

**令和３年度「原子爆弾の投下に伴う気象シミュレーションモデルの
構築及び放射性降下物の拡散状況の分析等に関する調査研究一式」**

令和４年３月２５日～令和５年３月３１日

研究報告書（全体版）

令和５年３月２８日

目次

第一章 緒言	1
【研究概要】	1
【実施方法の概要】	1
(1) 気象シミュレーションモデルの構築	1
1) 爆発再現計算取り組み	2
2) 気象モデルによる雲形成・降雨再現計算	2
(2) 放射性降下物の拡散状況に係る調査に関する研究	2
(2) a. 土壌採取調査及び原爆由来物質の分離・測定方法の検討	2
①調査地点の設定、試掘または、土壌コア等採取の実施	4
②放射性降下物、街区火災由来の物質の分離・測定	4
(2) b. 試料活用のための整理ならびにアーカイブ化	5
(3) 文献調査及び体験記調査を含めた関連研究の整理とアドバイザー会議の開催、 ならびに調査報告書の作成	5
参考文献	6
第二章 今年度成果	6
(1) 気象モデルの構築に向けた調査研究	6
1) 爆発再現計算取り組みおよび2) 気象モデルによる雲形成・降雨再現計算 取り組み	6
○必要な文献調査	6
参考文献	7
○爆発モデルの構築	7
参考文献	8
○街区火災由来の熱量と水蒸気量デジタルデータセットの作成	9
参考文献	10
○気象モデルの構築	10
(2) 放射性降下物の拡散状況に係る調査に関する研究	15
(2) a. 土壌の採取方法の検討及び調査の実施	15
①調査地点の設定、事前踏査の実施	15
②土壌試料の採取作業	18
③採取試料の到着から測定用試料作成までの流れ	19
④放射性降下物、火災煙由来の物質の分離・測定	20
○放射性降下物の測定事例(¹³⁷ Cs および ²¹⁰ Pb 測定)–京都大学複合原子力科学研究所 における Ge 半導体検出器を用いた γ 線測定の事例)	20
○大学および役務業者による ¹³⁷ Cs および ²¹⁰ Pb 分析結果のまとめ	21
○スペクトルデータの解析や点検について	22
○土壌改変の有無の判別について	23

○放射性降下物の一種としての放射性微粒子.....	43
参考文献.....	43
○元宇品海岸海砂から抽出した熔融球状粒子の ICP-MS 分析.....	44
参考文献.....	45
○放射化物を含まない不溶性粒子および火災炎由来の物質について.....	45
参考文献.....	46
○ウランを含む原爆降下物粒子.....	46
○街区火災由来の微粒炭粒子.....	48
参考文献.....	50
○土壌試料に含まれる水銀の分析.....	50
参考文献.....	51
○土壌試料に含まれる全炭素の分析.....	51
○土壌試料に残る原爆由来のシグナルー総合解析.....	52
参考文献.....	53
○ ¹³⁷ Cs 鉛直方向移行シミュレーション.....	54
参考文献.....	55
○「黒い雨」の正体に関する分析.....	55
参考文献.....	56
○「黒い雨」資料に含まれるウラン同位体の分析.....	57
参考文献.....	59
(2) b. 試料活用のためのデータベース開発ならびにアーカイブ化.....	59
○土壌試料のデータベースおよびアーカイブシステムとしての管理.....	59
○長崎大学における試料活用のための整理ならびにアーカイブ化.....	60
○広島大学における試料活用のための整理ならびにアーカイブ化.....	61
(3) 文献調査及び体験記調査を含めた関連研究の整理とアドバイザー会議の開催、 ならびに調査報告書の作成.....	61
(3) a. 文献調査及び体験記調査を含めた関連研究の整理.....	61
(3) b. アドバイザー会議などの開催.....	62
 第三章 結言.....	62
謝辞.....	64

* 図表番号は、報告書全体で昇順で統一して付されている。

* * 参考文献の番号は、各章、各節ごと（著者ごと）に 1 番から付されている。

令和3年度「原子爆弾の投下に伴う気象シミュレーションモデルの構築及び放射性降下物の拡散状況の分析等に関する調査研究一式」強化策報告書（全体版）

第一章 緒言

本稿は、2022年3月25日付けで国立大学法人京都大学複合原子力科学研究所が厚生労働省健康局から受託した標記調査等一式に関する、**令和3年度**における**強化策**の調査研究進捗を記載した**全体版の報告書**である。なお、令和3年度調査研究強化策は、令和4年度の調査研究と並行して推進されたことを付記する。

【研究概要】

原子爆弾の投下後の気象状況や放射性物質の拡散状況、大規模な爆発や火災が気象に与える影響等を考慮に入れた気象モデルによる放射性物質の沈着状況再現のため、**（１）気象シミュレーションモデルの構築**に関わる一連の作業を行った。また、モデルの不確実性の評価方法についても検討した。モデルの構築と並行して、**（２）放射性降下物の拡散状況に係る調査に関する研究**として原爆投下にもなって発生した放射性物質を含む降水現象や放射性物質の沈着（以下「黒い雨」と呼称）が生じたと推定される地域を含む広範な領域で **a. 表土試料を採取し、放射性物質等の分析**に供し、放射性降下物の拡散状況を調査した。広島、長崎で採取・保管されてきた歴史的な試料に対しても、新規に採取した土壌試料とともに、**b. 有効活用するために整理およびデータベース化**を進めた。また、委託者の厚生労働省とも協力して**（３）文献調査及び体験記調査を含めた関連研究の整理**として従来研究の総括と利用可能な文献・データなどの収集を行い、**（１）および（２）**の取り組みに寄与し、それぞれの調査研究の進展を図りながら**本報告書の作成**を行った。

【実施方法の概要】

（１）気象シミュレーションモデルの構築（担当者： 五十嵐、石川、遠藤、今中、大原、滝川、谷田貝および役務業者で実施）

広島、長崎の原爆被災に際するいわゆる「黒い雨」の再現計算は1990年代初期に実施されたが、当時の計算では[1]、原子雲を構成する爆発雲、巻き上がった衝撃塵、火災煙の各成分について、それぞれ大粒子、中粒子および小粒子が10,000個ずつ存在すると仮定し計算を行っている。しかしながら、鉛直流項のない方程式系での気象モデルによる再現計算は不十分であったと指摘せざるを得ない。

そこで本調査研究では、原子爆弾の投下後の気象状況と放射性物質の地表面への沈着の再現や検証に資するよう、気象予測に関する論文や1945年8月の広島地方の天気図などの文献調査をさらに行い、得られた文献やデータに基づき、令和2年度調査において得られた気象モデルや爆発モデル等の各種分析を統合して解析し、分析の再現性や不確実性を踏まえた検証を行った。また、試験的な気象シミュレーションの精緻化及び最終的な放射性降下物分布再現への加速化に向け、気象学に精通した者を新たにWGのメンバーに加える等、予備的な計算実験を実施するだけでなく、1945年当時の気象データを含む20世紀気象再解析

データの品質やこれを用いたダウンスケール計算の再現性や堅牢性を、近年の類似事例を対象に最新の気象再解析データを用いた場合と比較して、評価をおこなった。この気象モデル計算の実施について困難性があれば、その困難性の原因も明らかにすることも目的とした。

1) 爆発再現計算取り組み（担当者：五十嵐、石川、遠藤、今中、大原、滝川および役務業者で実施）

- ・市販の Computed Fluid Dynamics モデルで、爆発雲の再現計算を実施した。
- ・爆発雲での爆弾由来物質の情報を気象モデルに与えるため、燃焼、爆発のシミュレーション技術（爆発モデル）を気象モデルにハイブリッドすべく、爆発開始から爆発雲の形成までの再現計算について検討した。

2) 気象モデルによる雲形成・降雨再現計算（担当者：石川、滝川、谷田貝、大原、今中、遠藤、五十嵐および役務業者で実施）

- ・計算を複数のプロセスに分割して実施し、原子雲の再現とその時間発展に関する計算の個別の実施可能性について検討、本格的な計算を実施した。また、モデル計算の不確実性の評価にも留意して検討を行った。

- ・気象データ： 米国海洋気象庁（NOAA）が作成した 20 世紀再解析データ（20CRv3）のアンサンブル平均データを選択した。

- ・地形データ： 国土地理院 10 m 格子データ及び経産省と NASA で共同作成した ASTER-GDEM データを採用した。

- ・土地利用データ： 国立環境研究所 J-STREAM プロジェクトで作成された WRF 用土地利用データをベースに、1945 年当時の土地利用状況に合わせて修正したデータを採用した。

- ・計算領域：朝鮮半島を含む領域（3600 m 格子）> 西日本（1200 m 格子）> 広島周辺（400 m 格子）と云う三重の入れ子構造をした計算領域を採用した。

- ・気象モデルの中に、爆発雲・街区火災・衝撃塵由来の物質を導入し、それぞれの沈着計算を実施した。

- ・より詳細なエアロゾル過程など、現在の気象モデルでは考慮されていない部分のモデル改善の可能性についても引き続き、検討中である。

（2）放射性降下物の拡散状況に係る調査に関する研究

（2）a. 土壌採取調査及び原爆由来物質の分離・測定方法の検討（担当者：五十嵐、高宮、福谷、八島、池上、芝原、向井、遠藤、松田、福田、横田、井上および役務業者で実施）

過去の累次の土壌調査の分析結果を踏まえるとともに、（1）の気象モデルの予測結果の検証を考慮に入れることを前提とした上で、新たに土壌調査を行うべき地域の特定や効率的・効果的な土壌の採取方法の検討を行いながら、令和 2 年度調査を踏まえ、上記（1）のモデル計算の検証に向けた土壌試料採取の実施と諸分析を実施した。また、土壌調査実施についての困難性があれば、その困難性の原因も明らかにすることも目的とした。

従来の原爆由来放射性物質の調査・探索は、均一に混合したバルク試料の放射性セシウム（ ^{137}Cs ）の放射能分析となっており、そのシグナルは原爆後の大型大気圏内核実験由来のシ

グナルに隠れてしまい、明瞭とは言い難かった。しかし従来の報告の中には、早い速度で地層堆積が生じた水環境下では原爆由来のさまざまな指標物質が見つかった事例がある。一例として、長崎市における調査 [2] から、底質中に層序として保存された ^{137}Cs 、アメリシウム (^{241}Am)、粗大および微小炭素粒子、銅等重金属の濃度ピークの共通した増大から長崎原爆のクローズイン・フォールアウト (CiF) としての痕跡の確認がなされている (図 1)。すなわち、これらはいわゆる「黒い雨」沈着の証拠—核爆発に由来する 1) 核分裂生成物の一種である ^{137}Cs や放射性物質、2) 熱線照射による街区火災由来の微粒子状の炭素、3) 地表から舞い上がった衝撃塵—放射化物が、互いに混合しながら共通したプロセスで輸送され、降水などで地表面へ沈着したと考えられる。

これに対し陸上の土壌層においては、沈着した上記のさまざまな物質が残留するかどうか問題となる。1950 年代～1970 年代まで継続し、1963 年に降下量の極大を迎えた核大国による大気圏内核実験由来の ^{137}Cs (グローバル・フォールアウト ; GF) と、地表面から散逸する ^{222}Rn の子孫核種で、降水や乾性沈着により常時大気より供給されている自然放射性核種の ^{210}Pb (過剰 ^{210}Pb として評価される (後述)) は、森林土壌などの浸食の調査研究においてトレーサーとして用いられてきた。これは、 ^{137}Cs と ^{210}Pb は共に拡散・下層へ浸透するが、表層土壌層に残留する傾向が大きい (図 2 ; [3]) ためである。また、陸上においても土壌層の形成が近傍由来の土ぼこり、大規模風送塵や火山灰、さらには植物由来の鉱物 (プラント・オパール等) の沈着・堆積によって生じ、層序の形成に寄与している。したがって、戦後ずっと耕作や客土・覆土、または表土の剥ぎ取りが行われず、土砂の流出や流入が無かった地点の表土層には、GF 由来 ^{137}Cs に重なる形で CiF 由来の ^{137}Cs がより下層に残留する可能性があると思定された。このことを踏まえて、広島、長崎において広範な地域において、土壌層を薄く剥ぎ取っていく手法 (スクレーパープレート法) を用いた土壌調査を実施することとした。

また、被爆物証の可能性の高い物質として広島市の海岸線から採取された海砂に含まれる高温熔融過程を経たと推定される微粒子 (数百 μm ～数 mm の大きさ) が報告されている [4] ことから、こうした微粒子についても存在や量、物理・化学性状につき検討・研究し、いわゆる「黒い雨」の物証として使用可能か検討を進めた。街区火災で放出された可能性のある水銀などの重金属や微量元素についても鋭意測定を進めて、「黒い雨」沈着の証拠探索を行った。

さらに、「黒い雨」の証拠物品が広島平和記念資料館に残されていることから、それらの資料も入手して先端の分析手法を適用し、「黒い雨」の性状を基礎から再研究し、沈着の判

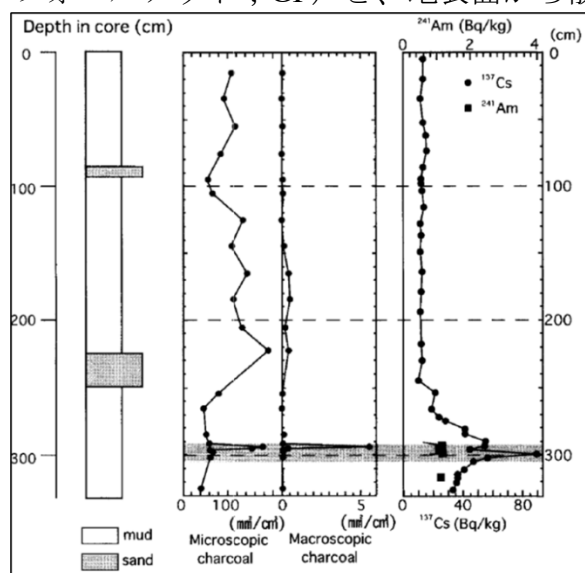


図 1. 長崎市西山地区で採取された底質コアにおけるリフラクトリ炭素および ^{137}Cs 、 ^{241}Am の濃度の鉛直分布 (吉川ほか, 2001 [2])

別に新たな指標物質を加えることが出来ないかを詳細に検討した。

これらを踏まえ、放射性降下物の計算結果を検証できるデータセットの作成を目指し、以下の項目①および②について検討・調査を行った。

① 調査地点の設定、試掘または、土壌コア等採取の実施（担当者：五十嵐、高宮、福谷、八島、向井、遠藤、松田、福田、井上および役務業者で実施）

・広島市内、長崎市内および近傍の「黒い雨」地域を包含するように、広島については100以上の区域（5 km メッシュ）を、長崎については2.5 km メッシュの区域を設定し令和4年度実施分と併せて12区域について採取を実施した。当時の表土層（被爆層）が改変なく地中に残っている可能性の高い地点を各区域で選定した。そのうえで、地権者など関係者との交渉・調整を実施して調査許可を得て、実際の採掘に臨んだ。

・層序が明瞭で、被爆層が残っている可能性があるか否かをトレンチ試掘等で確認し、土壌試料を採取した。採取にあたっては、スクレーパープレートで試料採取可能な地点で同器具を用いて深さ方向10 mm程度の分解能で層序を崩さずに薄く剥いで300 mm深さまで試料採取を行った。

② 放射性降下物、街区火災由来の物質の分離・測定（担当者：五十嵐、高宮、福谷、八島、向井中、池上、芝原、遠藤、松田、福田、井上、向井広樹、高橋、および役務業者で実施）

・放射性降下物の代表的な放射性核種として ^{137}Cs 、地層かく乱の有無判別のために自然に存在する鉛-210（ ^{210}Pb ；半減期約22年）をGe半導体検出器による γ 線スペクトル分析法により分析した。地層かく乱が無ければ、 ^{210}Pb の地層内の鉛直分布は大気からの常時の供給を考慮すると上層から指数関数的に減少するはずであり、また、大気から供給されたと考えられる ^{210}Pb のみ（過剰 ^{210}Pb と呼ぶ）を評価した場合、蓄積の時間的な指標も得られる可能性がある。単純な堆積を想定するだけではなく、 ^{137}Cs の下層への拡散・輸送についても土壌 K_d の実測とモデルを用いて検討を加えた。

・本調査研究で採取した土壌試料から被爆当時の街区火災で発生した可能性の高い炭素微粒子の分離・計数、また街区火災で大気への輸送が発生した可能性のある金属元素として水銀やその他の元素の計測を実施した。

・光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡－エネルギー分散型X線分析（SEM-EDX）、質量分析法、フーリエ変換赤外分光法（FT-IR）などの先端的な分析手法で、「黒い雨」資料の分析を実施し、指標とできる成分の解析を行った。

・長崎においても令和4年度実施分と併せて12区域において土壌試料を採取し、一部について広島同様の分析を実施した。

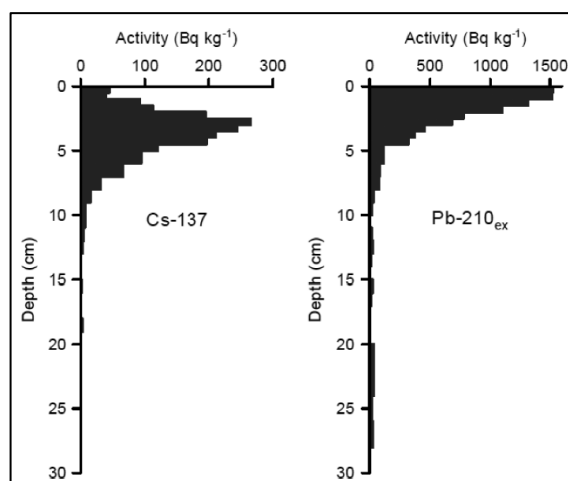


図2. 三重県大紀町の森林で採取された土壌試料における ^{137}Cs 、過剰 ^{210}Pb の濃度分布（Fukuyama et al., 2010 [3]） ^{137}Cs 、過剰 ^{210}Pb のインベントリは、それぞれ、約3000、約8500 Bq/m²と報告されている。

(2) b. 試料活用のための整理ならびにアーカイブ化 (担当者: 高宮、松田、福田、横田、吉永、久保田、五十嵐、福谷、および役務業者で実施)

○「黒い雨領域の推定」のため、多数の研究機関から成る調査研究チームが約 3000 試料の土壌分析のデータを共有し、データを随時可視化しながら総合的解析を行うため、地点・分析データ格納、地点の地図上位置描画機能をもつデータアーカイブシステム (DABS: Database of Atomic Bomb Samples) を開発し、その維持と機能向上を図った。

○長崎大学原爆後障害医療研究所、広島大学原爆放射線医科学研究所に保管された試料を適宜、整理し、本調査研究で活用すべく、命名シラベル (物理試料番号を作成) を付与し、データとの紐づけを行った。2つの被爆地の物理試料の情報の共有化を図ることで、より有益なアーカイブ化を目指し、将来にわたって公に利活用可能な仕組みの基礎となる、データアーカイブの開発を継続して行った。

○(2) a. の調査において収集された土壌試料ならびに、そこから分割された試料や分離された微粒子等についても、将来にわたって公に利活用可能な形態で同様にアーカイブ化を引き続き進めた。

(3) 文献調査及び体験記調査を含めた関連研究の整理とアドバイザー会議の開催、ならびに調査報告書の作成 (担当者: 今中、石川、滝川、久保田、五十嵐ほか、全員で実施)

従来研究の総括と利用可能な文献・データなどの収集を行い、(1) および (2) の取り組みに寄与し、それぞれの調査研究の進展を図った。また、過去の調査研究に従事した専門家・有識者を招いてアドバイザー会議を実施し、調査研究の進捗を報告する機会を設けると同時に、有識者からの助言を得る機会を設け、貴重なご意見等を拝聴した。さらに、上記項目の調査内容・結果を整理して、わかりやすく取りまとめ、本報告書を作成した。

【履行体制図】

気象・土壌WG

代表:五十嵐康人 京都大学複合原子力研究所・教授

土壌チーム

- 五十嵐康人 京都大学複合原子力科学研究所・教授
- 福谷 哲 同上・准教授
- 高宮幸一 同上・准教授
- 八島 浩 同上・准教授
- 池上 麻衣子 同上・助教
- 芝原 雄司 同上・助教
- 遠藤 暁 広島大学大学院 先進理工系科学研究科・教授
- 吉永信治 広島大学 原爆放射線医科学研究所・教授
- 久保田明子 同上・助教
- 松田尚樹 長崎大学 原爆後障害医療研究所・特命教授
- 福田直子 同上・技術職員
- 横田賢一 同上・助教
- 井上 淳 大阪公立大学大学院 理学研究科・准教授
- 高橋嘉夫 東京大学大学院 理学系研究科・教授
- 向井広樹 同上・特任研究員

実施・協力機関

- ☑ 土壌採取 ・民間会社・財団 (3社)
- ☑ 試料分析及び解析 { ・大学・研究機関 (25者)
・民間会社・財団 (4社)

令和3年度後半から体制を強化

全体

- ・月に1-2回全体進捗会議を開催
- ・他調査に関する分析も実施

- 向井中 京都大学複合原子力科学研究所・研究員
- 栗原雄一 同上・研究員 現所属 長岡技術科学大学

気象チーム

- 五十嵐康人 京都大学複合原子力研究所・教授
- 石川 裕彦 京都大学防災研究所・名誉教授
- 大原 利真 埼玉県環境科学国際センター・研究所長
- 滝川 雅之 海洋研究開発機構 北極環境変動総合研究センター・グループリーダー
- 遠藤 暁 広島大学大学院先進理工系科学研究科・教授
- 今中哲二 京都大学複合原子力研究所・研究員
- 谷田貝亜紀代 弘前大学大学院 理工学研究科・教授

実施・協力機関

- ☑シミュレーション開発・解析
・民間会社 (1社)
- ☑データベース開発・解析
・民間会社 (1社)

データ
提供
気象
庁:高
層気象
データ

参考文献：

- [1] 丸山隆司、吉川友章、"広島原爆の黒い雨による残留放射能と被ばく線量"、葉佐井 博巳、星 正治、柴田誠一、今中哲二編、広島・長崎原爆放射線量新評価システム DS02 に関する専門研究会報告書、京都大学原子炉実験所、KURRI-EKR-11 (KURRI-KR-114) 2005 (注：ネット公開は 2016 年、レポートは 2005 年出版) https://www.rri.kyoto-u.ac.jp/PUB/report/04_kr/img/ekr011.pdf
- [2] 吉川周作、山崎秀夫、井上淳、三田村宗樹、長岡信治、兵頭政幸、平岡義博、内山高、内山美恵子、長崎県西山水源池堆積物に記録された原爆の「黒い雨」、地質学雑誌, 107(8), 535-538, 2001 <https://doi.org/10.5575/geosoc.107.535>
- [3] Fukuyama, et al., Quantifying the impact of forest management practice on the runoff of the surface-derived suspended sediment using fallout radionuclides. Hydrological Processes: An International Journal, 24(5), 596-607 (2010).
- [4] Wannier et al., Fallout melt debris and aerodynamically-shaped glasses in beach sands of Hiroshima Bay, Japan, Anthropocene, 25, 100196 (2019).

第二章 今年度成果

本調査研究は、2022 年 3 月 25 日から 2023 年 3 月 28 日までの期間に令和 3 年度強化策として実施したものであり（契約期末：3 月 31 日）、前記研究概要に記した目標をおおよそ達成できたと自己評価している。

（１）気象モデルの構築に向けた調査研究（担当者： 五十嵐、遠藤、石川、大原、滝川、今中、谷田貝および役務業者で実施）

１）爆発再現計算取り組みおよび ２）気象モデルによる雲形成・降雨再現計算取り組み

この項目では、1945 年 8 月 6 日に広島市に投下された原子爆弾に起因する放射性降下物および降雨の先端モデルによる **１）爆発再現計算**を目指し、原子爆弾の投下後の気象状況の検証、核爆発による放射性降下物の拡散状況、大規模な爆発や火災が気象に与える影響等を考慮した **２）気象モデルによる雲形成・降雨再現計算**を実施した。以下に、主な作業（**必要な文献調査、爆発モデルの構築、気象モデルの構築**）についての概要を記載する。

○必要な文献調査

前年度までに実施した文献調査で下記の文献などを基本文献として入手している。まず、シミュレーション条件で不明瞭な点について引用されている元資料 [1, 2]や昨年度に調査したデータ以外の観測点における同種のデータの利用可能性を検討するための文献を入手した [3, 4]。気象シミュレーションモデルの構築においては、ヨーロッパ中期予報センター（ECMWF）やアメリカ大気海洋庁（NOAA）が提供するデータセット（ERA-20C や NOAA-20CR）の description paper を入手した [5, 6]。また、これまでの黒い雨に関する議論を確認するため、関連資料を入手した [7]。一方、原子爆弾の投下により発生する街区火災については、先行研究である HiSoF（Hiroshima Study group on Re-construction of Local Fallout form A-bomb in 1945）から当該文献を入手した [8]。さらに、高層気象観測の歴史に関する解説資料も参考資料として入手した [9～11]。

参考文献：

- [1] 丸山隆司, 吉川友章「広島原爆の黒い雨による残留放射能と被ばく線量」, KURRI-KR-114, 184-195, 2005
- [2] 黒い雨に関する専門家会議「黒い雨に関する専門家会議報告書／資料編」, 平成 3 年 5 月
- [3] 高層気象観測原簿 <http://www.jmbasc.or.jp/jp/offline/hd0050.html>
- [4] Aoyama et al., “Aerological data in August 1945 at Hiroshima, Japan”, Revisit the Hiroshima A-bomb with a Database: Latest Scientific View on Local Fallout and Black Rain, HiSoF, 2013
- [5] Poli et al., “ERA-20C: An Atmospheric Reanalysis of the Twentieth Century”, Journal of Climate, 2016, 29:11, 4083-4097, Doi: 10.1175/JCLI-D-15-0556.1.
- [6] Compo et al., “Review Article The Twentieth Century Reanalysis Project”, Q. J. R. Meteorol. Soc. 137: 1–28, January 2011 Part A
- [7] 原爆症認定集団訴訟記録集刊行委員会編「原爆症認定集団訴訟たかひの記録」第 2 巻, 7.” 黒い雨” 問題と気象シミュレーション (2004 年 11 月 10 日) /増田善信 (資料 12)
- [8] Aoyama et al., “Estimation of heat, water, and black carbon fluxes during the fire induced by the Hiroshima A-bomb”, Revisit the Hiroshima A-bomb with a Database: Latest Scientific View on Local Fallout and Black Rain, HiSoF, 2013
- [9] 二宮洸三「気象観測史的に見た高層気象台におけるジェット気流の発見」, 天気, 61, 10, 2014
- [10] 阿部豊雄「気象庁における高層気象観測の変遷と観測値の特性 第 1 部 高層気象観測の変遷」, 天気, 62(3), 161-185, 2015
- [11] 阿部豊雄「気象庁における高層気象観測の変遷と観測値の特性 第 2 部 観測値の特性」, 天気, 63(4), 267-295, 2016

○爆発モデルの構築

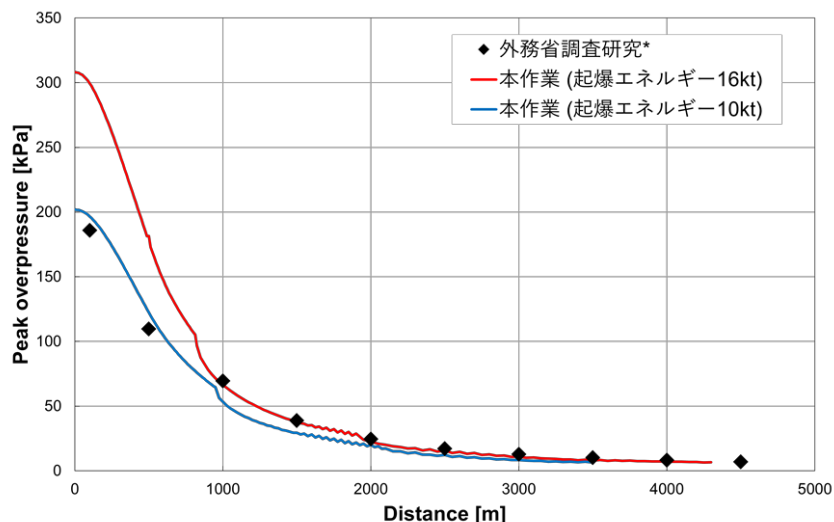


図 3. 爆心地からの距離と爆圧の比較（爆発モデル計算と報告値 [2]）

爆発モデルの計算手法の概要は、以下の通りである。起爆直後にある程度時間が経過した（0.01～0.1 秒程度）後の状態を爆発再現のための初期値として使用し、半径数十メートルの高温高压の一様なガス球体として初期場を設定して計算を実施する方法は、Bethe ら（1947）による Los Alamos 研究所レポート(LA-1020)に記載があり、LA-1020 と LA-1021 を統合した

文献は LA-2000 として現在公開されている [1]。本報告では、主として LA-2000 に記載の手法に沿って起爆後の状態量をエクセルで計算する仕組みを作成し、爆発シミュレーションの初期値として使用することとした。なお、爆発の規模については広島原爆の TNT 換算値 16 kt を、本報告においては 10 kt として起爆に際するエネルギーとして扱うこととした [2]。

雲の形成に関しては、通常の圧縮性流体の数値解法の支配方程式である質量、運動量、全エネルギーの保存方程式に加えて、固相密度に関する質量保存式を追加して同時に解く火山の噴煙についての手法 [3]に沿って起爆直後から噴煙が上昇するまでの過程を、シームレスにシミュレーションすることとした。なお、本報告においてはキノコ雲に含まれる粉塵は 1 種類として解析手法を構築したが、爆弾本体に由来する粉塵と地上建築物に由来する粉塵とでは放射性物質としての性質が異なるため、質量分率を 2 種類に分類する必要があるとの指摘がなされており、この点は課題として認識していたが、並行して実施した令和 4 年度の結果として、問題の解決が達成されている。

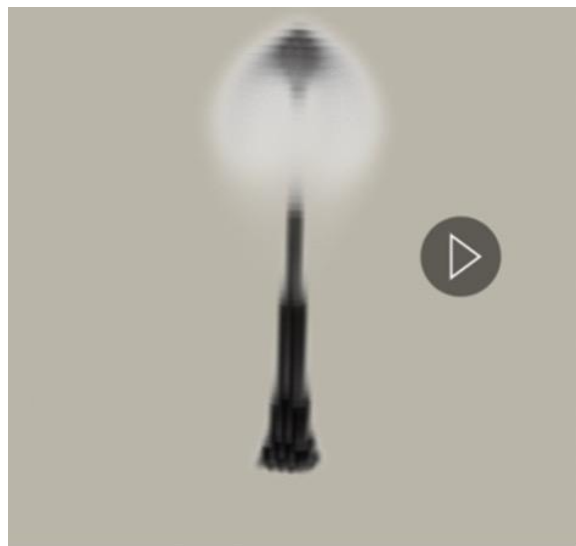


図 4. シミュレーションによるキノコ雲形成過程の可視化

爆発シミュレーションの結果について以下に記す。起爆後のキノコ雲の上昇過程では、強い上昇気流により真上から見た場合にはドーナツ型の、いわゆるトーラス状の渦が形成される。この位置を時刻とともに追跡をし、雲の成長過程を検証することを目的として、過去の類似のシミュレーションと核実験データの比較を実施しところ、本作業において TNT 換算値 10 kt と設定した初期値を用いた場合に参考文献 [4]の計算と良く一致すること分かった。また、起爆量がそれぞれ異なるが、Nevada 州において実施された種々の実験値 [5]とも、3.5 kt と 31 kt の実験を除くと、総じて実験値の傾向と一致することが確認できた。また、爆発規模の予測精度を検証することを目的として、地上を過る衝撃波に起因する爆圧に関して報告値 [2]と比較検討を行ったところ、前述した通り、起爆エネルギーを 10 kt に設定するほうが広島の地上での過圧とよく一致することが確認された（図 3）。

上述した検証を踏まえて粉塵濃度分布を鳥観図で可視化した。可視化データは動画ファイルであるため、ここではスナップショット（図 4）を 1 種類示す。この図はキノコ雲が形成されつつある瞬間の粉塵の可視化図である。キノコ状の笠の上部は約 8,000 m であり、若干細い形状に見えるが、可視化範囲の粉塵濃度をさらに小さな値まで範囲を拡大するとより太い形状を可視化することは可能である。ただし、その場合は全体が黒い分布図になるため、可視化手法そのものについても、さらに検討を進めている。

参考文献：

- [1] Bethe et al., “Blast Wave,” Los Alamos Scientific Laboratory report LA-2000 (this report supersedes LA-1020 and LA-1021).
- [2] 平成 25 年度外務省委託「核兵器使用の多方面における影響に関する調査研究」、外務省

HP、<https://www.mofa.go.jp/mofaj/files/000034833.pdf>

- [3] 鈴木雄治郎、火山噴煙挙動の数値的研究、京都大学数理解析研究所講究録、第 1800 巻、2012 年、pp.195-202.
- [4] Radiation Effects Research Foundation. In, Roesch, W. C, ed., Radiation Effects Research Foundation, Vol. 1 and 2. 1987.
- [5] Howard A. Hawthorne, "Compilation of Local Fallout Data from Test Detonations 1945-1962 - Extracted from DASA 1251 - Volume I - Continental U.S. Tests", DNA 1251-1-EX, 1979.

