

# 塩水くさびと躍層

川 端 猛

## 1. 緒 言

河口附近における淡水と塩水の混合する現象はそこでの工業用水、農業用水等の利水上の観点でも重要な意味を持っている。

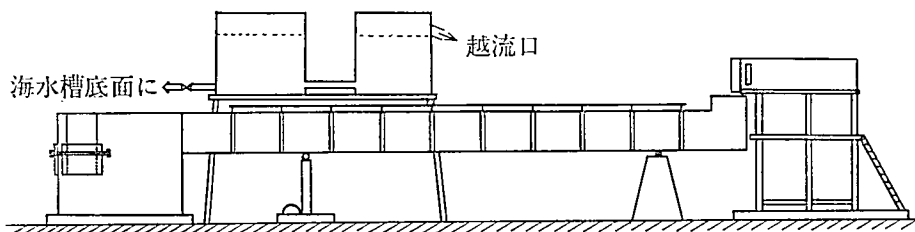
河口附近では淡水と塩水との接触により密度流を形成しその実体は複雑である。河口密度流については多くの研究が進められているが、淡水と塩水の境界面における両者の混合、海水層内の流動等が難解のためにその性質を十分に解明したとは云えない。

筆者はここ数年の間、模型実験により二層流体（弱混合）の観点で河口密度流の問題に取り組んで来たが、ここにその一部として、塩水くさびの形状、二層の抵抗係数、淡塩両層の密度差が定常状態に達すると生ずる躍層の性質等について考察を行う。

## 2. 実験装置及び方法

実験に使用した水路は長さ 17m、幅及び高さ 0.4m、河床勾配 1/300 の片面ガラス張りの鋼製二次元水路である。水路下流端 0.6m 区間は水路幅の 2 倍に漸次開口してゆき、その先端は長さ、幅 1.5m、高さ 1.3m 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 B）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海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目の細い金網により必要な粗度がつけてある。水路上流端には堰装置（直角三角堰）があり流量の測定ができる。

（図—1）



図—1 実験装置概略

尚、実際河川における条件として、河床勾配  $i=1/3000$ 、河岸の粗度係数  $n=0.013$ 、河口水深 2~3m を想定し、相似率鉛直方向  $n_r=1/50$ 、水平方向  $n_H=1/500$  のひずみ模型とした。

実験は前もって作っておいた海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。海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。海水の侵入速度  $V=0$  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 10cm 間隔に鋼尺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  $H$  とはわずかではあるが数 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ピ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。海水は食塩を溶解させて、その密度  $\rho_2$  を同一実験中は一定とし、海水と淡水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。使用した海水密度  $\rho_2$  は 1.017～1.037 の範囲にある。淡水は地下水使用のためその密度  $\rho_1$  は 1 より大きく 1.003 程度である。淡水の動粘性係数  $\nu$  は電気水温計で水温  $t^\circ\text{C}$  を測定し、

$$\nu = 0.0178 / (1 + 0.0336t + 0.000221t^2) \quad (\text{cm}^2/\text{sec})$$

なる実験式より算定する。

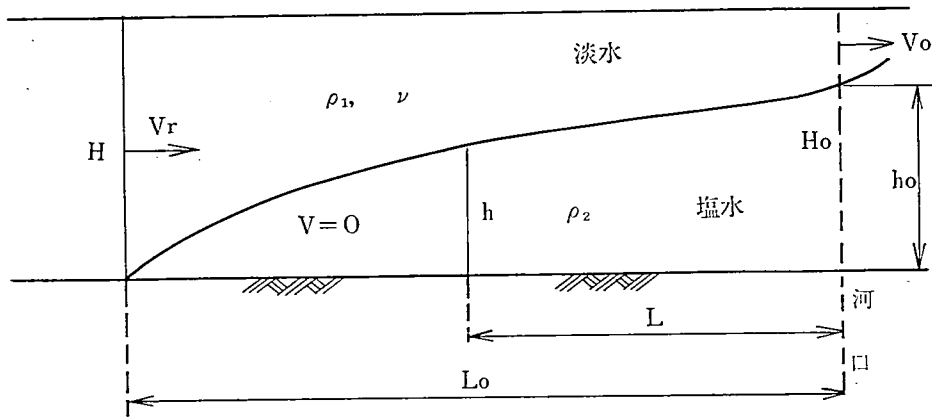
$$4\rho = \rho_2 - \rho_1, \quad \rho_m = \frac{1}{2}(\rho_1 + \rho_2) \quad \text{とすると}$$

