

TSUBAME 共同利用 平成 30 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

我々は、これまで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、数値流体解析による検討を行ってきた。本研究では、さらに流体力学特性として、新たに壁面せん断応力等を追加し、流れの力学的性質と流動挙動を調べ、間隙構造と流れの関係解明を試みた。

#### 英文抄録

A numerical method for simulating pore flow in landfills is presented. The Navier-Stokes equation is used as a governing equation and discretized using the streamline upwind Petrov-Galerkin/pressure stabilizing Petrov-Galerkin stabilized finite element method(FEM). Moreover, wall-shear stress(WSS) was calculated to elucidate fluid-flow dynamics, affecting the geometry of porous media in waste materials. We focus on the relationship between the geometry of porous media and the fluid dynamics of a landfill.

*Keywords:* landfill, Numerical simulation, FEM, Navier-Stokes equations, WSS

#### 背景と目的

近年、計算機の高速度化・大容量化によって発展した数値流体力学は、測定や理論解析が困難な複雑な流れ現象の理解やモデル化に貢献している。廃棄物の分野においても、埋立地からの浸出水やガス量を予測し制御することは、埋立地の設計・管理における最重要課題の一つであり、これら流れ現象の解明やモデル化にとって数値シミュレーション又は数値計算は有用なツールとなる。我々はこれまで、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、数値流体解析による検討を行ってきた<sup>1~3)</sup>。マイクロフォーカス X 線 CT 装置を利用し、廃棄物層間隙の構造解析とモデル化を行い、そのモデル化した流れ場における流動現象の数値解析を行った。複雑な幾何形状を有する間隙を扱うため、有限要素法を適用し<sup>4)</sup>、それに伴い計算時間が増大する問題に対しては、GPU スパコンを用いた並列計算を行うことにより計算の高速化を図った。間隙内を通る流れの計算結果は、渦

の発生が認められる等、不均質な間隙構造に依存した複雑な様相を示した(図 1)。本研究では、さらに流体力学特性として新たに壁面せん断応力等を追加し、流れの力学的性質と流動挙動を調べ、間隙構造と流れの関係解明を試みる。

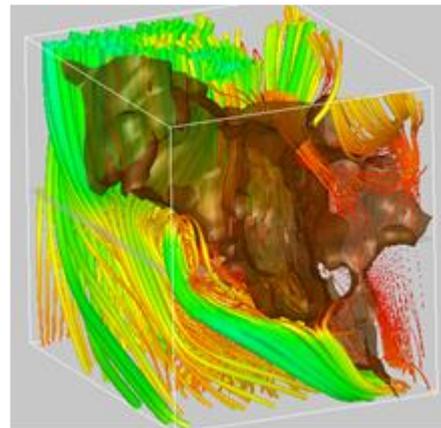


図 1 廃棄物層間隙流れの可視化(流線)

#### 概要

マイクロフォーカス X 線 CT 装置を用いて撮影した埋立廃棄物のコアサンプル等の 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。詳細は、前報<sup>1,2)</sup>に記載している。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 Gmsh<sup>5)</sup>を用いて有限要素メッシュの生成を行った。

支配方程式には、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、 $\Omega$  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。

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

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

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

ここで、 $w_i, q$  は、それぞれ式(1),(2)に対す Galerkin 項の重み関数である。また、 $\bar{u}_i$  は移流速度を表し、 $\beta$  は安定化パラメータで以下の式のように定義されている。

$$\beta = \left[ \left( \frac{2}{\Delta t} \right)^2 + \left( \frac{2 \| \bar{u}_i^e \|}{h_e} \right)^2 + \left( \frac{\mu}{\rho h_e^2} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\| \bar{u}_i^e \| = \left[ \sum_{i=1}^{n_d} \bar{u}_i^e \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

ここで、 $\| \bar{u}_i^e \|$  は、要素移流速度のノルム、 $h_e$  は代表要素長、 $n_d$  は次元数を表す。

これら(3), (4)式に対して、空間の離散化要素には、四面体 1 次要素を用い、時間方向の離散化には、Crank-Nicolson 法を適用した。なお、最終的に得られる連立一次方程式の解法には GPBi-CG<sup>8)</sup>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、NVIDIA 社の統合開発環境である CUDA と cuBLAS, cuSPARSE 等のライブラリを用いて GPBi-CG の並列化を行い、GPU スパコンを利用して計算を実施した。

