

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24380078

研究課題名(和文) 森林土壌における放射性セシウム上方輸送の制御要因解明と定量的評価

研究課題名(英文) Evaluation of regulation factors of upward transport of radiocesium in forest soils

研究代表者

竹中 千里 (Takenaka, Chisato)

名古屋大学・生命農学研究科・教授

研究者番号：40240808

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：森林に沈着した放射性セシウムは土壌に入り、土壌の下層に移動すると考えられがちであるが、本研究では、それを上方すなわち土壌表面に輸送する過程に焦点をあて、定量的な評価を試みた。上方輸送の過程としては、土壌表層の微生物によるリター層への輸送を、福島県林業研究センターのスギ林と広葉樹林におけるリターバック実験で調べたが、下からの輸送よりも地上部からの沈着がいまだに多いことが明らかとなった。また、樹木の経根吸収による上方輸送については、ほとんど吸収が確認できず、実験を圃場でおこなったことが原因であると考えられた。事故後3,4年経過した状態では、いまだに初期沈着の影響がのこっていることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：We focused on the upward transport of radiocesium in forest ecosystem. One possible process of upward transport is microbiological activity in litter layer. We conducted litter-bag experiments in Japanese cedar and deciduous forests in Fukushima prefecture. As the results, we found that the contribution of deposition from above-ground parts in forest was larger than the upward transport of radiocesium by microorganisms. We planted seedlings of various tree species in the contaminated soils of nursery and confirmed the root uptake of radiocesium. The radiocesium amounts absorbed by roots were very small comparing with the results in a forest site reported by Iizuka (personal communication). The low absorption ability of trees should be due to the different soil conditions. In conclusion, it is difficult to estimate the upward movement of radiocesium at present time, because the situation of radiocesium dynamics in forest ecosystem has not reached to a steady state.

研究分野：森林環境化学

キーワード：放射性セシウム 上方輸送 リター 微生物 経根吸収

## 1. 研究開始当初の背景

2011年3月の東日本大震災により、福島第一原子力発電所が甚大な被害を受け、多量の放射性物質が環境中に放出された。その結果、近隣市町村において放射性物質による汚染が深刻な問題となっている。福島県はその面積の70%が森林であるため、特に、森林に沈着した放射性セシウム( $^{137}\text{Cs}$ )の問題は重要である。これまでに、スギ人工林では葉や樹皮に、落葉広葉樹林では土壌リター層に大量に存在することが報告されている。このような状況に対して、林野庁は里山において林縁から20mの地点までのリター層を除去すれば、里に与える空間放射線量の低減に有効であるという指針を提示している(2011年9月)。しかしながら、このような里山以外の森林における放射能汚染に対して、どのように対処していくかはこれからの重要課題とされている。この対策を考える上で、現在求められているのは、森林生態系における $^{137}\text{Cs}$ 動態に関する基礎的な知見である。森林生態系における $^{137}\text{Cs}$ 動態には、土壌中での移動、植物による吸収・蓄積、植物から土壌への還元、動物による拡散・持ち出しなどさまざまな要素が含まれる。これらの中で、本研究では、土壌における $^{137}\text{Cs}$ の上方輸送について焦点をあてた。

我々は以前から森林における放射性物質の挙動について研究を進めてきた。1960年代の大気圏核実験、およびチェルノブイリ原発事故によって大気から広域的に沈着した $^{137}\text{Cs}$ は、森林土壌表面の有機物や粘土鉱物に安定的に吸着し下方へ移動しない性質があることは、多くの研究者が報告している(Rosen et al., 1999)。その性質を利用して、申請者らは森林内での土壌侵食のトレーサとして $^{137}\text{Cs}$ を用いることを提案し、その基礎的なデータの蓄積を行ってきた(Takenaka et al. 1998、福山ら、2001など)。その研究の中で申請者らは、 $^{137}\text{Cs}$ が森林土壌において下方に移動しにくいだけでなく、上方へ移動することをヒノキ林において初めて見出し、土壌微生物が $^{137}\text{Cs}$ の上方輸送に関与していることをつきとめた(Fukuyama & Takenaka, 2004)。同様に、土壌微生物が放射性核種の吸着に関与していることは、Prekhら(2008)によっても報告されており、放射性セシウムの動態において、重要な観点である。このような $^{137}\text{Cs}$ の上方移動は、今回の福島における森林の放射能汚染においても起こる可能性がある。しかしながら、福島県の森林の広域を占めるスギ林や広葉樹林においては研究事例がない。

