

港湾技術研究所報告

REPORT OF PORT AND HARBOUR TECHNICAL RESEARCH
INSTITUTE MINISTRY OF TRANSPORTATION, JAPAN

第 4 卷 5 号

Vol. 4 No. 5

(通巻第 16 号)

流路の水深が変化する場合の塩水楔の機構……… 金子 安 雄

1965年6月

運輸省港湾技術研究所



流路の水深が変化する場合の塩水楔の機構

目 次

1. ま え が き	2
2. 実験装置及び方法	2
2-1 装 置	2
2-2 実 験 方 法	3
3. 実 験 結 果	4
3-1 塩 水 楔	4
3-2 流速, 塩分濃度分布	5
3-3 水 面 勾 配	8
4. 実験結果の考察	9
4-1 塩水楔の長さ, 型状	9
4-2 境界面抵抗係数	12
4-3 剪 断 力	16
4-4 渦動粘性係数	17
4-5 水面勾配と楔の勾配	19
5. 結 論	19
参 考 文 献	20

流路の水深が変化する場合の塩水楔の機構

金子安雄*

Experimental study on Salt Wedge in a channel of non-uniform depth

by

YASUO KANEKO

Synopsis

In this report the behaviour of Salt Wedge which have been experimentally are presented.

The Salt Wedge in an estuary non tidal motion is determined by the Fresh Water velocity and the channel topography, Hence, the length of salt wedge variation will be considerable for irregular of width and depth. Experiments have been conducted for the fast case of a channel with an abrupt change in depth of local. Measurements include the wedge shape and size, the surface slope, the inter face slope, the velocity and density distribution. Profiles of stress and interfacial stress coefficient are developed from the observation and the equation of motion.

It was found that the Salt Wedge length is change by the channel with an abrupt change in depth of local. Comparison of the theory with experimental results obtained from the measurements of wedge length show a fairly good agreement.

The interfacial stress coefficient is depends on the Reynolds number & Froud number of fresh water and Salt Wedge slope.

1. まえがき

河口に存在する海水は、河水と海水の密度差、潮汐の干満によって河口からかなり上流まで遡上し種々の災害を与えることが多く、河口港では上流からの掃流物、浮游物の沈殿堆積のため航路、泊地が埋設される問題、又工業及び農業では用水の汚染の問題などでとりあげられ、河口に浸入する海水を制御するために構造物の築造さへ行なわれている現状である。一方近年船舶の大型化に伴って港湾の泊地航路の増深が著しい。このような局所的な水深の増大は河口においては必然的に海水の侵入を容易にし、より上流まで遡上させる結果となり、海水による汚染、埋没機構を複雑化し、河口港における航路水深維持を益々困難ならしめる結果となる。

この見地から航路改修によって河口の水深を増大した場合、侵入する海水の規模、性質などが予知出来たならば、港湾の改修、用水の取水などに非常に有用であると

* 水工部主任研究官

考えられる。

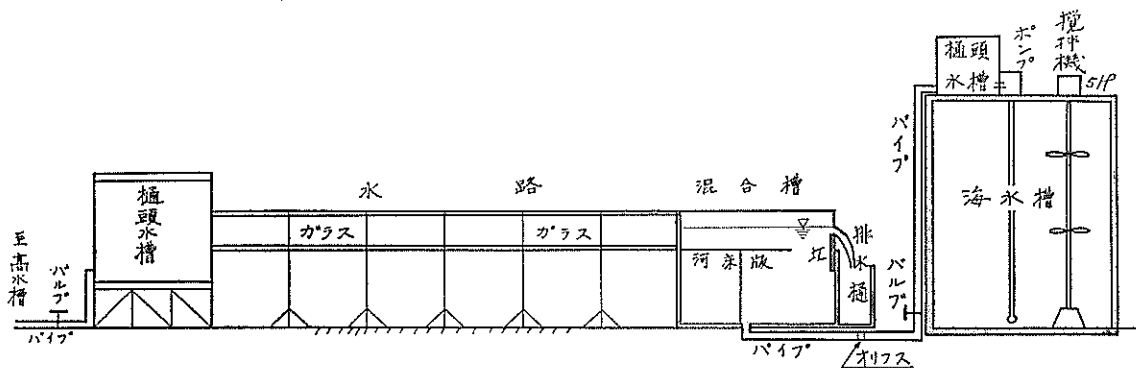
塩水楔に関する研究は Schijf & Schönfeld¹⁾, Farmer, Morgan²⁾, Keulgan, 浜田³⁾, 其の外の人達によって、塩水楔の長さ、型状、境界面の抵抗係数などが明らかにされているが、いずれも水平底に関する理論、実験であり、局部的に水深が急変する場合の特性については明らかにされていない。J.B Hinwood⁴⁾ は侵入楔を制御する立場から河床を変化させて研究しているが詳細には論じていない。

今回報告するのは局部的に水深が変化する流路における塩水楔の侵入長、型状、境界面の剪断抵抗係数、剪断力、渦動粘性係数などについて、主として定常的な塩水楔に関して実験的に考察したものである。

2. 実験装置及び方法

2-1 装置

この実験に使用した装置は図-1 に示す如く、樋頭水槽、水路、混合槽、海水槽から成っている。樋頭水槽



図一 密度流実験装置

は縦 2 m, 横 3 m, 高さ 1.5 m の木製で流量測定用の矩形堰が取付けられている。水路は深さ 0.5 m, 巾 0.6 m, 長さ 22 m の木製でその両側面は全てガラス張りである。混合槽は縦 4 m, 巾 3 m, 深さ 1.5 m のコンクリート製であるが、水路との連結部は水路水深と同一深さに河床版を長さ 3 m まで取付けてある。更に下流端には水位調節用の可動堰が全巾にわたり設置されている。海水槽は縦 3.2 m, 横 6.5 m, 深さ 4.2 m の大きさを持つコンクリート製で貯水容量約 80 m³ まで可能である。海水槽には 5 HP の攪拌機 2 台が設置され溶液の混合用に使用される。又槽の上部には 2 m × 1 m × 1 m の鋼製樋頭水槽がある。

実験に用いた溶液は淡水として通常の水道水を用い樋頭水槽の矩形堰で計量し水路に流下させ、塩水としては海水を使用した。海水は海から直接海水槽にポンプで揚水し実験に必要な密度を得る様に水道水で稀釈し攪拌機で混合して約 80 m³ の溶液が一定密度を保持した後実験に使用した。海水槽から混合槽への送水は、海水槽からポンプで槽上の樋頭水槽に揚水し、水頭を一定に保った後径 3 吋のパイプで導水した。その流量はパイプに設置されたオリブスで計量され、流量の調節はバルブによってなされた。混合槽内には水路を流下した淡水と、海水槽から導入された海水が存在するが、海水量が多くなれば海水は水路内に楔状となって侵入し、淡水は上層に押しあげられて表層を流下する。ここで淡水流量を一定にし、海水流量を適当に調節すれば塩水楔を水路内の任意点で定常的に保つことが可能である。水路の水位は混合槽下流端の可動堰によって調節され、混合された溶液は堰を溢流して水路外に流出し再使用は行なわれない。尚水路勾配はほとんど零である。

2-2 実験方法

実験に用いられた物理量すなわち流量、水深、密度に

ついては、塩水楔の存在する最も代表的な例である旧信濃川河口の新潟港を対象としその物理量を模型化して使用した。ここで模型化について相似則を簡単に記述すれば次の如くである。

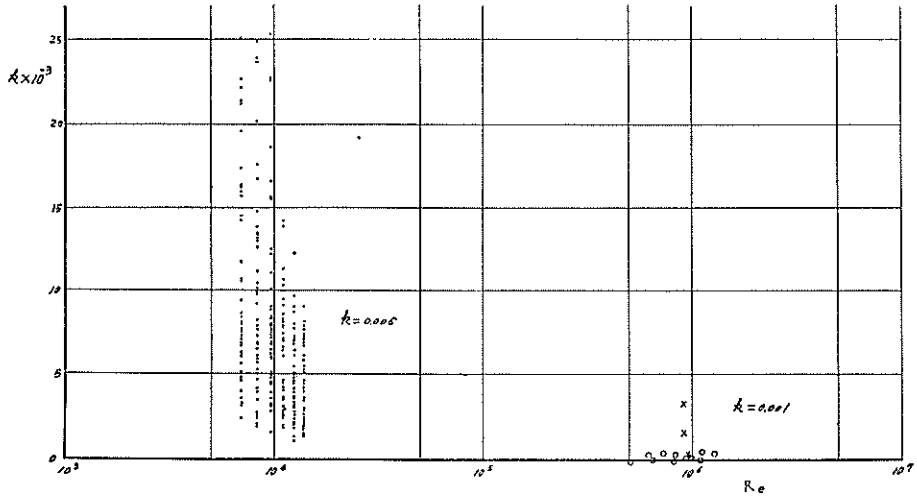
- ① 海水と淡水の相互作用を取扱ふ密度流の実験においては、密度を考慮した内部フルード数 $(Fr = \frac{v^2}{\epsilon ga})$ を同一にしなければならない。このためには密度に関する比 $\epsilon = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2}$ を現地と模型で一致させる必要がある。
 ρ_1 : 淡水密度, ρ_2 : 海水密度

