

波力発電の現状と重力式（越波型）波力 発電装置の開発

PRESENT CONDITIONS OF WAVE POWER GENERATION AND DEVELOPMENT OF GRAVITY-TYPE(WAVE OVERTOPPING TYPE) WAVE POWER GENERATION DEVICES

田中博通¹・鈴木厚志²・淀川已之助³

Hiromichi TANAKA, Atsushi SUZUKI and Minosuke YODOKAWA

¹正会員 工博 東海大学教授 海洋学部海洋土木工学科(〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸3丁目20番1号)

²学生会員 東海大学大学院海洋学研究科海洋工学専攻(〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸3丁目20番1号)

³東海大学研究員(〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸3丁目20番1号)

In this paper, the authors report on the domestic and international status of wave power generation, and describe their development of a gravity-type (wave-overtopping type) wave-power generation device which utilized the principle of water-flow energy. Over the course of six years, the authors have developed a conical floating body device, which has both wave-eliminating and water-flow (pumping) functions, for the purpose of promoting water circulation in a closed water area with wave energy. A wave power generation device has been developed as the energy from the water flow is expected to generate in the conical floating body. The device is a conical floating body with 12 sheets of convergence banks and a column-shaped tank where overtopping waves flow into its center. The power generation mechanism is such that the blades installed at the duct entrance of the floating body's lower-center section turn the generator turbine. This paper reports the results of an experimental study on the generating efficiency of the wave power generation system regarding the blade characteristics, wave height, time cycles, and the wave overtopping head.

Key Words : Wave Power Generation, Conical Floating-body, Wave Overtopping Type

1. はじめに

2004年1月8日付け「Nature」でイギリス Leeds 大学の国際研究グループが1103種調べた結果、現状のまま化石燃料を消費した場合、大気中のCO₂濃度が500ppm~550ppmになり、15~37%の陸上動植物が絶滅する調査結果が発表された。¹⁾ IPCC「第4次統合報告書」によれば、地球温暖化の原因は化石燃料の大量消費による人為的な影響であることを断定し、この使用状況が継続されるならば、種の絶滅、食糧問題、海面上昇、大雨の頻度の増加、台風などの大型化が指摘された。²⁾

このような状況において、地球環境に負荷のかからない再生可能エネルギーである太陽光、風力、バイオマス、地熱、海洋エネルギー等を積極的に利活用する技術を開発することは土木技術者の使命であるものと考えられる。

わが国のこれまでの波力発電に関する研究の進展から、波力エネルギーはそもそも再生可能エネルギーに分類されるにもかかわらず、未だに新エネルギーとしての地位が技術的にも確立されていないのが現状である。一方、欧米諸国においては、波力エネルギー技術への関心は増加し、中でも欧州における

波力エネルギーの実証プロジェクトでは、地域の送配電網への接続が実現している。欧州での海洋エネルギー利用技術の開発は、欧州委員会の地球温暖化対策をとしての再生可能エネルギーの利用を基本においた政策に支えられている。

そこで、本研究は、波力発電について国内外の状況を述べることにより、波力発電が商用電力と成りえた欧米の発電方式と戦略について言及する。

恒常的に波高が大きい EU 諸国（特に北海沿岸）において、いかなる方式の波力発電でもかなりの発電量が期待できる。因みに、2004年のNOWPHASデータから下田、清水、御前崎、酒田、石垣の各観測所の波浪統計から出現頻度が最大となる波高を求めると、それぞれ0.51~0.75m, 0.26~0.5m, 0.51~0.75m, 0.26~0.5m, 0~0.25mであり、比較的低波高の波から年間を通して電力を得るためには波力発電方式の選定と発電機構の技術的な取り組みが重要となる。

そこで、水は空気に比べ常温(20℃)で828倍も高密度であることから、低波高でも電力を得ることが出来る越波型の波力発電方式を採用することとし、著者等が6年間に渡り波エネルギーによる閉鎖性水域の水循環を目的として開発してきた消波機能と送

水機能(ポンプ機能)を兼ね備えた円錐形状浮体³⁾⁴⁾⁵⁾の送水エネルギーが見込まれることから、その原理を活かした重力式(越波型)波力発電装置を開発した。ここでは、この波力発電システムについて、波高、周期、越波揚程、プロペラの特性に対する発電効率について実験的な研究成果を報告する。

