

# 河川への放射性セシウムの移行の実態理解と分布物理型モデルによる解析

木内 豪（東京工業大学）

恩田 裕一（筑波大学）

## 1. 調査目的

陸域に降下して土壌や植物等に沈着した放射性セシウムは、降雨を起因とする侵食・掃流作用により各種土地被覆面から土砂や有機物とともに流出する。これらは洪水とともに水路・河川を流下し、一部は湖沼・貯水池等において一時的に沈降して、その後の水利用に伴い農地等へ移行するとともに、洪水時に再流出しながら、下流に輸送されていく。このような現象が長期間繰り返された場合に放射性セシウムの量や分布にどのような変化が起きるか、また、どの程度の量が水系を通じて海域に供給されていくのかを評価するには、水系における長期間の放射性セシウム移行現象の解析モデルの構築が必要となる。

本研究では、複雑な土地利用面を有する流域における降雨流出現象に伴う放射性セシウムの長期的移行を定量化できる数値モデルを構築するため、平成 24 年度に構築したモデル<sup>1</sup>を基本としながら、都市域、水田、畑地、森林といった異なる土地利用面からの土砂・放射性セシウム移行の特性を踏まえたモデルに改良し、阿武隈川支川の口太川流域で放射性セシウムの長期的変化の推定を行う。また、放射性セシウムの吸着量が土砂の粒径に依存することを考慮するモデルを構築するため、浮遊土砂の粒径分布特性の分析を実施するとともに、粒径別の浮遊土砂流出と放射性セシウムの移行を解析できるモデルへと高度化し、阿武隈川流域全体への適用を図る。

## 2. 調査内容

放射性セシウムは粘土を含む細粒分の土砂により多く吸着されることから、流域におけるセシウムの移行特性を把握する上では細粒土砂の挙動理解が重要である。そこで、継続的に様々な調査が行われている口太川流域を検討対象域に、粒径分布と浮遊土砂濃度の連続モニタリングを実施し、浮遊土砂輸送の特徴を整理した。モニタリング地点は口太川下流（図-1 の流量測定地点）である。浮遊土砂の粒径分布計測には Sequoia 社製 Streamside を用いた。本機器により、1 時間おきに河川水を自動で揚水し、レーザー回折方式によって、粒径約 2~360  $\mu\text{m}$  の範囲にある浮遊土砂について、32 の粒径区分別の体積濃度を計測した。また、平成 24 年度に構築した降雨流出に伴う放射性セシウム移行モデルの改良を行った。具体的には、市街地における降下物の影響を考慮するために地表面負荷堆積モデルを組み込むとともに、調査対象域内に多く存在する溜池等において浮遊土砂が沈降する現象を考慮できるようにした。また、放射性セシウムが土壌中を鉛直下方に移行する現象もモデルに組み込んだ。

以上の改良を行った上で、口太川流域にモデルの精度を検証した後、将来予測を行った。さらに粒径別の浮遊土砂・セシウムの流出モデルを作成し、口太川流域に適用した。最後に、阿武隈川流域全体にモデルを適用し、これまでのセシウム流出量を試算するとともに、口太川流域を対象として土砂輸送に伴う流域内の空間線量の変化を試算した。

<sup>1</sup> 木内豪, 恩田裕一: 改良 WEP モデルの作成, 平成 24 年度放射能測定調査委託事業成果報告書, 日本原子力研究開発機構, 2013.

### 3. 結果と考察

#### (1) 浮遊土砂の連続モニタリング

浮遊土砂の粒度分布時間変化の観測結果の例を図-2に示す。これは、平成25年10月(台風26号)の出水時とその前後における口太川下流(図-1の口太川流量測定地点)の流量、浮遊土砂(SS)濃度の推定結果とともに、連続粒度分布測定装置による浮遊土砂粒径分布の時間変化の測定結果を示したものである。比較的短時間に洪水のピークを迎え、その後、1日以内に平常時の状態に戻っている。中央粒径 $3.4\ \mu\text{m}$ 以下と約 $80\ \mu\text{m}$ 以上のSS濃度が洪水流量の増大とともに高くなり、全体のSS濃度に占める割合が高くなっている。これに対して、洪水時前後のSS濃度の低いときは、粒径区分としては、シルト成分(約 $3\sim 63\ \mu\text{m}$ の範囲)が主体となっている。一方、比較的粒径の大きな成分が洪水時のみならず、洪水後にかけてもみられる。