- ② 摩擦抵抗を規定する条件 $k_r = \frac{V_r}{H_r}$ を満足するために淡水、海水境界面の摩擦抵抗係数の大きさを模型及び現地について知らなければならない。(k_r : 摩擦抵抗係数, V : 垂直縮尺, H : 水平縮尺, Suffix r は原型の量と模型の量との比を示す)

このため①については新潟港の ϵ はほぼ 0.02 であるから同じ海水を使用する本実験でも 0.02 とし全実験をとおり一定とした。②についての k は Reynold 数の函数と予想されるので、新潟港、石狩川⁵⁾ の観測値と小型水路の実験値⁶⁾ を Reynold 数に対して整理すれば図-2 に示す関係が得られ、実験値は現地の k に対して約 6 倍となる。又この結果垂直縮尺を 1/40 とすれば水平縮尺は、1/240 と決定される。更に流量は流れを二次元として取扱えば単位巾流量に対して $V^{3/2}$ で換算される。

前記の縮尺によって実験に用いた現地及び模型の物理量を示すと(()内は実験値)、流量は 350 m³/s, 500 m³/s および 700 m³/s (3.12 l/s, 4.38 l/s, 6.12 l/s) の三種、上流河川部の水深は一定とし 4.0 m (10 cm) を選定し、航路水深は、4.0 m, 7.5 m, 12.5 m (10 cm, 18.75 cm, 31.25 cm) の水深を与えた。水深 4.0 m は河床水平の場合であるが、7.5 m, 12.5 m 増深区域は河口端より上流約 1,440

- 実験値(本誌)
- 石野川
- × 新潟港

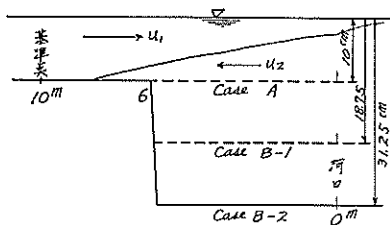


図—2

m (6.0m) までの水域である。

実験方法は (i) 河床水平, (ii) 局部増深の場合についてそれぞれ水理量の測定を行なったが, 水深の設定は河口端 (水路と混合槽の接合部とする) より上流10m地点を上流部水深の基準点とし水深 10cm になる様あらかじめ淡水について堰を調節し固定した。従って海水侵入によって水位が上昇し水深が増加しても堰での調節は行なっていない。航路水深増大の場合は増深水域で規定の水深が得られる様に河口端より 6.0m 以上上流部に木製の河床盤を挿入し水路の上流端までの河床を上昇させ, 基準点で水深 10cm になる様堰を調節した。尚河床盤取付の勾配は 1 : 0.3 である (図—3 参照) 又実験の内部フルード数を現地と合致させるため, 河口端において $Fr = 1$ となる様, 淡水層の水深を測定しながら, 海水流量を調節し, 楔を定常的に保つことができた。

更に楔先端河川部の摩擦抵抗を現地の河川部と相似に保つため ($n_p = 0.025$) 実験水路底に高さ 1.2 ~ 1.5cm, 巾 1.2cm, 間隔 15cm の人工粗度を流れに直角に施した。



図—3 河床図

測定量は塩水楔の長さ型状, 淡水, 海水の速度分布, 塩分濃度分布, 水面勾配などである。塩水楔は水路部分ではガラスを通じて楔の型状が見られるので, ポイントゲージで測定し, 流速の測定は淡水層はプロペラ流速計を用い, 海水層は流速微弱なため流速計が使用できないので, 四塩化炭素, トルオールを海水と同一比重になる如く混合し, ズダンにて着色した溶液を用い, 一定距離 (50cm) の流去時間を測定し流速を計算した。この溶液は配合によって淡水, 海水の境界面上に流すことも出来るので境界層附近の流速測定にも使用した。塩分濃度分布は電気伝導度を利用した濃度計により測定し, 同時に水温も測定され電磁オシログラフに記録せしめた。表面水位の測定はポイントゲージによつて行なった。尚これらの測定はすべて水路の中心においてなされている。

海水の比重は赤沼式比重計で測定したが, 比重は 1.0190 ~ 1.0209 の間にあり, ほぼ一定に保たれた。

3. 実験結果

3-1 塩水楔

図—4 ~ 1—4 に実験から得られた楔の代表例を示し, 表—1 に侵入長を示した。

海水は各実験ともに河口において限界水深を ($Fr_0 = 1$) 保ちながら楔状に水路内に侵入しているが, 河口外では急激にその厚さを増大し淡水層の厚さは 1cm 程度に減少する。侵入楔の長さは流量と見事な対応をみせ流量の増加に逆比例して減少する。又局部的な増深によつて同一流量でも楔の長さは増大する。この効果は増深部の水

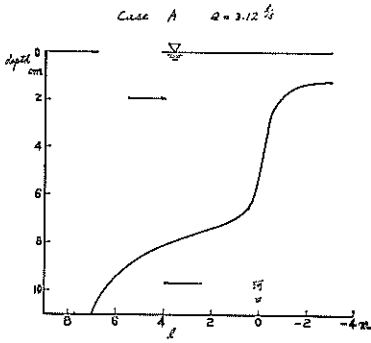


図 4-1-1

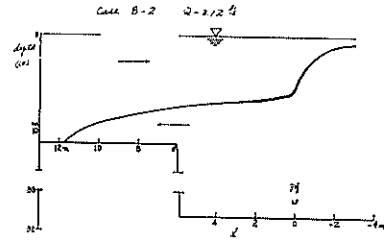


図-4-1-3

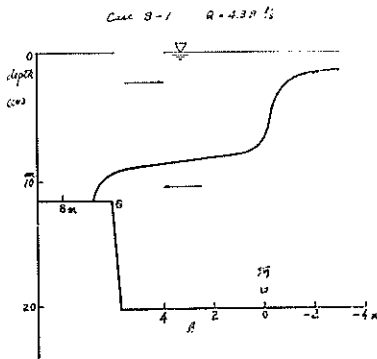


図-4-1-2

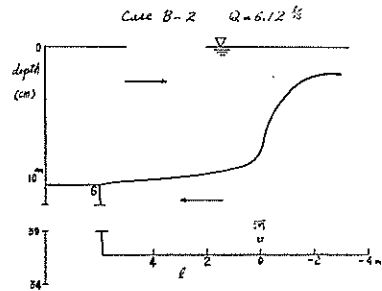


図-4-1-4

深・距離の函数であると予想されるが実験は距離 6 m のみであり、その関係を知ることができなかった。局部増深 B-1, B-2, $Q = 6.12 \text{ l/s}$ の case はいずれも楔は河床盤端に達しており、ここで control されるものと思はれる。

楔の形状は河口近傍を除いて、増深部の勾配が緩でありほぼ一定値を示し、河床盤上の変化が大きい、特に $Q = 4.37 \text{ l/s}$ の場合に顕著である。写真-1 に塩水楔を示す。

3-2 流速, 塩分濃度分布

図 5-1-8 に代表的な水路内の流速分布。塩分分布, 温度分布を示す。(測定点を河口端からの距離によつて station 1……station 9 (距離 1 m……9 m) と呼称する) 河口外すなわち混合槽内の流速分布は海水層の測定不能なため淡水層についてのみ図-5-9 に示した。

図によれば海水層上を流下する淡水の流速分布は特有の傾向を示し、境界面摩擦の減少と、流下方向の密度差のために除々に舌状分布を示してくる。特に河口を流出した流速分布はこの傾向が著しい。河口外 station -1, -2 の淡水層は塩分濃度分布から知られる如くフィルム

