

波力発電ケーソン防波堤の実証試験結果

Results of field experiment of a wave power extracting caisson breakwater

合田良実*・中田博昭**・大根田秀明**・鈴木 勝**・高橋重雄***・鹿籠雅純****

Yoshimi.Goda,Hiroaki.Nakada,Hideaki.Ohneda,Masaru.Suzuki,Shigeo.Takahashi,Masazumi.Shikamori

The Ministry of Transport is currently developing a wave energy absorption type caisson breakwater called a wave power extracting caisson. The aim of developing this type of breakwater is to improve its performance such as stability against waves by providing air chambers which serve as energy converters, and to reduce costs for wave power generation through use of breakwater.

This report describes the field experiment of the breakwater at Sakata Port and its results.

Keywords: 波力発電、防波堤、消波機能、堤体の安定性

1. はじめに

クリーンで枯渇することのない海洋エネルギーの利用方法の一つとして、波力エネルギーを利用した発電システムが多数考えられている¹⁾。しかし、波の変動性、特に台風等の異常波浪時の波に耐えられ、しかも経済的なものを設計することは非常に難かしいため、実用化が期待できるものは多くはない。この異常波浪に対して設計される防波堤こそ、経済的な波エネルギー変換装置として利用できる可能性がある。

このような背景のもとに、運輸省では「波とたたかう」代表的構造物である防波堤に、波エネルギーを吸収し電力に変換する機能を持たせた、「波を利用する」波力発電ケーソン防波堤の研究を行ってきた。本研究は、沿岸開発技術研究センターを中心とした民間20社との共同研究として実施しており、当該防波堤の各種設計法の検証、電力利用法及び堤体施工法の検討を目的とした、実海域における世界初の大規模実証試験である。本報告では、1989年12月から山形県酒田港で行われている本実証試験に関して、既報²⁾の続報として構造物の安定性の解析及び発電試験の結果について述べるものである。

2. 実証試験の概要

2.1 実験堤の形状と特性

現地実証試験は、酒田港第二北防波堤に実験堤一函を設置し実施している³⁾。本海域は日本海沿岸でも有数の高波浪の常襲地帯であり、設計有義波高は10.2mにもなる。実験堤は、全体としては図-1に示すような上部斜面堤タイプであるが、空気室と呼ばれる中空の箱状の部分とそれを支持する通常のケーソンの部分から構成されている。空気室の前壁はカーテンウォールとなっており、波が空気室に侵入できるように開口部を有する。空気室は4m幅で5室に分けられているが、隔壁上部に開けられた通気口により5室が一体となっており、さらに背後のタービン発電機が設置されている機械室とはノズルで通じている。波によって空気室内の水位が変動し空気を圧縮・膨張させ、空気室上部のノズル内に往復の空気流を発生させる。この特殊形状により、波のエネルギーを吸収して空気エネルギーに変換できるため消波機能が向上するという特徴があり、直立消波ケーソン式防波堤と

