

河口成層流における塩水の拡散

北海道大学工学部

同
同
同
同

福島 久雄
柏村 正和
八 鉄 功
高橋 将
大谷 守正

1. 序

石狩川河口における弱混合型としての塩水楔の構造について筆者等の行つた研究の結果はすでに数回にわたつて発表した所である。ことに昭和36年以来行つてきた超音波による塩水楔の縦断構造の観測は最近においてかなりの資料を得るに至つた。超音波による観測では塩水楔の形状が明瞭に図示されるので、従来行われたような数地点の不連続な観測をつなぎ合わせたものと比べて著しい利点がある。従つて塩水楔の先端の到達した地点の確定も容易であり、流量と塩水楔の長さの関係も求めることができる。

超音波記録によるとその他に塩水楔と河水との境界面の状況もわかり従つて、塩水楔の消長に伴う境界面の状況の変化もみることができる。また河口の表面塩素量分布の問題は下層にある塩水楔からの塩素量拡散の問題と密接に関連し、実際面からも研究の面からも重要なものである。今年度の観測においては航行する観測船上にて連続自記記録をとり興味ある結果を得たので、直接採水によつて得た塩素量分析結果と併せて報告する。

特に本年度の観測は石狩川河口附近の揚水の問題に関連して詳細な調査が必要となつたため行はれたものである。図-1は河口の平面図を示す。

2. 石狩川河口の塩水楔

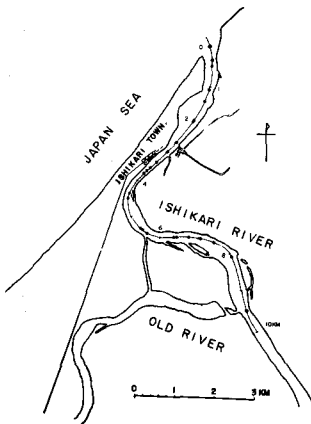
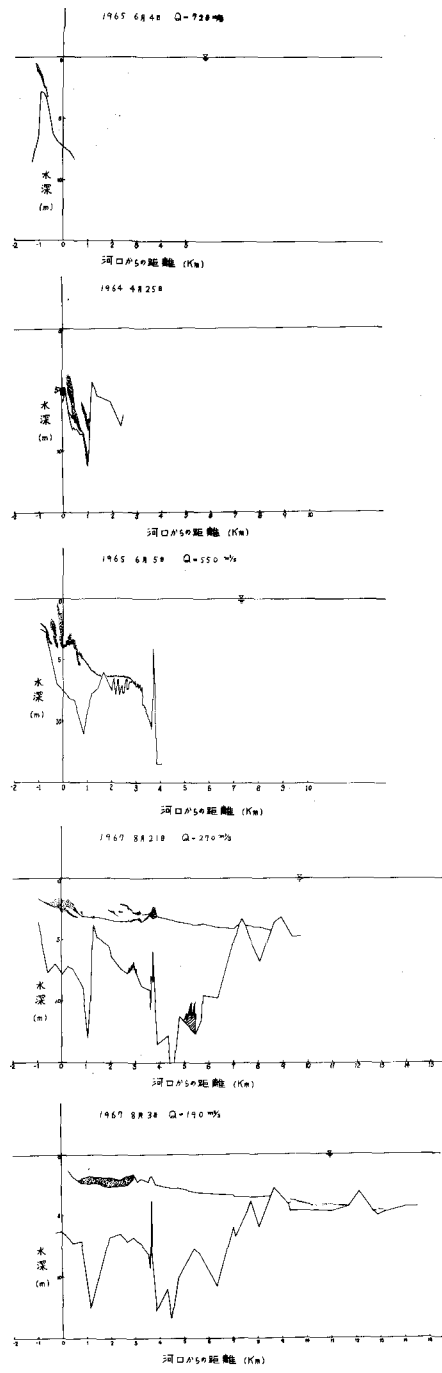


