

3 土壌中における放射性物質の深度分布の確認

代表研究者：斎藤公明、青木和弘（原子力機構）、谷畑勇夫（大阪大学）

福島第一原発の事故により環境中に放出され土壌に沈着した放射性物質は、長期的に環境中にとどまり、周辺に居住する者の被ばく線量に影響を与えることが予想される。この地表面に沈着した放射性物質は、地表面への降下直後は地表面付近の平面線源として近似できるが、時間と共に地中に浸透し、多くの場合、深さ方向の指数分布を示すことがチェルノブイリ事故での調査等で明らかになっている。また、土壌中における放射性物質の深度分布は、①土壌中の放射性物質の移行解析、②地下水への放射性物質の移行、③外部被ばく線量評価、④土壌に蓄積した放射性物質の除染等の観点から重要な情報である。

このような観点から、第1次分布状況等調査においては、鉄パイプ、スクレーパープレート、ジオスライサー等を用いて土壌試料を採取し放射性物質の深度分布について多面的に調査した。その結果、第1次分布状況等調査を実施した平成23年6月期では、多くの調査箇所で土壌表層から5cm程度の深さに放射性セシウムがほぼ全量含まれており、深度方向に指数関数に近い分布を示すことが確認された。他方で、前述したように、福島第一原発の事故以前の調査結果から、時間と共に放射性セシウムは土中に浸透していくことが確認されている。

そこで、第2次分布状況等調査においても、第1次分布状況等調査に引き続き、深度別の土壌試料を採取し、放射性セシウムの深度分布の状況について確認するとともに、第1次分布状況等調査を実施した平成23年6月期からの放射性セシウムの浸透状況の評価、放射性セシウムの深度分布の違いに影響を与える土壌特性等の評価を実施した。

3.1 スクレーパープレート及び鉄パイプを用いた土壌中における放射性セシウムの深度分布の確認

3.1.1 調査概要

福島第一原発から80km圏内を中心に網羅的に放射性セシウムの深度分布の状況を確認するため、スクレーパープレート及び鉄パイプを用いて深度別の土壌試料を採取し、放射性セシウムの深度分布を調査した。なお、土壌試料の採取にあたっては、作業者の被ばく低減の観点から、福島第一原発から20km圏内を中心に土壌採取時の作業時間が短い鉄パイプを用いて土壌コア試料を採取し、福島第一原発から20km～80km圏内を中心にIAEAが標準的手法として放射性物質の深度分布測定に用いられているスクレーパープレートを用いて深度別の土壌試料を採取した。

3.1.2 調査箇所及び調査期間

- 福島第一原発から20km圏内：
鉄パイプを用いた土壌コア試料の採取（27箇所）（平成24年4月3～5日に採取）、スクレーパープレートを用いた深度別の土壌試料の採取（3箇所）（平成24年4月17～19日に採取）
- 福島第一原発から20km～80km圏内：
鉄パイプを用いた土壌コア試料の採取（24箇所）、スクレーパープレートを用いた深度別の土壌試料の採取（81箇所）（平成23年12月12日～22日に採取）
土壌採取箇所について、図3.1.2-1とAppendix 3.1-1に示す。

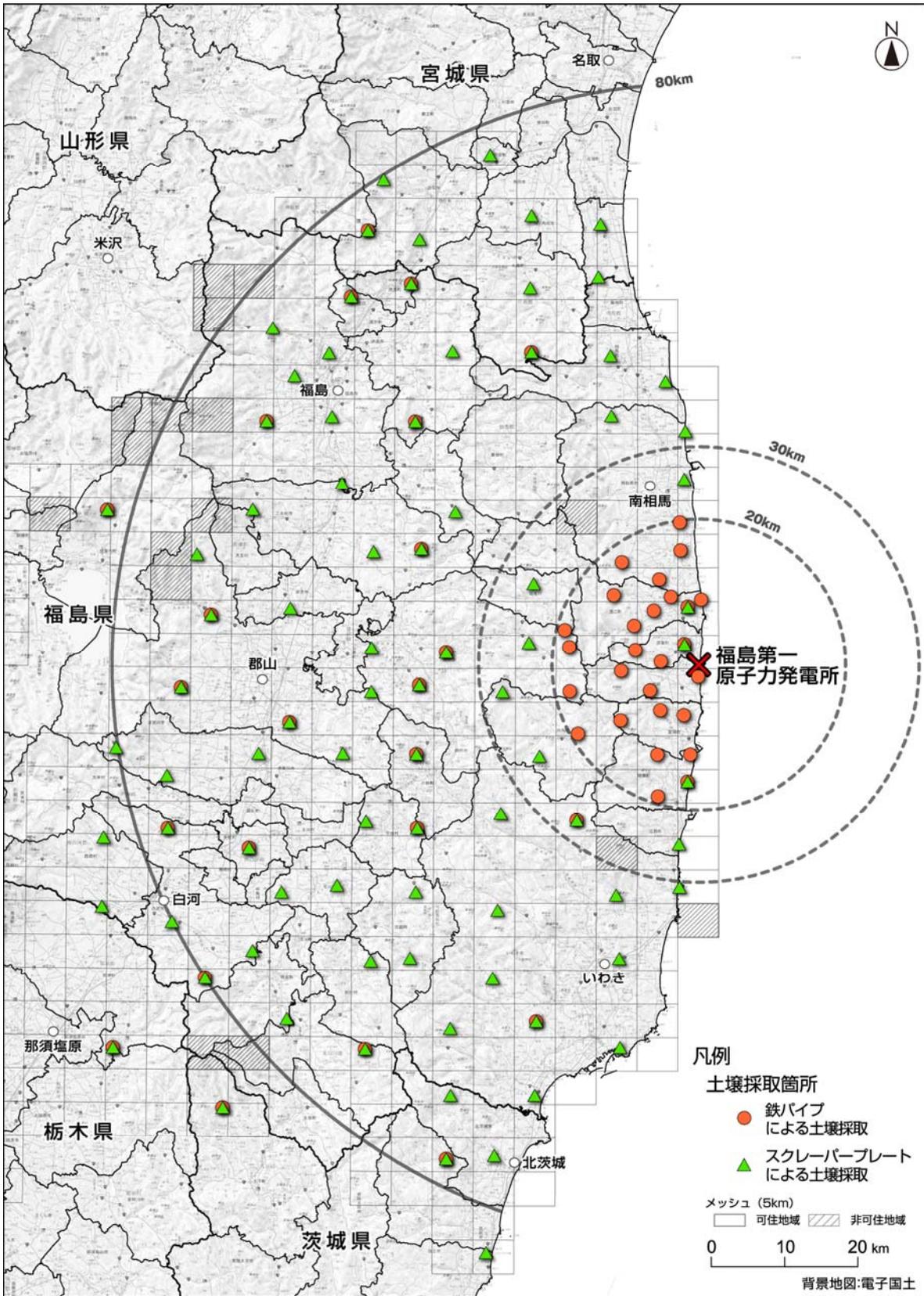


図 3.1.2-1 放射性セシウムの土壤深度分布測定における土壤試料採取箇所
 (20km 圏外は平成 23 年 12 月に 20km 圏内は平成 24 年 4 月に試料を採取)

3.1.3 調査内容

(1) 土壌採取

土壌試料の採取には、スクレーパープレート及び鉄パイプを用いた。

土壌採取は、地表面から 0～0.5、0.5～1.0、1.0～1.5、1.5～2.0、2.0～3.0、3.0～4.0、4.0～5.0、5.0～8.0cm の 8 層に分けて実施し、各層から採取した土壌を U-8 容器に封入した。なお、スクレーパープレートは、土壌を表面から少しずつ剥ぎ取りながら採取することで、深さ方向に任意の幅を持った層別の試料を得ることができる手法である。採取した土壌を U-8 容器に詰め込み放射性核種の分析を行い、土壌深度分布を調べることができる。採取時にクロスコンタミネーションが少なく精密な土壌採取が行なえるため、IAEA においても標準的な深度方向の土壌試料採取法として認められている。第 1 次分布状況等調査では放射性物質の包括的移行状況調査において用いられたスクレーパープレートによる土壌採取法であるが、クロスコンタミネーションが僅かで放射性物質の土壌中深度分布を正確に測定できることが確認されたことから、第 2 次分布状況等調査においては福島第一原発から 80km 圏内を中心に網羅的にスクレーパープレートを用い、土壌中における放射性物質の深度分布調査を実施することとした。ただし、スクレーパープレートを用いての土壌採取は他の土壌採取法に比べて時間がかかることから、土壌を採取する作業員の被ばく低減を考慮することが重要である。

そのため今回の調査においては、比較的空間線量率の高い警戒区域を除いた区域で放射性物質の沈着量が多く、今後、影響評価や事故対策の主な対象となることが予想される福島第一原発より 20km～80km 圏内を中心に、スクレーパープレートを用いた土壌中放射性物質の深度分布調査を実施した。

また、鉄パイプを用いた土壌コア試料の採取は、長さ 300mm、外形 60mm、内径 56mm の鉄パイプ（円筒管）をハンマーにより地面に打ち込み、周辺の土壌を一部除去しながら引き抜くことで、土壌採取時に土壌試料が崩れないように土壌コア試料を採取した。その後、発泡スチロール及びプラスチックキャップを取り付け、採取した土壌が輸送中に鉄パイプ内で移動しない状態で分析機関に輸送した。第 1 次分布状況等調査では簡易に土壌コア試料を採取できる手法として活用しており、今回の調査でも、放射線量が高い福島第一原発から 20km 圏内を中心に使用した。

(2) 土壌の放射能分析

スクレーパープレートで採取した深度別の土壌試料については、ゲルマニウム半導体検出器を用いたガンマ線スペクトル解析によりセシウム 134 とセシウム 137 の定量を行なった。ゲルマニウム半導体検出器を用いた土壌試料の分析は、東京大学、大阪大学、環境科学技術研究所、日本分析センターの 4 機関で分担し実施した。その際、同じ条件で測定することで系統誤差を少なく抑えるために、必ず同一機関で測定することとした。土壌深度の単位として g/cm^2 及び cm の 2 種類を考え、それぞれの深さにおける放射性セシウム濃度 (Bq/kg) の深度方向分布を求めた。

また、鉄パイプで採取した土壌コア試料については、図 3.1.3-1 に示すように鉄パイプを鉛によるコリメータ（幅 5mm）を用いて鉄パイプを移動させ、位置を変えながらゲルマニウム半導体検出器で測定を行った。その際、円周方向によるガンマ線強度の変化がないことを確認した。ガンマ線スペクトルから、セシウム 134 及びセシウム 137 のガンマ線ピークを同定しそれらの強度を鉄パイプの位置の関数として計数、グラフ表示を行った。土壌深度の単位としては cm のみを考え、深さ方向の相対的な放射性セシウム濃度を求めた。

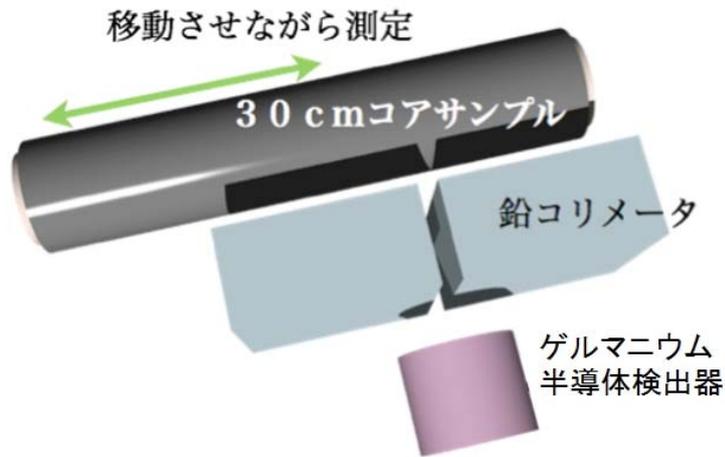


図 3. 1. 3-1 30cm 鉄パイプ土壌コア試料のガンマ線測定方法

(3) 土壌の粒径測定

放射性セシウムの深度分布特性の違いに関する要因を確認するため、スクレーパープレートで採取した深度別の土壌試料のうち、表面土壌のみ粒径測定を行った。粒径測定はふるい分析法とレーザー回折式粒度分布測定装置を用いて、筑波大学で測定した。粒径が $425 \mu\text{m}$ 以上の土壌粒子についてはふるい分析法で、それ以下の粒径についてはレーザー回折式粒度分布測定器を用いて粒径ごとの重量百分率を測定した。

3. 1. 4 調査結果

(1) 個々の調査箇所の放射性セシウムの深度分布の状況

スクレーパープレートを用いた放射性セシウムの深度分布状況の調査の結果について土壌深さの単位を cm と g/cm^2 それぞれで表現する解析を行ったが、ほとんどの調査箇所では図 3. 1. 4-1 の左の図に示すように、浅い部分ではこの図上で直線的に減少（指数関数的に放射能濃度が減少）していることが確認された。一部の調査箇所で、図 3. 1. 4-1 の右の図に示すように、土壌が攪乱されたことで深い部分までほぼ同一濃度となる分布が確認された。これはチェルノブイリ等においても時々観察された形で、土壌の性質等の条件によるものと考えられる。ただ、全体としては指数関数分布に近い形をしており、次項で述べる緩衝深度の解析は他の観測データと同じように行なった。

土壌試料の採取箇所として攪乱のない箇所を選択するよう心がけたが、測定結果から明らかに何らかの攪乱があったと判断される箇所が 4 箇所存在した。攪乱があったと考えられる場所に関しては次に述べる緩衝深度の解析は実施しなかった。スクレーパープレートによる土壌試料分析により測定された深度分布データ全体を Appendix 3. 1-2 に示す。

また、鉄パイプを用いた測定からも、図 3. 1. 4-2 に示すように指数関数分布に近い深度分布が確認された。

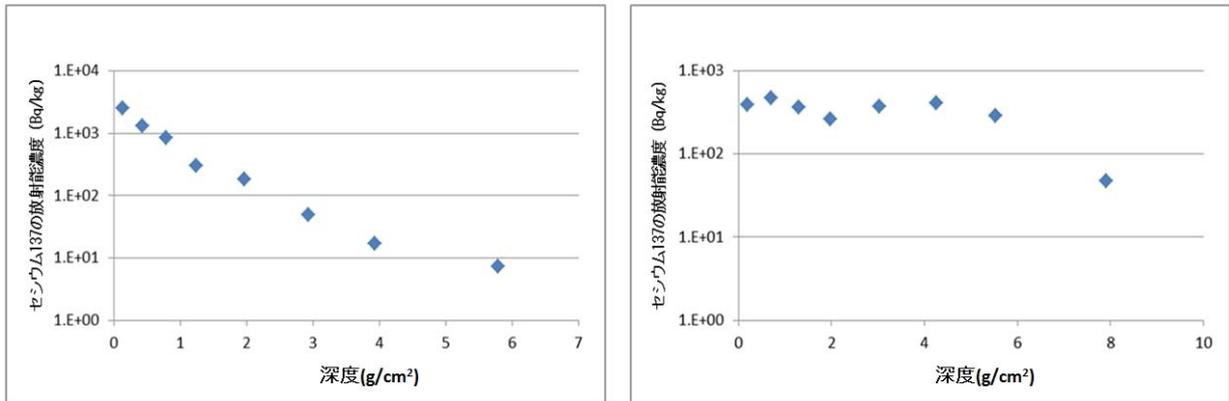


図 3.1.4-1 土壌中におけるセシウム 137 の深度分布測定結果の事例(左：土壌中におけるセシウム 137 が典型的な指数関数分布の例、右：深いところまでほぼ同一濃度に分布の例)

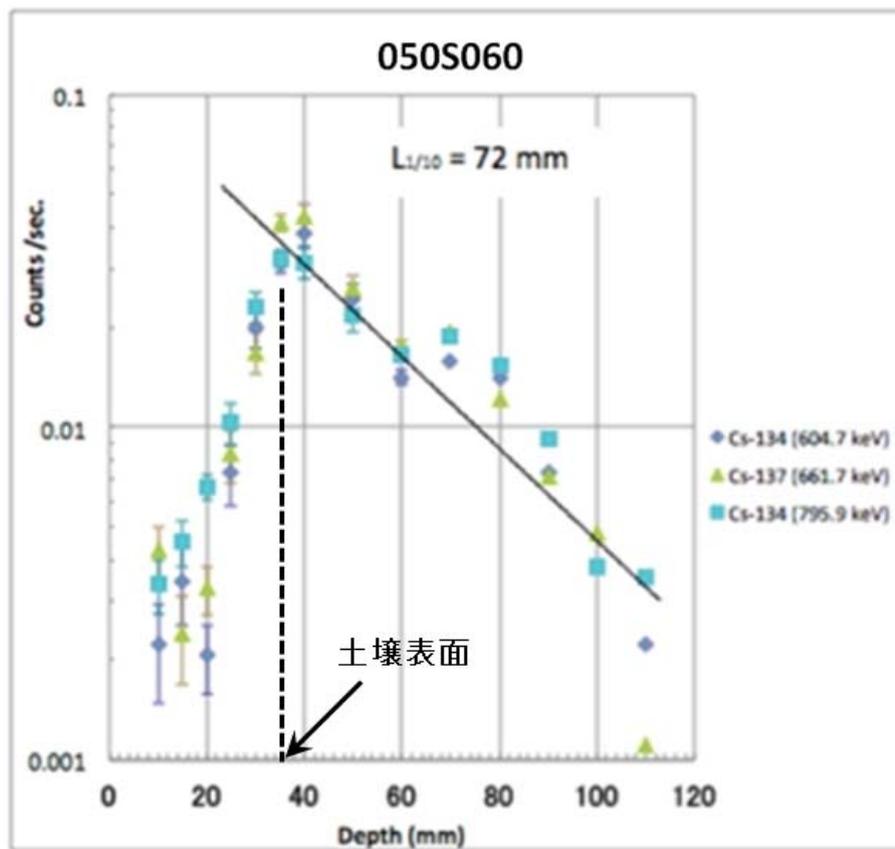


図 3.1.4-2 鉄パイプによる放射性セシウムの深度分布測定結果の例
($L_{1/10}$ は放射性核種濃度が地表面に比べて 1/10 になる深度)

(2) 放射性セシウムの深度分布特性の評価

ほとんどの調査箇所では土壌中の深度分布が指数関数に近い形をしていることが確認できたので、指数関数分布を仮定して、各調査箇所の放射性セシウムの深度分布特性（緩衝深度 β (g/cm²)：放射性セシウムの地中への移行の程度を表すパラメータ）について解析を実施した。緩衝深度の算出にあたっては、以下のように算出した。

- ① 深さ t における放射能濃度 $A(t)$ は以下の式で表現される。

$$A(t) = A_0 \cdot \exp(-t/\beta)$$

ここで A_0 は地表面における放射能濃度、緩衝深度は放射能濃度が地表面の $1/e$ ($\approx 1/2.7$) になる深度 (cm または g/cm²)。

- ② 観測された土壌深度分布データを基に、各層の放射能濃度で重み付けをした最小自乗法により緩衝深度を算出。

攪乱があった土壌については、指数分布を仮定するのは適切でないことから、指数関数分布を用いた解析からは除外した。スクレーパープレートの結果から評価した緩衝深度の分布を図 3.1.4-3 及び図 3.1.4-4 に、また、調査箇所毎の緩衝深度の値を Appendix 3.1-1 に示す。g/cm² 単位で表した緩衝深度の平均値は 1.17 であり、可搬型ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定で用いた $\beta=1$ という仮定は、適切であったことが確認された。g/cm² で表した緩衝深度の全データの 80% は 0.5 から 2.0 の間に含まれており、 $\beta=1$ を用いることによる in-situ 測定の不確かさは、ほとんどの場合 20% 以内であると評価される。

鉄パイプ試料の結果から評価した緩衝深度の分布を図 3.1.4-5 に、また、調査箇所毎の緩衝深度の値を Appendix 3.1-1 に示す。鉄パイプ試料の解析は cm で表した緩衝深度のみを評価した。鉄パイプ試料から評価した緩衝深度 (cm) の平均値は 1.89 であり、スクレーパープレートの平均値 0.98 と比べて 2 倍弱大きい。採取箇所の違いに起因する差である可能性も考えられたが、同じ採取箇所でも得られた結果に限って比べてみても、同様な差が観察された。従って、鉄パイプ試料を用いた深度分布測定はスクレーパープレートを用いた測定に比べて、系統的に緩衝深度の値が過大になる傾向があると思われる。この原因として、鉄パイプを用いた方法では、対象とする深さの範囲外の土に含まれるガンマ線を測定してしまうこと及び鉄パイプ押し込み時の外側引き摺りにより、深度分布が実際よりも緩やかになることが考えられる。

緩衝深度 (cm) と緩衝深度 (g/cm²) の比率： β (g/cm²) / β (cm) から評価した実効土壌密度の分布図を図 3.1.4-6 に示す。ここで実効土壌密度は土壌中の放射性核種濃度で重み付けした平均的な土壌密度として解釈され、一般に表層部分の土壌密度に近い値となる。実効土壌密度は 0.5 から 2 まで全体にブロードに分布しているが、1 から 1.5 程度の範囲の密度が最も多く、地表面の平均的な土壌密度に近い密度が得られている。

さらに、緩衝深度の地域特性を明らかにするため、緩衝深度 (g/cm²) の結果を地図上にプロットした。その結果、図 3.1.4-7 に見られるように、同じ程度の緩衝深度値の調査箇所が地域的に集まっている傾向がうかがえる。緩衝深度値の地域的な傾向や土壌の性質との関係に関しては、今後の調査の結果も含めて引き続き解析が必要である。

