

中層密度流の挙動に関する室内実験と数値計算

水工学研究室 垣内 浩志
指導教員 細山田 得三

1. はじめに

密度流とは、二種類の流体における密度差が起因となり発生する流下・上昇運動である。密度流は、自然界においては頻繁に観察される現象である。

例として、ダム貯水池に流入する濁水が挙げられる。貯水池に流入した濁水は密度躍層に到達すると、下層流体より小さいものは躍層に沿って進入するという現象が起こる。この現象を中層密度流の貫入現象という。中層密度流を形成する濁水は、躍層において上下流体の中間密度をもつ。中層密度流の先端部形状は貯水池水の密度分布と濁水の密度、流量の関係によって決まる。本研究では、この中層密度流の貫入現象について室内実験と数値実験によって詳細にしらべた。実験では、塩分濃度により作られた密度差を持つ周囲水に中間の密度の塩水を進入させて再現した。実験で得られたデータと数値計算結果とを比較し、流動特性や挙動の違いを解明することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 実験装置および実験方法

実験装置は、図-1に示すように奥行き15cm、長さ400cm、高さ60cmの亚克力製水槽を用いた。密度流流出部には流出口が1.5cm×13.5cmである亚克力製の箱を用いた。ヘッドタンク内には、水深を一定に保つための仕切りを設けてある。

実験方法は、次のとおりである。周囲流体は塩分濃度の密度差によって変化させた。上層水には淡水を用い、中層密度流は可視化できるようにウラニン色素で着色した。ヘッドタンク内に、一様密度に調整した塩水を導き水槽内に流入させた。流入の様子はデジタルビデオカメラ3台で撮影し、その撮影画像から各種データを測定した。各カメラに基準点をそれぞれ設定した。

測定項目は中層密度流の先端移動速度と先端部層厚を測定した。先端移動速度は、

中層密度流の先端が各基準点を通過してから5秒ごとに先端の移動距離を測定した(図-2参照)。先端部の層厚は5秒ごとの先端から10cm後ろの部分の層厚とした(図-3参照)。なお、濁水の流入時間を26秒、撮影終了を中層密度流の先端が流入口から260cmを通過したときとした。

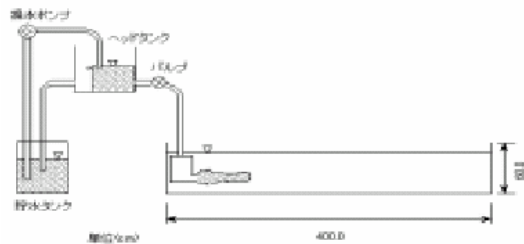


図 1 実験装置

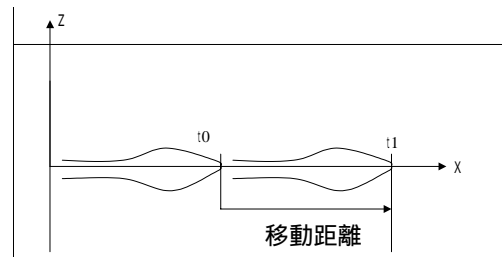


図-2 移動距離の測定方法

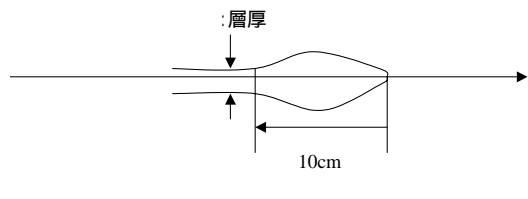


図-3 先端層厚の測定方法

2.2 実験条件

表1に実験の組み合わせを示す。流入位置、濁水濃度、下層水濃度の3種類のパラメータを組み合わせ、これを実験条件とした。

3 . 実験結果

3.1 流入状況

写真 1 に境界面より進入したときの流況、写真 2 に水面直下より進入したときの流況の一例をそれぞれ示す。

流入状況で境界面付近から流入させたものは、中層密度流の上部界面で渦が発生している。一方、下部では滑らかに境界面に沿って下層へ影響を与えずに直進した。

水面付近から進入させたものは、流入直後から激しく混合し広がりながら進行する。また、濁水が沈み込むことによって境界面に波が発生しているのが確認できる。

3.2 実験結果

撮影により得られた画像から、流下時間および距離ごとの密度流の先端部形状、先端部層厚、先端移動速度を調べた。

測定結果において流入の違いについては、水面直下から流入したものは流入初期に大きな値を示すが流下とともに境界から流入したものと傾向が一致している。

中層密度流の濃度の違いについては傾向の違いがはっきりと見られ、密度の大きいものは流入直後から移動速度がほぼ一定であった。一方、密度の小さいものは 50 cm ぐらいまでは急激に減速し、一定の値に漸近していく。

先端部ははっきりとした特徴的なふくらみとくびれを持って進行する。そして、層厚は、密度な大きなものは時間による減少はそれほど見られず変化しないことが結果としてわかった。密度の小さいものは流下とともに薄くなっていく傾向が見られた。

