水みち状流れによる吸着性物質の移動特性： 確率論的ネットワークモデルをもちいて

杉田 文

Sorptive Solute Transport in a Channelized Flow System: Application of a stochastic channel network model

Fumi Sugita

Abstract

Sorptive solute transport through channelized flow regimes was investigated using a two-dimensional channel network model. Channel networks of various geometry were generated stochastically and sorptive as well as non-sorptive solute transports in the media were simulated. The sorption reaction was assumed to become equilibrium instantaneously and to have a linear and singular isotherm. Breakthrough curves (BTCs) in actual concentration and time were normalized by total tracer concentration and by an average discharge time of non-sorptive tracer from the network. These normalized BTCs indicate distinctive characteristics of sorptive solute transport in the heterogeneous media such that: (1) The medium with smaller average channel size gives delayed breakthrough and greater spreading in sorptive solute BTCs, whereas non-sorptive solute BTCs are not affected by average channel size, since BTCs are normalized (2) When average channel size is the same, a medium which has wider channel size variation gives significantly greater spreading in sorptive solute BTCs whereas non-sorptive solute BTCs show only slight increase in BTC spreading (3) As channel density increases, difference in effects of channel size variation on non-sorptive and sorptive solute BTCs becomes small (4) BTC characteristics are not significantly affected by channel orientation nor by variation in channel orientation, although permeability of the network is affected by the orientation of the channels. The second and the third results indicate that sorptive solute transport exhibits more pronounced effect of heterogeneity in the discrete media than non-sorptive solute transport does. It also suggests that medium with greater heterogeneity causes larger spreading in sorptive solute BTCs, which may lead to considerably early arrival of the solute to a certain point of ques-

tion in a field situation.

key words: channel network, sorption, stochastic model, heterogeneity

1. はじめに

多孔体と異なり透水性の比較的低い固結岩盤における水および物質の動きは放射性廃棄物やその他の有毒廃液等の隔離処分といった問題から近年特に注目をあびるようになった。岩盤内の水の流れは亀裂が高密度に発達しているなどある特殊な条件下では多孔体内のそれと同様に一樣流として扱うことができる(Long *et al.*, 1982など)。しかし多くの野外や室内におけるトレーサー実験は岩盤内における水の流れが非常に不均一であることを示し、不連続的な水みち状の流れとして扱う必要性を示唆している(Dverstorp *et al.*, 1992)。

不均一な水みち状流れが生じる原因は、岩盤全体といった大スケールでは亀裂の存在によるもので、単一亀裂のような小スケールでは亀裂内の水みちの発達によるものである。このうち大スケールの不均一な流れ場は亀裂ネットワークモデルにより有効にモデル化されることがよく知られている。初期の多くのネットワークモデルでは各亀裂内の流れを一組の平行板内の流れと見なせると仮定していた(Schwartz *et al.*, 1983など)。しかし単一亀裂を用いた室内実験(Neretnieks *et al.*, 1982)や野外実験にネットワークモデルを応用した研究(Cacas *et al.*, 1990a, b, Dverstorp *et al.*, 1992)では単一亀裂内においても水みちが発達し不均一な流れが卓越していることが指摘された。そして、このような水みちの発達は物質移動に特に強い影響を与えることが示された(Dverstorp *et al.*, 1992)。

Moreno *et al.* (1988)は確率論に基づいた粗面を持つ単一亀裂モデルを用いて単一亀裂内で水みち状流れが卓越することを示した。Tsang *et al.* (1988)は亀裂内の水みちを統計的に等価な一次元の流れとしてモデル化することを提案し、Moreno *et al.* (1988)の二次元モデルと流出曲線の計算結果においてよい一致を示した。彼らのモデルでは分子拡散、テイラーの分散(Taylor, 1953)のほ

か水みちから基岩への物質の拡散などを考慮していなかった。そこでJohns & Roberts (1991)は比較的大きい水みち内の物質移動をより微細な亀裂部分および基岩への拡散を考慮しながら解析的に解き、水みち状流れにおいては水と基岩との接触面積が少ないため基岩への拡散は物質移動に大きな影響を与えない一方、微細な亀裂部分への拡散は大きな影響を与える可能性が強いことを示した。

