

写真-1 は、固定した 16 mm カメラによって水路側面より撮影した画像のうちの一コマである。写真中、水表面付近で白く映っている部分は連行気泡によるものであり、下層の無数の白い点はトレーサーとして混入した中立浮遊粒子である。一方、図-2 は写真-1 に見られる連行気泡領域と下層でのトレーサーの動きを $1/32\text{ s}$ 間隔で連続的に示したもので、気泡存在領域の下縁を細い実線で、気泡の運動方向を細かな線分で表わしている（線分の長さは、16 mm フィルム画像から概略の長さをトレースしたもので正確ではない）。気泡混入領域より下側に記入してある点の連なりはいくつかの中立浮遊粒子の運動軌跡を表わしたものである。また、図-3 は、カメラのフレームを bore 先端とはほぼ同じ速度で移動させて撮影して得られた同様の画像から気泡混入領域と領域内の気泡運動パターンを示したものである。

これらの写真および図より以下のことがわかる。

- 写真-1 あるいは図-2 に見られる気泡混入領域は大きく波打っているが、これは前報で述べた水平渦によるものと考えられる。ここでこれが単なる脈動でなく渦によるものであるとしたのは、波とともに移動する系で見た図-3 で流線が閉じた形になっており、後述するように、この領域内では有意な大きさの渦度が存在することによる。
- この渦塊の中心部は、図-2 から得られる走時曲線によると、bore 先端の移動速度の約 $0.5 \sim 0.6$ 倍の速さで波の進行方向に移動する。
- 図-3 に見られるように、bore 前面では、渦塊に伴う水粒子の前面への突込み運動により、さらにその前面に新たな渦塊が作り出される。その結果、bore 前面の水面勾配は時間的に脈動する形になる。
- 写真-1 からわかるように、気泡混入領域（以下「渦層」と呼ぶ）では気泡が筋状に写っているのに対し、下層でのトレーサーは点状に写っている。このことは、渦層内の流体が下層に比べて相対的にかなりの高速で岸向きに移動していることを意味している。したがって、渦層と下層との間にはかなりの大きさの shear が作用しているものと考えられる。

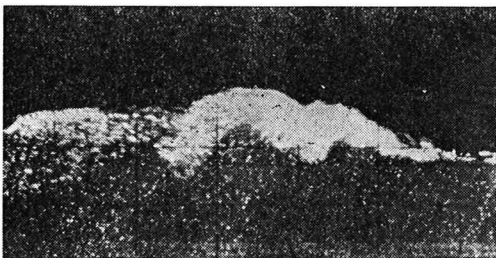


写真-1 測定断面付近の可視化写真（シャッタースピード $=1/136\text{ s}$ 、写真中のメッシュは $10 \times 7\text{ cm}$ ）

