HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|---|---|
| Title | 土壌中の溶質移動におよぼす粗間隙の影響 |
| Author(s) | 石黒, 宗秀 |
| Citation | 日本土壌肥料学雑誌, 65(3), 349-356<br>https://doi.org/10.20710/dojo.65.3_349 |
| Issue Date | 1994 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/70059 |
| Rights | © 1994 一般社団法人日本土壌肥料学会 |
| Type | journal article |
| File Information | 65_KJ00001688448.pdf |

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition



総　説

# 土壌中の溶質移動におよぼす粗間隙の影響

石　黒　宗　秀*

キーワード　溶質移動，粗間隙，拡散，分散

## 1. はじめに

農地土壌中における溶質移動に関する研究は，従来から化学肥料の効率的利用を図るため行われてきた．また，作物を栽培するためには，乾燥地や半乾燥地では塩類集積を招かないようにする必要があり，海面干拓地では干陸初期に除塩する必要があるため，塩類の移動に関心が払われてきた．近年では，環境問題と関連して，注目されるテーマとなっている．鉱山廃水による土壌の重金属汚染や，原子力発電所事故や核廃棄物処理に伴う放射性物質による汚染，肥料・農薬による水質汚染等を扱う場合，汚染物質の土壌中での挙動を明らかにすることが重要となる．

溶質は，自己の熱運動による拡散と，溶媒である水に運搬される移流が複雑に組み合わさって，土壌中を移動する．土壌中の水移動は，土壌構造に規定されるため，溶質の移動も土壌構造に大きな影響を受ける．土壌の構造は多様であり，土壌中での溶質移動現象は，科学的にも興味深い．

水で飽和した土壌カラムに一定濃度の溶液を浸透させ，浸透流出する溶質の濃度変化を調べると，濃度変化の様子は土壌構造によって異なる．第1図は，それを模式的に示したものである．縦軸は，流入液の溶質濃度を基準にして表わした流出液の相対濃度を示す．横軸は，土壌カラムの水分量を基準にして表わした流出液量であり，pore volume を単位とする．図中の曲線を，流出濃度曲線という．カラムに土を均質に分布するように充填した場合，その流出濃度曲線は，図のBのようなシグモイド曲線となる．一方，土壌カラムに粗間隙が含まれる場合，浸透溶液が粗間隙中を選択的に流れるため，図のAの曲線のように浸透初期に急な濃度上昇を示すことが多い．本稿では，粗間隙の影響を中心にして土壌中の溶質移動現象に関して概説する．

## 2. 拡散と分散

### 1) 拡散

水中に溶存している物質の分子は，熱運動により常にランダムな動きをしている．これが拡散現象の本質であり，巨視的にみれば，次のフィックの第1法則で示され，拡散フラックス $J$ は濃度勾配の負の値に比例する．

$$J=-D_0\frac{dc}{dx} \qquad (1)$$

ここで，$D_0$ は溶質の拡散係数，$c$ は濃度，$x$ は距離である．分子の拡散係数は，次のストークス・アインシュタインの関係式[1]で与えられる．

$$D_0=kT/6\pi\mu a \qquad (2)$$

ここで，$k$ はボルツマン定数，$T$ は絶対温度，$\mu$ は粘性係数，$a$ は分子の半径である．したがって，拡散の速度は分子半径の大きな物質ほど小さくなる．土壌の微細間隙中では，溶質は主に拡散で移動すると考えられるため，厳密に移動現象を評価する場合，土壌中での拡散係数を求めることが重要となる．

土壌の間隙は屈曲しているため，土壌中での拡散移動に必要な実際の距離は，直線距離よりも長くなる．そこで，自由水中の溶質の拡散係数を $D_0$ とすると，土壌中の溶質の拡散係数 $D$ は

$$D=\frac{1}{\tau}D_0 \qquad (3)$$

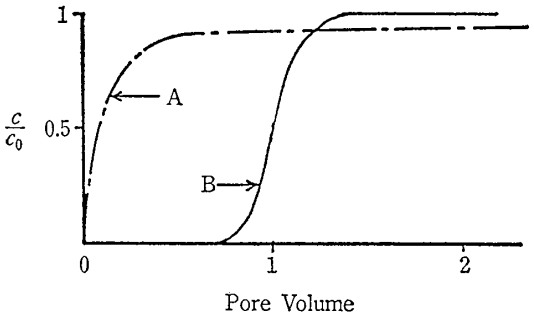
と表わせる．ここで，$\tau$ は屈曲度である．BEAR[2] は，飽和粒子層中の拡散係数の実測値を整理し，次の関係を示した．

Munehide ISHIGURO : Solute Transport in Soils as Affected by Macropores
* 農業工学研究所農地整備部（305 つくば市観音台 2-1-2）
1993年8月17日受理
日本土壌肥料学雑誌 第65巻 第3号 p. 349～356 (1994)

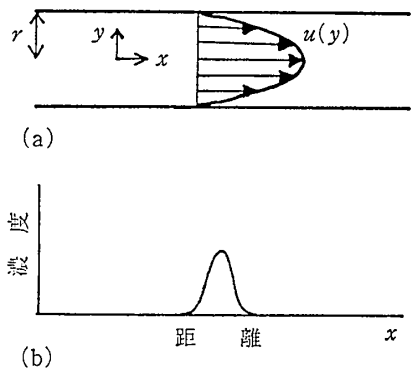
NII-Electronic Library Service

Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition






第1図 粗間隙中を溶液が選択的に流れる場合の流出濃度曲線（A）と，土壌中を溶液が均質に分散しながら流出する場合の流出濃度曲線（B）
縦軸は流出液濃度（$c$）と流入液濃度（$c_0$）の比，横軸は流出液量と土壌カラムの含水量の比（単位：pore volume）を表わす．




