

東京大学工学部
東京大学大学院

正員
学生員

玉井 信行
池田 清宏

1. はじめに

感潮域の混合形態は、一般的に、弱混合、緩混合、強混合に分類される。不連続な密度分布を有する2層流れはいわゆる塩水楔で、原理的には弱混合の場合にのみ適用される。しかしながら、通常行なわれる1次元解析では鉛直方向に平均操作が施されるので、連続的な密度分布を考慮しても2層流れに置換できる場合が多い。この場合には、分布曲線の勾配あるいは密度の絶対値などを基準に塩水層と淡水層とに区分する。こうした場合の2層モデルは緩混合型の感潮部にも適用できると考えられる。

河川で通常見られる2層流では常流が出現している。従って、定常流に対する数値計算は下流から行なうのが理に適っている。また非定常計算においても下流端の条件を知ることが重要である。本論文ではこうした下流端における条件を河口条件とよび、これを理論的に決定する過程を検討した。

2. 経験的な手法

ここでは内部境界水深の生ずる位置を水理的河口と呼ぶ。そしてこの位置を図-1に示すように地理的河口より x_0 だけ沖合に設定した。 x_0 の値を変化させ、実験¹⁾の内部境界面に最もよく適合する場合の x_0/b_0 の値を示したのが表-1である。

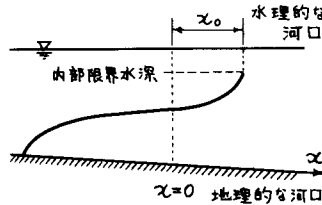


図-1 水理的な河口位置

Run	x_0 (cm)	x_0/b_0
3	320	11
7	300	10
11	180	6
14	500	17
18	200	7

表-1 水理的河口位置の移動量

たのが表-1である。計算の前提は不連続な密度分布、界面での連行は考慮せず、界面抵抗係数と¹⁾は玉井・珠枝²⁾のものを用いた(式(1)参照)。表-1に見られるように水理的な河口位置は、地理的河口から水路幅の5~15倍程度沖側の点となる。しかしながらこの移行量は実際の河口流出の形態から推測される値に比べて大きく過ぎると共に、最適な移行量が一定していない。従ってこうした方法は便宜的に用いるにしても、その適用についてはかなりの注意を要すると思われる。

3. 連行を考えた水面形状方程式に基づく考察

最近では境界面での混合を考慮した塩水楔の挙動の解析も行なわれている(例えば(3))。定常な塩水楔の場合には下層が停止しているのと同流質の移動は常に下層から上層に向かうことになる。従って、上層は下流側に向って流量が増加する流れとなり、下層は先端部においては流量が0となるが、塩水楔が停止するためには上層への連行を補うだけの海水補給が海側から行なわれなければならない。x軸を海側からとると、下層は楔の先端より徐々に負の流量が増大する流れとなる。本研究は連行を考えた場合のこうした流れの特性を水面形状方程式を通して究明し、合理的な河口条件を導こうとするものである。定常状態に対する基礎方程式は次式となる。

$$\begin{aligned} & -i + (1 - \frac{\rho' - \rho}{3\rho}) \frac{dR}{dx} + \frac{dR'}{dx} - \frac{\alpha v^2}{gA} \frac{dA}{dx} + \frac{\alpha v}{gA} \frac{dQ}{dx} + i_f + \frac{R}{3\rho} \frac{d\rho}{dx} = 0 \\ & -i + \frac{\rho}{\rho'} \frac{dR}{dx} + \frac{dR'}{dx} - \frac{\alpha v'^2}{gA'} \frac{dA'}{dx} + \frac{\alpha v'}{gA'} \frac{dQ'}{dx} + i_f + \frac{R}{\rho'} \frac{d\rho}{dx} = 0 \\ & \frac{dQ}{dx} = E |v - v'| b_i, \quad \frac{dQ'}{dx} = -E |v - v'| b_i, \quad \frac{d\rho}{dx} = \frac{v - v'}{v} \frac{\rho' - \rho}{A} E \\ & f_i = 0.09 (Re F_d)^{-1/2}, \quad E = 6 \times 10^{-3} F_d^{10/3} \end{aligned}$$

