



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	密度流の研究. I : 塩水くさびの模型実験
Author(s)	柏村, 正和; Kashiwamura, Masakazu; 吉田, 静男 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 41, 327-342
Issue Date	1966-08-20
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40797
Type	departmental bulletin paper
File Information	41_327-342.pdf



密度流の研究 I

— 塩水くさびの模型実験 —

柏村 正和*

吉田 静男*

(昭和 41 年 4 月 30 日受理)

Studies on Density Current I

— A Model Study on Salt Wedge —

Masakazu KASHIWAMURA

Shizuo YOSHIDA

Abstract

This paper is the first among a systematic series of studies on density current.

Dynamical properties of a density current in a gravitational field are important particularly in a geophysical sense and is a matter of great interest. In the present paper, the authors dealt with a model study on a salt wedge with an outflow of fresh water.

A dimensionless relationship between the length of the salt wedge and a discharge of fresh water, and a longitudinal figure of the salt wedge were examined in the experiment and tested by a theory. Furthermore, stream lines of the outflow of fresh water were observed and a transition of the stream lines from an exponential figure into a parabolic jet stream are briefly discussed.

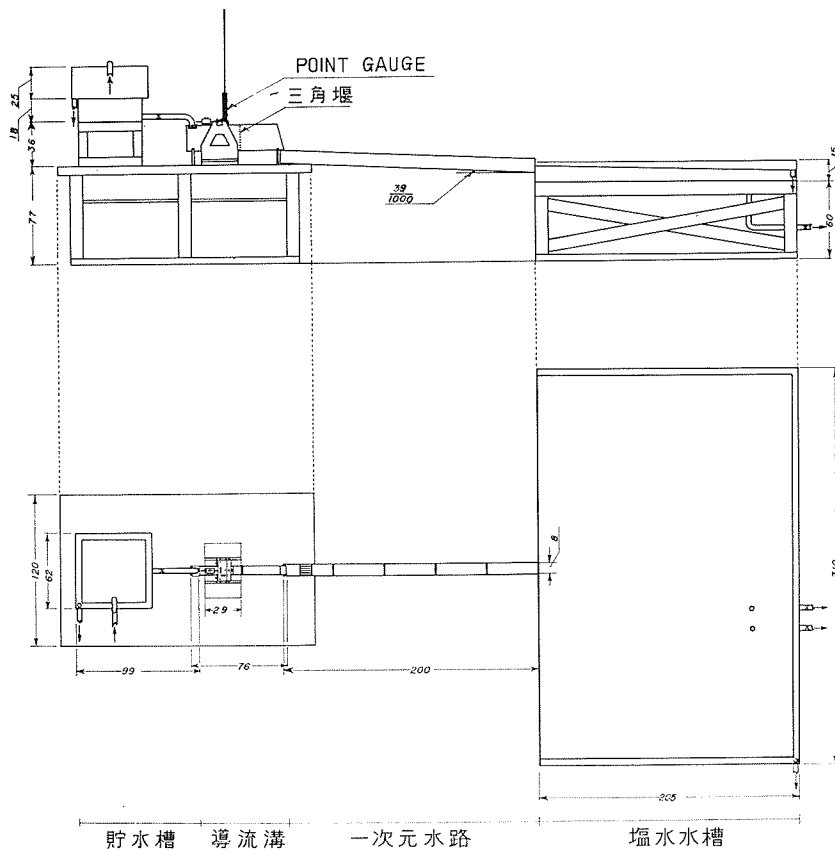
1. 序 論

重力場において密度を異にする二流体が接触した場合の力学的挙動は複雑であるとともに非常に興味深いものがある。自然現象に例をとるならば、温暖、寒冷等の前線における気団の接触による諸現象とか、海水と淡水の会合する河口の複雑な流れ、あるいは沈澱池、湖水における温度差にもとづく特殊な密度流の発生等は代表的なものとして知られている。二流体の接触面が密度の不連続面であるような混合の発達していない段階ではそれら各層の持つ流れはとくに二層流と呼ばれている。たとえば、河口から海水が河水の下をくさび状をなして入り込んでいる場合は、海水の形状に対して塩水くさびという名称が与えられているが、海水、河水の各層の流れは二層流の典型的なものであって、外部波、内部波、水路の形状、密度の差、流速等によってその型はいろいろ複雑に変化する。鉛直面で密度の変化が連続的である場合は、上

* 工業力学第二講座

記の二層流に対して多層流と呼ばれることもあるが、たとえば、湖海における温度の鉛直分布にもとづいて生ずる連続的な密度場における流れとか、あるいは潮差の大きい海に面した estuary 内では塩分の拡散が大きく密度の連続変化をとともうが、そのような場合の流れとかに見られる。

二層流の理論的研究は方程式の非線型性の困難があるにしても、近似的な扱いによってかなり多くの問題が明らかにされており、二層流の運動に関する定性的な判断に豊富な資料を提供している。一方密度の連続的な変化を持つ多層流の問題はなかなか理論的な取り扱いが困難であって、たとえば二層流のモデルを多段的に積重ねることにより近似し、二層流の理論を応用しようという試みもなされて来たが、あまりめざましい成功を見ていない。しかも乱流を含む場合の多層流の問題は幾多の努力にもかかわらず解決に向かってほとんど進展していない状況である。筆者らは密度流に関する従来の研究を整理し、検証しつつあらたな問題を理論的、実験的に解析し、密度流を体系づけて研究しようと企図しており、今回の報告は初報として、塩水くさびおよび二層流の運動について行なった実験結果を吟味し、また実験によって得られた事実を紹介するものである。



