

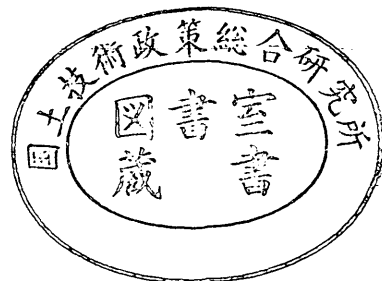
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 31 NO. 2 JUNE 1992

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I)

第31巻 第2号 (Vol.31, No.2) 1992年6月 (June.1992)

目次 (CONTENTS)

1. Numerical Simulation of the Shoaling of Irregular Waves Using a New Boussinesq Model
.....Okey Nwogu, Tomotsuka Takayama and Naota Ikeda3
(新ブシネスモデルによる不規則波の浅水変形計算
.....Okey Nwogu・高山知司・池田直太)
2. 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
.....高橋重雄・安達 崇・中田博昭・大根田秀明・加藤久雄・鹿籠雅純.....21
(Field Experiment of Wave Power Extraction Caisson Breakwater
-Date Analysis of Wave Forces and Power Conversion-
.....Shigeo Takahashi, Takashi Adachi, Hiroaki Nakada,
Hideaki Ohneda, Hisao Katoh and Masazumi Shikamori)
3. 単地点出力型スペクトル法による波浪推算システム
.....後藤智明・青野利夫.....55
(A Spectral Wave Prediction System For A Single Point
.....Chiaki Goto and Toshio Aono)
4. 箱型浮体の波浪による断面力の計算法
.....上田 茂・白石 悟・石崎崇志.....75
(Calculation Method of Forces and Moments Induced on Pontoon Type Floating
Structures in Waves
.....Shigeru Ueda, Satoru Shiraishi and Takashi Ishisaki)
5. 地形的圍繞の認識と空間規模との関係に関する研究
.....斎藤 潮・竹下正俊・上島頭司107
(A Study on Human Scale of Space Surround With Hills and Capes
.....Ushio Saitoh, Masatoshi Takeshita and Kenji Ueshima)

2. 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

高橋重雄*・安達 崇**・中田博昭***・
大根田秀明****・加藤久雄*****・鹿籠雅純*****

要 旨

港湾技術研究所では、波エネルギー変換装置の機能を有する波力発電ケーソンの開発を1982年から実施している。波力発電ケーソンは、通常の上部斜面ケーソンの前面に空気室と呼ぶ波エネルギー変換装置を持つケーソンであり、防波堤や護岸に用いることができる。これまでの研究によってエネルギー変換装置の設計法および防波堤としての耐波設計法が提案されている。

これらの成果を受けて、運輸省第一港湾建設局と沿岸開発技術研究センターを代表とする民間企業20社が、港湾技術研究所と協力して、山形県酒田港において波力発電ケーソン防波堤の現地実証実験を実施した。実験では、長さ20mの波力発電ケーソン1函を設置し、これに定格60kWのタービン・発電機を搭載して発電運転および計測を行っている。現地実験における発電運転と観測は1989年度冬期(12月)から1991年度冬期(1992年3月)まで行われ、入射波パワー、ケーソンの耐波安定性、エネルギー変換性能などの貴重なデータが得られた。

本報告は酒田港における実証実験の観測データを解析した結果を報告するものであり、主要な結論は以下の通りである。

- 1) 発電運転時の波と波パワーを明かにし、酒田港の波と波パワーの特性を把握した。また、波パワーの一般的特性についても検討し、従来使用している波パワーの簡易算定法の妥当性を示した。
- 2) 観測波圧や部材の応力から、すでに提案している空気室の設計波圧分布の妥当性を示した。また、合田式を準用した波力発電ケーソンの耐波設計法が適切であることがわかった。
- 3) 波力発電防波堤による発電状況を明らかにした。また保護対策装置等の制御装置を含めた波エネルギー変換装置の出力や効率、熱力・波動法に基づく数値計算によってほぼ妥当な値を予測できることを示した。

キーワード：防波堤、波エネルギー変換装置、現地実験、波浪観測、波力発電、波力

* 水工部 耐波研究室長

** 水工部 耐波研究室

*** 第一港湾建設局 新潟調査設計事務所長

**** 第一港湾建設局 酒田港工事事務所長

***** 第一港湾建設局 新潟機械整備事務所長

***** (財)沿岸開発技術研究センター 調査研究部長

2. Field Experiment of A Wave Power Extracting Caisson Breakwater - Data Analysis of Wave Forces and Wave Power Conversion -

Shigeo TAKAHASHI*
Takashi ADACHI**
Hiroaki NAKADA***
Hideaki OHNEDA****
Hisao KATOU*****
Masazumi SHIKAMORI*****

Synopsis

The Port and Harbour Research Institute has been developing a wave power converter named as a wave power extracting caisson. The wave power extracting caisson has an air chamber, where wave power is converted into air power. The air power activates a turbine and generator. This convertor is a concrete caisson to be used as a vertical breakwater with low wave reflection. The design method of the wave power extraction caisson breakwater has already been proposed based on the basic researches by the institute.

The First District Port Construction Bureau and the Coastal Development Institute of Technology cooperating with twenty private enterprises have conducted a field experiment of the wave power extracting caisson breakwater at Sakata Port in Yamagata prefecture. The Port and Harbor Research Institute also joined the experiment. The system was completed in the winter of 1989 and the power generation was conducted until March 1991. The experiment has been done very successfully.

In the experiment, incident waves, wave pressures, and converted powers were measured. This report describes the results of data analysis. The results of the field experiment confirmed the proposed design method of the system.

Key Words : Breakwater, Wave Power Converter, Field Experiment, Wave Observation, Wave Force

* Chief of Maritime Structures Lab., Hydraulic Engineering Div.

** Member of Maritime Structures Lab., Hydraulic Engineering Div.

*** Director of Niigata Investigation and Design Office, The First District Port Construction Bureau.

**** Director of Sakata Port Construction Office, The First District Port Construction Bureau.

***** Director of Niigata Machinery Office, The First District Port Construction Bureau.

***** Head of Investigation and Research Div., Coastal Development Institute of Technology.

目 次

要旨	21
1. まえがき	25
2. 現地実証実験の概要	25
2.1 実験の概要	25
2.2 測定および解析	30
3. 波浪の観測結果	31
3.1 観測波浪結果の概要	31
3.2 波浪と波パワーの特性	32
3.3 定常観測結果との比較	37
3.4 水圧波形から水位波形への変換	38
4. ケーソンの耐波安定性	39
4.1 空気室部材に作用する波圧と応力	39
4.2 堤体全体に作用する波力	42
5. 波エネルギー変換装置としての特性	42
5.1 代表的な発電状況	42
5.2 エネルギー変換時の各出力と効率	45
5.3 保護対策装置と回転数制御	47
5.4 実用機の発電予測	49
6. まとめ	50
参考文献	51
主要記号表	52

1. まえがき

二度にわたる石油危機以来、海の波のエネルギーは再生可能な自然エネルギー(renewable energy, natural energy)の一つとして注目されている。さらに近年では、化石燃料等の使用による温暖化など地球環境の問題がクローズアップされ、環境に対する負荷の小さい自然エネルギーに対する関心がさらに高まっている。

波エネルギー変換装置の開発は、内外の多くの機関で進められ、数多くの波エネルギー変換装置が考案されている¹⁾²⁾³⁾。しかしながら、実用化が期待できる装置は多くはない。これは波の変動性が問題であり、特に台風など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が困難であったことによる。防波堤は、厳しい波を防ぐためにつくられる構造物であり、波エネルギー利用を実用化するためには、波エネルギー変換装置を防波堤と一体化することが考えられる。

港湾技術研究所では、1982年より波力発電ケーソン防波堤の開発を進めている。波力発電ケーソン防波堤は、前面に空気室を有する特殊なケーソンからなり、防波堤本来の波を防ぐ機能に加え、波エネルギー変換装置の機能を併せ持つものである。空気室において波エネルギーは空気の流れのエネルギーに変換され、ケーソン上部の機械室に設けられたタービン・発電機により、空気のエネルギーを電気のエネルギーに変換するものである。防波堤内で波エネルギーを吸収・利用することにより反射波が小さくなり、ケーソンに作用する波力の低減も期待できる。

港湾技術研究所においては、1982年度から5か年の特別研究として波力発電ケーソン防波堤の基礎的研究を実施してきた。既に7編の研究報告^{4)~10)}を発表しており、その機能や耐波安定性を明らかにし、ケーソンおよび空気室の設計法を提案している。

また、(財)沿岸開発技術研究センターは電力、建設、造船、電機等の民間企業と1985、86年度に「波力エネルギー利用に関する総合調査」を実施し、波エネルギーの変換から利用までの全体を明らかにした¹¹⁾。

これらの成果を受けて、運輸省第一港湾建設局は(財)沿岸開発技術研究センターを代表とする民間企業20社と共同で、波力発電ケーソン防波堤の実用化に向けて、1987年度から5か年にわたり、山形県酒田港において波力発電ケーソン防波堤の現地実証実験を実施してきた。港湾技術研究所もこの現地実験に協力し、特に観測データの解析などを担当した。実証実験では、波力発電ケーソン防波堤を設置し、発電運転を実施するとともに、以下の

項目に関する計測を行った。

①波浪観測

波高計アレイによる波の方向スペクトル観測

②波力観測

ケーソンの各点に作用する波圧とケーソンの部材応力の測定

③発電計測

空気室内の水位や圧力、タービンの回転数、発電出力の計測

本報告は、特にこの観測データを解析し、波と波パワーの特性、防波堤としての耐波安定性、そして波エネルギー変換装置としての特性について検討している。酒田港の波力発電ケーソンや発電システムの設計法の詳細については、別途発表されている文献^{12)~20)}を参照されたい。

2. 現地実証実験の概要

2.1 実験の概要

(1)実験堤と発電装置

図-1は、実証実験の行われている酒田港の平面図である。波力発電ケーソンは、酒田港第二北防波堤に1箇所掘え付られた。実験データの観測および発電装置の制御は、実験堤から約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介して行っている。写真-1は、完成した波力発電ケーソン防波堤を示している。

波力発電ケーソンは、図-2に示すように外観は上部斜面型ケーソンであるが、前面に配置された空気室と呼ぶ中空の箱の部分とそれを支持する通常のケーソンからなる。防波堤の設置位置は水深 $h=18\text{m}$ で、設計波が $H_{1/3}=10.2\text{m}$ ($H_{\text{max}}=15.3\text{m}$)、 $T_{1/3}=14.5\text{s}$ と厳しい波浪条件のため、ケーソンは幅 $B_c=24.5\text{m}$ 、高さ 27.0m (天端高 $h_c=+12.5\text{m}$)、長さ 20.0m と大型である。ケーソンは鉄筋コンクリート製で、使用した材料の許容応力度は鉄筋が $\sigma_{ca}=2000\text{kgf/cm}^2$ 、コンクリートが $\sigma_{ck}=300\text{kgf/cm}^2$ である。また滑動安全率は1.15、転倒の安全率は2.07である。表-1に、設計に用いた波浪条件を示す。

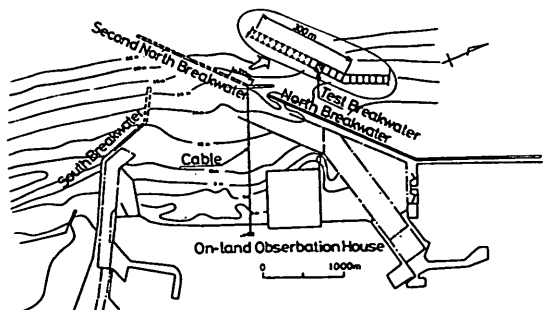


図-1 酒田港の平面図

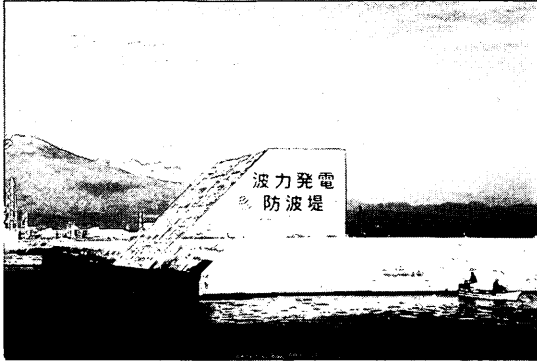


写真-1 波力発電ケーソン防波堤

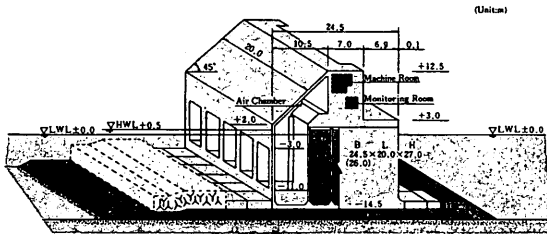


図-2 波力発電ケーソン防波堤

表-1 設計に用いた波浪条件

堤 体	設計最高波高	15.3 m
	設計有義波高	10.2 m
	設計周期	14.5 s
	波向き	25 deg
発 電	発電対象有義波高	1.0 ~ 5.0 m
	発電対象中心有義波高	2.2 m
	発電対象中心有義周期	7 s

空気室は幅 $B=7\text{m}$ （壁厚を考慮した有効厚さは 6.75m ）で、長さ方向には隔壁で5室に区画されているが、隔壁上部に設けられた通気開口部により5室の空気圧が同じになり、一体の空気室として稼動するようになっている。空気室の面積 A_w は、壁厚等を考慮すると約 115m^2 である。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、カーテンウォール下端から侵入する波による水面の上下動により空気を圧縮・膨張させて上部のノズルに空気流を作り出すものであり、いわゆる水柱振動型

(OWC: Oscillating Water Column Type) の波エネルギー一次変換装置である。

空気室で発生した空気流は、ケーソン上部の機械室中央部に設置されたタービン・発電機へ導かれ、タービンおよび発電機を回転させることによって発電を行う。空気室で発生する空気流は、波の上下動による往復流であることから、タービンとして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いる。ウェルズタービンは、直径 $R_t=1.337\text{m}$ のものを2台、発電機をはさむ形で同軸上に配置している。これはタービン・発電機の軸受に作用する軸方向力を相殺させるもので、タンデム型と呼ばれる。発電機は、200V同期発電機で定格 60kW 、最大回転数 3000rpm である。図-3にタービン・発電機の形状を示す。

発電装置は、有義波高 1m から 5m の波に対して発電運転可能なように設計されている。発電運転では、短時間のうちに不規則に変動する波（特に高波浪時）に対する運転制御や機器の保護が重要となる。本装置には、タービンへ流れる空気量を調整する空気流調整弁、過大な空気圧を低減する圧抜弁、緊急時にタービン・発電機を保護する緊急遮断弁の3種類の保護対策装置が設置されている。

空気流調整弁は、図-4に示す形状で、タービン回転数によって制御されている。弁の開度を全開から全閉まで 15° づつ5段階に変化させタービンに流入する空気量を調整することによってタービンの過回転を防止し、発電出力を安定化させる。また、空気流調整弁は発電運転の停止装置も兼ねており、運転停止時には弁を全閉にして空気流の全量を大気へ開放することにより運転を停止する。この弁の特徴は、発電停止時も含め常に空気室に対する開口部が確保されることである。これによって、常に波のエネルギーを空気のエネルギーに変換し消波することができる。また、異常な空気圧縮圧力の発生を防止することもできる。

圧抜弁は、図-5に示す形状の重力式の弁であり、重量を変えられる弁蓋およびこれを支持する筒からなり、作

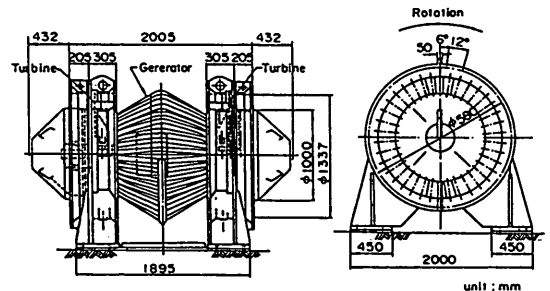


図-3 タービン・発電機

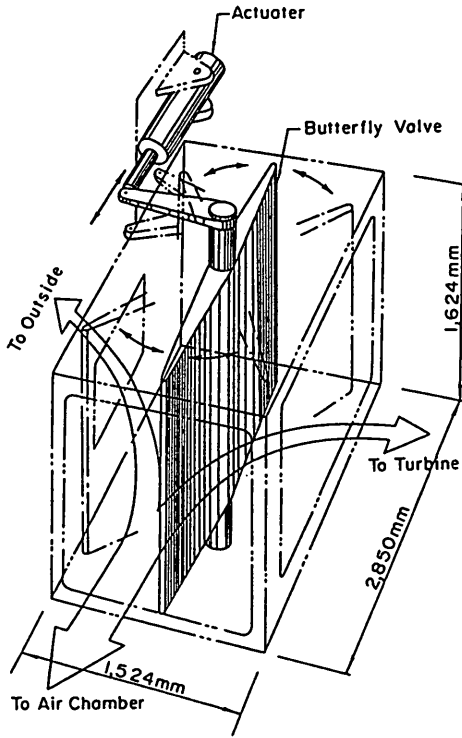


図-4 空気流調整弁

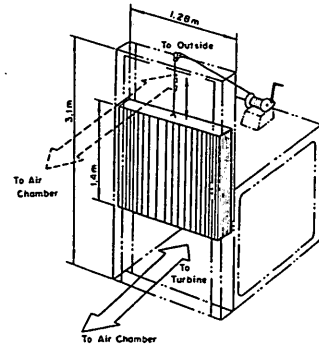


図-6 緊急遮断弁

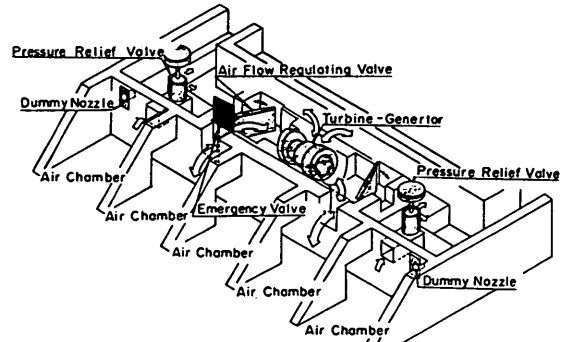


図-7 機械室

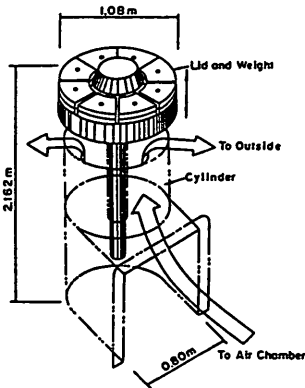


図-5 圧抜弁

動限界圧力を越える空気室内の正の空気圧力に対して圧力を低減し、発電出力を平滑化する。圧抜弁は、通常過大な空気圧から空気室やタービン・発電機を保護するために設けられるが、今回のシステムではタービン・発電機の定格が小さいため作動限界圧力を低く設定して比較的小さな波浪から作動するようにしている。機械室内には2台の圧抜弁が設置されているが、弁の作動時に急激な圧力低下による弁の振動を防ぐために2台の圧抜弁の作動限界圧力を変えている。

