

土の分散特性および吸着特性の評価に関する基礎的研究

Study on the Hydrodynamic Dispersion and Adsorption Characteristics of Soil

高橋 直樹 NAOKI TAKAHASHI
中田 雅夫 MASAO NAKATA
山本 陽一 YOICHI YAMAMOTO

本研究では、地下水における汚染物質の分散特性および吸着特性を評価することを目的とし、汚染物質に塩水および六価クロムを用いたカラム試験を実施した。対象として砂およびシルト質土に着目し、今回は主に密度の違いが分散特性や吸着特性に与える影響について示した。

キーワード：カラム試験，分散，吸着，重金属，地下水汚染

To evaluate the hydrodynamic dispersion and adsorption characteristics of pollutants in groundwater, a series of column tests were conducted using salt water and hexavalent chromium as pollutants. Each characteristic by difference of the soil density was clarified based on the test results using sandy soil and silty soil.

Key Words: Column Test, Hydrodynamic Dispersion, Adsorption, Heavy Metal, Ground Water Pollution

1. はじめに

わが国における土壌・地下水汚染は、カドミウム汚染米によって注目された、いわゆる、農用地土壌汚染に端を発している。その後、市街地の土壌汚染問題の先駆けとして 1975 年に顕在化した東京都六価クロム鉍滓事件¹⁾に端を発し、近年では、工場跡地などの再開発に伴い、重金属や揮発性有機塩素化合物などの有害物質による市街地周辺地域における土壌・地下水汚染が顕在化している。また、重金属含有製品の大量消費・大量廃棄がもたらすごみ焼却場や廃棄物埋立地による重金属汚染も問題となっている。これら汚染原因の重金属としては、鉛、砒素、水銀、カドミウムおよび六価クロムが挙げられ、揮発性有機塩素化合物には、トリクロロエチレンやテトラクロロエチレンが挙げられる。

このような土壌・地下水汚染は、水を経由して人の健康や自然環境へ悪影響を及ぼすものであり、浄化のために早急な対応が望まれている。また、国土の狭いわが国では、汚染された工場跡地を有効利用するためにも、汚染土壌の浄化対策が必要であると考えられる。

汚染土壌の修復、浄化対策を講じる上で、地盤内における汚染物質の挙動を把握することが重要となる。そのための手法の一つに移流分散解析がある。本解析手法は、重金属、農薬、亜硝酸性窒素、塩水および水に溶解

した有機塩素系化合物など、環境基準に定められたほとんどの有害物質の水溶性汚染挙動に対応が可能である。移流分散解析における水溶性汚染の基礎方程式は、式(1)²⁾に示すように移流項（右辺第 2 項：地下水実流速による移行）、拡散分散項（右辺第 1 項：溶質濃度拡散と流体力学的分散の効果）および遅延項（左辺：吸脱着現象の蓄積による物質移行の遅れ効果）の大きく 3 項から構成されている。その他、原子崩壊や化学的な分解による物質の消失を表す減衰項、および移行過程における物質の湧き出しや吸い出しを表す源泉項を考慮することも可能である。なお、分散特性を表す拡散分散項は、溶質濃度拡散と流体力学的分散とから成る。建設実務で問題となる実流速の場合には、溶質濃度拡散は無視できるほど小さく、拡散分散項は流体力学的分散係数 D と考えて良いとされる³⁾。

$$R\theta\rho\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}(\theta\rho D_{ij}\frac{\partial c}{\partial x_j}) - \theta\rho v_i\frac{\partial c}{\partial x_i} - R\theta\rho\lambda c - Q_c \quad (1)$$

ここに、 R ：遅延係数、 θ ：体積含水率、 ρ ：流体密度 [ML^{-3}]、 D_{ij} ：分散テンソル [L^2T^{-1}]、 c ：濃度（正規化濃度、比濃度）、 v_i ：間隙内流速 [LT^{-1}]、 λ ：減衰定数 [T^{-1}]、 Q_c ：源泉項（解析領域内での湧き出し、吸い出し） [ML^3T^{-1}]、および t ：時間 [T]である。