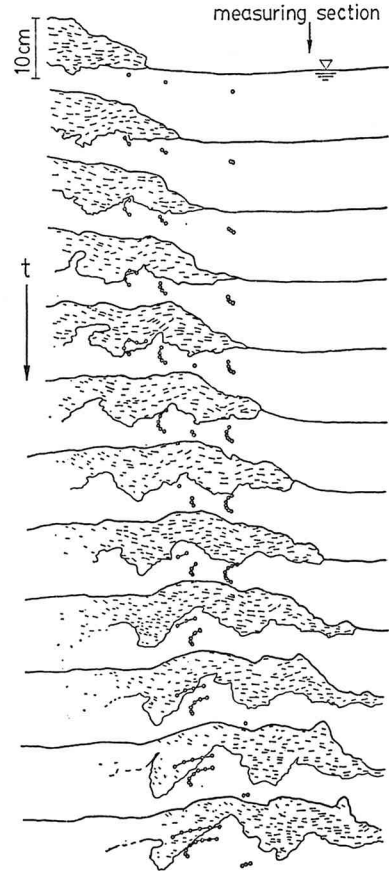


図-2 気泡混入領域および中立浮遊粒子の動き（固定座標系, $1/32\text{ s}$ 間隔）

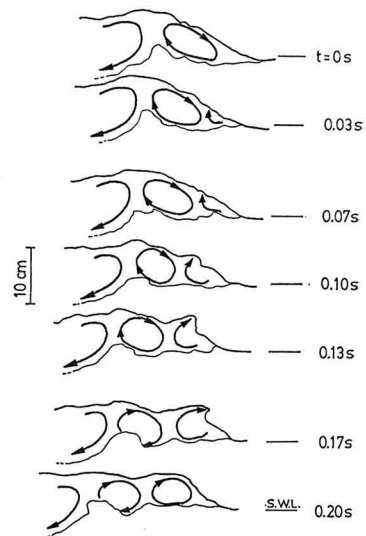


図-3 気泡混入領域および気泡運動パターン（移動座標系）

- e) 下層内部でのトレーサーはかなり規則的な軌道運動を行っている(図-2)。したがって、下層内部での流体運動はかなりポテンシャル的な振舞を示すことがわかる。ただし、図-2には示されていないが、boreの後方では、前報で示したように斜降渦の影響が現われる。
- f) 図-2に示されるように、渦層内の高速流体は間欠的に降下するが、これは、この領域での Reynolds 応力の生成に重要な寄与を果しているものと考えられる。このことは、実際に FLV とビデオ撮影の同時記録をとることにより確認された。図-4はその一例で、渦層下縁付近にあたる底面上 11.5 cm での FLV 記録を示したものである。図中の白ぬきの矢印は、ビデオ画像から確認された高速流体塊が流速測定点を通じた位相を示したものであるが、ちょうどこの位相で $-uw$ の値が正のピークを示していることがわかる。なお、 $-uw$ の記録には、正のピークだけでなく波の前面付近の位相で負のピークも現われているが、これは渦運動によるものでなく波としての軌道運動によるものである(5.(2)参照)。
- g) 上述のような渦層下部での流体塊の降下現象は、それがさらに発達すると前報で示した bore の crest 後方での斜降渦となって現われる。図-5は、このような流体塊の降下現象を、渦層内の大規模渦に伴う流線

パターンとの関連で見た概念図である。図のように渦と渦の間には saddle point が現われるが、その周辺では saddle point をはさんで右斜め方向に stretch される場となる。連行気泡領域の下縁の突出部はちょうどこの stretch 部分の延長線上に位置することになる。

4. 流速場の平均的応力特性と変形特性

前節で示したように、砕波帯内流速場では砕波の過程で生成された組織的大規模渦が流速場の構造を大きく支配するが、ここではこのような特徴を流速場の平均的な応力特性と変形特性の面から見てみることにする。

(1) 応力特性

Reynolds 応力に関しては、既に酒井ら⁷⁾や青野ら⁸⁾によって測定例がいくつか報告されている。しかし、ここで注目している大規模渦構造と Reynolds 応力特性の関連については必ずしも十分に明らかにされているとは言えないようである。

ここでは、Reynolds 応力 $-\langle u'w' \rangle$ を、 $-uw$ の位相平均値 $-\langle uw \rangle$ から $-\langle u \rangle \cdot \langle w \rangle$ を差し引くことによって求めた。図-6がその結果である。これを見ると、crest 下部の渦層下縁付近に明瞭な正のピークが現われていることがわかる。このことは、前節の d) 項や f) 項で述べた渦層下部の流体運動特性と符合している。

(2) 変形特性

ここで得られている流速データは固定点での時間記録であるが、測定断面付近では表面波形の変化は緩やかであることが確認されているので局所的には保存波的に取扱えるものとすれば、時間 t は波速 c を介して水平座標 $x (=ct)$ に置き換えて考えることができる。そこで、位相平均流速 $\langle u \rangle$ の空間微分をとることにより、以下のように流速場の変形特性が算定される。

