

定常二層流の三次元混合過程

吉田 静男*・西田 修三**・田城 徹雄***

1. はじめに

過去数年間に、二層流の混合機構に関する研究が活発に行なわれ^{1)~6)}、断片的ながら、界面現象に関する多くの知見が得られている。中でも、界面に近い、上・下層に生じるスパイラル渦と、河口沖合の一時加速域などの、強い、せん断流を有する界面に見られ、中心が界面に位置する、スパイラル渦が、主として、界面破壊に寄与するという結論は重要と思われる。本論文は、従来の研究が、断片的、且、二次元的であることに注目し、下層水が上層に拡散するまでの、一連の、過程を、三次元的に検討したものである。なお、以下の記述において、幾つかの種類の波と渦が出てくるので、まぎらわしさを避けるため、あらかじめ、次の様に略記する。

- IGW : Interfacial gravity wave (界面重力波)
- SVA : Spiral vortex above interface (界面より上のせん断流不安定により生ずるスパイラル渦)
- SVB : Spiral vortex beneath interface (界面より下のせん断流不安定により生ずるスパイラル渦)
- SVC : Spiral vortex the center of which coincides with interface (界面に中心をもつスパイラル渦)

2. 実験方法

三次元的な界面現象を検討するには、水路幅を、十分広くする必要がある。そこで、図-1 に示す、下流端が広い水槽と連絡する、幅 50 cm の水路を用いて実験を

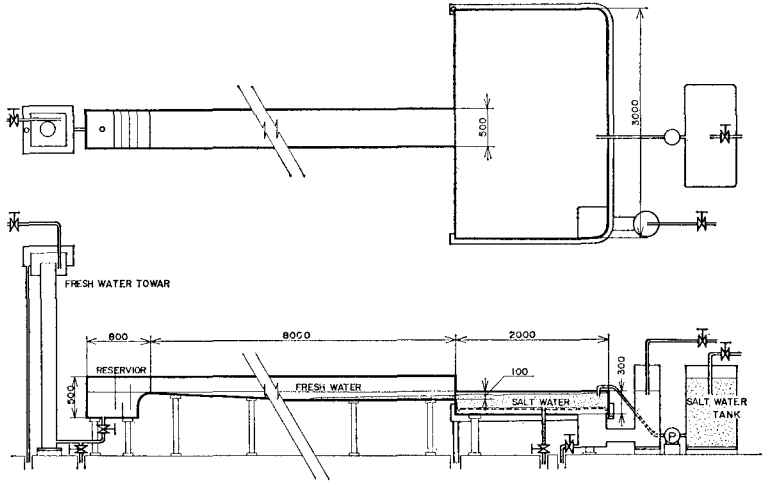


図-1 実験水槽 (数値単位 mm)

行なった。二層流は、あらかじめ、水槽に塩水をため、水路上流端から淡水を供給して作り出しているので、ほぼ、河口二層流である。なお、全水深は 10.0 cm とし、上層淡水の水温は約 12℃、下層塩水の密度は 1.003, 1.007 g/cm³ の 2 種類とした。又、流況や界面変動の観測は色素法によったが、対象とする現象を良く把握できる様に、適宜、色素の注入法を工夫した。その、具体的な、内容については、後に、写真を示す際に説明する。

淡水層の平均流速分布と各点での流速変動については、図-2 に示した、小さな、光学系を有する、素子型 LDV を用い、参照光法で測定した。なお、その時の信号はカウンタタイプ信号処理器で処理された。一方、界面の変動や各点での塩分は、平行金属線や白金電極を用いて測定した。そして、更に、流れによる圧力変動を測定するために、ダイヤフラム型の半導体圧力素子も使用した。

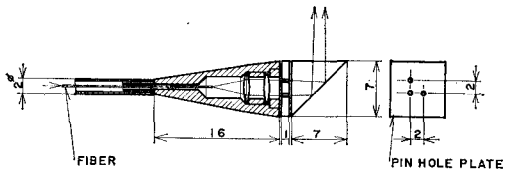


図-2 素子型 LDV 光学系 (数値単位 mm)

