

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

京都大学大学院情報学研究科教授

千葉大学大学院理学研究科准教授

東京大学大学院農学生命科学研究科特任研究員

筑波大学大学院生命環境科学研究科准教授

大手 信人

村上 正志

遠藤 いず貴

堀田 紀文

1. 森林での調査の必要性

2011年3月に発生した福島第一原子力発電所の事故によって、約 1.5×10^{17} Bqの放射性ヨウ素(^{131}I)と 1.2×10^{16} Bqの放射性セシウム(^{137}Cs)が、主として福島県、宮城県の周辺地域に飛散した(文部科学省、農林水産省2012)。これらの地域は、森林率が70%を超える市町村が多く、降下した放射性物質の影響に対する懸念は、生活圏での被曝の問題だけではなく、林業・林産業への被害や森林の水源としての機能への影響に及んでいる。

放射性物質の飛散・沈着後、初期段階における文部科学省・農林水産省主導の調査では、森林に沈着した放射性セシウムは常緑樹林では樹冠、落葉樹林では地表の落葉層に留まっていることが示された(文部科学省・農林水産省2012)。放射性セシウムは土壌中では粘土鉱物や土壌有機物に吸着されることが示されており(Kruyts and Delvaux, 2002)、土壌の浸食・流出が生じるとそれによって土粒子や溶存有機物とともに溪流・河川に流出することがすでに報告されている(例えば、Wakiyama et al. 2010)。

森林生態系内で、樹冠に降下・付着した放射性セシウムは、時間の経過とともに降雨による洗脱¹⁾によって(Kinnersley et al. 1997; Kato et al. 2012; Hashimoto et al. 2013)、あるいは落葉によって林床に移動する(例えば、Schimmack et al. 1993; 久留ら 2013; Hashimoto et al. 2013)。

また、溶存態の放射性セシウムは森林生態系内では微生物、藻類、植物な

1 降雨の流下によって、洗い流されること。

ど種々の生物に吸収される。生物群集の中では、これら一次生産者に取り込まれた放射性セシウムは食物網を介して伝播し、最終的には高次の栄養段階にある魚類、鳥類、哺乳類などにも移行していくことが推測できる。この移行に伴って、生物濃縮が生じるかどうか注目した研究はこれまでも行われてきているが（例えば、Rowan and Rasmussen, 1994; Wang et al. 2000）、今回に関しても注意深い調査と記述が必要である。

以上のような背景を踏まえて、森林に降下・分布した放射性セシウムが、初期数年間に生態系内でどのように移動し再分配が生じるのか、あるいは系外にどれだけ流出していくのかを詳細に記述することは、今後のこの地域の森林取り扱いを検討する上で極めて重要な課題である。このため、筆者らは福島県北部の森林に調査集水域を設定し、放射性セシウムの動態モニタリングを行った。本稿では、2014年度末までに採られたデータをもとに現況を報告する²⁾。

2. 調査の概要

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に位置し、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1.0～1.9 μ Sv/hr、¹³⁷Csの推定総降下量は300～600 kBq/m²であった（2013年6～7月調査、文科省 2015）。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 densiflora*) 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³⁾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カ所の方形調査プロットを設定し、それぞれでリターフォール⁴⁾の採取、林

2 本稿の内容の殆どはすでに Ohte et al. (2015) に公表したものである。

3 単位時間、単位面積あたりの物質の移動量。

4 落葉・落枝。

内雨、樹幹流⁵⁾の量と放射性セシウム濃度の測定を行った⁶⁾。

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を調べた。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⁷⁾。

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、放射性セシウム濃度を測定した（Ohte et al. 2013）。

3. 植物体の¹³⁷Cs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い、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¹³⁷Cs濃度は、2012年に旧葉も当年葉も10,000 Bq/kgを超えていたが、2013年には旧葉で3,500 Bq/kg、当年葉で2,700 Bq/kg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

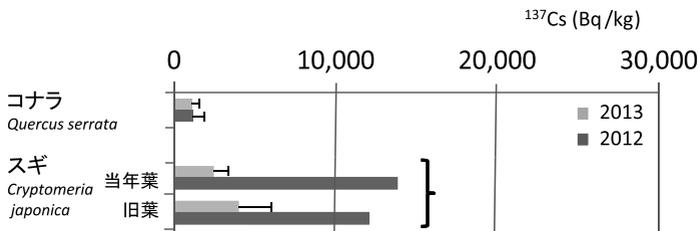


図1 スギとコナラの生葉の¹³⁷Cs濃度。試料は2012、2013年11月に、立木の伐採によって採取した。スギは旧葉と当年葉を区別して濃度を測定した（Ohte et al. 2015）