担当者： アドバンスソフト(株)、石川裕彦、今中哲二、五十嵐康人

○街区火災由来の熱量と水蒸気量デジタルデータセットの作成

Aoyama et al. (2013)は、当時の建築様式をも考慮して都市火災により発生した総熱量と水蒸気発生量を見積もり、これを燃焼時間（8 時間を仮定）で除して平均の熱フラックスと水蒸気フラックスを見積もった [1]。ここに掲載されている火災熱流量の図および水蒸気発生量の図の元となるデジタル・データを著者に依頼していたが、著者ご逝去の為、入手できなくなった。そこで繰り越し分の作業として、論文に掲載された図を直接読み取り、

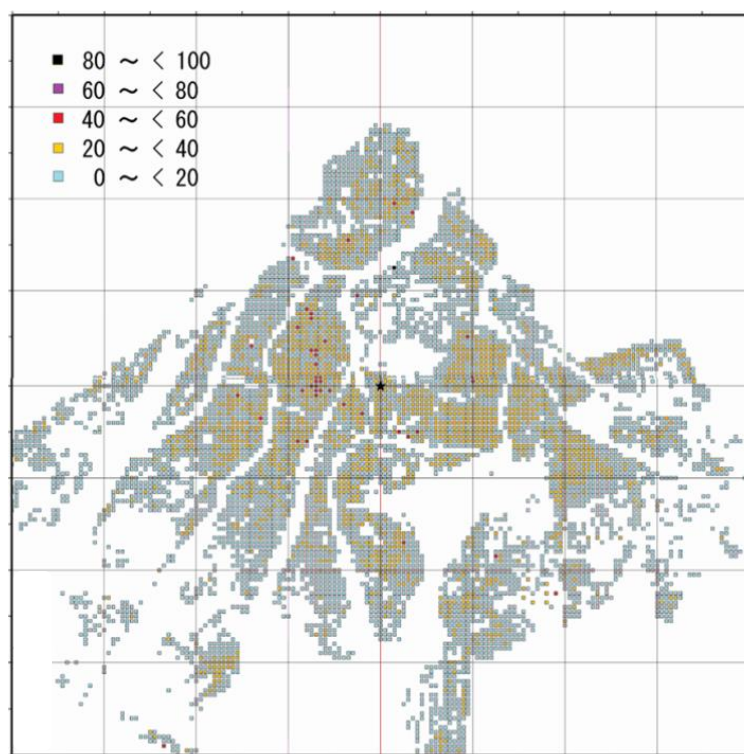


図 5. Aoyama et al. (2013) にもとづき本調査研究で作成した街区火災由来の熱量のデータセット
単位は $\text{kJ s}^{-1}\text{m}^{-2}$

手入力でエクセルファイルを作成した。熱流量は爆心を中心とする 8 km 四方の領域を 50 m 四方に分割した格子で 5 段階の濃淡（グレートーン）で塗り分けられている。この原図の濃淡を画像ソフトで着色し（図 5）、階級（1～5）を読み取り、誤読を避けるよう工夫した。各格子で読み取った階級に、その階級の中央値を与えて格子全体の平均を計算すると、 $15.9 [\text{kJ s}^{-1}\text{m}^{-2}]$ となった。この値は論文に記載されている値、 $14.4 [\text{kJ s}^{-1}\text{m}^{-2}]$ よりも 10% 程大きめであるが、元のデジタル・データを良い近似で再現できたといえる。水蒸気発生

量の図には、燃焼で生じる水蒸気フラックスが、同じく 50 m 四方格子で 5 階級に塗り分られている。この図も同様に読み取った。しかし、水蒸気フラックスは、爆心地を中心とする 4 km 四方の範囲しかカバーしていない。そこで、4~8 km の範囲の水蒸気生成量は、以下のように推定した。まず、爆心から 4 km の範囲で水蒸気発生量と発熱量の平均を求め、その比を計算した。そして、爆心地より 4 km 以遠の地域では、火災熱流量の格子値にこの比を乗じて水蒸気発生量とした。

* 計算モデルでは 300 m (400 m) 格子を用いるので、読み取った値を 6×6 (8×8) 格子で平均した発熱量を用いた。

参考文献：

[1] Aoyama et al., “Estimation of heat, water, and black carbon fluxes during the fire induced by the Hiroshima A-bomb”, Revisit The Hiroshima A-bomb with a Database: Latest Scientific View on Local Fallout and Black Rain, HiSoF, 2013

担当者： 京都大学複合原子力科学研究所 石川裕彦、今中哲二

アドバンスソフト(株)

海洋研究開発機構 滝川雅之

埼玉県環境科学国際センター 大原利真

○気象モデルの構築

気象モデルでは計算を複数のプロセスに分割して実施する。まず夏季の広島周辺の海陸風循環を伴う局地気象を再現し、この中に原爆とこれに引き続く街区火災の熱源や発生する微粒子を埋め込み、積乱雲の発生発達とこれに伴う降水を計算する。繰越分では、引き続き各プロセスの計算手法開発と実装を実施した。

気象場の再現に関しては、モデルへ入力する歴史的再解析データ、米国大気海洋庁 (NOAA) のデータ (20CRv3) やヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) のデータ (ERA-20C) を入手して、気象モデル WRF (Weather Research Forecasting Model) を利用した基本計算を実施した。入力データの信頼性を確認するため、20CRv3 で公開されている「アンサンブル平均」データの基となった個々のアンサンブルメンバー (全 80 メンバー) を入手して上層風を解析すると、メンバー間のバラつきが大きいことがわかった (図 6)。上層風は積乱雲 (爆発雲) の移動方向を決めるので、特に雨域の再現性に直接影響する。よって、上層風の不確実性を加味した上で再現計算を行う必要がある。

モデル自体の信頼性を確認するため、データの完備した最近の事例での性能検証、モデルパラメータに関する感度実験を実施した。具体的には、当時と似た気象条件 (類似事例) を 2000 年以降の 8 月上旬を対象に抽出し (表 1)、その中で 2019 年 8 月の事例を対象に観測の再現性の調査を進めた。その結果、熱的局地循環の再現性においては、海陸風循環をおよそ再現できることがわかった (図 7)。また、気象モデルの初期・境界条件として使用した再解析データとデータ同化の 1 種であるナッジングをすることで上層風を良く再現できることが示された。今後、他の類似事例について同様の解析を行い不確実性情報として蓄積する必要がある。

気象モデルへの爆発雲の取込みについては、爆発時の計算結果に爆発の熱源を付加し、こ

れを初期値として以降の計算を実施する方法を開発し、理想実験として、地形等は考慮せずに原爆の爆発に相当する熱エネルギーを一様大気中に与えた計算を行った。その結果、上昇気流が生じて降水が発生することを確認した（図 8）。さらに、理想実験の結果を現実地形の基本計算に取り込む手法を考案し、爆発雲を取り込む目途をつけた。並行して実施した令和 4 年度分の調査研究では、爆発モデルの計算結果を反映した爆発雲を与えた計算を実施した。

担当者： 京都大学複合原子力科学研究所 石川裕彦、今中哲二、五十嵐康人
アドバンスソフト(株)
海洋研究開発機構 滝川雅之
埼玉県環境科学国際センター 大原利真

表 1. 類似事例と利用可能な入力気象データ及び検証データ. 2000 年以降の 8 月上旬の気象庁地上天気図から、原爆投下時とよく似た「鯨の尾」型の気圧配置を選び出した.

ID	期間	NCEP_25	NCEP_1	ERA-20C	20CRv3	アメダス	Wind Profiler
1	Aug. 11, 2000		○	○	○	1 時間値	
2	Aug. 1, 2002		○	○	○	1 時間値	
3	Aug. 3, 2002		○	○	○	1 時間値	
4-1	Aug. 3, 2006		○	○	○	1 時間値	○_KU-RISH
4-2	Aug. 4, 2006		○	○	○	1 時間値	○_KU-RISH
5-1	Aug. 11, 2006		○	○	○	1 時間値	○_KU-RISH
5-2	Aug. 12, 2006		○	○	○	1 時間値	○_KU-RISH
6-1	Aug. 5, 2007		○	○	○	1 時間値	○_KU-RISH
6-2	Aug. 6, 2007		○	○	○	1 時間値	○_KU-RISH
7	Aug. 6, 2015	○	○		○	10 分値	○_KU-RISH
8	Aug. 12, 2016	○	○			10 分値	○_KU-RISH
9	Aug. 4, 2018	○	○			10 分値	○_KU-RISH
10-1	Aug. 1, 2019	○	○			10 分値	○_KU-RISH
10-2	Aug. 2, 2019	○	○			10 分値	○_KU-RISH

Scatter of (U,V) at the grid nearest to Hiroshima at 1945-08-06_00UTC

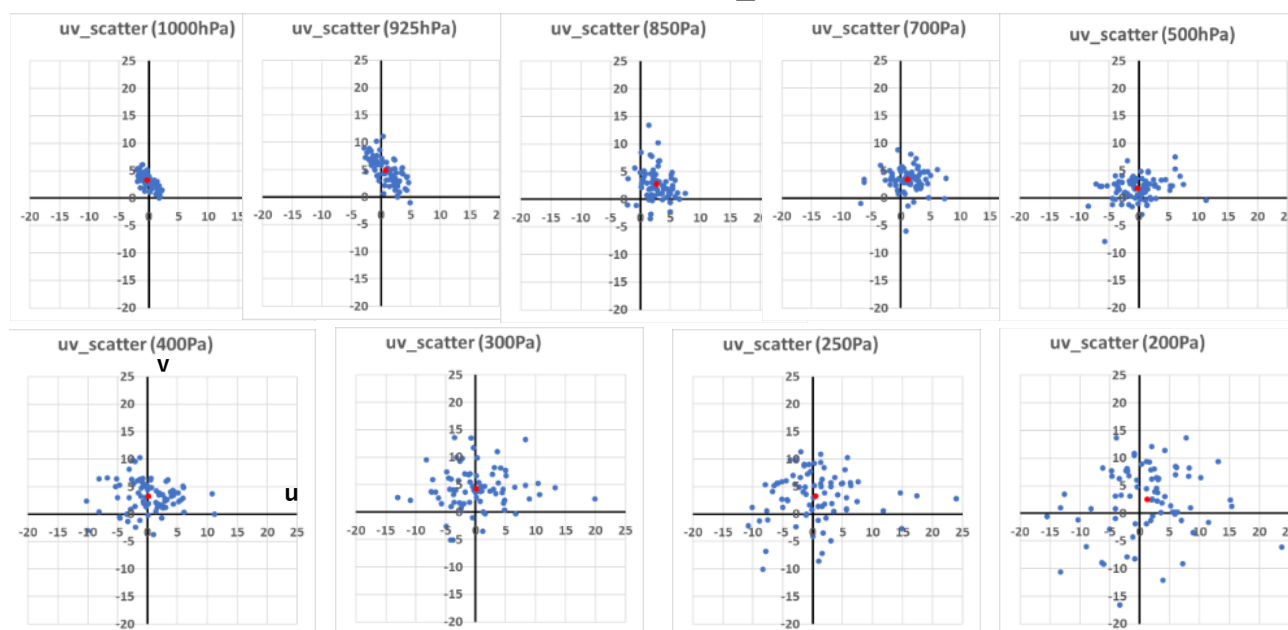
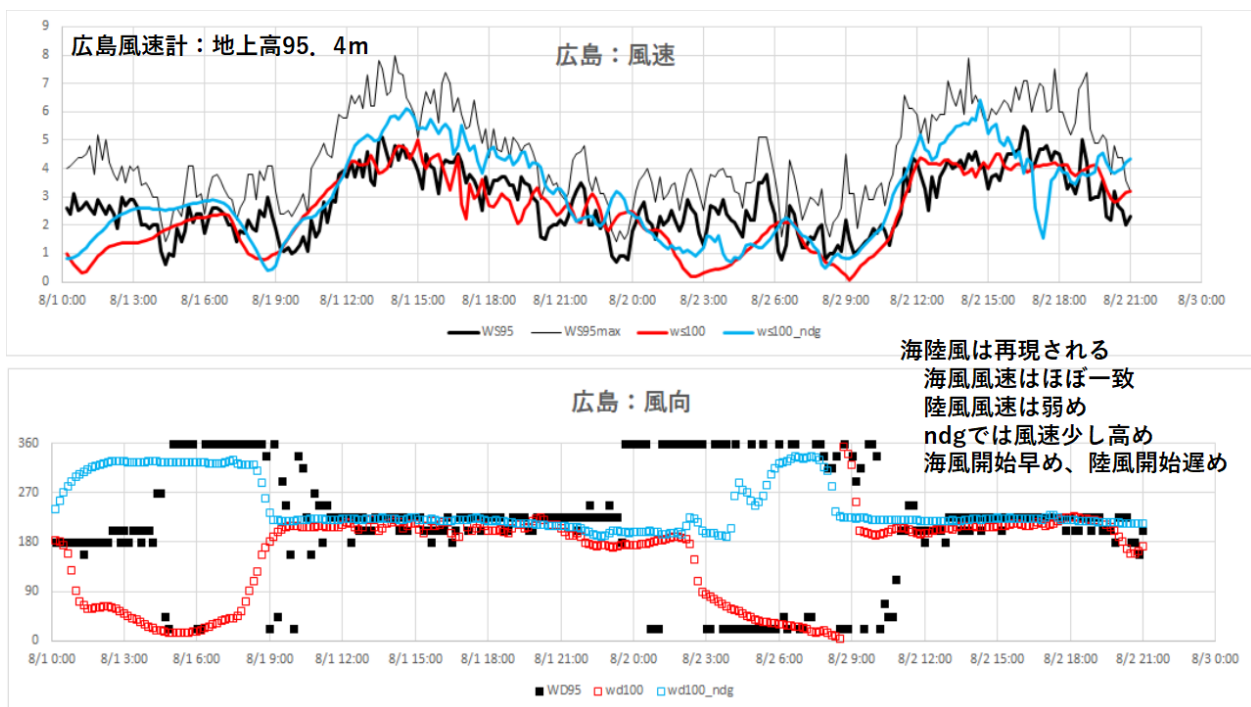


図 6. 歴史的再解析データのアンサンブルメンバーとアンサンブル平均の関係. 1945 年 8 月 6 日 9 時 (日本時) における、広島に最も近い格子点での (u, v) を高度別にプロットした. 赤点がアンサンブル平均の (u, v) 、青点はアンサンブルメンバーの (u, v) 80 個. アンサンブル平均することで風速の絶対値が小さくなる可能性が示唆される.

(a)



(b)

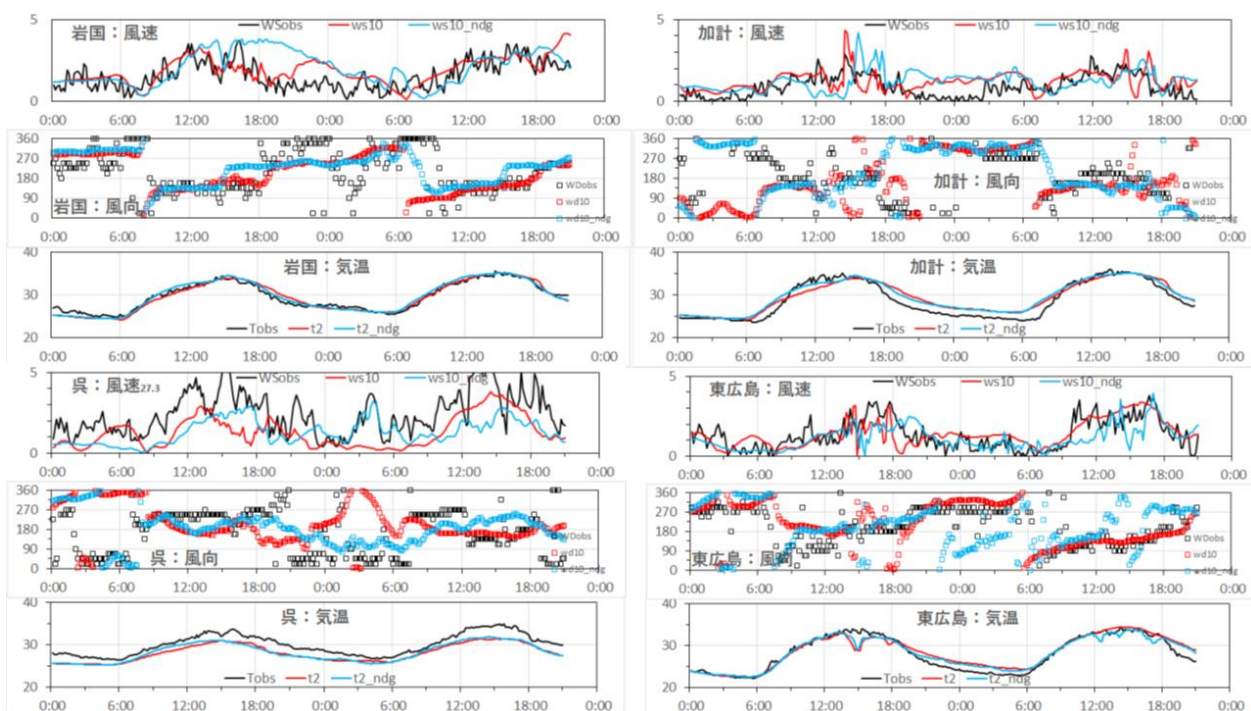


図7. 最近の類似事例（2019年8月1日～8月2日）をWRFで計算した結果を、(a)広島及び(b)周辺のアメダス観測データと比較した結果。赤はナジングなしのWRF結果、水色はナジング有りのWRF、黒がアメダスデータを示す。(b)の黒細線は10分間の最大風速。海陸風循環（特に海風）が良好に再現されていることがわかり、WRFモデルがこの地域の海陸風循環に適用できることが示されている。

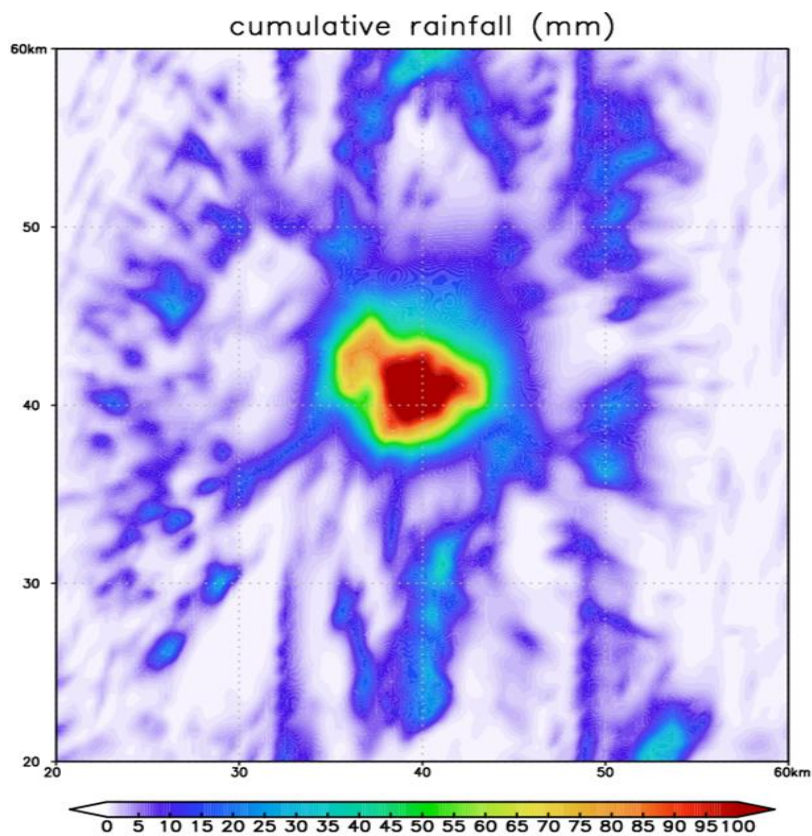


図 8. 原爆の爆発に相当する熱エネルギーと 2006 年 8 月 6 日 0 時（協定世界時；UTC）の爆心地の風を一般風として与えた場合の理想実験の結果で積算雨量（1 時間後）を示す。空間スケール 10 km の範囲で最大 100 mm の降雨が見られた。なお、爆心は図の中心である。

(2) 放射性降下物の拡散状況に係る調査に関する研究

(2) a. 土壌の採取方法の検討及び調査の実施(担当者: 五十嵐、高宮、福谷、高橋、遠藤、松田、福田、横田および役務業者で実施)

本業務では、広島市、長崎市、ならびに周辺市町村の近傍地域での放射性降下物調査の適地の選定、表土試料の採取・測定、さらに分析手法の検討とその報告を行うことが必要で、研究チーム全体で分担した。役務業者をはじめ、地方自治体や協力機関の支援を受けて業務を実施した。具体的な任務分担は以下のとおりである。長崎における土壌採取は令和4年度事業における実施が主体ではあるが、参考のために一部について併記している。

地図の作成および地点選定: (株式会社) ヴィジブル インフォメーション センター (V.I.C.)、
ならびに京都大学

広島での地権者同定と同意取得: 広島市役所、広島県庁、京都大学

長崎での地権者同定と同意取得: 長崎市役所、諫早市役所、大村市役所、長崎県庁、京都大学、長崎大学

実地調査および土壌試料採取: 京都大学、広島大学、長崎大学、(一般財団法人) 広島県環境保健協会、(株式会社) 九州自然環境研究所

この結果、広島、長崎両地域の地図作成と地点選定を進め、広島地域で~100箇所、長崎地域で令和4年度実施分と合わせて合計12箇所において土壌採取を実施し、再採取分を含めて¹³⁷Csの測定を実施できた試料数は3000を超えた(2023年3月中旬時点)。

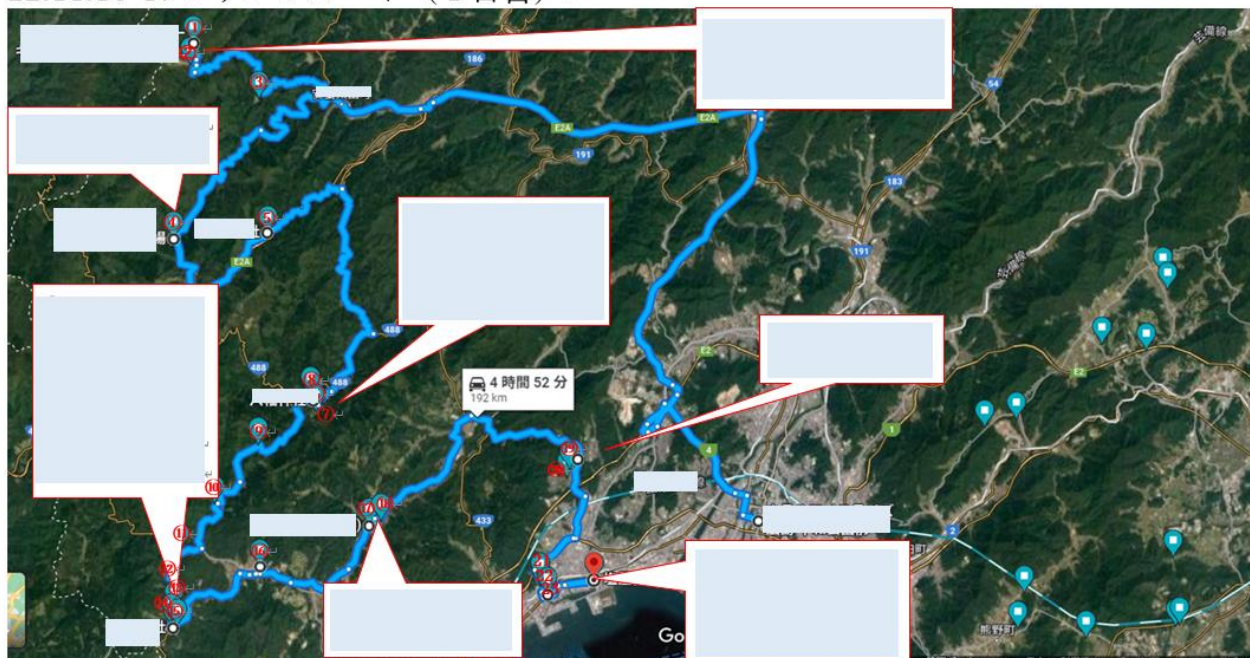
① 調査地点の設定、事前踏査の実施

広島地区、長崎地区において、それぞれ、広島大学、長崎大学所属の分担研究者の主導で、V.I.C.のスキームを元に、京都大学にて過去の航空写真などの情報も併せて土壌試料採取の適地選定に取り組んだ。本調査では、A) 原爆投下以前~現在まで移転せずに留まっていること B) 所有土地内に原爆投下の影響を残している可能性のある土地が保持されていることの条件を満たす神社・仏閣・古城の位置情報を収集した(長崎は教会も含む)。

広島全体では110区域において候補地点が得られ、令和3年度分として報告した100区域において2022年3月末に採取を終了し、その後の土壌試料前処理、スクリーニング測定および本格測定に供した。その結果、多くの地点において客土・覆土等が行われ未改変とは判断できなかったため、2022年夏から2023年2月末まで追加の土壌試料の再採取を実施した。広島における土壌試料採取地点の事前踏査(ロケーションハンティング; ロケハンと称した)の一例を図9に示す。ロケハンとは、京都大学複合原子力科学研究所が協力大学または役務業者と実施した分のみで、延べ20日余にわたり、200箇所を数えた。このほか、役務業者に依頼した分は21箇所あり、総計で221箇所について実施した。このように令和3年度強化策での再採取では未改変と推定される地点を慎重に選定し、土壌試料採取に臨むこととした。また、特に100の区域の中心付近20の区域を重点的に採取を行うことと決め対応した。再採取は土壌試料の放射性物質測定に協力した大学関係者の支援と、新たに選定された役務業者が担った。未改変地点として古城跡が望ましかったが、史跡の発掘と判断されてしまうことから許認可の点で困難性が高く、さらに地権者の特定が困難であった。そのため、ほとんどの候補地点が社叢、寺林となった。採取に臨んでは、地権者からの採取同意を必ず

得ている。試料を区別するために、区域番号に加えて、同一区域での最初の採取試料、再採取試料、再々採取試料などを、それぞれ A, B, C, D として記号を付した。

22.11.16-17 ロケハンルート（1日目）



22.11.16-17 ロケハンルート（2日目）

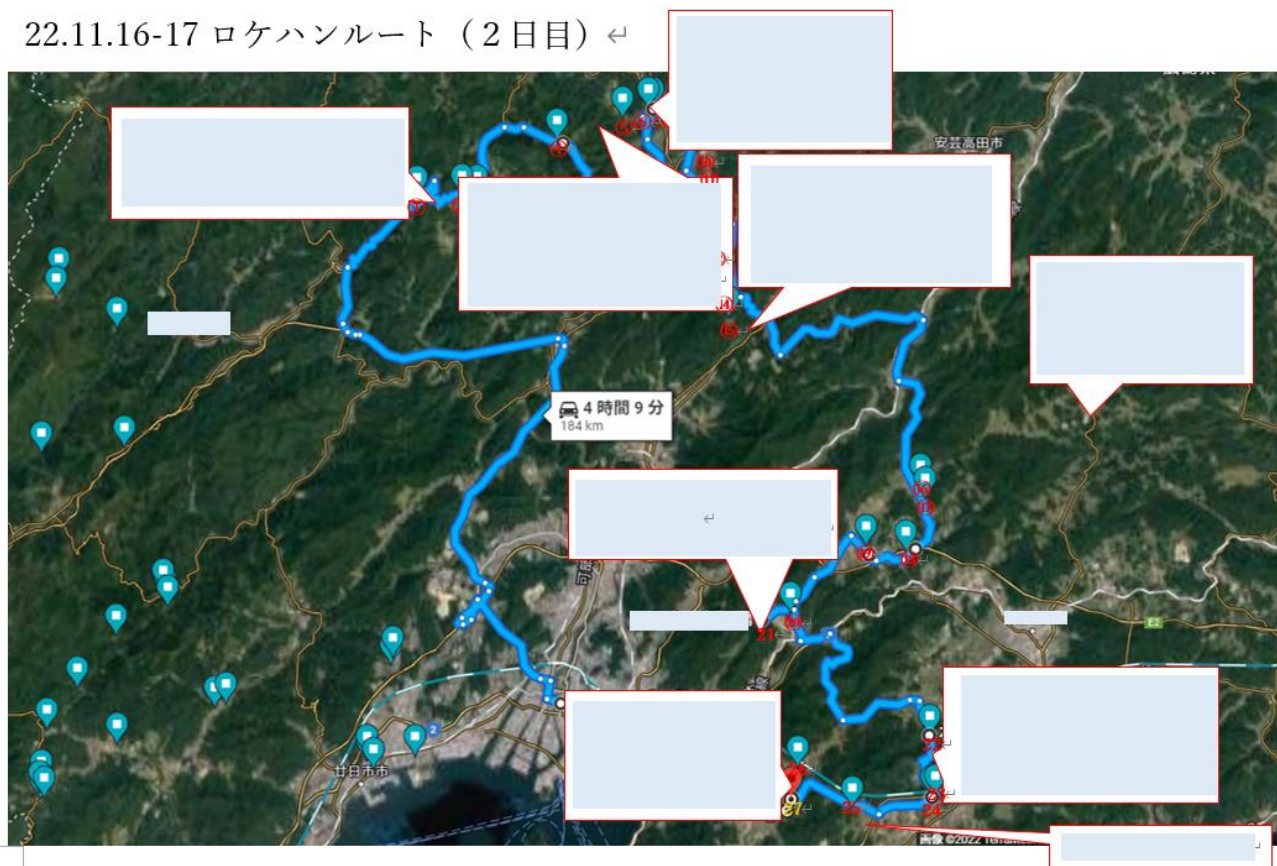


図 9. 広島における事前踏査（ロケハン）の状況例 場所特定を避けるため塗りつぶしている

担当者： 京都大学複合原子力科学研究所： 五十嵐康人、高宮幸一、福谷 哲、向井 中
広島大学： 遠藤 暁
長崎大学： 松田尚樹、福田直子
V.I.C.関係者

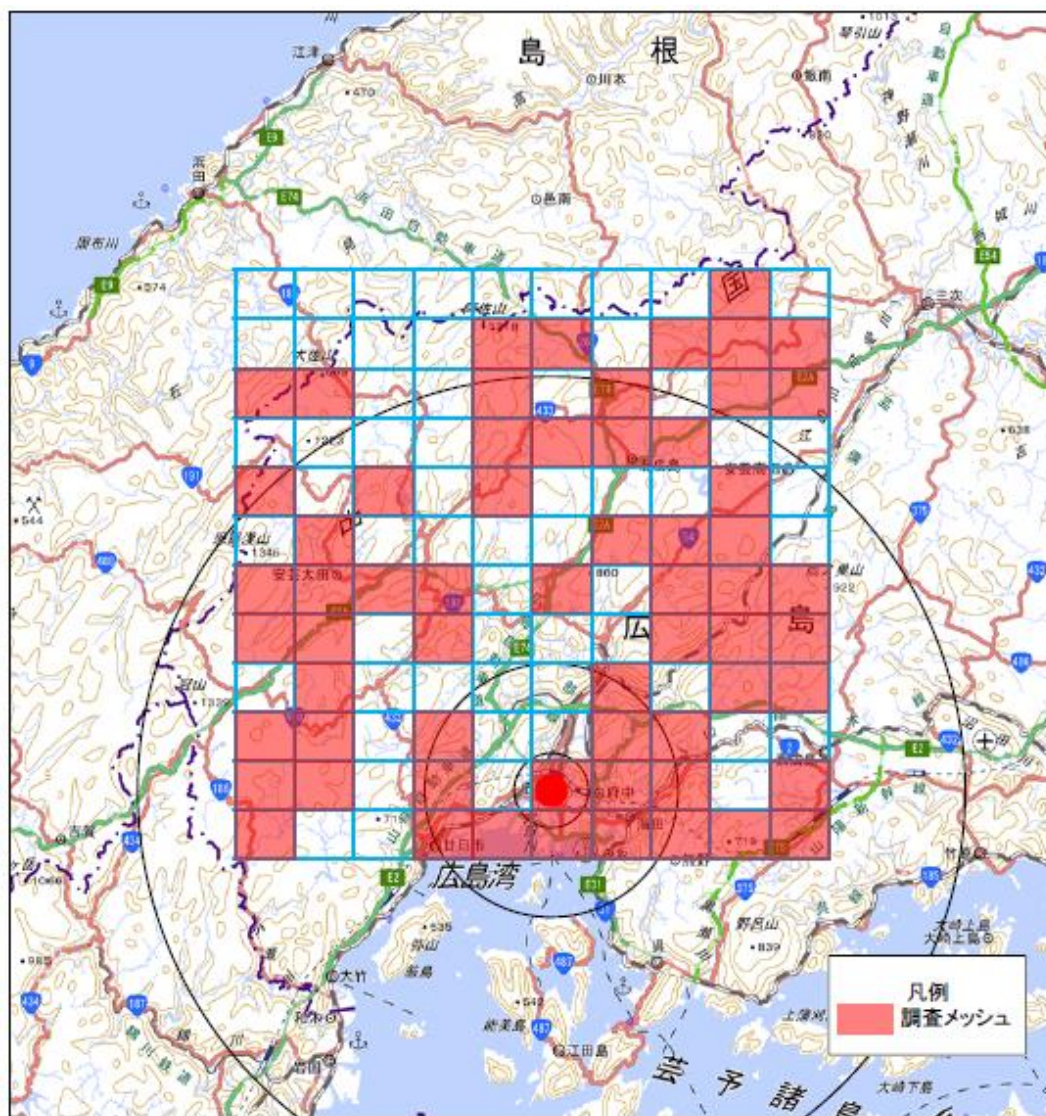


図 10. 広島における土壌試料再採取実施の区域（広島県環境保健協会実施分）

② 土壌試料の採取作業

京都大学複合原子力科学研究所が地権者の同意を得て、京都大学、協力大学ならびに（一財）広島県環境保健協会が、実地に調査し土壌採取を行った地点に関して報告を記載する。

