

河口二層流の混合機構に関する実験的研究 I

吉田 静男*・田城 徹雄**・西田 修三***

1. はじめに

河床に凸凹がある場合の河口密度流は、たとえ、定常流であっても、二層系として取り扱うことができない場合がある。その理由は、河床の粗度によって著しい乱れの発生する塩水楔の先端では、常に、上下層水の混合が行なわれ、これによって生じた混合流体が、中間密度層を形成するためである。この現象は、現実の河口密度流においては、大なり小なり見出されるものであるが、本論文においては、この中間密度層の厚さが、界面波高に比して十分小さい場合の、河口二層系の混合機構が、定性的に、明らかにされる。

2. 実験方法

使用された液体は、水道水と塩水である。実験装置は河道に相当する水路（幅 8 cm、深さ 15 cm（成層深さ 9.0 cm）、長さ 600 cm）と、海洋部に相当する広い水槽（300 cm×200 cm×30 cm）から成っている。水路上流端には、供給される淡水と、あらかじめ、水路及び水槽に注いである塩水とが、できるだけ混合しないように、傾斜部を設けてある。淡水の供給は、一定水位を保った淡水タンク底部から流量バルブを通じてなされている。

流速の測定は、色素液を流し、その流跡を追うことによって求められている。なお、この方法による測定誤差は、10% 程度である。

密度は、ガラスサージミスターと白金電極が対になった素子を用い、水温と電極間の伝導度から間接的に求めた。又、素子の位置は、素子の移動に連動するポテンシオメーターの抵抗変化から、十分な精度で決定された。

3. 実験結果及びその考察

定常な二層流の界面を通じての混合は、界面破壊を発端として開始される。従って、この種の従来の研究は、

ほとんど、界面の破壊機構の解明を目的として行なわれ、それによって、様々な流れ構造の安定性が調べられたり、しかし、現実の河口二層流の界面破壊には、それらの中の、どの結果が当てはまるのか、といった点についての研究はきわめて少ない。また、従来の研究の方向では、界面の破壊についてはある程度議論し得るものの、本質的な混合機構、すなわち、界面の破壊によって、界面の上方に変位した希釈塩水塊がその後どのような機構で上層内に連行されるか、といった点については、何ら論じ得ないという問題もある。

河口二層流の混合機構を考察する上で、もう一つの考慮すべき点は、楔の先端から沖合遠方にかけて、流れ構造がしだいに変化している点である。このことは、場所的に界面破壊の程度及びその機構自体に、差異の生じ得ることを暗示している。

そこで、以下においては、得られた実験結果から、界面破壊の場所的な差異を明確にし、界面破壊によって界面から変位を強いられた流体塊の各層への輸送機構に関係すると思われる、流れの微細構造についてのべてみる。

3.1 定常河口二層流の界面破壊

まず、上、下層の密度差 $\epsilon = (\rho_2 - \rho_1)/\rho_2$ 、 ρ_1 , ρ_2 は、それぞれ、上、下層の密度）を 0.007 とし、淡水流量を様々に変えた場合の界面現象からのべる。

淡水の河口流出流況が、柏村・吉田²⁾のいう type A というような、微少流量（約 5 cc/sec 以下）のもとでは、水路上流部から徐々に淡水厚さが減少し続け、河口でさらに急激に減少して、以後沖合遠方に向かうに従って、やはり、漸減するといった、よく知られた界面状況が見い出される。しかし、type B, C に近づくにつれて、河口沖合の一時加速域に、type A には見られない特徴が現われる。それは、図-1 に示されるような界面の山がその領域に出現することである。なお、写真-1 には、この山が2つ出現する場合の流心沿いのプロフィールがとらえられている。この界面の山は、当然、流線にも影響を与えることになるが、その影響は、図-2 が示すように、界面上昇部で流線間隔が拡がり、その領域をすぎると再びその間隔が狭くなるといったもので、

