

河口地形の海水遡上に及ぼす影響

奥田 節夫, 金成 誠一

SOME EFFECTS OF ESTUARINE TOPOGRAPHY ON SALINITY DISTRIBUTION

By Setsuo OKUDA and Seiichi KANARI

Synopsis

Some effects of estuarine topography on salinity distribution were studied by field observations and simple model experiments.

The results of observations of salinity distribution at river Yoshino and Nagara showed dominant effects of river bed undulation and meandering which control rising velocity of salt wedge and diffusion process of salinity.

Especially a narrow neck of river section prevents upstream flow of salt water and causes a steep gradient of salinity along the river.

Simple experiments in a test flume, which consists of Sea Part (3m×3m) and River Part (7m×0.5m), show considerable effects of wavy bottom and meandering on upstream flow of sea water and distribution of salinity.

ま え が き

河口における海水の遡上と塩分の分布については水利用の実用的立場ならびに密度成層流の学術的興味にもとづいて多くの研究が進められているが、その実態はきわめて複雑であって、いまだ説明されていない問題点が多い。

とくに弱混合型と称せられ、淡塩水界面のはつきりしたいわゆる「塩水楔」の存在をともしなう場合、および強混合型と称せられ、鉛直方向の密度差が小さく縦断方向の塩分分布のみが顕著な場合については解析的な研究もかなり進められている。

しかしながら多くの実際の河川では上述の混合型の中間的段階である緩混合型の塩分分布がみとめられ、またひとつの河川に上流から下流に向かって「強混合型」「緩混合型」「弱混合型」が連続的に存在したり、一定の場所でも時期によって混合の型が変わってくるものがしばしばあり、ひとつの河川にひとつの混合型をあてはめることは適当でない場合が多い。

このような淡塩水の混合の条件の変化は単に河川流量、潮汐条件のみでなく、河口近くの水路地形に強く支配されることは明らかであり、Schijf and Schönfeld¹⁾はオランダの河川の縦断方向の塩分分布に及ぼす入江、浅瀬などの影響を定性的に検討している。

しかしながらとくに河口地形の塩分分布におよぼす影響を具体的に示した観測例は比較的少なく、またその機構も明らかではない。

本論文は実測例によって河口の地形的特色が塩分分布に顕著な影響を及ぼしていることを確認し、模型水

槽実験によって地形要素の塩分分布に及ぼす物理的プロセスについて考察を加えるものである。

1. 長良川河口における観測例

長良川河口付近の海水遡上と塩分分布の実状については工業用水取水計画、河口締切計画の資料として四日市工業用水道事務所、あるいは中部地建木曽川下流工事事務所による調査が行われており、また東大、嶋

教授²⁾による塩水楔の遡上機構に関する考察も発表されており、概観的な塩分分布の特性は明らかになっている。

しかしながら局地的微視的な塩分分布の特性も実際の用水計画には必要な資料であり、また概観的な分布にも密接な関連があるので、次のような観測をこころみた。

対象は一応取水計画に直接に関連のある千本松原揚水場下流の上坂手付近浅瀬を中心とした領域と、長島地区の塩害発生に関連があると思われる伊勢大橋下流の領域をえらび、昭和39年秋から40年夏までの間に5回の観測を行なった。観測地点の概要は Fig. 1 に示される。

観測には電気伝導度計(東邦電探製)を主として利用し、ときどき採水して Cl^- 濃度を化学分析によってチェックした。

短時間に局所的な塩分分布を効率的に観測するために、携帯用レコーダー(東亜電波製)を伝導度計に連結して、モーターボートで航走しながら伝導度の水平分布を連続的に記録し、必要な地点でボートを停めて伝導度の鉛直分布を測る方法をとった。

