

敷設資材と下草を活用した土壤除染法

赤井 広子・斎藤 祐一・瀧田 克典¹・湯田 美菜子・佐藤 守Decontamination Method of ¹³⁷Cs in Soil by Netting and WeedingHiroko AKAI, Yuichi SAITO, Katsunori TAKITA¹, Minako YUDA and Mamoru SATO

Abstract

The effects of the decontamination method combined weeding of undergrowth and covering soil surface with laying materials on ¹³⁷Cs removal from soil were evaluated. In March or May 2012 and March 2013, we covered the soil surface with wood pulp sheeting containing zeolite(zeolite sheeting), nonwoven fabric sheeting containing Prussian blue, root ball netting, or revegetation netting (60 × 190 cm wide), and encouraged forbs and grasses (shepherd's-purse; *Capsella bursa-pastoris(L.)Medik.*, deadnettle; *Lamium purpureum L.*, bittercress; *Cardamine scutata Thunb.*, and others) to grow or sowed seeds mixed *Poa pratensis L.*(Kentucky bluegrass) at 40 g/m² and *Trifolium repens L.*(White clover) at 30 g/m² on top. Note that only zeolite sheeting was used in 2012. After 6 to 12 months, the materials were rolled up with the plants, roots, and rhizosphere soil to strip the topsoil. To evaluate the effect on soil decontamination, we calculated the rate of removal of ¹³⁷Cs (RR, %) as $RR = 100a / (a + A)$, where a is the ¹³⁷Cs content (kBq/m²) in the removed soil and A is the ¹³⁷Cs content in the 3-cm soil layer beneath the stripped soil. Revegetation netting with grass had a significantly higher RR by sowing in March 2014—34.6 to 50.8% (equivalent to 42.4 to 66.1% to the ¹³⁷Cs amount in 3-cm topsoil on uncovered area) and in May 2012—17.0% than other treatments. RR of zeolite sheeting without sowing seeds had the least, because mesh of zeolite sheeting has too fine for root of forbs and grasses to pass through. RR of Kentucky bluegrass with enough root mats was 93.1% without netting, indicating that decontamination was due to development of roots or root mats. Since forbs and grasses which did not grow enough had passed through the revegetation netting, RR was decreased. This result indicates that increasing the mesh density of the revegetation netting would increase RR. A significant relation between RR and dry weight of soil removed (x): $RR = 5.58x$ ($p < 0.001$) was found. By this relation, the removal of 14.3 kg/m² in dry weight would achieve RR = 80%.

Key Words : ¹³⁷Cs removal rate, Grass, Orchard, Revegetation net, Topsoil strippingキーワード : ¹³⁷Cs除去率、果樹園、牧草、植生回復ネット、表土剝土

1 緒言

2011年3月11日の東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所事故により、環境中に大量の放射性

核種が放出され、東日本の一部の大気や土壌は放射性セシウム（以下RCs）であるセシウム134（以下¹³⁴Cs）及びセシウム137（以下¹³⁷Cs）によって汚染された。

東京電力福島第一原子力発電所事故後の調査によ

り、チェルノブイリ原子力発電所事故で土壤中のRCsを吸収する能力が高いと考えられていたヒマワリ栽培は、土壤中RCsのファイトレメディエーション効果はほとんど期待できないことが明らかになった²⁾。また、これまでの果樹研究所での調査により樹園地では汚染初年は園内下草を刈り取ることで下草に直接沈積したRCsの除去効果が期待されたが、RCs除去率は数パーセントと試算された（未発表）。さらに、汚染2年目以降は下草茎葉部のRCs濃度は初年の1/100程度と明らかに低く、下草の刈り取りだけでは除染効果は期待できないことが明らかとなった⁶⁾。一方で、樹園地のケンタッキーブルーグラス¹⁾（ナガハグサ *Poa pratensis* L.、以下KB）等のイネ科多年草の根群は土壌表層下2～3cm以内に密生してルートマット（以下RM）層を形成し（図1）、ほとんどのRCsがRM層に存在し、しかもRM層のRCsのほとんどが土壌に存在していることが明らかとなった⁴⁾。また、県北果樹主産地における¹³⁷Cs垂直分布は土性に係わらず表層0～3cmに2011～2012年は90%以上、2013年は80%以上が沈積していた⁵⁾。このように、樹園地では表層0



図1 ケンタッキーブルーグラスのRM層
注) RM層の厚さは1.6cm



図2 ゼオライトシートと牧草播種による表層土壌の剥離層（右：ゼオライトシート単用、左：ゼオライトシート+牧草混播）

～3cmまでに数千Bq/kgDW以上の¹³⁷Csが依然として沈積している。表土除去が根本的な対策であるが、重機を使用した表土除去は植栽されている樹が障害物となり除去できる部分がかかり限定され、また、重機による土壌の踏圧が課題となっている。加えて、福島県内の樹園地では傾斜地が多く、表土を剥ぎ取るのに重機が入れないことも想定される。そのため、樹園地での簡易な表土除去技術として農研機構・生物系特定産業技術研究支援センターと果樹研究所との共同研究により歩行型ロータリの後部に排土板を装着した剥土機が開発されたが³⁾、排土板の受容量はあまり小さくなく、土壌の集積が課題となっている。本研究では、重機や剥土機による表土除去を補完する技術として、樹園地の表層土壌に沈積したRCsを簡易な方法で除去することを目的に、草生栽培が一般的である樹園地の下草の根群に着目し、敷設資材と下草の根群を活用した土壌表層のRCs除去方法の開発に取り組み、一定の成果が得られたので報告する。

