

防波施設に併設する波浪エネルギー吸収装置の研究 (4)

——取得エネルギー量の推定——

近藤 俊郎 *・谷野 賢二**・渡部 富治***
倉内 公嘉****・松岡 功****

1. ま え が き

沿岸固定方式による波浪エネルギーの吸収システムは、沖合浮体方式に比べて種々の利点があることから実用化に向けて世界的に関心をもたれてきており、南ア連邦共和国では 77 万 kW の波浪発電システムの建設がケープタウン北の大西洋沿岸で予定されている¹⁾。

筆者らは防波施設に併設できる波浪エネルギー吸収装置について継続的に研究しており、二、三の新しい装置を開発しその性能に関する室内実験、理論解析並びに現地試験を行なって成果を本論文集^{2)~4)}他に発表してきた。本論文は実海域に設置する沿岸固定式システムによって取得されるエネルギー量を、深水域における方向スペクトルとシステムの性能から理論的に推定する方法を導くことを目的として行なわれた。この問題は、線状に配置される沿岸固定方式にとっては、実用的見地から重要と考えられる。

2. 不規則波のスペクトルと工率

エネルギー利用の立場からすると、波のエネルギーそのものではなく、エネルギー輸送量すなわち工率を推定する必要がある。不規則波の単位峰幅当りの平均工率 $\bar{W}$ は以下のように推定される。

不規則波を周波数と進行方向が異なる無数の小振幅波の重ね合せとして表現すると、特定の周波数帯 ($f, f+df$) の工率 $d\bar{W}$ は、その周波数帯の単位面積当りの全エネルギー $w_0 S(f) df$ に群速度 c_g を乗じて得られる。ここで、 $w_0 = \rho g$ は水の単位重量で $S(f)$ は周波数スペクトルである。これより $\bar{W}$ は下式で求まる。

$$\bar{W} = \int_0^\infty d\bar{W} = w_0 \int_0^\infty S(f) c_g df \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

方向スペクトル $S(f, \theta)$ をもつ不規則波の θ 方向の工率 $\bar{W}(\theta)$ は下ようになる。ただし θ は主方向からの偏角とする。

$$\bar{W}(\theta) = w_0 \int_0^\infty S(f, \theta) c_g df \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

周波数スペクトルを下式のように表現する。

$$S(f) = A f^{-5} \{ \exp(-B f^{-4}) \} \times \gamma \exp[-(f/f_p - 1)^2 / 2\sigma^2] \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

ここで A, B および γ は係数でそれらはスペクトルの種類によって異なり 表—1 のような値をとる。 f_p は $S(f)$ が最大になる f で、 σ は JONSWAP スペクトルの場合、下のような値をとる。

$$\sigma = \begin{cases} 0.07, & f \leq f_p \\ 0.09, & f > f_p \end{cases}$$

3. 深水波としての工率

微小振幅波理論では群速度は周期 $T (=1/f)$ と水深 h の関数として与えられる。深水波の場合は下のよう f のみの関数である。以下、下付き記号 0 は深水波に関するものとする。

$$c_{g,0} = \frac{1}{2} c_0 = \frac{gT}{4\pi} = \frac{g}{4\pi f} \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

深水波の周波数スペクトルが (3) 式で与えられるとすると、(1) に (3) と (4) を代入すると、 $\gamma=1$ の場合は下式のように $\bar{W}_0$ が求まる⁵⁾。

$$\begin{aligned} \bar{W}_0 &= \frac{w_0 g A}{2\pi} \int_0^\infty f^{-6} \exp(-B f^{-4}) df \\ &= \frac{w_0 g A}{16\pi} \cdot \frac{\Gamma(5/4)}{B^{5/4}} \quad \cdots \cdots \cdots (5) \end{aligned}$$

