

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：82405

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04766

研究課題名（和文）廃棄物処分場内部の複雑系数理構造解明に向けた連成シミュレーション手法の構築

研究課題名（英文）Coupling simulation study to understanding the complex mathematical structure in landfills

研究代表者

鈴木 和将（Suzuki, Kazuyuki）

埼玉県環境科学国際センター・資源循環・廃棄物担当・主任研究員

研究者番号：70379824

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：廃棄物最終処分場内部の複雑な現象を解明するため、本研究では、内部で起こるいくつかの連成現象に着目し、それらの解析に適切な数値シミュレーション手法を構築した。さらに、これら開発したプログラムをベースに、模擬処分場（テストセル）内部現象の数値シミュレーションへと展開した。このアプローチにより、パイロットスケールレベルの長期埋立現象を再現することができたことが本研究の成果である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の連成シミュレーション手法により、長期汚染物質動態シミュレーションの予測が可能となり、今後の廃棄物最終処分場の設計や維持管理に活用できることが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have been developed numerical analysis methods for the several coupled phenomena in order to elucidate the complex phenomena in landfills. Furthermore, we expanded these developed programs to simulate the phenomena in pilot-scale landfills (test cells). Concerning the internal phenomena of the test cells, we specifically focused on the trapping mechanism of pollutants by the permeable reactive barrier. The adsorption parameters used in the numerical calculations were determined through simplex method based on column adsorption experiment results. The convection-diffusion equation incorporating the adsorption process is used as a governing equation. We conducted numerical simulations and compared the long-term monitoring data from the test cells with the numerical analysis results.

研究分野：廃棄物工学

キーワード：廃棄物最終処分場 連成解析 数値シミュレーション テストセル PRB

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

廃棄物の研究において、埋立地からの浸出水やガスの量・質を制御するというのは埋立地の設計及び管理における最重要課題である。特に、現在のような有害重金属を含む無機系廃棄物主体の埋立地では、将来、貯蔵施設的な観点で半永久的に管理することも考えられ、その重要性は尚更である。地盤工学の分野において、土粒子(ミクロ)レベルの運動メカニズムの解明が、連続体としての挙動の説明につながると指摘されており、不飽和土の挙動等未だにメカニズム解明が十分でない問題に対して、数値シミュレーションが有力なツールとして用いられる。地盤の浸食や破壊現象といった連成シミュレーションに個別要素法(DEM)を適用した例が数多く報告されているが、既往研究では、単純形状によるモデルの解析が多く、廃棄物を対象とした場合、地盤・岩盤と比較し複雑な幾何構造を有しているため、複雑な形状のモデリングが必要となる。また、この間隙構造の幾何学的な特徴は、ミクロな流れ挙動を通して、マクロな流れに密接に関係するが、これまで埋立層間隙のような複雑な形を表す適切な記述法がなく、その関係性を定量化することは困難であった。この課題に対し、申請者は先の研究(科研費16K00594)で、「穴」に着目した新しい数学的アプローチであるパーシステントホモロジー群を応用し、間隙構造を定量化し、流体挙動を調べることに成功した。ただし、この研究では、飽和流のみを対象としており、現実の問題で起こる液体・気体(不飽和流)流体・汚染物質、流体・粒子の相互作用といった連成現象を扱っておらず、非線形性が強く数値解析が困難なマルチスケール問題が課題として残った。

### 2. 研究の目的

本研究では、最終処分場内部で起こるいくつかの連成問題に対して、個別の現象の解析とその相互作用の解析の精度と効率の追求を目指し、その異なる現象の連成解析に適切な数値シミュレーション手法を開発する。その際に動的に変化する間隙に対しては、パーシステントホモロジー等のトポロジー解析により、幾何学形状の定量化を行う。次いで、開発した連成シミュレーションによる処分場内部系ダイナミクスの評価を通して、既存数値モデルの不十分さを明らかにする。さらに、そこから得られた結果をトポロジーの視点から統一的に整理・解析し、最終的には、間隙構造に由来する微細な流れの影響を組み込んだ新しい数値モデリングと内部系の数値的理解を目指す。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 間隙内3次元粒子-流体連成シミュレーション

