

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24248027

研究課題名(和文) 福島原発事故で沈着した<sup>137</sup>Csの集水域生態系における移動の実態把握とモデル化

研究課題名(英文) Ecosystem observation and modeling of radioactive cesium in a forest deposited after the nuclear power plant accident

研究代表者

大手 信人(Ohte, Nobuhito)

京都大学・情報学研究科・教授

研究者番号：10233199

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,200,000円

研究成果の概要(和文)：福島県内で事故を起こした原発から約50km北西に位置する森林集水域において、<sup>137</sup>Csの動態観測を行った。その結果、溪流を通して流出する<sup>137</sup>Csの主要な形態は粒子状浮遊物質であり、有機物が重要なキャリアであることが示唆された。このため降雨時の洪水流出が<sup>137</sup>Cs流出を著しく促進することが明らかになった。森林生態系内における<sup>137</sup>Csの最大のプールはリターとその分解途上の有機物の堆積層にあるため、生物群集内の<sup>137</sup>Csの拡散は生食連鎖よりも腐食連鎖からなる食物網の方が急速に進んでいることが明らかになった。栄養段階に沿った<sup>137</sup>Csの増加は見られず、生物濃縮は生じていないことが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Radioactive cesium (<sup>137</sup>Cs) emitted by the Nuclear Power Plant accident at Fukushima in March 2011 were deposited onto forested areas in the northeastern Japan. To clarify the mechanisms of re-distribution of <sup>137</sup>Cs in a forested ecosystem, the <sup>137</sup>Cs flow and storage have been monitored in a forest at 50 km from the power plant. Two pathways of <sup>137</sup>Cs transport were hypothesized: 1) by moving water via dissolved and colloidal forms, and 2) by dispersion through the food web in the forest-stream continuum. The results indicate that the major form of exported <sup>137</sup>Cs is via suspended matter in the streamflow. High water flows by a storm accelerated the transportation of <sup>137</sup>Cs from forested catchments. The results also suggested that as the major portion of <sup>137</sup>Cs was accumulated in litter and detritus, <sup>137</sup>Cs dispersion is quicker through the detritus food chain than through the grazing food chain. Bioaccumulation of <sup>137</sup>Cs through the food chain was not detected.

研究分野：森林生態学

キーワード：福島第一原子力発電所事故 放射性セシウム 森林生態系 物質循環 浮遊粒子状物質 食物網 生物濃縮 経根吸収

## 1. 研究開始当初の背景

東日本大震災時に福島県内の原子力発電所の事故によって放出された大量の放射性核種は、乾性・湿性の気象降下物として陸域の生態系にもたらされた。降下した放射性核種のうち  $^{137}\text{Cs}$  は最も大量に放出されたと考えられており、また、 $^{137}\text{Cs}$  の半減期は約 30 年で、ある場所にとどまると長期間にわたって放射線を放出する。このため、研究開始当初、当該地域の森林における  $^{137}\text{Cs}$  の現存量の測定や線量のモニタリングが政府、関係研究機関によって実施されていた。

$^{137}\text{Cs}$  は、土壌内ではある種の粘土鉱物に比較的強固に吸着されたり、土壌有機物に吸着されたりすることが知られている。このことは現在リター層に多く蓄積している  $^{137}\text{Cs}$  が土壌に一旦移動すると長期に保持されやすいことと、降雨による浸食に伴う表層土壌や土壌有機物の移動がもっとも  $^{137}\text{Cs}$  の輸送に重要な役割を果たすことを意味している。また、 $^{137}\text{Cs}$  は、 $\text{K}^+$  イオンと類似した化学的挙動をとることが知られている。 $\text{K}^+$  は植物にとっては極めて重要な養分で、常態として土壌溶液中からイオンチャネルを介して吸収されている。 $^{137}\text{Cs}$  も自然条件では、植物等一次生産者に吸収され、農作物や飼料と食用の諸動物を介して人間に摂取された場合、内部被曝による健康被害が懸念されている。いくつかの農作物については吸収時の土壌からの移行係数が報告され、植物種によって大きな差異があることがわかっている。

