

降雨浸透にともなう表層不飽和帯中の溶質移動の数値モデルによる検討

Numerical Experiment on Solute Transport in Unsaturated Soil of S-shaped Hillslope

東京工業大学工学部 木内 豪 Tsuyoshi KINOUCHI
静岡大学農学部 野上 啓一 郎* Keiichirou NOGAMI
東京工業大学工学部 ○日 野 幹 雄 Mikio HINO

A numerical scheme for computation of the convective diffusion of solute in saturated-unsaturated soil layers with arbitrarily shaped boundaries has been developed applying the boundary fitted coordinate method. Examples of computation on convective diffusion of solute, with surface and point or localized sources in an S-shaped hillslope are given. For a plain source like acid rain, the solute concentration can hardly be observed in the throughflow discharge caused by the first rainfall, but it increases largely as soil moisture increases by the convection of rain water in unsaturated soils. For point sources, even in the initial stage of infiltration near the ground surface, the solute is diffused laterally, although the flow velocity is nearly vertically and the diffusing cloud of solute is convected downslope.

1 序

われわれが極く最近まで、地球上にはふんだんに存在する天の恵みと考えていた水、空気、土壌などの自然資源・環境が、人間の社会・経済・生産活動の拡大に伴って急速に汚染され破壊が進行し、それらが貴重なものとなりつつある。中でも土壌の酷使は最もすさまじいものであろう。米国ではすでに1930年代、土壌流出は深刻な問題となっていた。吹き荒れた世界的大不況にあたかも調子を合わせたかのように、干ばつにより乾燥した土壌を強風が削りそれを吹雪のように巻き上げ、あるいは世界の作物庫として農地面積は拡大の一途を辿っていったが、このように被覆植生をはぎ取られて農地化した表土を降雨が深く切り刻んだ。この対策のために土壌保全局が設置された。

一方最近では、巨大化した工場からの大気汚染物質(SO_2 , NO_x)を溶解した酸性雨が国境を越えて地表に降り注ぎ、土壌を酸性化し、森林を枯らし、湖沼を無生物化するなどの環境問題をもたらしている。その一方では、PCB、DDT等の有害化学物質、IC工場などからのTCFなど溶剤、埋蔵処理された産業廃棄物、あるいは地下に貯蔵された高レベル放射性廃棄物などの溶解流出による土壌汚染が重大な社会問題となっている。こうした土壌汚染問題については地下水流による溶解物質の移流拡散現象として多くの研究がなされつつある。

ところで、これらの物質は、地下水層に侵入する前にまずその上の不飽和土壌層を浸透する。地下水流の水理のメカニズムや基礎方程式は一応確立されているが、不飽和土壌中のそれは未だ不明のことが多い。本論文は、降雨による不飽和-飽和浸透流の流れと溶解物質の移流拡散について、任意形状の境界をもつ領域に適用可能な一般座標系による数値モデルを構築し、それを用いて溶質の移流・拡散の特徴の把握を試みたものである。

2 基礎方程式

2・1 不飽和浸透方程式

不飽和-飽和土壌中の溶質の流れは、Richardsの浸透方程式と、Pick型の拡散方程式を連立させて解けば良い。Richardsの浸透方程式および境界条件は、それぞれ式(1)および(2a, b)で与えられる。なお初期条件は

*) 1988年度 東工大・研究員

平衡状態 (式 (3)) とする。

$$c \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (K \frac{\partial \Phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K \frac{\partial \Phi}{\partial y}) \quad (1)$$

$$R d S_s = -K \frac{\partial \Phi}{\partial n} d S_s \quad (2a)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad (\text{不透水面}) \quad (2b)$$

$$\Psi(x, y, 0) = y_s - y \quad (3)$$

2・2 不飽和土壌中の移流拡散方程式

不飽和土壌中の溶質の移流拡散は、土壌水が不飽和状態であることに対応し、次のようなFick型の拡散方程式で表される。溶質の土粒子への吸着、土粒子の表面保水がないと仮定し、拡散係数テンソル D_{ij} は主軸成分以外を0とした場合、式(4)のような移流拡散型の式になる。このときの境界条件、初期条件は、式(5)、(6)で表される。

$$\frac{\partial \theta C}{\partial t} + \frac{\partial q_1 C}{\partial x} + \frac{\partial q_2 C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (\theta D_{11} \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\theta D_{22} \frac{\partial C}{\partial y}) \quad (4)$$

$$C_s R d S_s = C q_s d S_s - \theta (D_{11} \frac{\partial C}{\partial x}, D_{22} \frac{\partial C}{\partial y}) \cdot n \quad (5a)$$