##### (1) 廃棄物試料と間隙形状のモデリング

試料には、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。試料をアクリル製のモールドに充填し、この供試体を試料テーブルにのせてマイクロフォーカス X 線 CT 装置を用いて撮影を行った。撮影した X 線 CT 画像を STL 形式のファイルに変換し、このファイルを画像処理ソフトウェアに読み込ませ、マスクの作成を行った。さらに、このマスクを六面体メッシュに分割した。これらのデータの中からノードデータのみを抽出し、csv 形式に保存した後、このデータを独自に作成したプログラムの特性関数に読み込んだ。本研究では、埋立地内部の間隙形状を表すために特性関数 $\chi_f$ を用いた。

##### (2) 流体方程式

流体運動を支配する方程式には、下記(1)、(2)式に示す非圧縮性の Navier-Stokes 方程式及び連続の式を用いた。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta u - C_1(1 - \chi_f)u - C_2 \chi_p(u - u_a) \quad (1)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2)$$

ここで、 $u$  は流速、 $p$  は圧力、 $\rho$  は密度、 $\nu$  は動粘性係数であり、 $C_1$  及び  $C_2$  は抵抗係数である。式(1)の右辺第3項は、埋め込み境界法を用いて間隙形状を表現しており、速度  $u$  に比例する抵抗を与える。また、右辺の第4項は、流体中の粒子を埋め込み境界<sup>4,5)</sup>を用いて表しており、 $\chi_p$  は、粒子の特性関数であり、粒子速度  $u_a$  と速度  $u$  の差に比例する抵抗を与える。これらの方程式を差分法によって離散化し、初期条件と適切な境界条件の下、SMAC 法で計算を行った。また、圧力 Poisson 方程式は、GP-BiCG 法を用いて解いた。

##### (3) 粒子の運動方程式

流体中で粒子の並進運動を考慮し、式(3)に示す Newton の運動方程式を用いた。

$$F_m = M a_m \quad (3)$$

ここで、 $F_m$  は  $m$  番目の粒子にかかる力、 $M$  は粒子の質量、 $a_m$  は粒子の加速度である。

本研究で、式(4)に示すように流体からうける力  $F_{mfluid}$  と粒子間に働く力  $F_{mparticle}$  を考慮した。

$$\mathbf{F}_m = \mathbf{F}_{mfluid} + \mathbf{F}_{mparticle} \quad (4)$$

(4) 粒子の流体から受ける力

流体中の粒子は、流体から圧力と粘性による力を受ける。応力テンソルは、次式(5)により得られる。

$$\sigma_{ij} = \left( -p\delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (5)$$

ここで、 $\delta_{ij}$  はクロネッカーのデルタである。

$m$  番目の粒子が流体から受ける力  $F_{mfluid}$  の各成分は、粒子の表面に対する法線ベクトル  $n_j$  を用いて式(6)で表される。

$$f_{mfluid}^i = \int_{\Omega} \sigma_{ij} \cdot n_j d\Omega \quad (6)$$

(5) 粒子間に働く力 (Lennard-Jones potential)

粒子の間に働く力は、次式(7)で示す分子間ポテンシャルモデルである Lennard-Jones potential で表す。

$$\varphi(l) = 4\alpha \left( \left( \frac{\beta}{l} \right)^{12} - \left( \frac{\beta}{l} \right)^6 \right) \quad (7)$$

ここで、 $\alpha$  は分子間力、 $l$  は粒子間の距離、 $\beta$  は引力の最大値、 $\beta^6$  は  $l$  が 0 となる距離である。