第2図 （a） 半径$r$の毛細管中の流速$u$の分布
（b） 毛細管中にパルス状に流入させた溶質の濃度分布

$$D=\frac{2}{3}D_0 \qquad (4)$$

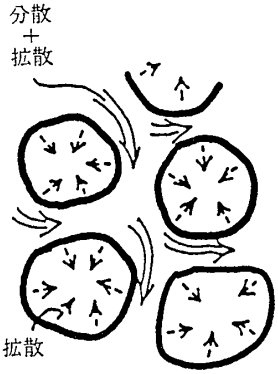
OOI[3] も，理論的に同様の結論を導いている．

### 2) 分散

水が土壌中を移動する場合，溶質は，水の運搬による移流と拡散が複雑に組み合わさって移動する．まず，半径$r$の1本の毛細管中の溶質移動を取り上げよう．毛細管中の水の流速は，中心軸で最も大きく壁面に近づくにつれて小さくなる（第2図（a））．平均流速が遅く，拡散の影響が無視できない条件下では，この流速分布と拡散によって，パルス状に流入させた溶質の，流れの方向に垂直な断面平均濃度は，平均移動距離を中心に正規分布する（第2図（b））．このように溶質が分布することを，分散という．この場合の溶質移動は，次の移流分散方程式に従う[4]．

$$\frac{\partial c}{\partial t}=K\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}-u\frac{\partial c}{\partial x} \qquad (5)$$

ここで，$t$は時間，$K$は分散係数，$u$は平均流速を示す．半径$r$の毛細管中での$K$は，次式で示される[4]．




第3図 団粒土壌中の溶質移動の模式図

$$K=D_0+\frac{r^2u^2}{48D_0} \qquad (6)$$

間隙構造が均質な多孔質体中や土壌中の溶質移動も，（5）式の移流分散方程式に従うことが知られている[5]．ただし，多孔質体中や土壌中での流速分布は毛細管より複雑であり，砂やガラスビーズのような粒子層中の分散係数は，

$$K=\alpha u \qquad (7)$$

で近似される[6,7]．ここで，$\alpha$は定数である．しかし，土壌は，粒子層とは異なる．たとえば，団粒が形成された土壌中では，溶質は団粒間の粗間隙中を分散するとともに，団粒内の微細間隙中を拡散する（第3図）．微細間隙中への拡散も，分散現象の一部分であり，分散係数$K$の近似は非常に困難であるが，種々のアプローチがなされ，複雑な3次元の移動現象を，一次元の移流分散方程式である（5）式で近似している[6,8~10]．KATOU ら[11]は，分散係数の比較によって移動現象を評価した．第1図のBのような流出濃度曲線は，（5）式の移流分散方程式で近似できる．

## 3. 粗間隙の影響

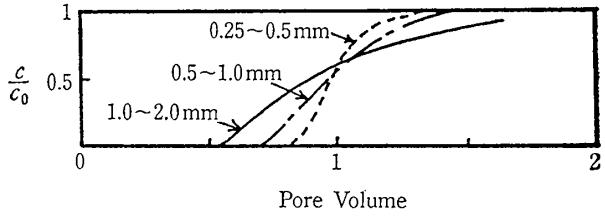
粗間隙の発達した土壌中では，流入した水や溶質が粗間隙中を急速に流下することは，古くから知られていた[12]．日本では，水田の暗渠排水におよぼす亀裂の効果が注目され，水みちの観察に水溶性塗料が用いられた[13~17]．近年，肥料成分や水質汚染物質の移動におよぼす粗間隙の影響が注目され，フルオレセイン，メチレンブルー，水溶性塗料，ウラニン等をトレーサーとして多くの研究が行われている[18~26]．造影剤を浸入させるX線撮影法が開発され，粗間隙の形態が明確になってきた[27,28]．

多くの実験により，溶質の粗間隙中での選択的な流れの実態が明らかになってきた．BIGGAR ら[29]は，大きさの異なる団粒を用いて，流出濃度曲線を比較し，第4図

NII-Electronic Library Service

Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition



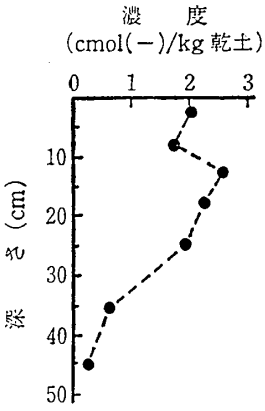



第4図　団粒径が塩素イオンの流出濃度曲線におよぼす影響
土壌は水分飽和状態.
図中の数値は団粒径を示す.
文献 29）より引用.

