

灯標用空気式波浪発電装置の研究

(その1 円筒固定型空気室の波エネルギー吸収特性)

岩井 勝美*・井上令作*

Studies on Air-Turbine Type Wave Energy Converter for Use of Light Beacon

Part 1 Wave Energy Absorption Characteristics of Fixed Type Circular Air Chamber

By

Masami IWAI and Reisaku INOUE

Abstract

The light beacon which is installed on the sunken rock, etc. as navigation aid has great difficulty in securing power supply because of its installing location.

The research project concerns both with the experimental investigation on the performance of circular air chamber and that of air turbine, which means a technical extension of the light buoy technology which already has been realized as only case successfully utilizing wave energy.

This paper deals with the first stage of the investigation, i. e., the power absorbing characteristics of circular air chamber in order to squeeze wave energy efficiently even in the calm or moderate sea state throughout a year.

The circular air chamber is attached around circular base of light beacon and is divided into two or four chambers.

In the experiment a 1/5 scale model has been used and the wave power absorbing efficiencies for each air chamber have been measured for various wave directions, wave periods and heights, water-line levels and so on. As the results, it is clarified that this system can generate sufficient power for use of the light beacon. Furthermore, absorbed wave energy was calculated by use of the equivalent floating body concept and compared with experimental values.

目 次

1. まえがき.....	2	(2) 底板及び円弧板.....	3
2. 二次元空気室による波エネルギー吸収効率.....	2	2.2 波エネルギー吸収効率の求め方.....	4
2.1 実験方法.....	2	2.3 実験結果及び考察.....	4
2.1.1 基本実験.....	2	2.3.1 基本模型の波エネルギー吸収効率.....	4
2.1.2 アダプター付実験.....	3	2.3.2 前面没水部アダプターによる波エネルギー吸収効率の変化.....	4
(1) 前面没水部アダプター.....	3	2.3.3 底板及び円弧板による波エネルギー吸収効率の変化.....	5
		3. 円筒型空気室の波エネルギー吸収特性.....	5
		3.1 実験方法.....	6

* 海洋開発工学部

原稿受付：昭和61年5月6日

3.1.1 空気室の設計条件 6

3.1.2 供試模型 6

3.1.3 実験項目 8

3.1.4 計測項目 8

3.2 実験結果及び考察 8

3.2.1 空気室の吸収エネルギー 8

(1) 各空気室の吸収エネルギー 9

(2) ノズル開口比による吸収エネルギー
の変化 9

(3) 波の入射角による吸収エネルギーの
変化 10

(4) 前面没水部長による吸収エネルギー
の変化 11

(5) 突出壁の効果 11

3.2.2 不規則波実験 11

3.3 吸収エネルギーの計算 12

3.3.1 計算方法 12

3.3.2 実験値との比較 13

4. 結論 14

5. 謝辞 14

1. ま え が き

航路標識として岩礁上に設置される灯標には、灯標電源として通常バッテリーが使用されているが、その交換や保守に大きな負担がかかることから、灯標周辺に存在する波エネルギーを電源として利用することは極めて有利な方法といえる。

現在、波浪発電装置が実用化されているものに、航路標識としての小型ブイ式の灯浮標がある。本研究ではこれらの波浪発電装置を大型化し、固定式灯標の電源として利用できる空気式の波浪発電装置を開発することを目的としている。空気式波浪発電装置は、波エネルギーを空気室内の空気の運動エネルギーに変換し、その空気をノズルから噴出させ、タービンを回転させ発電する方法である。ここでは、空気室及びタービン・発電機に関する研究をそれぞれ平行して実施した。^{1),2)}さらに、それらの結果を総合して考察することにより、一つのシステムとしての灯標用波浪発電装置に関する開発研究を行っている。

灯標の電源としての波浪発電装置は年間を通してエネルギーの供給が必要であり、そのためには潮汐の干満による水位の変動、波高及び波周期、波の入射方向などにかかわらず、必要最小限の波エネルギーの吸収が保障されなければならない。このような条件に適したものとして、円形の灯標基礎部の周囲に、円筒型空

気室をもつ波浪発電装置を採用した(図-9 参照)。

空気室の設計にあたっては、まず、二次元空気室模型に各種アダプターを取り付けて水槽実験を実施し、波エネルギー吸収効率の変化を検討した。それに基づき、灯標の設置予定海域の波浪及び潮汐のデータをもとに、実機で約300Wの発電出力が可能となるように空気室の主要目を設定し、縮尺1/5の模型を用いて水槽実験を行い、円筒型空気室の波エネルギー吸収特性をしらべた。

2. 二次元空気室による波エネルギー吸収効率

円筒型空気室の主要目を設定するに先だち、二次元空気室による波エネルギー吸収効率を確認するための基本実験と空気室に各種アダプターを取り付け、空気室の波エネルギー吸収効率の変化をしらべるためのアダプター付実験を二次元水槽で実施した。

2.1 実験方法

2.1.1 基本実験

空気室の基本模型は厚さ1.5cmの透明アクリル板を使用して製作した。その形状及び寸法を図-1に示した。実験は図-2に示した二次元水槽の一端に空気室模型を設置し、これに波をあて、その時の空気室内の空気圧及び水位変動を計測し、吸収エネルギーを求めた。

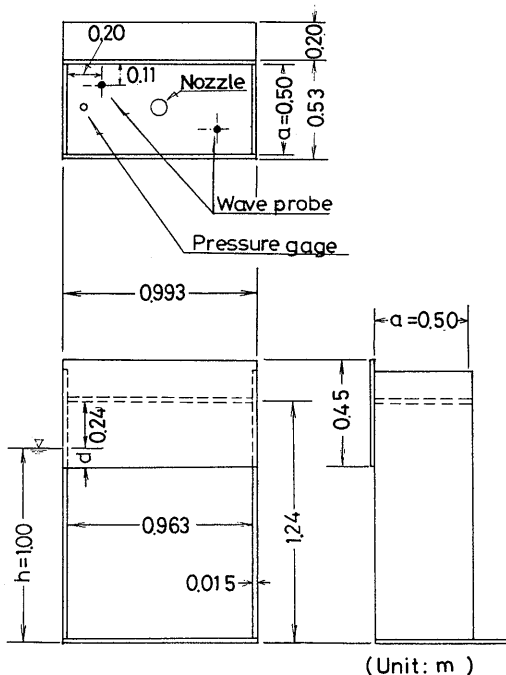


図-1 二次元空気室模型

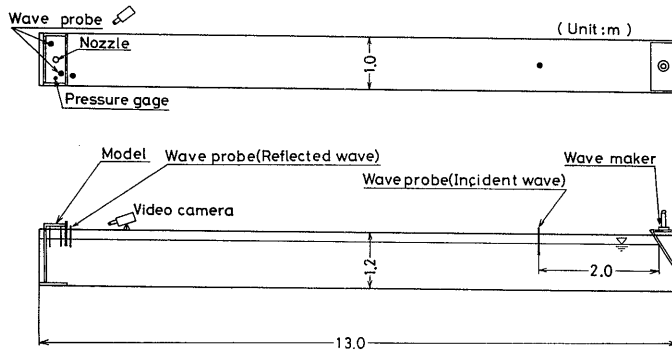


図-2 二次元水槽と模型及び計測器の配置

表-1 実験状態

		実験状態					
前面没水部長 d (cm)		4	6	8	14	20	
ノズル開口比 R		1/50	1/75	1/100	1/150	1/270	1/350
規則波	T (sec)	1.0	1.2	1.6	2.0	2.2	
	H_i (cm)	4	6	8			

