

波浪発電

Electricity Generation by Wave Power

北村 文俊*
Fumitoshi Kitamura

1. はじめに

日本のような島国では海はごく身近な存在である。多くの資源をもたらす海の中で波はどちらかというところへ厄介視されて来た。しかし、波エネルギーの量と普遍性から見れば波エネルギー利用は省資源にかなり寄与できるのではないかとと思われる。

波エネルギーの密度は化石燃料等と比較すれば小さいが自然エネルギーとしては大きい方と言える。しかしエネルギーの利用を難しくしている問題点がいくつかある。まず変動性が非常に大きいということである。大波が荒れ狂うこともあればべた凧が続く時もある。つぎが海洋環境の厳しさである。構造物は波力、潮流力、風力、潮汐などの外力、紫外線や海水による腐蝕、生物付着などを受け、耐えなければならない。しかしこれらの点を克服すればおのずと道は開けるはずである。

ここでは電力以外の利用法も含めて幅広く波浪エネルギー利用の現状と将来を展望してみたい。

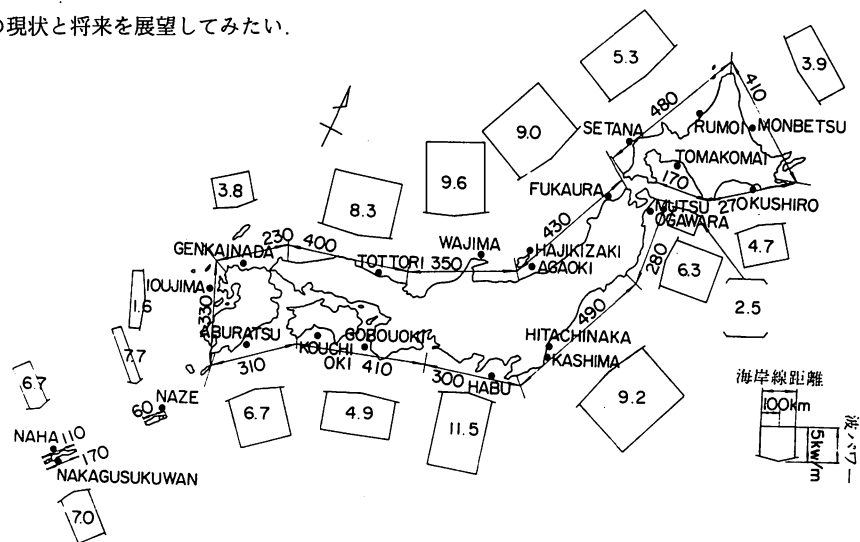
2. 波浪エネルギー資源量と変動性

波は海面を風が吹くことにより発達する。波のエネルギーは海上の風エネルギーが形を変えたものと言える。

図-1¹⁾は日本列島を5200kmの折れ線で囲み、各区域について波浪の観測データより年平均波パワーを推定したものである。これは全国では平均約7kW/m合計 3.6×10^7 kWものパワーになる。本州中部から北部にかけての地方が太平洋岸、日本海岸とともに大きくなっていることがわかる。

また世界の結氷しない全海岸線では 2.7×10^9 kW、全海面では 70×10^9 kWと推定されている²⁾。

このように波は非常に多くの資源量を有しているが、利用を困難にしている理由のひとつがその変動性である。図-2¹⁾にその例として日本海岸の酒田と太平洋岸の鹿島の月海の平均波パワーを数年間分示す。特に日本海岸では夏に少なく、冬に多いことがわかる。



