

塩水と淡水の境界面附近の拡散と希釈

明星大学理工学部 正会員 川 端 猛

1. まえがき

近年水資源の利用が活発化し、河口附近における塩水の河川への浸入する現象はそこでの工業用水や農業用水等の面でも重要な意味を持っている。河口密度流については以前から多くの研究が進められ、幾多の成果を出しているが、淡塩境界面における両者の混合、塩水層内の流動及び海水の底面におけるセン断応力等の無視のために、まだ充分にその性質を解明しているとは云えないようである。ここではごく初歩的な立場で、現象を知るために河床勾配の有る水路での塩水くさびの形状、塩淡境界面附近での拡散や希釈の状況等についての実験結果を報告します。

2. 実験装置及び方法

実験に使用した水路は長さ17 m、幅及び高さ0.4 m、河床勾配1/300の側面ガラス張りの鋼製二次元水路である。水路下流端0.6 m区間は水路幅の2倍に漸次開口してゆき、その先端は幅1.5 m、高さ1.3 mの海水槽に接続している。海水槽には前面及び両側面に水門があり、又底面から数本のパイプ(2^φ)により補給水槽に連結されている。補給水槽には越流口があり、別の水槽に前もって作ってある塩水をポンプで汲み上げたのが越流し、水位を一定に保てるようにしてある。補給水槽と海水槽の間にはバルブがあり補給量を調節できるようにしてある。水路床及び側面には薄い金網により必要な粗度がつけてある。水路上流端には直角三角堰があり、流量の測定ができるようになっている。

実験は前もって作っておいた塩水を海水槽に入れておき上流より淡水を流す。次に補給バルブを一定に開き補給を開始する。塩水は水路床面に沿ってくさびの如く侵入を開始し15~20分後に安定する。塩水の侵入速度 $V=0$ になった時に計測を始める。塩水くさびの長さ L_0 は河口を原点として、水路側面に貼ってあるテープにより読み取る。各地点の水深とくさびの高さ h は河口より10 cm間隔に鋼尺及び砂面測定器にて水路中央部で測定する。水路に河床勾配があるため河口水深 H_0 とくさび先端の水深 H とは数mmの差異がある。淡水の流速はくさび先端 V_r 、河口 V_0 、中間点数ヶ所で小型流速計及びビトー管にて測定する。又各地点の密度の測定のため、電気伝導度計を使用する。電気伝導度と塩水の密度との関係は実験により前もって表-1を作製した。塩水は食塩を溶解させてその密度 ρ_s は同一実験中は一定とし、塩水と淡水の境界面が判読しやすいようにローダミンBにて赤く着色してある。淡水の動粘性係数 ν は電気水温計で水温 t ℃を測定し Poiseuille の

$$\nu = 0.0178 / (1 + 0.0336t + 0.000221t^2)$$

なる式より算定する。

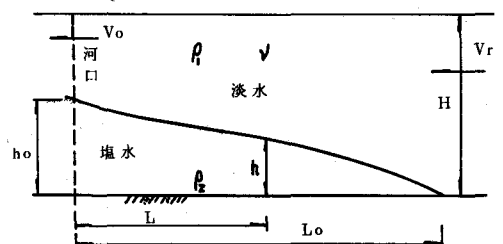


図-1 塩水くさび

ρ_1 を淡水密度, $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$, $\rho_m = \frac{1}{2}(\rho_1 + \rho_2)$

とすると

$V_\Delta = \sqrt{\Delta\rho/\rho_m \cdot g H}$ を densimetric velocity
 $R_\Delta = V_\Delta H/\nu$ を densimetric Reynolds number
 $Fr = 2 V_r/V_\Delta$ を river flow parameter
 として使用する。

電導度 塩水温度	5×10^{-3} M/cm	10×10^{-3}	20×10^{-3}	80×10^{-3}	40×10^{-3}
5 °C	1.0085	1.0080	1.0172	1.0271	1.0892
10 °C	1.0081	1.0060	1.0141	1.0282	1.0812
15 °C	1.0029	1.0056	1.0118	1.0192	1.0266
20 °C	1.0018	1.0047	1.0100	1.0162	1.0227

表 - 1 電導度と密度の関係 単位 (g/cm³)

3. 塩水くさびの形状

河床勾配を有する水路での塩水くさびは水平水路での塩水くさびに比べてどのように異なるのであろうか。両者の比較により調べてみよう。

水平水路の場合に、水路断面は矩形、塩水の浸入は弱混合型で、境界面での混合と底層海水の運動を無視し、河口水深は限界水深を保つとして定常時における上下両層に対する運動方程式及び連続方程式を解いて、くさびの形状を与える式を Schijf-Schönfeld が導き、さらに Farmer-Morgan が二層間のせん断応力がくさび全長に渡り一定として近似化している。この近似式は Keulegan の実験資料などでみると、実際の形状が Fr の大小によって扁平化したり丸みを帯びたりするのに一つの形状しか表現できないようであるが、大むねその形状を示しているようである。

