

森林生態系の自浄作用 (Self-Cleaning) としての ^{137}Cs 下方移行

高橋 純子

Takahashi Junko

1. はじめに

福島第一原子力発電所事故により、およそ 2.7 PBq の ^{137}Cs が陸域に沈着し、その面積の約 67% は森林である¹⁾。 ^{137}Cs 沈着量が 100 kBq m^{-2} 以上と高濃度に汚染された森林は 2600 km^2 に及ぶが、森林除染は「生活圏」と定義された林縁部から 20 m の範囲に限定されており、除染が実施された森林は 104 km^2 に過ぎず、大部分は手付かずのままとなっている²⁾。年間被ばく線量が 1 mSv を超えるすべての森林を除染した場合の総費用は 16 兆円を超えるという推定³⁾があるほか、事故から 14 年が経過した現在では沈着した ^{137}Cs の 90~95% 以上が既に土壌層に移行しており、従来の落ち葉かきを中心とした除染方法では ^{137}Cs の除去効率が悪く、更なる森林除染は現実的ではない。福島県の林業産出額は、2022 年度に初めて震災前を上回り、林業従事者も増加しているものの、森林整備（間伐）面積は依然として事故前の 6 割程度に低迷している⁴⁾。帰還困難区域や旧避難区域における適切な森林管理の再開は復興へ向けた大きな課題の 1 つである。

近年、土壌汚染の浄化や管理の分野では持続可能性がますます重視され、社会経済的側面や二次的な環境影響を考慮した“green and sustainable remediation (GSR)”という概念が発展している。膨大なエネルギーと費用を必要とする人工的な浄化・管理ではなく、地域ごとの自然のプロセスやサイクルに基づく対策は、まだ事例は限られているものの、GSR を達成するアプローチの 1 つとして注目されている⁵⁾。今後の森林除染に関しても、伐採や落ち葉かき等の

放射性物質の直接除去が現実的ではない以上、このような自然のプロセスに基づく新しい除染・管理方法が求められている。そのためには森林生態系内での ^{137}Cs の分布状況やその経時変化といった自然のプロセスを把握することが重要である。

森林に沈着した ^{137}Cs はまず樹冠や幹にトラップされ、その後時間をかけて降雨や落葉と共に林床へ降下し、更に落葉落枝（リター）層から鉍質土壌層へと移行する。 ^{137}Cs は土壌に非常に強く吸着し、長期的に土壌表層に留まることになる。事故後数年間は森林の樹冠や樹皮に付着した ^{137}Cs の直接吸収が無視できないが、現在では根からの吸収が樹木への ^{137}Cs の唯一の取込み源となっている⁶⁾。吸収された ^{137}Cs の一部は再び落葉となり森林生態系内を循環することから、根による ^{137}Cs 吸収量は、将来の森林生態系の長期的な ^{137}Cs 動態を支配する最も重要な因子であるといえる。しかしながら、実際のフィールドにおいて ^{137}Cs 吸収量を直接測定することは不可能であり、樹木根中の ^{137}Cs 濃度に関する研究でさえ、そのサンプリングと前処理の煩雑さから極めて少ない。

そこで、本稿では、2011~2023 年にかけて福島県川俣町山木屋地区（旧計画的避難区域）のスギ林において実施したリター層、鉍質土壌層及びスギの細根中の ^{137}Cs の深度分布調査を紹介する。そして、これらのモニタリング結果に基づき、今後の森林復興へ向けて自然のプロセスを最大限に活用した管理方策について考察する。