多くの放射性物質を用いた室内実験(Moreno *et al.*, 1985, Neretnieks *et al.*, 1982など)ではトレーサーが岩盤表面と吸着反応を起こすことが報告されているが、以上のいずれのモデルでも物質の吸着反応はあまり考慮されていない。そこで本研究では統計値に基づき確率的に発生させた互いに連結した水みちのネットワークを用いてトレーサー移行に関する数値シミュレーションを行い、不連続の流れ場における吸着を伴う汚染物質の移動特性について検討することを目的とした。多くの有毒物質の環境中における許容濃度は非常に低い。したがって地中におけるそれら汚染物質の移動を考える時、ある特定地点への平均到達時間よりも極低濃度による初期到達時間の予測が重要な課題となる。この初期到達時間は物質の平均移動速度ばかりではなく広がり、つまり分散の度合いに大きく左右されると考えられる。そこで本研究ではとくに分散の度合いに重点をおきながら吸着反応の影響について考察を行った。

2. 水みちモデルの概要

本研究で用いた二次元水みちネットワークモデルは多孔体を微視的にモデル化した間隙モデル(Sugita *et al.*, 印刷中)を基礎としてその一部を水みちを表現するように改良したものである。全体の計算手順は以下の様である。

- (1)二次元の解析領域内に与えられた数の水みちの中心点を任意に選ぶ。

(2)各中心点に対して水みちの長さ、径、主動水勾配方向からの角度をそれぞれのパラメーターに与えられた分布関数から独立に任意に選び、水みちのネットワークを構築する。様々な種類の亀裂性岩盤の調査から一般に岩盤中の亀裂の幅(径)は対数正規分布をもつとされている(Snow, 1970)。そこで本解析では径は対数正規分布を持つとし、平均径および標準偏差の二つの統計値を入力パラメーターとした。長さは、本解析ではネットワーク構築時の入力値としては均一とした。しかし、一本の水みちが水や物質輸送に実際に寄与する有効長は他の水みちとの交点の位置や流出入境界との連続性により異なってくるため、最終的には個々の水みちはそれぞれ異なる長さを持つことになる。実際の岩盤中における水みちの角度は一般的にはいくつかの似た方向性をもつグループに分けられるといわれている。本解析では水みちは二つのグループからなるとし、それぞれのグループは比較的狭い角度範囲において正規分布をもつと仮定してそれぞれに異なる統計値を与えた。個々の水みちの径や角度はそれぞれに与えられた分布関数に基づいて互いに独立にランダムに抽出した値とした。

(3)流出入境界から不連続であったり行き止まりになる水みち、また解析領域からはみだした水みちを取り除く。

(4)構築されたネットワークを数値計算のため小さい要素に分割する。各要素の分割点は節点と呼ばれる。水みちの各交点を節点とするほか交点間、即ち単一水みちも数値計算上の必要に応じてより小さい一次元要素に分割する。

(5)流れ場(水頭)について与えられた外部境界条件(一定水頭または不透水)に基づき、ガラキン法に基づいた有限要素法により解く。水みち内の一次元定常流の連続の式は次のように表せる。

$$\frac{\partial}{\partial l}(K_l \frac{\partial h}{\partial l})=0 \quad (1)$$

h は水頭、 l は線形要素に沿った距離、 K_l は

透水係数で各水みちを完全円筒形とすると次式で与えられる(例えば、Daugherty & Franzini, 1977)。

$$K_l = \frac{\rho g b^2}{8 \mu} \quad (2)$$

ρ は流体密度、 g は重力加速度、 μ は流体粘性係数、 b は水みちの半径である。本研究では解析領域を一辺10cmの正方形とし、上下境界は不透水、左右の境界は一定水頭値を持つとした。

(6)(5)で解いた流れ場に基づいて物質移動について非吸着性物質、吸着性物質の順に粒子追跡法(Kinzelbach, 1986)により解く。すなわち、上流境界に多数の同一濃度を代表するトレーサー粒子を放出すると各粒子は(5)で得られた流れ場およびローカルな遅延係数(R)の値に従ってネットワーク内を移動し下流境界から流出する。一つの時間ステップごとの粒子の移動は次式により表せる(Kinzelbach, 1986)。

$$l_p(t + \Delta t) =$$

$$l_p(t) + \frac{V(l(t), t)}{R} \Delta t + N(0, 1) \sqrt{2 \frac{D}{R} \Delta t} \quad (3)$$