タービン・発電機にかわる空気室の負荷は、模型の天端にある円孔ノズルから空気を噴き出させることにより加えた。また、前面没水部 d （水面から模型前面の没水部先端までの深さ）は模型前面のアクリル板を上下して変化させることができる。

表-1に実験状態を示した。前面没水部長 d の変化は潮位の変動に対する吸収エネルギーの変化をしらべるためのものである。また、ノズル開口比 R は円孔ノズル面積と空気室の水線面積 (0.482m^2) との比であり、空気室に作用する負荷を表わすパラメーターである。

図-2に示したように、入射波及び模型前面での反射波を容量式の波高計で、空気室内の空気圧及び水位をそれぞれ微小圧力計及び容量式水位計で計測した。また、空気室内部の水面の運動をビデオカメラで撮影した。

2.1.2 アダプター付実験

(1) 前面没水部アダプター

前面没水部アダプターは空気室の波エネルギー取り入れ口、即ち前面没水部先端で波エネルギーをよりスムーズに空気室内に取り入れることを目的として取り付けられたもので、直径10cm及び9.7cmのアルミニウム製の半円筒型のものである。図-3にその形状と寸法を示した。

(2) 底板及び円弧板

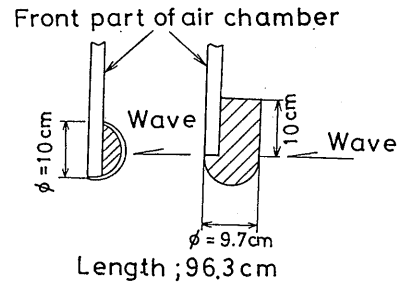


図-3 前面没水部アダプター

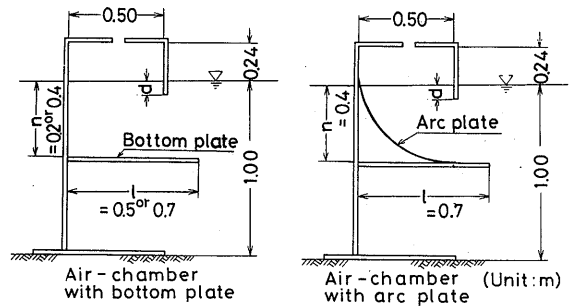


図-4 底板及び円弧板付空気室模型

底板及び円弧板を、波の水平方向のエネルギーを空気室内で効率よく鉛直方向のエネルギーに変換させるために、図-4に示したように空気室内に取り付けた。

底板は厚さ1.5cmの透明アクリル板であり、その長さ l は0.5及び0.7mである。その取り付け位置 n は水面より0.2及び0.4mの深さである。

円弧板は厚さ2mm、曲率半径0.5mのアルミニウム板を $l=0.7\text{m}$ の底板に取り付けた。図-4にその形状及

び寸法を示した。

2.2 波エネルギー吸収効率の求め方

空気室内の空気圧と水位の変動を実験で計測することにより、空気室における吸収エネルギーを求めることができる。そして、入射波のエネルギーとの比で、波エネルギー吸収効率を計算できる。

いま、ある一定幅における入射波の波エネルギーを E_i 、同一幅の二次元空気室で吸収されたエネルギーを E_a とし、波エネルギー吸収効率 η を次式で定義する。

$$\eta = E_a / E_i \quad (1)$$

単位時間に幅 B を横切って輸送される平均波エネルギーは次式で表わされる。⁶⁾

$$E_i = \frac{B}{8} \rho g H_i^2 V_g \quad (2)$$

上式で V_g は入射波の群速度であり、微小振幅浅水波として次式で計算した。

$$V_g = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{4\pi h / \lambda}{\sinh 4\pi h / \lambda} \right) \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{\lambda}} \quad (3)$$

ここで、 λ は入射波の波長であり、微小振幅浅水波として次式で計算した。

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{\lambda} \quad (4)$$

H_i ; 入射波の波高

T ; 入射波の周期

h ; 水槽の水深

ρ ; 水の比重

g ; 重力の加速度

入射波が空気室内に伝達されたとき、空気室内の水位は一様に水平に上下するものと仮定する。この水位変動の速度を v とし、空気室内の水面に作用する圧力を p とすると単位時間内に吸収される波エネルギー E_a は次式となる。

$$E_a = \frac{1}{T} \int_0^T p v A dt \quad (5)$$

ここで、

p ; 空気室内の水面に作用する空気圧力

v ; 水面の上下変位速度

A ; 空気室の水線面積

T ; 入射波の周期

空気室内の水位や圧力はすべて時間に対して正弦的に変動するものと仮定する。また、実験結果から、圧力と水位の位相差はすべての場合ほとんど $\pi/2$ であることを考慮して (図-15参照), (5)式を積分すると、空気室の吸収エネルギー E_a は次式となる。

(314)

$$E_a = \frac{1}{2} \omega z_0 p_0 A \quad (6)$$

ここで、

ω ; 入射波の円周波数

z_0 ; 空気室内の水位の上下変位振幅

p_0 ; 空気室内の空気圧振幅

また、現象の線型化については、3.3.1で述べる。実験値の解析にあたっては入射波、空気室内の空気圧及び水位の変位などの計算値はすべてフーリエ解析を行い、その一次項を用いた。

2.3 実験結果及び考察

2.3.1 基本模型の波エネルギー吸収効率

図-5は基本模型における波エネルギー吸収効率 η とノズル開口比 R との関係を示したものである。実験値はすべて入射波の波高 $H_i = 6$ cmの場合の値のみをプロットで示し、また波高を変えて得た結果を平均して波周期ごとに実線等で示した。

吸収効率の最大値は波周期 $T = 1.2$ sec 付近の波でノズル開口比 $R = 1/100$ の場合であり、その値は約80%である。これらの結果はこれまでにに行なわれている幾つかの二次元模型実験の結果と一致している。^{例えは3)}

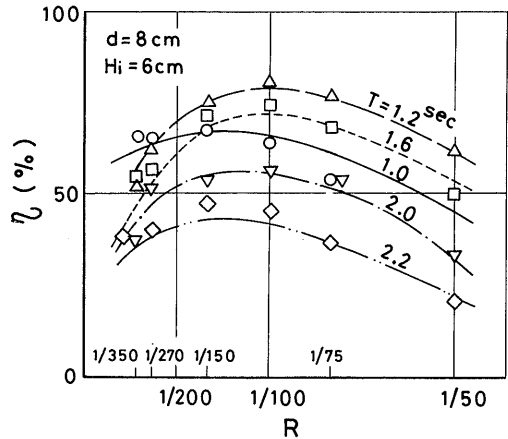


図-5 ノズル開口比に対する吸収効率の変化

2.3.2 前面没水部アダプターによる波エネルギー吸収効率の変化

図-6に前面没水部に半円筒型のアダプターを付けた場合の吸収効率 η とアダプターを付けない基本模型の吸収効率 (実線) を比較して示した。波周期 $T = 1.0$ sec ではアダプターを付けた場合の方が吸収効率は低下しているが、1.2, 1.6 sec では逆に幾分増加して

