



HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|------------------|---|
| Title | 密度流の研究（第2報）：軽い流体のoutflowのpatternについて |
| 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, 43, 167-175 |
| Issue Date | 1967-05-15 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/40822 |
| Type | departmental bulletin paper |
| File Information | 43_167-176.pdf |



密度流の研究 (第2報)

— 軽い流体の outflow の pattern について —

柏村 正和*

吉田 静男*

(昭和41年11月30日受理)

Studies on Density Current (II)

On the Outflow Pattern of Lighter Fluid

Masakazu KASHIWAMURA

Shizuo YOSHIDA

Abstract

In the work described in this second paper on density currents, the authors have concentrated on the transition of flow patterns of lighter fluid, from a potential flow to a turbulent jet flow, when it passes through an outlet.

It has been reported by various researchers that the river flow shows a parabolic jet stream at the river mouth. Some of these workers have attempted to explain this phenomenon by the plane jet theory without taking into account the density difference between the river water and the sea water.

One of the present authors, however, discovered at the Ishikari River in its normal discharge that the outflow of the river water does not assume a parabolic flow but shows a certain flow pattern resembling a potential flow, in which the interval of any two stream lines increases exponentially with the distance from the mouth.

The existence of these two modes of flow pattern suggests that the outflow is transformed from one type to the other through a certain hydraulic condition, which seems to be related to the density difference between two fluids, for example, fresh water and salt water; in addition it also seems to be related to the amount of the discharge, and to the magnitude of the outflow.

In order to clarify this hydraulic condition, a model experiment was conducted by the authors. As a result, it was revealed that a combination of theoretically deduced two dimensionless factors $\theta(=\nu\varepsilon g)^{1/3}/U$ and $R(=Ub/\nu)$ dominate the hydraulic condition of transition, where ν is the coefficient of kinematic viscosity of water, ε is equal to $1-(\rho_1/\rho_2)$, in which ρ_1 is the density of lighter fluid and ρ_2 is the density of the other fluid, g is the gravitational acceleration, U is the cross-sectional mean velocity of lighter fluid at the outlet and b is the breadth of the outlet.

Flow patterns were classified into five types from the exponential (stable) pattern to

* 工業力学第二講座

the parabolic (unstable) jet pattern.

If both θ and R decrease, the outflow changes from exponential to parabolic. This result shows good agreement with the experience that the flow approaches the exponential type when the density difference becomes large, or the velocity decreases, or the outlet breadth increases.

1. 序 論

河口二層流の興味ある問題の一つとして、河口を出る淡水の挙動があげられるが、中でも outflow の流況の問題は、上流から輸送される土砂の堆積、また沿岸海水汚染の問題と関連してきわめて重要である。また同時にその理論的背景は、長年にわたり各国の学者の研究によって次第に明らかになった平面噴流の考え方と、さらにこれとは現象を異にする淡塩二成層による密度流の考え方を結合せねばならない宿命を負っており未解決のしかも興味ある素材である。

実際の大河川における outflow の流況に関する研究は、沿岸海洋学や海岸工学の分野において理論的実測的に行なわれてきたが、その場合ほとんどのものが密度差を考えない二次元噴流の仮定に立っており、流れの外縁形状が放物線的であるとされている¹⁾。密度流を考慮した数少ない平面噴流の考え方は高野によって与えられているが²⁾、その理論的仮定には多少筆者等と意見を異にする所はあっても流況は筆者等の実測結果と似ており流れは双曲線的に海上に拡がるという結論で前記平面噴流のみの結論とは非常に違って注目すべきものである。

筆者の一人は、かつて数回にわたり石狩川河口の outflow の実測を行ない、流況が平面噴流のいわゆる放物線型と異なり、流線間隔が沖に向かい距離に対し指数関数的に増大することを確認した^{3),4)}。このような流況の場合常に海水は河口内部に入り込み、淡水の下を上流に向かって侵入し塩水くさびを形成していたので、このような観測結果は平面噴流だけでなく密度流の考えを導入せねば証明できないものと論じたのである。しかしその後淡水流量が増大すると、このような型がくずれ平面噴流型式の流れに近くなることは数度にわたる小規模の模型実験から経験されるようになり、結局河口の outflow は流量が増大すれば指数関数的流況から放物線的の乱流ジェットに移り変ることが実験的に立証されたのである。このような遷移条件は単に流量のみならず、二層流体の密度差にも、また流出口の規模にも関係することもあわせて確認されたので、本格的にこの遷移の水理条件を求める為に精密な実験をくり返し、ようやくその条件を明らかにすることができた。

