

波エネルギー変換装置の現状について

Recent Development of Wave Power Converters

高橋 重雄

Shigeo TAKAHASHI

1. 波との闘いから利用へ

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(Hiroi, 1919)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が、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。

1973年の石油危機以後、クリーンで再生可能なエネルギーとして自然エネルギーが見直されてきた。波エネルギーも資源として位置付けられるようになり、波エネルギー変換装置の開発が英国など各国で開始されてきている。我国でも活発な研究開発が行われ、海洋科学技術センターの「海明」や室蘭工大の「振り子式装置」など多くの装置が研究されている(益田1987、土木学会エネルギー土木委員会1990)。

運輸省でも、1982年から防波堤に設置するタイプの波エネルギー変換装置(波力発電ケーソン防波堤)の開発(合田ら1991)を行っている。広井博士から約80年後の1989年12月1日、山形県酒田市でこの装置による発電が開始された。本報告では、酒田港の波力発電装置を紹介するとともに、波エネルギー、各種の波エネルギー変換装置、そして波エネルギーの利用について現状を述べる。

2. 酒田港における現地実証実験

2.1 装置と実験の概要

酒田港の現地実験は、運輸省第一港湾建設局が、(財)沿岸開発技術研究センターを中心にした民間会社20社(第二期からは電力会社等10社も参加)との共同研究として実施している。1982年から5か年にわたる港湾技術研究所での基礎的研究などを経て、1987年より第一港湾建設局によって防波堤やタービン・発電機的设计・施工が行われた。1989年夏にケーソンが完成し、12月から発電運転が開始された。主たる計測は、1991年3月で一応終了したが、さらに電力の利用に関する実験を中心に第二期の現地実験を1995年3月まで

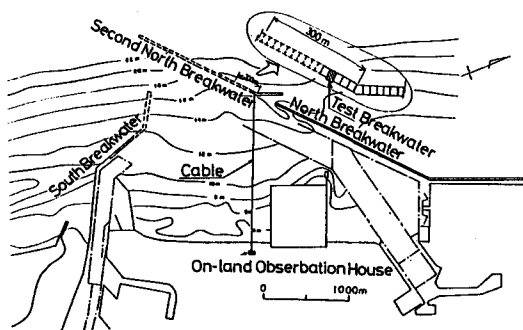


図-1 酒田港平面図

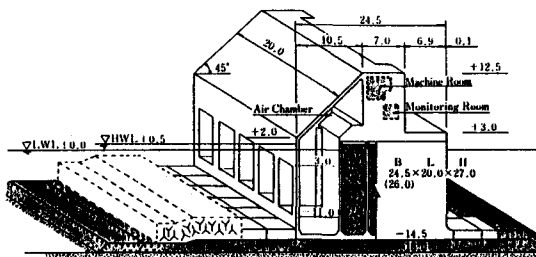


図-2 波力発電ケーソンの概略図

実施することになっている。現在まで順調に発電運転が実施されており、ほぼ設計どおりの変換装置の性能。そして耐波安定性が確かめられている（高橋ら1992）。

図-1は、酒田港の平面図である。波力発電ケーソンは、酒田港で現在建設が進められている第二北防波堤の一部として建設された。実験の制御及び観測は約2km離れた陸上観測局において光電力複合海底ケーブルを通じて行っている。

波力発電ケーソン（図-2）は、水深18mの地点に設置されており、長さ（防波堤法線方向）20m、幅24.5m、高さ27mの上部斜面型ケーソンである。またこ

のケーソンは、波エネルギーを変換するための空気室およびタービン・発電機等を設置する機械室を有している。空気室は水柱振動型（Oscillating Water Column Type）の波エネルギー一次変換装置である。すなわち、前面の開口部から波が入り、空気室内の水位が上下運動することにより空気流を発生させ、波のエネルギーを空気のエネルギーに変換するものである。空気室はケーソン前面部に位置し幅 $B = 7\text{ m}$ 、長さ $l_B = 20\text{ m}$ である。長さ方向においては隔壁で5室に分けられているが、隔壁の上部には比較的大きな孔があり、空気室内の空気圧は一樣となって、一つの空気室として働く。

図-3は、機械室の概要を示している。機械室の中央にはタービン・発電機があり、この左右に2個ずつ対称に空気流調整弁や圧抜弁そしてダミーノズルなどが配置されている。空気室において発生した空気流は、空気流調整弁を通り、タービン・発電機へと導かれる。空気流調整弁は、タービン回転数によって制御されており、弁の開度を全開から全閉まで5段階に調整

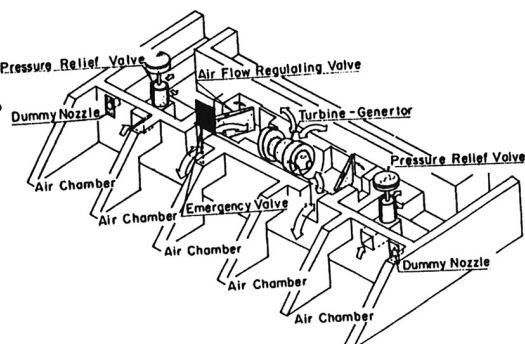


図-3 機械室



写真-1 波力発電ケーソン



写真-2 陸上監視局

することによってタービンの過回転を防止し、発電出力を安定させ、また運転の始動・停止装置をも兼ねるものである。タービンは往復の空気流に対しても一方向の回転が得られるウェルズタービンを用いており、直径 $Rt=1.337m$ のものを同軸上に2枚タンデム型に設置している。発電機は定格60kWの同期発電機であり2枚のタービンの中央に設置している。今回の実験では、予算の制約から空気室の大きさに比してタービン・発電機の定格が小さいため、空気流を逃がすダミーノズルを設け、発生する空気流のおよ40%以上を常時大気に開放している。また、空気室の過大な空気圧力を低減し、発電出力を平滑化するための圧抜弁（実質開口率 1/149）も設置している。さらに空気流調整弁が故障した場合等に、タービン開口部を塞ぎ別の開口部から空気流を逃がすために緊急遮断弁を設置している。写真-1は、防波堤を斜め前からとった写真であり、写真-2は、陸上監視局とそのタワーであり、合計40kWの電球に波エネルギーの光がともっている。

2.2 発電運転

この発電システムは、基本的には無人で24時間運転が可能であるが、現在は管理人によって運転制御されている。たとえばその始動は、陸上監視局における操作によって、空気流調整弁を全開（大気側に開放）状態から次第に閉じてタービンに空気流を送り込むことによって簡単に行われる。発電電力は、通常は抵抗によって消費されているが、この電力で、揚水装置や融雪装置を作動させることもしている。特に第二期の実験では、後述するように大型の揚水システムや系統電力への接続等の検討を行っている。なお、システムは有義波高が0.7mから5mの範囲で発電するように設計されており、波高が5mを越える場合には発電を停止する。ただし、その場合も空気室では波エネルギーが空気エネルギーに変換され、それが大気に放出されており、消波は常に行われている。

図-4は、やや波高が大きい場合の標準的な発電状況の記録波形の例を示している。この例は1990年11月8日14時前後20分間の空気室内水位 η 、空気室内圧力 p_a 、空気流調整弁開度 V_B 、タービン前後差圧 p_t 、タービン回転数 N_T 、発電出力 $\bar{W}_g$ の変化をそれぞれ示している。空気室内の水位は来襲する波の水位変動によって変化し、その振幅はほぼ2～4mとなっている。そして空気室の圧力は水位が上昇する時に正圧（圧縮）となり、水位が下降する時に負圧（膨張）となる。空気室には圧抜弁が設置されており、空気圧が $+1.30$ 、 $+1.61\text{tf/m}^2$ 以上となるとこの2基の圧抜弁が作動し、圧力の急激な変動は緩和される。こうして発生した空気流は空気流調整弁を通してタービンに導かれるが、この例ではタービン回転数が $1250\sim 2100\text{rpm}$ で変動しており、弁が作動する上限回転数 2000rpm を越えたために30秒程度、全閉[4]から1/4開[3]に変わっている。波高がさらに大きくなると弁の作動頻度は大きくなる。タービン

