

大村湾における反射波の観測と護岸反射率の推定

近藤 浩 右*, 赤間 正 幸**, 金子 和 宏***, 奥 武 之****

1. ま え が き

近年, 周辺海域における静穏性の確保を目的として, 各地で消波形式の防波堤や護岸等が築造されている。これら消波構造物の反射波低減効果を把握するためには, その反射率の評価が不可欠である。通常は, 不規則波造波水槽を用いた水理模型実験を行ない, 構造物前面における数地点の水位記録より, 鹿島¹⁾あるいは合田²⁾の方法により反射率を推定することが多い。しかし, 実験では手法上の制約から, 実際の波浪が有するエネルギーの方向分散性を考慮して反射特性を明らかにすることが困難であり, 現地観測により実際の構造物の反射率を推定することの意義は極めて高い。本研究では, 鋼矢板護岸およびタイプの異なる2種類の直立消波護岸前面において, 波高計アレイにより取得した波浪の実測データにMMLM (Modified Maximum Likelihood Method)³⁾を適用し, 方向スペクトルおよび反射特性について整理した結果を報告する。

2. 現 地 調 査

2.1 調査地点と調査日

調査地点である九州電力株式会社大村発電所は, 図-1に示す長崎県大村湾の東岸に位置する。大村湾は, 年間を通して非常に静穏であり, 調査地点でも波高0.5m以上の出現頻度は3%にも満たない。このため, 調査の実施時期は, NW方向からの風波が発達する冬期を対象とした。第1回調査は図-2に示す第4灰捨場護岸(鋼矢板式)の前面に消波ブロックを設置する以前で第5灰捨場護岸も完成前の昭和57年3月1日に, 計12回の観測を行なった。また, 第2回調査は第4灰捨場護岸前面に直立消波ブロックが設置され, 第5灰捨場護岸(直立消波ケーソン)も完成した昭和59年1月25日, 26日の2日間にわたって, 計60回の観測を実施した。

2.2 調査方法

第1回調査では, 図-2に示す第4灰捨場の鋼矢板護岸前面で矢板壁面から10.0m, 11.2mおよび13.6mの位置に3台の容量式波高計を配し(直線アレイ), 重複波を観測するとともに, 反射波の影響を受けにくい北方約2kmの地点で2台の容量式波高計により入射波を観測した。また, ブイ式波高計を用いて沖合1.5kmの範囲の波高分布も測定した。第2回調査では, 図-2に示す第4灰捨場護岸(図-3)と第5灰捨場護岸(図-4)の構造形式が異なるため, 各々護岸前面で5台ずつの容量式波高計により観測を行なった。ま

