

地裁判決が認めた黒い雨による内部被曝

大瀧 慈

広島大学平和センター客員研究員

Health Effects of Internal Radiation Exposure from “Black-Rain” Recognized by District Court

Megu OHTAKI

Affiliated Researcher, The Center for Peace, Hiroshima University

Abstract

After the atomic bomb was dropped on August 6, 1945, “black rain” containing black-colored raindrops fell in the city of Hiroshima and some surrounding areas. Regardless of the color of the raindrops that actually fell, any rain that fell in and around Hiroshima City from the time of the atomic bombing until the evening is called “black rain”. Seventy years later, in 2015, 84 people who experienced the “black rain” filed a class-action lawsuit in the Hiroshima District Court against the city of Hiroshima, Hiroshima Prefecture, and the national government, claiming that they fell under the category of “those who were likely to suffer physical damage from the effects of atomic bomb radiation at the time of the atomic bombing or after the atomic bombing” as stipulated in Article 1, Item 3 of the Atomic Bomb Survivors Relief Law. Since the lawsuit was filed, 22 oral proceedings had been held. On July 29, 2020, the Hiroshima District Court ruled in favor of the 84 plaintiffs in the “black rain” lawsuit, signifying a complete victory for the plaintiffs. This paper examines the health effects of internal radiation exposure for the *Hibakusha* that led to the plaintiffs’ victory, including the events leading up to the trial.

Keywords: 被爆者、放射性微粒子、放射線、原子爆弾、黒い雨、内部被曝、訴訟

1. はじめに

広島市及びその周辺地域の一部では、1945年8月6日の原爆投下後、黒い色の雨粒を含む「黒い雨」が降った。なお、実際に降った雨粒の色にかかわらず、原爆投下時から夕方までに広島近郊で降った雨は、「黒い雨」と言われている。その後70年を経た2015年、「黒い雨」体験者84名は、被爆者援護法1条3号にいう「原子爆弾が投下された際またはその後において、身体に原子爆弾の放射能の影響を受けるような事情の下にあった者」に該当すると主張し、広島市・広島県及び国を相手に広島地方裁判所での集団訴訟を起こした。提訴以来、裁判では22回の口頭弁論を通じて国が定めた援護対象区域の妥当性が最大の争点となった。この「黒い雨」訴訟に対して、2020年7月29日に広島地方裁判所は、原告84名らの主張を認め、完全勝訴を意味する判決を下した。以下、その裁判に至るまでの経緯を含めて、原告勝訴に繋がった原爆被爆者における内部被曝の健康影響について論ずる。

2. 「黒い雨」訴訟の背景および経緯

2.1. 宇田による「黒い雨」の調査

文部省（現・文科省に改組）は1945年9月14日、広島・長崎に投下された原爆による被害を調査・研究するため、学術調査会に原爆被害調査特別委員会を設置した。各学問分野に9つの分科会が設置され、翌年3月まで現地調査が行われた。気象技術者の宇田（1953）は、広島市の原爆被害全般の調査報告を命じられ、広島地方気象台の気象技術者・技術者とともに、広島市内外の約160人から聞き取り調査を行い、1945年12月までにデータを収集した。そのデータの分析結果は、1953年5月に発表された「広島原爆による気象被害に関する報告書」にまとめられた。³⁹⁾ それによると、広島原爆投下後、縦29km、横15kmの楕円形の地域で降雨が発生し、縦19km、横11kmの地域では1時間以上の連続降雨があった、と報告されている。楕円形の降雨域全体を「宇田降雨域」、1時間以上の降雨が続いた地域を「宇田大雨域」、宇田大雨域を除いた地域を「宇田小雨域」と命名した。

2.2. 広島における健康診断特例区域の指定

広島市と広島県は、宇田雨域に含まれる全域を被爆地と認定するための資料を得るため、1973年11月20日から12月20日にかけて、「黒い雨」が降った状況や、宇田雨域とその周辺地域の健康状態などを問うアンケート調査を行った。回答者数は5,106名であった。その結果、調査対象地域の住民の約4割において健康状態が悪いことが判明した。調査対象者から、降雨状況を小雨、中程度の雨、大雨の3カテゴリーでの回答を得て、宇田降雨域周辺ではかなりの降雨量であったことが判明した。その後、1974年6月の原爆医療法改正に伴い、暫定的なものとして原爆医療法附則第3項が設けられた。また、受診特例措置の施行から約1ヶ月後に通達第402号が発出され、受診特例措置の対象となった者が、造血機能障害や肝臓機能障害などの障害を伴う疾患と診断された場合には、原子爆弾被爆者の医療等に関する法律による第2条第3号に該当する者として、被爆者健康手帳の交付を受けられることになった。

翌年の1976年には、原爆医療法施行規則が改正され、宇田雨域が健康診断特例地区に指定された。

2.3. 「黒い雨」の降雨域と残留放射線に関する調査

宇田は、原爆投下直後の混乱の中にあった広島地方気象台の気象技術者と技術者わずか6人で徒歩や自転車で調査した。調査期間が3ヶ月程度と非常に短かったにもかかわらず、調査範囲が山間部にまで及んでいたため、調査地点がまばらで、調査が出来なかった地区が多かったとのことである。宇田論文は時間的・物理的制約の中で実施した調査結果に基づいており、「黒い雨」の降雨域の全範囲を特定や大雨域と小雨域の境界の線引きには、資料が不十分であったことは明らかであった。一方、原爆症医療法の制定後、被爆地域が拡大され、健康診断のための特別区域が設けられるなど、法第2条の3に基づき被爆者と認められる者の範囲が拡大されたが、被爆者の範囲が拡大されていないことから、被爆地域の科学的根拠があるかどうかを確認する必要がある。そのため、被爆地の拡大に科学的根拠があるかどうかを確認する必要がある。そこで、1976年に広島・長崎の残留放射能調査報告書（1976年度残留放射能調査）が行われ、「広島・長崎残留放射能調査報告書1976年度」がまとめられた¹⁸⁾。その結論において、原爆に起因する明らかな異常な放射能は未検出であり、宇田雨域と他の地域では地表面放射能密度に統計的に有意な差は存在しなかったと記されている。その2年後の1978年にも補足調査が行われ、「1978年度広島・長崎の残留放射能調査報告書」がまとめられ、目立った高度汚染地域は検出されなかったと結論づけられた。^{3), 19)}

2.4. 増田による「黒い雨」の調査

気象研究所で数値予報研究に携わっていた増田（1989）は、「黒い雨」の宇田雨域のデータの不備を認識し、1988年に再度データを収集・解析し、「黒い雨」の宇田雨域に代わる新たな雨域（増田雨域）を発表した。¹⁵⁾ その降雨域の面積は宇田降雨域の約4倍である。増田は、宇田論文の基礎資料、広島県の調査資料、72人への聞き取り調査結果、1,188点のアンケート結果、回顧録・記録集の358点の資料など、2,000点以上の資料をもとに、降雨パターンを30分以内の小雨、30分以上1時間以内の中雨、1時間以上の上雨の3段階に分けて、詳細な分析を実施した。

