

# 波浪発電の現状

## Wave Energy Utilization

前田久明\*

Hisaaki Maeda

### 1. はじめに

1985年7月上旬ポルトガルの首都リスボンで IUT A M 主催の波浪エネルギー利用シンポジウムが開催された。日本、英国、ノルウェー、米国その他の国から約80名の参加者があり、30数編の論文が発表された。波浪発電の理論と実際に関して世界の最先端に行く研究者が一同に会したシンポジウムであった。1984年11月下旬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開催された。200余名の参加者があり30数編の論文が発表された。それまではお互いに交流も無く個々別々に研究を進めていた研究者が一同に会し、日本の波浪発電分野の実力を示しそのレベルの高さを確認し合ったシンポジウムであった。波浪発電の現状を知るにはこれら二つのシンポジウムで発表された論文が最も重要である。その他にも米国機械学会主催の海洋工学および極地工学に関するシンポジウム (OMAE) の論文集、造船学会論文集、機械学会論文集、日本大学主催 Ocean Space Utilization '85 論文集等々にも重要な論文がある。これらの論文を参照して波浪発電の要素技術、波浪発電システムの設計法並びに開発の現状、即ち、ウエールズタービンの高性能化、振動水柱型波浪発電装置のエネルギー一次変換装置の高性能化、現在開発中の振動水柱—空気タービン型装置「海明」、可動物体—油圧型装置「海陽」、ノルウェーで開発中の二例等の現状を述べる。

### 2. 波浪発電の要素技術<sup>1, 2)</sup>

波浪発電システムは、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、送電、海洋構造物、係留装置から構成される。これらの要素のうちの幾つかは、波浪発電装置の種類によっては省略される。現在実際に開発が進められている波浪発電装置は、一次

変換装置と二次変換装置の組み合わせで見て、振動水柱—空気タービン式と可動物体—油圧式の二種類が主流で、その他集波堤を用いて水流を作り貯水地に水を溜め低落差タービンを用いる方式がノルウェーに一例見られる。装置を設置海域で分類すると、沿岸固定式と沖合浮遊式（または沖合固定式）の二種類となる。

波浪発電システムのうち、波浪エネルギー一次変換装置の高性能化については次章で述べることにする。波浪エネルギー二次変換装置のうちの油圧装置、発電機、逆電、海洋構造物、係留装置に関する要素技術は海底石油掘削用大型海洋構造物の要素技術がそのまま利用可能である。波浪エネルギー二次変換装置のうちの空気タービンの高効率化について特に本章で述べる。

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。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。往復流で使用可能な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、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。ところでウエールズタービンは歴史が浅いこともありその設計法は未だ確立していなかった。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

\* 東京大学生産技術研究所第2部教授  
〒106 東京都港区六本木7-22-1

エールズタービンの特性は基本的には準定常的に解析が可能である<sup>2)</sup>。何故ならば、不規則に変動する周期が実海域で3秒から10秒くらいとゆっくりしているからである。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なことが明らかとなった<sup>2)</sup>。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<sup>3)</sup>。

波浪発電を実用化するためには、波浪発電で得られた電力の質を向上させ供給の信頼性を高める必要がある。この方面の研究は「海陽」の実海域試験において進められている。「海陽」における電力の供給は、波浪発電によるものと、電池と、ディーゼルによる補助電源の三系統から成る。波浪エネルギー一次変換装置で得られたエネルギーは油圧装置によりアキュムレーターに貯蔵される。アキュムレーターは二本あり、満杯のアキュムレーターが発電機を廻している間に、空のアキュムレーターに波浪エネルギー一次変換装置からのエネルギーを貯蔵するようになっている。発電機により得られた電力は電池に蓄えられる。アキュムレーターと電池を使用することにより、不規則変動する波浪発電装置からの電力の質は向上し実用に供することが可能となっている。風ぎの状態でも波浪エネルギーが得られない場合で、二本のアキュムレーター共に空となり電池の電力も無くなった場合には、補助電源のディーゼルを廻して電力を供給するようになっている。このように波浪発電装置「海陽」では波浪の無い状態でも電力の供給が可能である<sup>4)</sup>。

