

果樹における放射性物質汚染の概要と除染対策について

福島県農業総合センター果樹研究所 専門研究員 佐藤 守

1 樹園地および土壌汚染の実態

◆ 土壌中放射性物質濃度の垂直分布(4/15~5/25)

(1) 表層から 30cm までの垂直分布は土性に関わらず、表層 5cm 以内に 90%以上の放射性セシウム(以下、放射性 Cs とする)が存在していた(図1~6)。

(2) 4/15 から 5/25(フォールアウト後 31~70 日)の期間の放射性核種の土壌中垂直分布はヨウ素 131(以下、 ^{131}I とする)は時間とともに減少したが、Cs は明瞭な減衰傾向は認められなかった。

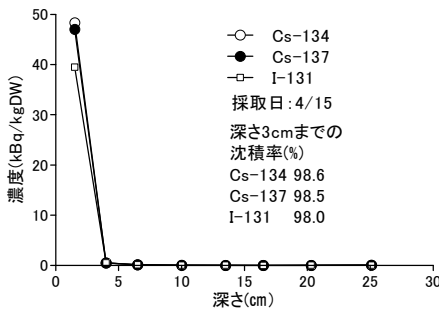


図1 土壌中放射性核種濃度の垂直分布(4/15)

(果樹研「紅玉」ほ場: 埴壤土)

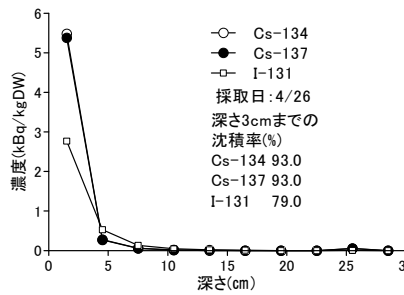


図2 土壌中放射性核種濃度の垂直分布(4/26)

(果樹研「あかつき」ほ場: 埴壤土)

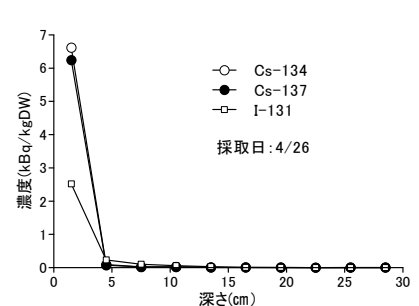


図3 土壌中放射性核種濃度の垂直分布(4/26)

(果樹研三島ふじほ場: 花崗岩系砂質土)

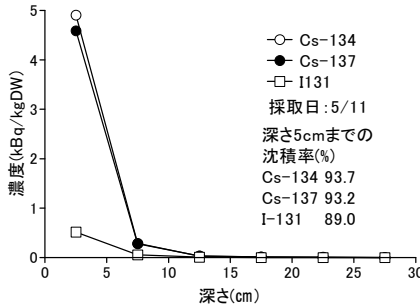


図4 土壌中放射性核種濃度の垂直分布(5/11)

(桑折町モモ園: 砂質壤土)

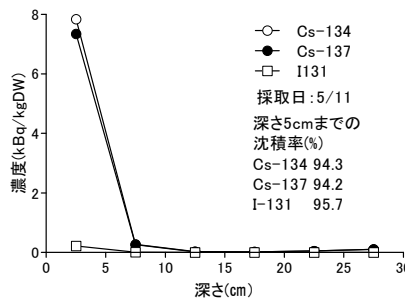


図5 土壌中放射性核種濃度の垂直分布(5/11)

(福島市渡利リンゴ園: 重埴土)

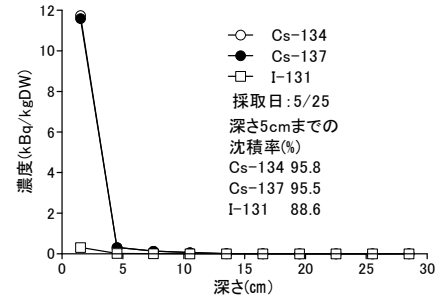


図6 土壌中放射性核種濃度の垂直分布(5/25)

(果樹研「紅玉」ほ場: 埴壤土)

◆ 土壌中放射性物質濃度の垂直分布(10/25)

(1) 放射性 Cs の垂直分布は砂質壤土~重埴土ではフォールアウト後 225 日(10/25)経過しても表層 0~3 cmに 90%以上が沈積していた。また 9cm までの沈積率では 4/26~5/25 と比較して 4%以内の低下にとどまった(表1)。

(2) 花崗岩系砂質土壌では 15%以上が 9cm 以下の下層に移行していた。9~18cm の層では 400Bq を超える放射性 Cs が検出された。このことから花崗岩系砂質土壌では放射性 Cs は下層に移行しやすいものと推察された。本土壌の深さ 10cm までの CEC、交換性 K は褐色森林土埴壤土と比較してともに 50%以下であった(図7、表1、2)。

表1 土壤中放射性Csの垂直分布

ほ場	三島ふじ		あかつき				紅玉				桑折・モモ園				渡利・リンゴ園						
	花崗岩系砂質土		褐色森林土・埴壤土				褐色森林土・埴壤土				沖積土・砂質壤土				褐色森林土・重埴土						
土性	¹³⁴ Cs		¹³⁷ Cs		¹³⁴ Cs		¹³⁷ Cs		¹³⁴ Cs		¹³⁷ Cs		¹³⁴ Cs		¹³⁷ Cs		¹³⁴ Cs		¹³⁷ Cs		
深さ (cm)	濃度 ² (%)	比率 (%)	濃度 (%)	比率 (%)	濃度 (%)	比率 (%)	濃度 (%)	比率 (%)	濃度 (%)	比率 (%)	濃度 (%)	比率 (%)	濃度 (%)	比率 (%)	濃度 (%)	比率 (%)	濃度 (%)	比率 (%)	濃度 (%)	比率 (%)	
3	1.63	77.4	1.85	77.2	5.31	94.4	6.16	94.1	5.02	96.2	5.56	95.7	1.65	92.0	2.13	91.0	2.23	89.4	2.83	89.5	
6	0.1	4.7	0.11	4.8	0.24	4.3	0.28	4.3	0.03	0.6	0.04	0.7	0.048	2.7	0.07	3.0	0.079	3.2	0.10	3.1	
9	0.06	2.8	0.07	2.7	0.04	0.7	0.05	0.7	0.02	0.3	0.03	0.4	0.017	1.0	0.03	1.1	0.054	2.2	0.07	2.2	
12	0.11	5.2	0.13	5.3	0.01	0.2	0.02	0.3	0.01	0.3	0.02	0.3	0.011	0.6	0.02	0.9	0.056	2.3	0.07	2.2	
15	0.06	3	0.07	3	0	0.1	0.01	0.1	0.01	0.2	0.02	0.3	0.026	1.4	0.04	1.5	0.033	1.3	0.04	1.4	
18	0.05	2.3	0.06	2.3	0.01	0.2	0.01	0.2	0.01	0.3	0.02	0.4	0.034	1.9	0.05	2.0	0.031	1.3	0.04	1.2	
21	0.02	1.1	0.03	1.1	0	0	0	0	0.1	0.03	0.6	0.04	0.7	0.004	0.2	0.01	0.3	0.007	0.3	0.01	0.3
24	0.02	1.1	0.03	1.1	0	0.1	0.01	0.1	0.02	0.4	0.02	0.4	0.002	0.1	0.003	0.1	0.003	0.1	0.004	0.1	
27	0.02	1.1	0.03	1.2	0	0	0	0	0.1	0.02	0.5	0.02	0.4	0.002	0.1	0.002	0.1	ND	-	ND	
30	0.03	1.3	0.03	1.3	0	0	0.01	0.1	0.03	0.6	0.04	0.7	ND	ND	ND	-	ND	-	ND	-	
合計	2.1	100	2.41	100	5.61	100	6.55	100.1	5.2	100	5.81	100	1.79	100	2.34	100	2.49	100	3.17	100	

²濃度の単位はkBq/kgDW

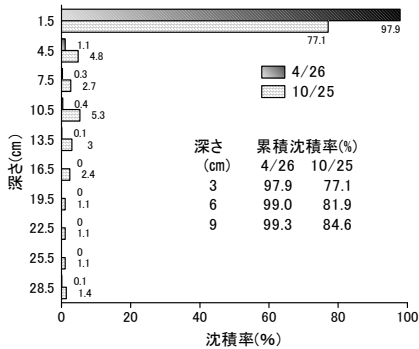


図7 ¹³⁷Csの垂直分布 (「三島ふじ」ほ場・砂質土)

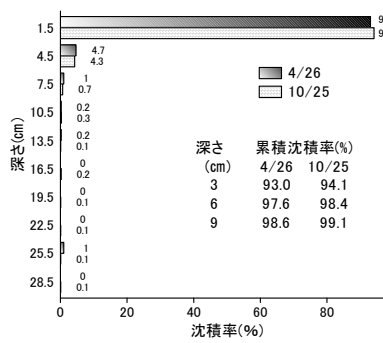


図8 ¹³⁷Csの垂直分布 (「あかつき」ほ場・埴壤土)

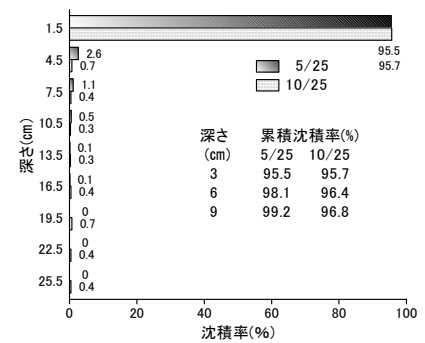


図9 ¹³⁷Csの垂直分布 (「紅玉」ほ場・埴壤土)

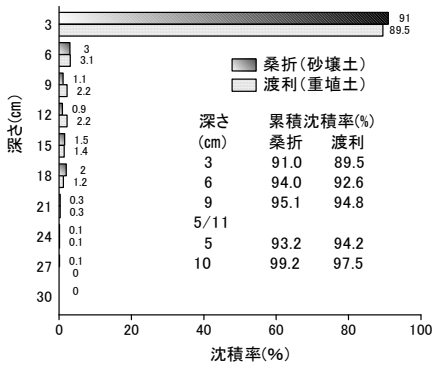


図10 ¹³⁷Csの垂直分布 (桑折・砂質壤土と渡利・重埴土)

表2 花崗岩系砂質土と褐色森林土・埴壤土とのCECおよび交換性Kの比較

土性	土壌管理法	CEC (cmol _c /kg)	交換性K (cmol _c /kg)
花崗岩系砂質土(A)	清耕部	8.4	0.35
	草生部	9.6	0.55
	平均	9.0	0.45
褐色森林土・埴壤土(B)	清耕部	18.9	1.08
	草生部	19.6	1.18
	平均	19.3	1.13
A/B(%)	清耕部	44.6	32.4
	草生部	48.9	46.4
	平均	46.8	39.7