2 試験方法

(1) ゼオライトシートと牧草播種による表層土壌の剥離 A 牧草混合播種による¹³⁷Csの除去（試験1）

ゼオライトシート（ゼオライトを内包した天然パルプ由来のシート、王子キノクロス株式会社製、厚さ4mm程度、以下ZS）単用及びZSと牧草播種の組み合わせによる表土の¹³⁷Cs除去効果を比較するため、2012年4月19日に果樹研究所モモほ場の雑草草生刈り取り後、‘あまづくし’樹冠下に幅約60cmのZSを2m長さで2列に敷設した。5月10日にシートの上1列へKB（40g/m²）及びシロクロローバ¹⁾（30g/m²、シロツメクサ *Trifolium repens* L.、以下WC）を混合播種してZS+牧草区とした。覆土は行わなかった。また、播種前にモモの慣行施肥N-P₂O₅-K₂O=14-15-16（kg/10a）を試験区全体に行い、その後は追肥を行わなかった。併せて、牧草未播種列を対照のZS単用区として、ZSに吸着して除去される¹³⁷Cs濃度を測定し、ZS+牧草播種との比較を行った。11月9、13、20日に試験区ごとに60×60cm方格で3か所ずつシート及びシート上に植生した牧草とその根圏土壌を併せて採取し（以下剥離層）、シート面積を計測後、全量を分析に供試した（図2）。併せて、それぞれのシート剥ぎ取り跡地から深さ3cmの土壌を直径83mmの円筒形採土器で4か所採取し（以下剥離下3cm）、礫を除き混合して分析に供試した（図3）。分析試料はNaIシンチレーションスペクトロメーター（CAN-OSP-NAI、日立アロカ、以下同）により測定時間を30～45分とし、¹³⁷Cs濃度を



図3 円筒形採土器による剥離下3cmの土壤採取

調査した。また、恒温乾燥器により105℃で1昼夜乾燥し、試料の水分含量を測定した。

佐藤によると2011～2013年の土性の異なる樹園地における土壤中¹³⁷Csの垂直分布は、土性に係わらず0～6 cm層に¹³⁷Csが95%以上沈積している⁵⁾。また、2014年に果樹研究所内のリンゴ、ブドウ及びモモほ場の下草根の存在量について、深さ0～3、3～9、9～15cmの3区分で土壤ごと採取して調査した結果、下草根は15cmまでの根量の73.8%が0～3 cm層に存在することが確認されている(未発表)。そこで、下草根のほとんどが存在する剥離層3 cm(0～3 cm)とその下層の剥離下3 cm(3～6 cm)の¹³⁷Cs濃度を分けて測定し、その合計を0～6 cm層の¹³⁷Cs量として算出した。さらに、合計¹³⁷Cs量に対する剥離層の¹³⁷Cs量の割合を算出し、剥離による除去率として評価した。¹³⁷Cs除去率(以下RR)は以下の式により算出した。

$$RR=100 a / (a+A)$$

a: 剥離層の¹³⁷Cs量 (Bq/m²)、A: 剥離下3 cmの¹³⁷Cs量 (Bq/m²)

B 大型イネ科牧草による¹³⁷Csの除去(試験2)

2012年3月21日に福島市飯坂町のアウトウほ場の雑草草生刈り取り後、‘紅さやか’樹冠下に幅約60cmのZSを4.8 m長で9列に敷設した。5月8日に片側ZS4列に乾燥防止のため山砂を約1 cm厚さに敷き、オーチャードグラス¹⁾(かもがや *Dactylis glomerata L.*、以下OG)を播種(40g/m²)してZS+牧草区とし、未播種列を対照のZS単用区とした。播種前にアウトウの慣行施肥N-P₂O₅-K₂O=12-5-10 (kg/10a)を試験区全体に行い、その後は追肥を行わなかった。OGは草生量が多く巻き取り作業に支障を来し、汚染2年目以降の下草茎葉部はRCs濃度が極めて低いことが明らかであったため、牧草区は試料採取直前に茎葉を刈り取っ

た。11月20日に試験区ごと60×60cm方格で3か所ずつ剥離層を採取し、それぞれのシート剥ぎ取り跡地から剥離下3 cmの土壤を直径83mmの円筒形採土器で5か所ずつ採取し混合して、分析に供試した。試料の採取、調整及び分析は試験1と同様の方法で行った。

(2) 下草刈り取り及び剥ぎ取りによる土壤表層の¹³⁷Cs除去効果

下草を地上部と根圏土壤を含めた根に分け、採取部位による¹³⁷Csの除去効果を明らかにするため、2013年に果樹研究所リンゴ育種‘Prima×95P6交雑’ほ場に植生する下草雑草において、各草種が優占する時期としてナズナ¹⁾(*Capsella bursa-pastoris (L.) Medik.*)は4月12日、ヒメオドリコソウ¹⁾(*Lamium purpureum L.*)及びタネツケバナ¹⁾(*Cardamine scutata Thunb.*)は5月13日に30×30cm方格で3か所ずつ試験区を設置し、地上部刈取り区と下草剥ぎ取り区に分けて試料を採取した。地上部刈取り区は鋏で下草の茎葉を地際部で刈り取った。下草剥ぎ取り区は下草の茎葉と根を約3 cm深さで根群土壤ごと剥ぎ取った。地上部刈取り区は無洗浄で凍結乾燥後、Ge半導体検出器により測定時間を10,000秒、下草剥ぎ取り区は根、土壤及び茎葉部をまとめてNaIシンチレーションスペクトロメーターにより測定時間を180分として、¹³⁷Cs濃度を測定した。また、恒温乾燥器により105℃で1昼夜乾燥し、試料の水分含量を測定した。Ge半導体検出器による測定は材料科学技術振興財団に依頼した。