$$V_d = \sqrt{4\rho/\rho_m \cdot gH} \quad \text{を Densimetric Velocity}$$

$$R_e = V_d \frac{H}{\nu} \quad \text{を Densimetric Reynolds number}$$

$$F_r = V_r/V_d \quad \text{を River flow parameter}$$

として使用する。使用記号は図—2, 7を参照のこと。



図—2 塩水くさび

### 3. 塩水くさびの形状と抵抗係数

弱混合型の場合で、一定水路幅の水平床矩形断面水路において、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、連続方程式を解いて、くさびの形状及び長さを求める式を Farmer・Morgan, Schijf・Schönfeld が導いている。Schijf・Schönfeld 式は  $L_0, V_r, \rho_1, \rho_2, H_0$  の量が測定されると計算できる。くさびの形状を  $F_r$  と水面より両層の境界面までの高さの 5 次式で示している。計算は相当に手が掛かるが当実験資料は割合よく当てはまる。Farmer・Morgan 式は  $H_0, L_0$  が与えられると使える。流速、密度を示す項が式中にないのでどのくさびも

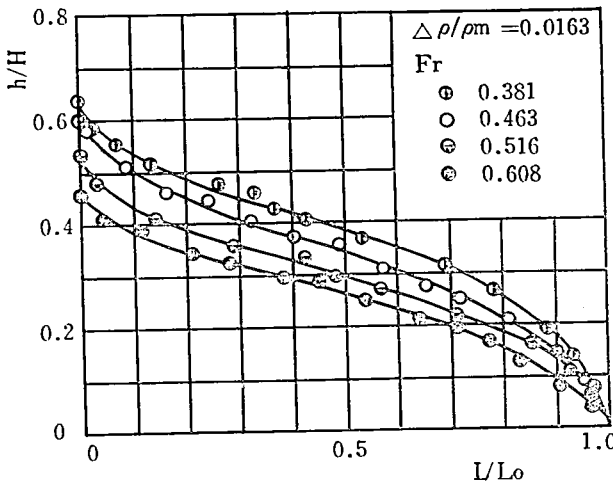


図-3 くさびの形状

よると

$$L_0/H = A_2 F_r^{-\frac{7}{2}}$$

となり、べき数が異なる。Keulegan 式では Mississippi 河のように大河川を対象とし、河床勾配  $i=0$  に対して、当実験では  $i=1/3000$  のように相当の勾配があることによる差異ではないかと思える。

一方、塩水くさびの形状や長さは、淡塩境界面の摩擦抵抗係数の取り方によって相当に変化する。淡塩二層間の抵抗係数  $f_i$  は、淡水流速  $u$ 、二層間せん断応力  $\tau_i$  とすると

$$\tau_i = \frac{1}{2} \rho_m f_i u^2$$

で定義されるが  $u$  はくさび上では一様でないので、各部分ごとに  $f_i$  も変化する。

くさび全長についての平均抵抗係数を  $\bar{f}_i$  とすると、Schijf・Schönfeld 式より

一つの線形でしか表現できない。実測資料より図-3を作製すると、 $F_r$  の差異、すなわち  $V_r$  の差異が明らかにでている。この式の仮定条件「二層間のせん断応力がくさび全長にわたって一定である」に問題があるのではないかと思える。