### 3. 波浪発電装置の高性能化

波浪発電装置を実用化するためには発電コストを50円/kw・hr以下に押さえなければならない。このため

には波浪エネルギー一次変換装置の高性能化を計り、さらに波浪エネルギー一次変換装置と波浪エネルギー二次変換装置とをマッチングさせ、波浪発電システム全体の効率を向上させる必要がある。

波浪発電装置の高性能化の手法で有望なものは三種類ある。浮遊式振動水柱型装置に底板を付けることと、振動水柱型装置の前面に港湾を付けることと、振動水柱型装置の振動水柱（エネルギー一次変換装置）に対する空気タービン（エネルギー二次変換装置）の運動の位相を制御する方法である。

波浪発電装置は一般にある特定の入射波の周波数で装置の可動部分（振動水柱）が同調運動を起こすように設計されている。この周波数を含む狭い周波数範囲では波浪エネルギー吸収効率が高い。しかし現実の不規則波のピーク周波数は一般に同調周波数より低いところにあるため波浪エネルギー吸収効率は下がってしまう。また現実の不規則波の周波数範囲で平均化すると波浪エネルギー吸収効率はさらに低いものになってしまう。そこで現実の不規則波中で波浪エネルギー吸収性能を向上させるためには、装置の可動部分の同調周波数を低くすることが有効である。さらには他の運動と連成させることにより複数の同調周波数を作ることができればなおのこと有効である。

縦置き（アテニューエーター）浮遊式振動水柱型波浪発電装置（図-1）では装置の下側に底板を取り付けると低周波数側での波浪エネルギー吸収性能が向上する（図-2）。この理由は、底板を取り付けることにより浮遊式構造物の付加質量が増加し、浮遊式構造物と振動水柱との相対運動の同調周波数が低周波数側に移動するためである<sup>5)</sup>。図-2の横軸  $KL = (\omega^2/g) \cdot L$  は無次元化した周波数である。但し、 $L$  は波浪発電装置の長さ、 $\omega$  は入射波の円周波数、 $g$  は重力加速度である。図-2の縦軸  $\eta_T$  は装置が吸収するエネルギーと装置の

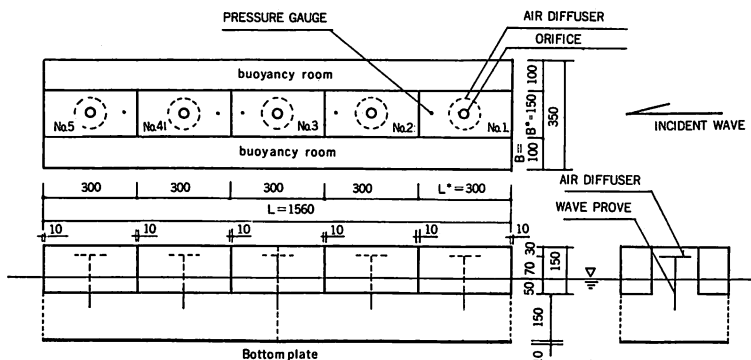


図-1 底板付きアテニューエーター式振動水柱型波浪発電装置

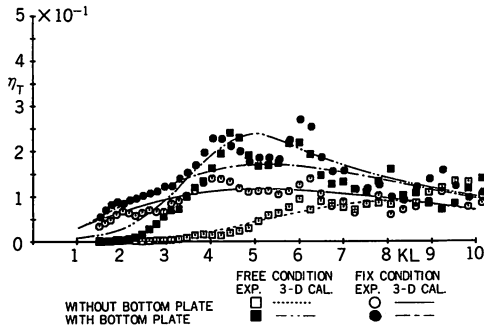


図-2 アテニューター式振動水柱型波浪発電装置のエネルギー吸収特性

長さ $l$ と同じ長さの波頂線を持つ入射波のエネルギーとの比を表す係数で、波浪エネルギー吸収係数あるいは吸収幅比と呼ばれている。図中黒丸は底板を取り付けた場合の実験結果を示し、白丸は底板の無い場合の結果を示す。

