

## 福島原発事故で汚染された森林の樹木地上部における放射性セシウムの蓄積量 Depositions of radiocesium in aboveground tree components of forest ecosystems affected by the accident of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant

梶本卓也<sup>\*1</sup>・齊藤哲<sup>\*1</sup>・川崎達郎<sup>\*1</sup>・壁谷大介<sup>\*1</sup>・矢崎健一<sup>\*1</sup>・太田敬之<sup>\*1</sup>・小松雅史<sup>\*1</sup>・田淵隆一<sup>\*1</sup>・  
松本陽介<sup>\*1</sup>・田中憲蔵<sup>\*1</sup>・阿部真<sup>\*1</sup>・杉田久志<sup>\*1</sup>・宇都木玄<sup>\*1</sup>・酒井武<sup>\*1</sup>・飛田博順<sup>\*1</sup>・伊東宏樹<sup>\*1</sup>・  
大橋伸太<sup>\*1</sup>・高野勉<sup>\*1</sup>・金子真司<sup>\*1</sup>・赤間亮夫<sup>\*1</sup>・田中浩<sup>\*1</sup>・清野嘉之<sup>\*1</sup>・高橋正通<sup>\*1</sup>  
Takuya KAJIMOTO<sup>\*1</sup>, Satoshi SAITO<sup>\*1</sup>, Tatsuro KAWASAKI<sup>\*1</sup>, Daisuke KABEYA<sup>\*1</sup>, Kenichi YAZAKI<sup>\*1</sup>,  
Takayuki OTA<sup>\*1</sup>, Masafumi KOMATSU<sup>\*1</sup>, Ryuichi TABUCHI<sup>\*1</sup>, Yosuke MATSUMOTO<sup>\*1</sup>, Kenzo TANAKA<sup>\*1</sup>,  
Makoto ABE<sup>\*1</sup>, Hisashi SUGITA<sup>\*1</sup>, Hajime UTSUGI<sup>\*1</sup>, Takeshi SAKAI<sup>\*1</sup>, Hiroyuki TOBITA<sup>\*1</sup>, Hiroki ITO<sup>\*1</sup>,  
Shinta OHASHI<sup>\*1</sup>, Tsutomu TAKANO<sup>\*1</sup>, Shinji KANEKO<sup>\*1</sup>, Akio AKAMA<sup>\*1</sup>, Hiroshi TANAKA<sup>\*1</sup>,  
Yoshiyuki KIYONO<sup>\*1</sup> and Masamichi TAKAHASHI<sup>\*1</sup>

\* 1 独立行政法人森林総合研究所

Forestry and Forest Products Res. Inst., Matsunosato 1, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687

**要旨：**森林の放射能汚染の実態把握と将来予測を目的に、福島・茨城県内に設定した異なるタイプの森林（スギ林、ヒノキ林、アカマツ林、コナラを主とする落葉広葉樹林）で、樹木の葉、枝、幹（樹皮、辺材・心材別）の放射性セシウムの濃度と蓄積量を約3年間（2011–2014年）調査した。各林分では毎年夏季に優占樹種を3個体伐倒し、部位別の採取試料で放射性Cs濃度を測定してそれに優占種の現存量を乗じて林分あたりの蓄積量を推定した。樹木の<sup>137</sup>Cs蓄積量（2011年）の配分をみると、常緑針葉樹林では葉に多く（60–80%）、落葉広葉樹林では枝と樹皮に多かった。常緑針葉樹林の場合、2年後（2013年）にはいずれも樹木の<sup>137</sup>Cs蓄積量は大きく減少したが、その減少割合はスギやヒノキ林がアカマツ林より小さく、部位別の配分もあまり変化しなかった。また、葉の<sup>137</sup>Cs濃度と樹冠内の位置や葉齢との関係においても、スギ・ヒノキとアカマツでは違いがみられた。以上の結果、事故後2~3年を経た樹木の放射性Csの挙動は、同じ常緑樹林でも、樹種による葉の寿命の違いにより異なることが示唆された。

