

防波堤利用による波力発電の実用化に関する研究 — 第Ⅱ期実証実験 —

Utilization Study On Wave Power Extracting Caisson Breakwater
— The Second Stage of Field Experiment —

大津光孝* ・ 田所篤博** ・ 高橋重雄***

Mitutaka Otu, Atuhiko Tadokoro, Shigeo Takahashi

喜島恭彦**** ・ 安西俊直****

Kyohiko Kizima, Toshinao Anzai

The Japanese Ministry of Transport has been developing a wave power extracting caisson breakwater. A test breakwater was constructed in the summer of 1989 in Sakata Port and the field experiment began in the winter of 1989. The first stage of the experiment was successfully completed in 1991. The design and construction as well as the operation of the system were demonstrated by the experiment. The field experiment was extended to investigate remaining problems, especially the way to utilize the converted power. This report describes the results of the second stage experiment, which includes a large scale water pumping test and a prototype-test to connect the wave power to commercial electric power lines.

Keywords : 波力発電、防波堤、波力電力利用技術

1. はじめに

自然エネルギーの利用は、地球環境への優しさ、無尽蔵といえる存在から着目され続けてきたものである。特に、石油危機以来、石油代替エネルギーの開発の重要性が高まっており、太陽光、地熱、風力といった自然のクリーンエネルギー利用が要求されており、各機関においてその研究が実施されている。波エネルギーについても、各国で有効活用する研究が進められており、周囲を海に囲まれた我が国においては波エネルギー利用の可能性は極めて高いものと考えられる。

「波力発電防波堤」は、外洋に面した港湾に必要な不可欠な防波堤に波エネルギー変換装置を設置し、本来の防波機能に発電機能を合わせ持つことにより、全体コストの低減をはかるものである。運輸省第一港湾建設局では、1987年度から防波機能や消波機能を備えかつ波のエネルギーを利用することのできる新しい直立消波防波堤を酒田港第二北防波堤に設置し、「波エネルギー利用防波堤」の現地実証試験を実施した。これに合わせて、(財)沿岸開発技術研究センターと民間企業20社では、「防波堤利用の発電に関する研究会」を設置し、1991年までの5ヶ年計画で発電運転システムの検証を目指した現地実証実験(第Ⅰ期)を実施した。

1992年度からは、発電した電力の実用化を目的として、新たに電力会社9社が参画し計29社で「防波堤利用による波力発電の実用化に関する研究会」が設置された。同研究会では、大容量揚水試験および一般商用電力への接続試験(第Ⅱ期実証実験)と電力利用の種々のケーススタディ等の研究が行われた。また、第一港湾建設局では、「波エネルギー利用防波堤実用化調査委員会」を設置し、1993年度に空気室を5室から3室に改造し、3室の場合の防波堤に発生する圧力および応力等を現地観測データより解析し、発電出力等の諸データを分析することにより、より経済的な設計法等の検討を実施した。