放射性セシウムの移行という観点からは、放射性セシウムがより吸着されやすい細粒分が流水中にどの程度含まれているのかが重要である。そこで、毎時の粒径区分別SS濃度の計測データに基づき、 $12\ \mu\text{m}$ 以下あるいは $62\ \mu\text{m}$ 以下の粒径区分のSS体積濃度が全体のSS体積濃度に占める比率を算出し、同時刻に透過光式濁度計で測定したSS濃度との関係性について調べたところ、SSの増大に伴い、 $12\ \mu\text{m}$ 以下の比較的微細な粒子の占める比率がわずかに大きくなる傾向が見られた(図-3)。この比率は、SS濃度が低いときは $26\sim 29\%$ 程度であったが、SSが $1,000\ \text{mg/L}$ を超えると $38\%$ 程度にまで増大している。一方、シルト・粘土の粒径サイズにあたる $62\ \mu\text{m}$ 以下の粒子は、全体の濃度のおよそ $80\sim 90\%$ を占めており、SS濃度に対する明確な依存性は確認されなかった。

SS濃度が高いほど粘土を含む細粒分(粒径 $12\ \mu\text{m}$ 以下)の濃度が高くなる<sup>2</sup>ことから、浮遊土砂中の平均セシウム $^{137}\text{Cs}$ 濃度も高くなると考え、浮遊土砂サンプラーを用いて捕捉された浮遊土砂のセシウム $^{137}\text{Cs}$ 濃度と、捕捉期間平均の河川水中のSS濃度との関係を整理した(図-4)。全体的には、水中のSS濃度が同程度でも、セシウム $^{137}\text{Cs}$ 濃度には大きな開きがある。

#### (2) 口太川流域への適用

修正モデルの検証を行うため、口太川流域を対象に解析を行い、口太川下流地点における流量、浮遊土砂量、放射性物質濃度の実測結果と解析結果を比較した。解析は平成23年1月1日から平成25年9月30日までの期間で行った。当該期間の気象条件(降水、気温、相対湿度、風速、日照時間)には、流域内外の国土交通省及び気象庁の観測データ<sup>3 4</sup>を利用した。土壌の透水係数や飽和含水率等の物理特性等の水循環に関わるパラメータには既往研究における値の一部、補正して用いた(表-1)。口太川の流量・浮遊土砂濃度の実測結果は筑波大学等により取得・整理されたものに加え、本研究で測定された浮遊土砂濃度もあわせて用いた。

図-5に口太川下流における浮遊土砂の累積流出量の実測値と計算値を示す。平成25年8月に大きな出水があり、このイベントで流出量、浮遊土砂量の双方で実測との差が開いている。図-6には口太川下流における浮遊土砂のセシウム $^{137}\text{Cs}$ 濃度の観測値と計算値を示す。主に土壌中の下方移行モデルを組み込んだことにより、経時的な変化傾向の再現性は平成

<sup>2</sup> 高橋嘉夫, 坂口綾: 土壌-河川系における放射性セシウムの動態解析, 平成23年度放射能測定調査委託事業成果報告書(第2編)放射線量等分布マップ関連調査研究, 日本原子力研究開発機構, 2012.

<sup>3</sup> 国土交通省: 水文水質データベース.

<sup>4</sup> 気象庁: 気象年報.

24年度よりも向上した。一方、最初の点（平成23年6月下旬）や平成24年1月～3月において実測値との差が大きい。

図-7に平成23年7月から平成25年9月までの浮遊土砂とセシウム137の月別流出量の計算結果を示す。また、表-1には過去24ヶ月間にわたる浮遊土砂とセシウム137の流出量計算値を整理した。なお、浮遊砂サンプラー等を用いた測定に基づく平成23年6月21日～平成25年1月22日までのセシウム137の流出量として、542 MBq/dayが報告されている<sup>5</sup>。平成23年9月には、大きな台風の影響により、土砂流出量とセシウム137流出量のどちらも他の月に比べて多い。一方、平成25年8月も大きな出水があり、土砂流出量は平成23年9月よりも多いにも関わらず、セシウム137の流出量は平成23年9月のときよりも少ないという計算結果となった。日平均のセシウム137流出量で見ても、平成24年9月～平成25年8月のセシウム137流出量が平成23年9月～平成24年8月の流出量の約65%に減少していることがわかる（表-1）。

モデルで算出される24ヶ月間の日平均セシウム137流出量の値（437 MBq/day）を用いて、この量のセシウム137の流出が30年後まで継続した場合に流域内に残存するセシウム量を試算した（図-8）。灰色の点線は、放射性崩壊のみを考慮した場合で、黒い実線は、降雨流出過程に伴い土砂とともにセシウム137が流出する現象を考慮した場合を示す。また、黒い破線は、土壌中の下方移行を考慮しないモデルによる解析結果である。降雨流出現象によって、今後10年程度における減少量で見ると、放射性崩壊のみのケースに比べて減少が早いことがモデルの試算により表された（図の黒丸で示した時点）。

