

北海道大学工学部	福 島 久 雄
同	柏 村 正 和
同	八 畝 功
同	高 橋 将

1. 序

従来河川の河口附近の塩水楔は塩分または水温、流速などの鉛直分布を実測することによって直接または間接に観測されているが、河底が不規則な場合や河道が彎曲している場合、または楔の先端が移動している過度的な場合に楔全体の形状を知るには非常に多くの時間と労力とを要し、場合によってはほとんど不可能ということが出来る。筆者らは数年前から音響測深機を用いて河道を縦断することにより、塩水楔の縦断全形状を一枚の記録紙に自記記録することを試みて多くの記録をとり、ほぼ満足すべき結果をえ、また同時に楔先端の形状や、河道の不規則による二層の混合状況の局部的変化など興味ある現象をとらえることが出来たので、ここにその一例をあげて発表する。また楔の自記記録と同時に、代表的な数地点で実測した塩分、水温、流速の鉛直分布から、二層の混合の状態と、流れの状態との関係について若干の考察を行うことにする。

記録に用いた音響測深機はとくに浅海用に設計されたもので 0 ~ 12.5 m の range を有し、送受信周波数として 100 K.C., 振動子としてチタン酸バリウムを使用し、図-1 のブロックダイアグラムにも示したように、記録と同時にオシログラフによって波形を観測することも出来、また抵抗減衰器によって二層の境界面からの反射率などを測定することも出来る。一般に境界面からの反射は微量であって、測深に用いる際よりも感度をずっとあげなければならなかった。

2. 石狩川河口における記録例

図-3 は筆者らが石狩川河口で観測した多くの記録のうちの一例で、昭和38年8月9日河口外約1 km の地点(記録紙の右端)から各断面の流心部にそって(図-2 の鎖線)

図-1 音響測深機ブロックダイアグラム

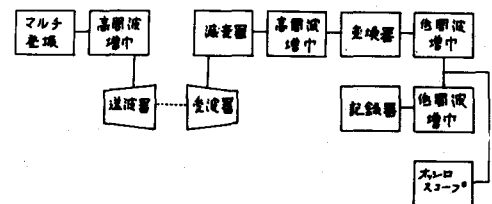


図-2 石狩川河口附近略図

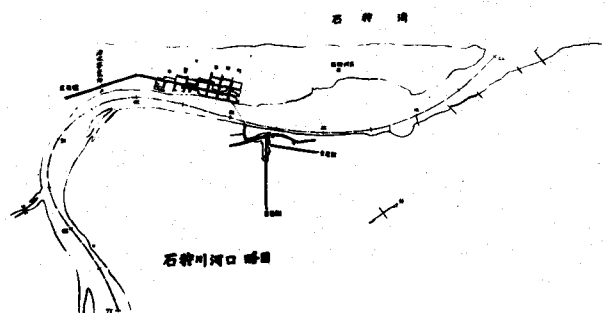
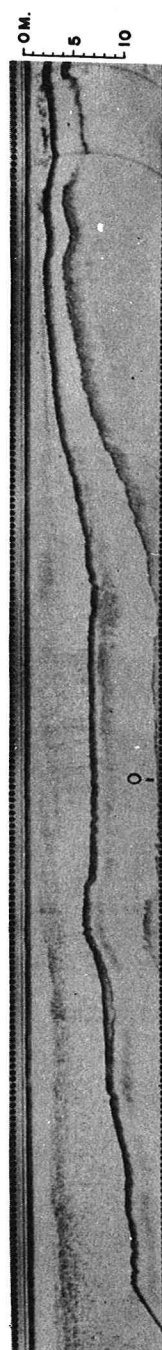
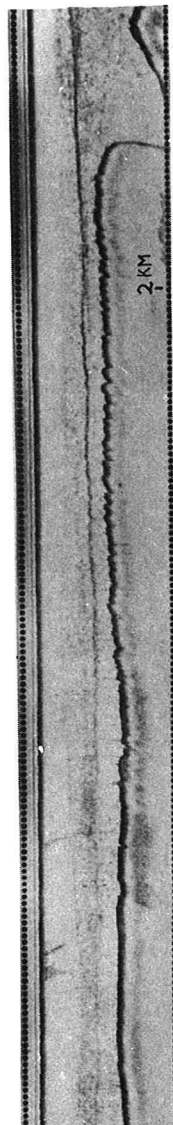
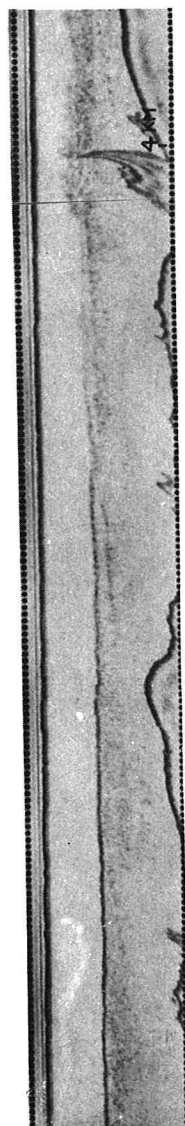
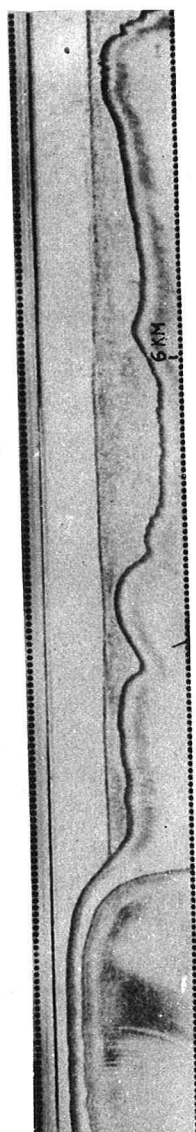