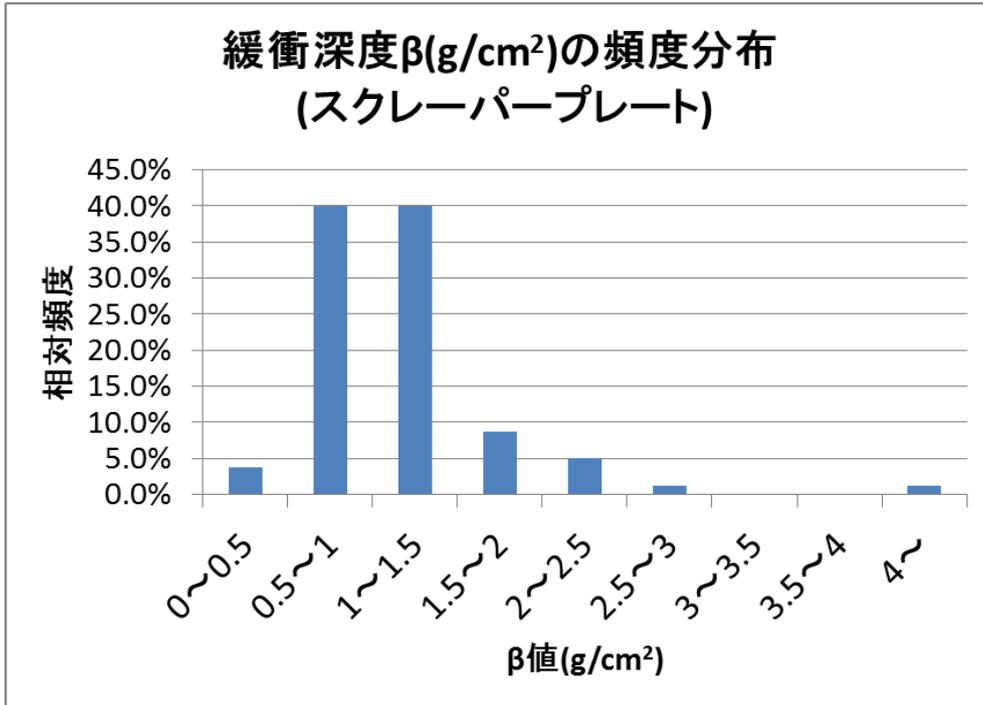


図 3.1.4-3 g/cm²で表した緩衝深度 (β : 放射能濃度が地表面の 1/e になる深度) の頻度分布
(緩衝深度の平均値 1.17)

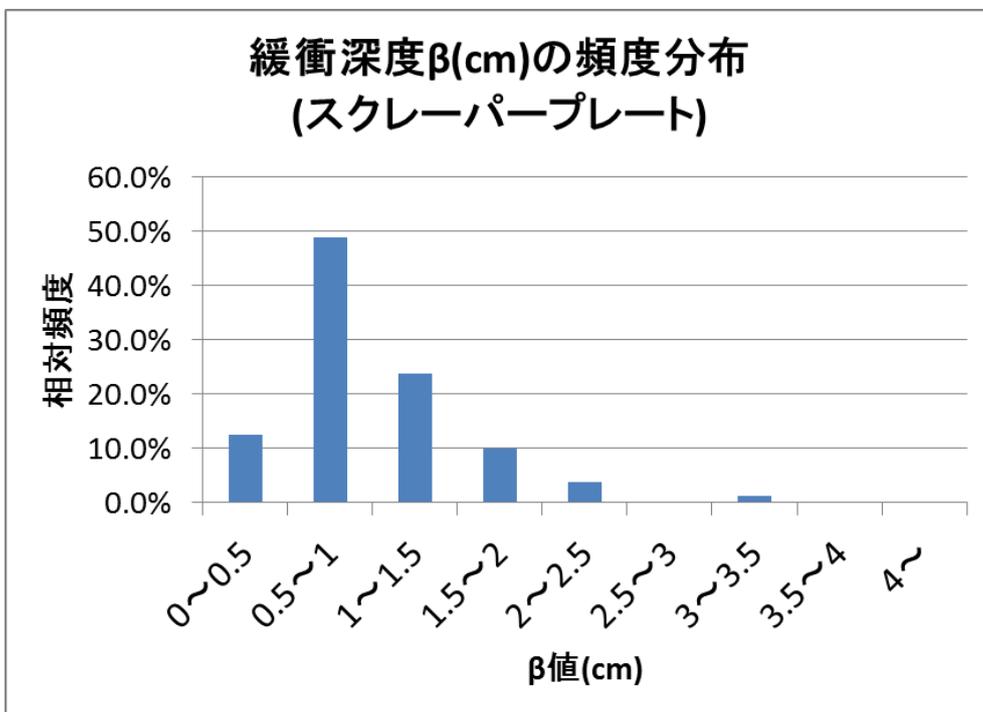


図 3.1.4-4 cmで表した緩衝深度 (β : 放射能濃度が地表面の 1/e になる深度) の頻度分布
(緩衝深度の平均値 0.98)

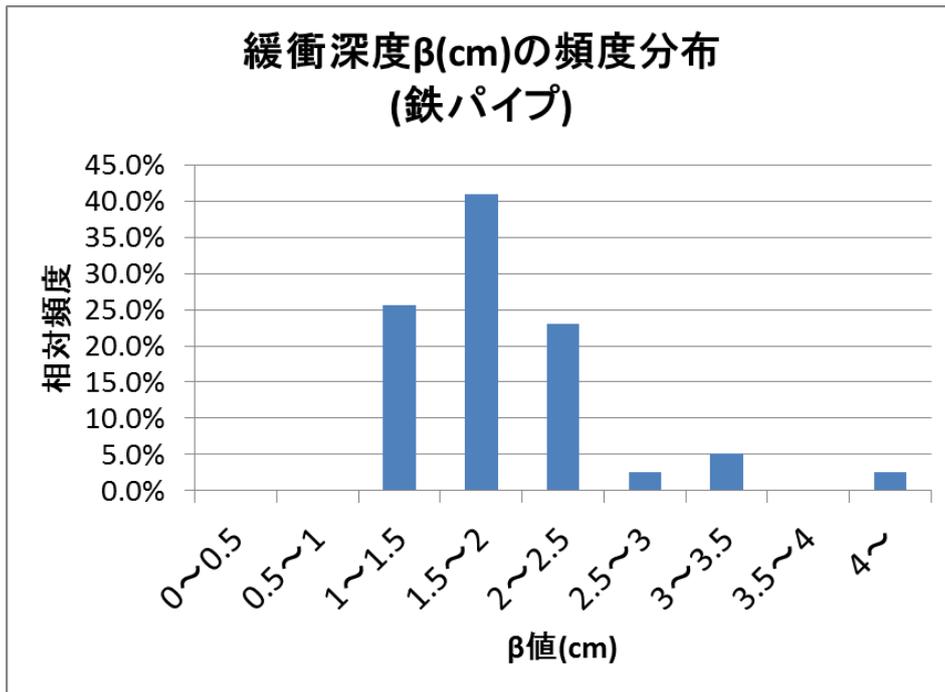


図 3. 1. 4-5 cm で表した緩衝深度 (β : 放射能濃度が地表面からの $1/e$ になる深度) の頻度分布
(緩衝深度の平均値 1.89)

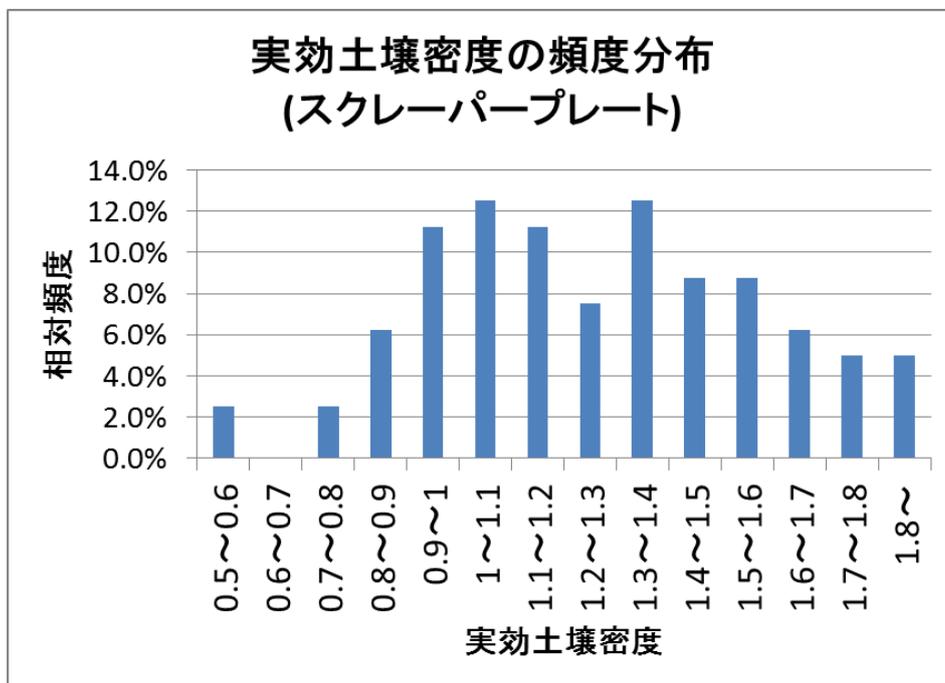


図 3. 1. 4-6 セシウム 137 のデータから評価した実効土壌密度 (土壌中の放射性核種濃度で
重み付した平均的な土壌密度) の分布

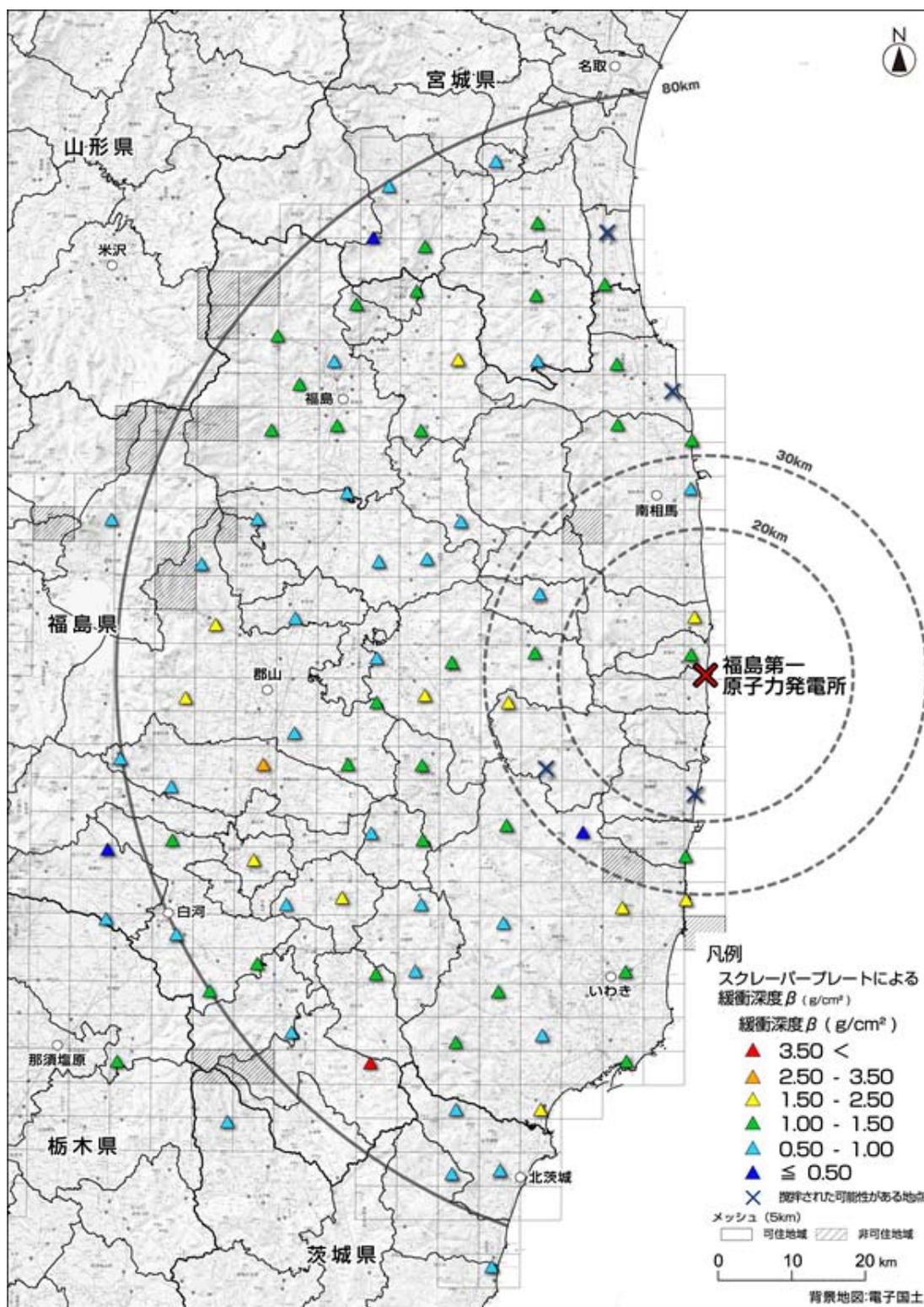


図 3.1.4-7 福島第一原子力発電所から 80km 圏内の放射性セシウム（セシウム 134 及びセシウム 137 の平均値）の緩衝深度（ β ：放射能濃度が地表面の $1/e$ になる深度）の分布状況（スクレーパープレートで採取した深度別の土壌試料を分析した結果：20km 圏外は平成 23 年 12 月に、20km 圏内は平成 24 年 4 月に試料を採取）

(3) 福島第一原発から 80km 圏内の放射性セシウム の 90% 深度の分布

スクレーパープレート及び鉄パイプを用いて採取した土壌試料の解析結果を基に、福島第一原発から 80km 圏内の放射性セシウム の深度分布の 90% 深度を評価し、図 3.1.4-8 及び図 3.1.4-9 に示した。90% 深度は地表面に比べて放射性核種濃度が 10% になる深度で定義される。この深さまでに、放射性セシウム の 90% が存在することになる。今後の除染においては、各サイトの状況を把握した適切な厚さの土壌の剥ぎ取りを行なうことが、廃棄土壌を減らすために重要であると考えられる。今回得られたデータによれば、3 cm の剥ぎ取りで放射能濃度が 10% になる地域が相当あることがわかった。

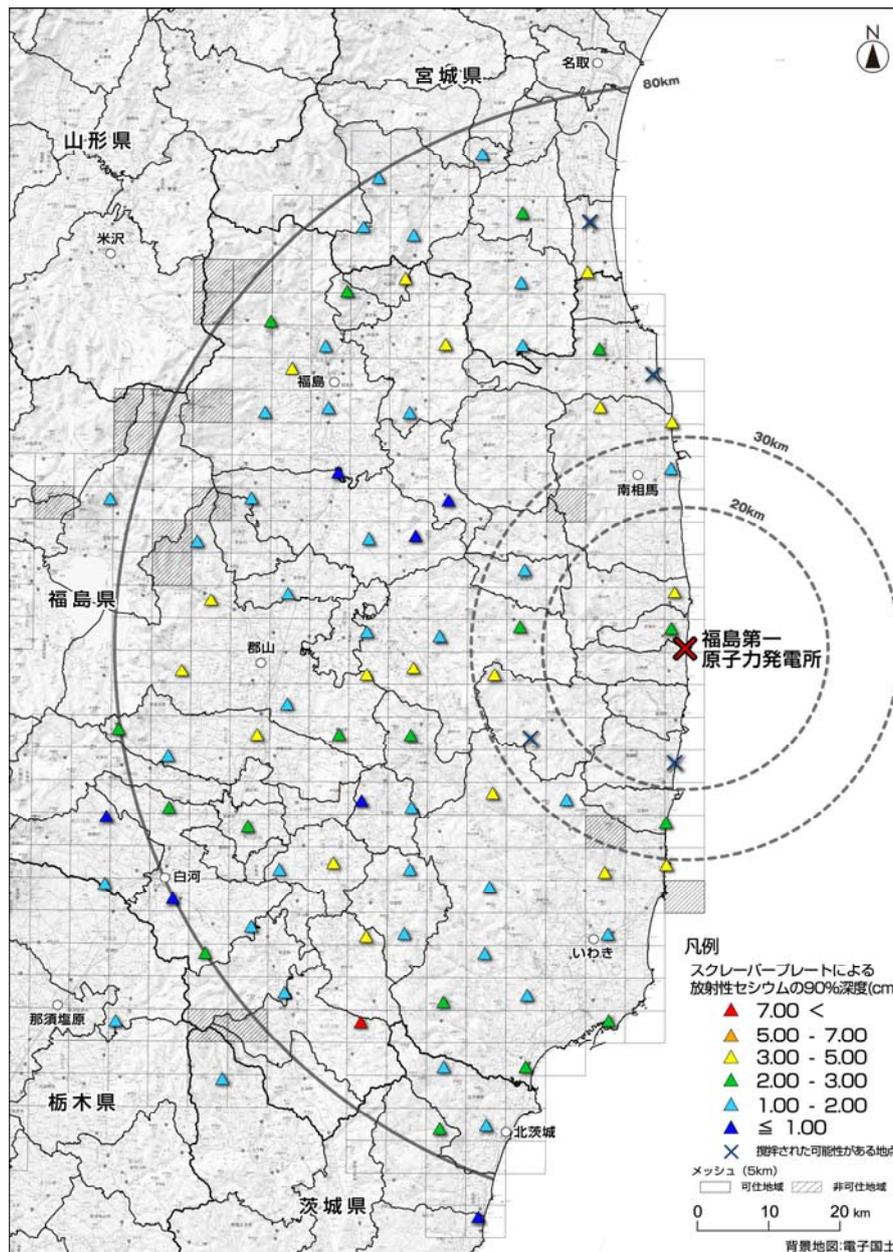


図 3.1.4-8 福島第一原子力発電所から 80km 圏内の放射性セシウム(セシウム 134 及びセシウム 137 の平均値) の 90% 深度(地表面に比べて放射性核種濃度が 10% になる深度) の分布状況(スクレーパープレートで採取した深度別の土壌試料を分析した結果: 20km 圏外は平成 23 年 12 月に、20km 圏内は平成 24 年 4 月に試料を採取)

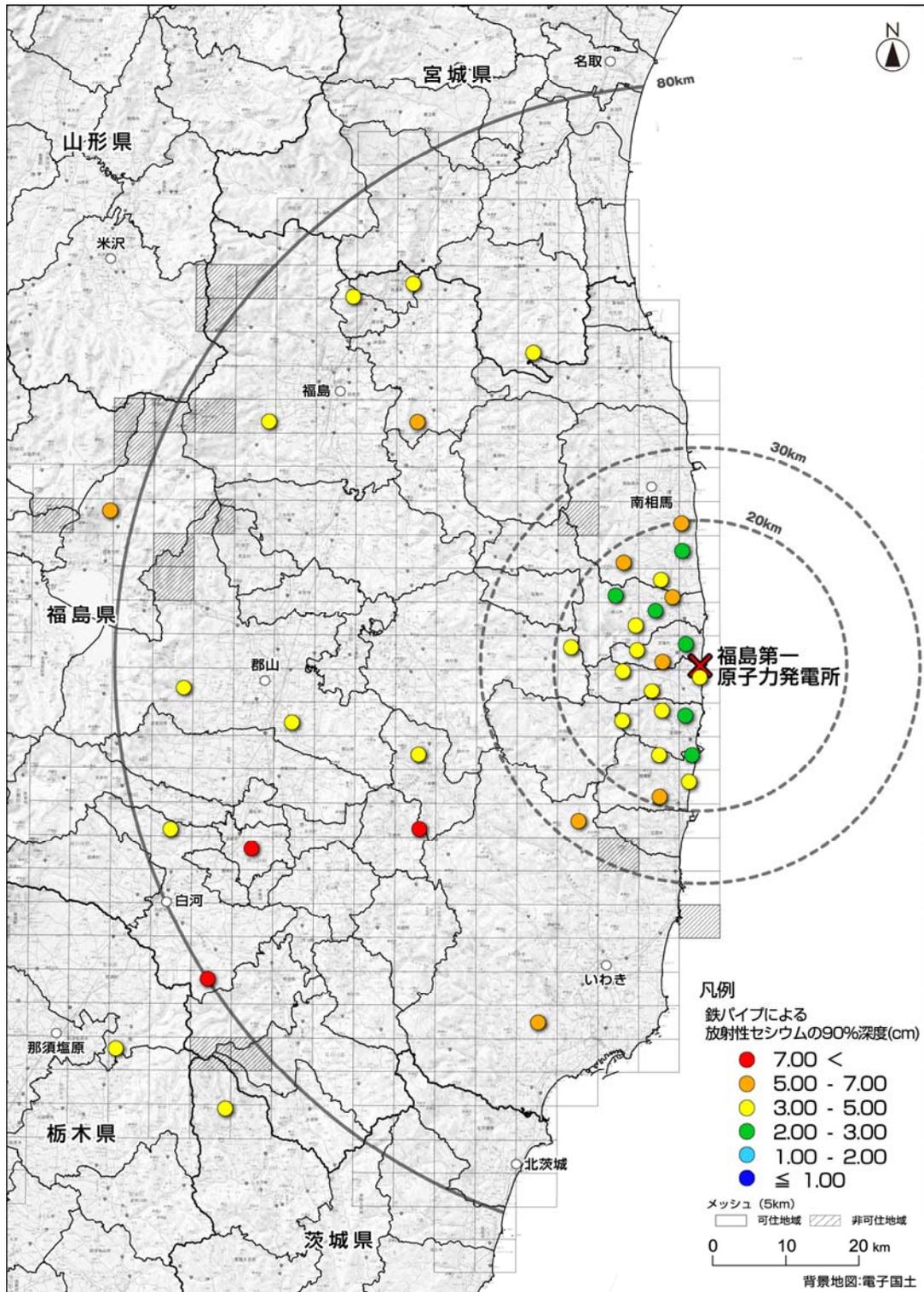


図 3. 1. 4-9 福島第一原子力発電所から 80km 圏内の放射性セシウム(セシウム 134 及びセシウム 137 の平均値) の 90%深度(地表面に比べて放射性核種濃度が 10%になる深度) の分布状況(鉄パイプ土壌コア試料の分析結果(スクレーパープレートによる測定に比べて系統的に深度分布を過大に評価している可能性あり): 20km 圏外は平成 23 年 12 月に 20km 圏内は平成 24 年 4 月に試料を採取)

