの改良型として生みだしたものである(Prof. Whittaker told Watabe.)。この装置の運動方程式は、式(4)に示される。

$$\sum (I_0 + I_1 + I_2) \ddot{\theta} + (N_1 + N_2) \dot{\theta} + K\theta + T_p = M_o \sin \omega t \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 I_0 :フラップの慣性モーメント、 I_1 :前側付加水の慣性モーメント、 I_2 :後側付加水の慣性モーメント、 N_1 :前側の造波ダンピング、 N_2 :後側の造波ダンピング。復元モーメント係数 K は、フラップに働く浮力による。

筆者のコメントを下記した。

「発電特性」

- ケーソン無、のため、海水による復元ばねが存在しない。代わりに浮力式フラップを海底側で軸受支持し、浮力による復元ばね作用を生みだしている。倒立振り子には極めて大きい付加水の慣性モーメントが、フラップ両面に加わるから、式(2)を満足する大変大きなばね定数値が必要になる。浮力型は、困難なこの条件をクリアできる、実用的な方式であり、容易に共振運転が実現する(3)。
- フラップは、その前後両面で造波するから、造波ダンピングが、ケーソン使用方式より大きい。式(3)を満たすポンプトルク T_p も大きくなる。反対に、フラップの振れ角(最適値)は、ケーソン使用方式より小さい。図2は、水中に据え付けたシリンダポンプ(2台)を使用している。作動流体は清水、閉回路を採用しているため、機器内部の清浄度は高い。外部は海水にさらされ、腐食防止、可動部の潤滑、巨大推力・極低速ポンプの安全運転など、特有の課題を抱えている。シリンダはアクチュエータとしての使用実績は多いが、大型ポンプの実績は少ない。気泡混入防止やキャビテーション(その影に、サージプレッシャー、衝撃が潜む)対策が忘れられやすい。また、駆動部や反力支持部に働く力は巨大かつ衝撃的である。潤滑環境が極めて厳しい。損傷を防止するため、専門家の注意が必要である。図2には、そのような配慮が見当たらず、耐久性が懸念されたが、2011-7月公開されたOyster800(800kW 図3参照)では、これらが見事に改められている。出力が、図2に比較して250%に増加しながら、製造コストは4/3に留まったとのこと。なお、図4は、前身の315kW Oysterが海域運転中の写真である。フラップを押す海洋波が、激しくしぶきを上げているのは、フラップ運動が、海洋波運動にうまく同期しないからであろう。



図 3 公開された Oyster 800 (Aquamarine Power) 出力800kW、動力取り出し部が頑丈な構造になっている。

- OWCは、空気タービン採用なので、空気圧縮性による位相ずれが無視できなかった。しかし、Oysterは媒体が空気から水に変わり、位相ずれによる問題への対応が容易である。発電効率改善に対する効果は少なくないと思われる。
- 「耐久性」
- 発電装置を遠浅海岸の岸近くに設置する。これによ

り、嵐時の大波高の波は、海底抵抗により減衰し、装置に到達しない。しかも通常波高の波に対しては、減衰作用が少ない。実用に都合よい減衰で、天然の入力制御法として採用している。可動物体型長所を保ちつつ弱点を消去する、実用的手法である^(4, 5)。

- 倒立フラップは、フラップ頭部を超える波のエネルギー吸収をしない。これも入力制御作用である。上記の効果に合わせ、耐久性を確実にする二重の入力制御方式を備えている。

「その他」

- この構造は、現地の据え付け作業が容易でない。陸上で組み立てを完成させ、大型クレーン船を使用して据え付ける。費用も少なくないであろうし、保守も容易でないだろう。

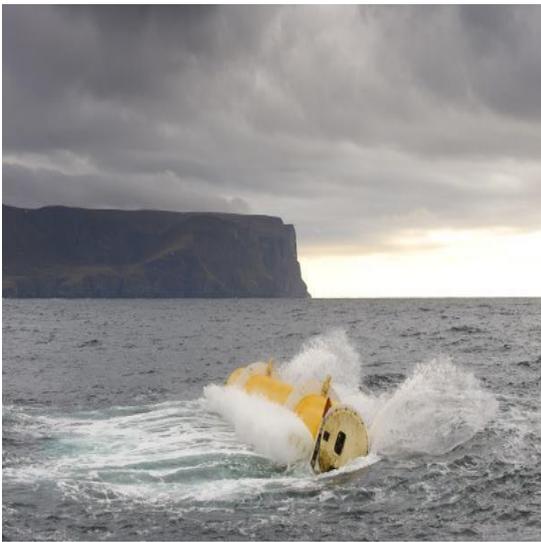


図 4 海域運転中の 315kW Oyster (Aquamarine Power Scotland)

