

## Dynamic analysis of soil particles in the Abukuma river basin by hydrological/water quality model

○高見 京平 (大阪大学)      正 近藤 明 (大阪大学)  
 嶋寺 光 (大阪大学)      井上 義雄 (大阪大学)  
 Kyohei TAKAMI, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka  
 Akira KONDO, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka  
 Hikari SHIMADERA, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka  
 Yoshio INOUE, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka

After the accident of Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant (FDNPP), a large amount of radiocesium were deposited in the wide area and adsorbed strongly to the soil particles. To evaluate the environmental fate of radiocesium, it is necessary to predict the behaviors of soil particles by rain-runoff. In this study, the migration of soil particles in the Abukuma river basin, located in the vicinity of FDNPP, was analyzed by a hydrological/water quality model for the three years of 2009 – 2011. The hydrological model simulated well river flows in the basin both in flooding and non-flooding seasons. The water quality model could analyze the behaviors of soil particles: clay, silt, very fine sand and fine sand.

*Key words:* Hydrological/water Quality Model, Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident, Abukuma River

### 1. はじめに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震に伴う津波によって全電源が損失し、福島第一原子力発電所 (FDNPP) 事故が引き起こされた。その結果、FDNPP から大量の放射性セシウムが環境中に放出され、大気中の放射性セシウムは大気拡散に伴って移動しながら地表面及び海面へと降下した。Fig.1 に示す航空機モニタリングの放射性セシウム沈着量測定結果<sup>(1)</sup>から読み取れるように、日本本土にも広範囲に及んで放射性セシウムが沈着した。

セシウムはアルカリ金属に属し、土壌の負電荷に強く吸着する<sup>(2)</sup>ため、放射性セシウムの地表面での残留、河川への流出、底質への沈降・分配、海域への流出などの環境動態プロセス全体の評価を行う上で、降雨や河川の流れなどの水循環に伴う土壌粒子の挙動を推定する必要がある。そこで、本研究では、流域が福島・宮城・山形3県にまたがり、福島県主要都市である郡山市や福島市、宮城県南部の岩沼市等の都市が、縦断的に上流から下流まで存在する阿武隈川流域<sup>(3)</sup>を対象として、水文/水質モデル<sup>(4)(5)</sup>を適用し、土壌粒子動態解析を行った。

### 2. 水文/水質モデルの概要

水文/水質モデルでは、流域界・水路網・土地利用<sup>(6)</sup>・気象データ<sup>(7)</sup>の数値情報を入力することで、降雨流出過程及びそれに伴う土壌粒子移動を再現する。水文モデルの概要図をFig.2 に示す。対象領域内の各計算格子について、鉛直方向にA～Dの4層の土壌層と河道を設定し、流域特性を3次元的に表現する。地表面及びA層については、畑・山林・市街地・田4種類の土地利用を考慮する。また、D層については、地下水を再現すると仮定する。