図 - 3 石狩川河口縦断 (昭 38. 8. 9)



を遡上し、河口から約 8.1 km 上流の水深浅くなって塩水楔の切れる地点（記録紙の端）まで約 9 km の間音響測深機によって底および海水と河水の境界面を連続記録しものである。従つて図-3 は河口附近 9 km 石狩川の縦断面を右岸側からみたものをあわしている。また図-2 は石狩川河口附近平面図であるが、河道が大きく彎曲して川は一様でなく、河口附近は水制や突堤など構築されているため、とくに河底が非常に規則で凹凸がはげしく、また河口は漂砂の積により水深が急激に浅くなっている。

記録当時の状況は、降雨によって増水してた河水が漸く減水し、前日から進入しはじめた塩水楔がやゝ安定した時期であつて、水深から約 5 m の境界面以深はすべて海水とな、上流部では海水の流速はなく、従つて二層の境界面は非常に安定して、明瞭な反射線

がみられた。後にも述べるように河道の変化によって二層の混合状態は局部的に変化し、図-2 における 4 km 附近から下流の 3 km 付近までは境界の記録がみだれ、二層間の混合がよく行われていることを示している。河口近くでは境界面の傾斜は急となって、流出する河水と流入する海水の接触面における混合がみられ、河口外に出るにつれて河水層はだんだん薄くなっている。図-3 の記録では底質からの部分的な異常反射もみられる。たとえば 600 m 附近の河底からは二重の反射がみられるが、これはもとの河底の上に新に泥が堆積したことを示すものとおもわれる。

図-4 (1) 河口から 9.2 km 附近 (昭 36.7.20)

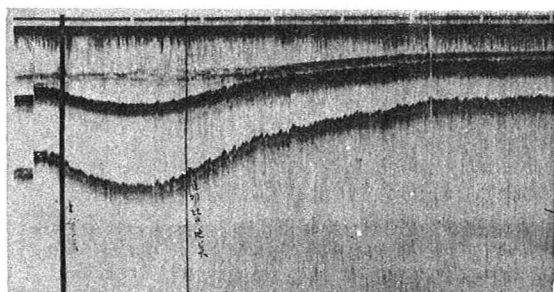


図-4 (2) 河口から 5.7 km 附近 (昭 36.10.7)

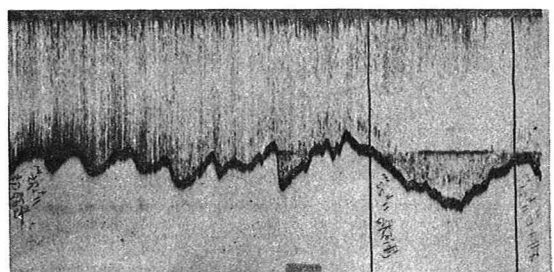


図-5 (1) 流速、水温、塩分の鉛直分布
石狩川河口第 1 突堤 (昭 38.8.9)