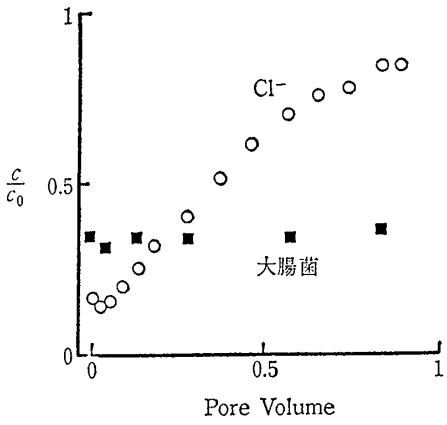
に示すように，シグモイド曲線が，団粒径が大きくなるにつれゆるやかな凸型の曲線に変化することを示した．彼らは，団粒径が大きくなると土壌中での溶液の混合が不十分となり，粗間隙中の選択的な流れの影響が大きくなるため，そのような曲線の相違が生じたと結論づけている．

不かく乱土の構造は，かく乱土の構造と著しく異なる．ELRICK ら[30]，RITCHIE ら[18]や MCMAHON ら[31]は，飽和状態に近い条件では，不かく乱土中の連続した粗間隙の存在によって，溶質は，不かく乱土中のほうがかく乱土中よりかなり速く流動することを明らかにした．THOMAS ら[32]や TYLER ら[33]は，粗間隙の影響で不耕起土壌中の肥料損失のほうが耕起土壌中のそれより大きいことを報告している．

圃場中において，浸透した溶質が土壌断面中で非対称な分布をしたり，流出濃度曲線が非対称な形となることが観察された[22,34~37]．濃度分布の一例を第5図に示す．この非対称な形も粗間隙による土壌構造の不均一性が原因である．佐久間ら[38]は，非対称な流出濃度曲線を，図解法により直接流出，中間流出，遅延流出の3成分に分けた．VAN DE POL ら[39]は，浸透溶液の濃度のピーク




第5図　溶脱実験終了後の土壌中における塩素イオンの分布
文献 22）より引用.




第6図　大腸菌と塩素イオンの流出濃度曲線
文献 49）より引用.

の到達が，深さ 46.0 cm よりも深さ 63.5 cm において早く観測されたことを報告した．SHAFFER ら[40]は，粗間隙中を溶質が急速に流動することを観測した．BIGGAR ら[41]や VAN DE POL ら[39]は，溶液浸透中の圃場断面の溶質濃度分布を測定し，土壌水の流速は対数正規分布すると報告した．

粗間隙のある土壌カラムからの流出濃度曲線が多数測定された．それらは，第1図のA曲線に類似して，初期の急な濃度上昇とその後の漸増を示した[24,42~53]．

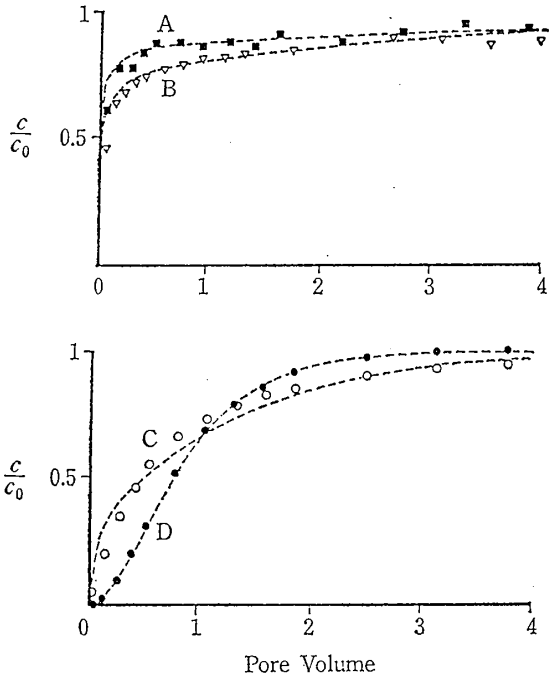
微細間隙中の溶質の拡散速度は，粗間隙を含む土壌中の溶質移動に影響をおよぼす．SMITH ら[49]や WHITE[48]は，大腸菌を含む溶液を粗間隙のある土壌カラムに浸透させたところ，溶質が初期の濃度上昇を示すのに対し，相対大腸菌数は最初から一定値を示すことを明らかにした（第6図）．これは，溶質が粗間隙中を流下しながら微細間隙中に拡散して移動するのに対し，大腸菌は微細間隙中には拡散できず粗間隙中のみを移動するためとしている．WHITE ら[47]は，塩素イオンはトリチウム水より微細間隙中への拡散速度が小さいため，塩素イオンのほうが早く流出することを示した．BOUMA ら[43]は，円管状の鉛直粗間隙を人工的に作った土壌カラムに溶液を断続的に浸透させ，40% の砂と 60% のシルト質埴壌土で構成されるカラムと，80% の砂と 20% のシルト質壌土で構成されるカラムを比較した．彼らは，前者のほうが微細間隙中への溶液の吸水が遅いため，前者のほうが溶質の流出が早くなったと報告した．

ISHIGURO[52] は，一見緻密な構造をもつ水田耕盤を用いて実験を行い，半径 1 mm にも満たない鉛直根成孔隙が水田耕盤中の溶質移動に大きな影響をおよぼすことを明らかにした．溶液は鉛直根成孔隙中を選択的に流れるため，流出濃度曲線は第7図に示すように前述の粗間

NII-Electronic Library Service

Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition

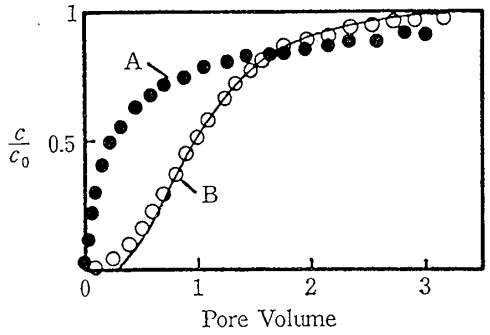





第7図 水田耕盤の臭素イオンの流出濃度曲線
点線は共軸円筒モデルによる計算結果.
鉛直根成孔隙内平均流速は, A (グライ土): $9.7\times10^{-2}$ cm $s^{-1}$, B (黒ボク土): $4.4\times10^{-2}$ cm $s^{-1}$, C (化学肥料連用灰色低地土): $8.1\times10^{-3}$ cm $s^{-1}$, D (堆肥連用灰色低地土): $1.1\times10^{-3}$ cm $s^{-1}$.
文献 52) より引用.

