

砕波下での大規模乱れ構造に関する実験的研究

青 野 利 夫*・服 部 昌 太 郎**

1. ま え が き

砕波によって生ずる乱れに関する最近の研究によって、高周波域での乱れの構造特性に対する新たな知見がえられつつある^{1),2),3)}。しかし、現地海浜での砕波々面後背部に見られる大規模な縦渦状の浮遊砂雲のように、全水深規模にも及ぶ組織性の強い乱れが砕波下に存在する。この乱れのエネルギーは非常に大きいことが想定され、砕波による乱れの全構造を解明するためには、大規模低周波の乱れ特性を明らかにする必要がある。

砕波によって生成される大規模な乱れの周波数は波動運動の非線形性によって生ずる高調波成分とほぼ同じであるため、測定流速データよりこの乱れ成分を正確に抽出することは非常に難しい。本研究は、水面と流速変動間のコヒーレンスを使用した乱れの分離法に若干の修正を行い、これによってえられた乱れの統計量と流れの可視化実験によるデータとによって、砕波下の大規模乱れの特性を検討したものである。

2. 実験装置・方法およびデータ処理法

実験は、幅 0.30 m、高さ 0.55 m、長さ 20 m の両面ガラス張り二次元波動水槽内に、勾配 1/20 斜面と水平床とによりなる海浜地形を設置して行った(図-1)。水面および流速変動は、容量式波高計と split 型熱膜流速計によって検出し、出力データは電算処理を行った。本報での実験装置・方法およびデータ処理法の基本的構成

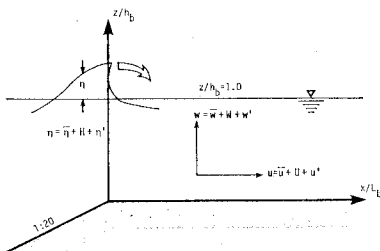


図-1 座標系と記号(図中の式は、[全変動成分]=[時間平均成分]+[波動成分]+[乱れ成分]を示す)

* 正会員 工修 中央大学助手 理工学部土木工学科

** 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

は、文献 4) に記載されている。

乱れの可視化実験は、水底付近(下層部)で生成される乱れの可視化を林ら⁵⁾が開発した thin-layered milk 法で、また上・中層部での乱れの挙動の可視化を添加洗剤による発生気泡のトレーサ法⁶⁾によって行った。乱れの可視化記録は、モータドライブ式 35 mm カメラ 4 台によって水槽側面と上方より同時に撮影した。本研究での実験波諸量は、表-1 に示される。

表-1 実験波諸量

実験	T (s)	H_I (cm)	h_b (cm)	H_b/h_b
1	1.0	2.97	5.0	0.80
3	1.6	2.88	6.0	0.97

注) T : 周期, H_I : 入射波々高, h_b : 砕波水深, H_b : 砕波々高

実験-1 の砕波形式は、崩れ砕波、実験-3 は巻き砕波である。

3. 乱れの抽出法の再検討

(1) 水面・流速変動間のコヒーレンスの修正

水面変動 η と鉛直流速 w 間のコヒーレンス $\gamma_{\eta w}(f)$ が入射波の高調波域で低下するため、この周波数特性を使用して測定データより乱れ流速を分離することの問題点と $\gamma_{\eta w}$ の低下原因について、著者らは前報⁷⁾で検討を行った。低周波域での乱れを精度よく測定データより分離するため、砕波によって発生する水面変動を流速変動と同様に、水面変動・水平流速間のコヒーレンス $\gamma_{\eta u}(f)$ によって波動と乱れの二成分 (H と η') に分離し、改めて γ_{Hu} と γ_{Hw} を測定データより計算する。このコヒーレンスの分離を行う。この修正法によって、水面・流速変動間のコヒーレンス特性は著しく改善された⁸⁾。

