

格子ボルツマン法による陸上構造物に対する津波流体力推定に関する検討

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. 序論

格子ボルツマン法(Lattice Boltzmann Method, 以下LBM)は、有限差分法などで流体の方程式を解く手法とは異なる、分子動力学に基づく新しい手法として注目されている。海岸工学の分野においても、浅水理論に等価なLBMが提案されて以来、LBMによる津波遡上解析や潮流解析が行われ、従来手法との比較により、LBMの津波遡上解析に対する適用性や計算安定性について検討した例もある(越村ら, 2009)。しかし、浅水理論に基づく以上、市街地を遡上する津波等の長波近似の成立しない流れ場においてはその精度は著しく低下する。また、陸上構造物に作用する津波流体力推定に関しては、その複雑な流れ場の再現のために3次元シミュレーションが要求される。

そこで上記問題に対応するため、LBMにおける津波流体力推定についての基礎的な検討を行う。本稿では、He(1997)に倣い、非圧縮流れに対するNavier-Stokes方程式に基づくLBMを自由表面を持つ流れ場に適用する。そして、3次元津波シミュレーションへ応用する新たな津波数値計算手法としてのLBMの可能性を検討する。

2. 格子ボルツマン法

(1) 格子ボルツマン法の概要

LBMは、流体を格子上を並進・衝突を繰り返す仮想的な粒子の集合体と近似し、格子上の粒子分布関数を用いて、質量および運動量保存則を満たすように流体の巨視的な変数を求める手法である。また、LBMから得られる解はNavier-Stokes方程式を2次のオーダーで満たすことが数学的にも保証されている。LBMは従来の数値計算手法に対し、(1)圧力のポアソン方程式を陰的に解く必要がない(2)完全に陽的な計算スキームであるため並列計算に向く(3)境界条件の取り扱いが容易である、等のメリットがある。以下では、He(1997)とThürey(2007)の手法に倣い、本解析手法の要点のみを述べる。詳細は参考文献を参照していただきたい。

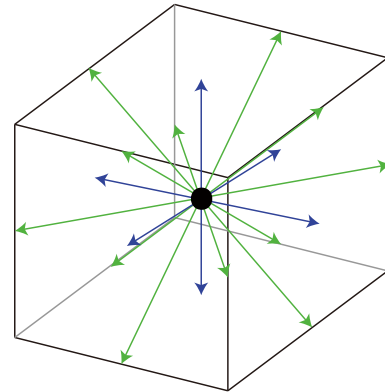


図-1 3次元19方向型格子

(2) 格子形状

本稿では図-1に示す3次元19方向型格子を用いる。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る。粒子の速度 e_i ($i = 1, 2, \dots, 19$)は(速度ベクトルの大きさを示す)。ここで、 $e = \Delta x / \Delta t$ (格子間隔 Δx , 時間刻み幅 Δt)である。

(3) 格子ボルツマン方程式

LBMは時刻 t , 位置 x で i 方向の速度を持つ粒子の分布関数 $f_i(x, t)$ の時間発展を式(1)に示す格子ボルツマン方程式により解く。並進過程において仮想粒子は速度に応じた方向の隣接する格子点へ移動する。また、衝突過程のモデルには格子BGKモデルを採用した。格子BGKモデルでは、粒子分布が単一の割合で局所的な平衡状態へ再分配される。

$$f_i(x + e\Delta t, t + \Delta t) = f_i(x, t) - \frac{1}{\tau} [f_i(x, t) - f_i^{eq}(x, t)] \quad (1)$$

ここで、 τ は格子BGKモデルにおける単一時間緩和係数であり、LBMにおける粘性を表すパラメータである。 τ により流体が平衡状態に達する速さが決まる。また、 $f_i^{eq}(x, t)$ は仮想粒子の局所的な平衡状態を表す関数である。LBMでは局所平衡分布関数の形により、流体のモデルが決定される。本稿ではHe(1997)による非圧縮流れに対する局所平衡分布関数に倣い、式(2)のように設定した。

$$f_i^{eq}(x, t) = w_i \left[\rho + \rho_0 \left\{ 3(e_i \cdot u) + \frac{9}{2}(e_i \cdot u)^2 - \frac{3}{2}u^2 \right\} \right] \quad (2)$$

キーワード: 格子ボルツマン法, VOF法, 3次元モデル, 津波流体力

連絡先: 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1 E302, TEL: 022-752-2082, FAX: 022-752-2083

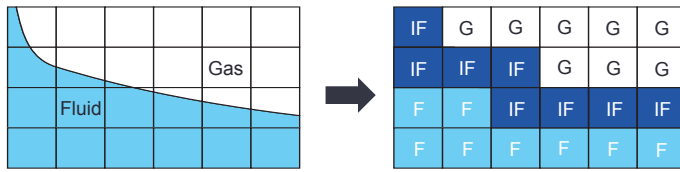


図-2 自由表面の表現 (F：流体，IF：界面，G：空隙)