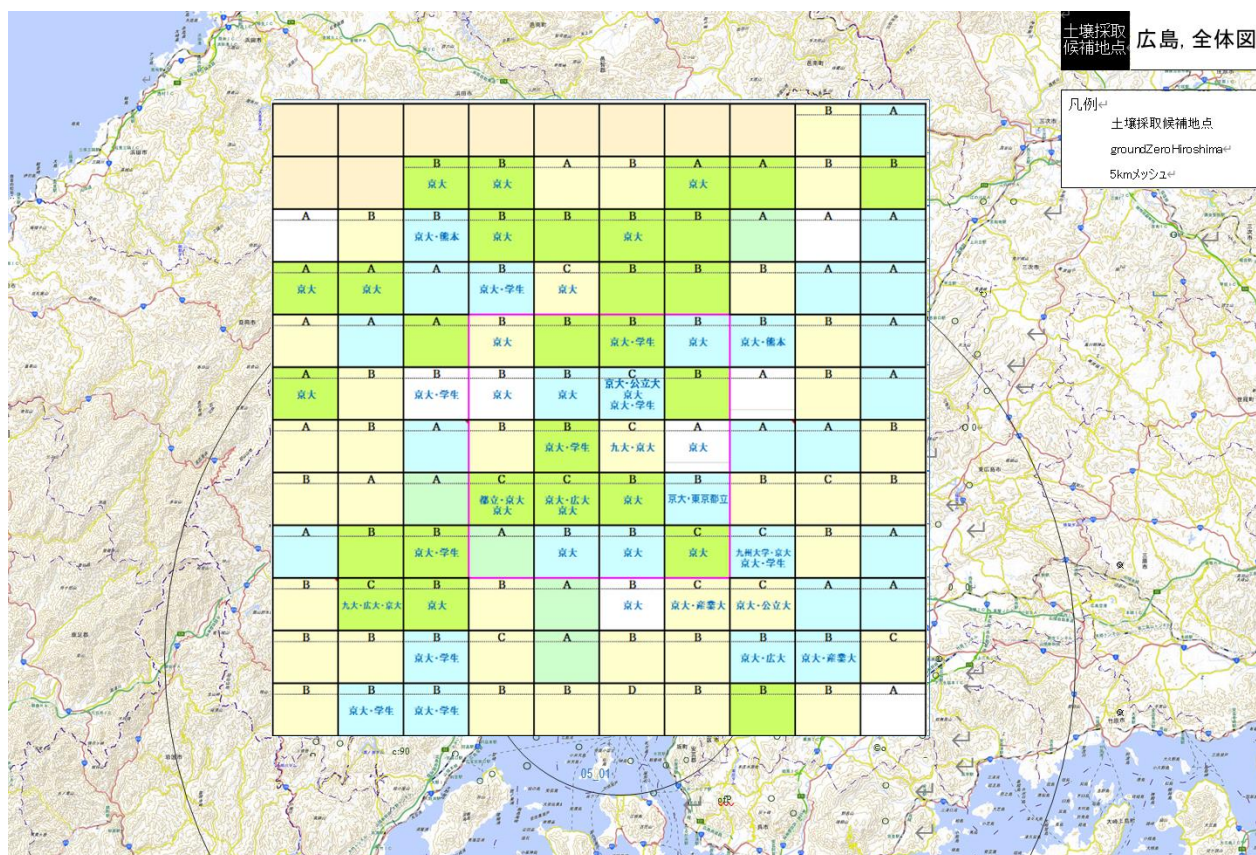


図 10 に（一財）広島県環境保健協会が中心となって再採取を実施した区域を色付して示す。図 11 に京都大学複合原子力科学研究所と協力大学が中心となって実施した採取区域の一覧を示す。京大と他大学で採取した先は、それだけで 41 区域の地点にて、延べ 46 回となった。結果として、～90 区域について土壌試料の再採取を実施した。試料採取地点の概要をまとめた「カルテ」の一例を掲載する（図 12 参照）。なお、風評等の発生を避けるため、採取地点を一般公表しないことを地権者と約定しているため、本報告書でも特定を避けるようマスクしている。土壌試料の採取は前年度と同様の方法論で臨み、スクレーパープレートを用いた土壌試料採取を実施した。スクレーパープレートを主体に鋤や熊手も使い、出来る限り四角になるように慎重に掘り進めた。礫や異物は別途採取し、植物根（地下茎）は鋏やナイフ、鋸などで切断するなどして除去した。10 mm ごとの土壌試料は土色帳の色見本と比較して写真撮影し、重量を現場で測定して、採取用ポリ袋またはオートクレーブ可能な袋に詰め、京大へ送付した。採取作業の量としては、作業員 2～4 名により実施して、1 地点あたり 3～5 時間の工程を要した。なお、長崎地域においても令和 4 年度実施分と併せて 12 区域について、広島地域における採取と同一の手法で採取を実施した。

③ 採取試料の到着から測定用試料作成までの流れ

役務業者等により採取された 10 mm 層単位の土壌試料は、チャック付ポリ袋に封入された状態で京都大学複合原子力科学研究所に届けられ、以下に記載する 1)～3) の処理に従い親試料として保管し、Ge 半導体検出器を用いた γ 線測定用 (^{137}Cs および ^{210}Pb) 試料、その他の分析へ供する試料の分取を行った。

1) 作業者の安全確保、試料の変質を防ぐための γ 線滅菌処理 (線量 20 kGy 以上)。あるいは、オートクレーブによる 120 °C での滅菌処理。2) 45 °C 設定の定温乾燥器にて数日間風乾 (定期的に重量を測定→重量が下げ止まった時点で乾燥を終了)。3) 乾燥済み試料は、スクリーロック容器に移し替えて、試料命名法に基づく試料 ID を付与、QR コード付のラベルを貼付して管理。

Ge 半導体検出器による測定用試料は、このスクリーロック容器に保管された親試料から大型の匙にて無作為に親試料を掬い取り、目開き 2 mm の篩で粒径分画後、篩い落ちた 2 mm 以下の試料を Ge 測定用試料として測定協力機関の仕様にもとづき U8 または試験管状のポリ容器に充填した。なお、過剰 ^{210}Pb の精密な測定のためには、 ^{226}Ra と放射平衡になる ^{214}Pb を精度良く測定しなければならず、 ^{226}Ra と ^{214}Pb の間には希ガスである ^{222}Rn が介在するため、土壌試料を容器内に密封して 3 週間程度放置し、適切に放射平衡状態に至らしめることが求められた。このため、アラルダイトやエポキシ樹脂などで密封操作を実施した。

採取場所:	広島	施設名:		緯度:	
作業日:	令和 4 年 9 月 10 日	候補順位:		経度:	

作業日報		現場位置図																																																																			
作業日報 京都大学 複合原子力科学研究所 現場代表者 氏 作業場所: 緯度: 北緯 作業日: 令和 4 年 9 月 10 日 経度: 東経 作業者名: 内田 幸平, 安永 利生 天候: 晴 PCY項目: 移動時の交通安全注意。サンプリング時の採取器具取扱注意。 安全・品質指示事項: 取扱器具の使用時に上場注意確認を行う。採取高さの仕分け及びコンタミについて確認する。 <table border="1"> <thead> <tr> <th>採取位置</th> <th>採取重量(g)</th> <th>採取位置</th> <th>採取重量(g)</th> <th>採取位置</th> <th>採取重量(g)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>✓ 0-10</td><td>171g</td><td>✓ 100-110</td><td>294g</td><td>✓ 200-210</td><td>331g</td></tr> <tr><td>✓ 10-20</td><td>384g</td><td>✓ 110-120</td><td>859g</td><td>✓ 210-220</td><td>406g</td></tr> <tr><td>✓ 20-30</td><td>329g</td><td>✓ 120-130</td><td>378g</td><td>✓ 220-230</td><td>426g</td></tr> <tr><td>✓ 30-40</td><td>299g</td><td>✓ 130-140</td><td>270g</td><td>✓ 230-240</td><td>400g</td></tr> <tr><td>✓ 40-50</td><td>293g</td><td>✓ 140-150</td><td>258g</td><td>✓ 240-250</td><td>410g</td></tr> <tr><td>✓ 50-60</td><td>268g</td><td>✓ 150-160</td><td>311g</td><td>✓ 250-260</td><td>428g</td></tr> <tr><td>✓ 60-70</td><td>362g</td><td>✓ 160-170</td><td>442g</td><td>✓ 260-270</td><td>498g</td></tr> <tr><td>✓ 70-80</td><td>339g</td><td>✓ 170-180</td><td>211g</td><td>✓ 270-280</td><td>380g</td></tr> <tr><td>✓ 80-90</td><td>392g</td><td>✓ 180-190</td><td>428g</td><td>✓ 280-290</td><td>466g</td></tr> <tr><td>✓ 90-100</td><td>240g</td><td>✓ 190-200</td><td>315g</td><td>✓ 290-300</td><td>408g</td></tr> </tbody> </table> 作業内容 1) 2) 3) 4) 5) 6) 作業時間		採取位置	採取重量(g)	採取位置	採取重量(g)	採取位置	採取重量(g)	✓ 0-10	171g	✓ 100-110	294g	✓ 200-210	331g	✓ 10-20	384g	✓ 110-120	859g	✓ 210-220	406g	✓ 20-30	329g	✓ 120-130	378g	✓ 220-230	426g	✓ 30-40	299g	✓ 130-140	270g	✓ 230-240	400g	✓ 40-50	293g	✓ 140-150	258g	✓ 240-250	410g	✓ 50-60	268g	✓ 150-160	311g	✓ 250-260	428g	✓ 60-70	362g	✓ 160-170	442g	✓ 260-270	498g	✓ 70-80	339g	✓ 170-180	211g	✓ 270-280	380g	✓ 80-90	392g	✓ 180-190	428g	✓ 280-290	466g	✓ 90-100	240g	✓ 190-200	315g	✓ 290-300	408g	現場位置図 採取場所特定を避ける為、塗りつぶしてあります。 土壌採取候補地点 広島 全体図 凡例 - 土壌採取候補地点 - groundZeroHiroshima 5kmメッシュ ・メッシュ中心に近い順にリストに表示している。 ・名称の末尾に(※)印が付加された地点は、他の地点に隣接する地点であることを表す。(例) 広島、境内社 ・他の地点に隣接する地点(※)印を除外して順位を付けている。	
採取位置	採取重量(g)	採取位置	採取重量(g)	採取位置	採取重量(g)																																																																
✓ 0-10	171g	✓ 100-110	294g	✓ 200-210	331g																																																																
✓ 10-20	384g	✓ 110-120	859g	✓ 210-220	406g																																																																
✓ 20-30	329g	✓ 120-130	378g	✓ 220-230	426g																																																																
✓ 30-40	299g	✓ 130-140	270g	✓ 230-240	400g																																																																
✓ 40-50	293g	✓ 140-150	258g	✓ 240-250	410g																																																																
✓ 50-60	268g	✓ 150-160	311g	✓ 250-260	428g																																																																
✓ 60-70	362g	✓ 160-170	442g	✓ 260-270	498g																																																																
✓ 70-80	339g	✓ 170-180	211g	✓ 270-280	380g																																																																
✓ 80-90	392g	✓ 180-190	428g	✓ 280-290	466g																																																																
✓ 90-100	240g	✓ 190-200	315g	✓ 290-300	408g																																																																
現場状況-特記事項 70-80にφ3cmの鉄釘、110-120に //		採取地点の状況 備考 ・本取の北側山中を採取地点とした。昔、道だった谷部分を避け、そこから西に少し離れた尾根部分で採取。 ・1990年以前の航空写真で、裏手の森は今よりも小さく、北に向かって少し縮れて延びていた。採取した尾根部分はこの縮れの中段と思われた。 ・もし芳しい結果が出なかった場合は、付近にあったという道を作った時代に、削った土砂を尾根に捨てていた可能性が考えられる。																																																																			

図 12. 広島地域において土壌採取した地点に関する「カルテ」

* 土壌試料のスクリーニング測定

前年度多くの地点で客土や覆土が行われていた改変地点で土壌試料を採取して(A 試料)多くの Ge 半導体検出器による γ 線測定が無駄になったことから、これを避けるために採取した土壌試料の一部を前処理なしで γ 線測定に供し、 ^{137}Cs が検出されるか否かを精密測定の前のスクリーニングとして実施した(～20,000 秒程度の測定)。協力機関へと送付して令和3年度強化分と並行して実施した令和4年度分を合計すると200試料(A および再採取したB 試料など)に適用し、スクリーニングを通過した試料数は136試料、全く検出されなかったもの34試料、 ^{137}Cs は含まれるもののかなり低濃度なもの30試料であった。スクリーニングで ^{137}Cs が含まれていないと判断された地点や測定の結果改変とされた地点については、再々度(C 試料)、ないしは再々再度(D 試料)の土壌試料採取も実施した(図11 参照)。スクリーニングを通過した試料は、前処理に付し Ge 半導体検出器による γ 線測定を依頼した。ただし、こうした対応が令和4年前半では完全には追いつかず、結果として無駄となった測定も多数あったことは事実である。

担当者： 京都大学複合原子力科学研究所 福谷 哲、八島 浩

④ 放射性降下物、火災煙由来の物質の分離・測定

○放射性降下物の測定事例(^{137}Cs および ^{210}Pb 測定) - 京都大学複合原子力科学研究所における Ge 半導体検出器を用いた γ 線測定の事例)

ここでは、測定の一事例として京都大学複合原子力科学研究所における Ge 半導体検出器を用いた γ 線測定結果について記載する。 ^{137}Cs と ^{210}Pb の分析測定をそれぞれ 662 keV と 46.5 keV の光電ピークを用いて測定した。試料1つにつき 80000～170000 秒の測定を行っ

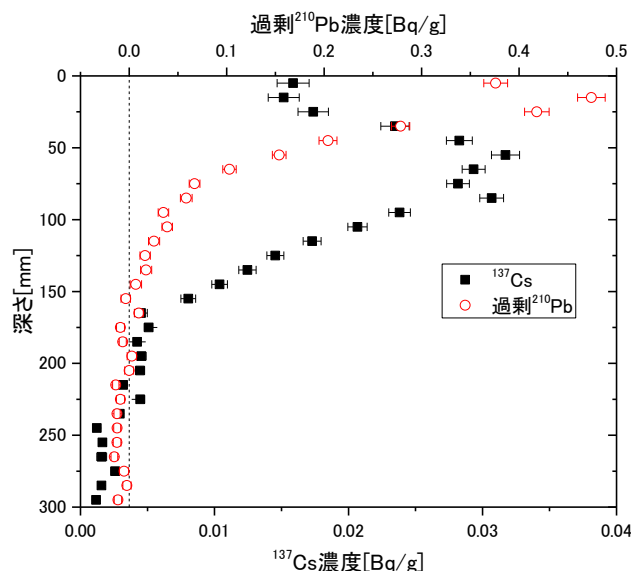


図 13. 鉛直方向における放射能濃度分布 (広島 H-05-03)

た。さらに、大気由来と推定される ^{210}Pb の画分(過剰 ^{210}Pb と呼ぶ)の見積もりも行った。 ^{210}Pb は、大気に地表の鉱物などから放出された ^{222}Rn の子孫核種であり、大気中で生成する。そのほか、土壌を構成する鉱物にも含まれるため、 ^{210}Pb は土壌に元々存在する。そこで、 ^{210}Pb と同じ壊変系列に属する ^{214}Pb との間で放射平衡(放射能が同じになっている状態)

にあることを利用して、 ^{210}Pb の測定値からこの ^{214}Pb の測定値を差し引くと、大気から供給された ^{210}Pb の画分（過剰 ^{210}Pb ）が推定される。これら放射性核種のデータを利用して、採取された土壌試料が改変の地点からなのか、それとも未改変の地点から得られたのかの推定に供した。図 13 に、広島 H-05-03 地点での鉛直方向における放射能濃度分布を示す。 ^{137}Cs の表層への残留の様相が見て取れ、過剰 ^{210}Pb 濃度の減少の様子（物理半減期 22 年で減衰する）からも、未かく乱の地点から採取されたことを示唆している。また、100 mm 以深でも ^{137}Cs が低濃度で検出されているが、これは一部の ^{137}Cs が可溶性形態で、土壌柱で鉛直下方へ輸送されていることを示す証拠と考えられる。鉛直下方輸送については別のセクションで検討するが、表層への残留傾向と矛盾するものではない。

担当者： 京都大学複合原子力科学研究所 八島浩

○大学および役務業者による ^{137}Cs および ^{210}Pb 分析結果のまとめ

本調査研究では、京都大学、広島大学、長崎大学にて ^{137}Cs と ^{210}Pb 等の分析測定を既存の Ge 半導体検出器を用い実施するとともに、強化策にて下記表 2 にある大学・研究機関ならびに公益財団などに依頼して、令和 3 年度強化策にて実施予定であった～100 地点×30 層の試料の分析が役務・再委託先において完了し、データを保有していて順次データベースへ

表 2. 令和 3 年度強化策にて ^{137}Cs , ^{210}Pb 分析を役務または再委託した機関および責任者一覧
(炭素測定は参考)

	分析委託機関名	測定者(担当者)	年度末までの測定予定試料数
大学 研究 機関	1 広島大学 大学院先進理工系科学研究科	遠藤暁	270 試料程度
	2 長崎大学 原爆後障害医療研究所	松田尚樹 福田直子	120 試料程度
	3 東京都立大学	大浦泰嗣 末木啓介	130 試料
	4 鹿児島大学 先端科学研究推進センター	尾上昌平	210 試料
	5 弘前大学 被ばく医療総合研究所	赤田尚史	90 試料
	6 大阪大学放射線科学基盤機構	吉村 崇 大江一弘	117 試料
	7 核融合科学研究所	田中将裕	150 試料
	8 九州大学アイソトープ統合安全管理センター放射線監視情報部	杉原真司	120 試料
	9 近畿大学 原子力研究所	山田崇裕	120 程度
	10 公益財団法人 環境科学技術研究所 環境影響研究部	大塚良仁	90 試料
	11 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻	高橋嘉夫 向井広樹	150 試料
	12 長岡技術科学大学	太田朋子 栗原雄一	60 試料
	13 明治大学	小池裕也	60 試料
	14 尚絅学院大学	齊藤敬	90 試料
	15 愛知医科大学	小島 貞男 緒方良至	60 試料
	16 大阪産業大学	碓隆太	30 試料
	17 福島大学環境放射能研究所	平尾茂一	60 試料
	18 東京海洋大学	伊藤友加里 神田稔太	120 試料
	19 広島大学 自然科学研究支援開発センター	中島覚	60 試料
	20 岡山大学 自然生命科学研究支援センター	寺東宏明	60 試料
	21 熊本大学 生命資源研究・支援センター	島崎達也	120 試料
	22 徳島大学 放射線総合センター	三好弘一	30 試料
	23 高知大学 海洋コア総合研究センター	新井和乃 松崎琢也	30 試料
	24 大阪公立大 放射線研究センター	秋吉優史	30 試料
	25 大阪公立大学	井上淳	炭素測定
法人・ 業者	26 いであ株式会社	長坂洋光 渡邊恵史	270 試料
	27 公益財団法人 日本分析センター	平出 功	60 試料
	28 一般財団法人 九州環境管理協会	山中潤二	30 試料
	29 日本空調サービス株式会社	伊藤憲司	270 試料
京都大学複合原子力科学研究所測定分			90
測定合計			3097 試料

の格納作業が進行中である。なお、各大学・研究機関において多様な Ge 半導体検出器とデータ解析ソフトが利用されていることから、 ^{137}Cs と ^{210}Pb の濃度標準試料として、それぞれ IAEA-385 (Natural and Artificial Radionuclides in Sediment from the Irish Sea; ^{137}Cs : 19.8 ± 0.6 [Bq kg $^{-1}$], 国際原子力機関供給)と IAEA-410 (Radionuclides in Bikini Atoll Sediment; ^{210}Pb : 211 ± 10 [Bq kg $^{-1}$])を準備して分析・測定を実施する機関に配布し、これらの試料の認証値を用いて校正を実施するか、あるいは測定が認証値をおおむね再現するか否かの確認を求め、分析・測定全体の精度管理と整合性確保に努めた。

担当者： 長岡技術科学大学： 栗原雄一

京都大学複合原子力科学研究所： 八島 浩、福谷 哲、高宮幸一、向井 中、

足立友紀、東江直樹、五十嵐康人

広島大学： 遠藤暁

長崎大学： 松田尚樹、福田直子

○スペクトルデータの解析や点検について

本調査研究では、原子爆弾投下後に発生した放射性物質を含む降水現象や放射性物質の沈着（黒い雨）の領域を推定するために、広島および長崎において採取した土壌試料に対して、 ^{137}Cs および過剰 ^{210}Pb の放射能濃度の分析を行った。分析方法には、Ge 半導体検出器を用いた γ 線スペクトロメトリを用いた。本事業では、多数の研究機関の協力を得て約 3000 試料の採取土壌の調査分析を行った。各研究機関から報告された測定結果の確認を目的として、測定結果とともに提出された γ 線スペクトルの生データを対象に、スペクトル解析（対象の光電ピークのネットカウント数の取得）を行い、スペクトルデータの解析で得られたネットカウント（図 14）および標準試料の測定から算出した対象核種の検出効率を用いて、土壌試料中の ^{137}Cs および過剰 ^{210}Pb 放射能濃度を算出した。得られた ^{137}Cs および過剰 ^{210}Pb 放射能濃度と各研究機関から報告された値とを比較することで、測定結果の点検を行なった。スペクトルデータの解析から点検までの作業の流れは以下の通りである。

① γ 線スペクトルのエネルギー校正

② 各測定機関から提出されたスペクトルの生データ（バックグラウンド・標準試料・土壌試料）に対し、解析ソフトウェア（スペクトルナビゲータ/スペクトルエクスプローラー）を用いた解析を行い、3 核種（ ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 、 ^{214}Pb ）のピークのネットカウント数を取得

③ ②のバックグラウンドおよび標準試料の 3 核種のネットカウント数などを用いて、研究

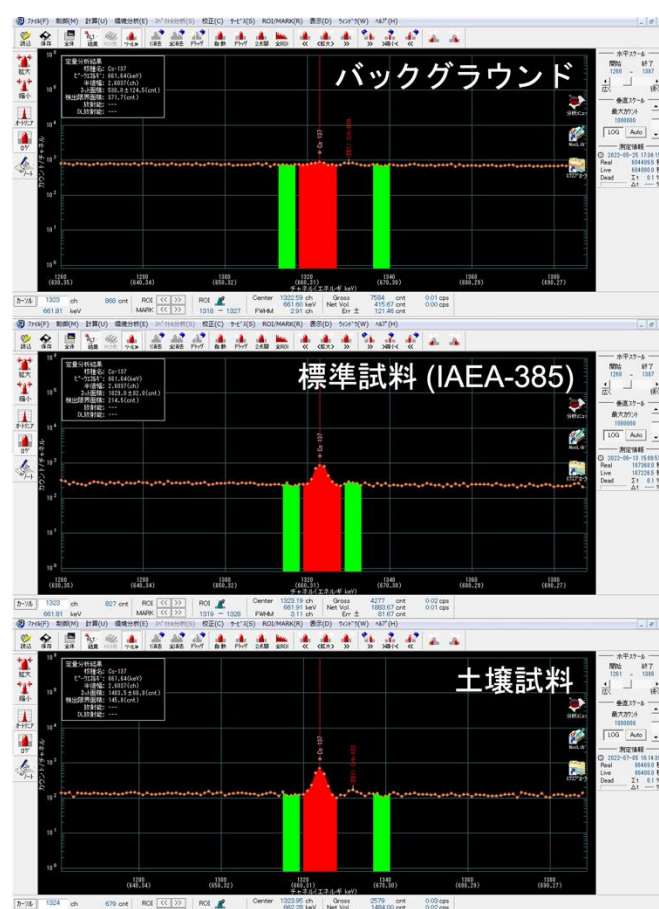


図 14. スペクトルデータの解析例

機関ごとに3核種の検出効率を算出

④ ③で算出した検出効率やその他の情報（測定時間や測定試料重量など）を用いて、土壌試料中の ^{137}Cs および過剰 ^{210}Pb 放射能濃度を算出

⑤ ④で算出した値と報告された値とを比較

現在、①および②を中心に作業を進めている。

担当者： 長岡技術科学大学 栗原雄一

京都大学複合原子力科学研究所 八島浩、福谷哲、高宮幸一

株式会社ヴィジブルインフォメーションセンター (V.I.C.)