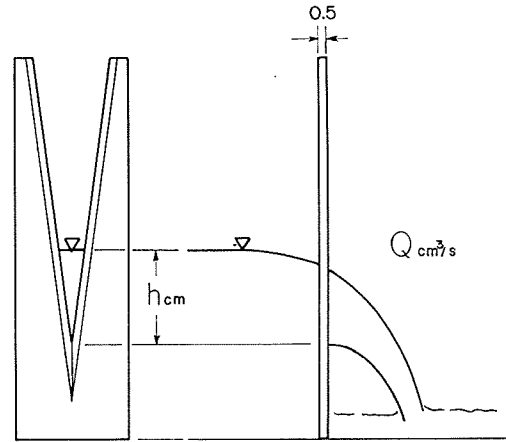
第1図 実験装置全体図

2. 実験装置

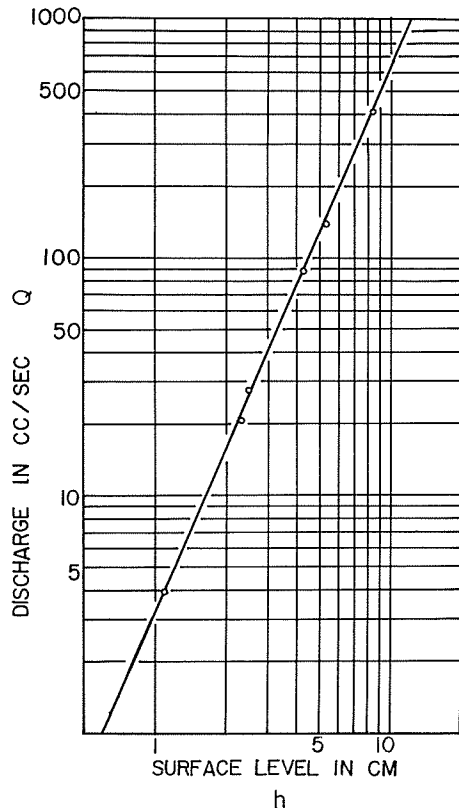
塩水くさび、二層流の実験装置の概略は第1図に示すとうりである。装置は大別して4つの部分に分かれている。40 cm の head を持った貯水槽、ポイントゲージによって水位を計測し流量を求める導流溝、塩水くさびの実験を行なう一次元開水路、その水路に塩水を供給し、また淡水の outflow の実験を行なう塩水水槽の各部分である。材質はそれぞれ塩化ビニールを用い、導流溝と一次元水路はとくに側方からの視察が可能なように透明な材質を使用した。貯水槽は高さ 40 cm、奥行、幅各 50 cm であって、外部から淡水を常に補給し、貯水槽上端面から overflow させて、head を一定に保つようにし、導流溝に流出する水量を安定ならしめている。その水量は貯水槽吐水口に附したバルブにより任意に変化せしめ得る。導流溝に入った水は溝の中央部に設けた三角せきにより一部せき止められ、その水位は、三角せきの切欠部から流出する流量と対応するので、ポイントゲージにより水位を測定すれば逆に流量を知ることができる。三角せきは、底辺 4.0 cm、高さ 15.0 cm の逆二等辺三角形をなし(第2図)、切欠部頂点から水面までの高さ h cm とせきを通過する水の流量 Q cm³/sec との関係は数多く実験をくり返し最小自乗法で整理した結果次式の如く得られた。

$$Q = 3.167 h^{2.297} \quad (1)$$

これを図示すると第3図の如くなる。ポイントゲージにより h を測定し第3図によりただちに流量が求められる。ただし、流量の小さな場合には Q の微小変化は h に大きな変化を与えて測定に不便であるので、別に



第2図 三角せき

第3図 三角せき内水位 h と流量 Q の関係

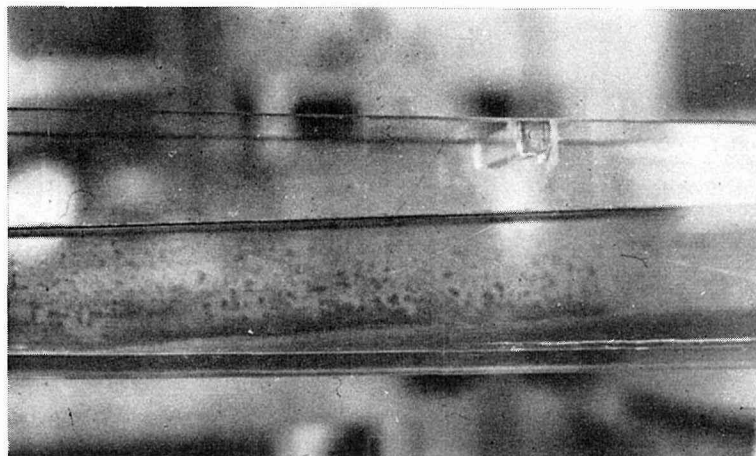


写真 1 一次元水路 (水路床に沿って塩水くさびが見えている)

メスシリンダー等で直接測定する方法を講じている。

三角せきの切欠部の edge は外側から傾斜をつけて刃状に薄くしてある。導流溝を通過した水は一次元水路に入る (写真 1)。一次元水路は長さ 2 m, 幅 8 cm, 深さ 10 cm であって底は 39/1000 の勾配を持っていて塩水水槽に接続する。塩水水槽は幅 3 m, 奥行 2 m, 深さ 15 cm であり塩水をたたえる。塩水は 1 回に 30 kg 入り食塩 2~3 袋を入れ攪拌して作る。水槽内の塩水は実験に際して十分静止していることが必要であるが、塩水を作る際に食塩を完全に溶解させることは難しく、従って数日放置して静止させた時に鉛直方向に塩分の勾配すなわち密度勾配を生ずるのは、ある程度まではどうしても避けられない。塩水を作ってから数日間毎日攪拌して溶解を進め、その後 3~4 日完全に放置して塩水が静止するのを待って実験を行なう。

塩水は上流から流入する淡水と区別できるように染料ローダミン B で赤く着色する。この着色塩水は一部一次元水路に入り込み、淡水の流入のない時はほとんど水路の上端にまで達する。導流溝から淡水が流入すると淡水は密度が塩水より小さいので塩水の上のり上げて流下し、その際の shear によって塩水は後退する。塩水層の形状はくさびの形をして底をはっているのでしばしばこれを塩水くさび (salt wedge または saline wedge あるいは saline tongue) と称している。塩水くさびの長さは、一次水路の塩水水槽への開口部からくさび先端までの長さとして扱われている。その長さや、くさびの形状すなわち淡塩二層の境界面の形状は直接スケールで測定すればよい。淡塩二層の状況を側方からあるいは上方から直接観測または写真撮影をする際には淡水にも着色すると一層鮮明である。淡水の着色には、筆者らはフルオレッゼインを使用した。ことに一次元水路から開口部を経て塩水水槽へ淡水が拡がっていく時の流線を調べる際にはこのような着色は絶対に必要となる。これらの装置に加えて、塩分をその都度測定せねばならない。筆者らは、精密測定の際は比重びんを用い普通は電導度計によって間接測定を行なっている。

