

Ⅲ-A34 連結格子セルラオートマトンを用いた落し戸の解析

京都大学農学研究科 正会員 村上 章
同 上 正会員 青山 成康

1. はじめに

粒状体の数値解析法には、連続体力学に立脚する方法 (FEM など) と粒子の集合体とみなす方法 (個別要素法¹⁾、粒状要素法²⁾、粒子群の極限解析³⁾、セルラオートマトン (CA)^{4)~6)}の二者がある。本研究で取り上げるCAは扱うことのできる粒子数 (自由度数) が、個別要素法、粒状要素法、極限解析のいずれよりもはるかに多く、計算時間もきわめて短い、という利点を有している。

CAで落し戸問題を扱った既往の文献は、主働モード、すなわち重力流動に関するものに限られていた。本研究では、連結格子セルラオートマトン (CL-CA) を用いて、特に落し戸の受働モードのローカルルールを示すとともに、均等径粒子集合体に関する計算を行って、その適用性を検討する。

2. CL-CAのローカルルール

ここで用いるCL-CAは、図1にあるようないくつかの三角形格子をつなぎ合わせ、12角形で粒子を近似したモデルを指す。従来のCAについては、落し戸主働モード (ホッパーフロー) に関するルールがいくつか提案され、粒子群の重力流動が検討されている^{4),5)}。これに比して、多格子1粒子型のCL-CAはさまざまな粒径・形状をもつ粒子を混在させた解析が可能となる、という利点を有しており、粉粒体の偏析や目詰まりといった現象が表現されてきた^{6),7)}。本文では、さらに多格子型の特徴を利用して、従来困難であった落し戸受働モード (Uplift Problem) のローカルルールを新たに考える。

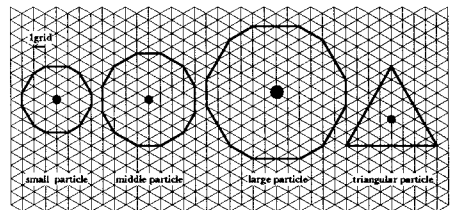


図1: CL-CAモデルの格子と粒子

落し戸受働モードのローカルルール

1. その中心座標が下方にある粒子から順に考えていく。中心座標の鉛直成分が同じなら、左 (右でもよい) から順に考える。図2 (a) では、粒子 A→B→C→Dの順となる。
2. 移動方向は、「6方向」および「静止」とする。
3. 今考えている粒子より下にある粒子が1格子移動したことにより、重なりが生じた場合 (図2 (b))、その重なりを解消する方向に、粒子を1格子だけ移動させる (図2 (c))。移動可能方向が左右両方ある場合は、乱数により移動方向を決める。
4. 重力を考慮して、左右斜め下が空いていれば、そちらを優先する。
5. 既に仮移動方向を決めた粒子の移動後位置と、改めて重なるような移動方向は避ける。

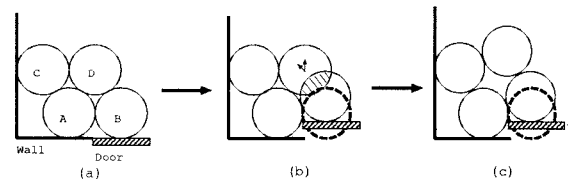


図2: 落し戸受働モードのローカルルール

ドアが1格子上昇する都度、以上のルールを全粒子に適用し、仮移動方向を決めていく。すべての粒子の仮移動方向が決定し、互いに重なり合うといった矛盾がないことを確認して、すべての粒子を一斉に1格子分移

Keywords: セルラオートマトン, 落し戸, 粒状体

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 TEL: 075-753-6152 FAX: 075-753-6346

動させる。

このルールを適用すると、例えば図2にあるように、ドアの上昇により粒子Bが1格子真上に移動するため、粒子BとDに重なりが生じる。粒子Dの移動可能方向は、「真上」または「左上」となるが、重なりを打ち消すために、「真上」を選択することになる。

3. Uplift problemの解析

図1のCL-CAのうち、最も小さい多格子粒子1058個を均等径粒子と見立て、これらを最密配置で敷き詰め、粒子約12個分の幅をもつ底部中央のドアを連続的に押し上げた。初期配置を図3、20格子分（約3粒子分）押し上げたあとの結果を図4、1格子ドアが上昇する間の粒子移動ベクトルを図5・6に示す。

