

# 福島県口太川流域における放射性物質の移行のモデル化と再現について

NUMERICAL MODELING AND ESTIMATION OF RADIOACTIVE CESIUM MOVEMENT AT THE KUCHIBUTO RIVER BASIN, FUKUSHIMA

田中 智大<sup>1</sup>・立川 康人<sup>2</sup>・椎葉 充晴<sup>3</sup>・萬 和明<sup>4</sup>・キム スンミン<sup>5</sup>  
T. TANAKA, Y. TACHIKAWA, M. SHIIBA, K. YOROZU and S. KIM

<sup>1</sup> 学生会員 京都大学大学院工学研究科 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)

<sup>2</sup> 正会員 博(工) 京都大学 准教授 大学院工学研究科 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)

<sup>3</sup> 正会員 工博 京都大学 教授 大学院工学研究科 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)

<sup>4</sup> 正会員 博(工) 京都大学 助教 大学院工学研究科 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)

<sup>5</sup> 正会員 博(工) 京都大学 講師 大学院工学研究科 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)

Radioactive cesium (Cs-134 and Cs-137) dispersed from the Fukushima No.1 Nuclear Power Plant is strongly attached to surface soil layers. To estimate a movement of radioactive cesium with suspended sediment in a catchment scale, a distributed rainfall and sediment runoff model was developed. Radioactive cesium attached to suspended load was modeled by considering a sediment particle size distribution. A constructed simulation model reproduced an observed rainfall runoff as well as an estimation of sediment runoff considering the origine of the source of sediment generation and an estimation of the cesium movement contained in the suspended load.

**Key Words:** *suspended sediment, distributed runoff model, radioactive cesium, particle size distribution*

## 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および津波によって引き起こされた東京電力福島第一原子力発電所1, 3号機での水素爆発により, 多量の放射性物質が大気中に放出された。大気中に放出された放射性物質はその後の大気・水循環過程によって広範囲に移動・拡散した。その中でも放射性セシウムであるCs-134およびCs-137はアルカリ金属であることから, その多くが陰イオンである土壤に強く吸着する。土壤に吸着したCs-134およびCs-137は降雨・土砂流出により河川に流集し, 海洋に流出すると考えられる。特にCs-137はその半減期が30年と長期間にわたるため, 移行・拡散の状況を予測し, 対策を立てることが重要である。

そこで本研究では, Cs-137の移動・拡散現象を降雨・土砂流出モデルを通して再現することを試みる。まず, 降雨・土砂流出現象を分布型流出モデルで表現し, 浮遊砂の発生起源を把握することによって, Cs-137の空間分布を考慮に入れた浮遊砂流出のモデル化を行う。次に浮遊砂中の放射性セシウム含有量のモデル化を試みる。対象流域は, 放射性物質が高濃度かつ広範囲に拡散した一級河川阿武隈川の支流で, 特に高い線量地域を含む口太川流域(139km<sup>2</sup>)である。浮遊砂に吸着して移動するCs-137の輸送量を予測し, その再現性を測定

結果と比較した。

Cs-137輸送量の測定値<sup>1)</sup>は, 筑波大学および京都大学によって得られた, 観測期間2011年6月21日~2011年8月24日の河川の水位, 濁度および2011年6月21日~2011年8月16日の浮遊砂単位質量あたりのCs-137含有量から得られた。測定地点は, 対象流域である口太川流域の中に設定した水境川下流地点, 口太川上流地点, 口太川中流地点, 口太川下流地点の4地点である。口太川および各測定地点の位置を図-1に示す。測定地点の位置は赤字で示す。

## 2. 降雨・土砂流出のモデル化

### (1) 分布型降雨流出モデルの構築

水文モデル構築システムOHyMoS<sup>2)</sup>を用いて分布型流出モデル<sup>3)</sup>を構築した。斜面部の流れは, 不飽和・飽和中間流・表面流を考慮したキネマティックウェーブモデル<sup>4)</sup>を用い, 河川流はキネマティックウェーブモデルを用いて追跡した。

### (2) 流量の計算結果

構築した分布型降雨流出モデルを用いて図-1中の4観測地点での流量の再現性を確認した。図-2は分布型流出モデルで用いた流域地形データであり, 赤色の流域下端が口太川下流地点, 水色の流域下端が口太川中