3. 定常塩水くさびの理論

塩水くさびの運動に関する基礎方程式は次式で与えられる¹⁾。

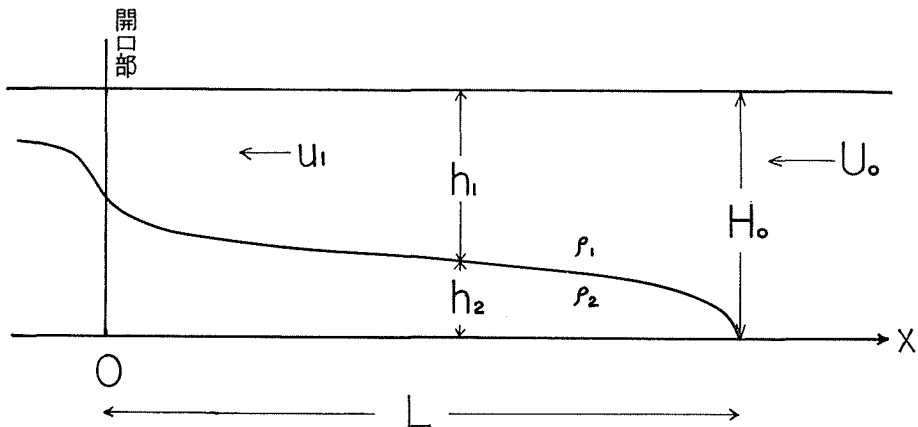
$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + g \frac{\partial h_1}{\partial x} + g \frac{\partial h_2}{\partial x} + g I_0 + \frac{\tau}{\rho_1 h_1} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + \gamma g \frac{\partial h_1}{\partial x} + g \frac{\partial h_2}{\partial x} + g I_0 - \frac{\tau}{\rho_2 h_2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial h_1}{\partial x} + h_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial h_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial h_2}{\partial x} + h_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

ここに用いた notation は巻末にまとめて掲載しておくが、大方は第4図によって知ることができる。これらの式を誘導した際の仮定をつぎに列挙しておこう。



第4図 塩水くさびの模型

- (1) 座標は開口部（または実際の河川では河口）を0とし、上流方向に x の正方向をとる。
- (2) 水路は直線とし水路幅を一定と見なす。(3) 各層内では流速および密度は鉛直方向に一様と考える。(4) 水面の空気との shear は無視し、また塩水層の流速は常に淡水層の流速に比し非常に小さいものとして底における shear も無視する。(5) 淡水層と塩水層間の相互作用は二者の接触面における shear τ のみによるものとする。

(1), (2) 式はそれぞれ淡水と塩水の運動方程式であり、(3), (4) 式は同じく淡水と塩水の連続方程式である。

これらの方程式を筆者らの行なった定常塩水くさびの問題に直接適用できる形式にするために、さらに二、三の条件を与えなければならない。すなわち、(1) 現象は定常状態のものであること。これによって各式内の $\partial/\partial t$ の項はいずれも0となる。(2) 塩水層は静止しているものとして取扱う。詳細に塩水層を観察すれば、淡水の shear によって塩水層内で上層は下流へ

下層は上流へ移動し、鉛直面内の循環を生じていることが判る。しかも上層部は流下と共に少しづつ塩分が淡水中へ拡散している。しかしながら、これらの流速、あるいは塩分の拡散量は全体的に見た場合微小であって、これらを無視することは単に力学的な面のみに視野を固定する場合には決して不自然な設定ではない。かくして $u_2=0$ として問題を進める。

この2条件を入れれば(1)~(4)の各式はつぎのような3式にまとめることができる。

$$u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + g \frac{\partial h_1}{\partial x} + g \frac{\partial h_2}{\partial x} + gI_0 + \frac{\tau}{\rho_1 h_1} = 0 \quad (5)$$

$$\tau g \frac{\partial h_1}{\partial x} + g \frac{\partial h_2}{\partial x} + gI_0 - \frac{\tau}{\rho_2 h_2} = 0 \quad (6)$$

$$u_1 \frac{\partial h_1}{\partial x} + h_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

(5)式から(6)式を差引くことにより次式を得る。

$$u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + (1-\tau)g \frac{\partial h_1}{\partial x} + \left(\frac{1}{\rho_1 h_1} + \frac{1}{\rho_2 h_2} \right) \tau = 0 \quad (8)$$

また(7)式はただちに積分できるが、塩水くさびの上流先端部における淡水の流速(これも鉛直方向に一定と仮定する)を U_0 、同じく水深を H_0 とすれば

$$u_1 h_1 = \text{const} = U_0 H_0 \quad (9)$$

さて、(8)式における τ の具体的な表現を考えねばならぬが、やはり、気流や水流の固体壁における shear と同じ表現をすることがこの際適当であろうし、また多くはこのように取扱われている²⁾。すなわち、

$$\tau = \frac{f_i}{8} \cdot \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} |u_1| u_1 \quad (10)$$

f_i は無次元の抵抗係数である。しばしば $f_i/8$ の代りに k とおいてこれを抵抗係数としていることもあるし、また $g/4C_i^2$ とおいて C_i を Chèzy 型の抵抗係数と称している場合もある³⁾。

いま流れは定常であって淡水流速 u_1 は常に x の負の方向に向いており従って(10)式はさらにつぎのようにおいてよい。

$$\tau = -\frac{f_i}{8} \cdot \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} u_1^2 \quad (11)$$

(11)式と(9)の流量保存の式を(8)式に代入して u_1 を消去するとつぎの方程式となる。すなわち

$$\left\{ \left(\frac{h_1}{H_0} \right)^3 - \frac{U_0^2}{(1-\tau)gH_0} \right\} \frac{dh_1}{dx} - \frac{f_i}{16} (1+\tau) \frac{U_0^2}{(1-\tau)gH_0} \left(\frac{h_1}{h_2} + \frac{1}{\tau} \right) = 0 \quad (12)$$

