

福島第一原発事故後に植栽・発芽した3樹種の当年枝と葉の放射性セシウム濃度

Leaf and branch radiocesium concentration in planted and naturally regenerated three tree species after the accident of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant

田中憲蔵*1 · 梶本卓也*1 · 齊藤哲*1 · 三浦寛*1

Tanaka KENZO*1, Takuya KAJIMOTO*1, Satoshi SAITO*1 and Satoru MIURA*1

* 1 森林総合研究所

FFPRI., Tsukuba, Ibaraki, 305-8687, Japan

要旨: 福島県田村市に設定した調査地で、東京電力福島第一原発事故後に植栽したコナラとスギ、事故後に天然更新したアカマツの実生、事故後伐採したコナラから発生した萌芽枝について、葉と枝の放射性の¹³⁷Cs濃度を測定した。調査は、2016年6月と7月に行なった。6月は3樹種とも新葉が展葉中であつたが、7月には展葉はほぼ終わっていた。コナラについては7月に二次枝が伸長したためこれも分析した。7月のコナラについては、葉の搾汁液中のカリウムイオン濃度やクロフィル量の指標となるSPAD値も測定した。樹種間で¹³⁷Cs濃度に違いが見られ、6月に採取した新葉ではスギの値が最も高く、アカマツ、コナラの順に低くなった。7月には、スギの¹³⁷Cs濃度が減少したが、コナラとアカマツでは変化は小さかった。コナラの7月の¹³⁷Cs濃度は、植栽・萌芽個体共に若い二次葉のほうが古い一次葉より高い値を示した。コナラの葉のカリウムイオン濃度は、成熟した一次葉に比べ若い二次葉で高い値を示したが¹³⁷Csとの相関はなかった。一方、コナラの葉の成熟度を表す葉面積当たりの葉重やクロフィル量と¹³⁷Cs濃度には負の相関が見られ、葉の成熟度と¹³⁷Cs濃度の間に密接な関係があることが分かった。

キーワード: アカマツ・カリウム・コナラ・スギ・¹³⁷Cs

Abstract: We measured leaf and branch radiocesium (¹³⁷Cs) concentration in planted and naturally regenerated tree species after the accident of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant of TEPCO. We collected current year shoots of planted seedlings of *Cryptomeria japonica* (Cj) and *Quercus serrata* (Qs), naturally regenerated seedlings of *Pinus densiflora* (Pd), and sprouted coppice of Qs at June and July in 2016, respectively in Fukushima, Japan. Concentrations of ¹³⁷Cs were measured for grinded samples by using germanium semiconductor detector. The highest ¹³⁷Cs concentration in June observed in current leaves of Cj, whereas Qs leaves showed the lowest values. Leaf ¹³⁷Cs concentration in the studied species reduced with leaf aging. Negative relation between leaf ¹³⁷Cs and indicators of leaf maturation such as leaf mass per area and chlorophyll content (SPAD value) in Qs also support this pattern. In contrast, relationship between leaf potassium ion and ¹³⁷Cs concentrations in Qs leaves was not significant. Those results suggested that leaf ¹³⁷Cs concentrations decrease with increasing leaf maturation in those tree species.

Keywords: *Cryptomeria japonica*, *Pinus densiflora*, potassium, *Quercus serrata*, ¹³⁷Cs

1 はじめに

福島第一原発事故による放射性Cs汚染地域での林業の再開にとって、事故後に植栽や天然・萌芽更新した樹木が、どの程度土壌から放射性Csを吸収するのか明らかにする必要がある。これまでの研究から、原発事故により、葉や幹枝に沈着した放射性Csが直接樹体内に取り込まれていることが明らかになっている(17)。そのため、事故後に植栽などにより更新した樹木の放射性Cs濃度は直接汚染木に比べ減少すると予測されるが、報告例は少ない(6)。

一方、木材やシイタケ原木として利用される木部の汚染の程度を、立木段階で簡便に推定する方法も求められている。葉や当年枝は、多個体での採取が容易なため、

放射性Csによる木部汚染の指標として有効かもしれない。しかし、葉や当年枝の放射性Cs濃度は季節変化する可能性がある。実際、葉齢に伴う葉の物質濃度の変動や、季節や枝のサイズによる枝のカリウムなど物質濃度の変化が報告されている(5, 9, 10)。特に、枝や葉の伸長展葉期には様々な物質が移動するため、放射性Csの変化も大きい可能性がある。福島原発やチェルノブイリ原発事故後の調査からも、葉齢に伴う¹³⁷Cs濃度の変化が指摘されているが(1, 2, 3, 16)、伸長展葉期の知見は限られている。また、放射性Csの樹体内での挙動は、性質が似たカリウムに類似するとの指摘があり、葉や茎の成長点で集積する可能性が高い(2, 14, 15)。しかし、当年枝・葉のCs濃度の季節変化や、葉の成熟度との関係

