

第一種健康診断特例区域等の 検証に関する検討会（第7回）	資料3
令和5年12月27日	

気象・土壌WG報告書（概要）

令和5年3月24日

京都大学複合原子力科学研究所 五十嵐 康人

1 本事業の趣旨

原子爆弾やその直後の爆心地を中心に起きた大規模な火災により、黒い雨が降ったとされており、現在の第一種健康診断特例区域については、当時の降雨状況やその後同区域に居住された方々の健康状態を踏まえて設定されている。この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、厚生労働省において、令和2年11月16日に、「第一種健康診断特例区域等の検証に関する検討会」（以下「検討会」という。）を開催したところである。

検討会においては、大きく分けてア．原爆由来の放射性物質を確認する課題、イ．健康影響が生じているかを確認する課題の2点が検証課題として設定され、それぞれ、以下の課題に細分化して検証していくことが合意された。

ア．原爆由来の放射性物質を確認する課題

（ア）気象シミュレーション

（イ）地域の土壌調査

（ウ）米国における被爆前後の調査（気象データ）等の文献調査

イ．健康影響が生じているかを確認する課題

（エ）広島原爆・赤十字病院におけるカルテ調査

（オ）健康相談事業受診者の疾患罹患状況の統計解析、アンケート調査

この検討会において設定されたア．（ア）及び（イ）の課題に関し、令和2年度厚生労働省「原子爆弾の投下に伴う放射性降下物の拡散状況等に関する調査等一式」事業（以下「令和2年度調査」という。）において、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、具体的に利用可能な数理モデルの設計に関する検討及び土壌採取に関する過去の文献調査や試掘による効率的・効果的な土壌の採取方法の検討が行われた。また、令和3年度厚生労働省「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」事業（以下「令和3年度調査」という。）において、試験的な気象シミュレーション、土壌調査における試料採取及び一部試料解析を実施した。

本件は、令和2年度及び令和3年度調査を踏まえ、気象モデルの構築に係る研究及び放射性降下物の拡散状況に関する調査研究をさらに進めることを目的とした。

なお、本件については、土壌調査が気象モデル計算結果の実証としての側面を有することから、複数の専門家で構成される気象モデル研究・土壌調査ワーキンググループを開催する方式で研究を行うこととした。