#### 2.1 水文モデルの基礎式

水文モデルでは、まず、入力される気象データを基に、各計算格子における蒸発散量を算出するため、エネルギー保存則に基づき、Eq.1 に示す熱収支解析が行われる。

$$R_n + Q_n = \sigma T^4 + H_n + LE + G_n \quad (\text{Eq.1})$$

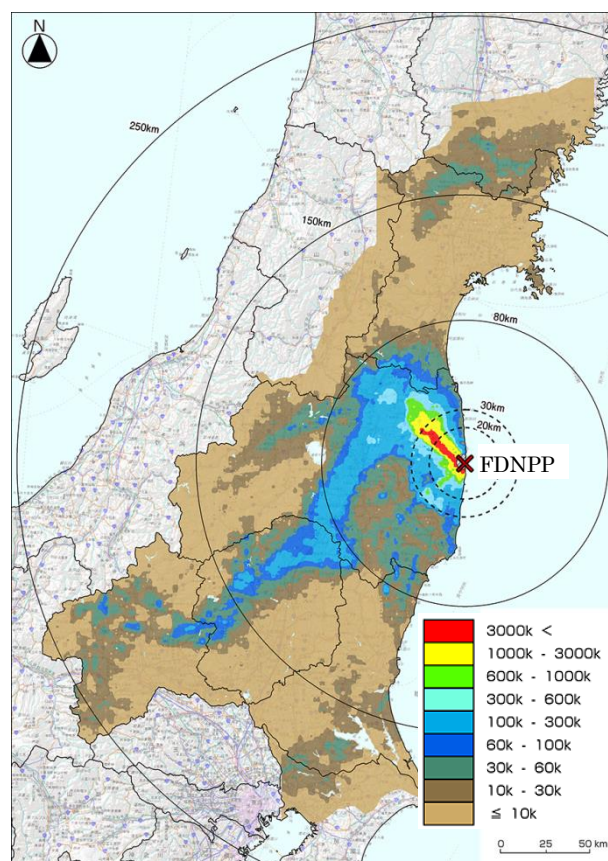


Fig.1 Radiocesium depositions [Bq/m<sup>2</sup>] in December 28, 2012<sup>(1)</sup>

ここで、 $R_n$  : 正味の入力放射エネルギー、 $Q_n$  : 人工排熱量、 $\sigma$  : ステファン・ボルツマン定数、 $T$  : 気温、 $H_n$  : 顕熱、 $l$  : 気化潜熱、 $E$  : 蒸発散量、 $G_n$  : 土壌貯熱量であり、各計算式を Eq.2～5 に示す。ただし、土壌貯熱量については、Force-Restore モデル<sup>(8)</sup>を基に算出する。

$$R_n = (1 - \alpha_r)S + L_d \quad (\text{Eq.2})$$

$$H_n = c_p \rho_a C_H u_a (T_s - T) \quad (\text{Eq.3})$$

$$E = \rho_a \beta_r C_H u_a (q_{asat} - q_a) \quad (\text{Eq.4})$$

$$G_n = \left( \frac{\omega c_v \lambda}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{1}{\omega} \frac{\partial T_s}{\partial t} + T_s - \bar{T}_s \right) \quad (\text{Eq.5})$$

ここで、 $\alpha_r$  : アルベド、 $S$  : 全日射量、 $L_d$  : 長波放射量、 $c_p$  : 空気の低圧比熱、 $\rho_a$  : 空気の密度、 $C_H$  : 顕熱輸送パラメータ係数、 $u_a$  : 風速、 $T_s$  : 地表面温度、 $\beta_r$  : 蒸発散効率、 $q_{asat}$  : 飽和比湿、 $q_a$  : 比湿、 $\omega$  : 地温変化角振動数、 $c_v$  : 土壌体積熱容量、 $\lambda$  : 土壌熱伝導率、 $\bar{T}_s$  : 熱平均地温である。

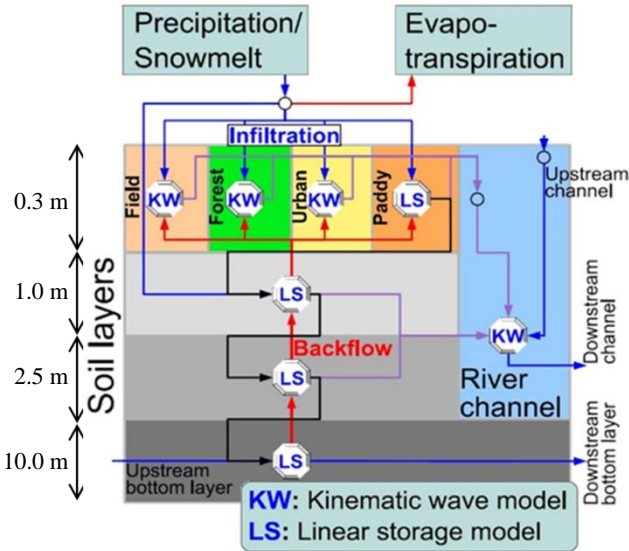


Fig.2 Principles for the hydrological model<sup>(5)</sup>

次に、降雨及び融雪の入力量について、土地利用ごとに流れ解析を行う。地表面及び A 層の畑・山林・市街地と河道には、Eq.6, 7 に示す kinematic wave モデルをそれぞれ適用する。ただし、河道断面は三角形であると仮定する。

