

砕波帯内の 3 次元乱れ特性に関する実験的研究

岡 安 章 夫*・鈴 木 崇 之**

1. はじめに

砕波帯内での底質移動, 物質拡散, エネルギー減衰, 流速分布等を評価するためには, 大規模渦運動を含む砕波による乱れ構造の把握が重要である。日野ら (1984), 青野・服部 (1983) は, 可視化手法により, 砕波帯内の流体運動に鉛直方向の軸を持つ大規模な渦構造(斜降渦)が存在することを指摘している。また, これらの流体運動とともに鉛直方向にスパイク状の大きな流速を観測している。これら 3 次元性の組織渦は, 水平渦と相まって底質の巻き上げや鉛直方向の物質拡散, さらに水平 2 次元面内における物質の移流・拡散等について重要な役割を果たしている。

このような運動を解明するためには, 流体運動を 3 次元的に把握する必要がある。そのためには流速場の直接的な 3 次元計測がまず考えられる。室内実験の場合, 砕波帯内での Lagrange 流速の測定には, トレーサーを VTR 画像解析するものが主流である(例えば, 日野ら, 1984)。PTV もこの応用であるが, スリット光源を使用する場合は対象物の 2 次元運動しかとらえられないという問題がある。一方, Euler 流速の測定については, レーザ流速計を用いたものが分解能, 応答性, 精度の面で優れており, より小さい規模の乱れ構造まで対象とすることが可能である。しかし, 室内実験において現時点で砕波帯内の流速の直接 3 次元計測が行われた例はほとんどない。現地計測においては, 灘岡ら (1987) により, 2 つの 2 成分電磁流速計による 3 次元計測が行われ, 斜降渦の特性について検討されている。

本研究では, 室内実験において, 2 成分レーザ流速計による下方および側方からの砕波帯内流速測定を行った。これは流速場の 3 次元直接計測ではないが, 得られた 2 組の 2 成分流速データを処理することにより, 3 次元的な解析を行うものである。また, 砕波帯内での沿岸方向の流速測定自体も室内実験においてはほとんどない。これらの解析結果をもとに, 砕波帯内の 3 次元の乱

れ特性について検討を行った。

2. 実験方法および実験条件

実験には, 反射波の吸収制御機能を備えたピストン型造波装置を持つ長さ 17 m, 幅 0.5 m, 深さ 0.55 m の二次元波動水槽を用いた。この水路には 1/20 (法先 1 m のみ 1/10) の一様勾配斜面が設置されている。水路の側面はガラス張りであり, また, 斜面の一部区間も 2 m に渡って底面ガラス張りとし, 下方からレーザー光を入射できるようにした。

実験に用いた波は, 周期 $T=2.2$ s, 沖側一様水深部での波高 $H_i=11.5$ cm の規則波 1 ケースのみである。沖側一様水深部の水深は 28.5 cm とした。造波信号には岡安ら (1997) と同様, クノイド波の 3 次近似を用いた。

この斜面上の砕波帯内に, 砕波点付近, 突っ込み点付近, さらに砕波が準定常的に進行する擬定常領域内となるように 3 つの測線を設け, それぞれ沖から測線 1, 2, 3 とした。静水位汀線を基準とした水平岸向き座標を x とすると, 測線 1, 2, 3 はそれぞれ, $x=-247, -192, -126$ cm に位置している。砕波点はおおよそ $x=-267$ cm であった。また, 静水面を基準とした鉛直上向きの座標を z , 底面を基準としたものを z' とする。実験水槽の概略図を図-1 に示す。

各測線において底面上 1 mm から平均水位付近まで鉛直方向に 14 点程度の測定点を配置した。各々の計測点について, 岸沖・鉛直 2 成分流速と岸沖・沿岸 2 成分流速をそれぞれ計測した。この水路の幅は 50 cm であり, 砕波帯内の代表的な水深より十分大きいので, 砕波による乱れの 3 次元性は損なわれていないと考えられる。

水位変動を 3 台の容量式波高計で同時に計測すると共に, 岸沖・鉛直または岸沖・沿岸の流速変動を 2 成分ファイバー・レーザ流速計 (FLV) で測定した。岸沖・鉛直 2 成分同時計測においては, 岡安 (1996) と同様にレーザ光は水路側壁の強化ガラスを通して水路内に入れた。また, 岸沖・沿岸 2 流速同時測定においては, ガラス底面よりレーザ光を上方へ入射させて計測した。