### (3) 粒径分布を考慮した計算

放射性セシウムは細粒土砂に多く吸着される一方、砂質分にはあまり吸着されない。また、浮遊土砂の粒径は下流河道内における堆積・侵食現象に対してもある程度の影響を及ぼす。そこで、粒径の違いによる浮遊土砂及びそれに付着するセシウムの動態の違いを考慮するため、粒径区別の浮遊土砂と放射性セシウムの流出計算を行った。土壌の侵食と流出に関する基本的な取り扱いは、平成24年度に開発したモデルと同じであるが、粒径に応じて浮遊土砂の最大輸送可能濃度が異なる。また、土壌の侵食度合いを表すパラメータの値を各粒径区分で別々に同定している。粒径区分は3 μm未満、3 μm～63 μm、63 μm以上の3つを設け、各区分が土壌侵食面に存在する割合には、既往研究<sup>6,7</sup>に基づく値を用いた。

各粒径区分の土壌中のセシウム137濃度は、実測に基づき、4:1:1の比率関係にあると仮定した。図-9に平成25年10月の台風26号による出水時の流量、浮遊土砂量の観測値と計算値の比較を示す。また、各粒径区分の浮遊土砂のセシウム137濃度を合算した値は図-6の結果を再現していた。

### (4) 阿武隈川流域全体への適用

改良されたモデル（単一粒径モデル）を阿武隈川流域全体に適用し、平成23年の阿武隈川本川における流量、浮遊土砂流出量、セシウム流出量を計算した。流量については平成

<sup>5</sup> 恩田裕一、吉村和也：河川水及び浮遊砂における放射性セシウム等の存在量の確認調査，平成24年度放射能測定調査委託事業成果報告書，日本原子力研究開発機構，2013。

<sup>6</sup> 福島県：定時降下物モニタリング結果，

[http://wwwcms.pref.fukushima.jp/pcp\\_portal/PortalServlet?CONTENTS\\_ID=27445&DISPLAY\\_ID=DIRECT&NEXT\\_DISPLAY\\_ID=U000004](http://wwwcms.pref.fukushima.jp/pcp_portal/PortalServlet?CONTENTS_ID=27445&DISPLAY_ID=DIRECT&NEXT_DISPLAY_ID=U000004) .

<sup>7</sup> 斎藤公明、青木和弘、谷畑勇夫：土壌中における放射性物質の深度分布の確認，平成23年度放射能測定調査委託事業成果報告書，日本原子力研究開発機構，2013。

23年9月～平成24年5月までの積算流量で実測値と計算値を比較したところ、相対誤差は15%であった。また、事故後から現時点までで最大規模の出水であった平成23年9月における伏黒地点での流量とSS濃度の計算結果は観測に近い変化を示した(図-10)。ここで、SS濃度には国土交通省による実測値を利用した。この国土交通省の実測時に採取されたSS試料からセシウム濃度を分析し、計算結果と比較したところ、伏黒地点では、試料5検体の実測値平均3.6 Bq/gに対して計算値が4.1 Bq/gとなり、1割程度過大であった。この計算結果に基づき、平成23年6月～平成24年12月における阿武隈川本川(伏黒地点)を通過して流下したセシウム137の量を計算したところ、総量で約3.2 TBq、日平均で5.7 GBqであった。今回の計算結果は既往報告の値(伏黒地点における平成23年6月21日～平成25年1月22日のセシウム137流出量8.4 GBq/day)ともオーダー的には同じ結果が得られた。

一方、粒径分布を考慮したモデルを阿武隈川流域に適用した計算を2011年1月～2013年12月の3年間を対象に実施した。3つの粒径区分(3  $\mu\text{m}$ 未満、3  $\mu\text{m}$ ～63  $\mu\text{m}$ 、63  $\mu\text{m}$ 以上)を設定した。八幡水位観測所地点(梁川橋下流、北緯37°52'03"東経140°36'33")における浮遊土砂流出量とセシウム137流出量の計算結果を粒径区分別に整理した結果、浮遊土砂流出量は1,619 ton/day、セシウム137流出量は58.6 GBq/dayと単一粒径による計算結果よりも過大評価となった。また計算結果では、3  $\mu\text{m}$ ～63  $\mu\text{m}$ の粒径区分が流出量に占める割合が最大であるが、セシウム137流出量は、3  $\mu\text{m}$ 未満で最大であった。

