

# 河川水系における放射性セシウムの移行状況調査

恩田 裕一、谷口 圭輔（筑波大学）

難波 謙二（福島大学）

高橋 嘉夫、栗原 雄一、ファンチャオファイ（東京大学）

## 1. 調査目的

福島第一原発事故により自然環境に沈着した放射性セシウムについて、河川を介した移行は移動距離が長い陸域環境中での分布状況の把握において重要なプロセスである。これまでに、福島県及び宮城県内の河川の30か所に調査地点を設置し、懸濁粒子及び河川水に含まれる放射性セシウム濃度の測定と、河川流量及び浮遊砂濃度の観測に基づいて放射性セシウム移行量（フラックス）のモニタリングを実施してきた。平成25年度の調査では、観測装置及び記録データに不具合のあった地点を除く28地点について放射性セシウム移行量を算出し、数値モデル（一次元モデルやUSLEモデル）の検証データとして活用した。

本年度調査では、河川を通じた放射性セシウム移行量の観測を実施し、河川水中の放射性セシウム濃度の経時変化傾向の把握及び地域性の解析を行う。また、移行量のモニタリング結果を解析し、放射性セシウム濃度の経時変化  $C(t)$ 、河川流量  $Q$  及び浮遊砂移行量  $Q_s$  の関係式を地点ごとに算出する。これらの関係式をもとに、河川流量から放射性セシウム移行量を推定する  $L-Q$  式を提示することを目的とする。

また、福島市街地を流れる祓川の  $Cs-137$  流出を観測し、都市河川における放射性セシウム移行の特徴について解析を行う。さらに、河川中の放射性セシウム濃度の地域性を説明するために、河川調査地点ごとの放射性セシウム濃度の時間変化傾向を、地質や土地利用などを考慮した化学平衡モデルにより解析するとともに、土砂流出寄与域の推定を実施する。

## 2. 調査内容

### (1) 調査地点

調査地域は、阿武隈川及び浜通りの2級河川に設置した、福島・宮城県下31地点である（図-1）。そのうち6地点（No. 1-6）は平成23年6-7月観測を開始した長期観測点である。No. 7-30の24地点の観測始期は平成24年12月-平成25年1月である。但し、No. 7-16の10地点については、平成24年度の調査までに日本分析センターにより計測された浮遊砂の放射性セシウム濃度の記録が利用可能である。なお、亘理観測点（No. 31）は、岩沼[6]観測点<sup>1</sup>のごく近傍で橋梁工事が行われるため、データ取得に支障が生じた場合に備えバックアップとして設置した。

都市域からの流出を調べるため、平成26年6月より福島市内に祓川観測点を新設した（図-1、2）。祓川は、松川と荒川に挟まれた地域を東流している。上流端は松川からの取水（松川堰）であり、その後数kmでは複数の農業用水路に分流し、それらの一部は松川・荒川に合流している。その後、福島市街地に入り、上流からの農業用水の一部・都市の排水・付近の湧水を集めて松川へと至る。流路（図-2中に緑色で示した）の周辺は住宅地及び商業施設が立地する都市化の進んだ地域となっており、都市部の影響が大きい河川となっている。なお、祓川地点の集水域における平均初期沈着量を第3次航空機モニタリングデータから算出すると、平成23年7月2日の値で  $70 \text{ kBq/m}^2$  程度である（松川堰より上流の松川流域

<sup>1</sup> 以下、河川観測点については“地点名[地点番号]”の形で表記する。

で 55 kBq/m<sup>2</sup>、取水後の都市区間で 196 kBq/m<sup>2</sup>)。松川堰よりも上流の河川水のすべてが祓川に流入するわけではないため、実質的な平均沈着量は 70 kBq/m<sup>2</sup> よりも多いと考えられるが、平成 24 年より採水調査が継続されている阿武隈本川上の黒岩地点[21] (結果と考察において比較に用いる) の初期沈着量(120 kBq/m<sup>2</sup>) を大きく上回ることはないと考えられる。

## (2) 調査方法

### 1) 河川を介した放射性セシウム移行モニタリング

各調査地点には、浮遊砂サンプラー<sup>2</sup>、濁度計 (Analite turbidity meter、MacVan 社製、3000-NTU)・水位計 (RuggedTR0LL100, In-situ Inc. 社製、一部国交省・福島県による水位データで代用) を設置している。浮遊砂サンプラーは、サンプラー内を通過する河川水に含まれる浮遊砂を連続的に採取する装置で、設置期間中の時間平均的な浮遊砂試料を得ることができる。浮遊砂サンプラー内に捕捉された浮遊砂試料を回収し、110°C で乾燥した後、ゲルマニウム検出器で放射性セシウム濃度を測定し、懸濁態セシウム 134、セシウム 137 濃度とした。河川水のサンプルは、濾過した後、ろ液に含まれる溶存態の放射性セシウムを AMP による共沈処理を行って吸着・回収した後、ゲルマニウム検出器で溶存態セシウム 137 濃度を測定した。本年度は、浮遊砂試料の回収を 5 回、河川水試料の採取を 1 回実施した。

濁度計・水位計はそれぞれ 10 分ごとに河川水の濁度と河川の水位を自動記録している。現地調査の際にデータを回収し、濁度から浮遊砂濃度を、水位から流量をそれぞれ算出し、両データを (Hugh Smith 博士 (リバプール大学) 及び William Blake 博士 (プリマス大学)) に送付する。同一河川上にある他の観測点との比較や、流量と浮遊砂濃度のピークの対応を確認して、観測データに含まれるノイズを除去する。上記のデータクリーニング処理を実施後、浮遊砂濃度と河川流量、当該期間の浮遊砂の放射性セシウム濃度を掛け合わせることで、放射性セシウムの移行量が算出される。

都市域からの放射性セシウム移行調査では、祓川観測点に水位計を設置し、水位の連続観測を実施した。取得した水位データから、河川流量を (水位-流量の関係式は、平成 26 年 9 月までに実施した流量観測をもとに作成) 算出した。1 ヶ月に 2 回の河川水の採取を行い、連続遠心器を用いた溶存態・懸濁態の放射性セシウム濃度の測定及び水質の分析を行った。定期的な採水に加え、台風を含む出水時の流出状況を捉えるため、降雨時にも採水調査を行った。

### 2) 浮遊砂試料の地球化学的分析

河川浮遊砂 (試料量不足等により分析が出来なかった松原[9]・船岡大橋[18]・太田[23]・原町[29]、及び亘理[31]を除く 27 地点) 及び山木屋地区で採取されたさまざまな土地利用 (水田・森林・畑地・草地を含む) の土壌試料について、RIP、Kd (固液分配係数)、GEC (陽イオン交換容量)、有機物含量 (OM)、鉱物組成 (XRD による雲母-石英のピーク比 (Mica) / (Quartz) 比)、希土類元素 (REE= Rare Earth Elements) パターン・主要元素組成などの測定を行った。

各測定項目の分析方法は以下の通りである<sup>3 4 5</sup>。

<sup>2</sup> Phillips, J. M., Russell, M. A., Walling, D. E. (2000) Time-integrated sampling of fluvial suspended sediment: a simple methodology for small catchments. *Hydrological Processes* 14(14), 2589-2602.

<sup>3</sup> Wauters, J., Elsen, A., Cremers, A., Konoplev, A. V., Bulgakov, A. A., Comans, R. N. J. (1996) Prediction of solid/liquid distribution coefficients of radiocaesium in soils and sediments. Part one: a simplified procedure for the solid phase characterisation. *Appl. Geochem.* 11, 589-594.

- <RIP> セシウム 137 を含む濃度の異なるセシウム溶液と土壌を混合し 2 日間振とうした (セシウム 133 濃度 : 10 ppt レベル; セシウム 137 :  $3 \times 10^3$  Bq/L 程度 = 1 ppt レベル; 固液比 = 10 mg/1 mL)。RIP 値は、カルシウムマスク法で求めた。
- <GEC> アンモニウムイオンを置換イオンとする Schofield 法を用いた。
- <OM> CHN 分析装置により行った。
- <鉱物組成> XRD (Rint-2100、Rigaku 製) を用い、常法に従い XRD パターンの分析を行った。
- <REE パターン> REE 分析は、上記 28 地点のうち、浜通りの一部河川を除く 26 地点 97 試料の浮遊砂試料について行った。阿武隈川支流の試料については、主に平成 25 年 9 月に採取された試料を、阿武隈川本川の御代田 [13]、二本松 [12]、黒岩 [21]、伏黒 [5]、丸森 [17] の 5 地点については、平成 24 年 12 月から平成 26 年 10 月までの異なる時期に採取された試料について分析を行った。浮遊砂試料に対して、酸化物相と炭酸塩・リン酸塩相を取り除く前処理を行い、浮遊砂が流下する途中で付着した REE の影響を除去した上で、 $\text{HF-HClO}_4\text{-HNO}_3$  の混酸による分解を行い、ICP-MS (Agilent 7700) によって REE の濃度を測定した。
- <主要元素組成> 主成分元素組成の分析は、XRF 法により行った。乾燥後、2 mm 篩でふるった浮遊砂試料について、携帯型蛍光 X 線成分分析計 (XL3t-950S、Niton 社製) を用いて XRF 測定を実施した。測定モードは Mining Mode とし、主要な元素の存在比を計測した。

### 3. 結果と考察

#### (1) セシウム 137 濃度経時変化

図-3 及び表-1~3 に、長期観測 6 地点における懸濁態及び溶存態セシウム 137 濃度の経時変化を示す。懸濁態セシウム 137 濃度 (懸濁態 1 kg あたりの値) については、昨年度に引き続き、減少傾向が続いていた (図-3 (a))。溶存態セシウム 137 濃度については、地点毎のばらつきが大きいため評価が難しいが、概ね横ばいの傾向が見られた (図-3 (b))。

平成 26 年 12 月までのデータをもとに、懸濁態セシウム 137 濃度の変化傾向を 2 重指数関数の形で定式化した。懸濁態セシウム 137 濃度を流域の平均初期セシウム 137 沈着量 (第 3 次航空機モニタリングによる平成 23 年 7 月 2 日の値を使用) で割った値  $C'(t)$  [ $(\text{Bq}/\text{kg})/(\text{Bq}/\text{m}^2)$ ] は、以下の形でフィッティングできた (図-4)。経過時間  $t$  の単位は年である。

$$\text{阿武隈川本川} : C'(t) = 2.55 \exp(-4.88 t) + 0.149 \exp(-0.694 t) \quad (1a)$$

$$\text{阿武隈川東側支流} : C'(t) = 0.202 \exp(-4.96 t) + 0.0507 \exp(-0.410 t) \quad (1b)$$

$$\text{阿武隈川西側支流} : C'(t) = 1.02 \exp(-4.58 t) + 0.141 \exp(-0.441 t) \quad (1c)$$

$$\text{浜通りの河川} : C'(t) = 0.793 \exp(-4.01 t) + 0.0385 \exp(-0.160 t) \quad (1d)$$

阿武隈水系に関する式 (1a)–(1c) は、阿武隈川における放射性セシウム移行の 1 次元・

<sup>4</sup> Wauters, J., Vidal, M., Elsen, A., Cremers, A. (1996) Prediction of solid/liquid distribution coefficients of radiocaesium in soils and sediments. Part two: a new procedure for solid phase speciation of radiocaesium. Appl. Geochem. 11, 595–599. ([http://www.jaea.go.jp/fukushima/kankyoanzen/mapping\\_report/mappinglist.html](http://www.jaea.go.jp/fukushima/kankyoanzen/mapping_report/mappinglist.html)).

<sup>5</sup> Fan, Q.H., Takahashi, Y., Iwatani, H., Tanaka, K., Sakaguchi, A. (2014) Effect of mineralogical composition and nature organic matter on cesium adsorption and mobility. Geochim. Cosmochim. Acta 135 (2014) 49–65.