(3) 敷設資材の違いによる¹³⁷Cs除去効果の比較

4種の表土敷設資材を使用し、牧草の混合播種と組み合わせる¹³⁷Cs除去効果の比較を行うため、2013年5月9日に果樹研究所モモ系統適応性検定試験ほ場の雑草草生刈り取り後、4年生モモ樹冠下へZS、植生回復ネット(ヤシ繊維の平織り、株式会社ウエスコットイースト製、商品名ボンテラ 植生基盤ネット CF-7、以下回復ネット)、プルシアンブルーシート(プルシアンブルー液に浸漬した不織布、大日精化工業株式会社製、以下プルシアン)、根巻きネット(麻繊維、小泉製麻株式会社製)を供試して試験区を設置し(図4)、各資材敷設後にKB(40g/m²)及びWC(30g/m²)を混合播種した。播種前にモモの慣行施肥N-P₂O₅-K₂O=11-5-7 (kg/10a)を試験区全体に行い、その後は追肥を行わなかった。回復ネット及び根巻きネットは目が粗く下草の植生を確保しやすいため、牧草未播種区(雑草草生)を併せて設置した。各試験区とも牧草の生育を確保するために適宜かん水し、さら

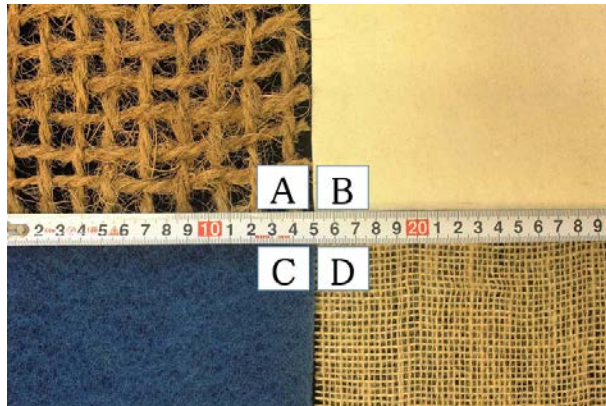


図4 敷設資材

A：植生回復ネット、B：ゼオライトシート
C：プルシアンブルーシート、D：根巻きネット

にKB及びWCを7月22日、9月9日に追加で同量を播種した。12月2日に試験区ごとに60×60cm方格で3か所ずつ剥離層を、各資材剥ぎ取り跡地から4か所ずつ剥離下3cmを採取し、¹³⁷Cs分析に供試した。試料の採取、調整及び分析は試験1と同様の方法で行った。

(4) 下草の剥ぎ取り量と土壤中¹³⁷Cs除去効果の関係

2012～2013年までの調査により¹³⁷Cs除去率の高かった多年生牧草のKB、WC及び春季雑草のナズナ、タネツケバナの剥離による土壤中¹³⁷Cs除去効果を再確認するため、以下の方法で試験を実施した。

2014年5月8日に果樹研究所ブドウ‘あづましずく’樹冠下のKB、WC及びナズナが優占して植生する各1か所を選び、100×60cm方格に切れ込みを入れ、剥離層を採取した。剥離下3cmの試料は、試験1と同様に採取した。5月12日にリング育種‘Prima×95P6交雑’樹冠下のタネツケバナが優占して植生する3か所を選び、50×50cm方格に切れ込みを入れ、剥離層及び剥離下3cmの試料を採取し、分析に供試した。分析は剥ぎ取り区画ごとにNaIシンチレーションスペクトロメーターにより測定時間を60分として、¹³⁷Cs濃度を調査した。また、恒温乾燥器により105℃で1昼夜乾燥し、試料の水分含量を測定した。

(5) 植生回復ネットによる表土剥離の実用性と作業効率

上記の試験方法(3)により¹³⁷Cs除去効果が高かった植生回復ネットと牧草混合播種による表土除去の実用性及び作業性を確認するため、以下の試験を行った。2014年3月19日に果樹研究所ブドウほ場において、播種する牧草の発芽率を高めるために下草雑草の株を草削りで浅く起こした。回復ネットを1.9m幅×5m長

で敷設し、試験区を3か所設置した。3月26日にかん水後、KB(40g/m²)及びWC(30g/m²)を混合播種し、牧草は伸長期に適宜刈り取り、ネット周辺の雑草草生を対照とした。試験区を設置した場所は10年前にブドウを伐採した後は雑草草生として適宜刈り取り、試験区設置の前後も施肥は行わなかった。12月2日に1.9m幅でネット端から外周に沿って1.5m長さの切れ込みを入れ、1.9m幅のままネット下の根圏土壌ごと巻き上げて1.5m長さで剥ぎ取り、作業の所要時間を計測した。ネットは60×60cm方格に切り取って剥離層とし、分析に供試した。併せて、剥ぎ取り跡地の対角線上の5か所から剥離下3cmの試料を採取した。対照区は試験区の外周5か所から深さ3cmの表土を直径83mmの円筒形採土器により採取した。分析は剥ぎ取り区画ごとにNaIシンチレーションスペクトロメーターにより測定時間を60分として、¹³⁷Cs濃度を調査した。また、恒温乾燥器により105℃で1昼夜乾燥し、試料の水分含量を測定した。

