

河口締切にともなう塩分分布変化について (I)

奥田 節夫・金成 誠一

ON THE CHANGE OF SALINITY DISTRIBUTION AFTER CLOSING OF RIVER MOUTH PART (I)

By *Setsuo OKUDA* and *Seiichi KANARI*

Synopsis

Experiments on the motion of salt water in the upstream side of river mouth dam were carried out in order to investigate the salinity distribution and prevent salt intrusion.

It was shown that a hollow in the river bed stores the intruding salt water and can suppress the rise of salt into the upstream water. Increase of flow velocity of the fresh water over the hollow, stimulation of interfacial oscillation by periodical discharge of water and utilization of suction pipe were tested in order to drain the salt water from the hollow.

Experiments on the prevention of salt intrusion by a vertical water jet from bottom showed the validity of fluid barrier against salt water inflow with low velocity.

§ 結 論

最近水資源の高度利用のために河口締切計画が諸所に進められているが、河口締切は湾口締切あるいは臨海湖造成とはかなり異なった問題を提起している。

対象をとくに水利用に関係の深い塩分分布に関連するものに限ってみても、次のような項目に対する研究が必要となってくる。

(I) 締切堤上流

1. 締切後の淡塩水交換（淡水使用時期の推定）
2. 最終的塩分分布（取水位置，条件の決定）
3. 取水による流況の変化
4. 堆積環境の変化（流速，塩分の分布変化の影響）

(II) 締切堤

1. 樋門，閘門の合理的設置と操作
2. 魚道の設置（流速，塩分の分布変化を考慮して）

(III) 締切堤下流

1. 樋門近傍における淡塩水混合（淡水放出条件との関連）
2. 二重層の形状（新しい境界条件に対応する塩水楔の形状）
3. 堆積環境の変化（(I)と同じ）
4. 外海への淡水の拡がり（(III)の2と関連して）

(I)の1および2の解決に必要な締切堤上流側に対する塩分収支の算定法および塩分濃度分布の推定法

については、湾口締切の場合と本質的に異ならず、すでに著者(奥田)によってその観測ならびに解析法が発表されている。また3, および4については別個に研究が進められている。

本論文ではとくに1および2に関連して、樋門、閘門から浸入してくる塩水の遡上拡散の状況とこれを防止排除する方法に関する模型水槽実験について述べる。

§ 実験の概要

具体的な水槽実験の対象は次に示す通りである。

1. 樋門、閘門から逆流した塩水の遡上, 拡散の状況, とくに「くぼみ」による塩水の貯溜効果。
2. 「くぼみ」に貯溜した塩水の排除法。
 - (i) 表層流の増加
 - (ii) 界面振動の共振利用
 - (iii) 吸い上げ管の利用
3. Fluid barrier による塩水遡上の阻止。

これらの実験はいずれも非定常な淡塩水の相対的運動にともなう乱流混合の現象をとめない, 模型と現場との対比がきわめて困難である。

しかしながら速度勾配による乱れの発生と密度勾配による安定作用とが現象を支配するものと考えられるから, 二つの効果を対比する物理的意味をもった無次元数として

Richardson 数を取りあげ,

$$Ri \equiv -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} / \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 \dots\dots\dots (1)$$

を考慮して模型と現場の scale 比を決定した。

ここで ρ は平均密度, $\partial \rho / \partial z$ は鉛直上方に向かった密度勾配, $\partial U / \partial z$ は同じく速度勾配をあらわす。

いま高さをあらわす基準長を H , 速度をあらわす基準速度を U , 淡水, 塩水の密度差を $\Delta \rho$ とすれば

$$Ri = \frac{\Delta \rho}{\rho} \frac{gH}{U^2} \dots\dots\dots (2)$$

となる。

すなわち密度比と Froude 数 (U^2/gH) を同一にとれば鉛直方向の乱流混合に関しては相似が保たれる。

しかしながら Ri は乱れの発生, 安定化に対するパラメーターにすぎないから, 混合の強さ, 鉛直方向の運動量, 質量の輸送等に対する定量的検討を Ri による相似実験から導くことはできない。