測定された流速成分については, 底面から計測した岸沖・沿岸流速を u_1, v , 側面から計測した岸沖・鉛直の流

* 正会員 工博 横浜国立大学助教授 大学院工学研究科人工環境システム学専攻

** 横浜国立大学大学院工学研究科

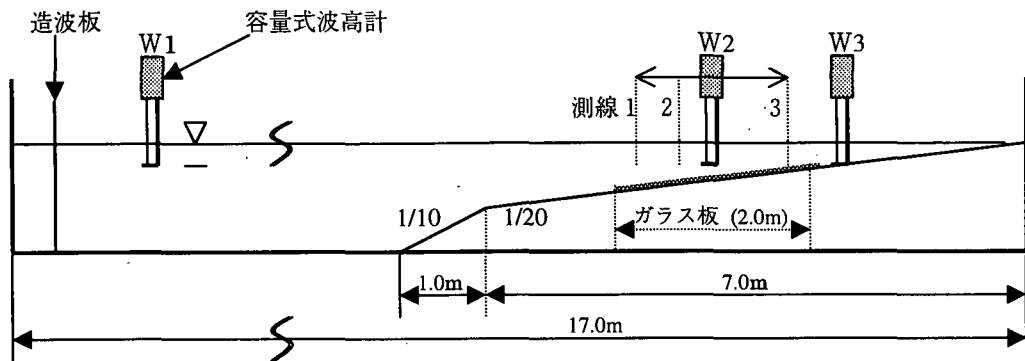


図-1 実験水槽の概略

 表-1 測線1から3の x 座標および水位変動幅

Line No.	x (cm)	h (cm)	H (cm)	$\bar{\eta}$ (cm)	η_c (cm)	η_t (cm)
L1	-247	12.4	14.1	-0.4	10.3	-3.8
L2	-192	9.2	8.6	-0.2	5.4	-3.2
L3	-126	6.3	5.5	0.6	3.8	-1.8

速を u_2 , w と表す。計測は、まず、全ての測定点について u_1 , v の2成分流速測定を行い、その後 u_2 , w の計測を行った。従って、同じ計測点でも、両者の計測には時間的にかなりの隔りがある。また、沿岸方向の測定位置については、水路およびレーザ流速計の構造的な問題から、岸沖・鉛直流速測定時には水路側面から 8 cm, 岸沖・沿岸流速測定時には 16 cm とせざるを得なかった。これら、計測時間の隔たりや側面からの距離の違いによる計測結果への影響については後で述べる。

流速は各計測点で毎秒 1500 個程度を 100 波分記録し、水位変動はサンプリング周波数 100 Hz でデジタルデータレコーダに記録した。流速計からのデータは時間的に等間隔でないので、解析は一度リサンプリングにより 800 Hz の等間隔データに変換した後行った。また、計測された流速変動のうち、3 Hz 以上の周波数特性を持つ変動を乱れと定義し、計測データから数値フィルターを用いて分離した。

3. 実験結果

(1) 位相平均流速

表-1 に各測線の x 座標と共に、位相平均の水面波形から求めた、波高 H , 平均水位 $\bar{\eta}$, 波峰レベル η_c , 波谷レベル η_t を示す。

図-2 は測線1での水面変動(上図)および岸沖(u_1 , u_2), 沿岸(v), 鉛直(w)方向の位相平均流速を示している。水位変動の η_1 , η_2 は η_1 が $z'=60$ mm の底面からの

計測時 (u_1 , v と同時), η_2 が側面からの計測時 (u_1 , w と同時)のものを表している。 η_1 , η_2 の相違は図から見る限りわずかであるものの、 η_1 の方が若干波高が大きい。造波装置への入力信号を出力する D/A 変換器は極めて安定しているものと考えられるが、吸収式造波装置のフィードバック系の一部をなす、造波板前面の容量式波高計は時間と共に若干特性が変化することが知られている。両者の相違の一因はこのためと考えられる。

一方、流速について比較すると、特に上層で u_1 , u_2 の差が顕著である。これは、 u_2 測定時の方が側面に近いため、その影響を受けて流速振幅が減少したものと考えられる。下層で差が小さいのは、側面より底面境界層の影響がはるかに強いためと考えられる。 v , w については特筆すべきことはないが、沿岸方向流速がほぼ0であることから、砕波直後でも波動運動は極めて2次元的な運動を保持していると判断できる。

