# 異なる陸域解析モデルによる 福島第一原子力発電所事故に起因する<sup>137</sup>Cs 流出率の比較

北村 哲浩<sup>1\*</sup>、今泉 圭隆<sup>2</sup>、山口 正秋<sup>1</sup>、油井 三和<sup>1</sup>、鈴木 規之<sup>2</sup>、林 誠二<sup>2</sup> <sup>1</sup>独立行政法人日本原子力研究開発機構 (〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33) <sup>2</sup>独立行政法人国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

# Comparative Study on Annual <sup>137</sup>Cs Discharge Rates after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident from Two Distinct Watershed Simulation Models

Akihiro KITAMURA<sup>1\*</sup>, Yoshitaka IMAIZUMI<sup>2</sup>, Masaaki YAMAGUCHI<sup>1</sup>,

Mikazu YUI<sup>1</sup>, Noriyuki SUZUKI<sup>2</sup>, and Seiji HAYASHI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Japan Atomic Energy Agency (4-33 Tokai, Naka, Ibaraki 319-1194 Japan) <sup>2</sup>National Institute for Environmental Studies

(16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506 Japan)

#### Summary

Annual discharge rates of radioactive cesium through selected rivers after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident were simulated using two distinct watershed models. One is the Soil and Cesium Transport, SACT, model that was developed by Japan Atomic Energy Agency. The other is the Grid-Catchment Integrated Modeling System, G-CIEMS, which was developed by National Institute of Environmental Studies. We compared the results from both models for the Abukuma, Ukedo, and Niida rivers in this study. While the components and assumptions adopted by these models differ, the estimates from both methods were within the same order of magnitude. We also compared the simulation estimates for <sup>137</sup>Cs discharge to the ocean against estimates available from field monitoring and the results matched acceptably.

Key Words: The Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, Radioactive cesium, Discharge rate, River basin, Environment

## 1. はじめに

東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故由来の放 射性物質のうち、事故から3年以上経過した現在、被ばくの 観点で重要な核種は放射性セシウム、特に半減期が約30年 と長い<sup>137</sup>Csである。従って、放射線による人への健康影響低 減のためには、環境中の<sup>137</sup>Csがどこに溜まりやすく、どこに 流れやすいかを把握した上で、被ばく対策や核種移行対策な どを講じる必要がある。そのためには、<sup>137</sup>Csの環境中での移 行挙動(環境動態)や現在の分布を明らかにするとともに、将 来の分布を予測することが重要である。

日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)福島環境安 全センターと国立環境研究所(以下、国環研)環境リスク研究 センターでは、数年から数十年以上の期間を対象として、環 境中における<sup>137</sup>Csの現在から将来にわたる分布を予測評価す る解析モデルの開発を進めている。両解析モデルは異なる設 計思想に基づき構成されているため、目的や条件に応じた適切な解析モデル選択を可能とするための比較研究が必要である。その最初の試みとして、両解析モデルの結果が基本的に整合しているかどうかの比較検討を行ったので、本稿でその内容を報告する。なお、このような解析モデルで予測ができる重要な量として<sup>137</sup>Csの流出フラックスが挙げられるが、上記の二つの解析モデルは初期条件として異なる情報を用いるため、両者の結果を比較する際はその点に留意する必要がある。ここでは二つの解析モデルの整合性を調べるため、幾つかの流域について海への<sup>137</sup>Csの流出率(流出量/初期沈着量)を算出しそれらの値を比較検討した。対象河川としては事故直後の放射性セシウム沈着量が高く、比較的規模の大きい阿武隈川、請戸川、新田川の3水系とした(図1)。比較の結果、解析モデルの構成内容や用いた仮定に異なる点があるものの、地表からの<sup>137</sup>Csの流出率はともに1%に満たないことが示さ

\*Corresponding author: TEL: 029-282-1111, FAX: 029-282-9328, E-mail: kitamura.akihiro@jaea.go.jp



