

波エネルギー利用への再挑戦

CHALLENGES FOR REDEVELOPMENT OF WAVE ENERGY UTILIZATION

高橋重雄
Shigeo TAKAHASHI

正会員 工博 港湾空港技術研究所 研究主監 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

The energy of waves to Japan's coasts is estimated to be at about 35 million kW, which is the one-third of the total electric power generated in Japan. Many attempts to exploit wave energy have been made from old times. After the first oil crisis research and development projects of wave power converters have been made in the world and various converters were developed including a wave power extracting caisson breakwater. However no system has been employed as a practical power plant due to cost of the system and irregularity of the electric output. Recently the challenges started again to develop the converters as a consequence of recent high oil price. Innovations are needed for the technologies of wave power converters and the social systems to utilize the wave energy.

Key Words: Wave power, wave energy, renewable energy, natural energy, wave power converter, ocean energy, oscillating water column

1. まえがき

最近の原油高騰は、第3次石油危機と呼ぶべき状況であり、また地球温暖化が大きな問題となっており、再び自然エネルギーの利用が大きく叫ばれるようになった。自然エネルギーの中でも、海洋エネルギーは可能性の大きなものである。波エネルギーは、有望なものの一つであり、古くから利用技術の開発が行われている。特に、1973年の第1次の石油危機以降、世界各国で研究開発が行われ、中でも我が国の研究は、世界をリードしてきたといえよう。ただし、残念ながら大規模な実用化には至っていない。

一方、我が国では昨年4月に海洋基本法が制定され、国として海を統合的に管理する体制が整備され、海洋に関する政策が総合的に進められることになった。特に、世界第6位の広大な海洋を有する我が国は、有効に海洋の利用を促進する必要がある、この機会に海洋利用の技術を見直して、さらに発展させることが重要となっている。海洋エネルギーの利用、波エネルギーの利用も、再挑戦が必要となっている。

現在世界中に、波エネルギーを含めて海洋エネルギーの利用に向けて本格的な研究を推進しようとする動きがある。本報告は、本格的な研究開発を再開する場合の資料とするために、これまでの研究開発を見直し、特に、実用化に至らなかった問題点を明らかにすることを目的としている。本報告では①これまでの我が国を中心とした研究を振り返り、②実用化に向けて問題点を検討し、③最近の新しい動きについて概観する。なお、1990年ころまでの波力発電装置の開発の詳細は「波エネルギー変換装置の現状¹⁾」を参照していただきたい。

2. これまでの技術開発

(1) 日本の波エネルギー

海岸に押し寄せる波は、波の高さが大きいほど、周期が長いほど大きなエネルギーを持つ。毎秒運ばれてくる波エネルギーを波パワーと呼び、電線で毎秒運ばれてくる電気のエネルギー(電力、電気パワー)と同じワット(W)の単位で表す。すなわち、

$$E = 0.5 H_s^2 \cdot T \quad (\text{kW/m}) \quad (1)$$

ここに、 E は海岸線1mあたりの波パワーであり、 H_s は波の平均的な波高(詳しくは有義波高)で T は波の周期である。たとえば、波高が1mで周期が6sであれば3kW/mのエネルギーが毎秒海岸1mに押し寄せてきていることになる。また、台風のときのように波高が10mで周期が15秒であれば750kW/m