**キーワード：**落葉広葉樹林、常緑針葉樹林、葉の寿命、放射性セシウム、樹木の<sup>137</sup>Cs蓄積量

**Abstract :** We have examined radiocesium dynamics in some forests, including three different types of conifer plantation (Japanese cedar, Hinoki cypress, and Japanese red pine) and deciduous broad-leaved forest (Konara oak), which were affected by the accident of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. In each stand, stand-level <sup>137</sup>Cs deposition on trees was assessed by measuring specific radiocesium activities and biomass of each tree component in the summer during 2011–2014. For all conifer plantations, initial trees-<sup>137</sup>Cs deposition (2011) occurred largely on needles (60–80% of total), and decreased greatly after two years (2013). However, the extent of reduction mainly due to needle litter-fall differed by dominant species: <sup>137</sup>Cs decreased slowly in the stands of cedar or cypress than red pine. Within-crown and age-related (current vs. old) variations of needle-<sup>137</sup>Cs concentration also differed among these conifer species. These findings suggested that the early phase dynamics of radiocesium on tree crowns differed even among evergreen conifer forests by reflecting species-specific traits, such as needle turnover (longevity).

**Keywords:** Deciduous broad-leaved forest, Evergreen conifer forest, Needle lifespan, Radiocesium, Tree-<sup>137</sup>Cs deposition

### I はじめに

福島第一原子力発電所（以下、原発）の事故に伴う森林の放射能汚染については、その実態が徐々に明らかにされつつある。チェルノブイリ事故の場合、林冠の葉や枝に初期沈着した放射性Csは、最初半年くらいは降雨による洗脱を強く受けるが、その後はおもに枝葉の枯死

脱落により林床へ移行し、やがてその多くはリターや土壤表層に蓄積されて森林内に長く停留することが示されている（4, 9）。福島の場合も、事故から1~2年の段階では、おおむねこれに似た放射性Csの挙動がスギ林などで報告されている（6, 7）。今後は、樹体内（幹材）への移行や蓄積が予想されるが（2, 8, 10），将来の変化

をモデルなどで正確に予測し（3），汚染された森林の管理に結びつけるためには，初期段階の放射性 Cs の挙動が優占種や林分構造などの違いでどの程度異なるのか把握しておくことが重要と思われる。

森林総合研究所では，事故以降，スギ林以外の異なる森林も含めて樹木やリター・土壤の放射性 Cs の調査を行ってきた（1, 6, 11）。本論では，樹木に関する調査結果から，とくに林冠（葉，枝）の初期沈着量とその後の移行過程について樹種による違いを中心に検討する。

## II 方法

### 1. 調査地

調査は，福島・茨城県内の計 5ヶ所で選定したスギ林（4 林分），ヒノキ林（2 林分），アカマツ林（1 林分）及び落葉広葉樹林（1 林分）の計 8 林分で行った（表-1）。スギ林は汚染度が異なる 4ヶ所に設定し，そのうち 3 林分はほぼ同齢の林（約 40 年生）を選んだ。大玉村では，スギ林の近くでアカマツ林と落葉広葉樹林（コナラが優占）を選定した。ヒノキ林は，原発に近い川内村（大津辺山）と遠方の筑波山の 2ヶ所で選定した。

表-1. 調査林分の概況

Table 1 Outlines of study forests

調査地 Location	調査林分と優占樹種 Forest type & dominant spp	林齢 Age (years)	密度 Density (/ha)	直径 DBH (cm)	現存量 Biomass (Mg/ha)		
					葉 Leaf	枝 Branch	地上部計 Above-total
川内村 (大津辺山)	スギ林 <i>Cj</i>	43	975	19.1	12.0	7.2	92.6
	ヒノキ林 <i>Co</i>	26	1330	17.6	9.1	11.0	124.8
川内村 (上川内)	スギ林 <i>Cj</i>	56	733	30.9	28.4	20.9	225.5
大玉村	スギ林 <i>Cj</i>	42	1117	25.1	23.9	15.2	188.8
	アカマツ林 <i>Pd</i>	43	917	19.0	4.5	10.4	86.9
	落葉広葉樹林 <i>Qs</i>	43	542	17.7	2.7	13.0	68.4
只見町	スギ林 <i>Cj</i>	41	1105	20.3	15.5	9.5	119.5
筑波山	ヒノキ林 <i>Co</i>	43	2133	20.6	23.5	33.2	314.4