図-1 石狩川河口平面図

図-2、図-3は筆者らが1964年から1967年までの4年間に超音波によつて観測した石狩川河口における塩水楔の記録の一部を図示したもので、河川流量と塩水楔の状況との関係を見るために、塩水楔観測と同時に実測した河川流量の多い順に配列してある。楔の状況は潮位の変動によつても影響されるが、石狩湾における干満の差は最大30 cm 以下であり、河川流量の変化による影響がはるかに大きいとおもわれるので、とりあえず河川流量と楔の状況との関係について考察する。

図-2によれば、流量が $720\text{ m}^3/\text{sec}$ の1965年6月4日の記録では塩水は河口内に入つておらず、流量が $550\text{ m}^3/\text{sec}$ に減少した1965年6月5日には楔の先端が舌状をなして河口内に侵入している。またその中間の状況を示すものとおもわれる1964年4月25

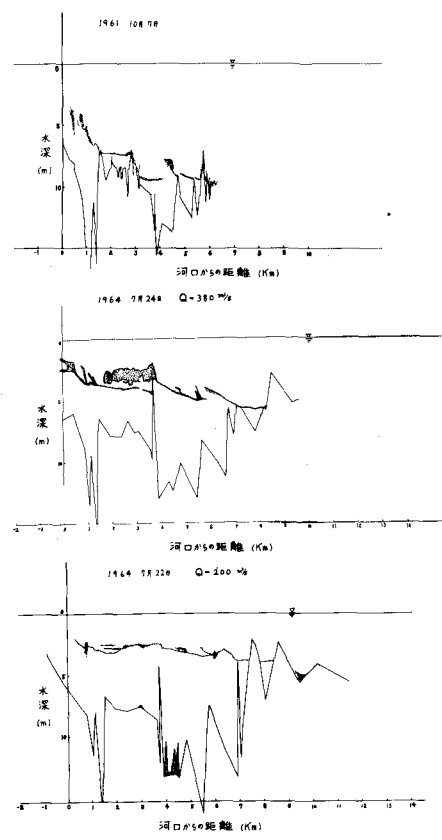
日の記録では楔の先端はまさに河口に侵入せんとしており、一方河口附近の凹部に残った塩水層と河水との境界では塩水が河水中に拡散している状況がみられる。流量が更に減少すると楔は更に河口の奥深く浸入して淡水層の厚さはうすくなり、流量 $190\text{m}^3/\text{sec}$ の1967年8月3日には楔の先端は河口から約13kmの地点まで達している。先端附近の河底が浅くなっているところでは、川すじの凹部を通つて浸入した塩水が河底の凹部にたまった様な状況を示している。4km附近より下流側で塩水と河水の混合がみられるのは3.7kmにある河底の凸起によつて境界面が不安定となるためである。



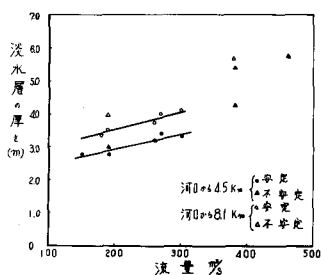
図一 2

河口から約13kmの地点まで達している。先端附近の河底が浅くなっているところでは、川すじの凹部を通つて浸入した塩水が河底の凹部にたまった様な状況を示している。4km附近より下流側で塩水と河水の混合がみられるのは3.7kmにある河底の凸起によつて境界面が不安定となるためである。

図一 2 は楔が進行しつつあるとき、あるいは進行を停止して安定の状態にあるときの記録であるが、降雨等のために流量が増加すると安定の状態にあつた楔は後退しはじめる。図一 3 に



図一 3



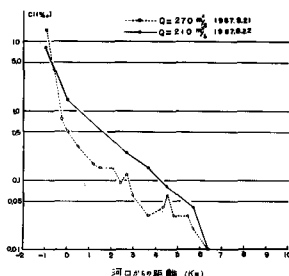
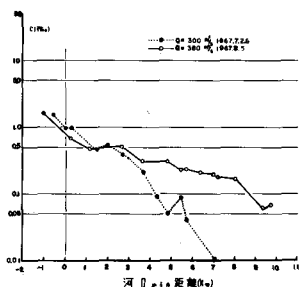
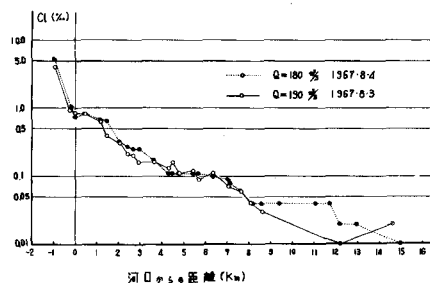
図一4