図-3 で示すように  $F_r$  が大きくなるとくさびの形状は扁平化してくるようである。

又、Keulegan は  $L_0/H$  と  $F_r$  の関係を

$$L_0/H = A_1 F_r^{-\frac{5}{2}}$$

としているが、当実験資料に

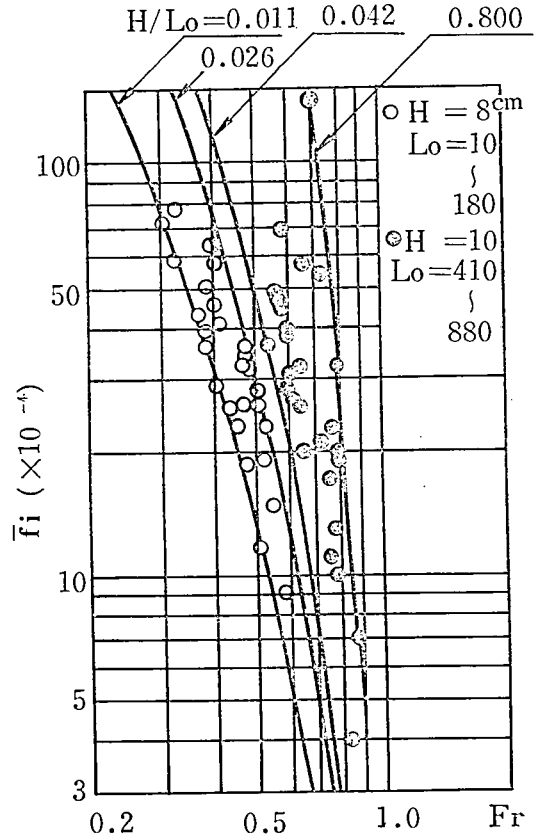


図-4 平均抵抗係数

$$\bar{f}_i = \frac{H}{2L_0} \left( \frac{1}{5F_r^2} - 2 + 3F_r^{\frac{2}{3}} - \frac{6}{5}F_r^{\frac{4}{3}} \right)$$

となる。図—4に示すようにくさびの形状が鋭いもの程曲線は直線化してくる。当資料も上式により算定し図に示した。

一般には抵抗係数は模型実験では  $10^{-2}$  程度、現地観測では  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  程度と報じられているが当資料では現地観測値に近いようである。

#### 4. Lamb 式との比較

河口における塩水くさびの深さ  $h_0$  と全水深  $H$  との比  $h_0/H$  は River flow parameter  $V_r/V_\Delta$  の関数で

$$h_0/H = f(V_r/V_\Delta)$$

で表わせる。塩淡水二層の境界面上の内部波が変化しないという事から、Lamb によると、 $U', U$  を淡水及び塩水層の流速、 $h', h$  を淡水及び塩水層の深さとする、

$$\rho_1 U'^2 \coth kh' + \rho_2 U^2 \coth kh = g(\rho_2 - \rho_1)/k \quad \dots\dots\dots(1)$$

となる。

$$U=0, \text{ 波長 } (2\pi/k) \gg h' \text{ として}$$

$$U'^2 = g \frac{\Delta\rho}{\rho_2} h' \quad \dots\dots\dots(2)$$

更に、淡水速度  $V_1 = U'$ ,  $\rho_2 = \rho_m$ ,  $h' = H - h_0$  とすると

$$V_1^2 = \frac{\Delta\rho}{\rho_m} g(H - h_0) \quad \dots\dots\dots(3)$$

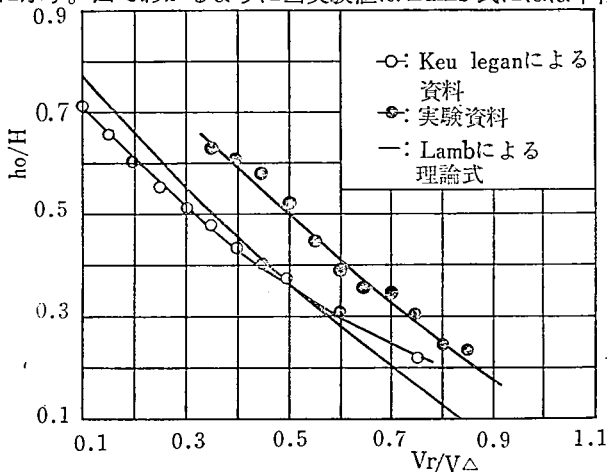
境界面での混合が少ないときの連続の条件は

$$V_1(H - h_0) = V_r H \quad \dots\dots\dots(4)$$

(3), (4)式より  $V_1$  を消去すると

$$h_0/H = 1 - (V_r/V_\Delta)^{\frac{2}{3}} \quad \dots\dots\dots(5)$$

となる。この理論式、Heuleganによる従来の実験値の平均及び当実験値の平均を図—5に示す。図でわかるように当実験値はLamb式にほぼ平行して位置している。Lamb式及