$$\frac{\partial h_r}{\partial t} + \frac{\partial q_r}{\partial x} = r_e, \quad (\text{Eq.6})$$

$$q_r = \frac{\sqrt{\sin \theta}}{n} (h_r - d)^{\frac{5}{3}} + \frac{k \sin \theta}{\lambda} h_r$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{in}, \quad (\text{Eq.7})$$

$$Q = \frac{\sqrt{I}}{n} \left( \frac{m}{2\sqrt{1+m^2}} \right)^{\frac{1}{3}} A^{\frac{4}{3}}$$

ここで、 $h_r$  : 水深、 $q_r$  : 単位幅あたりの流出量、 $r_e$  : 単位幅あたりの流入量、 $\theta$  : 斜面勾配、 $n$  : 斜面の等価粗度、 $d$  : 飽和貯水量、 $k$  : 透水係数、 $\lambda$  : 空隙率、 $A$  : 流水断面積、 $Q$  : 河川流量、 $q_{in}$  : 単位幅あたりの土壌層からの横流入量、 $I$  : 河道勾配、 $m$  : 河道の法面勾配である。

田と B~D 層には、Eq.8, 9 に示す線形貯留モデルをそれぞれ適用する。水深が飽和貯水量を超過した場合、溢水量は上層へ復帰するものとする。田について、水管理方式を畦畔越流や畦畔横浸透に反映させ、河川から取水することで、維持湛水深を再現する。Fig.3 に線形貯留モデルの概念図を示す。

$$\frac{\partial h_r}{\partial t} = r_e - q_r, \quad (\text{Eq.8})$$

$$q_r = \sum a_p (h - z_r)$$

$$\frac{\partial h_r}{\partial t} = r_e - q_r, \quad (\text{Eq.9})$$

$$q_r = (k_h + k_v) h_r$$

ここで、 $a_p$  : 水田タンクモデル流出定数、 $z_r$  : 流出限界高さ、 $k_h$  : 水平流出係数、 $k_v$  : 鉛直浸透係数である。

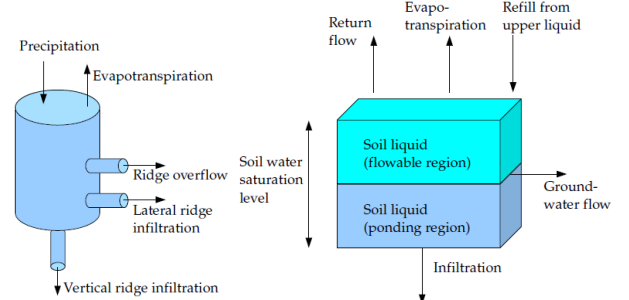


Fig.3 Principles for the linear storage model (left: in paddy, right: in B~D layers)<sup>(5)</sup>

## 2.2 水質モデルの基礎式

水質モデルでは、移流・拡散・沈降・再浮上・横流入負荷を考慮し、Eq.10 に示す物質保存式に基づいて河川中土壌粒子濃度を計算する。

$$\frac{\partial}{\partial t} (AC) + \frac{\partial}{\partial x} (AUC) = \frac{\partial}{\partial x} \left( AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) - W \frac{A}{H} - q_s \frac{A}{R} + f \quad (\text{Eq.10})$$

ここで、 $C$  : 河川中土壌粒子濃度、 $U$  : 断面平均流速、 $D$  : 拡散係数、 $W$  : 水中における土壌粒子沈降速度、 $H$  : 河川水深、 $q_s$  : 土壌粒子再浮上量、 $R$  : 径深、 $f$  : 横流入負荷量である。