2.5. 黒い雨専門家会議報告書

増田雨域の発表を受けて、医学・物理学・気象学の研究者10名が参加する「黒い雨」に関する専門委員会が1988年8月25日に設置され、「黒い雨」の実態と人体への影響が検討され、黒い雨専門家会議報告書が刊行された。²⁰⁾ 気象シミュレーション法による放射線降下量の推定では、宇田降雨域の上雨域と同様の結果が得られたが、推定の根拠となる確たる初期データが不十分なため、信頼性の高い結果が担保されているとはいえないものであった。例えば、この気象シミュレーションでは、広島原爆のキノコ雲の雲頂に関する海拔最大高度を8,000mとしていたが、2011年に広島市立大学の馬場正志らが、キノコ雲の多数の写真をもとに解析を行い、その雲頂高度の最大値を16,000mに修正すべきであることを報告した。²⁾ キノコ雲の高さを倍増させると、雲下周辺の放射性降下物やエアロゾルによる放射能汚染域は大きく拡大する方向への修正の必要性が明白である。

2.6. 原爆体験者等健康意識調査報告書

2.6.1. 調査の目的および方法

広島市は、原爆被害の実態解明を進めるため、2001年度から広島市原子爆弾被爆実態調査研究会を立ち上げていたが2008年度から同会を再組織し、同年6月から、原爆体験者等健康意識調査を実施した。その調査結果を基に2010年5月、「原爆体験者等健康意識調査報告書」としてとりまとめ公表した。⁶⁾ 調査方法は、郵送自記式質問紙調査による基本調査と、基本調査結果を検証するための個別面談調査である。調査対象は、1945年6月時点において、①広島市内又は県域の一部に、原爆投下前から居住し続けている者、及び②広島市内又は県域の一部に、1950年1月1日から1952年12月31日までに転入し、居住し続けていると思われる者で、かつ、原爆投下前に生まれた被爆者以外の者の合計3万6,614人に対して実施した郵送によるアンケート調査により収集されたもので、そのうちの約74%にあたる2万7,147人から得られた自書式回答である。

2.6.2. 「黒い雨」の時空間分布の解析

上記のアンケート調査で収集された項目の中に「黒い雨」の体験の有無、体験場所、雨の降り始めと降り止んだ時刻（時単位）、雨の強さなどが含まれている。表1に関連項目についての質問と回答様式を示す。Ohtaki (2011) は、「黒い雨」を体験したと回答した調査時の年齢が71歳以上の者を対象として限定し、「黒い雨」の時空間分布の解析を行った。²²⁾ 雨の降り始めと降り終わりの双方の時刻が回答されていた対象者は1,084人であった。表2にそれらの時刻別の度数分布を示す。なお、降り始めの時刻のみが回答されていた対象者は481人であった。

場所情報については、概ね旧町村単位（市内中心部については体験者が一定数集まる範囲）で統合し、その地域の代表地点（中心地の役場や学校）の位置情報（経度と緯度）に変換を行った。降雨時間の長

表1. 原爆体験者等健康調査におけるアンケート質問と回答様式（「黒い雨」関係を抜粋）

問15-1.	問15-2.	問15-3.
黒い雨体験有無	浴びたり触れたりしたか	降った時にどこにいたか
有り= 1 なし= 2 わからない～3 欠損は「9」	沢山浴びた= 1 少し浴びた= 2 降っているのを見た= 3 わからない= 4 欠損は「9」	欠損は「9」

問15-4.	問15-5-1.	問15-5-2.	問15-6.	問15-7.
黒い雨の強さ	何時頃から	何時頃まで	雨の色	紙くずや破片が飛ぶのは見えたか
強い、どしゃぶり= 1 中くらい、サ～サ～= 2 弱い、パラパラ= 3 わからない= 4 欠損は「9」	24時間表示 欠損は「99」	24時間表示 欠損は「99」	真っ黒= 1 黒っぽい= 2 茶色っぽい= 3 透明に近い= 4 わからない= 5 欠損は「9」	はい= 1 いいえ= 2 わからない= 3 欠損は「9」

表 2. 「黒い雨」の降り始めと降り終わりの双方の時刻が回答されていた対象者における「黒い雨」の降り始めの時刻別降り止んだ時刻別回答度数²²⁾

降り始めの時刻(時)	降り止んだ時刻(時)											total
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
8	12	110	19	2	8	2	4	2	0	0	0	159
9	0	25	147	52	26	13	4	9	2	2	0	280
10	0	0	13	157	69	32	18	13	2	1	1	306
11	0	0	0	9	62	28	22	10	7	2	0	140
12	0	0	0	0	6	25	9	6	3	1	0	50
13	0	0	0	0	0	1	24	12	4	3	1	45
14	0	0	0	0	0	0	2	39	8	1	2	52
15	0	0	0	0	0	0	0	2	25	13	2	42
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	2	10
total	12	135	179	220	171	101	83	93	51	31	8	1084

さ（解析対象者数903人）、時刻ごとの降雨の状況（解析対象者数1,413人）、降雨の強さ（解析対象者数1,378人）、降雨の色（解析対象者数1,248人）について、ノンパラメトリック平滑化を適用して各時空間分布を求め、新しい「黒い雨」降雨域（大瀧雨域）を定めた（図1）。その結果、推定された降雨域（大瀧雨域）は増田雨域とほぼ一致しており、増田が雨域の拡大の可能性について指摘していた点を再確認するに至った（図2）。

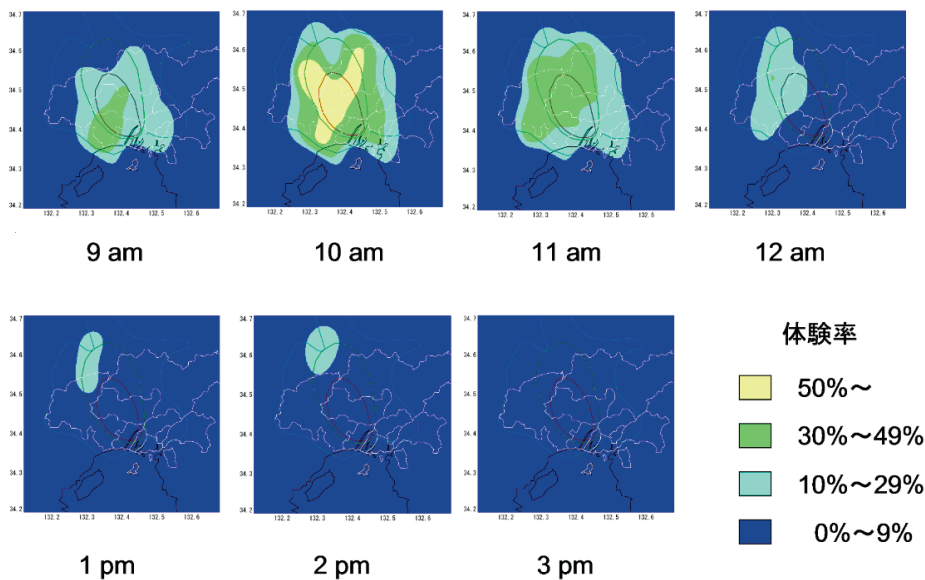


図 1. 推定された広島「黒い雨」体験の時刻別地理分布²²⁾

図 1 は推定された黒い雨の条件付体験率について、午前 9 時から午後 3 時の時刻毎の地理分布を示している。黄色の領域は、条件付体験率が50%超を、緑色の領域は30%～49%、水色の領域は10%～29%の領域を表している。この図より、黒い雨は午前 9 時頃に広島市西方近郊から降り始め、その後北西方向に拡がり午前10時～11時に最も広い範囲で降り、その後縮し午後 3 時頃安芸太田町（加計）付近で消失したことが推定された。