移流分散解析により汚染物質の影響を予測する場合、式(1)からも理解されるように、その解析精度を高めるためには、土の分散特性や吸着特性の評価を精度良く行うことが重要である。

そこで本研究では、砂およびシルト質土の2種類の試料を対象とし、トレーサに塩水および六価クロムを用いたカラム試験を実施し、土の種類や密度が分散特性および吸着特性に与える影響について検討した。なお、分散特性としては流体力学的分散に着目するため、試験条件上、溶質濃度拡散現象の影響が生じにくい比較的透水性の良い材料を対象とした。

2. カラム試験の概要

(1) 試験装置

図-1 にカラム試験装置の構成、写真-1 にその全景を示す。本装置は、上部・下部トレーサ槽、上部・下部淡水槽、ポンプ、流入管、排水管およびカラムから構成されており、その通水機構は定水位透水試験機と同様である。すなわち、下部トレーサ・淡水槽の溶液または水をポンプにより流入管を通じて越流口を有した上部トレーサ・淡水槽へ送り、越流口から溶液または水を排出することにより上部トレーサ・淡水槽の水位を一定に保持する機構となっている。なお、越流した溶液または水は、排水管を通じて下部トレーサ・淡水槽に戻る。カラムは写真-2 に示すようにアクリル製であり、その寸法は内径30mm、長さ300mmである。

(2) 試料およびトレーサ

試料は、浜岡砂 ($\rho_s=2.692\text{g/cm}^3$, $e_{\max}=0.881$, $e_{\min}=0.570$) とシルト質土である。シルト質土の物理特性を表-1 に示す。トレーサには、非吸着性トレーサとして塩水(濃度:500mg/l)、吸着性トレーサとして六価クロム(濃度:0.5mg/l)を用いた。トレーサ溶液は、これらを脱気水に所定の濃度になるよう溶解させ作成した。カラム供試体から流出した溶液の濃度計測は、塩水は電気伝導度により、六価クロムは分光光度法で行った。

(3) 試験方法と試験結果の整理方法

カラム供試体は、まず乾燥状態の試料を所定の乾燥密度となるようカラム内に充填した。次に、真空ポンプを用いてカラム内を真空状態にした後、脱気精製水をカラム下端から通水させて飽和供試体を作成した。試験は、まず上部淡水槽から水をカラム上端から下端方向に通水し、定常状態となるよう十分な時間放置した。その後、トレーサ溶液を同一方向にて通水し、任意の時間間隔で

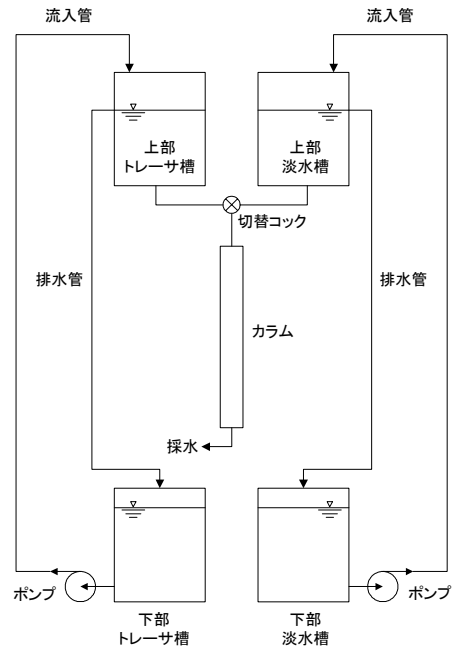


図-1 カラム試験装置の構成



写真-1 カラム試験装置の全景



写真-2 カラム

カラム下端からの溶出水をサンプリングした。

ここで、前述した、式(1)の減衰項や源泉項を無視し、密度一定、体積含水率を均一かつ一定とし、一次元で表すと式(2)が得られる。さらに、上流側の境界濃度を一定と仮定すれば、式(2)は解析的に解くことが可能であり、式(3)が得られる。

$$R \frac{\partial c}{\partial t} = D_y \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x_j^2} \right) - v_i \frac{\partial c}{\partial x_i} \quad (2)$$

