

波浪エネルギーの利用技術と将来性

Wave Energy Utilization and its Possibilities

前田 久 明*

Hisaaki Maeda

1. ま え が き

1984年11月に海洋科学技術センター主催で第一回波浪エネルギー利用シンポジウムが日本で初めて波浪エネルギー関係の本格的なシンポジウムとして開催された。波浪エネルギー利用技術の研究開発に関する最新の情報はこのシンポジウムの494頁にわたる論文集に網羅されている¹⁾。また、世界の波浪エネルギー利用技術の現状は、1985年7月ポルトガルのリスボンで開催されたIUTAM主催の“Hydrodynamics of Ocean Wave Energy Utilization”シンポジウム論文集に収められている²⁾。波浪エネルギー利用の要素技術はほぼ開発は済んだ段階にあるといえる。現在の問題点は、波浪エネルギー利用システムを如何にして社会のニーズにマッチングさせるかにある。以下に波浪エネルギーの利用システムに触れ、波浪エネルギー利用技術につき、その歴史、要素技術、研究開発の現状を述べ、その将来性を展望する。

2. 波浪エネルギーの利用システム^{3), 4)}

利用システムの内容を、エネルギーの賦存量、利用形態、利用地域、事業主体、利用目的に分解して個々別々に考えることにする。

2.1 エネルギーの賦存量^{5), 6)}

日本近海での波浪パワーの期待値の全国平均は、単位幅の波頂線当たり、沖合で10KW/m、沿岸で6KW/mである。自然エネルギーは密度が薄いとされるが、波浪エネルギーは太陽エネルギーあるいは風エネルギーが凝縮したものと考えると、自然エネルギーの中では密度の濃い方である。沖合より沿岸での波浪パワーが小さくなっている。砕波帯のある海岸では波浪パワーは更に小さくなる。このことは必ずしも沿岸での波浪エネルギー利用が沖合のそれに比べて不利になると

いうことを意味しない。波浪エネルギーを利用する海域を沖合にするか沿岸にするかは、エネルギー利用システムに依存するからである。

2.2 利用形態

波浪エネルギーを変換して利用する際のエネルギーの形態は、電気、熱、動力の3種類である。波浪エネルギーの質から考えて、必ずしも電気が一番便利なエネルギー形態とは限らない。波浪エネルギーの変換については要素技術の項で述べる。

2.3 利用地域

波浪エネルギーが大規模集中型エネルギーとして使用できるなら電気に変換して、商業電力網に乗せられるので、利用地域は全国全域となる。しかしエネルギーの質と単位面積当たりの量(密度)の少なさから見て、波浪エネルギーは小規模分散型エネルギーと考えざるを得ない⁷⁾。経済コストの観点から、小規模分散型エネルギーの成り立つ地域は、中央の大電力網(あるいはエネルギー網)から遠く隔たった地域である。送電線、海底ケーブルの長さが経済コストの決め手となる。即ち、離島、岬、半島、沖合人工島等が利用地域と考えられる。

2.4 事業主体

個人、民間企業、電力・ガス会社、公営企業、自治体などが事業主体となる。事業主体により、利用目的、利用システムの規模は大きく異なる。

2.5 利用目的^{4), 8), 9)}

民生用、交通・運輸用、産業用と大きく分けられる。これまでに実用化されたり提案されてきた利用目的を列挙する。

灯台・灯標の電源、一般電源、融雪、魚礁用電着工法、浮消波堤、海水ウラン回収、人工藻礁、人工漁礁、魚礁ヒーティング、家庭用給湯、暖房用、温水供給、海水交換、エアバブルカーテン、サンドバイパス、養殖場のエアレーション、海水の淡水化、観光用イベント等等。