A. 歪み速度 $\langle \gamma_{xz} \rangle$

図-7は、 $\partial \langle w \rangle / \partial x + \partial \langle u \rangle / \partial z$ で計算される歪み速度 $\langle \gamma_{xz} \rangle$ の分布を示したものである。これを見ると、図-6に示した Reynolds 応力の場合と同様に、渦層下縁付近に明瞭なピークが現われていることがわかる。したがってこのことから、このような流速場での Reynolds 応力表現に渦動粘性係数を介した通常の勾配拡散型モデルを使用することが可能であることが示唆される。

B. 変形の主方向と主歪み

次に、速度勾配テンソルのうちの対称部分、

$$\begin{bmatrix} 2 \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial x} & \frac{\partial \langle w \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial z} \\ \frac{\partial \langle w \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial z} & 2 \frac{\partial \langle w \rangle}{\partial z} \end{bmatrix}$$

に対して、その主方向と主値を計算した結果を図-8に示す。ただし、ここでは伸張側の主軸と主値のみを記しており、矢印の長さによって主値の大きさが示してあ

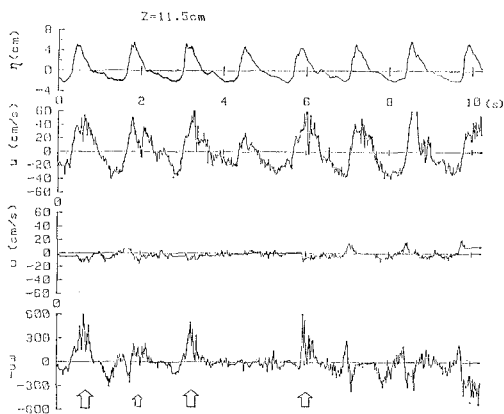


図-4 $-uw$ の時間記録上で見た Reynolds 応力の発生と渦塊の通過位相(白ぬき矢印)の関係

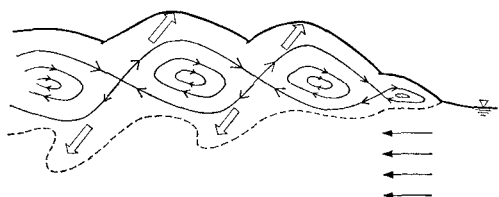


図-5 渦層内の流線パターン概念図(移動座標系, 点線は気泡混入領域の下縁)

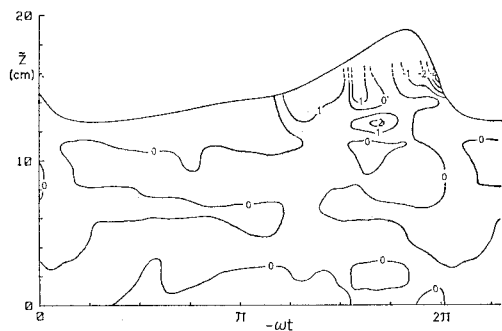
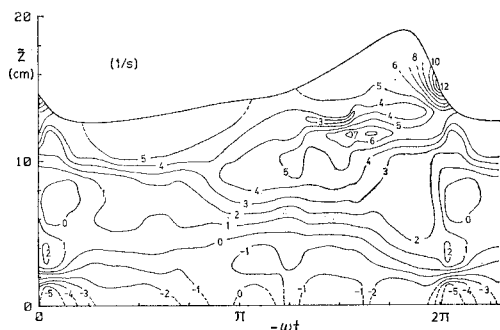
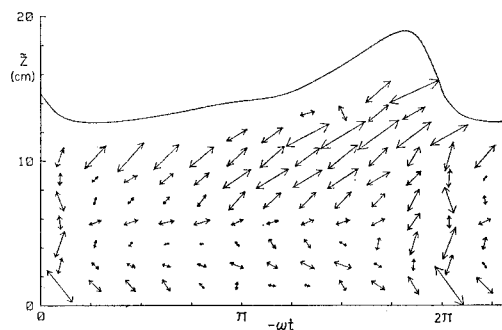
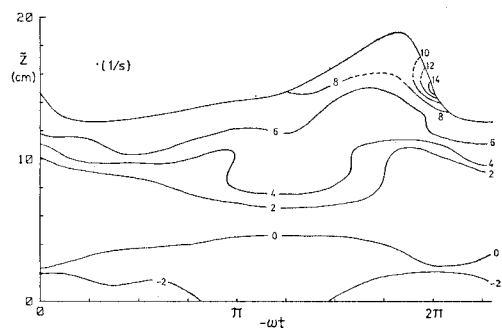