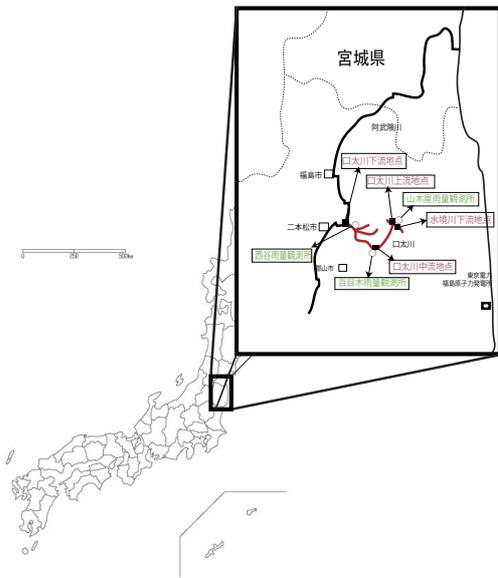


図-1 口太川流域の位置と各測定地点

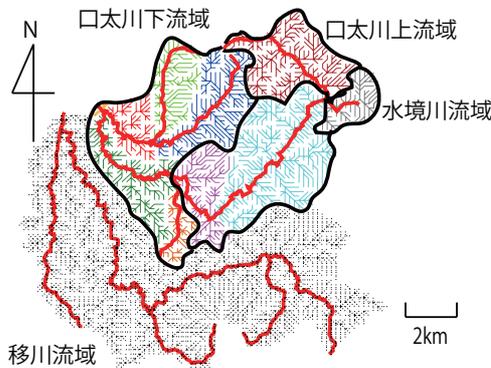


図-2 口太川および移川流域の流域地形モデル (赤:河道)

流地点，茶色の流域下端が口太川上流地点，灰色の流域下端が水境川下流地点である．口太川流域では過去の流量観測記録がない．そこで，降雨流出モデルのパラメータは，口太川流域に隣接し，口太川流域と同様に流域の大部分を山地が占める，移川流域 (120km<sup>2</sup>) の過去の流量観測記録を用いた．移川流域は図-2 中の南側の薄灰色の部分である．

パラメータの同定に用いた降雨事象は 2004 年の台風 23 号による降雨流出である．パラメータはそれぞれ  $d_s = 0.3440$ ， $d_c = 0.2875$ ， $k_a = 0.0046$ ， $\beta = 6.3486$ ， $n = 1.6667$  とした (パラメータの意味は文献<sup>4)</sup> 参照)．同定したパラメータを用いた移川の計算流量と H-Q 換算流量を図-3 に示す．降雨データについては国交省の百目木地点，山木屋地点の雨量データ，および福島県の西谷地点の雨量データを用いた．それぞれの位置は図-1 に示す通りである．口太川 4 地点での河川流量は，4 観測地点で計測された水位をもとに，観測期間中の低水時に流量を測定して作成した H-Q 曲線を用いて，流量に変換した．口太川下流地点での計算流量と H-Q 換算流量を比較した結果を図-4 に示す．計算流量と H-Q

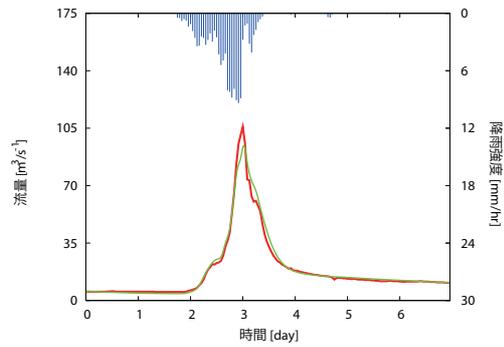


図-3 移川流域での観測流量と計算流量の比較

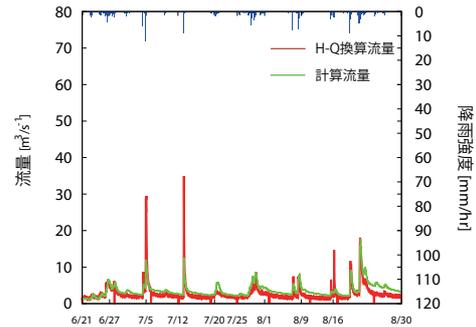


図-4 口太川下流地点での H-Q 換算流量と計算流量の比較

換算流量はおおむね一致しているが，7月 5 日，7月 13 日および 8月 16 日のピーク流量の計算流量が H-Q 換算流量に比べ小さくなっている．H-Q 曲線が低水時のみのデータを用いて作成されたことから，7月 5 日および 7月 13 日の H-Q 換算流量は H-Q 曲線の適用範囲外であり，過大である可能性がある．他の 3 地点においても同様の可能性がある．したがって，高水時の H-Q 換算流量には不確かさが含まれているため，低水時の H-Q 換算流量との適合性と移川流域での適合性を考え，同定したパラメータを以下の分析に用いた．

