

底層密度流の非定常挙動 (1)

山口大学工学部 学〇水 沼 道 博
 山口大学工学部 正 羽田野 袈裟義
 九州大学工学部 正 平 野 宗 夫

1. まえがき

前報¹⁾では、自然災害と密接に関連する底層密度流として貯水池内の濁水密度流、斜面下降風(冷気流)、山腹における火山ガスなどの流動を想定し、その非定常流の基礎式を特性曲線網を用いて解析することを試みた。しかしながら、初期条件や境界条件の設定には不十分な点を残していた。今回、初期条件、境界条件について若干の考察を行なったのでここに報告する。

2. 流れ場の設定と解法の概要

図-1のように上層、中層、底層の3層流を考える。斜面の上流側延長線上の適当な位置を原点0とし、図のような座標系を考える。いま何らかの原因で上層と中層の境界に重力波が発生し、このため底層流が時間的・場所的に変動すると考える。上層・中層の内部境界面を $z = \eta(x, t)$ 、底層流の流動厚さを $\delta(s, t)$ 、底層の断面平均流速を $u(x, t)$ とし、底層流を非定常1次元(s 方向)問題として取り扱う。簡単のため圧力は各層において静水圧分布にしたがうと仮定し、連行を無視する。

基礎式は底層流の連続式、および運動量の式である。これらを連立させて $u(s, t)$ 、 $\delta(s, t)$ を解く。運動量補正係数を1とおくと、開水路非定常流についてのMassauの方法がそのまま適用できる。すなわち、 $C^2 = \Delta \rho_2 / \rho \cdot g \delta \cos \alpha$ を導入し、 $\tau_i - \tau_b = -\rho(f_i + f_b) |u| u$ とおくと、連続式と運動方程式は式(1)および(2)で表わされる。

$$2 \frac{\partial C}{\partial t} + C \frac{\partial u}{\partial s} + 2u \frac{\partial C}{\partial s} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial s} + 2C \frac{\partial C}{\partial s} = -\frac{\Delta \rho_1}{\rho} g \frac{\partial \eta}{\partial s} + \frac{\Delta \rho_2}{\rho} g \sin \alpha - \frac{1}{C^2} \frac{(f_i + f_b) |u| u}{\frac{\Delta \rho_2}{\rho} \cos \alpha} = G(u(s, t), C(s, t)) \quad (2)$$

式(1)と(2)の和および差を特性曲線表示すると、

$$\text{特性曲線 } \omega_+ : ds/dt = u + C \text{ 上で } d(u + 2C)/dt = G(u(s, t), C(s, t)) \quad (3)$$

$$\text{特性曲線 } \omega_- : ds/dt = u - C \text{ 上で } d(u - 2C)/dt = G(u(s, t), C(s, t)) \quad (4)$$

式(3)と(4)を適当な初期条件と境界条件のもとに解けば、 $u(s, t)$ 、 $C(s, t)$ を求めることができる。

3. 初期条件・境界条件

開水路の非定常流と同様、初期条件として $u(s, 0)$ と $C(s, 0)$ が必要である。また、境界条件として、一般に常流の場合上流側境界 $s = s_s$ での $u(s_s, t)$ または $C(s_s, t)$ 、そして下流側境界 $s = s_E$ での $u(s_E, t)$ または $C(s_E, t)$ が必要で、射流の場合上流側境界 $s = s_s$ での $u(s_s, t)$ と $C(s_s, t)$ が必要である。なお、開水路定常流では、流量を与えフルード数に応じて水深の境界条件を与えて水面形を求めるが、このことを本解析法と照らし合わせると、上流端で流量(一定)を与えていることがわかる。

