格子ボルツマン法を用いた崩落体が引き起こす津波の数値実験とその精度

東亜建設工業(株) 正会員 ○原 知聡, 非会員 濱田 南樹 正会員 AIN NATASHA BALQIS, 正会員 倉原 義之介 正会員 武田 将英, 正会員 栗原 明夫, 正会員 間瀬 肇

1. 目的

格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann Method:以下, LBM) は、1990 年代以降開発が盛んに進められてきた 比較的新しい数値流体解析手法であり、これまでに、混 相流や乱流、熱動流モデルといった複雑な流れや界面 を持つ現象に適用されてきた.近年では、自由表面流れ の数値解析に応用する研究も進められている.既往の LBM を用いる研究として、荒木・越村^{1)、2)}は自由表面 流れへの適用性を検討したほか、水・油二相流れの数値 シミュレーション、佐藤・越村³⁾は自由表面流れ解析 の高精度化を試みている.しかしながら、未だ研究事例 は少ない.本研究では、LBM の適用事例として崩落体 が引き起こす津波再現性のベンチマーク問題を対象と して、LBM による解析のモデル化と津波の再現性につ いて検討した.

2. 格子ボルツマン法 (LBM)

LBM とは、流体を有限個の速度を持つ多数の仮想粒 子の集合体で近似し、各粒子の衝突と並進とを粒子の 速度分布関数 f_i を用いて逐次計算し、 f_i のモーメント から巨視的流れ場を求める数値計算法である⁴⁾. f_i は、 式(1)の離散ボルツマン方程式に従う.

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + e_i \cdot \nabla f_i = \Omega_i, \quad i = 1, \dots, b$$
(1)

ここで、 e_i :粒子速度、 Ω_i :仮想粒子の衝突による f_i の増減を表す衝突演算子である.添え字iは粒子の持つ速度ベクトルの数に対応する.

LBM では, Ω_i を求めるために式(2)の多緩和時間モデ ル⁵がよく用いられる.本研究では,流体解析コード XFlow 2021 (Next Limited 社製)に実装された,式(2)の素 モーメント μ_i を,式(3)の局所的な速度を基準として求 めることによって数値安定性の向上を図った中心モー メント空間型多緩和時間モデル (Multiple Relaxation Time with Central Moments : 以下,LBM-MRT-CM)⁶を用 いた.

$$\Omega_{i}^{MRT} = -M_{ij}^{-1}S_{ij}(\mu_{i}^{eq} - \mu_{i})$$
⁽²⁾

$$\mu_{i} = \mu_{x^{k}} \mu_{z^{m}} = \sum_{i}^{N} f_{i} \left(e_{ix} - u_{x} \right)^{k} \left(e_{iz} - u_{z} \right)^{m}$$
(3)

ここで、 M_{ij} :変換行列、 S_{ij} :緩和係数の対角行列、 μ_i^{eq} :平衡状態での素モーメントを表す.k,mはそれぞ れx,z方向のモーメント次数を、 u_x,u_z は巨視的な速度 構成要素を表す.

3. 解析モデル

Kakinuma et al.⁷⁾の水理実験を基に断面 2 次元の解析 モデルを作成した(図-1).水路長 2 m,幅 0.2 m,水深 h=0.09 m の水槽に一様勾配斜面,静水面と斜面の接点 (汀線位置)から鉛直方向に開閉ゲートが設置されてい る.開閉ゲート左側に崩落体となる水を積載し,ゲート を瞬時開放して崩落体による津波を発生させた.解析 ケースを表-1 に示す.斜面勾配の異なる 2 ケースにつ いてモデルを作り,図-1 の地点 P,Qにおいて,ゲート 開放後 2 秒間の水面変動を実験結果と比較した.ただ し,実験条件では水路長 4 m であるが,解析コスト省 力化のため水路長 2 m とした.なお,今回の解析時間 内に反射波の影響がないことをあらかじめ確認してい



図-1 数値波動水路モデルの概要()内は実験水路長

表-1 解析ケース				
	崩落体の密度	斜面勾配	崩落体の積	
	$\rho_{b}\left(=\rho_{w}\right)$	tan β	載状況	
Case A	1.000 kg/m^3	1.0	$\zeta = 0.15 \text{ m}$	
Case B	1,000 kg/m ³	0.5	$\zeta = 0.15 \text{ m}$	

キーワード 格子ボルツマン法, MRT-CM, CADMAS-SURF, 津波, 崩落体
 連絡先 〒230-0035 横浜市鶴見区安善町 1-3 東亜建設工業(株)技術研究開発センター TEL 045-503-3741

る.水理実験同様に LBM・MRT・CM モデルにはゲート を実装させ、開放速度を 2.0 m/s に設定している. さら に、港湾の設計検討で一般的に用いられる CADMAS-SURF でも同様な条件で解析モデルを作成した.ただ し、ゲートは実装していない.計算条件を表-2 に示す.