は不明な点が多い。

この研究では、原発事故後の植栽や天然・萌芽更新した樹木の当年枝と葉の放射性 Cs 濃度の違いについて、林業樹種として重要なスギ (*Cryptomeria japonica* (Thunb. ex L.f.) D. Don), アカマツ (*Pinus densiflora* Siebold et Zucc.), コナラ (*Quercus serrata* Murray) のシュートの伸長展葉期に調査を行った。また、コナラの葉のカリウムイオン濃度や葉の成熟度と放射性 Cs 濃度の関係についても検討を行なった。

II 材料と方法

調査は、福島県田村市都路地区で行った。調査地の 2015 年 11 月の空間線量は約 $0.5 \mu\text{Sv hr}^{-1}$ で、放射性 Cs の沈着量は約 130 kBq m^{-2} であった。スギは 2013 年に植栽した個体、アカマツは約 3~4 年生の天然更新実生を各 10 個体調査に用いた。また、コナラは 2013 年に植栽した個体と、2012 年に伐採した株からの萌芽個体を各 10 個体選んだ。

2016 年 6 月に供試木の当年枝を採取し、アカマツとコナラについては枝と葉に分けて放射性 Cs を測定した。スギは、枝と葉の区別が困難なため分けずに測定した。また 6 月のスギについては、当年葉に加え古い一年葉も採取した。7 月にも同様の試料を採取したが、コナラについては 6 月に伸びていた一次枝の先に新たに二次枝が伸長していたため、それぞれの枝を分けて採取した。また 7 月はコナラ萌芽個体についても、一次枝と二次枝の採取を行った。各樹種とも 6 月は展葉開始からまだ時間がたっていないため葉の色が薄く質感も柔らかかったが、7 月には成熟した葉に近い葉色や堅さであった。

全ての試料は、乾燥器 (75°C) で 72 時間程度乾燥してから細かく粉砕し、放射性 Cs 濃度をゲルマニウム半導体検出器 (GEM20-70, セイコー EG&G) で測定し、半減期を使って基準日 (2016 年 9 月 1 日) に補正した値を用いた (3)。また、 ^{134}Cs の濃度が個体によっては薄いため本研究では ^{137}Cs の濃度で評価した。

7 月に採取したコナラの植栽と萌芽個体の一次葉と二次葉について、葉の様々な特性と ^{137}Cs 濃度の関係を調べた。まず、葉の搾汁液中のカリウムイオン濃度をカリウムイオンメーター (LAQUAtwin B-731, 堀場製作所) で測定した。次に葉の成熟度の指標となる、葉面積当たりの葉重 (LMA) を生葉面積と葉の全乾重から求めた。また、葉内クロロフィル量の指標として、葉の SPAD 値を SPAD-502 (コニカミノルタ) で測定した。

III 結果と考察

1. 種間での葉と枝の放射性 Cs 濃度 事故後に植栽・更新した樹木の葉や枝の放射性 Cs 濃度は、樹種間で異なることが明らかになった。6 月の葉の ^{137}Cs 濃度はスギが約 $740 \text{ (Bq kg}^{-1}\text{)}$ と最も高く、次にアカマツ (370 Bq kg^{-1})、コナラ (100 Bq kg^{-1}) の順に低く、種間で最大 7 倍の差が見られた (図-1, 2)。原発事故による直接汚染木の放射性 Cs 濃度の樹種間差も報告されており、コシアブラで高くミズキなどで低いことなどがわかっている (7, 12, 15)。これら種間差は、樹種によるカリウムを蓄積しやすい性質や樹皮の形態など様々な可能性が指摘されている (11, 13, 14, 15)。一方、事故後に植栽・更新した樹木の放射性 Cs 吸収についての報告例は限られているが、水耕栽培による ^{137}Cs の吸収実験からは根からの吸収量が植物種間で異なることが報告されている (11)。さらに事故後に発芽した草本種間でも、経根吸収に差があることが示され (12)、本研究の結果と矛盾しなかった。

