

砕波帯における方向スペクトルの観測例

伊 福 誠*・柿 沼 忠 男**・油 井 秀 人***

1. ま え が き

海岸工学上、港湾内での回折波、沖合いの構造物の振動解析、掘削船の運動予測および海浜における底質の運動などを議論する際には波浪の方向スペクトル特性を十分に考慮する必要がある。とくに、海浜における底質の運動を調べる場合には、波浪の入射方向および水平流速成分の卓越方向を適確に把握することが重要である。

この研究は、現地観測によって、波浪の運動機構が極めて複雑である砕波帯における方向スペクトルに関する基礎的資料を得ようとしたもので、観測は愛媛県中予海岸において1981年12月14日から1982年1月28日まで風速 6.5~12.0 m/sec での冬期季節風時に実施した。

2. 観測地点および流速計と圧力計の設置法

図-1 は、観測地点とその付近の平均断面を示したもので、観測地点の平均水深および平均海底勾配は 1.52 m および 0.096 である。

使用した電磁誘導型流速計 MODEL 551 (MARSH-McBIRNEY 社製) は、2 台のセンサが直交するように 1 台の流速計に他の 1 台をステンレス製のバンドで取り付け、ステンレス製の架台に固定し、重さ約 60 kg および 90 kg のコンクリート製ブロック、それぞれ 8 個および 2 個で設置した。

2 個の流速計センサおよび圧力計 (Setra Systems 社

製 MODEL 205-2) は、それぞれ、海底上 0.62, 1.02 および 0.76 m の高さにあり、上部センサでは岸沖および沿岸方向の流速、下部のセンサでは岸沖および鉛直方向の流速を測定した。

3. 解析方法

方向スペクトルは 2 台の流速計および圧力計で得た資料から次の二つの組み合わせで求める。

M-1: 水平流速成分と圧力変動

M-2: 水平流速成分と鉛直流速成分

ただし、2 個の流速計センサおよび圧力計が同一の高さにないことから、線型理論を適用して換算し、すべて海底上 1.02 m の高さにあるものとして、0.024~0.464 Hz の周波数帯について解析した。

圧力変動、水平および鉛直流速成分の資料の読み取り間隔および個数は 0.2 sec および 2048 個である。

4. 解析結果

表-1 は、得た有義波高、有義波周期および目視観測に基づく各資料における砕波の発生頻度を示したものである。以後、Run No. 28-3~6 を非砕波、Run No. 28-8~11 を砕波し始め、Run No. 28-12 および 13 を砕波と呼ぶことにする。Run No. 28-13 は砕波点が観測点より僅かに沖側である。なお、砕波型式は spilling 型である。

表-1 有義波高、有義波周期および砕波の発生頻度

Run No.	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (sec)	Numbers of breakers	Numbers of waves	Frequency
28-3	1.11	4.85	2	91	0.02
28-4	1.22	4.85	5	87	0.06
28-6	1.09	5.06	8	87	0.09
28-8	1.16	5.64	17	83	0.20
28-9	1.06	5.65	20	84	0.24
28-10	1.18	5.78	30	80	0.38
28-11	0.99	5.94	38	85	0.45
28-12	1.02	5.93	59	85	0.69
28-13	0.86	6.16	66	82	0.81