ここで l_p は線形要素に沿った粒子の位置、 t は時間、 V は水流速、 R は遅延係数、 D は分散係数、 $N(0, 1)$ は平均0、標準偏差1の正規分布をもつランダム変数である。本研究では分配係数は解析領域内で均一であり、吸着は可逆反応で瞬時にして平衡に達すると仮定した。水みち中の分配係数(K_d)は単位固体表面積に吸着された物質質量と流体中の濃度の比と定義されるため、各水みちの遅延係数(R)は次式で表される。

$$R = 1 + \frac{\text{unit surface area of a channel}(2b\pi)}{\text{unit volume of a channel}(\pi b^2)} K_d \quad (4)$$

$$R = 1 + \frac{2K_d}{b} \quad (5)$$

式(5)に従って全水みちは同一の分配係数を

持つが、その径(b)の値により異なる遅延係数をもつことになる。本解析では水みちの交点で完全混合が起こると仮定したため、ある交点に到達した粒子は過去の履歴に依らず単純に各水みちの流量の比に従った確率で次の水みちへ進む。各粒子は等濃度トレーサーを代表するので、粒子の放出時刻をゼロとする時間軸に対して流出粒子数あるいは積算粒子数をプロットすることにより流出曲線を得ることができる。

間隙モデルと本モデルの主な相違点を次に示す。

- (1) 本モデルでは間隙モデルでは考慮されていなかった水みち内での分散、すなわちテイラーの分散を物質移動ルーチンにとりいれた。これは本解析では特に分散に注目しており、水みち状流れではこの分散機構が溶質全体の分散に大きな影響を与える可能性があるためである。
- (2) 間隙モデルでは流路の密度は一定、角度は二方向に限定されていたが、水みち状流れではこれらの値にばらつきがあることが予測されるため、これらのばらつきを考慮した。

3. 解析方法および解析結果

3.1 基本ケース入力値と解析手法

基本ケースとして用いたシミュレーションの入力値を表1に示す。本解析では全ての入力値セットに対してモンテカルロ的に10の流れ場を発生させてシミュレーションを行い、解析結果を検討するためには単一シミュレーションの結果のほかそれらのアンサンブル平均値をもちいた。基本ケースとして発生させたネットワークの一例を図1に示す。このネットワークの場合、孤立した水みちを除いた後の水みち総数は344、交点総数は1196、流れおよび物質移動計算に用いた節点総数は9240となった。粒子追跡法に用いた総粒子数は400である。これは総粒子数2000個の場合から計算時間節約のため流出曲線形状に大きな変化が現れない範囲で徐々に個数を減らして決定した。

本解析ではトレーサーの流出曲線に対しては同一ネットワークから得られた非吸着性物質の平均流出時間が1となるように標準化・無次元化した時間(T)を横軸に、全粒子が流出した場合が1となるように標準化された濃度値を縦軸にとりプロットした。無次元化した時間(T)は次式で表せる。

表1 基本ケースの入力値

Table 1 Input parameters used for a reference case

各グループの水みち数	グループ 1	グループ 2
	200	200
主動水方向からの角度		
分布関数	正規分布	正規分布
平均	45°	-45°
標準偏差	0°	0°
径		
分布関数	対数正規分布	対数正規分布
平均	0.01cm	0.01cm
標準偏差	0.1	0.1
水みち長	均一 2 cm	均一 2 cm
分子拡散係数	$1.61 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{sec}$	
分配係数(Kd)	0.025cm	
平均動水勾配	0.1	
総粒子数	400

図1 基本ケースとして発生させたネットワークの例

Figure 1 A channel network generated as a reference case

$$T = \frac{t}{t_1} \quad (6)$$

ただし、

$$t_1 = \frac{\int_0^\infty lc(t)dt}{\int_0^\infty c(t)dt} \quad (7)$$

ここで t は実時間、 c は非吸着性物質の濃度、 t_1 は非吸着性物質の実時間における流出曲線の平均流出時間（第一モーメント）である。分配係数（0.025cm）は砂に対して弱く吸着されるストロンチウムの分配係数にほぼ相当する。

