

福島環境動態将来予測システムの開発・解析評価の現状 「環境修復に向けた取り組み」

北村哲浩*1 町田昌彦*2 飯島和毅*1 佐藤治夫*1

福島第一原発事故に伴う放射性物質のうちとくに放射性セシウムの長期的な分布を予測し、被ばく評価、汚染対策を講じることを目的として、福島環境動態を将来的に予測するシステムを開発している。ここではその現状と解析評価の状況を報告する。具体的には、土壌の表層流出に伴う放射性セシウムの移行については、土壌流亡予測式を用いた流出解析、河川における核種移行については河川解析コード TODAM, iRIC を用いた移行解析、河口域における土砂堆積については3次元解析コード ROMS 等を用いた堆積解析を行っている。また、計算方法の並列化も進めており、それらの概要を述べる。セシウムと土壌の吸着メカニズムについては分子原子レベルの分子挙動計算法を用いた解析を開始しており、その解析状況についても報告する。

Keywords: 福島第一原発事故, 環境動態, 計算科学, 放射性セシウム

A number of mathematical models of predicting future distribution of radioactive contaminants, with particular attention on cesium, on the land and in rivers, lakes, and estuaries is developed and applied for the environments of Fukushima. For examples, a model comprises of the Universal Soil Loss Equation and the Geographical Information System is developed for predicting future distributions of soil and cesium on land and the one-dimensional river model, TODAM is provided for rivers and lakes. The iRIC/Nays2D model is used for predicting detailed distributions of soil and cesium in rivers in a two dimensional configuration and modified versions of ROMS and other models are examined for the sediment transport in estuary of ocean in a three dimensional configuration. We also implemented the parallelization of iRIC code. Furthermore, we started to simulate the molecular dynamics of cesium and soil in order to provide cesium adsorption and desorption mechanisms in a molecular-scale. In this article we present an outline of our current activities.

Keywords: Fukushima Dai-ichi NPP accident, environmental dynamics, computer science, radioactive cesium

1 はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震後の津波によって発生した福島第一原子力発電所の事故では、多量の放射性物質が環境中に放出された。それらの放射性物質はその後、地表に降下し、土壌や植物等に沈着した。そのなかで特に空間線量率への寄与が大きいのは放射性セシウムであることが判明している。地表に沈着した放射性セシウムは、土壌粒子に含まれる粘土鉱物に吸着することが知られており、環境中での放射性セシウムの移動は、地表面における降雨流出ならびに河川における水流による土壌粒子の運搬・堆積および再移動に伴うものが主なプロセスと考えられる。

そこで、本プロジェクトでは、放射性セシウムの移行を解析し、将来の被ばく評価や移行抑制対策に役立てることを目的に、放射性セシウムの将来的な分布を予測するシステムの開発を進めている。このシステムは、Fig. 1 に示されるように、着目する領域ごとに移動現象や時空間スケールに応じて適切なモデルを選択し解析を実行するために、複数のモデルを配備している。

例えば、地表面における土壌流亡による放射性セシウムの移動の場合、数100 km²規模の広域かつ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モデルを開

発し、浜通り側の領域を対象に試計算を開始した。他方、数km²の小領域かつ日・月単位の短期的な移動現象に関しては、オープンソースの流域モデルの活用を検討している。



広域の地表流を対象とした土砂・Cs 分布解析



河川を対象とした1次元・2次元解析(TODAM, iRIC)



河口域を対象とした3次元解析(FLESCOT, ROMS)

Fig. 1 Scopes of simulation; land, river, and estuary

Status of future environmental prediction system and preliminary simulation results by Akihiro KITAMURA (kitamura.akihiro@jaea.go.jp), Masahiko MACHIDA, Kazuki IJIMA, Haruo SATOH.

