

**「令和４年度原子爆弾の投下に伴う気象及び土壌に関する
調査研究一式」**

**令和４年４月１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の戦略.....	1
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
(2) b. 試料活用のための整理ならびにアーカイブ化.....	4
(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.....	4
参考文献.....	5
第二章 今年度成果.....	5
(1) 気象モデルの構築に向けた調査研究.....	5
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	5
○必要な文献調査とその活用.....	5
参考文献.....	5
1) 爆発モデルの構築.....	6
参考文献.....	7
2) 気象モデルの構築.....	8
参考文献.....	13
○気象モデルデータにおける不確実性の解析.....	14
参考文献.....	16
○WRF/Chem を用いた計算の概要.....	16
参考文献.....	19
(2) 放射性降下物の拡散状況に係る調査に関する研究.....	20
(2) a. 土壌の採取方法の検討及び調査の実施.....	20
(2) a. 1) 調査地点の設定、試掘および土壌試料採取の実施.....	20
(2) a. 2) 土壌試料の採取.....	22
(2) a. 3) 採取試料の到着から測定用試料作成までの流れ.....	23
(2) a. 4) 放射性降下物の測定事例 (^{137}Cs および過剰 ^{210}Pb の測定) - 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	24
(2) a. 5) ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 、Pu 分析結果のまとめ.....	24
○ $^{239, 240}\text{Pu}$ の分析結果について.....	25

参考文献.....	26
(2) a. 6) 球状の熔融粒子.....	28
参考文献.....	29
(2) a. 7) 街区火災由来の微粒炭粒子.....	29
参考文献.....	30
(2) a. 8) 土壌試料に残る原爆由来のシグナル-総合的解析.....	31
(2) b. 試料活用のための整理ならびにアーカイブ化.....	32
(2) b. 1) 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.....	34
(2) b. 2) 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.....	34
(2) b. 3) DABS のシステム改善.....	35
(3) 文献調査及び体験記調査を含めた関連研究の整理.....	35
(3) a. 文献調査の結果.....	35
(3) b. アドバイザリ会議等の開催.....	35
第三章 結言.....	36
謝辞.....	37

* 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4年度原子爆弾の投下に伴う気象及び土壌に関する 調査研究一式」報告書（全体版）

第一章 緒言

本稿は、2022年4月1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4年度における調査研究進捗を記載した**概要の報告書**である。なお、令和4年度の調査研究は、令和3年度調査研究強化策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ともなって発生した放射性物質を含む降水現象（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」の気象モデルによる再現計算は1990年代初期に実施されたが、当時の計算では[1]、原子雲（爆発雲、巻き上がった衝撃塵、火災煙を含む）をカッコ内の個別成分について、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。残念ながら、1990年時点では鉛直方向のない方程式系での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、現時点での最先端の非静力学気象数値モデルおよび燃焼・爆発モデルを取り入れた原子雲ならびに「黒い雨」の再現計算に新たに取り組むため、その必要条件の詳細について検討を行い、必要な気象データセットの準備を進め、可能な範囲で計算実験を実施した。

１）爆発再現計算取り組みの戦略

・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。

- ・市販の Computed Fluid Dynamics モデルで、爆発雲の再現計算を実施した。
- ・爆発モデルからの気象モデルへの移行、どの段階から爆発雲の展開を気象モデル側に引き継ぐことが可能かを検討し、爆発時刻の気象場に爆発モデルで計算された爆発 80 秒後の温位差（最大 48 K、中心高度 5000 m）を埋め込むことに成功した。

2) 気象モデルによる雲形成・降雨再現計算

- ・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、検討を進めた。

(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、遠藤、松田、福田、横田、井上および役務業者で実施）

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土壌試料の放射性セシウム（Cs）の放射能分析となっており、そのシグナルは原爆後のもっと大量に沈着・降下した大型大気圏内核実験由来の Cs のシグナルに隠れてしまい、明瞭とは言い難かった。

従来の報告では、長崎市における調査から [2]、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 Cs や放射性物質、

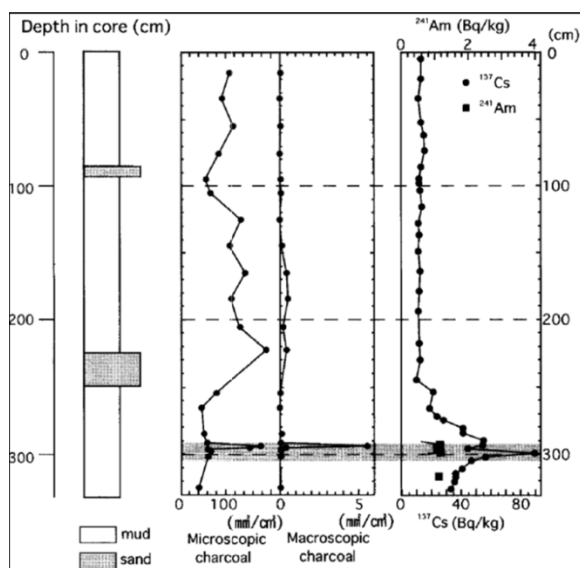


図 1. 長崎市西山地区で採取された底質コアにおけるリフラクトリ炭素および ^{137}Cs 、 ^{241}Am の濃度分布（吉川ほか，2001）

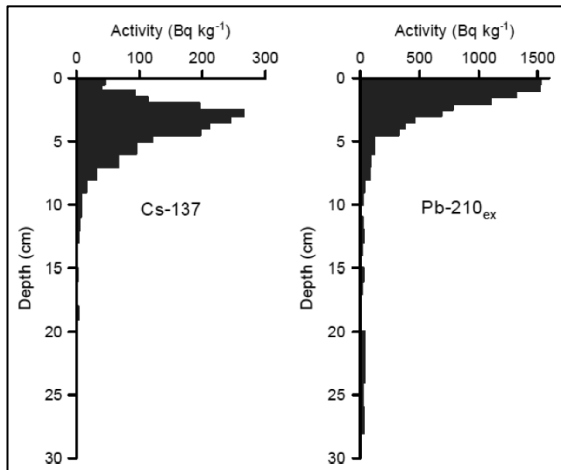


図2. 三重県大紀町の森林で採取された土壌試料における ^{137}Cs 、過剰 ^{210}Pb の濃度分布 (Fukuyama et al., 2010 [3]) ^{137}Cs 、過剰 ^{210}Pb のインベントリは、それぞれ、約3000、約8500 Bq/m^2 と報告されている。

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。

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

・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。
・層序が被爆層として残っているかどう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

・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求めた。地層かく乱が無ければ、大気から常時供給されている天然の ^{210}Pb （過剰 ^{210}Pb と呼ぶ）の地層内の鉛直分布は上層から指数関数的に減少するはずであり、また、過剰 ^{210}Pb

のみを考えた場合、蓄積の時間的な指標も得られる可能性がある。

・上記と並行して、長崎で採取された土壌試料中のプルトニウム-239,240 ($^{239,240}\text{Pu}$) の分析測定を実施した。長崎では広島と異なりプルトニウムが原爆材料として使用された。そのため、「黒い雨」はPuを含んでいたと想定され、表土層に残留するPuから降雨域を推定できる可能性が想定された。

・そこで、長崎においても土壌試料を採取し、一部の分析を実施した。

(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: 高橋、松田、福田、横田、吉永、久保田および役務業者で実施)

○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 (QR コードを作成) 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表土試料ならびに、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。また、試料の整理保管を効率的に行う目的で、RF-ID を用いた「在庫管理」の仕組み導入を図った。

(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

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

実施・協力機関

- ☑ 土壌採取
- ☑ 試料分析及び解析
- ・民間会社 (1社)
- ・大学・研究機関 (25大学・機関)
- ・民間会社 (4社)

昨年度後半から体制を強化

全体

- ・8月以降月に1-2回全体進捗会議を開催
- ・他調査に関する分析も実施

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
- ☑データベース開発・解析
- ・民間会社 (1社)
- ・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 4 月 1 日の受託から 2023 年 3 月 28 日までの期間に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。

○必要な文献調査とその活用

前年度までに実施した文献調査で入手した文献を活用している。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 [3, 4]ならびに、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、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.jmbc.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, 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

1) 爆発モデルの構築

爆発モデルの計算手法の概要は以下のとおりである。Bethe ら (1947 ; Los Alamos 研究所レポート LA-1020) は、起爆直後にある程度時間 (0.01~0.1 秒程度) が経過した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圧の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を提案し、Los Alamos 研究所レポート LA-2000 において現在公開されている [1]。本調査研究では、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、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、爆弾本体に由来する粉塵と地上建築物に由来する粉塵の 2 種類をそれぞれ扱えるように前年度の成果物から改良した。

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。

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
島の地上での過圧とよく一致することが確認された。

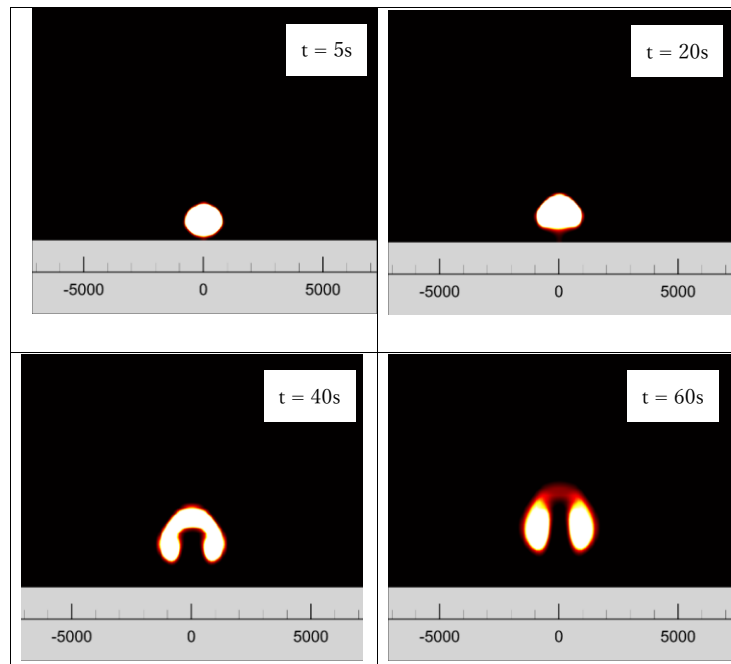


図 3. 爆発シミュレーションによるキノコ雲形成過程の可視化

上述した検証を踏まえて粉塵濃度分布について、起爆地点を通る中心断面上で原爆由来の
粉塵濃度を可視化した図を図 3 として示す。これらの図はキノコ雲が形成されつつある各時
刻の粉塵の可視化図である。火球が地表面付近まで膨張するが、途中から強い上昇気流によ
って球状の雲が変形し、その後上昇に転じる様子が伺える。上述した検証を経て、粉塵濃度
分布を気象モデルの初期データとして渡すことができた。

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 II – Oceanic U.S. Tests", 1979

2) 気象モデルの構築

気象モデルでは計算を構成する複数のプロセスに関して、原爆雲（熱源、爆発雲、巻き上がった衝撃塵）、街区火災（熱源、水蒸気発生、火災煙）をまず個別に作成し、そのプロダクトを気象モデルに統合して、熱源により発生する積雲対流の時間発展、これに伴う降水を計算を実施する方針でモデル構築を進めてきた。今年度は、原爆雲のシミュレーション結果、街区火災の効果を合わせて（あるいは別々に）WRF（Weather Research Forecasting Model）に

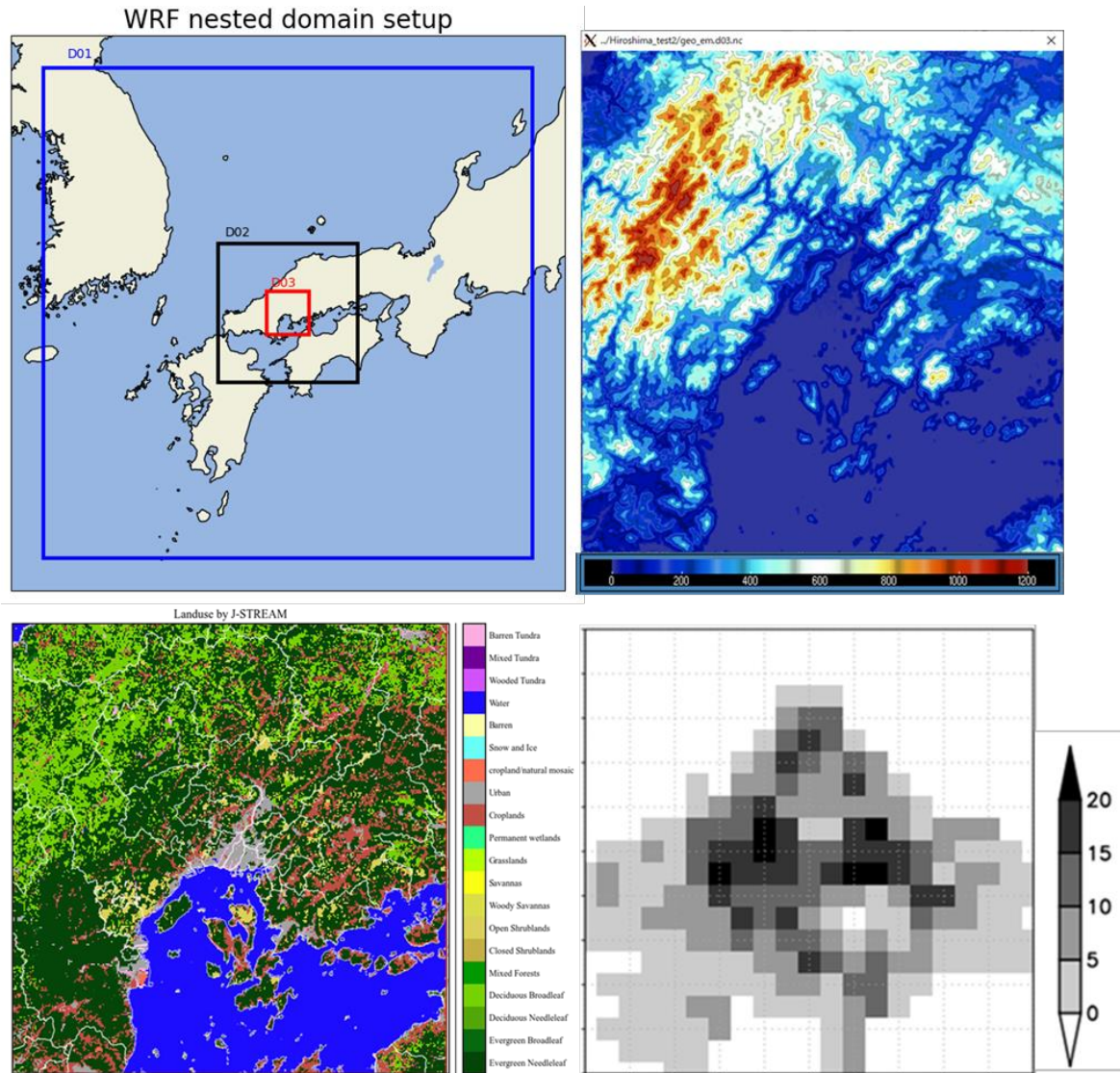


図4. 左上：使用した計算領域のドメイン（図は3ドメインの場合で2ドメインの場合はD02とD03のみとなる）。右上：最内領域（D03）の高度分布で水平解像度10m。左下：最内領域の土地利用（国立環境研究所のJ-STREAMプロジェクトのWRF土地利用データを使用）右下：最内領域で与えた熱フラックス [1]（単位はkJ）で実際にはさらに時間変化 [1]を考慮して与える。