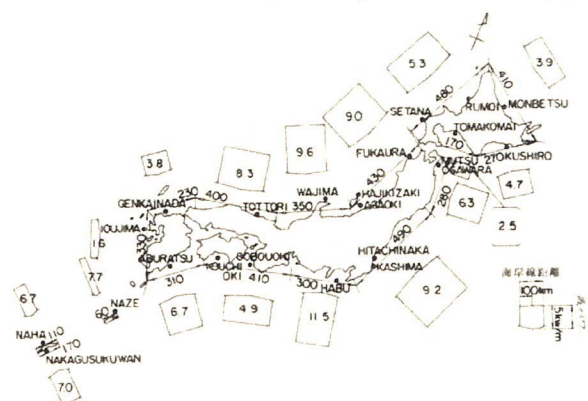


図-1 日本の波パワー

という非常に大きなパワーとなる。

図-1 は、我国周辺の波パワーの分布²⁾を示すもので、運輸省(現国土交通省)の波浪観測結果から求めたものである。日本周辺には 3,500 万 kW の波パワーが平均的に来襲しており、これを図中の日本を囲む折れ線の総延長 5200 km で除すと 7kW/m となる。やはり希薄なエネルギーであるが、3,500 万 kW は、日本の総発電量の 1/3 にも達しており、世界的にみても我国は波エネルギーに恵まれた国である。

(2) 歴史的な装置

我々が海を利用しようとするとき、波はその大きな障害であり、海の利用は、その障害を取り除くことによって進められてきた。波を防ぎ広い海を利用可能な空間にする構造物は防波堤である。海の波は厳しく、防波堤の歴史は多くの失敗の歴史でもあり、波に耐え得る防波堤の設計がほぼ可能となったのは最近に過ぎない。一方、波が強大であればある程、それを利用しようとするのは当然であり、先輩の技術者のなかにも波の利用を試みた人々がいる。

たとえば、土木工学の偉大な先達の一人である広井勇教授は、1911 年、千葉県大東崎において波エネルギー変換装置の実験³⁾を行っている。広井博士は、小樽港などの防波堤の建設において、厳しい波との闘いを経験した人であった。彼の波エネルギーを具体的に利用しようとする我国初の現地実験は、残念ながら成功に至らなかった。

海外でも波エネルギーを利用しようとする試みは、古くから存在する。例えば、イタリア人の H. F. Linden は、1889 年に波エネルギーで推進する舟(波喰舟)を試作している。また、20 世紀初頭には、フランス人の Bouchaux-Praceique が岩場に空気室のようなものを掘抜き一家の電気をまかなったと言われている。



写真-1 波力発電による航路標識ブイ

写真-1 は、既に実用化されている波力発電装置であり、航路標識ブイ^{4) 5)}である。このブイは、その中心に円筒があり、円筒内の水面が動き、これによって衝動タービンを回転させるものである。ただし、空気流は往復流であるため、弁装置によって空気流を一方向にしてタービンに作用させている。これは益田が終

戦後から続けていた開発の成果であり、1965 年から実用化されすでに 1,000 台以上が使用されている。ただし、発電出力は 10-500W と小さい。

なお、この変換方式は、円筒中の水柱が振動す

ることから水柱振動方式 (Oscillating Water Column, OWC) と呼ばれ、また空気流によってタービンを回転させることから空気タービン方式と呼ばれている。この装置は浮遊式であるが、固定式の装置が 1966 年東京湾久里浜沖のあしか島に造られている。これは、海上保安庁燈台部の長崎らによるもので、燈台に定格 130kW の電力を供給するものであった。なお、多くの波エネルギー変換装置は、最終的に波エネルギーを電力に変換しており、それらは波力発電装置と呼ばれている。

(3) 石油危機後の日本の波エネルギー変換装置

1973 年の石油危機以降、本格的な波エネルギー変換装置の開発が多く機関で行われている。装置には、アイデアだけのものから実証試験に至ったものまでいろいろあるが、ここでは、実証試験に至った波力発電装置を中心に、装置のタイプ別に述べる。日本の開発において特徴的なものは、水中振動方式 (OWC) タイプが多いことであり、浮体式のものから発展し、固定式のものもつくられて、OWC は実用化直前に至っている。

①浮体型の水中振動方式

世界に先駆けて開発された波力発電装置が海洋科学技術センター(JAMSTEC:現海洋研究開発機構)の「海明」である。海明は船形をしたブイであり、多くの空気室を持つものである。まさにこれは航路標識ブイを大型にしたものである。海明の第一期の研究は、1976 年から始まり 1981 年まで続けられ、その間 IEA (International Energy Association) の共同実験を含め 2 度の海上実験を山形県鶴岡市の沖合で行っている。