3. 2 浮体式 Pelamis (図 5 参照)

この発電装置は英国エジンバラ大学で研究が始まり、スコットランドの企業 Pelamis Wave Power が商品化した。4 台の円筒型浮体を、ヒンジを介して軸方向に結合、海面を進行してくる海洋波に向け、1 直線に浮かべる。波が浮体に沿い移動すると、浮体に働く波力・浮力が周期的に変動するから、浮体それぞれ固有位相の揺動運動が発生する。ヒンジ部の浮体間相対運動に着目し、油圧変速機でそれを回転動力に変換し、発電機駆動を行う。①浮体が波に共振して揺動運動すること、②ヒンジ部には、なるべく大きな相対変位が発生すること。の 2 点が基本である。このため、③浮体に関しては、式(2)の条件を満たす設計を施すこと、④ヒンジとヒンジの間隔に関しては、波長値に関連する長さを選ぶことが大切になろう。式(3)のインピーダンスマッチが成立することの条件は変わらない。これらから結論されるポンプトルク T_p は、後述 Pendulum の場合よりかなり大きい(反対にストロークは小さい)。Pelamis は、ポンプにシリンダー型を採用しているので、実用機設計において、技術的な困難さが、一層強調されることになる。実用化に至

る間に存在する、避けられぬ難関である。

ここで筆者のコメントを述べたい。



図 5 実験中の 750kW Pelamis II (Pelamis Wave Power)

「発電特性」

- 装置構造は、海洋波運動に似た動きをしやすいよう考慮されている。その一方で、①式(2)の共振条件成立に対し、不適切な形状に思われる(垂直型ブイと比較するとき、その違いが明白)。②波の運動エネルギー吸収に対する配慮が不十分。
- 上記から、③Pelamis 浮体を垂直型ブイに置き換え、ヒンジ付き連結板で一直線に並べる。④連結板から垂直版を海底に向け下ろすと、連結板は波の運動エネルギーを吸収してピッチングをする。⑤垂直型ブイのヒービングと連結板のピッチングが、相互に連携し、連結部の相対運動が、波の位置エネルギーと運動エネルギーとの合成により行われるように、構成条件を整える。⑥これが実現すれば、Pelamis を参考にした効率改善型装置が誕生するだろう。(このアイデアは、筆者から Pelamis Wave Power 社へ好意として送付したことがある。2000 年初期。参考までに記した。)

「耐久性」

- Pelamis における最大弱点は、ヒンジ部の動力取り出し機構にある。浮体が海洋波エネルギーを吸収し、ヒンジ部から全エネルギーを油圧ポンプに向け送り出すには、対象部が局部的に集中しすぎている。低速なので、シリンダー推力が大きく、ヒンジの健全動作を阻害し、浮体への悪影響、などが避けきれないと思われる。海水環境が重なり、摺動部の破壊的な損傷、本体亀裂へと進展する危険がある。こうした危険性につき、早期に筆者から Dr. Richard Yemm (The inventor of Pelamis) へ伝えている (Pelamis 構想段階において)。しかし結果的に、彼はそれを無視した。彼ばかりでなく多くの人は、こうした部分に存在する技術的問題を認識していないのではなかろうか⁽⁶⁾。
- 図 5 の装置(ヒンジ部:動力取り出し機構、改良済み)は、新しい Pelamis II である。ポンプは、シンプルで頑丈なラム型に交換、収納本体も一回り大型の外容に生まれ変わっている。しかし、この対策は、上述原因がそのまま残る。装置強度を高めただけ

なので、根本的な解決策ではない。(装置寿命が、改造前の1~2か月から12か月程度になるか?)

