

重金属吸着のカラム試験結果の連続時間ランダムウォークによる検討

A column test of heavy metal adsorption with comparison of the CTRW model

神尾 優仁 [1]; 羽田野 祐子 [2]
Yuto Kamio[1]; Yuko Hatano[2]

[1] 筑波大・シス情・リスク; [2] 筑波大・シス情
[1] Risk Engineering, Tsukuba Univ.; [2] Inst. Eng. Mech & Sys., Tsukuba Univ.

1. 目的

地下水・土壌汚染による日常生活への影響が大きく取り上げられるようになり、正確な汚染状況の把握や長期的な予測が必要となっている。従来土壌における吸着のある汚染物質の挙動の予測は、以下の移流分散方程式 (advection-dispersion equation: ADE) と呼ばれるものが用いられて来た。この式は 1950 年代から用いられているもので、流速と分散係数が分かれば各位置・各時間での濃度変化が分かるという簡単なものであるが、Adams and Gelhar によるフィールド実験 [1] などにより物質移動の予測モデルとして適切ではないと言われている。そのため、近年連続時間ランダムウォークと呼ばれる新しい物質移動のモデルが提案されている。塩化物イオンや臭化物イオンではこの新しいモデルの有効性が確認されている [2]。しかし、系内で吸着が起こる実験を新しいモデルで行った例はあまりない。そこで本研究では室内カラム試験を行い、その結果を従来の移流分散方程式とフィッティングさせて結果が合致しない事を示し、新しく提案されている支配方程式である連続時間ランダムウォークとのフィッティングを行い、これの適用可能性を検討する。

2. 理論

上で述べた移流分散方程式の問題点を解決するための新たな支配方程式として、連続時間ランダムウォークが提案されている。これは一次元ランダムウォークをもとに考案されたものである。一次元ランダムウォークとは、一次元の直線上で原点から出発し、単位時間ごとに右あるいは左へそれぞれ確率 p および $q=1-p$ で、一定距離ずつ移動するとしたときに粒子の位置を予測するものである。これは従来の移流拡散方程式に帰着する考え方である。連続時間ランダムウォークは、各ジャンプの起こる前にそのサイトにとどまる時間 (待ち時間) に分布を持たせたものである。本研究では遷移を表す式の場所依存性を省略して先行研究 [3] より、待ち時間関数として次のような離散化した関数を使用する。

$$P(t) = Ct^{-A}$$

定数 C はリーマンのゼータ関数より決定される。この値を実験結果とフィッティングさせ、物質移動の予測モデルとしての適用可能性を考える。式中の A の値は系の挙動に深く関わっており、 A の値により系が通常の拡散で表されるか否かが決まる。 A が 3 以上の場合、系は通常の拡散方程式で表される挙動を示し、 A が 2 以下の場合系は異常拡散という通常拡散とは非常に異なる挙動を示す。2 以上 3 以下の場合には通常拡散と異常拡散の中間的な挙動を示す。

3. 実験概要及び手順

汚染物質の拡散を見る実験として、カラム試験を行った。直径 31mm の塩ビ管に豊浦標準砂を水中落下法により充填し、ペリスタティックポンプによって一定流量に保たれた濃度 2ppm の重金属溶液を注入する。カラムの下部から流出した溶液を 30 分ごとに回収し、その濃度を測定する。溶液回収にはフラクションコレクター、濃度測定器には日立偏光ゼーマン原子吸光光度計 Z-2300 を使用した。使用する重金属は亜鉛と鉛の 2 種類を用い、吸着の強弱による拡散挙動の変化を見る。また、重金属溶液を流した砂層を一定間隔ごとにスライスし、質量濃度 3% の硝酸溶液に 24 時間浸したものを原子吸光光度計で測定する事で、豊浦砂に吸着された重金属の量を測定する。

4. 結果

カラム試験により得られたデータを元に、横軸は経過時間、縦軸は濃度比をとったグラフを描く。これは破過曲線 (break-through curve) と呼ばれるもので、このグラフと移流分散方程式、連続時間ランダムウォークとのフィッティングを行う。連続時間ランダムウォークによりシミュレーションを行った結果を図 1 に示す。横軸は流下時間に相当するステップ数、縦軸はカラムから流出した粒子数を表す。図は A の値を変化させたものであり、 A の値が小さくなるほど異常拡散の特徴が大きく現れることを示している。通常拡散のケースは $A=3$ の場合に相当する。学会当日は、移流分散方程式と連続時間ランダムウォークによる実験値のフィットの詳細を報告し、吸着系の汚染物質の挙動が異常拡散に近い事を述べる。

1) Adams, E.E., and L. W. Gelhar.: Field study of dispersion in a heterogenous aquifer, 2, spatial moment analysis, Water Resour. Res., Vol28(12) 3308, 1992.

2) Margolin, Gennady ; Dentz, Marco ; Berkowitz, Brian: Continuous time random walk and multirate mass transfer modeling of sorption, Chemical physics. 295, no. 1, 2004

3) Monte Carlo simulation and data analysis of anomalous diffusion of the continuous time random walk model, Y. Hatano, N. Hatano, in preparation

