

波力発電と海洋温度差発電の現状と展望

永田 修一・池上 康之

佐賀大学海洋エネルギー研究センターでは、1973年から開始した海洋温度差発電と2005年から開始した波力発電に関する研究を、センターの基幹研究と位置づけ、発電装置の実用化を目指して、現在、研究開発を行っている。本論文では、波力発電と海洋温度差発電研究に関する我が国と海外での現状を整理して、今後の我が国の研究の課題や方向について私見を述べる。また、佐賀大学海洋エネルギー研究センターで実施している波力発電と海洋温度差発電に関する研究についても紹介する。

キーワード：海洋エネルギー、海洋温度差発電、波力発電

1. はじめに

海洋に存在する波浪エネルギーを利用して発電する波力発電は、1919年に広井勇博士が、大東崎に振子式及び空気圧縮方式の波エネルギー変換装置に関する現地実験を行って以来、我が国では、様々な形式の波力発電装置が提案されている。特に、1973年の第一次石油危機による石油の高騰以後、波力発電装置への関心が高まり、多くの研究が行われ、我が国の技術は世界をリードしていた。しかしながら、今日では、海外での活発な波力発電開発ブームに比べ、我が国の波力発電開発は低調で、今後の復活が期待される場所である。

また、海洋の表層海水と深層海水の温度差を利用して発電する海洋温度差発電は、自然エネルギーの中でもエネルギー規模及び安定性などの点で、最も有用なエネルギー源の一つとして実用化が期待されている。1881年に発電の原理が提案されて以来、今日まで、実用化のための多くの研究が行われている。海洋温度差発電システムでは、得られる電力だけでなく、発電の際に汲み上げられる海洋深層水を利用して「海洋肥沃化」、「海水淡水化」、「水素製造」、「リチウム回収」等の複合的プロジェクトの実現が可能である。海洋温度差発電とこの動力源を利用した大規模海洋深層水利用技術は、我が国が卓越した技術と実績を有している分野である。

以下では、波力発電と海洋温度差発電研究に関する我が国と海外での現状を整理して、今後の我が国の研究の課題や方向について私見を述べる。また、著者ら

が属する佐賀大学海洋エネルギー研究センターで実施中の研究についても紹介する。

2. 波力発電の現状と展望

(1) 我が国の波力発電装置開発の状況¹⁾

今日までに提案された波力発電装置の主なものは、次の3種類に大別される。第1は、装置内に空気室を設け、海面の上下動によって生じる空気の振動流を用いて空気タービンを回転させる振動水柱型、第2は波浪のエネルギーを可動する物体を介して油圧に変換した後、油圧モータ等を用いて発電を行う可動物体型、第3は波を貯水池等に越波させ、この貯水池の落差により生じた水流を用いてタービンを回転させる越波型である。我が国では、このうち、振動水柱型と可動物体型の波力発電装置に関する開発が主に行われている。中でも振動水柱型については、沿岸に固定した固定型、海上に浮かべた浮体型に関して多くの研究がある。しかしながら、波力発電装置で実用化されているものは極めて少ない。1965年に海上保安庁に採用された益田式航路標識用ブイは、最初に実用化された浮体式の振動水柱型装置で、最大出力が30W～60Wの小型のものがほとんどであるが、世界で広く用いられている。

振動水柱型、可動物体型について、プロトタイプによる実海域実験が行われたものとして、以下のものがある。

①固定式の振動水柱型装置

新技術開発事業団他が山形県三瀬海岸で行った沿岸

固定式波力発電システム「三瀬」(1983～1984)、大成建設株が新潟県寝屋漁港で行った波力利用熱回収システム(1986～1987)、(財)エンジニアリング振興協会他が千葉県片貝海岸で行った消波工型定圧化タンク方式波力発電システム(1987～1996)、運輸省第一港湾建設局、港湾技術研究所が山形県酒田港北防波堤で行った波力発電ケーソン防波堤(1998～1999)、東北電力株が福島県原町火力発電所南防波堤で行った水弁集約式波力発電システム(1996～2000)などがある。

②浮体式の振動水柱型装置

海洋科学技術センターは、山形県由良沖で浮体式の振動水柱型波力発電装置「海明」(1978～1980, 1985～1986)、三重県五カ所湾沖で浮体型波力発電装置「マイティーホエール」の実験を行った(1998～2003)。