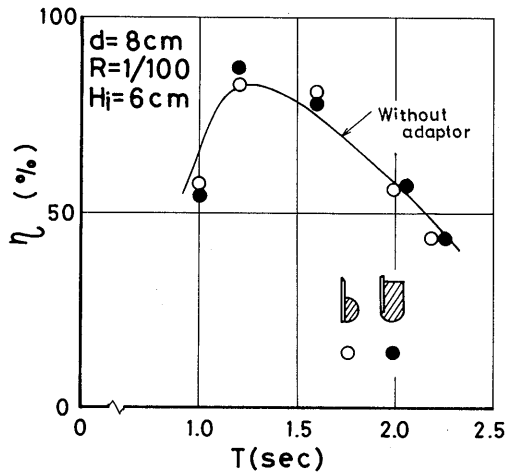


図-6 前面没水部アダプターによる吸収効率の変化

いる。しかし、実験誤差もあるので、両者の値はほとんど変わらないものとする、前面没水部アダプターによる吸収効率の増加に対する効果はないものと考えられる。

一方、空気室を設計する場合には、前面没水部先端の厚さは波圧に耐えるように非常に厚く設計されるものと考えられる。従って、前面没水部先端の厚さが空気室奥行の1/5程度の厚さ(本実験では空気室奥行は50cm、前面没水部アダプターの厚さは9.7及び10cm)になっても吸収効率は減少しないものと考えられることができる。

2.3.3 底板及び円弧板による波エネルギー吸収効率の変化

図-4に示した底板付模型と基本模型における吸収効率を比較して図-7に示した。黒丸印は底板の取り付け深さ $n=40\text{cm}$ で、白丸印は $n=20\text{cm}$ の場合である。また、基本模型の実験値を実線で示した。 $n=40\text{cm}$ の場合のように底板と前面没水部先端との間の間隙がある程度以上ある場合(この場合36cm)には、その吸収効率は基本模型におけるそれと変わらない。しかし、 $n=20\text{cm}$ の場合のようにこの間隙が狭くなると(この場合16cm)、吸収効率は非常に減少する。従って、底板を取り付けることによって吸収効率の増加をはかることは期待できない。

図-8に、図-4に示した円弧板付模型及び底板付模型と基本模型における吸収効率を比較して示した。円弧板を取り付けると底板のみの場合よりも一層吸収効率は減少する。

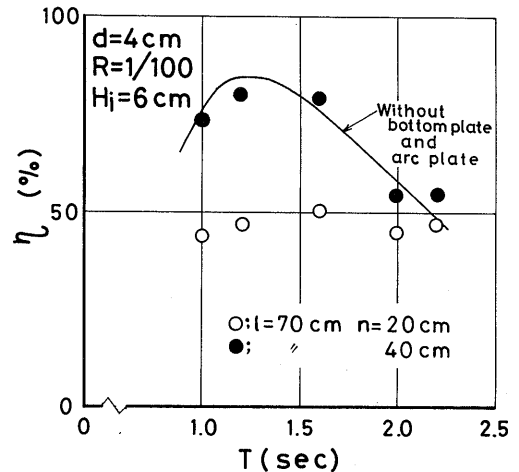


図-7 底板による吸収効率の変化

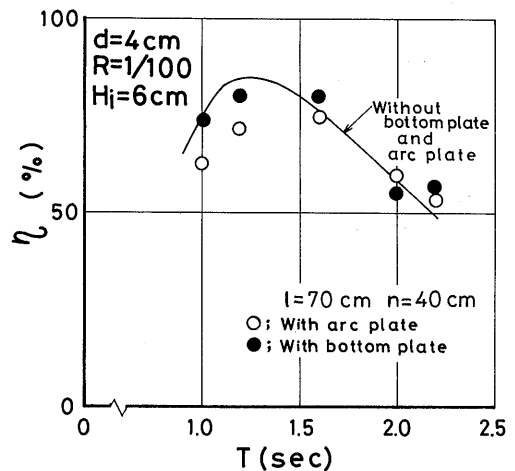


図-8 円弧板による吸収効率の変化

従って以上述べた結果をもとに、次章で述べる円筒型空気室模型を設計する場合には、これらのアダプターは考慮しなかった。

3. 円筒型空気室の波エネルギー吸収特性

図-9に灯標用の空気式波浪発電装置の概念図を示した。これは灯標の円形の基礎部の全周にわたって空気室をもち、そこで吸収されたエネルギーでタービンを回転させ発電する方式である。基礎部の全周にわたって取り付けられた空気室は円周方向に幾つかに等分割されていて各空気室の平面は扇形をなしている。こ

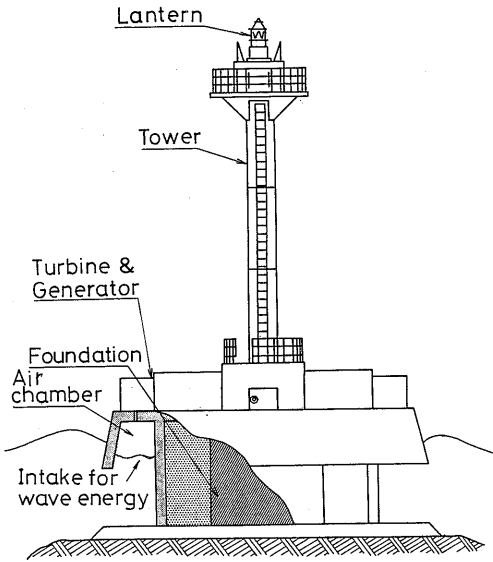


図-9 灯標用波浪発電装置の概念図

ここでは、4分割及び2分割した4空気室型及び2空気室型について波エネルギー吸収特性をしらべた。

3.1 実験方法

3.1.1 空気室の設計条件

灯標用の波浪発電装置としての円筒型空気室の主要目を設定するに際し、灯標の建設地を徳島県小松島沖にある岩礁、沖ノ瀬と想定し、発電出力は300Wと設定した。

この地域の波浪、潮位等の自然条件はおおむね次の通りである。

- 水深 h 5 m
- 波高 $H_{1/3}$ 0.1~0.7m
- 波周期 $T_{1/3}$ 3~10sec
- 潮位変化 ΔH ± 1 m

灯標設置の想定場所の沖ノ瀬から約2 km離れた波浪観測所のデータをもとにした波高頻度分布の一例を図-10に示した。

空気室の出力を算定するにあたって、波及び潮位を表-2のように設定した。この波の設定値は、灯浮標の発電出力の算定に用いられている方法で、該当する海域の波の観測データから波高の出現率が50%に相当する波を採用し、その波で簡単に発電出力を求める方法である。潮位に関しては、実際の潮位の変動 $\Delta H = \pm 1$ mに対して、潮位が非常に低下し空気室前面没水部先端が空気にさらされてしまう -0.6 mから -1.0 mまで (316)

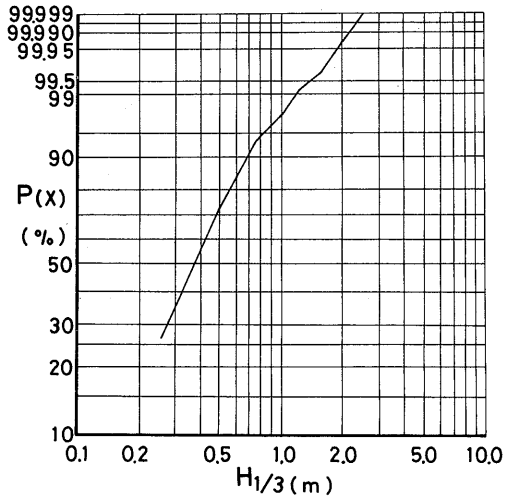


図-10 有義波高の累積頻度 (小松島港 昭和56年)

表-2 波及び潮位の設定値

設 定 値		出現率
波 高 $H_{1/3}$ (m)	0.35	} 50%
波 周 期 $T_{1/3}$ (sec)	4.0	
潮 位 ΔH (m)	1.0~-0.6	80%