第3次航空機モニタリング結果に基づく八幡水位観測所地点を下流端とする集水域におけるセシウム137量として前述の伏黒地点における値8.4 GBq/day(伏黒地点と八幡水位観測所はかなり近い位置にある)を用いて、図-8に示したものと同様に、今後30年間に、阿武隈川流域内(ここでは八幡水位観測所地点を下流端とする集水域)に残存するセシウム137量を算定した結果、約183 TBqまで減少すると試算されるとともに、集水域内に残存するセシウム量が半減する期間は23年になると推定された。また、IAEA-TECDOC-1162<sup>8</sup>に基づく換算係数(セシウム137に関して2.1( $\mu\text{Sv/h}$ )/(MBq/m<sup>2</sup>))を用いて空間線量の変化に換算すると、集水域全体の平均では、空間線量率が0.270  $\mu\text{Sv/h}$ から0.107  $\mu\text{Sv/h}$ に低下するという試算結果となった。

<sup>8</sup> International Atomic Energy Agency (IAEA), 2000. Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency, IAEA-TECDOC-1162.

表-1 移行モデルのパラメータ

パラメータの種類	$c_f$ (h/m)			$c_h$ (1/m)	$D$ ( $\mu\text{m}$ )	$c_g$ (1/s)	$\gamma_s$
	裸地	高い植生	低い植生				
パラメータ値	0.30	0.038	0.060	150	20	$5 \times 10^{-9}$	2.7

表-2 浮遊土砂とセシウム 137 の流出量の計算結果

期間	浮遊土砂流出量		セシウム 137 流出量	
	総計	日平均	総計	日平均
	(t)	(t/day)	(GBq)	(MBq/day)
H23. 9~H24. 8	17,647	48.2	186.3	509
H24. 9~H25. 8	24,274	66.5	121.3	332