緊急遮断弁は、図-6に示す形状の重力落下式の弁で、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装置である。

なお今回の実験では、実験予算等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、必要な空気ノズル開口率を確保する目的で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そ40%以上を常時大気に開放している。図-7に機械室内の各機器の配置状況を示す。表-2に、実験装置の諸元を示している。

実験堤内には、機械室の下に計測室が設けられている。計測室は、ケーソンに設置された各種の計測器センサーの信号を増幅するアンプ類の他、発電機や保護対策装置の制御盤、変圧器が設けられている。発電された電力は変圧器で昇圧し、海底ケーブルで陸上観測局に送られる。また、発電の制御や計測データの解析も光ケーブルを介して前述の陸上観測局で行われる。

写真-2は、波力発電ケーソンに有義波高3m程度の波が作用しているところを港内側からみたものである。また、写真-3は、陸上監視局と照明タワーである。照明タワーには、1kWのライト40個が取り付けられ発電電力で

表-2 実験装置の諸元

空気室	$B=6.75\text{m}$, $l_0=20\text{m}$ $D_0=8\text{m}$, $d_c=3\text{m}$, $A_w=115\text{m}^2$
タービン	$2R_t=1.337\text{m}$ $A_t=0.6185\text{m}^2 \times 2$ $l_{t0}=55.0\text{kgm}^2 \times 2$
発電機	60kW (1800rpm-60kW)
空気流調整弁	close - open (1700rpm) (2000rpm) $c_{ev} \varepsilon \nu = 0.00892$ (1/112)
ダミーノズル	$A_n=0.0746\text{m}^2 \times 2$ $c_{ev} \varepsilon \nu = 0.00130$ (1/770)
圧抜弁	$A_p=0.481\text{m}^2 \times 2$ $c_{ev} \varepsilon \nu = 0.00671$ (1/149) $p_{p0} \nu = 1.34, 1.61\text{tf/m}^2$

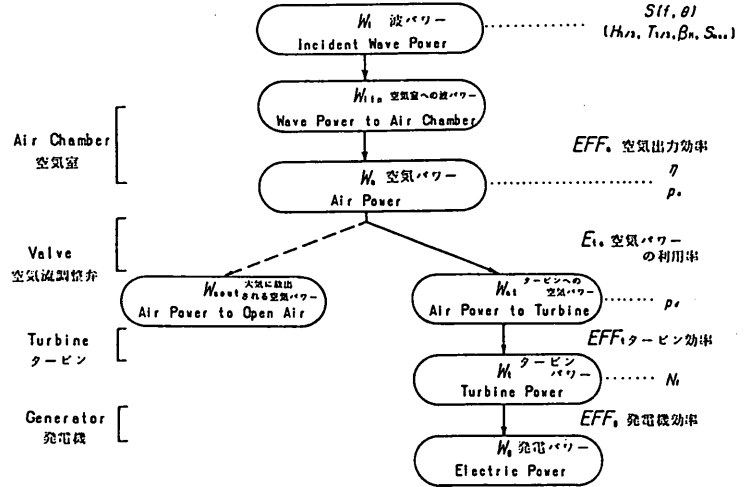


図-8 エネルギーの変換過程

照明されている。発電された電力は、基本的には抵抗によって消費されているが、写真のような照明などの電力利用試験にも用いられている。

(2)波力発電ケーソンによるエネルギー変換

図-8は、波力発電ケーソン防波堤によるエネルギーの変換過程を示している。すなわち、

①入射波パワー

W_i は幅1m当たりの平均入射波パワーを示し、これは測定された波の方向スペクトルから求められる。ここで、入射波パワーとは波エネルギーの輸送量であり、単位時間に波エネルギー変換装置に入射する波エネルギーを示す。 W_i は、ほぼ有義波高 $H_{1/3}$ の2乗と有義波周期に比例し、平均入射波向き θ_m や波の方向分散性によって変化する。 W_{im} は空気室に入射する平均波パワーであり、 W_i に空気室法線方向の長さ(ケーソンの長さと同じ、 $l_0=20\text{m}$)を乗じたものである。

②空気パワー

W_a は空気室で変換された空気パワーであり、空気室内の水位 η の変化率と圧力 p_a 、そして空気室の面積 A_w から求められる。波パワーから空気パワーへの変換は、主に空気室の幅 B と波長 $L_{1/3}$ との比や空気が流れるタービンの直径 R_t すなわち空気室に対するタービンの開口率によって決まる。ただし、本装置には弁やダミーノズルなどがあり、それらの開口率も考慮する必要がある。このほか空気室前壁のカーテンウォールの没水水深 d_c や空気室の高さ D_0 によっても多少変化する。

③弁による空気パワーの制御

W_{aout} は弁等から大気に開放される空気パワーを示し、 W_a は実際に発電に使用される空気パワーであり、ター

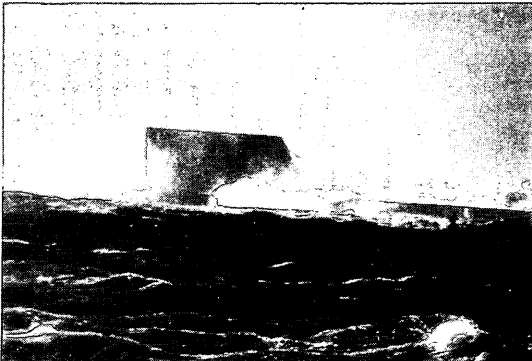


写真-2 波力発電ケーソンに來襲する冬期波浪

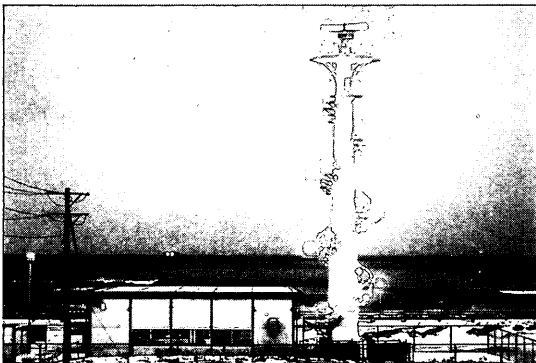


写真-3 陸上観測局と発電電力による40kWのタワーの照明

ピン前面で測定される差圧 p_d により求められる。もちろんこの二つの和は W_a である。 W_{at} と W_a の比は空気パワーの利用率 E_{ta} であり、タービンの開口部とダミーノズルや弁などの開口部の大きさの比によって決定され、弁の制御方法によって変化する。

④タービンパワー

W_t はタービンパワーであり、通常タービンの発生トルクと回転数から求められるが、本システムではタービン軸トルク計が設置されていないため、発電出力から逆算して求めている。タービンは、16枚翼ウエルズタービンであり、その基本特性はあらかじめ定常風による試験によって求めている⁹⁾³¹⁾³²⁾。タービンは、タービン翼に向かう空気流の迎え角 α_t によって効率が異なり、効率が最適となるように回転数の制御を行うことが重要である。

⑤発電パワー

W_g は発電パワーを示しており、電力計により直接測定される。発電機は、回転数が500rpmから励磁が入り200Vの電圧が発生する。電流は利用側の負荷によって決まるが、タービンから得られる出力以上の負荷にすると回転数が低下し、タービンの効率が最適でなくなったり発電が停止したりする。したがって、回転数に対して最適な負荷を与えるように制御している。回転数は、一波一波あるいは波の連なりによって変動するが、変動の程度は、タービン・発電機の慣性モーメント I_{lg} によって決まる。

なお変換過程における各段階の効率は、
 空気出力効率 : $EFF_a = W_a / W_{in}$,
 空気パワーの利用率 : $E_{ta} = W_{at} / W_a$,
 タービン効率 : $EFF_t = W_t / W_{at}$,
 発電機効率 : $EFF_g = W_g / W_t$

と定義される。ここで、 EFF_g はあらかじめ工場で検定されているため、後の解析ではこの検定結果を用いている。そして、最終的な発電効率 EFF_{atg} は、ダミーノズル等を設けない理想的なシステムでは

$$EFF_{atg} = EFF_a \times EFF_t \times EFF_g$$

となる。ただし、本システムではダミーノズルや圧抜弁等を設けているため、実質的な発電効率は空気パワーの利用率を考慮して

$$EFF_{atgo} = EFF_{atg} \times E_{ta}$$

となる。なお、これらの値は各瞬間における値でもあるが、特に断わらない限り20分間の平均的な値を用いている。

(3)発電運転の経緯

波力発電ケーソン防波堤は、1989年10月3日に竣工し、10月16日より試運転調整に入った。10月17日には有義波高3.5mの波に対して種々の制御で運転を行い、短時間で

はあるが定格である60kWの発電を記録している。その後、各制御機器の調整および測定解析装置の調整を行い、1989年12月1日から本格的な運転に入った。

発電装置の運転は、各種の弁の制御方法や負荷の設定方法によって種々の運転方法が考えられるが、1989年度冬期は回転数を抑えたできるだけ安全側の運転を行い、その結果を解析した後、1990年度の冬期に最適に近い制御方法で運転を行った。1989年度と1990年度の夏期には比較のため種々の制御方法でも運転を行っている。

表-3は、実証実験において実施した種々の制御方法を示すものである。

「標準設定I (ST I)」は、発電出力や回転数を低めに設定した安全側の制御方法であり、1989年12月から1990年2月まで行った。

「標準設定II (ST II)」は、空気流調整弁の制御をやや高回転側にして出力を高めた制御で、1990年3月の運転方法である。

「標準設定III (ST III)」は、1990年度の冬期に行った負荷および各弁装置の制御をより高出力となるようにした制御方法である。標準設定IIIでは、発電出力(投入負荷)はタービン回転数の3乗に比例し、1800rpmで定格の60kWの出力となるように制御している。空気流調整弁の制御は、タービン回転数が2000rpmを越えると

表-3 発電運転制御方法

設定名	発電機負荷	圧抜弁	空気流調整弁	J' I'-J' b	実施日
標準設定 I (ST I)	60kW-2000rpm	0.65b 1.08tf/a*	1500-1800rpm 15a	開	1989.12 1990.3.3 *を除く
標準設定 II (ST II)	60kW-2000rpm	0.65b 1.08tf/a*	1700-2000rpm 15a	開	1990.3.3 1990.3.29
標準設定 III (ST III)	60kW-1800rpm	1.34b 1.61tf/a*	1700-2000rpm 12a	開	1990.9.14 1991.3.31
弁開度一定 (BVO)	60kW-2000rpm	0.65b 1.08tf/a*	開度一定	開	0 1990.1.11 1990.1.16
負荷一定 (CC)	負荷一定	0.65b 1.08tf/a*	1500-1800rpm 15a	開	0 1990.1.17 1990.1.19
圧抜弁開 (PVC)	60kW-2000rpm	閉	1700-2000rpm 15a	開	1990.3.29 1990.5.11
J' I'-J' b 閉 (DNC)	60kW-2000rpm	閉	1700-2000rpm 15a	閉	1990.5.11 1990.8.3

弁が一開度開き、1700rpmより低下すると一開度閉じる。「弁開度一定 (BVO)」, および「負荷一定 (CC)」は、特殊な運転によりそれぞれ空気流調整弁, タービン・発電機の特性を明らかにするものであり, 日を限って実施している。

また、「圧抜弁閉 (PVC)」および「ダミーノズル閉 (DNC)」もそれぞれの装置の特性を明らかにするものであるが, 夏期の波高が小さいときにできるだけ出力を大きくするためにとられた制御方法である。

発電装置の運転は, 年末年始等の休日を除いて通常火曜日から日曜日の午前9時から16時までに行っている。また, 1989年度から1990年度夏期は有義波高3.5mを警戒水準の有義波高と考え, 4.0m以上は原則的に運転を停止している。ただし, 有義波高が急激に増大しないことを確認した場合は4.0m以上でも運転している。1990年度の冬期には, 有義波高4.0mを警戒水準の有義波高と考え, 初期の設計通り5.0mまでの波に対して発電運転を行った。

本報告では, 発電運転に関してはこれらの実験結果のうち, 標準的な制御である「標準設定III」の結果について述べる。

2.2 測定および解析

実証実験では, 第1章で述べたように波浪観測, 波力観測そして発電計測を行っている。表-4は, 計測の内容をまとめたものである。以下に各観測とその解析の内容について述べる。

(1)波浪観測と解析

波浪観測の目的は, まず発電時の波の状態を把握することである。観測では, 通常行われている波高, 周期等の他, 波力発電ケーソンに入射する波パワーを正確に算定するため, 方向スペクトルを含めた波パワーの観測を行った²²⁾²³⁾²⁴⁾。波浪観測に用いる装置は, 周辺構造物の反射波等の影響を少なくするため, 図-9に示すように波力発電ケーソンが設置されている位置から防波堤法線延長上275mの位置に設置した。波浪観測装置は1台の超音波式波高計と3台の水圧式波高計のアレイとして波の位相差から方向スペクトルを観測した。それぞれの波高計は水深-17.5mの海底に設置された, 一辺が20.8mの正三角形の平面形状で高さ1.5mの波高計架台に取り付けられている。その三角形の架台の中心に超音波式波高計, 三辺の各頂点には水圧式波高計が取り付けられている。

計測されたデータは防波堤を経由して光ケーブルで陸上の観測局に伝送され, 1時間毎に毎正時10分前から10分後までの20分間のデータを2Hzのサンプリングでパソコンに収録し, リアルタイムで解析処理を行った。解析

表-4 計測の内容

調査名	調査項目	計測事項
波観測	入射波	波高, 周期, 方向スペクトル, 波パワー
波力観測	耐波安定性	波圧, 空気圧, 兼圧力 鉄筋応力
発電計測	エネルギー変換	空気出力, 空気室水位, 圧力 発電出力, タービン回転数 保護対策装置の挙動

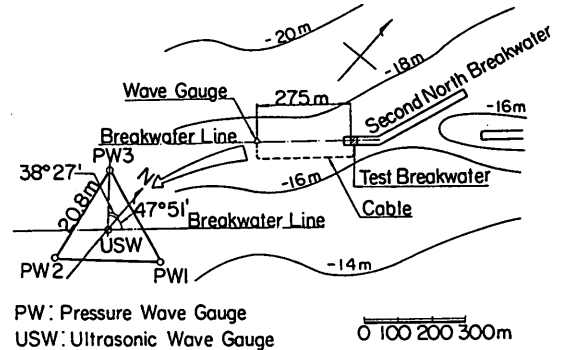


図-9 波高計の配置図

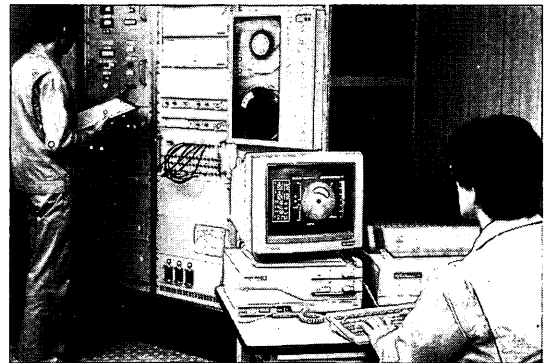


写真-4 陸上観測局における観測状況

は, 通常のゼロアップクロス解析による有義波高や周期の算定の他に, 拡張最尤法 (EMLM)²³⁾やベイズ型モデル法 (BDM)²⁴⁾²⁷⁾による方向スペクトルや波向きの解析, 防波堤に入射する波パワーの算定を行った。なお, 方向スペクトルの解析は, 処理時間の制限からパソコンによるリアルタイム解析ではEMLMを用い, 代表的なデータについてのみBDMによる解析を行った。写真-4は, 陸上観測局内の状況であり, パソコンには方向スペクトルが示されている。

なお, 波浪観測データは, 上述したように発電運転時の波を把握するために行っているが, このデータを基に

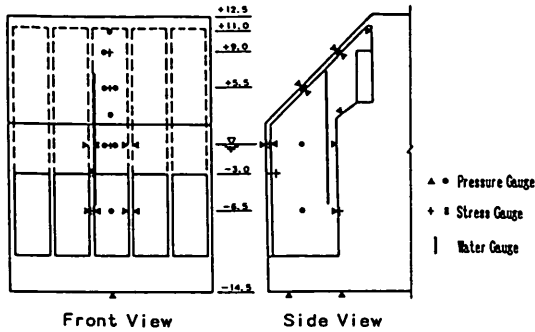


図-10 波圧計・鉄筋計の配置図

以下の検討も実施している。

- ①酒田港の波浪特性の把握(方向スペクトル, 年間変動)
- ②波パワーの一般的特性の把握と簡易算定式の妥当性の検証
- ③波と波パワーの観測上の問題点とその解決法