○土壌改変の有無の判別について

土壌改変の有無の判別基準や判定については、ワーキンググループ（WG）を組織して対応した。議論の結果、土壌試料中の ^{137}Cs インベントリ（資産とか在庫などの意味をもつ英単語だが、地球科学では賦存量、ここでは単位面積の土壌柱中での賦存量を意味する）、 ^{137}Cs 濃度ピークの有無、過剰 ^{210}Pb 濃度の鉛直分布データ、および ^{137}Cs インベントリ／過剰 ^{210}Pb インベントリ比などから、土壌改変の有無の判定を行った。次ページ以降の図15に、各大学や法人から得た土壌試料中の ^{137}Cs および過剰 ^{210}Pb 濃度の鉛直分布データを示す（2023年3月末時点）。未改変の土壌採取という条件が満たされた試料と、満たされない試料とが見受けられ、特にかく乱を受けた土壌では、上層で濃度高・下層では濃度低で一定となるはずの過剰 ^{210}Pb 濃度の鉛直分布に乱れが見られ、 ^{137}Cs 濃度がほぼ検出限界未満（ND）となった例もある。このような ^{137}Cs が土壌上層から下層に至るまでほぼ検出されない試料では、真砂土などが人為的に投入されて改変を受けた地点と判断され、試料採取地点選定が適切ではなかったと考えられる。しかし、これらの採取も原則的に地権者の「改変をおこなっていない」との証言を元に実施しており、土壌調査実施における大きな課題と言える。早急にデータ精査を進め、土壌試料データのさらなる解析に資することが肝要である。

WGの会合における議論に基づき、未改変は現状20地点程度、判断保留（微粒炭粒子の分析や過剰 ^{210}Pb を活用した年代指標など詳細をさらに検討する）とした地点が17程度となった。残りは、改変ありと判断されることから、未改変と判断保留を合計しても40弱の区域分に達するだけで、広島県の西部を100あまりの区域でおおったことを考えると、不十分と言わざるを得ない。結果論ではあるが、**半分に満たない未改変地点でのデータから「黒い雨」領域の精度良い推定を行うことは非常に困難性が高いと結論せざるを得なかった。**

担当者： 長岡技術科学大学 栗原雄一

京都大学複合原子力科学研究所 八島浩、福谷哲、高宮幸一、五十嵐康人

広島大学 遠藤暁

協力者： 九州大学 杉原真司

弘前大学 赤田尚史

尚絅学院大学 齊藤 敬

環境科学技術研究所 大塚良仁

東京都立大学 末木啓介

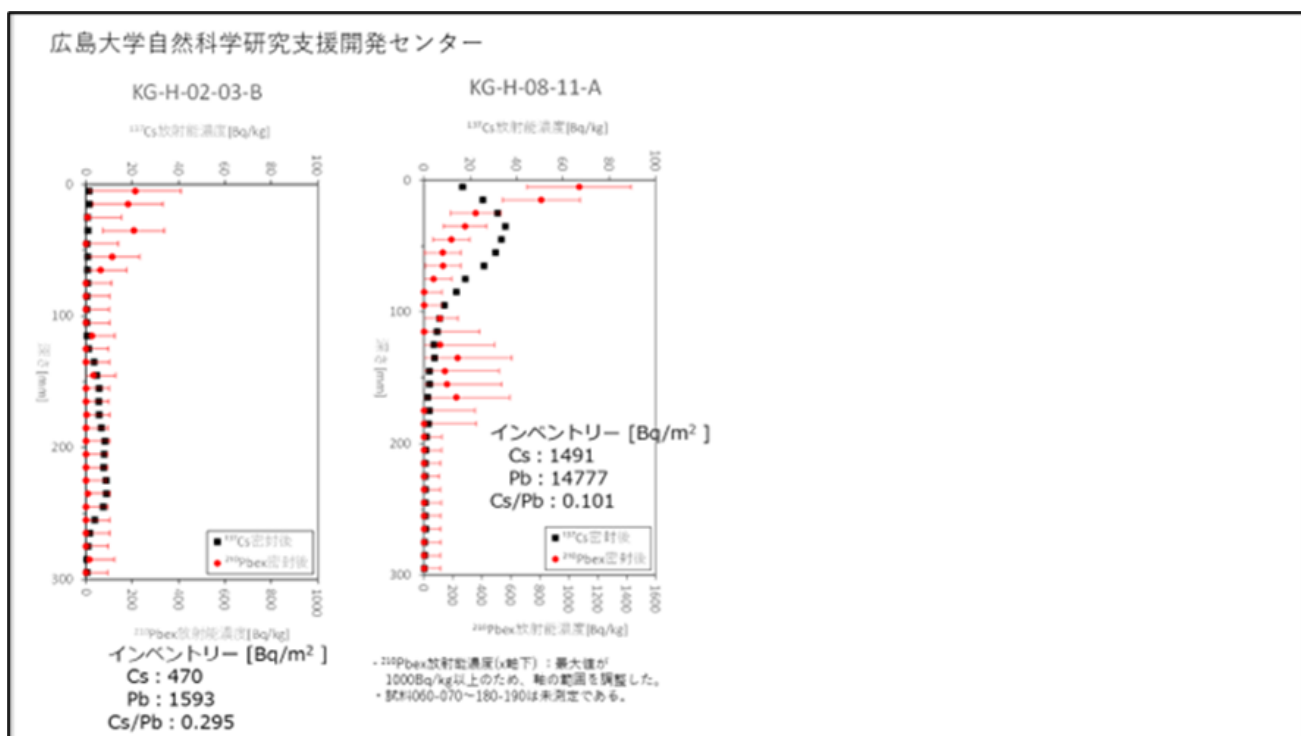
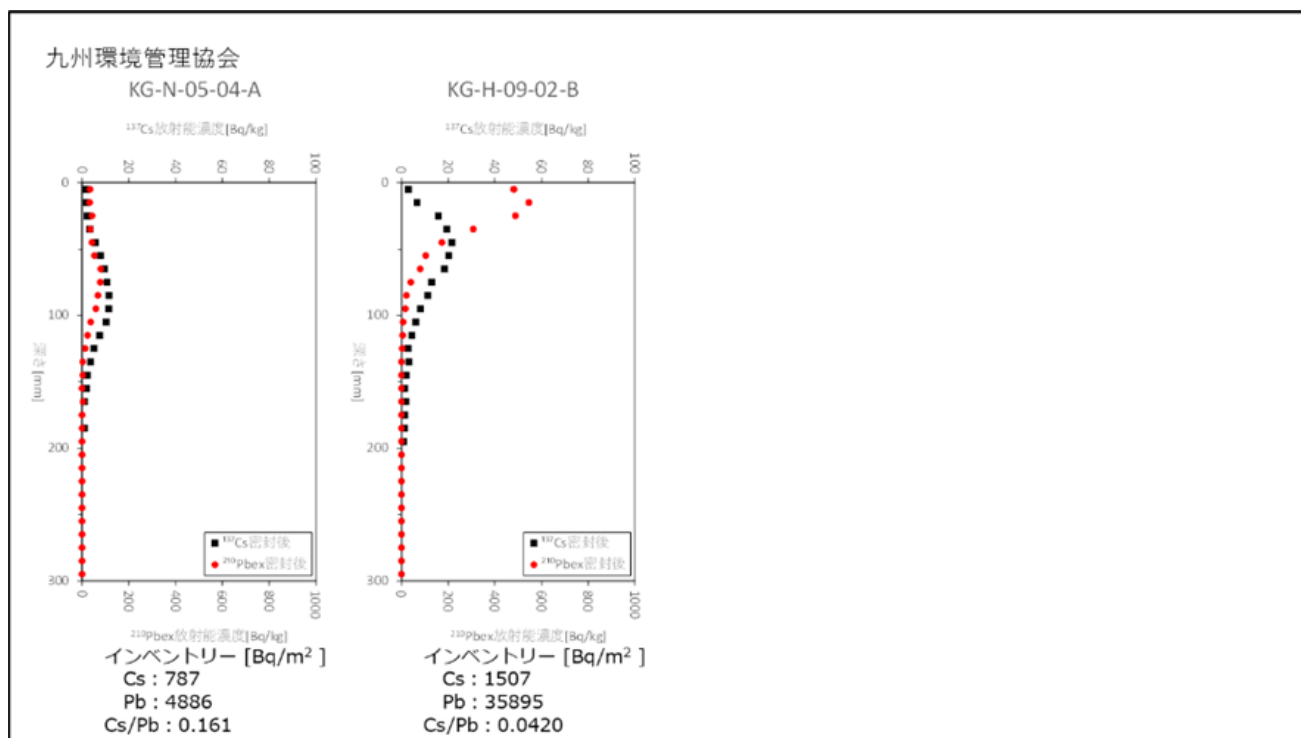


図 15-1. ^{137}Cs および過剰 ^{210}Pb の土壌柱中での鉛直プロファイル

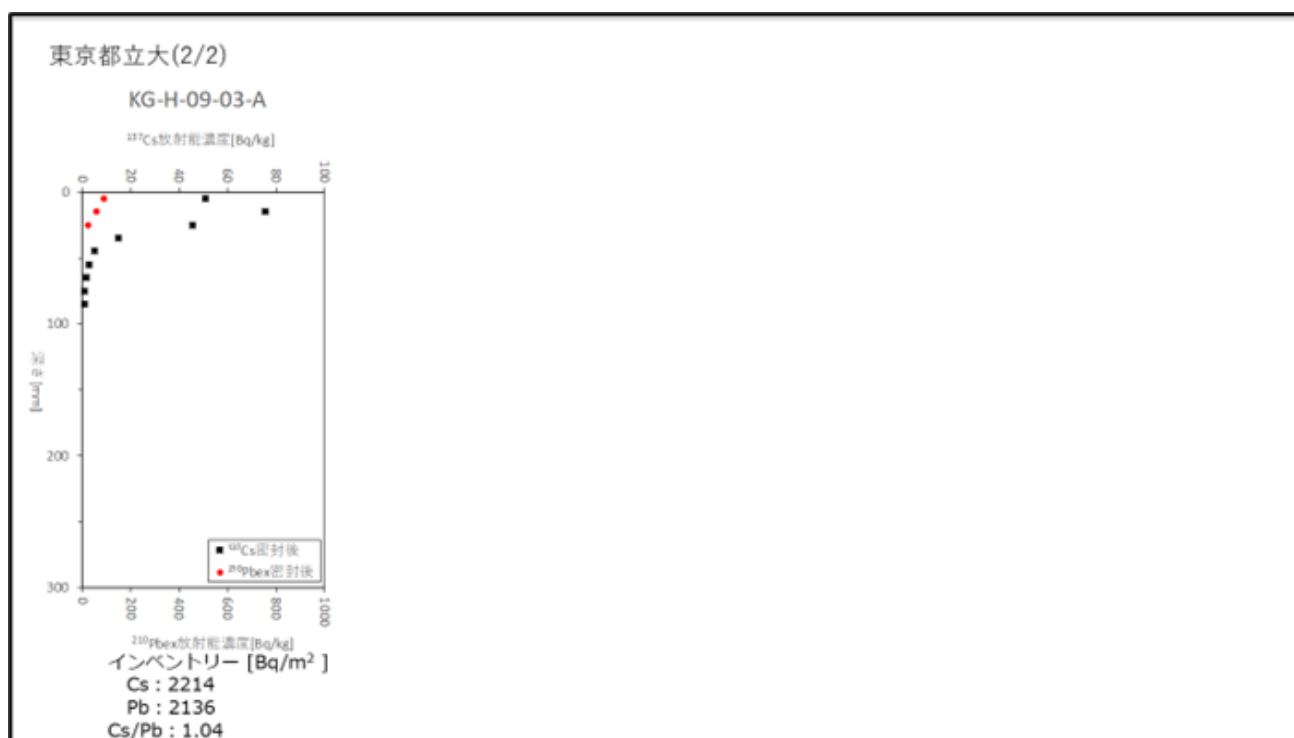
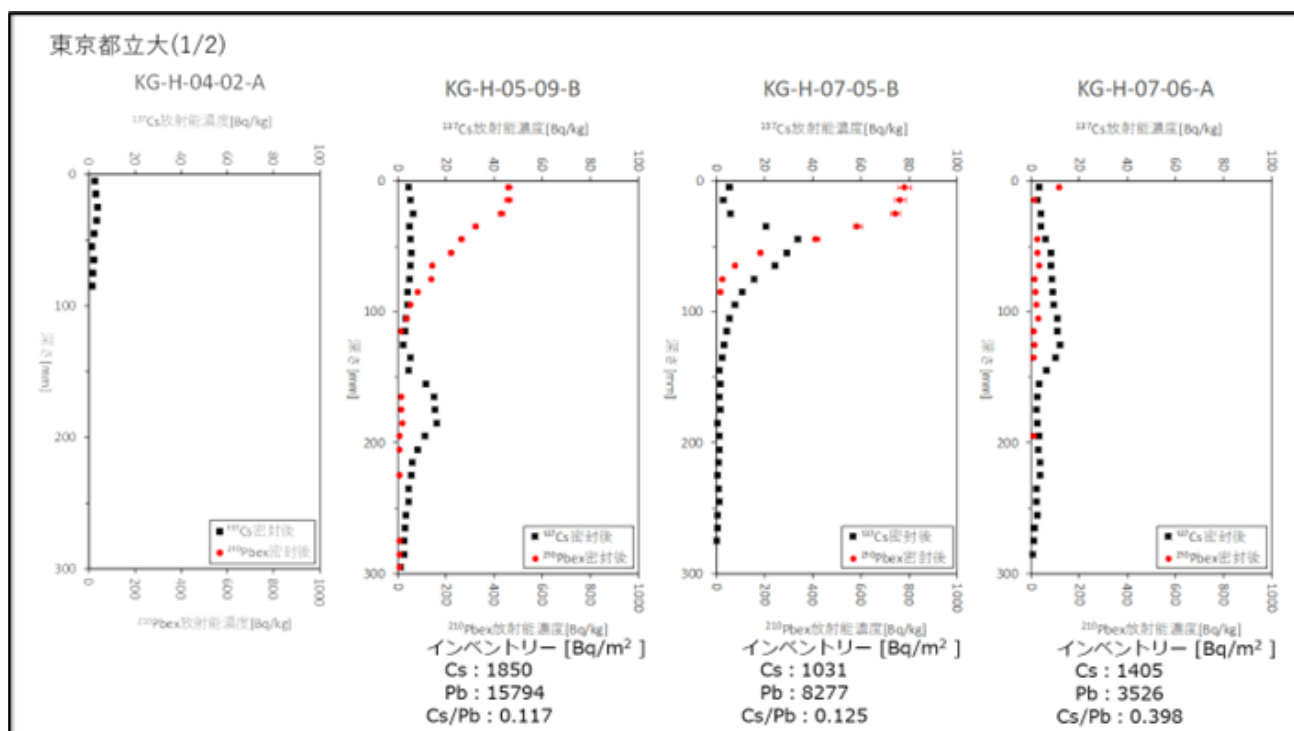
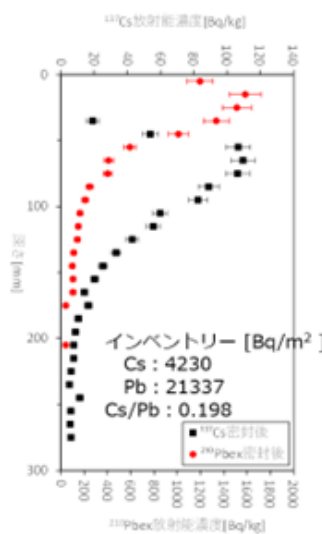


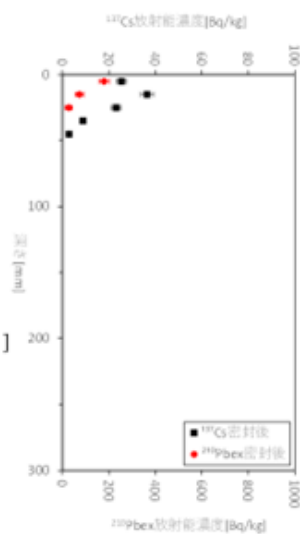
図 15-2. つづき ^{137}Cs および過剰 ^{210}Pb の土壌柱中での鉛直プロファイル

愛知医科大学

KG-H-03-10-B



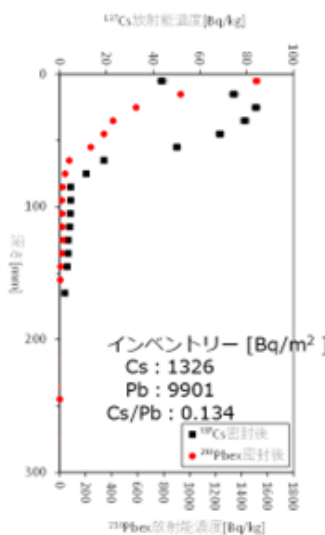
KG-H-10-08-A



¹³⁷Cs放射能濃度(x軸上)：最大値が100Bq/kg以上のため、軸の範囲を調整した。
²¹⁰Pbex放射能濃度(x軸下)：最大値が1000Bq/kg以上のため、軸の範囲を調整した。

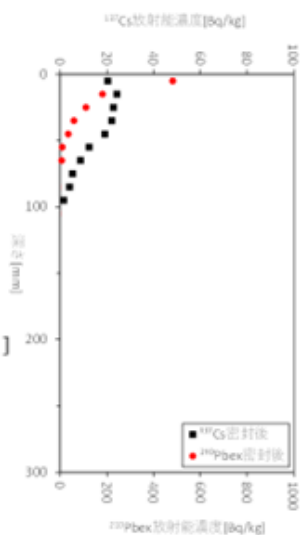
いであ (1/3)

KG-H-01-07-A

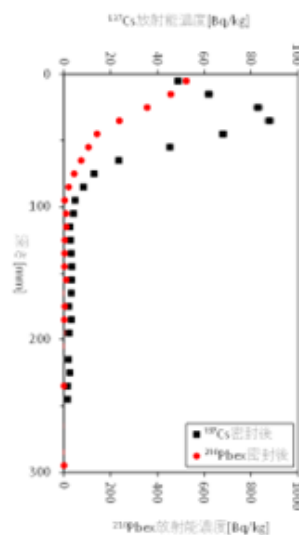


²¹⁰Pbex放射能濃度(x軸下)：最大値が1000Bq/kg以上のため、軸の範囲を調整した。

KG-H-02-01-B



KG-H-03-01-B



KG-H-04-11-A

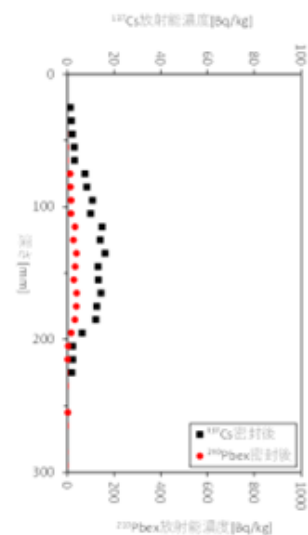
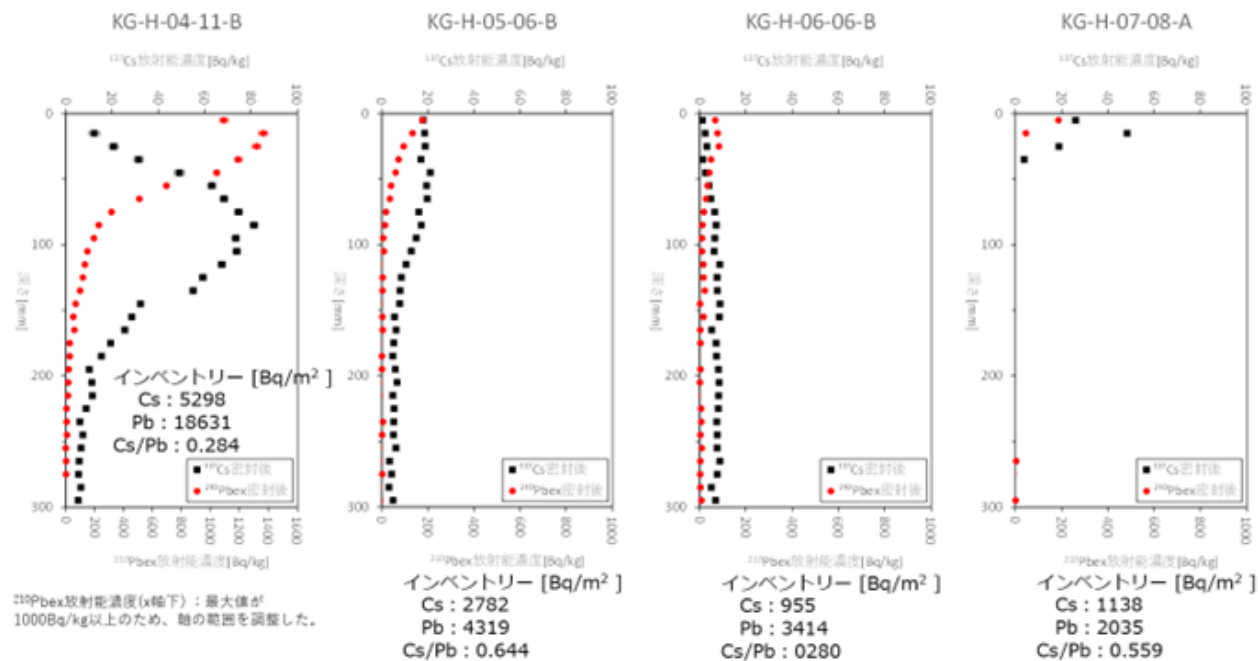


図 15-3. つづき ¹³⁷Cs および過剰 ²¹⁰Pb の土壌柱中での鉛直プロファイル

いであ (2/3)



いであ (3/3)

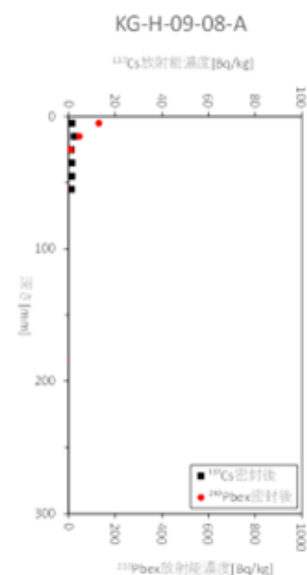
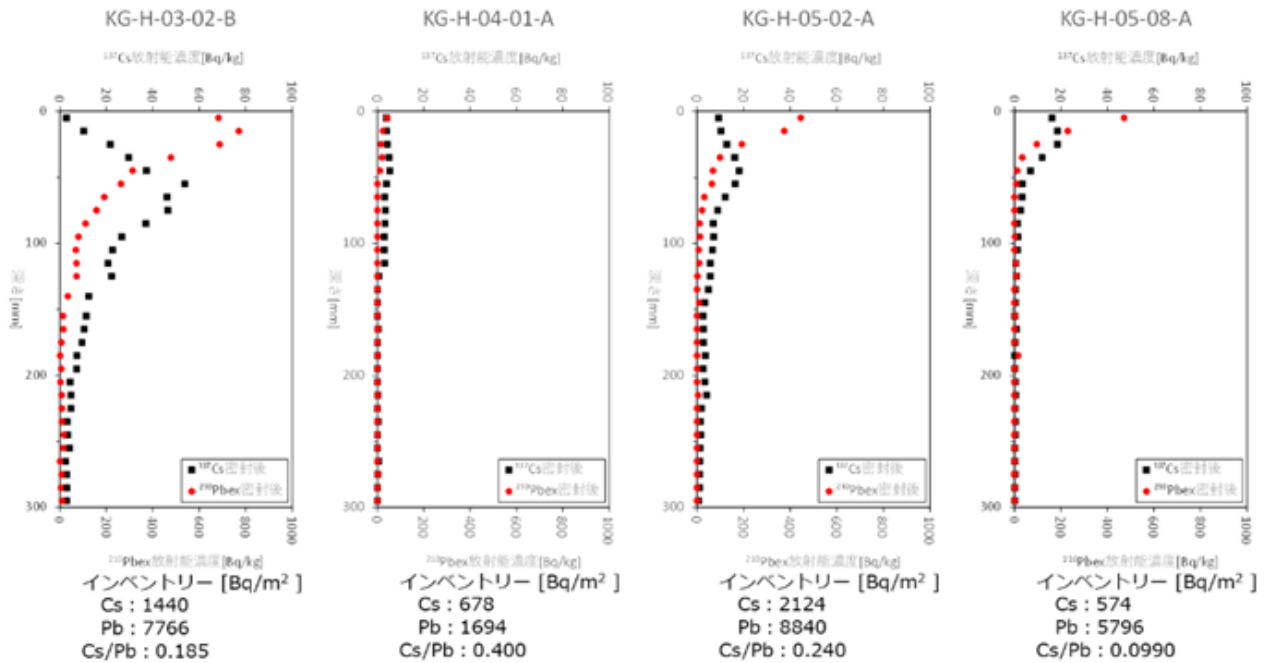


図 15-4. つづき ^{137}Cs および過剰 ^{210}Pb の土壌柱中での鉛直プロファイル

鹿児島大学 (1/2)



鹿児島大学 (2/2)

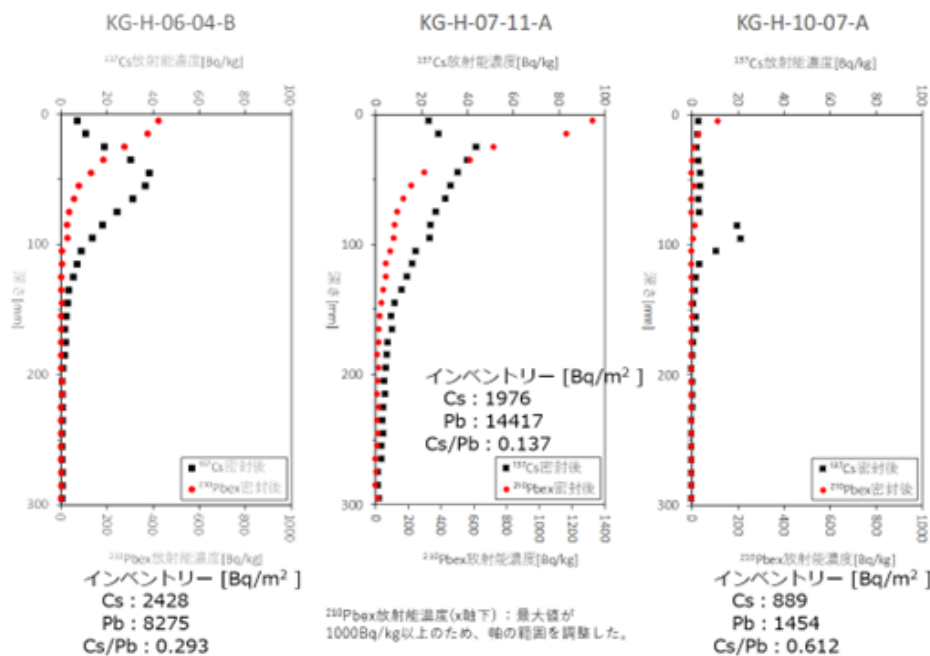


図 15-5. つづき ^{137}Cs および過剰 ^{210}Pb の土壌柱中での鉛直プロファイル

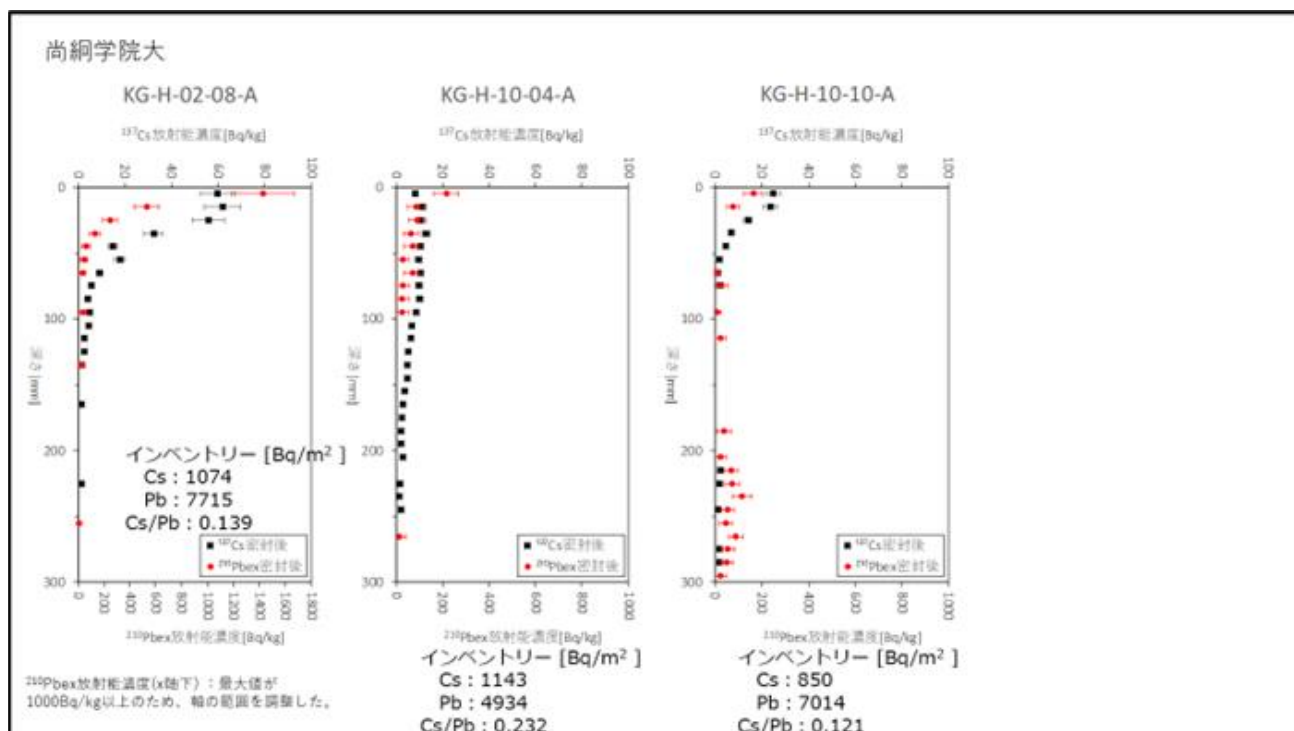
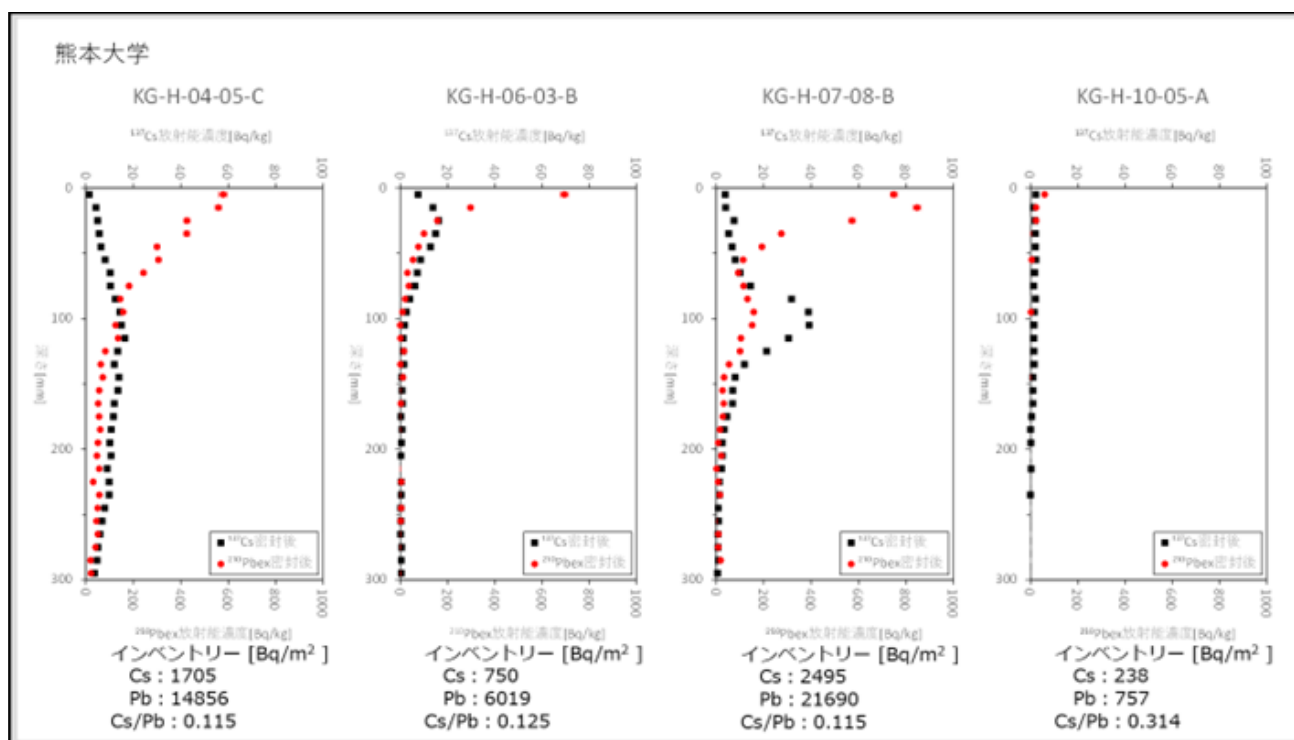
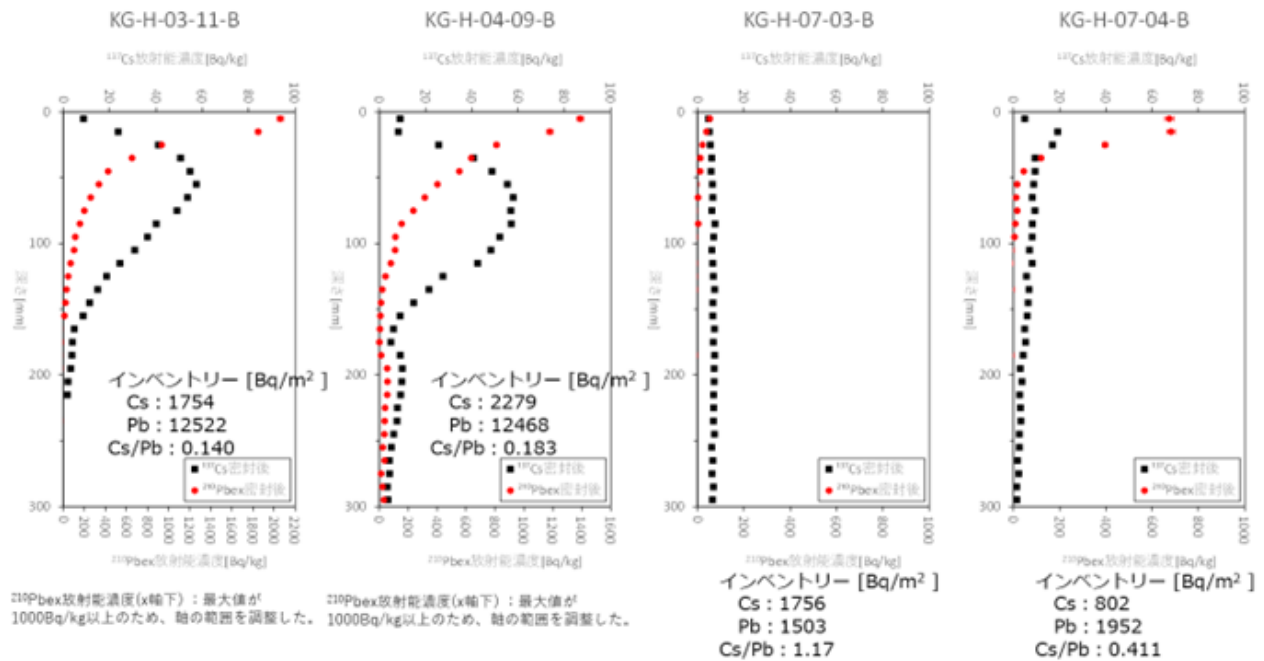