図-3 は測線2に対する同様な図である。まず、 η_1 が η_2 に比べて若干位相が遅れている。これは、主に水槽内の時間的な水深変化によるものと考えられる。解析時の位相は、沖に設置した波高計の水位変動を基準としているので、水深が小さい場合伝播に要する時間が長くなり、見かけ上の位相遅れを生じることになる。また、図-2 と同様、側壁の影響と考えられる差異が岸沖流速に見られる。

v については、特に上層でかなり大きな変動が存在する。これが位相平均の結果であることを考えると、砕波点と側壁に拘束された渦が波峰付近で形成され、波と共に計測点を通過していたことが予想される。また、 w についてみると、やはり上層において極大値が3カ所に現れている。このうち少なくとも最初の2つは、山下ら(1988)が述べる複数の水平渦の影響によるものであろう。

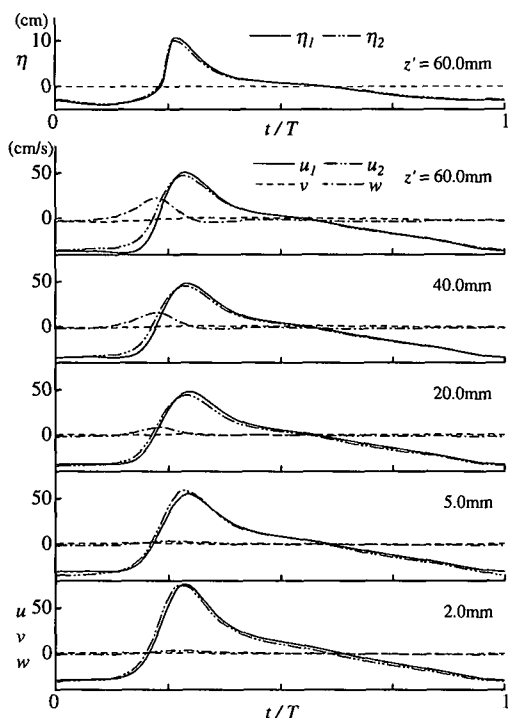


図-2 測線1での位相平均流速データ

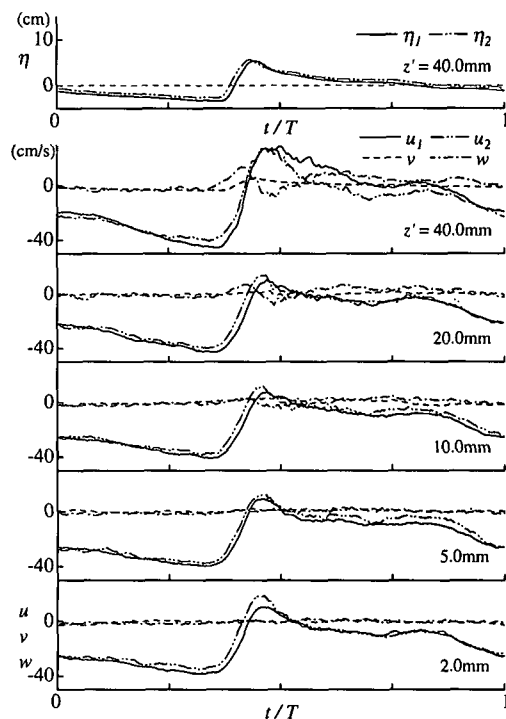


図-3 測線2での位相平均流速データ

(2) 乱れ強度の位相変化と乱れの伝播

図-4は測線1上の鉛直方向に異なる点での乱れ強度の位相変化を示している。砕波直後なので、中層付近には目立った乱れは観測されない。底面近傍では波峰通過時に比較的大きな乱れを示しているが、これは岡安(1996)と同様、底面波動境界によるものと考えられる。 $z'=60\text{ mm}$ (波谷下約26 mm)で見られる波動状の乱れ強度変化の原因についてはよく分からない。

測線2, 3について同様に乱れ強度の位相変化を示したものが図-5, 6である。図-5では、波峰通過直後に波谷付近($z'=40\text{ mm}$)で乱れ強度が最も大きく、下方に行くに従って強度が下がり位相も遅れている。これは、波峰付近で生成された乱れが下層に伝播する様子を示したものであると考えられる。また、底面境界層内($z'=2\text{ mm}$)では上層より乱れ強度が大きくなる位相が若干早く、ほぼ加速度が最大となる位相に一致している。また、鉛直方向の乱れ強度が小さい。

図-6についても、状況はほぼ同じである。中上層においては、底面から計測した u_1, v と、側面から計測した u_2, w との乱れ強度分布に系統的な開きが見られる。砕波による大規模渦運動の空間スケールが高々水深程度(測線3で $h=6.3\text{ cm}$)であるので、 u_1, u_2 でほぼ同じ乱れ強度変化が計測されるものと期待したが、おそらく水

