

河口二層流の流速構造と界面現象 VELOCITY STRUCTURE AND INTERFACIAL PHENOMENA OF TWO-LAYER FLOW SYSTEM AT A RIVER MOUTH

北海道大学工学部 正会員 吉田 静 男
北海道大学工学部 正会員 柏村 正 和
北海道大学工学部 学生会員 ○西田 修 三

1. 序 文

柏村・吉田¹⁾による河口二層流に関する一連の研究は、定性的ながら、定常、非定常を通じた、河川水と海水の相互作用に関する多くの知識を与えている。勿論、流速構造についても、その概略を知ることができる。たとえば、河道内における、特に塩水楔内での界面近傍の流速は、主流を横断する方向に分布しており、特に、実験水路の場合で流出淡水流量の小さい間は、水路内の流心の鉛直方向の流速分布を、流れの代表とし得ない場合のあること、あるいは、河口沖合では、上層の鉛直方向での最大流速値が、一時的に加速される場所が、必ず、存在するといったこと等が特筆すべきものであろう。しかし、現時点における河口密度流の研究は、柏村²⁾や玉井³⁾の研究にみられるように、河道から沖合にわたる全成層域にN-S方程式を適用し、一挙に流れ構造を解明する準備段階をむかえているといえ、従来のような、断片的な流れに関する知識だけでなく、ある水理条件下における、ほぼ同一時刻における、全成層域の流速構造をも把握しておく必要が生じてきている。一方、この新たな研究動向と密接な関係を有するのが、河口における F_i (内部フルード数)の問題であり、現在やはり河口密度流の中心課題となりつつあるが、これも又、河道から沖合にわたる F_i の遷移の実態を解明することに、強くかかわってくる。

このような観点から、本研究においては、幅広い密度差の河口二層流について、広い領域の流速構造を調べ、従来なし得なかった F_i や $\mathcal{R}$ (岩崎数) の水平分布を描くとともに、それらと従来見出されてきた界面現象の発生日点との関係も明らかにしてみる。

2. 実験方法

二層構造は、淡水—塩水、及び、灯油—淡水を用いて形成され、前者についての実験領域はおよそ $0.0006 < \varepsilon < 0.012$ (ここに $\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$ で ρ_1, ρ_2 は上、下層の密度) であり、後者については $\varepsilon = 0.215$ だけについて観測された。なお、前者については水温が12℃程度であり、 ε の変化による動粘性係数の変化領域は $0.0125 \sim 0.0145 (\text{cm}^2/\text{sec})$ 、後者については18℃で 0.019 程度である。

水槽は、4 cm×10 cm, 8 cm×15 cm, 15 cm×20 cmの矩形断面を有する、長さが、それぞれ 200 cm, 600 cm, 300 cmのまっすぐな水路を、広い水槽に直交するように取付けたものから成り立っている。なお、材質は、アクリル樹脂、又は、ガラスで、壁面は平滑で、水路は水平に保たれた。

密度の測定は伝導度素子を用いて間接的に行なわれたが、計算上必要な、下層の密度については、上層流体を流す前の平均的な値を採用し、界面下の微弱な淡水混入については、本研究においては、考慮しないことにする。

流速は、色素法、又は、LDVにより測定した。色素法とLDV法は互の欠点を補い得る。たとえば、前者は、流速の分布を、おおまかではあるが一挙に調べ得るが、任意の点近傍の詳細な測定とか、その点での流速の時間変動の測定には適しない。これに対し、LDVの場合には、適、不適がちょうど逆になっている。色素法については、すでに、よく知られているので、ここでは、本研究に使用したProbe-Type LDVの概略の説明をしておく。河道に相当する水路部では、既報⁴⁾のものを使用したが、沖合の測定には、Probe-Type LDVを用いた。理由は、既報のLDVの光学系を広い水槽で使用したり、界面が三次元的に変化している場

