

明石工業高等専門学校 学生会員 ○上山遥路
明石工業高等専門学校 正 会 員 稲積真哉

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災によって、東京電力福島第一原子力発電所（以下、福島第一原発）事故が起こった。これより、大気中に放出された放射性物質は風により運ばれ、降雨などにより海面や地表面へ降下し、東北・関東地方を含む広範囲の農地や市街地の地盤や森林等の陸域でヨウ素¹³¹I（以下、¹³¹I）、セシウム¹³⁴Cs、およびセシウム¹³⁷Cs（以下、¹³⁴Cs、¹³⁷Cs）が検出されている¹⁾。

この事故による地盤環境汚染範囲は過去に事例がないほど大きく、現状においても除染作業が継続している。一般に地盤における除染方法は、地盤表の5cm程度を掘削除去するものである²⁾が、様々な地盤特性の下で解析的に放射性物質の挙動を検討されておらず、安全性および妥当性が懸念されている。そのため、地盤に対する除染対策手法を新たに立案するために、地盤内の放射性物質の挙動を把握する必要がある。

放射性物質の地盤内浸透挙動を評価するために、移流分散方程式に半減期を考慮した項を組み込んだ。現地での測定結果と比較することによって、半減期を考慮した浸透・移流分散解析は、放射性物質の浸透挙動の妥当性を確認することが目的である。

2. 地盤中における放射性物質の挙動

地表面に沈着した放射性物質は、①自己崩壊に伴う濃度減衰、②地盤中での移動、③風雨による飛散・流出、④植物等による吸収により、その濃度を変化させる。しかしながら、③、④は極めて小さい値であることや、地盤中での浸透挙動を評価するため、本研究では、①、②のみを着目した。

自己崩壊に伴う濃度減衰は、放射性物質の半減期により支配される。¹³¹Iは、半減期が約8日のため、¹³¹Iの残存率は、すぐに0%になる一方、¹³⁷Csは、約30年のため、長期的な検討が必要となる。

地盤中での移動に関しては、放射性Csの存在形態と地盤の特性が重要な要因となる。地盤中での放射性Csは主

に1価の陽イオン（Cs⁺）として存在する。地盤中には、表面に多数の負電荷がある粘土鉱物や有機物等が存在しており、他の重金属類や陽イオンと同様に、放射性Csはこれらに負電荷に吸着する（イオン交換態）。

3. 放射性物質の地盤内浸透・移流分散解析

一般に、地盤内における物質移動解析は移流分散方程式によってモデル化される。この方程式に半減期を考慮した項を加えることで、放射性物質の移動解析に適用できると考えられる。また、浸透解析によって、流速分布、体積含水率分布を求め、この値を求めることで、移流・分散解析を実施することができる。2次元の飽和・不飽和の浸透流方程式は、以下の式によって表される。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial H}{\partial x_i} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

ここで、 k ：透水係数（m/day）、 H ：全水頭（m）、 θ ：体積含水率、 Q ：境界流束（m³）、 t ：時間（day）である。

半減期を考慮した移流分散吸着方程式は式（2）で表せられる。

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} + \rho_d \frac{\partial S}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - U_i \frac{\partial C}{\partial x_i} - \lambda (\theta C - S \rho_d) \quad (2)$$

ここで、 C ：放射性物質濃度（g/m³）、 ρ_d ：土の乾燥密度（g/m³）、 D_{ij} 、分散テンソル（m²/day）、 U_i ：ダルシー速度（m/day）、 λ ：減衰定数（1/day）、 S ：吸着率である。

4. 浸透・移流分散解析の妥当性の検証

4. 1 現地調査データ

福島第一原発から約70km離れた地点での事故発生から9、20ヶ月経過時の深度方向の¹³⁷Csの濃度分布を測定された³⁾。土壌試料採取には、国際原子力機関により標準的な深さ方向の土壌試料採取法と認められているスクレーパープレートを用いられた。¹³⁷Csの

深度分布の測定方法はガンマ線スペクトル分析により行われた。その結果より、どの時間経過時においても、深度が大きくなるにつれて、濃度が指数関数的に小さくなる傾向となっている。また、同時に調査対象地点の粒径測定により、シルト層であると判定された。

