

河口締切にともなう塩分分布変化について (Ⅱ)

国 司 秀 明・鈴 木 徹

ON THE CHANGE OF SALINITY DISTRIBUTIONS AFTER CLOSING OF RIVER MOUTH (PART II)

By *Hideaki KUNISHI* and *Toru SUZUKI*

Synopsis

The salinity distribution in the down stream side of a lock set near a river mouth due to fresh water discharge overflowed from a part of the lock is studied in a simple experimental flume. The results of the experiments show that the flow exhibits a stratified two layer system and that the salinity of the upper layer decreases with increasing the fresh water discharge.

1. ま え が き

河口締切堤を築造して海水の遡上を遮断するような場合に、締切堤下流側の塩分濃度がいかなる状況を示すかについては、これまであまり研究がなされていない。著者らは、締切堤の一部から淡水を溢流させる時に、下流側塩分分布が淡水放水量、放水形式、淡塩水の初期密度差、淡塩水落差によっていかなる特性的な変化を示すかについて、簡単な水槽実験を行った。

2. 実 験 方 法

実験に用いた水槽は防災研究所地形土壌部門に設置されているものである。その装置の概要は Fig. 1 に示すように、縦横 3m、深さ 0.5m の海部に、長さ 7m、巾 0.5m、深さ 0.5m の河川部が接続している。側壁は透明な塩化ビニール板であり、目視観察、写真撮影が可能である。海部の隅には表層取水型の排水孔があって、水位を一定に保つことができる。河川部の河口から 2.9m 地点に塩化ビニール板の10門のゲートからなる樋門を固定した。このゲートによって放水位置を任意に選べる。水道水に食塩を溶かして比重秤によって所定の密度の塩水を作り、これを樋門下流側に所定の水位差に保って溜めておく。一方、ゲート上流側からは浮子式流量計を通して一定流量の水道水を流す。溢流淡水放水型式は、樋門中央部 (Center

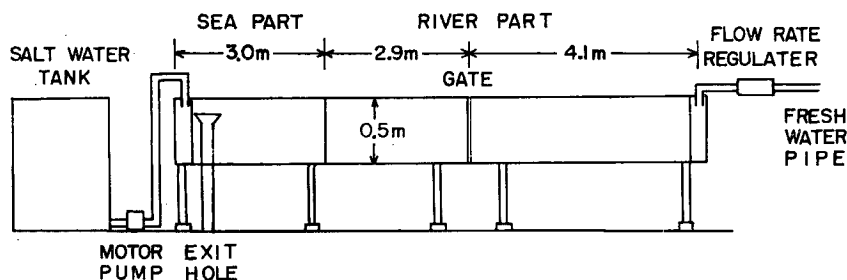


Fig. 1 General view of the experimental flume.

Over-flow) からと、樋門側壁側 (Side Over-flow) からとの二通りで、通水巾は両者とも河巾の $\frac{1}{2}$ である。

淡塩水の混合状況を調べるために直径 3 mm の電極を用いて電気伝導度の変化を自記させ、塩分濃度に換算する。測定は、河床および表面からそれぞれ数 mm 上下と、その中間で上層底部付近の三層を巾方向へ 5cm 毎に、順次ゲートから下流側へと行った。

また、目視によって混合状況や流況を調べるために、染料 (ウォーターブルー) の水溶液や粉末を利用した。

3. 目視による混合状況の一般的記述

ゲートから溢流した淡水は河床まで落下し、塩水と混合する。混合水はすぐに塩水上にのりあがり二層を形成して流下する。内部境界面は下流に向かって上っていく (Photo. 1)。

一方、淡水は塩水を取りこんで上層から流出していくため、下層には上流に向かう流速が認められる (Photo. 2)。右側が上流、左側が下流である。一見して、下層にかなりの流速のあることがわかる。この写真は、淡水流量 (Q) が 500l/h のものであるが、上層への塩水の混入量の大きいことが推察される。