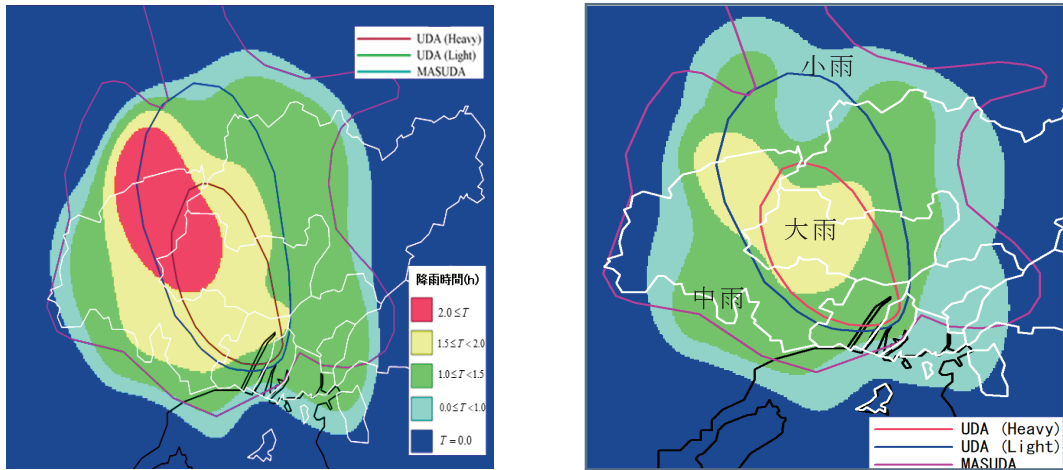


図 2. 推定された広島「黒い雨」の降雨時間（左図）と最大強度（右図）の地理分布²²⁾

図 2 は、推定結果として得られた広島市近郊での「黒い雨」の地理分布を示す。左図は、降雨時間について、右図は最大降雨強度について地理分布を示している。これらの図より、「黒い雨」は爆心地の北西約25km付近を中心に現広島市の東部を除くほぼ全域で0時間～2時間程度降ったことが示されている。参考のために、宇田雨域や増田雨域も併記している。

2.7. 平成24年（2012年）検討会

国は、被爆地域を拡大するためには、科学的、合理的な根拠が必要である旨指摘されていることを踏まえ、前記要望を受けた地域における広島原爆による健康影響について、「原爆体験者等健康意識調査報告書」等に関する検討会（後に、平成24年検討会と称される）を設置した。同検討会は、放射線の健康影響等に関する専門家によって構成されており、2010年12月28日から2012年7月9日まで合計9回開催され、前記専門家による知見に加え、「黒い雨」降雨域の線量推計を行った物理学者からのヒアリングや、広島市が行った住民アンケートに関する推計を行った研究者などからのヒアリング等、多角的な検討が行われ、最終的に「原爆体験者等健康意識調査報告書」等に関する検討会報告書が提出された。¹³⁾ それによると、広島市調査について、同じ地域において「黒い雨」の体験率が50%を超える地域が「被爆地域及び健康診断特例区域として指定されていない地域」の一部に限られていること、爆心地から20km以遠においてデータ数が少ないこと、調査対象者本人の60年以上前の記憶によっており、その正確性を十分に検証することができないという理由により、広島市調査によって「黒い雨」降雨域を推知することは困難と判断された。

3. 「黒い雨」訴訟の提訴

「黒い雨」体験者84人は、被爆者援護法1条第3号に定める「原爆投下時又はその後、身体に原爆の放射線被曝の影響を受けるような事情の下にあった者」に該当するとして、2015年に広島市と広島県、国を相手取り集団訴訟を起した。その後、22回の口頭弁論を経て、2020年1月に結審した。こ

の裁判では国が定めた援護対象区域の妥当性が最大の争点となった（図3）。

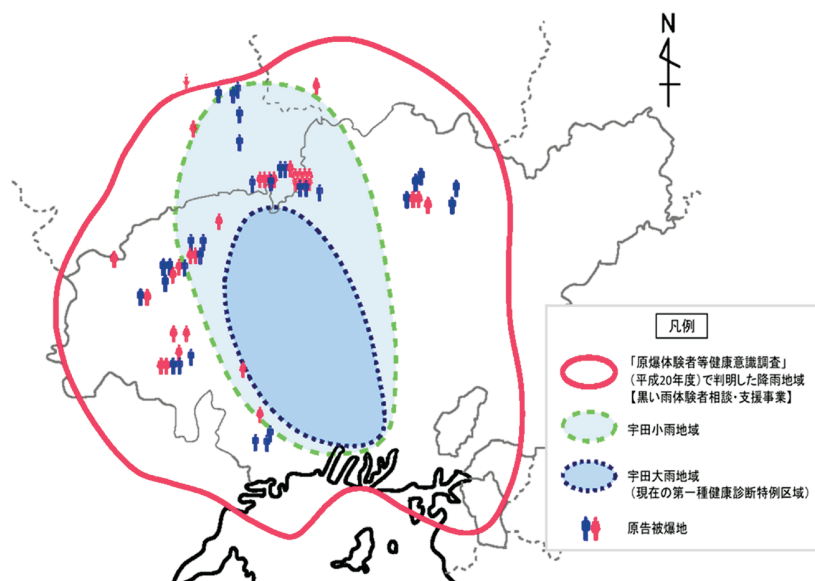


図3. 「黒い雨」降雨地域図（宇田雨域と大瀧雨域）

本図は「黒い雨訴訟」原告団作成図を借用したものである。

3.1. 内部被曝による健康影響の傍証となった疫学的知見

原爆の残留放射線（間接被爆）による健康影響は、その放射線量の直接的推定が不可能であるという理由により、未解明のまま残されている。その一方、原爆被爆者における急性放射線障害（以下、急性症状）の発症や固形がん罹患（死亡）危険度が初期被爆線量だけでは説明できないことについて、被爆直後から着目していた臨床家や研究者もいた。^{16), 38)} 広島町の町医者であった於保（1957）は、放射能障害の実態を知るため調査時点で生存していた直爆者3,946名、入市者692名について被爆条件、急性放射線原爆症の有無およびその程度、被爆後3ヶ月間の行動等の聞き取り調査を行い、その結果、原爆投下後3ヶ月以内に中心地（爆心地から1km以内）への立入りがない場合には、各急性症状の発症率が被爆距離の増大とともに減少していたこと、3ヶ月以内に中心地への立入りがあつた場合には、立ち入らなかつた場合よりも発症率が高くなつたばかりか、原爆投下時に広島市内にいなかつた者にまで急性症状を発症していたこと、その有症率は必ずしも被爆距離に正相関しなかつたことなどを見出し、爆心地付近への立入りに伴う残留放射線の影響を軽視できないことについて示している。²¹⁾ その後、Sawada（2011）は於保らの研究結果を踏まえて原爆被爆者の急性症状への残留放射線被曝の影響の機序に関する仮説を提示している。³⁰⁾