 図-6 Reynolds 応力 $-\langle u'w' \rangle$ の分布

 図-7 歪み速度 $\langle \gamma_{xz} \rangle$ の分布


図-8 変形の主方向と主歪みの分布


 図-9 渦度 $\langle \omega \rangle$ の分布

る。これを見ると水表面付近の渦層内部は右斜め方向に stretch される場となっていることがわかるが、これは“斜降渦”の発達方向とほぼ対応している。

C. 渦度 $\langle \omega \rangle$

図-9 は、 $\partial \langle u \rangle / \partial z - \partial \langle w \rangle / \partial x$ で計算される渦度 $\langle \omega \rangle$ の分布を示したものである。これより、波頂前面より渦度が生成され、それが斜め後方に徐々に移流・拡散していく様子がよくわかる。

5. 質量および運動量輸送に対する大規模渦の効果

これまで述べたことから明らかなように、砕波帯内の流速場の構造は、crest 下部の渦層の存在によって特徴づけられる。もともと“渦”は、通常の“波”と対比されるべき概念であるが、砕波帯内の流速場の場合にはこの“渦”が“波”の中に混在しているところにその大きな特徴がある。ここでは、文献 6) に示した、流速場をポテンシャル成分と渦度成分に分離する方法に基づいて、大規模渦に伴って発生した渦度が質量輸送と運動量輸送に対して果たす役割（「渦度効果」）について検討する。

(1) 質量輸送に対する渦度効果

図-10 は、分離された非ポテンシャル成分⁶⁾を大規模渦の平均的な存在領域（ハッチ部分）とともに示したものである。これを見ると、上層での流速ベクトルは全て岸向きとなっており、この方向への実質的な質量輸送が存在することがわかる。この岸向き流速は、特に大規模渦領域でかなり大きな値を示している。このことと、図-2 で見られる大規模渦の岸向きの移動とを考え合わせると、このような多量の岸向き質量フラックスの発生は、大規模渦の存在によるものと考えられる。このことは、“渦”のもつ基本的性質からも理解される。というのも、もともと“波”は、(2 次のオーダーの質量輸送を引き起こすとしても) 基本的には水粒子の軌道運動に基づく往復運動を行うだけであるのに対し、“渦”はその本質的な性質として、それ自身の移動に伴って渦に含

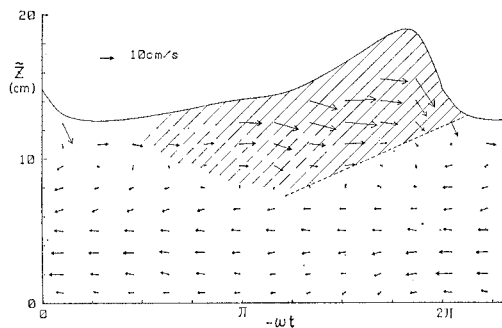
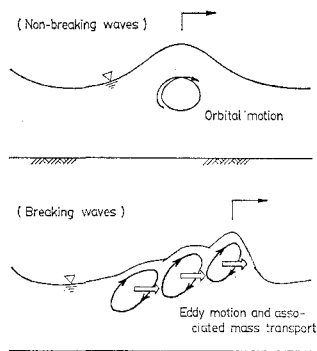


