

砕波帯の波の研究(3)

——佐賀ノ関海岸の例——

上 床 隆 彦*・湯 村 や す**

1. はし が き

近年、直立壁を有する消波護岸の開発が進み護岸前面の波の分布、特に反射波の影響を知ることが必要となってきた。不規則波で護岸に対する反射波の影響を求めめるためには護岸前面の波の反射率を示すのが適当である。不規則波の反射率を計算する方法として波の周波数スペクトルを用いることが知られている¹⁾。この方法によると護岸法線に直角に入射した波については容易に算定できる。しかしながら入射方向が護岸法線に直角でない場合には算定が困難となる。著者らはこの問題を解決する一方法として方向スペクトルによる不規則波の反射率算定を行うことにした。方向スペクトルについては先に砕波帯の波の観測をステレオ式波高計により行い²⁾、水深を異にする砕波帯の波の方向スペクトルを得ている³⁾。入射波と反射波とが存在する領域で方向スペクトルを求めると入射波と反射波のエネルギースペクトルが周波数

について得られるので、それらの比の1/2乗によって反射率が算定できる。今回は方向スペクトルによる反射率の算定法および実測例について報告する。また入射波向が護岸法線に直角の場合には周波数スペクトルを用いて測定を行う方が測点の数が少ない等の利点があるのでこの方法も併用している。

2. 不規則波の反射率算定法

(1) 周波数スペクトルによる方法

この方法は既に報告されているように構造物法線に直角な波向に沿って距離 ξ なる2点 x 及び $(x+\xi)$ で水面変動を計測し、2点間の co-spectrum $C_c(f)$, quadspectrum $Q_c(f)$ 及び水位変動の power spectrum $C_0(f)$ を求め、式(1)、(2)によって入射波と反射波のパワースペクトル $E_i(f)$ と $E_r(f)$ を計算してそれらの比の平方根によって反射率 $r(f)$ が求められる。

$$E_i(f) = \frac{[C_c^2(f) + C_\xi^2(f) + Q_c^2(f) - 2C_0(f)C_c(f)\cos k\xi - 2C_0(f)Q_c(f)\sin k\xi]}{4\sin^2 k\xi C_0(f)} \quad (1)$$

$$E_r(f) = \frac{[C_c^2(f) + C_\xi^2(f) + Q_c^2(f) - 2C_0(f)C_c(f)\cos k\xi + 2C_0(f)Q_c(f)\sin k\xi]}{4\sin^2 k\xi C_0(f)} \quad (2)$$

$$r(f) = \sqrt{\frac{E_r(f)}{E_i(f)}} \quad (3)$$

(2) 方向スペクトルによる方法

方向スペクトルはまず co-spectra, quadspectra およびパワースペクトルを既知数とする多元1次方程式を解くことにより式(4)の係数 $A_0(f)$, $A_1(f)$, $A_2(f)$ および $A_3(f)$ を求める。方向角を θ とすると方向スペクトル密度 $\Phi(f, \theta)$ は次のように近似される。

$$\Phi(f, \theta) = \frac{1}{2}A_0(f) + A_1(f)\cos\theta + A_2(f)\cos 2\theta + A_3(f)\cos 3\theta \quad (4)$$

ここでは weighting function として次式を用いている。

$$W = 1 + \frac{3}{2}\cos\theta + \frac{3}{5}\cos 2\theta + \frac{1}{10}\cos 3\theta \quad (5)$$

式(4)によって周波数別、方向別のスペクトルが求められる。方向スペクトルにより入射波のスペクトル $\Phi_i(f, \theta)$ と反射波のスペクトル $\Phi_r(f, \theta)$ が判別できた場合には反射率 $R(f)$ はそれぞれの f について方向角 θ に関してスペクトルの和を求め、次式によって算定する。

$$R(f) = \sqrt{\frac{\sum_{\theta=0}^{\pi} \Phi_r(f, \theta)}{\sum_{\theta=0}^{\pi} \Phi_i(f, \theta)}} \quad (6)$$

(3) 波の方向角を考えた周波数スペクトルによる方法(近似法)

周波数スペクトルによる式(3)の反射率 $r(f)$ は先に述べたように、護岸法線に対して直角に入射した波には適用できる。しかし現地の波の場合には波は護岸法線に直角以外の方向からも入射して反射する。しかも周波数ごとに入射波向の異なる場合もあり、したがって周波数スペクトルをそのまま適用するのが無理なケースも生じ