## 2. 研究の目的

森林土壌における $^{137}\text{Cs}$ の上方輸送は、植物による吸収・輸送・枯死によっても起こる。本研究では、植物による経根吸収と微生物による上方輸送の両方に焦点をあて、森林生態系の土壌-植物連関における上方輸送を定量

的に明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

### 3.1 リターバッグ法による上方輸送の評価

#### (1) 調査地

調査地は、福島県林業研究センター(福島県郡山市)構内のスギ林と広葉樹林である。東京電力福島第一原子力発電所の西方約60kmに位置する。写真1にスギ林と広葉樹林の設置状況を示した。2012年9月6日にリターバッグを設置し、実験を開始した。

#### (2) リターバッグの作成と設置

非汚染地域(長野県上伊那郡南箕輪村、信州大学農学部構内演習林)の広葉樹林、スギ人工林から枝葉を採取し、乾燥させた。広葉樹の試料には、ムラサキシキブ、ミヤマハハソ、サンショ、クリが含まれる。ポリエステル製不織布の排水口ネット(約20cm×20cm)に一定量のリターを入れ、開口部を熱で圧着して封入した。リターバッグ1枚あたりに封入した平均試料量(乾燥重量)は、スギ16.8g、広葉樹12.4gである。

林床の約1.5m×3mの範囲の草本やササを刈り取り、未分解のリターを除去した後、写真2のようにリターバッグを重ねり合わないよう地表に並べ、竹串で固定した。両試験区の一部には、リターバッグの下にナイロンシートを敷き、地表からのCs輸送を遮断した区画を設け、遮断区とした。試験区には45枚、遮断区には5枚のリターバッグを設置した。

リターバッグ設置時(2012年9月6日)の地表線量および土壌水分は、スギ林では、リターを取り除いた地表面の線量は $0.94\text{--}1.08\ \mu\text{Sv h}^{-1}$ 、周辺の林床では $1.2\text{--}1.3\ \mu\text{Sv h}^{-1}$ だった。ハンディタイプの土壌水分計(プローブ長12cm)で計測した体積含水率は、11-15%であった。広葉樹林では、リターを取り除いた地表面の線量は $0.88\text{--}0.97\ \mu\text{Sv h}^{-1}$ 、周辺の林床では $1.05\text{--}1.15\ \mu\text{Sv h}^{-1}$ だった。体積含水率は、13-15%であった。

#### (3) 地温、気温および土壌水分の計測

スギ林と広葉樹林において、地温および気温を1時間間隔で計測した。温度の計測には、ボタン電池型のロガー一体型温度計(サーモクロンGタイプ、KNラボラトリーズ社製)を使用した。土壌水分は、地表から5cmと20cmの深度に土壌水分センサー(ECH20、Decagon Devices Inc.)のプローブを挿入し計測した。

#### (4) 試料の回収と分析

リターバッグは、設置の46日後(2012年10月22日)、195日後(2013年3月20日)、278日後(2013年6月11日)、371日後(2013年9月12日)に、スギ林と広葉樹林からそれぞれ5枚ずつ回収した。その後、実験室で風乾させて乾燥重量を測った後、電気炉で450℃で2時間加熱して灰化し、灰化重量を

測った。灰化試料はそれぞれポリエチレン製のU-8容器(100 ml)に入れ、試料の密度を揃えるために静かに圧縮した。さらに、容器内で試料が飛散するのを防ぐために、ポリエチレン製の内蓋で試料を抑え、接着剤で固定した。その後名古屋大学において、ゲルマニウム半導体検出器を用いたガンマ線分析により、 $^{137}\text{Cs}$  と  $^{134}\text{Cs}$  を計測した。

### 3.2 樹木苗の植栽による経根吸収の評価

#### (1) 植栽地

3.1 と同様に、福島県林業研究センター内苗木育成のための圃場で行った。

#### (2) 樹木苗の植栽

植栽した樹木苗は、福島第一原発事故の影響のない西日本で入手した落葉広葉樹3種(モミジイチゴ、コナラ、コシアブラ)、常緑広葉樹5種(アセビ、ヒサカキ、サザンカ、チャノキ、ヤブツバキ)、常緑針葉樹2種(スギ、アカマツ)である。これらを2012年4月に植栽した。コシアブラについては2013年に一部補植した。