### (3) 分布型浮遊砂流出モデルの構築

流域からの浮遊砂流出量を推定する手法は多数提案され<sup>5)6)</sup>，河川中を流れる土砂の粒径分布や拡散・沈降を考慮したモデルが清水ら<sup>7)</sup> などによって数多く提案されている．本研究では表土層の浸食を表現し，分布型降雨流出モデル組み合わせて用いることができ，パラメータの扱いが容易と考えられる市川ら<sup>8)</sup> が構築した赤土流出モデルを基本とする．流域斜面は矩形斜面の集合であり，個々の斜面に対して次の浮遊砂の流出モデルの基礎式を用いる．

$$\frac{\partial(C h_s)}{\partial t} + \frac{\partial(C q_s)}{\partial x} = R_E \quad (1)$$

$$R_E = \rho_s E(1 - \gamma) p_f \quad (2)$$

$t$  は時間， $x$  は流下方向， $C$  は浮遊砂濃度， $h_s$  は表面流の流積， $q_s$  は表面流の単位幅流量であり， $h_s$  および  $q_s$  は斜面流のキネマティックウェーブモデルから算出される．(1) 式は浮遊砂の連続式に相当し，右辺の  $R_E$

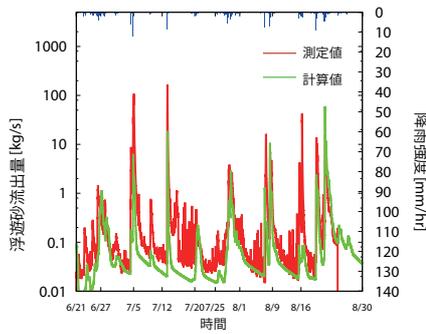


図-5 口太川下流地点での浮遊砂流出量の観測値と計算値

は(2)式で表される単位時間単位長さ当たりの土砂の浸食量である。ただし、 $\rho_s$ は土砂礫の密度、 $E$ は浸食速度、 $\gamma$ は表層土層の空隙率、 $p_f$ は表層土層内の微細粒子の重量百分率である。

(2)式中の浸食速度  $E$  については、芦田・田中<sup>9)</sup>の実験によって得られた浸食速度と摩擦速度の関係式を利用する。芦田・田中<sup>9)</sup>の実験によると、掃流力  $\tau$  と土粒子が移動し始めるときの掃流力(限界掃流力) $\tau_c$ の比  $\tau/\tau_c$  が1に近いところでは、掃流力の増加に伴って浸食速度が急増する。この実験結果から、薄層流が発生する斜面で掃流力の増加、すなわち摩擦速度の増加に伴って浸食速度が急増すると仮定し、比例定数  $\xi$  およびべき定数  $\zeta$  を用いて浸食速度  $E$  を  $E = \xi u_*^\zeta$  とする。摩擦速度  $u_*$  は表面流の流積  $h_s$ 、重力加速度  $g$ 、斜面勾配  $\sin\theta$  を用いて  $u_* = \sqrt{gh_s \sin\theta}$  とした。斜面流域における各矩形斜面間での浮遊砂の受け渡しは、下流側に表面流が存在する場合のみ受け取り、存在しない場合は上流側矩形斜面に堆積するとした。河道では、浮遊砂の発生・沈降はなく斜面部で発生した浮遊砂を(1)式によって輸送すると仮定した。そのため河道では、(1)式の右辺の項は斜面部からの浮遊砂の流入強度を表す。

#### (4) 浮遊砂流出量の計算結果

上記の浮遊砂流出モデルを分布型降雨流出モデルに組み込み、浮遊砂流出量を計算した。浮遊砂流出量については過去の観測データが存在しないため、2011年6月21～27日の観測データをもとに、浮遊砂流出モデルのパラメータ  $\xi$  と  $\zeta$  を、試算を繰り返して  $\xi = 1.0$ 、 $\zeta = 11$  とした。 $p_f$  および  $\rho_s$  は、 $p_f = 1.0$ 、 $\rho_s = 2750 \text{ kg/m}^3$  と固定した。口太川下流地点での浮遊砂流出量の観測値および計算値を図-5に示す。観測値は濁度計の計測値から算定した浮遊砂濃度を流量と掛けて算出した。H-Q換算流量と計算流量が一致した期間は時系列変化を再現することができた。他の3地点においても同様の傾向であった。

