

「黒い雨」にともなう積算線量

静岡 清*

広島大学大学院工学研究科

1. はじめに

DS86 最終報告書¹⁾では残留放射能による積算線量について中性子誘導放射能によるものとフォールアウトによるものについて評価が行われている。集積線量は原爆の1時間後から無限時間その場所に滞在した場合の被曝線量を表す。集積線量の推定は文献1においては2通りの方法で推定されている。一つは原爆の初期調査で行われた線量率の測定データに基づく方法で、他の一つは土壌中の¹³⁷Csの降下量の測定データに基づく方法である。残留放射能による集積線量の推定はこれまで、Arakawa²⁾、庄野³⁾、Takeshita⁴⁾、Hashizume⁵⁾、Okajima⁶⁾らにより行われている。庄野は己斐、高須付近、および、旧市内でのフォールアウトによる放射線量について、旧市内においては己斐高須地区の約1/10と推定した。

DS86 最終報告書ではDS86のフォールアウトについては原爆から経過時間t時間後の線量率は1時間後の地上1mの線量率を X_1 として

$$X_t = X_1 t^{-1.2}$$

とし、

$$\int_1^{\infty} X_t dt = X_1 \int_1^{\infty} t^{-1.2} dt = 5X_1$$

で与えられる。

¹³⁷Csの降下量に基づく方法では¹³⁷Cs降下量1mCi/km²が1時間後から無限時間までの集積線量で300mRに相当するとしている。ただし、Fractionationにより異なるが、原爆の場合は不明とされている。

初期調査の線量率測定データから推定された長崎西山地区の集積線量を表1に示す。これらのデータから長崎西山地区でフォールアウトによる集積線量は20-40Rと推定された¹⁾。

表1 長崎西山地区のフォールアウトによる集積線量推定値 (文献1)

Investigator	Days after bomb	Measured Exposure Rate (mR/h)	Kind of Measurement	Exposure Rate at 1 h (R/h)	Cumulative Exposure (R)
¹³ Shinohara et al	N+53	0.1-2.7	Range	0.5-14	2.5-70
¹⁴ Tybout (¹⁶ Wilson)	N+57	1	-	5.8	29
(¹⁷ McRaney)	N+48	1-1.8	Max.	4.7-8.5	24-43
¹⁵ Pace and Smith	N+73	1.08	Max.	8.4	42
	N+96	0.7	Village	7.6	38

* SHIZUMA Kiyoshi, Hiroshima University; shizuma@hiroshima-u.ac.jp

表2 土壌中の¹³⁷Cs から推定された集積線量 (文献1)

Investigator	Year Taken	Year Measured	Deposition of ¹³⁷ Cs (mCi/km ²)				Cumulative Exposure (R)
			Nishiyama	Nagasaki	Net	1945 ^a	
¹⁹ Miller	1956	1982	62	7	55	130	40
²² Mahara and Miyahara	1981	1981	600	200	400	900	270
^{23,24} Okajima et al	1969	1970	1520 ^b	1040	480	760	230
	1969	1970	740 ^c	290	450	710	210

^a The extrapolation of measured values back to 1945 includes only radioactive decay of ¹³⁷Cs.

^b Uncultivated soil.

^c Arable soil.

また、土壌中の¹³⁷Csの測定データから推定された集積線量を表2に示す。西山地区の土壌中の¹³⁷Cs降下量から長崎市内の値を引くことにより西山地区での原爆フォールアウトによる降下量が推定されている。しかしながら、原爆以後1950年から1960年にかけて各国は大気圏核実験を繰返した。これらの核実験によるフォールアウトは日本を含めて世界中に広がった。このため、現在では広島、長崎の原爆のフォールアウトより、核実験のほうが圧倒的に大きい。表2において土壌の採取年が1969年以降ではすでに核実験フォールアウトの影響が大きく、正確な評価は困難である。DS86報告書では西山地区のフォールアウトによる集積線量は40Rと推定された¹⁾。

長崎の場合と同様に広島初期調査による線量率から推定された己斐・高須地区における集積線量の推定値を表3に示す。DS86報告書では広島の己斐・高須でのフォールアウトによる集積線量は1~3Rと推定された。

表3 広島の己斐・高須地区のフォールアウトによる集積線量推定値 (文献1)

