固液流動化シミュレーションによる脱水構造形成

永田 裕作*・草薙 誠徳**・高木 隆司*

Simulation of water-escape structure by fluidization

Yusaku Nagata*, Tomonori Kusanagi** and Ryuji Takaki*

The particle-water fluidization is simulated numerically and a mechanism of formation of water-escape-structure is investigated. The numerical method employed in this study consists of computation of the two phase flow and that of movements of particles. The latter is based on the discrete element method (DEM) where effects of virtual mass and lubrication due to the movement of particles in water are taken into account. It is found that the water-escape structure is not formed in the case of fixed sedimentary layer, whereas it is formed when there is a water layer under the sedimentary layer. These results agree with previous experimental observations.

Key words : computational fluid dynamics, discrete element method, fluidization, water-escape structure

1. 緒 論

粒子層に底面から上方へ流れが作用することにより粒子が流動化する現象は、工業的には流動層と呼ばれ、化学プラントにおける化学反応装置などに応用されている。その流動層に関する研究において、粒子の流動化状態は、粒子や流体の種類、流速などによって大きく変化することが知られている（鞭ほか, 1984）。特に、流体として気体を用いた場合にはバブルやスラグと呼ばれている特徴的な構造が現れるのに対し、液体を用いた場合には一般に様に流動化する。

一方で、砂層からの脱水過程における流動化現象によって、多様な堆積構造が形成されることが知られており、これらは脱水構造と総称されている（Lowe, 1975）。堆積層中の脱水構造は、液状化など

によって絞り出された間隙水が、透水性の低い層で局所的な流動化現象を起こしたものと説明されることが多い（辻・宮田, 1987）。しかし、Mount (1993) は均質な砂岩層中に、よく発達した脈状/パイプ状脱水構造が形成された例を報告している。また、近年キューバにおいて発見された白亜紀-第三紀（K/T）境界の厚い砂岩複合層においても、同様の構造が発見された（Takayama et al., 2000）。このような単一層での脱水構造の形成は、先に述べた工学的な知見と一見矛盾する。

しかし、自然界の堆積層は、工学で扱われている粒子層に比べ、水平スケールが鉛直スケールよりも非常に大きい。また、堆積層の流動化における流体の流速は、通常はそれほど大きくなく、層が流動化を開始する最小限の速度（最小流動化速度）程度の流速であると考えられる。そのような条件下での固液系の流動化現象は、従来あまり工学では調べられておらず、脱水構造が形成される可能性は十分にありうる。

近年の計算機の急速な発達により、莫大な粒子数による計算量の多さから、従来は不可能と考えられてきた流動化現象の数値シミュレーションが、数万

受付: 2002 年 5 月 7 日 受理: 2002 年 11 月 14 日

* Department of Mechanical System Engineering, Faculty of Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology

** Department of Earth and Planetary Physics, Faculty of Science, University of Tokyo

個程度の粒子数の場合に実現できるようになった。そのスケールとしては、室内実験程度の流動化現象に相当する。室内実験に対して、数値シミュレーションには、初期条件や境界条件を厳密に設定することが容易であること、計測すべき物理量を空間的にくまなく取得することができること、それから現象の可視化が容易であるなどの利点がある。一方で、計算時間が莫大にかかることや計算可能な粒子数が限られているという欠点があるが、それは計算機の能力の問題であり、将来のさらなる計算機の発達によって解消できる種類のものである。このことから今後は、流動化現象の研究手段として、数値シミュレーションが主流になるものと考えられる。

筆者らは、これまで液体による流動化現象のシミュレーション法についての研究を進めてきた。気体による流動化現象のシミュレーション法は既に確立している（川口ら，1992）が、液体によるものに関しては、粒子と流れとの間の相互作用が非常に複雑であるため、ほとんど行われていない。しかし、粒子が流動化を始める最小の流速付近に液体の流速を限定することで、筆者らは液体での流動化をシミュレーションすることに成功した。筆者らは主に流体物理学を専門とし、堆積学に関しては部外者であるが、脱水構造の形成に関する問題は本方法と条件が重なることと、問題自体に非常に興味を持ったために、この問題への本方法の適用を試みたものである。現状の固液流動化現象の数値シミュレーション法によって、脱水構造を含めどのような自然現象が計算可能であるか、堆積学の専門家である読者の方々からのご意見やご提案などを期待したい。