注:0-10cm層1987、1991、1994年平均
出典:福島県果樹試験場研究報告Vol/18(2000)

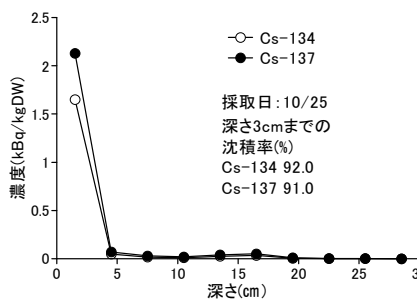


図11 土壤中放射性核種濃度の垂直分布(10/25) (桑折町モモ園:砂質壤土)

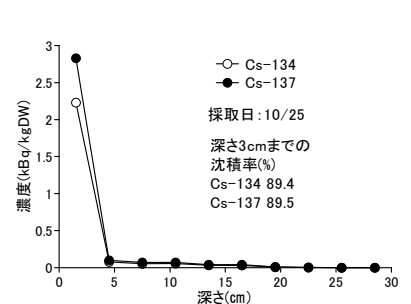


図12 土壤中放射性核種濃度の垂直分布(10/25) (福島市渡利リンゴ園:重埴土)

◆ 花崗岩系砂質土壌と放射性Cs垂直分布

花崗岩系砂質土壌ではフォールアウト後 225 日で放射性Csが表層下 18cm まで明らかな沈降が認められた。このような土壌では CEC が小さく交換性 K も褐色森林土・埴壤土の2分の1程度であり、K が不足している可能性がある。したがって、このような土壌では、土壌中の交換性 K 濃度を測定した上で K 肥料や吸着資材の施用を検討する必要がある。

◆ 土壤中放射性物質濃度の水平分布

- (1) 果樹研究所内の8ほ場(面積 5ha)から1ほ場につき、5か所の深さ 5 cmを採取混合して測定した放射性 Cs 濃度は 6.4~14.0kBq/kg(抑草シートほ場を除く)で2倍程度のバラツキが存在していた(図 13)。
- (2) 「あかつき」ほ場(面積 6a)の 12 樹から1樹につき、3か所の深さ 5 cmを採取混合して測定した放射性 Cs 濃度は 2.6~11.1kBq/kg で4倍程度のバラツキが存在していた(図 14)。
- (3) 「三島ふじ」ほ場(面積 3a)の 16 樹から1樹につき、2か所の深さ 5 cmを採取混合して測定した放射性 Cs 濃度は 2.3~11.2kBq/kg で5倍程度のバラツキが存在していた(図 15)。

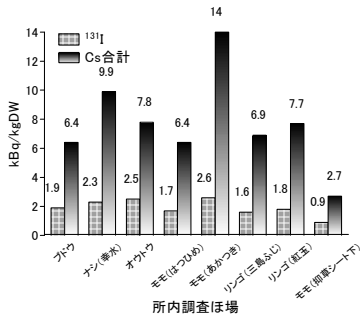


図 13 土壤中(5cm)放射性核種濃度の水平分布 (ほ場間)

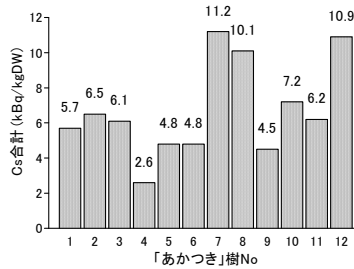


図 14 土壤中(5cm)放射性核種濃度の水平分布 (樹間:あかつき)

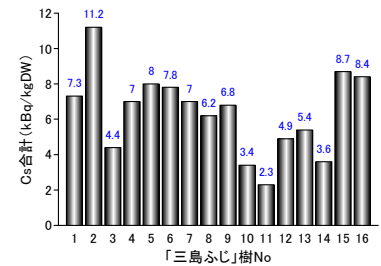


図 15 土壤中(5cm)放射性核種濃度の水平分布 (樹間:三島ふじ)

◆ 土壤中放射性 Cs の水平分布

土壤中放射性物質濃度の水平分布は変動幅が大きく、樹園地の土壤中の放射性 Cs 濃度は 10a に満たないほ場でも樹間のバラツキが4~5倍程度ある。そのため土壤中放射性物質濃度の分析値のみでの樹園地の汚染実態の判定は限界がある。サーベーターによる測定により樹園地内のホットスポットを検出し、汚染マップを作成することが実用的である。

◆ 土壌表面 1cmの放射線量の経時的推移

- (1) 地表から 1cm 高の放射線量は調査開始から 5 月 25 日までの 44 日間で約 30%低下した。これは ¹³¹I の低下(3月 15 日の 512 分の 1;0.5 の 9 乗倍)によるものである。¹³¹I が消失した5月 25 日以降の 200 日間では約 20%低下した(図 16)。

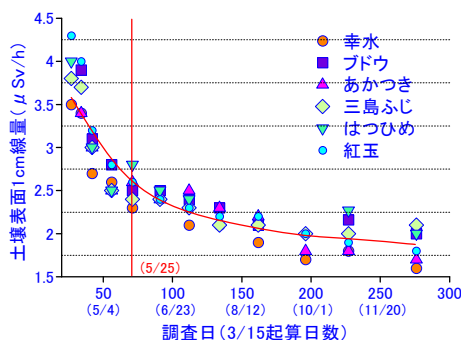


図 16 土壌表面(1cm)の空間線量の経時的推移

土壌採取日	3/15起算日数	ほ場	¹³¹ I/ ¹³⁷ Cs比	減衰比
4/15	31	紅玉	0.84	1
4/26	42	三島ふじ	0.4	
		あかつき	0.51	
		平均	0.46	0.55
5/11	57	桑折	0.11	
		渡利	0.03	
		平均	0.07	0.08
5/25	71	紅玉	0.03	0.03

放射線測定日	3/15起算日数	放射線量 (μS/h)	5月29日との差	減衰比
4/15	31	3.7	1.21	1
4/26	42	3.08	0.59	0.49
5/11	57	2.58	0.09	0.07
5/25	71	2.5	0.009	0.007
5/29	75	2.49	0	

注:減衰曲線より算出

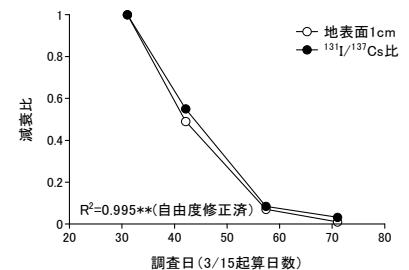


図 17 土壌表面線量と¹³¹I/¹³⁷Cs比の減衰比

◆ 樹園地内外の空間線量と地表面線量の関係

- (1) 樹園地の放射線量は土壌表面 > 園内(地上1m) > 園外(地上1m)の順に高かった(図 18~25)。
- (2) 樹園地内の地上部1mの放射線空間線量は地表面1cm高の放射線量と相関が高く、樹園地内空間放射線量は土壌表面放射線量の影響を強く受ける(図 27)。

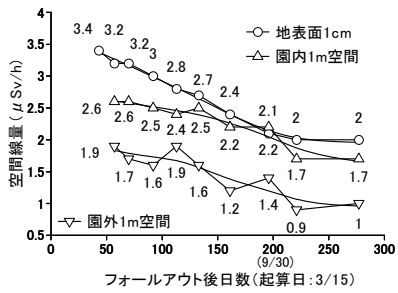


図 18 地表面および樹園地内外空間線量の推移(柱沢)

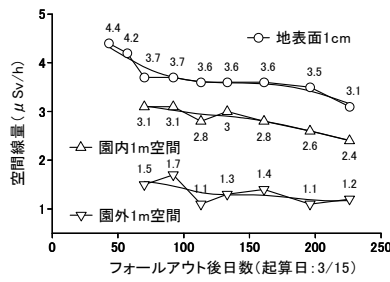


図 19 地表面および樹園地内外空間線量の推移(渡利)

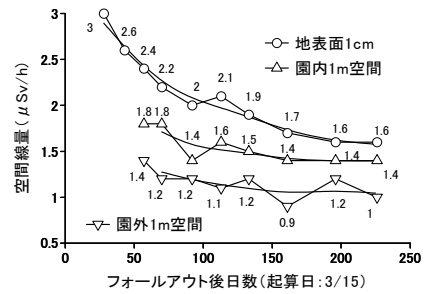


図 20 地表面および樹園地内外空間線量の推移(宮代)

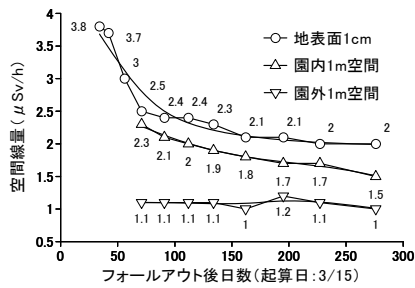


図 21 地表面および樹園地内外空間線量の推移(あかつき)

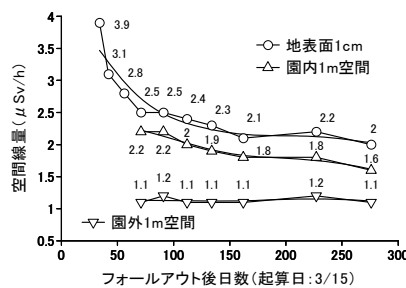


図 22 地表面および樹園地内外空間線量の推移(ブドウ)

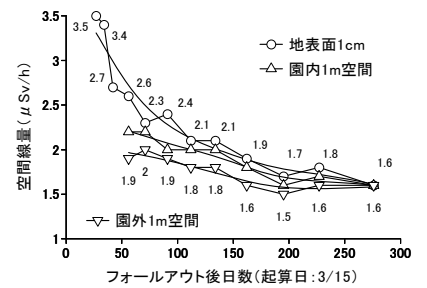


図 23 地表面および樹園地内外空間線量の推移(幸水)

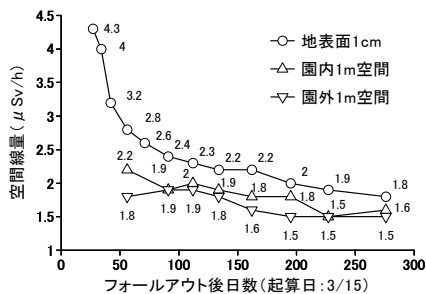


図 24 地表面および樹園地内外空間線量の推移(紅玉)

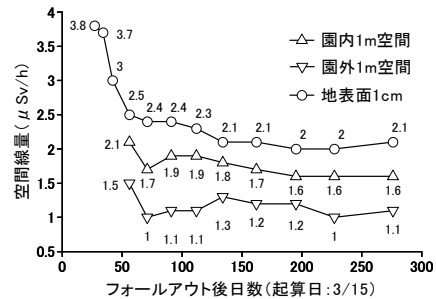


図 25 地表面および樹園地内外空間線量の推移(三島ふじ)