(4) 緩衝深度と表面土壌の粒径分布との関係の確認

第1次分布状況等調査では、0~0.5cm層への放射性セシウムの残留率と粘土の量との間に正の相関関係があることが確認された。そこで、今回の調査でも、福島第一原発から80km圏内といった広範な地域においても同様の傾向であるか確認するため、緩衝深度値と表面土壌の粒径分布との関係について調べた。土壌試料の粒径は、粒径分布測定結果をもとに、粘土($<5\mu\text{m}$)、シルト($5\mu\text{m}< \sim 74\mu\text{m}$)、砂礫($\sim 74\mu\text{m}$)に分類した(図3.1.4-10)。その結果、今回調査した土壌にはシルトが多く含まれていることが確認された。これらの土壌成分と緩衝深度値の関係調べた結果、表層土壌中の粘土の含有率が増えるに従って緩衝深度値が増加する傾向が見られた。特に、シルトの量が同程度の土壌については、粘土含有率と緩衝深度値との明らかな相関が見られた(図3.1.4-11)。一般的に放射性セシウムは粘土に吸着しやすいことが知られており、ここで得た知見は一見理解しにくい印象を受けるが、放射性セシウムの移行が土壌の粒径や存在状態とどのような関係にあるのか、空隙率、土壌密度等のパラメータを考慮しながら解析を進めることが必要である。

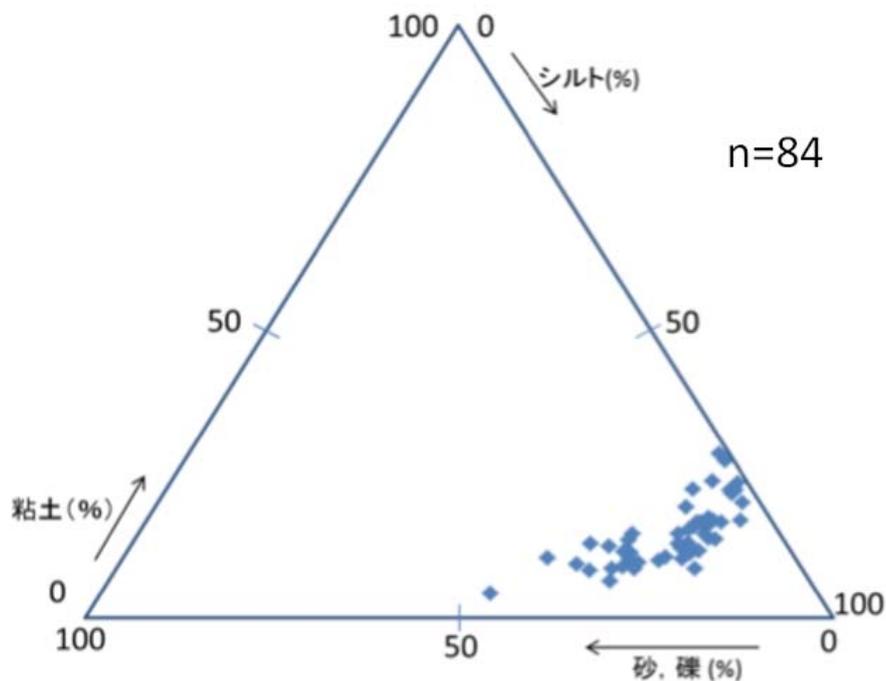


図 3.1.4-10 調査対象試料の土性図上での分布
(土壌試料の粒度分布の状況)

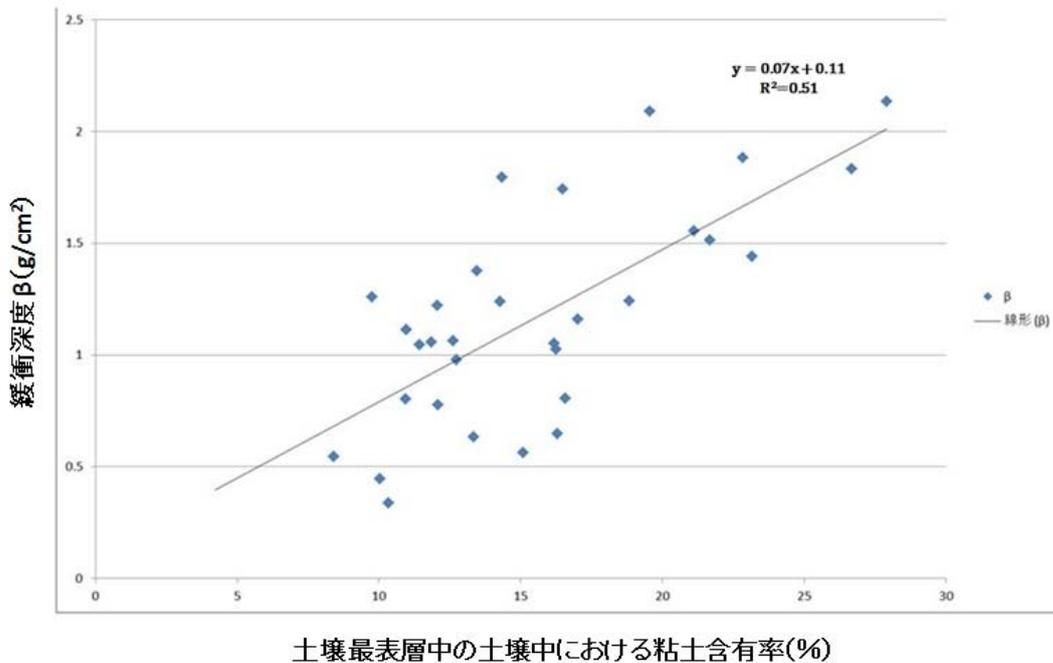


図 3.1.4-11 土壌最表層中(地表面から 0~0.5cm)の粘土含有率と緩和深度 (β : 放射能濃度が地表面の 1/e になる深度) の相関図

(5) スクレーパープレート及び鉄パイプを用いた土壌中の放射性セシウムの深度分布の確認結果のまとめ

スクレーパープレートと鉄パイプを用いて深さ方向の土壌試料を採取し、土壌中の放射性セシウムの深度分布の測定と解析を行なった。スクレーパープレートに関しては土壌試料を採取した 84 箇所全箇所の試料について分析を実施した。一方、鉄パイプの土壌濃度については、放射性セシウムの濃度が高い試料のみ測定が可能であるため、採取した 51 試料のうち測定結果が得られたのは 39 試料であった。

ほとんどの箇所において土壌深度分布は指数関数で近似できる分布を示した。観測した土壌中深度分布を最小自乗法により指数関数にフィッティングし、放射性セシウムの地中への移行の指標となる緩和深度を求めた。スクレーパープレートにより採取した試料の解析結果によれば、g/cm² で表現した緩和深度の平均値は 1.17 であり、可搬型ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定の解析で用いた $\beta=1$ g/cm² という値の妥当性が確認された。得られた緩和深度を地図上にプロットした結果からは同じ程度の緩和深度値の地点が地域的に集まっている傾向がうかがえるものの、土壌表層の特性との関係とは明確ではなかった。

得られた緩和深度値から、地中の放射性セシウム濃度が地表面に比べて 1/10 になる深さ (90% 深度) を評価した。90% 深度はほとんどの箇所で 5cm よりも浅く、また 3 cm よりも浅い 90% 深度の箇所が 75% 程度存在することが明らかになった。今後、除染における土の除去を効率よく行なうためにはこの状況を十分に考慮して行なうことが必要であると考えられる。

緩和深度値と表面土壌の粒径分布との関係について調べた結果、表層土壌中の粘土の含有率が増えるに従って緩和深度値が増加する傾向が見られた。特に、シルトの量が同程度の土壌については、粘土含有率と緩和深度値との明らかな相関が見られた。放射性セシウムの地中への移行のしやすさと土壌の性状の関係について解明するためには、今後さらなる解析が必要である。

3.2 土壤中における放射性セシウムの深度分布状況の違いの確認及び土壤中における放射性セシウムの移行要因の検討

3.2.1 調査概要

平成24年6月期に実施した第1次分布状況等調査においては、通常の地表面土壌と元農地と推定された土壌中では放射性セシウムの深度分布、浸透深さに違いが見られた。また、3.1でまとめた福島第一原発から80km圏内についてスクレーパープレート及び鉄パイプを用いて土壌中の放射性セシウムの深度分布を確認した今回の調査の結果においても、調査箇所によって、放射性セシウムの深度分布に違いが生じている箇所が確認されている。

そこで、今回の調査では、3.1の調査と並行して、平成23年6月期に放射性セシウムの深度分布状況を確認した調査箇所において、再度、大口径のサンプラーを用いて土壌コア試料を採取し、時間の経過に伴う放射性セシウムの深度分布状況の違いについて確認した。現地調査は、平成24年2月27日から3月6日に実施した。

また、土壤中における放射性セシウムの移行要因について、先の第1次分布状況等調査における検討では、土壌に対する放射性セシウムの収着分配係数(K_d)にバリエーションが見られ、それらは土壌構成鉱物の種類やその含有率、有機物含有量等の多様性の影響によるものと考えられるが、具体的な情報が不足していた。そこで、土壤中における放射性セシウムの移行要因について定量的な解釈やそれに基づいた解析を行うため、今回の調査では、土壌の物性関係を主に調査し、放射性物質の移行状況等を把握することを目的として調査を実施した。

3.2.2 調査箇所と試料採取地点

今回の調査は、時間の経過に伴う放射性セシウムの深度分布状況の違いを確認するため、調査箇所(試料採取地点)は第1次分布状況等調査と同一箇所を基本とした。なお、層位や土壌構成、土地利用状況等が同一である必要があるため、第1次分布状況等調査の試料採取地点の近傍数メートルの範囲で試料を採取した。

第1次分布状況等調査を行った11調査箇所のうち、3箇所は積雪及び除染作業等により調査ができなかった。従って、第2次分布状況等調査の調査箇所は、二本松市1箇所、川俣町2箇所及び浪江町5箇所の合計8箇所である(図3.2.2-1及び図3.2.2-2)。このうちの2箇所においては、調査箇所周囲の地形の影響を調べるため1箇所で複数の試料採取地点を設定した。浪江町下津島では3地点、浪江町昼曽根では2地点で試料採取を行った。調査箇所、試料採取地点、調査項目の一覧及び第1次分布状況等調査で対応する試料番号対比表を表3.2.2-1に示した。また、浪江町下津島及び浪江町昼曽根における調査箇所の試料採取地点位置図を図3.2.2-3及び図3.2.2-4に示した。

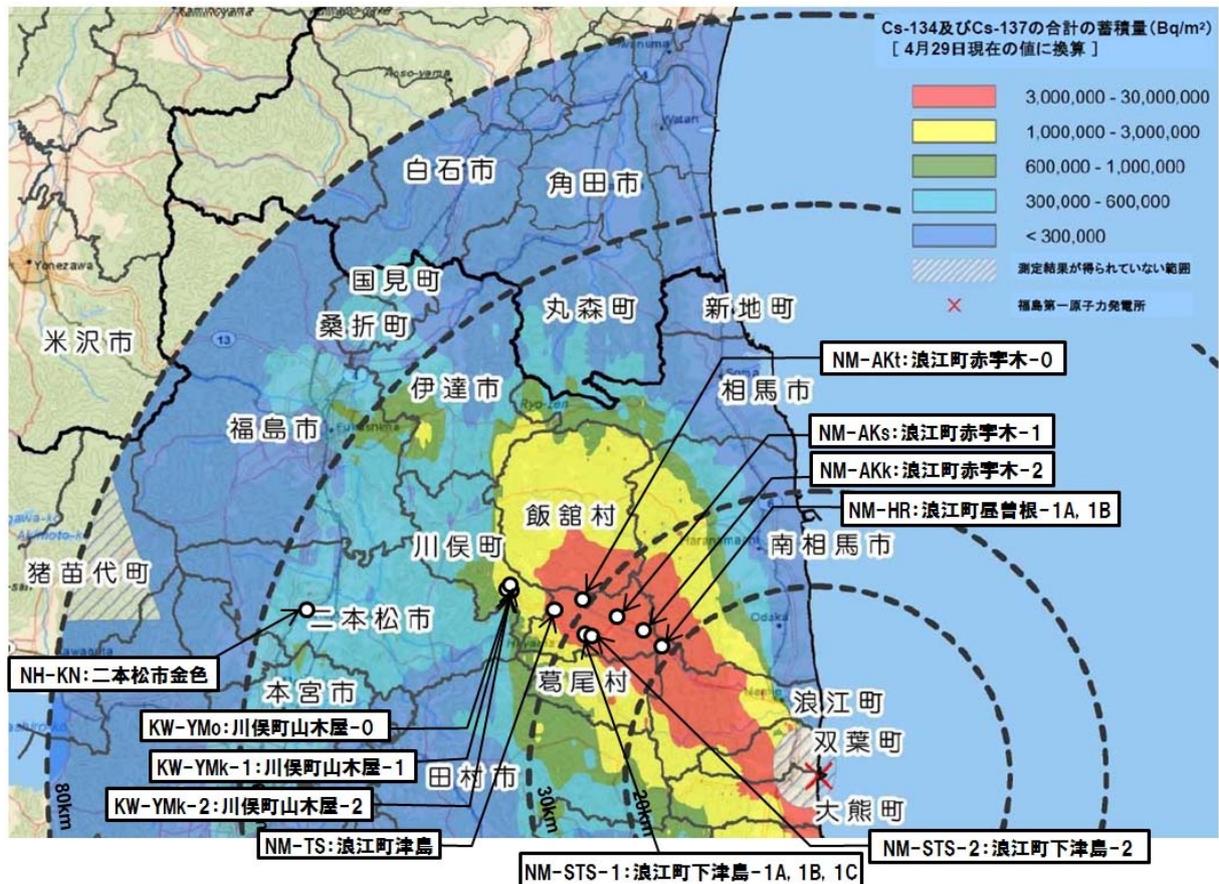


図 3.2.2-1 第1次分布状況等調査及び第2次分布状況等調査における調査箇所位置図

(第2次分布状況等調査では、第1次分布状況等調査における調査箇所の内、①浪江町赤字木-0、②浪江町下津島-2、③川俣町山木屋-1の3箇所では、それぞれ積雪、除染による剥土、地権者の了解が取れない等の理由により、試料の採取ができなかった。)

※放射性セシウムの分布図は航空機モニタリング結果^[1]による。

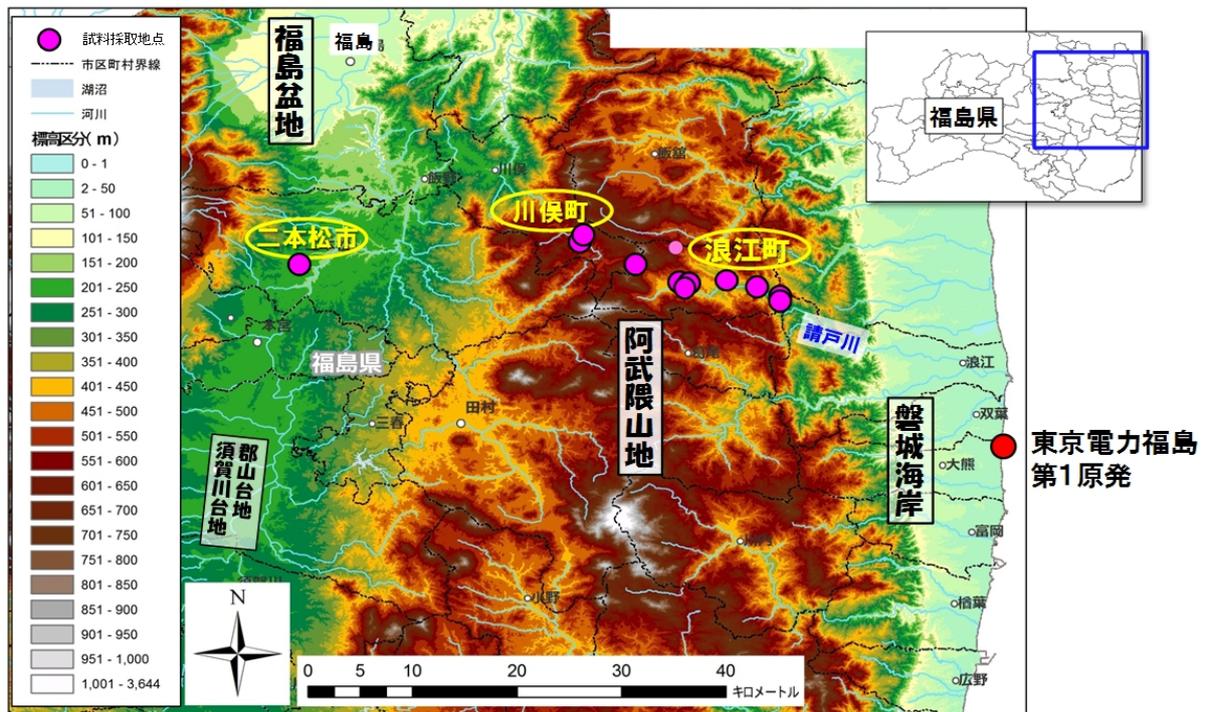


図 3.2.2-2 第 2 次分布状況等調査における調査箇所と試料採取地点の位置図と標高

(8 箇所の調査箇所の内、浪江町下津島と浪江町昼曾根については、地形分布の影響についても検討するため、傾斜方向を考慮して、それぞれ 1 地点で 3 箇所及び 2 箇所で土壌試料を採取した。)

表 3. 2. 2-1 調査箇所及び試料採取地点と調査項目との対比表

調査箇所	試料採取地点	WGS84座標	試料採取日時	調査項目					第1次分布状況等調査での試料
				ポータブルドリルによる土壌抜き取り	土壌記載	試料採取			
						土質試験用	放射能濃度測定用	・土壌構成鉱物の含有率の測定用 ・土壌の鉱物組成の分析用 (XRD分析) ・土壌の特性パラメータの測定用 (CEC/AEC分析) ・取捨・脱着試験用	
福島県伊達郡川俣町	川俣町山木屋-2	N37,36,22.6 E140,40,20.7	2012/2/27/12:30	PSP-01	○	○	○	砂質土壌 (深度10-18cmより採取)	HGS-3
			2012/2/27/12:50	PSP-02	○	×	×	×	---
福島県二本松市	二本松市金色	N37,35,02.5 E140,25,53.1	2012/2/28/11:00	PSP-03	○	○	○	粘土質土壌 (深度15-30cmより採取)	HGS-4
			2012/2/28/11:20	PSP-04	○	×	×	×	---
福島県伊達郡川俣町	川俣町山木屋-0	N37,36,24.5 E140,40,12.7	2012/2/29/10:17	PSP-05	○	○	○	×	HGS-1
			2012/2/29/10:40	PSP-06	○	×	×	×	---
福島県双葉郡浪江町	浪江町津島	N37,34,52.7 E140,43,18.7	2012/3/1/11:30	PSP-07	○	×	×	×	---
			2012/3/1/11:50	PSP-08	○	○	○	×	HGS-19
福島県双葉郡浪江町	浪江町赤字木-1	N37,34,06.8 E140,47,55.8	2012/3/2/9:54	PSP-09	○	○	○	×	HGS-22
			2012/3/2/10:10	PSP-10	○	×	×	×	---
福島県双葉郡浪江町	浪江町下津島-1A	N37,33,41.1 E140,45,53.8	2012/3/3/10:00	PSP-11	○	○	○	×	HGS-25
			2012/3/3/10:20	PSP-12	○	×	×	×	---
	浪江町下津島-1B (下津島-1Aの北側約60m)	N37,33,43.0 E140,45,53.2	2012/3/6/10:15	PSP-17	○	○	○	有機質土壌 (予備試料:深度4-25cmより採取)	---
	浪江町下津島-1C (下津島-1Aの西側約30m)	N37,33,41.0 E140,45,53.0	2012/3/6/13:30	PSP-18	○	○	○	粘土質土壌 (予備試料:深度30-35cmより採取)	---
福島県双葉郡浪江町	浪江町屋曽根-1A	N37,32,54.8 E140,50,31.2	2012/3/4/10:10	PSP-13	○	○	○	×	HGS-12
			2012/3/4/10:30	PSP-14	○	○	○	有機質土壌 (深度0-10cmより採取)	---
			2012/3/4/10:50	PSP-14b	○			※PSP-14で採取した有機質土壌の不足分を同一深度の同一岩相から採取	---
	浪江町屋曽根-1B (屋曽根-Aの北側約20m)	N37,32,55.1 E140,50,32.1	2012/3/4/12:15	PSP-15	○	○	○	×	---
福島県双葉郡浪江町	浪江町赤字木-2	N37,33,37.8 E140,49,25.4	2012/3/5/10:30	PSP-16	○	○	○	×	HGS-16

浪江町下津島

(谷底平野/山麓緩斜面、黒色(有機質)土壌/粘土質土壌、元農地)