放射線影響研究所の研究グループが2001年に安定型染色体異常率と骨髄線量の関連に関する研究結果を論文で公表した。¹²⁾ 図4は同論文に掲載されているFig.3を基に描いたもので、被爆者（3,042人分）の被爆線量（微小）カテゴリー区分別安定型染色体異常細胞の相対頻度の平均値を縦軸に、横軸に被爆線量彼御り区分別平均値をプロットして得られる散布図を示す。左図は広島の被爆者のデータに関するものであり、右図は長崎のデータに関するもので、ともに、横軸はDS86¹による骨髄線量であり、縦軸は染色体異常率をもつ（末梢血リンパ球）細胞の相対頻度で、軸の目盛りは共通として描いている。

被爆状況別に、原爆炸裂時に家の中に場合はピンク色の○（回帰分析により、当てはめられた傾向曲線は黄土色の実線）で、爆弾炸裂時に戸外にいた場合は青色の△（回帰分析により、当てはめられた傾向曲線は青色の点線）で、長崎の工場（コンクリート建造物）の中に居た場合に緑色の（回帰分析により、当てはめられた傾向曲線で緑色の一点破線）で示している。この図によると、初期放射線を対象にした被曝線量DS86による被曝線量が同じ値であっても、家の中で被曝した場合の方が、家の外で被曝した場合よりも染色体異常率が高くなっていることが分かる。

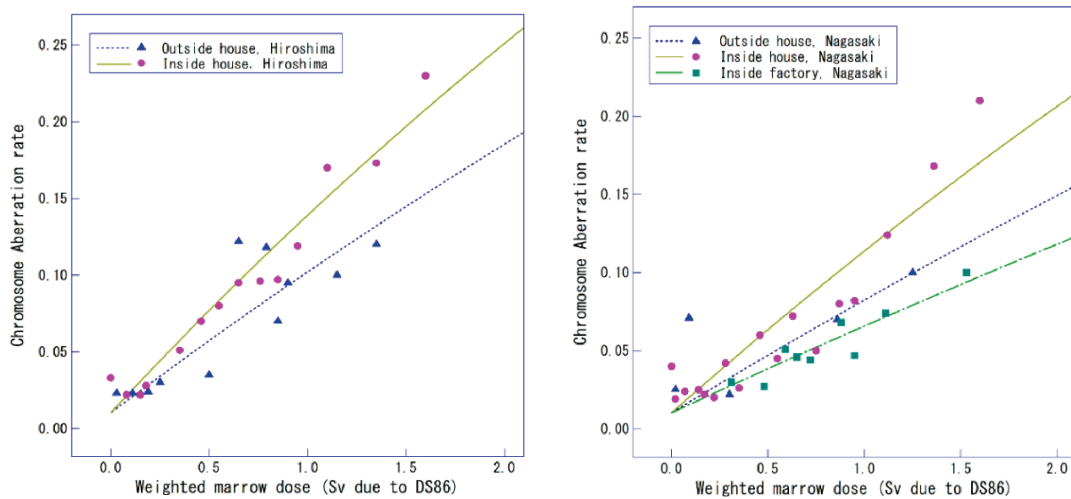


図4. 放影研LSSによる被曝状況別染色体異常細胞頻度（この図は、論文¹²⁾のFig.3を対象にマークの属性を一部改変し再描画して得られた図を転写したもの）

大瀧ら（2018）は、この調査結果に対して、安定型染色体異常を持っていない細胞の相対頻度（ $1-PA$ ）の対数値が被曝線量の一次式になる数理モデルを想定して、回帰分析を適用し、以下に示す式を得た。²⁵⁾

$$PA_i = 1 - \exp(-0.00451 - 0.0333 \times [NO_i + 1.27 \times HO_i + 1.44 \times \{(NI_i + 0.52 \times NF_i) + 1.27 \times HI_i\}] \times DS86_i + \varepsilon_i),$$

$$\varepsilon_i \sim N(0, 0.0088^2),$$

ただし、 NO , HO , NI , HI , NF はそれぞれ次式で定められるダミー変数である、

$$NO_i = \begin{cases} 1, & \text{長崎の屋外で被曝,} \\ 0, & \text{その他,} \end{cases} \quad HO_i = \begin{cases} 1, & \text{広島屋外で被曝,} \\ 0, & \text{その他,} \end{cases}$$

$$NI_i = \begin{cases} 1, & \text{長崎の家の中で被曝,} \\ 0, & \text{その他,} \end{cases} \quad HI_i = \begin{cases} 1, & \text{広島の家の中で被曝,} \\ 0, & \text{その他,} \end{cases}$$

$$NF_i = \begin{cases} 1, & \text{長崎の工場に被曝,} \\ 0, & \text{その他,} \end{cases} \quad i = 1, \dots, 56.$$

上記の分析結果は、広島原爆被曝者における染色体異常細胞の頻度は長崎のそれに比べてDS86調整

¹ DS86は原爆の初期放射線による線量評価システムで、1986年に導入され、原爆投下時に爆心地から2,500メートル以内において、遮蔽されていなかったか、または、日本家屋等の木造建築物によって遮蔽されていた被曝者のうち詳細な遮蔽歴が得られている人全員を対象としている。その後、2003年に、大気中の水蒸気による遮蔽効果等が取り入れられ現在も使用されている線量評価システムであるDS02に更新されたが、DS86の場合と同様に、残留放射線等の間接被曝由来の放射線の線量は軽微とされ無視されている。

後で27%高いこと、屋内被爆者における染色体異常細胞の頻度は屋外被爆のそれに比べ、44%高いことを示している。そして、染色体異常頻度における線量推定システムDS86（本質的にはDS02も同じ）による被爆線量に関する線量反応関係の被爆状況依存性の原因はDS86線量システム²⁹⁾の持つ構造的偏りにあり、屋内被爆の場合、31%線量が低く見積もられていることが示唆されている。この偏りは、DS86システムが初期線量のみを対象としており、放射性粉塵（微粒子）の吸引・摂取が絡んだ間接被爆では大きな遮蔽効果はないにもかかわらず、遮蔽効果による線量の低減調整を行ったことによるものと思われる。（図5参照のこと）なお、都市間差として、広島の方が長崎に比べて線量が21%低く評価されているが、その要因としては、原子爆弾に使われていた核分裂物質の違い（広島の爆弾はウラン、長崎の爆弾はプルトニウム）、爆心地の位置、爆心地付近の土壌成分や植生、爆弾投下当時の気象条件の違いで、曝露物質の生成量や飛散分布の違いにより生じたものと思われる。

