

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 14 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26511001

研究課題名(和文)流域レベルの放射性セシウム動態予測モデルの構築

研究課題名(英文) Establishment of a watershed scale model predicting radiocesium redistribution.

研究代表者

波多野 隆介 (Hatano, Rsyusuke)

北海道大学・農学研究院・教授

研究者番号：40156344

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：2011年3月11日に起こった福島第一原発事故後の放射性セシウム(Cs)の再分配を予測するため、土壌から植物への放射性Cs移行が土壌の中カリウム(K)濃度、土壌の放射性Cs捕捉ポテンシャル(RIP)の関数として表したCsモデルを、USDAが開発したSWATモデルに組み込み、SWAT-Csを開発した。Csモデルは水稲玄米の放射性Csの移行係数を良く再現することを確認した。SWAT-Csは、流量を良く再現したが、2015年の除染後は土壌の剥ぎ取りのためにパラメータを変える必要があった。一方、濁度、K、Csの突発的な極大ピークを予測できず、河岸崩壊のような特異なプロセスが含まれていると思われた。

研究成果の概要(英文)：To predict the redistribution of radio-caesium (Cs) deposited in a watershed with an accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant on 11 March 2011, Soil Water Assessment Tool (SWAT) model developed by USDA was modified (SWAT-Cs). The SWAT-Cs was equipped the Cs module describing Cs transfer from soil to plant as a function of K concentration and radio-caesium interception potential (RIP). The Cs module predicted well the measured Cs transfer coefficient of paddy brown rice. Performance of SWAT-Cs for daily streamflow was satisfactory. However, due to removing surface soils during the decontamination in 2015, the parameters of SWAT-Cs should be changed after decontamination. On the other hand, SWAT-Cs performance for the stream loads of SS, K and Cs was not satisfactory. SWAT-Cs could not predict large episodic peaks of SS, K and Cs loads without increase of streamflow. This may be due to channel degradation associated with the abandonment of land managements after the accidents.

研究分野：農学

キーワード：放射性セシウム SWATモデル 放射性セシウム捕捉ポテンシャル 移行係数 流域 除染 流量 水田

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日の福島第一原発事故以来、陸域生態系を汚染した降下放射性物質の行末を明らかにする必要性が叫ばれてきた。とくに放射性セシウム(Cs)のうち Cs-137 は半減期が長く(30.1年)、土壌、植物、河川水の汚染状況や除染の効果の長期監視が必要であり(Nakao et al, 2014)、予測モデルはその助けになる。

アメリカ農務省が開発した SWAT (Soil Water Assessment Tool) モデルは、地表水、土壌粒子および化学物質の動態を流域スケールで予測する総合的な数値モデルである(Neitsch et al., 2005)。化学物質の一部は、植物に吸収され、土壌中に残存したものが、溶存態、懸濁態となって水の流出とともに、下方、側方に移動し、河川へ流出する。しかし SWAT は、Cs のような陽イオンの動態を記述するモジュールを持っていないため、その開発を行う必要がある。

植物の経根吸収は溶液を通して行われる。溶液濃度を決める交換態は固定態へと徐々に変化することから、ポイントは、放射性 Cs の交換態と溶存態の間の固液分配と、交換態と固定態の間の分配にある。ただし、その分配過程でカリウム(K)の増加は放射性 Cs の固定量を低下させることが知られている(Absalom et al., 1999)。さらに、植物の Cs 吸収は K と拮抗し、K の増加は放射性 Cs の吸収を抑制する効果があることが知られている。このために K の動態を同時に予測する必要がある。

2. 研究の目的

(1) 放射性 Cs の固定態、交換態、溶存態の分配と植物吸収について、K 濃度の影響を含めて記述する Cs モデルを開発する。

(2) Cs モデルを既存の SWAT モデルに組み込み、新たに SWAT-Cs モデルを開発する。

(3) 放射性物質により汚染され耕作放棄された流域において、河川流量、懸濁物、K、放射性 Cs 流出を実測し、SWAT-Cs のパラメータを決定し流出予測を行う。