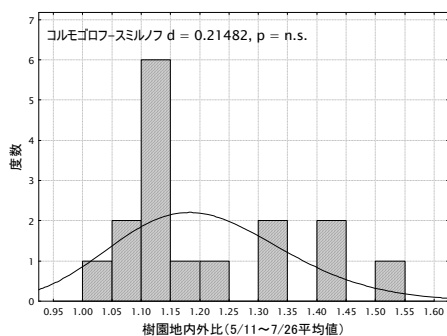


図 26 樹園地内外の空間放射線量の比較

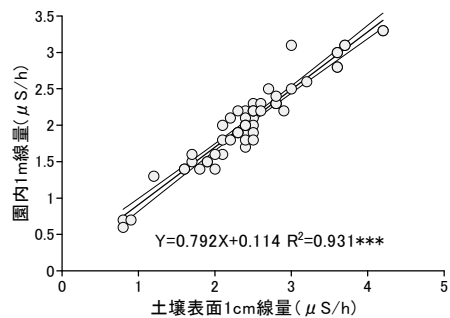


図 27 土壌表面放射線量と樹園地内空間線量間の相関関係

◆ 樹園地の下草の放射性核種濃度および経時的推移

- (1) 果樹研ほ場に植生するケンタッキーブルーグラスとシロクローバーの6月(2番草)から9月までの放射性Cs濃度は時間とともに減衰傾向を示し、対数変換した葉中Cs濃度は、採取日との間で直線関係が認められた。1番草の刈取り日を5月1日とした時の推定濃度はケンタッキーブルーグラスで14,757Bq/kgFW、シロクローバーでは17,140 Bq/kgFWと高濃度であった(図28、29)。
- (2) ケンタッキーブルーグラス等のイネ科多年草の根群は土壤表層下2~3cm以内に密生し、ルートマット層(以下、RM層)を形成していた。RM層とその直下5cmの土壤層の放射性Csの濃度比は10倍を超えた。また、RM層を含む表層下5cmとの放射性Csの濃度比は3~4倍であった。
- (3) ペレニアルライグラス系イネ科多年草のRM層の洗浄によりRM層の95%の放射性Csが離脱し、RM中の放射性CsはRM層の5%にとどまった(図30)。
- (4) イヌビエ、ギシギシ、メシバ、オオバコおよびスベリヒユの茎葉中の放射性Cs濃度は110~20Bq/kgFWの範囲でオオバコ>イヌビエ>メシバ>スベリヒユ>ギシギシの順であった(図33)。
- (5) 下草の地上茎葉部の放射性セシウム濃度は、越冬株が直接汚染されていた多年生草種であるケンタッキーブルーグラスやシロクローバーで高濃度であったが、多年生でも深根性で葉の大きいギシギシでは低濃度であったことから、地上茎葉部の放射性Cs濃度は、下草の根域の分布特性や葉の大きさなども影響している可能性が高い。

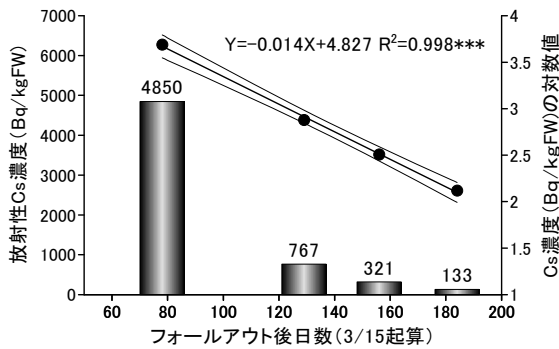


図28 ケンタッキーブルーグラスの葉中Cs濃度の経時的推移

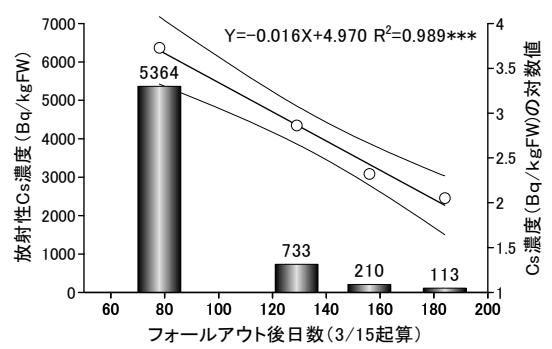


図29 シロクローバーの葉中セシウム濃度の経時的推移

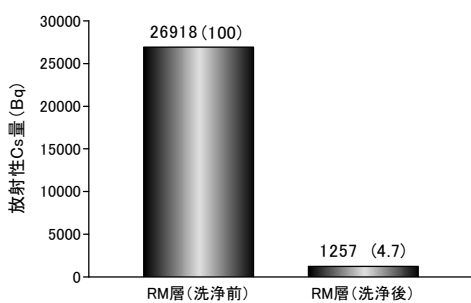


図30 洗浄によるRM層中Cs量の比較



図32 洗浄後のRM根群層



図31 洗浄前のRM層の厚さ

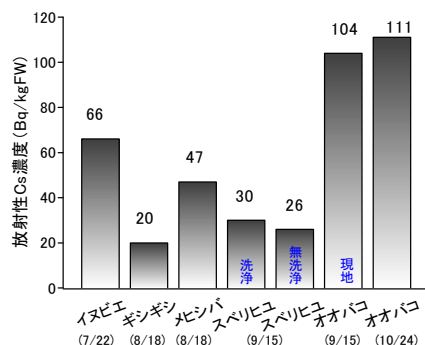


図33 樹園地の下草類の放射性Cs濃度

◆ イネ科多年草 RM 層の放射性 Cs

- イネ科多年草の植生する樹園地ではほとんどの放射性 Cs が厚さ 2cm 程度の RM 層に存在する。RM に吸収されている放射性 Cs 量は限定的で RM 層のほとんどが土壤に存在している。
- このことからイネ科多年草の地上部の放射性 Cs 濃度の経時的減衰の原因は土壤中の放射性 Cs が時間の経過とともに不可吸態化したためと推察された。
- イネ科多年草やシロクロバー、オオバコは9月から12月の採取でも、葉中 Cs 濃度として 100~200Bq 検出されているので、下草の中では放射性 Cs の吸収能力が高いものと考えられる。

◆ 樹体表面の汚染状況

- (1) 6種類の落葉果樹(モモ、オウトウ、リンゴ、ナシ、ブドウ、カキ)の主枝分岐部から30cmの位置の周囲方向で上部、側部、下部の位置の汚染状況を GM サーベーターにより測定した。上部 > 側部 > 下部の順に放射線量は高く主枝表面の天空側で地面側に比べ明らかに高い放射線量が計測された(図 34)。また、上部の放射線量は経時的に減衰した。
- (2) ナシ「幸水」およびブドウ「あづましずく」の主枝の樹皮中放射性 Cs 濃度は上部(天空側)で高い濃度を示した(図 35)。
- (3) モモでは表皮に7~14 万 Bq/kgFW を超える放射性 Cs が沈積し、内皮でもその 10 分の 1 程度の放射性 Cs が検出された(図 36)。
- (4) カキでは表皮の放射性 Cs 濃度は主幹 > 3年枝 > 2年枝(前年枝) > 当年枝の順に高く、枝齢を重ねるほど高まった。木部では2年枝のみ高く、当年枝、3年枝の3倍となった(図 37)。コケは 40 万 Bq を超え、主幹樹皮の4倍以上の高濃度を示した(図 38)。

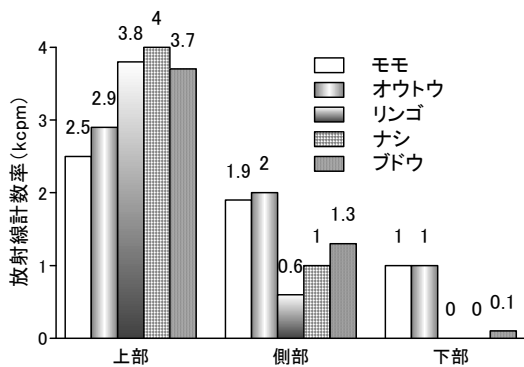


図 34 主枝表面の部位別(円周方向)放射線量

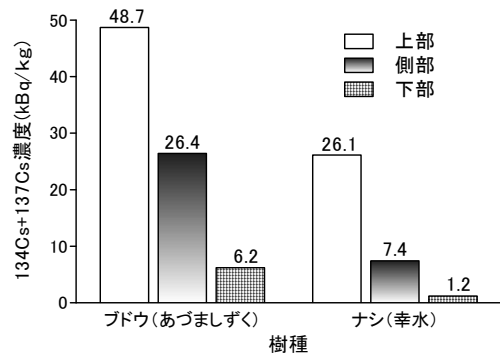


図 35 主枝表面の部位別(円周方向)放射性 Cs 濃度(5/25 採取)

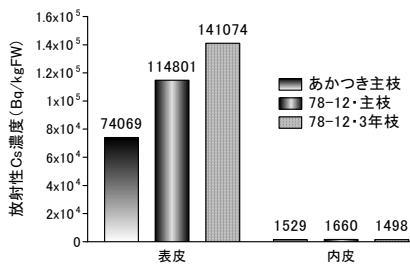


図 36 モモ主枝および側枝表面の放射性 Cs 濃度(6/16 採取)

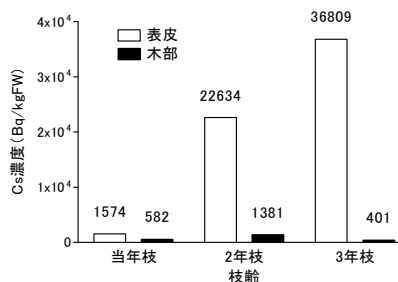


図 37 カキ側枝および当年枝の放射性 Cs 濃度(10/18 採取)

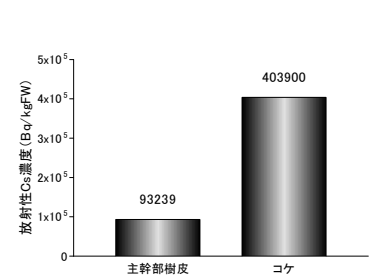


図 38 カキ主幹樹皮およびコケの放射性 Cs 濃度(11/14 採取)

◆ 樹園地における土壤表面および樹皮表面の放射線量の経時的推移

- (1) 土壤表面は 5/9、樹皮表面は 5/10 の測定値を 100 として以後の測定値の比率を算出した。
- (2) 土壤表面の放射線量は、5/9 から 175 日の期間で約 70% 程度までに減衰した。樹皮表面の放射線量は 5/10 から 176 日の期間で 45~50% までに減衰した。フォールアウト後約 120 日目までは急激に減衰し、以後は緩やかな減衰傾向を示した。
- (3) 樹皮表面の放射線量の減衰率は土壤表面と比較して 20~25% 程度高く、また減衰傾向は急激な減衰とその後の緩やかな減衰の 2 パターンに分かれ、既知の放射性 Cs の生態学的半減期の減衰傾向と類似していた。このことから、土壤と比較して樹皮上の放射性核種の動態は樹皮周辺の環境の影響を受け拡散しやすいものと推察された。

