

河口を出る淡水の流れ

柏村正和*・吉田静男**

1. 序 文

河口で鉛直に淡塩二層を形成し、河口内に塩水くさびの存在する場合に、淡水の流出の様子がどのようなかという問題を数年来興味を持って実際の河口で調べてきたが、これに関する実験を行なう機会を得て一応の状況が把握されたので報告する。

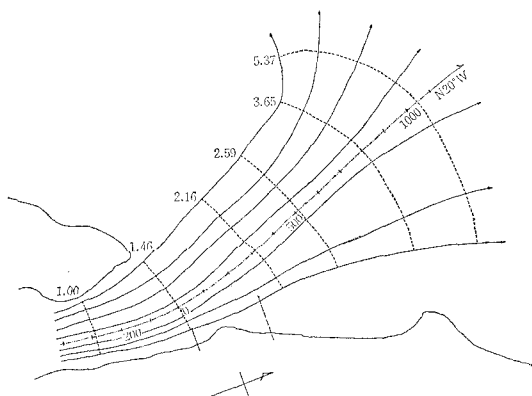
従来河口から流出する流れは淡水塩水の密度差を無視した一流体の噴流として考察されることが多く、そのような場合流れの外縁形状は放物線的に沖に向かうという結果が得られている¹⁾。このような結果は実際の河口沖で航空写真によってしばしば確かめられているものであってそのような流れの型が存在することは事実であるが、一方それに反するような観測結果が筆者らによって毎年石狩川河口で得られている。その場合流れは河口を離れるにしたがって流線の間隔が指数関数的に増大する傾向にあり上記の噴流の型と大いに異なる^{2), 3)}。このような性質は後者が密度流の性格を強く持っているために現われるものと考えられる。すなわち淡水は密度が小さいために海水の上に乗上げてその厚さを急激に減少せしめつつ四方へ広がって一種のポテンシャル流の趣を持っている。この種のひろがりを高野は理論的に考察したが、その場合の外縁形状は双曲線であった⁴⁾。その理論的背景をなす部分には筆者と若干意見を異にする所があるが、河口近傍では筆者の観察した指数関数的ひろがりとの双曲線的ひろがりとは酷似しており大いに注目すべきものである。現地の流れや室内実験における流れを注意深く観察すると、流速が小さく、密度差が大きく、かつ河口の幅が大きいほど、流れは密度流の性格が強く、指数関数的ひろがりを示し、逆の場合ほど噴流形式になることが認められる。

この報告は、どのような条件でどのように流れの形式が遷移するかという点を実験結果から追求するものである。

2. 従来の現地実測結果

前節でのべたように石狩川河口では流出する淡水流が指数関数的ひろがりを持つことが多い。ここに従来の数

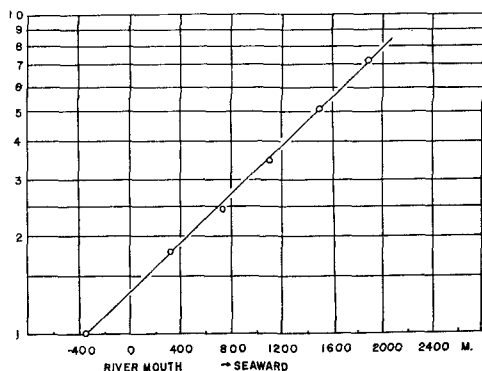
図一 表面流流線図 (昭和 35 年 7 月)
昭和 35 年 7 月実測のものから作成



例を掲げておく²⁾。

図一は昭和 35 年 7 月の流れであって、測定は発電式流向流速計を用い、海上 60 数点の観測結果から流向をつらねて求めた流線図である。破線は流線に直角に引かれた速度ポテンシャル線に相当するものであって、この破線の長さが淡水流のひろがり方を量的に示す目安となる。河口内のある断面における破線の長さを 1 にとり河口外に向かってその長さがどのように増加していくかを片対数紙に画くと図二のとおりである。この図の横軸は河口を原点としミオ筋上にとった距離である。図三、図四は昭和 35 年 9 月の測定によるものであって同様にとりまとめられている。この他にも数例の観測があるが⁵⁾、そのほとんどが、図二、図四と同

図二 流線のひろがり (昭和 35 年 7 月)



* 正会員 理博 北海道大学教授 工学部工業力学第二研究室
** 北海道大学助手 工学部工業力学第二研究室

図-3 表面流流線図(昭和35年9月)

