

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06027

研究課題名(和文) 重金属類の溶出メカニズムに寄与する卓越流路の解明

研究課題名(英文) Visualization of water flow in column based on measurement of porosity distribution and impact assessment of harmful matter elution

研究代表者

中村 謙吾 (Nakamura, Kengo)

東北大学・環境科学研究科・助教

研究者番号：30757589

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では土壌をISO/CENに準じた手法で充填し、X線CTを用いることで内部の間隙分布や卓越流路を可視化した。得られた三次元の間隙分布と流路形成から、土壌の流路形成と溶出メカニズムについて考察した。

カラム内の卓越流路は、豊浦標準砂や真砂土は管中央付近に卓越流路を形成した。一方、関東ロームは管壁付近などに卓越流路を生じており、明らかに豊浦標準砂や真砂土とは流路形成の様相が異なることが確認された。そのため、現状のカラム試験では、同充填方法を使用しても流路が異なり、土壌の物理化学的特徴から、液固比や分散に大きな違いが生じている可能性が高い。

研究成果の概要(英文)：This study is visualized soil structure of porosity distribution and water flow inside of ISO/CEN column test by using the X-ray CT using 3 types soil samples. It is discussed that forming pathway and dissolution mechanisms in column. Water flow in column is made difference of each soil. Toyoura Sand and Decomposed Granite were formed excellence flow path in the vicinity of the tube center. On the hand, Kanto Loam was caused a excellence flow path in the vicinity of the tube wall. The conventional column test is suggested that water flow is different by soil to be used. Thus, it is possible that each column test are caused different the liquid-solid ratio and dispersion in column to filled soil by Physico-chemical characteristics of the soil.

研究分野：環境リスク

キーワード：X線CT 上向流カラム試験 間隙率 可視化 移動性

### 1. 研究開始当初の背景

土壌汚染のヒト健康影響を防止する過程で、高額な措置費用による企業経営や自治体財政の圧迫等、社会・経済的な影響は日米欧を中心に大きな課題である。地盤環境を適切かつ合理的に管理していくためには、土壌からの汚染物質の溶出特性を適切に評価する必要がある。現在、我が国においては、バッチ式溶出試験が主に用いられているが、実環境の再現が期待できるカラム溶出試験(流通式試験)も活用されはじめている。土壌中での三次元的な卓越流路の形成の定量的な知見は乏しく、また卓越流路の形成がカラム溶出試験に及ぼす影響も不明である。

### 2. 研究の目的

本研究では、申請者がこれまでに培ってきた岩石中での卓越流路の可視化および評価法、特に X 線 CT を用いた手法、を土壌水理学分野へ展開・応用し、土壌中での卓越流路の形成を可視化および評価し、加えて、カラム溶出試験に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 上向流カラム試験

本研究では、日本国内において一般的な土壌を用いる。試料に豊浦標準砂、ローム、まさ土を用いる。まず、以下に従来のカラム試験方法を示す。

カラム条件：本研究では、直径 5cm、高さ 30 cm のアクリル製のカラムを用いる。溶媒及び流量：溶媒には、純水を用いる。流量調整可能なペリポンプでカラム内の線速度を 15cm/day とし、 $12 \pm 2$  ml/h で溶媒を通水させる。

試料条件：カラム試験は ISO と CEN 規格に準拠して行う。風乾(25, 7day, 大気)後、ふるいをを用いて <2mm に調整した試料を用いる。試料は、高さ 6cm 毎 5 層に分けて充填し、各層充填後ランマー(125g)を高さ 20cm より 3 回落下させ締固める。カラム上部にはプレフィルターとして  $0.45 \mu\text{m}$  のメンブレンフィルターを設置する。試料充填後、純水をカラムの下端から約 40ml/min で通水させ、飽和終了後に 3 日間静置する。静置後、ペリポンプを用いて通水速度を  $12 \pm 2$  ml/h としてカラム内を通水させる。通水開始後、液固比(以下、L/S とも言う)が 10 になるまで通水する。カラム浸出水は、L/S=1 までは 3 回程度、L/S=1~10 までは、L/S=1~2 で 1 回程度採水し、 $0.45 \mu\text{m}$  のメンブレンフィルターを用いて吸引濾過をしたものを検液とする。