2. 国内外の波力発電について

(1) 国内の波力発電の状況

日本沿岸の波エネルギーは全国平均で 6kW/m と推定され⁶⁾、沿岸域に沿う直線的な周囲距離 5,200km から算定される賦存量は 3,120 万 kW となる。この未利用な波エネルギーを発電効率と設置条件を考慮して設置することによってかなりの電力得ることができる。

100 年前にイギリスで波力発電の特許が取得され、その後、おもにベルファースト式(OWC)の波力発電装置が開発された。わが国では 1919 年に廣井勇博士が 1911 年に千葉県大東岬に空気タービン式の波エネルギー実験施設を設置し、約 10 年間実験を行ったことが発電ではないが波エネルギー利用としては先駆けの研究である。⁷⁾

波力発電の原理は下記の 6 種類に大別される。⁸⁾ ①減衰型(浮動装置が波で屈曲することを動力源とする)、②点吸収型(浮体が波で上下運動するエネルギーを利用する)、③振り子式波力変換型(波にตอบสนองして受圧板が振動した力を油圧に変換する)、④振動水柱型(空気室の水位が波で上下することにより空気が加減圧されてタービンを回す)、⑤越波型(越波した海水を貯水槽に入れ、この水の流れてタービンを回す)、⑥没水圧力差型(波の水位で装置内部に生じた圧力差を利用して揚水発電する)である。また、他の発電方式としてつるべ式波力発電⁹⁾が開発されているが、これは点吸収型に分類される。最近、浮体の波による動揺から発生したジャイロモーメントにより発電機を駆動するジャイロ式発電装置が開発された。(特開 2005-207332) この方式は、波力発電

装置としてまったく新たな原理である。

表-1 はわが国で行われた波力発電に関する既往のおもな実証研究である。わが国における波力発電は、1970 年代後半から実用化研究がなされ、実験船「海明」¹⁰⁾で 1978 年から 2 ヶ年にわたって波力発電の実証実験を行ったがコストの割にエネルギーが得られなかったため実験は一時凍結されたが、1998 年から「マイティーホーエル」による実験を再度行った。わが国の波力発電方式の多くは、波の上下運動による空気流を利用する「振動水柱型空気タービン方式」(OWC)と波エネルギーを受圧板の振り子運動としてとらえて油圧に変換する「振り子方式」である。今後は、地球温暖化防止対策と 2007 年 7 月に施行された「海洋基本法」の基本計画に基づく海洋に関する研究開発の観点から、わが国において波力発電の開発は重要な課題となるものと考えられる。

(2) 海外の波力発電の状況

海外の波力発電の実用化に関する研究開発は、わが国同様に 1970 年代後半から行われ、他の再生可能エネルギーの技術開発と同様な位置づけで 1990 年代から大学とベンチャー企業の研究協力により実用化された。特に、欧州海洋エネルギー協会主導の下、地球温暖化対策として海洋エネルギー開発が各国政府の政策となっており、その中でもイギリス(スコットランド政府)が中心的な役割を担い、2004 年には欧州海洋エネルギーセンター(EMEC)をオークニー諸島に設立した。表-2 は、海外の主な波力発電の

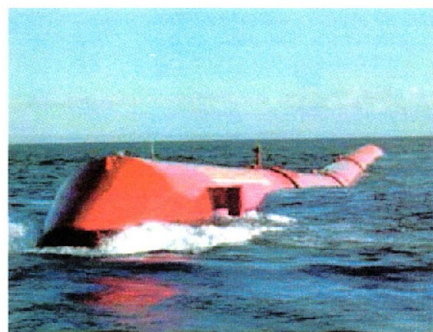


図-1 Pelamis



図-2 PowerBuoy

表-1 わが国の波力発電の開発

実験名および実験機関	実施年	発電方式
海明	海洋科学技術センター	1977~1985 振動水柱型
振り子式装置	室蘭工大	1979~1990 振り子式
沿岸固定式	海洋科学技術センター	1983 振動水柱型
海陽	日本造船振興財団	1984~1986 振り子式
定圧化タンク方式	エン・エリク・振興協会	1988~2000 振動水柱型
波力発電防波堤	運輸省	1990~1991 振動水柱型
水弁集約式	東北電力	1996 振動水柱型
マイティーホーエル	海洋科学技術センター	1998~2002 振動水柱型
ジャイロ式	神戸大・鶴アルファ技研	2001~ ジャイロ式

