

# 林産物への放射性セシウムの移行について

村松康行<sup>1</sup>・杉山 翠<sup>1</sup>・大野 剛<sup>1</sup>・佐藤睦人<sup>2</sup>・佐藤 守<sup>2</sup>

キーワード 林産物, 放射性Cs, 山菜, キノコ, 森林生態系

## はじめに

東京電力福島第一原子力発電所の事故（以下、原発事故という）により福島県を中心に森林や農耕地が広範囲に渡って放射能で汚染された。特に森林は福島県の約7割の面積を占めることから、林地の汚染状況やそこでの放射性物質の分布と移行を調べることは重要である。

今回の原発事故後、農耕地については、多くの農作物のモニタリング調査や移行低減化対策が行なわれたが、林地および林産物の調査については必ずしもデータは十分でない。ここでは、最初に、植物生態系（農作物も含める）における汚染の特徴を振り返ってみる。そして、どのような植物がどのような経路を経て放射性セシウム（以下、放射性Cs）を取り込んだのか、また、林地と農地の汚染状況や汚染経路の違い、および、山菜とキノコへの濃縮について我々が行った調査・研究の結果などを紹介する。（注：文中の放射性Cs濃度  $Bq\ kg^{-1}$  は、原則として、採取日における「生重量当り」の「 $^{134}Cs$ と $^{137}Cs$ の合計」とする。）

### 1. モニタリング結果から見た農産物と林産物の汚染

原発事故後、農作物や林産物のうち放射性Csの食品基準値（2011年度： $500\ Bq\ kg^{-1}$ ）を超えた品目を表1に示す。これは、公共機関のモニタリングデータ（厚生労働省、2011, 2012）を参考にし、2011年3月から2カ月ごとにまとめたものである。

2011年3～4月は、葉菜類と原木シイタケから高い値が検出された。葉菜類は大气から葉面への直接沈着であり、シイタケは野外に置いたほど木が汚染されたためである。

5～6月は、タケノコ、茶葉（新茶）、原木シイタケ、コゴミなどで基準値超えが出た。キノコは予測できたが、タケノコ、新茶、コゴミについては過去にデータがなかった。

7～8月は、ユズ、原木シイタケ、茶葉、ビワ、イチジク

クで基準値を超えた。シイタケを除き、高い値が出たものは、常緑の果樹または茶葉である。これらは3月の原発事故時に葉が出ていたため、葉面や幹に付着した放射性Csが新芽や果実に転流したと推定される。小麦や菜種でも基準値を超えたが、これらも3月の時点で葉が出ていたため、葉面に沈着したものが、種子部に転流したものと考えられる。

9～10月は、様々な野生のキノコから基準値を超える値が検出されている。ユズも7～8月に引き続き基準値を超え、果実の中でも特に高い値を示した。

11～12月は、野生のキノコに引き続き高い値が見られた。また、玄米でも基準値超えが出た。（玄米で高い値が見られた地域は土壤中の交換性カリウムが低いことが主な原因と考えられる。）

2011年1～2月は、玄米、キノコ、ユズ、葉わさびが基準値を超えた。葉わさびは多年生の植物であり、直接沈着を受けた株では、転流により高い値を示したと考えられる。また、葉わさびは山間で栽培されることが多く、有機物に富んだ森林土壌に起因している可能性もある。

以上から分かるように、畑作物については高い値はあまり見られず、基準値超えがでたものは、主に、キノコ、山菜、茶葉、ある種の果物に限られていた。

表1 2011年3月以降に基準値を超えた農産物

植物（又はキノコ）の種類	
2011年	ハウレンソウ、ブロッコリー、原木シイタケ、
3, 4月	コマツナ、アブラナ、信夫冬菜、クキタチナ、キャベツ、紅葉苔、ミズナ、パセリ、ビタミンナ、花ワサビ、セリ、カブ、山東菜、チヂレナ、カキナ
5, 6月	タケノコ、生茶、原木シイタケ、コゴミ、カブ、パセリ、ウメ
7, 8月	ユズ、原木シイタケ、生茶、ビワ、イチジク、小麦、ナタネ、原木ナメコ、チチタケ
9, 10月	原木シイタケ、チチタケ、ハツタケ、アマタケ、マイタケ、ナメコ、ユズ、ザクロ、マツタケ、コウタケ、クリタケ、ハタケシメジ、チャナムツムタケ、クリ
11, 12月	玄米、原木シイタケ、クリタケ、ナメコ、原木ムキタケ
2012年	玄米、原木シイタケ、ユズ、葉ワサビ
1, 2月	