波浪発電装置の前面に港湾を取り付けることにより波浪エネルギー吸収性能が向上する。港湾を取り付けた装置を図-3に示す。港湾の長さを変化させることにより図-4に示すとおり波浪エネルギー吸収効率に変化している。港湾の長さを長くするに従い低周波側における波浪エネルギー吸収効率は向上するが、高周波側では効率は逆に下がってくる。全周波数において最適な波浪エネルギー吸収効率を示す港湾の長さはほぼ装置の奥行きと同程度である<sup>6)</sup>。図-3で装置の幅を $2a$ 、奥行きを $d$ 、港湾の長さを $L$ 、水深を $h$ としている。図-4の横軸 $ka = (\omega^2/g) \cdot a$ は装置の半幅 $a$ で無次元化した入射波の周波数である。縦軸は吸収幅比すなわち波浪エネルギー吸収係数である。パラメーター $L/d = 0$ が港湾の無い状態である。

振動水柱型波浪発電装置の波浪エネルギー二次変換装置としては空気タービンが用いられる。その中でも、

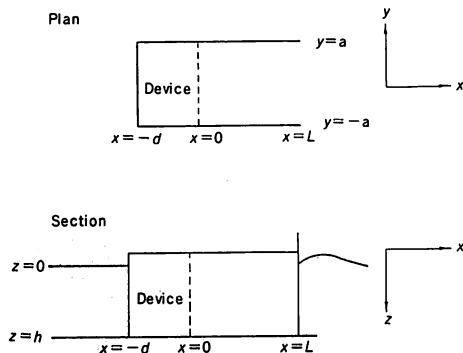


図-3 港湾付き波浪発電装置

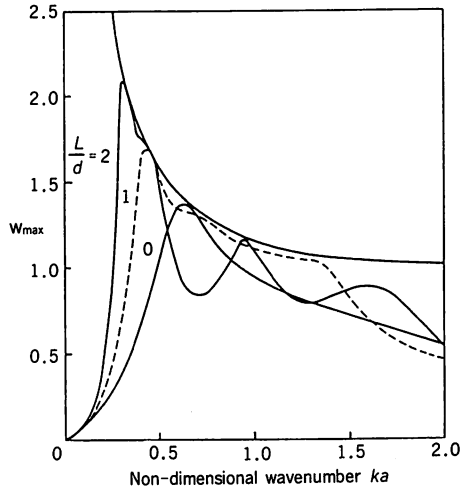


図-4 港湾付き波浪発電装置のエネルギー吸収特性

空気の往復流を整流するための弁機構を必要としないウエルズタービンが一般的に用いられる。振動水柱型波浪発電装置では、入射波により振動水柱が上下に振動すると空気室内の空気に往復流が発生しウエルズタービンを回転させる仕組みになっている。実機規模の装置では空気室内の空気の圧縮性を無視しえないので、振動水柱の運動とウエルズタービンの運動は連成することになる。しかし、空気の圧縮性はそれほど大きくないので、振動水柱の運動とウエルズタービンの運動を等価的に直結して考えることが出来る。即ち、振動水柱の運動に等価線形化したウエルズタービンの反力が外力として加わると考える。このようにしてウエルズタービンの特性は、振動水柱の運動に対応する等価的ばね常数と減衰係数として表現される。このウエルズタービンの等価ばね常数 $a_T$ と等価減衰係数 $d_T$ との間の関係を図-5に示す。図中実線、鎖線、点線等は往復流の周波数に対応している。パラメーター $n$ は一つの空気室に付けたウエルズタービンの個数であり個数 $n$ が増すことはウエルズタービンの負荷が減少していることに対応している。ところで位相制御とは、ウエルズタービン前面に設けた弁を開閉して空気の流れを制御することを指す<sup>7)</sup>。位相制御の手順では、振動水柱が上昇する時にはウエルズタービン前面に設けた弁を閉じ空気の流れを遮断し、振動水柱が上死点近くに来ると思われる時点で弁を開き空気を一気にタービンに流し、振動水柱が下降を始めたなら弁を閉じ空気の流れを遮断し振動水柱が下死点近くに来ると思われる時点で再び弁を開き空気を一気にタービンに流し、振動水柱が上昇を始めたなら弁を閉じ空気の流れを遮断す