(2)波力観測と解析

波力観測では、まず堤体に作用する波圧と揚圧力を測定し、耐波設計法の検証を行った。空気室部材については、空気室内の各部材に作用する波圧を測定し、模型実験等によって決定した空気室の設計波圧分布の検証を行い、さらに空気室の部材に発生する鉄筋応力を測定し、部材の安定性を検証した。

波圧や部材応力の計測は、図-10に示すように波圧計20点、鉄筋(応力)計20点(ただし、伝送チャンネル数の制限により鉄筋計は20点のうち10点を選定して計測した)、揚圧力計2点により行った。計測されたデータは、海底ケーブルで陸上局に送られ、代表的な測点についてはパソコンでリアルタイム解析するとともに全測点のデータをデータレコーダに収録し、有義波高が5mを越えた場合を中心にミニコンで別途詳細解析を行った。データのサンプリング周波数は標準的に20Hzであるが、波高の大きい場合には最大100Hzにしている。データの長さは20分である。

なお、ケーソンの部材の設計法や全体の耐波設計法は、波力発電ケーソンに関する基礎的研究(港湾技術研究所報告、波エネルギーに関する研究第7報、1987¹⁰⁾)に基づいている。

(3)発電計測

発電計測の目的は、波力発電が実際どのようにできるのか、発電の状況を明らかにすることである。また、発電システムは、すでに提案されている「熱力波動法」とよぶ計算に基づいて設計されている。したがって、発電計測で得たデータをこの計算値と比較することによって、

設計法の妥当性を検討することができる。

発電計測では、空気室内に設置したステップ式波高計と波圧計で空気室内の水位や空気圧力を測定した。またタービン前面に設置した差圧計でタービン前後差圧を測定し、さらにタービン回転数、発電電力および空気流調整弁や圧抜弁の開度等を測定している。観測されたデータは陸上観測局のパソコンでリアルタイム処理される。データのサンプリング周波数は5Hz、長さは20分間である。

なお、発電システムの設計の基本である熱力波動法については、港湾技術研究所報告(波エネルギーに関する研究、第6報)⁹⁾に詳しく説明している。

3. 波浪の観測結果

3.1 観測波浪結果の概要

図-11は、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_m 、入射波パワー W_i 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30kW/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($\beta_m = 0^\circ$)のNW方向が多いようである。ただし、有義波高がおよそ0.5m以下になると波向き観測に用いている水圧式波高計で海面の水位変動を適切に計測できなくなるため、測定値の変動幅がかなり大きくなっている。代表的な気象擾乱と波向きの変化とについて見ると、低気圧が発達しながら本州に沿って日本海を通り東北地方北部から北海道付近を通過する場合、まず波向きがNWからW方向へと変化して有義波高が増大し、W方向のまま急激に大きくなり、その後NWへと戻る。そしてNW方向でさらに発達する場合としない場合があるが、NW方向の波が比較的長く続き波高が次第に減衰していくケースが多いようである。

入射波パワーは波高の2乗と周期の1乗に比例するた

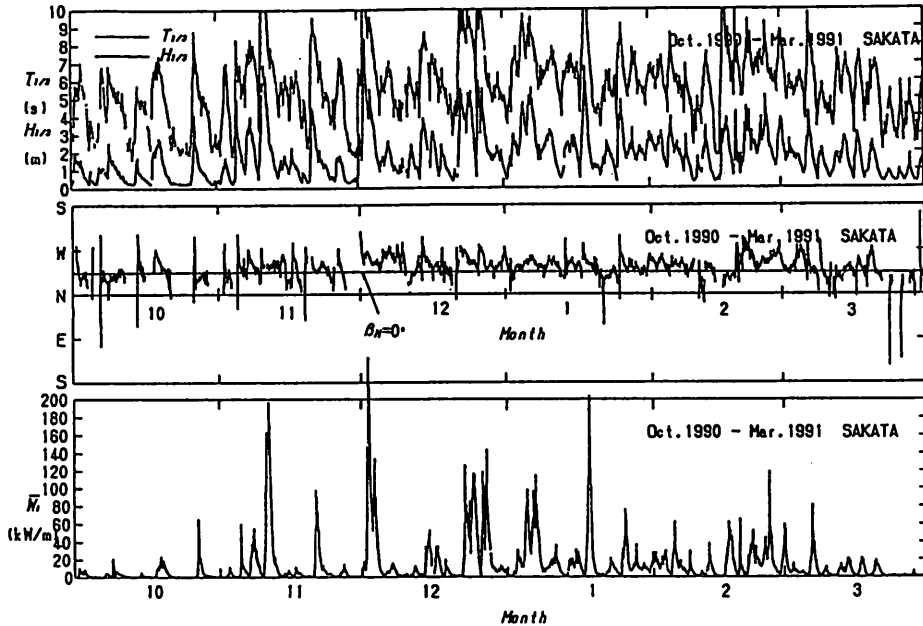


図-11 1990年度冬期の波浪の変化

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。

3.2 波浪と波パワーの特性

(1)有義波高, 周期と波向き

図-12は、1990年度冬期(1990年10月~1991年3月)の有義波高の出現頻度分布を示している。有義波高は

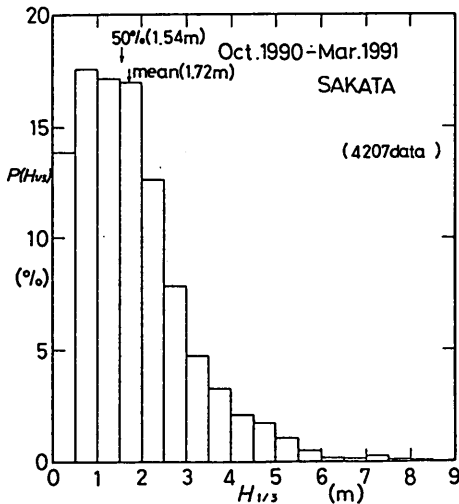


図-12 有義波高の出現頻度分布

0.5~1.0, 1.0~1.5, 1.5~2.0mの出現頻度が大きく、それぞれ17%程度である。出現頻度の累積が50%となるのは1.54mであり、この期間の平均値はこれよりやや大きい1.72mである。有義波高が5mを越えるのは全体の2%程度であり、有義波高0.5m以下の静穏な時間の割合は約13.8%である。

なお今回の実験堤の波エネルギー変換装置の設計においては、1970~1982年冬期(10月~3月)の定常波浪観測結果の平均値を用いている。すなわち、この期間の有義波高の平均値は1.70m、出現頻度の累積が50%となるのは有義波高1.35mである。したがって1990年度の観測結果は、有義波高の平均値についてみるとほぼ設計に用いた値と等しいが、出現頻度の累積が50%となる有義波高は1990年度の方がやや大きい。

図-13は、横軸に有義波周期 $T_{1/3}$ を、縦軸に有義波高 $H_{1/3}$ をとり、1990年度冬期の有義波高と有義波周期の結合分布を示している。図には出現頻度が1%および5%を超えるものについて線で囲んで示している。酒田港においては、波浪をもたらす気象擾乱が限定されており、有義波高と有義波周期は非常に相関が高く、有義波高の増大とともに有義波周期も増大する。平均的にみると有義波高と周期は図中に示している波高と波長の比 $H/L_0 = 0.03$ の曲線にはほぼ一致する形で分布している。

図-14は、1990年度冬期の波向きと有義波高の結合分布を示している。図には出現頻度が1%および5%を超え

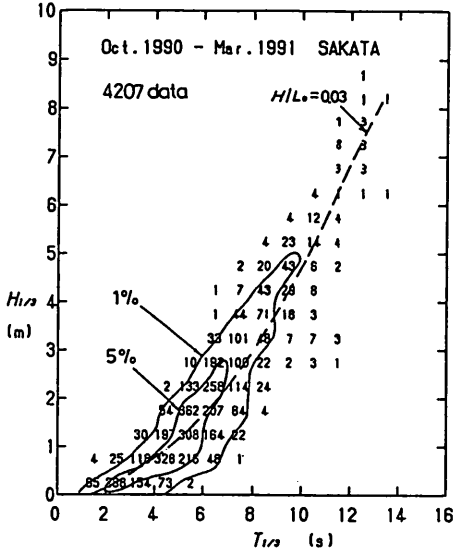


図-13 有義波高と周期の結合分布

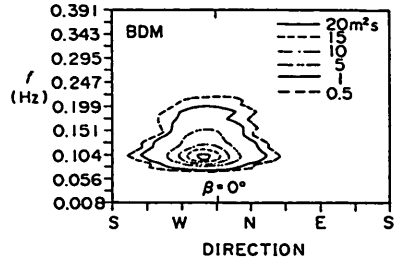


図-15 方向スペクトル

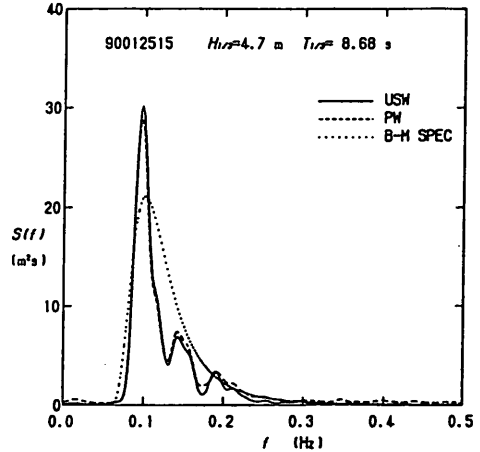


図-16 周波数スペクトル

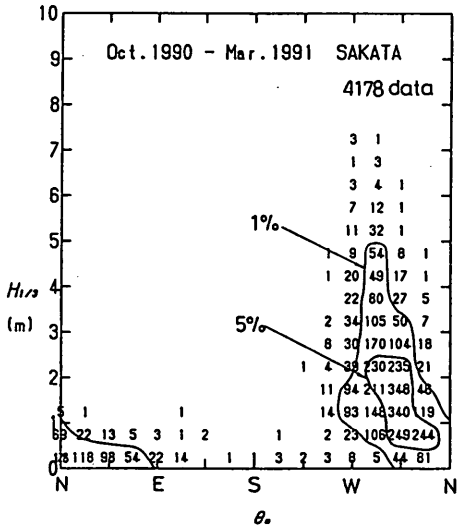


図-14 有義波高と波向きの結合分布

るものについて線で囲んで示している。波向きは、防波堤にはほぼ直角に入射するNW方向が最も多いが、有義波高が大きくなるとWやWNW方向が多くなる傾向が見られる。有義波高が1m以下では、波高計の測定精度が悪くなるため波向きのばらつきが大きくなっている。

(2)波のスペクトル

a) 方向スペクトル

図-15は、1990年1月25日15時の波の方向スペクトルを示している。図には、BDM²⁵⁾により計算した方向スペクトルを、横軸に方位、縦軸に周波数をとって、スペクトル

ル密度の等高線で表している。この時は有義波高4.7m、周期8.2s、平均波向き303°である。この他のケースについても、方向スペクトルの形状はほぼ全般に楕円ないし円形に近い形状でやや低周波側にピークがあり、ピーク方向からおおよそ±45°内にエネルギーの大半が分布している。また、強風により波が急激に発達した場合に、スペクトルのピークが二山型となって現われることがある。

b) 周波数スペクトル

図-16は、横軸に周波数 f を、縦軸にスペクトル密度 $S(f)$ をとり、1990年1月25日15時の周波数スペクトルの分布を示している。図中には実線で超音波式波高計のスペクトル：USWを、破線で水圧式波高計3点の平均スペクトル：PWを示している。また点線は、観測有義波高と有義波周期から次式で算出した修正Bretschneider-Mitsuyasu型（修正B-M型）スペクトルを示している。

$$S(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-5} * \exp[-0.75 (T_{1/3} f)^{-4}] \quad (1)$$

周波数スペクトルはこの図からわかるように、実測スペクトルと修正B-M型スペクトルは分布形状は比較的似ているが、実測の方がスペクトルのピークが非常に鋭

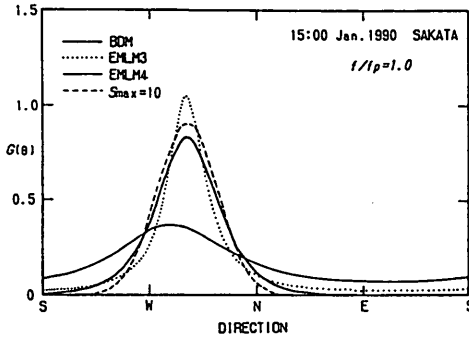


図-17 方向関数

くなる傾向が見られ、やや低周波側にエネルギーが集中するようである。この傾向は他のケースについても言え、全般に高周波側のエネルギーがやや少なくピーク付近に集中している。

c) 方向関数

図-17は、1990年1月25日15時の方向関数を示している。図中には、スペクトルピーク周波数 f_p におけるBDMで計算した方向関数を示している。また同時に方向集中度パラメータ $S_{max}=10$ の光易型方向関数も示している。同図にはEMLM3とEMLM4の方法でパソコンによって計算した方向関数も示している。ここでEMLM3は水圧式波高計3点のデータをEMLMで解析したものであり、EMLM4は超音波式波高計も含めた4点のデータによるものである。EMLM4による方向関数は、水圧式と超音波式という二種類の異なった形式の波高計に基づいているため、主方向のエネルギーが低くなり反対方向の陸側からのエネルギーがかなり大きくでている。EMLM3では、主方向のエネルギーはBDMによる値に比較的近いが、陸側からのエネルギーを無視できない。この程度の誤差でも入射波パワーの測定にかなり影響することに留意する必要がある。

BDMの計算値と $S_{max}=10$ の線を比較すると、計算値の方がピーク付近でやや小さく、値が小さいところでやや大きくなっているがほぼ形状が一致しているといえる。波高が1m以下と小さい場合などを除けば、この他のケースでも若干の変動はあるが $S_{max}=10$ にほぼ一致している。

(3) 波パワーと有義波高・周期 (波パワーの簡易算定式)

a) 標準スペクトルにおける波パワーの算定

波エネルギー変換装置に入射する1m当りの波パワー W_i は、一般に有義波高と有義波周期によって次式で簡易的に表される²¹⁾。

$$W_i = \kappa H_{1/3}^2 T_{1/3} \quad (\text{kW/m}) \quad (2)$$

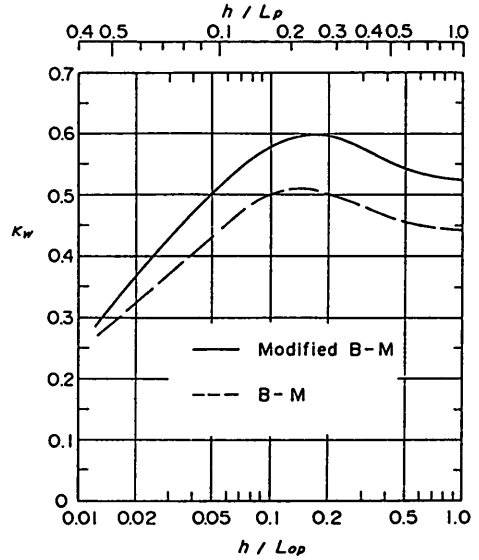


図-18 パラメータ κ_w の計算値

$$\kappa = \kappa_w \kappa_d' \cos \beta_M \quad (3)$$

ここで $H_{1/3}$ はm、 $T_{1/3}$ はsの単位である。また κ_w は周波数スペクトルの形状や水深の影響を表す係数、 κ_d' は波の方向分散による低減係数、 β_M は波エネルギー変換装置への波の入射角(防波堤法線に直角方向と中心波向きのなす角)である。 κ の値は酒田港の波力発電ケーソンに対しては平均的に0.45程度である。

図-18は、標準的な周波数スペクトルとして従来使用されている、B-M型と修正B-M型について κ_w を計算した結果である。B-M型の場合には、 κ_w は沖合で0.44、水深とスペクトルピーク周期における沖波波長の比 h/L_{op} が0.15で κ_w の値は0.51となる。修正B-M型では波パワーが大きくなり、沖合で $\kappa_w=0.52$ 、同様に $h/L_{op}=0.15$ で $\kappa_w=0.60$ となる。

図-19は、波の方向分散性と波パワーの関係 κ_d' を示すものである。ここでも二つの標準的なスペクトルについて計算を行った。ただし、方向関数としては光易型方向関数を用い、光易の方向集中度パラメータ S_{max} と入射角 β_M を変えて示している。

上述の関係式および計算値から入射波パワーを簡易的に算定することができる。例えば、 $H_{1/3}=2\text{m}$ 、 $T_{1/3}=7\text{s}$ で修正B-M型のスペクトルを持った $S_{max}=10$ の波が、 $h=20\text{m}$ の地点に設置された波エネルギー変換装置に $\beta_M=30^\circ$ で作用する場合、 $\kappa_w=0.6$ 、 $\kappa_d'=0.85$ であり式(2)から入射波パワー $W_i=0.6 \times 0.85 \times \cos 30^\circ \times 2^2 \times 7=12.4 \text{ kW/m}$ と計算される。

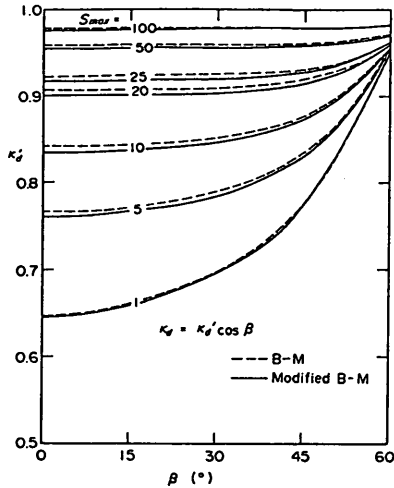


図-19 パラメータ κ_d' の計算値

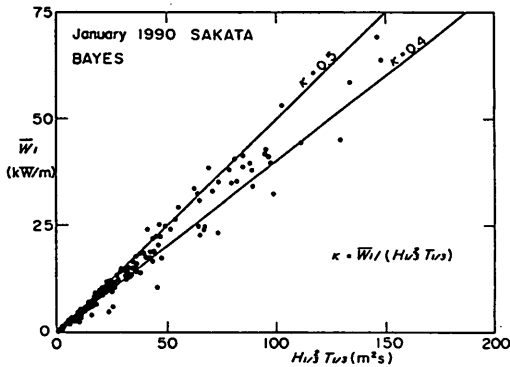


図-20 パラメータ κ の測定値

b) 測定値における κ

図-20は、BDMによる方向スペクトルから求めたケーンに入射する平均入射波パワー W_i をプロットしたもので、横軸に有義波高の2乗と有義波周期の積をとっている。この縦軸と横軸の比が κ の測定値となる。なお、計算に用いたデータは1990年1月のデータである。 κ の測定値は波向き等によって変化し、ほぼ0.4から0.5程度の値となる。従来、波エネルギー変換装置の設計において簡便的に κ の値を0.5として有義波高の2乗と有義波周期の積から波パワーの算定を行っているが、ほぼ妥当な値であることがわかる²⁵⁾。