では屈折の問題を生じるためである。かりに、自由表面が水平な固体壁であれば、側壁を使用せずに、鉛直方向に光路を導く手法も考えられる。しかし、自由表面変動を止めることは不可能であって、この手法さえ採用できない。そこで、筆者の一人、吉田により考案されたのが Probe-Type LDV である。その光学系は Fig.1 に示す通りであり、デュアルビーム法によっている。Fig.2 には素子部の詳細が示されている。今回の流速条件下では、ビーム交差点（流速測定点）から素子までの距離は、Probe 自体が生み出す乱れを考慮しても十分であると思われる（素子間隔は任意に変える）。

Probe-Type LDV を成層流の流速測定に使用する上での有利な点は、界面での光路の屈折がある程度除き得ることである。今後、Probe の小型化が進めば、この屈折の問題は次第に完全解決の方向へ向かうことになる。今回使用の Type は未だ十分に小型化されておらず、Probe 近くの界面変化をおさえることができない。勿論、光学系をそのつど変えることによって、この問題は解決できるが、それでは、広範囲の測定が十分行えなくなるので、今回は、この手段を省いた。

3. 実験結果及びその解析

(1) 鉛直方向ならびに水平方向の流速構造

以下においては、塩水楔の先端での内部フルード数と Ψ (岩崎数) をパラメーターとして流速構造を示す。又、それぞれの流れ条件には淡水の河口流出流況も併記し、相互の関係をわかりやすくする。界面下に生ずる Longitudinal Vortex Pair (LVP)⁹⁾ の発生には注意を払わず、とにかく、流心に沿って流速の水平成分を測定してみると、Fig.3 の結果を得る。この場合の水理条件は図中に記されている通りであるが、淡—塩水の実験としては ϵ は中程度である。なお、Fig.4 は流心以外の流速構造である。

この種の実験では、下層塩水を供給して定常化を計ろうとしても、はじめに静止していた塩水（十分静止に至るには相当日数を要する）の上に淡水を流す場合とは異なる、循環流を伴う流れになってしまうため、淡水流量が微量な場合には、この方法はさけねばならない。本研究においては、この事を考慮して塩水供給をしていないが、そのために界面水位の降下という問題が生じた（界面は沖合の Overflow 端での内部フルード数が 1 以下になるまで降下し続ける）。幸い、この降下の程度では、各瞬間には流れが定常と見なしうるので、淡水放流後の経過時間が、いつもほぼ同じになるようにデーターを採取している。

Fig.3, 4 右半分の図は、各点での流速値を無次元化し、一つの図に示したものである。この結果からは、河河道のみ、及び、沖合のみの分布形状は、おおむね、一致しているといえる。このことは、色素法による流速測定によって沖合各点での最大流速値を求め、上記の特徴を利用すれば、上層の平均流速値が得られることを示唆している。実際に LDV、及び、タイムライン法により速度分布を求め、最大流速値と平均流速値を求めると Fig.5 の関係を得る。そこで、この関係から平均流速を求め、等 F_r , Ψ 分布を求めたのが Fig.6(1)~(4) である。