河床勾配を有する水路でのくさびの形状を与える式はまだ確立されてないようなので、Farmer-Morgan 式と実験資料を比較してみた。(図 - 2) 図 - 2 では河口付近で近似式よりも実験資料が上にきて、しかも直線的傾向を示し、くさび先端に

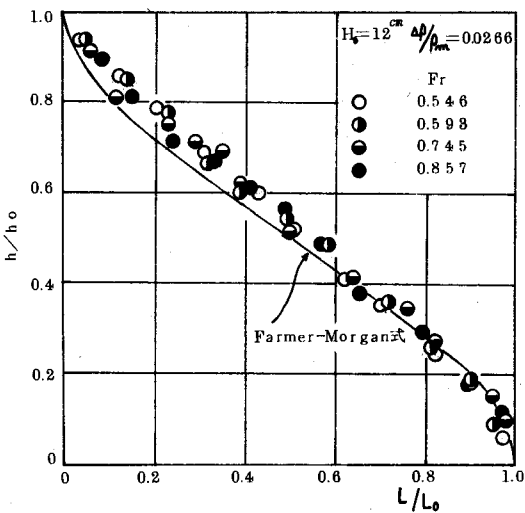


図 - 2 塩水くさびの形状

近づくとつれて近似式に接近するようである。この事は水平水路での塩水くさびに比べて、河口付近ではくさびがふくらみを持っていると思える。

一方 Lamb によると、水平水路において、塩淡水二層の境界面上の内部波は変化しない、さらに内部波は長波として存在し、塩水層は停止し、淡水層の流速はその地点の淡水流速に一致し、塩水密度と平均密度の差はなく、境界面の混合は少なく連続の条件が成立するという条件で、

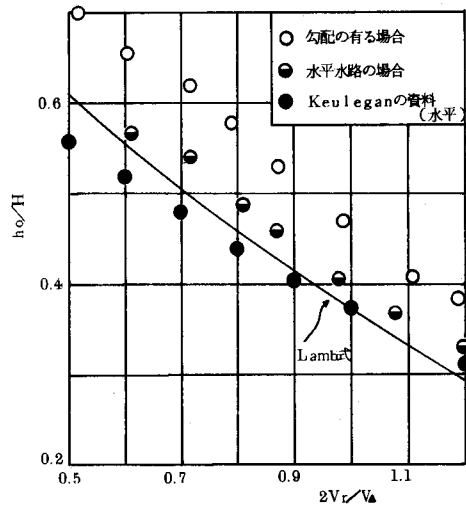


図 - 3 河口での塩水くさびの厚さ

河口での塩水くさびの深さ h_0 と全水深 H_0 との比は river flow parameter $2 V_r/V_{\Delta}$ の関数で

$$h_0/H_0 = 1 - 1/2^{2/3} (2 V_r/V_{\Delta})^{2/3}$$

と導いている。

図 - 3 は Lamb 式と Keulegan の実験資料及びこの実験の水平水路の場合と河床勾配の有る場合の資料の比較をしている。水平水路の場合に比べて、河床勾配の有る場合は相当に上側に位置している。この事は同条件なら水平水路の場合に比べて、河口でのくさびの深さが大きいことを示していると思える。

4. 塩淡水境界面附近の拡散と希釈

一般に淡水と塩水の密度差が安定してくると、両層の中間の比較的薄い層の中で密度が急に変化することになり、この薄く不連続的層を躍層と云うのは周知の通りである。この不連続な層の存在は肉眼では確認できないので、くさびの各断面においてその鉛直方向の密度の変化を電気伝導度計で追跡してみると図 - 4 のようになる。

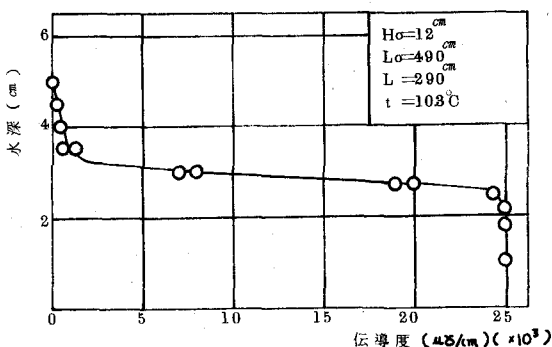


図 - 4 伝導度の鉛直分布

図 - 4 の例では河口より約 6 割の地点のものであり、塩水層の伝導度は $25 \times 10^3 \mu S/cm$ ($\rho_2 = 1.0183 g/cm^3$) で、淡水の伝導度は $0.0 \mu S/cm$ ($\rho_1 = 1.0000 g/cm^3$) である。塩水と淡水の境界面は $3.8 cm$ の位置にある。そこでこのような不連続的な層を境界