表層土壌を耕起した区画と耕起していない区画の両区画にそれぞれの樹種を植栽した。

#### (3) 試料の採取と測定

2012年から毎年10月に各樹種から葉を採取した。また、土壌試料も、3回採取した。植物試料は乾燥、粉碎後、土壌試料は風乾後、ゲルマニウム半導体検出器を用いたガンマ線分析により、 $^{137}\text{Cs}$  と  $^{134}\text{Cs}$  を計測した。

## 4. 研究成果

### 4.1.1. 地温と気温

図1に、スギ林の気温と地温の変化を示す。スギ林では、気温は-5 ~ 32、地温は-1 ~ 29の範囲を推移した。同様に、広葉樹林では、気温は-5 ~ 30、地温は-1 ~ 35の範囲を推移し、どちらのサイトでも気温に比べて地温の変動が小さい傾向が見られた。1月~2月にかけて約1カ月間は積雪により地温の変化が少なかった。

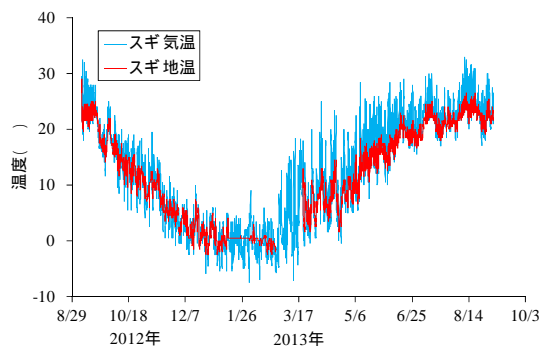


図1 スギ林の気温と地温の変化

### 4.1.2 リターバッグ試料の重量変化

図2に、リターバッグ試料の乾燥重量の時間変化を示す。リターバッグ試料の乾燥重量はどちらも時間と共に減少する傾向が見られ、スギ試料では実験開始から195日で9.2%、278日で12.4%減少した。広葉樹試料では、195日で29.0%、278日で25.2%減少した。これらの重量の減少は、リターの破碎や分解によるものと考えられる。スギなどの針葉樹の落葉は、広葉樹の落葉に比べて分解されにくいことが指摘されていることから(市川ほか、2003)、スギと広葉樹の減少率の違いは、両者の分解されやすさの違いを反映していると考えられる。

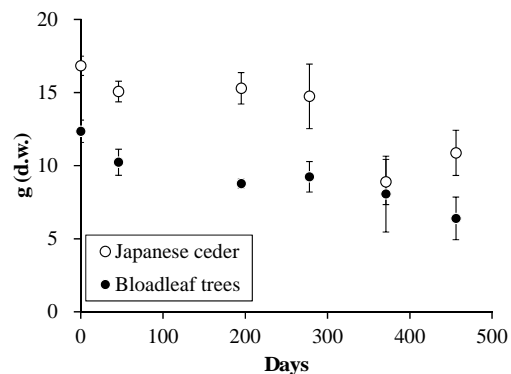


図2 リターバッグ試料の乾燥重量の時間変化 (n=5, error bar: 1)

### 4.1.3 リターバッグ試料の放射性セシウム濃度変化

図3、4にスギ林と広葉樹林に設置したリターバッグの放射性セシウム濃度の時間変化を示す。 $^{137}\text{Cs}$ 濃度の初期値はスギ・広葉樹でそれぞれ  $1\text{ Bq kg}^{-1}$ 、 $11\text{ Bq kg}^{-1}$ であったが、371日後まで増加し続け、371日後にはそれぞれ  $20,501\text{ Bq kg}^{-1}$ 、 $8,336\text{ Bq kg}^{-1}$ となった。 $^{134}\text{Cs}$ 濃度は初期値がスギ・広葉樹でそれぞれ  $0.1\text{ Bq kg}^{-1}$ 、 $0.3\text{ Bq kg}^{-1}$ であったが、 $^{137}\text{Cs}$ と同様に371日後まで増加し続け、371日後には  $9,378\text{ Bq kg}^{-1}$ 、 $3,819\text{ Bq kg}^{-1}$ になった。地表からのセシウム輸送を遮断したControl区でも、放射性セシウム濃度は無処理区と同様の推移を示していた。