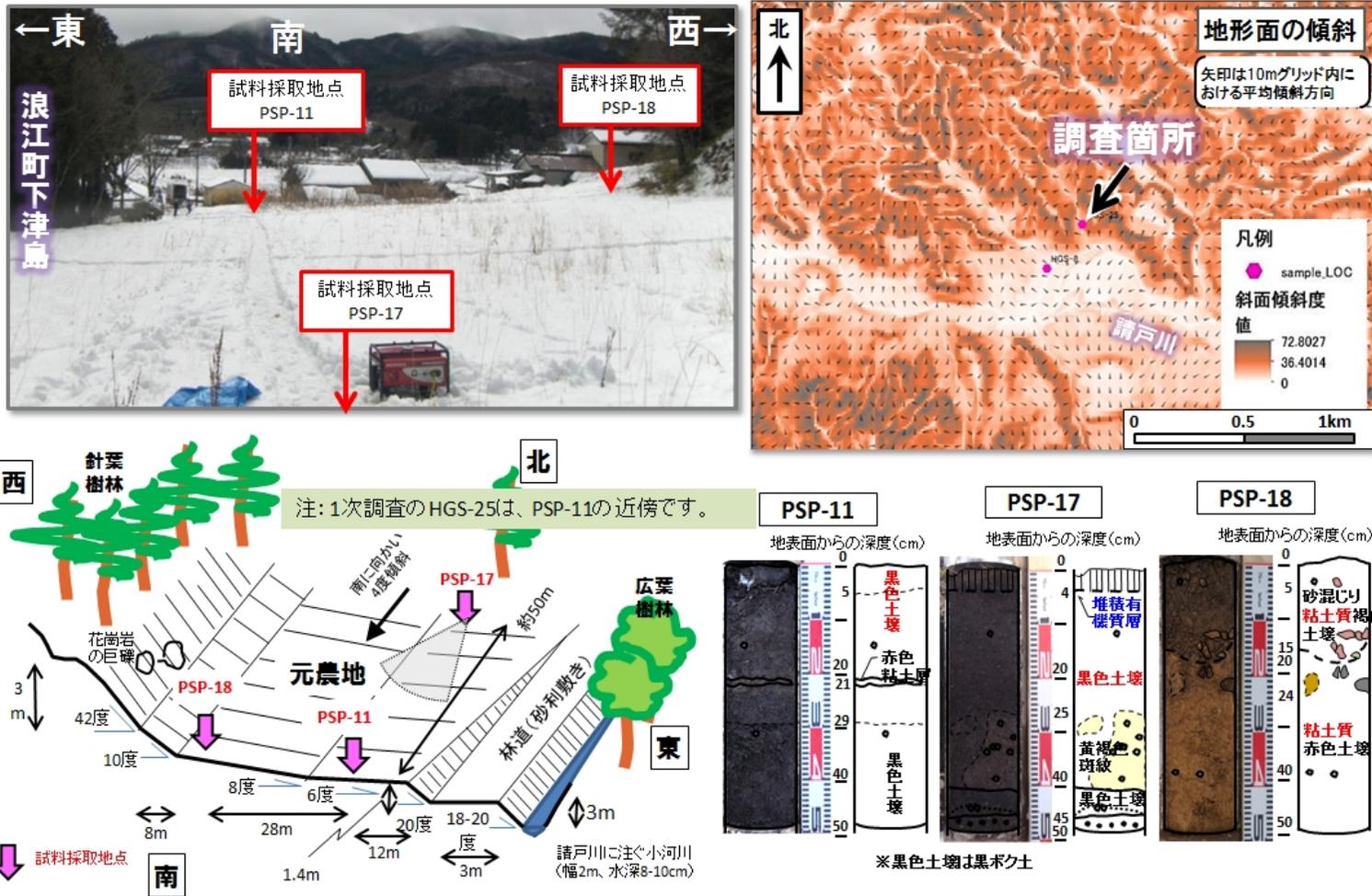


図 3.2.2-3 試料採取地点図 (浪江町下津島)

浪江町昼曽根

(河成段丘面、黒色(有機質)土壌/黒色土壌(粘土質)、広葉樹林地の端部)

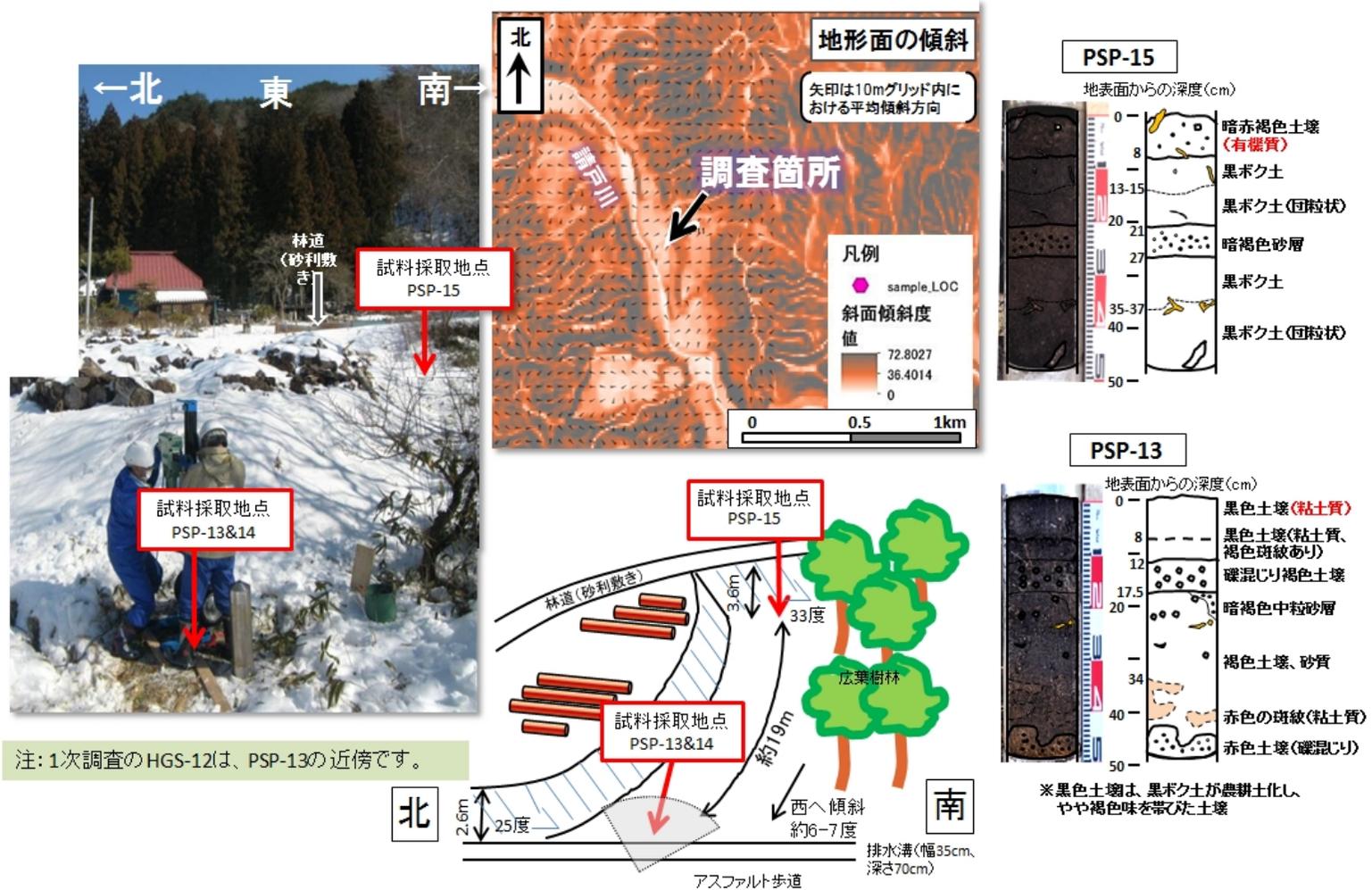


図 3.2.2-4 試料採取地点図(浪江町昼曽根)

3.2.3 調査内容

(1) 土壌中における放射性セシウムの深度分布状況の調査方法

第1次分布状況等調査では、活断層調査などで使用されるジオスライサーを用いた方法により、地表面から最大1m程度の深さまでを対象として、深度方向に板状の試料を採取した。しかし、板状の試料は、横幅10~12cm、厚さ2~3cmであり、特に厚さが薄いためジオスライサー押し込み時の外側引き摺りに伴うクロスコンタミネーション等が見られた試料もあった。このため、深部を含む濃度分布全体を評価する場合においては不確実性が残り、定量的な濃度分布の評価は限定的であった。

そこで、今回の第2次分布状況等調査においては、試料採取時のサンプラー押し込みによる壁面での土壌の引き摺りの影響を除去するため、試料径を大きくしてロッド壁面付近の土壌を剥ぎ取った後、円柱状サンプルの中心部のみから土壌を採取することとした。使用した器材は、(株)セロリ社製のポータブルドリル「アルファロング」(図3.2.3-1(a))と内径150mmの大口径の「ぱかつとサンプラー」(図3.2.3-1(b))である。このサンプラーは、土壌試料の入るロッドの1/3が開口可能な(中心角120°に相当するロッド部分が取り外せる)構造になっている(図3.2.3-1(c))。

次に、ロッドからの試料採取では、クロスコンタミネーションをさけるため開口部分の土壌を廃棄し、土壌表面を平滑化処理した後、土壌観察・土壌記載を行った。土壌観察・土壌記載の方法については、第1次分布状況等調査の報告書^[2]に示すとおりである。なお、土壌観察の際、第1次分布状況等調査時と同様に土地利用状況に基づく土壌区分(元農地(花壇を含む)と推定される土壌とそれ以外の地表面土壌)も行った。

その後、ロッドの壁面から離れた壁面引き摺りの影響が無い中心部分の土壌のみをスクレーパーとスプーンによりU-8容器に採取した(図3.2.3-1(c))。ロッドを打ち込む際に生じる壁面での土壌の引き摺りは、軟らかい土壌で壁面から1cm程度であることが掘削毎の観察結果から分かり、試料採取ではそれらのことを考慮して実施した。

調査は、第1次分布状況等調査時と同じ11箇所の中から、二本松市(金色:1箇所1地点)、川俣町(山木屋:2箇所2地点)、浪江町(津島:1箇所1地点、下津島:1箇所3地点、赤宇木:2箇所2地点、昼曽根:1箇所2地点)の8箇所11地点で行い、最大深さ50cm程度の土壌コア試料を予備も含めて19本採取した。8箇所の調査箇所の内、浪江町下津島と昼曽根については、地形分布の影響についても検討するため、傾斜方向を考慮して、1箇所あたりそれぞれ3地点及び2地点で土壌試料を採取した。採取した19本の試料の内、12本のコア試料について深度方向の濃度分布を調査した(表3.2.2-1)。土壌試料は、地表面から深度20cmまでが2cm刻み、深度20~40cmの間は4cm刻み、深度40cm以上は5cm刻みで採取し、試料毎に重量を測定した後、ガンマ線放出核種をゲルマニウム半導体検出器により60分間測定した。

(2) 土壌中における放射性セシウムの移行要因の検討に係る調査

土壌中における放射性セシウムの移行要因の検討を行うため、現場での土壌観察結果に基づいて、砂質、有機質及び粘土質と判定された3種類の土壌試料(図3.2.3-2(a))に対し、放射性セシウムと吸着性能に影響を与える土壌粒度分布、鉱物組成の特徴、土壌基本特性の測定(CEC測定)について調査を行った。また、これらの土壌試料の吸着、脱離しやすさの違いを確認するため、吸着試験及び脱離試験を行った(図3.2.3-2(b))。さらに、土壌中の放射性物質の濃度分布(単位体積当たりの放射能)の算出や、移行・遅延の解釈や解析等に使用するため、土質試験を行った。それぞれの調査内容は以下のとおりである。

① 水簸分級による土壌構成成分の含有量の測定

現場での土壌観察結果に基づいて、砂質、有機質及び粘土質と判定された3種類の土壌に対し水

簸分級を行った。具体的には、土壌懸濁液中における土壌粒子の粒径による沈降速度の違いを利用し^[3]、粘土（2 μm 以下）、シルト（2～20 μm ）、砂（20 μm 以上）の3区分に分級した。作業手順を図3.2.3-3に示す。

② X線回折（XRD）による鉱物組成分析

福島第一原発の事故以前の調査結果から放射性セシウムはカオリナイトや雲母（マイカ）、パーミキュライト、スメクタイト等の粘土鉱物などと結合しやすいことが確認されている。そこで、砂質、有機質及び粘土質と判定された3試料について、X線回折による鉱物組成の分析を行った。分析にあたっては、粉末法による無処理での鉱物判定に加えて、定方位法及びエチレングリコール処理、並びに塩酸処理による粘土鉱物の判定も行った。作業手順を図3.2.3-4に示す。

③ 土壌基本特性の測定（陽イオン交換容量（CEC）の測定）

土壌構成成分の陽イオン交換容量（CEC）は、放射性セシウムと土壌の一時的な結びつき（吸着）の評価に使用され、CECが大きいほど、放射性セシウムが土壌と吸着しやすいことを示す。そこで、砂質、有機質及び粘土質と判定された3試料について、CECを測定した。風乾した土壌試料に1M NH_4Cl 水溶液を加えて振とうさせ、遠心分離する操作を5回繰り返してイオン交換させた後、1M NaNO_3 水溶液により NH_4^+ イオンを抽出・分析することで算出した。測定手順を図3.2.3-5に示す。

④ 収着試験及び脱離試験

収着試験で得られる放射性セシウムの収着分配係数は、土壌中の放射性セシウムの移行と密接に関係があり、収着分配係数が大きいほど土中深部に放射性セシウムが移行しづらい。また、脱離試験で得られる結果は、土壌中における放射性セシウムの長期的な移行を考える際に重要であり、土壌粒子と放射性セシウムが脱離し易いほど、土壌深部に放射性セシウムが移行しやすい。

そこで、砂質、有機質及び粘土質と判定された3試料について、収着試験及び脱離試験を実施した。収着試験は、(社)日本原子力学会標準のバッチ法^[4]を参考にし、条件を最適化して実施した。第1次分布状況等調査での収着試験から、放射性セシウムと土壌試料は極めて高い収着性が見込まれたため、固液比を1:100(g/mL)とし、液相の定量性を向上させた。また、収着試験終了後の試料を用いて脱離試験を行った。脱離溶液が0.33M KCl となるように3.3M KCl 水溶液を添加し、再び分配平衡にして脱離の程度を確認した。測定手順を図3.2.3-6に示す。

⑤ 土質試験

土質調査では、第1次調査と同様、土壌の含水比、湿潤密度、乾燥密度、間隙率、真密度（土壌粒子密度）を測定した。測定方法についても同様の方法で行い、真密度（土壌粒子密度）については、日本規格協会「土壌粒子密度試験方法（JIS A 1202）^[5]に従い、ピクノメータを用いて測定した。その他のパラメータについても、U-8容器で採取した塊状試料を用いて、試料の体積や乾燥重量、湿潤重量、水飽和重量を測定する、水中飽和法^[6]により測定した。

なお、土壌に対するこれらのパラメータは、土壌中の放射性物質の濃度分布（単位体積当たりの放射能）の算出や、移行・遅延の解釈や解析等に使用した。



(a)ポータブルドリルと大口径サンプラー（内径 150mm）による掘削作業（左写真：地中への押し込み状況）と(b)採取された土壌コアの例（右写真：開口した状態のロッド）

U-8容器



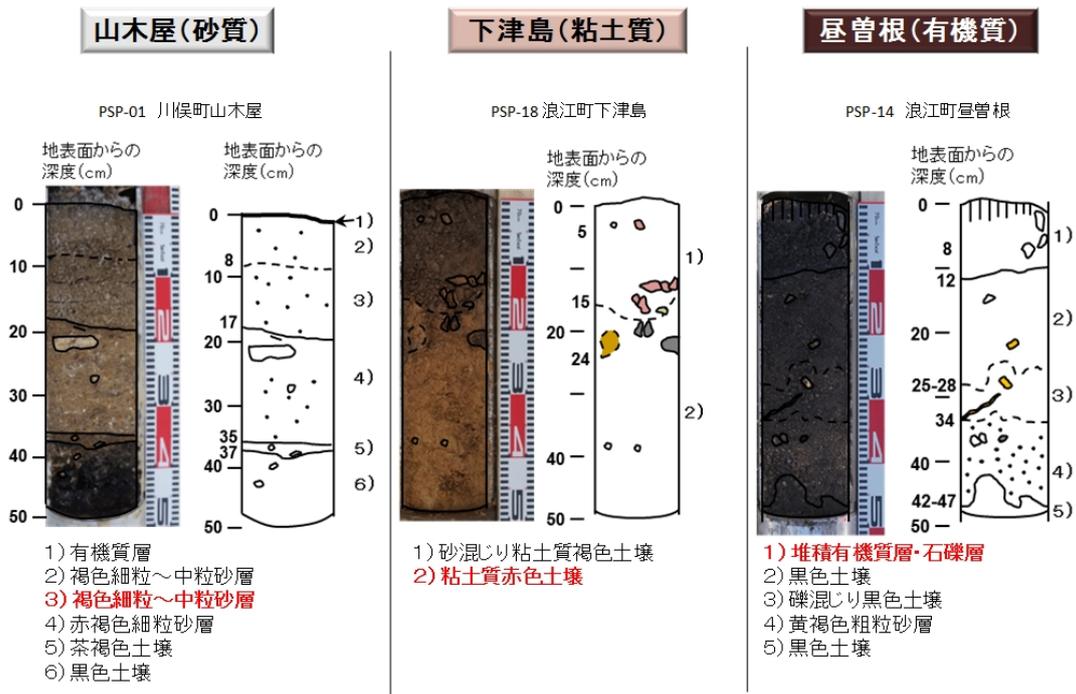
(c)ロッドからの土壌試料の採取（スクレーパーにより採取区間を仕切り、中心部分のみから採取）



カラム（土壌コア）

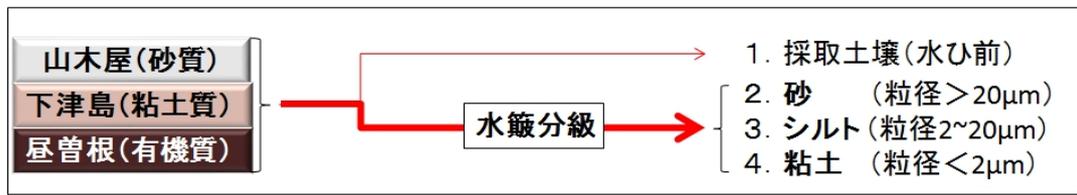
(d)水頭差による簡易式透水試験（土壌の透水性の状況により 30~40cm の水頭差にて実施）

図 3. 2. 3-1 大口径土壌サンプラーを用いた土壌中深さ方向の放射性物質の分布状況調査の状況（(a)掘削作業状況、(b)採取された土壌コアの例、(c)土壌試料の採取、(d)透水試験）



土壤観察の結果から、**砂質**、**粘土質**、**有機質**土層を選定 ⇒ それぞれ約1kg採取

図 3. 2. 3-2(a) 放射性セシウムの移行要因検討のために用いた 3 種類の土壤試料



土壤懸濁液中における、土壤粒子の粒径による沈降速度の違いを利用^[3]

3種の土壤 × 4区分 = 計12試料

X線回折による鉱物分析	CECの測定	収着・脱離試験
<ul style="list-style-type: none"> 不定方位法 定方位法 (エチレンジリコール処理) 塩酸処理 	<ul style="list-style-type: none"> 1 M NH₄Cl でイオン交換 → 1M NaNO₃ で抽出 NH₄⁺ イオンの定量 → CEC算出 	<ul style="list-style-type: none"> Cs の収着試験 KCl による脱離試験