主要な観測結果は Fig. 2, 3 および 4 に示される。

Fig. 2 は河川蛇行部の変曲点に当る上坂手付近の川幅が狭く、水深も浅い地点の存在が塩分分布に及ぼす影響を示すものである。

同図中上段は河川(淡水)流量 $25 \sim 35 \text{ m}^3/\text{sec}$ で下げ汐時の Cl^- 濃

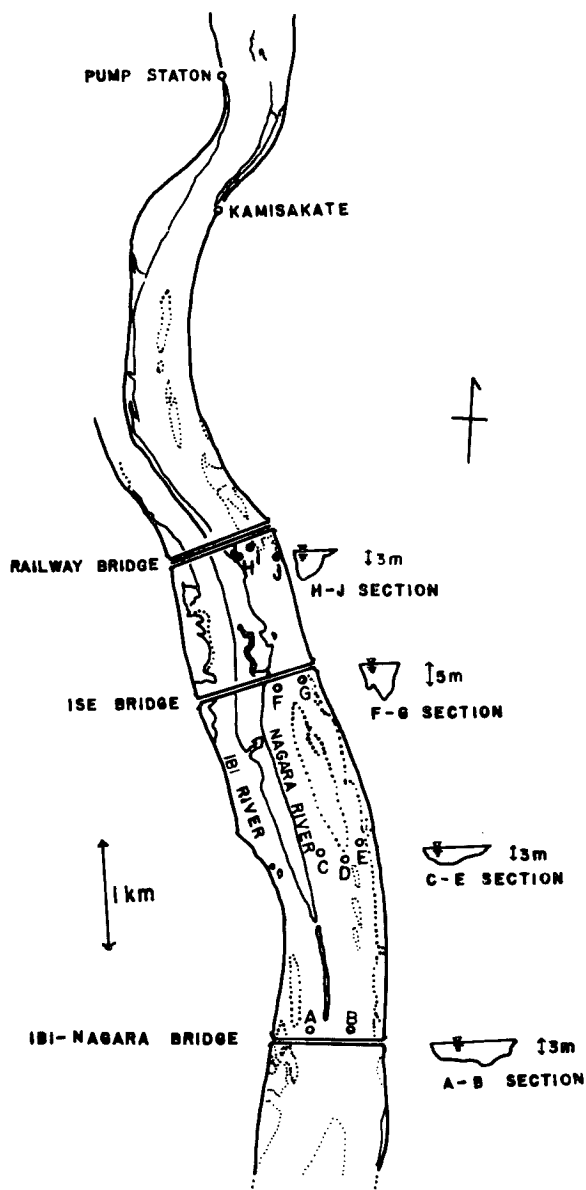


Fig. 1 Survey region of Nagara river.

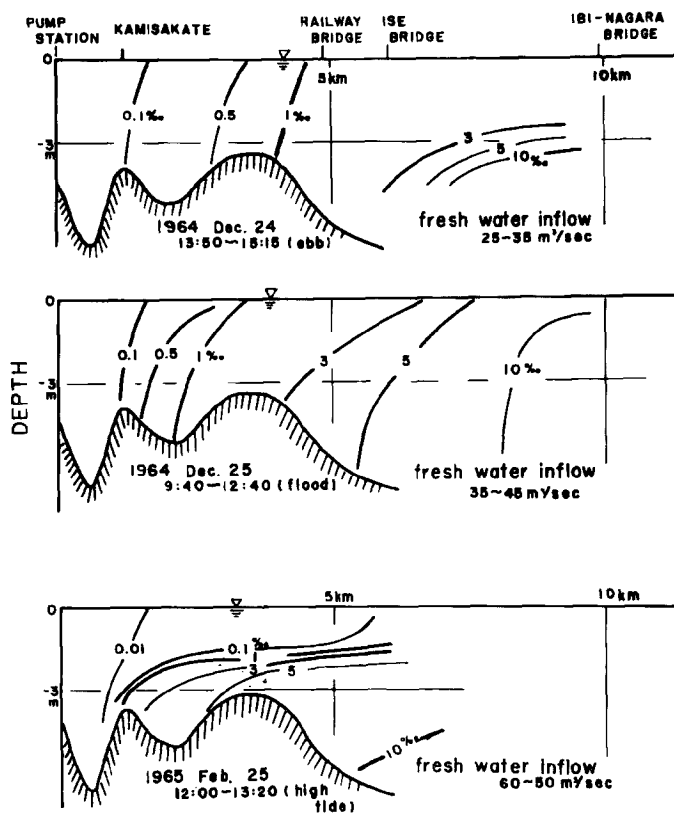


Fig. 2 Chlorinity distribution near Kamisakate shoal in Nagara river showing control effect of the shoal on rising up of salt water.

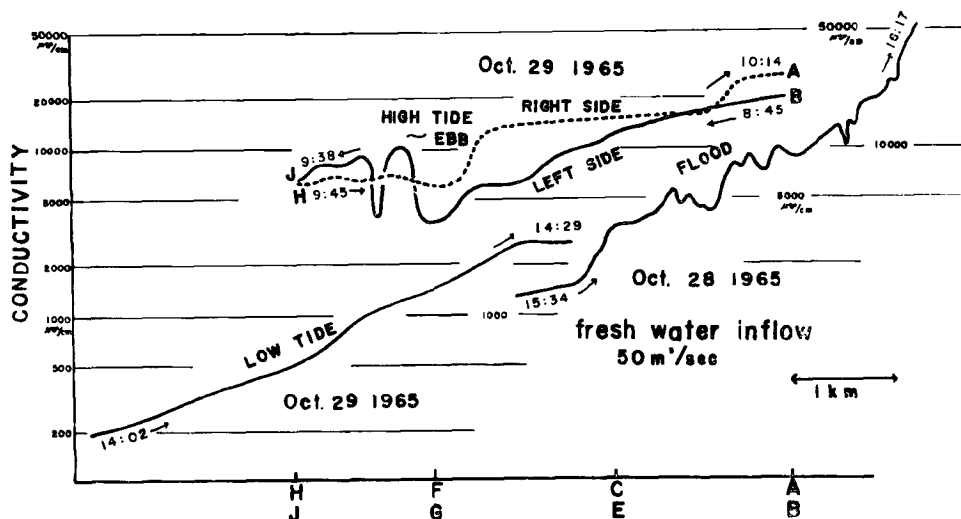


Fig. 3 Conductivity change of surface layer along Nagara river. Upper curves show the difference of conductivity distribution between right and left sides at meandering waterway.