ここで ρ ， u はそれぞれ流体の巨視的な密度と流速であり， ρ_0 は非圧縮流れを仮定した際の流体の定密度である．また， w_i は3次元19方向型格子において，それぞれのベクトル方向に対する重みを表すパラメータである．

$$\rho = \sum_i f_i \quad u = \frac{1}{\rho_0} \sum_i f_i e_i \quad (3)$$

本稿では，以上より得られた巨視的な変数を用いて有光(2012)による手法により構造物に働く流体力を算出した．

(4) 自由表面探索法

a) 3種類のセル

本研究では，Thürey(2007)の手法に倣い，VOF法に基づく自由表面の探索を行う．図-2の様に流体の充填率に応じて3種類のセルに分類する．はじめに，全て流体で満たされているセルは流体セルとし，流体を全く含まないセルは空隙セルとする．そして，流体を一部だけ含むセルを界面セルと定義する．流体セルはこれまでと同様に扱い，空隙セルは計算では考慮しない．界面セルでは後述する特別な操作を行う．

b) 界面セルの取り扱い

巨視的密度 ρ および，粒子分布関数から得られる巨視的な質量 m から，界面セルが「流体で満たされた($m > \rho$)」か「空になった($m < 0$)」かを判断し，界面セルを追跡することで自由表面の位置を追跡する．

3. シミュレーション結果

本稿では，Marsooli(2014)によるゲート急開流れの再現計算を行った．実験の詳細はMarsooli(2014)を参照していただきたい．本稿では水位の時系列変化と構造物に対する圧力の時系列変化を算出した．

図-3はH2地点における水位の時系列変化である．本稿では比較のため，従来の非圧縮流れを仮定しないLBMでの計算も行った．その結果，非圧縮流れに対するLBMは全体的に良好に水位を算出しているといえる．また，図-4にP1地点における圧力の時系列変化を示す．圧力は有光(2012)による経験式を用いて算出した．圧力は全体的に過小評価する傾向が見られた．有光(2012)の式の3次元計算の適用性について，検討を行う必要があるといえる．

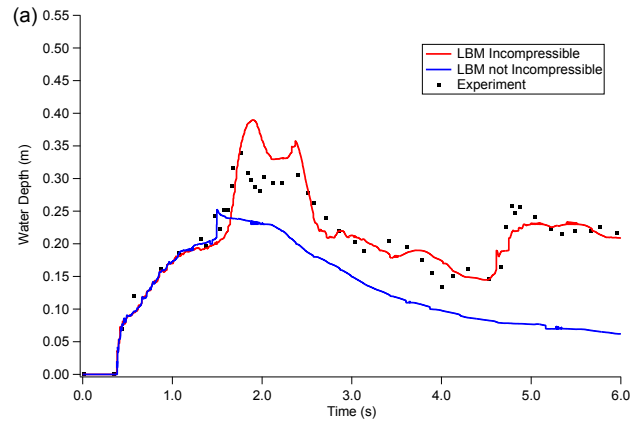


図-3 水位の時系列変化

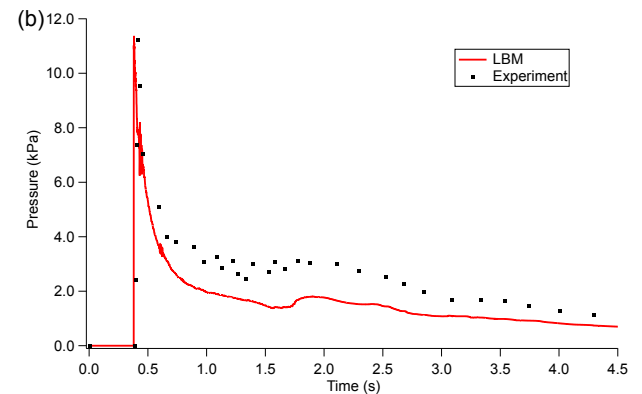


図-4 圧力の時系列変化

4. 結論

本稿では，He(1997)による非圧縮流れに対するLBMを自由表面を持つ流れ場に適用し，その計算安定性と流体力推定の基礎検討を行った．その結果，非圧縮流れを仮定することにより，従来のLBMにおいて問題となる，密度が発散することによる計算不安定を改善した．また，流体力推定に関して，有光(2012)の式を3次元計算に使用することへの検討を行う必要がある．

参考文献

- He X. and Luo L. S. (1997) : Lattice Boltzmann Model for the Incompressible Navier-Stokes Equation, *J. Stat. Phys.*, Vol. 88, Nos. 3/4, pp. 927-944.
- Marsooli R. and Wu W. (2014) : 3-D finite-volume model of dam-break flow over uneven beds based on VOF method, *Adv. Water. Resour.*, Vol. 70, pp. 104-117.
- Thürey N. (2007) : Physically based Animation of Free Surface Flows with the Lattice Boltzmann Method, University of Erlangen-Nuremberg, Ph.D. Thesis, 145p.
- 有光 剛・大江一也・川崎浩司 (2012) : 平面2次元津波遡上計算結果を用いた津波波圧算定方法の提案，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol. 68, No. 2, pp. 781-785.
- 越村俊一・村上和幸 (2012) : 格子ボルツマン法による津波解析コード構築に向けた実地系適用に関する研究，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol. B2-65, No. 1, pp. 256-260.