図5は、原子爆弾炸裂時に爆弾から放出された中性子が爆心地付近の日本家屋や土塀に当たり粘土や土壌に含まれていた²⁷Al、⁵⁵Mnや²³Na等の安定型元素が原子核に中性子が取り込まれ、放射化され放射能を持つ²⁸Al、⁵⁶Mnや²⁴Naとなり放射性粉塵が生成された状況を模式的に描いたものである。屋内で被爆した人々にとっては、爆弾から放出された中性子やガンマ線（初期放射線線）は屋根や壁による遮蔽効果により減衰されていたはずである。一方、爆弾炸裂後に生成された放射性粉塵への曝露（DS86では、その線量は全く無視されている。従って、日本家屋等の建造物による遮蔽効果も存在し得なかった）による線量は、爆弾炸裂の瞬間に居た場所が屋内と屋外での系統的な差はなかったものと思われる。このような放射性粉塵曝露による線量の割合が無視できない程度に大きかったとすると、上記の染色体異常率データに観られる屋内・屋外被爆による一見不整合な線量依存性が説明出来ることになる。

チェルノブイリ原発事故をきっかけに、1986年に、あらためて残留放射能の問題に取り組もうとNHK広島局が中心となり、広島市中心部に早期入市した賀茂郡北部防衛隊99名を対象に被爆線量推

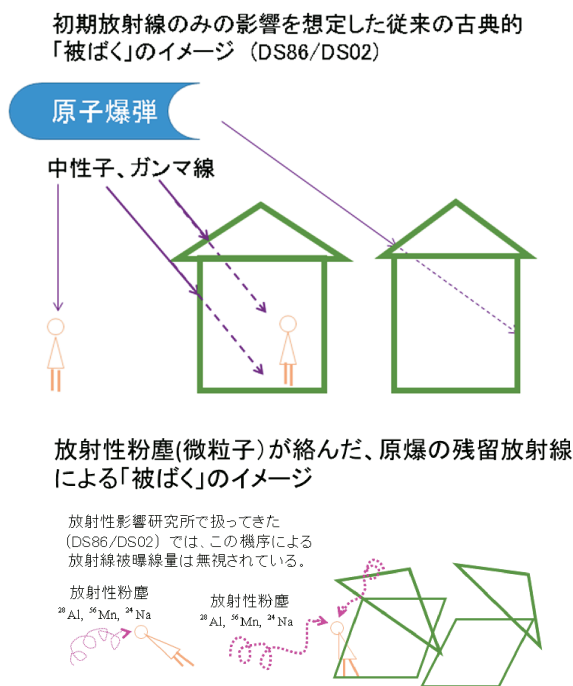


図5. 原爆による放射線被曝の機序の概念図

定や染色体異常について調査研究が行われた。¹⁷⁾しかし、その結論は歯切れの悪いものであった。調査対象者のうちはっきりとした急性症状を示したものが数名みられたが、賀北部隊が被曝した残留放射線の推定総被曝線量は高々120mGyであり、急性症状発症の閾値とされている1 Gyの線量には達していなかった。その観点からは、広島原爆の場合、被曝距離が1.9km以遠の直爆者や入市者は全員が100mGy未満の被曝線量（初期線量と残留放射線量）であり、2章や3章で紹介した多くの遠距離被爆者や入市者における高頻度での急性症状発症の事実について説明できないことになる。^{9), 11), 23)}

上記の疑問に対する解答を出すために、大瀧と大谷（2016）は、放射性微粒子の吸飲による内部被曝がこれらの要因であるとの仮説の下、原爆投下当日広島市外で召集され、その日の午後（正午頃から夕方5時頃にかけて）原爆被爆者の救護のため広島市内に入市した陸軍船舶特別幹部候補生3期生142名を対象とし、2016年に郵送によるアンケート調査（有効回答者数は64名）を行った。²⁴⁾作業場所及び作業中の粉塵曝露の有無により、A群（2 km以遠で作業、粉塵曝露無（22名））、B群（2 km以遠で作業、粉塵曝露有（9名））、C群（2 km以内で作業、粉塵曝露無（12名））、D群（2 km以内で作業、粉塵曝露有（21名））の4群に分け、急性症状の発症の有無及びがん罹患既往歴の有無について、A群を基準とする各群のオッズ比と95%信頼区間を算出した。図6にその結果を示す。

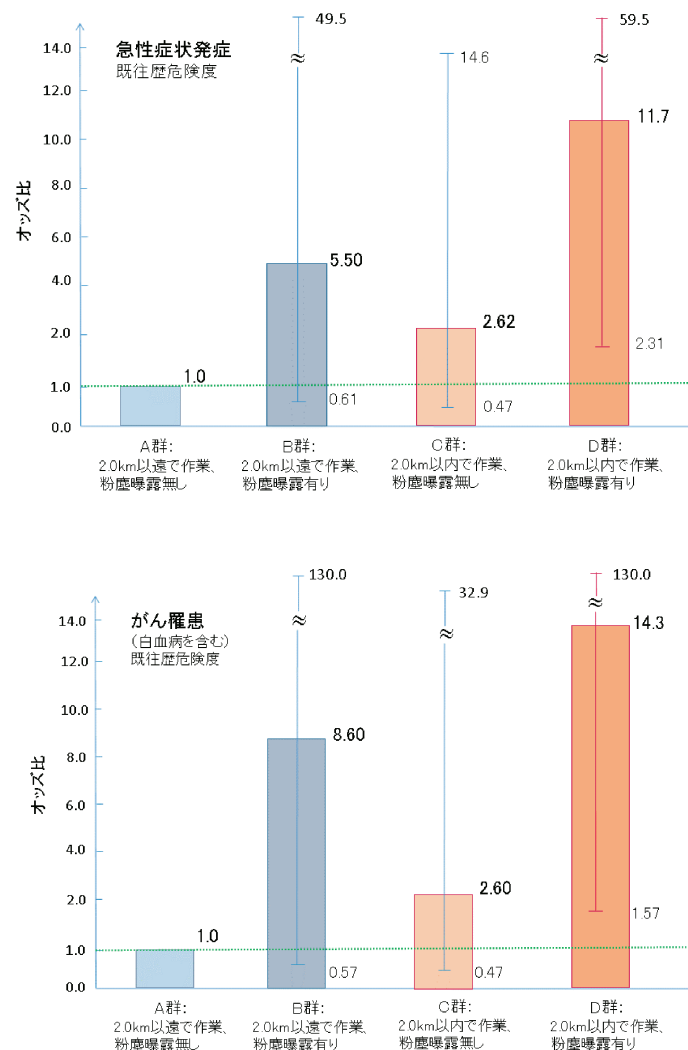


図6. 広島早期入市少年兵における健康影響の作業場所・粉塵曝露状況別オッズ比²¹⁾

その結果、D群において、急性症状様の既往歴（有）の危険度やがん罹患既往歴（有）危険度が10倍を超える高い上昇を検出し、この少年兵集団における急性症状やがん罹患の既往歴の危険度が救護活動中の放射性微粒子の吸飲による内部被曝に強く関連していることを見出した（図6）。