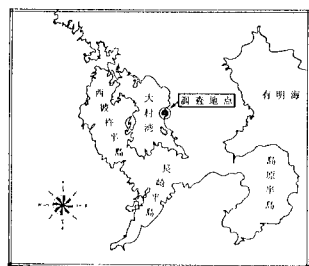


図-1 調査地点位置図

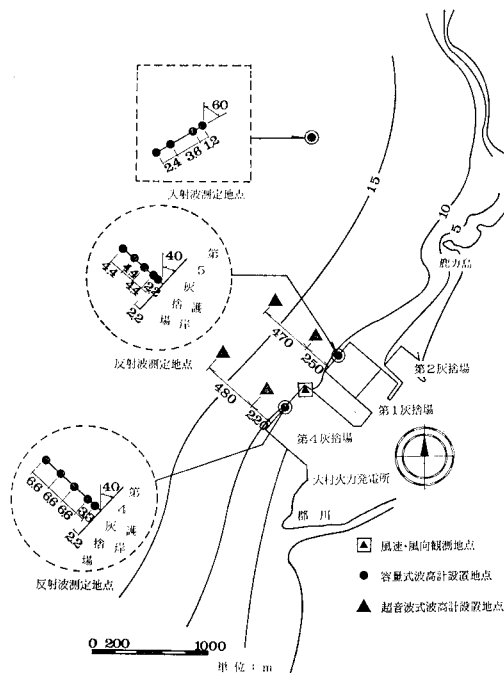


図-2 第2回調査時の計器配置

* 正会員 工修 五洋建設株式会社土木設計部

** 正会員 五洋建設株式会社土木設計部

*** 九州電力株式会社土木部

**** 九州電力株式会社松浦発電所

た、第1回調査とはほぼ同じ地点で4台の容量式波高計により入射波を同時に観測した。さらに護岸前面にポールレイを配し、16m/m 撮影機を用いて護岸から1波長以内の波高分布を詳細に調べるとともに、護岸から約

200m および 700m の地点では、超音波波高計により波高観測を実施した。図-2 の容量式波高計の配置に関しては、あらかじめ数値シミュレーションにより、1台目の波高計の壁面からの距離と波高計間隔を変えた検討を行ない、方向スペクトルおよび反射率の推定精度が高くなるよう、1台目の波高計は壁面から $0.2L$ (L : 波長) 離し、5台の波高計を $1:2:2:2$ ($\times 0.2 \sim 0.3L$) の間隔で配置することとした。

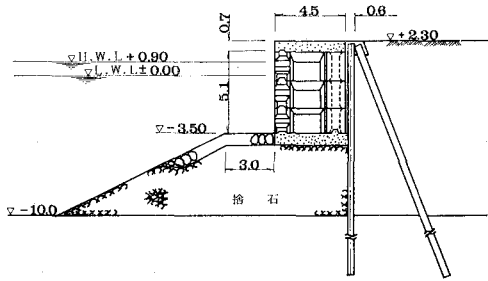


図-3 直立消波護岸タイプA (第4灰捨場護岸)

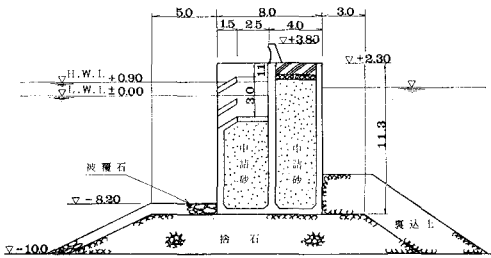


図-4 直立消波護岸タイプB (第5灰捨場護岸)

3. 調査結果

3.1 データ処理の方法

容量式波高計により得られた 10 分間毎のアナログ記録をサンプリング間隔 0.1 秒で A/D 変換し、zero-up-cross 法により波高および周期など各種の統計量を算出した。この時、周期 0.5 秒未満の波は後続の波に含まれるものとして処理を行なった。次に、スペクトル解析に当っては、0.1 秒間隔の 2048 個のデータを対象に、リニアトレンドの除去を行なった後、FFT 法により生スペクトルを求め、Hanning Window によりスペクトルの平滑化を行なった。また、スペクトル解析により算出されたパワースペクトルおよび各波高計のクロススペクトルより、MMLM を用いて方向スペクトルおよび反射率を式 (1) および式 (2) により推定した。

$$\frac{\alpha}{\hat{S}(k, \sigma)} = \frac{\sum_m \sum_n \Phi_{m,n}^{-1} \exp \{ik(x_n - x_m)\}}{\sum_m \sum_n \Phi_{m,n}^{-1} [\exp \{ik(x_n - x_m)\} + \exp \{ik(x_{nr} - x_m)\}]} \quad (1)$$

$$r = - \frac{\sum_m \sum_n \Phi_{m,n}^{-1} [\exp \{ik(x_n - x_{nr})\} + \exp \{ik(x_{nr} - x_m)\}]}{2 \sum_m \sum_n \Phi_{m,n}^{-1} \exp \{ik(x_{nr} - x_{mr})\}} \quad (2)$$