#### (2) X 線 CT を用いた土壌カラムの可視化

本研究では、X 線 CT 装置(コムスキャンテクノ(株)製、ScanXmate-D225R225RSS270)を

用いてカラム内に充填された土壌構造の形成及び間隙分布の可視化を行った。対象物の断面画像を取得するためには、X 線透過画像に再構成処理を行う必要がある。再構成は、X 線透過画像に含まれるノイズ除去、畳み込み積分による再構成フィルター処理、逆投影によって装置から出力された X 線透過画像処理データを一般的な画像濃度値がある。この画像濃度値の表現方法に CT 値[単位：HU(Hounsfield unit)]がある。CT 値は、水を原点の 0 HU として、空気を -1000 HU と定義した相関値である(式(1))。

$$CTN = \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_w}{\varepsilon_w} \times 1000 \quad (1)$$

ここで、

CTN：CT 値 [HU(Hounsfield Unit)]

$\varepsilon_t$ ：対象の X 線吸収係数 [ $\text{m}^{-1}$ ]

$\varepsilon_w$ ：水の X 線吸収係数 [ $\text{m}^{-1}$ ]

X 線 CT 測定は、室温、大気圧下において、試料に管電圧 120 kV、還電流 300  $\mu\text{A}$  を用い、画素数  $1856 \times 1472$ 、フレームレート 4.0 f/sec で行った。これより、要素サイズの分解能は、 $800 \times 800 \times 800 \mu\text{m}^3$  で測定した。また、固体粒子の CT 値を知るために、試料のみを  $10 \times 10 \times 10 \mu\text{m}^3$  で測定した。

#### (3) 土壌カラム内の間隙分布の測定

土壌構造及び間隙分布の可視化を行うためには、得られた X 線 CT 値を用いた間隙モデリングを実施する必要がある。本研究では、CT 値の三次元分布から間隙率の三次元分布を求めるために、パーシャルボリューム効果を用いた手法を用いた。パーシャルボリューム効果とは、各要素の CT 値は要素中に含まれる成分の平均 X 線吸収率によって求められることを示す。そのため、土壌などの試料の CT 値は、要素中の固相と空隙の割合、間隙率によって変化する。CT 値と間隙率の間にはパーシャルボリューム効果によって、一定の関係があることが示される。よって、要素中の間隙率が 0% で土壌しか存在しない場合の CT 値は土壌のみの CT 値を示す。反対に、間隙率が 100% の間隙しか存在しない場合の CT 値は、間隙中の流体の CT 値を示す。その中間の間隙率の場合の CT 値は、パーシャルボリューム効果による関係式によって推定することが可能である。このパーシャルボリューム効果による関係性は、測定時の分解能において均質な土壌であれば、線形な関係性となると考えられる。

本研究では、パーシャルボリューム効果によって間隙率と CT 値が線形性を有していると仮定し、測定したカラム内の CT 値分布から式(2)、式(3)を用いて間隙分布をもとめた。

$$Total\ pore\ volume = \sum \left[ \frac{CT_{Solid} - CT_N}{CT_{Solid} - (Water = 0)} \times Cell\ volume \right] \quad (2)$$