従ってこの実験によって示される結果は淡塩水の非定常な相対運動による混合現象を定性的, 近似的に表現するにすぎないが, このような現象の理論的解析が不可能に近い現段階では, 模型水槽実験を行なう意義は存在するものと考えられる。

なお樋門近くに出現する流速は, 淡水, 塩水の密度差によって生ずる流速 $U_{\Delta \rho}$ あるいは樋門両側の水位差によって生ずる流速 $U_{\Delta h}$ に分類されるが

$$U_{\Delta \rho} \propto \sqrt{\Delta \rho g h / \rho} \quad h \text{ は塩水の厚み}$$

$$U_{\Delta h} \propto \sqrt{g \Delta h} \quad \Delta h \text{ は水位差}$$

とみなし得るから, 模型と現場について

$\Delta \rho / \rho$ を同一にとっておけば, (2) 式より

h/H または $\Delta h/H$ すなわち鉛直方向の長さの割合が同一であれば現象は相似であるとみなされる。

実験は幅 50cm 深さ 50cm 長さ 700cm の水槽で行ない, 長さのほぼ1/2地点に樋門模型を設置した。

淡水には水道水を用い, 塩水は水道水に食塩を溶かして所定の密度差を与え, 染料で着色して肉眼観察または撮影によってその流れあるいは混合の状況を観察した。

とくに塩分濃度の精密測定を行なう場合には、直径 3 ミリのステンレスパイプを利用して作られた電極を用い、電気伝導度計と自動レコーダの組合せによって伝導度を連続測定した。

流速分布の測定は water blue 粉末の溶解線を観測する方法によった。

なお水底には白色碎石砂（平均径 2mm 程度）を敷いてあるのでその移動配列によって任意の形状の「くぼみ」を容易に作る事ができた。

淡水に一定の流れを与えるときには浮子型の流量計を通して通水量を調節した。

§ 逆流塩水の遡上拡散（「くぼみ」への貯溜）

締切堤を築造した後も、堤体を通しての浸透あるいは樋門、閘門を通しての塩水侵入は不可避であり、また場合によっては魚群の誘導のためにことさらに塩水の逆流を許すことも考えられる。

したがってある程度の塩水逆流はあらかじめ計画に入れてその遡上限界あるいは拡散状況を推定した上で取水地点および取水条件を考慮しなければならない。

もし締切堤上流側の水底が平滑であれば、下流方向への淡水流がない限り、侵入した塩水は密度差のため水底に沿って遡上し、理論的にその遡上限界を求めることはできない。

水槽実験によっても有限量の塩水を模型締切堤の上流側に流入させると、次第に薄層になって遡上速度はゆるくなるが、水槽上端まで到達することが認められる。

したがって取水点が締切堤に近いと逆流塩水を取水する惧れがある。

その対策としては締切堤上流側水底に「くぼみ」をつくり、流入した塩水をそこに貯溜してさらに上流側への遡上を防止することが考えられる。

この効果は実際に児島湖の閘門近くに存在する「くぼみ」への海水貯溜現象によって確認されているが、種々の逆流条件に対して完全に貯溜し得るかどうか、また表層にどの程度の塩分拡散の影響があらわれるかについて実験的検討が必要である。

ゲートから逆流した塩水の遡上、拡散に関する実験の一例は、Fig. 1, 2, および 3 に示されているが、いずれの実験においても逆流塩水は「くぼみ」に最終的には安定して貯溜されている。