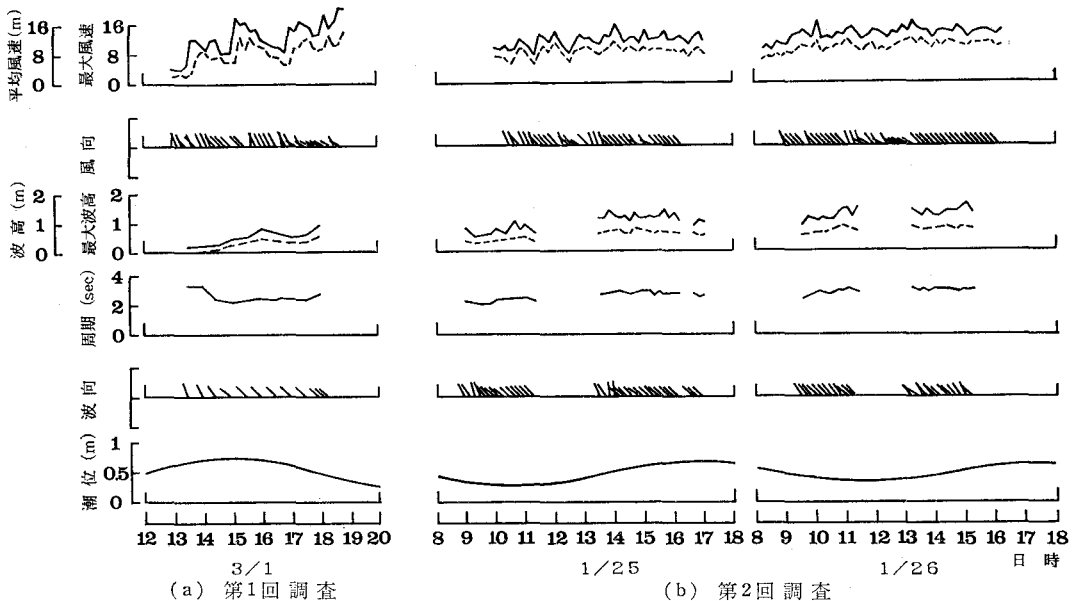


図-5 調査期間中の気象・海象

ここで、 $\hat{S}(\mathbf{k}, \sigma)$: 方向スペクトル, α : パワーを調整するための定数, Φ^{-1} : クロススペクトル行列の逆行列, σ : 角振動数, $\mathbf{k}$: 波数ベクトル, $\mathbf{x}$: 座標, r : 反射率, 添字 m, n は各波高計の位置を表わし, 添字 r は反射面に関して対称となる相対的な位置を表わしている。

3.2 調査期間中の入射波特性と護岸前面波高

第1回および第2回調査期間中の気象・海象を図-5に示す。図中の波向は、式(1)の右辺第2項を0とおいて得られるMLMにより推定された方向スペクトルを周波数に関して積分した場合に、エネルギーが最大となる方向である。調査期間中の有義波高は各回とも0.5m~0.8mに達し、有義波周期は2.5秒~3.0秒、波向は風向に対応しNW方向で護岸にはほぼ直角入射であった。

次に、入射波観測地点の波高と鋼矢板護岸、タイプAおよびタイプBの護岸前面の波高経時変化を比較したものが図-6である。ここで、入射波高は2台あるいは4台の容量式波高計の記録から求めた平均値であり、護岸前面の波高は反射面から1波長以遠に設置された2台あるいは3台の容量式波高計の記録から算出した平均値である。第1回調査では、護岸前面の波高が入射波高と比べて小さい値となっており、風場の変動が激しかったためと考えられる。第2回調査では、調査時の風場が比較的定常状態に近く、このような現象はほとんど見られない。図-6(b)でタイプAとタイプBの護岸前面波高を比較すると、全体的にタイプAの場合の方が大きい。各々のタイプの護岸の反射率を比較した場合、タイプAの方がタイプBに比べて若干大きくなるということも推測

