

人工被覆面の放射能深度分布調査及び空間線量率への影響に関する研究

小林 光（東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻・准教授）

研究要旨

福島第一原子力発電所事故発災後、一定期間を経過した被災地における空間放射線量率は地表面等に沈着、分散した放射性セシウム（以降 Cs）からの γ 線によって形成されている。今後、特定復興再生拠点区域など Cs の沈着量が高い地域における避難指示解除に伴う住民の帰還に際しては、事故由来の放射線による空間線量率への影響に配慮しながら新たな生活の場となる建築物の改修や新築を進めることが求められる。

筆者らは、建物が立地する敷地周辺の放射能汚染の状況を反映した建物内外の空間線量率を簡易に予測することを目的として、放射線解析に用いる γ 線境界条件の開発を行っている。この境界条件の開発では、地表面から射出される γ 線の方向特性の把握が重要となる。同特性は Cs の地中深さ方向の濃度分布に応じて決まるため、人の活動空間の地面、即ち、土壌露出面、アスファルト舗装面、コンクリート面等の Cs の深度分布情報が必要になる。土壌露出面については、斎藤公明らによって、時間と共に地中へ浸透する Cs の深度分布が指数関数で近似されることが示されている。その一方で、アスファルトやコンクリート等による人工被覆面の同様のデータは著しく不足している。

そこで本研究では、旧・現避難指示区域で人工被覆面の試料採取を行い、Cs の深度分布を調査する。人工被覆面は土壌面と異なりスクレーパープレート法が適用できないため、研究初年度に引きずりに注意した調査法を確立した上で、Cs の深度分布情報を得るための調査を実施する。研究期間中、同じ場所で試料を複数回採集し、経時変化を含めて Cs の深度分布を明らかにする。また、採取した試料を一定期間乾燥条件と湿潤条件で保管し、現地試料と比較することで、人工被覆面に沈着した Cs の時間経過に伴う移動についても検討する。最終的には、これらの結果を用いて建物内外の空間放射線量率の予測解析に利用可能な Cs 深度分布データと実用的な γ 線境界条件の開発を行う。

キーワード：人工被覆面、放射能深度分布、放射線測定、放射線解析、 γ 線境界条件

研究協力者

吉田 浩子（東北大学大学院薬学研究科ラジオアイソトープ研究教育センター・准教授）、眞田 幸尚（日本原子力研究開発機構・グループリーダー）、Alex Malins（日本原子力研究開発機構・研究員）、町田 昌彦（日本原子力研究開発機構・研究主席システム計算科学センター副センター長）

I. 研究目的

本研究は工被覆面の放射能深度分布調査を中心とした以下の 4 課題、（【課題①】避難指示区域における人工被覆面(コンクリート、アスファルト)へのセシウム(以降 Cs)の沈着状況調査、【課題②】人工被覆種別ごとの Cs 深度分布の傾向分析及び地上への影響評価、【課題③】試験体を用いた Cs 深度に関するウェザリング影響評価、【課題④】空間線量率予測のための実用的 γ 線境界モデルの検討）の実施を目的とする。

II. 研究方法

1. 【課題①】避難指示区域における人工被覆面へのセシウム(以降 Cs)の沈着状況調査

1.1 Cs の沈着状況調査を目的とした人工被覆面コア試料採取

福島県内の避難指示区域にて、人工被覆面のコア試料（アスファルト及びコンクリート面）を研究期間に亘って複数回採取可能な地点を選定し、研究目的に応じて 2 個または 4 個の試料を採取する。コア試料は放射線測定に用いるほか、切削加工による Cs の深度分布測定に用いる。試料の採取に際する引きずり（試料深度毎のコンタミネーション）に注意したコア試料の採取方法については研究結果にて詳述する。

1.2 Cs 深度分布測定のためのコア試料の加工

深度毎の Cs 深度分布測定はコア試料を地表面側から深度 0.5 mm 毎に粉末化して実施する。試料の加工方法は、作業性、加工精度、加工時の引きずり回避を条件として、切断、研磨、切削等の機械加工法を検討し、汎用卓上旋盤を用いた旋削を選定した。ポーラスな試料や硬度の低いアスファルトは機械加工に伴って変形或は形状の崩れを生じて、加工精度と引きずりに問題が生じる可能性があるため、試料を樹脂包埋処理した上で加工を行う方法とした。旋削はポーリングバー（中ぐり加工を行うための切削刃）を用いて試料中央より外周に向かって一定の厚さで切削、粉末化する方法を採用する。検討した加工方法については研究結果にて詳述する。

1.3 深度毎の Cs 沈着量測定

切削加工による深度毎の試料粉末を HPGe 検出器にて分析する。（初年度は Covid-19 の影響により上記検討及び装置納期に遅れが生じたことでコア試料の分析は未実施である）

2. 【課題②】人工被覆種別ごとの Cs 深度分布の傾向分析及び地上への影響評価

課題①で調査する Cs が沈着した人工被覆面による地上への影響を評価するため、課題②では人工被覆面試料の採取場所にて放射線測定を行う。また、課題①で得られる被覆種別ごとの Cs 深度分布の傾向を分析し、地上で観測される放射線の状況との関係を明らかにする。

2.1 Cs の深度分布による地上への影響調査

人工被覆面の試料採取地点の地上における γ 線スペクトル、地表面における γ 線スペクトル、 β 線計数率、 γ 線計数率を測定することを目的として、可搬型 Ge 半導体検出器、NaI(Tl)シンチレーション検出器、GM 管検出器を用いた In-situ 測定を行った。可搬型 Ge 検出器は、コリメータを付した可搬型 Ge 半導体検出器（FALCON-5000、CANBERRA、USA）を用い、1m高で 30 分間測定した²⁾。 γ 線スペクトルは、In-Situ Object Calibration Software (CANBERRA、USA)により解析した。解析に用いるパラメータとして、測定対象の密度は 2.35 g cm^{-3} 、緩衝深度は 0.1 g cm^{-2} とした。シンチレーション検出器（EMF211、EMF ジャパン）は Ge 半導体検出器と同じく 1m高で 15 分間 γ 線スペクトルを測定した。また、シンチレーション検出器にて試料切削位置の地表面直上で 5 分間測定した。なお今回のシンチレーション検出器の測定ではコリメータは用いていない。GM管検出器（TGS-146B、日立アロカ）は試料切削位置の地表面直上で時定数 30 秒にて 3 回測定した。なお、GM 管検出器による測定は β 線の影響の有無による評価を意図して樹脂製遮蔽体の有・無を条件に測定した。

2.2 Cs 深度分布の被覆種別ごとの傾向分析

課題①の結果を用い、人工被覆面試料の種別ごとに Cs 深度分布の特徴を分析する。ここで得られる特徴と地上面で観測される放射線の関係を明らかにする。本研究では、アスファルト、コンクリート面について斎藤公明ら³⁾による露出土壤面を対象とした地中の Cs 深度分布の定式化と同様な整理を行うことを意図する。但し、初年度は課題①の分析を実施していないため、2 年度以降に実施する。

3. 【課題③】試験体を用いた Cs 深度に関するウェザリング影響評価

露出土壤面の Cs 深度分布は発災後の時間経過に応じてウェザリングによって Cs が地表から流出及び地中に拡散することで変化する。土壌内の Cs 濃度分布は拡散と収着などの現象によって生じると考えられ、水をキャリアとした吸脱着を伴う移動も想定される。人工被覆面内部の Cs 深度分布についても時間経過に応じて同様な変化が生じると考えられる。そこで、アスファルト、コンクリートについて、Cs 深度分布に作用する因子を検討するために、採取した試料を実験室で条件を管理して 1 年以上保管し、その後新たに現地から採取した試料と比較することで、Cs 深度分布の経時変化に関する情報を得る。研究初年度は保管方法の検討及び実験環境の構築を行った。

3.1 試験体保管条件と方法

試験体保管方法を図 1 に示す。採取したコア試験体 2 個を用い、実験室にて 2 条件 A:ドライ条件、B:定期的に試料表面に注水するウェット条件（降雨想定）で保管する。温度は試料採取地に近い条件とすることを意図して、浪江のアメダス統計値より月平年値を採用し、月毎に変化させる。湿度は、注水した水が適度に乾燥することを意図して相対湿度 50%に設定する。

3.2 試験体の概要及び保管装置

ドライ条件の試験体は、コア抜きしたままの状態を上記温湿度環境に暴露する。ウェット条件の試験体は透明樹脂製の薄肉容器に試料を納め、試料表面を水平にした状態でエポキシ樹脂等にて試料外周部の水密を確保する。試料上面はカバーせず地表面のままの状態として、注水時には地表面のみから水が浸透する条件とする。この状態で上記温湿度環境に暴露する。ウェット試験体の製作要領を図2に示す。試験体は実験室に設置した恒温恒湿槽（写真1、いすゞ、TPAC-154-20、庫内 600*600*430）庫内にて月毎に温度条件を変えながら保管する。注水は水の浸透及び乾燥を確認しながら週1回程度の頻度で実施する。