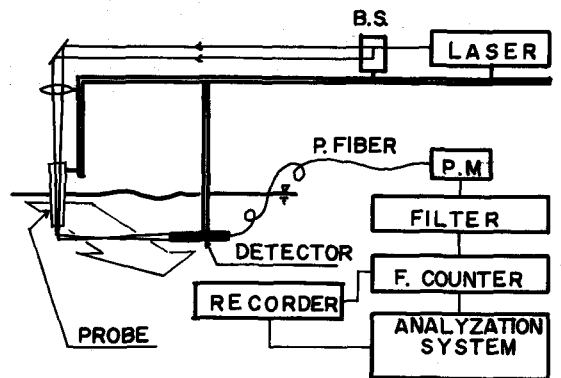


FIG. 1

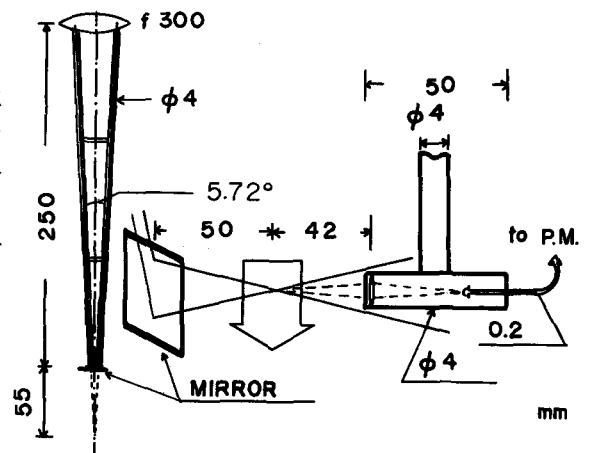


FIG. 2

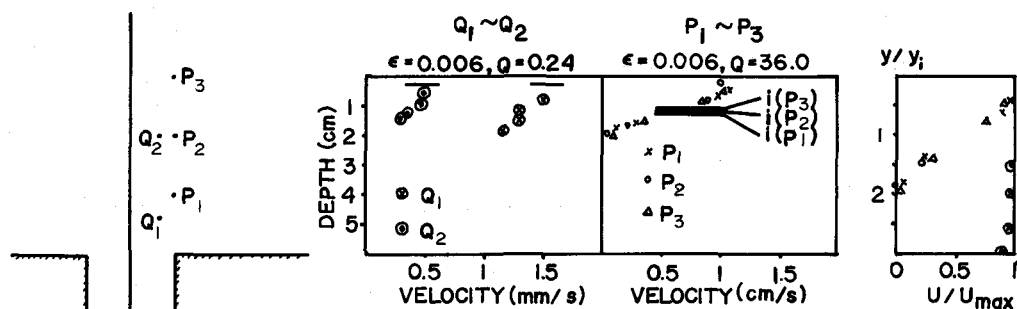
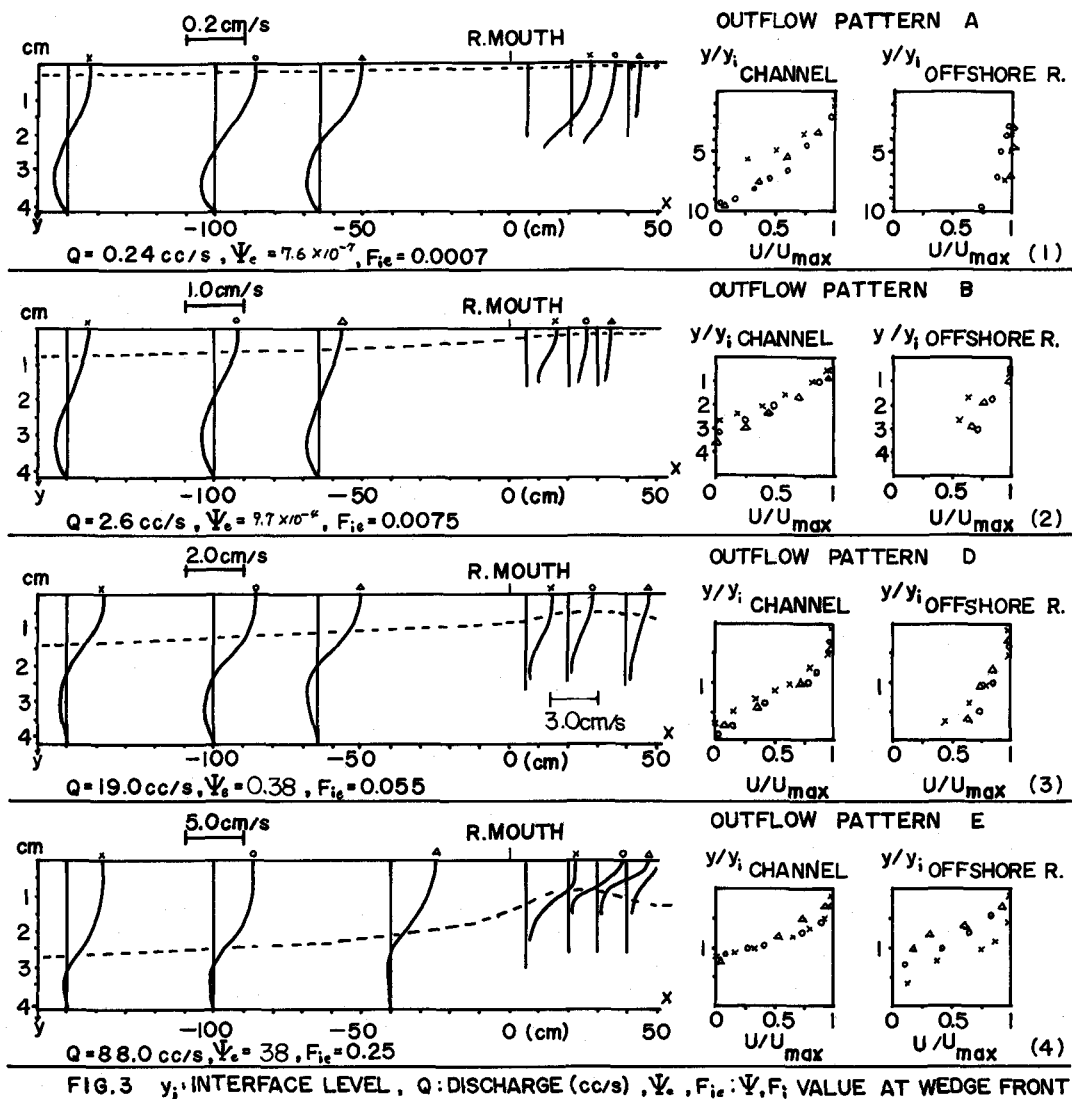


