

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30

移流分散方程式で用いられる遅延係数について

江種伸之*

* 和歌山大学 システム工学部
(〒640-8510 和歌山県和歌山市栄谷 930 番地)

A Retardation factor used in the advection-diffusion equation

EGUSA Nobuyuki*

* Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

1 1. はじめに

2 地下水に溶存している物質（溶質）の輸送過程をシミュレーション
3 する場合には移流分散方程式を解くことになる。このとき、溶質の物
4 性に応じて、土粒子への吸脱着過程、生物学的分解・生成過程、化学
5 反応過程などの項を追加する。本稿は土粒子への吸脱着過程を対象
6 とするが、この場合は遅延係数を用いることが多い。

7 この遅延係数は、使用する吸着等温線によって、線形吸着型（ヘン
8 リー型）、フロインドリッヒ型、ラングミュア型があり、ヘンリー型
9 が成立する濃度範囲はごく一部と言われているが（遠藤・小澤, 2011）,
10 ヘンリー型が最も一般的である。実際に著名な地下水理学の和洋書
11 （Bear, 1972; Freeze and Cherry, 1979; フヤコーン・ピンダー, 1987; キ
12 ンツェルバッハ, 1990; ドミニコ・シュワルツ, 1996; Spitzs and Moreno,
13 2003; 登坂, 2006; ジュリー・ホートン, 2006; 日本地下水学会, 2010 ;
14 藤縄, 2010, など）で解説されているのはヘンリー型の遅延係数であ
15 る。また、汎用的な移流分散解析コード（MT3D, RT3D, HYDRUS,
16 Dtransu-3D・EL, G-TRAN/3D など）でもこの遅延係数が用いられて
17 いる。

18 このため、溶質の土粒子への吸脱着過程をヘンリー型の遅延係数
19 で表すことは、特殊な反応過程を考慮した移流分散特性を自作プロ
20 グラムで解析する場合を除いて、現在では一般的で、我々は何の疑問
21 もなくこの遅延係数を使っていると思われる。しかし、コンピュータ
22 の発展とともに移流分散解析が誰でも手軽に行えるようになった現
23 在において、この遅延係数が持つ意味について改めて理解し、その特
24 徴を知っておくことは重要である。

25 そこで、本稿では溶質の土粒子への吸脱着過程を表す遅延係数を
26 取り上げ、現在広く使用されているヘンリー型の遅延係数（一般的な
27 遅延係数と呼ぶ）の導出から、その特徴について概説する。さらに、
28 一般的な遅延係数をベースとしながらも異なる形の遅延係数を、そ
29 の特徴も含めて紹介する。

30

1 2. 一般的な遅延係数の特徴

2 ここでは一般的な遅延係数の導出を行う。帯水層を対象として地
3 下水中に溶存している物質の土粒子への吸脱着過程を考える。溶質
4 の土粒子への吸脱着過程に局所平衡が成り立っており可逆的である
5 と仮定すると、地下水中の溶質濃度 c と土粒子への吸着量 q の関係
6 は、溶質濃度が小さい場合（環境基準値が小さな土壌・地下水汚染物
7 質を対象とした場合には成立すると考えてよい）には、次の線形吸着
8 等温式（ヘンリー型の吸着等温式）で表される。

9
$$q = Kc \quad (1)$$

10 ここに、 K は分配係数である。

11 ここでは、簡単のために水平一次元の帯水層で考える。このとき、
12 地下水流れ方向に x 軸を取った水平一次元帯水層における溶質の土
13 粒子への吸脱着過程を考慮した移流分散方程式は次式で表される。

14
$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{s}{n} \quad (2)$$

15 ここに、 t は時間、 c は溶質濃度、 D は分散係数、 v は地下水の実流
16 速、 n は全間隙率、 s は生成・消滅項（単位時間当たりの土粒子への
17 吸脱着量）である。なお、ここでは土の間隙に存在する水（地下水）
18 は全て移動できる可動水と考えている。