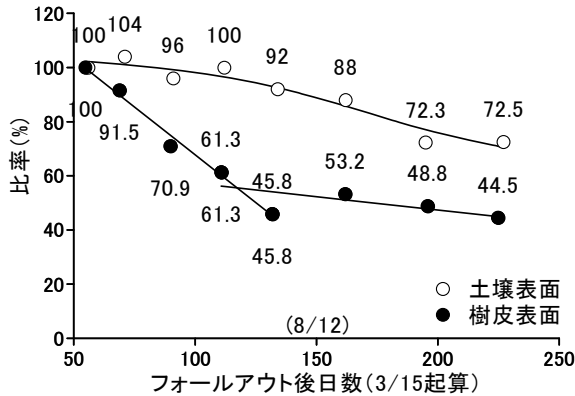


図 39 土壤表面および樹皮表面の放射線量の経時的推移(モモ)

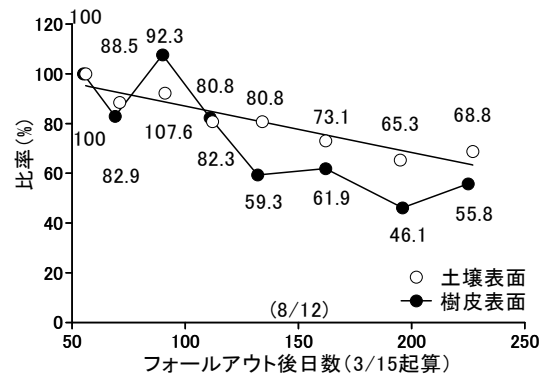


図 40 土壤表面および樹皮表面の放射線量の経時的推移(ナン)

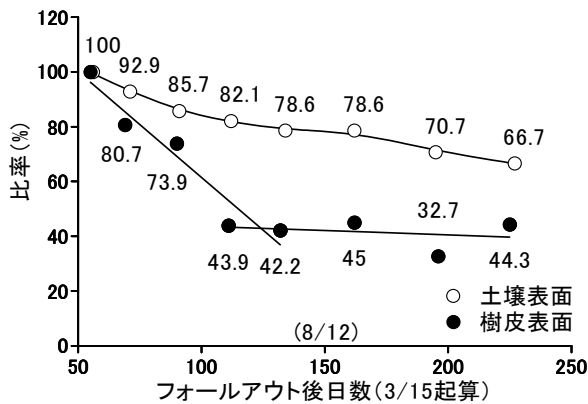


図 41 土壤表面および樹皮表面の放射線量の経時的推移(リンゴ)

◆ 生態学的半減期

植物では土壤からの再吸収、動物では汚染された食物の再摂取など、日々変動する自然生態系において循環する生物の生活環境の影響をひとまとめにして観測対象の放射能を減少させる過程を評価した半減期を生態学的半減期(ecological half-life)という

◆ 樹園地土壤の除染の考え方

- 果樹は深根性であり、耕うんは主根域が分布する下層土へ放射性 Cs を移動させることになるので除染方法としては不適である。限定された垂直分布と不均一性の大きい水平分布を活用することが樹園地土壤除染のポイントとなる。
- 表土 3cm の剥ぎ取りは土壤中の放射性 Cs 濃度を低下する上で効果的であるが、機械による除去は経済的、地形的制約がある。樹園地内のホットスポットなど、対象を限定して実施。
- 中・長期的には下草の表層管理による RM や根群層を活用した除染が有効と考えられる。この手法では表層は 2cm 以内でも効果が高い。

2 落葉果樹の葉および果実中放射性 Cs の経時的推移および移行係数

◆ オウトウ、モモ、ブドウ、ナシ、リンゴおよびカキの葉および果実内放射性 Cs の経時的推移

- (1) 果実中 Cs 濃度はモモ、ナシ、リンゴでは満開後 40 日以内(6/1)の幼果期で高く、成熟果の 5~7 倍の高濃度であった。しかし、満開後 50 日頃には少なくとも幼果期の 3 分の 1 以下まで激減した。これに対し、成熟期の濃度の低下は緩やかであった。
- (2) 果実当たりの Cs 量はブドウ、ナシ、リンゴ、カキでは果実肥大に係わらず完熟期の 30 日前からほぼ一定量で推移した。しかし、モモでは完熟期まで果実肥大とともに増加した。
- (3) 葉中 Cs 濃度はモモ、ナシ、リンゴでは果実同様、未成熟葉で高濃度を示した。ブドウでは発芽後 29 日から増加しベレゾーン直前期(7/12)で最高値を示した。またカキでも着色開始期前の成葉(8/23)で高濃度を示した。成熟期ではいずれの樹種も減衰傾向を示したが、オウトウおよびカキでは他の樹種に比較し成熟期の葉中 Cs 濃度は高濃度であった。また、生育期間の長いリンゴ、カキでは果実肥大期から成熟期まで一定濃度で維持された。

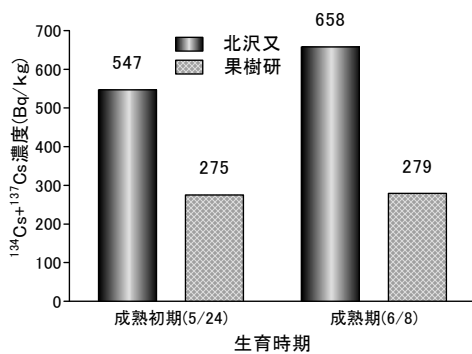


図 42 葉中 Cs 濃度(紅さやか)

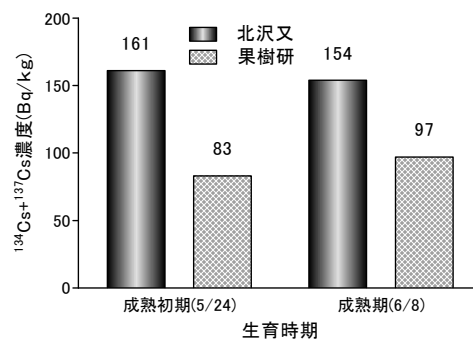


図 43 果実中 Cs 濃度(紅さやか)

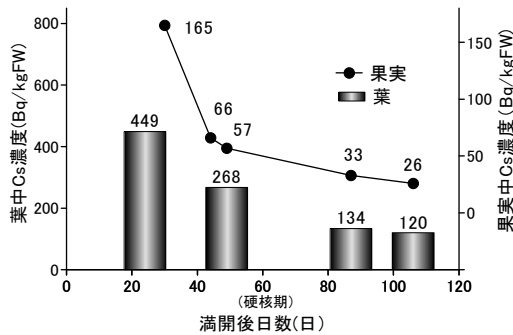


図 44 葉および果実中 Cs 濃度の推移(あかつき)

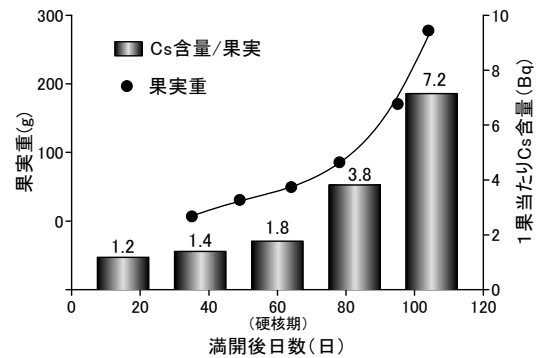


図 45 果実当たり Cs 含量の推移(あかつき)

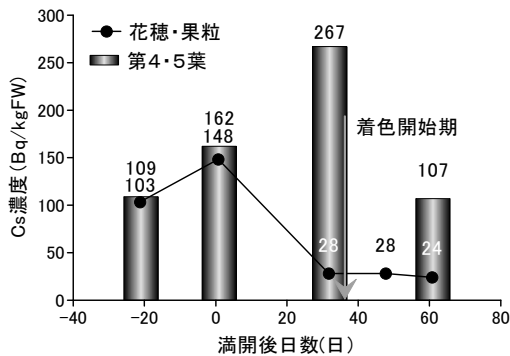


図 46 葉および果実中 Cs 濃度の推移(あづまじく)

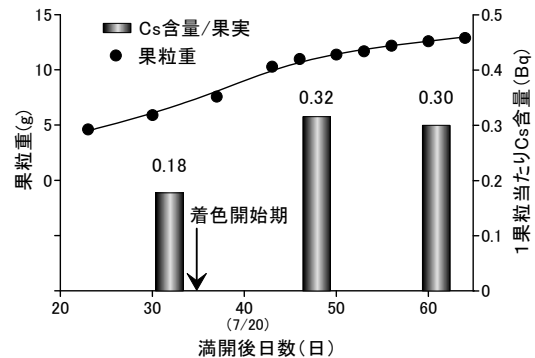


図 47 果実当たり Cs 含量の推移(あづまじく)

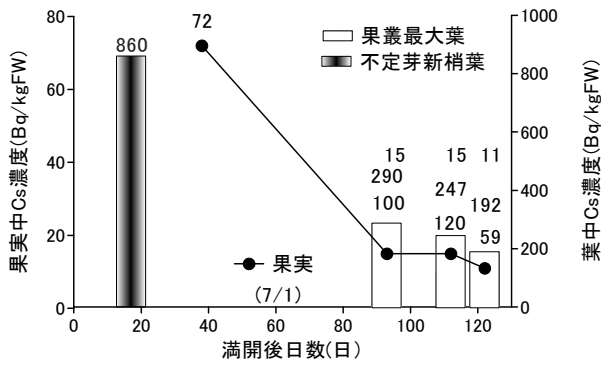


図 48 葉および果実中 Cs 濃度の推移(幸水)

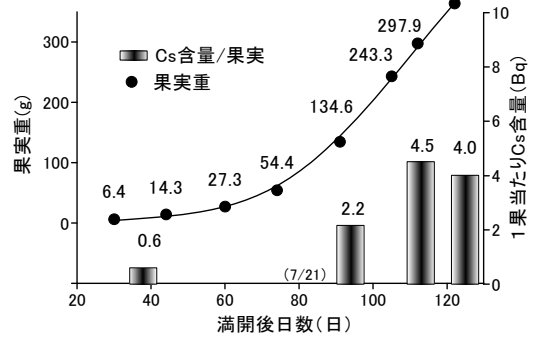


図 49 果実当たり Cs 含量の推移(幸水)

