

二次元碎波帯における碎波による乱れの構造

酒 井 哲 郎*・三 反 畑 勇**

1. ま え が き

最近碎波帯の水理現象の解明の過程で、乱れの存在の重要性が指摘されるようになった¹⁾。すでに直接測定を試みた研究もある²⁾。ここで問題は少なくとも2つある。1つは測定機器の問題である。果たして乱れを抽出しうるかどうか、とくに受感部の存在、気泡の存在が問題である。もう1つの問題は、ここで乱れといっているものが何を意味しているかである。漠然とした意味で、碎波によって水塊が落下し、また水面が不安定になり気泡を連行することによって、碎波前の波動場では見られない激しい不規則な流速変動が生じるということは認められる。しかし、従来狭義の意味での乱れが持っている性質、すなわち拡散性、三次元渦度変動、逸散性など³⁾が碎波による乱れにもあるのかどうかは解っていない。また従来我々がよく知っている壁面乱流とは明らかに異なっており、むしろ自由乱流に類似していると考えられるが、どこまで自由乱流の概念で解明しうるかも解っていない。さらに流速変動の中には波動として説明しうる部分もあるはずである。波動と乱れとを混同している可能性もある。波動は本来非回転で拡散性を持っていない。

以上のように、きわめて混沌とした状況の中で、実際には工学的に有用な碎波による乱れの性質を明らかにしなくてはならない。ここで述べる研究も、そのような意味できわめて初歩的な測定方法で、きわめて初歩的な解析手法で乱れらしきものを抽出し、碎波帯の乱れの本質のごく一部を垣間見たものである。

2. 実験装置および方法

すでに昨年の土木学会年次学術講演会において、予備的な実験の結果を発表した⁴⁾。その結果にもとづいて、改良しうる点は改良して改めて実験を行った。

実験は、京都大学工学部土木工学教室地下実験室の全長 33 m、幅 48 cm、高さ 70 cm の両面ガラス張り水槽を用いて行なった。水槽の一端に設置されたフラッター式造波機により正弦波を発生させ、他端に設置した 1/31

の勾配を持つ斜面の途中で波が碎けるようにした。波高計は、容量式を3本使用し、一様水深部、碎波点および流速測定点にそれぞれ1本ずつ設置した。流速計としては、1成分用ホットフィルム流速計を用いた。受感部は長さ約 2 mm の円筒で、それを鉛直方向に設置し、波の進行方向流速を測定した。受感部のサポートからの後流は、直接受感部に影響を与えることはない。流速計ブルーはポイントゲージの先端に取り付け、ポイントゲージは水槽上を移動する台車に設置した。ポイントゲージの取り付け台は出来るだけ低くして、片持ばりとしての長さを短くし、固有振動数を 50 Hz 以上にした。流速計のキャリブレーション装置は、モーターの回転により静水中を上下運動する鉛直板（京都大学工学部土木工学教室研究生裯義光氏製作）に、ホットフィルム流速計と波高計を取り付け、正弦運動させるものである⁵⁾。

表-1 実験条件

Case	A	B
i	1/31	1/31
h_1 (cm)	35.0	35.0
T (sec)	1.00	1.32
H_1 (cm)	12.7	8.0
H_0/L_0	0.088	0.032
breaker type	spilling	spilling near plunging

実験は、表-1 に示す2ケースについて行った。ここで i は斜面勾配、 h_1 は一様水深部水深、 T は波の周期、 H_1 は一様水深部波高、 H_0/L_0 は換算された沖波波形勾配である。斜面勾配と沖波波形勾配から碎波形式を分類すると、ケースAは典型的な崩れ波型碎波、ケースBは巻き波に近い崩れ波型碎波であることがわかった。流速の測定は2ケースとも碎波点を含めて碎波点から約 50 cm (ケースB)あるいは 100 cm (ケースA) おきに6点とり、同じ位置 x (x : 静水時丁線を原点にとり沖向きを正とした座標) で波高計によって水位変化も測定した。ケースAでは碎波帯幅約 6.0 m のうち沖側 3.5 m、ケースBでは碎波帯幅約 4.5 m のうち沖側 2.5 m が測定範囲である。各測定点 x では、鉛直方向に波の谷直下か