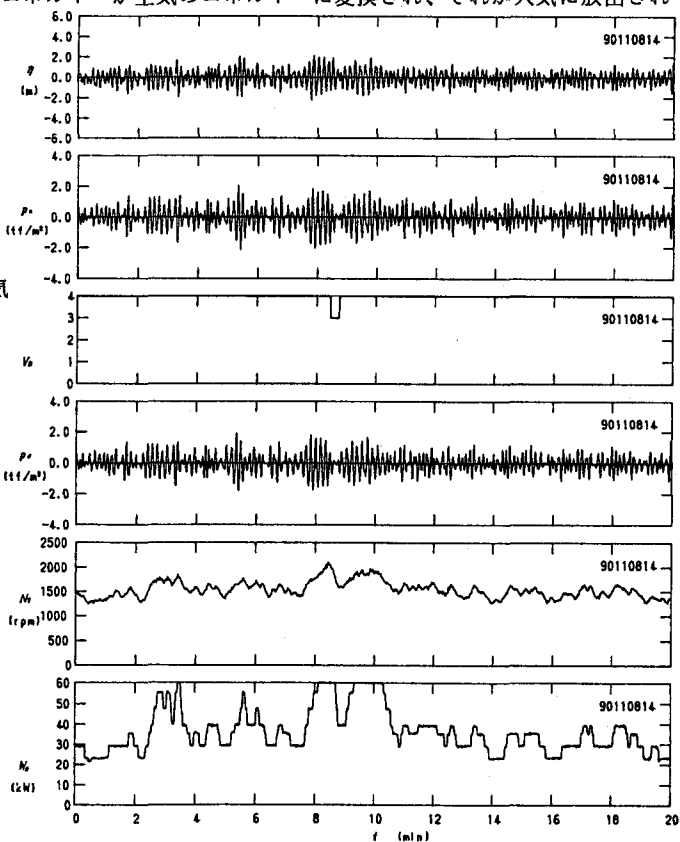


図-4 発電アナログ記録

回転数は波の一波一波の変動よりも数波の入射波からなる波の連なりの大小によって変動していることがわかる。発電パワーは回転数の3乗で変化するため出力の変動はやや大きく20～60kW程度で変動しているが、これも一波一波の変動よりは波の連なりによって変動する。この時の平均発電出力は36.4kWである。また有義波高3.01m、周期7.9s、波の入射角13°、入射波パワー539.2kWであり、空気パワー、タービンパワー、発電パワーはそれぞれ、317.9、39.9、36.4kWである。

ただし、今回の発電システムではタービン・発電機の定格が空気室の容量に比べ小さいためダミーノズルや圧抜弁を設けている。そのため、空気室で変換された空気パワーの発電への利用率は低く0.342である。すなわち、変換した空気パワーのうち約66%を大気へ放出している。こうしてエネルギー変換時のそれぞれの効率は、空気出力効率が0.590、タービン効率が0.367、発電機効率が0.912である。空気パワーの利用率を含むこれらの積である発電効率は0.068となる。ただし発電システムに最適なタービン・発電機を設置すれば、発電パワーおよび発電効率は向上し、試算によれば約3倍の106kW、0.197となる。また、回転数の変動が比較的大きく、発電出力の変動も大きい。これはやはりタービン径が小さく慣性モーメントが小さいためである。

図-5は、有義波高と最終的なアウトプットである平均発電出力 $\bar{W}_g$ の関係を示している。発電出力の平均値は波高とともに大きくなり、有義波高が3mを超えたあたりから空気流調整弁等が作動し、出力の上昇を抑制し、4m付近からはほぼ55kW前後で一定となっている。測定値は波向によって変動し、波向が0°に近いほど発電出力が大きくなる傾向がある。そして図中の破線で示している計算値と測定値を比較すると、測定値の方がやや大きい場合もあるが計算値はほぼ測定値の上限となっている。なお計算値は、「波動・熱力法」にもとづく数値計算結果（小島ら1983）であり、システムは、この計算に基づいて設計されている（高橋ら1988、鈴木・荒川1991）。

図-6は、冬期で最も波パワーの大きい1月（1991年）の毎時の平均発電出力の変化を示している。この月は5日から通常の発電を行っているが、運転時間が9時から16時までと限られているために各月の発電運転時間はほぼ150～180時間程度であり、発電出力は棒グラフ状になっている。1991年1月の発電運転時間は154時間であり、運転時の平均の発電出力は13.25kWである。ただし、有義波高が約0.7m以下では発電してなく、発電量が0の時間が2%、発電量が0～1kWと非常に小さい時間が13%であることに留意する必要がある。

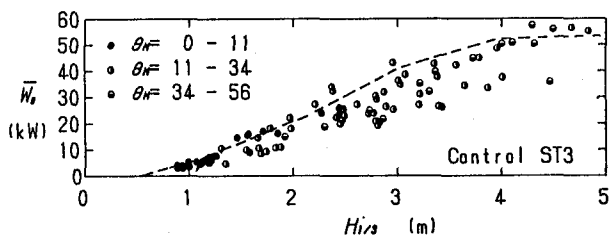


図-5 有義波高と発電出力

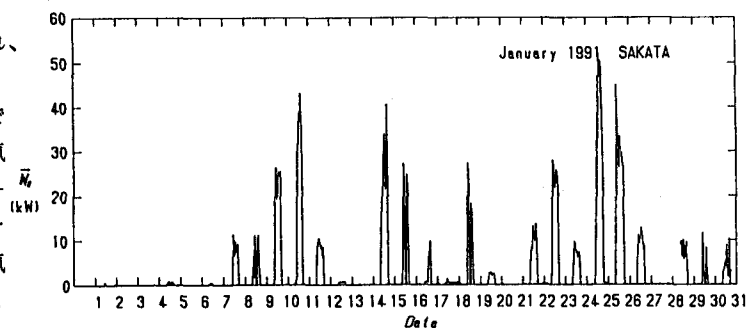


図-6 日々の発電（1991年1月）

表-1 月別発電結果

Year/Month	'90/10	'90/11	'90/12	'91/1	'91/2	'91/3
(W_1)... (kW/m)	3.3	13.0	23.9	20.3	15.0	6.7
(W_0)... (kW)	6.03	10.65	13.34	13.25	10.88	9.73
Operation Time	168	172	156	154	155	193
Ratio($W_0=0$ kW)	0.39	0.25	0.13	0.02	0.13	0.18
Ratio($0 \leq W_0 < 1$)	0.51	0.28	0.24	0.13	0.23	0.23

また表-1には、1990年度冬期の月別の発電運転結果を示している。表には月の平均入射波パワー $\bar{W}_1$ 、運転時の平均発電出力 W_e 、発電運転時間、発電量が0の時間の比率、発電量が1kW以下とごく小さい時間の比率を示している。1月、12月をピークに入射波パワーが小さくなり平均発電出力も小さくなっている。そして発電量が0あるいは非常に小さい時間が多くなり、特に小さい10月ではこれらの時間がおよそ50%にも達している。

なお、定格150kWのタービン・発電機を用いた場合の試算では、酒田港の冬期には一基当たり49kW程度の平均発電量となり、年間では27kWとなる。また、同様のシステムを鹿島港に設置した場合には、年間40kW程度の発電となる。発電単価については、仮定が多く必ずしも正確ではないが比較的大規模に実施した場合、20から40円/kWh程度と予測されている。

3. 波パワー

3.1 波パワーの算定

波力発電の関係では、波のエネルギー (Wave Energy) の他に、波パワー (Wave Power) と言う言葉をよく用いる。波のパワー $\bar{W}_1$ は、いわゆる波エネルギーの輸送率(W/m)である。すなわち、波が規則波であれば波高を H 、波の群速度を C_g 、水の単位体積重量を $\rho_w g$ として

$$\bar{W}_1 = \frac{1}{8} \rho_w g H^2 C_g \quad (1)$$

であり、たとえば、周期6秒で沖波波高1mであれば約5.9kW/mの波パワーである。ただし、波エネルギー変換装置の単位長さに入射する波パワー $\bar{W}_1$ は、装置に入射する波の角度 θ_M を考慮して

$$\bar{W}_1 = \frac{1}{8} \rho_w g H^2 C_g \cos \theta_M \quad (2)$$

となる。実際の波は不規則でしかも方向分散性を持っている。こうした多方向不規則波が中心の入射角 θ_M で装置に入射するとき、波パワー $\bar{W}_1$ は、方向スペクトル $S(f, \theta)$ から

$$\bar{W}_1 = \rho_w g \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \int_0^{\infty} S(f; \theta) C_g(f) \cos(\theta + \theta_M) df d\theta \quad (3)$$

となる。しかしながら、実際には方向スペクトルを測定することは簡単でなく、以下の簡便式を用いて概略値を知ることができる(合田1984)。

$$\bar{W}_1 = \kappa H_{1/3}^2 T_{1/3} \quad (4)$$

ただし、有義波高 $H_{1/3}$ の単位はm有義波周期 $T_{1/3}$ の単位はs、そして波パワー $\bar{W}_1$ の単位はkW/mであり、酒田港における観測では、 κ はほぼ0.4から0.5であった。 κ は水深と周波数スペクトルの形状による係数 κ_w と方向分散による係数 κ_d' そして中心波向き $\cos \theta_M$ の積でも表すことができる。すなわち

$$\bar{W}_1 = \kappa_w \kappa_d' \cos \theta_M H_{1/3}^2 T_{1/3} \quad (5)$$

酒田港の観測では、おおそ κ_w が0.6、 κ_d' が0.85であり(高橋ら1992)、

$$\kappa = 0.5 \cos \theta_M \quad (6)$$

であった。これらの係数を用いると θ_M が 0° の場合、有義波高が1mで有義波周期が6sであると $\bar{W}_1$ は、約3kW/mとなる。発電を停止する有義波高が5mで有義波周期が10sの場合は125kW/m、設計波に相当するような有義波高が10mで有義波周期が15sでは750kW/mとけた違いに大きくなることがわかる。

