

河口の flow pattern について

北海道大学工学部 柏村正和
同 吉田静男

1. 序文

筆者等の一人は石狩川河口から流出する表面流を数年にわたつて観測する機会を得て、流れの拡がり方が距離に対して指数関数的であることを見出し報告してきた。¹⁾²⁾³⁾ 例えば一例として昭和35年9月の観測結果を示すと図-1のとおりである。この観測は発電式流向流速計を用い、海上60数点の表面流速流向を測定して図上に記入しそれから実線にて流線を引いたものである。石狩湾は平均20cm程度の小さな潮差のために潮流の影響はほとんどなく、流線は風や流量の変化の少ない限りかなりの期間安定している。この図の破線は実線で示した流線に直交するように引いた速度ポテンシャル線の如きものであつて、その長さは流れの拡がり方を表示する一つの目安として取扱つてよいであろう。流心に沿つて河口からの距離を測り、また河口内の一断面に引いた破線の長さを単位にとつてこれを1とし他の破線の長さが距離に対してどのように増大しているかを示したものが図-2である。片対数紙上きれいな直線を呈しており、流れの拡がり方が距離に対して指数関数的であることを示している。これは一例にすぎないが、他に数年にわたつて数回観測した結果があり例外もあつたがほとんどが指数関数的な拡がり方を示していた。

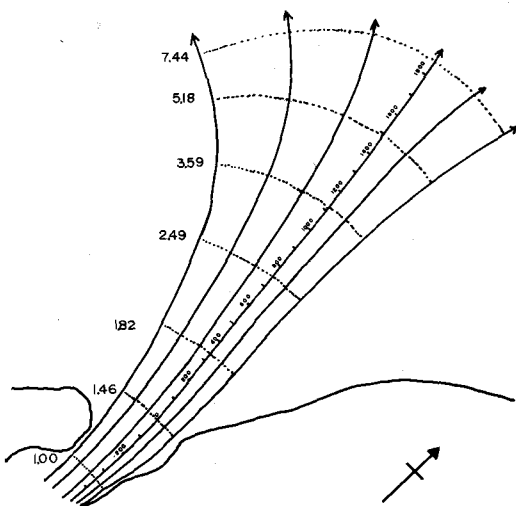


図-1 石狩川河口の流線(昭35.9)

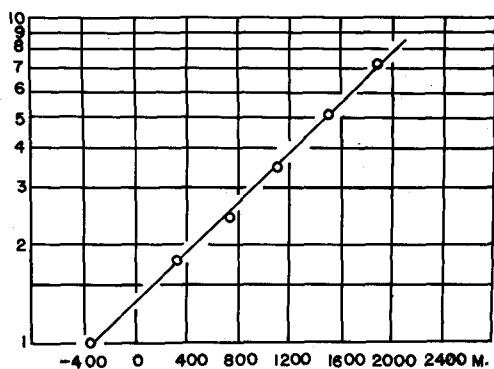


図-2 同上流線のひろがりかた

しかし一方では河口から出る流れの航空写真によつて流れの外縁形状が上記のように外側に開く指数関数的傾向とは全く逆に放物線的であるという報告やあるいはこれを平面噴流理論によつて論じた研究報告がある。⁴⁾ また筆者も実際に航空写真により諸河川の流出状況がそのようであることを見聞している。またこのような流れは乱流のジェットであることも詳細に見ると識別できる。石狩川は大河川でありその出水期には危険で諸観測が不可能であるが、このような時期には流れはやはりおそらく乱流ジェットの形式であろう。

以上述べたような河口を出る二つの pattern の流れは何故存在するか。石狩川で前者の pattern が

観測されたときは流量が比較的少なく塩水くさびが常に川の奥深くまで侵入していたことから、この pattern は淡塩二水層の密度差にもとづく密度流の性格が強く支配しているために生ずるのであろうと考えた。すなわち流出する淡水は海水より密度が小さいために海水の上へ乗りあげ四方に拡がっていくであろう。また後者の pattern に対しては淡水流量が増大して河口の内部フルード数が 1 以上になると塩水くさびが河口から押し出されるがそのような場合あるいはそれに近い場合には流況は一流体のジェットの様相に近い流れを示すであろう。