FIG. 4

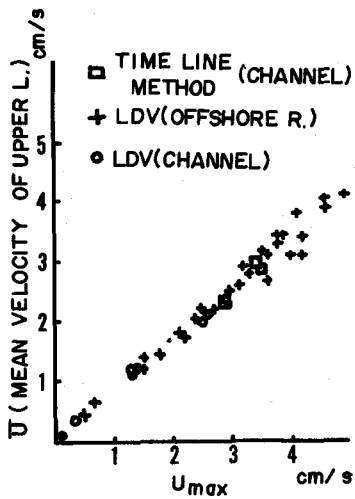
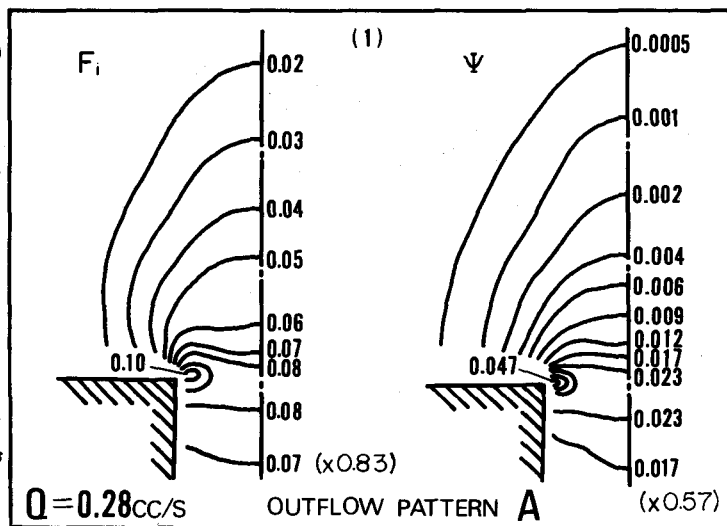