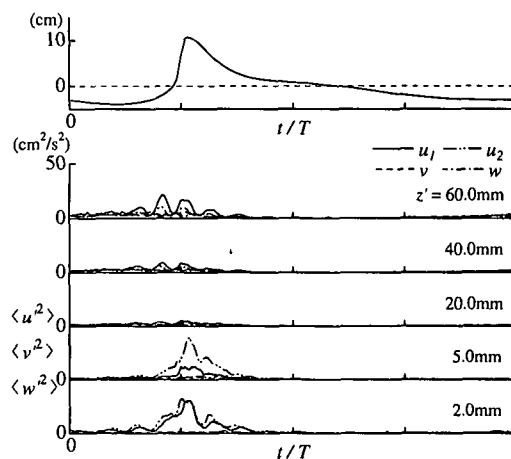


図-4 測線1での乱れ強度の位相変化

槽側面からの距離の違いが顕著に出たものであろう。しかし、図-6の $z'=30\text{ mm}$ で u_1 の乱れ強度の最大値が u_2 の2倍程度あることを考えると、水平方向にはもう少し大きな組織運動が存在する可能性がある。

(3) 一周期平均乱れ強度と乱れの3次元特性

図-7は測線2での一周期平均乱れ強度の鉛直変化である。2回の岸沖流速(u_1, u_2)で有為な差が見られる。中

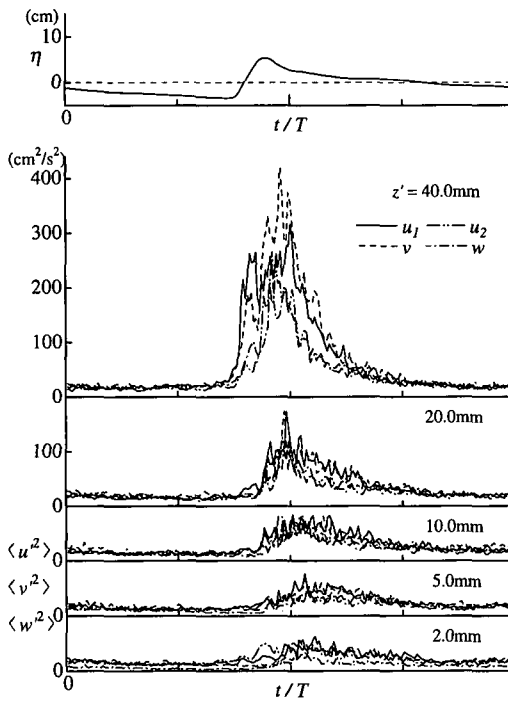


図-5 測線 2 での乱れ強度の位相変化

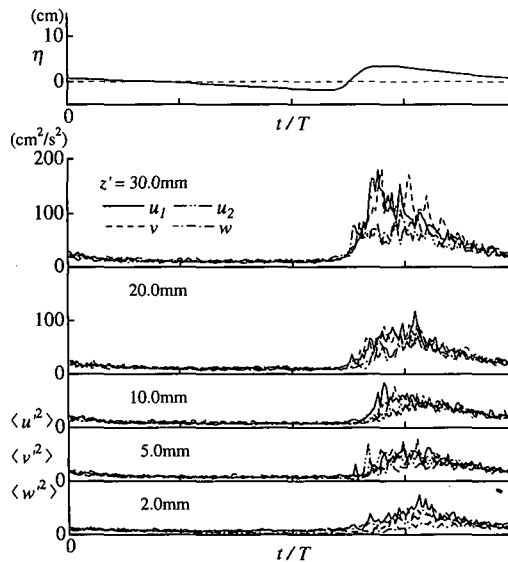


図-6 測線 3 での乱れ強度の位相変化

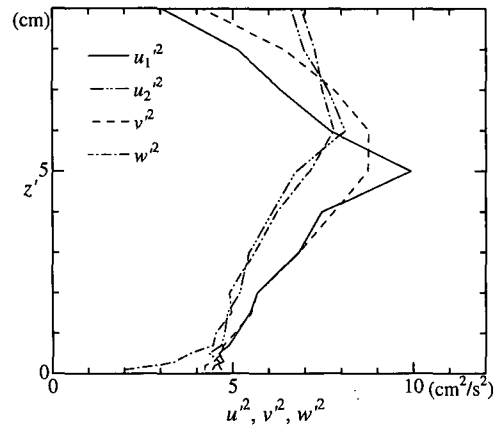


図-7 測線 2 での一周期平均乱れ強度の鉛直方向分布

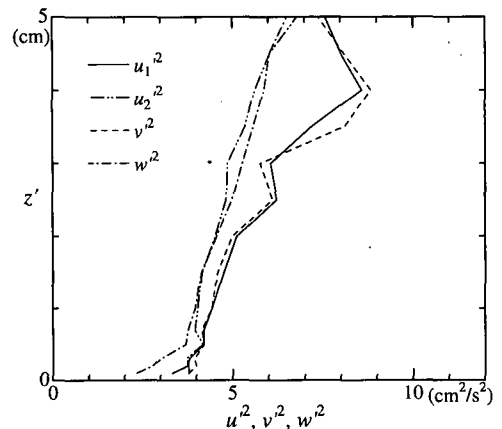


図-8 測線 3 での一周期平均乱れ強度の鉛直方向分布

表面付近で著しくデータ数が減少していた。これが解析後の乱れ強度に反映されたものと考えられる。また、この測線での波谷レベルはほぼ $z' = 6$ cm であり、これより上は測定点が位相により空気中に露出することになるので、一周期平均の乱れ強度の値は小さくなる。

上述の系統差をとりあえず排除するために、 u_1 に対する v 、 u_2 に対する w の大きさを比較する。中層 ($z' = 1 \sim 5$ cm) では v は u_1 に w は u_2 にほぼ等しく、ほぼ等強度の 3 次元性乱れとなっている。測線 2 は突っ込み点岸側にあたるが、この領域では砕波の突っ込みによる水平渦が顕著に観察された。しかし、乱れ強度の分布には 2 次元性渦の持つ乱れの特徴は現れていない。本研究では乱れの抽出に 3 Hz の数値フィルターを用いた。乱れの定義が妥当であるとするなら、砕波による乱れは、強度分布の面からはほぼ当方性であると考えて良いと思われる。

一方境界層付近 ($z' < 1$ cm) では、鉛直方向の乱れ強度

層までは u_1 の乱れ強度が u_2 より大きく、前節で述べた原因が主であると考えられる。しかし、図中 $z' = 50$ mm より上では、傾向が逆転する。一般に下方からの計測の場合は、水面による反射がノイズを大きくしており、水

が相対的に小さく、水平面内での乱れが支配的であることが確認できる。また、この領域での乱れについては、相対的に高周波で大きいことを岡安 (1996) が確認している。

