

堆積軟岩を対象としたチャンネルネットワークモデルへの分散・収着・核種移行機能の追加

岩野 圭太^{1*}・川端 淳一¹・戸井田 克¹・渡辺 邦夫²

¹鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

²埼玉大学 地圏科学研究センター (〒107-8502 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

*E-mail: iwanokeita@kajima.com

堆積軟岩を対象とした地下水挙動を行う場合、基質部と割目双方の水理特性を考慮することが必要となる。DonChanは、元々割目系岩盤を対象としたチャンネルネットワークモデルであるが、堆積軟岩を想定した割目—基質部複合モデルも提案されている。本論ではこのDonChanに対し移流分散方程式に基づく分散・収着や、核種崩壊機能を追加し、理論解との比較により、その確からしさを検証した。また分散について、微視的分散と巨視的分散の岩盤全体への影響について数値解析的検討による知見を得ており、他にも物質移行に関し原位置試験では評価が困難な事項について、数値解析的検討により新たな知見や示唆が得られる可能性を見出した。

Key Words : channel network model, sedimentary rock, groundwater flow simulation, dispersion

1. はじめに

一般に表層地盤を対象に地下水流動解析を行う場合、水理的に均質な多孔質媒体として捉え、有限要素法や有限差分法にて検討される場合が多い。一方で、花崗岩に代表されるような割目系岩盤では、一般に岩盤中の割目の透水性は岩盤基質部のそれに比べ極めて大きく、割目は岩盤全体の水理特性の支配的要因であると考えられるため、割目系岩盤の透水特性を評価する様々な地下水挙動解析手法が提案されており¹⁾、代表的な手法として、割目を出来るだけ忠実に再現する割目ネットワークモデル²⁾やチャンネルネットワークモデル³⁾が提案されている。

これに対し堆積軟岩は、基質部の透水性も比較的高いが、割目の透水性も無視できず、地盤と割目系岩盤の双方の水理特性を特徴を持つといえる。

近年の大規模岩盤地下構造物は、放射性廃棄物処分に代表されるように水理学的な評価が非常に重要となってきた。この場合、岩盤は天然バリアとして、放射性物質を生活環境から隔離する核種移行抑制の重要な一翼を担っており⁴⁾、処分施設周辺岩盤の水理特性の評価は極めて重要である。従って、その天然バリアとして堆積軟岩を想定した場合、基質部と割目双方の透水性を考慮した地下水流動性の評価が必要となる。DonChanは、元々、割目系岩盤を対象とし、一次元のパイプを三次元

管路網にしたチャンネルネットワークモデルであるが、**図-1**に示すように、近年その対象は割目系岩盤だけでなく、堆積軟岩にも適用できるよう割目と基質部を複合したモデル(割目—基質部複合モデル)として対象岩盤の巨視的な水理特性の算出にも用いられている⁵⁾。DonChanにおける物質移行解析には、仮想粒子(パーティクル)の移行経路を追跡するパーティクルトラッキングが行われるが、堆積軟岩を想定した場合、割目内のパーティクルの移行だけでなく、基質部内の分散や、収着に伴う遅延などの現象を評価できることが極めて重要となる。

従って本論文では、DonChanに対し、理論に基づいて基質部に分散を表現できるようプログラムを改良し、解析解との比較にてその確からしさを検証する。さらにこれにより、堆積軟岩を想定した割目—基質部複合モデルにおいて分散に関する数値解析的検討も行う。また収着

