

砕波帯近傍における波の波高，周期分布について

堀 田 新 太 郎*

1. はじめに

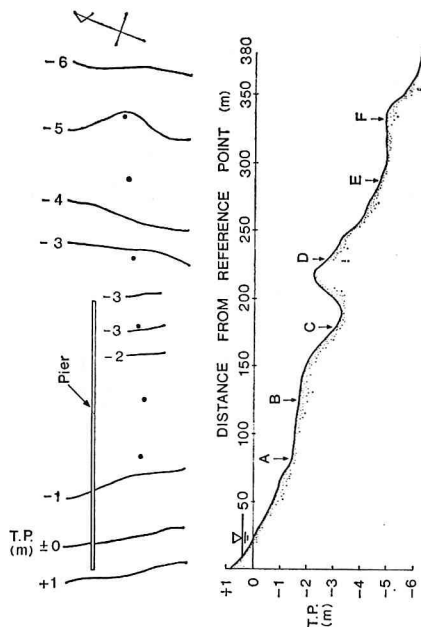
著者は砕波帯近傍の波の観測方法の1つとして，何台かの同期された 16 mm メモモーションカメラを使用する方法，いわゆる 16 mm メモモーションカメラシステムを過去の現地観測に使用してきた¹⁾．従来までは主として砕波帯内の波の諸特性を明らかにしようとする目的から多点の観測値を得ることに最大の努力を払ってきた．また標識としてのボールの打設の困難さの故に，砕波点よりわずか沖側から汀線までの範囲に観測は限られ，いわゆる波が浅水変形をする領域における情報を欠くという事態になった．加えて，観測時間はフィルム長によって限定されることから，得られたデータも 12～13 分，対象となる波数はせいぜい 120 波～180 波程度であった．これらの観測でも多くの新しい知見が得られたものではあるが，この程度の観測時間では波の諸特性，特に波の重要な取り扱い法である統計的な方法で波の性質を定量的に議論しようとする時，観測時間が短か過ぎるということは疑問の余地もない．そこで，今回はソリを利用することにより浅水変形領域に標識を設け，2 台のカメラを交互に使用することによって長時間の観測を可能ならしめ，波の浅水，砕波変形の定量的な議論ができる観測を実施した．

この観測から多くの知見が得られることが期待できる．しかしながら，紙面にも限りがあり，かつ解析にも時間を要するので，今回はその一部として波高・周期およびその結合分布に限って報告する．

2. 現地観測とデータ解析

2.1 現地観測

現地観測は昭和 55 年 9 月 2 日，茨城県那珂湊市阿字ヶ浦にて，建設省土木研究所の漂砂研究用栈橋を利用して実施した．栈橋の南側に約 30 m 離れて，栈橋にほぼ平行に高さ 8 m のポールを持つ 6 台のソリを約 50 m 間隔に連結し，海上より 2 艘の漁船で海中に引き出した．



図—1 ソリの位置および Beach Profile



写真—1 観測時の波

汀線より 3 台目 (C) のソリが目視による平均的な砕波点に位置している (図—1)．これらのポールを標識として，栈橋上よりポールに沿う水位を撮影した．1 台のカメラが 3750 コマの撮影を終了した時点で自動的に他の 1 台に切り変わるようになっている．撮影間隔は 0.2 秒で 37500 コマ (10 ロール，約 2 時間 8 分) の観測をした．データは完全に得られている．写真—1 にソリと波の状態を示す．

2.2 データの解析

データの処理はフィルムアナライザーとグラフペンデ

* 正会員 工修 東京都立大学助手 工学部土木工学科

ジタイザーを使用して行なった。ボールに沿う水位はグラフペンデジタイザーによりボール先端からの距離として紙テープにパンチアウトした。紙テープよりコンピューター処理に都合がよいように一度 MT に変換し、さらにライプリンターで波形として出力し、データチェックがなされた。

1本のボールを1台のカメラで撮影したので良好な大縮尺の画像が得られている。しかしながらデジタイザーの分解能よりデータには最大 ± 1.5 cm 程度の誤差は避けられなかった。