表-2 海外の波力発電の開発

プロジェクト名及び装置名	国名	社名及び事業名	実施年	発電方式
Pico	ポルトガル	Wave Energy Centre	1998	振動水柱型
Archimedes Wave Swing	スコットランド	AWS Ocean Energy Ltd	2004	没水圧力差型
WaveDragon	デンマーク	WaveDragon ApS	2005	越波型
Port Kembla	オーストラリア	Oceanlinx	2005	振動水柱型
Pelamis	イギリス	Pelamis Wave Power	2006	減衰型
AquaBuOY	アメリカ	AquaEnergy Group	2006	点吸収型
PowerBuoy	アメリカ	Ocean Power Technologies	2006	点吸収型
Wavebob	アイルランド	Marine Institute	2006	点吸収型
OE Buoy	アイルランド	Ocean Energy	2007	振動水柱型

開発状況である。これらの中には商用電力として送配電網へ接続しているものもあり、将来的には地域で数 MW 規模の発電を計画している。図-1, 2 はそれぞれ Pelamis と PowerBuoy の概観である。Google INC は、2008 年 8 月に、波力発電または潮力発電を備えた水上プラットフォームに多数のサーバを設置し、電力と熱交換を同時に解決することが可能な水上データセンター(Water-Based Data Center)の特許を出願した。このように波力発電は様々な用途があり、平常時のみならず特に災害時等の緊急時に役立つ施設として構想しておくことも大切である。

表-1 と表-2 を比較すると、海外の発電方式は、多くの企業と研究機関が関係していることから各種方式の波力発電が開発されている。また、海外において 2005 年以降の波力発電の開発が盛んであり、欧州とわが国の波浪条件の違いを考慮しても、わが国と欧州との科学技術に対する哲学の質の違いを感じる。

3. 実験方法

実験は、平面水槽(22m×23m×1.2m)で不規則波による実験を行った。波浪条件は、フルードの相似則を用いた。写真-1 に示す消波機能と送水機能を併せもつ円錐形状浮体(模型縮尺 1/17)に波力発電装置を設置し、円錐形状浮体はチェーンで 4 点係留し、アンカーで固定してある(図-3)。

実験条件は、①プロペラ(写真-2)の枚数(4, 6, 8枚)、②プロペラ角度(15, 17, 19, 21, 23, 25°)、③越波揚程(10, 12, 13, 14cm)、④波高(14, 15cm)、⑤周期(1.1, 1.2, 1.3, 1.4s)の条件を組み合わせ

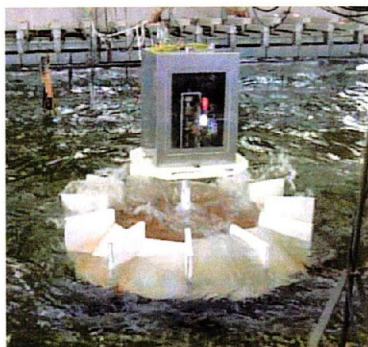


写真-1 波力発電装置

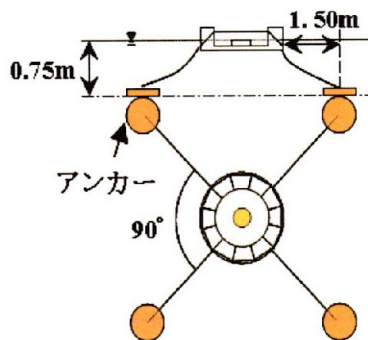


図-3 係留方法

て、回転数(rpm)、電圧(v)、送水管内流速 u (cm/s)、波高 $H_{1/3}$ (cm)、周期 $T_{1/3}$ (s)を取得し比較検討を行った。なお、実験波の条件は、造波装置の制約内で発電が可能となった波高 14cm(2.38m)と 15cm(2.55m)とし、周期は実海域の周期に近い 1.1~1.4s(4.5~5.8s)の範囲に設定した。