の潮位、即ち、全体の20%は発電に寄与できないものとし、その出現率を80%としたものである。

このようにして定めた設定値をもとに、発電出力300 Wをまかなえる空気室出力をおおまかに算出する。いま、タービン効率を50%、発電機効率を40%と仮定すると必要な空気室出力 E_a は、

$$E_a = 300 / (\eta_H \cdot \eta_{\Delta H} \cdot \eta_T \cdot \eta_G) = 3.75 \text{ kw}$$

となる。ここで、

- η_H ; 波の出現率 50%
- $\eta_{\Delta H}$; 潮位の出現率 80%
- η_T ; タービン効率 50%
- η_G ; 発電機効率 40%

である。即ち、空気室出力が3.75kw 以上であるならば、ほぼ300W以上の発電出力になることがわかる。当然、空気室及びタービン・発電機の特徴が把握できた段階ではより正確な方法で発電出力を見積ることができ。

3.1.2 供試模型

円筒型空気室模型を図-11に、また、その写真を写真

-1に示した。円筒型空気室を設計するに際して、二次元空気室模型実験において、前面没水部アダプター、底板及び円弧板等の付属物は吸収エネルギーを増加させるためにほとんど効果がないことがわかったので、それらの付属物は一切取り付けず最もシンプルな形状として設計した。

模型は基礎部と空気室部に分離できる。模型の縮尺は1/5で、厚さ2.3及び4.5mmの鋼板で製作した。空気室部の上面及び側面の一部は透明アクリル板を用いて製作し、空気室内部の水面が観察できるようにした。ま

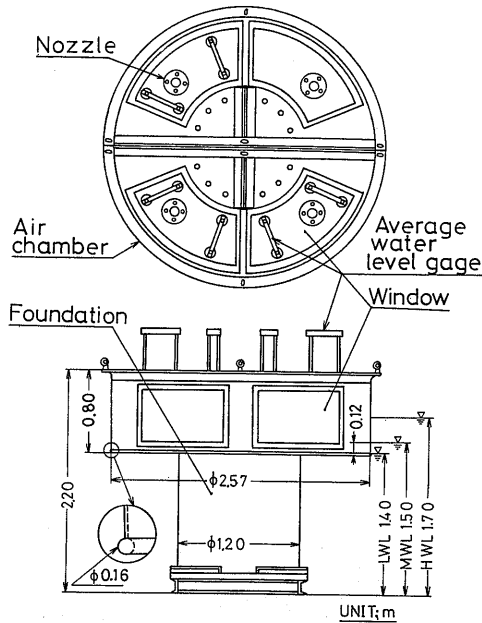


図-11 円筒型空気室模型

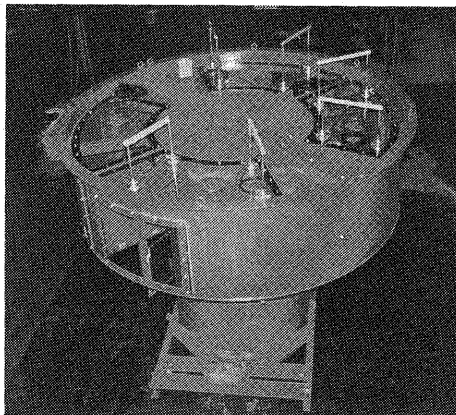


写真-1 円筒型空気室模型

た、前面没水部の下端には16mm φの丸鋼を全周にわたって溶接した。

空気室部は円周方向に4室及び2室の扇形の空気室に区切ることができる。また、空気室に対する波の入射角を変えるために、空気室部は任意の角度に回転できるようにになっている。

タービン・発電機に代る空気室の負荷は各空気室の天端にある円孔ノズルの面積を変えることにより変化させた。

空気室の寸法は次の通りである。

- 空気室外径 ; 2.56m
- ” 内径 ; 1.24m
- 空気室の直径方向の奥行 ; 0.66m
- ” 高さ ; 0.70m
- 各空気室の水線面積 (4空気室型) ; 0.985m²
- (2空気室型) ; 1.970m²

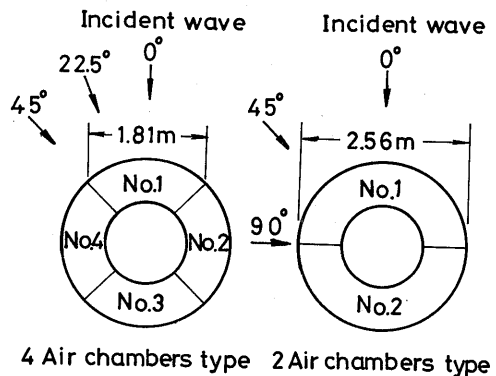


図-12 波の入射角

表-3 実験状態

		実験状態		
空気室数		4	2	
波の入射角 χ (deg)		0° 22.5° 45°	0° 45° 90°	
前面没水部長 d (cm)		12 32 2		
ノズル開口比 R		1/100 1/150 1/270		
波	規則波	T (sec)	1.0 1.5 2.0 2.5 3.0	
		H_i (cm)	5 10	
	不規則波	T_m (sec)	1.2 2.0	
		$H_{1/3}$ (cm)	6.0 9.5	

3.1.3 実験項目

図-11に示した模型を用い、空気室の数(図-12参照)、前面没水部長 d (潮位変化)、波の入射角 α (図-12参照)、ノズル開口比 R (円孔ノズル面積と空気室の水線面積との比)等を変化させて実験を行った。表-3に実験状態を示した。また、図-12に空気室数に対する波の入射角を示した。

3.1.4 計測項目

空気室模型における計測器の配置を図-13に示した。空気圧は空気室の天端で微小圧力計を用いて計測した。また、空気室内の水位変動は新しく製作した平均水位計で計測した。平均水位計は図-14に示したように、10条のテフロン被覆線と水との間の容量変化を取り出し、その間(45cm)の平均水位を計測するものである。図-14の右側に平均水位計の検定値を示す。検定の方法は平均水位計の中心のまわりに約 $\pm 20^\circ$ まで傾斜させ、平均水位計が計測する平均の水位を求めたものである。この検定結果から、平均水位が正しく計測されていることがわかる。

空気室内の水位の変動は4空気室型では各室2本、

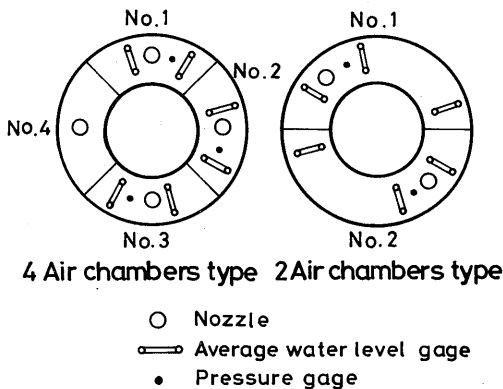


図-13 計測器の配置

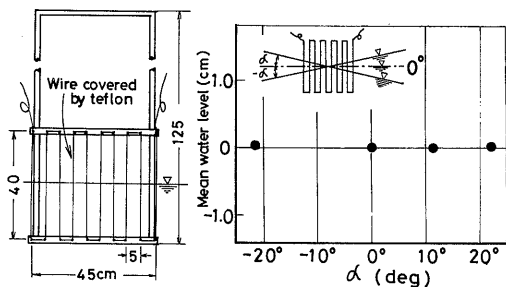


図-14 平均水位計とその検定値

2空気室型では各室3本の平均水位計で計測し、それぞれの平均値を空気室の水位変動とした。また、空気圧は各室一個の微小圧力計で計測した。これらの値のペンオシロによる記録例を図-15に示した。