本報告は8年間(表-1参照)にわたる研究のうち、既報¹⁾の続報として 第Ⅱ期実証実験について述べるものである。

* 正会員 運輸省第一港湾建設局

** 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

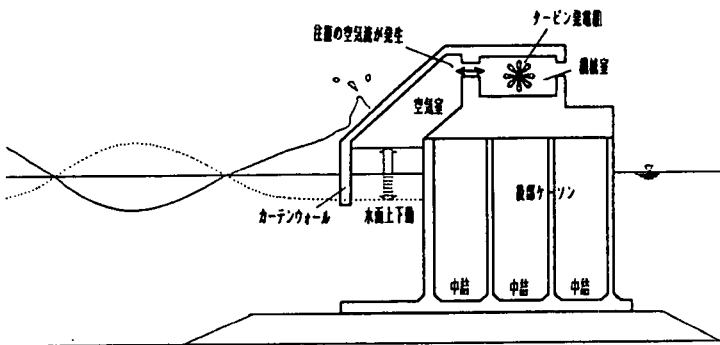
**** 非会員 (財)沿岸開発技術研究センター

表－１ 研究スケジュール

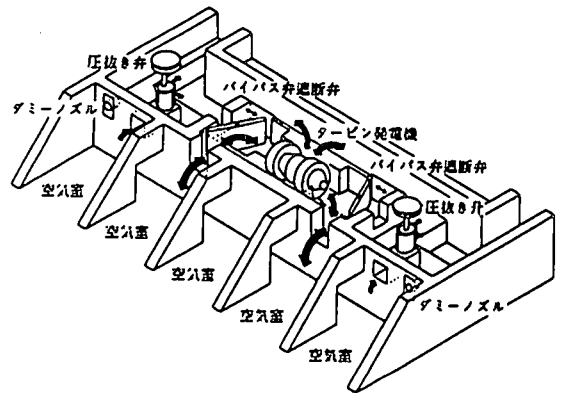
年度	第Ⅰ期実証実験					第Ⅱ期実証実験		
	昭和62年度	昭和63年度	平成元年度	平成2年度	平成3年度	平成4年度	平成5年度	平成6年度
設計	基本設計	構想設計						
施工	施工法検討	ケーソン製作・運付				ケーソン改造		
計測	計画シミュレーション検討	計画シミュレーション・機器設置	現地観測			現地観測		
発電	発電システム検討	解析処理システム検討	データ解析			データ解析		とりまとめ
電力利用	電力利用システム検討			データ解析		現地試験・観測		
研究課題	●耐波設計法の検証 ●空気室設計法の検証 ●熱力・波動法に基づいた発電システムの検証 ●発電システム設計法の検証 ●計測システムの検証 ●発電運転システムの検討					(系統連系実験) ●商用系統への連系に際しての影響評価および保護回路動作の検証 (大容量揚水試験) ●変動する電力に対する大容量ポンプの運転特性の検証 ●運転制御方法の検証		
	(空気室3室での検討) ●耐波安定性の検証 ●空気室設計法の検証 ●波浪と発電出力との関係の検証 (ケーススタディ) ●波力電力利用技術の検討							

2. 実証実験の概要

図－１は酒田港の波力発電ケーソン防波堤の発電原理を示したものである。波力発電ケーソン防波堤は、空気室と呼ばれる中空の部分とそれを支持する通常ケーソン部（後部ケーソン）で構成されている。空気室の前壁（カーテンウォール）は、波が進入できるように開口部をもち、そこから波が出入りする際に空気室内部の水面が上下することにより空気が圧縮・膨張し、空気室の上部に設けたノズルに往復空気流が発生する。この往復空気流を受けて一方に回転するウエルズタービン発電機を回転させて発電するものである（図－２参照）。酒田港では、水深18mの場所にこの防波堤があり、幅7m長さ20mの空気室に60kWのタービン発電機を設置して実験を行っている。



図－１ 波力発電ケーソン防波堤の発電原理



図－２ 機械室と制御装置（第Ⅰ期）

表－１に示すように、1991年度までの第Ⅰ期実証実験では、波力発電防波堤における耐波設計法の妥当性及び波浪と発電に関する「熱力・波動法」に基づく発電システム設計法の妥当性を確認^{2) 3)}しており、防波堤を利用した、波力発電システムの実用化につながるハード面での研究を完了している。

第Ⅱ期の実証実験では、ケーソン改造に伴い、防波堤利用による波力発電システムの実用化へ向けて、最適設計法、電力利用上の各種問題点など、検討、検証を行っている。その目的を要約すると以下ようになる。

- ①波力電力の商用電力系統への接続
- ②波力電力による大容量揚水ポンプの運転特性の検証
- ③空気室3室における最適設計法、空気室設計法の検証および発電システム保護対策装置の簡素化
- ④実験結果を踏まえた波力発電利用技術のケーススタディ⁴⁾

図-3に空気室2室を静水面上までコンクリートにより中詰めした第Ⅱ期実証実験の波力発電防波堤の概念図を示す。また、この改造に伴い、共同研究会ではダミーノズル、圧抜き弁（図-2参照）を封鎖するなど、制御方法の簡素化を計っている。なお、ケーソンを改造（空気室2室をコンクリートで中詰め）したのは、実験終了後のケーソンの強度確保が第一の目的であり、併せてタービンに比して大きすぎる空気室を小さくし、タービンと空気室の適合性を高めることを目的としている。実験終了後は、このケーソンが防波堤の隅角部に位置するため、消波工が前面に設置される予定である。