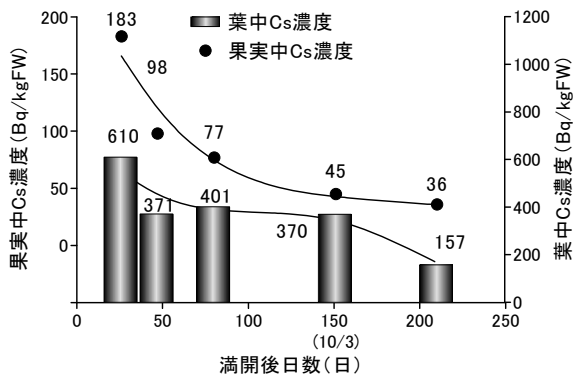


図 50 葉および果実中 Cs 濃度の推移(ふじ)

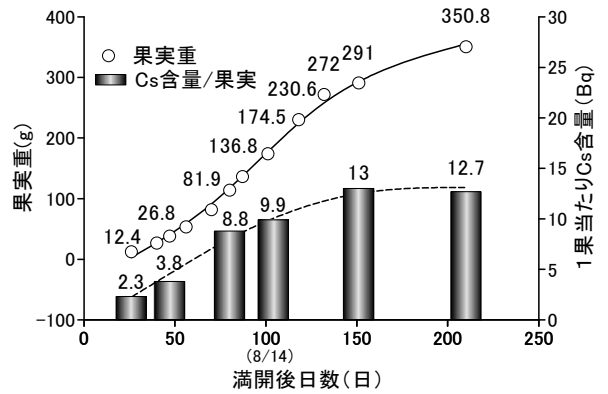


図 51 果実当たり Cs 含量の推移(ふじ)

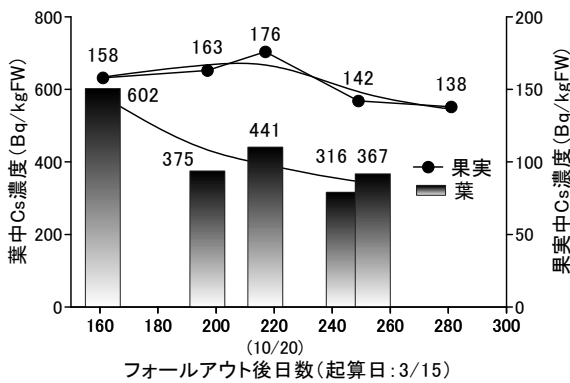


図 52 葉および果実中 Cs 濃度の推移(蜂屋)

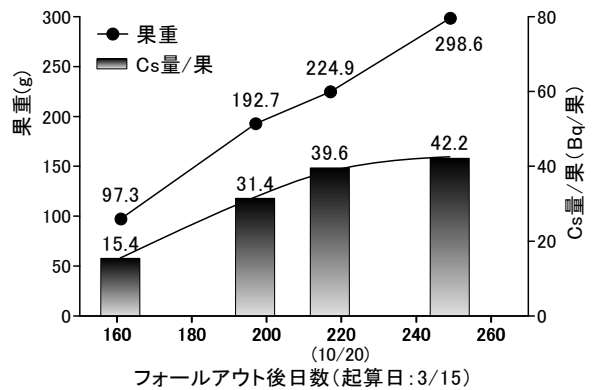


図 53 果実当たり Cs 含量の推移(蜂屋)

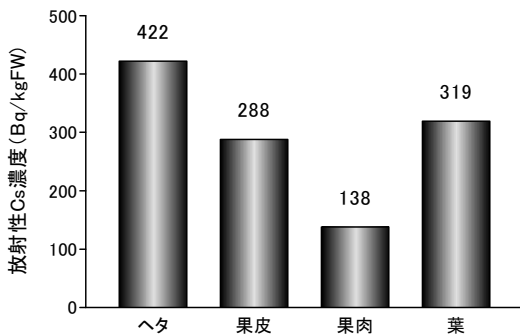


図 54 カキ「蜂屋」果実の部位別 Cs 濃度(11/14 採取)

カキでは果実の呼吸器官であるへたが乾物換算で果肉の2倍の高濃度を示した。

葉および果実の乾物当たり放射性Cs濃度

器官名	乾物率 (%)	¹³⁴⁺¹³⁷ Cs濃度 (Bq/kgDW)	±	誤差
へた	35.5	1188	±	56.8
果皮	20.2	1423	±	39.7
果肉	21.6	638	±	21.7
葉	29.4	1083	±	51.5

注:採取日 11月14日

◆ オウトウ、モモ、ブドウ、ナシ、リンゴおよびカキの移行係数

(1) 表層 5 cm の土壤中 Cs 濃度を深さ 20cm に換算し、以下の式により、移行係数 (TF) を算出した。

$$\text{移行係数 (TF)} = \frac{\text{果実中の Cs 濃度 (Bq/新鮮重 kg)}}{\text{土壌 20cm の Cs 濃度 (Bq/乾土 kg)}}$$

(2) 移行係数は樹種間で有意差が認められ、オウトウで他の樹種より高かった。見かけの移行係数の平均値は各樹種とも 10^{-2} オーダーであった。最大値は果樹研オウトウ「紅秀峰」0.054、最小値は果樹研ナシ「幸水」0.004 で 13.5 倍の差に留まり、変動幅は比較的小さかった。

(3) 成熟期の放射性 Cs 濃度の葉/果実比はナシ「幸水」以外は 3~6 の範囲で樹種間差は認められなかった。上保原の「あかつき」および柱沢の「蜂屋」は 2.1 および 2.3 で低く、果樹研「はつおとめ」および「幸水」(最大果叢葉)では 10 以上で高かった。

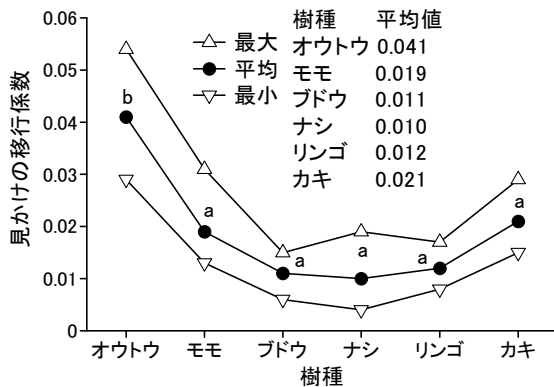


図 55 移行係数の比較

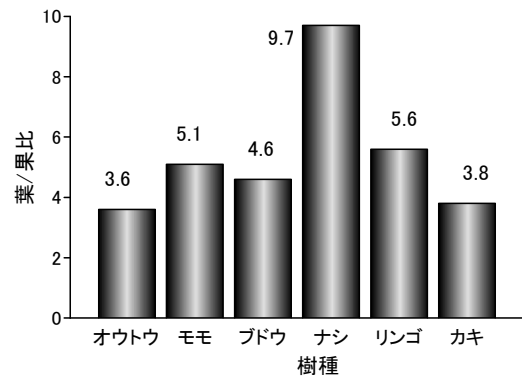


図 56 成熟期の Cs 濃度の葉/果実比の比較

異なる英小文字間でチューキーの多重検定法により危険率 5% で有意差あり

表6 オウトウ、モモ、ブドウ、ナシ、リンゴおよびカキの移行係数

樹種	品種	産地	土壌表層5cm			成熟果			移行係数	文献の移行係数
			¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	合計	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	合計		
オウトウ	紅さやか	北沢又	10.7	10.3	20.9	77.0	77.0	154.0	0.029	0.002
		果樹研	3.9	3.9	7.8	48.8	48.2	97.0	0.050	~0.072
		佐藤錦	3.9	3.9	7.8	26.0	33.0	59.0	0.030	
		紅秀峰	3.9	3.9	7.8	51.8	52.7	104.6	0.054	
モモ	はつおとめ	果樹研	3.2	3.2	6.4	14.0	16.6	30.6	0.019	0.009
		はつひめ	果樹研	3.2	3.2	6.4	15.9	15.7	31.6	0.020
	日川白鳳	桑折	5.2	5.0	10.2	20.6	21.2	41.8	0.016	
		果樹研	3.2	3.2	6.4	10.4	11.0	21.3	0.013	
	あかつき	湯野	1.6	1.6	3.2	7.3	8.1	15.4	0.019	
		果樹研	3.1	3.1	6.3	11.7	14.0	25.7	0.016	
ブドウ	あずましずく	上保原	2.0	2.0	4.0	14.1	16.3	30.4	0.031	
		果樹研	3.2	3.2	6.4	11.2	12.5	23.7	0.015	0.001~
		巨峰	果樹研	3.2	3.2	6.4	10.5	10.6	21.1	0.013
ナシ	幸水	高子	9.4	9.0	18.4	12.9	15.4	28.4	0.006	
		果樹研	5.0	4.9	9.9	5.3	5.7	11.0	0.004	0.006
		笹木野	1.4	1.3	2.7	6.1	6.7	12.8	0.019	(洋ナシ)
リンゴ	ふじ	果樹研	4.2	4.2	8.4	4.1	8.8	12.9	0.006	
		果樹研	3.4	3.4	6.9	11.6	17.1	28.7	0.017	0.00086
		宮代	4.6	4.5	9.1	12.7	15.0	27.7	0.012	~0.037
カキ	蜂屋	渡利	11.9	11.5	23.5	18.7	28.5	47.1	0.008	
		果樹研	3.9	3.8	7.7	11.5	16.8	28.3	0.015	—
	平無核	柱沢	9.7	9.3	18.9	63.0	74.8	137.8	0.029	
		果樹研	3.9	3.8	7.7	15.3	17.2	32.5	0.017	
禅寺丸	果樹研	3.9	3.8	7.7	17.7	25.1	42.7	0.022		

表7 成熟期の新梢葉中Cs濃度

樹種	品種	産地	採取日	放射性Cs濃度(Bq/kgFW)			葉/果比	備考
				¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	合計		
オウトウ	紅さやか	北沢又	6/8	331	327	658	4.3	
		果樹研	6/10	140	139	279	2.9	
モモ	はつおとめ	果樹研	6/22	179	202	381	12.5	
		果樹研	7/12	60	61	121	3.8	
	桑折	7/6	80	82	162	3.9		
	あかつき	果樹研	8/10	55	65	120	4.7	
		上保原	8/9	28	36	64	2.1	
ブドウ	あずましずく	果樹研	8/10	51	57	107	4.5	第4、5葉
ブドウ	巨峰	果樹研	9/5	66	63	128	6.1	第4、5葉
		高子	9/5	43	49	92	3.3	第4、5葉
ナシ	幸水	果樹研	9/1	95	96	192	17.4	最大果叢葉
		笹木野	9/5	39	47	86	6.8	最大果叢葉
		果樹研	9/1	25	34	59	5.3	不定芽新梢葉
		笹木野	9/5	57	63	120	9.4	不定芽新梢葉
リンゴ	三島ふじ	果樹研	12/2	75	101	176	6.1	
		果樹研	12/2	70	88	157	4.3	
		渡利	11/14	129	175	304	6.5	
カキ	蜂屋	果樹研	11/24	64	73	137	4.8	
		柱沢	11/14	128	188	316	2.3	
		平無核	果樹研	11/25	63	72	135	4.1