波力発電の原理は、図-4 に示すように、入射波エネルギーを位置エネルギーに変換し、その落差で水流エネルギーが生じ、その運動エネルギーを直接利用することでプロペラを回転させ、接続した発電機を回転させて発電する方式である。

計測は、浮体の前後左右合計 5 本の波高計、浮体に取り付けた 3 次元加速度計、放水管内に取り付けた 2 次元電磁流速計、プロペラの回転を計測する回転計、発電機からの出力電圧を同時計測行った。データ総数は各 4096 個、サンプリング時間は 20Hz である。

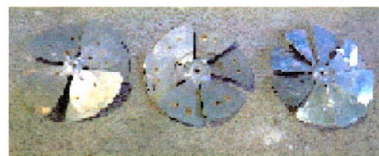


写真-2 プロペラ

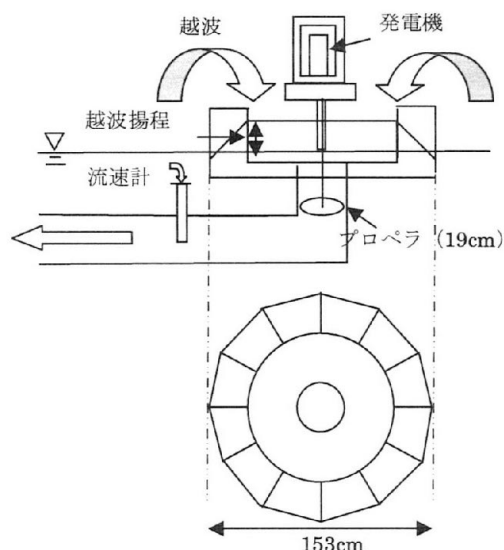


図-4 波力発電の原理

4. 実験結果

(1)揚程との関係(波高 15cm, 揚程 10cm, プロペラ 6枚, 角度 17°)

図-5, 6, 7 は揚程 10~14cm における周期 1.1~1.4s の変化である。図中の▲は管内流速、■は回転数、●は出力電圧である。揚程 10cm において周期が変化した場合、どの周期でも安定した回転数と流速が得

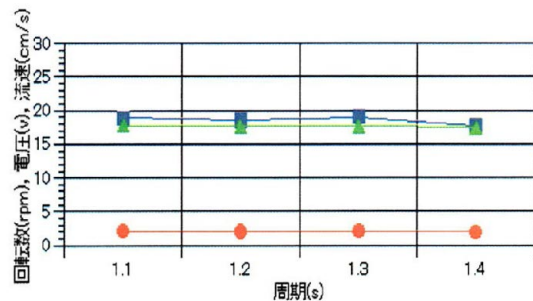


図-5 波高 15cm, 揚程 10cm, プロペラ 6 枚, 角度 17°

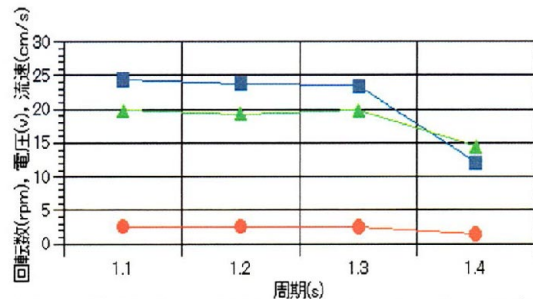


図-6 波高 15cm, 揚程 12cm, プロペラ 6 枚, 角度 17°

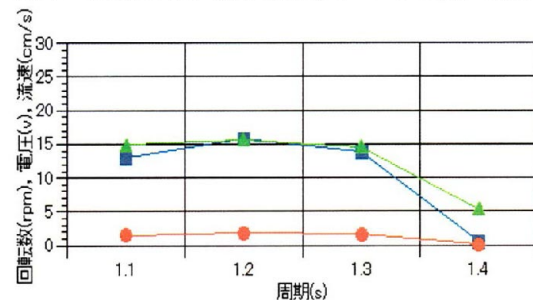


図-7 波高 15cm, 揚程 14cm, プロペラ 6 枚, 角度 17°

られている。これは揚程が低い場合には、長周期の波でも越波しやすいため、共振などの問題が無いと考えられる。揚程 12cm において短周期の 1.1~1.3s までは回転数、流速が安定して効率も良い。1.4s において周期 1.1~1.3s と比較すると、回転数が約 20%, 流速は約 50%低下している。これは揚程が高くなると、長周期では波と浮体が共振してしまうため波が越波することが少なくなり回転数、流速が低下した。揚程 14cm において周期が 1.1~1.3s までは回転数、流速が安定しているが揚程 12cm と比較すると効率は悪い。周期 1.4s では回転数、流速ともにほぼ 0 に近づいている、これは揚程が最大のため、波と浮体が共振してしまい効率が低下した。ちなみに、この浮体の固有周期は、約 2 秒である。