* 正 会 員 工博 北海道大学講師 工学部数物系共通工業力学第二講座
** 学生会員 北海道大学大学院工学研究科博士課程応用物理学専攻 工業力学第二講座
*** 学生会員 北海道大学大学院工学研究科博士課程機械工学専攻工業力学第二講座

3. 実験結果及び解析

(1) 上層流速変動及び界面水位変動

まず、従来の狭い水路での界面現象との差異を見るため、徐々に、淡水を増加させ、IGW が最初に現われる水理条件を調べた。その結果、河口クーリガン数、 θ 、と代表長さを淡水厚さにとったレイノルズ数、 R_h 、がそれぞれ、 $\theta \leq 0.11$ 、 $R_h \geq 1100$ のとき、塩水楔先端から、河口に至る、全界面で、IGW の発生が認められた。この臨界値は、Ippen-Harleman⁷⁾ の界面破壊限界、及び、Keulegan⁸⁾ の砕波限界のデータの最小の θ 、 R_h に、ほぼ、一致する。又、筆者らの幅 8 cm の水路を用いた実験結果⁹⁾ と比較しても、大差はなく、この段階では、水路拡幅による効果が、ほとんど、認められなかった。なお、このときの河口内部フルード数は 1.09 であったから、流れは、完全な、河口二層流になっていたと見てよい。次に、流量を増し、下層塩水の供給をすることなしに、楔全長を 1.0 m に保ち続けた。このようにすると、

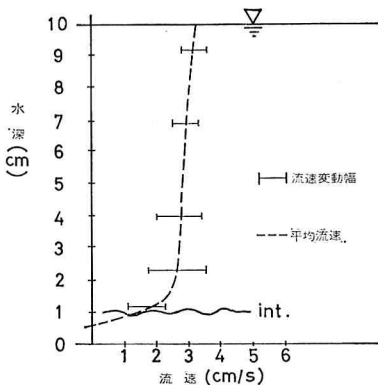


図-3 平均流速

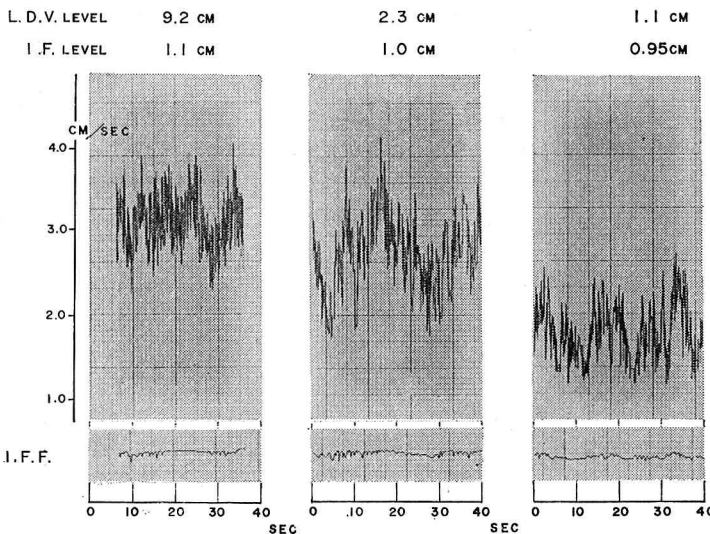


図-4 流速変動(上)及び界面水位変動(下)

