

流域水循環系における降下放射性核種の動的挙動解析

(株)地圏環境テクノロジー ○正会員 森康二・非会員 多田和広・正会員 田原康博
 東京大学 正会員 登坂博行

1. 目的

福島第一原子力発電所事故により環境中に放出した放射性核種の分布は、その後のモニタリングにより継続的な実態把握が進められている。地表面に沈着した放射性核種は、流域における水循環プロセス、除染や利水等の人間活動の中で時間・空間的に再配置される。地域毎に異なる変化の状況に応じた効果的な除染を行うためには、事故後の放射性核種の短期的・長期的挙動を予測するツールの活用が有効となる。著者らは、流域水循環系における降下放射性核種の動的挙動を解析する3次元数値シミュレータの開発を行ってきた¹⁾。本数値シミュレータの特徴は、地上、地下における水、土及び溶存態・懸濁態核種の輸送現象を一体的に取り扱う点にある。開発シミュレータの妥当性は、斜面プロットスケールの人工降雨浸食実験データの再現解析や小流域の核種移行解析等へ適用し検証がなされてきた。

2. 対象システムの概念

陸域の大気、地上及び地下空間は、降水を時間・空間的に再配置させる流域水循環の場であり、ここでは大気中の粒状性物質や陸面上の土砂、栄養塩及び熱量等が相互に影響を及ぼしながら輸送される。大気中に飛散・拡散した放射性核種は、湿性・乾性沈着によって降下する。地表面に沈着した放射性核種の移行形態は、土地・水利用や植生被覆等の地上状態によって異なり、流域の水（液相）、粒状性懸濁物質（固相）の両者を主要な輸送媒体とする。

図1に流域水循環系における降下放射性核種の移行形態を模式的に示した。本研究では大気中の輸送現象は扱わない。陸面に与えられた面的負荷のもとで、地表水（河川・渓流水、斜面流）、地下流体（水、空気）、土砂（落葉・落枝や粉塵も含めた懸濁態物質）を輸送媒体とした放射性核種の動的再配置を考える。放射性核種は水や土砂の輸送媒体間を吸着・離脱により移動するものとし、水相中の溶存態核種と土砂固相中の懸濁態核種の双方を考える。

3. 流体-土砂-放射性核種輸送計算モデル

対象システムを記述する支配方程式は、流体、土砂、放射性核種に関する単位時間・単位体積あたりの質量収支式により構成される。流体は地下流体（水、空気）の一般化ダルシー則と地表流のマニング則を同型式の質量収支式で記述し両者の完全連成を考慮する²⁾。土砂は掃流砂、浮遊砂に加えて、

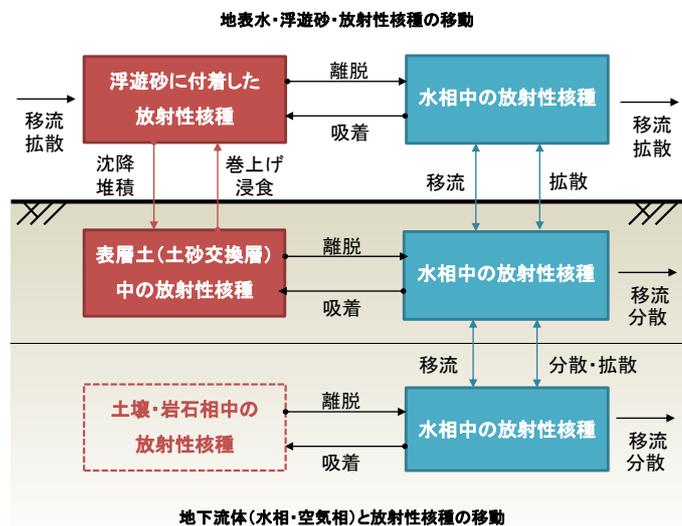


図1. 解析対象とする流体・土砂・核種共存系

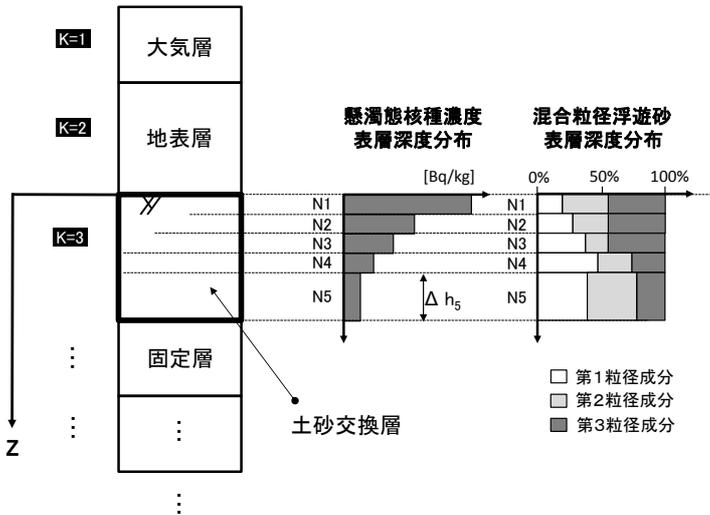


図2. 表層土壌内の沈着 Cs 深度分布の取扱い

細粒径成分の粘着性材料や他の有機物等を含めた懸濁態物質として一般化し、地表水中における粒径別の質量収支式を用いた。放射性核種は水相中の溶存態核種、浮遊砂等に吸着した懸濁態核種、土壌・岩石へ吸着し固定された核種について各々の物質収支式を適用した。これらの基礎式を積分差分法により離散化し、気相圧力、飽和度、粒径毎の浮遊砂濃度、溶存態及び懸濁態核種濃度について解く。本解析機能は統合型水循環シミュレータ GETFLOWS へ実装した¹⁾²⁾。なお、地表下数cm~数十cm付近における沈着核種の深度分布を考慮するため、土砂交換層内を複数のレイヤーに分割し、浮遊砂、放射性核種の深度方向の変化をモデル化できるよう機能拡張を行った。土砂交換層内の粒径別浮遊砂やそこに吸着した核種の存在量はレイヤー毎に求められる(図2)。これにより、除染によって削ぎ取られた表土やその後の再堆積等に伴う放射性核種の分布とその変化を予測することが可能となり、地域毎の特徴を踏まえた除染の実施頻度や優先順位の検討等に役立つ情報提供が可能となる。