できる。

3.3 方向スペクトル

第2回調査時の入射波観測地点、タイプAならびにタイプBの護岸前面における方向スペクトルを推定した。推定した方向スペクトルを周波数に関して積分した時のエネルギー分布の一例を図-7に示す。図中、入射波観測地点の場合 $0^\circ, 180^\circ$ はアレイ平行入射を表わし、タイプAおよびタイプBの場合、 180° は護岸法線直角方向に対応している。図-7(a)は4台の容量式波高計の記録より計算したものである。入射波向はアレイに対してほぼ直角であり、ピーク付近にエネルギーが集中した形となっている。(b)および(c)は、それぞれタイプAとタイプBの護岸前面において5台の波高計記録より計算した結果である。入・反射波に対応して2つのエネルギーピークが 90° を対称に存在し、入・反射波の分離は非常に良い。この時の入射波向がほぼ護岸法線直角方向であったにも拘らず、推定された波向はやや歪む傾向にある。

また、図-7(c)について、0.2~0.5 Hzの周波数別の方向分布関数を図-8に示した。各周波数で入・反射波に対応して2つのエネルギーピークが 90° を対称に存在する。高周波領域で見かけのピークらしき尖鋭な立ち上がりが見られるが、他の周波数帯に比べて相対的なエネルギーが低いため、周波数に関して積分した分布形状(図-7(c))では、消失していることがわかる。

3.4 推定反射率

各護岸の反射率は、以下の2通りの方法で計算した。

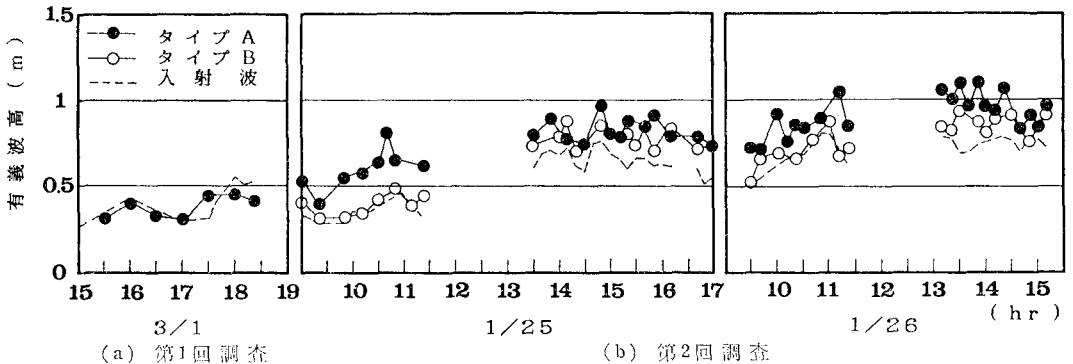


図-6 入射波観測地点の波高と護岸前面波高の経時変化

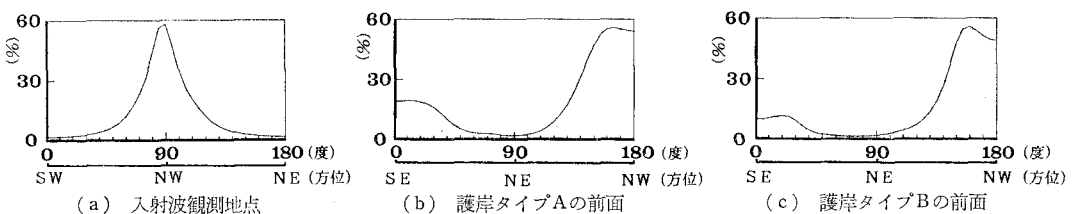


図-7 方向スペクトル推定例(第2回調査 1/26 13:30)