[3] 日本土壤肥科学会監修 土壤環境分析法 博友社

図 3. 2. 3-2(b) 土壤特性評価

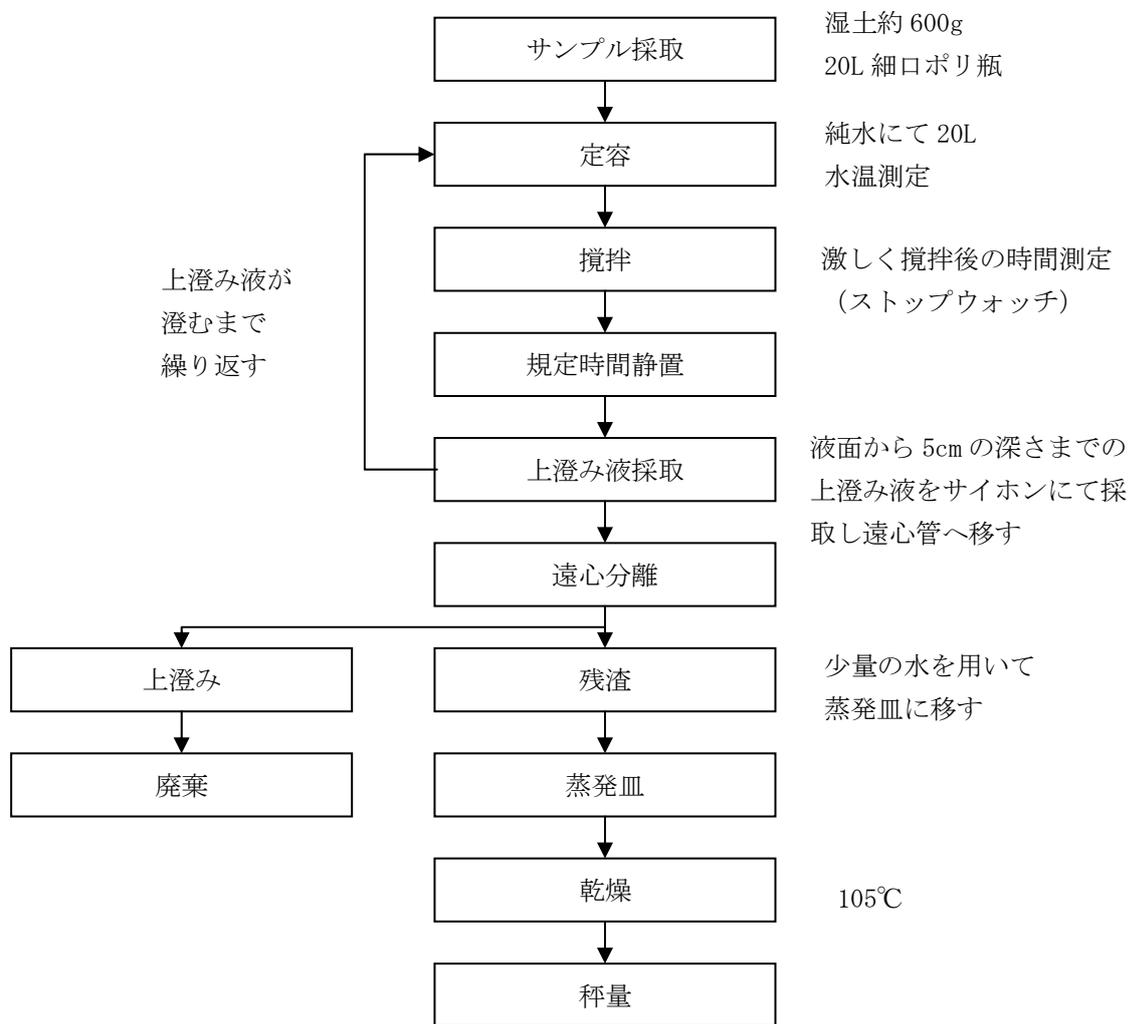


図 3.2.3-3 水簸分級(土壤懸濁液中における土壤粒子の粒径による沈降速度の違いを利用した分級)の手順

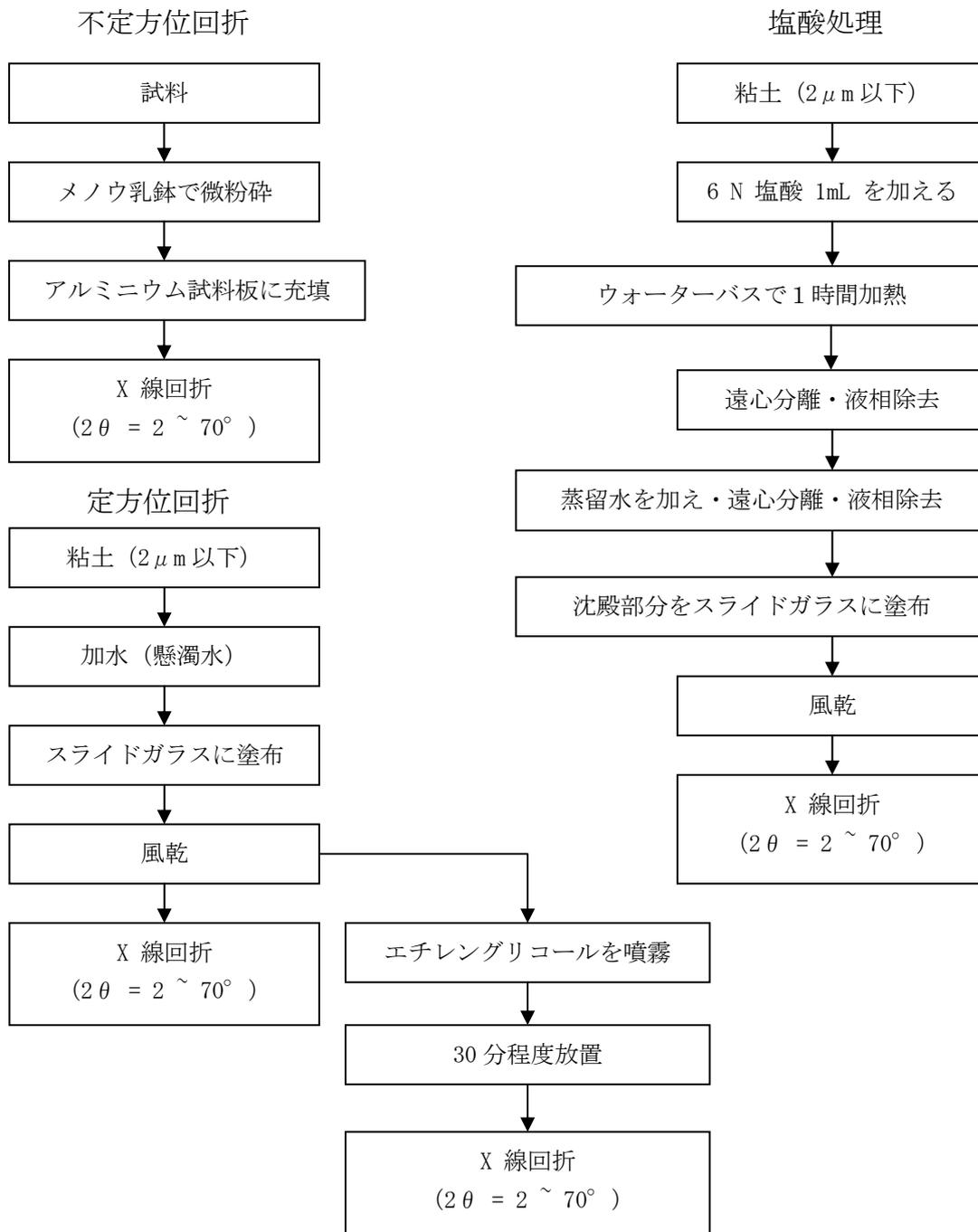


図 3.2.3-4 X線回折による鉱物組成の分析作業手順

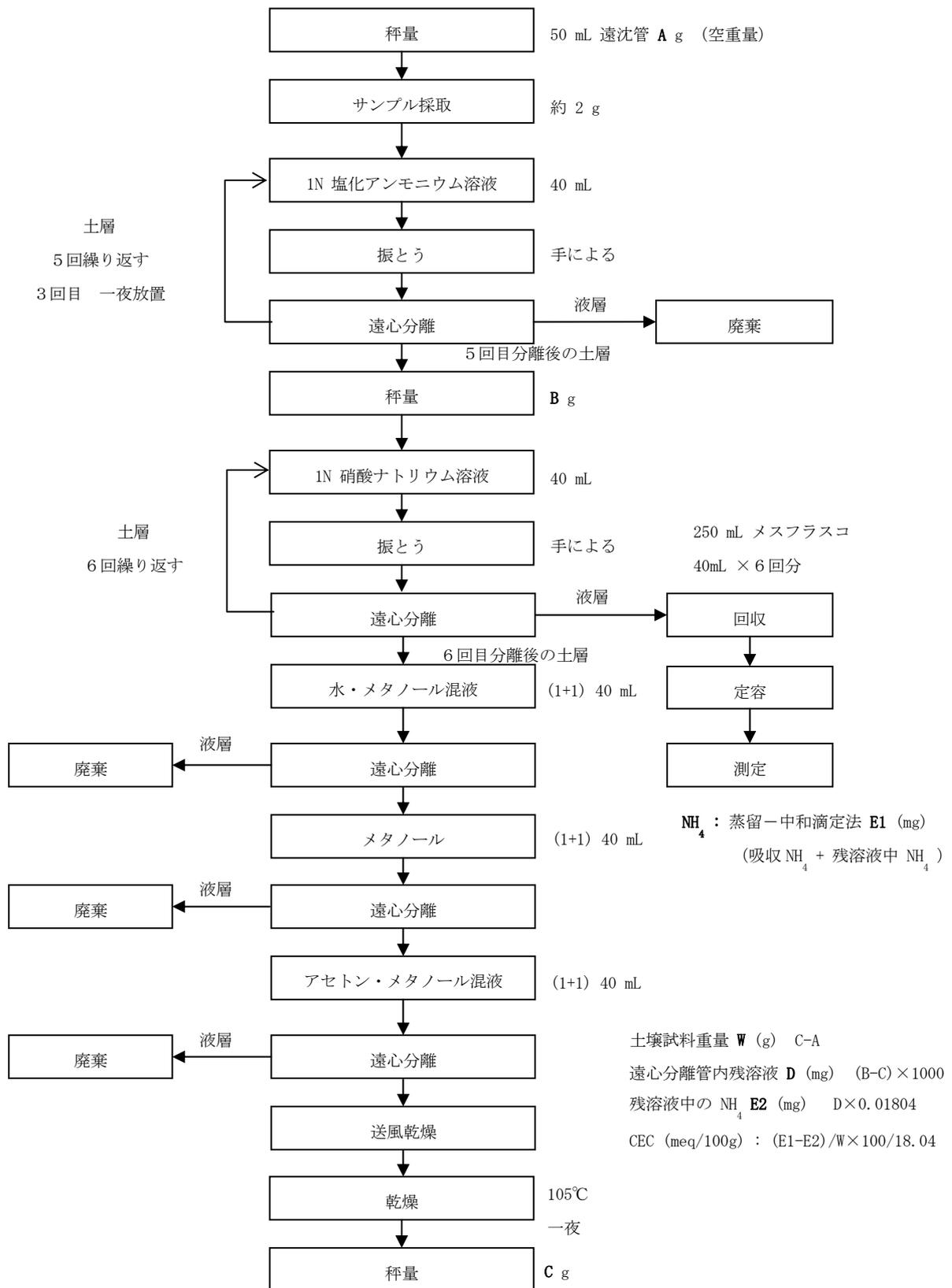


図 3.2.3-5 土壌構成成分の陽イオン交換容量 (CEC) の測定手順

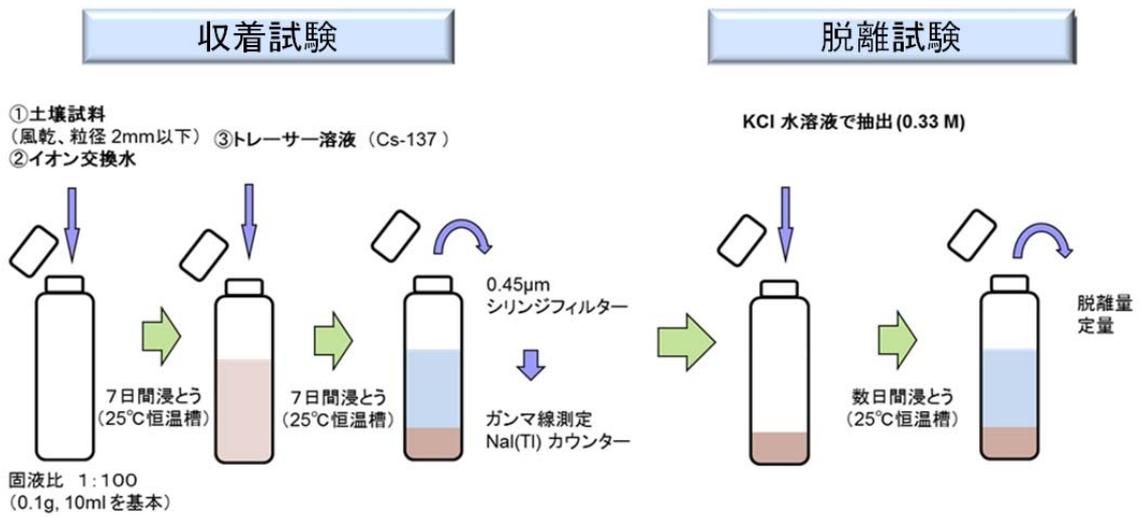


図 3. 2. 3-6 収着試験及び脱離試験の測定手順

3.2.4 調査結果

(1) 土壌中深さ方向における放射性物質の放射能濃度分布について

第2次分布状況等調査において検出された放射性核種は、セシウム 134、セシウム 137、銀 110m であった。放射性セシウムの両核種は全ての試料採取地点で、銀 110m は空間線量率が高い浪江町赤宇木地区と昼曽根地区の試料採取地点で検出された。銀 110m (半減期 249.8d) は、前回の調査においても同様の地区で検出されているもののその量は僅かであり、今回の調査においては更に少なく、最大でも 250 Bq/kg 程度と前回の調査時よりも全ての試料採取地点で半分以下に減少していた。

前回、川俣町山木屋地区より東側の試料採取地点で検出されたテルル 129m は、今回の調査では全ての試料採取地点で検出下限値以下であった。これは、テルル 129m の半減期が 32.6d と短いためであり、前回の調査結果を減衰補正して求めた結果とも整合している。

① 土中における放射性セシウムの分布状況の調査結果

今回の調査では、最大深さ 50cm 程度の土壌コア試料を予備も含めて 19 本採取し、放射性セシウムの深度分布状況について確認を行った(表 3.2.2-1 参照)。土壌観察結果と土地利用状況に基づく土壌区分から、それぞれ地表面土壌と元農地(花壇を含む)と推定される土壌に分類した土壌に対する深度方向の放射性セシウムの濃度分布を、土壌観察結果と共に図 3.2.4-1(a)～図 3.2.4-1(d) と図 3.2.4-2(a)～図 3.2.4-2(f) に示す。なお、平成 23 年 3 月 11 日時点で明らかに畑地や田んぼと思われる農地は、調査対象としていない。

放射性セシウムの深度分布の状況としては、土壌観察結果と土地利用状況に基づく土壌区分から元農地(花壇を含む)と推定される土壌(PSP-5、8、11、16、17、18)とそれ以外の地表面土壌(PSP-1、3、9、13、15)とに分類して考察した結果、図 3.2.4-1(a)～図 3.2.4-1(d) に示すように、地表面土壌については、昼曽根地区の試料採取地点(PSP-13、15)を除き、表層 5cm 以内にインベントリの 95%以上が、表層 10cm 以内に 99%以上が存在していた。これは、第1次分布状況等調査の結果の内、同じ調査地点においてクロスコンタミネーションが明らかに無いと判定された試料(WGS-1、HGS-3)の結果^[2]と比較しても殆ど変化しておらず、放射性セシウムがほとんど移行していないことを示しており、放射性セシウムの土壌への収着分配係数が極めて高いことと整合する。

他方で、元農地(花壇を含む)と推定される土壌については、図 3.2.4-2(a)～図 3.2.4-2(f) に示すように、第1次分布状況等調査の結果と同様、地表面土壌よりも土中深部まで放射性セシウムの分布が広がる傾向であるものの、殆どの地点で表層 16cm 以内にインベントリの 95%以上が、表層 20cm 以内に 99%以上が存在していた。第1次分布状況等調査においてクロスコンタミネーションが明らかに無いと判定された試料(HGS-1、25)の採取地点について第1次分布状況等調査と第2次分布状況等調査の結果を比較すると、第1次分布状況等調査では表層 14cm 以内にインベントリの 99%以上が存在していたのに対して、第2次分布状況等調査では表層 20cm 以内と僅かながら深部へ移行している傾向が見られた。土壌深部に存在する放射性セシウムは、フォールアウトによる影響も考えられたため Appendix 3.2 にて考察した。

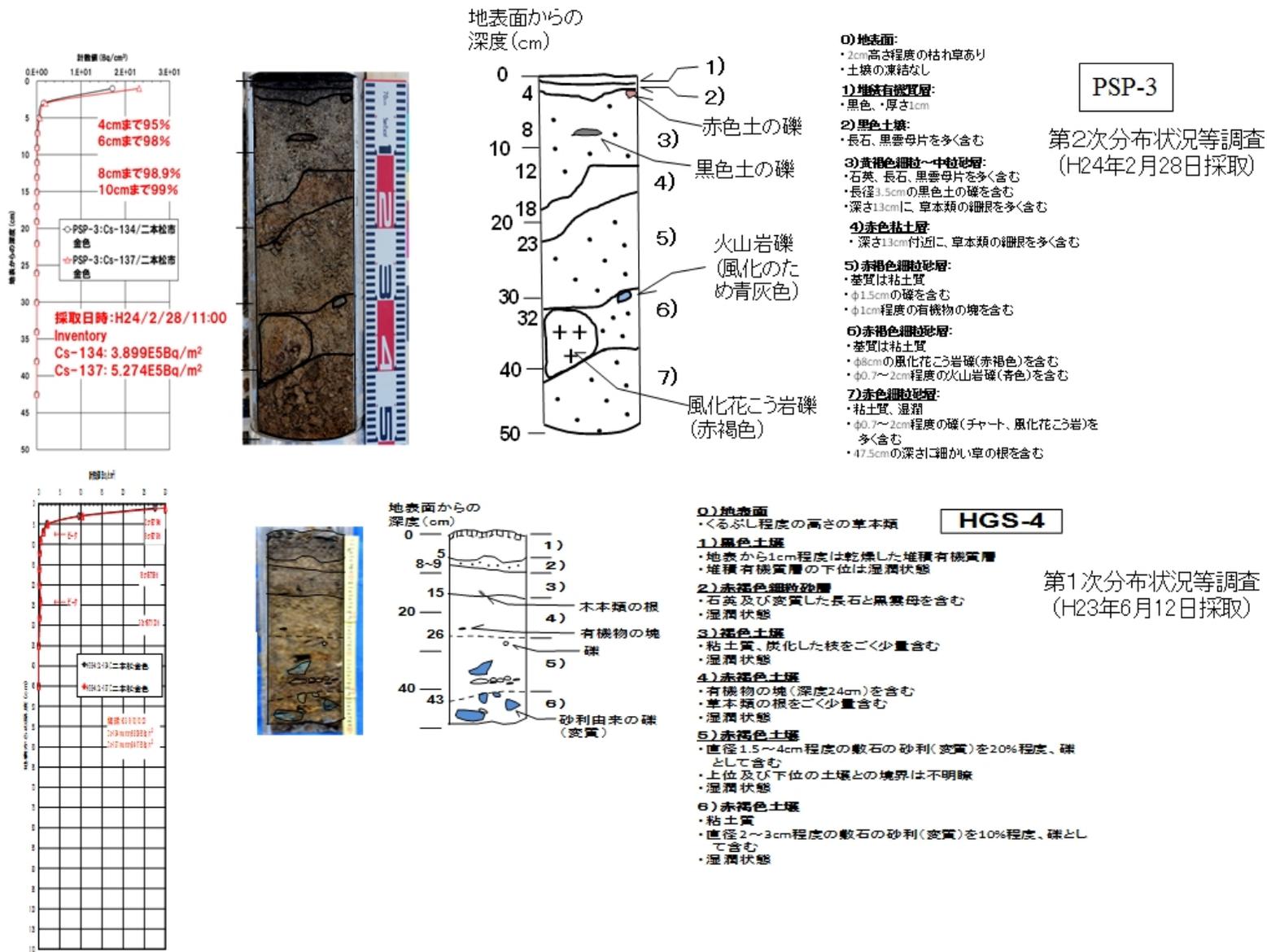
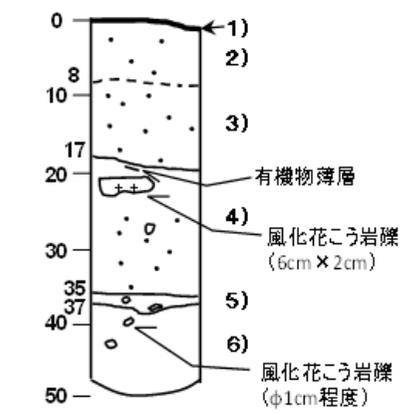
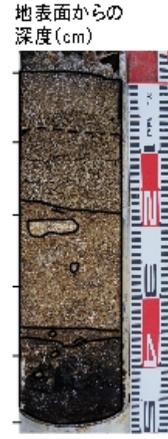


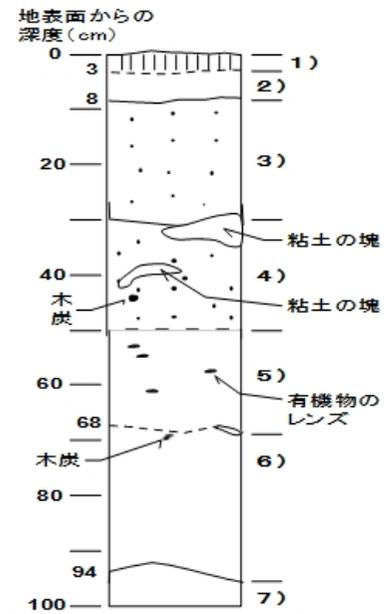
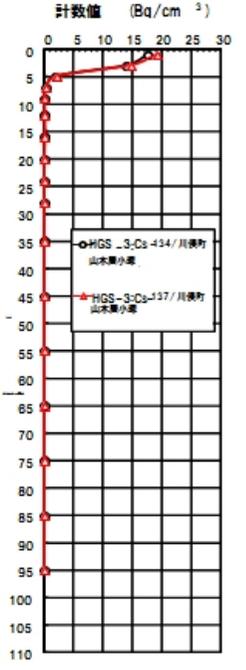
図 3.2.4-1(a) 地表面土壌中の放射性セシウムの深度分布調査の結果 1/4 (PSP-3:二本松市金色)



- 0) 地表面:**
 ・3cm高程度の草本とその枯草あり
 ・8cm程度まで凍結
- 1) 有機質層:**
 ・黒色、凍結
 ・厚さ1cm
- 2) 褐色細粒～中粒砂層:**
 ・粘土質、凍結
 ・草本類の根を多く含む
- 3) 褐色細粒～中粒砂層:**
 ・粘土質、湿潤
 ・ディスクリング(試料採取時に生じた水
 平割れ目)が深さ15～16cmに発達
- 4) 赤褐色細粒砂層:**
 ・粘土質、湿潤
 ・有機物の薄層を含む
 ・風化花こう岩礫を含む
 ・φ3mm以下程度の石英、長石片を多く含む
- 5) 茶褐色土壌:**
 ・湿潤
 ・φ1cm程度の風化花こう岩礫を含む
- 6) 黒色土壌:**
 ・農耕土、湿潤
 ・φ1cm程度の風化花こう岩礫を含む