記 号

d : 粒径
 $\mathbf{F}_c$: 粒子間衝突力
 $\mathbf{F}_f$: 流体抵抗
 F_i, F_j : 流体抵抗力の xy 方向成分
 $\mathbf{F}_l$: 潤滑力
 F_l^h, F_l^v : 2 粒子間の潤滑作用による力の中心軸、接線方向成分
 $\mathbf{F}_p$: 近接粒子間に作用する力
 $\mathbf{g}$: 重力加速度
 h : 2 粒子間距離
 I : 粒子の慣性モーメント
 m : 粒子の質量
 m_0 : 粒子の水中での仮想質量

P : 流体の圧力

$\mathbf{T}$: 粒子に作用するトルク

u, v : 流体速度の xy 方向成分

v_h, v_r : 2 粒子間の相対速度の中心軸、接線方向成分

$\mathbf{v}_p$: 粒子速度

ϕ : 空隙率

μ : 流体の粘性率

ρ, ρ_p : 流体と粒子の密度

ω : 粒子の角速度

2. 計 算 方 法

1. 概 要

流動化の計算では、粒子は離散的で流体は連続体であるので、両者を何らかの方法で連成させることが必要である。本研究では、粒子は個々の運動方程式を解き、流体はナビエ・ストークス方程式に相当する連続体の運動方程式を解き、両者の相互作用として流体抵抗を外力としてそれぞれの運動方程式に追加する方法をとった。

なお、本計算は、奥行き方向に 1 層の 2 次元的な空間で行った。これは、このモデルを 3 次元に拡張することは困難ではないが、PC や大型計算機で計算する上で現実的な粒子数は、大体 1 万個から多くても 10 万個程度と限られているので、3 次元の場合は流動化の空間的な状態を把握するのに十分な領域を取ることができないためである。

2. 基礎方程式

流体運動の基礎方程式としては、Anderson and Jackson の 2 流体モデル（Anderson and Jackson, 1967）の式に粘性による応力項（(2)(3) 式の右辺第 2 項）を加えた式を用いた。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial \phi u}{\partial x} + \frac{\partial \phi v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \phi u}{\partial t} + \rho \frac{\partial \phi u^2}{\partial x} + \rho \frac{\partial \phi uv}{\partial y} = \\ -\phi \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \phi u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi u}{\partial y^2} \right) - F_i \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \phi v}{\partial t} + \rho \frac{\partial \phi uv}{\partial x} + \rho \frac{\partial \phi v^2}{\partial y} = \\ -\phi \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 \phi v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi v}{\partial y^2} \right) + \phi \rho g - F_j \end{aligned} \quad (3)$$

粒子の運動方程式は、粒子にかかる力として、浮力と重力に加え、流体抵抗 $\mathbf{F}_f$ および近接粒子間に働く力 $\mathbf{F}_p$ を導入した。そして粒子質量に仮想質量

m_0 を加えた.

$$\frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = \frac{1}{\rho_p} \nabla P + \mathbf{g} + \frac{1}{m+m_0} (\mathbf{F}_f + \mathbf{F}_p) \quad (4)$$

$$\frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \frac{\mathbf{T}}{I} \quad (5)$$

$$m_0 = \frac{1}{12} \rho \pi d_p^3 \quad (6)$$

粒子が存在することにより流体に作用する抵抗力として、本研究では固定粒子層の圧力損失の半実験式である Ergun の式を用いた.

$$F_f = \left[150 \frac{(1-\phi)^2}{\phi} \frac{\mu(u-\bar{u}_p)}{d^2} + 1.75(1-\phi) \frac{\rho(u-\bar{u}_p)|u-\bar{u}_p|}{d} \right] dx dy dz \quad (7)$$

また、近接する粒子間に働く力 F_p として、本研究では潤滑力 F_l のみを考慮した. 固液系では、これらの他に履歴力、揚力なども作用することが知られているが (粉体工学会, 1998), ここで考えている系では、粒子の初期配置からの移動量・回転速度は非常に小さく、流体速度のシア어도小さいので、この場合は2つの作用を無視することができる. 潤滑力とは、2つの近接している粒子が互いに運動する際に、その間に存在する水の圧力変化のため、2粒子間の相対運動と逆向きに働く力である. 本研究では、2粒子間の距離が十分に小さい (半径の0.5倍以下) 場合についてのみこの力が作用するものとし、Hele-Shaw 近似および連続の式を適用して以下の式を独自に導き、それを用いた.