19 単位時間あたりの土粒子への吸脱着量を表わす s は、 ρ を土の乾
20 燥密度とすると、次式で表される。

21
$$s = \frac{\partial \rho q}{\partial t} \quad (3)$$

22 式(2)と式(3)を整理すると、次のような土粒子への吸脱着過程を考
23 慮した水平一次元移流分散方程式が得られる。

24
$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{1}{n} \frac{\partial \rho q}{\partial t}$$

25 ↓

26
$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{1}{n} \frac{\partial \rho K c}{\partial t}$$

1 ↓

$$2 \quad \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{1}{n} \frac{\partial \rho K c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x}$$

3 ↓

$$4 \quad \left[1 + \frac{\rho K}{n} \right] \frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x}$$

5 ↓

$$6 \quad R \frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} \quad (4)$$

$$7 \quad R = 1 + \frac{\rho K}{n} \quad (5)$$

8 ここに、 R は遅延係数である。これより、特に断らない限り、「遅延
9 係数」とは式(5)で表されるヘンリー型の遅延係数を指すものとする。

10 遅延係数は、土粒子への吸脱着のない物質では $R=1.0$ 、吸脱着のあ
11 る物質では $R>1.0$ となる。遅延係数が溶質の動態に与える影響は、次
12 式のように式(4)の両辺を遅延係数 R で割るとよくわかる。

$$13 \quad \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{D}{R} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \frac{v}{R} \frac{\partial c}{\partial x} \quad (6)$$

14 例えば、 $R=2.0$ の場合は、溶質の移流と分散の大きさが2分の1にな
15 ることを意味している。すなわち、遅延係数は土粒子への吸脱着によ
16 り溶質の移流と分散が小さくなる様子を表す係数である。

17 このように、溶質の土粒子への吸脱着過程を遅延係数で表せば、移
18 流分散過程のみが対象となる溶質と同様な移流分散方程式を解けば
19 よいので、非常に手軽である。この手軽さが遅延係数を用いることの
20 最大のメリットといえる。

21 ここで、遅延係数についてももう少し詳しく見てみる。図1は、式(6)
22 の解析解である Ogata and Banks (1961) の式を用いて、溶質の土粒子
23 への吸脱着が無い場合 ($R=1.0$) と有る場合 ($R=2.0$) における地下水
24 の流れ方向に沿った濃度分布を示している。この図を見ると $R=2.0$ の
25 場合の濃度分布は $R=1.0$ の場合と比べて、流下方向への移動が半分

1 となっており、また濃度勾配が急になっていることがわかる。すなわ
2 ち、 $R=2.0$ の場合には、土粒子への吸脱着が無い場合と比べて移流と
3 分散が小さくなっている。ただし、遅延係数では土粒子への吸脱着は
4 可逆的と仮定しているため、土粒子に吸着した溶質はそのうち脱着
5 する。すなわち、遅延係数によって溶質の輸送は遅くなるだけである。
6 このことは、 $R=2.0$ の場合の計算を図 1 より長い時間行えば理解でき
7 る。図 2 は $R=1.0$ の場合は経過時間 100 日後、 2.0 の場合は経過時間
8 200 日後の地下水の流れ方向に沿った濃度分布を示している。この図
9 を見ると、 $R=2.0$ の場合、 $R=1.0$ の場合の倍の時間経過すると全く同
10 じ濃度分布を示すことがわかる。すなわち、遅延係数は土粒子への吸
11 脱着により溶質輸送が「遅れる」ことを表す係数であり、これが「遅
12 延係数」と呼ばれる理由である。

13 このように地下水中の溶質の土粒子への吸脱着過程を遅延係数で
14 表すことは、半世紀以上前から行われており、1972 年発刊
15 の”Dynamics of Fluids in Porous Media”には遅延係数が定義されてい
16 る。それ以外の和洋書においても遅延係数が定義されており、また一
17 般的な移流分散解析コードにおいても遅延係数が用いられているの
18 は前述したとおりである。