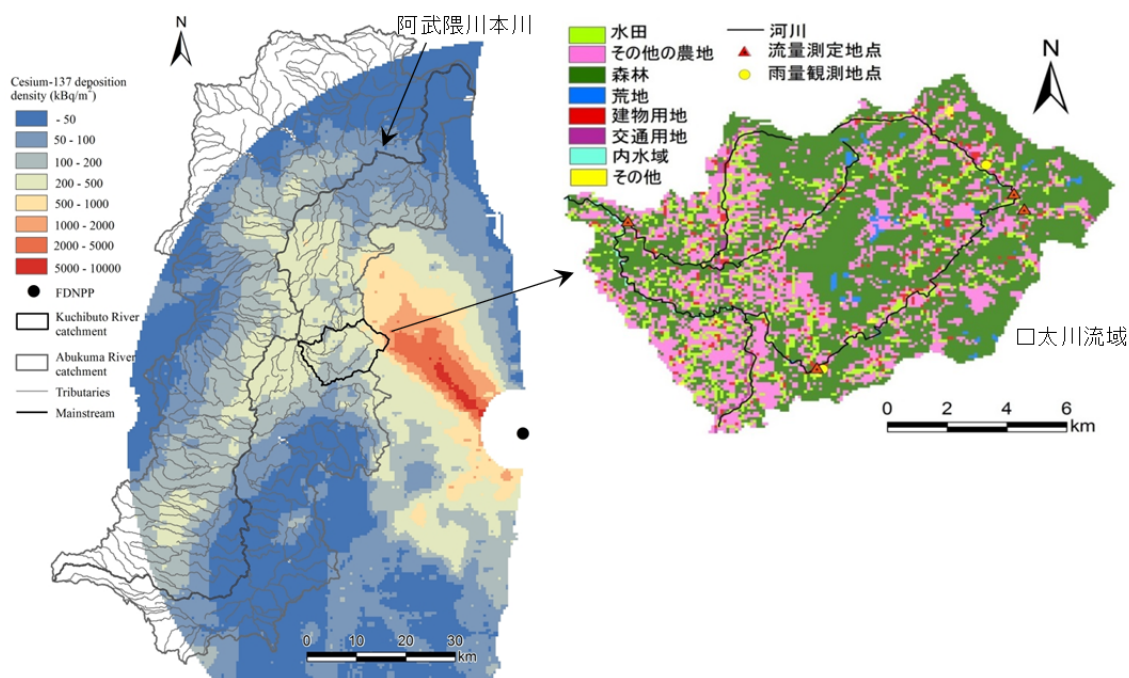


図-1 阿武隈川流域・口太川流域の位置関係（左）と口太川流域の土地利用（右）  
（右図で流域の下流端近くにある赤△が口太川下流の測定地点である）

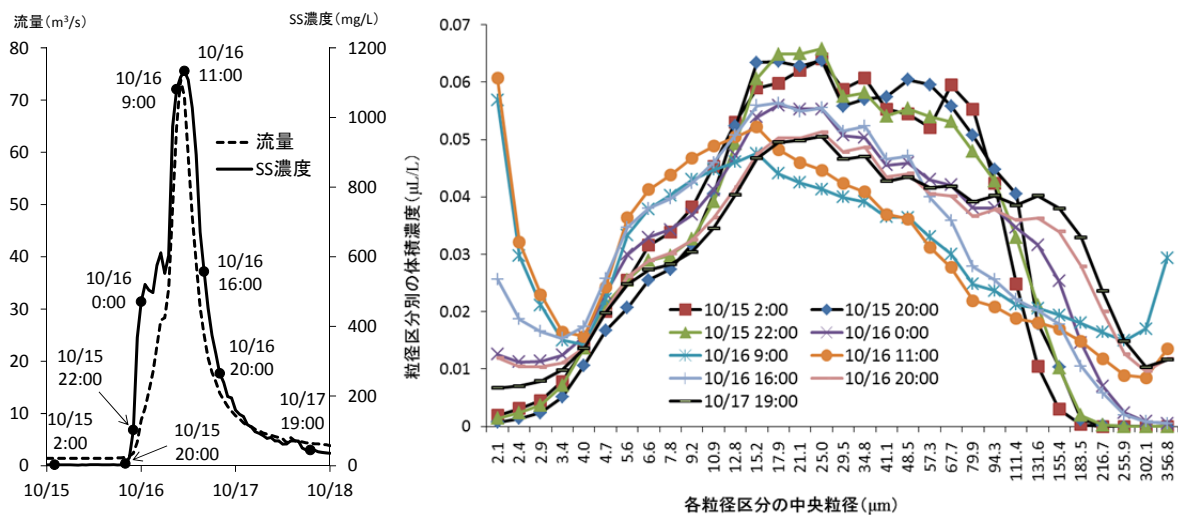


図-2 洪水時の流量・SSの変化（計算値）と、連続粒径分布測定装置による河川水中に含まれるSSの粒径区分別体積濃度の実測値  
 （平成25年10月15～17日：左図の●は右図の粒径分布測定時刻におけるSS濃度を意味する）