2 本事業の内容及び結果

(1) 気象モデルの構築に向けた研究

- 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年度及び令和3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。
- まず、爆発に伴う熱源に関して、爆発モデルによる詳細計算を実施した。具体的には広島型原爆の起爆エネルギーを考慮して起爆から数ms経過後を初期値として、計算を行った。乱流モデルに浮力の影響を考慮することで、火球の上昇速度や地表面での衝撃波圧力は核実験の結果と一致することが確認された。また、原爆投下に伴う衝撃塵や原爆由来の物質濃度の評価が可能となった。これらの結果から、気象モデルWRF (Weather Research and Forecasting model) で用いる400 m格子にアップスケールした熱源分布を作成し、この熱源を原爆投下時刻にモデルに与えることで、爆発の影響を気象モデルに反映できるようにWRFを改良した。街区火災に関しては、Aoyama et al. (2013)が50 m格子で見積もった熱源と水蒸気発生量をWRFの計算格子に変換し、これを市街地サブモデルの人工熱源（および水蒸気源）として気象モデルに与えた。
- 米国海洋気象庁 (NOAA) が作成した20世紀歴史的再解析気象データ (20CRv3) を入力データとして、上記のモデルを用いて原爆投下時の気象を計算し、原爆が投下されなかった場合と比較した。その結果、原爆の熱源により積乱雲が発生し確かに降水が生じること、さらに引き続く市街地火災の熱源および水蒸気源を考慮すれば降水量が増加し範囲も拡大することが確認された。多いところでは100 mmを越える降水が計算され、報告されている量に匹敵する降水量であった。一方で、降水範囲は爆心の北ないし北北東に分布しており、北西ないし北方向に降水があったとされる既存報告とは様相が少し異なった。
- NOAA 20CRv3はラジオゾンデによる高層気象観測が実用化する以前に遡り、地上観測データのみを入力して大気全層の気象状態を推定したデータセットである。海面温度など外部条件のばらつきを反映するため、80個の異なる初期値境界値のもとで解析を進め、これら80例のアンサンブル平均と分散をプロダクトとして公開している。分散の情報を見ると、高層観測データが無いと、大気上層になるほど信頼性が低下している。そこで、アンサンブル平均の基となる各メンバーの解析結果を個別に調べたところ、各メンバーの風向風速は、平均値の周囲に大きく広がって分布していることがわかった。そこで、北西方向に流れる傾向をもつ事例 (mem 051) を一つ選び出し、この気象データを入力とした計算を試行したところ、爆心の北西ないし北方向に降水が分布する結果を得た。
- 粒子型の物質移流拡散モデルFLEXPART (FLEXible PARTicle dispersion model) を用いて移流拡散沈着計算を実施したところ、有意な沈着量が計算されることが確認できた。さらに、爆発や火災で生じた微粒子によるエアロゾル-雲相互作用を考慮した計算をWRF-chemモデル (WRFに大気化学の計算モジュールを組み込んだモデル) を用いて試行した。その結果、上層風の鉛直シアによりエアロゾルおよび雲凝結核、氷晶核は降水域よりも広い範囲に輸送されており、エアロゾル-雲相互作用が降水分布推定における不確実性の要因の一つとなりうることが示唆された。
- 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近年の天気図から選び出し、これらの事例を対象に最新のデータを用いた計算と観測データとの比較、歴史的再解析データを用いた計算と最新データを用いた計算との比較を進めた。気象再解析データを用いた類似事例計算結果は、アメダス（気象庁地域気象観測点）の地上観測（風向・風速、気温、湿度など）と比較的よく一致し、海陸風の交代を概ね実況に即して再現すると判断できた。上層風に関しては、ウィンド・プロファイラー観測と比較して風速はやや小さめであるが、風向も含めて概ね観測に追従する結果が得られていた。結論として、気象モデルWRFそのものは、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。

- ・1945年の計算で入力気象データとして用いる歴史的客観解析NOAA 20CRv3の不確実性は、具体的には、1) 風向風速のばらつきが上層に発達した積乱雲の移動方向に直接影響し降水域の地域分布に反映される、2) 気温のばらつきが大気の安定度に影響を与え積乱雲の発達程度や降水量に反映される等で、黒い雨評価の不確実性に波及する。この不確実性を克服する方法として、NOAA 20CRv3データの個別メンバー・データを入力データとして用いた再現計算を実施し、その中から既得情報（本事例の場合は、1945年当時の降水域や降水時間の情報）に合致する事例を選び出し、ベイズ統計の手法を援用して評価することが考えられる。この一例として、上記のようにmem 51を用いた計算を実施し、既存情報に近い結果を得たが、他のメンバーについて確認計算を進める必要が残されている。

- ・このほか、1945年の歴史的客観解析による再現の評価のため、新たに1945年8月の中国・四国地方の気象官署観測日原簿からのデータ興しを行い、広島観測所をはじめ手書きの気象観測記録をデジタル化し、気象再現計算の検証データの充実を図った。その結果、1945年8月の気象観測とWRFによる計算結果が比較可能となり、計算条件などを調整した。以上に加えて、エアロゾルが雲生成に与える効果も不確実性の要因としてあげられる。WRF-chemを用いた計算をさらに実施することで、この不確実性を減少させることが想定できる。

(2) 放射性降下物の拡散状況に係る調査に関する研究

- ・過去の累次の土壌調査の分析結果を踏まえるとともに、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、放射性降下物の拡散状況の調査のため、広島で土壌調査を実施した。