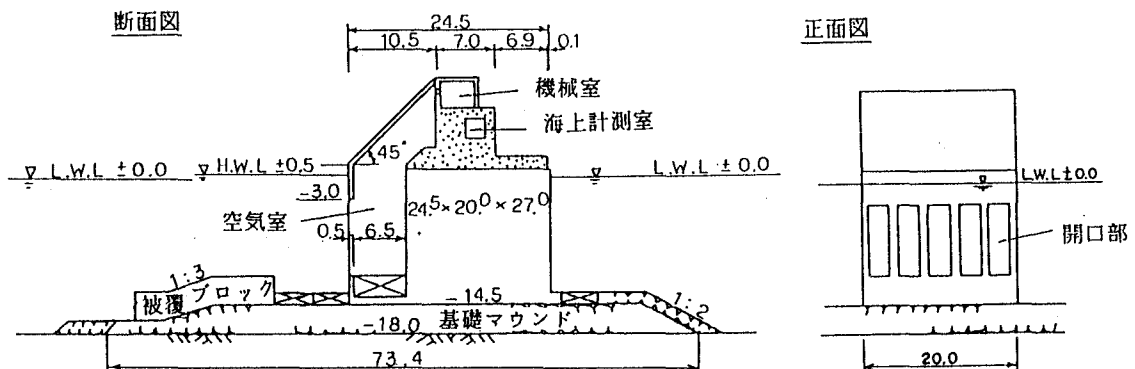


図-1 波力発電ケーソン防波堤の形状

* 正会員 横浜国立大学工学部建設学科 (240 横浜市保土ヶ谷区常盤台)

** 正会員 運輸省第一港湾建設局

*** 正会員 運輸省港湾技術研究所

**** 正会員 (財)沿岸開発技術研究センター

同程度に反射波が小さく、上部斜面堤に比べ越波・伝達波も小さい。また、堤体に作用する波力も軽減されるという特徴を有している⁴⁾⁵⁾。

2. 2タービン発電機と保護対策装置

図-2は、機械室の概念図である。タービン発電機はケーソン上部に設けられた機械室の中央部に設置され、空気流でタービン発電機を回転させることによって、電気エネルギーを得るものである。タービンには、空気流が往復流であっても一方方向の回転力が得られるウエルズタービンを用いた。ウエルズタービンは、直径1.377mのものを2台、発電機をはさみ形で同軸上に配置している。これはウエルズタービンに働く軸方向力を相殺させるものでタンデム型と呼ばれている。発電機は200V同期発電機で、定格60kW、最大回転数3000rpmである。ただし、タービンおよび発電機は空気室の大きさとそこで変換される空気パワーの大きさに比例して小さい。したがって、後述するダミーノズルや保護対策装置によって空気流を制御し、過剰なパワーを大気に逃がしている⁶⁾。

保護対策装置は空気流調整弁（バイパス弁）と圧抜弁及び緊急遮断弁からなり、タービンを中心に左右対称に配置されている。空気流調整弁は、タービンへの空気量を調整する弁であり、開度を全開とすることにより空気流を全量開放し、全閉とすることにより、空気量の全量をタービン発電機に導くことができる。また、全開から全閉まで15度きざみで4段階の開度制御が行えるようにしてある。これにより、低波高から高波高時（有義波高0.7～5m）までの幅広い範囲において、タービン発電機が安全に運転することができるようになっている。圧抜弁は、空気圧が所定の圧力以上となる時、大気に開放して空気圧を減じるものである。緊急遮断弁は、タービンに異常を生じた時などに重力落下式の弁板が落下し、タービンへの空気流を遮断し、同時にその空気流を大気に開放するものである。さらに2つのダミーノズルを設けており、これらの空気ノズルを通じて全体のほぼ2/5の空気パワーが常に大気に開放されている。

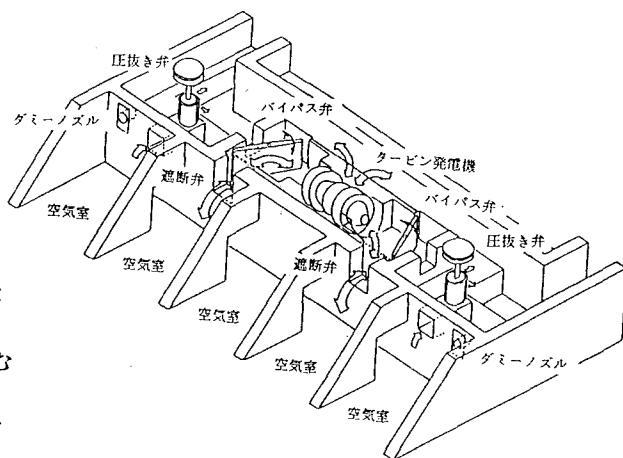


図-2 機械室の概念図

2. 3計測方法

現地実験では種々の計測を行っており、防波堤法線上沖合い275m地点に波高計を、また、ケーソン堤体には図-3に示すように波圧計、鉄筋計、差圧計、揚圧力計等のセンサーを設置している。さらに、タービン回転数や発電出力など発電関係の測定も実施している。これらの計測データは、ケーソン上の計測室および海底に敷設された光・電力複合ケーブルを経由して陸上局に送られ、パソコンシステムによりリアルタイムに解析、