図-21は、波向きを考慮しないで全ての波の成分が波エネルギー変換装置に対して直角に入射した場合の波パワー、すなわち周波数スペクトルのみから求めた波パワー W_{ief} をプロットしたものである。横軸には、有義波高の2乗と有義波周期の積をとっている。この縦軸と横軸の比が κ_w の測定値となる。計算に用いたデータは図-20と

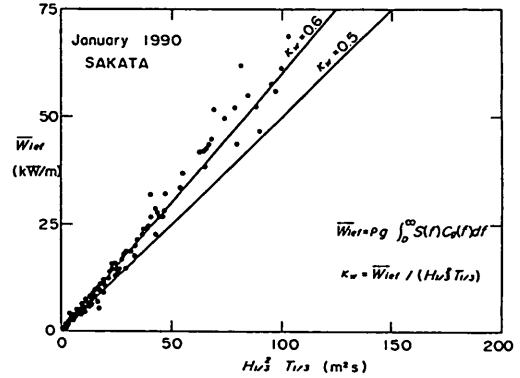


図-21 パラメータ κ_w の測定値

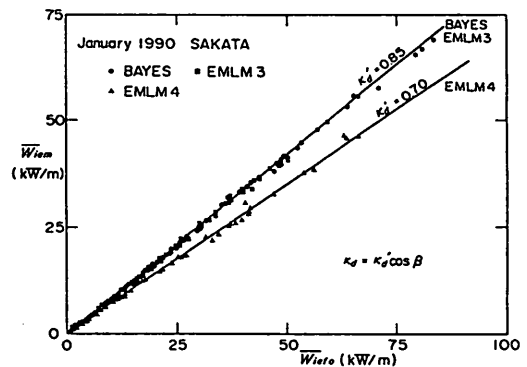


図-22 パラメータ κ_d' の測定値

同様に1990年1月のデータである。 κ_w の値はややばらついているが平均的には0.6程度である。すなわち κ_w はかなり大きく修正B-M型スペクトルの値に近い。

図-22は、縦軸に平均波向きのずれを考慮しない入射波パワー、すなわち平均波向きが常に波エネルギー変換装置に対して直角に入射する方向であると仮定した場合の波パワー W_{iem} 、横軸にはさらに波の方向分散性による低減を考慮しない（長波峰の波でかつ波向きが直角と仮定した場合）波パワー W_{iero} をとり、1990年1月のデータをプロットしたものである。この縦軸と横軸の比が波の方向分散による低減率を表す係数 κ_d' の測定値となる。なお、図中のデータは、 W_{iem} をBDM, EMLM3, EMLM4の3通りの解析法により求めている。BDMとEMLM3で求めた κ_d' の値はほぼ0.85程度で一定である。これはおよそ $S_{max} = 10$ の場合の値に相当しており、既に述べた実測された方向関数の形状とも一致している。ただし、EMLM4で求めた κ_d' の値はこれより小さい0.7程度となる。これは、既に述べたように方向関数の推定精度に問題があるためである。

なお、上述の検討に使用した各波パワー W_i , W_{ief} , W_{iem}

そして W_{iero} は測定された波の周波数スペクトル $S(f)$ や方向関数 $G(f; \theta)$ によって以下の式から計算される。

$$W_i = \rho_w g \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \int_0^{\infty} S(f) G(f; \theta) C_g(f) \cos(\theta + \beta_M) df d\theta \quad (4)$$

$$W_{ier} = \rho_w g \int_0^{\infty} S(f) C_g(f) df \quad (5)$$

$$W_{iem} = \rho_w g \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \int_0^{\infty} S(f) G(f; \theta) C_g(f) \cos \theta df d\theta \quad (6)$$

$$W_{iero} = \rho_w g \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \int_0^{\infty} S(f) G(f; \theta) C_g(f) df d\theta \quad (7)$$

ここに、

$$\theta_{max} = \pi/2, \quad \theta_{min} = -\pi/2 \quad (8)$$

$C_g(f)$: 波の群速度

ρ_w : 海水の密度

g : 重力加速度

β_M : 波エネルギー変換装置に直角方向と平均波向ききのなす角

陸上観測局でのパソコンによるリアルタイム解析では、入射波パワーを計算するにあたって、方向スペクトルから直接波パワーを算定する方法、および測定された周波数スペクトルから求まる波パワー W_{ier} と入射角 β_M を用いて次式により求まる入射波パワーの計算も行っている。

$$W_i = \kappa_d' \cos \beta_M W_{ier} \quad (\text{kW/m}) \quad (9)$$

ただし、上述の観測結果から $\kappa_d' = 0.85$ とした。この方法は、方向スペクトルが測定できないが波の平均波向きがわかるときには有効である。

(4) 酒田港の波パワー

図-23は、有義波高と波力発電ケーソンに入射する幅1mあたりの入射波パワー W_i の関係を示している。図中の実線は、実験堤の設計において「熱力・波動法」による発電予測計算の入力条件として用いた波パワーの推定値である。ただし、この推定値は波の方向分散性の影響は考慮しているが、波パワーが最も大きい波向き、すなわち $\beta_M = 0^\circ$ の場合である。また測定値は波向き別に記号を変えてプロットしており、波向きが大きくなるほど波パワーは小さくなっていることがわかる。そして、推定値の実線がほぼ測定値の上限となっている。波力発電ケーソン全体に入射する波パワー W_{in} は、例えば発電対象波の中心有義波高2.2mで360kW、有義波高4mでは1340kWとなる。

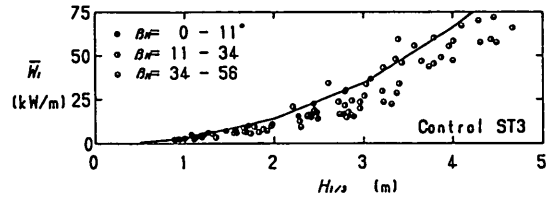


図-23 有義波高と入射波パワー

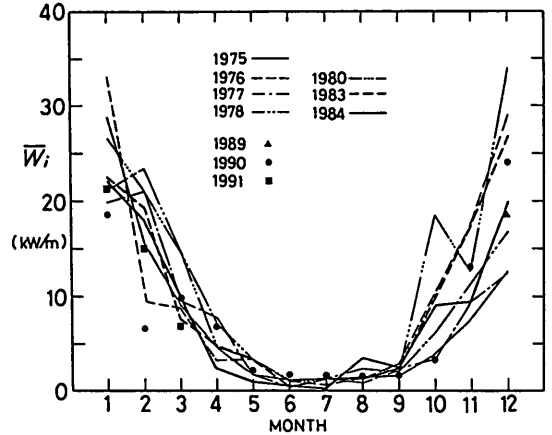


図-24 月別の平均入射波パワー

図-24は、月別の平均入射波パワーの測定値を例年と比較したものである²¹⁾²⁶⁾。入射波パワーは、月の平均有義波高が小さい1990年2月と10月は例年よりかなり小さいが、他の月はほぼ例年の分布の範囲内であるといえる。ただし、1989年以前の波パワーは、観測された有義波高と周期から簡易算定式を用いて求めたもので、波向きや方向分散性の影響は考慮されていない。

図-25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、0~5kW/mの頻度が45.7%と最も大きく、累積頻度が50%となるのは6.3kW/mのときである。また入射波パワーが非常に大きく100kW/mを越える場合が約1%ある。なお、この期間の平均値は13.9kW/mである。なお、実験堤の設計で用いている1970年から1982年の冬期における平均波パワーは16.8kW/mであり、1990年度の実測波パワーと比較してやや大きい。しかしながら、設計に用いたデータは波向きや波の方向分散性が考慮されておらず、これらの影響を考慮した場合1990年度冬期の観測値はほぼ設計に用いた値と同じ程度であると考えられる。

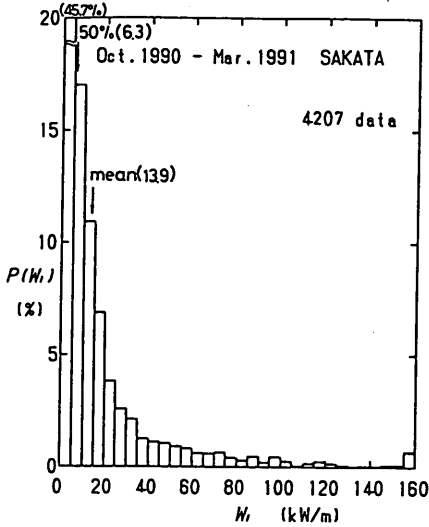


図-25 入射波パワーの出現頻度分布

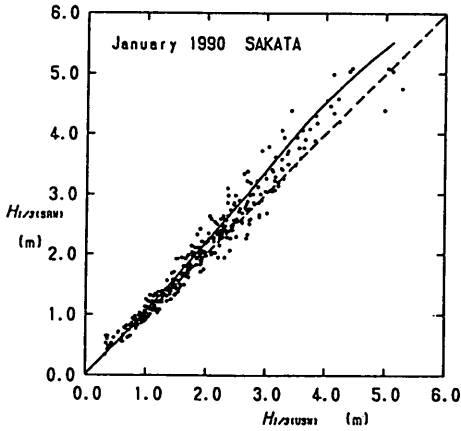


図-26 有義波高 (マフコタワーとの比較)

3.3 定常観測結果との比較

(1) 沖合における観測波浪との比較

酒田港においては1973年から運輸省第一港湾建設局によって定常波浪観測が行われており、現在は酒田港の沖合約7kmの水深-45m地点に設置された波浪観測塔(マフコタワー)において2時間毎の観測が行われている。

図-26は、横軸に防波堤付近の有義波高 $H_{1/3}$ (USW)を、縦軸にマフコタワーで観測された有義波高 $H_{1/3}$ (SRW)をとり、1990年1月のデータを比較している。防波堤付近とマフコタワーの有義波高はほぼ一致しているが、マフコタワーの観測値が防波堤付近よりやや大きい。これは、水深の違いによるものと考えられ、波の屈折と浅水変形を考慮した図中の実線にほぼ一致している。

図-27は、横軸に防波堤付近の平均波向きを、縦軸にマ

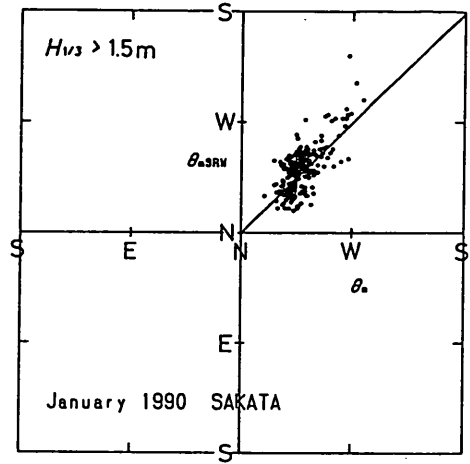


図-27 平均波向き (マフコタワーとの比較)

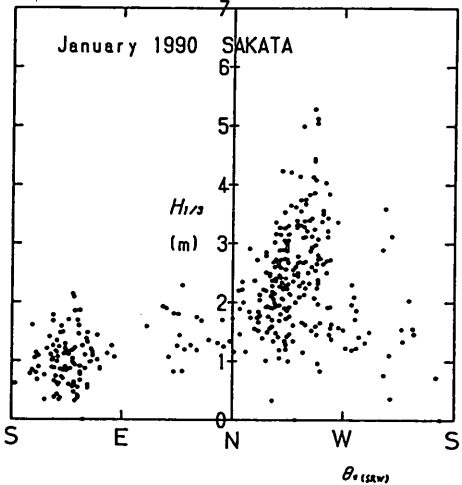


図-28 有義波高と平均風向

フコタワーでの平均波向きをとり、1990年1月の有義波高1.5m以上のデータを比較したものである。二点で観測された波向き θ_m はほぼ一致しているが、マフコタワーの波向きは防波堤付近と比較してやや変動が大きい。

(2) 風と波浪

図-28は、1990年1月のデータを用い、風向 θ_w と有義波高の関係プロットしたものである。風向は海側から吹きよせるNW方向と、陸側から吹くSE方向にほぼ大別でき、ここでは区別していないが、そのうち平均風速が10 m/sを超えるのはほとんどNW方向である。また有義波高が2mを越えるのはほぼNW方向の風の場合であり、有義波高が1m以下となるのはSE方向の風の時である。

図-29は、1990年1月の有義波高と酒田港で観測されている平均風速の関係を示している。酒田港においては波

浪をもたらず気象擾乱が限られているため、有義波高と風速は非常に相関が高い。図中の実線は観測された全データについて最小二乗法により計算した関係式である。また、図中の破線は平均風速が10m/s以上のデータ、すなわち海側からの風について最小二乗法で計算したものである。

3.4 水圧波形から表面波形への変換

有義波高が6mを超えるような大波浪時において、砕波などによる気泡の混入により超音波式波高計の測定波形が乱れ観測不能となる場合がある。今回の実証実験ではケーソンの耐波安定性の検証を行う上で、このような大波浪時における波も正確に観測する必要がある。幸い今回の波浪観測装置には、水圧式波高計が波向き観測用に用いられており、水圧式波高計は大波浪時においても正常に作動しているため、水圧のデータから水位波形を求める方法を検討した。水圧式波高計を併用する方法は、既に小舟ら²⁸⁾²⁹⁾が検討しているが、今回は超音波式波高

計と水圧式波高計の位置が異なるため、全く同じ方法を用いることはできない。したがってここでは、水圧の時系列データからFFTによって水圧の成分波の振幅を求め、応答関数によって水位の成分波の振幅に変換し、逆FFTで水位の時系列波形に戻す方法について検討した。

図-30は、計算に用いた応答関数 $k(f)$ を示している。応答関数は、微小振幅波理論から得られる理論応答関数を用いた。ただし超音波式による乱れていない水位波形と水圧式による水圧波形から求まる実測応答関数を調べ、理論関数を修正している。実測値は、0.21Hz程度まで理論値とほぼ同じであるが、それ以上ではほぼ一定となっている。したがって計算に用いる応答関数としては、0.21Hz以下では理論値に一致し、0.21Hz以上では一定とした。ただし、1Hz以上は1.0とした。

図-31は、水圧式波高計の水圧波形を上述の応答関数を用いて水位波形に変換したものである。点線の水圧波形から変換された水位波形 η_{pw} は、超音波式波高計で計測された水位波形 η_{usw} と比較的よく一致している。ただし

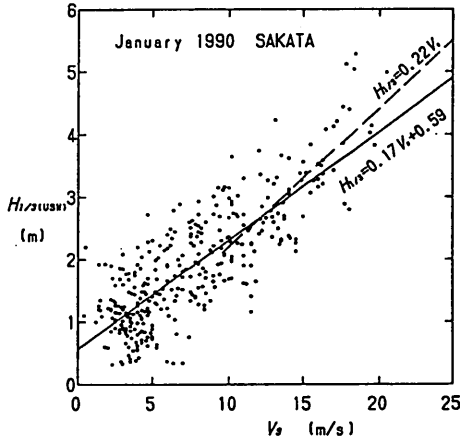


図-29 有義波高と平均風速

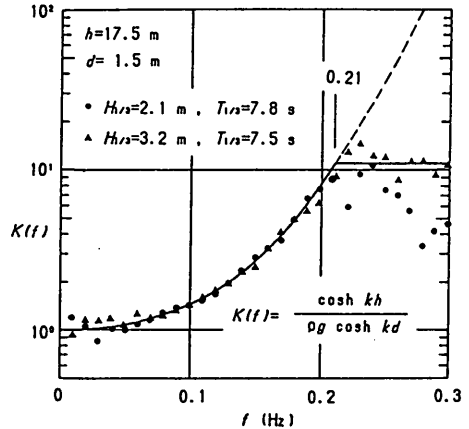


図-30 水圧から水位への応答関数

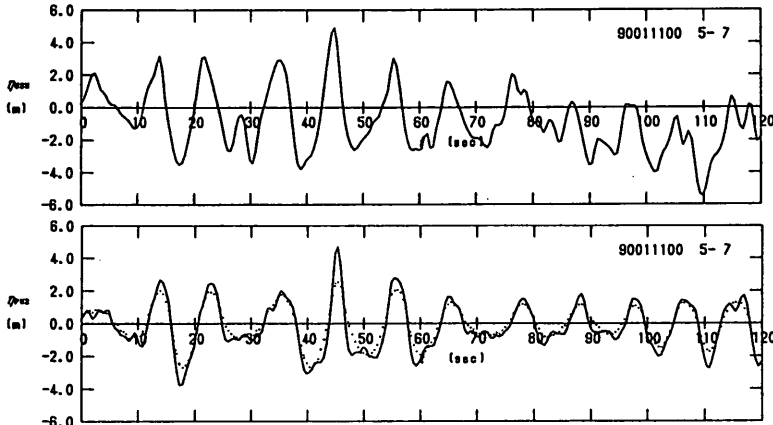


図-31 水圧波形から変換された水位波形

η_{usw} は $t=80$ 秒付近から気泡の混入によるゼロレベルの変動が生じている。

図-32は、水圧式波高計による水位の周波数スペクトルの面積 m_0 と超音波式波高計の有義波高の相関を見たものである。有義波高と $4\sqrt{m_0}$ は、ややばらつきはあるがほぼ一致しており、 $4\sqrt{m_0}$ から有義波高を求めることができる。

