

3D プリンターを利用した粒子—流体計算のバリデーション

○藤澤和謙*, 北尾 朋広**, 福元 豊***, 村上 章*

K. Fujisawa, T. Kitao, Y. Fukumoto, A. Murakami

1. はじめに

土中の浸透挙動をミクロ的な観点から数値的にシミュレートすることは、間隙水と土粒子の相互作用を高解像度で直接的にとらえることを可能にする。このようなシミュレーションは、固体と流体の相互作用に関わる多くの現象に応用でき、これまでに液状化現象や侵食・浸透現象にも適用例がある。しかし、そのような数値計算結果に対する実験的検証は現在においても十分ではない。本論では、3Dプリンターにより球形粒子で構成された多孔質体を作成し、数値計算と実験との間で同一の間隙構造を実現し、その中を流れる浸透実験を通して、粒子—流体計算のバリデーションを試みた。

2. 格子ボルツマン法

複雑な多孔質領域を流れる流体計算に格子ボルツマン法 (LBM) は有利である。LBM では、ボルツマン方程式を離散化し、以下の仮想粒子の密度分布関数 f_i の時間発展を解くことにより流れのシミュレーションを可能にする。

$$f_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i, t + \delta_t) = f_i(\mathbf{x}, t) + \Omega_i(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

ここに、 \mathbf{c}_i は離散速度ベクトルであり、計算コストと計算精度を考慮して 19 速度モデルを用いた。式 (1) は時刻 t において速度 \mathbf{c}_i をもつ粒子がすぐ隣の格子点 $\mathbf{x} + \mathbf{c}_i$ に移動することを表し、並進過程と呼ばれる。密度分布はまた、時間ステップ δ_t の間に、式 (1) の右辺第 2 項である衝突項 Ω_i によって更新され、衝突過程と呼ばれる。この両過程により密度分布関数 f_i を更新し、流体の密度 ρ や速度 \mathbf{u} を計算する。高レイノルズ数条件においても安定計算を可能とするため RLBM モデルを採用した。また、流体と固体の相互作用を記述するにあたり、Noble and Torczynski (1998) ¹⁾ によって提案された PS-LBM を用いた。

3. 人口樹脂多孔質体を用いた浸透流実験

上述の LBM によって多孔質体中の微視的な流れをシミュレートし、その結果を実験的に検証するには、数値計算と実験において同一の多孔質構造を実現する必要がある。個別要素法 (DEM) によって多孔質領域の空間形状を再現するため、3D プリンターを利用して球形粒子から成る多孔質材料を作成した。造形した 1 層の多孔質体 (以下、粒子シートと呼ぶ) を図 1 に示す。この一枚の粒子シートには、直径 4.9 mm の球が左右方向及び上下方向に規則正しく配列されており、半球が

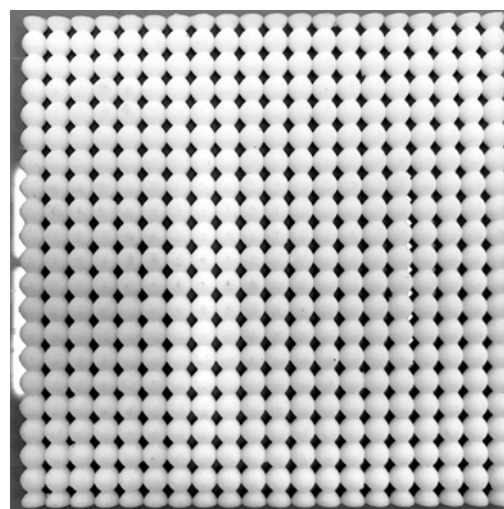


図1 3Dプリンターによって造形した土粒子層
Fig.1 A layer of particles made by 3D printer

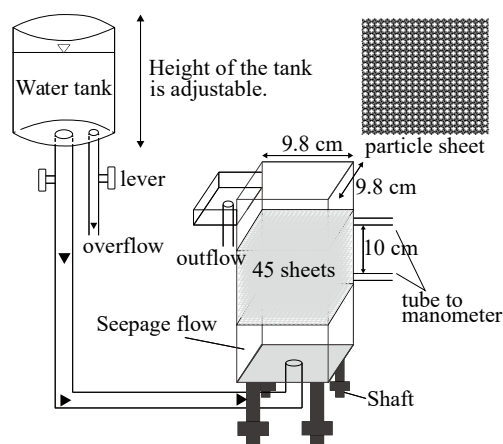


図2 浸透実験装置の概要
Fig.2 Experimental apparatus for seepage test

*京都大学 Kyoto University, **農林水産省 Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, ***長岡技術科学大学 Nagaoka University of Technology **Keywords:** 浸透流, 数値流体力学