図—5 Lamb式との比較

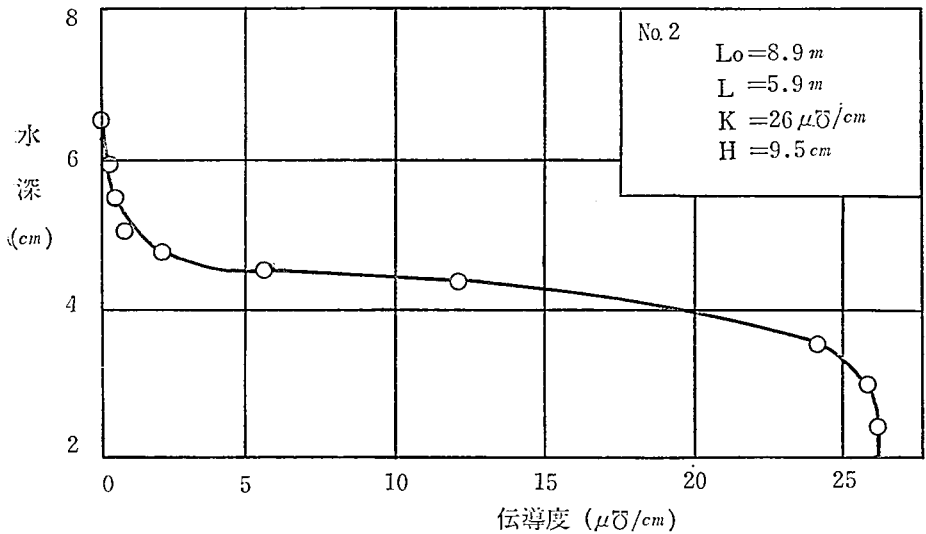
び Heulegan による資料では水路は水平であるという条件に対して、当実験は河床勾配  $i=1/300$  を水路に持たせているため、流速がかなり大きくなるので全体が平行移動したのと考えられよう。

一方 Lamb 式の連続の条件を吟味するためくさび上の各地点での流量を測定してみたが相当に差異があり、条件に修正を加える必要があるかと思えた。

### 5. 躍層の厚さと躍層内の密度

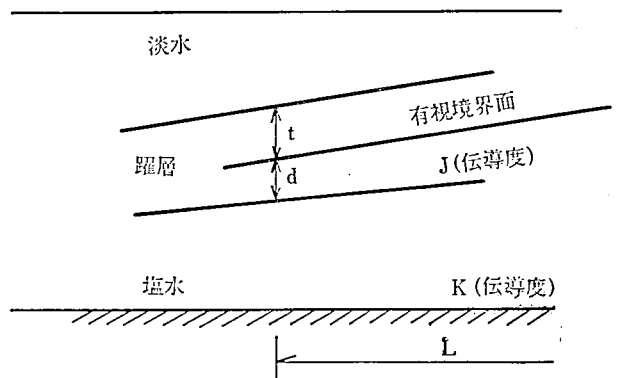
表—1 電導度と密度の関係

電導度 塩水温度	$5 \times 10^3$ $\mu\Omega/\text{cm}$	$10 \times 10^3$	$20 \times 10^3$	$30 \times 10^3$	$40 \times 10^3$	$50 \times 10^3$
15°C	1.0029	1.0056	1.0113	1.0192	1.0266	1.0347
20°C	1.0018	1.0047	1.0100	1.0162	1.0227	1.0297
25°C	1.0005	1.0029	1.0078	1.0125	1.0190	1.0242