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0 \quad (5b)$$

$$C(x, y, 0) = 0 \quad (6)$$

ここに、 C ：濃度 (= 溶質の質量 / 溶液の質量)、 θ ：体積含水率、 C_s ：雨水中の溶質濃度。

本論文の目的は、不飽和土壌中の溶質の拡散計算スキームを作成し、斜面土壌中での溶質の移流拡散の特徴を理解することであるから、上式中の拡散係数はBond(1986)に従い単純に次式のように仮定する。

$$D/D_0 = \Gamma + aP^b \quad (7)$$

ここに、 D_0 ：溶質中の分子拡散係数、 Γ ： $q/\theta=0$ のときの D/D_0 の値、tortuosity factor、

P ：ペクレ数、 $Pe=q\ell/\theta D$ 、 ℓ ：多孔質の特性長 (平均粒径)、 a, b ：経験定数

2・3 不飽和土壌中の浸透拡散係数の問題点

不飽和土壌中の拡散は式(4)で記述されるが、実際には問題はそれ程単純ではないことが徐々に明らかになってきた。と云うのは、上式中の拡散係数は一定ではなく流速に依存し、また飽和状態より不飽和状態の方が移流速度が大きいこと、不飽和度や溶質濃度あるいはpHも移流に影響するなど疑点が多いのである。また、溶質は土壌粒子に吸着したり、化学的に反応したり複雑な過程を考えなければならず、多成分系として取り扱う考え方など新たな分野も展開しつつある。

多成分系としての取扱いを一応別にして、いろいろな問題を整理していると次のようになる。まず、土壌水が飽和か不飽和かが問題となる。通常の砂質土の場合の飽和地下水では特に問題はないようである。(しかし、土壌が団塊構造 (aggregate) をなす場合には、飽和状態においても不飽和土壌と同じ問題が生じる。) そこで、問題を不飽和土壌の場合に限定してみても、流れが定常か非定常かの問題がある。

(1) 非定常不飽和土壌中の溶質移動

開水路の洪水の場合には、Kleitzi-Seddonの公式として良く知られているように、洪水 (波) の伝播速度は流れの速度より速い。これと同様に、不飽和浸透流では湿润前線の移動速度は、水の実質部分の移動速度より一桁も速い (山田、1987)。

(2) 定常不飽和土壌中の溶質移動

しかし、例えば浸透流が定常であっても、不飽和浸透流中の溶質の（実質の）移動速度は飽和浸透流のそれよりも速いことがしばしば指摘されている。これについては、物理的観点から次の3つのメカニズムが提案されている。

(a) 土粒子間隙の移動水と非移動水

土壌水には容易に動ける部分とそうでない部分 (mobile water, immobile water) があり、溶質は動けない部分に拡散しながら動ける部分を通して全体が動ける場合より速く流下する。それゆえ、2つの方程式により現象が記述される。この考えは Coats & Smith (1964) によって提案され、多くの研究により支持されている。この式の解析解は、De Smedt & Wierenga (1979)、Bond & Smiles (1983) などによって得られ、また実験との比較も行われている。

(b) 溶質の吸着・溶解モデル

溶質は土粒子表面に吸着・析出し、あるいはそこから溶出してくる。この場合も上と同様に2つの方程式により現象が記述される。

(c) 水みちの形成あるいはフィンガーリング現象

不飽和土壌中の浸透流は流下断面内を均一に流れるのではなく、フィンガーリング現象によりあるいは大空隙（マクロ・ポア）を通して、非均一的に流下するという考えである。敵密に云えば、フィンガーリングと水みちは必ずしも同一なものを指してはいない。マクロ・ポアとは土壌構造の不均一性に基づくものを指すのに対し、フィンガーリングは均質土壌中の不飽和浸透流が自励的不安定性により流体力学的メカニズムで形成された鉛直方向に不均一な流路をいい、その間隔はそしてほぼ規則的である。

(3) 団塊構造の飽和土壌

土壌が団塊構造 (aggregate) を形成する場合には、たとえ流れが飽和であっても、不飽和浸透流と同じように拡散係数が一定ではなく、不飽和土壌の場合と同じような問題が生じる。