* 正会員 大分工業高等専門学校助教授 土木工学科

** 九州大学研究員 工学部水土木学教室

る。そこで方向スペクトル等により求められた入射方向角 α と反射方向角 β (いずれも護岸法線からの角度) を式 (1) と (2) の 2 点間の距離 ξ に入れ ξ', ξ'' とする。

これらを用いた式 (7) は近似式ではあるが周波数ごとに方向の異なった波の反射率を周波数スペクトルにより示している。

$$r'(f) = \sqrt{\frac{C_0^2(f) + C_\xi^2(f) + Q_\xi^2(f) - 2C_0(f)C_\xi(f)\cos k\xi'' + 2C_0(f)Q_\xi(f)\sin k\xi''}{C_0^2(f) + C_\xi^2(f) + Q_\xi^2(f) - 2C_0(f)C_\xi(f)\cos k\xi' - 2C_0(f)Q_\xi(f)\sin k\xi'}} \quad (7)$$

ただし、 $\xi' = \xi \sin \alpha$, $\xi'' = \xi \sin \beta$, α : 入射角, β : 反射角

3. 不規則波の反射率実測例

(1) 周波数スペクトルを用いた例

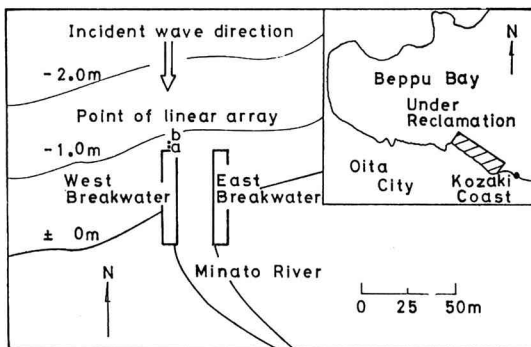
a) 平面水槽での実測例

不規則波の反射率を測定するために平面水槽として室外の 25 m プール (幅 15 m) を使用し, 水深 1.5 m, 風速 7 m/s 程度の自然風で, 表面波の波形を容量式波高計 (波高 30 cm 用) により記録した。波は直立壁法線に対して直角に入射し, 2 測点間の距離は波向に沿って $\xi = 0.5$ m であった。測定結果は式 (3) により計算を行い, 反射率 $r(f)$ 及び測点のパワースペクトル $C_0(f)$ を求めて 図-1 に示している。図より反射率 $r(f)$ はスペクトル $C_0(f)$ のピークの周波数付近で最小値 0.68 を示している。

b) 佐賀ノ関海岸の実測例

① 観測方法

不規則波を現地海岸で観測するために佐賀ノ関海岸 (大分県) にある神崎漁港防波堤を用い, 堤体断面に直角に入射する波の反射率を測定した。神崎付近の海岸は 図-2 に示すように遠浅海岸であり, 砕波現象が観測される。観測地点の西防波堤の水深は 1.5 m ~ 2.2 m である。波浪観測は堤体前面を移動しながら測定する必要があるので, 写真-1 に示すような容量式波高計の検出部 (波高 1 m 用) を支柱に取付け, 陸上から海面に押し出して測点に移動させる。次に 写真-2 に示すような鋼製パイプで 2 本の支柱を固定する。移動にはブイを用い, 水



