

砕波帯付近の波にともなう流速場に関する現地観測

磯部 雅彦*・水口 優**・堀川 清司***

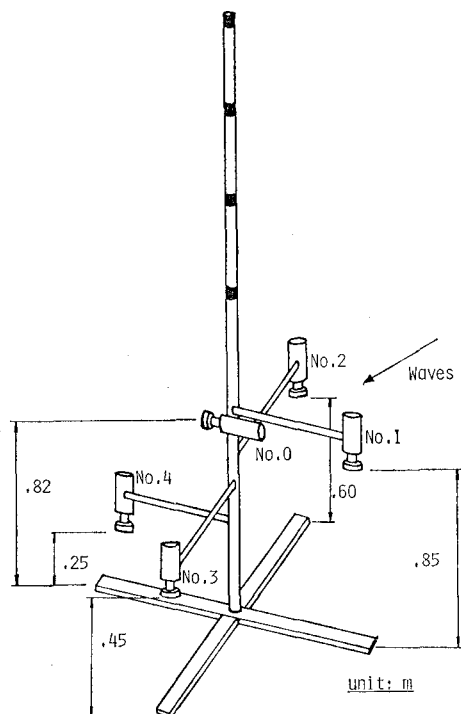
1. はじめに

砕波帯近傍における流速場の特性を解明することの重要さは言うまでもない。著者らは既に電磁流速計（盛岡計器製）および 16 mm シネカメラを用いて砕波帯内の一点における水面変動と水平流速の鉛直方向分布を観測した結果について報告した〔堀川・堀田・水口・磯部（1979）. 以下 Ref. I と書く〕。パー型地形のトラフ部という特殊な地点における観測ではあったが、水位変動より線型理論を用いて得られる流速の算定値が実測値より大きいこと、および流速分布に鉛直構造があり、砕波によって生じる乱れは表面に著しいこと等を明らかにした。最近 Guza・Thornton（1980）は抵抗線式水位計、圧力計および Marsh-McBirney 型電磁流速計を用い、ほぼ様な緩勾配斜面において砕波帯内を含む浅海域での波の場の現地観測を行ない、スペクトル解析の結果から線型理論により現象がよく説明できることを報告している。しかし彼らのデータにおいても、砕波帯近傍においては、線型理論による流速の計算値は実測値を上まわる傾向がある。

本論文では、砕波帯内外の 6 点において水位変動および流速の鉛直構造に関する現地観測を行なった結果をもとに、そこでの流速場の特性を論じる。

2. 現地観測

この観測における測定項目は砕波帯付近の 1 点における水面変動とそこでの流速の鉛直分布である。流速は図—1 に示す流速計設置架台に 2 成分電磁流速計を 5 台固定し、出力信号をレクチグラフによりモニターしつつデジタルデータレコーダに記録した。また水面変動は架台中央に取り付けたポールを 16 mm メモーションカメラで撮影し、フィルム解析装置を用いて最小単位 1 cm で読み取るにより得た。サンプリング周波数は 5 Hz で、測定時間は波の統計的处理に十分となるよう 25 分とした。フィルム一巻の有効コマ数は約 3800 なの



図—1 流速計設置架台概略図

で、2 台の 16 mm メモーションカメラを若干オーバーラップさせて使用した。また、16 mm カメラとデータレコーダとの同期は手動により行なった。

観測地点としては、波高が比較的小さく、砕波帯の外側まで架台が設置できるという条件から、茨城県大洗海岸にある防砂突堤の北側を選んだ。図—2 に平面的な概略図を示す。ここは突堤の影響による回折および地形の影響による屈折が起こる区域であるが、観測を行なった地点ではすでに波峯線の曲率半径は十分に大きく、二次元的な進行波の場であると見なすことができる。観測は 1979 年 9 月 5 日の午後、図—2 の中に○印で示す 6 か所について沖側から順に架台を移動させて行なった。それぞれの観測条件は表—1 に示す通りで、砕波帯の外側から始めて内側に至る領域をカバーした。図—3 は観測を行なった岸沖方向断面における海底地形であり、測定地点と観測開始時刻および平均水位も示してある。潮位表