(4) Cs モデルを、異なる地域・土壌・施肥条件で栽培された水稲玄米への放射性 Cs 移行データに適用し、移行係数(玄米の放射性 Cs 濃度/土壌の放射性 Cs 濃度)を予測する簡易モデルの開発を行う。

3. 研究の方法

(1) Cs モデルの構築

Absalom et al. (1999)が提案した経験的方程式に基づき、放射性 Cs の分配過程をモデル化した。土壌の交換性 K 含量、粘土含量及び事故後の経過時間を記述する 8 つの式を Cs モジュールとして SWAT への組み込んだ。

(2) 観測サイトの概要

福島第一原発の北西約 30km に位置する飯舘村南部の比叡川上部流域で観測を行った。

流域面積は 445 ha である。年間降水量 1361 mm yr⁻¹、年平均気温 10 °C で、月最高気温は 8 月の 27.3 °C、月最低気温は 2 月の -6.3 °C である。例年、12 月中旬から 4 月下旬にかけて降雪が観測され、年間の平均積雪深度は 30 cm、年間積雪量は 189 cm である。

福島第一原子力発電所事故後、流域内のすべての農地は耕作放棄地となり、2015 年の除染による土壌の剥ぎ取りまで、野草に覆われた。

流域は事故発生前、落葉樹林(41%)、常緑樹林(28%)、水田(11%)、牧草地(8%)、畑地(5%)、混合樹林(3%)、市街地(2%)、荒地(1%)、水域(1%)から構成されており、流域内を流れる河川沿いおよび下流部に水田が広がっている。主な土壌タイプは褐色森林土(54%)、黒ボク土(24%)、細粒グライ土(11%)、乾燥褐色森林土(10%)、灰色低地土(1%)である。モデリング対象とした範囲内の最高高度は 791 m、最低高度は 607 m であり、比較的平坦な流域である。

(3) 試料採取および観測

流域の末端で、流速、水位、濁度(FTU)を 10 分毎に自動観測した。水位、河川形状および流速から河川流量を計算した。観測地点では、月 1 回の頻度で平水時の水試料を採取し、増水時の水試料は、自動採水装置で採取した。この試料を用いて懸濁物(SS)、K 濃度、溶存態および懸濁態放射性 Cs 濃度を分析した。懸濁物は水試料のろ過残渣量により求め、放射性 Cs 濃度は、ゲルマニウム半導体検出器(ウエル型)で分析した。

SS、K および放射性 Cs 濃度は、ともに濁度(FTU)と強い相関がみられた。R²はそれぞれ 0.876、0.928、0.780 であった。これらの回帰式と自動観測による実測値から、毎日の SS、K および放射性 Cs 濃度を求め、流量を掛けあわせて SS、K および放射性 Cs 負荷量を求めた。

(4) SWAT モデルの適用の手順

図 1 に SWAT モデルの構造およびモデリングの手順を示す。予測に用いた SWAT モデルは、物理学的なプロセスに基づいた分布型水文モデルである。インプットデータは ArcGIS インターフェースにより体系化され、気象データ、地形情報、土地利用、土壌データ等が含まれる。流域スケールのモデリングが可能であり、流域全体はまず、地形や流路を基にサブ流域に分割される。各サブ流域は、さらに土地利用、土壌タイプ、傾斜の組み合わせによって水理学的反応単位(hydrologic response unit, HRU)に分けられる。HRU は最小の空間分割単位である。本研究ではアウトプットとして河川流量、SS 流出、K 流出、Cs 流出をアウトプット値として出力し、1 日毎で実測値との比較を行った。各アウトプットについて、パラメータ値の校正はマニュアルおよびオートの二手法で行い、後者に

