

TSUBAME 共同利用 令和2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、全国各地で頻発する集中豪雨が常態化する中、処分場においても今後適切な設計・管理を行っていく上で、廃棄物層の水分移動現象の把握は、ますます重要な課題となっている。種々雑多な廃棄物から構成される複雑な廃棄物層間隙形状と流体力学的作用は深く関わっているが、そ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、間隙形状とそれに寄与する水分移動現象のメカニズムを解明することを目的とした。前報¹⁾では、これまで形の記述が困難であった間隙の幾何構造に対し、数学者が開発した新たなデータ解析手法 Topological Data Analysis²⁾の一つであるパーシステントホモロジーを適用し、間隙形状の特徴付けを行った。一方、これまで間隙内流れについては、シミュレーションを行い、計算結果は、速度ベクトル又は流線で可視化し流れ解析を行ってきた。本報では、さらに、間隙形状に起因する流れの流体力学的作用の指標であるエネルギー損失を算出し、より詳細な流れ挙動の解

析を行うとともに、間隙形状との関係性について考察する。

概要

試料には、一般廃棄物焼却施設から採取した主灰、不燃・粗大ごみ処理施設から採取した不燃残渣及び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 Gmsh³⁾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。

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

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

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)を適用すると以下の弱形式が導かれる。

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} w_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) d\Omega - \int_{\Omega} \frac{\partial w_i}{\partial x_i} \\ & + \int_{\Omega} \frac{1}{Re} \frac{\partial w_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \\ & + \sum_{e=1}^{n_{el}} \int_{\Omega} \left(\tau \bar{u}_k \frac{\partial w_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) d\Omega = 0, \quad (3) \\ & \int_{\Omega} q \frac{\partial u_i}{\partial x_i} d\Omega + \sum_{e=1}^{n_{el}} \int_{\Omega} \left(\tau \frac{\partial q}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) d\Omega = \\ & 0, \quad (4) \end{aligned}$$

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、エネルギー損失は、下記に示す(5)式を用いて算出した。

$$\begin{aligned} \text{Energy Loss} = 2 & \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} \\ & + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \\ & + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \\ & - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \quad (5) \end{aligned}$$

結果および考察

エネルギー損失を計算した結果を図 1(不燃残渣)、図 2(コア試料)及び図 3(焼却主灰)に示す。青い線は、間隙領域を表している。不燃残渣は、比較的大きい径の試料から構成されており、最も間隙率が高く、一方、主灰は、粒子が密に充填されており、間隙率が最も低いものである。図内の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。その速度ベクトルから算出したエネルギー損失は、等値面を用いて可視化した。赤色の等値面がエネルギー損失 1000 を、オレンジ色の等値面 500 を黄色の等値面 100 を表している。不燃残渣試料のエネルギー損失が見られる箇所は、限定的であったが、コア試料に対して、エネルギー損失箇所が増え、主灰試料では、その領域がさらに広範囲になった。特に間隙の狭窄部では、エネルギー損失の大きい赤い領域が見られた。これは、間隙中に水が流れる際に、狭窄部位を抜けると、流れが乱れエネルギー損失が大きくなると思われる。

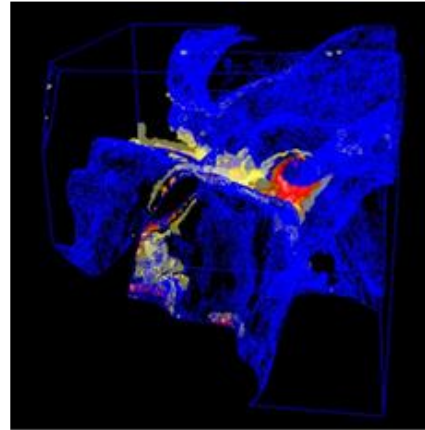


図 1 不燃残渣におけるエネルギー損失

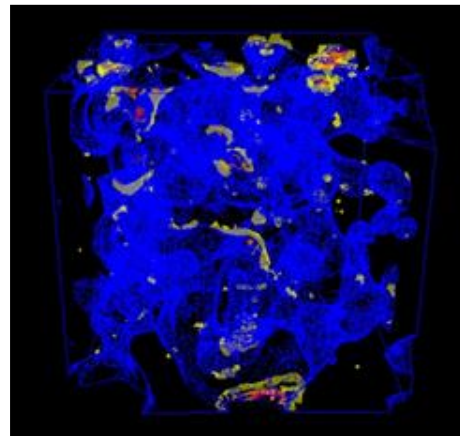


図 2 コア試料におけるエネルギー損失

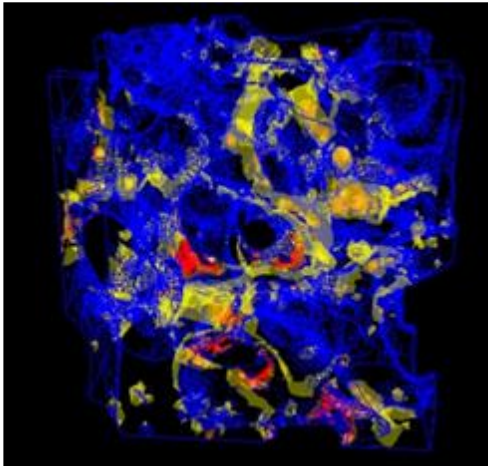


図 3 焼却主灰におけるエネルギー損失

まとめ、今後の課題

今後、エネルギー損失等様々な流体力学的作用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) 鈴木和将, Huynh Quang Huy Viet, 宇田智紀, 水藤寛: パーシステントによる廃棄物埋立層の間隙構造解析、第 30 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演原稿, 415-442 (2015)
- 2) Edelsbrunner, H. Letscher, D. & Zomorodian, A.: Topological persistence and simplification, *Discrete Comput. Geom.*, 28(4), 511-533 (2002)
- 3) 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)
- 4) Tezduyar, T.E.: Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations, *Advanced in Applied Mechanics*, 28, 1-44 (1991)
- 5) 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)
- 6) 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)