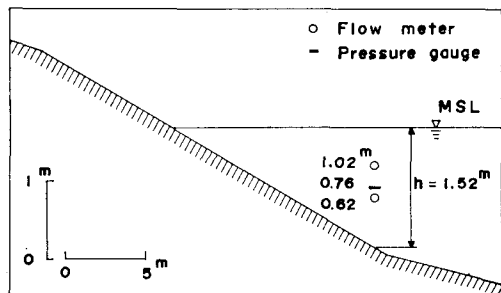


図-1 観測地点と平均断面図

* 正 会 員 工 修 愛媛大学講師 工学部海洋工学科

** 正 会 員 工 博 愛媛大学教授 工学部海洋工学科

*** 学生会員 愛媛大学大学院工学研究科

(1) パワースペクトルの経時変化

図-2 (a) および (b) は、それぞれ、圧力変動およ

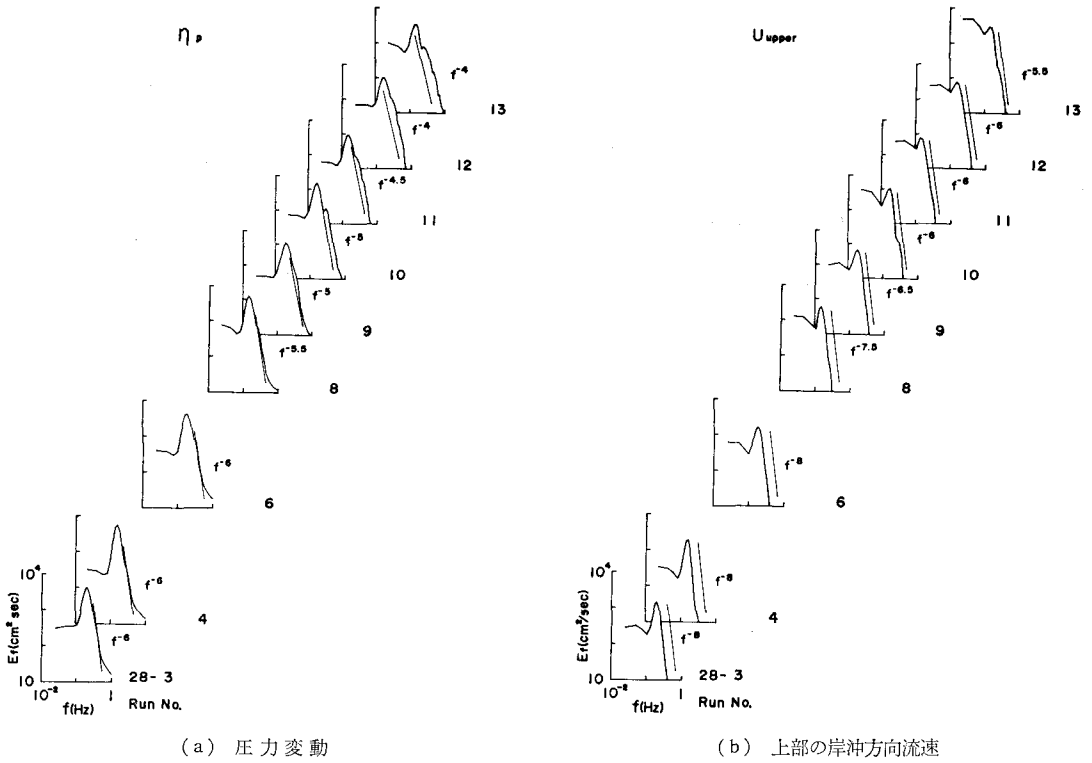


図-2 パワースペクトルの経時変化

び上部の岸沖方向流速のパワースペクトルの経時変化を示したものである。(a)をみると、ピーク周波数より高周波側のエネルギー密度は周波数の -6 乗から -4 乗に比例し、砕波の発生頻度が高くなるにつれて勾配も小さくなり 0.1 Hz より低周波側のエネルギー密度が徐々に大きくなることがわかる。(b)をみると、ピーク周波数より高周波側のエネルギー密度は周波数の -8 乗から

-5.5 乗に比例し、(a)と似た傾向を示しているが、Run No. 28-13は 0.06 Hz より低周波側のエネルギー密度は 0.15 Hz 付近より大きくなっている。下部の岸沖方向の流速のエネルギー密度は全周波数帯で上部より小さいことを除けば(b)と似た傾向を示している。また、鉛直方向流速は砕波の発生頻度が高くなるにつれて、ほぼ 0.2 Hz より低周波側のエネルギー密度が大き