Sketch of Kozaki Coast

図-2

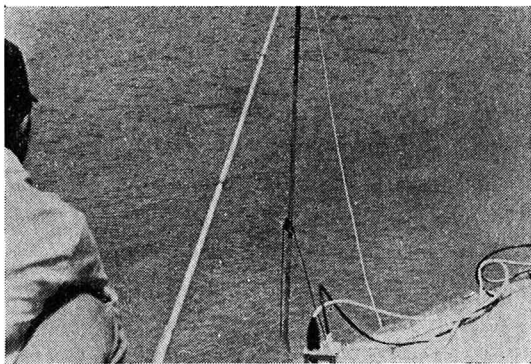


写真-1 Pick up of capacity type wave meter

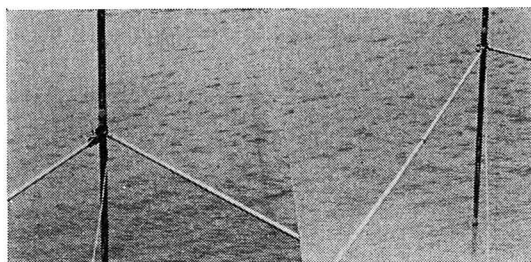


写真-2 Poles and pipes for capacity type wave meter

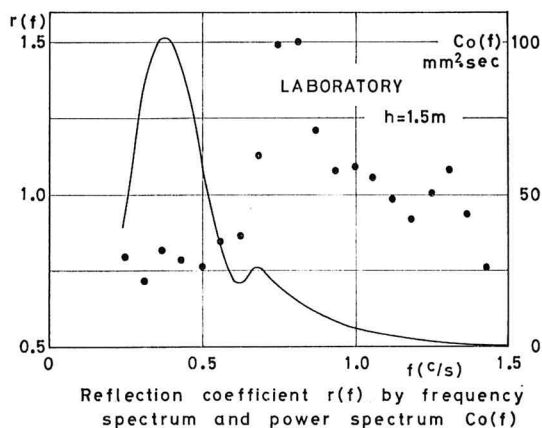


図-1

深に対応するためにパイプは接続式にした。検出器は陸上より遠隔操作によって上下にスライドさせ, 必要な高さで固定させている。この方法は移動が容易であり, 観測が簡単に行える特徴がある。測定できる陸上からの距離はパイプの強度の関係から最大 10 m 程度であるが, 反射波の測定領域を考えるとこの程度で充分である。

② 反射率測定

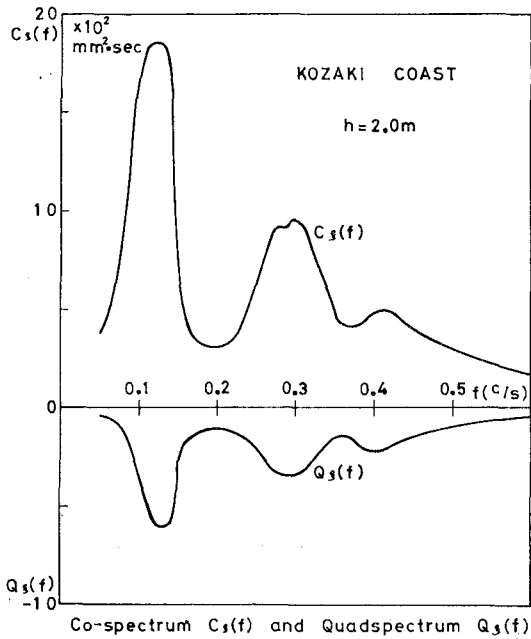


図-3

測点は 図-2 に示すように堤体前面 2m (a 点) と 4m (b 点) の 2 点で $\xi=2.0\text{m}$ となる。周波数スペクトルを求めるための測定記録長さは 900 秒、読取り間隔 0.5 秒で相互相関のラグは +40 秒 ~ -40 秒であった。これらのデータから a 点のパワースペクトル $C_0(f)$ 、点 ab 間の co-spectrum $C_s(f)$ と quadspectrum $Q_s(f)$ が求められる。図-3 に $C_s(f)$ と $Q_s(f)$ を示す。これらの結果から反射率 $r(f)$ が式 (3) を用いて計算される。図-4 には反射率 $r(f)$ 及びパワースペクトル $C_0(f)$ が示されている。 $C_0(f)$ が示すように 2 つの周波数の波が存在し、エネルギーの大きい周波数 $f=0.12\text{ c/s}$ 付近で反射率は小さくなっている。直立堤前面の値としては少

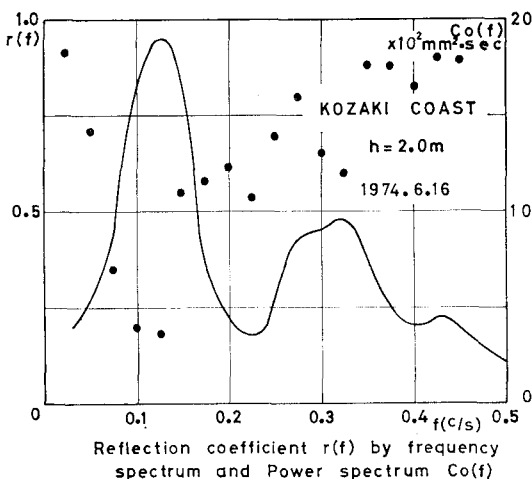


図-4

し小さいようである。

(2) 方向スペクトルを用いた例

a) 奈多海岸の実測例⁴⁾

奈多海岸 (福岡県) の観測については先に報告しているので、ここでは方向スペクトルによる反射率の算出例について述べる。奈多漁港の防波堤前面 40m ~ 60m で 4 測点の波形をステレオ式波高計により同時観測し、4 測点の組合せによって計 6 個の co-spectrum $C_s(f)$ と quadspectrum $Q_s(f)$ が求められる。これらの値より方向スペクトル $\Phi(f, \theta)$ の近似値が式 (4) より得られる。計算結果を図-5 に示している。2 方向に強いエネルギーが表われており、防波堤付近の等深線の方から array 方向より $0^\circ \sim 45^\circ$ 及び $120^\circ \sim 180^\circ$ は入射波の領域であり、 $45^\circ \sim 120^\circ$ には反射波が存在していると考えられる。それぞれの領域の方向スペクトルの和を算出して求めたものが 図-6 である。各周波数について入射波のエネル