PSP-1

第2次分布状況等調査
(H24年2月27日採取)



- 0) 地表面**
 ・腰高程度の高さの草本
- 1) 堆積有機質層**
 ・ほぼ植物根から構成される
 ・湿潤状態
- 2) 暗褐色土壌**
 ・細粒砂及び細礫をごく少量含む
 ・湿潤状態
- 3) 赤色土壌**
 ・細粒砂、細礫をごく少量含む
 ・湿潤状態
- 4) 暗褐色土壌**
 ・粗粒砂を含む
 ・レンズ状の粘土を含む
 ・湿潤状態
- 5) 暗褐色土壌**
 ・有機物のレンズを含む
 ・上位及び下位の土壌との境界は不明瞭
 ・湿潤状態
- 6) 暗褐色土壌**
 ・上位の5)暗褐色土壌と比較し有機物レンズを含まない
 ・湿潤状態
- 7) 黒色土壌**
 ・湿潤状態

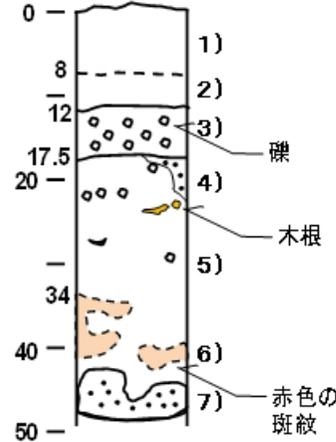
HGS-3

第1次分布状況等調査
(H23年6月11日採取)

図 3.2.4-1(b) 地表面土壌中の放射性セシウムの深度分布調査の結果 2/4
(PSP-1:川俣町山木屋-2)



地表面からの
深度 (cm)

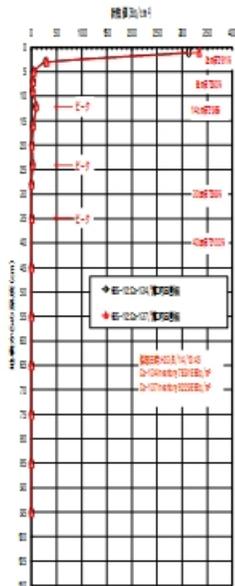


0) 地表面: 枯草あり、8cm程度まで凍結

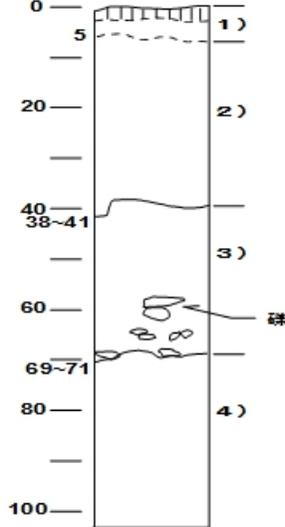
PSP-13

- 1) 黒色土壌
・φ3-5mmの岩片(花崗岩等)を含み、やや粘土質
- 2) 黒色土壌
・φ4cmの褐色斑紋あり、やや粘土質
- 3) 礫混じり褐色土壌
・直径5mm以下の礫を多く含む
- 4) 暗褐色中粒砂
・φ1cmの礫含む
- 5) 褐色土壌
・やや砂質
・φ0.5~1cmの礫、木根を少量含む
- 6) 赤色の斑紋
・やや粘土質
・φ4mmの長石片、φ5mmの有機質塊含む
- 7) 赤色土壌
・粘土質
・花崗岩由来の黒雲母(風化)と長石片を多く含む

第2次分布状況等調査
等(H24年3月4日採取)



地表面からの深度 (cm)



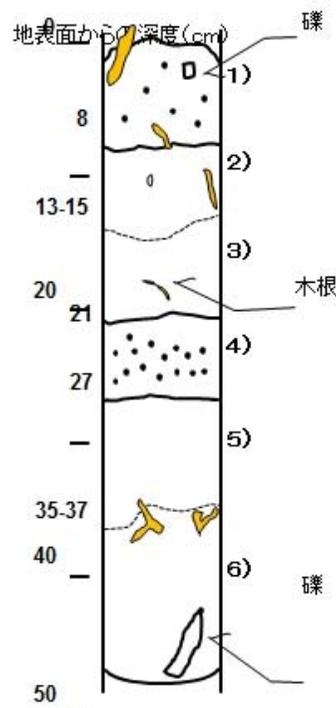
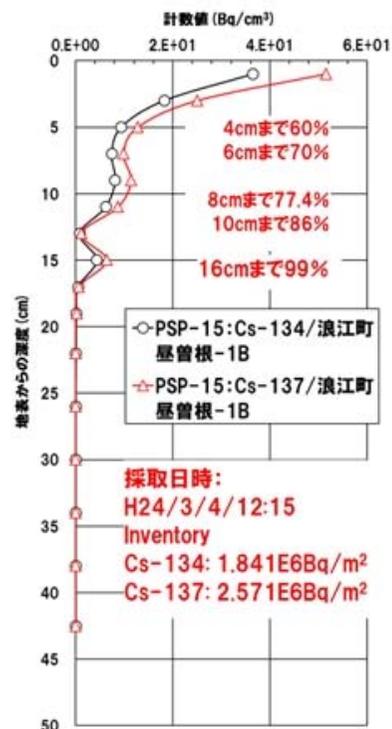
0) 地表面

HGS-12

- ・腰高程度の草本類
- 1) 褐色土壌
・地表2~4cm程度までは、草本類の根や枯葉、枯草を多く含む堆積有機質層
・堆積有機質層の下位には塊状の土壌構造が発達する
・湿潤状態
- 2) 褐色土壌
・直径4mm以下の礫を少量含む
・湿潤状態
- 3) 赤色土壌
・粘土質
・直径3mm以下の礫を少量含む
・深度60~70cmに直径2~3cmの礫を含む
・湿潤状態
- 4) 黒色土壌
・直径2cm以下の礫(風化花崗岩)をごく少量含む
・草本もしくは木本類の根をごく少量含む
・湿潤状態
※ 黒ボク土のA層に相当する

第1次分布状況等調査
(H23年6月14日採取)

図 3.2.4-1(c) 地表面土壌中の放射性セシウムの深度分布調査の結果 3/4
(PSP-13:浪江町昼曾根-1A)



0) 地表面: 枯草あり

1) 暗赤褐色土壌

- ・マサ土と黒色土壌が混合した土壌で有機質
- ・石英、長石、風化黒雲母の粗粒～極粗粒砂サイズの鉱物片に富む
- ・全般に草本類の細根が認められ、特に基底部に

2) 黒ボク土

- ・草本類の細根を含む
- ・φ5mmの石礫を稀に含む
- ※基底部にビニールひもの埋立ゴミあり

第2次分布状況等調査
(H24年3月4日採取)

3) 黒ボク土

- ・上位2)黒ボク土に同じ、但しφ4mmの団粒状構造が発達(上位との境界は不明瞭)

4) 暗褐色砂層

- ・粗粒～極粗粒砂サイズ
- ・4mm以下の礫を多く含む

5) 黒ボク土

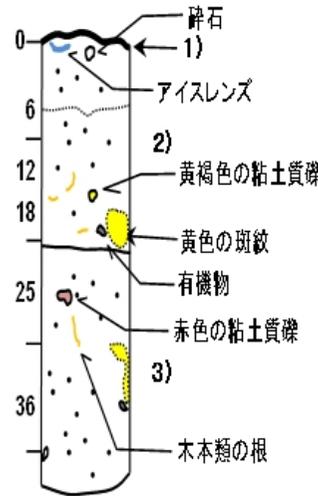
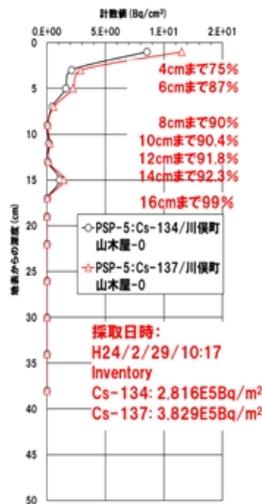
- ・全体に細根を含み、下部に木本類の根あり

6) 黒ボク土

- ・上位5)黒ボク土に同じ、但しφ0.5～1cmの団粒状構造が発達
- ・ごく稀に石礫を含む(長径1～4cm)

第1次分布状況調査では上記PSP-15の近傍で試料採取を行っていない。

図 3. 2. 4-1(d) 地表面土壌中の放射性セシウムの深度分布調査の結果 4/4
(PSP-15:浪江町昼曾根-1B)



0) 地表面: 針葉樹、広葉樹の枯葉・枝を含む

1) 有機質層:

・黒色、凍結状態、厚さ0.5cm

PSP-5

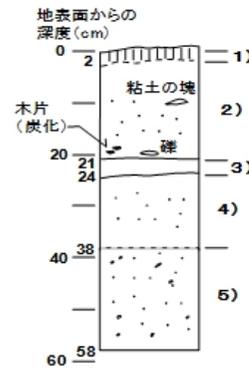
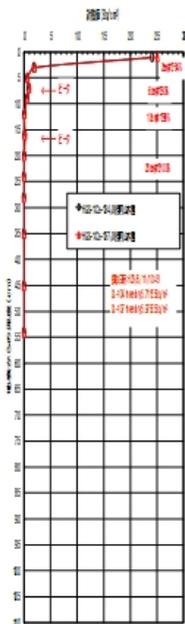
2) 褐色細粒砂層:

・粘土分を含む
・深さ6cmまで、凍結状態
・深さ2cmに、厚さ2cm、長さ3cmのアイスレン
ズ(氷の塊)を含む
・深さ20cm付近に長石片を多く含む
・φ3.5cmの黄色の斑紋がみられる
・草本類の根を多く含む

第2次分布状況等調査
(H24年2月29日採取)

3) 褐色中粒砂層:

・幅1.5cm、長さ5cmの黄色の斑紋がみられる
・長石、黒雲母片を多く含む
・草本類の根を多く含む



0) 地表面

・くぶし程度の高さの草本
・乾燥した堆積有機質層は1cm以下の厚さ

1) 黒色土壌

・植物根を多く含む
・湿潤状態

2) 暗褐色土壌

・砂質
・粘土の塊や礫をこくまれに含む
・炭化した木片(直径1cm)を含む
・湿潤状態

3) 赤色土壌

・砂や礫を含まず、ほぼ粘土からなる
・湿潤状態

4) 赤褐色土壌

・石英、長石、黒雲母等の花崗岩由来の鉱物を含む
・長石及び黒雲母は変質

・基質は粘土質、細礫を少量含む
・湿潤状態

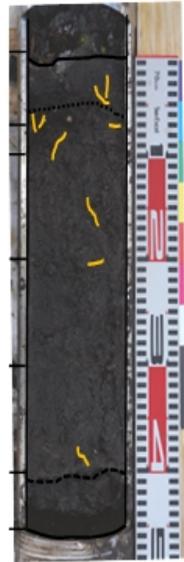
5) 赤褐色土壌

・上位4)との境界は漸移的
・石英、長石、黒雲母等の花崗岩由来の鉱物を含む
・長石及び黒雲母は変質
・基質は粘土質、細礫を含む
・上位の4)赤褐色土壌と比較し長石、細礫多い
・湿潤状態

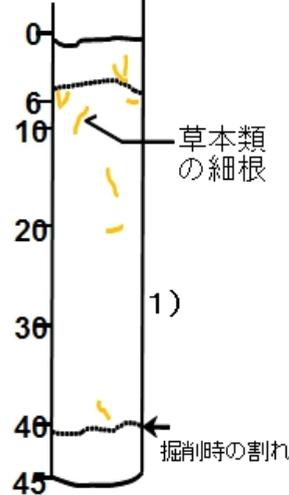
HGS-1

第1次分布状況等調査
(H23年6月11日採取)

図 3. 2. 4-2(a) 元農地と推定される土壤中の放射性セシウムの深度分布調査の結果 1/6
(PSP-5:川俣町山木屋-0)



地表面からの深度 (cm)



0) 地表面:

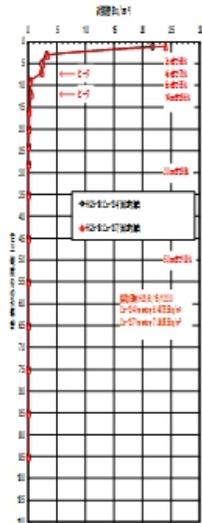
・20cm高の枯れた草本類

1) 細粒砂を含む黒色土壌:

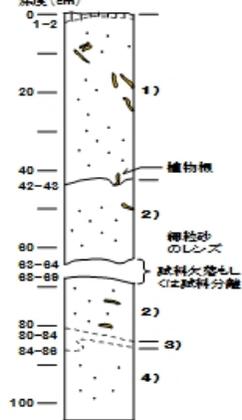
- ・深さ6cmまで凍結状態、それ以深は湿潤
- ・粘土質かつ、全体的に有機質
- ・石英、長石片、粗粒～極粗粒砂サイズの石礫を含む
- ・黒雲母片を非常に多く含む
- ・草本類の細根を非常に多く含む
- ・非常に湿潤。掘削孔は30分立たないうちに地下水で満たされる
- ・土地利用状況は放棄畑

PSP-8

第2次分布状況等調査
(H24年3月1日採取)



地表面からの深度 (cm)



0) 地表面:

・30～40cm程度の高さの草本類

1) 黒色土壌
・地表面直下層は地表面から1～2cm、多量状態
・地表面直下層の下位は砂質土壌
・植物根を多く含む
・多量状態

2) 黒色土壌

・砂質
・貧みを帯びた土色を呈する
・植物根を含む
・多量状態

3) 赤褐色土壌

・上位及び下位との境界は不明瞭
※鉄料積部の不規則な層境界は鉄料採取時の引きずりによると考えられる

4) 黒色土壌

・上位の(3) 赤褐色土壌との境界は不明瞭
・砂質
・多量状態

HGS-19

第1次分布状況等調査
(H23年6月15日採取)

図 3.2.4-2(b) 元農地と推定される土壌中の放射性セシウムの深度分布調査の結果 2/6
(PSP-8:浪江町津島)

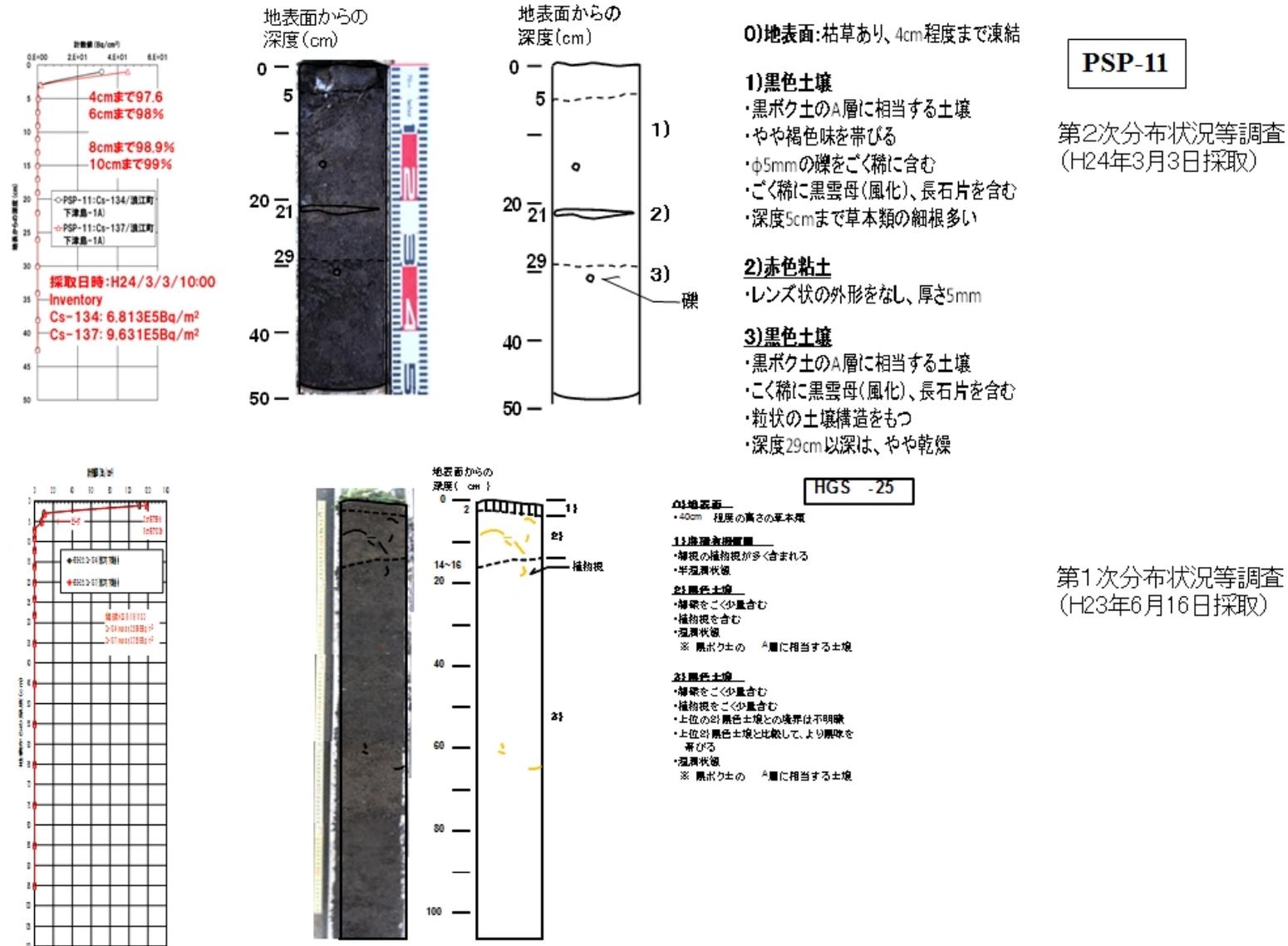
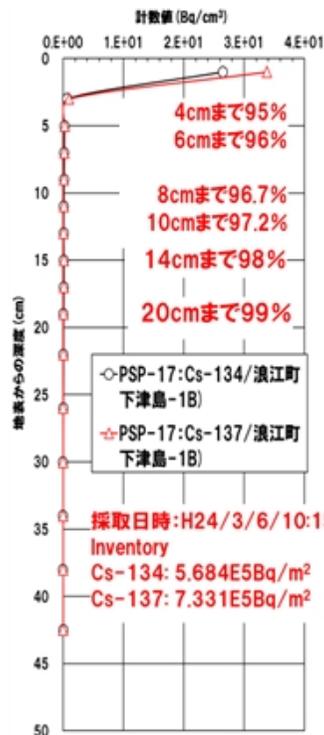
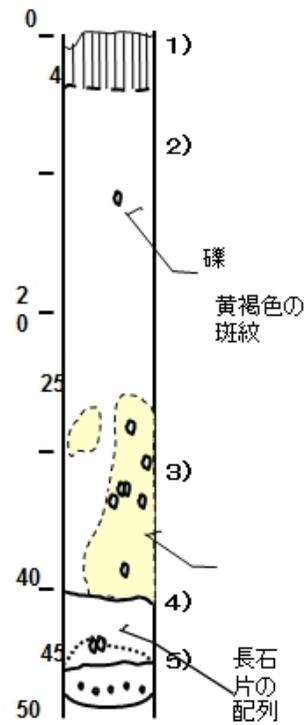


図 3.2.4-2(c) 元農地と推定される土壌中の放射性セシウムの深度分布調査の結果 3/6
(PSP-11:浪江町下津島-1A)



地表面からの深度(cm)



0) 地表面: 草本類の枯草あり

1) 有機質層

・ほぼ草本類の細根から構成される

第2次分布状況等調査
(H24年3月6日採取)

2) 黒色土壌

・有機質, 細根を多く含む
・φ1mm程度の黒雲母(風化), 長石片を多く含む
・ごく稀にφ5mmの礫を含む

3) 黄褐色斑紋

・2)の黒色土壌と混在して分布
・φ3~5mmの長石片を多く含む
・草本類の細根をまれに含む

4) 黒色土壌

・黒ボク土のA層に相当する土壌
・深度43~45cmにかけて長石片が層状に分布
・黒雲母と長石片を多く含む

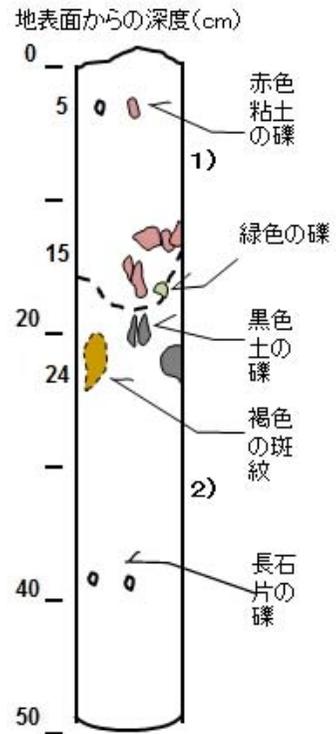
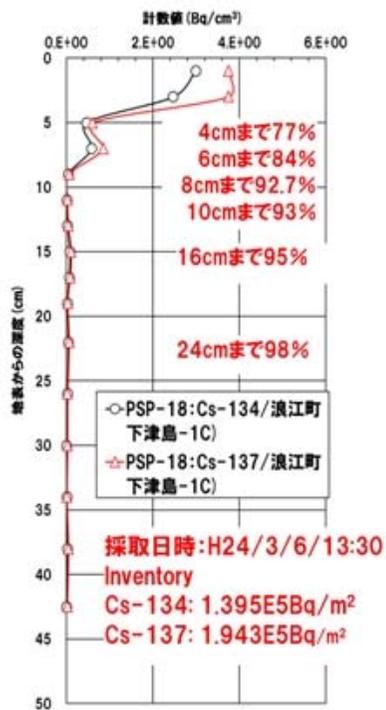
5) 黒色土壌