よる気象計算に取り込み、積雲発達と降水を計算できるモデル体系を構築した。まず、米国大気海洋庁（NOAA）が作成した歴史的再解析データ（20CRv3）を入力として気象モデルWRFにより当時の背景気象場再現計算を実施した。爆発時刻の背景気象場に爆発で計算した温度分布を与えることで爆発雲を取り込み、さらに街区火災由来の熱フラックスと水蒸気

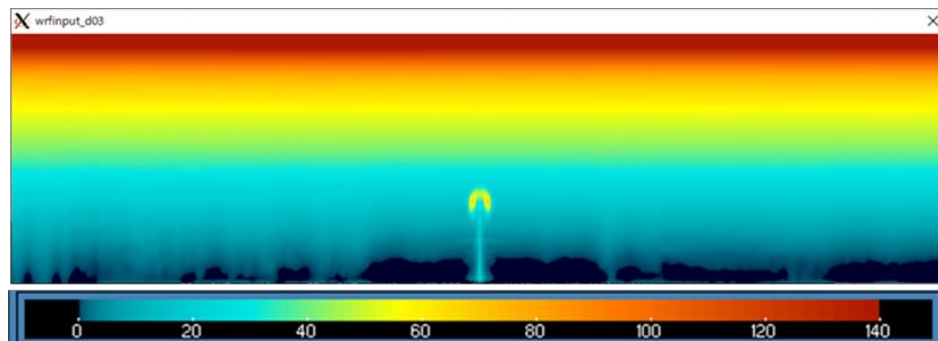


図 5. 爆発モデル温度を与えて作成した気象モデルの初期値例（カラーは温位を示す）

フラックスを気象モデル WRF の都市キャノピーサブモデル内の人工排熱（顕熱、潜熱）として与えることで街区火災の効果をとり込んだ。ただし、衝撃塵や火災煙による、エアロゾルが気象場に与える影響は無視している（後述するオンライン化学輸送モデル WRF-Chem を用いた計算で取り扱っている）。一方、移流拡散沈着計算では、ノルウェー大気研究所により開発された FLEXPART モデルを利用して、爆発モデルより構築した原爆由来物質の質量濃度分布を考慮した ^{137}Cs の発生量と分布をソースタームとして、WRF で計算された気象場の中で移流拡散・沈着計算を実施した。これらの計算により ^{137}Cs の乾性沈着量や湿性沈着量を求めることができるようになった。また、複数のプロセスに分割したことにより、爆発雲の熱、街区火災の熱の影響の有無による違いを調べることができるようになった。また、不確実性の評価の手始めとして、任意性のある計算領域の設定や使用する歴史的再解析データの選択（アンサンブル平均か特定のアンサンブルメンバーか）による結果への影響を見た。

図 4 に今回の計算で使用した計算領域のドメインと最内領域（D03）の標高分布、土地利用および与えた熱フラックスの分布図を示す。また、図 5 に爆発モデルの温度分布（爆発モデルの計算開始 80 秒後で原爆雲の雲頂高度は約 5000 m）を考慮した後の温位分布を示す。

気象モデルの計算条件を表 1 に示す。また、オフライン計算の際に使用した原爆由来物質の質量濃度分布を図 6 に示す。この質量濃度分布を存在割合として、 ^{137}Cs の拡散・沈着計算を行った。原爆による ^{137}Cs の生成量を 10^{11} kBq として 100 万粒子を用いて計算した。湿性沈着と乾性沈着のモデルで使用したパラメータは FLEXPART のデフォルト値 [2, 3] とした。

表 1. 気象モデルの計算条件

設定項目	設定内容	補足説明
爆心地の緯度	34.3946°	計算領域の中心となる緯度
爆心地の経度	132.4548°	計算領域の中心となる経度
stand_lon	132.4548°	計算領域の y 軸と平行になる経度
truelat1	30°	計算格子の距離と実距離の比が 1 になる緯度
truelat2	60°	
水平解像度 (D01)	3600m	グリッド数は 300×300
水平解像度 (D02)	1200m	グリッド数は 256×256
水平解像度 (D03)	400m	グリッド数は 238×238
鉛直層	85	大気上端は 50 hPa
雲微物理スキーム	Thompson	水蒸気・雲水・雨粒・雲氷・雪・霰が予報変数
積雲対流スキーム	なし	直接計算（高解像度のため）
放射スキーム	RRTMG	N/A
接地層スキーム	Monin-Obukhov	
大気境界層スキーム	MYJ	
ナッジング	スペクトル	ナッジングの時間間隔は 1 時間おき

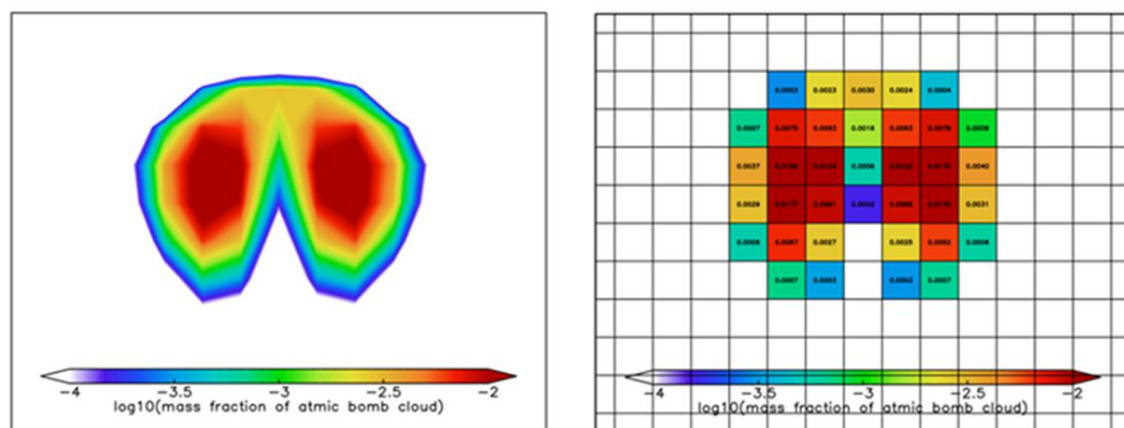


図 6. 原爆雲の雲頂高度が 5000 m 時点での原爆由来物質の質量濃度分布。左図が爆発モデルの計算結果で右図はオフライン計算で初期条件を設定するために利用した 500 m 格子での質量濃度分布を示す。

計算結果として、原爆投下 9 時間後の積算降水量を図 7 に示す。また、時間降水量から求めた降雨時間を図 8 に示す。それぞれ背景気象場の作成に 20CRv3 のアンサンブル平均を用いて計算領域を 3 ドメインとした場合と 2 ドメインとした場合を比較している。また、図 9 に 2 ドメインの計算結果を駆動場とするオフライン計算の結果の 1 例を示す。放射性降下物の拡散状況に係る土壌調査と比較し易いように GIS（地理情報システム）上で表示している。

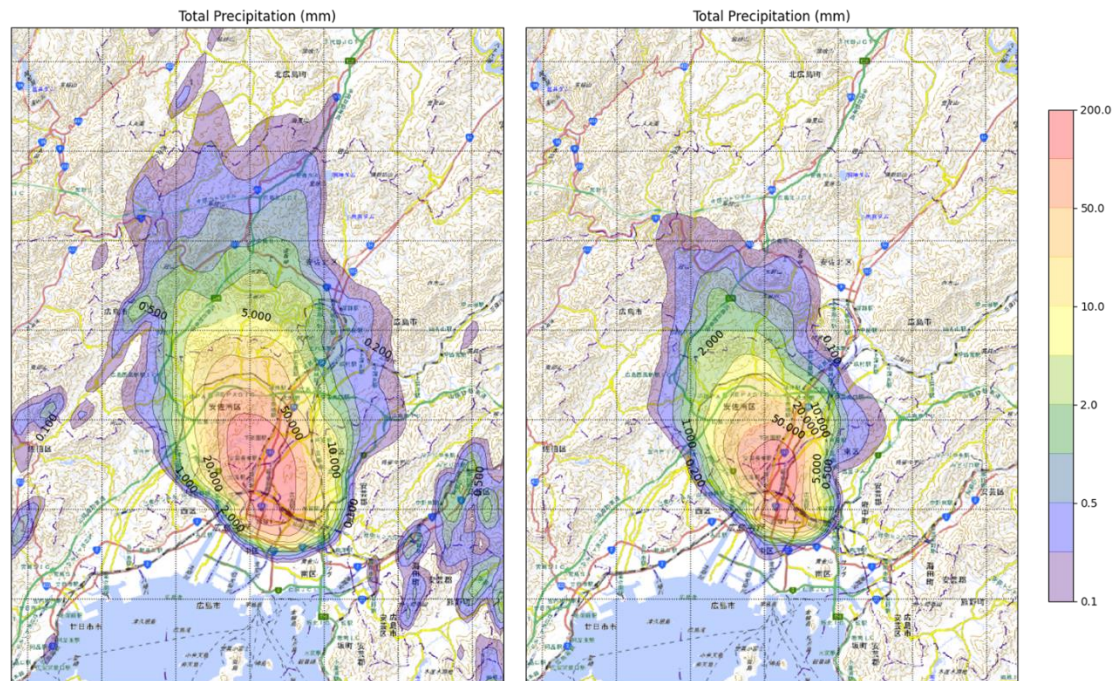


図 7. 原爆投下 9 時間後の積算降水量 (左 : 3 ドメイン, 右 : 2 ドメイン)

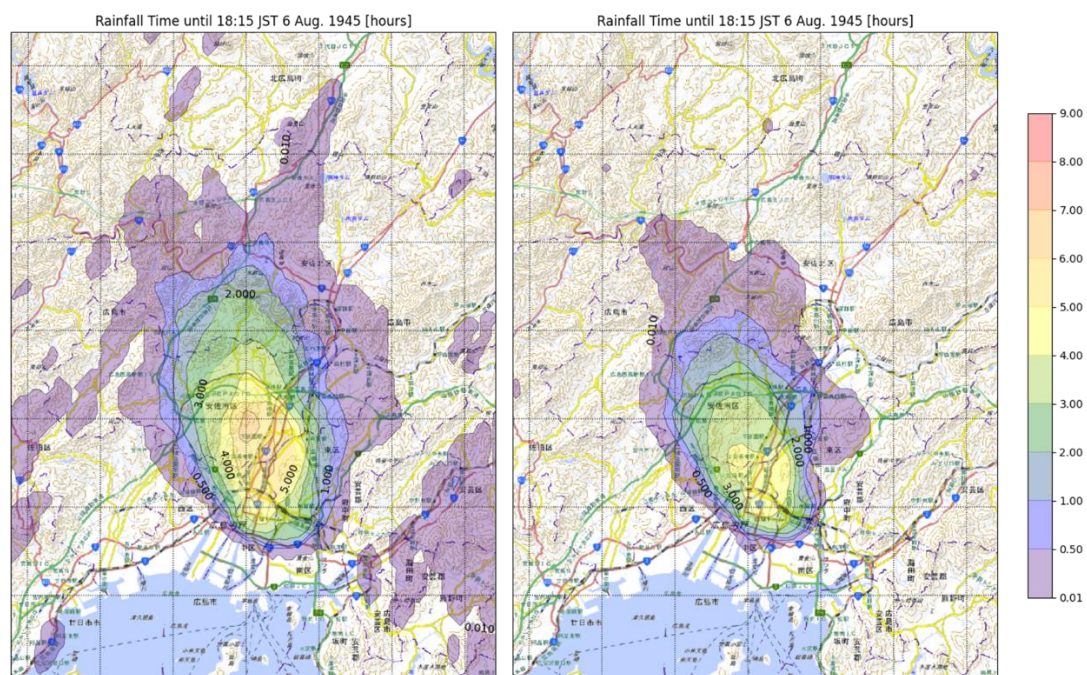
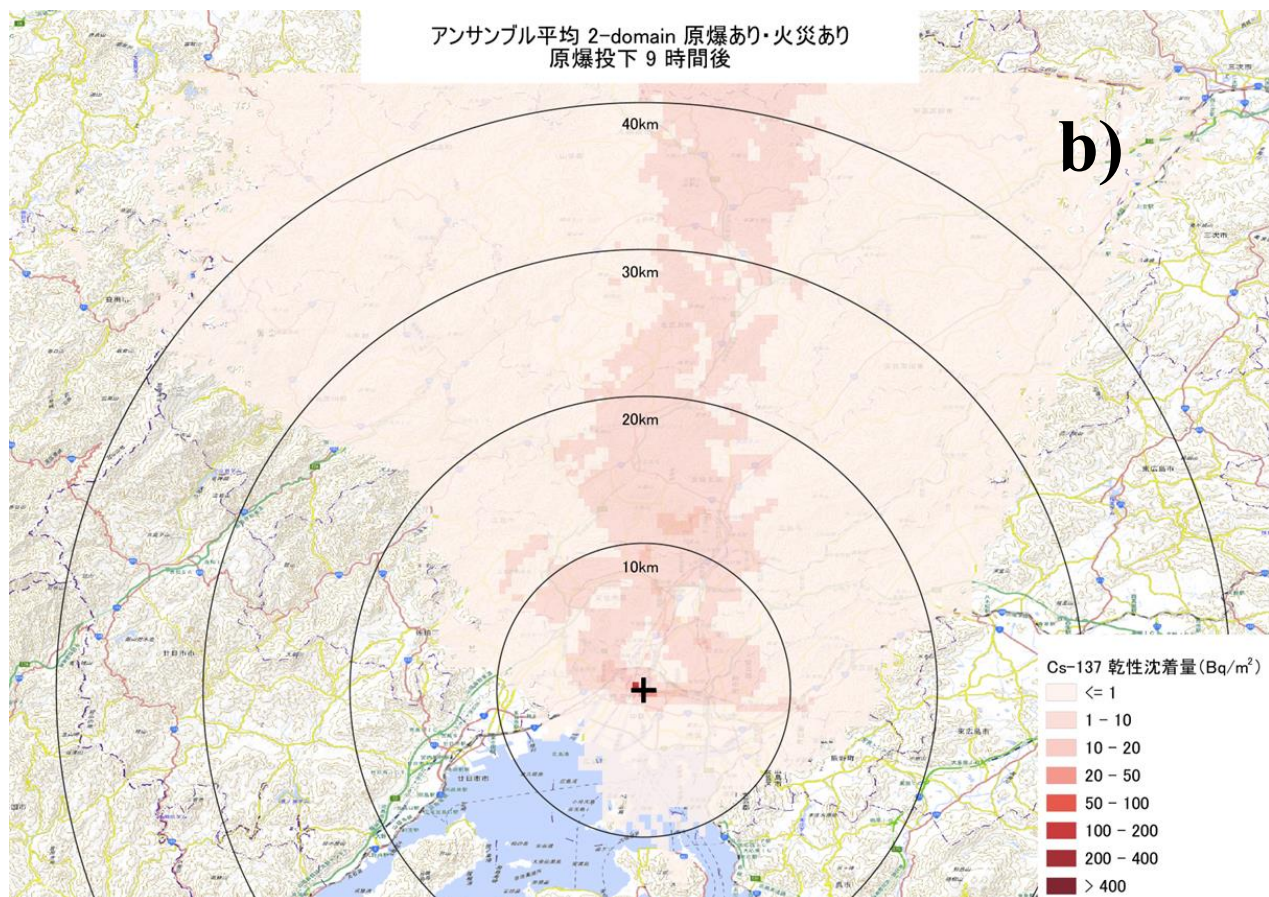
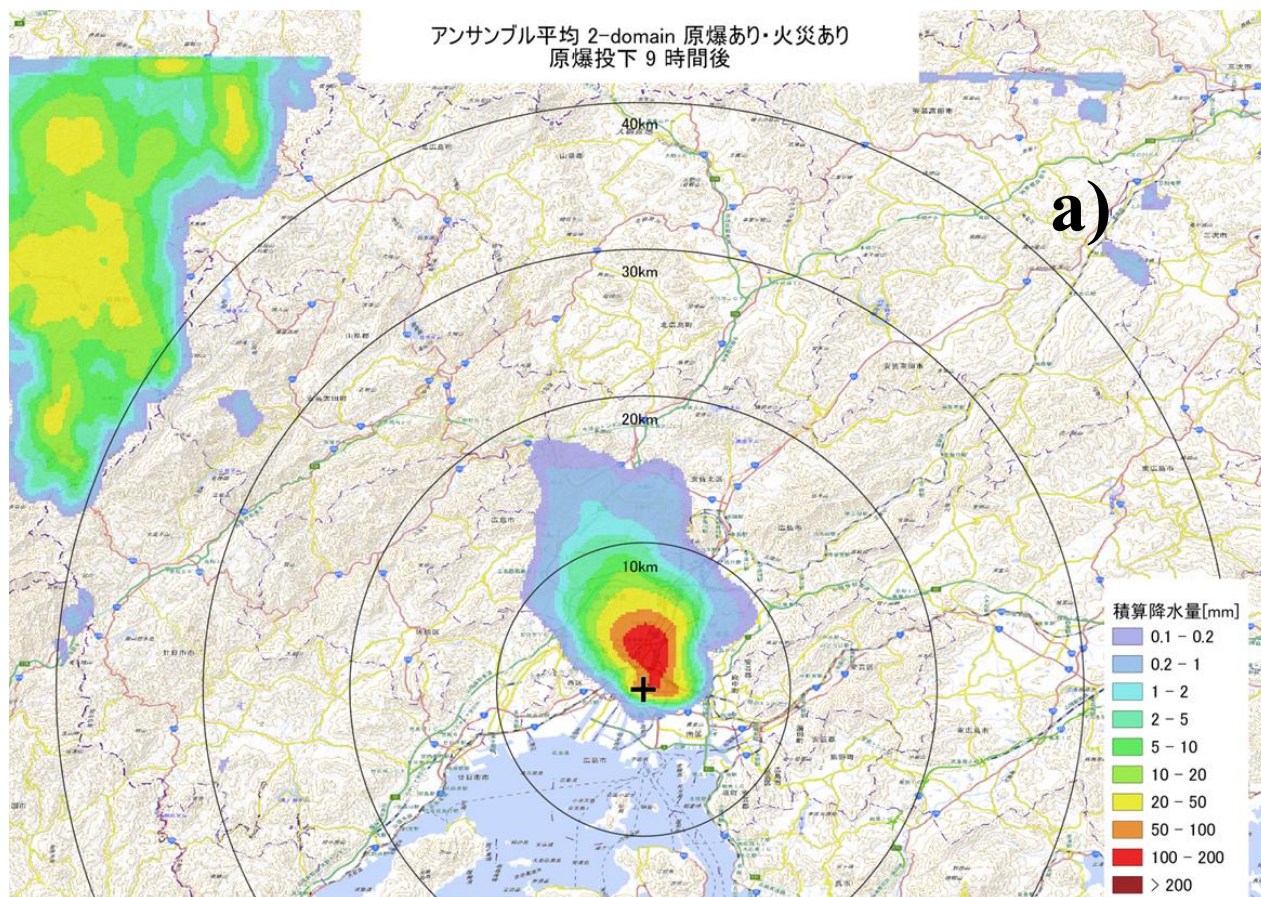


