

II-51 塩水くさびに関する大型水路実験による二三の考察

建設省土研鹿島試験所

正員 須賀 堯三

正員 高橋 晃

1. 目的と検討概要

塩水くさびの長さは抵抗係数にほぼ反比例の関係にあり、抵抗係数は実用上からかなり重要な量となっている。塩水くさびの境界面の抵抗係数については、Keulegan, Jppen-Harleman, 沢田博士、岩崎博士、椎貝博士等その他多くの人達の研究があり、二、三の理論式、あるいは実験式が提案されている。しかし実測値の数はあまり多くなく、また実験値は小型水路によるものが多く、ここではかなり大型の水路で実験を行ってみた。そしてスケリーガン数の範囲をひろげ、これまであまり実験値のない範囲の抵抗係数について、いままで発表されている境界面抵抗係数値と比較検討した。さらに水質汚染や湖の淡水化で問題とされる塩水層から淡水層への塩分混入速度について、若干の実験を行ない、これまで発表されている研究結果をもとに簡単な考察を加えてみた。

2. 実験装置および実験方法

実験に使用した水路は長さ30m、幅0.30m、深さ0.50mの片面ガラス張り密度流二次元水路と、長さ100m、幅0.80m、深さ1.0mの片面ガラス張り密度流大型水路で、これらの水路には付属設備として攪拌機を備えた攪拌水槽および貯塩水槽等の塩水製造装置があり、さらに高水槽、流量計を経てこれと接続した水槽が水路下流端にある。実験は上流から淡水流量 Q_f を与え、下流端水槽へ塩水流量 Q_s を与えると塩水はくさび状になって水路内へ侵入し、淡水は上に押し上げられて表層を流れる。ここで塩水流量も適当に調節すれば、塩水くさびを定常的に保つことが可能である。また実験中淡水塩水の境界面をはっきりさせるため塩水側にフルオレセイン水溶液にて緑色に着色した。なお塩水比重は1.005~1.020について、淡水流量は30m水路の場合10~60分、水深10~30cm、100m水路の場合200~600分、水深35~80cm、について実験を行なった。測定したものは塩水くさびの形状、流速分布、濃度分布、水位等であり、流速分布の測定には実験用の小型プロペラ式流速計を使用し、さらに流速が微弱な場合は、水素気ほう式の流線観測器あるいは色素等により測定した。濃度分布は種々の深さにおける資料を採取して電導度計により測定した。

3. 実験結果とその考察

塩水くさびの長さはレイノルズ数あるいは内部フルード数の増加にともない減少し、同一水理量の場合は密度差の大なるほど長くなる。流速分布は淡水部分でほぼ一定値を示し、境界面付近で急激に変化している。また流速の正負が逆転している位置は内部波等の影響で周期的に多少変動している。したがって塩水層の流速分布(流速値)も幾分変化するようである。この逆転位置は密度差に關係なく塩水深の約1/3付近になっている。濃度分布は上下両層の密度差が大なる場合は境界面はよく安定しており、ガラス面を通して測定した塩水くさびの形状と変曲点とよく一致している。しかし上下両層の密度差が小さい場合は一般に混合し易く、ガラス面より測定した形状は密度分布の変曲点より幾分上層を境界面としている。

(1) 塩水くさびの形状と抵抗係数について

淡塩水の境界面におけるせん断抵抗は表現に多少の差はあるが、いずれも表層流の2乗に比例する量として表わされている。定常状態における塩水くさびの形状がわかれば、逆にくさび各部分の抵抗係数 f_L は、次田博士による次式によって求められる。

$$f_L = \frac{f_i}{2} = \frac{\left(\frac{U_1^2}{\epsilon g h_0} - 1\right) \cdot \frac{dh_0}{dx}}{\frac{U_1^2}{\epsilon g h_0} - \frac{1}{K_0}} \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 U_1 は表層淡水の平均流速、 h_0 および h_L はその点における水深および表層淡水の水深、 $\epsilon = \Delta p / p + \Delta p$ 、 dh_0/dx はその点における表層淡水水深の変化である。抵抗係数は層境界面の安定性に

関係する *Keulegan* の無次元数 $\Theta = 1/K_0(F_1')^2$ の関数と考えられており、 $K_0(F_1')^2 = \Xi$ と書いて $f_L = A \Xi^n$ なる関係で表わされている。ここで $K_0 = U_1 h_0 / \nu$: 淡水層のレイノルズ数、 $F_1' = U_1 / \sqrt{\epsilon g h_0}$: 淡水層の内部フルード数である。そして今まで発表されている主な理論式あるいは実験式を示すと表-1のようである。

表-1

	A	n	
岩崎(1962)	9.88	-0.8356	実験
桂貝(1965)	12	-1	理論・実験
金子(1966)	0.2	-0.5	小矢部川河口
中村(1966)	4.228	-0.7117	神通川河口
中村(1970)	0.136	-0.934	九頭竜川河口