4地点に設置された浮遊砂サンプラーは、観測期間中8回(6月27日、7月5日、7月12日、7月20日、7月25日、8月1日、8月9日、8月16日)回収され、各期間の浮遊砂量とそれに含まれるCs-137含有量が測定されている<sup>1)</sup>。浮遊砂流出量について、4地点のサ

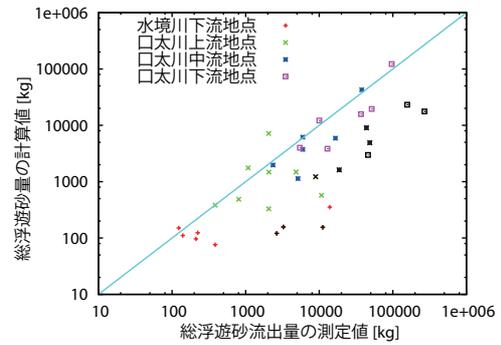


図-6 サンプラー設置期間の総浮遊砂流出量(横軸がH-Q換算流量を用いた測定値、縦軸が計算値)

ンプラー設置期間の計算値と測定値の総量を図-6に示す。図-6中で、H-Q換算流量と計算流量に大ききずれがあった期間を黒くプロットした。全体としていずれの観測地点においても計算値が測定値に比べやや小さいが、計算流量とH-Q換算流量がおおむね一致した期間については、オーダーが一致した。ただし、水境川と口太川上流では計算流量とH-Q換算流量が一致していても浮遊砂流出量の計算値と測定値が大きく異なる期間がある。これは、下流で同定したパラメータ  $\xi$ 、 $\zeta$  を流域全体に用いたことが原因と考えられる。

### 3. 発生起源を考慮した浮遊砂流出のモデル化および計算結果

本研究で用いる分布型流出モデルでは、図-2中の異なる色で表される部分流域から生産された浮遊砂が、赤線で表される河道区分に流出する。河道区分への浮遊砂流入強度は、部分流域からの浮遊砂流出量を河道区分の長さで割った単位長さ単位幅当たりの浮遊砂横流入量  $R_s$  とし、河道での浮遊砂連続式

$$\frac{\partial(CA)}{\partial t} + \frac{\partial(CQ)}{\partial x} = R_s \quad (3)$$

に導入する。 $A$ は通水断面面積、 $Q$ は流量、 $R_s$ は斜面部からの浮遊砂の流入量である。今、ある部分流域とその河道区分を考える場合、この河道区分上流にある部分流域で発生した浮遊砂は、(3)式とは独立して追跡する。たとえば、この河道区分より上流の部分流域が  $N$  個ある場合、この河道区分には(3)式で追跡する浮遊砂とは別に、上流の部分流域ごとに発生した  $N$  種類の浮遊砂が流れると考え、モデル上ではこの河道区分で  $N$  個の連続式を設定して浮遊砂を別々に追跡する。すなわち

$$\frac{\partial(C_i h_s)}{\partial t} + \frac{\partial(C_i q_s)}{\partial x} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

とする。(4)式は上流域から供給される  $N$  種類の浮遊砂濃度  $C_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) の連続式となっている。右辺

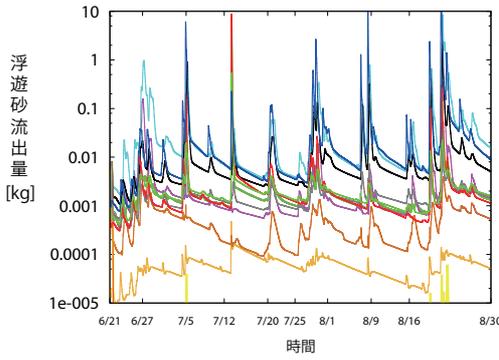


図-7 口太川下流地点での発生起源別浮遊砂流出量

の横流入項は、(3)式で与え、(4)式では0とする。結局、この河道区分の場合、合計  $N + 1$  個の連続式を解いて発生源の異なる浮遊砂を追跡することになる。(3)式、(4)式は浮遊砂濃度  $C$  に対して線形であるため、このようにモデル化することにより、部分流域ごとの浮遊砂流出量を個別に追跡することができる。