広島大学では広島原爆被爆者コホートデータベース（ABS）に基づいた被爆者研究が実施されているが、被爆者の健康が非初期線量で説明出来ない（必然的に内部被曝によるものと解釈せざるを得ない）研究結果が論文として複数報告されている。Tondaら（2012）は被爆者における固形がん死亡危険度についてセミパラメトリック手法による解析を行い、爆心地の西側で死亡危険度が高くなっていること（非円型対称性を）を視覚化した³⁷⁾（このような非円型対称性に関しては、1984年にPetersonらは放影研のLSSデータに基づいたCox回帰分析による解析結果が報告されている²⁷⁾。大谷らは、初期放射線（ピカ）の影響が全く考えられない広島原爆の入市被爆者を対象とした1970年～2010年の期間での入市日が8月9日以降の場合に比べて8月6日および8月7日の固形がん死亡危険度が、それぞれ18%および7%超過していたことを報告している。²⁶⁾ また、鎌田らは1970年～1990年の期間での被爆者の白血病罹患危険度は、男女とも入市日が8月6日である場合に同期間の全国日本人に比べて3.7倍高く（ $p < 0.05$ ）なっていたことを報告している。¹⁰⁾ 大瀧と大谷（2016）は、ABSの被爆者のうち、60歳未満のときに爆心地から2,000m以内で被爆し、1970年1月1日の時点で広島県内に居住（生存）していた1万8,154人（男性6,815人、女性1万1,339人）を解析対象として、1970年から2010年までの41年間における全日本を基準集団とした期待死亡数と観察死亡数の比（SMR）を男女別年齢階級別、被爆地点方向別に求め、公表している。²⁴⁾ 同論文では、SMRの値は被爆時年齢が10歳代の男性の場合には、爆心地近傍を含めて爆心地から西側では被爆距離が遠くなるとともに増大し、2.0km付近に限ってみると、西側の方が東側よりも高い傾向が認められるなど、被爆後の固形がん死亡の超過危険度の被爆地点依存性の特徴が初期線量だけでは説明できないことについて論じられおり、さらに、研究結果のまとめとして、被爆者における内部被曝の主因は放射性粉塵によるものと考えられること、ただし、その放射線の線量を測る方法については現時点で十分な知見は得られていないことについて言及している。

3.2. その他の内部被曝の健康影響に関連する知見

3.2.1. 原告らへの曝露に関して想定される放射性微粒子の動態

原爆爆発後、地上においては、熱線によって起こる直接発火に加え、爆風で建物が破壊され、それに伴って発生する間接発火が生じ、火災によって生じた煤が上昇気流に吹き上げられた。その際、中性子によって放射化された爆心地付近の家屋や土壌等に含まれる核種（²⁸Al, ⁵⁶Mn, ²⁴Na等）が粉塵に付着し、核分裂生成物（¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr等）や未分裂原爆材料と共に雨滴への混入や粉塵として上空に巻き上げられ、風に流されながら大気中に拡散して次第に地表に降下したものと想われる。半減期が2.2分の²⁸Alを含む放射性微粒子の吸飲は、爆心地近傍の人々にとって不可避であったはずである。一方、⁵⁶Mn（半減期2.6時間）や²⁴Na（同15時間）を含む放射性微粒子は、広範囲に飛散し、遠距離被爆者や入市者までも曝露の対象となったと考えられる（図7）。地表で活動していた人々が呼吸や汚染された井戸水、川（沢）の水、さらには野菜等の体内摂取により内部被曝を起こしたものと想定される（図8）。なお、

「黒い雨」降雨地域とされている己斐・高須地区の土壌等から高濃度の放射能が検出されたという複数の報告があったことで裏付けられている。^{1), 33), 35)}

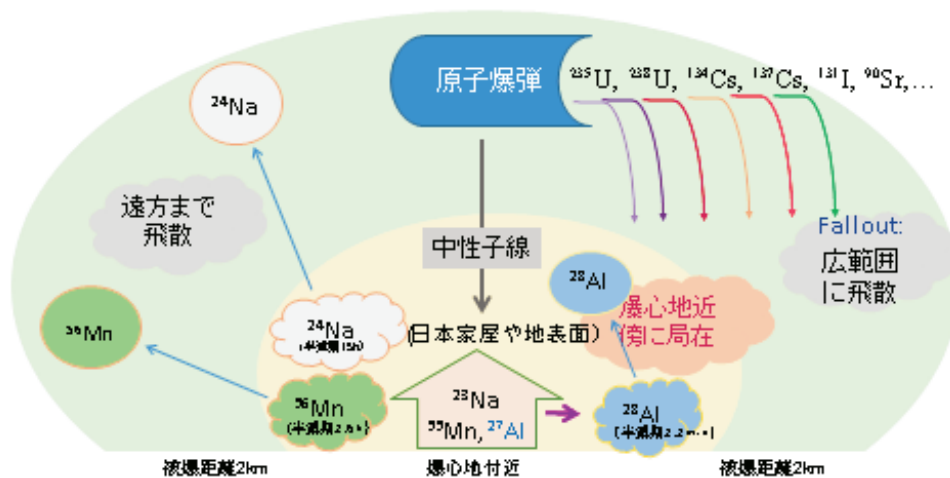


図7. 想定される広島原爆被爆者における放射性微粒子被曝の機序²¹⁾

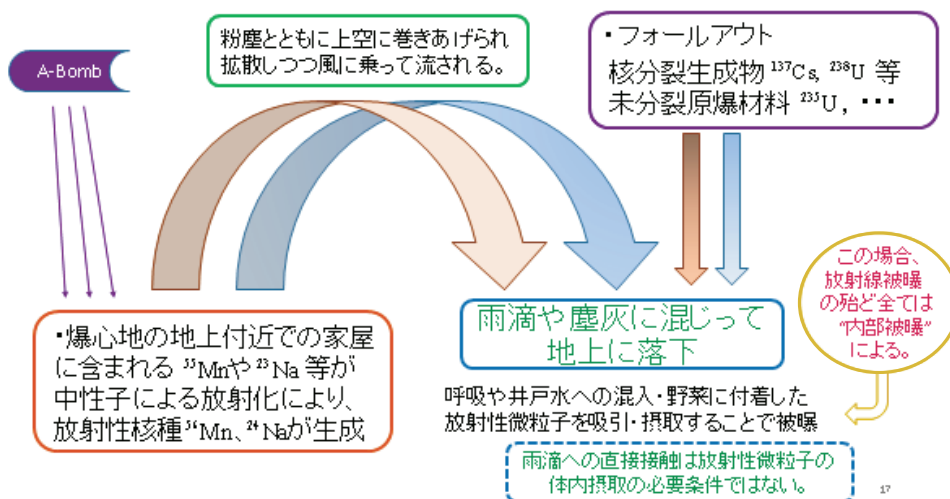


図8. 原告らにおける放射性微粒子曝露の想定機序

3.2.2. 不溶性放射性微粒子による内部被曝

放射性粉塵に含まれる不溶性の放射性微粒子⁸⁾の中には、1か所にとどまり半永久的に被曝を与えるようなこともあり、その例が、原爆投下後60年以上も経って、被爆者や黒い雨地域に居た人の臓器標本からウラニウムやプルトニウムの微粒子を発生源とするアルファ線が観測されている。³²⁾ 放射性微粒子1個で内部被曝するだけで、「身体に原子爆弾の放射能の影響を受けるような事情」が出現している証拠と見なされている(図9)。不溶性放射性微粒子の周囲にホットスポットと呼ばれる集中被曝が生じる極端に不均一な被曝は通常の外部被曝での均一被曝の場合よりも危険が大きいと指摘する意見^{14), 36)}や、放射線を照射された細胞の隣の細胞も損傷されるというバイスタンダー効果、細胞の慢性被曝の場合、大量の急性被曝よりも大きな障害が起こり得るというペトカウ効果や逆線量率効果が生じるなどの研究報告がある。^{5), 27)}