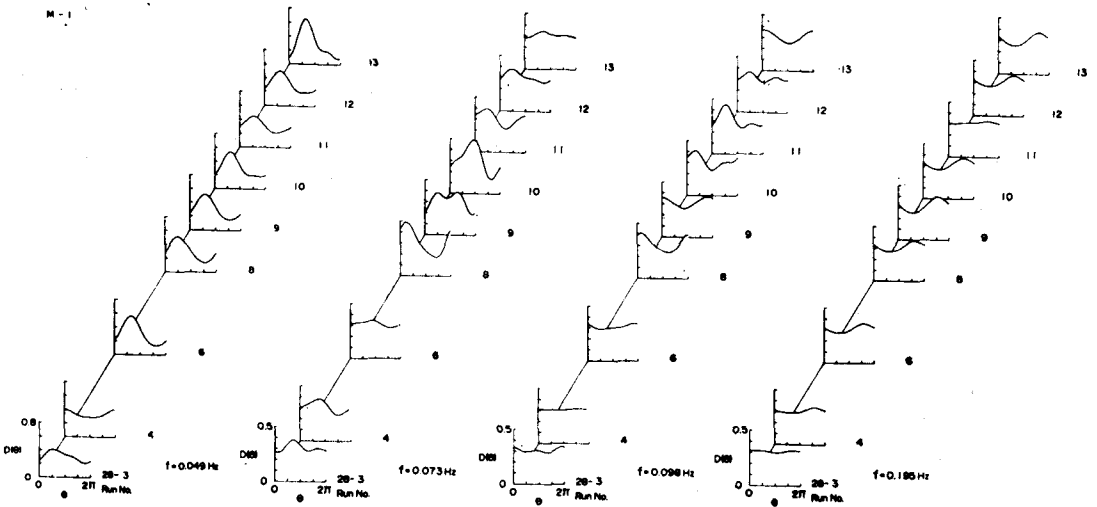


図-3 方向分布関数の経時変化

くなり、それより高周波側では周波数の -5 乗から -3 乗に比例する。岩垣ら⁹⁾に従い波動成分分離法を使用して乱れを抽出すると、こうしたエネルギー特性をもつ鉛直方向流速の乱れ強度 $\sqrt{w'^2}$ は水平方向流速の乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ のほぼ 0.3 倍であり、レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ は水平方向流速の乱れ強度と鉛直方向流速の乱れ強度の積 $\sqrt{u'^2}\sqrt{w'^2}$ のほぼ 0.7 倍である²⁾。

(2) 方向分布関数

図-3 は、0.049, 0.073, 0.095 および 0.195 Hz における方向分布関数の経時変化を示したものである。この図をみると砕波し始めると 0.049 Hz といった低周波数では、エネルギー密度は沖側より岸側が大きく、砕波の発生頻度が高くなるにつれてそうした傾向が顕著になる。また、0.073 Hz および 0.098 Hz では 0.049 Hz にくらべ沖側のエネルギー密度が大きく、岸側と沖側のエネルギー密度の差が小さいようである。砕波の発生頻度が低い砕波し始めでも、岸側のエネルギー密度が沖側より大きいことは、観測地点より岸側で頻繁に砕波がおりその反射あるいは戻り流れのエネルギーが砕波と同程度の大きさによると思われる。こうしたことから、砕波帯内においては 0.049 Hz あるいは 0.073 Hz といった低周波数成分波が常に存在すると思われる。非砕波の資料をみると、周波数が高くなるにつれて岸側と沖側のエネルギー密度の差が小さくなり、0.098 Hz ではエネルギーの卓越方向がないようである。また、圧力変動のピーク周波数付近の 0.195 Hz における方向分布関数は非砕波、砕波し始めおよび砕波とも沖側のエネルギー密度が岸側より大きい。

(3) 反 射 率

(2)において岸側のエネルギー密度が沖側より大きい周波数があり、低周波数成分波が常に存在することがわかった。こうしたことから、各成分波の principal direction³⁾ のエネルギー密度と反射方向のエネルギー密度から式(1)で反射率 K_R を定義する。

$$K_R = \sqrt{\frac{\text{反射方向のエネルギー密度}}{\text{principal direction のエネルギー密度}}} \quad \dots\dots\dots(1)$$

