沿岸固定式波力発電装置の開発

海洋科学技術センター　海洋開発研究部　正会員　堀田　平
鷲尾　幸久
石井　進一
益田　善雄
正会員　宮崎　武晃
工藤　君明

1.　はじめに

近年，離島および燈標などの電力供給システムとして，海の波の持つエネルギーを利用して発電を行う波力発電装置の開発が注目されてきており[1)]，その固定形式の装置の一つとして，小規模ながらも海岸の自然地形を利用して設置できるコンパクトな装置の開発が望まれている。著者らは，その一つとして振動水柱型空気タービン方式の装置について，浮体形式である「海明」を用い，波力発電の実用を目指して開発を行ってきた[2)]。また，国内外においても同方式の固定装置について多くの研究開発が行われている。[3)～7)]

海洋科学技術センターにおいても，「海明」による開発成果を活用して，離島電源などに用いることを目的とした同装置を開発する計画を立て，これを新技術開発事業団に開発課題として申請した。これが採用され，「沿岸固定式波力発電システム」として，堤体（空気室）は三井造船株式会社が，空気タービン・発電機については富士電機株式会社がそれぞれ担当して昭和５８年９月に建造され，以後，翌年３月まで海洋科学技術センターおよび前記二社によって発電運転試験および各種の計測が行われた。[8)]

本研究はその過程において生じたものであり，本報では，特に，装置の概要を紹介するとともに，計測および解析結果の一部を報告し，今後の同方式装置の設計のための一資料とする。

2.　装置概要

2．1　設置場所

沿岸固定式波力発電装置は，山形県鶴岡市三瀬の立岩地区の岩礁に設置された。図１に設置場所の概略図を，写真１に設置前の状況を示す。設置場所は，西北西に湾口を開いた幅約20mの入り江の奥にあり，水深は湾口で約７m，入り江中央で約４m，設置場所で約３mである。この付近では，冬期における波の多くは西から北西の範囲で進行して来るため，この湾内においてもほぼまっすぐに進行し，装置に正面から入射する状態になっている。なお，湾前方の海域の海底勾配は約 1／120，また，海底地質は砂であり波浪および流れにより多少水深が変動することがある。

2．2　工事および計測期間

装置の設置工事は昭和５８年５月より同年９月中旬にかけて行われた。まず，６月下旬まで現場の基礎工事を行うと同時に鋼製ケーソンを酒田港岸壁で製作し，ケーソンは７月初旬に現場に据え付けられた。その後，裏込め石を投入し，ケーソン両側および天端にコンクリート打ちを行った。８月下旬に空気タービン・発電機および制御盤などが設置され，また計測室も建てられて発電装置との間の配線が行われ，９月に写真２に示すように完成した。

計測は装置完成以後，翌年３月下旬までの間行われたが，計測器等の故障などが発生したため，全期間を通じて必ずしも順調な計測は行われなかった。

なお，４月以降はタービン・発電機，制御盤，各種計測器および計測室は撤去された。

2．3　波浪および潮汐

2．3．1　波浪

本計測においては，装置前方および沖合における波浪の観測は行われなかった。そこで，装置に入射する波のデータとして，装置の設置場所から海岸線に沿って南西に約７kmの地点にある気象庁五十川波浪観測所において，沖合約２km，水深約40mの地点において水圧式波高計により計測されている波浪データ（平均波浪，有義波浪，最大波浪）を用いた。その一例として，表１に計測期間中における１／３有義波の出現度数分

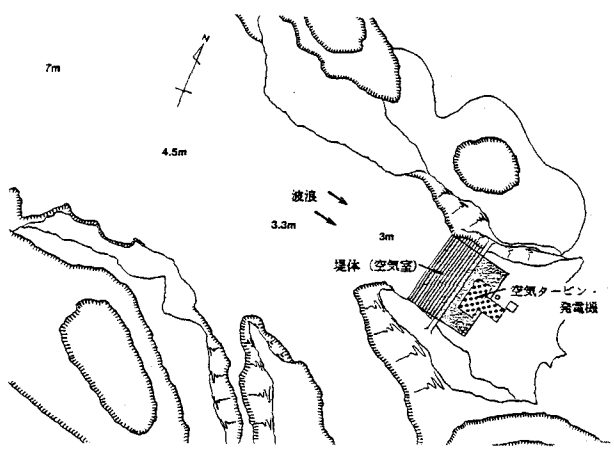

図１　装置の設置場所概略図

布を示す。

2．2．4　潮汐

日本海は4海峡により外洋に通じているので潮汐による水位変動は小さい。一日に一回潮であり，潮汐の高さは大潮で 0.6m程度，小潮で 0.3m程度である。なお，surf beat 現象等による水面上昇は 0.6m位まで達することがある。