- ・広島では県のほぼ西半分の地域を5 km四方のメッシュに区切り（120区域）、可能な範囲で（110区域程度）各地点において戦後未改変の土壌層を探索して30層にわたって1 cm厚での試料採取を行った。セシウム-137 (^{137}Cs) が簡易に検出できるか否かのスクリーニング測定を行い、複数深度で不検出となった地点については、土壌試料の再採取を実施した。また、改変ありと判断された区域では再採取を実施した。これらの土壌試料を用いて、人工放射性核種のひとつ ^{137}Cs 、ならびに天然の放射性核種で常時大気より供給されている ^{210}Pb （過剰 ^{210}Pb ）の残留状況（鉛直分布）を、100地域以上×30層（合計3000以上）の試料について調べた。これらの測定は、京都大学、広島大学、長崎大学ならびに協力大学・研究機関24者および財団法人・業者4者によって、多数のGe半導体検出器を用いて実施した。この測定は、本目的で使用可能な我が国の測定資源の数分の1以上の動員と認識している。

- ・また、令和2年度及び令和3年度調査を踏まえ、広島での土壌調査結果の総括的な検

証を行ない、広島で構築された原爆由来降下物の確認方法について、長崎に適用することの妥当性についても検証を行った。具体的には、令和3年度調査で採掘された長崎の試料について、 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 等の原爆由来物質等の解析を行うとともに、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、平成3年度に実施された「長崎原爆残留放射能プルトニウム調査」の調査手法や結果との比較分析を行う等、分析精度や調査効率や得られる成果の観点からの検証を行った。

- 長崎における調査では、広島よりも凹凸の激しい地形を考慮して2.5 km四方のメッシュを於き、12区域程度の地点での土壌試料採取を実施し、うちいくつかの試料について広島同様の測定を実施した。長崎試料のいくつかについて上記に沿い、 $^{239, 240}\text{Pu}$ の鉛直分布も調べた。
- このほか、街区火災から由来すると想定される炭の微粒子について、化学処理の後に光学顕微鏡を用いた計数法で個数濃度の鉛直分布を調べた。その結果、古城跡などでは土壌の層序は確かに改変されておらず（未改変と推定）、層序の中に大気圏内核実験由来の ^{137}Cs だけではなく、微粒炭個数濃度と ^{137}Cs 濃度の極大が相関することから、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（長崎の試料を含む）。加えてこれを支持する事実として、広島平和記念資料館から入手した衣類や土壁に残る「黒い雨」痕跡からも炭の微粒子を発見している。このことは、本調査研究事業が開始された当初の科学的な仮説が正しかったことを示すもので、「黒い雨」領域特定の指標になり得る成果である。これと同時に、長崎でも広島で培った手法を活用できる可能性が示された。
- また、「黒い雨」が確実に降ったと推定される地点の土壌につき、原爆由来のウランを高濃度で含むと推定される微粒子をFission Track法により分析し、その個数濃度の鉛直分布を調べたところ、「黒い雨」領域外と推定される地点の土壌とは異なる分布が得られた。このほか、後述する黒色の雨滴痕の分析により、「黒い雨」は炭・樹脂様の物質を含み、強い酸性であったと推定された。これは今後の「黒い雨」域特定の指標検出の重大な示唆を与える成果である。なぜなら、強酸により放射性微粒子は溶解した可能性もあるので、放射性微粒子を指標とすることは困難なことを意味するからである。これは同時に、土壌上層に残留する ^{137}Cs や ^{210}Pb 、さらにはPuやUの物理・化学性状や土壌構成鉱物との相互作用がより複雑で、さらなる研究が求められることも示している。
- しかし、結果として、「黒い雨」領域内にあったと判断可能な地点は少なかった。その原因は、次のように整理される。
 - 1) 懸命の探索にもかかわらず、未改変の地点を見つけて土壌試料採取を行うことは非常に困難であった。採取にあたっては地権者を探し、その了解を得なければならず、この作業もぼう大な手間と時間を要した。許可を得ると採取に臨むが、当初は未改変の根拠を地権者の証言に求めた。しかし未改変との証言を元に進めても、特に境内などで採取した場合、ほとんどの例で、土地は覆土・客土されていた。他方、古城跡などの史跡は戦後手つかずの状態で見捨てられた地点が多いと推測されたが、史跡での土壌採取の許可を得ることは原則困難で、かつ地権者の同意も非常に困難であった。また、発掘調査を受けていた場合表層土は剥がされていることが多く、専門家の協力が得られなかったため、発掘調査記録に当たることも困難であった。
 - 2) そのため、過去の航空写真、Google Map等での現状の把握、現地での試掘によって過去も現在も森林となっている地点（ほとんどが神社社叢または寺院寺林）において未改変土壌の採取に努めたが、 ^{137}Cs や ^{210}Pb の測定データから、かなりの数の地点が未改変地点と判断できなかった。旧学校跡地などでも土壌試料採取を実施したが、客土・覆土さ

