

河 口 の 流 れ の 構 造 (1)

柏 村 正 和*・吉 田 静 男**

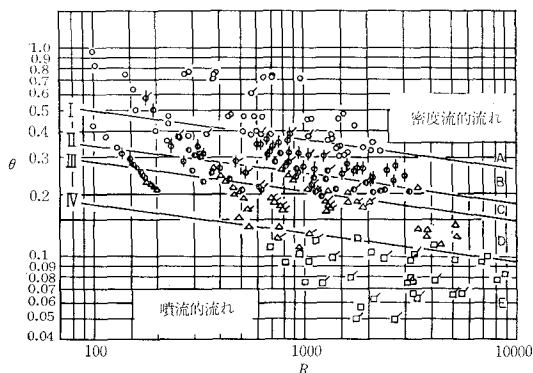
河口付近の流れの鉛直構造を実地観測によって調査した結果について述べ、室内実験の第一段階として得られた二、三の結果と対比した。不明の点なお多く、今後も継続すべき研究であるが、今回はその第一歩として得られたものについて述べてみたい。

1. 概 説

衆知のごとく、河口付近の流れは淡水と塩水の接触により密度流を形成し、その実態は複雑である。それらの流況のうち、筆者らは過去2年間にわたって河口を出た淡水がどのようなひろがり方を示すかという問題に興味をもち、実測や室内実験をくり返した結果流れの形式が密度流的性格の強い流線の安定なA型から、平面噴流的性格の流線の不安定なE型に至る5つの形式に分類されることを指摘し、さらに図-1に示すようにこれらの結果が2つの無次元量 θ , R によって図上に表わし得ることを示した^{1), 2), 3), 4), 5), 6)}。

以上の研究は河口を出る淡水表面流についての問題であるが、水面下の流れの構造については現地観測資料の不足と、室内実験における測定の問題や要因の多様性によって、いまだ定性的理解の域を出ていなかった。ここに筆者らは河口の水面下の流況を定量的にも把握して河口流の実態を明らかにすることを思いたち、数年来蓄積してきた石狩川の実測結果を整理したうえ、本年度はとくにこの点を念頭において現地観測を行なった。また同時に従来の実験施設による二、三の流況測定を行なっ

図-1 河口を出る表面淡水流の flow pattern の分類



た。装置改造の余裕がなく、outlet 外の部分は測定できなかったのでまだ不十分ではあるが実測と比較した。

2. 河口流の概要

日本海のように潮差の小さい海に面した河川では、たとえば石狩川、天塩川のごとく、淡水と塩水が鉛直方向に明瞭に分離された二重水層を構成するのが通例であって、下層はいわゆる塩水くさびをなしている。

淡水はくさびの上を塩水を少しずつ自身の中にとり入れながら流下する。河口をすぎると淡水は急激にその厚さを減じ海上を四方に拡がっていく。河口に達する頃の淡水は通常かなりの塩分を含むが河口を出ると著しく濃度を増す。しかし淡水の流速は河口を出てもすぐには減衰せず、むしろ一時加速される傾向があり、やがてピークを過ぎてからゆっくりと減衰していく。河口をすぎた途端に流線が四方にひろがり、また淡水厚もうすくなるのに対し、流速が一時加速されるのは興味深い。この事実についてはまた後の節で再びふれることにしよう。

河口では内部 Froude 数が1になるといわれ、その点で internal jump が存在することが理論的に予想されているが実際には顕著な jump の形式ではなく、河口を通過するにしたがって淡水厚が次第に減少し同時に下層塩水の混入が一層目立ってくるというような形態になっている。

下流に向かって淡水中の塩分濃度が増すことは下層塩水がたえず上層に混入していることであるから、塩分は河床近くを遡上し適当な点で淡水に入り再び海へ戻るといふ鉛直循環を行なって全体的に重力場における塩分配の平衡を保っている。ただし河口近くでは淡水がうすくなって加速される結果下層との shear を増し、直接塩水層の上部をも連行していわゆる entrainment current を形成して流出することが認められる。このように鉛直循環には塩分混入によるものと直接連行によるものがあるが、後者は前述のように河口近くで顕著であり、そのためその付近では淡塩二層間の無流面は塩水層中にあり、それより下層の塩水のみが遡上していることになる。

以上は塩水くさびの存在する平水時における河口の様相を述べたものであって図解的に示すならば図-2のようなものになる。

* 正会員 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-2 平水時の河口流
(矢印は流向, 点密度は塩分, 破線は無流面を表わす)

