

TSUBAME 共同利用 令和3年度 学術利用 成果報告書

利用課題名 廃棄物最終処分場における間隙内流体挙動の数値解析
英文: Numerical analyses of fluid dynamics in pores of landfill waste layer

利用課題責任者 鈴木和将
Kazuyuki Suzuki

所属 埼玉県環境科学国際センター
Affiliation Center for Environmental Science in Saitama
URL <http://www.pref.saitama.lg.jp/cess/index.html>

邦文抄録

本研究では、廃棄物最終処分場内部の水やガスの流れ問題の高品質な計算スキームの開発を目的として、数値流体解析の検討を行った。具体的には支配方程式に Navier-Stokes 方程式を用いて SUPG/PSPG 法に基づく安定化有限要素法により離散化した。さらに、GPGPU コンピューティングによる計算の高速化を試みた。連立一次方程式の求解には GPBi-CG 法を導入し、マルチ GPU を利用して高速並列計算によるシミュレーションを行った。

英文抄録

The purpose of this study is to establish a numerical simulation model of fluid flow in a landfill layer with high quality and high precision. A 3D finite element method is a powerful tool for flows having complex geometry such as porous media in landfill. However, it leads a huge amount of computation cost. In this study, we examined to accelerate the 3D FEM by using the Graphics Processing Unit as a general-purpose use (GPGPU).

Keywords: landfill, Numerical simulation, FEM, Navier-Stokes equations, GPGPU

背景と目的

近年、資源開発や地球科学の分野では、岩石のような多孔質媒体における流体特性を明らかにするため、デジタル岩石物理学の研究が進んでいる¹⁾。デジタル岩石物理学は、岩石をデジタル化し、それに対し数値シミュレーションを適用することにより、不均質な岩石の間隙形状を考慮して水理特性といった物理特性を求めることが可能となる。この手法は、複雑な廃棄物層間隙形状を有する廃棄物最終処分場の流体挙動の解析においても有用なツールとなるものと期待される。廃棄物層内の流体挙動は、間隙形状に強く依存すると考えられるものの、従来の方法では、定量的な間隙形状分布や間隙に関する幾何学的な位置情報を表すことができなかつたため、間隙形状と流体挙動との相互作用は十分に解明されていない。そこで、本研究では、マイクロフォーカス X 線 CT を用いて、廃棄物材料の間隙に関する 3 次元ボリューメータを取得し、このデータから定量的な間隙の幾何学的な情報の抽出を試みるとともに、モデ

ル化した流れ場において流体シミュレーションを行い、流体特性と間隙形状の関係を明らかにすることを目的とする。

概要

試料には、一般廃棄物焼却施設から採取した主灰と廃棄物最終処分場においてボーリングにより採取した廃棄物試料等を用いた。

これらの試料は、マイクロフォーカス X 線 CT 装置を用いて撮影した。その後、試料の CT 画像を画像処理ソフトウェアに読み込み、モデル間隙形状の作成を行った。さらに、作成した間隙形状のデータを STL ファイルへ変換し、この STL ファイルを基に、自動メッシュ生成ソフトウェア Gmsh²⁾を用いて有限要素メッシュの生成を行った。

数値シミュレーションの支配方程式には、下記(1),(2)式に示す非圧縮性 Navier-Stokes 方程式、連続の式を用いた。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \text{ in } \Omega, (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \text{ in } \Omega. (2)$$

ここで、 u は流速、 p は圧力、 Re は Reynolds 数、 Ω は計算領域である。

上記(1),(2)の支配方程式に対して、安定化有限要素法(SUPG/PSPG 法)^{3,4)}を適用すると以下のように弱形式が導かれる。

$$\int_{\Omega} w_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) d\Omega - \int_{\Omega} \frac{\partial w_i}{\partial x_i} + \int_{\Omega} \frac{1}{Re} \frac{\partial w_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$+ \sum_{e=1}^{n_{el}} \int_{\Omega} \left(\tau \bar{u}_k \frac{\partial w_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) d\Omega = 0, (3)$$

$$\int_{\Omega} q \frac{\partial u_i}{\partial x_i} d\Omega + \sum_{e=1}^{n_{el}} \int_{\Omega} \left(\tau \frac{\partial q}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) d\Omega = 0, (4)$$

ここで、 w_i, q は、それぞれ式(1),(2)に対する Galerkin 項の重み関数である。また、 \bar{u}_i は移流速度を表し、 τ は安定化パラメータを表している。これら(3),(4)式に対して Crank-Nicolson 法により時間方向の離散化を行うことで、有限要素方程式が導かれる。導かれた連立一次方程式の解法には GPBi-CG 法⁵⁾を適用した。

本研究では、計算の高速化を達成するために、GPGPU を用いた並列計算を取り入れ、NVIDIA 社の統合開発環境である CUDA とそれらのライブラリ(cuBLAS, cuSPARSE)を用いて GPBi-CG 法を適用した。