以上のような考えにもとずいて淡塩二水層の密度流を作り実験的に河口外の flow pattern を調べることを計画した。以下はその経過および結果であり予想とよく一致している。

2. Flow pattern に対する理論的考察

非圧縮性粘性流体が重力場で多層をなして定常運動をしている場合の基本運動方程式は次式のとおりである。

$$(\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = \mathbf{K} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{V} \quad (1)$$

ここに $\mathbf{V}$ は流速ベクトル、 $\mathbf{K}$ は外力ベクトルでこの場合は重力による質量力すなわち重力加速度を示す。 ρ, p, ν はそれぞれ流体の密度、圧力、動粘性係数である。

問題としている淡水塩水の二層流では流れは水平に近いので速度の鉛直成分は微小であり、これを無視すれば圧力 p は静水圧のみとなる。⁵⁾ (1) 式を各層毎に鉛直に積分し各層の厚さで割るとそれぞれ淡水

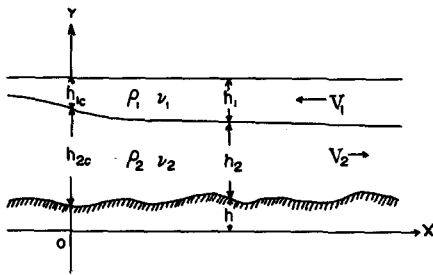


図-3 二層流のモデル

水と塩水の運動方程式を得る。添字 1, 2 を以て淡水、塩水を表わすことにすれば

$$(\mathbf{V}_1 \cdot \nabla) \mathbf{V}_1 = -g \nabla (h_1 + h_2 + h) + \nu_1 \nabla^2 \mathbf{V}_1 \quad (2)$$

$$(\mathbf{V}_2 \cdot \nabla) \mathbf{V}_2 = -g \nabla (\gamma h_1 + h_2 + h) + \nu_2 \nabla^2 \mathbf{V}_2 \quad (3)$$

ここに $\gamma = \rho_1 / \rho_2$ で、 g は重力加速度、その他は図-3 に示してある。

上層と下層はその接触面において粘性のために互いに運動を抑制する。式の上では (2), (3) 両式の右辺最終項がその作用をするのでその意味では (2), (3) 両式は互いに独立ではない。もし下層塩水層がほとんど静止して $\mathbf{V}_2 \approx 0$ とおき得る場合でも、(3) 式の右辺最終項はその理由によつて消し去ることはできない。ゆえに下層が静止しているときの両層の相対的運動を示す式は (2) 式から (3) 式を引き前記の条件を考慮してつぎのように得られる。 $1 - \gamma = \varepsilon$ とすれば

$$(\mathbf{V}_1 \cdot \nabla) \mathbf{V}_1 = -\varepsilon g \nabla h_1 + \nu_1 \nabla^2 \mathbf{V}_1 - \nu_2 \nabla^2 \mathbf{V}_2 \quad (4)$$

さらに淡水と塩水の粘性がほぼ等しいとして $\nu_1 \approx \nu_2 = \nu$ とすれば

$$(\mathbf{V}_1 \cdot \nabla) \mathbf{V}_1 = -\varepsilon g \nabla h_1 + \nu \nabla^2 \mathbf{V}_1 - \nu \nabla^2 \mathbf{V}_2 \quad (5)$$

となる。この式の右辺オ一項は重力による密度流の傾向を表わす項であり、オ二オ三項は粘性によつて互いに運動量を拡散しその結果両層の混合を促進させようとする傾向を表わす項である。つまりオ一項がオ二オ三項より卓越すれば密度流的性格の強い安定な流れ、逆にオ二オ三項がオ一項より優れば一流体の平面噴流の形式に近いものとなろう。