(4) 多成分系浸透流

溶質が2つ以上の成分から成る場合とか、溶質が相変化をする場合、pH濃度変化の場合なども多くの論文で取り扱われている。

3 数値計算スキーム

3・1 一般座標系の導入

複雑な境界形状を自然に覆えるよう、一般座標系 (ξ, η) (Thompson, Warsi & Mastin, 1985) を導入する。

$$\xi = \xi(x, y) \quad (8a)$$

$$\eta = \eta(x, y) \quad (8b)$$

3・2 一般座標系による基礎方程式の変換

この ξ, η を独立変数として、基礎方程式を変換する。これにより、基礎方程式はやや複雑化するが、新しい平面 (ξ, η) での計算領域が矩形となるため、式の差分化が容易になるという利点が生じる。これらの点についてはすでに記したので、発表すみの論文 (渡辺他 1986, 1987, 木内・日野, 1988) を参照して頂きたい。

3・3 解の精度の検討

(1) 理論解（一次元）との比較

以上の方針により作成した演算プログラムの精度を検討する。そこで、解析解も得られている理想化された単純な問題について、理論解と数値解とを比較する。ここでは、水平一次元の非定常流れ中の溶質の拡散

について、次式で与えられている Bond & Smiles (1983) の解と比較する。

$$\frac{C-C_n}{C_0-C_n} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{g/2 \cdot (t/v)^{1/2}}{\lambda} \right\} \quad (9)$$

$$v/t = (\theta^*)^2 D_0 \left\{ \Gamma + \{a/(1-b/2)\} \cdot \{\lambda * \ell / 2 D_0 t^{1/2}\}^b \right\} \quad (10)$$

$$g(\lambda) = \int_0^\lambda \theta d\lambda - \int_{\theta_n}^{\theta_0} \lambda d\theta \quad (11)$$

$$\lambda = x t^{-1/2} \quad (12)$$

$$C = C_0, \quad \theta = \theta_0, \quad \psi = 0 \quad (13)$$

$$C \rightarrow C_n, \quad \theta \rightarrow \theta_n, \quad x \rightarrow \infty$$

$$\lambda^*, \theta^* : g=0 \text{ のときの } \lambda, \theta$$

図-1 に示すように、数値解の結果は理論的と良く一致し、数値スキームの信頼性は一応確認された。
なお、不飽和浸透流の計算精度は、鉛直一次元の場合の Philip (1957) の解との比較によりすでに行った (渡辺 (明)、1987、1989)

4 計算結果

土壌内への溶解物質の浸透放出源は次のように2つに分類でき、具体的にはそれぞれ次のような物質拡散の問題がある。

- (a) 平面的拡がりをもつもの . . . 酸性雨、核実験の放射性物質の fallout、散布農薬、自然安定同位体 (降雨にふくまれるものなど) 体 (^{18}O 、D) など。
- (b) 点源ないし局所源 IC工場、クリーニング店、自動車洗車店などからの溶剤 (TCE)、埋蔵処理産業廃棄物の溶出 (PCB、6価Cr)、放射性廃棄物処理場・貯蔵庫からの漏出、農薬 (DDT、BHC etc)。

上に例を挙げたもののうちには、自然界に存在する安定同位体 (^{18}O 、Dはいずれも降雨の形で存在する) などのように、地下水流や流出過程の研究のトレーサーとなるものもあるが、その他のものは多くの場合深刻な環境問題を引き起こしている。

4・1 面源からの溶質拡散

上述の (a) 面源からの溶質の拡散の例として、降雨に含まれる物質 (^{18}O 、D; Acid rain) の土壌への浸透・拡散、斜面の下流端からの流出を計算した。土壌としては山地土壌を想定して、次の Brooks-Corey 式の係数を決めた (表-1)。

$$Se = (\psi_h/\psi)^\lambda \quad (14)$$

$$\kappa(\psi) = \kappa_s S_e^\eta \quad (15)$$

$$S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \quad (16)$$

ここに、

無次元強度 $R^*=0.05$ の降雨が無次元時間 $\Delta t^*=15$ 降り続いた後、 $\Delta t^*=15$ だけ休止し、再び同じ強度の降雨が $\Delta t^*=15$ だけ降った場合である。図-2 (a) は斜面末端からの全流出ハイドログラフと溶質を含んだ新しい雨 (event water) のハイドログラフである。同図によれば、断続する降雨に対応して流出ピークは2つ生起するが、2回目の降雨による流出量ピークは1回目のそれより大きい。また、溶質を含んだ新しい雨ははじめの降雨ではあまり流出せず、その時点での流出のほとんどは以前から不飽和水として斜面土壌中に貯留されていた水分である。しかし、降雨の休止中も降雨は土壌中を浸透し、その結果土壌の水分量が増加し、それに伴って透水係数も大きくなるので、2回目の降雨により全流出量も溶質の流出も急増する。