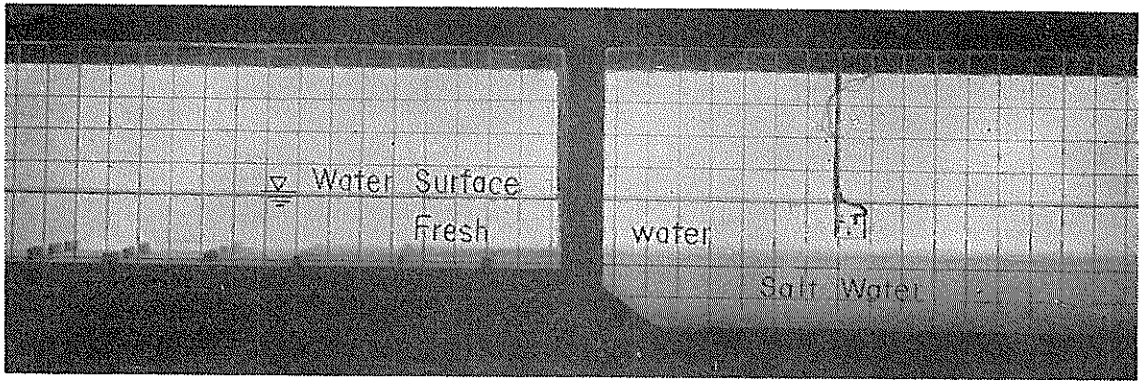


写真-1

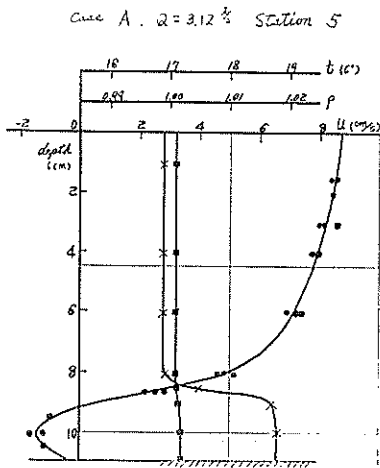


図-5-1

実験種別	上流水深 (cm)	航路水深 (cm)	流量 (l/s)	楔の長さ (m)	備考
水平底 (A)	10	10	3.12	7.0	航路水深増深区域は河口より上流6mと流ます。
			4.38	3.1	
			6.12	0.4	
局部増深 (B-1)	"	18.75	3.12	9.5	
			4.38	6.8	
			6.12	6.0	
局部増深 (B-2)	"	31.25	3.12	11.75	
			4.38	7.1	
			6.12	6.0	

表-1

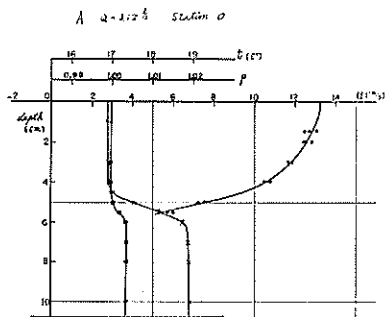


図-5-2

状となり depth 2 cm は完全な海水で占められており、表面流速はおそらく 15~20cm/s を示すものと思はれる。

又底層の海水は表層と逆に水路内へ 1~1.5cm/s の速度を持って侵入している。この流速の大きさは境界面における内部波による混合によって消費される量と関係があると考へられるが詳細は明らかでない。

塩分濃度分布は各実験とも、淡水、海水の境界面において急激に変化し界面の安定を示している。塩水楔の表面には小さい内部波が発生し、この波高、波長は楔の先端からの距離に比例して増大して行く傾向がみられるが、増深部に入ると波高は減少する。この実験では内部波の

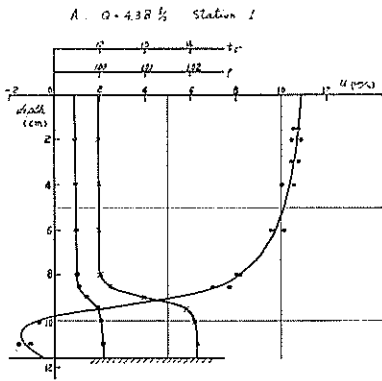


图-5-3
B-1. $\alpha = 3.12 \frac{1}{2}$ Station 2

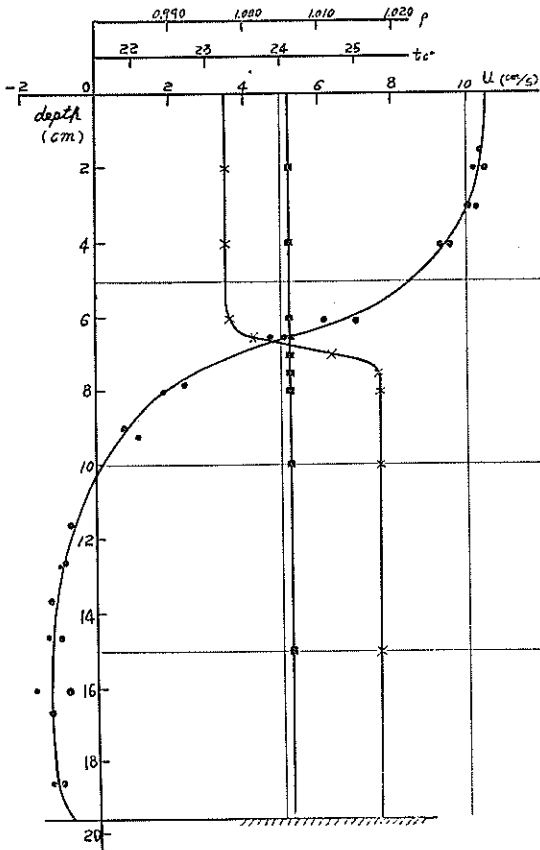


图-5-4

B-1. $\alpha = 4.38 \frac{1}{2}$ Station 4

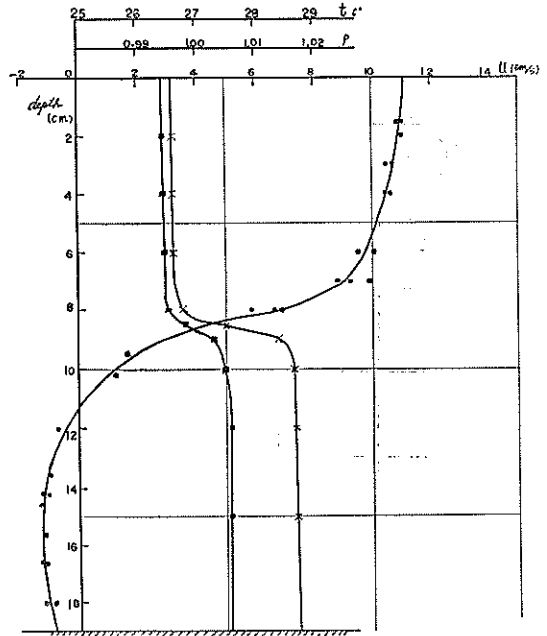


图-5-5

B-2. $\alpha = 3.12 \frac{1}{2}$ Station 10

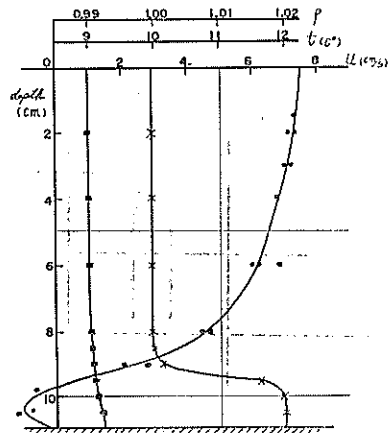


图-5-6

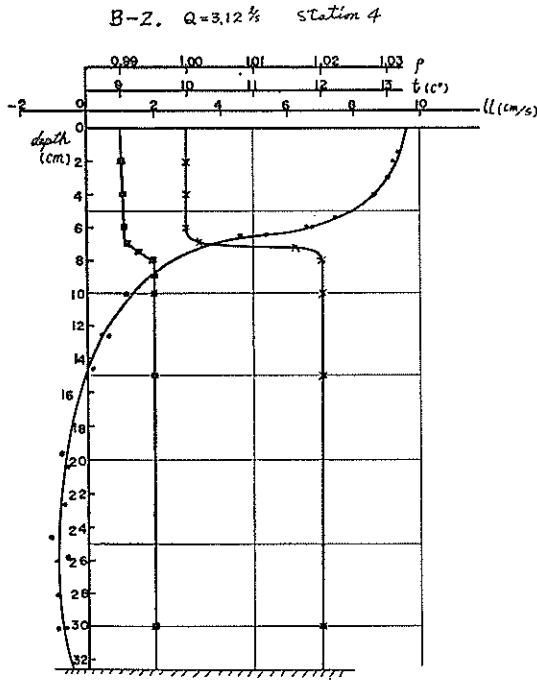


図-5-7

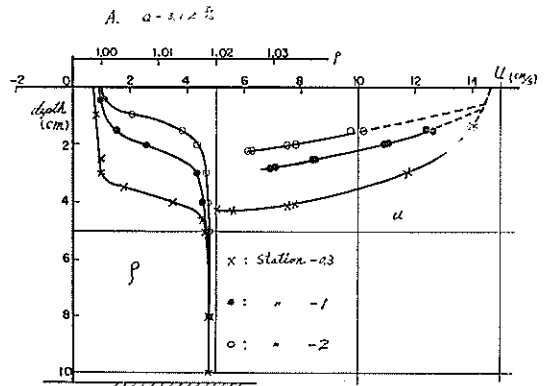


図-5-9

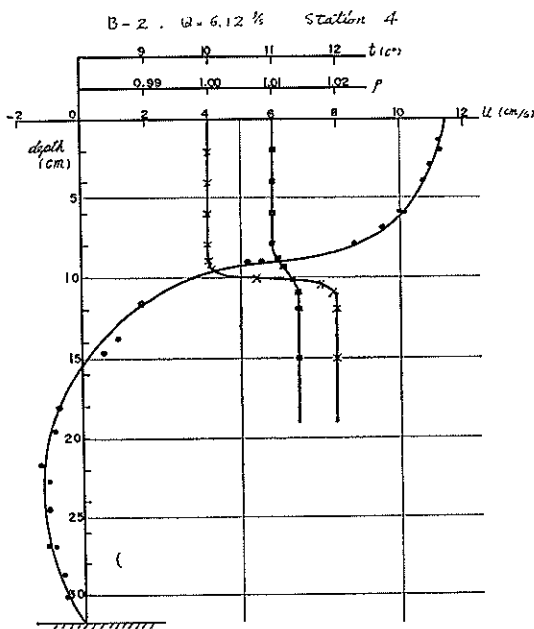


図-5-8

測定は行っていないけれども側壁ガラス面を通しての目視によれば波高は0.5cm程度と推定される。尚楔先端は河床粗度の効果で海水の混合が大きく、混合層の発達と考えられるけれども図-5の各図からはその影響がみられず、局部的なものと思はれる。