(6) 剥離厚さ指数と土壤中¹³⁷Cs除去率の関係

上記の試験方法(1)、(3)、(4)、(5)より得られた果樹研究所内ほ場(褐色森林土)で実施した表土敷設資材を利用した下草剥離等の試験成績27事例を用いて、剥離量の目安を剥離厚さ指数として、剥離厚さ指数と土壤中¹³⁷Cs除去率の関係を回帰分析法により解析した。

剥離厚さ指数は以下の式により算出した。

剥離厚さ指数(kg/m²)=剥ぎ取り重量(kg)/剥ぎ取り面積(m²)

3 試験結果及び考察

(1) ZSと牧草播種による表層土壌の剥離

ZS単用ではZSを土壌表面に敷設し、土壌水に含まれる水溶性CsをZSに吸着することにより¹³⁷Csの除去効果を期待したが、試験1、試験2ともに¹³⁷Cs吸着量はごくわずかであり、表土の¹³⁷Cs除去には実用的でなかった。それに対し、ZSと牧草を組み合わせ、ZS下に牧草の根群層を育成した後にZS及び根群層とともに表層土壌を除去する方法では、ZS単用より除去率が向上した(表2、表4)。試験1のZS敷設とKB+WC混合播種を組み合わせた方法による¹³⁷Cs除去率は、ZS単用の0.4%に対し、39.3%と向上した(表1、表2)。試験2のZS敷設とOG播種を組み合わせた方法による¹³⁷Cs除去率は、ZS単用の1.3%に対し、22.4%と向上した(表3、表4)。試験2では播種した牧草種子の乾燥を防いで発芽率を高めるためZS上に山

表1 ZS剥離下3cmの¹³⁷Cs量 (試験1)

採取場所 ^z	採取面積 (m ²)	採取重量 (kgDW)	¹³⁷ Cs 濃度 (kBq/kgDW)	¹³⁷ Cs 含量 (kBq)	面積当 ¹³⁷ Cs 量 (A) (kBq/m ²)	剥離厚さ指数 ^x (kg/m ² DW)
ZS+牧草 ^y	0.0216	0.660	2.64	1.71	78.9	30.5
ZS単用	0.0216	0.590	10.2	5.97	276	27.3

^z 各処理3反復、土壌採取器により採集、採取面積0.0054m²×深さ3cm 4か所^y 牧草はKB+WC^x 剥離厚さ指数(kg/m²)=剥ぎ取り重量(kg)/剥ぎ取り面積(m²)表2 ZS剥離層の¹³⁷Cs量及び¹³⁷Cs除去率 (試験1)

採取場所	剥離面積 (m ²)	剥離重量 ^y (kgDW)	¹³⁷ Cs 濃度 (kBq/kgDW)	¹³⁷ Cs 含量 (kBq)	面積当 ¹³⁷ Cs 量 (a) (kBq/m ²)	剥離厚さ指数 (kg/m ² DW)	除去率 ^x (%)
ZS+牧草 ^z	0.331	2.34	6.57	15.7	46.4	6.9	39.3
ZS単用	0.349	0.328	1.10	0.380	1.05	0.9	0.4

^z 各処理3反復、牧草はKB+WC^y 剥離重量はZSの重さを含む^x 除去率=100 a/(A+a)表3 ZS剥離下3cmの¹³⁷Cs量 (試験2)

採取場所 ^z	採取面積 (m ²)	採取重量 (kgDW)	¹³⁷ Cs 濃度 (kBq/kgDW)	¹³⁷ Cs 含量 (kBq)	面積当 ¹³⁷ Cs 量 (A) (kBq/m ²)	剥離厚さ指数 (kg/m ² DW)
ZS+牧草 ^y	0.027	0.851	3.22	2.79	103	31.5
ZS単用	0.027	0.806	7.98	6.41	237	29.9

^z 各処理3反復、土壌採取器により採集、採取面積0.0054m²×深さ3cm 5か所^y 牧草はOG表4 ZS剥離層の¹³⁷Cs量及び¹³⁷Cs除去率 (試験2)

採取場所	剥離面積 (m ²)	剥離重量 ^y (kgDW)	¹³⁷ Cs 濃度 (kBq/kgDW)	¹³⁷ Cs 含量 (kBq)	面積当 ¹³⁷ Cs 量 (a) (kBq/m ²)	剥離厚さ指数 (kg/m ² DW)	除去率 ^x (%)
ZS+牧草 ^z	0.387	5.13	2.05	10.3	26.7	13.3	22.4
ZS単用	0.383	0.230	5.17	1.18	3.04	0.6	1.3

^z 各処理3反復、牧草はOG^y 剥離重量はZSの重さを含む^x 除去率=100 a/(A+a)

砂を覆土し、またOGは茎葉の繁茂が良好な特性をもち、1m²当たりの剥離量(剥離厚さ指数)は13.3kg/m² DWとKB+WCの6.9kg/m² DWよりかなり多かったものの、KB+WC混播より¹³⁷Cs除去率は低くなった。これはKB+WCに比べてOGは株状となり、また、根の分布が深いため、剥ぎ取れる厚さが不均一となり、一部は深く剥ぎ取ることになるためと考えられる。¹³⁷Csは表層3cmに80%以上が存在しているため、表層3cmをいかに均一に剥ぎ取るかが¹³⁷Cs除去率を向上させるポイントとなる。そのため、ZSと牧草播種を組み合わせる根群層と表層土壌を併せて剥ぎ取る方法では、根が浅く均一の厚さで剥ぎ取れるKB+WCを混合播種することにより、¹³⁷Cs除去率の向上につながると考えられた。