* 東京大学生産技術研究所教授

〒106 東京都港区六本木7-22-1

2.6 利用方法

波浪エネルギーの単独利用,他の自然エネルギー(太陽,風,海洋温度差)とのハイブリッド利用,ディーゼル発電・電池との併用,商用電力網との関係等。

利用システムの要素のつながりは次のようになるであろう。まず事業主体が利用目的を定め,利用形態を考える。次にエネルギーの賦存量を勘案しながら,利用目的に適った利用地域を選定する。その上で,利用目的,利用形態,利用地域に整合するように波浪エネルギー利用装置が選定される。

3. 波浪エネルギー利用技術の歴史

波浪エネルギー利用技術の歴史は,古くは1799年のフランス人ジラルの特許にさかのぼる事ができる⁹⁾。波浪エネルギーを動力源として利用する以外の利用法としては波浪推進がある。この立場にある特許は,1874年ヘニングが取得しており,これを1898年イタリア人リンデンが実用化している¹⁰⁾。今日では,波浪推進,いわゆる波喰い推進は,省エネルギーの観点から脚光を浴びつつあるが,ここではこれ以上触れない¹¹⁾。日本では,1918年代に広井勇博士により振り子式波浪エネルギー利用装置の実海域試験が試みられている¹²⁾。

1974年時点で,英国では340件に上る波浪エネルギー利用装置の特許が取られている²⁾。日本では,広告,公開特許,実用新案を取り混ぜると,1980年時点で600件の特許が取られている^{13,14)}。英国でも日本でも1973年の第一次石油危機以降に特許件数が急激に増えている。波浪エネルギー利用技術は,特許に見られる通り古くはあるが,波浪発電という形での実用化は海上保安庁による灯浮標(益田善雄氏発明)にその起源をもつもので,1965年に世界最初の実用化に成功し,現在日本周辺の全海域に420基余りが利用されている¹⁵⁾。第一次石油危機後に,代替エネルギー開発の観点から,日本,英国,ノルウェー,スウェーデンで波浪エネルギー利用技術が国のプロジェクトとして,取り上げられるようになった¹⁰⁾。

4. 要素技術

要素技術は,構造物と係留,波浪エネルギー一次変換装置,波浪エネルギー二次変換装置,発電機,熱発生装置,エネルギー貯蔵,変動パワーの平滑化,送電装置などのハードに関するものと,システムの最適制御に関するソフトの技術からなる。

4.1 構造物と係留

大型海洋構造物の建造技術は,石油掘削リグ等で既に完成されたものである。材料はスチール,コンクリートが主で,特殊な個所にはケブラー繊維も使用される。大型海洋構造物の係留技術も既に完成している。

4.2 波浪エネルギー一次変換装置^{1,5)}

波浪エネルギー利用装置の特徴が最もよく現れた要素技術である。波浪エネルギーを利用するためには,波浪エネルギーをまず何等かの物体の力学的エネルギーに変換しなければならない。この部分を受け持つのが波浪エネルギー一次変換装置である。要素技術に関する特許の殆どが波浪エネルギー一次変換装置に関するものでその数は数百に達する^{13,14)}。しかしそれらの内で実用に供せられるものは限られており,振動水柱式装置,可動物体式装置と水流(浅海波の質量輸送)を利用した装置くらいである。水流を利用した装置は波浪の非線形性を利用したもので,他の二つの装置とはそのエネルギー変換のメカニズムが異なり,設置海域の形状が重要となるためある特定の海域でしか利用できないのでここでは除外する。一次変換装置のメカニズムはつぎの通りである。振動水柱なり可動物体が一つの振動系に組み込まれており,波浪外力が強制力となって振動水柱・可動物体を運動させることにより,波浪エネルギーが振動水柱・可動物体の運動エネルギーに変換される。振動水柱・可動物体に負荷をかければエネルギーを外部に取り出すことが出来る。このエネルギー変換効率を最大にするには,負荷と振動系とのインピーダンス・マッチングをとればよい。即ち,振動系を入力した波浪外力で同調するように調整し,負荷の大きさを振動系の減衰力に等しくとればよい。現在は,波浪エネルギー一次変換装置の幾何形状が与えられれば,エネルギー変換特性を解析することは可能である。また,最適幾何形状を設計することも可能である。理論解析上手間がかかるのは,波浪外力や装置が運動するとき生じる流体力を推定することである。3次元形状であっても,波浪外力や付加質量,造波減衰力はポテンシャル理論により求めることができる。粘性流体力は実験値あるいは実験公式による。現在は,振動水柱式装置では空気の圧縮性まで考慮した解析法が整備されている。入力不規則波の場合の解析法も完備している。高性能化も低周波数側で同調するとか同調点を複数化する等による高性能化が図られている¹⁶⁾。