従来の観測結果の解析において繰り返し述べてきたことであるが、波を zero crossing method で定義すれば極めて微小な波が多数定義され、結果として波を統計的に処理するとき、統計諸量を小さくすることを指摘してきた²⁾。

この問題に対して明確な解答は未だ与えられていない。しかし、著者は少なくとも最小読取値の2~3倍以下の波は無視した方がよいだろうと考えている^{1),2)}。既に述べたようにデータには ± 1.5 cm 程度の誤差が避けられない。無視すべき微小な波の基準が与えられないので、ここでは一応 5 cm 以下の波を無視している(定義される最小の波高は 5 cm である)。

3. 観測結果とその検討

3.1 水位分布について

波に関する統計量の多くは、基本となる水位変動の出現確率の正規分布を仮定することから始まる。本稿において、水位分布について詳細な検討をする意図はないが

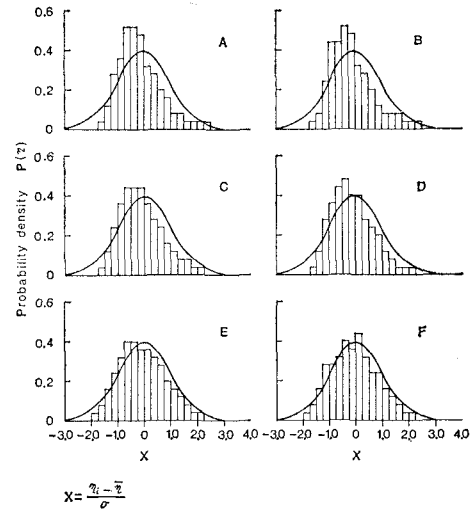


図-2 水位分布

念の為に確認しておく、図-2に各測点の出現水位分布を示す。ヒストグラムは水位の確率密度を示し、平均ゼロ・標準偏差で正規化してある。実線は正規分布を示す。

図より、沖側の点より岸に近づくに従って出現頻度が一側に移動し、かつピークを鋭くする。表-1に skewness および kurtosis を示す。上述の傾向を数字で示している。明らかに水位の出現頻度は正規分布をずらすとは断じ難い。水位の分布が正規であるという波に関する諸理論は砕波帯近傍ではその根拠を失うことになる。尚、skewness と kurtosis は、いわゆる波が浅水変形をなす領域で $H_{1/3}/h$ (有意義波高水深比)、あるいは $H_{1/3}/h$ ・

表-1 観測された波の統計諸量

測 点	zero up cross 法						zero down cross 法						$\bar{H}^*$ (cm)	$\bar{T}^*$ (s)	定 義 される 波 数
	H_{max} (cm)	T_{max} (s)	$H_{1/10}$ (cm)	$T_{1/10}$ (s)	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)	H_{max} (cm)	T_{max} (s)	$H_{1/10}$ (cm)	$T_{1/10}$ (s)	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)			
A	173	3.2	115	6.7	96	6.4	166	3.1	122	6.9	102	6.9	64	5.1	1,457
B	191	16.2	137	8.3	113	7.1	189	13.6	140	7.3	118	7.2	73	5.5	1,367
C	208	10.1	141	6.2	112	6.3	217	9.1	143	7.0	111	6.8	71	5.2	1,446
D	241	10.1	167	9.1	126	8.4	243	8.2	172	8.6	129	8.4	78	6.6	1,125
E	228	10.8	138	9.1	109	8.5	217	9.6	138	9.3	109	8.7	68	6.5	1,157
F	208	10.7	141	9.1	113	9.0	242	15.9	142	9.5	114	9.0	72	6.8	1,101

測 点	水位に関する統計諸量				ϵ	ν_s
	$\bar{\eta}$ (cm)	σ (cm)	skewness	kurtosis		
A	27	23	1.26	5.05	0.981	0.844
B	27	27	1.25	4.89	0.983	0.901
C	-1	28	0.93	4.36	0.967	0.803
D	-2	30	1.16	5.43	0.961	0.794
E	13	28	0.64	3.73	0.944	0.875
F	24	30	0.51	3.43	0.939	0.865