図 8. 原爆投下 9 時間後までにおける降雨時間 (左 : 3 ドメイン, 右 : 2 ドメイン)



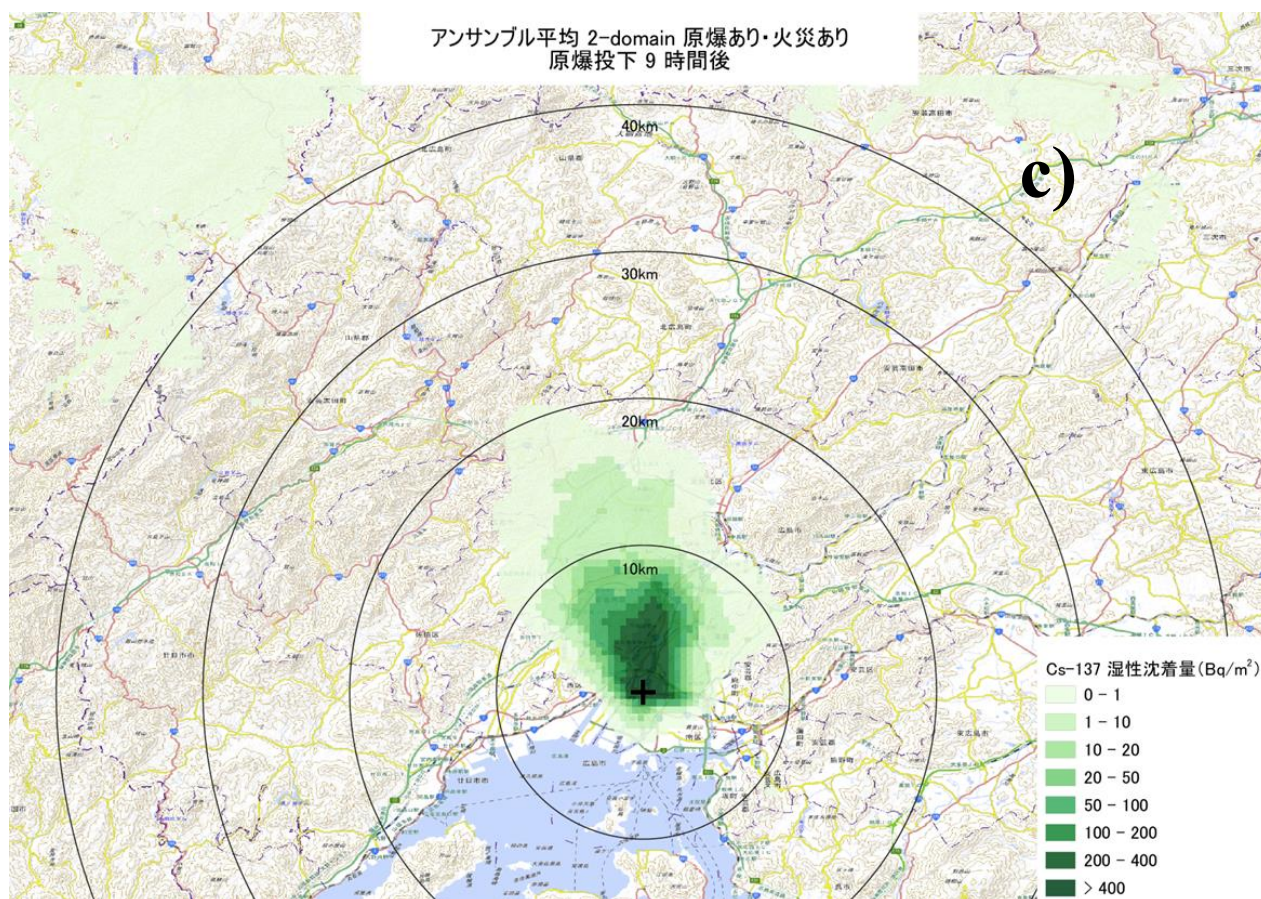


図 9. 原爆投下 9 時間後における積算降水量 (a) ; 図 4 右と同じデータ) と b) ¹³⁷Cs の乾性沈着量および c) ¹³⁷Cs の湿性沈着量

図 7～9 に計算結果を例示したが、今年度に構築した気象モデルを用いることで放射性降下物の拡散評価にかかるシミュレーションが実施可能であること示すことができた。次年度以降は、不確実性の評価をさらに実施する。例えば、図 7,8 から計算領域の違いだけでも降水が異なることが分かる。これは 3 ドメインでは海洋を多く含む外側の計算領域があるため、湿った空気が内側の領域に輸送された可能性がある。また、背景気象場の作成にアンサンブル平均ではなく他のアンサンブルメンバーを用いた場合や、再解析データに別のデータ (ERA-20C 等) を用いた場合にどの程度結果が変わるかなどを確認する必要がある。オフライン計算では、沈着パラメータによる感度解析、まだ扱っていない土壌由来の物質の拡散計算などにも取り組む。

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
- [2] https://www.flexpart.eu/browser/trunk/options/SPECIES/SPECIES_016
- [3] https://www.flexpart.eu/browser/flexpart.git/options/SPECIES/SPECIES_016
- [4] https://www.nies.go.jp/chiiki/jqjm1000000guawf-att/veg_jstream_manual.pdf
- [5] 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

[6] 大瀧慈「地裁判決が認めた黒い雨による内部被曝」, 広島平和学, 42, p1-16, 2020

[7] Ohtaki, M. “Re-construction of spatial-time distribution of 'black rain' in Hiroshima based on statistical analysis of witness of survivors from atomic bomb”, Revisit The Hiroshima A-bomb with a Database: Latest Scientific View on Local Fallout and Black Rain, HiSoF, 2013

[8] <https://pywinter.readthedocs.io/en/latest/>

○気象モデルデータにおける不確実性の解析

令和4年度11月から2月の期間において「気象モデルの構築に向けた研究」を担当した。関係者と意見交換をしつつ以下を実施した。

1) 歴史的再解析データによる気象モデル WRF 再現性・不確実性の評価

2) 近年の再解析データによる気象モデル WRF 再現性・不確実性の評価

3) 1945 年 8 月 5～7 日の広島周辺の気象観測原簿のデジタル化, 文献調査

1) 歴史的再解析データによる気象モデル WRF 再現性・不確実性の評価

1945 年の原爆投下時の気象シミュレーションの最大の課題の 1 つが, 当時の高層観測データが少なく初期条件・境界条件が得にくいことにある。爆発や化学物質の輸送シミュレーション以前に, WRF シミュレーション結果の風向風速の適切な再現が黒い雨降下域再現の鍵である。気象シミュレーションチームでは, 歴史的再解析のアンサンプルのうち北西方向に流れる傾向をもつ事例 (mem 051) を入力とした計算を行った。弘前大学は 3) で気象原簿をデジタル化し, 気象モデル実行結果の検証を行い, モデルの条件設定に貢献した。ここでは, 2 段階ネスティング (2-domain) によるダウンスケーリング結果の検証図を図 10 に示す。

図 10 より, WRF は気温, 風向, 風速ともよく再現していることがわかる。気温, 風速は若干モデルが過小評価している。この実験は, 原子爆弾の爆発や続く火災の影響が含まれないため, 該当する時間のモデルと観測値との差が, 爆発や燃焼の影響を示している可能性はある。爆発や燃焼による強い上昇気流が周囲 (海洋を含む) からの水蒸気を集め黒い雨の元となった可能性があり, 今後の爆発・燃焼実験による広島気象台付近の水蒸気量や風向の検証に用いるべきものと考ええる。

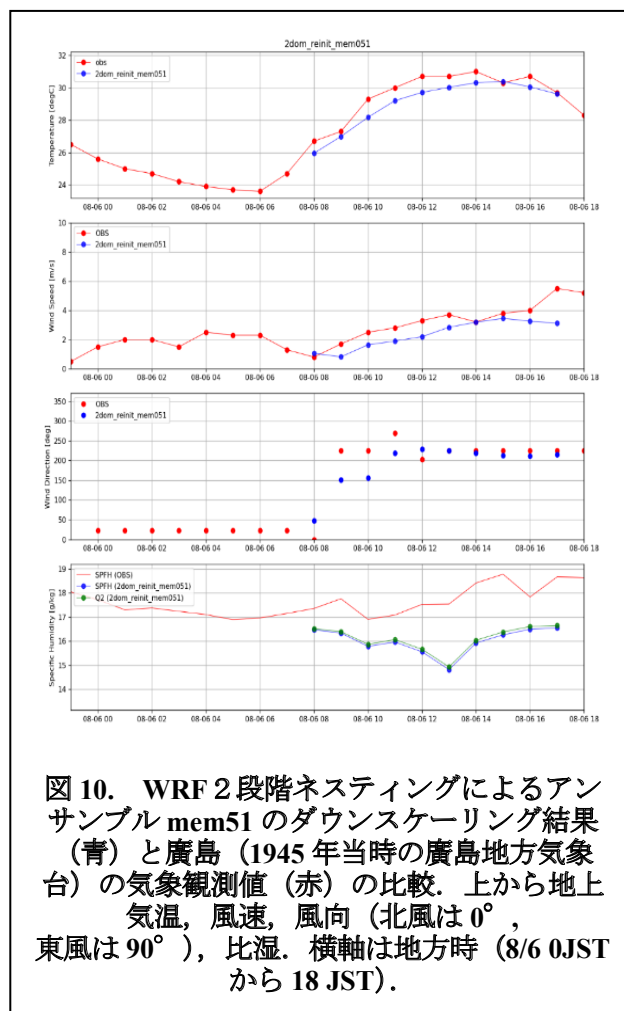
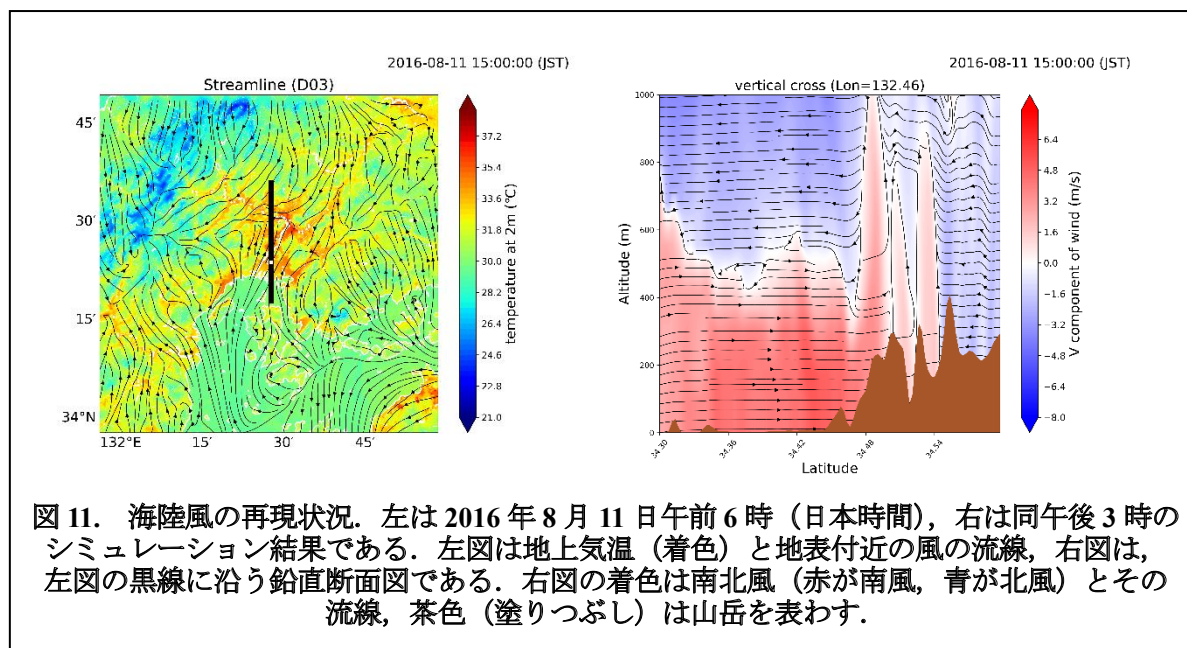


図 10. WRF 2 段階ネスティングによるアンサンプル mem51 のダウンスケーリング結果 (青) と広島 (1945 年当時の広島地方気象台) の気象観測値 (赤) の比較. 上から地上気温, 風速, 風向 (北風は 0°, 東風は 90°), 比湿. 横軸は地方時 (8/6 0JST から 18 JST).

