

水門開放に伴う二次元密度流に関する研究

九州大学理学部物理科学科 学生員 冷泉伸泰  
 九州大学工学部エネルギー科学科 学生員 伊東慎吾  
 九州大学大学院総合理工学研究院 正会員 経塚雄策

1. はじめに

今日、有明海における諫早湾干拓の問題がたびたび話題に挙がっている。その中で今、諫早湾の潮受け堤防を開放して海水を調整池内に導入することによって、調整池内の干潟による水質浄化機能を調査する中長期開門調査の実施が検討されている。開門調査実施の際、海水の流入を数値シミュレーションで予想することは諫早湾干拓問題において大変重要になってくる。水門開閉に伴って湾内と湾の外の塩分差や温度差により重力流が発生することが考えられる。重力流の形態はその生成要因によってさまざまだがその先端部の構造や挙動には共通の特徴がある<sup>4)</sup>。本研究では諫早湾水門開閉の数値シミュレーションに並行して、重力流の先端部に注目してその挙動、主に先端の進行速度について水槽実験と数値シミュレーションの比較を行い、検討を行う。同時に調整池から海水への淡水の流入を想定した淡水が自由表面を進行する場合に対する同様の検討も行う。

2. 実験方法

長さ L=2m、幅 B=0.1m、深さ D=0.04m のアクリル水槽を用いて密度の異なる流体の水門開放問題の実験を行った。水槽を厚さ 1cm のアクリル平行板で仕切り一方には淡水(密度  $\rho_0$ )を、もう一方には塩水(密度  $\rho_0 + \Delta\rho$ )を深さが同じになるように入れた。仕切りを開けてビデオカメラにより先端の挙動を追跡し撮影した後に解析した。追跡する方にはウラン(C20H10Na2O5)により着色した。実験では塩水が淡水の下を進む場合と淡水が塩水の上を進行する場合を塩分濃度が 1%、2%、3% の場合についてそれぞれ行った。実験で撮影した映像をもとに約一秒ごとに先端の位相距離を測定してグラフ化をおこなった。

3. 計算内容

支配方程式は密度変化を伴う粘性流体に対するナビエ・ストークス方程式、媒質の密度輸送方程式、非圧縮性流体の連続の式で、浮力項でのみ密度変化を考えるブシネスク近似

を適用する。これらの式の変数を深さ H、代表速度  $U_0$ 、媒体の密度  $\rho_0$  で無次元化する。この際、代表速度  $U_0$  は内部浅水波の伝播速度  $U_0 = \sqrt{g'H}$  とする<sup>1), 2)</sup>。

ただし、 $g' = (\Delta\rho/\rho_0)g$ 、 $g$  : 重力加速度  
 密度差は非常に小さい  $\Delta\rho/\rho_0$  が  $10^{-2}$  のオーダーの場合を考える。流体の密度  $\rho$  は一定密度  $\rho_0$  の媒体の中で密度  $\rho_s$  の媒質が移流、拡散によって不均一に分布して変化するとして、但し、 $\rho = 1 + (\Delta\rho/\rho_0) \rho_s$  ( $0 \leq \rho_s \leq 1$ ) で表されると仮定する。 $\rho_s$  は密度差  $\Delta\rho$  により無次元化されている。無次元量と有次元量の関係、無次元化された支配方程式、および各濃度での係数は Table を含めた以下のとおりである。

$$X^* = HX, \quad U^* = U_0 U, \quad t^* = (H/U_0) t$$

$$P^* = P \rho_0 U_0^2, \quad \rho^* = \rho_0^* \rho$$

$$P_0^* = \rho_0^* g' Y H, \quad P^* = P_0^* + P^*$$

(但し、\*は有次元量)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{F_n^2} \rho_s \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + u \frac{\partial \rho_s}{\partial x} + v \frac{\partial \rho_s}{\partial y} = \frac{1}{Rs} \left( \frac{\partial^2 \rho_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho_s}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

ここで

$$R_s = \frac{UH}{\kappa}, \quad Re = \frac{UH}{\nu}$$

$$F_n = \frac{U}{\sqrt{\left(\frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right)g'H}} = 1$$

$$\nu = \kappa = 1.139 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

Table.1 各濃度での係数

	$\Delta \rho / \rho_0$	$1/Re=1/Rs (10^{-4})$
1%	0.01	4.55
2%	0.02	3.22
3%	0.03	2.63