* $\bar{H}$, $\bar{T}$ は zero up cross 法, zero down cross 法のいずれにおいても理論的には同じ値となる。

$$\epsilon = [1 - m_2^2 / (m_0 m_4)]^{1/2}$$

$$\nu_s = [m_0 m_2 / m_1^2 - 1]^{1/3}$$

$$m_n = \int_{-\infty}^{\infty} f^n S(f) df$$

$(L/h)^2$ (アーセル数) とある直線関係を有することが見つけ出されている^{1), 3)}.

3.2 波高分布について

図-3 に波高と周期の分布を示す。図中ヒストグラムは波高分布、黒丸を繋いだ線は周期分布、細い折れ線は周期 T の2乗分布を示す。いずれも平均波高 $\bar{H}$, 平均周期 $\bar{T}$, および $\bar{T}^2$ で正規化してある。図中太い破線はレーレー分布曲線を示す。波は zero crossing 法によって定義され、無視した波高 5 cm 以下の微小波の周期分はその微小波の前の波に付けられている。図-3 より先ず気づくことは、zero-up cross 法で波を定義すれば F~A のいずれの測点においてもレーレー分布に近い分布形状を示すことである。本来、波高の分布がレーレー分布である根拠は水位の出現確率が正規であり、かつスペクトル幅が小さいという仮定から出発している⁴⁾。すぐ前に水位の出現確率が正規でないという事実が示された。表-1 に 32768 個のデータを使用して FFT 法でスペクトル解析して求めたスペクトル幅パラメータを示してある。 ϵ はいずれの測点においても大きく、ほとんど 1 に近い。この2つの事実は Longuet-Higgins (1952)⁴⁾ の理論の仮定を否定するが、観測結果は少なくとも砕波点までの浅水領域においても波高分布はレーレー分布をなすようである(適合性の検定はまだ実行していない)。もっとも合田 (1975)^{3), 9)} によれば ϵ は風波のスペクトルの特性を表わす量ではなくて、むしろ測定・記録・解析系の感度の指標であると解釈した方が妥当のようであり、また彼の (1970)⁷⁾ 又は (1975)⁸⁾ の数値線型シュミレーションによれば、スペクトルの形状に拘らず zero up cross 法で定義した波高の分布はレーレー分布を成しているという結果は観測結果の解釈の一助になるかもしれない。

波を zero down cross 法で定義すると、砕波点以深での波高分布形状は zero up cross 法による分布と大差ない。しかしながら、砕波帯内では既に著者等⁹⁾ によって指摘されているように波高分布は bi-modal による。今回のデータ数は従来のデータに比べて 10 倍の大きさである。zero down cross 法で波を定義すれば、砕波帯内における波の1つの特性として認めて良いであろう。

浅水砕波変形に伴う波高分布の変化のモデルとしては合田 (1975)¹⁰⁾, Battjes (1974)¹¹⁾, 水口・松田 (1980)¹²⁾ 等により提案されたものがあるが、この観測結果からみ限りにおいては再考が必要となろう。

3.3 波の周期の分布について

Bretshneider (1956)¹³⁾ の半経験的な周期分布、いわゆる T^2 の分布がレーレー分布になるとする分布は、現在までのこの分布に対する評価から推して砕波帯近傍では適応しないであろうということは容易に想像がつく¹⁴⁾。

