

砕波帯における岸沖方向の物質拡散に関する研究

三村 信男*・池谷 毅**・堀川 清司***

1. 緒 言

砕波帯における拡散現象の解明は沿岸海域の水質を論じる上で重要な課題の一つである。この現象は沿岸方向と岸沖方向の2つの過程に分けて取り扱われてきた。本研究はこのうち岸沖方向の物質拡散を対象として取り上げその機構の解明を目的としたものである。

この課題に関しては、従来の研究の多くが現地海浜において染料の拡散過程を観測するという手法で行なわれており、解析にあたっては現象が水深方向に一樣という仮定がおかれている¹⁾。筆者らも同様の研究を進めてきたが²⁾、現地観測によって染料の拡散が砕波の通過に強く依存しているという示唆を受け、物質拡散と砕波帯の流速場との相関や現象の水深方向の差異に対して検討を加える必要があると感じてきた。本研究は、そのために所を実験室に移し、二次元造波水槽を用いて詳細な物質拡散の観察と流速の測定を行なったものである。

本研究で取り扱った実験の条件は広い範囲に及んではない。二次元造波水槽を用いたことから、沿岸方向に現象の一樣な二次元的な砕波帯を対象としたものになっている。また、砕波形式としても崩れ波の場合に限られるが、詳細な観測に基づいてこうした条件下における物質の拡散機構に対する定式化を試みた。

2. 実験の概要

本研究では、大別して次の2種類の実験を行なった。第一は、トレーサーを用いた砕波帯における物質の拡散現象の観察であり、第二は、それを支配する流速場の測定である。各々の実験の内容は後で紹介する。

実験には、図-1に示すような長さ23 m、幅80 cmの二次元造波水槽を用いた。この水槽の一端に1/30の一樣勾配斜面を設置し規則波を作用させて砕波帯を現出させた。沿岸方向の一樣性を保つために砕波帯内外4 mの区間を二つに仕切り、実験には幅20 cmの区間を使用した。

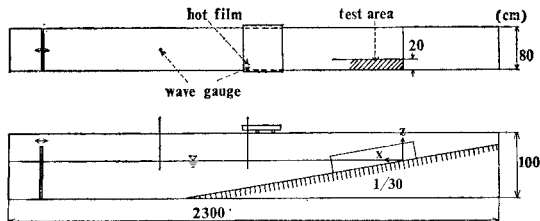


図-1 実験装置模式図

表-1 実験の条件と項目

CASE	I	II	III	IV	V
一樣水深部 波 高 (H_i) cm	2.2	4.5	4.3	2.9	2.1
周 期 (T) s	1.25	1.25	1.00	1.00	0.83
換算沖波 波 形 勾 配 (H_0/L_0)	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02
砕波帯の幅 (x_b) cm	110	210	180	115	90
染 料 拡 散	○	○	○	○	○
塩水の濃度分布の測定		○			
流 速 測 定		○		○	○

(○印は実験を行なったことを示す)

実験は、表-1に示すように波高と周期を変化させ合計5ケース行なった。もっとも詳細な観測を行なったのは砕波帯の幅をもっとも大きくとれたCASE IIの場合である。したがって、実験結果の報告はCASE IIを中心に行なう。これら全ての実験ケースに対して一樣水深部の水深は一定に保ち、35.2 cmとした。また、砕波形式は全て崩れ波型であった。