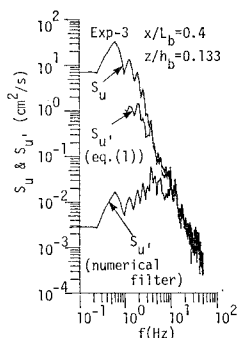
(2) パワースペクトルによる乱れの評価

図-2 は、 $\gamma_{\eta u}$ を周波数特性とする数値フィルタで分離した乱れ流速の時系列データより直接計算した水平流の乱れのパワースペクトルと、 γ_{Hu} と γ_{Hw} を使用し式(1)より計算したパワースペクトルと比較例である。

$$\left. \begin{aligned} S_{w'}(f) &= S_w(f)(1 - \gamma_{Hu}^2) \\ S_{w''}(f) &= S_w(f)(1 - \gamma_{Hw}^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

図-2 に見られるように、乱れ流速の時系列データに

は本研究の対象とする低周波域での乱れは適切に抽出されていない。一方、式(1)によるスペクトルでは、低周波域では、波動と乱れの相互干渉の存在が考えられ、この領域に対してスペクトル解析を適用することには問題がある。しかし、現時点では妥当な乱れの見分けが確立されていないため、乱れを波動運動とは独立の成分と考えて、パワースペクトルによって乱れの特性の検討を行うこととする。

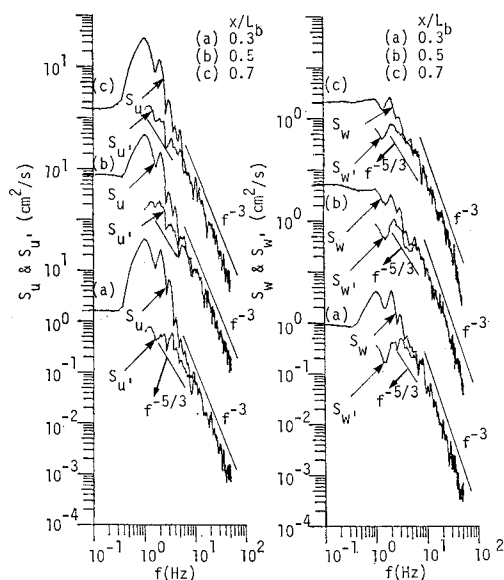
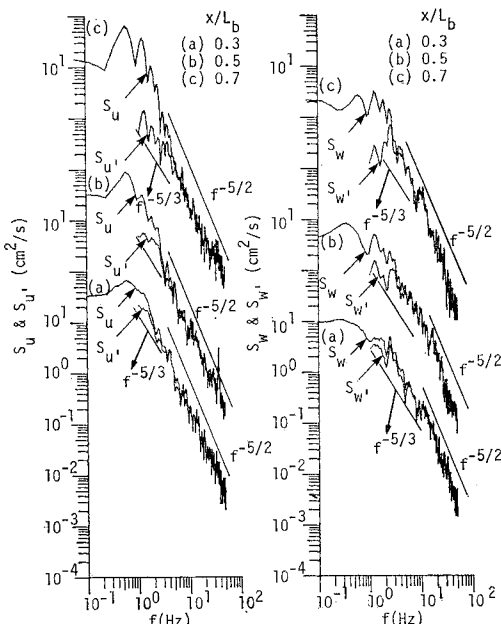

 図-2 S_u の比較図

4. 大規模乱れの特性

(1) パワースペクトル

図-3と4は、実験-1と3の $z/h_b=0.4$ での流速変動と乱れのスペクトルの水平方向変化を示したものである。前報の図-8と9との比較より、低周波域でのパワースペクトルが著しく改善されたことが認められる。

乱れ流速のパワースペクトルは、砕波形式によってその特性が変化する。すなわち、(1) 崩れ砕波下のスペクトルは、低周波域 (2~6 Hz) では $-5/3$ 乗則に、また高周波域では -3 乗則に従う (図-3)。(2) 巻き砕波下では、水平・鉛直方向の乱れ流速のスペクトル間に若干の差が認められる。砕波の突込み点付近までの区域では


 図-3 S_u と $S_{u'}$ および S_w と $S_{w'}$ の水平方向変化 (実験-1, $z/h_b=0.4$)

 図-4 S_u と $S_{u'}$ および S_w と $S_{w'}$ の水平方向変化 (実験-3, $z/h_b=0.4$)

