

II-221 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 学生員 ○野口 英樹
愛知県庁 村山 孝
東京理科大学 正会員 大西 外明

1. はじめに

密度成層をなす貯水池に長期停滞する濁水塊を、底に潜り堰を設けることにより早期に外部に排出できる場合を想定すると、このときの堰上の流れは『突起部を越える密度流』となる。また、海底山をもつ海峡部や海岸部にある発電所の排水口付近に設けられる潜り堰上においても『突起部を越える密度流』が生じる。いずれの場合にも、堰の近傍における密度界面の状態変化は興味のある研究課題の一つである。本研究では、実験水槽内に食塩水で密度層をつくり、その中にモーターで動く半円形断面の潜り堰を走らせることにより疑似的に『突起部を越える密度流』を実現し、おもに堰の下流における密度界面の低下の挙動を解明しようと試みた。

2. 実験内容

実験は図1のような水槽で行なった。実験条件に関する諸元は下表のとおりである。全水深を変化させることにより、堰の高さの全水深に対する比率（堰の無次元高さ β_{max} ）を変化させた。実験条件としては、3種類の全水深に対してそれぞれ下層水深を3種類（ $H_0=22.0\text{cm}$ のときのみ $h_2=20.0\text{cm}$ を除く2種類）に変化させて計8パターン、さらにその各々に対して堰移動速さを変え、実験パターンは計57種類となっている。

これらの実験条件のもとで、堰を越えた密度流の内部界面の低下の程度（最小下層水深 h_{min} ）を写真から測定した。なお、密度層の可視化は、上層にフロレセンス・ソーダを溶解させることにより行なった。

表. 実験の条件

密度	上層 $\rho_1=1.0000$, 下層 $\rho_2=1.0145$ (g/cm ³)	
水深	全水深 H_0	22.0, 30.0, 42.0 (cm)
	下層水深 h_2	13.0, 16.0, 20.0 (cm)
	※ 以上の組み合わせで合計 8 パターン	
堰速さ	$V = 0.78 \sim 9.76$ (cm/s)	
	※ 各水深パターンに対し 6～8 段階	

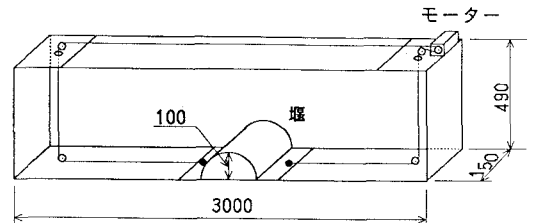


図1. 実験水槽

[単位: mm]

3. 実験結果及び考察

堰を動かすことにより密度界面の分布に変化が生じる。これを固定した堰を越える流れに置き換えて解析するにあたり、堰のはるか上流（実験では水槽の左端にあたる）における上層と下層の水深、及び流れの全域における全水深は変化しないものとした。また、密度界面は内部跳水の起こる地点まで保たれるとし、界面での混合は生じないとした。これらの仮定により、各層の単位幅流量は次のように堰の速さ V であらわされ、一定値となる。

$$q_1 = h_{10} \cdot V, \quad q_2 = h_{20} \cdot V$$

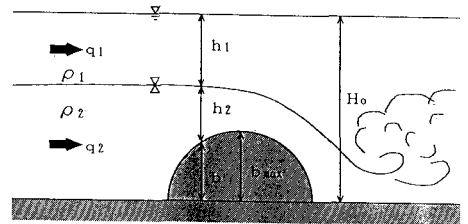


図2. 堰を越える密度流

実験で得られたデータは各水深パターンごとにまとめ、次のような観点から調べた。なお、以下では堰の無次元高さが中程度で下層水深が小さい場合（ $\beta_{max}=0.35$, $h_{20}^*=0.43$ ）の結果を中心に述べる。

①複合フルード数 G_2^2 と h_{min}^*

流れの速さと堰下流における最小下層水深 h_{min} の関係を調べるにあたり、次のように定義される複合フルード数を導入した。

$$G_2^2 = Fr_1^2 + Fr_2^2 - (1-r_1)Fr_1^2Fr_2^2$$

G_2^2 は流れの場を代表する無次元量であり、ここでは密度流の上層と下層が同じ速さで見し得る堰のはるか上流での値を考えている。 r_1 は上層と下層の密度の比、 Fr_1 ($i=1, 2$)は内部フルード数である。

$$Fr_1^2 = \frac{q_1^2}{(1-r_1)gh_1^3} \quad (i=1, 2), \quad r_1 = \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