4. 2 解析結果と測定結果の比較に基づく妥当性の検証

解析断面はシルト層とし、シルトの各パラメータの代表値を表-1 に示す^{4), 5)}。また、既往の研究において、この地点における¹³⁷Csの分子拡散係数 D^* ならびに初期濃度 C_0 が報告されており⁶⁾、その数値を用いて解析を実施した(表-2)。

図-1 は、深度方向の測定値ならびに解析値の深度方向の濃度分布である。解析値の深度ごとの数値は、測定値と酷似しており、また、減少傾向も測定結果と同様な指数関数的である。また、時間が経過しても、これらは同様である。これより、半減期を考慮した浸透・移流分散解析は、放射性物質の地盤内浸透挙動に十分に適用できる妥当性が得られた。

5. おわりに

本研究では、放射性物質の地盤内浸透挙動の評価を行うために、移流分散方程式に半減期を考慮した項を組み込んだ。現地調査データの測定値と解析値を比較することで、半減期を考慮した浸透・移流分散解析は、放射性物質の地盤内浸透挙動に十分に適用できる妥当性が得られた。今後は、土質特性ごとの放射性物質の浸透挙動を把握し、現状の除染方法を評価する必要がある。

【参考文献】

1) 文部科学省：文部科学省による放射線量等分布マップ（放射性セシウムの土壌マップ）の作成について、文部科学省，2015

2) 環境省：除染ガイドライン（改訂版），環境省，2015

3) 斎藤公明，青木和弘，谷畑勇夫：土壌中における放射性物質の深度分布の確認，独立行政法人日本原子力研究開発機構，2015

4) 地盤工学会：土質試験-基本と手引き-，地盤工学会，p.91，2010

5) 井上頼輝，森澤眞輔：放射性物質の土壌と水との間の分配係数値，日本原子力学会誌，Vol.18，pp.524-534，1976

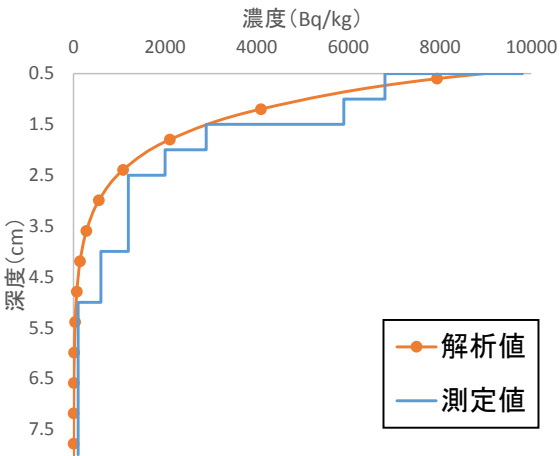
6) 鈴木和之，小宮由里子，南 弘征，水田正弘：土壌中における放射性セシウムの深度分布に関する解析，日本計算機統計学会シンポジウム論文集，Vol.27，pp.11-14，2013

表-1 シルトのパラメータ

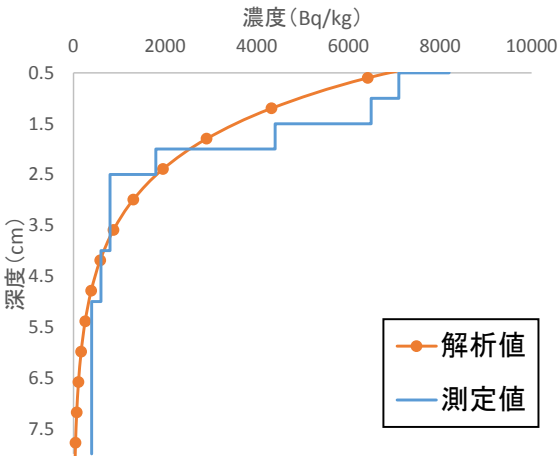
透水係数 k (m/sec)	1.0×10^{-6}
体積含水率 θ	0.4
乾燥密度 ρ_d (g/m ³)	1.2×10^6
分配係数 K_d (g/m ³)	8.0×10^{-3}

表-2 ¹³⁷Csのパラメータ

半減期 $T_{1/2}$ (years)	30.2
分子拡散係数 D^* (m ² /day)	7.2×10^{-6}
初期濃度 C_0 (Bq/m ²)	3.0×10^8
分散長 α (m)	0.01



(a) 9ヶ月経過時



(c) 20ヶ月経過時

図-1 深度方向における¹³⁷Csの解析値と測定値の濃度分布