3. 砕波帯における岸沖方向の物質拡散

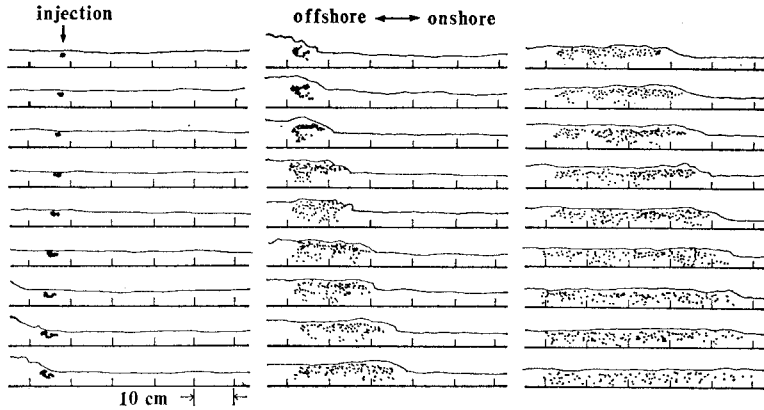
3.1 観測方法

最初に砕波帯における拡散現象の観測方法について述べる。まず、現象を詳細に観察するために染料(ウォーターブルー)溶液を投入し、その広がりを8 mmフィルムに撮影した。全ての実験ケースについて、投入点は砕波帯を4等分し岸側1/4、中央、沖側1/4の3地点とした。水深方向の現象の差異をみるため、投入位置を表層と底層とに分けて実験をくり返した。8 mmフィルムの撮影の際には、水路側面に大鏡を置き同一の画面上に上方から見た状況と側面の状況が同時に写し込まれるようにした。

* 正 会 員 工博 東京大学助手 工学部土木工学科

** 学生会員 東京大学大学院 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 染料の拡散 (CASE II, 投入点 $x=190$ cm, 各図の間隔は $1/24$ 秒)

染料をトレーサーとした観察では現象を量的には把握できない。そこで、CASE II だけではあるがトレーサーとして塩水を投入し岸沖方向の濃度分布を継時的に測定した。塩分濃度の測定には抵抗式濃度計を用い、測点は岸沖方向の 14 地点に配置した。この実験における投入は、砕波帯中央に設けた投入点の水面から塩水を水中に一挙に噴出させる、いわゆる面投入方式をとった。また、濃度計の検出部は常に全水深をカバーしていたので本実験では水深方向に積分された塩分濃度が測定されたといえる。

3.2 観測結果

染料をトレーサーとして用いた実験から物質の拡散過程の特徴が明瞭に把握された。砕波帯における拡散現象におけるもっとも大きな特徴は、表層に投入された場合と底層に投入された場合とで染料の広がり方に大きな差異が存在することである。その状況の代表例を図—2 および図—3 に示し、以下説明を加える。

(1) 表層投入の場合

図—2 は波のトロフの位相に投入された染料が砕波 1

波の通過によって広がる状況を側面から写し取ったものである。この図からもわかる通り、表層における染料の拡散は砕波の通過に直接的に関連している。

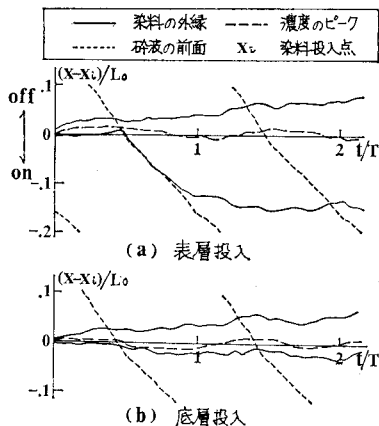
表層に投入された染料は、砕波前縁に出会うまで徐々に沖側に移動する。砕波前縁に出会うと染料は急激に砕波上部にまきこまれ、さらに砕波の進行に伴ない水面に薄く引き伸ばされる。図—3 は染料雲の広がり時間の時間変化を示したものであるが、(a) に見られる通り表層における岸向きの広がり速度は 1 波目の砕波ではほぼ波速と等しい大きさを持っている。水深方向の染料の混合は岸向きの伸長にやや遅れて生じるが、一波目の砕波の通過では完全には混合されず、完全に混合されるためにはさらに数波の砕波の通過が必要であった。

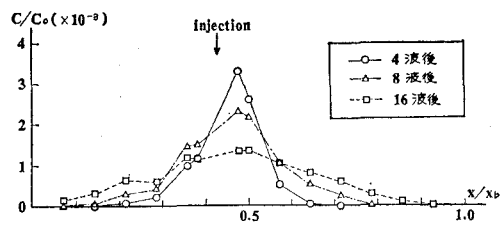
(2) 底層投入の場合

図—3 (b) にみられる通り底層に投入された染料の広がりには砕波の通過にはさほど影響を受けない。染料雲は波の位相に対応して前進後退をくり返しながら全体としては徐々に沖向きに移動する。ただし、砕波通過時に底面の染料がまき上げられ混合作用を受けるという現象もみられた。

