

## $k - \epsilon$ 乱流モデルを用いた中層密度流の数値解析

長岡技術科学大学大学院

学生会員

増戸洋幸

長岡技術科学大学環境・建設系

正会員

福嶋祐介

### 1. はじめに

成層した貯水池に多量の微細砂（ $200\mu\text{m}$ ）を含む濁水が流入すると、密度躍層に到達した濁水はそれ自身の密度分布と貯水池水の密度分布の相対的な関係により、流入濁水の一部またはすべてが躍層界面に沿って水平に向きを変えて、楔状に貫入する。これを中層密度流と呼ぶ。中層密度流は、濁水長期化の主たる原因として挙げられ、下流域の環境問題や堆砂問題と密接に関係している。中層密度流の内部特性を明確にすることにより、このような問題に対して効果的な対策を講じることが期待できる。

### 2. 研究の目的

Kao<sup>1)</sup> は理論的に中層密度流の先端移動速度を求めているが、非粘性流体の仮定に基づいているため、実現象を精度良く再現できてはいない。そこで本研究では、乱流運動エネルギー  $k$  と分子粘性逸散率  $\epsilon$  を未知数とする  $k - \epsilon$  乱流モデルを用いて中層密度流の数値解析を行う。その解析結果より中層密度流の先端移動速度、先端部厚さ、中層密度流厚を求め、福嶋<sup>2)</sup> の行った実験結果と比較することにより、モデルの妥当性を検証する。また、内部構造解明のため中層密度流先端部付近における流速ベクトル・濃度コンターを求める。

### 3. 実験概要

福嶋が行った実験の概要を述べる。実験水路は長さ700cm、幅20cm、水深80cm、底勾配1/10の片面ガラス張り水槽である。上層流体は淡水を使用し、下層流体は一樣密度に調整した塩水を用い、淡塩水の密度成層場が形成された。フルオレイセンナトリウムで黄緑色に着色した塩水を一定ヘッドタンクに導き、流量制御バルブを通して上流端の堰より流入させる。堰の近傍では激しい混合が生じ流れが不安定なため、測定区間は堰より90cm離れた地点より下流とされた。

水槽と平行に35mmカメラを数台設置し、着色した塩水の先端が測定区間に達したときを  $T=0\text{sec}$  とし、10秒間隔で撮影された。同時に8mmカメラにより塩

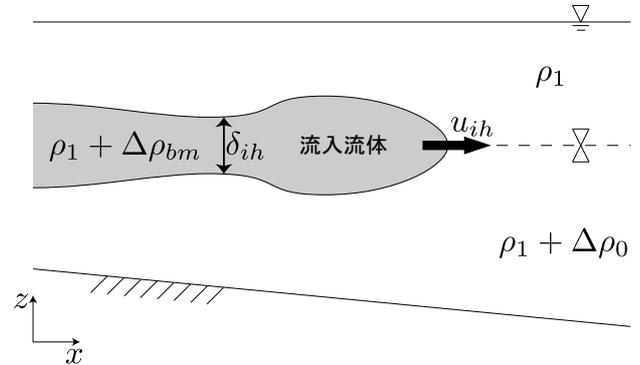


図 - 1 中層密度流の模式図

表 - 1 計算条件

$\delta_{ih0}(\text{cm})$	11.0	$u_{ih0}(\text{cm/sec})$	3.0
$\Delta\rho_{bm}/\rho_1$	0.0017	$\Delta\rho_0/\rho_1$	0.0035
$\rho_1(\text{g/cm}^3)$	0.9981		

水の先端を追跡した。このようにして得られた35mmフィルムと8mmフィルムから流入水の流動形態、厚さ、先端形状、先端移動速度の場所的、時間的变化が求められた。

### 4. 解析モデル

図 - 1 のように、上層が  $\rho_1$  下層が  $\rho_1 + \Delta\rho_0$  の密度をもつ二層界面にこれらの中間の密度  $\rho_1 + \Delta\rho_{bm}$  をもつ流体が進入する場合を考える。流れは二次元であり、十分に発達した乱流であるものとする。密度は塩分濃度  $c$  のみの関数と仮定する。数値解析に用いた基礎方程式は、連続式、 $x, z$  方向のレイノルズ方程式、塩分の輸送方程式、乱流運動エネルギー  $k$  の方程式、分子粘性逸散率  $\epsilon$  の方程式である。

以上の基礎方程式を S.V.Patanker(1985) の SIMPLE 法を用いて離散化を行い、数値解析を行った。

### 5. 実験結果と数値計算結果の比較

数値計算の計算領域は  $x$  軸方向410cm、 $z$  軸方向80cmとし、格子間隔は  $\Delta x = 1.0\text{cm}$ 、 $\Delta z = 0.5\text{cm}$  とした。底面は1/10勾配の階段状とした。計算時間は時間ステップを  $\Delta t = 0.1\text{sec}$  とし、140secまで行った。計算条件を表 - 1 に示す。以上の条件のもとで数値計算を行い、中層密度流先端の移動速度、先端部厚さ、中層密度流厚の実験値と比較をした。図 - 2, 3 は中層密度流先端の移動速度、先端部厚さの流下距離変化であり、図 - 4 は  $x = 280\text{cm}$  における中層密度流