注：厚生労働省HP（2011, 2012）より。  
アンダーラインは、畑作物以外のもの（林産物、果実、キノコなど）。

Yasuyuki MURAMATSU, Midori SUGIYAMA, Takeshi OHNO, Mutsuto SATO and Mamoru SATO: Transfer of radiocaesium into forest products

<sup>1</sup> 学習院大学理学部（171-8588 豊島区目白1-5-1）

<sup>2</sup> 福島県農業総合センター（960-0231 福島市飯坂町平野字檀の東1）

## 2. 汚染経路

上で述べた結果から、高い値が出た林産物や農作物の汚染経路をまとめると以下の通りである。

- ①大気から植物葉面への直接沈着(乾性および湿性沈着)
- ②汚染された葉面や樹幹から新器官への転流
- ③菌糸を通じたキノコ(菌類)への取り込み
- ④土壌からの経根吸収

葉面への直接沈着経路(①)は、葉菜類や常緑の樹木の汚染を考えると重要である。モニタリングデータを調べる限り、植物中の放射性Csの一番高い値は、2011年3月21日に福島県本宮町で採取された茎立菜で82,000 Bq kg<sup>-1</sup>であった。これは放射性プルームの流れとも関係している。因みに、この試料の<sup>131</sup>Iの濃度は15,000 Bq kg<sup>-1</sup>であった。<sup>131</sup>Iと<sup>137</sup>Csの比率は地域により大きく違い、原発の北側よりも南側の方が<sup>131</sup>Iの割合が大きかったことが知られている。

林地においても、葉菜類の場合と同様に、葉面への直接沈着の寄与が大きかった。放射性物質の沈着状況は常緑樹林と落葉樹林では大きく異なる。つまり、原発事故が起こった3月の時点を考えて、落葉樹林では葉が出ていなかったため、放射性Csの多くが雨などと共に森林土壌に直接沈着したと考えられる。一方、常緑樹林では葉が茂っていたため、葉など樹冠部に沈着した割合が大きかったと推定される。杉や松の葉は数年間枝についているので、転流により新芽や樹体内へ汚染が広がると考えられる。2012年の初春に杉の花粉から高い値が検出されたのは、樹冠に沈着した放射性Csの転流が影響していると考えられる。また、葉が落ちると森林土壌中の放射性Cs濃度が高くなる。このようにして、常緑樹林では、時間経過と共に表層土壌中の放射性Csは増加している。

つまり、事故直後は、リター層(落葉層)の濃度が高く、時間と共にその下の腐植層に浸透し、徐々に下層に移行していく。リター層や腐植層は有機物含量が高く、粘土鉱物も少ないことから、放射性Csは弱く吸着している。その為、動きやすく、その層に根を張る植物や菌糸を張るキノコに吸収され易い。

## 3. 森林土壌中での放射性Csの深度分布

我々は、2011年4月に福島県郡山市の森林、畑地、水田、果樹園で土壌を採取し、放射性Csの深度分布を調べた。その結果、森林土壌中ではリター層に放射性Csの80%以上が分布しており、その下0~4 cmまで合わせると、約98%に達する。その他の土壌も含め、詳しいデータは、Ohno *et al.* (2012)を参照。その後も調査を行っているが、リター層における濃度は減少し下層に浸透しつつある。しかし、多くが未だにその下5 cm以内の有機物に富んだ層に留まっている。このことから森林に生育する植物で有機物に富んだ表層に根を張るものは放射性Cs濃度が高くなると考える。一方、根を深くに張る樹木には移行しにくいと推定される。

## 4. 山菜中の放射性Cs

## 1) モニタリングデータより

山菜の値が高いことは上で述べたが、この項ではタケノコ、タラの芽、コシアブラに注目して、モニタリングデータ(厚生労働省, 2011, 2012, 2013)を詳しく見てみる。表2に2011年~2013年にかけて、5月に測定されたこれら3種の山菜における放射性Cs濃度の推移を示す。

タケノコの最大値は、2011年が3,100 Bq kg<sup>-1</sup>と基準値を大幅に超えていたが、2012年が550 Bq kg<sup>-1</sup>、2013年が160 Bq kg<sup>-1</sup>と時間経過と共に低下した。また中央値も毎年減少している。