リターバッグ試料の乾燥重量は、スギ・広葉樹共に減少し続ける傾向にあった(図2)。スギでは、リターバッグの乾燥重量は456日で平均35%減少し、広葉樹では48%減少した。

### 4.1.4 スギ林と広葉樹林の差異

図3、4に示すように、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ ともにスギ林において濃度が高く、上昇率も大きい結果となった。スギ林、広葉樹林の樹木地上部やリター、表土の放射性セシウムは未計測であるが、スギは樹体や樹冠部が大きく、葉面積が大きいことから、大気中の浮遊物質の捕捉効率が高い。また、常緑であるため冬季にも乾性降水物を捕捉できる。これらの特徴

を持つことから、スギは広葉樹に比べて乾性沈着量が多いことが報告されている（佐々木、2005）。したがって、スギは放射性降下物を効率的に捕捉し、スギ林の林床では放射性セシウム濃度は高いと考えられる。このことがスギ林のリターバッグの高い放射性セシウムの要因になっている可能性がある。

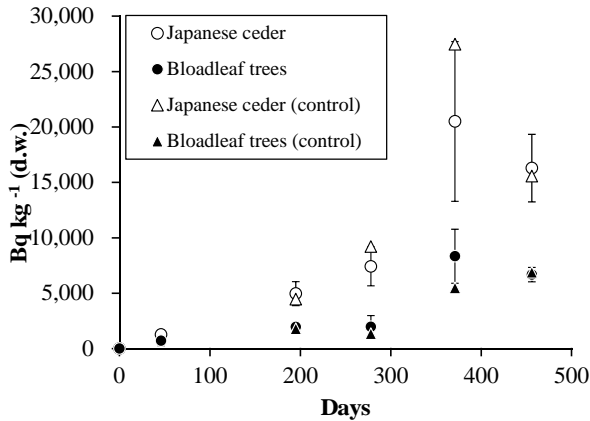


図3 リターバッグ試料の乾燥重量当たり<sup>137</sup>Cs濃度の時間変化  
値は5試料の平均を示し、エラーバーは1を示す。遮断区のデータは1試料の値。

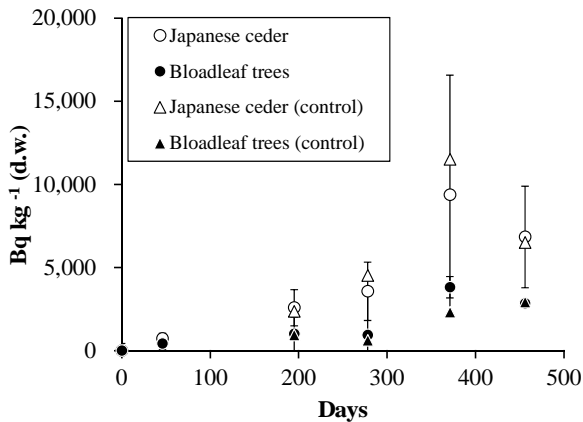


図4 リターバッグ試料の乾燥重量当たり<sup>134</sup>Cs濃度の時間変化  
値は5試料の平均を示し、エラーバーは1を示す。遮断区のデータは1試料の値。

#### 4.1.5. 同位体比に基づいて検討したリターバッグ試料の放射性セシウム濃度変化の要因

大気降下により樹冠に沈着した<sup>137</sup>Csと<sup>134</sup>Csの比（fallout）を放出時（2011/3/15）の<sup>137</sup>Cs/<sup>134</sup>Cs比を1として、両同位体の半減期（それぞれ30.1年、2.1年）をもとに同位体比の変化を計算した。また、リターバッグ設置時に採取した表土の<sup>137</sup>Cs/<sup>134</sup>Cs比の変化を計算により求めた。<sup>137</sup>Csと<sup>134</sup>Csは環境中の挙動は同じであるため、生物的・物理的等

の要因による表土からリターバッグへの放射性セシウムの上方移動が生じると、リターバッグの同位体比はその時の土壌の同位体比に近づくことになると考えられる。一方、樹冠に沈着した<sup>137</sup>Csと<sup>134</sup>Csが落葉や溶脱によってリターバッグに混入すれば、リターバッグの同位体比はその時の樹冠の同位体比に近づくことになると考えられる。