2．3　堤体[9)]

2．3．1　設計波圧

設計に用いる沖波として，三瀬漁港の防波堤の設計に適用された値を準用した。すなわち，H1/3 =7.75m，T1/3 =13.5秒とすると，堤体（空気室）直前における相当沖波波高は 7.9mとなった。これより，設計波として最大波高を 12.44mとした。これを用いて設計波圧を求めると，堤体に及ぼす波力の合計は約94.5 ton／mとなり，前面壁全体での波圧力は約 800ton になる。また揚圧力の合力としては約 54.6 ton ／mとなる。

表1　有義波出現度数分布

波高（m）＼周期（秒）	0~3	~4	~5	~6	~7	~8	~9	~10	~11	~12	12<
0.0 ~ 0.5	1	32	58	60	26	6	4	0	1	1	3
~ 1.0	0	4	58	89	126	27	3	0	0	0	0
~ 1.5	0	0	14	99	122	62	12	0	0	0	0
~ 2.0	0	0	2	36	96	59	22	0	0	0	0
~ 2.5	0	0	0	1	48	87	31	2	0	0	1
~ 3.0	0	0	0	0	16	61	54	0	0	0	0
~ 3.5	0	0	0	0	0	31	52	12	1	0	0
~ 4.0	0	0	0	0	0	6	48	16	0	0	0
~ 4.5	0	0	0	0	0	1	14	23	3	0	0
~ 5.0	0	0	0	0	0	0	4	16	4	0	0
~ 5.5	0	0	0	0	0	0	0	7	2	1	0
~ 6.0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	1	0
~ 6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
~ 7.0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0
7.0 <	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0