密度差、ゲート両側の水位差、水深、ゲート開放の条件（上半開放、下半開放等）を種々組合せて実験を行なった結果次のような結論が導かれる。

- (i) ゲート近傍では速度勾配が大きいため乱流混合が盛んであるが、塩水が遡上するにつれて淡塩水界面が安定し、「くぼみ」にさしかかると、さらに安定度が増大する。
- (ii) 塩水塊が「くぼみ」を通過するときは、底から水平に堆積して「くぼみ」に充満してからさらに上流側に遡上するとは限らずある程度「くぼみ」をたびこえて進行することもある。
- (iii) 有限量の塩水が「くぼみ」に貯溜して静止した状態では常に安定な淡塩水界面が出現し、その状態における上層淡水の塩分濃度は塩水浸入前とほとんど変わらない。
- (iv) 密度差が小さく、ゲート通過流速が大きい程流入直後の混合が激しく、またゲート上方から流入する方が下方から流入するよりも混合が起り易い。

ゲート付近の混合によって塩水は希釈され、「くぼみ」に貯溜する塩水の容量はゲートを通過した塩水の容量よりも大きい。（2 倍近くに達する場合もある）

§ 「くぼみ」に貯溜した塩水の排除

前節で逆流した塩水を「くぼみ」に貯溜することの有効性を説明したが、「くぼみ」に貯溜した塩水を排除しないと塩水遡上を防止する効果は減少してしまう。

したがって「くぼみ」に貯溜した塩水を効果的に排除する工夫が必要であり、これに関連した二三の実験を説明する。

- (i) 上層の高流速による排除

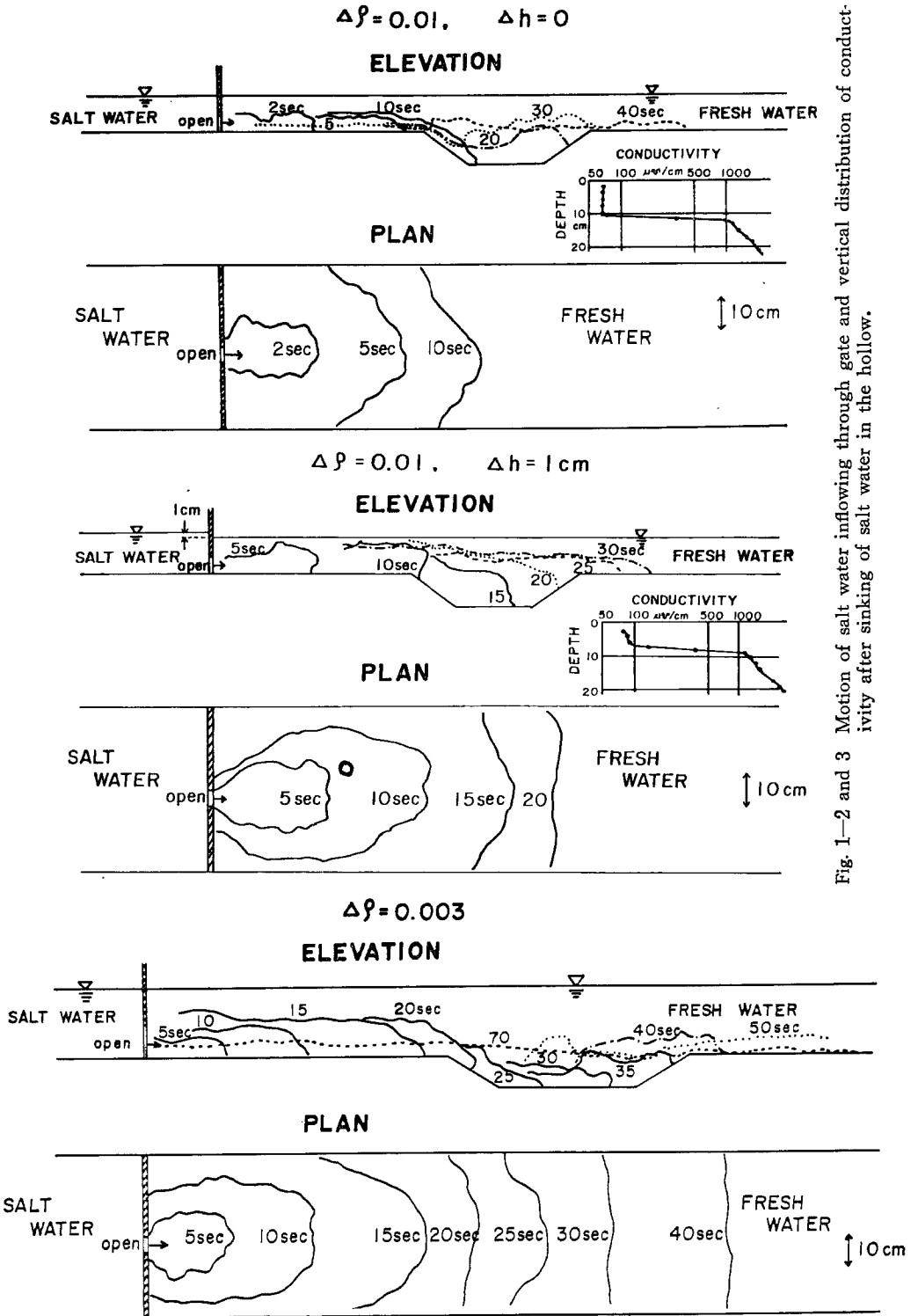


