フェロシアン化鉄（紺青顔料プルシアンブルー）の施用が 土壌からコナラ苗木への放射性セシウム移行に及ぼす影響

近藤 晃^{*1)}・鈴木拓馬²⁾・伊藤 愛¹⁾・加藤 徹¹⁾

1) 静岡県農林技術研究所 森林・林業研究センター

2) 静岡県交通基盤部森林整備課

摘要：フェロシアン化鉄（プルシアンブルー（PB））施用が土壌からコナラ樹体への放射性セシウム（Cs）移行に及ぼす影響を検討した。ワグネルポットを用い、Csを含む土壌1 L当たりPB0.1 g 土壌混合、PB1.0 g 土壌混合、PB1.0 g 土壌表面散布および無施用（対照）の4水準で2年生コナラ苗木を1生育期間、灌水等に伴うCsの系外流出がない閉鎖系で育苗した。その結果、PB施用がコナラ苗木の成長に及ぼす短期的な影響は認められなかった。一方、根系を含むコナラ樹体全体に含まれるCs濃度はPB施用区が対照区より低く、土壌からコナラ樹体へのCs移行係数は、PB施用区が0.11～0.15で対照区より有意に低く、PB施用がCs移行の低減化に有効であることが認められた。

キーワード：放射性セシウム、プルシアンブルー、フェロシアン化鉄、移行係数、コナラ、福島第1原発事故

1. はじめに

福島第一原発事故で降下した放射性セシウム（以下Csという）は森林生態系内のリター層および土壌表層に主に蓄積され、それらは樹木の経根吸収に伴い再び植物体へ移行し^{3, 4, 6, 12)}、その吸収能力は植物種で違いがあることが報告されている⁸⁾。コナラ（*Quercus serrata* Murray.）は重要なしいたけ原木であるが、ほだ木からシイタケ子実体へCs移行が明らかとなり、Cs汚染がない原木が求められている¹⁾。鈴木ら⁹⁾は紺青顔料プルシアンブルー（以下PBという）をほだ木に散布することによりほだ木からシイタケ子実体へのCs移行を低減させることを明らかにし、その施用技術を開発した。このPBはフェロシアン化第2鉄に属し、ペンキ、インクおよびクレヨンなどの青色顔料として使われており、その結晶構造は立方晶でジャングルジムのような空隙を持つことから、その空隙にセシウムイオンを選択的に吸着する能力があるといわれている^{5, 13)}。そこで、著者らは今後森林生態系内のCsの物質循環、特に土壌から植物体へのCs移行の低減化を図るため、PB施用が土壌からコナラ樹体へのCs移行に及ぼす影響を検討した。

2. 材料および方法

2.1 供試材料

試験に供した土壌は、2012年4月5日、静岡県伊東市地内のコナラ・クヌギ原林木内で採取したもので、リター層を剥皮後に地表面から2 cm厚の表層土を掻き取った適潤性黒色土のA層部分の森林土壌である。

コナラ苗木は、2009年10月に静岡県浜松市浜北区地内で採取したコナラ堅果を2010年4月に赤玉土と鹿沼土を2:1の容積比で混合した用土を詰めたビニールポットに播種し、緩効性肥料（N:P₂O₅:K₂O=14:12:14）を加えて、同地区に所在する静岡県森林・林業研究センター構内のガラス室で育成した2年生ポット苗である。なお、土壌採取時の空間線量は0.12～0.14 μSv/h（シンチレーション式サーベイメータ、（株）堀場製作所、PA-1000）、育苗試験地のそれは0.04～0.05 μSv/h（同）である。

2.2 試験方法

2012年5月14日、土壌およびコナラ苗木を用いて表-1に示す試験を設定した。すなわち、PB_{0.1}混合区は森林土壌にPB粉末（大日精化工業（株）、MF4905）を土壌1 Lあたり0.1 g混合した用土、PB_{1.0}混合区は同土壌にPB粉末を1.0 g混合した用土およびPB_{1.0}散布区は同土壌にPB粉末を1.0 g表面散布した用土をそれぞれ4 L用い、磁器製ワグネルポット1/5000 a（開口面積200 cm²、以下、ポット）にコナラ苗木を3本ずつ植え付けた。また対照区としてPBを施用しないポットを設けた。以上の4試験区について、各3反復、計12ポットを設けた。そして、降水や乾性降下物質によりCsの影響がないガラス室内にて、適宜水道水を灌水しながら無施肥で育苗した。これは経根吸収によって植物体へ移行するCsが同族のカリウムの影響を強く受けるといわれるため¹¹⁾、無施肥での試験とした。なお、ポットから排出した水はシャーレで受けて、再びポットへ施用するなど、ポット外へ