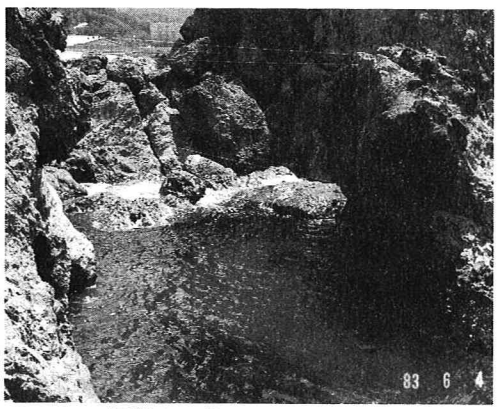

写真1　装置の設置場所

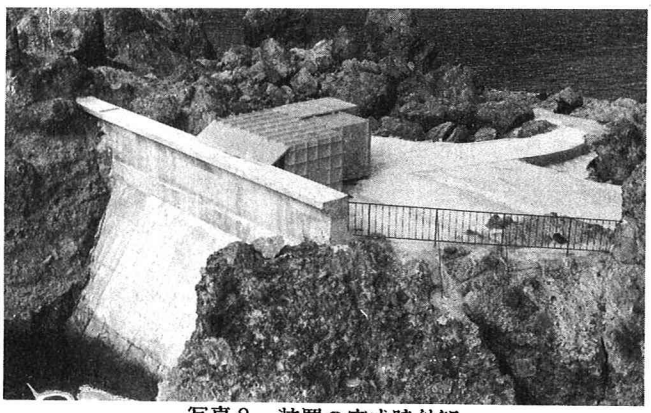

写真2　装置の完成時外観

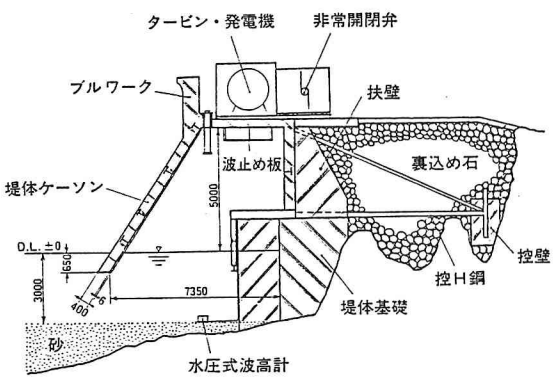

図2　装置断面図（1）

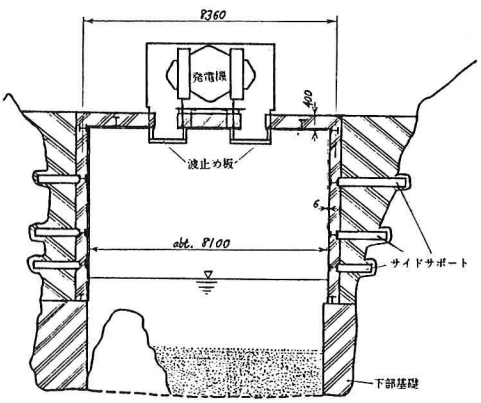

図3　装置断面図（2）

2．3．2　構造

堤体（空気室）は，波エネルギーを有効に吸収し，また設計波圧に対して十分安全であり，更に，設置工事を考慮して，鋼製ケーソンとコンクリートからなるハイブリッド構造とし，その寸法は幅約8.1m，高さ約5m，静水面奥行き約7m，空気室面積約50m とした。

鋼製ケーソンは，写真3に示すように前面壁部が約35度の傾斜を持ち，H鋼にて補強された厚さ6mmの鋼板で作られており，その重量は約50ton である。前面壁はその上に厚さ 400mmの鉄筋コンクリートが被覆されている。図2および図3に堤体の断面を示す。堤体の前面壁の没水深さは，現場水深を考慮して，波エネルギーをできる限り取り入

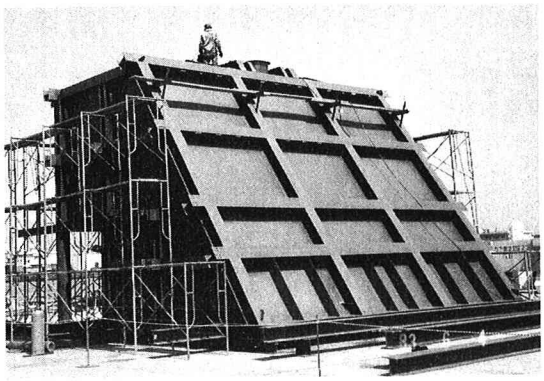

写真3　鋼製ケーソン

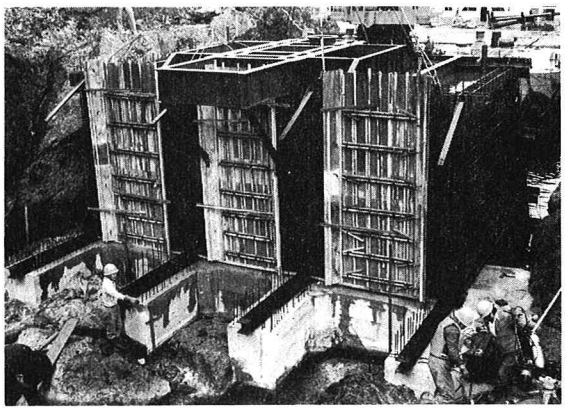

写真4　ケーソン据付状況

れ，なおかつ波面下降時に前面壁の下端が露出して空気室内圧力の低下を招かないように，平均水位に対して0.65mとした。

入射波によって堤体（空気室）内の波面が上下動し，空気圧力を変動させ，天端に設けられた開孔部を出入りする空気流を励起する。これにより，開孔上に設置されたタービン・発電機を回転させて発電を行う。この方式を，振動水柱型空気タービン方式と言う。

2．3．3　据え付け方法

波圧力等に対する堤体の安定は自重による摩擦力だけでなく，次のような据え付け方法により安全を図った。

（1）後端壁に扶壁を4個所設ける。（2）H鋼により側方の岸壁にサイドサポートを付ける。（3）側方の岸壁と堤体との空隙にコンクリートを充塡する。（4）基礎に段違いを設けてストッパーとする。（5）写真4に示すように，アンカーボルトで基礎に固定する。（6）控H鋼を設け，先端を控壁で根止めする。（7）堤体の後ろに裏込め石を詰め，天端にコンクリートを張る。