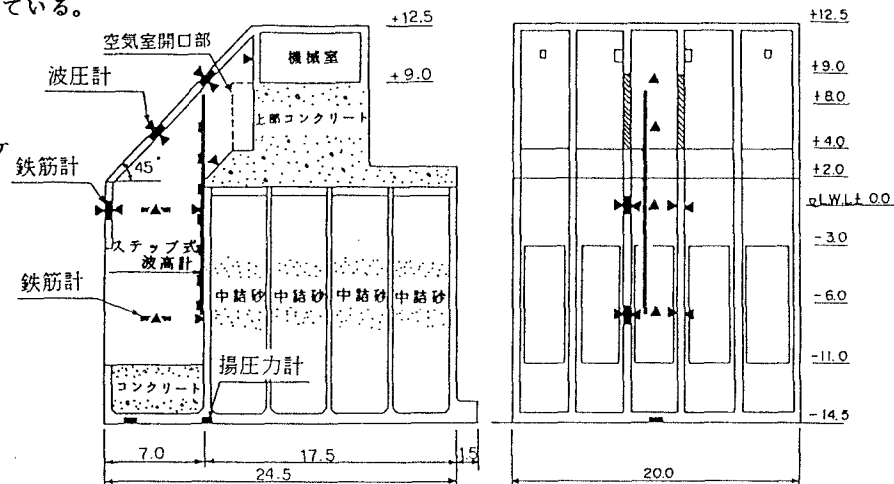


図-3 センサーの位置

出力、モニタするとともに、データレコーダに記録し後日詳細な解析を行った。また、発電電力も同様にして陸上のデモンストレーションハウスに導き、ライトの点灯、ロードヒーティングによる融雪、地下水の揚水、海水中溶存金属の回収、自動給茶器の熱源等実際に利用している。

2. 4実証試験の工程

表-1は実証試験の工程を示すもので、1987年度から1991年度の予定で実施している。波力発電ケーソンの設計は1987年度に開始し、設計条件や実験堤の基本寸法の決定、FEMによる空気室部材等の堤体の設計までを終了し、88年度には機械室の設計を行った。施工については、87年度に実験堤の製作場所や施工方法の検討を行い88年度よりケーソンの製作を開始し、89年度に空気室上部製作を行って同年7月にケーソン据付けを完了した。また、これと平行して保護対策装置を製作している。発電装置の設計は87年度から開始しており、88年度に発電機を製作し、89年10月に保護対策装置とともに実験堤に設置した。同年12月より本格的に発電を開始し、現地観測を始めている。計測については、87年度より方法の検討を始め、波圧計等のセンサー類を購入し、88年度には計

表-1 実証試験の工程

	1987年度	1988年度	1989年度	1990年度	1991年度
設 計	堤体の設計	機械室の設計			
堤体の施工		堤体下部製作	上部製作	据付	
機械室の施工			機械室の施工		
タービン・発電機		タービン・発電機の製作	設置	発 電	
計 測	計測システムの検討	機器の製作・購入	機器の設置	観 測	
解 析				解 析	報告書作成

測機器を実験堤及び発電機に取り付けた。これに平行して、観測計画やデータの解析処理システムの開発を行い、発電開始と同時に計測を開始した。写真-1、2は施工中および完成した波力発電ケーソン防波堤である。