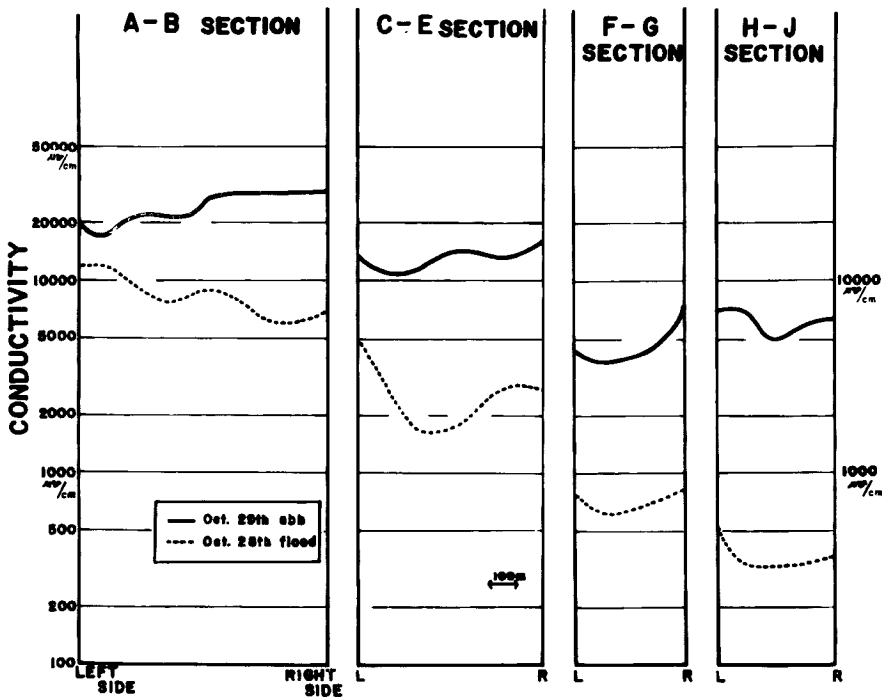


Fig. 4 Conductivity change of surface layer across Nagara river.

度分布を示す。

これによれば上坂手の浅瀬のところから塩分が増加しそこより上流にわたって強混合型の分布、7 km 位のところから弱混合型の分布を示し、その間は緩混合型の分布が予想される。

中段は翌日の上げ汐時の分布で全体が緩混合型に近い分布を示しているが、高濃度の領域がかなり遡上しているのに、浅瀬上端の濃度は変わらず、浅瀬の塩分遡上を抑制する効果を示している。

下段は全く別の流量の大きい ($50 \sim 60 \text{ m}^3/\text{sec}$) 時期に行われた観測の結果を示すが、満潮時でも表層近くに浅瀬から延びてきた淡水層が安定に存在しており、河川流量が大きい程界面が乱れて混合層が厚くなるという一般的な予想に反している。

これらの現象は単にその時期の水文条件のみで決定されるものではなく、前からの種々の流況の変化を経て現況に到達しているので、その説明は簡単ではないが、各段階を通じて水路の浅くて狭い地点の塩分遡上抑制効果は認められるであろう。

勿論さらに低流量期間がつづいた場合にはこの地点も塩水が通過遡上して取水地点にも濃塩水が到達することは度々あるが、そのときでもこの浅瀬部分に塩分分布の異常性が認められている²⁾。

Fig. 3 は下流表層の電気伝導度の水平分布をボートで航走しながら測定した記録を示すものである。

ただし測定水深は水面下 50cm で実際の記録には短かい周期の不規則な振動が現われているが、全水域の傾向をみるために平滑した結果を示している。

図中上段は左岸と右岸の塩分分布を比較するために行った観測で HJ 断面～FG 断面の間では左岸沿いに高塩分領域が現われ、FG 断面～CE 断面間では右岸沿いに高塩分領域が現われている。これはいずれも蛇行部で浅瀬の発達した部分の下流に当り、河水が流下するとき浅瀬下流側に剥離が生じて高塩分領域が残

り易いことを示すものと思われる。

同図中にさらに上流から下流にわたっての河川中央部表層の電気伝導度の分布を示している。

なおこの観測期間にはあまり明瞭な塩水楔は認め難かったが、水底近くの高塩分領域 (Cl^- 7 ‰ 程度) は FG 断面, CE 断面の中間付近より下流に存在していた。

Fig. 4 は各断面における表層 (水面下 50cm) の伝導度の横断方向の分布を示している。

川幅が広くて流速が遅くまた蛇行の影響の小さい AB 断面以外の断面ではいずれも岸沿いに塩分の相対的に高い領域が狭い帯状に存在し, HJ 断面, FG 断面では蛇行の凸岸 (浅瀬側) 下流に塩分が残留しやすい傾向が認められる。

また HJ 断面, FG 断面ともに下げ汐時の方が急峻な勾配が認められるが, これは後述の実験結果の傾向と一致している。

しかしながらこれらの地形的影響による塩分濃度の差異は潮汐による全体的な塩分濃度の変化に較べれば小さく, 岸沿いに発生する塩害の地域的特性を河水の塩分濃度分布の特異性に帰せしめることは妥当でない。

2. 旧吉野川河口における観測例

旧吉野川は灌漑水として河水を使用するために汐止め樋門が設けられており, 樋門を閉じているときは, 下流側には淡水流入がなく, 低潮時に樋門を開いたときには淡水が表層を流下しながら海水と混合してゆく。

したがって樋門開放時から閉鎖後にわたって下流の塩分, 流速の分布を調べると, 非定常な密度成層流の発達, 消滅の経過が興味深く観察されるが, この現象は河口締切計画に際して締切堰下流の塩分, 流速の分布推定に有効な資料を提供するものであろう。