2．4　空気タービン・発電機および負荷装置

空気タービンは往復する空気流に対して同一方向に回転するウェルズタービンを使用し[10)12)]，図4に示すようにこれを発電機の両側に取りつけて回転によって生じる軸方向のスラスト荷重を打ち消すタンデム配置とした。使用した空気タービンの諸元を表2に，また，タービン軸流速度Na とタービン差圧ΔPの関係を図5に示す[11)]。なお，この空気タービンの及ぼす負荷を従来より模型実験において用いていたノズルによる負荷に換算するとしたなら，空気タービンの環状流路断面積から翼面積を差し引いた値がノズル面積に相当するとすれば[14)]，タービンは2枚であるから0.36m^2，従ってノズル比（ノズル面積／空気室水線面積）としては約 1／140 に相当することになる。

表2　空気タービン諸元

翼断面	NACA0021
翼枚数	16枚
チップ直径	1.337 m
ハブ直径	1.000 m
環状流路断面積	0.6185m^2
翼厚	34.1 mm
弦長	162.5 mm
弦節比	0.62
重量	351 kg
GD^2	220 kg·m^2
材質	ステンレス鋳鋼

また，使用した発電機は，定格出力40kw，定格回転数1792rpm の同期発電機であり，出力電圧が 200Vで一定になるように制御されている。　一方，負荷装置としては，屋外自然冷却式シリーズ抵抗器を用いた。これにより，発電した電気エネルギーは総て熱エネルギーに変換され，消費されることになる。

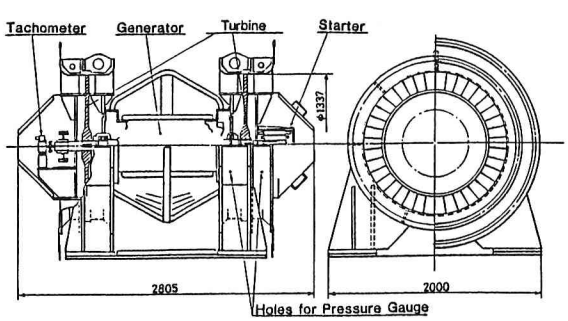

図4　空気タービン・発電機の概略図

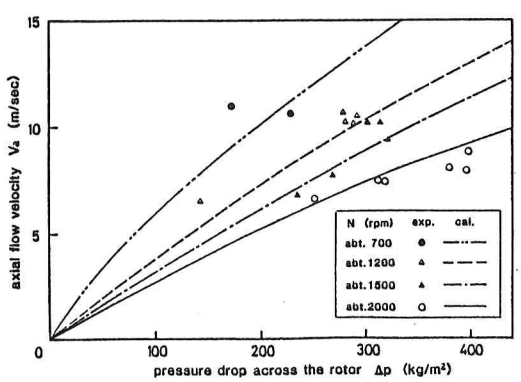

図5　空気タービンによる負荷特性

3．　計測および解析

3．1　空気室内水位変動

空気室内の水位変動は，図3中に示すように水底に設置された水圧式波高計によって計測された。計測例として平均発電出力約40kwの時のデータを図6に示す。図中の ζ は空気室内水位，Pは空気圧力，Nはタービン回転数，Eは発電出力である。