4.3 波浪エネルギー二次変換装置

波浪エネルギー一次変換装置からエネルギーをくみ取る装置である。実用的には油圧装置と空気タービンに限られる。油圧装置には油圧シリンダー、サーボバルブ、油圧源、油圧モータが含まれる。油圧装置関連の技術は既に完成された技術である。波浪発電装置用に往復流を一方流れに変えるブリッジ型の油圧バルブが開発されている¹⁷⁾。油圧装置は可動物体式装置と組み合わせて用いられる。

振動水柱式波浪発電装置で使用される空気タービンとしては、衝動タービンとウエールズタービンが主たるものである¹⁸⁾。振動水柱上部の空気室の空気の流れは往復流である。そこで空気タービンは往復流で使用出来るものでなければならない。このため衝動タービンでは、往復流を一方流れに変換する弁機構を余分に設けなければならない。「海明」では衝動タービンと弁機構の組み合わせを採用している。「海明」の実海域試験では、この弁機構が複雑となり、弁が破損しやすいという欠点のあることが判明した。往復流で使用可能のように工夫した衝動タービンにマコーミックタービンと言われるものがあるが、未だ性能が不明なことから、高価格であるためあまり使用されていない。効率は衝動タービンに劣るものの機構が簡単であるため、現在のところウエールズタービンがもっとも有望視されている。ウエールズタービンの設計法の確立並びに高効率化はここ数年間に日本で開発された。ウエールズタービンに基本的に要求される特性は、不規則に変動する往復流で効率が低いことと、自己起動することである。不規則に変動する往復流中でのウエールズタービンの特性は現状では準定常的に解析が行われている¹⁸⁾。ウエールズタービンは対称翼を持っており、高効率化と自己起動性能を両立させることは難しい。しかしガイドベーンを取り付けることで効率を損なわずに自己起動特性を向上させることが可能となった。また最近二連のタービンの組み合わせで性能が向上することが明らかとなった¹⁹⁾。

4.4 発電機

交流同期発電機と交流誘導発電機が用いられる。直流発電機は大容量には向かないとか、交流発電機あるいはインバーターを必要としコストが高いとかの理由で使用されない。油圧モータあるいは空気タービンで一定回転数が保証されるならば、交流同期発電機が適している⁴⁾。回転数が変動する場合には2次励磁側で制御可能な誘導発電機が適している²⁰⁾。発電機そのもの

に関する技術は完成されたものである。商業電力網との接続も「海明」において試験済みである²¹⁾。

4.5 熱変換装置¹⁴⁾

油圧ポンプ、多段オリフィス、蓄熱槽、油圧源からなる油圧式熱変換装置と、ヒートポンプによる熱変換装置に実用性がある。

4.6 エネルギー貯蔵²²⁾

蓄電池、フライホイール、超伝導コイル、圧縮空気、蓄熱、化学反応利用、揚水発電などの方法が考えられる。これらを、蓄積容量と蓄積効率、蓄積規模、蓄積期間、利便性、立地環境、開発の見通しの観点から評価してみると、現在のところ、鉛蓄電池がやや優れている。将来においては、新型電池、化学反応利用、超伝導コイル、圧縮空気のいずれも利用可能となるであろう。