2011 年末までの政府関連諸機関の調査では、 $^{137}\text{Cs}$  は、森林樹冠やリター層を含む土壌表面に多く蓄積されており、鉱質土壌への移行が進みつつある段階である推測された。これは、土壌表層近くの粘土粒子や土壌有機物とともに、降雨流出過程で、森林から水系に流出することと、植物や土壌微生物に吸収されやすい、吸着・吸着される以前の比較的移動しやすい  $^{137}\text{Cs}$  が現況で多量に森林樹冠や林床に存在していることを意味していた。森林生態系では、植物に取り込まれた  $^{137}\text{Cs}$  が、植食性昆虫の摂食をスタートとして食物網を介して、高次の栄養段階の生物群に伝搬・拡散していくことが考えられた。また、水域生態系でも流下する  $^{137}\text{Cs}$  の底生の藻類等の取り込みから始まり、水生昆虫、水生甲殻類、魚類と、陸域と同様に食物網を介して拡散していく可能性が考えられた。

1986 年の旧ソ連（現ウクライナ）におけるチェルノブイリ原子力発電所事故の際の、北欧の森林への影響評価に関する調査報告では、降雨による溪流・河川への流出や地下水による流去は極めて少ないと結論づけられているものが多いが、山地が少なく、降水量も少ない北欧に比べて、我が国のように山地が国土の大部分を占め、降水量も多い条件で、山地からの侵食された土壌や有機物の輸送量は圧倒的に多く、これによる  $^{137}\text{Cs}$  の水系への輸送は無視できないものと予想された。

## 2. 研究の目的

そこで、本研究は森林・溪流生態系における上記モニタリングの基盤を構築し、 $^{137}\text{Cs}$  の移動、拡散の実態を把握しすることを目的とした。その上で、沈着初期の移動と拡散を予測するための概念モデルを構築することを目指した。このために、研究期間内に以下の 3 点を達成目標とした。

1) 森林における  $^{137}\text{Cs}$  の蓄積と流出のメカニズム、溪流・河川生態系への流下メカニズムを水文学的、生物地球化学的な側面から実態を明らかにする。モニタリングサイトを設定し、森林地上部（樹体内、表面付着）、リター層、土壌層、地下水帯、山地溪流、中流域河川の 8 種類のコンパートメントについて蓄積量、流入・流出量を把握する。

2) 陸域生態系、水域生態系における生物群集の食物網を介した  $^{137}\text{Cs}$  の移動、拡散の実態を明らかにする。

3) 1), 2) の結果を基に、生態系の構成要素コンパートメントモデル) を構築する。

## 3. 研究の方法

対象とした森林集水域は福島県北部、伊達市霊山町上小国地区の位置し、上小国川の源頭部である。福島第一原発からの距離は約 50km で、航空機観測による周辺の空間線量率は  $1.0\sim 1.9 \mu\text{Sv h}^{-1}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  の推定総降下量は  $300\sim 600 \text{ kBq m}^{-2}$  であった（文科省による 2013 年 6-7 月調査）。集水域の主要な部分は、コナラ (*Quercus serrata*)、ケヤキ (*Zelkova serrata*) などの落葉広葉樹にアカマツ (*Pinus desiflora*) が混交する二次林で、谷部は林齢が 50 年前後のスギ (*Cryptomeria japonica*) 人工林である。

森林内で水の移動に伴って移動する放射性セシウムのフラックスを経時的に把握するために、降雨-流出過程の水文観測を実施し、素過程（降水、樹冠通過、溪流への流下など）ごとに放射性セシウム濃度を測定した。上記の主要な林分である落葉広葉樹-アカマツ混交林に 2 カ所、スギ人工林に 1 カ所の方角調査プロットを設定し、それぞれでリターフォールの採取、林内雨、樹幹流の量と放射性セシウム濃度の測定を行った。

溪流周辺における陸棲、水棲生物を採取し、生物群集内で放射性セシウムの伝播状況調べた。採取した生物試料は種同定を行った後、一次生産者、消費者、捕食者などの機能群に分類した。

加えて、主要な林分の地上部全体における放射性セシウム蓄積量を推定するため、試料木（コナラ、スギ）の伐倒を 2012 年と 2013 年の 11 月に実施した。試料は生葉、枝、幹（樹皮、辺材、心材）に分けて  $^{137}\text{Cs}$  濃度を測定した。