・黒色土壌に黄褐色の斑紋が認められる(2)の黒色土壌と3)の黄褐色斑紋に類似)
・黒雲母と長石片を非常に多く含み、長石片はφ3~5mm程度の大きさ
・まれに草本類の細根を含む

PSP-17

第1次分布状況調査では上記PSP-17の近傍で試料採取を行っていない。

図 3. 2. 4-2(d) 元農地と推定される土壌中の放射性セシウムの深度分布調査の結果 4/6
(PSP-17: 浪江町下津島-1B)



PSP-18

- 0) 地表面: 枯草や草本類の細根なし
第2次分布状況等調査 (H24年3月6日採取)
- 1) 砂混じり粘土質褐色土壌
 - ・深度5cm程度にφ5~1cmの礫を多く含む
 - ・下位の2)粘土質赤色土壌由来する礫を、下部に含む
 - ・φ0.5~1cm程度の団粒状の土壌構造が発達
- 2) 粘土質赤色土壌
 - ・黒雲母(風化), 長石片を多く含む
 - ・褐色、黒色土の礫を上部に含む
 - ・深度35cmにφ5~1cmの長石片の礫を層状に含む
 - ・上位の1)褐色土壌との境界部は不明瞭であり、褐色土壌と赤色土壌が混在
 - ・φ2~5cm程度の塊状の土壌構造が発達

第1次分布状況調査では上記PSP-18の近傍で試料採取を行っていない。

図 3. 2. 4-2(e) 元農地と推定される土壌中の放射性セシウムの深度分布調査の結果 5/6 (PSP-18: 浪江町下津島-1C)

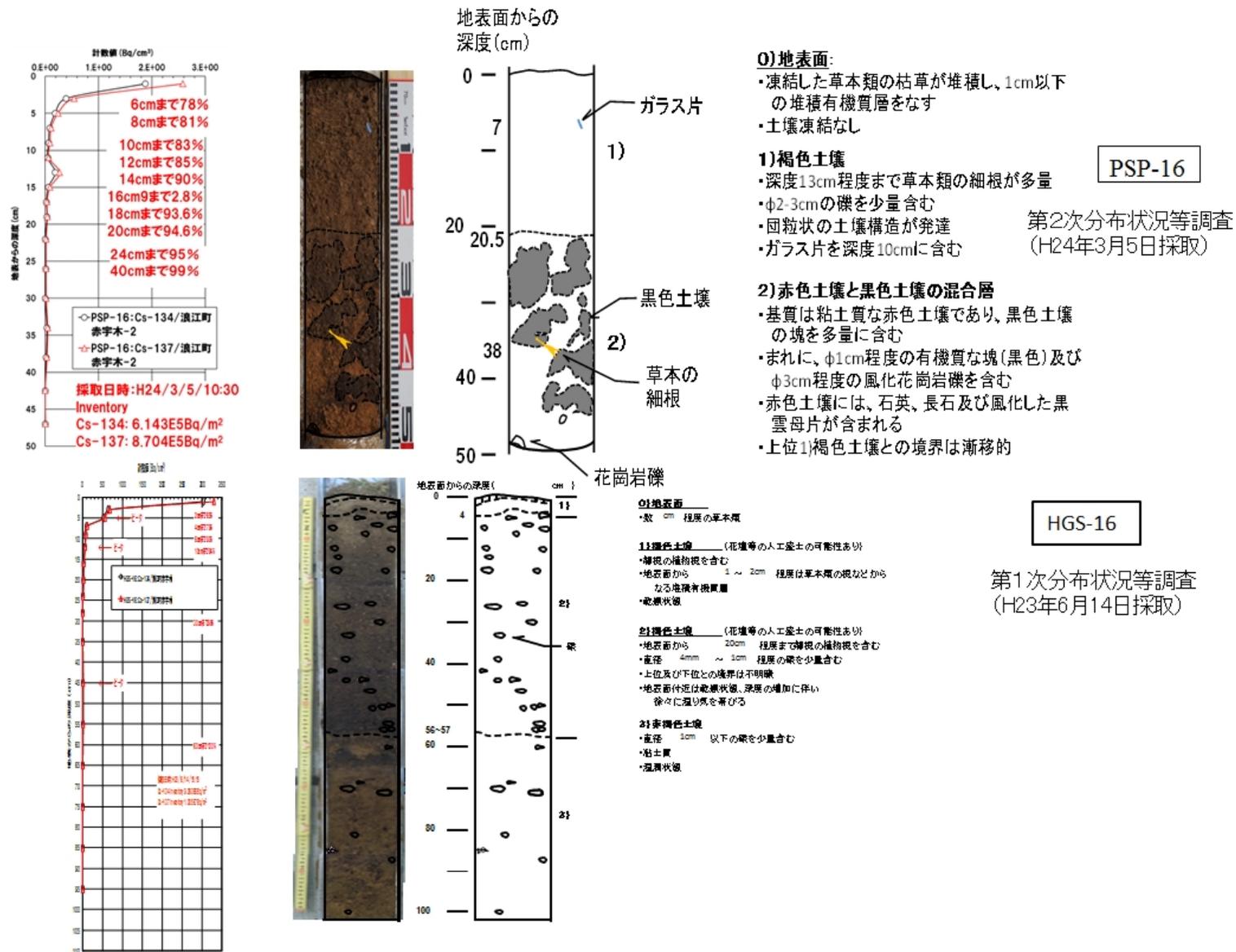


図 3.2.4-2(f) 元農地と推定される土壌中の放射性セシウムの深度分布調査の結果 6/6
(PSP-16:浪江町赤宇木-2)

② 土中における放射性セシウムの分布状況の違いの考察

放射性セシウムの濃度分布と土壤構成との関係について考察した結果、褐色ないし黒色土壤を支持層とした土壤（PSP-5、8、11、13、15、16、17、18）において深部まで分布し、特に有機質土壤（PSP-8、11、13、15、17）において分布が広がる傾向が見られた。これは、放射性セシウムが直接土壤成分へ収着するよりも有機物と錯形成する方が収着分配係数に及ぼす効果が小さいため、相対的に有機物が土壤への放射性セシウムの収着を阻害する方向に作用することに加えて、有機物と放射性セシウムとの反応が可逆的であるためと考えられる。このことは、後述する有機質土壤に対する放射性セシウムの収着分配係数が他の土壤よりも小さいことや CEC（23.6meq/100g）が粘土質土壤（10.4meq/100g）や砂質土壤（5.5meq/100g）よりも大きくイオン交換反応による収着容量も大きいと見積もられるものの、収着の可逆性の割合も大きく移行しやすいことと整合する。

また、土壤の性質の違いに伴う放射性セシウムの深度分布の違いを確認するため、各調査箇所にて採取された土壤試料の土壤観察の結果を基に、主な土壤の構成が砂質土壤、粘土質土壤、有機質土壤かで分類し、それぞれの土壤分類における放射性セシウムの深度分布の傾向を比較した。比較にあたっては、90%深度（土中の放射性セシウムの全存在量の90%が含まれる深さ）、及び99%深度（土中の放射性セシウムの全存在量の99%が含まれる深さ）を指標とした。その結果、表3.2.4-1に示すように、調査箇所によるばらつきはあるものの、土壤攪乱の影響のない地表面土壤について比べると、有機質土壤では、砂質土壤や粘土質土壤に比べて、90%深度、99%深度が大きくなる傾向が確認され、有機質土壤、つまり有機質が多い土壤では放射性セシウムが深くまで浸透している傾向にあることが確認された。

なお、土壤中における放射性セシウムの深度分布の状況は、地表面から深度方向への放射性セシウム濃度の減少率及び土壤中における放射性セシウム濃度ピークの位置に基づく、4種類に区分され、今回の調査では、クラスAとBが大半を占め、クラスCとDは極一部に限られた（図3.2.4-3）。

- a) クラスAは、地表面で最も放射性セシウムの放射能濃度が高く、深度2cm以内に放射性セシウムのインベントリの90%以上が存在し、それ以深で濃度が急減する。
- b) クラスBも同じく地表面で最も放射性セシウムの放射能濃度が高いが、深度0～4cmまでの放射性セシウムの濃度に変化が認められず、深度4cm以深で濃度が急減する。
- c) クラスCは、地表面で最も放射性セシウムの濃度が高く、深度4cm以内に放射性セシウムのインベントリの60～70%が存在し、深度10cm付近に濃度ピークを有する。
- d) クラスDは、地表面から深度4cm付近での放射性セシウムの放射能濃度が最も高く、土壤中に複数の濃度ピークを持つ。

表3.2.4-1 大口径土壤サンプラーを用いた土壤中の放射性セシウムの深度分布調査の結果（土壤分類（砂質土壤、粘土質土壤、有機質土壤）ごとの評価）

		90%深度 (土中の放射性セシウムの全存在量の90%が含まれる深さ)	99%深度 (土中の放射性セシウムの全存在量の99%が含まれる深さ)	備考 (土壤分類ごとに該当する調査箇所)
砂質土壤	地表面土壤	2cm以下～4cm程度	2cm程度～10cm程度	PSP-1,PSP-3,PSP-9
	元農地と推定される土壤	～8cm程度	～16cm程度	PSP-5
粘土質土壤	地表面土壤	7cm程度	10cm程度～12cm程度	PSP-13
	元農地と推定される土壤	7cm程度～14cm程度	10cm程度～40cm程度	PSP-11,PSP-16,PSP-18
有機質土壤	地表面土壤	～13cm程度	～16cm程度	PSP-15
	元農地と推定される土壤	4cm程度～9cm程度	18cm程度～20cm程度	PSP-8,PSP-17

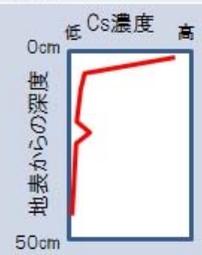
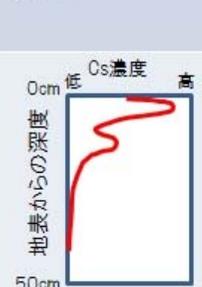
クラス	深度分布のパターン	試料採取地点	土壌裡	土地利用情況	試料採取地点/周囲の地形
A	<ul style="list-style-type: none"> 地表面で最もCs濃度が高く、深度方向に向かい急減する 深度2cm以内のCs積算濃度(%)が90%以上である 	<ul style="list-style-type: none"> 二本松市金色 浪江町下洋島-1A 浪江町下洋島-1B 浪江町赤牛木-1 川俣町山木屋-2 	<p>○深度2cmまで: 二本松(金色)堆積有機質層と黒色土壌 下洋島-1A)黒色土壌(黒ボク土) 下洋島-1B)有機質層 赤牛木-1)堆積有機質層・砂礫層 山木屋-2)有機質層と粘土質細～中粒砂層</p> <p>○深度4cmまで: 二本松(金色)黒色土壌 下洋島-1A)黒色土壌(黒ボク土) 下洋島-1B)有機質層 赤牛木-1)砂質土壌 山木屋-2)粘土質細～中粒砂層</p>	二本松(金色) 駐車場わきの側溝近傍 下洋島-1A) 山間の元畑 下洋島-1B) 山間の元畑 赤牛木-1) 山間の元畑 山木屋-2) 屋根を切り土した駐車場、マサの客土	二本松(金色)平坦面(試料採取地点は、駐車場から10-15cm程度掘り込んだ側溝の近傍) 下洋島-1A)山麓緩斜面の最大傾斜方向に直交して流れる小河川の downstream 側端部(河川方向に4度、河川直交方向に6-8度傾斜) 下洋島-1B)山麓緩斜面の最大傾斜方向に直交して流れる小河川の upstream 側端部(河川方向に4度、河川直交方向に6-8度傾斜) 赤牛木-1)小河川沿いに発達する山地斜面基部の麓斜面。幅24mで河川に向かい7度傾斜。後背地の山地斜面は傾斜15度以上。 山木屋-2)山地斜面(傾斜8-15度)
B	<ul style="list-style-type: none"> 深度0～2cmと深度2～4cmの全Cs濃度がほぼ同じであり、深度方向に向かい急減する 	<ul style="list-style-type: none"> 浪江町下洋島-1C 浪江町原菅根-1A 	<p>○深度2cmまで: 下洋島-1C)砂混じり粘土質土壌 原菅根-1A、手前)黒色土壌、やや粘土質</p> <p>○深度4cmまで: 下洋島-1C)砂混じり粘土質土壌 原菅根-1A、手前)黒色土壌、やや粘土質</p>	下洋島-1C) 山間の元畑 原菅根-1A、手前) 広葉樹林地の端部	○下洋島-1C)山麓緩斜面の末端部(河川方向に4度、河川直交方向に6-8度傾斜) 原菅根-1A、手前)請戸川沿いに発達する幅約80mの河成段丘面の中央部、河川側。
C	<ul style="list-style-type: none"> 地表面で最もCs濃度が高く、深度方向に向かい急減する 深度4cm以内のCs積算濃度(%)が60-70%台である 深度15cm程度に濃度ピークを持つ 	<ul style="list-style-type: none"> 川俣町山木屋-0 浪江町赤牛木-2 浪江町原菅根-1B 	<p>○深度2cmまで: 山木屋-0)有機質層と細粒砂層 赤牛木-2)褐色土壌 原菅根-1B、奥)マサ土と黒色土壌の混合した有機質土壌</p> <p>○深度4cmまで: 山木屋-0)細粒砂層 赤牛木-2)褐色土壌 原菅根-1B、奥)マサ土と黒色土壌の混合した有機質土壌</p> <p>○ピーク深度: 山木屋-0)細粒砂層と粘土質礫 赤牛木-2)褐色土壌 原菅根-1B、奥)塊状黒ボク土と団粒状黒ボク土境界部</p>	山木屋-0) 花壇、マサの客土 赤牛木-2) 花壇、マサの客土が土壌化 原菅根-1B、奥) 広葉樹林地の端部	山木屋-0)請戸川の沖積面端部(後背地は山地斜面で傾斜20-35度) 赤牛木-2)請戸川沿いの幅20mの河成段丘面。河川に向かい2度傾斜(後背地は山地斜面で傾斜22度) 原菅根-1B、奥)請戸川沿いに発達する幅約80mの河成段丘面の中央部、山地側。後背地は山地斜面で傾斜20-35度。
D	<ul style="list-style-type: none"> 地表面に比べて深度数cmにおけるCs濃度が高い 複数深度に濃度ピークがある 	<ul style="list-style-type: none"> 浪江町洋島 	<p>○深度2cmまで: 洋島)細粒砂を含む有機質黒色土壌</p> <p>○深度4cmまで: 洋島)細粒砂を含む有機質黒色土壌</p> <p>○ピーク深度: 洋島)細粒砂を含む有機質黒色土壌</p>	洋島)元田んぼ	洋島)小河川沿いに発達する幅250m程度の沖積面。周囲を囲まれた盆地状の地形をなし集水域。地下水位はほぼ地表面

図 3.2.4-3 土壌中深度方向の放射性セシウムの分布状況に関するパターン分類
(クラス C 及び D における濃度ピークは、表面濃度に比べて数桁少ない濃度での変動である)

③ 土中における放射性セシウムの深度分布の特徴に関する考察

3. 1で土壌深度特性をまとめた際と同様に、土壌深度別の放射性セシウムの放射能濃度が深度が大きくなるにつれ、指数関数的に減少しているか調べた。その結果、今回の調査箇所においても、全体的に土中深度に対する対数表示の放射性セシウムの濃度分布は指数関数的に減少する形状のものが多く確認された。これは、土中における放射性セシウムの移行状況は、単純な拡散ないし移流分散などによる移行方程式では表現できず、可逆と不可逆な収脱着反応が混在すると見られる。このことは、後述する土壌構成鉱物の分析結果において、イオン交換を主体とする可逆的な収着反応（収着後、はがれる）を示すパーミキュライトや不可逆な収着反応（収着後、はがれない）を示すマイカなどの粘土鉱物が同定されたことと整合する。

(2) 水簸分級による土壌構成成分の含有量測定、XRDによる鉱物組成分析、土壌基本特性（CEC）の測定結果による砂質土壌、粘土質土壌、有機質土壌への放射性セシウムの収着特性の評価について

前記3.2.4(1)②の「土中における放射性セシウムの分布状況の違いの考察」において示したように、砂質、粘土質、有機質土壌で、放射性セシウムの深度分布が異なる傾向を示すことが確認された。そこで、採取した土壌試料から3種類の土壌（砂質土壌、粘土質土壌、有機質土壌）を選択的に抽出し、放射性セシウムと吸着性能に影響を与える土壌粒度分布（図3.2.4-4）、鉱物組成の特徴、土壌基本特性の測定（CEC測定）について調査を行った（図3.2.4-5）。表3.2.4-2に、3種類の土壌（砂質土壌、粘土質土壌、有機質土壌）に対して水簸分級により得られた土壌構成成分（粘土、シルト、砂・礫）の含有率（重量%）及びそれら土壌構成成分のCEC（陽イオン交換容量）の測定結果を示す。また、表3.2.4-3にXRDによる鉱物組成分析結果を示す。

これらの結果から以下のことが確認された。

- 放射性セシウムは陽イオンとして、土壌を構成する粘土鉱物に吸着すると言われている。この土壌試料との収着しやすさを表す指標として、土壌試料の陽イオン交換容量（CEC）があり、CECが大きいほど、放射性セシウムは収着しやすくなる。このCECについて砂質、粘土質、有機質土壌について調査したところ、有機質土壌は、砂質、粘土質土壌に比べて全体的にCECが高い値を示し、特に、粘土成分（83.4meq/100g）とシルト成分（58.2meq/100g）でベントナイト並みの高い値を示した。
- また、放射性セシウムは粘土鉱物と収着しやすいものの、粘土鉱物の種類の違いによって、可逆的（収着しやすく、脱離しやすい）、不可逆的（収着した後、脱離しづらい）な反応を示す。そこで、砂質土壌、粘土質土壌、有機質土壌の陽イオン交換容量の違いについて、土壌の鉱物組成の面から影響を確認したところ、
 - a) 砂質土壌は、マイカとカオリナイトの含有量が多く、相対的にCECは低い。マイカの含有量が多いことから、粘土鉱物への収着に対する不可逆性の割合が高く、放射性セシウムが移動しづらいことが確認された。
 - b) 粘土質土壌は、パーミキュライトの含有量が多い。粘土鉱物への収着に対する可逆性の割合が高く、砂質土壌に比べて放射性セシウムはやや移行しやすいことが確認された。
 - c) 有機質土壌は、CECが最も高く、可逆性も大きいと考えられることから、放射性セシウムが移行しやすいことが確認された。

- これらのことから、有機質土壌は、バーミキュライトの含有率が粘土、シルト成分共に多くないことを考えると、CEC の多くは有機物のイオン交換体（例えば、カルボキシル基）によるものと考えられる。なお、粘土質土壌では、粘土成分及びシルト成分共にバーミキュライトを多く含むにも関わらず、CEC は砂質土壌における粘土成分やシルト成分の方が高い。この要因としては、イオン交換の際に用いた NH_4Cl 水溶液中の NH_4^+ イオンがバーミキュライトに固定された可能性^[3]が考えられる。

なお、粘土成分（粒径 $2\mu\text{m}$ 以下）の含有率はいずれも $1\sim 2\text{wt}\%$ 程度であった。一方、シルト成分の含有率は、粘土質土壌で $43.9\text{wt}\%$ と最も高く、次いで有機質土壌の $14.7\text{wt}\%$ 、砂質土壌の $3.9\text{wt}\%$ の順であった。特に、粘土質土壌はシルト以下の粒子が $44.7\text{wt}\%$ と全成分の半分近くを占めており、現場観察における目視や接触による性状の違いは主にシルト含有率に起因すると考えられる。

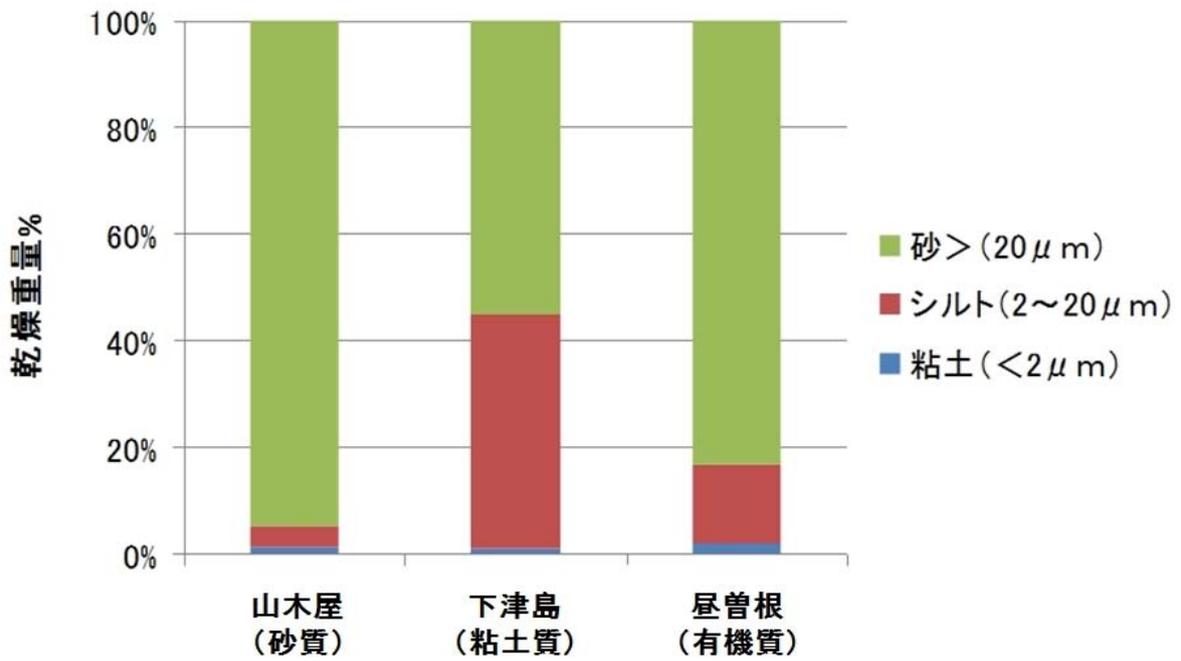
表 3.2.4-2 水簸分級(土壌懸濁液中における土壌粒子の粒径による沈降速度の違いを利用した分級)により得られた土壌構成成分の含有率及び CEC の測定結果