今回の報告はこのように重力場で自由表面をもつ軽い流体が重い流体の上部にのり上げて開口部から半無限空間に流出する場合、どのような水理条件によって流況が指数関数的な安定の型から放物線的な乱流ジェットの不安定な型に移行するかを、理論の援護の下に実験的に明らかにした経過を紹介するものである。

2. outflow に対する理論的考察

非圧縮性粘性流体が重力場で二層を形成し、かつ定常的運動をしている場合の運動方程式は次式のとおりである。

$$(\mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V}) = \mathbf{K} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \mathbf{V} \quad (1)$$

ここに \mathbf{V} は流速ベクトルであり、 \mathbf{K} は外力のベクトルでこの場合は重力による質量力を示す。 ρ , p , ν はそれぞれ流体の密度、圧力、動粘性係数を示す。

流れは水平に近いので鉛直の速度成分は微小であり、これを無視するならば、圧力 p は静水圧のみとなる⁵⁾。従って上層、下層に対する運動方程式を各々独立に subscript 1, 2 で区別して書けばつぎのようになる。

$$(\mathbf{V}_1 \cdot \nabla) \mathbf{V}_1 = -g \nabla (h_1 + h_2 + h) + \nu_1 \Delta \mathbf{V}_1 \quad (2)$$

$$(\mathbf{V}_2 \cdot \nabla) \mathbf{V}_2 = -g \nabla (\tau h_1 + h_2 + h) + \nu_2 \Delta \mathbf{V}_2 \quad (3)$$

ここに $\tau = \rho_1 / \rho_2$ で、 g は重力加速度、その他は 図-1 に示すとおりである。

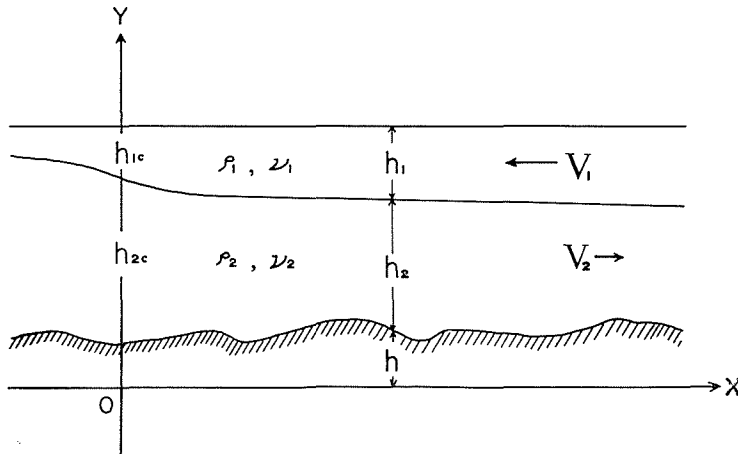


図-1 二層流のモデル図

上層と下層の接触面では、粘性の影響によって互いに運動を抑制する。その効果は (2), (3) 両式の右辺最終項によって示される。従って (2), (3) 式は互いに独立ではない。もし下層塩水層がほとんど静止して $\mathbf{V}_2 \doteq 0$ とおき得る場合でも、(3) 式の右辺最終項は以上の理由によって 0 とすることはできない。

ゆえに下層が静止しているときの両層の相対的運動を示す式は (2) 式から (3) 式を差引き、前記の条件を考慮して次式の如く得られる。 $1 - \tau = \varepsilon$ として、

$$(\mathbf{V}_1 \cdot \nabla) \mathbf{V}_1 = -\varepsilon g \nabla h_1 + \nu_1 \Delta \mathbf{V}_1 - \nu_2 \Delta \mathbf{V}_2 \quad (4)$$