図1 今回の解析で対象にした福島県浜通り側の3つの河川流域

れた。以下に両解析モデルの概要と算出した流出率の比較検 討結果を紹介する。また観測に基づく算定値との比較につい ても言及する。

## 2. 方法

ここでいう陸域解析モデルとは、福島での原子力発電所の 事故で環境中に放出された<sup>137</sup>Cs がその後地表に降下し陸域 や河川でどのように移動していくかを、数値的に解析するシス テムのことである。原子力機構の解析モデルは地表に降下して からの<sup>137</sup>Csを対象に主要な移行経路の一つと考えられる土砂 移動(侵食、運搬、堆積)を考慮した簡易的な移行解析手法 であり、国環研の解析モデルは環境中に放出された<sup>137</sup>Csを対 象に移行経路を大気・水・土壌・底質などの媒体(多媒体) 間での輸送を計算して推定するもので、それぞれ異なる特徴 を有している。以下に、それぞれの解析モデルの概要を紹介 する。

# (1) 原子力機構の陸域解析モデル SACT

<sup>137</sup>Csを含むセシウムは土壌もしくは土砂粒子に含まれる粘 土鉱物に吸着することが古くから知られており<sup>11</sup>、環境中での <sup>137</sup>Csの移動は、地表面での降雨を起点とした表流水による土 壌の侵食、その後の土砂の運搬・堆積および再移動とともに、 河川での水流による土砂粒子の運搬・堆積及び再移動とともに、 河川での水流による土砂粒子の運搬・堆積及び再移動とともに、 河川での水流による土砂粒子の運搬・堆積及び再移動に伴う ものが主なプロセスと考えられる。他方で溶存成分としてのセ シウムについても考慮すべき場合がある。そこで、原子力機構 では対象とする移動現象や時空間スケールに応じて適切な解 析モデルを選択し解析を実行するために、複数の解析モデル を組み合わせた<sup>137</sup>Csの移動予測モデルの開発を進めている<sup>21</sup>。 この内、地表面での土壌流亡による<sup>137</sup>Csの移動の場合、広域 かつ1年以上の長期的な移動現象については、土壌流亡予測 式(以下、USLE:Universal Soil Loss Equation)と土砂の 運搬・堆積・再移動に関する水理公式を組み合わせた土砂・ Cs 移行(以下、SACT:Soil (Sediment) and Cesium (Con-



<sup>※</sup>シート侵食(面状侵食):面状王瑞による地表面の削剥・侵食作用。 ※リル侵食(雨溝侵食):土壌の雨食の一種。雨水や融雪水により土壌に小溝をつくるもの。(新版地学辞典)



taminant) Transport)解析モデルを開発し解析を進めている<sup>3</sup>。 図2に本解析モデルの計算ステップを示した。本解析モデ ルは地理情報システムソフトウェアに組み込まれた解析モデル 構築機能を活用することにより、地表の河川や斜面を含む対 象領域全体を100 m×100 mのメッシュで分割し、分割した各 小領域(セル)において、土壌の侵食、土砂の運搬・堆積お よび再移動を計算するものである。以下に計算手順の概要を

示す。

まず、各セルにおける年間流亡土量をUSLEにより計算する。 USLE は畑地土壌の浸食を予測するために作られた統計予測 モデルで、降雨係数、土壌係数、地形係数、作物係数、保 全係数の五つの係数の積で定義されるものである。この式よ り単位面積から1年間に流出する平均的な土砂の量(流亡土 量)が与えられる。なお、表流水による侵食は規模やプロセ スに応じて様々な形態があるが、土壌に沈着した放射性セシ ウムは広い範囲で深さ数センチ以内にとどまっていることか ら、ここではシート侵食(面状侵食)とリル侵食(雨溝侵食) による土壌流亡を対象とした<sup>3)</sup>。

次に、セル間で運搬あるいはセル内で堆積し得る土砂量を 水理公式により求める。本解析モデルでは、河川や斜面を含 む流域全体を流路とみなした上で土砂粒子の種類を砂、シル ト、粘土の3 種類に区分けしてそれぞれについて独立に計算す る。具体的には砂は掃流、シルトおよび粘土は浮流の形態で 移動するものと仮定し、掃流については DuBoys 式<sup>4)</sup>を、浮 流については Partheniades-Krone 式<sup>5,6)</sup>を適用した(これら の式を採用した主な理由は、要求されるパラメータが少ないた め不確実性を抑制でき、比較的迅速な計算を行うことができ るためである)。なお、ここでは砂:2 mm ~ 63 µm、シル ト:63 µm ~ 4µm、粘土:4µm 以下のように土砂粒子の種類 を区分した。