図 15-6. つづき ¹³⁷Cs および過剰 ²¹⁰Pb の土壌柱中での鉛直プロファイル

東京海洋大学



東京大学(1/2)

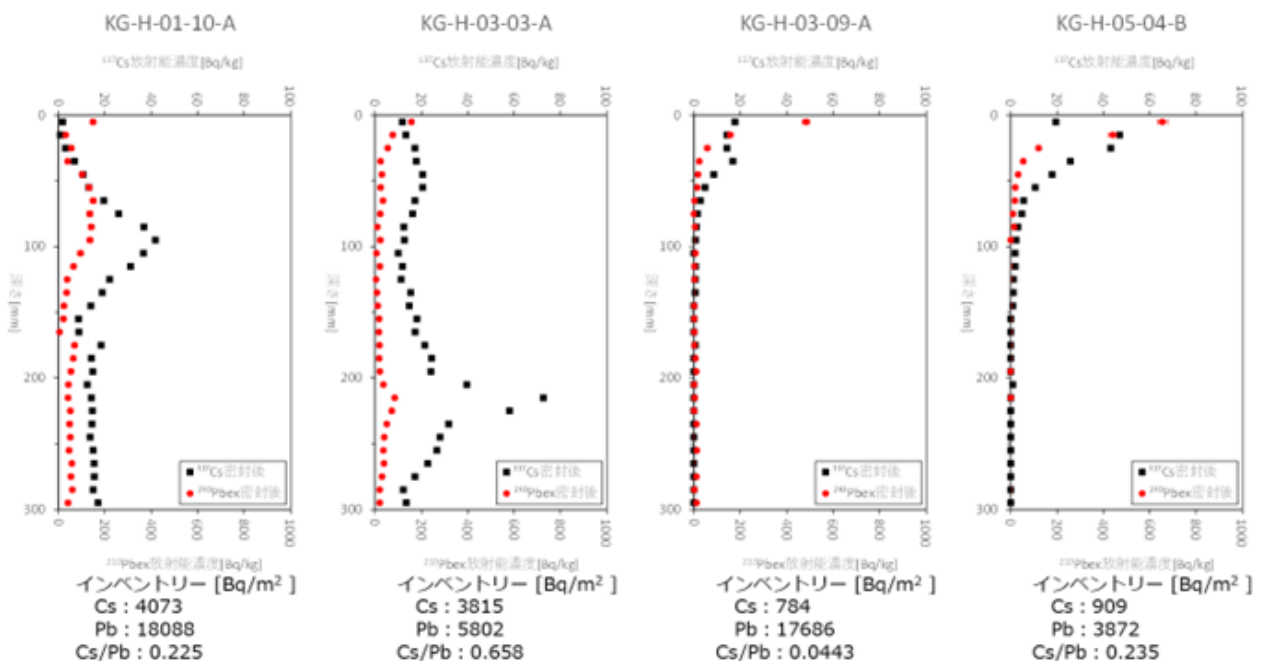
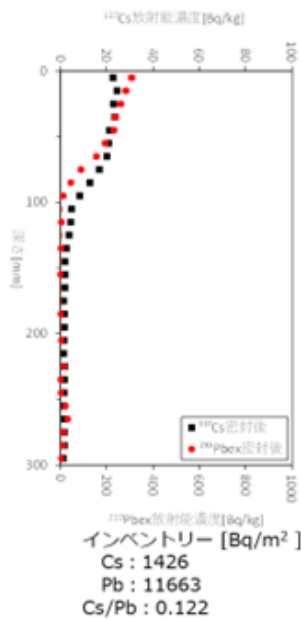


図 15-7. つづき ^{137}Cs および過剰 ^{210}Pb の土壌柱中での鉛直プロファイル

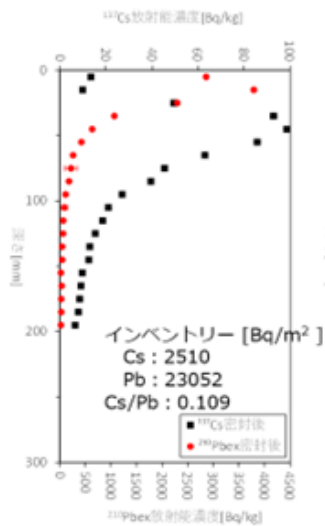
東京大学(2/2)

KG-H-09-09-A



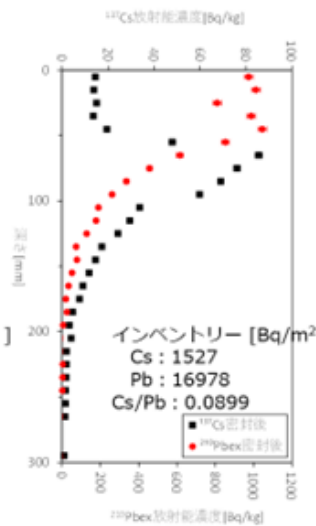
長崎大学

KG-H-04-10-B



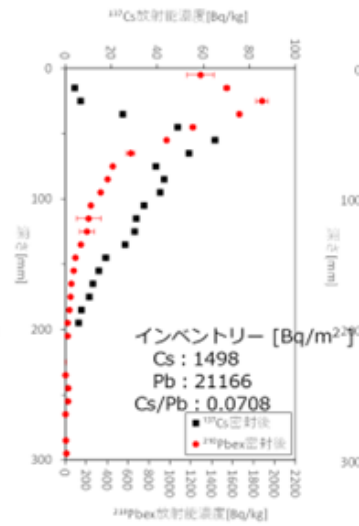
・ ^{210}Pb 放射能濃度(x軸下) : 最大値が
1000Bq/kg以上のため、軸の範囲を調整した。
・試料230-240~270-280は未測定である。

KG-H-05-07-B



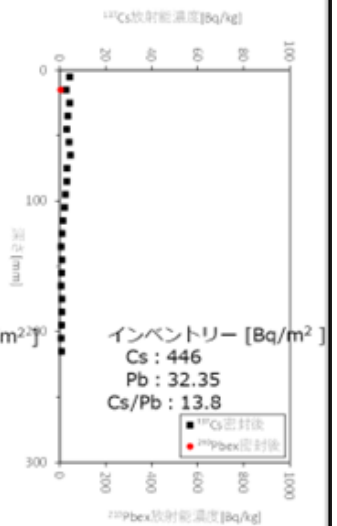
・ ^{210}Pb 放射能濃度(x軸下) : 最大値が
1000Bq/kg以上のため、軸の範囲を調整した。

KG-H-06-08-B



・ ^{210}Pb 放射能濃度(x軸下) : 最大値が
1000Bq/kg以上のため、軸の範囲を調整した。
・試料170-180,180-190はCs-137のみ未測定である。
・試料190-200~290-300は未測定である。

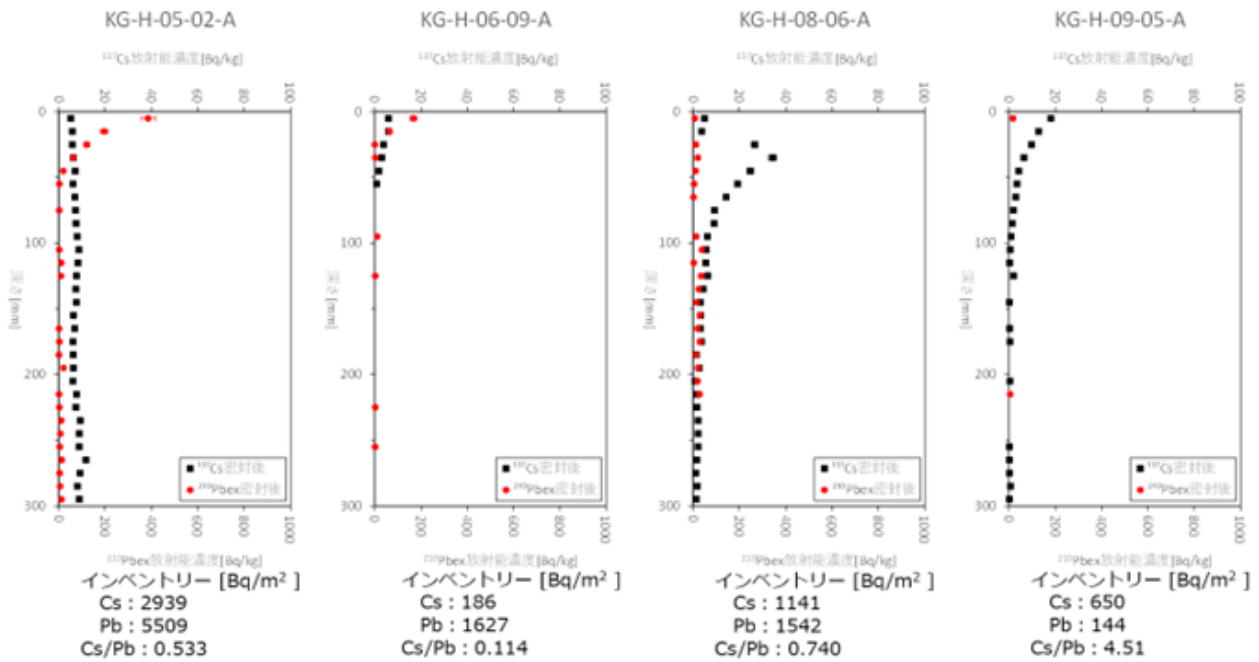
KG-H-09-11-A



試料230-240~270-280は未測定である。

図 15-8. つづき ^{137}Cs および過剰 ^{210}Pb の土壌柱中での鉛直プロファイル

大阪大学 (1/2)



大阪大学 (2/2)

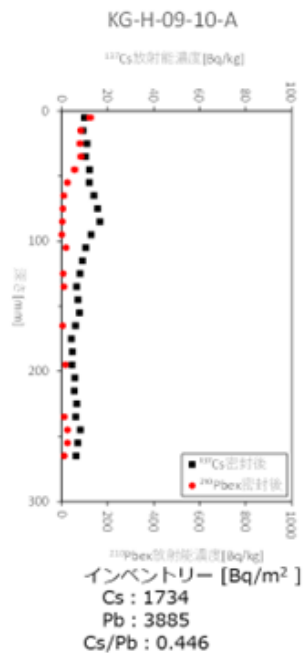
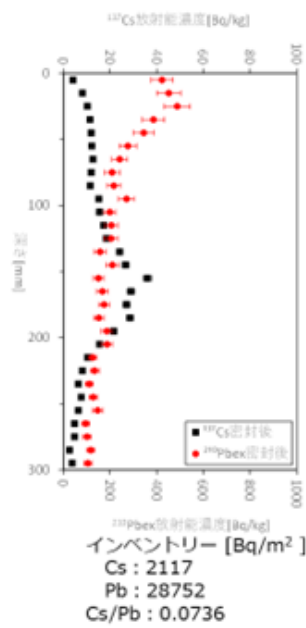


図 15-9. つづき ^{137}Cs および過剰 ^{210}Pb の土壌柱中での鉛直プロファイル

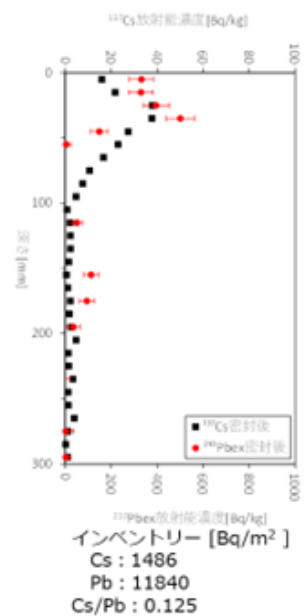
徳島大学

KG-H-04-07-B



明治大学

KG-H-06-05-B



KG-H-10-06-A

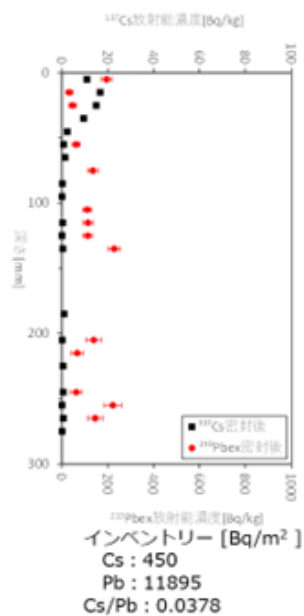
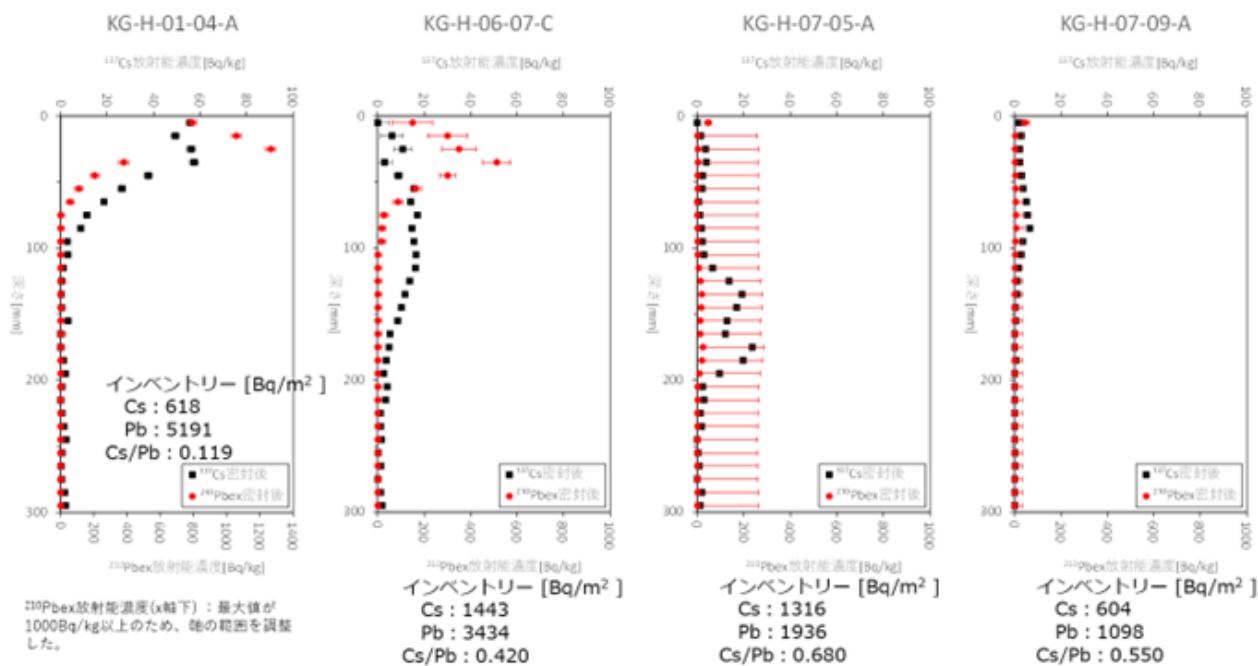


図 15-10. つづき ^{137}Cs および過剰 ^{210}Pb の土壌柱中での鉛直プロファイル

近畿大学



広島大学 (1/2)

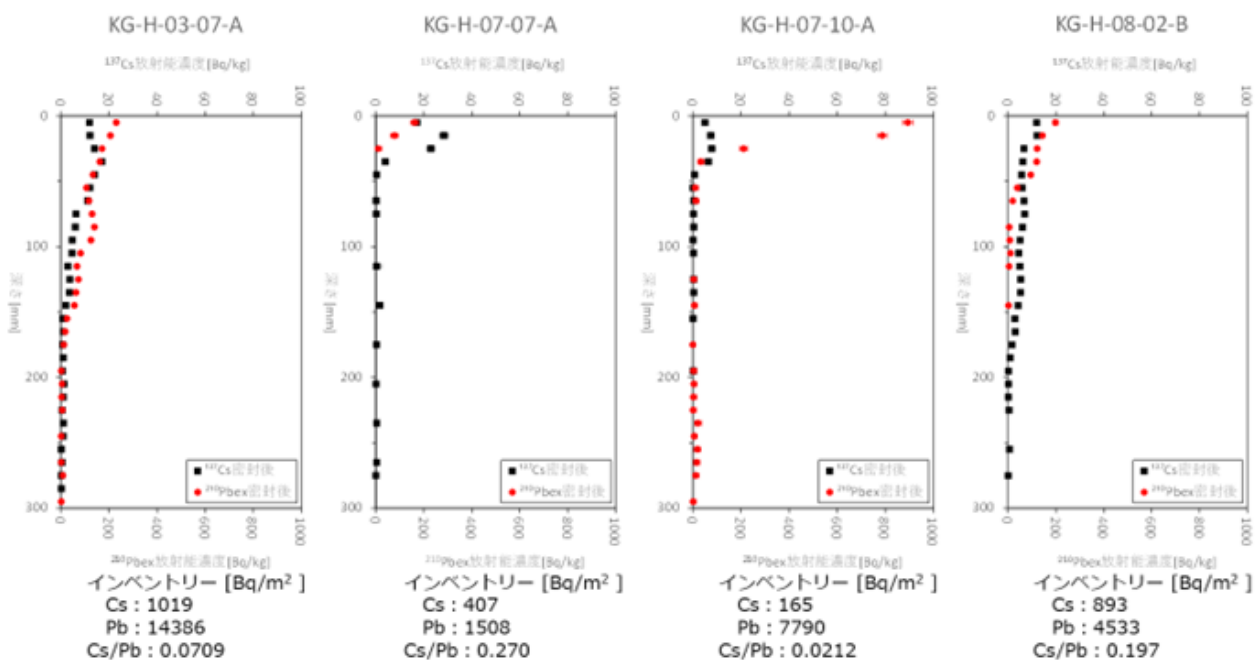
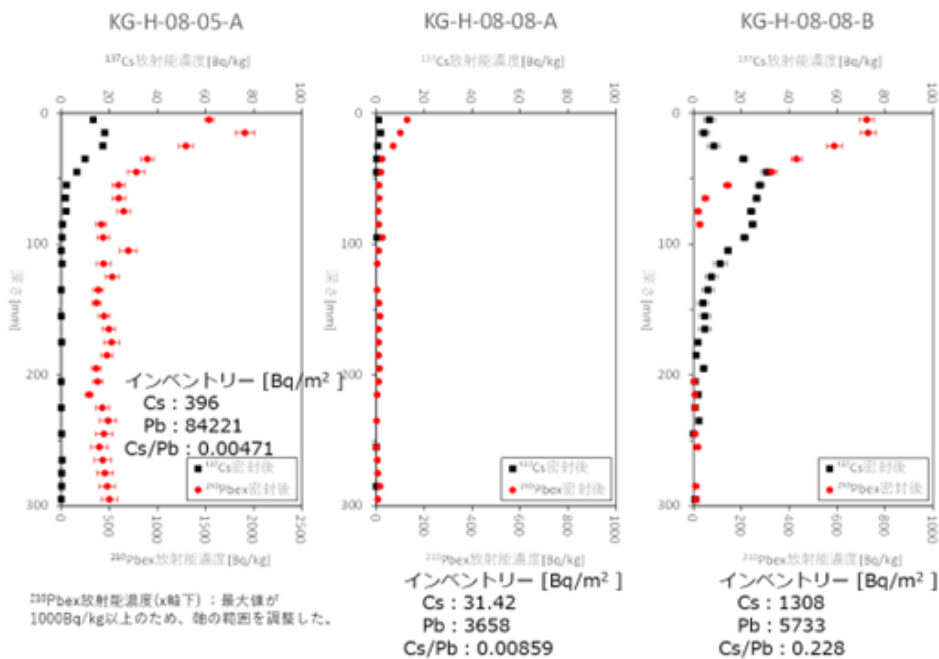


図 15-11. つづき ^{137}Cs および過剰 ^{210}Pb の土壌柱中での鉛直プロファイル

広島大学 (2/2)



大阪産業大学

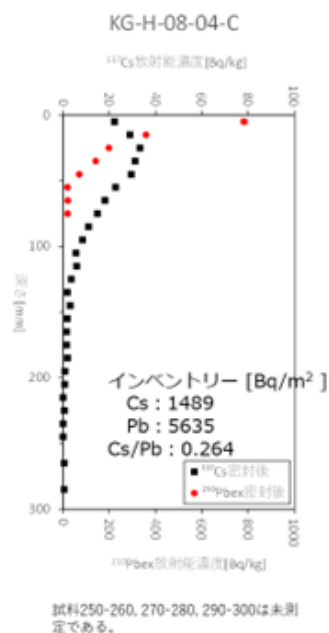
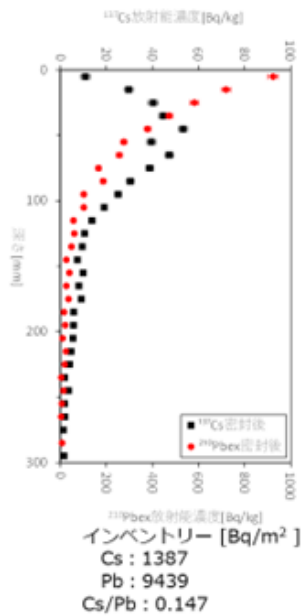


図 15-12. つづき ^{137}Cs および過剰 ^{210}Pb の土壌柱中での鉛直プロファイル

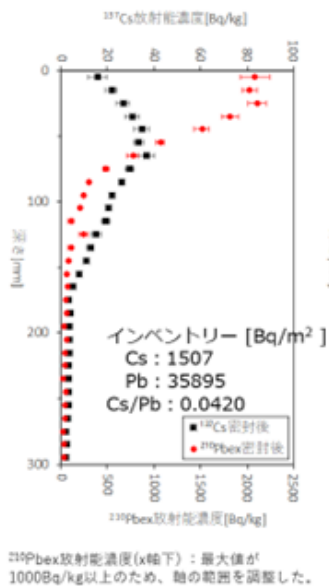
高知大学

KG-H-03-07-B



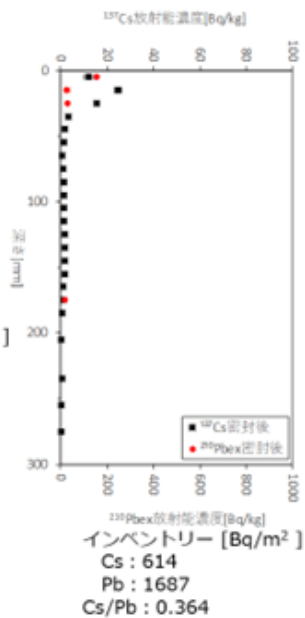
核融合研(1/2)

KG-H-04-08-B

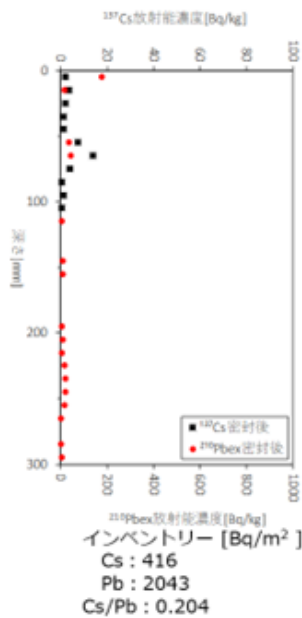


^{210}Pb 放射能濃度(x軸下) : 最大値が1000Bq/kg以上のため、軸の範囲を調整した。

KG-H-05-07-A



KG-H-05-09-A



KG-H-06-03-A

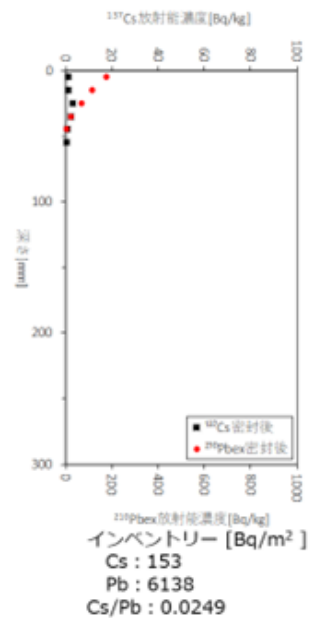
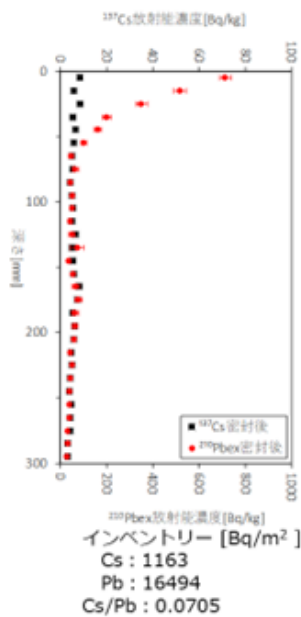


図 15-14. つづき ^{137}Cs および過剰 ^{210}Pb の土壌柱中での鉛直プロファイル

核融合研(2/2)

KG-H-06-07-D



大阪公立大

KG-H-03-04-B

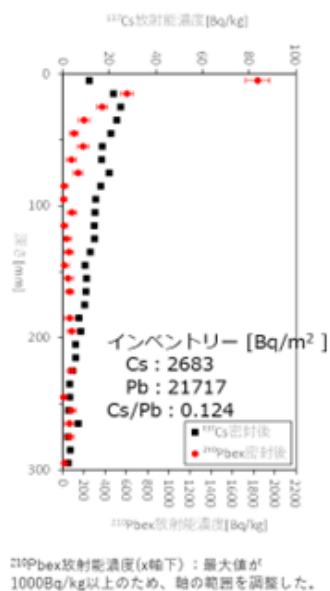
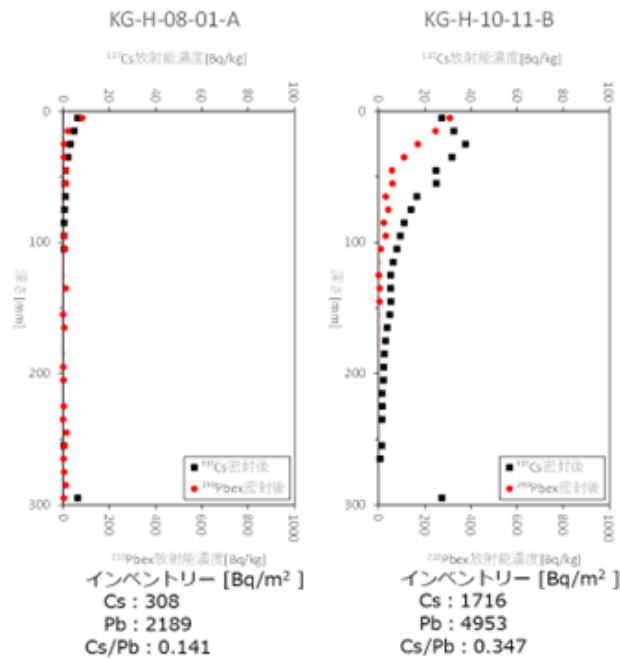


図 15-15. つづき ^{137}Cs および過剰 ^{210}Pb の土壌柱中での鉛直プロファイル

福島大学



九州大学

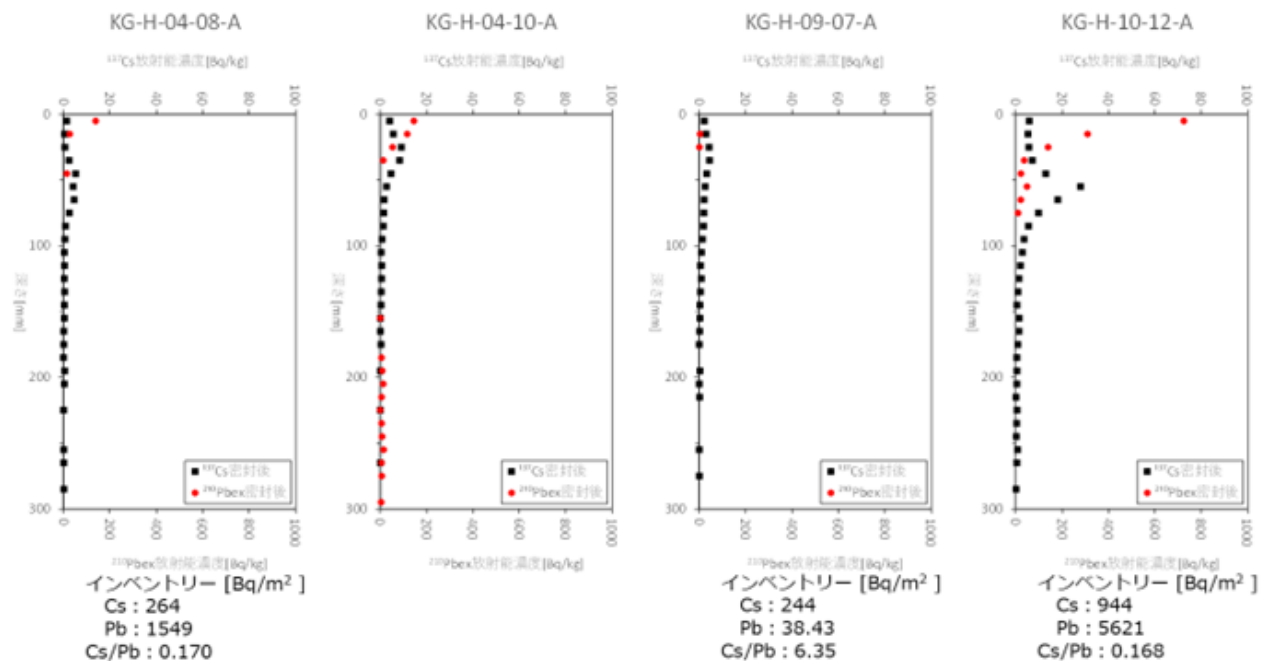
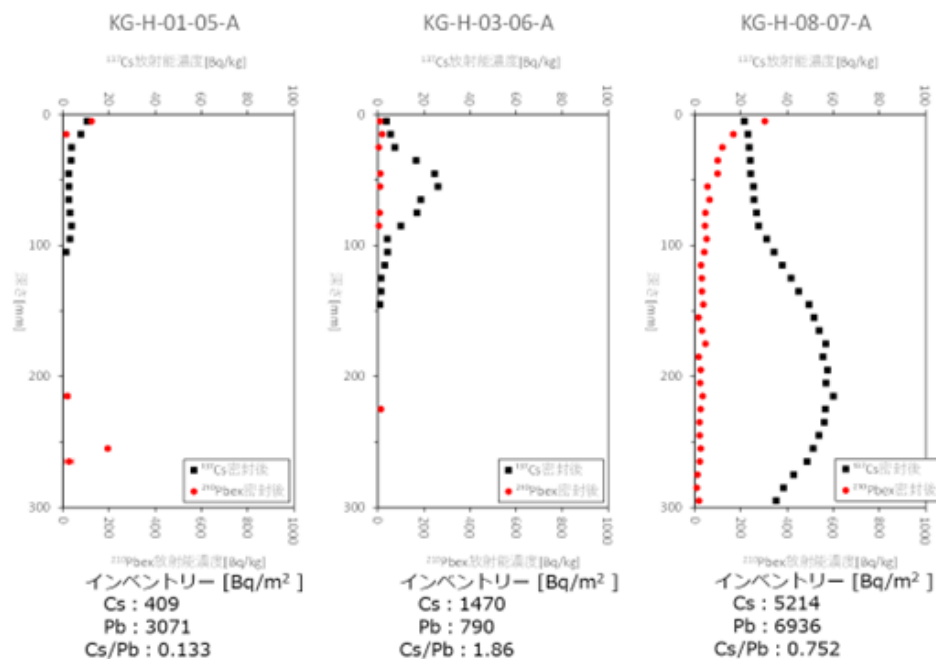


図 15-16. つづき ¹³⁷Cs および過剰 ²¹⁰Pb の土壌柱中での鉛直プロファイル

環境科学研究所



日本空調サービス (1/3)

