

新方式振動水柱型波力発電システムの提案

羽田野袈裟義 (社会建設工学専攻) ・種浦圭輔 ・ Pallav KOIRALA

A Proposal of Wave Power Generation System of New OWC-Type

Kesayoshi HADANO (Civil & Environmental Engineering), Keisuke TANEURA and Pallav KOIRALA

This paper proposes the wave power generation system of new OWC (Oscillating Water Column) type. The weaknesses of the previous OWC system are the high-cost structure due to a massive air chamber required to withstand the high pressure, and low efficiency of the special turbine which converts bidirectional airflow into unidirectional rotation of the shaft. In this paper, the new system consisting of a unidirectional turbine and a ratchet mechanism is devised. When the water level is rising the turbine does not work i.e. it rotates freely, which has an advantage that high pressure does not occur inside an air chamber; when the water level is descending the turbine works to generate electric power. Therefore, the air chamber can be lighter and of lower cost than that of the previous system and the efficiency of the turbine is definitely higher than the bidirectional turbine used in the previous OWC system. Consequently, the proposed system has much higher cost performance than the previous OWC system.

Key Words: wave energy, OWC system, chamber, high efficiency, ratchet mechanism, unidirectional turbine

1. はじめに

近年、地球温暖化とエネルギー資源枯渇の問題から新エネルギーの開発が切望されており、太陽光や風力や小型水力などの自然エネルギー^{1)、2)}、あるいは天然ガスや燃料電池などの種々の新エネルギーの研究開発が鋭意に進められている。またグリーン制度の導入など、自然エネルギーの開発には追い風が吹いている。特に風力や太陽光の直接利用については実用化が進み、電力会社が積極的にこれを買取る仕組みができています。一方、波力エネルギーの利用技術は活発な研究が行われているにも拘らず、コストと耐久性を両立する方法が確立されていないのが現状です。しかし、波力は太陽光の直接利用や風力に比べて安定性などの面から大変有利です。波エネルギーが安定な理由は、海の波が風により発生して風のない海域までエネルギーを輸送すること、風は絶えず何処かの海域で吹いていること、水の密度が空気に比べて遥かに大きいことなどです。

また日本海側では暖房用エネルギーの需要期^{3)、4)}に波エネルギーが大きく、また寒波来襲時の電力量の大きい日⁵⁾には波エネルギーが大きく、二重の意味でタイムリー性に優れた魅力的なエネルギーです。最近、欧州や豪州では再び精力的な取り組みが行われているのに対

し、海洋国の日本で取り組みが低調であるのは大変残念です。その理由としては、これまで研究開発されたシステムに対して高コストのイメージが定着したこと、そしてこれに伴い経済産業省から新エネルギーに指定されていないこと、所轄官庁が複数にまたがり手続きが煩雑なことや漁業補償が高くなることなどが挙げられる。このような状況を考慮すると、日本国内で実用技術を完成させたのちまず海外で種々の用途のために波力発電を活用し、一定の評価を得たのち日本国内に導入していく方向が現実的な戦略と考えられます。なお一般論として、波力発電の実用化促進には、自然エネルギーの宿命である不安定性を問題としない利用技術との連携を視野に入れることが必要であろう。その詳細は後で述べる。

波力エネルギー変換技術の主要な方式は以下の4つに大別される。

① 可動物体型：これは水面近くに置かれた物体が波の作用により運動することを動力として取り込む装置である。これは工夫次第では低コストが可能であるが、これまでは構造強度上の問題が指摘されていた。著者らはワイヤ・フロート・カウンタウエイトなどからなる「つるべ式」の波力発電装置を考案し、従来の可動物体型の課題であった構造強度の問題の主要部を解決した⁶⁾。また欧州の各国は、最近になって

可動物体型の装置の開発に注力している。特に2007年スコットランドで開発されたPelamis⁷⁾は、獲得電力も一基当り750kWと想定され、耐久性等の問題を確認する実験が開始された旨の報告がある。