③可動物体型装置

日本造船振興財団海洋環境研究所は、沖縄県八重山郡竹富町西表船浮湾サバ崎沖に浮体式波浪発電装置「海陽」(1984～1988)、室蘭工業大学は、室蘭港外防波堤沖で、振り子式波力発電装置の実験を行った(1983～2000)。

2003年に終了した「マイティーホエール」の研究開発以後は、大規模な実証プロジェクトが無く、波力発電装置に関する研究開発は低調であったが、近年の石油価格の歴史的な高騰に伴い、波浪エネルギー研究についても、回復の兆しが見られる。研究の方向は、発電効率の向上の方向であり、浮体式や固定式の振動水柱型波力発電装置では、発電効率を高めるために、浮体や水室の最適形状を求める研究が行われている。

(2) 海外での波力発電装置開発の状況^{2), 3)}

海外においても、日本と同様に、1970年代のオイルショックを機に、波力発電の研究が、ノルウェーや英国を中心に始められた。この初期の研究の多くは、政府の基金に基づいて、装置の原理等の研究を主体に、大型の火力発電所級(100万kW級)の大規模な波力発電所を目指して、可動物体型装置である Salter Duck (Edinburgh 大学)、Oscillating Cylinder (Bristol 大学) などの研究が行われたが、装置の経済的な面での克服ができず、商用レベル装置の開発までは至らなかった。また、1983年以降のエネルギー危機の緩和の影響もあり、その後、波力発電の研究は縮小した。

しかしながら、ヨーロッパを中心とした海外での波力発電装置の開発は1990年の半ばから復活している。この時期からの開発は、以前の反省を踏まえ、目標とする装置の規模を Max.2 MW と小規模なものにして、

開発の主体も小規模な会社が担当している。このような波力発電装置の開発の復活は、ヨーロッパ等では、日本に比べ、波エネルギー密度が高いために波力発電装置への期待が高く、多くのベンチャー企業が波力発電装置の開発に参入しているためと思われる。この流れは近年も続いており、2006年に公開された AEA Energy & Environment によるレポートでは、海外で現在、53の波浪エネルギー利用装置の開発が行われている。このうち、10基の装置で実機サイズでの実海域実験が行われている。ヨーロッパでは、このような研究を支援するための組織も整備されている。欧州委員会は1992年から波力発電分野の研究を資金面から支援している。欧州委員会の賛助の下に2000年に設立された European Wave Energy Thematic Network は、ヨーロッパで波力発電装置を開発している14の研究機関から構成され、波力発電装置に関する技術開発、経済性評価、標準化等を協力して行っている。

また、装置の商用化に際しては、実海域での実証実験が必要となるが、欧州海洋エネルギーセンター(EMEC)では、スコットランドのオークリーの水深50mの海域に、4つのテストバース、このバースから陸上へまでの海底電気ケーブル、波高計測用ブイ等を備えた波力発電用実験海域を2003年に完成させ、下記に示す Pelamis 等の波力発電装置の実験を行っている。

実海域で実験が行われた代表的な装置としては、以下のようなものがある。

①可動物体型装置

スウェーデンの Interproject Service 社は、Vinga 沖で IPS ブイ(1980～1981)、オランダの Teamwork Technology BV は、北ポルトガル沖で Archimedes Wave Swing 2 MW 機(2005)、イギリスの Ocean Power Delivery 社は、スコットランドの Orkney で Pelamis 750 kW 機、デンマークの Wave Star Energy 社は、Wave Star の 1/10 モデル(24 m)、アメリカの Ocean Power Technologies 社は、point absorber である PowerBuoy40 kW 機の実海域実験を行っている。

②振動水柱型装置

スコットランドの Islay 島では、英国の Wavgen 社が、世界初の産業用発電である沿岸固定式波浪発電装置(LIMPET)500 kW(2000～現在)を、ポルトガルアゾレス諸島の Pico 島では、欧州委員会の下で400 kW の沿岸固定式波浪発電装置が稼働している。

③越波型装置

ノルウェーノルウェーブ社が、Toftestallen で、350 kW 狭水路越波型発電装置 TAPCHAN (1985 ~ 1991)、デンマークの Wave Dragon ApS が、Nissum Breiding で、浮体式越波型装置 Wave Dragon の実証実験を行っている (2003 ~ 現在)。