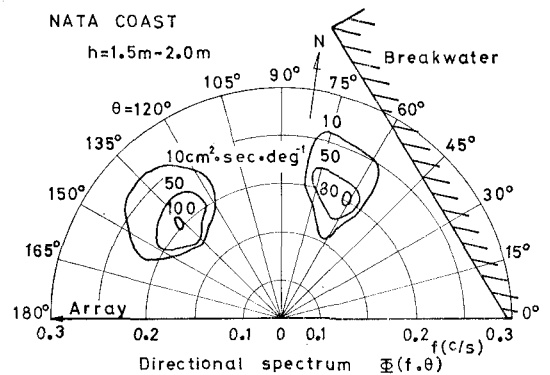


図-5

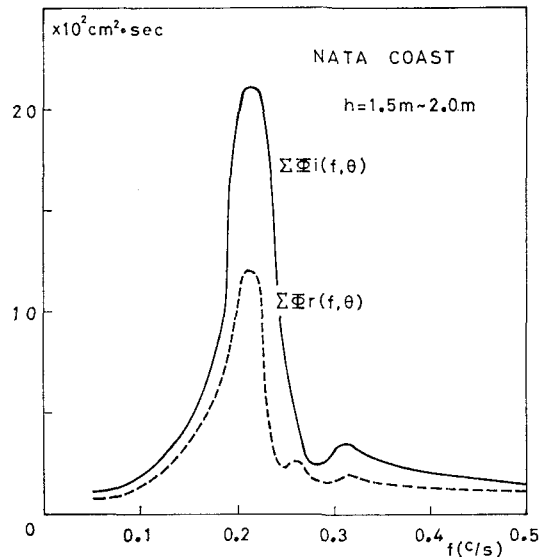
Incident wave spectrum $\Sigma \Phi_i(f, \theta)$ and Reflection wave spectrum $\Sigma \Phi_r(f, \theta)$ by directional spectrum

図-6

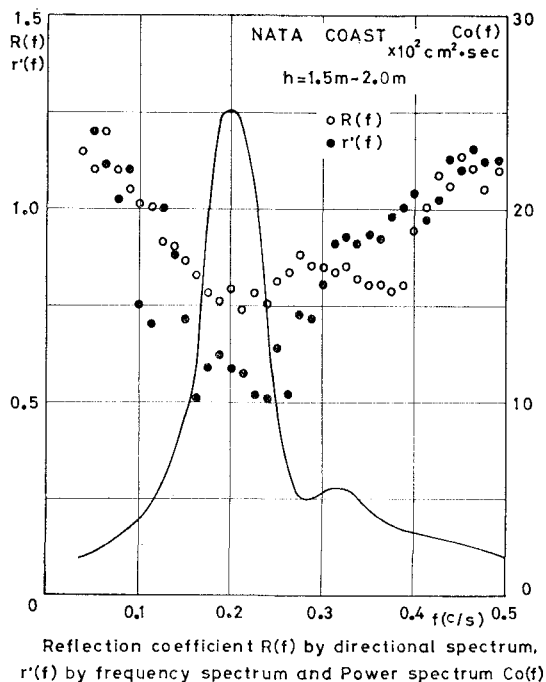


図-7

ギー $\Phi_i(f, \theta)$ の和と反射波のエネルギー $\Phi_r(f, \theta)$ の和を式 (6) に代入したものが方向スペクトルによる反射率 $R(f)$ であり、結果は 図-7 に示している。図中に示されているパワースペクトル $Co(f)$ によると反射率 $R(f)$ の最小値の周波数で $Co(f)$ はピークを示しており、反射率は 0.75 でやや大きいようである。

次に 図-5 の方向スペクトルより入射波の方向角 α および反射波の方向角 β が得られたので式 (7) により周波数スペクトルに波の方向角を考えた反射率 $r'(f)$ が求まる。計算結果は 図-7 の中に示している。 $Co(f)$ のピーク時と反射率 $r'(f)$ の最小値時との周波数は少しずれているが、 $Co(f)$ のピーク時の反射率 $r'(f)$ は 0.6 であり、値としては適当である。式 (7) の反射率 $r'(f)$ は近似式ではあるが実測によって実際に使用が可能なが示された。

b) 平面造波水槽の実験例

① 実験法

奈多海岸の実測では不規則波の反射率の算定に方向スペクトルを用いたが、実測例が少ないため不明な点も残っている。そこで現在、平面造波水槽 (幅 9m×長さ 20m) で方向スペクトルによる不規則波の反射率の測定法について実験を行っている。不規則波は無段変速機により周期をランダムに与え、ストロークは一定とした。今回は直立壁法線にほぼ直角に入射した波について方向スペクトルより反射率 $R(f)$ を求め、周波数スペクトルにより求めた反射率 $r'(f)$ と比較している。