密度、平均サイズ、現存量は、各林分の優占種のみの値を示す。  
*Cj*:*Cryptomeria japonica*, *Co*:*Chamaecyparis obtusa*, *Pd*:*Pinus densiflora*, *Qs*:*Quercus serrata*

### 2. 現存量の推定

各林分では、プロット（0.10～0.24 ha）を設けて毎木調査（直径 10 cm 以上）を行い、樹木の部位別現存量を推定した。葉と枝の乾重は、樹種別にそれぞれ作成した直径を変数とする相対成長式から推定した。幹は 3 つの部位（樹皮・辺材・心材）別に放射性 Cs の蓄積量を推定するために、一度幹材積を求めてから、それに各部位の容積（材積）比と容積密度（比重）を乗じて乾重に換算した（式や手順の詳細は、既報（5）を参照）。

### 3. 林分の放射性 Cs 蓄積量の推定

放射性 Cs 濃度の測定試料は、各林分で毎年おもに 7 月下旬～9 月上旬の夏季に優占樹種を 3 本（大・中・小；

中が平均）伐倒し、葉、枝及び幹の各部位から採取した。樹皮と幹材部の試料は、幹の胸高付近で採取した。枝と葉は、まず樹冠を 3 等分した各層（上・中・下層）から枝を数本づつ採取して枝と葉をより分けた。2011 年と 2012 年は、これら層別の試料を枝、葉でそれぞれ一度混ぜてから樹冠全体で 1 試料（個体で n=1）採取した。2013 年は、混ぜずに層別に枝と葉を 1 試料づつ（1 個体で 3 試料）採取した。2014 年は、各層の葉についてさらに当年葉と旧葉に分けて試料を採取した。各試料は、実験室に持ち帰って乾燥後粉碎し、ゲルマニウム半導体検出器（GEM20-70）を用いて放射性 Cs 濃度を測定した。本論では、各年の放射性 Cs 濃度は、測定日の違いによる減衰率の違いを補正するために 9 月 1 日の値に揃えた（以上の試料採取や各測定手順の詳細は、既報（5）を参照）。

林分あたりの放射性 Cs 蓄積量は、優占種の伐倒試料で得た部位別の平均濃度（3 個体平均）に現存量を乗じて推定した。実際には、優占種以外に混交する樹種（針葉樹林の場合、落葉広葉樹類）の蓄積量も推定したが（5）、本論ではそのうち優占種のみの蓄積量に基づき検討する。また、樹種間の差や年変化の傾向は、<sup>134</sup>Cs を加えてもほぼ同じであったため、<sup>137</sup>Cs の結果のみ述べる。

## III 結果と考察

### 1. 樹木の放射性 Cs の蓄積量と配分の変化

図-1 に、各林分の 2011 年時点の樹木 <sup>137</sup>Cs 蓄積量（優占種のみ）と部位別の配分比を示す。4ヶ所のスギ林について、蓄積量は原発に近い川内村の 2 林分で高く、大玉、只見の順で大きく低下した。部位別にみると、いずれも葉が最も多く（60～80%），次いで枝（20～40%）が多かった。この結果には、スギ林の葉の現存量が枝と同じかやや多く（表 1），<sup>137</sup>Cs 濃度（2011 年）も葉が枝よりも高かったことが反映されている。