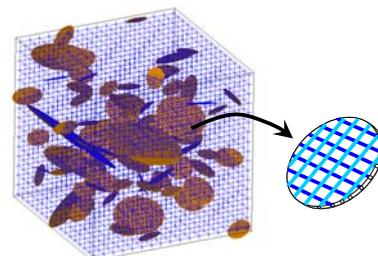


図-1 DonChan の概念

による遅延効果、核種崩壊現象もモデル化できるよう改良し、割目-基質部複合モデルにおける簡易的な核種移行解析の試解析を行う。

2. 分散機能の追加

(1) DonChanへの分散機能の組み込み

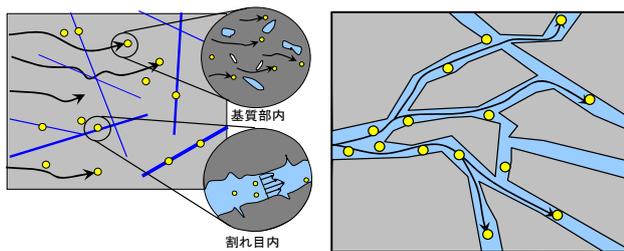
分散現象を評価する上で、分散長は対象としている物質の拡がり度合を決める重要なパラメータである。

Gelhar⁹⁾は多孔質媒体と割目系岩盤について原位置試験データから分散長についてとりまとめ、縦方向（あるいは横方向）分散長は測定スケールに依存すると報告している。中川ら⁷⁾は、地盤や岩盤のそれぞれのスケールで地下水流速の不均質性をもたらす要因は様々であると考へ、不均質性を同じ統計量で示すことができる場（統計的均質場）の場合は、分散長は流下距離に従って増加するが、ある程度の流下距離を越えるとその増加は鈍り遷移領域を経て収束するとしている。

このように発生要因の観点から整理すると、実験室や原位置試験の対象スケールによって分散現象を区別することが出来ると考えられる。1つは、地盤を水理特性上、均質と考えられるまでサイズダウンした場合の基質部や同一割目内で観察される分散であり、微視的分散と呼ぶことが出来る。また、よりマクロに原位置試験のサイズで対象水理場を見た場合、局所的な透水性の違いによる迂回流れや、割目の存在およびその連結性による移行経路の違いにより生じる分散と考えることができ、ここではこれを巨視的分散と呼ぶ。（巨視的分散は、岩盤全体の分散と呼ぶ場合があるが、本論の巨視的分散との区別のため、ここでは岩盤全体の分散を等価分散長と呼ぶ）。

図-2 にそれぞれの分散発生要因の概念を示す。

DonChan について考えてみると、割目を発生させ仮想粒子が割目の連結性に沿って移流に従い移行する物質移行挙動は、図-2 の (b) 巨視的分散に相当する分散を求めていることになる。従って堆積軟岩のように、割目数が限定的で連結性が低く、基質部の透水性が相対的に高い場合は、図-2 の (a) 微視的分散を無視できないが、従来の DonChan ではこれを表現できておらず、岩盤全体の地下水挙動として分散現象をモデル化できていないこ



(a) 微視的分散の概念図 (b) 巨視的分散の概念図

図-2 微視的・巨視的分散の概念図

とになる。DonChanに図-2の (a) 微視的分散の効果を加えることは、構成されている1次元のパイプ内のパーティクルに対し、移流分散方程式に基づく移行挙動となるような改良が必要となる。ここで遅延と減衰を考慮した1次元の移流分散方程式は次式にて示される⁸⁾。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{D}{R} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \frac{u}{R} \frac{\partial c}{\partial t} - \lambda c \quad (1)$$

ここで c : 濃度, D : 縦方向分散係数, R : 遅延係数, u : 実流速, λ : 減衰定数. この (1) 式に対し、パルス入力条件 ($t=0, x=0$ で瞬時放出条件) での濃度の確率密度関数の理論解は、投入物質質量 c_0 で正規化すると、以下のように示される。

$$\frac{c(x,t)}{c_0} = \frac{1}{2\sqrt{\pi Dt/R}} \exp\left(-\frac{(x-ut/R)^2}{4Dt/R}\right) \exp(-\lambda t) \quad (2)$$

