

淡塩水二層流における界面波と微細流れ構造

田 城 徹 雄*・吉 田 静 男**

1. はじめに

成層密度流の不安定現象についての最近の国内の研究の多くは、二層流の界面の破壊機構に的を絞った取扱をしている。そして、この分野での研究は、密度界面での不安定波の発生から砕波に至るまでの一連の諸現象の発展段階の時系列を明らかにし、いわば定性的な知識は実験的にも理論的にも相当深まったといえる。更に進んだ認識を得るためには、この現象の各々の発展段階での諸現象を支配する物理諸量の定量的な測定が要求され、特に密度界面近くの微細流れ構造について、主として二次元的な定量的観測が行われ始めている。そして、定量的な解析をもとに理論的な検討も行われようとしている。

しかし、詳細な定量的解析に先立って、実験や観測の諸条件を明確にし、区別しなければならない。なぜなら過去の多くの研究結果を検討してみると、様々な条件の下での二層流の界面現象にはいくつかの類似する現象が見出されるものの、それらの現象の発生条件については、大域的な物理量を用いた内部フルード数やクーリガン数などでは一意に決定出来ないからである。定量解析によって得た現象の解析も、一般に制限された適用領域を条件づけられている。

このことに留意し、本研究では、河口二層流の実験装置を用いて塩水楔上の界面の不安定現象を取扱った。そして、流れ場での刻々の局所的な変動に注目して、従来、見出されて来た SVA に随伴する IGW²⁾ と SVB に随伴する IGW (サイクロイド波: C 波)²⁾ の発生機構を明らかにするために界面近傍の微細流れ構造を定量的に測定した。

2. 実験装置、実験条件と実験方法

実験装置は河口二層流型の水理模型を用いており、既報の論文²⁾に記載したものと同一である。装置の概要は、水路部全長 800 cm、幅 50.0 cm、全水深 9.6 cm であり、海相当部は 200 cm×300 cm、全水深 23 cm である。

淡水の給水系統は、オーバーフロー・タンクを持つ給水塔から始まり、オリフィス型流量計を通り、バルブ開度を指示する給水バルブを通して水路部上流端の給水部に導かれている。給水部はほぼ一定の高さの水面を保つために低い堰を持っており、給水はこれをわずかに越流して水路部に入る。給水部は一定の整流作用を持っているが、更に水路部の最上流部には、厚さ 0.1 cm のアクリル板を長さ 200 cm にわたり幅 10.0 cm 間隔で設置し、整流を行っている。

実験の開始に先立ち、密度 1.0033 g/cm^3 の塩水を湛え静置したのち、上流から一定流量の淡水を供給して河口二層流を作り出している。この実験装置系は、定常性が良く制御が正確に行えるので、同じ実験条件の再現は容易である。

流れの可視化法としては、新たに色素を糸に浸み込ませ乾燥させて、これを流水中に張り流れに応じた速度で静かに巻取ることによって、流れ場を乱すことのない色付流面を作り出す装置を使用した。この装置はカムにより色素糸に任意の時間間隔の微小なパルス振動を与えることができるようになっていて、速度分布を得るためにも用いた。

また、流れ場や界面波の観測には、従来の吉田らによるスリット光法の他に、フィルター付ストロボ光源、及び、ブラックライトを照射光とする可視化法を新たに用いた。特に、ブラックライトは色素糸による色付流面の可視化法や、塩水楔先端の上流の河床に色素を全面塗布する界面可視化法などでは、効果的で、非常に鮮明な像を得ることができた。

一方、上記の方法で流れ場を可視化して観測しながら、同時に定量的な測定を行うために、準素子型 LDV を使用した。この装置は、受光部が素子型になっていて、ファイバーによって受光されるものであって完全な素子型ではない。なお、回散転乱板によってレーザー光にドップラー・シフトを与えているので、流向の判別も容易であり、二つの方向の速度を同時に測定できる。この LDV の光学系と測定原理については吉田・塚田の論文³⁾に述べられているので説明を省く。その他、電気抵抗式界面波高計、流し撮りカメラ等を用いた。