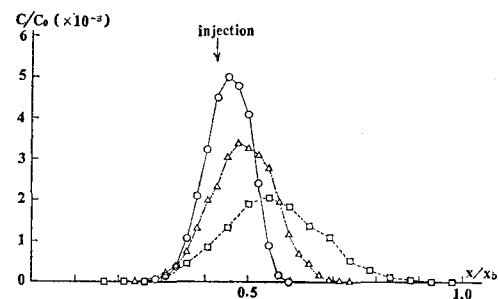
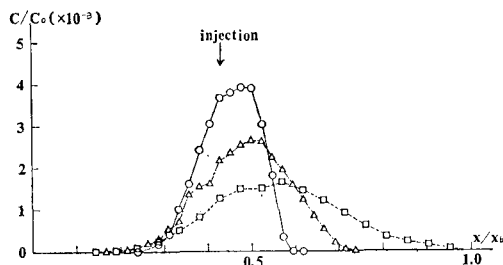
以上のような表層と底層における現象の差異は、各々の場所における流体運動の特性によっていると考えられる。即ち、表層では砕波に伴って岸向きの質量輸送と強い乱れが生じており、底層では逆に沖向きの流れが生じていると推測される。それを確かめるために詳細な流速測定を行なったが、これに関しては次節で述べる。

次に、図—4 (a) に塩水を投入して測定した岸沖方向の濃度分布を示す。図中の塩分濃度は水深に関して平均された量であるが、拡散初期には沖側にピークを残し岸側により長く尾をひく分布形を示している。これに対して、Kraus と筆者らが水深方向に現象の変化がないと仮定して水深方向に積分された乱流拡散方程式を導き、それを解いて得た濃度分布形は今回の実験結果と逆の傾向を示している²⁾。このことから、砕波帯における物質


 図—3 染料の広がり時間の時間変化 (CASE II, 投入点 $x=90$ cm)



(a) 実測

(b) 計算例 1 ($w_t = 0.7u_t$)(c) 計算例 2 ($w_t = u_t$)

図—4 塩水の平均濃度分布

の拡散過程においては、上に述べたような水深方向の現象の差異が重要な役割を果たしているといえる。

4. 砕波帯における流速場の特徴

4.1 測定方法

物質の拡散機構を明らかにするためには流速場の特性を把握する必要があるが、砕波帯における流速場に関してはその複雑さのために十分に理解されているとはいえない。そこで、染料拡散実験に対応する3ケースの条件を選んで砕波帯の流速場の詳細な測定を行なった。

流速の測定には熱膜流速計を用いた。受感部にはスプリットフィルム型センサーを採用した。スプリット型センサーは直交する2方向の流速成分を検出し、このうち1方向の流速については符号も検出するという特質を持っている。今回の測定では岸沖方向の水平流速(u)の符号が検出されるようにセンサーを設置した。

測定点としては、砕波帯に15 cm 毎に測線を設け各測線上に4~12点の測点を配置した。砕波帯の幅がもっとも大きいCASE IIでは測点数は131点にのぼった。表層における流速場を知るためもっとも位置の高い測点

は静水面より1 cm 上方に置かれている。この測点をはじめ波のトロフの水面より上方に位置する測点ではセンサーが空中に露出する瞬間が生じる。このため熱膜の設定温度を下げて流速を測定するとともに、データ解析にあたってはセンサーが空中に入出入りする瞬間のデータを除き充分水中にある期間のデータだけを用いた。

各測点毎に26波分の流速データを用いて位相平均流速を求め、それからの偏差を乱れと定義した。さらに位相平均流速の1周期平均をとって定常流成分を求めた。これらの流速の定義を以下に示す。

$$u = \bar{u} + u' \quad (\text{— は位相平均を表わす}) \quad \dots\dots(1)$$

$$\bar{u} = \bar{\bar{u}} + \bar{u}'' \quad (\text{— は1周期間の平均を表わす}) \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 u : 岸沖(x)方向の水平流速、 $\bar{u}$: 岸沖方向の位相平均流速、 u' : 岸沖方向の流速の乱れ成分、 $\bar{\bar{u}}$: 岸沖方向の流速の定常流成分、 u'' : 岸沖方向の流速の波動成分であり、乱れの強さは $\sqrt{u'^2}$ で表わすものとする。