実験は当所の海洋構造物試験水槽(長さ40m、幅28m、深さ2.0m)で行った。その実験写真を写真-2に示した。

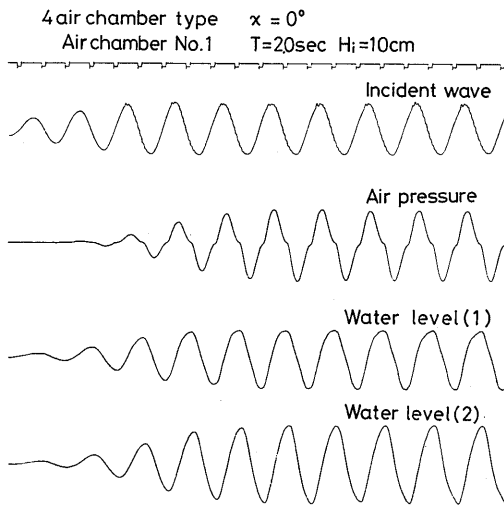


図-15 規則波実験の記録例

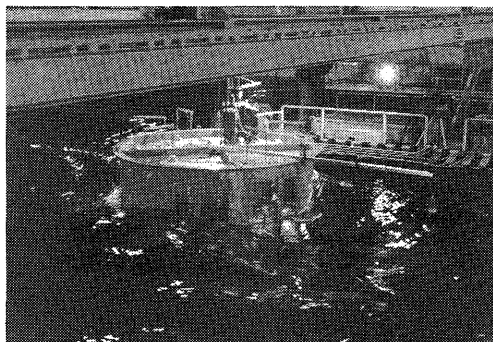


写真-2 水槽実験

3.2 実験結果及び考察

3.2.1 空気室の吸収エネルギー

円筒型空気室の特性で最も興味があるのは、それぞれの空気室における波エネルギーの吸収量や波の入射方向による吸収エネルギーの変化などである。ここでは規則波実験における波エネルギー吸収特性について考察する。不規則波実験については3.2.2で述べる。

吸収エネルギーの計算法は二次元実験の場合と同様である(2.2参照)。三次元実験では、模型実験で計測した吸収エネルギーを実機は模型と等しいフルード数をもつものとして実機に換算した値で示した。即ち、空気室での吸収エネルギーは(5)式で示される。従って実機と模型の長さ、速度、時間、圧力をそれぞれ1と l_m 、 v と v_m 、 t と t_m 、 p と p_m とし、(5)式にフルード則 $(v/v_m)^2=1/l_m$ 、 $(t/t_m)^2=1/l_m$ 、 $(p/p_m)=1/l_m$ を適用すると、

$$E_a = \left(\frac{1}{l_m}\right)^{7/2} E_{am}$$

なる式で実機に換算できる。ここで、 E_{am} は模型の吸収エネルギーとする。

(1) 各空気室の吸収エネルギー

図-16及び図-17は模型実験で計測した吸収エネルギー E_a をフルード則で実機に換算してキロワットで表わし、各空気室の吸収エネルギーを4及び2空気室型の場合について示した。横軸は波周期である。波の入射角 $\chi=0^\circ$ 、前面没水部長 $d=0.6m$ 、ノズル開口比 $R=1/100$ のときの値で、入射波高 $H_i=0.5m$ である。 $H_i=0.25m$ については全空気室の吸収エネルギーの合計値のみを示した。また、発電出力300Wを満足する空気室出力 $E_a=3.75kW$ の値を目標値として示してある。

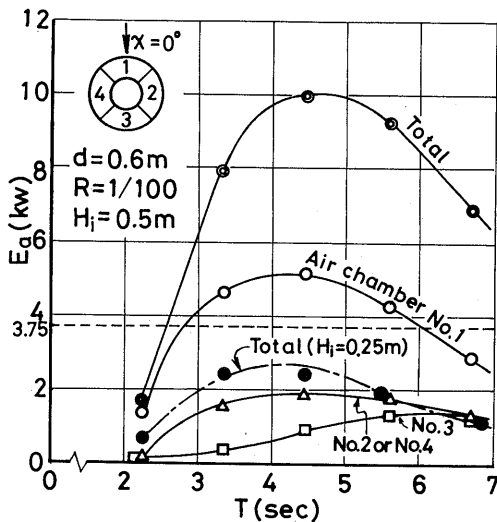


図-16 各空気室の吸収エネルギー(4空気室型)

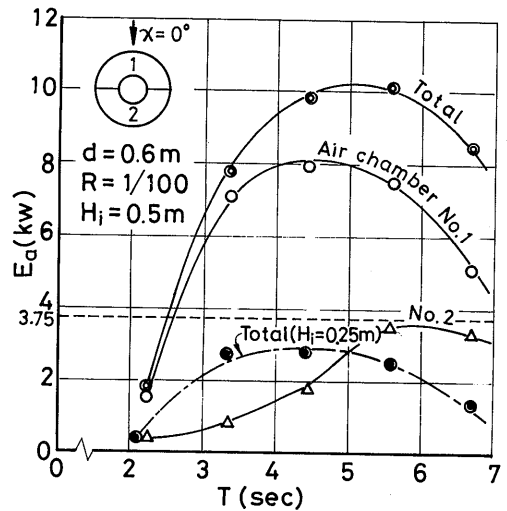


図-17 各空気室の吸収エネルギー(2空気室型)

4空気室型においては、空気室No.2及びNo.4の吸収エネルギーは空気室No.1の約2/5である。空気室No.3は極大値の発生点が高他の空気室とは異なっているが、その吸収エネルギーの最大値は空気室No.1の1/4程度である。2空気室型についてはNo.2の吸収エネルギーの最大値は空気室No.1の約1/2である。

いずれの場合も $H_i=0.25m$ の波では全吸収エネルギーは目標値3.75kWに到達できないが、0.5mでは十分である。また、空気室数は異なっても、全吸収エネルギーは両者とも同程度である。比較すると、ほぼ波高の2乗に比例していることがわかる。

(2) ノズル開口比による吸収エネルギーの変化

ノズル開口比による波エネルギー吸収効率 η の変化をノズル開口比 R をパラメーターとして図-18に示した。吸収効率 η は入射波の波エネルギー E_i と空気室での吸収エネルギー E_a との比 E_a/E_i で求めた。しかし、波エネルギー E_i の入射幅 B を二次元実験では水槽幅にとることができるが、このような三次元実験では一義的に定めることができない。そのために、ここでは便宜的に入射波の波エネルギー E_i の入射幅を空気室No.1の開口幅 $B=9.05m$ (図-18参照)としてその幅における E_i を計算した。

吸収効率 η は二次元実験の場合と同様にノズル開口比 $R=1/100$ の場合が最も大きい。図中の実線、破線、一点鎖線はそれぞれの値の平均値を結んだものである。

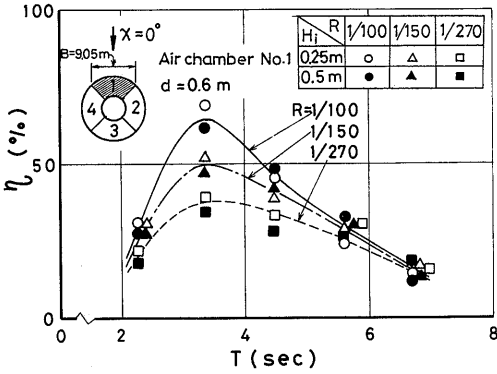


図-18 ノズル開口比による吸収効率の変化

この実験での空気室は二次元実験の場合のそれとは形状も異なり、波エネルギーの入射幅Bも便宜的に定めた値で両者の吸収効率の値を厳密に比較することはできないが、二次元実験の場合(図-5参照)よりもかなり低下している。