* 学生会員 北海道大学大学院機械工学第二専攻

** 正 会 員 工博 北海道大学助教授 工学部数物系共通講座

3. 実験結果

従来の吉田らの研究により河口二層流型の成層密度流の様々な沈況や界面現象が明らかにされて来た。その中で、今回の研究と関連して特に重要な結果は、ほとんどの界面現象が各層内に生じる集中性の強い渦によって引起されているという点である。

河口二層流において、特徴的な界面現象は3つのステージをとって立現われる。この3つのステージにそれぞれ対応する淡水流量の領域値があり、それぞれに特徴的な流速構造を持つ。ここでは先づ、淡水厚を全水深にとった塩水楔先端の大域的な岩崎数 ϕ_L を用いて分類し、それぞれに対応する典型例について実験結果を示す。

3.1 $\phi_L = 3.51 \times 10^{-5}$

この条件下では、淡水層は非常に薄く、塩水楔先端は淡水流入堰のすぐ近くにあって、主流は特別な構造を持たず一様に流下する二次元的な流れである。

写真-1 は河口上流 314 cm の位置において、色素糸によって着色された、水面下 0.75 cm の界面の流れ模様である。色素糸のパルス振動間隔は 10 sec である。界面の速度分布はこの写真から得ることができて 図-1 に