ヒノキ林については、樹木の <sup>137</sup>Cs 蓄積量は、2 つの林分で大きく違うが、配分ではどちらも葉（約 60%）が多かった（図-1）。ただし、スギ林に比べると樹皮の占める割合がやや多かった（13～15%）。アカマツ林も <sup>137</sup>Cs は葉に多かったが（64%），同じ大玉村の落葉広葉樹林では、事故当時まだ展葉していなかったために枝（60%）と樹皮（37%）に多く蓄積していた。

図-2 は、2013 年の <sup>137</sup>Cs 蓄積量とその配分比を、大玉村の 3 林分と汚染度が比較的似た筑波山のヒノキ林を例に樹種間で比較したものである。<sup>137</sup>Cs 蓄積量はいずれも 2 年間で減少したが、その程度は落葉広葉樹林が最も小さかった（対 2011 年比で 58%）。常緑針葉樹林の中では、アカマツ林（9%）はスギ林（30%）やヒノキ林（42%）

に比べて減少割合が顕著に大きく、また配分比も大きく変化し、葉に代わって枝が大半(72%)を占めた。

常緑針葉樹林の場合、この2年間に樹木の放射性Csが減少したのは、降雨による洗脱よりも毎年秋頃に集中して起こる落葉がおもな原因と思われる(7,9)。つまり、<sup>137</sup>Cs濃度の高い葉が毎年枯死脱落し、その分事故以降に成長して濃度が低い葉に置き替わっていけば、本研究の手法のように樹冠全体の平均で求めた葉の<sup>137</sup>Cs濃度や蓄積量は徐々に減少することになる。

## 2. 葉の<sup>137</sup>Cs濃度：樹冠内の位置と葉齢との関係

図-3に示すとおり、葉齢を区別せずに測定した2013年の試料では、スギやヒノキの場合、下層の葉の方が上層より濃度が高かった( $p<0.05$ , Tukey)(図-3A, B)。また葉齢別に測定した2014年は、下層や中層の旧葉は当年葉より濃度が高かった( $p<0.05$ , ANOVA)。これらの結果と同様、事故以降に出た新しい葉が旧葉に比べて<sup>137</sup>Cs濃度が低いことは、スギやヒノキなどで報告されている(2, 12)。一方、アカマツの場合(2014年)、下層だと旧葉と当年葉で<sup>137</sup>Cs濃度に差はなく、上層ではむしろ当年生葉が旧葉を上回った( $p<0.05$ )(図-3C)。

アカマツで新旧の葉の濃度差が小さいことは、事故から3年目(2014年)には<sup>137</sup>Csが初期沈着した旧葉がすでにほぼ脱落して新しい葉に置き替わったことを示唆している。このことは、アカマツの針葉の寿命が2~3年であることと矛盾しない。一方、一般にスギやヒノキの葉の寿命は4~6年と長く、毎年20%程度しか葉が入れ替わらない。2014年時点でも、まだ4割程度は古い葉が残っており、その影響で旧葉の<sup>137</sup>Cs濃度が当年葉よりも高めであったと推察される。

以上の結果を踏まえると、事故後2~3年における樹木の放射性Csの挙動は、優占種が常緑樹か落葉樹かの違いとともに、同じ常緑樹でも種による葉の入れ替り方(寿命)の違いを反映して異なることが考えられる。つまり、スギ・ヒノキはアカマツに比べて、初期沈着した放射性Csがより長い期間林冠に残存し続けることになる。

今後は、こうした初期段階の森林タイプによる放射性Csの挙動の違いが、林分の成長に伴いどのように変化し、長期的に樹木-土壤系の循環にどう影響するのかさらに研究を続けて明らかにする必要がある。

**謝辞**：調査、試料木の採取で便宜を図って頂いた磐城、福島、会津の各森林管理署(支署)及び福島県川内村の関係者各位、ならびに調査や分析にご協力頂いた森林総合研究所の多くの研究員及び非常勤職員にこの場を借りてお礼申し上げます。本研究は、林野庁委託事業「森林