2. 調査地と方法

本研究の対象地は福島第一原子力発電所から北西約 35 km に位置する川俣町山木屋地区（旧計画的避難区域）のスギ林とした。同地区は 2017 年 3 月に避難指示区域の指定が解除されたものの、研究対象地であるスギ林は事故以降これまで間伐が行われておらず、林内は暗く下層植生はほとんど見られない。このスギ林内の比較的平坦な面に調査プロットを設け、2011 年から継続して年に一度、スクレーパープレートと呼ばれる土壌採取用具を用いて、15 cm × 30 cm の範囲を深さ 5 mm 間隔でサンプリングしている。本研究では、2012、2015、2017、2020、2023 年の土壌試料から更にスギの根をピンセットで 1 つずつ分取し、超音波洗浄により付着している土壌粒子を取り除いた後粉碎し、 ^{137}Cs 濃度を測定した。また、2011 年についても別の手法によって採取した土壌試料（0–20 cm）を用いて根を分取した。このとき、養分吸収を行い、当年性の根であると考えられる直径 0.5 mm 以下の細根を測定対象とした。

3. リター層及び土壌中 ^{137}Cs 深度分布の経年変化

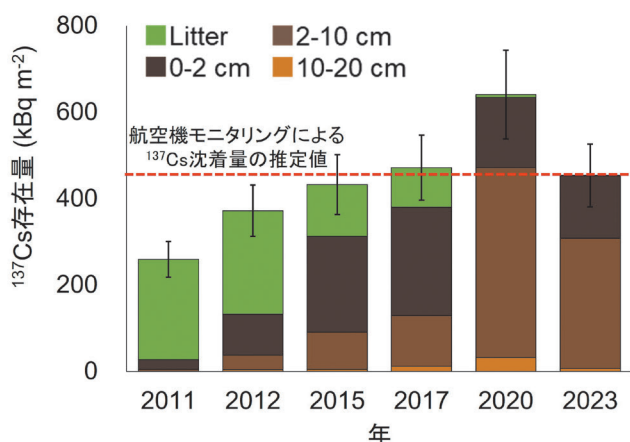
図 1a に示すように、リター層及び土壌中の ^{137}Cs 存在量は、2017 年頃まで時間と共に増加した。この地点の ^{137}Cs 初期沈着量は、2011 年 5–7 月にか

けて実施された第 3 次航空機モニタリングによると約 440 kBq m^{-2} （2011 年 7 月 2 日時点）と推定されており、事故後にスギの樹冠に沈着した ^{137}Cs は、そのほとんどが 2017 年頃までに落葉や降雨等によって林床に到達したことが確認された。林内の ^{137}Cs 沈着量は非常にばらつくことが知られているが⁷⁾、2020 年の特に高い ^{137}Cs 存在量は、スギの幹付近で採取したことによる樹幹流の影響であると考えられる。

その深度分布を見ると、2011 年には 90% 以上の ^{137}Cs がリター層に分布しているのに対し、2023 年にはその割合は 0.2% まで減少しており、 ^{137}Cs はリター層から土壌層へと急速に下方移行していることが明らかとなった。このようなリター層中 ^{137}Cs の時間に対する指数関数的な減少は、直線的な減少であったチェルノブイリ原子力発電所事故の影響地域の森林よりも速く、より温暖で多雨な福島で顕著な特徴である。

更に、2020 年頃からは土壌最表層（0–2 cm）から次表層（2–10 cm）への移行も顕著に現れている。一方で、土壌 10 cm 以深の ^{137}Cs 存在量はいずれの年も 5% 未満であり、時間変化も明確ではなく、依然として表層 10 cm の中に沈着した ^{137}Cs の 95% 以上が保持されていることが明らかとなった。言い換えれば、20 cm 以深への下方移行は極めて少なく、地下水に到達するリスクは非常に低い。