### 3.2 最終処分場浸透性反応層における数値解析手法の構築

本研究では、小野と田中が、土壤中における化学物質の土壌分配係数等の物理化学的基礎データ取得のために開発した高速液体クロマトグラフィー-HPLC を用いた土壌カラム実験装置<sup>1)</sup>に着目した。土壌カラムに最終処分場の浸透性反応層 (Horizontal Permeable Reactive Barrier: HPRB) を充填した際の層内を流れる重金属の移動吸着モデルを構築し、数値計算を行なった。それから、Simplex 法による最適化手法を用い、数値計算結果とカラム吸着実験で得られた濃度プロファイルより、吸着パラメータを推定する手法について検討を行った。

(1) HPLC を用いた土壌カラム試験

HPRB 試料には、埼玉県に多く産出する関東ローム土壌 (鶴ヶ島土壌) を用い、化学物質の捕捉強化材として鑄鉄管のグラインダダストである粉状の酸化鉄を添加し、透水性を調整するため産業廃棄物の溶融スラグを 15:1:84 の割合で混合したものをを用いた。

カラム試験は、小野と田中が開発した HPLC を用いた土壌カラムシステム<sup>1)</sup>で行った。本システムは HPLC システムを利用した定圧・定流量の土壌カラム実験装置であり、土壌を充填したカラムに、一定流速で化学物質を移動させ、カラム出口で化学物質の消長をモニター、データ解析し、化学物質の物理化学的な情報を得るものである (詳細は文献 1)。カラム管は、ステンレス製の内径 10mm、長さ 50mm を用い、その管に HPRB 試料を充填し、30 のカラムオープン内に設置した。所定濃度に調整した重金属類溶液を 0.2ml/min の速度でカラムに通水させ、カラム出口の流出液は、フラクションコレクターにより分取し、ICP-AES により重金属類を定量した。

本研究では、針谷が行った土壌カラム試験の結果<sup>2)</sup>を用いて、数値解析に利用した。

(2) 支配方程式

土壌カラム中を流れる重金属類の輸送は、次の(8)式に示す吸着を伴う移流分散方程式で表される。

$$R \frac{\partial c}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) c = D \Delta c \quad (8)$$

ここで、 $u$  は流速、 $c$  は重金属濃度、 $t$  は時間、 $D$  は分散係数、 $R$  は遅延係数である。吸着現象が Langmuir 吸着等温式で近似できる場合、遅延係数は、(9)式で表すことができる。

$$R = 1 + \frac{\rho}{\theta} \frac{bW_c}{(1 + bc)^2} \quad (9)$$

ここで、 $\rho$  は密度、 $\theta$  は間隙率、 $b$  と  $W_c$  は Langmuir 吸着定数ある。

上記のモデル式に基づいて、土壌カラム中の吸着過程の数値シミュレーションを行った。

(3) 吸着パラメータの同定

処分場におけるシミュレーション結果をより精度の高いものとするためには、より現実に即

した吸着パラメータの推定が必要である。土壌カラム吸着試験結果とそれに対応する数値計算結果の濃度を比較し、それを用いて吸着パラメータを同定することを試みた。

土壌カラム吸着試験結果とシミュレーション結果を比較するために、目的関数  $J$  を次のように定義した。

$$J = \sum_{i=1}^N \{h_i(T) - H_i(T)\}^2 \quad (10)$$

ここで、 $h(T)$ は時刻  $T$  における数値シミュレーション結果、 $H(T)$ は、同時刻の土壌カラム試験結果を示す。添字  $i$  は、サンプリング番号である。この目的関数を最小化するような吸着パラメータを求めた。

本研究では、最適化は、自作ソフトウェアによって Simplex method に基づいて行った。

#### (4) HPRB を用いたテストセル実験

浸透性反応層 HPRB の効果を検証するため、パイロットスケールレベルのテストセル（直径 5m × 深さ 7m の円柱）により試験した（図 1）。テストセル 1 (TC1) の中間覆土及び底部覆土に、HPRB を敷設し、比較対象として、テストセル 2 (TC2) は、HPRB の代わりに熔融スラグを敷設し実験を行った。この覆土により、廃棄物層から流出してくる浸出水を適宜採取し、重金属類等の各種汚染物質の分析を行い、モニタリングした。（詳細は文献 3）