さらに、上層と下層流体の粘性がこの報告の実験のようにほとんど等しい場合には $\nu_1 \doteq \nu_2 = \nu$

として

$$(\mathbf{V}_1 \cdot \nabla) \mathbf{V}_1 = -\varepsilon g F h_1 + \nu \Delta \mathbf{V}_1 - \nu \Delta \mathbf{V}_2 \quad (5)$$

となる。右辺の第一項は重力によるポテンシャル流を支配する項であり、第二、三項は粘性による運動量拡散を支配する項である。

ここで取扱わなければならない問題は流れの型であるのでその辺の推察をより明瞭にするために (5) 式をつぎの置換によって無次元化してみる。

$$\begin{aligned} F &= b^{-1} F_*, & \mathbf{V}_1 &= U \mathbf{V}_{1*}, & \mathbf{V}_2 &= U \mathbf{V}_{2*}, & h_1 &= b h_{1*}, & h_2 &= b h_{2*}, \\ h &= b h_*, & \Delta &= b^{-2} \Delta_* \end{aligned}$$

ここに b は開口部の水路巾、 U は開口部における上層流の断面平均流速である。これらを (5) 式に代入して次式を得る。

$$(\mathbf{V}_{1*} \cdot \nabla_*) \mathbf{V}_{1*} = -\theta^3 R F_* h_{1*} + R^{-1} (\Delta_* \mathbf{V}_{1*} - \Delta_* \mathbf{V}_{2*}) \quad (6)$$

ここに

$$\theta = \frac{(\nu \varepsilon g)^{1/3}}{U}, \quad R = \frac{bU}{\nu} \quad (7)$$

である。

(6) 式は上層流の流況を示す無次元化された方程式であるから、 θ , R が同一の値であるかぎり流れの型は同じということになる。逆に θ , R が変化すると流況も変る。従って outflow の型に関する実験は θ と R についてとりまとめればよいという見通しが得られる。

この式から流況の大体の予想を立てることができる。

もし流出の流速 U が大きくなれば $\theta^3 R$ は小さくなり、逆に R^{-1} は大きくなるので右辺第一項の密度差の効果はなくなり、第二項の粘性による拡散の項が顕著になるから、流れは密度差を無視した平面噴流の型に近くなるであろう。もし密度差が大きいときは ε が大きく、従って第一項の密度流の影響が顕著になってポテンシャル流の型式、すなわち指数関数的拡がりの流れになるであろう。さらに水路巾 b が大きくなっても同様に第一項が第二項を抑えてやはり指数関数的になると予想される。これらの傾向は模型実験や現地実測によって以前から経験されていることであり、よく符合する。

従って実験は θ と R の値によって流れがどのような pattern になるかを調べればよいことになる。

3. 実験装置

Outflow の観測には第 1 報と同一の実験水槽を使用しているが、一次元水路を水平にし、くさび先端で強い混合が起らぬように図-2 のように傾斜部を設けた点が異なっている。さらに貯水槽のバルブは 10 cc/s 以下の流量制御が困難なので水位差式貯水槽を自作した。その概