これらの結果を用いて上流から順番にセル間の土砂移動を 計算することにより、流域全体の土砂の移動量を算出する。 本解析モデルでは、平水時における表流水の有無に関わらず、 すべての領域に同じサイズの計算格子を設定し、河川に相当す るセルではその下流方向にあるセルに、またそれ以外のセル では、最大傾斜方向にあるセルに物質が移動するものとして 計算を行った。なお、この計算においても、上述した土砂粒 子の種類の定義に従って砂、シルト、粘土に分けた上で、そ れぞれについて独立に計算を行うこととし、各流域の最上流部 のセルから最下流部のセルまで、土砂の入出力をセル毎に順 番に計算した。

最後に、土砂移動を<sup>137</sup>Csの移動に置きかえることで、流域

全体における<sup>137</sup>Csの移動を計算する。ここでは、文部科学省 が公表している土壌中の<sup>137</sup>Csの沈着量の分布を初期値として、 <sup>137</sup>Csの土壌中の深度分布ならびに粒度依存性、<sup>137</sup>Csの放射性 壊変を考慮した上で、土砂移動に伴う<sup>137</sup>Csの移行評価を行っ た。<sup>137</sup>Csの土壌中の深度分布は $C_0 exp(-\alpha \cdot x)$ の分布を仮定 した。ここに、 $\alpha(cm^{-1})$ は分布の特徴を示す係数、 $C_0$ はx = 0 (cm)における放射能濃度(Bq/kg)である。また、<sup>137</sup>Cs 濃度、 Cn(mBq/g)、は簡単のため土砂粒子の比表面積にのみ依存 すると仮定した上で、Cn = 22.1 · ( $S_{SP}$ )<sup>0.60</sup> (ここに  $S_{SP}$ は比表 面積 (m<sup>2</sup>/g))の関係を用いて粒度依存性の補正を行うこと とした<sup>71</sup>。

本解析モデルの特徴は各関係機関からオンラインで提供されている公開データのみを使って土砂移動に伴う<sup>137</sup>Csの移行 計算を行うことができること、また実測データを容易にフィー ドバックできること、各種河川・河口域専用解析モデルへの 接続が容易なことが挙げられる<sup>2)</sup>。

これまでに、インターネットで各機関が提供するデータを利用した解析として事故から数十年後までの<sup>137</sup>Cs 蓄積量の時間変化<sup>30</sup>、各種パラメータの値を変化させた場合の感度解析<sup>80</sup>、浜通り側の13河川流域の土砂および<sup>137</sup>Cs 流出量の解析および観測量との比較<sup>90</sup>などを進めてきた。今後は、現地調査の結果に基づいて、実際の自然環境における放射性 Cs の移行挙動を反映させた解析条件による数値解析を進めるとともに、



図 3 G-CIEMS による多媒体(大気、土壌、河川など 化学物質が存在する場)解析概要

解析結果と実測値とのより詳細な比較を通じた本解析モデルの妥当性の確認および改良を実施する予定である。

## (2) 国環研の陸域解析モデル G-CIEMS

国環研では、有機汚染物質を対象に多媒体環境動態解析 モデルG-CIEMS(Grid-Catchment Integrated Modeling System)<sup>10)</sup>を開発している。本解析モデルでは、大気、地表面 (土地利用に応じて7区分)、表流水(河川・湖沼)および表 流水の底質という多媒体における化学物質の動態を計算して いる。図3に示したように、各媒体において化学物質の挙動 に関わるプロセス(沈降や分配、分解など)に移流・拡散な どの空間的な移動を含めてマスバランス的に解いている。例え ば河川では、底質への土砂沈降と底質からの再浮遊、土砂粒 子との吸脱着などに加えて、各地表面からの土壌流出や溶存 態・懸濁態の流下などを合わせて解いている。実際の地形 データを基に地表面を小流域に分割している点が特徴であり、 実際の河川網を模した河道ネットワークを流下する物質移行を 計算することに加え、格子状に分割した大気との間の物質移 行も計算できる。また、日本全土の小流域・河川・大気デー タセットおよび計算に必要な気象 ・水文データも整備してい る<sup>11)</sup>。小流域は平均約10km<sup>2</sup>の面積であり、例えば阿武隈 川水系は543 個の小流域に分割される。阿武隈川水系や利根 川水系を含めた範囲での試算を進めており、本比較検討では そのうち前述の3水系における試算結果だけを抽出して比較し た。なお、この3水系には参照元である国土数値情報の湖沼 データに含まれる湖沼が存在しないため、地理データには湖 沼が含まれていない。