5 林内雨とは、降雨時に樹冠を通過して滴下してくる降水を指す。樹幹流とは、その時に樹幹の表面をつたって流下する降水を指す。

6 リターフォール、林内雨、樹幹流の採取の方法等の詳細はEndo et al. (2015)に記載されている。

7 生物試料の採取法、機能群ごとの分類についてはMurakami et al. (2014)に詳述されている。

ムは葉か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ることを物語っている。旧葉の ^{137}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}Cs 濃度は 2012 年、2013 年とも約 1,000 Bq/kg 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}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}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}Cs 濃度は殆どの試料で 10,000 Bq/kg を超えていた (Ohte et al. 2015)。

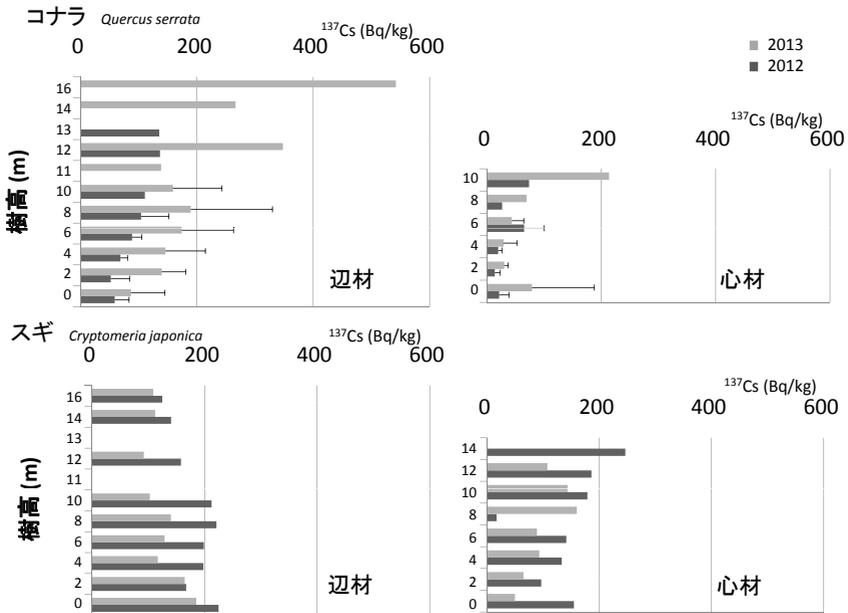


図 2 スギとコナラの辺材と心材の ^{137}Cs 濃度。試料は 2012、2013 年 11 月に、立木の伐採によって採取した (Ohte et al. 2015)

2012、2013年とも、コナラに比べてスギの辺材と心材の ^{137}Cs 濃度に大きな差が見られないことから（図2）、放射性セシウムの樹幹内での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}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ろう。

4. 放射性セシウムの樹冠から林床への移動

リターフォールによる樹冠から林床への ^{137}Cs 移動量は、DP1、DP2（落葉広葉樹－アカマツ混交林）、CP（スギ人工林）のプロットの中では、スギ人工林で最も大きかった（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。林内雨と樹幹流と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}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

表1 林内雨、樹幹流、リターフォールの年平均 ^{137}Cs 濃度と年間 ^{137}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}Cs 濃度 (Bq/L: 林内雨、樹幹流; Bq/kg: リターフォール)			^{137}Cs フラックス (Bq/m ² /year)		
	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

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、リター層、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。

5. 溪流への放射性セシウムの流出

図3は、2013年10月の洪水時の、流出浮遊粒子状物質と ^{137}Cs 濃度の時間変動を示している(伊勢田 2015)。 ^{137}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}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}Cs 濃度の変化を考慮した上で、集水域からの年間 ^{137}Cs 流出量を推定すると、2012年8月31日～2013年8月30日の集計では $330\text{ Bq/m}^2/\text{year}$ となった(伊勢田 2015)。しかし、例えば、

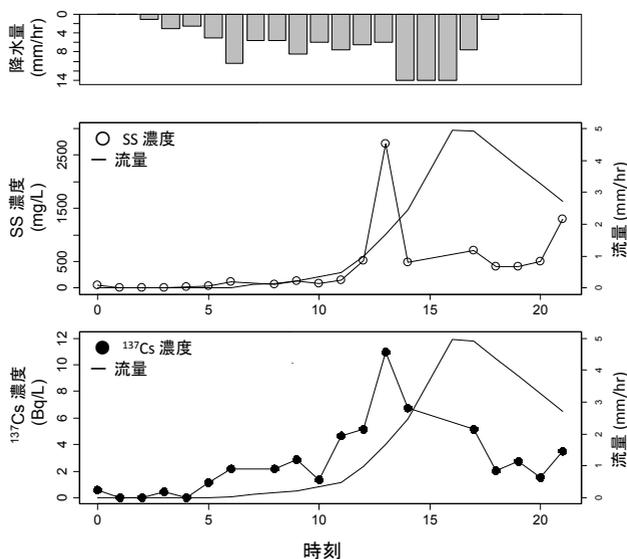


図3 2013年10月15日の洪水イベント時の降水量、浮遊粒子状物質(SS)濃度、 ^{137}Cs 濃度、河川流量の時間変化(伊勢田 2015)