これが塩水くさびの形状を与える微分方程式である。この式に現れる $U_0^2/(1-\tau)gH_0$ は塩水くさび先端の interfacial Froude number と呼ばれる無次元量であり、今後これを F_{i0}^* とおくことにするが塩水くさびの性質を左右する重要な量である。(12)式において通常は $\tau = (\rho_1/\rho_2)$

は開口部からの距離 x の関数であり、淡水中の塩分を生ずる諸原因、たとえば内部波の存在あるいはその程度、いい換えると二層間抵抗係数 f_i の大きさの問題にもつながってくるが、それらによって左右されるものである。また塩水層の厚さ h_2 は淡水との相互作用の他に水路底の形状によって変る、やはり x の関数である。従って r や h_2 のとり方によってこの一見単純な(12)式は解き難いものになりかねない。幸なことに、ここではつぎのような単純化が可能であってそれらの困難を克服することができる。

淡水の比重を 1.00 とする場合、海水の比重はほぼ 1.02 の程度であり、筆者らの実験の塩水の場合でも最大で約 1.06 である。従って $r=1.02\sim 1.06$ の範囲を考えればよい。 $1-r$ という factor が(12)式に入ってくるがこれはいかに小さくとも密度差が現象を支配している以上無視はできないが $1+r$ という factor は $r\approx 1$ とみて $1+r=2$ とおいても、ほとんど式の上から差支えない。従って(12)式中の $1+r$ は 2 とおき $(h_1/h_2)+1/r\approx h_1/h_2+1$ とおくことは差支えないと考えられる。

また水路底の勾配がほとんど 0 に近い場合は、水面勾配はこの種の二層流ではきわめて小さいのが常であるので全水深はくさびの全長にわたってほぼ一定という取扱いが可能になってくる。水路底が勾配を持っている場合の補正はつぎの論文で再び取扱うこととし、ここでは先ず全水深が一定、すなわち $h_2=H_0-h_1$ という近似化を採用することにしよう。これら二つの近似条件を(12)式に適用すると式はつぎのように単純化される。

$$\left\{ \left(\frac{h_1}{H_0} \right)^3 - F_{20}^2 \right\} \frac{dh_1}{dx} - \frac{f_i}{8} F_{20}^2 \left(1 + \frac{h_1}{H_0 - h_1} \right) = 0 \quad (13)$$

これはつぎのように直ちに積分可能な形に変形できる。

$$\left\{ \left(\frac{h_1}{H_0} \right)^3 - F_{20}^2 \right\} \left\{ 1 - \left(\frac{h_1}{H_0} \right) \right\} d \left(\frac{h_1}{H_0} \right) = \frac{f_i}{8} F_{20}^2 d \left(\frac{x}{H_0} \right) \quad (14)$$

積分常数を決めるにあたって開口部における水理条件を導入しなければならない。開口部では水路幅が不連続的に拡大するのであるから淡水層の厚さはその点で急激に変化することになる。即ち淡塩二層の境界面は開口部で外方に向って急激に上昇する。これは一種の内部波もしくは jump が定常的に開口部に存在するというように見て差支えないので内部波が静止する条件として導くことができる¹⁾。この条件とは開口部でつぎの式が成り立つことである。

$$\frac{u_1^2}{(1-r)gh_1} = 1 \quad (15)$$

この左辺はしばしば F_i で表わされるが interfacial Froude number である^{4), 1), 3)}。下層塩水層が静止している時はこの関係が完全に成立し、移動しているときは近似的に成り立つ。また実際の河口でもほぼ満足されることが確かめられている¹⁾。(15)式は(9)式を用いさらにくさび先端の interfacial Froude number F_{20} を使うことによってつぎのように書き換えられる。

$$\frac{h_1}{H_0} = F_{20}^{2/3} \quad (16)$$

したがって(14)式を積分するに当って $(x/H_0)=0$ で(16)式が成り立つとして積分常数を決めればよい。かくてつぎの式を得る。

$$-\frac{1}{5F_{i0}^2} \left(\frac{h_1}{H_0}\right)^5 + \frac{1}{4F_{i0}^2} \left(\frac{h_1}{H_0}\right)^4 + \frac{1}{2} \left(\frac{h_1}{H_0}\right)^2 - \left(\frac{h_1}{H_0}\right) - \frac{3}{10} F_{i0}^{1/3} + \frac{3}{4} F_{i0}^{2/3} = \frac{f_i}{8} \frac{x}{H_0} \quad (17)$$

これが塩水くさびの形状を表わす式である。この式は座標 x のとり方の相違による差の点を除いて、別に Schijf と Schönfeld の提出した式と全く一致している⁹⁾。

塩水くさびの長さ L は(17)式からただちに求めることができる。すなわち、くさびの先端 $x=L$ で $h_1=H_0$ という条件をこれに代入すればよい。結局くさびの長さを与える式としてつぎの式を得る。

$$\frac{L}{H_0} = \frac{2}{f_i} \left(\frac{1}{5F_{i0}^2} - 2 - \frac{6}{5} F_{i0}^{1/3} + 3F_{i0}^{2/3} \right) \quad (18)$$