内における放射性物質実態把握調査事業」と森林総研交付金プロジェクト(課題番号201205)により実施した。

## 引用文献

- (1) FUJII, K. et al. (2014) Vertical migration of radiocesium and clay mineral composition in five forest soils contaminated by the Fukushima nuclear accident. *Soil Sci Plant Nutr* **60**: 751-764
- (2) 福田健二ら (2013) 千葉県柏市の森林における放射能汚染の実態. *森林立地* **55**: 83-98
- (3) HASHIMOTO, S. et al. (2013) Predicted spatio-temporal dynamics of radiocesium deposited onto forests following the Fukushima nuclear accident. *Sci Rep* **3**: 2564
- (4) IAEA (2006) Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience. Radiological Assessment Reports Series, IAEA, Vienna:166pp
- (5) 梶本卓也ら (2014) 森林生態系における樹木・木材の放射性セシウム分布と動態の調査法. *森林総研報* **432**:113-136
- (6) 金子真司ら (2012) 東京電力福島第一原子力発電所事故による森林放射能汚染の実態調査. *関東森林研究* **63**: 97-100
- (7) KATO, H. et al. (2012) Interception of the Fukushima reactor accident-derived<sup>137</sup>Cs, <sup>134</sup>Cs and <sup>131</sup>I by coniferous forest canopies. *Geophys Res Lett* **39**: L20403
- (8) KURODA, K. et al. (2013) Radio cesium concentrations in the bark, sapwood and heartwood of three tree species collected at Fukushima forests half a year after the Fukushima Dai-ichi nuclear accident. *J Environ Radioact* **122**: 37-42
- (9) NIMIS, P.L. (1996) Radio cesium in plants of forest ecosystems. *Studia Geobot* **15**: 3-49
- (10) OHASHI, S. et al. (2014) Radial and vertical distributions of radio cesium in tree stems of *Pinus densiflora* and *Quercus serrata* 1.5 y after the Fukushima nuclear disaster. *J Environ Radioact* **134**: 54-60
- (11) 高橋正通ら (2014) 森林生態系における樹木・木材・土壤・溪流水の放射性セシウム動態調査法の利用ガイド. *森林総研報* **432**:107-112
- (12) YOSHIHARA, T. et al. (2013) Radio cesium contaminations of 20 wood species and the corresponding gamma-ray dose rates around the canopies at 5 months after the Fukushima nuclear power plant accident. *J Environ Radioact* **114**: 60-68

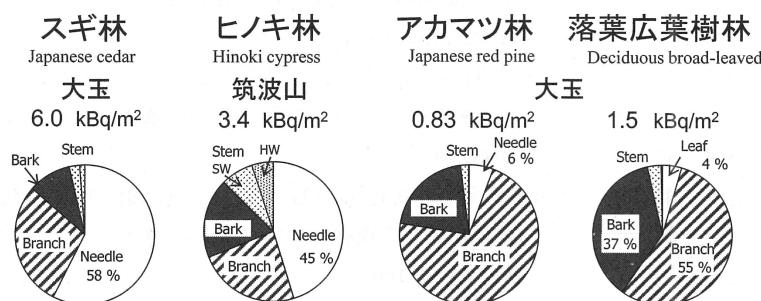
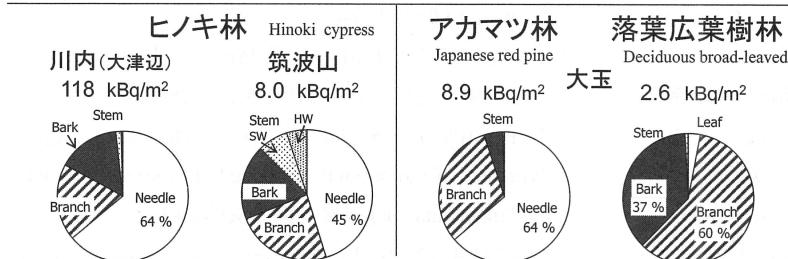
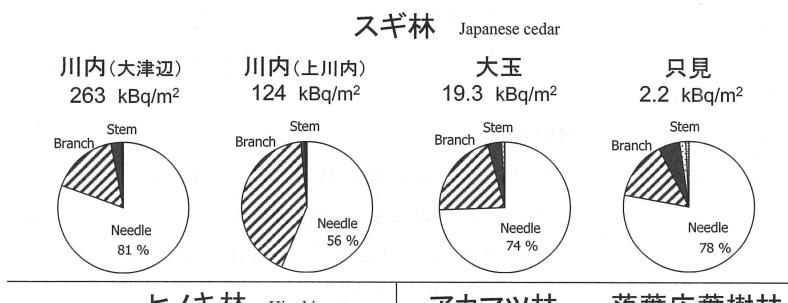
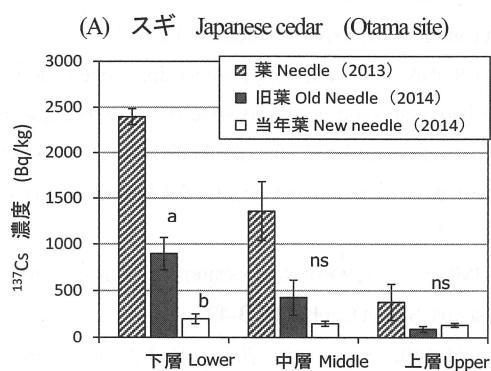


