

河口における塩水と淡水の混合

福島 久雄*・八鍬 功**・高橋 将***・大谷 守正****

1. 序

河口付近における河水に下層の塩水くさびから塩水が混合する現象は、河口における工業用水、農業用水、河口付近における流量測定などの問題と関連し、実際面からみても重要な意味をもっている。石狩川河口をモデルとしたこれらの問題の解明について、筆者らは長年にわたって調査研究を行なっているが、昭和 36 年以来、超音波による観測を開発し、塩水くさびの縦断構造を具体的に描くことができるようになった。この方法によればくさびの形状、境界面の状態等が刻々と図に描かれてゆくの、従来測器を数地点で船上から下ろして行なった不連続な観測の欠点を補うことになる。超音波による記録は最近かなりの量に達したが、これらを整理してまず考えられることは、この方法なくしては塩水くさびの挙動の詳細を知ることがきわめて困難であるということである。

また筆者らは、昨年より観測船上で河水の電気伝導度の連続自記記録を行ないつつ河口を上下し、同時に同じ船上から多数回の採水を行なってその塩素量を分析によ

って決定し、これらの観測結果を照合して塩水と淡水の混合の状態を調べてみた。以下にその結果を報告する。

図-1 はこの観測の行なわれた石狩川河口の平面図である。

2. 流量による塩水くさびの消長

図-2, 3 は筆者らが 1964 年から 1967 年までの 4 年間に超音波測深機によって観測した石狩川河口における塩水くさびの記録の一部を図示したものである。くさびの状況は潮位の変動によっても影響されるが、石狩湾に

図-2 (a) 1965 年 6 月 4 日
 $Q=720 \text{ m}^3/\text{sec}$

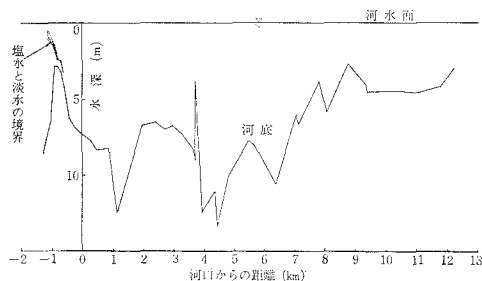


図-2 (b) 1964 年 4 月 25 日

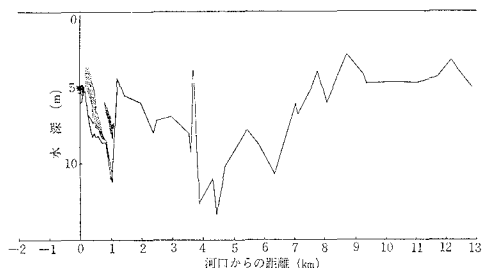


図-2 (c) 1965 年 6 月 5 日
 $Q=550 \text{ m}^3/\text{sec}$

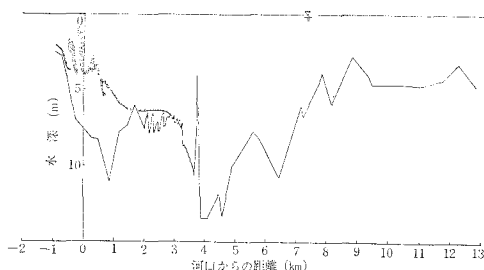
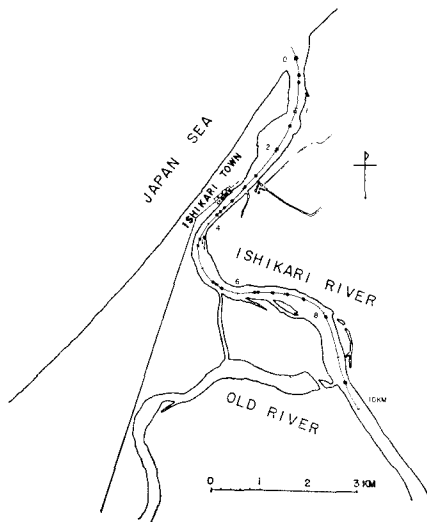