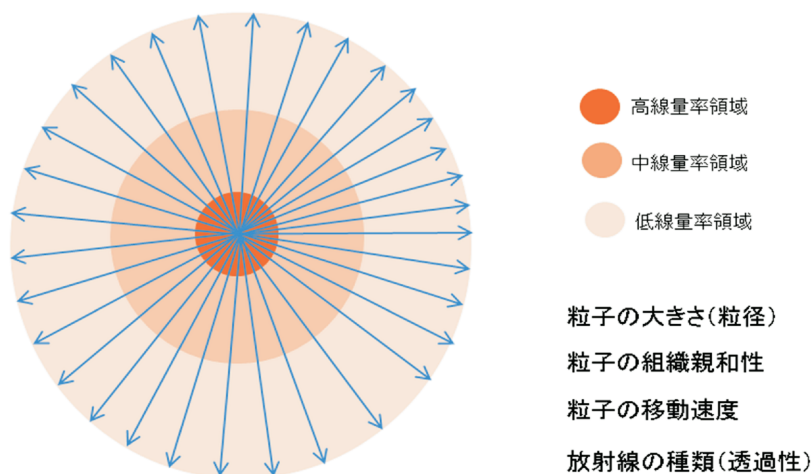


図9. 放射性微粒子による被曝のイメージ

Geiserら（2000）は、放射性微粒子の体内への取り込みが主に呼吸によるものであり、粒径などの属性により吸収過程や体内での循環状況が大きく変化することを報告している。⁴⁾ それによると、鼻呼吸の場合、粒径が1～5 μm の粒子では約50%が気管気管支領域に滞留し、残りの50%は肺胞領域に到達する。5～6 μm より大きな粒子は90%が鼻腔内に捕捉され、10～20 μm の粒子が気管・気管支まで達することは少なく、10 μm 以上の粒子は肺胞レベルには沈着しない。一方、口呼吸においては粒径が1～5 μm の粒子の40～60%は肺胞レベルに沈着、1～10 μm の粒子の約60～80%は細気管支レベルに沈着し、10～20 μm の大きな粒子の95%以上が気管・気管支に沈着する。なお、健康成人では、鼻呼吸の頻度が高く、口呼吸を習慣的に行っている人の割合約13%と少ないものの下気道に達する粒子数は口呼吸の場合に増加することである。

放射線障害の専門家から、「線量が同じなら、内部被曝と外部被曝の影響は同じだ」という声を耳にすることがある。確かに、内部被曝であろうが外部被曝であろうがSv単位による線量（以下、Sv値）が同じなら健康影響は同じはずである。²⁾しかし、Sv値は防護のために一つの係数を当てたもので、実際の放射線の健康影響を検討する際には全く無意味なものである。その理由は、曝露原因核種の体内取り込み量の把握などにより何らかの方法で臓器レベルでの放射線被曝関連の物理量としてのBq値やGy値を推定することは出来ても現時点では健康影響への寄与の程度について未解明であることによりSv値への換算は出来ないことによる。³⁾扱うことが出来ない被曝指標を比べて比較を行うことは不可能である。実際、単純な外部被曝によるGy値が同じでも健康影響が非常に強い場合も、弱い場合もあることが知られている。例えば中性子被曝の場合、同じGy値でもガンマ線に比べ約5倍から20倍の生物学的・健康的影響（RBEが5～20）とされている。不溶性放射性微粒子被曝の健康影響については、最近になって、ようやく、星ら（2021）による国際共同研究チームが動物実験を始められた段階であ

²⁾ Sv（シーベルト）は放射線を被曝した場合の人体への影響を表す単位。吸収線量（Gy値で表される）との比をRBE（生物学的効果比）という。外部被曝によるガンマ線やX線の場合は、RBE=1であり、Sv値とGy値は一致している。

³⁾ Bq（ベクレル）は放射性物質が放射線を出す能力（放射能の強さ）を表す単位。1 Bqは1秒間に1個の放射性壊変をする放射性物質の量を表す。通常、単位体積当たり又は単位重量当たりの放射能の強さを表すBq/リットルやBq/kgという表現で用いられる。Gy（グレイ）は吸収された放射線のエネルギーの量（吸収線量）を表す単位。1 Gyは物質1 kg当たり1 J（ジュール）=0.239calのエネルギー吸収を与える量である。

る。^{3), 7) 31), 34)} ヒトへの健康影響についての詳細は我々が行ってきた疫学的研究による断片的なものを例外として、殆ど何もわかっていない。

4. 結びに代えて

放射線影響研究所が発表してきた被爆者の放射線の健康影響に関する知見は、内部被曝の影響を無視したものであり、実際の疫学データを十分な精度で合理的に説明することができていない。放射線の健康影響の解明には、分子生物学からコホート研究まで幅広い分野の研究を、放射性粒子による内部被曝の影響を含めて全面的に見直すことが必要であると思われる。

謝辞

本稿をまとめるにあたり、星正治広島大学名誉教授より心強い後押しをいただいたことに深謝いたします。なお、本研究は、文部科学省科学研究費の基盤研究（A）課題番号19H01149からの援助を受けたものである。なお、本論文の一部は、広島大学原爆放射線医科学研究所の被爆者データベースのデータに基づいている。

参考文献

1. Arakawa, E. T. (1962), Residual Radiation in Hiroshima and Nagasaki, Hiroshima, RERF; ABCC TR 2-26.
2. Baba, M., Ogawa, F., Hiura, S., Asada, N. (2011), Height Estimation of Hiroshima A-bomb Mushroom Cloud from Photos, Revisit the Hiroshima A-bomb with a Database --*Latest Scientific View on Local Fallout and Black Rain*--, Hiroshima City, 55-67.
3. Fujimoto, N., Amantayeva, G., Chaizhunussova, N. et al. (2020), Low-Dose radiation exposure with ⁵⁶MnO₂ powder changes gene expressions in the testes and the prostate in rats, *International Journal of Molecular Sciences*, 21, 4989. doi: 10.3390/ijms21144989
4. Geiser, M., ImHof, V., Schurch, S., et al. (2000), Structure and interfacial aspects of particle retention. In Gehr P, and Heyder J, eds. *Particle-lung interactions*. Marcel Dekker, New York, 291-322.
5. 肥田舜太郎 鎌仲ひとみ (2005) 内部被曝の脅威 原爆から劣化ウラン弾まで『筑摩書房』、pp90-91。
6. 広島市 (2010)、『原爆体験者等健康意識調査報告書』、平成22年 5 月。
7. Hoshi, M. (2021), Radioactive microparticle effects found in animal experiments, *The Innovation Platform* 5. <https://www.innovationnewsnetwork.com/effects-of-radioactive-microparticles-found-in-animal-experiments/9639/>.
8. Igarash, Y., Kogure, T., Krihara, Y. et al. (2019), A review of Cs-bearing microparticles in the