また、図-2 (b) に示すように等濃度線はほぼ斜面の地表面に沿っており、すでに示した (渡辺他、1986、

表-1 : 種々のパラメータ値

不飽和浸透流 :	$K_s = 0.50 \text{ (cm/min)}$	$\psi_s = -10.0 \text{ (cm)}$
	$\lambda = 0.16$	$\eta = 0.40$
	$\theta_s = 0.50$	$\theta_r = 0.10$
溶質移流拡散 :	$D_s = 0.005 \text{ (cm}^2/\text{min)}$	
	$\ell = 0.015$	$\Gamma = 0.50$
	$a = 1.60$	$b = 1.20$

表-2 : 無次元化

$R^* = R/K_s$	(無次元化降雨強度)
$q^* = q/(-\psi_s K_s)$	(無次元流出量)
$t^* = t/[-\psi_s (\theta_s - \theta_r)/K_s]$	(無次元時間)
$l^* = l/(-\psi_s)$	(無次元長さ)

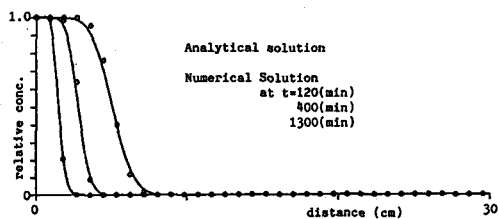


Fig. 1; Comparison of the numerical solution with the analytical solution

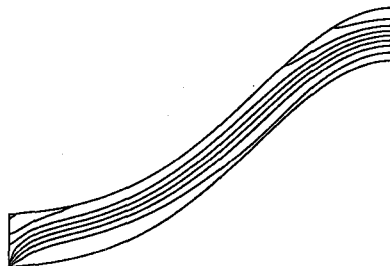
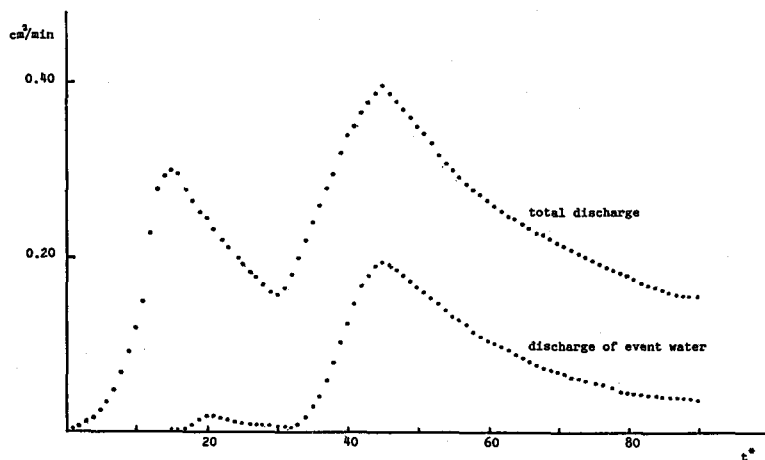


Fig. 2(b)

Fig. 2 (a) Hydrographs of total discharge and event water, (b) Contour lines of soil moisture at $t^*=30$.

このような場合を想定して、次のような計算を行った。浸出源は互いに離れており、しばらくの間は相互に拡散が重なり合うことはないと考えて、同じS字型斜面の上、中、下に3個の局所源を置いた。

計算結果は、図-3 (この図は、拡散の様子が良くわかるように、縦のスケールを横のスケールの2倍にしてある。) に示すように、流速ベクトルは鉛直下向きにもかかわらず、溶解物質ははじめてから不飽和土壌中を横方向に広がる。流速ベクトルは最初は鉛直下向きであるが、時間の経過とともに斜面測方流が斜面下流方向に発達することが示されている。

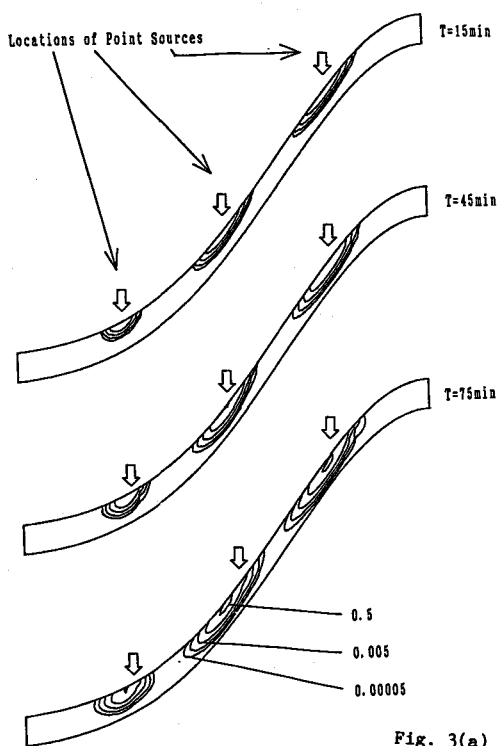


Fig. 3(a)