(3) 波の入射角による吸収エネルギーの変化

図-19及び図-20は波の入射角 χ を変化させた場合の、4及び2空気室型における実機の吸収エネルギーの変化を示したものである。 $d=0.6m$, $H_i=0.5m$ の場合であり、図-19には4空気室型における空気室No.1及び全空気室における吸収エネルギーの合計を併記した。4空気室型においてはいかなる方向から波がきて

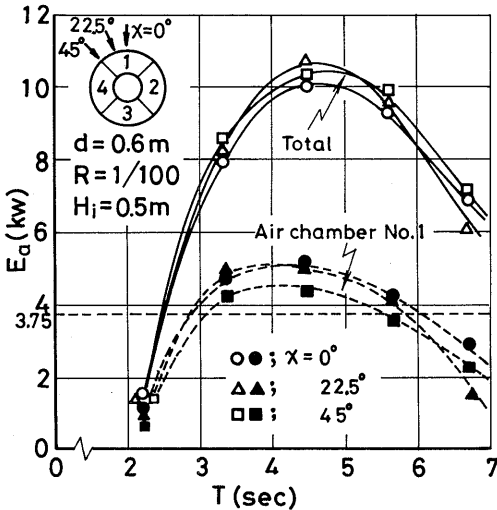


図-19 波の入射角による吸収エネルギーの変化 (4空気室型)

も、大きな変化はないことがわかる。2空気室型では波の入射角 χ が 0° から 90° に変化するに従って、吸収エネルギーは減少する。空気室No.1(図中のA.C.No.1は空気室No.1の略)においては、 $\chi=45^\circ$ 及び 90° における吸収エネルギーは $\chi=0^\circ$ の場合に対して、それぞれ2/3及び1/3程度の吸収エネルギーになっている。従って、波の入射角の大きい場所では4空気室型が2空気室型にくらべ有利であるといえる。

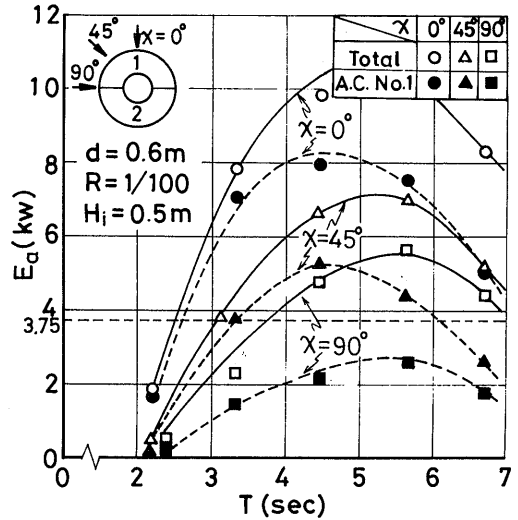


図-20 波の入射角による吸収エネルギーの変化 (2空気室型)

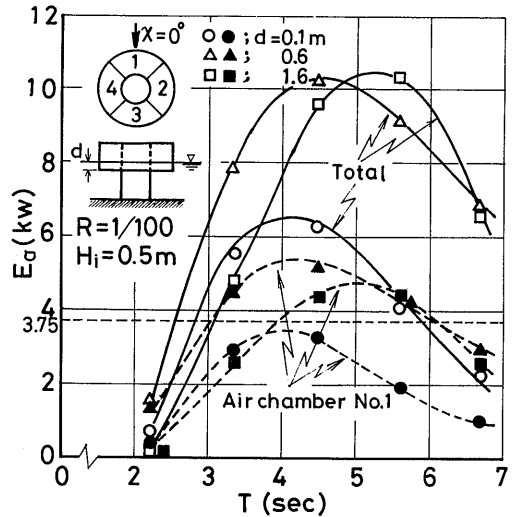


図-21 前面没水部長による吸収エネルギーの変化

(4) 前面没水部長による吸収エネルギーの変化

図-21は4空気室型における前面没水部長の変化に応じる吸収エネルギーの変化を示したものである。 $H_1=0.5\text{m}$, $R=1/100$, $\chi=0^\circ$ である。空気室No.1及び全空気室での吸収エネルギーはともに $d=0.6$ と 1.6m では同等の値となっている。 $d=0.1\text{m}$ では前面没水部の下端が波の谷の部分で空气中にさらされ、その時には空気室内の圧力は大気圧と等しくなるために吸収エネルギーは小さくなっている。また、 $d=1.6\text{m}$ の極大値が他のそれよりも長周期側に発生しているのは、空気室の水柱の容積が大きくなり同調周期が長くなるためである。

(5) 突出壁の効果

4空気室型の実験では図-22に示したような突出壁を模型に取り付けた実験も行った。突出壁は前面没水部から直径方向に 0.33m 突出している。その壁は水槽底面まで達して、空気室No.1は隣の空気室と仕切られている。この突出壁は空気室No.1により多くの波エネルギーを取り入れるために取り付けたものであり、実験は $\chi=0^\circ$, $d=12\text{cm}$, $R=1/100$, $1/270$ について行った。

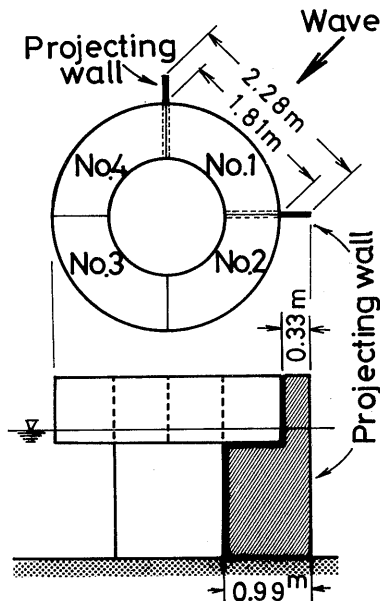


図-22 突出壁付模型

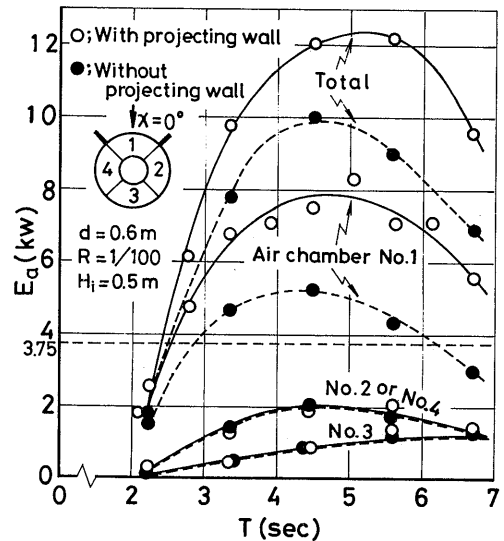


図-23 突出壁の効果

図-23は突出壁の効果を実機に換算した吸収エネルギーで示したものである。空気室No.1の吸収エネルギーは突出壁が無い場合に比較して約50%増加している。空気室No.2, No.3ではほとんど変化がないために、全吸収エネルギーの増加は空気室No.1の値の増加である。突出壁を取り付けることにより波エネルギーは空気室No.1に集中し、後方の空気室では波が遮断され、全吸収エネルギーは減少するのではないかと予想であったが、実験結果によると突出壁を取り付けたために逆に増加することがわかった。これは、空気室No.2及びNo.4は側面からの波エネルギーの入射が大きいことをあらわしている。