このような意図の下に電気伝導度計と自記レコーダーを利用して長良川の場合と同様な観測法に従って調査した結果の一部を次に示す。

Fig. 5 は観測の対象とした地域の概略図であるが, とくに弯曲部大津橋付近は右岸に中州が発達し, 水路が狭くまた浅くなっている。

また紀伊水道に面した河口部には砂嘴が突出して水路断面を狭くし, 海水と河水の自由な混合を制限している。

Fig. 6 は樋門を開いて淡水を放出しているとき (放流量 $100\text{m}^3/\text{sec}$ 程度), 樋門閉鎖後 1 時間および 3 時間経過したときの Cl^- および流速の縦断方向の分布を示す。

これによれば樋門開放中は流出淡水は表層

にひろがり, D 点付近のくぼみに溜った塩水の上をのりこえて流れ, E 点を通過したあたりからかなり塩水と混合して流下をつづけている。

これは後述の模型実験でみられる現象と一致している。

樋門を閉じた後は大体緩混合型の塩分分布を保ちながら次第に塩水は上流に遡上してゆくが E 点付近でかなり遡上が抑制され, この部分で急峻な塩分勾配が観測される。

Fig. 7 は表層 (水面より 50cm の深さ) の電気伝導度を小舟で航走しながら記録した結果を示す。

この結果は樋門閉鎖後, 塩水が遡上するとき大津橋付近でかなり遡上が抑制されることを明瞭に示してい

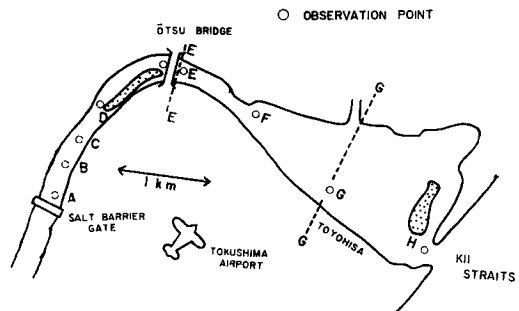


Fig. 5 Survey region of old-Yoshino river.

る。

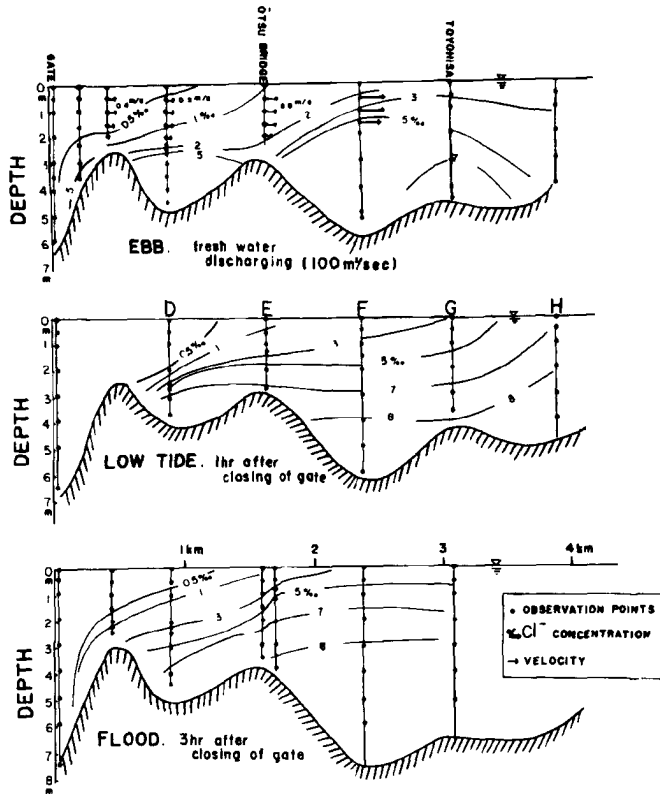


Fig. 6 Change of chlorinity distribution at old-Yoshino river after stopping of fresh water discharge.

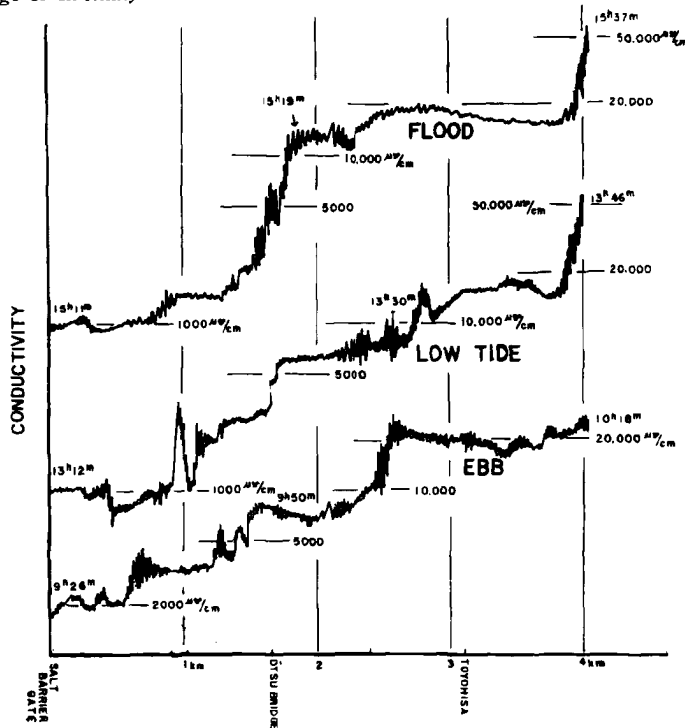


Fig. 7 Conductivity change of surface layer along old-Yoshino river showing a steep jump at Ōtsu bridge.