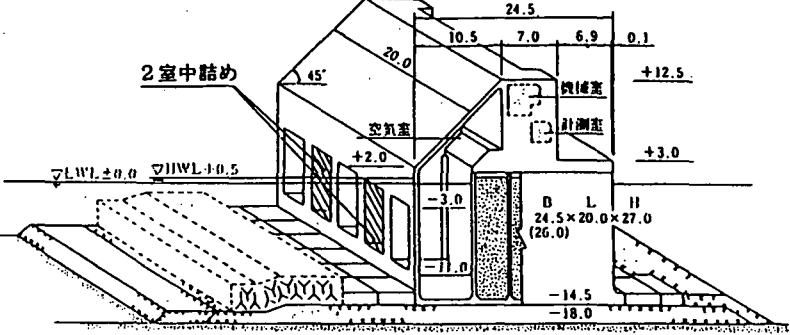


図-3 第Ⅱ期 波力発電ケーソン概要図（空気室3室）

3. 連系試験結果

(1) 試験の目的と方法

第Ⅰ期実証実験における波力電力利用実験は商用電力系統と切り離れた単独の電力利用系統を構成し、各種の機器・装置の運転を実施した。第Ⅱ期実証実験においては、波力電力を商用電力系統と連系することにより、離島用電力等の一般家庭用電力としての利用を実証することを目的に実施した。

商用電力系統への連系実験では、図-4に示すように、変動する波力電力を一度直流電力に変換（順変換）し、さらに商用電力系統と同品質の交流電力に変換（逆変換）する方法を採用した。したがって、陸上観測局（デモハウス）内にC.V.C.F方式の変換器を設置して実施しており、波力電力が系統へ連系された場合（逆潮流）の商用電力側の電圧、周波数等へおおよそ影響について調査を実施している。なお、連系に際しては、東北電力（株）の審査のうえ、実施したものである。

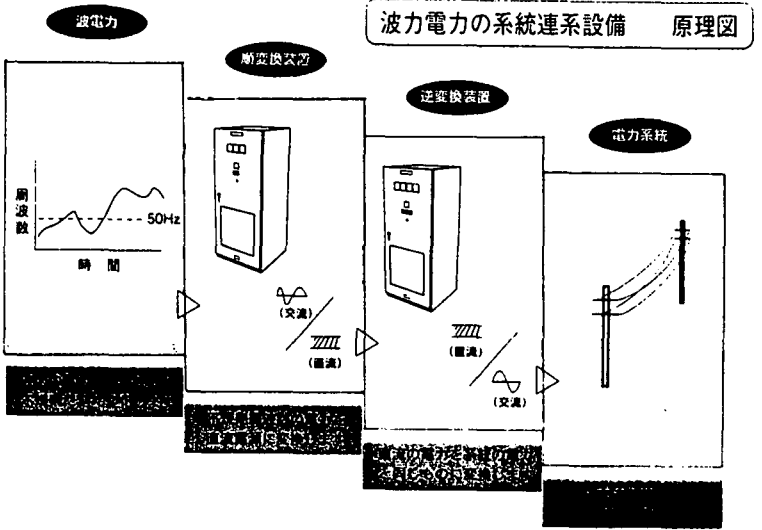


図-4 波力発電系統連系設備の概要図

(2) 実験結果

① 系統連系時の逆潮流量

平成6年3月より平成7年3月までに東北電力（株）の配電線へ逆潮流した電力量は、191kWhであった。この量は波力発電が行われ、連系運転が行われている時に、陸上観測局の室内電力を供給した後の余剰電力が商用電力の配電線へ送電された電力量である。また、実験中の最大逆潮流電力は、25.3kWであった。

② 連系前の電圧、周波数変動

電圧変動は、200Vに対し、 $\pm 2\%$ 以内であった。周波数変動は、50Hzに対し、 $\pm 0.5\%$ 以内であった。

③ 連系時の電圧、周波数変動

波力電力は急激に変化する電力であり、性質の違う電力が商用電力の中に系統電力量の1/10以上あれば、電圧や周波数が変動することになる。しかし、連系時において、電圧や周波数の変動はみられなかった。図-5に示すとおり、電圧波形に対して負荷が入った時に電流波形が立ち上がってくるが、その時でも電圧の変動は見られない。すなわち、電力変換装置の出力電力として逆潮流がスムーズに行われ、その時でも系統側に電圧や周波数の動揺はなかった。これは連系の電力を電力変換装置が徐々に上昇させていくためである。したがって、他の電力需要家が同じ送電線に接続されていても、波力電力による送電影響は見られないことを表している。