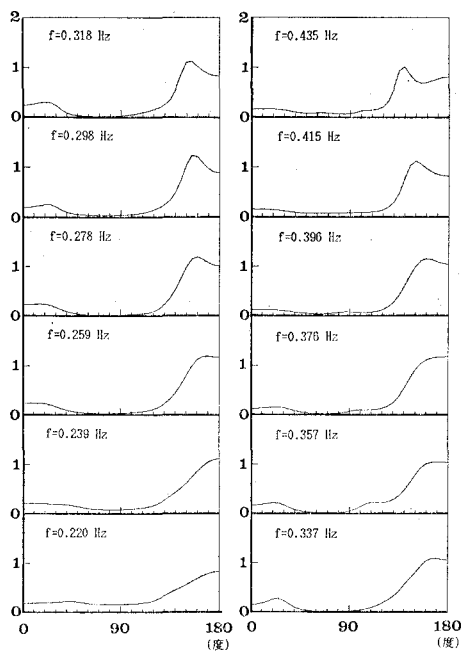


図-8 方向分布関数の推定例

表-1 鋼矢板護岸の反射率推定結果

時刻 (3/1)	推定反射率		波向 (N-deg)	ピーク 周波数 (Hz)
	r_p	r_s		
15:30	0.96	0.93	25	0.435
16:00	0.84	0.87	30	0.376
16:30	0.86	0.98	30	0.357
16:50	0.89	(1.06)	30	0.357
17:00	0.72	(1.01)	50	0.376
17:10	0.82	0.93	50	0.337
17:20	0.96	0.95	25	0.357
17:30	0.73	0.89	25	0.376
17:40	0.90	0.89	20	0.357
18:00	0.86	0.87	20	0.337
18:10	0.93	0.98	70	0.347
18:20	0.78	0.90	70	0.337
平均	0.85	0.92		

より推定した反射率 r_p を縦軸に、遊水室幅 l_z と波長 L ($g/2\pi f_m^2$, f_m : ピーク周波数) との比を横軸にとって整理したものを図-9に示す。タイプAの構造はスリットケーソンと違い明確な遊水室がないため、消波ブロックの全長 (=4.5m) を遊水室幅と見做した。図-9は、谷本ら⁴⁾の室内実験と同じ傾向を示しており、 $l_z/L \div 0.25$ で反射率は最小、 $l_z/L \div 0.5$ で反射率は最大となっている。反射率は、最小で約 0.3、最大で 0.9 の範囲に拡がっている。波高の増大に伴う反射率の低下は、波高と周期の相関性に基づく見かけ上のものと考えられる。

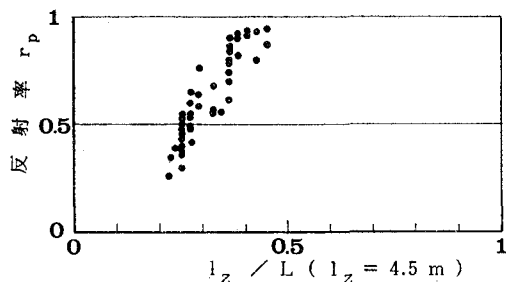


図-9 遊水室幅・波長比と反射率の関係(タイプA)

第一の方法は、推定された方向スペクトルが最大値をとる時に式(2)により反射率 r_p を計算する。第二の方法は、推定された方向スペクトルを 90° を境に入射波と反射波に分離し、各エネルギー総量の比の平方根として次式により定義される反射率 r_s を計算する方法である。

$$r_s = \sqrt{E_R/E_I} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$E_R = \int_0^\infty \int_0^{\pi/2} s(f, \theta) df d\theta \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$E_I = \int_0^\infty \int_{\pi/2}^\pi s(f, \theta) df d\theta \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 r_s : 反射率、 E_R : 反射波エネルギーの総量、 E_I : 入射波エネルギーの総量、 $S(f, \theta)$: 方向スペクトルである。

また、数値シミュレーション結果から反射率が大きい場合には r_p より r_s 、反射率が小さい場合には r_s より r_p の推定精度が高いという結果を得ており、鋼矢板護岸の場合には r_s を、消波護岸タイプAおよびタイプBの場合には r_p を推定反射率とした。