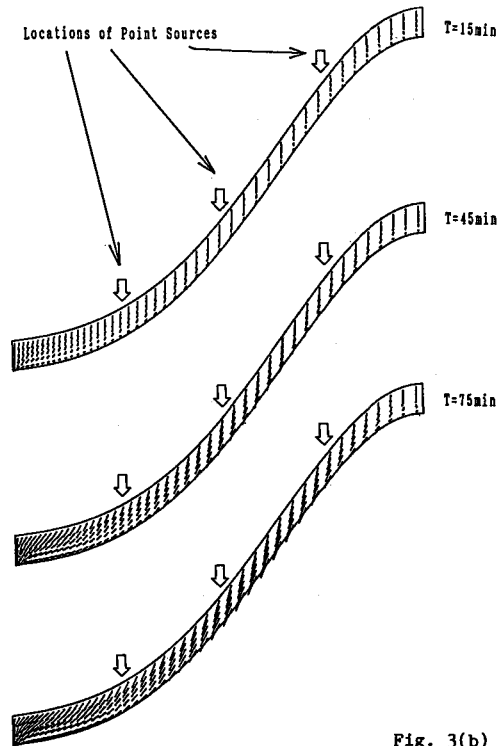


Fig. 3(b)

1987) 鉛直浸透ベクトルの傾向を反映している。

4・2 点源もしくは局所源からの溶質の流出

最近では人里離れた山あいの土中に、廃棄物がこっそりとあるいは公的承認のもとに埋められる。この場合、たとえ有害物の浸出を不透水性被膜やライニングにより防止しても、永い年月の間にはこれらの防止材が、破膜し有害物質が浸出する事態となる。

参考文献

- Barfield, W. D. (1970): An optimal mesh generator for Lagrangian hydrodynamic calculations in two space dimensions, J. Comp. Phys. vol. 6, 417-429.
- Bond, W. J. (1986): Velocity-dependent hydrodynamic dispersion during unsteady, unsaturated soil water flow: Experiments, Water Res. Res., vol. 22, 1881-1889.
- Bond, W. J. & Smiles, D. E. (1983): Influence of velocity on hydrodynamic dispersion during unsteady soil water flow, Soil Sci. Soc. Am., J., vol. 47, 438-441.
- Brooks, R. E. & Corey, A. Y. (1966): Properties of porous media affecting fluid flow, J. of Irrigation and Drainage Div., Proc. ASCE, Vol. 92, (IR2), 61-88.
- Coats, K. E. & Smith, B. D. (1964): Dead-End Pore Volume and Dispersion in Porous Media, Soc. Pet. Eng. J., (64), 73-84.
- 木内豪・日野幹雄(1988): 不飽和浸透流に伴う溶質移動モデル、水文・水資源学会・1988年研究発表会要旨集、76-79.
- Nielsen, D. R., van Genuchten, M. Th. and Biggar, J. W. (1986): Water flow and solute transport processes in unsaturated zone, Water Res. Res., vol. 22, 895-1085.
- Thompson, J. P., Warsi, Z. U. A., Mastin, C. W. (1985): Numerical Grid Generation, Foundations and Applications, North-Holland.
- 渡辺明英(1987): 3次元不飽和浸透流の数値モデルの開発とその適用について、昭和61年(1986年度・東工大・修士論文)
- 渡辺明英(1989): 数値モデルの精度・計算安定性の検討、日野・太田・砂田・渡辺(邦)著: 「洪水の数値予報」の補遺3、森北出版
- 渡辺明英・瀬岡和夫・日野幹雄(1986): 任意境界形状の山腹斜面を対象とした曲線座標系による不飽和浸透流の数値モデル、第30回水理講演会論文集
- 渡辺明英・日野幹雄(1987): 一般座標を用いた3次元不飽和浸透流モデルによる流出解析、第31回水理講演会論文集
- 山田 正(1987): ヒステリシス効果、降雨流出における不飽和浸透の役割と流出過程、流出現象の物理機構に関する研究(高樺琢馬 編)、昭和60・61年度科研(総合(A))報告書