* 正 会 員 工 博 北海道大学助手 工学部数物系共通

** 学生会員 北海道大学大学院工学部機械工学科

*** 学生会員 北海道大学大学院工学部応用物理学科

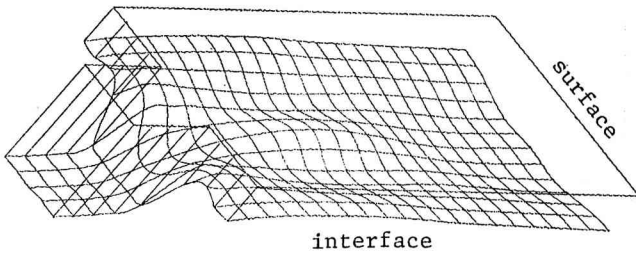


図-1



写真-1

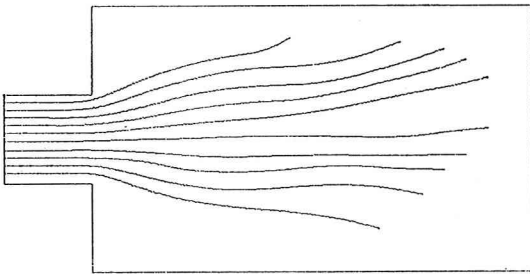


図-2



写真-2

3次元の lee wave が作り出す流れ場と定性的に一致している。従って、写真-1 にも見出される、河口から遠い側に出現する界面の山は、河口に最も近い山の存在にもとづく lee wave であるという見方ができる。なお、図-1, 2 は $\epsilon=0.003$ 、淡水流量 35 cc/sec の条件下で、淡水放流後の経過時間が 50 分のものであるが、定性的には、 $\epsilon=0.007$ の場合と大差はない。

淡水流量がさらに増大し、type D の流況が見られるようになると、上述の界面の山の沖合側傾斜部に、まず、不安定波（恐らくサイクロイド波であろう）が発生する。しかし、この不安定波は沖合の界面破壊の主役を担うことにはならない。というのは、淡水流量がさらに増大（約 40 cc/sec）すると、全体的に界面水位が低下すると同時に、河口に最も近い界面の山の河口側傾斜部でのせん断流が相当に強くなり、上述の不安定波をはるかに上まわる成長を示すサイクロイド波³⁾（以後 C 波と

略記する）が出現するからである（写真-2）。この C 波は、時間の経過につれて、その発生点を河口へと移し、やがて、河道部にさえ見出されるようになる。この現象は、時間の経過とともに、全体の界面水位が低下し、流れ場が安定化していくという、現実の実験条件からすると、不自然なものである。しかし、C 波の発生には、連行層内に、ある程度の淡水混入が必要であり、そのためには、時間を必要とすることを考えるならば、決して、矛盾はない。なお、従来の研究⁴⁾によれば、C 波発生のトリガーとして、有限振幅の界面重力波及びそれ以外の非常に微小な振幅の界面波もしくは連行層より下層の乱れがあげられているが、ここにのべた C 波は、このうちの後者がトリガーとなっているものと思われる。

淡水流量がさらに増大すると（70 cc/sec）界面波が楔の先端部から発生したり、サイクロイド波直上のせん断層内に生ずるスパイラル渦によって誘発される⁵⁾。このような段階では、界面重力波とサイクロイド波の重畳による、いわゆる cusped breaking が河道の内外で目立ちはじめ、塩水が淡水層内に輸送されるようになる。そして、これ以上淡水流量を増大させると、一時加速域に攪乱の最大振幅が、ほぼ界面に位置する Thorpe 型のまき波が出現する（写真-3）。ただ、このまき波の発生は、界面の山が存在する一時加速域でのみ成長し、これを越すと、自由表面が障害となって、十分成長する前に乱流と化してしまう。従って、一時加速域より沖合においては、まき波によって作られた混合流体が下層塩水との間で新たな二層（もっとも、界面は不明瞭で、新たに上層となる混合層内の密度分布は漸変しているが）を形成し、流れはむしろ安定化する。



写真-3

次に $\epsilon=0.0003$ とした場合の界面状況についてのべよう。この密度差は、下層が 12°C、上層が 17°C の淡水成層に相当している。このように密度差が小さい場合には、河口での全水深 9 cm の制約を受け、150 cc/sec 以上の流量下では塩水楔が河口外に押し出されてしまう。従って、河道に二層が形成される状況下では、淡水内の乱れも小さく、又、サイクロイド波が形成される水理条件にもならない。こうした理由から、この場合の混合は、専ら沖合の一時加速域での界面破壊を通じて行なわ