4. 解析結果

水理実験の計測水位および LBM-MRT-CM モデル, CADMAS-SURF モデルで計算した地点 P・Q の水面変 動を図-2,図-3 に示す.斜面勾配の急な Case A では, 地点 P,Q ともに実験値と比べて最大水位が大きく出て いる.これは CADMAS-SURF の計算でも同じ結果とな っているが,地点 Pの2波目では LBM-MRT-CM のみ 水位が大きくなる結果となった.勾配の緩やかな Case B では,LBM-MRT-CM は最大水位が実験結果とよく一 致する結果となった.また,ゲートを実装することで, CADMAS-SURF と比べて1波目の立ち上がり時刻は若 干の改善が見られる.なお,Case A, B 共に LBM-MRT-CM はノイズを含むような波形となっている.これは, 水位変動の計測方法が鉛直方向のセル上の水粒子を含 む最高地点を水面と判定していることで,水しぶきの 影響を受けているためで,今後の課題である.

5. まとめ

本研究では、LBM の適用性を確認するために、崩落 体による津波の再現計算を行った.その結果、衝突演算 子に MRT-CM モデルを用いた LBM-MRT-CM では、 CADMAS-SURF による計算結果とよく一致し、水理実 験の結果を再現することができた.また、開放ゲートを 実装することで、波の立ち上がり時刻は実験に近づく 結果となった.水面の判定に課題は残るが、実務計算で 用いられる CADMAS-SURF と比べても遜色はなく、本 検討において LBM-MRT-CM の再現性が確認できた.

謝辞

本研究の一部は, 土木学会海岸工学委員会津波作用 に関する研究レビューおよび活用研究小委員会が主催 した津波解析ハッカソンの成果である.事務局ならび に,実験データを提供頂いた鹿児島大学柿沼太郎准教 授には,大変お世話になった.ここに記して感謝の意を 表する.

参考文献

- 荒木 健, 越村 俊一: 格子ボルツマン法による自由表面 流れの解析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.65, No.1, pp.56-60, 2009.
- 2) 荒木 健, 越村 俊一: 格子ボルツマン法による水・油二層

表-2 LBM-MRT-CM, CADMAS-SURF 計算条件			
	LBM-MRT-CM	CADMAS- SURF	
離散格子系	D2Q9 格子	スタッガード 格子	
自由水面	VOF 法		
格子間隔	$\Delta x = \Delta z = 0.005 \text{ m}$		
乱流モデル	なし		
時間間隔	クーラン数:0.3	自動可変	
壁面境界	フリースリップ		
ゲート 開放速度	2.0 m/s	なし	
総粒子数	約4万個		



図-2 Case A 地点 P, Q の水面変動



流れの数値シミュレーション, 土木学会論文集 B2(海岸 工学), Vol.66, No.1, pp.66-70, 2010.

- 3) 佐藤 兼太, 越村 俊一:多緩和時間モデルを用いた格子 ボルツマン法による自由表面流れ解析の高精度化, 土木 学会論文集 B2(海岸工学), Vol.72, No.2, pp.253-258, 2016.
- 4) 稲室 隆二,吉野 正人,鈴木 康祐:格子ボルツマン法入 門,丸善出版, p.1, 2020.
- d'Humieres, D.: Generalized Lattice Boltzmann Equations, Rarefied Gas Dynamics, Theory and Simulations, Prog. Aeronaut., Vol.159, pp.450-458, 1992.
- 6) Holman, D. M., Brionnaud, R. M., Abiza, Z.: Solution to industry benchmark problems with the lattice-Boltzmann code XFlow, *In Proceeding in the European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS)*, 2012.
- 7) Kakinuma *et al.*: Journal of Disaster Research, 2021. (submitted)