計測は89年12月より特に波浪の大きい冬期を中心に行っており、現在取得データの解析を行っているが、今回の報告は主として89年10月から90年3月までのデータについて述べる。解析は今後も引き続き行い、最終的に波力発電ケーソン防波堤の実用化の評価を行う予定である。

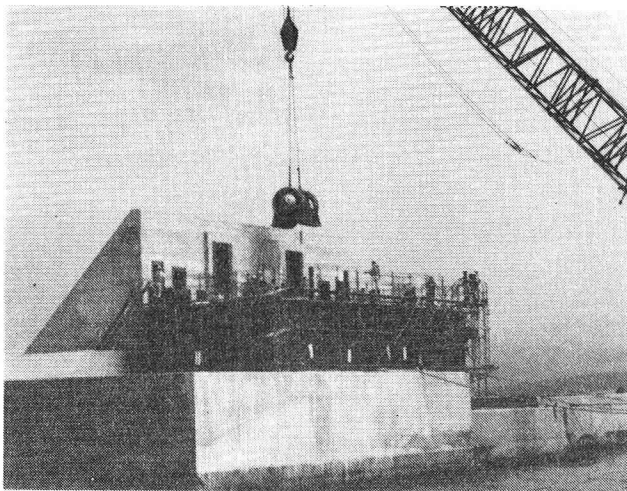


写真-1 施工状況（タービンの設置）

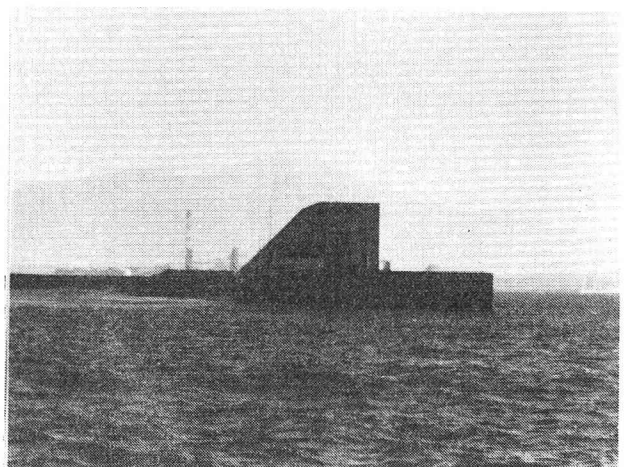


写真-2 完成した波力発電ケーソン防波堤

3. 現地実験結果

3. 1 波浪観測状況

図-4は1989年12月から1990年3月までの波のデータのうち、有義波高、有義波周期、主波向および波パワーを示したものである。例えば1990年1月では、有義波高および波パワーの平均はそれぞれ2.05m、18.5kW/mとなっている。また、波高は大幅に変動しているが、最大有義波高は5.45m、波パワーの最大値は101kW/mとなっている。観測期間を通じ、有義波高が5mを何回か越えることがあり、1989年11月19日には、7.5mを記録している。主波向は概ねNW方向であり、防波堤の法線にほぼ直角となっている。

3. 2 ケーソンの耐波安定性

観測開始から現在まで、酒田港には上述した有義波高7.5mを始めとして、幾度もの大波浪が来襲している。これらは設計波の有義波高と比較するとやや小さいが、最高波高は設