2) 近年の再解析データによる気象モデル WRF 再現性・不確実性の評価



計算モデルに内在する計算結果の不確実性や入力気象データの信頼度に関する情報を得る目的で, 原爆投下時の気象状況とよく似た気圧配置の事例を選び出し, これらの対象日の WRF によるシミュレーションを行い, 観測データとの比較を行った. 弘前大学は, 2016 年 8 月 12 日と, 2018 年 8 月 4 日を担当し, 2 種類の再解析 (NCEP FNL と NCEP GDAS) を用いシミュレーションを行った. モデルの出力結果と AMeDAS (気象庁地上気象観測), Wind Profiler (上層風) の観測値を比較した. その結果, AMeDAS との比較に関しては, 広島を含む中国地方のどの地点においてもシミュレートされた時系列の変動傾向は, 観測値と定性的に一致した. 岩国ではモデルの風速が夜間に過大評価したが, 統計的には十分に有意な結果であり, 本研究の対象時間 (夏の昼間) においては問題ないこともわかった.

Wind Profiler による浜田, 高知の上層風シミュレーションを検証した結果, 浜田では, 600 m, 900 m, 2100 m と高い相関が得られたが, 3200 m は負の相関となり再現はよくなかった. 高知は全般的に浜田よりも再現が悪いが, 2100 m は非常に高い相関が得られた.

次に, 海陸風の再現状況を, 本研究にとって重要な海風の事例から示す. ここでは, 2016 年 8 月 11 日午後 3 時の気温, 地表付近の風の流線と鉛直断面図を示す. 午後 3 時は陸の温度が海上より高く, 海から陸に向かって風が吹いていること, 上空では陸から海に向かって風が吹いていることが確認できた (図 11).

以上から, 近年の再解析データを用いた類似事例シミュレーション結果は, 地上観測とよく一致し, 海陸風の交代を実況に即して再現すると判断できた. 上層風は, Wind Profiler 観測と比較して風速はやや小さめであるが, 概ね観測に追従する結果が得られた. 気象モデル WRF は, 適切な入力データが与えられれば, 夏季の瀬戸内海沿岸地域の海陸風循環を再現するのに適した性能を有していると判断できた.

3) 1945 年 8 月 5～7 日の広島周辺の気象観測原簿のデジタル化，文献調査

デジタル台風：区内気象観測原簿—地上気象観測原簿アーカイブ (<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/genbo/5/1/>) から，右図に示す 1945 年 8 月 5 日～7 日の広島周辺の手書き地上観測記録の風向・風速データをデジタル化した。広島は，それに加えて気温，相対湿度，気圧もデジタル化し，当時の気圧計に含まれるバイアスを補正した値から比湿データも整備した（図 12 にデジタル化したデータの地点を記した）。

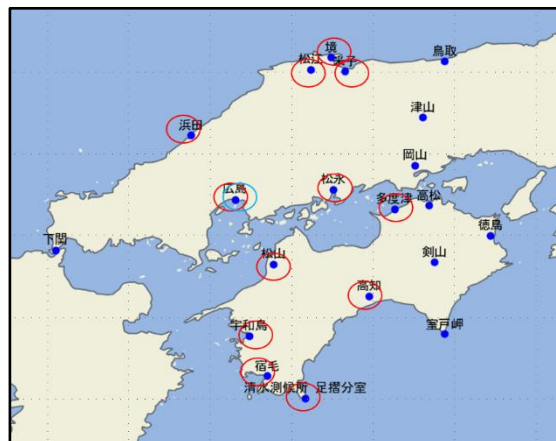


図 12. 1945 年当時の手書き地上観測記録をデジタル化した気象観測地点 赤丸

また，当時の広島地方気象台（現在の江波山気象館）を 2023 年 1 月に訪問し，当時の観測データ記録（遠藤，2022 [1]）や，黒い雨の聞き

取り調査記録を閲覧した。また，増田（1989）[2]によって考察された，局地的な降水に対する河川の影響について関係者と意見交換し，土壌サンプリングサイト複数箇所を訪問した。

参考文献：

[1] 遠藤正智（2022）広島市江波山気象館所蔵の気象学史的資料，天気，69，229-233.

[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，36，69-79.

謝辞： 1945 年当時の気象データの補正について，専門家の山本哲氏からご助言をいただいた。江波山気象資料館の遠藤正智氏には，貴重な観測記録を閲覧させていただき，有益なコメントをいただいた。本計算の実行の一部は，東京大学情報基盤センター所有の Oakbridge-CX を使用した。WRF シミュレーション実行，図化，デジタル化作業は，弘前大学技術補佐員前田未央氏，川代迅氏（M1），山田雄斗氏（B4），池森凜氏（B4），去田尚悟氏（B4）にご協力いただいた。

担当者： 弘前大学 谷田貝亜紀代

京都大学複合原子力科学研究所 石川裕彦

OWRF/Chem を用いた計算の概要

前年度までに行った，気象数値モデルや燃焼・爆発モデルを取り入れた原子雲（爆発雲、巻き上がった衝撃塵、火災煙を含む）・黒い雨の再現計算の詳細に関する検討および気象データセットの準備を踏まえ、広島に関する本格計算実験を実施した。具体的には、局地的な気象と爆発や街区火災にともなう降水の発生を計算し、爆発雲、衝撃塵、および火災煙由来の物質の降下地域や降雨量の推定を行った（黒い雨地域の推定・評価）。この際、原爆の熱源、街区火災等の人工熱源に対する気象モデルの応答は理想化計算で精査した条件設定および過去の研究事例等を踏まえて計算を行った。火災の設定条件、衝撃塵、および火災煙由来の物質のモデル組み込みについても検討を行った。合わせて、計算実験の各過程に付随する不確実性の評価について、とくに気象場の与える影響について評価を進めた。さらに、このモデル計算の実施に際する困難性の要因の一つとして考えられる、雲-エアロゾル相互作用に関する予備的な実験を、WRF とオンライン結合した化学輸送モデル WRF/Chem を用いて行った。

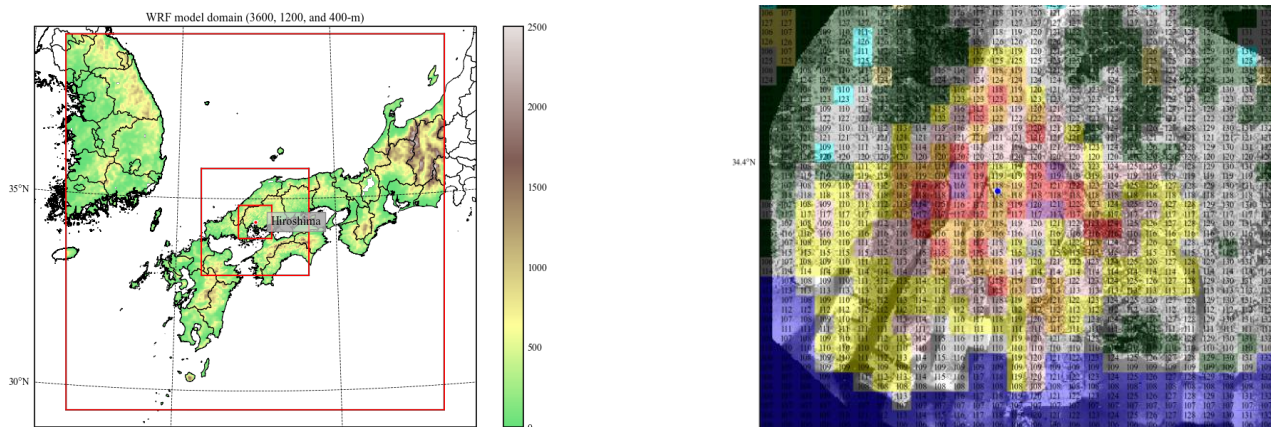


図 13. 計算対象領域(左図)および広島周辺の土地利用(右図)。計算対象領域における赤枠はネスト計算時の各段階(3600 m 格子、1200 m 格子、400 m 格子)をそれぞれ示す。広島周辺の土地利用については米軍による航空写真と重ねたうえで、暖色系の色で火災域を合わせて表示している。また数字は 400 m 格子における格子番号を、青丸は爆心地をそれぞれ示す。

広島における「黒い雨」分布再現実験のためのデータ・モデル整備

昨年度から引き続き数値実験に関する議論を行い、入力データの整備を行なった。具体的には、地形標高データについて国土地理院の 10 m メッシュ基盤地図情報 [1]をベースに、1945 年から 1950 年にかけて撮影された米軍航空機写真 [2]などを用いて海陸分布等を修正し、原爆投下当時の地形および土地利用をより適切に反映できるよう、モデル入力データの精緻化を進めた (図 13 左図)。また、街区火災による気象場への影響についても、京都大学から提供された青山ら [3]により推定された街区火災(図 13 右図)による潜熱、顕熱フラックスを取り込めるよう領域気象モデル WRF の改変を行った。具体的には、街区火災による潜熱および顕熱フラックスについては WRF の都市キャノピーモデル内での人工排熱として与えるとともに、原爆投下時の時刻 (8 時 15 分) を考慮できるよう 15 分ごとの時間間隔で与えるよう設定した。

街区火災によるエアロゾルの放出と巻き上げについては、オンライン化学輸送モデル WRF/Chem の GOCART 化学モジュールを用いて黒色炭素粒子および土壌粒子をそれぞれ考慮した。黒色炭素粒子の排出量については街区火災の潜熱フラックスおよび木材燃焼時の熱効率(17.9 MJ/kg)から 400m 格子における可燃物の平均質量を求めた上で、黒色炭素粒子のエミッションファクター (0.5 gBC/kgC [4])を乗じて推定した。土壌粒子の排出量については街区火災域において GOCART のダスト巻き上げモジュール [5]を使用した。またその際、モデル内の各タイムステップで火災旋風等の影響を含めて計算される地表風速を用いて巻き上げ量を推定した。

「黒い雨」における街区火災の影響評価

本モデルを用いた降雨再現実験を行うにあたり、気象場の初期値および側面境界として 20 世紀再解析データ (20CRv3)のアンサンブル平均データを用いた。街区火災や巻き上げられたエアロゾルによる降雨分布の変化に影響すると思われる雲微物理スキームや接地境界層スキーム等も含め、計算設定としては表 1 のような設定を用いて実験を行った。積分期間は 1945 年 8 月 6 日 6 時からの 12 時間とした。

表 2. 本計算における設定

使用モデル	WRF/Chem バージョン 4.4
化学モジュール	GOCART (黒色炭素粒子および土壌粒子のみ使用)
水平解像度	3 段ネスト (3600 m, 1200 m, 400 m)
鉛直層数	85 層 (モデル上端: 50h Pa)
初期値・側面境界	NOAA/CIRES/DOE 20th Century Reanalysis version 3
地表面過程	Unified NOAA + single layer Urban Canopy Model
雲微物理過程	Goddard
積雲対流過程	考慮せず
放射過程	Goddard (長波・短波)
接地境界層過程	Shing-Hong 'scale-aware'

本計算による降水持続時間および積算降水量について図 14 に示す。初期値および側面境界として使用した 20 世紀再解析データは ECMWF ERA5 などの近年を対象とした再解析データより解像度が荒く (1 度×1 度)、3 段ネストでのダウンスケーリング計算では広島周辺で西風バイアスが見られた。このため降水分布についても観測された「黒い雨」の降水域よりも東側に偏りが見られるが、卵形の宇田雨域にやや近い形状の降雨域が見られた。また降水時間についても 1 時間以上降水が見られた地域が爆心地から下流域にかけて広く広がっている様子が見られた。

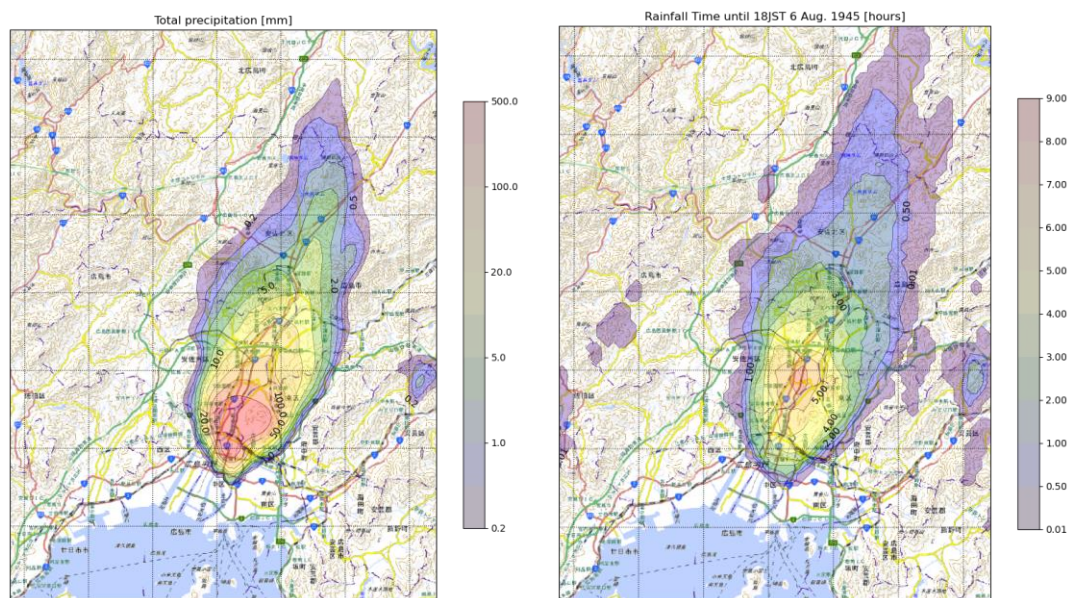


図 14. WRF/Chem により計算された 1945 年 8 月 6 日 18 時までの間の積算降水量(左図)および降水時間(右図)

