

液固比バッチ試験を用いた移流分散解析によるカラム試験の再現性とその適用範囲の検討

福岡大学大学院
福岡大学工学部
(国研)国立環境研究所

学生会員
正会員
佐藤 研一
藤川 拓朗
古賀 千佳嗣
肴倉 宏史

○崎山 大星

1. はじめに 浸出水濃度の予測は、有効利用する廃棄物・副産物や汚染土壌の環境安全性評価を行う上での重要な課題の一つである。そのような環境安全性評価の一つとして、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)に近年注目が寄せられている。しかし、カラム試験は1試験あたり30日程度の試験時間と労力を要するため、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。このような背景を踏まえ、著者らは¹⁾、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」の結果からパラメーター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、汚染土を用い液固比バッチ試験を用いた移流分散解析によるカラム試験の再現性の検討とその適用範囲(解析可能な元素)について検討した結果について報告する。

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、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。カラム試験は、ISO 21268-3に準拠して実施した。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。突き固めは直径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。採水した浸出液は、吸引濾過を行い検液とし、pH、ホウ素(B)、ナトリウム(Na)、カルシウム(Ca)、亜鉛(Zn)、マグネシウム(Mg)、六価クロム(IV)、フッ素(F)について定量した。

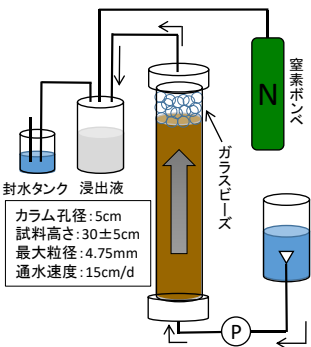


図-1 カラム試験の概略図

表-1 試料の物理特性と環告46号試験結果

試料		汚染土
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
	F(mg/L)	0.69
	Na(mg/L)	71.0
	Ca (mg/L)	2.55
	Zn(mg/L)	0.07
	Mg(mg/L)	2.80
	Cr(VI)(mg/L)	N.D

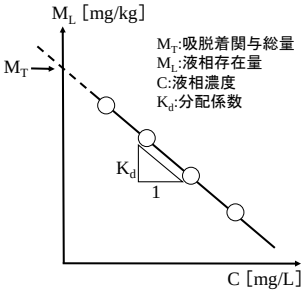


図-2 汚染物質の液相存在量と液相濃度の関係(ヘンリー型)¹⁾

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			

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測には、式(1)に示す一次元移流分散方程式による理論解を用いた。

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

ここで、R:遅延係数 ($R = 1 + \rho K_d/n$ 、ここで ρ :乾燥密度 (kg/m³)、 K_d :分配係数 (m³/kg)、 n :間隙率)、 c :液相濃度 (mg/L)、 D :分散係数 (m²/s)、 v :間隙内流速を表す。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 (図はヘンリー型) 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。なお溶出操作の影響を確認するため、水平振とう、プロペラ攪拌、プロペラ攪拌 (pH 保持) の3つの方法で行った。試料はカラム試験と同様に最大粒径4.75mmの汚染土を用いた。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 調整) では、0.1MのHNO₃と1MのNaOHを用いてカラム試験で得られるpHと同じ値に保持したまま、毎分約200回転で攪拌を行った。

キーワード カラム試験, 移流分散解析, 液固比バッチ試験,
連絡先 〒814-0180 福岡市城南区七隈 8-19-1 福岡大学工学部 TEL092-871-6631(ext.6464)