また、X 線 CT 画像データからの間隙構造解析は、ExFact VR 及び ExFact Analysis for Porous / Particles (日本ビジュアルサイエンス)を用いて行った。この解析により、間隙の 3 次元幾何学的情報として空隙中心軸 (medial axis) とその過程で得られる連結経路 (connecting path) あるいは屈曲度 (tortuosity) の情報を得た。空隙中心軸の決定には、burn algorithm⁶⁾が採用されている。また、屈曲度は次式で定義される。

$$Tortuosity = -\frac{f}{s}$$

ここで、 f は向かい合う面を貫通する中心軸の実際に通った経路の長さ、 s は f の経路の始点と終点を結ぶ直線の長さである。

結果および考察

上部の面より垂直に流入する一様流を与え、流れの数値シミュレーションを実施した。焼却灰の間隙内速度ベクトルを図 1 に示す。焼却灰は、コアサンプルと比較して、粒径が小さく、密に充填されているため、より複雑なパスと通り水が流れている様子が確認できた。

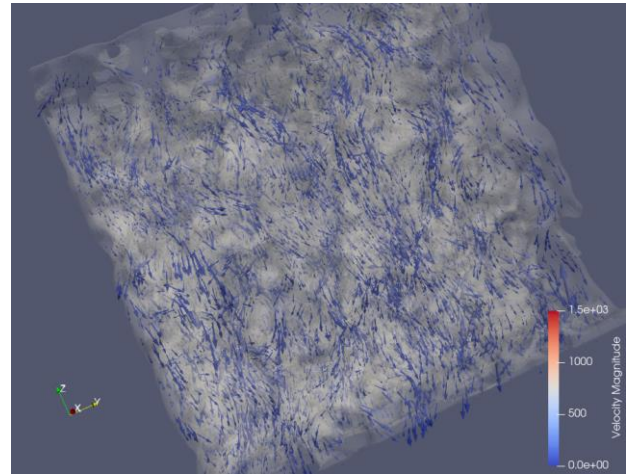


図 1 焼却灰試料における数値シミュレーション結果

そこで、これらの試料に対して定量的な間隙の構造解析を行った。中心軸に対し直交する面の中で周囲より面積の小さくなる場所(くびれた部分)をスロートと定義し、スロートによって囲まれた領域をポアと定義した。焼却灰とコア試料を比較すると、空隙率は、焼却灰がわずかに小さかったものの、ポア数は、焼却灰が極めて多く特徴的であった。平均ポア体積、平均ポア有効半径は、コア試料より小さかった。また、くびれた部分のスロートは、平均面積、平均有効半径ともに焼却灰が、コア試料と比べて小さかった。

図 2 に、焼却灰とコア試料の間隙のネットワーク構造を細線化した結果を示す(中心軸分布)。焼却灰は、コア試料と比較して多くのパス(path)が存在しており、比較的小さい径のポアが連結し多数のパスを形成している。これは、流体移動が可能となるルートがより複雑になることを示唆しており、数値シミュレーション結果と同様の傾向であった。

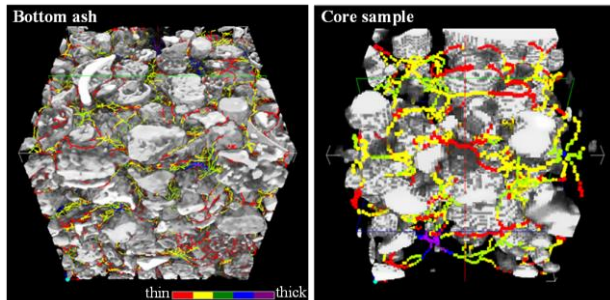


図 2 間隙のネットワーク構造
(左図: 焼却灰、右図: コアサンプル)

まとめ、今後の課題

今後、間隙内流体挙動と間隙形状との関係性について評価を行い、廃棄物最終処分場の水分移動現象のメカニズム解明につなげていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 辻健:貯留層マネージメントに向けたデジタル岩石の利用、石油技術協会誌,84(6) 403-410 (2019)
- 2) Geuzaine, C. and Remacle, J.F.: Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 79(11), 1309-1331(2009)
- 3) Tezduyar, T.E.: Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations, *Advanced in Applied Mechanics*, 28, 1-44(1991)
- 4) Tezduyar, T.E., Mittal, S., Ray, S.E. & Shih, R.: Incompressible flow computations with stabilized bilinear and linear equal-order-interpolation velocity-pressure elements, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 95, 221-242(1992)
- 5) Zhang, S.L.: GPBi-CG: Generalized product-type methods based on Bi-CG for solving nonsymmetric linear system, *SIAM J. Sci. Comput.*, 18, 537-551(1997)
- 6) Lindquist, W. B., et. al: Medial axis analysis of void structure in three-dimensional tomographic images of porous media, *Journal of Geophysical Research*, 101(B4),8297-8310(1996)