図-4 は、式(1)で求めた反射率を周波数ごとに示したもので、図中の白丸および黒丸は、それぞれ、Run No. 28-12 および 13 のものである。この図をみると、0.049 Hz では両資料とも最大で 1 より大きく、0.2 Hz では最も小さく 0.2 程度であり、それより高周波側ではばらついてはいるものの 0.7 程度であることがわかる。0.1 Hz より低周波側での反射率が 1 程度であるのは、砕波帯内に常に存在する低周波数成分波が沖側とほぼ同じ大きさのエネルギーをもつことを示している。

図-5 は、現地海岸の状況から海岸を不透過粗面の斜

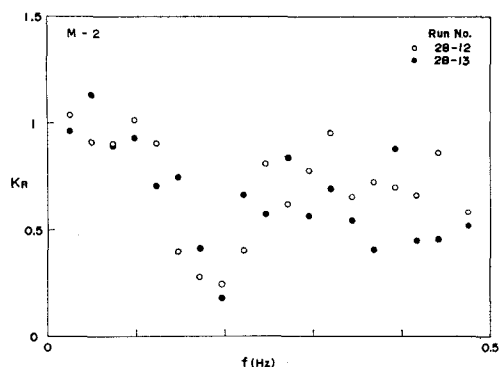


図-4 反射率(砕波)

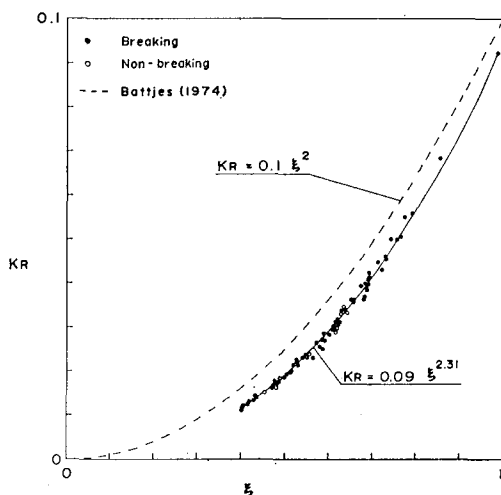


図-5 反射率と similarity parameter との関係

面と考え Miche の式⁴⁾中の斜面の性質をあらわす係数を 0.8 として求めた反射率と Battjes⁵⁾が提唱した similarity parameter との関係を示したもので図中には Battjes が得た結果を破線で示している。なお、白丸は観測地点より岸側で砕波したものである。この図をみると、反射率は Battjes の値よりも 6~20% 程度小さいが似た傾向を示していることがわかる。なお、Battjes は similarity parameter が 0.4 より小さい範囲で spilling 型砕波が生ずるとしているが、目視による観測からはその値より大きい範囲で spilling 型砕波が生じている。図-5 中の波の周期は 5 sec 程度であるので図-4 の 0.2 Hz 付近の反射率とくらべると式(1)で求めた反射率は Miche の式から求めたもののほぼ 2~20 倍である。

(4) peakedness

エネルギーの方向分散の指標である peakedness $I_{\min}/a_0\eta^4$ と周波数を圧力変動のパワースペクトルのピーク周波数で無次元化した周波数 f/f_p との関係は砕波の資料について示したものが図-6 である。この図をみると、ばらつきはあるものの圧力変動のピーク周波数付近

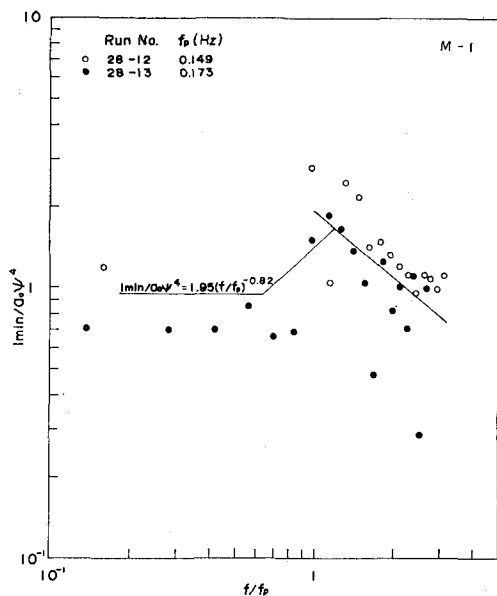


図-6 peakedness と無次元周波数との関係 (砕波)