◆ 落葉果樹の果実への放射性核種の吸収移行

- 移行係数は、オウトウが高く、モモ、ブドウ、ナシ、リンゴ、カキでは樹種間差はなかった。モモでは既報以上の値を示した。
- 土壌中の放射性 Cs は粘土鉱物と結びつきやすく植物に吸収されにくい。また、土壌中の放射性 Cs は、発芽後の新梢生育期間は表層の3cm 程度の極浅いところに 95%以上が存在しており、深根性の果樹の根域の放射性 Cs 濃度は低い。
- 以上から果樹では土壌からの放射性セシウムの吸収の可能性は極めて低く、樹皮上の放射性セシウムが何らかの経路で樹体内に移行した可能性が高い。

◆ 樹齢の異なるモモにおける果実中放射性セシウム濃度の比較

(1) 果樹では土壌よりも樹皮上に沈積した放射性 Cs の影響が高い可能性が疑われている。樹皮上の沈積量と関連性が高い樹容積は樹齢に依存する。そこで樹齢の異なるモモ12年生および18年生「あかつき」、6年生および18年生「ゆうぞら」における果実中放射性 Cs 濃度を比較し、果実への放射性 Cs 移行に対する樹齢の影響を検証した。

(2) 果実中放射性 Cs 濃度は「あかつき」「ゆうぞら」ともに樹齢の進んだ樹で有意に高かった。特に樹齢差の大きい「ゆうぞら」で濃度差は大きかった。このことからモモの果実中 Cs 濃度は樹皮上の放射性 Cs の沈積量の影響が高いものと推察された。

表8 樹齢を異にするモモ「あかつき」の果実中放射性Csの比較

樹齢	反復	¹³⁴ Cs濃度(Bq/kg)		¹³⁷ Cs濃度(Bq/kg)		¹³⁴⁺¹³⁷ Cs濃度(Bq/kg)	
		濃度	± 誤差	濃度	± 誤差	濃度	± 誤差
18年生	1	15.6	± 1.3	16.3	± 0.8	31.9	± 1.6
	2	18	± 1.6	19.9	± 1	37.9	± 1.9
	3	17.8	± 1.4	18.7	± 0.8	36.6	± 1.6
12年生	1	9.7	± 0.5	13.4	± 0.9	23.1	± 1
	2	11.4	± 0.5	12.6	± 0.8	23.9	± 1
	3	14.1	± 0.5	16	± 0.8	30.1	± 1
18年生	平均	17.1	± 1.4	18.3	± 0.9	35.5	± 1.7
12年生	平均	11.7	± 0.5	14	± 0.8	25.7	± 1
t検定p値							0.027(*)

表9 樹齢を異にするモモ「ゆうぞら」の果実中放射性Csの比較

樹齢	反復	¹³⁴ Cs濃度(Bq/kg)		¹³⁷ Cs濃度(Bq/kg)		¹³⁴⁺¹³⁷ Cs濃度(Bq/kg)	
		濃度	± 誤差	濃度	± 誤差	濃度	± 誤差
18年生	1	19.6	± 1.6	22.6	± 1.1	42.2	± 2
	2	19	± 1.4	21.4	± 0.9	40.4	± 1.7
	3	23.9	± 2.4	28.9	± 1.7	52.8	± 2.9
6年生	1	6.3	± 0.6	8.8	± 0.5	15.2	± 0.8
	2	8.8	± 1.4	9.2	± 0.9	18	± 1.7
	3	9	± 0.9	10	± 0.5	19.1	± 1
18年生	平均	20.8	± 1.8	24.3	± 1.2	45.1	± 2.2
6年生	平均	8.1	± 1	9.3	± 0.6	17.4	± 1.2
t検定p値							0.002(**)

◆ 鱗片および芽鱗痕の汚染状況

- (1) オウトウ「紅秀峰」の鱗片を含む芽鱗痕部からは 15000Bq/kg を超える放射性 Cs が検出された。果柄の放射性 Cs 濃度は果実より低かった。芽鱗痕部を採取した 7/6 の Cs 濃度を果肉 100Bq/kg、鱗片を含む芽鱗痕部を 15000Bq/kg とすると、芽鱗痕部の重量は 0.05g、果実重は 15g 程度なので果梗当たりの Cs 量は 0.75Bq、果実あたりでは 1.5Bq 程度になる。1果叢あたり 5 果とすると果叢あたりでは 7.5 Bq。従って果叢には芽鱗痕部の 10 倍以上の Cs が蓄積されていることになる。
- (2) モモ「あかつき」の果梗部器官別では、果梗（基部）<芽鱗痕表層<鱗片の順に高濃度の放射性 Cs が検出され、芽鱗痕部を含む果梗部は 5000Bq/kg を超えた（図 39）。果梗を採取した 7/6 の Cs 濃度を果肉 60Bq/kg、芽鱗痕を含む果梗部 5000Bq/kg とすると、果梗の重量は 0.1g、果実重は 60g 程度なので果梗当たりの Cs 量は 0.5Bq、果実あたりでは 3.6Bq 程度になる。従って果実には果梗部の 7 倍以上の Cs が蓄積されていることになる。

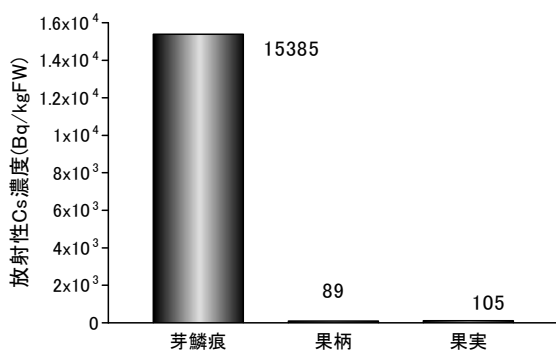


図 57 オウトウ「紅秀峰」の芽鱗痕および果柄部の放射性 Cs 濃度 (7/6 採取)

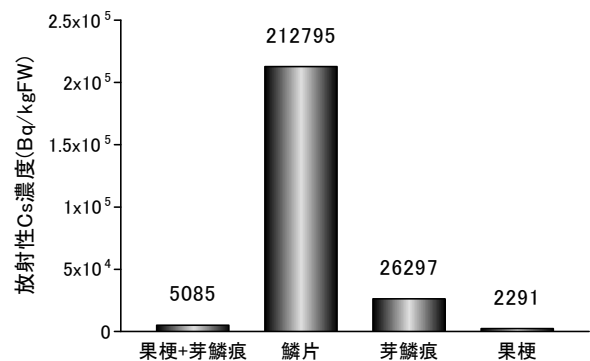


図 58 モモ「あかつき」の芽鱗痕および果梗部の放射性 Cs 濃度 (7/6 採取)



図 59 芽鱗痕・鱗片・果梗

表10 モモ「あかつき」の果実と果梗部のCs含量試算値

器官	7/6のCs濃度	7/6の重量	7/6のCs含量
	(A) (Bq/kgFW)	(B) (g)	(A×B) (Bq)
果肉	60	60	3.6
果梗部	5000	0.1	0.5
果肉/果梗部	0.012	600	7.2

◆ 芽鱗痕中放射性 Cs と果実中放射性 Cs の関係

7月6日に採取したオウトウおよびモモの果実中の Cs 量は鱗片を含む芽鱗痕の Cs 量の数倍に相当することから、冬芽の鱗片に沈積した放射性 Cs と果肉内放射性 Cs との関連性は低いものと推定された。

3 ユズの葉および果実内放射性 Cs の経時的推移および移行係数

- (1) 果実中の放射性 Cs 濃度は 7/26 から経時的に減衰傾向を示し、11/14 には 7/26 の濃度と比較してほぼ半減した。また果皮と果肉では果皮が果肉より 40% 程度、高濃度であった。果実当りの放射性 Cs 量は果皮の黄化開始期 (9/28) からは果実の肥大に係わらずほぼ一定量で推移した。
- (2) 葉中の放射性 Cs 濃度は、旧葉および春枝葉ともに経時的な減衰傾向は認められなかった。旧葉は 10000Bq/kgFW 以上で推移し、最大で 42000Bq/kgFW が検出された。春枝葉は 1000~10000 Bq/kgFW の範囲で推移した。
- (3) 土壌からの移行を前提とした移行係数は落葉果樹の約 6 倍に達した。なお 7/26~11/14 の期間の旧葉の平均濃度 (1834Bq/kgFW) と 11/14 の果実の平均濃度 (624 Bq/kgFW) の比は 0.034 であった。
- (4) 10/26 に採取した土壌中放射性 Cs の垂直分布は 40% 以上が深さ 3~18cm まで沈降していた。

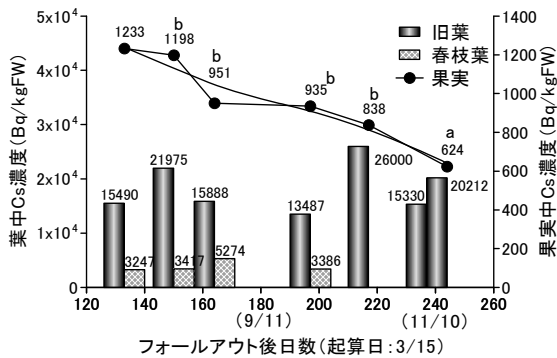


図 60 葉および果実中 Cs 濃度の推移(ユズ)
異なる英小文字間でチューキーの多重検定法により危険率 5% で有意差あり

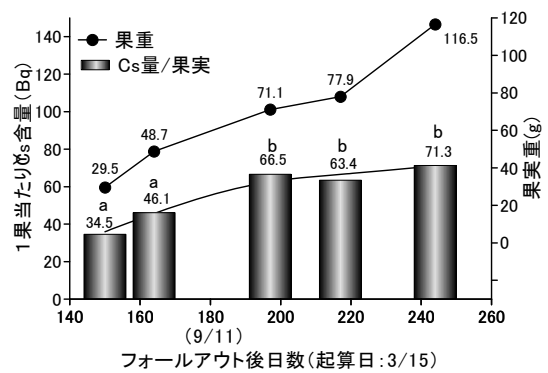


図 61 果実中 Cs 含量の推移(ユズ)
異なる英小文字間でチューキーの多重検定法により危険率 5% で有意差あり

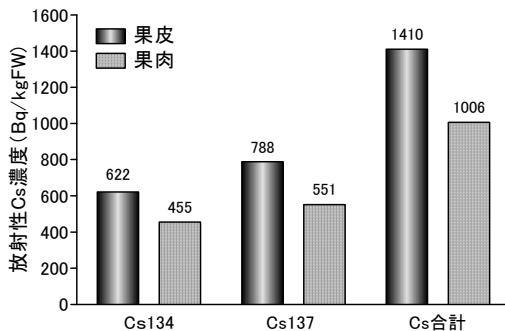


図 62 ユズ果実の部位別放射性 Cs 濃度 (9/28 採取)

