

河川流域からの流出土砂とともに海域に流出する放射性セシウムの定量的把握

清水 康行、岩崎 理樹、Mohamed NABI（北海道大学）

恩田 裕一（筑波大学）

1. 目的

本検討は、阿武隈川の流域から土砂の移動に伴い河川に流入するセシウム 137 の移行をモデル化し、河川におけるセシウム 137 の移行、堆積過程を明らかにすることを目的としている。平成 24 年度の調査では阿武隈川を対象とし、セシウム 137 輸送の長期的移動の定量化に重要である長期的な土砂移動を計算できる一次元モデルを構築した。また、微細土砂粒子（ウォッシュロード）の移動により輸送されるセシウム 137 を二次元モデルにより計算し、無人ヘリにより測定された阿武隈川下流域における河川敷の空間線量率の分布特性を再現した。

一方、一次元モデルでは土砂輸送量とセシウム 137 輸送量が関連付けられていないこと、二次元モデルにおいては実際に起きる様々な粒径の土砂粒子移動に伴う河床変動、セシウム 137 移動がモデル化されていない点が課題であった。

平成 25 年度の調査はこれらの課題を受け、一次元モデルによる土砂輸送量をセシウム 137 量と関連付けて、長期的なセシウム 137 の河川への堆積と海域への放出量を試算する。また、二次元モデルを様々な粒径の粒子を持つ土砂の移動を扱えるモデルに拡張するとともに、放射性物質輸送モデルを組み合わせ、平成 24 年度モデルとの再現性の比較と将来大規模洪水が発生した場合の河川内のセシウム 137 移動特性について検討した。

2. 検討内容

(1) 一次元モデルを用いた阿武隈川における長期的なセシウム 137 移行過程

モデル適用対象範囲は、阿武隈川河口（1.0 km 地点の荒浜観測所）から本川ダムである信夫ダム（河口からの距離約 83 km）までの区間とし、主要支川である、荒川、松川、摺上川、広瀬川、及び白石川を流入支川として考慮した(図-1)。この区間において過去の水位、土砂移動量、河床変動量等データから土砂移動量の再現性が示された平成 24 年度に構築した一次元モデルを用いて、セシウム 137 輸送特性を解析した。計算には、平成 23 年 3 月の震災後に測量、調査された河道形状及び河床材料を用いた¹。

まず、福島第一原発事故後のセシウム 137 流出に大きな影響を与えたと考えられる平成 23 年 9 月洪水について計算を行い、平成 23 年 9 月 18 日～27 日間に観測されたセシウム 137 流出量との比較を行いモデル性能の評価を行った。

次に、予測期間を平成 24 年度の再現計算と同様に 28 年間と設定し、将来予測の一つのシナリオとして 1975 年 1 月 1 日から 2002 年 12 月 31 日までに観測された流量規模(図-2)におけるセシウム 137 の動態について検討を行う。この期間には 1986 年 8 月に観測された戦後最大の出水（岩沼地点最大流量 7,591 m³/s）が含まれている。

河川に流入する浮遊砂中のセシウム 137 濃度は、現在までのモニタリング成果より流域

¹ 国土交通省東北地方整備局，阿武隈川流砂系調査検討業務（巻末資料），pp.12-67，2012.

平均沈着量と相関があることがわかっている²。そこで、各支川に流出する浮遊砂中のセシウム 137 濃度 G [Bq/kg] は、流域平均沈着量 Cs_{inv} [Bq/m²] から式 (1) を用いて推定した。

$$G = ACs_{inv} \quad (1)$$

ここに、 A [m²/kg] は比例定数であり、流域平均沈着量には第 3 次航空機モニタリングの結果を用いた³。なお支川の白石川流域の一部は航空機モニタリングの実施範囲外にあるため、流域平均セシウム 137 沈着量を求めることができない。しかし、流域の一部が福島第一原発の 80 km 圏外に位置していることから、セシウム 137 沈着量は他領域に比べて低いと考えられるため、白石川流域からのセシウム 137 流出は無視できるほど小さいと仮定して考慮していない。また浮遊砂が持つセシウム 137 濃度に対する福島第一原発事故後の継続的なモニタリング結果より、河川に流入する浮遊砂中のセシウム 137 濃度は時間的に減少することがわかっており、式 (1) に示す比例定数 A の時間変化が式 (2) のような二重指数関数として求められている。

