

割れ目ネットワークモデルに対する畳込み積分の適用性の検証

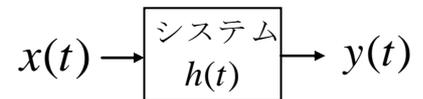
鹿島建設 正会員 ○岩野 圭太 戸井田 克
川端 淳一 羽根 幸司

1. 背景

放射性廃棄物処分施設の安全評価を進めていく上で、天然バリアの地下水挙動評価は極めて重要である。岩盤においては、断層や割れ目が天然バリア全体の透水特性に多大な影響を及ぼすと考えられており、割れ目を直接的にモデル化できる解析手法を用いた評価も検討されている¹⁾。これらの解析手法は、頻度、半径分布など割れ目の幾何学特性あるいはその透水特性を考慮するため3次元的评价が必要となり、検証として岩盤全体を均質媒体として扱う理論解との比較を行うことは難しい。一方で、天然バリアの核種移行解析では、数千年または数万年オーダーで濃度変化が起こる人工バリアからの核種移行率が、天然バリアにおける核種移行解析の入力条件になると考えられ、その結果、解析条件は非常に複雑となり計算量も膨大になる。このような3次元場における評価・検討が複雑かつ膨大となる問題を解決し、安定して計算できる有力な方法として、畳込み積分が考えられる。本報では、この畳込み積分の割れ目を含んだ3次元水理場の解析に対する適用性について検証した。

2. 畳込み積分

畳込み積分(合積: Convolution)は、電気工学における信号処理などにおける基礎手法で、波形処理などでも用いられている。あるシステム $h(t)$ が、線形(Linear)かつ時不変性(Time Invariant)であるシステム(以降: LTI システム)の場合、入力信号 $x(t)$ 、出力信号 $y(t)$ との関係は下式のように表せる。

図1 入出力システム $h(t)$

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)h(t-\tau)d\tau \quad \text{式(1)}$$

更に、入力信号としてパルス信号 $\delta(t)$ が与えられたときには下式のように、インパルス応答がそのままシステムの伝達関数となる。

$$y(t) = \delta(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(\tau)h(t-\tau)d\tau = h(t) \quad \text{式(2)}$$

つまり、パルス信号 $\delta(t)$ に対する応答(インパルス応答)が求められれば、任意の入力信号 $x(t)$ に対する応答 $y(t)$ が求められることになる。つまり、天然バリアの地下水挙動評価において考えると、人工バリアからパルス状に放出された核種の移行(インパルス応答)が算出できれば、任意の人工バリアからの核種移行率に対して、その応答を求めることができることになる。

3. 畳込み積分の適用性検証1(解析解との比較)

図1で示した入出力システムがLTIシステムであれば、畳込み積分が適用できる。つまり任意の $x_k(t)$ 、 $y_k(t)$ に対し以下が成り立つことである。

$$\text{線形性 (Linearity)} \quad ax_1(t) + bx_2(t) \rightarrow ay_1(t) + by_2(t) \quad \text{式(3)}$$

$$\text{時不変性 (Time Invariant)} \quad x(t-t_0) \rightarrow y(t-t_0) \quad \text{式(4)}$$

ここで、移流/分散・遅延・減衰を考慮した支配方程式(式(5))がLTIシステムであるとは、式(5)の一般解が式(3)、式(4)を満足することを示すことである。入力条件によっては解析解が得られるが、ここでは式(5)に基づくシステムがLTIシステムであることを、解析的に検証をすることとした。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{R} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{v}{R} \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda C \quad \begin{array}{l} C: \text{濃度}, D: \text{拡散定数}, R: \text{遅延定数} \\ v: \text{実流速}, \lambda: \text{減衰係数} \end{array} \quad \text{式(5)}$$