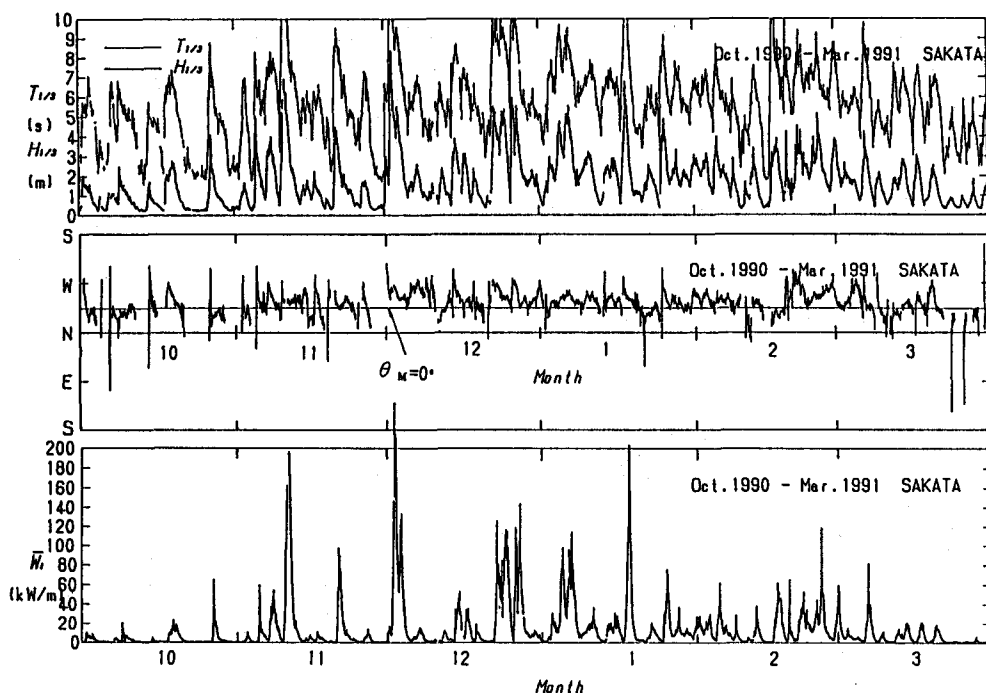


図-7 波浪状況 (1990年度冬期)

3.2 波パワーの変動

波パワーの変動性は、波エネルギー変換装置の最も大きな問題である。ここでは、酒田港の例を中心に、その変動性を具体的にみてみたい。

図-7は、酒田港の1990年度冬期、すなわち1990年10月から1991年3月までの期間中の波浪状況を示すものであり、有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ 、平均波向き θ_w 、入射波パワー $\bar{P}$ の1時間毎の変化を示している。冬場の最盛期である1990年12月から1991年2月は、2～5日周期で有義波高が2m以上となり、入射波パワーも20kW/m以上となっている。また、冬期の始まりの10月と終わりの3月あたりは気象擾乱の間隔が長く、波高も小さい。

有義波高は、ほぼ0.5～5mの範囲で変化している。有義波高、有義波周期の月別の平均値は10月からそれぞれ、0.88m 4.8s, 1.52m 6.0s, 2.28m 7.1s, 2.25m 6.9s, 2.05m 6.7s, 1.37m 5.8sである。またこの冬期間の平均は、1.72m 6.2sである。なお、この期間に有義波高が5mを超えたのは9回の異常波浪時で合計96時間であった。また、1989年の観測開始からの最大の異常波浪は1990年12月2日で、最大有義波高が8.7mに達している。

波向きは、全般的に防波堤法線にほぼ直角な方向($\theta_w = 0^\circ$)のNW方向が多いようである。入射波パワーは波高の2乗と周期の1乗に比例するため非常に変動性が激しく100kW/mを超える場合もある。各月の平均入射波パワーは3.3, 13.0, 23.9, 20.3, 15.0, 6.7kW/mであり、冬期の平均は13.9kW/mである。

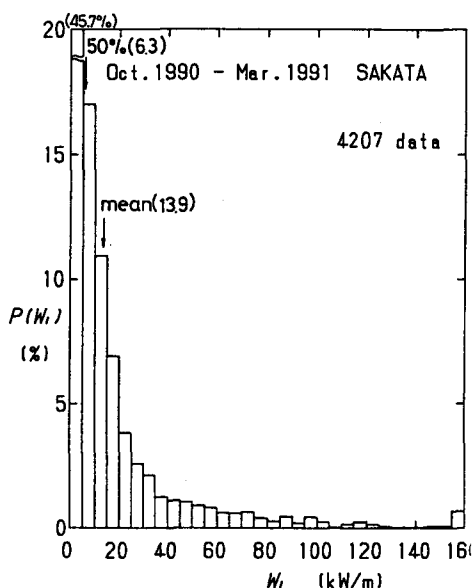


図-8 入射波パワーの頻度分布

図-8は、1990年度冬期の入射波パワーの頻度分布を示している。入射波パワーは、0～5 kW/mの頻度が45.7%と最も大きく、累積頻度が50%となるのは6.3 kW/mのときである。また約70%が平均の入射パワーより小さく、100 kW/mを越える場合が約1%ある。 $\bar{W}_i$ すなわち、できるだけ定期的に運転できるようにするためには、低い波パワーを対象に装置の設計すればよい。一方、高い波パワーを対象に設計すると発電量は大きくなるが発電の頻度が小さくなってしまふ。変換したエネルギーをどう利用するかを先に決め、対象とする波の範囲を決定する必要がある。

図-9は、酒田港における月別の波パワーの観測値を示すもので、酒田港における従来の定常観測による値も示している。酒田港をはじめ日本海側では、冬期の波浪は厳しいが夏期はほとんど静穏になってしまう。こうした季節的な変動も問題となり、実際酒田港の装置では、夏期はほとんど発電できない。ただし、図-10に示す鹿児島港のように、太平洋側では比較的季節変動が少なく、年間を通じた発電が可能と考えられる。

3.3 我が国の波パワー

図-11は、我国周辺の波パワーの分布（高橋・安達1989）を示すもので、運輸省港湾建設局の波浪観測結果から求めたものである。波パワーの計算は上述した簡便式を用いているが θ_w は 0° とした。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5200kmで除すと7 kW/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といえよう。

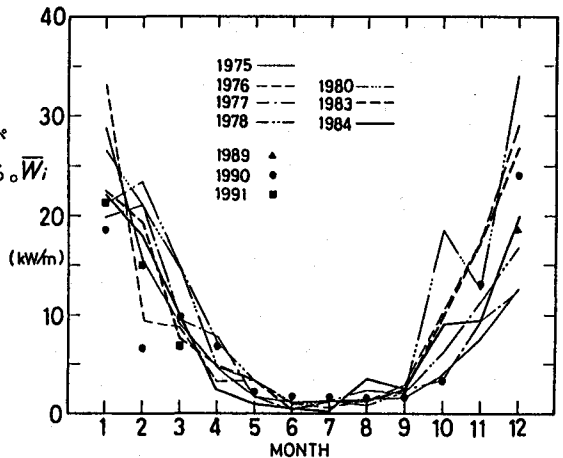


図-9 月別波パワー（酒田港）

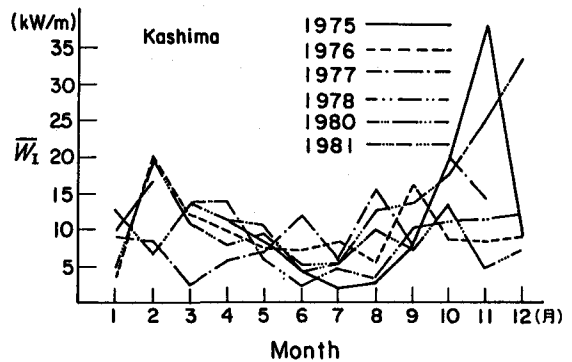


図-10 月別波パワー（鹿児島港）

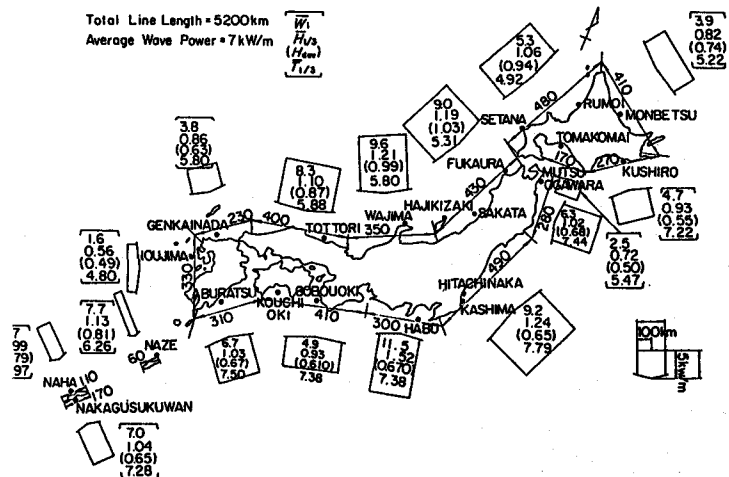


図-11 わが国周辺の波パワー

4. 各種の波エネルギー変換装置

4.1 歴史的な装置

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。さらに、1931年頃にはモナコ海洋研究所で海水の揚水を行う波エネルギー変換装置が造られ10年間稼働した。この他にも多くのアイデアが出され、いくつかが実際にテストされている。