## 4. 研究成果

### (1) 植物体の $^{137}\text{Cs}$ 濃度

スギは、常緑樹なので生葉は通常 1 年以内

に落下することはなく、寿命は約3年である。つまり2011年3月に放射性セシウムが沈着した葉のある割合は、次年度以降にも着葉している。その年に展葉した葉のことを当年葉、それより前の年に展葉した葉を旧葉と呼ぶ。スギの生葉の $^{137}\text{Cs}$ 濃度は、2012年に旧葉も当年葉も $10,000 \text{ Bq kg}^{-1}$ を超えていたが、2013年には旧葉で $3,500 \text{ Bq kg}^{-1}$ 、当年葉で $2,700 \text{ Bq kg}^{-1}$ まで低下していた(図-1)。2012年に展葉した葉の濃度が、前年にあった葉と同じレベルであったことは、樹冠に沈着した放射性セシウムが新たな葉の形成時にそちらに転流したか、他の部位から転流したことを示唆している。このことは、附着した放射性セシウムは葉が枝や樹幹の表面から樹体内に滲入し得ること、放射性セシウムが樹体内の養分転流のメカニズムによって輸送され得たことを物語っている。旧葉の $^{137}\text{Cs}$ 濃度が2013年で減少していることは、比較的濃度が低い新葉によって葉の入れ替わりが生じていたことと、附着した放射性セシウムが降水によって洗脱されたことによって説明ができるだろう。

一方、コナラは落葉樹なので、葉は初夏に展葉し、晩秋に落葉する。つまり、樹冠の全ての生葉は毎年入れ替わっている。生葉の $^{137}\text{Cs}$ 濃度は2012年、2013年とも約 $1,000 \text{ Bq kg}^{-1}$ であった。放射性セシウムが降下した2011年3月当時、生葉はまだ展開していなかったため、これら試料の $^{137}\text{Cs}$ は、幹や枝の表面に附着したものが樹体内に滲入し、それが転流したか、林床表面に沈着した $^{137}\text{Cs}$ が根系から吸収され、新葉に送られたものと考えられる。2012年同時期のコナラの樹皮の $^{137}\text{Cs}$ 濃度は殆どの試料で $10,000 \text{ Bq kg}^{-1}$ を超えていた(Ohte et al. 2015)。

2012、2013年とも、コナラに比べてスギの辺材と心材の濃度に大きな差がみられないことから(図-2)、放射性セシウムの樹幹内での

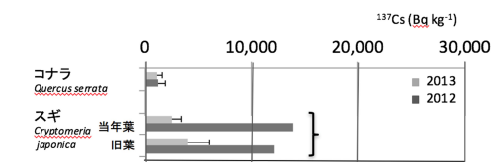


図-1 スギとコナラの生葉の $^{137}\text{Cs}$ 濃度。試料は2012、2013年11月に、立木の伐採によって採取した。スギは旧葉と当年葉を区別して濃度を測定した(Ohte et al. 2016)。

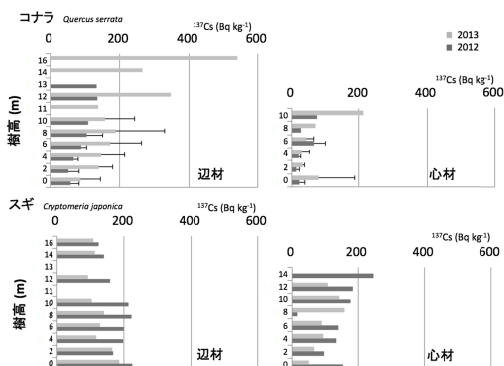


図-2 スギとコナラの辺材と心材の $^{137}\text{Cs}$ 濃度。試料は2012、2013年11月に、立木の伐採によって採取した(Ohte et al. 2016)。

移動がスギの方がより迅速に生じていたことが示唆される。

以上のような結果は、放射性セシウムが樹木の栄養輸送のメカニズムの中で活発に移動しているということを示していた。特に、高濃度の放射性セシウムを含んでいる樹皮から辺材への移行と、新葉の形成時のそこへの転流があることが見いだされたことは重要である。今後は、高濃度の $^{137}\text{Cs}$ を持った落葉が蓄積する林床からの根系による吸収を定量的に把握することが課題となる。