次第に、塩水水位が下がり、河口での内部フルード数も 1 以下となってくるが、そのうち、長時間にわたって、準定常流が維持されるようになる。これは、広い水槽からの、直接的な、下層水流出が完了するためである。この様に、楔を短くした理由は、楔先端から、サイクロイド波の発生領域までの距離を、できるだけ広げ、IGW のみの成長観測を、容易にするためである。この状態で、楔先端から 20 cm 下流地点で、鉛直方向の流速分布と、水深 9.20, 2.30, 1.15 cm における流速と界面水位変動の測定を行なった。図-3, 4 は、これらの結果である。なお、この位置では、 $\theta=0.12$ 、 $R_h=2138$ 、下層密度は 1.003 g/cm^3 であった。この結果からは、流速変動に関する、いくつかの、特徴を見出すことができる。まず、水表面から、界面に近づくにつれ、流速変動幅が、著しく、増大すること、流速変動と間接的な波群の発生との間には、流速が大きい時間帯に波群が発生するという相関のあることが認められる。しかし、更に、重要な事は、界面近傍の流速変動が、界面波にもとずくと考えるには、あまりにも、大きすぎる点である。そこで、次に、この大きな流速変動を生じる原因を明らかにすべく、流れを可視化して観察してみた。その結果、界面近くの淡水中に発生するスパイラル渦によって、IGW が、楔先端のわずかに下流で生じ、以後、次第に成長し、ある程度成長した時点で、急に砕波すること、そして、上記の大きな流速変動は、この SVA の循環流による事、等が明らかになった。以下、流れの可視化と諸量の実測を通して知り得た、IGW の発生から、破壊に至る過程を、詳細に、記述してみる。

(2) IGW の発生機構

IGW は、界面近くで物体を振動させても、又、柱状物体を界面上適切な位置に設置して、後流に放出される

カルマン渦で界面を刺激しても、発生させ得る。この前者の機構は圧力変動に対する共鳴であり、後者のそれは渦の強い循環流による連行作用である。当面の IGW の発生には、これら二つの機構が関連している様に思われる。

まず、楔先端近くでの IGW の発生状況から記述すると、主流の変動が小さく、写真-1 (色素を含んだ糸を水平、且、流れに垂直に張る可視化法を用いた) のごとく、ほぼ、水平な流れであったり、界面から遠ざかる方向に変動する流れの存在するときには、IGW は発生しない。しかし、写真-2 のごとく、一部分でも、界面に向かって降下する流れ



写真-1

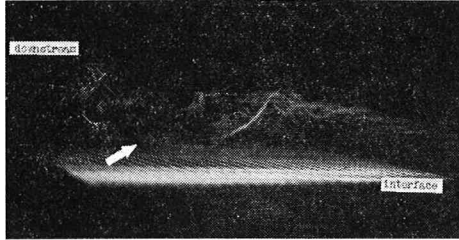


写真-2

の存在する場合には、高い確率で IGW が発生する。なお、降下流の存在は、下層に圧力を及ぼすことを示しているが、この事実も、水路床に取付けた圧力素子による圧力変動の測定によって、確かめられている。最初に生じる IGW の波長は、見きわめ難いが、一般に長く、波形は不規則で、波高は 1mm 以下と、微小である。ここで、強調すべきことは、この IGW は、将来、成長して砕波するわけではないという事である。砕波に関する界面波は、上記の IGW による攪乱と、乱流により、一時的、且、局所的に発生した強い、せん断流が不安定となり、コヒーレント構造を有するスパイラル渦、すなわち、SVA の循環流に影響されて生じる。この波は、ちょうど、サイクロイド波が SVB による界面変形であるのと同様、SVA による界面変形と見ることができる。実際に、その位相速度は SVA のものと一致し、SVA を伴わない IGW のものとは異なっている。従って、本来の IGW とは区別すべきと思われるが、従来から、この波を界面波と呼んでいるので、ここでは、SVA に随伴する IGW と呼んでおく。

この SVA に随伴する IGW は、先に生じた IGW とは異なり、波形は規則的で、その頂点を境に、上・下流方向に、ほぼ、対称な断面形状を有している。しかし、SVA の軸は直線的でないことが多く、写真-3 (界面全体に色素が広がる様に、楔先端から上流の水路床に色素を塗布する可視化法を用いている) に示すような、弧を描く峰の IGW を見出すのが普通である。図-4 にも示した様に、この波は、通常、ピート信号に似た波群となるが、この理由は、せん断流の不安定領域が、ある程度、広がりを持っているためと考えられる。すなわち、最も不安定な位置で SVA が、まず、発生し、次いで、その渦に隣接する流れが不安定になってゆくためと思われる。