リターバッグ試料の同位体比は、設置から278日後までは樹冠に沈着した<sup>137</sup>Csと<sup>134</sup>Csの同位体比に近い値を示している。設置時にはリターバッグの放射性セシウム濃度は極めて低かったが、その後濃度が上昇したことから、樹冠に沈着した<sup>137</sup>Csと<sup>134</sup>Csが落葉や溶脱によってリターバッグに混入した可能性が考えられる。設置371日後および456日後に回収したリターバッグの同位体比は、樹冠に沈着した<sup>137</sup>Csと<sup>134</sup>Csの同位体比と比較して顕著に低く、表土の<sup>137</sup>Cs/<sup>134</sup>Cs比に近づいている。このことは、生物的・物理的等の要因による表土からリターバッグへの放射性セシウムの上方移動が生じた可能性を示している。なお、ここで求めた樹冠の<sup>137</sup>Cs/<sup>134</sup>Cs比は、放出時（2011/3/15）の<sup>137</sup>Cs/<sup>134</sup>Cs比を1として計算したもので、表土の<sup>137</sup>Cs/<sup>134</sup>Cs比は、リターバッグ設置時に

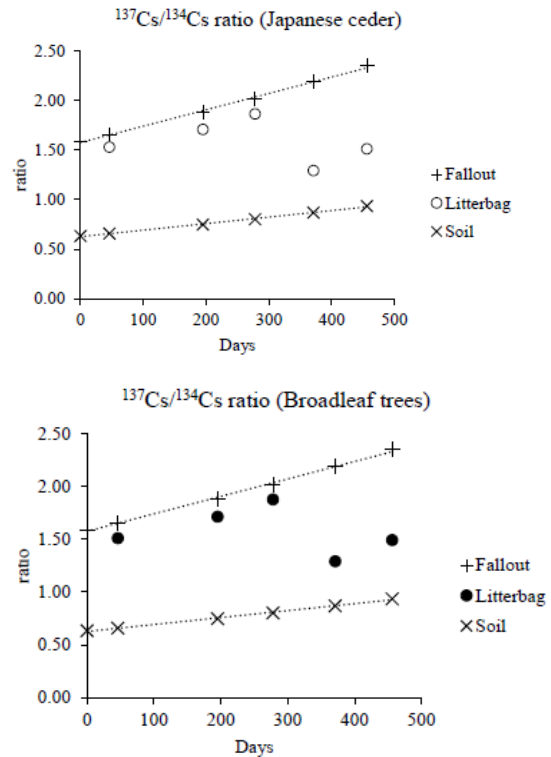


図5 樹幹沈着（fallout）、リターバッグ（無処理区）、表層土壌の同位体比の推移

採取した表土の<sup>137</sup>Cs/<sup>134</sup>Cs比の時間変化を半減期計算により求めたものであり、表土やリターの実際の同位体比ではないため、現時点の表土や落葉の同位体比に基づいて検討する必要がある。

#### 4.2.1 圃場土壌の放射性セシウム

図5に耕起区および不耕起区の土壌中の<sup>137</sup>Csの単位面積当たりの存在量を示す。

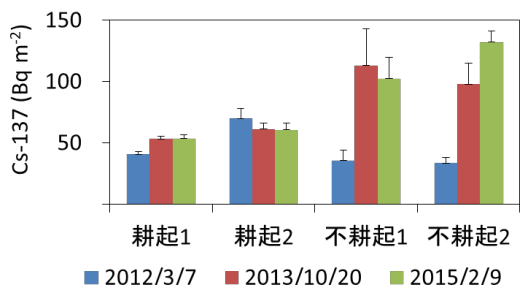


図6 福島県林業研究センター圃場の<sup>137</sup>Cs存在量

この結果より、耕起区の土壌は比較的均質になっているのに対し、不耕起土壌はばらつきが大きく、採取した地点の差が3倍以上違うことが明らかとなった。

#### 4.2.2 植物葉中の<sup>137</sup>Cs濃度

表2に、葉試料中の<sup>137</sup>Cs濃度の測定データの一部をTF値(葉中濃度(Bq/kg)/土壌中濃度(Bq/m<sup>2</sup>))とともに示す。<sup>137</sup>Csが検出された個体は存在するものの、全個体(128~160個体/年)のごく一部であり、検出限界以下の個体が多いことが明らかとなった。