におけるエネルギーの方向分散は小さく、ピーク周波数より高周波側ではエネルギーの方向分散が大きくなることからわかる。非砕波、砕波し始めおよび砕波の資料について、無次元周波数がより大きい範囲において次のような近似式を得た。

$$\left. \begin{aligned} I_{\min}/a_0\psi^4 &= 2.13(f/f_p)^{-1.14} && \text{非砕波} \\ I_{\min}/a_0\psi^4 &= 2.58(f/f_p)^{-1.06} && \text{砕波し始め} \\ I_{\min}/a_0\psi^4 &= 1.95(f/f_p)^{-0.82} && \text{砕波} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

この近似式から、砕波の発生頻度が高くなるにつれて無次元周波数が1より大きい範囲では圧力変動のピーク周波数成分波の方向分散とそれより高周波数成分波の方向分散との差が小さくなることからわかる。

(5) long-crestedness

波浪の伝播方向を示す long-crestedness と無次元周波数との関係を砕波の資料の一つである Run No. 28-12 について示したものが 図-7 であり、破線は岩田⁶⁾の経験値である。岩田は、相模湾の岸から 1.3 km 離れた水深 20 m にある観測塔で容量式波高計および超音波式流速計により得た資料から long-crestedness を求め、Priestley⁷⁾ が地上における大気の流れ圧力変動から求めたものと比較したところ、両者は良く合うことを報告している。図-7 をみると、long-crestedness は圧力変動のピーク周波数で最小であり、経験値のほぼ半分である。

各資料について調べてみると、非砕波はピーク周波数付近において大気の流れ圧力変動あるいは深海波とくらべて波向が比較的揃っていること、砕波し始めは大気の流れ圧力変動あるいは深海波と良く似た傾向を示し、その値は経験値のほぼ半分であること、砕波はピーク周波

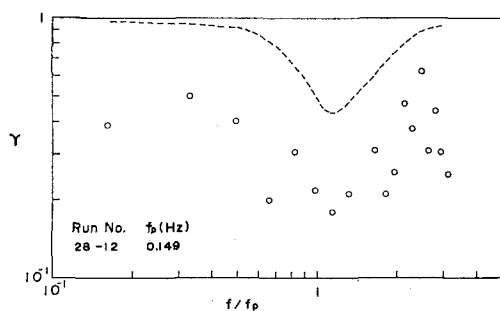
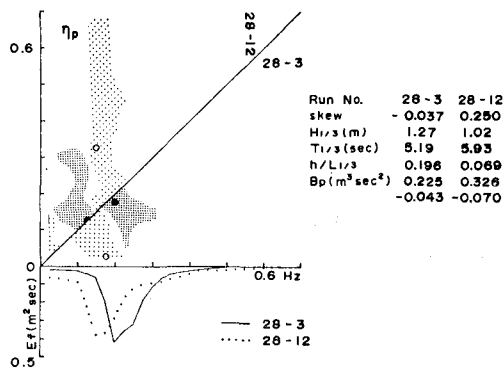


図-7 long-crestedness と無次元周波数との関係 (砕波)

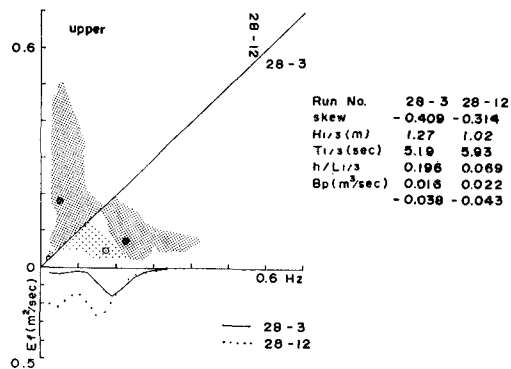
数より低周波側においてはピーク周波数からそのほぼ 6 割までの間では経験値と良く似た傾向を示すが、それより低周波数においてはほぼ一定の値を取り経験値と異なった傾向を示すことがわかった。