はSWATの感度解析、校正工程を簡略化したソフト、SWAT-CUPを用いた。キャリブレーションにはパラメータの特性に応じて3つの手法がある。1は校正値と初期値を単純に置き換える手法。2は校正値を初期値に足すことで適正値を求める手法、3は校正値を掛け算することで適正値を求める手法である。



図1 SWATモデルの構造と適用の手順

(5) モデル評価

実測値を有する期間を校正期間、検証期間に分けてシミュレーションを行い、それぞれについて統計的指標を用いた精度評価を行った。2008年から2012年までの5年間はパラメータ初期値調整期間、実測値を有する2013年を校正期間、2014年を検証期間とし、日ごとの予測を行った。流域内の土地利用のうち、水田、牧草地、畑地は、事故後、自然草地となったと設定した。採用した統計的指標は、決定係数(R^2)、Nash-Sutcliffe係数(ENS)およびパーセントバイアス(PBIAS)の3種類である。 R^2 は実測値と推定値の直線的相関の強度を、ENSは1:1の関係の強度を示し、いずれも0.5以上が望ましいとされる(Santhi et al., 2001)。PBIASは実測値と比較した推定値の平均的傾向を示し、正で過小評価、負で過大評価、絶対値が小さいほど精度が高く(Gupta et al., 1999)、月単位のSSシミュレーションの場合、 $\pm 30 < \text{PBIAS} < \pm 55$ で良好とされる(Moriasi et al., 2007)。実測値と推定値の相関強度を示す前述2つの統計値と合わせ、過大・過小といった総合的な傾向を示すために用いられることが多い。

(6) SWATモデルへの入力データ

SWATは独自のデータベースを有し、最低限必要とする入力データは、GISデータである地形情報、土地利用、土壌タイプである。本研究ではさらに、気象データ(降水量、気温、相対湿度、風速、太陽放射)、現地調査に基づく土壌物理性(粒径組成、飽和透水係数、有効水分量、容積重、土壌深度)および河川形状をデータベースに書き込むことによりモデルの精緻化を図った。

土壌および植物体中のK、Csの初期濃度は、流域内で採取した土壌の分析値から決定した。事故以前は作付けに伴い農地にK施与が行われたとして、現地で推奨される値を与えた。岩石の風化により放出されるK量も与えた。

放射性Csの動態に関する経験定数はAbsalom et al., (1999)を参照した。

(7) 除染の影響調査

2015年以降、流域では除染が始まった。これは、表土5cmを剥ぎ取り、フレコンバックにつめ、流域の一箇所に集積するものである。事故後、農地は野草で覆われていたが、除染により野草はなくなり土壌表面が直接現れ、フレコンバック置き場は、市街地と似た状況を作り出した。この除染の影響が河川流量に与える影響を見るため、SWATに、2013年の実測値により校正したパラメータを用いて2015年と2016年の流量を検証した結果と、2015年の実測値による校正により、2016年の流量を検証した結果を比較した。

2015年以降の除染作業により水田、牧草地、畑地は、土壌が剥ぎ取られ荒地になったと設定した。さらに、除染作業によりフレコンバックが積み立てられた土地を市街地と設定した。結果として土地利用の内訳は、落葉樹林(41%)、常緑樹林(28%)、荒地(23%)、市街地(4%)、混合樹林(3%)、水域(1%)となった。また、除染作業の影響を反映させた土壌タイプデータでは、土壌の剥ぎ取りがなされた土地の土壌第一層が取り除かれたと設定した。

(8) Csモデルの移行係数を水稻玄米に適用するため、モデル改良とパラメータ校正を行った。土壌によるRIPの大きな違いを考慮できるように、放射性Csの固液分配係数(K_d)を算出するモデル式を改良した。また、農地に施用される様々なK肥料及びK含有資材(塩化K、ケイ酸K、堆肥、粘土鉱物資材)による交換性K含量増大効果の違いを評価できるように肥料・資材別の経験的係数をモデル内に採り入れた。改良Cs移行係数モデルを水稻玄米(2011~2012年に福島県及び北関東で実施された圃場試験の文献データに基づく)に適用し、モデル内の各種パラメータ(土壌特性、作物特性及び時間による減衰傾向を表現するパラメータ群)を校正した。