沈降速度について、Eq.11 に示すストークスの式から算出する。再浮上については、摩擦速度が限界摩擦速度を上回った場合に発生すると仮定し、再浮上量は Eq.12 に示す式に基づいて算出する。横流入負荷算出には、Eq.13 に示す LQ 式を適用し、水流入量に対して土壌粒子流入負荷が指数関数的に増加すると仮定する。

$$W = \frac{g(\rho_s - \rho_w) d_s^2}{18\mu} \quad (\text{Eq.11})$$

$$q_s = \alpha_s \left( \frac{u^{*2}}{u_c^{*2}} - 1 \right)^{\beta_s} \quad (\text{Eq.12})$$

$$f = \alpha_l q_{in}^{\beta_l} \quad (\text{Eq.13})$$

ここで、 $g$  : 重力加速度、 $\rho_s$  : 土壌粒子の密度、 $\rho_w$  : 水の密度、 $d_s$  : 土壌粒径、 $\mu$  : 水の粘性係数、 $\alpha_s$  : 巻き上げ速度定数、 $\beta_s$  : 掃流式指数、 $u^*$  : 摩擦速度、 $u_c^*$  : 限界摩擦速度、 $\alpha_l, \beta_l$  : LQ 式定数である。

## 2.3 ダムモデル

ダムモデルでは、1 年を洪水期と非洪水期に分け、洪水期は制限水位を、非洪水期は常時満水位をそれぞれ維持するよ

う放水量を調整する。ただし、前 24 時間の降水量が 100 mm を超える場合、洪水警戒体制を執り、放水量を減少させる。

### 3. 計算条件

#### 3.1 計算領域及び計算期間

Fig.4 に計算領域である阿武隈川流域を示す。計算領域の格子解像度は第 3 次メッシュとした。なお、ダムとしては、流域の根幹的治水施設である七ヶ宿ダム・摺上川ダム・三春ダム 3 基のダム<sup>(3)</sup>を考慮した。

計算期間は、2009～2011 年の 3 年間とした。

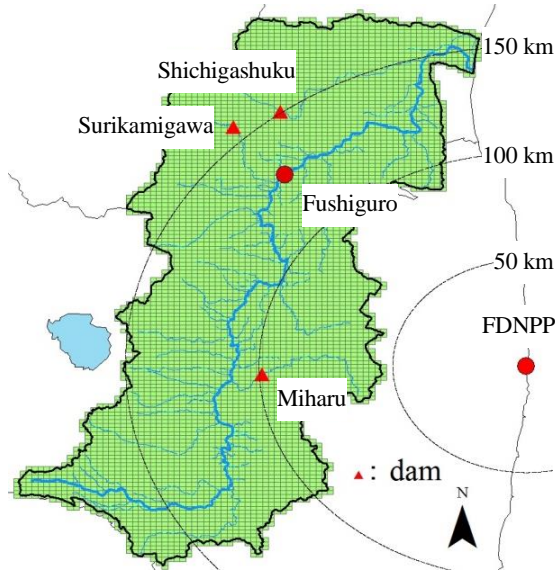


Fig.4 Computational domain

#### 3.2 土壌粒子の分類

土壌成分のうち、セシウム吸着への寄与が大きい無機物を対象として、2011 年 6 月から 2012 年 12 月までに Sakaguchi らが行った河川中浮遊粒子 (SS) の分級結果<sup>(9)</sup>を基に、Table.1 に示す 4 種類の土壌粒子を考慮し、粒径による流出特性の違いを再現した。

Table.1 Classification by the size of the soil particles

Name of soil separate	Particle size[μm]
Clay	~3
Silt	3~63
Very fine sand	63~125
Fine sand	125~250

### 4. 水文/水質モデルの検証

河川流量と河川中 SS 濃度について、Fig.4 の伏黒観測所における実測値<sup>(10)</sup>と計算値を比較することで、水文/水質モデルの検証を行った。