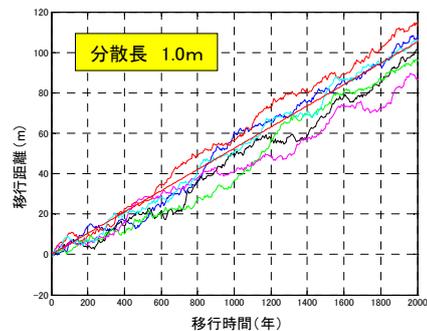
この (2) 式は減衰項を無視すれば移行距離 x について移流による移行距離 ut/R を中心とし、標準偏差 $\sqrt{2cut/R}$ の正規分布である。従って理論上、時刻 t における移行距離 $x(t)$ は、 Rnd を正規乱数 $N(0,1)$ として、次のように示すことができる。

$$x(t) = ut/R + Rnd\sqrt{2cut/R} \quad (3)$$

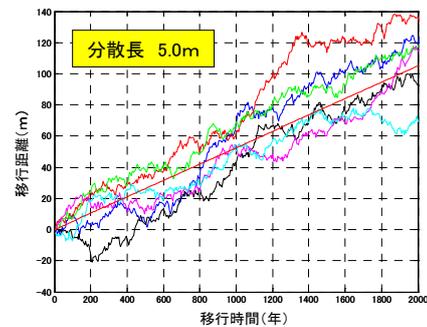
DonChanでは、全体の移行時間に比べて十分小さい時間 Δt の間に進む移行距離を求め累積していく。

$$X(t_{i+1}) = \underbrace{X(t_i)}_{T=t_i \text{ の移行距離}} + \underbrace{u\Delta t/R}_{\Delta t \text{ 間の移流による移行距離}} + \underbrace{Rnd\sqrt{2cu\Delta t/R}}_{\Delta t \text{ 間の分散による移行距離}} \quad (4)$$

図-3に1次元問題として仮想粒子の移行軌跡シミュレ



(a) 分散長を 1.0mとした場合



(b) 分散長を 5.0mとした場合

図-3 1次元モデルにおけるパーティクルの移行軌跡

ーションを示す。仮想粒子はマクロ的には移流に従って移行していくが、設定する分散長により仮想粒子の移行軌跡にばらつきが生じていることがわかる。

(2) DonChanに組み込んだ分散機能の検証

DonChanに組み込んだ分散の検証のため、割目を含まず基質部だけのモデルにて解析を行った。表-1に解析条件を示した。移流のみでの下流到達時間は約950年である。

表-1 解析条件

解析条件	
領域	50 × 50 × 50 m
動水勾配	5 %
基質部 透水係数	1.0E-08 m/s
基質部 間隙率	0.3
分散長	1.0/ 5.0/ 10.0 m
移流のみで下流まで到達する時間	951 年

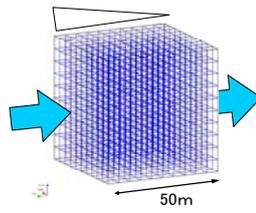
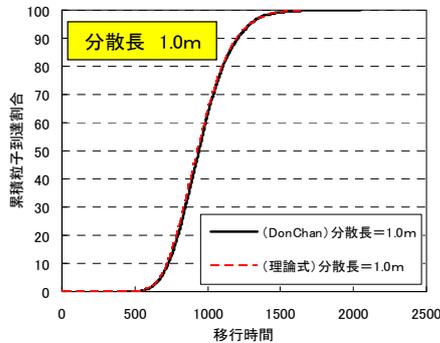
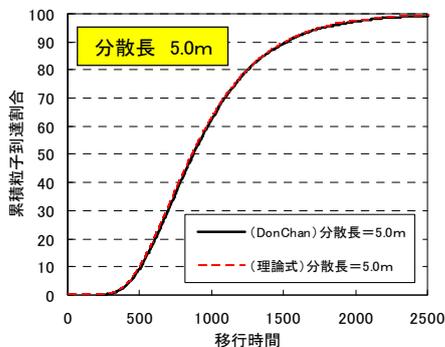