20 世紀再解析データは 80 メンバのアンサンブル平均であり、また地表面での観測のみを拘束条件とする長期再解析の特性上メンバ間の差異が大きくなりやすいため、アンサンブル平均でなく個々のメンバのうち観測された風系に近いメンバを用いることにより降雨域のバイアスが改善される様子なども見られた。このため、気象場の不確定性による降水域推定精度の評価のためには、広島周辺の気象場の再現精度の悪いメンバを除いたうえで降水域のメンバ間の差異等を精査する必要があることなどが示唆された。

再現実験における雲-エアロゾル相互作用の影響評価のための予備的実験

街区火災などにより発生する黒色炭素粒子や土壌粒子などに代表されるエアロゾルは、雲-エアロゾル相互作用を介して「黒い雨」の降水分布などに影響を与えうる。このため、

雲-エアロゾル相互作用を考慮した予備的な数値実験を実施した。ここでは、エアロゾルが放射過程に与える直接効果と、雲凝結核として雲粒子数や雲粒の有効半径などに影響を与える、いわゆる直接効果と第一種間接効果を考慮した。

図 15 に、街区火災が激しかった 12 時時点での光学的厚さ、すなわちエアロゾルによる太陽放射の減衰量の鉛直積算量を示す。光学的厚さ 1 は、地上における直達日射量が大気外日射量の $1/e$ ($1/2.72$ 、すなわち約 3 分の 1) に減衰することを意味する。街区火災に伴う熱対流により自由対流圏まで巻き上げられた水蒸気およびエアロゾルは上層風により北側に輸送され、図 14 に見られるような卵形の降水域を形成しているが、上層風の鉛直シアによりエアロゾルはより広範に輸送されている様子が見られた。また鉛直方向の輸送およびエアロゾルの雲への影響等を見るため、爆心地から下流方向にかけての高度断面図を図 16 に示す。図 16 左図では、黒色炭素粒子が熱対流により高度 12 km 以上にまで輸送されていること、および火災がそれほど激しくない地点では高度 3 km 程度の高度域まで輸送されており、広い高度域での気象場の検証が必要であることが示唆された。また図 16 右図のように過飽和状態でのエアロゾルが雲凝結核および氷晶核として作用している可能性があることなどが確認されたが、

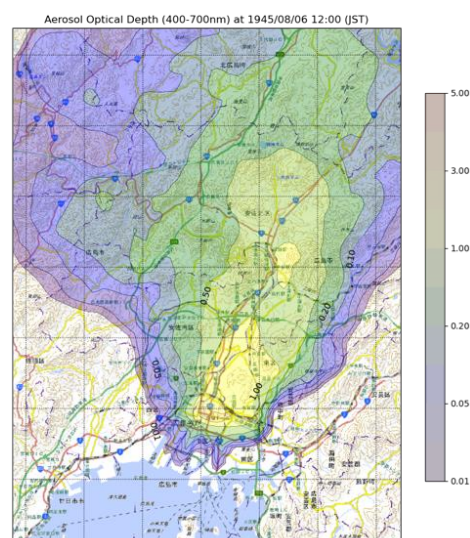


図 15. WRF/Chem で計算された 1945 年 8 月 6 日 12 時におけるエアロゾル光学的厚さ

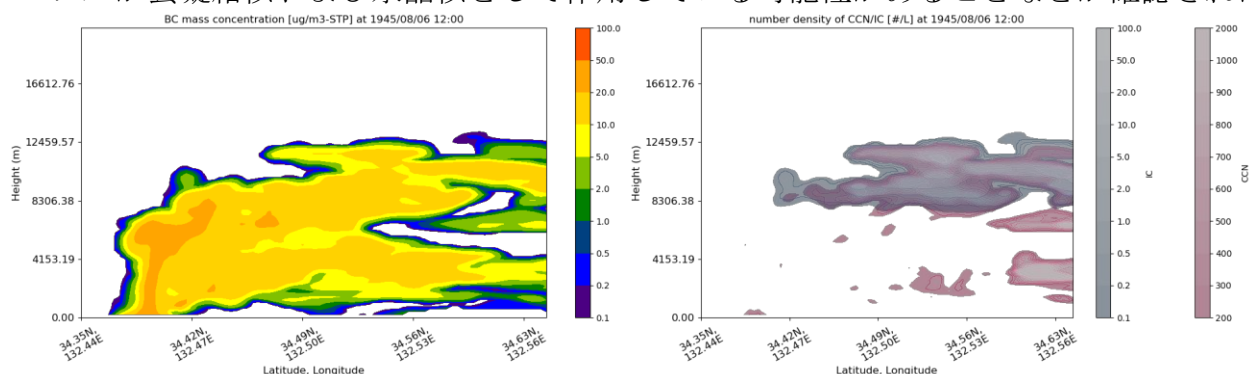


図 16. 爆心地から下流域にかけての黒色炭素粒子の質量濃度の高度分布(左図) 雲凝結核(赤色)、氷晶核(青色)の高度分布(右図)

現在は土壌粒子および親水性の黒色炭素粒子のみの雲-エアロゾル相互作用のみを考慮している。このため、他のエアロゾルも含めた検証についても引き続き必要と考えられる。

謝辞

本計算の実行にあたっては東京大学情報基盤センター所有の Oakbridge-CX および海洋研究開発機構所有の地球シミュレータを使用した。

参考文献：

- [1] 基盤地図情報数値標高モデルについて. 国土交通省国土地理院 https://fgd.gsi.go.jp/download/ref_dem.html.
- [2] 地理院タイル一覧. 国土交通省国土地理院 <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>.
- [3] Aoyama, M. 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* (Eds. Aoyama, M. & Oochi, Y.) 43–54 (Hiroshima City, 2011).

[4] Akagi, S. K. et al. Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models. *Atmos. Chem. Phys.* **11**, 4039–4072 (2011).

[5] Ginoux, P. et al. Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model. *Journal of Geophysics Research* **106**, 20255–20273 (2001).

担当者： 海洋研究開発機構 滝川雅之

(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。

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

長崎での地権者同意と同意取得：長崎市役所、長崎県庁、京都大学

実地調査および土壌試料採取：京都大学、長崎大学、（株式会社）九州自然環境研究所

この結果、長崎地域の地図作成と地点選定を進め、令和3年度強化分で実施した5箇所分と併せて長崎地域で12箇所において土壌採取を実施し、複数の地点の土壌試料について ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 、プルトニウム等の測定を実施できた（2023年3月中旬時点）。

(2) a. 1) 調査地点の設定、試掘および土壌試料採取の実施

長崎においては、長崎大学所属の分担研究者の主導で、広島での経験を元に、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）。

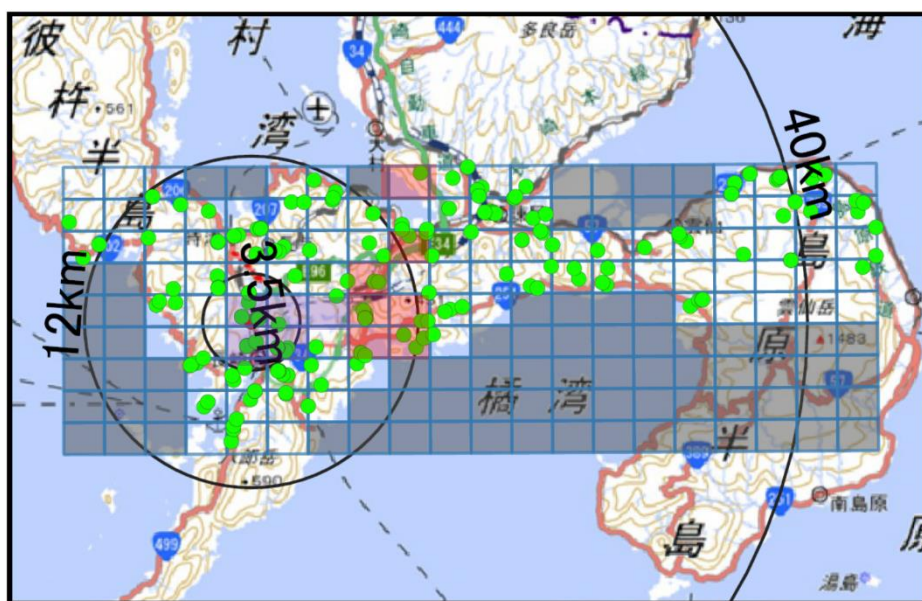


図 17. 長崎における調査範囲の概略 赤色が令和4年度採取、紫色が前年度採取実施区域 緑○は候補地点

23.1.29-30ロケハンルート(1日目)



23.1.29-30ロケハンルート(2日目)



図 18. 長崎における事前踏査（ロケハン）の状況例

長崎における調査範囲を図 17 に示す。長崎における土壌採取候補地点は、全体で 100 区域となり、候補地点を選定した。全 100 区域のうち、12 の区域において候補地点を選択し、事前踏査（ロケーションハンティング；ロケハンと称した）を実施し（図 18）、最終的に土

壤試料採取に臨んだ。

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
長崎大学： 松田尚樹、福田直子、株式会社 九州自然環境研究所

採取場所：長崎		施設名		緯度：北緯																																																																									
作業日：令和 5 年 3 月 11 日		候補順位	経度：東経																																																																										
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 印 作業場所： 度：北緯 作業日： 度：東経 作業名：足立(室)、内田、水野、古賀 天候：晴 KY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： 取土器具の持ち手等に土壌付着を確認し、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>採取深度(m)</th> <th>採取位置</th> <th>採取深度(m)</th> <th>採取位置</th> <th>採取深度(m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0-10</td><td>15.2</td><td>100-110</td><td>18.2</td><td>200-210</td><td>28.0</td></tr> <tr><td>10-20</td><td>6.5</td><td>110-120</td><td>27.7</td><td>210-220</td><td>22.7</td></tr> <tr><td>20-30</td><td>9.5</td><td>120-130</td><td>15.7</td><td>220-230</td><td>28.7</td></tr> <tr><td>30-40</td><td>5.7</td><td>130-140</td><td>28.7</td><td>230-240</td><td>27.7</td></tr> <tr><td>40-50</td><td>18.6</td><td>140-150</td><td>22.4</td><td>240-250</td><td>29.0</td></tr> <tr><td>50-60</td><td>13.7</td><td>150-160</td><td>28.4</td><td>250-260</td><td>23.7</td></tr> <tr><td>60-70</td><td>18.3</td><td>160-170</td><td>21.2</td><td>260-270</td><td>18.8</td></tr> <tr><td>70-80</td><td>13.2</td><td>170-180</td><td>21.2</td><td>270-280</td><td>27.2</td></tr> <tr><td>80-90</td><td>12.2</td><td>180-190</td><td>24.4</td><td>280-290</td><td>27.3</td></tr> <tr><td>90-100</td><td>17.8</td><td>190-200</td><td>18.4</td><td>290-300</td><td>26.4</td></tr> </tbody> </table> 作業内容 <table border="1"> <tr> <td>1) 現場確認、準備</td> <td rowspan="6">12:55~13:05</td> </tr> <tr><td>2) 土壌採取(コア採取)</td></tr> <tr><td>3) GPS測位</td></tr> <tr><td>4) 土壌採取</td></tr> <tr><td>5) 現場確認</td></tr> <tr><td>6) 土壌採取</td></tr> </table> 現場写真・採取箇所 0-10 10-20 20-30 30-40 40-50 50-60 60-70 70-80 80-90 90-100		採取位置	採取深度(m)	採取位置	採取深度(m)	採取位置	採取深度(m)	0-10	15.2	100-110	18.2	200-210	28.0	10-20	6.5	110-120	27.7	210-220	22.7	20-30	9.5	120-130	15.7	220-230	28.7	30-40	5.7	130-140	28.7	230-240	27.7	40-50	18.6	140-150	22.4	240-250	29.0	50-60	13.7	150-160	28.4	250-260	23.7	60-70	18.3	160-170	21.2	260-270	18.8	70-80	13.2	170-180	21.2	270-280	27.2	80-90	12.2	180-190	24.4	280-290	27.3	90-100	17.8	190-200	18.4	290-300	26.4	1) 現場確認、準備	12:55~13:05	2) 土壌採取(コア採取)	3) GPS測位	4) 土壌採取	5) 現場確認	6) 土壌採取	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 長崎 全体図 凡例 - 土壌採取候補地点 - メッシュ - groundZeroNagasaki - 原爆地下地点からの同心円 メッシュ中心に近い順にリストに表示している。 名称の末尾の(A)(B)(C)等は、同じ地点に関連すると思われる地点を表す。(例：島田、堀内社) 類似は、同じ建物に関連すると思われる地点((A)(B)(C)等)毎に付けている。 備考欄に「別途調査」があるものは、原爆地下地点に付ける存在の判断を、当地図以外で行っている。 備考欄に「追加地点」とあるものは、Google map 検索結果に無かった地点を、国土地理院地図及び現地調査に基づき、追加している。		
採取位置	採取深度(m)	採取位置	採取深度(m)	採取位置	採取深度(m)																																																																								
0-10	15.2	100-110	18.2	200-210	28.0																																																																								
10-20	6.5	110-120	27.7	210-220	22.7																																																																								
20-30	9.5	120-130	15.7	220-230	28.7																																																																								
30-40	5.7	130-140	28.7	230-240	27.7																																																																								
40-50	18.6	140-150	22.4	240-250	29.0																																																																								
50-60	13.7	150-160	28.4	250-260	23.7																																																																								
60-70	18.3	160-170	21.2	260-270	18.8																																																																								
70-80	13.2	170-180	21.2	270-280	27.2																																																																								
80-90	12.2	180-190	24.4	280-290	27.3																																																																								
90-100	17.8	190-200	18.4	290-300	26.4																																																																								
1) 現場確認、準備	12:55~13:05																																																																												
2) 土壌採取(コア採取)																																																																													
3) GPS測位																																																																													
4) 土壌採取																																																																													
5) 現場確認																																																																													
6) 土壌採取																																																																													
採取地点の状況		備考																																																																											
		・リター層(Aの層)が非常に厚く、特にガイドフレーム内の北側部分(神社本殿側)は~120mmあたりまでH層と呼ばれる微細な堆積有機物層が出現した。 ・作業途中から石礫が多く出現し、大きな礫は細土を刷毛としておおよそのサイズを測定し、写真を撮影したうえで除去した。また、瓦の破片も出土したため記録した。 ・260~300mmの間でスクレーパープレートの深度の設定に誤りがあったと考えられる。																																																																											