本解析モデルでは、大気輸送解析モデル(CMAQ)によっ て得られた検討結果<sup>12)</sup>より計算対象流域への<sup>137</sup>Csの沈着量を 設定した。本計算に係るG-CIEMSの計算過程としては、土 壌への吸着分配、土壌粒子の土地利用区分別流出率、土壌 層厚、河川水中の粒子 - 水分配などが重要である。土地利用 区分ごとに<sup>137</sup>Csが存在する土壌層厚が異なるため、層厚を農 地:30 cm、市街地:3.5 cm、それ以外:5 cmとし、各区分 での土壌流出係数を設定した。新たに無機元素である<sup>137</sup>Csを 本解析モデルの計算対象とするために、土壌粒子との分配係 数の媒体による違い<sup>13)</sup>を、解析モデル内の係数の本来の意味 を便宜的に変更させることで記述した。

前述のようにセシウムの土壌もしくは土砂への吸着性が高い ことが知られており、陸域での<sup>137</sup>Csの移行を把握する上では、 吸着性と土壌粒子の挙動が重要な因子になると考え、吸着性 と土壌流出係数についてそれぞれ複数の条件で計算を実施し た。具体的には、土壌吸着性については、高吸着条件 (HighKd)、中間的な条件(CntKd)、低吸着条件(LowKd) の3条件を、IAEA報告書<sup>13)</sup>の分配係数の幾何平均値とそ の5倍、1/5倍の値を元に設定した。また、土壌流出係数を 高流出のCase1から低流出のCase4まで4条件設定した。 なお、土壌流出速度として、森林については豪雨時も含めて長期的に実施された観測結果<sup>14)</sup>に基づき一定値として設定し、 その他の土地利用区分については仮定に基づき豪雨時も含め た年間の平均値としていくつかの条件を設定した。土壌への 吸着性条件と土壌流出条件を合わせて12条件において<sup>137</sup>Cs の挙動を試算した。

本解析モデルの特徴は、多媒体を同時に計算していること、 多媒体の地理的構造に関わる情報を含めて計算対象地域に依 存する入力データを外部のデータベースとして有しておりユー ザーによる変更が比較的容易なこと、河川網と地表面構造を 独立に設定することで河川中での挙動を含めて現実を反映し た計算が可能であることが挙げられる。これまでのところ限ら れた流域での観測結果からパラメータ設定を進めてきたが、 現在流出のプロセス記述に基づき、より一般性を高めた解析 モデル改良を進めている。今後、観測結果を用いた検証を進 め、解析モデルの精緻化を進めていく予定である。

# 3. 結果および考察

## (1) SACT および G-CIEMS の解析に用いた仮定

上記二つの解析モデル SACT および G-CIEMS を用いて、 福島県浜通り側に位置する阿武隈川、請戸川、新田川の3水 系について<sup>137</sup>Csの海への流出率の解析を行うに当たり、両者 で用いた仮定をここで整理する。まず、共通する仮定は次のと おりである。

- 河川やダム湖など、水系に初期沈降した<sup>137</sup>Cs量は定量的な解析モデル化が困難なため考慮しない。
- •対象とした期間は年のオーダーとした。

また両者で用いた異なる仮定は次のとおりである。

- 初期<sup>137</sup>Cs分布量としてSACTでは文部科学省が2011 年6月~7月にかけて実施した調査結果に基づき設定した値を用い<sup>3)</sup>、G-CIEMSでは大気解析モデル(CMAQ) をリンクさせて計算した結果を用いた<sup>12)</sup>。
- ・土砂の移行について、SACTでは砂・シルト・粘土成分 に区分した形でそれぞれ計算を行い、G-CIEMSでは観 測や仮定に基づき土壌流出係数を設定した。
- ・土砂・<sup>137</sup>Cs の吸脱着について、SACT では最初から吸着 固定しているものと仮定し、G - CIEMS では分配係数を 設定して吸脱着を考慮した。
- 初期<sup>137</sup>Csの土壌中垂直濃度分布として、SACTでは既存 文献に基づき形を仮定し<sup>3)</sup>、G-CIEMSでは前述のとおり 土地利用区分ごとに<sup>137</sup>Csの存在する土壌層厚を規定し鉛 直方向の濃度は一定とした。
- 湖水の扱いとして、SACTでは考慮し、G-CIEMSでは考 慮していない。