(a) リター層および土壌層



(b) スギ細根

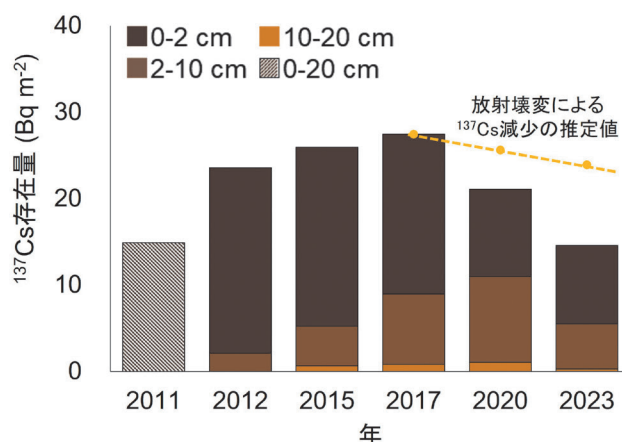


図 1 ^{137}Cs 存在量の経時変化

(a) リター層及び土壌層 (b) スギ細根（直径 0.5 mm 以下）

4. スギ細根中の ^{137}Cs 深度分布の経年変化

スギ細根中の ^{137}Cs 存在量は、2017 年頃まではリター及び土壌層と同様に増加していたものの、2020 年からは減少傾向にある（図 1b）。これは、2017 年を基準とした時の放射壊変による ^{137}Cs 減少よりも大きい減少率で、特に土壌 0–2 cm 深の細根中の ^{137}Cs が減少している。

その理由を明らかにするために種々の相関分析を行ったところ、土壌 0–2 cm 深の細根中 ^{137}Cs 濃度は、同じ深度の土壌中の ^{137}Cs 濃度ではなく、リター層中の ^{137}Cs 濃度との間に高い正の相関があることが確認された（図 2a, b）。つまり、リター層中の ^{137}Cs 濃度が時間と共に減少したことを強く反映して、0–2 cm 深の細根中の ^{137}Cs 濃度が減少したと考えられる。一方、2–20 cm 深では、細根中 ^{137}Cs 濃度と根と同じ深度の土壌中の ^{137}Cs 濃度の間に正の相関が認められた（図 2c）。そのため、2–20 cm 深では時間と共に細根中 ^{137}Cs 濃度は増加する傾向にある。

また、養分吸収を行う細根は表層に集中しており、そのバイオマス量は深さに伴い指数関数的に減少した。具体的には、0–2 cm 深だけで 0–20 cm 深全体の 28% を、0–4 cm 深で 51% を占める。そのため、0–2 cm 深の細根中の ^{137}Cs 濃度が低下することは、細根全体の ^{137}Cs 存在量、すなわち ^{137}Cs 吸収量を低下させる効果が非常に高く、反対に 2 cm 以深の細根中の ^{137}Cs 濃度が高くなったとしても、細根の量自体が少なくなるため、細根による ^{137}Cs 吸収量は減少する。このことから、わずか数 cm でも土壌中

で ^{137}Cs 下方移行が進めば、樹木による ^{137}Cs 吸収量が減少することが期待される（図 3）。

木材中 ^{137}Cs 濃度の経年変化を調べた研究でも、本研究と同様に最初は ^{137}Cs 濃度が増加するものの、次第に減少に転じたことが報告されている⁸⁾。その理由として、これまでは木の成長（木材の体積の増加）に伴う ^{137}Cs の希釈や土壌中の ^{137}Cs 固定化の進行が挙げられていた。本研究で明らかになった土壌中の ^{137}Cs 下方移行に伴う ^{137}Cs 吸収量の低減効果は、5 mm 間隔という非常に詳細なモニタリング調査だからこそ発見できたものと考えている。

5. 森林生態系の自浄作用 (Self-Cleaning) 効果

筆者らは、 ^{137}Cs の下方移行に伴うこの効果を森林生態系の自浄作用とみなすことを提案している⁹⁾。自浄作用とは、自然のプロセスによって放射性核種の濃度が低下することを指す用語であり、チェルノブイリ原子力発電所事故後、河川や海洋等水域生態系において、雨水や流入河川水による希釈や拡散等のプロセスが ^{137}Cs 濃度を低下させる自浄作用として報告されている¹⁰⁾。陸域、特に森林生態系ではほとんど着目されてこなかった作用であるが、わずか数 cm でも下方に移行した ^{137}Cs は、細根によって吸収され、また落葉として地表面に戻ってくるという森林生態系の活発な循環から除外されるため、これは自然のプロセスによる除染効果と言える。更に、土壌自体に放射線を遮蔽する能力が