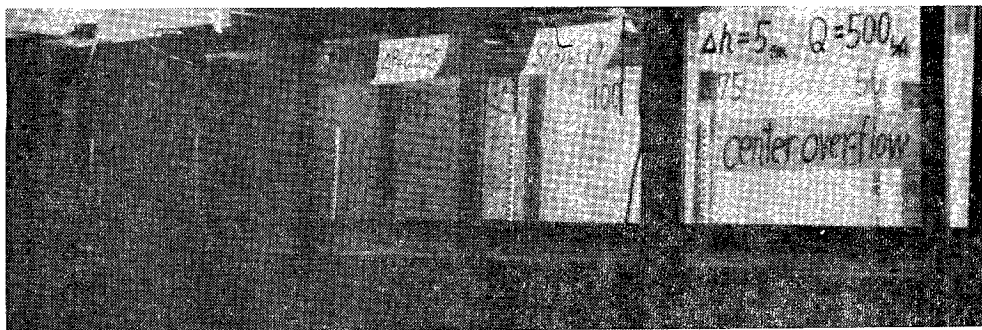


Photo. 1 Synoptic view of the stratified flow. (Center Over-flow. $Q=500\text{l/h}$, $\Delta\rho=0.005\text{g/cm}^3$, $\Delta h=5\text{cm}$)

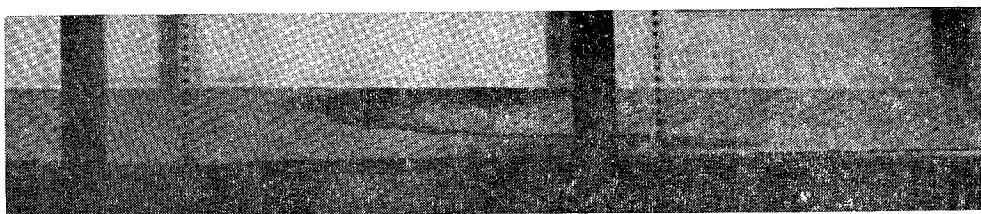


Photo. 2 Vertical velocity profile showing the appreciable velocity of the lower layer. (Center Over-flow, $Q=500\text{l/h}$, $\Delta\rho=0.02\text{g/cm}^3$, $\Delta h=5\text{cm}$)

後述の塩分分布との関連で、最も重要なパラメーターである淡水放水量によって、以下の記述を進める。

(1) $Q=500\text{l/h}$ の場合

a) Side Over-flow Photo. 3 に境界面先端の形状を示す。境界面は滑らかに低下して、その先端で消滅し、塩水がゲートから落下してきた淡水の領域へ侵入して、大きく混合しているのがわかる。その意味でこれを接触混合領域と呼ぶことにする。下層に染料粉末を投入して、水槽上部からその動きをみると、塩水がこの接触混合領域へその周囲から混入していく様子を見ることが出来る。樋門の側壁側から淡水を溢流さ

せているので、接触混合領域の平面的な形状は側壁に沿う半舌状である。

この混合水は塩水の上にのしあがって、河巾全体に拡がりながら流下するが、樋門付近の反対側には反流が存在している。

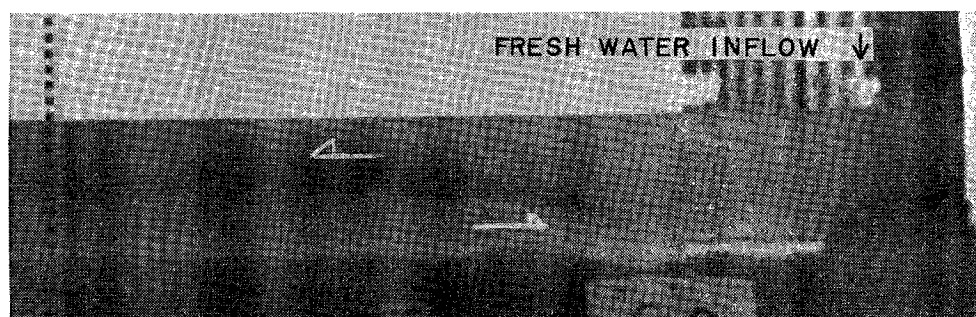


Photo. 3 Head of the interface. The lower arrow shows the intrusion of salt water into the mixing region with the fresh water falling over the gate. The upper arrow shows the direction of the upper flow. (Side Over-flow, $Q=500\text{l/h}$, $\Delta\rho=0.02\text{g/cm}^3$, $\Delta h=2\text{cm}$)