8) 同様のことはすでに、例えば、Yamashiki et al. 2014; Evrard et al. 2015などによって報告されている。

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 Bq/m^2 の ^{137}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。

事故後に当該地域に沈着した ^{137}Cs の推定量は $100 - 300 \text{ kBq/m}^2$ とされており（文部科学省 2015）、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、 ^{137}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方が明らかに少ないということがわかる。

6. 食物網を介した放射性セシウムの伝播

図4は陸棲と水棲の生物試料の ^{137}Cs 濃度を、機能群ごとに示している。落葉、菌類、腐植食者、捕食者の ^{137}Cs 濃度は植物の生葉、植食者よりも有意に高かった。地表に堆積している落葉やその破砕物が ^{137}Cs の最も大きな

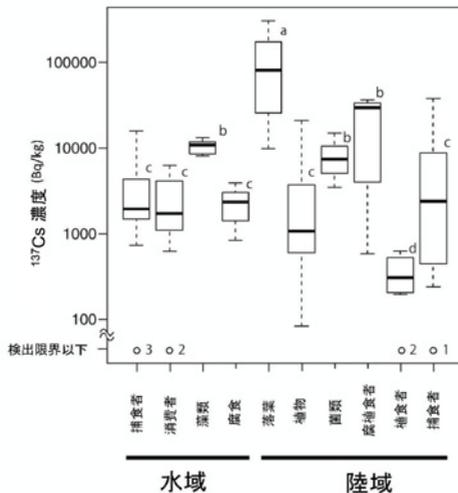


図4 機能群ごとの ^{137}Cs 濃度。各プロットに附記されているアルファベットは、機能群を統計的にグルーピングした結果を示している。同じ文字は同じグループを示す。試料の測定値が、測定器の検出限界以下であったものについて試料数を附記している（Murakami et al. 2014）

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植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生の藻類の ^{137}Cs 濃度は生葉と落葉の間であり、高次の生物群集の ^{137}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 ^{137}Cs 濃度との関係は、緩やかな負の相関を示していた⁹⁾。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 ^{137}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ことである。上記の結果は、本調査での生物群集において ^{137}Cs の生物濃縮は見られなかったことを示していた。

7. おわりに

これまでのモニタリングで得られた最も重要な知見は、放射性セシウムがある特定の空間的な配置をもって安定的に分布しているわけではなく、現在も活発に移動しているということである。特に、植物－土壌間の養分循環の経路に沿って、生態系内の内部循環が生じている可能性が示された。一方で、河川を通じて水とともに系外に輸送される放射性セシウム量は沈着した総量に比べて著しく小さいことが示された。

樹冠から林床への放射性セシウムの移動が、植物の根系からの吸収や樹皮からの移行に比べて、特に常緑針葉樹であるスギで依然として大きいことは、樹冠からの移動量が年々減少していることから示唆される。これは、今後、樹体の吸収量と樹冠から林床への移動量が同程度になる「平衡」状態に近づいていくことが予想される。この間、一定量は、鉍質土壌層に流下し、粘土鉍物に貯留されていくことは考えられるが、リター・腐植層と植物との間の内部循環系は長期に亘って保たれることが考えられる。粘土鉍物による吸着・貯留は、放射性セシウムの生物に対する可給性を低下させるが、リター・腐植層と植物との間の内部循環系において放射性セシウムが循環する限り、生

9 このデータについては Murakami et al. 2014 に詳述されている。

物に対するその放射性セシウムの可給性は保たれると見てよい。この内部循環系における循環量とそのメカニズムを今後も注意深く観察を続ける必要がある。中長期的に見たモニタリングだけでなく、リター層と土壌表面での現象についての詳細なプロセス研究が依然として重要であると考えられる。

謝辞

以上の研究は、科学研究費補助金（24248027）、河川財団河川整備基金（平成26、27年度）の援助を受けて遂行されている。また、伊達市霊山町上小国地区在住の渡辺長之助氏から多大なご協力を賜っている。これらの方々から感謝の意を表したい。