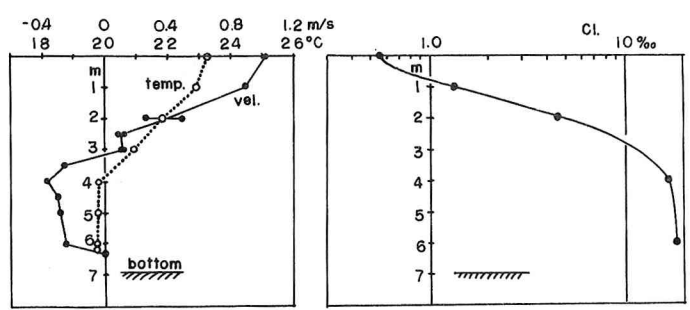


図-5 (2) 河口から 2.2 km の地点 (昭 38.8.9)

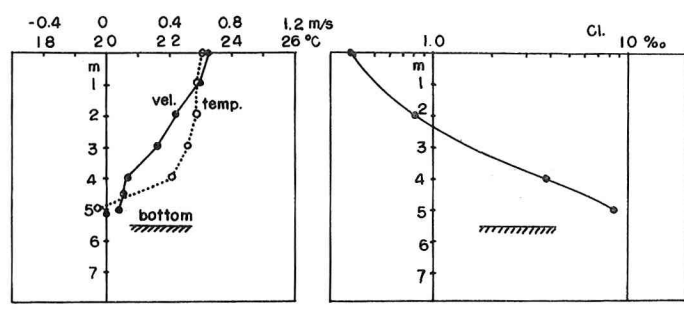


図-4に示したのは塩水楔の先端の形でとくに興味があるとおもわれる例である。(1)では海水が河底にそつて河底の凹部に流入している形となっている。これは河底に凹凸がある場合の塩水楔の遡上は、まず進入して来た海水が凹部に流入して凹部をうずめ、しかる後 Kármán の式で近似される速度で前進するとした筆者らの考察と現象的によく一致している。また(2)も(1)と同様に河底に凹凸がある場合の例であるが、凹部をうずめつゝある海水が凸部によって完全に前進を阻止されている状況を示している。これは塩水楔が後退する場合も全く同様であつて、楔の後退によって全体的な海水と河水の境界がなくなった後にも凹部に後退を阻止された塩水が残留し、部分的に河水との接触面が存在している例がいくつかみられた。これらはいずれも塩水楔の移動が河底の形によって著しく影響されることを示す例である。

夏季の渇水期には水面下1 m 近くまで海水が進水することがあり、この場合には塩水楔は図-3よりも更に長い距離にわたって存在することとなるが、増水期には塩水は完全に河口外に追い出される。

3. 現象の考察

記録紙に現れた塩水楔の状況について他の観測記録を参照しながら考察を加えることにする。塩水楔の実際の形状は理想化された形状として既に知られているものとはいくらか趣を異にしている。先端が丸くなっているものと予想されているが²⁾³⁾そのような状況は今回は見られなかった。ただし前に行なった他の例でややそれに近い傾向をみせているものがある。また河口では川巾が急変する

るので通常内部ジャンプが見られるはずであるがそれらしきものがないわけではないがそれほど顕著ではない。このときの塩水楔の長さは河口から8.1km にも達していてかなり発達した状況であつた。このときの淡水流量の正確な値はつまびらかでないが約 $300 \text{ m}^3/\text{sec}$ と推定される。淡水層と海水層の境界面の勾配 I_i はかならずしも一様ではないがこの場合には平均すると 28×10^{-4} である。一般に水面勾配 I_s との間に $I_s = \epsilon I_i$ の関係が成り立つので⁴⁾ ($\epsilon = 1 - \rho_1/\rho_2$, ρ_1, ρ_2 はそれぞれ淡水層, 海水層の密度) 水面勾配としては 5.6×10^{-6} が期待されるがこの値は平水時の石狩川ではまず妥当な範囲内の値