Fig. 1-2 and 3 Motion of salt water inflowing through gate and vertical distribution of conductivity after sinking of salt water in the hollow.

「くぼみ」に溜った重い流体が上層の軽い流体の流れにひきづられてくみ出される可能性については G.I. Taylor による水槽実験¹⁾、奥田による児島湖における実測²⁾、福島他による石狩川河口における計算³⁾があげられるが未だ定量的な見通しが確立されていない。

実験は Fig. 4 に示すような4種類の「くぼみ」について、「くぼみ」内に塩水を満たしておいてから上層の淡水を一定速度で流して側方から観察した。その一例を Fig. 5 に示す。

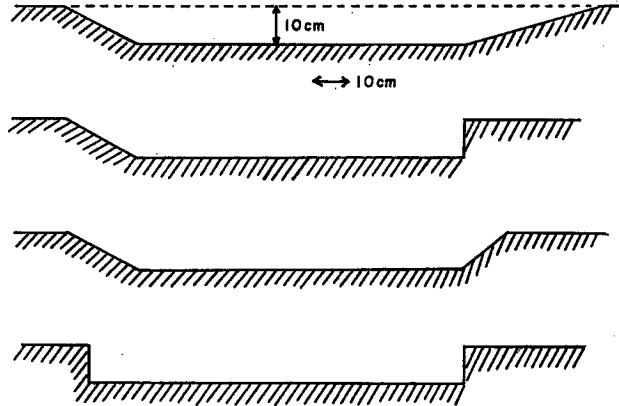


Fig. 4 Geometrical forms of the hollow used in the flume experiment.

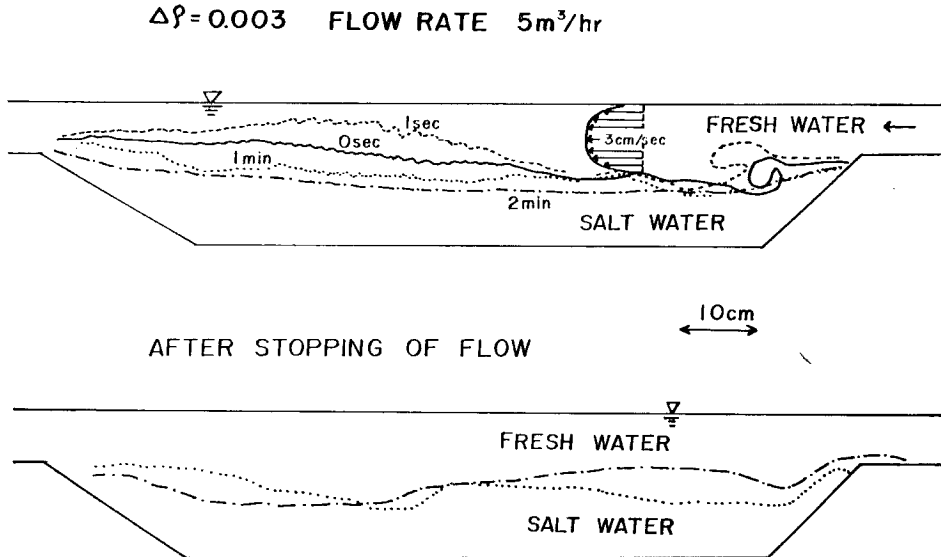


Fig. 5 Inclination of interface between fresh and salt water by the flow of upper layer and interfacial oscillation after stopping of the flow.