* 運輸省船舶技術研究所海洋開発工学部主任研究官
〒181 東京都三鷹市新川6-38-1

図-1 日本周辺の波パワー

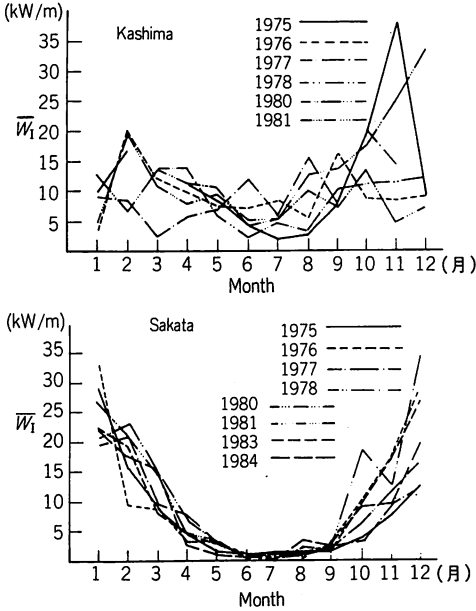


図-2 鹿島港酒田港における波パワーの月別変化

3. 波浪エネルギー利用の歴史

このように海があれば存在する波を利用しようというアイデアは古くから考えられて来た。歴史的には18世紀末から様々なアイデアが特許等に現われ、1895年にイタリア人のLindenが船舶の推進の実験に成功している。(図-3)³⁾。今世紀初頭にはフランス人のBouchaux-Praceiqueが1kWの発電に成功し、家庭に給電を行なった(図-4)⁴⁾。

日本では1917~18年に広井勇東京帝国大学教授が大東岬で実験を行なっているのがおそらくその最初であろう。終戦直後から益田善雄氏は波浪発電装置の開発に取り組み、1965年頃から波浪発電式の航路標識ブイを実用化し、これは現在日本全国で960基以上が稼動している(図-5)。

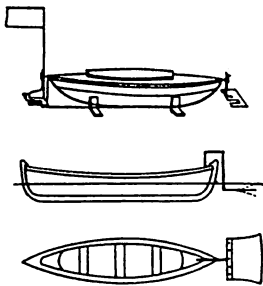


図-3 Lindenの波浪推進船

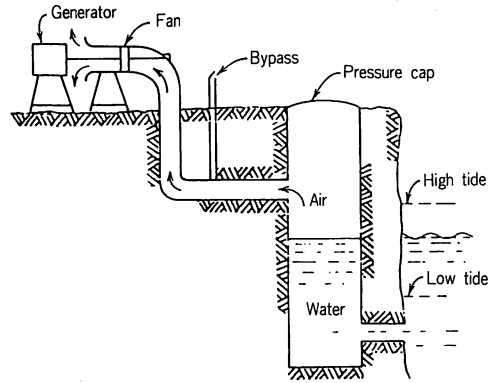


図-4 Bouchaux-Praceiqueの波浪発電装置

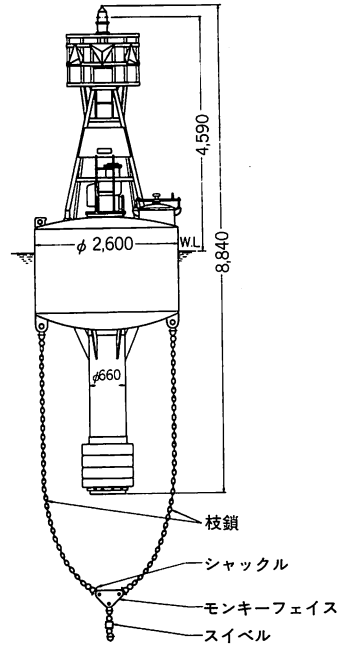


図-5 波力発電航路標識ブイ(緑星社)

しかし本格的に開発が始められたのは、1973年の第一次石油ショックの頃からで、日本、ヨーロッパを中心に研究が進められた。そして現在はいくつかの地点で発電設備が作られ、実用化が始まりつつある段階と言えよう。

4. 波浪発電装置の構成

4.1 波浪発電装置の基本構成

一般に波のエネルギーを直接電気等のエネルギーに変換することはできない。例えばフロート、フラップあるいは空気室などで一旦機械的エネルギーや空気流などの利用しやすい形に変換する。この装置は一次変