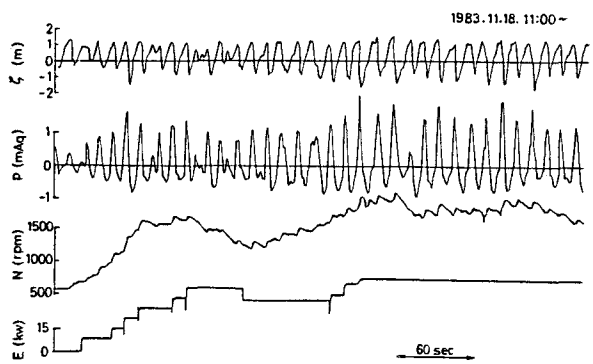

図6　発電運転時の計測データ例

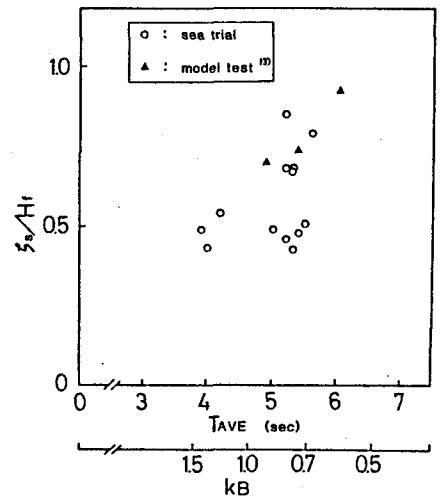

図7　比波高特性

振動水柱の入射波に対する応答を調べるために，砕波しない波のみについて比波高（空気室内水位変動両振幅 ζ_s ／装置直前の入射波高Hf）の平均波周期 T_{AVE} に対する特性を求めたものが図7である。図中の模型実験値は，木下ら[3]による値である。計測値は実験値に近い値があるとは言え，ばらつきが多いことから，空気室内の水面が常に水平にはなっていないため計測位置での水位変動が必ずしも平均水位変動となっていなかったことに加えて，空気圧力の影響を受けているためであろう。

3．2　空気室内圧力

空気室内圧力は，天端から空気室まで貫通されたパイプに圧力計を取りつけて，計測を行った。

これについても，砕波しないと推定される波に対してのみ T_{AVE} と比圧力（空気室内圧力変動片振幅 $1/2P_s$ ／Hf）の関係についてプロットし，ノズル比 1／352 として行った模型実験[4]で得られた値と比較したものが図8であり，これから，装置直前の波高Hf を用いた比圧力特性は模型実験によって得られる値と相関があることが明らかになった。

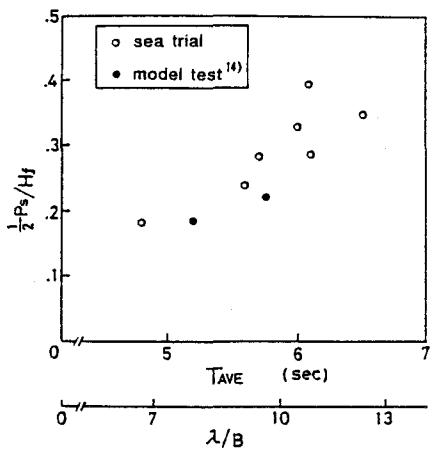

図8　比圧力特性

また，模型実験結果と比べて実海域データは，ほぼ定性的，定量的に近い値であったが，従来より，空気出力に対して最適なノズル比は 1／80～ 1／120 とされている　ことから，本装置の空気タービンは水柱の運動に対しては過負荷となっており，より適した規模の空気タービンを用いれば，より出力が向上することが確認された。

なお，空気室内圧力変動の波形は，図6にも示したように，正圧が負圧に比べて大きくなっている。これは，正圧が空気室内水面上昇時，負圧が下降時であることから，浅海波によって生じる現象であると考えられる。

3．3　空気タービン・発電機

図6に示したように，空気タービン・発電機の回転数は，入射して来る波の一波一波に対して約50rpm ほど変動するのみであり，大きくは群波に対して変動する。発電電圧は常に 200V一定に保たれており，これより，従来の空気タービン式装置に比べ　発電出力の平滑化については，かなり改善されていると考えられる。また，沖

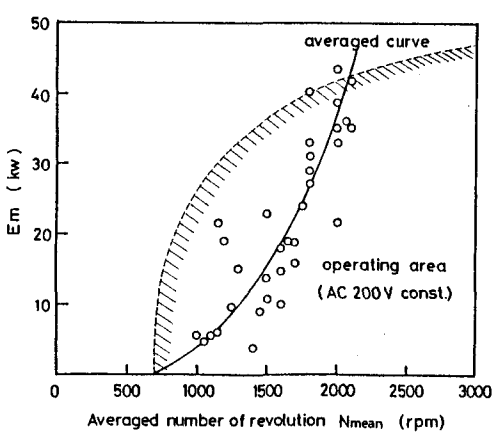

図9　空気タービン回転数と発電出力の関係

合での波浪条件Hs ＞ 0.7m程度であれば，空気タービンは自己起動を行うこと，空気入力から発電出力への二次変換効率は30～50%であったことも確認された。

一方，空気タービン回転数の計測時間内平均値Nmeanと平均発電出力Em の関係を図９に示す。これより，発電運転にあたっては，比較的に低出力の運転を行っていたことが判る。

