

II-249

断面急変部における密度成層流の
水理学的挙動の実験的研究

東京理科大学大学院

学生員 野田 祥一

東京理科大学大学院

学生員 今井 元喜

東京理科大学理工学部土木工学科

正会員 大西 外明

1. 研究の背景と目的

河川や海などでは、密度を異にする流体が層状をなして流れている密度成層流が形成される。これが河床や海底などにある突起物を越える際（例えば、海底山を持つ海峡部付近の発電所などで、海に冷却水を放水する場合など）に、どのような水理学的挙動を示し、またそれが周辺に及ぼす影響についても知る必要がある。ところが、現在のところこれらの突起物のようなものを越える密度流、つまり断面急変部における密度流についての系統的な研究は十分なされていない。そこで、本研究では水路底に堰を設けることで突起物を越える密度流を再現し、その時の密度流の水理的性質を実験により解明することを試みた。なお、二成層流の場合については先に報告したが、本報告では三層の流れについて論じる。

2. 実験内容

密度成層状態での定常流を水槽内に作ることは困難なため、本研究ではあらかじめ図1のような水槽に密度の異なる食塩水で三層の密度層をつくり、堰を移動させることによって相対的に堰を越える密度流を再現することにした。

実験条件は、層厚を三層、上層密度 $\rho_1 = 1.0000 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ 、中層密度 $\rho_2 = 1.0072 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ 、下層密度 $\rho_3 = 1.0145 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ とする。また、全水深を一定とし、層厚を変える。実験の方法としては、中層水を着色することで密度流を可視化し、その際に界面形状、界面水深についてデータを測定する。

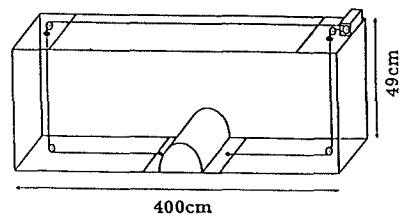


図1. 実験水槽

3. 内部界面形状についての解析及び考察

密度成層の場合は、堰の移動速度の増加、すなわち流量の増加にともない堰の下流では、上層と中層、中層と下層とが混合してしまい、この境目の判別がたいへん困難になることが多い。そこで上層と中層、中層と下層の間にある境目、つまり内部界面に着目して、解析を行う。また三層流においては内部界面が上方と下方の二つ存在するが、本研究では下方の内部界面の水理的性質に注目して解析することにした。

まずビデオ映像より内部界面形状に着目すると、以下の3パターンに分類することができる。

- (1) 上方の界面の最も高くなる位置が、下方の界面の最も低くなる位置に比べて上流側にある。
- (2) 上方の界面の最も高くなる位置が、下方の界面の最も低くなる位置に一致している。
- (3) 上方の界面の最も高くなる位置が、下方の界面の最も低くなる位置よりも下流側にある。

これらの界面形状は、流速が大きくなるにつれて、(1) $\Rightarrow$ (2) $\Rightarrow$ (3) と変化していくことがわかった。また各層を一定とし流量を変化させた時に下方の内部界面が最も低下する点での内部界面形状について考えてみると、(2)のパターンに相当しているという事がわかり、これは(1)や(3)に比べて混合が下の方で起こっていることがわかった。さらに、上方の界面は下方の界面よりも上流側で混合を起こしていることも明らかとなった。

4. 内部界面高さをを用いての解析

以上の内部界面形状の観察結果から、内部界面水深と流量の2つの間には何等かの関係があるのではないかと考えられる。そこで、図2のような三層流を考え、同一堰移動速度での最も低くなる下方の界面を h_{I23} 、そのときの上方の界面を h_{I21} と定義し、流量の無次元量としての複合フルード数 G_3^2 を用いて、 $h_I^* \sim G_3^2$ の関係を図示すると、図3のようなになる。これらの無次元量は以下に示すものとする。

$$\text{無次元内部界面高さ: } h_{I23}^* = \frac{h_{I23}}{H_0}, h_{I21}^* = \frac{h_{I21}}{h_0}$$