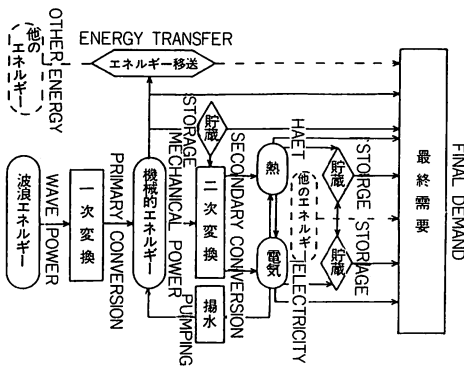


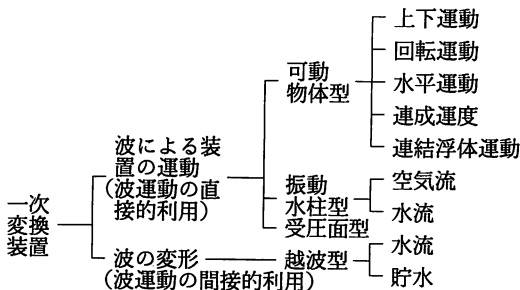
図-6 波エネルギー利用の概念図

換装置と呼ばれる。さらにつぎの目的である回転運動、電気、熱などのエネルギーに変換する装置、例えば油圧シリンダー、タービン、発電機等は二次変換装置と呼ばれている。さらにエネルギーの伝達装置、蓄エネルギー装置等を組み合わせてシステムが構成される。波浪エネルギー利用システムのエネルギーの流れを図-6⁹⁾に示す。

4.2 一次変換装置

表1に一次変換装置の分類を示す。

表1 一次変換装置の分類



またこのような変換方法による分類の他に、配置により、防波堤のように波の進行方向と直角に配置するターミネーター型、波の進行方向と平行に配置するアッテネーター型、ブイのようなポイントアブソーバー型という分類もできる。

別の分類方法として、浮体式と固定式という区別ができる。浮体式（浮遊式）は装置全体が水面あるいは水中に浮かんでいるもので、波エネルギーの大きな沖合いに設置することが可能で、大波浪や潮位の変化に対しても対策は容易であるが、係留や送電線をどのようにするかという問題がある。一方固定式は、海底や岸に固定して設置するもので、係留や送電などの問題は、潮位変化による効率の低下や、大波浪時の

対策を考慮する必要がある。

一次変換装置で大切なのは変換効率である。大部分の一次変換装置は系の固有振動周期と波周期との共振を利用して高い効率を稼いでくる。波周期が設計周期より長くなっても短くなっても効率は低下するので海域の波にあった装置の設計が大切である。

4.3 二次変換装置

二次変換装置の種類は一次変換装置が何であるかほぼ決まり、油圧モーター、空気タービンまたは水車といったものになる。さらに発電機、発熱機、ポンプなどまでも二次変換装置ということもある。

二次変換装置は一次変換装置の負荷になり、前述の固有周期にも影響を与える。従って一次変換装置とのマッチングが極めて重要である。

5. 波浪エネルギー利用の現状

5.1 海外

英国では恵まれた波資源と国家の援助という条件のもとでいくつもの種類の装置の研究が行なわれた。

可動物体型ではカム型の浮体の回転運動により波エネルギーを取り出すもの（Salter Duck）、連結したいかだ型浮体相互間の回転運動により波エネルギーを取り出すもの（Cockerill Laff）、水面直下に置いた円柱の波の水粒子による回転運動から係留索に付けた油圧シリンダーによりエネルギーを取り出すもの（Bristol Oscillating Cylinder）が提案された。いずれも模型も実海域実験が行なわれたが係留方法が難しいといわれている。

受圧面型ではSea ClamとLancaster Flexible Bagがある。いずれもエアバッグの周辺の波による水圧変化により空気流を作りタービンを回転させるものである。Sea Clamは1983～84年にネス湖で1/14模型の実験が行なわれた。

振動水柱型のシステムもいくつか提案され改良されて現在ではNELとBelfastの固定式システムが有望視

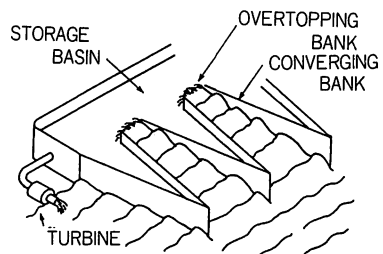


図-7 集波式越波型波浪発電装置

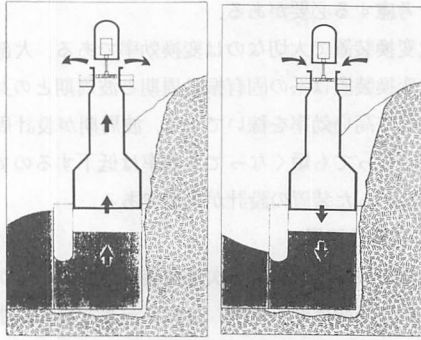


図-8 振動水柱型波浪発電装置 (Kværner社)