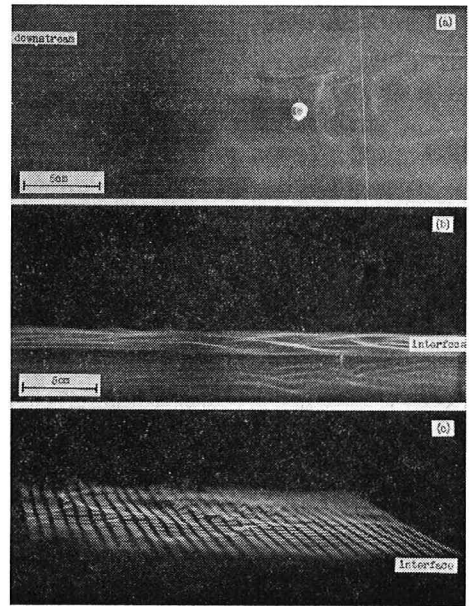


写真-3

る。このような機構で生じる IGW の峰の長さ方向は、変動流の方向と、ほぼ、直交する。従って、別個の IGW 群の進行方向は、通常、一致せず、しばしば、異なる IGW 群間の重量を見出すことができる。

(3) SVA に随伴する IGW の成長-破壊過程

SVA により誘発される IGW の成長は、専ら、SVA



図-5 SVA と IGW の成長過程

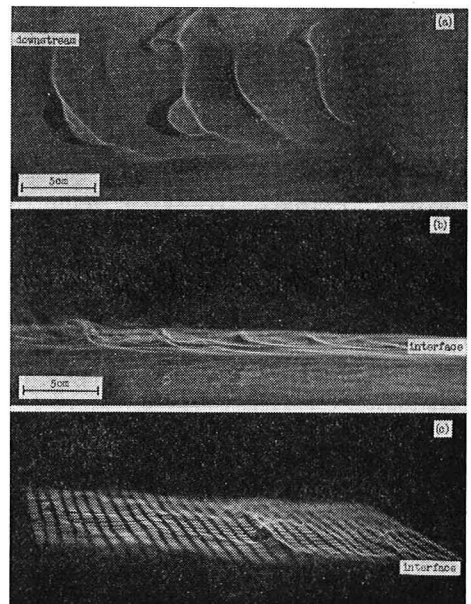


写真-4

の成長に依存する。図-5 には、その成長の一例が示されているが、これより、実際の成長の度合を知ることができる。しかし、IGW の成長には、限度があって、楔先端から、30~40 cm 下流域で、写真-4 に示す様に、突然砕波する。これは、まさに、cusped breaking 現象であり、幅 8 cm の水路実験では、IGW がサイクロイド波と重畳する際に見出されたものである。この砕波は、実に、なめらかに、IGW の峰が引きのぼされる形で実現するが、砕波のフロントは鋭く、長さ方向形状は、SVA の三次元的な成長のため、舌状になることが多い。しかし、砕波する峰の部分は、IGW の峰が直線に近い程広くなり、フロントの長さ方向形状も直線的となる。この場合には、現象の二次元性が、ほぼ、保証されるが、それでも、峰の全長は 5~10 cm 程度にしかならないことに注意する必要がある。ところで、このときの砕波は、SVA がその中心を、

あまり、上昇させぬまま、非線型的な成長を続けるため、界面自体が SVA に連行され、その渦の外殻を構成することに基づくもので、風成水波の砕波とは、かなり、異なる性質を有している。多くの cusped breaking 現象を観察すると、更に、興味深い事実を見出せる。それは、図-6、B に示す様に、IGW の峰が、SVA の成長につれ