4. 研究成果

(1) 河川流量予測

SWATモデルはピークの位置、高さともに実測値を良く再現した(図2)。推定値と実測値間の R^2 およびENSは、校正期間(2013)で

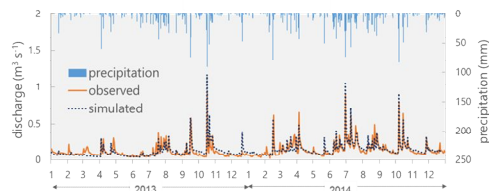


図2 河川流量のモデル推定値と実測値の比較および降水量の経時変化

それぞれ 0.69、0.66、検証期間(2014)でそれぞれ 0.74、0.57 であり、どの統計値も基準値 (0.5) を上回った。また、PBIAS は校正期間で -4.72%、検証期間で -4.49% と十分に小さい値を示した。このように、SWAT モデルは河川流量を精度よく予測した。

(2) SS 流出

SWAT モデルは 2013/7/27 - 2013/8/10 (term1)、2014/7/10 - 2014/7/27 (term2)、2014/8/16 - 2014/8/23 (term3) の夏期の 3 期間において、顕著な過小評価が確認された (図 3)。全てのピークを対象とした場合、推定値と実測値間の R^2 および E_{NS} は、校正期間(2013)でそれぞれ 0.32、0.30、検証期間でそれぞれ 0.36、0.34 であり、全期間において統計値が基準値(0.5)を下回り、PBIAS は校正期間で 55.2%、検証期間で 35.7% となり、顕著な過小評価の傾向が見られた。一方、この 3 期間を除外した場合、推定値と実測値間の R^2 および E_{NS} は、校正期間(2013)でそれぞれ 0.89、0.88、検証期間でそれぞれ 0.62、0.59 と顕著に上昇し、さらに、PBIAS は校正期間で -2.1%、検証期間で -9.9% と過小評価も解消された。除外した 3 つの極大ピークの共通点として、ピーク直前に、中小規模の降水が続く期間が確認できた。

(3) K 流出

SS 流出と同様、K 流出にも極大ピークが見られた (図 4)。全データでは、推定値と実測値間の R^2 および E_{NS} は、校正期間(2013)でそれぞれ 0.46、0.44、検証期間でそれぞれ 0.42、0.39 であり、いずれも精度として不十分であった。PBIAS は校正期間で 16.3%、検証期間で 19.3% と、過小評価と算出された。そこで SS 流出と同様、極大ピークの期間を除外したところ、推定値と実測値間の R^2 および E_{NS} は、校正期間(2013)でそれぞれ 0.67、0.60、検証期間でそれぞれ 0.63、0.63 であり、両期間、両統計値において基準(0.5)を満たした。PBIAS は校正期間で 0.73%、検証期間で 1.64% であり、全体の傾向としても大きく精度が改善された。モデル精度が SS 流出と同じ傾向を持つことは、極大ピーク時の K 流出も懸濁態の占める割合が大きいことを示唆している。またこの結果は、極大ピーク時以外の基底流量時や通常降雨時には精度よくシミュレーションが行えていることを示している。

(4) Cs 流出

SS、K 流出と同様、極大ピークが見られた (図 5)。推定値と実測値間の R^2 および E_{NS} は、校正期間(2013)でそれぞれ 0.40、0.33、検証期間でそれぞれ 0.46、0.42 であり、いずれも基準値を下回りモデル精度が低かった。PBIAS は校正期間で 52.6%、検証期間で 34.3% と算出され、顕著に過小評価であった。極大ピークを除いた場合、推定値と実測値間