* 正会員 工修 東京大学助手 工学部土木工学科

** 正会員 工博 中央大学助教授 理工学部土木工学科

*** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

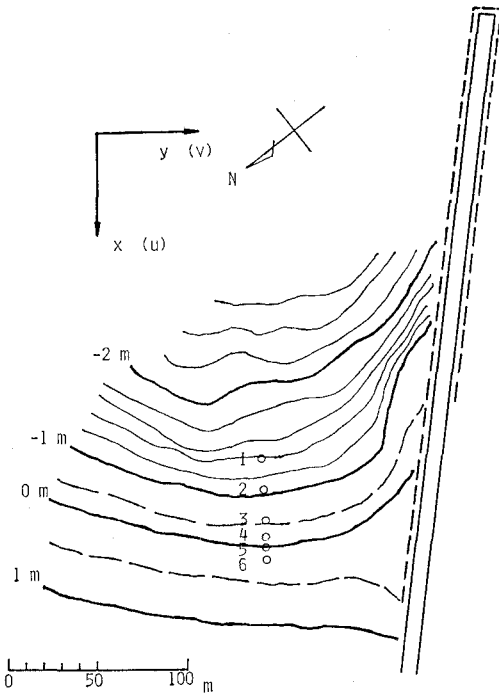


図-2 観測点付近の地形図

表-1 観測時の条件 (観測地点)

CASE	1	2	3	4	5	6
水深 h (m)	2.17	1.62	1.27	1.19	1.04	0.92
有義波高 $H_{1/3}$ (m)*	.68	.73	.74	.80	.75	.67
有義周期 $T_{1/3}$ (s)*	6.4	6.8	6.8	6.3	6.3	6.5
水位変動の rms 値 η_{rms} (cm)	16.6	16.6	15.2	16.7	15.6	15.1
波の数 N_w	257	231	237	262	260	249

* 波別解析法によって読み取り誤差を 1cm 考慮したもの

より, 観測期間 (約 3 時間) は潮差約 1m の上げ潮時の後半にあたり, CASE 1 から 6 に至るまで約 40 cm の水位の上昇が見られた。

3. 結 果

(1) 水位変動の特性

まず観測時における波の条件を把握するために, 水面変動に関して各種の統計量の計算を行なった。碎波帯付近においては入射波と独立であると考えべき長周期の水位変動が存在することが多い。従って, 入射波の特性について論じるためにはそのような成分は取り除いて考えるのが妥当である。そこで, 0.05 Hz 以下の成分は完全に通過し, 0.0625 Hz 以上の成分は完全に排除するような数値フィルターを通したものを長周期成分とし, 生データよりそれを差し引いたものを入射波浪としての記録 η' と考えた。これについて, zero-down-cross 法により有義波高 $H_{1/3}$ ・有義周期 $T_{1/3}$, 水位変動の rms 値 η_{rms} , 波の総数 N_w を計算した結果が表-1 に示してある。なお, フィルムからの読み取りに際しては最小読み取り単位 1cm 程度の誤差は不可避であり, この範囲内では平均水面を切ったとは見なさないこととした。図-1

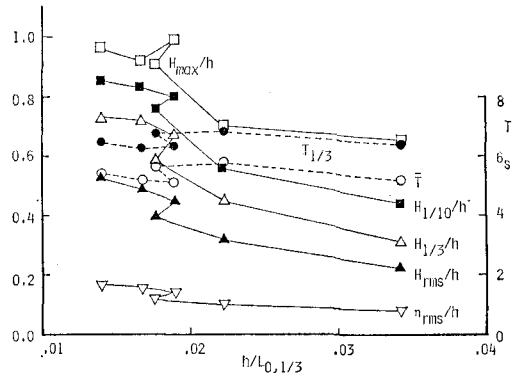


図-4 水位変動に関する統計量の変化 (zero-down-cross 法)

4 は計算された有義周期 $T_{1/3}$ および平均周期 $\bar{T}$, ならびに最大波高 H_{max} , 1/10 最大波高 $H_{1/10}$, 有義波高 $H_{1/3}$, 波高の rms 値 H_{rms} および水面変動 η' の rms 値 η_{rms} を平均水深 h によって無次元化したものを図示したものである。横軸には有義周期を用いて計算した場合の相対水深がとっており, ケース番号の順に実線または点線で結んである。また 図-5 は波高の相対頻度分布図であり, 横軸には無次元化された波高をと

