

重金属による地下水汚染について

京都大学 工学部 井上頼輝 森澤真輔 小林一朗

近年の廃棄物量の増大にともない 廃棄物埋立て処分場周辺の地下水汚染も大きな環境問題となる。本研究はこのうち重金属による汚染に注目し、(1)従来より沈殿池流動 etc の解析に用いられている混合槽の理論を 土壌による重金属の吸着項を考慮して変形し、(2)地下水系に適用し、帯水層模型による実験結果と比較・検討することを目的とした。

帯水層において n 個の完全混合槽が直列にならんでいると仮定すれば その i 番目の槽について物質収支をとると次式を得る。

$$\frac{V}{n} \cdot \frac{dC_i^*}{dt} = QC_{i-1} - QC_i \quad \text{----- (1)}$$

ただし、

$$C_i^* = \lambda \cdot C_i + (1-\lambda) \cdot \rho \cdot g_i$$

ここに、

 V : 帯水層の全容積 Q : 地下水流量 C_{i-1} : $i-1$ 番目の槽より i 番目の槽に流入する溶質濃度 C_i : i 番目の槽の地下水中濃度 g_i : i 番目の槽の土壌中濃度

一般に地下水の流速はきわめて遅く、かつ重金属の地下水中濃度は希薄であるのでつぎの関係が成立すると仮定してよい。

$$g_i = k_d \cdot C_i \quad \text{ここに、} k_d : \text{分配係数 (ml/g)}$$

インパルス入力について 微分方程式(1)を解くとつぎのような解が得られる。

$$C_{out}(t) = \frac{n^n}{(n-1)!} \cdot \frac{1}{K_f} \cdot \left(\frac{t}{K_f \cdot T} \right)^{n-1} e^{-\frac{n \cdot t}{K_f \cdot T}} \quad \text{----- (2)}$$

$$\text{ここに、} K_f = 1 + \frac{1-\lambda}{\lambda} \cdot \rho \cdot K_d \quad T = \frac{V \cdot \lambda}{Q}$$

ステップ入力については

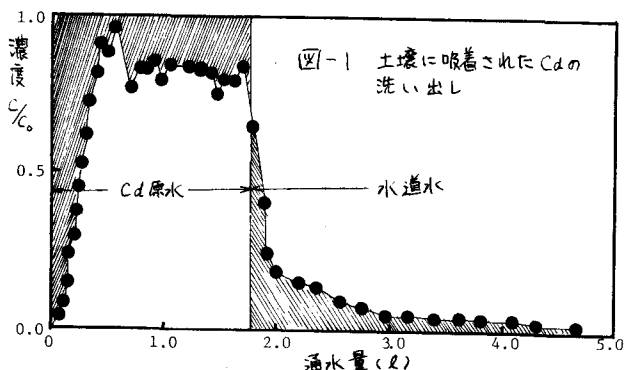
$$C_{out}(t) = (1 - e^{-\frac{n \cdot t}{K_f \cdot T}}) + e^{-\frac{n \cdot t}{K_f \cdot T}} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{(n-k)!} \left(\frac{n \cdot t}{K_f \cdot T} \right)^{n-k} \quad \text{----- (3)}$$

となる。また槽の数 n と分散 σ^2 との間には $\sigma^2 = \frac{1}{n} \cdot K_f^2$ なる関係がある⁽¹⁾ から分散を実験によって調べることににより槽列の数 n を知ることができる。(2)式はインパルス入力の場合、濃度を規準化してトレーサーの溶出曲線 ($K_f=1$) を時間軸方向に K_f 倍し、濃度軸方向に $1/K_f$ 倍すると重金属の溶出曲線に一致することを示している。また(3)式はステップ入力の場合はトレーサーの溶出曲線を時間軸方向に K_f 倍することによってトレーサーと重金属の溶出曲線とが一致することを示している。すなわち重金属の移動には、地下水の移動に要す時間の K_f 倍の時間が必要となることが解る。したがって地下水中の重金属の移動を予測するには、地下水そのものの流動状態とともに、分配係数で表わされる重金属の土壌への吸着を知ることが重要な要因となる。

帯水層の実験では全長 70cm の水道水を通水している地層模型に瞬間面源とみなせるようにカドミウムを投入した。また実験に先だちカドミウムの分配係数および、また模型にト

トレーサー（塩素）を通し流下方向の各地点で滞留時間と分散とから槽列の数を求めた。分配係数はカドミウム 47.9 ml/g 銅 7.73 ml/g 鉛 4.80 ml/mg の値を得た。また重金属の分配係数は共存する陽イオン濃度が高いときは小さな値、共存する陽イオン濃度の低いときは大きな値を取る傾向を示す。また土壌を充填したガラスカラムにカドミウム原液を通過させたのち水道水によって土壌に吸着されているカドミウムの洗い出し実験を行なった。（図-1）

図の斜線部が土壌に吸着されたカドミウム量および水道水によって溶出したカドミウム量を表わす。吸着されたカドミウムのうち溶出したカドミウムの割合は33.5%であった。帯水層模型にインパルス状にトレーサーを投入し、その溶出曲線の分散から槽列の数を求めた。槽列の数は流下方向に10, 20, 30, 40, 50, 60, cmの地点で各々1.38, 2.43, 14.14, 5.31, 9.97, 13.42であった。Cd濃度の予測値と実測値を比較するとそのピークの出現時間はよく一致している。予測濃度曲線は全体的に実測値の約3倍程であって絶対値には差があるが、予測カーブの形は実測溶出曲線にほぼ一致している。



本研究によって明らかになった事項を整理するとつぎのようになる。

・完全混合槽列モデルによって重金属

の濃度を予測する方法と、拡散現象に注目した重金属の地中移動に関する井上の理論⁽²⁾とを比較すると、実験によって定めるパラメータが、槽列の数であるか、拡散係数であるかを除けば、理論の適用方法、手順などほとんど同じであるとの結論を得た。

・バッチ実験、カラム実験などで測定した実験パラメータを槽列モデルに適用して、地層模型内におけるCdの移動を予測したところ、予測値と実測値とはピーク濃度の出現位置、溶出曲線の形ともよく合致したが、濃度の絶対値はあまりよく合致しなかった。これは、投入したカドミウムの内ある部分は一度土壌に吸着すると水道水では洗い出されなくなることが、予測値が実測値より大きくなることの原因であると考えられる。これは、土壌と吸着・脱着をくり返すCdの量が初期投入量より次第に少なくなるのと同じ効果を表わす。

・本研究の理論展開では、Cdの分配係数値は一定であると仮定している。Cd濃度、 $(Ca + Mg)$ 濃度、pH etc を変えて分配係数値を測定した結果、分配係数値は必ずしも一定値とはみないことが解った。今後この関係を理論にくみこむよう、理論を改良する必要があると考えられる。