この方法では、下流に向かうほど河道区分での連続式の数が増え計算量が増加するが、各部分流域で発生した浮遊砂を時々刻々と追跡できる。このモデル化手法により、Cs-137の空間分布を考慮してCs-137の移行を追跡することが可能となる。口太川下流地点において図-2の各部分流域から生産された浮遊砂の観測期間中の計算結果を図-7に示す。計算結果の色と図-2の流域分割図の色が対応している。

#### 4. 浮遊砂中のCs-137含有量のモデル化

前節までの浮遊砂流出のモデル化によって、部分流域ごとに浮遊砂量を追跡することが可能となった。次に、浮遊砂中のCs-137含有量をモデル化する。前節では、浮遊砂として輸送される全粒径の浮遊砂濃度を追跡するモデルを構築した。ただし、一般に、降雨によって供給されたCs-137の土砂への分配(固液分配係数)は粒径に依存し、粒径の小さい土粒子にCs-137が選択的に付着することが知られている<sup>1)</sup>。各粒径ごとの浮遊砂流出量は、粒径分布が得られれば、前節までで計算される総浮遊砂流出量に粒径分布をかけて得られる。

そこで、ここでは観測期間中に浮遊砂サンプラーから得られた粒径分布<sup>1)</sup>が時間的に変化しないものと仮定して、各粒径の浮遊砂に含まれるCs-137含有量をモデル化することで、浮遊砂全体に含まれるCs-137含有量を推定した。粒径分布の設定については、5.で改めて述べる。モデル化の流れを以下に示す。

##### (1) 粒径分布を用いたCs-137含有量のモデル化

粒径  $D[\mu\text{m}]$  の土粒子1粒に含まれるCs-137含有量  $p[\text{Bq}]$  を

$$p = \beta D^\alpha \quad (5)$$

と仮定する。土粒子が球形であると仮定すれば、1粒の体積  $V_p$  は

$$V_p = \frac{4\pi}{3} \left(\frac{D}{2}\right)^3 \quad (6)$$

なので1粒あたりの土粒子の密度  $\rho_s = (\text{const.})$  とすると粒径  $D$  の粒子1粒あたりの質量  $m_p$  は

$$m_p = \rho_s V_p = \frac{4\pi}{3} \rho_s \left(\frac{D}{2}\right)^3 \quad (7)$$

となる。一方、浮遊砂サンプラーによって補足される浮遊砂の質量を  $M$ 、質量密度関数を  $P_f(D)$  とすると、サンプラー中の粒径  $D$  の粒子の質量密度は  $M P_f(D)$  となる。したがって、サンプラー中の粒径  $D$  の粒子数密度  $N(D)$  は

$$N(D) = \frac{M P_f(D)}{m_p} = \frac{6M}{\pi \rho_s} P_f(D) D^{-3} \quad (8)$$

となり、これに粒子1粒あたりのCs-137含有量  $p = \beta D^\alpha$  を掛けて全粒径で積分することで、サンプラー中のCs-137含有量  $C_s$  は

$$C_s = \frac{6M\beta}{\pi \rho_s} \int_D D^{\alpha-3} P_f(D) dD \quad (9)$$

となる。

##### (2) パラメータ決定方法

粒径分布の観測値は、ある粒径幅  $\Delta D_j$  ごとの質量累積分布関数  $F(D_j)$  として得られている。そこで、(9)式を  $\Delta D_j$  ごとに離散化し、その代表粒径を  $D_j[\mu\text{m}]$  とすると

$$C_s = M \frac{6\beta}{\pi \rho_s} \sum_{j=1}^n D_j^{\alpha-3} P_f(D_j) \Delta D_j \quad (10)$$

となる。 $n$  は粒径分布の観測値における粒径の分割数であり、ここでは  $n = 51$  である。質量累積分布関数  $F(D_j)$  が観測値として得られているので、 $P_f(D_j) \Delta D_j$  は  $F(D_{j+1}) - F(D_j)$  で得ることができる。また、左辺の  $C_s$  と浮遊砂の質量  $M$  がサンプラーの回収した回数だけ観測値として得られている。