④ 波浪エネルギーの発電以外への利用

Hydam Technology Ltd. は、アイルランド、シャノ川河口で海水淡水化装置 McCabe Wave Pump、デンマークの Wave Plane International A/S は、海水循環装置 The Wave Plane の実証実験を行っている。

(3) 商用展開に向けた課題と今後の展望

ヨーロッパを中心とした近年の波力発電装置の開発の方向は、①沿岸域の浅い海域から、水深が深く波高の大きい沖合へ、②沿岸域の固定式の振動水柱型装置から、浮体型装置、特に、可動物体型装置へ、③大型の単一装置から、多数の小規模分散型装置へ、④波力発電という単一機能から、波力・風力・潮流・太陽光のエネルギーのトータル利用型装置へと変わってきている。

我が国の従来の波力発電の研究は、固定式や浮体式の振動水柱型の波力発電装置の開発が中心であったが、今後は、波高が大きい沖合に装置を設置することを考えて、一次変換効率の良い可動物体型の装置も含め、高効率・高信頼性で低価格の浮体型装置の開発が必要と思われる。その際、実海域実験海域の整備も欠かせない。

(4) 佐賀大学海洋エネルギー研究センターでの波力発電装置の開発

佐賀大学では、理工学部において、1980年代から現在まで、振動水柱型波力発電用の2次変換装置である空気タービンの開発を続けてきた。この間、ウェルズタービン、衝動タービン等に関する多数の研究を行っている。近年、松江高専と共同で、低回転域で高出力が可能なコアレス発電機を波力発電用衝動タービン

に組み合わせた新型発電装置を提案し、これを新潟西海岸の突堤に設置されている国土交通省所有の沿岸固定式振動水柱型波力発電プラントに搭載して、装置の性能評価実験を実施している。また、浮体式の振動水柱型波力発電装置である後ろ曲げダクトブイを開発中である。これは、従来型よりも、小型で、発電性能が良い、係留力が低減できる等の利点を持っている (図-1)。

3. 海洋温度差発電の現状と展望

(1) 海洋温度差発電と海洋深層水利用

海洋温度差発電は、表面層の温海水と深層約 600 ~ 1000 m の冷海水との温度差による熱エネルギーを利用して、電気エネルギーを取り出す発電方式である。海洋温度差発電に関する研究開発は、今から約 126 年前の 1881 年 (明治 14 年)、世界で最初の火力発電所ができた年まで遡る。この年にフランスのダルソンバール (J.D' Arsonval) が最初に考案した。その後、1973 年の第一次エネルギーショックをきっかけにして、日本と米国で本格的な研究が行われた。実証プラントが、相次いで建設され、実験が行われた⁴⁾。当初は、正味出力 (EPR が 1 以上) が得られないのではないかと懸念されていたが、MINI-OTEC をはじめ、3つのプロジェクトによって海洋温度差エネルギーのみで正味出力が得られることが検証された。海洋温度差発電の技術力は、実用レベルにあることは検証されたが、これまでの実証試験は 100 kW レベルである。海洋温度差発電は、再生可能なエネルギーのなかで特にスケールメリットの大きなシステムであるため、実用化推進のためには 1000 kW (1 MW) 以上での実証試験が不可欠であると長年指摘されている。

海洋温度差発電は、発電とともに持続的な海水淡水化や水素製造、リチウム回収などの複合利用が可能である。さらに、発電の際に汲み上げる海洋深層水の利用も可能である。

(2) 過去の取り組みとその成果

(a) 海洋温度差発電

海洋温度差発電の発電方式には、大きく、オープンサイクル方式とクローズドサイクル方式の2種類がある。我が国のサンシャイン、ニューサンシャインプロジェクトでは、オープンサイクル方式が主に採用された。米国でも当初オープンサイクルが採用された。一方、佐賀大学では、OTEC の実用化推進のためには、クローズド方式が不可欠であるとして、その技術に特

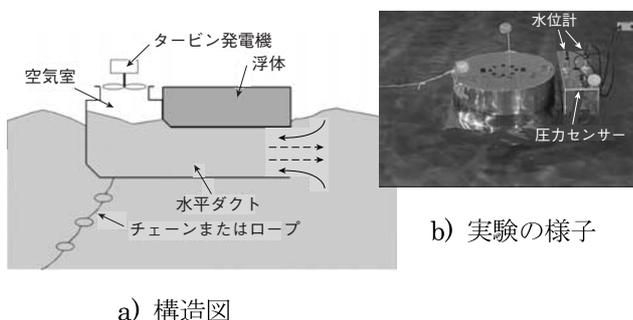


図-1 後ろ曲げダクトブイ

化した研究を行ってきた。これまでの成果として、オープンサイクルよりクローズドサイクル方式が、適しているとの評価を得ており、現在は、クローズドサイクル方式が国際的に主流である。なお、我が国において、オープンサイクルにおける評価が、海洋温度差発電の評価となっており、誤解されている面は否めない。