* 正 会 員 工 博 京都大学助教授 工学部土木工学科

** 学生会員 京都大学大学院 工学研究科修士課程

ら底面付近までの 5~6 点で流速を測定した(後の図-4 参照)。目視によれば、波の谷の高さより下では碎波により連行される気泡の存在はほとんどないことがわっている。なお鉛直方向 5~6 点の測定は同時に行ったのではなく、造波機を運転し続けて順に測定をした。波高計と流速計の出力は、同時にデータレコーダーに記録した(各測定点 90 sec 間)。流速計のキャリブレーションは、各ケースの前後に行った。

3. 実験結果と解析

データレコーダーに記録された流速計の出力は、読み取り間隔 0.01 sec で AD 変換を行った。AD 変換したデータの時間長は 60 sec である。さらに波高計と流速計の較正曲線を用いて、各測定点の 60 sec 間の最初の 24 sec 間の水位と流速を求め、その時間変化を図示した。図示したのはケース A では各 x の最上点(波の谷直下)の 6 点、ケース B では全点である。

図-1 は、ケース B の碎波点($x=4.5$ m)の波の谷直下での結果の一部である(z は静水面を原点とする鉛直上向き座標、したがって $z+h$ は底面からの高さである。水位の図の $Y=0$ は平均水面に一致しない)。図からわかるように、碎波点では波の進行方向の流速変動 $|u|$ は水位変動に良く対応している。ただしホットフィルム流速計は流れの向きを判別できないので、波の峰、谷とも同符号になっている。波の峰の位相では流速は滑らかに変化しているが、谷の位相では明らかな変動が見られる。これはブループを支持しているポイントゲージからの後流が、谷の位相で逆流し、しかもその高さが低くなってブループ部分を通過するためと考えられる。いずれにせよ碎波点では、碎波による乱れは存在していない。

図-2 は、同じケース B の碎波点から 1.0 m 岸側($x=3.5$ m)の波の谷直下での結果の一部である。碎波点に比べて、水位の方は一波一波の変動があまりないのに対して、流速の方はその変動が明らかである。また波の峰の位相での流速が谷の位相での流速より小さい場合も見られる。さらに兩位相とも碎波点に比べて変動が激しく、明らかに碎波後の波による乱れの存在を示している。

図-3 は、底面から 1.3 cm 上の点での結果の一部($x=2.5$ m)である。底面近傍では、

乱れはかなり減少している。また流速波形は一周期の間に一山しかなく、これは強いもどり流れが存在して峯の位相でも流れが沖向きであることを示している。

ケース A の結果はここでは示さないが、波の谷直下での流速変動の x 方向変化はケース B と基本的には類似している。ただしケース B と比べて岸側ほど水位波形と流速波形との対応が良く、それだけ碎波後の波動としての再成が顕著であることを示している。