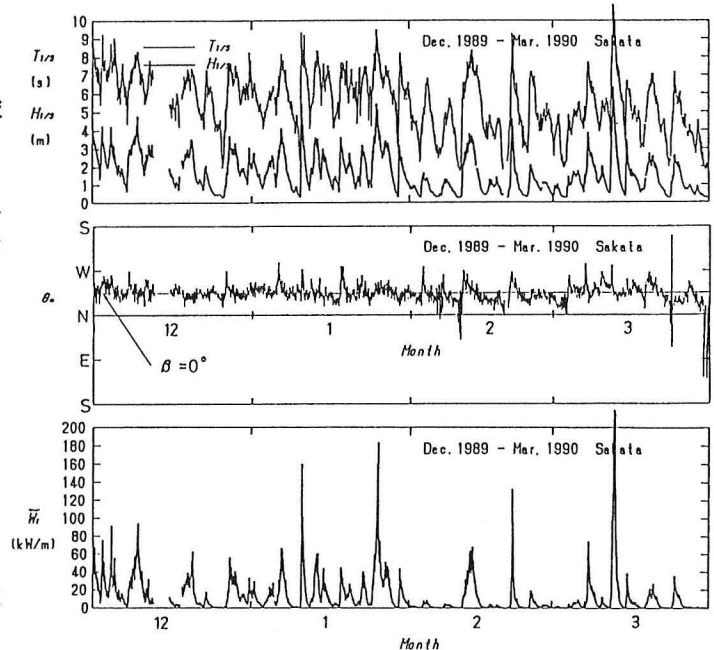


図-4 有義波と波パワーの経時変化

計波高に比較的近い状態も経験したものである。しかしながら、堤体の滑動やケーソン壁の変状等は生じておらず、期待どおりの耐波安定性を有していることが確認された。以下の解析では、有義波高7.5mであったケースについて述べる。

図-5は堤体全体に作用する波圧の測定値と計算値を比較するものである。堤体に作用する波圧分布（計算値）は拡張された合田式、すなわち波力発電ケーソンの消波機能を考慮して波圧の補正係数を $\lambda_1=1.0$ 、 $\lambda_2=0$ として用いた式により、来襲波浪の条件から求めている。計算値に比べ測定値の方がやや小さい値を示すが、分布の様子は合田式とほぼ同じとなっている。その他のケースについても、波高の小さい一部の場合を除いて、ほぼ同様の波圧分布を示しており、当該ケーソンへの耐波安定性を検討するに当たり、合田式を適用することの妥当性が確認された。

図-6は、空気室の部材波力の設計値と測定結果を示すもので、押し波時で空気室内の圧力がピークの状態である。この場合は斜面部の内側から $1.0w_a H_{max}$ の等分布荷重を想定していたが、空気室内の圧力は $0.8w_a H_{max}$ 以下であった。また、実際には斜面外側からの波圧も作用しており、設計で想定した条件よりも安全側となっている。このほか、引き波時や押し波時でケーソン前面の波圧がピークとなったときの波圧も考慮して設計を行っており、その設計波圧は測定波圧に比べやや安全側であることがわかった。