図-1 石狩川河口平面図



* 正会員 理博 北海道大学教授 工学部
 ** 正会員 理博 北海道大学助教授 工学部
 *** 北海道大学講師 工学部
 **** 北海道大学助手 工学部

図-2 (d) 1967 年 8 月 21 日
 $Q=270 \text{ m}^3/\text{s}$

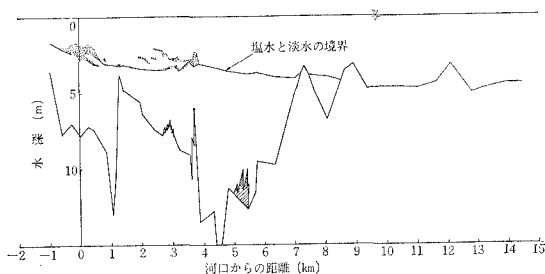


図-2 (e) 1967 年 8 月 3 日
 $Q=190 \text{ m}^3/\text{s}$

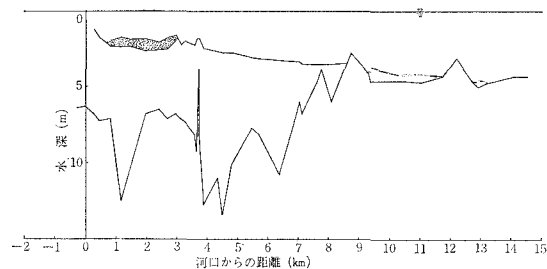


図-3(a) 1961 年 10 月 7 日
 $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$

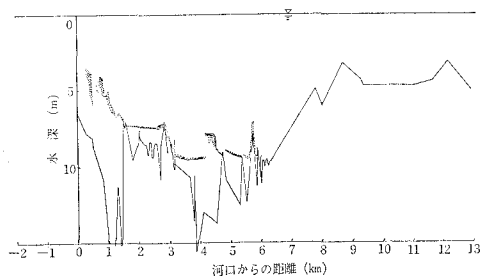


図-3 (b) 1964 年 7 月 24 日
 $Q=380 \text{ m}^3/\text{s}$

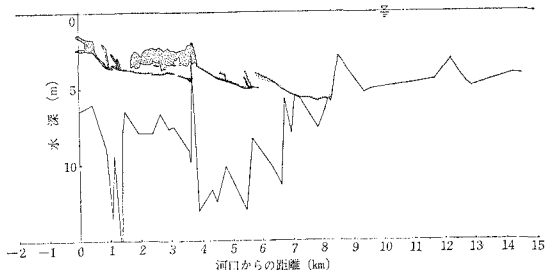
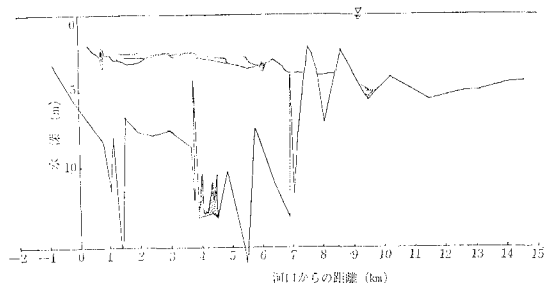


図-3 (c) 1964 年 7 月 22 日
 $Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$



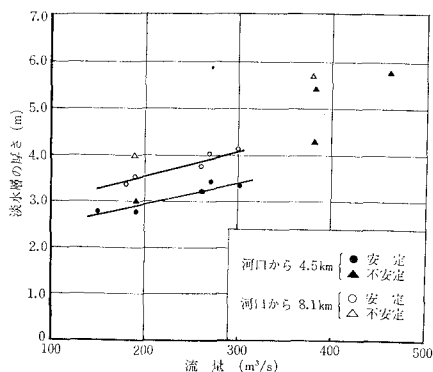
おける干満の差は最大 30 cm 以下であって、河川流量の変化による影響ははるかに大きいとおもわれるので、とりあえず河川流量とくさびの消長との関係について考察する。