熱膜流速計の出力としては流速の鉛直成分(w)も測定されたが、方向が判定できず精度も落ちるので本論文では触れない。

4.2 測定結果

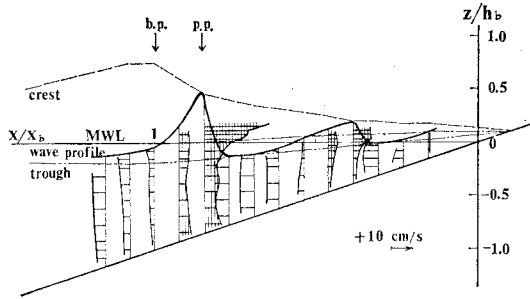
流速の測定は3つのケースについて行なったが、もっとも多く測点が配置されているCASE IIの結果を中心に砕波帯における流速場の特徴を述べる。

図—5に位相平均流速の空間分布の例と定常流成分の空間分布を示す。ここで定義した定常流成分はオイラー流速の時間平均量であるため、(b)では平均水位より上方になお流速が存在するという表示になっている。

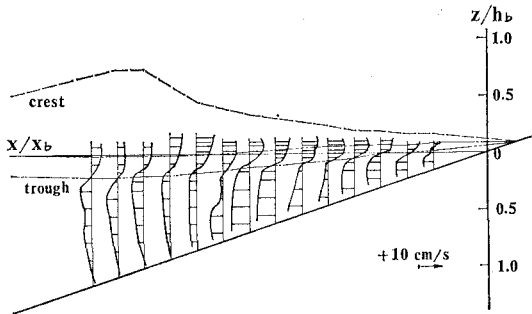
さて、位相平均流速をみると波の位相によって鉛直分布形が異なっている。即ち、波のクレストの位相では表層に岸向きの大きな流速が存在し、しかも表面からトロフのレベルまで強いシアをもった流速分布が形成されている。その下では底面付近まではほぼ流速は一定となる。一方、トロフの位相では流速は全水深にわたって沖向きでその値はほぼ一定である。

図—5(b)をみると、砕波帯の全域でトロフの水面位置をつないだ線より上で岸向き、下で沖向きの定常流が存在している。この結果は、砕波帯において鉛直断面内に循環流が存在するという堀川らの指摘⁹⁾を裏づけるものである。物質の輸送過程との関連を考えた場合、重要なのはラグランジュ的な質量輸送であるが、砕波帯における質量輸送速度の分布は明らかではない。しかし、砕波帯が浅海域であり砕波が長波として近似しうること考えれば、ラグランジュ的な質量輸送の分布も今回計測された定常流の分布と類似していると推測される。

次に、図—6に乱れの強さの空間分布の例及びその1周期平均を示す。(b)をみるとわかる通り、つっこみ点(P.P.)から岸側において砕波帯の沖側と異なる大きな乱

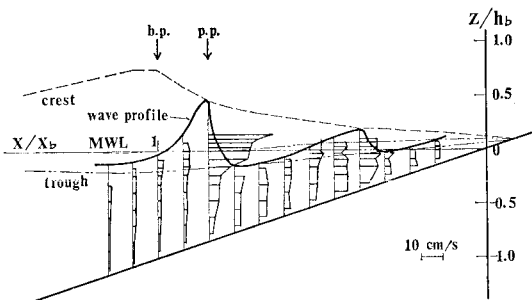


(a) 位相平均流速

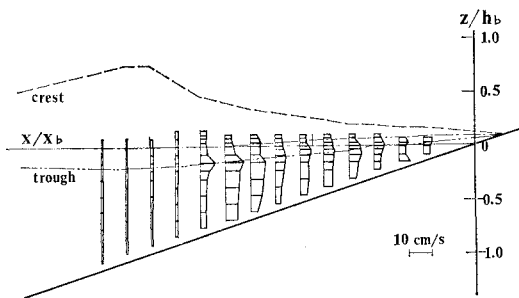


(b) 定常流成分

図-5 流速分布 (CASE II)



