

土壌侵食量及びセシウム流出量の計算

近藤 昭彦（千葉大学）

恩田 裕一（筑波大学）

1. 調査目的

地表面に沈着した放射性セシウムは、侵食土砂の斜面及び河道を通じた運搬現象に伴う放射性物質の移行により、再配分が進行していくと考えられる。

本課題では放射性物質の移行の主要プロセスである土砂の移動に伴う放射性物質の再配分過程を評価することを目的とした。なお、ここでは放射性セシウムとしてセシウム 137 を扱う。

まず分布型 USLE (Universal Soil Loss Equation) モデルを用いて、福島第一原発 80 km 圏に含まれる主要河川流域及び阿武隈川流域を対象としてグリッド単位で侵食量を求めた。次に地形勾配に沿う侵食土砂の移動を予測する移行モデルを構築し、平成 23 年(2011 年)から平成 53 年(2041 年)までの 30 年間の土砂移動に伴うセシウム 137 の沈着量の分布の変化の計算を試みた。USLE モデルは平成 23 年度の調査で作成されたプロトタイプを基に、平成 24 年度の調査で地形、植生等の入力情報の高精度化を図るとともに、平成 23 年 6 月の調査以降継続している USLE 標準プロットにおける観測データに基づき改良された USLE モデルを用いて侵食量の再計算を行った。また、阿武隈川を含む福島第一原発から 80 km 圏に含まれる 36 の流域 (DEM: Digital Elevation Model により自動抽出した流域) を対象として、セシウム 137 の沈着量分布の経年変化、河川を通じたセシウム 137 流出量を試験的に計算した。

2. 調査内容

(1) 地理情報（空間情報）の整備

侵食量の分布を画像として可視化するために、グリッドデータ（メッシュデータあるいはラスタデータとも呼ばれる）として整備されている地理情報を収集し、USLE モデルに組み込んだ。投影法は UTM (ユニバーサル横メルカトル) 図法の第 54 帯、空間分解能は 25 m とし、阿武隈川流域と福島第一原発から 80 km 圏を含む東西 3,960 ピクセル、南北 6,360 ラインの画像データに変更し、他のモデル計算結果との整合性を図った。

① 航空機モニタリングマップ

今回の計算は阿武隈川を含む広域を対象とするために、第 4 次（基準日：2011 年 11 月 5 日）航空機モニタリングマップをセシウム 137 移行計算の初期値として用いた。航空機モニタリングマップは 25 m グリッドに内挿されて格納されているセシウム 137 の沈着量 (Bq/m^2) データであり、複数の地理情報と重ね合わせて解析を行うことができる。

② 植生及び土地利用

環境省による自然環境保全基礎調査成果である第 2 回～第 5 回植生調査集約シェープファイルを生物多様性センターホームページよりダウンロードして利用した。作成年度は平成 6～10 年度(1994～1998 年度)であり、最新の成果ではないが、広域を対象とした場合には植生・土地利用変化域の割合は小さく、データがベクター形式で提供されているため、

任意の分解能のグリッドデータに変換して用いることができる。そこで、このデータから UTM54 帯、空間分解能 25 m のグリッドデータを作成して解析に利用した。

③地形情報

国土地理院が提供している 10 m 分解能 DEM を利用し、航空機モニタリングマップと同じ空間分解能のグリッドデータに変換し、以下の 2 次情報を抽出し、計算に使用した。

- i) 斜面の傾斜角 ($0\sim 90^\circ$)
- ii) 落水線図 (FD: Flow Direction) : 各グリッドの下流側グリッドの方向 (8 方位)
- iii) 上流側のグリッド数 (FA: Flow Accumulation) : 任意のグリッドにおける流域面積に相当
- iv) 地形指数 (TPI: Topographic Index) : 飽和帯発生域すなわち河道の特定に使用

TPI は FA を用いて、 $TPI = A / \tan(\theta) = FA * 25 * 25 / \tan(\theta)$ で定義できる。ここで、A は任意のグリッド (25 m 分解能) の上流側の流域面積、 θ は斜面勾配である。大きな TPI 値は集水性が大きく (流域面積が大)、飽和帯が発生しやすい (緩傾斜) ことを表し、流出寄与域と呼ばれる水流が発生し、侵食が起こりやすい河道近傍を抽出することができる。セシウム 137 移行計算では斜面を運搬されるセシウム 137 が $TPI > 15$ の領域 (流出寄与域) に達したら河道を流下させ、流域末端における積算値 (Bq/year) を求めた。