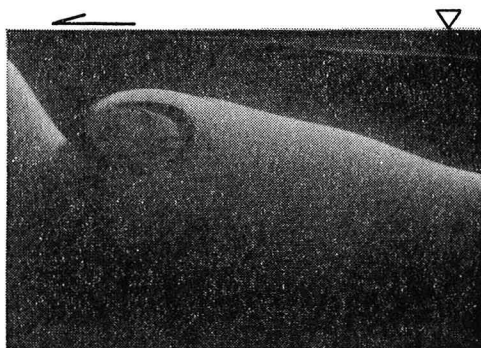


写真-4

界面

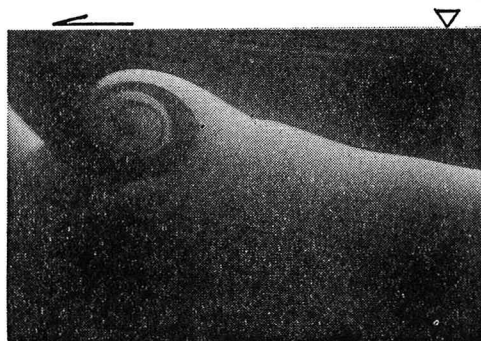


写真-5

界面

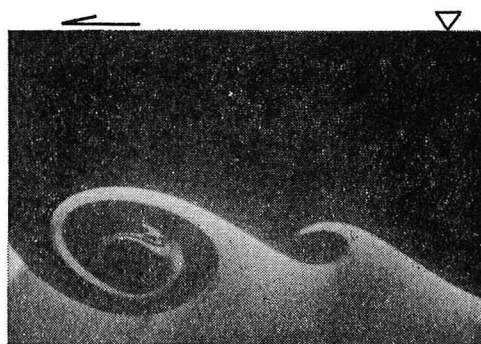


写真-6

界面

れることになる。淡水流量をしだいに増加させてゆくと、まずC波が、次いで、まき波が出現する。まき波は淡水流量により若干異なる形態をとる。たとえば、淡水流量が比較的小さい場合は、写真-4に示すように、C波の谷から上層淡水が吸込まれるといった印象が強く、攪乱の最大振幅は界面より下方の連行層内に位置している。淡水流量が増加すると、この最大振幅を示す位置はちょうど、界面に位置し、渦は両層流体を等量ずつ連行して成長する(写真-5)。これ以上流量が増大すると、写真-6に示すように、攪乱の最大振幅を有する位置が淡水側に移動し、淡水内のスパイラル渦によって、下層がカスプ状に連行される形態をとる。以上の結果は、河

口流出淡水がその増加に伴って、いかに界面の安定性に影響を与えるかを示していて重要である。

河口での内部フルード数が2を越えるような、非常に大きい淡水流量下では、淡水層の厚さも相当に増す。その効果は、まき波の振幅増大や、ベアリング現象となって現われる。ベアリング現象はかなり広く存在する現象であり、よく知られた現象でもある。しかし、河口でのまき波の合体現象は隣り合う2つのまき波にとどまらない。淡水流量しだいで、3~5つのまき波の合体(すなわち、波数が $1/3 \sim 1/5$ に減少することを意味する)が、一挙に行なわれることも珍らしくはない。

ただ、沖合に向かうに従って、淡水層が薄くなっているために、前例同様、十分な成長を見ないうちに乱流と化してしまう。

本節の最後に、 $\epsilon=0.06$ という、大きな密度差の場合の特徴をのべてみよう。この場合においても、流量の増大によって、C波や、まき波の発生が見られることは、上述の2例と同じである。ただ、こうした不安定波が生ずる段階では、界面近傍のせん断流が上述2例の場合より、はるかに強くなっており、特に、一時加速域では、界面の不安定に先んじて、まず、淡水内せん断層に不安定波が生ずる。この不安定による流れ模様は固体壁上の境界層において見られるバースト現象に似ており、これによって、界面近傍の希釈塩水がまき上げられる結果となる。ただ、この現象は、河道の界面においては、ほとんど見あたらず、そこでは、やはり、cusped breaking主体の界面破壊が見出される。

3.2 定常河口二層流の微細構造

これまででは、混合の契機となる界面破壊について、定性的ながら、やや詳細にのべてきた。このうち、一時加速域における、まき波による破壊は、二層の混合の様子が明解であり、混合機構についてはこれ以上の知識を必要としない。しかし、cusped breakingやbursting、あるいは、C波直下のスパイラル渦⁹⁾による下層への淡水輸送についての知識は未だ不十分である。この問題は、上層あるいは、下層の微細な流れ構造を調べることによって解決し得る。