図-2 (a) 流量 $720 \text{ m}^3/\text{sce}$ の記録では、塩水は河口内に入っておらず、河口の凸部で塩水と淡水とは激しく混合して、不明瞭な境界面がみられる。流量がやや減少したとみられる 図-2 (b) では塩水はくさび状をなして河口内に侵入しようとしている。また河口付近の凹部には前回出水の際くさび先端が河口外に後退したあとにも塩水が残っており、その境界面では塩水が河水中に拡散している状況がみられる。流量がさらに減少すると 図-2 (c) 流量 $550 \text{ m}^3/\text{sec}$ のようにくさびの先端は舌状をなして大きく河口内に侵入する。図-2 (d), (e) は流量がそれぞれ $270 \text{ m}^3/\text{sec}$, $190 \text{ m}^3/\text{sec}$ でいずれも渇水期の例であるが、淡水層の厚さは流量の減少とともにますますすくなり、図-2 (e) の例では塩水の先端が河口から約 13 km の地点まで達している。また河底が浅くなっている先端付近では、川筋の凹部を通して侵入した塩水が河底の凹部にたまったような状況を示している。4 km 付近より下流側でとくに激しい塩水と淡水の混合がみられるのは 3.7 km にある河底の凸起によって境界面が不安定となるためである。図-2 に示したのはいずれもくさび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ったくさびは不安定となって後退しはじめる。図-3 の例は降雨による増水のためくさびが後退しつつあるときの状況を示すものであるが、図-2

にくらべて境界面はきわめて不安定である。図-3 の (a), (b), (c) はそれぞれ 図-2 の (c), (d), (e) と同程度の流量における記録であるが、いずれの場合も図-2 の安定状態にくらべて塩水と淡水の境界面は不安定で、境界の全域にわたって塩水と淡水とが激しく混合しているのがみられる。とくに 図-3 (a) の記録では、くさび侵入時にみられた舌状のくさび先端はみられず、塩水は河底の凹凸にそって河水中に拡散している。

図-4 はくさび侵入時における淡水層の厚さと河川流量との関係を示したものである。境界面が明瞭にみられる河口から 4.5 km, 8.1 km の2地点における淡水層の厚さと流量との関係を調べると、くさびの状態が安定の場合には両地点とも淡水層の厚さは流量の増加とともに大体直線的に増加するが、くさび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あっても淡水層の厚さは厚く、安定状態からのずれは流量が多い場合にはとくに著しい。また塩水と淡水の境界面の勾配も安定の場合

図-4 淡水層の厚さと流量との関係



と不安定の場合とは著しく異なる。たとえば、河口から 4.5 km, 8.1 km 2 地点間の勾配は安定の場合流量 200 m³/sec, 300 m³/sec でそれぞれ 0.17×10^{-3} , 0.19×10^{-3} であるが、くさびが後退しつつある不安定な状態では、同地点間の勾配は流量 200 m³/sec (図-3 (c)) で 0.26×10^{-3} , 流量 380 m³/sec (図-3 (b)) で 0.31×10^{-3} と前者にくらべて非常に大きな値となっている。

3. 表面水塩素量分布

塩水と淡水との境界面における混合の度合は流れの状況によって変化するし、また地域的にも異なるものとおもわれる。したがって、淡水層への塩水の拡散の状況を調べるにはなるべく多くの点の塩素量分布を連続的に測定することが必要である。筆者らは、塩水くさび全域にわたる塩水の拡散状況を調べるために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た。採水点の河口からの距離および各地点における表面水塩素量は図-5 に示すとおりである。図-5 (a) 1967 年 8 月 3 日, 4 日は夏季渇水期の例で、塩水の先端は河口から 15 km にも達しており、くさびはきわめて安定で、各地点の表面水塩素量は両日ともほとんど同じ値を示している。図では、河水の back ground を 0.01 Cl% としてあるが、表面水塩素量は河口に近づくにつれて指数関数的に増加し、河口付近では海水と河水が激しく混合するため増加

図-5 (a) 表面水塩素量分布 (1)

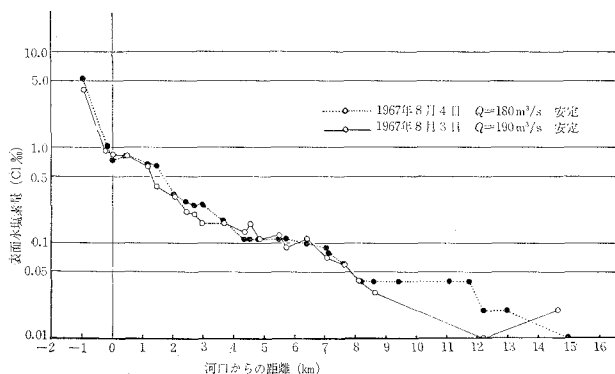


図-5 (b) 表面水塩素量分布 (2)