<sup>137</sup>Cs 濃度の粒度依存性として SACT では比表面積との
関係により He and Walling<sup>7)</sup>の回帰式に拠った。

上記の仮定のうち、両者の結果を比較する上で重要と考え られるものは、土壌もしくは土砂の粒径区分の扱い(SACTで は考慮しG-CIEMSでは考慮せず)、土砂・<sup>137</sup>Csの吸脱着の 有無(SACTでは最初から吸着しているものととらえ、 G-CIEMSでは観測や仮定に基づく土壌流出量と分配係数を 用いている)、初期<sup>137</sup>Csの土壌中垂直濃度分布の違いである。 なお、初期沈着量の設定として、SACTでは沈着量を用いてい るのに対しG-CIEMSでは大気解析モデル(CMAQ)で計 算した結果から導出した初期量を用いており、それぞれの初 期沈着量が異なるため流出量に違いがでる。しかしながら、 両解析モデルともに初期沈着量に対して総流出量は線形のた め、初期沈着量で基準化することにより両者の比較が可能と なる。

# SACT および G-CIEMS による 3 河川<sup>137</sup>Cs 流出率解析 結果の比較検討

まず、SACTで解析した結果を表1に纏めた。ここでは文 献データを参考に砂、シルト、粘土の比を2:2:1と仮定して、 砂、シルト、粘土の粒度組成をそれぞれ40%、40%、20%と した<sup>3)</sup>。流出率に関してはどの河川についても0.7%程度との 算出結果となった。なお、現在降雨係数、限界せん断応力、 粒度組成などを変化させた場合の感度解析を実施しており<sup>8)</sup>、 その上下の幅を考慮すると上記流出率の振れ幅は、0.05~ 0.9%程度と見積もられた。

次に、G-CIEMSで解析した結果を図4に示す。中間的な 値(図中の数値の入った丸)を採用すると、請戸川と新田川の 流出率は0.1%程度と見積もられたが、阿武隈川では0.03% と小さな値となった。この原因としては、底質との交換のため 河川が長いほど事故直後数年間の流出率が低い傾向にあると 考察された。なお、表1に示したようにSACTでも粒径の大 きな砂成分に付着した<sup>137</sup>Csの流出率は0.03%に留まる結果と なった(請戸川・新田川はそれよりも大きい)。全体として、 G-CIEMSでの予測結果としては、おおむね0.01~0.3%で あり、中間的な値では0.02%~0.1%/年程度と見積もること ができた。なお、解析モデル上の"溶存態"の挙動が実際の 微小粒子に吸着している<sup>137</sup>Csの挙動を表しているという解釈 も可能であり結果の解釈には注意が必要である。

以上、両陸域解析モデルで流出率を計算した結果、SACT の方がG-CIEMSに比べ一桁ほど大きな値となっていること が判明した。この主な原因としては、土壌中の<sup>137</sup>Cs 垂直濃度 分布の与え方によるものと考察された。これはG-CIEMSで は土壌中Cs 濃度を縦方向に均一としており、他方 SACTで は $exp(-\alpha \cdot x)$ の分布を仮定しているため(現在 $\alpha$ =1.2 cm<sup>-1</sup> と している)、後者の方が地表表面に高い値をもっており、従っ

