

河 口 の 流 れ の 構 造 (2)

柏 村 正 和*・吉 田 静 男**

1. 序 文

河口では淡水と海水の接触による密度流が存在し、淡水流量の増減にしたがって複雑な流況を示すのが常である。筆者らは 4 年前にこの流況を解析することを計画し、第 1 段階として表面流の flow pattern についての研究を行なった^{1), 2), 3), 4), 5), 6)}。河口を境にして表層淡水が海上へどのような拡がりを示すかという点に重点を置き、実験と現地観測の両面から追求したものであって、pattern は密度流的性格の強い A 型から、平面噴流的性格の E 型までの 5 つの形式に分類されることを示し、さらにこれら各 pattern の水理学的生成条件が二つの無次元量 θ , R の組みあわせによって与えられることを明らかにしたものである。

表面流の pattern の実験および実測の際に、表面下の流れがかなり複雑であることに気づき、第 2 段階としてこれら下層の流況についての研究を開始した。現地観測をこの線に沿って計画し、同時に過去の観測からいくつかの資料を拾いあげて実態の把握につとめ、さらに平行して室内実験を始めた⁷⁾。ただし実験は規模が小さくて取り扱う流れが微流速なために測定技術に多くの新しい工夫をせねばならず、現地と実験との間を結びつけるにはかなりの月日を要することになった。今回はとくに河口で表層流が加速される事実を中心に二、三の密度流の特徴について実験と実測から明らかになったものについて述べてみたい。

以上の研究と同時に、始めに述べた A 型の流れについて若干の考察を行なっているのであわせて述べる。A 型の流れは最も密度流の特徴をもつもので、流速がきわめておそく、また淡塩水の密度差が大きく、さらに河口幅が大きいほど現われやすいものであるが、表面の流線は乱れを示さず、きれいに四方へ拡がる形式のものである^{1), 2), 3)}。この流線はあたかも単一の理想流体の 2 次元ポテンシャル流のごとくであり、したがってくわしく両者を比較することは密度流の理解のために有用と思われる。次節にまずこの問題を取りあげて述べることにする。

2. 河口の A 型流れについて

図-1 は A 型 outflow の典型的なものの写真である。いかにも単一の理想流体が示す 2 次元ポテンシャル流を想起させる。両者が流線において、また流速においてどの程度合致するかを調べるのがこの節の目的である。

2 次元ポテンシャル流の流線および速度ポテンシャル線の方程式は、Schwarz-Christoffel 変換を介してつぎのような写像関数によって与えられる⁸⁾。すなわち、

$$z' = 2(e^{w'} + 1)^{1/2} + \log \frac{(e^{w'} + 1)^{1/2} - 1}{(e^{w'} + 1)^{1/2} + 1} \dots\dots (1)$$

ここに、 $z' = 2\pi z/b$, $w' = 2\pi w/Q$ であり、さらに b は河口幅の $1/2$, Q は流量の $1/2$ を与えるものであり、また $z = x + iy$, w は複素ポテンシャルで $w = \phi + i\psi$ を

図-1 典型的な A 型 flow pattern

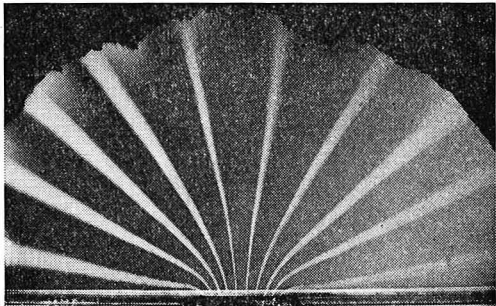
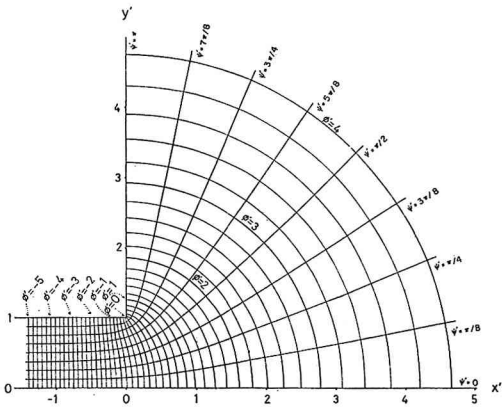
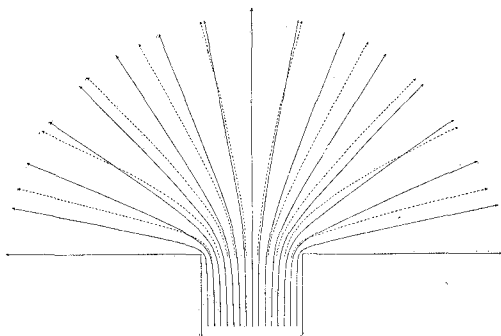