$S_{u'}$ は $-5/2$ 乗則、また $S_{w'}$ の低周波域は $-5/3$ 乗則、高周波域は $-5/2$ 乗則に従う。 $x/L_b > 0.5$ では、 $S_{u'} \cdot S_{w'}$ 共低周波域は $-5/3$ 乗則、高周波域では $-5/2$ 乗則となっている (図-4)。

図-3と4のスペクトル算定結果より、高周波域の乱れは崩れ砕波では二次元性の強い構造、また巻き砕波では三次元性の構造であることが想定される。一方、低周波域の乱れ構造は、スペクトルの勾配が $-5/2 \sim -5/3$ であることから三次元性の強いものと云える。パワースペクトルの水平方向の変化傾向より、砕波後の乱れに及ぼす波動運動の二次元性の効果が、砕波の進行と共に弱まることが認められる。パワースペクトルより認められた乱れの構造特性は、一様勾配斜面上の実験結果と異っているが³⁾、本実験での乱れ構造の特性には砕波後の波の水深減少による特性変化の効果が無い事等によるものと考えられる。

(2) 乱れ強度

図-5と6は、 $S_{u'}$ と $S_{w'}$ とにより計算される乱れ強度、 u'_{rms} と w'_{rms} の空間分布を示したものである。これらの図中には、 $z/h_b=0.4$ での高周波域 ($f \geq 6f_0$, f_0 : 基本周波数) の乱れ強度の分布が示されている。 $z/h_b=0.4$ の乱れ強度分布より、乱れが十分に発達する $0.3 \leq x/L_b \leq 0.7$ で低周波域の乱れ強度は高周波域の約2~4倍程度であり、砕波にともなう諸現象に低周波の乱れが大きく関与していることがわかる。また、図-5と6より乱れの減衰機構の砕波形式による違いが認められる。砕波点より乱れ強度は急激に増大するが、崩れ砕

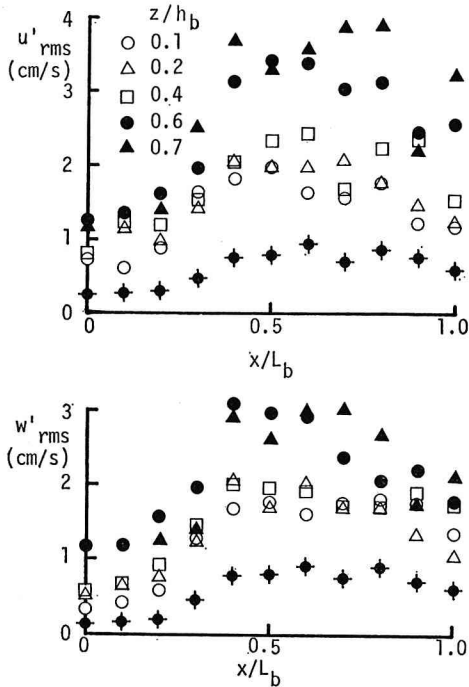


図-5 乱れ強度の空間分布 (実験-1)
(+: 高周波域での乱れ強度)

波では崩壊波面が波底部に達し段波状の砕波が進行する $0.3 < x/L_b < 0.8$ の区間で乱れ強度がほぼ一定で、 $0.8 < x/L_b$ で減少する。一方、巻き砕波下では砕波の突込み点以後 ($x/L_b > 0.3$)、乱れ強度は指数関数的に減少している。このような乱れ強度分布の違いは、崩れ砕波は砕波の進行と共に上層部より乱れが生成されるのに対し、巻き砕波では砕波の突込みによって急激に乱れが生成されることに対応している。

砕波の乱れは、水底付近に生成される乱れに加えて、波面崩壊によって水面より持込まれる乱れがある。この水面よりの乱れが十分に到達する区域は、図-5 と 6 よう $z/h_b = 0.5$ 程度であることがわかる。

5. 可視化実験による大規模乱れの検討

前節まで、砕波によって生成される大規模乱れの特性を、パワースペクトルと乱れ強度とによって検討を行い、その構造は非常に三次元性の強いものであることを指摘した。本節では、大規模乱れの生成過程と構造を、可視化実験によって検討する。