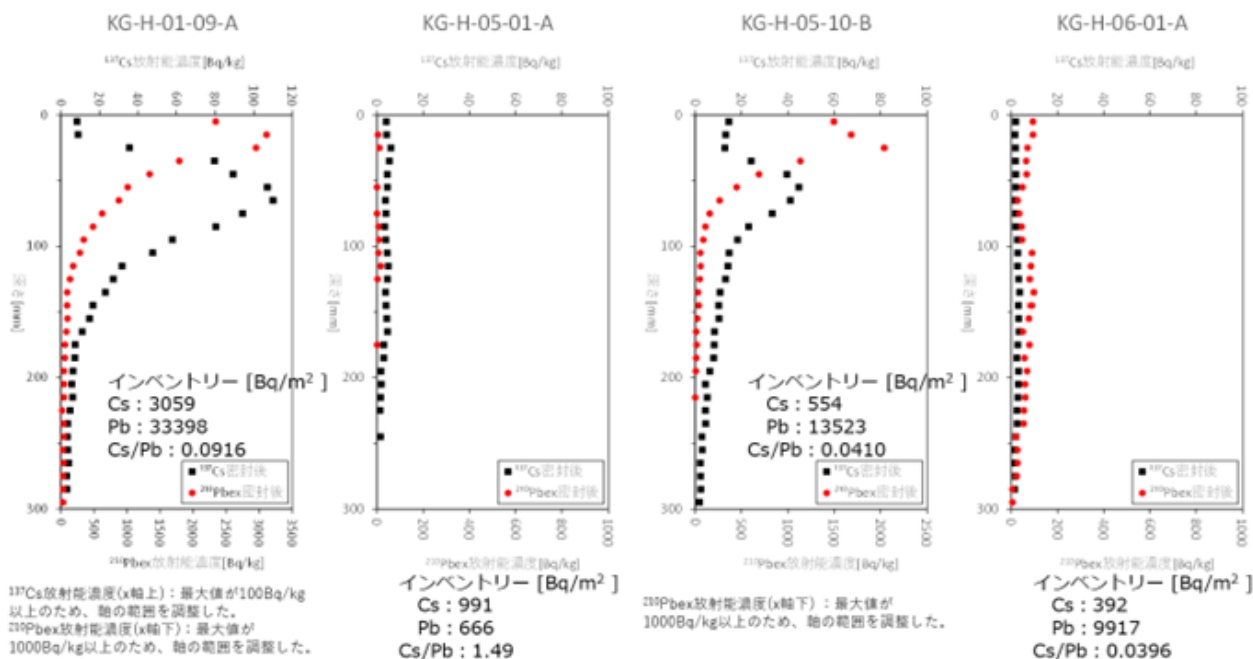
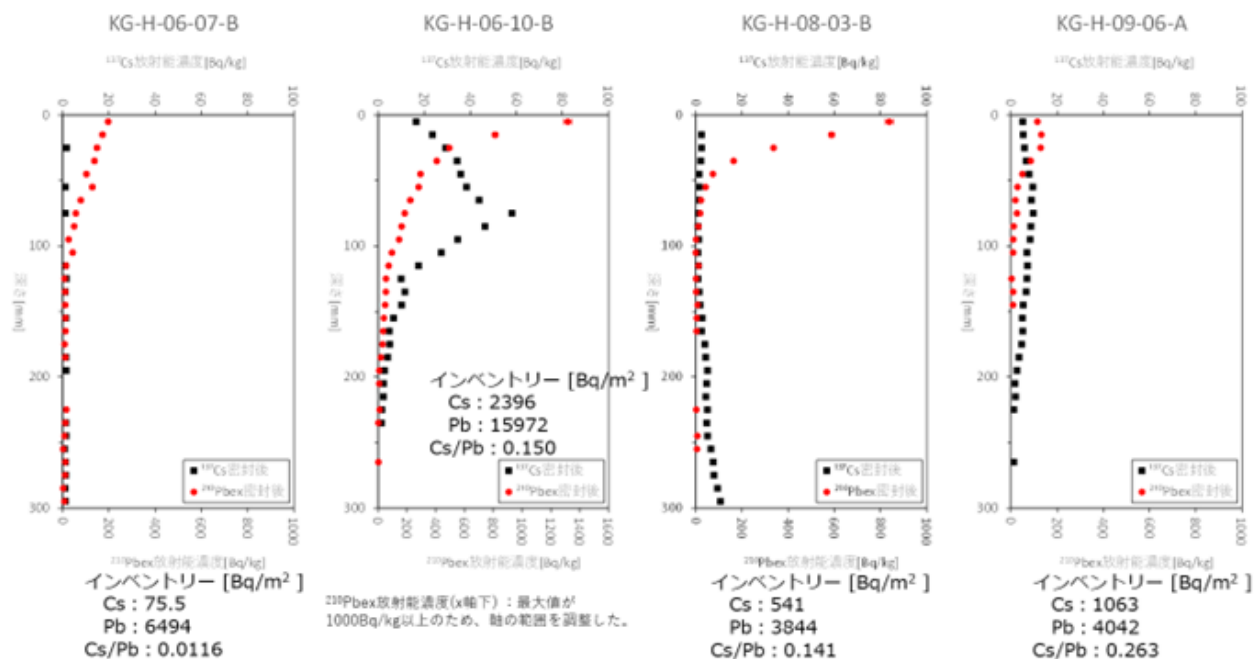


図 15-17. つづき ^{137}Cs および過剰 ^{210}Pb の土壌柱中での鉛直プロファイル

日本空調サービス (2/3)



日本空調サービス (3/3)

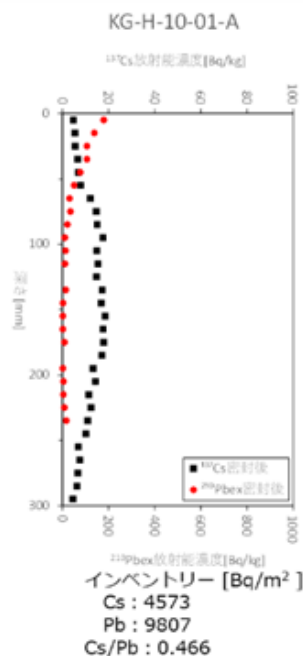
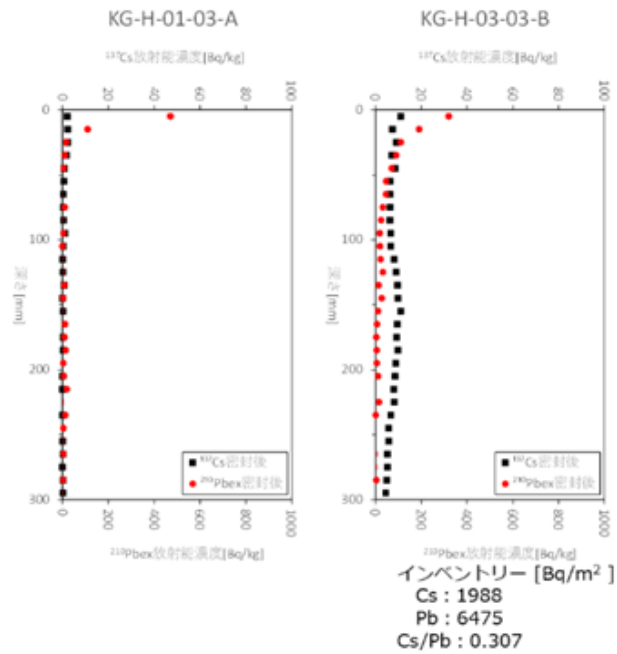


図 15-18. つづき ^{137}Cs および過剰 ^{210}Pb の土壌柱中での鉛直プロファイル

日本分析センター



弘前大学

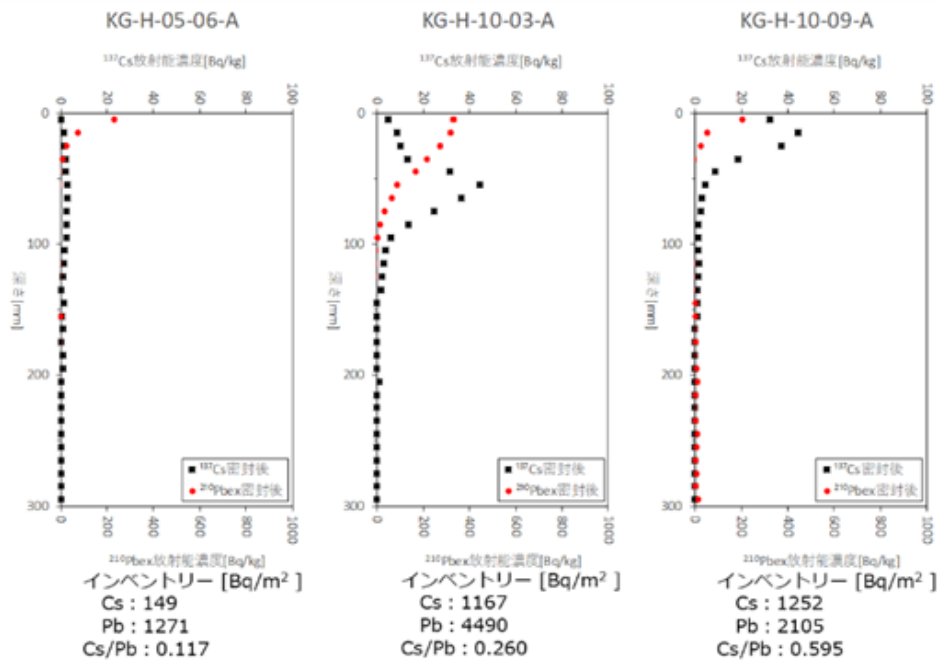


図 15-19. つづき ^{137}Cs および過剰 ^{210}Pb の土壌柱中での鉛直プロファイル

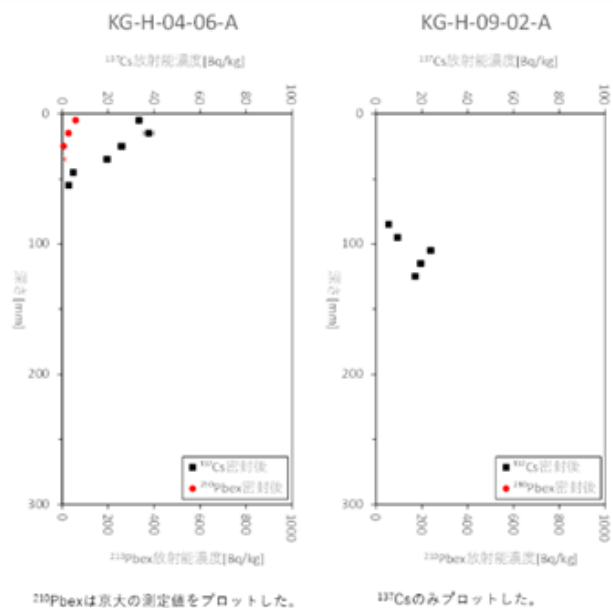


図 15-20. つづき ^{137}Cs および過剰 ^{210}Pb の土壌柱中での鉛直プロファイル

○放射性降下物の一種としての放射性微粒子

2011年3月11日に発生した東日本大震災が引き金となった東京電力福島第一原子力発電所の事故では、大量の放射性物質が環境中に放出された。これらの放射性物質は、従来、可溶性のエアロゾル粒子として環境中を移行すると考えられていた。しかし、Adachi et al. (2013) [1]によりケイ酸ガラス質で放射性セシウム ($^{134,137}\text{Cs}$) を高濃度で含む不溶性の放射性微粒子 (CsMP, Cs-bearing microparticle) が発見され、その後多くの研究者によりその物理的、化学的性状の解明が進められた [2]。この不溶性微粒子は炉内の核分裂生成物や核燃料物質および周囲の原子炉構成材を原料として高温環境下で生成したものと考えられ、その生成過程の違いによって数 μm サイズで球状の Type-A と数百 μm ～数 mm サイズで不定形の Type-B の少なくとも2種類が存在する。Type-A 粒子は高温環境下で揮発、凝集した核分裂生成物や燃料成分、ケイ酸蒸気が、自由沈降の過程で冷却され固化し球状となったと考えられ、Type-B 粒子は高温の燃料デブリ (熔融状態; メルト) などから直接生成したものと考えられている。我々は類似性状の不溶性微粒子が生成する過程が、原爆投下後の高温の火球中や熱線を受けた地表の物質から生成したのではないかと考えた。この推測を裏付けるような報告もあり、Wannier et al. (2019) [3]は広島湾の元宇品の海砂の中から、前述の CsMP に似た形状の不溶性粒子が見つかったとしている。また、CsMP は事故後10年が経過しても土壌表面などの環境中で採取されており、可溶性エアロゾルとは異なり生成時の物理的、化学的性状を残したまま環境中に長期間留まる [4～7]。原爆により CsMP 類似の粒子が生成していれば、現在も環境中に存在していると期待される。また、黒い雨には爆発後に発生した大規模な街区火災により生成したすすが含まれていたとされており、同時に微粒炭粒子 (約20 μm 以上) も放出されたと推測される。特に後者は環境中に長期間留まることが知られ、さらに Cs などのように溶存して地下へは浸透しにくいことから [8]、原爆降下物の一つとして環境中に残留している可能性がある。このほか、「黒い雨」資料を広島平和記念館より入手し、その正体に迫る作業も実施した。特に、「黒い雨」が特異的に含んでいた何らかの指標物質が見いだされれば、放射性物質を含んだ降雨が発生した領域、および放射性物質の地表への沈着が生じた領域の推定に寄与できる。本調査研究では、採取した土壌試料中から U または Pu、FP、放射化生成物 (AP) を含んだ粒子や、熱線により生成した粒子、火災由来の微粒炭粒子を抽出し、それらの存在量を定量するための非破壊での分析方法を検討した。

参考文献：

- [1] Adachi et al., “Emission of spherical cesium-bearing particles from an early stage of the Fukushima nuclear accident” Scientific Reports, 3, 2554 (2013).
- [2] Igarashi et al., “A review of Cs-bearing microparticles in the environment emitted by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident”, J. Environ. Radioact., 205–206(March), 101–118 (2019).
- [3] Wannier et al., “Fallout melt debris and aerodynamically-shaped glasses in beach sands of Hiroshima Bay, Japan” Anthropocene, 25, 100196 (2019).
- [4] Suetake et al., “Dissolution of radioactive, cesium-rich microparticles released from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in simulated lung fluid, pure-water, and seawater” Chemosphere, 233, 633-644 (2019).
- [5] Okumura et al., “Loss of radioactivity in radiocesium-bearing microparticles emitted from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant by heating” Scientific Reports, 8:9707 (2018).

- [6] Okumura et al., “Finding Radiocesium-bearing Microparticles More Minute Than Previously Reported, Emitted by the Fukushima Nuclear Accident” Chemistry Letters, 48, 1336-1338 (2019).
 [7] Okumura et al., “Dissolution behaviour of radiocaesium-bearing microparticles released from the Fukushima nuclear plant” Scientific Reports, 9:3520, (2019).
 [8] 井上淳, 吉川周作 “琵琶湖周辺に分布する黒色土中の黒色植物片について -黒色土中の微粒炭研究の新たな取り組み-” 第四紀研究(The Quaternary Research), 44(5), 289-296 (2005).

担当者： 京都大学複合原子力科学研究所： 八島 浩、福谷 哲、高宮幸一、向井 中、
 足立友紀、東江直樹、五十嵐康人
 広島大学： 遠藤 暁
 長岡技術科学大学： 栗原雄一
 大阪公立大学： 井上 淳

○元宇品海岸海砂から抽出した球状熔融粒子の ICP-MS 分析

2019 年に Wannier et al. [1]が発表した論文では，広島県広島湾の砂に高温起源（約 1800℃以上）の熔融粒子が約 3000 トン存在すると報告されており，起源は 1945 年 8 月 6 日の広島原子爆弾に由来するのが妥当であろうと議論されている.この熔融粒子は，土壌分析で目指していた放射性熔融粒子と同一のものである可能性があり，Wannier et al.の熔融粒子が原子爆弾に由来するものと確認できれば，採取土壌分析に大きく寄与すると期待される．この試料を用いて，Ge 検出器による測定で， ^{137}Cs 濃度，ウラン濃度およびトリウム濃度を定量した．その結果は， ^{137}Cs 濃度は $1.3 \pm 0.5 \text{ mBq g}^{-1}$ と，極微量であり熔融粒子が原爆由来とする

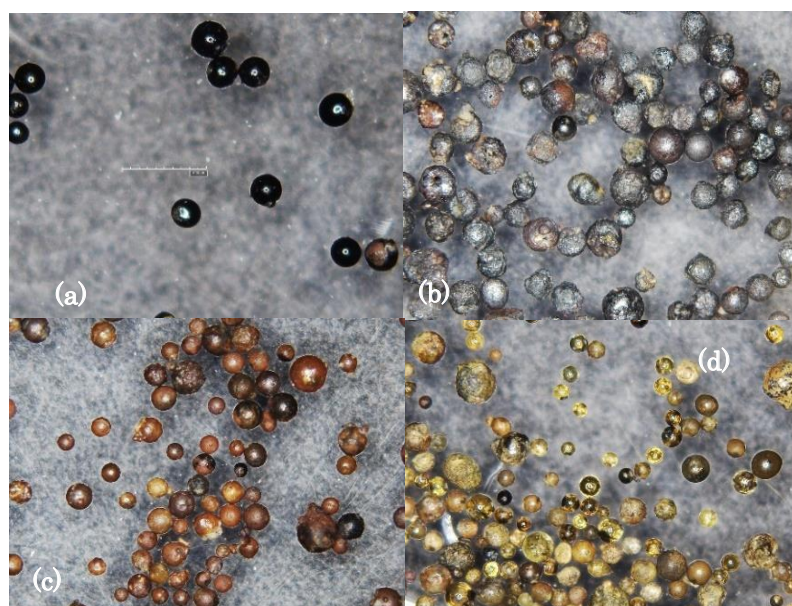


図 16. 広島県の海岸砂から抽出され色分けした球状熔融粒子の光学顕微鏡写真.
 (a) 黒色 (BL), (b) 銀色 (SV), (c) 赤色 (RD), (d) 黄色 (YL)

には濃度が低すぎた．また，ウラン濃度およびトリウム濃度は，それぞれ 8.67 ppm と 20.06 ppm で広島市内の太田川河川敷の濃度と同程度かやや高い値であった．この結果は，球状熔融粒子が市内の土壌起源と考えられる可能性を示していた．そのため，Ge 測定で推定した $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比は， 0.00673 ± 0.00503 と天然の同位体比 (0.00725) と誤差の範囲で矛盾ない値で

あった。これらの結果を考えると、球状熔融粒子は広島原爆由来と結論するには不十分であった（Endo et al., 2023 [2]）。

そこで本年度は異なるアプローチを実施した。広島県元宇品海岸の砂から抽出した球状熔融粒子 5.86 g は、大きく分類して、黒色、銀色、赤色、黄色およびその他色や 2 色以上を呈する粒子などが観察され、このような色の違いは熔融粒子に含まれる元素の違いを反映している可能性があるため、色分けして再抽出を行った（図 16）。およそ 1200 個の熔融粒子を黒色、銀色、赤色、黄色および“others”に分けて数を計数した結果、黒色：30%，銀色：2%，赤色：8%，黄色：4%と見積もられた（図 17）。これらの粒子は、誘導結合プラズマ質量分析法（ICP-MS）を用いて微量元素分析を実施した（結果については、令和 4 年度報告書を参照）。

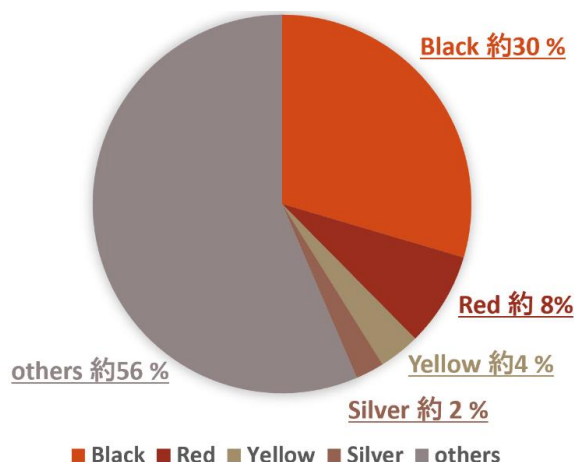


図17. 球状熔融粒子の色分布

参考文献：

- [1] Wannier M.A. M, Urreiztieta M, Wenk H, Stan V. C, Tamura N, Yue B (2019) Fallout melt debris and aerody-namically-shaped glasses in beach sands of Hiroshima Bay, Japan, Anthropocene 25, 100196.
- [2] Endo S, Kajimoto T, Tanaka K, Higuchi H, Fukutani S, Takamiya K, Maeda M, Igarashi Y (2023) Preliminary Analysis of Spherical Iron-rich Particles Extracted from Moto-Ujina Beach Sand as a Possible Tracer for the Hiroshima Black Rain, J Nucl Radiochem Sci, 23, 5-13.

担当者： 広島大学大学院先進理工系研究科： 遠藤 暁、赤時僚伽、梶本 剛
京都大学複合原子力科学研究所： 福谷 哲、高宮幸一、五十嵐康人

○放射化物を含まない不溶性粒子および火災炎由来の物質について

環境中の不溶性粒子としては、原爆由来のもの以外にも宇宙起源の球状粒子（cosmic micro-spherule）[1,2]や花火、熔接由来の微粒子、火山灰などの自然、人工由来の粒子が存在する。また微粒炭粒子に関しては山火事などの大規模な火災の発生により生成する。そこで、気象研究所によって大気圏内核実験が盛んに行われていた時期に捕集された大気降下物試料を分析することで、この様な不溶性粒子がどの程度存在するかを調査した。気象研究所による降下物の捕集には水盤が用いられ、降下物を含んだ水を蒸発・濃縮するなどして固体状にして保存されていたため、試料中には天然のエアロゾル由来の硫酸塩などの多くの塩が含

まれている。そこで、塩などの可溶性物質を純水で溶解し、乾燥後に光学顕微鏡と SEM/EDX による観察・分析を行った。

観察の結果見つかった複数の不溶性粒子の SEM イメージの一例を図 18 に示す。これらの粒子の由来の特定には至っていないが、数 μm 前後の大きさの Fe や Si を含む球状粒子や、熔融粒子と推測される微粒子が発見された。しかし、微粒炭と考えられる粒子や Wannier et al.が発見した数 100 μm を超えるような熔融粒子は発見されなかった。これらの結果から、広島および長崎の土壌粒子について、顕微鏡や SEM/EDX を用いた分析により Wannier et al.の報告した熔融粒子や微粒炭粒子が見つかった場合には、原爆由来降下物である可能性が高いと考えられる。しかし、形状分析や元素分析のみでは由来を確定することは難しいため、これらの粒子の個数濃度の深度プロファイル調査や ^{137}Cs 濃度の深度プロファイルと比較するなどの多面的な調査を行う必要がある。

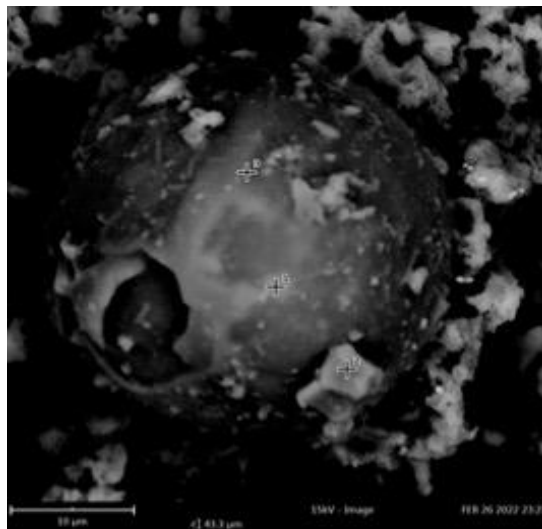


図 18. 不溶性降下物(6306M-01)の SEM 画像

参考文献：

- [1] Fredriksson, K. Cosmic Spherules in Deep-Sea Sediments. Nature 177, 32–33 (1956).
- [2] Parashar et al., “Investigations on a Large Collection of Cosmic Dust From the Central Indian Ocean”Earth, Moon and Planets, 107(2–4), 197–217 (2010).

担当者： 京都大学複合原子力科学研究所： 高宮幸一、東江直樹

○ウランを含む原爆降下物粒子

土壌試料中に含まれる ^{137}Cs の起源は、原爆降下物以外に、世界中で行われた大気圏内核実験の降下物も含まれる。また、土壌試料中での ^{137}Cs の化学・物理形態は、どちらの由来でもほぼ同一であると推測されるため、その起源識別は非常に困難である。そこで、広島に

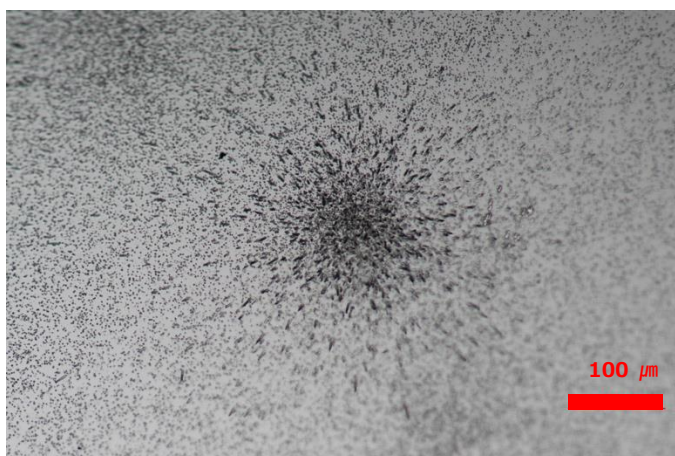


図 19. 観測された飛跡のクラスターの例 U を含む不溶性原爆降下物粒子と考えられる

のみ存在しうる原爆降下物としてウラン（U、爆弾の中心構成材料であった高濃縮ウラン（ ^{235}U の割合が 80%以上））を含んだ不溶性粒子を指標として利用できないかと考えた。東京電力福島第一原子力発電所事故においては、放射性 Cs や U を含んだ不溶性微粒子が多数見つかり、原爆降下物にも類似の不溶性粒子が含まれると考えられる。これらの粒子は数十 km を越えて拡散するが、後述のフィッシュントラック（FT）法を適用した調査により日本国内の大気圏核実験に由来する降下物中に U を含んだ粒子が存在する可能性が極めて低いと結論づけられた。したがって、広島県の土壌調査において U を含んだ粒子が発見さ

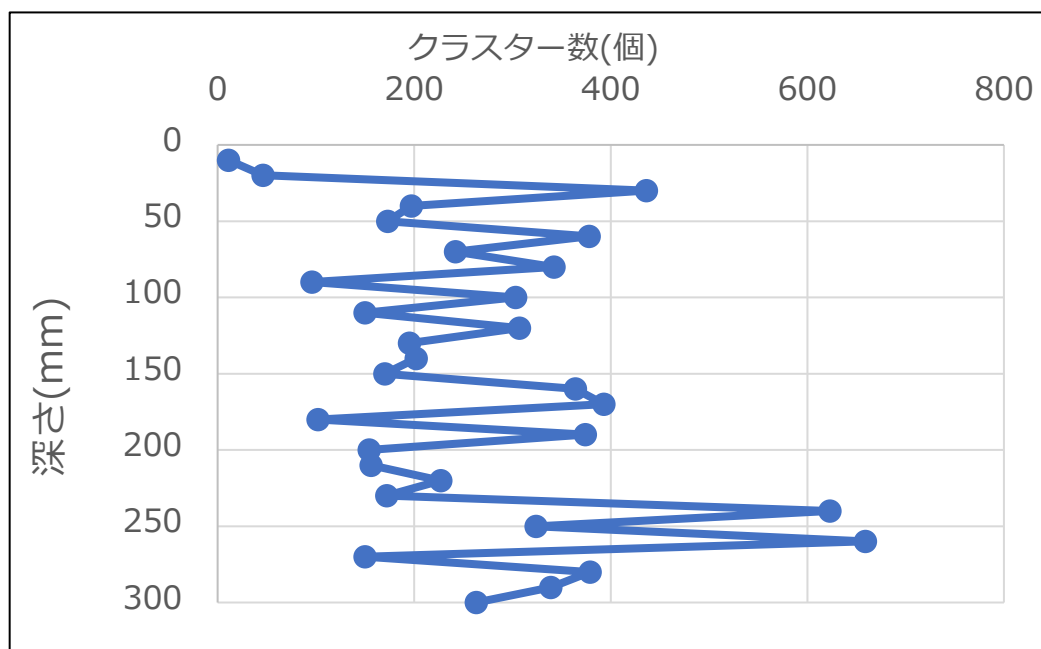


図 20. U を含む不溶性の原爆降下物粒子の深度ごとのクラスターの個数分布

れた場合、核実験由来ではなく原爆降下物である可能性が高いと考えられ、原爆降下物の分布を知る上で重要な情報となる。

そこで、重液分離によって 3.0 g/cm^3 以上の比重をもつ粒子を分離してトラック検出器に密着させ、研究用原子炉（KUR: Kyoto University Research Reactor）を用いて熱中性子を照射した。 ^{235}U が中性子を捕獲して核分裂した際に、密着したトラック検出器上に核分裂片は飛跡を残す。飛跡を試薬浸漬により拡大し、光学顕微鏡で観察した。U 含有粒子が存在した場合、その粒子を中心として放射状に飛跡が生じると期待されるため、このような飛跡の集合体（クラスター）を計数することにより U 含有粒子の個数濃度を見積もった。このように FT 法を用いて土壌試料中の U 含有粒子を計数する手法を確立した。

広島原爆の爆心地から西方の黒い雨が降ったとされる地点（H-05-02）で採取した土壌試料に対して分析を行った結果、図 19 に示すような飛跡のクラスターが多数観察されることがわかった。前述のとおりこのようなクラスター状の飛跡は U 含有粒子の存在を示しており、原爆投下後の 1960 年以降の国内での降下物試料に対する実験では見つからない。そのため、この粒子の由来は大気圏内核実験ではないと言える。図 19 のようなクラスターの個数を土壌試料ごとに計数して得られた、採取深度との相関（深度プロファイル）を図 20 に示す。

図 20 より、U 粒子の存在を示すクラスター数は、土壌表面では 100 個未満と少なく、深度が 30 mm の試料で 400 個と多くなり 150 mm 付近まで深度とともに減少するような傾向がみられ、150 mm 以深では増加するような傾向となり、250 mm 付近で最大値となった。土壌中の ^{137}Cs の濃度は表層で少なく 50~100 mm 付近でピークとなり、その後深度とともに減少し 200-250 mm 付近以降は増減が見られなくなり、U 粒子と ^{137}Cs とでは挙動が異なることがわかる。土壌中では ^{137}Cs はイオンとして存在し、土壌粒子の表面やフレイドエッジと呼ばれる鉱物の間隙に吸着されている。したがって、深度プロファイルが ^{137}Cs のようなイオンとして存在している物質と異なることは、今回の分析でクラスターとして観測された U が粒子状の固体である可能性をより確かにするものである。一方で、広島市の平均的な土壌では約 3 ppm 程度の天然ウランが含まれ、土壌中にも ^{235}U は微量に含まれる。そのため、原爆降下物の影響が小さかったと考えられる東広島市（H-10-03）で採取した土壌試料に対しても同様の分析を行った。その結果、クラスターの個数は最大で数十個程度であったため、H-05-02 の土壌試料で観察されたクラスターのほとんどが原爆由来の U 粒子であると考えられる。

原爆由来の U 粒子の探索法として FT 法が有用であることを示したが、粒子としての性状やその由来を明らかにするためにはクラスターを生成した粒子を SEM/EDX 等を用いて外観観察、元素分析を行う必要がある。また、多くの粒子に対して分析を行うことで原爆の爆裂後における U 粒子の生成過程を推測することができれば、原爆の火球中の温度や存在する元素の濃度分布等の時系列変化の推測につながり、「黒い雨」という事象が発生したプロセスが解明されることが期待される。