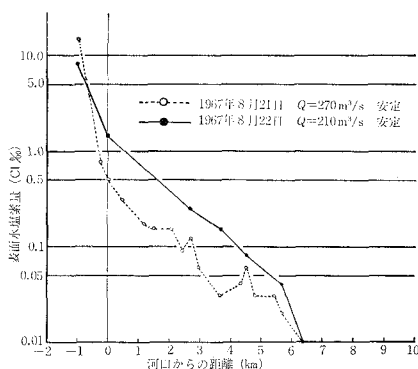
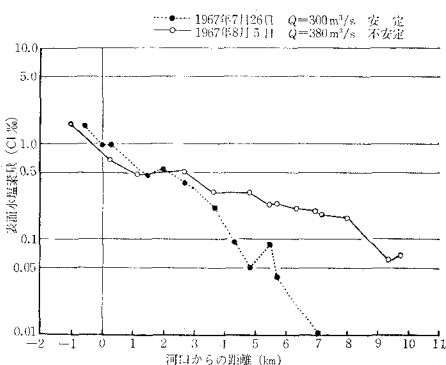


図-5 (c) 表面水塩素量分布 (3)



の度合は大きくなっている。したがって、くさび先端を原点とし、河水の流下方向を x 軸にとれば、河口までの任意の地点 x_1 , x_2 における表面水塩素量 S_1 , S_2 と塩水層の塩素量 S_0 との関係は次式で与えられる。

$$S_0 - S_2 = (S_0 - S_1)e^{-k(x_2 - x_1)}$$

ここに k は混合の度合をあらわす係数で、塩素量の拡散係数、河水の流速、淡水層の厚さの関数である。また S_0 の値は実測の結果によればくさび全域にわたってほぼ同じで、海水の塩素量に近い値であった。流量が増加した場合は図-5 (b), (c) のようにくさびの先端が後退し、かつ河口部における表面水塩素量が同程度におさえられているので表面水塩素量曲線の勾配は急になる。

図-5 (b) 1967 年 8 月 21 日, 22 日は流量がそれぞれ 270 m³/sec, 210 m³/sec の場合でもにくさびは安定であったが、8 月 22 日には 10 m/sec 程度の南風が吹いていたため風によって混合が促進され、流量の少ない 8 月 22 日のほうが流量の多い 8 月 21 日にくらべて逆に全境界面にわたって塩素量が大きな値になったものとおもわれる。図-5 (c) 1967 年 7 月 26 日, 8 月 5 日は流量がさらに増加した場合の例である。7 月 26 日はくさびが安定状態であったのに対し、8 月 5 日はくさびが不安定状態であったため境界面における混合が激しく行なわれ、淡水層の塩素量はくさび先端付

図-6 (a) 1967年7月27日

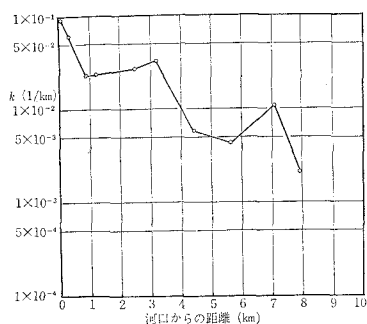
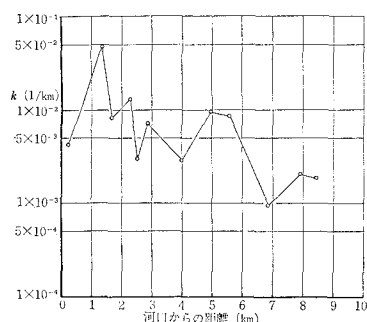