また、検出の有無には、耕起、不耕起による違いは認められなかった。2012年には、さまざまな樹種で検出されたのに対し、2013年はスギとモミジイチゴのみ、2014年はスギのみで検出された。これらの結果から、スギは比較的放射性セシウムを吸収しやすい樹種であることが示唆された。しかしながら、その面移行係数は2014年で0.0015程度であることが明らかとなった。

それに対し、宇都宮大学の演習林の森林伐採跡地に2011年5月に植栽されたスギの葉中のデータでは、最大3000Bq/kgの<sup>137</sup>Csが検出され移行係数は0.1にも達する個体が存在していた(飯塚、私信)。

その理由のひとつとして考えられたのが、土壌中の放射性セシウムの存在形態の違いである。そこで、福島県林業研究センターの圃場土壌と宇都宮大学演習林土壌中の交換態<sup>137</sup>Csの比較を行った。交換態<sup>137</sup>Csは、1Mの酢酸アンモニウム溶液で抽出した<sup>137</sup>Csである。その結果、交換態セシウムの存在量で郡山林業センターと宇都宮大演習林におけるスギの吸収量の違いを説明することはできなかった。

その理由として、スギの品種の違い、および土壌における<sup>137</sup>Csの回転速度の違いといったことが考えられた。

表2 圃場に植栽した苗木の葉中<sup>137</sup>Cs濃度

年	樹種	サイト	<sup>137</sup> Cs (Bq/kg)	TF
2012	アカマツ	非耕起	71	0.0014
		非耕起	21	0.0004
		耕起	120	0.0016
	アセビ	耕起	30	0.0070
	サザンカ	非耕起	354	0.0015
	スギ	耕起	104	0.0008
2013	スギ	耕起	421	0.0019
		耕起	119	0.0078
		耕起	150	0.0016
	モミジイチゴ	非耕起	87	0.0020
	ヤブツバキ	耕起	77	0.0012
	スギ	耕起	63	0.0004
2014	スギ	耕起	10	0.0002
	スギ	耕起	11	0.0002
2014	スギ	非耕起	12	0.0001
	スギ	耕起	100	0.0015

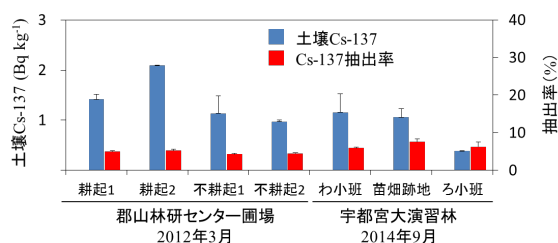


図7 土壌中の交換態<sup>137</sup>Csの比較

### 5. まとめ

森林土壌層における放射性セシウムの上方輸送過程として、微生物による取り込みと、樹木根による吸収に焦点を当て、定量的評価を試みた。しかしながら、結果から判断すると、2011年事故後の放射性セシウムの動態は、いまだに定常的な状態に達しているとはいえないようである。グローバルフォールアウトの放射性セシウムを用いてヒノキ林でかつて行った実験結果とは明らかに異なり、地上部から土壌表面への沈着がいまだに多いことが示された。

また、経根吸収においても、個体差が大きく、また圃場環境は実際の林地とは異なる条件であることが推測され、今回の実験条件では定量的に示すことはできなかった。放射性セシウムは長期間森林のリター層に留まる可能性は十分にあるが、現状でそのメカニズムを定量的に評価することはまだ難しい。スギ林では、事故時に地上部にあった葉が全て落葉すると考えられる5, 6年経過後からの観測が望まれる。

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)  
Kanasashi T, Sugiura Y., Takenaka C. and Ozawa H. (2013) Dynamics of radiocesium in Sugi (*Cryptomeria japonica*), KEK Proceedings 7: 311-315.

〔学会発表〕(計 1 件)  
竹中千里・金指努・杉浦佑樹・小澤創(2013)  
樹木による放射性セシウムの経根吸収の実態第 124 回日本森林学会大会  
〔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〕  
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹中 千里 (TAKENAKA Chisato)  
名古屋大学・大学院生命農学研究科・教授  
研究者番号: 40240808

(2) 研究分担者

福山泰次郎 (FUKUYAMA Taijirou)  
信州大学・農学部・助教  
研究者番号: 60462511

富岡利恵 (TOMIOKA Rie)  
名古屋大学・大学院生命農学研究科・助教  
研究者番号: 40456588