担当者： 京都大学複合原子力科学研究所： 高宮幸一、東江直樹

○街区火災由来の微粒炭粒子

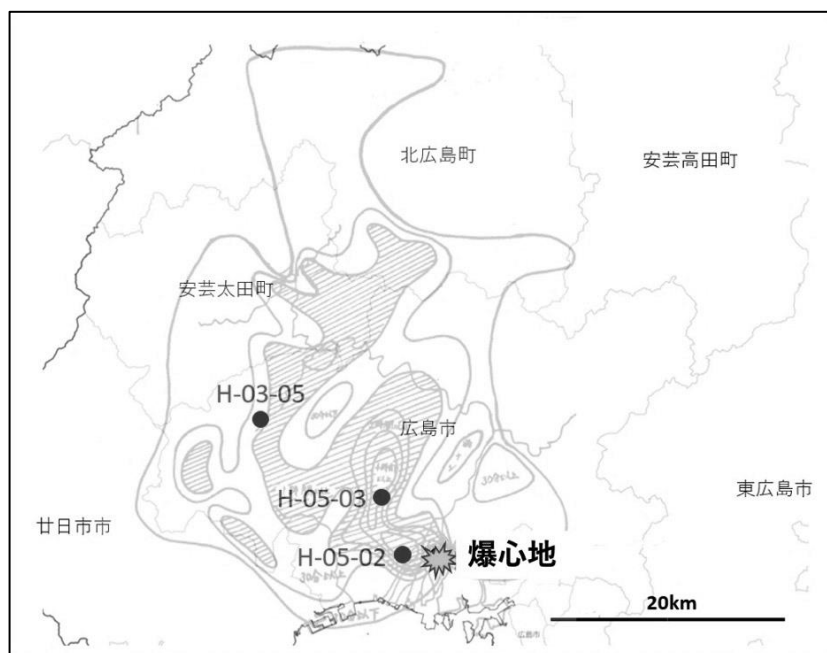


図 21. 微粒炭粒子分析試料地点（国土地理院地理院地図に増田, 1989 を重ね合わせて地点を加筆）

広島県の爆心地周辺の H-03-05, H-05-02, H-05-03 の 3 地点（図 21）から採取された土壌の柱状試料深度 0～30 cm について、炭素微粒子のうち植物質起源であるミクロンサイズの微粒炭粒子（図 22）を抽出し含有量を測定した。微粒炭粒子の抽出と観察は堆積物に用いられ

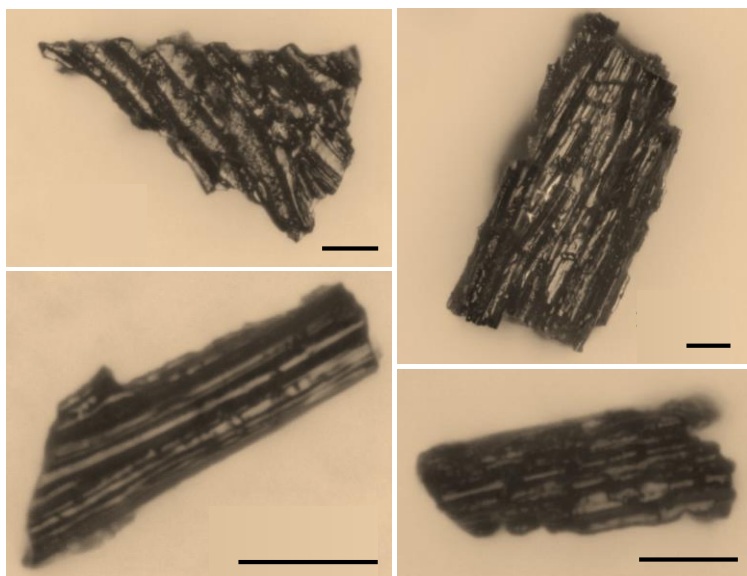


図 22. 土壌中から抽出した微粒炭粒子（スケールバーは 20 μm ）

ている手法（Inoue, et al., 2018 [1]）を参考に行った。20 μm 以上の微粒炭粒子の個数を計数し、重量単位あたりの微粒炭粒子数を微粒炭含有量とした。微粒炭含有量の鉛直プロファイルを各点の ^{137}Cs 放射能濃度とともに図 23 に示す。分析した 3 地点は、黒い雨降雨推定域（増田雨域 [2]）内に位置する（図 21）。H-05-02、H-05-03、では、 ^{137}Cs 放射能濃度とともに

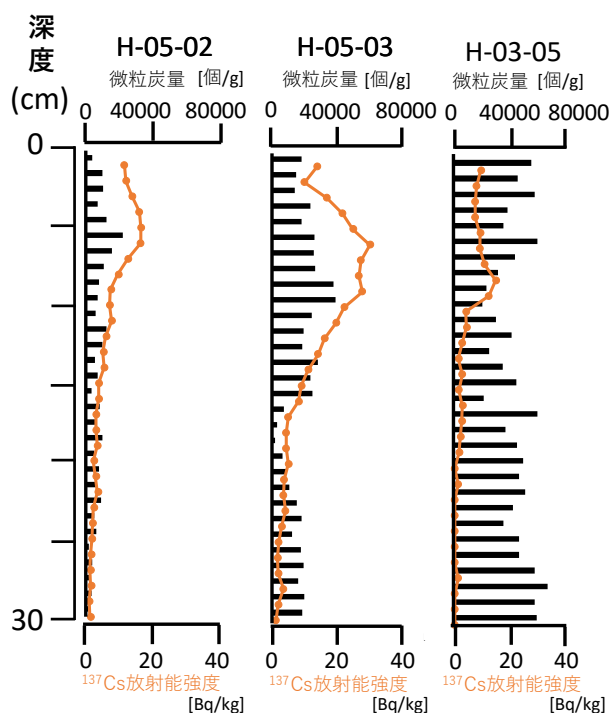


図 23. 3 地点の微粒炭量（個数濃度）と ^{137}Cs 放射能濃度の鉛直プロファイル

に微粒炭含有量のピークが深度 50～100 mm に認められた。一方、黒い雨降雨域内 1 地点では、 ^{137}Cs 放射能濃度と微粒炭含有量との間に明瞭な関係は認められなかった。H-05-02、H-05-03 は、森林下で採取されたもので、一方、H-03-05 は裸地で採取されたものである。H-05-02、H-05-03 での表層近くにおける ^{137}Cs 放射能濃度と微粒炭含有量の増加やピークは黒い雨によってもたらされたものである可能性が高い。

参考文献：

[1] Inoue et al., “Long-term fire activity under the East Asian monsoon responding to spring insolation, vegetation type, global climate, and human impact inferred from charcoal records in Lake Biwa sediments in central Japan.” *Quaternary Science Reviews*, 179 (1), 59-68 (2018).

[2] 増田善信 (1989) 広島原爆後の“黒い雨”はどこまで降ったか. *天気*, 36(2), 69-79.

担当者： 大阪公立大学 井上淳

○土壌試料に含まれる水銀の分析

街区火災により発生した可能性のある金属元素として水銀に着目した。水銀は、火災などによって、大気中への放出が容易な重金属である [1]。大気中に放出された水銀は、降雨などによって地表に沈着するものもある [2～4]。また、広島平和記念資料館から提供を受けた「黒い雨」資料の分析でも水銀を含む微粒子が見つかっている。そのため、土壌中水銀濃度について、 ^{137}Cs 濃度や微粒炭含有量との相関があれば、より簡易的に領域の判別に使用できる可能性が考えられるため、深さ方向における土壌中水銀濃度の測定を行った。水銀の測定には、加熱気化水銀測定装置を用いた。

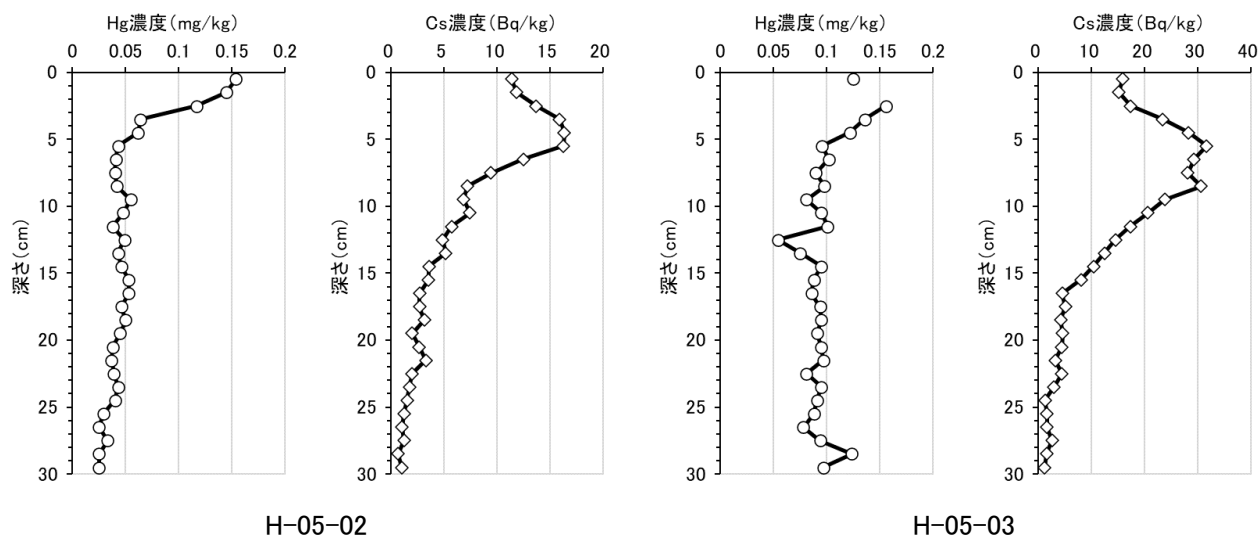


図 24. 土壌試料中の水銀濃度、 ^{137}Cs 濃度の比較

^{137}Cs 濃度や微粒炭含有量のピークがともに深さ 5～10cm にあった、H-05-02、H-05-03 の土壌中水銀濃度の結果を、図 24 に示す。H-05-02、H-05-03 の水銀濃度は表層でピークが見られ、深い層では表層よりも小さくなった。他の地点においても表層でピークとなり、深い層で小さい値となる地点が多く見られた。水銀濃度、 ^{137}Cs 濃度のピークが見られる深さを比較すると、H-05-02、H-05-03 の ^{137}Cs 濃度のピークが 5～10 cm であったのに対し、水銀濃

度は0～3 cm にピークがあり、ピークが見られる深さが異なった。他の地点についても、多くの地点でピークの深度が異なることがわかった。以上より、水銀濃度、 ^{137}Cs 濃度のピークが見られる深さが異なるため、水銀を「黒い雨」領域の判別材料や指標として使用することは難しいことがわかった。

参考文献：

- [1] 丸本幸治, 坂田昌弘「大気中の水銀に関する研究の現状」, 地球化学, Vol.34, p.59-75, 2000.
- [2] 丸本幸治, 坂田昌弘「土壌からの水銀発生量とその変動要因」, 地球化学, Vol.39, p.183-196, 2005.
- [3] 福崎紀夫「大気環境中の水銀」, 大気汚染学会誌, Vol.21, No.1, p.1-12, 1986.
- [4] 中川良三, 金田直樹, 早坂達哉, 鈴木武史, 長根範子「都市環境中における土壌中の残留水銀の挙動」, 安全工学, Vol.39, No.1, p.12-18, 2000.

担当者： 京都大学複合原子力科学研究所： 池上麻衣子、福谷哲、五十嵐康人

○土壌試料に含まれる全炭素の分析

より簡便に土壌中の微粒炭の量を求めることが可能であれば、微粒炭データを「黒い雨」領域判定指標により効果的に活用できる。そこで、全炭素量（TC; Total Carbon）と微粒炭量との相関性を検討した。TC は multi N/C 3100+HT1300（アナリティクイエナ社製）を用いて測定した。H-05-02 地点における各深さ分画での全炭素量と微粒炭量の値を図 25 に示す。微粒炭素量は前述の「街区火災由来の微粒炭粒子」に記載されたものである。微粒炭素量は隣接する分画において増減がみられるが、全炭素量は深さ方向に概ね減少している傾向がみられ、両者に相関性はあまりないと考えられる。一方で、当該 TC 測定装置を用いれば、微粒炭素量を個数ではなく重量で測定できる可能性があり、実現出来れば新たな知見が得られる可能性も高いと考えられる。また、TC の主要な発生源は林床へのリター（落葉や落枝など）と考えられることから、この TC の鉛直プロファイルから、土壌層の改変・未改変についての情報が得られる可能性もある。こちらの実現出来れば過剰 ^{210}Pb を補完する指標データが得られるかもしれない。このような観点から、引き続きデータ取得を行う。

図 25 は、H05-02 地点で採取した土壌中における全炭素量（mg/g）と微粒炭量（個/g）の鉛直プロファイルを示している。縦軸は深さ（センチメートル）で 0 から 30 まで表示されている。左側の横軸は全炭素量（TC）で 0 から 500 mg/g まで表示されている。右側の横軸は微粒炭量で 0 から 25000 個/g まで表示されている。TC は赤い実線と赤い丸で示され、微粒炭量は青い点線で青い丸で示されている。TC は地表付近で約 400 mg/g あり、深さが増えるにつれて減少し、10 cm 以下ではほぼ一定の約 100 mg/g 程度に落ち着いている。微粒炭量は地表付近で約 25000 個/g あり、深さが増えるにつれて減少し、10 cm 以下では約 5000 個/g 程度に落ち着いている。

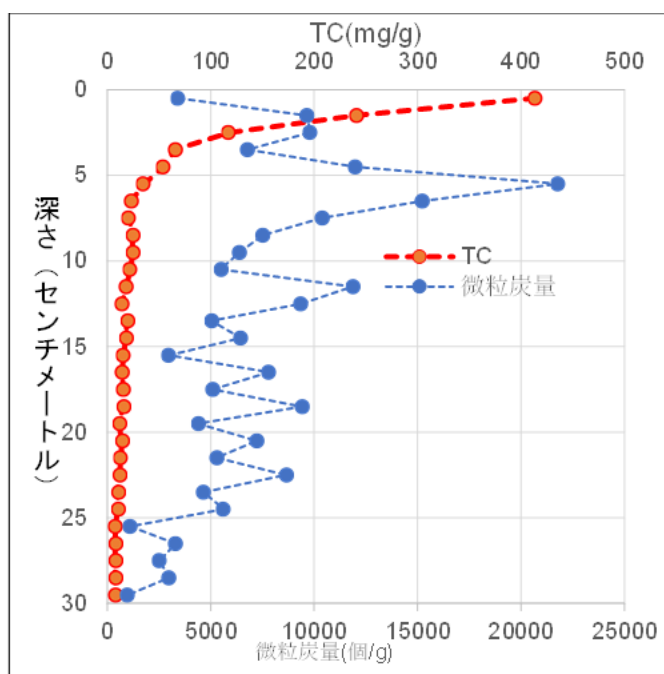


図 25. H05-02 地点で採取した土壌中における全炭素量（mg/g）と微粒炭量（個/g）

担当者： 京都大学複合原子力科学研究所： 福谷哲、池上麻衣子、五十嵐康人、
大阪公立大 井上淳

○土壌試料に残る原爆由来のシグナル総合解析

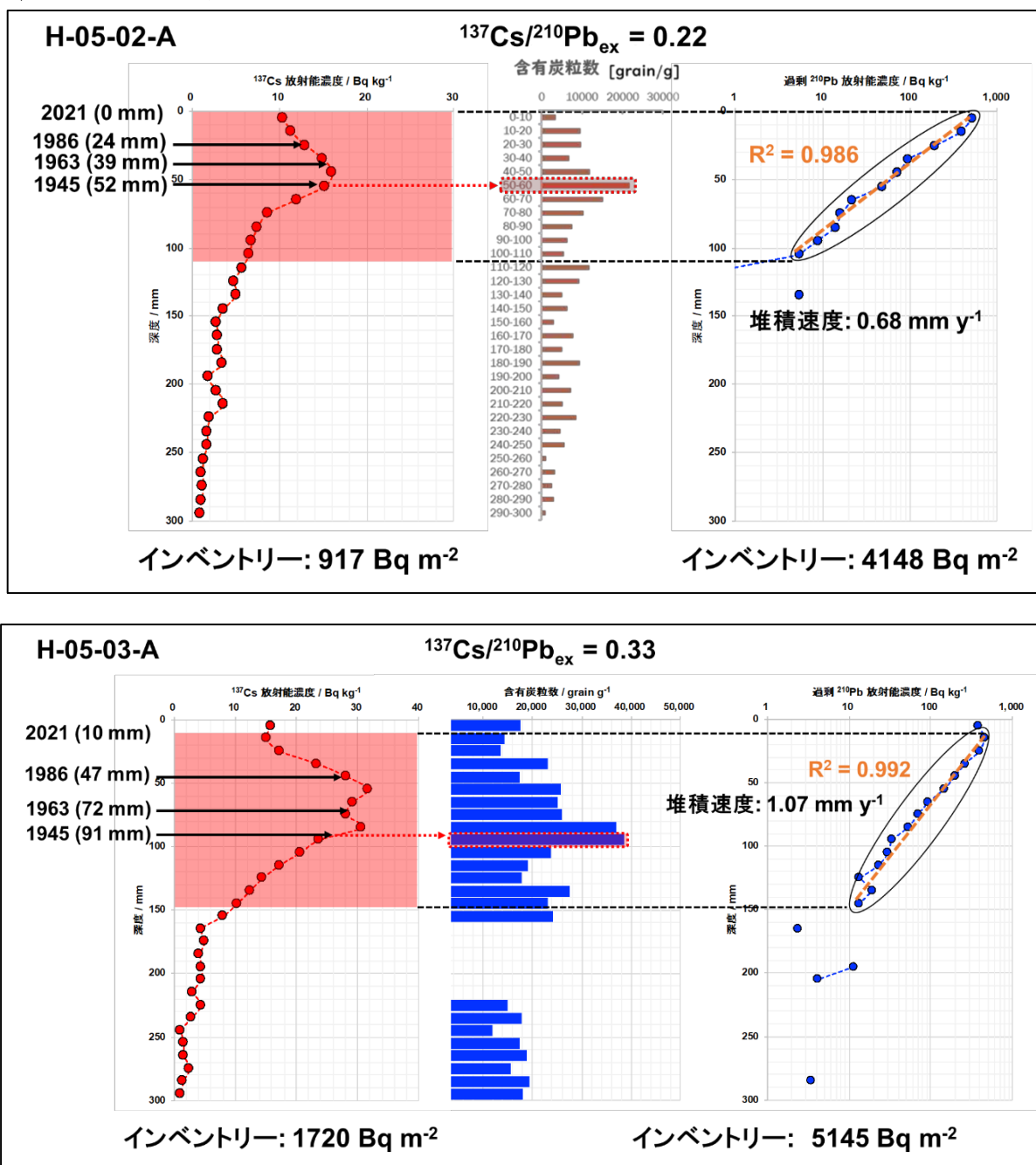


図 26. 土壌における ^{137}Cs 、微粒炭、過剰 ^{210}Pb および過剰 ^{210}Pb による時間指標を用いた「黒い雨」沈着可能性の評価手法 上：H-05-02 地点の土壌 下：H-05-03 地点の土壌 での解析

本年度においてはより総合的な解析を進め、土壌試料での ^{137}Cs 、過剰 ^{210}Pb および微粒炭の鉛直プロファイルにもとづき、主体が 1960～70 年代に大気へ放出されて沈着した GF 由来の ^{137}Cs である分布に重なって、原爆由来の CiF である ^{137}Cs が見られるかどうかの検討を行った。図 26 に広島 H-05-02、H-05-03 において採取された土壌試料に関しての解析結果を示す。3 つある図は左から、 ^{137}Cs 濃度の鉛直分布、微粒炭の個数濃度の鉛直分布、過剰 ^{210}Pb 濃度の鉛直分布（対数グラフ）を示す。H-05-02、H-05-03 地点はいずれも 1945 年 8 月 6 日当時、「黒い雨」が降ったとの証言があり、広島平和記念資料館が所蔵する土壁などの試

料が得られた地域でもある。土壌改変の有無判定の項で述べたように、土壌試料中の ^{137}Cs インベントリ、 ^{137}Cs 濃度ピークの有無、過剰 ^{210}Pb 濃度の鉛直分布データ、および ^{137}Cs インベントリ／過剰 ^{210}Pb インベントリ比の4つの条件から、H-05-02、H-05-03のいずれも未改変と判断されている。ここではH-05-02を取り上げて、考察する。H-05-02では過剰 ^{210}Pb が表層 100 mm 辺りまでは直線的に濃度減少しており、一定の期間は土壌かく乱が無かったことが示唆される。 ^{137}Cs は 30～60 mm 付近で濃度大でやや幅広に表層 70-80 mm 付近まで分布し、ピーク頂下部の 50-60 mm の層では、微粒炭の一番大きな個数濃度ピークと同期している。 ^{137}Cs と街区火災由来の微粒炭が共に濃度上昇を示していることは、「黒い雨」が沈着したことの証拠ではないかと考えられた。そこで過剰 ^{210}Pb 濃度の深度 100 mm まで単調に減少することから、過剰 ^{210}Pb を堆積した年代の指標として利用することを考えた。もっとも単純な仮定だが、 ^{210}Pb の壊変定数を λ とし、 t 年前に濃度 A_0 で堆積し、見かけの堆積速度 w (mm/y) で堆積が継続したとする。また、 ^{210}Pb の大気からの供給は、一定で変化がないと仮定する。この場合、現在深さ x (mm) にある堆積物の濃度 $A(x)$ は、 $t=x/w$ より

$$A(x)=A_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t)=A_0 \cdot \exp(-\lambda/w \cdot x)$$

となる [1]。

本試料において過剰 ^{210}Pb 濃度を表層から 100 mm まで指数関数で近似すると (R^2 : 0.986)、

$$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}(x) = 604.9 \exp(-0.04597 \cdot x)$$

である。これより ^{210}Pb の半減期 22.23 年を用いて見かけの堆積速度 w (mm/y) を算出すると、

$$\text{見かけの堆積速度 } w \text{ (mm/y)} = 0.693/22.23/0.04597 = 0.678 \text{ mm/y}$$

が求められた。この値にもとづき、1945 年はどの深さに相当するか見積もると、52 mm が得られて、ちょうど ^{137}Cs と微粒炭の濃度ピーク位置と整合した。同様に、H-05-03 の土壌試料データでも類似した ^{137}Cs 、微粒炭、過剰 ^{210}Pb および過剰 ^{210}Pb による年代指標がほぼ整合する傾向を示し、H-05-03 は特に ^{137}Cs の上層のピークが双山形状を呈していることから、下層の濃度ピークは CiF 由来の ^{137}Cs ではないかと推察された。

このように、1945 年の原爆由来の ^{137}Cs が含まれると推定され、かつ ^{137}Cs の濃度極大が街区火災由来と推定される微粒炭個数濃度と関連した事例が見つかった。また、過剰 ^{210}Pb 濃度の減少から評価した時間指標評価でも整合性があると推測された。街区火災由来の微粒炭粒子の節で述べられているように、微粒炭粒子はかなり大きな粒子であって、雨水に溶存して下方へ浸透することは非常に考えにくく、かつ微生物による分解もあったとしても分解速度は遅いと考えられる。したがって、過剰 ^{210}Pb による時間指標、さらに ^{137}Cs 濃度ピークと整合すると云うことは、CiF「黒い雨」の 1945 年 8 月の沈着が残留している強い証拠である可能性が非常に高いと考えられた。これは従来の土壌調査に比べて大きな進展である。つまり、**その地点が戦後未改変かつ「黒い雨」が実際に降ったのであれば、領域判別の指標は存在し得る**ことが示されたからである。

参考文献：

[1] 金井豊. (2000). 鉛-210 堆積年代測定法とその問題点. 地球化学, 34(1), 23-39.

担当者：長岡技術科学大学 栗原雄一

京都大学複合原子力科学研究所 八島 浩、福谷 哲、高宮幸一、五十嵐康人

広島大学 遠藤 暁

大阪公立大学 井上 淳

協力者：九州大学 杉原真司

弘前大学 赤田尚史

尚絅学院大学 齊藤 敬

環境科学技術研究所 大塚良仁

東京都立大学 末木啓介

○ ^{137}Cs 鉛直方向移行シミュレーション

2011 年 3 月に生じた福島第一原子力発電所の事故によって環境中に大量の放射性物質が放出されたが、その中で ^{137}Cs は土壌表層に強く固定されたことが知られている [1, 2]。1945 年 8 月の原子爆弾の投下によって地表面に沈着した ^{137}Cs についても土壌表層に固定されたと考えられるが、数十年以上の長期間での鉛直方向の移行挙動についてはあまりよくわかっていない。当調査研究では鉛直方向に 10 mm 層単位で 300 mm 以深まで土壌採取を行い Ge

半導体検出器によって γ 線測定を各深度の土壌試料について行っている。その中で ^{137}Cs の鉛直方向放射能濃度分布において、原爆の影響によりどの程度の ^{137}Cs がどのような鉛直プロファイルを持って土壌中に残留しているか特定することが求められる。ここでは、まず広島爆心地周辺で土壌改変がないことが確認された採取地点 H-05-02 および H-05-03 の土壌について、 ^{137}Cs トレーサーを用いた室内 ^{137}Cs 吸着実験を行った。そして各深度の土壌試料について吸着実験から決定された分配係数 (K_d) (図 27) を基にソフトウェア (GET FLOWS) を利用し Reactive transport model [3, 4, 5] によって ^{137}Cs 鉛直方向移行についてのシミュレーションを行った。

^{137}Cs 吸着実験の結果、H-05-02 および H-05-03 の土壌試料の K_d 値はともに深度ごとに大きな違いが見られていた。またおおよそ表層付近で K_d 値は高くなっており、下層では低くなっていた。そして ^{137}Cs 鉛直輸送シミュレーションについて、表

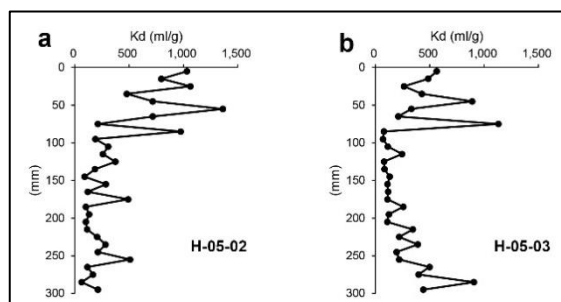


図 27. ^{137}Cs 吸着実験より得られた土壌採取地点(a) H-05-02 および(b) H-05-03 の土壌試料についての K_d 値

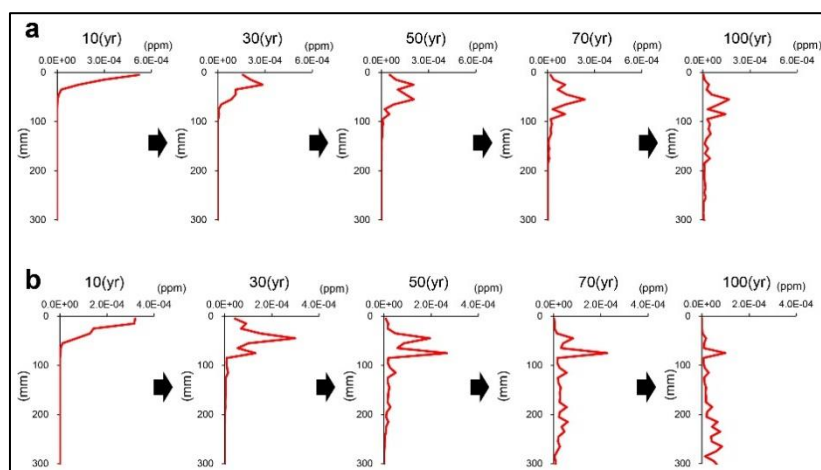


図 28. ^{137}Cs 鉛直方向移行についての表層沈着後 100 年までのシミュレーション結果 計算のための K_d は、(a) H-05-02 および(b) H-05-03 の土壌試料の値をそれぞれ用いた。

層に ^{137}Cs が沈着後 100 年までの結果を図 28 に示す。沈着から 10 年後では表層から下層に ^{137}Cs が移行し始め、30 年以降では表層付近でピークが形成されることがシミュレーションから示唆された。H-05-02 および H-05-03 の土壌についての ^{137}Cs の鉛直方向放射能濃度分布では、それぞれ 40-60 mm, 40-70 mm 付近でピークが見られていた。 ^{137}Cs 沈着後 70 年のシミュレーションの結果と比較したとき、実土壌についての ^{137}Cs のピーク位置（図 26 参照）とおおよそ一致していることがわかる。

以上、実試料について実験的に得られた K_d を用いた Reactive transport model の結果、実土壌における ^{137}Cs の濃集ピークが原爆またはグローバルフォールアウトに由来するものであることが示唆された。このことは、 ^{137}Cs の鉛直プロファイルが単純な土壌層の堆積により生成したと云う先に述べた議論と矛盾することではなく、実環境下では土壌の堆積に加えて、鉛直の拡散・輸送も生じているはずであり、それらの複合した結果として、現実の鉛直プロファイルが生じていることを示す。すなわち、鉛直の拡散・輸送があっても、H-05-02 や H-05-03 と同様な K_d 条件を有する土壌層であれば、表層より 100 mm 以深に ^{137}Cs の大きな濃度ピークは形作られないことがわかった。将来的には鉛直の拡散・輸送に加えて、土壌層の堆積も考慮したモデルの開発や適用が望まれる。

参考文献：

- [1] Tanaka, K.; Takahashi, Y.; Sakaguchi, A.; Umeo, M.; Hayakawa, S.; Tanida, H.; Saito, T.; Kanai, Y., Vertical profiles of Iodine-131 and Cesium-137 in soils in Fukushima Prefecture related to the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident. *Geochemical Journal* **2012**, 46, (1), 73-76.
- [2] Yoshida, N.; Takahashi, Y., Land-Surface Contamination by Radionuclides from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident. *Elements* **2012**, 8, (3), 201-206.
- [3] Steefel, C. I.; DePaolo, D. J.; Lichtner, P. C., Reactive transport modeling: An essential tool and a new research approach for the Earth sciences. *Earth and Planetary Science Letters* **2005**, 240, (3-4), 539-558.
- [4] Mori, K.; Tada, K.; Tawara, Y.; Ohno, K.; Asami, M.; Kosaka, K.; Tosaka, H., Integrated watershed modeling for simulation of spatiotemporal redistribution of post-fallout radionuclides: Application in radiocesium fate and transport processes derived from the Fukushima accidents. *Environmental Modelling & Software* **2015**, 72, 126-146.
- [5] Kato, T.; Kawasaki, Y.; Kadokura, M.; Suzuki, K.; Tawara, Y.; Ohara, Y.; Tokoro, C., Application of GETFLOWS Coupled with Chemical Reactions to Arsenic Removal through Ferrihydrite Coprecipitation in an Artificial Wetland of a Japanese Closed Mine. *Minerals* **2020**, 10, (5).