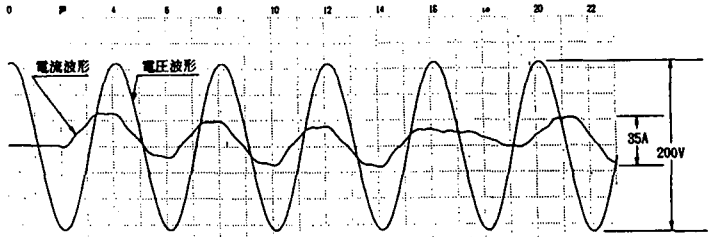


図-5 連系時の電圧波形（11.9kW送電時）

④ 連系中の電圧、周波数変動

波力の電力は、刻々変動しているものであるので、電力の変化が大きく変化した場合は電圧や周波数の変動につながる恐れがある。しかし、連系中の電圧や周波数は、連系前の変動値と変わりが無い。すなわち、電力変換装置の運転において、出力は系統の電力によく追従されて運転され、系統と同じ仕様の電力が逆潮流されていることがわかる。図-6にその電圧波形の例を示す。

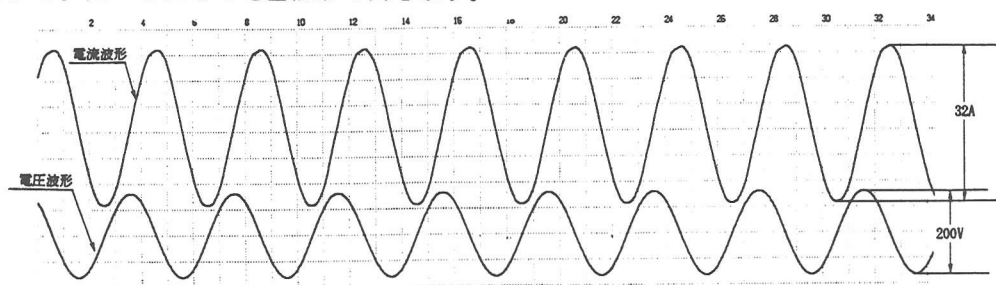


図-6 連系中の電圧波形 (15.3kW送電時)

⑤連系遮断時の電圧、周波数変動

連系運転中に故障や事故が発生した時は、瞬時に系統の配電線と解列する。その連系遮断時でも電圧や周波数の変動はみられなかった。図-7に示すとおり、負荷を遮断した時に電流波形が減少しているが、その時でも電圧の変動は見られない。

以上の実験の結果、通産省資源エネルギー庁のガイドラインにより決められている以下の条件を満足するもので、当初の目的を達成した。

①電力系統の供給信頼度（停電時間帯）および

電力品質（電圧、周波数等）に対して悪影響を与えないこと。

②電力系統との連係によって、公衆および作業者の安全並びに電力供給設備または他の需要家の電気設備に対して悪影響を与えないこと。

4. 大容量揚水試験結果

(1)試験の目的と方法

波力発電によって得られた電力の利用方法として、有力なものに、港内水質の向上のための海水交換システムや海浜の地下水を下げて砂浜の浸食防止を図るサブサンドフィルターシステムが考えられている。これらは、いずれもポンプを駆動させるものであり、小型の揚水システムについてはすでに第Ⅰ期の実証実験で実際に稼働させている。第Ⅱ期では、波力発電装置の容量に匹敵するような大型のポンプによって、揚水するシステムを念頭に置いた大容量揚水試験を行っている。

試験では、60kWの発電機に対し55kWの誘導電動ポンプを使用し、波力発電で実際にこれを駆動させている。写真-1は、陸上観測局の敷地内で実施した揚水試験の状況を示すものであり、小さなタンク（水槽1）から大きなタンク（水槽2）へ揚水を行っている。ただし、送水管路の損失（負荷）をバルブの開度を調整することによって変化させており、水は循環するようにしている。