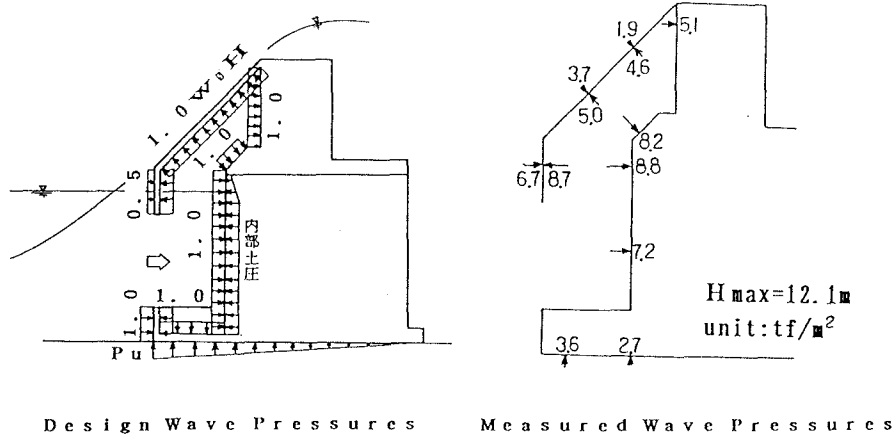


図-5 観測波圧と合田式との比較

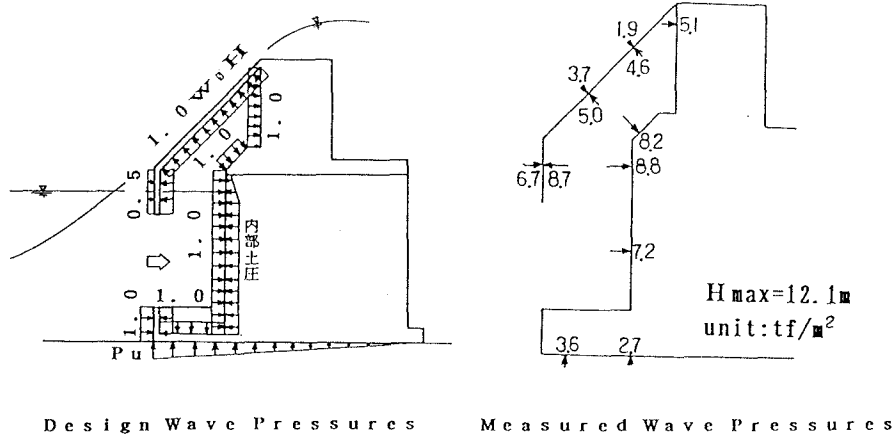


図-6 部材波力の比較

3. 3 発電運転状況

発電は1989年10月より試験的に実施し、12月より本格運転を開始している。これまで順調に発電しており、ほぼ設計どおりの発電となっている。ただし、1989年度は初年度であるため、やや安全側の制御をしており、平均発電量は発電機定格に比べ全体的に小さい。

図-7に代表的な発電状況の例として、1990年1月7日11時の記録の一部を示す。図には空気室水位 η 、空気室圧力 p_a 、バイパス弁の開度 v_B （全閉が4で全開が0）、タービン差圧 p_d 、タービン回転数 N_T および発電出力 W_g の計測20分間の経時変化を示している。このときの有義波高は3.21m、有義波周期7.47s、入射波パワー40kW/mで、平均発電量は30.7kWであった。タービンの回転数 N_T が1300rpmから2000rpmの間となっており、発電量 W_g が20kWから50kWの範囲で変化している。波高が大きい波の連なりが来ると回転数が上がり、1800rpmを越すとバイパス弁が開き、回転数が低下して1500rpm以下となると再びバイパス弁が閉じる様子がよくわかる。発電出力は2000rpmで60kWに設定されており、1800rpmでは40kWとなりバイパス弁によって回転数の上昇が抑えられているため、平均発電量は発電機定格に比べて小さい。この場合の空気出力効率（波パワーと空気パワーの比率）は0.5、タービン効率は0.39、発電機効率は0.92で、これらの積の発電効率は0.18である。しかしながら、タービンの大きさや発電機の容量のため、ダミーノズルによっておよそ40%の空気エネルギーを利用しておらず、また、圧抜弁やバイパス弁で空気を逃がしているため、空気室の空気の利用率は低い。この場合は、空気パワーの利用率が0.23であり、適切なタービン発電機であればほぼ4倍、すなわち120kW程度の発電となる。また、このタービン発電機の回転数はかなり変動しているが、これはやはりタービン発電機が小さく、慣性モーメントが小さいためで

ある。

図-8は発電試験結果の一例を示したものである。有義波高が3mのとき発電出力は20~40kWとなっており、波向が0度に近いほど発電出力は大きい。また、1990-1991年冬の「設定Ⅲ」による発電出力の方が1989-1990年冬の「設定Ⅰ」による発電出力よりも大きくなっている。「設定Ⅲ」は、本来の設計に基づく空気流制御や負荷制御である。計算値の実線および点線は波向きが0度の場合であり、実測値のほぼ上限を示していることがわかる。