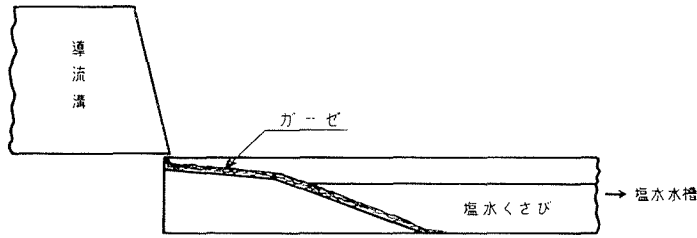


図-2 傾斜部 (ガーゼで蔽われた部分) を設けた一次元水路

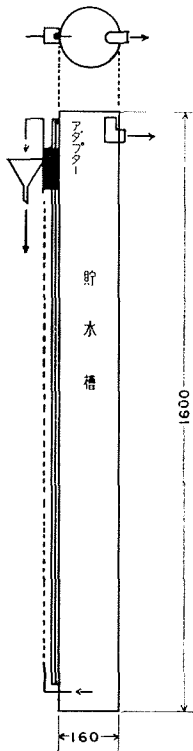


図-3 水位差式貯水槽。アダプターを上下させて微小流量の流出を制御する

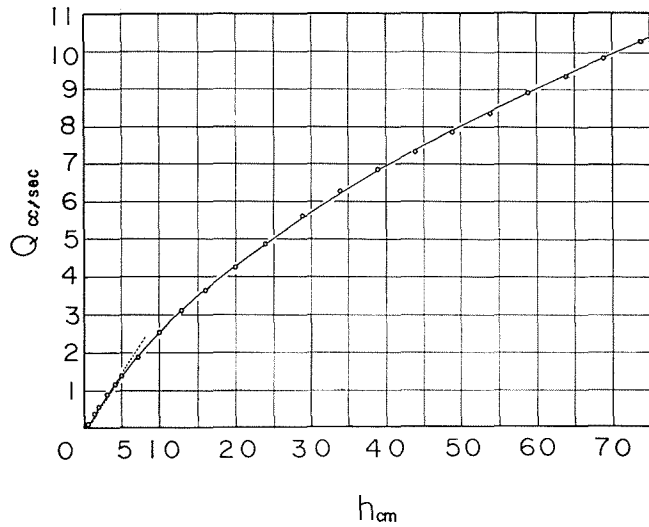


図-4 水位差式貯水槽流量特性図

略図を図-3に示す。この装置は0.02 cc/sの精度を有し約10.0 cc/sまで流出量を連続的に変えることが可能である。10.0 cc/s以上の流量が必要なときには、より太い導管を用いるか、または導管の数を増せばよいが本実験では10.0 cc/sまではこの水位差式貯水槽を用い、それ以上の流量に対しては第1報で紹介した貯水槽を使用している。水位差式貯水槽の導管アダプター出口の位置と流量の関係は数多くの測定の結果図-4に示すようになった。これを見ると流量のきわめて少ない1 cc/s以下では特性の傾向が変わっているのに気が付くが、その理由は1 cc/s以下では滴状流出となるからである。このような滴状流出の部分と連続流出の部分に分けて、その特性を二次曲線と仮定し最小自乗法で求めると次式のようなになる。

$$Q = -0.07587 + 0.31478 h \quad (\text{滴状流出})$$

$$Q = -2.377 + 1.4857 \sqrt{3.1169 + h} \quad (\text{連続流出})$$

ここに Q は流量 (cc/s), h は貯水槽水面と導管アダプター出口の水位差 (cm) である。こ

ようにして微小流量の読取り, または制御は, h の読取り, または h の調節によって自由に行なうことができた。

今回の実験では種々の ε を得るために数多くの濃度の塩水を作っており, 密度 ρ_2 は最小の場合 1.00026 ($\varepsilon=0.00026$) から最大では飽和に近い $\rho_2=1.15251$ ($\varepsilon=0.133$) にわたっている。とくに密度の小さい場合は温度によって ε に相当大きな差をもたらすのでその点を注意し, できるかぎり一定温度に近い状態で実験をするように心がけた。また逆に濃度の高い場合には密度の局部的不平衡によって発生する局部的流動がかなり発達するので長時間, たとえば一週間程度の放置が必要であった。

Outflow の pattern を決めるのには直接の視察あるいは模写, さらに写真撮影によった。流れの流線を目視するにはいろいろの方法が考えられるが, 初期の段階では着色した淡水を流す方法をとった。しかしこれでは流線がよく判らないので, 最後には一次元水路に 10 本の注射針を配置した流出装置を自作設置し, 蛍光染料フルオレッセインを溶解した水を針から静かに淡水に注ぎこんで, 流線を目視又は撮影を満足ならしめた。この流出装置は図-5 にその概略を示すが非常に有効であった。

比重の測定はすべて比重びんと精密天秤を使用した。塩水の密度は塩水作製後かなりの日数をかけた後でも鉛直方向に分布をもつのは避けられないので代表の密度を定める方法は重要なことになる。今回は水路の出口で鉛直 4~5 点の密度を測定しており, 最終的に結果をまとめるときには二層境界面下に存在する力学的静止点(無流面)の密度を採用した。塩水の採水にもまた注射針を使用した。