図 19. 長崎において土壌採取した地点に関する「カルテ」

(2) a. 2) 土壌試料の採取

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(株)九州自然環境研究所が、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。本年度は、昨年度強化策による広島地域での採取での問題点や改善すべき点を考慮・検討の上、あらためて採取地点を精査して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。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 19 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。

以下に、2023 年 3 月 23 日現在の長崎土壌試料採取と処理の進捗状況の一覧を図示した。試料採取や前処理は、順当に進捗したと判断している。長崎地域においては令和 3 年度強化分として実施した 5 地域分を併せると全体 12 地域での土壌試料採取を実施した。

(2) a. 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研究所に届けられ、以下の処理 1)~3) 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。

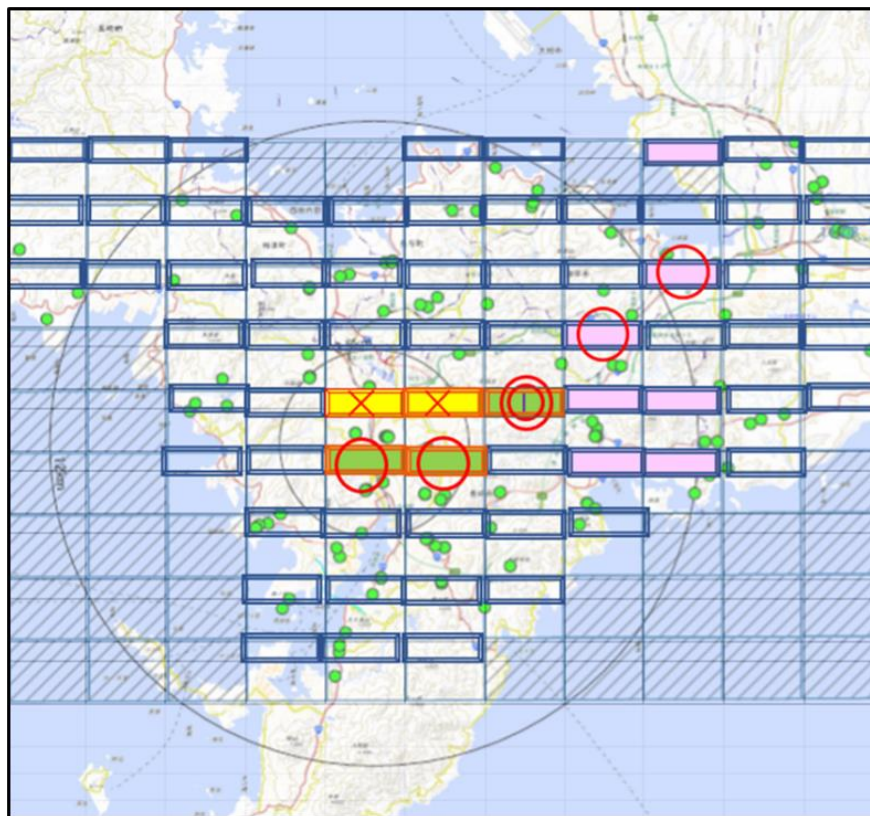


図 20. 長崎における土壌試料採取と前処理進捗状況 (2023/3/23 時点)

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、スクリュ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、このスクリュ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。

(2) a. 4) 放射性降下物の測定事例 (^{137}Cs および過剰 ^{210}Pb の測定) – 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土壌試料の γ 線測定結果について記載する。 ^{137}Cs の壊変によって放出される 662 keV ガンマ線の光電ピークを用いて分析測定を行った。さらに令和 3 年度に導入した Ge 半導体検出器により ^{210}Pb の壊変によって放出される 46.5 keV の光電ピークの測定が可能になったため、 ^{210}Pb の分析測定も併せて行った。さらに、大気由来と推定される ^{210}Pb の面分(過剰 ^{210}Pb) の見積もりも行った。土壌を構成する鉱物に含まれるため、 ^{210}Pb は土壌に存在す

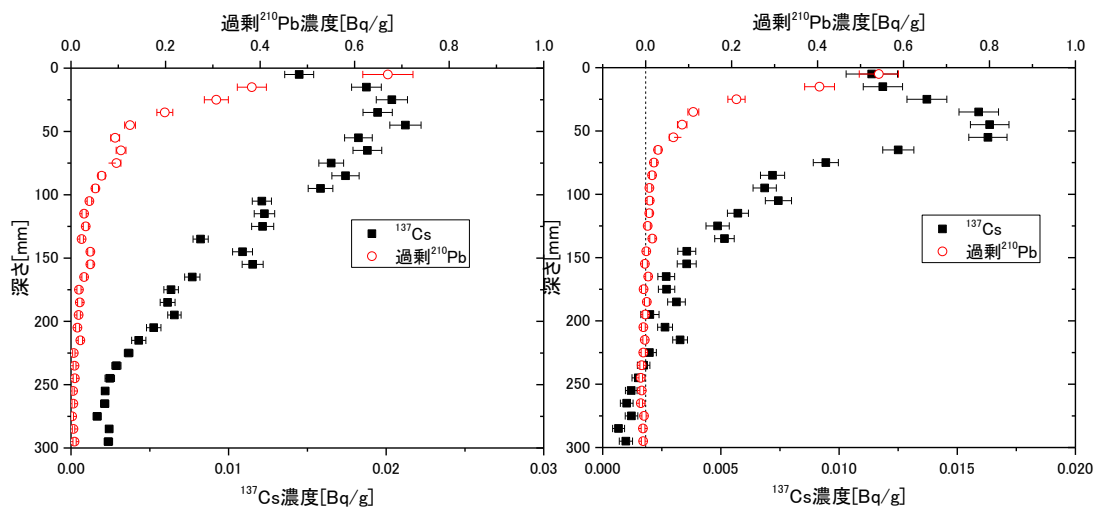


図 21. 土壌試料の鉛直方向の放射能濃度分布 (左: 長崎 N-09-13; 右: 広島 H-05-02)

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 の面分が推定される。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 21 に示す長崎の地点(N-09-13)での鉛直方向における放射能濃度分布並びに広島の地点(H-05-02)での鉛直方向における放射能濃度分布をそれぞれ示す。両方のデータとも ^{137}Cs の残留の様相が見て取れ、過剰 ^{210}Pb 濃度の減少の様子からも、未かく乱の地点から採取されたことが示唆された。

担当者： 京都大学複合原子力科学研究所 八島浩

(2) a. 5) ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 、Pu 分析結果のまとめ

本調査研究では、令和 3 年度強化策での諸大学・研究機関ならびに公益財団などへの再委託や役務による ^{137}Cs と ^{210}Pb の分析測定を、令和 4 年度分として京都大学、広島大学、長崎大学にても既有的および新規に導入した Ge 半導体検出器を用い実施した。その結果、合計で

16 地点×30 層の試料の分析が完了しデータを保有している。

長崎において採取された土壌試料についても、そのスクリーニングで ^{137}Cs が不検出だったか、過剰 ^{210}Pb の鉛直分布データなどから、未かく乱の土壌採取という条件が満たされない試料が見受けられた。特にかく乱を受けた土壌では、大気からの常時供給があるため上層で濃度高・下層では濃度低で一定となるはずの過剰 ^{210}Pb の鉛直分布に大きな乱れが見られた。このように改変を受けた試料は、耕作や人為的な改変を受けた地点と判断され、試料採取が適切ではなかったと考えられる。しかし、これらの採取も地権者の「改変をおこなっていない」との証言を元に採取しており、土壌調査実施における大きな問題であった。

○ $^{239,240}\text{Pu}$ の分析結果について

令和 4 年度の計画では、 ^{137}Cs と ^{210}Pb の分析測定に加えて、先行した平成 3 年度のプルトニウム (Pu) 調査の結果と、本調査研究での調査手法や結果との比較を行うことが望まれた。そこで、爆弾材料に ^{239}Pu が使用された長崎の試料に限定されるが、 $^{239,240}\text{Pu}$ の分析を実施した。我が国において $^{239,240}\text{Pu}$ の分析が可能な機関は限定され、 ^{210}Pb を測定可能な大学・機関と比べてもはるかに少ない数しか能力を有さない。京大複合研でもルーチン的には Pu の分析を実施しておらず、困難性が高い。本調査研究では、(一財)九州環境管理協会と(公財)日本分析センターの 2 者に役務分析を依頼し、長崎の 3 地点、計 90 試料の分析を行った。分析では放射化学分離の後 Si 半導体検出器による α 線スペクトロメトリにより Pu を分析・測定した。検出限界水準は、20~30 mBq/kg 程度であり、精度はほぼ満足すべき水準であった。 α 線スペクトロメトリでは、Pu 同位体の 239 と 240 が、一緒に定量されてしまう。Pu 同位体比 (239/240 比など) から Pu の起源 (発生源) を大気圏内核実験の GF、長崎の CiF、再処理由来などと判別することも質量分析法を適用すれば可能ではあるが、Pu 同位体標準の入手と高度な質量分析手法での測定が求められ、現状では京大複合研においても実施の取り組みが困難である。

平成 3 年の調査 [1]では、黒い雨の降った西山地区、風上、風下地域を含め爆心から 12 km までの 70 地点で未耕地土で表層から 10 cm 深さまでのサンプリングを実施し $^{239,240}\text{Pu}$ の分析を行っている。GF 由来のバックグラウンドの $^{239,240}\text{Pu}$ 放射能の平均値は、乾燥細土 1 kg 当たり 0.90 ± 0.41 Bq とした (風上側など 10 地点の平均値)。西山地区を中心に Pu は高濃度で、最高値は 24 Bq/kg dry だった。今回の N-09-13 西山地区での土壌試料では、相対的には高い濃度を呈したが最大で~約 10 Bq/kg となり、平成 3 年調査よりも低濃度の傾向を示した。特に風上側の N-08-13 では最大濃度でも約 0.4 Bq/kg と相当に低濃度で、 $^{239,240}\text{Pu}$ の分析にはより長時間の測定や試料量を増やすことが必要と考えられた。現時点ではこの「長崎検討会」データに比べて本事業でのデータが低濃度となっている理由は不明だが、この 30 年程度の期間に Pu の下層への移行や流出があれば、表層土壌の Pu 濃度低下はあり得るかもしれない。したがって Pu の分析・測定資源が極めて限定的なことから、本調査研究の手法であるスクレーパープレート法の適用は得策ではないと判断される。おそらく 30 cm の土壌コアを採取し、その全量をプルトニウム分析に供試する方がよいと考えられる。

上記をより詳細に述べると、以下の通りである。2) a. 8) 土壌試料に残る原爆由来のシグナル-総合的解析にて述べるように、N-09-13A 試料では過剰 ^{210}Pb 鉛直プロファイルの

評価にもとづき土壌は未改変で、 ^{137}Cs の幅広なピークの下部側が 1945 年当時の被爆層（最表層）に相当すると評価され、微粒炭粒子の個数濃度の増大と ^{137}Cs 濃度ピークが同期した例となっている。これに対して図 22 に描かれた $^{239,240}\text{Pu}$ は表層より 150 mm 深辺りまで ^{137}Cs よりも鉛直に深く幅広な濃度ピーク形状を呈しており、 $^{239,240}\text{Pu}$ は ^{137}Cs に比べより深く地中に浸透して明瞭な幅が狭い濃度極大ではなく、幅広な濃度増大が示唆された。N-09-13B 地点での $^{239,240}\text{Pu}$ 濃度分布は、その濃度水準は 1/10 程度ではあるが、鉛直プロファイルの形状は N-09-13A に類似しており、A での鉛直プロファイルを裏付けるものであった。このほかの 1 地点は、改変土壌と判断された（令和 4 年度報告書詳細版を参照）。

$^{239,240}\text{Pu}$ の分析データは統計的な解析が充分に行えるほどには多く得られてはいないが、 $^{239,240}\text{Pu}$ が 30 年前よりも土壌中で低濃度化している可能性があること、 ^{137}Cs よりも地表にとどまりやすい傾向を持たないらしい（むしろ有機物などとの相互作用により浸透性が高いと推測される [2-4]）と云うことが示唆された。すなわち、スクレーパープレート法を適用した場合、 ^{137}Cs に比べて黒い雨領域判別の指標として特段に有利であるとは言えず、試料数が増える点では却って不利である。むしろ、広島で適用した ^{137}Cs と過剰 ^{210}Pb 、さらに微粒炭の鉛直プロファイルの組み合わせで、未改変土壌分析を実施することの方がより効率的であると考えられた。あるいは、平成 3 年の調査よりも深く 30 cm まで鉛直の土壌コアをサンプリングし、 $^{239,240}\text{Pu}$ 濃度を多数地点で測定し、239/240 同位体比測定と組み合わせる方が、現実的であると考えられる。

参考文献：

- [1] 長崎原爆被爆地域問題検討会、長崎原爆残留放射能プルトニウム調査報告書、平成 3 年 6 月。
- [2] Zhang, W., Hou, X., Dang, H., Chen, N., & Zhang, H. (2023). Distribution and migration of $^{239,240}\text{Pu}$ in soil profiles in North China. *Science of the Total Environment*, 857, 159471.
- [3] Xu, C., Athon, M., Ho, Y. F., Chang, H. S., Zhang, S., Kaplan, D. I., Schwehr, K. A. DiDonato, N., Hatcher, P. G. & Santschi, P. H. (2014). Plutonium immobilization and remobilization by soil mineral and organic matter in the far-field of the Savannah River Site, US. *Environmental Science & Technology*, 48(6), 3186-3195.
- [4] Lin, P., Xu, C., Kaplan, D. I., Chen, H., Yeager, C. M., Xing, W., ... & Santschi, P. H. (2019). Nagasaki sediments reveal that long-term fate of plutonium is controlled by select organic matter moieties. *Science of the Total Environment*, 678, 409-418.