④植被率

米国の地球観測衛星 Terra に搭載された MODIS センサーによる 250 m 分解能の NDVI (正規化植生指標: Normalized Difference Vegetation Index) から植被率を計算した。現状ではこれより空間分解能が高い時系列 NDVI データは存在しない。使用した MODIS/NDVI は東京情報大学 (千葉市若葉区) で受信された MODIS 画像を幾何補正し、5 日ごとの MVC (Maximum Value Composit) で雲域を除去し、さらに、TWO (Temporal Window Operation) 法によるスムージングで NDVI の季節変化を抽出したデータセットである。

東日本大震災が発生した平成 23 年の NDVI 画像を用いて年平均 NDVI 画像を作成した。ただし、計算で使用する土地利用・植生データセットが 25 m 空間分解能であるため、両者を重ねた場合、NDVI 値と土地利用・植生項目の間で齟齬が生じることがあり (例えば、NDVI の高い都市域、NDVI の低い森林域)、USLE 式による侵食計算の誤差の要因になる。そこで、土地利用・植生データと NDVI 画像を重ねて土地被覆と NDVI 値の対応関係を修正した。

⑤流域の抽出

海岸線に相当するグリッドから上流を探索するアルゴリズムにより計算領域における流域の自動抽出を行った。沿岸部では直接太平洋に流出する狭小な流域が多数抽出されるため、流域面積が 10 km^2 より小さな流域は計算対象から除外した。その結果、阿武隈川流域と合わせて 36 流域が抽出できた。なお、4 流域は流域の範囲が航空機モニタリングによる沈着量データが存在しない福島第一原発 10 km 圏にかかる。また、南西部の一部では 80 km 圏の外側で太平洋に流出するため計算からは除外している。

(2) USLE 計算式

USLE 式による侵食量 (t/ha/year) は次式で計算できる。

$$A = RKLSCP \quad (1)$$

ここで、

- A : 年間土壌侵食量 [$t \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$]
- R : 降雨流出の侵食力ファクタ (Erosivity factor) [$\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ hour}^{-1} \text{ year}^{-1}$],
- K : 土壌の受食性ファクタ (Erodibility factor) [$t \text{ ha MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$],
- L : 斜面長ファクタ (Slope length factor) [無次元],
- S : 斜面勾配ファクタ (Slope steepness factor) [無次元],
- C : 被覆管理ファクタ (Cover management factor) [無次元],
- P : 保全対策ファクタ (Conservation practice factor) [無次元]。

各項の計算式は USLE 標準プロットにおける観測及び文献調査から求め、2. (1) 地理情報の整備で収集した地理情報を用いて土地被覆ごとに計算を行った。平成 25 年度の USLE 標準プロットにおける観測によって得られた新しい推定式を組み込んだ。

(3) 土砂移動に伴うセシウム 137 の斜面移動と河川を通じた移行計算

USLE 式から求められる侵食量は年間の侵食量である。よって、土砂移動に伴うセシウム 137 の移行は時間ステップ ΔT を 1 年として、グリッドごとに生産された土砂（侵食量）を下流側グリッドに移動させた。その際、 ΔT の間に下流側に移動する土砂量を求めるために SDR (Sediment Delivery Ratio) を設定した。SDR は生産された土砂のうち、下流側グリッドに移動する土砂の割合であり、次式で定義できる。

$$\text{SDR} = (\text{下流側へ移動する土砂量}) / (\text{USLE 式で計算された侵食土砂量}) \quad (2)$$

SDR は最大値が 1 であるが、その値は経験的に決定する必要がある。現状では日本における値は不明であるため、SDR=1 を設定することにより土砂移動の最大値を計算した。SDR=1 とした場合、各グリッドで生産された土砂は全量が 1 年間でグリッドサイズの 25 m を移動することになる。植生で覆われた緩傾斜の斜面における観察によると、地形変化が年単位で可視化できるほど進行している訳ではなく、概ね妥当な値と考えた。

