

液固比バッチ試験で得られた分配係数によるカラム試験の再現性の検討

福岡大学工学部 学生会員 崎山 大星 永山 陽裕
 福岡大学工学部 正会員 佐藤 研一 藤川 拓朗 古賀 千佳嗣
 国立環境研究所 正会員 肴倉 宏史

1. はじめに 土壤汚染対策法の改正に伴い、自然由来重金属含有土壤を建設事業で取り扱う事例が増加しており、汚染の判定や対策費用の負担などの問題が顕在化している。その打開策の一つとして、特性化試験である上向流カラム通水試験（以下、カラム試験（※2019年9月にISO化））による環境影響評価手法に注目が寄せられている。カラム試験は地盤材料の詳細評価が可能である。しかし、環告46号試験に代表される判定試験と比べて多量の試料を必要とし、1試験あたり20~30日程度の試験時間が必要など、多くの時間と労力を必要とすることが指摘されている。そのため試験時間の短縮化や汚染物質の挙動を再現できるモデルの構築が求められている。そこで、本研究では、汚染源地盤を構成する地盤材料に対して液固比を所定の範囲で段階的に割り振って行う「液固比バッチ試験¹⁾」の結果からパラメータを取得する新たな移流分散解析手法について検討を行っている。本報では、解析結果の妥当性についてカラム試験から得られた結果と比較から、その課題について考察する。

2. 実験概要

2-1 上向流カラム通水試験方法 図-1にカラム試験²⁾の概略図を示し、表-1に実験に用いた試料の物理特性と環告46号試験結果を示す。カラム容器への試料充填は、試料を5層に分け、最終高さが30±5cmになるように充填する。突固めは直径3.5cm、重さ125gのランマーを高さ約20cmから各層3回落下させ供試体を作製し、その後、カラムの下端から溶媒をカラム上端まで通水し、2日間以上静置させている。飽和過程終了後、通水速度10~15mL/hとなるようにポンプの調整を行い、所定の分画にて採取を行った。なお、採水タンク内は空気に接触して浸出液のpHに影響を与えないように、あらかじめ窒素を封入している。採水した浸出液は、孔径0.45μmのメンブレンフィルターを用いて吸引濾過を行い検液とし、pH、ホウ素(B)を測定した。ホウ素(B)は、ICPプラズマ発光分析装置(ICP7000-Ver.2:島津製作所製)を用い定量した。

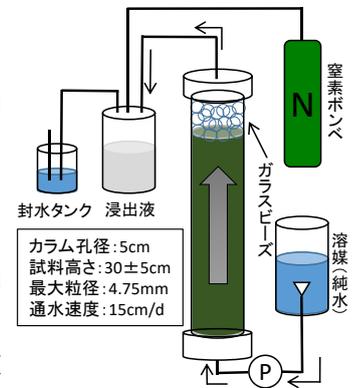


図-1 カラム試験の概略図

表-1 試料の物理特性と環告46号試験結果

試料	汚染土(粘性土)	
土粒子密度 ρ _s (g/cm ³)	2.616	
初期含水比 w(%)	47.8	
細粒分含有率 F _c (%)	69.7	
環告46号法	pH	8.29
	B (mg/L)	0.31

2-2 移流分散方程式を用いた液固比バッチ試験 カラム出口における浸出濃度の予測には、式(1)に示す次元移流分散方程式を用いた。遅延係数Rはヘンリー型の場合、式(2)で表すことができる。

$$R \frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} \quad (1) \quad R = 1 + \frac{\rho_d K_d}{\theta} \quad (2)$$

ここで、R:遅延係数、c:間隙水中の化学物質濃度 (mg/m³)、D:分散係数 (m²/s)、v:間隙内流速、K_d:分配係数(m³/kg)を表す。式(1)の遅延係数Rに式(2)のヘンリー型を用いた場合、次元移流分散方程式は理論解が存在し、式(3)で表すことができる。

$$c(x, t) = c_0 \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{Rx - vt}{2\sqrt{DRt}} \right) + \exp \left(\frac{vx}{D} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{Rx + vt}{2\sqrt{DRt}} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