隙のある場合と同様の形状を示した. また, 鉛直根成孔隙中の平均流速が小さくなると, 溶質は鉛直根成孔隙中を流下しつつ十分に緻密な微細間隙中へ拡散するため, 流出濃度曲線の立ち上がりが遅れ, 第7図D曲線のようにシグモイド曲線になることを明らかにした. KISSEL ら[19]は, 不かく乱土壌カラムを用いて, 長さの短いカラムの場合のほうが流出濃度曲線の立ち上がりが早くなることを示した.

粗間隙中を溶液が流れるのは, 飽和に近い状態のときのみであるため, 溶質移動におよぼす粗間隙の影響は, 土壌水分状態で大きく異なる. QUISENBERRY ら[36]は圃場調査から, 初期水分含量が大きいほど浸透させた溶質の移動速度が速くなることを示した. BOUMA ら[20]は, 粗間隙の発達した乾燥粘質土にメチレンブルートレーサーを散布し, 粗間隙壁面の着色面積を測定した. 彼らは, 溶液の総浸透量が同じでも, 散布強度が大きいほど深くまでトレーサーが浸透することを明らかにした. ELRICK ら[30]は, 飽和に近い状態では不かく乱土の流出濃度曲線はかく乱土の流出濃度曲線に比べて流出の始まりが早くなるが, 含水率が低くなると, 両者の間にほとんど差がなくなることを示した. SEYFRIED ら[24]は, 飽




第8図 流出濃度曲線に対する土壌水分張力の影響

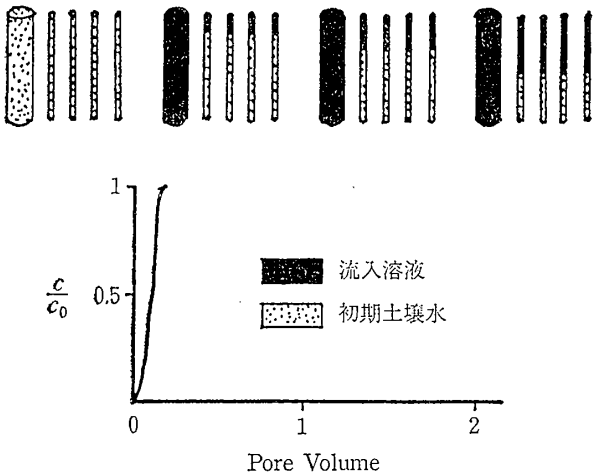
| | 土壌水分張力 | 体積含水率 | ダルシー流速 |
|---|---|---|---|
| A | 0.0 kPa | 0.57 $m^3m^{-3}$ | $7.3\times10^{-5}$ m $s^{-1}$ |
| B | 1.0 | 0.53 | $3.3\times10^{-5}$ |

文献 24) より引用.

和および飽和に近い状態では, 不かく乱土の流出濃度曲線は初期の立ち上がりとその後の漸増を示すが, 土壌水分張力が大きくなってくると, 流出濃度曲線は(5)式のような移流分散方程式に従うシグモイド曲線になることを明らかにした (第8図).

## 4. 溶質移動の粗間隙モデル

前述のような多くの実験や調査によって, 式(5)の移流分散方程式では表現できない移動現象の存在が明らかになり, 粗間隙の影響を考慮したモデルが提案された. BOUMA[54] は, 粗間隙のある土壌の溶質移動モデルとして, 第9図の鉛直管状モデルを提案した. 微細間隙を示す細管中の溶質移動は, 相対的に遅く, 溶質は粗間隙を示す太い管中を急速に流れ, 流出濃度曲線は溶質の添加直後に急な立ち上がりを示し, 流出液濃度はすぐに流入液濃度にほぼ等しくなるとしている. 選択的流れを直感的に表現するモデルであるが, 微細間隙と粗間隙の間の




第9図 粗間隙のある土壌中の間隙の模式図とその流出濃度曲線
文献 54) より引用.

NII-Electronic Library Service

Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition



拡散の影響が無視できない場合には適用できない．

DEANS[55]は，液相を可動相と不動相に分け，両者間の溶質移動フラックスが両者の濃度差に比例すると仮定するモデルを提案した．COATSら[56]は，このモデルの可動相に分散項を追加して，次の方程式で示されるモデルを提案した．

$$\theta_m\frac{\partial c_m}{\partial t}+\theta_{im}\frac{\partial c_{im}}{\partial t}=\theta_m K\frac{\partial^2 c_m}{\partial x^2}-u_m\theta_m\frac{\partial c_m}{\partial x} \quad (8)$$