海洋科学技術センターでは第二期の海明の研究⁶⁾を進め 1985 年に海上実験を再び実施している。さらに 1989 年から 2003 年に海洋科学技術センターは海明を発展させたマイティホエール (写真-2) の開発研究を進めた⁷⁾。



写真-2 マイティホエール

②固定型の水中振動方式

海洋科学技術センターは富士電機や三井造船とともに、1983 年に山形県三瀬の海岸で沿岸固定式波力発電装置⁸⁾の現地実験を行った。この装置は、岩場に固定されたものであるが水柱振動方式の装置である。定格 40kW のタービン発電機によって、実

験期間中平均 11.3kW の発電が記録されている。固定式的水中振動式装置を防波堤に付加したのが**波力発電ケーソン**であるがこれについては、(4)で説明する。

大成建設は、1985 年から 1987 年に新潟県寝屋漁港で**波力利用熱回収システム**の現地実験⁹⁾を行っている。これは、既設の防波堤の前面に設置された空気室ケーソンであり、ここにウエルズタービンを設置して実験を行っている。この実験の特徴は、既設の防波堤に波エネルギー変換装置を取り付けたことと、波エネルギーを電気ではなく直接熱エネルギーに変換したことである。

エンジニアリング振興協会は、竹中工務店等とともに 1987 年から千葉県九十九里町で**消波工型定圧タンク式波力発電システム**¹⁰⁾の現地実験を行っている。この装置の特徴は、多数のパイルからなる空気室を持ち、ここからの空気圧を定圧タンクに一度ためてタービンを回転させているところである。

東北電力は、**水弁集約式波力発電システム**¹¹⁾の開発を行った。本装置は基本的には水柱振動式の装置であるが、大規模な装置になった場合、数多くの空気室からの空気流を整流して集約・平滑化する必要がある、水弁を利用してそれを行うシステムであることが特徴である。

③機械式の装置

室蘭工大の近藤ら¹²⁾は、水車式と振り子式の 2 種類の装置の開発を行っており、室蘭港南外防波堤沖で現地実験も行っている。このうち振り子式の装置は、波によって振り子を振動させるもので、同様な装置は、日立造船によって室蘭工大および北海道開発局土木試験所(現寒地土木研究所)の協力のもと、増毛港北防波堤の縦スリットケーソンの遊水室内にとりつけられて現地実験が行われた。

日本造船振興財団海洋環境研究所は 1984 年に沖縄県の西表島の水深 10m の地点に波エネルギー変換装置「**海陽**¹³⁾」を設置している。これは、SEP にあひる型の浮体を取り付け、この浮体の動きからエネルギーを取り出すものである。この実験では、得られた電気はバッテリーに充電された。この装置の特徴は、非常に厳しい波浪下では、デッキを上昇させて危険を避けることができることである。これら以外にも多くの装置が研究されている。

このほか鹿島建設は、波のエネルギーで直接揚水する「**波動ポンプ**¹⁴⁾」を開発している。揚水型の装置としては、大洋ブランド工業社の**波力ポンプ**¹⁵⁾もある。

④その他

電中研では、**低天端越流型防波**¹⁶⁾の研究が行われている。防波堤の越波水をためてそのヘッド差で発電するものである。関西電力では**振り子式装置**の現地実験¹⁷⁾を宮津研究所で実施している。

(4) 波力発電ケーソン防波堤

図-2 は波力発電ケーソン防波堤の概念図である。波力発電防波堤は、ケーソンと呼ばれる鉄筋コンクリート箱が海底の基礎石(マウンド)上に設置されたものであり、前面の下部に開口部がありここから空気室と呼ぶ前室に波が出入りし、空気によってタービン・発電機を回す。この空気流は一方ではなく往復流であり、空気流が往復流であっても一方に回転するウエルズタービンを使用している。こうしたケーソンを並べて防波堤として波を防ぐだけではなく、波のエネルギーを吸収し電力に変換するものである。