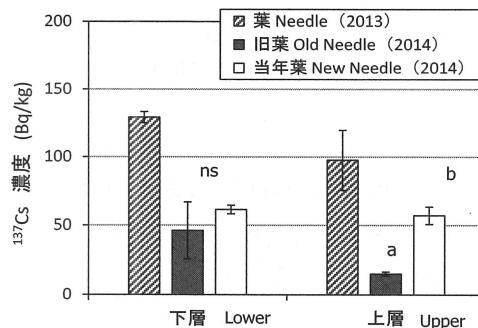
図-1. 各林分の樹木の $^{137}\text{Cs}$ 蓄積量 (2011年) とその部位別配分比  
蓄積量の値は、優占樹種のみの合計を示す。  
(落葉広葉樹林は、広葉樹のみの合計。  
川内・ヒノキ林の値は、2012年の推定値。  
幹は、樹皮(黒)、辺材(点)及び心材(灰色)の合計。

Fig. 1 Initial trees- $^{137}\text{Cs}$  deposition (2011) and its allocation in each study forest.

Depositions are estimates only for dominant species. Stem includes bark (black), sapwood (SW) and heartwood (HW).



(A) スギ Japanese cedar (Otama site)



(C) アカマツ Japanese red pine (Otama site)

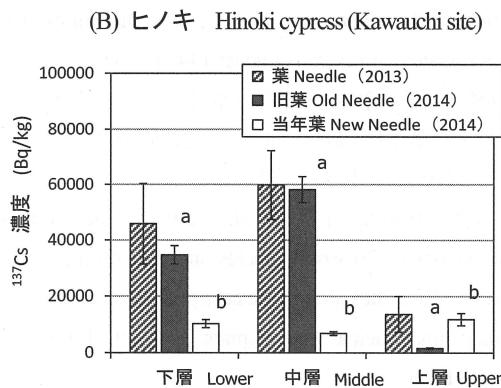


図-3. 葉の $^{137}\text{Cs}$ 濃度と樹冠内の位置及び葉齢との関係  
(A) スギ(大玉), (B) ヒノキ(川内), (C) アカマツ(大玉)。  
試料木3本の平均値(+SE)。小文字(a, b)は、各層の旧葉と  
当年葉(2014年試料)で差がある場合( $p < 0.05$ , ANOVA)。

Fig. 3 Comparisons of needles- $^{137}\text{Cs}$  activities among three layers within crown (upper, middle, lower) and between old and new needles for each conifer species. Value (+SE) shows mean of sample trees (n=3) by layers.