$$F_l^h = -\frac{3}{32h} \pi \mu d_p^2 v_h \quad (8)$$

$$F_l^r = \frac{1}{2} \pi \mu d_p v_r \ln 2 \quad (9)$$

これにより、接近する2粒子は衝突する前に潤滑力による反発を受け、衝突は回避される. しかし、タイムステップ幅や粒子の位置関係によっては、この力が十分に作用しないうちに粒子同士が計算上衝突する場合がある. そのときは粒子要素法 (DEM) による粒子間の衝突・反発アルゴリズムを用い、衝突力 F_c を計算した (Mikami et al, 1998).

3. 計算手順

全体の計算は、

- ① 全領域の粒子配置をもとに空隙率 ϕ を計算し、式(7)より流体抵抗を求める
- ② 圧力 P および流速 u, v を式(1)~(3)により

図1 層の平均空隙率と流速との関係

SIMPLER 法により計算

③ 粒子速度を式(4)と(5)から陽解法により求め、粒子移動量を計算という手順を各タイムステップで行なった.

4. 計算条件

粒子として砂を想定し、比重 2.65、粒径 1 mm とした. 粒子数は、計算機のメモリーの関係から 10,000 個とした. 容器は、幅が 270 mm で高さが 90 mm とした. 流体としては水を想定し、密度を 998 [kg/m³], 粘性率を 1.0×10^{-3} [Pa · s] とした.

流体を計算するための格子は、1 格子の一边を粒子直径の 2.5 倍としたので、幅方向に 108 個、高さ方向に 36 個とった. 時間幅は、川口ら (1992) による DEM での決定法に基づき、 $\Delta t = 2.6 \times 10^{-5}$ [s] とした.

容器底面から与える流速は、粒子層の初期状態における最小流動化速度よりも多少大きな値とした. 最小流動化速度については、Wen and Yu (1966) の研究をもとに、いくつかの流速での数値シミュレーションを行い、 4×10^{-3} m/s という値を得た (図1). これから、層底面から与える流速を 5×10^{-3} m/s とした.

そして容器の中には、粒子をランダムに充填して層を形成した. そのとき容器内の粒子層の高さは 40 mm 程度である. 容器内の粒子層として、本研究では、以下の2種類について計算を行なった.

図 2 粒子層底面から一様流を与えた場合の間隙率分布（上：初期状態，下：10 秒後）

① 粒子を底面から充填した場合、つまり粒子層の底面に直接一様流が流入する場合。

② 容器の底面から 20 mm の高さの間には、粒子が入らないようにした場合、つまり粒子層の底面に流体は通すが粒子は通さない仕切り板があるような場合。

ここで②の条件は少々人工的であるが、例えば液状化において透水係数が小さい層の直下に水が滞留するような状況をモデルとしたものである。

3. 計算結果および考察

1. 粒子層底面から一様流を与えた場合

前節 4 の①のように容器に粒子を充填し、底面から一様流を流した場合の間隙率分布を図 2 に示す。この図は容器内全体を示しており、下半分の色の濃い部分が粒子層である。粒子層部分についてみると、初期には乱雑な粒子堆積構造を反映して、粒子が密な部分と疎な部分が細かく入り混じっている。それに対して 10 秒後のスナップショットでは、粒子が密な部分が減少し、水平方向に比較的一様な分布となった。

これは、液体中の固体粒子層への一様流による流動化ではチャネリングが生じにくいという工学での一般的な認識と一致している。

2. 粒子層底面に空隙がある場合

前節 4 の②のように、容器底部と粒子層との間に空隙を設け、容器底面から一様流を流した場合の結果の間隙率分布を図 3 に示す。前項の場合と異なり、10 秒後の粒子層の間隙率分布では、粒子が密な部分と疎な部分が細かく入り混じっている。特に粒子層右端付近の間隙率が周囲に比べて大きくなっており、ここでチャネリングが生じていると考えられる。図 4 は、この 10 秒後のときの、x 方向、y 方向の流速分布である。x 方向の図で、網目状の領域は左から右への流れを、一様に塗られている領域は右から左への流れを表している。y 方向の図では上方を正としている。これらの流速分布より、粒子層下部の流体部分の流れについてみると、粒子層へ入る流れは非一様であり、チャネリングが生じている部分に集中していることがわかる。