図-4 に実験結果を示す。

4. 数値計算結果

実測値と計算値の比較において SOLA 法を用いた流れの直接数値シミュレーションを用いた。この手法は非定常な流れの問題に適用可能であり、特に大規模なコ

表 1 実験条件

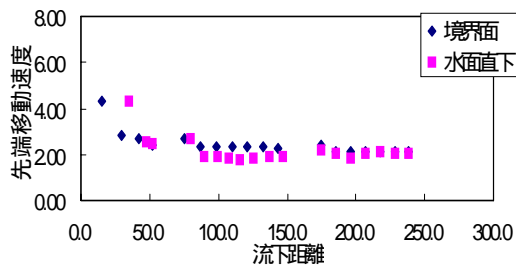
組み合わせ	流入位置	濁水濃度 (%)	下層水濃度 (%)
RUN1-1	境界面 付近	0.5	1.0
RUN1-2			2.0
RUN1-3			3.0
RUN1-4			4.0
RUN1-5			5.0
RUN2-1		2.0	3.0
RUN2-2			3.5
RUN2-3			4.0
RUN2-4			4.5
RUN2-5			5.0
RUN3-1	水面 付近	0.5	1.0
RUN3-2			2.0
RUN3-3			3.0
RUN3-4			4.0
RUN3-5			5.0
RUN4-1		2.0	3.0
RUN4-2			3.5
RUN4-3			4.0
RUN4-4			4.5
RUN4-5			5.0



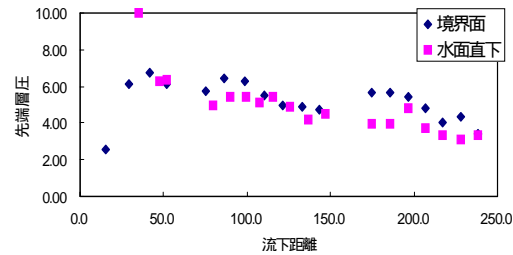
写真 1 境界付近より進入したときの流況



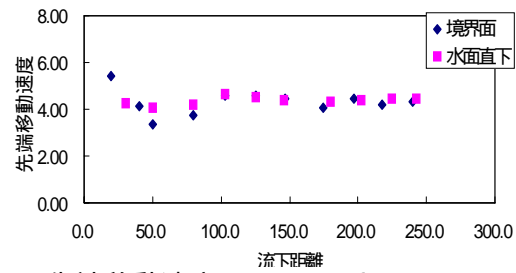
写真 2 水面付近より進入したときの流況



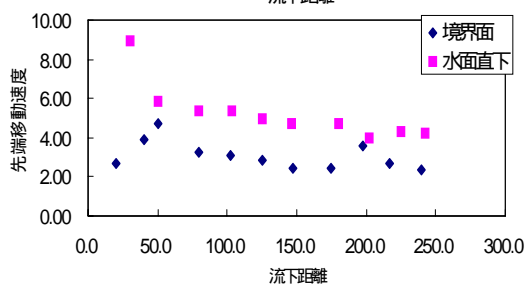
a) 先端移動速度 (RUN1-1 と RUN3-1)



b) 先端層厚 (RUN1-1 と RUN3-1)



c) 先端移動速度 (RUN2-5 と RUN4-5)



d) 先端移動速度 (RUN2-5 と RUN4-5)

図-4 実験結果

ンピュータプログラムを必要としないで流れを数値解析することができる。この解析法を用いた結果をもとに密度分布の空間的分布についての画像を作成した(図-5,6 参照)。この図は濃度を色によって分類している。

実測値と計算値の比較を行った結果を図

-7 に示す。

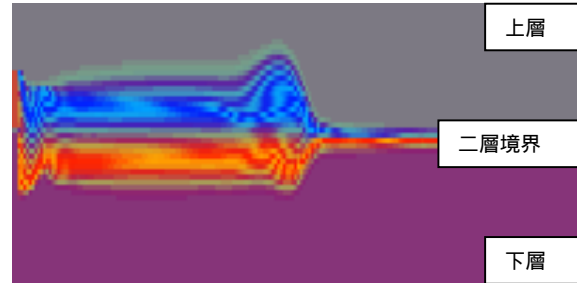


図 6 計算結果 境界面付近(20s 後)