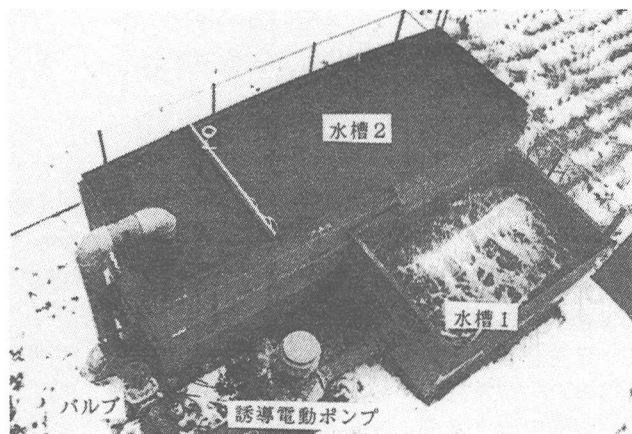


写真-1 揚水試験状況

この試験は、ポンプの駆動方法によって以下の2つに分けられる。

①インバーターによる定回転運転試験

インバーターによって、波力電力を一定電圧で一定周波数の交流に変換して、ポンプを駆動させることができる。したがって、インバーターを用いれば、設定周波数、すなわちポンプの回転数を変えることによって使用電力を変えることができ、周波数を変えて使用電力を発電電力以下に抑えれば、ポンプは確実に継続運転できる。実験では、こうしたシステムを実際に製作して、その性能を調べることを目的としている。

②発電機直結運転試験
インバーターを用いず、発電機とポンプを直結することができれば、より経済的と思われる。特に、発電機も

ポンプも回転機であり、その特性は類似しており、直結の可能性は高い。しかしながら、こうした直結運転では、起動時の突入電力の問題など種々の電気的な問題が予想されたため、この試験を行った。

(2)試験結果

①インバーターによる定回転運転試験

インバーターの出力周波数を徐々に増加させて所定の回転数でポンプを運転させることは、全く問題なく行うことができた。回転数の追従性もよくインバーターの出力周波数を変えるとポンプの回転数も変わり、消費電力も変化している。

図-8はポンプの性能曲線であり、それぞれのポンプ開度と回転数に対するポンプの揚程と流量である。図には、測定した結果も示しており、よく一致している。たとえば、周波数を70 Hzとすると1400rpmで回転し、揚程15mで流量0.06m³/sとなる。このとき、ポンプのパワーは揚程と流量から9kWとなり、このときのポンプ効率0.74であるので、12kWの発電量以上が必要となる。ポンプの運転はほぼ予想どおりであり、こうした運転にあまり問題がないことが確かめられた。

②発電機直結運転試験

直結運転では、ポンプの起動は発電量がある程度以上（10kW以上）あって、発電機の回転数が800から1,000rpmであれば可能であり、そのときの突入電力は予想されたものより小さかった。図-9は直結運転時の計測データ（上からポンプの圧力、発電機出力電圧、発電電力、タービンおよびポンプ回転数）を示したものである。回転数は大きな波形がポンプを小さい波形はタービンの回転数を示すもので、ポンプの回転数がタービン回転数とほぼ同様となり、直結運転が順調に進んだことを示すものである。したがって、直結運転は基本的に可能であるが、起動時の条件を緩和する電気的な方法など、さらに検討する必要がある。

5. 発電運転結果および空気室3室における検証

酒田港波力発電防波堤は、1989年10月3日に竣工し12月1日より本格的な運転を行っている。運転は、係員のいる1日7時間行われ、1995年3月まではほぼ順調に実施された。期間中有義波高8mを越える異常波浪が来襲しているが、機器は実験終了時まで問題なく作動している。

実験では様々な制御運転が行われているが、基本となるのは標準設定Ⅲと呼んでいるもので、負荷を抵抗器にしてタービン回転数1800rpmで60kWとなるものである。ただし、第Ⅰ期実証実験では、タービン発電機の容量が空気室に比べて大きいので、空気流調整弁の制御の他に圧抜弁やダミーノズルによって過剰な空気パワーを大気に開放して、利用していないことに留意する必要がある。