ここで著者ら¹⁾は、図-2に示すように、液固比を所定の範囲で段階的に割り振った複数の単一バッチ試験を並行して行う液固比バッチ試験を実施することにより、吸脱着関与と総量 M_Tを変えずに液相存在量 M_Lと液相濃度 C の関係を用いて分配係数 K_d (ヘンリー型)を求める手法を提案している。そこで K_dを求めるために、表-2に示す条件で液固比バッチ試験を行った。なお溶出操作は、水平振とう、プロペラ攪拌、プロペラ攪拌 (pH保持) の三つの方法で行った。試料はカラム試験と同様に4.75mmでふるい分けした汚染土を用いた。プロペラ攪拌は、利用有姿試験を基に毎分約200回転で行った。プロペラ攪拌 (pH保持) では、0.1MのHNO₃と1MのNaOHを用いてpHを所定の値になるように保持したまま、毎分約200回転で攪拌を行った。

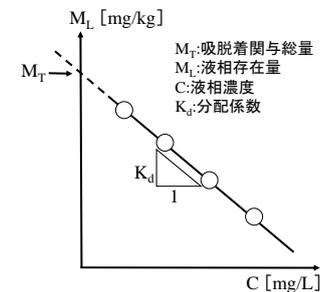


図-2 汚染物質の液相存在量と液相濃度の関係(ヘンリー型)

表-2 液固比バッチ試験の条件

液固比(L/kg)	3	10	30	100
試料量(g)	200	60	20	6
溶媒量(mL)	600			
容器容量(mL)	1000			
溶出時間(h)	6, 48			

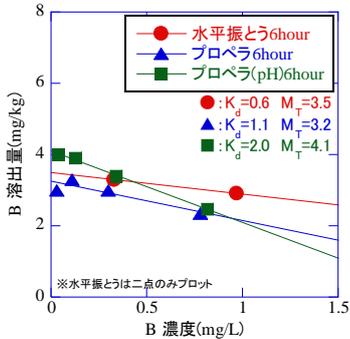


図-2 B溶出濃度と溶出量 (6hour)

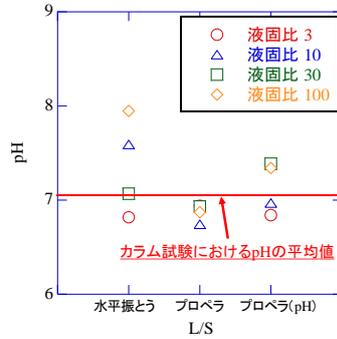


図-3 各溶出操作における pH の比較 (6hour)

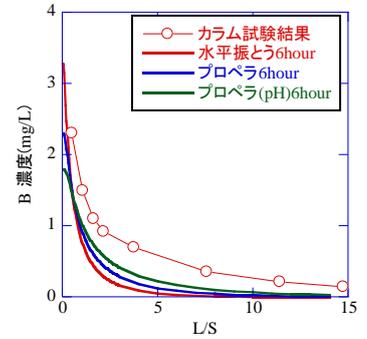


図-4 カラム試験結果と解析値の比較 (6hour)

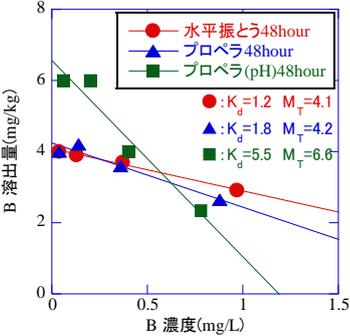


図-5 B溶出濃度と溶出量 (48hour)

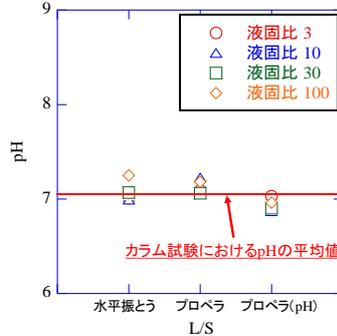


図-6 各溶出操作における pH の比較 (48hour)