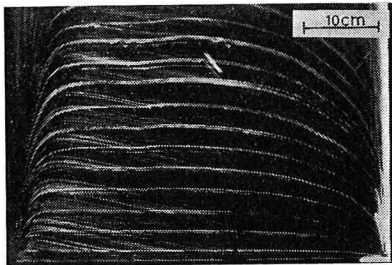


写真-1

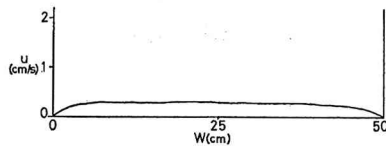


図-1

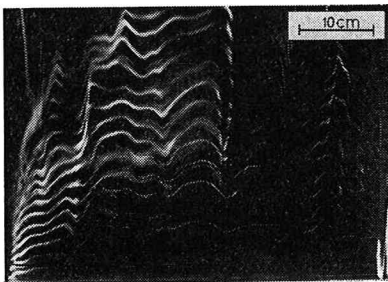


写真-2

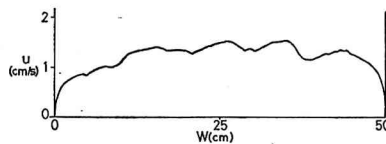


図-2

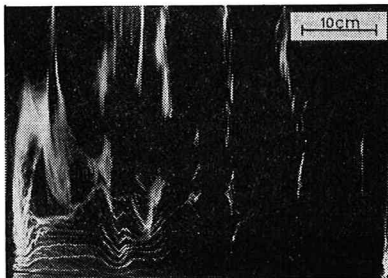


写真-3

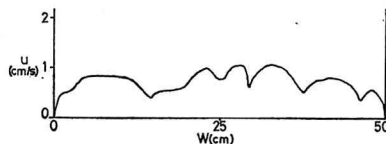


図-3

示すとうりである。なお、流速分布が左右非対称なのは海相当部の広い水槽からの越流の不均一によるものと思われる。垂直流速分布は界面のすぐ近くで最大となる。

3.2 $\phi_L = 4.51 \times 10^0$

このステージでは河口付近の一時加速領域に、最初に SVB に随伴する IGW (サイクロイド波) が発生する。

写真-2 は、このときの水深 4.6 cm の界面を同様に可視化して撮影したものである。色素糸のパルス振動間隔は 2 sec である。この写真から、界面に定在する速度分布のむらが発生しているのを見てとることができる。サイクロイド波は、界面の速度の早い帯状の部分に発生する。得られたデータと観測を照合すると、水路の中央部付近では塩水楔内部のカウンターフローがない場合さえある。このとき、水路の兩岸の壁近くでカウンタフローが卓越するのが観測される。そして、河口で発生したサイクロイド波の発生域は、水路の壁近くの兩岸に沿って上流に遡上する。この現象は、吉田の指摘したサイクロイド波の発生機構を反映しており、カウンタフローによる擾乱が支配的な場合にも、連行層内部に剪断流不安定が発生し SVB に発達すると直上の界面に C 波を随伴するに至るものである。この現象は 8 cm 幅の水路でも見られ、一定幅以上の距離断面水路における一般的現象といえる。

このステージにおける流れ模様と水路中央部での界面の速度の早い位置での垂直速度分布を 図-2、図-3 に

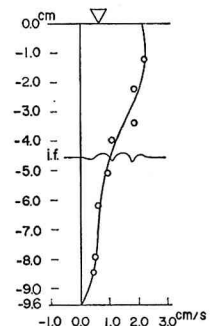


図-3

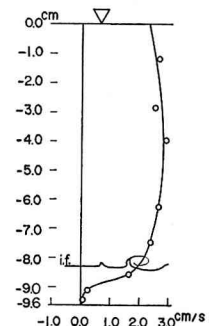


図-4



図-5

示す。このデータは河口から 103.5 cm 上流で、LDV により得られたものである。このデータには塩水楔内のカウンターフローは見られない。

3.3 $\phi_L = 1.79 \times 10^2$

このステージでは、SVA に随伴する IGW が塩水楔先端部に発生し、下流に伝播して、そこに定在するサイクロイド波と重畳して cusped breaking を起すに至る。

このとき塩水楔先端は河口から約 300 cm 上流まで後退して、準定常状態となる。このあと塩水楔先端は、1 時間に 50 cm 程度後退するにすぎない状態に入る。種々の測定に要する時間は 10 分を越えることがないので、測定時間にわたり二層流は定常状態とみなしてよい。

さて、前二例と同様に界面の流れ模様を示すと、図 4 となる。

写真—3 は色素糸に 2 sec のパルス振動を与えて撮影したものである。主流の流速の増大と共に縦縞がより多く発生し、縞のパターンも変化しやすくなっているのが見られる。界面の速度の遅い部分にとり残された色素の縞が、このパターンを強調して見せているが、界面のこの部分は峰をなして盛上っているのが観察される。逆に界面の速度の早い部分は界面の谷をなしてへこんでいる。SVA に随伴する IGW は塩水楔先端部の界面の谷に発生する。次節で、この界面の変形が主流に定在する縦渦によって作り出されたものであることを明らかにする。

図—5 は LDV による垂直流速分布で、塩水楔厚さは 1.3 cm、測定位置は塩水楔先端から 73 cm 下流である。

4. 解 析

4.1 擾乱発生機構

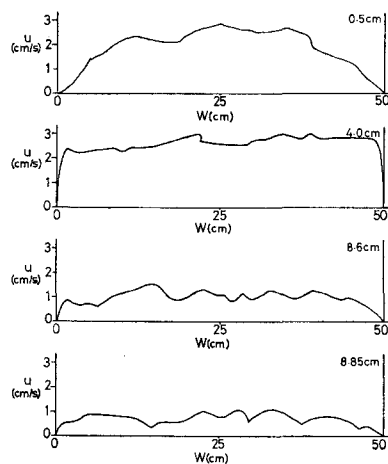
不安定波が密度界面に発生するのは、次第に主流の流速を増していき、ある速度分布を持つ剪断流場となった段階である。このとき、本実験装置では岩崎数 $\phi_L \geq 1$ に相当し、サイクロイド波の発生が見られるのは既に述べた通りであるが、これに先立って界面に速度分布のむらが発生する。この速度分布のむらは ϕ_L が 10^{-5} の様な値をとる微小流量のときにはない。勿論、このとき界面に不安定波はない。流れ場を攪乱して不安定に至らしめる擾乱は、この界面に現われた速度分布のむらと密接な関係がある。