示した例は何れも降雨による増水のため楔が後退をはじめたときの状況を示すもので、流量が同程度の図一2の記録と比較すると、塩水層と淡水層との境界面は極めて不安定で、塩水と河水とが境界面のいたるところで激しく混合しているのがみられる。1961年10月7日の記録（流量約 $500\text{ m}^3/\text{sec}$ とおもわれる）では浸入時にみられた舌状の楔先端はみられず、塩水は河底の凹凸にそつて河水中に拡散している。

図一4は淡水層の厚さと流量との関係を示すもので、境界面が明瞭にみられる河口から4.5km、8.1km2地点における河水面から境界面までの深さを縦軸に、観測時の流量を横軸にとつてある。楔の状態が安定の場合には淡水層の厚さは流量が増加するにつれて大体直線的に増加するが、楔が不安定の場合には、安定の場合にくらべて流量が同じでも淡水層の厚さは厚くなり、安定状態からのずれは流量が多くなるとくにいちじるしい。安定状態の場合には4.5km、8.1km2地点間の境界面平均勾配は流量 $200\text{ m}^3/\text{sec}$ で 0.17×10^{-3} 、 $300\text{ m}^3/\text{sec}$ のとき 0.19×10^{-3} の逆勾配となるが流量が増加して楔が後退しつつある不安定な状態では境界面の勾配も大きく、図一3の流量 $200\text{ m}^3/\text{sec}$ （1964年7月22日）では同区間平均勾配 0.26×10^{-3} 、流量 $380\text{ m}^3/\text{sec}$ （1964年7月24日）のときは 0.31×10^{-3} と安定の場合よりかなり大きな値となつている。

3. 表面水の塩素量

図一2、図一3によつても明らかなように、境界面における塩水と淡水の混合の状況は楔の安定、不安定によつていちじるしく異り、また河道の曲折や河底の形状によつても影響される。従つて淡水層への塩水の拡散の状況をしらべるには、なるべく多くの地点の塩素量分布をすることが必要である。筆者らは航行中の船から連続的に表面水を採水してその塩素量を測定し、また数点で塩水層の塩素量をも測定した。採水点の河口からの距離および表面水塩素量は図一5に



図一5 表面水塩素量

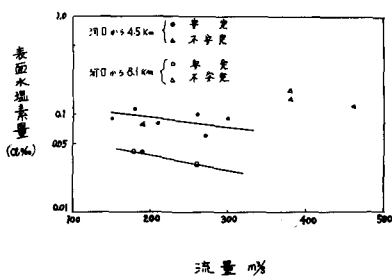


図-6

示すとおりである。図では河水の back ground を 0.01 Cl‰ として示したが、何れの場合も back ground の実測値はほとんど同じであつた。また河口附近では海水と河水がはげしく混合するため、河口の表面水塩素量測定値は河川流量によらず大体 1.0 Cl‰ で、各地点の表面水塩素量は指数関数的にこの値に近づく傾向にある。

1967年 8月3日、4日は所謂夏の洪水期で、塩水の先端は河口から 15 km にも達しており、楔はきわめて安定の状態、各地点の表面水は両日ともほとんど同じ塩素量分布を示している。流量が増加した場合はたとえば 1967年 7月26日の測定結果のように楔が後退するので表面水塩素量曲線の勾配は急になる。1967年 8月5日の例は、楔が不安定な場合であつて境界面における混合が激しく行われる結果淡水層の塩素量は先端附近から急激に増加し、勾配は緩になつている。1967年 8月21日、8月22日は共に楔の安定な場合であつて、流量も大きな差はないが、8月22日にはとくに約 10^3 /sec の南風が吹いていたため、風によつて混合が促進され、流量の少い 8月22日の方が逆に表面水塩分濃度が全境界面にわたつて多くなつたものとおもわれる。塩分層の塩素量は楔先端附近の河底の浅い部分では 1.0 Cl‰ 以下となつているが、その他の部分では 1.7 ~ 1.8 Cl‰ と海水に近い塩分濃度で、また同一の観測では各地点ともほとんど同じ値であつた。