2次元数値モデル<sup>6</sup>に反映させた。

水境川[1]・口太川上流[2]地点が位置する山木屋地区は、避難指示解除準備区域に指定されており、平成26年度春以降集中的に除染作業が実施されている。これら2地点のセシウム137濃度は、今年度に入り明らかに低下を示したので、平成25年度までを除染前、平成26年度を除染後として、以下の2式を適用することとした(図-5)。

口太川上流・水境(除染前) :

$$C'(t) = 0.0554 \exp(-2.11 t) + 0.0347 \exp(-0.240 t) \quad (2a)$$

口太川上流・水境(除染後) :

$$C'(t) = 0.0190 \exp(-0.234 t) \quad (2b)$$

## (2) 河川を介したセシウム137移行量観測

### 1) 放射性セシウム移行量観測データによるQ-Qs式算出

平成26年10月までの流量・浮遊砂濃度について、リバプール大・プリマス大にてデータの解析を実施した。データクリーニング作業を実施したのち、実測に基づく河川流量Q(kg/month)と浮遊砂移行量Qs(kg/month)が算出された期間のデータを用いて、27の観測点地点について<sup>7</sup>、以下のべき乗の形のQ-Qs式を示した(図-6,表-4)。

$$Q_s(Q) = a Q^b \quad (3)$$

ここで、 $a, b$ はフィッティングにより地点ごとに算出される定数である。

浮遊砂移行量の補完方法としては、生データ(本調査では10分間隔)から算出された流量-浮遊砂濃度の線形の関係式を用いる方法が一般的である。しかし、実際に両者を算出して比較を行ったところ、浮遊砂移行量の月間値を用いて式(3)のべき乗式を用いるほうが、より良い相関関係を得ることができた(図-7)。

### 2) 流域平均雨量データによる河川流量推定

河川流量観測が行われていない期間の河川流量データの補完のため、流域の月間平均雨量P(mm)と月間河川流量Q(kg/month)の間の回帰式を以下のように作成した。

$$Q(P) = c \exp(dP) \quad (4)$$

$c$  [kg],  $d$  [ $\text{mm}^{-1}$ ]は、フィッティングにより地点ごとに算出される定数である。Pは、観測エリア周辺に位置する50箇所の降水量データをもとに、ティーセン法<sup>8</sup>を用いて流域平均した一時間雨量を月毎に積算して求めた。ただし、ダムの手元下流側に位置する観測点(真野[7]・瀬ノ上[19]観測点など)や、流域が小さく参照する気象観測点が少ない地点(浅見観測点[25]など)では相関が低くなっている(表-4)。

<sup>6</sup> 本報告書(“平成26年度放射性物質測定調査委託費(東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約及び移行モデルの開発)事業”成果報告書)の「河川水系における放射性セシウム移行モデルの検証」を参照のこと。

<sup>7</sup> 二本松[12]・丸森[17]の2地点については、濁度計の埋没等により正常なデータを取得できた期間が短いため、船岡大橋[18]では浮遊砂試料の採取を行っていないため、亘理[31]は岩沼のバックアップ地点であるため、Q-Qs式を算出していない。

<sup>8</sup> ティーセン法とは、流域を各観測点を含む多角形の領域に分割し、その面積比で重み付けして流域の平均降水量を算出する方法。各領域は、隣接する観測点の間に引いた垂直二等分線を境界とする多角形となる。

### 3) L-Q 式の算出

河川流量  $Q$  から懸濁態によるセシウム 137 の移行量  $L$  [Bq/month] を概算する L-Q 経験式は、以下の形で表される。

$$L = D \times C'(t) \times Q_s(Q) \quad (5)$$

ここで、 $D$  は流域全体のセシウム 137 の平均初期沈着量 [Bq/m<sup>2</sup>]、 $C'(t)$  は、流域の初期沈着量あたりのセシウム 137 濃度 [(Bq/kg)/(Bq/m<sup>2</sup>)] で、観測地点の地域により式 (1a)–(1d) のいずれかを適用する。 $Q_s(Q)$  は式 (3) に示した浮遊砂移行量 (kg/month) である。試みに、長期観測 6 地点のうちの 1 点である岩沼 [6] 観測点について、セシウム 137 移行量の実測値と L-Q 式からの予測値を比較したところ、両者の値はよく一致しており、 $R^2 = 0.96$  の良い相関が見られた。L-Q 式はこれまでのセシウム 137 移行量をよく再現していると言える (図-8)。

### 4) 河川を介したセシウム 137 移行量の特徴

図-9 に、長期観測 6 地点におけるセシウム 137 移行量と、流域の初期沈着量に対するセシウム 137 の流出率を示した。積算区間は平成 23 年 7 月～平成 26 年 10 月までとし、平成 23 年 7 月の 5\_伏黒・6\_岩沼地点及び平成 24 年 5～7 月の全 6 地点について、雨量データからの流量補完後、L-Q 式を用いて月間のセシウム 137 流出量を算出した。月間のセシウム 137 移行量の時系列変化をみると、長期的には横ばいか、ごく緩やかな減衰傾向があるが、出水などの流量の変動に関係して 3～4 桁の範囲で移行量の増減が見られる (図-9(a))。流出率の積算値については、平成 25 年度報告書と同様、口太川では上流ほど流出率が低く、阿武隈本川の流出率は口太川に比べ高くなる傾向が見られた。平成 25 年の欠測期間を補完した上での、平成 23 年 7 月以降の阿武隈本川のセシウム 137 流出率は、初期沈着量の 2～3% と推定された (図-9(b))。

30 地点での移行量観測が開始された平成 24 年 10 月～平成 26 年 10 月までの間の積算のセシウム 137 移行量と流域の初期沈着量に対する流出率を、図-10 に示した。平成 25 年度調査では浜通りの一部の河川で欠測期間が存在していたが、今回は、L-Q 式を用いて流出量を補完した。阿武隈川本川最下流の岩沼 [6] 地点における、この期間のセシウム 137 移行量は約 3.1 TBq で、浜通りの河川全体を足したセシウム 137 移行量は 2.3 TBq 程度であった (図-10(a))。流域の初期沈着量に対する流出率については、流域にダムを持つ観測点 (瀬ノ上 [19]・赤沼 [30]・真野 [7]・小島田堰 [8]・北町 [15]・太田 [23]・請戸 [27]) では、北町 [15] 観測点を除き、近隣の流域ダムを持たない観測点よりも低い値を示した (図-10(b))。なお、請戸 [27] 地点は流出率が大きく見えるが、同じ水系にあり、流域にダムを持たない支流上にある高瀬 [28] 地点に比べると流出率は小さい。ダムにより浮遊砂の一部がトラップされている可能性を示唆している。

### (3) 都市域における河川水中のセシウム 137 濃度のモニタリング

祓川観測点における、懸濁態のセシウム 137 濃度 (懸濁物質 1 kg あたり) を図-11(a) に示す。「調査地点」で述べたように、祓川地点と阿武隈川本川上の黒岩 [21] 地点とで、集水域の平均初期沈着量に大きな差は無いが、祓川観測点におけるセシウム 137 濃度は、阿武隈川本川の黒岩 [21] 地点よりも高い値で推移した (図-11(a))。同様の傾向は、郡山市内に位置する富田 [22] 観測点 (流域全体に占める都市の割合が 13% で、全 31 地点のなかで 2 番目に高い) でも見られた。図-11(b) に、富田 [22] における懸濁態セシウム 137 濃度を示す。

比較のため、富田[22]の近傍に位置し、流域の平均初期沈着量が近く、阿武隈本川上に位置する御代田[13]の値もプロットした。祓川の場合と同様、阿武隈本川上の観測点（御代田[13]）よりも、都市域（富田[22]）のセシウム 137 濃度が高い状態が継続している。水 1L あたりのセシウム 137 濃度についても、祓川観測点の値が黒岩[21]地点よりも高い値を示した（図-11(c)）。懸濁態の最高値（4 Bq/L）、溶存態の値の範囲（0.03-0.09 Bq/L）は、ともに黒岩地点の平成 24 年の観測値よりも高い（図-11(d)）。これらの都市河川の流入先である阿武隈川本川では浮遊砂中の放射性セシウム濃度は低下傾向が続いており、都市河川からの流出粒子によって下流域の空間線量率が上昇することはないと見られる。

#### (4) 流域の土地利用割合及び浮遊砂の RIP とセシウム 137 濃度の減少傾向の関係

平成 23 年 8 月から平成 26 年 12 月までの期間を対象に、No. 3-9、11-16 の観測点（阿武隈川本川・支流・浜通りの河川を含む）における流域の初期沈着量あたりのセシウム 137 濃度  $C'(t)$  の経時変化を、図-12 に示す（水境川[1]・口太川上流[2]の 2 地点は除染の影響があるため、小名浜[10]地点は汽水域で塩水の影響が考えられるため除外した）。各地点の  $C'(t)$  の経時変化を指数関数 ( $C'(t) = A \exp(-kt)$ ) の形に近似し、指数関数のパラメータ（初期値  $A$ 、減少速度  $k$ ）と流域の土地利用別被覆割合との関係を解析した。この解析で 2 重指数関数を用いないのは、No. 7-16 の地点で、事故後 1 年以内のデータ数が少ない（最大 3 点）ためである。なお、流域の土地利用別被覆率は、環境省による「第 2-5 回植生調査集約シェープファイル<sup>9</sup>」をもとに、調査地域の土地利用を水田・畑・草地裸地・森林・都市域・水界・その他に分類し、土地利用ごとの被覆率を算出した。その際、避難区域内の水田・畑については、未耕作であることから草地裸地に分類した（図-13(a)）。セシウム 137 濃度の減少速度  $k$  [年<sup>-1</sup>]と土地利用別の被覆率[%]との関係を、図-13(b-f) に示す。森林との相関はみられないが、水田・都市住宅・畑・草地裸地の被覆率との間に比較的高い相関があることがわかる。そこで、土地利用別の被覆率を説明変数として、 $k$  について重回帰分析を行い、

$$k = 0.023 + 0.14 p_{\text{都市住宅}} + 0.065 p_{\text{水田}} + 0.0047 p_{\text{草地裸地}} - 0.011 p_{\text{都市住宅}} p_{\text{水田}} \quad (6)$$

という重回帰式を得た（自由度調整済み  $R^2$  は 0.95、 $p < 0.001$ ）<sup>10</sup>。式中の  $p_n$  は、土地利用  $n$  の被覆率（%）を、説明変数の積は交互作用項を表す。定数項は、セシウム 137 の崩壊定数（年<sup>-1</sup>）である。解析結果の詳細を表-5 に示す。草地裸地の係数以外は 5% 有意の範囲内であった。なお、森林が面積比で最大を占める土地利用であるにもかかわらず式(6)に含まれないのは、セシウム 137 濃度の減少速度が非常に遅く、物理減衰の値にほぼ一致するという特徴によると考えられる。実際に、山木屋サイトの森林試験流域のうち、浮遊砂のセシウム 137 濃度の減衰が最も遅い疣石山流域で観測された低減速度は 0.028 [年<sup>-1</sup>]で、セシウム 137 の崩壊定数（0.023）とほぼ一致していた<sup>11</sup>。

<sup>9</sup> 環境省自然環境局生物多様性センター(2005) 第 2-5 回植生調査集約シェープファイル第 2 版、(<http://www.biodic.go.jp/trialSystem/info/vg.html>)。

<sup>10</sup> 各地点の  $k$  の値から物理減衰の寄与 0.023 を差し引いた上で、定数項なし、水田・都市住宅・畑・草地裸地の土地被覆率及びそれらの交互作用項を初期の説明変数として、ステップワイズ式変数選択（変数増減法）により係数を決定し、式(6)の回帰式（自由度調整済み決定係数=0.95）を得た。解析には、統計解析ソフト R(ver. 3.0.2)を用いた。

<sup>11</sup> 本報告書（“平成 26 年度放射性物質測定調査委託費（東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約及び移行モデルの開発）事業” 成果報告書）の「森林環境中等における放射性セシウムの移行調査」を参照のこと。

さらに、係数 A についても土地利用別の被覆率を説明変数とした重回帰解析<sup>12</sup> を実施し、式 (7) の回帰式を得た (自由度調整済み  $R^2$  は 0.63、 $p < 0.01$ )。ただし、表-6 に示すように各係数の有意確率は高くない。

$$A = 0.0059 p_{\text{水田}} + 0.0014 p_{\text{都市住宅}} + 0.010 p_{\text{畑}} + 0.0019 p_{\text{草地裸地}} \quad (7)$$

式 (7) においても森林が説明変数に入っていないが、森林はどの流域においても最大の面積を占めているため、値の変化割合が他の土地利用より小さくなることが影響している可能性がある。

図-14 に、式 (6) (7) の指数関数式による推定値と、実測の  $C'$  の値の比較の例 (口太川下流 [4]、伏黒 [5]) を示す。実際の低下傾向をよく再現していることが分かる。また、USLE モデル計算で得られたセシウム 137 流出フラックスを土砂流出量で除すことにより、侵食土砂のセシウム 137 濃度を試算すると<sup>12</sup>、上記の重回帰モデルで表した時間変化傾向と概ね対応する結果が得られた。

#### (5) 浮遊砂試料の地球化学的分析

27 箇所の河川観測点で採取された浮遊砂試料を分析した結果、浮遊砂試料をセシウム 137 トレーサーを用いて実験室系で測定した放射性セシウムの固液分配係数  $K_d$  (mL/g) と、浮遊砂試料の RIP 値 (mmol/kg) には、比例の関係が見られた (図-15(a);  $R^2=0.42$ )。この結果は、平成 25 年度報告書で報告した、液体中のセシウムが懸濁粒子に取り込まれる際の吸着しやすさを表す熱力学的モデル (GAM = Generalized Adsorption Model) により理論的に支持される。福島河川におけるセシウム濃度 (放射性同位体 + 安定同位体) のレベルでは、セシウム吸着は粒子の Frayed Edge Site (FES サイト) のみで起きる (図-15(b)) ため、浮遊砂や土壌による放射性セシウムの吸着特性を、RIP 値 (= FES サイトへの吸着特性を示す) で表すことができる。

RIP の地域差を決定する要因を調べるため、それぞれ規格化された CEC (陽イオン交換容量)、有機物含量 (OM)、鉱物組成 (XRD による雲母-石英のピーク比 (Mica) / (Quartz) 比)、粒径 (SA=比表面積。値が大きいほど平均粒径は小さい) を説明変数として重回帰分析<sup>13</sup> を実施し、以下の回帰式を得た。(自由度調整済み  $R^2$  は 0.98、 $p < 0.001$ )。

$$\log\{\text{RIP}/(\text{mmol}/\text{kg})\} = 0.86 \log(\text{CEC}_{\text{norm}}) - 0.34 \log(\text{OM}_{\text{norm}}) \\ + 0.027 \log\{(\text{Mica}/\text{Quartz})_{\text{norm}}\} + 0.46 \log(\text{SA}_{\text{norm}}) \quad (8)$$