#### A. Kitamura et al.

河川名	土砂粒子の種類	海への土砂流出量 t/y	海への <sup>137</sup> Cs 流出量 Bq/y	<sup>137</sup> Cs 初期沈着量 Bq	<sup>137</sup> Cs 年間流出率
阿武隈川	砂	5.8×10 <sup>4</sup>	5.3×10 <sup>10</sup>	1.6×10 <sup>14</sup>	0.03%
	シルト	1.1×10 <sup>3</sup>	6.6×10 <sup>11</sup>	1.6×10 <sup>14</sup>	0.4%
	粘土	7.6×10 <sup>4</sup>	2.3×10 <sup>12</sup>	8.0×10 <sup>13</sup>	2.9%
	全粒系	2.4×10 <sup>5</sup>	3.0×10 <sup>12</sup>	4.0×10 <sup>14</sup>	0.8%
請戸川	砂	1.4×10 <sup>4</sup>	1.0×10 <sup>11</sup>	1.5×10 <sup>14</sup>	0.07%
	シルト	7.6×10 <sup>3</sup>	3.7×10 <sup>11</sup>	1.5×10 <sup>14</sup>	0.2%
	粘土	5.9×10 <sup>3</sup>	1.5×10 <sup>12</sup>	7.4×10 <sup>13</sup>	2.0%
	全粒系	2.7×10 <sup>4</sup>	2.0×10 <sup>12</sup>	3.7×10 <sup>14</sup>	0.5%
新田川	砂	8.1×10 <sup>3</sup>	5.8×10 <sup>10</sup>	6.0×10 <sup>13</sup>	0.1%
	シルト	5.0×10 <sup>3</sup>	2.4×10 <sup>11</sup>	6.0×10 <sup>13</sup>	0.4%
	粘土	3.1×10 <sup>3</sup>	7.6×10 <sup>11</sup>	3.0×10 <sup>13</sup>	2.5%
	全粒系	1.6×10 <sup>4</sup>	1.1×10 <sup>12</sup>	1.5×10 <sup>14</sup>	0.7%

表 1 SACT による<sup>137</sup>Cs の海への年間流出率の計算結果



図4 G-CIEMS による<sup>137</sup>Cs 流出率解析結果(中間値を黒丸で示した)

て後者の方が流出<sup>137</sup>Cs量は高くなり流出率も高くなるためである。

具体的には単位面積当たりの<sup>137</sup>Cs 初期沈降量をAとして、G-CIEMS および SACT における地表表面に存在する<sup>137</sup>Cs 量をそれぞれ B および C と置くと、<sup>137</sup>Cs の存在が垂直方向に 5 cm までと仮定すれば、

$A=B\times 5$		(G - CIEMS)
$\mathcal{A}=\int_0^5 C \cdot e^{-a \cdot x} dx \sim C/1.2$		(SACT)
したがって、C~6×Bとなる。	つまり、	垂直分布の違いだけ

で、SACT解析モデルの方がG-CIEMSに比べ地表表面 <sup>137</sup>Cs量を6倍多く見なしていることが判る。この部分の仮定 による影響だけでG-CIEMSとSACTとの結果の違いを説明 しうることから、環境動態の解析モデル予測においてオーダー 程度の一致をまず目標とすることが一般的である理解に基づ けば、両解析モデルの結果は一定の誤差の範囲でほぼ整合し ていると考えられる。

ところで、初期沈着量については、その導出手法が異なると はいえ、それぞれの解析モデルでどの程度であったかを確認

河川名	SACT <sup>137</sup> Cs 初期沈着量 Bq	G-CIEMS <sup>137</sup> Cs 初期沈着量 Bq
阿武隈川	4.0×10 <sup>14</sup>	2.9×10 <sup>14</sup>
請戸川	3.7×10 <sup>14</sup>	4.2×10 <sup>14</sup>
新田川	1.5×10 <sup>14</sup>	1.1×10 <sup>14</sup>

表 2 SACT および G-CIEMS による <sup>137</sup>Cs 初期沈着量の計算結果

しておくことは流出量の評価の観点から重要である。そこで両 者の値を算出した結果を表2にまとめた。ここでG-CIEMS の結果は別途大気シミュレーションを行った結果のアウトプッ トデータ<sup>12)</sup>から、各単位流域に按分したものを水系別に集計 したものである(大気シミュレーションは2011年3月12日か ら29日までを対象とした)。表より、両者の結果に3割程度 のばらつきはあるもののオーダー評価としてはほぼ同程度であ ることが確認された。