Investigator	Days after bomb	Exposure rate at time of measurement		Exposure rate at 1h (R/h)	Cumulative exposure (R)
		Gross	Net		
²⁸ Miyasaki and Masuda	H+188	22 I	Max. 17 I ^a	0.6	3
		20 I	Average 15 I	0.5	2.3
²⁹ Fujiwara and Takeyama	H+49	6 x Bkg.	Max. 40 μR/h	0.19	1
	H+920	2.4 x Bkg.	11 μR/h	1.8	9
¹⁴ Tybout (³⁰ Arakawa)	H+60	45 μR/h	Max. 37 μR/h	0.23	1.2
¹⁵ Pace and Smith	H+87	19-20 μR/h Range		0.11-0.33	0.6-1.6

^aI, the unit of ionization obtained with the Neher electrometer is about 1.5 μR/h.

土壌中の ^{137}Cs データからも集積線量の推定が可能であるが、広島の場合には、評価に使用される ^{137}Cs データがない。広島フォールアウトによる ^{137}Cs の測定はこれまで多くの研究者により行われてきた⁶⁻⁸⁾。しかし、現在では原爆フォールアウトより、核実験のほうが圧倒的に大きい。従って、原爆由来の痕跡を調べるためには、原爆に被爆したままの状態での試料を入手するしかない。本研究ではそのような貴重な試料として3種類：1) 理学部岩石学教室の被爆試料、2) 理研の土壌試料、3) 原爆資料館の「黒い雨」壁面についての測定結果を報告する。DS86 報告書においてはフォールアウトについての線量評価が詳細に行われたが、近くまとめられる DS02 においては中性子、ガンマ線の評価に中心がおかれており、フォールアウトについての再評価は行われていない。

2. 広島原爆の初期調査およびその後の調査

初期調査については主として原子爆弾災害調査研究特別委員会の報告書にまとめられている。この委員会は原子爆弾の災害を総合的に調査研究するために、1945年9月に文部省学術会議により設立され、物理化学地学科会をはじめ9分科会で構成された。

1945年、8月8日に理化学研究所の仁科芳雄氏は陸軍調査団とともに空路、広島に入った。8月9日には仁科氏の指導のもとに陸軍関係者により爆心から5km以内の28カ所から土壌試料が採取された⁹⁾。試料は使用済みの封筒などに入れられて8月10日に東京に空輸されて、その日の内に理研において測定され、銅線から放射能が検出された。これにより原爆であることが確かめられた。この他、初期調査としては8月10日に大阪調査団¹⁰⁾が入市し、携帯用箔検電器を使用して西連兵場の砂から放射能を検出した。翌11日には市内の数箇所から砂を採取し、己斐駅付近で放射能が高いことが確かめられた。8月10日には京都大学調査団¹¹⁾も入市し、市内で砂を採取して11日に帰京ののち放射能を検出した。そして、9月3日、4日には山崎文男氏¹²⁾(理研)がローリツェン検電器を自動車に乗せて外部放射線量の現場測定を行った。

渡辺武男氏(東京帝国大学教授)は地学班長として1945年10月11日に広島に入り、11,12,13日に広島の調査を行った¹³⁾。14日には長崎に向かい、15-19日に長崎の調査を行った。さらに、1946年5月7日に広島、13日に長崎を再調査した。渡辺氏の収集した試料は東京大学総合研究試料館(現、東京大学総合研究博物館)で保管されていた。これらの試料は平成16年1月24-4月12日に「石の記憶-ヒロシマ・ナガサキ」として初めて特別展示されるとともに、写真集¹⁴⁾にまとめられている。渡辺氏の調査のあと小島丈児氏(広島文理大)らは独自に調査を行った。実際の現地調査と試料収集は10月27日、11月4,5,9,13日、12月2,3日に当時学生であった秀敬氏(広島大学名誉教授)が行った。これらの試料は岩石学的調査のあと、広島大学理学部岩石学教室で保管されていた。

原爆後、1945年10月3日~7日には、日米合同調査団の調査¹⁵⁾が行われた。この調査では携帯用ガイガーミュラー計数管を用いて広島の100箇所、その後、長崎で900箇所について行われた。そして、両爆心地と風下にあたる広島市の西方3.2kmの高須地区、長崎市の東方2.7kmの西山地区で高いことが確かめられた。