$$Total\ porosity = \frac{Total\ pore\ volume}{Total\ volume} \quad (3)$$

本研究で用いた充填方法では、通水後は、カラム内に水が充填されたとして、式(2)でCT値に水=0 HUを用いた。

#### 4. 研究成果

X線CT測定によって得られた通水後の各土壌のCT値3次元分布を図1に示す。図1から、カラム内に充填された各土壌は、土壌ごとに異なるCT値を示した。豊浦標準砂のCT値によるカラム内の様子は、明確な層状構造が確認される。この層状構造は、おおそ2cmごとに形成され、突き固めによる層ができる位置と同一に形成されていた。真砂土のカラム内の様子は、豊浦標準砂のような層状構造は見られないが、CT値の低い部分と高い部分がカラム内部に不均一に分布していた。関東ロームは、他の二つの土壌と比較して、CT値が低い。また、関東ロームのカラム内の様子は、層状構造や不均一な様子も見られず、他の土壌と比較して比較的均一にCT値が分布していた。真砂土や関東ロームでは、豊浦標準砂のような突き固めによる層状構造がCT値の分布からは確認されない。しかし、CT値は、土壌ごとの密度や成分から得られる値であり、その値の大きさに大きな意味は持たない。よって、共通したパラメータを用いて土壌ごとの土壌構造及び間隙分布の評価を行う必要がある。

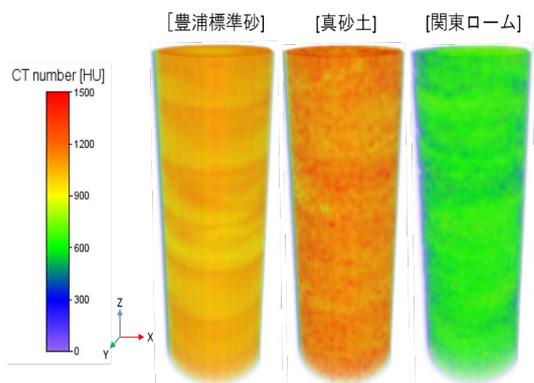


図1 土壌カラム内の3次元CT分布

そこで、図1に示したCT値の分布から、式(1)~(3)を用いて各土壌のカラム内における間隙分布を図2に示す。図2に示したカラム内部の間隙分布は、各カラムを2つの方向(XY方向及びXZ方向)の断面図である。Fig.2のCT値同様に、土壌ごとに異なった間

隙分布を示していた。豊浦標準砂の間隙分布は、XY方向の間隙分布では、カラム内部に内径3cm程度の円型に間隙率の高い部分が見られた。XZ方向の間隙分布より、そのカラムの中央に形成された円形の高間隙率の部分は、層ごとに円柱型に形成されていた。豊浦標準砂の間隙分布では、管壁付近の低い箇所では45%程度、高い箇所では55%程度が連続して分布することが示された。層状構造のみられる付近では、間隙付近で40%程度、内部で50%となっていた。

真砂土では、豊浦標準砂ほど鮮明にカラム内と管壁付近で間隙率の違いが見られない。しかし、間隙分布は、同様に管壁付近で低くなり、中央部で高くなる傾向が示された。XY方向から、管壁付近の低い箇所では50%程度、高い箇所では55%程度であった。XZ方向から見た間隙分布では、一様の傾向として、カラム中心ほど間隙率が55%高く、管壁付近では間隙率は、50%と低くなっていた。真砂土を充填したカラム内の間隙分布は、間隙率の高い部分と低い部分がカラム内に混合していた。

関東ロームの間隙分布は、豊浦標準砂や真砂土とは異なる傾向を示し、XY方向及びXZ方向から管壁付近で、間隙率が70%以上となり、カラム中心部では、50~70%の間隙率の部分が混在していた。関東ロームの間隙分布は、管壁付近では間隙が連結して形成され、カラム中心部の間隙が独立して存在していることが示された。

最後に、カラム試験中のカラム内の差圧及び浸透率は、カラムへの溶媒(本実験:純水)の通水では、豊浦標準砂が2.1 kPa、真砂土が2.4 kPa、関東ロームで0.7 kPaであった。その時の各土壌を充填したカラム内の浸透率は、豊浦標準砂が $6.94 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 、真砂土が $2.08 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 、関東ロームで $5.21 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ であった。

