

## 2次元溶質移動実験装置を用いた移流分散過程の経路依存性に関する検討

法政大学工学部 学生会員 小松 義隆  
 法政大学大学院 学生会員 木下 孝介  
 法政大学工学部 正会員 岡 泰道

### 1. はじめに

本研究では移流分散過程における経路依存性を検討するため2次元溶質移動実験装置を試作した。実験では、NaCl 溶液を降雨の形態で供給し、EC(電気伝導度)センサにより均一土壌内の濃度変化を経時的に計測した。土壌間隙内の濃度変化を EC センサで計測し、数値シミュレーションに基づくパラメータの最適化により、移流分散現象の再現性を確認する。また実験より得られた破過曲線が tailing 現象を示す場合の検討も行う。

### 2. 2次元溶質移動実験装置

実験装置を図1に示す。この装置を2次元溶質移動実験装置(水平方向0.96m×幅0.3m×高さ0.98m)と呼び、降雨装置、暗渠、および地下水位設定装置を含めて全体が構成されている。降雨装置については、内部の残留空気を極力排除するため、供給部をフック状の針とした。なお、EC センサ相互の干渉による影響を防ぐために、センサを図2に示すように配置した。

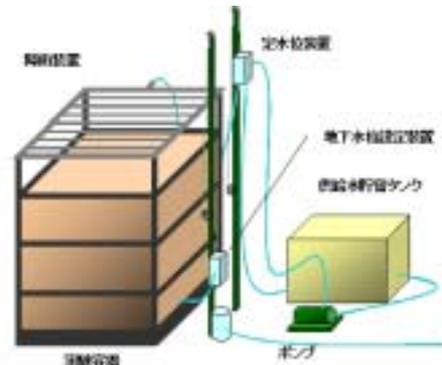


図1 2次元溶質移動実験装置

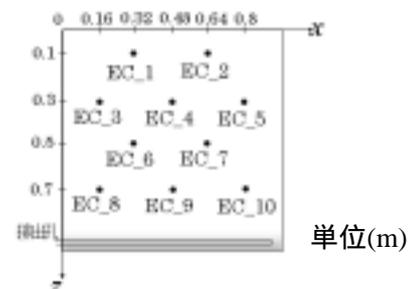


図2 EC センサの配置(正面図)

### 3. 2次元溶質移動実験

#### (1) 実験方法

土壌試料には豊浦標準砂( $d_{50}=0.196\text{mm}$ )を、溶質には非吸着性物質である NaCl を用いた。一定降雨を降雨装置から供給し、試料内が定常状態となった後に、供給水を NaCl 溶液に切り替え、浸透水ならびに流出水の電気伝導度等をデータロガーにより経時的に測定した(以下、NaCl 浸透過程と呼ぶ)。実験開始時ならびに終了時にバケツによる直接計測により降雨強度を算出した。

#### (2) 実験結果

EC センサで計測された、土壌内各深度の相対濃度の時間的変化を図3に示す。本実験における装置内初期相対濃度は0であり、360分後には装置内の溶液濃度が一定となっている。一方、深度0.3, 0.7mにおいては、それぞれ2測定点の反応時間に10分程度のずれが確認できる。同一深度において反応時間にばらつきが生じるのは、フィンガリング前線が経路に依存しているからと考えられる。佐々木ら<sup>1)</sup>は、水みちの観察実験より、フィンガリングの進む平均速度は、平均粒径( $d_{50}$ )が大きくなるほど大きくなると報告している。本実験において EC10 は他のセンサと違い、相対濃度が0.9から1に収束するまでに時間がかかっており、いわゆる tailing 現象が生じている。これは NaCl 浸透過程において相対濃度が速やかに1に収束しない現象、あるいは脱塩過程において相対濃

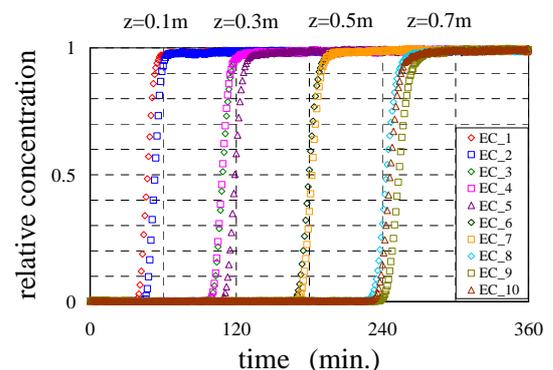


図3 相対濃度の時間的変化

キーワード 2次元溶質移動実験装置, 移流速度, 分散係数, 数値シミュレーション

度が0に収束しにくい現象のことをさす。この現象の発生原因としては、土壌間隙内の溶質の通過経路に依存する時間的な差などが挙げられる。

### (3)数値シミュレーションモデル

数値シミュレーションにおいては、流れが鉛直1次元であり、横方向への分散がないものと仮定した。

$$\text{土壌内の溶質移動を表す1次元移流分散方程式は、} \frac{\partial C}{\partial t} + u'_i \frac{\partial C}{\partial z} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad \dots(1)$$