我が国でも多くの装置が考案されている。例えば図-12は、前述した広井博士の装置の一つで、空気を圧縮して霧笛を鳴らすものである。図-13は、内務省の技師であった前出が1948年の雑誌「港湾」に発表した波力発電ケーソンの原型とも言うべきアイデアである。前出は、防波堤に波エネルギー変換装置を付加することが合理的であると述べている。

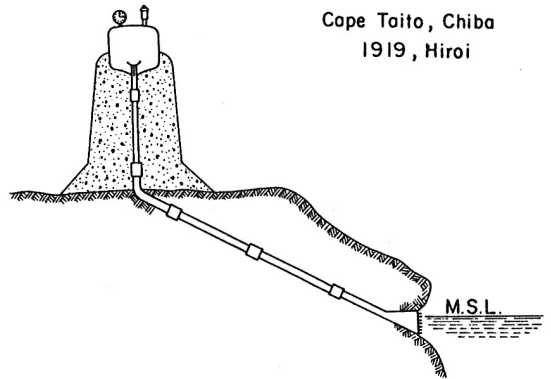


図-12 広井の波エネルギー変換装置

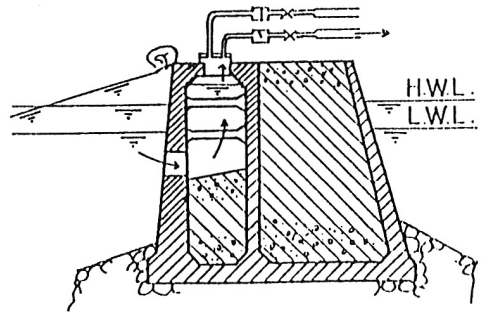


図-13 前出の波エネルギー変換装置



写真-3 航路標識ブイ

写真-3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（築貫ら1986、中村ら1991）である。図-14は、その発電原理を示すもので、ブイに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1000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波力発電ケーソンと同様に水柱振動方式(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

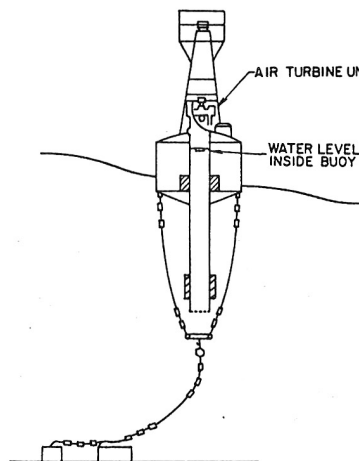


図-14 航路標識ブイの断面図

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。

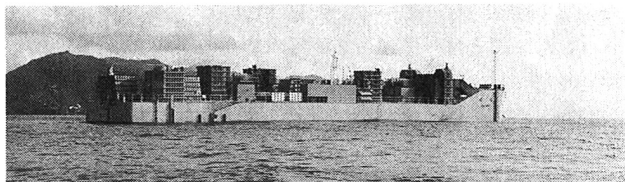


写真-4 実験中の海明

4.2 最近の我が国の装置

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の機関で行われている。写真-4は、海洋科学技術センターの「海明」であり、図-15はその概念図である。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（海技セ1988）を進め1985年に海上実験を再び実施している。

室蘭工大の近藤らは、防波堤に設置するタイプの波力発

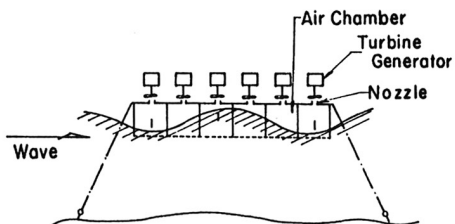


図-15 海明の概念図

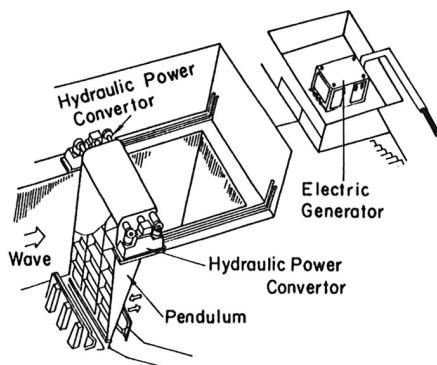


図-16 振り子式装置の概念図

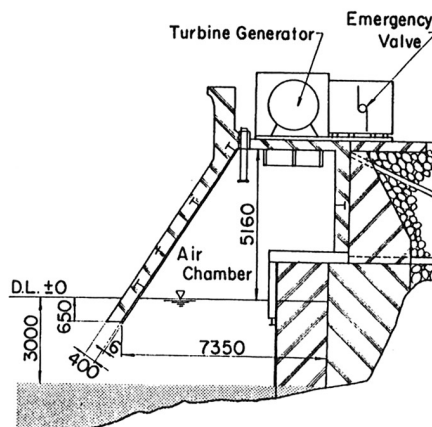


図-17 沿岸固定式装置の断面図

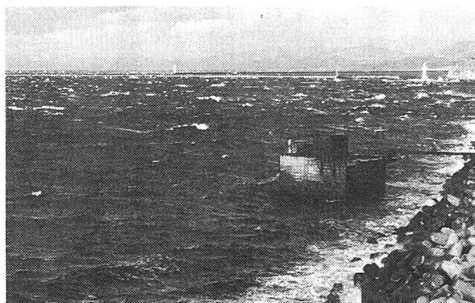


写真-5 室蘭港の振り子式装置

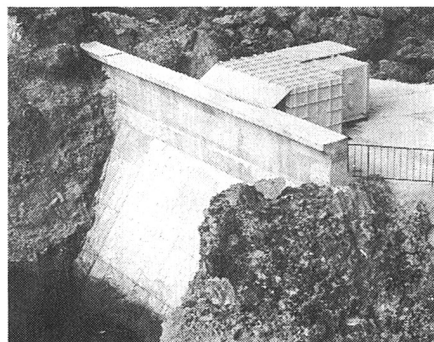


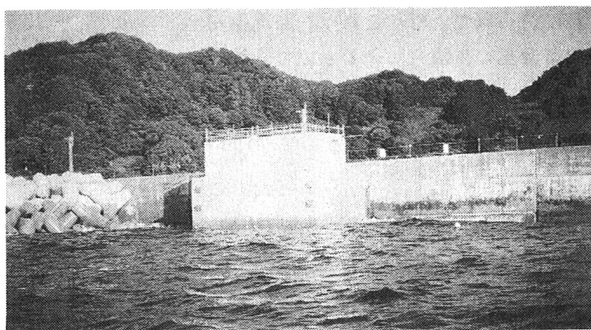
写真-6 沿岸固定式装置（三瀬）

電装置の開発を行っている。近藤（1987）らは、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（写真－5）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、図－16に示す同様な装置は、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。

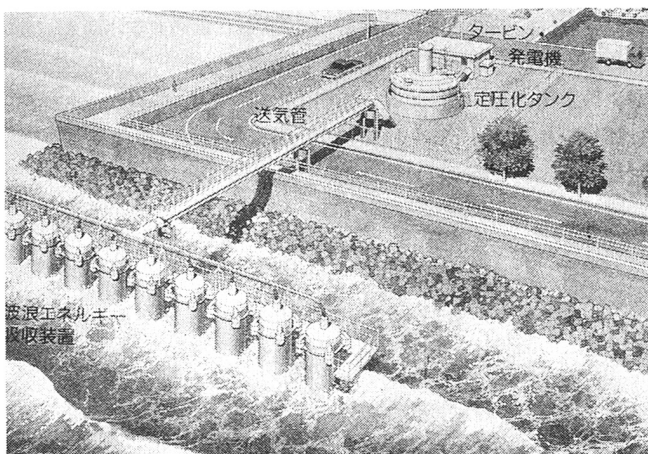
写真－6は、沿岸固定式波力発電装置（石井ら1985）と呼ばれるものであり、海洋科学技術センターが富士電機や三井造船とともに1983年に山形県三瀬の海岸で現地実験を行ったものである。この装置は、図－17の断面図が示すように岩場に固定されたものであるが波力発電ケーソンと同じ水柱振動方式の装置である。定格40kWのタービン発電機によって、実験期間中平均11.3kWの発電が記録されている。