流出曲線は時間に対して積算流出粒子数をプロットしたものであるが、解析においては時間に対して単に流出粒子数をプロットした曲線（流出曲線を一回微分した曲線）、 C 、のモーメントを求めることによりその特性を数値化することを試みた。第一モーメント（ M_1 ）は次式によって定義され、時間軸上における流出曲線の中心位置、すなわち平均流出時間を示す。

$$M_1 = \frac{\int_0^\infty TC(T)dT}{\int_0^\infty C(T)dT} \quad (8)$$

第二モーメント（ M_2 ）の平方根（STD）は曲線の広がり示し次式で与えられる。

$$STD = (M_2)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{\int_0^\infty (T-M_1)^2 C(T)dT}{\int_0^\infty C(T)dT} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

第二モーメント（ M_2 ）の三乗と第三モーメント（ M_3 ）の二乗の比（SKW）は曲線の歪みを表し、0の場合曲線の中心軸に関して左右対象、正の場合は急激な立上りと長い尾を持つ方向に、そして負の場合は緩やかな立上りで短い尾を持つ方向に曲線が歪んでいることを示す。第三モーメント（ M_3 ）および歪み（SKW）はそれぞれ(10)式、(11)式で定義される。

$$M_3 = \frac{\int_0^\infty (T-M_1)^3 C(T)dT}{\int_0^\infty C(T)dT} \quad (10)$$

$$SKW = \frac{M_3^2}{M_2^3} \quad (11)$$

基本ケースから水みちの径、角度および総数などを独立に変化させて各パラメーターが流出曲線に与える影響を調査した。

3.2 平均径および径のばらつき

水みちの平均径を変化させた場合の流出曲線の典型例を図2に示す。平均径の変化のみの影響を観察するため、示された3例の水みちの幾何学構造は同一のものである。非吸着性物質の流出曲線自身は第一モーメントで標準化された場合平均径変化の影響を全く受けない。一方、吸着反応を伴う場合平均径が大きいものほど流出時間が早くなることがわかる。これは遅延係数が水みちの体積と表面積の比の関数であるためである。すなわち大きい径の水みち程小さい遅延係数をもつため吸着性物質の移動速度は速く、小さい径の水みちほど逆に遅延係数が大きくなるため、吸着性物質の移動速度が遅くなるためである。他の9例の水みちネットワークにおけるシミュレーションも同様の結果を示した。

10のシミュレーションのモーメント特性のアンサンブル平均値を表2にまとめた。吸着性物質の平均流出時間を表す第一モーメントが平均径が小さくなるにつれ大きくなり、流出時間が径の小さいものほど遅れることを示している。一方、広が

りを表す標準偏差も非吸着性物質では何れの平均径でもほとんど変化しないが吸着性物質では径が小さくなるにつれ大きくなっており分散の度合いも大きくなることわかる。吸着性物質のSTDをM1で除した値は、均一な多孔体における理論では、平均径(媒体の透水性)に依存せず、非吸着性物質のSTDと等しくなることが知られている。得られたSTD/M1は平均径に依存はしないが、常に非吸着性物質のSTDより大きい値をとることがわかる。これは、多孔体には存在しないネットワーク媒体の不均一性の影響と考えられ

る。歪みには特に顕著な平均径への依存性は見られなかった。上の結果から、吸着性物質の移動が非吸着性物質のそれに比べて水みちの平均径の大きさの影響を平均流出時間に強く受けることがわかった。

次に同一の平均径で径分布の標準偏差を0.0、0.1、0.2とし、媒体の不均一性を変化させた。得られた流出曲線の一例を図3に示す。図3に示した曲線を得たネットワークはいずれも同一の幾何学構造を持ち、径分布の標準偏差の値だけを変化させたものである。平均径の値が同一なため平均

図2 異なる水みち平均径をもつネットワークから得られたトレーサ流出曲線

Figure 2 Breakthrough curves obtained from networks with different mean channel aperture

図3 異なる水みち分布をもつネットワークから得られた流出曲線

Figure 3 Breakthrough curves obtained from networks with different channel aperture distribution