* 連絡先著者：E-mail : akira1_kondo@pref.shizuoka.lg.jp 〒434-0016 静岡県浜松市浜北区根堅 2542-8

表-1 試験に供したプルシアンブルーの施用量と施用法

	土壌体積 (L)	プルシアンブルー 施用量(g/土壌1L)	施用法
PB_0.1混合区	4.0	0.1	混合
PB_1.0混合区	4.0	1.0	混合
PB_1.0散布区	4.0	1.0	表面散布
対照区	4.0	—	—

PB (プルシアンブルー) の土壌 1 L 当たりの施用量と施用法を示す。各ワグネルポットには土壌 4 L を使用。

写真-1 ガラス室における土壌からコナラ苗木への放射性セシウム移行試験

ポットへの灌水およびその排水は同一ポットへ施用し、系外へ放射性セシウムの流出がない閉鎖系での育苗試験

の Cs 流出がない閉鎖系で育苗試験を行った (写真-1)。試験に供した期間は 222 日である。

1 成長期後の 2012 年 11 月 2 日にポットから苗木および土壌を抜き取った後、根系に付着した土壌を刷毛できれいに取り除いた。その結果、目視で確認される土壌の付着はなかったが、念のために根系表面を軽く流水で洗浄した。その後、植物体を地下部 (根系) と地上部 (幹および枝葉) に切り分け、さらに地上部は同化器官 (葉) と非同化器官 (幹および枝) に分別して、105 °C にて各部位の絶乾重を測定した。

放射性セシウム濃度の測定については、各ポットごとに植物体は地上部と地下部を含めた苗木 3 本を全てまとめてミキサーで粉碎したもの、土壌は風乾したものを乳鉢で粉碎したものをそれぞれ四分法で縮分して分析に供した。分析は、U8 容器 (100 ml) へ充填し、Cs134 と Cs137 の放射能をゲルマニウム半導体検出器 (キャンベラジャパン (株), GC2020 または GC4020) で定量した。

解析には、半減期が短い Cs134 と長い Cs137 の合計値について、試料絶乾重あたりの Cs 濃度 (Bq/kg) のデータを用いた。移行係数は樹体および土壌に含まれる Cs 濃度の比率を示す。さらに、コナラ苗木の Cs 吸収率はポットごとにコ

ナラ樹体 Cs 量/(コナラ樹体 Cs 量+土壌 Cs 量)で算出した。

3. 結果および考察

図-1 にプルシアンブルー施用がコナラ樹体の部位別現存量に及ぼす影響を示す。1 成長期後のコナラ苗木全体の現存量 (3 本/ポット) は、PB_0.1 混合区が 83.4 g、同 1.0 混合区が 78.1 g、同 1.0 散布区が 84.4 g および対照区が 76.3 g であり、樹体全体、並びに根系、幹・枝および葉の各部位別重量には処理間に有意な差異は認められなかった (ANOVA, $0.05 < p$)。苗木の部位別現存量の配分比は、根系が全体の 60 %、幹・枝が 20 % および葉が 20 % で、地下部の現存量が半分以上を占め、根系がポット内の土壌全体に伸長している状態であった。これは 1 年生クヌギ苗を苗畑で育成した場合の部位別重量比の値²⁾と近似しており、根系の現存量が大きいのはナラ類の苗木の特徴と推察される。一方、PB はその結晶構造中に Cs イオンを吸着、固定するといわれているため¹³⁾、コナラ苗木の成長に必要な各種養分元素が同様に吸着、固定された場合、成長の減退が危惧されるが、本試験に用いた PB1.0 g/L 以下程度の施用量ではコナラ苗木の初期成長において短期的な成長減退等のマイナスの影響はないことが認められた。