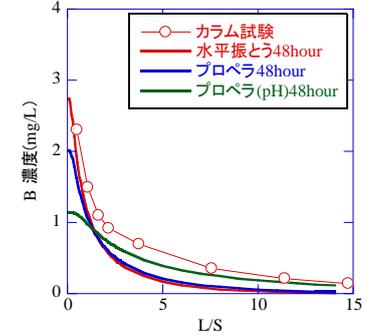


図-7 カラム試験結果と解析値の比較 (48hour)

3. 実験結果及び考察

3-1 溶出操作が解析結果に与える影響

図-2 に各液固比におけるホウ素の溶出量、図-3 に各溶出操作における pH の関係を示す。なお、図-3 にはカラム試験結果で得られた溶媒の最終 pH も併せて示している。溶出中にカラム試験で得られる pH に保持したままプロペラ攪拌を行った条件において、分配係数 K_d は最も大きな値を示した。水平振とうにおいては、液固比の影響によって pH が異なることから溶出量に影響を及ぼし、プロペラ攪拌においては、カラム試験によって得られる pH よりも低い環境下での溶出となり K_d と M_T は最も低い値を示した。これらの結果を踏まえ、図-4 にカラム試験結果と移流分散解析によって得られた結果を示す。カラム試験結果より、実験に使用した汚染土壌に含まれるホウ素は液固比の低い初期段階で最も高い溶出濃度を示し、液固比の増加とともに溶出濃度が低下することが分かる。これに対し解析結果は、いずれも溶出挙動こそカラム試験と類似しているものの、初期の溶出濃度や低液固比領域における溶出濃度に差が見られることが分かる。これら3つの解析結果がカラム試験結果と異なる理由は、いずれも溶出時間が影響しているものと考えられる。カラム試験結果は、試料を充填した後に溶媒を通水させ、2日間(48時間)飽和した後に通水を開始している。これに対し液固比バッチ試験は、いずれも6時間の溶出時間によって得られた結果を用いていることから、両者の初期濃度の違いや吸脱着効果が結果に影響したものと考えられる。

3-2 溶出時間が解析結果に与える影響

前節において、溶出操作に係る時間が初期の溶出量や吸脱着に影響を及ぼすことが判明したことから、溶出時間を48時間とし、溶出時間が解析結果に与える影響について検討を行った。図-5 に各液固比におけるホウ素の溶出量、図-6 に各溶出操作における pH の関係を示す。48時間の溶出時間においては、いずれの条件とも6時間の結果と比べ pH の差が見られず安定しており、カラム試験結果で得られる pH とほぼ等しいことが分かる。これらの結果を踏まえ、図-7 にカラム試験結果と移流分散解析によって得られた結果を示す。個々の溶出操作における溶出時間をカラムの飽和時間と等しく48時間実施することで、解析結果は概ね同等の結果を得ることが明らかとなった。なお、プロペラ (pH 保持) で K_d が大きくなり、カラム試験と比べて溶出濃度が小さくなった理由については引き続き検討を行っていく必要がある。

4. まとめ

1) カラム試験によって得られる汚染物質のホウ素溶出挙動は、液固比バッチ試験(溶出時間:48時間)を用いた移流分散解析により再現できることが示唆された。2) 液固比バッチ試験を用いた移流分散解析は、汚染源地盤での汚染物質の挙動を適切に評価できるツールとなり、試験時間の短縮に期待が持てる。

謝辞: 本研究は、令和元年度科学研究費助成事業(課題番号:19K04606)の助成を受けたものです。関係者各位に心より感謝申し上げます。

【参考文献】1) 肴倉宏史・伊藤健一:「液固比バッチ試験」による汚染物質を保有する材料の吸脱着パラメータの取得法, 第53回地盤工学研究発表会, pp2167-2168, 2018. 2) ISO/TS 21268-3 Soil quality-Leaching procedures for subsequent chemical and ecotoxicological testing of soil and soil materials, Part3:Up-flow percolation test.