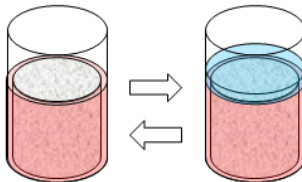

A 実験室 ドライ条件	B 実験室 ウェット条件	現地(比較対象)
 <p>試験体は防水などの処理は行わずに恒温恒湿槽内に保管する。</p>	 <p>試験体の外周を樹脂で防水する。恒温恒湿内に保管し、定期的に注水・乾燥を繰り返す。</p>	 <p>現地の温度履歴、降雨履歴に暴露される</p>
<ul style="list-style-type: none"> 採取した表面に欠けの無い試料を用いる 恒温恒湿槽内に保管し、恒温恒湿槽は浪江のアメダス平年値の各月平均温度及び、相対湿度を50%とする ウェット条件は定期的に降雨を模擬した注水（5mm）を行う 1年以上保管の後に切削し、採取時と比較する 同時期に採取した現地サンプルと比較する 		<ul style="list-style-type: none"> 実験室試料の切削に併せて新たに現地より試料を採取し、同時期に分析・比較する

図1 決定したコア試験体保管方法

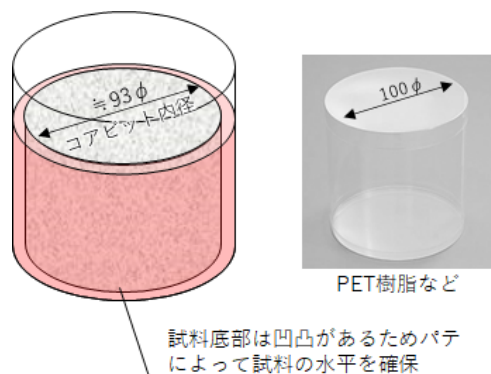


図2 ウェット試験体製作要領



写真1 恒温恒湿槽

4. 【課題④】空間線量率予測のための実用的 γ 線境界モデルの検討

課題①で得られる深度毎のCs深度分布を用いた放射線解析により、地表面(水平の境界面)を通過して射出される γ 線の射出方向プロファイル（地表面から地上に射出される γ 線の射出角度方向に対する微小立体角毎の強度の方向プロファイル。この強度は可視光における光度[cd]に相当し、プロファイルは配光曲線に相当する)及び、鉛直の境界面を通過する γ 線の通過方向プロファイル（仮想的境界面を外から内に通過する γ 線の微小立体角毎の強度）をエネルギー帯毎に整理する。これらのプロファイルを用いて、放射線解析に於いて γ 線の線境界条件として利用可能な γ 線境界モデルを構築する。

4.1 γ 線境界モデルについて

筆者らはこれまで放射線解析（粒子・重イオン輸送計算コードPHITS³⁾を使用）による建築環境の実用的解析を意図して露出土壤面を対象とした水平、鉛直の γ 線境界モデルの検討・開発を行っている⁴⁾。被災地の建築空間内の放射線場の解析を行う際には、解析対象を中心にして半径200m程度の解析領域を設定して、Csの地中での分布等を正しく再現した解析を行う必要があり、計算負荷が大きく、建築計画等に伴う実用的な計算には適していない。また実際の街区の中の建物の解析では周辺の建物を含む街区形状を再現する必要があり、これは実質的には困難であり、どのような境界条件を用いればよいか判断が難しい。これらの問題に対応することを意図して、地中の放射性核種自体と周辺街区の詳細な情報を与えずに利用可能な境界条件として、解析対象建物近傍の境界面を通過する γ 線をモデル化する。図3に γ 線境界モデルの体系を示す。 γ 線境界には(A)仮想境界面線源モデル、(B)地表面線源モデルの2種類があり、(A)は敷地外の広範囲から仮想境界面を越えて入射する γ 線をモデル化し、(B)は地表面から解析領域内に射出される γ 線をモデル化する。これらの γ 線境界モデルは地中のCs深度分布を再現した放射線解析を利用して作成できる。

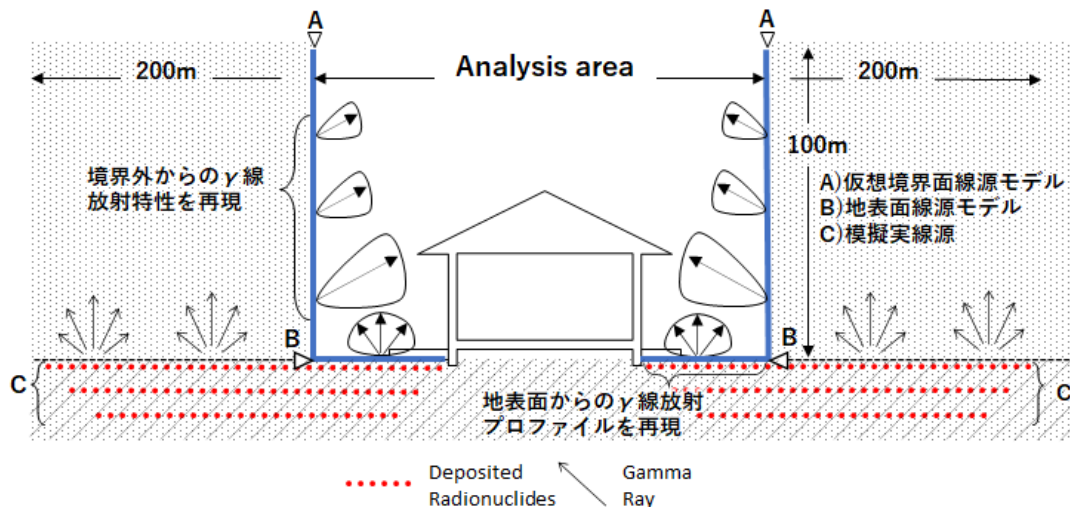


図3 γ 線境界モデルの体系

本研究では γ 線境界モデル作成用の放射線解析で地中に与える Cs 線源を (C) 模擬実線源と称する。課題①で得られる人工被覆面の Cs 深度分布を模擬実線源とした (A) (B) の γ 線境界モデルを開発する。(A) 仮想境界面線源モデルでは、仮想境界の外側に均質な人工被覆面等の模擬実線源が広がるモデル(図 4、a)に加え、仮想境界外側の地表面が均質ではないケースや建物が存在するケースなど様々な都市・建築的な要素を取り入れた境界モデル(図 4、b)を作成できる。

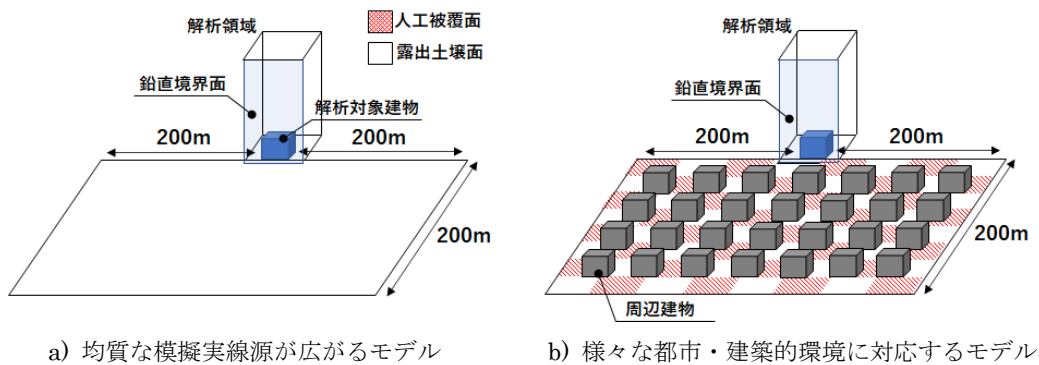


図 4 周辺敷地の状況に応じた γ 線境界モデル

(倫理面への配慮)

本研究では、以下の理由により倫理面の問題がないと判断した。

本研究はヒト、動物、自然を対象とする研究ではなく、また、研究初年度に調査対象とした施設は全て自治体などの公的機関が管理する建物に付随する駐車場その他であり、個人の財産等に影響せず、個人情報に該当する資料も含まれない。

III. 研究結果

1. 【課題①】避難指示区域における人工被覆面へのセシウム(以降Cs)の沈着状況調査

1.1 人工被覆面コア試料採取

1) 試料採取地点

福島県大熊町内の5カ所（表1及び図5参照）を選定し、各箇所1～4地点、合計10地点の試料採取地点を選定した。採取地点毎に試料を用いた試験項目に違いがあり、各地点で2個または4個の試料採取を計画した。

表1 試料採取地点

地点	被覆面タイプ	採取地点概要	試験項目			R2年度採取予定(個)	R2年度採取結果(個)
			放射線測定	切削による深度分布測定	インキュベーション試験		
1-1	コンクリート	玄関先	○			2	0
-2	コンクリート	ガレージ	○			2	0
2-1	コンクリート	玄関先	○			2	2
3-1	アスファルト	校舎脇	○	○	○	4	4
-2	アスファルト	体育館前	○	○		2	2
-3	コンクリート	運動場スロープ	○	○	○	4	0
-4	コンクリート	教室前犬走	○	○		2	2
4-1	アスファルト	駐車場	○	○	○	4	4
-2	コンクリート	駐車場	○	○	○	4	0
5-1	アスファルト	駐車場	○	○		2	0
						28	14