図-2 および図-3 にプルシアンブルー施用がコナラ樹体および土壌の放射性セシウム濃度に及ぼす影響を示す。1 成長期後のコナラ樹体の Cs 濃度は、PB_0.1 混合区が 135.2 Bq/kg、同 1.0 混合区が 99.5 Bq/kg、同 1.0 散布区が 82.6 Bq/kg および対照区が 160.8 Bq/kg であり、処理間に有意な差異が認められた (ANOVA, $p=0.028$)。一方、土壌における Cs 濃度には処理間に有意な差異は認められなかった

図-1 プルシアンブルー施用がコナラ樹体の部位別現存量に及ぼす影響

苗木 3 本/ポットの値で、ns は ANOVA により水準間に有意差がないことを示す。

(ANOVA, $p=0.073$)。このことから、PB 施用は土壌中の Cs 濃度には影響を及ぼさないが、土壌中 Cs のコナラ樹体への移行を低減する効果があると認められた。特に PB_1.0 散布区の樹体 Cs 濃度は対照区の半分程度に低減することが確認された。林野庁は原木やほだ木の Cs 安全基準として 50 Bq/kg を設定し、この値を超えるものは使用しないことを求めている⁷⁾。本試験では Cs_1.0 散布区でも樹体 Cs 濃度は 82.6 Bq/kg で林野庁が示す基準値を超えていた。しかしながら、本試験では若いコナラ苗木を用いた上に、葉や根を含む樹体全体を込みにして Cs 濃度を測定しているため、原木として将来用いられる幹部への移行および蓄積はより低い値になるものと推測される。

図-2 プルシアンブルー施用がコナラ樹体の放射性セシウム濃度に及ぼす影響
異なる英字間には Fisher の最小有意差法により水準間に 5 %水準で有意差があることを示す。

図-3 プルシアンブルー施用が土壌の放射性セシウム濃度に及ぼす影響
ns は ANOVA により水準間に有意差がないことを示す。

図-4 にプルシアンブルー施用が土壌からコナラ樹体への放射性セシウム移行係数に及ぼす影響を示す。1 成長期後の移行係数は、PB_0.1 混合区が 0.15, 同 1.0 混合区が 0.12, 同 1.0 散布区が 0.11 および対照区が 0.20 であり、処理間に有意な差異が認められた (ANOVA, $p=0.034$)。特に PB_1.0 混合区および同散布区の移行係数は対照区の 55~60 %に低下した。移行係数は土壌中 Cs 濃度から植物体（可食部など）中 Cs 濃度を類推するための移行パラメータであり、移行係数を土壌中 Cs 濃度に掛けることにより、おおよその植物体中 Cs 濃度を求めることができる¹¹⁾。また土壌から植物体への Cs 移行係数は、植物種、土壌種および粘土鉱物組成などの様々な要因によって異なるといわれ¹¹⁾、同一種でも調査地で異なることが指摘されている⁸⁾。本試験に供したコナラ苗木は、その育成経過上、外界からの Cs 付加がないものと推測されることから、対照区の Cs 移行係数 0.20 はコナラ苗木の値としてはじめて示した事例と考えられる。そしてこの値は Cs 吸収能力が高いキノコ類である生シイタケ子実体への原木からの移行係数¹¹⁾と匹敵する比較的高い値であった。本試験では採取地の土壌が火成岩を母材とする黒色土で、静岡県では富士山麓や伊豆半島に広く分布している。このような黒色土はアロフェンやイモゴライトといった粘土鉱物で構成され、他の鉱質土壌タイプに比べて Cs 吸着能力が弱いといわれ、PB のような吸着資材の施用による植物体への吸収抑制効果がより強く働いたと推測される¹²⁾。

図-5 にプルシアンブルー施用が土壌からコナラ樹体への放射性セシウム吸収率に及ぼす影響を示す。1 成長期間で土壌 4 L に含まれる Cs をコナラ苗木 3 本が吸収した吸収率は、PB_0.1 混合区が 1.3 %, 同 1.0 混合区が 1.0 %, 同 1.0 散布区が 0.8 %および対照区が 1.6 %であり、処理間に有意な差異が認められた (ANOVA, $p=0.041$)。一般的に苗木へ施用さ