されている。

ノルウェーも波資源に恵まれ開発が進んでいる。図-7⁶⁾は越波型と呼ばれるもので波がくだけの時に全エネルギーを放出するというを利用して、貯水池に海水を蓄え、水車を回転させてエネルギーを取り出すものである。ノルウェーではTAPCHANと呼ばれる350KWのプラントが作られ発電を行なっている。

図-8は振動水柱型 (OWC: Oscillating Water Co-

lumn) で、最大出力500kWまでのシステムが製品化されている。

またスウェーデンではブイピストン式の発電機が製品化され、またチューブポンプと呼ばれる先にブイを付けたチューブの伸び縮みにより中の海水が入り出すのを利用して水車を回す方式も開発されている。

そのほかアメリカ、アイルランド、南アフリカ、インド、中国等で開発が進められている。

5.2 国内

表2に国内で開発され運転された主なシステムを示す。

国内での開発も振動水柱型空気室とウェルズタービンの組み合わせが主流になっている。浮体式では実用化されている波浪発電航路標識ブイ、波力発電装置「海明」(図-9)⁷⁾、固定式では酒田港の波浪発電式防波堤(図-10)等多数がある。

図-11⁸⁾は室蘭港および増毛港で実験された振り子式波浪エネルギー吸収装置である。波の動きを振り子型の板で受け、その動きを油圧シリンダーで吸収する

表2 国内で運転された主な波力発電装置

名称	方式	場所	期間	実施者
航路標識ブイ用波力発電装置	浮体式振動水柱型	ほぼ全国で960基	'65~	海上保安庁等
灯台用波力発電機	固定式振動水柱型	東京湾あしか島	'66~'72	海上保安庁
波力発電装置「海明」	浮体式振動水柱型	山形県由良沖	'78~'80	海洋技術開発センター
G1-T波力吸収装置	可動物体型	神奈川県横須賀市	'80~'83	横浜国立大学
波力水車式波浪エネルギー吸収装置	固定式振動水柱型	北海道室蘭港	'80~	室蘭工業大学
振り子式波浪エネルギー吸収装置	可動物体型	北海道増毛港	'81	室蘭工業大学
振り子式波浪エネルギー吸収装置	可動物体型	北海道室蘭港	'83~	室蘭工業大学
沿岸固定式波力発電システム	固定式振動水柱型	山形県三瀬	'83~'84	新技術開発事業団
浮体式波浪発電装置「海陽」	可動物体型	沖縄県西表島沖	'84~'85	新技術開発事業団
波力利用熱回収システム	固定式振動水柱型	新潟県寝屋港	'86~'87	大成建設
消波工型定圧タンク方式波力発電装置	固定式振動水柱型	千葉県九十九里町	'87~'89	エンジニアリング振興協会
エネルギー自給型自動観測装置	固定式振動水柱型	沖の鳥島	'89~	海洋技術開発センター
下部支持振り子板式波力発電装置	可動物体型	兵庫県宮津市	'89~	日立造船
波力発電ケーソン	固定式振動水柱型	山形県酒田港	'89~	運輸省第一港湾建設局

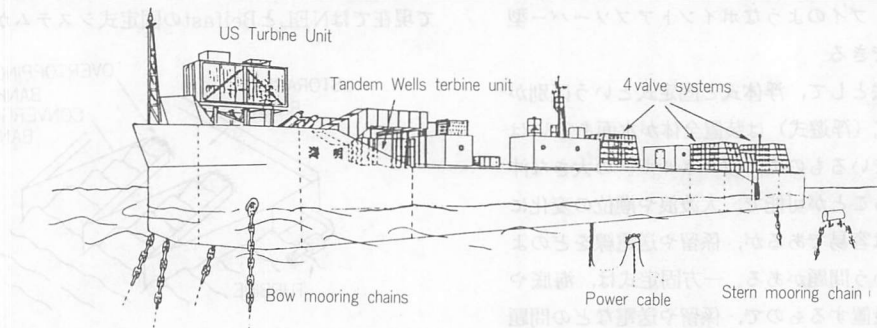
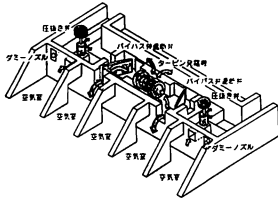