写真-1 は、巻き砕波 ($H_b = 5.5$ cm, $T = 1.2$ s, $h_b = 6$ cm) の可視化実験結果の一例である。撮影範囲は砕波点より $30 \text{ cm} \leq x \leq 80 \text{ cm}$ の区間で、画面内の十字印は水平方向に 10 cm、鉛直方向に 5 cm 間隔でつけられている。写真-1 (a) に見られるように、先行波の砕波突込み点より砕波帯内の水底面に、大規模なスポット状

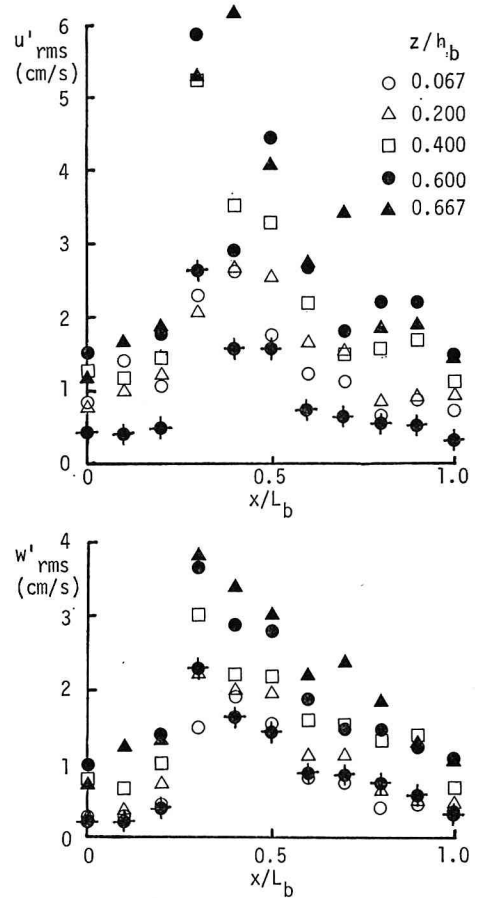


図-6 乱れ強度の空間分布 (実験-3)
(+: 高周波域での乱れ強度)

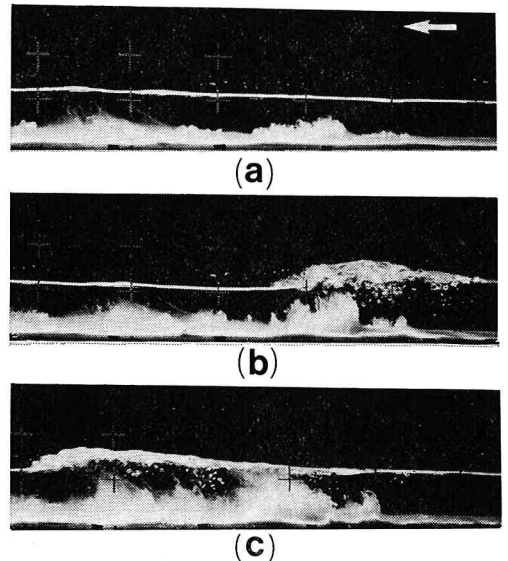
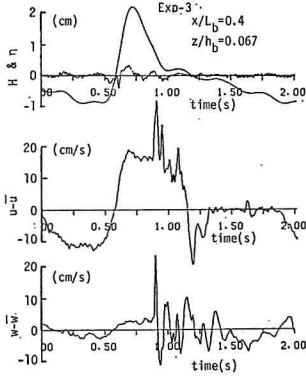


写真-1 可視化実験結果
(矢印: 砕波の進行方向)

の乱れが間欠的に発生し、この乱れが後続の砕波波峰通過時に水面方向に急激に引伸される様子が、写真—1 (b) に記録されている。そして、砕波々峯通過後に、大規模な乱れが激しく移流・拡散する状況が写真—1 (c) に見られる。実験条件は若干異なるが、写真—1 の砕波々峯通過とともに大規模乱れによる流速変動と考えられる流速記録が、図—7 に示される。