表-2は、代表的な発電状況の例を示すものであり、波パワー W_i 、空気パワー W_a 、タービンパワー W_t 、発電パワー W_g が示してあり、空気出力効率 EFF_a 、タービン効率 EFF_t 、発電機効率 EFF_g 、そしてその積である発電効率 EFF_{atg} が示してある。さらに、ダミーノズルで空気を大気に開放しているため、空気の利用率 E_{ta} とそれと発電効率との積である EFF_{atgo} も示している。各効率は、ほぼ設計どおりであり、発電効率もほぼ0.14から0.2であり設計値に近い。ただし、空気パワー利用率は、設計より小さく、空気流調整弁回りの空気漏れが予想以上に大きかったことが考えられる。表-3は、発電結果をとりまとめた例で、1990年度の結果である。やはり、12月と1月の平均発電量が大きく10月から3月の冬期では、平均10.6kWとなっている。

1992年度からは、第Ⅱ期の実験に入り、実験終了後の空気室の構造的な強度を考慮して空気室の2室をコンクリートで埋めた、空気室3室運転を実施した。この場合、空気パワーは減るが、ダミーノズルを閉じることによって、第Ⅰ期と変わらぬ発電量が期待されたが、空気流調整弁からの空気漏れの影響が大きく、発電量は低減している。ただし、この発電システムでは、あくまで全空気室を対象にした第Ⅰ期の発電が標準的な発電であることに留意すべきである。

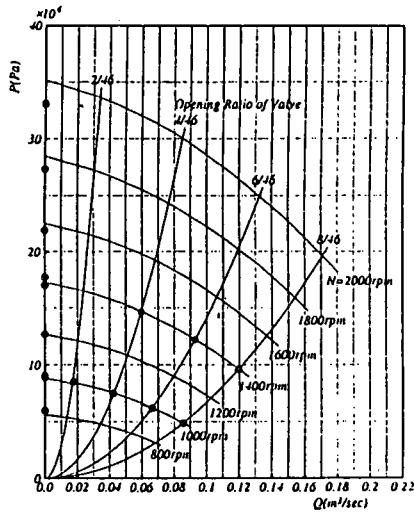


図-8 ポンプ揚程と流量

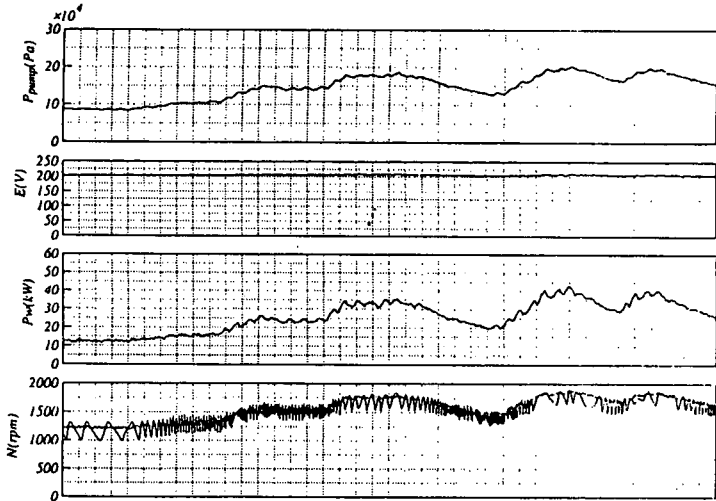


図-9 ポンプ・発電機直結駆動の計測データ

表-2 代表的な発電状況

	D A T E	H _{1/3} (m)	H _{max} (m)	T _{1/3} (s)	θ ₀ (°)	W ₁ (kW)	W ₂ (kW)	W ₃ (kW)	W ₄ (kW)	EFF ₁	EFF ₂	EFF ₃	EFF ₄ go	EFF ₅ ...	
(a)	12-Oct. 19, 1990 (標準設定Ⅲ)	2.44	3.87	7.09	290	369.7	179.4	25.2	23.3	0.485	0.360	0.390	0.924	0.063	0.175
(b)	14-Nov. 8, 1990 (標準設定Ⅲ)	3.01	5.09	7.87	304	539.2	317.9	39.9	36.4	0.590	0.342	0.367	0.912	0.066	0.197
(c)	16-Nov. 10, 1990 (標準設定Ⅲ)	4.83	7.69	9.70	304	1982	736.0	60.7	55.3	0.371	0.198	0.416	0.911	0.028	0.141
(d)	12-Oct. 28, 1990 (標準設定Ⅲ)	1.13	1.88	5.74	317	75.9	44.9	7.2	5.6	0.592	0.364	0.442	0.777	0.074	0.203