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、五十嵐康人
長崎大学： 松田尚樹、福田直子
長岡技術科学大学： 栗原雄一
広島大学： 遠藤 暁

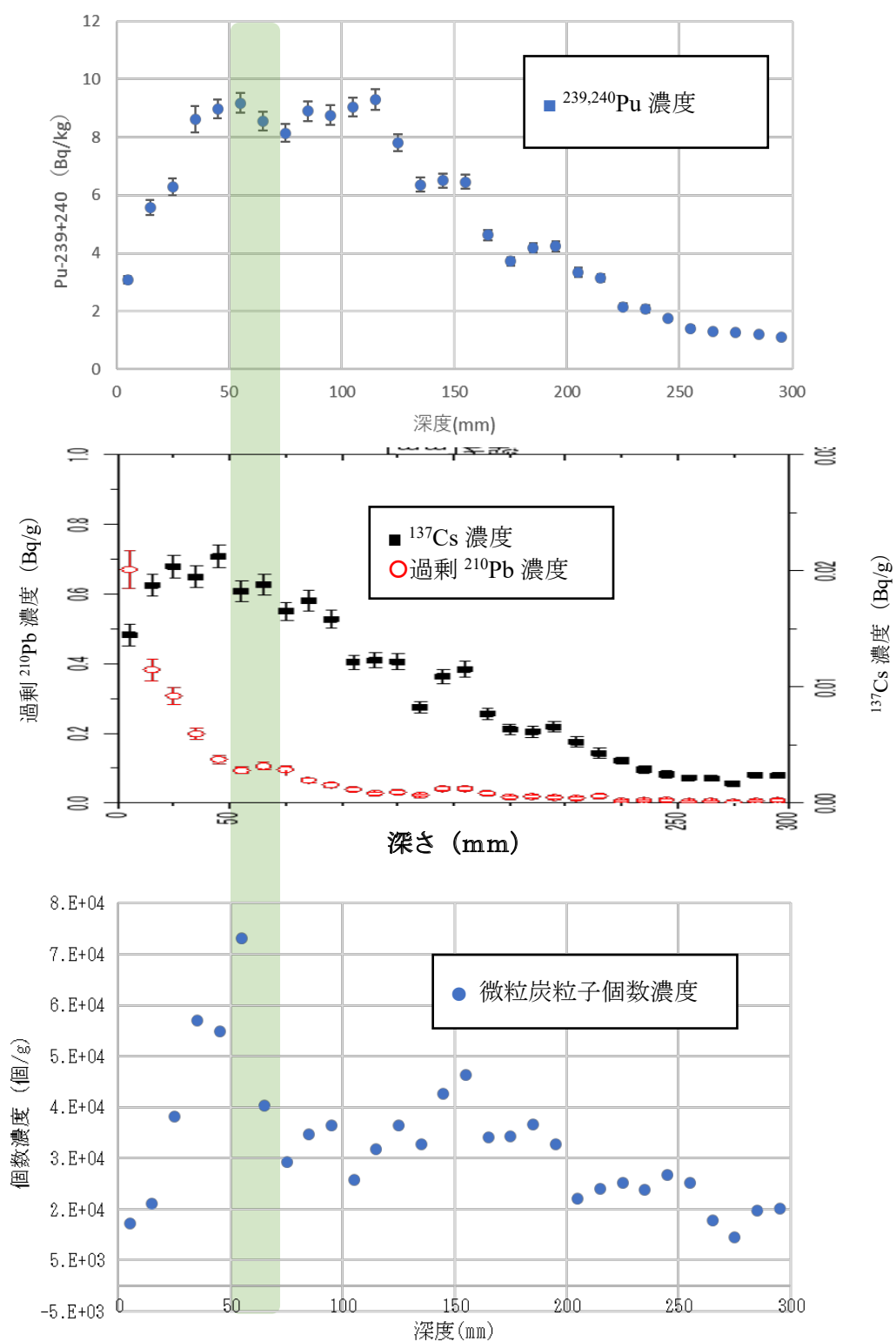


図 22. 長崎 N-09-13A における $^{239,240}\text{Pu}$, ^{137}Cs , 過剰 ^{210}Pb およびの微粒炭粒子の鉛直分布の比較
網掛けした部分が 1945 年前後と推定される地層

(2) a. 6) 球状の熔融粒子

Wannier et al. (2019) は、広島県元宇品海岸の砂に高温起源（1800℃以上）のメルトデブリが含まれていることを報告した [1]。その報告によると、球状のシリカや酸化鉄の粒子、気泡を含む変形した飴状のガラス粒子、同じく気泡を含み、破碎後に溶けて艶が出た多くの粒子

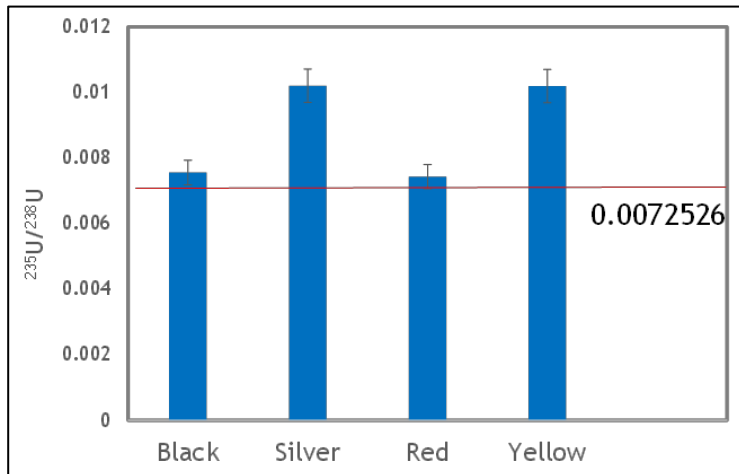


図 23. 色分けによる熔融球状粒子中の $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比

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た（令和3年度強化策報告書を参照）。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。そこで、色の違いによる含有元素の違いを ICP-MS 分析により確かめることとした。

5.86 g の球状熔融粒子を用いて、黒色、銀色、赤色、黄色に色分けして再抽出を実施した。抽出にはデジタル顕微鏡)にマイクロマニピレータシステムを取り付けて利用した。また、黒色、銀色、赤色、黄色の球状熔融粒子の含有比を確認するため、0.4 g の球状熔融粒子を用いて、ランダムに5つの領域を設定し、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。

ICP-MS 分析により、10 元素が定量された。熔融粒子 BL では、Be, Co, Rb, Cs, Th, U がその他の熔融粒子と比較して含有量が多い傾向が認められた。U 濃度は、7.10 ppm と昨年度実施した Ge 検出器による測定値 8.67 ppm [2]と同程度であった。また、Th 濃度は、4.62 ppm が得られ Ge 検出器による測定値 20.6 ppm [2]の 1/3 程度であったが、中国地方由来の標準岩石試料 JG-3 [3]と同程度であった。熔融粒子の色分布を見ると、銀色や黄色は数が少なく、黒色が 30%や“others”が 56%と数が多い。昨年度の Ge 検出器による U 濃度 8.67 ppm および Th 濃度 20.6 ppm [2]は、主に黒色と“others”の濃度と考えると矛盾はない。

色分けによる分類に基づく熔融微粒子中の $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比を図 23 に示す。熔融粒子 BL および RD では、 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比が低く、天然の存在比 0.0072526 と矛盾のない値であった。これに対し、熔融粒子 SV および YL では、0.0102 と存在比より 30%程度高く、 ^{235}U の過剰が認められる。広島原爆は、 ^{235}U (^{235}U 平均濃縮率 80.4%) 51.55 kg を用いたウラン原爆である [4, 5]。そのうち核分裂を起こした ^{235}U は 1 kg 程度と推定されている [4, 5]。一方グローバルフ

子からなる粒子群を発見・分離された。彼らはこの粒子の存在量を広島沿岸で約 3000 トンと推定し、「粒子の起源が 1945 年 8 月 6 日の核爆発に関連していることを示唆する証拠である」と結論付けた。もしこのような熔融粒子が原子爆弾に由来するものと確認できれば、採取土壌分析において「黒い雨」のトレーサとして利用できることが期待される。

2021 年度に広島県元宇品海岸の海砂から抽出した 5.86 g の球状熔融粒子には、大きく分類して、黒色、銀色、

オールアウトには過剰の ^{235}U はあまり認められない [5, 6] ことから, 熔融粒子 SV および YL の過剰 ^{235}U は広島原爆が起源である可能性を示唆する。

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.
- [3] Imai, N., Terashima, S., Itoh, S. and Ando, A. (1995) 1994 Compilation of analytical data for minor and trace elements in seventeen GSJ geochemical reference samples, “igneous rock series”, Geostandards Newsletter, 19, 135-213.
- [4] Fujikawa Y, Shizuma K, Endo S, Fukui M (2003) Anomalous $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ Ratios and metal elements detected in the Black Rain from the Hiroshima A-bomb. Health Physics, 84, 155-162.
- [5] Sublette C. (1997) Nuclear weapons frequently asked questions. Version 2.17. Available at <http://www.fas.org>. Accessed 7 October 2001.
- [6] Roesch, W. C., Eds. (1987) U. S.—Japan Joint Reassessment of Atomic Bomb Radiation Dosimetry in Hiroshima and Nagasaki. Vols. 1 and 2. Radiation Effects Research Foundation.

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

(2) a. 7) 街区火災由来の微粒炭粒子

広島県の爆心地から離れた地点 (H-07-08, H-08-08, H-08-10) から採取された土壌 (図 24) と長崎市西山地区で採取された土壌 (N-09-13) の柱状試料深度 0~30 cm について、炭素微粒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 25) 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。各地点の測定結果について、令和 3 年度事業で測定された H-03-05、H-

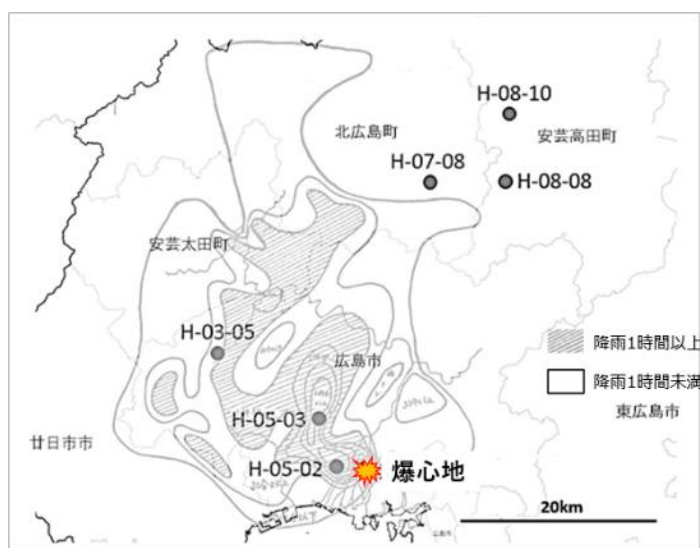


図 24. 広島における微粒炭粒子分析試料地点 (国土地理院地理院地図に増田, 1989 [2]を重ね合わせ、地点を加筆)

05-03、H-05-02 の 3 地点（図 24）の結果とともに各地点の ^{137}Cs 放射能濃度と併せて図 26 に示す。

黒い雨降雨推定域（増田雨域 [2]）内に位置する H-05-02、H-05-03、H-03-05（図 26）および長崎市西山地区に位置する N-09-13 のうち、H-05-02、H-05-03、N-09-13 では、 ^{137}Cs 放射能濃度とともに微粒炭含有量のピークが深度 5～10 cm に認められた。一方、黒い雨降雨域内 1 地点、降雨域外 3 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、H-07-08、H-08-08、N-09-13 は、森林下で採取されたもので、一方、H-03-05、H-08-10 は裸地で採取されたものである。H-05-02、H-05-03、N-09-13 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と推察される。以上のことから、植生が繁茂し土壌が発達する中で ^{137}Cs や微粒炭が付加された場合に、これらが良好に保存される状況下においては、黒い雨降雨域内外においてこれらの記録が異なる可能性が示唆される。H-07-08、H-08-08 のような森林下での土壌であるにもかかわらず、 ^{137}Cs 放射能濃度と微粒炭含有量の傾向に関係が認められない地点においては、黒い雨が降らなかった可能性があるが、土壌形成と土壌中のこれらの記録には様々な要因が影響するため、その他の要因についても考慮して考える必要がある。

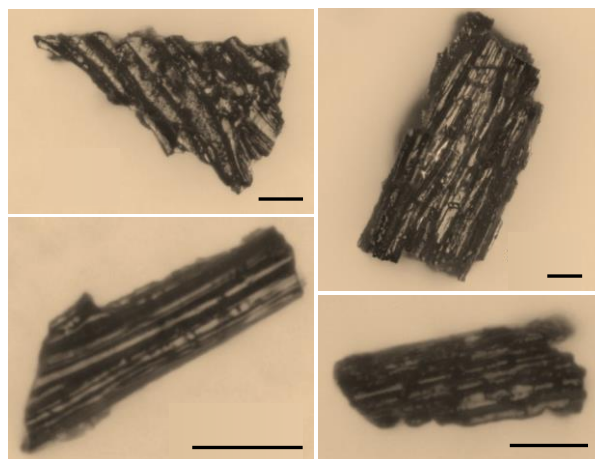


図 25. 土壌中から抽出した微粒炭粒子（スケールバーは 20 μm ）

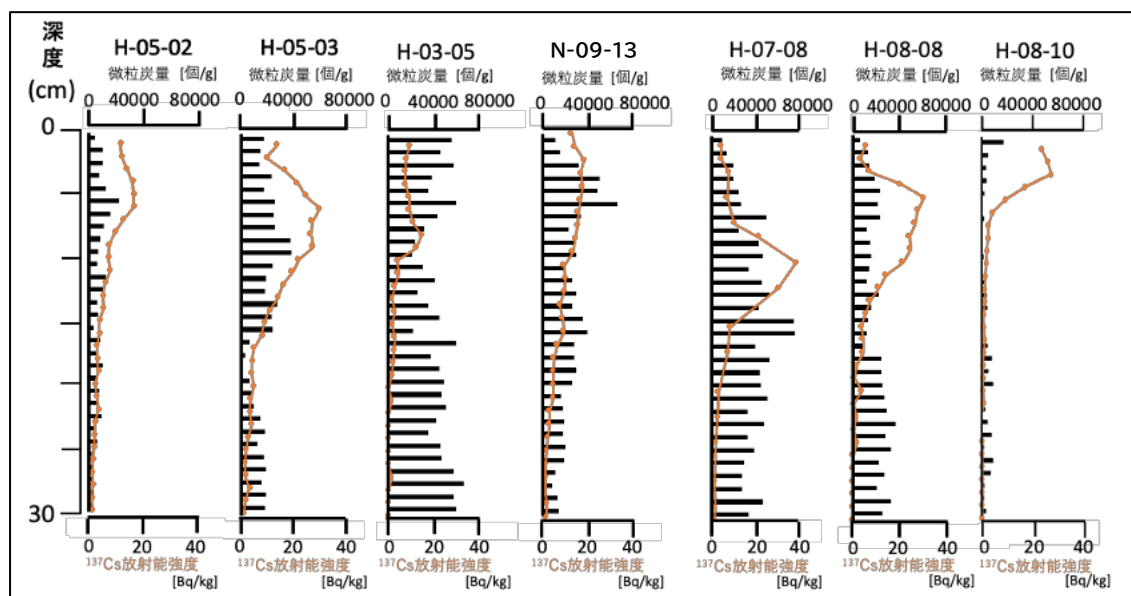


図 26. 各地点の微粒炭含有量と ^{137}Cs 放射能濃度の鉛直プロファイル

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

(2) a. 8) 土壌試料に残る原爆由来のシグナル-総合的解析

本調査研究と並行的に実施した令和3年度強化策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ている。広島と同様の解析を長崎 N-09-13 において採取された土壌試料に適用した結果を図 27 に示す。3 つある図は、左から ^{137}Cs 濃度の鉛直分布、微粒炭粒子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）である。N-09-13 地点は、広島における H-05-02、H-05-03 地点と同様に、1945 年 8 月 6 日当時、「黒い雨」が降ったとの証言があり、高線量率が過去に記録された地点である。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、最後の比がやや小さいが N-09-13 も未改変と判断された。