4.7 パワー平滑化技術

蓄圧装置としての油圧用アキュムレーター^{22, 23)}あるいは空気式では定圧化タンク⁴⁾を利用する方法がある。さらに吸収パワーの変動を押さえるために、油圧バルブあるいはガバナーを調節して、油圧モータあるいは空気タービンの回転数を一定にする²²⁾。さもなくば、コンバーター・インバーター方式により、交流を直流にして改めてインバーターにより一定周波数の交流にする⁴⁾。あるいは、交流誘導発電機の2次励磁を制御することにより、周波数と電圧を一定にすることが可能である²⁰⁾。

4.8 制御技術

不規則波中でトータルシステムを最適制御するソフトは未だ完備していない。しかし、各要素、たとえば振動水柱式装置の空気弁の位相制御¹⁾とか係留系の制御²⁴⁾とかの技術あるいは解析法は完成している。

これらの要素技術はそれぞれ単独にはほぼ確立されたものとなっている。しかし波浪エネルギー利用システムを実用化するためには、これら構成要素ならびにシステム全体を、設計、製作、建造、施工、保守、運転の観点から検討する必要がある。更に、構成要素並びにシステム、全体装置の安全を計り、全体装置、システムによる環境破壊を防止するために、安全アセスメント、環境アセスメントを行う必要がある。

5. 波浪エネルギー利用装置開発の現状¹⁶⁾

実海域で波浪発電装置の開発が進められた例はそれほど多くない。日本では8例、英国では3例、ノルウェーでは3例、その他スウェーデン、米国にそれぞれ

1 例見られるに過ぎない。日本の例としては、海上保安庁灯台部、オーシャンエネルギー開発、海洋科学技術センター、横浜国立大学工学部、室蘭工業大学、日立造船、新技術開発事業団、日本造船振興財団海洋環境技術研究所である²⁵⁾。これらのうち実機規模の開発例となるとごく限られた数となる。現在、波浪エネルギー利用装置の開発と本格的に取り組んでいる国々は、日本、英国、ノルウェーであり、続いて少し遅れてスウェーデンというところである。世界各国の開発の現状は次の通りである。

5.1 日本の開発体制

波浪発電に関して日本の最大の特徴は本格的な実機試験の経験を有する唯一の国という点である。海洋科学技術センターの「海明」は1985年度に山形県由良沖で第二期実験が行われた。日本造船振興財団海洋環境研究所の「海陽」は1984、1985年度にまたがり沖縄県西表島サバ崎沖で実験が行われた²²⁾。「海明」は縦置き式浮遊船型をした振動水柱型のエネルギー一次変換装置と空気タービンの二次変換装置を組み合わせたものである。「海陽」は可動物体型の一次エネルギー変換装置と油圧システムの二次変換装置を組み合わせたものである。その他、エンジニアリング振興協会では、1987年度に消波工型定圧化タンク方式の固定式波浪発電装置を千葉県九十九里町に建設を予定している。発生する電力はヒラメ養殖場のポンプの駆動源に使うとともに、このプラントを観光資源とする^{11, 26)}。海上保安庁は1986年度から3年計画で、徳島県小松島港外の阿波沖ノ瀬灯標に固定式の振動水柱—ウエルズタービン式の波浪発電装置を設置する予定である。灯標の光力は従来10~25W程度であったものを300Wにアップしている^{15, 17)}。沿岸開発センターでも堤防を利用した沿岸波浪発電装置が開発されている。

5.2 英国の開発体制

英国は1975年以降エネルギー省を中心にして大掛りな研究・開発体制を採ってきた。しかしその後エネルギー事情の好転並びにサッチャー政権の政策変更もあり、1983年以降は波浪発電開発プロジェクトは規模を縮小し現在に至っている。規模縮小の一因は、波浪エネルギーを大規模集中型エネルギーとした基本戦略にあると考えられる。