#### 4.1 水文モデルの検証方法

河川流量の実測値は、常時観測されている水位から水位流量曲線式を用いて算出されており<sup>(10)</sup>、日平均流量について、計算値と比較を行った。また、Eq.14 に示すナッシュ係数 (NSE)<sup>(11)</sup>を用いて、統計的にも検証を行った。NSE は、その値が 0.70 以上となれば数値計算の再現性が良好、負の値となれば予測の効果がないとみなせる統計指標である。

$$NSE = 1 - \frac{\sum(M_i - O_i)^2}{\sum(O_i - \bar{O})^2} \quad (\text{Eq.14})$$

ここで、 $M_i$  : 計算値、 $O_i$  : 実測値、 $\bar{O}$  : 実測平均値である。

#### 4.2 水質モデルの検証方法

河川中 SS 濃度の実測値は、河川水質試験方法<sup>(12)</sup>に基づき、月に 1 回程度行われており、その実測値と計算日平均値の比較を行った。

### 5. 計算結果

計算各年における阿武隈川流域からの河川水流出量と積算土壌流出量計算結果を Fig.5 に示す。2010 年には、1 年を通じて多くの降水が観測され、年降水量は 3 年間で最多の 1666 mm となった。また、2011 年 9 月 21 日には、東日本に上陸した台風としては戦後最大級の勢力を誇る台風 1115 号が流域に接近した<sup>(13)</sup>ことに伴って、河川水・土壌流出量ともに急増した。