また、境界面には内部波が認められる。樋門からの流下距離（流程）の小さいところでは、波長は短かく、波頂は碎けて塩水は上層へ混入していく。流程が増すにしたがい境界面の乱れは減衰して、安定な境界面を示し、波長の長い内部波となる。

b) Center Over-flow 接触混合領域と境界面先端の形状は側壁からは観察できないが、平面的な接触混合領域の形状は横にふくらんだ舌状で、塩水がその周囲から混入していくことが同様に認められる。上層の流況、境界面内部波の状況はa)と同様である。

(2) $Q=2000\text{l/h}$ の場合

a) Side Over-flow 接触混合領域の平面的な形状は $Q=500\text{l/h}$ に比べ、さらに長い半舌状あるいは帯状となる。この接触混合領域へ横から混入していく下層の動きを、Photo. 4 に示してある。黒くのびているのが下層の動きを示す染料の跡である。淡水は画面右上から放水されている。白く写っているのはライトである。

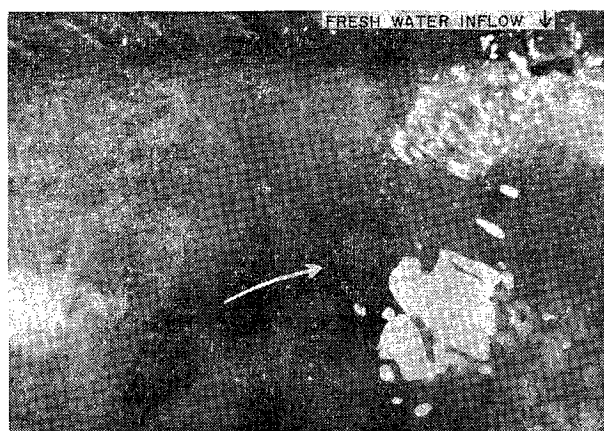


Photo. 4 Trace of dye showing the intrusion of the salt water into the mixing region. (Side Over-flow, $Q=2000\text{l/h}$, $\Delta\rho=0.02\text{g/cm}^3$, $\Delta h=5\text{cm}$)

境界面の内部波が流程にしたがって、不安定な領域から安定な領域へと変化していくことは、前項(1)で述べた通りである。Photo. 5 に側面を通して斜め上からみた安定な内部波を示す。

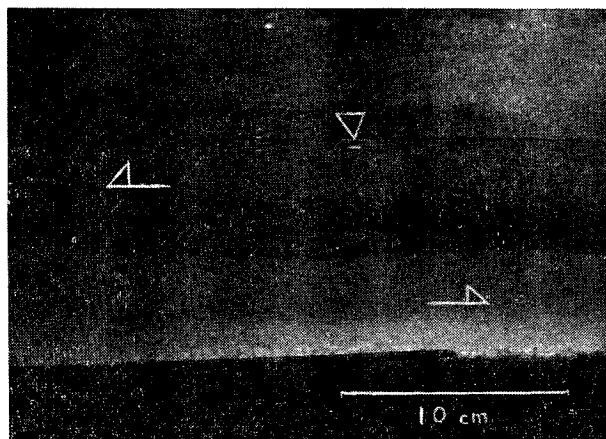


Photo. 5 Stable internal waves seen through the side wall. The arrows show the flow directions. (Side Over-flow, $Q=2000\text{l/h}$, $\Delta\rho=0.02\text{g/cm}^3$, $\Delta h=5\text{cm}$)

その他の流況は前項で述べた通りである。

b) Center Over-flow 接触混合領域が(1), b)の場合に較べて、巾、長さ共に増大しているが、その他の流況は、これまでの各項に述べられているのと同様である。