$$A = \beta_1 e^{-\alpha_1 yr} + \beta_2 e^{-\alpha_2 yr} \quad (2)$$

ここに、 yr は福島第一原発事故からの経過年数であり、各係数はモニタリングより、 $\alpha_1 = 5.27$ 、 $\alpha_2 = 0.266$ 、 $\beta_1 = 1.55$ 、 $\beta_2 = 0.069$ と求められている。また、本計算では浮遊砂のみならず様々な粒径粒子で構成される土砂の移動を計算するため、各粒径のセシウム 137 濃度が必要である。これには、以下に示す He and Walling により報告されている比表面積とセシウム 137 濃度の関係式⁴を利用する。

$$G = \mu_n S_p^{\nu_n} \quad (3)$$

ここに、 S_p [m²/kg] : 浮遊砂の比表面積、 μ_n : セシウム 137 濃度を規定する係数 [Bq/(m² ν_n kg^{1- ν_n})]、 ν_n : べき乗定数で 0.65 程度の値をとることが示されている。各河川における具体的な ν_n の値は不明であるため、ここでは近似的に全河川で 0.65 とした。式 (3) 左辺 G に式 (1)、式 (2) から推定される各支川の浮遊砂中のセシウム濃度を、右辺 S_p に平成 23 年の浮遊砂量観測による流域毎の代表粒径 (中央粒径 d_{50}) から求まる比表面積を代入してセシウム 137 濃度の時間変化を考慮した各流域における μ_n を求める。この係数を用いて、式 (3) が各粒径階層 k に対しても近似的に成立すると仮定し、次の式 (4) を用いて各河川別に浮遊砂のセシウム 137 濃度の時間変化を考慮した。

² 恩田裕一, 吉村和也, H. Smith, W. Blake : 河川水系での放射性セシウムの移行状況調査 —河川における土砂流出にともなう放射性セシウムの移行調査, 平成 25 年度東京電力(株)福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立に向けた検討会資料。

³ 文部科学省による第 3 次航空機モニタリングの測定結果について,
http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/5000/4858/24/1305819_0708.pdf .

⁴ He, Q., Walling, D.E., Interpreting particle size effects in the adsorption of ¹³⁷Cs and unsupported ²¹⁰Pb by mineral soils and sediments, Journal of Environmental Radioactivity Vol. 30, pp.117–137, 1996.

$$G_k = \mu_n S_{pk}^{v_n} \quad (4)$$

(2) 二次元モデルによる河川領域でのセシウム 137 輸送・堆積特性の把握

平成 24 年度に構築した均一粒径ウォッシュロードモデルを、粒度分布を考慮できる一般的な河床変動モデル⁵に拡張するとともに、土砂輸送方程式からセシウム 137 輸送方程式を導出し、両者を同時に解くことで、新たに土砂移動に伴うセシウム 137 輸送モデルを構築した。このモデルを阿武隈川下流域、丸森地点から亘理大橋付近までの区間に適用する(図-1)。流量は、近年で最も大規模な出水であった 2011 年(平成 23 年)9 月 22-24 日にわたる洪水を対象とする。下流端水位は、荒浜地点で観測された潮位を与える。河床の抵抗度合は、一般的に河川の抵抗を求めるのに用いられるマンギの粗度係数により与えることとし、1986 年洪水の逆算水位から同定された値⁶を用いた。粒度分布は、震災後の測定値を与えることとする。上流から供給されるウォッシュロード濃度は、同洪水中に丸森地点において観測された値から作成された流量-SS 濃度式により与える。なお、高水敷は初期河床から侵食しない条件を課した。ウォッシュロードに相当する粒径の土砂が持つセシウム 137 濃度は、モニタリングの結果を踏まえて 6,000 Bq/kg とし与え(平成 24 年度の調査)、これを基準として次元計算と同様に式(4)を用いて粒径別にセシウム 137 濃度を設定した。なお、流域から河川に流入したセシウム 137 の河川内での動態を明確にするため、初期セシウム 137 沈着量は 0 とした。