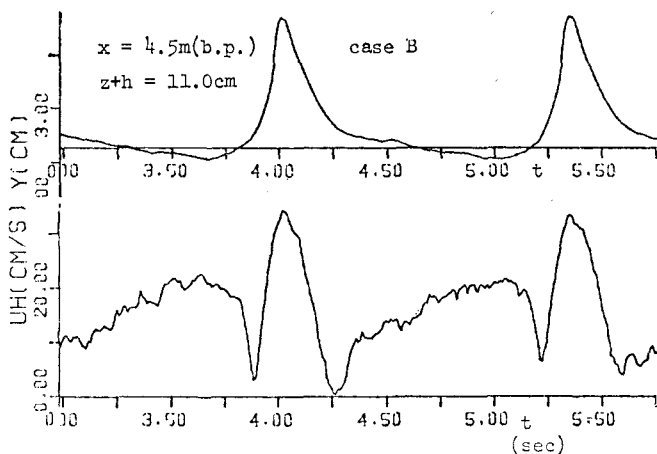


図-1 碎波点での流速測定例

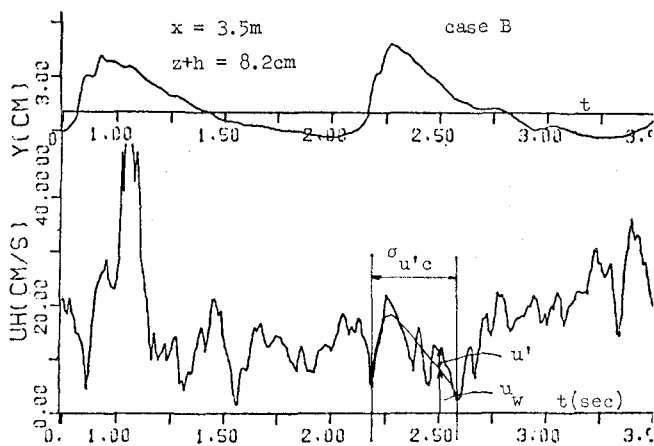


図-2 碎波帯内での流速測定例

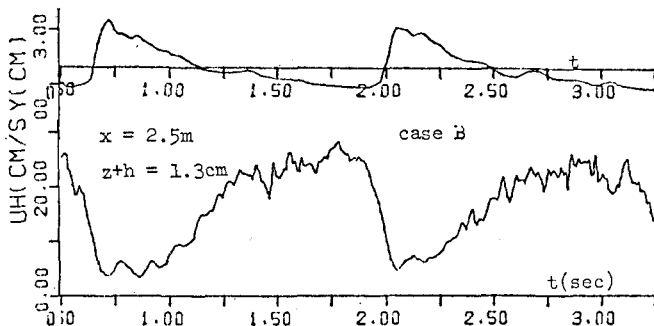


図-3 碎波帯内の底面近傍の流速測定例

次に定量的な議論をするために、乱れを定義することにする。図-2 で例を示したように、碎波帯内では流速波形の一波一波の変動が激しく、平均流速が一波一波変動していることを意味している。このような場合、多数の波について位相平均を行ない、それからの偏差として乱れを定義すると、その中に平均流速の変動を含むことになる。碎波の乱れといっても現状では漠然とした概念なのでその定義の仕方に確立されたものはないが、ここでは、とりあえず流速波形の移動平均をとり、そこからの偏差として乱れを定義する。

実際に計算する場合に問題となるのは、流れの向きを判別できない流速計の記録から、いかに流れの向きが変化する位相を決定するかである。図-2 の場合、水位波形との対応から一応決定出来るが、一般的には困難な場合もある。したがって、ここでは図示された 24 sec 間に含まれる波のうち、その位相の決定の可能な波のみを取り出し、岸向きおよび沖向きの位相毎に上述の移動平均を行なった。なお、波の谷の位相でも移動平均をとって乱れを求めたのは、図-2 でわかるように、一般に波の谷の位相でもポイントゲージからの後流による流速変動以上の変動が含まれるものの、ある程度碎波による乱れの存在を示すものと考えたからである。

具体的には、選ばれた波の峯および谷の位相ごとに、0.1 sec の時間幅で移動平均し、それをここでは一応波による水平方向水粒子速度 u_w とする。乱れ u' は $u - u_w$ とし、波の峯あるいは谷の位相における u' の標準偏差 $\sqrt{\sum u'^2 / N}$ (u' : 0.01 sec ごとに読み取られた u' , N : データ個数) をもって、波の峯あるいは谷の位相での乱れ $\sigma_{u'c}$, $\sigma_{u't}$ と定義した (図-2 参照)。

図-4 は、ケース B の各測定点における $\sigma_{u'c}$ と $\sigma_{u't}$ の値の分布を示したものである。図の上側のものは、各 x の最上点 (波の谷直下) でのもとの H の変化を示している。ただし、24 sec 間に含まれる波数は約 18 波で、

乱れの計算に選ばれた波数は最も多い場合でそのうちの約 9 割程度である。その中の最大値と最小値をプロットして結んでいる。また、図-3 に例示したように一般に底面近傍では乱れは小さいので、このような場合は最も変動の大きい波と小さい波についての $\sigma_{u'}$ を求めている。さらに碎波点では図-1 に示したように本来の碎波による乱れは存在していないと考えられるので、適当な 1 波のみについて計算している。

図-4 から次のことが言える。まず、一波毎の乱れの強さの変動幅が大きいことである。次に、波の峯の位相 (岸向き流速の位相) での乱れについては、大きさそのものは碎波点から岸に向かって大きくなり、その後はほぼ一定の大きさを保っている。値そのものは約 5 cm/sec である。この値はあくまで平均的なもので、瞬間値はさらに大きい。もちろんこの実験の測定点の最小水深が 6.5 cm であり、それより浅いごく汀線近くでの現象についてはわからない。

なお碎波点での $\sigma_{u'c}$ の値は、図-1 で示したように、本来の乱れを意味するものではなく、ここで用いた移動平均によるみかけの $\sigma_{u'c}$ と考えるべきである。滑らかな波の峯の位相での u の移動平均後の u_w は、特にピーク付近で u より小さくなり、この差が $\sigma_{u'c}$ の値の大半を占めている。このみかけの $\sigma_{u'c}$ は約 1 cm/sec である。