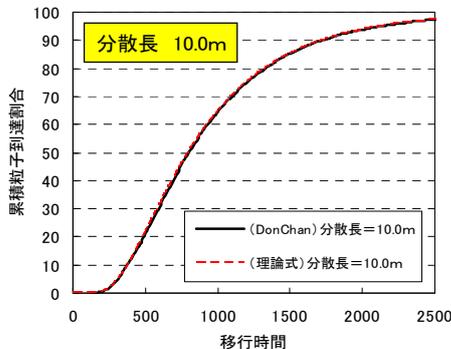
図-4 解析領域



(a) 分散長を 1.0mとした場合



(b) 分散長を 5.0mとした場合



(c) 分散長を 10.0mとした場合

図-5 分散長を組み込んだ DonChan の解析結果と理論解とのブレイクスルーカーブの比較

る。また、パルス入力条件における濃度の累積分布関数の理論解は、ここでは簡単のために遅延は考慮せず、また保存系として (2) 式において崩壊定数 $\lambda = 0$ とすれば、時間積分を行うことによって以下のように得られる⁹⁾。

$$\int_0^t c(x,t)/c_0 dt = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x-ut}{2\sqrt{aut}} \right) + \exp \left(\frac{x}{a} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x+ut}{2\sqrt{aut}} \right) \right] \quad (5)$$

図-5に分散機能を組み込んだDonChanの解析結果と理論解を設定した分散長に比較した。いずれにおいても解析結果と理論解が良い一致を示し、理論に則った分散を表現出来ていることが示された。

(3) 割目を含む堆積軟岩を対象とした分散の検討

次に割目を含む堆積軟岩を想定し、微視的分散と巨視的分散が岩盤全体の分散（等価分散）に及ぼす影響を解析的に検討した。具体的には、表-2の解析条件に示すように、微視的分散の影響因子として基質部の分散長、巨視的分散の影響因子として割目密度をそれぞれ変数とした。基質部の透水係数や割目の透水量係数については、実際の堆積軟岩サイトで得られた透水係数を参考に現実的な数値を採用し、固定条件とした。割目密度は図-6に示すように3つのパターンを用意した。統計的均質場を想定し、表-2に従う幾何学特性に従う割目を発生させ、変数である基質部分散長と割目密度の設定ごとに10リアライゼーションずつ、パーティクルトラッキングによる物質移行解析を行った。図-7にブレイクスルーカーブを示す。これより、以下のことがわかる。

- ・同じ基質部の分散長の場合、割目密度が大きくなるほど各リアライゼーションのブレイクスルーカーブのばらつきが大きい。
- ・基質部の分散長=0m、割目密度=0.01m²/m³の場合、割目密度が小さいため割目を通過しない仮想粒子は基質部を移流によってのみ移行するため、約950年で一斉

表-2 解析条件

		設定値	備考	
全体条件	解析領域	50m × 50m × 50m	条件固定	
	動水勾配	0.05		
	境界条件	上流面2.5m、下流面0.0m その他 側面は不透水境界		
基質部	透水係数	1.00E-08 [m/s]	条件固定	
	分散長	0.0/1.0/5.0/10.0 [m]	変動パラメータ	
割目	密度分布	0.01/0.05/0.1 [m ² /m ³]	変動パラメータ	
	半径分布	べき乗数	4.0	条件固定
		最小半径	3.0 [m]	
	方向分布	Fisher定数	3.0	条件固定
		卓越主極方向	鉛直真下	
		透水量係数	1.00E-05 [m ² /s]	条件固定
	分散長	設定なし [m]		