(2) 下草刈り取り及び剥ぎ取りによる土壌表層の¹³⁷Cs除去効果

3種の春季雑草の地上部刈り取りでは、面積当たり¹³⁷Cs量はナズナが72.7kBq/m²と高かった(表5)。しかし、面積当たり¹³⁷Cs量を同一草種で採取方法により比較すると、下草剥ぎ取り区は46.2~102kBq/m²で地上部刈り取り区の990~4550倍と明らかに高く、土壌表層の¹³⁷Cs除去には根及び土壌を含めた下草の剥ぎ取りが有効であることが再確認された(表5、表6)。剥ぎ取りでは、ヒメオドリコソウは地上部の生育が旺盛であっても根群は狭く、土壌付着量が少なかったが、これに対し、ナズナやタネツケバナは根群が広く、土壌付着量が多いことが観察された。剥ぎ取り量が多い順にタネツケバナ>ナズナ>ヒメオドリコソウであったが、反復のばらつきが大きく、草種による明らかな

表5 地上部刈り取りによる下草の草種別¹³⁷Cs持ち出し量

草種 ^z	刈取り面積 (m ²)	刈取り量 (kgDW)	¹³⁷ Cs 濃度 (Bq/kgDW)	¹³⁷ Cs 含量 (Bq)	面積当 ¹³⁷ Cs 量 (Bq/m ²)
ナズナ	0.09	0.021	344	6.55	72.7
ヒメオドリコソウ	0.09	0.025	53.5	1.35	15.0
タネツケバナ	0.09	0.035	55.9	2.02	22.4
分散分析	-	ns ^y	ns	ns	ns

^z 各処理3反復、採取日 ナズナ 2013/4/12、ヒメオドリコソウ及びタネツケバナ 2013/5/13

^y ns 有意差無し

表6 下草剥ぎ取りによる下草の草種別¹³⁷Cs持ち出し量

草種 ^z	剥ぎ取り面積 (m ²)	剥ぎ取り量 (kgDW)	¹³⁷ Cs 濃度 (kBq/kgDW)	¹³⁷ Cs 含量 (Bq)	面積当 ¹³⁷ Cs 量 (kBq/m ²)	剥離厚さ指数 (kg/m ² DW)
ナズナ	0.09	0.675	10.5	6.49	72.1	7.5
ヒメオドリコソウ	0.09	0.482	8.33	4.16	46.2	5.4
タネツケバナ	0.09	0.787	11.8	9.21	102	8.7
分散分析	-	ns ^y	ns	ns	ns	ns

^z 各処理3反復、採取日 ナズナ 2013/4/12、ヒメオドリコソウ及びタネツケバナ 2013/5/13

^y ns 有意差なし

表7 シート剥離下3cmの¹³⁷Cs量

試験区 ^z	採取面積 (m ²)	採取重量 (kgDW)	¹³⁷ Cs 濃度 (kBq/kgDW)	¹³⁷ Cs 含量 (kBq)	面積当 ¹³⁷ Cs 量(A) (kBq/m ²)	剥離厚さ指数 (kg/m ² DW)
ZS+牧草	0.0216	0.497 a ^x	9.77	4.76	220	23.0 a
回復ネット	0.0216	0.558 ab	5.21	2.99	138	25.9 ab
回復ネット+牧草	0.0216	0.665 b	4.04	2.70	125	30.8 b
プルシアン+牧草	0.0216	0.522 ab	10.2	5.16	239	24.2 ab
有意差	-	* ^y	ns	ns	ns	*
F 値		4.8				4.8

^z ZS：ゼオライトシート、牧草：ケンタッキーブルーグラスとシロクローバ混合播種

回復ネット：植生回復ネット、プルシアン：プルシアンブルーシート

各処理3反復、土壌採取器により採集、採取面積0.0054m²×深さ3cm 4か所

^y * 危険率5%で有意差あり

^x 異なる文字間に Tukey 法による多重検定により危険率5%で有意差あり

表8 シート剥離層の¹³⁷Cs量及び¹³⁷Cs除去率

試験区	剥離面積 (m ²)	剥離重量 ^y (kgDW)	¹³⁷ Cs 濃度 (kBq/kgDW)	¹³⁷ Cs 含量 (kBq)	面積当 ¹³⁷ Cs 量(a) (kBq/m ²)	剥離厚さ指数 (kg/m ² DW)	除去率 ^x (%)
ZS+牧草 ^z	0.362 a ^y	0.526 a	8.26 ab	4.78 a	13.1 a	1.5 a	5.1 a
回復ネット	0.412 ab	1.60 bc	2.90 a	4.65 a	11.2 a	3.8 b	9.5 ab
回復ネット+牧草	0.441 b	2.50 c	4.53 a	11.6 ab	26.4 ab	5.7 b	17.0 b
プルシアン+牧草	0.383 ab	1.44 ab	11.8 b	17.1 b	44.7 b	3.8 b	16.4 ab
有意差	* ^y	**	*	*	*	**	*
F 値	6.3	13.8	6.6	7.3	7.3	11.4	4.5

^z 各処理3反復、60×60cm 方格で剥ぎ取り

^y 剥離重量はシートの重さを含む

^x 除去率=100 a/(A+a)