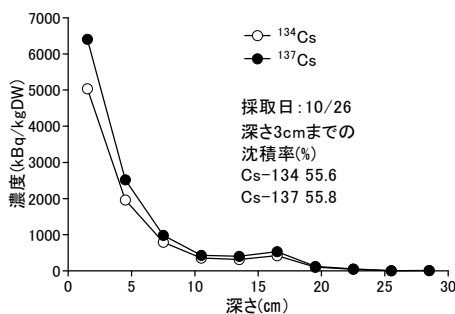


図 63 土壌中放射性核種濃度の垂直分布 (10/26)

産地	土壌表層5cm			成熟果			移行係数
	放射性Cs濃度(kBq/kgDW)			放射性Cs濃度(Bq/kgFW)			
	Cs134	Cs137	合計	Cs134	Cs137	合計	
滝	9.1	9.0	18.2	247.5	333.5	581.0	0.128
谷	12.1	12.1	24.2	234.8	322.2	557.0	0.092

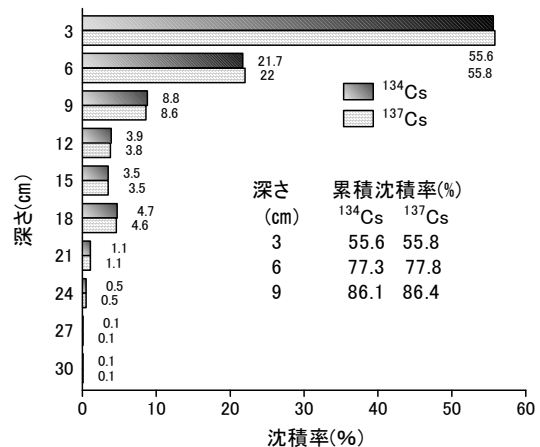


図 64 放射性 Cs の垂直分布 (信夫山:凝灰岩系シルト質壤土)

3 除染技術

- ◆ 国が示した除染の目標は、環境から放射性物質を排除する観点が抜けている。農畜産物及び牧草のモニタリング等において放射性セシウムが検出されないこと。追加被ばく線量が年間1mSv(空間線量率0.23 μ Sv/h)以下となること。

- ◆ 環境全体が放射性核種で汚染されているという認識が重要。樹園地では放射性核種による土壤汚染と樹体汚染が混在している。
 - ◇ 樹体の除染: 整枝・せん定、粗皮削り・粗皮剥ぎ、樹体洗浄
 - ◇ 土壤の除染: 表土の削り取り、下草のルートマット層の育成・剥離
 - ◇ 2次汚染対策: 屋敷林(アカマツ、スギ、ヒノキ)、人工林、竹林の周辺、粉塵
 - ◇ ウメ、カキ、クリ等粗管理園における土壤の物理化学性の検証と改善

◆ 除染のための整枝・せん定

せん定枝には放射性物質が付着しており(特に放射性物質の降下時に樹上に存在していた旧年枝)、放射性物質が付着した枝を切除することは、樹体から放射性物質を除去するために有効な手段になるので、整枝・せん定で積極的に切除する。

(1) 除染ための整枝・せん定のポイント

- 植栽距離が狭く、混み合っている樹園地では、積極的に縮・間伐を実施し、放射性物質の付着した樹体を除去する。
- 樹高が高い樹では、樹冠上部の枝を除去するため積極的な低樹高化を図り、計画的に樹高を切り下げる。
- 骨格枝(主枝や亜主枝など)が多い樹では、骨格枝を積極的に間引きする。
- 大型化した側枝は、間引きせん定により積極的に更新する。
- 側枝は、各樹種の特性や枝の着生状況により、適宜間引きせん定や切り戻しせん定で、積極的に更新する。
- 立木の樹種では、放射性物質が付着した旧枝と葉や果実の接触をできるだけ回避するため、枝が重ならないよう側枝を配置する。

(2) 作業上の留意点

- 放射性物質が付着または含まれるせん定枝を野焼きすると、灰などとともに放射性物質が周囲に拡散する可能性があるため、野焼きは、極力控える。
- せん定枝を一般廃棄物として焼却施設等での処分を希望する場合は、各自治体の焼却施設等に確認が必要。処分が困難な場合は、処分方法が明らかになるまで園地の一部等を利用し、一か所に集めて一時保管する。
- せん定枝を一時保管する際は、集めたせん定枝から放射性物質が飛散したり、水で地下に浸透したりしないよう管理する。
- せん定枝堆肥等は、400Bq/kg以下であることが確認できれば利用可能。

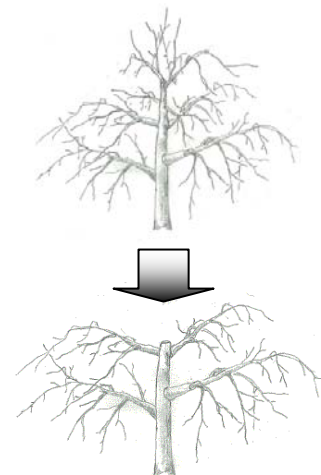


図 65 ポイントは樹高の切り下げと間引き

◆ 粗皮削り・粗皮剥ぎ

(1) 粗皮削り・粗皮剥ぎの方法

○粗皮が形成され、これらを取り除くことが可能な形態をもつ果樹(ナシ、ブドウ、リンゴ、カキ)が対象。主幹部と主枝の上部および側部を中心にナシ、リンゴ、カキは粗皮削り、ブドウは粗皮剥ぎや粗皮削りを実施する。(放射性セシウムの低減率は約80~90%。図66, 67)。

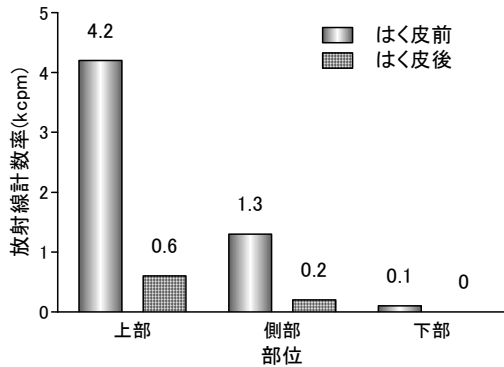


図 66 ナシ「幸水」の主枝の粗皮削り処理と放射線量

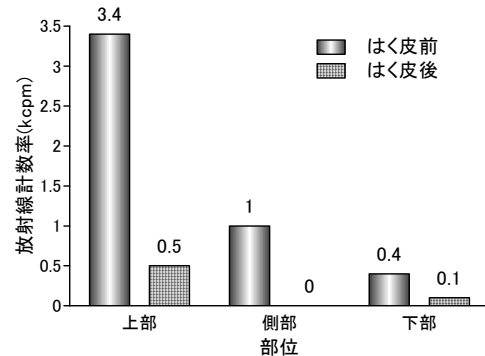


図 67 ブドウ「あづましずく」の主枝はく皮処理と放射線量

○ブドウの粗皮剥ぎは、古くなり枝幹部から剥がれた樹皮(粗皮)を引きはがす。ナシ、リンゴ、カキ等の粗皮削りは、専用の削り器具でかき落とすように古い樹皮(粗皮)を削り取る(図68)。

○粗皮削りは、生きた樹皮まで傷つけないよう粗皮の部分だけ削り落とすよう注意する。

○粗皮を取り除くことが可能な果樹は、高圧洗浄機で粗皮剥ぎ(洗浄も兼ねる)を行うことも可能(落葉期以降実施)。方法は樹体の洗浄方法に準じますが、水圧は6~10MPaを目安に高めに設定する。

(2) 作業上の留意点

○作業時の服装や作業後の注意点は、「樹体の洗浄」の「(3) 作業上の留意点」を参照。

○生育期間中は、放射性物質を含むちりやほこりの葉や果実への付着が懸念されるため、降雨後で樹体が濡れているときなど、ちりやほこりが飛散しにくい時に実施する。

○剥いだ樹皮は、処理前に樹冠下にブルーシート等を敷いて集め、処理方法が明らかになるまで園地の一部に集めて一時保管する。

○高圧洗浄機で粗皮剥ぎを行う場合、粗皮剥ぎ時の水圧で粗皮が形成されていない若い枝幹部まで処理すると、生きた樹皮を傷つけるので注意する。



図 68 ナシの粗皮削り

◆ ナシの粗皮削りのポイント

- 古いナシでは幹にコケが着生している。コケは放射性セシウムの2次汚染源になる可能性が懸念されるので丁寧に除去する。
- 主枝、垂主枝、側枝などの分岐部、大枝のせん除痕などの凹部は放射性セシウムが滞留しやすいので丁寧に除去する。その際には裂傷に注意する。

◆ 樹体の洗浄(別添:樹種別高圧洗浄マニュアル 参照)

(1) 樹体洗浄の方法

- 高圧洗浄機(試験では旋回ノズルを使用)を用い洗浄する。粗皮が形成されにくい樹種など(モモ、スモモ、オウトウ、ウメおよびリンゴやナシ等の若木)で実施する(放射性セシウムの低減率は約55%。図69)。
- 洗浄は、主幹部や主枝の上部および側部を中心に実施し、作業は主枝先端から基部、高い部位から低い部位の順序で行う。
- スピードスプレーや装備の動噴を使用して洗浄することも可能であるが、高圧洗浄機に比べ水圧が弱い(1.5MPa=15気圧)ので、水量を2倍程度にして時間をかけて丁寧に行うと一定の効果が得られます(放射性セシウムの低減率は45%)。

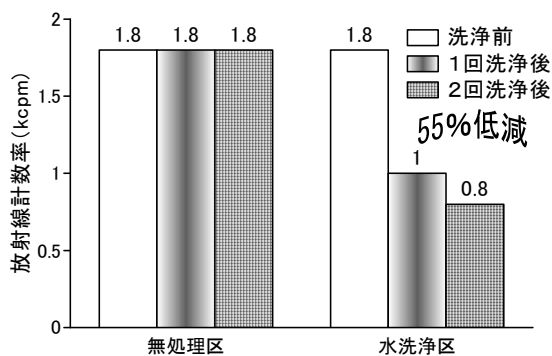


図69 樹皮洗浄によるモモ「あかつき」の主枝上部の放射線量の変化.