ここでは流れの型を問題にしているので(6)式を無次元表示にあらためるのが考察のためには便利であろう。つぎの置換を行なう。

$$\nabla = b^{-1} \nabla_*, \quad V_1 = UV_{1*}, \quad V_2 = UV_{2*}, \quad h = bh_{1*}, \\ h_2 = bh_{2*}, \quad h = bh_*, \quad \nabla^2 = b^{-2} \nabla_*^2$$

ここに b は河口巾あるいは開口部の水路巾で、現象が表面流の二次元的拡がりを問題にしているの
でこれを長さの代表量にとつた。また U は河口の上層淡水の断面平均流速である。この置換によつて
(6)式はつぎのように変換される。

$$(V_{1*} \cdot \nabla_*) V_{1*} = -\theta^3 R \nabla_* h_{1*} + R^{-1} (\nabla_*^2 V_{1*} - \nabla_*^2 V_{2*}) \quad (6)$$

$$\text{ここに} \quad \theta = \frac{(\nu \varepsilon g)^{1/3}}{U}, \quad R = \frac{bU}{\nu} \quad (7)$$

である。(6)式は上層流の流況を与える無次元式であるから、 θ, R が一定の値をとる限り流れは相似と見てよく、 θ や R が値を変えればそれによつて流れの pattern が変ると判断してよい。

もし流出速度 U が大きくなれば $\theta^3 R$ は小さくなり、同時に R^{-1} も小さくなるが、 $\theta^3 R$ の方が速やかに小さくなるので、オ二項がオ一項よりまさり、オ一項の示す密度流の傾向は消えてオ二項の粘性による拡散項が顕著になつて流れの pattern は平面噴流的不安定な型になるであろう。また淡塩水の密度差が増して ε が大きくなれば θ が大きくなるためにオ一項が顕著になつて流れは密度流的な安定型になるであろう。また河口巾 b の増大は R の増大となりやはり密度流の傾向を強めるであろう。

以上のような(6)式による考察は模型実験や現地観測によつて筆者等が以前から経験している事実とよく符合している。従つて実験結果は θ と R の値のいろいろな組み合わせにより流れがどのような pattern をとるか調べればよいであろう。

8. 実験装置

実験装置は図-4に示すとおりである。^{9) 11)} 一次元水路では主として塩水くさびの実験を行ない、河口から流出する流れの実験は塩水水槽と称する部分で行なう。材質は塩化ビニールで塩水はロータミンBで赤く着色し、また流出する表面流の流線の可視化のために図-5のように注射針を並べた注水装置を作つて表面に蛍光染料フルオレッセイン溶液を静かに注入するようにした。淡水流量の制御のために図-7のような水位差式の淡水供給装置を作り0.02 cc/s という精度で微量流量を自在に制御できるようにした。水位差と流量の特性は図-6に示すとおりである。

一次元水路は始め長さ2 m、巾8 cm、深さ10 cmで、後で巾を4 cmに変えて行なつた。塩水水槽は巾8 m、奥行2 m、深さ15 cmである。塩水水槽に入れる塩水は1回に多いときは30 Kg入り食塩

2～8袋を数日間かくはんし充分にとかして作らねばならない。流れの pattern はフルオレツセイン溶液による表面流流線の目視によつて行なうが、そのためには塩水が全く静止している必要があり、従つて塩水を作つてからさらに数日間放置しておく必要がある。

種々の ε を得るために数多くの各種濃度の塩水を用意しなければならないが、比重 ρ は最小 1.00026 (4℃換算, $\varepsilon = 0.00026$) から最大では飽和に近い 1.15251 ($\varepsilon = 0.133$) にわたっている。とくに ε の小さい場合は温度分布によつて ε の分布つまり密度のむらの影響が顕著になるので、できるだけ塩水を一定温度に近い状態に保つように心がけた。比重の測定は注射針で任意の点から採水し比重びんを使用して行なつた。

