

河 口 密 度 流 の 解 析

柏 村 正 和*・吉 田 静 男**

1. 序

今回は昨年発表した河口を出る淡水の流れの型に関する研究においてその後行なった実験結果と、その他河口密度流の二、三の現象について行なった解析とか室内実験についてとりまとめられた部分を集めて報告する。

2. 河口を出る淡水の流れの型

昨年度の海岸工学講演会において筆者らは淡塩二層を形成する河口から流出する淡水の流れはその型が大別して2つ存在し、1つの型から他の型へ移行する遷移過程においてさらに細かく分けて3つの型が認められ、結局5つの型に分類されることを指摘した¹⁾。

図-1 (a) A型の流れ

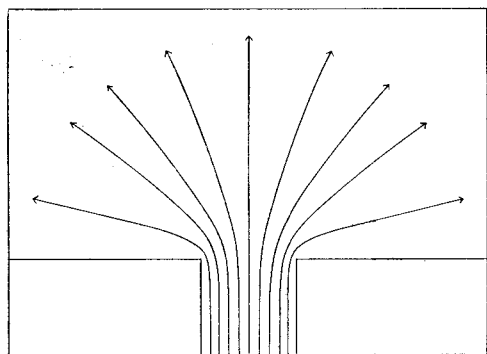


図-1 (b) B型の流れ

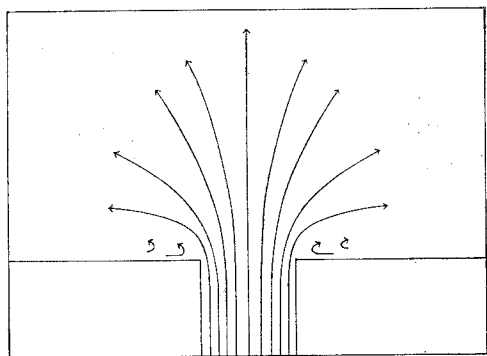


図-1 (c) C型の流れ

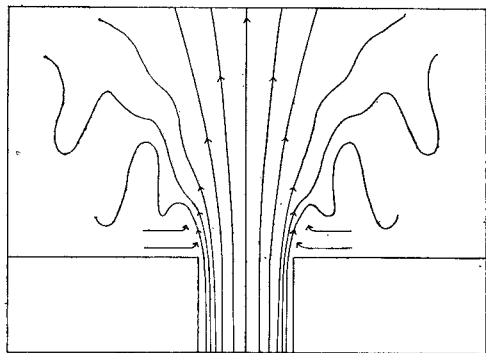


図-1 (d) D型の流れ

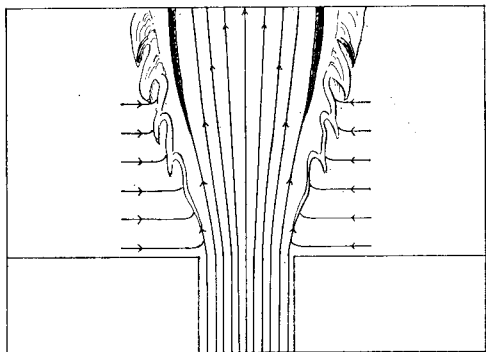
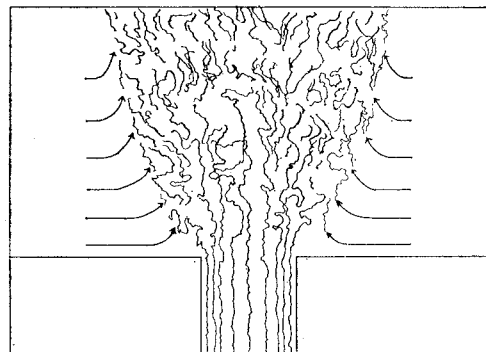


図-1 (e) E型の流れ



大別した2つの型のうちの1つは淡水流出速度のきわめて小さい場合で淡塩水の密度差が大きくしかも河口幅の大きな場合に生じこれを安定型またはポテンシャル流型(図-1のA型)と称したが、この流れでは各流線相互