N-09-13 では過剰 ^{210}Pb が表層 60 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。その下層では、～130-140 mm 層辺りまで、過剰 ^{210}Pb 濃度の減少はやや緩やかになっており、若干異なる堆積環境下にあったことも示唆される。 ^{137}Cs は上層～100 mm 付近まで濃度大でやや幅広に分布し、表層 30-40 mm 付近で濃度ピーク、やや下部の 70-80 mm 付近で小さいが第二の濃度ピークを示し、下部の ^{137}Cs 第二ピーク（左向き矢印）と微粒炭の一番大きな個数濃度ピークはほぼ同期している。広島における H-05-02、H-05-03 地点と同様に ^{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。過剰 ^{210}Pb 濃度が深度 60 mm までは単調に減少することから、過剰 ^{210}Pb を土壌層が堆積した年代の指標として利用できると考えた。下層への拡散や移送を無視し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。現在深さ x (mm) にある堆積物での濃度 $A(x)$ 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。過剰 ^{210}Pb 濃度を表層から 60 mm まで指数関数で近似し ($R^2: 0.983$) ^{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、

$$\text{堆積速度 } w \text{ (mm/y)} = 0.693/22.23/0.03946 = 0.79 \text{ mm/y}$$

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、60 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。このように広島の事例と長崎の事例はよく一致していることから、N-09-13 の第二の ^{137}Cs 濃度ピークはクローズイン・フォールアウト (CiF) 由来の ^{137}Cs を含むのではないかと推察された。

このように、広島において培われた原爆由来の CiF 由来 ^{137}Cs の存在の有無を判定する手法は、長崎においても適用可能であると結論された。今後この観点からの調査研究が進められれば、「黒い雨」の領域の判定は可能であると考えられる。ただし、今年度の調査では広

範な領域においての未改変地点での土壌試料採取は達成できておらず（全体で 12 地点）、令和 4 年度実施の限られた期間内においては、長崎における「黒い雨」領域の判別にまで到達することは実現できなかった。

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

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

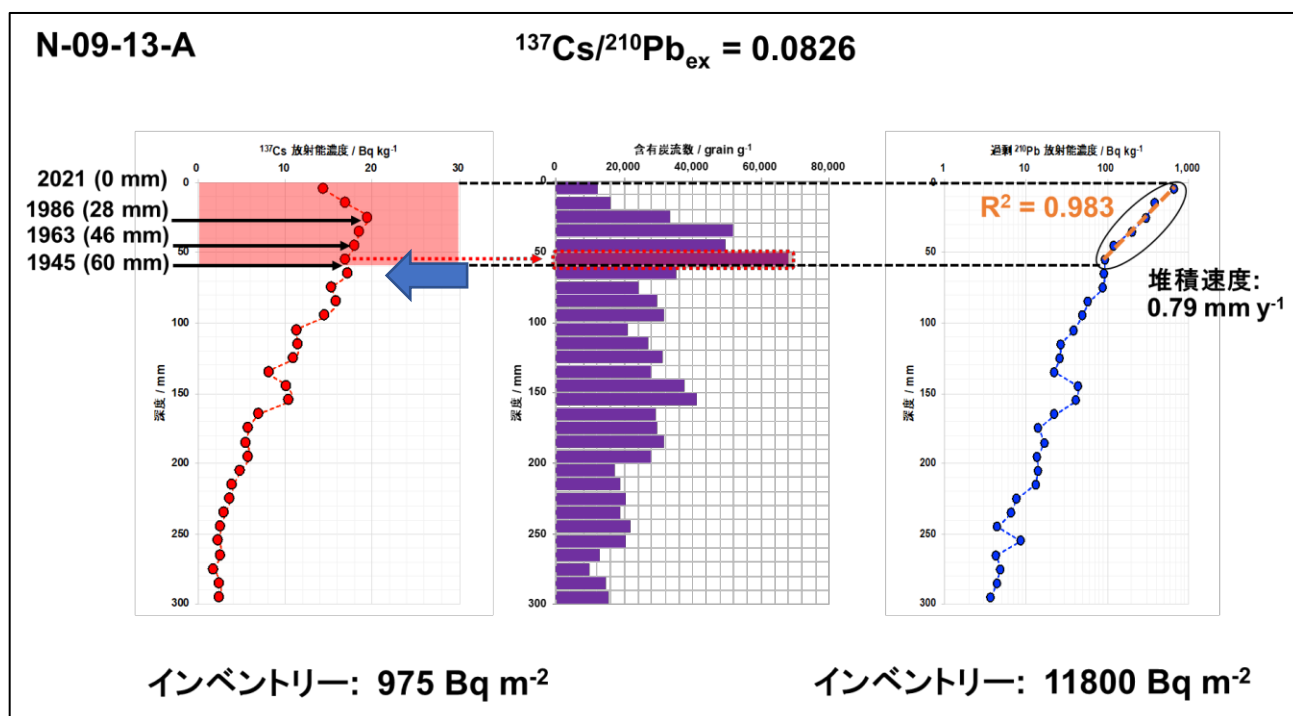


図 27. 土壌における ^{137}Cs 、微粒炭、過剰 ^{210}Pb および過剰 ^{210}Pb による時間指標を用いた「黒い雨」沈着可能性の評価手法 N-09-13 地点の土壌での解析

(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）

気象モデル計算結果検証のための土壌調査の実施、実施結果の検証、収集した試料の諸分析が行われている。これらの様々な情報をお互いに紐付けて整理、アーカイブするために、原爆試料データベース DABS (Database of Atomic Bomb Samples) を開発し継続してカスタマイズを行っている。令和 4 年度においては、気象モデル計算結果検証をより効率的に行うことを目的として、分析・解析値の可視化のための機能追加を行った。DABS のシステムは

web を経由したデータベースサーバーをベースとしたシステムになっているため、情報の登録や閲覧には適しているが、高度な分析・解析値の可視化を行いたい場合には最適とは言いがたい。そこで分析・解析値の可視化のための機能追加においては、DABS のように web 経由ではなく、個々のユーザーの PC に導入したアプリケーションソフトウェアから直接データ



図 28. RF-ID の活用イメージ（複数の IC タグを離れた位置から一括で読み取り、瞬時に個体を識別することが可能。株式会社東北システムズ・サポート、「RFID とは？基礎知識編①RFID のイロハのイ」より許可を得て引用） 例えば、ダンボールに梱包された物品を箱の外側から読み取ることができ、検品や在庫チェックなどの作業効率がアップする。

ベースサーバーにアクセスする仕組みとした。このアプリケーションソフトウェア（DABS Tools）を利用することで、前述の目的に対して、(1) 地点毎の分析・解析値の深度分布グラフの解析値間での比較、(2) 統計解析値のマッピングが可能となった。(1)の分析値・解析値間での比較機能では、例えば ^{137}Cs の放射能濃度の深度分布を、他のデータ、例えばフィッシュントラック法により得られたウランを含む粒子の個数濃度や街区火災由来の微粒炭粒子の個数濃度の深度分布と比較が可能となる。このことにより、それぞれの解析値間の相関の有無を視覚的に判断することが容易となり、原爆降下物の種類による深度分布の同一性や差異を明確化できるようになった。(2)のマッピング機能では、分析値・解析値の深度分布から各メッシュにおけるインベントリ値を見積り、地図上にこのインベントリ値の大小に応じたカラーマッピングをすることが可能となる。つまり、(1)の機能では深度分布に関する比較を行うことができるが、(2)の機能では地図上の水平面での比較を行うことができ、原爆降下物の種類による水平方向の分布の同一性や差異を明確化できるようになった。

さらに令和4年度は、京都大学複合原子力科学研究所では電波を用いて IC タグの情報を非接触で読み書きする自動認識技術（RF-ID; Radio Frequency Identification）、すなわち、IC タグと RF-ID リーダー（読み取り装置）の間で電磁波や電波を送受信し、非接触で IC タグの情報を一括で読んだり書き換えたりすることが可能なシステム（図 28）を導入して、土壌試料の活用に供せるように取り組んでいる。

（２） ｂ． １） 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

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。

昨年度の事業により、①：保管していた全ての物理試料の確認と③：再保管は完了した。本年度は②：データベース化も完了し、DABS への最終データの書き出しも一部実施した。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、継続的に実施した。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、解説ビデオコンテンツ 4 本を新たに制作し、公開、発信する等、試料の供与、見学・教育等に対応した。

（２） ｂ． ２） 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

広島大学原爆放射線医科学研究所（以下、広大原医研）では、原爆関連の線量推定評価等の研究対象として収集・活用した土壌試料等の物理試料を現在まで保管している。本プロジェクトでは、その現状を把握するための調査を行い、本プロジェクトに寄与できる物理試料を抽出することを検討した。結果、妥当と考えられた試料に優先順位をつけて、それに沿って、測定および分析にかけられるような状態にする整備を実施した。また、併せて、これらの物理試料の収集の背景となった研究経緯等の調査を行った。試料整理の計画立案と実施は以下の通りである。

（１） 試料の物的整備

令和 4 年度においては、基盤整備（物的整備）を完了させ、データ化を推進した。近年、当該土壌試料を活用する研究が行われていなかったこと、元々の保管場所の移転があったことなどから、長崎大学の土壌試料のように整備がされておらず、そのため、まず発掘調査のような、根本的なところからの整備から着手した。この整備は、昨年度（令和 3 年度）から本格的に進めていたが、本年度に、本プロジェクトに活用できると考えた分の試料に関しての物的な整備は完了した。

整理の方針として、先行している長崎大学の資料整理や調査を参考にし、物的状態（例：同じボトルに入れる）やデータ化など極力同一の手法や同一にそろえるように努め、試料に関する情報の共有化・標準化を図ることを重要な方針と定めた。また、土壌試料の採取時の詳細データに関しては、報告書以上の詳細なものは広大原医研には残っておらず、その点では長崎大学のものより劣ることとなったが、可能な限りの整備を行った。

（２） 試料に関する情報収集と整理・整備

当該の試料は、年代は古いが、先に述べたように、日本公衆衛生協会による重要な調査で得た、本プロジェクトと非常に関連の深い試料であるため、さらに重要なことは、(1) 当該試料の採取や分析に関するデータの整備、(2) 日本公衆衛生協会の調査の正当性の説明、と考えた。そこで、この 2 点について、調査研究を進めた。対象とした試料について、以下①

～④を行った。

① これまで広大原医研で整備された当該試料に関するデータの探索

広大原医研に所属され、竹下健児先生のあとに研究室を引き継がれた星正治広島大学名誉教授から有力な情報と示唆を、遠藤暁教授からのデータの提供を受けることができた。

② 今回の上記試料整備で得たデータの整備

上記の物的な整備を遂行する中、同時進行で現時点で得た情報を整備した。

③ 日本公衆衛生協会刊行の昭和51年度および昭和53年度の報告書記載のデータ整理

昭和51年度および53年度の2冊の報告書を改めて確認し、採取地点や当時のデータの整備を進めた。

④ 上記①、②および③についてのデータを合わせる作業

このように、令和4年度において対象とした土壌試料については、整備の基本作業は完了した。次年度は、本年度までの状況の再確認を進めるとともに、他機関（京都大学複合研、長崎大学原研）とのデータ情報の共有および標準化、またデータベースへの登録等を進め、解析に更に寄与する計画である。

（2）b. 3）DABSのシステム改善

今年度は下記の3つの事項についても取り組み、システムの改善を実施した。

令和3年度においては、①地図上位置の描画機能の高速化、②試料の採取地点情報の可視化、③ユーザビリティの向上のための機能追加を行った。①では大量の試料データに関するマップの地点表示に対応させ、表示に支障をきたさないようにシステムを改善した。②では採取地点に関連する地図、地点カルテなど任意の画像・PDFファイルの登録、ダウンロードを可能とした。③では表示中の画面に応じたマニュアルがアイコンのクリックによって簡便に参照できる機能の追加を行った。

（3）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）

（3）a. 文献調査の結果

本調査研究とは別に実施されている厚生労働省による関連する調査において、被爆者体験記調査及び国内外の関連文献調査が実施されており、それら調査において、特に後者につき得られた情報について、本調査研究に活かすことを目的として内容を精査し読み解く作業を実施した。

（3）b. アドバイザリ会議等の開催（担当者：五十嵐、高宮、福谷、今中）

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、アドバイザリ会議（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。令和3年度強化策と並行して実施した打合せ等の実数は、以下のとおりである。アドバイザリ会議 1回；Databaseに関する打合せ 7回；気象モデルに関する打合せ 4回；厚労省・研究チーム打合せ 4回；トピックス別ではない合同ミーティング 3回；土壌採取に関する打合せ 2回（GSユアサとの対面を含め3回）；セシウムおよ

び鉛測定に関する打合せ 6回（個別を含めて）；拡大合同進捗報告会 1回

アドバイザー会議(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。

（１）では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。原爆雲の再現は高速の流体力学モデルで行い、爆発から数十秒のうちに周囲の空気塊と熱的に馴染んでくることから、爆発雲を気象モデル計算に組み込むことに成功した。これにより先端の気象モデルによって、原爆雲、街区火災、衝撃塵の統合的な再現計算を実施できた。その結果、一定程度、広島における「黒い雨」の輸送・沈着状況について再現を実現できた。再現計算の不確実性の評価のため、1945年8月6日の気象場とよく似た気象場を持ち、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。また、1945 年当時の広島地方気象台の気象観測データとも比較した。これらの結果、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**。しかしながら、令和 3 年度強化策の報告書にも述べたように、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、背景気象場の違いやネスティングの仕方の違いなど、**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を伴うことが明らかとなった**。今年度にあっては、**エアロゾル-雲相互作用が降水分布推定に及ぼす定性的な影響も明らかに出来た**。

モデル計算結果の検証に資するため、(2)において、長崎でも令和 3 年度強化分と併せて 10 を超える地域で土壌試料採取を実施し、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、 ^{137}Cs や ^{210}Pb の精密測定を行い、その鉛直分布から未改変の地点でのデータを選び、そのほか、炭素や熔融微粒子の分析なども実施し、記載した成果達成を見た。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、原爆由来の ^{137}Cs が含まれると推定され、かつ時間指標評価でも整合性がある事例が見いだされた（広島だけでなく長崎の事例とも共通していた）。これは従来の土壌調査に比べて大きな進展であり、**広島にて培った分析や解析の手法が基本的には長崎においても適用可能**なことを示した。また、長崎原爆に特徴的なプルトニウム ($^{239,240}\text{Pu}$) についても分析を加えた上で検討を進めた。しかし、 $^{239,240}\text{Pu}$ は ^{137}Cs に比べより深く地中に浸透して明瞭な濃度極大を示さない可能性が示唆され、 $^{239,240}\text{Pu}$ 分析に要する資源も限られることから、広島での手法である核種の鉛直分布情報から「黒い雨」領域の推定を行うのははかなり困難性が高く、得策ではないように考えられた。

なお、(3)については、精査の結果が(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、有用であったことを付記する。

上記のような達成状況を見たが、令和 4 年度実施の本調査研究の限られた期間内においては、長崎における「黒い雨」領域の判別まで到達することは実現できなかった。

謝辞

本調査研究の実施にあたり、アドバイザ各位、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、長崎県はじめ、自治体の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。 ^{137}Cs ならびに ^{210}Pb 分析をお引き受け頂いた大学、機関の関係各位に深く感謝します。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.、(株)

九州自然環境研究所)、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：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

分担：谷田貝亜紀代 弘前大学大学院理工学研究科 気象学研究室・教授