図-2 理想流体の 2 次元ポテンシャル流
X' 軸は流心を示す



* 正会員 理博 北海道大学教授 工学部
** 北海道大学助手 工学部

図—3 両者の流線の比較 (点線は A 型密度流の流線を示す)



与える。 ϕ , ψ は速度ポテンシャルおよび流れ関数である。さらに $\phi' = 2\pi\phi/Q$, $\psi' = 2\pi\psi/Q$, $x' = 2\pi x/b$, $y' = 2\pi y/b$ とおいたときに得られる ϕ' と ψ' の情況は図—2 に示される。 x 軸は流心の方向を指し、流れは流心を境に対称なので図では上半分のみを示したものである。

実験で得られた A 型密度流と、いま得られた単一流体のポテンシャル流を同じ図上に示して比較したものが図—3 である。双方の流線は予想のとおり酷似している。しかし詳細に見れば若干の相違が見出される。たとえば A 型流の方が拡がり方がやや大きく、とくに両側に向かって流線の不一致の度合が大きくなっている。また A 型流は河口を出るときに慣性を持ち、少し前方に出てから急速に左右へ拡がっていく傾向がある。流線の相違点として指摘できるのはその程度のものであって、たとえば河口を出てしだいに放射状に直線に近づく傾向などは非常によく似ている。

一方、流速の方には大きな相違点がある。2 次元ポテンシャル流の流速絶対値 q は式 (1) から

$$q = \left| \frac{dw}{dz} \right| = \frac{Q}{b} (2e^{2\phi'} + 1 + 2e^{\phi'} \cos \psi')^{-1/4} \dots (2)$$

として得られるが流心 ($\psi' = 0$) に沿っては流速が単調に減少することが示され、 $x' \rightarrow \infty$ では 0 に集束する。この点は密度流では大いに異なり、後節に述べるように流れが河口に近づくとしだいに加速され、河口を少し出た所でピークに達しその後減衰していく経過をたどる。密度流のこの傾向は実験でも実際の河口でもその都度経験しているものであって、淡水の厚さとその流速との間

に内部フルード数が 1 になるようにする傾向があることに基因していると考えられている⁸⁾。

以上のほかにも両者の流れの間には種々検討すべき相違点あるいは類似点があるが、それらは今後の問題として残すことにしよう。

3. 各種 pattern の流況について

さきに述べた A 型の流れの鉛直分布についての実験例を図—4 に示す。流速は 1 mm/sec 前後であるので色素による特別な方法を用いた。

フルオレッセン濃厚溶液を塗布して乾燥した糸を針金のわくに張り目的とする点に瞬間的におろす。糸は水面から底まで鉛直に張られることになり、それから溶出するフルオレッセンは緑色に流速鉛直分布を水中に画くことになる。それを写真にとり作図して得られたのが図—4 である。横軸は流心に沿っての距離で、0 が河口に相当する outlet である。左方は水路で川に相当し、右は広面積の塩水をたたえた水槽に相当する。表層にうすく流出している流れが淡水で下層は比重約 1.026 の塩水である。塩水は食塩を入れて十分に攪拌してとかし数日間放置したものでかなり一様な比重分布になっている。表層の淡水は水路を流下する途中でしだいに下層の塩分を拾うのでそれを補うために中層に塩水の遡上が見られる。これが塩水くさびに相当する。現地と状況の異なるのは水路の底に流出する層のあることで、おそらくこれは塩水中のわずかな密度差などによって生ずるものと思われ、実験の都度状況が変わる。表面の流速が河口付近で加速されるのが見られるが、河口を出て流れが四方へ拡がるのに伴い急速に減速する。これは非常に特徴的な二層流の挙動であって現地の状況とも一致している。