*1 日本原子力研究開発機構 福島技術本部 福島環境安全センター
Fukushima Environmental Safety Center, Headquarters of Fukushima Partnership Operations, Japan Atomic Energy Agency
〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

*2 日本原子力研究開発機構 システム計算科学センター
Center for Computational Science & e-Systems, Japan Atomic Energy Agency
〒277-8587 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

また、河川における放射性セシウムの移動予測については、河川を1次元として扱う広域かつ長期間を対象とした概略的な解析手法とともに、河川を上流域や下流域等のセグメントに区分し、2次元および3次元のシミュレーション手法により河川の流れや河床の状況を詳細に解析する環境を整備しつつある。また、少し系統が異なるが、セシウムと粘土鉱物の吸着状況を詳しく把握することにより、除染や上記の動態予測を原理的側面から補強する試みとして、原子レベルのシミュレーションも開始しており、最後にそのような取り組みについても紹介する。

2 土壌流亡量と水理公式を組み合わせた解析モデル

比較的広い領域において、数年から数十年以上の期間を対象として事故由来放射性セシウムの分布予測を行うシステムとして、地理情報システムソフトウェアに組み込まれたモデル構築機能を活用した、解析モデルを構築した[1]。本モデルでは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、地図上に記載のある河川ではその下流方向に、それ以外では地形の最大傾斜方向に土壌粒子が移動することとして計算する（Fig. 2）。

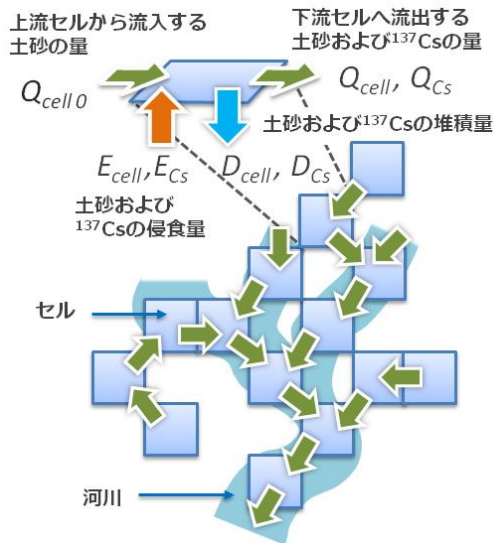


Fig. 2 Schematic representation of calculation procedure of soil and cesium transport model

手順としては、まず、各セルで1年間に侵食され得る土砂量を土壌流亡予測式（Universal Soil Loss Equation, USLE）[2]で計算し、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。これらの結果を逐次上流から順番に計算することにより、流域全体の土砂移動を算出する。最後に、土砂移動を放射性セシウムの移動に置きかえることで、流域全体での放射性セシウムの移動が得られる。なお、本モデルでは土砂の種類を砂、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。砂についてはDuBoy式[3]を用いて流砂量を計算し、シルトおよび粘土についてはPartheniades-Krone式[4, 5]を用いて再浮遊・堆積量を計算することとした。いずれの場合も河床におけるせん断応力がそれらの諸量を規定することになる。

これまで、本モデルに国土交通省等の各機関が提供するデータを入力した試解析を進めている。セシウムの分布予測を対象領域について示したものがFig. 3に示されている[1]。事故後2年後、20年後、50年後のセシウム蓄積量の計算結果で、図より時間の経過とともに全体にセシウム蓄積量が低下する一方で、発電所から北西方向にのびる地域では比較的長期にわたってセシウムの蓄積量の大きな地域が残存することが読み取れる。今後は、現地での調査結果に基づいて、実際の自然環境や放射性セシウム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、解析結果と実測値との比較を通じた本モデルの妥当性の確認を実施する予定である。