- ② 振動水柱型：これは空気室を持ち、波により空気室内に水面変動と圧力変動をつくって空気室内外の圧力差によりタービンを回して発電する方式である。この方式は可動部を持たないため構造強度上の問題は少ないが、コストパフォーマンスが実用化の障害になっている。本提案はこの弱点を解決した方式であるので、この点について後で詳細に述べる。
- ③ 越波型：これは波を収斂堤で越波させて貯水し、その位置エネルギーを利用するものである。しかし、収斂堤や貯水池に大規模な工事を要する割にはエネルギー変換効率が低いという問題がある。
- ④ 受圧面型：これは波エネルギーを直接圧力と流れの形で受け止めるものである。一般的に没水型であるので、異常波浪時には安全であるが、防水機構が必要なため、保守管理やコストの問題がある。

上で述べたように、本論文では②の振動水柱型の弱点であるコストパフォーマンスの問題を解決した方式を提案する。

2. 従来の振動水柱型

まず、従来の振動水柱型波力発電の構成と原理、事例および課題について説明する。

2.1 構成と原理

振動型波力発電装置は空気室を持ち、空気室の一部にノズルを設けノズル位置にタービンを設置して、波により空気室内に水面変動と圧力変動をつくって空気室内外の圧力差によりタービンを回して発電する。従来方式では水面の上下動に伴い空気室内が加圧・減圧状態となり空気がノズル位置を往復する。そして二方向タービンを用いてこの空気の往復流から一定の向きに回転する軸の動力を取り出す仕組みである。このように従来方式は二方向タービンを用いて常時発電する。二方向タービンとしてまずウェルズタービンがつけられ、その後改良版が次々に開発されている。

詳細は後で述べるが、コストパフォーマンスが弱点であることは前述のとおりである。具体的には空気室のコストと二方向タービンの効率の低さである。

2.2 事例

これまで研究開発されたいくつかの振動水柱型の装置を紹介する。

- (a) 航路標識用ブイ^{1)、8)}：これはFig.1のように、ブイとブイ中央に設置した中央パイプを持ち、中央パイプは空気室となっている。波によるブイの上下動と中央パイプの中の海水の上下動の相対運動により中

央パイプ内の空気部分の圧力変動をつくりタービンを回して発電する。

- (b) 防波堤設置型⁴⁾：これはFig.2のように、混成防波堤やケーソン式護岸として用いる事を想定し、空気室をケーソンと一体化したものであり、約60kWを発電することが可能との報告がある。
- (c) 後ろ曲げ型ブイ⁴⁾：これはFig.3のように、空気室のダクトが波に対して後向きにL字形になっているブイ形式の装置である。これは浮体のピッチング運動によってダクト内の水が大量に移動するため高出力が期待される。現在、佐賀大学がこの方式に取り組んでいる⁹⁾。

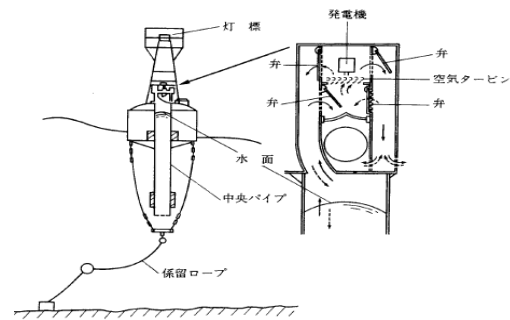
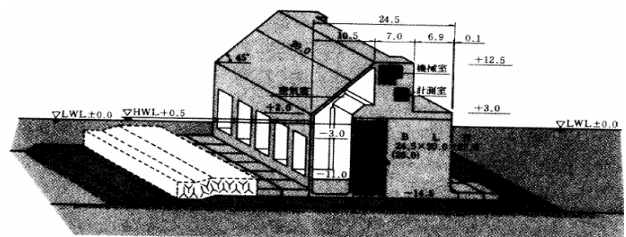