19 ただし、遅延係数を解説した図書を見ると、遅延係数と言っても以
20 下の 2 つの式があることがわかる。

$$21 \quad R = 1 + \frac{\rho K}{n} \quad (7)$$

$$22 \quad R = 1 + \frac{\rho K}{n_1} \quad (8)$$

23 ここに、 n_1 は有効間隙率である。

24 式(7)は先に導出したとおり、飽和土中の間隙の水が全て移動する
25 可動水であるとした場合の遅延係数である。すなわち、不動水がほと
26 んど存在しない粒径の大きな土粒子で構成された帯水層を対象とし
27 た場合にはこの形の遅延係数を用いればよい。ただし、一般的な土の
28 間隙には重力水として移動できる水（可動水）、および結合水もしく

1 は孤立した間隙にあって移動できない水（あわせて不動水と呼ぶ）が
2 存在している。そこで、不動水は溶質の輸送には影響を与えないとし
3 て溶質の輸送から除外し、可動水のみを考慮した移流分散方程式が
4 利用されることも多い。このとき用いられる遅延係数が式(8)である。
5 この式は式(7)の全間隙率 n を有効間隙率 n_1 に置き換えたものである。
6 有効間隙率とは、土の間隙部分のうち、水が動き得ない程小さいか孤
7 立した間隙および結合水が占める間隙を除いた部分、すなわち水の
8 移動に有効な間隙の割合である。なお、間隙の水が全て可動水と仮定
9 した場合に用いる移流分散方程式（遅延係数に式(7)を用いる場合の
10 移流分散方程式）では、実流速は $v=V/n$ （ V はダルシー流速），間隙
11 に可動水と不動水が存在していると仮定した場合に用いる移流分散
12 方程式（遅延係数に式(8)を用いる場合の移流分散方程式）では、実流
13 速は $v=V/n_1$ になることに注意していただきたい。

14 このように有効間隙率を用いて不動水の影響を除外して移流分散
15 解析することは、全間隙率は大きい有効間隙率は小さい、すなわち
16 間隙中に存在する水は多いが、その多くが不動水である粒径の小さ
17 な土粒子で構成された帯水層を対象とする場合に特に重要となる。
18 ただし、間隙の水が全て可動水とした式(7)は、式(8)の特殊な場合（有
19 効間隙率が全間隙率に等しいとした場合）とみなせるので、現在は式
20 (7)と式(8)を区別せずに、有効間隙率を用いた式(8)を使うことが多い。

21 ここからは、全間隙率を使った式(7)をモデル 1、有効間隙率を使っ
22 た式(8)をモデル 2 と呼ぶことにする。図 3 はモデル 1、図 4 はモデ
23 ル 2 の概念図を示している。モデル 1 は間隙中の水を全て可動水と
24 見なしているのに対して、モデル 2 は溶質の輸送から不動水を除外
25 している。すなわち、土粒子の周囲には可動水のみが存在し、溶質の
26 土粒子への吸脱着は可動水と土粒子表面の間で生じることになる。
27 モデル 1 の場合は、可動水しか存在しないので、実際に溶質の吸脱
28 着は可動水と土粒子の間で起こっているため、この仮定で特に問題
29 はない。

30 これに対して、不動水が存在する場合には、不動水の影響を完全に

1 除外したモデル 2 で妥当であるかよく考えてみる必要がある。モデル
2 ル 2 の概念図を示した図 4 を見るとわかるが、モデル 2 では、不動
3 水は溶質の輸送過程に影響を与えないとして移流分散方程式から除
4 外されている。すなわち、溶質の土粒子への吸脱着は可動水と土粒子
5 表面の間で起こっていると仮定している。しかし、土の間隙に可動水
6 と不動水が存在している場合、不動水は結合水や土の間隙に孤立し
7 て残っている水なので、不動水は土粒子の周りに存在している。すな
8 わち、可動水と土粒子表面の間に不動水があると考えるのが自然で
9 ある。そうなると、溶質の土粒子への吸脱着は、可動水と土粒子表面
10 の間で起こるのではなく、可動水から不動水に溶質が移行し、不動水
11 に移行した溶質が土粒子表面に吸着すると考えることもできる。特
12 に不動水が多い帯水層は、一般的には全間隙率が大きく、有効間隙率
13 が小さいので、可動水と土粒子の間に不動水の層が存在していると
14 考えられる。