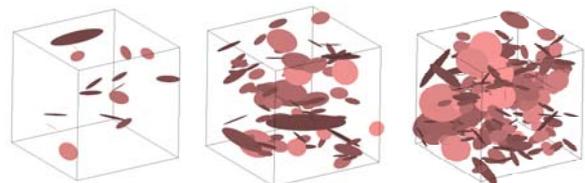


図-6 割目密度ごとに発生させた割目の一例

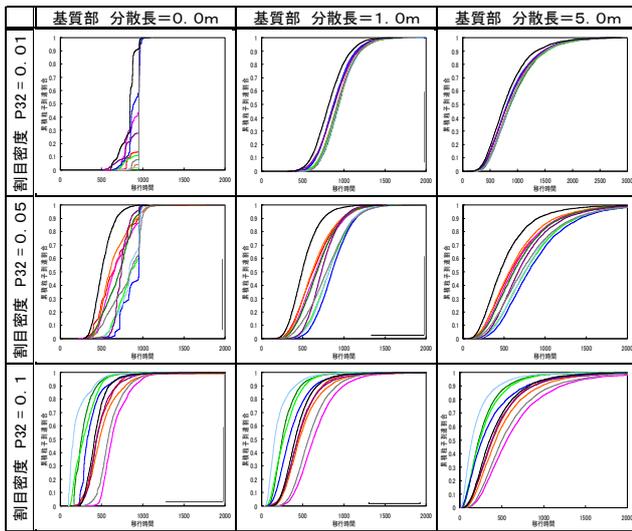


図-7 分散長の違いによるブレイクスルーカーブ

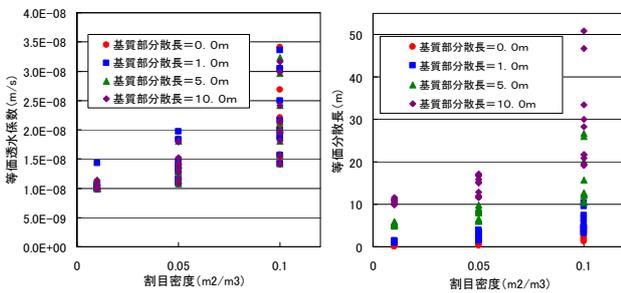


図-8 割目密度と等価透水特性の関係

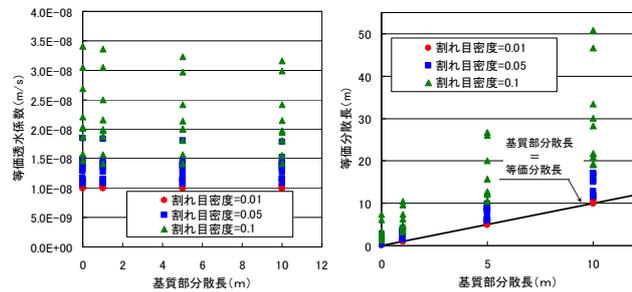


図-9 基質部分散長と等価透水特性の関係

に下流に到達するが、割目密度が上がる解析ケースとなるにつれ、巨視的分散の影響でブレイクスルーカーブは滑らかな曲線を描く。

以上のような定性的な知見に対し、より定量的に検討するため、各ブレイクスルーカーブから一次元移流分散方程式の解析解とのフィッティングを行い、岩盤全体の等価透水係数および等価分散長を求めた。図-8に変数である割目密度に対する等価透水特性の関係、図-9に同じく変数である基質部の分散長に対する等価透水特性の関係を示す。ここから次のようなことがいえる。

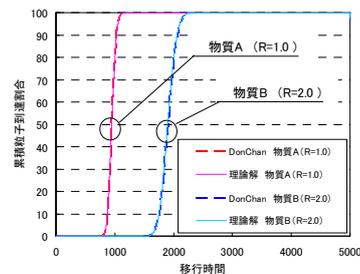
- 割目密度と等価透水係数は緩い正の相関がある。ただし、割目密度が大きくなると、とりうる等価透水係数の範囲が広がる。これは割目密度が大きくなるほど粒子の基質部または割目の通過時間にばらつきが生じやすくなるためであると考えられる (図-8 左グラフ)。

- 割目密度と等価分散長は緩い正の相関がある。これは割目密度が大きくなるほど、巨視的分散の効果が大きくなるためであると考えられる (図-8 右グラフ)。
- 基質部の分散長は等価透水係数に殆ど影響を及ぼさない (図-9 左グラフ)。
- 基質部の分散長は、等価分散長と相関が高い。また常に基質部分散長 \leq 等価分散長の関係である。これは、等価分散長として、微視的分散に巨視的分散の効果が加えられた結果であると考えられる (図-9 右グラフ)。