- environment emitted by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, *Journal of Environmental Radioactivity*, 205, 101-118. doi: 10.1016/j.jenvrad.2019.04.011.
9. Imanaka, T., Endo, S., Tanaka, K., Shizuma, K. (2008), Gamma-ray exposure from neutron-induced radionuclides in soil in Hiroshima and Nagasaki based on DS02 calculations, *Radiation and Environmental Biophysics*, 47, 331-336.
 10. 鎌田七男、大北威、蔵本淳、川上秀史、島本武嗣、富田哲治、大瀧慈 (2006)、8月6日入市被爆者白血病の発生増加について、『長崎医学会雑誌』81、特集号、pp245-249。
 11. Kerr, G., Egbert, S., Al-Nabulsi, I., Bailiff I, et al. (2015), Workshop report on Atomic bomb dosimetry – Review of dose related factors for the evaluation of exposures to residual radiation at Hiroshima and Nagasaki, *Health Physics*, 109, 582-600. doi:10.1097/HP.0000000000000395
 12. Kodama Y, Pawel D, Nakamura N et al. (2001), Stable chromosome aberrations in Atomic bomb survivors, Results from 25 years of investigation, *Radiation Research*, 156, 337-346.
 13. 厚生労働省 (2012)、『原爆体験者等健康意識調査報告書等に関する検討会報告書』、平成24年。
 14. 松岡理 (1976)、放射線量の不均等分布とその生物効果—Tamplinのホットパーティクル提案をめぐって、*Radioisotopes*, 25, pp659-669。
 15. 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、pp13-23。
 16. 永井隆 (1946)、長崎の鐘、『アルバ文庫』。http://www.aozora.gr.jp/cards/000924/files/50659_42787.html
 17. NHK広島局・原爆プロジェクト・チーム (1988)、ヒロシマ残留放射能の42年、『日本放送協会』。
 18. 日本公衆衛生協会 (1976)、『広島、長崎の残留放射能調査報告書』、昭和51年度 (厚生省調査研究委託費による)。
 19. 日本公衆衛生協会 (1978)、『広島、長崎の残留放射能調査報告書』、昭和53年度 (厚生省調査研究委託費による)。
 20. 日本公衆衛生協会 (1981)、『黒い雨に関する専門家会議報告書』、平成3年、黒い雨に関する専門家会議。
 21. 於保源作 (1957)、原爆残留放射能障碍の統計的観察『日本医事新報』、1746、pp21-25。
 22. Ohtaki, M. (2011), 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*-, *Hiroshima City*, 131-144.
 23. 大瀧慈、富田哲治、大谷敬子ら (2014)、広島大学原爆被爆者コホートデータにおける固形がん死亡危険度の初期放射線量依存性および特異的な被爆時年齢依存性・被爆距離依存性について—放射性PM2.5の影響か?—、『広島医学』、67、pp311-315。
 24. 大瀧慈、大谷敬子 (2016)、広島原爆被爆者における健康障害の主要因は放射性微粒子被曝である、『科学』、86、pp819-830。
 25. 大瀧慈、保田浩志、大谷敬子、星正治 (2018)、原爆被爆者 (LSS) の安定型染色体異常細胞の

- 頻度に観られる被爆ばく状況依存性—DS86被爆ばく線量の持つ大きな偏りの存在が示唆されている—、『広島医学（第58回原子爆弾後障害研究会特集号）』、71(4)、pp310-313。
26. 大谷敬子、富田哲治、佐藤健一ら（2012）、広島入市被爆者の死亡リスクに関する統計的解析、『長崎医学雑誌』、87、pp261-264。
27. Peterson, A., Prentice, R., Ishimaru, T., Kato, H., Mason, M. (1983), Investigation of circular asymmetry in cancer mortality of Hiroshima and Nagasaki A-bomb survivors, *Radiation Research*, 93, 184-199.
28. Petkau, A. (1972), “Effect of $^{22}\text{Na}^+$ on a phospholipid membrane”, *Health Physics*, 22(3), 239-244. doi: 10.1097/00004032-197203000-00004
29. Roesch, C. (1987), US-Japan Joint Reassessment of Atomic Bomb Radiation Dosimetry in Hiroshima and Nagasaki Final Report. *Radiation Effects Research Foundation*, Hiroshima.
30. Sawada, S. (2011), Estimation of residual nuclear radiation effects on survivors of Hiroshima atomic bombing from incidence of acute radiation disease. *Study of Social Medicine*, 29, 47-62.
31. Shichijo, K., Fujimoto, N., Uzbekov, D. et al. (2017), Internal exposure to neutron-activated ^{56}Mn dioxide powder in Wistar rats—Part 2: pathological effects, *Radiation and Environmental Biophysics*, 56, 55-61. doi: 10.1007/s00411-016-0676-z
32. Shichijo, K., Takatsuji, T., Fukumoto, M. et al. (2018), Autoradiographic analysis of internal plutonium radiation exposure in Nagasaki atomic bomb victims, *Heliyon*, 4(6): e00666. doi: 10.1016/j.heliyon.2018.e00666
33. Shizuma, K., Iwatani, K., Hasai, H., Hoshi, M. et al. (1996), ^{137}Cs Concentration in soil samples from an early survey of Hiroshima Atomic bomb and cumulative dose estimation from the fall out, *Health Physics*, 71(3), 340-346.
34. Stepanenko, V., Rakhypbekov, T., Otani K. et al. (2017), Internal exposure to neutron-activated ^{56}Mn dioxide powder in Wistar rats: part 1: dosimetry, *Radiation and Environmental Biophysics*, 56, 47-54. doi: 10.1007/s00411-016-0678-x
35. 庄野直美（1967）、残留放射能について、『広島医学』20、pp75-91。
36. Tamplin, A., Cochran, T. (1974), Radiation standard for hot particle, *Natural Resources Defense Council*.
37. Tonda, T., Satoh, K., Otani, K., Sato, Y. et al. (2012), Investigation on circular asymmetry of geographical distribution in cancer mortality of Hiroshima atomic bomb survivors based on risk maps: analysis of spatial survival data, *Radiation and Environmental Biophysics*, 51, 133-141. doi: 10.1007/s00411-012-0402-4
38. 都築正男（1954）、医学の立場から見た原子爆弾の災害、『医学書院』。
39. 宇田道隆、菅原芳生、北勲（1953）、気象関係の広島原子爆弾調査報告、本学術会議原子爆弾災害調査報告書刊行委員会編。