15 すなわち、一般的な帯水層においては不動水が何らかの形態で存
16 在しているので、その不動水が可動水と完全に分離されていない限
17 りは(図 4 のような状態でなければ)、可動水と不動水の間溶質移
18 行を完全に無視することが適切とは考えにくい。このため、一般的な
19 帯水層中の移流分散解析においては、不動水を溶質の輸送過程から
20 除外した有効間隙率を用いた遅延係数(式(8))では十分な再現性が
21 得られない状況も想定される。

22 このことは、有効間隙率を用いた遅延係数(式(8))では、溶質の土
23 粒子への吸脱着過程を正確に表せていない可能性を示唆する。そこ
24 で、次に一般的な遅延係数(式(7)と式(8))とは異なる形の遅延係数
25 について考える。

26

27 3. 可動水と不動水の間溶質移行を考慮した遅延係数

28 ここでは一般的な遅延係数とは異なる形の遅延係数を紹介する。
29 この遅延係数を本稿では可動水と不動水の間溶質移行を考慮した
30 遅延係数と呼ぶ。この遅延係数をモデル 3 と呼ぶことにする。この

1 遅延係数自体は 1976 年に Van Genuchten and Wierenga により提案さ
2 れており、新しいものではない。ただし、Van Genuchten and Wierenga
3 は遅延係数としては定義しておらず、またその特徴についても具体
4 的に考察していない。このためか、1976 年にはすでにこの遅延係数
5 は提案されているものの、その後は普及せず、これまで本稿で議論
6 してきた一般的な遅延係数が用いられてきた。Van Genuchten and
7 Wierenga によって提案された遅延係数は最近になってようやく
8 Egusa et al. (2021) によって遅延係数として定義され、その特徴につ
9 いても考察された。

10 そこで、まずこの遅延係数を導出する。Egusa et al. (2021) はこの
11 遅延係数および一般的な遅延係数 (式(7)と式(8)) を可動水と不動水
12 の間の溶質移行を考慮した MIM モデル (例えば、Bear and Verruijt,
13 1987) から導出しているが、ここでは MIM モデルの概念を用いなが
14 らも少し異なるアプローチで導出する。まず、間隙中の水の存在状態
15 であるが、図 5 のように考える。すなわち、間隙中には可動水と不動
16 水が存在するが、土粒子表面は不動水で覆われており、可動水と土粒
17 子表面が接する部分はない。このため、溶質の土粒子への吸脱着は不
18 動水部分でのみ生じることになる。このとき、可動水中の溶質の輸送
19 を表す水平一次元帯水層における移流分散方程式は次式で表される。

$$20 \quad \frac{\partial c_m}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c_m}{\partial x^2} - v \frac{\partial c_m}{\partial x} - \frac{s_1}{n_1} \quad (9)$$

21 ここに、 c_m は可動水中の溶質濃度、 s_1 は単位時間あたりの可動水と不
22 動水の間溶質移行量である。

23 一方、不動水では移流と分散は生じず、不動水中の溶質濃度の変化
24 は可動水との間の溶質移行および土粒子への吸脱着のみで生じると
25 すると、単位時間当たりの不動水中の溶質濃度の変化量は次式で表
26 される。

$$27 \quad \frac{\partial c_{im}}{\partial t} = \frac{s_1}{n_2} - \frac{s_2}{n_2} \quad (10)$$