実証研究については、オイルショック以降、100 kW レベルの実証的な研究が数例行われ、海洋の温度差エネルギーのみを利用して、正味出力（EPRが1以上）が得られることが検証されている。一方、経済性を高めた実用機の推進には、1000 kW 以上での実証が不可欠である。このような状況の中、海洋温度差発電の実用化に積極的なインド政府は、1 MW の実証試験を行うために、研究プロジェクトをインド国立海洋技術研究所（National Institute of Ocean Technology, NIOT）を中心にスタートさせ、注目されている。発電プラントは、佐賀大学等の協力により完成したが、プラント設置後の1000 mの取水管の課題により、現在では海水の温度差を利用した海水淡水化等を重点的に、プロジェクトに取り組んでいる。2005年6月には、日量100トンの海洋エネルギーを利用した海水淡水化を実用化させている。2007年4月には、我が国の「拓海」プロジェクトの取水管技術の成功事例などを参考にして、530 mの深さから管径1 mの取水管の設置に成功し、この取水による日量1000トンの海洋温度差エネルギーを用いたプロジェクトを成功させている。このプロジェクトでは、現在、動力源としてディーゼル発電を用いているが、今後海洋温度差発電での利用を検討している。インドは、環境に優しいエネルギーを用いた持続可能な淡水化の実用化推進のために、海洋温度差エネルギーを利用した日量1万トンの海水淡水化プロジェクトをスタートさせている。インドだけにとどまらず、現在、米国、台湾、スリランカ、モーリシャスなどで新たなプロジェクトが提案され、実際に進行中である。

海洋温度差発電の高性能化については、佐賀大学海洋エネルギー研究センターにおいて、作動流体として従来のアンモニアの代わりに、アンモニア/水を用いた研究が行われている（図-2）。これまでの成果として、アンモニア/水を作動流体として用いた30 kWのシステムにおいて安定して正味出力が得られることが示されている。また、佐賀大学海洋エネルギー研究センターでは、海洋温度差発電を推進するための複合利用技術についても取り組み、海水淡水化、リチウム回収に関して、実際の海水を用いて実証試験を行い、その可能性を示している。



図-2 30 kW 海洋温度差発電システム（佐賀大学）

(b) 海洋深層水利用

1986年に科学技術庁のプロジェクトとしてスタートした海洋深層水利用に関しては、1989年に日本で最初の陸上型海洋深層水施設が設置されて以来、我が国において全国的規模で利用され、新たな産業の創出に貢献している。我が国の陸上型取水施設は、取水量が日量数100トンから約13,000トン（久米島の総計）規模である。この海洋深層水利用技術は、国際的にも我が国は米国とともに先導的な役割を担っており、その成果が台湾をはじめ国際的に普及し広がっている。

海洋深層水の特徴は、低温安定性、富栄養性、清浄性であり、食品・飲料への利用、医療分野への利用、豊かな魚場造成のための海洋肥沃化等で注目されている。

海洋深層水を利用した海洋肥沃化に関しては、マリノフォーラム21のプロジェクト「拓海」において、世界で初めて浮体型で日量10万トンの海洋深層水を汲み上げる実証実験に成功し、台風等にも耐える装置であることが検証されている。その肥沃化の効果は現在詳細な評価がなされている。この関連の技術は、国際的にも卓越した技術として高い評価を得ている。しかしながら、海洋深層水を利用した海洋肥沃化を効果的に行うためには、日量50万トンから100万トン以上のプロジェクトによる検証が必要といわれている。

(3) 海外の事例とその評価

海外ではオイルショック以降、米国を中心に100 kW規模で実証研究が行われてきたが、この10年余りで本格的な実証プラントを用いた研究は、インドにおける1000 kWプロジェクトのみである。特に、海洋温度差発電は、技術的には実用レベルにあると評価されており、今後は経済性を高めるための大型化の実証研究が海外をはじめ国内で重要となっている。一方、地球温暖化とエネルギー問題が世界的に深刻化する