上式により計算された $\bar{W}_0$ (kW/m) の値が 表—1 の右端の欄に掲げてある。ただし、 $w_0 = 1025$ (kgf/m³) = 10.1 (kN/m³) としている。 $\gamma \neq 1$ では (1) 式の解析的積分は不可能で、数値積分を必要とする。JONSWAP スペクトルの $\bar{W}_0$ は山口⁶⁾が提唱するパラメーター $\bar{m}_n^*$ などを用いることで、下のように表現できる。

$$\bar{W}_0 = \frac{w_0 \alpha g^3}{2(2\pi f_p)^5} [\bar{m}_{-1}^*][\bar{m}_0^*] \quad \cdots \cdots \cdots (6)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \bar{m}_n^* &= \int_0^\infty f_*^{-5} \exp\left\{-\frac{5}{4} f_*^{-4}\right\} \\ &\quad \times \gamma \exp[-(1-f_*)^2 / 2\sigma^2] \quad \cdots \cdots \cdots (7) \end{aligned}$$

$$\bar{m}_n^* = \bar{m}_n / \bar{m}_0; \quad n \neq 0 \quad \cdots \cdots \cdots (8)$$

* 正 会 員 工博 室蘭工業大学教授 工学部土木工学科
** 正 会 員 工修 室蘭工業大学助手 工学部土木工学科
*** 工博 室蘭工業大学教授 工学部第二機械工学科
**** 学生会員 室蘭工業大学大学院 土木工学専攻

表-1 各種スペクトルの平均工率 $\bar{W}$ (kW/m)

スペクトルの名称	A	B	r	$\bar{W}$ (kW/m)
Pierson-Moscovitz	$(1/4\pi)H_{1/3}^2\bar{T}_2^{-4}$	$(1/\pi)\bar{T}_2^{-4}$	1	$0.59H_{1/3}^2\bar{T}_2$
ISSC (国際船体構造会議)	$0.111H_{1/3}^2\bar{T}_1^{-4}$	$0.44\bar{T}_1^{-4}$	1	$0.545H_{1/3}^2\bar{T}_1$
Bretschneider-光易	$0.257H_{1/3}^2\bar{T}_1^{-4}$	$1.03T_{1/3}^{-4}$	1	$0.441H_{1/3}^2T_{1/3}$
JONSWAP	$0.072H_{1/3}^2\bar{T}_1^{-4}$	$(5/4)T_p^{-5}$	3.3	$0.458H_{1/3}^2T_{1/3}$

註: $\bar{T}_1 = \int_0^\infty S(f)df / \int_0^\infty fS(f)df$, $\bar{T}_2 = \sqrt{\int_0^\infty S(f)df / \int_0^\infty f^2 S(f)df}$

$$\bar{m}_n = \frac{\alpha}{(2\pi\nu)^4} \int_0^\infty f_*^{n-5} \exp\left\{-\frac{5}{4}f_*^{-4}\right\} \times \gamma \exp[-(1-f_*)^2/2\sigma^2] df_* \dots\dots\dots (9)$$

$$\bar{m}_0 = [\alpha/(2\pi\nu)^4] \bar{m}_0^* \dots\dots\dots (10)$$

ただし $f_* = f/f_p$, $\nu = f_p U_{10}/g$, $U_{10} = 10$ m 高度での平均風速. また

$$\alpha = (0.072/g^2)(2\pi/\bar{T}_1)^4 H_{1/3}^2 \dots\dots\dots (11)$$

ここで $\bar{m}_n^*$ は (8) 式のように定義されているが, それは又スペクトルの積率で定義した各種の平均周波数や平均周期と次のように関連している.

$$\bar{m}_n^* = (\bar{f}_n/f_p)^n = (\bar{T}_p/\bar{T}_n)^n; \quad n \neq 0 \dots\dots\dots (12)$$

山口⁶⁾による $\bar{m}_n^*$ の近似式は下式である.

$$\bar{m}_n^* = a\gamma^{-b} + \{(\bar{m}_n^*)_{PM} - a\} \dots\dots\dots (13)$$

ここで係数 a , b は n の関数であり, 下付き添字 PM は表-1に掲げたピアソン・モスコビッチ・スペクトルについての値を表わす. $n=0, -1$ についての a , b , $(\bar{m}_n^*)_{PM}$ は表-2のように与えられ, それから $\gamma=3.3$ に対する $\bar{m}_n^*$ を (13) 式で求めると同表の右端の欄のように得られる. (6) 式の α , $\bar{m}_n^*$, $\bar{m}_0^*$ に (11) および表-2の値を代入して, $\bar{W}_0$ が下のように求まる.