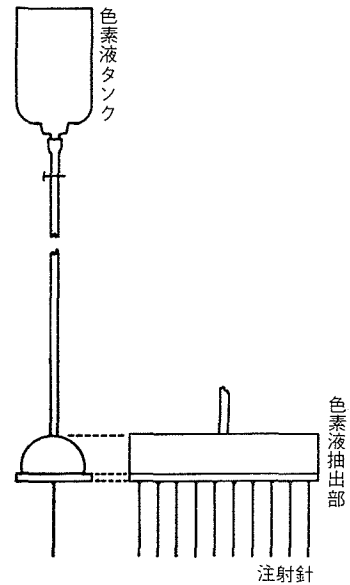


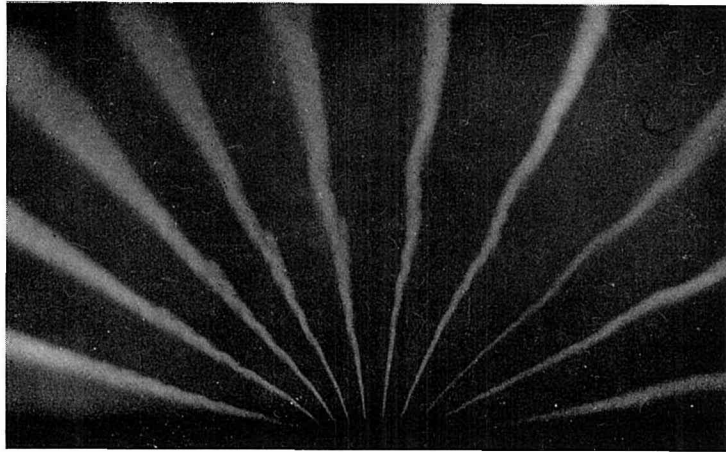
図-5 フルオレッセイン溶液注出装置

4. 実験結果および考察

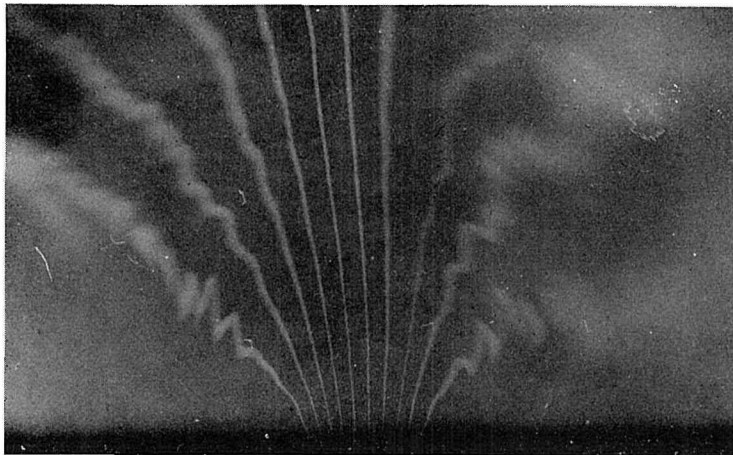
淡水の流量が増加するに伴って outflow の流況が指数関数的拡がりをもつポテンシャル流の形式から, 放物線の形状の乱流ジェットの形式に移行する傾向のあることはすでに第1報にて述べたところであるが, 今回の実験では流量の他に二層の密度差を与える ε や, 動粘性係数 ν あるいは水路開口部の巾 b などがこの遷移過程を支配する要因であることが明らかになり, しかもこれらによって作られる二つの無次元量 θ と R によってその遷移の条件が定量的に与えられることになった。