土粒子の質量密度  $\rho_s$  については、2.と同様に  $\rho_s = 2750 \text{kg/m}^3$  と固定した。そのため、モデルパラメータは  $\alpha$  および  $\beta$  となる。これらはCs-137の土粒子への吸着を示すパラメータであり、空間的に変化する値をとると考えられるため、部分流域ごとにこれらのパラメータを同定した。具体的には、流域を図-2に示すように、黒い太線で区切られた、水境川流域、口太川上流域、口太川中流域、口太川下流域の4つの部分流域に分割し、浮遊砂サンプラーが設置された水境川下流地点、口太川上流地点、口太川中流地点、口太川下流地点の4地点での粒径分布の観測結果を用いて、4つの部分流域でそれぞれパラメータを同定した。

浮遊砂の粒径分布と質量、Cs-137含有量は流量・浮遊砂濃度と同様に、水境川下流地点、口太川上流地点、口太川中流地点、口太川下流地点の4地点で浮遊砂サ

表-1 各分割領域でのパラメータ

流域パラメータ	$\alpha$	$\beta$
水境川流域	2.43	0.02
口太川上流域	2.85	0.01
口太川中流域	2.88	0.002
口太川下流域	2.76	0.01

ンプラーにより得られた．そのためまず，最上流域にある水境川流域および口太川上流域において，それぞれの流域ごとに  $\alpha$  および  $\beta$  を同定した．

次に，上流域をもつ口太川中流域および口太川下流域については以下に示すようにパラメータ同定した．水境川流域，口太川上流域，口太川中流域，口太川下流域で発生した浮遊砂に関する量を示す添え字をそれぞれ  $i = 1, 2, 3, 4$  とすると，口太川中流地点での Cs-137 輸送量  $C_{sm}$  は，水境川流域，口太川上流域，口太川中流域を起源として中流地点を通過する浮遊砂の質量  $M_1$ ， $M_2$ ， $M_3$ ，その質量密度関数  $P_1$ ， $P_2$ ， $P_3$ ，および部分流域ごとに定めるパラメータ  $\alpha_i$ ， $\beta_i$  を用いて

$$C_{sm} = \sum_{i=1}^3 M_i \frac{6\beta_i}{\pi\rho} \sum_{j=1}^n D_j^{\alpha_i-3} P_i(D_j) \Delta D_j \quad (11)$$

と表される．ただし，上流から流下してくる浮遊砂の発生源別の粒径分布や質量を観測することはできない．観測できるのは，それらすべてを合わせた口太川中流地点での浮遊砂の粒径分布  $P_m$  と質量  $M_m$  である．そこで，部分流域ごとに発生する浮遊砂の粒径分布に大差はないと仮定し， $P_1 = P_2 = P_3 = P_m$  とすると，(11) 式は

$$C_{sm} = \sum_{i=1}^3 \frac{M_m M_i}{M_1 + M_2 + M_3} \sum_{j=1}^n \frac{6\beta_i}{\pi\rho} D_j^{\alpha_i-3} P_m(D_j) \Delta D_j \quad (12)$$

となる．

$C_{sm}$ ， $M_m$  および  $P_m$  は観測値として得られており， $M_1$ ， $M_2$ ， $M_3$  は，3. で構築した発生源を考慮した浮遊砂流出モデルによって計算できる．(12) 式中の  $M_m/(M_1 + M_2 + M_3)$  は，計算した浮遊砂流出量の和が観測された浮遊砂サンプラー中の浮遊砂の質量となるように補正していることを意味している．また  $\alpha_1$ ， $\beta_1$ ， $\alpha_2$ ， $\beta_2$  は水境川流域および口太川上流域のパラメータとして得られているため，(12) 式の未知パラメータである口太川中流域でのパラメータ  $\alpha_3$  および  $\beta_3$  を同定した．下流についても同様の手法で  $\alpha_4$  および  $\beta_4$  を同定した．同定は RMSE 法により行った．

### (3) パラメータの決定結果と再現計算

筑波大学および京都大学による浮遊砂中の Cs-137 含有量の測定<sup>1)</sup>は，浮遊砂サンプラーを 2011 年 6 月 20 日～8 月 16 日の観測期間中 8 回 (6 月 27 日，7 月 5 日，7 月 12 日，7 月 20 日，7 月 25 日，8 月 1 日，8 月 9 日，8 月 16 日) 回収して行われたため，浮遊砂サンプラー