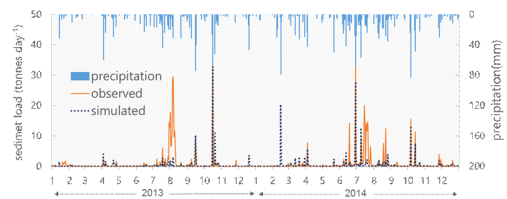


図 3 SS 流出のモデル推定値と実測値の比較および降水量の経時変化

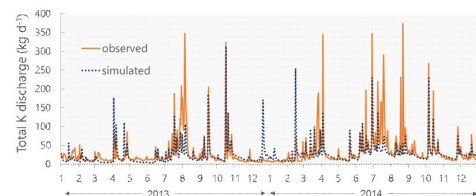


図 4 K 流出のモデル推定値と実測値の比較および降水量の経時変化

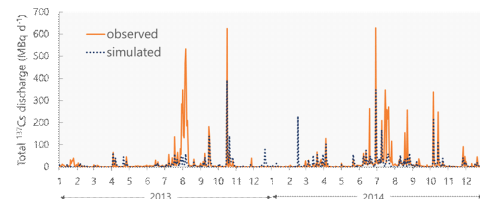


図 5 Cs 流出のモデル推定値と実測値の比較および降水量の経時変化

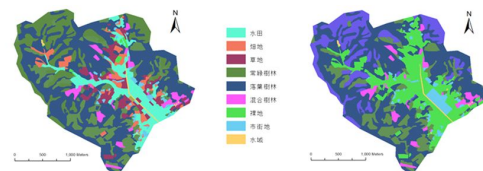


図 6 事故前の土地利用図 (左) と除染後の土地利用図 (右)

表 1 事故後の 2013 年を校正期間とし、除染時の 2015 年、除染後の 2016 年を検証した時の流出予測精度

	R^2	ENS	PBIAS (%)
2013	0.74	0.63	-14.10
2014	0.65	0.64	2.42
2015	0.82	-0.91	-33.20
2016	0.93	0.84	-24.67

* 2013 を校正、2014-2016 年を検証

表 2 除染時の 2015 年を校正期間とし、2016 年を検証した時の流出予測精度

	R^2	ENS	PBIAS (%)
2015	0.78	0.77	-4.60
2016	0.88	0.73	-13.70

* 2015 を校正、2016 年を検証

の R^2 および E_{NS} は、校正期間(2013)でそれぞれ 0.83、0.78、検証期間でそれぞれ 0.65、0.63とSS、K流出と同様に精度は向上した。PBIASは校正期間で 14.1%、検証期間で 6.1%となり、全体として実測値に大きく近づいた。Csはその大部分が懸濁態として存在することが知られており、SWATによるシミュレーション結果からもSS流出とCs流出が挙動を共にしていることが示唆された。

(5) 除染が流出に及ぼす影響

2015年に除染により表土が剥ぎ取られ、荒れ地が大きく拡大するとともに、汚染土壌をつめたフレコンバックが河川近傍に積まれた(図6)。汚染後の農地は自然草地として、2013年を校正期間、2014年から2016年を検証期間として流出予測を行ったところ、2013年、2014年、2016年の河川流量シミュレーションは R^2 、ENSともに0.5以上であったが、2015年のENSが0.91と著しく低下し、2015年から行われた除染作業の影響が顕著に現れた(表1)。除染による表土の剥ぎ取りによる、土地利用変化、土壌変化を与えて、2015年を校正期間、2013年、2014年、2016年を検証期間として、流出予測を行ったところ、2015年、2016年ともに精度良く予測できた(表2)。除染作業による土壌の剥ぎ取りや土地利用変化は明らかに流出へ影響をおよぼしていた。