表-2 $\gamma=3.3$ に対する $\bar{m}_n^*$ 値

n	a	b	$(\bar{m}_n^*)_{PM}$	$\bar{m}_n^*$
0	0.06533	-0.8015	0.2	0.30477
-1	-0.7733	0.05144	0.8572	0.90326

$$\begin{aligned} \bar{W}_0 &= 0.058H_{1/3}^2\bar{T}_1 \text{ (tf} \cdot \text{m/sec} \cdot \text{m)} \\ &= 0.568H_{1/3}^2\bar{T}_1 \text{ (kW/m)} \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

$\bar{T}_1$, T_p , ならびに $T_{1/3}$ の間にはおよそ下の関係があるとされている⁷⁾.

$$\bar{T}_1 = \frac{T_p}{1.296} = \frac{1.05T_{1/3}}{1.296} = 0.81T_{1/3} \dots\dots\dots (15)$$

これより JONSWAP スペクトルについての深水波領域における単位峰幅当りの平均工率を有義波によって表現すると下式となる.

$$\bar{W}_0 = 0.458H_{1/3}^2T_{1/3} \text{ (kW/m)} \dots\dots\dots (16)$$

表-1の $\bar{W}_0$ を有義波の諸元を用いて表現したもので比較すると

$$\bar{W}_0 = (0.44 \sim 0.458)H_{1/3}^2T_{1/3} \text{ (kW/m)}$$

で JONSWAP スペクトルのものが最も大きい, その他のものとの差は 5% 以内であるに過ぎない.

方向スペクトルを有する深水波の θ 方向の工率は (2) 式で, $S(f, \theta)$ と c_g を深水波の値を代入して計算することと求められる.

4. 浅水におけるスペクトルと工率

深水での方向スペクトルを $S_0(f, \theta_0)$

で表わすと, その波が浅水域に進入して屈折と浅水変形をした後のスペクトル $S(f, \theta)$ は下のように推定される^{7), 8)}.

$$\begin{aligned} S(f, \theta) &= \left[K_r^2(f, h, \theta_0) \frac{d\theta_0}{d\theta} \right] \cdot K_s^2(f, h) S_0(f, \theta_0) \\ &= \frac{k}{k_0} \frac{c_{g,0}}{c_g} S(f, \theta_0) \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

これから θ 方向の工率 $\bar{W}(\theta)$ は, (2) 式を用いて

$$\begin{aligned} \bar{W}(\theta) &= w_0 \int_0^\infty K_r^2(f, h, \theta_0) c_{g,0}(f) S_0(f, \theta_0) \\ &\quad \times \frac{d\theta_0}{d\theta} df \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

で表わされる. 又周波数スペクトルは (17) 式より, 下のようになる.

$$S(f) = K_s^2(f, h) \int_0^{2\pi} K_r^2(f, h, \theta_0) S_0(f, \theta_0) d\theta_0 \dots\dots\dots (19)$$

$\bar{W}$ は, $K_s^2 = c_{g,0}/c_g$ であることから下式で求まる.

$$\begin{aligned} \bar{W} &= w_0 \int_0^\infty S(f) c_g(f, h) df \\ &= w_0 \int_0^\infty c_{g,0}(f) \int_0^{2\pi} K_r^2(f, h, \theta_0) \\ &\quad \times S_0(f, \theta_0) d\theta_0 df \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

$S(f, \theta)$, $S(f)$, $\bar{W}(\theta)$ および $\bar{W}$ は, $S_0(f, \theta_0)$ を与えて屈折係数 K_r が解ると, 上式を数値積分することで得られる.

深水波の方向スペクトルを

$$S_0(f, \theta_0) = S_0(f) \cdot G(f, \theta_0) \dots\dots\dots (21)$$

とおき, $S_0(f)$ としてブレットジュナイダー・光易スペクトル, G として光易型の方向分布関数をもつ不規則波について $\bar{W}$ を計算する場合を考える. その際 G の中のパラメーター S については合田・鈴木の提唱する S_{max} を用いた表現を採用することにする.