- ヒンジ部のポンプを、Pendulor が採用したロータリベーンポンプに置き換えると、ポンプが、①ヒンジ作用と②動力吸収作用、の2機能を兼用する。構造が簡素化し、ヒンジ部にまつわるトラブル解消の切り札になりうる。問題は、ロータリベーンポンプの設計・製作技術が、まだ開発途上にあることで、韓国海洋開発研究院 (KORDI) が、この開発に取り組んでいる。筆者は公職を離れ自由人の立場にある。個人で判断し、国際共同作業の意義を理解したので、KORDI の要請に応え、この開発事業に協力している。図6は、かつて室蘭工大が試作し、今は博物的色彩のロータリベーンポンプだが、現物はスクラップ処理され、存在しない。

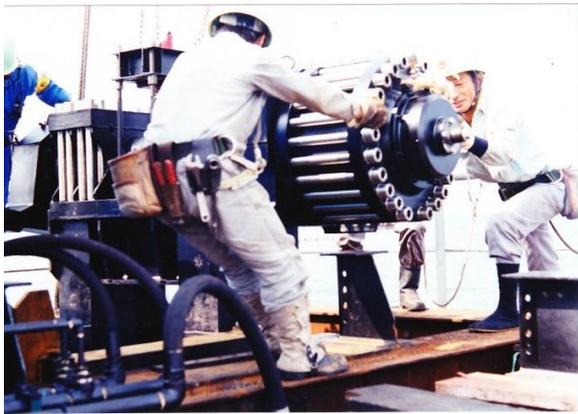


図6 Rotary Vane Pump (室蘭工業大学が試作・開発) このポンプは、貴重な研究成果を生みだすのに貢献した

3. 3 振り子式 Pendulor (図7および8参照)

振り子式は、アンテナ理論を実現しやすい発電方式である。振り子と水室がセットになり、弦と共鳴体を組み合わせた楽器のように、効率のよい共鳴振動が発生し、それをベースにした自律的発電に特徴がある。少ない人為的細工の下で、いわば天然の共振が生まれる。海洋波の特性にゆらぎがあっても、ほぼ安定な運転をするどっしりしたものを備えている。嵐に対し、効果的入力制御を行うことが、耐久性問題解決の命題である。実用性から可動機構の利用をさげ、入射波によるシンプルなアクティブダンピング法を活用する方向に、筆者は耐久性改善策を模索した。図7は、この方針の中から生まれた発電方式の一つで、日本特許 (Pat.4448972) が認可されている。概要を述べよう。

図7は、特殊浮体を使用する洋上型振り子式発電装置で、図8は、図7装置用の油圧回路である。海洋波の波動性が、発電機駆動に影響せず、一定速度回転するように考慮した方式 (航空機のCSD発電方式に似ている) になっている。

- 浮体には、Pendulor 用水室がある。波浪海面上で静止に近い状態で浮上するように、Heave, Surge and Pitch の3方向に働く波力を、Active damping 法を利用して相殺し、静止浮上を実現する。図7は、この

機能を備えた装置なので、ここに Pendulor を設置すれば、固定ケーソン使用の場合と変わらぬ発電特性が期待できる。浮体は、浮き防波堤の機能を持つので、静穏海面の醸成に貢献する。

- Active damping 法による効果は、波周期に支配される。通常海象時に最大効果となるようにするので、嵐時にはほとんど効果がない状況になる。Pendulor への、嵐時入射パワーは激減、結果として発電効率も 1/10 レベルに低下する。このように、Active damping 法を利用すると、嵐時には入力制御作用が働き、発電装置は安全に保護される。他方で、浮体による浮き防波堤機能は、嵐時には消滅する。
- Active damping 法は、浮体に働く波力を、浮体に働く反対向きの波力で相殺するのだから、浮体係留に要する力は大変小さい。係留が容易なので、それに伴う技術的、経済的メリットが少なくない。
- 高価なケーソンを、廉価な浮体に置き換え、その状態で沖合海面を利用するとなれば、洋上電源基地など、さらに広範囲利用の可能性が生まれる。電力単価低減に向け効果的なので、開発途上国の電源用として有望ではないか (7) ?