* **, * 危険率1%, 5%で有意差あり

^y 異なる文字間に Tukey 法による多重検定により危険率5%で有意差あり

差は認められなかった。草種別の ^{137}Cs 持ち出し量は、タネツケバナ>ナズナ>ヒメオドリコソウの順に高く、達観で根群が広く分布する草種で ^{137}Cs 除去効果が高い傾向がみられた(表6)。土壤表層の ^{137}Cs の除去には、特に細根が多く、根群を広く形成し、草を剥ぎ取った時に根へ土壌が多く付着するタネツケバナやナズナなどの草種でより効果が高いと考えられた。

(3) 敷設資材の違いによる ^{137}Cs 除去効果の比較

根巻きシートは剥ぎ取り時点ですでに分解が進んでおり、剥ぎ取りができなかった。それ以外の敷設資材では、60×60cm方格のシート剥離層の重量は0.526~2.50kgDWであり、 ^{137}Cs 除去率は5.1~17.0%であった。回復ネット+牧草区はZS+牧草区と比較して剥離層の重量が多く、 ^{137}Cs 除去率も有意に高かった(表7、表8)。ZS+牧草区ではZSの春の乾燥期には保湿性が不十分でZS上に播種した牧草の発芽が不良で生育が悪く、十分な根群層を確保できなかったため、剥ぎ取り重量が少なく、剥離厚さ指数も他の試験区より有意に小さく、 ^{137}Cs 除去率も低かったと考えられた。この結果は試験方法(1)の試験1で得られた ^{137}Cs 除去率39.3%より明らかに低く、同じ資材を使用しても牧草の十分な根群生育が確保できないと除去率は著しく低下することが示唆された。プルシアン+牧草区は回復ネット+牧草区に次いで ^{137}Cs 除去率は高かったが、使用後に腐食分解する回復ネットの方が取り扱いは容易であり、実用性が高いと考えられた。また、回復ネットによる剥ぎ取りを牧草播種と雑草草生で比較すると、牧草播種の方が剥離層の重量は多く、 ^{137}Cs 除去率も高まる傾向を示したが有意差は認められなかった。これは、回復ネットの目が約15mmと粗いため(図4)、剥ぎ取り時に下草の根が細く根域が狭いとネットに絡みつわずに目をすり抜けて根が残ることや雑草草生の不均一性によると考えられた。これらのことから今回の試験区の中では、剥離層の重量を一番多く確



図5 ケンタッキーブルーグラスの剥ぎ取り

保できた回復ネット+牧草区で ^{137}Cs 除去率が高まったと推察された。そのため、試験1、試験2の結果と同様に、牧草混合播種により均一な根群層を確保することが効果を高めるのに重要な点と考えられた。併せて、資材の特性を考慮すると、供試した資材の中でZS以外は網目状になっており(図4)、播種した種子は直接土壌に達するため、ZSのように乾燥による発芽不良はほとんど影響しない。一方で、ZSは連続した巻き取りが可能であり、回復ネットより作業が容易に進められる利点を有するため、ZS上に有穴加工を行うなど牧草種子が発芽しやすい条件を確保すれば ^{137}Cs 除去率は高まると考えられた。また、回復ネットについても本試験に供試した型より更に目の細かい(5~10mm)資材を選択することでさらに除去率の向上が期待できると考えられた。

(4) 下草の剥ぎ取り量と土壤中 ^{137}Cs 除去効果の関係

多年生のKBはRMがよく発達しており、約3cmの厚さでロール状に剥離することができ(図5)、 ^{137}Cs 除去率は93.1%と高かった(表9)。多年生のWCは地下茎と表層付近の根の発達が良好であり、剥離層は厚さが約1.5cmであったものの、KBと同様にロール状に剥離することができ、 ^{137}Cs 除去率は57.7%とKBに次いで高かった。一方、樹園地で多くみられる越年生のナズナ及びタネツケバナは、5月の調査時点で地上部がすでに枯死しており、断片的な剥離で39.1~43.7%の除去率となり、雑草草生よりも牧草を播種することでRM層の発達を促し、連続した剥離層を確保するのに有効なことが再確認できた(表9)。

(5) 回復ネットによる表土剥離の実用性と作業効率

回復ネットとKB+WC混合播種を利用した表土剥離では、剥離層の面積当たり ^{137}Cs 量は45.3~63.0kBq/m²であり、対照の85.3~149kBq/m²に対し、42.4~66.1%相当であった。 ^{137}Cs 除去率は34.6~50.8%であり、牧草の生育量が多い剥ぎ取り区画で剥離層の重量が多く、除去率が高まる傾向にあった(表10)。ネット幅1.9mの表土剥ぎ取りに係る所要時間は176~212秒/mであり(表11)、巻き取り作業が進み重量が増すにしたがって作業性は著しく低下した。そのため、根群深さに包丁で切り込みを入れながら巻き取り作業を進めた結果、牧草の根を途中で切断することになり、剥離下3cm層に根及び付着する根圏土壌が残留し、除去率が低下する一因となったと考えられる。今後は、ネット幅を狭くして巻き取るなど剥ぎ取り方法を検討し、作業の効率化と除去率の向上を目指し実用性を高める必要がある。