28 ここに、 c_{im} は不動水中の溶質濃度、 n_2 は単位体積あたりの不動水の

1 割合 ($=n-n_1$) , s_2 は単位時間あたりの土粒子への吸脱着量である。

2 単位時間あたりの土粒子への吸脱着量は、先に一般的な遅延係数
3 を導出した場合と同様に土粒子への吸着量と不動水中の溶質濃度に
4 式(1)が成り立つとすると次式で表される。

$$5 \quad s_2 = \frac{\partial \rho q}{\partial t} = \frac{\partial \rho K c_{im}}{\partial t} \quad (11)$$

6 式(9)から式(11)より s_1 と s_2 を消すと以下のように変形できる。

$$7 \quad \frac{\partial c_m}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c_m}{\partial x^2} - v \frac{\partial c_m}{\partial x} - \frac{1}{n_1} \left(n_2 \frac{\partial c_{im}}{\partial t} + \frac{\partial \rho K c_{im}}{\partial t} \right)$$

8 ↓

$$9 \quad \left(\frac{\partial c_m}{\partial t} + \frac{n_2}{n_1} \frac{\partial c_{im}}{\partial t} + \frac{1}{n_1} \frac{\partial \rho K c_{im}}{\partial t} \right) = D \frac{\partial^2 c_m}{\partial x^2} - v \frac{\partial c_m}{\partial x}$$

10 ここで、可動水中の溶質濃度 c_m と不動水中の溶質濃度 c_{im} の間に局所
11 的平衡関係が成り立ち、 $c_m=c_{im}$ とすると、

$$12 \quad \left(1 + \frac{n_2}{n_1} + \frac{\rho K}{n_1} \right) \frac{\partial c_m}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c_m}{\partial x^2} - v \frac{\partial c_m}{\partial x}$$

13 となる。この式を遅延係数 R を用いて表すと次式となる。

$$14 \quad R \frac{\partial c_m}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c_m}{\partial x^2} - v \frac{\partial c_m}{\partial x} \quad (12)$$

$$15 \quad R = 1 + \frac{n_2}{n_1} + \frac{\rho K}{n_1} \quad (13)$$

16 導出された遅延係数は、有効間隙率を用いた遅延係数 (式(8)) に可
17 動水と不動水の存在比が加わった形をしている。なお、式(12)の実流
18 速は、 $v=V/n_1$ である。

19 ここからは、可動水と不動水の間溶質移行を考慮した遅延係数
20 (モデル3の式(13)) と一般的な遅延係数 (モデル1の式(7)とモデル
21 2の式(8)) を、Egusa et al. (2021) の考察をもとに簡単に比較する。
22 まずは3つのモデルの遅延係数を用いた場合の見かけの実流速 (実
23 流速/遅延係数) と見かけの分散係数 (分散係数/遅延係数) の違いを
24 比較する。3つのモデルの見かけの実流速と分散係数を整理すると次

1 のようになる。

2 ○モデル 1

$$3 \text{ 見かけの実流速} = \frac{v}{R} = \frac{V/n}{1 + \rho K/n} = \frac{V}{n + \rho K}$$

$$4 \text{ 見かけの分散係数} = \frac{D}{R} = \frac{\alpha_L |v| + \tau D_M}{1 + \rho K/n} = \frac{\alpha_L |V|}{n + \rho K} + \frac{n\tau D_M}{n + \rho K}$$

5 ○モデル 2

$$6 \text{ 見かけの実流速} = \frac{v}{R} = \frac{V/n_1}{1 + \rho K/n_1} = \frac{V}{n_1 + \rho K}$$

$$7 \text{ 見かけの分散係数} = \frac{D}{R} = \frac{\alpha_L |v| + \tau D_M}{1 + \rho K/n_1} = \frac{\alpha_L |V|}{n_1 + \rho K} + \frac{n_1 \tau D_M}{n_1 + \rho K}$$