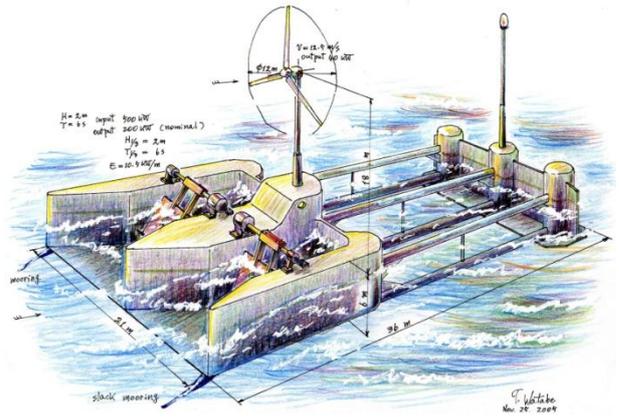


図7 洋上浮体型振り子式発電装置 (T-Wave, Pat.4448972)

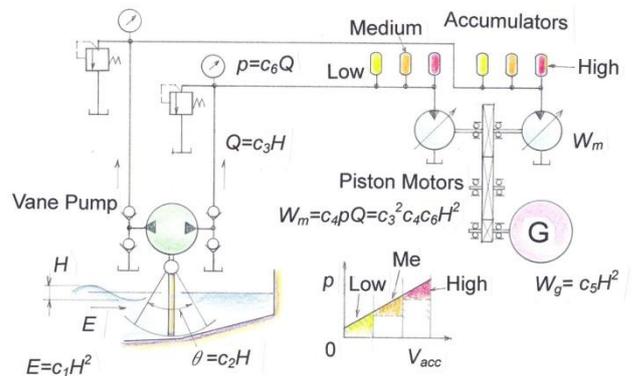


図8 振り子式発電装置の油圧回路 (T-Wave) (渡部、特願2000-373544)

[油圧変速機]

振り子式にとって、油圧変速機、特にポンプの影響は大きい。ポンプトルク T_p の性質がポンプにより微妙に変わり、ポンプ特性単独の領域を超え、発電システム特性

領域にまで、少なからず影響が波及する。振り子式は室蘭工大が発明した。初期研究は、シリンダーポンプ使用のシステムが対象になっていた。当初は、ポンプに原因する破損事故を繰り返し経験した。シリンダポンプが原因していると判断し、ロータリベーンポンプへの転換を決断した。この結果、問題を克服することに成功した。この過程で、ロータリベーンポンプそのものの試作・開発に、予想外の辛酸をなめた。室蘭工大はもとより、日本工業界にも、目的とするポンプ製造経験（技術）が無かったからである。しかし、室蘭工大と室蘭地区の企業（檜崎製作所、永沢機械）の献身的努力により、ポンプ試作に挑戦し、波力発電実験研究を、ついに完了させた。現在は、次のように認識している。「対象のロータリベーンポンプは、振り子式を成功させるための、基本的な技術要素の一つである。」 現実には厳しく、今日現在も、このポンプの設計・製作を請け負う日本企業との交渉成功例がない。技術資料は、唯一、室蘭工大の研究事例である。図9に、図7の装置用として筆者が設計したロータリベーンポンプを示す。図9を対象に、技術内容について説明したい（6, 8）。

- 図9は、一本の共通軸が、振り子支持とポンプ支持とを兼用した構造になっている。振り子に働く波力（トルク）は、共通軸により、振り子 → ポンプロータを経て、ベーンに働く油圧（トルク）へ、ダイレクトに伝わる。シンプルだから、壊れにくいし、エネルギー伝達もスムーズである。（普通なら、カップリング、リンク、ピンなど介在するが、ここでは一切不要）
- 浮体に対する振り子軸受の固定位置は、永年運転により多少の移動が避けられない。共通軸のため、この影響がポンプに伝達すると、精密構造のポンプが故障する心配がある。しかし、ロータは、共通軸の膨張、圧縮、傾き変化に関係なく、ケーシングに対し最適な位置に向け自己補正する。良好な運転が継続する。
- 振り子は平板が海水中にあるので、起電力が発生し、軸受を通過する電流が流れる。軸受が電食によりガタガタになる。軸受を電気絶縁支持し、さらに共通軸をアースする。アース自体が電食で侵される危険にも注意。
- 浮体にポンプを据え付けする場合の注意事項を述べる。大きなせん断力が、繰り返し働くボルトには、「ねじ緩みが発生しやすい。」・・・が知られている。波力発電用の「シリンダーポンプ」は、まさしくこの場合に相当する。固定ボルトのトラブルが、簡単に発生するかもしれない、典型的な場合である。室蘭工大の振り子研究で、十分、その困難を経験した。専門メーカーが設計・製作したシリンダーポンプを使用したのが、海域運転には耐えられなかった。室蘭工大が改造設計し、地元企業へ製作発注したポンプに交換した。
- この経験を、ロータリベーンポンプ設計・製作に生かしている。図9のポンプは、据え付け部ボルト