本論文の実験ではこれら(17)、(18)両式と実験値とを比較し f_i がいかなる値の時によく適合するかを調べることになる。

4. 実験結果

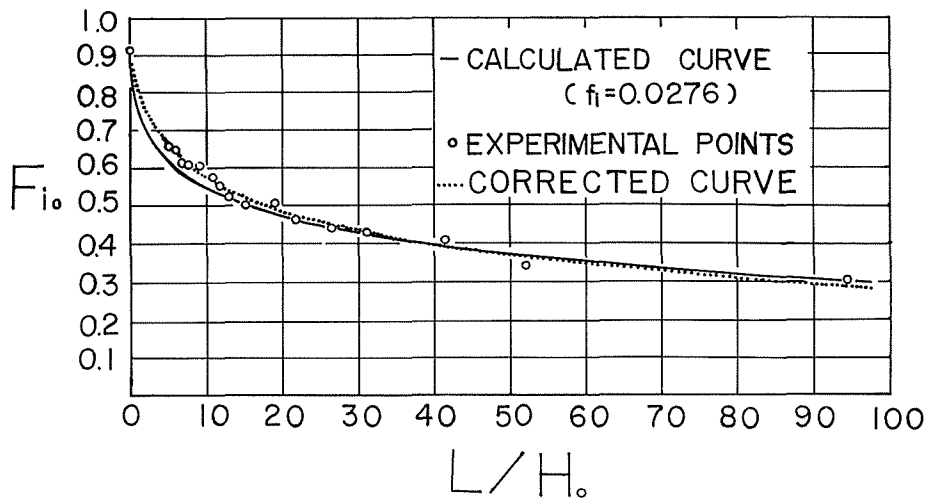
はじめに行なった実験は淡水流量と塩水くさびの長さの関係についてである。淡水流量の測定は実験装置の項で説明したように導流溝内三角せきの上流部水位をポイントゲージで測定することにより行ない、またくさびの長さは直接一次元透明水路の外側にスケールをあてて測定した。流量とくさびの長さの関係を無次元化して求める為には、くさび先端における interfacial Froude number F_{i0} を知らなければならないので先端の水深 H_0 を同時にスケールにより直接測定した。これらの結果は第1表にまとめられている。これによれば淡水流量の増加とともに塩水くさびは後退し、長さが短くなる様子をうかがうことができる。この関係を無次元化して普遍性を持たせるためには、流量 Q の代りにくさび先端の $F_{i0}(=U_0/\sqrt{(1-\bar{r})gH_0})$ を用い、またくさびの長さ L の代りに L/H_0 をとり入れればよい。第1表には Q , L , H_0 を用いて計算した F_{i0} と L/H_0 の値も同時に掲載してある。この F_{i0} と L/H_0 の関係は第5図に図示されている。すなわち F_{i0} が1に近い時は L/H_0 は0に近く、 F_{i0} がこれより小さくなると L/H_0 は次第に増加し、 F_{i0} が0.5より小さくなれば L/H_0 は急速に増大する傾向を認めることができる。このようにして F_{i0} と L/H_0 の関係が求められたので(18)式を用いて二層間の抵抗係数の値を算出してこれを同じく第1表に記載した。これによると f_i は一定の常数ではなく、かなり計算値には乱れが見られるが F_{i0} の増加と共に次第に減少していく状況になっており、ある関数関係があるものと考えられる。いま、この関数関係を無視して f_i に0.0276という数値を与えて(18)の理論式と実験値を比較してみよう。

0.0276という値は理論式と測定値が比較的良好に合致するように選んだものであって、とく

第1表 塩水くさびの諸実験値

流量 Q (cm^3/s)	くさびの 長さ L (cm)	くさび先端 水深 H_0 (cm)	くさび先端 平均流速 U_0 (cm/s)	くさび先端内部 フルード数 F_{i0}	L/H_0	二層間抵抗 係数 f_i
23.43	148.23	1.57	1.87	0.305	94.41	0.0263
50.83	127.50	2.45	2.59	0.342	52.04	0.0346
76.18	117.80	2.85	3.34	0.408	41.33	0.0236
103.71	105.00	3.38	3.84	0.430	31.07	0.0258
121.91	97.74	3.69	4.13	0.443	26.49	0.0269
146.62	88.99	4.05	4.53	0.464	21.97	0.0270
178.16	80.76	4.36	5.11	0.504	18.52	0.0222
198.48	72.42	4.73	5.25	0.497	15.31	0.0286
223.76	65.57	4.96	5.64	0.522	13.22	0.0264
249.26	60.83	5.14	6.06	0.551	11.84	0.0224
268.76	57.02	5.26	6.39	0.574	10.84	0.0196
301.70	50.69	5.51	6.84	0.601	9.20	0.0177
323.09	43.99	5.77	7.00	0.601	7.62	0.0215
341.92	39.78	5.92	7.22	0.612	6.72	0.0218
380.54	35.30	6.10	7.80	0.651	5.79	0.0167
399.26	31.42	6.28	7.95	0.654	5.00	0.0187
682.70	2.0 ± 0.5	7.26	11.96	0.915	0.28	0.0029

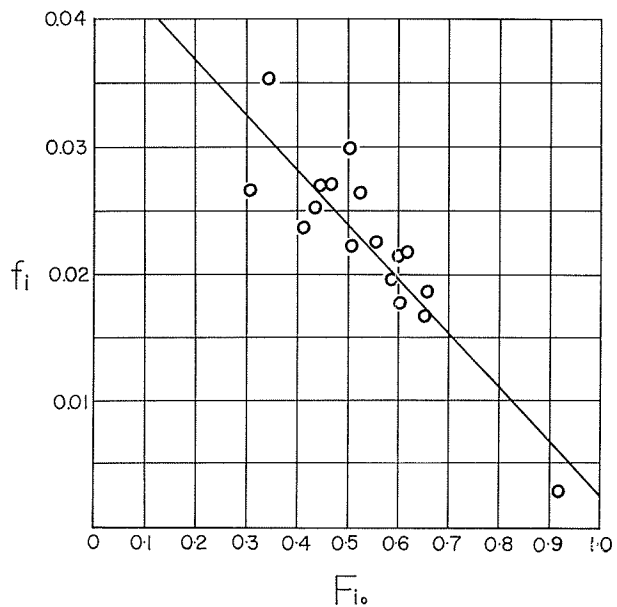
備考：底勾配 39/1000，淡水流量 $0 \text{ cm}^3/\text{s}$ のときの $L=173.20 \text{ cm}$ ， Q 、 L 、 H_0 の各値は数個の測定平均値， $1-\gamma=0.0240$ で一定として取扱った。 f_i は (18) 式を用いて計算したものである。