解析結果の詳細を表-7 に示す。4 つの説明変数のうち、鉱物組成の項は  $p$  値が大きかった。他の 3 変数についてはいずれも  $p < 0.001$  であることから、陽イオン交換容量・有機物含量・粒径による影響ははっきり出ている。

<sup>12</sup> 水田・畑・草地裸地・都市住宅・森林の被覆率を候補とし、VIF の値が小さくなる組み合わせとして水田・畑・草地裸地・都市住宅の被覆率を説明変数として選択、強制投入法にて式 (8) を算出した。解析には、統計解析ソフト R(ver. 3.0.2) を用いた。

<sup>13</sup> 各説明変数の間に多重共線性 (=説明変数間の相関が高く、重回帰解析の結果に悪影響が出る状態) がないことを、VIF を算出することにより確認した後、強制投入法により式 (6) を得た。解析には、統計解析ソフト R(ver. 3.0.2) を用いた。

農業環境技術研究所(農環研)が平成25年度の調査<sup>14</sup>で報告した土壌のRIP値(図-16(a))は、浜通り地域で低く、阿武隈山地を流域とする支流や阿武隈川下流域(二本松より下流)で高いという傾向がある。また、ばらつきが非常に大きいものの、RIPの値を土地利用別に見てみると、畑地・水田にくらべ草地(牧草地)のRIPの値が低い(図-16(b); 平均値として幾何平均を示した)。さらに、浮遊砂試料のRIP値と、土地利用の種類によらず各河川の流域で得られている土壌試料の平均のRIP値を比較すると(図-17)、弱い正の相関が見られた( $R^2 = 0.281$ )。流域中の多くの土地利用の地域から土砂が流入し、河川浮遊砂のRIPを決定しているとみられる。

ここで、浮遊砂試料のRIPを説明変数に加え、第(4)節で解析を行ったパラメータA及びkに関する重回帰解析<sup>15 16</sup>を実施し、

$$k = 0.023 + 0.28\log(\text{RIP}) + 0.00034 p_{\text{都市住宅}} - 0.020 p_{\text{草地裸地}} + 0.0043 p_{\text{都市住宅}} p_{\text{草地裸地}} \quad (6')$$

$$A = 0.044\log(\text{RIP}) - 0.015 p_{\text{都市住宅}} - 0.013 p_{\text{畑}} + 0.0063 p_{\text{都市住宅}} p_{\text{畑}} \quad (7')$$

という回帰式を得た。それぞれの解析結果を表-8と表-9に示す。土地利用別被覆率のみで算出した場合と、回帰式の精度(自由度調整済み $R^2$ 及びp値など)は同程度であった。

#### (6) 浮遊砂試料の地球化学分析結果による寄与率推定

阿武隈川の下流域においては、集水域内に放射性セシウム沈着量の異なる地域が存在するため、各地域の寄与率の違いによる放射性セシウム濃度の変化が起こる可能性がある。丸森[17]地点を例に、上流部(二本松[12]地点より上流)・西側支流(瀬ノ上[19]、八木田[20]の2地点を含む)・東側支流(口太川下流[4]・月館[11]の2地点を含む)の3地域の寄与率推定を行った。各地域は、表層地質<sup>17</sup>と放射性セシウム沈着量に以下の特徴がある。上流部には、火山岩・深成岩・堆積岩が同程度の割合で存在し、セシウム137の沈着量は低い。西側支流部は、火山岩の占める割合が3地域で最も高いが、セシウム137の沈着量は低い。東側支流部は、阿武隈花崗岩帯を含むために深成岩の割合が極めて高く、セシウム137の沈着量が高い(図-18)。

寄与率推定は、3つの地域(エンドメンバー)を特徴付けるふたつのパラメータ(A、Bとする)を設定し、以下の連立方程式を解くことによる。

$$\alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (9a)$$

$$\alpha A_{\text{上流}} + \beta A_{\text{西川支流}} + \gamma A_{\text{東側支流}} = A_{\text{丸森}} \quad (9b)$$

$$\alpha B_{\text{上流}} + \beta B_{\text{西川支流}} + \gamma B_{\text{東側支流}} = B_{\text{丸森}} \quad (9c)$$

<sup>14</sup> 日本原子力研究開発機構, “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事業,” 成果報告書, Part2, (平成26年3月)。

<sup>15</sup> kについて: VIFの値をもとに都市住宅・草地の被覆率と $\log(\text{RIP})$ を説明変数として選択、これら及びその交互作用項を説明変数とし、ステップワイズ式変数選択(変数減少法)を用いて式(6')を得た。解析には、統計解析ソフトR(ver. 3.0.2)を用いた。

<sup>16</sup> Aについて: VIFの値をもとに $\log(\text{RIP})$ 及び都市住宅・畑の被覆率を説明変数として選択、これら及びその交互作用項を説明変数とし、ステップワイズ式変数選択(変数減少法)を用いて式(7')を得た。解析には、統計解析ソフトR(ver. 3.0.2)を用いた。

<sup>17</sup> 産業技術総合研究所 地質調査総合センター(編)(2014), 20万分の1日本シームレス地質図 2014年1月14日版, 産業技術総合研究所 地質調査総合センター。



$\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$ は、それぞれ上流部・西側支流・東側支流の寄与率である。

地域を特徴付けるパラメータとして、主要元素組成と REE パターンを用いた事例を図-19 に示す。主要元素組成については、XRF 測定によって求めた Al と Ti の存在割合[%]をパラメータに設定したが、丸森[17]地点の試料の測定値が、3つのエンドメンバーが作る三角形の外側に出ている場合があり、この場合は寄与率推定ができない(図-19(a))。一方、REE パターンについては、La/Sm 比(鉱物中のランタン [La] とサマリウム [Sm] の存在量の比)及び Eu/Eu\* 比(Eu 異常を表し、鉱物中のユーロピウム [Eu] と周期表の両隣の元素であるサマリウム [Sm] とガドリニウム [Gd] の存在量の比)をパラメータに設定した。これらは、マグマの分化過程に関係するパラメータで、浮遊砂試料がどのような種類の岩石を起源としているかを示す指標である。REE パターンを用いた場合は、すべての丸森[17]地点の測定値が、エンドメンバーの三角形の中に入り、寄与率推定が可能であった(図-19(b))。これは、REE 解析の際には水酸化鉄相やケイ酸塩/炭酸塩相などの付着成分を除去しているため、主要元素の分析結果よりも母岩の性質をよく反映しているためと考えられる。図-20 に、2つの手法で算出された寄与率を示した。

本川上流部、西側支流部、東側支流部の寄与率と、各エンドメンバーのセシウム 137 濃度の値から、丸森[17]のセシウム 137 濃度を推定した(図-21(a))。実測のセシウム 137 濃度と寄与率計算から算出されたセシウム 137 濃度を比較すると、ある程度類似した傾向を示した。例えば、平成 25 年 11 月 19 日に採取された浮遊砂試料では、西側支流部の寄与が大きく、またこの地域はセシウム 137 濃度が低いため、丸森[17]のセシウム 137 濃度もこの時期に低くなった。2つの手法による解析結果が異なる場合もあったが、流下途中で 2 次的に付着した成分の影響を除去している REE パターンを用いた場合のほうが、実測のセシウム 137 濃度の増減をよく再現している(図-21(a))。

東側支流部の寄与が大きいと予測された時期については、セシウム 137 濃度を過大に評価する傾向があった(図-21(b)。実測値と寄与率からの推定値が一致する場合、図中の点線上に値がプロットされる)。東側支流部の観測点(口太川下流[4]・月館[11])が、この地域の中でも放射性セシウムの沈着量の多い支流の上にあることが関係していることから、東側支流部に位置し、口太川や広瀬川よりもセシウム 137 濃度が低い支流から流入した浮遊砂が影響したと考えられる。

主要元素及び REE パターンをエンドメンバーとした推定法による本流上流部及び東西流域からの寄与率の推定結果と、各流域の平均降水量の実測値との比較を行ったところ、両者の間に似た傾向が見られた。平成 25 年 11 月 19 日の試料の採取期間について、積算降水量の比を取ると、東側流域の割合が 23%と少なく、西側支流・本川上流の影響が大きいという結果となった。セシウム 137 濃度の過大評価が見られた平成 25 年 6 月 18 日の試料でも、東側支流の割合が 50%と高くなり、東側支流の寄与率が高いという推定結果と整合する結果が得られた。

#### 4. まとめ

河川を通じた放射性セシウムの移行観測を継続し、平成 27 年 1 月までの放射性セシウム濃度を計測し、平成 26 年 10 月までのセシウム 137 移行量を算出した。この結果をもとに、地域ごとの懸濁態セシウム 137 濃度の経時変化を定式化し、阿武隈川における放射性セシウム移行の 1 次元・2 次元数値モデル<sup>18</sup> の入力値として使用した。また、各観測点にお

<sup>18</sup> 本報告書(“平成 26 年度放射性物質測定調査委託費(東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約及び移行モデルの開発)事業”成果報告書)の「河川水系における放射性セ

る L-Q 式を算出し、河川流量データから放射性セシウムの移行量を推定することが可能となった。福島市街を流れる祓川及び郡山市街を流れる富田[22]観測点における観測結果から、都市河川については、阿武隈川本川と比べてセシウム 137 濃度が高めに推移していることがわかった。本川のセシウム濃度に影響がないことからわかるように、都市からの流出は下流域の空間線量率に影響するほどのものではない。

平成 23 年 8 月以降の河川中のセシウム 137 濃度の減少傾向が、流域の土地利用別の被覆率と高い相関を持つことを示した。土地利用別の被覆割合を説明変数とした重回帰解析を実施し、相関の高い回帰式を算出できた。RIP を加えた重回帰モデルにおいても同様の結果が得られた。また、さまざまな土地利用からの流出土砂の組み合わせによって計算されるセシウム 137 濃度の低下傾向とは概ね対応していた。

河川浮遊砂及び土壌試料の分析により、福島県のセシウム濃度の条件下では放射性セシウムの吸着の程度を RIP で評価可能であることが分かった。また、河川浮遊砂の RIP 値と、対応する流域平均の土壌の RIP 値には相関があった。

REE パターンと主要元素組成という 2 種類の化学組成パラメータを用いて、丸森[17]地点の浮遊砂のセシウム 137 濃度に対する阿武隈川上流部、西側支流部、東側支流部の 3 成分による寄与率推定を実施した。算出された寄与率をもとに推定された丸森地点におけるセシウム 137 濃度は、実測の値と類似した増減の傾向を示し、REE パターンや主要元素組成からセシウム 137 の起源地域を推定できることが示唆された。特に、流下時に付着した成分を取り除く前処理を行った REE パターンからの推定で、よい推定結果が得られた。

表-1 放射性セシウム濃度の測定結果 (1)

地点 No.	地点名	平成 26 年 8 月 4 日～9 日						
		Cs-134		Cs-137		懸濁物の D50 ( $\mu$ m)	溶存態 Cs-137	
		放射能 (Bq/kg)	±誤差	放射能 (Bq/kg)	±誤差		放射能 (mBq/kg)	±誤差
1	水境川	1,600	62	4,800	91	27.4	130	5.8
2	口太川上流	1,100	50	3,300	73	33.9	29	1.8
3	口太川中流	710	38	2,100	54	46.5	9.2	0.44
4	口太川下流	620	36	1,900	51	35.9	1.6	0.44
5	伏黒	800	40	2,300	57	26.3	26	1.4
6	岩沼	410	26	1,200	37	25.3	6.6	0.47
7	真野	5,000	200	14,000	290	34.5	9.2	0.5
8	小島田堰	2,000	63	6,300	92	22.1	2.9	0.25
9	松原						2.8	0.31
10	小名浜	300	22	760	29	19.8		
11	月館	490	27	1,600	39	34.4	1.5	0.14
12	二本松	660	31	2,000	44	23.2	46	2
13	御代田	330	22	910	30	29.5	12	0.76
14	西川(県)	160	11	500	15	25.1	12	0.65
15	北町	5,000	200	14,000	280	27.3	140	5.3
16	川俣	430	26	1,300	37	44.1	2.4	0.18
17	丸森	690	45	2,100	65	30.3	360	16
18	船岡大橋						6.5	0.75
19	瀬ノ上	390	23	1,200	34	26.4	1.3	0.12
20	八木田	360	23	920	31	25.0	10	0.6
21	黒岩	990	63	3,000	89	25.8	8.9	0.56
22	富田	1,200	65	3,900	97	26.9	15	0.69
23	太田	14,000	910	40,000	1,300	31.8	170	6
24	小高	5,900	250	17,000	360	23.5	33	1.3
25	浅見						12	0.73
26	津島	6,200	250	18,000	350	38.3	57	2.4
27	請戸	13,000	350	41,000	510	21.5	460	17
28	高瀬	2,300	110	7,800	160	36.0	12	0.5
29	原町	6,800	250	21,000	360	25.8	28	1.3
30	赤沼	150	13	410	17	31.1	30	2.9
31	亘理	810	43	2,300	60	19.9	9.7	0.68