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（宮崎1987）を行っている。写真－7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。

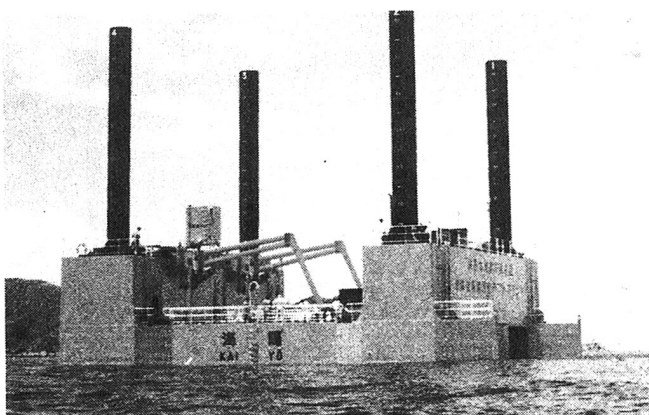
エンジニアリング振興協会は、竹中工務店等とともに1987年から千葉県九十九里町で消波工型定圧タンク式波力発電システム（田村ら1988）の現地実験を行っている。この装置は、写真－8に示すように多数のパイルからなる空気室を



写真－7 波力利用熱回収システム（寝屋）



写真－8 消波工型定圧タンク方式波力発電システム



写真－9 海陽（西表島）

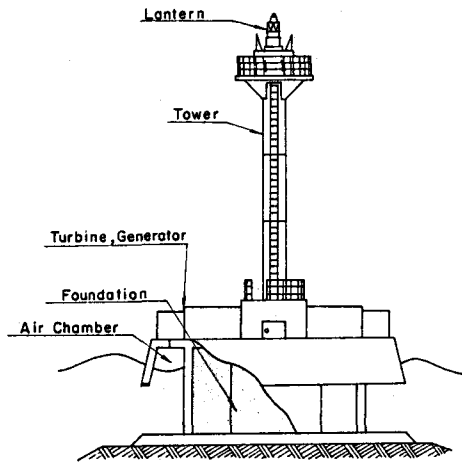


図-18 固定式燈台用波浪発電装置

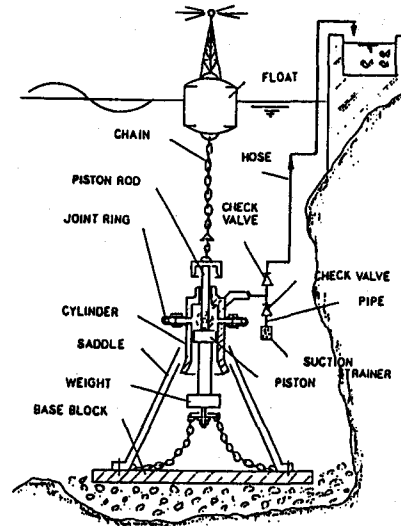


図-20 波力ポンプ

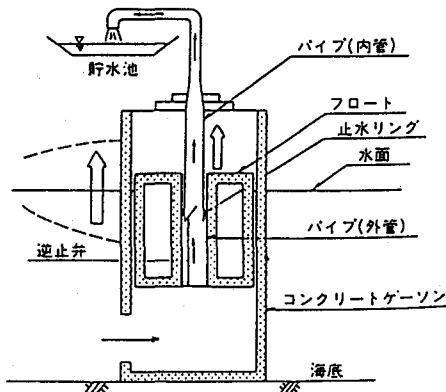


図-19 波動ポンプ

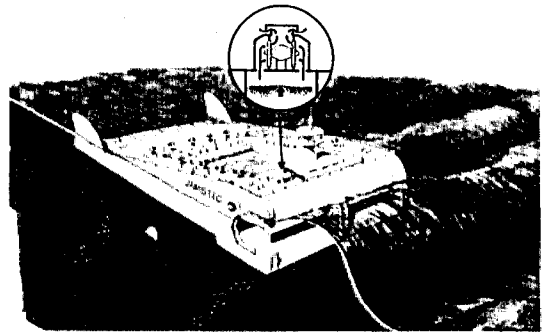


図-21 マイティホール

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。

写真-9は、海洋環境研究所(日本造船振興財団)が1984年に沖縄県の西表島の水深10mの地点に設置した、波エネルギー変換装置「海陽(矢崎ら1987)」である。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。図-18は、海上保安庁燈台部と船舶技術研究所が開発している波エネルギー変換装置を持つ燈台「固定式燈台用波浪発電装置(井上ら1989)」である。これも水柱振動方式の装置であるが、空気室が燈台の基部の回りに取り付けられているのが特徴である。東北電力では、水弁集約式波力発電システム(渡部ら1987)の開発を行っている。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する必要がある、これを水弁を利用して行うシステムである。水弁の機能については沢本ら(1986)が研究をしている。このほか鹿島建設では、波のエネルギーで直接揚水する「波動ポンプ(図-19、今井ら1988)」が開発されている。揚水型の装置としては、大洋プラント工業社の波力ポンプ(図-20、真鍋1988)もある。電中研では、低天端越流型防波堤(広瀬ら1987)の研究が行われている。防波堤の越流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の装置の現地実験(下平ら1991)を宮津研究所で実施している。さらに最近で

は、緑星社が次世代の航路標識ブイとして曲げダクトブイ（益田1991）を開発しており、海洋科学技術センターがマイティホエール（図-21、宮崎ら1991）の開発研究を進めている。

4.3 外国の装置

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、研究期間、民間会社等によって進められている（Grove-Palmer1982, Davies,1985）。図-22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そうとするものである。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。この他英国では、Bristol大学のOscillating Cylinder（図-23） Lancaster大学の Flexible Bag（図-24）、National Engineering LaboratoryのOWC（図-25）、Hydraulic Research StationのRectifier（図-26）、C. Cockerellの Raft（図-27）、Conventry Polytechnicの Sea Clam（図-28、Duckers1991）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、最近では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。たとえば、北アイルランドでISLAY WAVE POWER PROJECT がクイーンズ大学を中心に鋭意進められている。1991年にISLAY島に沿岸固定型の水柱振動方式の装置が設置され発電を開始した（UKDoE1991）。