$$\theta_{im}\frac{\partial c_{im}}{\partial t}=\beta(c_m-c_{im}) \quad (9)$$

ここで，$\theta_m$ と $\theta_{im}$ はそれぞれ可動水と不動水を表わす体積含水率，$c_m$ と $c_{im}$ はそれぞれ可動相と不動相の溶質濃度，$K$は可動相中の分散係数，$u_m$ は可動相中の平均流速，$\beta$は可動相と不動相間の物質移動係数である．VAN GENUCHTENら[57]は，このモデルを，土壌への吸着を含む溶質移動に拡張した．HATANOら[50]は，このモデルと類似の考え方で図解法を用いて検討した．このタイプのモデルは，土壌の間隙構造の形状に関する情報が不必要なため，適用範囲が広い．しかし，物質移動係数$\beta$が，実測結果に合わせるためのフィッティングパラメータとして用いられ，物理的な移動機構が曖昧となる．RAOら[58]は，形状の明らかな多孔質のセラミック球を用いて実験を行い，物質移動係数$\beta$が球の半径，拡散時間，球の内部と外部の含水率および分子拡散係数に依存することを明らかにした．RAOら[59]は，すべての入力パラメータを独立した実験から求め，実測結果とよく一致する流出濃度曲線の計算値を得た．彼らは，飽和状態において，球の半径が大きいほど，間隙水流速が大きいほど，カラム長が短いほど，その流出濃度曲線は非対称で初期に急な立ち上がりとその後の漸増を示す曲線となることを明らかにした．

一方，可動相と不動相の間の物質移動則に，拡散方程式（フィックの第二法則）を適用したモデルが提案された．SCOTTER[60]は，壁面が平らで間隙幅一定の亀裂モデルと，中心に鉛直な円筒孔隙のある正六角柱の集合した円孔モデルを提案した．RAOら[59]やRASMUSONら[61]は，球状団粒中の溶質移動モデルを示した．その基礎方程式は[10]，

$$\theta_m\frac{\partial c_m}{\partial t}+\theta_{im}\frac{\partial c_{im}}{\partial t}=\theta_m K\frac{\partial^2 c_m}{\partial x^2}-u_m\theta_m\frac{\partial c_m}{\partial x} \quad (10)$$

$$c_{im}(x,t)=\frac{3}{R^3}\int_0^R r^2 c_a(x,r,t)\,dr \quad (11)$$

$$\frac{\partial c_a}{\partial t}=\frac{D}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial c_a}{\partial r}\right) \quad (12)$$

$$(0\leqq r\leqq R)$$

である．ここで，$c_{im}$ は団粒内の平均濃度，$c_a$ は団粒中の局所濃度，$R$は団粒の半径，$r$は動径座標，$D$は団粒内の拡散係数を示す．このほかにも，間隙幅一定の亀裂モデル[62~64]，共軸円筒モデル[52,65]が提案され，それぞれ解法が示された．これらのモデルは，物理的に移動機構を明確にしているが，対象とする土壌の間隙構造が，モデルと類似したものにしか適用できず，応用の幅が広範でない．

圃場中の土壌構造は，不均一であり，場所や深さによって異なるのが普通である．そのような不均一な構造を詳細に調べて正確にモデル化することは非常に困難である．DAGANら[66]やBRESLERら[67]は，圃場スケールでの溶質濃度をランダム変数として取り扱い，溶質移動を数学的方法で表現した．JURY[68]は，確率密度関数を用いた伝達関数モデルを提案し，深さ$L$，積算流入水量$W$における溶質濃度を$c_L(W)$として，これを次式で表わした[69]．

$$c_L(W)=\int_0^W f(W-W'|W')c_{IN}(W')\,dW' \quad (13)$$

ここで，$f(W-W'|W')$は，積算流入水量 $W'$ となった時点において添加された溶質が，積算流入水量 $W$ となった時点で深さ$L$まで到達する確率を表現する確率密度関数である．$c_{IN}(W')$は，積算流入水量 $W'$ の時点で添加される溶質の濃度を示す．溶液の流速が圃場で対数正規分布した調査結果[39,41]を利用して，JURY[68]は確率密度関数に対数正規分布を適用した．このモデルは，土壌中での溶質の移動機構を説明するものではなく，実測値と最もよく一致するような確率密度関数を当てはめるモデルである．

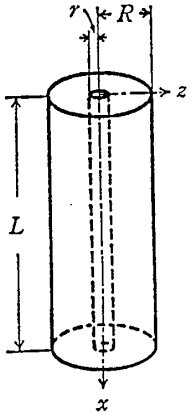
不かく乱土壌の土壌構造は複雑であり，それに移動機構を説明するモデルを適用することは困難な場合が多い．しかし，間隙構造を単純化して基本的移動機構を評価することは，溶質移動に関連する諸問題を解決するための知見として重要である．ISHIGURO[52]は，鉛直根成孔隙の多数存在する水田耕盤に，円柱状の土壌基質の中心に円管孔隙の空いた共軸円筒（第10図）が束になったモデルを適用し，第7図に示されたその溶質の移動機構を明らかにした．水田耕盤では，鉛直根成孔隙中の移流と土壌基質中の横拡散が溶質移動を規定する．TAYLOR[4]が毛管中の溶質移動の評価に用いたのと同様の方法で，この共軸円筒中の移流に要する時間 $t_1$ と横拡散に要する時間 $t_2$ は，それぞれ次のように表わせる．

$$t_1=\frac{L}{u} \quad (14)$$

NII-Electronic Library Service

Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition

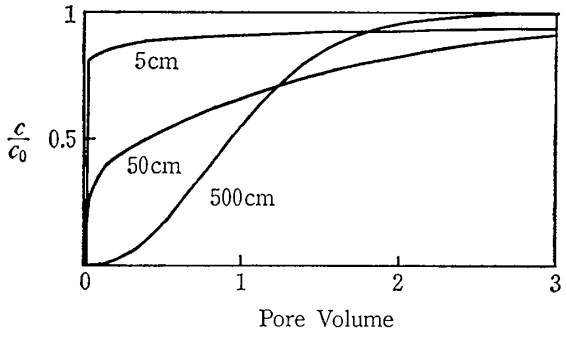





第 10 図 共軸円筒モデル
$L$は土壌試料の長さ，$r$は鉛直根成孔隙半径，$R$は土壌基質の半径，$x, z$ はそれぞれの方向の距離を示す．
文献 52) より引用．