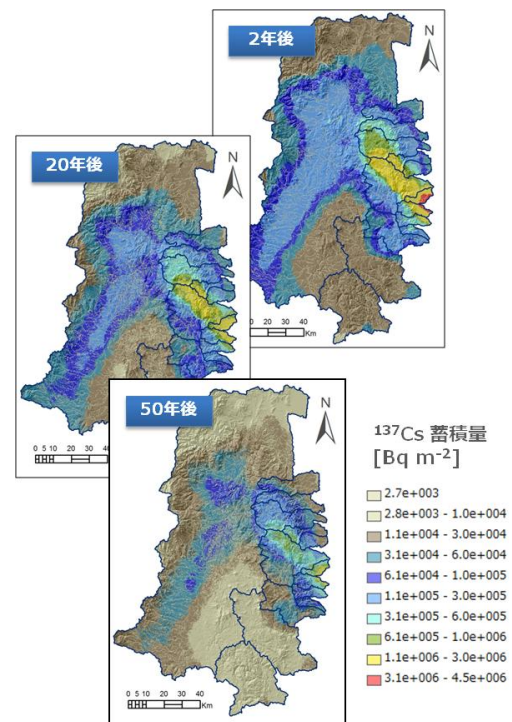


Fig. 3 Calculated temporal change of cesium distribution in a part of Fukushima area

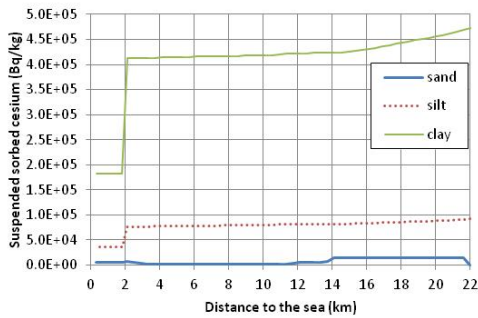
3 1次元河川解析コードTODAMによる河川内の放射性セシウムの移行挙動の解析

河川における放射性セシウムの移行挙動に関しては、米国のパシフィックノースウエスト国立（PNNL）研究所で開発された1次元数値計算コードTODAM（Time-dependent One-dimensional Degradation and Migrational model）[6]を応用した解析を現在PNNLと共同で進めている。この計算コードでは、河川水に溶解あるいは土壌粒子に吸着したかたちで存在する放射性セシウムの移行挙動をシミュレートするもので、先程のモデルと同様に3つの浮遊砂を区別するが、さらにそれらの吸着係数 K_d をパラメータとし、異なる吸着挙動を扱えるようにしている。

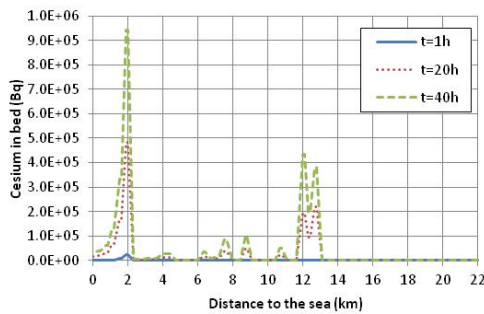
これまで、請戸川における河川水中の土砂濃度に関して、公開データによる試解析を実施している。その結果、

土壌粒子に含まれる砂サイズの粒子が河川で堆積する一方で、主にシルトと粘土サイズの粒子は海まで到達し、河川におけるシルトサイズ以下の土壌粒子を媒体とした放射性セシウムの運搬が主要であることが示唆された。

また、河川底のセシウム堆積量として、ピークが2か所見られた。1つは河口から12 km 辺りで、ここでは川幅が広く傾斜が変化する位置になっており、もう1つは高瀬川の合流地点で、高瀬川からの流入が加わる地点になっており、いずれも物理的な考察により推測される結果と整合している。洪水時には水に含まれる土砂中のセシウム濃度が10万 Bq/kg のオーダーとなった (Fig. 4) [7]。他方、河川底に堆積したセシウム量は比較的小さな値となった。今後、現地での調査結果に基づいた解析結果と実際の分布状況等との比較を通じて、予測精度を高めていく予定である。