図-4 プルシアンブルー施用が土壌からコナラ樹体への放射性セシウム移行係数に及ぼす影響
異なる英字間には Fisher の最小有意差法により水準間に 5 %水準で有意差があることを示す。

図-5 プルシアンブルー施用が土壤からコナラ樹体への放射性セシウム吸収率に及ぼす影響
異なる英字間にはFisherの最小有意差法により水準間に5%水準で有意差があることを示す。

れた肥料の吸収率は、窒素およびカリウムが40～60%，リン酸が5～20%とされるが、その値は施肥量、土壤および苗木の生育状態等で異なるといわれる¹⁰⁾。本試験におけるCs吸収率は肥料の主要養分と比べて低い値であった。これはCsがコナラ樹体の成長に必要な必須元素ではないこと、またその濃度が肥料成分と異なり低いことが理由と考えられる。

以上から、PB施用がコナラ苗の成長に及ぼす短期的な影響は認められなかった一方、コナラ樹体全体に含まれるCs濃度はPB施用区が対照区より低く、土壤からコナラ苗へのCs移行係数はPB施用区が0.11～0.15で対照区より有意に低く、PB施用がCs移行の低減に有効であることが認められた。なお、以上の結果は本試験に用いたCs濃度が820 Bq/kg程度の比較的低いCs汚染土壤の場合であり、濃度がさらに高い土壤ではPB施用量およびCs移行係数等の異なることが予想される。

引用文献

- 1) 江口文陽(2012)東京電力福島第一原子力発電所の事故にともなう福島県及び近隣地域のシイタケ生産への影響、特産情

報, 2: 8-13.

- 2) 橋詰隼人・岡垣喜彦(1983)クヌギ苗の生長と養分の季節変動, 広葉樹研究, 2: 13-25.
- 3) 金子真司・高橋正道・赤間亮夫・池田重人・佐野哲也・三浦覚・大貫靖浩・平井敬三・志知幸治・阪田国司・橋本昌司・梶元卓也・田中浩・齊藤哲・高野勉・小野賢二(2013)福島原発事故から1年半後の森林の放射性セシウムの分布状況, 日本森林学会大会学術講演集, 124: O05.
- 4) 小林達明・山本理恵(2012)里山ランドスケープの放射性物質汚染に関する問題と今後の展望, 日本緑化工学会誌, 38(2): 265-273.
- 5) 小林信義・山本泰・明石真言(1998)放射線事故時におけるセシウム除去としてのプルシアンブルー, 保健物理, 33: 323-330.
- 6) 久留景吾・恩田裕一・河守歩・加藤弘亮(2013)落葉広葉樹-アカマツ混交林およびスギ人工林における落葉に伴う放射性セシウムの移行, 日本森林学会誌, 95: 267-274.
- 7) 林野庁(2012)きのこ原木及び菌床用培地の当面の指標地の設定について, http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/tokuyou/120328_2.html, 2014年4月11日.
- 8) 杉浦佑樹・竹中千里・前島正義・三宅博・柴田裡尋・世羅耕一郎(2012)福島県に自生する草本植物の放射性セシウム集積特性, 日本生態学会講演要旨集, 59: P3-319J.
- 9) 鈴木拓馬・山口亮(2013)ほだ木のフェロシアン化鉄処理によるシイタケ中の放射性セシウム低減, 日本森林学会大会学術講演集, 124: P1-157.
- 10) 塘 隆男(1971)施肥設計の理論と実際, 苗畑施肥と林地肥培, 地球出版, pp. 90-100.
- 11) 塚田祥文・山口紀子・高橋知之(2011)土壤-作物系における放射性セシウムおよび放射性ストロンチウムの動態, 化学と生物, 49(12): 834-842.
- 12) 山口紀子・高田裕介・林健太郎・石川覚・倉俣正人・江口定夫・吉川省子・坂口敦・朝田景・和穎朗太・牧野知之・赤羽幾子・平舘俊太郎(2012)土壤-植物系における放射性セシウムの挙動とその変動要因, 農業環境技術研究所報告, 31: 75-129.
- 13) 吉野和典(2013)プルシアンブルー; 新しい応用とそのナノ粒子, THE CHEMICAL TIMES, 229: 23-270.

(2014. 6. 9 受理)