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{Rx-vt}{2\sqrt{DRt}} + \frac{1}{2} \exp \frac{vx}{D} \operatorname{erfc} \frac{Rx+vt}{2\sqrt{DRt}} \quad (3)$$

ここに、 c :濃度、 c_0 :境界濃度 ($x=0$ における) および x :境界線からの距離である。

分散係数 D および遅延係数 R の評価に関しては、カラム下端から採取した溶液の比濃度 c/c_0 とトレーサ注入開始後の経過時間 t の関係をグラフにプロットし、これを式(3)と比較することにより両パラメータを同定する。塩水の場合、吸着を無視することから遅延係数 $R=1$ として分散係数 D を同定した。なお、吸着性トレーサとして六価クロム溶液を用いた場合は、トレーサに塩水を使用して得られた分散係数 D を用いて遅延係数 R を同定した。また、カラム中の間隙内流速 v は、比濃度 $(c/c_0)=0.5$ に達した時間と供試体長さから算出した。縦分散長 α_L は式(4)から求めた。

$$D = \alpha_L v \quad (4)$$

(4) 試験ケース

試験ケースは、表-2 に示すように浜岡砂に関しては相対密度 D_r を 70%, 80%および 95%の 3 ケースとし、それぞれに塩水および六価クロム両トレーサを用いて実施した。なお、動水勾配は、トレーサに塩水を用いた場合のみ $i=0.5$ および 1.45 とし、六価クロムを用いたケースについては $i=1.45$ とした。一方、シルト質土については、乾燥密度 ρ_d を 0.703g/cm^3 , 0.758g/cm^3 とし、トレーサには塩水を用いた。なお、このときの動水勾配は $i=1.45$ とした。

3. 試験結果および考察

図-2、図-3 に、代表的なケースとして CASE5 および CASE11 における溶液の比濃度の時刻歴 (以下、破過曲線) を示す。なお、図には、式(3)を用いて同定した結果もそれぞれ示している。表-3 に分散係数 D および遅

表-1 シルト質土の物理的特性

含水比	(%)	85.13
土粒子密度	(g/cm^3)	2.74
塑性限界	(%)	125.6
液性限界	(%)	144.6
塑性指数		19
最適含水比	(%)	92.58
最大乾燥密度	(g/cm^3)	0.79
礫分 (2~75 mm)		3.31
砂分 (0.075~2 mm)		12.42
細粒分 (0.075 未満)		82.27

表-2 試験ケース

CASE	試料	トレーサ	動水勾配	乾燥密度 $\rho_d(\text{g/cm}^3)$
1	浜岡砂	塩水	0.5	1.619($D_r=70\%$)
2				1.650($D_r=80\%$)
3				1.699($D_r=95\%$)
4			1.45	1.619($D_r=70\%$)
5				1.650($D_r=80\%$)
6				1.699($D_r=95\%$)
7		六価クロム	1.45	1.619($D_r=70\%$)
8				1.650($D_r=80\%$)
9				1.699($D_r=95\%$)
10	シルト質土	塩水	1.45	0.703
11				0.758

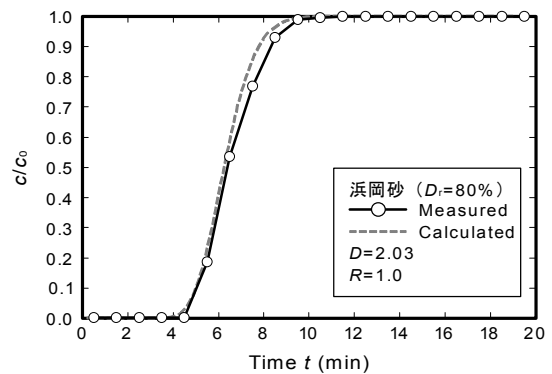


図-2 破過曲線 (CASE5)