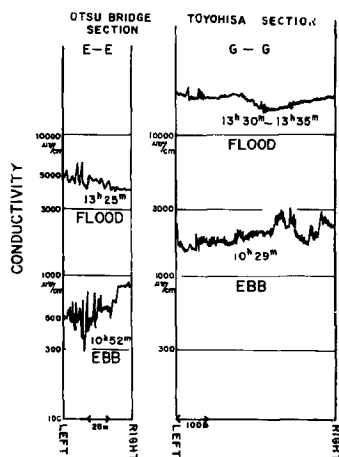


Fig. 8 Conductivity change of surface layer across old-Yoshino river.

さらに Fig. 8 は E-E 断面および G-G 断面における表層の伝導度の横断方向の分布を示す。

これによれば大津橋付近では淡水放出中に州の背後に本流が剥離して高塩分領域がとり残されていることが認められるが、上げ汐時には殆んどその影響がない。

この現象は後述の実験結果と同じ傾向を示している。

3. 模型水槽実験

上述の観測によって河口地形が塩分分布に顕著な影響を及ぼしている実状は確認されたがその物理的な機構は明らかでない。

そこで非定常な塩水楔の運動を観察し、水底地形が塩水楔の運動、淡塩水の混合に及ぼす物理的作用を確認するために簡単な模型水槽実験をこころみた。

(i) 装置および寸法

実験に用いた装置の概要は Fig. 9 に示す通りである。

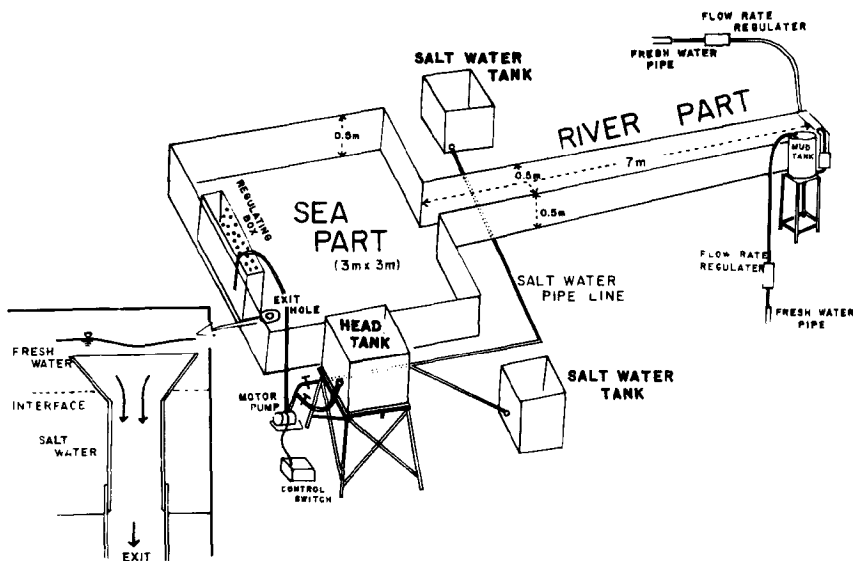


Fig. 9 A general view of experiment flume.

この水槽は $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ の海部と $7\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ の河川部からなり、海部には塩水（食塩水）をモーター・ポンプによって出し入れして潮汐に相当する水位変動を生ぜしめ、河川部には上流側から流量計を通して一定流量の淡水（水道水）を流すようにしてある。

なお河川部には泥流も注入できるように攪拌機を付けた給泥槽から濁度計（光電式）を通したパイプが水槽上端に入っている。

水槽の側壁は透明な塩ビ板で作られており、塩水に着色しておくことで淡塩水の混合状況が直接に肉眼で観察される。

水槽の底には写真撮影効果を考慮して白砂(砕石した粒径2mm程度のもの)を敷いたが、これによって実験目的に応じて河床勾配、水底の凹凸、水路の蛇行などを容易に人為的に与えることができた。

なお今回の各種の実験では塩水が水底に対して運動する速度は殆んど1cm/sec以下でその厚みも5cmより薄く、Reynolds数は500以下であって水底は流体力学的には滑面とみなせるから、淡塩水界面の摩擦に比して底面の摩擦は微弱である。

流速の分布を調べるためには着色水をビュレットを用いて流水中に鉛直に注入し、定時間間隔(通常5~10sec)で写真撮影して、流速の鉛直分布および乱れの模様を記録した。

淡塩水の混合状況は塩水を着色することによって肉眼観察、或いはカラー写真撮影で調べられるが、一部の試験では電気伝導度計によって界面付近の伝導度分布の時間的変化を記録した。

実験に際しては河口に如何なる条件を与えるかによって塩水遡上状況はかなり変わってくるのが予想されるが、実際の河川における河口条件の確認はきわめて難しく、また実験施設の制限もあるので、塩水を海部