濃度の値は有効数字 2 ケタで表記。

空欄は“測定試料なし”を表す。

表-2 放射性セシウム濃度の測定結果 (2)

地点 No.	地点名	平成 26 年 9 月 8 日～11 日					平成 26 年 10 月 20 日～21 日				
		懸濁態 Cs-134		懸濁態 Cs-137		懸濁物 の D50 ( $\mu$ m)	懸濁態 Cs-134		懸濁態 Cs-137		懸濁物 の D50 ( $\mu$ m)
		放射能 (Bq/kg)	±誤差	放射能 (Bq/kg)	±誤差		放射能 (Bq/kg)	±誤差	放射能 (Bq/kg)	±誤差	
1	水境川	1,100	68	3,300	96	32.7	590	38	1,800	53	37.3
2	口太川上流	1,800	100	5,300	140	31.9	630	28	1,900	41	30.1
3	口太川中流	550	39	1,700	57	38.5	420	33	1,100	41	39.1
4	口太川下流	580	37	2,100	58	36.5					
5	伏黒	860	50	2,500	70	22.1	340	6	1,000	8	21.5
6	岩沼	310	38	1,200	47	28.0	400	23	1,400	34	25.8
7	真野	6,700	190	20,000	270	28.2	5,400	240	18,000	350	33.7
8	小島田堰	2,000	120	5,700	170	23.1	1,500	97	4,900	140	25.3
9	松原	330	32	810	40	19.0	220	13	590	17	20.7
10	小名浜	230	19	700	26	19.8	230	19	710	26	21.8
11	月舘	1,500	45	4,400	65	30.3	830	46	2,500	65	28.2
12	二本松										
13	御代田										
14	西川(県)	430	23	1,300	33	20.0	110	7	310	9	24.9
15	北町	4,400	120	13,000	170	26.9	3,200	120	9,000	170	29.5
16	川俣	980	45	2,600	63	39.3	480	22	1,300	29	31.6
17	丸森						710	43	2,000	58	21.6
18	船岡大橋										
19	瀬ノ上	1,300	100	4,100	140	29.4	390	27	1,300	40	24.7
20	八木田	960	51	3,000	75	26.1	560	28	1,500	37	21.8
21	黒岩	860	56	2,900	84	15.2	220	15	620	20	29.2
22	富田	2,100	84	6,200	120	23.3	1,300	58	4,000	83	21.4
23	太田	12,000	540	36,000	790	25.0	12,000	720	39,000	1,000	26.4
24	小高	7,500	510	22,000	740	26.5	5,700	260	16,000	370	27.3
25	浅見	1,300	80	4,200	120	27.4					
26	津島	5,500	300	16,000	430	27.4	7,100	230	21,000	330	27.6
27	請戸	14,000	800	44,000	1,200	27.8					
28	高瀬	2,600	130	8,100	190	27.6	4,200	180	13,000	260	28.0
29	原町	5,900	270	19,000	400	18.9	6,100	220	18,000	320	16.7
30	赤沼	310	22	900	31	21.0	230	13	650	17	22.0
31	亘理	690	45	2,300	64	26.0	490	33	1,500	45	21.3

濃度の値は有効数字 2 ケタで表記。

空欄は“測定試料なし”を表す。

表-3 放射性セシウム濃度の測定結果 (3)

地点 No.	地点名	平成 26 年 12 月 3 日～5 日					平成 27 年 1 月 13～15 日				
		懸濁態 Cs-134		懸濁態 Cs-137		懸濁物 の D50 ( $\mu$ m)	懸濁態 Cs-134		懸濁態 Cs-137		懸濁物 の D50 ( $\mu$ m)
		放射能 (Bq/kg)	±誤差	放射能 (Bq/kg)	±誤差		放射能 (Bq/kg)	±誤差	放射能 (Bq/kg)	±誤差	
1	水境川	1,600	80	5,400	120	15.3	1,800	100	6,900	170	24.2
2	口太川上流	1,300	79	4,200	110	19.0	2,100	100	7,100	160	24.0
3	口太川中流	580	37	1,900	53	33.1	770	44	3,000	73	36.2
4	口太川下流	520	43	1,700	64	26.9	970	68	3,000	100	29.6
5	伏黒	620	37	2,200	45	26.6	420	92	1,500	86	28.2
6	岩沼						950	82	2,900	86	19.0
7	真野	4,500	280	14,000	350	31.8	3,300	210	11,000	240	33.0
8	小島田堰	1,600	72	4,800	100	20.7	2,400	220	9,100	340	23.6
9	松原	180	22	590	20	33.5	67	9	260	9	42.4
10	小名浜	240	17	830	26	15.3	170	11	570	16	19.5
11	月館	1,000	43	3,100	60	29.6	650	36	2,100	53	34.9
12	二本松						660	47	2,300	74	21.1
13	御代田	440	34	1,600	50	26.6	1,200	110	4,700	170	29.1
14	西川(県)	520	32	1,900	48	21.3	480	44	2,100	69	24.7
15	北町	4,900	250	16,000	370	25.7	4,300	290	14,000	440	22.5
16	川俣	1,100	66	3,600	97	30.0	1,400	55	4,500	84	32.5
17	丸森	420	13	1,400	18	27.8	1,500	130	5,600	190	31.1
18	船岡大橋										
19	瀬ノ上	450	26	1,500	32	26.5	370	26	1,500	33	25.9
20	八木田	1,200	73	3,800	110	15.9	590	42	2,300	64	23.2
21	黒岩	700	36	2,200	53	22.5	410	34	1,800	55	21.3
22	富田	3,100	160	9,100	220	21.6	1,000	71	3,300	110	17.5
23	太田	8,300	210	28,000	280	33.0	11,000	740	37,000	1,100	34.9
24	小高	3,700	130	13,000	190	27.1	2,900	200	10,000	290	31.5
25	浅見	770	32	2,600	48	29.0	N. D. (280)		710	46	20.6
26	津島	4,300	150	15,000	210	43.4	6,500	340	23,000	520	28.7
27	請戸	9,500	230	31,000	340	29.0	14,000	910	46,000	1,400	25.1
28	高瀬	3,900	180	11,000	250	33.7	2,300	68	7,900	100	29.4
29	原町	5,400	180	19,000	280	20.9	5,700	330	18,000	490	17.3
30	赤沼	200	7	630	8	20.1	210	22	720	28	17.4
31	亘理	680	50	2,100	62	26.5	800	36	2,900	54	23.9

濃度の値は有効数字 2 ケタで表記。

空欄は“測定試料なし”を表す。

N. D. = 検出限界値以下、括弧内の数値は検出限界値を表す

表-4 放射性セシウム 137 移行量算出のためのパラメータ一覧

地点 No.	地点名	Cs-137初期沈着量 (Bq/m <sup>2</sup> )	C'(t)	Qs(Q)			Q(p)		
				a	b	R <sup>2</sup>	c	d	R <sup>2</sup>
1	水境川	4.22E+05	式(2a),(2b)	4.91E-15	2.13	0.54	2.99E+08	4.21E-03	0.3
2	口太川上流	4.37E+05	式(2a),(2b)	9.63E-17	2.28	0.55	1.51E+09	2.07E-03	0.23
3	口太川中流	3.38E+05	式(1b)	2.84E-23	2.92	0.61	3.01E+09	3.25E-03	0.42
4	口太川下流	2.68E+05	式(1b)	4.39E-22	2.76	0.65	4.21E+09	4.28E-03	0.47
5	伏黒	1.18E+05	式(1a)	1.41E-11	1.61	0.63	1.28E+11	5.26E-03	0.67
6	岩沼	1.16E+05	式(1a)	1.56E-28	3.01	0.68	3.65E+11	3.19E-03	0.75
7	真野	4.86E+05	式(1d)	3.17E-08	1.29	0.73	1.79E+09	2.77E-03	0.12
8	小島田堰	3.94E+05	式(1d)	8.12E-12	1.64	0.86	4.00E+09	6.38E-03	0.41
9	松原	5.05E+04	式(1d)	1.04E-08	1.3	0.26	3.27E+10	2.85E-03	0.58
10	小名浜	4.82E+04	式(1d)	1.37E-26	3.28	0.91	1.10E+09	6.42E-03	0.83
11	月舘	2.68E+05	式(1b)	5.76E-22	2.76	0.39	2.66E+09	4.34E-03	0.33
13	御代田	8.12E+04	式(1a)	2.50E-17	2.14	0.8	3.52E+10	7.14E-03	0.88
14	西川(県)	1.62E+05	式(1c)	1.03E-15	2.09	0.86	2.50E+09	9.74E-03	0.86
15	北町	5.32E+05	式(1d)	1.58E-09	1.46	0.83	1.02E+09	6.87E-03	0.39
16	川俣	2.27E+05	式(1b)	1.49E-22	2.88	0.66	1.64E+09	2.45E-03	0.27
19	瀬ノ上	1.18E+05	式(1c)	1.20E-09	1.39	0.67	3.19E+10	3.00E-03	0.12
20	八木田	6.90E+04	式(1c)	1.64E-07	1.24	0.91	3.26E+09	6.97E-03	0.47
21	黒岩	1.20E+05	式(1a)	2.95E-21	2.45	0.88	9.26E+10	6.80E-03	0.83
22	富田	1.20E+05	式(1c)	1.63E-20	2.62	0.78	3.28E+09	5.21E-03	0.72
23	太田	1.64E+06	式(1d)	4.95E-10	1.5	0.88	4.16E+08	3.86E-03	0.21
24	小高	7.31E+05	式(1d)	1.14E-09	1.44	0.79	6.82E+08	5.59E-03	0.3
25	浅見	2.00E+05	式(1d)	9.35E-09	1.37	0.9	3.62E+08	4.33E-03	0.09
26	津島	9.26E+05	式(1d)	3.11E-15	2.13	0.82	4.27E+08	4.25E-03	0.37
27	請戸	2.53E+06	式(1d)	5.79E-29	3.26	0.66	1.56E+10	2.54E-03	0.36
28	高瀬	6.85E+05	式(1d)	1.50E-39	4.45	0.73	3.29E+09	6.47E-03	0.61
29	原町	8.86E+05	式(1d)	2.49E-11	1.62	0.94	2.68E+09	9.68E-03	0.6
30	赤沼	6.72E+04	式(1b)	7.96E-37	4.13	0.69	8.26E+09	2.36E-03	0.49

表-5 土地利用別の被覆割合による  $k$  の重回帰解析の統計量

変数名	係数	p 値 <sup>19</sup>	VIF <sup>20</sup>	重回帰式全体	
$\rho$ 水田	0.065	p<0.001	7.1	自由度調整済み 決定係数	0.95
$\rho$ 都市住宅	0.14	p<0.05	3.7	p 値 <sup>19</sup>	P<0.001
$\rho$ 草地裸地	0.0047	$\rho=0.19$	3.2	AIC <sup>21</sup>	-41
$\rho$ 都市住宅 $\rho$ 水田	-0.011	p<0.01	1.5		

表-6 土地利用別の被覆割合による A の重回帰解析の統計量

変数名	係数	p 値 <sup>19</sup>	VIF <sup>20</sup>	重回帰式全体	
$\rho$ 水田	0.0059	$\rho=0.51$	5.8	自由度調整済み 決定係数	0.63
$\rho$ 都市住宅	0.00014	$\rho=0.87$	1.4	p 値 <sup>19</sup>	p<0.01
$\rho$ 畑	0.010	$\rho=0.54$	3.4	AIC <sup>21</sup>	-51
$\rho$ 草地裸地	0.0019	$\rho=0.41$	3.0		

表-7 規格化した RIP 値の重回帰解析の統計量

変数名	係数	p 値 <sup>19</sup>	VIF <sup>20</sup>	重回帰式全体	
log(CEC <sub>norm</sub> )	0.86	p<0.001	3.7	自由度調整済み 決定係数	0.98
log(OM <sub>norm</sub> )	-0.34	p<0.001	3.5	p 値 <sup>19</sup>	p<0.001
log{(Mica/Quartz) <sub>norm</sub> }	0.027	$\rho=0.54$	1.1	AIC <sup>21</sup>	-160
log(SA <sub>norm</sub> )	0.46	p<0.001	1.1		

表-8 RIP と土地利用別の被覆割合による  $k$  の重回帰解析の統計量

変数名	係数	p 値 <sup>19</sup>	VIF <sup>20</sup>	重回帰式全体	
log(RIP)	0.28	p<0.01	1.2	自由度調整済み 決定係数	0.96
$\rho$ 都市住宅	0.00034	$\rho=0.99$	8.6	p 値 <sup>19</sup>	p<0.001
$\rho$ 草地裸地	-0.020	$\rho=0.051$	7.3	AIC <sup>21</sup>	-41
$\rho$ 都市住宅 $\rho$ 草地裸地	0.0043	$\rho=0.20$	5.5		