(2) プロペラの枚数との関係(波高 15cm, 周期 1.2s, 角度 17°)

図-8, 9, 10, 11 は揚程 10~14cm におけるプロペラ 4, 6, 8 枚の変化を表したものである。揚程 10cm においてはさほど変化が見られなかったが、プロペラ 6 枚で流速が最大となったが、回転数は最大では無かった。また、揚程 12cm においてプロペラ 6 枚が最も効率よく回転性した。プロペラの枚数が少ない

程、通水性が良くなる傾向があることから流速が速くなっている。しかし、流速が速くてもプロペラに効率よくエネルギーが伝わるとは限らない。揚程 13cm において揚程 10cm と同じような傾向があったが平均回転数、流速と共に数値は揚程 13cm の方が高い。揚程が低すぎると位置エネルギーが小さくなるため効率が低下する。揚程 14cm では揚程 13cm と比較するとプロペラ 4 枚では回転数が若干上昇したが、プロペラ 6, 8 枚は大幅に回転数が低下した。揚程が高い場合はプロペラ枚数が多い程、効率が低下することわかる。

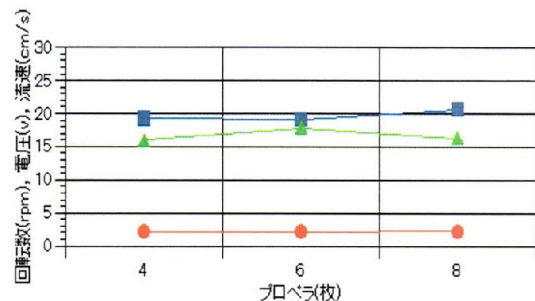


図-8 波高 15cm, 周期 1.2s, 揚程 10cm, 角度 17°

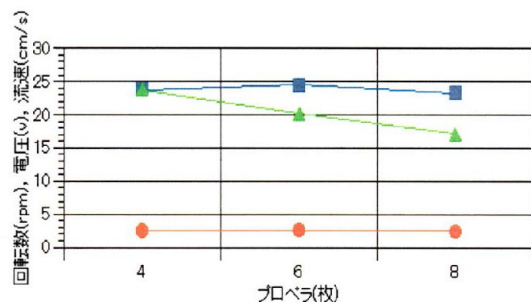


図-9 波高 15cm, 周期 1.2s, 揚程 12cm, 角度 17°

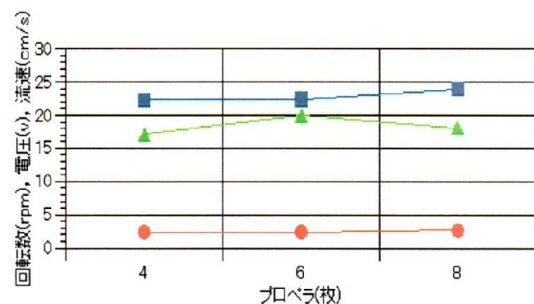


図-10 波高 15cm, 周期 1.2s, 揚程 13cm, 角度 17°

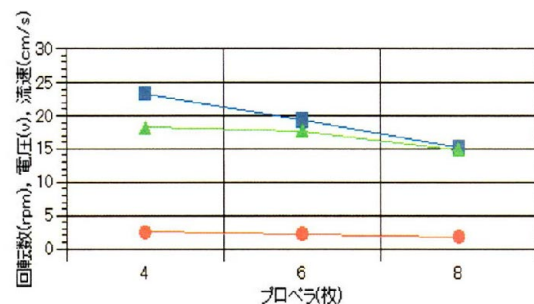


図-11 波高 15cm, 周期 1.2s, 揚程 14cm, 角度 17°

(3) プロペラの角度との関係 (波高 15cm, 周期 1.2s, ∇ ロペラ 6 枚)