この計算条件における河川敷のセシウム 137 沈着量分布と無人ヘリによる河川敷の空間線量率分布(平成 24 年度の調査)を比較し、モデルの再現性について検討する。将来予測シナリオの一つとして今後の大規模洪水により起こり得る河川での放射性物質の移動・堆積過程について考察するため、平成 23 年 9 月洪水が連続するような流量を想定する。これにより、一洪水により堆積した放射性物質が、次に起こる大規模出水でどのように移行するのかを考察し、将来予測に対して一つの情報を提供することを試みる。なお、流入土砂が持つセシウム 137 濃度の時間的変化については多様な条件が想定されるため、ここでは流入土砂のセシウム 137 濃度は計算期間中に同一であるとして計算を行っている。

3. 結果と考察

(1) 次元モデルによる検討結果

平成 23 年 9 月 18 日~27 日の出水を対象とした計算より、同期間におけるセシウム 137 流出量は 2.54 TBq となった。これは、同期間に観測された 5.94 TBq(平成 23 年度の調査)よりは小さかった。

次に、想定した 28 年間の流量シナリオにおける結果を見ると、次元モデルによる計算では想定した 28 年間のセシウム 137 の阿武隈川への総流入量、総河道内堆積量はそれぞれ 2.27 TBq、11.3 GBq となり、河道内に堆積する割合は流入量の 0.5%と試算された。なお、ここで計算したセシウム 137 流出量は事故後の流出量よりも小さい。これは、本計算で想定している流量が、1975 年から 28 年間に観測された流量が再び生じた場合の将来計算であり、例えば平成 23 年 9 月洪水のような大規模出水を含んでいないためである。岩沼地

⁵ Iwasaki, T., Akahori, R., Giri, S. and Shimizu, Y. : Numerical study on the flow and the sedimentation during 2008 flood in the Koshi River in Nepal, Advances in River Sediment Research - Fukuoka et al. (eds), pp. 2063-2073, 2013.

⁶ 平成 18 年度 阿武隈川下流河川整備計画検討業務 報告書, (株)建設技術研究所, 2007.

点の平成 23 年 9 月洪水のピーク流量は、計算に用いた一年目のピーク流量よりも 10 倍程度大きな値であるため、計算値は実測値よりも小さくなっている。

図-3 は、想定した流量シナリオにおいて計算された、阿武隈川から海域へ流出する浮遊砂量を示している。これに対応する海域へのセシウム 137 放出量計算値を図-4 に示す。流出する放射性セシウム 137 のほとんどは、阿武隈川上流を起源としていると計算された。流出量は時間の経過と共に減少し、図-4 中の実線に示す累加割合の推移をみると、本検討で想定した流量規模による土砂移動と流入土砂のセシウム濃度の時間変化のシナリオのもとでは、計算開始 4 年後には 28 年間の総流出セシウム 137 量の半分以上が流出すると推定された。

(2) 二次元モデルによる検討結果

図-5 は、計算された地表面のセシウム 137 沈着量の時間変化である。図-5 a)、b)、c) の結果は、図-5 d) の洪水ハイドログラフに示す A、B、C に対応する時間の結果を示している。まず、一つの洪水後の結果である図-5 a) を見ると、高水敷でセシウム 137 沈着量が高くなると計算された。

河道内での放射性セシウムの移動解析を行った(図-6)。その結果、河道内の放射性セシウムの輸送過程において局所的に放射性セシウムが集中する地点が計算された。河道内の放射性セシウム空間分布の予測値を無人ヘリにより得られた観測結果と比較すると、本モデルによる推定結果と同様の位置に、高い沈着量が認められた。