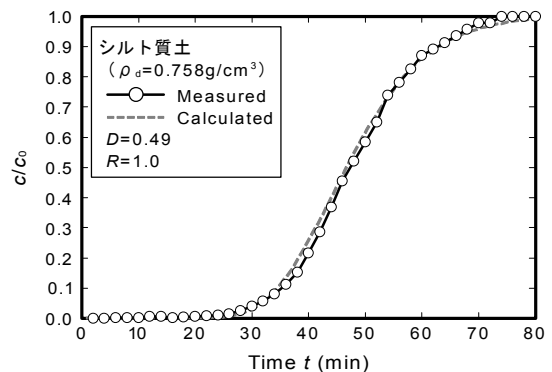


図-3 破過曲線 (CASE11)

遅延係数 R の同定結果を示す。

図-4 は、トレーサとして塩水を用いた CASE1, CASE6 および CASE10, CASE11 における間隙内流速 v と分散係数 D との関係を示したものである。分散係数 D は、間隙内流速 v の増加に伴い大きくなり、図中破線で示す式(4)の関係が成り立つことがわかる。また、式(4)の関係から求められる縦分散長 α_L に着目すると、浜岡砂よりも細粒分を多く含むシルト質土の縦分散長 α_L の方が大きい。細粒分が多くなるとカラム内試料の間隙構造が複雑になり、カラム内の浸透が不均一になって、流れの速い部分と遅い部分の差が大きくなることに起因するものと考えられる⁴⁾。

図-5 に浜岡砂に関して相対密度 D_r と縦分散長 α_L との関係を示す。縦分散長 α_L は密度の増大に伴い減少することがわかる。この関係は、CASE10 と CASE11 の結果からシルト質土についても同様の傾向が認められる。なお、縦分散長は試験スケールに依存し、おおむね移行距離の 1/10 程度の値になることが示されている⁵⁾。本試験結果から得られた浜岡砂の縦分散長 α_L の値は 0.2 ~ 0.7cm であり、今回用いたカラムとほぼ等しいカラムスケールを用い、砂を試料とした既往の研究結果⁶⁾ 0.1 ~ 2cm と整合するものである。

図-6 は浜岡砂に関して相対密度 D_r と遅延係数 R の関係を示したものである。いずれの相対密度 D_r においても遅延係数は 1 程度であり、六価クロムの浜岡砂への吸着性は認められない結果となった。しかしながら、試料に砂を用い、トレーサ、カラムサイズ、間隙内流速などが本研究とほぼ等しく、六価クロムの濃度を 10mg/l という条件下で行われた既往の研究結果⁵⁾では、遅延係数 $R=3\sim5$ という結果が得られている。このことから、本研究においてほとんど吸着が認められなかったのは、六価クロムの濃度の影響によるものと考えられる。

4. まとめ

砂およびシルト質土の2種類の土に着目し、トレーサに塩水および六価クロムを用いたカラム試験を実施して土の種類や密度が分散特性および吸着特性に与える影響について検討した。

本研究により得られた主な結論は以下のとおりである。

- ① 浜岡砂およびシルト質土について、分散係数 D は間隙内流速 v の増加に伴い増大する。
- ② 縦分散長 α_L は、細粒分の多い土の方が大きな値となる。これは、土の骨格構造の影響により、土中の浸透が不均一になることによるものと考えら

表-3 分散係数 D および遅延係数 R の同定結果

CASE	D (cm^2/min)	R
1	1.11	1
2	0.45	1
3	0.25	1
4	3.02	1
5	2.03	1
6	1.06	1
7	3.02	1.01
8	2.03	1.03
9	1.06	1.03
10	2.95	1
11	0.49	1