最後に観測結果に基づく算定値との比較を試みる<sup>9)</sup> 2012 年の4月から9月の観測結果に基づく海への137Cs流出量とし て、阿武隈川、請戸川、新田川からそれぞれひと月当たり  $0.28 \times 10^{12}$  Bq(約 3.4×10<sup>12</sup> Bq/y)、 0.19×10<sup>12</sup> Bq(約 2.3×10<sup>12</sup>) Bq/y)、0.50×10<sup>11</sup> Bq(約 6.0×10<sup>11</sup> Bq/y) が流出していたとす る評価結果が報告されている15)。また、2011年8月10日から 2012 年の5月11日までの274日間に阿武隈川から流出した放 射性物質の移行状況を調査した結果、<sup>137</sup>Cs 量として 5.74×10<sup>12</sup> Bqが海へ流出し、そのうち台風15号に起因するものは 3.21×10<sup>12</sup> Bq(2011 年 9 月 19 日から9 月 27 日の間に海へ流出 した量) であったとする報告もある<sup>16)</sup> (2012 年には 2011 年の 台風15号のような大きな規模の台風は観測されていない)。 これらの事例と表2や上記に示した振れ幅を勘案すると、二 つの解析モデルによる計算値と観測に基づく算定値はほぼ同 等であると考えられる。例えば SACT では土砂が流出する条 件を表流水量が定常時の10倍以上となった出水時と仮定した 上で、その時間を(過去10年間の平均値を参考に)年間約 40hと想定して年間の土砂移動量を計算している<sup>8)</sup>。阿武隈川 で観測された流量を整理した時刻別流量表によると17)、2011 年9月の台風15号通過時において河川流量が定常時の10倍 以上となった時間は (9月21日から23日にかけて)約60hと 見積もることができ、解析モデルの結果とおおよそ整合してい るものと推測される。しかしながら、豪雨時の流出現象につ いての予測精度については今後さらに検討を進める必要があ り、必要に応じて解析モデルの改良を行っていく予定である。

#### 4. まとめと今後の方向

今回の両解析モデルによる流出率解析結果の比較検討によ り、解析モデルの構成内容や用いた仮定に異なる点があるも

のの、地表からの<sup>137</sup>Csの流出率は1%に満たないことが両解 析モデルで試算され、オーダー評価としては良好な一致が見 られた。またこれらの結果は観測結果に基づく算定値とも整 合していることが示唆された。ただし、蓄積されている観測と の詳細な検証は実施していないため、今後とも両機関で協力 しながら、両解析モデルを改善・改良していくための検討を 進めていく予定である。具体的には、解析モデル構成内容が 異なることに起因する両モデルの適用範囲の違いに留意しつ つ、分配係数を含めた各種パラメータについて両機関による 今後の観測や既往観測による検証を進めながら、実環境にお けるキープロセスの見極めやその解析モデル再現性の検証を 進めていく予定である。SACT については現在、USLE の詳細 データの抽出と計算メッシュの細密化を進めている。他方、 G-CIEMSについては現在、地表面からの土壌流出量の空間 分布の精緻化を進めている。より詳細な比較については、今 後調査が予定されている宇多川を解析モデルの検証として対 象とすることを視野に入れ準備を進めている。加えて、SACT は表流水による土砂移動に限定しているため広域の長時間解 析を短時間に行うことができ、他方 G-CIEMS は様々な媒体 間の物質の挙動を解析モデルの中に含んでいるため大気、水、 土壌、底質などの多媒体間の移動を一括して追跡でき、両解 析モデルの特徴を強化する方向性についても検討していく予 定である。

#### 謝 辞

今回実施した二つの異なる陸域解析モデルの比較検討は、 日本原子力研究開発機構と国立環境研究所の二機関で進めた 環境動態解析モデル比較研究の作業部会の成果である。本作 業部会に貢献いただいた関係各位に深い感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) B. L. Sawhney: Selective sorption and fixation of cations by clay minerals: A review. *Clays Clay Miner.*, **20**, 93-100 (1972).
- A. Kitamura, H. Kurikami, M. Yamaguchi, Y. Oda, S. Saito, T. Kato, T. Niizato, K. Iijima, H. Sato, M. Yui, M. Machida, S. Yamada, M. Itakura, M. Okumura, Y. Onishi: Mathematical modeling of radioactive contaminants in the Fukushima environment. *Nucl. Sci. Eng.*, in press. (2014)
- 3) 山口 正秋、前川 恵輔、竹内 信司、北村 哲浩、大 西 康夫:土砂移動に着目した福島第一原子力発電所 事故後の放射性物質分布に関する解析手法の開発。 原子力バックエンド研究、20,57-69 (2013)
- 4) M. P. DuBoys: Le Rohne et les rivieres a lit affouillable. *Ann. des Ponte et Chaussees*, **18**, 141.