表9 下草剥ぎ取り部の¹³⁷Cs除去率

優占草種・層区分	採取面積 (m ²)	採取重量 (kgDW)	¹³⁷ Cs濃度 (kBq/kgDW)	¹³⁷ Cs含量 (kBq)	面積当 ¹³⁷ Cs量 (kBq/m ²)	剥離厚さ指数 ^y (kg/m ² DW)	¹³⁷ Cs除去率 ^x (%)
KB剥離層	0.600	7.74	22.1	171	286	12.9	93.1
KB剥離下3cm	0.027	0.694	0.827	0.574	21.2	25.7	
WC剥離層	0.600	3.78	21.8	82.2	137	6.3	57.7
WC剥離下3cm	0.027	0.661	4.12	2.72	101	24.4	
ナズナ剥離層	0.600	3.03	22.7	68.7	115	5.0	43.7
ナズナ剥離下3cm	0.027	0.684	5.84	3.99	148	25.3	
タネツケバナ剥離層 ^z	0.250	1.84	9.35	17.1	68.2	7.3	39.1
タネツケバナ剥離下3cm	0.027	0.715	4.01	2.86	106	26.4	

^z タネツケバナのみ3反復の平均値、他は1反復

^y 剥離厚さ指数(kg/m²)=剥ぎ取り重量(kg)/剥ぎ取り面積(m²)

^x 除去率=100 a/(A+a) a:剥離層の¹³⁷Cs量(kBq/m²), A:剥離下3cmの¹³⁷Cs量(kBq/m²)

表10 植生回復ネット+牧草を利用した表土剥離による¹³⁷Cs除去率

反復	試験区	採取面積 (m ²)	採取重量 ^y (kgDW)	¹³⁷ Cs濃度 (kBq/kgDW)	¹³⁷ Cs含量 (kBq)	面積当 ¹³⁷ Cs量 (kBq/m ²)	剥離厚さ 指数 ^x (kg/m ² DW)	¹³⁷ Cs 除去率 ^w (%)	対照区 対比 (%)
1	剥離層	0.360	7.88	2.87	22.6	62.8	21.9	50.8	66.1
	剥離下3cm ^z	0.027	0.88	1.86	1.65	60.9	32.7		
	対照区 ^z	0.027	0.60	4.27	2.57	95.1	22.3		
2	剥離層	0.360	6.61	3.43	22.7	63.0	18.3	41.8	42.4
	剥離下3cm	0.027	0.70	3.41	2.38	87.9	25.8		
	対照区	0.027	0.65	6.21	4.02	149	23.9		
3	剥離層	0.360	5.69	2.87	16.3	45.3	15.8	34.6	53.1
	剥離下3cm	0.027	0.73	3.18	2.31	85.5	26.9		
	対照区	0.027	0.65	3.61	2.31	85.3	23.6		
平均	剥離層	0.360	6.73	3.06	20.5	57.1	18.7	42.4	53.9
	剥離下3cm	0.027	0.77	2.82	2.11	78.1	28.4		
	対照区	0.027	0.63	4.70	2.97	110	23.3		

^z 土壌採取器により採集、採取面積0.0054m²×深さ3cm 5か所

^y 剥離層の採取重量は植生回復ネットの重さを含む

^x 剥離厚さ指数(kg/m²)=剥ぎ取り重量(kg)/剥ぎ取り面積(m²)

^w 除去率=100 a/(A+a) a:剥離層の¹³⁷Cs量(kBq/m²), A:剥離下3cmの¹³⁷Cs量(kBq/m²)

表11 回復ネット+牧草による表土剥離の作業時間

反復	作業 内容	所要時間 ^z (秒)	単位当たり所要時間	
			(秒/m)	(秒/m ²)
1	溝切り	81.6	16.7	—
	剥ぎ取り	318	212	112
2	溝切り	95.9	19.6	—
	剥ぎ取り	290	193	102
3	溝切り	78.2	16.0	—
	剥ぎ取り	263	176	92.4
平均	溝切り	85.2	17.4	—
	剥ぎ取り	290	194	102

^z 1.9m幅、1.5m長の溝切りまたは剥ぎ取りの所要時間

(1)~(4)までの考察と合わせ、表土の剥土効率を高めるためには回復ネットの目の密度やネットの剥ぎ取り幅を再検討し、また牧草草生の均一なRMを確保することが重要であることが明らかになった。ここで、イネ科多年草のKBは6~10月の生育が良好であり、浅根性で表層下に厚さ3cm程度のRMを形成する。マメ

科多年草のWCは窒素固定作用があるためイネ科牧草との混播に適しており、ほふく茎で生育するという特性がある。そのため、KBが形成したRMをWCのほふく茎が補い、剥ぎ取る表土の連続性が保持できると考えられる。このような特性を考慮すると表土除去を目的とした下草の草種としては、本研究で使用したKB

とWCの混合播種が有効と考えられた。今後の課題としては、剥ぎ取り効果をも高めるための牧草の育成期間及び剥ぎ取り作業の適期を明らかにする必要がある。

(6) 剥離厚さ指数と土壤中¹³⁷Cs除去率の関係

試験方法(1)、(3)、(4)のデータに基づき回帰分析すると、下草による0～3cmまでの表土の剥離量(剥離厚さ指数)と¹³⁷Cs除去率の間には有意な比例式が得られ、77.8%の寄与率であった(図6)。この回帰式により除去率80%を目標とした場合の剥離厚さ指数は、14.3kg/m² DWと試算された。

一方、試験方法(5)では、剥離厚さ指数が15.8～21.9kg/m² DWと高かったものの、¹³⁷Cs除去率は34.6～50.8%と比例式から得られる試算値よりかなり低かった。これは回復ネット敷設に先立つ下草株の掘上により表層土壤が攪乱され、¹³⁷Csが下層へ移動し、(1)、(3)、(4)の試験ほ場と¹³⁷Csの垂直分布が異なった可能性があるかと推察される。