この界面の速度分布のむらは、勿論、主流の流速構造によって生じたものに他ならない。そこで、流量が大きく ϕ_L が 2×10^2 程度の流れについて観察した例を示す。主流の速度分布のむらはすでに塩水楔の上流で発生しており、パターンを変えることなく塩水楔先端に乗上げる。この様子を概念的に説明すると、塩水楔の先端は河床面で波状を呈しており、塩水楔の界面は、主流の速度の早い部分（以後、速度ピークと表現する。）で界面の谷を、

主流の速度の遅い部分（以後、速度バレーと表現する。）で界面の峰を、それぞれ形作っている。界面の峰と谷の出現数は、すでに指摘したとおり速度が増大すると共に狭い間隔で多数出現する様になるが、そのパターンはやはり保持される。そして、SVA に随伴する IGW とサイクロイド波がこの界面の谷に発生するのであるから、不安定波の発生の機構を明らかにするためには、これをもたらし主流の流れ構造を明らかにしなければならない。

この主流に存在する速度分布のむらは、水路の上流部に置いた整流板によって生じたものではない。このことは、整流板を取去っても、速度分布のパターンは消去しないことから明白である。

次いで、主流の速度分布のむらを界面から自由表面まで追跡して観測した結果を、整理して図—6 に示す。こ



図—6

こに界面上の速度パターンは、界面直上の主流の速度パターンと当然一致し、淡水の半ほどの深さで速度パターンの対応を失い、自由表面近くで再び界面で見られる速度パターンに回復していることが分る。注意すべきことは、この速度分布のむらのパターンは、それぞれの水深で、水平に張られた色素糸から出発した色付流面のフロントの平面図であって、速度分布そのものを表してはいないことである。特に図—6 の水深 4.0 cm の速度パターンは、上下に波打ち複雑な空間曲線となった色付流面のフロントの平面図を表している。このことに注意して観察すると、この一連の速度パターンが主流に存在する縦渦が作り出したものであることが見てとれる。この主流の縦渦は、この例では界面の峰と峰との間にペアとなって存在し、界面の谷（速度ピーク）で主流の大きな運動量を下降流に乗せて運び、界面の谷に強い剪断流場を作り出す。こうして界面の谷は相対的に早い速度分布を常に与えられている。このことは、界面の峰（速度バレー）の上方に定在する上昇流のもたらす、相対的に遅い速度

分布によって強調される。

まさに安定性を失おうとしている界面近傍の剪断流場に加えられる主流の擾乱は、この縦渦構造を持つ主流に間欠的に発生する。それは、界面の谷の上方にあるペア渦を巻込む集中性の強い渦であり、主流に直交する軸を持っていて、渦糸は、界面の相隣る二つの峰の一方から始まり他方で終る。

この主流のもたらす擾乱によって、界面の谷に、SVAに随伴するIGWが発生する。この不安定波の発生を撮影したのが写真-4である。これは、塩水楔の上端部上流に垂直に張った色素糸を一定時間間隔でパルス振動させ、SVAに随伴するIGW発生時の、主流擾乱の渦構造、剪断流速度場の形状、界面形状の変形と、SVA及び随伴するIGWを写し出している。

主流の擾乱そのものであるこの集中渦は、色素糸による可視化法他に、界面の谷の上方に設置した一本の注射針から連続して出される色素によって作られた色付流線によっても観測できる。この場合は色付流線の急勾配を持った下方へのたなびきとして観察される。

更に、この事情を一層明瞭にするために、塩水楔の先端より上流の河床に色素を全面塗布して観察する。このとき、界面の峰の上に特殊な色付流面が形成される。これは、主流擾乱の発展過程の明瞭なトレーサである。