4. 実験結果と考察

塩水水槽の塩水が全く静止してから一次元水路を経て微量の淡水を供給すると開口部を出た後塩水上を四方へ拡がつていき、石狩川の実測とよく似た拡がり方を示す。これは写真-1に示すとおりで A 型と呼んでおこう。A 型では流線は非常に安定で淡水が密度差によつて塩水の上にのりあげていることが観測されている。

淡水流量をやや増加すると写真-2のように両側部に不安定な領域が発生しはじめる。これを

B 型とする。さらに流量を増すと粘性による shear の効果が顕著になつて両側に水平渦動あるいは水平な二次流を発生し写真-3のように流線に乱れを生ずる。これを C 型とする。つぎは二次流が発達して主流を圧迫する結果、流れは拡がりやが少なくなつて写真-4のような D 型に移行し、淡水流量がさらに多くなると写真-5のように開口部から流線の乱れた不安定な噴流形式の E 型になる。塩水の濃度や開口部巾などを変えて数多くの実験をくり返したが、この A から E までの 5 つの pattern が常に観測された。

前節で理論的考察をしたようにこの実験結果の 5 つの pattern は θ と R の組み合わせによつて分類されると予想できるので縦軸に θ 、横軸に R を

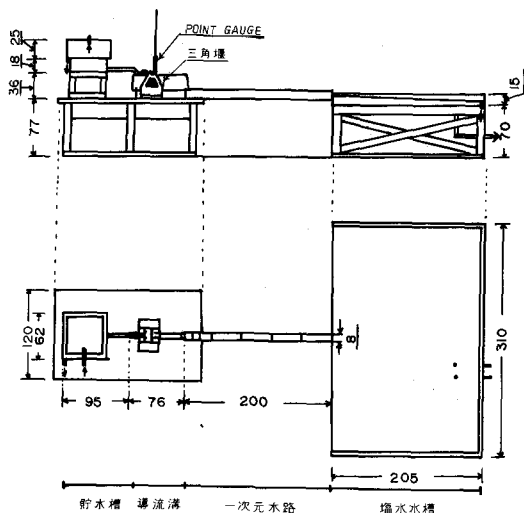


図-4 実験装置の概略図

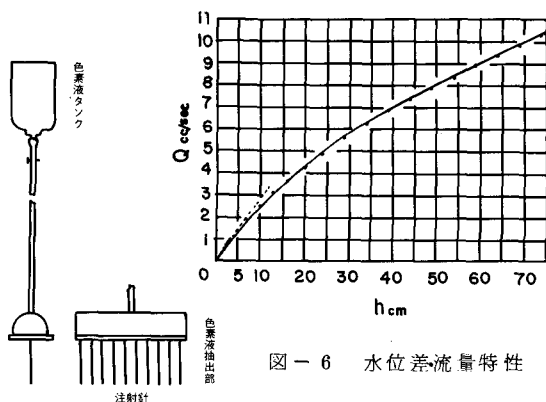


図-6 水位差流量特性

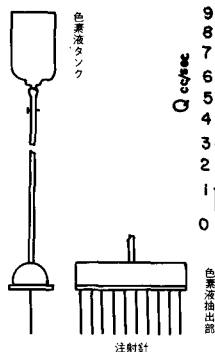


図-5 色素注入装置

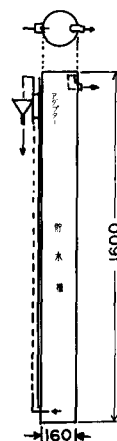


図-7

水位差式
淡水供給
装置

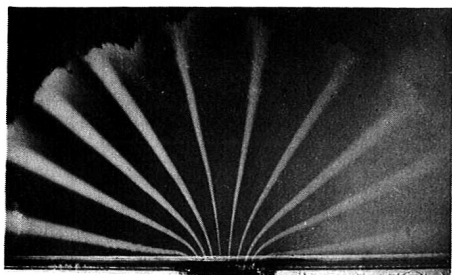


写真-1 A型の安定な流れ

(密度流型)