タラの芽の最大値は、2011年が200 Bq kg<sup>-1</sup>であったが、2012年が450 Bq kg<sup>-1</sup>、2013年が1,400 Bq kg<sup>-1</sup>と時間経過と共に高くなる傾向にあった。また、コシアブラ(葉)は、2011年の測定データは無かったので、2012年と2013年を比べると、2,900 Bq kg<sup>-1</sup>から12,000 Bq kg<sup>-1</sup>と高くなっていった。タラノキとコシアブラは、共にウコギ科の樹木(落葉樹)である。これらの値はモニタリングデータのため採取場所などはばらばらであり、一般化はできないが、大まかな傾向を知ることができ興味深い。(移行メカニズムに関しては後で議論する。)

表2 モニタリング結果から見た山菜中の放射性Cs濃度  
(<sup>134</sup>Csと<sup>137</sup>Csの合計値、減衰補正は採取日)

タケノコ		2011年5月	2012年5月	2013年5月
測定数	個	78	86	297
最大値	Bq kg <sup>-1</sup>	3,100	550	160
中央値	Bq kg <sup>-1</sup>	415	44	16
タラの芽		2011年5月	2012年5月	2013年5月
測定数	個	2	88	118
最大値	Bq kg <sup>-1</sup>	200	450	1,400
中央値	Bq kg <sup>-1</sup>	145	41	33
コシアブラ		2011年5月	2012年5月	2013年5月
測定数	個	データ無し	75	92
最大値	Bq kg <sup>-1</sup>	—	2,900	12,000
中央値	Bq kg <sup>-1</sup>	—	190	70

注：厚生労働省 HP (2011, 2012, 2013) より。

2) 現地調査 (タケノコ, コシアブラ等)

モニタリングデータとは別に、比較的線量が高い地域の林地で、山菜および土壌を採取し、放射性Csの移行経路について考察した。

タケノコは、2011年5月に福島市渡利の竹林で可食部、葉、土壌を採取し測定した。得られた結果を図1に示す。タケノコの可食部上部では $1,900 \text{ Bq kg}^{-1}$ 、可食部下部では $780 \text{ Bq kg}^{-1}$ であった。上部の方が高いことから、放射性Csは新しい部位に濃縮し易いと言える。タケノコの皮については可食部上部とほぼ同様な値であった。

土壌中の深度分布を見ると、表層に放射性Csは溜まっている(図1)。竹林の土壌は有機物に富んでおり、根は表層近くに張っているため、放射性Csのタケノコへの移行は経根吸収経路が主であると考えられる。しかし、竹は常緑であり、事故当時は葉が茂っていたので、地上部への沈着量は大きかった。竹の葉は6月ごろに生えかわることから、葉面に付着した放射性Csは、落葉する前にカリウムなどと一緒に樹体内へ吸収され、新生器官であるタケノコに転流した可能性も考えられる。図には示さなかったが、落ち葉層の濃度は $100,000 \text{ Bq kg}^{-1}$ を超える値であり、今後、落ち葉が分解して溶け出した放射性Csが地中に入ってくると、経根吸収からの寄与が大きくなるかもしれない。

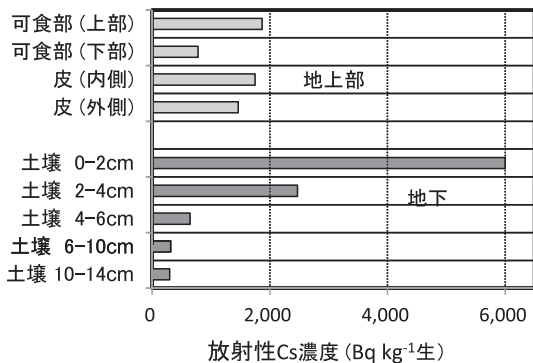


図1 タケノコ及び竹林土壌中の放射性Cs濃度 (<sup>134</sup>Csと<sup>137</sup>Csの合計; 2011年5月, 福島市)

次に、コシアブラとタラノキの葉(タラの芽)の測定結果を述べる。我々は、飯舘村の林地においてコシアブラの葉、タラノキの葉、笹の葉、ツクシ、ヨモギなどを採取し、放射性Csを測定した。結果を図2に示す。最高値を示したコシアブラの葉は約 $20,000 \text{ Bq kg}^{-1}$ と非常に高い放射性Cs濃度であった。隣接する林地で採取したコシアブラの葉は $4,100 \text{ Bq kg}^{-1}$ と前者と比べると1/5程度である。両者は50mくらいしか離れおらず、空間線量率(1mの高さ)も同程度(約 $2.7 \mu\text{Sv h}^{-1}$ )であった。濃度の違いは、土質や放射性Csの深度分布などに関係すると思われる。タラノキの葉も $7,800 \text{ Bq kg}^{-1}$ と高い値を示した。しかし、笹の葉、ツクシ、ヨモギなどは明らかに低い値であった。図には載せていないが、その他、桜の木、シダ類、ワラビなどの植物も調べたが、笹の葉やヨモギと同程度の濃