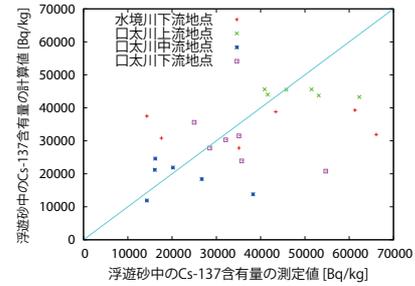


図-8 浮遊砂単位質量あたりの Cs-137 含有量 (パラメータ同定期間 6 月 27 日～8 月 1 日)

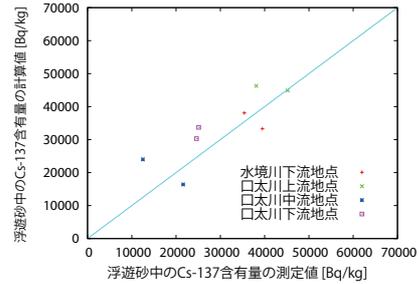


図-9 浮遊砂単位質量あたりの Cs-137 含有量 (再現期間 8 月 1 日～8 月 16 日)

設置期間ごとの 8 個のデータとなっている．そのため，6 月 27 日～8 月 1 日までの 6 期間の測定値を用いてパラメータ同定を行い，8 月 1 日～8 月 9 日，8 月 10 日～8 月 16 日の 2 期間で再現性を確認した．一番最初の観測期間 6 月 20 日～6 月 27 日の期間はすべての観測地点において測定値が非常に大きな値を示しており，余震や観測誤差，局所的な高濃度汚染地の可能性などが考えられる．そこで，本研究のモデル化ではこの期間をパラメータ同定期間から除外した．

同定したパラメータを表-1 に示す．(9) 式から明らかのように， $\alpha < 3$  の場合は粒径が大きいほど，単位質量の浮遊砂に含まれる Cs-137 含有量は小さくなる．得られた  $\alpha$  の値は，どの部分流域でも 3 以下となり，粒径の小さい土粒子に選択的に Cs-137 が吸着する性質が，結果として表れている．また，パラメータの値から口太川中流域において比較的 Cs-137 含有量が少ないことが示唆される．

パラメータ同定期間について，4 観測地点の全 8 期間の浮遊砂中の Cs-137 含有量の計算値と観測値を図-8 に示す．また，再現期間については図-9 に示す．パラメータ同定期間は多少のばらつきはあるが，再現期間である最後の 2 期間はすべての観測地点で計測値と計算値がおおむね一致した．

## 5. Cs-137 輸送量の予測

2.，3. で示した浮遊砂流出のモデル化，および 4. で示した浮遊砂中の Cs-137 含有量のモデル化により，Cs-137 輸送量を以下のように予測する．まず，降雨データ

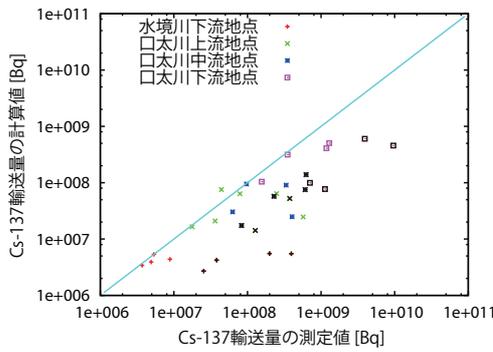


図-10 4観測地点でのCs-137輸送量の観測値と予測値の比較(6月27日~8月16日)

から分布型降雨・土砂流出モデルにより浮遊砂流出量を計算する。次に、この値にCs-137の含有量を乗じて、Cs-137の移行量を予測する。浮遊砂中のCs-137含有量の値は、浮遊砂の粒径分布に依存するが、粒径分布は予測値としては得られない。ただし、図-8および図-9からわかるように、単位質量あたりのCs-137含有量は部分流域ごとには異なるが、浮遊砂サンプラー設置期間ごとに大きな変化が見られない。すなわち(10)式における $C_s/M$ の測定値および計算値が部分流域ごとにほぼ一定であり、浮遊砂の粒径分布の期間変化が小さいことがわかる。そこで、各部分流域ごとに粒径分布を固定し、その空間分布を考慮したCs-137の輸送量推定を行った。固定した粒径分布は、まず8回の浮遊砂サンプラー中の浮遊砂の質量および粒径分布を用いて各サンプラー中の質量分布を求め、それを8回のサンプラー中の浮遊砂の総量で割ることで作成した。