(3) $Q=4000\text{l/h}$ の場合

この場合には $Q=500\text{l/h}$ および 2000l/h の場合と状況は一変する。ゲートから放水された淡水は Side Over-flow, Center Over-flow のいずれの場合も水路巾全体にひろがり、塩水は樋門近くまで到達しない。一方境界面の乱れはかなり強くなる。

4. 濃 度 分 布

得られた濃度分布のうち、一例として、初期淡塩水密度差 $\Delta\rho=0.02\text{g/cm}^3$ 、落差 $\Delta h=5\text{cm}$ を一定にして、Side Over-flow で Q を変えていった時の等濃度線の水平分布図を Fig. 2 に示してある。上段が表面、中段が中層、下段が底である。図中左端がゲートであり、横軸はゲートからの距離、黒点は測定点である。等濃度線に書きこまれている数字は、塩水の初期濃度 S_0 に対する濃度 S のパーセントを表わしている。この場合、塩水の初期濃度は、NaCl の重量千分比で約30%である。中段右端の数字 (cm 単位) は底からの測定位置を表わし、密度境界面のやや上側にあたる。いずれの場合も下層の等濃度線の密なる領域は、目視による接触混合領域とよく一致している。

Q が 500l/h , 2000l/h の場合には、淡水落下口のすぐ近くまで高塩分水が存在しているのに対して、 Q が 4000l/h になると、塩水は樋門まで到達せず、樋門付近はほとんど淡水の領域になっているのがこの図でわかる。表面の濃度分布は、樋門からある程度流下すると巾方向へはほとんど一様になっている。これは Center Over-flow の場合も同様であって、巾方向へひろがる傾向の強いことを示している。中層は多少の差はあるにしても、表面とほとんど同じ濃度であって、上層内では鉛直方向へもほぼ均一な濃度であることがわかる。

Fig. 3 に接触混合領域内外の鉛直方向への濃度分布の例を示す。横軸は初期塩分濃度 S_0 に対する濃度 S の比であり、縦軸は水深である。上図は、水路中央部において長さ方向へ測ったもので、左の二つが混合