5.3 その他の国の開発体制

ノルウェーで現在開発している波浪発電関連装置は Multi-resonant OWC と Focusing of Wave Energy の2種類である。これらは実海域試験あるいは

大規模な水槽試験を行っており、理論的研究、実験的研究面では日本、英国に勝るとも劣らない実力を備えている。

スウェーデンは波浪発電では後進国であったが、Buoy Systemによる波浪発電の経済性のアセスメントを行い有望であるとの結論を出している。バルト海の小島 Gotland に実験場を設けて実海域試験まで行っている。

アメリカは、波浪発電装置の開発を国のプロジェクトとしては採りあげていない。しかし大学、民間会社等で個別に研究が行われている。アメリカは、研究面は注目に値するが、波浪発電装置の開発の面では日本、英国、ノルウェーに大きく遅れをとっている。

6. 波浪エネルギー利用の将来性

波浪エネルギーを大規模集中型エネルギーとみなすには無理がある。何故ならば、波浪エネルギーの密度が十分高くないからである。電力レベルで比較すると、波浪発電コストは良くて50円/KW・hrである。従って、石油、原子力、石炭には太刀打ちできない。しかし離島のディーゼル発電では120円/KW・hr程度であるので、波浪発電は十分対抗可能である。燃料電池、風力、石炭ガス化の発電コストと大差ないと考えられる。灯台、灯浮標では海底ケーブルによる送電あるいは太陽電池より経済的である。融雪に熱を利用する場合には熱輸送のパイプラインの長さで経済性が定まる。

波浪エネルギー利用の経済性は、エネルギーの獲得地域と利用地域との距離に関係が深い。波浪エネルギーはその場で利用するのが一番有利である。そのような利用地域と利用目的の選定が最も重要である。

利用地域は海洋の場である沿岸あるいは沖合が望ましい。利用目的は海洋産業が成長するに伴い増加する。波浪エネルギー利用装置の需要が増せばコストは減少する。現在は石油が安く海洋開発の必要性が痛感されていないため海洋産業が未だ夜明け前の状態にある。それでも現実に波浪エネルギーが灯台あるいは水産関係、観光に利用される時代に入ってきた。

これから日本では海洋の場は残されたニューフロンティアとしての認識が高まり、海洋開発を行う必然性が必ず生じるであろう。その時のために波浪エネルギーの利用技術はいつでも対応できる状態になっている。1987年6月頃に海洋科学技術センター主催の第2回波浪エネルギー利用シンポジウムが計画されている。波浪エネルギー利用技術の全貌はこの際に明らかにな

るであろう。

波浪エネルギー利用に将来性があるというのが結論である。ただし、その時期は海洋産業が本格的に活動するまで待たなければならない。

7. あとがき

本稿では波浪エネルギーの利用目的、事業主体、利用地域、利用形態について今までに提案されたり実施されたことを述べた。次いで、要素技術と波浪エネルギー利用装置の現状を解説しそれらの将来性にふれた。

波浪エネルギー利用技術は要素技術を組み合わせた総合技術である。個々の要素技術はほぼ完成された段階に達している。これからは各要素技術どうしのマッチングの技術を完成させ、総合システムの高性能化、最適化をはかる事が重要である。

波浪発電の特徴は、小規模分散型エネルギーとしての利用に適したものであり、原料費がたかだか、再生可能なエネルギーであるので、環境破壊も少ない点にある。これらの特徴を生かしつつ、かつ波浪エネルギー利用装置を海洋開発に生かすならば経済性の向上に効果が有るばかりでなく、環境とのマッチングからも最も望ましいエネルギー利用方法と言える。