鉛直分布の方は、碎波点ではどの高さでも $\sigma_{u'c}$ の値は上述のみかけの値であって、碎波による乱れは存在していない。しかし $x=4.0$ m ではすでに明らかな鉛直分布が存在し、さらに岸側のいずれの x においても、一般的に底面付近では乱れが小さく、水面付近で乱れが大きくなっている。このように碎波による乱れは、大まかに言って底面近傍にまでは侵入していないと言える。

一方、波の谷の位相 (流速が沖向きの位相) での乱れ $\sigma_{u't}$ に関しては、まず碎波点ではその値は約 1.0 cm/sec であるが、これは波の峯の場合のみかけの $\sigma_{u'}$ と、さら

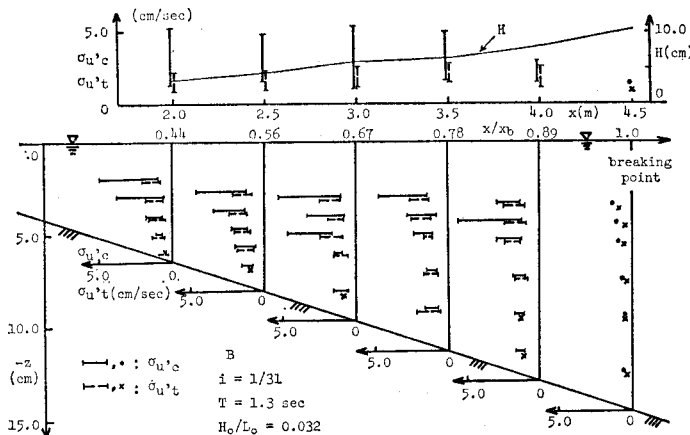


図-4 碎波帯内の波の峯および谷における乱れの分布 (ケース B)

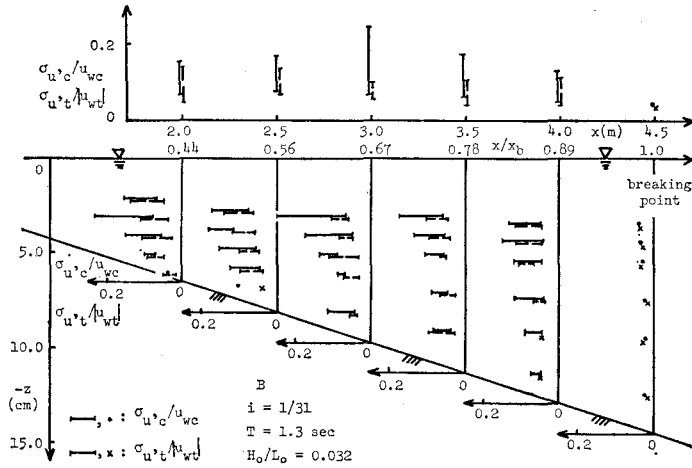


図-5 砕波帯内の波の水粒子速度に対する乱れの相対的強度の分布 (ケースB)

にポイントゲージからの後流による流速変動によるものであり、本来の乱れではない。岸・沖方向には、 $\sigma_{u'c}$ と同様、砕波点から増加してその後ほぼ一定になるが、値は約2 cm/secで $\sigma_{u'c}$ より小さい。鉛直分布は、 $\sigma_{u'c}$ に比べるとそれほど顕著ではないが、やや水面の方が底面付近より大きい傾向がある。

次に、乱れの相対的な強さを調べるため、ここでは $\sigma_{u'}$ を同じ位相の間における $|u_w|$ の最大値(波の峯の位相では u_{wc} 、谷の位相では $|u_{wt}|$ とする)で割ったものを図-4と同様の表現で図示したのが図-5である。ただし、砕波後の波の運動場を考えれば、砕波による乱れが同じ位相の u_w によって発生したと単純に考えることはできないので、ここでは $\sigma_{u'}/u_w$ は単に u_w に対して $\sigma_{u'}$ が何割ぐらいになるかという目安を与えるものと考えべきである。 $\sigma_{u'c}/u_{wc}$ に関しては、砕波点から岸に向かって増加した後やや減少している。値は最大0.25程度である。また鉛直分布は $\sigma_{u'c}$ ほどではないが、やはり水面付近の方が大きい。一方 $\sigma_{u't}/|u_{wt}|$ は最大0.15程度である。

