

堰を越える2層密度流に関する実験的研究

東京理科大学大学院

学生員 今井 元喜

東京都庁

野口 英樹

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

貯水池においては、初春から晩秋にかけて、水温差によって生じた密度差のある流体が層状を成している密度成層が形成され、そこへ洪水等によって、濁水が流入すると長期間下層に停滞する。この長期停滞する濁水塊が、貯水池内の水質悪化の主要因となっている。本研究では、貯水池底部に設けた堰によって、内部界面の混合を促進させ濁水を排水する方法に注目し、その時の密度流の水利的性質を実験により解明することを試みた。

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のような水槽内に密度の異なる食塩水で2層の密度層を作り、堰を移動させることにより堰を越える密度流を再現することにした。表1の実験条件に基づいて、上層水にフロレンス・ソーダを溶解させ、上下層水の色分けをし密度流を可視化することにより、内部界面の低下の程度 h_I を測定した。

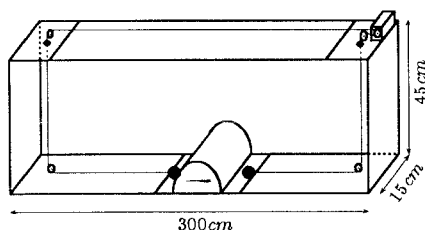


図1．実験水槽

表1．実験条件

層数	2層
密度	上層 $\rho_1 = 1.0000$ 下層 $\rho_2 = 1.0145(g/cm^3)$
実験数	全水深を3パターン それぞれ層厚を6～8種類 堰移動速度6～10種類変化

3. 内部界面高さを用いての解析

図2のような2層流を考え、解析では流れ全域における全水深の変化はないものとし、内部跳水が起こるまでは、内部界面の混合は生じないとした。1994年度の野口らの研究で、以下のようなことが明らかとなっている。詳しくは、参考文献の1を参照。

図3は、横軸に流量の無次元量として堰の上流における複合フルード数 G_2^2 、縦軸には内部界面が最も低下した時の水深 h_{Imin} を全水深 H_0 で割って無次元化した h_{Imin}^* としたグラフで、流量に対する内部界面の低下の程度を表す曲線である。 G_2^2 と h_{Imin}^* の関係は内部界面の低下の傾きが異なる2本の直線で近似でき、屈曲点(2直線の交点)が生じることが分かっている。複合フルード数 G_2^2 は以下の式で表される。

$$G_2^2 = Fr_1^2 - Fr_2^2 + \frac{e_2 - e_1}{\rho_2} Fr_1^2 Fr_2^2$$

図4は無次元下層エネルギー E_2^* と内部界面高さ h_I を全水深 H_0 で割った h_I^* の関係を表したもので、それぞれ堰移動速度を変化させ曲線を描いた。 E_2^* は以下の式で表される。

$$E_2^* = E_2 \text{ (下層のエネルギー)} - E_1 \text{ (上層のエネルギー)} = h_2^* + \beta + \frac{1}{2} Fr_2 h_2^* - \frac{1}{2} Fr_1 h_1^*$$

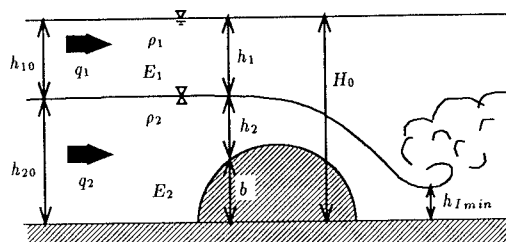


図2．堰を越える2層密度流

この図4のエネルギー曲線が極値をとる時、一様流での限界状態に相当する流れが生じ、 h_I^* が極小値と極大値の間の領域に点がある場合は常流の状態、それ以外の曲線上に点がある場合は流れは射流の状態である。また、このことより図4での屈曲点の流量より小さい流れでは常流、屈曲点の流量より大きい流れでは射流の状態であると言える。