参考文献

- 1) 海洋科学技術センター；第一回波浪エネルギー利用シンポジウム論文集，1984
- 2) Evans, D. V. and Falcao, A. F. de O.; Proceedings of Hydrodynamics of Ocean Wave-Energy Utilization, IUTAM Symposium, Lisbon/Portugal 1985, Springer-Verlag, 1986
- 3) 近藤徹郎，渡辺富治，奥田教海，松田敏彦；離島に対する沿岸型波浪エネルギー利用システムの適用性，第1回波浪エネルギー利用シンポジウム，海洋科学技術センター，1984
- 4) エンジニアリング振興協会；固定式波力発電システムの実証試験に関する報告書-消波工型定圧化タンク方式-，エンジニアリング振興協会，ENAA 1985-DP1, 1986
- 5) 日本造船学会海洋工学委員会性能分科会海洋エネルギーパネル；「海洋エネルギー利用」特集，日本造船学会誌 637号，1982
- 6) Hiroi, I.; An Experimental Determination and Utilization of Wave Power, 東京帝国大学工学部紀要，第10冊，第1号，1919
- 7) 前田久明；多様な代替エネルギー，東京大学教養講座8・現代社会とエネルギー（茅陽一編），東京大学出版会，1983
- 8) 日本航路標識協会；灯標等に利用するは波力発電システムの研究開発，日本航路標識協会中間報告書，1984；完了報告書，1986
- 9) Ross, D.; ENERGY FROM THE WAVES, Pergamon Press, 1979
- 10) Taggart, R.; Marine Propulsion-Principles and Evolution, Gulf Publishing Company 1969
- 11) Isshiki, H.; A Theory of Wave of Devouring Propulsion(1st Report)-Thrust Generation by Linear Wells Turbine, 日本造船学会論文集 151号，1982
- 12) ECOR日本委員会海洋エネルギー作業部会；海洋エネルギー利用に関する報告書，日本造船振興財団，1983
- 13) 海洋産業研究会；新波力発電システム開発調査研究報告書，1980
- 14) 海洋産業研究会；沿岸波力発電システム研究報告書，1981
- 15) 矢作 勝，梶原勝正，山崎哲夫；航路標識ブイ用空気タービン式波力発電装置の開発と現状，第1回波浪エネルギー利用シンポジウム，海洋科学技術センター，1984
- 16) 前田久明；波浪発電の現状，エネルギー・資源，6巻，6号，1985
- 17) 田中裕久，斉藤 誠；波力エネルギーの動力特性（第1報），日本機械学会56回講演論文集，1979
- 18) 荒川忠一；波浪エネルギー二次変換装置，第一回波浪エネルギー利用シンポジウム，海洋科学技術センター，1984
- 19) Inoue, M., Kaneko, K., Setoguchi, T. and Raghunathan, S.; Starting and Running Characteristics of Biplane Wells Turbine, Proc. of 5th International Symp. on Offshore Mech. and Arctic Eng., ASME, Tokyo, 1986
- 20) 安藤直明，大西公平，宮地邦夫；交流二次励磁誘導発電機を用いた不規則入力発電，第1回波浪エネルギー利用シンポジウム，海洋科学技術センター，1984
- 21) 萩原良樹；波力発電装置「海明」による電力系統との連係試験，第1回波浪エネルギー利用シンポジウム，海洋科学技術センター，1984
- 22) 日本造船振興財団；波エネルギーの機械エネルギーへの転換に関する実用化研究，海洋環境技術研究所報告 第7号，1983；第10号，1984；第14号，1986
- 23) 木下 健，前田久明，増田光一，西条憲一，今井康広；波力発電装置に関する基礎的研究（その4），日本造船学会論文集，第151号，1982
- 24) Masubuchi, M. and Kawatani, R.; Dynamic Response and Input Adaptive Maximum Energy Converting Control of an Ocean Wave Energy Converter, IUTAM Symposium Lisbon/Portugal 1985, Springer-Verlag, 1986
- 25) 高石敬史；海洋構造物の実海域実験，第一回波浪エネルギー利用シンポジウム，海洋科学技術センター，1984
- 26) 日本経済新聞；昭和61年5月17日，1986
- 27) 海上保安新聞；昭和61年6月19日，1986