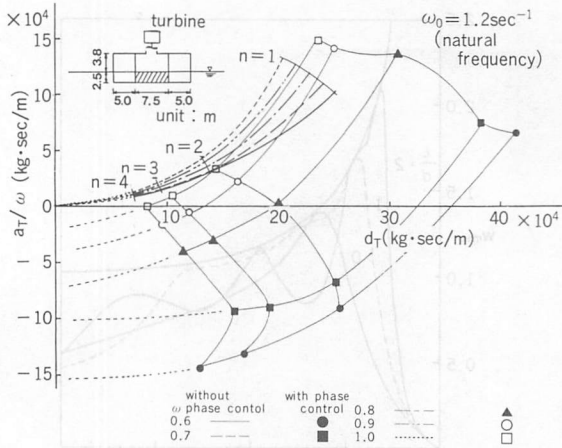


図-5 ウェルズタービンの等価ばね常数と減衰係数に及ぼす位相制御の効果

というサイクルを繰り返す。このように位相制御は非線形の制御である。位相制御を施した時の等価ばね常数と等価減衰係数の関係を図-5の丸、四角、三角印で示す。図-5から分かる通りウェルズタービンの負荷が小さい場合で周波数の低い場合には、位相制御を施すと等価ばね常数は負となる。即ち等価質量が増すことになり、振動水柱の振動系の固有周期が長くなることを意味する。このことは、振動水柱型波浪発電装置のエネルギー吸収特性が長周期側（低周波数側）で向上することを意味する。図-6に、位相制御無しの場合のエネルギー吸収特性を実線で、位相制御を施した場合のエネルギー吸収特性を破線で示してある。ウェルズタービンの負荷が大きすぎると（例えば  $n=1$ ）位相制御の効果が現れない場合もあるが、適当な負荷を持つウェルズタービンでは位相制御を施すことにより低周波数側での波浪エネルギー吸収特性を向上させることが可能である<sup>8)</sup>。図-6の横軸と縦軸はそれぞれ図-4の横軸、縦軸と同じ無次元周波数と波浪エネルギー吸収係数を表す。

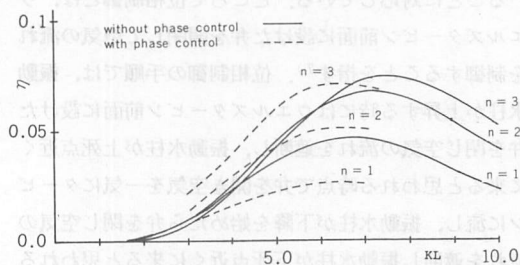


図-6 波浪発電装置のエネルギー吸収特性に及ぼす位相制御の効果

#### 4. 開発の現状

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、海上保安庁燈台部、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<sup>9)</sup>。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。以下に、実海域で実機規模で波浪発電装置の開発が進められている例を紹介する。

世界で初めて実海域で実機規模で波浪発電装置の実験が行われたのは海洋科学技術センターの「海明」である。図-8に示す「海明」は浮遊アテニューエーター（縦置き）式振動水柱型波浪発電装置である。第一次海上実験は1978年から1980年にかけて、山形県鶴岡市由良港沖約3 kmで行われた。初めての実験でもあるため発電コストは約400円/kw・hrと実用化にはほど遠い状態であったが、各要素技術を設計するための貴重なデータを多数得ることができた。第二次海上実験は同じ装置を用いて1985年秋から始められる。発電コスト約50円/kw・hrを目指して装置の高性能化を図るための基礎データを得ることを目的としている<sup>10)</sup>。

新技術開発事業団の沿岸固定式波力発電システムの実験は、1983年から1984年にかけて、山形県鶴岡市三瀬立岩地区にて行われた。図-7に示すこの装置は固定ターミネーター（横置き）式振動水柱型波浪発電装置である。この実験では初めて実機規模のウェルズタービンが採用され、ウェルズタービンを設計するための