簡単な1次元モデルとして、移行距離 $L=50\text{m}$ 、拡散定数 $D=1\text{m}^2/\text{年}$ 、遅延定数 $R=1$ 、実流速 $v=1\text{m}/\text{年}$ とし、保存系として $\lambda=0$ の場合と、非保存系として $\lambda=0.0139(1/\text{年})$ (半減期50年に相当)の2ケースについて検討した。図2にその検討結果を示す。図左のインパルス応答に対し、入力条件が矩形パルスおよびステップ関数の場合において、解析解と畳込み積分の結果が保存系・非保存系共によく整合している。

キーワード 放射性廃棄物処分, 畳込み積分, インパルス応答, 物質移行解析, 核種移行解析,

連絡先 〒213-0013 東京都調布市飛田給2-19-1 鹿島建設(株)技術研究所 TEL042-489-7423

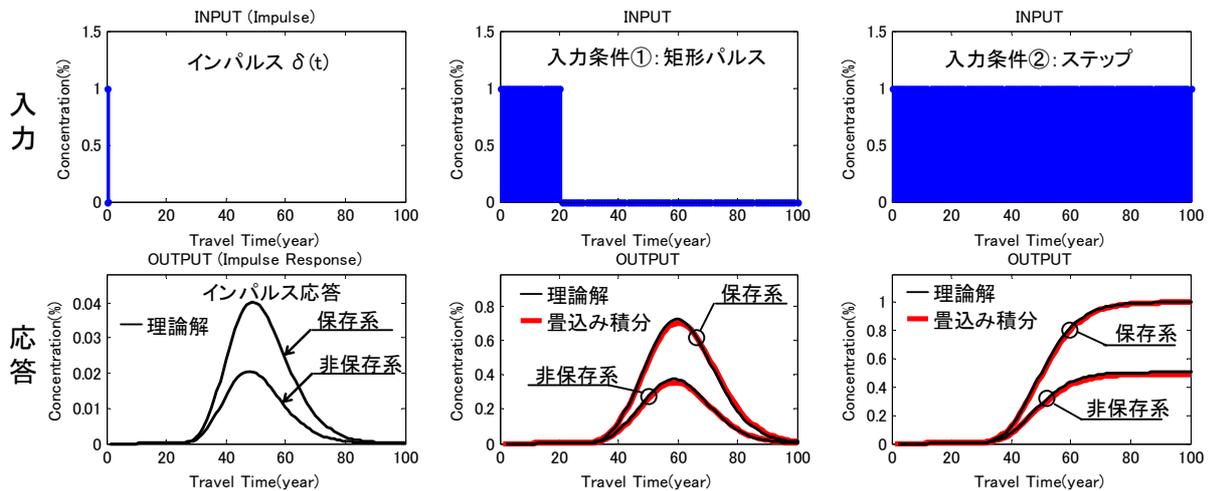


図2 畳込み積分の適用性の検証(解析解との比較検証)

4. 畳込み積分の適用性検証2(割れ目を含む不均質水理場の場合)

次に割れ目を直接モデル化できる数値解析手法(FracMan)を用い、解析解との比較が難しい割れ目を含む不均質水理場における畳込み積分の適用性を検証した。岩盤は図3に示す割れ目と基質部の組み合わせとしてモデル化した。表1に解析条件を示す。ここでは保存系のみとした。検証は上流から瞬時放出した仮想粒子の移行経路を求めるパーティクルトラッキング(インパルス応答)を基にした任意の入力関数に対する畳込み積分と、数値解析上で直接任意の入力関数を与えパーティクルトラッキングの結果を比較した。入力関数は、0、200、400、600年に均等量の粒子を放出した場合と、次第に放出量を増加させた場合とした。図4に結果を示したが、両者の結果はほぼ完全に一致しており、割れ目を含む不均質透水場においても畳込み積分が適用できることが示された。