図-6 (b) 1967年8月3日

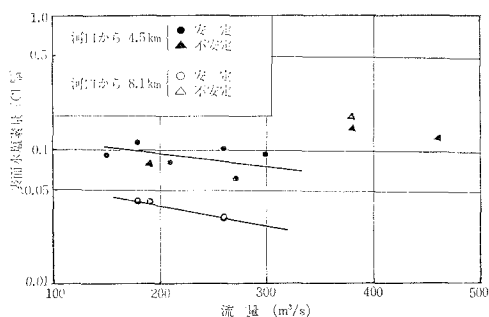


近から急激に増加して勾配はむしろ緩になっている。

図-6 (a), (b) は 1967 年 7 月 27 日, 8 月 3 日の測定で得られた k の値を示したものである。いずれもくさびの状態が安定の場合であるが, 地点によって k の値は大きく変化している。河口に近づくにつれて k は大きな値になるが, とくに河道が大きく曲折している 5~6 km の区間, および河底に突起のある 3.7 km から下流側では混合が激しく行なわれるため k の値が大きいことが他の例でも確かめられた。

図-7 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。くさびが安定の場合は両地点とも流量が増加するにつれて表面塩素量は直線的に減少しているが, くさびが不安定の場合には安定の場合にくらべて図-4 に示したように淡水層の厚さが増加するにもかかわらず表面水塩素量も増加している。これからくさびが不安定の場合には安定の場

図-7 表面水塩素量と流量との関係



合にくらべて塩水と淡水の境界面における混合が激しく, したがって淡水層への塩分の拡散も非常に多いことがわかる。

4. 表層水電気伝導度の連続自記測定

表面水に含まれる塩分の量は, 電気伝導度を測定しても知ることができるから, 昨年来トランジスタ化した交流ブリッジと小型の電極を用いて, 河道の縦断連続観測を行なっている。

ただし河水中には内部境界面から拡散してくる塩分(塩素イオン)のほかに, 工場排水, 農業用水や汚水の混入により多種多様なイオンが存在し, 電気伝導度法のみではこれらを区別できないので, 塩水くさびから拡散により表層水へ供給される塩素イオン濃度の絶対量は求め得ない。

しかし昨年試験的に行なった数回の伝導度測定の結果, 多くの場合流下してくる表層水の汚水イオン濃度は, 時間的にも場所的にもおおむね一定値を示し, とくに縦断連続観測に要する 1~2 時間の範囲では, この back ground となるイオン濃度の値は記録紙上で明確に識別できることがわかった。

必要ならば, 測定値からこの back ground を差し引くことにより拡散塩素イオン濃度だけを取り出せるが, 半対数紙上に河口からの距離との関係を plot するならば, どちらも同じ形となるのでとくに back ground を除かなかった。

ただ一, 二, 例外的な測定記録として局所的な高濃度イオンをもつ水塊がみられた場合があるが, これは一時的な汚水の放流があったとしか考えられないものなので, ここではとり上げないことにする。

硝酸銀滴定法で, 表面水の塩素イオンの連続的な濃度変化を調べることは, 採水の早さに限りがあるので, ある密度以上行なうのは不可能であり, また滴定作業自体簡便な方法ではなく, ここに電気伝導度法を併用すれば, 塩分拡散の研究をより効果的に進めることができる。

図-8 は塩水くさび先端位置よりさらに上流で得た記録の一例で, 当然内部からの塩分拡散による塩素イオンの供給はなく, 河水のもつ各種イオンの back ground

図-8

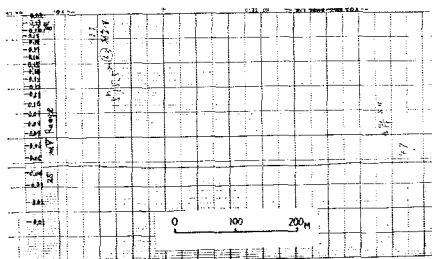


図-9

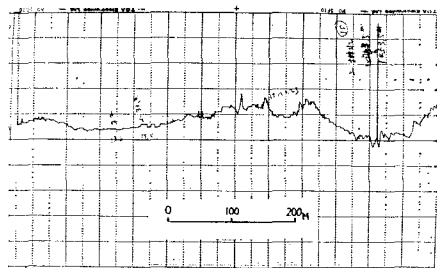
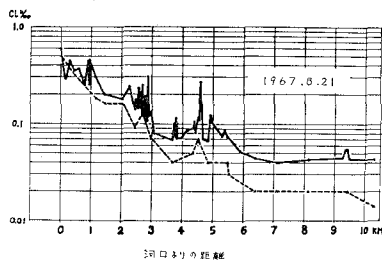