(a) 乱れの強さ



(b) 1 周期平均した乱れの強さ

図-6 乱れの強さの分布 (CASE II)

れが存在している。図-6 (a) はいわば瞬間的な乱れの分布を示したものになっているが、これをみると砕波の波峰の表面付近でもっとも乱れが大きく、その沖側に徐々に値を小さくしながら乱れの大きい領域が広がっている。このことは、砕波の進行に伴って砕波前面で乱れが

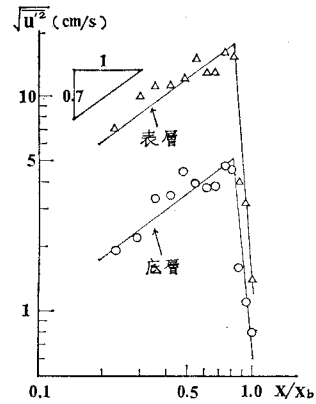


図-7 乱れの強さの岸沖分布

生産され、それが砕波背面及び底層付近まで広がっていくことを示している。

図-7 に乱れの強さの岸沖方向の分布を示す。従来砕波によって生じる乱れは、砕波の波高減衰に関連づけて取り扱われてきた。即ち、砕波の進行によって失なわれるエネルギーが乱れの運動エネルギーに変換され逸散されるとして見積られてきた⁴⁾。これによると、一様勾配斜面の場合には $\sqrt{u'^2} \propto X^{0.5}$ (X は汀線から沖向きにとった距離) という関係が成り立つ。しかし、今回の実験では乱れの強さが CASE II では $X^{0.7}$ (図-7)、CASE IV, V では測線は少ないが $X^{1.0}$ に比例するという結果が得られている。従来の取り扱いと今回の実験結果の乖離の理由は明らかではない。

5. 物質の拡散機構に対する検討

以上にみたような 2 種類の実験結果から、砕波帯における物質の拡散機構を流速場の特性に基づいて説明することができる。本研究で取り扱った、二次元的な砕波帯で崩れ波砕波が生じている場合における物質の拡散機構は次のようにまとめられる。

- 砕波帯における拡散現象は、流速場の特性に対応して、表層における岸向きの物質輸送、底層における沖向きの物質輸送及び鉛直方向の混合の 3 つの面から成っている。
- 表層における拡散は、砕波の通過に直接関連している。表面付近では砕波の通過に伴って岸向きの質量輸送が生じており、砕波前面では強い乱れが生産されている。表層に存在する物質は、砕波の前面にまきこまれ、この両者の作用によって表面付近を岸向きに長く引き伸ばされるように輸送される。
- 砕波帯底層には、表層における岸向きの質量輸送を補償する沖向きの定常流が生じている。底層に存在する物質はこの流れによって沖向きに輸送される。乱れによる拡散は表層に比べ激しくない。

iv) 碎波によって生じる乱れは、表層と底層とにおける逆向きの物質輸送過程の間で物質の交換を媒介し、鉛直方向の均一化を促す。従って、物質が投入されていくつかの碎波の通過を受ければ水深方向にほとんど濃度変化がなくなり、物質の拡散をいわゆる分散として扱いうる段階になると思われる。ただし、本研究では、初期の物質拡散を対象とし、分散への遷移時間等の検討は行なわなかった。

以上に述べた定式化の妥当性を確かめるために、モデル的な検討を試みた。

物質拡散をシミュレートするためにはまず流速場を与えられなければならない。しかし、碎波帯における流体運動は極めて複雑で、碎波、定常流、乱れといった現象を包括的に表現する取り扱いはない。そこで、今回の実験との対応をみることを目的として、流速測定の結果に基づいて流速場の現象的モデル化を行なった。