向かい合う境界の片方に配置される。

球及び半球はわずかな接触面積を持って連結され、合計で380個の球と40個の半球から成る1枚の粒子シートは、一辺の長さが98 mmの正方形領域を占める。1枚の粒子シートの上に、90度回転させたもう1枚の粒子シートを重ねると、はじめの粒子シートの球と球の間に、もう1枚の粒子シートの球がかみ合うように位置し、体心立方構造を有する多孔質材料を作成できる。なお、粒子シートは白色の樹脂でできており、その密度は1180 kg/m³であった。

図2に、粒子シートを用いた浸透実験の概要を示す。実験では、45枚の粒子シートを上述のように90度回転させて重ね合わせることで多孔質層を形成した。同図から分かるように正方形の断面を持つ越流水槽を透明の亚克力板によって作成し、その内部に上記多孔質層を配置した。多孔質層と亚克力板はシリコンシートを介して密着しており、亚克力面に沿う集中流を完全に防止した。多孔質層の占める体積と、1枚あたりの粒子シートの体積から多孔質層の間隙率を計算すると、0.245であった。

越流水槽の底面を、一定の水面を保つことのできる越流式の貯水槽に接続し、越流水槽内に鉛直上向きの浸透流を発生させた。越流水層から流出する水の流量と、多孔質層の側面に設置されたマンメータから水頭差を計測した。貯水槽の高さを変化させ、合計9種類の異なる水頭差を与えて、動水勾配と流量（またはダルシー流速）の関係を得た。

図3に、実験から得られた動水勾配とダルシー流速の関係を水色のプロットで示す。同図に示す通り、実験で与えた水頭差の範囲では、動水勾配とダルシー流速は線形な関係にあり（非線形領域までは達しておらず）、透水係数は2.471 cm/sであった。図4においても、水色のプロットで、摩擦係数 f_b とレイノルズ数 Re_b の関係を示す。摩擦係数とレイノルズ数の定義は以下の通りであり、

$$f_b = \frac{-P'}{\frac{\rho v^2}{D} \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3}}, \quad Re_b = \frac{\epsilon}{1-\epsilon} \frac{\rho D v}{\mu} \quad (2)$$

P' , ρ , D , ϵ , v , μ は圧力勾配、流体の密度、粒径、間隙率、ダルシー流速、粘性係数を表す。図4からは、実験結果は摩擦係数がレイノルズ数の増加に伴って線形に減少する層流域にあり、Ergun式²⁾と良い一致を示すことが見てとれる。図3及び図4に桃色のプロットでLBM-DEMによる数値解析結果を示す。全体的に数値解析は実験を良く再現する。図4からは、実験と数値解析の結果は非常に良い一致を示すが、図3においては、動水勾配が大きくなるにつれて、ややズレが生じる。様々な解析条件を変えて、この理由を考察した結果、実験と数値解析との間隙率のわずかな差がこのズレの原因と考えられた。

参考文献：Noble D, Torczynski J (1998). A lattice-boltzmann method for partially saturated computational cells, International Journal of Modern Physics C - IJMP, 9, 1189–1201. 2) Rajinder P (2019). Teach second law of thermodynamics via analysis of flow through packed beds and consolidated porous media, Fluids, 4, 116.

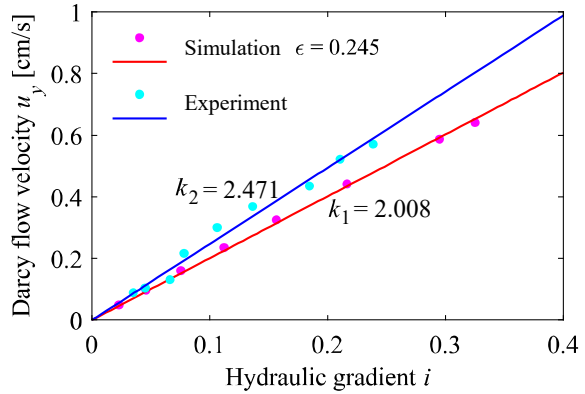


図3 動水勾配とダルシー流速の関係

Fig.3 Hydraulic gradient vs. Darcy flow velocity

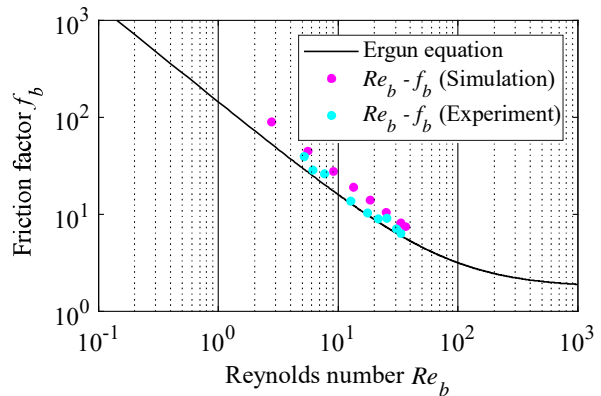


図4 摩擦係数とレイノルズ数の関係

Fig.4 Friction factor vs. Reynolds number