表2 異なる平均径をもつ水みちネットワークから得られた流出曲線の形状特性
(M1: 平均流出時間、STD: 標準偏差、SKW: 歪み)

Table 2 Ensemble averages of breakthrough curve properties: three different mean channel apertures
(M1: average discharge time, STD: standard deviation, SKW: skewness)

平均径(mm)	非吸着性物質			吸着性物質			
	M1	STD	SKW	M1	STD	SKW	STD/M1
0.316	1.00	0.15	1.01	2.39	0.51	1.61	0.21
0.100	1.00	0.15	1.48	5.57	1.07	0.94	0.19
0.032	1.00	0.17	1.33	15.75	3.45	0.94	0.22

的流出時間(濃度 $\equiv 0.5$ の流出時間)に大きな差は認められない。一方、非吸着性・吸着性物質共に径のばらつきが大きい場合ほど曲線の広がりが大きくなり、その傾向は吸着性物質の流出曲線により顕著であることがわかる。特に、吸着性物質の流出曲線の初期流出時間が大きく影響を受けており、径のばらつきが増すにつれて非常に早い時間に流出を開始することがわかる。水みちの径が均一なほど領域内における水の流速のばらつきが小さくなるためにトレーサの分散が小さくなり、逆に不均一になるほど流速のばらつきが大きくなりトレーサの分散が大きくなるため、水みち径の標準偏差は非吸着性・吸着性物質両者の移動に影響を与えていると考えられる。吸着性物質においては、水流速の遅い小さい水みちは大きい遅延係数を持つため吸着性物質の移行速度はさらに遅くなるのに対し、水流速の速い大きい水みちは小さい遅延係数をもつために吸着性物質の移行速度は相対的にさらに速くなる。このメカニズムのため、移行速度分布のばらつきは吸着性物質では非吸着性物質のそれよりさらに助長されて大きくなり、曲線の広がり、すなわち分散が大きくなったと考えられる。

モーメント特性のアンサンブル平均値を表3に示す。吸着性物質の平均流出時間にあまり大きな変化は認められない。広がり(STD)は非吸着性・吸着性物質共に径の標準偏差、つまりばらつきが増すにつれて大きくなっている。均一な媒体では吸着性物質のSTDの値を第一モーメントの値で除すると非吸着性物質のSTDの値になる。吸着性物質のSTD/M1の値も表3に示した。径の標準偏差が0.0、つまり均一径の時は非吸着性物質

のSTD値とほぼ等しくなるが、1.0、2.0と径のばらつきが増加にともなって非吸着性物質のSTDに比べ大きな値となることがわかる。したがって非吸着性物質のSTDと比較しても、多孔体中とは異なり、径のばらつきが大きくなるにつれ吸着性物質のSTDがより強い影響を受けて大きくなっていることがわかる。

歪み(SKW)は径の標準偏差が0.1の時に最小でその前後で大きくなっている。これは径が単一の時は一斉に物質の流出が開始され、流出曲線の立上りが非常に急なのに比し、尾の部分が長引いているため歪みが大きくなり、標準偏差が0.2の場合にはむしろ尾の部分が長引いているために曲線の歪みの値が大きくなっていることが図3からわかる。以上の結果から水みち径のばらつきの影響は吸着性物質のほうがより強くその広がりを受けることが認められた。

3.3 水みちの密度

水みちの総数を200、400、750と変化させることによりその密度が流出曲線に与える影響を調べた。水みち総数が200と750の場合のネットワークの例を図4(aとb)に示す。図4aとbの例では不連続な水みちを取り除いた後の有効水みち数は160と695、また交点総数はそれぞれ351および4219である。すなわち後者の方が水みち数にして約4.3倍、交点数にして約12.0倍水みち密度が高い媒体となっている。流出曲線の一例を図5に示した。非吸着性・吸着性物質ともに水みち密度の低い媒体ほど曲線の広がりが大きく長い尾をもつことがわかる。その影響は吸着性物質により顕著である。流出開始時間には大きな変化は認められ

表3 同一平均径で異なる標準偏差の水みち径分布もつネットワークから得られた流出曲線の形状特性(M1: 平均流出時間、STD: 標準偏差、SKW: 歪み)

Table 3 Ensemble averages of breakthrough curve properties: three different channel aperture distributions (M1, STD and SKW are the same as in Table 2)