担当者： 東京大学大学院理学系研究科： 向井広樹、田中啓資、高橋嘉夫

○「黒い雨」の正体に関する分析

「黒い雨」の降雨域の推定に際し、その原点である「黒い雨」の主成分を把握することは重要である。なぜなら、その成分は放射性物質以外の物証として、降雨域を推定する指標になり得るからである。そこで「黒い雨」の痕跡が残る遺品等を保存・展示する広島平和記念資料館に資料の採取許可を申請し、承諾を得たものを分析しその正体に迫った。結論は以下のとおりである。

「黒い雨」の主成分は、炭・樹脂状物・強酸（推定）と考えられる。この根拠の例を示す。金屏風（黄銅箔、洋金（真鍮）とも云う；主成分は銅）の黒色痕跡を落射光と透過光を用いて顕微鏡下で観察した結果、落射光では図 29 左に示すような涙形の黒色痕跡部分が、透過

光では図 29 右に示すように大部分が淡い黄色透明となった。これは、元の金属箔が消失し、下からの光が透過したことを示す。また、この痕跡には黒色粒状物の炭（SEM/EDX、レーザーラマン等の結果より）・種別不明の淡褐色の樹脂様物質（SEM/EDX、FT-IR 等の結果より）・銅と硫黄の化合物（EPMA、SEM/EDX 等の結果より推定）の混在が認められた。以上より、金属箔の黄銅を溶かし硫酸銅等を生成する硫酸が当時存在したであろうことが示唆され、原爆の爆発時に発生した NO_x 由来の硝酸と共に硫酸を含む酸性雨が降ったと推定された。

なお、硫酸中の硫黄の供給源は、海洋や生態系由来のジメチル硫黄（DMS）やゴム、アスファルトなど硫黄含有物の火災による揮発、あるいは衝撃で発生した粉塵由来などと推定している。一方、仁科土壤（被災直後に当時の理化学研究所の仁科調査団が採取した土壤試料）や「黒い雨」の雨滴痕が残る土壁も分析した結果、銅、水銀、チタンを含む微粒子やトリウムやウランを含む天然鉱物を認めたものの、¹³⁷Cs や ²³⁵U を含む放射性微粒子は発見されなかった。この原因の一つとして、上記の硫酸による放射性微粒子の溶解が考えられる。

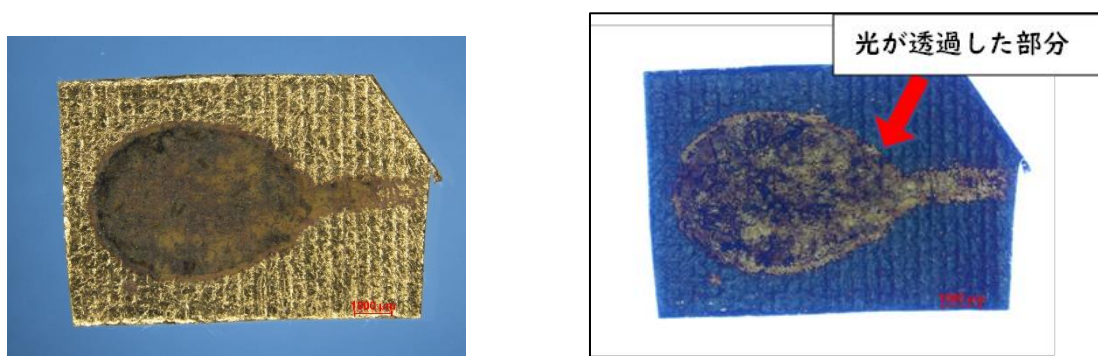


図 29. 金屏風の黒色痕跡の光学顕微鏡写真（左：落射光、右：透過光）

広島土壤の成分分析

広島で採取した土壤から「黒い雨」の指標となる成分を探すために、「黒い雨」が降ったとされており、かつ ¹³⁷Cs の濃度ピークが認められた 2 地点（H-05-02、H-05-03 の地点）の各土壤層 0～15 cm の厚さ 1 cm 分について①未処理のもの、②重液分離後の沈殿物の蛍光 X 線により成分分析した結果、①から多成分（硫黄、鉛、錫、水銀、亜鉛等）を検出したが、いずれも鉛直分布上での濃度ピークは認められなかった。なお、②は引き続き分析を継続中である。

「黒い雨」と広島土壤の共通成分

「黒い雨」の痕跡より、新たな物証として炭（炭素）と硫黄が発見された。これは井上らによる微粒炭粒子の計数法で得られる土壤中の鉛直プロファイル [1] が「黒い雨」の指標に成り得ることを支持する。ただし、炭（炭素）は蛍光 X 線装置では検出不可能である。さらに、硫黄は土壤の常在成分でかつ、深さ方向にピークが認められないので指標にはならない。

参考文献：

- [1] Inoue et al., Long-term fire activity under the East Asian monsoon responding to spring insolation, vegetation type, global climate, and human impact inferred from charcoal records in Lake Biwa sediments in central Japan, Quaternary Science Reviews, 179 (1), 59-68 (2018).

担当者： 京都大学複合原子力科学研究所： 向井中、高宮幸一、福谷哲、八島浩、
足立友紀、東江直樹、芝原雄司、池上麻衣子、五十嵐康人
大阪公立大学： 井上淳、井原祐弥
長岡技術科学大学： 栗原雄一

謝辞： 広島平和記念資料館の皆様、特に学芸課の方々には、資料採取の手続きからその立会まで半年に亘り本当にお世話になりました。ここに記して感謝申し上げます。また、貴重な遺品の採取許可を頂いたご遺族の方々にも心より感謝申し上げます。

○「黒い雨」資料に含まれるウラン同位体の分析

「黒い雨」の正体に関する分析の項で述べた金屏風および土壁（図30および31）の黒色付着物について、表面電離型質量分析装置（Thermal Ionization Mass Spectrometer, TIMS：ThermoFisher Scientific, TRITON-T1）を用いたU同位体比分析による、核兵器由来のUに関する分析を実施した。TIMSによるU同位体比分析の条件などは過去に報告している分析スキーム [1, 2]を基にしており、CRM U010 ウラン標準試料[3]を用いた校正（表3）を行い、分析精度と再現性について確認している。

また、各試料からのUの回収は、福島原発事故で放出された環境中のUおよびPuの同位体比分析で採用した、UTEVATM樹脂を用いた回収スキームを採用した [1, 2]。同スキームをIAEA-465（バルト海堆積物）標準試料 [4] 1 g に対して適用し、Uの回収およびU同位体比分析を実施したところ（1 g×3セット）誤差範囲内でよい一致を示し（表3）、Uの回収スキームの再現性、および同試料に含まれているUが天然Uであることを確認している。

本検討結果を基に、土壁3、金屏風3およびそれらの黒色付着物の無い箇所の試料から一部試料を分取し（それぞれ、5.6 mg：土壁3、1.2 mg：土壁・黒色付着物無し、0.75 mg：金屏風3、および0.68 mg：金屏風・黒色付着物無し）、それらに対してUの回収およびU同位体比分析を実施した。図（図32）に土壁3から回収したUのマスペクトルを示し、表

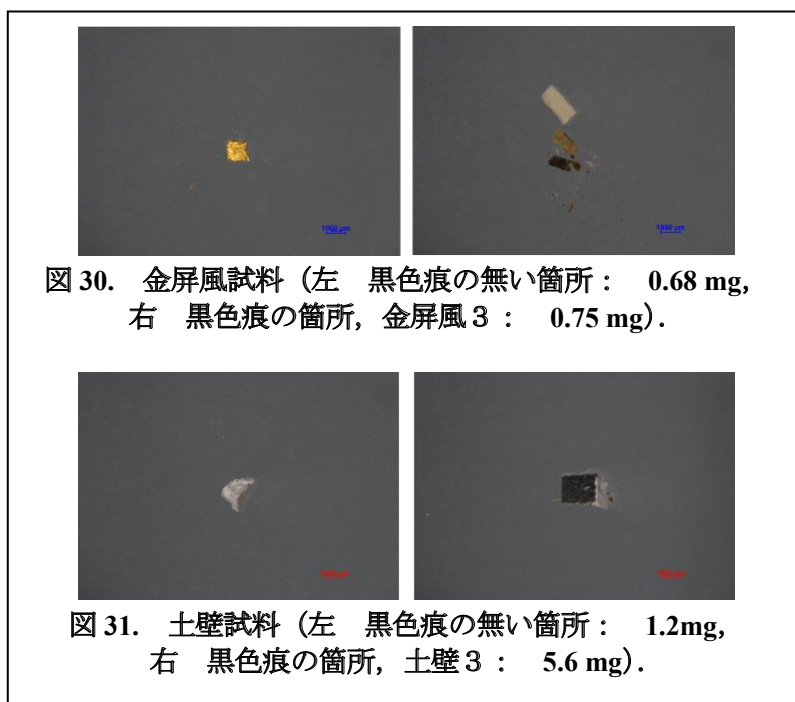


図 30. 金屏風試料（左 黒色痕の無い箇所： 0.68 mg, 右 黒色痕の箇所, 金屏風 3： 0.75 mg）.

図 31. 土壁試料（左 黒色痕の無い箇所： 1.2mg, 右 黒色痕の箇所, 土壁 3： 5.6 mg）.

表 3. U 同位体比の分析精度と U 回収スキームの適用性検討結果

	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$
U010 標準試料の分析による U 同位体比分析精度と再現性 (1ng 使用時)			
保証値	0.000055(1)	0.01014(01)	0.000069(1)
分析値 (n=49)	0.000055(6)	0.01013(10)	0.000071(9)
IAEA-465 標準試料からの U 回収スキームによる U 同位体比分析結果			
セット 1 (n=3)	0.000059(2)	0.00726(4)	0.000000(1)
セット 2 (n=3)	0.000060(3)	0.00728(4)	0.000000(2)
セット 3 (n=3)	0.000058(2)	0.00726(9)	0.000000(1)

カッコ内は誤差 (2 σ). n : 繰り返し分析数.

表 4. 各試料の U 同位体比分析結果と IUPAC2013 の値との比較

	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$
IUPAC2013	0.000054(5)	0.007257(6)	--
土壁 (n=5) 黒色付着物無し	0.00007(3)	0.00726(08)	0.00000(2)
土壁 3 (n=6)	0.00007(3)	0.00729(10)	0.00001(3)
金屏風 (n=4) 黒色付着物無し	n.d.	0.00730(14)	n.d.
金屏風 3 (n=4)	n.d.	0.00730(06)	n.d.

カッコ内は誤差 (2 σ). n : 繰り返し分析数. n.d. : 検出されず.

(表 4) に黒色付着物およびそれらの付着物の無い箇所から回収した U 同位体比分析結果を示す。土壁 3 および金屏風 3 とともに、黒色付着物から回収した U の同位体比は付着物の無い箇所から回収された U のそれと誤差範囲内で一致していた。また、黒色付着物の有無に関わらず、土壁および金屏風のいずれの試料も天然存在比 [5] と相違なく、顕著な核兵器由来の U は検出されなかった。

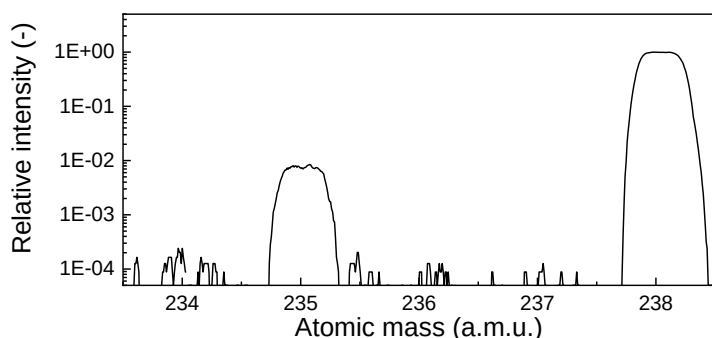


図 32 土壁 3 から回収した U のマススペクトル

今回得た U 同位体比の分析精度と核兵器 U の ^{235}U 濃縮度を基に、これらが混合した場合で得られる U 同位体比を評価した (図 33)。ここで、広島に投下された ^{235}U の濃縮度は文献 (今中、2016 [6]) を基に平均 80% とした。これらの条件を基に評価した結果、土壁試料では $9.7 \times 10^{-3} \%$ また金屏風試料

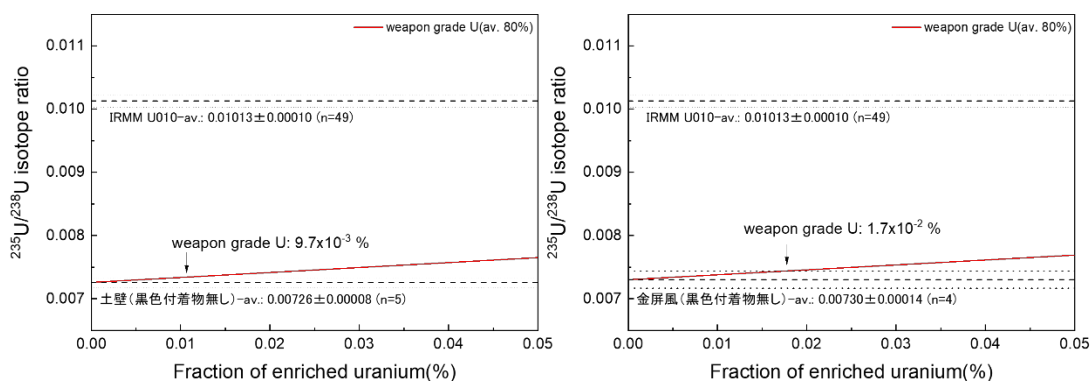


図 33. 土壁（左）および金屏風（右）から回収した U と核兵器 U との混合による U 同位体比変動の評価結果

では $1.7 \times 10^{-2} \%$ と、 $1 \times 10^{-2} \%$ 程度の核兵器由来の U がそれぞれの試料から回収された U に含まれていれば検出可能であることが見積もられた。

参考文献：

- [1] Shibahara et al., U-235/U-238 Isotopic ratio in plant samples from Fukushima Prefecture, J. Radioanal. Nucl. Chem., 303, 1421-1424 (2015).
- [2] Shibahara et al., Determination of isotopic ratios of plutonium and uranium in soil samples by thermal ionization mass spectrometry, J. Radioanal. Nucl. Chem., 307, 2281-2287 (2016).
- [3] CRM U010, Certificate of Analysis CRM U010 Uranium Isotopic Standard, <https://www.energy.gov/nnsa/articles/nbl-program-office-certificate-analysis-certified-reference-material-crm-u010-5mg>, accessed at 3 Mar., 2023.
- [4] IAEA 465, CERTIFICATE, https://nucleus.iaea.org/sites/ReferenceMaterials/Shared%20Documents/ReferenceMaterials/Radionuclides/IAEA-465/Certificate_IAEA-465_Rev01.pdf, accessed at 27 Mar., 2023.
- [5] Meija et al., Isotopic compositions of the elements 2013 (IUPAC Technical Report), Pure Appl. Chem., 88(3), 293-306 (2016).
- [6] 今中哲二, 広島原爆放射線の初期プロセスについての考察 —リトルボーイノートより—, 放射化学 第 34 号, 24-37 (2016).

担当者： 京都大学複合原子力科学研究所 芝原雄司、福谷 哲、向井 中

(2) b. 試料活用のためのデータベース開発ならびにアーカイブ化 (担当者：高宮、松田、福田、横田、吉永、久保田、五十嵐、福谷および役務業者で実施)

○土壌試料のデータベースおよびアーカイブシステムとしての管理

分析データにもとづく「黒い雨領域の推定」のため、多数の研究機関から成る調査研究チームが約 3000 試料の土壌データを共有し、データを随時可視化しながら総合的解析を行う必要がある。そのため、令和 2 年度までに地点・分析データ格納、地点の地図上位置描画機能をもつデータアーカイブシステム (DABS: Database of Atomic Bomb Samples) を開発した。本強化策においては、地図上位置の描画機能の高速化、試料の採取地点情報の可視化、分析・解析値の可視化、ユーザビリティの向上のための機能追加を行った。試料の採取地点情報の可視化においては採取地点に関連する画像・PDF ファイルの登録、ダウンロードを可能と

し、分析・解析値の可視化においては地点毎の分析・解析値の深度分布グラフの比較機能、統計解析値のマッピング機能を追加し、ユーザビリティ向上では表示中の画面に応じたマニュアルが参照できる機能の追加を行った。

DABS は次に掲げるようなシステムイメージ（図 34）で作られている。全体を包括し、調査研究の進捗を支えることを想定して開発・整備を進めており、新規に採取された広島の土壌試料 100 地点分ならびに長崎で採取された土壌試料をもこの仕組みで整理・管理することが最終の目的である。

担当者： 京都大学複合原子力科学研究所： 高宮幸一、五十嵐康人、福谷 哲
長崎大学： 松田尚樹、福田直子、横田賢一
広島大学： 吉永信治、久保田明子

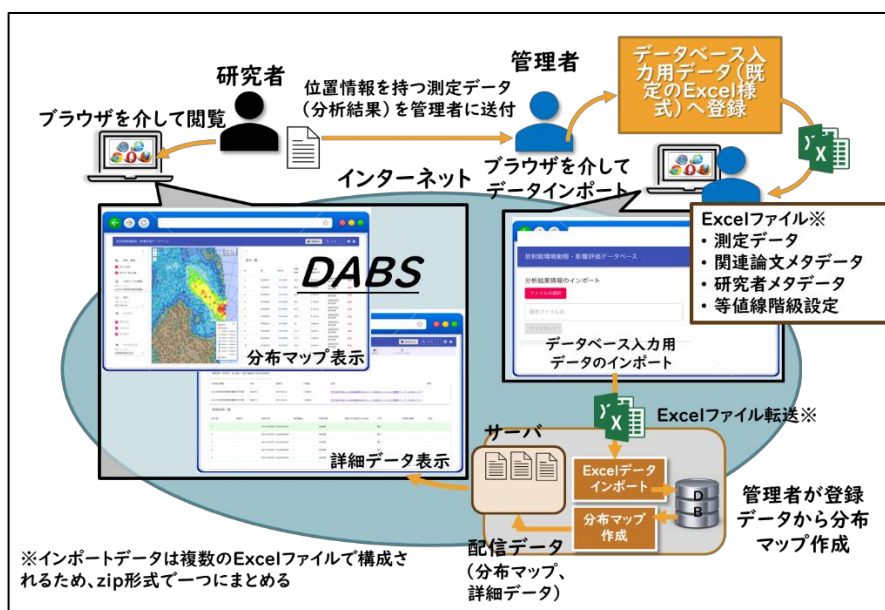


図 34. 地点・分析データ格納、地点の地図上位置描画機能をもつサンプルおよびデータアーカイブシステム（DABS: Database of Atomic Bomb Samples）イメージ

○長崎大学における試料活用のための整理ならびにアーカイブ化（担当者：松田、福田、横田）

長崎大学では 1969 年以降数度にわたり土壌試料等の採取を行っており、それらの試料は原爆後障害医療研究所管轄の倉庫に保管されてきた。本年度は、これらの試料を安定して保管し、公開し、今後の調査研究に活用するためのアーカイブ化を目的とした業務（①：試料確認；②：データベース化；③：再保管；④：再測定）を行った。

本年度の事業により、保管していた全ての物理試料の確認と再保管は完了した。DABS への最終データの書き出しは、次年度に持ち越す。DABS 移行後は、DABS を元データとして長崎部分を定期的にダウンロードし、長崎データベースとして維持する。試料の再測定は、本事業で得られる新規試料の測定強化を優先しつつ、継続的に実施する。整備された保管環境及び保管試料は、今後、長崎大学の責任のもとに維持・管理・拡充し、試料の供与、見学・教育等に対応する。

○広島大学における試料活用のための整理ならびにアーカイブ化（担当者：久保田、吉永）

広島大学原爆放射線医科学研究所（以下、広大原医研）では、竹下健児教授、星正治教授（いずれも当時）らが在籍時に原爆関連の線量測定評価の研究対象として収集・活用した土壌等の物理試料について、現状を把握する調査を実施した。さらに、それらの試料の整理を開始するとともに、試料に関連する過去の主要な調査研究について文献調査を実施した。試料整理の計画立案と実施は以下のとおりである。

1. 試料整理の方針と対象

上記の調査の結果、本プロジェクト開始時の状況から、整備に時間を要する状況であるため、長崎大学の試料の整理や調査等を参考にし、“長崎大学の同様試料についての情報の共有化・標準化を図る”ことを重要な方針と定めた。

2. 保管庫の整備

広大原医研と同キャンパス内の屋外倉庫に配置されているが、担当者の部署に近い施設可能な1室を確保した。

3. 移動・数量の把握

試料の移動の際に、数量を把握した（全体の箱数：600箱程度）。

4. ボトル詰め替え事前調査（詳細調査）

土壌試料は、長崎大学と同種のボトルに入れ替えることとした。

5. 情報データ整備

上記の物的な試料整備を進行すると同時に、日本公衆衛生協会（1971年、1973年調査）の報告書や遠藤教授提供のデータ、また星教授の残した断片的な資料情報によって、日本公衆衛生協会調査の資料情報リストを作成し、上記のボトル入替の際に、リストから該当するデータを探し、整理状況を含めた情報を整理することとした。

おわりに：今後の予定

4月からはデータ整備等にも重点を置いて、本プロジェクトに可及的速やかに寄与できるよう、試料整備を進める。

（3）文献調査及び体験記調査を含めた関連研究の整理とアドバイザー会議の開催、ならびに調査報告書の作成

（3）a. 文献調査及び体験記調査を含めた関連研究の整理（担当者：今中、五十嵐、高宮、福谷、大原）

厚生労働省の調査において、被爆者体験記調査及び国内外の関連文献調査を行っており、そこで得られた情報について、前年度に引き続き、（1）の調査に活かすとともに、内容を精査した。より具体的には、過去に米国で収集・解析された諸データを含む報告書や見過ごされた論文などが紹介されることで、爆発モデルの検討・検証（爆発雲高度やその時間変化の検討・検証）、HiSoF 事業による街区火災による潜熱・顕熱フラックス評価などに関する情報や知見が得られ、（1）において実施された作業の基礎の提供と点検につながった。また、過去実施された調査に従事した専門家や諸知見を有する有識者を直接招き、アドバイザー会議を実施して、本調査研究の進展に資した。

(3) b. アドバイザリ会議などの開催（担当者：五十嵐、高宮、福谷、今中、大原）

先行研究の成果や到達点を出来る限り正確に調査・把握して、本調査研究に活用するために、アドバイザリ会合（ウェブ）等を以下に記載するように実施し、質疑応答、議論の上で、発表ファイルを収集した。2022年4月から2023年3月までの期間に並行して実施された令和4年度事業分と併せ、打合せ等の実数は以下のとおりである。

キックオフミーティング 1回; Databaseに関する打合せ 5回; 気象モデルに関する打合せ 11回; 厚労省・研究チーム打合せ 7回; 土壌採取に関する打合せ 9回; セシウムおよび鉛測定に関する打合せ 12回（個別を含めて）; アドバイザリ会議 1回。このように多数の会合を実施し、調査研究の進捗管理と調査研究内容の充実に資した。

このうち、特に、土壌採取に関する打合せ 9回; セシウムおよび鉛測定に関する打合せ 12回（個別を含めて）については、令和3年度強化策の調査研究内容に沿ったものであった。また、以下に記載するアドバイザリ会議でも、令和4年度実施分の成果だけではなく、並行して実施された令和3年度強化策実施分についても議論が行われた。

アドバイザリ会議(令和4年12月20日(火))の概要プログラムと参加専門家(敬称略)

- 趣旨説明（全体計画概要） 五十嵐康人（京大複合研）
- 「放射性降下物の拡散評価にかかる気象シミュレーションモデルの構築—進捗報告」
高橋邦生（アドバンスソフト）
- 「データベース構築—進捗報告」 高宮幸一（京大複合研）
- 「表層土壌試料の γ 線計測—進捗報告」 八島浩（京大複合研）代理発表：五十嵐康人
- 「土壌試料の改変（攪乱）の有無について」 栗原雄一（長岡技術科学大学）
- 「『黒い雨』とは何者か」 向井中（京大複合研）
- 「水銀測定について」 池上麻衣子（京大複合研）
- 「土壌中の炭化物粒子含有量分析」 井上淳（大阪公立大）代理発表：五十嵐康人
- 「溶融粒子のICP-MS分析の進捗」 遠藤暁（広島大学）
- 「広島大学原爆放射線医科学研究所所蔵物理試料整備進捗報告」 吉永信二（広島大学）
代理発表：五十嵐康人
- 「長崎大学 進捗報告」 福田直子（長崎大学）
- 総合討論

参加専門家(5名)：

- 高辻俊宏（長崎大学・名誉教授および独協医科大学 医学部・特任教授）
- 島崎達也（熊本大学 生命資源研究・支援センター・助教）
- 星 正治（広島大学 平和センター・名誉教授）
- 國分陽子（日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部 計画管理グループ・研究主幹）
- 大瀧 慈（広島大学 原爆放射線医科学研究所・名誉教授）

第三章 結言

第一種健康診断特例区域の設定について、再検討を行うため、これまで蓄積されたデータ

を最大限活用し、最新の科学技術を用いて可能な限りの検証を行うため、(1) 気象モデルの構築に向けた研究、(2) 放射性降下物の拡散状況に係る調査に関する研究、(3) 文献調査及び体験記調査を含めた関連研究の整理に取り組んだ。

その結果、(1) では、広島における「黒い雨」の輸送・沈着状況を計算可能な気象シミュレーションモデルを構築し、その不確実性について考察した。すなわち、原子爆弾の投下後の気象状況検証や原子爆弾に由来する放射性降下物の拡散状況を再現するため、爆発シミュレーションを含む気象シミュレーションモデルの構築を行った。再現計算の不確実性の評価のため、1945 年 8 月 6 日とよく似た気象場をもち、客観解析データが高層データや衛星データ、AMeDAS のデータを含み構築されたと考えられる 2000 年以降の対象日を選び、本調査研究で活用する気象モデルのアウトプットとの比較を行った。その結果、使用する気象モデルからのアウトプットはかなりよい精度で実観測値と一致することがわかった。しかし、NOAA_20CRv3 気象データにおいても 1945 年 8 月当時の高層観測データが不足しているため、大気上層になるほど信頼性が低下していた。この他にも、計算結果の不確実性の評価を慎重に実施したところ、**不確実性は相当程度大きく、「黒い雨」領域判定を気象モデル計算によって行うことは、2020 年代にあっても依然困難性が高いことが明らかとなった。**

(2) では、その気象シミュレーション結果の検証に資するため、広島で 100 を超える地域で、また長崎でも 5 地域（令和 4 年度実施分を併せると 12 地域）で土壌試料採取を実施し、合計で 3000 をはるかに超える土壌試料を入手した。これらを、京都大学、広島大学、長崎大学のみならず、全国の大学、研究機関、財団、企業の手を借りて、3000 試料以上の ^{137}Cs や過剰 ^{210}Pb の精密測定を実施し、それらの鉛直分布や単位面積当たりの賦存量から未改変の地点でのデータを選び、そのほか、微粒炭や熔融微粒子、重金属、同位体の分析なども実施し、記載したように「黒い雨」が降ったとされる地点において、その物証を見出すと云う成果達成をみた。すなわち、土壌の層序が改変されていない地点では、土壌層中の ^{137}Cs 濃度極大が微粒炭個数濃度と相関することから、大気圏内核実験由来の ^{137}Cs だけではなく、1945 年の原爆由来の ^{137}Cs が含まれると推定される事例が複数見つかった。また、過剰 ^{210}Pb 濃度の減少から評価した時間指標評価からも整合性があると推測された。これは従来の土壌調査に比べて大きな進展と言うことが出来る。つまり、その地点が戦後未改変かつ「黒い雨」が実際に降ったのであれば、領域判別の指標は存在し得ることが示されたからである。このように新たな発見を得たり、「黒い雨」の正体にも迫ったりしたが、本報告書概要に詳しく記載したとおり、さまざまな困難性から、「黒い雨」領域の精度よい判別までには至らなかった。とりわけ、未改変地点を探索して土壌試料を採取すること自体が本質的に極めて挑戦的で作業量もぼう大であることから、率直なところ、検証データセットの確立には届かなかった。そのため、**「黒い雨」領域の精度良い推定を本調査研究事業の期間内で達成するのは困難と判断された。**

なお、(3) については、精査の結果や多くの打合せ、アドバイザーからのコメント等が(1) および(2)において実施された作業の基礎提供につながり、非常に有用であったことを付記する。

謝辞

本調査研究の実施にあたり、アドバイザー各位、土壌試料採取にあたりご協力を得た広島市健康福祉局原爆被害対策部調査課、広島県、ならびに長崎市原爆被爆対策部調査課、長崎県ほかの自治体関係各位に感謝します。また、本調査研究の実施に関わりご支援・ご協力を頂戴した第一種健康診断特例区域等の検証に関する検討会構成員各位、ならびに担当された厚生労働省健康局関係各位に感謝するとともに、そのご尽力と熱意に敬意を表します。土壌試料の採取にご協力くださった広島、長崎の地元のみなさまに深く感謝申し上げます。¹³⁷Cs ならびに ²¹⁰Pb 分析をお引き受け頂いた大学、機関の関係各位（東京都立大学 大学院理学研究科 大浦泰嗣 准教授、末木啓介 特任教授；鹿児島大学 先端科学研究推進センター 尾上昌平 技術長；弘前大学 被ばく医療総合研究所 赤田尚史 教授；大阪大学 放射線科学基盤機構 吉村崇 教授、大江一弘 准教授；核融合科学研究所 田中将裕 准教授；九州大学 アイソトープ統合安全管理センター 放射線監視情報部 杉原真司 准教授；近畿大学 原子力研究所 山田崇裕 准教授；（公財）環境科学技術研究所 環境影響研究部 大塚良仁 副主任研究員；長岡技術科学大学 太田朋子 准教授；明治大学 小池裕也 准教授；尚絅学院大学 齊藤敬 教授；愛知医科大学 小島貞男 名誉教授、緒方良至 客員研究員；大阪産業大学 裕隆太 教授；福島大学環境放射能研究所 平尾茂一 准教授；東京海洋大学 伊藤友加里 技術専門職員、神田穰太 教授；広島大学 自然科学研究支援開発センター 中島覚 教授；岡山大学 自然生命科学研究支援センター 寺東宏明 教授；熊本大学生命資源研究・支援センター 島崎達也 助教；徳島大学放射線総合センター 三好弘一 教授；高知大学海洋コア総合研究センター 新井和乃 特任専門職員、松崎琢也 技術専門職員；大阪公立大 放射線研究センター 秋吉優史 准教授；（公財）日本分析センター 平出功 氏；（一財）九州環境管理協会 山中潤二 氏；いであ（株） 長坂洋光 氏、渡邊恵史 氏；日本空調サービス（株） 伊藤憲司 氏 ほかのみなさま）に深く感謝します。貴重な「黒い雨」資料を本調査研究の分析に快く提供くださった広島平和記念資料館のみなさまに深く感謝します。最後に多くの調査実働や事務処理を担った役務業者（アドバンスソフト（株）、（株）V.I.C.、（一財）広島県環境保健協会）、京都大学複合原子力科学研究所財務掛（早崎裕子、内田恭嗣、藪内裕樹）および補助者（北村真由美、池田句実、足立友紀、RF 東江直樹、佐藤恵梨子、青木雅子、ベヴァリィ久美子、新谷美喜、戸谷允子、岩岡恭江）の各位にも感謝致します。

とりまとめ：五十嵐康人 京都大学 複合原子力研究所・教授

分担：高宮幸一 同上・准教授

分担：福谷 哲 同上・准教授

分担：八島 浩 同上・准教授

分担：池上麻衣子 同上・助教

分担：芝原雄司 同上・助教

分担：石川裕彦 同上・研究員（非常勤）
（京都大学 防災研究所 名誉教授）

分担：今中哲二 同上・研究員（非常勤）
（京都大学 複合原子力科学研究所 元助教）

分担：栗原 雄一 長岡技術科学大学・特任助教
（京都大学 複合原子力科学研究所 元研究員）

分担：向井 中 京都大学 複合原子力科学研究所・研究員（非常勤）

分担：高橋嘉夫 東京大学大学院 理学系研究科・教授

分担：向井広樹 同上・特任研究員

分担：遠藤 暁 広島大学大学院 先進理工系科学研究科・教授

分担：吉永信治 広島大学 原爆放射線医科学研究所・教授

分担：久保田明子 同上・助教

分担：松田尚樹 長崎大学 原爆後障害医療研究所・教授

分担：福田直子 同上・技術専門職員

分担：横田賢一 同上・助教

分担：井上 淳 大阪公立大学大学院 理学研究科・准教授

分担：大原利眞 埼玉県環境科学国際センター・研究所長

分担：滝川雅之 海洋研究開発機構 地球環境部門 北極環境変動総合研
究センター・グループリーダー