

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

金子真司・外崎真理雄・清野嘉之・池田重人・黒田克史・田中浩・川崎達郎・齊藤哲・梶本卓也・阿部真・杉田久志・矢崎健一・太田敬之・三浦覚・志知幸治・大貫靖浩・阪田匡司・篠宮佳樹(森林総研)

要旨：東京電力福島第一原子力発電所の事故によって放出された放射性物質の森林における汚染実態を明らかにするために、福島県内の3箇所の国有林に試験地を2011年8月から9月にかけて設置して調査を開始した。測定が終了した大玉村の41年生スギ林の結果は以下の通りであった。樹木(n=3)の放射性セシウム濃度は、スギの葉 11.9 kBqkg^{-1} で最も高く、枝(5.2 kBqkg^{-1})、樹皮(1.3 kBqkg^{-1})がそれに次いで高かった。心材と辺材はそれぞれ 0.027 、 0.014 kBqkg^{-1} 未満と非常に濃度が低かった。林床の堆積有機物は 24.1 kBqkg^{-1} と高く、表層土壌(0-5cm深)は約 1.3 kBqkg^{-1} と落葉に比べてかなり少なく、さらに土壌が深くなるに従いセシウム濃度は急激に低下した。また各サンプルの放射性セシウム濃度と単位面積当たりの重量を掛け合わせて、単位面積当たりの放射性セシウム量を計算して比較したところ、葉、枝、樹皮、堆積有機物、土壌の放射性セシウムが森林全体に占める割合は、それぞれ38、11、1、33、18%であった。すなわち、樹木に森林全体の半分の放射性セシウムが分布し、残りの放射性セシウムの多くが堆積有機物に存在することが明らかになった。

キーワード：放射能汚染、放射性セシウム、スギ林、森林土壌

Abstract : In order to evaluate radioactive contamination of forests caused by the accident at Tokyo Electric Power Company's Fukushima Daiichi Nuclear Power Stations, we set up three experimental sites in national forests in Fukushima prefecture from August through September 2011. In this paper, we showed the preliminary results of the studies at a 41 year-old Sugi (*Cryptomeria japonica*) forest in Otama experimental site. The concentrations of radioactive caesium on/in needle leaf, branch and bark were 11.9 , 5.1 and 1.3 kBq kg^{-1} , respectively, and those of sapwood and heartwood were less than 0.030 kBq kg^{-1} . The highest concentration of 24.1 kBq kg^{-1} was observed in O layer on the ground, while the concentration in mineral soil was 1.3 kBq kg^{-1} at the soil of 0-5cm depth and decreased with depth. We found that half of the total radioactive caesium remained on/in the needle leaves and branches of the trees and the other half existed in the O layer and surface soil.

Key words: radioactive contamination, radioactive caesium, *Cryptomeria japonica*, forest soil

I はじめに

東京電力福島第一原発事故によって放出された多量の放射性物質によって周辺の森林地域は広範囲に汚染された。森林は放射性物質を捕捉する効果が大いと言われているが、事故後の調査事例は少なく実態はほとんど明らかになっていない。今回の事故で放出された主な放射性元素はヨウ素 ^{131}I (I131)、セシウム ^{134}Cs (Cs134)、セシウム ^{137}Cs (Cs137)の3種類である。I131は半減期が8日と短いために事故から200日以上経過した現在ではほとんど残っていないが、Cs134、Cs137は半減期がそれぞれ2.07年、30.1年と長いので、これら放射性物質による放射能汚染はしばらく続くことになる。

セシウムはカリウムと同じアルカリ金属であり、化学物質としての性質はカリウムに類似する。カリウムは植物の3大栄養素の一つであり、細胞内では最も多量に存在する陽イオンである(1)。植物体内における働きは①酵素の活性化、②細胞内のpH・イオンバランス調節、③浸透圧調節への関係が知られている(2, 3)。カリウムは植物体内における移動性が高く、樹木においては古い組織から、若い組織、樹皮の柔組織など細胞分裂が盛んな新しい部位に移動する(3)。放射性セシウムも樹体内でカリウム同様の動きを示すと考えられる(4)。