実験によって観測される流れの pattern を 5 種類に分類した。

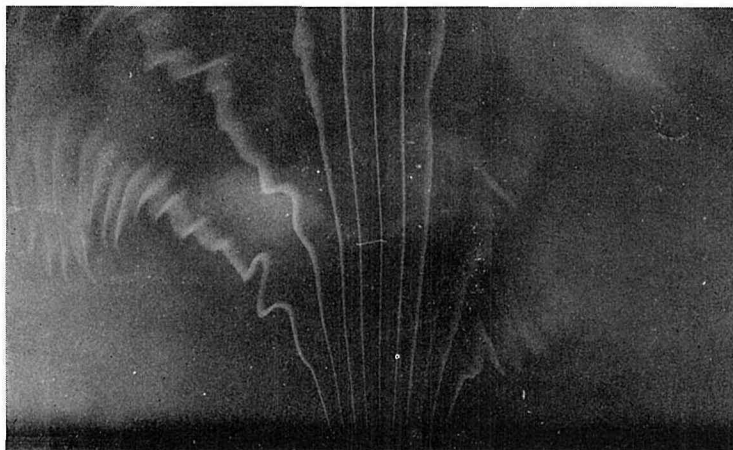
A 型を指数関数的ポテンシャル流とし, E 型を放物線の噴流としてその間に B, C, D のよう



A型

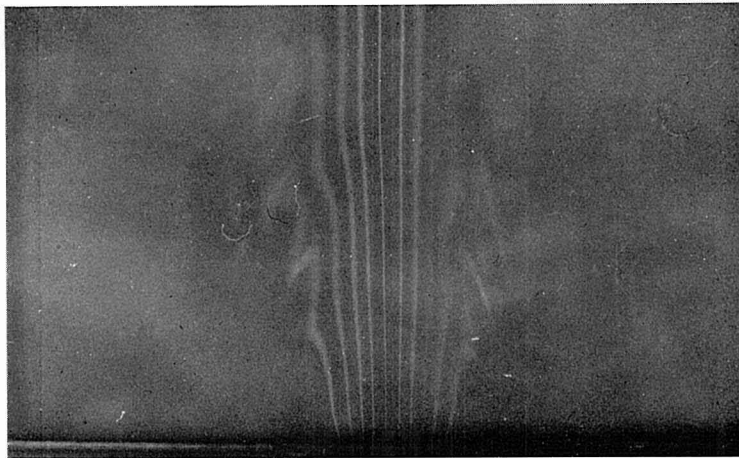


B型

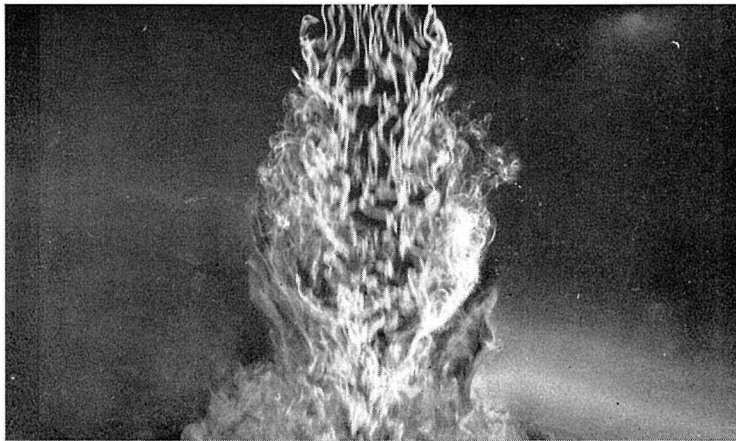


C型

図-6 Outflow の各 pattern を示す写真



D型



E型

図-6 Outflow の各 pattern を示す写真

な遷移過程を示す流れがある。これを図-6に示す。実験は各 ε について流量（または開口部の淡水平均流速 U ）を次第に増加せしめ、それに応じて流況がどの型に属するかを調べた。これらの実験結果は前述のように $R-\theta$ 図に記録した。これは図-7のとおりであって、この研究の結論を示すものである。 ε は 1.3×10^{-1} から 2.6×10^{-4} の間の範囲で変化させた。また流出口の淡水平均流速は開口部の水理条件 $U^2/\varepsilon gh_1=1$ (h_1 : 開口部淡水水深) と $Q=Ubh_1$ (Q : 淡水流量) とから h を消去してできる式

$$U = \sqrt[3]{\varepsilon g Q / b}$$

を用いて算出した。またレイノルズ数 R はこの実験では $100 \sim 10,000$ の範囲であった。

図-7の結果が示すように θ と R が共に大きいときは安定な流線のポテンシャル流的傾向であり、逆に小さいときは流線の不安定な乱流ジェットの型になることが示されており、理論的考察の節で述べた傾向と一致している。また U の増大、 ε の減少、 b の減少によって流れが指数関数的ポテンシャル流形式から放物線の噴流形式に移るといふ従来の経験とも全く一致し