3.2.2 不規則波実験

実験の入射波に利用した不規則波はISSC型標準波スペクトラムを目標に作成したもので、平均波周期 $T_m=1.2\text{sec}$, 有義波高 $H_{1/3}=6$ 及び 11cm である。図-24に入射波のスペクトラムを示した。

不規則波による実験は空気室内の波エネルギー吸収効率を規則波実験における効率と比較することを目的に行ったもので、不規則波中の波エネルギー吸収効率 η は次式で計算できる。

$$\eta = \frac{S\eta(\omega)A}{\frac{1}{2}\rho g S(\omega)V_g B}$$

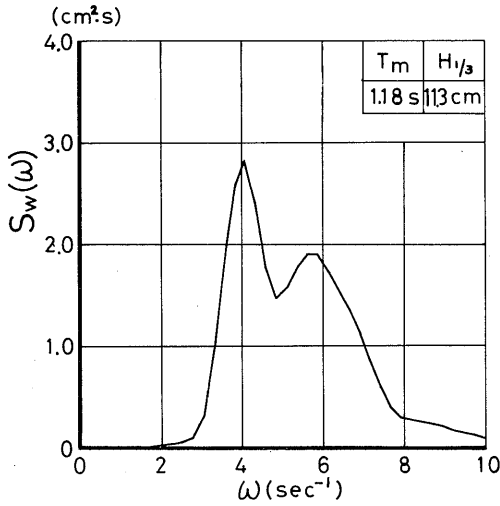


図-24 入射波のスペクトラム

ここで、

$S(\omega)$; 入射波のパワースペクトラム

$S_\eta(\omega)$; 平均吸収エネルギースペクトラム (空気室内で計測した水位変動と空気圧変動のクロススペクトラムをとり求める)。

A ; 空気室の水線面積

V_g ; 入射波の群速度 (式(3)参照)

図-25及び図-26は不規則波における波エネルギー吸収効率 η (8式) と規則波における η (2.2参照) を、横軸に波周波数の無次元値 $\omega^2 a/g$ をとり比較した。 ω は波の円周波数、 a は空気室の直径方向の奥行、 g は重力の加速度である。

また、不規則波実験の結果はすべて模型寸法で整理した。

図-25は4空気室型の空気室No.1における値を比較したものである。規則波の吸収効率は波高によりほとんど変化しないので、不規則波の有義波高 $H_{1/3} = 6$ cm に最も近い波高 $H_i = 5$ cm における実験値を用いて比較した。図-26では2空気室型の全空気室における値を比較して示した。吸収効率を求める場合の空気室に対する波エネルギーの入射幅 B は、図-25では空気室No.1の開口幅 ($B = 1.81$ m)、図-26では空気室の直径 ($B = 2.56$ m) を用いた。

これらの図に示したように不規則波と規則波における波エネルギー吸収効率はよく一致していることから、吸収効率を求めるための実験では、いずれの波で実験を行っても同一の結果がえられるものと考えられ (322)

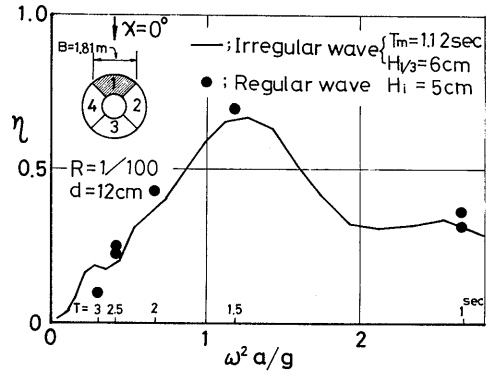


図-25 不規則波と規則波における吸収効率の比較 (4空気室型)

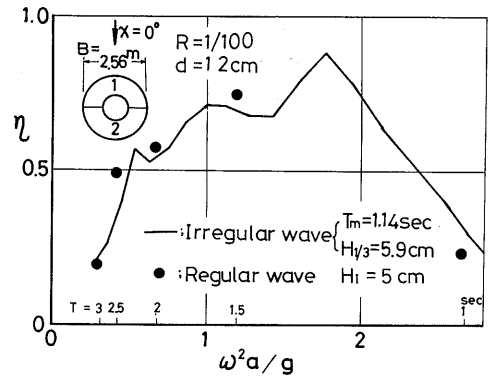


図-26 不規則波と規則波における吸収効率の比較 (2空気室型)

る。

3.3 吸収エネルギーの計算

3.3.1 計算方法

円筒型空気室における吸収エネルギーを等価浮体法³⁾で計算した。等価浮体法は空気室内の水柱は、一様に水平に上下運動するものと仮定して、水柱の上下運動をそれと等価な浮体の上下運動におきかえて計算する近似計算法である。

空気室内の等価浮体の運動は大気圧中にある浮体の運動と異なり浮体表面に空気圧 p_A (A は等価浮体の水線面積) による負荷が作用している。いま圧力 p_A を図-27に示すような線型ばね力と線型減衰力におきかえる。また等価浮体の上下運動を正弦運動と仮定し、次式で表わす。

$$(m + m_z) \ddot{z} + (N + d_0) \dot{z} + (\rho g A + k_0) z = F_z e^{i\omega t} \quad (9)$$

ここで、

- Z ; 等価浮体の上下動変位
- m, m_z ; 等価浮体の質量と付加質量
- N ; 造波減衰係数
- k₀ ; 角荷ばね定数
- d₀ ; 負荷減衰係数
- A ; 等価浮体の水線面積
- F_z ; 波強制力

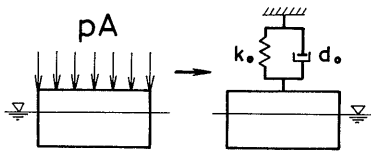


図-27 空気室における負荷の線形化

負荷ばね定数による力は負荷減衰力にくらべ非常に小さく、空気室の圧力の大部分が減衰力成分である。³⁾これは、図-15に示した記録において、圧力と水位の位相差がほとんど $\pi/2$ であることからわかる。従って、(9)式で $k_0 = 0$ とおくことができる。

付加質量 m_z 及び造波減衰係数 N の流体力は近似的に各空気室内の水柱は一体となって運動するものと仮定し、図-28に示したように、中心にコアをもつドーナツ状の浮体模型について有限要素法で計算した。その計算結果の無次元値を図-28の右側に示した。ここで、 ρV はドーナツ状浮体の質量、 ω は波の円周波数である。各空気室それぞれについて計算する場合には、4 空気室型ではこれらの値を1/4、2 空気室型では1/2