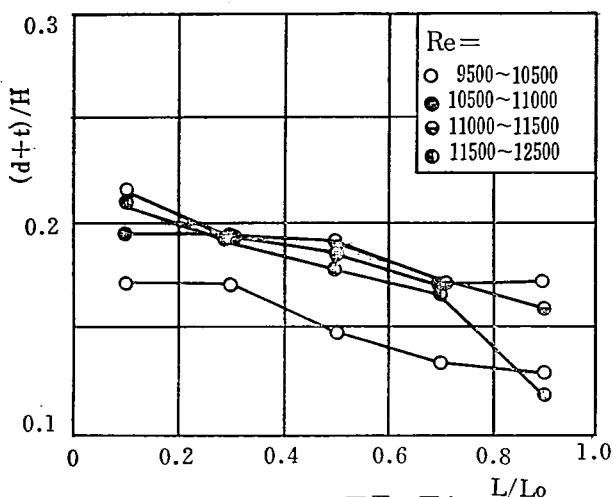


図—6 一地点の伝導度分布（鉛直）

一般に淡水と塩水の密度差が安定してくると両層の間の比較的薄い層の中で密度が急に変わることになり、この薄い層を躍層と云うがこれを境として上下両層が違った運動をすることが多い。躍層の存在は肉眼では確認できないので、一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によって追跡してみる。電気伝導度と密度の関係は表—1に示す。



図—7 躍 層



図—8 躍層の厚さ

部分と下部で一定伝導度になる迄の部分に分けることが可能である。上部層の厚さを  $t$ 、下部層の厚さを  $d$  とし、各々  $t$  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で拡散層、 $d$  層は逆に塩水が淡水に侵された部分で稀釈層と考えられるだろう。当実験資料から図—8, 9 を作製した。図—8 によると躍層はくさび先端より河口に近づくに従い徐々にその厚みを増してゆき、図—9 によると、河口及びくさび先端では  $t$  層が  $d$  層よりも厚く、くさびの中間部分では逆に  $d$  層が厚くなることを示している。

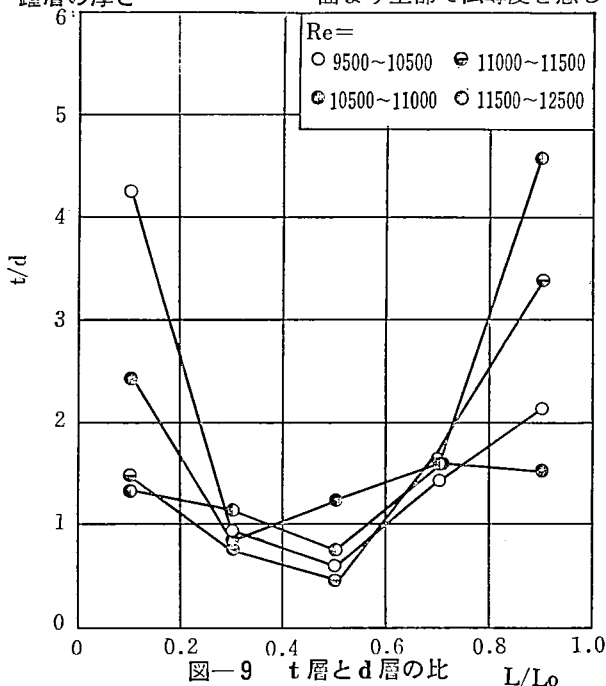
換言すれば拡散はくさび先端及び河口付近で大きく、稀釈は中間部分で盛んであると云えよう。

一方、塩水くさびの各地点での密度変化を調べるために、その内部の伝導度 ( $K$ ) を測定してみたが鉛直方向も水平方向もほとんど変化がない。この事実は躍層の部分を除いてくさびは淡水の影響を受けていないことを示している。躍層内の密度変化は鉛直方向については一般に図—6 のようである。水平方向についても各地点で相当に変化がある。