下端から注入または排出して塩水層の厚みを一定周期で変化させた。この場合に河川部から流入する淡水が海部に貯溜すると水位が時間とともに増加するので海部下流端近くに図中左隅に示したような表層取水型の排水孔を設け、表層淡水(一部塩水が混合)のみを流出させた。

このような方法で行なった実験記録の一例をFig.10に示す。

実際の河川と模型との現象の相似性については複雑な要素が同時に効いてくるために単純な取扱いにはできないが、特に速度のshearによる乱れの発生と密度成層による安定性の比較に重点をおくときはRichardson数(Ri と略記)に着目すべきであろう。

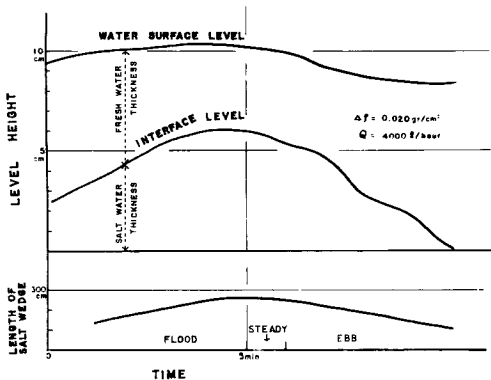


Fig. 10 An example of control of salt water thickness and its results in the change of salt wedge length.
 $\Delta\rho$, density difference and Q , fresh water discharge.

Ri 数は次のように定義される。

$$Ri \equiv -\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz} / \left(\frac{dU}{dz} \right)^2$$

ここに g は重力加速度、 ρ は密度

$\frac{d\rho}{dz}$, $\frac{dU}{dz}$ はそれぞれ鉛直方向の密度勾配, 速度勾配である。

ここで代表的な深さを H , 流速を U , 密度差を $\Delta\rho$ とおけば

$$Ri = -\frac{g}{\rho} \frac{\Delta\rho}{H} / \left(\frac{U}{H} \right)^2 = \frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot \frac{gH}{U^2}$$

となる。

すなわち密度差を同じにとれば Froude 数を揃えることによって相似の条件が保たれる。

上述の実験施設で与え得る Ri 数の範囲は 0.1~3 で吉野川河口, 長良川河口の流速, 塩分分布の実測値から得られる値の範囲に大体一致する。

しかしながら地形の影響は主として流水の剥離によって生じる大きな eddy による混合効果として現われてくるから, 上述の Ri 数を揃えたのみでは相似性は保たれない。

地形の影響を定量的に正確に調べるには地形変化の幾何学的形状と流況に応じて境界層剥離の条件を確め

た上で相似性を検討しなければならないから、今回は一先づきわめて特徴的な地形の影響を定性的に考察する段階にとどめた。

(ii) 実験結果

(A) 塩水楔上昇速度

河床勾配ゼロの河口部において塩水位上昇速度を一定値 (0.15mm/sec) に保ち、密度差 $\Delta\rho$ 、淡水流量 Q を変え、上げ汐期間の平均塩水楔遡上速度を求めてみると、Fig. 11 のような結果が得られる。

この図から密度差が小さく淡水流量が大きいときは塩水遡上速度はきわめて小さくなることがうかがわれる。

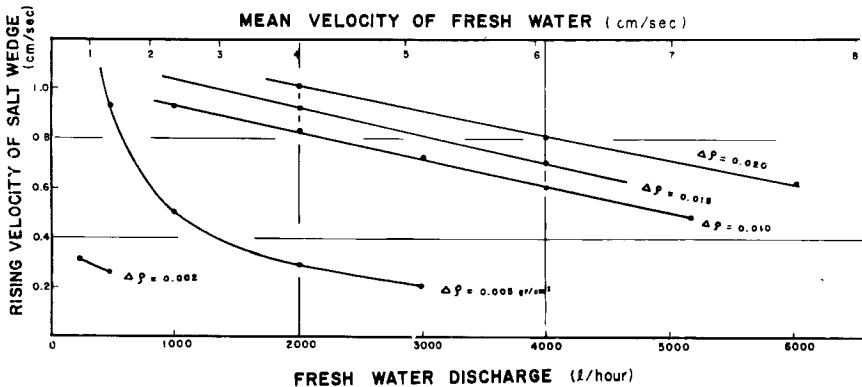


Fig. 11 Mean rising velocity of salt wedge during flood period in the experiment.

たしかに密度差が小さく淡水流速が大きいときは界面に振動が起り易いことが観察され、界面の摩擦が増大することは容易に想像されるが、一定の Ri 数を境として界面の乱れが顕著に変わることは認められなかった。

(B) 特殊水路形状の塩水楔遡上に及ぼす影響

(A) の実験は全部一様な矩形断面をもった水路を遡上する塩水楔の速度を求めたものであるが、水路断面に色々な形状変化を与えると遡上の模様はかなり異なってくる。

その典型的な二、三の例を Fig. 12 に示している。これによれば一様な矩形断面をもった水路に比して、他の条件が同じであれば水底に波状起伏をもった水路、側方からのなだらかな突起による狭窄部をもった水路はいずれも塩水楔の遡上が妨害され、中央を掘り下げた「みおすち」のある水路では遡上が促進されることが明らかにみとめられる。