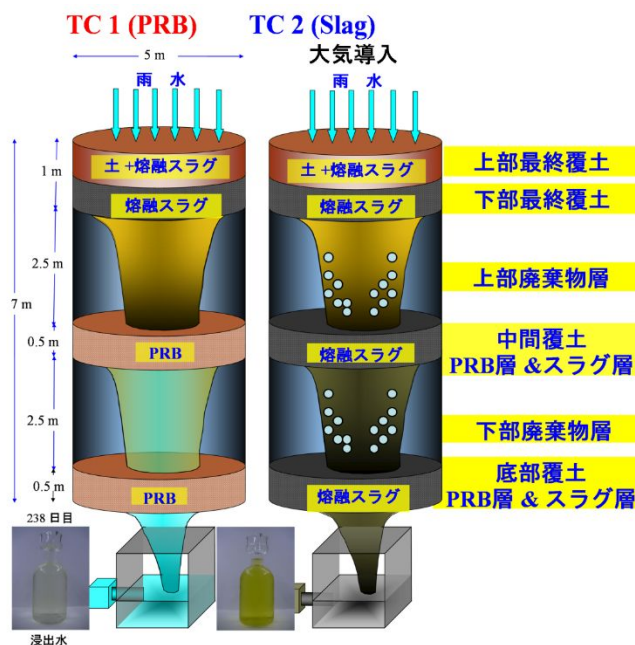


図 1 テストセル実験

## 4. 研究成果

### 4.1 間隙内三次元粒子 - 流体連成シミュレーション

埋立処分場間隙内の粒子-流体連成計算を行った結果を図 2 に示す。緑色の領域は、埋立層内の固相である特性関数  $f_p=1$  の領域であり、それ以外の空間が流体が流れる間隙の領域である。間隙内上部に 3 個の粒子（白色の球  $p=1$ ）を配置した。境界条件は、図内の上部の面より垂直に流入する一様流を与え、下部の面を自由流出とし、上面から流れてきた内部保有水が固相部分を避け、間隙中を下へ浸透していく様子をシミュレートするものである。図の矢印は、内部保有水の速度ベクトルを表している。

図 1 に、間隙内浸透流と粒子運動の時間変化を示す。初期条件に 3 個配置した粒子は、間隙内流体の流れに伴って下方に移動し、やがて下面に到達する様子がシミュレートされている。本研究では、埋立処分場内部の粒子-流体連成シミュレーションを行うため、埋め込み境界法を用いた数値シミュレーション手法を構築することができた。今後、間隙形状の違いや粒子数等の実験条件を変化させることにより、間隙内流体挙動と粒子運動の相互作用を明らかにするとともに、間隙形状のトポロジー変化をともなう廃棄物最終処分場の内部連成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。