このような表層流の河口での加速状況をもっとくわしく調べたのがつぎの実験である。図—5~7 はそれぞれ A, B, C 型に対応する表層流速を数値で示したものである。水路の表層にフルオレッセン溶液を注入し、その流れを 8 mm 撮影機でとり各時刻の色素の状況を見て各点の流速 (cm/sec) を計算したものである。各型とも河口部で加速されているのを見ることができる。流速値にかなりばらつきが認められるのは水槽内の水の固有振動による周期的流動の影響である。これらの図を整理し流

図—4 A 型密度流の流心における流速分布

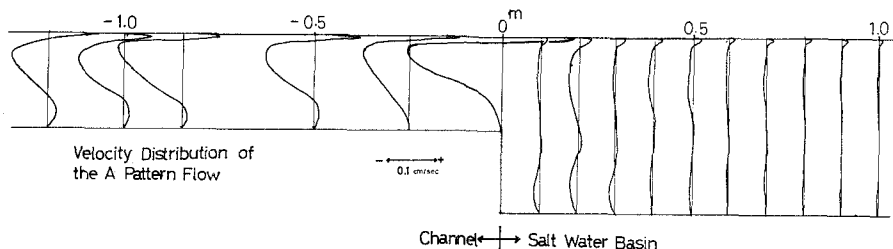


図-5 A型流の流速 (cm/sec)

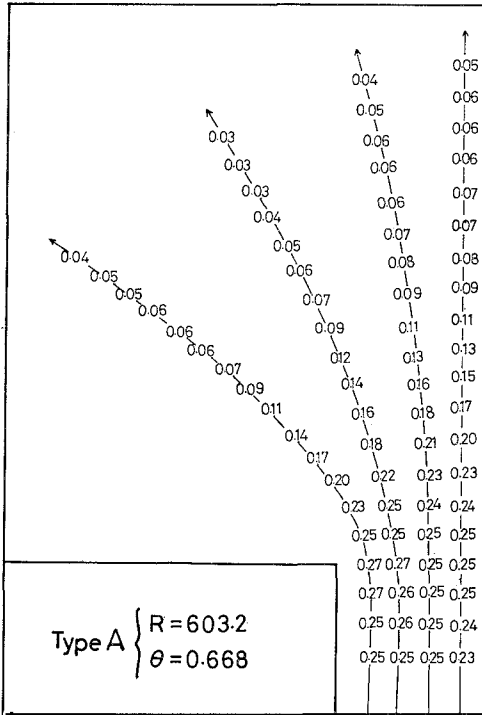


図-7 C型流の流速 (cm/sec)