水温の分布は両層の差が小さいけれども塩分濃度分布と極めてよい対応を示し、その傾向は全く一致している。

3-3 水面勾配

淡水、海水境界面の剪断力及び塩水楔の勾配と水面勾配の関係を求めるため、全実験について水位測定がなされている。水路内の各 station 間の水位差は極めて微小であり、且つ表面の変動のため測定は高い精度を要求された。図-6-1-3に得られた水面勾配の代表例を示す。水路内の勾配は極めて小さく $10^{-4} \sim 10^{-6}$ の値であり無視出来る程微小であるが、河口端において急激に増加し河口外の領域でも正勾配を示している。一般に河中が無限に急拡する流路に於いてはエネルギー損失のため流速が低下し水位は上昇する。このため水面は負勾配を示すはずであるが、(我々の実験でも清水のみを使用した予備実験では明らかに負勾配を示した) 海水の侵入によって淡水層の水深が減少する場合に正勾配を示すことは興味深い現象である。

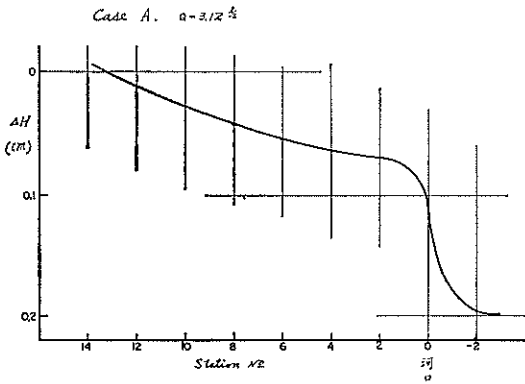


図-6-1

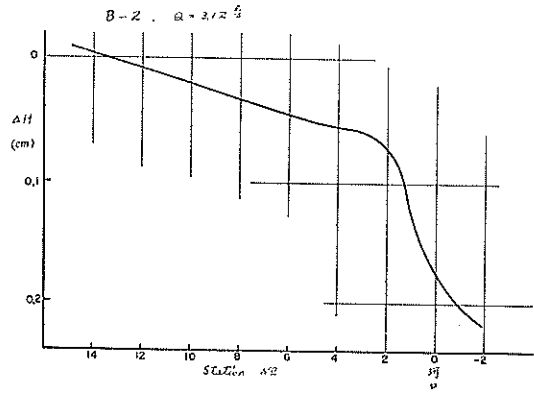


図-6-3

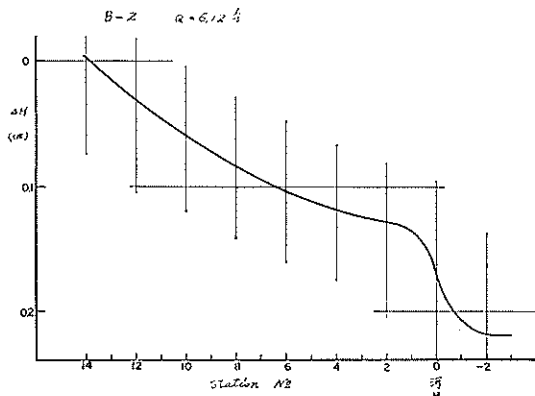


図-6-2

又水面勾配と塩水楔の勾配の変化量は水面勾配の方が微量であるけれども、両者の型状は極めてよい対応を示しており、その間に或る関係の存在することが推察できる。

尚境界面の安定度を示すリチャードソン数は各stationの $\partial\rho/\partial y$ max の水深で計算されたが、いずれも1.0以上であり境界面の安定を示している。又実験のレイノルズ数は $4 \times 10^3 \sim 8 \times 10^3$ の範囲である。

4. 実験結果の考察

4-1 塩水楔の長さ、型状

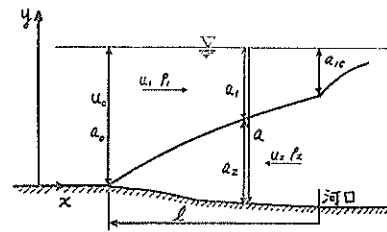


図-7

川中一定の水平床短形断面水路で定常状態における、塩水楔の侵入距離、型状は前述した如く、Schiff-Schönfeld, Farmer-Morgan などによつて理論式が得られており、それらは実際の現象とはほぼ合致することが確められている。けれども水路の水深を局部的に変化させた場合その効果が非常に大きく、楔の長さ型状は水深及び改修水域の大きさの函数であることが推察される。そこで理論的にこれらの関係を求め実験結果と比較検討してみる。

図-7の如く座標軸を底面において淡水の流れの方向に x 軸を、垂直上向きに y 軸をとる。速度の x 成分を u 、 y 成分を v とする。更に塩水楔の先端より上流の水量には Suffix 0 を、楔上の淡水には Suffix 1、更に海水には suffix 2 をそれぞれつけるものとする。

流れは二次元とし、淡水、海水の混合を無視した二層

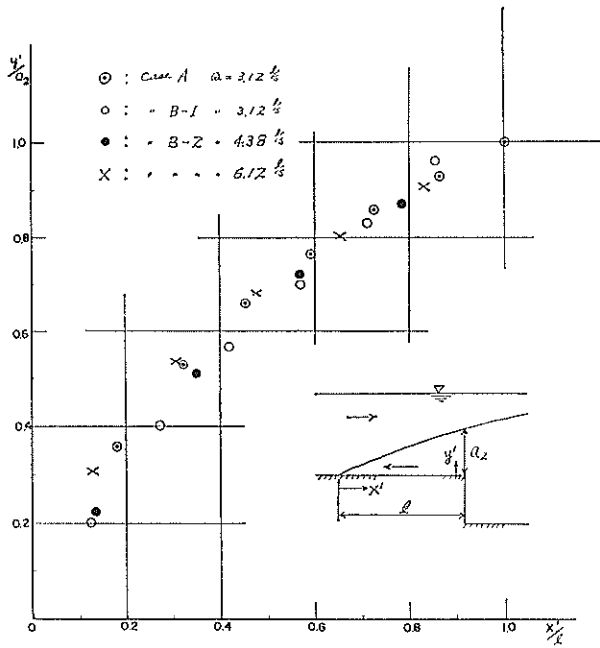


図-10

表-2 抵抗係数
 $R \times 10^{-3}$

実験 Case	(Ql/s)	station No $l(m)$	station No										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
水平底 (A)	3.12	7.0	2.91	2.58	2.55 (2.32)	3.32	4.45 (5.38)	6.77	—	—	—	—	—
	4.38	3.1	3.43	3.72	station 1.5 (2.02)		—	—	—	—	—	—	—
局部増深 (B-1)	3.12	9.5	2.04	1.82	1.28 (2.79)	1.37	1.41	2.28	4.63	5.92	—	—	—
	4.38	6.8	1.47	1.39	1.47 (2.00)	1.60	2.67	3.34	—	—	—	—	—
	6.12	6.0	1.14	0.92	0.83	0.77	0.71	—	—	—	—	—	—
局部増深 (B-2)	3.12	11.75	2.18	1.82	1.59 (2.12)	1.57	2.45	1.67	2.66	3.52	4.47 (4.98)	6.08	7.52
	4.38	7.1	1.36	1.48	1.77 (3.70)	1.83	3.34	3.25	—	—	—	—	—
	6.12	6.0	1.32	1.38	1.45 (2.36)	1.45	1.22	—	—	—	—	—	—

4-2 境界面抵抗係数

淡水、海水の境界面における剪断抵抗に関する密度流の実験は数多く⁷⁾⁸⁾行はれているが、抵抗係数はいずれも表層流の平均流速の2乗に比例する量すなわち $k = \rho_1 u_1^2$ として表わしている。従って抵抗係数の算定に