第5図 F_{i0} と L/H_0 の関係

に理論的根拠はない。第5図中の実線がその f_i に対する(18)式の理論曲線であって、かなりよく実測値と合致している。ことに F_{20} の減少にともなう L/H_0 の増加する傾向はよく理論式の妥当性を証明していると云わなければならない。しかし詳細に見れば L/H_0 の小さい領域でいくらかくいちがいを生じている。これは前述の如く f_i が F_{20} と関数関係にあると察せられる点を無視したことによるのであろうと思われるのでこの点を修正するために f_i と F_{20} の関係を直線的と仮定して第1表の実測計算値を用い最小自乗法によりつぎのように誘導した。

$$f_i = 0.04543 - 0.04293 F_{20} \quad (19)$$

f_i と F_{20} の実測による計算値と(19)式の実験式とを第6図に示す。 f_i と F_{20} とが直線的傾向を持つということはあくまで仮定であって2次式あるいは他の曲線がより妥当であるかもしれないが、とに角 F_{20} の増加とともに f_i が減少することは確実である。 f_i が F_{20} の関数であることはこのように間違いないものとしても f_i がさらに他の要素たとえば流れのReynolds number等によっても変化するものである可能性がある。たとえば実験室における f_i の値と実際の河川の塩水くさびにおける f_i の値とでは非常に開きがあり、河川の方がはるかに低い^{1),6)}。



第6図 f_i と F_{20} の関係

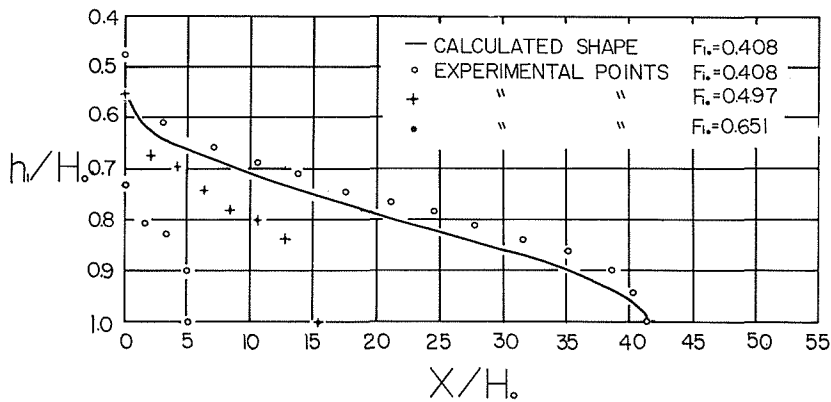
従って上記の f_i と F_{20} の関係は普遍的なものではないが、少なくともこの装置においてはこの関係を認めてよいと考えられる。そうすれば f_i は F_{20} の関数であり、結局 L/H_0 は F_{20} の値により一義的に決定されることになる。(19)式を(18)式の f_i に代入して画いた修正曲線を第5図の点線で示す。この修正曲線は当然のことではあるが f_i を一定とした実線の理論曲線より細部にわたってよく実測と一致していることが認められる。

つぎに塩水くさびの形状についての実験とその結果について考察を進めよう。

淡水の厚さ h_1 と一次元水路の下流開口部からくさび各点に至る距離 x との間の関係を調べればよいのであるが、やはりこれらの無次元化された量、すなわち h_1/H_0 と x/H_0 との関係として求めておけば(17)式との対比が容易であるから都合がよい。ただし理論式(17)はその計算が至って手数と時間を要するのでここでは一例についてのみ比較した。 h_1/H_0 と x/H_0 との実験値は第2表のとおりである。これを図上で示すと第7図のとおりである。ここに縦軸は h_1/H_0 。

第2表 塩水くさびの形状の実験値3例

$F_{i0}=0.408$	h_1/H_0	0.47	0.61	0.66	0.69	0.71	0.74	0.76	0.78	0.81	0.84	0.86	0.90	0.94	1.00
	x/H_0	0.00	3.51	7.02	10.53	13.68	17.54	21.05	24.56	27.72	31.58	35.09	36.60	40.35	41.33
$F_{i0}=0.497$	h_1/H_0	0.55	0.67	0.70	0.74	0.78	0.80	0.83	1.00	—	—	—	—	—	—
	x/H_0	0.00	2.11	4.23	6.34	8.25	10.57	12.69	15.31	—	—	—	—	—	—
$F_{i0}=0.651$	h_1/H_0	0.73	0.81	0.83	0.90	1.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	x/H_0	0.00	1.64	3.28	4.92	5.79	—	—	—	—	—	—	—	—	—



第7図 塩水くさびの形状の実験と理論

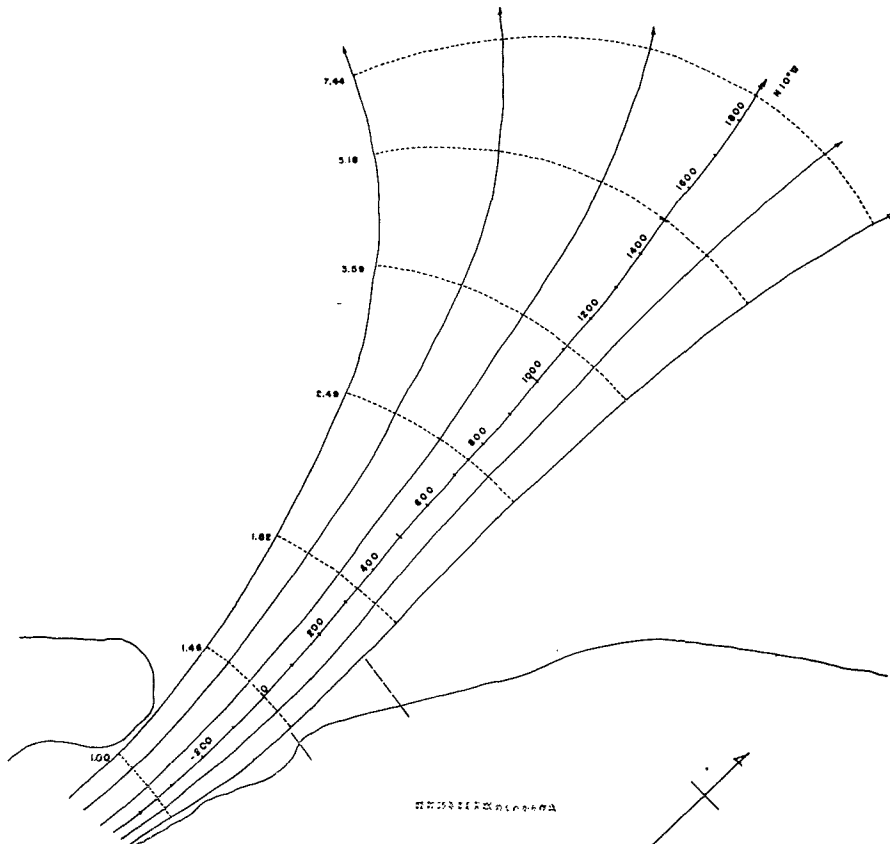
であるが塩水くさびの形状を直ちに視察し得るように上から下へ値が大きくなるごとく目盛つてある。また横軸 x/H_0 の0の点は一次元水路の開口部、実際の河川では河口に相当する点でありそれから右は上流の各点を表わしている。 $F_{i0}=0.408$ の場合のみ、理論式(17)と比較したがその理論曲線は実線で示してある。この場合のくさびの長さに対応する L/H_0 、および二層間抵抗係数 f_i は既に第1表に示したとおりそれぞれ41.33および0.0236である。理論曲線と実験値を比較してみると理論曲線が一様に下側に現われていることが見出されている。両者のちがいについての検討は未だ十分ではないがいろいろな予想がされる。まず最も根本的な点としては、理論式と実験との条件の相異である。理論式では下層塩水は静止していると仮定しているが、実際には塩水の下層は底を遡上し、その上層は淡水と共に流下し、一種の鉛直面内で circulation を生じている。この点は実際の河川においても同様である¹⁾。従って無流面は必ず塩水層の内部にあり、水面からこの面までの厚さを h_1 としてとるのが妥当ではないかと考えられる。そうすれば h_1 はこの実験値よりすべて大きく出て、理論曲線に近づくとと思われる。この点は十分検討の必要がある。また別の原因として考えられるものに f_i の見つもりがある。 f_i は F_{i0} で変るということは前述のとうりであるが、一つの塩水くさびについても上流から下流に向かって各点の interfacial Froude number F_i が変わるので、それと同時に f_i も変化するのであろうという点である。そうすれば f_i は x の関数として考えられるものであり、当然くさび