今回大型水路による実験結果から(1)式より抵抗係数 f_L を求めると、塩水くさびの勾配の影響が大きく、くさびの勾配の大きい先端部および河口端部で抵抗係数は大きくなる傾向が見られ、中央部は一定値で小さくなっている。

この抵抗係数 f_L と Ξ の関係を図-1に示した。この場合、くさびの勾配の大きい先端部および河口端部は除外した値を採用した。これによると抵抗係数 f_L はクーリーマン数 Ξ の増大とともに減少することは認められるが、一つの塩水くさびにおいての散乱が大きいため、一つの直線で表現するのは困難であるが、実用的な見地から $f_L \sim \Xi$ の関係を求めると次式が得られる。

$$f_L = 0.35 \Xi^{-0.5} \quad \text{----- (2)} \quad \text{実験範囲} (K_0 = 10^3 \sim 10^5, \Xi = 10^2 \sim 10^5)$$

図-1の○印は利根川下流部において行われた塩分観測の小潮時における濃度分布および流速分布より計算したものである。計算は濃度分布の変曲点を境界面とし、各地点とも最大流速となるような時間を、定常状態の塩水くさびと考え、(1)式より抵抗係数を算出した。この場合、レイノルズ数の大きな現地の抵抗係数も含めた $f_L \sim \Xi$ の関係は(2)式から多少ずれるようである。すなわち我々の実験範囲では現地利根川の抵抗係数もほぼ(2)式で表わせるが、 $\Xi > 3 \times 10^5$ では(2)式と違った傾向を示すようである。このようなことからレイノルズ数の大きな現地の抵抗係数も含めた $f_L \sim \Xi$ の関係を求めると次式が得られる。あるいは図-1で曲線で表示した方がよいのかも知れない。

$$f_L = 1.29 \Xi^{-\frac{2}{3}} \quad \text{----- (3)}$$

(2) 塩水くさびの到達距離と抵抗係数について

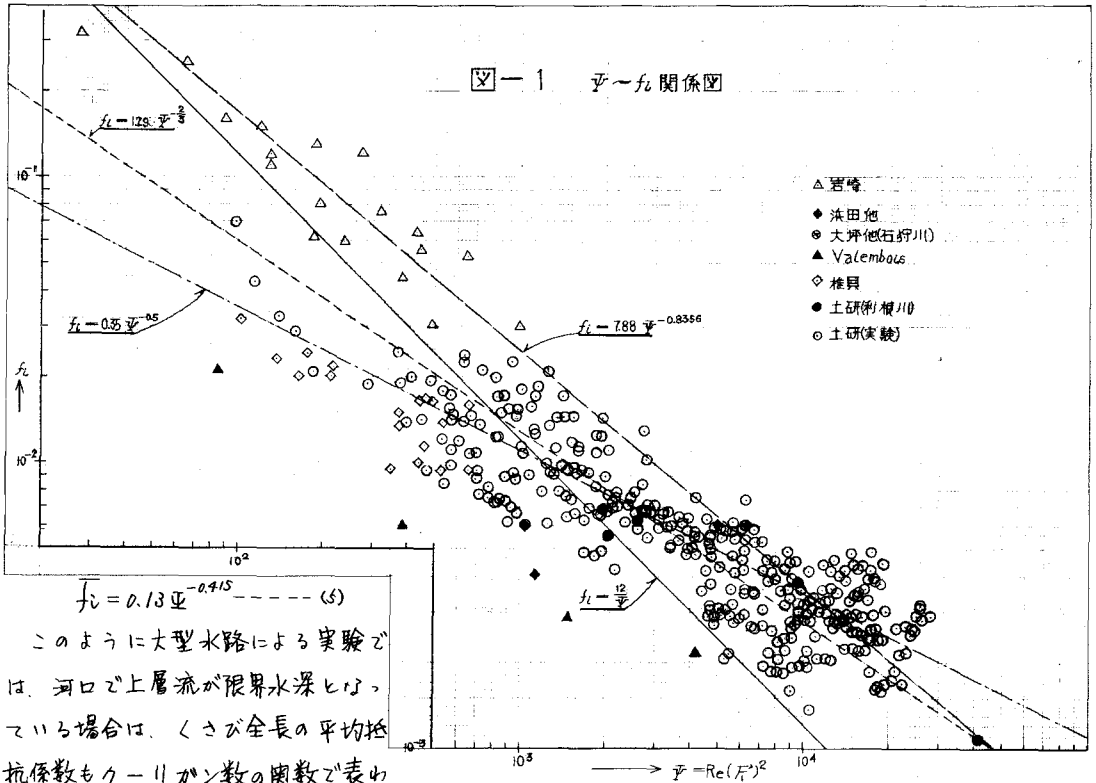
定常状態時の塩水くさびの長さ L がわかれば *Schijf-Schönfeld* の与えた式からくさび全長の平均抵抗係数 $\bar{f}_L$ は(4)式で表わされる。

$$\bar{f}_L = \frac{h_0}{2L} \left\{ \frac{1}{5(F_0')^2} - 2 + 3(F_0')^{\frac{2}{3}} - \frac{6}{5}(F_0')^{\frac{4}{3}} \right\} \quad \text{----- (4)}$$