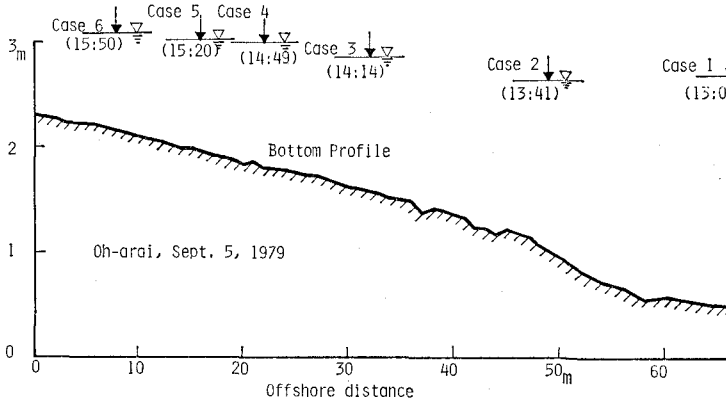


図-3 海底地形断面図

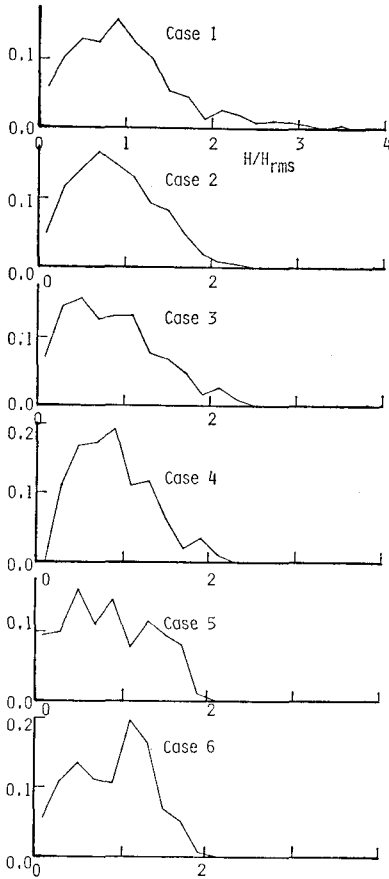


図-5 無次元波高に対する確率密度の変化

り、縦軸は全体の面積が 1 となるように正規化してある。波形記録ならびに 図-4 および 5 から判断すると各地点における水面変動の特徴は以下になる。CASE 1 および 2 では最大波高と水深との比 $H_{\max}/h$ が碎波限界以下であり、碎波帯外に位置していると考えられる。波高の頻度分布も Rayleigh 型に近い。CASE 3 および 4 では $H_{\max}/h$ の値が碎波限界に達していることから碎波が始まっていると考えられる。CASE 5 では碎波の影響で頻度分布における大波高側の傾きが急になるが、CASE 6 の場合のように碎波帯内に特有な双峯型分布ではなく、まだ碎波が起こりつつある領域であると考えられる〔堀田・水口 (1979)〕。なお、CASE 3 の前半と後半のデータでは、統計的諸量に有意な差があったことから、観測期間内にある程度の入射波浪の変化が存在したと考えられ、各ケース相互の比較には注意を要する。

(2) 流速変動と水位変動との相関性

図-6 は底面から測った高さ z と岸沖方向の平均成分 $\bar{U}$ および沿岸方向の平均成分 $\bar{V}$ との関係を示したものである。波高が比較的小さく、波向きもほぼ汀線に直角

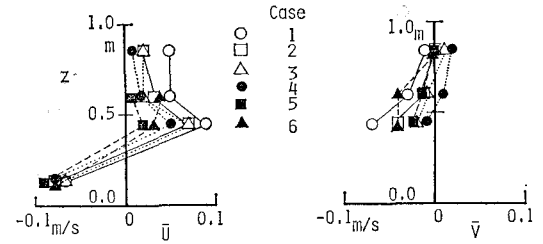


図-6 流速の時間平均値

であることから、いずれのケースにおいても平均流速成分はほとんどない。わずかに碎波帯内外を通じて底面近くで沖方向へ向かう流れが存在することがわかる。鉛直方向の平均値としてはほぼ 0 となることから、Ref. I と同様に 2 次元的な質量輸送速度を測定していると考えられる。