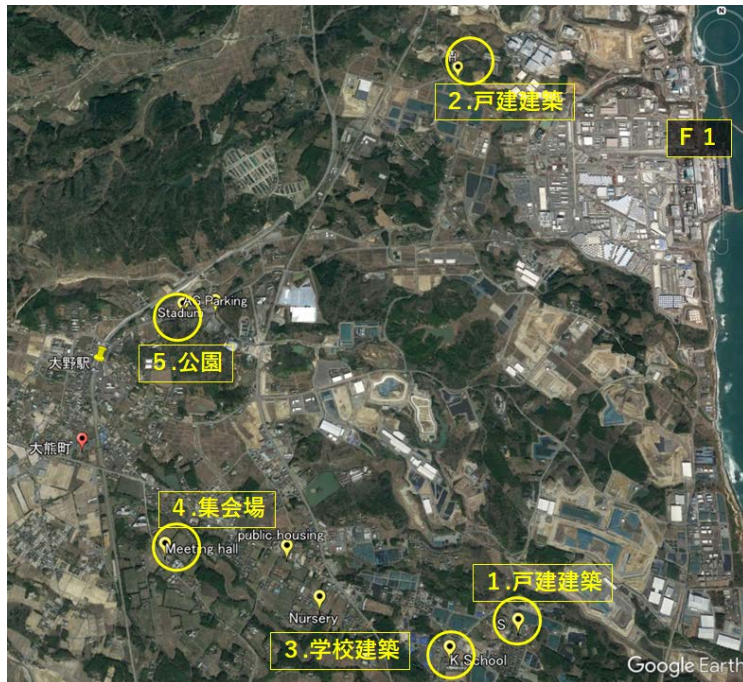


図5 試料採取地点

2) 試料採取

試料採取はコアドリル+コアビット(ドライビット)を用いる方法とし、採取時の引きずりを避けることを意図して乾式とした。アスファルトには固定アンカーが良好に打てないため、鋼製架台を作成し、これを用いてコア採取を実施した(写真 2、写真 3)。現地作業に先立ち東北大学構内でアスファルト及びコンクリートの試験採取を複数回実施し、ドライビット 1 本でコア 10 個程度採取できる見込みであったが、現地作業では作業効率が極めて悪く時間がかかるほか、コアビットの損耗が著しく、コアビット 1 本あたり 3~4 個程度の採取数にとどまった。現地での作業性の悪さに加え、Covid-19 の影響による現地作業時期の遅れにより、コア採取数は計画数の半分となった。また、試料表面の欠けが多く発生した(写真 3、b)。コアビットの損耗及び試料の欠けは、作業時のコアビットの暴れに起因する可能性があり、第 2 年度の作業時にはコアドリル自体の改造及び固定法の改善による対策を検討する。



写真 2 コンクリートコア採取作業



a) 良好なコア試料

b) エッジの欠けが著しいコア試料

写真 3 採取したコア試料

1.2 人工被覆面試料の加工

切削に関する机上検討及び切削の試行（コールドランによる）によって決定した試料の切削手順を図 6 に示す。写真 4 に切削装置を示す。切削装置は、汎用卓上旋盤(写真 4 (a))、コア試料用の特注チャック(写真 4 (b))、及び HEAP フィルタを備えた集塵機(写真 4 (c))からなる。旋盤を用いることで切削厚さの管理は比較的容易になる。切削は、試料をチャックに装着後、回転時の試料周りの乱流の発生を抑制するため、チャックの爪を樹脂カバーで覆い(写真 5、(a))、集塵フードをかけた状態で吸引式の切削粉末収集器を刃先に装着して試切削する(写真 5、(b))。切削粉

末収集器(写真 6)は吸引式で、吸引パーツ、サイクロンパーツ、U8 容器からなる。吸引パーツはボーリングバーに隙間なく装着し、刃先より切削粉末を吸引する。吸引した粉末はサイクロンパーツを通過させることでU8 容器に落とす仕様とした。


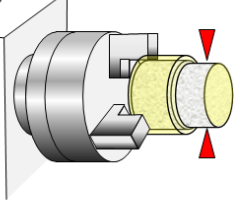
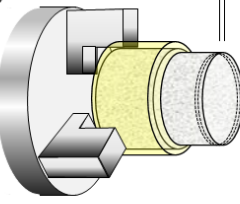

切削作業手順	①コア抜き試料樹脂包埋	②試料外周切削	③深度別切削 1層 0.5mm	④切削粉末回収
				
遂行上の留意点等	<ul style="list-style-type: none"> 樹脂真空含浸の上、乾燥炉にて加熱硬化。 アスファルトは軟化温度に配慮し50℃を上限とする。 包埋樹脂は有機溶剤などによるアスファルトの浸食の無いものを選定。 	<ul style="list-style-type: none"> 旋盤により試料外周を樹脂ごと切削し、コア採取時のコンタミを排除。 切削粉はコンタミとなるため、外周切削時は、極力刃物の切先付近で吸引処理する。 	<ul style="list-style-type: none"> 1層0.5mmにて切削。旋盤は切削厚さ管理が容易。 試料中央から外周に向けて超硬バイト(刃)にて切削。切削粉を吸引捕集。 1層毎に試料表面をGM管サーベイメータで測定。カウントが地表の1/10以下迄切削。 	<ul style="list-style-type: none"> 切削粉末は取り扱い易いU8容器に回収し、分析時にはU8容器又は試料の量が少ない場合はマイクロチューブを用いることを想定。

図 6 切削手順

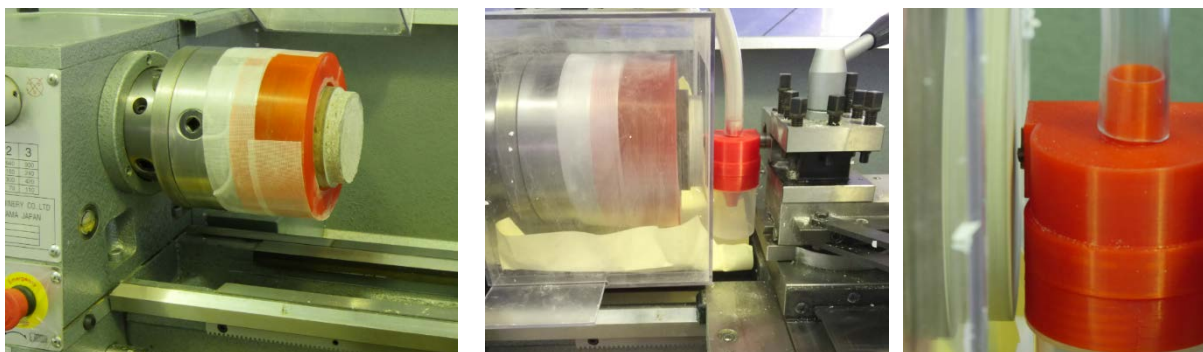


a) 汎用卓上旋盤

b) 特注チャック

c) 集塵装置

写真 4 切削装置



a) 試料取付け(樹脂カバー装着)

b) 切削粉末収集器を併用した切削

写真 5 試料の切削と切削粉末の回収

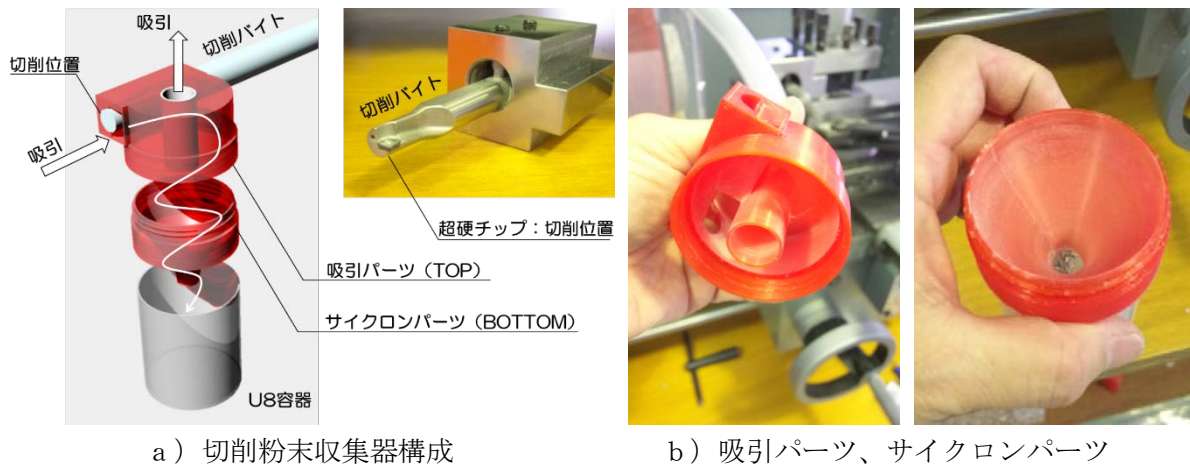
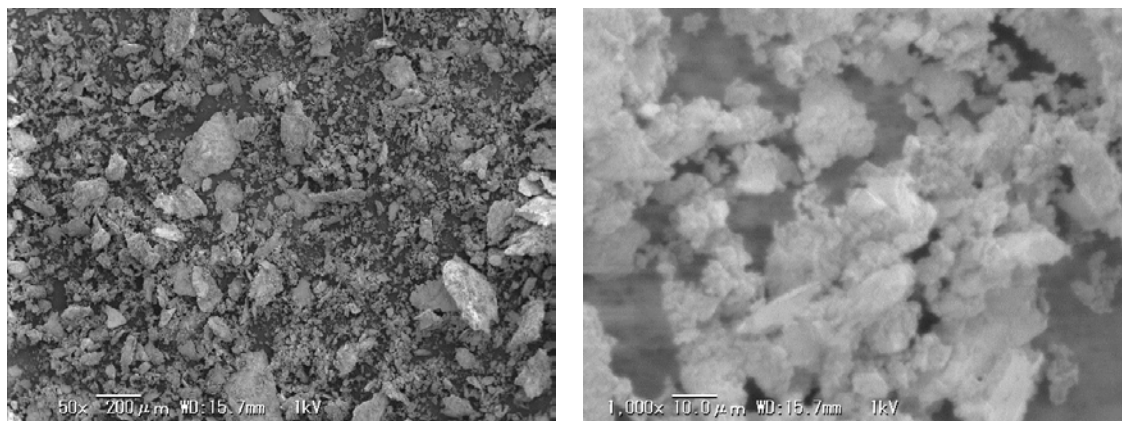