は境界面の剪断力を決定しなければならないが剪断力は直接測定出来ないで、ここでは定常状態の楔の形状から浜田、堀口⁹⁾の与へた公式を用いて楔各部の抵抗係数を算出した。(剪断力については次節で述べる) 浜田によれば抵抗係数の大きさは二層流の底層海水の運動を省

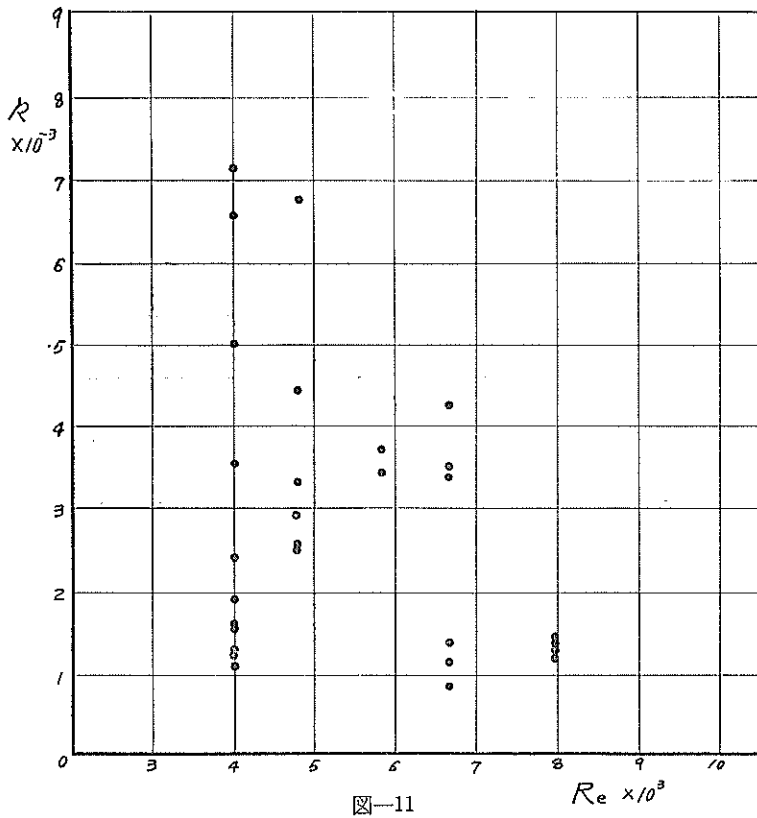
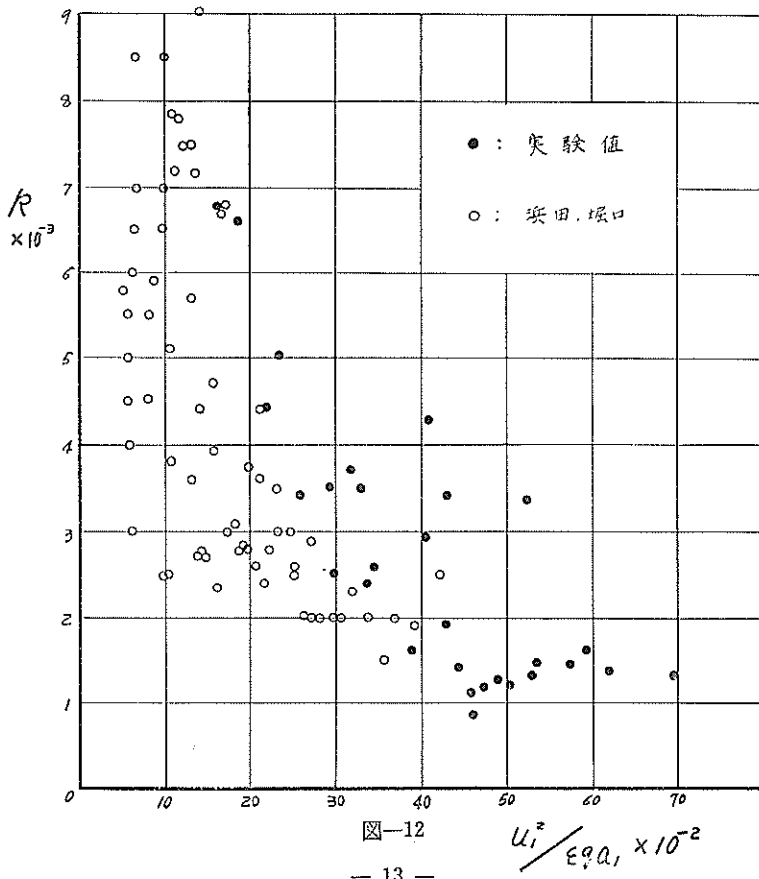


图-11



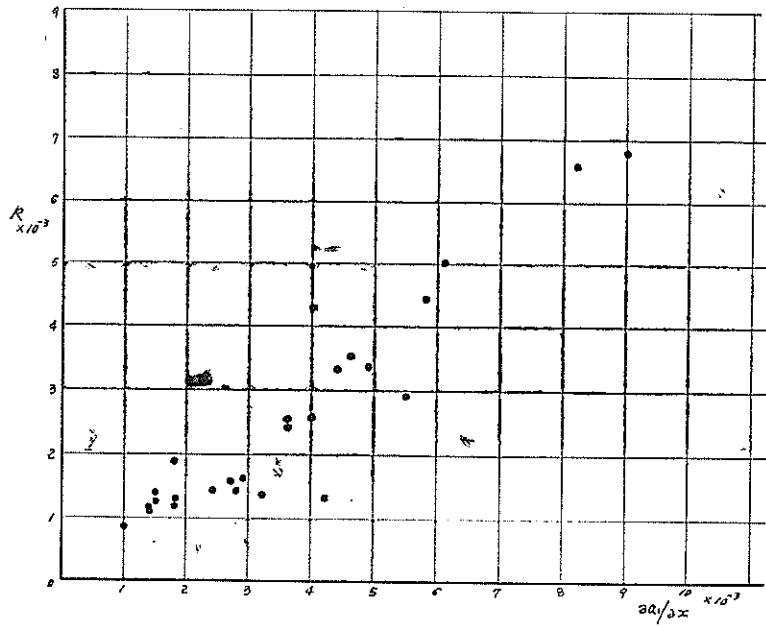


图-13

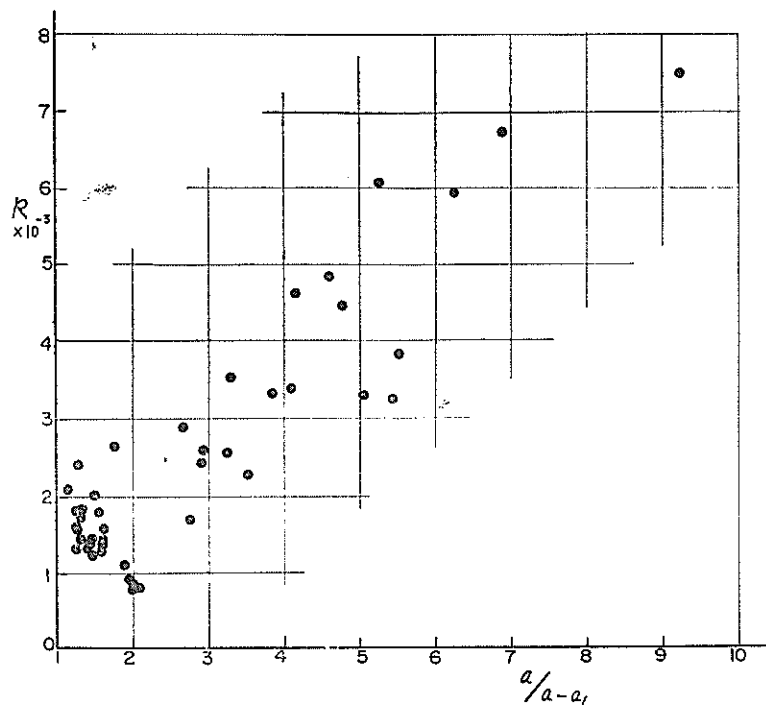


图-14

Case A. $Q=3.12 \frac{1}{2}$ station 3

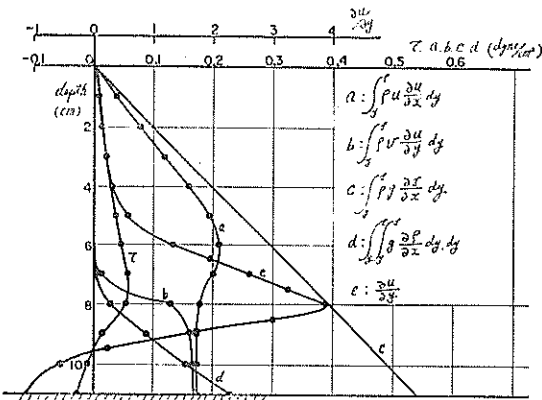


図-15-1

B-1. $Q=3.12 \frac{1}{2}$ station 7

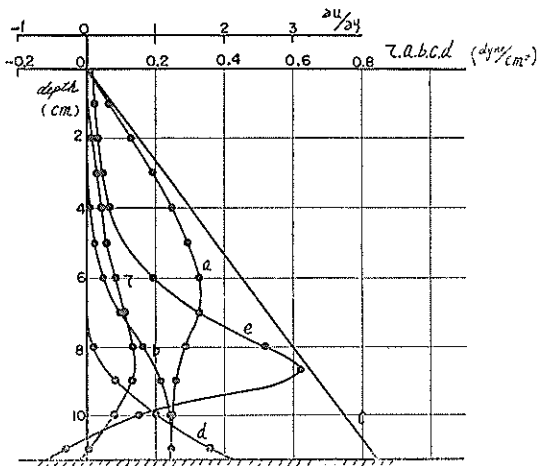


図-15-2

略しても、運動を考慮した場合とほぼ同値であるとしている故、本実験でも底層海水は静止しているものと仮定した。(実際は 1.0~1.5cm/s の流速を持つ)

$$k = \frac{-\left(1 - \frac{u_1^2}{a}\right) \frac{\partial a_1}{\partial x}}{\varepsilon g a_1 a - a_1} \dots \dots \dots (9)$$