図-12, 13, 14, 15 は揚程 10~14cm におけるプロペラ 6 枚時のプロペラ角度 15~25° の変化を表したものである。揚程 10cm において角度が上昇するに連れて回転数と流速が上昇している。揚程が低い場合、波と浮体が共振することなく越波しやいが、プロペラ角度が低い場合は流速から判断すると、通水性が悪いため貯水槽が比較的満水状態となり、越波した波がオーバーフローしてしまう。このオーバーフローを避けるためにもプロペラ角度を大きくして通水性を良くすることにより、効率が上昇する。揚程 12cm においてプロペラ角度 15~23° まで流速と回転数が上昇し、揚程 10cm の時と比較しても回転数、流速と

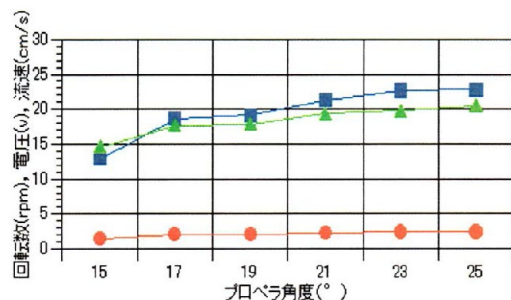


図-12 波高 15cm, 周期 1.2s, 揚程 10cm, ∇ ロペラ 6 枚

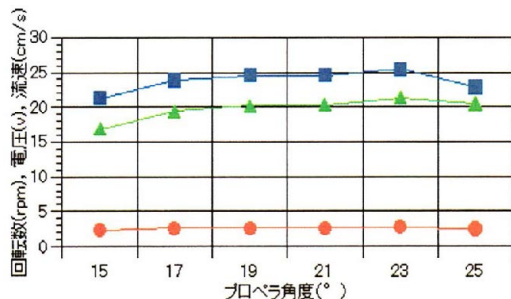


図-13 波高 15cm, 周期 1.2s, 揚程 12cm, ∇ ロペラ 6 枚

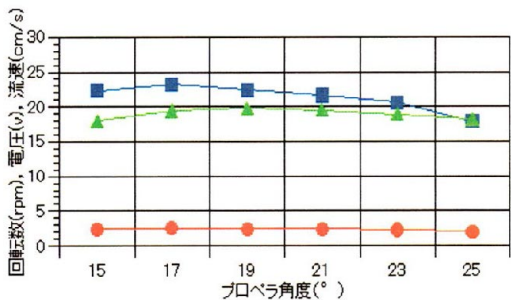


図-14 波高 15cm, 周期 1.2s, 揚程 13cm, ∇ ロペラ 6 枚

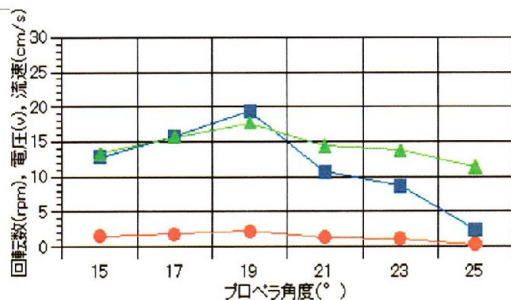


図-15 波高 15cm, 周期 1.2s, 揚程 14cm, ∇ ロペラ 6 枚

もに効率が良い。しかし、プロペラ角度 25° の時に回転数、流速が低下した。これは角度が大きくなると、通水性が良くなる、プロペラにエネルギーが効率良く作用しなくなるため失速する。揚程 13cm ではプロペラ角度 17° で回転数が最大となり、その後角度が大きくなるに連れて回転数、流速は低下した。揚程 14cm ではプロペラ角度 17° で回転数、流速が最大となり、その後角度が大きくなるに連れて回転数、流速は大幅に低下した。揚程が高くプロペラ角度も大きいと、通水性が良い方向に作用するためプロペラに効率良くエネルギーが作用しなくなったものと考えられる。

(4) 揚程との関係 (波高 15cm, 周期 1.2s, ∇ ロペラ 6 枚)