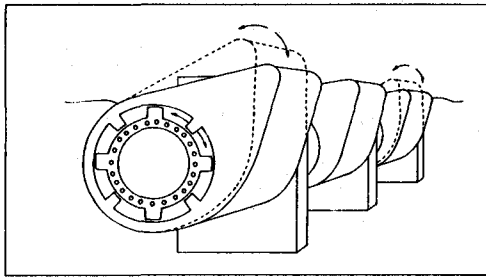


図-22 ソルターダック

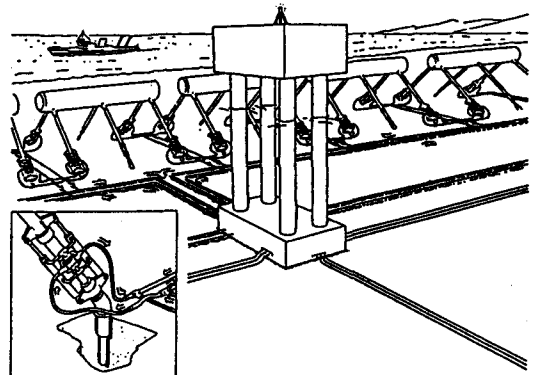


図-23 オシレイティングシリンダー

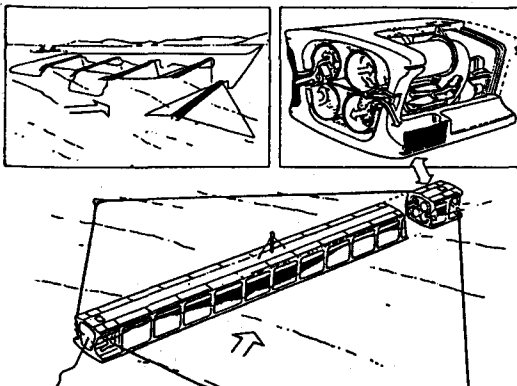


図-24 フレキシブルバッグ

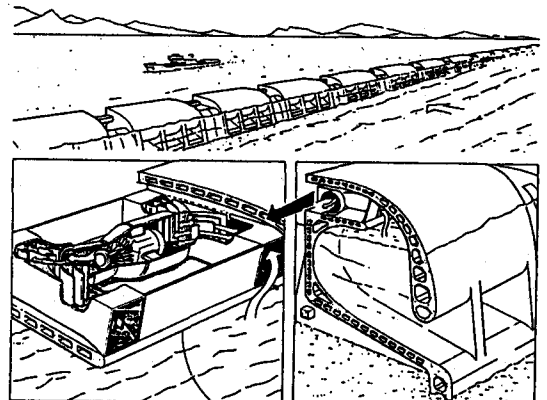


図-25 NEL OWC

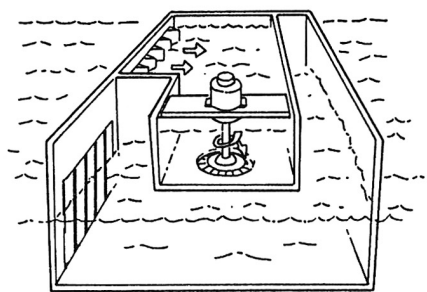


図-26 レクティファイヤー

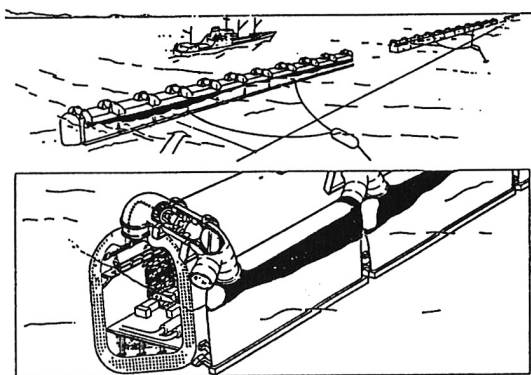


図-28 シークラム

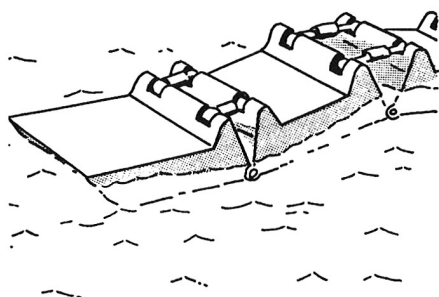


図-27 ラフト

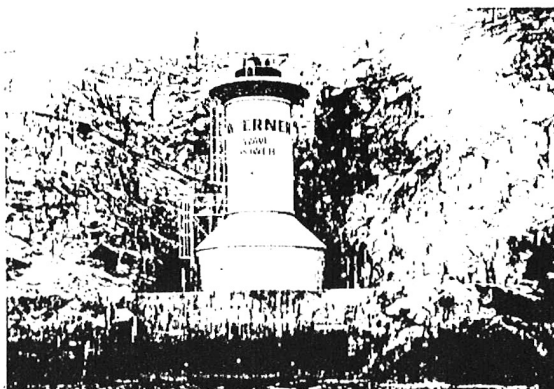


写真-10 MOWC

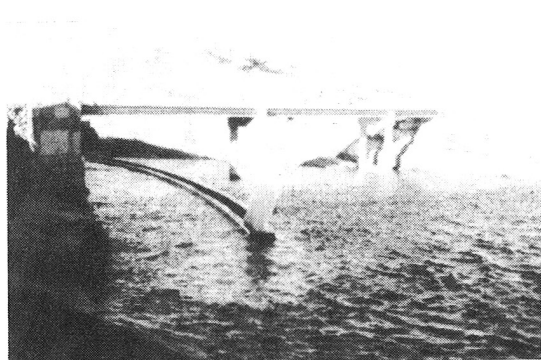


写真-11 タブチャン

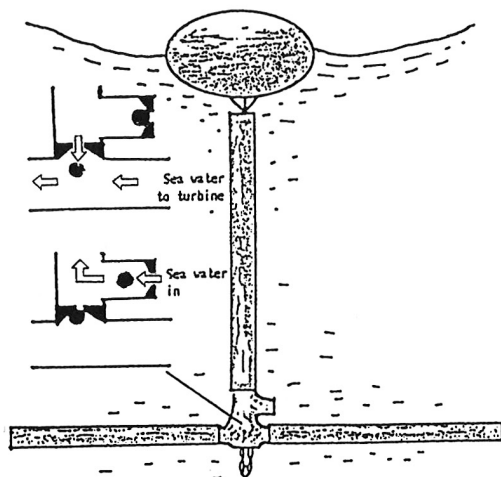


図-29 ハウスポンプ

ノルウェーでも波エネルギー変換装置 (Malmö1985) に関する研究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 (写真-10) 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 50m^2 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、ノルウェーがタブチャン (Tapered Channel, Hysing1983) と呼ぶ装置を運転している。これば、写真-11に示すように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を対象にしたAZORES Project (Falcao1991) 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 Pump (図-29, Berggren 1991)) 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 (Nielsen1991) が現地で試験されている。

開発途上国でも波力発電の研究は進んでいる。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 (Raju1991) を実際に建設し、発電を行っている。写真-12は現地実験中の装置である。中国でも航路標識を対象にした波力発電装置 (Liang1991) の開発が進んでおり、韓国でも基礎的な研究 (Ahn1983) が行われている。

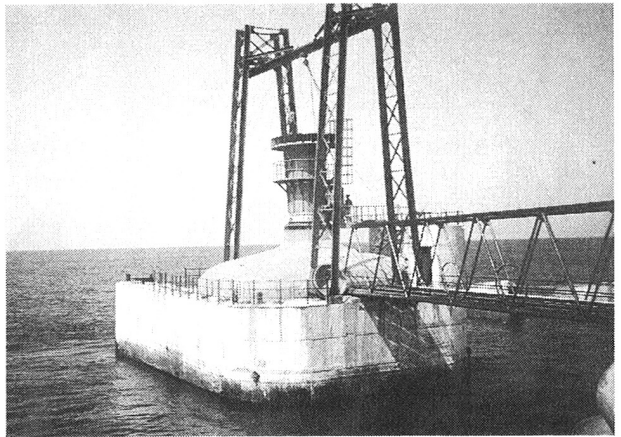


写真-12 インドの波力発電ケーソン

4.4 波エネルギー変換装置と波浪制御

波エネルギー変換装置は、波エネルギーを吸収するのであるから波を防ぐ防波堤の機能もある。波力発電ケーソン防波堤は、まさにこの機能に注目したものであるが、低天端型防波堤やソルターダック、マイティホエールなども同様である。ソルターダックやマイティホエールは、浮防波堤と考えることもできるが、これらは単に波を反射するだけでなく消波するから、通常の浮防波堤より防波機能が高く、安定性も高いと考えられる。

波エネルギー変換装置としてのアイデアは、おそらく1000以上あると思われる。それらのなかには波浪制御構造物にも適用できるものが少なくない。例えば図-30は、潜堤タイプの波エネルギー変換装置である (McCormick1981)。これは、合成繊維膜を使った新しい構造であることが興味深い。新しい素材は、フレキシブルバッグやクラムなどいくつかの波エネルギー変換装置に用いられている。

波エネルギー変換装置の開発のなかで生まれてきたアイデアで波浪制御への適用性が高いものは「集波」の考え方である。波エネルギー変換装置は、その効率を上げるためにできるだけ波を集める必要がある。図-31は、前掲写真-10のMOWCに用いられた、ハーバーによる共振効果を利用した集波である。すなわち、岩場を陸側に少し掘込みハーバーと呼ぶ領域を造り、ここで波を共振させるものである。著者らは、この考え方にもとづいた消波ケーソン (凹型ケーソン) を考案している。図-32は海洋科学技術センターの三日月型没水平版による集波装置 (工藤ら1991) である。これは、水平版による波の屈折効果を利用したものであり、Wave Focussingとも呼ばれている。木下らは、水平版ではなくパイプを水平に並べることによって同様の効果があることを示している (Murashige1991)。図-33は、米国で考案されたDAM-ATOLL (McCormick1981) で

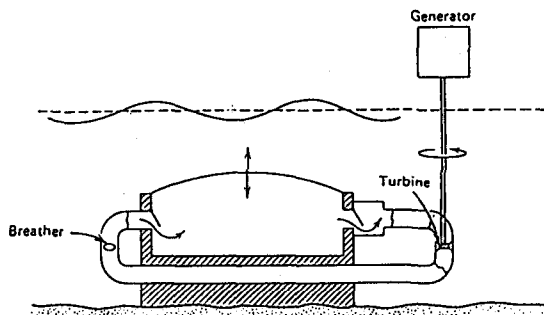


図-30 Uniform pressure wave pump

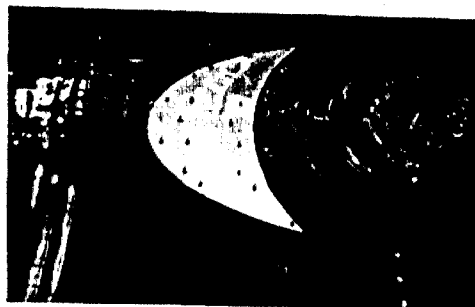


図-32 三日月型没水平板

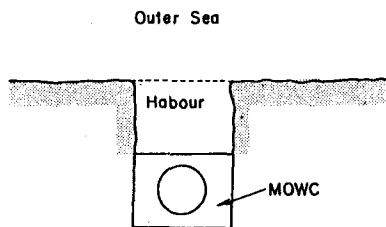


図-31 ハーバーによる集波

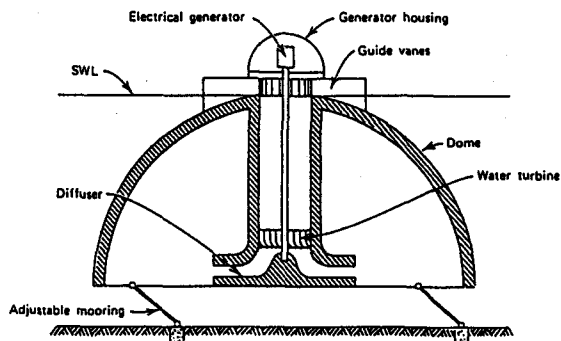


図-33 DAM-ATOLL

ある。これも波の屈折を利用し波を中心に集めようとしたものであるが、アイデアだけに終わっている。球面状の浅瀬を利用するこの装置は、東洋建設のレンズマウンド（藤原ら1991）と同様な考え方に基づいている。