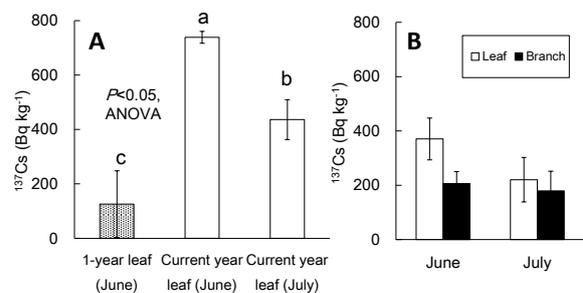


図-1. スギ (A) とアカマツ (B) の枝と葉の放射性 Cs 濃度. スギのバーの上の英小文字は有意差を表す。

Fig. 1. Changes on radiocesium concentration in branches and leaves in *Cryptomeria japonica* (A) and *Pinus densiflora* (B). Different letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

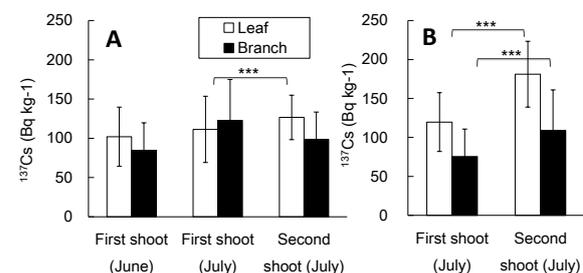


図-2. コナラ植栽個体 (A) と萌芽個体 (B) の枝と葉の放射性 Cs 濃度. アスタリスク (***) は有意差を示す ($P < 0.001$).

Fig. 2. Changes on radiocesium concentration in current-branches and leaves in planted seedlings (A) and sprouted coppices (B) in *Quercus serrata*. Asterisks (***) mean statistical differences ($P < 0.001$, t -test).

また、本調査地で直接汚染を受けたコナラ成木の当年枝の ^{137}Cs 濃度は約 420 (Bq kg^{-1} , 三浦ら未発表) で、本研究のコナラ植栽木や萌芽枝の約 4 倍の濃度を示した。同様の低下は、千葉県内の事故後に植栽したコナラからも報告されている (6)。このことから、事故後に植栽・更新した樹木の放射性 Cs 濃度は、直接汚染木より低くなるのが期待できると考えられた。

2. 葉と枝の放射性 Cs 濃度の変化 調査した 3 樹種の葉の放射性 Cs 濃度は葉齢とともに減少すると考えられた。スギでは、6 月に展葉をはじめた当年葉で ^{137}Cs 濃度が最も高く、7 月の同じ当年葉では約 40% 値が低下した (図-1A)。さらに、6 月に採取した一年葉の値は当年葉に比べ約 6 分の 1 の値に低下しており、葉齢とともに放射性 Cs 濃度が低下すると考えられた。アカマツの葉も、6 月に比べ 7 月の値は約 40% 低下したが、僅かに統計的な有意差はなかった (t -test, $P=0.068$)。一方、アカマツの当年枝の ^{137}Cs は、6 月と 7 月でほとんど同じ値を示した (図-1B)。コナラの植栽と萌芽個体の葉と枝の ^{137}Cs 濃度を比較したところ、葉、枝とも植栽と萌芽個体間で差は見られなかった (図-2, ANOVA, $P>0.05$)。一方、コナラ植栽個体の葉の ^{137}Cs 濃度は、6 月と 7 月の一次枝の葉 (一次葉) で差が見られなかったが、同じ 7 月の一次葉と二次葉を比べると約 10% 値が有意に大きかった (図-2A)。しかし、枝に関しては差がなかった。コナラ萌芽個体の一次と二次枝の葉と枝を比べると、両者とも若い二次枝で値が高く (図-2B, t -test, $P<0.001$)、若い葉で ^{137}Cs 濃度が高まると考えられた。

3. コナラの葉の成熟度と放射性 Cs 濃度の関係 コナラの葉の成熟度は、葉面積当たりの葉重 (LMA) やクロロフィル量の指標となる SPAD 値で推定出来た。7 月に採取したコナラの一次葉に比べ、若い二次葉は、LMA や SPAD 値が半分程度であった (表-1)。樹木の未成熟な葉は、LMA やクロロフィル量が低くなるのが分かっており、これらの値が葉の成熟度の指標になると考え

表-1. コナラの一次葉と二次葉の LMA, SPAD 値, カリウムイオン濃度. **は有意差を示す ($P<0.01$, t -test).
Table 1. Leaf mass per area (LMA), SPAD value, and potassium ion concentration of *Quercus serrata* leaves attached on the first and secondary shoot. Asterisks (**) means statistical differences ($P<0.01$, t -test).