図-9 波浪発電装置「海明」

空気タービン		発電機	
形式	タンデム式ウェルズタービン	形式	横軸巻線形内附発電機
プレート外径	1,337mm	定格出力	600kw
プレート枚数	16枚	電圧	AC200V



設計条件

設計波高H1/4	10.2m
設計周期T1/4	14.5sec
入射角	25°

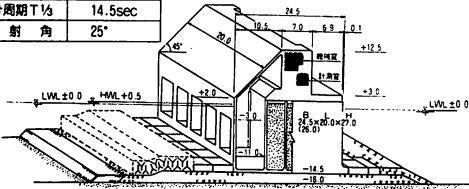


図-10 波力発電ケーソン (運輸省第一港湾建設局)

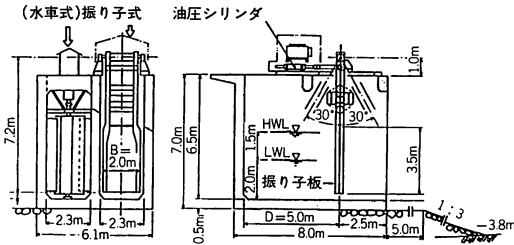


図-11 振り子式波浪エネルギー吸収装置

ものである。

日本は英国、ノルウェー等とならんで波力発電では最先端を行っていると言える。

6. 波浪発電の原理

6.1 振動水柱空気室

このように様々なシステムが考案され研究されて来たが、現在主流となっているのは振動水柱型である。このシステムが他の機械式に比べて有利な点は多く、①構造がシンプルである、②機械的な可動部分が少ない、③可動部はすべて空気中にある、④大波浪時の安全対策をしやすい、などと言う点があげられる。一方デメリットとしては、水柱の共振を利用しているため設計周期以外では効率が若干低下する。タービンが騒音を発生する、といった点があげられる。

ここでは主として振動水柱型の原理を説明する。空の容器を伏せたような空気室を海面に設置する。部屋の上部に孔を開けておくと、液面の波が入射すること

によって空気室内の水面も上下し、これに伴い空気は加圧または減圧される。この空気でタービンを回し、発電を行なうものである (図-8 参照)。

6.2 ウェルズタービン

空気室から出る空気流は往復流であるから、タービンとして通常の衝動型などのように一方の流れてしか回転しないものを用いる場合には、図-12のように弁機構によって空気流を一方に整流する必要がある。

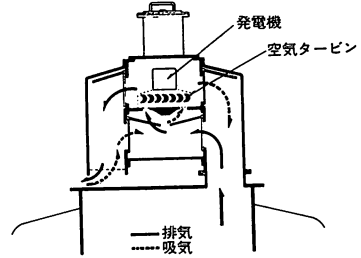


図-12 整流弁機構 (緑星社)

特に大型のシステムでは弁箱自体のスペースもかなりのものになり、またトラブルの原因になり易い。弁機構が不要なように往復流中でも一方に回転するタービンもいくつか考えられた。その中で代表的なものがウェルズタービンである。

ウェルズタービンは英国Queens大学のWells教授によって発明されたもので、円盤状のハブの周囲に対称翼を回転面に対して取り付け角零で一方に向けて取り付けただけという極めて簡単な形をしている (図-13)⁹⁾。通過する空気流は、タービン自体が回転しているため、翼には相対的にある迎え角を持って流入することになる。この時翼に発生する揚力の回転方向成分がタービンの発生するトルクになる (図-14)¹⁰⁾。ウェルズタービンの特長は、弁機構が不要、可動部分は回転軸受けのみ、流量のわりにタービンサイズが小さくてすむ、などである。