３．４　発電出力

発電出力は，運転操作における負荷設定によって異なってくるため，定量的に正確な評価は困難であるが，ここでは定性的な特性について調べた。

図10に，沖合での有義波高Hs の一日平均値に対する一日平均発電出力Ed の関係を示す。これより，沖合波浪と発電出力の間には相関があることが判る。一方，空気室内圧力変動に対する発電出力の特性として，図11に変動の片振幅の平均値Pmeanおよび有義値Ps とその計測時間中の平均発電出力Em の関係を示す。これより，負荷の設定は空気室内圧力に依存し，したがって発電出力もそれによって決定されていることが判る。

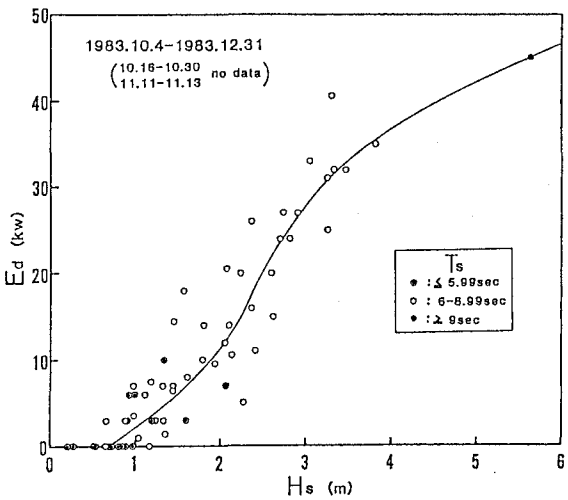

図10　沖合波浪に対する発電出力特性

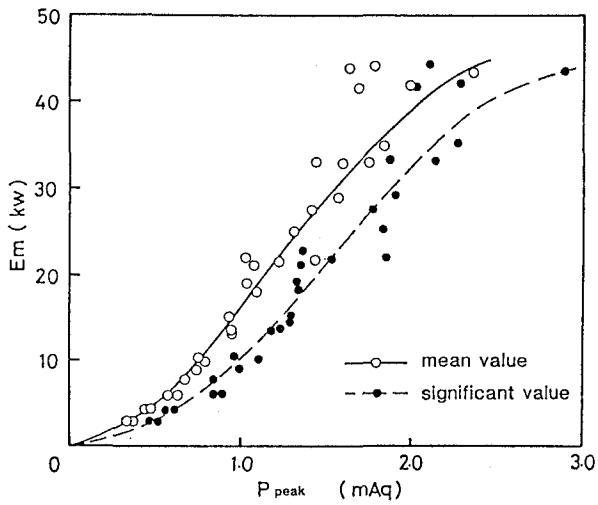

図11　空気室内圧力に対する発電出力特性

なお，計測期間中の月別および総合の平均有義波浪と平均発電出力を表３に示す。これより，本装置の沖合の波エネルギーに対する総合発電効率としては，約11%を，また二次変換効率が約40%とすれば，この堤体の波エネルギー吸収効率は50～80%となることが確認された。

表３　月別平均有義波浪と平均発電出力

年	月	平均 1／3 有義波浪		平均発電出力
		周期（秒）	波高（m）	（kw）
1983	10	6．5	1．4	8．8
	11	6．8	1．6	13．7
	12	7．3	2．2	17．4
1984	1	7．3	2．2	12．8
	2	6．9	2．1	9．5
	3	6．6	1．7	5．4
総平均		6．9	1．8	11．3