- れたと推測される地点が多数との結果だった。
- 3) また、戦後77年余が経過して¹³⁷Csの放射壊変が大気圏内核実験由来分も含め進んでいることから、福島第一原発事故に際しての汚染マップ作成時とは異なり、各試料の放射能測定は少なくとも～100倍の測定時間を要した（機器性能に依存、1試料あたり最大数日）。このため、限られた時間のうちに精度良く合計3000試料の測定を実施して、未改変地点を主とするデータセットを作成するだけでも相当な大事業であった。すなわち、土壌試料が改変地点由来と判断した場合には再度の採取を可能な限り実施したが、再採取実施の時間にも、人的資源にも限界があった。
 - 4) 広島平和記念資料館より「黒い雨」資料を入手して分析したり、熱によって熔融した微粒子を分析したりすることで「黒い雨」領域判別の新指標確立を目指したが、限られた期間内での指標確立は困難であった。令和4年秋に資料館が新たに入手した金屏風に残された黒色の雨滴痕から「黒い雨」が強酸性であったらしい新証拠を得たが、放射性微粒子などを見出すことは出来なかった。熔融微粒子は一部が原爆由来と推定されるウランを含む可能性は示唆されたが、産業活動などの他の発生源からの粒子が混入していると推測されるために、現時点での指標確立までには至らなかった。
 - 5) このほか、街区火災からの煙や原爆の材料本体に含まれる可能性のある物質として、揮発性の高い水銀や重金属、爆弾材料から影響を受けるウラン同位体（235/238比）などにも着目し、最先端の手法を用いて、鋭意、分析・測定を実施したが、微粒炭粒子を除き、指標物質となる新証拠はこれまでには得られなかった。

(3) 文献調査及び体験記調査を含めた関連研究の整理について

- ・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、上記(1)の調査に活かすとともに、内容を精査した。精査の結果、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（爆発雲高度の検討）、最近の気象モデル（化学輸送モデル）WRFによる原爆雲再現の試み、核分裂生成物の粒径分布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提供と点検につながった。また、最近の気象モデル（化学輸送モデル）WRFによる原爆雲再現の試みや核分裂生成物の粒径分布などの情報も得ることが出来た。
- ・過去に実施されたHiSoFの成果をアドバイザー諸氏から教授頂くことで、本調査研究の進展に活用できた。典型例として、街区火災データ（顕熱、水蒸気フラックスなど）の取得が挙げられる。

3 本事業のまとめ

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。しかしながら、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、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。また、輸送・沈着状況の推計から健康への影響等を推定することは、上述のように不確実性が大きく、困難であることに留意が必要で

ある。(2)では土壌の層序が改変されていない地点では、土壌層中に大気圏内核実験由来の ^{137}Cs だけではなく、 ^{137}Cs の濃度極大が微粒炭粒子個数濃度極大と相関することから原爆由来の ^{137}Cs が含まれると推定され、かつ過剰 ^{210}Pb による時間指標評価でも整合性がある事例が見つかった（長崎の事例を含む）。これは従来の土壌調査に比べて大きな進展とすることが出来る。つまり、その地点が戦後未改変であってかつ「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。また、「黒い雨」の実態に迫る新規発見もあった。しかしながら、未改変地点を探索してその地点での土壌試料を採取すること自体が本質的に極めて挑戦的な作業であることから、「黒い雨」領域の精度良い推定を本事業期間内で達成するのは困難と結論された。なお、(3)については、精査の結果が(1)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。