図-33は、水圧式波高計による水位波形から求めた最高波高を超音波式波高計から求めたものと比較した結果も示している。水圧式により求められた最高波高は、超音波式から求めたものに比較して80%程度となっている。これは図-31に示した変換波形からわかるように、超音波式で計測した水位波形と比較して、変換波形は尖鋭性がやや小さいためであり、有義波高についても変換波形をゼロアップ解析すると同様な結果となっている。したが

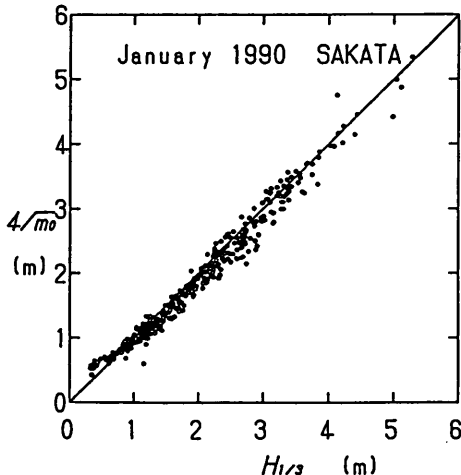


図-32 水圧波形から変換された波形の $4\sqrt{m_0}$ と有義波高

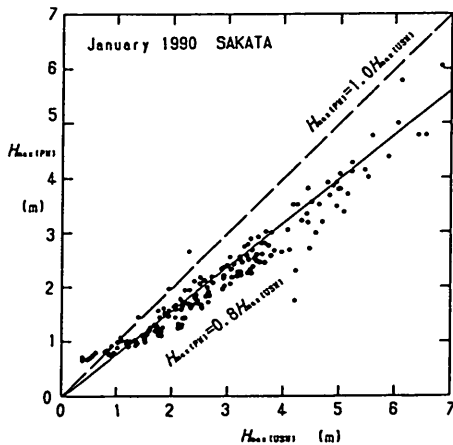


図-33 水圧波形の変換による最高波高の推定

って、実際に最高波高等を求める場合には、これらの関係から補正する必要がある。

今回の実証実験におけるケーソンの耐波安定性の検討においては、波高計の設置位置がケーソンから300mあまり離れているため、前述の $4\sqrt{m_0}$ から求めた有義波高のみを用いた。そして、 H_{max} や $H_{1/10}$ 、 H_{mean} は、レーリ-分布から求められる統計的な値、 $H_{max}=1.61H_{1/3}$ (波数100波)、 $H_{1/10}=1.27H_{1/3}$ 、 $H_{mean}=0.625H_{1/3}$ を用いて算出した。

4. ケーソンの耐波安定性

4.1 空気室部材に作用する波圧と応力

(1) 測定波形の例

図-34は、実験期間中に観測した最大の有義波高8.67mの時の測定波形の例である。測定波形は上から、空気室斜面部内側+5.5mの高さの波圧(空気圧)、空気室斜面部外側+5.5mの波圧、空気室斜面部+5.5mの水平方向鉄筋応力、空気室隔壁左側-6.5mの波圧、空気室隔壁右側-6.5mの波圧、空気室隔壁-6.5mの水平方向鉄筋応力を示している。

最上段に示した空気室内部の+5.5mの波圧計には、 $t=2.5$ s付近から波面の上昇による圧縮空気圧が作用し始め、5秒付近で最大約 10tf/m^2 の空気圧が働いている。

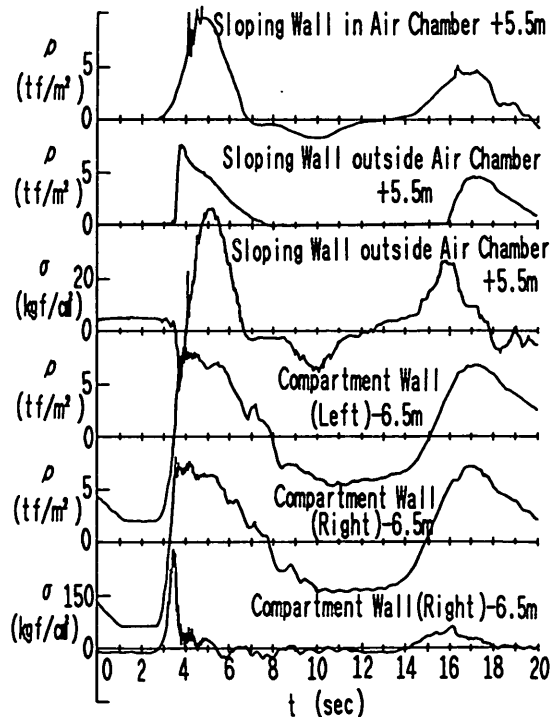


図-34 波圧および部材応力波形の例

このときはそれに加えて波面の直接的な作用によるやや衝撃的な圧力が働いているのがわかる。なお、空気による圧力波形は正弦波的にゆるやかに変化するのに対して、波面の直接的な作用による圧力は切り立った波形で作用時間が比較的短い。この空気圧は空気室内各点に様に作用しており、隔壁にも波面の直接的な作用による圧力に続いてこの空気圧が認められる。

また、外側の斜面部には $t=3.5s$ 付近に切り立った波圧波形が認められる。空気室部材にかかる波力は、内側と外側の波圧の差であり、このときの空気室斜面部(外側)の鉄筋の応力は、最初に外側からの波の作用によって一度 20kgf/cm^2 程度の圧縮応力が発生し、その後内側からの空気圧力によって 50kgf/cm^2 程度の引っ張り応力が発生し、さらに負の空気圧力によって 15kgf/cm^2 程度の圧縮応力が生じている。

隔壁の鉄筋応力は、隔壁の右側と左側の圧力の差によって生じており、 300kgf/cm^2 と斜面部に比して大きな応力が発生している。これは波面の直接的な作用による圧力の差によって生じたものである。空気圧の差は無くこれによって応力は発生していない。隔壁の左右の波圧波形を比較すれば、右側(西側)から最初に波圧が作用しているのがわかる。この場合の平均波向きは、ケーソンに直角方向から西側に 31° 傾いており、こうした波圧の差が生じている。

(2)空気室斜面部に作用する圧力と応力のピーク値

図-35(a)は、空気室斜面部内側(+5.5m)の圧力のピークの代表値と、これに対応する代表波高の関係をプロットしたものである。正のピーク値は、設計波高に近いところでは 0.7 から $1.0w_0H$ である。設計では、 $1.0w_0H$ を考慮しており¹⁰⁾、ほぼ妥当な値と考えられる。なお、模型実験結果だけからは $2w_0H$ 以上になると予測されており、やはり空気の弾性による縮尺効果があることが確認された。設計値は、衝撃的な空気圧の理論計算を行ない空気圧の縮尺効果¹⁰⁾²⁹⁾を考慮したものであり、その計算法の妥当性が確かめられた。図には、負のピーク値も示しているが、波高が大きい時には空気室が大気に開放されるため、ほぼ 3tf/m^2 ($=-1.0w_0d_c$; d_c はカーテン壁の没水深さ)で上限となっている。したがって、設計で与えていた $-0.5w_0H$ は、やや過大な値であった。

図-35(b)は、斜面部外側(+5.5m)の波圧のピーク値と波高の関係をプロットしたものである。波高の大きいところでは 0.6 から $1.2w_0H$ であり、ばらつきが大きい。ここには図-34で見たような波面の衝突による切り立った波形の圧力が作用しており、局所的に大きな値となることがあるため、ばらつきが大きくなっていると考えられ

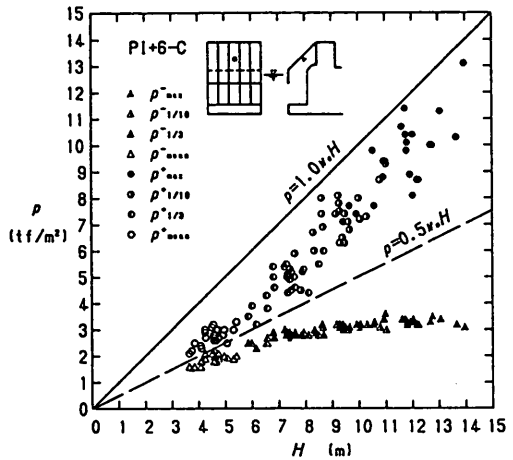


図-35(a) 空気室斜面部内側の波圧

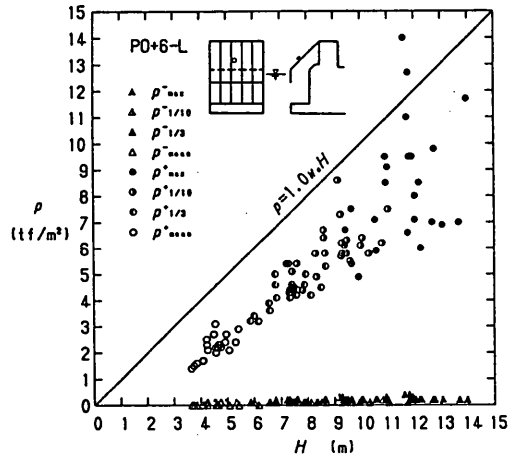


図-35(b) 空気室斜面部外側の波圧

る。設計に用いた波圧は $1.0w_0H$ であり、測定値は全体にやや小さい。また、この測点は静水面上であり、当然のことながら負の波圧は0である。

図-36は、図-35(a)、(b)で示した空気室斜面部の内側と外側の波圧の時系列の差、すなわち部材に作用する合力のピーク値を示すものである。ここで示す負の波圧は空気室の内側から外側方向への波圧であり、正の波圧は外側から内側方向への波圧を示す。空気室の設計では、斜面部外側から作用する波圧 $1.0w_0H$ と斜面部内側からの波圧 $1.0w_0H$ を異なる位相で考えている。しかしながら、図-34で示した波圧波形やこの図からも明らかなように波圧は内側と外側から同時に作用しており、波圧の合力は設計に用いた波圧分布よりやや安全側になっている。

図-37は、空気室斜面部の鉄筋応力のピーク値を示すものである。鉄筋の応力は、波高が大きい場合でも 80kgf/cm^2 以下であり、設計波高であっても 100kgf/cm^2 以下と

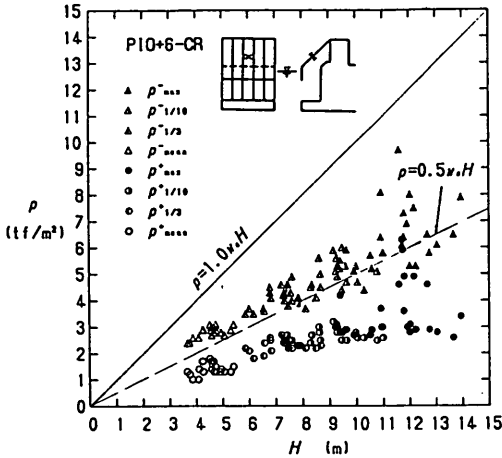


図-36 空気室斜面部の波圧差

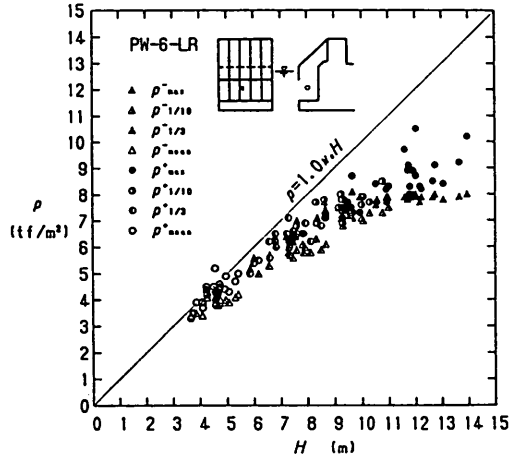


図-38(a) 空気室隔壁部に作用する波圧 (西側)

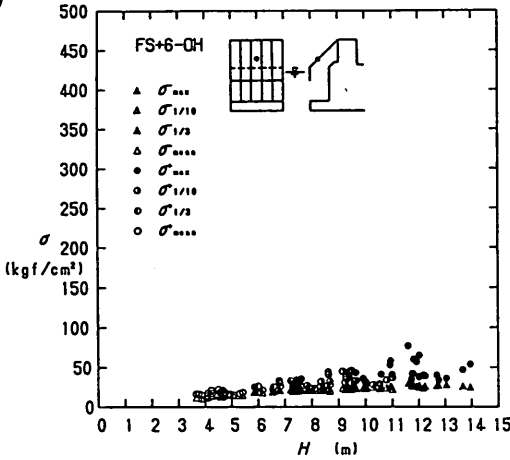


図-37 空気室斜面部の鉄筋応力

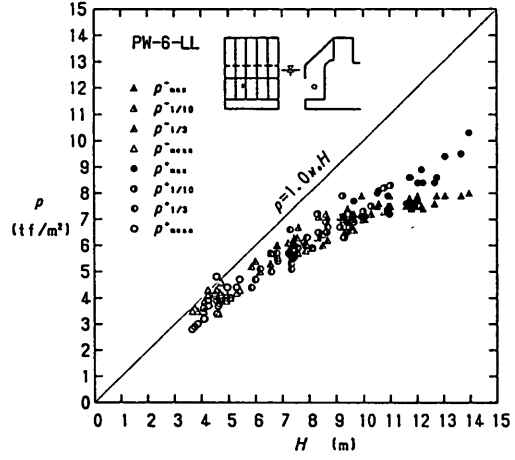


図-38(b) 空気室隔壁部に作用する波圧 (東側)

考えられ、鉄筋の許容応力 ($\sigma_{sa}=2000\text{kgf/cm}^2$) の1/20以下である。これは鉄筋コンクリートの設計で無視しているコンクリートの引っ張り応力が有効に作用し、全断面で波圧を受けることによって、鉄筋の応力が小さくなっているためと考えられる。コンクリートの引っ張り応力については次項で説明する。なお上述のように設計では、空気圧が内側から作用している時には外側からの波圧を考慮していないが、実際にはある程度外側からの波力も作用しており、鉄筋応力もやや小さくなっていると考えられる。

(3) 空気室隔壁に作用する圧力と応力のピーク値

空気室隔壁には、両側から圧力が作用するが、隔壁の設計では、その差の合力が問題となる。すでに述べたように、空気圧は両側でほぼ同じであり、波の直接的な作用による波力の差が問題となる。

図-38(a)と(b)は、空気室隔壁 (-6.5m) に作用する

波圧のピーク値を示すものであり、(a)は隔壁の西側に作用する波圧、(b)は隔壁の東側に作用する波圧を示している。正の波圧について見ると、隔壁の西側に作用する波圧が東側の波圧よりやや大きいとともに $1.0w_0H$ 以内である。負の波圧は、西側と東側はほぼ同じ値であり、正の波圧と比較してもほぼ同じ程度であるが、水位がある程度下がると波圧計が大気に露出するため、波圧は 8tf/m^2 程度で上限となっている。

図-39は、隔壁 (-6.5m) における両側の波圧差のピーク値を対応する波高を横軸にとってプロットしたものである。正の波圧(東から西方向の波圧)は、設計値の $0.25w_0H$ よりやや小さいが、負の波圧(西から東方向の波圧)は、波高が大きい時には $0.5w_0H$ 程度となることもある。これは図-34でみたようなやや衝撃的な波圧が少し時間差を持って作用するからである。解析したケースはすべて西側からの波であり、こうしたやや衝撃的な負の圧力

が現われていると考えられる。

図-40は、隔壁の鉄筋応力のピーク値と波高の関係をプロットしたものである。ただし鉄筋計の位置は、波圧計より後壁に近い位置である。図-39で調べたように、波高が大きいところでは設計波力を上回る合力が作用しているため、200kgf/cm²を超える鉄筋応力となっている。しかしながら、最大でも許容応力の1/7以下である。やはりコンクリートの引張り応力が働き、鉄筋の応力を小さくしていると考えられる。

コンクリートの引張り応力の限界値は、一般に30kgf/cm²程度である。鉄筋応力が80kgf/cm²のとき、コンクリートに鉄筋と同じひずみが発生しているとすると、11kgf/cm²の引張り応力が発生していると考えられる。この値はコンクリートの許容引張り応力よりかなり小さく、コンクリートの引張り応力が有効に作用していると十分考えられる。鉄筋の応力が300kgf/cm²の場合はややこの限界値を上回るが、それでもある程度コンクリートの引張り応力が発生していると考えられる。ただし、コンクリートにひび割れが生じた場合には、このコンクリートの引張り応力は期待できず、鉄筋の応力が急速に大きくなると考えられる。

4.2 堤体全体に作用する波力

図-41は、各測点の圧力から求めた水平波力のピーク値 F_H とこれに対応する波高の関係を示すものである。図には、合田式により求めた正の水平波力の計算値および負の波圧の算定式より求めた負の波力の計算値も示している。ただし、合田式¹⁰⁾²²⁾³⁰⁾による計算値は波の入射角が10°の場合であり、また測定値の周期がばらついているため10.0sと14.5sについて示している。正の水平波力の測定値は、ほぼ10.0sと14.5sの計算値の間に分布しており、設計に用いた計算法が妥当であることを示している。負の水平波力の測定値は計算値より大きくなっているが、実用上問題となる波高が大きくなるところでは、計算値に近づいている。

図-42は、同様に鉛直波力のピーク値 F_V (揚圧力と斜面に働く波力の鉛直成分の合力) とこれに対応する波高の関係を示すものである。正の揚圧力の測定値は、ほぼ合田式の値と一致しており、負の鉛直波力もほぼ計算値と一致している。