径の標準偏差(/)	非吸着性物質			吸着性物質			
	M1	STD	SKW	M1	STD	SKW	STD/M1
0.0	1.0	0.07	7.18	6.00	0.38	9.70	0.06
1.0	1.0	0.15	1.48	5.57	1.07	0.93	0.19
2.0	1.0	0.28	2.24	5.19	2.20	8.39	0.42

図4 異なる水みち密度をもつネットワークの例
(a: 入力水みち総数 200 b: 入力水みち総数 750)
Figure 4 Networks of (a) sparse and (b) dense channel densities

図5 異なる水みち密度をもつネットワークから得られた流出曲線
Figure 5 Breakthrough curves obtained from different channel density

ない。流出特性に関する10のアンサンブル平均値を表4に示す。水みち密度の増加は媒体の透水係数と直接的に結び付いてそのアンサンブル平均は

200、400、750の時にそれぞれ0.261、0.807、2.021cm/minとなった。吸着性物質の平均流出時間に密度変化に伴う変化は見られず、STD(標準偏差)およびSKW(歪み)の値は媒体の水みち密度が高まるほど小さい値をとる。すなわち水みち密度が高くなるほど流出曲線の広がり小さくなり、左右対象になることを示している。連続性媒体である多孔体では、平衡吸着条件下において吸着性物質のSTD/M1の値は非吸着性物質のSTDの値と等しくなり、SKWは0に近い値をとる。本モデルにおいても、最も密度が高く連続性のよい場合では非吸着性物質のSTDと吸着性物質のSTD/M1の値が接近し、SKW値は0に近づくことが分かる。このことは、水みち密度が高く連続性がよければ吸着反応による流出曲線に対する特異な影響は小さくなり一般多孔体と同様に非吸着・吸着性物質を扱えることを示唆している。

3.4 水みちの方向性

亀裂表面にランダムな凹凸がある場合や規則的あるいは方向性を持つ凹凸がある場合などその表面の性状および充填物質の有無、また動水勾配方向と凹凸の方向性の角度差などにより水みちの方

向性にも違いが生じることが予測される。そのような水みちの主方向と動水勾配の方向との違いや水みち方向のばらつきが物質移動に与える影響を調査した。

基本ケースでは水みち角度のばらつき(標準偏差)は0であったが標準偏差が10度および20度の場合の計算を行なった。発生させた媒体の例を図6(aとb)に示す。図6の例では有効水みち数は10度の場合で351,20度で356、交点数は10度が1421,20度が1510であり連続性に大きな違いはない。これらの媒体から得られた流出曲線の例を図

7に示した。非吸着性物質では20度の場合に少し長めの尾が認められるものの曲線の形状にほとんど角度のばらつきの影響は見られない。吸着性物質においてはばらつきが全く無い場合に比べて10度の場合は曲線がより急激に立ち上がって広がりがわずかではあるが小さくなる。20度の場合は逆にやはりわずかではあるがより早い流出とより長い尾が認められ広がりが多少大きくなっていることがわかる。いずれにしても形状変化はあまり顕著ではない。流出開始時間にもほとんど差はみられなかった。

表4 異なる水みち密度をもつネットワークから得られた流出曲線の形状特性

(M1：平均流出時間、STD：標準偏差、SKW：歪み)

Table 4 Ensemble averages of breakthrough curve properties: three different aperture densities (M1, STD and SKW are the same as in Table 2)

水みち数 (入力値)	交点数	透水係数 (cm/min)	非吸着性物質			吸着性物質			
			M1	STD	SKW	M1	STD	SKW	STD/M1
200	4293	0.26	1.0	0.21	8.42	6.38	1.84	3.25	0.29
400	1270	0.81	1.0	0.15	1.48	5.57	1.07	0.93	0.19
750	334	2.02	1.0	0.08	0.20	5.61	0.66	0.37	0.11

図6 水みちの方向にばらつきがある場合のネットワークの発生例
(平均 $\pm 45^\circ$ 、標準偏差 a: 10° 、b: 20°)

Figure 6 Networks of different channel angle distributions
(mean $\pm 45^\circ$, STD a: 10° , b: 20°)