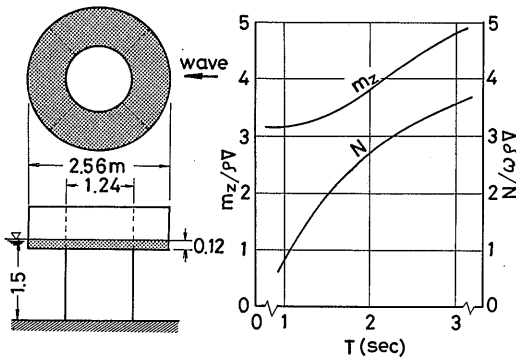


図-28 等価浮体と付加質量及び造波減衰係数の計算値

として用いた。

次に、波強制力 F_z は、有限要素法で計算したドーナツ状浮体の底面の圧力を、それぞれの空気室ごとに積分して求めた。

負荷減衰係数 d_0 は実験値を用いた。図-27をもとに $k_0 = 0$ とし、圧力と水位の位相差は $\pi/2$ であることを考慮すると d_0 は次式で表わすことができる。

$$p_0 A = d_0 \omega z_0 \quad (10)$$

従って、実験において p_0 (空気室内の空気圧 p の振幅) と z_0 (空気室内の水位の上下変位 z の振幅) が計測できると、 d_0 を求めることができる。一例として図-29にこのようにして求めた d_0 を波周期に対して示した。この図に示したように d_0 は波周期に対して一定値をとるので、計算にはこの一定値を用いた (それぞれ一点鎖線の値)。

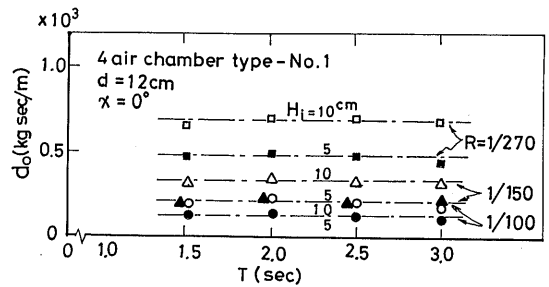


図-29 負荷減衰係数

このような条件のもとで定係数微分方程式(9)を解き等価浮体の上下変位振幅 z_0 を計算すると、(6)式及び(10)式から空気室の吸収エネルギー E_a が次式で計算できる。

$$E_a = \frac{1}{2} d_0 (\omega z_0)^2 \quad (11)$$

3.3.2 実験値との比較

図-30及び図-31に一例として実験値と計算値を、フルード則で実機に換算し、比較して示した。

4 空気室型、2 空気室型ともに実験値と計算値の波周期 T に対する傾向は非常によく一致しているが、すべての場合で実験値が幾分か大きくなっている。これらの違いは、この計算が近似解法であること、流体力を求める際の仮定、空気室内の負荷の線型近似化などに起因しているものと考えられるが、いづれにしても、計算ではたえず少なめに、即ち安全側に吸収エネルギー

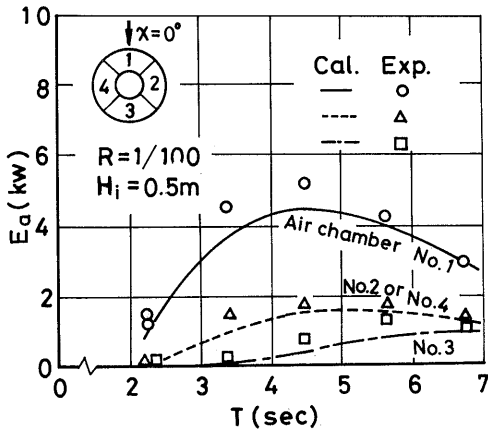


図-30 計算値と実験値の比較(4空気室型)

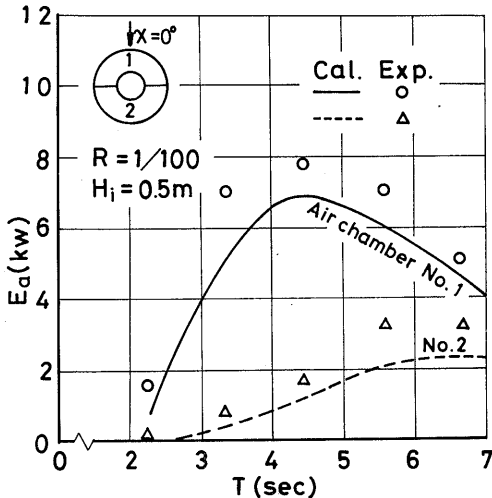


図-31 計算値と実験値の比較(2空気室型)

一を見積ることができる。

4. 結 論

これまで述べてきた結果を要約すると次のことがいえる。

(1) 二次元空気室について

i) 空気室の前面没水部アダプターにより吸収効率を特に増加させることはできなかった。しかし、逆に、前面没水部先端の厚さは波圧に耐えるように実機では非常に厚く設計することになるので、厚さが空気室奥行の1/5程度になっても吸収効率は減少しないとい

える。

ii) 空気室に底板や円弧板を取り付けることによって吸収効率の増加をはかることはできなかった。取り付け位置がある場合には、その取り付け位置はできるだけ下方にする必要がある。

(2) 円筒型空気室について

i) 各空気室における吸収エネルギーは、波の入射方向に向いた正面の空気室が最も大きい。4空気室型では側方及び後方の空気室の吸収エネルギーはそれぞれ正面の空気室の値の2/5及び1/4程度である。2空気室型では後方の空気室の吸収エネルギーは正面の空気室の値よりも非常に小さい。

ii) 全空気室における吸収エネルギーの合計は4及び2空気室型とも等しい。

iii) 4空気室型の空気室では、いかなる方向から波が入射しても一定の波エネルギーを吸収できる。しかし、2空気室型では入射角が大きくなるに従って減少する。

iv) 実機空気室の前面没水部長は $d=0.6m$ 付近で吸収エネルギーがほぼ最大となるので、平均潮位がこの位置にくるように空気室を設計するとよい。

v) 二次元実験の結果と同様にノズル開口比 $R=1/100$ で吸収エネルギーは最大となる。

vi) 突出壁を付けた4空気室型の空気室No.1は、波の入射方向 $\alpha=0^\circ$ の場合に吸収エネルギーは突出壁がない場合に比較して約50%増加した。他の空気室の吸収エネルギーはほとんど変化しないので、全吸収エネルギーは空気室No.1の増加分だけ増える。

vii) 吸収効率を求める実験では、規則波、不規則波いずれの波で実験を行っても同一の結果を得ることができる。

viii) 吸収エネルギーは等価浮体法を用いてよく計算できる。その計算値は実験値よりも幾分小さくなる。従って、吸収エネルギーを安全側に見積もることができる。

ix) 設計波 ($H_{1/3}=0.35m$, $T_{1/3}=4sec$) において全空気室における吸収エネルギーの合計は、4空気室型では空気室の出力の目標値3.75kWを満足できると考えられるが、2空気室型ではすべての状態で(特に波の入射方向の変化で)目標値に達することは困難といえる。

5. 謝 辞

この研究に御協力いただいた海上保安庁灯台部に深く感謝いたします。また、本論文の有限要素法による計算に御援助いただいた当部の影本浩主任研究官に厚

く御礼を申し上げます。なお、この研究の一部は株式会社緑星社の受託試験として行った。

参 考 文 献

- 1) 財団法人 日本航路標識協会：灯標等に利用する波力発電システムの研究開発, 中間報告, (1984-3)
- 2) 財団法人 日本航路標識協会：灯標等に利用する波力発電システムの研究開発, 中間報告, (1985-3)
- 3) 前田久明, 木下健, 増田光一, 林秀郎, 加藤渉：波浪発電装置に関する基礎的研究(その5), 日本造船学会論文集第152号, (1983-1)
- 4) 岩井勝美, 前田久明, 木下健：着底型空気タービン式波浪発電装置について, 生産研究, 第34巻 第8号, (1982-8)
- 5) 井上令作, 岩井勝美, 矢作勝, 山崎哲雄：灯標に利用する円筒固定型の空気式波エネルギー吸収装置の特性, 第一回波浪エネルギーシンポジウム, (1984-11)
- 6) 土木学会編：水理公式集, 昭和60年度版