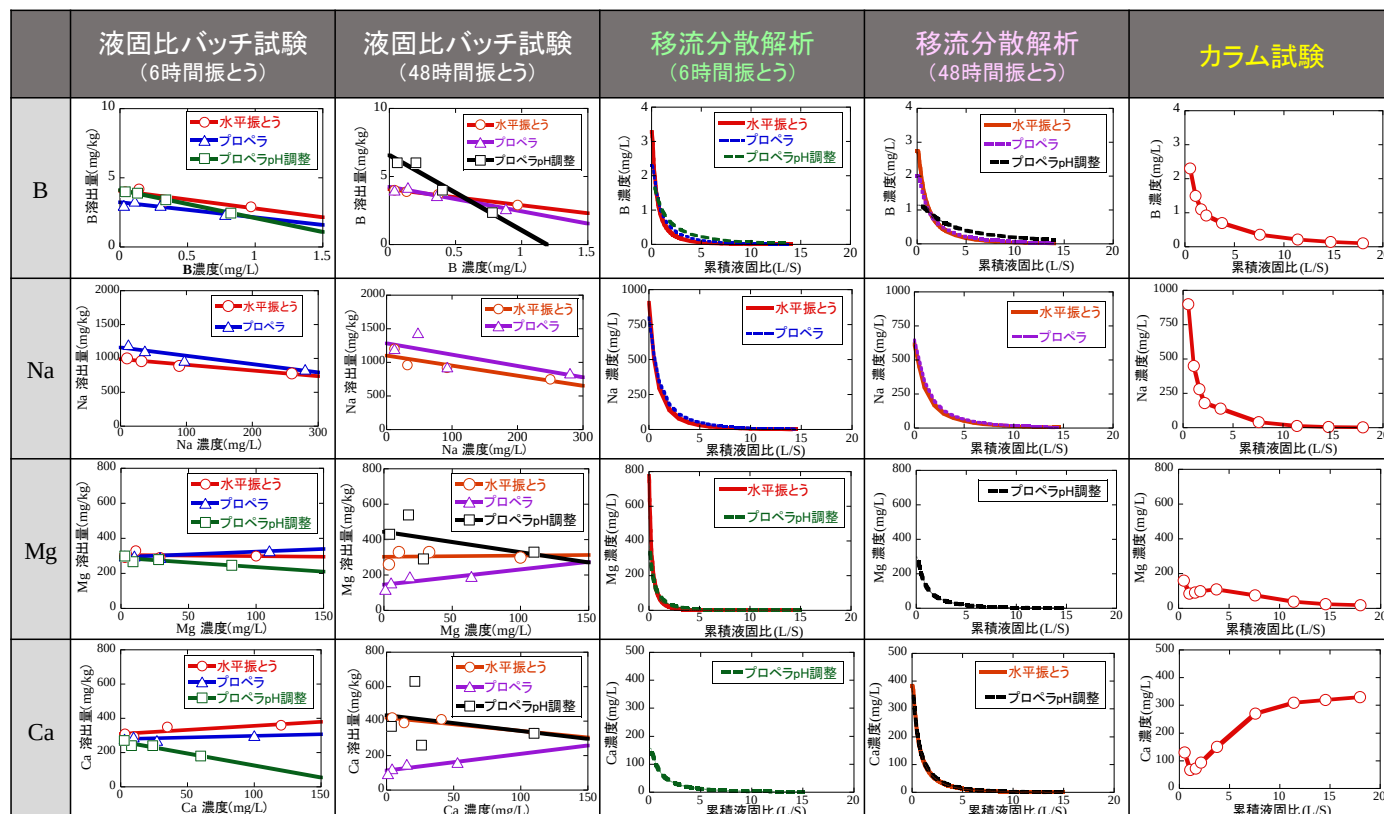


図-3 移流分散解析とカラム試験結果の比較

3. 実験結果及び考察 図-3 に液固比バッチ試験によって得られるパラメータを用いた、移流分散解析結果とカラム試験結果を示す。なお、Zn, F, Cr(IV)については、液固比バッチ試験において溶出が見られない条件もあったため、今回の結果から割愛している。B の吸脱着は Henry 式で表される³⁾ことから、本実験においても移流分散解析を用いてカラム試験結果を再現できることが分かる。また、48 時間振とうによって得られるパラメータを用いた方が、低液固比領域における溶出濃度がカラム試験結果と類似する結果となった。Na についても、B と同様に液固比バッチ試験により求まるパラメータを用いて、カラム試験結果を再現できることが分かる。また、B と異なり、6 時間振とうによって得られた結果がカラム試験結果と類似する結果となったことを考慮すると、対象とする元素によって適切な溶出時間があることを示唆している。Mg については、条件によっては Henry 型の吸脱着式を用いて表すことが出来ず、全体的にバラつきの多い結果となった。しかしながら、カラム試験によって得られた平均 pH に調整した 48 時間振とうによる液固比バッチ試験において、カラム試験結果をある程度再現できることが分かる。このように Mg については、溶出中の pH の影響を受ける可能性があり、今後更なる検討が必要である。また、Ca のカラム試験結果のように、低液固比領域において濃度が一旦減少した後、再度、液固比の増加に伴い溶出濃度が上昇するような複雑な溶出挙動を示すものについては、Henry 型の吸脱着式を用いてもうまく再現できないことが分かる。そのため、Ca の再現については、液相中の粒子表面による瞬時の吸脱着反応のみならず、内部拡散や境界膜拡散も考慮した検討や Langmuir 型や Freundlich 型を用いた液相存在量と液相濃度の検討が必要と考えられる。

4. まとめ 1) カラム試験によって得られる B や Na の溶出挙動は、液固比バッチ試験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) Mg の溶出挙動は、液固比バッチ試験において溶出操作中の pH を調整することで再現できることが示唆された。3) Ca の溶出挙動は、Henry 型の吸脱着式を用いて再現することが難しく、内部拡散等によるパラメータの取得が必要と考えられる。

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を申し上げます。

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，pp.2167-2168, 2018. 2) ISO 21268-3 Soil quality-Leaching procedures for subsequent chemical and ecotoxicological testing of soil and soil materials, Part3: Up-flow percolation test. 3) 五十嵐敏文・下垣 久：バッチ法およびカラム法によるホウ素の地中移行特性，地下水学会誌，Vol.40, No.2, pp.121-132, 1998.