今回の観測では、沿岸方向の流速成分 v では平均値のみならず変動成分も小さいので、岸沖方向流速についてのみ議論する。図-7 は岸沖方向流速の長周期成分除去後の変動の自乗平均 $\overline{u'^2}$ を gh (g は重力加速度) により無次元化したものである。全体として CASE 5 の値が最も大きいものの、CASE 3~6 ではかなり近い値となり、碎波現象を通じて水深により流速も規定されていると考えることができる。鉛直方向分布に着目すると、どのケースも底面に近づくほど値が小さくなっている。

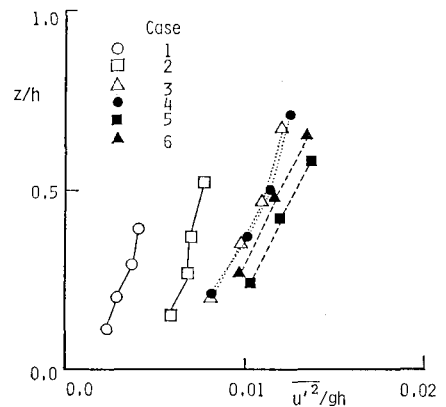


図-7 岸沖方向流速の自乗平均値

図-8 は水面変動と流速の相関を調べるために、相関係数の値を図示したものである。なお、図中の値は長周期成分除去後の水面変動と流速変動との間で、位相のずれを考慮した場合の最大値である。図中に水面変動が先行する場合を正として、相関係数を最大にする位相差 (phase lag) を示す。その値は CASE 1~6 にかけて漸増し、碎波現象と関連性があるように見える。しかし現在のところ、水面変動と流速変動の記録の同期が完全でないため、測定上の誤差である可能性も残っている。相関係数は碎波帯外で 1 に近く、相似性が非常によいことを