ここで $\left(-\frac{\partial a_1}{\partial x}\right) \doteq \frac{\partial a_2}{\partial x}$ であるから(9)式から抵抗係数はそ

の点における内部フルード数、根の勾配及び a/a_1 に関係づけられる。(9)式より求められた k の値は表-2 に示す如くであり、表には特定 station について剪断力か

B-1. $Q=4.32 \frac{1}{2}$ station 3

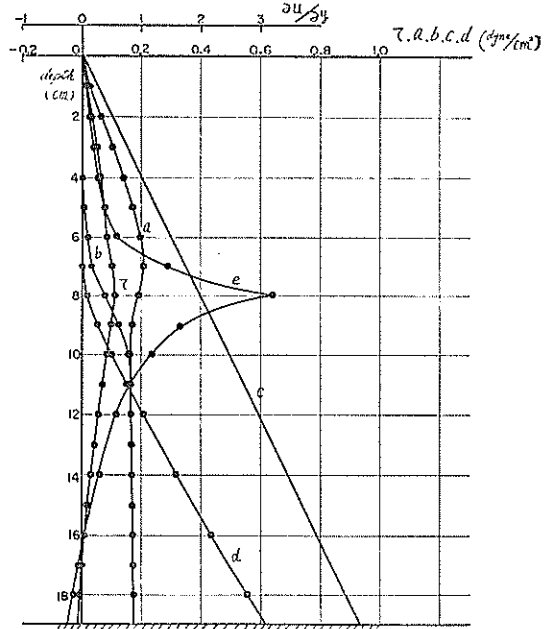


図-15-3

B-2. $Q=3.12 \frac{1}{2}$ station 9

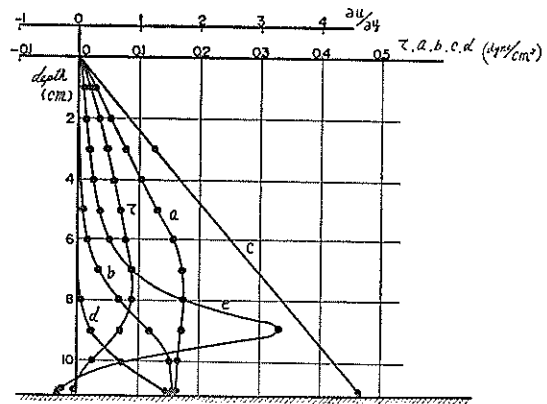


図-15-4

ら計算した k も () で併記した。表によれば(9)式から求めた k と剪断力から計算した値とはかなり差があり剪断力から求めた k が大きい。これは実験の規模が小さく、且つ境界面が内部波によつて変動するため測定誤差によるものと考へられる。しかし(9)式から求められた k は水平底の場合楔前半部が大きく 3×10^{-3} 以上であり、楔後半部は $2.5 \sim 3.0 \times 10^{-3}$ の範囲でほぼ一定である。又局部増深 Case は増深部の k が全般的に減少し $1.3 \sim 2.0 \times 10^{-3}$ の範囲にあり、河床盤上の k が大きい傾向を示

B-2, $Q = 3.12 \frac{1}{2}$ Station 3

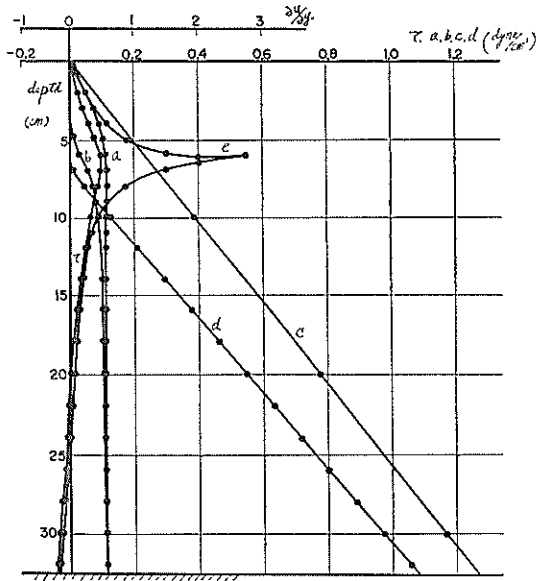


図-15-5

B-2, $Q = 4.38 \frac{1}{2}$ Station 3

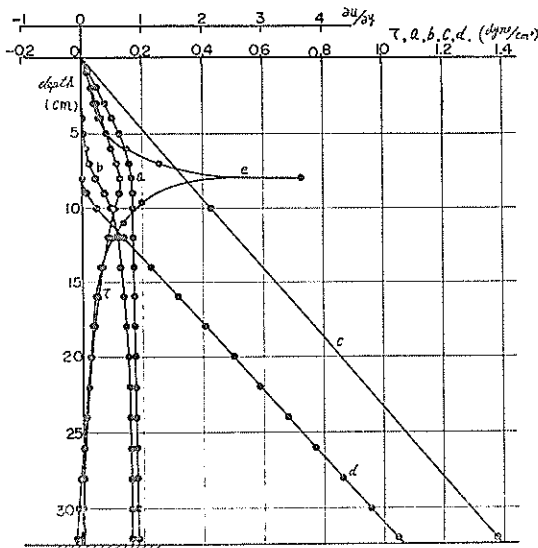


図-15-6

している。次にこの h と内部フルード数 $(\frac{u_1^2}{\epsilon g a_1})$, $(-\frac{\partial a_1}{\partial x})$ 表層レイノルズ数 $(\frac{a_1 u_1}{\nu})$ 及び $a/a-a_1$ との関係を図-11~14 にそれぞれ示した。この結果内部フルード数及び表層レイノルズ数の増加によつて h は減少し, $(-\frac{\partial a_1}{\partial x})$ 及び $a/a-a_1$ の増大につれて h は増大する傾向にある。ここで $a/a-a_1 = a/a_2$ であり, 海水層の厚

B-2, $Q = 6.12 \frac{1}{2}$ Station 3

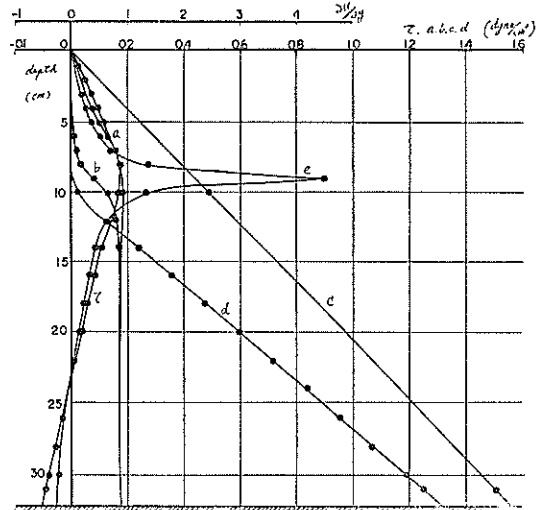


図-15-7

さを表す数である。従つて, 水平底の場合その変化は $(-\frac{\partial a_1}{\partial x})$ と同じであるが, 局部増深部ではその効果が期待されたけれども, 図-14に示す如く傾向としては認められるが Case ごとくの変化は明らかに出来なかった。それは増深部の楔の勾配が緩となりその効果の方が大きいためと推定される。

4-3 剪断力

境界面剪断力の大きさは前述した如く直接測定出来ないで運動方程式から計算した。

流れは二次元とし, x 軸を河床において水平に淡水の流下方向を正とする。 y 軸を垂直上向きにとり, 水面の座標を ζ とすれば, 二次元流体の運動, 連続の両方程式は次の如くである。

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (10)$$

$$0 = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (11)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (12)$$