$$\text{複合フルード数: } G_3^2 = Fr_{12}^2 + Fr_{21}^2(1 - F_1^2) + Fr_{23}^2 + Fr_{32}^2 - Fr_{12}^2 Fr_{23}^2(1 - F_1^2) - Fr_{12}^2 Fr_{32}^2 - Fr_{21}^2 Fr_{32}^2$$

$$\text{内部フルード数: } Fr_{12}^2 = \frac{q_1^2}{g_{21} h_1^3}, Fr_{21}^2 = \frac{q_2^2}{g_{21} h_2^3}, Fr_{23}^2 = \frac{p_2 q_2^2}{\rho_3 g_{23} h_2^3}, Fr_{32}^2 = \frac{q_3^2}{g_{23} h_3^3}$$

$$\text{フルード数: } F_1^2 = \frac{q_1^2}{g h_1^3}, g_{21} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} g, g_{23} = \frac{\rho_3 - \rho_2}{\rho_3} g$$

ここで、 H_0 : 全水深、 h_i : 各層における水深、 q_i : 各層における単位幅当りの流速、また、 $i = 1, 2, 3$ で、添字1は上層、添字2は中層、添字3は下層である。この $h_I^* \sim G_3^2$ のグラフより分かるように、 h_{I21}^* と h_{I23}^* とは、性質の異なる2つの領域に分けられ、各領域におけるこれらの関係はそれぞれについて2本の直線に近似することができる。

次にこの屈曲点付近のエネルギー的考察を得るために、図4のような無次元下層エネルギー E_3^* と無次元内部界面高さ h_{I23}^* を用いて、それぞれの堰の移動速度を変化させた曲線を描いてみた。このときの E_3^* は以下の式で表される。この図4のエネルギー曲線が極値をとる時、一樣流での限界状態に相当する流れが生じるので、屈曲点の複合フルード数に相当する流れを上流でもつとき、堰の下流の内部界面が最も低下する点において $G_3^2 = 1$ の限界流になることがわかる。また h_{I23}^* が極小値と極大値の間の領域に点がのる場合の流れは常流状態であり、それ以外の曲線上に点がのる場合には射流状態であるので、屈曲点の流量より小さい流れでは常流状態、屈曲点の流量より大きい流れでは射流状態であると言える。

$$\text{無次元下層エネルギー: } E_3^* = h_3^* + \beta + \frac{1}{2} Fr_{32}^2 h_3^* + \frac{1}{2} Fr_{23}^2 h_2^*$$

$$\text{ただし、} h_2^* = \frac{h_2}{H_0}, h_3^* = \frac{h_3}{H_0}, \beta = \frac{b}{H_0} \text{ とする。}$$

以上のことから、断面急変部における三層の密度流の下方の内部界面の水利的挙動は、今井らの研究により解明された二層流における内部界面の現象に、類似していることが明らかになった。これにより、多層流の内部界面の水利的挙動も最も下の界面から順に二層流の内部界面と同様に変化していくと考えられる。

参考文献: 今井元喜: 堰を越える2層密度流に関する実験的研究

土木学会第50回年次学術講演会公演概要集

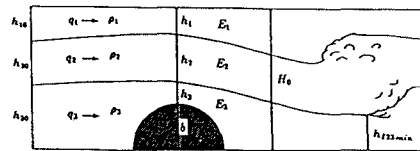


図2. 堰を越える3層密度流

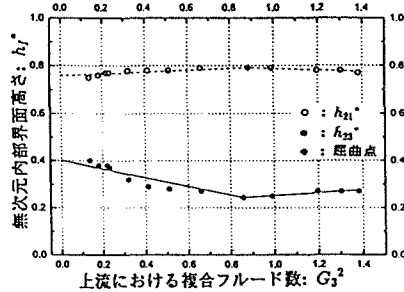


図3. 内部界面曲線

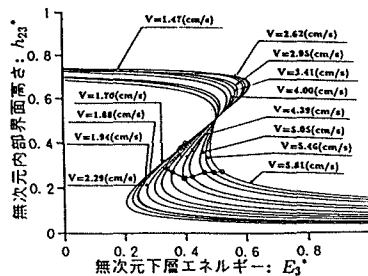


図4. エネルギー曲線