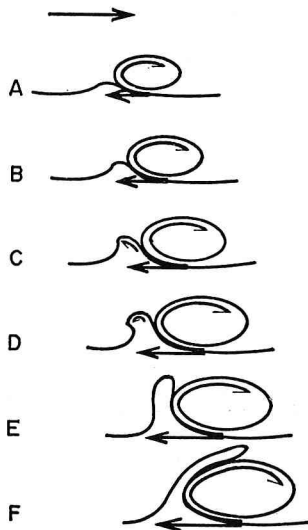


図-6

て、上流側に傾倒してくるという、一見、矛盾した現象である。この理由は、次のとおりである。SVA は、長波の IGW や、上層乱れによって時おり、その中心位置をずらしたり、自身の循環を強めたりする。このとき、界面直下、すなわち、連行層の上層部が減速し、それがもとで図-6、B の状態が作られる。さらに循環流が強い場合には、図-6、D に示す様な SVA と逆回転の循環を有するスパイラル渦が IGW の山頂部付近に生じ、続いて、SVA による連行によって、図-6、F、及び、写真-5 に示す、鎌首状の cusped breaking に発展する。このときのフロントには Head が形成され、その断面形状は丸味をおびているので、視覚的にも、明瞭な砕波形状となる。

このような現象を見ると、IGW が、いかに、SVA に従属的であるかがうかがえる。



写真-5

(4) SVA にに伴する IGW の成長停止

前節に述べた SVA の成長が、そのままの勢で続くなれば、やがて、Thorpe¹⁰⁾ が観察したスパイラル渦 (SVC) の発生を見るであろう。しかし、SVA の循環速度は、SVA の伸長が観測されないことから、せいぜい、主流々速程度であり、仮に、主流内に、時折、発生する、集中性の強い渦によって加速されるとしても、逆に、必らず、主流を加速する時期があり、又、更に、粘性とか、下層水を吸い上げる際に、運動エネルギーが失われるといった、減衰効果のため、その成長には限度がある。今回の実験では、実際、縦 1.7 cm、横 3.5 cm の径以上の SVA は発見されていない。しかし、流れ場が、下流ほど、強いせん断流となっているため、cusped breaking を担った SVA は、その後も、IGW に附随し、やがて、サイクロイド波発生界面に到達する。

(5) サイクロイド波発生界面での砕波機構

写真-6 はこの段階の界面破壊をとらえたものである。この段階では、IGW がサイクロイド波上を、上下に振動しながら伝播することによる、様々な、砕波機構が見出せる。例えば、① SVA が、この領域に突入して、著しい、成長をとげることによる cusped breaking

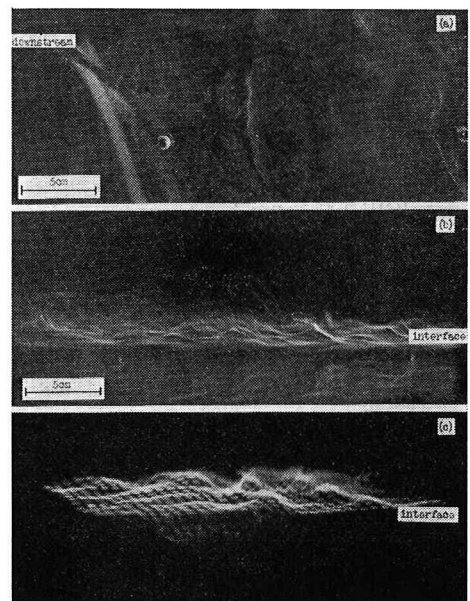


写真-6

② SVA がサイクロイド波の短い峰を通過するとき、その軸が、鉛直方向に曲げられるための、あたかも、海上のたつ巻の様な塩水の吸い上げ ③ SVA と近傍のスパイラル渦とのペアリング現象がもたらす cusped breaking ④ サイクロイド波上のせん断流不安定により生じた、新たな SVA による cusped breaking, 等 SVA の成長にもとづくものがある。又、この他、SVA によらない、この過程特有の機構もある。これは、IGW が、サイクロイド波の谷から山にかけて、大きな、鉛直方向の加速度を得、その程度が、最も著しい峰が IGW から分離してしまうもの

である(図-7)。この機構によって、ひきちぎられた塩水塊



図-7

は、もとの IGW の峰とはなり得ず、周囲の流れに連行される。この様に、この段階では、多種多様な、界面破壊の機構が見られるが、主要なものは、やはり、SVA にもとづく cusped breaking である。