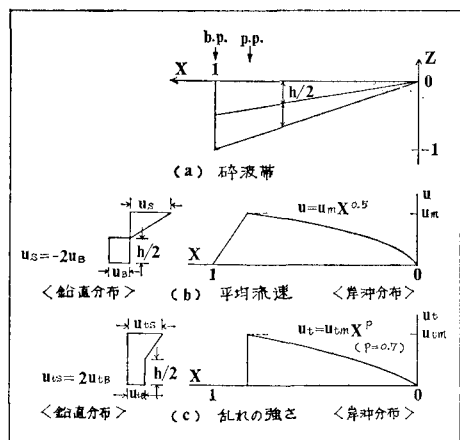


図-8 碎波帯の流速場のモデル

その模式図を 図-8 に示す。碎波帯は一様勾配の三角形断面で与える。これを水深方向に二等分し、表層と底層とした。水面変動は無視し、流体運動としても平均流と乱れだけを考慮した定常な流速場を考えた。この両者に対して、実測された分布形を単純化して、図-8 (b), (c) に示すような岸沖及び鉛直方向の分布を与えた。岸沖分布は、表層と底層に対して同一であるが、平均流は表層で岸向き、底層で沖向きであり、乱れの強さは表層の方が大きな値を与えられている。

物質拡散のシミュレーションにはモンテカルロ法を用いた。即ち、トレーサーとして粒子 5 000 個を投入し、時間ステップ毎の粒子の位置を式 (3), (4) によって計算して濃度分布を求めた。

$$X_i = X_{i-1} + \{u_{i-1} + u_{t,i-1}R_X\} \Delta t \quad \cdots \cdots (3)$$

$$Z_i = Z_{i-1} + w_{i-1}R_Z \Delta t \quad \cdots \cdots (4)$$

ここで、 X_i , Z_i は各々 i ステップにおける粒子の水平、鉛直座標、 u は水平平均流速、 u_t , w_t は各々水平、鉛直方向の乱れの強さであり、 R_X , R_Z は平均 0.0, 標準偏差 1.0 の正規乱数である。

モンテカルロ法を用いて乱流拡散をシミュレートする場合、乱れの階層構造に見合った複合乱数列を用いる必要がある⁵⁾が、碎波帯における乱れの構造が不明であるので今回の計算では単一の乱数列を用いている。

計算結果の一例を 図-4 (b), (c) に示す。(b) は $w_t = 0.7u_t$, (c) は $w_t = u_t$ とした場合である。図はたて軸を無次元濃度 (C_0 は初期濃度) にとって実測値と比較してあるが、ある程度よい一致を示している。この他にも、碎波の波速で強い乱れを持った領域が進む非定常な乱れの効果を入れたモデルも検討したが、結果はほぼ同様の傾向を示した。いずれにせよ、現象論的なモデルではあるが実測した濃度分布を説明しえたことから、先に述べた碎波帯における物質の拡散機構に関する考察の妥当性が裏づけられる。

6. 結 語

二次元造波水槽において、詳細に物質拡散の状況を観察した。併せて、それを支配する碎波帯の流速場の測定を行なった。これらの実験から、表層における物質の拡散現象と底層のそれとは大きな差異があること、表層における物質拡散には碎波の通過が強い影響を持っていることを見出した。さらに、二次元的な碎波帯において崩れ波碎波が生じている場合の物質の拡散機構を、定性的ではあるが流速場の特性に対応させて考察した。

物質拡散を解明するためには、水域の流速場を知る必要がある。本研究を通して、複雑で興味深い碎波帯の流動場に対する研究を進める必要性を痛感する。

最後に、本研究は文部省科学研究費補助金 奨励研究 (A) から補助を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 例えば, Inman, D. L., R. J. Tait and C. E. Nordstrom: Mixing in the surf zone, Jour. Geoph. Res., 76, pp. 3493~3514, 1971.
- 2) Kraus, N. C.: 三村信男・堀川清司: 碎波帯付近における拡散係数の測定法に関する研究, 第 27 回海講演集, pp. 173~177, 1980.
- 3) 堀川清司・砂村継夫・鬼頭平三・品川正典: 海浜変形に関する実験的研究 (第一報), 第 27 回年講演概要集 II, pp. 95~98, 1972.
- 4) Battjes, J. A.: Modeling of turbulence in the surf zone, Proc. Symp. on Modeling Techniques, ASCE, pp. 1050~1061, 1975.
- 5) 日野幹雄: モンテカルロ法による乱流拡散の二, 三の計算について, 第 9 回水理講演会講演集, pp. 67~72, 1965.