写真 6 切削粉末収集器

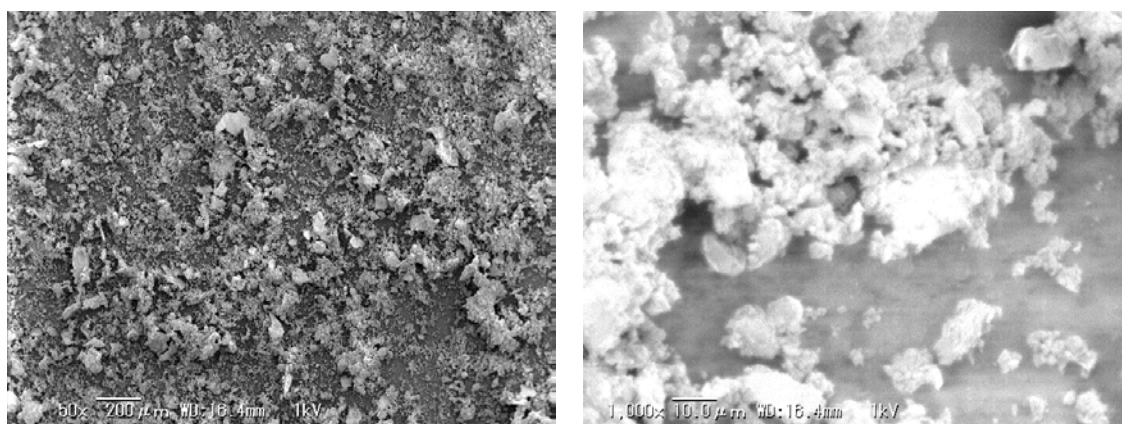
切削粉末収集器は 3D モデリングソフトにて設計し、3D プリンタによる製作、切削試験、評価改善の繰り返しで検討した。コンクリート試験体で切削粉末を回収した場合、吸引で 85% 程度の回収率となり、切削下方に落下する試料粉末をトレーで回収し、これを合わせることで 92% 弱の回収率となった。コンクリート 100φ の試験体を 0.5 mm 切削することで約 5g、粉末の状態では U8 容器に 3~4 mm 程度の試料が得られる。HPGe 検出器の分析に必要な量の切削粉末が得られた(写真 7)。コンクリート、モルタルを切削した粉末の粒径は数 μm ~200 μm 程度(写真 8)で、回収しにくい微細な粉末が含まれる。吸引風量の増加、サイクロンパーツの改善、フィルタの併用等による微細粉末の回収率の向上により回収率の向上が期待される結果となった。



写真 7 U8 容器に回収した切削粉末(コンクリート試験体)



a) モルタル試験体（東北大キャンパス内建物床より採取した試験体）



b) コンクリート試験体（同上）

写真 8 切削粉末 SEM 顕微鏡写真

1.3 作業環境の構築

作業環境として写真 9 に示す 2 重のクリーンブースを構築し、内ブースを陰圧、外ブース陽圧に管理可能とした。内ブースに旋盤他装置を設置した。ブース間の差圧を 10~20Pa 程度とした。



写真 9 2重のクリーンブース(左)とフィルタ付きブロワ(右)

2. 【課題②】人工被覆種別ごとの Cs 深度分布の傾向分析及び地上への影響評価

2.1 Cs 濃度の深度分布による地上への影響調査

1) 可搬型 Ge 半導体検出器、NaI(Tl)シンチレーション検出器を用いた In-situ 測定

可搬型 Ge 半導体検出器による各測定地点の空間線量率及び同測定より算出された放射性セシウム沈着量を表 2 に示す。空間線量率の範囲は 0.78-4.04 μ Sv、Cs-137 沈着量の範囲は 161-1569 kBq m²であった。取得された γ 線スペクトルを図 7 に示す。空間線量率、放射性セシウム沈着量を反映し、Sites-1、2、5 で波高の高いスペクトルが得られた。NaI(Tl)検出器による同上測定地点での γ 線スペクトルを図 8 に示す。測定結果はゲイン調整が不十分であったため、エネルギーにズレが生じているが、Ge 半導体検出器同様に Cs-137 のピークが見て取れる。

表 2 各測定地点の空間線量率、放射性セシウム沈着量

検出器：可搬型 Ge 検出器
 設定パラメータ：密度=2.35[g/cm³]、重量緩衝深度=0.1[g/cm²]

測定地点 ()内は表 1 に 示す地点番号	測定日	空間線量率 (μ Sv hr ⁻¹)	沈着量 (kBq m ⁻²) Cs-134	沈着量 (kBq m ⁻²) Cs-137
Site-1 (3-1)	2021/1/7	3.00	32	684
Site-2 (3-2)	2021/1/7	3.95	74	1569
Site-3 (4-1)	2021/1/7	0.78	8	161
Site-4 (4-2)	2021/1/7	0.83	10	206
Site-5 (5-1)	2021/1/7	4.07	52	1102

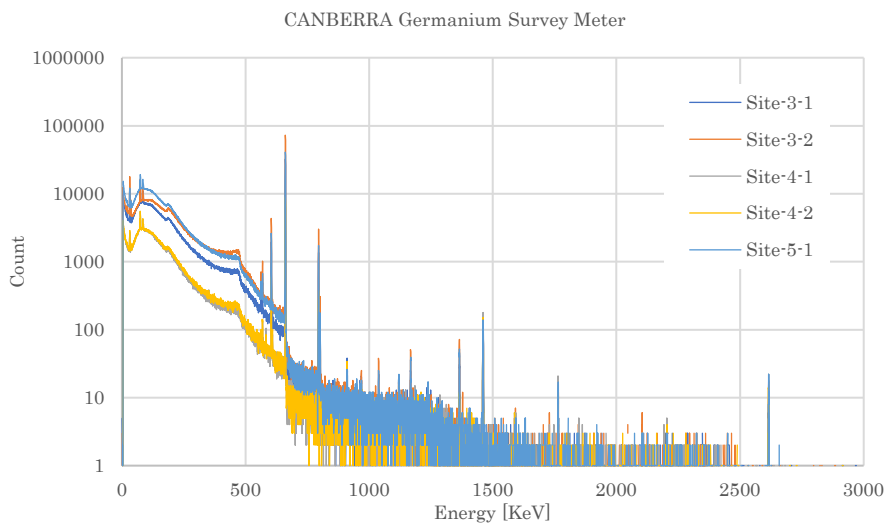


図 7 可搬型 Ge 検出器で測定した各点の γ 線スペクトル(コリメータ使用)

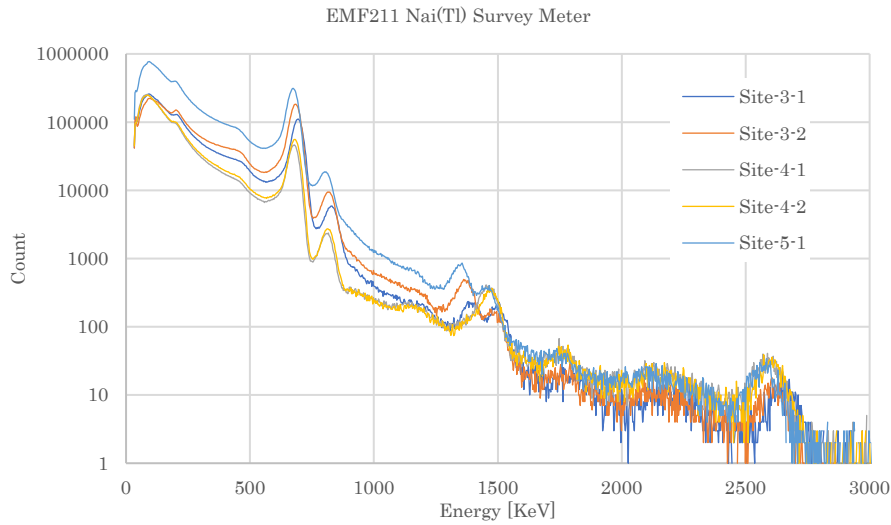


図 8 NaI 検出器で測定した各点の γ 線スペクトル(地上 1m、コリメータなし)