図7 異なる水みち方向特性をもつネットワークから得られた流出曲線
(主動水勾配からの平均角度 $\pm 45^\circ$)

Figure 7 Breakthrough curves obtained from different channel angle distribution (mean angle $\pm 45^\circ$)

流出曲線の形状特性をまとめたものを表5上段($\pm 45^\circ$)に示す。アンサンブル平均においてもいづれの特性値にも標準偏差の増加に伴う大きな変化や系統的变化は見られない。吸着性物質のSTD値は標準偏差が10のとき最小になる。角度のばらつきが0の時に比べ10度の時は交点数が大幅に増えているため媒体の連続性がよくなり速度

のばらつきが小さくなり、STDが小さくなったと推定される。更に流路方向のばらつきが大きくなると交点数はあまり変化しないが流路が複雑になるため、移行速度のばらつきが大きくなってSTDが増加したと考えられる。

次に水みちの主方向を動水勾配の主方向(0度)または直交方向(90度)とし、そのばらつきを0、10度および20度と変化させた。10のシミュレーション結果のアンサンブル平均値を表5下段(0、90度)に示してある。水みちの主方向が0、90度の場合、 $\pm 45^\circ$ の場合に比べ、透水係数の値は大きくなる。これは水みちの主方向の一つが流れの上流と下流を直接的に結び付ける方向に一致することにより透水性が高くなったためと考えられる。また標準偏差が0の場合に限ってみると流出曲線の分散を表すSTDが、0、90度の場合 $\pm 45^\circ$ の場合に比べて大きくなっている。これは水みちの主方向の一つ(0度)が流れの上下流を直接的に結び付けて流速の速い流路を提供する一方、もう一つの主方向(90度)が動水勾配と直角となり極端に流速の遅い流路を形成して総合的にネットワーク内での流速のばらつきが大きくなったためと考えられる。主方向の違いによるSTDの値の差は方向のばらつきが増加するのに伴い小さくなり、標準偏差が20度の場合にはSTDの値は主方向によらずほぼ等しくなっている。

そのほか主流方向が $\pm 45^\circ$ の時には標準偏差の増加に伴う交点数の増加により、透水係数が増加したが、0、90度の場合には交点数の増加に伴う

表5 異なる水みちの方向特性をもつネットワークから得られた流出曲線の形状特性
(M1: 平均流出時間、STD: 標準偏差、SKW: 歪み)

Table 5 Ensemble averages of breakthrough curve properties: three different channel angle distributions (M1, STD and SKW are the same as in Table 2)

平均 (度)	標準偏差	交点数	透水係数 cm/min	非吸着性物質			吸着性物質		
				M1	STD	SKW	M1	STD	SKW
± 45	0	1270	0.72	1.0	0.15	1.48	5.57	1.07	0.93
	10	1505	0.81	1.0	0.14	0.77	5.85	0.84	3.50
	20	1610	0.83	1.0	0.22	0.60	5.64	1.12	2.60
0と90	0	1328	0.92	1.0	0.25	1.06	6.53	1.92	0.42
	10	1551	0.92	1.0	0.23	1.06	5.75	1.73	0.97
	20	1664	0.91	1.0	0.22	2.34	6.23	1.27	0.97

透水係数の変化は見られなかった。したがって、主流方向に水みちの主方向が一致している場合には交点数のわずかな増加は全体の透水性に影響を与えないことがわかった。

4. まとめ

不連続な水みち状流れによる物質移動特性について水みちの二次元ネットワークモデルをもちいて調査した。さまざまな幾何学的統計値を持った水みちモデルを確率論的に発生させ非吸着性・吸着性物質を想定したトレーサー移行に関する数値シミュレーションを行い流出曲線を算出した。吸着反応は系内で一様かつ可逆、瞬時にして平衡に達すると仮定した。非吸着性物質の平均流出時間により無次元化した時間に対してプロットされた流出曲線の特性から次の結果を得た。(1)水みちの平均径の大きさは非吸着性物質の流出曲線の形状には影響を与えないが、平均径が小さい場合ほど吸着性物質の平均流出時間は遅くなる。(2)水みちの平均径が等しい場合、径の大きさのばらつきは遅延係数にばらつきを生じさせるため、吸着性物質の分散に顕著な影響を与える。径のばらつきが大きい場合ほど、吸着性物質の流出曲線の分散は非吸着性物質の分散に比べて大きくなる。吸着性物質の流出開始時間は早くなり、長い期間流出が続くようになる。(3)水みちの密度が低い場合には吸着性物質の流出曲線は非吸着性物質に比べ大きな分散と歪みを呈する。一方密度が高くなると非吸着性・吸着性物質の流出曲線の分散・歪みに見られた形状特性の違いは小さくなり多孔体から得られる流出曲線の特性に近づく。(4)水みちの主方向が動水勾配方向と一致すると透水性は高くなる。一方、主方向からのばらつきの度合いは流出曲線に大きな影響を与えない。