$$t_2=\frac{R^2-r^2}{3.8^2 D} \qquad (15)$$

ここで，$L$は土壌試料の長さ，$u$は鉛直根成孔隙中の平均流速，$R$は土壌基質の半径，$r$は鉛直根成孔隙の半径，$D$は土壌基質中の拡散係数である．移流に要する時間が横拡散に要する時間より短ければ，鉛直孔隙中の選択的流れが生じ，流出濃度曲線は第7図の曲線AやBのように初期に急な濃度上昇を示す．横拡散に要する時間が移流に要する時間より短ければ，溶質は土壌基質中に十分に拡散しながら流出するため，第7図の曲線Dのようなシグモイド曲線に近い曲線となる．また，同じ土壌構造でも，KISSEL ら[19]や RAO ら[59]が指摘したように，測定する試料の長さによって流出濃度曲線の形状が異なる．共軸円筒モデルを用いてこれを評価すると，次のようになる．土壌試料の長さ$L$が短く，(14)式で示される移流時間が横拡散時間より短い場合，初期に急な濃度上昇を示す流出濃度曲線となる．土壌試料の長さ$L$が長くなるにつれて，移流時間が長くなり，相対的に横拡散時間が短くなる．つまり，試料の長さが長くなるほど溶質は十分横拡散しながら流出するため，シグモイド曲線に近づくことになる．流出濃度曲線と試料の長さの関係の数値計算例を第 11 図に示す．




第 11 図 土壌カラムの長さ（$L$）と流出濃度曲線の関係
共軸円筒モデルの計算諸元は，$r$：0.05 cm，$R$：0.5 cm，鉛直孔隙内流速：0.1 cm $s^{-1}$，土壌基質中拡散係数：$1.0\times10^{-5}$ $cm^2$ $s^{-1}$，土壌基質の間隙率：0.5．
図中の数値は土壌カラムの長さを表わす．

## 5. おわりに

均質に充塡した土壌カラム中の溶質移動も，ミクロにみれば不均一な流動を示す．IWATA ら[70]が指摘しているように，不飽和状態で粗間隙が溶質移動にあまり寄与していない場合でも，相対的に大きな間隙が主な経路となり，微細間隙中への拡散との組合わせで流出濃度曲線の形が決まる．土壌中には，植物根の腐朽跡，土壌動物によって形成された孔隙，収縮亀裂等多様な粗間隙が存在し，飽和に近い状態での溶質移動にさまざまな影響をおよぼす．マクロなスケールの地下水の流動に関しても，地層の不均一性の影響が重要視されている[71]．溶質移動現象の評価のために，どのようなモデルを適用すればよいかは，目的により異なるが，間隙構造の複雑さ故に，物理的移動機構は無視して，測定結果によく一致するようなモデルを適用する場合がある．しかし，そのモデルは，その測定時の結果のみに一致しただけかもしれない．実測結果と多少の不一致があっても，対象としているスケールで何が主要な移動機構かを明確にすることが問題解決の早道である場合もある．

複雑な流れ構造を把握することは非常に困難であるが，フラクタル次元を導入した HATANO ら[72,73]の取り組みにみられるような，丹念なデータの蓄積と，新たな科学的アプローチが，今後の研究の発展の鍵を握るものと思われる．

## 文 献

1) ATKINS, P. W.: 物理化学，下，p. 1021，東京化学同人，東京 (1985)
2) BEAR, J.: Hydrodynamic dispersion; in Flow through porous media, ed. R. J. M. DE WIEST, p. 109～199, Academic Press, New York and London (1969)
3) OOI, S.: A theory of dispersion in a porous medium. World Congress III of Chem. Eng., Vol 2, p. 495～498 (1986)
4) TAYLOR, G. I.: Dispersion of soluble matter in solvent flowing slowly through a tube. *Proc. Roy. Soc. London*, **A 219**, 186～203 (1953)
5) DE SMEDT, F. and WIERENGA, P. J.: Solute transfer through columns of glass beads. *Water Resour. Res.*, **20**, 225～232 (1984)
6) BOLT, G. H.: Movement of solutes in soil: principles of adsorption/exchange chromatography; in Soil chemistry: B. Physicochemical models, ed. G. H. BOLT, p. 285～348, Elsevier, Amsterdam, The