地上で観測される γ 線スペクトルは Cs の深度分布を反映している。今後波高分布のプロファイルをもとに Cs の深度分布と紐づける検討を行う。

2) GM 管検出器を用いた In-situ 測定

コア試料採取（2021 年 1 月 21 日、22 日実施）と同時に、コア試料採取位置の地表面で放射線の計数率を測定した。GM 管検出器(TGS-146B)を用いて測定した。 γ 線を遮蔽するコリメータは用いず、 β 線の段階的な遮蔽を意図して a)遮蔽体なし、b)ビニルフィルム(0.2 mm)1 枚及び 2 枚、c)樹脂遮蔽体 5 mm の条件にて測定を行った(写真 10)。測定結果を表 3 に示す。また、図 9 に Site-3、4 (Site-2 はアクリル 5 mm 条件欠測)における測定結果を示す。



a) 遮蔽体：なし

b) 遮蔽体：ビニルフィルム(2枚)

c) 遮蔽体：樹脂 5 mm

写真 10 GM 管検出器を用いた計数率測定

表3 GM管検出器を用いた計数率測定結果

TGS-146B R03306		時定数 30 s			単位(cpm)			
対象	被覆面タイプ ロケーション	No.	date	time	遮蔽体			
					遮蔽体なし	クリアファイル1枚	クリアファイル2枚	アクリル板5mm
戸建建築 Site 2	コンクリート 玄関前	①	2021.1.20	10:03	1.78E+03	1.26E+03	942	-
					1.76E+03	1.23E+03	956	-
	1.78E+03				1.19E+03	971	-	
	②	2021.1.20	10:14	991	742	597	-	
				996	750	606	-	
				988	765	551	-	
学校建築 Site 3	アスファルト1 校舎脇	①	2021.1.20	14:25	1.23E+04	7.67E+03	4.90E+03	1.12E+03
					1.23E+04	7.43E+03	4.83E+03	1.19E+03
					1.22E+04	7.45E+03	4.82E+03	1.17E+03
		②	2021.1.20	14:35	1.02E+04	6.08E+03	4.35E+03	1.13E+03
					1.02E+04	5.85E+03	4.16E+03	1.15E+03
					1.01E+04	5.88E+03	4.14E+03	1.13E+03
	③	2021.1.20	14:45	1.09E+04	7.20E+03	4.94E+03	1.25E+03	
				1.12E+04	6.97E+03	4.80E+03	1.24E+03	
				1.11E+04	6.93E+03	4.88E+03	1.21E+03	
	④	2021.1.20	14:54	1.01E+04	6.43E+03	4.04E+03	1.24E+03	
				1.03E+04	6.40E+03	4.02E+03	1.22E+03	
				1.03E+04	6.38E+03	4.01E+03	1.12E+03	
	アスファルト2 体育館前	①	2021.1.20	15:10	2.13E+04	1.42E+04	9.24E+03	2.36E+03
					2.14E+04	1.38E+04	9.38E+03	2.35E+03
					2.13E+04	1.36E+04	9.40E+03	2.30E+03
		②	2021.1.20	15:22	2.02E+04	1.29E+04	8.66E+03	2.26E+03
					2.02E+04	1.28E+04	8.65E+03	2.37E+03
					2.04E+04	1.28E+04	8.52E+03	2.32E+03
コンクリート1 運動場前スロープ	①	2021.1.21	10:35	4.85E+03	3.17E+03	2.29E+03	1.10E+03	
				4.65E+03	3.07E+03	2.30E+03	1.01E+03	
				4.60E+03	3.04E+03	2.29E+03	1.00E+03	
				4.35E+03	2.92E+03	2.32E+03	1.11E+03	
				4.27E+03	2.88E+03	2.14E+03	1.07E+03	
				4.26E+03	2.85E+03	2.17E+03	1.04E+03	
	③	2021.1.21	11:01	5.17E+03	3.53E+03	2.38E+03	1.03E+03	
				5.35E+03	3.52E+03	2.41E+03	1.00E+03	
				5.32E+03	3.51E+03	2.37E+03	1.04E+03	
	④	2021.1.21	11:16	4.25E+03	2.88E+03	2.27E+03	926	
				4.16E+03	2.81E+03	2.22E+03	912	
				4.32E+03	2.85E+03	2.14E+03	985	
コンクリート2 教室前犬走	①	2021.1.21	10:07	2.95E+03	2.06E+03	1.52E+03	867	
				2.91E+03	2.08E+03	1.59E+03	849	
				2.89E+03	2.11E+03	1.63E+03	874	
	②	2021.1.21	10:19	2.48E+03	1.86E+03	1.34E+03	745	
				2.64E+03	1.78E+03	1.35E+03	721	
				2.73E+03	1.75E+03	1.30E+03	726	
集会場 Site 4	アスファルト 駐車場	①	2021.1.21	13:32	2.23E+03	1.63E+03	1.09E+03	380
					2.36E+03	1.54E+03	1.05E+03	364
					2.33E+03	1.48E+03	1.00E+03	390
		②	2021.1.21	13:45	2.56E+03	1.65E+03	1.20E+03	379
					2.58E+03	1.53E+03	1.15E+03	380
					2.56E+03	1.54E+03	1.14E+03	407
	③	2021.1.21	14:00	2.41E+03	1.60E+03	1.14E+03	426	
				2.36E+03	1.60E+03	1.08E+03	381	
				2.42E+03	1.58E+03	1.06E+03	357	
	④	2021.1.21	14:11	2.07E+03	1.23E+03	952	385	
				2.02E+03	1.27E+03	964	414	
				2.04E+03	1.28E+03	979	390	
コンクリート 駐車場	①	2021.1.21	14:27	2.46E+03	1.67E+03	1.15E+03	433	
				2.45E+03	1.55E+03	1.26E+03	408	
				2.55E+03	1.53E+03	1.22E+03	429	

※Site2 は樹脂遮蔽 5 mm欠測

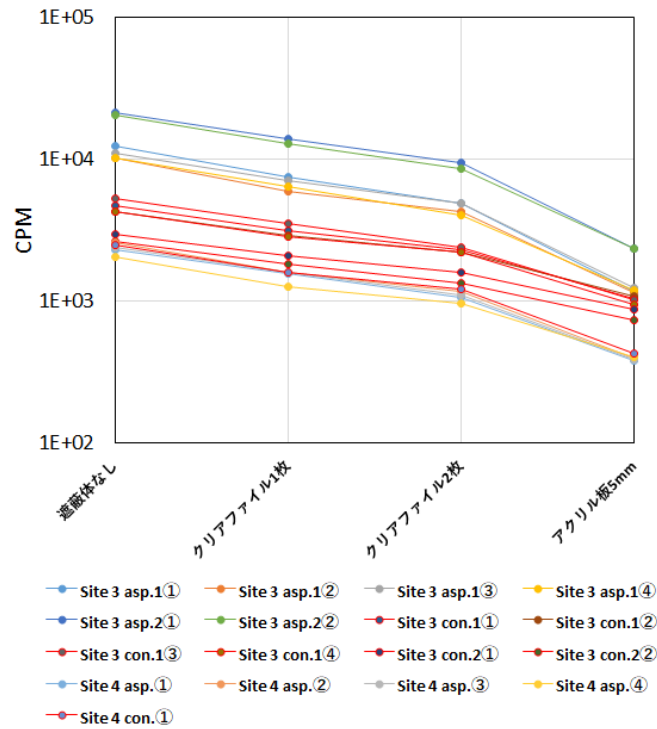


図 9 GM 管検出器 (TGS-146B)による計数率 (赤：コンクリート)

GM 管検出器 (TGS-146B)で測定される β 線による計数率を β_{CPM} 、 γ 線による計数率を γ_{CPM} とすると、遮蔽体なし、ビニルフィルム 1 枚、ビニルフィルム 2 枚、アクリル 5 mm の条件で測定される計数率は、ビニルフィルム 1 枚による β 線の遮蔽率を r (< 1) 且つ γ 線はほぼ全量透過するものとした場合、遮蔽体なしの計数率 $= \beta_{\text{CPM}} + \gamma_{\text{CPM}}$ 、ビニルフィルム 1 枚条件 $= r\beta_{\text{CPM}} + \gamma_{\text{CPM}}$ 、ビニルフィルム 2 枚条件 $= r^2\beta_{\text{CPM}} + \gamma_{\text{CPM}}$ 、アクリル 5 mm 条件 $= r^a\beta_{\text{CPM}} + \gamma_{\text{CPM}}$ となり、 r は実測結果(表 3)より 0.4~0.5 程度なので、アクリル 5 mm 条件 $\doteq \gamma_{\text{CPM}}$ と考えられる。また、測定される線種毎の計数率 β_{CPM} と γ_{CPM} の関係は、Cs の γ 崩壊の確率(定数)、使用する GM 管サーベイメータの線種毎の計数効率(定数)、及び地中の Cs 深度分布に応じた遮蔽特性(地中の Cs 深度分布によって変化)、を総合して決まると考えられる。この関係を仮に $\beta_{\text{CPM}} \doteq R\gamma_{\text{CPM}}$ と整理できれば係数 R は $(\beta_{\text{CPM}} + \gamma_{\text{CPM}})$ と (γ_{CPM}) から簡単に計算される(式(1))。 R に含まれる定数部分を適切に消去すれば、Cs 深度分布を説明できる可能性がある。図 10 に係数 R の試算結果を示す。今後放射線解析も併用しながら地中の Cs 深度分布と地上で観測される β 線と γ 線を紐づける検討を行う。

$$\frac{\text{遮蔽体なし} = \beta_{\text{CPM}} + \gamma_{\text{CPM}}}{\text{アクリル 5 mm} = \gamma_{\text{CPM}}} \doteq \frac{R\gamma_{\text{CPM}} + \gamma_{\text{CPM}}}{\gamma_{\text{CPM}}} = R + 1$$

$$R = \frac{\beta_{\text{CPM}} + \gamma_{\text{CPM}}}{\gamma_{\text{CPM}}} - 1 \quad (1)$$