次に、将来的に同程度の洪水が生じた場合の影響について考察する。図-5 b) を見ると、洪水ピーク時におけるセシウム 137 沈着量は、一洪水で堆積したセシウム 137 沈着量よりも小さくなっていると計算された。その後、前洪水と同様に洪水終期に高水敷に土砂が堆積することで、高水敷のセシウム 137 沈着量が高くなるとの計算結果が得られた。図-7 に、洪水前後(図-5 a) と c)) の高水敷のセシウム 137 沈着量計算結果をプロットしたものを示す。図より、高水敷のセシウム 137 沈着量は洪水前後で増加する傾向があるが二倍には達しない部分が多い。一方で、沈着量が二倍を超える部分も計算上、認められた。

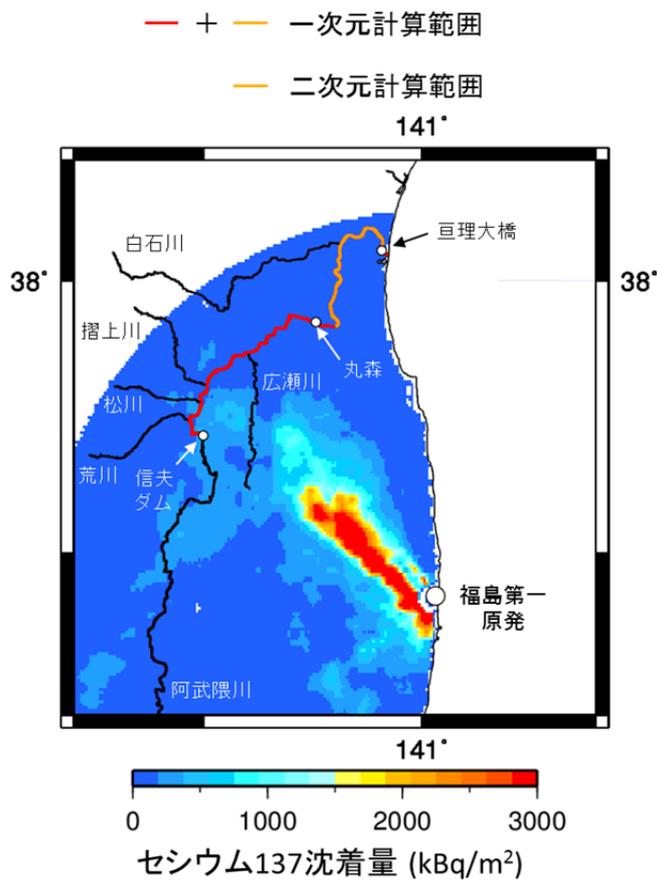


図-1 計算対象河川及び範囲
(第4次航空機モニタリング結果(測定日:平成23年10月22~11月5日))

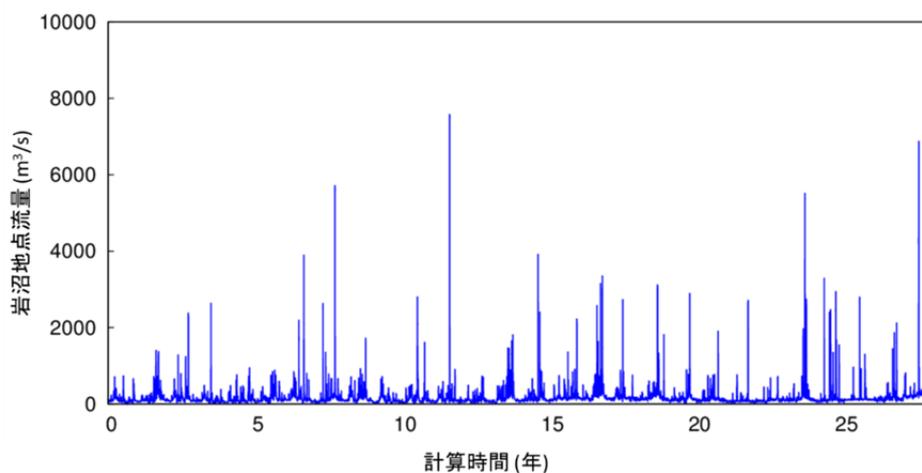


図-2 阿武隈川岩沼地点における流量
(同地点における戦後最大流量は1986年8月5日に観測された7,591 m³/sである)