る中、近年、米国、キューバ、パラオ、韓国、台湾などで、その実用化の推進が検討・評価されている。主なものは次の通りである。

2007年8月に、ハワイで開催されたENERGY OCEANの国際会議において、OTEC meetingが約70人規模で開催され、米国を中心にOTECの推進のための種々の提案がなされた。この会議において、特に、米国・ハワイでの1000kWの多目的利用のプロジェクト、シンガポールにおける100MW（10万kW）浮体式のOTECなどの提案が紹介され注目された。

台湾においては、海洋深層水の利用が進展し、海洋深層水の大規模利用のプロジェクトが進められている。そのエネルギー源の一つとしてOTECが検討されている。

パラオでは、佐賀大学と学術協力の覚書が交わされ、パラオにおける海洋温度差発電の複合利用が検討されている。これまでパラオにおける海洋調査、概念設計等が行われている。

南太平洋などの島嶼国では、原油の高騰や水問題が深刻で、持続可能な発展のために、再生可能なエネルギーの開発が急務となっている。このような状況の中、海洋温度差エネルギーが豊富なこの地域では、持続的な発展のために、海洋温度差エネルギーの利用が検討されている。十分な実績を有する我が国の海洋技術が貢献できる重要な分野である。

(4) 商用展開に向けた課題と今後の展望

海洋温度差発電は、他の自然エネルギーと異なり、スケールメリットが極めて大きい特性を有するシステムである。言い換えると、小さいシステムでは、経済的には成立することが困難となる。そこで、商用展開を考える場合、1000kW以上のシステムでの実証が不可欠となる。

海外では1000kW規模での海洋温度差発電は実用化が積極的に検討されている。しかしながら、我が国では、実績ベースの傾向が強いため、まず、国の支援を受けたプロジェクトの成功事例が不可欠と考えられる。

また、海洋温度差発電の商用展開を考える場合、我が国においては、まず、海洋温度差発電に加え、海洋温度差発電を利用した大規模海洋深層水の利用の実証が重要と考えられる。海洋温度差発電は、電力だけでなく、海水淡水化や魚場造成、水素製造、リチウムやストリチウムの回収などの複合利用が可能であるため、これらを複合的に利用した500-1000kW規模の

実証的研究を国家プロジェクトとして立ち上げ、実績を積むことが商用化推進にとって極めて重要であると思われる。

海外では、米国などで、電力と淡水化などの複合利用の商用化プロジェクトが検討されている。我が国が海洋産業を国際的に先導していくためには、国際的に優れた我が国の「浮体」「係留」「温度差エネルギー利用技術」「水素製造」「魚場造成」「リチウム回収」「造水技術」などの技術を横断的総合的に結集することが重要と考えられる。このためには、省庁横断型のプロジェクトとして立ち上げることが重要と思われる。

4. おわりに

波力発電と海洋温度差発電に関する研究の現状、今後の課題について整理した。両発電に関して今後の議論のたたき台となれば幸いである。

佐賀大学海洋エネルギー研究センターは、海洋エネルギー研究を専門にする国内で唯一の研究機関であり、海洋エネルギーに関する全国共同利用施設として、2007年から正式運用を開始している。また、国際エネルギー研究機関（IEA）の海洋エネルギー部門における日本の代表を、2005年に、JAMSTECから引き継いでいる。今後、海洋温度差発電については、従来からの積み上げられた研究成果をさらに発展させ、さらに実用化研究を進めて行く予定である。また、波力発電については、現在、息切れ失速状態にある我が国の研究状況を復活させるために、努力して行く予定である。 JICMA

《参考文献》

- 1) 近藤俊朗編：海洋エネルギー利用技術，pp14-94，森北出版（1996）
- 2) AEA Energy & Environment: Review and Analysis of Ocean Energy Systems Development and Supporting Policies（2006）
- 3) Duckers, L.: Renewable Energy, Boyle, G. ed., P.325, Oxford University Press（1996）
- 4) William H.A. and Chih.W.: Renewable Energy from the Ocean — A Guide to OTEC, Oxford University Press（1994）

【筆者紹介】

永田 修一（ながた しゅういち）
佐賀大学海洋エネルギー研究センター
教授
副センター長



池上 康之（いけがみ やすゆき）
佐賀大学海洋エネルギー研究センター
准教授