図-8 は、同じく測線 3 での一周期平均乱れ強度の鉛直変化である。波谷レベルが $z=4.5$ cm であるので測線 2 の場合と異なり、上方でも乱れ強度の減少はあまり見られない。それ以外の特徴については測線 2 の場合とほぼ同じであり、突っ込み点と擬定常領域とで、乱れ強度について顕著な差異を見いだすことはできない。

4. おわりに

碎波帯内の 3 次元の乱れ構造を検討する目的で、室内実験において、2 成分レーザ流速計による下方および側方からの碎波帯内流速測定を行った。得られた 2 組の 2 成分流速データを処理することにより、乱れ構造の 3 次元特性について検討を行い、以下の結論を得た。

1) 突っ込み点以降においては、境界層内を除いて上部の乱れの影響が強く、位相の経過と共に底面方向へ伝播している。

2) 波谷より下の領域では乱れの 3 次元性が強く出て

おり、この構造は底面近傍まで保たれている。底面境界層内では底面の影響で鉛直方向の乱れが小さい。

3) 碎波帯内の乱れ構造は、中層部では 3 次元的、底層部では水平方向の乱れが支配的である。

なお、本研究は文部省科学研究費奨励研究 A (No. 09750590, 代表者 岡安章夫) による研究であることを付記する。

参考文献

- 青野利夫・服部昌太郎 (1984): 碎波下での大規模乱れ構造に関する実験的研究, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 21-25.
- 灘岡和夫・上野成三・五十嵐竜行 (1987): 碎波帯内の三次元的大規模渦構造と浮遊砂の現地観測, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 21-25.
- 岡安章夫・大山 基・鳥谷 聡 (1997): 碎波帯内底面近傍及び上層の流速場の特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 126-130.
- 岡安章夫 (1996): 碎波帯における粗底面上の流速場の特性, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 41-45.
- 日野幹雄・灘岡和夫・小俣 篤 (1984): 碎波帯内の乱れの組織的渦構造と水粒子運動について, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 21-25.
- 山下隆男・James R. Tallent・土屋義人 (1988): 碎波水平渦の生成機構と移動特性, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 54-58.