(a) Concentration of suspended sediment-sorbed cesium



(b) Cesium in riverbed

Fig. 4 Results of the simulation in case of high river discharge condition

4 2次元河川解析コード iRIC/Nays2D による河川内の放射性セシウムの移行挙動の解析

TODAM では広域、長時間スケールでどのあたりにどの程度のセシウムが河川内に分布するかの情報が得られたわけであるが、今度はそのように特定された領域をさらに詳しく解析し、河川横断面のどこに、どれくらいの放射性セシウムが堆積するかを予測するモデルが必要となる。ここでは北海道大学の清水教授のご厚意で使用許可を頂いた Nays2D/iRIC とよばれる河川の解析コード[8] を活用した解析手法の準備を進めている。

現在、TODAM 同様請戸川を対象とした試解析を進めており、これまでに高瀬川からの河川水の流入も考慮した結果、請戸川と支流の合流部における土砂の堆積状況を再現

することができた。このことは、河川における土砂の堆積状況等の解析を現実的に即して進めるためには、河川の横断面形状や支流との合流といった、河川の2次元的な形態を考慮することが必要であることを示している[9]。

なお、Nays2D については計算コードの並列化も実施しており、計算コストの削減に努めている。具体的には川の流れ方向に複数の分割領域を形成し並列化を行った。また通信命令には、ほぼすべての並列計算機でサポートしている、デファクト・スタンダードである MPI を使用した。約 30,000 格子点のテストケースに対して原子力機構の BX900 を利用したところ、32 並列で 14.8 倍の高速化を実現した。約 1,300 格子点の実モデル (請戸川) では 4 並列で 2.4 倍の高速化を実現した。今後、セシウムの土砂への吸脱着機能を組み込むことで計算量が増加するため、更なる並列化の効果向上が期待され、さらに、Nays2D の 3 次元版である NaysCUBE や FLESCOT のような 3 次元シミュレーションコードへの並列化の組み込みも計画しており、詳細解析の計算コストの大幅圧縮も進める予定である。

5 3次元河口解析コードによる河口内の堆積土砂の移行挙動の解析

さて、河川に流れたセシウムを含む土砂粒子は川を下り、やがて海へと流れて行くが、河口に流入した土砂は、そこで河川とは異なる挙動を示す。河口に至ったセシウムを含む粘土粒子が沿岸にどのように堆積し移動するかを予測するには、立体的な河口形状を再現した3次元の計算が必要となる。ここでは世界規模で用いられているオープンコード ROMS[10]を使用し、福島沿岸での海岸輸送に寄与する主要な力を分析した。

まずは簡単な流れ場の計算を行った結果、粘土類は沿岸約 1km 以内に、シルト類は約 300m 以内に沈降することとなった。この結果は実際に観測されている河口域数百メートル以内にほとんどのセシウムが沈降したという結果とも整合するものと考えられる。

次に河口域の主なプロセスとして、潮汐、海流、波浪等の現象を取り込み、どれがどの程度の寄与を示すかを解析した。そして波浪の計算コード SWAN[11]を組み込み河口・沿岸域での土砂輸送の駆動力となる海洋現象を評価した結果、波浪による効果が他を圧倒している (他の効果の 10 倍程度) ことが確認された (Fig. 5)。つまり、波浪によ

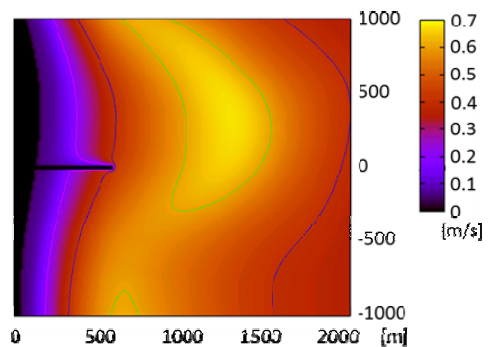


Fig. 5 The distribution of the bottom water orbital velocity induced by the wave

る海底付近の流速成分の寄与が最も重要であり、堆積土砂の移動は主に波浪により生じていることが判明した[12]. 今後このような寄与を考慮した本格的な解析を進めて行く予定である.