カリウム等の栄養元素は森林系外との移動量に比べて森林生態系内で内部循環する割合が高いことから、樹木

Shinji KANEKO, Mario TONOSAKI, Yoshiyuki KIYONO, Shigeto IKEDA, Katsushi KURODA, Hiroshi TANAKA, Tatsuro KAWASAKI, Satoshi SAITO, Takuya KAJIMOTO, Shin ABE, Hisashi SUGITA, Ken-ichi YAZAKI, Takayuki OTA, Satoru MIURA, Koji SHICHI, Yasuhiro OHNUKI, Tadashi SAKATA and Yoshiki SHINOMIYA(For. and Forest Prod. Res. Inst., Ibaraki 305-8687), The survey of Radioactive contamination of forests caused by the accident at Tokyo Electric Power Company's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station.

に取り込まれたセシウムも生態系内の内部循環に取り込まれ、長期間森林内に留まると予想される(5)。ただしセシウムは土壌中の粘土に強力に固定される性質をもつために、堆積有機物の分解過程で放出される無機セシウムは土壌に保持され、樹木に吸収される量は小さいとも言われている(5)。

森林生態系内のどこにどれだけの放射性セシウムが存在するかは、放射性セシウムの今後の動態や森林の除染を考える上で必要な情報である。そこで、本研究では、福島県内の森林において樹木の葉、枝、樹皮、幹材、林床の堆積有機物および表層土壌の放射性セシウムの分布状況の調査を行った。

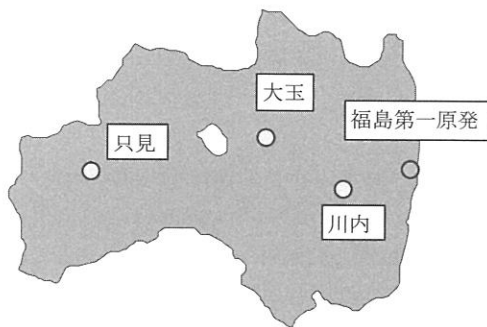


図1 森林放射能調査の試験地

Fig.1 The sites of radioactive contamination survey in forest

II 試験地および方法

福島第一原発から距離の異なる福島県内の3箇所の国有林に2011年8月から9月にかけて調査地を設定した(図1)。福島森林管理署管内の大玉試験地(安達郡大玉村)ではスギ林, アカマツ林, 落葉広葉樹・アカマツ混交林, 磐城森林管理署管内の川内試験地(双葉郡川内村)ではスギ林, 会津森林管理署南会津支署の只見試験地(南会津郡只見町)ではスギ林を対象林分とした。各林分では0.16~0.24haの方形区を設けて区内の胸高直径10cm以上の樹木の胸高直径と20本程度の樹木の樹高, 枝下高, 枝下直径を測定し、幹材積式(6)、枝下直径をパラメータに持つ葉量・枝量の推定式、root-to-shoot比を用いて幹材積や葉、枝、根の重量を推定した。また地上高10cmと1mの空間線量率を方形区の10mグリッド上で測定した。

さらに成長の異なる3本の供試木を選び、伐倒して葉、枝、樹皮および心材、辺材をサンプリングした。樹皮、辺材、心材の重量比を幹の木口断面における各部位の割

合と容積密度から求めた。供試木の伐倒の前に、各供試木の周囲4カ所で堆積有機物と表層土壌を採取した。堆積有機物は25cm×25cmの方形枠内のすべての堆積有機物を採取し、土壌は500mLの土壌採取用円筒(高さ5cm, 面積100cm²)を用いて東西南北4カ所で表層土壌(0-5cm)を採取し、そのうちの1カ所では5-10cm深, 10-15cm深, 15-20cm深の土壌についても採取した。採取試料は研究所に持ち帰り、乾燥・粉碎を行った後に財団法人日本冷凍食品検査協会においてゲルマニウム半導体検出器を用いてガンマ線スペクトロメトリ法で放射性セシウム(Cs134, Cs137)を定量した。葉、枝、樹皮は100mLのU-8容器で、心材、辺材は2Lのマリネリ容器に試料を詰めて測定した。測定時間は土壌が2000秒あるいは3000秒、それ以外はすべて1000秒で行った。部位別の放射性セシウム量の比較は、単位面積当たりの堆積有機物、土壌、樹木の各部位の現存量に、それぞれの放射性セシウム濃度を乗じて単位面積当たりの放射性セシウム量を求めた。