運搬される土砂に含まれるセシウム 137 の濃度は沈着量 (Bq/m^2) と流出（侵食）土砂のセシウム 137 濃度 (Bq/kg) との比（侵食土砂濃度係数： S_c ）を土地利用項目ごとに求め、沈着量に掛けることにより求めた。なお、 S_c の値は蓄積された侵食量観測成果により改善された値を用いた。

斜面を移動する土砂は崩壊が生じない限り、急速に移動することはまれである。しかし、斜面基部、谷底の飽和帯が発生しやすい領域に土砂が到達すると出水時に侵食され、下流に運搬される。そこで、TPI によって飽和帯発生域（流出寄与域）を特定し、この領域に土砂が到達すると一定量が水流によって取り除かれるとした。今回は河道近傍に到達したセシウム 137 の 100% が河川に流出するとして計算を行った。現実には河道内における滞留時間を考慮しなければならないため、セシウム 137 流出量の最大値を計算していることになる。なお、放射性壊変による減衰はセシウム 137 の半減期 30.1 年に基づき考慮してある。

3. 結果と考察

現場における侵食現象は場の条件に起因する多様性が極めて大きな現象であるが、ここで得られる計算結果はあくまでも単純な土地条件を想定した上での結果である。またモデルによる計算結果の検証が済んでいないため、ここでは侵食量のマクロな分布及び後段ではセシウム 137 沈着量の変化速度に対するオーダーを理解することを目標としている。

(1) 侵食量の分布

図-1 に実測値に基づき改善された USLE 式と空間情報を用いた年間の土壌侵食量推定値の分布図を示す。水田の侵食量は福島県伊達郡川俣町山木屋地区における観測に基づき 0.97 t/ha/year の定数を与えた。耕作畑、草地、森林の平均侵食量はそれぞれ 1.35 t/ha/year、0.04 t/ha/year、0.05 t/ha/year であり、耕作畑の侵食量が相対的に大きい。なお、計算上、都市域・市街地の侵食量はゼロとしている。

(2) セシウム 137 流出量と沈着量の経年変化

福島第一原発から 80 km 圏に含まれる流域と阿武隈川流域におけるセシウム 137 の沈着量の経年変化を試験的に計算した。阿武隈川流域におけるセシウム 137 の沈着量は、全体として経時的に減少する傾向にあるが、30 年後でも福島第一原発北西方向の現在の帰還困難区域に相当する地域では 1,000 kBq/m² 以上の領域が残存するという計算結果となった。また、この試算結果から、事故後初年度における阿武隈川を通じて流出したセシウム 137 の総量は 1.9×10^{13} Bq と試算された。阿武隈川における初年度のセシウム 137 流出量の実測値（岩沼地点）は 1.5×10^{13} Bq（平成 24 年度の調査）であり、両者のオーダーが一致した。

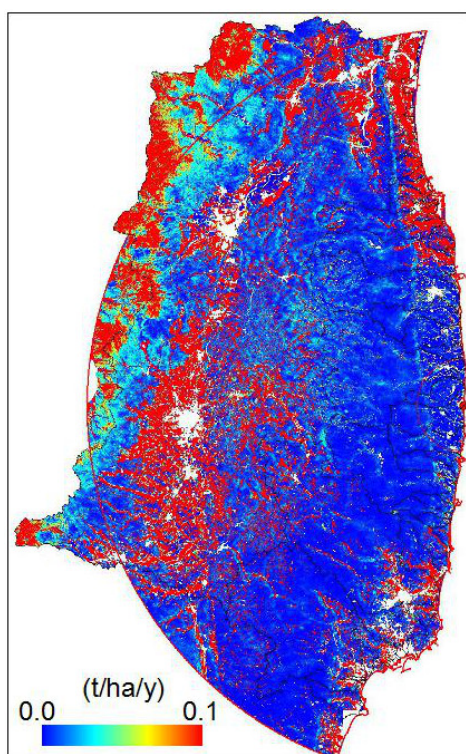


図-1 福島第一原子力発電所80 km圏及び阿武隈川流域における土壌侵食量推定値の分布