図-3 は明白に推測が事実であることを示す。 T^2 の分

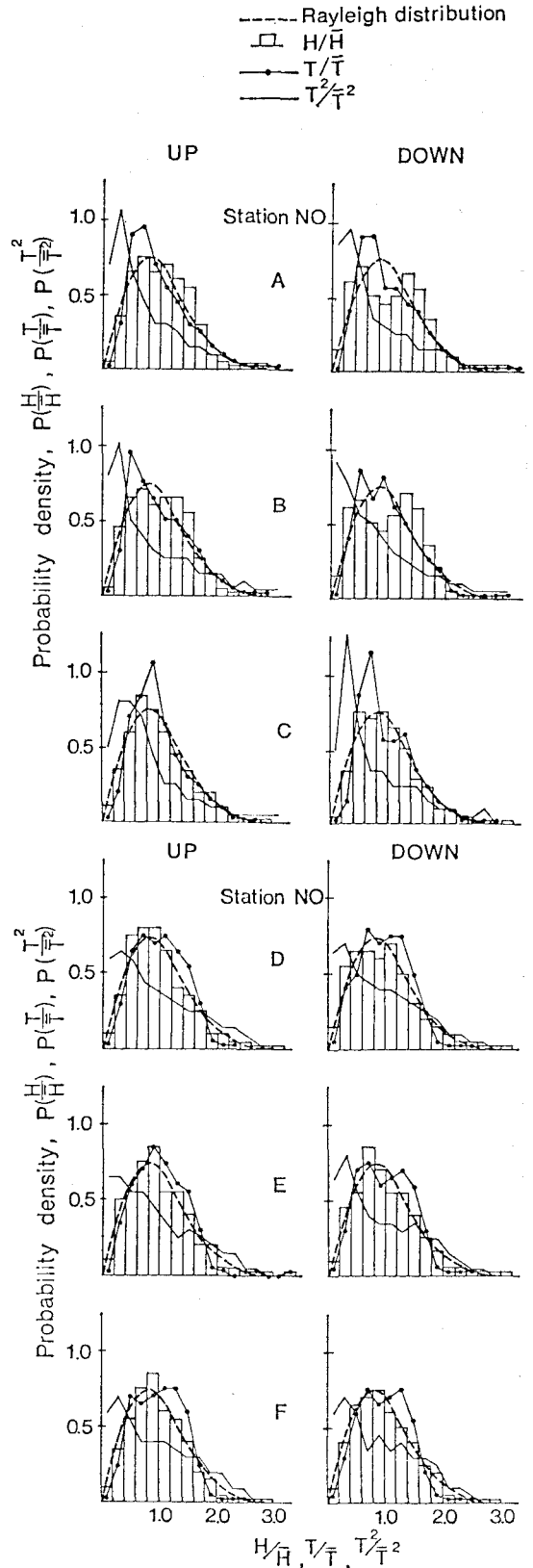


図-3 波高と周期の分布

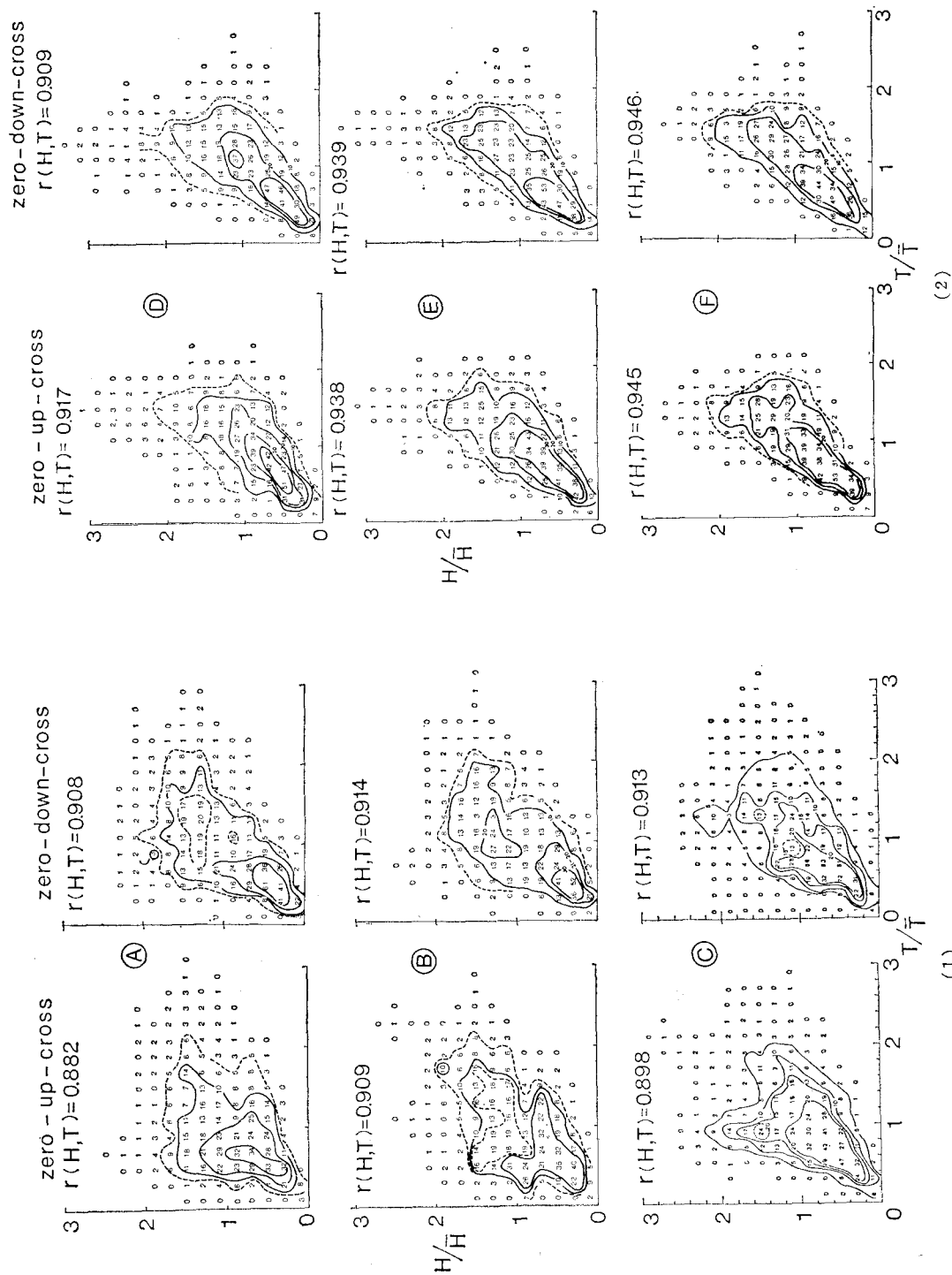


図-4 波高と周期の結合分布

布をみると岩垣・木村(1975)¹⁵⁾が周期分布に対して適用した Weibull 分布の形状母数 $m=1.0$ に似た分布形状をなす。最早、砕波帯近傍の波の周期分布について、 T^2 の分布がレーレー分布を成すという仮定は考慮の対象からはずしてよいように思われる。むしろ、 T そのものがレーレー分布に似た分布を示している。従来著者等によって得られたデータによると、砕波帯近傍では周期は波高分布に対応するような分布を示している。このデータもその例である。これはすぐ後に述べるように波高と周期の相関が極めて強いという事実による。

3.4 波高と周期の結合分布

波高と周期の結合分布については Longuet-Higgins (1975)¹⁶⁾ はスペクトルの帯域幅が十分に狭いことを仮定して理論式を与えている。しかしながら海の波は広いスペクトル幅を持つことは周知の事実であり、広いスペクトル幅を持つ波についての波高と周期の結合分布の理論式は未だ与えられていない。

この問題に関して合田(1977)¹⁷⁾ は多くの波浪観測データを解析し次のような結論を得ている。すなわち、波高と周期の相関係数が低い場合には Longuet-Higgins の理論に比較的よく適合するが、相関係数が高くなると適合性はよくない。しかしながら、スペクトル幅のパラメータを周期分布に合わせて設定することにより結合分布のうち波高比の大きな範囲については部分的に適合させることができる。

合田の解析は主として波高と周期の相関係数をパラメータとして解析し、かつ砕波の影響を避けてなされている。波の浅水、砕波変形に伴う結合分布の変化という観点からの解析はなされていない。そういう意味で本観測で得られたデータは波の浅水、砕波変形に伴う結合分布について量的な議論に答え得るデータと思われる。以下測点 A より F 点までの結合分布を図-4 に示す。定義される波数は 1,100~1,500 波程度であるが図はすべて 1,000 で正規化されている。図-4 より次のようなことが指摘される。