(6) 改良 Cs 移行係数モデルの水稲玄米への適用

モデルは移行係数の2桁以上の違いを十分に(決定係数 $R^2 = 0.87$)説明することが出来た(図7)。さらに、土壌の放射性Cs濃度を用いて水稲玄米の放射性Cs濃度を推定したところ高い適合性($R^2 = 0.91$)が得られた。福島県内の農地については、RIPと交換性K含量の実測データが広域でデータベース化されており、改良Cs移行係数モデルを用いれば、土壌・施肥条件が大きく異なる広域を対象に、適切なK施肥量を提示するようなシナリオ分析が実施可能である。

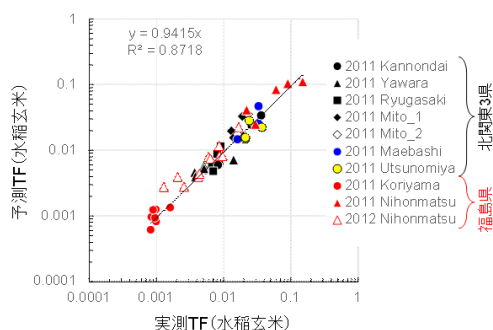


図7 改良Cs移行係数モデルによる水稲玄米の移行係数(TF)予測値と実測値(文献データ)の関係

<引用文献>

Absalom JP, Young SD, Crout NMJ, Nisbet AF, Woodman RFM, Smolders E, Gillett AG. 1999. Predicting soil to plant transfer of radiocesium using soil characteristics. *Environmental science & technology*, 33(8), 1218-1223.

Gupta, H. V., S. Sorooshian, and P. O. Yapo. 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *J. Hydrologic Eng.* 4(2): 135-143.

Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R., Veith, T. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50, 885-900.

Nash JE, Sutcliffe JV. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part 1: a discussion of principles. *J Hydrol.* 10, 282-290.

Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR, Williams JR, King KW. 2005. Soil and water assessment tool. Theoretical documentation: Version 2005. TWRI TR-191. College Station, Texas: Texas Water Resources Institute. 476p.

Santhi C, Arnold JG, Williams JR, Dugas WA, Srinivasan R, Hauck LM. 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *J Am Water Resour Assoc.* 37(5), 1169-1188.

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計3件)

江口定夫、農業環境中における放射性セシウムの挙動、土壌の物理性、査読有、vol. 135、2017、pp. 9-23

Wang CY, Boithias L, Ningd Z, Hana Y, Sauvagee S, Sánchez-Pérez JM, Kuramochi K, Hatano R, Comparison of Langmuir and Freundlich adsorption equations within the SWAT-K model for assessing potassium environmental losses at basin scale. *Agricultural Water Management*, 査読有、vol. 180, 2017, pp. 205-211.

DOI: 10.1016/j.agwat.2016.08.001

Wang, CY, Jiang, R, Boithias, L. Sauvage, S, Sanchez-Perez, JM, Mao, XM, Han, YP, Hayakawa, A, Kuramochi, K, Hatano, R: Assessing potassium environmental losses from a dairy farming watershed with the modified SWAT model. *Agricultural Water Management*, 査読有, vol. 175, 2016, pp. 91-104,

DOI: 10.1016/j.agwat.2016.02.007

〔学会発表〕(計 13 件)

江口定夫、農業環境中における放射性セシウムの挙動、土壤物理学会シンポジウム、2016 年 10 月 29 日、京都大学(京都府・京都市)

亀井大輝、小倉加世子、Wang Chunying、江口定夫、神山和則、山口紀子、倉持寛太、波多野隆介、SWAT モデルを用いたカーブナンバー法とグリーンアンプト法による小規模流域の土砂流出量の推定、日本土壤肥料学会 2016 年度佐賀大会、2016 年 9 月 22 日、佐賀大学(佐賀県・佐賀市)

江口定夫、水田における放射性セシウムの動態とモデル化、日本土壤肥料学会 2016 年度佐賀大会シンポジウム、2016 年 9 月 22 日、佐賀大学(佐賀県・佐賀市)