4. Stive (1980)⁶⁾ の結果との比較

以上のようにきわめて大雑把な解析をしてきたが、この結果を従来の唯一の測定例であるStive (1980)⁶⁾の実験結果と比較する。彼の場合、斜面勾配は1/40で、乱れを測定した波は1種類(沖波形勾配0.010)である。流速はレーザードップラー流速計を用いて測定しており、位相平均を用いている。なお、測定は波の谷の高さ以下に限られている。砕波形式の分類では、 $i=1/40$ 、 $H_0/L_0=0.010$ は典型的な巻き波型であり、ここでの実験における巻き波に近い崩れ波型とは異なる。波は位相平均を用いているので、すでに述べた理由から計算された乱れの強さの値そのものには問題がある。ただし、こ

こでの実験のように、岸向きと沖向きの流速の位相間での平均値とは違って、1周期の間の各位相で乱れの強さが求められている。

表-2 Stive (1980)⁶⁾ による砕波帯での乱れの測定結果

x/x_b	0.71	0.52	0.33
h (cm)	18.6	14.3	10.0
H (cm)	10.1	8.0	5.4
$\sigma_{u'c}$ (cm/s)	12	12	10
$\sigma_{u't}$ (cm/s)	8	6	4
$\sigma_{u'c}/u_{wc}$	0.40	0.34	0.50
$\sigma_{u't}/ u_{wt} $	0.32	0.30	0.16

表-2は、Stiveの論文のFig. 8に示されている $\sigma_{u'}$ の1周期および水深方向の分布を示すコンター図から読み取ったものである。 $\sigma_{u'c}$ 、 $\sigma_{u't}$ とも波の位相および水深方向の最大値を読み取った。 u_{wc} 、 $|u_{wt}|$ についても同様である。図-4を見てもわかるように、測定点の x/x_b (x_b : 砕波点での x)はここでの実験の測定点とは異なる。また波高もここでの実験の値の2倍に近い。したがって詳細な比較は出来ないが、 $\sigma_{u'}$ の値はやはり2倍以上になっていることがわかる。 $\sigma_{u'c}/\sigma_{u't}$ の値に関しては約2.0でここでの値にほぼ等しい。また $\sigma_{u'c}/u_{wc}$ 、 $\sigma_{u't}/|u_{wt}|$ の値は、Stiveの方がやや大きい。

5. あとがき

以上、測定値の解析結果を示したが、そこにはいくつかの誤差が含まれている。まずホットフィルム流速計の較正曲線の精度、測定装置の固有振動の影響、気泡の通過にともなう測定値のdrop-outの影響、流速のとくに水平成分が0になる位相で鉛直方向成分を感知することの影響、水平方向流速の向きが変わる位相の決定におけるあいまいさ、などである。この中で較正曲線の精度は

$\pm 3 \text{ cm/sec}$ 程度であるが、これは移動平均後の流速 u_w には影響があっても、 $u - u_w$ で定義される u' には直接影響は少ないと考えられる。鉛直成分をも感知する点に関しては、すでに検討がなされているが⁷⁾、その結果を用いるとその影響は数%にとどまり、この実験の場合には 1 cm/sec 程度である。また位相決定の問題は仮りに誤ったとしても、平均値である σ_w' に関しては影響が少ないと考えられる。問題はやはり気泡の通過による drop-out の問題である。

最後に、この研究は文部省科学研究費一般研究Cによったことを付記し謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 酒井哲郎: 碎波による乱れ, 水工学シリーズ 80-B-4, 土木学会水理委員会, 1980.
- 2) 泉宮尊司・磯部雅彦・渡辺 晃・堀川清司: 波および沿岸流共存場における内部流速と底面摩擦係数について, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 168~172, 1980.
- 3) Tennekes, H. and J. L. Lumley: A First Course in Turbulence, The MIT Press, pp. 1~3, 1972.
- 4) 酒井哲郎・稲田義和: 斜面上の碎波による乱れの測定, 土木学会第 35 回年次学術講演会講演概要集 2, pp. 83~84, 1980.
- 5) 岩垣雄一・襲 義光: 碎波帯を含む固定斜面上の波動場の特性に関する実験的研究, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 35~39, 1980.
- 6) Stive, M. J. F.: Velocity and pressure field of spilling breakers, Proc. 17th Conf. on Coastal Eng., 1980 (in printing).
- 7) 磯部雅彦・福田直利・堀川清司: 碎波帯における流速場に関する二次元実験, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 41~45, 1979.