図-5 (8) 河口から3.8 kmの地点 (昭38.8.9)

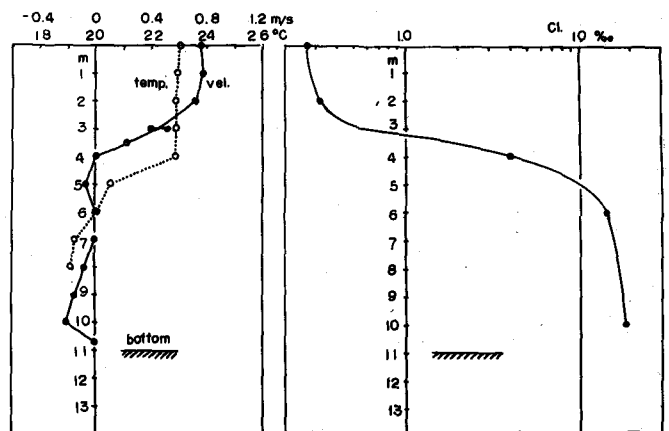
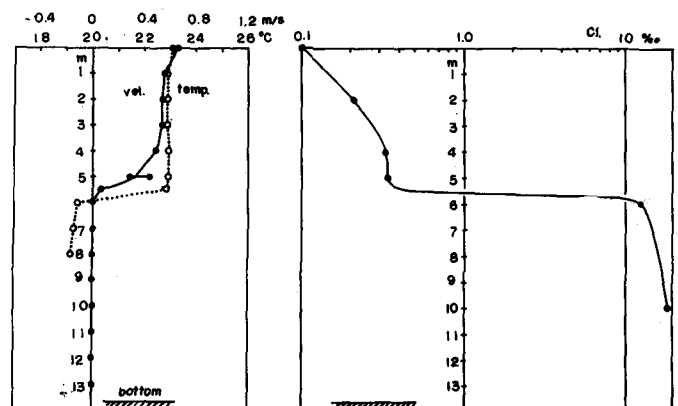


図-5 (4) 河口から4.5 kmの地点 (昭38.8.9)



といえる。記録紙上の二層境界面は淡水と塩水が明瞭に区切られている場合には最もよく現れるが二層が混合をおこしたときでも鉛直密度勾配が最も急な所でやはりはっきりと現れる。また二層が混合をおこす際にはその状況がそのまま記録されているので極めて価値が高い方法といえる。二層の境界面は塩水楔の全体にわたって安定なものではなく各所で乱れて混合がおこっていることが示されている。ここに示した例ばかりでなく従来行なってきた数度の記録でも常に河口から上流 3.8 km の町役場附近と河口近くの点ではかならず境界面の乱れが記録されている。この原因についてはまだ臆測の段階であるがこれらの点では表層の流れが他の点に較べてやや大きいことや河床が不整であつて凹凸がはげしいことなどが原因ではないかと思われる。記録全体について見られることであるが淡水層は比較的きれいであるが海水層は多くの点点が描かれて黒ずんで見えるのが特徴的である。この原因もまだ明らかではなく今後の問題になろう。この記録を得たとき同時に別の船によって塩水楔に沿って 4 ケ所で流速、塩分、水温の実測を行なった。これらは図-5 (1) ~ (4) に示してある。流速の測定には電気式流向流速計、水温にはサーミスタ温度計を用い、塩分は採水して塩素量を滴定により求める他、電気伝導度計を併用した。これによると記録紙上で二層境界がきわめて明瞭な治水事業所前の地点では、水温、流速、塩分いづれも劇然と境界面で値が不連続的に変っている。これから二層の混合は微弱なことが判るが、塩分濃度の図で、表層中の鉛直分布の形から見て下層海水層からの塩分混入が微量ながら存在していることが示されている。この地点から約 700 m 下流の役場前附近は先に指摘したように記録紙上で二層境界が乱れる地点であるが、流速塩分の分布は二層の境界附近でかなり勾配がゆるくなっていて乱れによって二層が混合していることを示している。又表層の塩分がかなり増加しているのも見られる。この点からさらに下流 1.6 km の燈台前地点、それに河口の第 1 突堤と行くに従つて表層塩分はさらに増大する。役場前地点で二層が乱れ混合が発達したがそれが燈台前地点では再び二層境界が明瞭に識別されるように記録紙上に現れるのは興味深い。この附近では川巾が増大し流速がおそくなり又流速の鉛直勾配がゆるくなっていることが原因ではないかと考えられるが、さらに研究を要する点である。河口第 1 突堤附近は表層は流速が早くなり同時に海水層も流入速度が大きい。又水温分布や塩分分布の勾配から判るように流出する流れと流入する流れとの間にはかなりの混合が行なわれていることが了解される。河口近くになつて記録紙上の二層境界面ににわか崩れ出すと同時に内部ジャンプの如きものが見られるのは、河道かこの附