採取箇所	性状	成分	粒径	水簸分級		CEC (meq/100g)
				乾燥重量(g)	含有量(%)	
川俣町山木屋	砂質		無処理			5.5
		粘土	$<2\mu\text{m}$	10.8	1.2	21.4
		シルト	$2\sim 20\mu\text{m}$	33.6	3.9	21.7
		砂、礫	$>20\mu\text{m}$	820.3	94.9	2.4
浪江町下津島	粘土質		無処理			10.4
		粘土	$<2\mu\text{m}$	3.5	0.8	12.6
		シルト	$2\sim 20\mu\text{m}$	190.4	43.9	17.6
		砂、礫	$>20\mu\text{m}$	239.8	55.3	8.8
浪江町屋曾根	有機質		無処理			23.6
		粘土	$<2\mu\text{m}$	5.2	2	83.4
		シルト	$2\sim 20\mu\text{m}$	38.8	14.7	58.2
		砂、礫	$>20\mu\text{m}$	220.1	83.3	7.3

表 3.2.4-3 X線回析（XRD）による鉱物組成分析結果

同定された鉱物		試料名											
鉱物名	Mineral name	川俣町山木屋				浪江町下津島				浪江町屋曽根			
		砂質土壌	粘土	シルト	砂分	粘土質土壌	粘土	シルト	砂分	有機質土壌	粘土	シルト	砂分
スメクタイト	Smectite	tr	+	tr	tr	—	—	—	—	—	—	—	—
バーミキュライト	Vermiculite	tr	tr	+	tr	+	+	++	+	tr	+	+	tr
雲母鉱物	Mica mineral	tr	++	++	+	tr	+	+	tr	tr	+	+	tr
滑石	Talc	—	—	—	—	—	—	—	—	—	tr	+	—
沸石族	Zeolite group	—	—	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—
角閃石族	Amphibole group	+	+	++	+	+	+	+	tr	tr	—	+	tr
カオリン鉱物	Kaolin mineral	tr	+++	++	tr	+	+	+	+	+	++	+	tr
ギブサイト	Gibbsite	—	—	—	—	tr	+	+	tr	tr	++	+	tr
クリストバライト	Cristobalite	—	—	—	—	—	—	—	—	—	++	—	—
石英	Quartz	++	+++	+++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
長石族	Feldspar group	+++	+++	+++	+++	++	—	+	+	+++	++	++	++
輝石族	Pyroxene group	+	+	+	tr	tr	+	+	tr	+	+	+	+

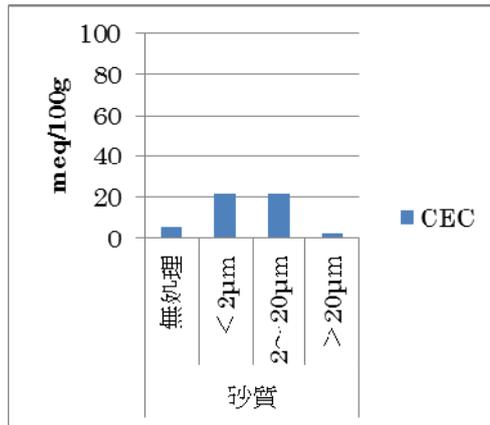
凡例 +++:多量 ++:中量 +:少量 tr:微量 —:不検出



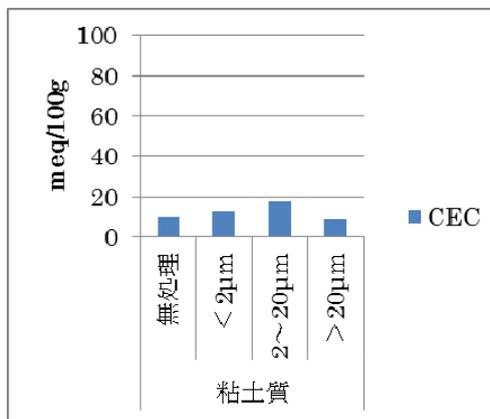
- ・粘土(2μm以下)は約1%、約1kgの採取土壌に対し、数グラム程度
- ・粘土・シルト成分の含有率: 下津島(約45wt%) > 昼曽根(約17wt%) > 山木屋(約5wt%)

図 3.2.4-4 水簸分級(土壌懸濁液中における土壌粒子の粒径による沈降速度の違いを利用した分級)により得られた土壌構成成分の含有率

山木屋(砂質)



下津島(粘土質)



昼曽根(有機質)

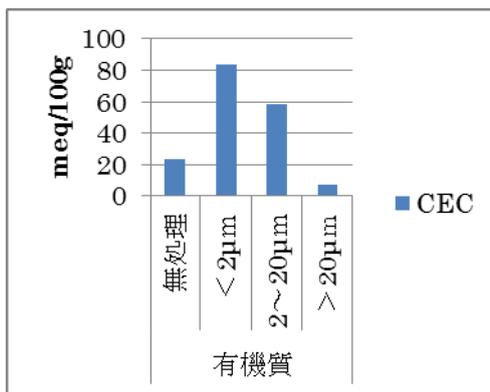


図 3.2.4-5 各土壤試料の陽イオン交換容量 (土壤試料と放射性セシウムの収着しやすさを表す指標) 測定結果 (それぞれの土壤構成成分 (砂質、粘土質、有機質土壤) についての評価)

(3) 収着試験及び脱離試験結果による放射性セシウムの砂質土壌、粘土質土壌、有機質土壌への収着、脱離しやすさの評価について

続いて、収着試験及び脱離試験結果を通じた放射性セシウムの砂質土壌、粘土質土壌、有機質土壌への収着、脱離しやすさを評価した。図 3.2.4-6 にバッチ法により得られた土壌及び土壌構成成分（粘土、シルト、砂・礫）に対する放射性セシウムの収着分配係数の測定結果を示す。なお、収着分配係数はこの係数が高いほど、放射性セシウムが土中で移行しづらいことを示す指標である。

これらの結果から以下のことが確認された。

○ 有機質土壌への放射性セシウムの収着分配係数は、砂質土壌や粘土質土壌に比べて、土壌粒子の粒径によらず、低い傾向を示した。これは、放射性セシウムが土壌構成成分と収着することを有機物が阻害していること、放射性セシウムが土壌構成成分へ収着するよりも有機物と錯形成する方が収着分配係数へ及ぼす効果が小さいためと考えられる。

この有機質土壌への放射性セシウムの収着分配係数が他の土壌よりも小さいことと、CEC が大きいことは、有機質土壌において放射性セシウムの分布が深部に広がる傾向を示していることと整合する。

○ なお、土壌構成成分への収着性について、シルト成分（2～20 μm の土壌粒子）への放射性セシウムの収着分配係数が高い傾向を示した。これは、XRD による鉱物分析から明らかのように、シルト成分に放射性セシウムと収着しやすい粘土鉱物（パーミキュライト、マイカ、カオリナイト）が多いためと考えられる。

また、図 3.2.4-7 に収着試験終了後の土壌試料（砂質土壌、粘土質土壌、有機質土壌）を用いて放射性セシウムの脱離試験を実施した結果を示す。脱離試験は土壌試料に 0.33M KCL 水溶液を流し、土壌（固相）への放射性セシウムの残存割合を評価した。なお、脱離試験の結果、土壌（固相）へ残存する割合が低いほど、土壌粒子に収着した放射性セシウムの脱離のし易さを示す。

これらの結果から以下のことが確認された。

○ いずれの試料においても、土壌試料に 0.33M KCL 水溶液を 5 回以降流すことで一定割合に漸近しており、土壌構成成分との不可逆的に収着していることが確認された。不可逆的に固相に収着した放射性セシウムの割合は、2 μm 以下（粘土区分）においては、添加した放射性セシウム全量に対し、

砂質土壌（約 60%） > 粘土質土壌（約 20%） > 有機質土壌（約 10%）

の順であり、この順に放射性セシウムが剥がれ難い状況であることが確認された。

○ また、それぞれの土壌試料における脱離傾向の違いとしては以下のとおりである。

a) 砂質土壌

砂質土壌では、土壌粒子の粒径が小さくなるにつれ、不可逆的な収着の割合が大きくなり（一旦収着した放射性セシウムがはがれにくくなる）という傾向が確認された。これは、XRD で確認されたように、雲母（マイカ）等の放射性セシウムと強く吸着する粘土鉱物の影響が大きくなるためと考えられる。

b) 粘土質土壌

粘土質土壌では、不可逆的に土壌固相に収着した割合が砂質土壌と有機質土壌の中間的な傾向を示した。これは、XRD で確認されたように、粘土鉱物への収着に対して可逆性を示すパーミキュライトの寄与によると考えられる。

c) 有機質土壌

有機質土壌では、砂質土壌、粘土質土壌に比べて、最も脱離しやすい傾向が確認された。有機質土壌は、XRD で確認されたように、各粘土鉱物（パーミキュライト、マイカ、カオリナイト）が同程度含まれており、土壌への放射性セシウムの収着にあたって、可逆性、不逆性双方の性質を有することが確認されているが、土壌固相に収着した放射性セシウムの9割が脱離し、可逆的な収着の割合が大きい（放射性セシウムがはがれやすい）ことが確認された。また、土壌粒子の粒径依存性は砂質土壌とは逆で、粒径が小さな土壌粒子ほど、放射性セシウムがはがれ易い状況が確認された。このことは、有機質土壌には放射性セシウムを吸着する要因として土壌粒子（特に粘土鉱物）及び有機物が考えられるが、土壌粒子（特に粘土鉱物）は放射性セシウムを吸着し易く、脱離しづらい。一方、有機物は放射性セシウムを（粘土鉱物と比べて）比較的吸着しづらく、脱離し易い。

今回の調査では有機物の定量を行っていないため、定量的な議論は今後の課題である。一般的には有機質土壌の分布は地表浅部に限られることが多く、今回の調査でも有機質土壌は、数 cm から数十 cm 程度の深さまでしか分布していない。

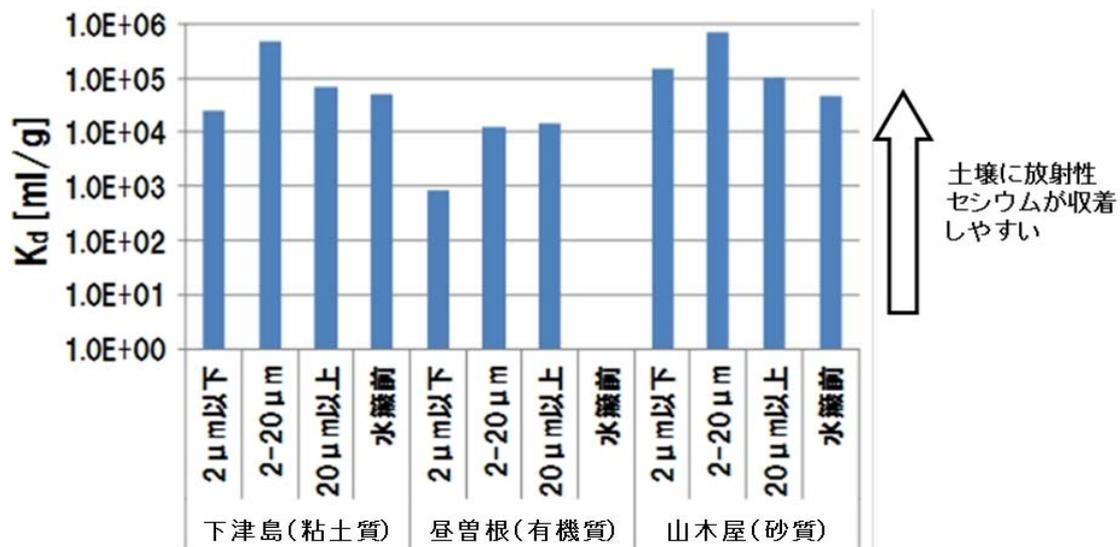


図 3.2.4-6 土壌及び土壌構成成分（粘土質、有機質、砂質）に対する放射性セシウムの収着分配係数 (K_d)（土壌への放射性セシウムの収着しやすさ）の測定結果

（なお、昼曽根（有機質）の水簸前の K_d 値については、風乾に時間を要するため、今回は調査結果が得られていない。）

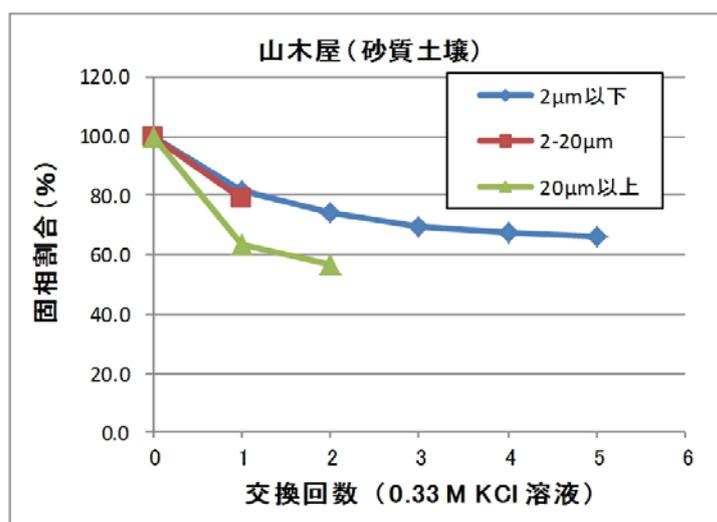
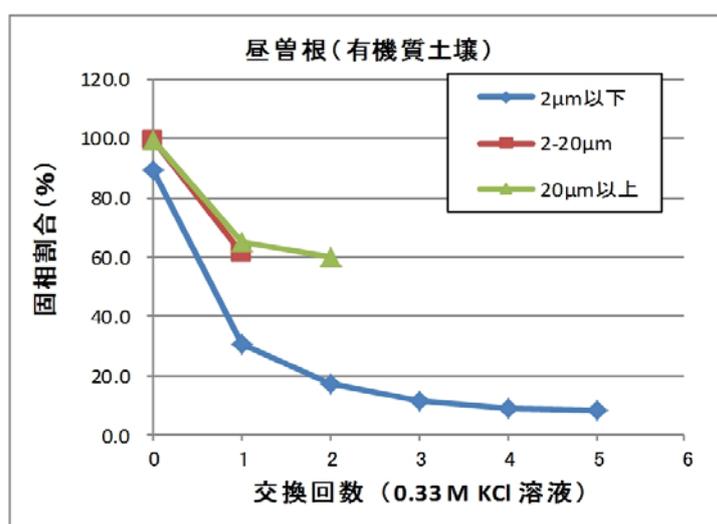
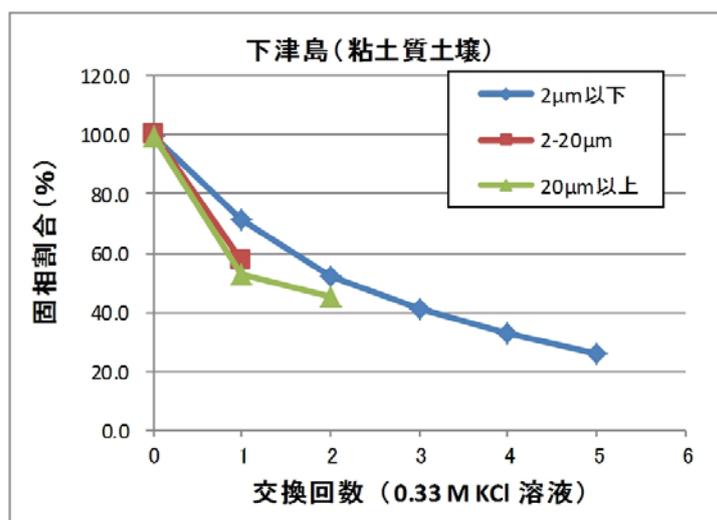


図 3. 2. 4-7 土壤及び土壤構成成分(粘土質、有機質土壤、砂質)に対する放射性セシウムの脱離試験結果 (0.33MKCl 溶液による脱離試験の結果、固相に放射性セシウムが残る割合(固相割合)が小さいほど土壤から放射性セシウムが脱離しやすいことを示す)

(4) 土壌中における放射性セシウムの移行要因の検討に係る調査の結果のまとめ

- ① 放射性セシウムの深度分布について、地表面土壌では、一部の調査箇所を除き、概ね表層 5cm 以内にインベントリの 95%以上、表層 10cm 以内に 99%以上が存在していた。これは、地表面土壌では、放射性セシウムがほとんど移行していないことを示しており、放射性セシウムの土壌への収着分配係数が極めて高いことと整合する。

他方で、元農地（花壇を含む）と推定される土壌では、第 1 次分布状況等調査の結果と同様に、この土壌においては地表面土壌よりも深部まで分布が広がる傾向であるものの、ほとんどの調査箇所では表層 16cm 以内にインベントリの 95%以上が、表層 20cm 以内に 99%以上が存在していた。

- ② 放射性セシウムの深度分布と土壌構成との関係について考察した結果、褐色ないし黒色土壌を支持層とした土壌層において深部まで分布し、特に有機質土壌において量はわずかであるものの、放射性セシウムが有機質土壌の分布する深度まで浸透(移行)する傾向が見られた。これは、有機質土壌に対する放射性セシウムの収着分配係数が他の土壌よりも小さいことや、陽イオン交換容量（CEC）が大きくイオン交換反応による収着容量も大きいと見積もられるものの、収着の可逆性の割合も大きく移行しやすいことと整合する。しかし、有機質土壌の分布は一般に地表浅部に限られることが多い。
- ③ 土壌中における放射性セシウムの深度分布の形状について、深度に対する対数表示の濃度分布は、全体的に指数関数的に減少する形状のものが多く、単純な拡散ないし移流分散などによる移行方程式では表現できない。これは、XRD による鉱物組成分析結果からも明らかのように、可逆と不可逆な収脱着反応を示す鉱物が混在すると考えられる。

3.3 全体のまとめ

土壌中の放射性セシウムの深度分布の調査を2つの観点から実施した。一番目は、多数の地点でスクレーパープレート及び鉄パイプを用いて土壌試料を採取し、放射性セシウムの深度分布の測定結果を統計的に解析するための調査である。二番目は、調査箇所を限定し大口径サンプラーを用いて深部までの土壌を採取して放射性セシウムの深度分布を詳細に調べるとともに、放射性セシウムの吸脱着試験の実施を含む、移行要因の詳細な解析を行なうための調査である。

両方の調査で共通して、一般の土壌においては土壌表面から5 cm以内にほとんどの放射性セシウムがまだ存在しており、放射性セシウムの地中への移行は全般に遅いことが確認された。一方、元農地（花壇を含む）と推定される箇所においては、より深いところまで放射性セシウムが入り込んでいることが分かった。土壌深さ方向の放射性セシウムの分布はほとんどの場合、指数関数で近似できる分布となっていた。

土壌成分に注目すると、砂質土壌、粘土質土壌、有機質土壌の順番に土壌固層に不可逆的に放射性セシウムが収着する割合が多く、セシウムの浸透の程度がこの順に小さいことを示唆する結果が得られた。実際に土壌試料の深度分布観察結果によれば、有機質土壌においては放射性セシウムが移動し易く、量はわずかであるが深くまで放射性セシウムが浸透している例が見られた。一方、スクレーパープレートによる測定値の統計解析からは、表層土壌の粘土成分と緩衝深度の間に相関があることが確認されており、放射性セシウムの地中移行のしやすさと土質との間に関係があることは明らかである。スクレーパープレートにより得られた緩衝深度を土壌図上にプロットした結果からは、土壌の種類と深度分布には明確な関係は見られなかったことから、より局所的な土壌の質に関する情報を得て解析を行なうことが必要であると考えられる。

スクレーパープレートによる深度分布の測定を今後も定期的の実施し、深度分布の経時変化を明らかにする予定である。今回得られた知見を参考にして経時変化の結果を解析することにより、将来の深度分布を予測するモデルを作成することが次の目標である。

参考文献

- [1] 文部科学省：文部科学省及び米国エネルギー省航空機による航空機モニタリングの測定結果について、平成23年5月6日。
- [2] 文部科学省 原子力災害対策支援本部：放射線量等分布マップ関連研究に関する報告書（第2編）、pp. 2-25～2-61、平成24年3月。
- [3] 日本土壌肥料学会監修 土壌環境分析法 博友社（1997）
- [4] (社)日本原子力学会：(社)日本原子力学会標準 収着分配係数の測定方法—浅地中処分のバリア材を対象としたバッチ法の基本手順：2002, AESJ-SCF003：2002（2002）。
- [5] 日本規格協会：JIS A 1202：1999 土壌粒子の密度試験方法（1999）。
- [6] 例えば、佐藤治夫：堆積岩系岩石マトリクス中の拡散移行過程に関する研究：砂岩微細間隙構中でのCs及びIの拡散移行挙動と固液界面モデル、核燃料サイクル開発機構技術報告書 JNC TN1400 2002-022（2003）。