

格子ボルツマン法による二相流れ場の数値シミュレーション

東北大学大学院 学生会員 ○荒木 健
東北大学大学院 正会員 越村 俊一

1. はじめに

陸上に津波が溯上した場合には、津波そのものの波力による構造物の破壊等の直接的な被害のみならず、危険物や油の流出によって火災や海水汚染など二次的、連鎖的な被害拡大が起こる(岩淵・今村, 2005). しかし、油層の巻き込みや移流等の詳細な物理過程は明らかになっておらず、また浅水理論の差分法を用いた既存の数値解析モデルでは局所的な流速を精度よく予測できないなど、被害把握手法には未だ多くの課題が残っている。

そこで本研究では、上記問題に対応するための新たな津波数値解析手法の開発を目指し、格子ボルツマン法(Lattice Boltzmann Method, 以下LBM)に基づく水・油二相流の数値解析手法の開発を目的とする。LBMとは分子動力学に基づく数値流体解析手法(CFD)であり、流体を模擬した微視的仮想粒子の運動から巨視的な流体の流れを求める手法である。本稿では、Grunau et al. (1993) および渡辺ら(2000)の二相モデルにKöner et al. (2005)の自由表面の追跡手法を組み合わせ、新たに自由表面を有する二相流れを解析するモデルを提案する。水・油の水槽実験との比較を通してモデルの妥当性の検討を行ない、また課題の抽出を行なう。

2. 格子ボルツマン法

(1) 格子形状

本研究では格子形状に図-1の3次元15速度モデルを用いる。仮想粒子の運動はこの格子によって有限な方向に制限され、粒子の速度 $\mathbf{e}_i (i = 1, 2, \dots, 15)$ は、それぞれ $0 (i = 1)$, $e (i = 2, \dots, 7)$, $\sqrt{3}e (i = 8, \dots, 15)$ となる。ここで、 $e = \Delta x / \Delta t$ (格子間隔 Δx および時間刻み幅 Δt)である。

(2) 二相流モデル

Grunau et al. (1993)の二相流モデルでは、互いに混ざり合わない異なる流体の粒子を別個に扱う(赤青粒子モデル)。時刻 t , 位置 \mathbf{x} で i 方向の速度を持つ粒子の分布関数 $f_i^k(\mathbf{x}, t)$ の時間発展を、並進と衝突の二つの過程を表す格子ボルツマン方程式により各色について解く。ここで、

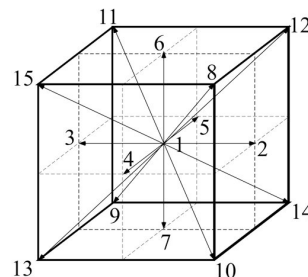


図-1 3次元15速度格子

添字 k は k 成分 (r: redまたはb: blue) の粒子に関する式であることを表す。

$$f_i^k(\mathbf{x}, t + \Delta t) = \left(1 - \frac{1}{\tau}\right) f_i^k(\mathbf{x} + \Delta t \mathbf{e}_i, t) + \frac{1}{\tau} f_i^{k(eq)} \quad (1)$$

ここで、 \tilde{i} は i と逆向きの方向を表す。また τ は単一時間緩和係数であり、 τ により流体の平衡状態へ達する速さ(粘性)が決まる。 f_i^{eq} は局所平衡状態における粒子分布関数であり、各セルにおける各流体の密度 $\rho^k = \sum_i f_i^k$ および流速 $\mathbf{u} = \sum_{i,k} \mathbf{e}_i f_i^k / \rho$ から求められる。3次元15速度モデルの場合には次式で求められる(渡辺ら, 2000)。

$$f_i^{k(eq)} = \begin{cases} \rho_k \left(\frac{\lambda_k}{7+\lambda_k} - \frac{1}{3} \mathbf{u}^2 \right) & i = 1 \\ \rho_k \left(\frac{1}{7+\lambda_k} + \frac{1}{3} \mathbf{u}^2 + \frac{1}{2} (\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u})^2 - \frac{1}{6} \mathbf{u}^2 \right) & i = 2, \dots, 7 \\ \frac{\rho_k}{8} \left(\frac{1}{7+\lambda_k} + \frac{1}{3} \mathbf{u}^2 + \frac{1}{2} (\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u})^2 - \frac{1}{6} \mathbf{u}^2 \right) & i = 8, \dots, 15 \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 λ_k をパラメータとし二流体の密度比を $\frac{\rho_r}{\rho_b} = \frac{7+\lambda_r}{7+\lambda_b}$ として導入する事ができる。

(3) 自由表面の追跡手法 (Köner et al. (2004))

VOF法の類推から、各セル内の流体の充填率 ϵ に応じて、その属性を空隙セル($\epsilon = 0$), 界面セル($0 < \epsilon < 1$), 流体セル($\epsilon = 1$)に分類する。界面セルは空隙セルと隣接するため、次式の境界条件を用いて流入する粒子分布関数を補完する必要がある。

$$f_i^k(\mathbf{x}, t + \Delta t) = f_i^{k(eq)} + f_i^{k(eq)} - f_i^k(\mathbf{x}, t) \quad (3)$$

その後界面セルの充填率を計算し、界面セルが「流体で満たされた ($1 < \epsilon$)」か「空になった ($\epsilon < 0$)」かを判断し、セルの状態を変換する。界面セルを追跡することで自由表面の位置を決定する。