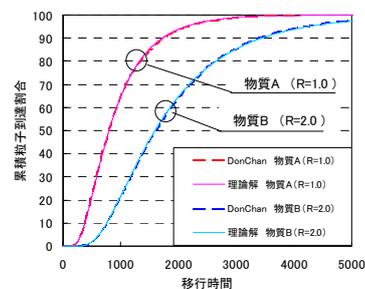
以上のような検討により、微視的分散と巨視的分散が岩盤全体の等価分散に及ぼす影響についての様々な知見が得られた。これは数値解析的検討の域を出ないものの、一般的に原位置での物質移行に関する試験が様々な制約により十分な量と精度のデータを得ることが困難な場合があることを念頭に置くと、割目を考慮した堆積軟岩の物質移行特性に関する貴重な示唆を与えるものと考えられる。

3. 収着機能の追加

収着は、移流分散方程式 (1) 式の中で遅延の効果としてあらわれる。つまり (3) 式または (4) 式における遅延係数 R で評価される。実験等に基づく遅延係数の算定は、現時点で体系的な整理に向けた研究段階であるが、一般に遅延効果は、割目系岩盤では溶解物質と基質部または割目を構成する鉱物との化学的相互反応によりもたらされると考えられる。従って、DonChanでは溶解物質 (核種等) と基質部・割目を構成する鉱物の遅延係



(a) 分散長を 0.1m とした場合



(b) 分散長を 10.0m とした場合

図-10 遅延を考慮した DonChan の解析結果と理論解のブレイクスルーカーブの比較

数に関するクロステーブルを用意し、遅延係数を決定するようにしている。図-10には、表-1と同じ解析条件に対し、異なる遅延係数を持つ2つの溶解物質（物質A、物質B）のブレイクスルーカーブを示し、同じ境界条件による理論解と比較を行った。いずれも理論解とよく一致していることが分かる。また、遅延係数が大きい物質Bの方が、仮想粒子が対象領域の中に長く存在する分、遅延による時間遅れだけでなく、分散の影響もより受けていることが分かる。

4. 核種崩壊

核種崩壊は、時刻 t において存在している粒子数を $N(t)$ 、崩壊定数を λ とすれば、以下の常微分方程式で示される。

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t) \quad (6)$$

また、半減期を T とおけば、崩壊定数 λ との関係は、以下ようになる。

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} = \frac{0.693}{T} \quad (7)$$