風波に相当する $S_{max} = 10$ の場合について, 直線平行等深線を有する海岸についての $\bar{W}$ を, 深水波の主波向 $(\alpha_p)_0$ と有義波の波長に関する相対水深 $h/L_{0,1/3}$ の関数として計算し, 図-1の実線のような結果を得た. 同図の縦軸は $(\bar{W}/H_{0,1/3}^2 T_{1/3})$ をとっており, 横軸には $h/L_{0,1/3}$ をとって $(\alpha_p)_0$ をパラメーターにしている.

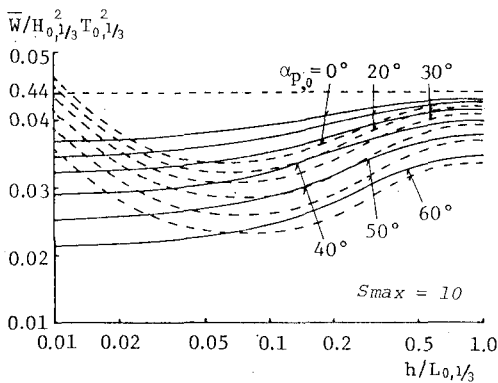
同図中の破線は Pocinki⁹⁾ により K_r が解析的に求められている, 下式のような海底地形をもつ「吊り鐘」状

の地形をした円形島についての $\bar{W}$ についてのものである。

$$\left. \begin{aligned} \frac{h}{L_0} &= \frac{\ln(r/r_0)}{2\pi} \tanh^{-1} \ln(r/r_0): 1 \leq r/r_0 < e \\ h &= \infty: e \leq r/r_0 < \infty \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (22)$$

ここで r は島の中心からの距離, r_0 は $h=0$ の r 。

同図から, 直線平行等深海岸における $\bar{W}$ は h/L_0 の減少とともに減少する傾向があり, $h/L_0=0.1$ では深き波の場合よりも約 11% 減少する。また主波向の影響は $(\alpha_p)_0=30^\circ$ の場合の $\bar{W}$ は 0° よりも約 17% 減少する。これに対して Pocinki の円形島では $\bar{W}$ は $h/L_0=0.05 \sim 0.1$ で最小値をとり, それより小さくなると再び $\bar{W}$ は増加する。このため, この円形島の場合, $(\alpha_p)_0=0^\circ$ では $h/L_0 < 0.03$, $(\alpha_p)_0=30^\circ$ では $h/L_0 < 0.06$ の領域で直線平行等海岸よりも $\bar{W}$ が大きくなる傾向がある。この結果から, 比較的長周期のうねりが多い島では, 浅い水深での沿岸固定方式による波浪エネルギー取得に大変有利となる地点が多いと, 推察される。



図一 平行等深海岸(実線)と Pocinki の円形島(破線)の単位峰幅当りの平均工率

5. 現地試験への適用

(1) 実験プラントの概要

波浪エネルギー吸収装置の実海域試験は実用化に対する基礎となる設計資料を得るために必要不可欠なものと広く認識されている。筆者ら室蘭工大波浪エネルギー研究グループも昭和55年3月に室蘭港外に現地実験プラントを設置して, 防波堤や護岸などに併設可能な水車式と振り子式装置に関する現地試験を実施してデータの収集に努めてきた^{2), 4), 10), 11)}。

実験プラントは図-2に示すように北海道の南西部で太平洋に連なる噴火湾に湾口近くにある室蘭港で, 湾内の西寄りの波浪に対して同港の南側水域を遮へいする目的で建設された南外防波堤の沖側に孤立して設けられた特殊ケーソンを堤体としている(図-3, 4参照)。ケー