波エネルギー変換装置は、波と構造物の相互作用のなかでも最も困難な「利用」が問題となるため、通常の防波堤の研究では考えつかないような卓越したアイデアが生まれている。ただし、利用の面ばかりに注目するために、激浪時に生き残るための検討が不十分なことが多い。特に、これまでのアイデアでは、町の発明家的な人々によるものが多く、激浪時の厳しさを十分認識していないものが少なかった。貴重なアイデアを生かして行くためには、激浪時を対象とした波浪制御構造物としての検討も必要である。

5. 波エネルギーの利用

波エネルギー変換装置のいくつかは、波力発電ケーソン防波堤を含めて、ほぼ実用化のレベルに達している。しかしながら、実際に建設を進めていくためには、変換されたエネルギーをどのように利用するかを検討しなければならない（合田ら1987）。

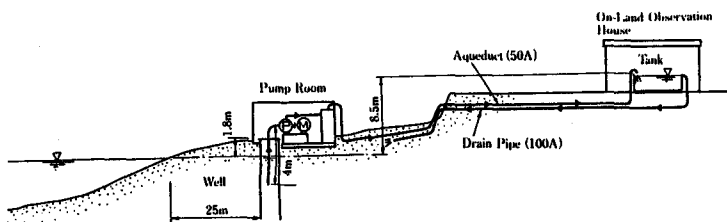


図-34 砂浜からの揚水試験装置

波エネルギーは、他の自然エネルギー同様、変動性の大きいエネルギーである。したがって波エネルギーの利用にとって、大容量で低コストのエネルギー貯蔵装置が不可欠である。しかしながらそうした装置の開発は、波エネルギー変換装置の開発に比べてかなり遅れている。波エネルギーの利用を促進するためには、その特性に即した利用を考慮することも必要となっている。

酒田港の実証実験では、変換された電力で図-34に示す揚水装置（大根田1991）を稼働させている。この装置は砂浜から揚水するもので、閉鎖海域の海水交換やサブサンドフィルター工法（砂浜の地下水位の低下による侵食防止工法）、深層水の揚水などに応用できる。

酒田港の第二期の現地実験では、この実用化を目指して大規模揚水実験（Ohno1993）を行っている。これは、一台のタービン発電機で一台の大型ポンプを回し、海水交換や揚水を行うもので、発電量が小さいときでも大きいときでも、そ

の発電量に応じた揚水（送水）を行うものである。写真-13はその実験装置であり、下部タンクから上部タンクへ定格55kWのモーターポンプで揚水している。実験は、1993年2月から4月に行われ、揚水システムの現地適用性が確認されている。

酒田港の実証実験では、揚水実験のほかにも種々の装置の実験を行っている。写真-14は、発電電力で融雪を行っているところである。また、電着技術の試験も行っている。電着は、海中から炭酸カルシウムを取りだし、これで金属の表面を覆う技術である。発電電力は、こうした用途の他に、防波堤燈台、温水プールへの熱供給も考えられる。さらに、波を防ぐためのエネルギー（水流式防波堤）やサンドバイパスあるいはエアレーションのエネルギーなどについても検討している。

なお、酒田港の第二期の実験では、系統電力への接続についても検討している。太陽エネルギーや風力エネルギーでは、すでに系統電力への接続が認められており（桑野1992）、波力発電でもこれが認められれば、エネルギーの貯蔵の問題はある程度解決される。

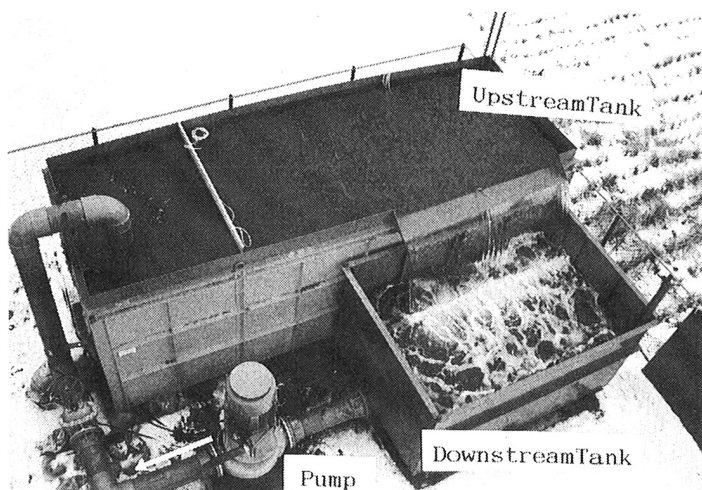


写真-13 大規模揚水実験装置

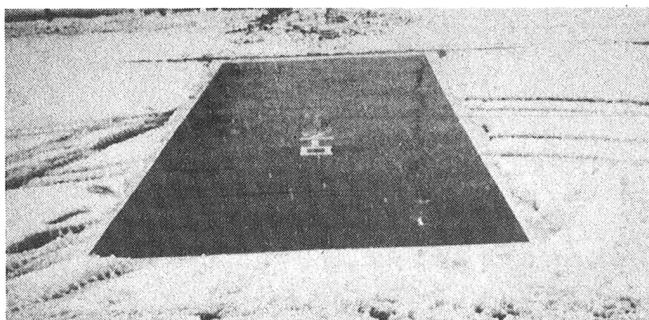


写真-14 融雪実験

6. あとがき

現在、地球環境の面からも自然エネルギーが見直されており（近藤1991）、波エネルギー利用も着実に進展させていく必要がある。また、新たなアイデアや材料による波エネルギー変換装置の開発や波エネルギーを利用した新たな海の技術の開発は、海の土木技術者にとって魅力ある挑戦ではないだろうか。なお、本年はInternational Symposium on Ocean Energy Development (ODEC) が室蘭工大で開催され、海洋エネルギー特に波エネルギー関連の論文が多く発表される予定である。

酒田港の実証実験は運輸省第一港湾建設局および沿岸開発技術研究センターによる委員会の指導のもとに実施されている。合田横浜国大教授、近藤室蘭工大教授、谷本埼玉大教授、荒川東大助教授、石井海洋科学技術センター理事、高山知司港湾技術研究所水工部長ほか委員の方々、中山第一港湾建設局次長ほか関係者の方々に深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 石井進一・益田善雄・宮崎武晃・工藤君明・堀田 平(1985)：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、海洋科学技術センター試験 研究室報告、第14号。
- 井上令作・勝原光治郎・北村文俊・岩井勝美・築賢義人・山崎哲雄・梶原勝正(1987)：固定式灯標用波浪発電装置の開発、第2回波浪エネルギーシンポジウム、海洋科学技術センター。
- 今井貫爾・吉田幸三・岩瀬浩二・高橋俊彦(1988)：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。
- 大根田秀明・五十嵐正一・新保 修・関原 進・鈴木和康・窪田博公・荻野秀雄・森田博夫(1991a)：波力発電防波堤の施工－酒田港波力発電実証実験－、第3回波浪エネルギー利用シンポジウム、pp.171-179。
- 大根田秀明・小宮俊夫・藤田良一・高橋 功・国栖弘志・石田英行・澤田源平・藤川功一・舟田邦雄(1991b)：波力発電防波堤の電力利用システム－酒田港波力発電実証実験、第3回波浪エネルギー利用シンポジウム、pp.207-218。
- 小島朗史・鈴村諭司・合田良實(1983)：波力発電ケーソンの空気出力に関する理論および実験、第30回海講論文集、土木学会、pp.638-642。
- 海洋科学技術センター(1988)：波力発電装置「海明」第Ⅱ期計画研究報告書、214p。
- 工藤君明・今井貫爾・藤田良一(1991)：没水平板による波浪制御技術、第3回波浪エネルギー利用シンポジウム、pp.293-303。
- 桑野幸徳(1992)：太陽電池を使いこなす、講談社、231p。
- 合田良實(1984)：沿岸波浪の統計的性質、第1回波浪エネルギー利用シンポジウム、pp.19-31。
- 合田良實・桜井正憲・森 好生・松沢直求(1987)：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、pp.249-258。
- 合田良實・中田博昭・大根田秀明・鈴木 勝・高橋重雄・鹿籠雅純(1991)：波力発電ケーソン防波堤の現地実験結果、海洋開発論文集Vol.7。
- 近藤俣郎他(1987)：室蘭工業大学における波エネルギー利用研究(1987-1986)の総括、室蘭工大研究報告(理工編)第37号、pp.251-261。
- 近藤俣郎・渡部富治(1991)：波浪エネルギー吸収に伴う自然環境保全効果に関する研究、第3回波浪エネルギー利用シンポジウム、pp.83-89。
- 沢本正樹・首藤伸夫・渡部国也・新嶋洋明(1986)：水弁を通過する空気流のエネルギー損失、土木学会論文集第375号。
- 鹿籠雅純・中田博昭・村田利治・高橋重雄・堀田 平・箭原憲臣・竹内孝行・梶原勝正・山下 朗・星 俊朗(1991)：波力発電防波堤のエネルギーの変換装置の設計－酒田港波力発電実証実験－、第3回波浪エネ