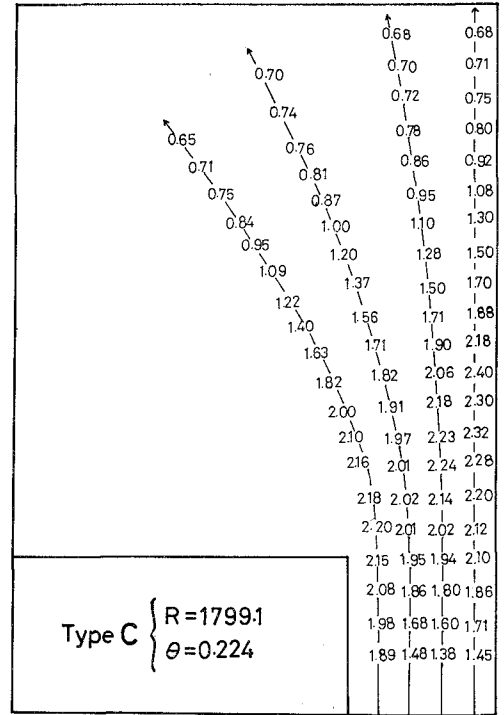


図-8 流心に沿った流速の分布

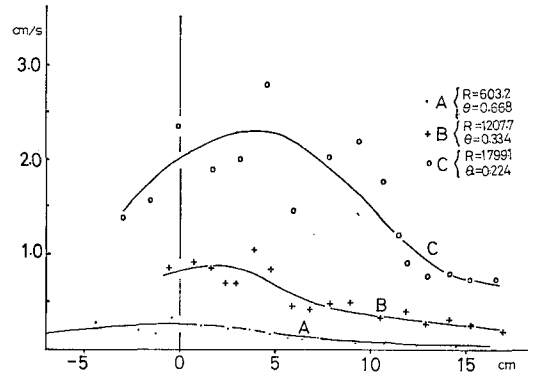


図-9 前図を無次元表示して得られた流速分布

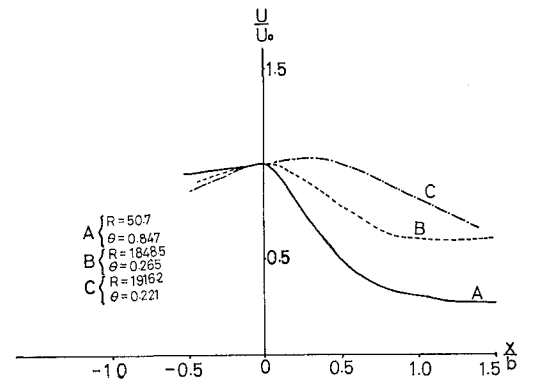


図-6 B型流の流速 (cm/sec)

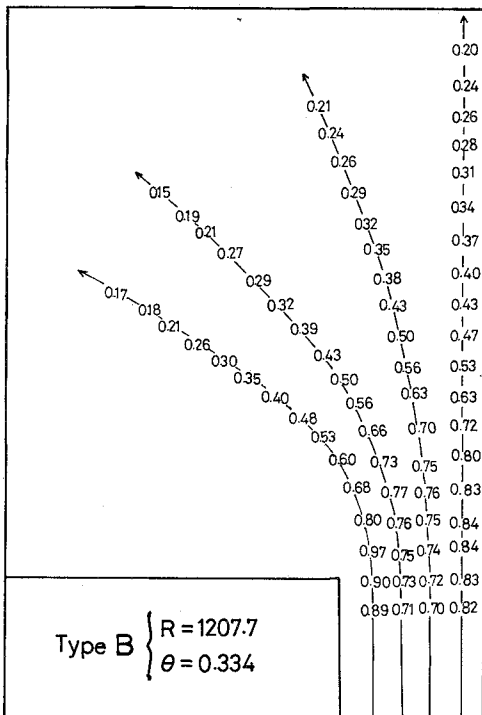
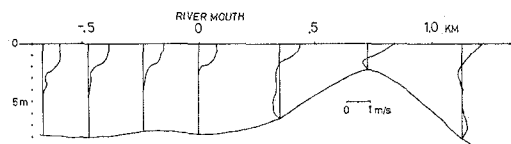


図-10 石狩川河口の縦断流速分布(昭和44年8月)



心の流速と距離の関係を調べたのが図-8である。これによればA型からC型へ移行するにしたがって流速のピークを示す位置が河口からしだいに沖へ移っていく。石狩川の実測ではまだこれは確認されていないが興味ある事実である。図-9は図-8を無次元表示して比較したものである。 U_0 は各型の河口での流速、 b は河口幅(この場合8 cm)である。