(1879)

- E. Partheniades: A Study of Erosion and Deposition of Cohesive Soils in Salt Water. Thesis, U.C. Berkeley(1962)
- R. B. Krone: Flume Studies of the Transport of Sediment in Esturial Shoaling Process. Final Report Prepared for Army Engineer District, San Fransisco, p.110 (1962)
- Q. He, D. E. Walling: Interpreting particle size effects in the adsorption of <sup>137</sup>Cs and unsupported <sup>210</sup>Pb by mineral soils and sediments, *J.Environ. Radioactiv.*, **30**, 117-137 (1996)
- M. Yamaguchi, A. Kitamura, Y. Oda, Y. Onishi: Predicting a long-term <sup>137</sup>Cs distribution in Fukushima after Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident: a parameter sensitivity analysis. J. Environ. Radioactiv., **135**, 135-146 (2014)
- A. Kitamura, M. Yamaguchi, H. Kurikami, M. Yui, Y. Onishi: Predicting sediment and cesium-137 discharge from catchments in eastern Fukushima. *Anthropocene*, article in press. (2014)
- N. Suzuki, K. Murasawa, T. Sakurai, K. Nansai, K. Matsuhashi, Y. Moriguchi, K. Tanabe, O. Nakasugi, M. Morita:Geo-Referenced Multimedia Environmental Fate Model(G-CIEMS). Model formulation and comparison to the generic model and monitoring approaches. *Environ. Sci. Technol.*, **38**, 5682-5693 (2004)
- 11) 鈴木 規之、村澤 香織、松橋 啓介、南齋 規介、桜

井健郎、森口祐一、田邊 潔、中杉 修身、森田 昌 敏:全国河川の河道構造データに基づく化学物質の GIS 河川動態モデル(G-CIEMS)の開発と空間分 布評価の試み。環境化学、15,385-395(2005)

- 12) Y. Morino, T. Ohara, M. Nishizawa: Atmospheric behavior, deposition, and budget of radioactive materials from the Fukushima Daiichi nuclear power plant in March 2011. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L00 G11 (2011)
- 13) IAEA, Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments, Vienna(2010)
- 14)国立環境研究所:東日本大震災後の災害環境研究の 成果 森から湖へ、4.2.2 放射性セシウムはどのように 動いているのか。(2013)
- 15) J. Kanda: Long-term sources: To what extent are marine sediments, coastal graoundwater, and rivers a source of ongoing contamination? Fukushima Ocean Impacts Symposium: Exploring the impacts of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accidents on the Ocean. November 13, Sanjo Conference Hall, University of Tokyo, Japan(2012)
- 16) Y. Yamashiki, Y. Onda, H. G.Smith, W. H. Blake, T. Wakahara, Y. Igarashi, Y. Matsuura, K. Yoshimura: Initial flux of sediment-associated radiocesium to the ocean from the largest river impacted by Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. Sci. Rep., 4, 3714 (2014)
- 17) 国土交通省水門学データベース:http://www1.river. go.jp/

2014年6月26日受付 2014年8月15日受理

## 和文要約

福島第一原子力発電所の事故に起因して福島の地表に降下した放射性セシウムについて、日本原子力研究開発機構と国立環境研究所で独立に開発した陸域解析モデル SACT および G-CIEMS を用いて、河川を通じて河口域に到達する<sup>137</sup> Cs の年間流出率を解析した結果を比較検討した。対象河川は規模および流域の放射性セシウム沈着量を考慮し、阿武隈川、請戸川、新田川の3水系とした。その結果、解析モデルの構成内容や用いた仮定に異なる点があるものの、地表からの年間流出率は1%に満たないことが両解析モデルで試算された。また、既存の観測データに基づく算定結果と比較した結果、これらの解析結果はほぼ整合的であることが示唆された。