* 正会員 理博 北海道大学教授 工学部工業力学第二研究室

** 北海道大学助手 工学部工業力学第二研究室

の間隔は河口の近傍においては距離に対して指数関数的な増大を示すものであって、実際の河口ではたとえば石狩川においては平水時にしばしばこれに近い型が観測されているものである⁹⁾。また別の一つの型は淡水流速が大きくまた淡塩水の密度差が小さく、さらに河口幅も小さいときに生じ易いものであって、これは平面噴流と同様のもので、これを不安定型または噴流型(図-1のE型)と称しており流れの外縁形状はほぼ放物線的である⁹⁾。

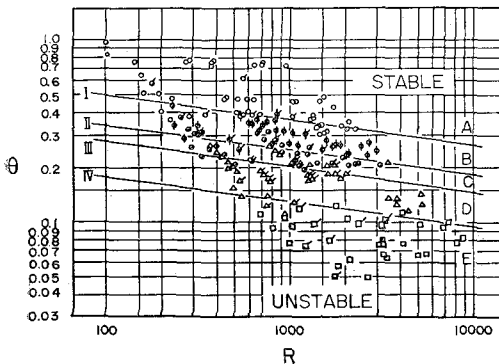
これら両極端の2つの型の間に存在する3つの型はつぎのような状況である。たとえばB型はA型において淡水流出速度が増加して河口両側の静止塩水を引きずる結果2次流が発生し、流れの外側が不安定になったもので、C型はさらに2次流の発達で流れを一層攪乱してその四方へのひろがりを抑制し、D型では2次流の勢力が前の型より増大して流れのひろがりをおさえ、乱れの発達を促すようなものである。その結果E型では流れは全く乱れ、一流体の平面噴流と同じような形態に至るのである。

このような流れの形態の変遷は簡単な理論的考察から $\theta = (\nu \varepsilon g)^{1/3} / U$, $R = Ub/\nu$ なる2つの無次元量により整理される。ここに ν は水の動粘性係数, $\varepsilon = 1 - (\rho_1 / \rho_2)$ で与えられ, ρ_1 は淡水密度, ρ_2 は塩水密度である。 g は重力加速度, U は河口における淡水の平均流速, b は河口幅である。

昨年度の講演会では片対数紙の両軸に θ と R をとり流れの型を図上に分類した。その際の実験では水路幅は8 cm にとり終始同寸法にて行なったものであるが、本年度は水路幅4 cm の場合について実験を行ない、その結果もあわせて図を作製した。図-2 がその結果である。図は両対数紙を用いてある。

図-2 実験結果

A型からE型までの各型の流れはこのような分類できる。
' のついたものは水路幅4 cm, 他は8 cm で行なったものである。



実験方法としては前回にも述べたが、食塩を十分に溶解した塩水層に1次元水路を経て淡水を微量供給してまずA型の流れを作り、次第に流量を増してB, C, D, Eの型を順次作っていく。塩水濃度を何種類も変えて同じ操作をくり返す。したがって1つの実験では $\theta R = \text{const.}$ に

なるので図-2では左上から右下に向かう1本の直線が1つの実験に対応する。○はA型を表わし●, △, □の順に順次B, C, D, E型を表わす。' のついたものは河口幅4 cmで行なった実験であり、その他は8 cmのものである。これによってA型は θ と R の大きな部分に、E型はそれらの小さな部分に現われることが示されている。各型の境は多少の出入はあるがほぼ勾配の等しい直線で示すことができる。この図に引いた直線の方程式は、それぞれつぎのとおりである。

$$AB \text{ 間 } \theta R^{-0.137} = 0.935 \dots \dots \dots (1)$$

$$BC \text{ 間 } \theta R^{-0.137} = 0.639 \dots \dots \dots (2)$$

$$CD \text{ 間 } \theta R^{-0.137} = 0.528 \dots \dots \dots (3)$$

$$DE \text{ 間 } \theta R^{-0.137} = 0.330 \dots \dots \dots (4)$$

水路幅を変えた2つの実験は共に図-2においてそれぞれの型の中に予期どおりに収まっており、 θR でとりまとめることの妥当性を示しているように思われる。

実際の河口では R は 10^8 の order になり θ もはるかに小さくなるので、これらの直線を延長して外挿するのは尚早であり、これらに対してはさらに実験または実地観測結果の資料を充実させて明らかにしていく必要がある。