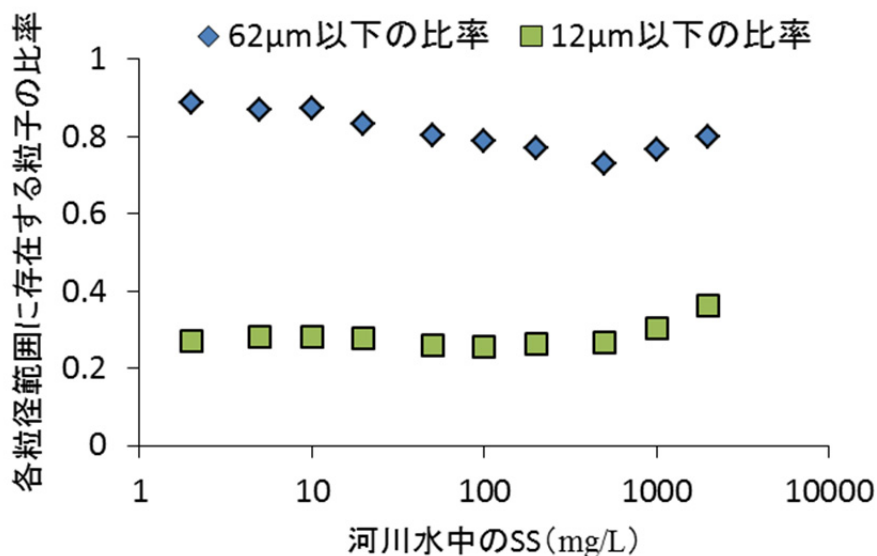


図-3 河川水のSS濃度とSSに占める細粒分の比率の関係  
 （平成25年9月20日～12月16日）

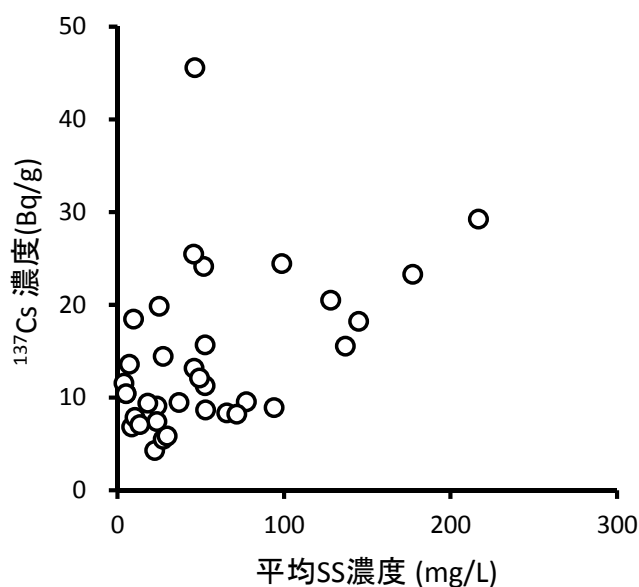


図-4 各期間の平均 SS 濃度とセシウム 137 濃度の関係

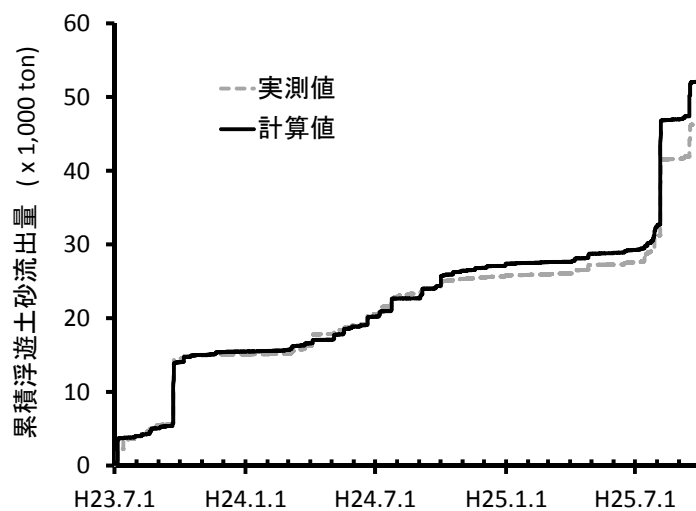


図-5 口太川下流における累積の浮遊土砂流出量  
(平成 23 年 7 月～平成 25 年 9 月)

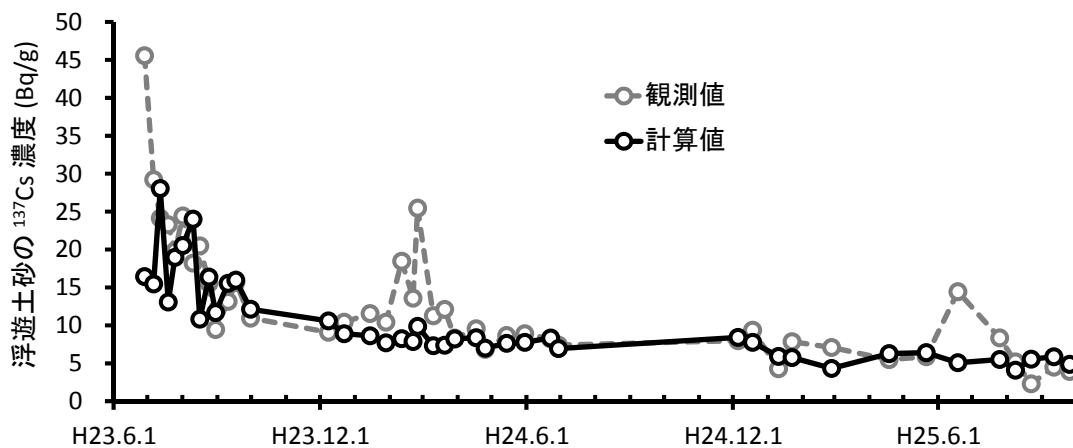


図-6 口太川下流における浮遊土砂のセシウム 137 濃度の観測値と計算値  
(平成 23 年 6 月～平成 25 年 6 月)

