

格子ボルツマン法による実地形津波シミュレーションとその検証

東北大学大学院

学生会員 ○佐藤 兼太

東北大学災害科学国際研究所

正会員 越村 俊一

1. はじめに

現在、格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann Method. 以下, LBM) を津波などの災害シミュレーションに応用する研究が進められている。例えば, Zhou (2004) が浅水長波理論に等価な格子ボルツマン法を定式化して以来, Liu & Zhou (2014) は, Chapman-Enskog 展開に基づく新たな移動境界条件を定式化し, Synolakis (1987) によるベンチマーク問題において, 従来の移動境界条件と比べて, 遡上計算を精度よく実行できることを示している。

しかし, Zhou (2004) による LBM の適用例は, 計算対象が理想地形であることが多く, 津波シミュレーションなどの実地形での検証は十分に行われていないのが現状である。そこで, 本研究では浅水長波理論に等価な LBM の実地形津波シミュレーションへの適用性の検証として, 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の再現計算を行い, 既往の Leap-frog 有限差分法との比較検証を行う。

2. 格子ボルツマン法

(1) 格子ボルツマン法の概要

LBM は, 気体分子運動論を起源とする数値流体シミュレーション手法である。連続体である流体を規則的な格子点を移動する仮想的な粒子の集合体と近似し, その仮想粒子の並進と衝突の時間発展から巨視的な流れ場の諸量を求めるメソスケールの解析手法である。LBM の特長として, 局所的な計算スキームであるため, 並列計算に向くことなどが挙げられる。以下では, 浅水長波理論に等価な LBM について, その要点のみを述べる。

(2) 格子ボルツマン方程式

LBM は, 各計算格子内に規則的に配置されたベクトル方向上に粒子分布関数 f_i を配置し, その時間発展を逐次計算することで, 流体の計算を行う。粒子分布関数の支配方程式は, 式(1)に示す格子ボルツマン方程式である。

$$f_i(\mathbf{x} + \mathbf{e}_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(\mathbf{x}, t) + \Omega_i[f_i(\mathbf{x}, t)] \quad (1)$$

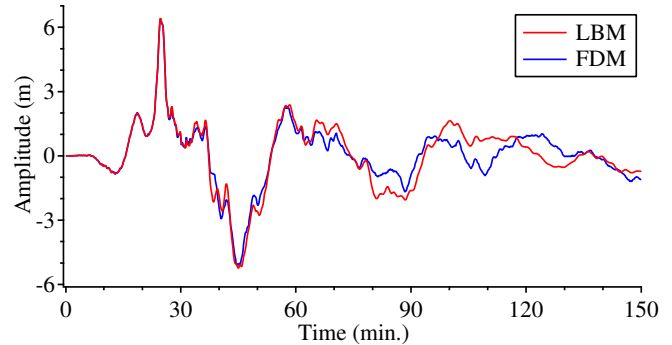


図-1 岩手県沖のGPS波浪計における計算波形の比較

ここで, $\Omega_i[f_i(\mathbf{x}, t)]$ は, 仮想粒子の衝突項であり, 本研究では式(2)に示す格子BGKモデルを使用する。

$$\Omega_i[f_i(\mathbf{x}, t)] = -\frac{1}{\tau} [f_i(\mathbf{x}, t) - f_i^{eq}(\mathbf{x}, t)] \quad (2)$$

式(2)における τ は, 単一緩和時間係数と呼ばれるパラメータであり, 流体の動粘性係数 ν と, 空間格子間隔 Δx および時間刻み幅 Δt を用いて, 以下の関係にある。

$$\nu = \frac{\Delta x^2}{6\Delta t} (2\tau - 1) \quad (3)$$

また, f_i^{eq} は局所平衡分布関数と呼ばれる関数であり, 本研究では, Zhou (2004) による浅水長波理論に等価な関数を用いる。具体的な式は紙面の都合上, 省略する。

3. 2011年東北地方太平洋沖地震津波の再現計算

(1) 計算体系の諸元

以上で述べた手法の検証として, 実際の地形データを用いて2011年東北地方太平洋沖地震津波の再現計算を実施した。本研究では, 内閣府中央防災会議による波源モデルを使用し, 既往の Leap-frog 差分法 (以下, FDM とする) による計算結果をベンチマークとして, LBM の計算精度を評価する。空間格子間隔は, 405m から 5m まで 1:3 で 5 領域のネスティング計算を行った。時系列波形の出力地点は, Satake *et al.* (2013) における岩手県沖の GPS 波浪計 (Iwate S) および宮城県女川町の検潮所とした。なお, 遡上計算は 5m 格子の領域 (女川町) のみで行い, 波先端の移動境界条件は, 全水深のみを線形外挿により与えた。