図4によれば、ドア直上に「粒子が互いに移動しない三角形領域」が見られる。この三角形領域は、その頂点を介して、さらに上方にも反転した形として残っている。また、ドア直上の三角形の頂辺（表面）の高さは、盛り上がった周辺部表面のそれよりもやや低くなっている。このような特徴は、アルミ棒積層体を用いた実験でも確認されている。

粒子移動ベクトル（図5・6）を見ると、三角形領域では粒子が一群となって直上に向かって移動する一方、その両側ではほぼ左右対称に右（左）上60°に移動する様子が見てとれる。本研究で提案したCL-CAにおいて、特に対称性を維持するようなルールを与えていないにもかかわらず、ほんの一部の粒子を除いて、ほぼ対称性を維持しているのが興味深い。また、移動可能方向が複数あるため乱数により方向を選択した、という場面がほとんど見られず、粒子群の挙動はほぼ一意に定まっているものと考えられる。そこで、図4のような移動後の粒子配置は「適合」した変形であるものと推察される。すなわち、連続系との対比において、本方法による粒子挙動は、つりあい式とは無関係であるものの、適合条件などを満足しているのではないと思われるが、こうした微分方程式との対比を明らかにするのは、それほど容易ではなく、今後の課題である。

本研究におけるローカルルールの着想に対して、オーストラリア国CSIRO研究員 阪口 秀博士ならびに、前修士課程学生 橋本 守氏（現西松建設）より、有益なご指摘・ご討論をいただいた。また、計算結果に対しては、本学工学部 田村 武氏、中央大学理工学部物理学科 田口善弘氏、本学防災研究所 澤田純男氏、名古屋工業大学 前田健一氏から有益なご意見をいただいた。記して深謝の意を表します。

参考文献：1) Cundall, P.A. and Strack, O.D.L. : A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, 29(1): 47-65, 1979. 2) 岸野佑次：新しいシミュレーション法を用いた粒状体の準静的挙動の解析, 土木学会論文集, (406): 97-106, 1989. 3) 田村 武・小池 渉・櫻井義之：剛体要素からなる粒状体の上界法とその応用, 応用力学論文集, 土木学会, Vol.1, 1998. 4) Baxter, G.W. and R.P. Behringer : Cellular automata models for the granular materials, *Physica D*, 51: 465-471, 1991. 5) 中野孝昭・宮本俊輔・森下 信・佐藤勇一：セルオートマトン法による粒状体の挙動解析, 日本機械学会論文集 (C編), 64(617): 134-140, 1998. 6) Sakaguchi, H., Murakami, A., Hasegawa, T. and A. Shirai : Connected lattice cellular-automaton particles: A model for pattern formation in vibrating granular media, *Soils and Foundations*, 36(1): 105-110, 1996. 7) 橋本 守・村上 章・青山成康・長谷川高士：連結格子セルオートマトンによる粒状体の重力流動シミュレーション, 第34回地盤工学研究発表会平成11年度発表講演集, 1999.

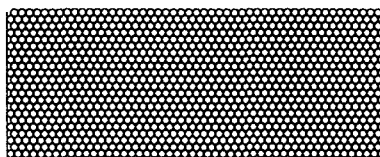


図 3: 初期配置

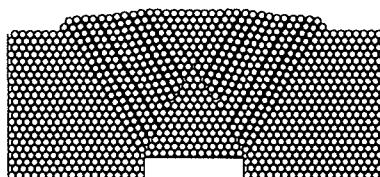


図 4: ドアを20格子押し上げた時の粒子群

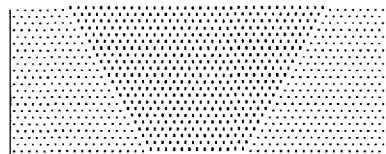


図 5: ドアを1格子押し上げた時の移動ベクトル (0→1ステップ)

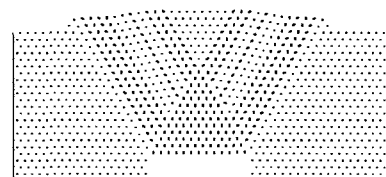


図 6: ドアを1格子押し上げた時の移動ベクトル (14→15ステップ)