計算方法

- ・ 速度ベクトルを格子の側面の中心で、密度、温度は格子の中心で定義するスタッガード格子
- ・ 移流項は3次の風上差分法により離散化
- ・ 拡散項は2次の中心差分法により離散化
- ・ 境界条件は上面では free-slip、その他では no-slip

HSMAC 法<sup>2)</sup>により数値計算を行い実時間でおおよそ2秒おきに出力するようにした。

4. 結果と比較

実験結果

初め重力流は勢いよく飛び出すものの時間経過とともに減衰していき、最終的にはほぼ一定の速度で進行する。

計算結果

I 淡水の下を進行する密度流

Fig.1,2より、初め、先端部は持ち上がったような形を保ちながら先端上方で小さな渦を巻きながら進行する。時間が進行するにつれて持ち上がりは徐々になくなり先のどがつたような形を保ちながら進行する事がわかる。

II 自由表面を進行する淡水

Fig.1,2より、開門直後、淡水はしきりをほぼ垂直に上り先端で下方は大きく渦を巻きながら進行する。大きく持ち上がった先端部はIの先端部に比べてやや大きい。この持ち上がりも時間の経過とともに徐々に小さくなる。

比較

傾きに関しては若干のずれがあるものの、初めは勢いよく飛び出し時間とともに減衰し、ある程度時間が経過すると一定速度に落ち着くという現象はよく表現されているように思われる。尚、グラフの縦軸は対数表示である (Fig.3,4 参照)。

参考文献

- 1) 川中幸一, 馬場信弘: 二次元重力流の計算, 日本造船学会, 178号, 33-39
- 2) 馬場信弘, 岡村将治, 福庭哲也: 重力流の先端部の構造, 日本造船学会, 184号, 193-201
- 3) 平野博之: 流れの数値計算と可視化
- 4) J.E.Simpson: Gravity Currents in the Environment and Laboratory

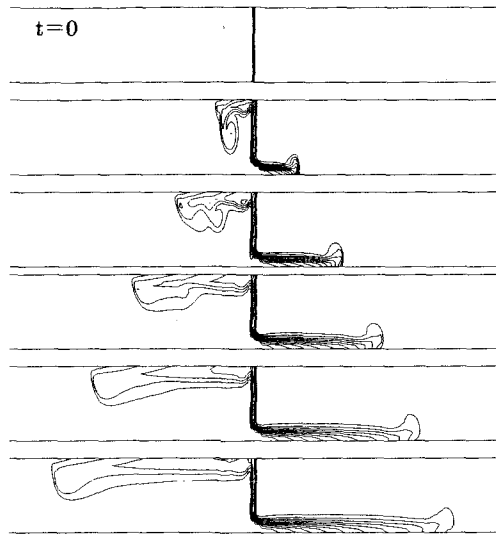


Fig.1 数値計算結果での密度流の発達過程(2秒おき)

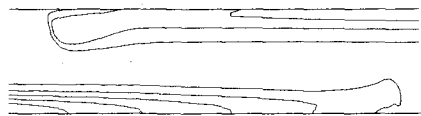


Fig.2 それぞれの先端の様子(1分後)

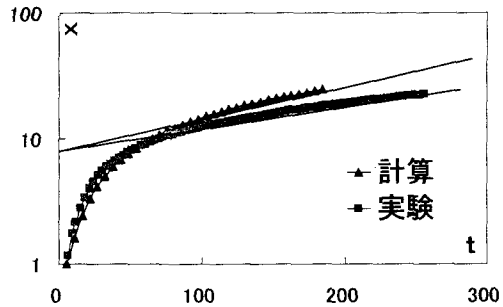


Fig.3 表層を進行する重力流の比較(対数表示)

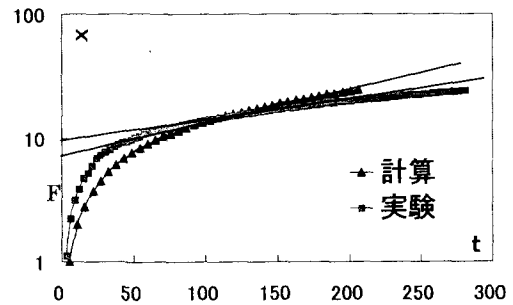


Fig.4 低層を進行する重力流の比較(対数表示)