本稿では放射性セシウムの測定が終了した大玉試験地のスギ林(41年生)の結果について報告する。なお大玉試験地の調査は2011年8月8~12日に行い、放射性セシウム分析は同年8月28日~9月5日にかけて行った。

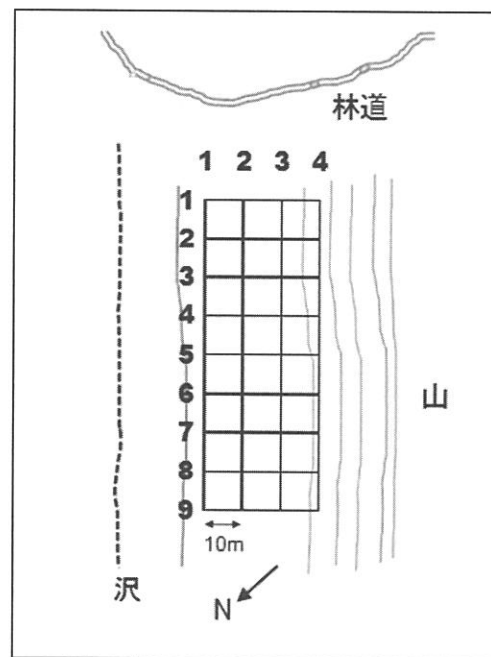


図2 大玉試験地スギ林の生育調査プロット

Fig.2 The design of Otama experimental site

III 結果

1. 空間線量率 大玉試験地は安達太良山麓の緩斜面

上に位置し、スギ林は傾斜5度未満の緩やか地形面に成立していた。生育調査プロットはスギの植栽状況を考慮して横30m、横80mとした(図2)。10m間隔の格子点上で地上10cmと1mで空間線量率を測定した結果、空間線量率は10cmが平均で $0.35 \mu\text{Sv hr}^{-1}$ であり、1m(平均 $0.31 \mu\text{Sv hr}^{-1}$)より有意に高かったが、両者の数値の差は小さかった(図3)。空間線量率は測定点でややばらつき、山側に位置する一列が他の3列に比べて若干高かった。

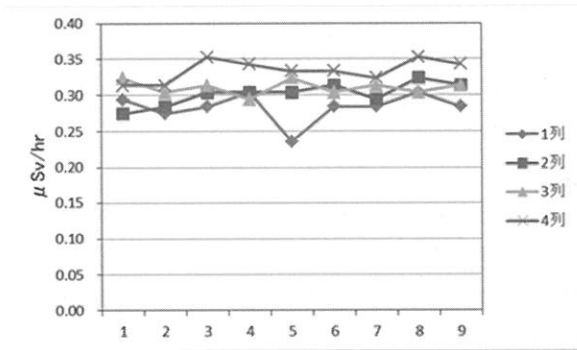


図3 大玉試験地における地上1mの空間線量率の変動
Fig.3 Spatial variation of air dose rate at 1m height in Otama experimental site

2. 放射性セシウム濃度 Cs137 と Cs134 を合計した

放射性セシウム濃度を各試料の乾重あたりで比べると、林床の堆積有機物が 24.1 kBq kg^{-1} と最も高く、次いで葉が 11.8 kBq kg^{-1} であり、枝が 5.2 kBq kg^{-1} であった。樹皮と表層土壌(0-5cm深)はともに 1.3 kBq kg^{-1} であった。材の放射性セシウム濃度に関しては、心材のCs134は3試料とも定量下限未満であり、Cs137については辺材、心材とも3試料のうち1試料が定量下限未満であった(図4)。定量下限未満であった試料は濃度を定量下限値であると仮定した場合の平均濃度は、辺材が $0.027 \text{ kBq kg}^{-1}$ 、心材が $0.014 \text{ kBq kg}^{-1}$ であった。Cs134に対するCs137の比の平均は堆積有機物、葉、枝、土壌、樹皮がそれぞれ1.16, 1.18, 1.32, 1.23であった。