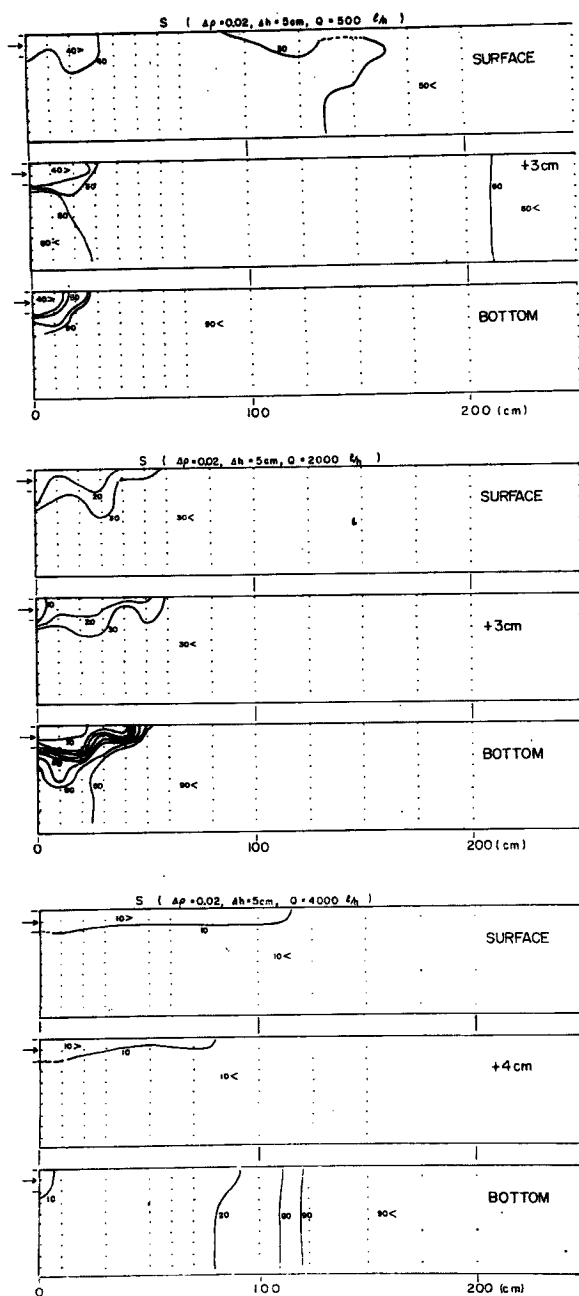


Fig. 2 Horizontal distributions of salt concentration. Dots are measuring points.
(Side Over-flow)

領域内、右の二つが混合領域外である。下図は、樋門付近で巾方向へ測ったものである。中央が接触混合領域内、左右が接触混合領域外である。接触混合領域内では底の濃度は低く、その外側では底の濃度は高くな

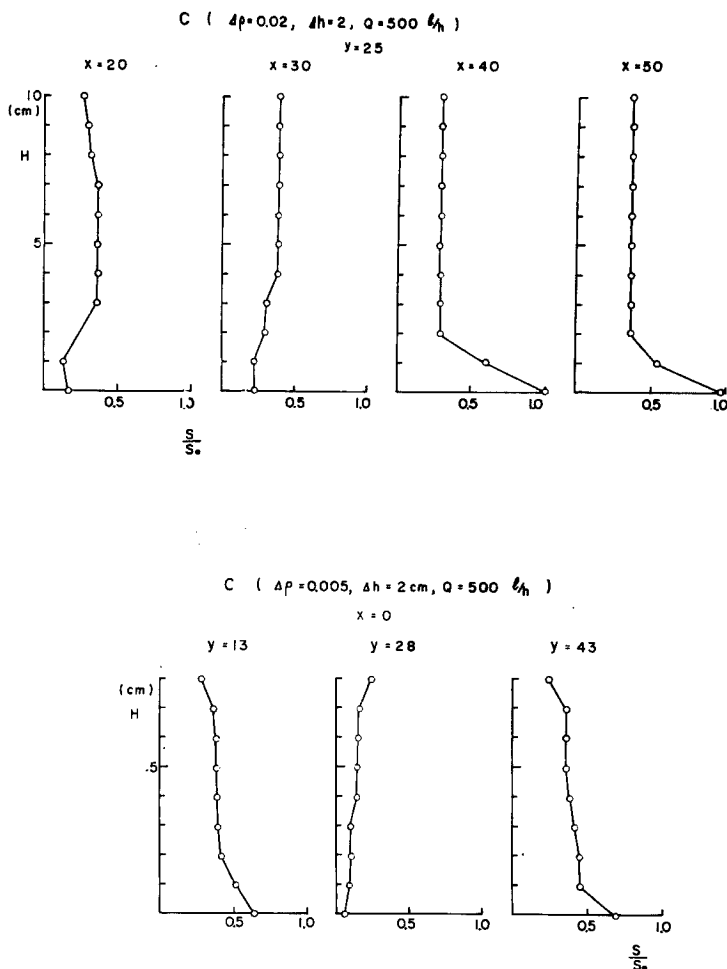


Fig. 3 Vertical distributions of salt concentration. (Center Over-flow)

っている。接触混合領域内では鉛直方向へは statical には不安定の状態にあるが, dynamical に balance しているであろう。

さて, Fig. 2 のようにして得られた水平濃度分布を巾方向へすべて平均し, 長さ方向へ一次元的に示したものが Fig. 4 である。図は Fig. 2 に対応している。白丸が底, 黒丸が中層, ×印が表面である。横軸は樋門からの距離, 縦軸は初期塩水濃度に対する濃度の比である。顕著なことは, 表面の濃度は, 多少の変動はあるが, 長さ方向に樋門からほとんど一定の値をとっているということである。このことは, すべての実験結果を通して認められた。これは上層濃度が放水ゲート直下の混合によってほとんど支配されていることを意味している。