波力発電ケーソン防波堤の基礎的な研究開発は、運輸省港湾技術研究所(現港湾空港技術研究所)で 1982 年から 5 ヶ年間行っている。波エネルギー変換の基礎的研究からはじめ、発電シミュレーション技術の開発、高波に対する安全性の研究などを行い、1987 年からは現地実証実験を行った。

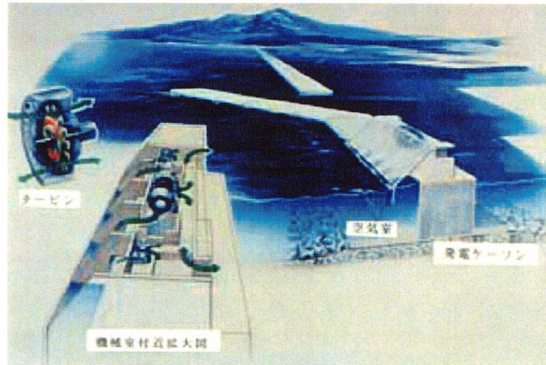


図-2 波力発電ケーソン防波堤

現地実証実験は、運輸省第一港湾建設局(現国土交通省北陸地方整備局)が運輸省港湾技術研究所、沿岸技術研究センターを中心とした民間会社 29 社との共同研究として(第一期 1987-1991, 第二期 1991-1995)実施している。現地実証実験は、酒田港の北防波堤で行われたが、建設中の北防波堤にこの波力発電ケーソン 1 函を設置して実験を行った。

第一期の実験では、あらかじめ計算されていた発電がほぼ確認され、第二期の実験では、一般商用電力系統への接合も行っている。また、種々の独立電源としての試験として、波力電力で海水の導水などを行うためのポンプの運転試験なども行っている。二つの実証実験を通じて、波力発電防波堤の発電システムの設計法をほぼ確立することができた。また、厳しい環境でシステムを 10 年以上稼働させることができたことは、このシステムの信頼性が高く、維持管理も容易である証と考えられる。

(5) 石油危機後の海外の波エネルギー変換装置

英国では、大型の火力発電所級(100 万 kW)の波力発電所を目指した研究が、1975 年以降エネルギー省の ETSU (ENERGY SUPPORT UNIT)を中心にして、大学、民間会社等によって進められた¹⁸⁾¹⁹⁾。

図-3 は、英国の代表的な波エネルギー変換装置の一つであるソルターダックである。これは、エジンバラ大学の Salter によって考案されたもので、あひる型の浮体の動揺からエネルギーを取り出すとするものである。効率は高いが機械的に複雑であることが問題とされている。

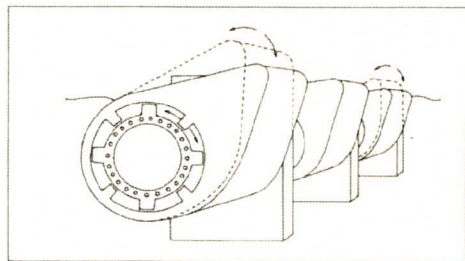


図-3 ソルターダック

この他英国では²⁰⁾²¹⁾、Bristol 大学の Oscillating Cylinder、Lancaster 大学の Flexible Bag、National Engineering Laboratory の NELOWC、Hydraulic Research Station の Rectifier、C. Cockerell の Raft、Conventry Polytechnic の Sea Clam²²⁾ など多くの興味ある装置が開発されている。しかしながら、1983 年以降は全体にその規模を縮小している。その原因としては、エネルギー危機の緩和がまず上げられる。このほか、多くの装置に短所と長所があり、一つの形式に絞った研究ができなかったことや、最初から大規模な発電所を目的としたことが挙げられる。