3. 放射性セシウムの存在割合 単位面積当たりの放射性セシウム量は、樹木では葉が 45.5 kBq m^{-2} と最も大きく、次いで枝が 13.2 kBq m^{-2} であり、樹皮が 1.3 kBq m^{-2} であった(図5)。葉、枝、樹皮の放射性セシウム量が堆積有機物や土壌を含めたスギ林全体の放射性セシウム量に占める割合は、それぞれ37.5, 10.9, 1.0%であり、スギ林に蓄積されている放射性セシウムの半分は樹木に存在していた。堆積有機物には 39.5 kBq m^{-2} と全体の32.7%が存在し、土壌の表層0-5cm深には 17.0 kBq m^{-2} と14.6%があり、5-10cm深には 3.0 kBq m^{-2} と2.6%が存在していた。なお根については測定していないため不明である。

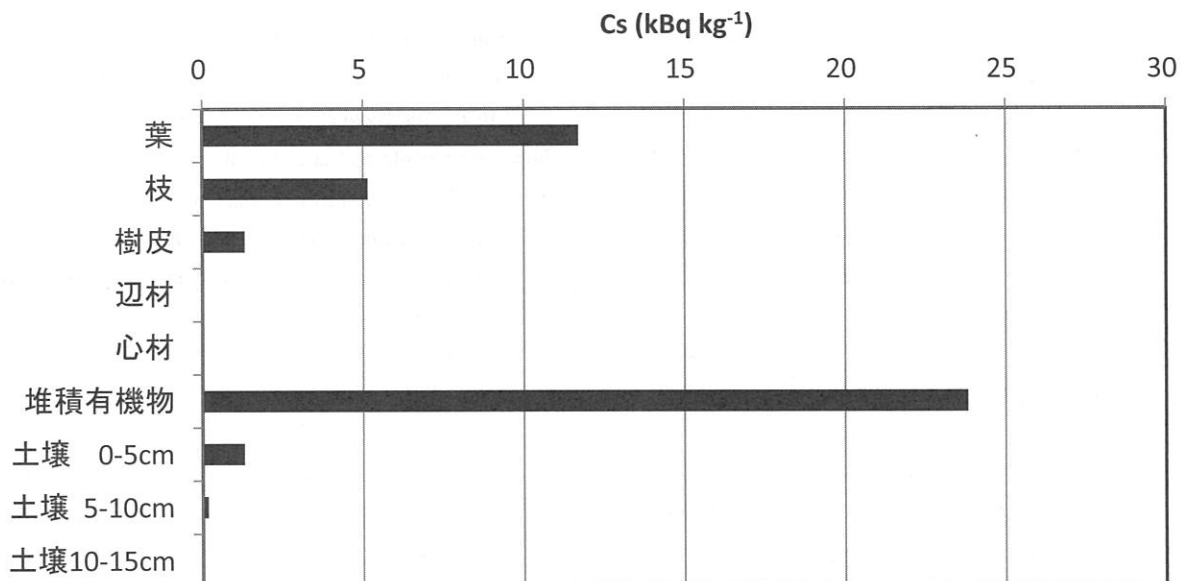


図4 大玉村スギ林の部位別の放射性セシウム濃度(乾燥重量当たり)
Fig.4 Radioactive caesium concentration in each component in the Sugi forest in Otama experimental site

IV考察

地表から 10cm の空間線量率が 1m に比べて高かった理由は堆積有機物の放射性セシウムの濃度が高かったためと考えられるが、葉や枝など樹体に約半分の放射性セシウムが付着しているために、地上 10cm と 1m の空間線量率に大きな差がなかったと推定される(図 3)。