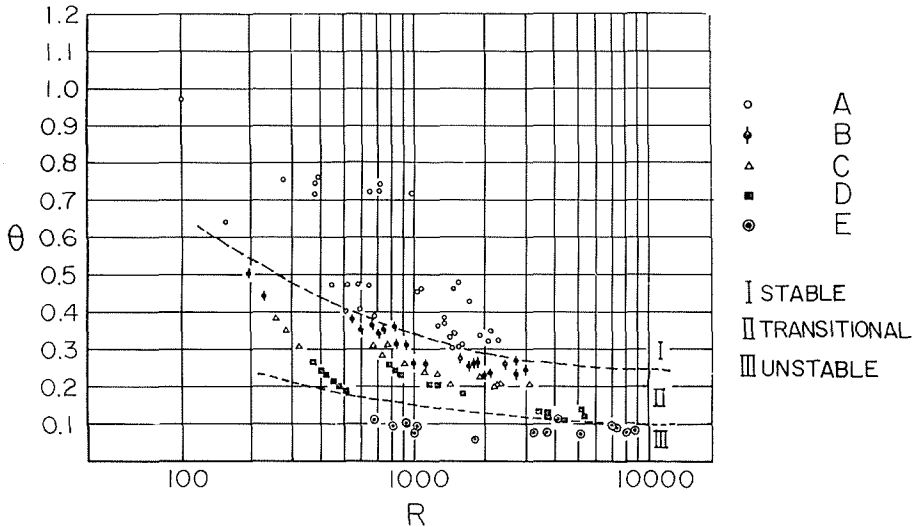


図-7 Outflow の pattern の遷移図。I は安定な指数関係のひろがりを持つ流れ。III は不安定な乱流ジェットの流れ。II は両者の遷移領域を示す。

ている。もし ε, b, ν を一定とすると $R\theta = \text{const.}$ となるので U を増加させると流れの型は $R-\theta$ 図において一つの双曲線に沿って A 型の方から B, C, D の遷移の型を通して E 型に移っていくことが理解される。

石狩川河口で指数関数的流況を観察した場合の水理条件は、 $\theta = 0.01$, $R = 2 \times 10^8$ であったが、この値は今回の実験の範囲外であって、このような値も包含する広範囲の実験が今後要求されよう。またこれにも関連するが今回の実験では開口部の巾 b は一定として扱ってきたが、今後はこれを変化させて $\theta-R$ 図を検討してみる必要もあると思われる。

以上により、二層の密度流を形成している水路開口部の outflow の pattern は R と θ によってその遷移の状況が明瞭に把握された。これは従来不明確であった河口外の噴流や密度流の関連性を明らかにしたものと見えよう。

本研究の一部は文部省科学研究費によったことを附記する。

文 献

- 1) Bates, C. C., & Freeman, J. C.: Inter-relations between jet behavior and hydraulic processes observed at deltaic river mouths and tidal inlets, Proc. 3rd Conf. Coast. Eng., Oct., 1952.
- 2) Takano, K.: On the salinity and the velocity distributions off the mouth of a river, Journ. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 10, No. 3, 1954.
- 3) 福島・柏村・八鍬・高橋: 石狩川の河口構造, 第8回海岸工学講演集, 昭和36年9月.
- 4) Fukushima, H. & Kashiwamura, M.: On the dynamical problems at the mouth of the Ishikari River, Coast. Eng. in Japan, Vol. 6, Dec., 1963.
- 5) 柏村: 河口における二重水層(2), 北大工学部研究報告, 第28号, 昭和37年3月.
- 6) 柏村・吉田: 密度流の研究(第1報), 北大工学部研究報告, 第41号, 昭和41年8月.