NII-Electronic Library Service

Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition



Netherlands (1982)
7) 大井節夫・岩田進午：土の中の化学物質の移動，農土誌，56，1115～1121 (1988)
8) Passioura, J. B.: Hydrodynamic dispersion in aggregated media : 1. Theory. *Soil Sci.*, 111, 339～351 (1971)
9) Parker, J. C. and Valocchi, A. J.: Constraints on the validity of equilibrium and first-order kinetic transport models in structured soils. *Water Resour. Res.*, 22, 399～407 (1986)
10) van Genuchten, M. Th. and Dalton, F. N.: Models for simulating salt movement in aggregated field soils. *Geoderma*, 38, 165～183 (1986)
11) Katou, H. and Akiyama, R.: Solute dispersion during unsteady leaching as affected by aggregate size and soil water content. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 36, 53～64 (1990)
12) White, R. E.: The influence of macropores on the transport of dissolved and suspended matter through soil. Advances in Soil Sci. 3, p. 95～120, Springer-Verlag, New York, U. S. A. (1985)
13) 山崎不二夫・八幡敏雄・竹中 肇・田淵俊雄：北海道小向の重粘土地の暗渠排水における心土亀裂の役割，農土研，30(8)，427～434 (1962)
14) 丸山利輔・森川正雄：埼玉県小見野地域における暗渠排水機構と効果，農土論集，17，28～33 (1966)
15) 田淵俊雄・中野政詩・住田 章・丸田 勇：小区画暗渠田の中干し・刈取り期の落水，同上，18，31～38 (1966)
16) 長浜謙吾・手島三二・富田政彦・谷口 浩：干拓地水田における暗渠排水のキ裂発生効果について，同上，26，23～28 (1968)
17) 井上久義・長谷川周一・宮崎 毅：亀裂が発達した圃場における水の横浸透，同上，134，51～59 (1988)
18) Ritchie, J. T., Kissel, D. E. and Burnett, E.: Water movement in undisturbed swelling clay soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 36, 874～879 (1972)
19) Kissel, D. E., Ritchie, J. T. and Burnett, E.: Chloride movement in undisturbed swelling clay soil. *ibid.*, 37, 21～24 (1973)
20) Bouma, J. and Dekker, L. W.: A case study on infiltration into dry clay soil : I. Morphological observations. *Geoderma*, 20, 27～40 (1978)
21) Omoti, U. and Wild, A.: Use of fluorescent dyes to mark the pathways of solute movement through soils under leaching conditions : 2. Field experiments. *Soil Sci.*, 128, 98～104 (1979)
22) 佐久間敏雄・老松博行・飯塚文男・岡島秀夫：乱さない土層中における物質移動の不均一性，土肥誌，50，10～16 (1979)
23) 波多野隆介・佐久間敏雄・岡島秀夫：メチレンブルートレーサー法による水みちの分布状態，同上，54，490～498 (1983)
24) Seyfried, M. S. and Rao, P. S. C.: Solute transport in undisturbed columns of an aggregated tropical soil : Preferential flow effects. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51, 1434～1444 (1987)
25) Miyazaki, T.: Water infiltration into layered soil slopes, 農土論集，133，1～9 (1988)
26) 石黒宗秀：水田耕盤・心土粗間隙の期別変化，白色塗料浸透調査によるクロボク土水田の一例，同上，142，107～108 (1989)
27) 徳永光一・成岡 市・深谷高俊：重液浸入法の開発とそれによる土壌間隙の軟X線透写像についての考察—X線透写像による土壌と間隙に関する研究（I）—，同上，114，61～68 (1984)
28) 成岡 市：土壌粗孔隙の形態とその測定法，土壌の不均一性と物質移動の研究前線，土肥誌，64，90～97 (1993)
29) Biggar, J. W. and Nielsen, D. R.: Miscible displacement : II. Behavior of tracers. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 26, 125～128 (1962)
30) Elrick, D. E. and French, L. K.: Miscible displacement patterns on disturbed and undisturbed soil cores. *ibid.*, 30, 153～156 (1966)
31) McMahon, M. A. and Thomas, G. W.: Chloride and tritiated water flow in disturbed and undisturbed soil cores. *ibid.*, 38, 727～732 (1974)
32) Thomas, G. W., Blevins, R. L., Phillips, R. E. and McMahon, M. A.: Effect of a killed sod mulch on nitrate movement and corn yield. *Agron. J.*, 65, 736～739 (1973)
33) Tyler, D. D. and Thomas, G. W.: Lysimeter measurements of nitrate and chloride losses from soil under convectional and no-tillage corn. *J. Environ. Qual.*, 6, 63～66 (1977)
34) Blake, G., Schlichting, E. and Zimmermann, U.: Water recharge in a soil with shrinkage cracks. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37, 669～672 (1973)
35) Wild, A. and Babiker, I. A.: The asymmetric leaching pattern of nitrate and chloride in a loamy sand under field conditions. *J. Soil Sci.*, 27, 460～466 (1976)
36) Quisenberry, V. L. and Phillips, R. E.: Percolation of surface-applied water in the field. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40, 484～489 (1976)
37) Jury, W. A. and Stolzy, L. H.: A field test of the transfer function model for predicting solute transport. *Water Resour. Res.*, 18, 369～375 (1982)
38) 佐久間敏雄・老松博行・飯塚文男・岡島秀夫：粗大粒団を含むカラムからの $NO_3^-$ の流出，土肥誌，50，17～24 (1979)
39) Van De Pol, R. M., Wierenga, P. J. and Nielsen, D. R.: Solute movement in a field soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41, 10～13 (1977)
40) Shaffer, K. A., Fritton, D. D. and Baker, D. E.: Drainage water sampling in a wet, dualpore soil system. *J. Environ. Qual.*, 8, 241～246 (1979)
41) Biggar, J. W. and Nielsen, D. R.: Spatial variability of the leaching characteristics of a field soil. *Water Resour. Res.*, 12, 78～84 (1976)
42) Anderson, J. L. and Bouma, J.: Water movement through pedal soils, I. Saturated flow. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41, 413～418 (1977)
43) Bouma, J. and Anderson, J. L.: Water and chloride movement through soil columns simulating pedal soils. *ibid.*, 41, 766～770 (1977)
44) Kanchanasut, P., Scotter, D. R. and Tillman, R. W.: Preferential solute movement through larger soil voids, II, Experiments with saturated soil. *Aust. J. Soil Res.*, 16, 269～276 (1978)
45) Bouma, J. and Wosten, J. H. M.: Flow patterns during extended saturated flow in two, undisturbed swelling clay soils with different macrostructures.