(6) バイスペクトル

図-8 (a) および (b) は、それぞれ、圧力変動および上部の岸沖方向流速のバイスペクトルについて示したものであり、密な影を付けた部分はバイスペクトル密度が正で、かつバイスペクトルピーク値の 20% より大きい領域を示し、粗い影を付けた部分は、バイスペクトル密度が負で、その絶対値が負のバイスペクトルピークの



(a) 圧力変動



(b) 上部の岸沖方向流速

図-8 バイスペクトル

絶対値の 20% より大きい領域を示している。(a) は圧力変動のピーク周波数が 0.198 Hz の非砕波と 0.149 Hz の砕波のものである。ピーク周波数が低周波側へ移るにともない、正および負の領域も移動しているが、ピーク周波数成分と高周波数成分との干渉が強くなっている。また、正および負のバイスペクトル密度のピークの絶対値も砕波のものが大きく、砕波の成分波間の干渉が強いことを示している。(b) は岸沖方向流速のピーク周波数が 0.193 Hz の非砕波と 0.149 Hz の砕波のものである。砕波のほぼ 0.04 Hz から 0.15 Hz にかけてのエネルギー密度は非砕波のほぼ 2 ~ 8 倍であり、そうした周波数成分間の干渉が強くなり正の領域がかなり大きくなっている。圧力変動および上部の岸沖方向流速とも砕波の場合の各成分波間の干渉が強いが、ピーク周波数成分と高周波数成分との干渉は圧力変動と岸沖方向流速でその符号が逆である。

5. 結 語

以上、著者らは砕波帯において圧力変動、水平方向および鉛直方向流速の観測を実施し、スペクトル法によって種々の発生頻度における spilling 型砕波について調べた。その結果、圧力変動および岸沖方向流速のピーク周波数より高周波側と鉛直方向流速の 0.2 Hz より高周波側では、エネルギー密度は砕波の発生頻度が高くなるにつれてその勾配が小さくなること、砕波帯内においては 0.049 Hz あるいは 0.073 Hz といった低周波数成分波が常に存在し、エネルギー密度は沖側より岸側が大きいこと、principal direction と反射方向のエネルギー密度から求めた反射率は 0.049 Hz といった低周波数で 1 程度で 0.2 Hz 付近で最小となり、その値はほぼ 5 sec 周期

の波に対して Miche の式から求めた反射率の 2~20 程度であること、Miche の式から求めた反射率は同一の similarity parameter に対する Battjes の値より 6~20% 程度小さいこと、砕波の発生頻度が高くなるにつれて、圧力変動のピーク周波数成分波とそれより高周波数成分との方向分散の差が小さくなること、long-crestedness は砕波し始めでは大気の流れ圧力変動あるいは深海波と良く似た傾向を示しその値はほぼ半分であり、砕波では圧力変動のピーク周波数の 6 割より低周波数においてほぼ一定の値をとり異なった傾向を示すこと、バイスペクトルは砕波の場合、各成分波間の干渉が強いが、ピーク周波数成分と高周波数成分との干渉は圧力変動と岸沖方向流速でその符号が逆であること、などを得た。

参 考 文 献

- 1) 岩垣雄一・浅野敏之・小谷敏樹：周期波と流れの共存場における乱れの定義とその特性について、第 28 回海岸工学講演会論文集，pp. 10~14, 1981.
- 2) 栗原 薫・伊福 誠・柿沼忠男：砕波帯における浮遊砂の観測，昭和 59 年度土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集，pp. 133~134, 1984.
- 3) Nagata, Y.: The statistical properties of orbital wave motions and their application for the measurement of directional spectra, Jour. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 19, No. 4, pp. 169~181, 1964.
- 4) 土木学会編：水理公式集，p. 504, 1971.
- 5) Battjes, J. A.: Surf similarity, Proc. 14th Conf. Coastal Eng., pp. 466~480, 1974.
- 6) Iwata, N.: Directional energy distribution of wind waves, Jour. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 27, No. 3, pp. 102~108, 1971.
- 7) Priestley, J. T.: Correlation studies of pressure fluctuations on the ground beneath a turbulent boundary layer, Nat. Bur. Std. Ann. Rep. 8942, pp. 1~91, 1965.