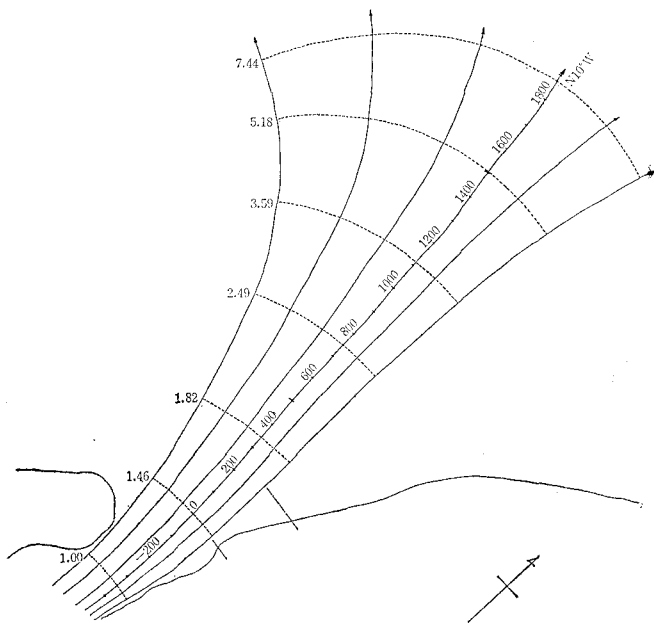


図-4 流線のひろがり(昭和35年9月)

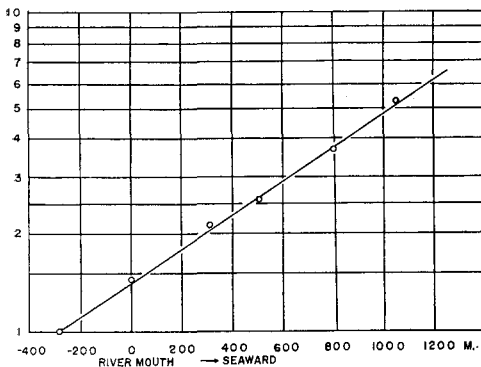


図-5 実験装置全体図

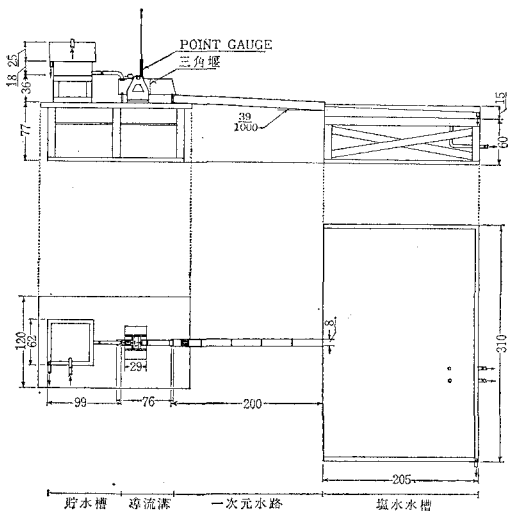
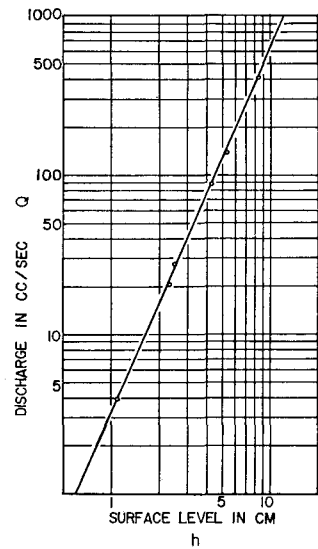


図-6 三角ぜき内水位 h と流量 Q の関係



様に片対数紙上で非常によい直線性を示しており、これは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すものである。これがヒントとなって、流況が噴流形式になる遷移条件があるという推定がなされたのである。

3. 実験装置と実験結果

実験装置は図-5に示すとおりである⁶⁾。一次元水路と称する部分は塩水くさびの実験を主として行ない、河口流出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あって塩水はローダミン B で赤く着色し、流出する淡水は測定時に 10 本の注射針を並べて作った注水装置によりフルオレセイン溶液を表面に継続して注入し流線を目視しうるようにしてある。淡水の流量は導流溝に設けた三角ぜき内の水位をポイントゲージによって測定して求める。その特性は図-6のとおりである。非常に微小な流量に対しては特別に工夫された毛細管に水を通せしめ、ヘッドを変えることにより望み通りの流量を供給せしめうようになっている。一次元水路は長さ 2 m、幅 8 cm、深さ 10 cm、塩水水槽は幅 3 m、奥行 2 m、深さ 15 cm である。塩水は 1 回に多いときは 30 kg 入り食塩 2~3 袋を入れ数日間かくはんして作る。実験を行なうには塩水が完全に静止している必要がある。なのでその後さらに 3~4 日放置しておかねばならない。