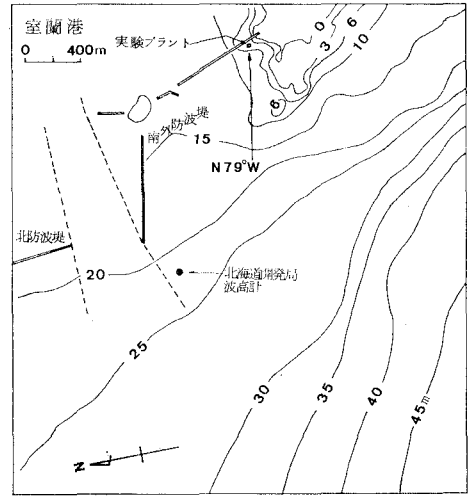


図-2 室蘭港南外防波堤周辺深浅図

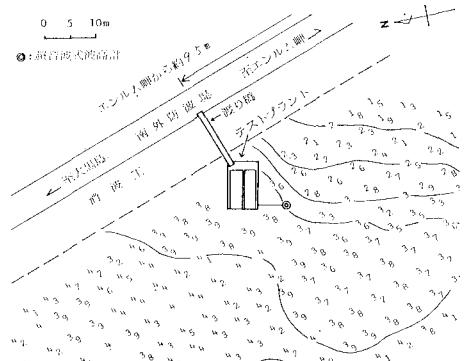


図-3 室蘭工大実験プラント周辺深浅図

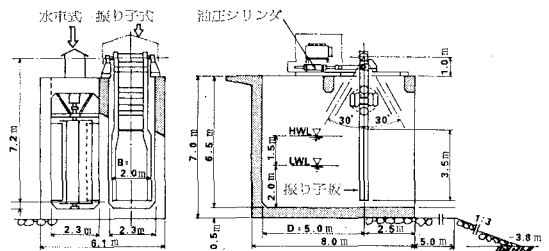


図-4 実験プラント正面図ならびに断面図

ソンは二つの水室からなり, 一室には水車式が昭和55年3月に, 他の一室には振り子式が昭和58年3月に図-4のように設置された。

(2) 波浪特性

実験プラントの近くでの波浪観測は図-3に示すようにプラントの側方に空中発射型超音波式波高計を設置し, 装置の性能試験に合せて実施した。設置地点はケーソンの近くで進行波としての波形が捉えられるよう配慮して決められたが, 背後の南外防波堤(テトラポッドによる消波ブロック被覆堤)の影響が若干あることは免れ

ない。沖合の波浪は図-2に示すように1.8km前方に北海道開発局の水底発射型超音波波高計があって平時は2時間ごとに観測している。湾内で発達した波のため、開発局の観測データによると $H_{1/3} \geq 1.0$ m の波の出現率は12%程度でそれも冬期に集中し、主波向はおよそ W ~ WNW である。

沖合の波の諸元から、実験プラントへの入射波の工率を推定する目的で、規則波の屈折図を周期と沖波向のある範囲について画いて得られた、プラント地点についての屈折係数と入射角 β の分布は図-5のようになった。これからすると、プラント地点の K_r と β は、周期や沖波向の変動に伴って大きく変化することはない。

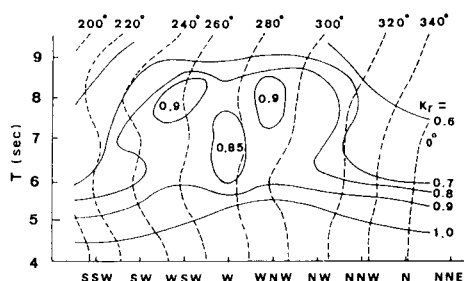


図-5 屈折係数(実線)と入射角(破線)

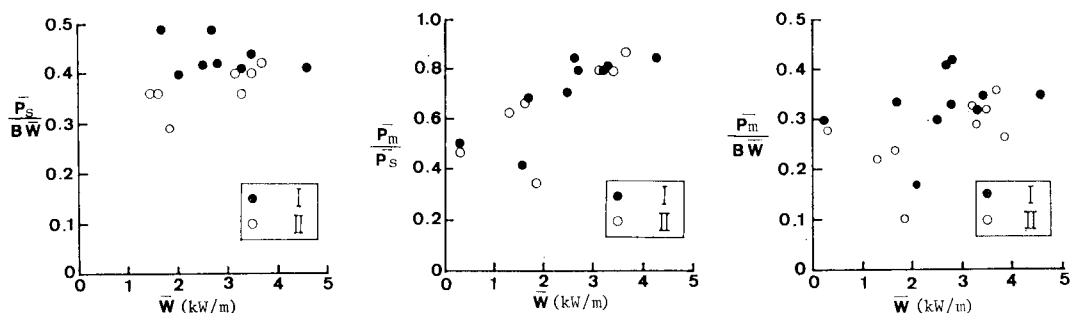


図-6 吸収工率 $\bar{P}_s$ (シリンダー), $\bar{P}_m$ (モーター) と波の工率 $\bar{W}$ との関係 (I, II は油圧回路の種類)⁴⁾