〔引用文献〕

- Endo I, Ohte N, Iseda K, Tanoi K, Hirose A, Kobayashi NI, Murakami M, Tokuchi N, Ohashi M (2015) Estimation of radioactive 137-cesium transportation by litterfall, stemflow and throughfall in the forests of Fukushima. *J Environ Radioactiv* 149:176-185
- Evrard O, Lacey JP, Lepage H, Onda Y, Cerdan O, and Ayrault S. (2015) Radiocesium transfer from hillslopes to the Pacific Ocean after the Fukushima Nuclear Power Plant accident: A review. *J Environ Radioactiv* 148:92-110.
- Hashimoto S, Matsuura T, Nanko K, Linkov I, Shaw G, Kaneko S (2013) Predicted spatio-temporal dynamics of radiocesium deposited onto forests following the Fukushima nuclear accident. *Sci Rep* 3:2564
- 久留景吾、恩田裕一、河守歩、加藤弘亮 (2013) 落葉広葉樹-アカマツ混交林およびスギ人工林における落葉に伴う放射性セシウムの移行. *日本森林学会誌* 95:267-274.
- 伊勢田耕平 (2015) 福島県北部の森林における浮遊砂の流出機構から見た ^{137}Cs 流出形態の変化に関する研究. 東京大学大学院農学生命科学研究科修士論文.
- Kato H, Onda Y, Gomi T (2012) Interception of the Fukushima reactor accident-derived ^{137}Cs , ^{134}Cs and ^{131}I by coniferous forest canopies. *Geophys Res Lett* 39:L20403
- Kinnersley RP, Goddard AJH, Minski MJ, Shaw G (1997) Interception of caesium-contaminated rain by vegetation. *Atmos Environ* 31:1137-1145
- Kruijts N, Delvaux B (2002) Soil organic horizons as a major source for radiocesium biorecycling in forest ecosystems. *J Environ Radioact* 58:175-190
- 文部科学省 (2015) 放射線量等分布マップ. <http://ramap.jmc.or.jp/map/map.html?> Accessed 30 August 2015
- 文部科学省・農林水産省 (2012) 東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に伴い放出された放射性物質の分布状況等に関する調査研究結果. 平成23年度科学技術戦略推進費「重要政策課題への機動的対応の推進及び総合科学技術会議における政策立案のための調査」[放射性物質による環境影響への対策基盤の確立]
- Murakami M, Ohte N, Suzuki T, Ishii N, Igarashi Y, Tanoi K (2014) Biological proliferation of cesium-137 through the detrital food chain in a forest ecosystem in Japan. *Sci Rep* 4:3599

- Ohte N, Murakami M, Suzuki T, Iseda K, Tanoi K, Ishii N (2013) Diffusion and transportation dynamics of ^{137}Cs deposited on the forested area in Fukushima after the Fukushima Daiichi Nuclear Power plant accident in March 2011. In: Nakanishi TM, Tanoi K, (eds) *Agricultural Implications of the Fukushima Nuclear Accident*. Springer, New York, pp 177-186
- Ohte N, Murakami M, Endo I, Ohashi M, Iseda K, Suzuki T, Oda T, Hotta N, Tanoi K, Kobayashi N, Ishii N (2015) Ecosystem monitoring of radiocesium redistribution dynamics in a forested catchment in Fukushima after the nuclear power plant accident in March 2011 In: Nakanishi T, Tanoi K, (eds) *Agricultural Implications of the Fukushima Nuclear Accident: First Three Years*. Springer, New York, (in press)
- Rowan DJ, Rasmussen JB (1994) Bioaccumulation of Radiocesium by Fish: the Influence of Physicochemical Factors and Trophic Structure. *Can J Fish and Aquat Sci* 51:2388-2410
- Schimmacck W, Förster H, Bunzl K, Kreutzer K (1993) Deposition of radiocesium to the soil by stemflow, throughfall and leaf-fall from beech trees. *Radiat Environ Biophys* 32:137-150
- Soil Survey Staff (2014) *Keys to Soil Taxonomy*, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Yamashiki Y, Onda Y, Smith HG, Blake WH, Wakahara T, Igarashi Y, Matsuura Y, Yoshimura K (2014) Initial flux of sediment-associated radiocesium to the ocean from the largest river impacted by Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *Sci Rep* 4:3714
- Wakiyama Y, Onda Y, Mizugaki S, Asai H, Hiramatsu S (2010) Soil erosion rates on forested mountain hillslopes estimated using ^{137}Cs and $^{210}\text{Pbex}$. *Geoderma* 159:39-52
- Wang WX, Ke C, Yu KN, Lam PKS (2000) Modeling radiocesium bioaccumulation in a marine food chain. *Mar Ecol Prog Ser* 208:41-50



大手 信人 (おおて・のぶひと)：代表筆者

京都大学大学院情報学研究科教授。博士（農学）。京都大学大学院農学研究科助教授、東京大学大学院農学生命科学研究科准教授を経て2014年より現職。専門は森林水文学、生態系生態学。森林生態系における水・物質循環のメカニズムに関する研究をしている。生態学琵琶湖賞受賞。1964年生まれ