４．　運転状況

計測期間中，堤体には大きな破損は見られず，安全に保たれていた。しかし，昭和５９年１月上旬に，前面壁右側の水面下に開口が生じ，そのため波面下降時に空気室内圧力が低下する現象が起こったが，これはその後，完全に塞がれた。また，堤体周辺の海底土質は砂であり，冬期間にこれが移動し，昭和５９年３月の時点で空気室内および前方においては，前年８月に計測された水深のほぼ1／2 になっていた。これによる出力への影響については明確にできないが，少なからずあったと考えられる。なお，昭和５９年６月末には，再び装置の建造当時の水深に戻っていることが確認されている。

一方，空気タービン・発電機，安全装置および制御盤については大きなトラブルは全く無かったが，空気タービンが約2000rpm 付近で回転するときに高周波数の騒音を発生していた。今後，これに対する対策が実用化へ向けての課題の一つとなるであろう。

５．　結言

（１）本方式装置の堤体（空気室）は，一部の改良点を除いて，本装置の構造および岩礁への固定方法で，日本海沿岸域の冬期の波浪に十分耐え得ることが確かめられた。

（２）空気タービン・発電機は，空気タービン径が小さく水柱運動に対して少々過負荷とは言え，大きなトラブル

無く運転され，これについても耐久性が確認された。

（3）本装置の冬期間における平均発電出力は11.3kwであり，沖合の波エネルギーに対する発電効率が約11%を得ていたことから，本方式の波力発電装置の実用化への目処を立てることができた。

6. おわりに

空気タービン方式の沿岸固定式波力発電装置による実海域における発電運転および計測の結果，計測期間を通じて大きなトラブルは無く，更に期間中の総合平均発電出力が11.3kwであったことなどから，本方式の波力発電装置の実用化へ大きく前進したと言えるであろう。

しかし，堤体には前面壁の強度，没水深さなどについて，空気タービン・発電機には騒音などについて，まだ改善すべき点は多い。一方，本計測においては，入射波を直接現場では測れなかったことなど不備が多く，堤体の波エネルギー吸収効率を明確にすることができなかった。今後，それらについて一層の研究開発を進め，発電単価の点まで含めて，十分実用に供する装置の設計手法を確立しなければならない。

本研究を行うにあたりご尽力下さった新技術開発事業団，三井造船株式会社ならびに富士電機株式会社の関係各位，ご指導頂いた東京大学工学部舶用機械工学科　荒川　忠一助教授，鈴木　正己助手および東京大学生産技術研究所木下　健助教授，ご協力頂いた山形県，鶴岡市，三瀬および漁業共同組合の関係各位に対し厚く御礼申しあげます。

7. 参考文献

1）近藤　淑郎ほか：離島に対する沿岸型波浪エネルギー利用システムの適用性，第一回波浪エネルギー利用シンポジウムテキスト，海洋科学技術センター，1984年11月

2）海洋科学技術センター：波力発電装置「海明」の研究に関する総合報告，1981年

3）Moody,G.W.：The NEL Oscillating Water Column：Proc. 1st Sympo. on Wave Energy Utiliztion ,1979.11

4）海洋産業研究会：沿岸波力発電システム研究報告書，1981年

5）前田　久明ほか：波浪発電に関する基礎的研究（その5），日本造船学会論文集，第 152号，1983年

6）髙橋　重雄ほか：Air Power of Pneumatic-type Wave Power Extractors due to Irregular Wave Actions (3rd Report)，港湾技術研究所報告，第24巻，第2号，1985年3月

7）日本航路標識協会：燈標等に利用する波力発電システムの研究開発（中間報告書），1985年3月

8）石井　進一ほか：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報告，第14号，1985年

9）三井造船株式会社：沿岸固定式波力発電用空気室（堤体）製作・据付及び付帯設備工事設計図書，1983年

10）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テキスト，1984年11月

11）鷲尾　幸久ほか：タンデムウェルズタービンの実機性能試験，第一回波浪エネルギー利用シンポジウムテキスト，海洋科学技術センター，1984年11月

12）荒川　忠一ほか：ウェルズタービンを用いた固定振動水柱型波力発電装置の研究（第1報，初期設計手法），日本機械学会講演論文集，No.830-12，1984年

13）木下　健ほか：固定式振動水柱型波浪発電装置のシステム・シミュレーション，日本造船学会論文集，第156号，1984年12月

14）堀田　平ほか：線形負荷による空気出力特性試験，海洋科学技術センター海洋利用技術部内メモ，1984年4月