ついて改良が必要であることが確認された。

3. 二相流モデルにおける自由表面追跡手法

Köner et al. の自由表面の追跡手法は、一流体の場合のみが適用対象であるため、二流体の界面であり、かつ気体との界面（自由表面）となるセルでは特別な操作が必要となる。そこで本モデルでは、赤粒子または青粒子のみの界面セルに加え、両方の流体を含む界面セルを新たに分類する。そのセルでは異なる二流体の含有比に応じてその中間の物性 (ρ, λ) を持つセルとして扱う。

4. 水・油の混合現象

(1) 実験および計算条件

縦20cm×横20cm×奥行10cmの塩化ビニル製実験水槽を用いて、ゲート急開により発生する二相流れ場の再現実験を行い、高速ビデオカメラで実験画像を撮影した。左側に着色した水を、右側にキャノーラ油を高さ4cmまで貯め、手でゲートを急開した。

LBMによる再現計算には表-1のパラメータを用い、壁面境界条件はSlip条件とした。赤および青流体の物性値は、 $\rho_r/\rho_b = 1/0.9$ ($\lambda_r = 2.0$ および $\lambda_b = 1.1$)、 $\nu_r/\nu_b = 1/30$ ($\tau_r = 0.518$ および $\tau_b = 1.04$)とした。

表-1 計算パラメータ

grid resolution	Δx (m)	Δt (s)	gravity (m/s ²)
200 × 50 × 100	0.001	2×10^{-4}	9.81

(2) 実験結果および計算結果の比較

図-2にゲート急開後0.2s後および1.4s後の界面形の比較を示す。LBMの結果は密度分布を水槽中央での断面図で示している。水が油層の下へ潜り反対に油が水の上を広がる様子を再現できている。実験では油先端の方が水よりも早く壁面に達するが、数値計算では実験に比べ油先端の移動速度が遅く、また自由表面付近で界面が垂直になっており実験結果とは異なる結果となった。水および油の各層の厚さの時間変化(図-3)からは、層厚が一定の場合には実験値とほぼ一致するが、層厚が変化する際に数値計算のほうが遅れて変化していることがわかる。

5. 結論

新たに提案したLBMの自由表面を有する二相流れモデル水・油の混合現象に適用したところ、界面の様子を自然に再現でき安定に計算することができた。しかし界面の移動速度は実験との差異がみられ、自由表面の条件に

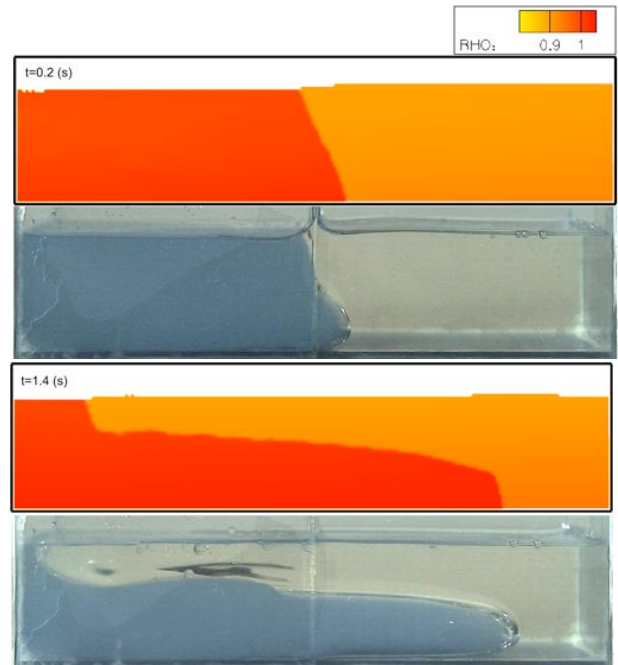


図-2 界面形の比較 (上：LBM, 下：実験画像)

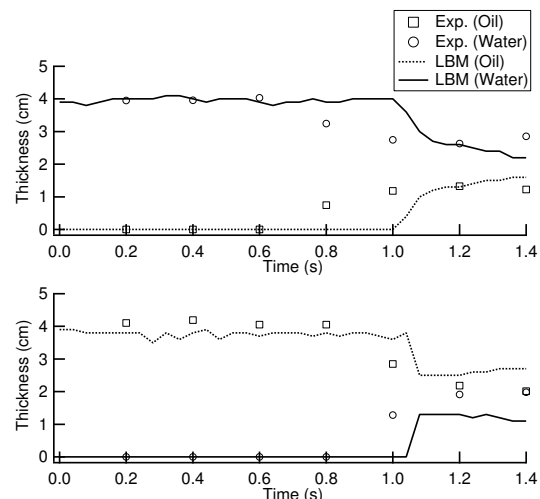


図-3 各地点での水および油の層厚の時間変化 (上：左壁面から5cm, 下：右壁面から5cm)

参考文献

- 岩渕洋子, 今村文彦 (2005): 津波来襲による原油流出・拡散問題の整理と解析手法の検討, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 301-305.
- Grunau, D., S. Chen and K. Eggert (1993): A Lattice Boltzmann Model for Multi-phase Fluid Flows, Physics Fluids A 5 (10), 2557.
- 渡辺正, 海老原健一, 伊藤豪一, 河野浩二 (2000): 格子ボルツマン法による二相流シミュレーションコードの開発並びに並列化, 日本原子力研究所研究報告書.
- Körner, C., M. Thies, T. Hofmann, N. Thürey and U. Rude (2005): Lattice Boltzmann Model for Free Surface Flow for Modeling Foaming, Journal of Statistical Physics, Vol. 121, (1-2), pp.179-196.