## (2) 放射性Csの樹冠から林床への移動

リターフォールによる樹幹から林床への $^{137}\text{Cs}$ 移動量は、DP1、DP2(落葉広葉樹-アカマツ混交)、CP(スギ)のプロットの中では、スギ人工林でもっとも大きかった(Endo et al., 2015、表-1)。これは前節で述べたように、附着した放射性セシウムが多かったことが影響していたと考えられる。林内雨と樹幹流による移動量をリターフォールによる移動量に加算しても常緑樹林であるスギ人工林の移動量が最も大きかった。この樹冠から林床への移動は、リター層、腐植層の微生物やそこに根系を伸ばしている植物への $^{137}\text{Cs}$ の供給であるが、リターフォールでの移動と林内雨・樹幹流での移動では、微生物や植物にとっての可給性は異なる。前述したように樹木根系の吸収量を把握しなければならないのと同様に、表層落葉層、腐植層中での可給態の放射性セシウムの現存量、その季節変動などを、今後詳細に把握しなければならない。

表-1 林内雨、樹幹流、リターフォールの年平均 $^{137}\text{Cs}$ 濃度と年間 $^{137}\text{Cs}$ フラックス。DP1: 落葉広葉樹-アカマツ混交林 1, DP2: 落葉広葉樹-アカマツ混交林 2, CP: スギ人工林(オリジナルデータは Endo et al. 2015 による)。

	年平均 $^{137}\text{Cs}$ 濃度 ( $\text{Bq L}^{-1}$ : 林内雨、樹幹流、 $\text{Bq kg}^{-1}$ : リターフォール)			$^{137}\text{Cs}$ フラックス ( $\text{Bq m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ )		
	DP1	DP2	CP	DP1	DP2	CP
林内雨	3.10	3.01	5.54	3,254	1,694	3,388
樹幹流	4.01	0.97	2.16	458	101	69
リターフォール	8,068	7,464	17,887	2,904	2,125	7,518

## (3) 渓流への放射性Csの流出

図-3は、2013年10月の洪水時の、流出浮遊粒子状物質と $^{137}\text{Cs}$ 濃度の時間変動を示している(伊勢田 2015)。 $^{137}\text{Cs}$ の濃度は浮遊粒子状物質の濃度の変化と同調しており、流出する $^{137}\text{Cs}$ の主要なキャリアが浮遊粒子状物質であったことがわかる(8)。

こうした流量の変動に伴う $^{137}\text{Cs}$ 濃度の変化を考慮した上で、集水域からの年間 $^{137}\text{Cs}$ 流出量を推定すると、2012/08/31~2013/08/30の集計では $330 \text{ Bq m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ となった(伊勢田 2015)。しかし、例えば、2013年10月中旬の豪雨に伴って生じた大きな出水では数日間に $227 \text{ Bq m}^{-2}$ の $^{137}\text{Cs}$ が流出しており、集水域からの放射性セシウム流出量を正確に把握するためには、洪水時の流出量観測がいかに重要であるかがわかる。

文部科学省の調査では事故後に当該地域

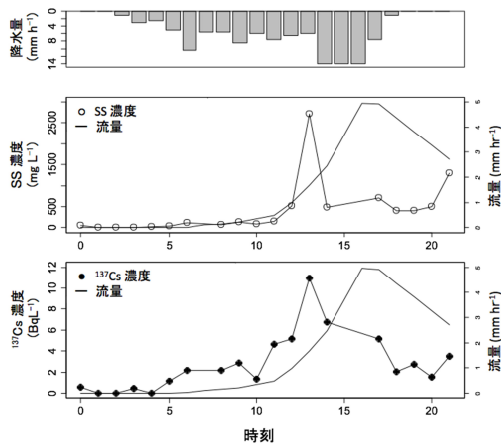


図-3 2013年10月15日の洪水イベント時の降水量、浮遊粒子状物質 (SS) 濃度、<sup>137</sup>Cs 濃度、河川流出量の時間変化。

に沈着した <sup>137</sup>Cs の推定量は 100–300 kBq m<sup>-2</sup> とされており、これは推定した年間流出量より 3 オーダー大きな量である。このことは、森林生態系内で貯留されている放射性セシウムが消失していくプロセスとしては、<sup>137</sup>Cs の半減期が約 30.1 年であることを考慮すると、系内での放射壊変よりも、水文過程を経て河川に流出するほうが明らかに少ないということがわかる。

#### (4) 食物網を介した放射性 Cs の伝播

図-4 は陸棲と水棲の生物試料の <sup>137</sup>Cs 濃度を、機能群ごとに示している。落葉、真菌、腐食食者、捕食者の <sup>137</sup>Cs 濃度は植物の生葉、食植性生物よりも有意に高かった。地表に堆