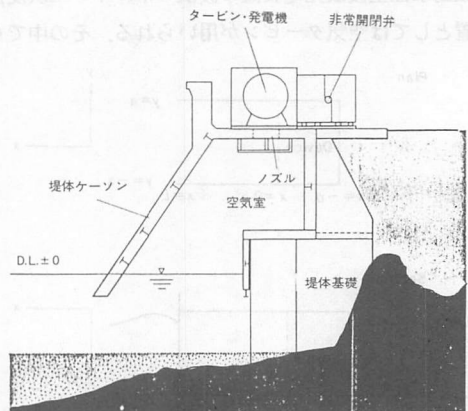


図-7 沿岸固定式波浪発電装置

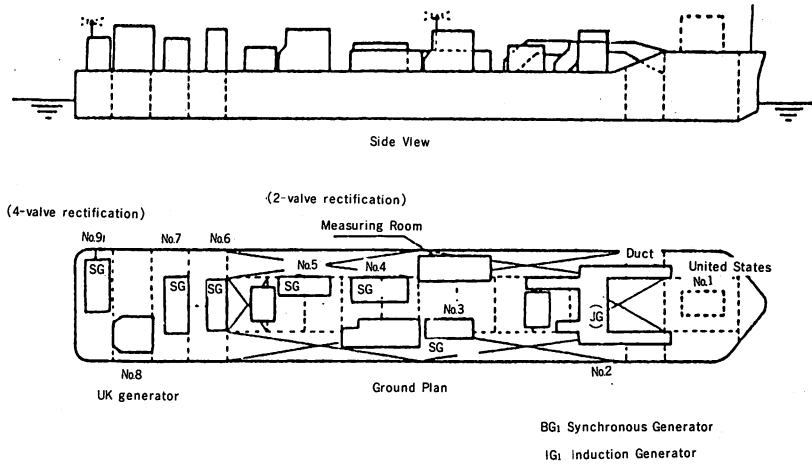


図-8 波浪発電船「海明」

貴重なデータが得られた<sup>11)</sup>。

日本造船振興財団海洋環境技術研究所の「海陽」は離島における電力供給を目標に開発が進められてきた。実験は1984年から1986年にかけて、沖縄県八重山郡竹富町西表船浮地区サバ崎沖北方約400mにて行われている。図-9に示す「海陽」はジャッキアップ式でそのデッキ部に可動浮体と油圧装置とから成る発電設備を備えた装置である。可動浮体はターミネーター（横置き）式でその断面形状は非対称である。可動浮体の上下揺、回転揺、左右揺でリンク機構を介して油圧シリンダーを動かすシステムになっている。二組のアクチュエーターを用意しており、一つのアクチュエーターに可動浮体が吸収したエネルギーを蓄えている間に、もう一つの満杯のアクチュエーターで油圧モーターを動かし発電機を廻すシステムとなっている。発生した電力は電池に蓄えられる。入射波が無い場合にも電力を供給できるようにディーゼルの補助電源をも備えている。発生した電力は陸上へ送電される。電源として波浪発電装置、電池、ディーゼル発電機の三系統を組み合わせ、電力を安定して供給するシステムの最適化をはかるための基礎データが集められている<sup>4)</sup>。

ノルウェーにおいては、外海に面したフィヨルドの岸壁を利用して、二種類の波浪発電装置の開発が進められている。一つは、クヴェルナー社が開発している、振動水柱式波浪発電装置である。この装置の特徴は、装置の前面に港湾を設け湾内の固有振動を利用して波浪エネルギー吸収特性を向上させている点にある。振動水柱並びに空気室の断面形状は円形で、空気室の高さを大きくとり、振動水柱の飛沫からウエルズタービンを守るように設計されている。現在建設中で本格的