これを解くと、ある崩壊性粒子数の確率密度関数および累積分布関数は、以下になる。

$$f(t) = \lambda \cdot \exp(-\lambda t) \quad (8)$$

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (9)$$

各仮想粒子に核種崩壊をモデル化する具体的な方策としては、図-11に示すように、ある崩壊系列（例えば物質

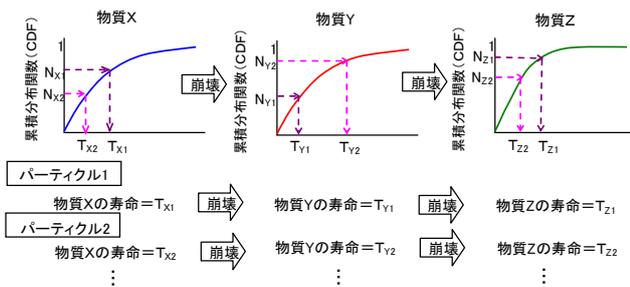


図-11 核種崩壊機能を付与する考え方

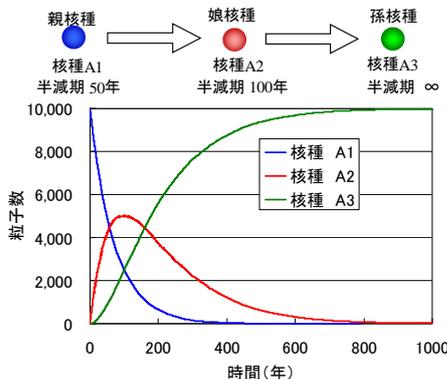


図-12 崩壊による粒子数の経時変化

X→物質Y→物質Z)における生存確率に関する累積分布関数から、一様乱数（例えばNX1, NY1…）に従い、各仮想粒子の核種崩壊系列の寿命（例えばTX1, TY1…）を決定する。図-12には、崩壊系列の半減期をそれぞれ設定した場合の10,000個の仮想粒子の粒子数の経年変化を示したものである。また、核種崩壊が進むに従い、核種ごとに設定した遅延係数に変更される。

5. 試解析

分散、収着（遅延）、核種崩壊機能を追加したDonChanに対し、堆積軟岩を想定した割目-基質部複合モデルで試解析を行った。解析の基本条件は表-2と同じであり、分散、収着、核種移行に関するパラメータは表-3のとおりである。ここで分散長は、基質部・割目とも同一の値としている。図-13に解析結果を示す。上段にブレイクスルーカーブ（破過曲線）と核種生存数、下段に下流面（X=50m）における核種の到達粒子数の経時変化を示す。いずれのケースも半減期は同一のため、上段の核種生存数の経時変化はケース毎に変わらないが、分散長の設定によりブレイクスルーカーブが変わるため、下流面に到達する核種の到達粒子数のピークが異なってくる事が分かる。ある距離の下流面に到達する核種の到達粒子数の経時変化により、その地点の核種濃度を評価するとすれば、対象岩盤内の核種濃度は流下距離（対象スケール）や分散効果（割目状況、分散長）、崩壊定数による影響を複雑に受けていることが分かる。従って、堆積岩盤のような割目-基質部複合モデルに対し、核種移行解析を行う場合、核種濃度ピークの変動予測は容易でないことが分かる。

7. まとめ

以上、堆積岩盤を想定した割目-基質部複合モデルとしてDonChanに分散、収着、核種崩壊の機能を付加し、それぞれ基本ケースにより理論解と比較した結果、解析結果が理論解と良い一致をすることを確かめることができた。さらに分散については、微視的分散と巨視的分散

表-3 核種移行解析条件

		Case 1	Case 2	Case 3		
収着・核種移行	分散 (基質部・割れ目)	α [m]	0.1	1	10	
		半減期	A1 [年]	300	300	300
			A2 [年]	500	500	500
	A3 [年]		-	-	-	
	基質部 遅延係数R	A1	1.0	1.0	1.0	
		A2	1.5	1.5	1.5	
		A3	2.0	2.0	2.0	
	割れ目 遅延係数R	A1	1.0	1.0	1.0	
		A2	1.3	1.3	1.3	
A3		1.8	1.8	1.8		