わかると計算できる。長さ B の装置によって吸収される不規則波の平均工率 $\bar{P}_a$ は、一般に以下のように推定される。いま周波数 f , 入射角 β の単調波に対して長さ B の装置が吸収する工率を $\bar{P}$ とすれば、装置の単位長さ当りの吸収係数 κ は下のようにおける。

$$\kappa(f, \beta) = \bar{P}/B\bar{W}_s \quad \dots\dots\dots (23)$$

ここで $\bar{W}_s$ は単調波の単位峰幅当りの平均工率である。これより方向スペクトルをもつ不規則波についての、長さ B の装置の吸収工率 $\bar{P}_a$ は下のように推定される。

$$\begin{aligned} \bar{P}_a &= B\bar{W}\kappa(f, \beta) \\ &= w_0 B \int_0^\infty c_g \phi(f) \int_0^{2\pi} K_r^2(f, h, \beta_0) \\ &\quad \times S_0(f, \beta_0) \kappa(f, \beta_0) d\beta_0 df \quad \dots\dots\dots (24) \end{aligned}$$

(3) 振り子式吸収装置

振り子式波浪エネルギー吸収システムについては、これ迄にエネルギー吸収性能について二次元水槽実験、現地試験並びに理論解析による研究がなされてきた^{2)-4), 10)-12)}。その結果この振り子式システムはすぐれたエネルギー吸収性能を有し、現存のシステムの中では最高の吸収効率を示していると判断される。

図-6 は現地試験データによる基準入射工率 $\bar{P}_w (= B\bar{W})$, B は装置の長さで振り子式の場合は振り子技の幅をとっている), 油圧シリンダーの平均吸収工率 $\bar{P}_s$ 並びに油圧モーターの平均吸収工率 $\bar{P}_m$ の三者の間の比を $\bar{W}$ の値との関連で示したものである。この場合の $\bar{W}$ は、プラント側方の波高計の海面記録から(1)式で推定したものをを用いている。同図からエネルギー吸収の割合は、 $\bar{W}$ が大きいほど大きく、ことに油圧回路内の損失割合は $\bar{W}$ が大きい程、顕著に低くなる。油圧モーターの吸収工率は入射工率に対して、油圧回路 I の場合、平均 33%, 最高 43% になっていて、空気タービン式や水車式²⁾に比べてかなり高い吸収効率を示している。

(4) 取得エネルギー量の推定

浅水域における単位峰幅当りの進行波としての $\bar{W}$ は、(20)式から、深水波の方向スペクトルと屈折係数 K_r が

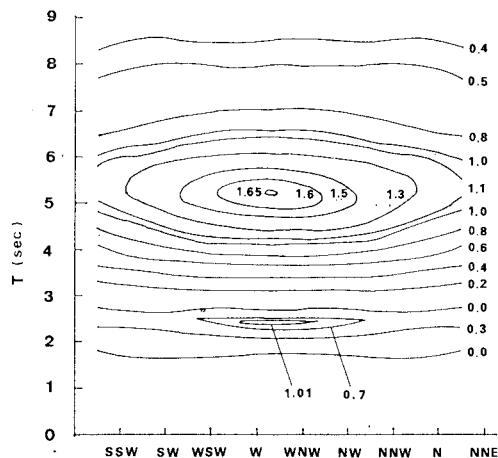


図-7 吸収係数 κ の周期と入射角による分布

表-3 取得工率の実測値と推定値の例

No.	沖 波				プラント地点			エネルギー取得特性			
	β_0 (°)	$H_{0,1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (sec)	$W_{0,c}$ (kW/m)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (sec)	$\bar{W}_m$ (kW/m)	$\bar{P}_{a,m}$ (kW)	$\bar{P}_{a,c}$ (kW)	$\frac{\bar{P}_{a,m}}{\bar{P}_{w,m}}$	$\frac{\bar{P}_{a,m}}{\bar{P}_{a,c}}$
1	300	0.93	4.0	1.52	0.87	4.1	1.67	1.67	2.36	0.50	0.71
2	300	0.98	4.2	1.78	1.06	4.4	2.53	2.13	3.00	0.42	0.71
3	280	0.99	4.2	1.81	1.16	4.6	3.32	2.71	3.15	0.41	0.86
4	300	1.77	5.2	7.17	1.20	4.9	4.62	3.83	13.55	0.41	0.28