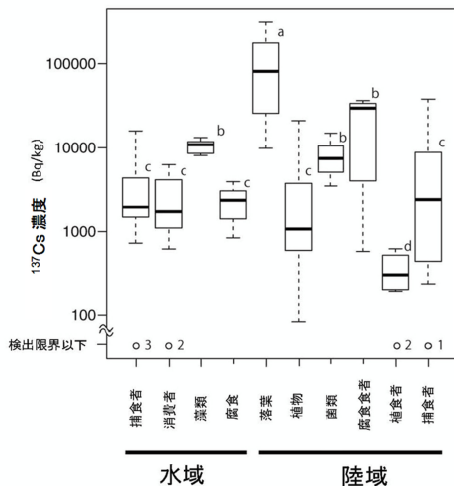


図-4 機能群ごとの<sup>137</sup>Cs濃度。各プロットに附記されているアルファベットは、機能群を統計的にグルーピングをした結果を示している。同じ文字は同じグループを示す。試料の測定値が、測定器の検出限界以下であったものについて試料数を附記している (Murakami et al. 2014)。

積している落葉やその破砕物が <sup>137</sup>Cs の最も大きな貯留であることから、陸棲の生物群集では、これを基盤として始まる腐食連鎖を介した移行が顕著に表れたものと考えられる。水棲生物群集では、基礎となる食物の落葉の破砕物や底性の藻類の <sup>137</sup>Cs 濃度は生葉と落

葉の中間であり、高次の生物群集の <sup>137</sup>Cs 濃度には、このレベルが反映していた。

栄養段階の相対的な指標として測定した生物試料の窒素安定同位体比と <sup>137</sup>Cs 濃度との関係は緩やかな負の相関を示していた。窒素安定同位体比は栄養段階が上昇すると大きな値をとる。つまり、本調査での生物群集では、栄養段階が高い生物ほど <sup>137</sup>Cs 濃度が低い傾向を示していた。化学物質の生物濃縮についての一般的な定義は、栄養段階が上がると特定の成分の濃度が増加するというものである。上記の結果は、本調査での生物群集において <sup>137</sup>Cs の生物濃縮はみられなかったことを示していた。

#### 5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕(計6件)

Pumpanen, J., M. Ohashi, I. Endo, P. Hari, J. Bäck, M. Kulmala, and N. Ohte. 2016. <sup>137</sup>Cs distributions in soil and trees in forest ecosystems after the radioactive fallout – Comparison study between southern Finland and Fukushima, Japan. *Journal of Environmental Radioactivity* **161**:73-81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.04.024>

Xu, C., S. Zhang, Y. Sugiyama, N. Ohte, Y.-F. Ho, N. Fujitake, D. I. Kaplan, C. M. Yeager, K. Schwehr, and P. H. Santschi. 2016. Role of natural organic matter on iodine and <sup>239,240</sup>Pu distribution and mobility in environmental samples from the northwestern Fukushima Prefecture, Japan. *Journal of Environmental Radioactivity* **153**: 156-166. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.12.022>

村上正志, 鈴木隆央, 大手信人, 石井伸

昌. 2015. 森林生態系における放射性セシウムの鳥類への移行. *日本鳥学会誌* **64**:55-61. doi: 10.3838/jjo.64.55

Endo, I., N. Ohte, K. Iseda, K. Tanoi, A. Hirose, N. I. Kobayashi, M. Murakami, N. Tokuchi, and M. Ohashi. 2015. Estimation of radioactive <sup>137</sup>-cesium transportation by litterfall, stemflow and throughfall in the forests of Fukushima. *Journal of Environmental Radioactivity* **149**:176-185. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.07.027>

Murakami, M., N. Ohte, T. Suzuki, N. Ishii,

Y. Igarashi, and K. Tanoi. 2014. Biological proliferation of cesium-137 through the detrital food chain in a forest ecosystem in Japan. *Scientific Report* **4**.10.1038/srep03599

#### 〔学会発表〕(計26件)

大手信人, 福島における森林生態系内の放射性セシウムの動態, 第5回原子力安全規制・福島復興シンポジウム, 2016/3/7, 早稲田大学(東京, 招待)

Ohte, N. et al., Dispersion and export dynamics of <sup>137</sup>Cs deposited on the forested ecosystem in Fukushima after the nuclear

power plant accident in March 2011, American Nuclear Society, Methods & Application of Radio-analytical Chemistry, 2015/4/12-17, Kailua-Kona, Hawaii (USA)