には、垂直荷重しか働かない。他に切り込みを設け、切り込み部が横荷重を受け止める。切り込みへはガイドで導入するので、海上クレーン作業に不安定さが伴っても、安心して確実な作業ができる。

「ロータリベーンポンプ用シール」(図10参照)

- 振り子式において、突出した技術的難関というものがある。代表はシールであろう。ポンプ効率の値は、①容積効率と、②トルク効率、の積である（シール構造・特性で決まる）。シール摺動部の隙間を（5～10） μm 程度に保ち、摺動部に働く押し付け力を、圧力平衡により必要最小限にコントロールする。これにより、摺動部の漏れと摩擦を極力小さくする。ポンプ油圧を受け、部品は変形（無視できぬ大きさになる）するが、変形に左右されることなく、摺動隙間が適正值内であるために、シールが自ら変形して対応する。シールには、このような適度の柔軟性が備わっていなければならない。
- シール原理は、次のように定義できる。「摺動部の流体流出防止のため、摺動部に介在させた浮遊体が、浮遊体表面に働く圧力により摺動面に押され、摺動面隙間を可能な限り微小に保つと共に、摺動抵抗も、可能な限り微小に保ちうる状況を作り出す。その結果、摺動部からの流体流出と、摺動部の摺動抵抗を、微小に保つようにした要素」 したが、摺動面のシール表面に発生する流体圧分布とその安定性が、シール効果の決め手になる。

上述のように、本来、シールは高度な特性を備える平面、デリケートで不安定である。ただし、円筒シリンダー用シールのような単純形状の場合は、圧力分布、その安定性、のいずれも健全で、心配ない。問題はロータリベーンポンプ用シールである。圧力分布、その安定性、どちらにも問題があり、しかも克服方法は制約される。図10のシール(渡部: Pat. 3851940)は、こうした問題点をクリアしたベーンポンプ用のものである。ゴム製だが、金属シール（構造は全く異なるが・・・）も作れる。

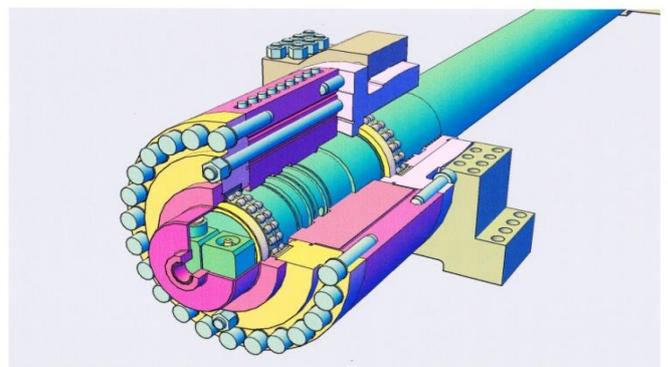


図9 Rotary Vane Pump (T-Wave Voluntary Consultant)
(寒地港湾、檜崎 他、Pat.2539742 & 2573905. 2006 権利放棄)



図10 ロータリベーンポンプ用シール
(渡部：Pat. 3851940)