	Planted		Sprout	
	First shoot	Second shoot	First shoot	Second shoot
LMA (g m^{-2})	75.8±2.8**	49.6±2.0**	81.7±2.6**	61.3±1.8**
SPAD	38.4±1.5**	19.8±2.6**	40.2±1.0**	26.4±1.4**
K ion (ppm)	2760±233**	3200±226**	1955±78**	2730±86**

られた (10)。一方、葉の搾汁液中のカリウムイオン濃度は、若い二次葉で有意に高かった (表-1)。他の研究からも、若い葉でカリウム濃度が増えることが指摘されており (9)、本研究の結果と矛盾しなかった。

また、コナラの植栽、萌芽個体とも LMA, SPAD 値と ^{137}Cs 濃度には有意な負の相関がみられ (図-3AB), 未成熟な葉ほど ^{137}Cs 濃度が高くなることが明らかになった。常緑樹を対象とした研究でも、葉の老化とともに ^{137}Cs 濃度が低下することが明らかになっており (15)、本研究で見られた一次・二次葉間での ^{137}Cs 濃度の違いと似ていた。一方、葉の ^{137}Cs 濃度と搾汁液中のカリウムイオン濃度には有意な関係が見られなかった (図-3C)。いくつかの樹種では、Cs と元素特性が似ているカリウム濃度と ^{137}Cs 濃度には正の相関が見られることが指摘されている (14,15,16)。本研究では、搾汁液中のカリウムイオン濃度を用いて比較したが、細胞壁などに吸着しているカリウムなどは十分抽出出来ていないと考えられる。今後、これらの葉内の総カリウム量と ^{137}Cs 濃度の関係を解明することで、カリウムと ^{137}Cs 濃度の関係がより明確になると考えられた。

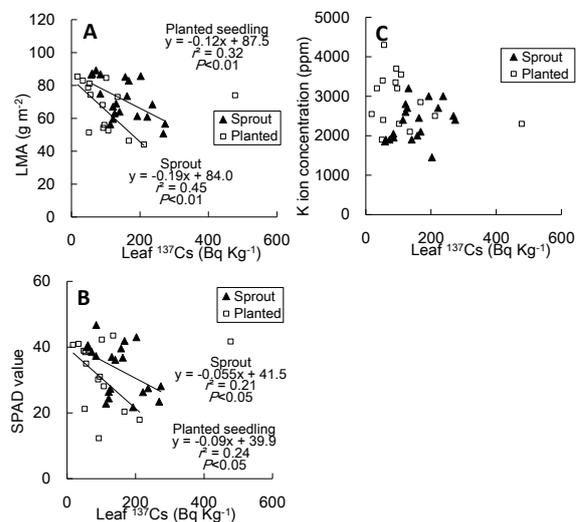


図-3. コナラの LMA (A), SPAD 値 (B), カリウムイオン濃度 (C) と放射性 Cs 濃度の関係. 植栽木の外れ値 1 点は除外して解析した。

Fig. 3. Leaf mass per area (LMA, A), SPAD value (indicator of leaf chlorophyll content, B), and leaf potassium ion content (C) in relation to radiocesium concentrations (^{137}Cs) in *Quercus serrata*. We excluded an outlier of planted trees for the analysis.

4. まとめ 福島原発事故後に植栽・更新した樹木の放射性 Cs 濃度は、直接汚染木に比べ低下する可能性が高いが、放射性 Cs の経根吸収量には種間差があると考えられた。一方、葉の成熟度と放射性 Cs 濃度には密接な関係があり、葉齢とともに放射性 Cs 濃度が低下すると考えられた。しかし、今後、放射性 Cs の経根吸収が続けば樹木体内の放射性 Cs 濃度が高まることも考えられる。実際、アカマツや樹冠上部のヒノキの葉でも事故から数年後に新葉の放射性 Cs 濃度が増加することが報告されていることから(4)、事故後に植栽・更新した樹木の長期的な放射性 Cs 濃度のモニタリングを継続する必要がある。