Ohte, N. et al., Ecosystem monitoring on dispersion and export dynamics of <sup>137</sup>Cs deposited on the forested area in Fukushima after the nuclear power stations accident in March 2011, International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity 2014, 2014/9/7-12, Barcelona (Spain)

大手信人, 集水域生態系における放射性セシウムの移動・蓄積の実態把握, 日本学術会議公開シンポジウム, 福島原発事故による放射能汚染と森林・木材 (Part II), 2014/1/24, 日本学術会議 (東京, 招待)

Endo, I., Ohte, N. et al., <sup>137</sup>Cs dynamics in the forest of Fukushima after the nuclear power plant accident in March 2011, American Geophysical Union, Fall meeting, 2013/12/9, San Francisco (USA)

Ohte, N. et al., Diffusion and transportation dynamics of <sup>137</sup>Cs deposited on the forested area in Fukushima after the nuclear power plant accident in March 2011, International Long-Term Ecological Research Network Conference, 2012/9/17-21, Lisbon (Portugal)

大手信人, 今、森林にある放射性セシウムは、これからどこへいくのか?, 第四回放射能の農畜水産物等への影響についての研究報告会, 2012/9/8, 東京大学 (東京)

#### [図書] (計4件)

大手信人, 村上正志, 遠藤いず貴, 堀田紀文. 2016. 原発事故によって沈着した放射性セシウムの森林生態系における動態. P 18-27 一ノ瀬友博, 鎌田磨人編. 森林環境 2016. 公益財団法人 森林文化協会, 東京.

Ohte, N., M. Murakami, I. Endo, M. Ohashi, K. Iseda, T. Suzuki, T. Oda, N. Hotta, K. Tanoi, N. I. Kobayashi, and N. Ishii. 2016. Ecosystem Monitoring of Radiocesium Redistribution Dynamics in a Forested Catchment in Fukushima After the Nuclear Power Plant Accident in March 2011. Pages 175-188 in Agricultural Implications of the Fukushima Nuclear Accident: The First Three Years. Springer Japan, Tokyo.

Ohte, N., M. Murakami, K. Iseda, K. Tanoi, and N. Ishii. 2013. Diffusion and transportation dynamics of <sup>137</sup>Cs deposited on the forested area in Fukushima after the nuclear power plant accident in March 2011. in Agricultural Implications of the Fukushima Nuclear Accident. Springer, New York.

Ohte, N., M. Murakami, T. Suzuki, K. Iseda, K. Tanoi, and N. Ishii. 2012. Diffusion and export dynamics of <sup>137</sup>Cs deposited on the forested area in Fukushima after the nuclear power plant accident in March 2011:

Preliminary results. Pages 25-32 Proceedings of the International Symposium on Environmental monitoring and dose estimation of residents after accident of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Stations, Kyoto, Japan, December 14, 2012.

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

大手 信人 (Ohte, Nobuhito)  
京都大学・情報学研究科・教授  
研究者番号: 10233199

##### (2)研究分担者

村上 正志 (MURAKAMI, Masashi)  
千葉大学・理学研究科・准教授  
研究者番号: 50312400

西田 継 (NSHIDA, Kei)  
山梨大学・医学工学総合研究部・准教授  
研究者番号: 70293438

堀田 紀文 (HOTTA, Norifumi)  
筑波大学・生命環境科学研究科・准教授  
研究者番号: 00323478

杉山 裕子 (SUGIYAMA, Yuko)  
兵庫県立大学・環境人間学部・准教授  
研究者番号: 40305694

大橋 瑞江 (OHASHI, Mizue)  
兵庫県立大学・環境人間学部・准教授  
研究者番号: 30453153

尾坂 兼一 (OSAKA, Ken'ichi)  
滋賀県立大学・環境科学部・助教  
研究者番号: 30455266

田野井 慶太郎 (TANOI, Keitaro)  
東京大学・農学生命科学研究科・准教授  
研究者番号: 90361576

小田 智基 (ODA, Tomoki)  
東京大学・農学生命科学研究科・特任助教  
研究者番号: 70724855

##### (3)連携研究者

小林 和彦 (KOBAYASHI, Kazuhiko)  
東京大学・農学生命科学研究科・教授  
研究者番号: 10354044

中西 友子 (NAKANISHI, Tomoko)  
東京大学・農学生命科学研究科・教授  
研究者番号: 30124275

石井 伸昌 (ISHII, Nobuyoshi)  
放射線医学総合研究所・研究員  
研究者番号: 50392212