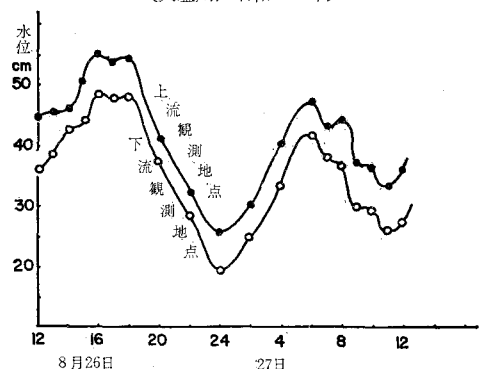
3. 潮汐に応答する河川内の水位と流動

近年塩水くさび等河口密度流の問題が活発に研究され、それにともなって定常的なくさびの状態は理論、実験、実測によりかなり明らかになってきている。しかし密度流の問題はまだ豊富な研究面を残しており、こしばらくは話題にこと欠くことがないと予想されるが、その中で塩水くさびの非定常問題は重要なものの1つと考えられる。

筆者の1人はかつて潮汐によって変動する河口内の二層流を天塩川で観測する機会を持ち非常に興味深い資料を得ているので⁴⁾それを紹介し、あわせてその解析結果を述べたい。

潮差の大きい海に面した河口では淡塩二層の混合が発達し、密度流は緩混合型、あるいは強混合型になること

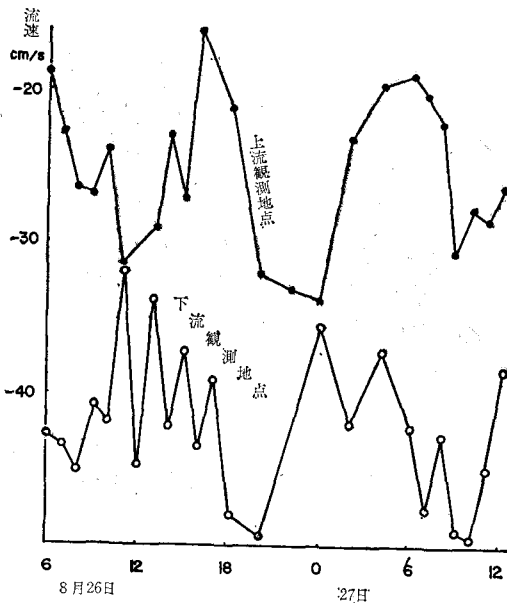
図-3 潮汐による河川内の水位変動
(天塩川, 昭和28年)



が知られている。しかし潮差が小さい場合、二層流は二層を保ちながら潮汐により変動し刻々興味ある phase を示す。

昭和 28 年 8 月の観測によると天塩川河口近く的一点(河口から 300 m 上流)とそれから 5 km 上流の一点における水位変化の観測結果は図一3に示すとおりであって、ほとんど同位相、同振幅で変化している。これはまた当時の潮位変動と全く同一の変化であることは他の資料から十分信じられる。

図一4 潮汐による河川内の表面流速の変動
(天塩川, 昭和 28 年)



図一4は同期間の同じ2地点における表面流速の変動を示したものである。かなり変動が激しいが、大きな傾向はやはり潮汐に定答していることがわかる。しかし水位の場合と異なり上流の流速変動は下流の値にくらべて約3時間位相がずれて現われていることが特徴的である。従来感潮河川では水深を H としたときに水位変動が $\sqrt{gH}$ で上流におよぶことはよく知られており、またその例証も多いが表面流速の変動についてはあまり知られていないように思われる。

河口から層間の抵抗を無視した二層流体の基本方程式は次式で示される⁴⁾。

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + g \frac{\partial h_1}{\partial x} + g \frac{\partial h_2}{\partial x} + g I_b = 0 \quad \dots (5)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + r g \frac{\partial h_1}{\partial x} + g \frac{\partial h_2}{\partial x} + g I_b = 0 \quad \dots (6)$$

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

$$\frac{\partial h_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial h_2}{\partial x} + h_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} = 0 \quad \dots (8)$$

u は各層流速, h は各層の厚さ, 添字 1, 2 はそれぞれ

淡水, 海水に相当する。 I_b は河床勾配, r は淡, 塩水の密度比である。

u, h に潮汐に定答する周期解があるものとして,

$$u_1 = \sum_n u_{1n}(x) e^{i n \omega t}, \quad u_2 = \sum_n u_{2n}(x) e^{i n \omega t}$$

$$h_1 = \sum_n h_{1n}(x) e^{i n \omega t}, \quad h_2 = \sum_n h_{2n}(x) e^{i n \omega t}$$