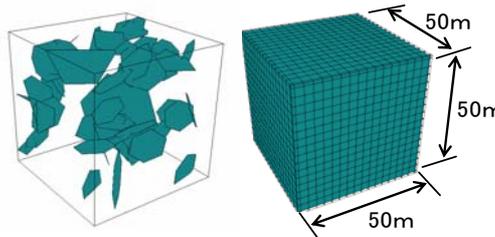


図3 割れ目・基質部のモデル化

表1 解析条件

岩盤物性	
透水係数	1.00E-08 m/s
間隙率	0.3
分割ピッチ	3 m
割れ目物性	
条数	50
透水量係数	1.00E-06 m ² /s
空間分布	一様(ポアソン分布)
方向分布	ランダム(Fisher定数=1)
長さ分布	べき分布
解析条件	
動水勾配	5 %

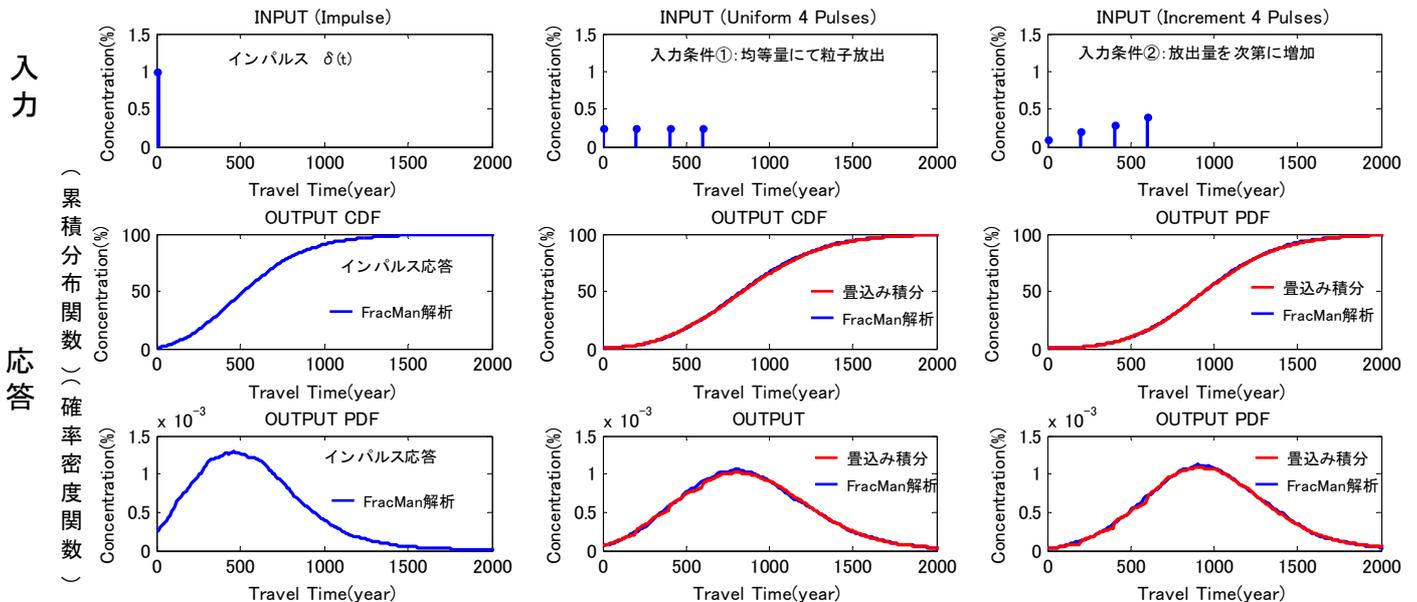


図4 畳込み積分の適用性の検証(割れ目を含む水理場)

5. おわりに

以上の検証により、天然バリアの地下水挙動/物質移行評価に畳込み積分が適用できることが明らかになった。これにより、LTIシステムであれば、割れ目を含む不均質な水理場においてもインパルス応答のみを知ることで、任意の入力に対し天然バリアの核種移行率が容易に求められることが分かった。

【参考文献】1)佐々木ら: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