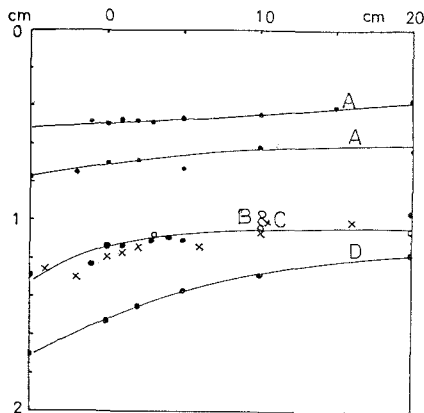
44年度の石狩川河口の流速分布を図-10に示す。これによると表層流は河口外で加速されている。この傾向は従来も同じであって、実験事実と一致している。ただ今年のピークの流速を示す点は従来よりかなり沖へ移っているのが目新しい。河口右岸に建設中の導流堤によって河口の実効位置が沖へ移っているためではないかと思われる。

今回は以上述べたように二層流の表層が河口で加速されることを実験ではっきりと認めることができた。これは密度流の一つの顕著な特徴と考えられる。扱った流れはA型からC型までの範囲であったが、D型、E型については実験中である。

横断方向の表面流速分布の実験も進行中でまだまとめるまでに至っていないが、この場合河口の左右の角付近では中心部より流速が早く一見ポテンシャル流に似た流れ方を示すことが見出されており興味深い。実際の河口にもしばしばそれと似た傾向が現われていることを書き加えておく。

河口に到達した時の淡水はかなりの塩分を含むのがふつうで、場合によっては二層と見なすのが困難なこともあるが、もしこれを二層と見なしたときの二層境界面深度をどこに取るべきかということは常に問題になる。たとえば無流面をこれに代えることがよくあるが、無流面は常に海水層中にあるのでこれでは淡水層を過大に見積ることになる。塩分鉛直分布の勾配の最も急な深さをとることも多いが、鉛直分布の形状によっては決めかねる場合が少なくない。今回の実験では表層淡水と海水の平均比重1.0092の深さを境界面深度として処理を行なった。図-11はこのようにして決めた淡水層が河口ではどのように変化するかをA, B, C, D各型について調べたものである。比重分布の測定には微小な電極を持った電導度計を用い、電極を水面から静かに下ろすのはモーターの駆動によって行ない、電導度はレコーダーにつな

図-11 淡水厚(縦軸)の河口での変化



いで電導度の鉛直分布が記録紙上に自記されるようにした。

この図のA型では流下して河口を通過する際にも淡水厚が漸減する形式であり、とくにジャンプ状の変化はしない。しかしB, C, D型では淡水厚が河口付近で著しく減少する。石狩川で通常見られる流れの形式はBまたはC型が多いようであるが淡水厚の変化の状況はこの実験のB, C型の変化とよく似ていることをつけ加えておく。

4. 結 語

今回ははじめにA型の表層流と単一理想流体の二次元ポテンシャル流との比較、ついで実験と現地観測とから二層流では河口で表層が加速される事実を中心に、いくつかの明らかになった密度流の特徴を記述した。今後はさらに実験実測を進めるかたわら、これらの現象の解析を行なっていきたい。

参 考 文 献

- 1) 柏村・吉田：密度流の研究(第1報)，北大工学部研究報告，第41号，昭41年8月。
- 2) 柏村・吉田：河口を出る淡水の流れ，第13回海岸工学講演会講演集，昭41年12月。
- 3) 柏村・吉田：密度流の研究(第2報)，北大工学部研究報告，第43号，昭42年5月。
- 4) 柏村・吉田：河口密度流の解析，第14回海岸工学講演会講演集，昭42年10月。
- 5) 柏村・吉田：Outflow pattern of fresh water issued from a river mouth. Coast. Eng. in Japan, Vol. 10, 1967.
- 6) 柏村・吉田：河口のflow patternについて，第12回水理講演会講演集，昭43年2月。
- 7) 柏村・吉田：河口の流れの構造(1)，第15回海岸工学講演会講演集，昭43年12月。
- 8) 柏村：密度流の研究(第3報)，北大工学部研究報告第53号，昭44年3月。