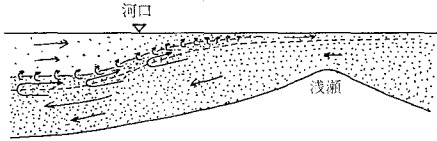


図-3 渇水時の流況

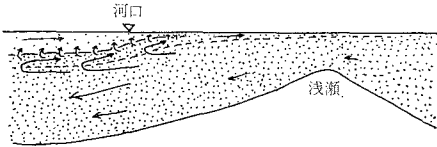
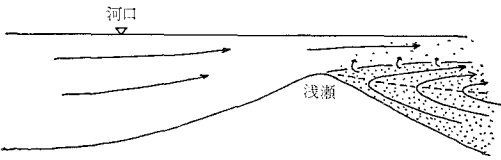


図-4 洪水時の流況



渇水時, または異常渇水時には図-3のように塩水くさびの発達にともなって塩水の淡水中への混入がさかんになり, 混入型の鉛直循環はいっそう発達するが, 直接連行型の鉛直循環にはあまりちがいが無いものごとくである。

出水時には塩水くさびは後退し, ある流量以上になれば河口内に塩水が認められなくなる。この限界流量 q は河口で内部 Froude 数が 1 になるという条件を用いて理論的に導かれ, $q = \sqrt{\epsilon} g A \sqrt{H}$ で与えられている^{7), 8)}。ここに A は河口断面積, H は河口水深, g は重力加速度, ϵ は淡水と塩水の密度比を 1 から引いた値である。

洪水時には, 塩水は河口は もちろん, 河口沖のかなり遠方にまで遠ざけられる。洪水時の河口外は実測が少ないので体験とはぼしいがつぎのように想定されている。図-4 に示すように淡水は河床を洗掘しつつ河口を出て, 噴流形式となり, 河口を遠く離れた沖で初めて海水と接触する。そこでは直接連行型の強い循環を生ずると考えられ, したがってここに土砂の堆積を見ることになり浅瀬が作られる。洪水流量の多い川の河口沖にはこのような浅瀬が必ず生ずるものであり河口港の難点になっているが, その位置は河口から河口幅の 4~5 倍の所といわれている⁹⁾。

以上, 従来の長年の観測や体験を通して筆者らが得た定性的な河口流の像を画いてみた。

次節では, 本年度の実測を中心に 3 年間の資料をもとにして, 河口流心に沿う速度分布やその他の量の分布について述べる。

3. 流速縦断分布の実測結果

図-5 は石狩川の河口を示すもので, 図上の諸点は昭和 41 年から 43 年にかけて 3 回行なわれた流心に沿う観測点である。また 図-6~図-8 はそのとき得られた流速鉛直分布を流心に沿ってとった距離に対して画いた

図-5 石狩川河口実測地点

(○, ●, + はそれぞれ昭和 41, 42, 43 年の観測を表わす)

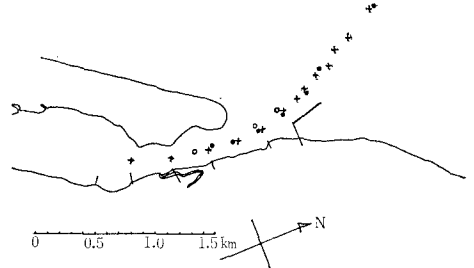


図-6 昭和 41 年 7 月 15 日の河口流況
(0 m は河口を表わす)

-1 0 +1 m/s

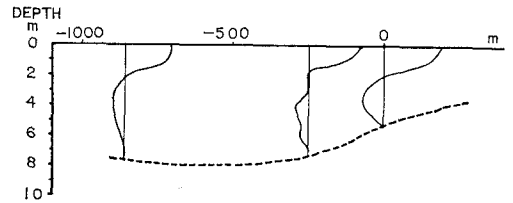


図-7 昭和 42 年 7 月 25 日の河口流況

-1 0 +1 m/s

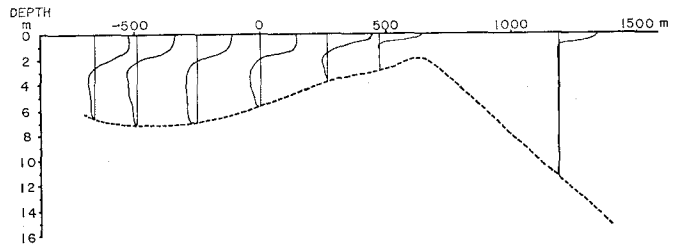
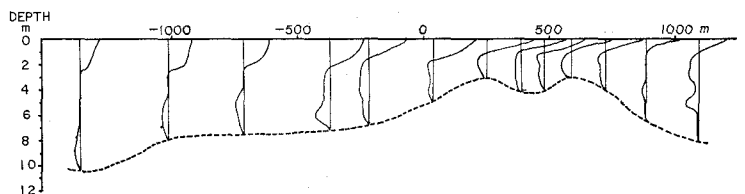