塩水の流動がなくなってから微量の淡水を供給すると開口部を出た後塩水上を拡がって行き、石狩川の実測と非常に似た拡がりを示す。これは写真-1に示すとおりで A 型と仮称する。A 型の一つを例にとってその拡がり方を前節と同様に片対数紙に画いたものが図-7であ

って非常によい直線性を示し、開口部付近では指数関数的ひろがりをしていることが認められる。流量をやや増すと写真-2のように両側部に不安定な領域が発生し始める。これをB型とする。さらに増すと粘性によるshearの効果が顕著になり両側に水平渦動あるいは二次流を生じ写真-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本流を圧迫する結果、流れはひろがり越来越少なくなって写真-4のD型に

写真-1 A型の流れ

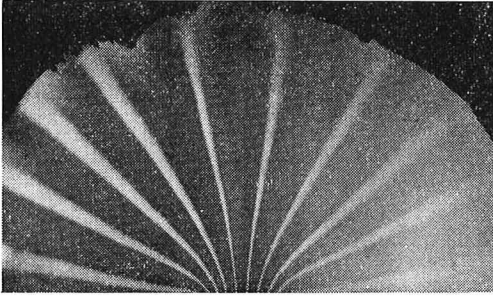


写真-2 B型の流れ

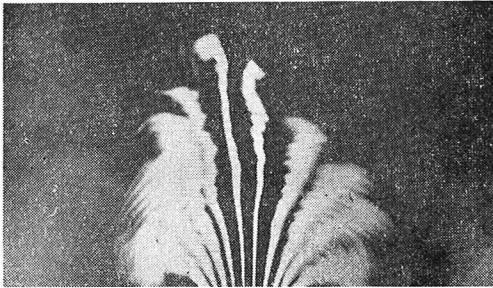


写真-3 C型の流れ

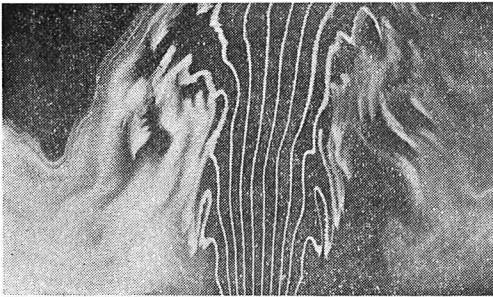


写真-4 D型の流れ

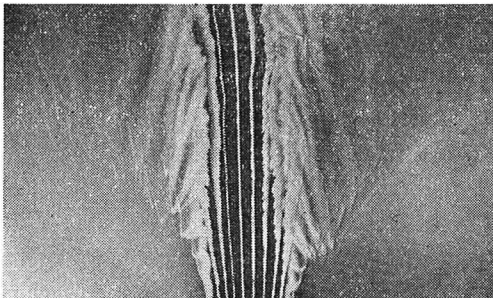
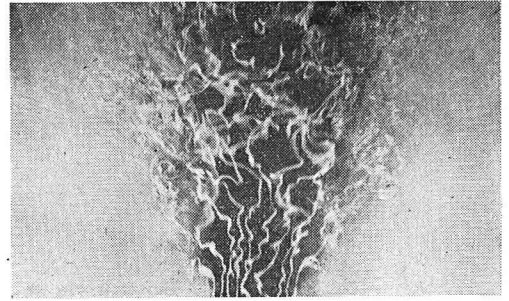
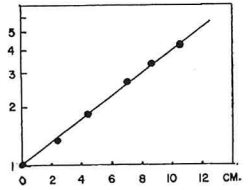


写真-5 E型の流れ



移行し、その後は写真-3のように開口部から流線の乱れた噴流形式のE型になる。実験は塩水の濃度を数種変えて長期間にわたって行なわれたが濃度が変わっても流量によって変化する流況の型は常にAからEの5つの型に分類されている。このような実験結果をどのような表現によって示し、遷移の条件をいかに求めるかが重要な問題であるので、若干の考察を加えることにする。