とつてそれぞれの値に対応してできる pattern を記号により識別し得るようにした。その結果は図-8のとおりであつてこの論文の結論をなしている。

各一回の実験では θ は一定で、流速すなわち U だけを微小値から次々に大きくして行つて順次 A, B, C, D, E の flow pattern を作つていく。 θ には分母に U があり、また R には分子に U があるから、その積 θR は U を含まずに一つの実験に対しては一定である。つまり一回の実験は両対数紙上では $\theta R = \text{const.}$ という直線に対応する。従つて図-8では左上から右下の方向に実験が進行する。図中 O は A 型を表わし、 ϕ , $\bullet$, Δ , $\square$ の順にそれぞれ B, C, D, E 型を表わす。' のついたものは河口巾 4 cm の場合で、その他は 8 cm で行なつたものである。

図-8にて示されるように、実験結果は予想と非常によく一致している。密度流的傾向の最も強い安定な A 型は θ , R の大きな右上の部分に現われるが、噴流形式の流線の不安定な E 型は θ , R の小さな左下の部分に見られる。そして中間の B, C, D 型はその中間にはさまつて存在する。各型の境界を仮りに直線で仕切つてみるとその方程式は次ぎのとおりである。すなわち、

$$A \text{ B 間} \quad \theta R^{-0.187} = 0.985 \quad (I)$$

$$B \text{ C " } \quad \theta R^{-0.187} = 0.639 \quad (II)$$

$$C \text{ D " } \quad \theta R^{-0.187} = 0.528 \quad (III)$$

$$D \text{ E " } \quad \theta R^{-0.187} = 0.330 \quad (IV)$$

またこの実験結果から定性的な河口流の性質、つまり密度差や河口巾が大きく、また淡水の流出速度が逆に小

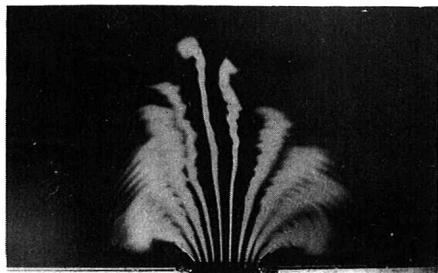


写真-2 B型の流れ

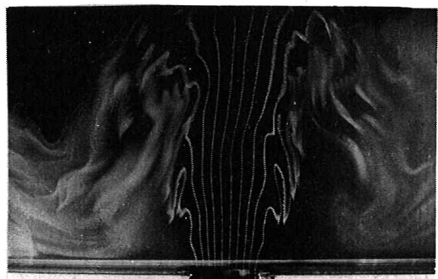


写真-3 C型の流れ

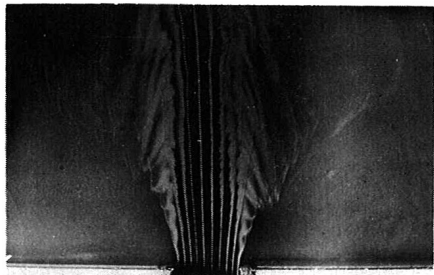


写真-4 D型の流れ

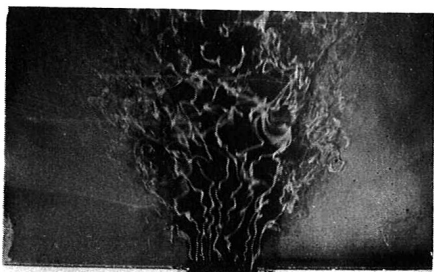


写真-5 E型の不安定な流れ
(噴流型)