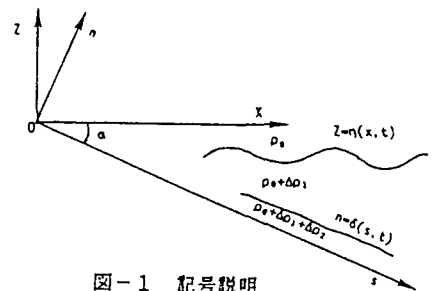


図-1 記号説明

さて、ここで対象とする流れでは、流れの状態がある区間では射流である区間では常流という状況が各時刻において現われる。したがって計算上は、上流端を含みその下流部分、および下流端を含みその上流部分の流れが常流・射流のいずれかを各時刻において判定し、対処することが必要である。また、各時刻において、射流・常流の境界点を計算区間内の新たな境界条件地点（境界条件は内部フルード数が1）として計算する。以下、実際に問題となると考えられるいくつかの初期条件・境界条件を検討する。

3. 1 初期設定と初期条件：

初期（ $t=0$ ）において、上層・中層の境界面が水平な状態にあり、底層流の定常状態が実現されており、この状態から境界面に $\eta = A \sin(2\pi t/T) \cos(2\pi s/L) + \eta_s$ の形で重力波が起こるケースを考える。この時、初期条件は流量が与えられていれば開水路と同様フルード数に応じて境界条件を与えることにより C と u の初期分布として求められる。

3. 2 流れの状況と境界条件

まず上流側境界条件を検討する。上流側境界条件は常流では1個、射流では2個必要である。したがって、最少限1個の上流側境界条件としては、色々考えられるが、感潮河川の非定常流の場合³⁾と同様、上流端の流量の時間的変化を与えればよいであろう。上流側境界条件地点周辺で限界流や射流が生じる場合この点で境界条件がもう一つ追加される。たとえば、ニオス湖の火山ガス災害²⁾のようにカルデラの縁からオーバーフローした火山ガスが長い急斜面を流下する場合、カルデラの縁で支配断面が生じるはずで、ここを上流側境界条件地点（境界条件はフルード数が1）とすることが出来る。また、濁水が貯水池に流入する場合、福岡ら⁴⁾に倣って潜入点での流動厚さを評価し対処することが出来る。解析対象区間上流端より上流が長い急勾配斜面（射流）の場合、非定常流では上流端の明確な境界条件はみあたらない。

次に下流側境界を検討する。下流側境界としては、たとえばダム湖の底層密度流が底部に溜っていくような場合と、ある地点から勾配がより急勾配に移行するケースが考えられる。前者の場合、次々に流入してくる底層流流体が蓄積されるため、この体積増加から次々刻々下流端の流動厚さを評価し、これを下流端の境界条件とすることが必要である。後者の場合、下流の影響がないケースでは勾配変化点が支配断面となるとしてこれを下流側境界条件とすることが出来る。勾配変化点下流で底層流流体が蓄積し、下流の影響があるケースでは、潜りぜきと同様に考えればよい。すなわち、この点より僅かに下流の内部境界面高さから評価される流動厚さを境界条件として採用することにし、これが限界流の条件から求まる流動厚さ h_c 以下になる部分は h_c とする方法である。また、上層で内部波を生じていると、それにより底層・中層の境界面が変動する。これは台風時の海面上昇の評価法に倣えば良いが、この場合も下流端の流動厚さが h_c 以下になる時は上と同様の処理が必要であろう。

4. 結び

以上、非定常底層密度流の計算について、境界条件に重点をおいて述べた。開水路流れな場合ととかなり重複するが、現実の状況を反映させる工夫が必要である。具体的な計算例は講演時に示す。

参考文献

- 1) 羽田野・住田：重力波の生じた流体中下部を流動する下層密度流の脈動、第46回土木学会年構、1991。
- 2) 金成誠一：ニオス湖ガス災害の原因と突発過程、自然災害特別研究；火山ガス災害ワークショップ報告書、pp.89-112,1987。
- 3) 岸ら：Digital Computer による感潮河川の流れの計算、土木学会北海道支部、技術資料第20号、p24-40、1964。
- 4) 福岡ら：2次元貯水池密度流の潜り込みと界面形状土木学会論文集No.302,pp55-65,1980。