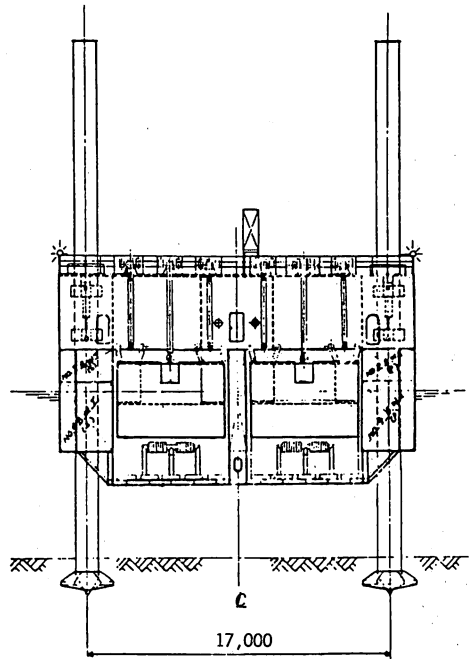


図-9 ジャッキアップ式波浪発電装置「海陽」

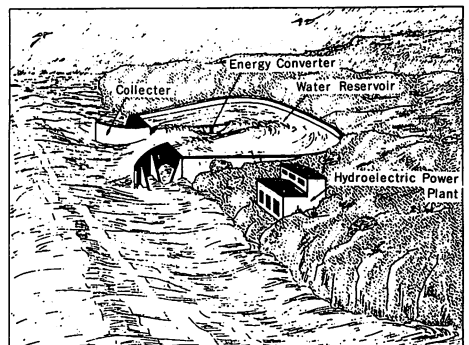


図-10 集波式波浪発電装置「タブチャン」

な実験はこれから始められる<sup>12)</sup>。

ノルウェーで開発されているもう一つの装置はノルウェーヴ社が開発しているもので、図-10に示すように集波堤を設けて水流を貯水池に導き低落差タービンを用いて発電する集波式波浪発電装置で「タブチャン」と呼ばれている。上記の振動水柱式波浪発電装置と同じフィヨルドを利用して現在建設がすすめられている。1985年中に商用電力系統につながれる予定である。入射する波浪エネルギーが十分でない場合には、集波レンズを利用することが考えられている。入射する波浪エネルギーが豊富なことと、フィヨルドという最適地が得られたことで、発電コストは約15円/kw・hrと見積もられている<sup>13)</sup>。

## 5. 将来展望

波浪発電装置はいよいよ実用化の段階に差しかかって来たと言える。それぞれの研究グループで進められてきた各要素技術の高性能化はほぼ達成されており、その設計法も確立されつつある。また実海域における実機特有の問題点も、第4章で紹介した日本3例、ノルウェー2例の実機規模の海上試験で明らかにされ、実機設計のためのノウハウも完備するものと考えられる。

今後に残された課題の主なもの、各要素技術のマッチングを図り波浪発電システム全体の最適化を図る実用的な手法を確立することである。但しこの場合、前提条件を明確にすることが重要である。すなわち、波浪エネルギーを、何にどのような目的で利用するか、何処で利用するか、いつどれだけの期間利用するか等を明確にして初めて波浪発電システムの最適化を図ることが可能となる。

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、原料費がただで、再生可能なエネルギーであり、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を海洋開発に生かすならば、経済性の向上に効果があるばかりでなく環境とのマッチングの観点からも最も望ましいエネルギー利用方法といえる。

## 参 考 文 献

- 1) 前田久明; 波浪エネルギー利用技術, 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, p.49~61, 1984.
- 2) 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, p.93~103, 1984.

- 3) 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., Tokyo, (to be published), 1986.
- 4) 日本造船振興財団; 波エネルギーの機械エネルギー吸収係数への転換に関する実用化研究報告書, 日本造船振興財団海洋環境技術研究所報告, 海研第12号, 1985.
- 5) 前田久明, 増田光一, 林秀郎; Attenuator 型 OWC 波浪発電装置の開発に関する研究(第二報), 日本造船学会論文集, 158号(掲載予定), 1985.
- 6) Count, B. M. and Evans, D.; The Influence of Projecting Sidewalls on the Hydrodynamic Performance of Wave Energy Devices, J. of Fluid Mech. Vol. 145, p. 361~376, 1984.
- 7) 堀田平, 宮崎武晃; 位相制御による波エネルギー吸収効率の向上, 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, p.105~120, 1984.
- 8) Maeda, H., Kinoshita, T., Kudo, K. and Masuda, K.; Optimization of Wave Energy Absorber of an Attenuator OWC Device with an Air Turbine, IUTAM Symposium on Wave Energy Utilization, Lisbon, Springer-Verlag (to be published), 1985.
- 9) 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, p.63~76, 1984.
- 10) 石井進一, 益田善雄, 宮崎武晃, 工藤君明, 堀田平, 鷲尾幸久; 波力発電装置「海明」の海上試験結果と今後の試験計画, 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, p.411~419, 1984.
- 11) 平本島, 玉木一三, 益田善雄; 沿岸固定式波力発電システムの開発, 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 p.403~409, 1984.
- 12) Malmo, O. and Reitan, A.; Development of the Kvaerner Multiresonant OWC, IUTAM Symposium on Wave Energy Utilization, Lisbon, Springer-Verlag (to be published), 1985.
- 13) Mehlum, E.; TAPCHAN, IUTAM Symposium on Wave Energy Utilization, Lisbon, Springer-Verlag (to be published), 1985.