5. 波エネルギー変換装置としての特性

5.1 代表的な発電状況

図-43(a)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。これは1990年11月8日

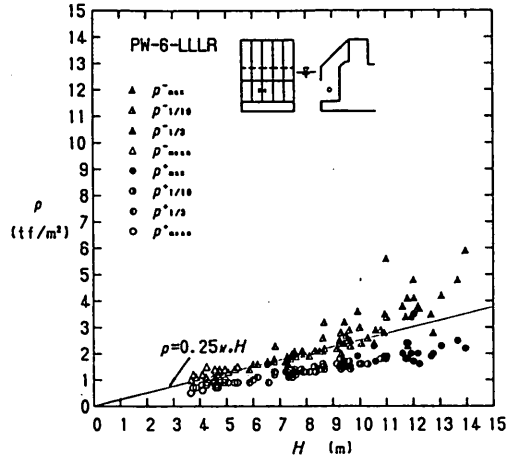


図-39 空気室隔壁部に作用する波圧差

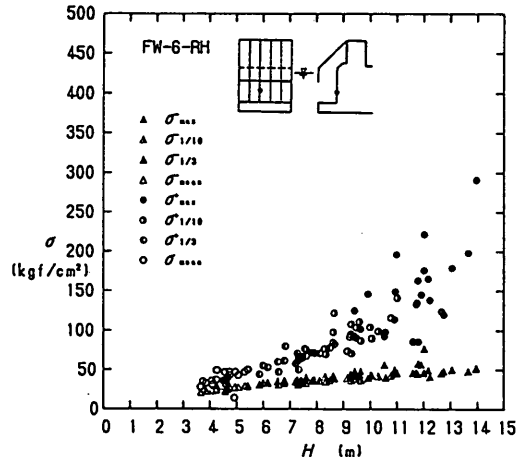


図-40 空気室隔壁部の鉄筋応力

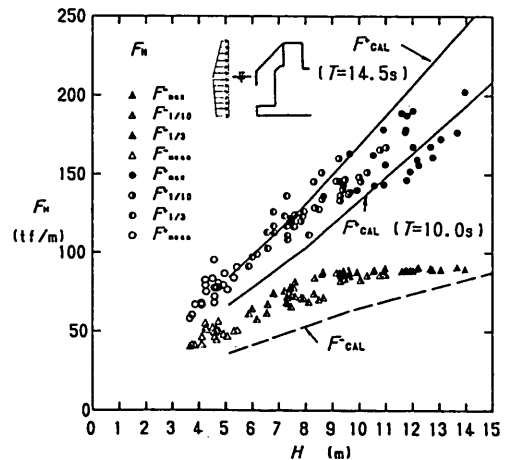


図-41 堤体に作用する水平波力

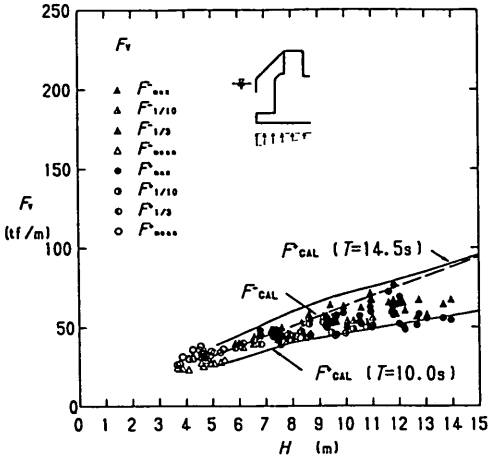


図-42 堤体に作用する鉛直波力

14時前後20分間の例で有義波高が3.01m,周期は7.9sであり, 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_d , タービン回転数 N_T , 発電出力 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となり(圧縮), 水位が下降する時に負圧となる(膨張)。空気室には圧抜弁が設置されており, 空気圧が+1.34, +1.61tf/m²以上となるとこの2台の圧抜弁が作動し, 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。この例ではタービン回転数が1250~2100rpmで変動しており, 空気流調整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。さらに波高が大きくなると弁の作動頻度は大きくなる。タービン回転数は波の一波一波の変動よりは数波の入射波からなる波の連り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はほとんど無く波の連りりによって変動する。

この時の波の入射角は13°, 入射波パワーが W_{in} 539.2kWであり, 空気パワー W_a , タービンパワー W_t , 発電パワー W_g はそれぞれ, 317.9, 39.9, 36.4kWである。ただし, 概要でも述べているように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, 変換した空気パワーのうち約66%を大気に放出している。すなわち, 空気室で変換された空気パワーの利用率 E_{ai} は低く0.342である。エネルギー変換時のそれぞれの効率は,

空気出力効率 EFF_a が0.590, タービン効率 EFF_t が0.367, 発電機効率 EFF_g が0.912である。そしてこれらの積である発電効率 EFF_{atg} は0.197となる。これに空気パワーの利用率を乗じた EFF_{atgo} は, 0.068となる。ただし後述するように発電システムに最適なタービン・発電機を設置すれば, 空気パワーの利用率はほぼ100%となり, 発電パワーは約3倍の106kWとなる。記録波形からわかるように回転数の変動は比較的大きく, 発電出力の変動も大きい。これはやはりタービン径が1.34mと小さく慣性モーメントが小さいためである。

図-43(b)は, 高波高の場合の発電状況であり, 1990年11月10日16時前後のデータを示している。この時は有義波高4.68m,周期9.7sで, 発電運転を行う上限の有義波高5mに近い。入射波パワーは1982kWと大きく, 平均発電量も55.3kWと発電機定格の60kWにかなり近くなっている。タービン回転数の変動は1500~2200rpm程度であり, 空気流調整弁による制御(1700~2000rpmの範囲)が適切に作動していることがわかる。また, 発電出力(投入負荷)は1800rpmで定格の60kWとなっているため, 定格出力での発電時間がかなり長い。このときの空気出力効率 EFF_a は, 波の周期が長く波長が空気室の幅と比較してかなり長くなるため0.37とやや小さい。タービン効率 EFF_t は0.42, 発電機効率 EFF_g は0.91で, これらの積の発電効率 EFF_{atg} は0.14である。

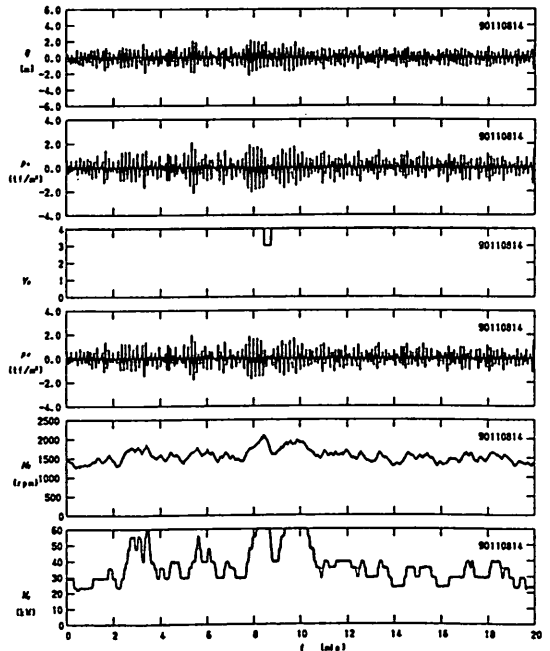


図-43(a) 発電のアナログ記録の例 ($H_{1/3} \div 3m$)

図-43(c)は、波高がかなり小さい場合の発電状況を示しており、1990年10月28日12時前後のデータである。この時は有義波高1.13m,周期5.7s,入射波パワー76kWで平均発電量は5.6kWである。波高が小さいためタービン回転数も小さく、700~1000rpm程度である。また、発電出力も2~10kW程度であるが、負荷の投入制御が適切であるためタービンが失速して高速回転領域から外れることはない。各効率 EFF_a は0.59,タービン効率 EFF_t は0.44,発電機効率 EFF_g はタービン回転数が小さいため0.77とやや小さく、これらの積の発電効率 EFF_{avg} は0.20である。表-5に、上述した各発電状況の例における発電効率等をまとめて示している。

図-44は、冬期のうち最も入射波パワーの大きい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日から通常発電を行っているが、前述のように運転時間が9時から16時までと限られており、休日もある

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以下では発電できず、発電量が0の時間が2%,発電量が1kW以下(0を含む)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。また表-6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 W_i ,運転時の平均発電出力 W_g ,発電運転時間,発電量が0の時間の比率,発電量が1kW以下(0を含む)とごく小さい時間の比率を示している。3章でも述べたように入射波パワーは冬期のうち12月,1月をピークに小さくなり、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、特に波パワーの小さい10月ではおよそ50%にも達している。

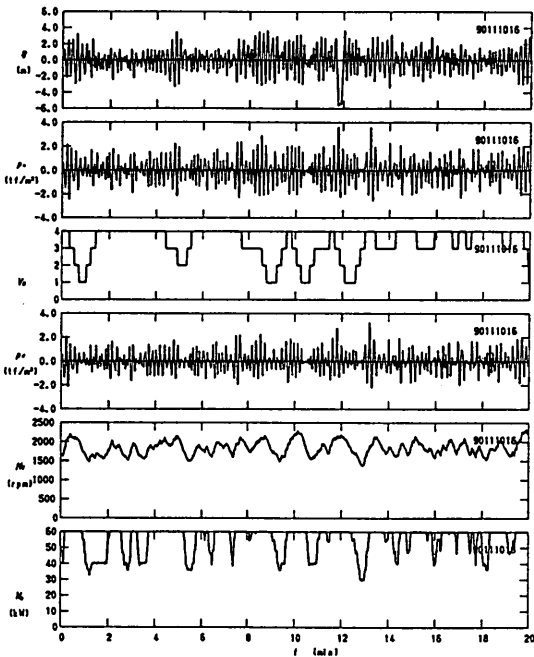


図-43(b) 発電のアナログ記録の例 ($H_{1/3} \approx 5\text{m}$)

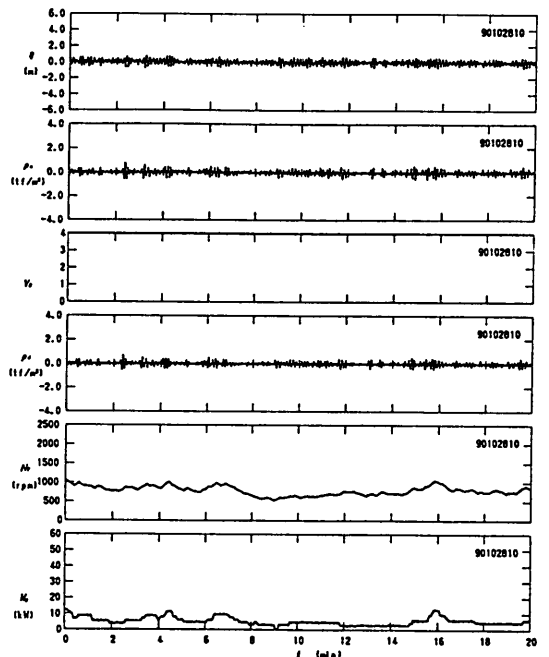


図-43(c) 発電のアナログ記録の例 ($H_{1/3} \approx 1\text{m}$)

表-5 代表的な発電状況の例

DATE	$H_{1/3}$ (m)	H_{max} (m)	$T_{1/3}$ (s)	β_m (°)	W_{in} (kW)	W_a (kW)	W_t (kW)	W_g (kW)	EFF_a	$E_{..}$	EFF_t	EFF_g	EFF_{avg}	EFF_{avg}
10- Oct. 28 1990	1.18	1.91	5.97	7	91.0	46.6	7.2	5.5	0.512	0.396	0.389	0.764	0.060	0.152
16- Oct. 27 1990	2.27	3.62	7.40	10	314.8	198.5	25.9	24.1	0.631	0.367	0.356	0.929	0.077	0.209
14- Nov. 8 1990	3.01	5.09	7.87	13	539.2	317.9	39.9	36.4	0.590	0.342	0.367	0.912	0.068	0.197
16- Nov. 10 1990	4.83	7.69	9.70	13	1982	736.0	60.7	55.3	0.371	0.221	0.374	0.911	0.028	0.126

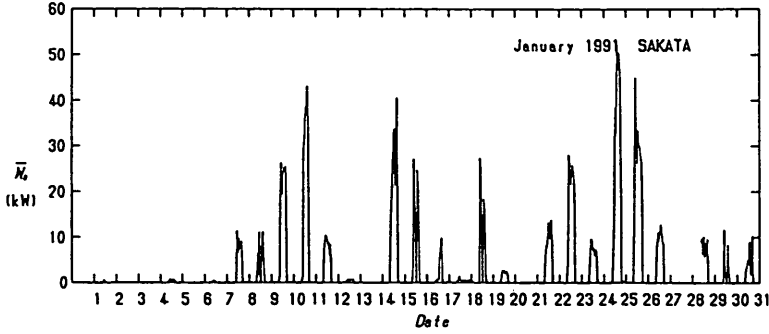


図-44 平均発電出力の変化 (1990年1月)

表-6 月別の発電運転結果 (1990年冬期)

Year/Month	'90/10	'90/11	'90/12	'91/1	'91/2	'91/3
(W _i) _{ave} (kW/m)	3.3	13.0	23.9	20.3	15.0	6.7
(W _e) _{ave} (kW)	6.03	10.65	13.34	13.25	10.88	9.73
Operation Time	168	172	156	154	155	193
Ratio(W _e = 0 kW)	0.39	0.25	0.13	0.02	0.13	0.18
Ratio(0 ≤ W _e < 1)	0.51	0.28	0.24	0.13	0.23	0.23

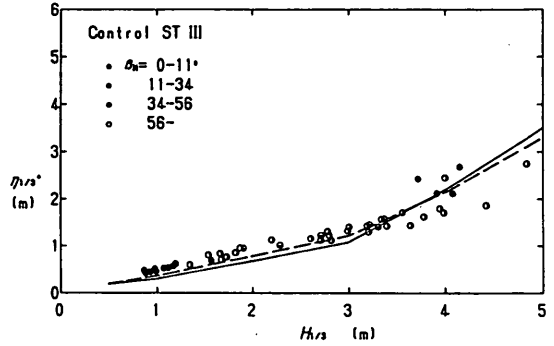


図-45 空気室の水位

5.2 エネルギー変換時の各出力と効率

(1) 空気室の水位と圧力

空気室において波のエネルギーは空気のエネルギーに変換される。すなわち、空気室内で上下する水塊の運動エネルギーが空気流に変換される。空気出力は、空気圧と流量の積で表されるが、流量の代わりに空気室の水位変動速度でも表される。

図-45は、空気室における水位変動の正のピーク値の1/3最大値と有義波高の関係を見るものである。図中には波向きを0°として「熱力・波動法」によって計算した設計値を実線で、波向き別に示した測定値を記号で示している。ただし本システムでは後程述べるように空気流調整弁の隙間等から空気漏れが発生しており、実質的な開口率がやや大きくなっている。測定値と比較するためにこれらの隙間の大きさを考慮した開口率の場合（流量係数を含めた実質開口率1/370）を破線で示している（以後、本章の図中の計算値はこれらと同様の条件で求めた値である）。

水位の測定値は、波向きが0°すなわち空気室に対して直角に近いほど大きくなっている。また計算値と比較して、ほぼ一致しているといえるが全体的にやや測定値の方が大きい。これは、水位計が空気室の壁面に取り付け

られているために、水面の振動や壁面の影響を受け測定値が過大になっていることが考えられる。有義波高3m付近から水位の上昇量が大きくなっているが、これは波高が大きくなると圧抜弁や空気流調整弁が作動して開口率が大きくなるためである。

図-46は、空気室の圧力の正のピーク値の1/3最大値と有義波高の関係を見るものである。圧力も水位と同様に波向きが0°に近いほど大きい。測定値はややばらついてはいるがほぼ計算値に一致している。ただし、有義波高が3mを越えるあたりから計算値は頭打ちになっているが、測定値ではそれほど低下していない。これは計算では考慮していないやや衝撃的な空気圧が作用するためと考えられる。衝撃的な圧力は、空気室前面の水位がカーテンウォール下端より下がり、一度空気室の圧力が大気圧となった後、再び上昇する波面で空気室の空気が圧縮されたり、また、しぶきや水塊の一部が直接圧力センサーに作用するために発生する。なお、計算値には二種類あり、実線は設計の開口率に対するものであり、波線は設計値よりやや大きい実質の開口率に対するものである。以下の図においても実線と波線の区別は同様である。

(2) 空気出力と発電出力

図-47は、空気室で変換された平均空気パワー（出力）

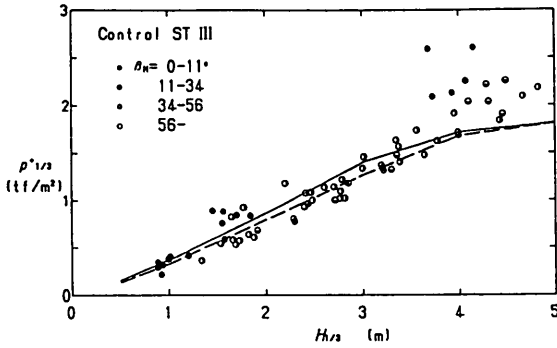


図-46 空気室の圧力

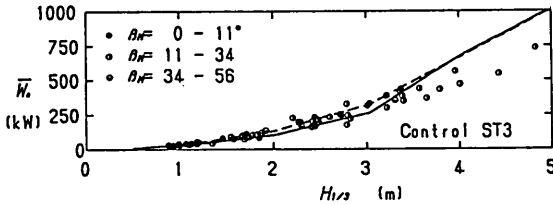


図-47 空気出力

と有義波高との関係を見たものである。空気パワーは当然波高が大きいほど大きくなり、例えば有義波高2.2mで170kWであり、有義波高4mでは670kWに達する。また、空気パワーは空気室に入射する波向きによる変化がみられ、入射波向きが0°に近いほど空気パワーは大きくなっている。有義波高3m以下では破線の計算値が測定値のほぼ平均であり、3m以上では計算値は測定値のほぼ上限となっている。

図-48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 W_g の関係を示している。発電出力の平均値は波高の増大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、出力の上昇量が小さくなり、4m付近からはほぼ55kW前後で一定となっている。発電出力の測定値は空気パワーと同様に波向きによって変動し、波向きが0°に近いほど大きくなる。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。