(2)、(3)の結果は不連続的な流れ場では吸着性物質の移動が非吸着性物質のそれに比べ媒体の不均一性の影響をより強く受け、不均一性の存在は吸着性物質の広がり(分散)を大きくすることを示している。地下水中の溶存物質が大きな分散をおこすとその物質のある地点への初期到達時間が平均到達時刻に比較し非常に早くなる。したがって、吸着反応をおこす汚染物質の亀裂中における移動

予測などを行う際には流れ場の不均一性の影響を考慮することが重要であることが示唆された。

参 考 文 献

- Cacas,M.C., E.Ledoux, G.de Marsily, B.Tille, E.Durand, B.Feuga and P.Peaudecerf (1990a): Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: Calibration and validation 1. The flow model. *Water Resour. Res.*, 26(3), 479-489.
- Cacas,M.C., E.Ledoux, G.de Marsily, A.Barbreau, P.Calmels, B.Gaillard and R.Margritta (1990b): Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: Calibration and validation 2. The transport model. *Water Resour. Res.*, 26(3), 491-500.
- Daugherty, R.L. and J.B. Framzini (1977): *Fluid mechanics with engineering applicaitons*. McGraw Hill, 564p.
- Dverstorp,B., J.Andersson and W. Nordqvist (1992): Discrete fracture network interpretation of field tracer migration in sparsely fractured rock. *Water Resour. Res.*, 28(9), 2327-2343.
- Johns,R.A. and P.V.Roberts (1991): A solute transport model for channelized flow in a fracture. *Water Resour. Res.*, 27(8), 1797-1808.
- Kinzelbach,W. (1986): *Groundwater Modelling: An introduction with sample programs in Basic*. Elsevier Science Publishing Company Inc. 334p.
- Long,J.C.S., J.S.Remer, C.R.Wilson and P.A.Witherspoon (1982): Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures. *Water Resour. Res.*, 18 (3) , 645-658.
- Moreno,L., I.Neretnieks and T. Eriksen (1985): Analysis of some laboratory tracer runs in natural fissures. *Water Resour. Res.*, 21(7), 951-958.
- Moreno,L., Y.W.Tsang, F.V.Hale and I.Neretnieks (1988): Flow and tracer transport in a single fracture: A stochastic model and its relation to some field observations. *Water Resour. Res.*, 24(12), 2033-2048.
- Neretnieks,I., T.Eriksen and P.Tahtinen (1982): Tracer movement in a single fissure in granitic rock: Some experimental results and their interpretation. *Water Resour. Res.*, 18(4), 849-858.
- Schwartz,F.W., L.Smith and A.S. Crowe (1983): A

- stochastic analysis of macroscopic dispersion in fractured media. *Water Resour. Res.*, 19(5), 1253-1265.
- Snow, D.T. (1970): The frequency and apertures of fractures in rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 7, 23-40.
- Sugita, F., R.W. Gillham and C. Mase: Pore-scale variation in retardation factor as a cause of non-ideal breakthrough curves: II. Pore-network analysis. *Water Resour. Res.*, (印刷中).
- Taylor, G.I. (1953): Dispersion of soluble matter in solvent flowing slowly through a tube. *Proc. Roy. Soc. A.* 219, 186-203.
- Tsang, Y.W., C.F. Tsang, I. Neretnieks and L. Moreno (1988): Flow and tracer transport in fractured media: A variable aperture channel model and its properties. *Water Resour. Res.*, 24(12), 2049-2060.
- (受付: 1994年3月25日、受理: 1994年12月21日)