こうして作成した観測地点ごとの粒径分布を $P_i$ ( $i = 1, 2, 3, 4$ は各観測地点)とし、得られたCs-137含有量モデルのパラメータ $\alpha_i, \beta_i$ を用い、(12)式を用いて観測地点ごとに単位質量あたりのCs-137含有量を設定した。観測地点ごとに設定した単位質量あたりのCs-137含有量を $\eta_i$ 、観測地点ごとのサンプラー設置期間のCs-137輸送量の予測値を $\tilde{C}_{sij}$ ( $j = 2, 3, \dots, 8$ はサンプラー設置期間)とすると、浮遊砂モデルによって得られる流域 $i$ 、期間 $j$ の浮遊砂流出量の計算値 $M_{ij}$ を用いて

$$\tilde{C}_{sij} = \eta_i M_{ij}, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad j = 2, 3, \dots, 8 \quad (13)$$

として得られる。

4観測地点でのサンプラー設置期間ごとのCs-137輸送量の合計値の予測値と観測値を図-10に示す。浮遊砂サンプラーを回収した8回のうち、計算流量とH-Q換算流量が適合してかつ、浮遊砂中のCs-137含有量の計算値と観測値も適合した期間は、適切な予測値が得られた。一方、残りの期間は主に、計算流量とH-Q換算流量にずれが見られた期間と、Cs-137含有量の測定値が著しく大きい6月20日~6月27日の期間(図-10中で黒くプロットした期間)であり、計算値が測定値に比べ約1オーダー小さい結果となった。

## 6. おわりに

本研究では、分布型降雨・浮遊砂流出モデルおよび浮遊砂中のCs-137含有量のモデルを構築して、河川中のCs-137輸送量の再現を試みた。その結果、流量・浮遊砂流出量ともに計算値が測定値とはよい適合性が見られた。浮遊砂中のCs-137含有量についても、測定結果に近い結果が得られた。発生源を考慮した分布型浮遊砂流出モデルによって浮遊砂中のCs-137含有量の空間分布をモデルパラメータとして表現したことで、Cs-137の含有量を浮遊砂粒径の関数としてモデル化したことは本研究の大きな特徴といえる。

しかしながら、上流部では一部浮遊砂流出モデルの精度がよくない期間があり、上流部でのパラメータなどの検討が課題として挙げられる。そして、本研究で構築したモデルを長期のシミュレーションに適用するためには、放射線強度の時間減衰を考慮するとともに、各部分流域でのCs-137の移動によるCs-137の残留量の減少を考慮するためのモデルの改良が必要がある。またCs-137の付着した土粒子の一部は河道中で発生・沈降すると考えられるため、これらの機構についても考慮する必要がある。

## 参考文献

- 1) 文部科学省原子力災害対策支援本部: 放射線量等分布マップ関連研究に関する報告書(第2編) 6.3.2. 森林, 土壌等の自然環境中における放射性物質の移行状況調査, pp.2-165-2-190, 2011.
- 2) 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻水文・水資源学分野: 水文モデル構築システム OHyMoS, <http://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/ohymos/index.html> (2012/9/30 確認).
- 3) 市川温, 村上将道, 立川康人, 椎葉充晴: 流域地形の新たな数理表現形式に基づく流域流出系 シミュレーションシステムの開発, 土木学会論文集, no. 691/II-57, pp. 43-52, 2001.
- 4) 立川康人, 永谷言, 寶馨: 飽和, 不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発, 水工学論文集, 48, pp.7-12, 2004.
- 5) 平林桂, 砂田憲吾, 大石哲, 宮沢直季: 片庭川における洪水時の浮遊砂・ウォッシュロード観測と流域土砂動態モデルの検討, 土木学会論文集, no. 768, pp. 33-43, 2004
- 6) APIP, Takahiro SAYAMA, Yasuto TACHIKAWA and Kaoru TAKARA, Lumping of a physically-based distributed model for sediment runoff prediction in a catchment scale, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, vol. 52, pp. 43-48, 2008.
- 7) 清水康行: 水理公式集 例題プログラム集 第2編 河川編 [例題 2 4]1次元流れと河床変動の計算, 2002
- 8) 市川温, 藤原一樹, 中川勝広, 椎葉充晴, 池淵周一: 沖縄地方における赤土流出モデルの開発, 水工学論文, 47, pp.751-756, 2003.
- 9) 芦田和夫, 田中健二: 粘土分を含有する砂れき床の浸食と流砂機構に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 17B, pp.571-5846, 1974.

(2012. 9. 30 受付)