以上の結果、樹園地土壤の表層に多く沈積した¹³⁷Csを除去する簡易な方法として、敷設資材及び下草を利用した剥離は有効な技術である。ただし、攪乱や時間経過による¹³⁷Csの下層への移動があった場合はその限りでない。

4 摘要

重機や剥土機による表土除去を補完する技術として、樹園地の表層土壤に沈積したRCsを簡易な方法で除去する技術開発を目的とした。園内に植生する下草に着目し、下草の茎葉部と根及びその根圏土壤を併せて剥ぎ取る方法が有効と考え、4種の敷設資材と牧草播種や雑草草生を組み合わせた表土剥離の効果を¹³⁷Cs除去率により評価した。¹³⁷Cs除去率(RR)は以下の式により算出した。

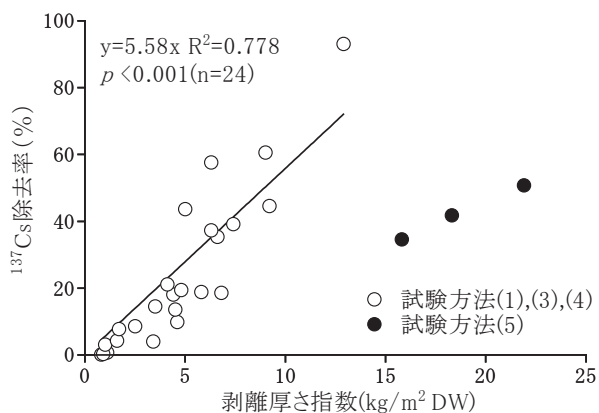


図6 下草による表土0～3cmの剥離量(剥離厚さ指数)と¹³⁷Cs除去率の関係

$$RR=100 a / (a+A)$$

a: 剥離層の¹³⁷Cs量 (Bq/m²)、A: 剥離下3cmの¹³⁷Cs量 (Bq/m²)

- (1) 下草による¹³⁷Cs持ち出し量は茎葉部、根及び根圏土壤を併せた剥ぎ取りが地上部刈り取りの990～4,550倍と、土壤表層の¹³⁷Cs除去には下草剥ぎ取りが有効であり、遠観で下草の根群が広いほど¹³⁷Cs除去量は多くなった。雑草草生より牧草播種の方が¹³⁷Cs除去量は多く、特にKBとWCの混合播種は連続したRM層を形成し、根群層の土壤剥離の均一性が確保できるため¹³⁷Cs除去効果は高くなった。
- (2) 敷設資材とKB+WC混合播種を利用した表土剥ぎ取りによる¹³⁷Csの除去率は、剥離層の重量が多いほど高くなり、調査した資材の中では回復ネットにおける効果が最も高かった。回復ネット単用では雑草草生の根及び根圏土壤の付着量が少なく断片的な剥離となり、KB+WC混合播種と併せて行うことにより連続的な剥離層を確保することができた。
- (3) 幅1.9 mの回復ネットと根群の発育が旺盛なKB+WC混合播種の組み合わせによる土壤表層の剥離は、ネット幅のまま巻き取る方法で¹³⁷Cs除去率が34.6～50.8%と表土のCs濃度の低減に有効と考えられた。しかし、剥離の所要時間は176～212秒/mで重量が増すにつれて作業性が低下し、また剥離層の¹³⁷Cs量は対照の42.4～66.1%と低かった。そのため、ネット幅を狭くするなど巻き取り時の重量負担を軽減し、根を途中で切断せずに根圏土壤を剥離層にできるだけ多く取り込むことが実用性を高めるのに重要と考えられた。また、回復ネットと牧草播種による表土剥ぎ取りの時期は、牧草の根張りを十分確保した後の根の生長活動が停滞する12～4月が適期と考えられるが、今後の検討課題としたい。
- (4) 2011～2014年に試験を行った24事例から、下草による表土の剥離量と土壤中¹³⁷Cs除去効果の関係を検証した結果、¹³⁷Cs除去率は剥離厚さ指数と比例関係が認められた。そのため、剥離厚さ指数は下草剥ぎ取りによる除染効果を表す目安となるが、その比例定数は¹³⁷Cs垂直分布の差異や土壤水分及び土壤孔隙率により変動することに留意する必要がある。

謝辞

本試験の実施にあたり現地試験に御協力いただいた生産者の皆様、本試験のほ場管理をする上で御助力いただいた農場管理員及び臨時職員の皆様に感謝いたします。

引用文献

- 1) 浅井元朗. 2015. 雑草大図鑑. 全国農村教育協会.
- 2) 平山孝・荒井義光・佐藤睦人. 2012. ヒマワリ栽培による土壌中の放射性セシウム吸収. 東北農業研究成果情報.
- 3) 井上利明・太田智彦・大西正洋・湯田美菜子. 2014. 果樹園除染用の樹冠下剥土機の開発. 農業食料工学会年次大会講演要旨 73:112.
- 4) 佐藤守・阿部和博・山口奈々子・瀧田克典・湯田美菜子・額田光彦・佐久間宣昭・安部充. 樹園地の下草の放射性核種濃度及び経時的推移. 平成23年度福島県放射線関連支援技術情報.
- 5) 佐藤守. 2014. 休眠期に汚染された落葉果樹における放射性セシウム移行メカニズムと吸収抑制対策. 土肥誌 85 (2) : 103-106.
- 6) 山口奈々子・斎藤祐一・佐藤守・額田光彦・阿部和博・湯田美菜子・赤井広子. 樹園地内下草の放射性物質吸収特性の解明. 平成24年度福島県放射線関連支援技術情報.