図-10



を示し、ほぼ一定値を保っているのがわかる。

図-9 は下層に塩水くさびが進入している地点で測定した例で、図-8 と異なり大きな変化を示している。この変化分は塩水くさびから表層水に拡散した塩分によるものである。

この変動についてみると、大振幅長周期の変動に、小振幅短周期の変動が重なった形で現われており、縦断方向の距離に換算すると、それぞれ約 120 m、約 3~8 m に相当し、これからそれぞれの規模の乱流の存在がうかがわれるのである。

変動はもちろん河水流量、河床地形、あるいは流速などに関係するから、いつも同じ値にはならないが、長短二様の周期変動は多くの伝導度記録に見られるもので興味ある現象である。

図-10 は 1967 年 8 月 21 日に行なった縦断観測の結果を示したもので、塩水くさび先端は河口より 8.6 km の地点に達していた。

以下の図は、いずれも縦軸を電気伝導度ではなく、塩素量に換算して示しており、ただちに硝酸銀滴定法で求められる塩素量と比較できるようにしたものである。

図中点線は測定中数点で採取した表層水の塩素量を、硝酸銀滴定法によって測定した数値であって、両者の形はほぼ一致しており、細部のちがいは採水を密に行なうことにより消失するものであると考えられる。

電気伝導度法による back ground は、このとき約 0.045% Cl^- であるが、滴定法による back ground は通常 0.01% 程度であるから、図中点線は塩水くさび先端より上流においても、back ground よりも大きい値になっている。

このことは、くさび先端の位置よりも上流ですでに拡

散塩分の存在を示すもので、この原因は後述するような古い塩水くさびの残りがさらに上流の凹部に滞留していることを推測させる。

この分を別として考えると、くさび先端位置より約 2.1 km 下流に至って、はじめて表層水の電気伝導度に変化が現われているが、あわせて行なった超音波測深機による観察によれば、この 2.1 km の間の内部境界面の反射像はきわめて強く明瞭で、安定した面であることがわかり、くさびとしての勾配もわずかで、くさびの前進速度は小さいと推定され、いわゆる弱混合型の典型的くさびであって、そのため拡散塩分が測定にかからない程度に少なくなっていたのであろう。

図中 4.5 km 地点に見られる変動は、この地点で河道が曲がるため、らせん流を生じた断面が小さいので流速が大となることが多く、この地形的特徴に加えて観測時の流量が $270 \text{ m}^3/\text{sec}$ と渇水時に属していたため塩分濃度が高くなったものである。

3.7 km 地点には、すでに述べたごとく河床に大きな突起があり、これにより常に局所的乱流拡散が生じており、記録にもそれが現われた。

図-11 は翌 8 月 22 日の測定結果である。河水流量は $210 \text{ m}^3/\text{sec}$ となり、塩水くさびの状況は前日とほとんど変わっていないが、この日は S ないし SSE の風が 9~10 m/sec 吹き水面に風波の発達が見られた。

結果は前日と一変して大きな変動が 1 カ所にみられるだけで他はすべて消失し、また濃度の勾配が急になっているのが特徴である。

これは風波が塩分拡散に影響をもたらした一例と考えられる。

まず風波により表面の河水には強い混合が起こりイオン濃度が各所で平均化されたため前日のごとき変動がなくなり、また風による水面上の気圧変化が境界面に内部波の発達をもたらした拡散量を増大させたものと考えられる。

1 カ所残っている変動は、石狩町のフェリーボート運航地点でみられるもので、これはボートのスクリーンによる機械的な混合の結果である。

図-11

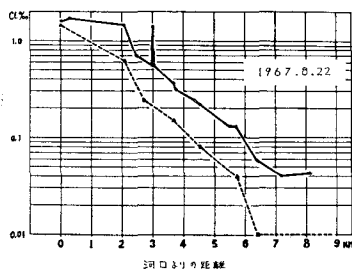


図-12 は本年7月15日のくさび先端部の測定結果である。

あわせて行なった超音波測深機の記録によると、くさび先端は河口より8.1 kmの地点にあり、この点で上流側の河床凸部のため遡上をさまたげられていた。この場合の河床凸部の深さは2 m、塩水くさびの深さは4.5 mで境界面があと2.5 m上昇しなければ遡上できない状況である。