Fig.1 Navigational buoy with OWC^{1)、8)}



(a) Photograph



(b) Schematic figure

Fig.2 OWC system set in a breakwater⁴⁾

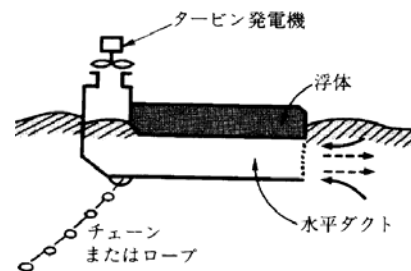


Fig.3 Schematic figure of the bent buoy^{4)、8)}

2.3 課題

この方式の課題として、空気室内の加圧状態と減圧状態の両方の時間帯で発電を行うため、空気室はこの圧力状態に耐えうる必要がある。防波堤形式では、加圧状態の時に空気室に作用する大きな浮力の処理のために、空気室に多額のコストを要する。また加圧状態においてはFig4のように空気室にはかなり大きい衝撃加圧が繰り返し作用する。Fig4の上から二番目のグラフが空気室内の圧力の経時変化の図である。図より、加圧時の圧力ピークは減圧時の負圧のピークよりもかなり大きく、加圧時の衝撃加圧が問題となることが分かる。したがって、圧縮空気を閉じ込める重量、部材の引張り強度が必要となる。また二方向タービンで往復流から一方向に回転する軸の動力を獲得する段階でエネルギー変換効率が一方向タービンの効率に比べてかなり低下する。これについては後で述べる。

以下では、上で述べた従来の振動水柱型の課題を考慮して新しい提案を行う。

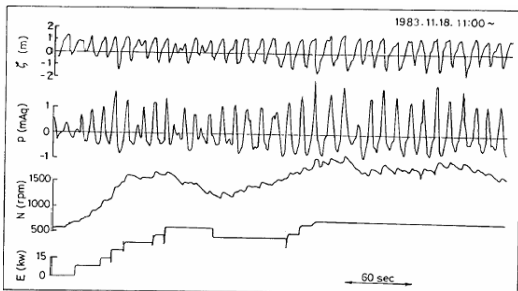


Fig. 4 An example of experimental data of the OWC wave power generation system “Kaimei”⁸⁾

3. 新しい提案

新しい提案として、一方向タービンとラチェット機構の組み合わせにより水面上昇時はフリーにし、水面下降時のみ発電し空気室内が加圧状態とならない方式を提案する¹⁰⁾。これにより、これまで空気室内の衝撃加圧への対策として求められた空気室の強度や重量への要求が低くなり、コスト低減になる。また一方向タービンの使用によりエネルギー変換効率が向上する。こうしてコストパフォーマンスが高くなる。その構成と原理について説明する。

3.1 構成と原理

Fig. 5に示すように、空気室を構成する筒体の中に、タービン、回転軸、ラチェット内蔵ギアボックスなどが収められ、波の上下運動によって筒体内に生じる流体の往復流により反転を繰り返す回転軸の回転をラチェット機構により一方向に変換し、エネルギーを獲得する。そのラチェット内蔵ボックスが含まれる機構をFig. 6に示す。タービン用の回転軸には、内輪がキー溝で固定され

ており、内輪と外輪12には歯車2が一体的に回転できるように取り付けられている。この歯車2に噛み合う歯車1には、発電機を駆動する軸が取り付けられている。したがって、内輪と外輪とが互いに空転する方向の回転力がタービンの回転軸を介して付加された場合には、各カムが内輪の外周面と外輪の内周面とかみこませる方向に作用し、外輪に対する内輪の回転が阻止され、両者は一体に回転することで、歯車2を回転させる。そして歯車機構を介して発電機を駆動する軸を回転することで発電機を回す仕組みである。その回転軸3の回転をラチェット機構により、一方向の回転に変換することができ、水面波の運動による空気室内の圧力変動において、空気室内が加圧状態または減圧状態のいずれか一つの時間帯にのみエネルギー変換できる。この場合、Fig4に示した空気室内の衝撃加圧を回避するため減圧時のみ動力変換するようにラチェット機構を装着する。