8 ○モデル 3

$$9 \text{ 見かけの実流速} = \frac{v}{R} = \frac{V/n_1}{1 + n_2/n_1 + \rho K/n_1} = \frac{V}{n + \rho K}$$

$$10 \text{ 見かけの分散係数} = \frac{D}{R} = \frac{\alpha_L |v| + \tau D_M}{1 + n_2/n_1 + \rho K/n_1} = \frac{\alpha_L |V|}{n + \rho K} + \frac{n_1 \tau D_M}{n + \rho K}$$

11 ここに、分散係数は $D = \alpha_L |v| + \tau D_M$ で表され、 α_L は縦分散長、 τ は屈曲度、
12 D_M は分子拡散係数である。 $\alpha_L |v|$ は機械的分散項、 τD_M は分子拡散項で
13 ある。ここから、モデル 1 とモデル 3 の見かけの実流速と機械的分散
14 は同形であることがわかる。このことは、地下水の流れが速くて移
15 流が卓越する帯水層中においては、モデル 1 とモデル 3 は同じ濃度
16 分布を示すことを示唆している。一方、モデル 2 とモデル 3 の見か
17 けの実流速、見かけの機械的分散、見かけの分子拡散はいずれも同じ
18 形をしておらず、両モデルの間には式の上で類似性が見られない。

19 そこで、Egusa et al. (2021) は水平一次元の移流分散方程式の解析
20 解である Ogata and Banks (1961) の式を使って、地下水実流速、全間
21 隙率、有効間隙率、分配係数を変化させた場合の感度解析を行ってい
22 る。その結果として、地下水流れが速い場では、遅延係数が小さい場
23 合には、間隙に占める可動水割合に関係なく、モデル 1 とモデル 3 の
24 破過曲線は同じ形状を示し、地下水流れが遅い場では、遅延係数が大

1 きくなるにつれて、モデル 2 とモデル 3 の破過曲線が似た形状を示
2 すようになるという知見を得ている。このことがわかるように、破過
3 曲線ではないが、図 6 に地下水流れが速い場合の 3 つのモデルの地
4 下水流れ方向に沿った濃度分布、図 7 に地下水流れが遅い場合の濃
5 度分布を示す。図 6 を見ると、モデル 1 とモデル 3 が全く同じ濃度
6 分布になっていることがわかる。一方、図 7 を見ると、モデル 3 は
7 モデル 1 よりもモデル 2 に近い濃度分布を示していることがわかる。

8 地下水流れが速い帯水層は砂層など土粒子径が大きいので、不動
9 水があまり存在せず、一般的な遅延係数ではモデル 1 を用いるのが
10 適切な場合が多いと思われる。一方、地下水流れが遅い帯水層はシル
11 ト・粘土層など土粒子径が小さいので、不動水が多く存在しているた
12 め、一般的な遅延係数ではモデル 2 を用いるのが適切な場合が多い
13 と思われる。これらに対し、今回紹介した可動水と不動水間の溶質
14 移行を考慮した遅延係数は、モデル 1 とモデル 2 の両者の特徴を有
15 していると言えるため、間隙に占める可動水と不動水の割合を意識
16 する必要がない。

17 このことについてももう少し具体的に説明する。例えば、不動水が存
18 在しない砂などの土粒子径の大きな土を考えた場合、 $n_1=n$ (有効間隙
19 率=全間隙率) , $n_2=0$ (単位体積あたりの不動水の割合=0) となるの
20 で、モデル 3 はモデル 1 と同じ形になる。一方、不動水が存在する
21 土の場合には、モデル 3 はモデル 2 と同じにならない。すなわち、
22 モデル 3 は不動水が存在する土を対象とした場合のモデル 2 とは異
23 なる形をした遅延係数である。このため、モデル 2 とモデル 3 を使
24 用した場合の濃度分布は完全には一致しないが、前述したように地
25 下水流速が遅い場ではモデル 3 はモデル 2 に近い濃度分布を示すの
26 で、モデル 2 の代わりにモデル 3 を用いてもよいかもしれない。そ
27 うすれば、不動水の有無を意識せずに (モデル 1 がよいのか、モデル
28 2 がよいのか迷わずに) , モデル 3 を用いればよいことになる。ただ
29 し、現時点では室内試験などでモデル 1 および 2 とモデル 3 の比較
30 をしているわけではないので、モデル 1 および 2 とモデル 3 のどち