ここにプライムを付した量は下層に関する量で、 Re は上層のレイノルズ数、 F_r は密度フルード数、 E は連行係数で須賀³⁾によるものである。この基礎式は上層の密度分布が線形に変化する場合を対象にしており、上下層の密度がそれぞれ一定で不連続な場合は第1式の第2項の係数が1であるほか、 $ds/dx=0$ とすればよい。また、連行を無視する場合には $E=0$ とする。水面、界面、底面の鉛直座標をそれぞれ S 、 H 、 B とすれば、式(1)は次の形に表わせる。

$$(2) \frac{ds}{dx} = \frac{f_1(S, H, Q, Q', x)}{g(S, H, Q, Q', x)}, \quad \frac{dH}{dx} = \frac{f_2(S, H, Q, Q', x)}{g(S, H, Q, Q', x)}$$

停止した塩水楔の場合には自由水面は水平となるので、 Q, Q' 、 S をそれぞれ $f_2(H, x)=0$ を満す界面位置と等流水深と呼び、 $g(H, x)=0$ を満す組を限界水深と呼ぶ。

河道部から海へ流出する淡水は浮力のため横方向に拡がるので、その特徴を1次元解析で表現するため図-2に示すように側面を水路幅を放物線的に拡げ、かつ水深も増大させた。このようにして支配断面の出現位置を調べた一例が図-3である(点aをみる)。この場合の下層流量は連行を補償するための量であるが、その数値は例示用のものである。図-4に実験結果との比較を示す。曲線Aは連行なし、密度不連続、限界水深から出発した計算結果であり、Bは連行考慮、密度連続分布、支配断面より出発した結果である。この場合には楔先端において上層流量が淡水流量、下層流量が0となるまで支配断面位置での流量の仮定を反復して行っている。図-4の例は支配断面からの計算が実験とよく一致した例であるが、予測が一致しない例もあり、不規則な河道の突河川への適用を含め、今後検討すべき課題もある。しかしながら支配断面モデルによれば河口の条件は一義的に決定され、界面は常流から射流へと滑らかに接続し、水面曲線の一般的な挙動とも一致する(従来の跳水モデルは逆)。そして射流状態が近付くと連行量が非常に大きくなるので、内部跳水という不連続現象も考慮せざるべし物理的には同様の現象が出現すると思われる。

また利根川などの実験⁴⁾によると河口付近では密度フルード数が1の周りで変動していたり、塩水くさびが河口を出て0.5 km付近で潜り始め、1~1.5 km付近で湧出することが報告されている。こうした現象は図-3の水面形曲線の特徴を考えると定性的には出現の予測ができる。図-3の符号は界面の勾配を示し、点(b)は渦状点に似た性質を示す。従って点(b)付近では内部跳水が生ずると思われる。河口部での水路幅は30 cmを12演算しているの、この場合(b)点は幅の3倍程度沖合の位置となる。より詳細な議論を行うには基礎式に含められている係数、あるいは河口部の状況についてさらに実験を知ることが重要と考えられる。

参考文献

- 1) 玉井信行：河口密度流の研究，東京大学卒業論文，1964.
- 2) 玉井信行，浅枝 隆：塩水2層流境界面における抵抗係数について，土木学会論文報告集第271号，1978.
- 3) 須賀 勉三，高橋 晃：混合を考慮した河口からの塩水くさびの型上，第18回水講，1974.
- 4) 須賀 勉三，高橋 晃：河口流出型に関する実験に基づく考察，第24回水講，1977.

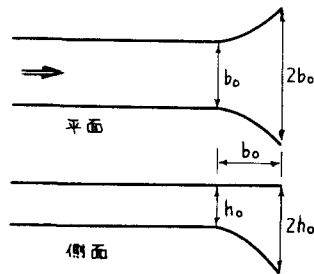


図-2 数値計算上の水路形状

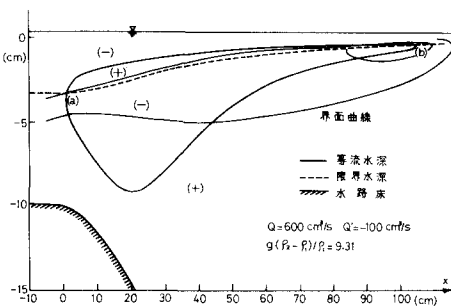


図-3 支配断面と界面曲線

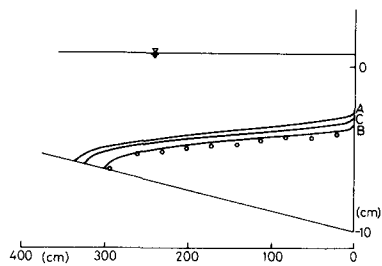


図-4 支配断面モデルと実験値との比較例