図-8 昭和 43 年 8 月 7 日の河口流況

-1 0 +1 m/s



ものである。

これらの図からまず注目されるのは河床海底の形状である。河口の内側から沖に向かって次第に浅くなっていて 600 m のあたりに浅瀬が存在し、それを過ぎて急速に深くなる。この浅瀬が融雪洪水期に形成され夏期は大体そのままの形状で維持されることがいままでの深淺図から変遷を調べてみると推察される。

つぎに流速分布から見ると、いずれも下層に逆流の部分が存在することが特徴的である。これらは海水であって塩水くさびに補給するためのものであることは明らかである。また無流面の深度は沖に向かって次第に小さくなりこれも河口を境にして変化が著しい。理論的に予想される河口の内部 jump がこれに相当するものと思われるが、昨年と今年の測定値からこれをグラフにすると図-9 のとおりになる。やはり河口付近で最も勾配が急である。

表面流速が河口を境にどのように変化しているかを調べてみよう。3 回の実測では流況が少しずつ異なるので、河口の表面流速を U_0 。各点の表面流速を U とし、 U/U_0 を x/b に対して画くと図-10 のごとくなる。ここに b は河口幅、 x は流心に沿う距離を表わす。これによると河口に向かう淡水は次第に加速され、河口を過ぎて川幅の約 0.8 倍程度沖でその最大値を示し、やがて減速して行く状況がよく観察される。河口を出たところで最大流速を示すことは従来の観測にも見られたが¹⁰⁾、今回はそれを確認できた。その理由についてはまだ明らかではないが、右岸導流堤の影響によるものか、あるいは河口流の一般的性質なのか今後の研究にまたねばならない。

図-10 の曲線の 図-9 無流面深度の河口付近での変化勾配は観測時によってかなり異なり、本年度の曲線は加速、減速とも勾配が急である。本年度は前2年度の観測時に比べて流量が少なく、

図-10 表面流速の河口付近での変化を示す

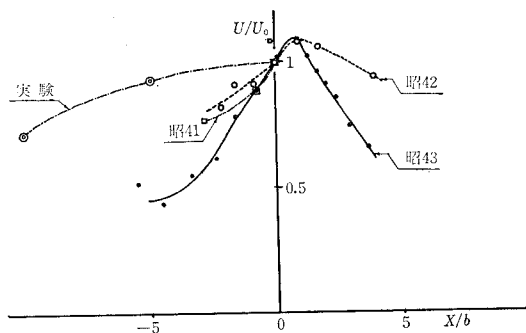
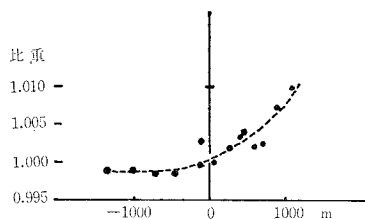


図-11 河口表面流の比重分布 (昭和 43 年)



そのため河口における無流面深度が小さかったが、その事実と関連があると思われ、結局流量が少なくなれば河口での加速、減速が勾配急になる傾向を持つものと思われるが、流量ばかりでなくその他の要因もあることが考えられ、これも今後の問題に属する。また、その他に塩水くさびの存在する川のちょうど河口の点では表面流速自体は流量によってそれほどの差異はないが、無流面深度が流量により大きく変化する傾向のあることは興味深い。

つぎに河口付近の水質分布について述べる。河口を出ると淡水と塩水の混合がいつそう促進される。この状況はたとえば水の電気伝導度、あるいは水温の分布から知ることができるが¹⁰⁾、今回は表面水の比重分布について述べることにしよう。本年度は図-8 に示した流速測定の際の諸点で採取した表面水の比重を測定し、温度補正して当時の現場比重に換算したがそれを図-11 に示す。これによれば、河口付近から沖に向かって比重が急激に増大し塩分濃度が増している。これは前述のように、河口を出ると淡水厚が減るが、流速は一時加速されて下層との shear を増す事実から予想されることではあるが、河口を出て淡水が四方に拡がり同時に厚みを減る密度流的推移の過程でのエネルギー損失が河口内におけるときより増大していることをも示唆していて興味深いものがある。

4. 実 験

前節で述べた現地実測結果に対する解析の手始めとして室内実験を試みた。施設の構造上河口に相当する outlet より内側の部分についての実験なのでまだ不十分ではあるが結果を述べる。装置は以前の報告²⁾ に述べたものを使用している。

