

## 飽和二層地盤における放射性物質の移動特性に関する数値解析

|            |      |       |
|------------|------|-------|
| 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  |
| 大阪大学       | 非会員  | 福岡将士  |
| トームック      | 非会員  | 宍戸賢一  |

## 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、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た。人体への放射線汚染を防ぐために各地で除染作業が行われ、事故発生から5年経過した現在では、除染作業は収束に向かっていている。しかしながら福島第一原発から半径20km圏内の市町村では、未だに帰宅困難な地域も存在している<sup>1)</sup>。

この事故における地盤環境中汚染範囲は過去に事例がないほど大きく、平成23年8月に環境省が行った調査によると、福島第一原発の20km圏内の2地点で微量ながらも放射性物質が検出されている<sup>2)</sup>。つまり、地下水に放射性物質が浸透し、それが起点となって地盤内を拡散する状況を考慮する必要がある。したがって本研究では、地下水の流れを存在する地盤において半減期を考慮した浸透・移流分散解析を行い、地下水による拡散範囲を決定することを目的とする。

## 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。

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<sup>+</sup>)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。

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、 $k$ は透水係数(m/day)、 $H$ は全水頭(m)、 $\theta$ は体積含水率、 $Q$ は境界流束(m<sup>3</sup>)、および $t$ は時間(day)である。

半減期を考慮した移流分散吸着方程式は式(2)で表される。

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

ここで、 $C$ は質濃度(g/m<sup>3</sup>)、 $\rho_d$ は土の乾燥密度(g/m<sup>3</sup>)、 $D_{ij}$ は分散テンソル(m<sup>2</sup>/day)、 $U_i$ はダルシー速度(m/day)、 $\lambda$ は減衰定数(1/day)、および $S$ は吸着率である。

## 4. 地下水による放射性物質の浸透挙動

本解析では、図-1のような解析断面を設定した。上層が砂、下層が粘土の互層断面であり、飽和状態で断面内に地下水が流れている。解析断面における青色の実線で示された境界は断面表層の左端から2mから3mの位置にかけて1mの範囲に<sup>137</sup>Csが降下し、地下水によって拡散することを想定している。砂、粘土の解析に必要なパラメー

タは、代表値を用いた<sup>3),4)</sup>(表-1)。<sup>137</sup>Csのパラメータは、福島第一原発事故の被災地の調査データから分子拡散係数 $D^*$ を引用した<sup>5)</sup>(表-2)。また、本研究の時間的濃度変化には、相対濃度を用いた。相対濃度とは断面表層に沈着している濃度を100%として表した無次元的な濃度のことを指す。つまり、実際の初期濃度に相対濃度を乗ずることによって、その地点における濃度を求められる。これらの条件の下で半減期を考慮した移流分散解析を行った。

図-2は、<sup>137</sup>Csの濃度の推移である。10年経過時、20年経過時の砂層においては、地下水の流れ方向に大きく浸透していることが確認できる。また、100年経過時の表層の濃度は、0%になっており、地下水の影響を大きく受けていることが判る。しかしながら、<sup>137</sup>Csが粘土層の上部で滞留しているように見える。これは、粘土の透水係数が小さいために、浸透が抑えられていると考えられる。鉛直方向の浸透が抑制される一方で、汚染範囲は水平方向に広がっていることが確認できる。

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。そして、地下水が存在する断面において、半減期を考慮した浸透・移流分散解析を行い、地下水による濃度の拡散を解析的に評価した。それによると、砂層では地下水の流れの影響を大きく受け、広範囲に拡散する。しかし、粘土層では、地下水の影響はあまり受けず、粘土層の上方で横方向に拡散する。したがって、対策法を挙げるとするならば、粘土層までに遮水工を打ち込むなどがある。

今後は、次なる課題として掲げられている放射性廃棄物の最終処分場の安全性の検討を行いたい。

【参考文献】

- 1)放射性物質汚染対処特措法施工状況検討会：放射性物質特措法の施工状況に関するとりまとめ，環境省，pp.2-11，2015
- 2) 環境省：被災地の地下水質のモニタリング調査における放射性物質濃度の測定結果（第4報）及び有害物質濃度の測定結果（第2報）について，環境省，2015
- 3) 地盤工学会：土質試験-基本と手引き-，地盤工学会，p.91，2010
- 4) 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
- 5) 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

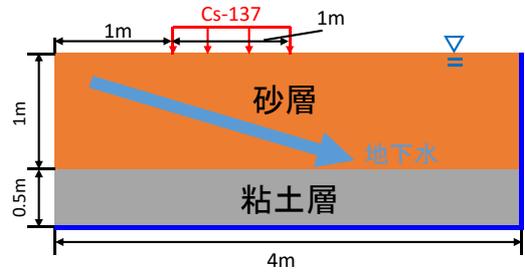


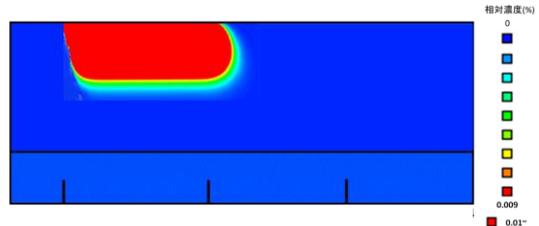
図-1 解析断面

表-1 土質のパラメータ

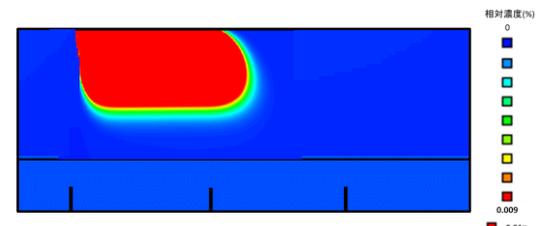
| 土質                                | 砂                    | 粘土                   |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------|
| 透水係数 $k$ (m/sec)                  | $1.0 \times 10^{-5}$ | $1.0 \times 10^{-7}$ |
| 体積含水率 $\theta$                    | 0.4                  | 0.4                  |
| 乾燥密度 $\rho_d$ (g/m <sup>3</sup> ) | $1.5 \times 10^6$    | $9.5 \times 10^5$    |
| 分配係数 $K_d$ (g/m <sup>3</sup> )    | $4.0 \times 10^{-3}$ | $1.0 \times 10^{-2}$ |

表-2 <sup>137</sup>Csのパラメータ

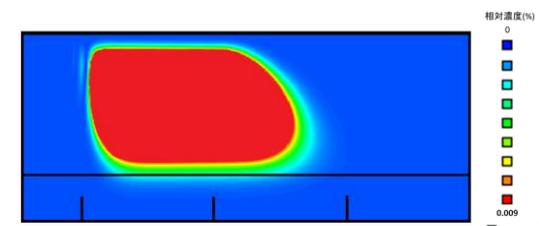
|                                    |     |                      |
|------------------------------------|-----|----------------------|
| 半減期 $T_{1/2}$ (years)              |     | 30.2                 |
| 分子拡散係数 $D^*$ (m <sup>2</sup> /day) |     | $7.2 \times 10^{-6}$ |
| 分散長 $\alpha$ (m)                   | 縦方向 | 0.01                 |
|                                    | 横方向 | 0.001                |



(a) 10年経過時



(b) 20年経過時



(c) 100年経過時

図-2 地下水による<sup>137</sup>Csの浸透推移