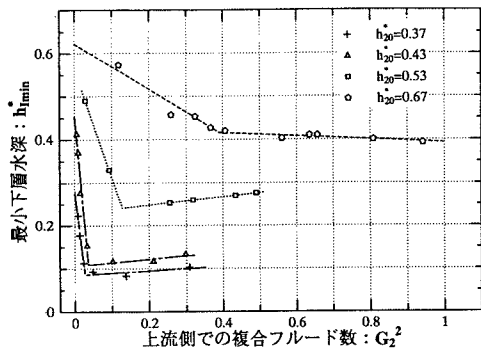


図3. 内部界面低下曲線

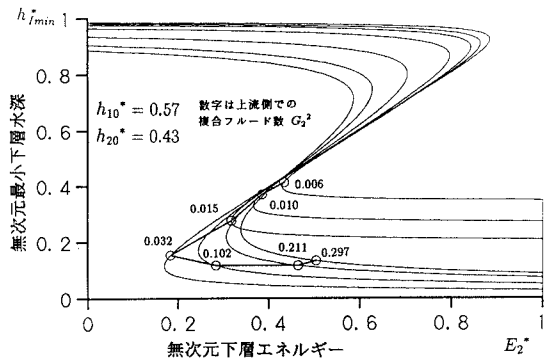


図4. エネルギー曲線

4. 限界状態における理論曲線を用いての解析結果

3節で述べた屈曲点とエネルギー曲線より、次の仮説を導入する。

”堰の下流の h_{Imin} の点において、流れが限界状態 ($G_2^2 = 1$) となる時、

上流側での複合フルード数は屈曲点での複合フルード数に相当する。”

この仮説に基づいた理論曲線は、次のような手順で描かれる。仮説が正しければ、屈曲点はこの理論曲線上にのると考えられる。

複合フルード数の式は、堰の移動速度 V と下層水深 h_2 を用いて、整理すると以下のような式となる。

$$G_2^2(V, h_2) = \frac{V^2}{(1 - \tau_1)gH_0^3} \left[\frac{h_{10}^2}{(1 - h_2^*)^3} + \frac{h_{20}^2}{h_2^{*3}} - \frac{V^2}{gH_0^3} \frac{h_{10}^2 h_{20}^2}{(1 - h_2^*)^3 h_2^{*3}} \right]$$

この式に、以下の条件を与える。

- ・堰の上流では、 $h_2^* = h_{20}^*$ (定数) である。
- ・ h_{Imin} の点では、 $G_2^2 = 1$ 、 $h_2^* = h_{Imin}^*$ となる。
- ・堰の移動速度 V は上流・下流において一定である。

以上より、 h_{Imin} の点で限界状態となる理論式は次のような形で表される。

$$G_2^2 = F(h_{Imin}^*)$$

図5より理論曲線上に屈曲点があることが分かる。上で述べた仮説は正しいということが出来る。また、理論曲線を境に、色のついている領域は一様流の時の常流状態の流れに相当し、色のついていない領域は一様流の時の射流状態の流れに相当することが分かり、2層密度流の常流域・射流域の分類が可能となった。

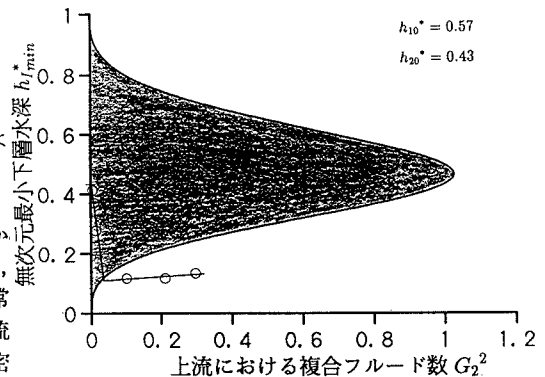


図5. 限界状態における理論曲線

参考文献： 1. 野口英樹：堰を越える2層密度流に関する実験的研究

土木学会第49回年次学術講演会講演概要集

2. David M Farmer: Hydraulic Control of Flow Over the Sill in Observatory Inlet