図-6は河口から 4.5 km、8.1 km の地点における表面水塩素量と流量との関係を示したものである。楔が安定の場合は、流量が増加すると表面水塩素量は直線的に減少しているが、不安定の場合は、安定の場合にくらべて淡水層の厚さが増加するにもかかわらず表面水の塩素量も増加しており、淡水層への塩分の拡散が激しく行われることを示している。

いま塩水の拡散によつて塩水層と表面水の塩素量の差が e^{-kx} の形であらわされるものとして塩水の淡水層への拡散係数をもとめる。塩水層の塩素量を一様に θ_0 (Cl‰)、河口からそれぞれ x_1 、 x_2 の距離にある地点の表面水塩素量を θ_1 、 θ_2 とすれば、 x_1 、 x_2 区間における平均的な塩素量の拡散係数 k は

$$\theta_0 - \theta_1 = (\theta_0 - \theta_2) e^{-k(x_2 - x_1)}$$

から計算することが出来る。

図-7は k の値が各地点によつてどの様に変化するかを示したものである。1967年 7月27日、8月3日ともに楔が安定の場合であるが、各地点によつて k の値は大きく変化している。しかし河道が大きく曲折している 5 ~ 6 km の区間および河底に凸起のある 3.7 km 附近から下流側は全般的に k の

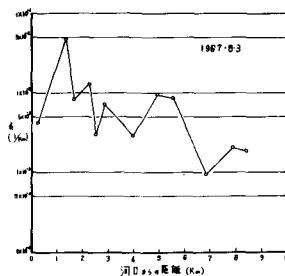
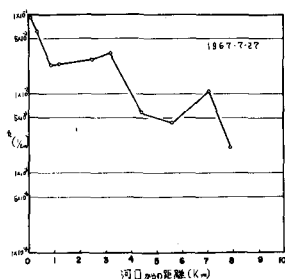


図-7

値が大きく、とくに塩水の拡散が激しいことがわかる。また楔が安定の状態にある1967年8月3日、8月4日と不安定の状態にある8月5日の同区間の k の値を比較すると表-1のようになる。

河口からの距離 (km)	1967年8月3日	1967年8月4日	1967年8月5日
0.28~1.16	0.016	0.013	0.014
2.68~3.70	0.0073	0.0071	0.012
5.70~6.38	—	0.0015	0.0029
6.38~7.07	0.0021	0.0069	0.0076

表 - 1 拡散係数 k ($\frac{1}{km}$)

表から流量が増加して楔が不安定の場合は k は大きな値となることがわかる。

4. 表面水電気伝導度と塩素量

河水表面への塩分拡散の様子は、電気伝導度の測定によつても知る事が出来る。河水中には問題とする塩素イオンをも含めて、多種多様の汚水に原因するイオンが存在しており、拡散によつて表面へ達する塩素イオンと区別出来ないために、電気伝導度の値から直ちに塩素量を知る事が出来ない。

しかし、これら汚水に原因するイオンは河水と共に流下して来るのに対し、目的の塩素イオンは下層塩水から供給されるものであるから汚水のイオン濃度が一定であれば両者は区別出来る。1967年8月21~22日の両日、表面水の採水とあわせて電気伝導度計で、河口から塩水楔先端まで連続観測を行つた、観測は水面下30cmの位置で行つたが、そのうち21日の記録の一部を写真-1、2として示す。