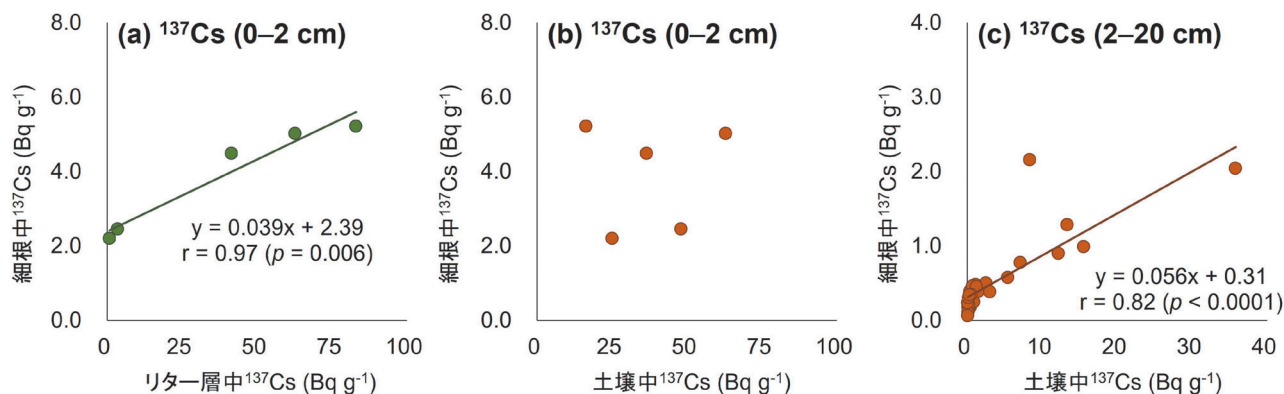


図 2 0–2 cm 深における細根中 ^{137}Cs 濃度と (a) リター層中 ^{137}Cs 濃度、(b) 0–2 cm 深の土壌中 ^{137}Cs 濃度及び (c) 2–20 cm 深における細根中 ^{137}Cs 濃度と土壌中 ^{137}Cs 濃度の関係