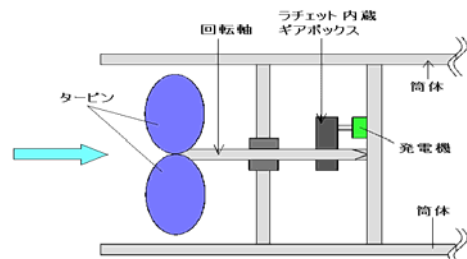


Fig. 5 The proposed energy converter¹⁰⁾

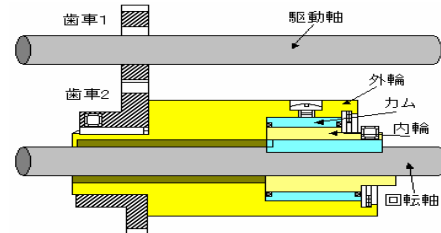


Fig. 5 Gear box with ratchet mechanism¹⁰⁾

3.2 優位性

従来の振動水柱型と比較し、本方式の優位性を述べる。まず、空気室が一体構造となりにくい場合や空気室隔壁をコンクリートなど引張り力に弱い材料で構成する場合は、空気室内の圧力の時間変動において、空気室内が加圧状態時間帯にはエネルギー変換を行わず、減圧状態の時間帯にのみエネルギー変換することができる。減圧状態では圧力変動もゆるやかで、衝撃圧は小さい。したがって、空気室に多大なコストを掛けないといったメリットがある。

また、二方向タービンでなく、一方向タービンを使うのでエネルギー変換効率が高くなる。両者の効率の比較のために、二方向タービンの効率をFig. 7にそして一方向タービンの効率をFig. 8に示す。Fig. 7より二方向タービンの効率は最大で40%程度でしかなく、また回転数（流量

係数) が小さい頻度の高い波浪条件の領域で効率がゼロとなっている。一方、Fig.8によると一方向タービンでは広い流量範囲で効率が80%以上となっており、二方向タービンに対する効率の優位性は歴然としている。

なお、二方向タービンを使う場合は常時エネルギー変換するのに対し、本提案の方式では水面が下降する時間帯のみエネルギー変換する。次に、エネルギー変換のポテンシャルである空気室内の水面上下動のストロークを比較する。重要な原理として、空気室内の水位変動はエネルギー変換のために外の水位変動よりも抑えられている。従来方式では平均水位を中心にしてほぼ同程度に抑えられた形で水位が変動するのに対し、本提案の方式では空気室内の水位は水面上昇時には外の水位と同程度まで上昇し、水面下降時には抑えられた形で水位が低下する。空気室内の水面上下動のストロークが抑えられる量は本方式では従来方式の半分程度と判断される。このためタービンの効率の違いを度外視して考えると、利得エネルギーは両者で同程度となる¹¹⁾。

また、ラチェット機構の後段にフライホイールを挿入することで、回転軸の回転速度の変動を抑え、発電機の回転速度変動による発電ロスを抑えることもできる。その他にタービンの回転速度を上げるためには、従来の振動水柱型で行われているように、空気室の断面積に比べて、ノズルの面積を小さくすればよい。

4. 実用化の方向性

前述のように、日本では波力発電の実用化やその利用に対して厳しい環境にあるため当面は国内で技術を完成させて海外で利用あるいは実施するのが賢明である。

また一般的な波力エネルギーの利用面から考えると、自然エネルギーの宿命で不安定は避けられない。このため、波力で得たエネルギーを直接売電することはあまり得策ではないかもしれない。現時点で合理的と考えられている用途としては、臨海域や災害時など系統電源が適さない地域または状況での諸用途、例えば、海水淡水化、地下水揚水、海域の水質改善などのエネルギー源として利用することが挙げられる。また、水産加工業や臨海部に位置する各種食品産業の関係者によると、臨海域で系統電源やディーゼル発電とのハイブリッドとして、波エネルギーが豊富なときにこれを使って従来のエネルギー使用を抑えることが合理的のようである。

エネルギーに関する世界的な潮流として、水素に大きく傾いている⁹⁾。自然エネルギーの不安定性に対してはエネルギーを水素として回収・貯蔵することが有力な選択肢である。将来的には、波力で得た電気をを用いて水を電気分解し、水素と酸素を製造・販売することが期待される。水を電気分解して得られた水素を燃焼させたときのエネルギーを水素獲得に要したエネルギーで除した