一方短所としては、起動時の出力トルクが小さい、

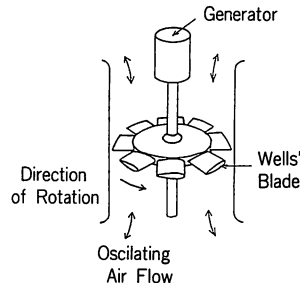


図-13 ウェルズタービン

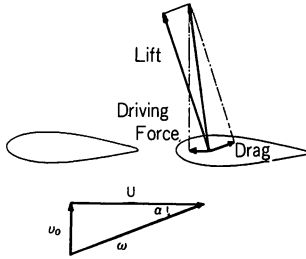


図-14 ウェルズタービンの原理

効率がやや小さい、軸方向の推力が大きい、騒音が大きいなどである。これらの点は発電機特性の改良やインデューサーの取り付け、一つの軸に2基のタービンを取り付け流れを互いに逆方向に流して軸方向の荷重をキャンセルするタンデム配置の採用、消音器の取り付け、といった対策である程度解決可能である。

振動水柱とウェルズタービンの組み合わせにより、機械的な可能部分なタービン軸の回転だけと言う極限的にシンプルなシステムが可能になった。

7. 今後の展望

波浪エネルギーの利用は、以上のように多くの可能性を持ちながらいくつかの要因により急速な発展ができない。しかし以下に述べるように問題点を解決していけばおのずと展望は開けて来ると思われる。

7.1 変動性

波浪発電の最大の問題点は他の自然エネルギーのいくつかと同様に波の変動性であろう。この発電電力を商品として見た場合、周波数は変動するし、電圧も変動する、供給も不安定といった極めて質の悪い商品である。

このことに対してまず考えられるのが蓄エネルギーシステムである。現に灯標用ではバッテリーが必要不可欠である。圧力タンクや貯水によるエネルギーの均一化も実験された。また将来的にはフライホイール、超伝導コイル等の蓄エネルギーシステムも採用可能となろう。しかしこういった蓄エネルギーシステムはどうしても設備が大がかりになり、技術的にも経済性の点でも問題が多く、もともと安くない電力のコストをさらに引き上げてしまうことになる。

あるいは他の発電システムとのコンバインドも可能である。相手がソーラー、風力等の自然エネルギーシステムの場合、多少補完できるかもしれないが全体としてはやはり不安定である。常に供給を保证するためにはどうしてもディーゼル発電機等とのコンバインド

が必要になってしまう。

そこで考えられるのがまず需要と供給がほぼ一致するような用途を探すことである。例えば冬の日本海岸には日常的に大波浪が押し寄せる。その波浪エネルギーで発生した電力あるいは熱を道路の融雪、暖房といった形で地域で直接利用するといった使い方も検討する必要がある。

次に考えられるのが変動性の影響を受けない積分的な使い方である。例えば海水の電気分解による水素製造、海水の淡水化等が考えられる。この方法では輸送、貯蔵も可能となる。

表3¹¹⁾に波浪エネルギー利用法の例を示す。

表3 波エネルギーの利用

エネルギー利用形態	利用項目
電気利用型	・離島用発電・灯台・港湾などの一般照明・バッテリー充電用電力・海洋レジャー施設の電力・低温倉庫用電源・電着工法・電気防食・電解による水素発生・波浪観測塔
熱利用型	・温水融雪・電熱融雪・冷凍、冷却、製氷（ヒートポンプ利用）・ヒーティングシステム（提防、魚礁）・温水供給（栽培漁業、一般家庭）
動力利用型	・サンドバイパス工法・終末処理場用供給電力・地盤改良用動力・空気防波堤・エアレーション・エアパブルカーテン・工業用水のくみ上げ・砂漠地帯への海水揚水・海水交換・海水場発電への利用・揚水用ポンプ・海水の淡水化

7.2 コスト

いくつかのケースについて試算が行なわれている。日本における試算例では、いくつかの方式についての差は余りなく、1 kWhあたり25円から40円という数字が出ている。これは現在の電力コストから見ればかなり高いと言える。波浪エネルギーは密度が低いので、装置を大規模化することによるコストダウンは期待できない。可能なのは、シンプル化、規格化された発電ユニットの量産、及び送電コストの削減であろう。