の形状にも影響を与えるであろう。

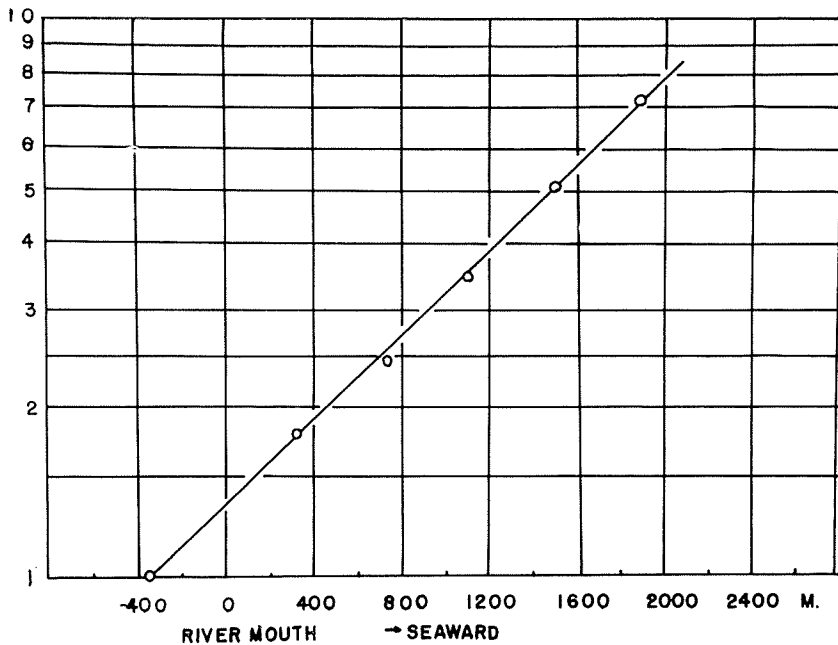
また淡水中の塩分濃度は上流から下流へ向かって増大するのが常であり、それにもなつて F_i がまた変ってくるわけであり、これまたくさびの形状に影響することになる。実験では水路床が 39/1000 の勾配を持っていたことも理論とちがう点である。以上いくつかの原因として考えられるものをあげたが、これらはさらに今後の研究によって検討する所存である。このようなくさびが見られるが、ただ境界面の勾配は理論曲線とほとんど一致していることはとくに注目する必要がある。

5. Outflow に対する考察

一次元水路で塩水くさびの上を流下した淡水が開口部を経て塩水水槽に入って後どのような運動をするかということは興味深いばかりでなく、実際の河川からの流出淡水の挙動に関連して非常に重要な問題である。筆者の一人は石狩川河口外において淡水流の流線が指数関数的に拡がっていることを発見して報告した^{7),8)} (第 8, 9 図)。しかし従来この問題は密度差を考慮しない二次元 jet の理論で考えられており⁹⁾, また実際にも jet の理論の結果を裏付けるよ



第 8 図 石狩川で実測した表面流流線の一例



第9図 石狩川の流線が指数関数的である一つの例

うな観測結果も報告されている¹⁰⁾。その場合流れは放物線的に拡がり、筆者の観測した石狩川の結果とは全く異なっている。

この実験ではどのような理由により、このような二つの型の outflow が存在するのか、あるいは一つの型から他へ遷移するものであるならばその条件はいかなるものであるかを究明するのが目的である。定性的にはこの実験により多くのことが明らかになった。それについては後に述べるが、定量的にはさらに今後の問題として残されており、第2報以後の報告にまきたい。今回は流量によるその流況の変化の実際を2枚の写真で紹介し、それについての若干の考察をするにとどめる。

塩水水槽に食塩を溶解して十分攪拌して4~5日放置し、水槽内の流動が全くなくなつてから微量の淡水を一次元水路から流下せしめて定常になって後観察をすると写真2の如き流線図が得られる。これは一次元水路の開口部近くにフルオレッセイン溶液を滴下して撮影したものであるが、開口部を出てから流れは密度差によって塩水の上に拡がって行き、石狩川の実測に酷似した指数関数的拡がりを持つ流れを形成する。この原因は一応密度差にもとづく密度流によるものと考えられるが流量を増加すると粘性による shear の効果が現われ、両側からこの流れに誘起されて開口部に至り、そこから沖の方へ向かう二次流が発生する。この二次流により淡水流は拡がりを抑制され、流線は細くなり、さらに流量を増すと二次流はさらに強まり、また渦動粘性をひきおこして、本格的な jet の形状に移行する。このようにしてできた jet の一例を写真3に示す。jet の外縁はあたかも放物線的であり、従来の二次元 jet の理論の示唆するもの