キーワード：貯水池、中層密度流、 $k - \epsilon$  乱流モデル、SIMPLE 法、数値解析

連絡先：〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1

長岡技術科学大学 Tel 0258-46-6000（代表）

厚の流下方向変化である．点で示したのが実験値，線が計算値である．図 - 5 は計算開始から 94.5 秒後の中層密度流先端付近における流速ベクトル，濃度コンター図である．

図 - 2 の中層密度流先端の移動速度は，距離的に変化せずほぼ一定であるという実験結果を解析結果がよく再現している．図 - 3 の先端部厚さは，流下初期 ( $x < 100\text{cm}$ ) において計算値が大きくなる結果となった．実験の場合には  $x = 0\text{cm}$  において放物線状の速度分布を持っていると考えられるが，計算では流入部条件として速度を断面内で一様として与えているため，流入開始直後に実験値より広く拡散してしまっていると考えられる． $x > 100\text{cm}$  は，実験結果と計算結果とでよく一致しているといえる．図 - 4 の中層密度流厚は，先端部に膨らみをもち急激に閉塞した後徐々に広がるという実験結果と同様の傾向は得られたが，先端部より上流において計算値が実験値より大きくなる結果となった．実験では密度流の厚さを染料によって可視化された塩水を画像解析することにより求めているが，数値計算では塩分濃度を基準にし求めているため，違いが現れたと考えられる．図 - 5 の流速ベクトル，濃度コンター図を見ると，中層密度流前方で内部孤立波の発生へと繋がる進行方向上向きの流速ベクトルが発生している．また，中層密度流先端上部を中心とした渦上の流れが形成されている．中層密度流先端部の形状は上下対称形となっており，実験結果をよく説明する．

## 6. 結論

中層密度流について，その流動特性を解明するため  $k - \epsilon$  乱流モデルを用いて SIMPLE 法による離散化を行い，数値解析を行った．中層密度流の先端移動速度，先端部厚さ，中層密度流厚の計算結果を福嶋の実験結果と比較し，よい再現性が得られた．また計算結果から流速ベクトル，塩分濃度コンター図を描くことによって，中層密度流の内部構造について詳しく知ることができた．

## 参考文献

- 1) Timothy W. Kao : Density Currents and Their Applications , *Journal of the Hydraulics Div.* , ASCE , Vol.103 , No.HY.5 , pp.543 ~ 555 , 1977 .
- 2) 福嶋祐介 : 成層化した貯水池に流入する濁水の流動機構に関する基礎的研究 , 東京大学学位論文 , 1981.

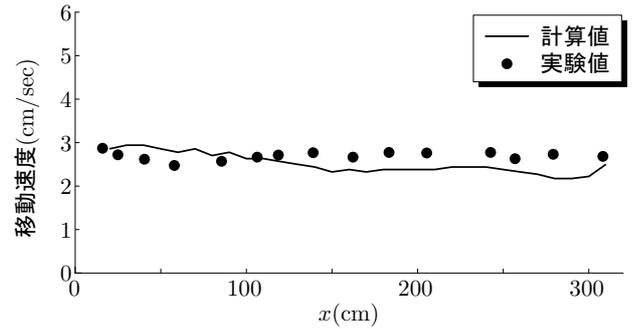


図 - 2 先端移動速度の流下距離変化

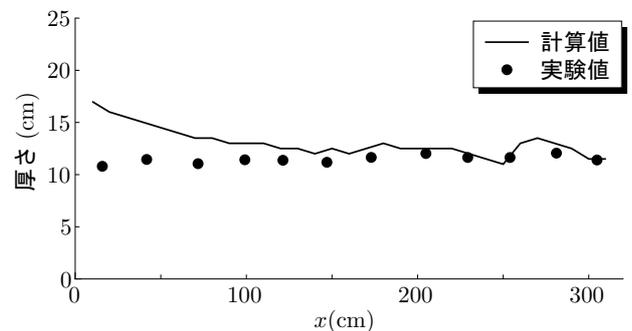


図 - 3 先端部厚さの流下距離変化

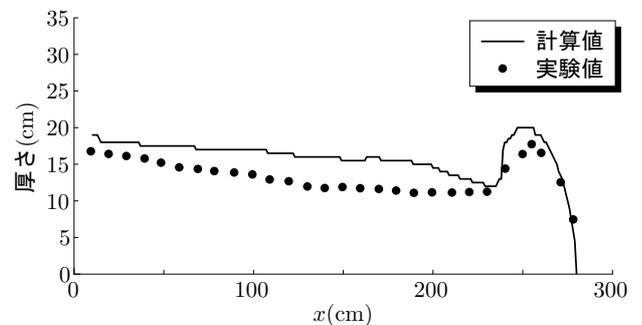


図 - 4 中層密度流厚の流下方向変化 ( $x = 280\text{cm}$ )

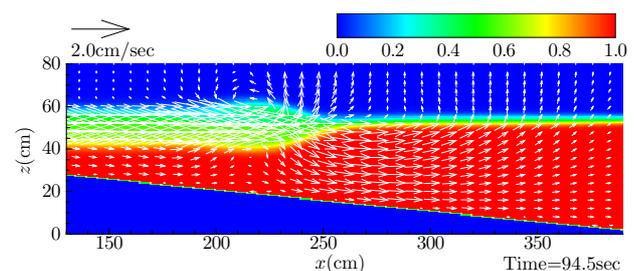


図 - 5 塩分濃度コンターと流速ベクトル図