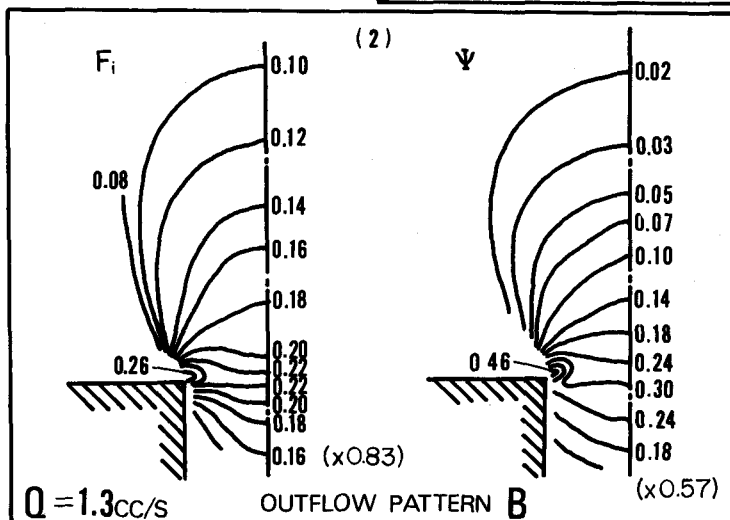
FIG. 5



$Q = 0.28 \text{ cc/s}$

OUTFLOW PATTERN A

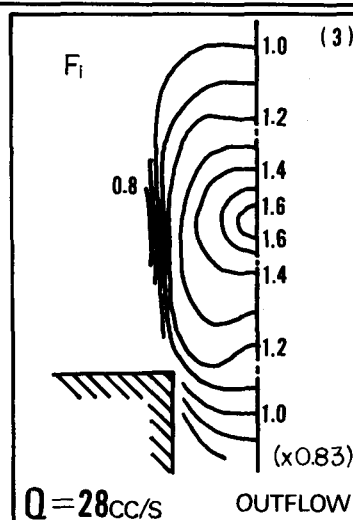
(x0.57)



$Q = 1.3 \text{ cc/s}$

OUTFLOW PATTERN B

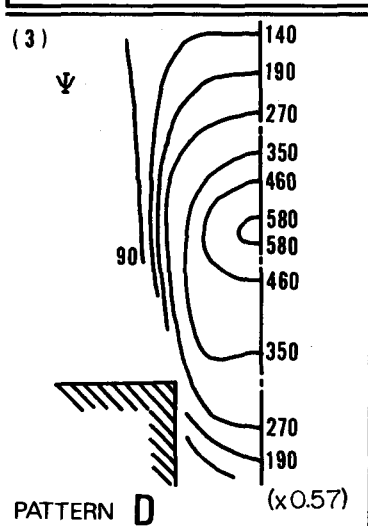
(x0.57)



$Q = 28 \text{ cc/s}$

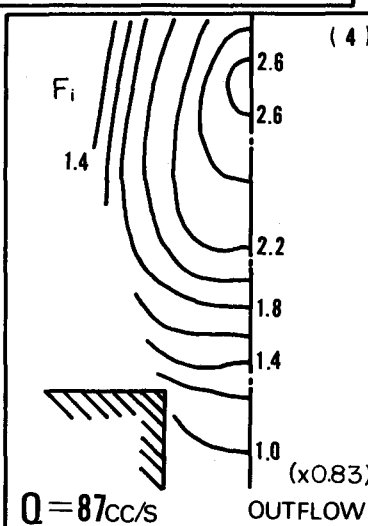
OUTFLOW

(x0.83)



PATTERN D

(x0.57)



$Q = 87 \text{ cc/s}$

OUTFLOW PATTERN E

(x0.57)

FIG. 6

Ψ と上層平均流速との関係は、同一の ϵ と粘性の流体については、定数倍の相異しかなく、等平均流速線と等 Ψ 値線は一致することになる。これに対して、上層平均流速と F_i の関係は、淡水厚さが関係してくるため両者の等しい値を結んだ線は厳密には一致しない。しかしながら、Fig.6の結果は、その差異が等 F_i 線と等 Ψ 線の形状の変化としてはほとんど表われないこと、を示している。Fig.6からは、さらに、一時加速領域が流量の増加に伴って河口から沖合に移動する事実が見出せる。この事実は従来から認められており、一時加速現象の生ずる原因は界面の急変にあると予想されてきた。この予想は、今回の実験結果を用いると容易に立証できる。具体的には、流心近くの二本の流線のひろがり率と上層厚さの変化率を比較すればよい。Fig.7は、この比較した結果が示されている。なお、界面からの塩分混入量は、検査区間ではほぼ無視できると考えられるが、念のため流速値も測定して流量変化が無視できることを確めている。Fig.7は、一時加速が最も強い地点が、沖合界面に生ずる lee wave に類似した静止波列⁷⁾の頂点とほぼ一致することをも示唆しているが、このことから、 F_i, Ψ の変化は界面形状の変化(界面重力波やサイクロイド波形状の界面変形は除く)と対応しているという重要な結論が得られる。