ここで注意すべきことは、色付流面の見せる渦構造が必しも流体粒子の渦運動を意味しないことである。

上記の諸現象の生じている剪断流場の速度と速度変動の垂直分布を、LDVによって測定した結果を図-7に示す。図-7から可視化によって得た知見と矛盾しない、可能な速度勾配の幅を読取ることが出来る。これ

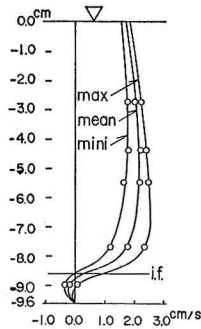


図-7

から、界面での局所リチャードソン数を求めると $J = \epsilon g L / U^2$ (L : 剪断層厚さ, U : 平均速度差) $= 2.38 \sim 0.30$ となり、速度場は平均流速場では安定限界にあり、瞬間的には不安定となり得ることを示している。ここに、いわば局所瞬間リチャードソン数と呼ぶべきリチャードソン数が存在する。これは主流の擾乱によって帰結されたものである。ここに主流の擾乱は縦渦構造を持つ流れ構造の中に発生し、搬ばれて、界面近傍の速度勾配を増大

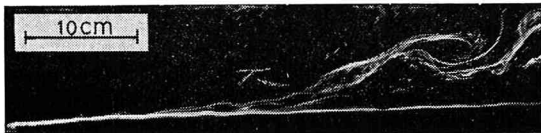


写真-4

させ、不安定波を発生させ SVA を形成させるに至る過程が、定量的に示された。この SVA が密度界面に IGW を発生させるのである。

今一つの注目すべき事実は、主流の擾乱をもたらした渦のスケールは、あまり大きくはなり得ず全水深よりもかなり小さい。従って、SVA の発生領域も、従ってまた IGW の発生領域も、やはり同程度のスケールであって、最初に発生する IGW は短い波群をなす。この事情の詳細については次に述べる。

4.2 界面波の伝播特性

ここでは、コヒーレント構造の渦 SVA に随伴する IGW の形状と伝播特性について述べる。写真-5 は流し撮り法による前者の波形を示している。ストロボ間隔は 5/12 sec であり、IGW の成長と破壊の過程がよく分

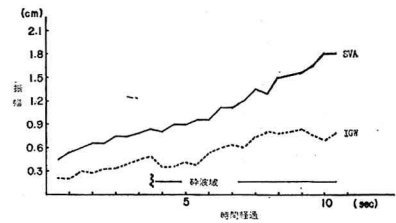


図-8

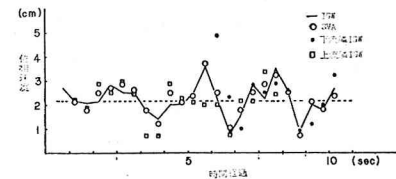


図-9

る。又、SVA, IGW の振幅を測定して図-8を得る。図-9 はそれらの位相速度と、その相隣る IGW との位相速度が示されている。これらの結果から SVA は発生後なめらかに、加速的に成長すること、随伴する IGW のカスプを除去した波高はほぼ直線的に増加すること、SVA の位相速度は大きく変動し、その傾向は随伴する IGW と良い相関を示すことが分る。SVA に随伴しない IGW の位相速度はこれ程変動しない。ここに、既に知られている、SVA に随伴する IGW の SVA に対する定性的な従属性を定量的に示し得た。

写真-5 からは、いち早く成長した IGW の上、下流に新たな IGW が発生することが明らかになる。この様子を観測するために二つの界面波高計を設置し記録した。そのデータからは、発生した IGW は下流に向うにつれて上下流に広がり、全体としては wave packet をなして伝播することが分る。この傾向は常に見出され、単一の IGW だけが生じ、伝播することはない。