表-3 月別発電状況

Year/Month	'90/4	'90/5	'90/6	'90/7	'90/8	'90/9	'90/10	'90/11	'90/12	'91/1	'91/2	'91/3
(W) _{ave} (kW/m)	6.2	2.2	1.6	1.4	1.4	1.7	3.3	13.0	23.9	20.3	15.0	6.7
(W) _{ave} (kW)	4.62	3.05	1.94	2.59	1.99	4.24	6.03	10.65	13.34	13.25	10.88	9.73

第Ⅱ期実験における発電出力低下は、空気室圧力に明確に現れており、空気室圧力（正のピーク値の1/3最大値 $P^+_{1/3}$ ）を示した図-10によると、3室の場合は5室と比べると3割～4割程度小さく、波高が大きくなっても圧力がそれほど増加していないことが分かる。計算値は5室の場合と3室の場合の空気漏れを考慮した場合を示している。3室で空気漏れがないとした場合は、5室の場合とほぼ同じとなる。また、電力出力低下の原因としては以下の2つの理由が考えられる。

- ①空気流調整弁の弁周りの空気漏れ
- ②くしの歯状の空気室に対する波向きの効果

なお、長期間（6年間）の発電運転において、簡単なメンテナンスを行っただけで、タービン・発電機に全く問題がなかったことは特筆すべき点である。

5. おわりに

防波堤利用による波力発電の実用化に関する研究は、波力発電電力の商用系統への連系の成功をもって、当初の目的を達成した。これは、波力エネルギーを一般家庭電力へ利用できることを実証したもので、今後の波力エネルギー利用技術に大きく貢献するものと考えられる。

これまでの多年に渡る実証実験において、発電システム・計測システムは海上という過酷な条件のもと、大きな故障もなく順調に作動し現在に至っており、各種データの収録・解析が行われ貴重なデータを取得できた。さらに、電力利用法に関する研究においては、各種の基礎的実験を基に波力電力利用システムの有効性を確認しており、実用化へ向けた当面の課題はクリアーされた。今後は波エネルギー利用防波堤の普及による、波力発電技術の高度化が望まれる。

第Ⅰ期・Ⅱ期の8年間にわたる研究を終えるに当たり、関係者の方々の努力、「波エネルギー利用防波堤実用化調査委員会」（委員長：合田良實 横浜国立大学 教授）、「防波堤利用による波力発電の実用化に関する研究会」（座長：谷本勝利 埼玉大学 教授）、並びに共同研究各社の貴重なご助言・ご指導を頂いており、関係者並びに委員各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 合田良実ほか(1991): 波力発電ケーソン防波堤の実証試験結果、海洋開発論文集Vol. 7
- 2) 中田博昭ほか(1991): 波力発電ケーソン防波堤の耐波安定性に関する現地実験結果、海岸工学論文集第38巻
- 3) 中田博昭ほか(1992): 防波堤を利用した波力発電装置の現地実験結果、土木学会論文集No. 453/VI-20
- 4) 喜島恭彦ほか(1996): 防波堤利用による波力発電の実用化に関する研究(波エネルギー利用のケーススタディー) 海洋開発論文集Vol. 12

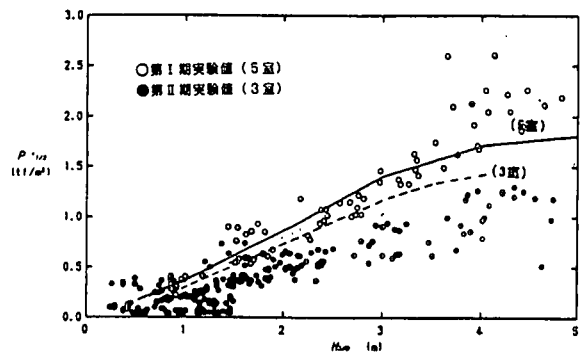


図-10 有義波高と空気室圧力