ただし、地球環境問題などによって再び研究が活発になっている。例えば、1991 年にスコットランドの ISLAY 島に沿岸固定型の水柱振動方式の装置 LIMPET が設置され発電を開始した²³⁾。ノルウェーでも研究開発²⁴⁾がエネルギー省を中心に行われており、クベルネル社が 1985 年に Bergen の海岸に MOWC と呼ぶ装置の現地実験を開始した。この装置も、岩場に固定した水柱振動式である。空気室の面積は 50 m² で最大 500kW の発電が可能であり、建設後順調に発電していたが、最近激浪のためにタービン部分が壊されている。また、ノルウェーブ社がタブチャン (Tapered Channel²⁵⁾) と呼ぶ装置を運転している。これは、次第にせばまった水路で波を誘導し越波水をダム湖に貯めるものである。

ポルトガルでは、沿岸固定型水柱振動式の装置 Pico を対象にした Azores Project²⁶⁾ が現在進行中である。スウェーデンでは、ゴムのチューブの伸縮を利用したチューブポンプ (Hose Pump²⁷⁾) が研究されており、デンマークでは大洋プラント工業の波力ポンプに似た装置²⁸⁾ が現地で試験されている。

インドではインド工大 (IIT) によって波力発電ケーソンタイプの装置²⁹⁾ を実際に建設し、発電を行っている。中国でも航路標識を対象にした波力発電装置³⁰⁾ の開発が進んでおり、韓国でも基礎的な研究³¹⁾ が行われている。

3. 実用化への問題点

(1) 装置の開発における問題点

これまで多くの装置が考案されているが、実証実験に至ったものは、担当者の熱意と努力が大きかったものばかりである。ただし、それだけでなく、アイデア→理論→実験→現地実証実験→現地適用性の各検討段階で、多くの機関との連携を図っている。例えば、浮体の運動理論³²⁾ やタービンの開発³³⁾ などについては、大学等との連携を図り、実証試験などでは、建設会社や電力会社などの協力を得ることが重要であった。

なお、開発の早い段階で中止となった構造も少なくない。それらは以下の点の検討に問題を持っていたと思われる。

- ① 幅の広い波の条件：限られた波の条件の範囲で発電効率が上がるが、幅の広い波の条件（周期や波高）で高い発電効率が確保できないこと。
- ② 波の不規則性：波は基本的に不規則であり、一波一波変動しており、そうした波に対して効率が低下したり、発電出力の変動性が大きいこと。
- ③ 波向きの考慮：波向きや波の方向分散性によって装置に入射する波のエネルギーは低減する。装置の平面的な配置や波向きについて考慮していないこと。
- ④ 台風時など厳しい条件に耐える構造：発電効率を上げるために、複雑な構造となり、装置には台風などの厳しい波が作用する場合に壊れ易い構造となること。
- ④ 耐久性が高く維持管理がし易い構造：やはり発電効率を高めるために複雑な構造で耐久性に問題があったり、維持管理が困難なこと。特に、水中での維持管理が問題となる。

(2) 実海域への適用上の問題点

有力な装置でも、実海域に適用して実用化するときには、いくつかの問題が顕在化する。すなわち、

① 波エネルギーの量と変動性

基本的に、波エネルギーの高い地域を選ぶ必要がある。日本はその意味では恵まれていると思われるが、東京湾などの内湾は、波エネルギーはかなり小さい。また、できれば定常的に波が発生しているところが望ましい。日本海側では、冬期風浪は大きいですが、夏期には波がほとんどない日が続くという問題がある。なお、極端に大きくなるときには、発電を停止することになり、変動幅も問題となる。

② 場所と建設コスト

沿岸域では、沖合の水深の大きいところに比べて波エネルギーは一般に小さくなり、地形の影響などで、場所による変動が大きい。建設コストが安くて大きな波エネルギーが得られるところはそれほど多くはない。また、既存の送電施設が使えない場合には、送電のコストが高い。特に海底ケーブルなどは高価であり、変電施設も思いのほか高い。