再び、図-8 に注目すると、SVA と IGW の増幅率は時間をさかのぼるにつれて、ほぼ同一になっていくこ

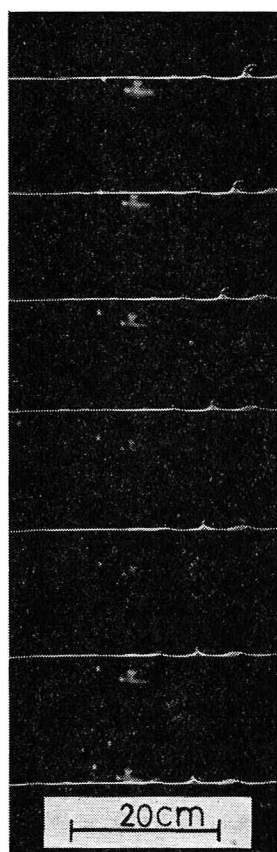


写真-5

とに気づく。このことから、IGW の発生初期の増幅率が SVA に発達するまでの critical level における、波動の成長率と大差ないものとみなし、IGW の発生初期の成長率を求めてみる。図-10 は、モータードライブカメラを用い、IGW の発生域で撮影した写真から読みとった結果である。測定位置は塩水楔先端より 40 cm 下流であり、そこでの塩水楔厚さは 1.0 cm、塩水楔先端は河口から 286 cm にある。図-10 からは波高の増加につれて、位相速度も次第に増すことや、新たな IGW の発生の様

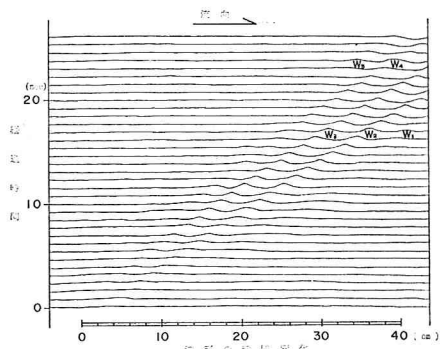


図-10 波形の時間変化

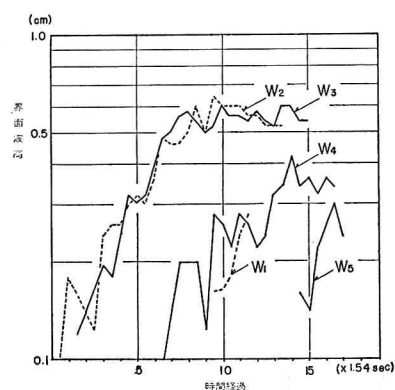


図-11

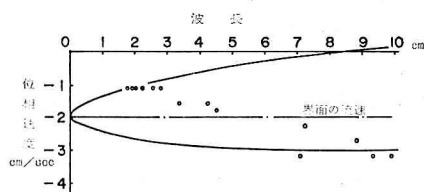


図-12

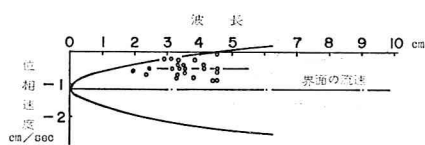


図-13

子が明確に捉えられている。振幅の時間的变化は図-11 に示すとうりて、図中の番号は図-10 の IGW の番号に対応している。この結果を用いると IGW の発生初期の増幅率は 0.09~0.2 の程度であることが分る。

図-12、図-13 はそれぞれ SVA と SVB に随伴する IGW の位相速度の分散関係が示されている。図中の実線はそれぞれ図-5 と、3 の速度分布を折線近似して得た理論曲線である。これらを見ると、白ぬきの測定結果と理論値との一致はよくない。この理由は、SVA や SVB の存在によるものである可能性が強い。

5. 謝 辞

この研究の遂行にあたり、多大の協力と寄与をいただいた、本講座大学院生大内利友君に深甚の謝意を表して謝辞とします。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 吉田静男・西田修三・田城徹雄：定常二層流の三次元混合過程，第 28 回海岸工学講演会論文集，pp. 525~529，1981.
- 3) 吉田静男・塚田昌司：水流流速測定に用いる光学的手法の改良，第 26 回水理講演会，pp. 489~494，1982.