さらに, 上層の濃度は淡水放水量によっても顕著な差を示している。すなわち, 淡水放水量の大きいほど上層濃度は低くなっている。この点もすべての実験を通して認められる。

実験水路に溜めた塩水の上を淡水が水平に流れるときの, 淡塩水混合に関する岡崎の実験¹⁾によれば, 内部 Froude 数が増すにしたがい, 淡塩水の混合量の増加することが示されている。いま混合の指標として

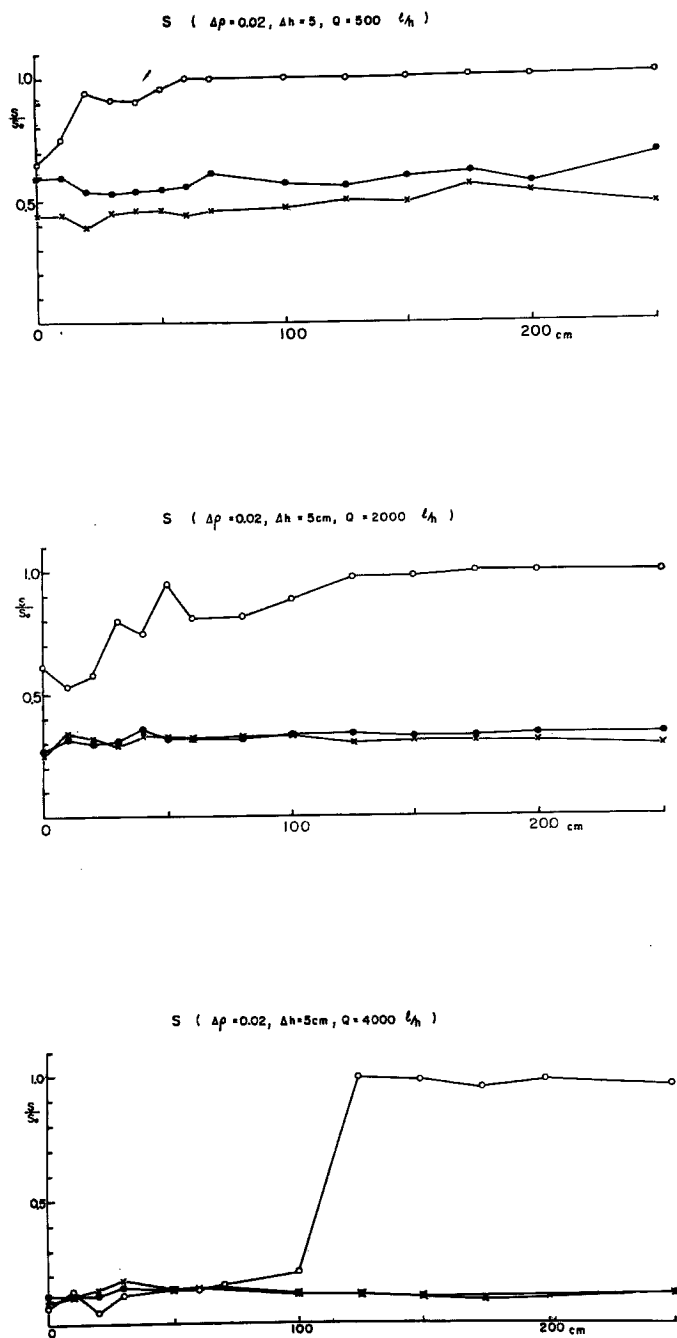


Fig. 4 Longitudinal distribution of mean salt concentration. (Side Over-flow)

$M = (\rho_1' - \rho_1) / (\rho_2 - \rho_1)$ (ρ_2 = 塩水密度, ρ_1 = 流入淡水密度, ρ_1' = 混合水密度) なる量を考える。この量は完全に混合が行われれば 1, 全く混合が行なわれなければ 0 であるから, $0 \leq M \leq 1$ なる量である。初