この図によれば上層淡水が流れ始めたときには淡塩水界面に沿って大きな剪断応力が作用して、界面は下流側が上昇する向きに傾斜して塩水は下流に流出し、また「くぼみ」上端の淡塩水接触領域では顕著に界面

波が捲き起り、混合が生じて塩分が上層に拡散する。

しかし電気伝導度計によって塩分分布を測定してみると下流側が盛り上って排除される塩分量の方が、混合によって拡散流下する塩分に比して非常に大きい。上層の流量が小さいときは、時間がたつにつれて二層の界面付近の速度勾配は小さくなり、界面の勾配はゆるくなり「くぼみ」上端における乱れも次第におさまってくる。

上層の流量を増大すると次第に界面は乱れ、平均的な界面勾配もきつくなってくるが、連続的に流量を変えていつでも界面の安定、不安定を明確に区切る臨界流量を決定することはきわめて困難である。

しかしながら淡塩水の密度差、淡水の厚み、流速を種々に組合せて実験を行なった結果、とくに「くぼみ」上端で大きな乱れが継続して発生し、混合拡散による塩分排除が支配的になると思われる状態は、上層平均流速 U 、厚み H 、密度差比 $\epsilon \equiv \Delta\rho/\rho$ 、重力加速度 g を組合せて internal Froude 数 (無次元数) が

$$F_{in} \equiv U^2/\epsilon g H > 0.7$$

の条件をみたすときに出現し易い。

この条件は一般的な界面の不安定を微視的に論じるものではなく、「くぼみ」上端の淡塩水接合部で大きな乱れが生じて顕著に塩分が排除される状態を上層の巨視的な量から推定する一つの条件を示すに過ぎない。なお Fig. 4 に示されたような「くぼみ」の形状の差は上述の条件にあまり影響を及ぼさなかった。

§ 界面振動の共振利用

Fig. 5 下図に示すように表層淡水の流れを停止すると淡塩水界面は大きく振動する。

この振動の周期は近似的に $T = 2\sqrt{2}l/\sqrt{gH\epsilon}$ で与えられる。

ただし、この l は「くぼみ」の長さ、 H は「くぼみ」の深さ、 $\epsilon \equiv \Delta\rho/\rho$ は密度比である。

したがって $l=1\text{m}$ 、 $H=10\text{cm}$ 、 $\epsilon=1/1000$ 程度の模型では 2 分弱の周期であるが、現地で $l=100\text{m}$ 、 $H=4\text{m}$ 、 $\epsilon=1/1000$ 程度であれば 24 分程度になる。

そこでもしこの程度の周期にあわせて上層の水を定期的に流してやると、界面波が共振して界面が大きく傾き短時間に多量の塩水を排除する可能性がある。

水槽実験では側方から界面の運動が観察できるから「くぼみ」下流側の界面位置が上昇しつつあるときに表層水を下流に向かって流してやり、下流側界面が下降しつつあるときには流水を停止するという操作を繰り返してみると、二三回にわたって塩水を下流側に排除できるが、「くぼみ」内の塩水の容量が減少すると界面振動による排除はできなくなる。

なお密度差が小さい場合には周期が長くなり、塩水がゆっくり流動している間に水底および界面の摩擦によって振動が減衰し、共振を助長することが困難であり、むしろ界面が乱れて混合による拡散効果の方が卓越してくる。