(2) 流速構造に対する ϵ の効果

まず、鉛直方向の流速構造を種々の ϵ について検討してみる。同一図上に各 ϵ についての流速分布を無次元化して描いてみるとFig.8の結果を得る。この図から分かるとおり、分布形状については、大きな差異は見出せない。このように分布形状に相異がなくとも、流速自体は、勿論、 ϵ によって差異を生ずる。その一般的傾向は、容易に考えつくように「 ϵ の大なるほど上層流速値も大」である。一方、 F_i, Ψ に対する ϵ の寄与については、そう単純ではない。沖合での F_i についてみるとFig.9に示すごとく ϵ の変化につれてたしかに変化するが、傾向は流速の場合と逆で、 ϵ の増大につれて一般的にその値が小さくなる。又、 Ψ 値についてみると、 $0.0006 < \epsilon < 0.012$ の領域で $\Psi = 300 \sim 450$ とあまり変化せず、測定誤差を考えると、今回の実験からは有意な傾向を示し得ない。

(3) 極端に大きい ϵ における流れ構造

従来、室内実験においては $0.0005 < \epsilon < 0.1$ の範囲内で、淡一塩二層の河口流の検討がなされてきた。しかし、 $\epsilon = 0.1$ となると、一様な塩水を作ることが非常に困難で、事実上は $\epsilon < 0.01$ の領域の実験が多い。今回はこの困難を克服するためと、混合しない二層流の研究を一步おし進めるため、灯油-淡水の成層を作って観測してみた。ただ、何分データーが十分でないので、従来の二層流の特性との比較をするのみにとどめたい。Fig.10, 11は、界面の形状、及び、流線のひろがり率を測定した結果である。なお、図中のA~Eは、柏村・吉田による分類に従っている。

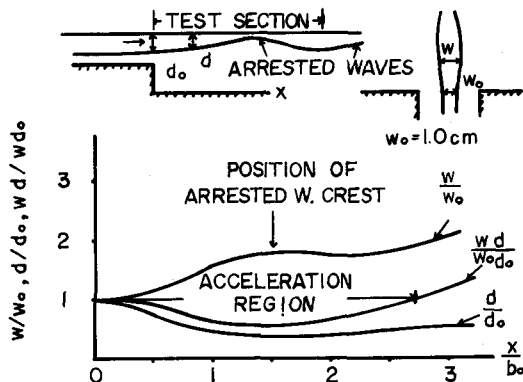


FIG. 7

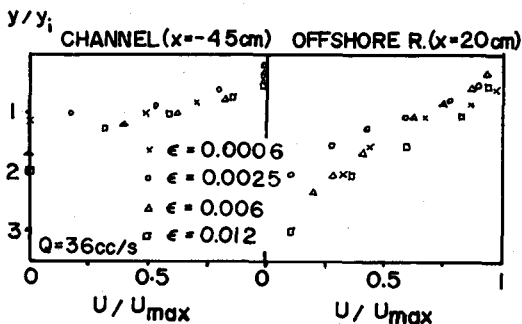


FIG. 8

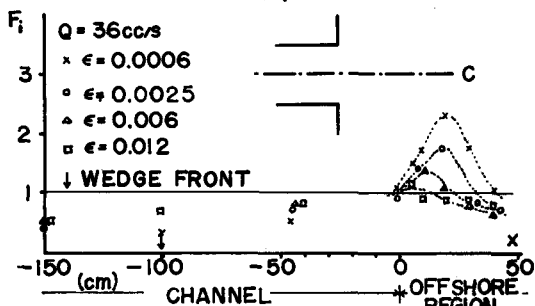


FIG. 9 DISTRIBUTION OF F_i VALUE ALONG C

この結果から分かるように灯油の場合にもA～E型の流況が存在するが、特にE型の流況の存在は、沖合の静止波列の形成を意味していて興味深い。なお、吉田・柏村によれば、各流況の境界は $\sqrt{b_0/h_0}=\text{const.}$ （ここで b_0, h_0 は河口における水路幅及び上層厚さである）で表現し得ることが分かっているが、今回用いた4cm幅の水路については、上記のconst. 値が若干大きく、完全な一致は見られない。淡塩二層流との相異は、界面抵抗係数 f_i についてもいえる。本実験の範囲（0.18cc/s～4.8cc/s）においては