ここで u : x 方向の流速成分, v : y 方向の流速成分。

P : 圧力, ρ : 密度, τ : 摩擦力

(10)式より圧力 P は静圧を仮定することにより

$$P = g \int_y^{\zeta} \rho dy$$

$$\therefore \frac{\partial P}{\partial x} = g \rho \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \int_y^{\zeta} g \frac{\partial \rho}{\partial x} dy \quad (13)$$

(13)式を(10)式に代入すれば

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \left(g \rho \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \int_y^{\zeta} g \frac{\partial \rho}{\partial x} dy \right) + \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (14)$$

(14)式のうち v については測定していないので(12)式の連

統方程式から算出した。

表一 3 渦動粘性係数

本実験の流れは定常であるから $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$ とおき(14)式を水底から表面まで積分すれば

$$\int_y^\zeta \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) dy = - \int_y^\zeta \rho g \frac{\partial \zeta}{\partial x} dy - \int_y^\zeta \rho g \frac{\partial \rho}{\partial x} dy + \tau \zeta - \tau_v \dots (15)$$

ここで流れの表面の $\tau \zeta$ は極めて小さいので無視すれば

$$\tau_v = - \int_y^\zeta \rho g \frac{\partial \zeta}{\partial x} dy - \int_y^\zeta \rho g \frac{\partial \rho}{\partial x} dy + \int_y^\zeta \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) dy \dots (16)$$

(16)式によつて任意水深の剪断力 (τ) が計算できる。尚剪断力の計算には本実験の如く巾 0.6m 程度の小型水路の実験の場合側壁摩擦の影響を考慮しなければならぬと思はれるが一応無視している。

計算結果を図一15-1~7に代表例を示した。図には τ とともに(16)式中の各項の値及び $\partial u / \partial y$ を併記した。得られた τ は總体的に小さく海水層上の淡水の持つ $\tau_{max} \approx 0.2 \text{ dyne/cm}^2$, $\tau_{mean} = 0.1 \sim 0.12 \text{ dyne/cm}^2$ 程度であり、榎上流河川部の $\tau_{max} \approx 1.0 \sim 1.5 \text{ dyne/cm}^2$ である。又その垂直分布は $\partial u / \partial y$ と非常によく対応を示しており $\partial u / \partial y_{max}$ すなわち境界面附近で τ_{max} を示し、 $\partial u / \partial y = 0$ で $\tau = 0$ となり、底層海水中では微小ながらも負の値を持つている。

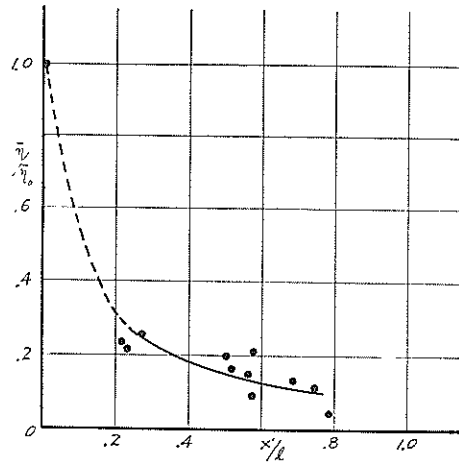
(16)のうち各項の大きさは、加速度の各項 $\int_y^\zeta \rho u \frac{\partial y}{\partial x}$ 及び $\int_y^\zeta \rho v \frac{\partial u}{\partial y} dy$ は全 Case とほぼ同値であり、密度の項 $\int_y^\zeta \rho g \frac{\partial \rho}{\partial x} dy$ は海水層の厚さの増加とともに急激に増大し、水面勾配 $\left(- \int_y^\zeta \rho g \frac{\partial \zeta}{\partial x} dy \right)$ とともに境界面下の剪断力を決定する重要な項となつている。

4-4 渦動粘性係数

河流は一般に乱流であり、乱流内には大小の渦流によつて交換作用が働きその作用によつて河道内の底質が拡散され流れで運搬されるのであるから交換作用の大きさは土砂送流の割合を示すものといへる。従つてこの作用が、河口附近で底層に存在する海上層上に於てどの様に变化するか、その推移によつて土砂の沈澱埋没傾向を推定することが可能と考へられる。一方この交換作用によつて渦動粘性が生じ更に剪断力が働くことになるから、渦動粘性係数を求めることによつて交換作用の変化は推定出来ることになる。

いま境界面に働く剪断力を τ (dyne/cm.) 渦動粘性係

実験 Case	Q (lis)	station No.					
		13	9	7	3	1.5	
水平底	3.12	7.0	0.913	0.916	—	0.079	0.037
A	4.38	3.1	—	—	(station No. 5) 1.10	—	0.178
局部増深 (B-1)	3.12	9.5	0.844	—	0.210	—	0.111
	4.38	6.8	1.132	0.915	—	0.135	—
	6.12	6.0	—	—	—	—	—
局部増深 (B-2)	3.12	11.75	0.801	0.165	—	0.087	—
	4.38	7.1	0.917	0.871	—	0.163	—
	6.12	6.0	1.318	1.220	—	0.238	—



図一16

数を η (g/cm.s) とするとき

$$\tau = \eta \frac{\partial u}{\partial y} \dots (17)$$

で定義する。

(17)式より本実験における値を求めると (τ 及び $\partial u / \partial y$ については前節で求められた値を使用した) 表一3に示す如くである。ただし表中の η は表層淡水の平均値である。表によれば上流河川部の η は約 1.0 程度であるが、塩水楔上の η は急激に減少し上流河川の約 1/10 以下になる。図一16は楔の長さ l と η の関係を示したもので、図の横軸には楔の長さ l と楔先端からの距離 X' の比 X'/l をとり、縦軸は楔先端上流河川部の η_0 と楔上の η との比 η / η_0 をとつたもので、海水層の増大換言すれば淡水層の

表-4 $u=0$ $\partial u/\partial y_{max}$, $\partial \rho/\partial y_{max}$ の水深

実験 Case	Q(l/s)	Station No.	a (cm)	a ₁ (cm)	水 深(cm)			a'/a ₁	a''/a ₁	a'''/a ₁	
					$\frac{a'}{u=0}$	$\frac{a''}{\partial u/\partial y_{max}}$	$\frac{a'''}{\partial \rho/\partial y_{max}}$				
水平底 A	3.12	6	11.10	9.0	9.70	9.50	9.50	1.078	1.056	1.056	
		5	10.90	8.2	9.20	8.70	8.70	1.123	1.061	1.061	
		4	11.00	7.8	8.80	8.30	8.20	1.128	1.063	1.051	
		2	11.10	7.0	8.30	7.70	7.50	1.185	1.100	1.071	
		1	10.90	6.5	8.00	7.30	7.00	1.231	1.123	1.077	
	4.38	2	11.40	9.5	10.35	10.20	10.00	1.090	1.073	1.053	
		1	11.60	8.4	9.80	9.50	9.00	1.166	1.131	1.072	
	局部増深 B-1	3.12	8	11.00	9.0	9.70	9.70	9.40	1.077	1.077	1.045
			6	10.90	7.4	8.50	8.00	8.00	1.149	1.081	1.081
			4	19.50	7.0	10.20	6.80	7.50	1.457	0.972	1.071
2			19.60	6.5	10.20	6.60	6.80	1.569	1.015	1.046	
4.38		6	11.30	8.5	9.20	8.80	9.00	1.082	1.035	1.059	
		5	19.00	8.3	11.10	8.80	9.00	1.337	1.060	1.084	
		4	19.00	8.3	11.25	8.40	8.70	1.283	1.012	1.048	
		2	19.20	7.5	11.00	8.00	8.30	1.467	1.067	1.107	
		1	19.18	7.5	10.50	7.90	8.00	1.400	1.053	1.067	
局部増深 B-2		3.12	10	11.00	9.0	9.70	9.40	9.40	1.078	1.056	1.056
	8		11.28	8.5	9.30	8.70	8.70	1.095	1.023	1.023	
	6		11.30	7.2	8.50	7.60	7.60	1.181	1.056	1.056	
	4		32.60	6.7	14.40	6.45	7.20	2.15	0.963	1.074	
	2		32.50	6.7	14.40	6.00	6.90	2.15	0.895	1.030	
	4.38	6	11.25	9.0	9.70	9.30	9.40	1.078	1.033	1.045	
		4	32.50	8.5	15.40	8.20	9.00	1.812	0.965	1.058	
		2	32.50	8.2	15.20	7.80	8.60	1.855	0.952	1.049	
	6.12	4	31.80	9.6	15.40	9.00	10.10	1.605	0.938	1.052	
		2	32.00	9.2	14.50	9.00	9.60	1.576	0.979	1.043	

減少によって η は急激に減少する傾向がみられる。

η の垂直分布は図-15に示す各図の $\tau \cdot \partial u/\partial y$ の分布からも予想されるが、上流河川部では水深1/2附近で最大となり、根上の各 station では淡水層水深1/2附近で最大、境界面附近で最小となる。又海水層内は速度勾配 $\partial u/\partial y$ が小さいためは大きく得られている。この減少は