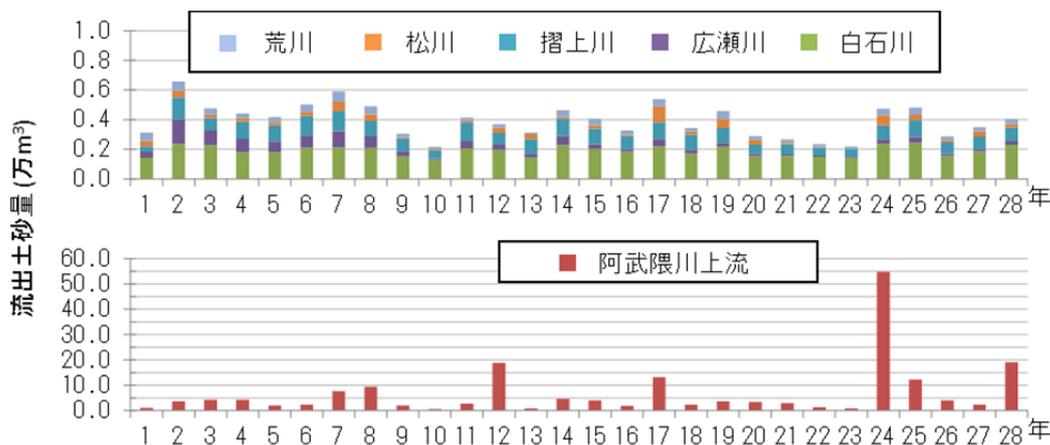


図-3 流域起源毎の流出浮遊砂量計算値の経年変化（河口部 1.0 km 地点）

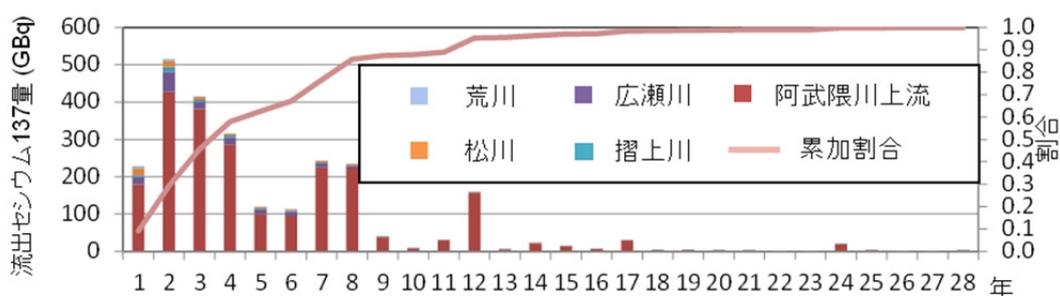


図-4 流域起源毎の流出セシウム 137 量計算値の経年変化（河口部 1.0 km 地点）
 （なお、初期河床を起源とする流出量は全体量に比して極めて小さいため、図中では省略している）