図-7 A型流の流線のひろがり



4. 理論的考察と実験結果の表現

粘性を考慮した二層流体の定常的運動方程式は、とくに鉛直方向の流速が微小のため圧力が静水圧で表わされる場合には次式で与えられる⁷⁾。

$$(V_1 \cdot \nabla) V_1 = -g \nabla (h_1 + h_2 + h) + \nu_1 \Delta V_1 \quad \dots\dots\dots (1) \text{淡水}$$

$$(V_2 \cdot \nabla) V_2 = -g \nabla (r h_1 + h_2 + h) + \nu_2 \Delta V_2 \quad \dots\dots\dots (2) \text{塩水}$$

ここに V_1, V_2 は各淡水・塩水の流速ベクトル、 h_1, h_2, h は淡水・塩水の厚さと水平基準面からの河床、海底の高さを表わし、 g は重力加速度、 ν_1, ν_2 は淡水・塩水の動粘性係数、 r は淡水・塩水の密度の比を表わす。式(1)と式(2)は独立ではなく互いに関連がある。すなわち淡水と塩水はその接触面で互いの運動を抑制するが両式の上では右辺の最終項がそれに相当する。したがって式(2)で塩水が静止している場合でも境界面上では右辺第2項は0とならずしたがってこれを $\nu_2 (\Delta V_2)_{\text{int}}$ で表わせば、

$$0 = -g \nabla (r h_1 + h_2 + h) + \nu_2 (\Delta V_2)_{\text{int}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

を得る。ただし $V_2 = 0$ である。式(1)から式(3)を差し引けば、

$$(V_1 \cdot \nabla) V_1 = -\epsilon g \nabla h_1 + \nu_1 \Delta V_1 - \nu_2 (\Delta V_2)_{\text{int}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに $\epsilon = 1 - r$ である。この式は塩水層が静止の場合の淡水層の運動方程式である。さて問題は流れの型を調べることであるから式(4)をつぎのように無次元化する。

$$\begin{aligned} \nabla &= b^{-1} \nabla_*, V_1 = UV_{1*}, V_2 = UV_{2*}, h_1 = bh_{1*} \\ h_2 &= bh_{2*}, h = bh_*, \Delta = b^{-2} \Delta_* \end{aligned}$$

ここに b は河口幅, U は河口平均流速とする。また, $\nu_1 = \nu_2 = \nu$ とする。これらを式 (4) に代入すれば,

$$\begin{aligned} (V_{1*} \cdot \nabla_*) V_{1*} &= -\theta^3 R \nabla_* h_{1*} \\ &+ R^{-1} \{ \Delta_* V_{1*} - (\Delta_* V_{2*})_{int.} \} \dots \dots (5) \end{aligned}$$

ここに $\theta = (\nu \varepsilon g)^{1/3} / U$, $R = Ub/\nu$ である。

したがって流れが相似であるためには θ, R が同一の値であればよく, 逆に θ, R が変化すれば流況が変わるといえる。ゆえに実験結果は θ, R についてまとめればよいという見とおしが得られる。右辺の第1項はポテンシャル流を支配し, 第2項は粘性による混合や拡散を支配する項であるから, R が大きいときはポテンシャル流に近く, R が小さいか, θ が小さい (淡, 塩水の密度

差が小さい) ときは噴流の形式に近くなることがうかがわれ, 実測や実験事実とまったく傾向が合致する。

以上の考察により実験結果を θ と R についてとりまとめたのが 図-8 であってこの報告の結論である。すなわち, A, B 型のほぼ指数関数的ひろがりを出すポテンシャル流に近いものを安定領域, D, E 型の噴流形式に近いものを不安定領域とし, その中間の C 型に属する部分に点線を引けば, これより上が安定, 下が不安定として分けることができる。

このように一応ポテンシャル流と噴流が θ, R の値によって分類されることが明らかになった。

この研究は昭和 39 年度文部省科学研究費各個研究補助金によったことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 福島・柏村・八鍬・高橋: 石狩川の河口構造, 第8回海岸工学講演会講演集, 昭和 36 年 9 月,
- 3) 福島・柏村: On the dynamical problems at the mouth of the Ishikari River, Coast. Eng. in Japan, Vol. 6, Dec., 1963.
- 4) 高野健三: On the salinity and the velocity distributions off the mouth of a river, Jour. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 10, No. 3, 1954.
- 5) 福島・柏村・八鍬・高橋: 石狩川河口の研究, 第11回海岸工学講演会講演集, 昭和 39 年 11 月.
- 6) 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, 昭和 41 年 8 月.
- 7) 柏村: 河口における二重水層 (2), 北大工学部研究報告, 第 28 号, 昭和 37 年 3 月.

図-8 ポテンシャル流 (安定) と噴流 (不安定) の遷移
中央の点線から上が安定, 下が不安定を示す