山口紀子、農耕地土壌における放射性 Cs の動態にかかわる有機物の役割、日本土壤肥料学会 2016 年度佐賀大会シンポジウム、2016 年 9 月 22 日、佐賀大学(佐賀県・佐賀市)

Noriko Yamaguchi、Toshihiro Kogure. Characterization of radiocesium - bearing microparticles deposited and resuspended in Fukushima, Goldschmidt conference, 2016 年 6 月 30 日、パシフィック横浜(神奈川県・横浜市)

Hatano, R., Some aspects in development and application of radiocesium simulation model using SWAT. MARCO Satellite International Workshop 2015、 - Adoption and adaptation of SWAT for Asian crop production systems and water resource issues -, 2015 年 10 月 22 日、筑波農林研究交流センター(茨城県・つくば市)

波多野隆介、流域レベルの放射性セシウム動態予測モデルの開発・適用・問題点、農業生態系における放射性セシウムの吸着・固定化 可給化メカニズムの解明に向けたワークショップ、2015 年 10 月 13 日、コラッセふくしま(福島県・福島市)

江口定夫、吉川省子、板橋直、井倉将人、神山和則、平舘俊太郎、楠本良延、徳岡良則、木方展治、藤原英司、山口紀子、大越聡、倉持寛太、波多野隆介、福島県内の不作付け農地及び農業流域からの放射性セシウムの流出実態、日本土壤肥料学会 2015 年度京都大会、2015 年 9 月 9 ~ 11 日、京都大学(京都府・京都市)

山口紀子、中尾淳、武田晃、塚田祥文、江口定夫、平舘俊太郎、放射性セシウム捕捉ポテンシャル(RIP)のセシウム濃度依存性、日本土壤肥料学会 2015 年度京都大会、2015 年 9 月 9 ~ 11 日、京都大学(京都府・京都市)

小倉加世子、Wang Chunying、江口定夫、神山和則、山口紀子、倉持寛太、波多野隆介、福島県内の不作付け農業流域における放射性セシウム動態予測のための SWAT

モデルの適用 - 小流域への適用に関する問題点 -、日本土壤肥料学会 2015 年度京都大会、2015 年 9 月 9 ~ 11 日、京都大学(京都府・京都市)

Kayoko Ogura、Wang Chunying、Sadao Eguchi、Kazunori Kohyama、Noriko Yamaguchi、Kanta Kuramochi、Ryusuke Hatano、Application of SWAT model to predict the material dynamics in an agricultural watershed. 13th International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements, ICOBTE 2015 FUKUOKA, 2015 年 7 月 12 ~ 16 日、福岡国際会議場(福岡県・福岡市)

S. Eguchi、N. Yamaguchi、K. Kohyama、I. Taniyama、Short to long-term prediction of radiocesium transfer factors for paddy rice, 13th International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements, ICOBTE 2015 FUKUOKA, 2015 年 7 月 12 ~ 16 日、福岡国際会議場(福岡県・福岡市)

N. Yamaguchi、H. Tsukada、K. Kohyama、Y. Takata、I. Taniyama、Radiocesium behavior in Japanese soils, 13th International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements, ICOBTE 2015 FUKUOKA, 2015 年 7 月 12 ~ 16 日、福岡国際会議場(福岡県・福岡市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

波多野 隆介 (HATANO, Ryusuke)
北海道大学・大学院農学研究院・教授
研究者番号：40156344

(2) 研究分担者

江口 定夫 (EGUCHI, Sadao)
農業・食品産業技術総合研究機構(農研機構) 農業環境変動研究センター物質循環研究領域・ユニット長
研究者番号：30354020

山口紀子 (YAMAGUCHI, Noriko)
農研機構農業環境変動研究センター有害化学物質研究領域・上級研究員
研究者番号：80345090