

$k - \epsilon$ 乱流モデルを用いた鉛直サーマルの数値解析

長岡工業高等専門学校

正会員

衛藤俊彦

日亜化学工業（株）

八木健太郎

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

鉛直重力密度流のフロント部の流動は、後続する流れの有無によって鉛直ブルームと鉛直サーマルに分類される。このような鉛直密度流は海洋汚染防止、海洋資源開発、廃水処理などと深い関連があり、その流動特性を明らかにすることは非常に重要である。

鉛直サーマルの模式図を図 - 1 に示す。上流より流入した流体が全体として非定常なフロント部を形成しながら流下する。このときフロント部では大規模な渦運動を伴うため、鉛直サーマルの解析には乱流構造を考慮したモデルを用いる必要がある。

本研究では保存性鉛直サーマルとして塩水の鉛直サーマルについて、その流動特性を明らかにするため $k - \epsilon$ 乱流モデルを用いて数値解析を行った。離散化手法に陰解法、圧力方程式の解法に S.V.Patankar による SIMPLE 法を採用した。数値計算結果から得られたサーマルの流下速度、最大厚さなどの流下特性を、福嶋・田中¹⁾の実験結果と比較することにより計算モデルの妥当性を検証する。また計算結果から塩分の等濃度線、流速ベクトル図を描き、サーマル内部の流動特性について明らかにする。

2. 福嶋・田中の実験概要

福嶋・田中が行った実験の概要を述べる。実験水槽は幅 1000mm、高さ 1500mm、奥行き 150mm である。水槽の上部中央には外形 6mm のビニール管を 24 本奥行き方向に均等に配置し束ねたノズルが取り付けられている。水槽には淡水が満たされ、ノズルから $165\text{cm}^3/\text{s}$ の流量の塩水を 2.2s 間流入させることで水槽内にサーマルを発生させ、この様子を画像解析することによりサーマルの流下速度、流動幅などを逐次求めた。重力密度流フロント部の流れではフロントが流下する際、大きな渦運動を伴い、流動幅や流下速度が大きく変動する。このような渦運動の影響を低減するため、各実験条件に対し 3 回以上の実験を行いその平均値をもって実験値とした。実験に用いた塩水の初期濃度は 1%、

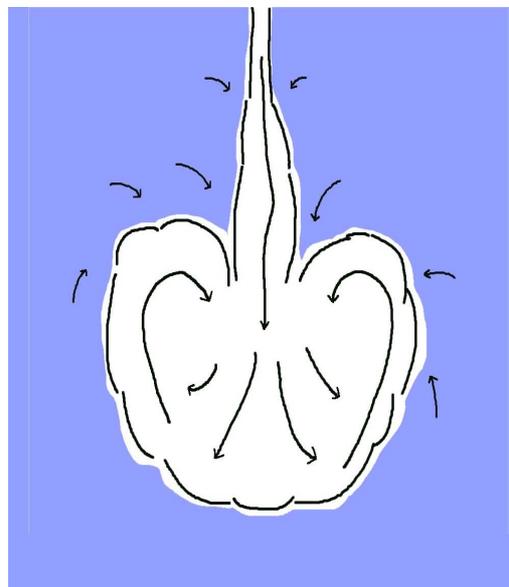


図 - 1 鉛直サーマルの模式図

表 - 1 計算条件

Case No.	塩水濃度 (%)	初期相対密度差 R
1	1	0.00711
2	3	0.02168
3	5	0.03635

3%、5%である。

3. 解析モデル

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 ϵ の方程式である。これらの方程式は衛藤・福嶋²⁾の研究と同様のものを用いた。ただし計算対象が鉛直サーマルであるため $\theta = 0^\circ$ である。

4. 実験結果と数値計算結果の比較

計算領域は x 軸方向 100.2cm、 z 軸方向 150cm とし、格子間隔は $\Delta x = 0.6\text{cm}$ 、 $\Delta z = 1.0\text{cm}$ とした。塩水は領域上部中央から流入させる。流入境界は x 方向 1 格子 (0.6cm) とし、計算開始から 18.33cm/s の流速を 2.2s 間与えた。塩水の初期濃度は実験と同様に 1%、3%、5% とした。それぞれのケースにおける食塩水の淡水に対する初期相対密度差は表 - 1 のとおりである。図 - 2 は塩水サーマルの流下速度の流下方向変化のグラフである。点で示したものは実験結果、線で示した

キーワード：保存性サーマル、鉛直サーマル、 $k - \epsilon$ 乱流モデル、SIMPLE 法、数値解析

連絡先：〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町 888 番地
長岡工業高等専門学校 Tel 0258-32-6435