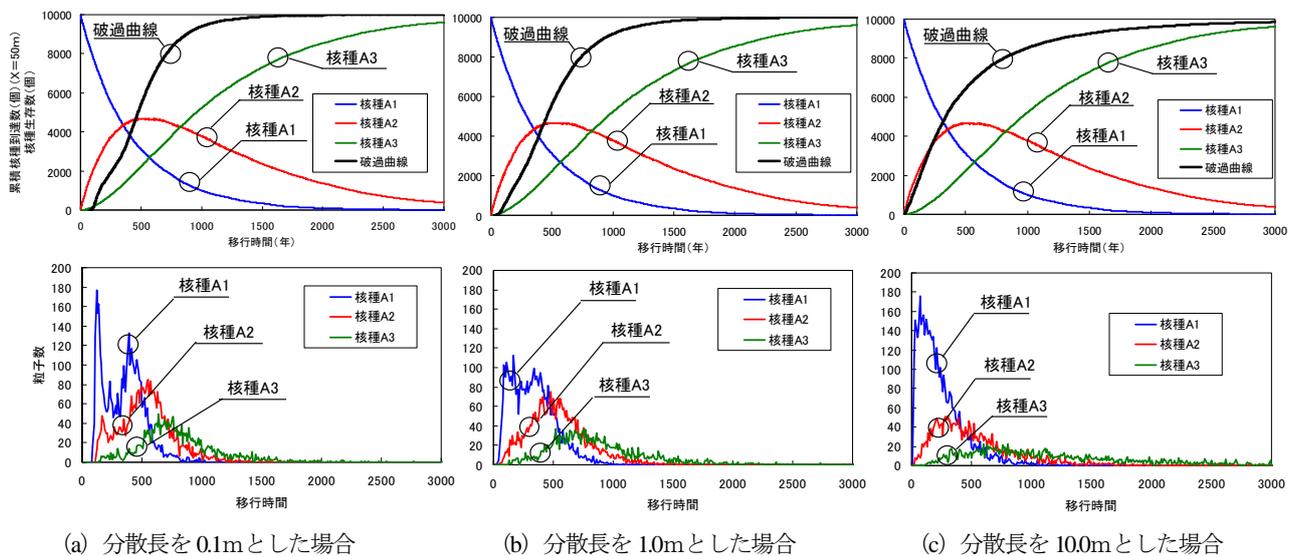


図-13 割目を含んだ岩盤を対象とした核種移行解析の試解析結果
 (上段：破過曲線と核種生存数，下段：流下距離 50mにおける到達粒子数)

という異なる分散要因が岩盤全体の分散（等価分散）に与える影響について数値解析的に検討し、様々な知見を得た。今後さらにこの改良したDonChanにより、原位置試験では様々な制約により評価することが困難な物質移行に関する事項について引き続き数値解析的検討を行う予定であり、それによりさらに新たな知見や示唆が得られると考えられる。

参考文献

- 1) 三枝博光ほか：複数のモデル化手法を用いた地質環境特性の調査における地下水流動特性の不確実性の検討，サイクル機構技報研究報告，No.20，pp.75-89，2003.
- 2) 渡辺邦夫ほか：地質構造を基礎とフラクチャーネットワークモデルの開発 その1—解析の考え方—，応用地質，35巻，3号，pp.22-33，1994.

- 3) Dershowitz.W.,Lee,G. et al:FracMan interactive discrete fracture data analysis, geometric modeling, and wxploration simulation, User documentation, Ver.2.6, Golder Associates Inc, Seattle WA.
- 4) 原子力委員会：現行の政令濃度上限値を超える低レベル放射性廃棄物処分の基本的考え方について，1998.
- 5) 佐々木泰ほか：水理特性を試験スケールから評価スケールに巨視化する方法，2005年地下水学会秋季大会講演要旨，pp222-227，2005.
- 6) Gelhar.L.W,et al :A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers, Water Resources Research, Vol.28, No.7, pp1955-1974, 1992
- 7) 中川啓，神野健二：不均一浸透場におけるトレーサー輸送の微視的分散と巨視的分散に対する水理学的考察，水工学論文集，42，p p 382-390，1998.
- 8) 日本地下水学会：地下水のトレーサー試験，技報堂出版，2009.
- 9) Christian Leibundgut et al.;Tracers in Hydrology, Chapter5, 2009.

CODE ENHANCEMENT OF CHANNEL NETWORK MODEL WITH DISPERSION, RETARDATION, AND RADIONUCLIDE DECAY

Keita IWANO, Junichi KAWABATA, Masaru TOIDA and Kunio WATANABE

Groundwater flow analysis especially for sedimentary rock requires the hydraulic properties of both matrix and fractures. The channel network code; DonChan, which had originally developed for fractured rock, was also applied for sedimentary rock. In this paper, DonChan is enhanced by incorporating dispersion, retardation, and radionuclide decay phenomena for aiming at sedimentary rock. Through simple numerical study about dispersion, this enhanced code brings several knowledge and suggestion which is quite hard to obtain by In-situ test.