③ 環境上の対策

波力発電装置の形式によっては、海の環境に影響を与えることも考えられる。また、騒音などの問題がある場合も考えられる。

(3) 実用化上の問題—波力発電防波堤の例

空気流式の波力発電装置、特に波力発電ケーソン防波堤は、本格的な波力発電装置として優位な特徴を持っている。しかし、残念ながら実用化に至っていない。実証実験を通じて、装置の設計法が確立したにもかかわらず、実用化に至っていないのには、主として得られる波力発電の電力コストが石油などによる通常の電力より高いことと、生産される電力の不安定性が原因と考えられる。

発電コストの低減には、電力関係の諸装置のコストダウンが不可欠である。ウエルズタービンよりコストが低く効率が高い衝動型のタービンの開発が進んでおり、これに期待したい。また、風力発電の実用化によって、インバーターなどの発電制御関連の諸装置のコストダウンが図れてきており、その進展によって実用化の可能性は高くなる。

一方、電力の不安定性は、自然エネルギー全体の問題でもある。次に述べるように欧米での風力発電の発展はそれを克服した実例であるが、残念ながら日本では大きな問題であり、我が国の自然エネルギー発電の発展を阻んでいる。なお、この問題を根本的に解消するには、電力の貯蔵などの技術の発展が必要である。水素エネルギーなどとして貯蔵することなども検討が始まっている。

(4) 北欧の風力発電との違い

風力発電は、北欧で実用化されて我が国でもようやく普及してきている。風力発電については石油危機以降、我が国でもかなり研究開発が進み、実用化寸前まで行っていたが、結局実用化に至らず、現在は北欧で発展した装置を受け入れる側となっている。海外で、そして風力発電が実用化された理由は次のように考えられる。

① 大きな風パワー

デンマークなど北欧で風力発電が実用化されたが、これは、もともと比較的安定で大きな風パワーが平坦な国土に幅広くあったことが大きな理由である。

② 電力の平滑化と電力会社の協力

北欧は水力発電が盛んな地域もあり、かつ電力が各国が融通しあって平滑化することができる体制があった。こうした電力会社の協力があつたことや発電の自由化が進んでいて小規模な発電事業が実施し易いことも理由と思われる。

③ 開発会社の努力と社会の後押し

風力発電装置を開発したのは、比較的小さな会社であり、その会社の技術者の努力と自然エネルギーに対する社会の経済的な手段を含めた支援によって実用化にいたったと思われる。特に実用化初期の段階での支援が大きかったと思われる。

④ 大型化によるコストダウン

風エネルギーは3次元的であり、翼の直径を大きくすると高さ方向にも風エネルギーを取り込むことができ、その効果が2乗で効いてくるため、コストダウンがはかられた。第一次石油危機後では定格が100kW程度であったが、実用化されたものはその10倍以上のものであった。

以上、北欧で風力発電の実用化が進んだ理由には自然条件だけでなく、社会的な条件も大きく影響していることが分かる。技術的な面だけでなく自然エネルギーによる発電事業を推進しやすい社会的な制度の改善も必要である。

4. 最近の動き

日本では、マイティホエールの後、大きな現地プロジェクトはないが、国土交通省北陸地方整備局が2002年から現在まで新潟西海岸の既存突堤に取付けた波力発電システムと陸側に取付けた太陽光発電システムのハイブリッド発電実験を実施しており、佐賀大学や松江高専らとの共同研究として衝動タービンの実験を行っている³⁴⁾。また佐賀大学は、浮体式の波力発電装置として後ろ曲げダクトブイ³⁵⁾を開発している。また山口大学³⁶⁾や神戸大学³⁷⁾でも新たな開発が行われている。

一方、世界でも再び研究が進んできており³⁸⁾、スコットランドやポルトガルの沿岸固定型水柱振動式の装置に加えて、オーストラリアのEnergetech社(Oceanlinx社)が波を集中させる翼のようなものを持つ形式のOWC浮体式水中振動式装置を開発し、オーストラリアだけでなく、米国や英国での採用が検討されている。