図70 除染時の作業着

(2) 作業の手順

作業着の準備→装備の点検→水圧の調整→噴口点検→洗浄

(3) 作業上の留意点

- 作業時は、ちりやほこりの吸い込みや肌への付着等を防止するためマスク、保護めがね、雨ガッパ、ゴム手袋、長靴等を着用する(図70)。
- 作業後は、手足、顔等の露出部分を洗浄するとともに、靴の泥をできるだけ落とし、服を着替えるなどして屋内にちりやほこりを持ち込まないように注意する。
- 高所での作業時には十分注意し、安全確保に留意する。
- 生育期間中は除去物質の葉や果実への飛散が懸念されるため、越冬害虫の耕種的防除と合わせ落葉期以降に実施する。

◆ 表土の削り取り

(1) 表土の削り取り方法

○ 小型バックホーの排土板を利用した表土の剥ぎ取り

バックホーの排土板で、表土を5cm程度削り取る(図70)。

○ トラクターのロータリーを利用した表土の剥ぎ取り

トラクターにロータリーを装着し、土壌を浅く耕うん後、表土を5cm程度削り取る(図71)。

○ 小型バックホー(排土板利用)やトラクター(ロータリー利用)を利用し、果樹園の表層5cm程度の土壌を除去すると、土壌中(深さ15cm)に含まれる放射性セシウム濃度は約77~87%低減した(表1)。また、土壌の削り取り部の地上1mの空間線量は約20%低減した。

表1 果樹園土壌深さ15cmの放射性セシウムの低減率 (農業総合センター果樹研究所)

試験区	剥土前(Bq/乾土kg)	剥土後(Bq/乾土kg)	減少率(%)
バックホー区(排土板利用)	3447	787	77.2
トラクター区(ロータリー利用)	2818	376	86.7
無処理	2597	2597	-

注: 土壌の放射線量はALOKA社 CAN-OSP-NAIを使用し、10月24日~26日に測定した。



図70 バックホー(排土板)



図71 トラクター(ロータリー)

(2) 作業上の留意点

○ 作業時の服装や作業後の注意点は、「樹体の洗浄」の「(3)作業上の留意点」を参照。

○ バックホーやトラクターを操作する際は、他の作業員や枝や幹、果樹棚などに十分留意する。

○ 除去土壌は、処分方法が明らかになるまで園内の一部の一か所に集めて一時保管する。

○ 除去土壌を山積みで保管する場合は、集めた土壌の周辺から水が地下に浸透しないよう、また、風雨で集めた土壌やちりやほこりが飛散しないよう管理する。なお、集めた土壌にはできるだけ近づかない。

○ 除去土壌を地下で保管する場合は、帯水層に達しないよう注意して穴を掘るとともに、除去土壌を保管する穴から水が地下に浸透しないように管理する。地下保管では遮蔽効果により集めた土壌からの放射線の影響が軽減される。

◆ 下草の根群を活用した表土の剥ぎ取り

- 中長期的には抑草シートやゼオライトシート等の上を下草を養成し、シート直下に形成されたRM層や根群を活用した剥土が経済的、地形的にも導入が容易(耕種的除染法)。



図73 抑草シート上の下草



図74 抑草シート下の根群



図75 根群に付着した表土

◆ ゼオライト資材について(参考資料)

(1) 放射性物質の吸着資材の開発と利用

- 現在、放射性物質の吸着資材として、ゼオライトシート(ゼオライトを不織布内に織り込んだシート)等が開発されてる(市販はされていない)。
- 使用方法は、土壌敷設、樹体被覆処理および牧草は種等を行う。土壌表面や樹体表面の放射性物質をゼオライトシートへ移動・吸着に加え、表土の簡易な除去手法としてゼオライトシート下に牧草のルートマット層を養成し、剥ぎ取ることで土壌表層の放射性セシウムを除去できないか検討している。



図 76 ゼオライトシート

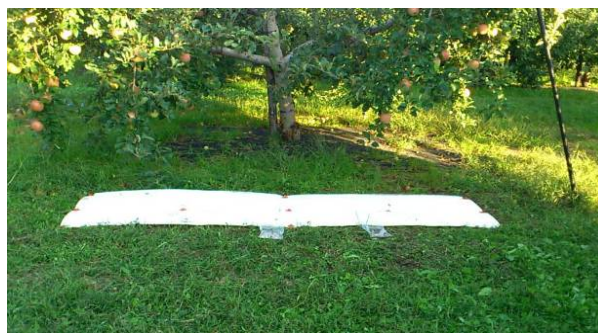


図 77 土壌への処理状況



図 78 樹体への処理状況(左:シートを巻いたあと散水、右:散水後ビニールで被覆)



図 79 伊達市ウメ園での敷設試験.



図 80 樹皮中の放射性 Cs の吸収試験.

(2) 使用上の留意点

- 水が存在しないと放射性物質がシートへ移動・吸着されないの、処理部位とゼオライトシートに水分を十分を保持する必要がある。
- 土壌に敷設する場合、ゼオライトシート上で作業を行っても差し支えない。

◆ 2次汚染対策

モニタリング調査において基準値を超える放射性セシウム濃度が検出された南相馬市カキ樹の周辺環境調査

- 周辺の環境調査として当該カキ樹の周辺の屋敷林(ヒノキ)の植栽状況を調査した(図81)。また、カキ樹の果実、樹皮および土壌、ヒノキの葉等を採取し、放射性セシウム濃度を測定した。
- 当該カキ樹は宅地に隣接した畑と道路の境界部に植栽され、宅地の北西側には屋敷林として高さ数m程度のヒノキの高木が成育しており、当該カキ樹からは数十m程度の距離であった。
- カキ樹皮の放射線量および放射性セシウム濃度のいずれにおいてもヒノキ側が高い値を示し、また、カキ表皮の洗浄の有無により高い濃度差が認められたことから、ヒノキの葉に付着した放射性セシウムが梅雨時等の風雨に伴う樹冠滴下水とともにカキ樹皮および果実表皮に付着した可能性が高いと推察された。
- 基準値を超える放射性セシウム濃度が検出された直接の原因は屋敷林(ヒノキ)に沈着した放射性Csの風雨等に伴う樹冠滴下水による2次汚染が加わったためと考えられた。

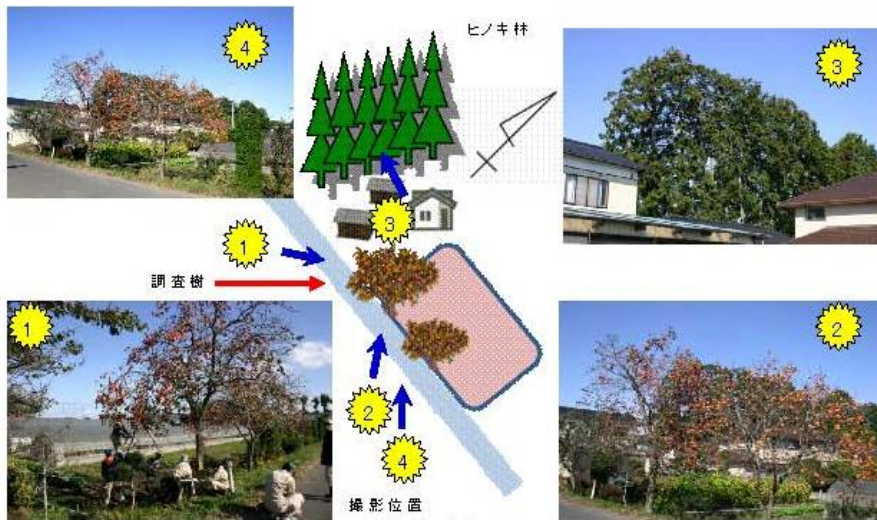


図 81 現地調査地の見取り図.

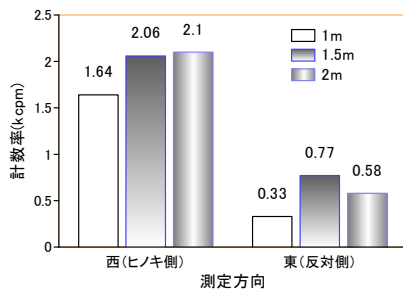


図 82 カキ樹皮表面の放射線量.

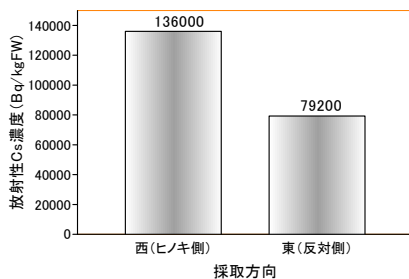


図 83 カキ樹皮表面の放射性 Cs 濃度

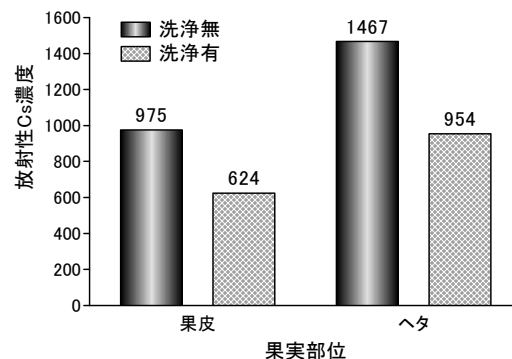


図 84 果皮とへたの洗浄による放射性 Cs 濃度比較

◆ 伊達市カキ園での除染試験 2011. 12.21



図 85 手順1 ゼオライトシートを敷設.



図 86 手順2 せん定により樹高を下げる.



図 87 手順3 洗浄準備完了.



図 88 圧力を10MP に設定.



図 89 高圧洗浄.



図 90 高圧洗浄.



図 91 高圧洗浄.



図 92 高圧洗浄後.



図 93 高圧洗浄前.



図 94 高圧洗浄後.



図 95 高圧洗浄後.



図 96 高圧洗浄後.



図 97 イネ科多年草.

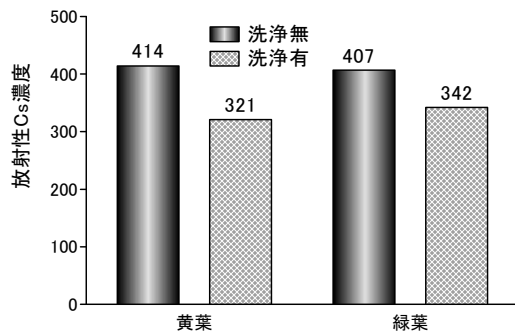


図 98 洗浄による葉中放射性 Cs 濃度比較

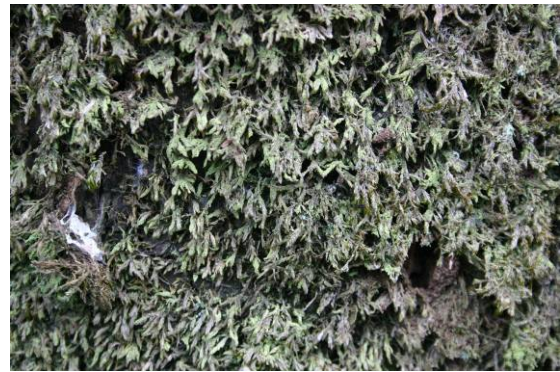


図 99 樹皮上のコケ.

◆ 2次汚染対策

- ◇ セシウムは葉から吸収されやすいため、マツ、スギ、ヒノキ、コケからの雨滴水や付着した落葉からの溶出により新梢生育期に葉が直接汚染される可能性が懸念される。
- ◇ 今後は2次汚染源の探索と対策が重要である。