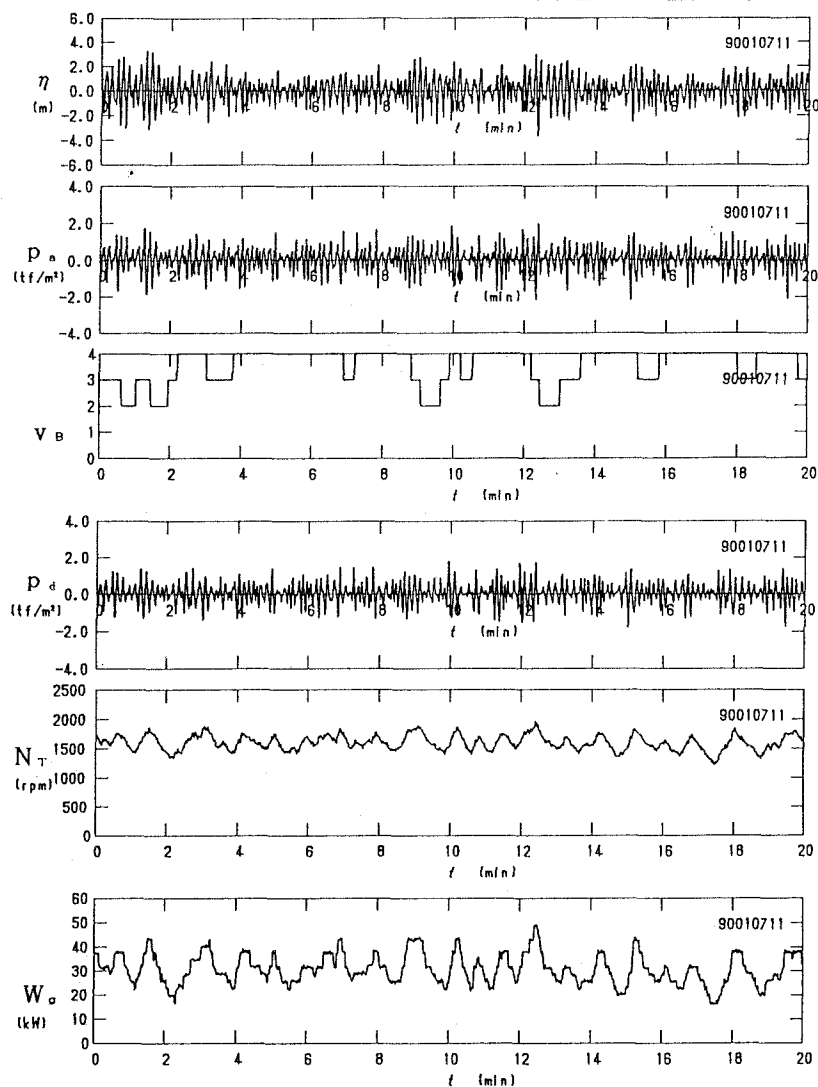


図-7 発電状況の例

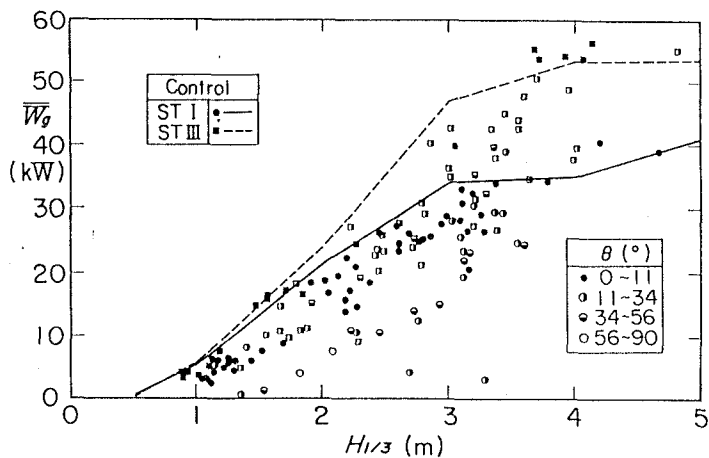


図-8 有義波高と発電出力

3. 4 電力利用実験

本実証試験の大きな目的の一つに、得られたエネルギーの利用方法の検討がある。波力発電で得られたエネルギーは変動性の大きなエネルギーであり、これを通常の電力として利用するには、安価で大容量の電力貯蔵装置が必要となる。しかしながら、波エネルギーの利用を促進するためにはこのエネルギーに適した利用方法を検討する必要がある。こうした利用方法については、