(C) 特殊水路形状の塩分分布に及ぼす影響

以上の実験は主として明瞭な淡塩水界面が認められる塩水楔の運動を対象としたものであるが、実際の河川ではすでに前例で示したように楔の存在していない場合もきわめて多い。

それ故に淡塩水の混合拡散がいかんして生じているかを考察することは実際の塩分分布の説明のために必要である。

従来多くの説明は淡塩水界面が不安定になりその結果、界面波がくづれて塩分の鉛直方向の攪拌が起るものと考えているが、平坦な水路内で速度の shear によってこのような現象が起るためには二層の密度差が小さく、相対速度が大きいことが必要である。

しかしながらそのような条件のときは淡塩水界面の摩擦係数はきわめて大きく塩水の遡上は著しく抑制さ

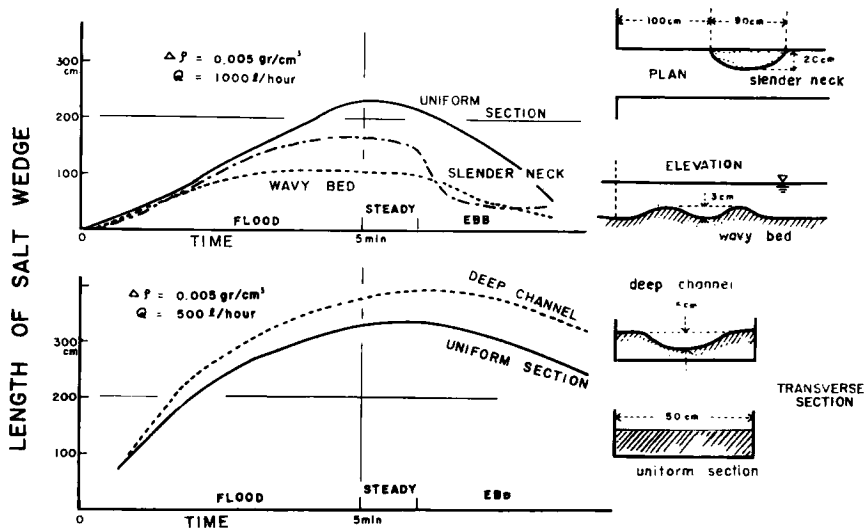


Fig. 12 Effects of special bed forms on rising velocity of salt wedge.

れる筈であってその傾向は Fig. 11 に明らかに認められる。

したがって河口から 10km も遡ったような地点まで海水が上り得るのはきわめて安定な塩水楔の存在するときに限られるであろう。

また上述の界面不安定が混合の主原因ならば淡塩水界面に沿って接触距離（風浪の吹走距離 *fetch* に相当する）の長い程乱れが大きく、下流にゆくにつれて強い混合が起る筈であるが多くの河川の観測例では、かえって下流の方で界面が明瞭に認められる。

以上のような考察によって淡塩水界面の乱れを二層の速度の *shear* による界面不安定のみに帰することは適当でないように思われる。そこで淡塩水の混合が特に起り易い条件を別に求めるために次のような二、三の実験をこころみた。

実際の河川の観測例では水底起伏、蛇行の存在が大きく海水遡上を抑制し、淡塩水の混合を助長しているように思われるから、水槽内で鉛直方向の水底の凹凸、または水路の蛇行を作ってその付近での混合作用の変化に着目した。

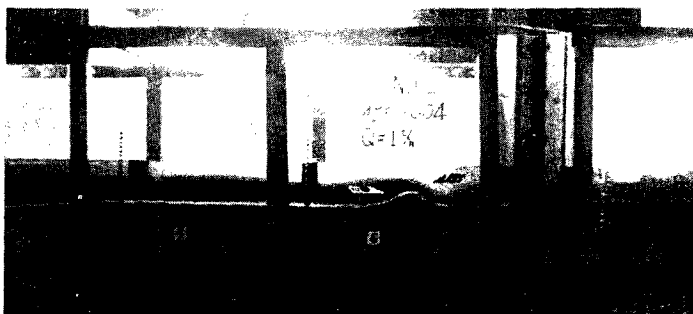


Photo. 1 Saltwedge flowing up over a bottom ridge at flood period.
(Arrows show flow directions)

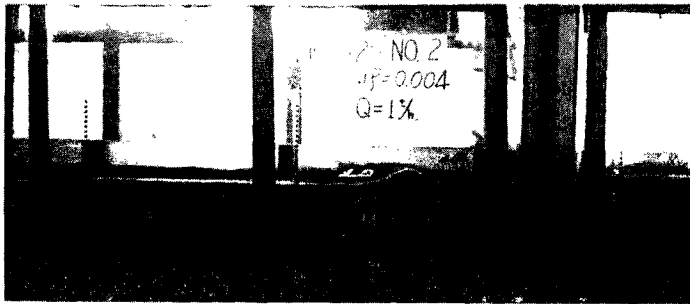


Photo. 2 Saltwedge flowing down over a bottom ridge at ebb period.