図-16, 17, 18, 19 は、プロペラ 6 枚時のプロペラ角度 19~25° における揚程 10~14cm の変化を表したものである。プロペラ角度 19~25° において揚程 10cm から 12cm になると全てのケースで回転数、流速が上昇し、揚程 12cm において最も回転数、流速が大きくなっている。その後、揚程が高くなるに連れて回転数、流速と共に低下している。揚程が低すぎても位置エネルギーが小さくなるため効率は低下し、逆に揚程が高すぎても越波しなくなり、効率は著しく低下する。

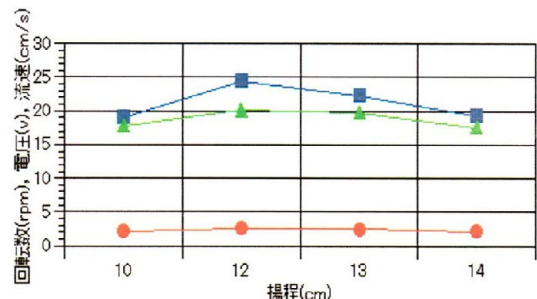


図-16 波高 15cm, 周期 1.2s, ∇ ロペラ 6 枚, 角度 19°

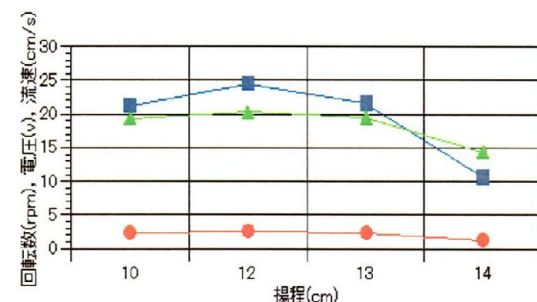


図-17 波高 15cm, 周期 1.2s, ∇ ロペラ 6 枚, 角度 21°

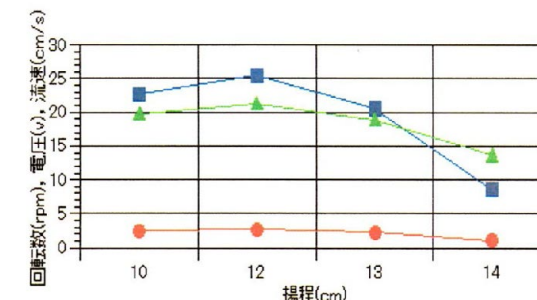


図-18 波高 15cm, 周期 1.2s, ∇ ロペラ 6 枚, 角度 23°

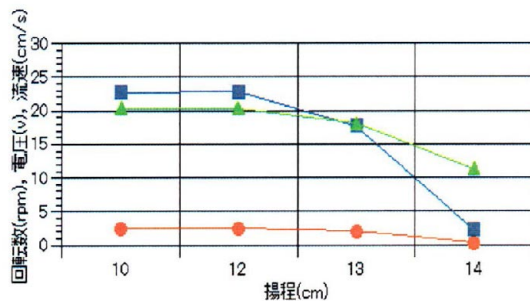


図-19 波高 15cm, 周期 1.2s, プロペラ 6 枚, 角度 25°

(5) 周期との関係 (揚程 12cm, プロペラ 6 枚, 角度 17°)

図-20, 21 はプロペラ 6 枚, 角度 17°, 揚程 12cm における波高 14, 15cm の場合における周期 1.1~1.4s の変化を表した図である。波高 14cm と波高 15cm を比較すると, 波高 15cm の方が回転数, 流速ともに効率が良い。波高が大きくなると越波する量が増えるため, 流水エネルギーが大きくなり, 結果として効率が良くなる。周期が 1.4s の場合は, 波高 14, 15cm において効率が低下した。