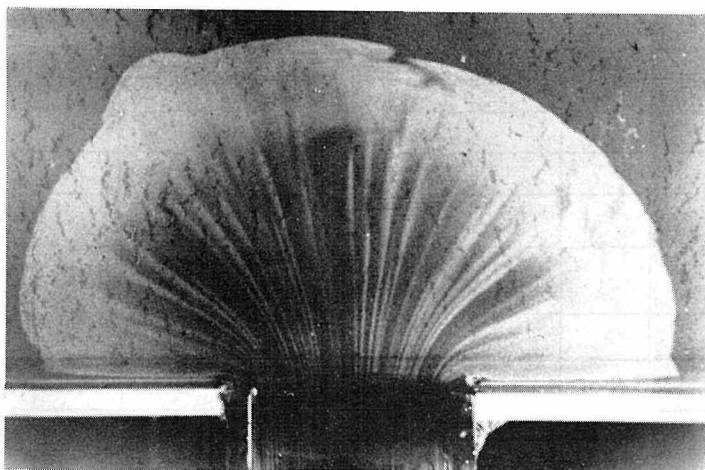


写真2 淡水流量が微小なときの outflow の流線

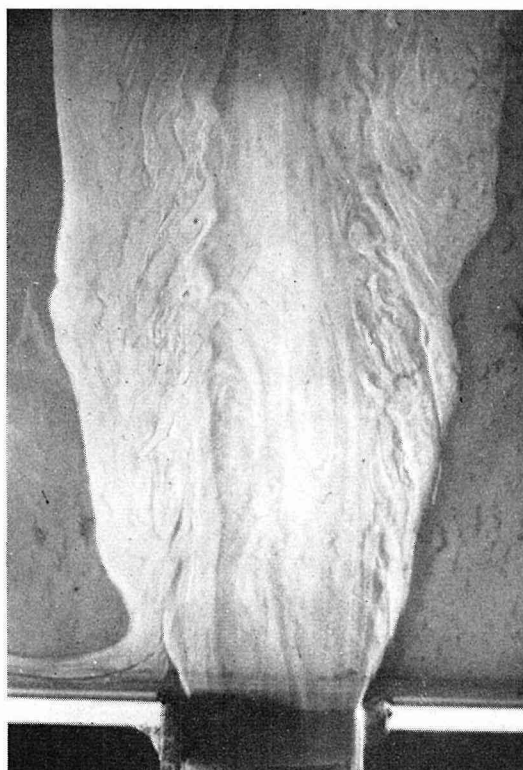


写真3 淡水流量が大きくなって二次元の turbulent jet に移りかわった状況

とか⁹⁾、他の観測結果と一致している¹⁰⁾。要するに淡水の流量によって密度流的性格の指数関数的拡がりから、密度差の効果のあまり影響しない jet の形式に移行するものである。また塩水の濃度を大きくしておく、つまり密度差が大きいと淡水流の流量を増しても jet に移行しにくくなり、逆に密度差を小さくすると僅かの淡水流量の時でも指数関数的拡がりを認め難くなる。

以上実験の視察結果を述べたが、この定量的問題は現在取扱中であって、結果は今後に残されており、とくに jet への遷移条件は非常に重要な課題であると思われる。

6. 結 語

以上密度流のうちの塩水くさびの問題と outflow の問題を新らしく建設した装置により取扱った結果について述べた。まだ今後に残された点も多く、さらに他の課題も沢山あり、ひきつづいて系統だてて研究を進めて行きたい。

終りにこの密度流の研究に古くから示唆を与えられ、またこの実験に多くの関心と激励をいただいた本学部の福島久雄教授に感謝の意を表す。

また本研究は装置の大部分の建設に当り、文部省科学研究費各個研究補助金によったことを附記する。

Notations

- F_i : interfacial Froude number
- F_{i0} : くさび先端の F_i
- f_i : 二層間抵抗係数
- g : 重力加速度
- H_0 : くさび先端の水深
- h_1 : 淡水の厚さ
- h_2 : 塩水の厚さ
- I_0 : 水路床勾配
- L : 塩水くさびの長さ
- U_0 : くさび先端の平均流速
- u_1 : 淡水層の平均流速
- u_2 : 塩水層の平均流速
- x : 開口部を原点とし上流を正にとった座標
- γ : 淡水と塩水の密度比
- ρ_1 : 淡水の密度

ρ_2 : 塩水の密度

τ : 二層間の shear

文 献

- 1) 柏村正和: 河口における二重水層 (2) 一河口二重水層の力学的特性に関する研究一, 北大工学部研究報告, 第28号, 昭和37年3月.
- 2) Harleman, D. R. F.: Stratified flow, Sect. 26, in "Handbook of fluid dynamics", edited by V. L. Streeter. 1st ed. McGraw-Hill, 1961.
- 3) 水理公式集, 第4編, 第8節, 河口密度流およびその他の流れ. 土木学会編, 昭和38年増補改訂版.
- 4) Stommel, H. and H. G. Farmer: Abrupt change in width in two-layer open channel flow, Jour. Mar. Res., Vol. 11, No. 2, 1952.
- 5) Schijf, J. B. and J. C. Schönfeld: Theoretical considerations on the motion of salt and fresh water, Proc. Minnesota Intern. Hydr. Conv. I. A. H. R., 1953.
- 6) 大坪喜久太郎・岸 力: 河口における海水の侵入. 技術資料15号, 昭和34年.
- 7) 福島久雄・柏村正和・八鍬功・高橋将: 石狩川の河口構造. 第8回海岸工学講演会講演集, 昭和36年.
- 8) Fukushima, H. and M. Kashiwamura: On the dynamical problems at the mouth of the Ishikari River, Coast. Engr. in Japan, Vol. 6, 1963.
- 9) Schlichting H.: Boundary layer theory, Pergamon, 1955.
- 10) Bates, C. C. and J. C. Freeman, Jr.: Inter-relations between jet behavior and hydraulic processes observed at deltaic mouths and tidal inlets, Proc. 3rd Conf. on Coast. Eng., 1952.