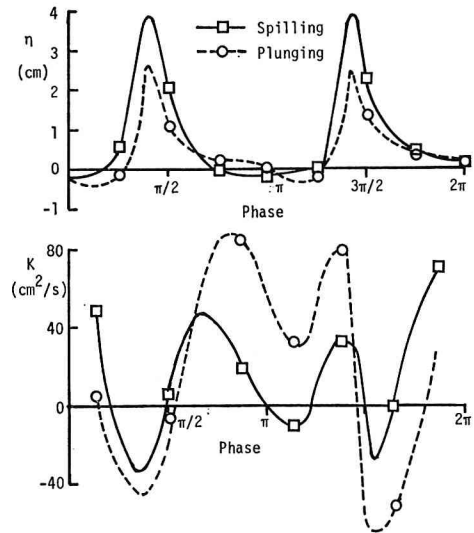
写真—2 と 3 は、砕波の突込み点付近に生成されたスポット状の乱れの挙動を、水槽上方より連続撮影したもので、撮影時間々隔は 0.5 秒である。写真—2 は写真—1 と同時撮影したもので、写真—3 は実験—3 と同一の条件である。これらの写真にも見られるように、砕波の突込み点付近には三次元構造をもつ大規模な渦状の乱れが存在し、スペクトルによる解析結果が妥当であった事を示している。写真—3 には、乱れの発達過程で大きな乱れがその周辺に発生した小さな乱れを巻き込んで行くことが



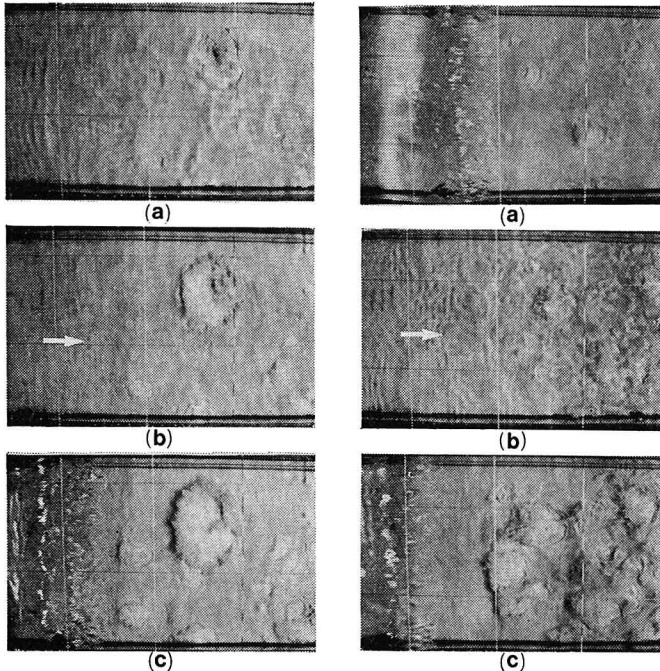
図—7 スポット状乱れの流速変動記録の例

認められる。このような大規模乱れの挙動は、Brown と Roshko⁹⁾ が示した二次元混合層の組織的な渦の挙動に類似していると考えられる。

砕波の突込み点付近に生成する大規模な乱れの経時的挙動を、定量的に示すことを以下に試みる。水槽上方より撮影した可視記録 (例えば写真—2, 3) の特定の乱れに着目し、その乱れの平面形状の変化を拡散係数として定量的に表示する。



図—8 大規模乱れの平面形状の位相変化

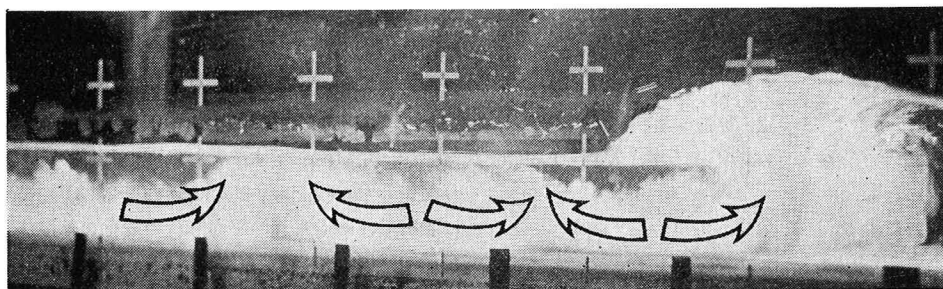


写真—2 可視化実験結果
(矢印: 砕波の進行方向)