度であった。これらの結果から見て、ウコギ科のコシアブラやタラノキが放射性Csを吸収し易いと言える。

コシアブラの各部位の放射性Csと安定Cs濃度を測定し、その相関を調べた(図3)。なお、試料の採取場所は、上述したものと異なる。図より分かるように、放射性Cs濃度は、高い順に、葉、根、幹であった。また、安定Csと高い正の相関が認められた。もしも、樹冠に沈着した放射性Csが転流したことが高い濃度の原因だとすると、安定Csとの比は部位ごとに異なるはずである。各部位で比がほぼ一定であることは、転流ではなく、根から吸収していると言えよう。

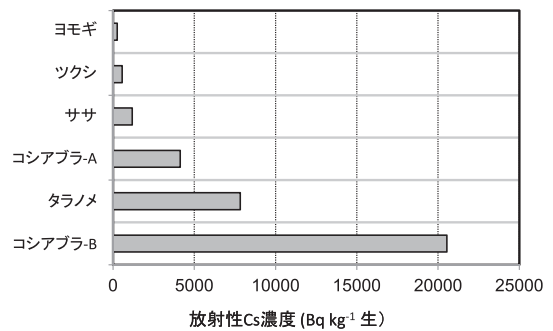


図2 飯舘村の林地で採取した植物中の放射性Cs濃度 (<sup>134</sup>Csと<sup>137</sup>Csの合計; 2013年5月)

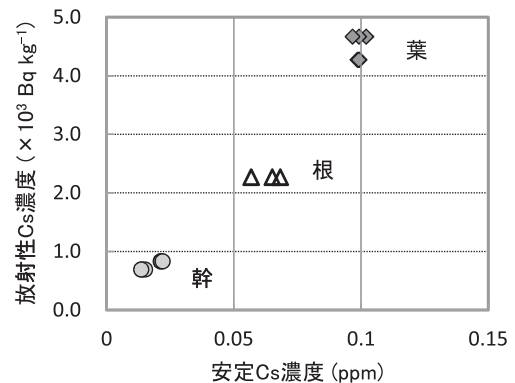


図3 コシアブラの各部位における放射性及び安定Csの相関 (<sup>134</sup>Csと<sup>137</sup>Csの合計; 2013年5月)

コシアブラの根の位置を調べると、表層土壌(落葉層の下に位置する腐植層あたり)に分布している傾向にあった。林地の表層土壌は放射性Csの濃度も高く、有機物に富んでおり、放射性Csは畑土とは異なり、粘土鉱物に吸着しているのではなく、有機物に富んだ層に存在している。そのため、根から吸われ易いと考えられる。また、コシアブラ自体も他の植物に比べ放射性Csの吸収能が高いと思われる。もう一つの可能性としては、根に付いている菌根菌の影響で、まずは菌にセシウムが吸収され、それを經由してコシアブラの樹体に移行したことも考えられる。

現在、試料の種類を増やし、また、様々な安定元素も分析し、コシアブラや森林生態系の植物における放射性Csの取り込みについて調べているところである。



## 5. キノコへの移行

キノコが放射性 Cs を吸収し易いことは福島原発事故以前からも知られている。我々は 1990 年代に様々な日本のキノコに含まれる放射性 Cs を測定した (Muramatsu *et al.*, 1991; Yoshida *et al.*, 1994; 村松・吉田, 1997)。その結果、当時でも  $1,000 \text{ Bq kg}^{-1}$  を超える値が観察された。1960 年代の核実験時に降ってきた放射性 Cs に起因している。ヨーロッパや旧ソ連の国々においてはキノコ中に非常に高い値が検出されているが、それはチェルノブイリ原発事故により放出された放射性 Cs が原因である。

福島原発事故後は、2011 年 9 月に行なわれたモニタリング調査 (厚生労働省, 2011, 2012) で、福島県棚倉町の山林で採取された野生のチチタケから  $28,000 \text{ Bq kg}^{-1}$  を超える放射性 Cs が検出された。また、2012 年 8 月には、栃木県日光市で採取されたチチタケで  $31,000 \text{ Bq kg}^{-1}$  という値も検出されている。