またこれより上流では、河床は徐々に深くなり河口から12.5 km付近までの間、長さ約3.8 kmにわたる大凹部を形成しており、ここに古い塩水くさびが残留しているのが見られた。

石狩川河口部の河床は起伏に富んでおり、数多く存在する凹部のうちで塩水くさび先端が進退をくり返す7~15 km地点では、河水流量の増加によって掃流される塩水くさびが掃流されきれずに残ることがあり、このような古い塩水層がしばしば見出されるのである。

このような状況下では古い塩水層から供給される拡散塩分に、塩水くさびから供給される塩分が重なり、表面水電気伝導度曲線は階段状となる。

図-12では、この階段ははっきり現われていないが、それは古い塩水層がすでに相当塩分濃度を失っていたためであろう。

図-13は翌々日の17日の測定結果であって、河口から6.5~10.5 kmに至る間に見られる伝導度曲線のふくらみは他の測定にない著しい特徴である。

これは前々日來凸部にさえぎられながら上昇を続けていた境界面が水面下2 m以浅となり、凸部を乗り越えて上流側の凹部へ

図-12

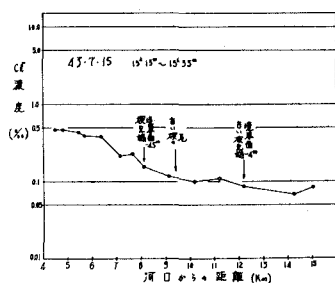
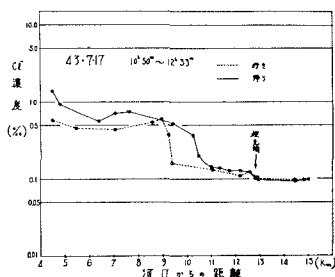


図-13



流れこみはじめた際の測定結果である。

塩水くさびは上流側凹部への下り勾配を、厚さ2~30 cmの層となって前進し、凹部では境界面の深さが3 mになっていた。

このような凹部の境界面上昇と貯溜した塩水内部の活発な流動により境界面の粗度係数は一時的に異常に大きくなり、ために表層水電気伝導度が急増したと解釈している。

またくさび先端位置の直上の点から電気伝導度が増加しているのも同一理由による。

この日の測定は4.5 km地点から15 km地点までの間を往復行なったが、わずか100分の往復時間中に点線と実線で示すごとく大きな差異があった。

この変化は境界面上昇、すなわち境界面面積の増加が原因であろう。

このような一時的現象は急速に変化し、ただちに安定状態に達するため観測にめぐまれる機会はきわめて少ない。

5. 結 び

石狩川河口の塩水くさびの観測のうち主として超音波によるものを中心として述べ、流量とくさびの形、拡散状態との関係を調べた。また自記連続記録による表面塩素量分布の観測を調べ多くの知見を得た。さらに本年は48時間連続観測を行ない、また定置自記観測の装置も開発中であるので塩水くさびから塩水と河水の混合の現象はいっそう明らかになるであろう。

終りにこの研究を遂行するにあたり、北海道開発局土木試験所、同開発調査課ならびに石狩町のご援助によるが多かった。ここに感謝の意を表する。また観測に参加された工業力学第二講座の諸氏にも感謝の意を表わし、費用の一部は文部省科学研究費によったことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 福島・柏村・八鍬・高橋：超音波による河口二重水層の研究，第8回水理講演会講演集，(1963)。
- 2) H. Fukushima, M. Kashiwamura, and I. Yakuwa: Studies on salt wedge by ultrasonic method. Coastal Engineering, (1966) pp. 1435~1447.
- 3) 福島・八鍬・高橋・大谷：塩水楔境界面における拡散現象，第18回応用力学連合講演会講演集(1968)。
- 4) 福島・柏村・八鍬・高橋・大谷：河口成層流における塩水の拡散，第12回水理講演会講演集(1968)。