1 らが良いのか判断できない。感度解析を含めたモデル 3 の特徴の詳細について、Egusa et al. (2021) の論文を参照していただきたい。

2
3 ただし、可動水と不動水の間での溶質移行を考慮した遅延係数(モデル
4 3)を用いる場合にも注意しなければならないことがある。モデル
5 3は式(13)で表されるように、有効間隙率を用いた遅延係数に可動水
6 と不動水の存在比が加わった形をしている。例えば、土粒子への吸脱
7 着がない場合(分配係数 $K=0$ の場合)を考えてもらいたい。土粒子
8 への吸脱着がないので、モデル 1 およびモデル 2 の遅延係数の値は
9 もちろん 1.0 になる。しかし、モデル 3 の場合には、間隙に可動水と
10 不動水が存在していれば、可動水と不動水の存在比はゼロにならない
11 ので、遅延係数は 1.0 より大きくなる。すなわち、土粒子への吸脱
12 着がないのに、移流や分散が遅延係数の値だけ小さくなるわけであ
13 る。可動水と不動水の存在比の項は可動水と不動水の間での溶質移行
14 の影響を表す項と考えることができるので、可動水と不動水の間で
15 溶質移行が行われる分だけ移流や分散が小さくなることになる。モ
16 デル 3 の式(13)はこのような過程も遅延効果と考えているわけであ
17 る。一般的に、土粒子、水、空気(不飽和土の場合に存在)の 3 相で
18 構成されているものを「土」と呼ぶので、モデル 3 は土粒子への吸脱
19 着を表す遅延係数ではなく、土への吸脱着を表す遅延係数と呼ぶの
20 がよいかもしれない。

21 ただし、このような現象が実際に生じているのか、室内試験などで
22 確認していないのでわからない。現時点では新しい形の遅延係数と
23 して導出したにとどまっているので、実現場に適用可能なモデルか
24 どうかを今後検討していく必要がある。

25

26 4. おわりに

27 本稿では、移流分散方程式を用いて地下水に溶存している物質(溶
28 質)の挙動を解析する場合に、土粒子への吸脱着過程を表す式として
29 用いられる遅延係数について、現在広く普及しているヘンリー型の
30 遅延係数(一般的な遅延係数)の導出から、その特徴について概説し

1 た。さらに、一般的な遅延係数とは異なる形の遅延係数を、その特徴
2 も含めて紹介した。

3 帯水層を対象とした遅延係数の一つである有効間隙率を用いたモ
4 デル (式(8)) は、不動水を溶質の輸送過程から完全に除外しており、
5 溶質の土粒子への吸脱着は土粒子表面と可動水の間で生じるとの仮
6 定に基づいている。ただし、不動水が存在する土では、土粒子表面が
7 不動水に覆われていると考えることが自然なので、有効間隙率を用
8 いた遅延係数は溶質の土粒子への吸脱着過程を正確に表現できてい
9 ない可能性を指摘した。

10 以上のような一般的な遅延係数の課題を述べた後に、1976 年に
11 Van Genuchten and Wierenga に提案されていたが、遅延係数として明
12 確に定義されておらず、その特徴も未知であった可動水と不動水の
13 間の溶質移行を考慮した遅延係数を Egusa et al. (2021) の論文を参考
14 に紹介した。ただし、Egusa et al. (2021) の論文では述べられていな
15 いが、この遅延係数は不動水が存在する場合には溶質の土粒子への
16 吸脱着がない場合でも 1.0 より大きくなる、すなわち遅延効果がある
17 ことも指摘した。