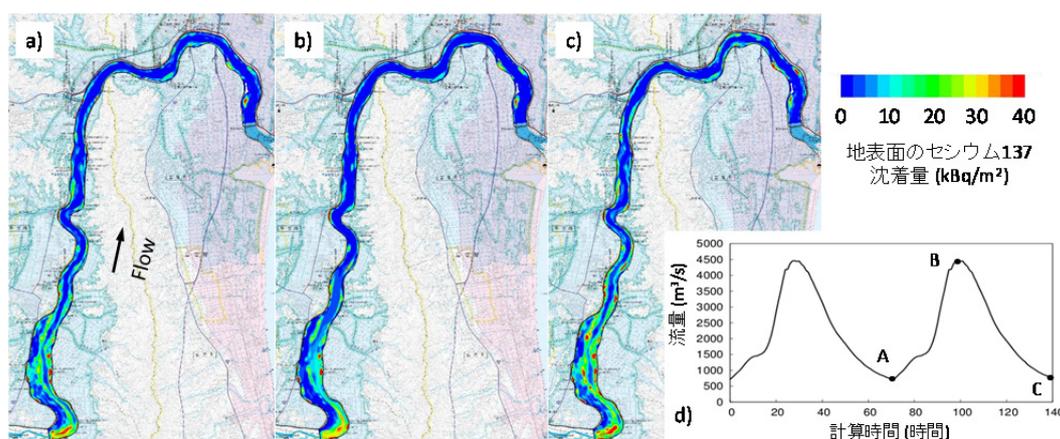


図-5 計算された地表面のセシウム 137 沈着量の時間変化

（ a）、 b）、 c）の時刻はそれぞれ d）の流量ヒドログラフに示す A、 B、 C の時刻に相当している。A 時点の結果は平成 23 年 9 月洪水の再現計算であり、B、 C は将来、平成 23 年 9 月洪水と同規模の洪水が発生した際に、沈着しているセシウム 137 がどのように再移動するかを想定した結果である。）

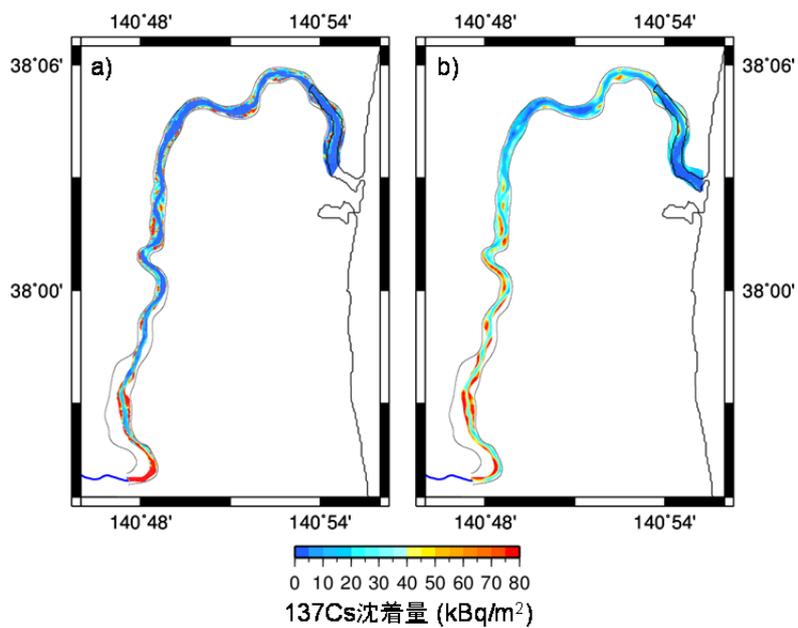


図-6 阿武隈川下流部におけるセシウム 137 の
a) 計算結果と b) 無人ヘリによる観測結果の比較

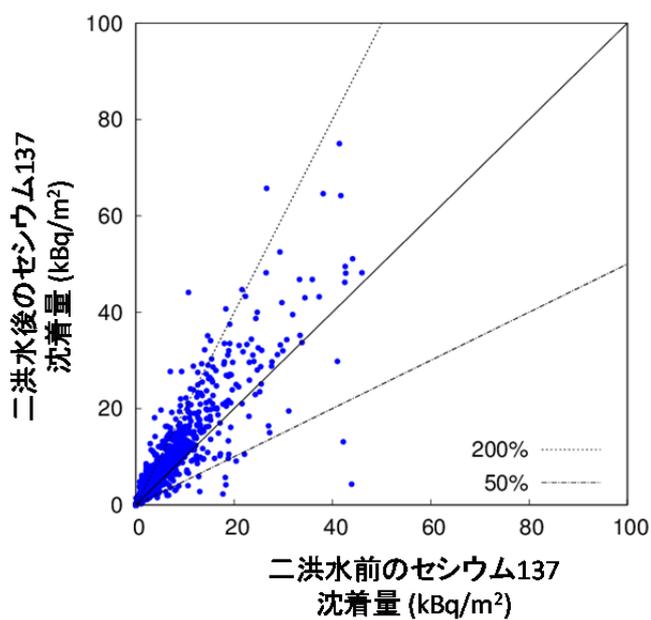


図-7 洪水前後（図-3 a, c）における地表面のセシウム 137 沈着量の比較