図-4の実験プラントの振り子式システムについて、上式を適用して $\bar{P}_a$ を推定する。 κ の理論解は前報⁴⁾で発表済みである。この場合は振り子数1の弧立型とみなされる。 κ の値を方位角で表わした β_0 と周期の関数で求める図-7のような分布をしている。この κ と図-5の K_r の値を用い、「ブレットシュナイダー・光易」周波数スペクトルと $S_{max}=10$ の光易型の方向分布関数で(24)式を計算して $\bar{P}_a$ を計算した例が表-3である。この表では $\bar{P}_a$ の推定値を $\bar{P}_{a,c}$ 、測定された $\bar{P}_a$ を $\bar{P}_{a,m}$ として表わしている。表中の $\bar{P}_a$ は(3)節で示した $\bar{P}_s$ に相当し、 $\bar{W}_m$ は(1)式で計算したものである。表-3において、波高が大きく沖合からプラントに到達する迄にかなり減衰している No. 4 を除けば、 $\bar{P}_{a,m}/\bar{P}_{a,c} \approx 0.71 \sim 0.86$ である。この値が1よりも小さい理由は、理論で水の粘性を無視しており、かつ一様水深を対象にしたものであることから、種々の損失があるからである。振り子板を固定した状態での図-4の断面についての二次元模型実験の結果では、この堤体の反射率 K_R はほぼ $0.6 \sim 0.8$ であった。入射波が振り子板に作用する迄のエネルギー損失の割合はおよそ $(1-K_R^2)/2 \approx 0.18 \sim 0.32$ と推定されるから、取得工率の推定値はほぼ妥当な値を与えている。

7. む す び

沿岸固定方式の波浪エネルギー吸収システムについて取得エネルギーの推定法を提示し、それを振り子式システムの現地試験値に適用してみた。その結果からすると、エネルギー損失を考慮に入れる必要が明らかになっ

た。

本研究は昭和59年度文部省科学研究費試験(2)「沿岸固定方式による波浪エネルギー利用に関する研究(研究代表者 近藤俊郎)」による成果の一部である。

参 考 文 献

- 1) Retief, G. F., Muller, Prestedge, Geutyn and Swart: Detailed design of a wave energy conversion plant, Proc. of 19th Coastal Eng. Conf. (in press).
- 2) 近藤・谷野・高橋・渡部・奥田: 防波施設に併設する波浪エネルギー吸収装置の研究——波力水車方式——, 第28回海岸工学論文集, pp. 381~385, 1981.
- 3) 渡部・近藤・谷野・竹田・黒井: 同上(2)——振り子式——, 第29回海岸工学論文集, pp. 486~490, 1982.
- 4) 谷野・近藤・渡部: 同上(3)——実海域性能試験——, 第30回海岸工学論文集, pp. 581~585, 1984.
- 5) 近藤・竹田: 消波構造物, 森北出版, 275 p., 1983.
- 6) 山口正隆: JONSWAP スペクトルの積分特性量に対する高精度近似式について, 土木学会論文集, 345/II-1, pp. 149~152, 1984.
- 7) 例えば, 合田良実: 海面波, 本間・林編「続水理学」, pp. 143~177, 丸善, 1980.
- 8) Le Mehaute, B. and Wan: Wave spectral change on sloped beach, Proc. ASCE, WW1, pp. 33~47, 1982.
- 9) Pocinki, L. S.: The application of conformal transformations to ocean wave refraction problems, Trans. AGU, 31-6, pp. 856~866, 1950.
- 10) 近藤俊郎(研究代表者): 沿岸固定方式による波浪エネルギー利用に関する研究, 文科研費成果報告書, 1985.
- 11) Kondo, H., Watabe and Yano: Wave power extraction at coastal structure by means of moving body in the chamber, Proc. of 19th Coastal Eng. Conf. (in press).
- 12) 浅野誠一: 岸壁部に設けられた振り子式波浪エネルギー回収装置の効率について, 造船学会水槽委第2部会, 1980.