さらに各種の浮体式装置が新たに開発されている。英国のOcean Energy Delivery社によるPelamisは、大型円筒状のRaftのようなものであり、スコットランドのOrkneyでテストされ、ポルトガルのポブア・デ・バリム付近の沖合い5kmに設置された。750kWのものを30基以上並べる計画である。このほかEUや米国を中心に、Wave Dragon, Archimedes Wave Swing, Power Buoys, AquaBouy, MacCabe Wave Pumpなどが開発されており、比較的小規模の会社による技術開発が政府の援助を受け進められている。

5. あとがき

最近我が国でも、海洋エネルギー資源利用推進機構(OEJ:会長木下東大教授)が発足し、この分野の研究が推進される機運が高まっている。また、International Electrotechnical Commissionにおいて、海洋エネルギー専門部会(TC114)の設立が決定され、国際標準化の動きも始まっている。

現在、波力発電について、欧米ではいくつかの研究開発が進められているが、いくつかは日本発の

技術である。そうした技術が実用化されて日本に逆輸入されるのを待つだけでいいのかは疑問である。単に過去の研究を繰り返すのではなく、過去の開発における問題点を明確にして、新しい挑戦が必要と思われる。特に、イノベーションによる技術的なブレークスルーを期待したい。また、自然エネルギーが容易に利用できる社会制度の改善も必要である。