写真—3 可視化実験結果
(矢印: 砕波の進行方向)

図—8 は、乱れの平面形状変化と水面変動の位相変化を示したもので、崩れ砕波と巻き砕波に対する特徴的な解析結果を示したものである。乱れの平面形状の位相変化を示す実線と破線は、数多くの実験結果を考慮して画かれたものである。図—8 に見られるように、波峯通過時に乱れ形状の拡散係数は負となり、乱れの鉛直方向への引伸しが発生していることがわかる。この状況は写真—1 に把握され、波峯通過時の水面よりの乱れの供給と共に乱れ強度が増大する機構がわかる¹⁾。また、この大規模乱れの挙動は、現地海浜での砕波によって発生する縦渦状の浮遊砂雲の挙動と対応すると考えられ、図—7 のスパイク状の流速変動が発生する、水面変動の位相とも一致する。

著者らは、前報⁷⁾で砕波の突込み点付近に定常的な渦構造の流体運動場 (大規模乱れとも云える) が存在することを、レイノルズ応力の空間分布によって示した。写真—4 は、このような流体運動場が形成して



写真—4 砕波下での渦状流速場(実験—3)

いる状況を記録したものである。灘岡らも砕波域の上層部に渦状の流速場が形成されることを指摘しているが³⁾、その生成過程は本研究のものとは異なるものと考えられる。

6. 結 論

砕波によって生成される大規模—低周波—の乱れ構造を検討するため、乱れの抽出方法を再検討し水面と流速変動間のコヒーレンスの算定法の修正を行った。その結果より、大規模乱れの構造はきわめて三次元性の強いもので、また砕波形式によって乱れの減衰機構が異なることが明らかにされた。可視化実験によって、大規模な乱れは砕波帯内の水底部付近に間欠的に生成され、波峯通過時の水面よりの乱れによって水面方向に急激に引伸されることが明らかにされた。この様に生成・発達する大規模乱れは、砕波帯内に定常的に存在する渦状の流体運動場へと発達する。

引 用 文 献

- 1) 青野利夫・服部昌太郎: 砕波による乱れの統計的特性, 第15回乱流シンポジウム, pp. 225~230, 1983.
- 2) 酒井哲郎・三反畑 勇: 砕波による乱れのレイノルズ応力について, 第30回海講論文集, pp. 30~33, 1983.
- 3) 灘岡和夫・近藤隆道・田中則夫: レーザードブラー流速計による砕波帯内の流速場の構造の解明, 運輸省港技研報告, Vol. 21, No. 2, pp. 49~106, 1982.
- 4) 青野利夫・服部昌太郎: 崩れ砕波による乱れの構造特性に関する実験的研究, 中央大学理工学部紀要, Vol. 26, pp. 77~127, 1983.
- 5) 林 泰造・大橋正和・魚谷 忠・志水 毅: Thin-layered milk 法による往復流境界層の可視化について, 流れの可視化, Vol. 1, No. 2, pp. 95~100, 1981.
- 6) Peregrine, D. H. and I. A. Svendsen: Spilling breakers, bores and hydraulic jumps, Proc. 16th ICCE, pp. 540~550, 1978.
- 7) 青野利夫・服部昌太郎: 砕波による乱れの空間特性に関する実験的研究, 第30回海講論文集, pp. 25~29, 1983.
- 8) 青野利夫・服部昌太郎: 砕波の乱れの分離法に関する検討, 土木学会第39回年次学術論文集, 1984 (印刷中).
- 9) Brown, G. L. and Roshko: On density effects and larger structures in turbulent mixing layers, J.F.M., 64, pp. 775~816, 1974.