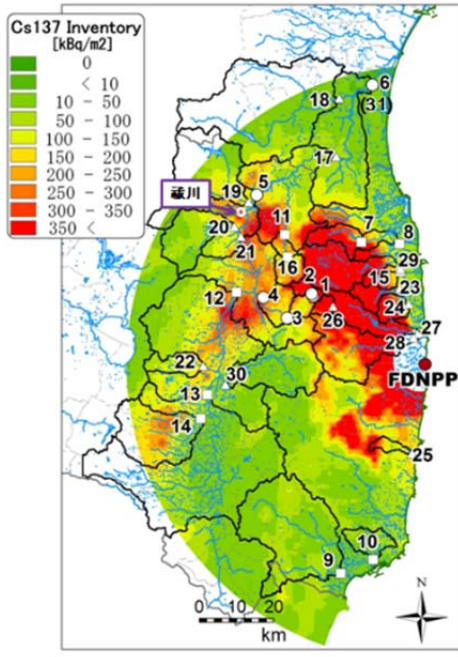
表-9 RIP と土地利用別の被覆割合による A の重回帰解析の統計量

変数名	係数	p 値 <sup>19</sup>	VIF <sup>20</sup>	重回帰式全体	
log(RIP)	0.044	$\rho=0.11$	2.7	自由度調整済み 決定係数	0.69
$\rho$ 都市住宅	-0.015	$\rho=0.30$	4.4	p 値 <sup>19</sup>	p<0.005
$\rho$ 畑	-0.013	$\rho=0.54$	2.4	AIC <sup>21</sup>	-53
$\rho$ 都市住宅 $\rho$ 畑	0.0063	$\rho=0.16$	5.1		

<sup>19</sup> p 値=示された係数が偶然にその値になる確率を示す。表中、斜字体で表示された係数は、5%有意水準を満たさないことを示す。

<sup>20</sup> VIF=説明変数同士に相関があると重回帰の解析結果に悪影響を及ぼす。これを多重共線性とよぶ。VIF>10となる変数がある場合、多重共線性の影響が懸念される。

<sup>21</sup> AIC=赤池情報量基準。説明変数の数と計算結果の妥当性の関係を示しており、値が小さいほど当てはまりのよいモデルとされる。



No.	地点名	No.	地点名	No.	地点名
1	水境川	11	月舘	21	黒岩
2	口太川上流	12	二本松	22	富田
3	口太川中流	13	御代田	23	太田
4	口太川下流	14	西川	24	小高
5	伏黒	15	北町	25	浅見
6	岩沼	16	川俣	26	津島
7	真野	17	丸森	27	請戸
8	小島田堰	18	船岡大橋	28	高瀬
9	松原	19	瀬ノ上	29	原町
10	小名浜	20	八木田	30	赤沼
				31	亘理

図-1 観測地点の位置図

(背景のカラーコンターは第3次航空機モニタリングによる平成23年7月2日時点のセシウム137沈着量)

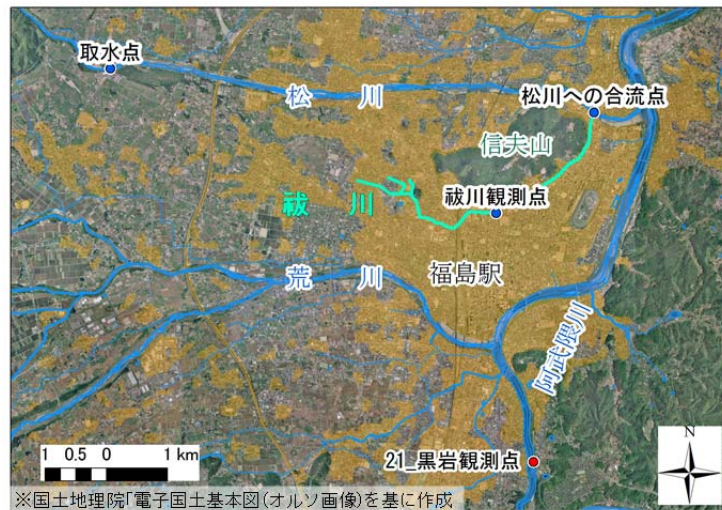


図-2 祓川観測地点周辺の拡大図  
(黄色に塗られた部分は都市域を示す)



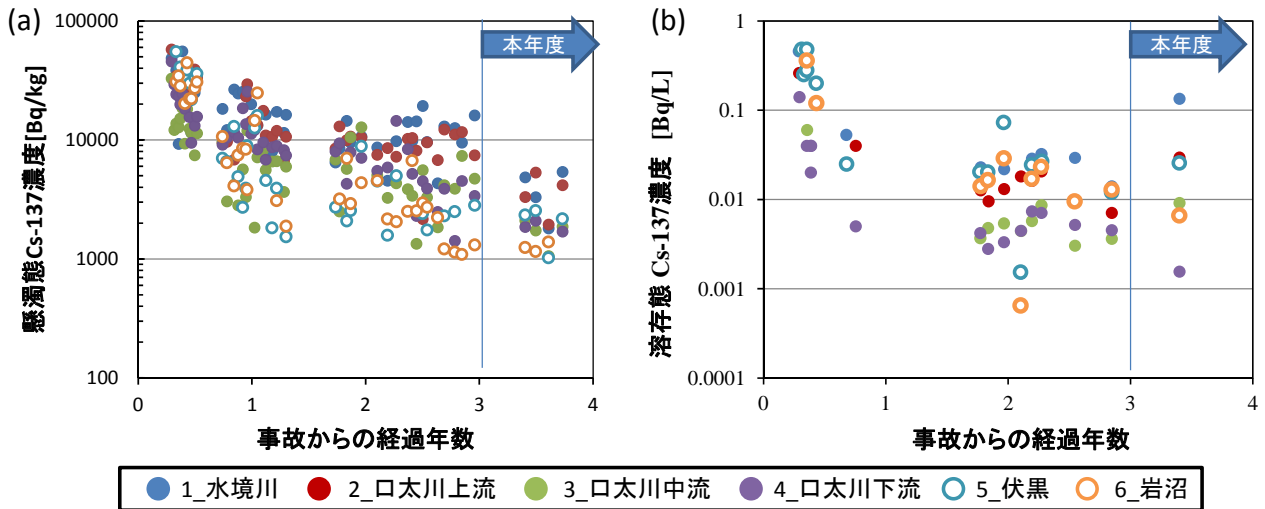


図-3 長期観測地点におけるセシウム 137 濃度の経時変化  
 ((a) 懸濁態(懸濁物質 1 kg あたり)、(b) 溶存態(河川水 1 L あたり))

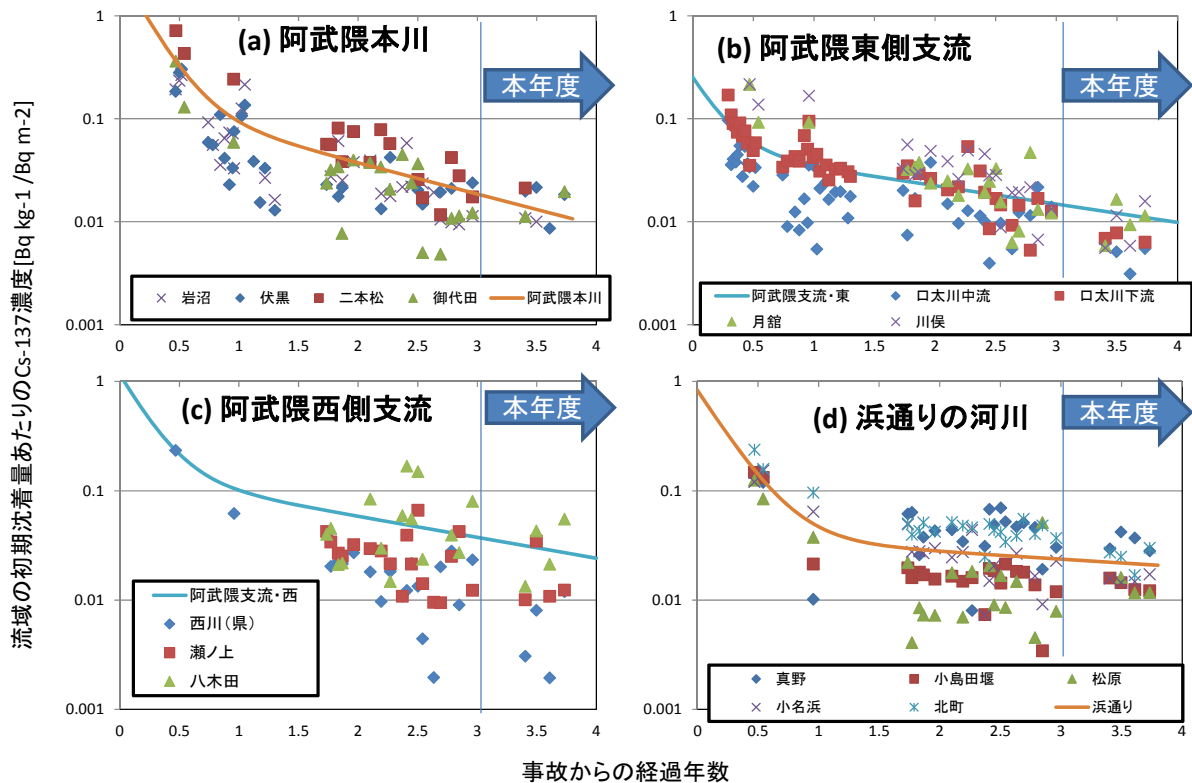


図-4 流域の沈着量あたりのセシウム 137 濃度の経時変化  
 (各グラフ中の曲線は実測値より算出された 2 重指数型回帰式を示す。(a) 阿武隈川本川、(b) 阿武隈川東川支流、(c) 阿武隈川西側支流、(d) 浜通りの河川)

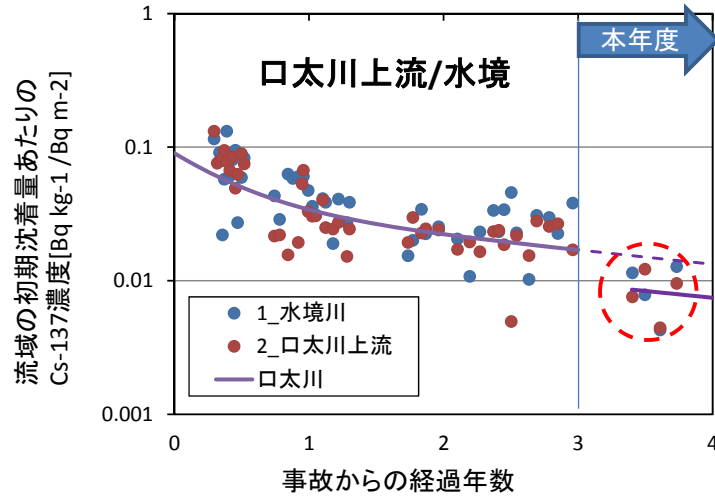


図-5 山木屋地区に位置する2観測点における、流域の初期沈着量あたりのセシウム137濃度の経時変化

(図中の実線は、実測値より算出された回帰式を示す。本年度のデータ(赤丸囲み)は、平成25年度調査までの変化傾向(点線で表示)より低い値となった)