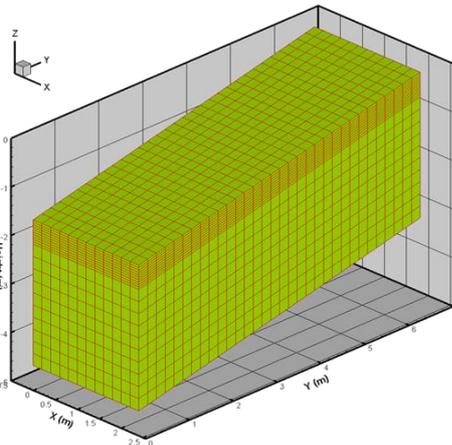


図 3. 斜面浸食実験データ解析モデル

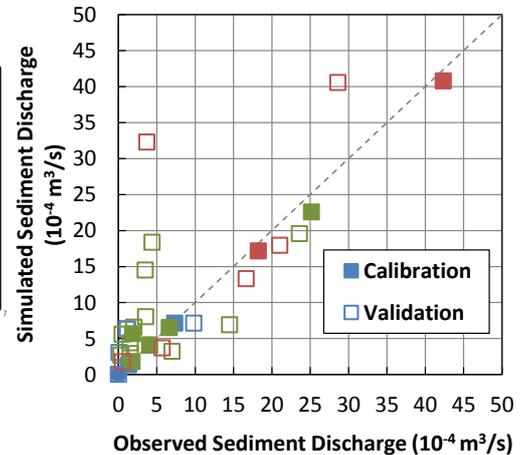


図 4. 流出土砂量の計算値と実測値

4. 解析事例

本研究で開発したシミュレータは、これまでに斜面浸食実験データの再現解析や小流域の核種移行解析へ適用され、定性的・定量的な検証が重ねられてきた。斜面傾斜や被覆率の異なる複数の試験プロットで実施された人工降雨浸食実験データ³⁾の再現解析では、プロット毎に選定した一部の試験ケースでキャリブレーションを行い、それらの結果を残りのケースへ適用し、再現性を検証した(図3)。大部分の計算結果は実測結果と良い対応を示す結果となったが、一部の検証ケースに差異が認められた

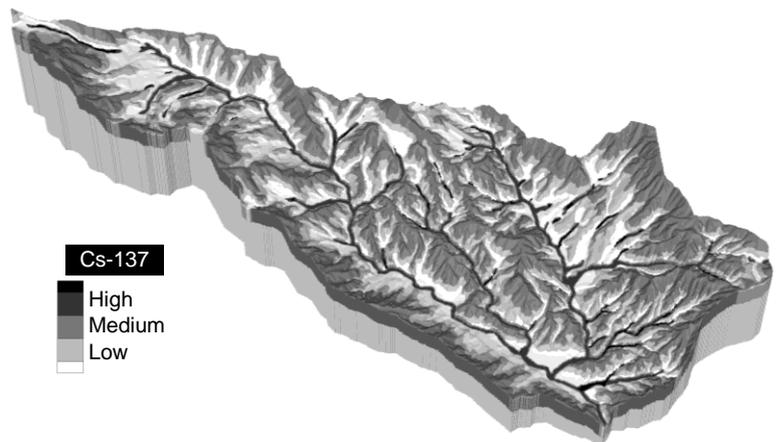


図 5. 地上の懸濁態セシウム分布の解析結果例

(図4)。この原因としては、同一プロットの同程度の降雨強度及び被覆率に対する実験結果の中でも流出量に数倍のばらつきがあり、雨滴粒径や斜面透水性分布の不均質性や実験ケース毎の初期状態の相違等の関与が考えられる。また、幾つかの小流域を対象として、雨滴や水流による地表面侵食・堆積過程に加え、陸面に沈着した放射性核種が移流、拡散・分散、吸着・離脱等の輸送過程を解析した。図5は模擬流域(約17km²)を対象とした解析事例より、ある時間断面の地表面における懸濁態セシウムの濃度分布を示したものである。侵食域は土壌水分量(地下水位)とも関係し、山頂の急斜面よりも谷地形周辺の緩斜面に生じる。斜面で生産された土砂は水流と共に河川に流入するため、懸濁態セシウムも同様に河川に集まりやすい傾向が見られる。

参考文献

- 1) 森康二, 多田和広, 田原康博, 登坂博行: 水・土砂輸送系における降下放射性核種の数理モデリング, 日本地下水学会講演会講演要旨, 168-173, 2012
- 2) Tosaka H., Itho K. and Furuno T.: Fully Coupled Formulation of Surface flow with 2-Phase Subsurface Flow for Hydrological Simulation, Hydrological Process, 14, 449-464, 2000
- 3) Emmanuel J.Gabet, Thomas Dunne: Sediment detachment by rain power, Water Resources Research, Vol.39, No.1, 2003