また、壁面せん断応力 (wall shear stress: WSS) は、下記に示す(7), (8), (9), (10)式から算出した。

$$\tau_{ij} = p \delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

$$\sigma_i = \tau_{ij} n_j \quad (8)$$

$$\sigma^n = \tau_{ij} n_j n_i = \sigma_i n_i \quad (9)$$

$$\sigma^{\tau_i} = \sigma_i - \sigma^n n_i \quad (10)$$

ここで、 $\tau_{ij}$  は応力テンソル、 $n$  は壁面の三角形要素の法線ベクトル、 $\delta_{ij}$  は Kronecker のデルタ、 $\sigma_i$  は壁面応力ベクトル、 $\sigma^n$  は壁面法線応力、 $\sigma^{\tau_i}$  は壁面せん断応力ベクトルである。

#### 結果および考察

焼却灰で構成されている間隙の壁面せん断応力 (WSS) を計算した結果を図 2 に示す。

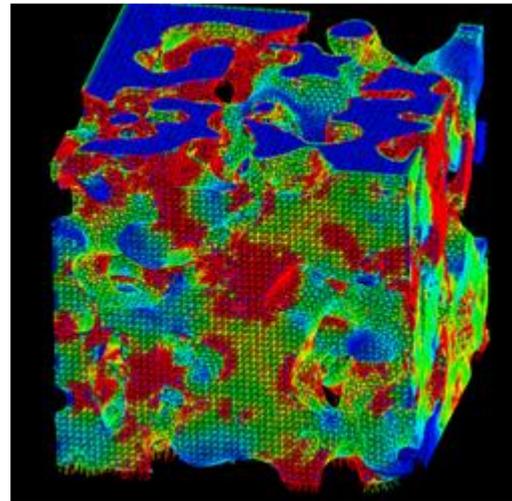


図 2 焼却灰の WSS 分布

解析対象とした有限要素メッシュは、節点数 99,560、要素数 437,386 である。また、流れの方向は上から下向きである。図 2 に示されているように、局所的に狭さく部、分岐部等の部位で強い壁面せん断応力が生じていた。壁面せん断応力は、壁面近傍の速度の勾配で決まるため、速度が速い部位や流れ

が乱される部位で高くなり、一方、流れが遅く停滞しているような部位では、壁面せん断応力が小さくなっていた。さらに、図3に不燃残渣で構成される間隙のWSS分布を示す。図2の焼却灰と比較するとWSS分布が大きく異なっていることが分かる。このWSS分布の違いは、間隙構造の違いに起因しているものと示唆された。

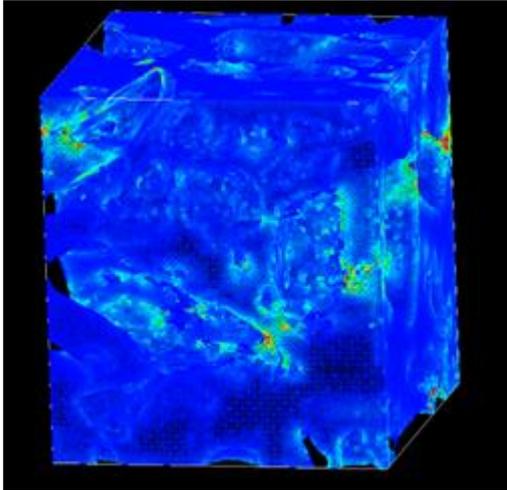


図3 不燃残渣のWSS分布

#### まとめ、今後の課題

今後、このような壁面せん断応力等の流体力学特性の違いが、どのような間隙構造に由来するのか、詳細なメカニズムを解明するため、間隙構造と流体力学特性との関係を定量的に評価し、間隙形状を考慮した新規で高品質な予測手法の開発につなげていきたいと考えている。

#### 参考文献

- 1) 鈴木和将, 水藤寛: 廃棄物最終処分場内部における間隙構造の可視化と間隙中流れの数値的研究、第26回廃棄物資源循環学会研究発表会講演原稿, 441-442 (2015)
- 2) 鈴木和将, 水藤寛: 廃棄物最終処分場における埋立層間隙内の気液二相流数値解析、第27回廃棄物資源循環学会研究発表会講演原稿, 451-452 (2016)
- 3) 鈴木和将, Huynh Quang Huy Viet, 水藤寛: GPUスパコンを用いた廃棄物埋立層内の数値流体シミュレーション、第28回廃棄物資源循環学会研究発表会講演原稿, 387-388 (2017)
- 4) 日本計算工学会流れの有限要素法研究委員会編: 続・有限要素法による流れのシミュレーション、シュプリンガー・ジャパン (2008)
- 5) 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)

- 6) Tezduyar, T.E.: Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations, *Advanced in Applied Mechanics*, 28, 1-44(1991)
- 7) 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)
- 8) 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)