淡水が流下して海水層上に流動すると今迄河床から与えられていた渦動が急激に減少し、混合を生ずべき乱れ粘性係数が減少しその後は淡水海水の境界面から発生する微弱な渦動によって乱れを与えられるだけとなるためであり、それからすれば河川部からの送流土砂は海水層に乗り上げた直後に沈殿推積することになり、底層では逆

流する海水によって外海から土砂が運搬されることになる。この現象は新潟港においても確認され、観測結果に¹⁰⁾よれば流路の埋没傾向と η の縦方向の分布は見事な対応をみせている。この η の値はその dimension のとりかたで値が変わると言われるが、本実験における縦方向の変化の傾向は認めてよいであろう。

4-5 水面勾配と楔の勾配

水面勾配、楔の型状については前節 3-1, 3-3 で簡単に記述したが、実験によればこの両者間に或る関係の存在することが認められる。此の関係については柏村¹¹⁾が石狩川河口の調査より $I_s = -\varepsilon I_t$ なる関係を与えた。 I_s : 水面勾配, I_t : 楔の勾配, 又浜田¹²⁾は二層流の淡水, 海水それぞれの運動方程式から(8)式を与えた。

$$\frac{\partial}{\partial x}(a_1 + a_2) = \frac{\varepsilon \left(\frac{1}{\rho_1 a_1} + \frac{Fr}{\rho_2 a_2} \right)}{\frac{\partial a_2}{\partial x} + \frac{1-\varepsilon}{\rho_1 a_1} + \frac{1-Fr^{exst}}{\rho_2 a_2}} \quad (8)$$

ここで $\frac{\partial}{\partial x}(a_1 + a_2)$: 水面勾配, $\frac{\partial a_2}{\partial x}$: 楔の勾配, $Fr = \frac{q^2}{\varepsilon g a_3}$, $Fr^{exst} = \frac{q^2}{g a_1^3}$ q : 単位巾流量

(8)式によって実験値を plot すれば図-17 の如くである。図中には実線で理論値と実験値の等値線を、破線で実験値 30%大の線を記入した。測定値は多少散乱して

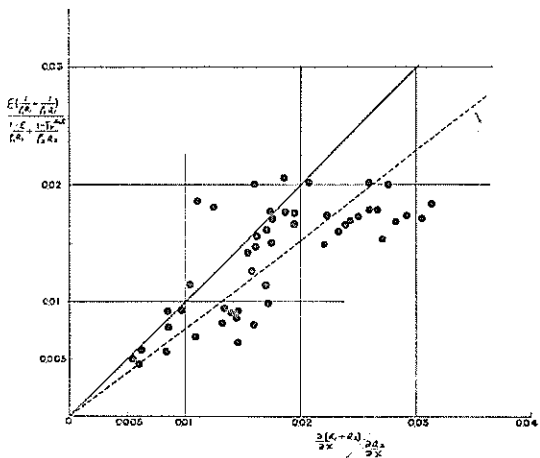


図-17

いるが、その傾向は充分認められる。実験値の $\frac{\partial}{\partial x}(a_1 + a_2)$ が大きいと30%大の傾向が得られているが、これは測定の誤差のみならず、側壁摩擦を無視した結果であろうと推察され、本実験の如き小型水路では無視できないことを示している。

4-6 $u = 0$, $\partial u / \partial y = \max$, $\partial \rho / \partial y = \max$ の水深
流体が u_0 なる速度で固体面上を流れる場合その境界面には境界層が発達し、境界層の厚さは距離に比例して増大することはよく知られているが、密度流の如く相対的に密度差、速度差を持つ流体が接触する場合の境界面は前述した様に内波が発生し、淡水、海水の混合が発達するため速度分布、密度分布及び流速零点などは、固体面上を流れる流体とはかなり異なったものになると思われる。そこで実験から得られた。流速 $u = 0$, 速度勾配 $\partial u / \partial y = \max$, 密度勾配 $\frac{\partial \rho}{\partial y} = \max$ の水深を示すと表-4の如くである。

表-4は、それらの比較を境界面を基点として表わすため、境界面の水深で除した値で示してある。境界面の水深は密度分布より $\rho = 1.005$ を示す水深(ポイントゲージによる境界値とほぼ一致する)を採用した。

表-4によれば、水平底(A)の実験では $Q = 3.12l/s$ $4.38l/s$ ($Q = 6.12l/s$ は楔の長さが短かいので除外した)ともに $u = 0$, $\partial u / \partial y \max$, $\partial \rho / \partial y \max$ の値は僅かなからいずとも1.0以上を示し、且つ楔先端からの距離に比例して増加する傾向にある。局部増深(B-1, B-2)の場合でも河床盤上 station 6~10 では各流量ともに水平底の傾向と全く同じであるが、増深部 station 5~1 の水域では実験 Case B-2 において $u = 0$ 値が急激に増大し 1.6~2.15 を得る。 $\partial \rho / \partial y \max$ 値は他の Case とほぼ同値であるが、 $\partial u / \partial y \max$ 値が僅かなから1.0以下となる。更にこの Case では変化の傾向が他 Case と異なつて $u = 0$, $\partial u / \partial y \max$, $\partial \rho / \partial y \max$ とともに河口に近づくに従って減少する傾向をみせている。同じ増深 Case B-1 では明瞭な傾向ではないが、河口に接近するにつれて増大する傾向が得られるのに反して、Case B-2 の現象は興味深い。

この結果、水平底の場合は楔先端からの距離に比例して発達する内部波のため混合が促進されて境界層の厚さが増大するためであり、局部増深水域では水深の増大によつて内部波が一時減衰するためと、底層海水の逆方向流速の効果が入るためと考へられる。尚 $u = 0$ の水深を海水層の厚さ a_2 で示すと境界面下約 1/3 に存在することになる。

5. 結 論

以上小型実験水路で安定した二層流の実験によって、流路の水深を局部的に急変した場合に侵入する塩水楔の長さ、抵抗係数などに関して得られた結果を要約すればつぎのとおりである。

- (1) 局部増深水路に侵入する塩水楔の長さ及び型状は(7)及び(8)式によって計算できる。
- (2) 増深部前端より上流の浅水部に侵入する楔の型状は、水平底の侵入楔前半部の形状と同一である。
- (3) 楔境界面の抵抗係数を $\tau = \rho k u^2$ で表現する場合、抵抗係数は表層レイノルズ数及び内部フルード数の増加につれて減少し、楔の勾配、海水層の水深が増大すればともに増大する。
- (4) 抵抗係数は楔前半部で大きく、後半部はやや小さくほぼ一定値であり、増深水域の値は減少して小さくなる。
- (5) 淡水の渦動粘性係数は淡水が楔上に流動すると急激に減少し河口附近では楔先端河川部のその約1/10に減少する。
- (6) 水面勾配と楔の勾配の関係は(8)式で示されるが、小型水路では実験値が理論値より約30%大きく、側壁摩擦の効果が大きい。

上記の結論は限られた条件、Case の実験から得られたものであり、此の外なお考慮して実験に加へる事項が幾つかある。例えば、レイノルズ数の範囲の拡大、 ϵ の変化、側壁摩擦の考慮……などである。その外測定器の開発によって微速流を完全に測定し得るならば実験の精度は更に向上するものと信ずる。今後この種の研究を進めることによって順次解決してゆきたいと考へている。

最後に本研究に対して、終始御指導、御教示を頂きました浜田水理研究室長、及び実験資料の整理に尽力してくれた堀江彬君、柳本充介君、堀越なみえ嬢に深謝致します。

参考文献

- 1) Schijf J. B. and J.C. Schönfeld Theoretical consideration on the motion of Salt and fresh water proc, Minn, Intern, Hydr, conv, I.A.H.R. 1953
- 2) Farmer H.G. and G.W. Morgan The Salt Wedge. proc 3rd Conf on Costal 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、昭和35年
- 4) Hinwood, H. B. : Estuarine Salt Wedges : The Dock & Har bour authority July 1964.
- 5) OtsubeK anp H. Fukushima : Density Current in a river mouth with a small tidal range I.A.H.R. 8th Congr 1959.
- 6) (3)に同じ
- 7) Lofquist, K : Flow and Stress near an interface between stratified liquids, Phys, Fluids vol. 3 No. 2 1960.
- 8) Bata, G.L. : Frictional Resistance at the interface of density Current. I.A.H.R. 8th Congr. 1959.
- 9) (3)に同じ
- 10) 新潟港の埋没並びに海岸欠蝕について
新潟港技術調査報告No.1 昭和23年12月
- 11) 相村正和：河口における二重水層(2)―河口二重水層の力学的特性に関する研究、北大工学部研究報告、vol. 28, 昭和37年
- 12) 浜田徳一、河口端における水面勾配―未発表

港湾技術研究所報告 第4卷5号

1965年6月

編集兼発行者 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市川間162

印刷所 株式会社 白泉社
東京都港区麻布霞町7