18 移流分散方程式を用いて土中の溶質の挙動を解析する場合には、
19 土粒子への吸脱着過程を遅延係数で表すことが一般的であり、我々
20 は普段は遅延係数のもつ特性についてあまり気を使うことがないと
21 思われる。しかし、溶質の土粒子への吸脱着を遅延係数で表す場合
22 には、土粒子への吸脱着過程を詳細にモデル化しているわけではなく、
23 ある仮定に基づいて簡略化している。このため、どのモデルもメリッ
24 トとデメリットを持つ。これから移流分散解析を行ってみようとい
25 う読者がいれば、使用する遅延係数にも目を向けて、その妥当性を評
26 価して適切なものを使用してもらいたい。

27 また、本稿では遅延係数を理論的に導出して、その特徴を解説した
28 が、室内実験などでその妥当性を評価したわけではない。本稿を読ん
29 で、遅延係数の特徴を詳しく調べてみたいと思った読者がいれば、ぜ
30 ひ室内カラム実験などを行って、一般的な遅延係数だけでなく、本稿

1 で紹介した可動水と不動水の間での溶質移行を考慮した遅延係数につ
2 いても調べてみてもらいたい。このとき、フロイドリッヒ型および
3 ラングミュア型の遅延係数と比較してみるのもよいかもしれない。

4

5 参考文献

6 ウィリアム・ジュリー, ロバート・ホートン (2006) : 土壌物理学 (取
7 出伸夫監訳), 築地書館, 231-234.

8 遠藤和人, 小澤一喜 (2011) : 講座 土の化学・物理 5.土の化学・物
9 理と廃棄物最終処分場, 地盤工学会誌, 59 (1) , 41-48.

10 キンツェルバッハ, W. (1990) : パソコンによる地下水解析 (上田年
11 比古監訳), 森北出版, 173.

12 登坂博行 (2006) : 地圏水循環の数理, 東京大学出版会, 266-267.

13 ドミニコ, P. A., シュワルツ, F. W. (1996) : 地下水の化学 II (地下水
14 の科学研究会 大西有三監訳), 土木工学社, 75-76.

15 日本地下水学会 地下水流動解析基礎理論の取りまとめに関する研
16 究グループ (2010) : 地下水シミュレーション, 技報堂出版, 67-
17 74.

18 藤縄克之 (2010) : 環境地下水学, 共立出版, 194-195.

19 フヤコーン, P. S., ピンダー, G. F. (1987) : 地下水解析の基礎と応用
20 上巻 (赤井浩一監訳), 現代工学社, 182-183.

21 Bear, J. (1972) : Dynamics of Fluids in Porous Media, Dover Publications
22 Inc., 618-619.

23 Bear, J. and Verruijt, A. (1987) : Modeling Groundwater Flow and Pollution,
24 D. Reidel Publishing Company, 177-179.

25 Egusa, N., Nakagawa, K. and Hirata, T. (2021) : A Retardation Factor
26 Considering Solute Transfer Between Mobile and Immobile Water in
27 Porous Media, Environmental Modeling & Assessment, 26(1), 103-112.

28 Freeze, R. A. and Cherry, J. A. (1979) : Groundwater, Prentice Hall, 404.

29 Ogata, A. and Banks, R. B. (1961) : A Solution of the Differential Equation
30 of Longitudinal Dispersion in Porous Media, Geological Survey

- 1 Professional Paper 411-A, United States Government Printing Office, 1-
2 7.
- 3 Spitzs, K. and Moreno, J. (2003) : 実務者のための地下水環境モデリン
4 グ (岡山地下水研究会訳) , 技報堂出版, 60-61.
- 5 Van Genuchten, M. T. H. and Wierenga, P. J. (1976) : Mass Transfer Studies
6 in Sorbing Porous media I. Analytical Solutions, Soil Science Society of
7 America Journal, 40(4), 473–480.