- ルギー利用シンポジウム、pp. 191-193.
- 下平昌兵・阿部 守・松永弘之・橋野幸二(1991): 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.
- 鈴木正己・荒川忠一(1991): 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.
- 高橋重雄・明瀬一行(1986): 波力発電ケーソンの空気出力に及ぼす波向と平面配置の影響、第33回海岸工学講演会論文集、土木学会、pp. 501-505.
- 高橋重雄・安達 崇(1988): 固定式水柱振動型波力発電システムの設計と実験的検証、第35回海講論文集、土木学会、pp. 873-841.
- 高橋重雄・安達 崇(1989): 日本周辺の波パワーとその利用に関する一考察、第36回海講論文集、土木学会、pp. 874-878.
- 高橋重雄・安達 崇・中田博昭・大根田秀明・加藤久雄・鹿籠雅純(1992): 波力発電ケーソン防波堤の現地実証実験における観測データの解析結果、港研報告第31巻第2号.
- 田村賢治・茅野秀則(1988): 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.
- 築貫義人・矢作 勝(1986): 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.
- 土木学会エネルギー土木委員会(1990): 波エネルギー利用技術の現状と将来展望、土木学会、219P.
- 中田博昭・村田利治・大根田秀明・安達 崇・宮崎武晃・長沢洋一・吉田洋一郎・牧野栄一・古賀尚宏・安松和(1991): 波力発電防波堤による発電運転結果-酒田港波力発電実証実験-、第3回波浪エネルギー利用シンポジウム、pp. 207-218.
- 中村研治、勝目幸二郎、矢作 勝、梶原勝正、太田義之(1991): 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.
- 広瀬 学、阿部宣行、角湯正剛(1987): 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.
- 藤原隆一・倉田克彦・宇田高明・小俣 篤(1991): 没水型消波構造物レンズマウンドの水理特性と波・流れ・標砂の制御に関する研究、第3回波浪エネルギー利用シンポジウム、pp. 273-282.
- 前出繁吉(1948): 波力発電装置を有する防波堤の考察、港湾、1-3月合併号、pp. 18-21.
- 益田善雄(1987): 日本の波力発電、霞出版社、184p.
- 益田善雄・太田義之(1991): 後曲げダクトブイ(BBD B)による浮体式波力発電の経済性の向上、第3回波浪エネルギー利用シンポジウム、pp. 121-130.
- 真鍋安弘(1985): 波力ポンプの開発、テクノオーシャン(神戸).
- 宮崎武晃・堀田 平・鷺尾幸久・石井進一(1991): 沖合浮体式波力利用装置(マイティーホーエル)の経済性検討、第3回波浪エネルギー利用シンポジウム、pp. 471-483.
- 宮崎弘志・花村哲也・和田憲治・東江隆夫(1987): 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.
- 矢崎敏生・竹沢節雄・菅原一美(1987): 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.
- 渡部國也・菊地省吾・小宮俊夫・小林正典・中川寛之(1987): 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ジウム.

Ahn, Hee-Do(1983): 韓国における海洋開発の現況と展望、OCEAN AGE.

Berggren, L., and L. Bergdahl(1991): Forces on a Wave-Energy Module, 3rd Symposium on Ocean Wave

- Energy Utilization, pp.47-56.
- Count, B. (19804): Power from Sea Waves, Academic Press, 449p.
- Davies, P.G. et al. (1985): Wave Energy, The Department of Energy's R&D Programme, ETSU.
- Duckers, L., F. Lockett, B. Loughridge, A. Peatfield, M. West, and P. White(1991): Membrane and Turbine Development for the Circular Clam, 3rd Symposium on Ocean Wave Energy Utilization, pp.415-424.
- Falcao, A. A. Sarmiento, L. Gato, and M. Pontes(1991): Preliminary Design of a Demonstration OWC Wave Power Plant for the Azores, 3rd Symposium on Ocean Wave Energy Utilization, pp.395-403.
- Grove-Palmer, COJ(1982): Wave energy in the United Kingdom, A review of the programme June 1975 - March, Proc. of 2nd International Symposium on Wave Energy Utilization. 1982, pp.23-54.
- Hiroi, I. (1919): 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.
- Hysing T. (1983): TAPCHAN Wave Power Plants, Norwave A.S.
- Liang, X., X. Gao, W. Zheng, Z. Yu, N. Jahng, X. Hou, and Y. You(1991): Research and Construction of a Small Experiment Wave Power Station, 3rd Symposium on Ocean Wave Energy Utilization, pp.377-383.
- Malmo, O. and Reitan, A. (1985): Development of the Kvaerner multiresonant OWC, Symposium on Hydrodynamics of Ocean Wave Energy Utilization, IUTAM, pp.57-67.
- McCormick, M.E. (1981): Ocean Wave Energy Conversion, A Wiley-Interscience Publication, 233p.
- Murashige, S., and T. Kinoshita(1991): Theoretical and Experimental Study on Ocean Wave Focusing, 3rd Symposium on Ocean Wave Energy Utilization, pp.283-292.
- Nielen, K. (1991): 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.
- Ohno, M., Funakoshi, H., Saito, T., Oikawa, K., Takahashi, S. (1993): Interim Report on the Second Stage of Field Experiments on a Wave Power Extracting Caisson in Sakata Port, ODEC93(Muroran).
- Raju, V., M. Ravindran, and P. koola(1991): Energy from Sea Waves - The Indian Wave Energy Programme, 3rd Symposium on Ocean Wave Energy Utilization, pp.405-414.
- U.K. Department of Energy(1991): Islay, Wave Power in Action, Review, The Quarterly Magazine of Renewable Energy, Issue 17.

**** 波力発電現地実験のエピソード ****

***1) 広井博士と大東崎**

広井博士は、海の土木の先達であり、合田式ができる前の波圧算定式（広井式）として有名である。彼の仕事は「広井勇伝」に詳しく書かれているが、これを読むと、広井博士は、千葉県大東崎に別荘を設け多くの夏期休暇を波エネルギーの研究に過ごしたとある。著者もある日曜日この地を訪れた。広井博士の別荘あとや実験場所は分からなかったが、海崖を削る厳しい波を見ていたら、広井博士がここにおられたことを、実感できたような気がした。

***2) 現地実験にはドラマがある**

現地実験は、比較的順調に進められている。しかし、今でもふと思い出して冷汗がでることがある。それは試運転中の1989年11月19日のことであった。有義波高が7 mを越える波によって空気流調整弁を動かすシリンダーの軸がねじ曲がってしまい、発電の制御ができなくなってしまった。かろうじて緊急遮断弁が作動して発電機本体の破壊は免れたのだが……。あと12日で市長等を招いた実験開始式である。この間に荒波にもまれる防波堤に行き、シリンダーを交換することは不可能と、目の前が真っ暗になってしまった。しかし、現地の方々の献身的な努力とそれに答えるかのように穏やかとなった海によってかろうじて応急修理をすることができた。現地実験にはドラマがあり、それは現地の方々が創っている。

***3) 前出（まえで）氏からの手紙**

前出氏は、図-13に示した波力発電ケーソンの原型ともいうべきアイデアを今から40年以上も前に雑誌「港湾」に発表している。ある日、酒田港の大根田所長にその前出氏から手紙が届いた。酒田港の実験は、地元はもちろん全国の新聞やテレビに取り上げられ、前出氏は新聞を読み私達を励ますためにご高齢にも関わらず筆をとられたのであった。私達は、驚くとともに感動を覚えた。その手紙によると鈴木雅次氏の指示によって投稿したそうである。