値として、評価されるエネルギー効率は条件が良い場合には60%程度と見られている。

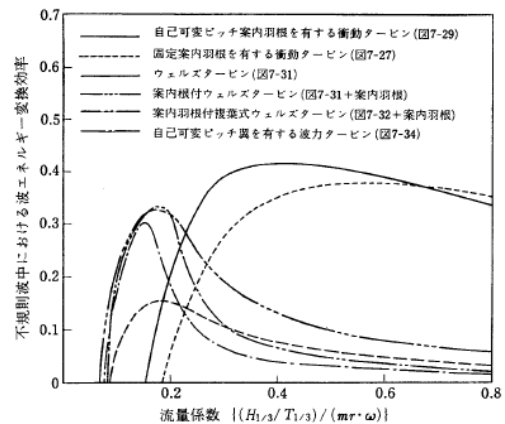


Fig. 7 Efficiency of bidirectional turbines¹⁾

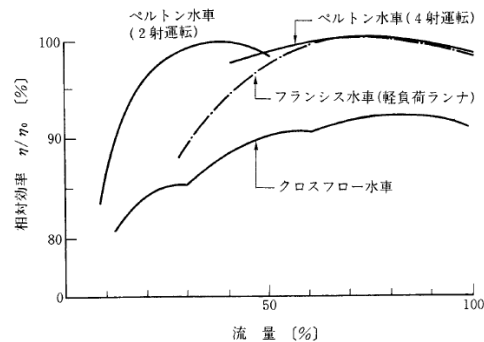


Fig. 8 Efficiency of unidirectional turbines¹⁾

5. 結語

以上、本論文では一方向タービンとラチェット機構とを組み合わせた新方式の振動水柱型波力発電システムを提案した。本提案の方式は、従来型の課題であったコスト(空気室)とエネルギー変換効率の両方を解決しており、有望なものと認識している。最後に、実用化・事業化に向けた構想を再度述べる。前述のように、日本国内で実用技術を完成させたのちまず海外で種々の用途のために波力発電を活用し、一定の評価を得たのち日本国内に導入していく予定である。このために、主に国内の企業や団体と徹底した技術開発を行うとともに事業化に向けた用途開発のため国内外の企業や団体と情報交換する予定である。

謝辞：著者らの一連の波力発電研究において、(株)青木建設、(株)きんでん、(財)やまぐち産業振興財団、(財)中国技術振興センター、藤井物産(株)科学技術振興事業団、中小企業総合事業団、佐賀大学、日本文理大学よりご協力、ご支援を賜った。また、本稿執筆にあたり、国土交通省、(株)パワー社、および(株)霞出

版社より図面の使用許可を快諾頂いた。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 清水幸丸編著：「自然エネルギー利用学（改訂版）」，パワー社，1999.
- 2) TRONIC風力発電ネットワーク：
<http://www.tronc.co.jp/hikakuhyou.html>.
- 3) 高橋重雄：日本周辺における波パワーの特性と波力発電，港湾技研報告，No.654，1989.
- 4) 近藤徹郎ら；海洋エネルギー利用技術，森北出版，1996.
- 5) 日刊工業新聞：2004年1月9日版，2004.
- 6) 羽田野袈裟義ら：浮体式波力エネルギー変換の力学，土木学会論文集B，Vol.62 No.3,270-283,2006.
- 7) Pelamis Wave Power: <http://www.pelamiswave.com/>
- 8) 益田善雄：日本の波力発電，霞出版社，1987.
- 9) Shuichi Nagata et.al：Experimental Study on Hydrodynamics Forces acting on a Floating Wave energy Converter “Backward Bent Duct Buoy”. ISOPE2008, 2008.
- 10) 羽田野袈裟義：振動水柱型波力発電装置用動力変換装置，特開2008-150997，2008.
- 11) 羽田野袈裟義ら：浮体式波力エネルギー変換装置の力学計算について，流体力の評価とその応力に関する研究論文集，第3巻，土木学会水工学委員水理部会，pp.97-102, 2004.

(平成20年12月26日受理)