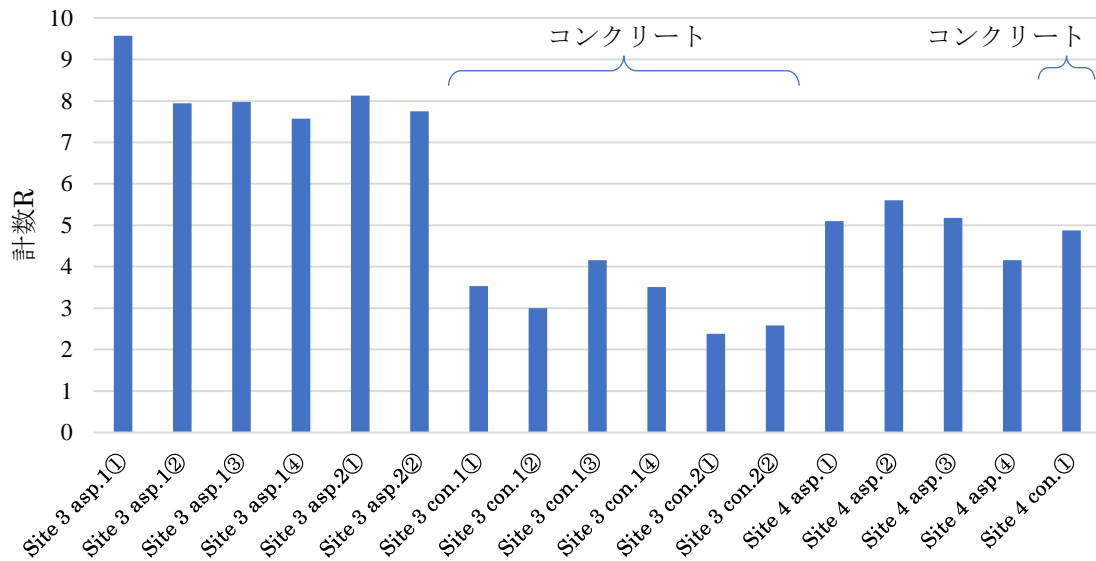


図 10 各測定位置における係数 R 試算値

3. 【課題③】 試験体を用いた Cs 深度に関するウェザリング影響評価

令和 2 年度は、Covid-19 の影響で試料採取時期が遅れ、採取した試料の数が予定に満たなかったことに加え、採取した試料のエッジの欠けが多く発生したことで保管に適した資料が得られておらず、保管が開始出来ていない。令和 3 年度に試料数を揃えて保管を開始し、研究期間に 1 年以上の期間保管を行う事とする。

4. 【課題④】 空間線量率予測のための実用的 γ 線境界モデルの検討

課題④は、当初 2 第年度以降に予定したが、Covid-19 による研究の遅れを圧縮するために前倒しして実施した。課題①の結果が得られていないため、吉村ら⁵⁾による非透水性アスファルトを対象とした Cs 深度分布の調査データを用いて境界モデルの検討を行い、今後の基礎となる γ 線境界モデルを完成した。今後、本研究による Cs 深度分布データを用いたモデル化を予定する。

4.1 人工被覆面モデルの開発

吉村らの不透水性アスファルトを対象とした調査結果を用いて境界モデルの開発を行った。

1) 不透水性アスファルトの Cs 深度分布のモデル化

吉村らによる計 10 ケースの Cs 深度分布調査結果(図 11)から不透水性アスファルトにおける Cs 深度分布のモデル化を行った(式 2)。調査結果には分布の傾向の異なるものがあるものの、ここでは区別せず一括して扱っている。また、基準化等の操作も行っていない。

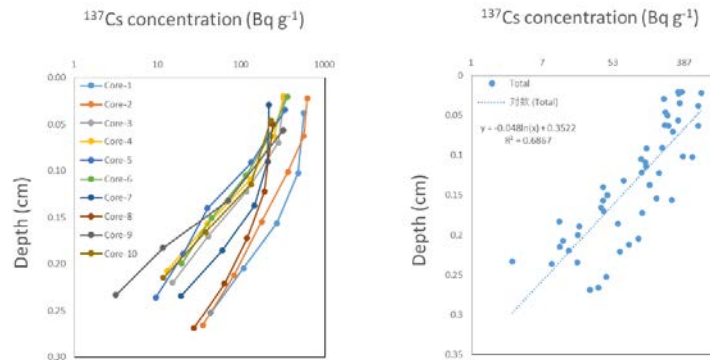


図 11 吉村らによる Cs 深度分布(左)と対数近似(右)

$$A_m(z) = \exp\left(\frac{0.3522 - z}{0.048}\right) \quad (2)$$

$A_m(z)$: 137Cs 濃度深度分布(137Cs Concentration per depth) [Bq/g]

z : 深度 (depth) [cm]

2) 人工被覆面における γ 線放射特性の解析

不透水性アスファルトが広がる地域の a)地表面及び b)仮想境界面における γ 線放射特性を図 12 に示す計算体系を用いた解析より求めた。これはそれぞれ図 3 に示す地表面線源モデル、仮想境界面線源モデルに対応する。

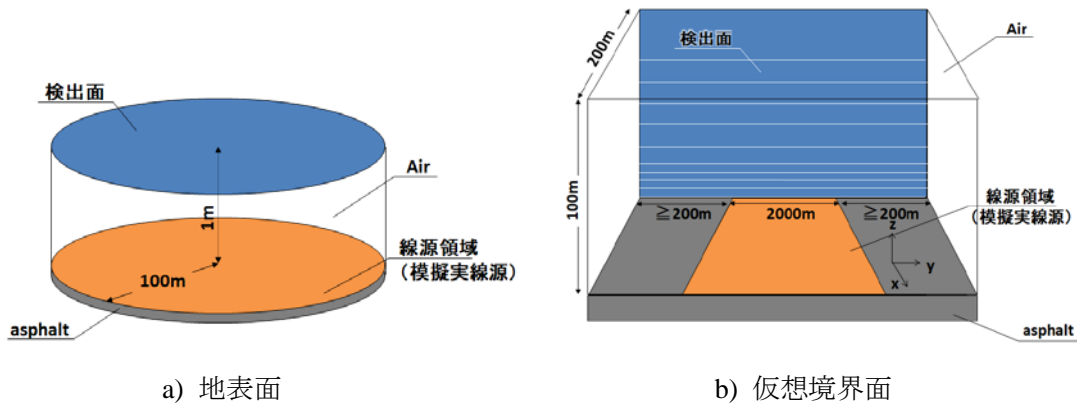


図 12 γ 線方向プロファイル解析体系

図 13 は a)地表面が発災後 5~10 年程度の露出土壌面である場合、と b)不透水性アスファルト面である場合について、地表面を通過する γ 線の放射特性を示す。図 13 の γ 線射出方向プロファイルの値は、線源領域で模擬実線源が発生する総 γ 線数量を 1 とした際の値を示している。この解析では全ての放射線源を 137Cs (0.662MeV の γ 線を放出) として計算し、地表面を通過する γ 線のエネルギーを 0.05MeV~0.75MeV 迄、0.1MeV 毎の 7 つのエネルギー帯に分割して示している。a)の発災後 5~10 年程度の土壌面の γ 線射出方向プロファイルは全エネルギー帯共に円形に近く、光環境で言うところの均等拡散の特性に近いことが分かる。均等拡散の条件では、光環境で言うところの輝度は角度に依らず等しいため、建物側から地表面が広く見える方が空間線量率が

高くなる。即ち、地表付近よりも少し高い位置の方が空間線量率が高くなる。これに対して、b) の不透水性アスファルト面では Cs が地表近くに多く存在し、これらが放出する γ 線の多くは散乱されず高エネルギーであり、また地表に存在する点線源の集合体として振る舞うために、高エネルギー帯の γ 線射出方向プロファイルは角度依存性が見られず、どの角度に対しても概ね等しい。よって、地表面の輝度は射出角度が増すに従って（水平方向に近づくに従って）高くなり、水平方向に強い指向性を有する結果となる。図 14 に鉛直の仮想境界面を通過する γ 線の通過方向プロファイルと比較する。図 14 の値はエネルギー帯(0.65-0.75MeV)の最大値で基準化している。b) の不透水性アスファルト面の場合、水平方向に極めて強い指向性を持つことが分かる。発災後しばらくは露出土壤面でも多くの Cs が地表近くに存在したため、露出土壤面とアスファルト面の差は小さかったと推測されるが、ウェザリングによる経年変化によって露出土壤面の Cs 深度分布がより早く変化したと考えられる。その結果、建築の周辺敷地地上面が人工被覆面であるか露出土壤面であるかによって、建物内の空間線量率の分布形状及び絶対値が時間と共にその差が顕著になってきている可能性が推察された。