NII-Electronic Library Service

Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition



*Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43, 16～22 (1979)
46) Tyler, D. D. and Thomas, G. W.: Chloride movement in undisturbed soil columns. *ibid.*, 45, 459～461 (1981)
47) White, R. E., Thomas, G. W. and Smith, M. S.: Modelling water flow through undisturbed soil cores using a transfer function model derived from $^3$HOH and Cl transport. *J. Soil Sci.*, 35, 159～168 (1984)
48) White, R. E.: The transport of chloride and non-diffusible solutes through soil. *Irrig. Sci.*, 6, 3～10 (1985)
49) Smith, M. S., Thomas, G. W., White, R. E. and Ritonga, D.: Transport of *Escherichia coli* through intact and disturbed soil columns. *J. Environ. Qual.*, 14, 57～91 (1985)
50) Hatano, R., Sakuma, T. and Okajima, H.: The source-sink effect of clayey soil peds on solute transport. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 31, 199～213 (1985)
51) Dyson, J. S. and White, R. E.: The effect of irrigation rate on solute transport in soil during steady water flow. *J. Hydrol.*, 107, 19～29 (1989)
52) Ishiguro, M.: Solute transport through hard pans of paddy fields, 1. Effect of vertical tubular pores made by rice roots on solute transport. *Soil Sci.*, 152, 432～439 (1991)
53) Ishiguro, M.: Solute transport through hard pans of paddy fields, 2. Cation exchange processes. *ibid.*, 153, 42～47 (1992)
54) Bouma, J.: Soil morphology and preferential flow along macropores. *Agric. Water Manage.*, 3, 235～250 (1981)
55) Deans, H. A.: A mathematical model for dispersion in the direction of flow in porous media. *Soc. Pet. Eng. J.*, 3, 49～52 (1963)
56) Coats, K. H. and Smith, B. D.: Dead-end pore volume and dispersion in porous media. *ibid.*, 4, 73～84 (1964)
57) van Genuchten, M. Th. and Wierenga, P. J.: Mass transfer studies in sorbing porous media, I. Analytical solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40, 473～480 (1976)
58) Rao, P. S. C., Jessup, R. E., Rolston, D. E., Davidson, J. M. and Kilcrease, D. P.: Experimental and mathematical description of nonadsorbed solute transfer by diffusion in spherical aggregates. *ibid.*, 44, 684～688 (1980)
59) Rao, P. S. C., Rolston, D. E., Jessup, R. E. and Davidson, J. M.: Solute transport in aggregated porous media : Theoretical and experimental evaluation. *ibid.*, 44, 1139～1146 (1980)
60) Scotter, D. R.: Preferential solute movement through larger soil voids, I. Some computations using simple theory. *Aust. J. Soil Res.*, 16, 257～267 (1978)
61) Rasmuson, A. and Neretnieks, I.: Exact solution of a model for diffusion in particles and longitudinal dispersion in packed beds. *AIChE J.*, 26, 686～690 (1980)
62) Grisak, G. E. and Pickens, J. F.: Solute transport through fractured media, 1. The effect of matrix diffusion. *Water Resour. Res.*, 16, 719～730 (1980)
63) Tang, D. H., Frind, E. O. and Sudicky, E. A.: Contaminant transport in fractured porous media. Analytical solution for a single fracture. *ibid.*, 17, 555～564 (1981)
64) Sudicky, E. A. and Frind, E. O.: Contaminant transport in fractured porous media. Analytical solutions for a system of parallel fractures. *ibid.*, 18, 1634～1642 (1982)
65) van Genuchten, M. Th., Tang, D. H. and Guennelon, R.: Some exact solutions for solute transport through soils containing large cylindrical macropores. *ibid.*, 20, 335～346 (1984)
66) Dagan, G. and Bresler, E.: Solute dispersion in unsaturated heterogeneous soil at field scale, I. Theory. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43, 461～472 (1979)
67) Bresler, E. and Dagan, G.: Convective and scale dispersive solute transport in unsaturated heterogeneous field. *Water Resour. Res.*, 17, 1683～1693 (1981)
68) Jury, W. A.: Simulation of solute transport using a transfer function model. *ibid.*, 18, 363～368 (1982)
69) Jury, W. A. and Sposito, G.: A transfer function model of solute transport through soil, 1. Fundamental concepts. *ibid.*, 22, 243～247 (1986)
70) Iwata, S. and Ooi, S.: Characteristics of cation transport in volcanic ash soils and a mineral soil under unsaturated conditions. Transactions 13th Congress of ISSS, Vol II, p. 89～90 (1986)
71) 小前隆美：地下水資源とその調査技術，農土誌，61, 313～318 (1993)
72) Hatano, R., Kawamura, N., Ikeda, J. and Sakuma, T.: Evaluation of the effect of morphological features of flow paths on solute transport by using fractal dimensions of methylene blue staining pattern. *Geoderma*, 53, 31～44 (1992)
73) Hatano, R. and Booltink, H. W. G.: Using fractal dimensions of stained flow patterns in a clay soil to predict bypass flow. *J. Hydrol.*, 135, 121～131 (1992)

NII-Electronic Library Service