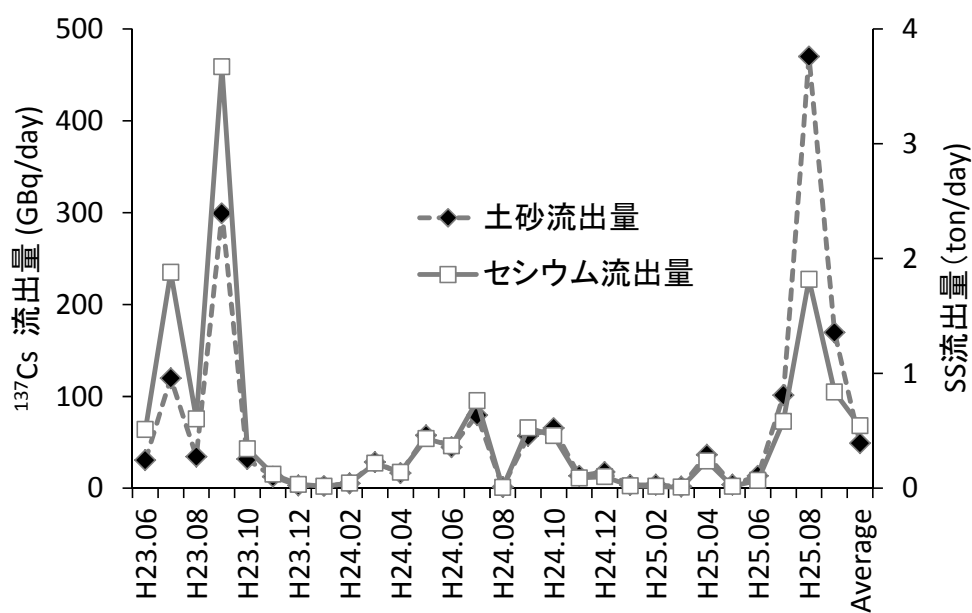


図-7 月別の浮遊土砂とセシウム 137 の流出量計算値

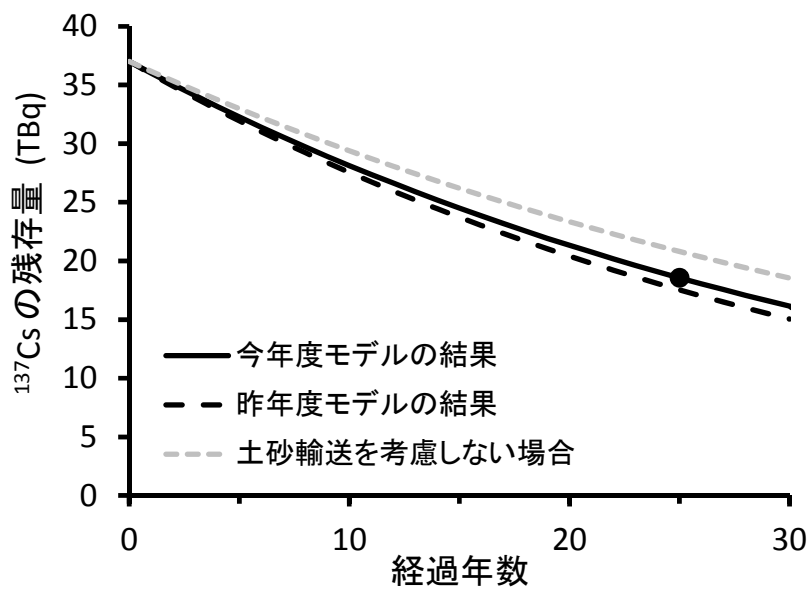


図-8 口太川流域の残存セシウム 137 量の推定値