(3)変換効率

図-49は、それぞれ空気出力効率 EFF_a 、空気パワーの利用効率 E_{in} 、タービン効率 EFF_t 、発電機効率 EFF_g および発電効率 EFF_{atg} と有義波高の関係を示している。図中の実線と破線は前述の計算値を示しており、測定値は波向き別に記号を変えて示している。

空気出力効率の計算値をみると、空気流調整弁が作動しない有義波高の小さい領域では弁の隙間からの空気漏

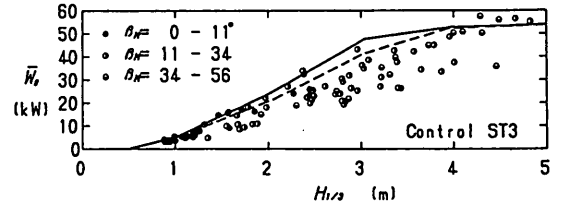


図-48 発電出力

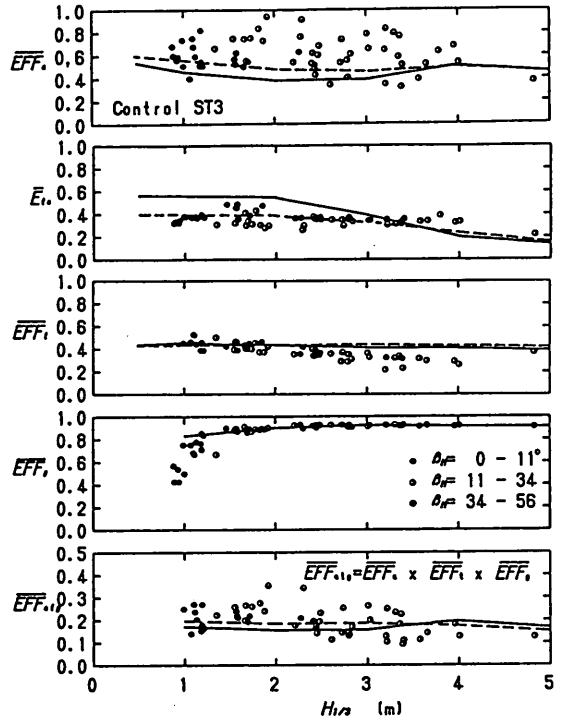


図-49 変換効率

れの影響が顕著に現われ、実質的な開口率が大きくなり、破線の計算値が実線の計算値より1割程度大きくなっている。破線の計算値は多少の変動はあるがほぼ一定であり、0.45から0.60程度となっている。これに対して測定値は0.3から0.9程度まで非常にばらついており、ほぼ全体的に計算値より大きい。このように測定値が計算値より大きく、またばらついているのは以下の理由が考えられる。

①波力発電ケーソンは1函だけであるため、平面的な効果により周辺のケーソンに来襲する波パワーも回折によってある程度波力発電ケーソンに入射しており、実質的な波パワー W_{in} が大きくなっている。この平面的な効果は空気室の長さや波長の比によって変化し、既往の研究結果から1~2割程度入射波パワーが増大していると考えられる³²⁾。

②波の方向スペクトルの測定精度が必ずしも十分ではなく、入射波パワーの測定精度に問題がある。また入射波と逆方向への波パワーが大きく評価される場合があり、入射波パワーの測定値が全体的に実際の値よりやや小さく計算されていることも考えられる。

③特に波高が小さく周期の短い時や波向きが大きいときに、空気室内の水面が振動したり、空気室壁面に取り付けられた水位計が壁面の影響を受け、実際の水位変動より大きく現われ見かけ上の空気パワーが大きくなっている。

なお、通常であれば波高が大きくなるにしたがって、空気室の幅と波長の比が最適値から外れてくるため空気出力効率は小さくなる。しかし、今回のシステムではタービンの開口率が元々最適値より小さく、空気出力効率も小さいが、波高が大きくなると空気流調整弁や圧抜弁を開くことによって実質的に開口率を大きくしており、結果として空気出力効率はほぼ一定となっている。

空気パワーの利用効率 E_{ia} は、図中の実線で示した計算値が0.55から0.15程度と有義波高が2m付近より大きくなるに連れて小さくなっている。しかし測定値はこの計算値よりもかなり小さく、ほぼ0.3程度で一定となっている。これは空気漏れの影響と考えられ、空気漏れを考慮して開口率を大きくした破線の計算値では E_{ia} は0.40から0.16とやや小さくなる。有義波高3m付近までは破線の計算値が測定値にほぼ一致しており、有義波高3m以上でやや測定値の方が大きくなっている。

タービン効率 EFF_t は、本システムではトルク計が入っていないため直接的に測定できない。したがって、あらかじめ検定されている発電機の効率 EFF_g から推定し、発電出力から逆算してタービンパワーを求め、タービン効率を計算している。図中のタービン効率の計算値は、実線、破線ともにほぼ0.4程度で一定である⁹⁾³³⁾³⁴⁾。これに対して測定値は、有義波高2m以下ではややばらつきはあるが平均的にほぼ計算値に一致している。しかしながら2mを越えるあたりから次第に低下し、計算値との差も大きくなっている。これはタービン・発電機の定格が小さく、高波高（高回転数）時の急激な回転数上昇を抑えるため発電機制御において高回転時の負荷を最適値以上に大きくしていることから、最適な効率点からややずれてくるためである。

発電機効率 EFF_g は、回転数と発電出力によって異なり、あらかじめ工場で測定されている。図中の実線および測定値はこの検定値を用いて変動する回転数と出力に対して平均値を求めたものである。発電機効率は有義波高1.5m以上で運転中はほぼ一定で、およそ0.85から0.92

となる。

発電効率 EFF_{alg} は、空気出力効率、タービン効率、発電機効率の積で表され、波パワーから電気パワーへの変換率を示す。図中の計算値は、有義波高1m以上では0.15から0.20とほぼ一定である。測定値は有義波高およそ3m以下では計算値よりかなり大きくなっている。これは空気出力効率の測定値と計算値にかなり大きな差があることが影響している。ただし、本システムではダミーノズル等を設けたことにより、実質的な発電効率 EFF_{alg} は小さく、 EFF_{alg} に空気パワーの利用効率 E_{ia} を乗じたものとなる。

5.3 保護対策装置と回転数制御

(1)保護対策装置の作動状況

前述のように本実験装置におけるタービン・発電機は定格が小さいため、圧抜弁と空気流調整弁でタービン回転数と出力をコントロールしている。また、空気流調整弁の制御が利かなくなったりして回転数が上がり過ぎた場合に、タービン・発電機を保護する緊急遮断弁を設けている。

図-50は、横軸に有義波高をとり、空気流調整弁の作動率 V_a 、圧抜弁の作動率 V_p を示している。空気流調整弁は有義波高4m程度までは1.0、すなわち全閉の状態であるが4mを越えたあたりから頻繁に作動するようになり、4.5m程度ではおよそ半分の時間で弁が開く方向へ作動している。圧抜弁は、過大な空気圧を逃がすものであるが、作動時に急激に圧力が低下し、弁が振動しないように2台の弁の作動圧力に差を持たせている。すなわち、作動圧力 1.34tf/m^2 の V_1 と 1.61tf/m^2 の V_2 があり、図から V_1 は波高2m程度から、 V_2 は3m程度から作動し始めていることがわかる。これらの弁によって高波高時における出力はかなり平滑化される。

図-51は、緊急遮断弁作動時におけるアナログ記録を示している。実験期間中に緊急遮断弁が作動したのは1回だけであった。これは発電装置の調整期間中の1989年11

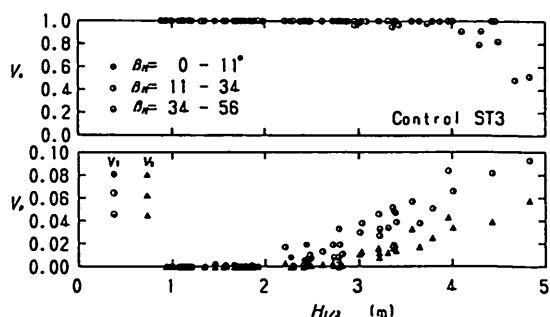


図-50 空気流調整弁と圧抜弁の作動状況

月19日18時33分頃である。この時には有義波高が7mを越えており、空気流調整弁を全開にして発電を停止していたが、空気流調整弁や水抜き管から漏れてタービンへ入る空気パワーのために回転数が上昇したため、発電することによって負荷を与え回転数を抑えていた。しかしながら、空気流調整弁内に海水が上昇し弁板を強く押したために、弁の位置がずれ、タービンへかなりの空気パワーが入るようになった。そして回転数が上昇し、設定値2400rpmを越えたため弁が自動的に作動している。図には、空気室の水位 η 、圧力 p_a 、差圧 p_d 、タービン回転数 N 、発電出力 W_g のアナログ記録を示している。矢印の位置で弁が作動した後、タービン差圧がほぼ0となりタービン回転数および発電出力が急激に低下し、発電が停止しているのがわかる。この現象により弁の形状に問題があることが判明し、弁の内部に水塊が入ってもスムーズに外部に排水できるように案内版を設けた。その後有義波高が8mを越える波浪も来襲しているが問題なく運転している。

(2)タービン回転数と変動

a)タービンの初期起動性

実験に用いているウェルズタービンは、比較的高速回転型のタービンであり、高速回転領域に達するまでの初期起動性が問題となることがある。今回使用した16枚翼のタービンは自己起動性があり、初期起動はほぼ問題とならないが、場合によっては起動用モーター等によって高速回転領域にする必要がある。

図-52(a)は、タービンがほとんど回転していない状態から空気流調整弁を閉じ発電運転を開始した場合の状況

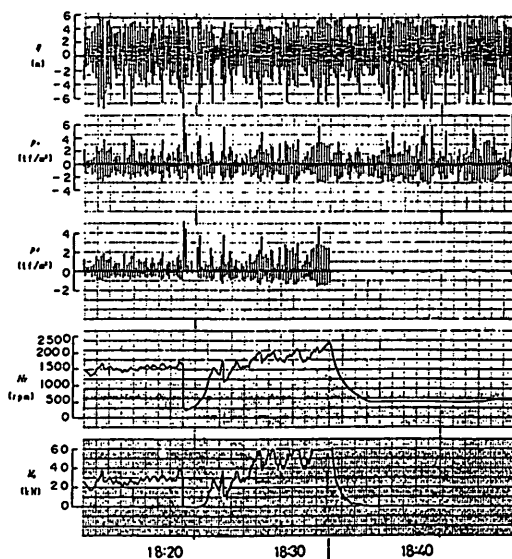


図-51 緊急遮断弁の作動状況

を示すものである。この例は、有義波高3.49m、周期8.3s、入射波パワー757kWである。空気流調整弁を閉じてタービンに空気流を送ると、回転数はおよそ300rpmまでは急速に上昇し、300rpmを超えた辺りから徐々に上昇して高速回転域に入っている。この例では、空気流調整弁を操作してからおよそ90秒で発電可能な状態(700rpm)となっている。

図-52(b)は、通常の運転開始の状況を示すものである。この例は、有義波高1.08m、周期5.8s、入射波パワー64kWである。空気流調整弁を閉じた場合でも、発電を停止しているためタービンは空気流調整弁の隙間等から漏れるわずかの空気パワーによって高速回転領域で回転しており、空気流調整弁を閉じると500rpm前後から回転数が上昇し、発電を開始する。この場合には、1、2分で定常状態に達している。タービンが低速回転領域から発電運転できるようになる最低の有義波高は約0.7mである。この場合は、比較的大きな波が続いて作用した場合に高速回転領域に入ることができるようである。図-52(c)は、有義波高が高いにもかかわらずタービンが高速回転領域に達しなかった例である。この例では、有義波高3.79m、周期8.1s、入射波パワー911kWであり、空気流調整弁は全閉であるが、タービン回転数は500~600rpmで上下し、高速回転に達していない。このように、有義波高が比較

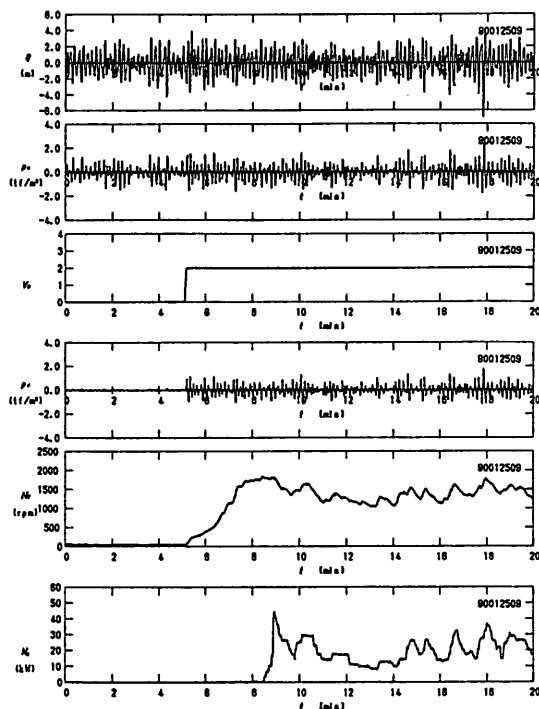


図-52(a) タービンの初期起動状況

(完全に停止した状態での起動)

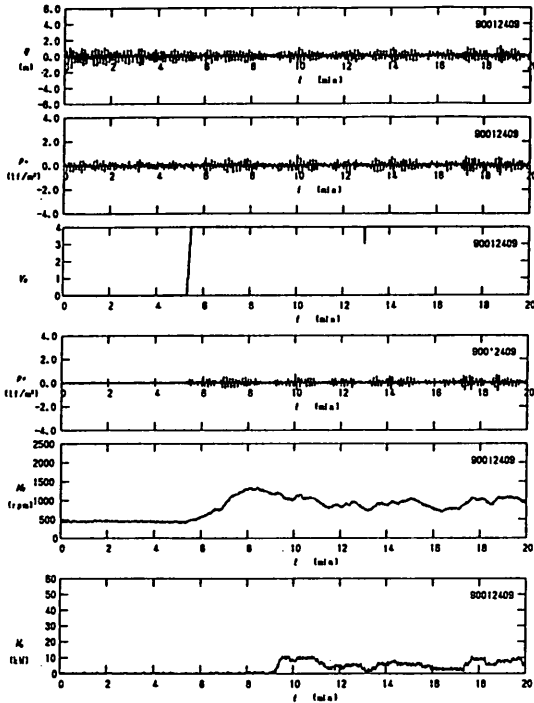


図-52(b) タービンの初期起動状況(通常の場合)

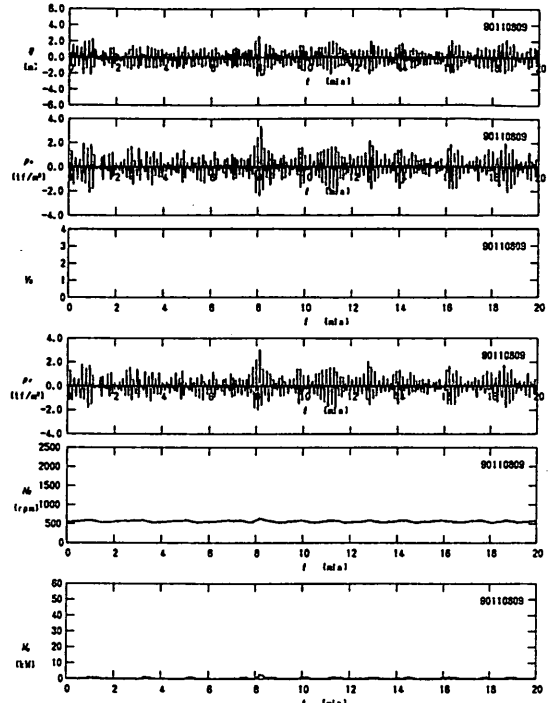


図-52(c) タービンの初期起動状況(初期起動しない場合)

的高いにもかかわらずタービンが定常回転に達しない例はかなり少ないが、中心波向が防波堤法線に直角方向と 30° 以上外れている場合に多いようである。また、ウェルズタービンの特性として、タービンの出力が最大となる運転を行うためには、タービン翼と空気流の迎角が最適となるような制御を行う必要がある。この例のように高波高の時は、空気流の流速がタービン翼の回転による推進速度より大きすぎるため、翼に対する空気流の迎え角が大きすぎて失速している。このような場合には、空気流調整弁を開いて空気流を絞ることによって徐々に回転数を最適な状態にし、その後、弁を閉じると通常の運転が可能となる。

b) 回転数と変動

図-53は、有義波高と発電運転時における平均タービン回転数 N_r 、回転数の標準偏差 σ_N の関係を示している。図には熱力波動法で波向きが 0° の時の計算値を実線で示している。また測定値は波向き別に記号で示している。破線は空気漏れの影響を考慮して開口率をやや大きくした計算値である。平均回転数は当然のことながら波高とともに大きくなる。実線と破線では、空気パワーの利用率が小さい破線の方が平均回転数、標準偏差ともに小さくなっている。測定値は波向きによって変化し、波向きが 0° に近い場合、破線で示した計算値がほぼ測定値の上

限となっている。回転数の標準偏差も波高とともにやや増大するが、空気流調整弁や圧抜弁による制御が適切に行われているため標準偏差はそれほど大きくなり、破線の計算値が測定値のほぼ上限である。

5.4 実用機の発電予測

本実証実験の結果から、「熱力・波動法」の理論に基づく波力発電装置の設計法がほぼ妥当であることが検証された。ただし今回の実験装置は2章の概要で述べているように実験予算の制約があり最適なシステムにはなっていない。しかしながら、実験結果から空気室に最適なタービン・発電機、すなわち実用機の諸元を求めることは