まず、流れ構造を $\epsilon \approx 0.005$ の場合について調べてみる($\epsilon < 0.06$ の二層流においては、密度差による、定性的な差異があまりない)。

淡水流量が十分に小さく、淡水の河口流出流況がtype Aを示す条件下では、上下層がともに、水路に平行に流れ、連行層の厚さは、水路の横断方向に一樣で、予想される通り、下層厚さの $1/3$ となっている。写真-7には、実際に、この水路内における成層の表面、界面、無流面がとらえられている。なお、無流面の可視化は、針金に色素を塗布し乾燥させ、これを直立させたまま、水内路を横断させて色素膜を作り若干の時間をおいてか

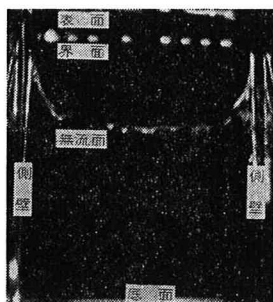


写真-7

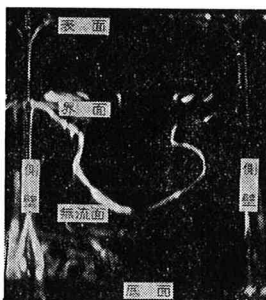


写真-8

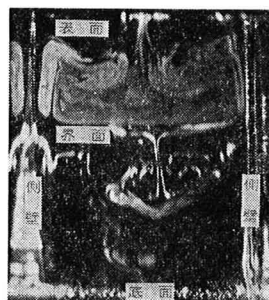


写真-9

ら、スリット光で照らすことにより行なえる。

淡水流量を増加し、type B の流況を実現すると、写真-8のごとく、無流面は水路中央部に窪んだ形になる。この無流面の窪みの原因を調べるため、観察断面より上流域から適当に色素を流して観察すると、写真-9に示す流れ模様が観察できる。これによると、無流面の窪みは、水路長さ方向に回転軸を有する、対をなす渦の発生に起因していることが分かる。なお、無流面より上の上層、及び連行層の流れは、写真の手前から裏側に向かっており、連行層内の左の渦は時計まわり、右の渦は反時計まわりに回転している。さらに、2つの渦の接触部において、主流方向の流速が最大値をとることから、流れ構造の特性を見る限り、従来から知られている単一流体における縦渦に酷似している。

一方、淡水層内の流れ構造について調べると、下層内に縦渦が発生する段階以前に微弱な縦渦が生じ、下層にその渦が発生する段階においては相当に強い回転の渦に発達する(写真-9)。又、この渦は三次元性が強く、その発生は間接的である。



写真-10

写真-10, 11 は、河口から約 10 cm ほど沖合での下層内の無流面をとらえたもので、写真-10 は流出流量が小さい場合、写真-11 は大きい場合に相当している。後者の写真は、河道内同様、沖合であっても、流出流量の増加につれて無流面の窪みの発生することを示してい

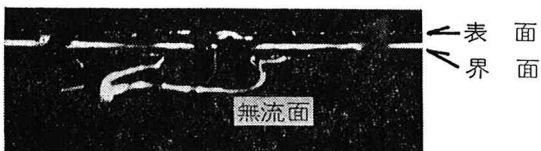


写真-11

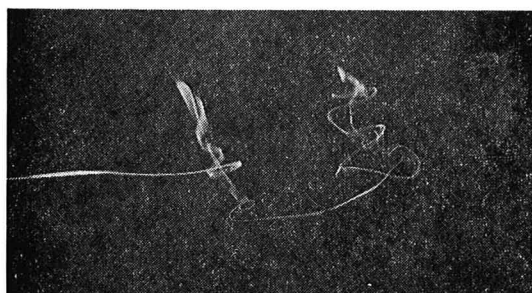


写真-12

る。なお、ここで強調しておきたい点は、界面に波動の生ずる段階においては、縦渦がその影響を受け、複雑な渦構造になるため、無流面の窪みは瞬間的にしか存在し得ず、時間平均の無流面はほぼ水平に近いものとなることである。