6 第一原理計算による土壌における放射性セシウム吸着様態の解析

最後に、これまで紹介したものと傾向の異なるモデルとして、放射性セシウム吸着に関する第一原理計算について紹介する. セシウムの移行予測においては、土砂との吸着分配係数 (K_d) の推定が重要となるが、それについてはいまだ不明な点が多く存在する. そこで K_d 値の振る舞いを根本から理解するために、原子レベルでのシミュレーションを開始した[13].

粘土鉱物によるセシウム吸着については古くから実験研究が続けられ、2:1 層状ケイ酸塩である雲母類がセシウムを吸着することが知られている. 2:1 層状ケイ酸塩とは、Fig. 6 に示されているように、ケイ素を中心に酸素を頂点とする四面体からなるシートが、アルミを中心に酸素を頂点とする八面体からなるシートを挟んでできている粘土鉱物の総称である.

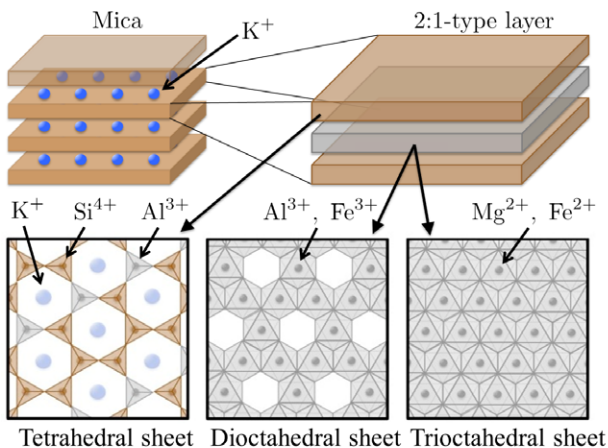


Fig. 6 Schematic representation of 2 : 1 phyllosilicate

この 2:1 層状ケイ酸塩の中で、いくつかのケイ素がアルミに置換されて負に帯電し、間にカリウムなどの陽イオンが挟まったものを雲母類と呼ぶ. このカリウムとセシウムが交換することにより、セシウムの強力な吸着が起こると考えられており、これを数値的に確認するというのが研究の狙いである.

なかでもほつれたエッジサイトと呼ばれる風化した雲母類にセシウムはより良く吸着すると考えられているが、そのような計算は、構造が複雑で行われてこなかった. そこで、セシウム吸着現象の核心部分である一部分を Fig. 7 のようにモデル化し、密度汎関数法を用いて解析を行った. 密度汎関数法を選んだのは、計算に経験的なパラメータを必要としない第一原理計算が適しているためである.

計算ではほつれたエッジサイトの開いた部分の距離を変

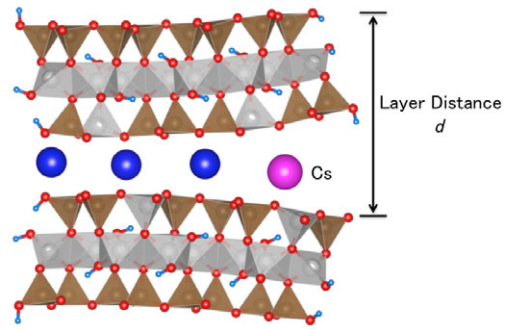


Fig. 7 A model of the frayed edge site used in the present first-principles calculation

化させ、その開き具合を変えてエネルギーがどのように変化するかを評価した. Fig. 8 に示されているように距離を増やしていくと 1.1 nm でエネルギーが逆転することが分った. これは、カリウムとセシウムイオンとのイオン交換、すなわち、セシウムの吸着がこの距離以降で起こりやすくなることを示している. すなわち、ほつれたエッジサイトというナノ構造にセシウムが吸着するメカニズムとして、開いた部分の大きさがセシウムのイオンの大きさと適合し、負に帯電しているとき、セシウムの選択的な吸着が起こることが明らかにされた.