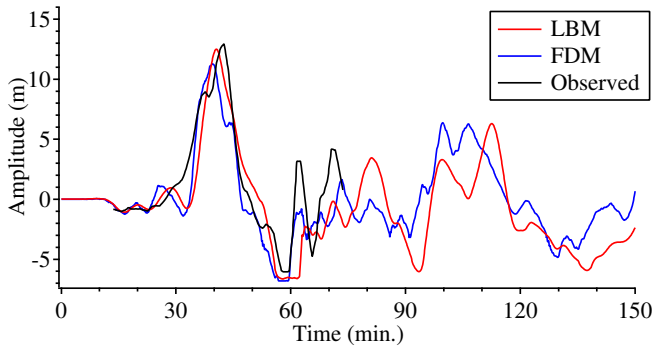


図-2 女川町の検潮所における計算波形と観測波形の比較

(2) 既往の有限差分法との比較検証

岩手県沖のGPS波浪計 (Iwate S) で出力した計算波形の比較を図-1に示す。計算開始から70min.までのLBMによる計算波形は、FDMとほとんど一致している。一方、90min.以降の波形については若干の差異が確認されたが、これは、陸に対する境界条件の違いによるものと解釈できる。本研究では、LBMの境界条件として遡上計算を実施しない領域ではBounce-back条件を与えて完全反射としたが、格子BGKモデルを用いた場合、Bounce-back条件は、完全反射を十分に満足しないことが報告されている。例えば、多緩和時間モデルによって衝突則の高度化を行うなど、衝突則とBounce-back条件の精度について、より詳細な検討が必要であろう。さらに、宮城県女川町の検潮所における計算波形と観測波形 (検潮記録) の比較を図-2に示す。LBMによる計算結果は、FDMの結果と同等の精度で津波の第一波を再現していることがわかる。ただし、この地点においても60min.以降の波形ではLBMとFDMの結果に差異がみられる。これは、前述した境界条件の違いに起因する問題と考えられるが、この地点は岩手県沖の出力地点より陸に近いので、反射波による計算結果の差異が顕著に表われたものといえる。

また、宮城県女川町における津波の最大浸水深の比較を図-3に示す。上がLBM，下がFDMによる計算結果である。両者はほとんど一致しており、LBMは従来の手法と変わらない精度で津波の遡上計算を実行できることが明らかとなった。以上より、LBMが津波シミュレーションにおいて高い実用性を有しているといえる。

4. おわりに

本研究では、LBMの実地形津波シミュレーションへの適用として、2011年東北地方太平洋沖地震津波の再現計算を実施した。既往のFDMとの比較を通じてLBMの妥当性を検証した結果、LBMは、実地形における津波のシ

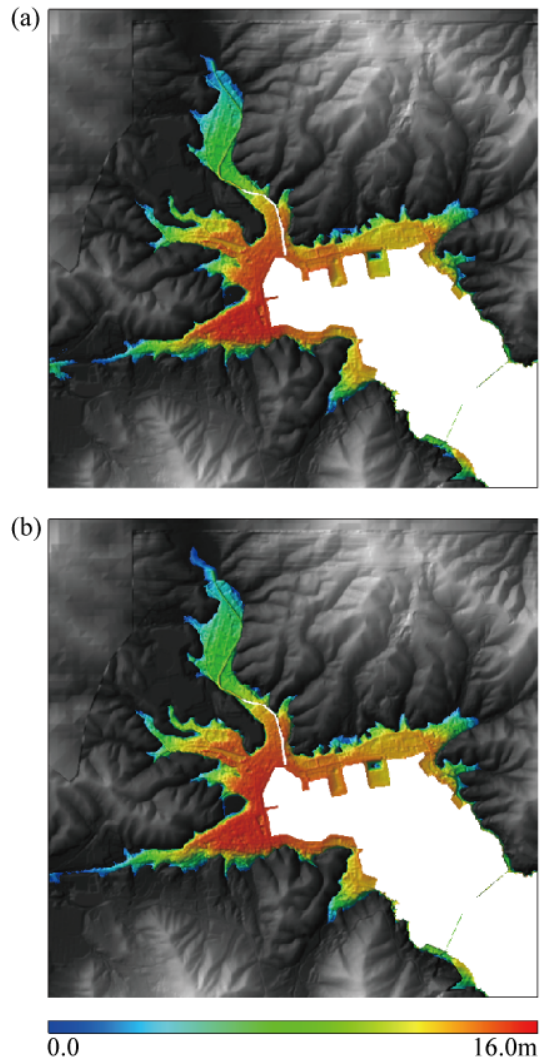


図-3 女川町における最大浸水深の比較 (a)LBM, (b)FDM
 ミュレーションを実用上問題ない精度で実施できることがわかった。一方で、格子BGKモデルにおけるBounce-back条件に起因する第一波以降の波の再現性に課題が残るため、LBMの衝突則の高度化を行う必要があることが明らかとなった。また、底面摩擦などの抵抗則や遡上先端部の境界条件、特に市街地における構造物の影響をどのように考慮するか、詳細な検討を行う予定である。

参 考 文 献

Liu, H. and Zhou, J. G. Lattice Boltzmann approach to simulating a wetting-drying front in shallow flows, *J. Fluid Mech.*, **743**, pp.32-59., 2014.
 Satake, K., Fujii, Y., Harada, T. and Namegaya Y. Time and Space Distribution of Coseismic Slip of the 2011 Tohoku Earthquake as Inferred from Tsunami Waveform Data, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **103** (2B), pp.1473-1492., 2013.
 Synolakis, C. E. The runup of solitary waves, *J. Fluid Mech.*, **185**, pp.523-545., 1987.
 Zhou, J. G. Lattice Boltzmann Methods for Shallow Water Flows, Springer, 2004.