① 波高と周期の相関が極めて強い。僅ではあるが zero down cross 法で波を定義した場合に波高と周期の相関は高い。これは著者等によって既に考慮されたように大きな波の後に小さい波が連らなっているときの両定義法の差異に起因するものであろう〔参考文献 2), 図-5 を参照されい。zero down cross 法は大きな波高と大きな周期の波、小さい波高と小さい周期の波を定義することがわかる〕。

② 砕波帯の沖側で波高の分布範囲が広い。逆に砕波帯内では周期の分布範囲が広い。これは砕波帯沖の浅水変形による波高の増大、そして砕波後の波高の減少と砕波に伴う乱れに依る波数の増大に依るものであろう。同じ理由で砕波帯内の相関係数が浅水領域より小さいのであ

ろう。

③ zero down cross 法で波を定義すれば、砕波帯内での結合分布は 2 つの極大値を持つ分布になっている。これは ① に述べた理由で理解できる。

4. 結 語

この現地観測より、砕波帯近傍の波高周期の分布、およびその結合分布の 1 つの素顔を浮かび上がらせることができた。しかし時間的制約より多くの数的検討が未だ残されている。特にスペクトル的な検討は紙面にも限りがあるので意図して避けた。なるべく早い機会に更なる結果を報告する。

尚、現地観測を実施するに当たって、建設省土木研究所海岸研究室長橋本弘氏、および宇多高明氏に御配慮をいただいた。紙上を借りて感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 例えば, Hotta, S. and M. Mizuguchi: A field study of wave in the surf zone, Coastal Engineering in Japan, Vol. 23, pp. 59~79, 1980.
- 2) 堀田新太郎, 水口 優, 磯部雅彦: 砕波帯内の波の平面分布特性について, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 129~133, 1980.
- 3) 堀田新太郎, 水口 優: 波の非線形性を示す指標としての至度について, 第 36 回年次学術講演会講演概要集, II-385, 1981.
- 4) Longuet-Higgins, M. S.: On the statistical distribution of the heights of sea waves, Jour. Marine Res. Vol. IX, No. 3, pp. 245~266, 1952.
- 5) 合田良実: 波浪の統計的性質とその応用, 1975 年度水工学に関する夏期研修会講義集, B コース, B-1 土木学会水理委員会, 1975.
- 6) 合田良実: 波浪観測記録による周期と波高の結合分布の解析, 港湾技術資料, No. 272, 運輸省港湾技術研究所, 20 p., 1977.
- 7) Goda Yoshimi: Numerical experiments on wave statistics with spectral simulation, Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol. 9, No. 3, pp. 3~57, 1970.
- 8) 前出 5)
- 9) 前出 1), 2)
- 10) 合田良実: 浅海域における波浪の砕波変形, 港湾技術研究所報告, 第 14 巻, 第 3 号, pp. 59~106, 1975.
- 11) Battjes, J. A.: Computation of set-up, Longshore currents, run-up and overtopping due to wind-generated waves, Rept. of Civil Engg., Delft Univ. Tech., Rept. No. 74-2, 244 p., 1974.
- 12) 水口 優・松田仲次: 現地不規則波浪の浅海変形について, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 134~138, 1980.
- 13) Bretschneider, C. L.: Wave variability and wave spectra for wind-generated gravity waves, BEB Teah. Memo. No. 113, 192 p., 1959.
- 14) 前出 5)
- 15) 岩垣雄一・木村 晃: 不規則波浪の周期の確率特性に関する研究, 第 22 回海岸工学講演会論文集, pp. 295~300, 1975.
- 16) Longuet-Higgins, M. S.: On the joint distribution of the periods and amplitudes of sea waves, J.G.R. Vol. 80, No. 18, pp. 2688~2693, 1975.
- 17) 前出 6)