このことから、粒子層の下部に流体部分がある場合、流体部分での流れは粒子層の中で流れやすい部分に集中し、そこが流動化してさらに流れが集中するという正のフィードバックによってチャンネルが形成されたと考えられる。

3. その他の場合

(1) 粒子層中心にパイプ状空隙がある場合

パイプ状の脱水構造が周囲に与える影響を調べるために、本節 2 と同様の粒子の充填で、粒子層の中心に垂直方向にパイプ状の空隙を設けた場合の計算

図 3 粒子層底面に空間がある場合の間隙率分布（上：初期状態，下：10 秒後）

を行なった。（空隙の領域では粒子は入ることができないが、流体は自由に行き来できるようになっている。なお、初期配置は図 3 の上図に空隙を設けたのと同じである。）図 5 は、この場合の 10 秒後の空隙率分布である。このとき、粒子層の左端付近で空隙率が大きい領域が見られ、この領域で局所的な流動化が生じていると考えられる。またパイプの周囲では比較的空隙率が小さい傾向が見られた。

(2) 衝突相互作用による場合（固気系）

ここまでは近接粒子間の相互作用に流体の潤滑力を導入したが、ここで比較のため、本節 2 と同様の粒子の充填で、粒子間の相互作用として衝突力を用いた場合の結果を示す。これは、気体による固体粒子の流動化に相当し、例えば陸上での火砕流堆積物のような気体で満たされた空間での流動化のモデルとなるようなものである。図 6 は、この場合の 10 秒後の結果の空隙率の分布である。このとき、粒子層の右端に局所的に流動化している箇所が見られ、その他の部分では比較的粒子が詰まった状態が見られた。

粒子間に潤滑作用を適用した場合、式 (7) で分母に粒子間の距離が入っているため、再び接触することはほとんどないのに対し、衝突作用を適用した場

合には、粒子は自由に接触・衝突し、接触をした粒子間は摩擦力が働くため、粒子が動きにくい。その結果、粒子層による圧力損失が大きくなり、最終的に突発的な流動化が生じる。これは固気系でしばしば実際に見られる現象である。

4. 考 察

本計算より、粒子層底面から一様流を流した場合には一様な流動化が生じ、粒子層の下部に流体層がある場合に局所的な流動が生じるという結果が得られた。これは、一見すると、透水性の低い層の直下に流体が滞留することにより局所的な流動化が生じるという姉川・宮田（2000）の実験的な研究に相当する結果のように見える。しかし、姉川らの実験では滞留した水の圧力により透水性の低い層に亀裂が入り、そこから局所的な流動が生じている。それに対して、本計算では、粒子層の初期配置の不均一性から、層の中の透水性の高い部分に流れが集中することにより、局所的な流動が生じている。納口（2001）は、粒径の異なる 2 種の砂を液中で混合し沈降させて層を形成し、瞬間的な振動を加えて液状化を起こす実験を行い、局所的な流動化が生じることを示した。この実験でも、液状化により 2 つの粒子

図 4 粒子層底面に空間がある場合の流速分布 (上: x 方向, 下: y 方向)

図 5 中心にパイプ状の空間がある場合の間隙率分布 (10 秒後)

層間に水の層が形成されて流動化が生じるが、水の層は水平方向にほぼ一様に形成されるので、本計算結果はこの場合の局所的な流動化形成機構に関連していると考えられる。

しかし、ほぼ均一の粒径の粒子層中で、局所的な流動化によりチャンネル状の脱水構造が形成される機構については、本計算からは直接的な結果を得ることができなかった。これは今後の課題である。

図 6 衝突相互作用による場合の間隙率分布 (10 秒後)