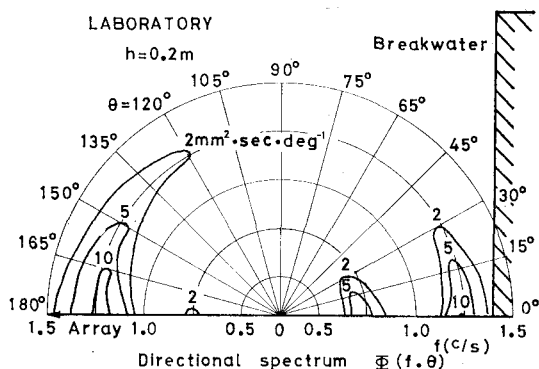


図-8

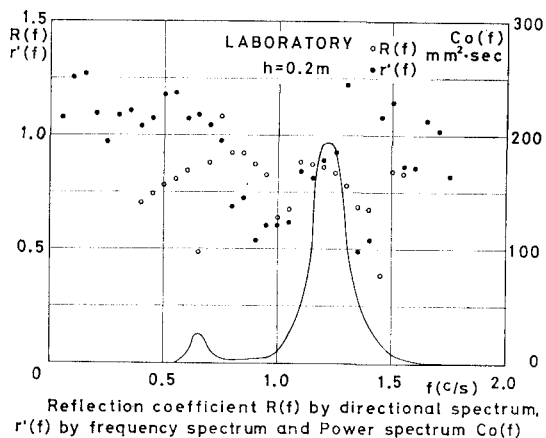


図-9

② 反射率算定

実験条件は水深 $h=20$ cm, 測点は 3 測点で間隔はそれぞれ $\xi=20$ cm, 40 cm, 60 cm で抵抗線式波高計により記録し、測定記録長さは 200 秒で 0.2 秒ごとに読取り、周期は 0.8 秒~2.8 秒をランダムに与えた。計算された方向スペクトルおよび反射率は 図-8, 図-9 に示している。図-8 の方向スペクトルにより、方向分散はあるが波が護岸法線に直角に入射して反射していることがわかる。図-9 では方向スペクトルによる反射率 $R(f)$ と周波数スペクトルによる反射率 $r'(f)$ がスペクトル $Co(f)$ のピークを示す周波数付近で、ほぼ一致している。堤体法線に直角な波の反射率は周波数スペクトルを用いると確かな値が算出されていたから、図-9 の結果は方向スペクトルによっても同様な波に対して反射率の算定ができることを示している。

4. む す び

不規則波の反射率は波の入射方向角によってその測定法が異なってくるということが明らかにされたが、現場において波の入射角が簡単に測定できれば 2 測点による周波数スペクトル法が近似式を用いてもよいことがわかった。

しかしながら一般的には方向スペクトル法によって3測点以上の波浪観測を行わなければならない。

今後、実験室と現場において方向スペクトルによる不規則波の反射率の測定を行い、消波護岸等の効果について実測により確かめてゆく予定である。

最後にこの報告を書くにあたって九州大学の井島教授より終始ご指導、ご助言を賜りました。また佐賀ノ関海岸の観測については大分高専の津崎喜市助手に、資料整理については秦敏和技官にお世話になりました。ここに厚くお礼申し上げる次第です。

参 考 文 献

- 1) 鹿島遼一: 不規則な波の入射および反射エネルギースペクトルの測定法について, 第15回海講講演集, pp. 91-96, 1968.
 - 2) 井島武士・松尾隆彦: 碎波帯の波の研究(1)—観測法および例一, 第15回海講講演集, pp. 36-40, 1968.
 - 3) 井島武士・松尾隆彦: 碎波帯の波の研究(2)—周波数スペクトルの平衡領域および2次元スペクトルの観測例一, 第16回海講講演集, pp. 41-45, 1969.
 - 4) 上床隆彦・津崎喜市・湯村やす: 周波数スペクトルによる防波堤前面の波の反射率測定, 第29回年講概要集Ⅱ, pp. 52-53, 1974.
-