期密度差が一定で、上層の水深も一定ならば、内部 Froude 数を増大させるのは上層流速が大きくなることであるから、淡水流量が大きくなることと考えてよい。そこで、 M と Q との関係を示したのが Fig. 5 である。 M は Q の増加と共に減少している。この結果は、岡崎の場合の実験結果と逆の方向であって、ひじょうに興味深い点である。これは、塩水上に水平に淡水を静かに成層させて流しだす場合と、塩水中に淡水を落下させるという放水形式とでは、淡塩水混合の機構がかなり異なることを示しているであろう。

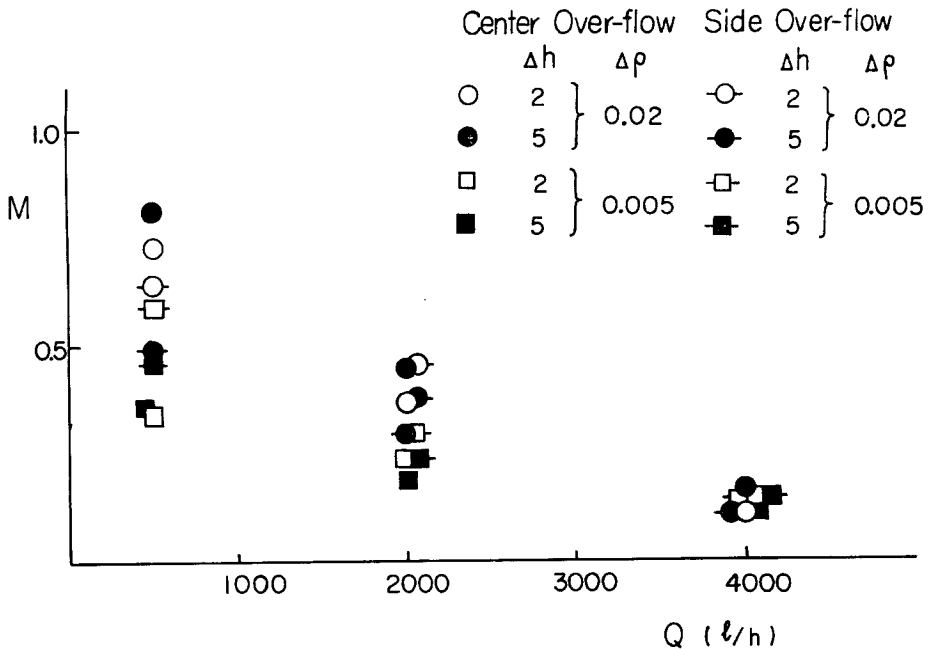


Fig. 5 Relation between M and Q . $M = (\rho_1' - \rho_1) / (\rho_2 - \rho_1)$. Q : fresh water discharge.

上層の塩分濃度は淡水流量と塩水の上層への混入量とによって決まるが、この塩水の混入量は、濃度分布から求めることができる。

水路の巾方向への平均値を扱うとして、長さ方向、樋門から下流へ向って x 軸、鉛直上向きに z 軸をとる。

定常状態を仮定すれば、任意の鉛直断面内で、

$$\int_0^H u dz = Q, \quad \dots\dots\dots (1)$$

および

$$\int_0^H u S dz = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

が成立する。ここに、 u は x 方向への流速、 S は塩分濃度、 H は水深である。(1)、(2)式について、密度境界面を境に上下二層にわけ、上層に頭符 r 、下層に頭符 s をつけて区別すれば、次のように書き直せる。

$$Q^r - Q^s = Q, \quad \dots\dots\dots (3)$$

および

$$Q^r S^r - Q^s S^s = 0, \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 S^r 、 S^s は上、下層の平均濃度である。また、 Q^r 、 Q^s は上層、下層において、それぞれ下流および

上流へむかう流量である。

これから、

$$Q^* = \frac{S^*}{S^* - S^r} \dots\dots\dots (5)$$

$$Q^* = \frac{S^r}{S^* - S^r} \dots\dots\dots (6)$$

となる。

上層へ混入して海部へ放出される塩分量は、河口から上流へ向かう下層の流量によってきまるから、表面および底の濃度測定値を S^r , S^* として用いて、下層の混入量を Q に対して示したのが、Fig. 6 である。