参考文献

- 高橋重雄：波エネルギー変換装置の現状について、1993 年（第 29 回）水工学に関する夏期研修会講義集，土木学会海岸工学委員会・水理委員会，pp. 93-B-1～2，1993.
- 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案，第 36 回海講論文集，土木学会，pp. 874-878，1989.
- 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.
- 築貫義人・矢作 勝：航路標識用波力発電システム，エネルギー資源研究会，Vol. 7, No. 6，1986.
- 中村研治・勝目幸二郎・矢作 勝・梶原勝正・太田義之：航路標識灯浮標用波力発電装置の実海域における発電量の現状，第 3 回波浪エネルギー利用シンポジウム，pp. 305-313，1991.
- 海洋科学技術センター：波力発電装置「海明」第Ⅱ期計画研究報告書，214p.，1988.
- 宮崎武晃・堀田 平・鷺尾幸久・石井進一：沖合浮体式波力利用装置（マイティホエール）の経済性検討，第 3 回波浪エネルギー利用シンポ，pp. 471-483，1991.
- 石井進一・益田善雄・宮崎武晃・工藤君明・堀田平：沿岸固定式空気タービン波力発電装置の発電運転試験報告，JAMSTEC 試験研究報告，第 14 号，1985.
- 宮崎弘志・花村哲也・和田憲治・東江隆夫：波力利用熱回収システムの開発，第 2 回波浪エネルギー利用シンポジウム，pp. 361-370，1987.
- 田村賢治・茅野秀則：固定式波力発電システム（定圧化タンク方式）について，HEDORO，（社）底質浄化協会，No. 43，pp. 36-41，1988.
- 渡部國也・菊地省吾・小宮俊夫・小林正典・中川寛之：密閉サイクル波力発電システムに関する水理模型実験，第 2 回波浪利用エネルギー利用シンポ，1987.
- 近藤俊郎：室蘭工大における波エネルギー利用緩急の総括，室蘭工大研究報告，第 37 号，pp. 251-261，1987.
- 矢崎敦生・竹沢節雄・菅原一美：波浪発電実用化テストプラント「海陽」の実海域について，第 2 回波浪エネルギー利用シンポジウム，1987.
- 今井賢爾・吉田幸三・岩瀬浩二・高橋俊彦：波動ポンプの揚水能力に関する研究，第 35 回海岸工学講演会論文集，1988.
- 真鍋安弘：波力ポンプの開発，テクノオーシャン（神戸），1985.
- 広瀬 学・阿部宣行・角湯正剛：低天端越流防波堤の発電特性，第 2 回波浪エネルギー利用シンポジウム，pp. 51-57，1987.
- 下平昌兵・阿部 守・松永弘之・橋野幸二：下部支持型振り子式波力発電システムの実海域におけるエネルギー変換効率について，第 3 回波浪エネルギー利用シンポジウム，pp. 15-25，1991.
- Grove-Palmer. COJ : Wave energy in the United Kingdom. A review of the programme June 1975-March, *Proc. 2nd International Symposium on Wave Energy Utilization*, 1982, pp. 23-54, 1982.
- Davies, P.G. et al. : Wave Energy, The Department of Energy's R&D programme, ETSU, 1985.
- McCormick, M.E. : Ocean Wave Energy Conversion, A Wiley-Interscience Publication, 233p., 1981.
- Count, B. : Power from Sea Waves, Academic Press, 449p., 1984.
- Duckers, L., F. Lockett, B. Loughridge, A. Peatfield, M. West, and P. White : Membrane and Turbine Development for the Circular Clam, 3rd Symposium on Ocean Wave Energy Utilization, pp. 415-424, 1991.
- U.K. Department of Energy : Islay, Wave Power in Action, Review. The Quarterly Magazine of Renewable Energy, Issue 17, 1991.
- Malmo, O. and A. Reitan : Development of the Kvaerner multiresonant OWC, Symposium on Hydrodynamics of Ocean Wave Energy Utilization, IUTAM, pp. 57-67, 1985.
- Hysing T. : TAPCHAN Wave Power Plants, Norwave A. S., 1983.
- Falcão, A., A. Sarmento, L. Gato, and M. Pontes : Preliminary Design of a Demonstration OWC Wave Power Plant for the Azores. 3rd Symposium on Ocean Wave Energy Utilization, pp. 395-403, 1991.
- Berggren, L., and L. Bergdahl: Forces on a Wave-Energy Module, 3rd Symposium on Ocean Wave Energy Utilization, pp. 47-56, 1991.
- Nielsen, K. : Results of the First Offshore Wave Power Test in the Danish Part of the North Sea, 3rd Symposium on Ocean Wave Energy Utilization, pp. 57-63, 1991.
- Raju, V., M. Ravindran, and P. Koola : Energy from Sea Waves - The Indian Wave Energy Programme. 3rd Symposium on Ocean Wave Energy Utilization, pp. 405-414, 1991.
- Liang, X., X. Gao, W. Zheng, Z. Yu, N. Jahng, X. Hou, and Y. You : Research and Construction of a Small Experiment Wave Power Station. 3rd Symposium on Ocean Wave Energy Utilization, pp. 377-383, 1991.
- Ahn. Hee-Do : 韓国における海洋開発の現況と展望，OCEAN AGE，1983.
- 木下 健，前田久明，増田光一，西條憲一，今井康廣：波浪発電に関する基礎的研究（その 4），日本造船学会論文集，151，65-71，1982.
- 鈴木正己・荒川忠一：波力発電防波堤のエネルギー変換特性，機械学会流体工学部門講演会論文集，機械学会，pp. 320-322，1991.
- 高尾学・玉利一也・佐藤栄治・永田修一・豊田和隆・瀬戸口俊明：振動水柱型波力発電プラントの実海域試験，土木学会年次講演会，2006.
- 永田修一・豊田和隆・経塚雄策・益田善雄：浮体型波力発電装置（後ろ曲げダクトバイ）の波浪中挙動に関する研究，日本機械学会 2006 年年次大会，2006.
- 羽田野 袈裟義：揺動を利用したエネルギー変換装置 <http://jstore.jst.go.jp/cgi-in/patent/list/>，2005.
- 神吉 博・森本高弘・川西通裕・大西 徹・畑卓宏：ジャイロ効果を用いた波力発電システムの研究，日本機械学会関西支部第 79 期定時総会講演会，2004.
- NEDO 情報システム部：NEDO 海外レポート No. 977，pp. 16-24，2006.