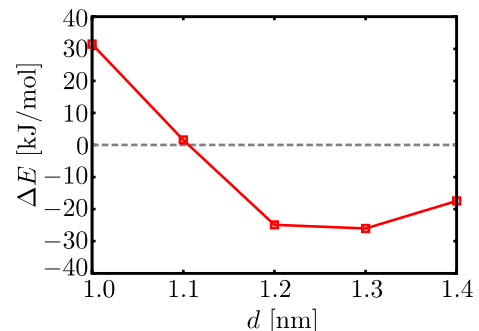


Fig. 8 Calculated energy difference by the ion exchange (potassium to cesium) vs. the layer distance.

まとめ

今回各モデルで実施した試解析結果は、定性的な物理現象をとらえていることが示され、また、数値的にもオーダーとしては等しいものとなった. しかしながら、詳細評価を行う上ではデータは不足しており、今後実測値の取り込みとフィードバックが望まれる. そのため、課題としてこれらのデータを継続して調査していく必要がある.

謝辞

本解析に貢献された日本原子力研究開発機構福島環境安全センター、地層処分研究部門およびシステム計算科学センターの関係各位、また総合的な技術指導を賜りました米国パシフィックノースウェスト国立研究所大西康夫教授に謝意を表します.

参考文献

- [1] 山口正秋, 前川恵輔, 竹内真司, 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, 印刷中 (2013).
- [2] Wischmeier, W. H., Smith, D. D.: *Predicting rainfall erosion losses—a guide to conservation planning*. USDA, Agriculture Handbook No. 537. (1978).
- [3] DuBoys, M. P.: Le Rohne et les rivieres a lit affouillable. *Ann. des Ponts et Chaussées* **18**, 141. (1879).
- [4] Partheniades, E.: A Study of Erosion and Deposition of Cohesive Soils in Salt Water. Thesis, U.C. Berkeley (1962).
- [5] Krone, R. B.: Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarial Shoaling Process. Final Report Prepared for Army Engineer District, San Fransisco, p.110, (1962).
- [6] Onishi, Y., Graber, H. C., Trent, D. S.: Preliminary Modeling of Wave-Enhanced Sediment and Contaminant Transport in New Bedford Harbor. *Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport*, In Book Series 42 of Coastal and Estuarine Studies, 541, AGU, (1993).
- [7] Kurikami, H., Kitamura, A., Yamaguchi, M., Onishi, Y.: Preliminary Calculation of Sediment and ¹³⁷Cs Transport in the Ukedo River of Fukushima. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, (2013)
- [8] Shimizu, Y.: Mutual relation between riverbed and bank variation characteristics in river channel landform formation. *Ann. J. Hydraul. Eng.* **47**, 643-648 (2003).
- [9] 山田進, 板倉充洋, 奥村雅彦, 町田昌彦: 福島長期環境動態研究 (6) 二次元河川コードを用いた河川内放射性物質の堆積分布予測. 日本原子力学会 2013 年秋の大会, 予稿集 (2013).
- [10] Shcepetchkin, A. F., McWilliams, J. C.: The Regional Ocean Modeling System: a split-explicit, free-surface, topography-following coordinates ocean model. *Ocean Model.*, **9**, 347 (2005).
- [11] Booij, N., Ris, R. C., Holthuijsen, L. H.: A third-generation wave model for coastal regions. Part I: Model description and validation. *J. Geophys. Res.*, **104**, 7649 (1999).
- [12] 板倉充洋, 山田進, 奥村雅彦, 町田昌彦: 福島長期環境動態研究 (7) 沿岸域の堆積土移動モデリング, 日本原子力学会 2013 年秋の大会, 予稿集 (2013).
- [13] Okumura, M, Nakamura, H., Machida, M.: Mechanism of strong affinity of clay minerals to radioactive cesium: First-principles calculation study for adsorption of cesium at Frayed edge sites in muscovite. *J.Phys. Soc. Jpn.* **82**, 033802 (2013).