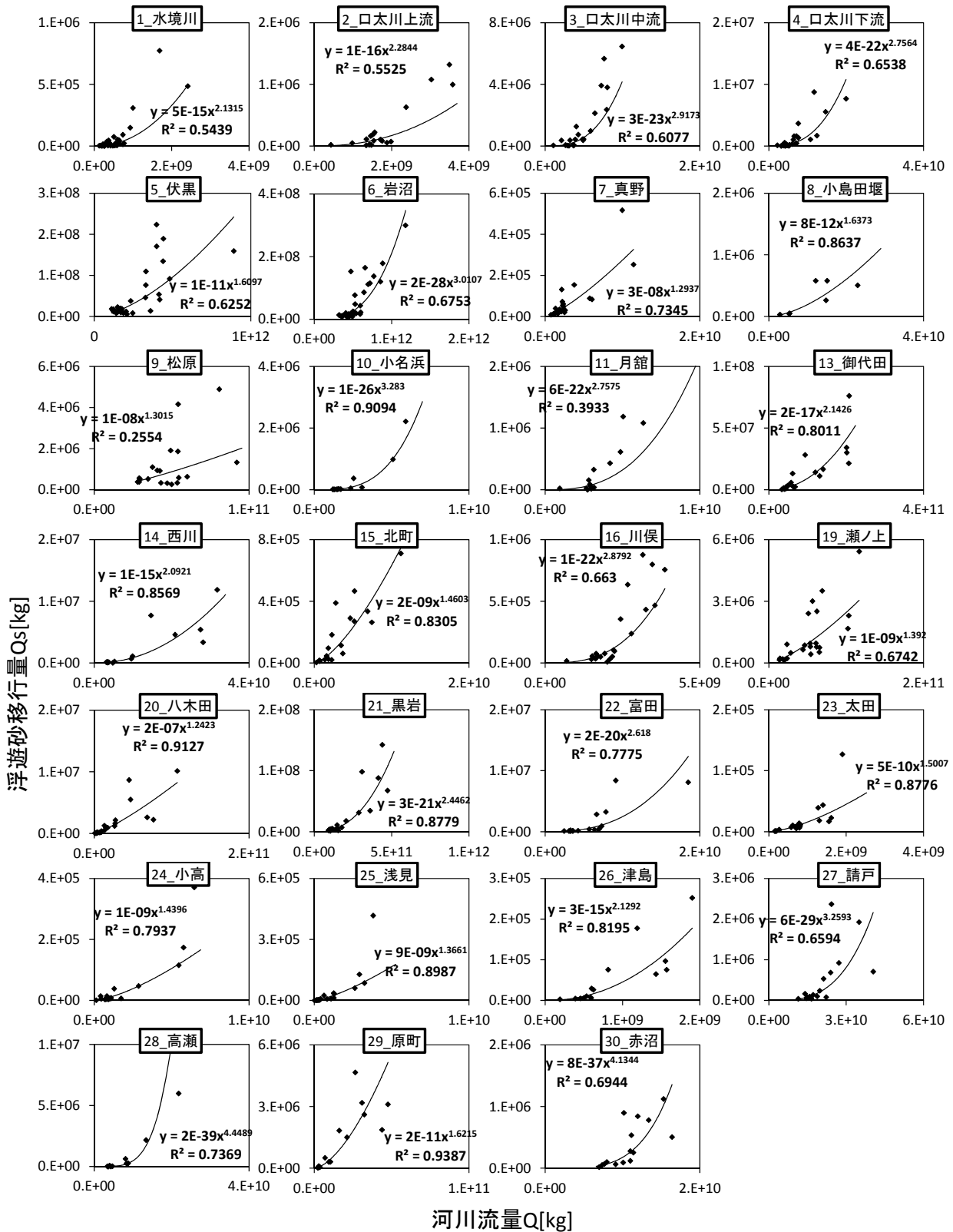


図-6 27の河川観測点における、月間河川流量 Q と月間浮遊砂移行量 Qs の関係

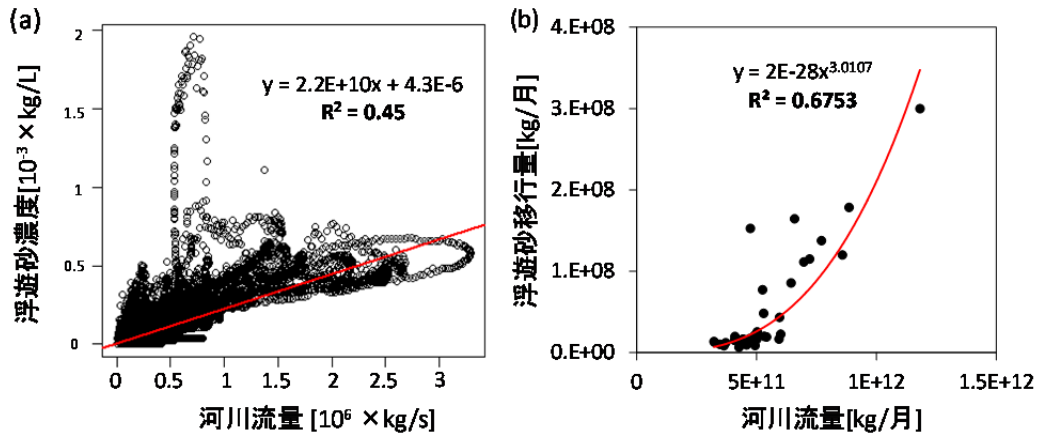


図-7 河川流量による浮遊砂移行量の補完方法の比較(岩沼[6]地点の例)  
 ((a) 10分おきに取得された流量  $Q$  と浮遊砂濃度  $SSC$  データの散布図と、その回帰式。(b) 月ごとに積算された河川流量  $Q$  と浮遊砂移行量  $Q_s$  の散布図とその回帰式)

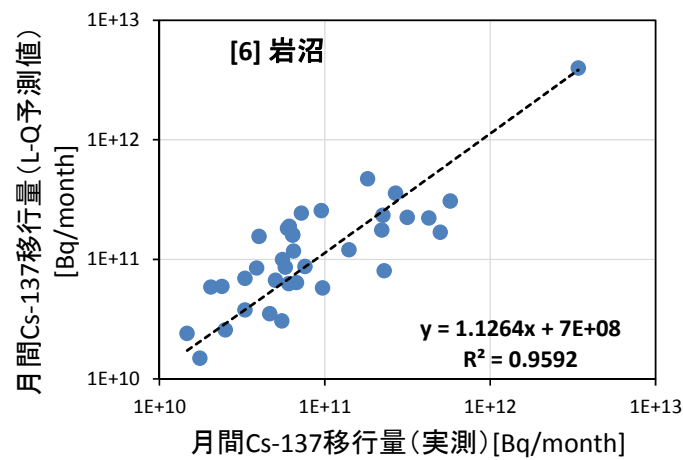


図-8 岩沼[6]観測点における月間セシウム 137 移行量の実測値と L-Q 式による予測値の比較

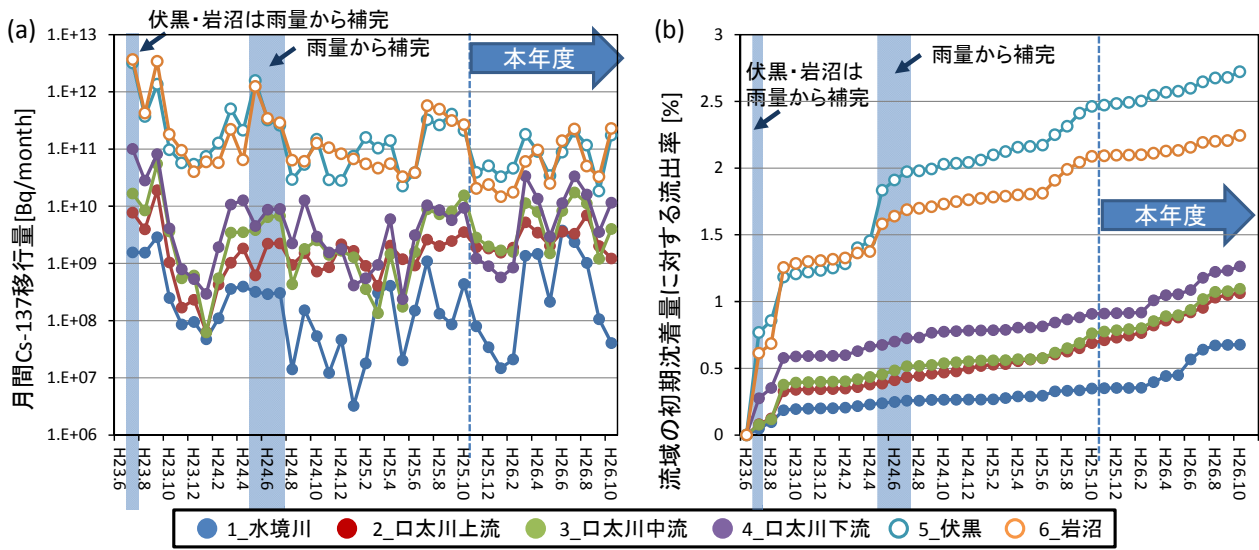


図-9 (a)長期観測6地点における、平成23年7月以降の月間セシウム137移行量。一部にL-Q式による補完値を含む。(b)平成23年7月以降の、初期沈着量に対するセシウム137流出率の積算値。

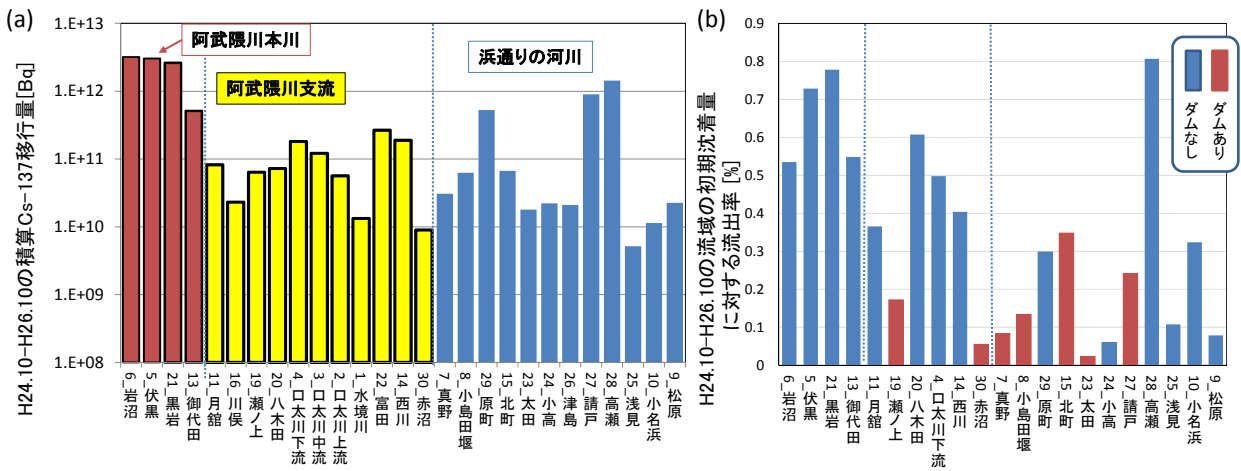


図-10 (a)河川観測地点におけるセシウム137移行量(平成24年10月～平成26年10月まで)。一部、L-Q式による補完値を含む。(b)河川観測地点における、初期沈着量に対するセシウム137流出率(平成24年10月～平成26年10月まで)。赤棒は流域にダムを持つ観測点。

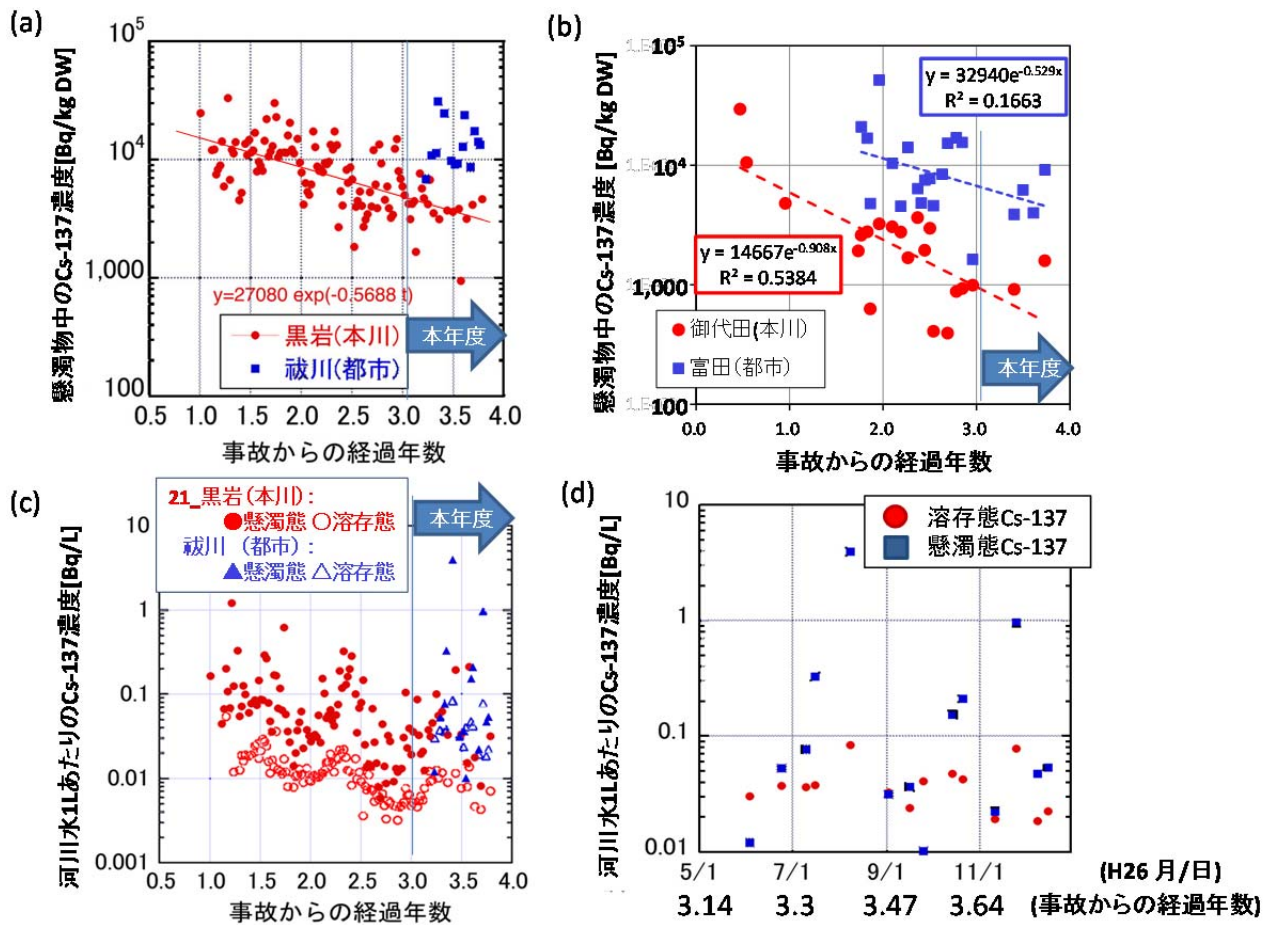


図-11 (a) 祓川地点における懸濁態セシウム 137 濃度 (懸濁物質 1 kg 当たりのセシウム 137 濃度)。阿武隈川本川上の黒岩地点の値と比較すると、明らかに高い値を示した。(b) 同じく都市域に位置する富田[22]観測点における、懸濁態 (懸濁物質 1 kg 当たりの) セシウム 137 濃度。祓川地点同様、本川上にある御代田[13]観測点よりも高い値となっている。(c) 河川水 1L 当たりの溶存態・懸濁態のセシウム 137 濃度。祓川と黒岩[21]の比較。(d) (c) の本年度部分を拡大した祓川の観測結果のみのプロット。