$f_i = C\Psi^{-0.5}$ と表わされるが、 $C=0.7\sim 1.0$ であり、 f_i は全般的に小さい値を示す。

(4) F_i, Ψ 分布と界面現象

従来、筆者らにより明らかにされた数多くの界面現象と上述の F_i, Ψ 分布との関係については、ある程度明らかにし得る。紙面の関係で詳細な記述はできないが、一応下記

のごとくまとめることができる。①等 F_i, Ψ 線は、界面の小さな波動を無視した界面形状とよく対応しており F_i, Ψ の大きい所ほど上層厚さがうすい。②上記の特性のため、沖合静止波は F_i, Ψ 分布から知り得る。③スケールの異なる河口二層流の界面破壊や種々の波⁵⁾ SVA, SVB(サイクロイド波), SVC(K-H波), 界面重力波)の発生条件については、 F_i, Ψ を用いて表現することができない。この理由は F_i, Ψ が overall な量であるのに対し、界面の波動の発生は局所的な事情にもとづくからと考えられる。④同一のスケールの流れにおいては、 Ψ を用いて、およそその界面波動の発生条件を示し得る。たとえば、 $b_0=8\text{cm}$, 全水深9cmの水路を用いた場合には、 ε によらず $\Psi \geq 3600$ でSVCが、又、 $\Psi \geq 200$ でSVBが発生し（ただし界面に厚い混合層が発達していない場合に限る）、 $\Psi=450$ で界面重力波がSVBと重畳し、SVA内にその crest がまき込まれる。

以上、紙面の関係で、かなりあらい表現に終始した感があるが、従来、表現し得なかった等 F_i, Ψ 線と界面現象の関係は一応示し得たと考える。おわりにあたり、本研究の実験を補助していただいた北海道大学工学部応用物理学科学生渡辺和樹、多久島実両君に深く感謝したい。

文

献

- 1) 柏村・吉田：河口二層流の流れ構造に関する研究，第13回(1966)～第20回(1973)及び第22回(1975)～第25回(1978)海岸工学講演会論文集，又は講演集。
- 2) Kashiwamura, M. & S. Yoshida: Outflow dynamics at a river mouth, Proceedings of the 16th Coastal Engineering Conference, ASCE/Hamburg, pp. 2925～2944, 1978.
- 3) 玉井・池田：河道における二層流れの河口条件について，土木学会年講，pp. 429～430, 1978.
- 4) 吉田・塚田：淡一塩二成層からの表層取水における混合効果，第24回水理講演会論文集，pp. 423～428, 1980.
- 5) Yoshida, S.: Mixing mechanisms of density current system at a river mouth, Proceedings of the Second International Symposium on Stratified Flows, IAHR/Trondheim, 1980.
- 6) 1) に同じ。
- 7) 1), 5) に同じ。
- 8) 5) に同じ。

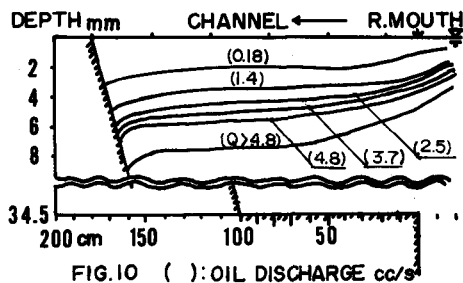


FIG.10 () : OIL DISCHARGE cc/s

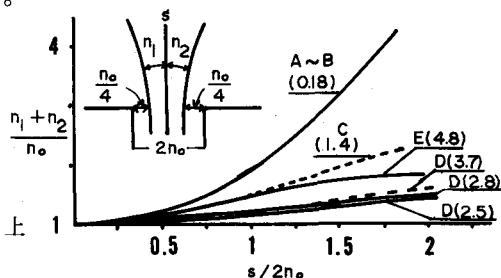


FIG.11 () : OIL DISCHARGE cc/s