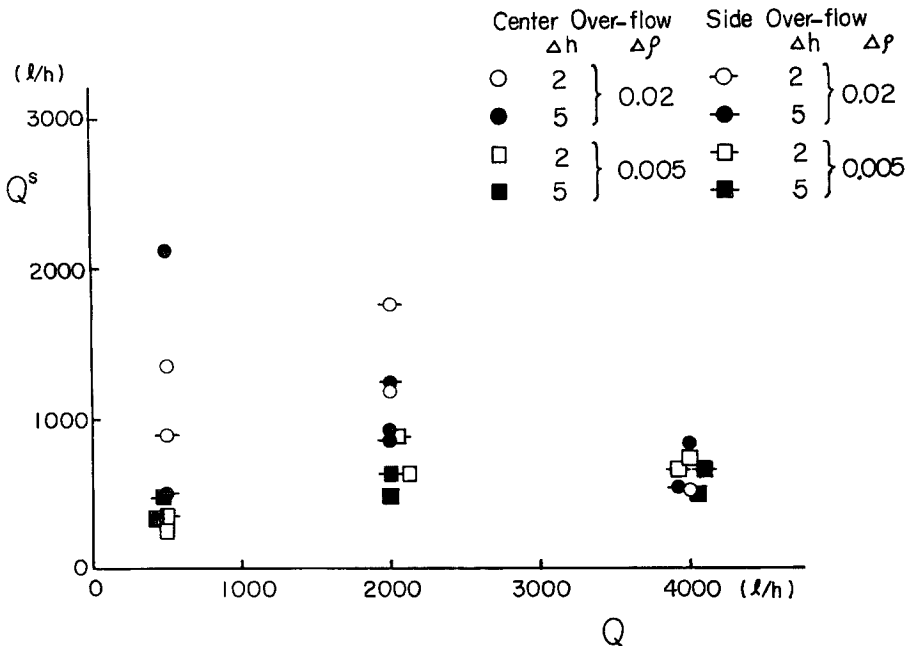


Fig. 6 Relation between Q^* and Q . Q^* : upstream flow of salt water.

実際の濃度の鉛直分布は連続的に変化するから、鉛直分布からの平均値を用いれば、これらの量はさらに大きくなる。 Q の小さい方で点のバラつきは大きい、全体の傾向として、 Q が増しても Q^* は一定値を越えず、むしろ小さくなる傾向がある。したがって、いずれにしても、水路内で淡水が塩水中に落下して混合し、混合水が上層を流下する場合には、淡水放水量が増すにつれて、上層濃度は低くなるということになる。

岡崎の実験の場合は淡水流量が増えると、塩水の混入量がそれ以上に増えていることを意味しているが、われわれの場合に、なぜ淡水放水量が増えても、塩水の混入量が増えず、むしろ減っているかということに対する物理的な条件の確認は、この程度の実験では困難であるが、たいへん興味深い問題である。

5. む す び

以上の各節を要約すると以下のようである。

(1) すべての実験を通して、上層濃度は流れの方向にほとんど一様であり、これは樋門直下の混合によ

って、淡塩水の混合状況がほとんど決定されているからであると考えられる。

(2) 上層濃度は、淡水流量が増すにつれて、低下する。

(3) 淡水流量がある値を越えると、樋門近くは河巾一杯に淡水で占められ、塩水は樋門近くに達しない。

なお、この実験の場合の淡塩水混合の機構について、若干の考察を試みてみたが、いろいろな解釈が成り立つようで、この程度の実験の結果からでは結論は得られなかった。

今後に残された問題である。

謝 辞

本実験は防災研究所地形土壌部門において行われたものであり、水槽の使用ならびに種々の便宜を与えられた奥田節夫教授に深謝する。

参 考 文 献

- 1) 岡崎守良：成層した二層流の境界面における内部波と混合に関する実験的研究，理化学研究所報告第38巻第6号，昭37，pp.597—610.