以上の流れ構造の観察から、界面破壊によって界面の上、あるいは下に変位した希釈塩水塊は、淡水流量の大きさに応じた強さの縦渦の連行作用によって、さらに界面から遠くへ輸送されることが理解される。

本節の最後に、cusped breaking 後の上層への塩水の輸送に関連して重要なもう一つの現象を明らかにしておこう。この現象は、河道、あるいは、沖合の cusped breaking の本質的な原因となる、淡水内の界面重力波前方のスパイラル渦が、その発生後、短時間のうちに(約 1 秒)水路横断方向にその渦糸をのぼすことに関連している。写真-12 は、ちょうど、沖合の界面に連続的に注入した色素液が、渦糸がのびる際に、スパイラルを描きながら輸送される状況を示している。界面の希釈塩水も同じ経路をたどって輸送されることは、いうまでもない。この現象は、界面破壊そのものが三次元性の強いものであることを示しており、理論解析上重要な意味を有している。

4. 一時加速域における界面の安定性

一時加速域での流速構造の一例を示すと、図-3のごとくである。ここでは、まき波発生のみを考えることと

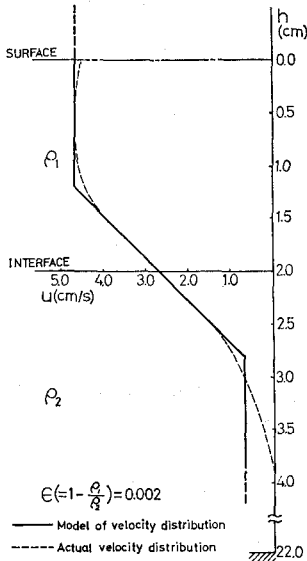


図-3

し、下層密度を一樣とみなす。測定結果(破線)を実線のごとく簡略化し、リチャードソン数 J_0 ⁸⁾ と波数を求めると、図-4 ○を得る。図-4 には、実験結果の他に天塩川における観測結果と Holmboe の理論結果から得た most unstable wave number が同時に示されている。実験、野外、ともに波長の測定に大きな誤差が見込まれ、図の上でも、バラツキが大きい。理論による予測と実際の相異はさほど大きくなく、かなり急勾配な沖合の一時加速域の界面においてさえ、Holmboe の結果が適用し得るといえる。しかし、この理論の欠点は現実に安定な界面に対しても不安定と予測してしまう場合が存

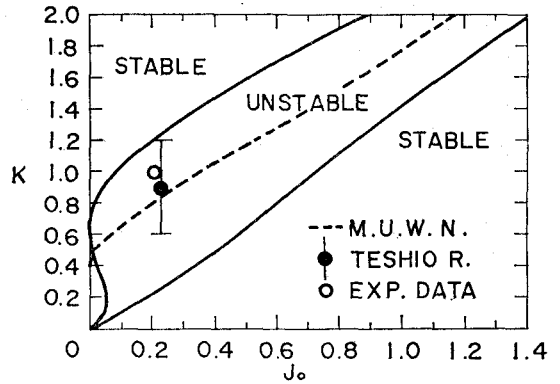


図-4

在することで、今後、粘性等との関連で、不安定波の発生限界を検討してゆく必要がある。

参考文献

- 1) Drazin, P. G. and L. N. Howard: Hydrodynamic stability of parallel flow of inviscid fluid, *Advances in Applied Mechanics*, Vol. 9, pp. 1~89, 1966.
- 2) Kashiwamura, M. and S. Yoshida: Outflow pattern of fresh water issued from a river mouth, *Coast. Eng. in Japan*, Vol. 10, pp. 109~115, 1967.
- 3) Yoshida, S.: On a mechanism for the mixing across density interface, *Coast. Eng. in Japan*, Vol. 20, pp. 7~15, 1977.
- 4) 吉田静男: 密度界面における波動の発生と破壊条件, 第23回水理講演会論文集, pp. 363~368, 1979.
- 5) 吉田静男: 密度界面における混合機構の研究, 土木学会論文報告集, Vol. 273, pp. 59~68, 1978.
- 6) 5) に同じ。
- 7) 林 泰造・山田 正: 開水路における縦渦の形成に関する研究, 第21回水理講演会論文集, pp. 245~253, 1977.
- 8) 1) に同じ。