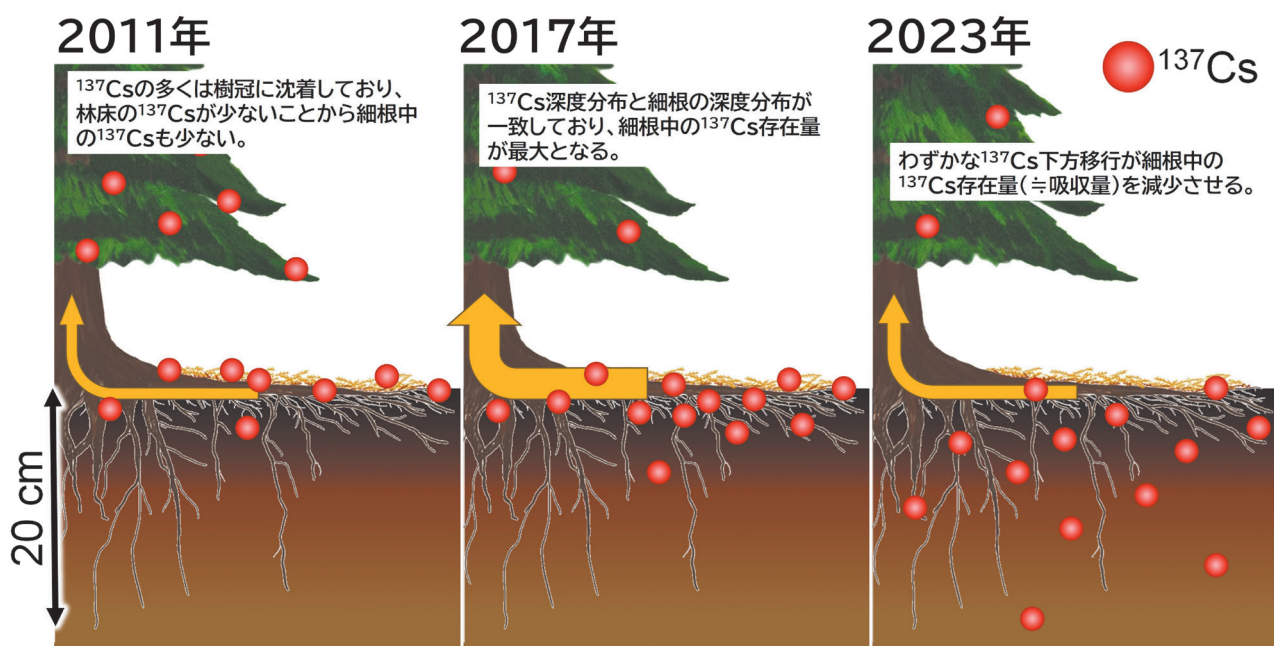


図3 ^{137}Cs 下方移行による自浄作用 (Self-Cleaning) 効果の概念図

あることから、わずかでも ^{137}Cs 下方移行が進むことで、森林内の空間線量率も大きく下がることが分かっている¹¹⁾。

樹木への吸収のみならず、空間線量率の面からも ^{137}Cs 下方移行の除染効果は高いことが期待されるが、帰還困難区域・旧避難指示区域の森林を何もしないで放置することが良いというわけではない。間伐や枝打ち等の管理がなされずに人工林が放棄されると、密になった樹冠が閉じて林内に光が届かなくなり、下草が衰退し、森林下流域に ^{137}Cs を流出させる土砂侵食のリスクは高くなる。一方、間伐等の適切な森林管理を行えば樹冠が開け、林内に到達する雨と日射量が増加する。これは、健全な森林生態系が維持されるだけでなく、リターや土壌有機物の分解を促進し、降雨の浸透によって ^{137}Cs の下方移行を促進する効果があることも期待される。

筆者らは現在、間伐によって ^{137}Cs 下方移行が促進されるかどうかの検証実験を行っており、この自浄作用効果を活用した新たな森林除染方策の提案を目指している。こと放射性物質に関しては「完全な浄化」が望まれがちであるが、地道なモニタリング

研究に基づいた根拠のある GSR として市民の理解を得ていきたいと考えている。

参考文献

- 1) Onda, Y., *et al.*, *Nat. Rev. Earth Environ.*, **1**, 644-660 (2020)
- 2) 川崎, 日本災害復興学会論文集, **18**, 1-10 (2021)
- 3) Evrard, O., *et al.*, *Soil*, **5**(2), 333-350 (2019)
- 4) 福島県農林水産部, 福島県農林水産業の現状(2024)
- 5) Keesstra, S., *et al.*, *Sci. Total Environ.*, **610-611**, 997-1009 (2018)
- 6) Ohashi, S., *et al.*, *Sci. Rep.*, **12**(1), 1-12 (2022)
- 7) Kato, H., *et al.*, *J. Environ. Manage.*, **314**, 115064 (2022)
- 8) Hashimoto, S., *et al.*, *J. Environ. Radioact.*, **238-239**, 106721 (2021)
- 9) Takahashi, J., *et al.*, *Sci. Total Environ.*, **945**, 174010 (2024)
- 10) Santschi, P. H., *et al.*, *Environ. Sci. Technol.*, **24**(4), 519-527 (1990)
- 11) Saito, K., *et al.*, *Radiat. Prot. Res.*, **44**(4), 128-148 (2019)

(筑波大学 放射線・アイソトープ地球システム研究センター)