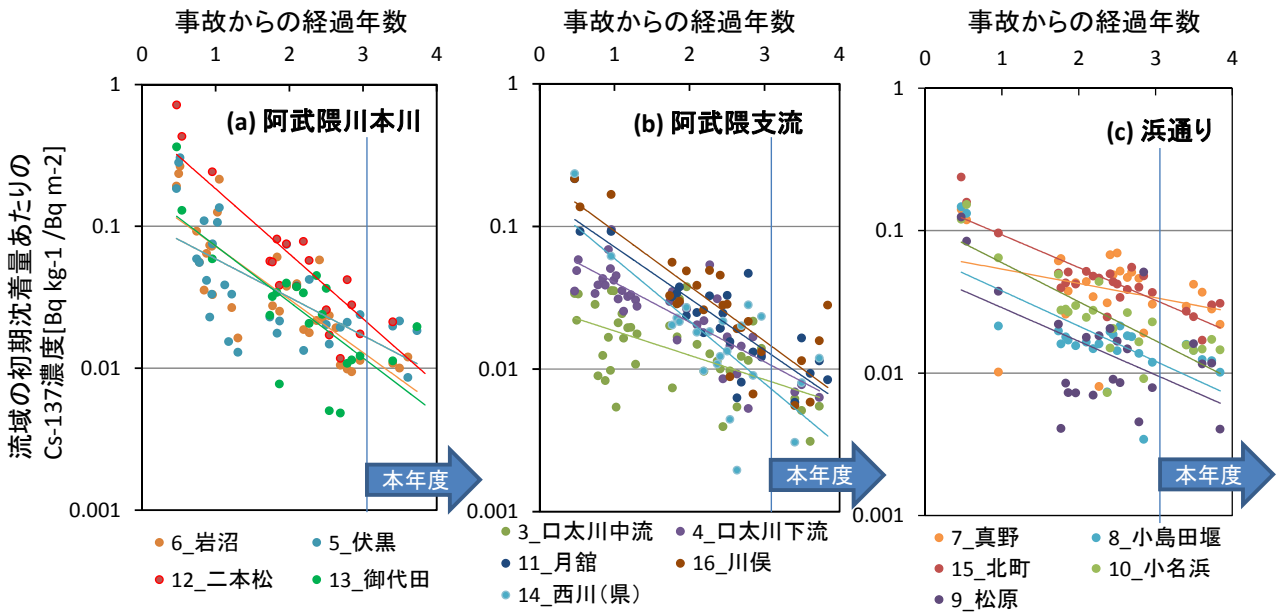


図-12 平成 23 年 8 月から平成 26 年 12 月までの、流域の初期沈着量あたりのセシウム 137 濃度の経時変化

((a) 阿武隈川本川、(b) 阿武隈川支流、(c) 浜通りの河川。長期観測地点のうち、除染の効果が見られた水境川[1]・口太川上流[2]の 2 地点は除外した)

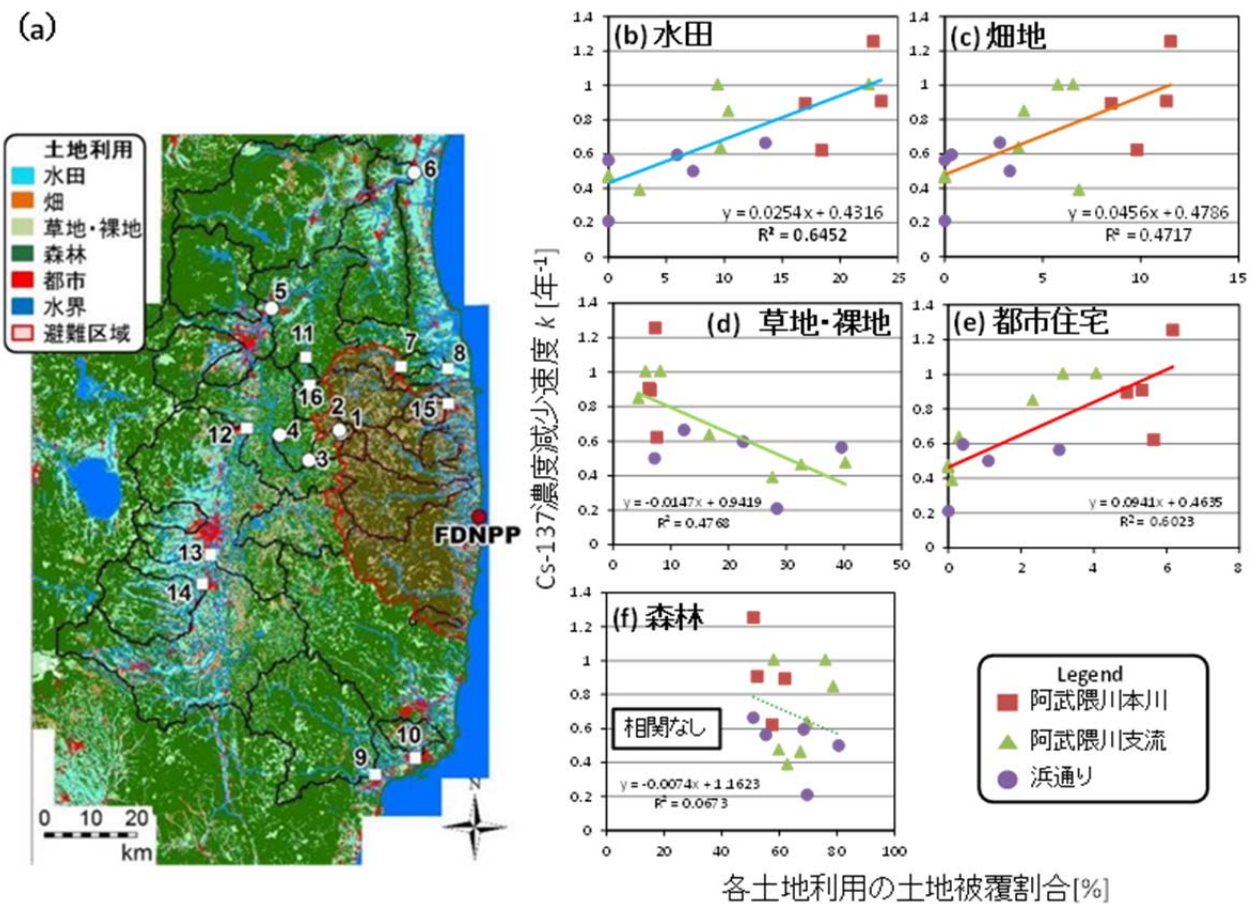


図-13 (a) 観測地点の位置と、流域の土地利用状況。(b)-(f) 流域の、土地利用別の被覆割合と、セシウム 137 濃度減少速度  $k$  との相関。

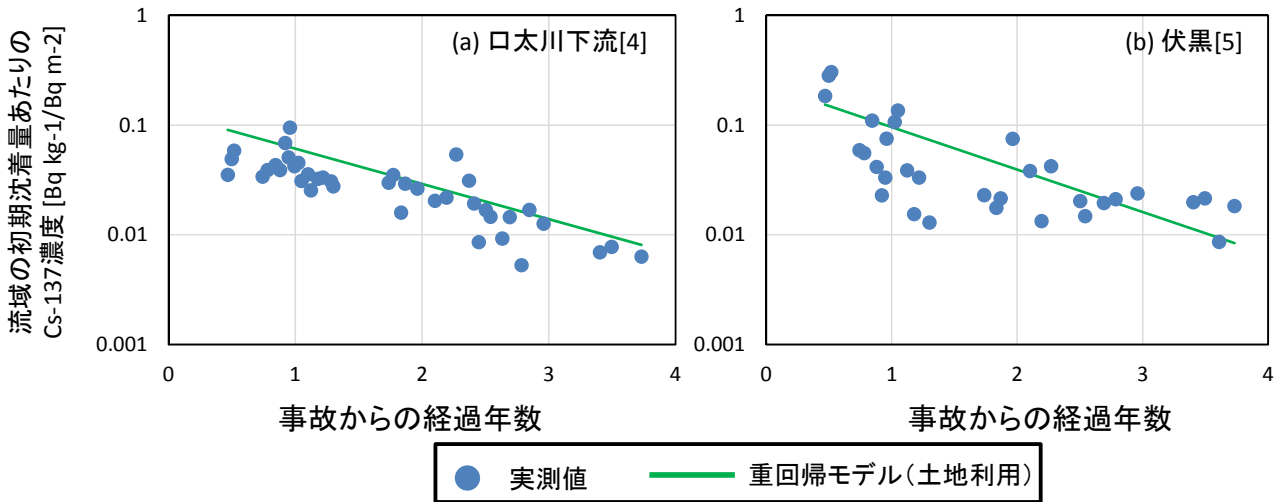


図-14 重回帰解析による濃度低下傾向の予測式と実測値との比較  
 ((a) 口太川下流[4]、(b) 伏黒[5])

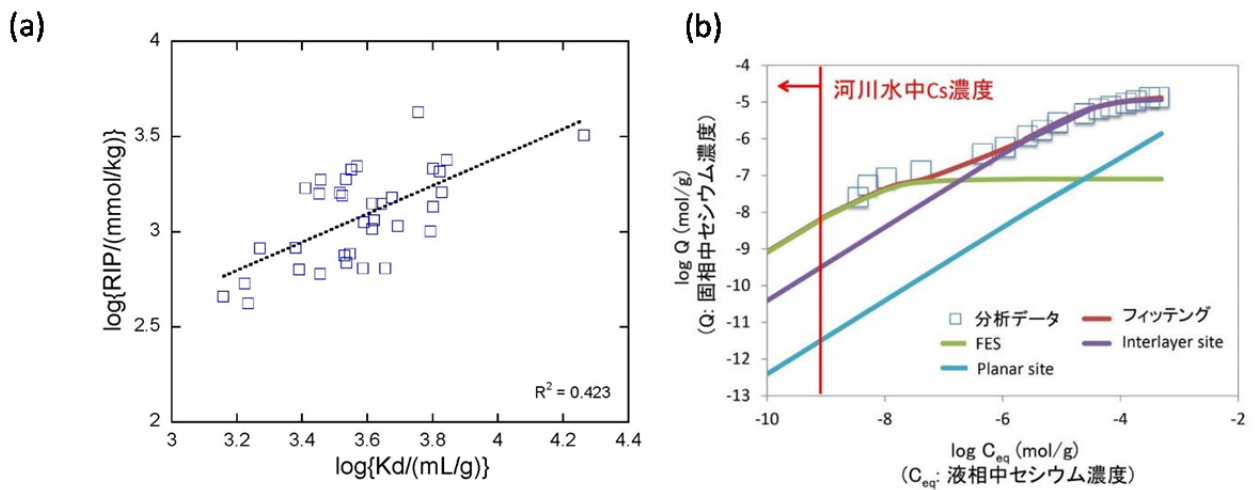


図-15 (a) 河川浮遊砂及び土壌試料の、セシウムの固液分配係数 Kd と RIP の関係。(b) 熱力学に基づく GEM モデルによる、溶存態 (液相中) と懸濁態 (固相中) のセシウム濃度の比。放射性セシウムのみでなく、安定セシウムも含んだ値であることに注意。



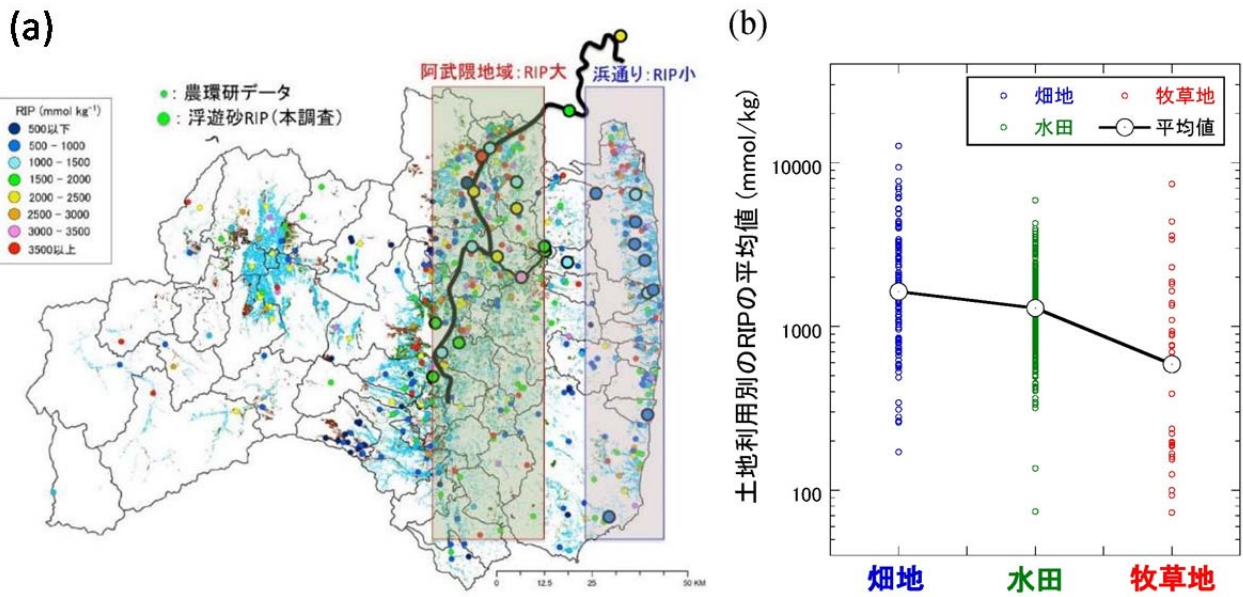


図-16 (a)浮遊砂のRIPと福島県下の土壌のRIPの比較。前者は本調査のデータ、後者は平成25年度調査の「農地における核種移行の広域調査」(農業環境技術研究所まとめ)による。(b)土壌試料のRIPを、土地利用ごとに示したもの。土地利用の違い(畑地・水田・牧草地)により、RIPの値が系統的に異なることがわかる。図中の「平均値」は、土地利用ごとのRIPの値の幾何平均を示す。