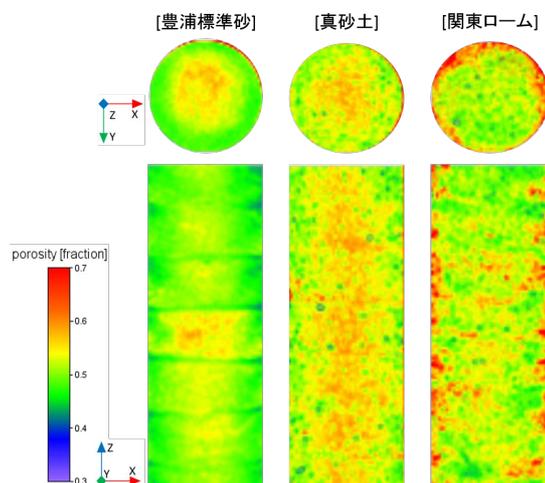


図2 XY方向及びXZ方向の2次元間隙分布解析結果

可視化した間隙分布の違いを示した図2から、真砂土と関東ロームの間隙分布は、その形状が異なっていた。真砂土では、カラム内部の一部のみ高い間隙率を示すのに対し、関東ロームでは、管壁付近に間隙率の高い部分が連結して存在していた。

各土壌の間隙分布の違いは、土壌ごとの特徴による影響であると考えられる。土壌の固相・気相・液相の土壌構造の形成については、農業、工業など様々な分野から報告されている。また、日本国内では土壌の粒径や密度、透水係数の測定方法がJIS規格化されている。その中で、土壌の間隙分布は、土壌の粒径、有機分及び含水比が大きく寄与しているとされる。

本研究から、カラム内に充填された土壌の間隙分布や卓越流路の形成には、土壌粒径や有機分の影響していることが示唆される。これらの土壌の物理・化学的特徴は、土壌中の有害物質の溶出にも大きく関わる。土壌の採取から実験用の試料とする際に、粒径や含水比などある程度統一した手法で用いられる。しかし、粘土・シルト・砂を粒度調整すること、また、有機分を取り除くことは、非常に困難である。よって、土壌は、試料の性質をコントロールすることができない。しかし、土壌の採取は、海底のコアサンプリングや希少な岩石と比較して容易である。評価すべきサイトから直接土壌をコアとして採取することで、実際の現場中の溶出メカニズムを検討すべきである。

今後、この異なる流路形成と直接土壌の溶出メカニズムを比較検討することで、見かけ上の再現性を検討するだけでなく、統一した規格、つまり、土壌を対象とした共通の評価方法を検討していく必要がある。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1件)

中村謙吾、青木飛翔、渡邊則昭、駒井武:X線CTを用いた三次元間隙構造可視化による土壌充填カラムにおける間隙分布の評価、土木学会論文集C(地圏工学)、査読有、Vol.72(2)、pp.190-195。(2016)

[学会発表](計 3件)

青木飛翔、中村謙吾、渡邊則昭、駒井武:上向流カラム通水試験の土壌中における卓越流路の三次元可視化、第22回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会、2016、6、23-24、京都(京都大学)

青木飛翔、中村謙吾、渡邊則昭、駒井武:X線CTを用いた土壌カラムにおける卓越流路の三次元可視化、資源・素材学会東北支部平成28年度春季大会、2016、7、7、仙台(東北大学)

青木飛翔、中村謙吾、渡邊則昭、駒井武:

第9回資源・素材学会東北支部若手の会、2016、10、30-31、角館(あきた芸術村温泉ゆぼぼ)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

中村 謙吾 (NAKAMURA, Kengo)  
東北大学・環境科学研究科・助教  
研究者番号: 30757589

### (2)研究協力者

渡邊 則昭 (WATANABE, Noriaki)  
東北大学・環境科学研究科・准教授  
研究者番号: 60466539