図-12、図-13 は各部分の流速、比重の鉛直分布を示したものである。淡水流量はともに $5.2 \text{ cm}^3/\text{sec}$ であるが、塩水の比重が異なっている。流速の測定には色素を用いた。あらかじめフルオレッセイン濃厚溶液を塗って乾燥した糸を針金に張っておき、実験の際にそれを水中に落として鉛直に立て溶出した色素の模様を写真にとって流速分布を求めるものである。比重測定は、12 本の注射針の先を曲げて束ねたものにより一度に鉛直 12 点

図-12 Outlet より上流の流速と比重分布
(0 cm は Outlet を示す)

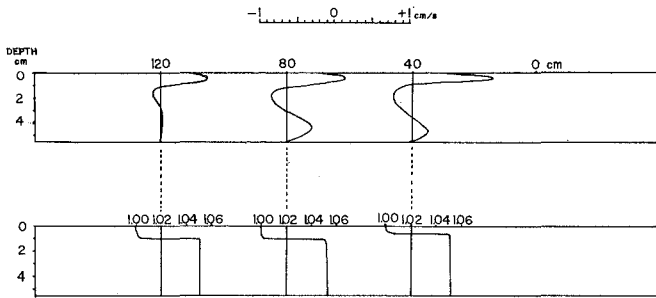
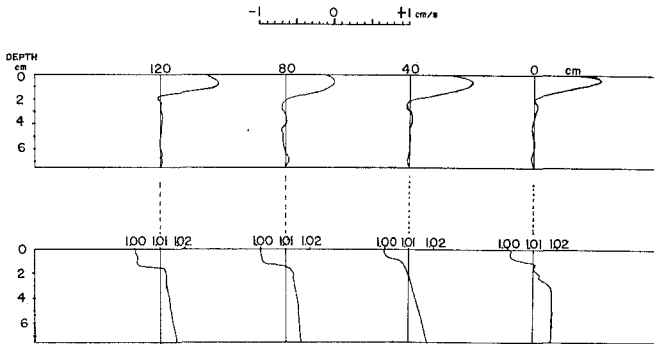


図-13 Outlet より上流の流速と比重分布



の採水をし、比重ビンによって測定する。流れを乱さないように採水量は 0.5 cc 以下とし、比重ビンは容量 0.2 cc で 10^{-5} の精度の得られるものを作製して用いた。

図-12 では塩水が濃厚でしかも塩水作製後十分日数を経ているので塩水層比重分布が安定しているが、図-13 では塩分濃度は小さいがまだ十分に溶解が進んでいなかったために塩水層比重分布が一様でない。outlet の位置は 0 cm の所であるが上流から下流に向かって表面流速が増し、淡水厚もうすくなり、さらにわずかではあるが表層塩分が増加して比重が大きくなっていることが認められる。また無流面は常に塩水層中にあるが、その傾向は下流ほど著しい。これは下流ほど流入塩水流量が多いことに相当し、それはまた下流ほど表層塩分濃度の高いことに対応している。

以上実験で示されている事実はいずれも現地観測結果と符合するものであるが、下層塩水の流入状況は多少趣きを異にしており、ことに図-12 で著しく底部部に流出する部分の生じていることが注目される。この実験は図-1 の θ , R を算出すると前者が 0.246, 後者が 2.455 で B 型 C 型の境付近の流況を示し、図-13 は $\theta=0.250$, $R=1.489$ で、やはり似たような流況のものであるが、

下層塩水の動きは微速のせいもありきわめて微妙で同一条件でも流入流出の二層になったり、また三層四層になったりすることもあり、そのときの条件によって塩水層の流速分布がまちまちで、この点は現地の状況と異なり、また実験としては注意を要する点である。

今後は outlet 外方の測定もできるよう装置を改造し、さらに図-1 の A から E までの各 pattern に対応する流れについて実験を行ないたい。また今回は定性的な比較のみにとどまったが、定量的に比較できるように資料を充実させたい。

5. 結 語

石狩川河口の実測をもとにして河口の流れの構造を論じ、さらに簡単な実験の結果と対比した。今回は主として定性的記述に終始したが、定量的解析も一方で進行しつつあるが、これらの発表は次回にゆずることにする。

終りに、現地観測でご協力いただいた福島教授以下理学第一研究室の方々や、当研究室の関係諸氏に謝意を表する次第である。

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) 大坪・岸：河口における海水の侵入，技術資料第15号，土木学会北海道支部，昭34年2月。
- 8) 大坪・福島：Density current in river mouth with small tidal range. IAHR, 8th Congr., 1959, および北大工学部紀要 Vol. 11, No. 1, 昭35.
- 9) Bates, C.C. & J.C. Freeman, Jr. : Inter-relations between jet behavior and hydraulic processes observed at deltaic mouths and tidal inlets, Proc. 3rd Conf. on Coast. Eng., 1952.
- 10) 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36年9月。