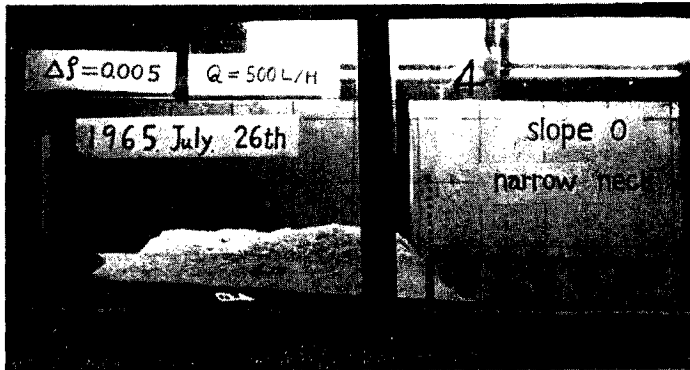


Photo. 3 Saltwedge flowing up through a narrow neck at flood period.

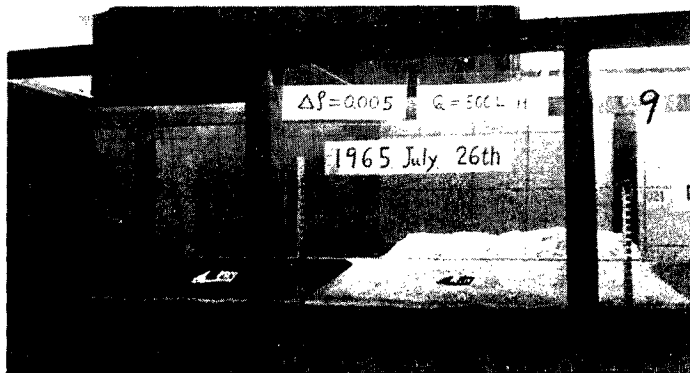


Photo. 4 Strong mixing between fresh and salt waters in downstream region of a narrow neck at ebb period.

その実験結果の一例を **Photo. 1～4** に示す。いずれも左方が河口に当り水の流向は矢印で示されている。

Photo. 1 は、水底の突起を塩水が乗り越えて遡上するとき（上げ汐時に相当）**Photo. 2** は塩水が流下するとき（下げ汐時に相当）の淡塩水の界面を現わしている。（下層着色部が塩水）

この写真から水底の起伏があるときにはとくに下げ汐時に頂上付近の剥離に伴って混合が起り易いことがうかがわれる。

Photo. 3 は水路が側方浅瀬によって狭くなっている場合 (**Fig. 12 slender neck**) の上げ汐時の層化の様を示し, **Photo. 4** は同じ場合の下げ汐時の層化の様を示している。

Photo. 4 においては界面は著しくばやけ, 淡塩水の混合が盛んに生じていることが認められる。

同様な実験は他にも数例ところみたが, いずれも下げ汐時に浅瀬下流に濃塩水領域がとり残され, 淡塩水が水平に並んで存在するときに著しい混合が生ずることが確認された。

これは水平方向の突起物にぶつかった流れが下流側で剥離するときに大きな渦が生じ易く, また水平方向に淡塩水が共存するときはその界面に密度差による安定作用が効かないのできわめて混合し易くなることを意味する。

このような現象は前述の河川の実測例でもよく認められている。

以上の実験の説明は定性的な段階にとどまり, さらに定量的な検討を必要とすることは云うまでもないが, 鉛直または水平な突起物による剥離現象が淡塩水の混合に大きな役割を果たしていることは明らかであろう。

なお水底の凹凸が海水遡上の速度を低下させることは **Fig. 12 (wavy bed)** に示されているが, 下げ汐時に「くぼみ」にとり残された塩分がいかなる条件で排出されるかについては, 二, 三の研究が進められている。^{3) 4)}

しかしながら定量的な条件の確認と現地での実測は残された問題である。

以上各節で述べたことを要約すると

- 1 河口地形は海水遡上に顕著な影響を及ぼし, 塩分分布に特異性を与える。
- 2 浅瀬, 狭窄部は海水遡上の抑制に顕著な効果がある。逆にみおすちの存在は遡上を促進する。
- 3 水路の蛇行, 水底の起伏は淡塩水の混合を促進するが, その作用は剥離現象による大きな渦の発生によるものである。

これらの諸項はいずれも容易に想像される内容のものではあるが, 河口で実際に観測し, また模型実験によって確認されたことに意義があると思われる。

さらに定量的な研究を進めることによって人工的な水路微地形の変化を与えて海水遡上をかなり有効に抑制する可能性も考えられるであろう。

謝 辞

本研究をすすめるに当って実験装置の製作と現地観測に特別の協力を寄せられた本研究所技術員横山康二氏に感謝する。

また現地観測に際して援助をいただいた四日市工業用水道事務所, 中部地建木曽川下流工事事務所, 中国四国農政局技術課, 徳島県耕地課の諸氏に深謝する。

なおこの研究は昭和39年度, 40年度文部省科学研究費の援助を受けて行われた。

参 考 文 献

- 1) Schijf, J. B. and Schönfeld, J. C. : Theoretical considerations on the motion of salt and fresh water, Proc. of 5 th Cong. of I. A. H. R., Minnesota, (1953) pp. 321~333.
- 2) 嶋 : 北伊勢工業用水道長良川水源に対する塩水楔の遡上機構とその防止工法, (1963) 東大・工, 水理研究室
- 3) 福島・柏村・八鍬・高橋・大谷 : 石狩川河口の研究 (2), 土木学会第12回海岸工学講演会講演集, (1965) pp. 158~161
- 4) 奥田 : 人造淡水湖における塩分の収支算定について(その1), 京大・防災研, 年報第6号, (1963) pp. 189~199