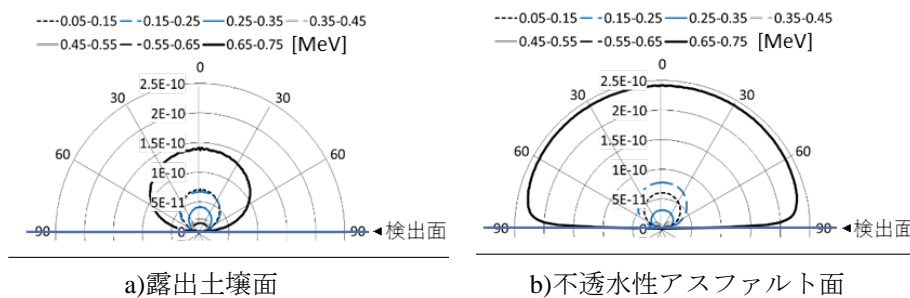
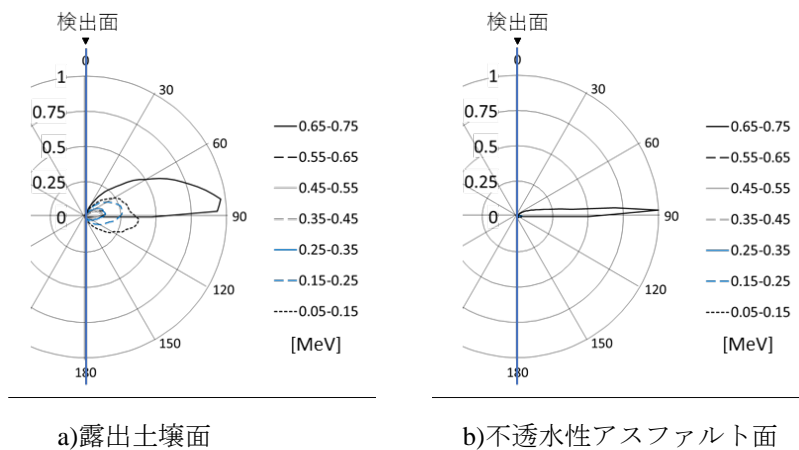


図 13 地表面における γ 線射出方向プロファイル



(a、b 共にそれぞれの 0.65-0.75MeV の最大値で基準化)

図 14 仮想境界面における γ 線通過方向プロファイル

3) 仮想線源面モデルを用いた建物解析試験

露出土壤面が一様に広がる条件と、不透水性アスファルト面が一様に広がる条件による仮想境界モデルを作成し、図 15 に示す木造戸建建物モデルを対象とした解析にて、両者を比較した。

ここでは仮想境界線源を建物西面のみに設定した解析を実施した。図 16、a)に露出土壤面を設定した場合、図 16、b)に不透水性アスファルト面を設定した場合について A-A'断面における空間線量分布を示す。図中の値は線源面で発生する γ 線数量1（ γ 線一本）当たりの線量を示している。不透水性アスファルト面の場合には、土壤面の場合に比べ、空間の床近傍における線量が高く、空間の内部まで高い線量が分布する結果が得られた。

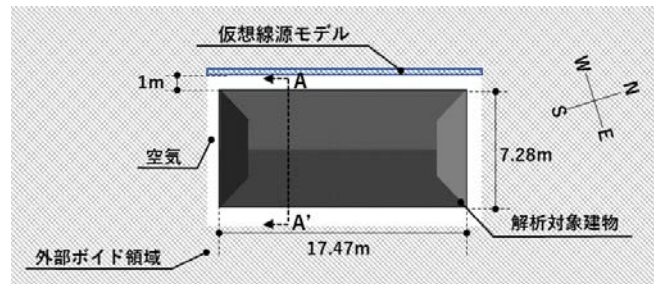


図 15 建物解析の解析体系（平面）

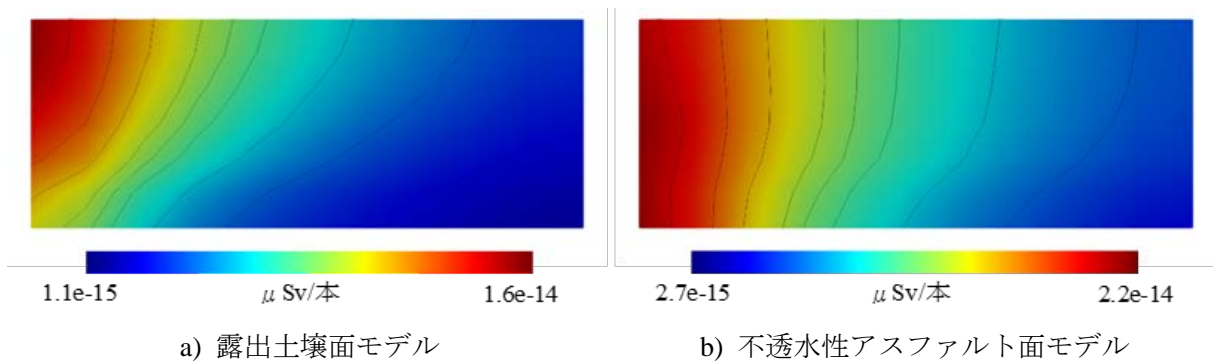


図 16 屋内の線量断面分布（A-A'断面）

4.2 実用的 γ 線境界モデルの検討及び試作

市街地の γ 線環境場を簡便且つ実用上十分に正確に再現する為、周辺街区の環境を取り入れた γ 線境界モデルの検討及び試作を行った。ここでは周辺街区の環境として表 4に示す3つの要素、地表面被覆、建蔽率、建物配置、を採用した。表 5にこれらの要素を設定した境界モデル作成用の解析ケースを示す。3要素、2水準の組み合わせで計8ケースの解析を実施し、仮想境界面を通過する γ 線の通過方向プロファイルを求めた。図 17に解析体系の例としてグロス建蔽率25%、格子状建物配置の状態を図示する。人工被覆面率を任意に設定する場合には、周辺敷地の人工被覆面率0%(露出土壤100%)の4ケース(Case1-4)と人工被覆面率100%(不透水性アスファルト面100%)の4ケース(Case5-8)の間で人工被覆面率を用いた荷重平均を行う。ここでは、表 6に示す人工被覆面率を50%又は80%に設定したmodel 1~4の仮想境界面線源モデルを試作した。図 18にmodel 4(人工被覆面率80%)の加重平均の例を示す。

表 4 周辺建物、街区形状、地表面被覆の解析条件

要素	解析条件設定
周辺敷地の地表面被覆	人工被覆面率 0%、人工被覆面率 100%の 2 水準
周辺敷地の建蔽率	木造戸建簡易モデルを作成し、グロス建蔽率 25%、40%の 2 水準
周辺敷地の建物配置	建物配置を、千鳥配置、格子配置の 2 水準

表 5 設定したパラメータ値

	地表面被覆	グロス建蔽率	建物配置パターン
Case 1	露出土壤面	25%	格子状配置
Case 2	露出土壤面	25%	千鳥状配置
Case 3	露出土壤面	40%	格子状配置
Case 4	露出土壤面	40%	千鳥状配置
Case 5	人工被覆面	25%	格子状配置
Case 6	人工被覆面	25%	千鳥状配置
Case 7	人工被覆面	40%	格子状配置
Case 8	人工被覆面	40%	千鳥状配置

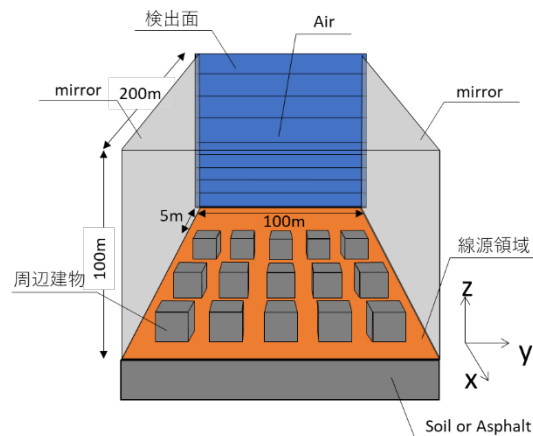


図 17 解析体系の例(グロス建蔽率 25%、格子状配置)

表 6 試作した 4 つの仮想境界面線源モデル

	人工被覆面率	グロス建蔽率	建物配置パターン
model.1	50%	25%	格子状配置
model.2	50%	25%	千鳥状配置
model.3	50%	40%	格子状配置
model.4	80%	40%	格子状配置

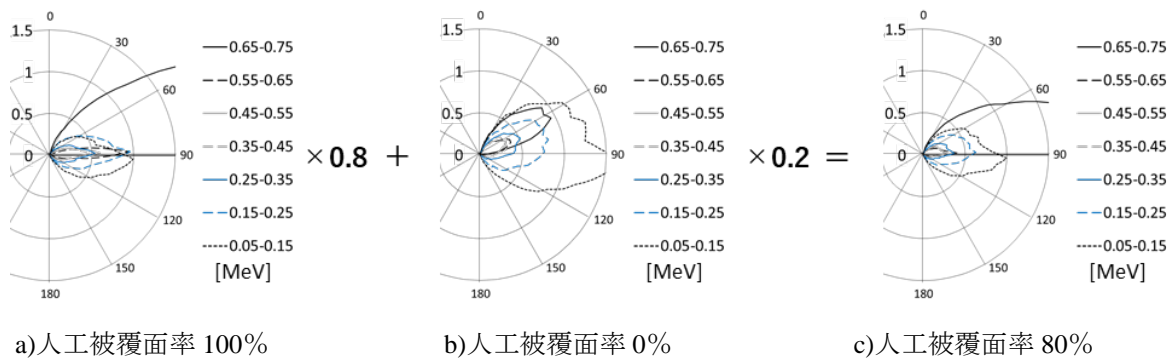


図 18 特性の加重平均の例(model 4)

4.3 γ 線境界モデルを用いた建物解析

今回試作した仮想境界面線源モデル model 1~4 を用い、前出の木造戸建建物を対象とした解析を実施した。建物の西面のみ線源モデルを設定した。周辺敷地の建物配置が異なる model 1 と model 2 には有意な差異は認められない。また、人工被覆面率の異なる model 3 と model 4 の比較においては、人工被覆面の割合が増えると空間下方の線量が高くなる傾向が確認された。また、グロス建蔽率が異なる model 2 と model 3 によっても屋内の空間線量率分布が変化しうることが確認された。これら結果の検証を通じて、モデルとその作成方法の妥当性等について検討を行う必要があるものの、人工被覆面の Cs 深度分布が地上の屋内外の空間線量率に与える影響を捉えることができた。