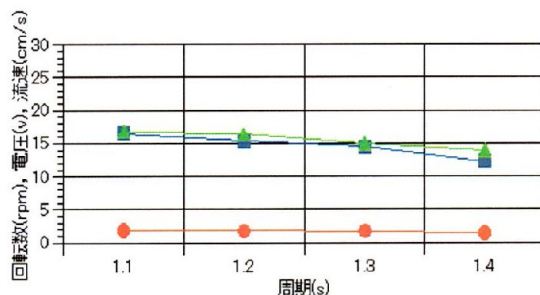


図-20 波高 14cm, 揚程 12cm, プロペラ 6 枚, 角度 17°

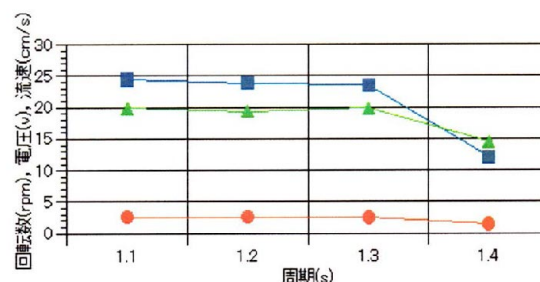


図-21 波高 15cm, 揚程 12cm, プロペラ 6 枚, 角度 17°

5. 結論

本研究は, 国内外の波力発電の現状について波力発電方式を中心に分析するとともに, 円錐形状浮体を用いた重力式 (越波型) 波力発電システムについて, 波高, 周期, 越波揚程, プロペラの特性に対する発電効率について実験的な研究を行った。

主要な結論を以下に示す。

1) 周期 1.1~1.3s では, 比較的安定した回転数, 流速が得られたが, 周期 1.4s では回転数, 流速が低下した。これは波の周期が浮体の固有周期に近づくことによる共振が原因である。

2) プロペラの枚数 4, 6, 8 枚では, 6 枚羽が最も効率よく回転した。プロペラの枚数が少ない程, 通水性が良くなることから流速が速くなっている。しかし, 流速が速くてもプロペラに効率よくエネルギーが伝わるとは限らない。

3) プロペラの角度においては, 角度が 15° から 23° まで増加すると回転数, 流速は増加するが, 角度 25° になったときに通水性が良くなり, 回転数, 流速が減少した。

4) 揚程 12cm で回転数, 流速が最大となった。揚程が 13, 14cm と増すと, 波高 15cm に対して越波できずに回転数, 流速が低下する。原型のスケールでは, 波高が大きいため揚程を高くすることが可能となり, 従って発電出力も増加する。

5) 今回, 最もエネルギー効率の良かったのは, 波高 15cm, 周期 1.2s, プロペラ 6 枚, 角度 23°, 揚程 12cm 時で, 発電効率は約 3.5% となった。

謝辞: 本研究を行うにあたり, 東海大学海洋学部海洋建設工学科の学生諸氏に実験等に協力していただいた。ここに記して謝意を表す。また, 本研究は, 科学研究費補助金基盤研究 (C) (No. 18560813) による成果であることを付記する。

参考文献

- 1) Chris D Thomas et al.: Extinction Risk From Climate Change, *Nature* 427, pp.145-148, 2004.
- 2) IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2007, The Scientific Basis*, 2007.
- 3) 田中博通, 長津安洋, 真鍋安弘: 浮遊渚の消波特性と送水特性について, 海洋開発論文集, 第 20 巻, pp. 455-460, 2004.
- 4) 田中博通, 長津安洋, 真鍋安弘: 浮遊渚 (円錐形状浮体) の消波特性及び送水特性に関する実験的研究, 海洋開発論文集, 第 21 巻, pp. 553-558, 2005.
- 5) 田中博通, 住田哲章, 鈴木厚志, 真鍋安弘: 円錐形状浮体の送水特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp. 1316-1320, 2008.
- 6) 高橋重雄, 安達崇: 日本周辺の波パワーとその利用に関する一考察, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 874-878, 1989.
- 7) Hiroi, I.: An experimental determination and utilization of wave power, 東京帝国大学工学部紀要, 第十冊, 第一号, pp. 22-37, 1919.
- 8) *NATURE DIGEST* 日本語編集版: TO CATCH A WAVE, Vol.05, No.1, pp.12-17, 2008.
- 9) 羽田野袈義, 種浦圭輔, 渡邊誠, 中野公彦, 齊藤俊, 松浦正己: 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, pp. 270-283, 2006.
- 10) 益田善雄: 日本の波力発電, 霞出版社, 1987.
- 11) <http://www.pelamiswave.com/>
- 12) <http://www.oceanpowertechnologies.com/>
- 13) <http://bits.blogs.nytimes.com/2008/09/07/googles-search-goes-out-to-sea/>