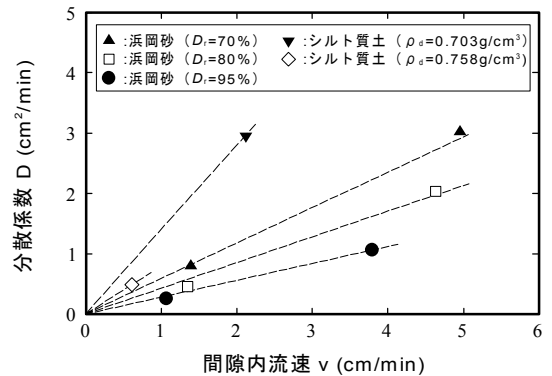


図-4 間隙内流速と分散係数の関係

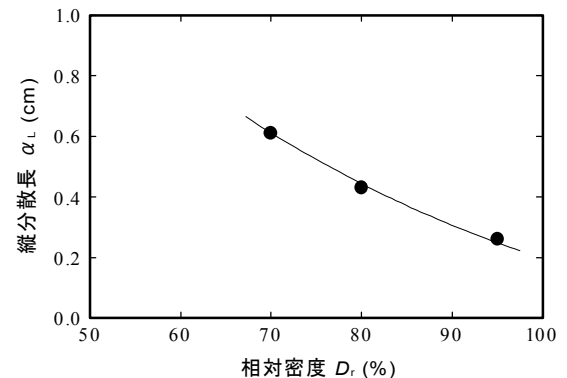


図-5 相対密度と縦分散長の関係

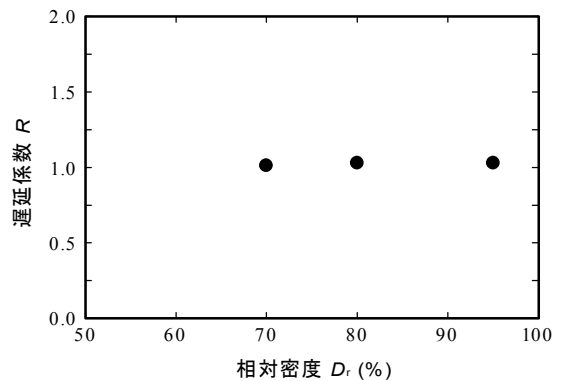


図-6 相対密度と吸着係数の関係

れる。

- ③ 縦分散長 α_L は、密度の増加に伴い減少する。
- ④ 今回の試験においては、砂への六価クロムの吸着はほとんど認められなかったため、相対密度の違いによる影響は確認されなかった。
- ⑤ 本研究のカラムスケールでの縦分散長 α_L が、既往の研究の値と整合することを確認した。

今後は、土やトレーサの種類、およびトレーサ濃度の違いが分散特性や吸着特性に与える影響について検討する予定である。さらに、拘束圧が制御可能な三軸セルを有するカラム試験を実施し、分散特性や吸着特性に与える拘束圧の影響についても研究を進める予定である。

謝辞：本報告のカラム試験は、宇都宮大学との共同研究として実施したものです。ご指導戴いた宇都宮大学、今泉繁良教授に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 六価クロムによる土壌汚染対策専門委員会編：六価クロム鉍滓による土壌汚染対策報告書，東京都公害局，pp.1～376，1977.
- 2) 西垣 誠，菱谷智幸，橋本 学，河野伊一郎：飽和・不飽和領域における物質移動を伴う密度依存地下水流の数値解析手法に関する研究，土木学会論文集，No.511/Ⅲ-30，pp.135-144，1995.
- 3) 小橋秀俊：地盤汚染の形態分類とその対策の評価手法に関する基礎的研究，土木研究所報告，第 202 号，pp.51-111
- 4) 青木一男，西田拓二，上村貴也，日置和昭：カラム試験における有効間隙率の間隙内流速依存性について，第 6 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp.143-148
- 5) Gelhar, L.W.: Stochastic subsurface hydrology from theory to application, Water Resources Research, Vol.22, No.9, pp.135-145, 1986.
- 6) 独立行政法人土木研究所：建設工事で遭遇する地盤汚染マニュアル，2004.