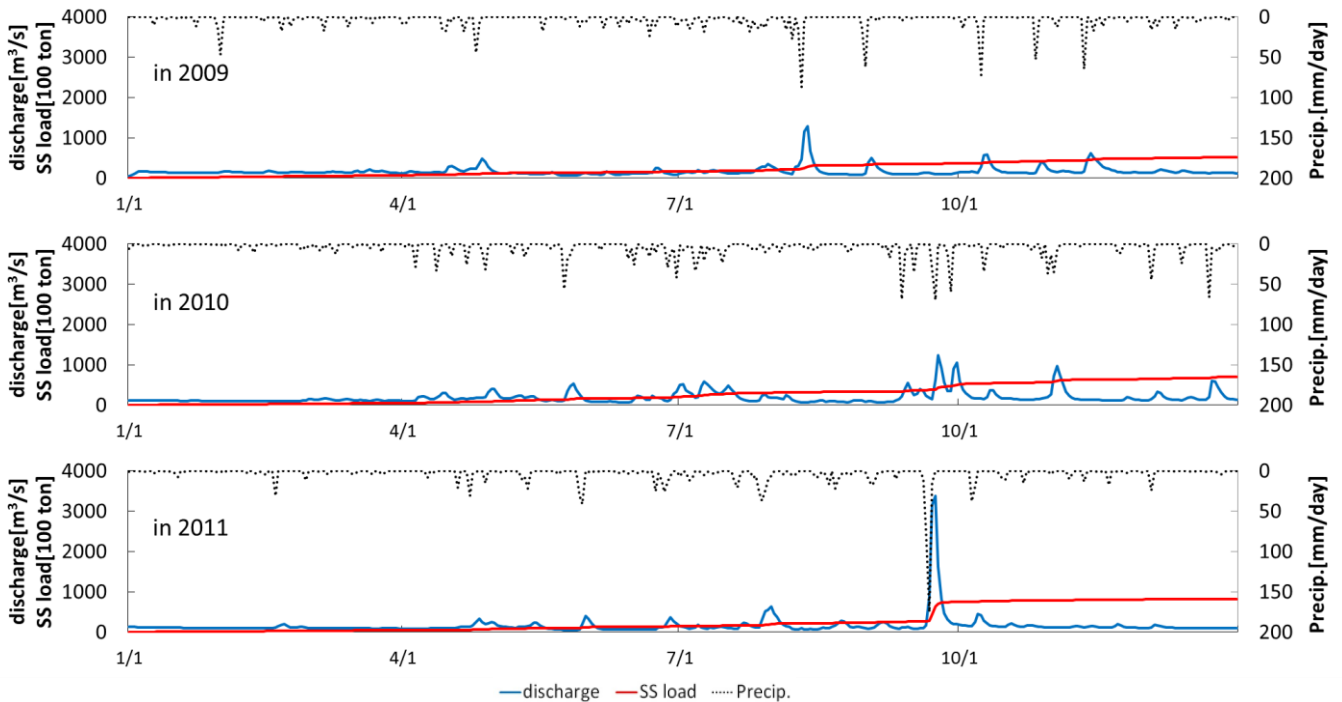


Fig.5 Water discharge and SS load from the Abukuma river basin



## 5.1 河川流量計算結果

伏黒観測所における、日平均流量の計算値と実測値の比較結果を Fig.6 に示す。平水時だけでなく出水時のピーク流量・タイミングが再現された。また、 $NSE = 0.71$  となり、統計的にも再現性は良好となった。

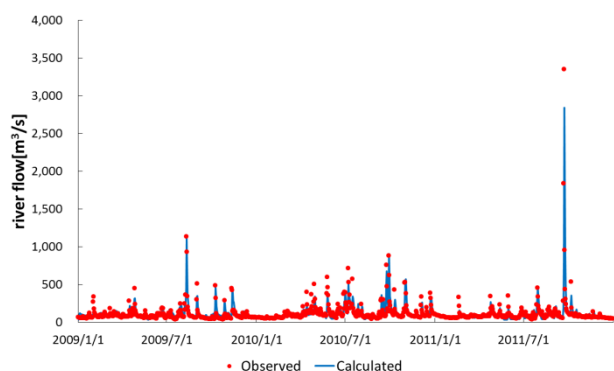


Fig.6 Daily river flow at the Fushiguro observatory

## 5.2 河川中 SS 濃度計算結果

伏黒観測所における、実測値と計算日平均値の比較結果を Fig.7 に示す。出水時には、水質観測が行われていないため、再現性検証は困難であるが、平水時の再現性について、概ね良好となった。