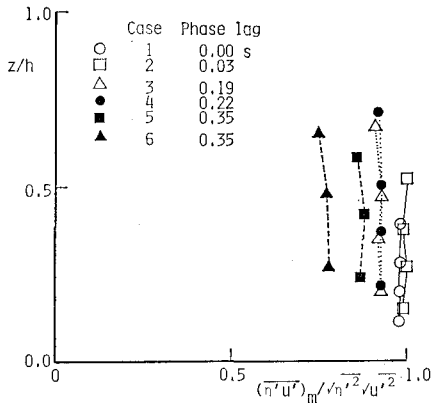


図-8 水位変動と流速変動の相関係数

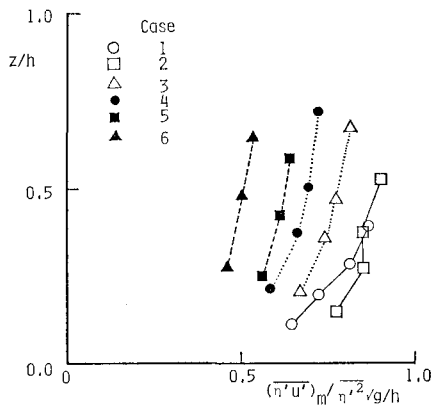


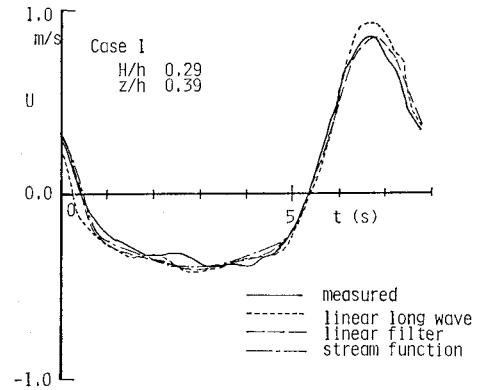
図-9 水位変動と流速変動との相関——線形長波理論との比較——

示しているが、砕波帯内ではやや小さくなる。鉛直方向には一様であり、深さの違いにより絶対値の違いはあるにしても、波形と流速が相似であることの程度は同じである。

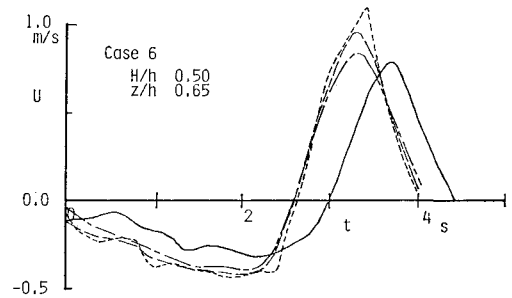
相似性がよいことを確認した上で、その比例定数を図示したのが図-9であり、微小振幅長波理論に基づく比例定数 $\sqrt{g/h}$ に比較した値を示している。砕波前では1に近く線型理論の適用性がよいことを示唆しているが、砕波後はかなり小さな値となる。なお、沖側のもの程、測定鉛直区間内では底面付近の値が減少する傾向を示し、長波近似との差が大きくなっている。理論上は沖側ほど波長が長いので、深さ方向の距離が等しければ、その間の流速変動の振幅の変化率は少ないことになり、沖側の変化率の方が大きいこと理由は不明である。

従来、砕波帯において最も単純には、波高が水深に比例し、流速場は微小振幅波理論によって表わされるとされる場合が多かった。その場合、波高水深比を0.7 (CASE 4~6 の H_1/h 平均値) とすると、 $u^2/gh \div 0.06$ となり、図-7 に示すように乱れを含んでいる測定値と比べても非常に大きくなる。これは、波形を正弦波形で

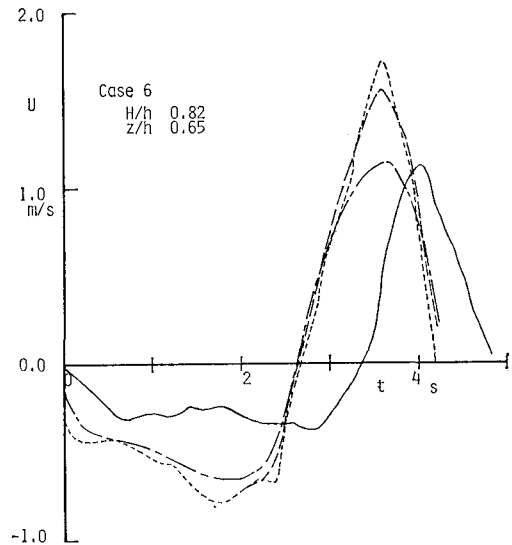
あると考えていることによる誤差が最も大きい。他にも波動理論において有限振幅性を無視していることも寄与する。そこで、水位変動と流速変動を関連づける際の長波近似および微小振幅近似の妥当性に対する検討を行なうために、長波理論、線形フィルタ法 [Reid (1958)] および流れ関数法 [Dean (1965)] を用いた水平流速の計算値と実測値とを比較した。図-10 (a)~(c) にそ



(a)



(b)



(c)

図-8 水位-流速変動関係における計算値と実測値

の結果の一例を示す。観測データ中より zero-down-cross 法で定義した一波の波を取り出して、実測値と各種理論による計算値を、それぞれの平均値が 0 となるようにして比較したものであり、実線が実測値で、点線、砕線および一点鎖線がそれぞれ上記の 3 種の計算値を示している。既に述べたように CASE 1 の底面付近は別として、波高水深比 H/h が小さく、砕波していない波については、図-10 (a) に示すように線形フィルターによる計算値でも実測値とよく一致する。しかし、図-10 (b) のように H/h が 0.5 程度になると線形フィルターによる値は過大評価になり、流れ関数法による値が振幅については実測値に近い。さらに H/h が大きくなると、流れ関数法による値でも、砕波直前で若干過小評価となり、砕波後においては図-10 (c) のように若干過大評価になってしまう。これを多くの波について調べるため、流速変動と水面変動との比を波峰前面の勾配との関連により整理したものが図-11 である。横軸には波の有限振幅性と前傾度を代表するものとして η_e/T_f (η_e は波峯の高さ、 T_f は平均水位を切るところから波峯までの時間) をとり、縦軸には流速変動と水面変動の rms 値の比を線形長波理論による値 $\sqrt{g/h}$ で無次元化したものとしてある。ばらついてはいるものの右下がりの傾向があり、波形の勾配が大きいほど線形長波理論を用いた場合、流速を過大評価することがわかる。ただし、各ケース間で若干の差があり、砕波帯内では砕波帯外に比べてその比は小さな値をとる。これは乱れが内部流速場および圧力場の変動を小さくする方向に働いているためであると予想される。なお、Guza・Thornton (1980) の結果にお