まづ写真-1は塩水楔先端位置より更に上流で得た記録で、この点では内部からの塩分拡散はない

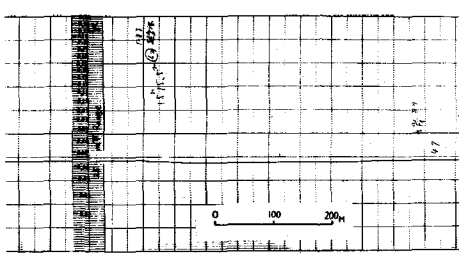


写真 - 1

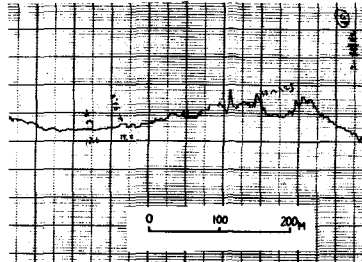


写真 - 2

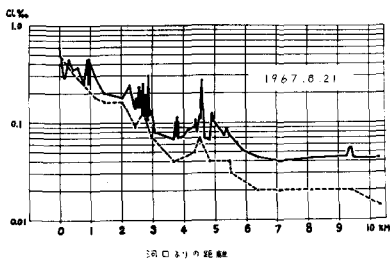
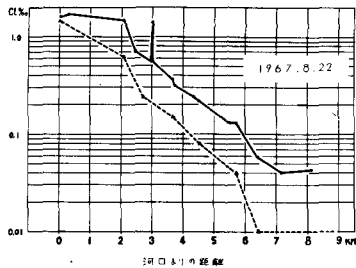


図 - 8 (1)



(2)

から河水自体の持つイオン濃度が示されており、又このイオン濃度は時間的にもほぼ一定であつて河水が良く混合している事をも示している。

この様に back ground が一定値を持てば内部境界面からの塩分拡散現象の解明は比較的容易であるが場所的には必ずしも一定値を示さず図-8(1)の9.35km地点で検出した長さ約250mにわたる伝導度の極大は明らかに高濃度のイオンをもつ水塊の流下がある事を示している。

この様な大水塊は河川の乱流の規模を大きく越えた大きさを持つものと考えられるから、伝導度が back ground の値までは容易に低下せず、内部境界面からの塩分拡散の観測の妨げとなる。

写真-2は塩水楔上の表面水電気伝導度を示したものであり写真-1とは異なり大きな変動が見られる。これは周期の長い振巾の大きい変動の上に短周期の小振巾変動が乗つた形で現われているが、この変動は大きい方で約120m、小さい方で約3~8mの長さに相当し、この変動分が即ちそれぞれの規模の乱流によつて起つた塩分拡散による伝導度変化と考えられる。

以上8月21日の観測結果であつて、これは平常一般に石狩川河口部で見られる状況であると思われるが、翌22日は南ないし南南東の風が9~10m/s吹き水面に風波の発達が見られた。

この日の表面水電気伝導度記録は図-8(2)に示した通りである。図-8(1)も同じであるが実線が電気伝導度、点線が途中採水した表面水の塩素量である。電気伝導度計はあらかじめ各種濃度の食塩水によつて目盛の較正をしてあり、観測中の目盛から、直ちにその塩素量が知れる様になつてゐるが、河水中の観測では他のイオンが存在するので結果的には各種イオン全体の電気伝導度を塩素量に換算した事になつた。

図-8(2)は前日と異なり一ヶ所を除いて全く変動が見られず、河口方向に徐々に増加する傾向だけが見られるのと、前日に比して7km~8km地点以外は、いづれも伝導度が大きな値を示しているのが特徴的である。

これは河水表面で風波のために強い混合が起り、イオン濃度が各所で平均化されて前日見られた様な変動を消し、又この風による水面上の気圧変動が内部境界面に内部波を発達させて下層海水からの塩分拡散を増大し、表面における塩素量の増加をもたらしたと考える事により説明が出来る。

河口より3km上流地点の極大は、この地点が石狩町の渡船場にあたつており、この点の河水層の厚さが観測時に3.2mであつた事などを考え合わせて、内部境界面で船舶の航行による混合が起り、それが表面水に現われたものとも思われるが今後の観測にまちたい。

、図-8(1)、(2)共に電気伝導度と表面水塩素量の、河口へ向つての増加傾向はほぼ一致していると見て良く、表面水採取を密に行うことにより塩素量変化の微細な構造が明らかとなれば、両者のグラフはより良い対応を見せるものと考えられる。

5. 結び

石狩川河口の塩水楔の超音波による観測結果を整理し、流量と形状および拡散状態の関係をしらべ、また、表面採水、および自記連続記録による表面塩素量分布の種々の場合をしらべて多くの新しい知見を得た。