(財)沿岸開発技術研究センターを中心とした「防波堤利用の波力発電に関する研究会」が検討を行っている。ここでは小規模ではあるが各種の利用装置を設置し、波力電力によって実際に稼働させている。

写真-3は陸上観測局の前面の砂浜に設置された揚水装置であり、周波数が変動する電力ではあるがスムーズにポンプが作動し、陸上局への送水に成功している。こうした揚水システムは海水交換、深層水の汲み上げあるいはサブサンドフィルターによる海浜侵食防止工法に用いることができる。写真-4は1000Wの白熱灯を40個つけたタワーであり、発電量が多いときにはこれが点灯されている。この他ロードヒーティング装置をはじめ多くの装置をテストしており、波力電力の実用性が確認された。なお、この陸上観測局は一般に開放されており、1991年4月までに約4,000名の見学者が訪れている。

4. おわりに

1989年12月に本格的に実証試験を開始してから、これまでのところ実験は順調に行われており、今回の試験で防波堤を利用した波力発電に関する技術的な課題の多くが解決され、実用化に向けて大きな前進が図られたものと考えている。今後、さらにデータの取得と解析を続けてゆく予定であるが、将来的にこうした装置の実現の可能性は十分期待できるものと考えている。

本実証試験を実施するにあたっては、実験の企画段階から現在に至るまで多くの方々から多大な御指導、御協力を得ており、ここに深甚なる感謝の意を表します。



写真-3 発電電力の利用（揚水システム）

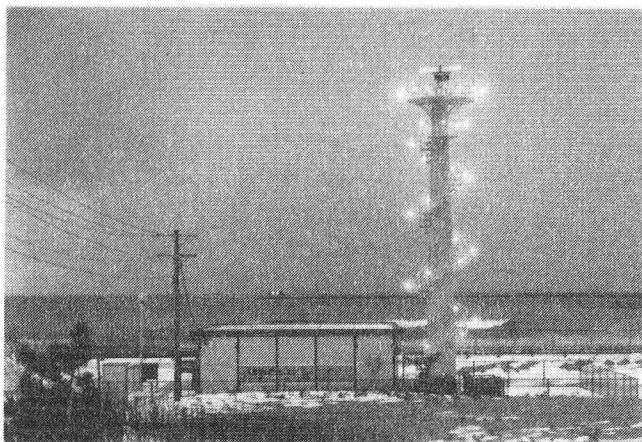


写真-4 発電電力の利用（白熱灯）

参考文献

- 1) 近藤俊郎・高橋重雄；海洋エネルギー利用研究の現状と課題、海洋工学連絡会第3回活動報告会（海洋開発における境界領域（その2））、1989.7.
- 2) 合田良実ほか；波力発電ケーソン防波堤の実証試験（堤体・発電装置の設計製作及び実証試験の計画）、海洋開発論文集Vol.5、1989.
- 3) 合田良実ほか；酒田港における防波堤利用の波力発電現地実証実験、第3回波浪エネルギー利用シンポジウム、1991.
- 4) 高橋重雄・安達崇・田中智；改良型波力発電ケーソン防波堤の特性（波エネルギーに関する研究第7報）、港湾技術研究所報告 第27巻第2号、1988.
- 5) 小谷拓・神田勝己・大根田秀明；波力発電ケーソン防波堤の耐波安定現地実験、土木学会第45回年次学術講演会、1990.
- 6) 中田博昭ほか；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、1991.