謝辞

試験地設定や現地調査、分析に際し、ふくしま中央森林組合の関係者各位、森林総合研究所の多くの研究員及び非常勤職員のご協力を頂いた。厚くお礼申し上げます。なお本研究は、森林総研交付金プロジェクト「森林の放射性セシウム動態解明による将来予測マップの提示」、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」、農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業「放射能汚染地域におけるシイタケ原木林の利用再開技術開発」により実施した。

引用文献

- (1) BROADLEY, M. R., and WILLEY, N. J. (1997) Differences in root uptake of radiocaesium by 30 plant taxa. *Environ. Pollut.* **97**:11-15
- (2) BROADLEY, M. R., WILLEY, N. J., and MEAD, A. (1999) A method to assess taxonomic variation in shoot caesium concentration among flowering plants. *Environ. Pollut.* **106**:341-349
- (3) 梶本卓也・高野勉・齊藤哲・黒田克史・藤原健・小松雅史・川崎達郎・大橋伸太・清野嘉之 (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. 森林総研研究報告 **13**:113-136
- (4) 梶本卓也・齊藤哲・川崎達郎ら (2015) 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. 関東森林研究 **66**:159-162
- (5) ICHIE, T., and NAKAGAWA, M. (2013) Dynamics of mineral nutrient storage for mast reproduction in the tropical emergent tree *Dryobalanops aromatica*. *Ecol Res.* **28**:151-158
- (6) 岩澤勝巳・廣瀬可恵 (2015) コナラ植栽木と萌芽

枝における放射性セシウムの動態. 関東森林研究 **66**:131-134

- (7) NAKAI, W., OKADA, N., OHASHI, S., and TANAKA, A. (2015) Evaluation of ¹³⁷Cs accumulation by mushrooms and trees based on the aggregated transfer factor. *J. Radioanalytical Nucl. Chem.* **303**:2379-2389

- (8) TAGAMI, K., UCHIDA, S., ISHII, N., and KAGIYA, S. (2012) Translocation of radiocesium from stems and leaves of plants and the effect on radiocesium concentrations in newly emerged plant tissues. *J. Environ. Radioact.* **111**:65-69

- (9) 堤利夫 (1973) 陸上植物群落の物質循環. 60pp. 共立出版

- (10) ŠESTÁK, Z. (1985) Photosynthesis during leaf development. 396pp. Dr W Junk Publishers.

- (11) SOUDEK, P., TYKVA, R., and VANĚK, T. (2004) Laboratory analyses of ¹³⁷Cs uptake by sunflower, reed and poplar. *Chemosphere* **55**:1081-1087

- (12) 田中憲蔵・梶本卓也・齊藤哲ら (2016) 福島原発事故で汚染された森林における様々な樹木種の放射性セシウム濃度. 関東森林研究 **67**:45-48

- (13) YAMASHITA, J., ENOMOTO, T., YAMADA, M., ONO, T., HANAFUSA, T., NAGAMATSU, T., SONODA, S., and YAMAMOTO, Y. (2014) Estimation of soil-to-plant transfer factors of radiocesium in 99 wild plant species grown in arable lands 1 year after the Fukushima 1 Nuclear Power Plant accident. *J. Plant Res.* **127**:11-22

- (14) YOSHIHARA, T., HASHIDA, S. N., ABE, K., and AJITO, H. (2014). A time dependent behavior of radiocesium from the Fukushima-fallout in litterfalls of Japanese flowering cherry trees. *J. Environ. Radioact.* **127**: 34-39

- (15) YOSHIHARA, T., MATSUMURA, H., TSUZAKI, M., WAKAMATSU, T., KOBAYASHI, T., HASHIDA, S. N., NAGAOKA, T., and GOTO, F. (2014) Changes in radiocesium contamination from Fukushima in foliar parts of 10 common tree species in Japan between 2011 and 2013. *J. Environ. Radioact.* **138**:220-226

- (16) YOSHIHARA, T., MATSUMURA, H., HASHIDA, S. N., and NAKAYA, K. (2016) Radiocesium contamination in living and dead foliar parts of Japanese cedar during 2011–2015. *J. Environ. Radioact.* **164**:291-299

- (17) WANG, W., HANAI, Y., TAKENAKA, C., TOMIOKA, R., IIZUKA, K., and OZAWA, H. (2016) Cesium absorption through bark of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*). *J. For. Res.* **21**:251-258