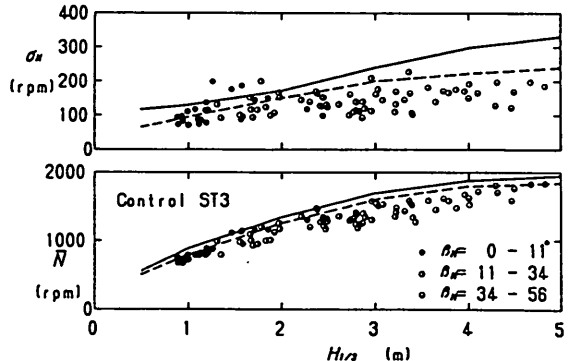


図-53 タービン回転数の平均と標準偏差

可能である。表-7は、空気室の大きさに適合してタービンの直径を2.4m、発電機の定格を200kWとした実用機の諸元を示している。実用機では機器の定格が適切であるため、ダミーノズル、圧抜弁は用いないこととした。空気流調整弁は、実験機と同じものを用いている。タービン回転数と発電出力の関係は、タービン直径が大きくなっているため1000rpmで定格の200kWとなる。そして空気流調整弁の制御は、1300rpmで一開度開き、1000rpmで一開度閉じるような設定とする。ただしタービン・発電機を大きくしたことにより、これらの回転部の慣性モーメントが大きくなり回転数の変動も小さくなることが期待される。

図-54は、「熱力・波動法」による実用機の発電予測計算結果である。発電運転は実験機と同様に有義波高1~5mの波に対して行う。例えば、発電対象の中心となる有義波高2.2mでタービン回転数が700rpmとなり75kWの発電出力となる。空気出力効率、タービン効率、発電機効率およびこれらの積である発電効率は、それぞれ0.53, 0.43, 0.90, 0.21である。実用機は実験機と異なり空気パワーの利用率は0.97と高い。また有義波高4mでは定格200kWの発電出力となっている。ただし、この計算は波の方向分散性の影響は考慮しているが、中心波向きを0°としており、実際には波向きによって多少小さくなると考えられる。結果を詳細にみると、実用機では実験機より空気室の全体としての開口率がやや大きくなり、空気出力効率も現在の空気漏れを考慮した計算値程度に大きくなる。タービンは実験機と同じ型のタービンを用いるため、タービン効率は実験機とほぼ等しくなる。発電機もほぼ同様であるため効率も実験機に等しくなる。回転数の標準偏差 σ_N はタービンが大きくなるためかなり小さくなり、有義波高5mでも100rpm程度と実験機の半分以下となる。発電効率 EFF_{avg} は実験機とほぼ等しいが空気パワーの利用率が大きいので、発電出力は実験機のおよそ4倍程度となる。

表-8は、酒田港において上述の実用機を設置した時にどのような運転状況となるかを計算したものである。計算には図-54に示した効率と年間の平均波高が平均的な値に近い波浪観測データを用いた。この表には、比較のために酒田の冬期だけの場合と、和泊港（沖永良部島）、そして本州の太平洋側に位置する鹿島港についても計算結果を示している。年間の平均入射波パワーが最も大きいのは鹿島港で、次が酒田港、和泊港の順番となる。酒田港の冬期の入射波パワーは15.9kW/mと、3港の年間平均値より大きい。発電出力は、酒田港では年間の平均発電量は29.2kW、発電時間率はやや小さく42.4%であ

表-7 実用機の諸元

空気室	$B=6.75m, l_B=20m$ $d_c=3m, A_w=115m^2$
タービン	$2R_t=2.4m$ $A_t=1.99m^2 \times 2$ $I_{rot}=1650kgm^2 \times 2$
発電機	200kW (1000rpm-200kW)
空気流調整弁	close - open (1000rpm) (1300rpm) $c_{av} \varepsilon_v=0.00892$

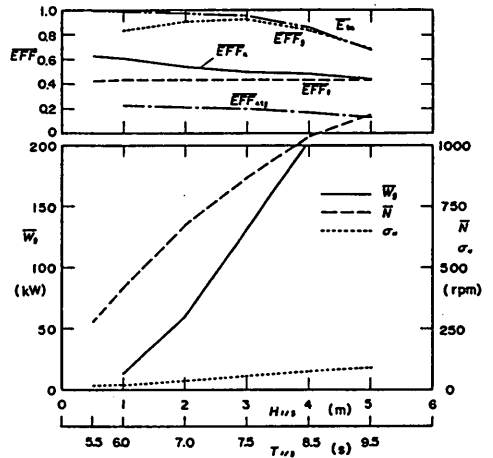


図-54 実用機の発電予測

る。冬期のみでは51.7kW、71.7%となる。鹿島港は年間を通じて発電でき、発電時間率が70.6%で平均発電量は40.1kWとなる。

6. まとめ

酒田港における波力発電ケーソン防波堤現地実証実験の観測データの解析結果をまとめると以下ようになる。
①発電運転時の波の状況を明かにし、酒田港における波と波パワーの特性を把握した。たとえば、1990年冬期の平均有義波高は1.72m周期は6.2s、平均波パワーは13.9kW/mである。また酒田港の冬期風浪による波パワーは、その方向分散性によって分散が無い場合に比して85%となることがわかった。

表-8 実用機の稼働予測

項目	単位	酒田(通年)	酒田(冬期)	和泊(通年)	鹿島(通年)
平均有義波高	m	1.17	1.76	1.18	1.45
平均有義波周期	s	5.19	6.14	7.19	7.97
平均入射パワー	kW/m	9.21	15.86	7.60	10.75
発電運転時間率	%	42.4	71.7	50.0	70.6
平均発電出力	kW/20m	29.2	51.7	23.0	40.1

さらに、波パワーの簡易算定法の妥当性を確認するなど波パワーの一般的な特性についても知見を得ることができた。

- ②波力発電ケーソンの空気室の設計波圧分布がほぼ妥当であることが確認された。たとえば空気圧縮時に $1w_0H$ の圧力となる。ただし、引き波時の空気室内上部の負圧は、設計では $-0.5w_0H$ としているが、 $-1.0w_0dc$ 程度でよい。また、空気室隔壁の波圧は $0.25w_0H$ で設計しているが、斜め入射波による波力を考慮して $0.5w_0H$ 程度にする必要がある。
- ③実験期間中に設計波にほぼ匹敵する波浪も来襲したが滑動等の被災は無く、堤体の耐波安定性が確認された。また、波力発電ケーソン全体に作用する波力は設計値にほぼ等しく、合田式を準用した設計法の妥当性が確認された。
- ④発電システムはほぼ設計どおり作動した。たとえば、有義波高3mで36kW程度の発電となった。空気流調整弁や圧抜弁などの保護対策装置を含めた発電装置の出力や効率、熱力・波動法で計算した値とほぼ一致しており、この計算法に基づく設計法の妥当性が確認された。
- ⑤定格200kWのタービン発電機を持つ実用機の発電予測計算を実施した。実用機では、ダミーノズルがなくまた定格も大きいため実験機より発電出力が向上し、有義波高4mで定格200kWの発電となる。

本報告は、すでに述べたように観測データの解析結果をとりまとめたもので、装置の設計・施工あるいは発電電力の利用方法に関する試験などについては別の報告書等を参考にされたい。酒田港の現地実証実験は、初期の目的を達して1992年3月に終了した。今後は、この実用化をめざして電力の利用と結びつけた検討を進めて行きたい。

本実証実験は、合田良實横浜国大教授を委員長とする委員会の指導のもとに行っている。また、実証実験は最初に述べたように第一港湾建設局と沿岸開発技術研究センターを中心とした民間会社20社との共同研究であり、

実験の計画から報告書の取りまとめに至るまでに非常に多くの方々の協力を得ている。ここに記して各位に深甚なる感謝の意を表します。(1992年3月31日受付)

参考文献

- 1) 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：波エネルギー利用技術の現状と将来展望，土木学会，1990，219p.
- 2) 宮崎武晃・堀田平・鷺尾幸久・石井進一：沖合浮体式波力利用装置（マイティーホエール）の経済性検討，第3回波浪エネルギー利用シンポジウム，1991，pp.471-483.
- 3) 近藤倣郎・渡部富治：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，1991，pp.83-89.
- 4) 小島朗史・合田良實・鈴木諭司：波力発電ケーソンの空気出力効率の解析，一 波エネルギーに関する研究，第1報一，港湾技術研究所報告第22巻第3号，1983，pp.125-158.
- 5) 小島朗史・鈴木諭司：波力発電ケーソンに働く波力特性に関する実験，一 波エネルギーに関する研究，第2報一，港湾技術研究所報告第23巻第1号，1984，pp.53-81.
- 6) 高橋重雄・小島朗史・鈴木諭司：Air Power of Pneumatic-type Wave Power Extractors due to Irregular Wave Actions，一 波エネルギーに関する研究，第3報一，港湾技術研究所報告第24巻第1号，1985，pp.3-41.
- 7) 高橋重雄・鈴木諭司：波力発電ケーソンに設置されたウェルズタービンの出力計算法，一 波エネルギーに関する研究，第4報一，港湾技術研究所報告第24巻第2号，1985，pp.205-238.
- 8) 高橋重雄・明瀬一行・吉本靖俊・田中智：Variation of wave power extraction due to incident angle and directional spreading，一 波エネルギーに関する研究，第5報一，港湾技術研究所報告第26巻第1号，1987，pp.3-39.
- 9) 高橋重雄・安達崇・田中智：大型模型による波力発電実験，一 波エネルギーに関する研究，第6報一，港湾技術研究所報告第26巻第3号，1987，pp.3-35.
- 10) 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，一 波エネルギーに関する研究，第7報一，港湾技術研究所報告第27巻第2号，1988，pp.23-57.
- 11) 合田良實，桜井正憲，森好正，松沢直球：波力エネ

- ルギー利用技術総合調査, 第2回波浪エネルギー利用シンポジウム, 海洋科学技術センター, 1987, pp.249-258
- 12) 合田良實ほか: 酒田港における防波堤利用の波力発電実験, 第3回波浪エネルギー利用シンポジウム, 海洋科学技術センター, 1991, pp.151-160.
- 13) 中田博昭, 鈴木勝, 高橋重雄, 鹿籠雅純, 大根田秀明, 五十嵐正一, 新保修: 波力発電防波堤ケーソンの設計と観測結果, 第3回波浪エネルギー利用シンポジウム, 海洋科学技術センター, 1991, pp.161-170.
- 14) 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: 波力発電防波堤の施工, 第3回波浪エネルギー利用シンポジウム, 海洋科学技術センター, 1991, pp.171-180.
- 15) 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: 波力発電防波堤の波エネルギー変換装置の設計, 第3回波浪エネルギー利用シンポジウム, 海洋科学技術センター, 1991, pp.181-194.
- 16) 大根田秀明, 小宮俊夫, 藤田良一, 高橋功, 国栖広志, 石田英行, 澤田源平, 藤川功一, 舟田邦雄: 波力発電防波堤の電力利用システム, 第3回波浪エネルギー利用シンポジウム, 海洋科学技術センター, 1991, pp.229-238.
- 17) 合田良實ほか: 波力発電ケーソン防波堤の実証実験結果, 第16回海洋開発シンポジウム, 土木学会, 1991.
- 18) 中田博昭・大根田秀明・鹿籠雅純・高橋重雄・安達崇: 酒田港波力発電防波堤現地実証実験における波浪と波パワーの観測, 第38回海岸工学論文集, pp.136-140, 1991.
- 19) 中田博昭・鈴木勝・加藤久雄・大根田秀明・高橋重雄: 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, 第38回海岸工学論文集, pp.606-610, 1991.
- 20) 中田博昭・大根田秀明・鹿籠雅純・高橋重雄: 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, 投稿中.
- 21) 高橋重雄・安達崇: 日本周辺における波パワーの特性と波力発電, 港湾技研資料, No.654, 1989, 18p.
- 22) 合田良實: 港湾構造物の耐波設計法, 鹿島出版会, 1977, 237p.
- 23) 磯部雅彦・近藤浩右・堀川清司: 方向スペクトルの推定におけるMLMの拡張, 第31回海岸工学講演会論文集, 1984, pp.173-177.
- 24) 橋本典明: ベイズ型モデルを用いた方向スペクトルの推定, 港湾技術研究所報告, 第26巻第2号, 1987, pp.97-125.
- 25) 合田良實: 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, 1984, pp.19-32.
- 26) 菅原一晃・小舟浩治ほか: 沿岸波浪観測15か年統計(昭和45年~昭和59年), 港湾技研資料, No.554, 1986, 872p.
- 27) 橋本典明・小舟浩治・亀山豊: 現地波浪データを用いた方向スペクトル推定法に関する検討, 港湾技術研究所報告, 第27巻第2号, 1988, pp.59-94.
- 28) 小舟浩治: わが国沿岸域における波浪観測手法と出現波浪の特性に関する研究, 港湾技研資料, No.668, 1990, 188p.
- 29) 小舟浩治・合田良實ほか: 現地観測における水圧波形状から表面波への換算手法について, 港湾技術研究所報告, 第27巻第3号, 1988, pp.161-183.
- 30) 運輸省港湾局: 港湾施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 1989.
- 31) 高橋重雄・谷本勝利: 直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力, 第2報-現地観測波圧データの解析-, 港研報告, 第23巻2号, 1984, pp.3-25.
- 32) 高橋重雄・明瀬一行: 波力発電ケーソンの空気出力効率に及ぼす波向きと平面配置の影響, 第33回海岸工学講演会論文集, 1986, pp.501-505.
- 33) 鈴木正己・荒川忠一・田古里哲夫: 波力発電用ウェルズタービン性能に及ぼす諸因子の影響, 第2回波浪エネルギー利用シンポジウム, 1987, pp.73-82.
- 34) 宮崎弘志, 花村哲也, 和田憲治, 東江隆夫: 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, 海洋科学技術センター, 1987, pp.361-370.

主要記号表

A_n	: ノズルの開口面積
A_p	: 圧抜弁の開口面積
A_t	: タービンの開口面積
A_w	: 空気室の面積
B	: 空気室の幅
c_{av}	: 流量係数
$C_g(f)$: 波の群速度
D_0	: 空気室の静水面上の高さ
d_c	: カーテンウォールの没水水深
EFF_a	: 空気出力効率
EFF_t	: タービン効率

EFF_g	: 発電機効率	$T_{1/3}$: 有義波周期
EFF_{atg}	: 発電効率	t	: 時間
EFF_{atgo}	: 空気パワーの利用率を含む発電効率 ($= EFF_{atg} \times E_{ta}$)	V_B	: 空気流調整弁の作動率
E_{ta}	: 空気パワーの利用率	V_P	: 圧抜弁の作動率
F_H^+	: 堤体に作用する正の波力合力	V_W	: 平均風速
F_V^+	: 堤体に作用する正の鉛直波力合力	W_i	: 入射波パワー (単位長さあたり)
f	: 波の周波数	W_{iem}	: 平均波向のずれを考慮しない入射波パワー
f_p	: スペクトルのピーク周波数	W_{ier}	: 周波数スペクトルから求まる波パワー
$G(f; \theta)$: 波のスペクトルの方向関数	$W_{ie\theta_0}$: 波の方向分散性による低減を考慮しない波 パワー
g	: 重力加速度	W_{iin}	: 空気室の入射波パワー
H	: 波高	W_a	: 空気パワーの平均値
H_0	: 沖波の波高	W_{at}	: タービンに入る空気パワー
$H_{1/3}$: 有義波高	W_{aout}	: 大気に開放される空気パワー
$H_{1/10}$: 1/10最大波高	W_g	: 発電出力の平均値
H_{max}	: 最高波高	W_t	: タービンパワーの平均値
h	: 水深	w_0	: 海水の単位体積重量
h_c	: ケーソンの天端高さ (静水面上)	α_2	: 合田式の修正係数
I_{ig}	: タービン・発電機の慣性モーメント	α_t	: タービンの仰角
k	: 波数	β_M	: ケーソンに直角方向と平均波向きのなす角
k_r	: 反射率	ε	: 空気ノズルの開口率
k_t	: 波高伝達率	ε_{prv}	: 空気流調整弁の開口率
$K(f)$: 応答関数	ε_t	: タービンの開口率
L	: 波長	κ	: 波パワーの係数
$L_{1/3}$: 有義波の波長	κ_w	: 水深による波パワーの変化を示す係数
L_0	: 沖波の波長	κ_d	: 中心波向きと方向分散性による波パワーの 変化を示す係数
L_{op}	: スペクトルピーク周期における沖波の波長	κ_d'	: $= \kappa_d / \cos \beta_M$
l_B	: 空気室の波峰線方向の長さ	θ	: 波向
m_0	: 波の周波数スペクトルの面積	θ_M	: 平均波向き
N_t	: タービン・発電機の回転数	θ_w	: 風向き
p_a	: 空気室内の圧力	σ	: 鉄筋の作用応力
p_d	: タービン前後差圧	σ_{ca}	: コンクリートの許容応力
p_{prv}	: 圧抜弁の作動限界圧力	σ_{sa}	: 鉄筋の許容応力
p^{+max}	: 正の波圧の最大値	σ^{+max}	: 正の鉄筋応力の最大値
$p^{+1/10}$: 正の波圧の1/10最大値	$\sigma^{+1/10}$: 正の鉄筋応力の1/10最大値
$p^{+1/3}$: 正の波圧の1/3最大値	$\sigma^{+1/3}$: 正の鉄筋応力の1/3最大値
p^{+mean}	: 正の波圧の平均値	σ^{+mean}	: 正の鉄筋応力の平均値
p^{-max}	: 負の波圧の最大値	σ^{-max}	: 負の鉄筋応力の最大値
$p^{-1/10}$: 負の波圧の1/10最大値	$\sigma^{-1/10}$: 負の鉄筋応力の1/10最大値
$p^{-1/3}$: 負の波圧の1/3最大値	$\sigma^{-1/3}$: 負の鉄筋応力の1/3最大値
p^{-mean}	: 負の波圧の平均値	σ^{-mean}	: 負の鉄筋応力の平均値
R_t	: タービンの直径	σ_N	: タービン回転数の標準偏差
S_{max}	: 光易型方向関数の方向集中度パラメータ	η	: 空気室内水位
$S(f)$: 波の周波数スペクトル	η_{pw}	: 水圧から変換した水位
T	: 波の周期		

η_{usw}

：超音波式波高計で計測した水位

ρ_w

：海水の密度