(1) 鋼矢板護岸の反射率

式(2)および式(3)により計算した反射率 r_p および r_s を表-1に示す。反射率 r_p と r_s は概ね似通った値となっている。鋼矢板護岸の反射率は、卓越周波数 f_m とは関係なく、0.85~1.0 の範囲で比較的安定した値を示し、反射率が1.0を上回るケースを除外した平均値は 0.92 となる。

(2) 直立消波護岸タイプA

タイプAの反射率は、入射波高が 0.5m 未満の時期に高い値を示し、波高の増大に伴い小さくなる。式(2)

(3) 直立消波護岸タイプBの反射率

式(2)により推定した反射率をタイプAと同様に、横軸に l_z/L をとって整理したものが図-10である。タイプBの場合はタイプAと異なり、 l_z/L との明確な対応関係は見られない。

一方、横軸に計測を行なった時の潮位をとって整理したものが図-11であり、比較的バラツキは小さくなり、ある程度ははっきりした関係が現われる。先の図-4に示した様に、直立消波護岸タイプBは水面付近に勾配 25° 、水平距離 1.5m、高さ 0.7m の一様斜面を有しており、

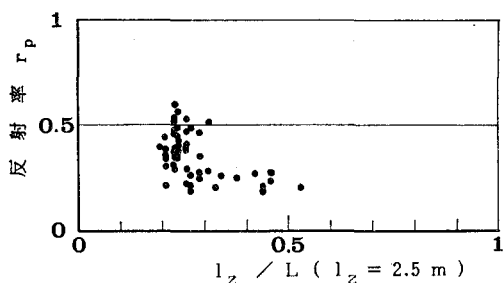


図-10 遊水室幅・波長比と反射率の関係(タイプB)

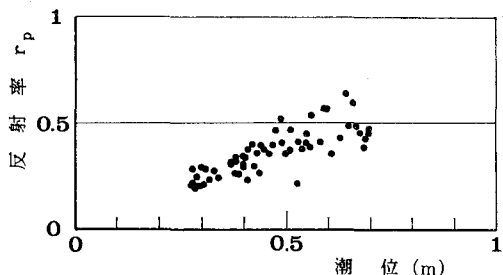


図-11 潮位と反射率の関係(タイプB)

入射波高が斜面の高さと同程度の大きさであったために、潮位と斜面下端との相対的な位置関係が反射率に影響を及ぼしたものと考えられる。反射率は、最小で約0.2(潮位+0.2m)、最大で0.6(潮位+0.6m)である。

4. あとがき

MMLMによる入・反射波共存場での方向スペクトル

推定手法を現地データに適用し、構造形式の異なる3種類の護岸に対してその反射特性を明らかにした。精度の高い方向スペクトルあるいは反射率の推定では、波高計の配置が問題となる。本調査では、卓越周期ならびに卓越波向があらかじめ判明していたため、数値シミュレーションにより反射率の推定精度が高くなるように波高計配置を決定することが可能であった。外海において測定を行なう場合は、周期あるいは波向が広範囲にわたって変化するため、より多くのケースについて数値シミュレーションを行ない、計画アレイ配置の適用範囲を事前に十分把握しておく必要がある。

本研究の実施にあたり、電力中央研究所環境部調査役鹿島遼一氏および横浜国立大学工学部建設学科磯部雅彦助教授から種々のご指導とご助言をいただいた。ここに記し、深甚の謝意を表する。

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回海岸工学講演会論文集, pp. 91~96, 1968.
- 2) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治: 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, 24 p., 1976.
- 3) 磯部雅彦・近藤浩右: 入・反射波の共存場における方向スペクトルの推定法, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 44~48, 1983.
- 4) 谷本勝利・吉本靖俊: スリットケーソンの反射率に及ぼす諸要因の影響, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 389~393, 1982.