ここに $F_0' = U_0 / \sqrt{\epsilon g h_0}$ 、(4)式より塩水くさび全長の平均抵抗係数を計算し、上層のレイノルズ数およびクーリーマン数との関係を図-2、3に示す。河口で限界水深をとっているケースは除いてある。

これより $\bar{f}_L \sim \Xi$ の関係を求めると次式を得る。

図-1 $\bar{f}_i \sim \bar{f}_i$ 関係図



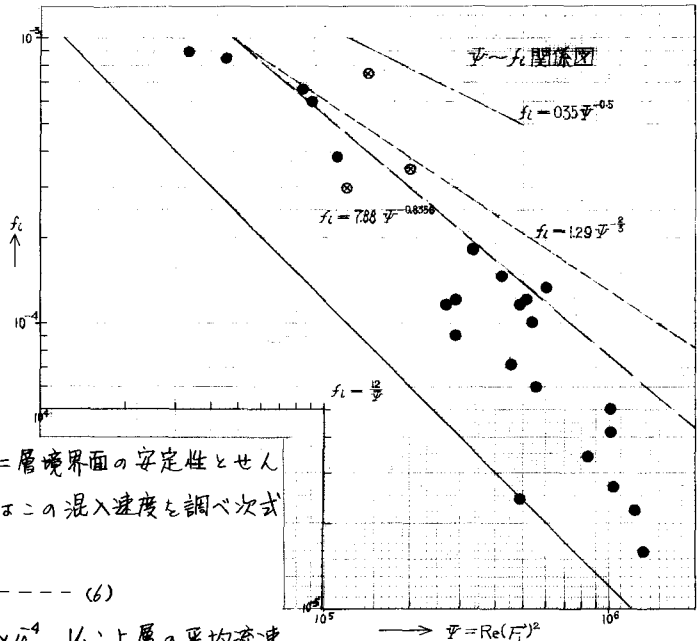
このように大型水路による実験では、河口で上層流が限界水深になっている場合は、くさび全長の平均抵抗係数もクーリー管数の関数で表わされるようである。(5)式が(2)式と異なるのはくさび上の各点の f_i は縦断的に一定でないこと、内部フルード数 F_i' と F_i の違いによる。また F_i' の範囲が大きくないこともあるが、図-2のように f_i はレイノルズ数のみによっても、かなりよく整理されるようである。

(3) 塩水層から淡水層への塩分混入速度について。

下層塩水の上層淡水中への混入は二層境界面の安定性とせん断抵抗力に関係があり、Kenelgan はこの混入速度を調べ次式を与えている。

$$U_m = K(U_1 - 1.15 U_c) \quad (6)$$

ここに U_m : 塩分混入速度、 $K = 3.5 \times 10^{-4}$ 、 U_1 : 上層の平均流速、 $U_c = (g \Delta \rho / \rho)^{1/2}$: 混入開始限界流速である。この塩分混入速度を実験結果の流速分布、濃度分布より求め、図-4に示した。これによると上層の流速が大きくなれば混入速度も大となる傾向が見られるが、上下層の密度差の影響もあり、散乱が大きい。この塩分混入速度に影響する無次元数としては、



クーリガン数、内部フルード数、リ
チャードソン数等が考えられ、これら
を検討したところ、上層の内部フル
ード数による整理が図-5に示すよ
うに比較的よい結果となった。これ
より *Keulegan* の式(6)の係数を内部
フルード数の関数で示し、この関係
を求めると次式が得られる。

$$U_m = 3.5 \times 10^{-3} (F_0)^2 (U_1 - U_c) \quad \text{--- (4)}$$

なお、混入開始限界流速 U_c は計算値
を用いているが、実験ではこれより
小さい流速で混入が開始しているよ
うであった。また、クーリガン数で
整理したものは多少ばらつきが大き
かったが、このことはせん断抵抗
以外の要素も関係していることを暗
示するものであろう。

4. おわりに

以上、塩水くさびに関する大型水
路による実験結果についてその概要

を報告した。実験の二次元性については、二三のケースにおいて検討したところ、ほぼ満足すべきものであったが、水路底における流線は $10 \sim 20^\circ$ ほど水路中央に向っていた。側壁の影響として、両端付近で中央部よりくさびが伸びる傾向にあるわけであるから、水路幅は大きい方がよい。また、くさびの勾配は非常に小さいものであるから、水路長さの長さが要求される。このような意味において、今回の実験資料はかなりの精度と信頼性をおくことができるものと思われる。今後はクーリガン数のさらに小さい範囲の実験や湖等における実測を計画している。