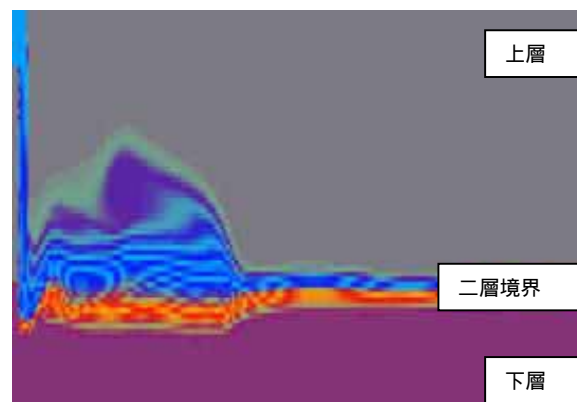
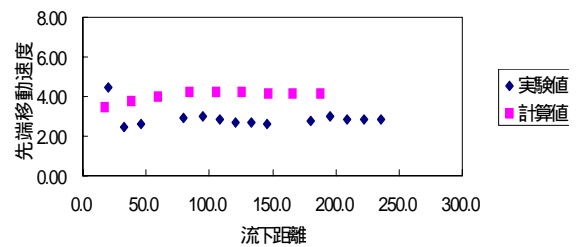
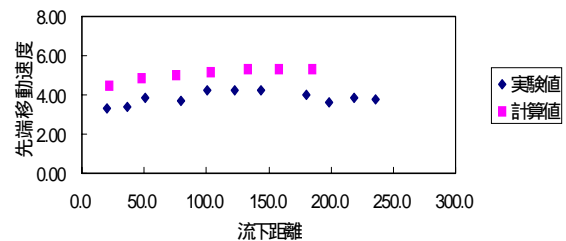


図 5 計算結果 水面直下(20s 後)



a) RUN1-1



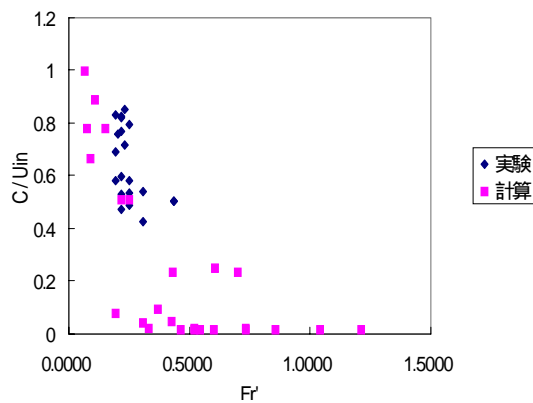
b) RUN2-1

図-7 実験値と計算値の比較(先端移動速度)

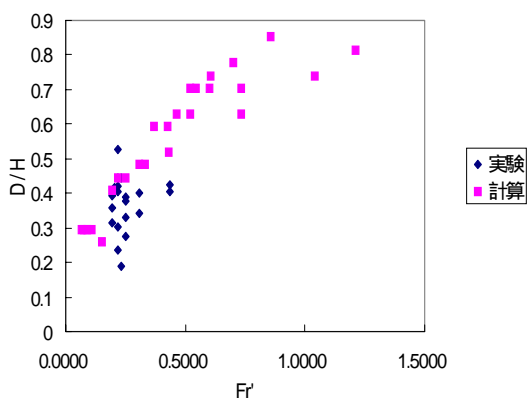
比較の結果、どちらにおいても実測値のほうが計算値より低い値を示した。その理由として、計算では躍層が考慮されていないためと、流入部分での初期条件を一致させることが困難なためにこのような結果になったと考えられる。しかし、傾向は一致していると考えられる。

さらに、内部フルード数と先端移動速度と先端層厚を無次元化したものをそれぞれ比較したものを図-8に示す。

比較の結果、実験値と計測値に一致する傾向が見られた。このことから、シミュレーションは実際の現象をある程度把握できたと考えられる。



a) 移動速度の無次元数



b) 先端層厚の無次元数

図-8 内部フルード数を用いた比較

5. 結論

塩分濃度により作られた周囲水に進入する中層密度流がどのような流動特性を示すのかを数値解析的に知るため、流体濃度や躍層の条件、流入条件を変化させて実験を行い、挙動の違いの解明や計算値との比較をおこなった。また、周囲水と濁水の混合に関しての検討を行った。以下に本研究で得られた結果をまとめる。

【先端部形状に関する結論】

- (1) 中層密度流の先端部は、周囲水の密度が二層界面の場合には上下非対称で特徴的なふくらみとくびれを呈しながら進行することがわかった。
- (2) 流入直後は複雑に乱れるものの次第に落ち着き、ほぼそのままの形状を保ちながら進行していく。
- (3) 濁水と周囲水の密度差が小さくなるにつれ、先端部の形状は不明瞭となる。

【層厚に関する結論】

- (1) 流入直後は総じて大きい傾向がある。その後次第にほぼ一定の層厚に近づく。
- (2) 濁水と周囲水の密度差が小さいほど、層厚は大きくなる傾向がある。

【移動速度に関する結論】

流入後の一定区間を除けば、濁水はほぼ等速度で進行する。

【理論値と実験値の比較に関する結論】

- (1) 実験値と計算値はすべての条件においてよく似た傾向が得られた。
- (2) 内部フルード数の比較においては、一部において計算値と内部フルード数に対する無次元速度と無次元層厚の依存性については数値実験と室内実験において、同様の傾向を示した。