逆に分布の広さを利用して地享発電、地元消費という方法をとれば補助エネルギー源として十分役立てることができると思われる。

7.3 騒音、環境問題

一般に振動水柱型システムでは二次変換装置に空気タービンを用いるために、どうしても騒音が発生する。特にウェルズタービンでは周速が大きいため騒音が大きくなりやすい。騒音は翼の回転音が支配的で、その

スペクトルは翼枚数と回転数の積である基本周波数と数次までの高調波からなり、状況によって各高調波のレベルは絶えず変化する。人家に近いところや大型のシステムでは対策が必要であろう。

環境問題としては波高の低下、気泡巻き込みの減少による溶存酸素量の低下、それに伴う生体系の変化等が考えられる。貝などの付着生物の性能への影響は一般には小さいとされているが、波浪発電ブイなどのように空気室面積の小さなものでは、無視できない。「海明」の実験では構造物体が良い魚礁になっていたという例も報告されている。波浪発電装置が自然環境、生体系等に対して重大な影響を与えとは考えにくい、十分なアセスメントは必要である。

7.4 荒天対策

波力発電装置から見た場合、設計点以外の条件における運転効率には配慮する必要がある。また特にシステムの設計点をはるかに超える大波高にも耐えなければならない。振動水柱型のシステムの場合対策は比較的容易で、大波浪時にはまず発電機の負荷調整による回転数制御を行なう。さらに大きな波の時はタービンを保護するために遮断弁でタービンへの流入空気を遮り、同時に空気室内の圧力が過大にならないように圧抜き弁で空気を逃がす必要がある。

8. おわりに

現在でも離島・僻地といったもともと電力コストが高くかつ自然条件に恵まれているところでは十分実用化が可能であろうと考えられる。さらに今後の発展の可能性はコストの低減がどの程度までできるかにかかっている。エネルギー自体は無料であるが建設費がかなりかさむため、システムをユニット化して量産し、波浪条件、発電電力に応じて選択する、といったことができればかなりのコスト低減が可能であろう。

また波力からエネルギーを取り出すと、当然のこと

ながら波は小さくなる。従って防波堤や消波堤と組み合わせると合理的である。また集波装置により波を集めて発電を行ない、それによって生じた静穏海域も養殖、港湾等に利用するといった、ちょうど多目的ダムのように、総合的な海域利用といったものを考えていくのがよいと思われる。また装置のコストが安くなればテトラポットの代わりに波力利用装置を設置し、発電あるいは発熱を行なって消波とエネルギー利用の一石二鳥の効果を上げることが可能になる。

波浪発電装置の場合、エネルギー密度が分散しているため規模の効果はないとされている。こういった特質を活かして、その場その場にふさわしい装置と方法で波浪エネルギーを利用していくのが良いのではないだろうか。

参 考 文 献

- 1) 高橋重雄; 日本周辺における波パワーの特性と波力発電、港湾技術研究所資料, No. 654, 1989
- 2) 本間琢也, ほか; 海洋エネルギー読本, オーム社, 1980
- 3) 前田久明; 波浪エネルギー利用技術, 第1回波浪エネルギー利用シンポジウム, 1984
- 4) 益田善雄; 日本の波力発電, 霞出版社, 1987
- 5) 近藤俊郎, ほか; 室蘭工業大学における波浪エネルギー利用研究, 室蘭工業大学研究報告理工編No. 37, 1987
- 6) 谷本勝利, ほか; 波エネルギー利用技術の現状と将来展望, 土木学会エネルギー土木委員会新エネルギー技術小委員会, 1989
- 7) 宮江伸一, ほか; 集波堤による波浪エネルギーの一エネルギーへの変換実験, 第1回波浪エネルギー利用シンポジウム, 1984
- 8) 宮崎武晃, ほか; 海明型波力発電装置の経済性の検討, 第2回波浪エネルギー利用シンポジウム, 1987
- 9) 北村文俊, ほか; 不規則波中におけるウエルズタービンの特性, 西部造船会会報, No. 76, 1988
- 10) 北村文俊, ほか; 灯標用ウエルズタービン型波浪発電装置の開発, 第6回研究発表会講演論文集, エネルギー・資源研究会, 1987
- 11) 合田良実; 波力エネルギー利用技術に関する総合調査, 第2回波浪エネルギー利用シンポジウム, 1987