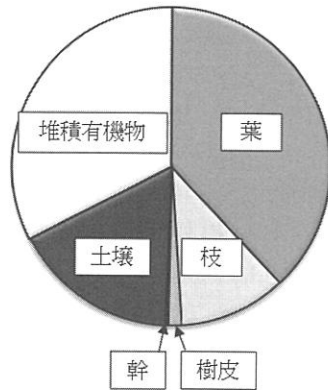


図 5 大玉試験地スギ林における放射性セシウムの部位別割合(単位面積当たりの放射性セシウム量で比較)

Fig.5 Composition of radioactive caesium in the Sugi forest in Otama experimental site

スギ林の放射性セシウムは樹体に全体の半分が存在し、堆積有機物に 3分の1 が存在していた。スギ林は常緑樹であり、事故当時着葉していたため多量の放射性セシウムが付着したと推定される。セシウムは水に溶けやすい(7)ので事故後の降雨によって付着したセシウムの一部は洗い流されたはずである。現在も多量に残る理由について今後検討が必要であろう。表層土壌の放射性セシウム量は森林全体の 20%未満と少ないが、堆積有機物の分解に伴って放射性セシウムが土壌に移行していくとみられる。このことから、森林の放射線量を低下させるために、堆積有機物が分解する前に除去するのがよいといえる。スギの場合には調査の時点では葉や枝に放射性セシウムの半分が存在していた。スギの葉の寿命は平均 4 年程度と長いので、葉や枝に付着した放射性セシウムは今後数年をかけて地面に落ちてくることが予想される。地面に落ちてきた枝葉を毎年取り除けばさらに放射線量を低下させることができる。このように林床の落葉を取り除くことで、放射性物質の多くを森林から取り除くことができるであろう。ただし森林はその面積が大きいため、除染を行うためには非常に多くの労力を必要とする。また落葉層の除去は養分を失うことになるので森林へのダメージは大きい。さらに雨滴から土壌の浸食を防止して

いる堆積有機物層の除去は表土の流亡を招くおそれがある。以上の理由から森林の除染については細心の注意が必要である。

今回の調査から森林の心材と辺材の中の放射性セシウム濃度は、ゲルマニウム半導体検出器の定量限界程度かそれ以下であった。ただし材中の放射性セシウムは根からの吸収によって今後徐々に濃度が上昇し、ピークに達するのに 15 年を要するという予測もある(8)。チェルノブイリの周辺地域とわが国とは、森林の樹木の種類、気候条件、地質、地形、土壌等の環境条件が異なることから、樹木への放射性セシウム移行や樹体内での移動については今後継続調査していく必要がある。

謝辞

本研究は森林総合研究所交付金プロジェクト「東日本大震災緊急調査」により行われた。現地調査では関東森林管理局福島森林管理署、磐城森林管理署、会津森林管理署南会津支署、森林組合、市町村の方々に多大なるご協力をいただきましたこと深く感謝します。

引用文献

- (1) 茅野充男(編)(1991)現代植物生理学(5)物質の輸送と貯蔵, 朝倉書店, 196pp.
- (2) PALLARDY, S. G. (2007) Physiology of woody plant 3rd ed. Academic Press, New York
- (3) MARSHNER, H. (1995) Mineral nutrition of higher plants, 2nd ed., Academic Press, London.
- (4) 日本土壌肥料学会, 原発事故関連情報(5):セシウム(Cs)の植物移行とそのメカニズム.
<http://jssspn.jp/info/nuclear/cs-1.html>
- (5) IAEA (2006) Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: twenty years of experience, report of the Chernobyl forum expert group.
- (6) 細田和男・光田靖・家原敏郎(2010) 現行立木幹材積表と幹材積式による計算値との相違およびその修正方法. 森林計画学会誌 44, 23-39
- (7) 日本土壌肥料学会, 原発事故関連情報(1):放射性核種(セシウム)の土壌-作物(特に水稻)系での動きに関する基礎的知見 <http://jssspn.jp/info/nuclear/post-15.html>
- (8) GOOR, F., THIRY, Y. (2004) Processes, dynamics and modelling of radiocaesium cycling in a chronosequence of Chernobyl-contaminated Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations. Science of the Total Environment 325, 163-180.