いても、圧力変動と流速変動との関係は線形理論によるものとよく一致するものの、抵抗線式波高計を用いて測った水面変動から線形理論を用いて流速変動を計算すると砕波帯内において過大評価になる傾向が見られる。

4. おわりに

今回の観測は、断面地形が約 1/40 の一様勾配斜面であって、Ref. I と異なり Guza・Thornton (1980) の場合に近い。砕波形式は目視によれば崩れ波型に近く、Ref. I のようなステップ型斜面上における巻き波型砕波とは異なる。以下、今回の観測によって得られた結果を列記するが、上記の差異に留意する必要がある。

a) 砕波帯の外側においては、長周期成分 (周期約 20 秒以上) を除去すれば、水位変動と流速変動との相関は非常によく、両者の関係は線形フィルター又は流れ関数法により、十分に関連づけられる。ただし、砕波直前においては、前者は過大評価、後者は過小評価になる。

b) 砕波帯内においては、水位変動と流速変動との間の相関係数はやや小さくなるものの、Ref. I に比べればかなりよい値を示し、かつ鉛直方向にほぼ一様である。流速変動の大きさ自体は、線形フィルターを用いると過大評価となり、流れ関数法によるものがほぼ妥当な値を与える。しかし、水深が浅くなるに従って流速変動の位相差は水面変動のそれに比して遅れる傾向にある。ただし、これについては記録の同期に問題がある可能性も残る。

今後さらに長周期成分の予測方法の確立や砕波による乱れの生成機構の解明に努める必要がある。

最後に、東京都立大学助手堀田新太郎氏をはじめとして、現地観測において協力して下さった方々に記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Dean, R. G.: Stream function representation of nonlinear ocean waves, J. Geophys. Res., Vol. 70, pp. 4561~4572, 1965.
- 2) Guza, R. T. and E. B. Thornton: Local and shoaled comparison of sea surface elevations, pressures, and velocities, J. Geophys. Res., Vol. 85, pp. 1524~1530, 1980.
- 3) Reid, R. O.: Correlation of water variations with wave forces on a vertical pile for nonperiodic waves, Proc. 6th Conf. Coastal Eng., pp. 749~786, 1958.
- 4) 堀川清司・堀田新太郎・水口 優・磯部雅彦: 砕波後の波にともなう流速場に関する現地観測, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 46~50, 1979.
- 5) 堀田新太郎・水口 優: 砕波帯内の波の現地観測, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 152~156, 1979.

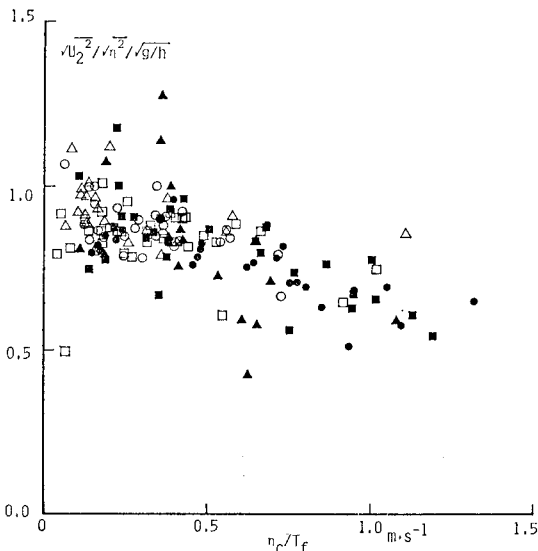


図-11 水位流速変動関係における波峰前面勾配の形響