「関連技術」

電波装置は、電波周波数が一定の場合を対象にして、アンテナ方式を適用している。しかし海洋波は、線形近似した場合も、その周波数は、短時間(数分)対象でも、長時間(数日)対象でも、一定とは見做せぬ程の変化をする。波力発電がアンテナ理論をベースに運転するには、海象変化に追従してパラメータ値を補正し、共振とインピーダンスマッチの条件を、よりよく保つようにできれば、例えば年間発電量を大きくする効果があるだろう。高価な波高計を使用しなくても、間接的に入射波状況を判断する方法をとることにより、目的を達することができる。こうして開発された“簡便制御式発電”の例が、図8 振り子式発電装置の油圧回路 である。コストパフォーマンスに注目した設計なので、高邁な狙いとはまるで違うシンプル構造になっている。油圧変速機の回路圧力が、波浪海象を知る情報信号として利用され、油圧制御弁の判断により、発電機駆動系のパラメータ(ピストンモーターの押しのけ容積値)が補正される。自前の油圧アナログ信号使用なので、電源不要。海水がかかる環境にも耐えられる。無人洋上運転や、離島・途上国向け需要にも応えられるであろう。

4. 決言

アンテナ理論をベースに検討すると、可動物体型波力発電の実用性は高い。あと一歩で実用化へ移れそうに思える。Pelamis, Oyster & Pendulor の3例だけを取り上げたが、これらの発電効率は、実用化に 대응する十分なレベルにあると期待されている。問題は耐久性である。

先頭を走った Pelamis は、支流部の構造設計で躓いた。この教訓が語るのは、波力発電装置は、広範囲の技術を結集した総合力による作品であって、例え末端部であろうとも、責任機能を果たさぬなら、装置全体の崩壊に至る危険をはらんでいる。Pelamis のトラブルは、その部分に詳しい専門家から見れば、早期に適切な対策ができたものと筆者は思う。

Oyster は、Prof. Whittaker 曰く、「OWC 研究の究極に到達した結論作品」という。(室蘭工大のまねではなく、新型 OWC である!) 本報告中で述べたように、Oyster

の最適運転条件を具体化する手法は、Pendulor の条件に照らし、相当違ったものになる。“似て非なるもの”であろう。Oyster が倒立振り子形式にしたのは、倒立型でなければならなかったからである。Oyster は、技術全般にわたり、注意深く、順調に、実用化へ向け進んでいる。写真で見える限り、弱点とされた部分に対する、十分すぎるほどの対策も認められる。

Pendulor は、専用油圧機器開発が鍵である。鋭意、韓国 KORDI が取り組んでおり、筆者は、成功するだろうと楽観している。日韓共同研究への発展を夢見ている。

検討結果を、次のようにまとめる。

1. 波力発電実用化のポテンシャルは高い。発電コスト低減のため、可動物体型波力発電は、都合良い方式である。耐久性を向上させ、普及を推進すべきである。
2. Pelamis は、power takeoff の設計ミスが命取りになった。発電性能が期待されていただけに惜しい結果であった。教訓とすべきである。
3. Oyster は、実用化が順調に進行している。慎重なシステム計画、装置設計が、成果を生んでいるように見受けられる。近日中に 800kW 機が実証運転を開始すると報じられている。実用化が近い。
4. Pendulor は、専用油圧変速機が鍵であり、韓国 KORDI が開発を進めている。筆者は協力している。

本報告書のまとめに当たり、室蘭工大、Pelamis Wave Power, Aquamarine Power, Queen's University Belfast の資料を参照した。感謝します。

5. 参考資料

- (1) Watabe T.: Pendulor wave power converter -15 years study & future prospect, proc. Int. sym. OEDM, 1993.
- (2) 渡部、近藤：波力発電、パワー社、2005.
- (3) 檜崎製作所：離岸堤に設置する波力発電装置のスターター報告書に、ケーソン無の場合の、振り子発電に関する理論解析が報告されている、1995.
- (4) Henry A. et al.: Advances in the design of the Oyster wave energy converter, 2009.
- (5) Collier D. et al.: The construction of Oyster -a near shore surging wave energy converter, 2009.
- (6) Watabe T.: Utilization of the ocean wave energy, Fuji Print, 2005.
- (7) Watabe T. & Suzuki N.: Comparison between power of the wind & the ocean wave, proc. RE 2006 Chiba, 2006.
- (8) 渡部、近藤 他3名：特許 2573905, 揺動ベーンポンプ、1996.