筆者等が、2011 年 9 月に伊達市の山林でキノコを採取し、放射性 Cs を測定した。結果のいくつかを以下に示すと、アカヤマドリダケ:  $2,100 \text{ Bq kg}^{-1}$ 、シロオニタケ:  $560 \text{ Bq kg}^{-1}$ 、タマゴダケ:  $5,400 \text{ Bq kg}^{-1}$ 、ハナホウキダケ:  $2,600 \text{ Bq kg}^{-1}$ 、ムラサキシメジ:  $120,000 \text{ Bq kg}^{-1}$  である。高い値を示したキノコの多くが、落葉層 (リッター層) や表層の腐植層に菌糸を張り、そこから栄養をとっているキノコである。採取時期が事故の年の秋であり、放射性 Cs はごく表層 (落ち葉層や腐植層上部) に多く含まれていた。その為、効率よく菌糸に取り込まれたと推定される。また、キノコは植物と比べ放射性 Cs を吸収し易い傾向にあることが栽培実験からも分かっている (Ban-nai *et al.*, 1994)。

キノコは、森の生態系において分解者として重要な役割を担っている。つまり、枯れ木や落ち葉などを分解することで、植物の栄養となるミネラル分などを森林土壌に供給する。キノコの本体は、菌糸であり土壌や枯れ木などに生育する。福島原発事故で汚染された地域においては、放射性 Cs の多くは表層のリッター層やその下の腐植層に存在する。また、これらの層は有機物に富み、粘土成分が少ないため、放射性 Cs は動きやすい状態にある。そのため、森林表層部に菌糸をはるキノコの値が高くなった。また、菌類の作用により、リッター層や腐植層の分解が進むと、放射性 Cs がより動きやすくなり、森林土壌中に浸透していくと考えられる。そうになると、今後、深いところに菌糸を張

るキノコの濃度も高くなることが予想される。

## 6. おわりに

原発事故により林地や山林が汚染されたが、除染のために広範囲に木を切るわけにはいかない。林地の表層土壌は有機物に富んでいるため、放射性 Cs はそこに根を張る植物や菌糸を張る菌類 (キノコ) に移行し易い。放射性 Cs が一旦、植物や菌類に取り込まれると、森林生態系内に入り、そこで循環する。そのため、林地の植物やキノコの汚染は長期間に渡り続くと予想される。チェルノブイリの例を見ても、野生のキノコ中の放射性 Cs 濃度は未だに高い。また、それを食べているイノシシやシカの肉の値も高い。森林生態系での放射性 Cs の分布や挙動には不明な点も多いため、さらなる研究と継続した調査が必要である。

謝辞:キノコの鑑定に協力して下さった根田仁博士 (森林総合研究所)、山林の案内やサンプリングに協力して下さった奥田博氏に感謝申し上げます。吉田聡 (放射線医学総合研究所) には森林生態系での放射性 Cs や安定元素の分布や挙動について、また、山田明義博士 (信州大学) にはキノコの生態に関して貴重な助言を頂いた。

## 文 献

- Ban-nai, T., Yoshida, S., and Muramatsu, Y. 1994. Cultivation experiments on uptake of radionuclides by mushrooms. *RADIOISOTOPES*, 43, 77-82.
- Muramatsu, Y., Yoshida, S., and Sumiya, M. 1991. Concentrations of radiocesium and potassium in basidiomycetes collected in Japan. *The Science of the Total Environment*, 105, 29-39.
- Ohno, T., Muramatsu, Y., Miura, Y., Oda, K., Inagawa, N., Ogawa, H., Yamazaki, A., Toyama, C., and Sato, M. 2012. Depth profiles of radioactive cesium and iodine released from the Fukushima Daiichi nuclear power plant in different agricultural fields and forests. *Geochem. J.*, 46, 287-295.
- Yoshida, S., Muramatsu, Y., and Ogawa, M. 1994. Radiocesium concentrations in mushrooms collected in Japan. *J. Environmental Radioactivity*, 22, 141-154.
- 厚生労働省 2011, 2012, 2013. 食品中の放射性物質の検査結果. <http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001m9tl.html>
- 村松康行・吉田 聡 1997. キノコと放射性 Cs. *RADIOISOTOPES*, 46, 450-463.
- 村松康行 2012. 福島原発事故による農作物および果実への汚染経路の解明と今後の対策について. *KEK Proceedings*, 2012-6, 1-10.