中心にパイプ状の空間がある場合の計算は、このような空間の影響がどの程度まで及ぶかを調べることで、複数の脱水構造が形成された場合にそれらの間隔がどのように決定されるかを理解するために行ったものである。しかし、計算領域が十分な広さをもっていないために、この計算からは明確な結果を得ることができなかった。今後の課題として、複数の脱水構造が形成されたとき、その間隔がどのような関係を満たしているかを、より広い空間での数値シミュレーションによって調べることが挙げられる。

4. 結 論

堆積砂層の流動化による脱水構造形成のシミュレーションへの試みの第一歩として、流動層の数値シミュレーションの手法を応用した2次元の数値シミュレーションを行なった。

その結果、工学的に知られていたとおり、単一堆積層では脱水構造が形成されなかった。それに対し、粒子層の底面に流体層がある場合には、パイプ状脱水構造が形成されることが示された。この結果は、定性的に従来の実験的研究における局所的な流動化の成因を示すものである。

近接粒子間に作用する力として潤滑力を導入することによって、粒子分布が平滑化されることにより、構造が形成されにくくなることが確かめられた。これは、固液系においては固気系に比べて不均質な流動化がおこりにくいことの一因と考えられ、これは固液系のシミュレーション手法として本方法が妥当であることを示している。

今後の課題として、単一層でのパイプ状脱水構造の形成機構について再検討すること、そして粒子数

や領域を十分な大きさに取った数値シミュレーションにより、近接するパイプ状脱水構造の間隔を決定する条件を調べることが挙げられる。

文 献

- Anderson, T.B. and Jackson, R., 1967 : A Fluid Mechanical Description of Fluidized Bed. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, **6**, 527-539.
- 姉川学利・宮田雄一郎, 2000 : 未固結砂泥互層における流体の移動過程. *地質学雑誌*, **107**, 270-282.
- 粉体工学会編, 1998 : 粒子シミュレーション入門. 産業図書, 105 p.
- 川口寿裕・田中敏嗣・辻 裕, 1992 : 離散要素法による流動層の数値シミュレーション (噴流層の場合). *日本機械学会論文集中*, **58**, 2119-2125.
- Lowe, D.R., 1975 : Water escape structure in coarse grained sediments. *Sedimentology*, **22**, 157-204.
- Mikami, T., Kamiya, H. and Horio, M., 1998 : Numerical simulation of cohesive powder behavior in a fluidized bed. *Chemical Engineering Science*, **53**, 1927-1940.
- Mount, J.F., 1993 : Formation of fluidization pipes during liquefaction. *Sedimentology*, **40**, 1027-1037.
- 鞭 巖・森 滋勝・堀尾正靱, 1984 : 流動層の反応工学. 培風館, 25 p.
- 納口恭明, 2001 : 教育普及用超小型液状化実験ボトル. 日本流体力学会年会 2001 講演論文集, 137-138.
- Takayama, H., Tada, R., Matsui, T., Iturralde-Vinent, M.A., Oji, T., Tajika, E., Kiyokawa, S., Garcia, D., Okada, H., Hasegawa, T. and Toyoda, K., 2000 : Origin of the Penol Formation in northwestern Cuba and its relation to K/T boundary impact event. *Sedimentary Geology*, **135**, 295-320.
- 辻 隆司・宮田雄一郎, 1987 : 砂岩層中にみられる流動化・液状化による変形構造. *地質学雑誌*, **93**, 791-808.
- Wen, C.Y. and Yu, Y.H., 1966 : A generalised method for predicting minimum fluidization velocity. *Chemical Engineering Progress Symposium*, **62**, 610-620.

固液流動化シミュレーションによる脱水構造形成

永田 裕作・草薙 誠徳・高木 隆司, 2002, 堆積学研究, No. 55, 9—16

Nagata, Y., Kusanagi, T. and Takaki, R., 2002 : Simulation
of water-escape structure by fluidization.

Jour. Sed. Soc. Japan, No. 55, 9—16

固液流動化の数値計算を行い、脱水構造の形成を調べた。本研究の数値計算法は、2相流体と粒子の運動の計算から構成されている。後者の計算は、流体から受ける仮想質量や潤滑効果を考慮した粒子要素法（DEM）に基づいている。この計算により、単一粒子層の場合には局所的な流動化は生じず、粒子層の下層に液体層が存在している場合に生じることが確認された。これは、従来の実験的な研究による結果と合致している。