また h_{1min}^* は、 h_{1min} を全水深で除した量である。実験で得られた h_{1min}^* と G_2^2 の関係を図3に示す。

図から分かるように、 G_2^2 の増大にともなう h_{1min}^* の減少の傾向は大きく2段階に分けられる。すなわち、その初期の段階では急激な減少傾向、後期の段階では微増傾向（微減の場合もある）をなす。この2つの段階を示すプロットはともにほぼ直線で近似でき、双方の交点はその明確な屈曲点となる。

②下層エネルギー E_2^* と h_{1min}^*

次にエネルギー曲線上での h_{1min}^* の変化の様子を調べる。ここで考えるエネルギーは次のように定義される下層エネルギー E_2^* である。

$$E_2^* = h_2^* + \beta + \frac{1}{2} Fr_2^2 h_2^* - \frac{1}{2} r_1 Fr_1^2 h_1^*$$

上式中の β はある地点の堰の高さ b （図2参照）を全水深で除して無次元化したものである。 $h_2^* + \beta$ の値を h_1^* とおき仮定条件などを考慮すると、 E_2^* は h_1^* 、 V 、 β の関数となる。図4に細線で示したのは、堰の無次元高さが $\beta_{max}=0.35$ 、無次元下層水深が $h_{20}^*=0.43$ の場合の $E_2^* \sim h_1^*$ 曲線であり、 V 、 β の相異のため実験パターンの数だけ描かれる。○でプロットされているのは h_{1min}^* の点でのエネルギーである。 V の増大にともない太線で示した軌跡をたどって変化していく。図3にみられた h_{1min}^* の相異なる2段階の変化傾向はこの軌跡と類似している。また、図3の屈曲点はエネルギー曲線の極小値（ $G_2^2=1$ に相当）付近に対応しうるのである。このことは、流れが図3の屈曲点に相当する G_2^2 の値を上流で持つとき、堰の下流における界面高さ h_1^* の最小値が内部界面に対する限界水深に一致することを意味していると考えられる。

5. まとめ

以上では実験パターンの一例について調べたが、同様の結果は他の実験パターンについても確認されている。実験結果から言えることをまとめると次のようになる。

- ・水深の構成が等しい場合、流量が大きいほど堰の下流での密度界面の高さの最小値は低下する傾向にあるが、低下するのはその値が内部界面に対する限界水深に一致するときまでであり、そのときの流量より大きな流量では界面の低下はほとんど進まない。
- ・堰の下流での密度界面の高さは、上流の複合フルード数 G_2^2 の増大に対して直線的に変化する。ただし、界面の最小値が下層の限界水深に達すると直線は屈曲し傾きを変える。
- ・上述の屈曲点に対応する G_2^2 は、上層と下層の混合を促進する際に効果が期待できる最小の流量を与える。（参考文献）

- 1) Farmer, D.M., and R.A. Denton, Hydraulic Control of Flow Over the Sill in Observatory Inlet, J. Geophys. Res. - Oceans, vol. 90, pp.9051-9068, 1985.
- 2) Denton, R.A., Hydraulic Control of Multilayered Exchange Flow through Obstructions, in Stratified Flow, edited by E.J. List and G.H. Jirka, Am. Soc. Civil Eng., pp.123-131, 1990.

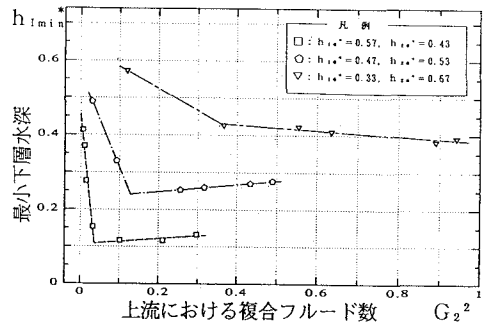


図3. 上流フルード数と h_{1min}^*

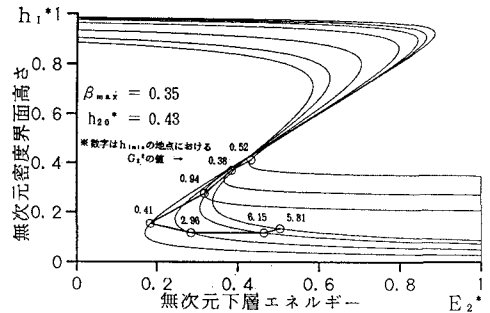


図4. エネルギー曲線と h_{1min}^*