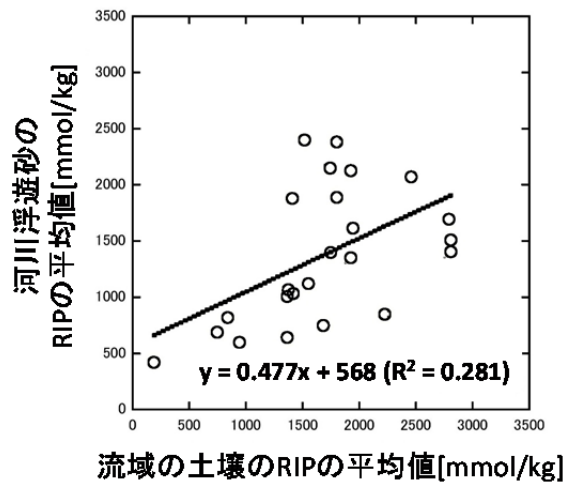


図-17 流域平均した土壌のRIPと河川浮遊砂のRIPの関係(弱い正の相関が見られる)

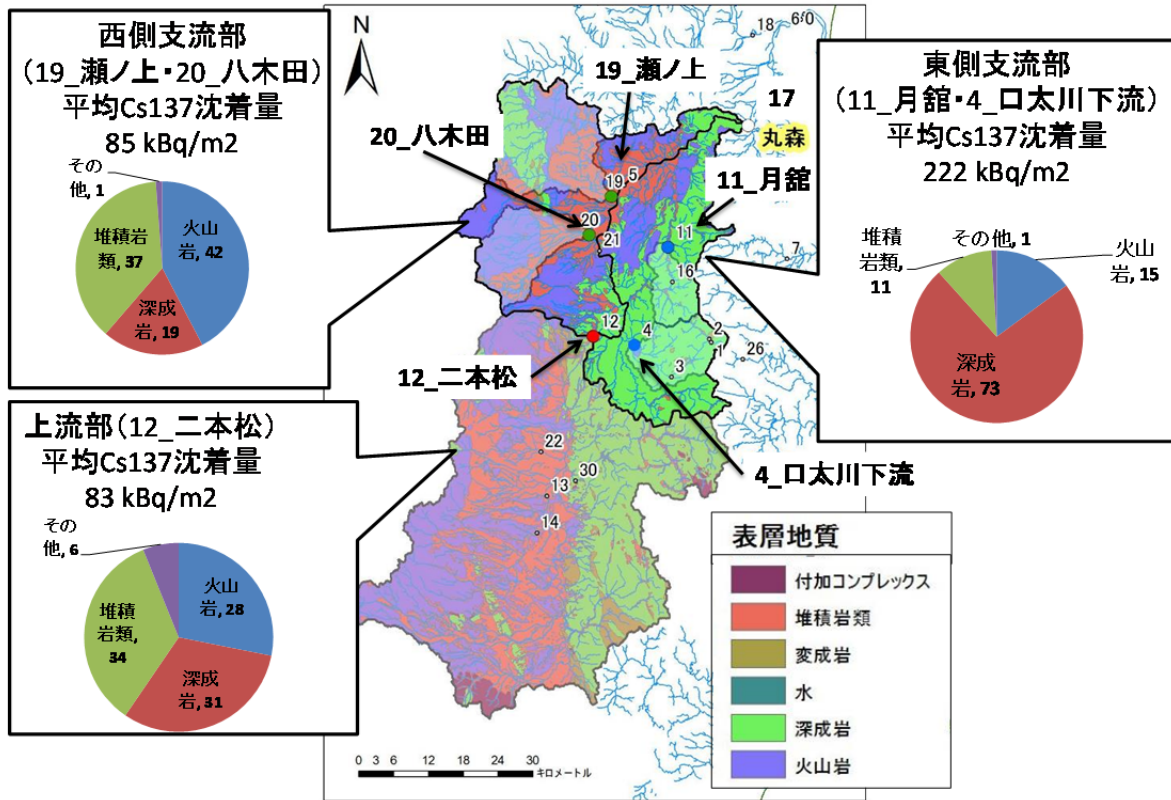


図-18 17\_丸森地点の集水域と表層地質

(上流部 (二本松[12]地点より上流)・東側支流域・西側支流域の3地域に分類し、それぞれの地域の表層地質の割合・平均セシウム 137 沈着量(第4時航空機モニタリングによる)を示した)

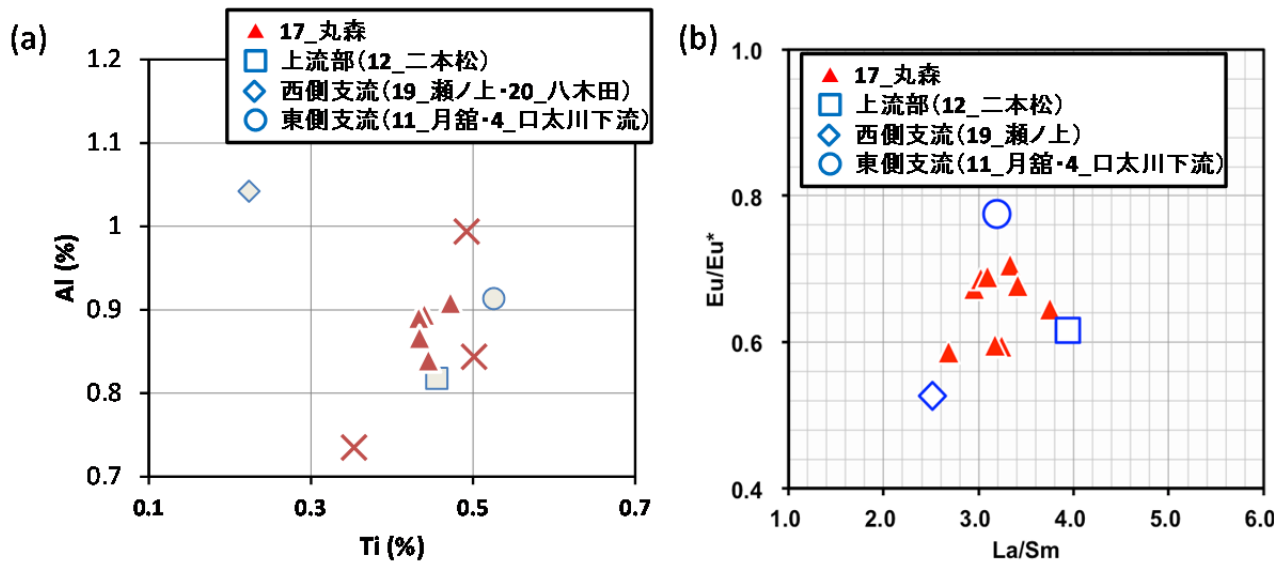


図-19 3地域の寄与率推定に用いるパラメータのプロット

((a) 主要元素分析の場合、(b) REE パターンの場合。白抜きの3点を作る三角形の中に下流側の地点(赤三角印)の値が入っている場合、寄与率推定が可能。浮遊砂試料をそのまま解析した主要元素分析の場合は、一部解析不能な試料がみられた(図a中の赤×印)。一方、REEパターンを用いた解析では、すべての時期の丸森[17]の試料について、寄与率推定計算が可能であった)

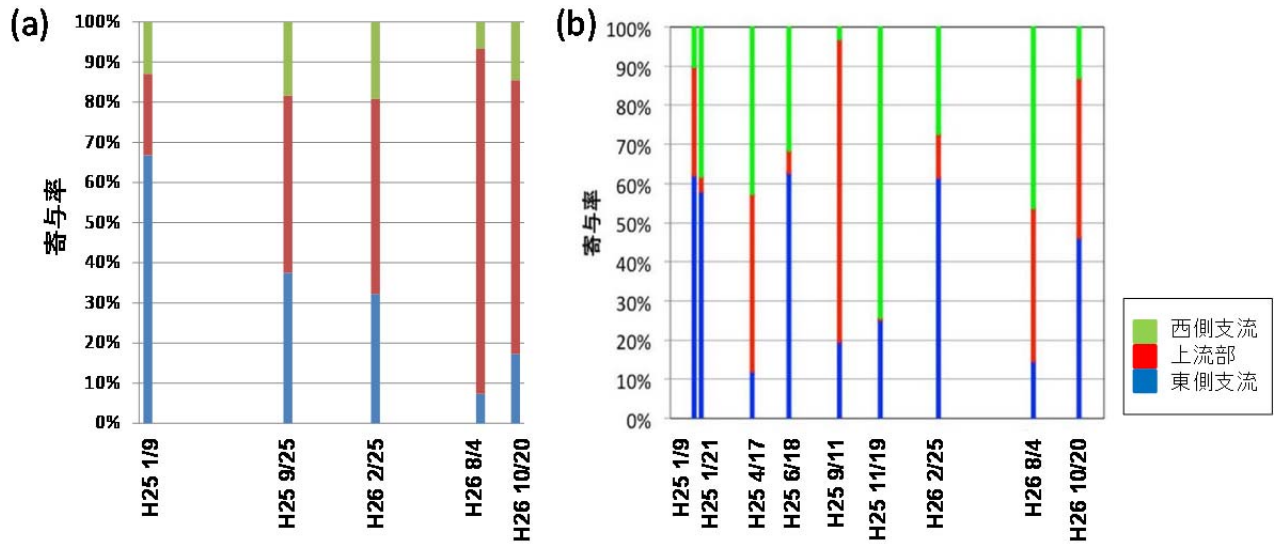


図-20 (a)主要元素組成と (b)REE パターンから算出された、3つの地域の寄与率

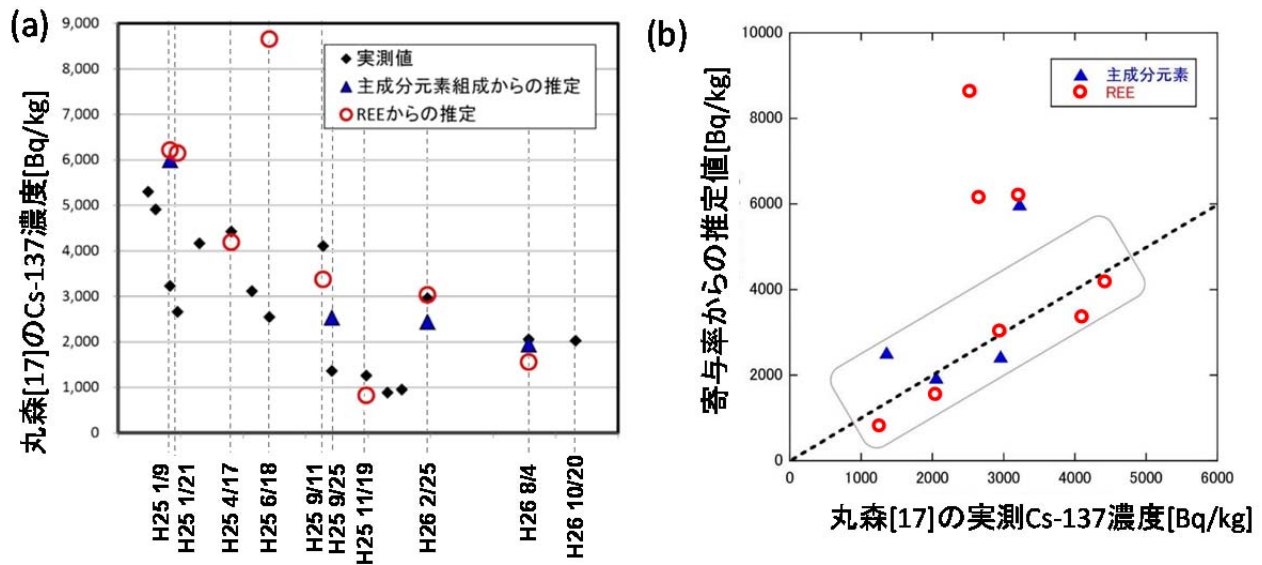


図-21 丸森[17]における実測と、寄与率から推定したセシウム137濃度の比較  
 ((a)時系列、(b)実測と推定値のプロット。図中の点線は、実測値＝推定値となる直線。)