面より上部で伝導度計の針の震れる部分と、下部で一定伝導度になる迄の部分に分けてみた。上部層の厚さを t 、下部層の厚さを d とし、 t 層、 d 層と呼ぶことにする。 t 層は淡水が塩水に侵された部分、 d 層は逆に塩水が淡水に侵された部分と考えられるであろう。

河床勾配のある水路での資料より図 - 5、6 を作製した。

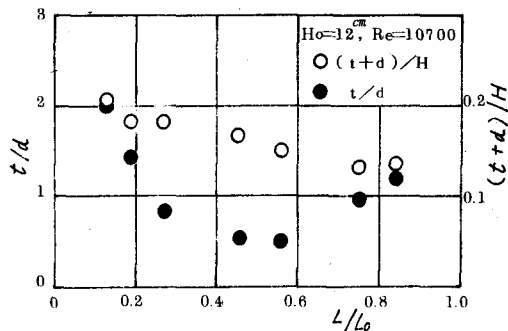


図 - 5 不連続層の厚さ

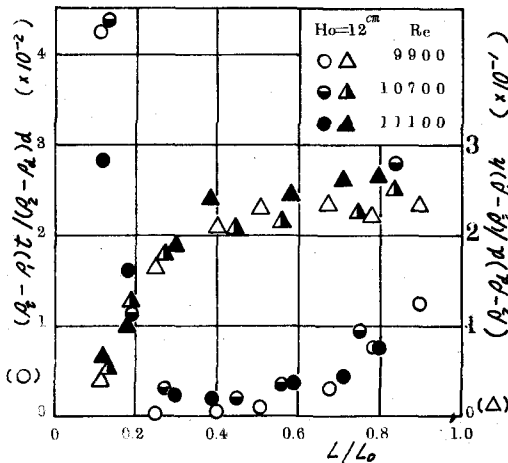


図 - 6 塩分の移動

図 - 5 には縦軸に不連続層全体の厚さと全水深の比及び t 層と d 層の比、横軸に河口からの距離とくさび全長の比を取ってある。これによると不連続層はくさび先端より河口に近づくにつれて徐々にその厚みを増してゆき、又くさびの中間部では t 層は d 層より薄くなっているようである。又図 - 6 では h を塩水層の厚み、 ρ_1 ,

ρ_d をt層, d層の平均密度として, 本来その地点の塩水層の持っている塩分量の目安として, $(\rho_2 - \rho_1)h$ 塩水層から失われる塩分量の目安として, $(\rho_2 - \rho_d)d$, 淡水層に拡散して残留している塩分量の目安として, $(\rho_1 - \rho_d)t$ を考え, その比 $(\rho_1 - \rho_d)t / (\rho_2 - \rho_d)d$ 及び $(\rho_2 - \rho_d)d / (\rho_2 - \rho_1)h$ を縦軸に取ってある。これによると塩水層はくさびの先端に近い所程, 失う塩分量が多いようであり, 塩水層から失われる塩分量の割りには淡水層に拡散しそこに残留している量は少ない。特にくさびの中間部分は僅少である。失われた塩分は海水槽に流下しているようである。一方塩水層内底部の密度 ρ_2 は各地点でほとんど一定値を示していた。

5. む す び

以上塩水くさびの実験資料を基にして, くさびの形状, 塩淡水境界面附近の拡散と希釈の現象を初歩的な立場で考察してみました。計測の精度等問題があり, 資料は十分な精度とは云い難く, 現在も実験を継続中です。御批判を頂ければ幸いです。

参 考 文 献

- (1) G.H. Keulegan : The mechanism of arrested saline wedge.
Estuary and Coastline Hydrodynamics edited by A.T. Ippen
- (2) Farmer, H.G. and G.W. Morgan : The salt wedge
Proc. 3rd Conf on Coastal Eng. (1952)
- (3) H. Lamb : Hydrodynamics
- (4) 浜田徳一, 堀口孝男 : 塩水楔の性質について
第7回海岸工学講演会講演集(1960)
- (5) 南 勲, 田中雅史 : 定常流における塩分の鉛直分布について
第12回海岸工学講演会講演集(1965)
- (6) 嶋 祐之, 椎貝博美, 玉井信行 : 河床勾配のある場合の塩水楔について
第19回年次学術講演会概要