なお流れを断続的に起すときは、継続的に流す場合に比べて界面に大きな速度勾配が出現し、界面沿いの剪断応力を大きくして勾配を急峻にする効果を高めていることが観察される。

§ 吸い上げ管の利用

ゲートから淡水を放流する際の高流速を利用して「くぼみ」内の塩水を吸い上げるテストはすでに横田⁴⁾によって試みられているが、定量的なデータは発表されていないので、大体の効果を検討するために Fig. 6 に示すような実験を行なった。導管は内径 17mm のビニールホースを用い、ゲートを通しての放水量 (通水断面 $4\text{cm} \times 4.3\text{cm}$) をかえて塩水排除量を測定した。

Fig. 6 よりその吸い上げ効果は明らかであり、淡水流出速度の増大につれて塩水排除速度も増大しているが、ゲート付近の正確な流速分布およびホース先端の圧力分布を測定しなかったので、定量的関係を解析することはできなかった。

とくに現場に適用する場合、大口径のパイプで吸い上げるとすれば口端の圧力分布の理論的推定が困難で

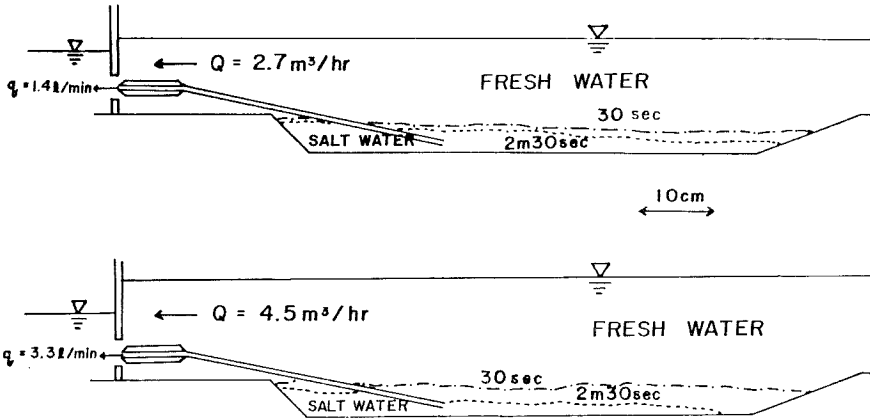


Fig. 6 Pumping out of salt water from the hollow by a suction pipe.

あるから、吸い上げ管による塩水排除を効果的に行なうためには大規模な実験による定量的解析が必要であろう。

§ Fluid barrier による塩水遡上阻止

塩水の遡上を防止する手段としては従来よく用いられたもぐりぜきのような固体の障壁 (solid barrier) による以外に、最近オランダにおいて気泡の噴出によって遡上速度を減少させる方法がテストされている⁵⁾。

この方法はすでに締切堰によって殆んど塩水が遮断され、少量の浸入塩水が遡上するような状況ではきわめて有効な方法と思われるが、その阻止効果のメカニズムは必ずしも明らかでない。

しかしながら水底からの上向きの流体噴射によって水底をはって遡上する塩水を上方に巻き上げ、水面近くの循環流にのせて下流に流す作用が効果的であるとすれば、気泡の上昇でなくても水流ゼットでも効果は同一であり、また所要 power に差があるとは考えられない。

そこで水槽を横断して水底に小孔のあいたパイプを設け別の給水源から水を供給して鉛直上方に水を噴射させてその塩水遡上防止効果を調べた。

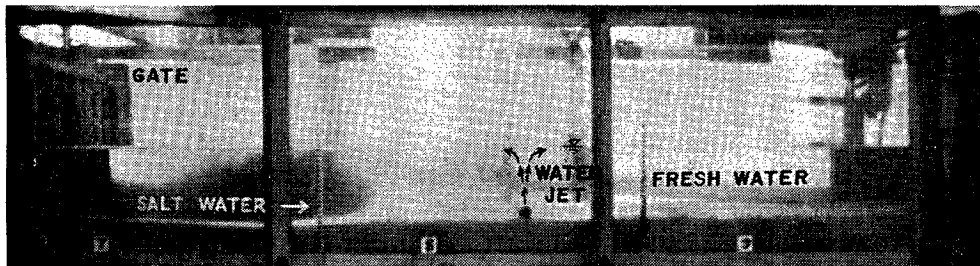


Photo. 1 Salt water wedge intruding through the gate.