ものは計算結果である．初期塩分濃度が大きいほど流下速度が大きくなっている．また，流入直後において計算値は実験値と異なり速度が急激に減少しているのがわかる．この違いは，実験と計算では流入方法が異なること，流下速度算定方法によるものだと考えられる． $z=30\text{cm}$ 以降では3%，5%の実験値と計算値はほぼ一致している．1%のケースでは実験値と比べ計算値が小さい値となっている．図-3は塩水サーマルの流動幅の流下方向変化のグラフである．初期塩水濃度が3%，5%の場合は実験値とほぼ一致している．1%の場合，流下距離が30cmまでは実験値とよく一致しているが，それ以降では実験値より大きな値となっている．実験結果においても1%の流動幅が3%，5%と比べ大きくなる傾向を示しているが，計算値はそれが顕著に表れている．図-4は初期塩水濃度5%，計算開始10s後の塩分濃度コンター，流速ベクトル図である．サーマルは楕円体の形状となっている．流速ベクトルはサーマル中心部で最も大きくなっており，左端，右端を中心としてそれぞれ循環流が形成されているのがわかる．

5. 結論

保存性鉛直サーマルである塩水サーマルについて， $k-\varepsilon$ 乱流モデルを用いて数値解析を行った．離散化手法に陰解法，圧力方程式の解法にSIMPLE法を採用した．数値計算は初期塩水濃度を变化させ3ケースで行った．得られたサーマルの流下速度，流動幅の流下方向変化を福嶋・田中が行った実験結果と比較し，初期塩水濃度3%，5%のケースでは両者が良く一致することを確かめた．また数値計算結果から塩分濃度コンター，流速ベクトル図を描くことによって，保存性鉛直サーマルの内部構造について詳細に知ることができた．

参考文献

- 1) 福嶋祐介・田中日出紀：鉛直ブルームフロントと鉛直サーマルの流動モデルの提案，ながれ，20，pp.45～58，2001.
- 2) 衛藤俊彦・福嶋祐介： $k-\varepsilon$ 乱流モデルによる保存性傾斜サーマルの数値解析，水工学論文集，第46巻，pp.1043～1048，2002.

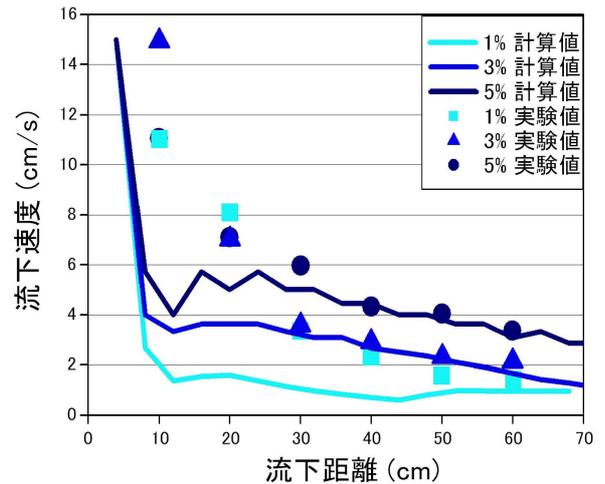


図-2 サーマルの流下速度の流下方向変化

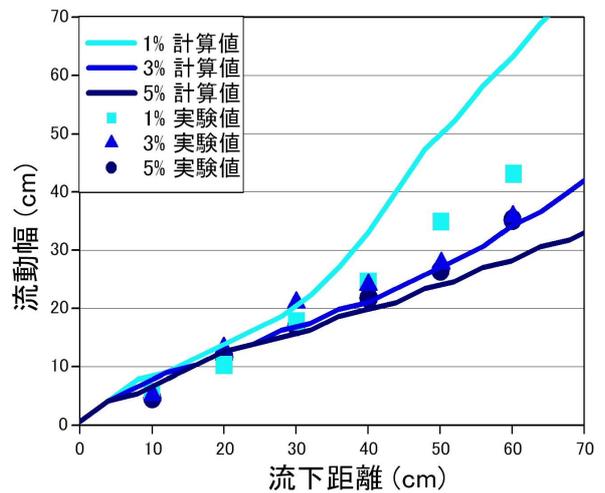


図-3 サーマルの流動幅の流下方向変化

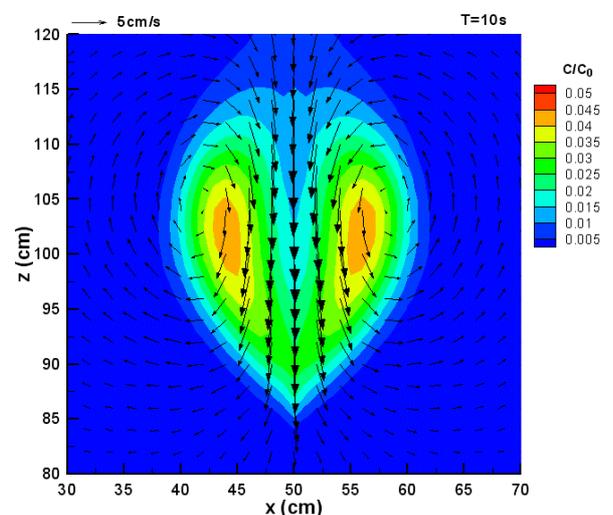


図-4 塩分濃度コンターと流速ベクトル図