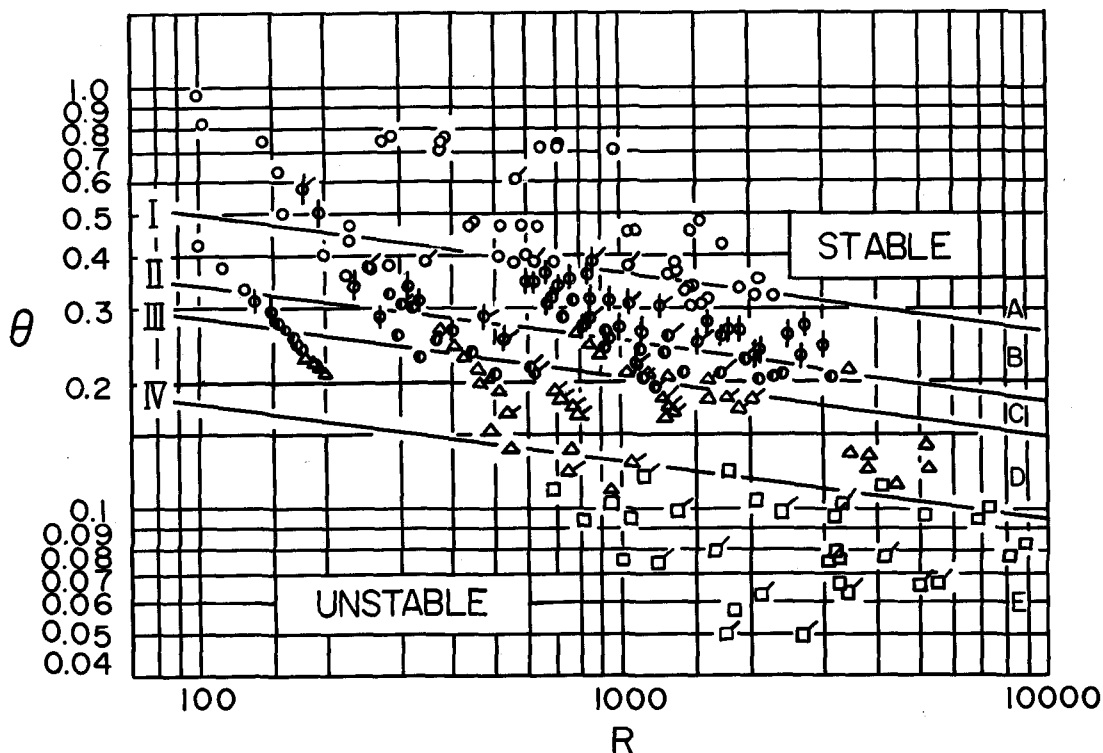


図-8 θ と R によつて示される flow pattern。Aは安定な密度流型、Eは不安定な噴流型。

さい程密度流的な四方への拡がり方を示す流れになり、その逆の場合には一流体の平面噴流によく似た pattern の流れになることが理解される。残念なことに石狩川の実測では R は 2×10^8 程度の大きな値となり、 θ は逆に 0.01 程度の小さな値であつて、この実験結果の範囲を大きく逸脱しているので、この結果からただちに現地の状況を外挿して論ずるのは尙早である。今後はさらに室内実験や現地実測によつてこの空白部を埋めていきたい。

文 献

- 1) 福島, 柏村, 八鍬, 高橋: 石狩川の河口構造, 才8回海岸工学講演会講演集, 昭和36年9月.
- 2) Fukushima, H. & Kashiwamura, M.: On the dynamical problems at the mouth of the Ishikari River, Coast. Eng. in Japan, Vol. 6, Dec., 1963.
- 3) 福島, 柏村, 八鍬, 高橋: 石狩川河口の研究, 才11回海岸工学講演会講演集, 昭和39年11月.
- 4) Bates, C. C. & Freeman, J. C.: Inter-relations between jet behavior and hydraulic processes observed at deltaic river mouths and tidal inlets, Proc. 3rd Conf. Coast Eng., Oct., 1952.
- 5) 柏村: 河口における二重水層(2), 北大工学部研究報告, 才28号, 昭和37年3月.
- 6) 柏村, 吉田: 密度流の研究(才1報), 北大工学部研究報告, 才41号, 昭和41年8月.
- 7) 柏村, 吉田: 河口を出る淡水の流れ, 才13回海岸工学講演会講演集, 昭和41年12月.