ここに、 $C$ ：濃度， $u'_i$ ：実流速(m/s)， $D$ ：分散係数(m<sup>2</sup>/s)である。しかし(1)式では、土壌間隙内への拡散による tailing 現象を説明できない。そこでこの現象を示していると判断される実験結果に対しては、領域内の流れを不動水と可動水に区分した、van Genuchten らによる次の two-region モデル<sup>2)</sup>を適用して、移流分散パラメータを推定することとした。

表1 パラメータの推定

$$\theta_m \frac{\partial C_m}{\partial t} + \theta_{im} \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \theta_m D \frac{\partial^2 C_m}{\partial z^2} - \theta_m v_m \frac{\partial C_m}{\partial z}, \quad \theta_{im} \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \alpha(C_m - C_{im}) \quad \dots(2)$$

ここに、 $C_i$ ：成分*i*の溶質濃度， $\theta_i$ ：成分*i*の体積含水率， $u'_i$ ：実流速(m/s)， $D$ ：分散係数(m<sup>2</sup>/s)， $\alpha$ ：物質移動係数(s<sup>-1</sup>)，である。また下付添字は、 $m$ ：可動水， $im$ ：不動水を表す。一般的に、物質移動は瞬時に行われずに、不動水と可動水の濃度変化に時間的なずれが生じるが、本実験では吸着を考慮していない。

### (4)パラメータの推定

顕著に tailing 現象が生じている測定位置(EC10)において、前節で述べた両モデルを用いて、各測定点について実験値と解析値が符合するように、移流分散パラメータを推定した。推定したパラメータを表1に、実験値と解析値の時間的な変化を図4に示す。従来用いられているモデルよりも two-region モデルのほうがよい整合性を得られた。次に、深度0.70mにおける two-region モデルによるパラメータの推定結果を表2に示す。実流速ならびに分散長にばらつきが生じている。これは溶質のたどった経路の相違により、それぞれの観測点における濃度が異なったことに起因すると考えられる。また、同様に推定した他の深度においても、似た傾向を示す結果となった。今後、実験データを増やし、パラメータの空間的な分布特性を検証する予定である。

表1 パラメータの推定値

	1次元 移流分散方程式	two-region モデル
実流速(×10 <sup>-5</sup> m/s)	4.78	4.89
分散係数(×10 <sup>-9</sup> m <sup>2</sup> /s)	9.40	5.30
物質移動係数(×10 <sup>-4</sup> s <sup>-1</sup> )		3.00
分散長(×10 <sup>-4</sup> m)	1.97	1.08

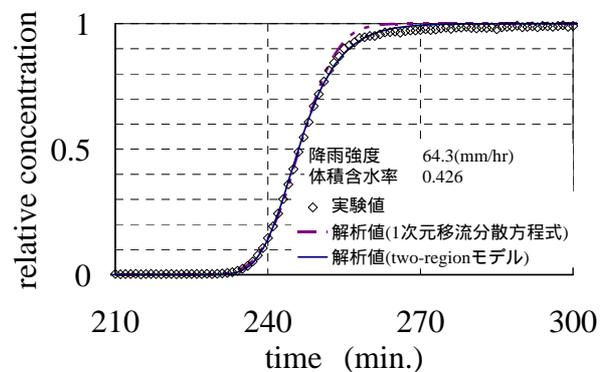


図4 実験値と解析値(EC10)

表2 パラメータの推定値(深度0.7m)

	EC8	EC9	EC10
実流速(×10 <sup>-5</sup> m/s)	4.95	4.73	4.89
分散係数(×10 <sup>-9</sup> m <sup>2</sup> /s)	5.00	10.0	5.30
物質移動係数(×10 <sup>-4</sup> s <sup>-1</sup> )	3.00	2.00	3.00
分散長(×10 <sup>-4</sup> m)	1.01	2.11	1.08

### 4. まとめ

本研究の結果より、two-region モデルを適用することにより、tailing 現象の近似的な再現性を確認した。さらに、各測定点に関して最適な溶質移動モデルを用いることにより、そのばらつきを把握することができた。

### 引用文献

- 1)佐々木康夫・佐藤邦明・福原輝幸(1988)：表層不飽和帯における降雨による溶質移行に関する基礎的研究，第32回水理講演会論文集，pp.107-112.
- 2)van Genuchten,M.Th.and Wierenga,P.J.(1976):Mass transfer studies in sorbing porous media: .Analytical Solutions, Soil.Sci.Soc.Am.J., Vol.40, No.4 , pp.473-480.