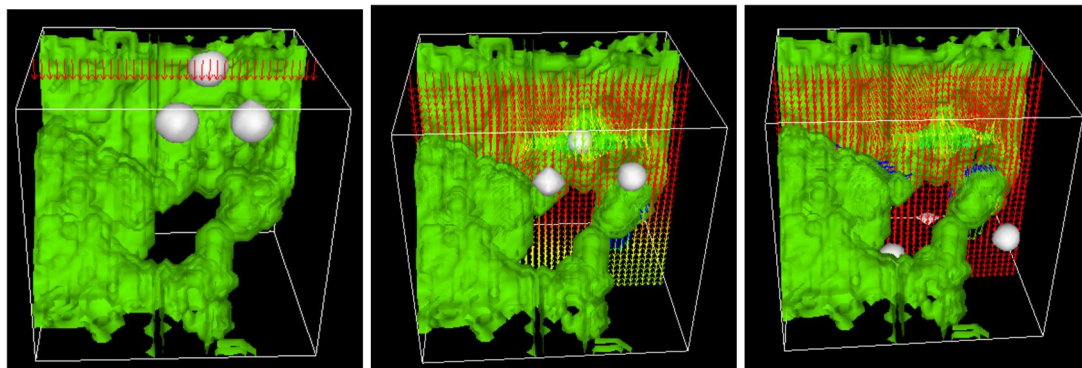


図 2 間隙内浸透流と粒子運動の時間変化

#### 4.2 最終処分場浸透性反応層における数値解析手法の構築

Simplex 法による最適化手法を用いて、吸着パラメータの推定を行った。土壌カラム試験のカラムに HPRB 試料を充填し、Cu 標準溶液を通液させた試験結果とその吸着過程を数値モデルによって表し、数値シミュレーションを行った結果を用い、逆解析を行った結果、Langmuir 吸着等温式の吸着パラメータ  $W_c$  は 0.561、吸着パラメータ  $b$  は、0.9877 であった。

この吸着パラメータを用い、中間覆土及び底部覆土に HPRB を敷設したテストセル実験の数値シミュレーションを行った。テストセルシミュレーションの支配方程式は、土壌カラム試験と同様に、吸着過程を伴う移流分散方程式を用いた。HPRB 層上部の濃度境界条件は、テストセル 2 実験 (HPRB なし条件) から溶出した実際の Cu 濃度を与え、数値計算を行った。数値シミュレーションの結果を図 3 に示す。図 3 に、数値計算結果だけでなく、テストセル実験の結果もあわせて (オレンジ色のプロットが TC1 の HPRB 有りの結果、青色のプロットが TC2 の HPRB なしの結果) 示す。数値シミュレーションの結果は、テストセル実験の埋立初期に高濃度に溶出する Cu を HPRB により捕捉している様子を再現できていることがわかる。

本研究では、Simplex method を用いた最適化手法により吸着パラメータを推定し、HPRB を敷設した処分場の浸出水濃度をより正確に再現する手法を構築した。

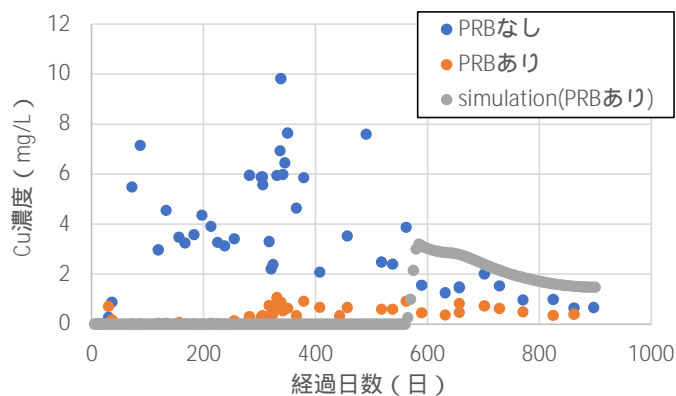


図 3 テストセル実験結果および数値シミュレーション結果

#### 参考文献

- 1) 小野雄策、田中信壽:高速液体クロマトグラフィーを用いた水飽和土壌カラムの物理化学的特性測定装置の開発、廃棄物学会論文誌、10, 3, 170-179 (1999)
- 2) 針谷隆史:覆土材料の埋立地保有水浄化能力の評価に関する基礎研究、埼玉大学大学院理工学研究科修士論文 (2005)
- 3) 小野雄策ら:最終処分場内部保有水制御のための浸透性反応層(HPRB)技術の開発、廃棄物学会論文誌、19, 3, 197-211 (2008)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鈴木和将、Huynh Quang Huy Viet、宇田智紀、水藤寛
2. 発表標題 デジタル廃棄物モデルを利用した間隙幾何情報の抽出及び評価法の検討
3. 学会等名 第32回廃棄物資源循環学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木和将、Huynh Quang Huy Viet、宇田智紀、水藤寛
2. 発表標題 廃棄物最終処分場間隙流れシミュレーションとエネルギー損失評価
3. 学会等名 廃棄物資源循環学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木和将、水藤寛
2. 発表標題 廃棄物最終処分場における間隙内3次元粒子-流体連成シミュレーション
3. 学会等名 廃棄物資源循環学会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------