とおけるものと仮定する。なお定常項であることを強調するために $u_{10} = U_1, u_{20} = U_2, h_{10} = H_1, h_{20} = H_2$ とおく。

また、以下多少大雑把な設定であるがつぎのように取扱う。すなわち塩水層の定常流 $U_2 = 0$ とおき、塩水層の定常的厚さ $H_2 \gg H_1$, しかも $H_2 \rightarrow \infty$ とする。実際のくさびではもちろん H_2 は有限でしかも河口でも H_1 にくらべて圧倒的に大きいわけではないが、潮汐のような長周期波に基づいて起こる前記のような現象では種々の検討の結果、このような設定によって現象の見積りを大きく誤ることはないと思信したからである。

また考えている2地点間の距離 5 km は当時のくさびの長さ 26 km に比し、ごく一部と考えて近似的に U_1, H_1, H_2 は一定とする。以上を考慮して式(5)~(8)の諸式から表面流速 u_1 および、水位に相当する $h_1 + h_2$ を基本周波数の項まで求めるとつぎようになる。

$$u_1 = U_1 + \sqrt{\frac{(1-r)g}{H_1}} \left\{ C_1 \exp i \sigma \left(t - \frac{x}{\sqrt{(1-r)gH_1 + U_1}} \right) - C_2 \exp i \sigma \left(t + \frac{x}{\sqrt{(1-r)gH_1 - U_1}} \right) \right\} \quad \dots (9)$$

$$h_1 + h_2 = H_1 + H_2 + T \exp i \sigma t + (1-r) \left\{ C_1 \exp i \sigma \left(t - \frac{x}{\sqrt{(1-r)gH_1 + U_1}} \right) + C_2 \exp i \sigma \left(t + \frac{x}{\sqrt{(1-r)gH_1 - U_1}} \right) \right\} \quad \dots (10)$$

ここに T は潮汐による振幅, C_1, C_2 は内部波の影響に基づく係数である。 $T \exp i \sigma t$ の項は潮汐と同位相で水位が変動することを表わしている。これは $H_2 \rightarrow \infty$ と設定したために生じたもので本来は $\sqrt{g(H_1 + H_2)}$ の速度で伝播するものである。いま上流に向かって x 軸の正をとるものとすれば、内部波にもとづいて上流におよぶ波動は式(9), (10)の C_1 のかかった項で表わされるが式(10)では $(1-r)$ がかかっており、これは非常に小さい値であるため $T \exp i \sigma t$ の項にくらべてこの項は微小であると考えられる。これから明らかなように表面流速の変動は内部波による $\exp i \sigma \left(t - \frac{x}{\sqrt{(1-r)gH_1 + U_1}} \right)$ が支配的であるのに対し、水位変動は外部波による $\exp i \sigma t$ が支配的である。したがって2地点間の水位変動が同位相に観測されるのに対して表面流速の変動は $\sqrt{(1-r)gH_1} + U_1$ (U_1 は負) という速度できわめてゆっくりと上流に波及することが理解される。試みに当時の記録から $r = 0.98, H_1 = 3.8 \text{ m}, U_1 = -0.43 \text{ m/s}$ を代入すると2地点間 5 km を伝播するのに約3時間と計算され、きわめてよく現象を説明することができる。以上是比较的簡

略化した考察であったが現在詳細な考察を進めているので
でまとめ次第再び問題として取り上げたい。

参 考 文 献

- 1) 柏村・吉田：河口を出る淡水の流れ，第 13 回海岸工学講演会講演集，昭和 41 年 12 月。
- 2) 福島・柏村・八鍬・高橋：石狩川の河口構造，第 8 回海岸工学講演会講演集，昭和 36 年 9 月。
- 3) Fukushima, H. & Kashiwamura, M.: On the dynamical problems at the mouth of the Ishikari River, Coast. Eng. in Japan, Vol. 6, Dec., 1963.
- 4) 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.
- 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) Kashiwamura, M.: Variation of surface-velocity in a tidal river, Jour. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 19, No. 1, March, 1963.