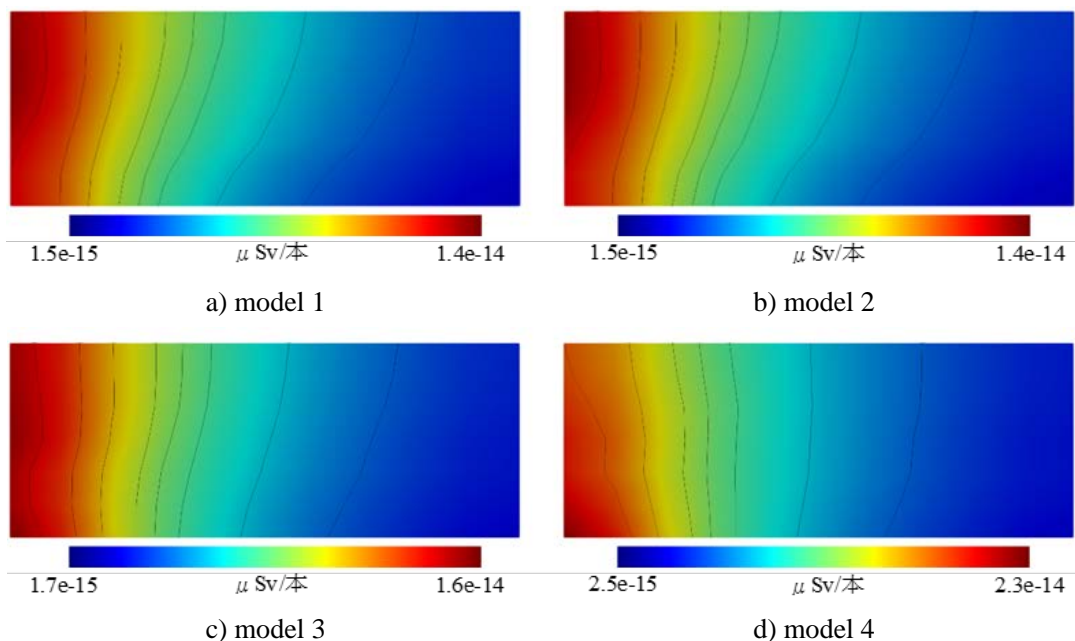


図 21. 屋内の線量断面分布（A-A'断面）

IV. 考察

1. 【課題①】 避難指示区域における人工被覆面へのセシウム(以降 Cs)の沈着状況調査

研究初年度は、アスファルト試料及びコンクリート試料の採取から分析用の加工方法を決定し、必要な機械装置類、作業環境整備迄を完了するとともに、試料採取と加工の試行を通じて決定した方法と試料の取り扱いに関するノウハウを蓄積した。Covid-19の影響により、初動に遅れが生じた他、研究者の移動制限などの影響によって最終的に試料採取に遅れが生じる結果となったが、第2年度以降の計画を圧縮し、最終的には当初計画した成果を満足する見通しである。

2. 【課題②】 人工被覆種別ごとの Cs 深度分布の傾向分析及び地上への影響評価

計画に沿って試料採取に伴う地上での放射線の状況に関する調査を実施した。課題①の Cs 濃度の深度に関する分析が2年度以降となることから、初年度は調査及び結果の机上検討のみとなった。今後得られる Cs 深度分布情報を用いた地上への影響評価は、放射線の実測調査結果と共に課題④で行った地表面の γ 線境界モデルの検討で得られた成果を発展させることで実現できると考えられる。

3. 【課題③】 試験体を用いた Cs 深度に関するウェザリング影響評

研究初年度は、試験体の保管方法の決定及び必要な機械装置類の整備迄を完了した。試料採取の遅れにより当初計画に比べ、実験室における試料保管期間が短縮されるが、保管環境の調整を通じて試験体への注水頻度を高める等の方法を併用して有意な結果を得ることを目指す

4. 【課題④】 空間線量率予測のための実用的 γ 線境界モデルの検討

課題④は放射線解析を利用した Covid-19 の影響を受けにくい机上作業が主となるため、当初計画を前倒して実施した。検討には課題①で取得を期待するデータに相当する既往の調査データをサンプルとして用いることで、実用的 γ 線境界モデルのフレームワークを完成した。また、試作した γ 線境界モデルを用いた解析を試行することで人工被覆面の Cs 深度分布が空間線量率に大きく作用すること及びそのメカニズムの検討が進んだ。初年度の成果に2年度以降得られる Cs 深度分布の結果を適用することで、人工被覆面の種別に応じた Cs 深度分布の地上への影響を整理し、実際の居住環境における空間線量率予測のための方法を提示できると考えられる。

V. 結論

初年度は Covid-19 の影響により研究の始動及び現地調査時期が遅れたため、当初計画したアスファルト及びコンクリート等人工被覆面から採取したコア試料を用いた Cs の深度分布分析まで完了することができなかった。しかしながら、同分析のための試料加工方法の検討、加工装置及び作業環境の確立を完了した。また、当初は第2年度以降に予定した放射線解析による空間線量率予測のための γ 線境界モデルの検討を前倒しし、今後得られる分析データを活用するための基礎となるモデルのフレームワークを開発した。既往研究のデータを用いた解析より、建物周辺の被覆状況に応じた Cs 深度分布が屋内の空間線量率に与える影響が小さくないと予見される結果

を得た。今後得られる Cs 深度分布情報を利用して初年度実施した検討を発展させることで、人工被覆面の特性による空間への影響を明らかにすることが期待できる。また、これを反映した実用的な解析のための提案及び、人の活動する空間への放射線の影響を低減するための建築的な具体的対策検討などにも発展できると考える。

VI. 次年度以降の計画

人工被覆面の放射性セシウムの深度分布分析を進め、研究第 2 年度には初年度に完了しなかった調査と当初第 2 年度に予定した調査を実施し、遅れを取り戻す計画とする。また、当初の計画にはない人工被覆面の放射性セシウムによる地上及び建築空間内への影響に関して、被災地の建築内外の空間線量率分布の詳細調査を計画に加える検討を行う。

VII. この研究に関する現在までの研究状況、業績

初年度成果についての研究報告等は該当なし。

VIII. 引用文献

- 1) N. Matsuda, S. Mikami, S. Shimoura et al., Depth profiles of radioactive cesium in soil using a scraper plate over a wide area surrounding the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, Japan. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2015, 139, 427-434.
- 2) K. Yoshimura, K. Saito, K. Fujiwara, Distribution of ^{137}Cs on components in urban area four years after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, 178-179, 48-54.
- 3) 日本原子力研究開発機構(JAEA), 粒子・重イオン輸送計算コード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System), <https://phits.jaea.go.jp/Newsj.html>, (2021 年 4 月 30 日閲覧)
- 4) 小林光, 山守諒, 中島主策 他, 原発事故被災地の建築空間内 γ 線空間線量率分布に関する研究 (その 1) γ 線空間線量率解析に用いる実用的な放射線境界条件モデルの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集 2019, 683-686. 等
- 5) K. Yoshimura, T. Watanabe, H. Kurikami, Vertical and horizontal distributions of ^{137}Cs on paved surfaces affected by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, 217, 106213.

Study on the radioactivity depth distribution survey in artificial pavement surfaces and their effects on air dose rates

Hikaru Kobayashi

Graduate School of Engineering, Tohoku University • Associate professor

Key word: Artificial pavement surface, depth distribution of radioactivity, detailed measurement, Radiation analysis, gamma-ray boundary conditions

Abstract

The radiation air dose rate of nuclear accident affected area in Fukushima consists of gamma-ray emitted from radioactive cesium (hereafter refer to Cs) deposited and diffused into the ground surfaces around the evaluate position. When residents return to the area after the evacuation order lift, it is desirable to renovate or build a new building considering the radiation environment caused by the Cs of the ground around the site.

The distribution of radiation air dose rate inside the building consists of gamma-rays incident radiated from surrounding ground surfaces due to ^{137}Cs and ^{134}Cs through the outer walls. The incident gamma-ray vector profile is determined by the characteristics of surrounding ground surfaces and the depth distribution of Cs. Thus, you can conduct an accurate indoor air dose distribution evaluation with the appropriate boundary conditions of gamma-ray or Cs using radiation simulation code such as PHITS. The ground surfaces existing in the area where residents are active are mainly composed of the exposed soil surface, asphalt, and concrete surface, and it is required to clarify the Cs depth distribution of these grounds to conduct the practical radiation evaluation. For exposed soil surfaces, Kimiaki Saito et al. have shown that an exponential function approximates the depth distribution of Cs that penetrates the ground over time. However, similar data on artificially paved surfaces in Fukushima are significantly lacking. Therefore, in this study, we will take core samples of concrete and asphalt pavement in the evacuation order area, and scrape the core in the depth direction, and measure the depth distribution of Cs. Furthermore, we will take samples at the same location every year during the research period, investigate changes over time, and aim to model the distribution of Cs in concrete and asphalt pavement in Fukushima as well as the exposed soil surfaces. In addition to acquiring measurement data, this study also aims to develop gamma-ray boundary conditions that apply to radiation analysis.

In the first year of this research, we established a survey method that does not cause cross-contamination at each core depth. We also collected multiple concrete and asphalt core samples in high-dose areas of Fukushima and conducted in-situ radiation measurements.