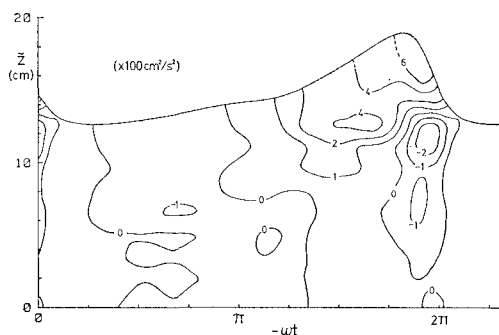
図-10 非ポテンシャル流速成分の分布と大規模渦領域

まれる水粒子を実質的に輸送する能力を持つからである。

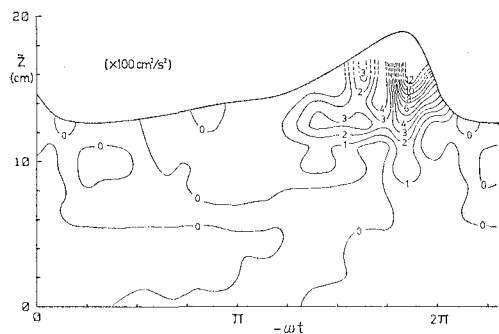
このように、崩れつつ進行する波のもとでは上層に大規模な渦構造が生成され、その岸向き方向への移動に伴って実質的な多量の質量フラックスが発生する。図—11は、このことを通常の波動と対比させて概念的に示したものである。



図—11 質量輸送に対する渦度効果の概念図



図—12 $-\langle uw \rangle$ の分布



図—13 $-\langle uw \rangle + \langle u_p w_p \rangle$ の分布

(2) 運動量輸送に対する渦度効果

上述のように、砕波に伴う渦度の存在は多量の過剰質量フラックスを発生させるが、これはさらに、運動量の輸送にも密接に関連するものと考えられる。

図—12は、 $-\langle uw \rangle$ の位相平均値 $-\langle uw \rangle$ の分布を示したものであるが、これを見ると、波の前面下部に負のピークが、またそれに隣接して crest 下部に正のピークが明瞭な形で現われていることがわかる。一方、図—13は、分離されたポテンシャル成分 $\langle u_p \rangle$ から計算された $-\langle u_p w_p \rangle$ を $-\langle uw \rangle$ から差し引いたもので、この場合には $-\langle uw \rangle$ に見られた負のピークがほぼなくなっていることがわかる。したがって、 $-\langle uw \rangle$ の負のピークはポテンシャル成分に対応したものであると考えられる。

図—13には、crest 下部に正の値を示す領域が現われているが、この領域はちょうど上述の大規模渦が存在している領域に対応しており、しかもその絶対値はポテンシャル成分 $-\langle u_p w_p \rangle$ の負のピーク値をしのいでいる。したがってこのことから、砕波に伴って生成された渦度成分は、運動量の輸送の面においても重要な役割を果たすことがわかる。

なお、図—13に示されている値は、渦度成分 $\langle u_e \rangle$ のみによる項 $-\langle u_e w_e \rangle$ と渦度成分とポテンシャル成分の相互作用項 $-\langle u_e w_p \rangle$, $-\langle u_p w_e \rangle$, ならびに Reynolds 応力項 $-\langle u' w' \rangle$ により構成されているが、このうち Reynolds 応力項は、図—6からわかるように、crest 後方のピークを形成している。

参考文献

- 1) 酒井哲郎：砕波による乱れ，1980年度（第16回）水工学に関する夏期研修会講義集，Bコース，1980。
- 2) 服部昌太郎：砕波による乱れの構造，1983年度（第19回）水工学に関する夏期研修会講義集，Bコース，1983。
- 3) 日野幹雄：振動流の乱流，特定研究「乱流」報告書（巽友正編），東大出版，1985。
- 4) 日野幹雄・瀬岡和夫・小俣 篤：砕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. 1~5，1984。
- 5) 日野幹雄・沢本正樹・山下俊彦・広永勝治・村本龍夫：光ファイバーを用いた2次元LDVの試作，第2回流れの計測大阪シンポジウム，pp. 71~75，1984。
- 6) 日野幹雄・瀬岡和夫・小谷野喜二：崩れつつ進行する波のポテンシャル成分と渦度成分の分離方法について，第30回海岸工学講演会論文集，pp. 55~59，1983。
- 7) 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回海岸工学講演会論文集，pp. 30~33，1983。
- 8) 青野利夫・大橋正和・服部昌太郎：砕波による乱れ構造の実験的研究，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 159~163，1982。