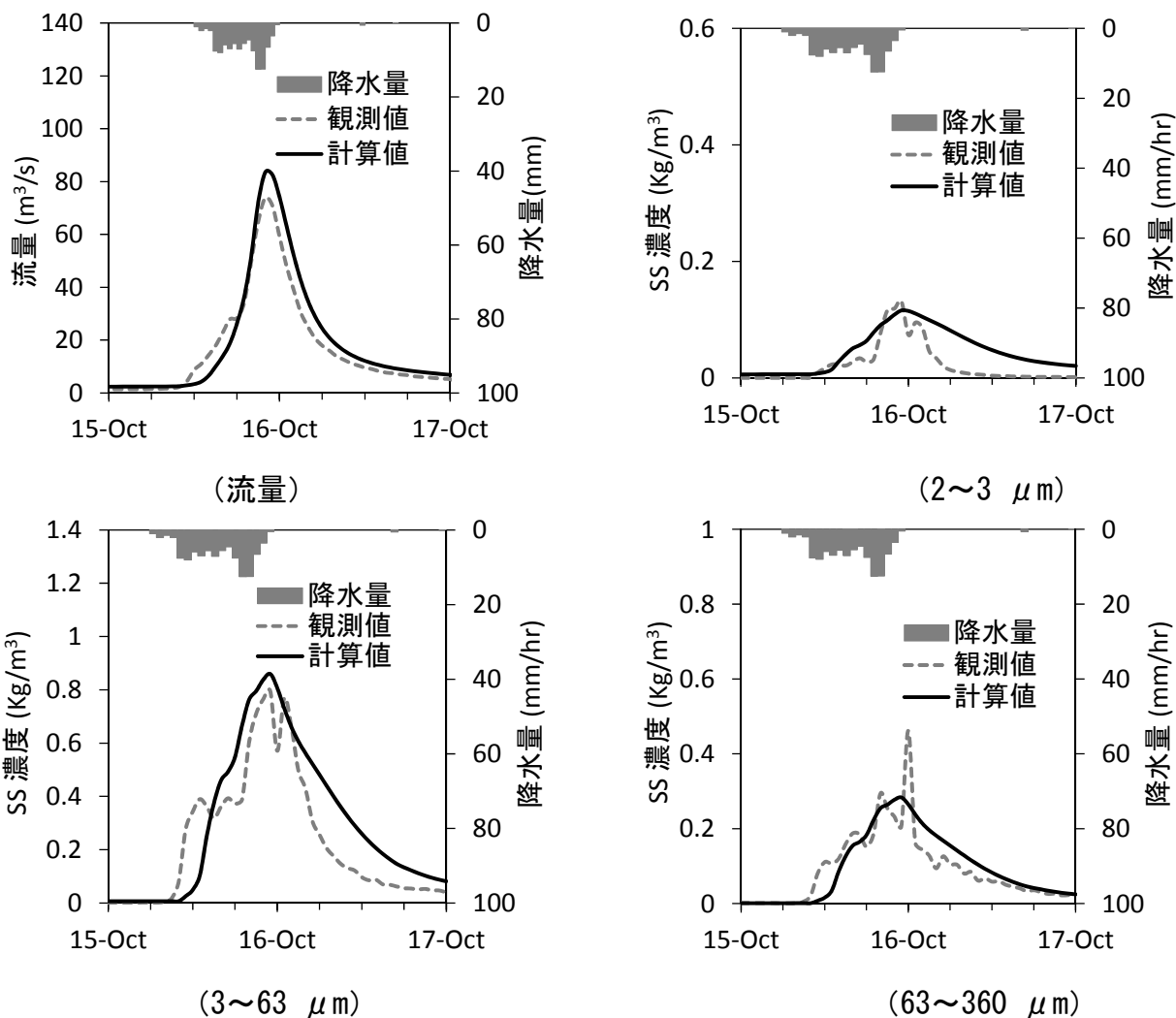


図-9 流量と粒径区別の浮遊土砂濃度の計算結果（平成25年10月）

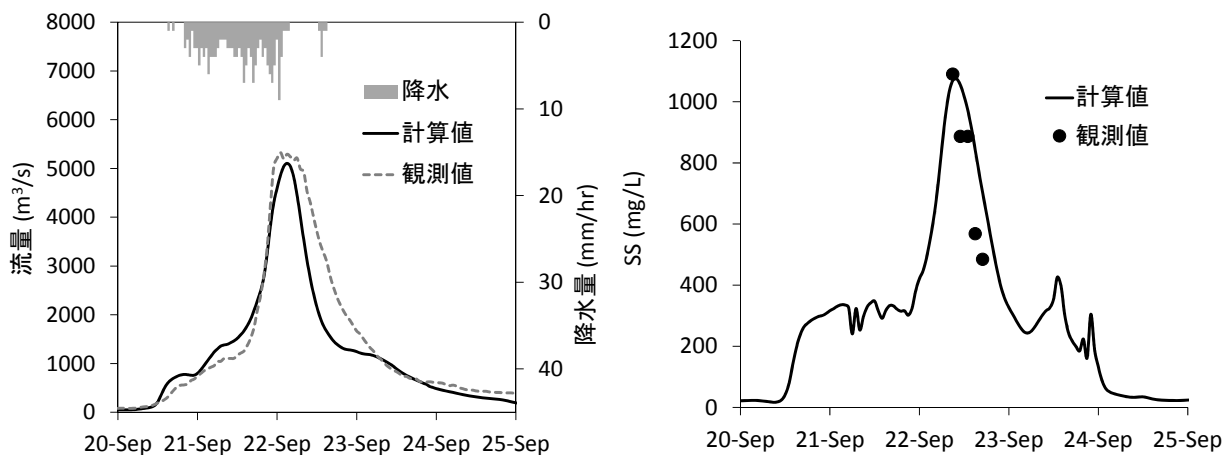


図-10 阿武隈川流域全体の計算結果