その模様は Photo. 1 および 2 に示されている。下流から遡上してきた塩水は、water jet によって上方に巻き上げられた後、表層で下流に向かう循環流にのって流れるが、下流側のある範囲が一ように希釈された塩水で充満されて来ると次第に塩水は water jet の層を通りぬけて上流側に浸入してくる。

とくに塩水がかなりの速度をもって接近してくる場合にはある部分はそのまま jet を通りぬけて上流側

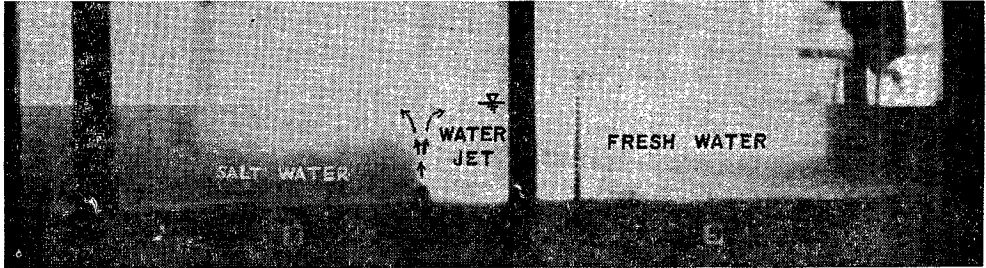


Photo. 2 Effect of vertical water jet reducing salt intrusion.

に浸入するが、上流側での遡上速度はかなり減少する。

単に肉眼で観察するのみでなく、電気伝導度計によって塩水の浸入状態を測定してみると明らかに water jet による遡上阻止効果が認められる。

塩水遡上の状態と jet の噴射条件の組合せによる定量的な解析は今後に残されており、その阻止効果に対する物理的検討も行われていないが、とにかく、水底に沿って楔状に進行してくる塩水を強制的に捲き上げて表層に運び上げる効果は明らかであるから、jet 自身による循環流に加えてゲート操作によって下流向きの表層流を生じさせるならば、塩水の遡上阻止はきわめて効果的であろう。

動力的にみても毎秒 1ton の塩水を水中で 5m の高さまで上昇させても、密度差が 0.01gr/cm^3 程度の塩水では

$$1000\text{kg} \times \frac{1}{100} \times 5\text{m/sec} = 50\text{kg} \cdot \text{m/sec} = \frac{2}{3}\text{H.P.}$$

の小動力である。

したがって締切堤上流側のような少量の塩水遡上のみを対象とし、さらに放水等によって一定方向の流れが作りやすい場合には有効な阻止法であると考えられる。

air jet と water jet の得失の比較、あるいは具体的な設置方法については今後の検討を待たねばならないが、少量の塩水の浸入によって用水価値が著しく損われるような取水環境では、このような流体の噴射を利用した fluid barrier の有効な適用が研究されるべきであろう。

参 考 文 献

- 1) G.I. Taylor: An Experiment on the Stability of Superposed Stream of Fluid, Proc. Cambridge Phil. Soc. Vol.23 (1927) 730—731
- 2) 奥田節夫: 人造淡水湖における塩分の収支推定について(その1), 防災研年報 No.6 (38) pp. 189—199
- 3) 福島久雄, 他4名: 石狩川河口の研究(2), 第12回海岸工学講演会講演集(1965) pp.158—161
- 4) 横田一秋: 水門操作に伴う淡水海二相流に関する実験報告書, (昭和39年5月) 香川県企画室
- 5) P. Van der Burch: Reduction of salt water intrusion through locks by pneumatic barriers. 2nd Int. Conf. on water Pollution Res. (1964) No.16