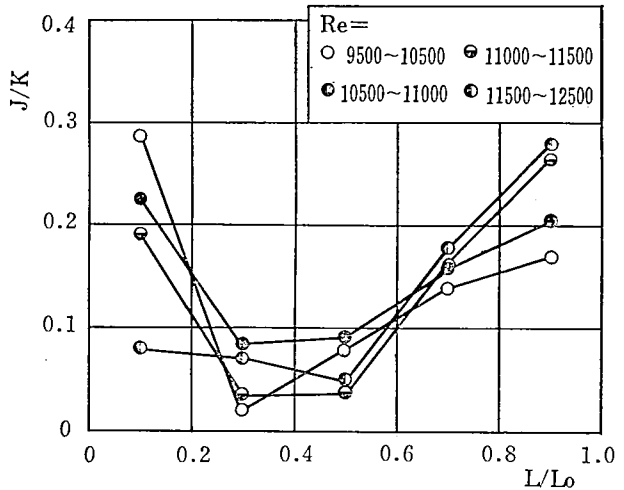
$d$  層内の平均伝導度を  $J$  として、各地点の伝導度 (密度) を調べると図—10 のようになる。傾向としては図—9 の  $t/d$  の変化に類似している。図—8, 9, 10 を基に考察すると  $t$  層の厚さが大きいということは塩分の拡散の度分が大きいとし、更に塩分量が全断面で

図—6 の例では、河口より約 7 割の地点のものであり、海水の伝導度は  $26 \times 10^3 \mu\Omega/\text{cm}$  で淡水は  $0 \mu\Omega/\text{cm}$  である。水深が 6.5cm 附近より除々に、4.5cm 附近で急に伝導度に変化している。そして 2.5cm 附近より下層の塩水の伝導度と一致する。

塩水はローダミン B で赤く着色してあるので両層の境界面は肉眼で識別できるから図—7 に示すように、有視境界面より上部で伝導度を感じる

図—9  $t$  層と  $d$  層の比

等しいとすると(塩分保存則) 拡散する塩分の補給はd層からであるから、d層の密度が高いとそれにつれてt層の厚さ(拡散の度合)も大きくなる。又、d層においてはその全地点で密度とその体積との積が等しいと考えると(質量保存則)密度が高いところではその体積(厚み)は小さく、逆に密度が低いとその体積(厚み)は大きくなると考えられる。躍層の厚さや密度の変化は塩水くさび上の淡水の流速分布や抵抗係数とは無縁ではないと思われるが、それについては次回に譲りたい。



図—10 躍層内の伝導度(密度)

## 6. 結 語

河床勾配をもつ水路での塩水くさびと躍層について、概して定性的な面から

① 水平水路での資料に比べても一般的傾向は変化しない。

②  $L/H$  と  $F_r$  の関係では  $L/H = A_2 F_r^{-\frac{7}{2}}$  となり水平水路でのベキ数  $-\frac{5}{2}$  に比してやや大きくなる。

③ 抵抗係数は  $10^{-3}$  程度で一般の値に比べて、模型実験値としてはやや小さい。

④ Lamb 式との比較では当資料は Lamb 式とほぼ平行となる。河床勾配をもつため流速が大きくなるためと考えられる。

⑤ 躍層を拡散層と稀釈層に分けて考えると拡散はくさび先端及び河口附近で大きく、稀釈は中間部分で盛んであると云えよう。

⑥ 躍層部分を除いては塩水くさびの内部では淡水による影響を受けていない。

⑦ 躍層の厚さ、密度分布を考えるのに保存則を当ててはどうか。

等を調べた。

現在も実験を継続中であり、堰によるくさびの侵入防止効果、躍層と内部波の関係、拡散方程式の導入等を検討中である。ご批判、ご助言を頂ければ幸いに存じます。末筆ではありますが、当研究を進めるに当り、明星大学・加藤正晴教授より終始暖い御指導を賜わり深く感謝する次第です。又実験に参加した、大堀耕平、稲葉恵一、谷岡秀樹君をはじめ水工学研究会の諸君の御助力に敬意を表します。費用の一部は文部省科学研究費によったことを付記します。

## 参 考 文 献

(1) G. H. Keulegan : The Mechanism of Arrested Saline Wedge.

Estuary and Coastline Hydrodynamics edited by A. T. Ippen—Mc Graw Hill

- (2) Farmer. H. G. and G. W. Morgan : The Salt Wedge.  
Proc. 3rd Conf on Coastal Eng. (1952)
- (3) 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）
- (4) 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）
- (5) 中村 宏：河口密度流に関する二，三の問題，  
第17回海岸工学講演会論文集（1970）