阿武隈川河口における、月平均 SS 濃度計算結果の粒子内訳を Fig.8 に示す。河川中 SS 高濃度の原因がシルト粒子であることが示唆された。

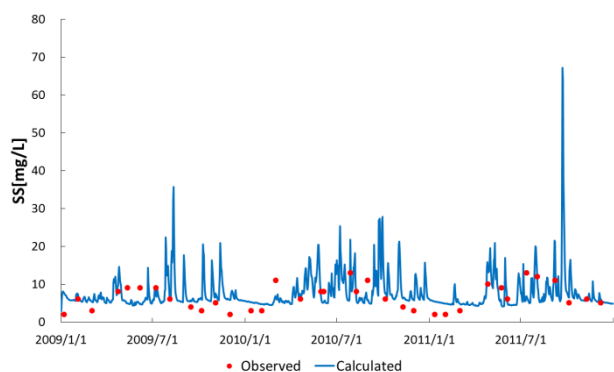


Fig.7 Daily SS concentrations at the Fushiguro observatory

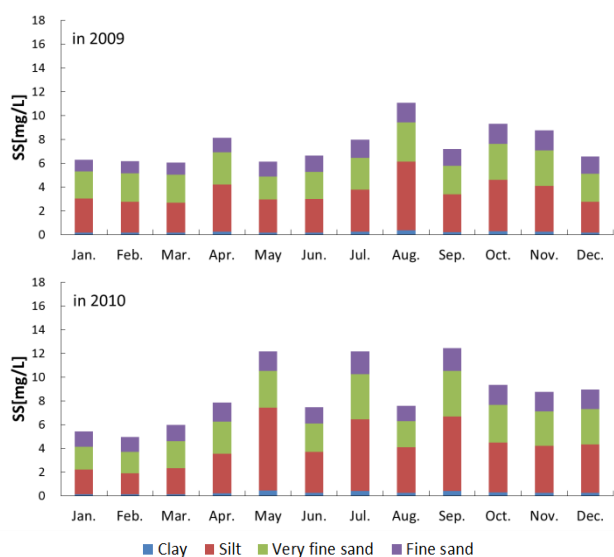


Fig.8 Monthly particle classification at the Abukuma estuary

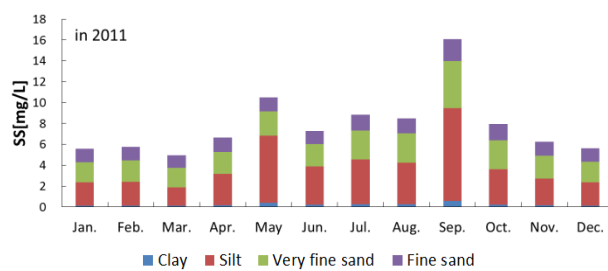


Fig.8 Continued

## 6. 結論

本研究では、流域が福島・宮城・山形 3 県にまたがり、都市が縦断的に上流から下流まで存在する阿武隈川流域を対象として、水文/水質モデルを適用し、2009～2011 年における土壌粒子動態解析を行った。

水文モデルでは、降雨流出過程が計算され、伏黒観測所における、阿武隈川の流量が平水・出水時ともに良好に再現された。水質モデルでは、粒径を考慮し、物質保存式に基づいて河川中 SS 濃度が計算され、平水時の SS 濃度を概ね再現した。ただし、出水時には、水質観測が行われていないため、出水時の再現性検証方法を考案する必要がある。

また、土壌中有機物や土壌鉱物によって、土壌粒子に対するセシウムの吸着量が変化する<sup>(2)</sup>ため、阿武隈川流域における放射性セシウムの環境動態を評価する上で、さらに土壌特性を考慮する必要がある。

## 参考文献

- (1) 日本原子力研究開発機構:第 6 次航空機モニタリング及び福島第一原子力発電所から 80 km 圏外の航空機モニタリングの放射性セシウムの沈着量の測定結果 (H24.12.28 換算), 2012  
<http://emdb.jaea.go.jp/emdb/portals/b224/>
- (2) A. Cremers, A. Elsen, P. De Preter, A. Maes : Quantitative analysis of radiocesium retention in soils, 1988
- (3) 国土交通省 : 阿武隈川水系の流域及び河川の概要, 2012  
[http://www.mlit.go.jp/river/basic\\_info/jigyo\\_keikaku/gaiyou/seibi/pdf/abukuma/h241114\\_4.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/seibi/pdf/abukuma/h241114_4.pdf)
- (4) 高見京平, 嶋寺光, 近藤明, 井上義雄 : 阿武隈川流域への水文・水質モデルの適用, 2014
- (5) Kundan Lal Shrestha : Water Resource Assessment of Yodo River Basin Using Coupled Hydrometeorological Modeling Approach, 2009
- (6) 国土交通省 : 国土数値情報ダウンロードサービス  
<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>
- (7) 気象庁 : 気象観測月報, 2009 ~ 2011
- (8) 広田知良, 福本昌人, 城岡竜一, 村松謙生 : Force-Restore モデルによる日平均地温の推定, 1995
- (9) A. Sakaguchi, K. Tanaka, H. Iwatani, H. Chiga, Q. Fan, Y. Onda, Y. Takahashi : Size distribution studies of <sup>137</sup>Cs in river water in the Abukuma Riverine system following the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, 2014
- (10) 国土交通省 : 水文水質データベース  
<http://www.l.river.go.jp/>
- (11) J.E. Nashi, J.V. Sutcliffe : River flow forecasting conceptual models part I – A discussion of principles, 1970
- (12) 国土交通省 : 河川水質試験方法 (案), 2009  
[http://www.mlit.go.jp/river/shishin\\_guideline/kasen/suishitsu/houhou.html](http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kasen/suishitsu/houhou.html)
- (13) 気象庁 : 台風 1115 号位置表, 2011  
<http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/data/typhoon/T1115.pdf>