図-6 実験水槽

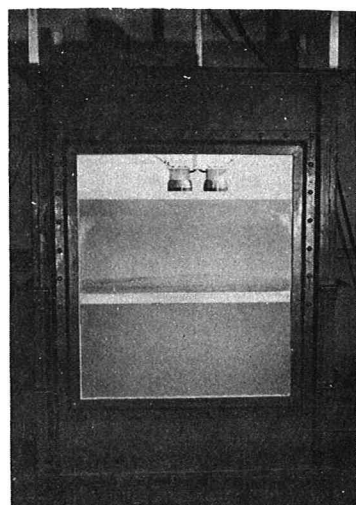
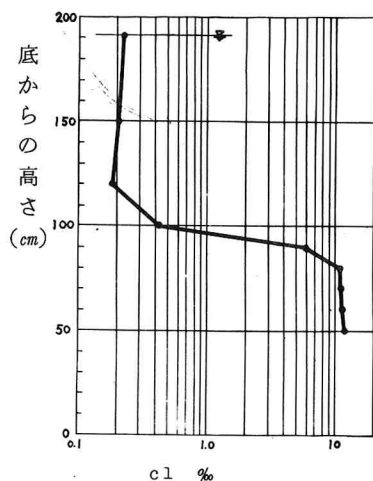


図-7 塩分鉛直分布



近で急激に変化することや水深が変化することによるものとおもわれる。

4. 水槽実験

密度の異なる流体が二層をなしている場合、その境界面から超音波の反射があることは既に実測あるいは実験によってたしかめられており、海洋方面ではいわゆるDSLが漁場と密接な関係があるところから、DSLに関する研究が多く行われている。⁵⁾しかしその反射が二層をなす海水の塩分の相異によつて生ずるものか、水温差によるものか、またはDSLにみられるプランクトン群によるものか、あるいは境界面にどの程度の塩分勾配がある場合に反射が生ずるかなどについてはなお解明すべき点が多い。また二層流体間に相対速度があつて、接触面で乱流混合が行われているような場合には、水塊群からの反射も考えられるので問題はますます複雑となる。これらの基礎的な問題を解明するためには前にも述べたように自記記録と同時に、塩分、水温、流速などを実測して流れの状態と記録との関係を考察したり、また水槽実験によって各要素を別々に切りはなして各要素からの反射率を調べたりすることが必要である。

図-6に示したのは筆者らが基礎的実験に用いている実験水槽で、巾1.5m、奥行1m、高さ2mあり、一面はガラスで内部を観察することが出来る。また図-7は同水槽内でえられた淡水と塩水の2重水層における塩分鉛直分布を示したもので、実際の河川で観測されるものと類似の形となっている。なおこの実験は現在進行中であり、境界面からの反射率などについては後の機会に述べることにする。

文 献

- 1) 福島久雄, 柏村正和, 八畝 功, 高橋 将: 石狩川塩水楔の遡上, 北海道大学地球物理学研究報告, 第7号, 昭和35年3月.
- 2) T. von Kármán: The engineer grapples with non-linear problems, Bull. Am. Math. Soc., 46, 1940.
- 3) L. Prandtl: The essentials of fluid dynamics, p.369, 1953.
- 4) 柏村正和: 河口における二重水層 (2), 北海道大学工学部研究報告, 第28号, 昭和37年3月.
- 5) たとえば T. Hashimoto, Y. Maniwa: Study of DSL by ultrasonic wave (1), (2), Jour. Tokyo Univ. Fish. vol.42, no.2, 1956.