(6) 上層へ下層水輸送機構

上述の界面破壊は、二層が混合するための必要条件とはなり得るが、十分条件とはならない。二層が混合するためには、界面破壊機構によってひきちぎられた水塊を、更に、遠方に輸送する機構(External mixing mechanism)が必要である。この機構の一例としては、従来、縦渦による連行が指摘されてきた¹¹⁾。しかし、今回の実験によれば、更に、様々な回転軸を有する、集中性をおびた渦による連行の重要性が指摘できる(写真-7: 色素を含んだ糸を鉛直方向に張る可視化法によった)。なお、上層の渦による色素の連行を、即座に、塩水の輸送としてよい事は、電極を用いた伝導度の測定によって確かめられている。

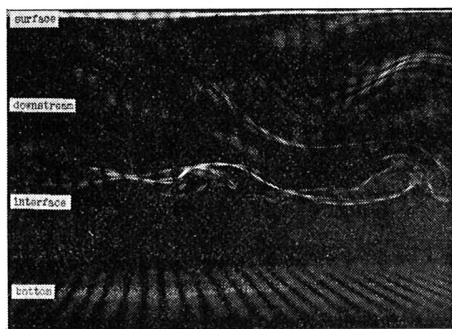


写真-7

4. おわりに

本研究において、内部フルード数が1以下の二層流の上層に、下層水が混入するまでの、三次元過程が詳細に

調べられた。その結果、界面破壊は、主として、せん断流不安定により生ずる、コヒーレント構造を有する渦(SVA)によっており、主流の乱れは、その渦の発生のトリガーであると同時に、界面での破壊水塊を上層に輸送する役割をはたしている事が明らかになった。これらの事実は、いずれも、混合における、流れ構造の重要性を示すもので、従来の結果をも加えて考察すると、下層密度の選択や、流れ規模によって、界面現象は、様々に変わるであろうと予想できる。かつて筆者の一人は、平水時より一段と流量の多い天塩川で Thorpe の見た様な SVC の存在を確め、D. M. Farmer は、ある河川で、SVA の存在を確認している(私信)。これらの結果は、野外の河口流にも、室内規模の河口流と類似の界面現象のあることを示していて興味深い。しかし、筆者らの、石狩川河口での水中テレビカメラを用いた界面現象の観測においては、混合層の発達のためか、あるいは、他の要因のためか、サイクロイド波の存在さえ確認されていない。これは、やはり、流れのスケールによる相異が現われたことによる様に思われ、今後、更に、流れのスケールを考慮した実験、あるいは、野外での直接観測が行なわれる必要があると考える。

参考文献

- 1) Yoshida, S.: On a mechanism for breaking of interfacial waves, *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 20, pp. 7~15, 1977.
- 2) 室田 明・平田健正: 成層密度流における内部波特性と混合機構について, 第22回水理講演会論文集, pp. 107~112, 1978.
- 3) 谷 一郎編(日野幹雄執筆): 流体力学の進歩 乱流, 丸善, pp. 177~219, 1981.
- 4) 本間 仁・林 泰造編(岩崎敏夫・玉井信行・大西外明執筆): 続水理学, 丸善, pp. 97~142, 1980.
- 5) Hino, M., S. H. Nguyen and K. Nakamura: Entrainment and friction at the interface of salt wedge, *Proceedings of 2nd Int. Symposium on Stratified Flows*, Vol. 2, pp. 763~782.
- 6) Yoshida, S.: Mixing mechanisms of density current system at a river mouth, *Proceedings of 2nd Int. Symposium on Stratified Flows*, Vol. 2, pp. 1062~1073.
- 7) 本間 仁・安芸皎一編: 物部水理学, 岩波書店, 645 p., 1962.
- 8) Keulegan, G. H.: Interfacial instability and mixing in stratified flows, *N.B.S.*, pp. 487~500, 1949.
- 9) 吉田静男・田城徹雄・西田修三: 河口二層流の混合機構に関する実験的研究 I, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 554~558, 1979.
- 10) Thorpe, S. A.: Experiments on the instability of stratified shear flows: miscible fluid, *J.F.M.* Vol. 46, pp. 299~319, 1971.
- 11) 9) に同じ。