近年の調査として、昭和51年度および53年度に厚生省は広島において爆心地から半径30kmの範囲の107地点、長崎で98地点について土壌を採取し、フォールアウトに含まれる ^{137}Cs 、 ^{90}Sr の調査を実施した⁸⁾。しかしながら、当時はすでに核実験フォールアウトの影響があり、広島原爆に起因する明らかなデータは得られなかった。また、黒い雨地域と他の地域との違いも認められなかった。

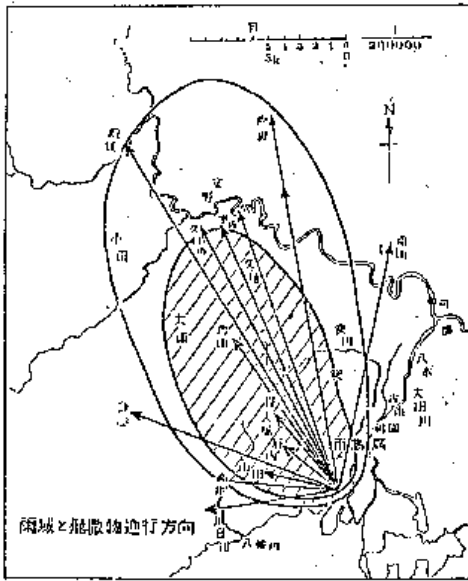


図1 宇田雨域 (文献 16)

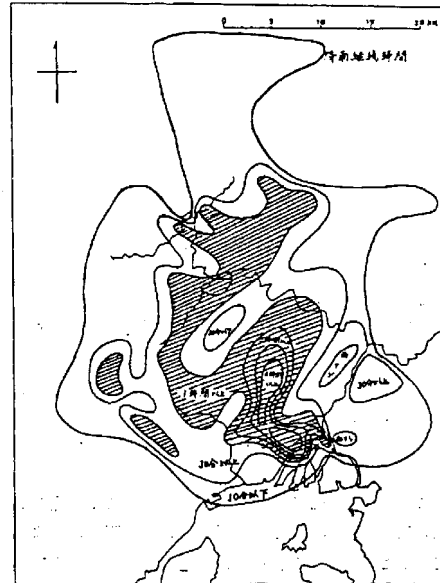


図2 増田雨域 (文献 17)

爆発の 20～30 分後から黒い雨が降ったことが知られている。1953 年、宇田道隆氏ら¹⁶⁾は、雨域、降雨開始時刻、降雨継続時間などの聞き取り調査を行った。宇田氏らによると、1 時間ないしはそれ以上激しい降雨のあった区域は長径 19km、短径 11km の楕円ないしは長卵型で、少しでも降雨のあった区域は長径 29km、短径 15km の長卵型の区域であった。この降雨地域を図 1 に示す。その後、1987 年に増田善信氏は宇田氏の調査データに加えて再度、アンケート調査を実施し、降雨地域は従来よりも広い説¹⁷⁾を発表した。その降雨地域を図 2 に示す。

3. 広島のフォールアウト調査試料

3.1 理学部岩石学教室の調査試料

原爆線量の見直しが 1980 年頃から日米で開始された。その結果は 1986 年に DS86 線量システム¹⁸⁾としてまとめられた。我々は 1985 年頃から原爆中性子による残留放射能の測定を行っていた。その間、1987 年に、広島大学理学部岩石学教室に被爆試料が保管されていることを知った。これらの試料は倉庫のなかに 14 箱、別の部屋に 3 箱の合計 17 箱あった。これらの試料採取を行った秀氏はフィールドノートと地図を保管されていた。フィールドノートから全サンプル 115 のうち、40 - 50 個の採取場所を確認できた。これらの試料は原爆の熱線による岩石学的調査の目的のために集められたので、己斐、高須付近の試料は含まれていなかったが、現在では存在していない爆心付近にあった広島郵便局、清病院、島病院などの建物の試料が数多く含まれていた。我々はこれらの試料についてまず、非破壊のままで、試料表面に付着しているフォールアウト成分 ^{137}Cs の測定を行い、続いて原爆中性子誘導放射能 ^{152}Eu の測定を行った。試料の採取位置と ^{137}Cs の 662keV 付近のガンマ線スペクトルの例を図 3 に示す。 ^{137}Cs が検出されたのは爆心付近の 5 サンプルのみであった。

3.2 理研の土壌試料

我々はその後も己斐、高須付近の被爆試料を探して回った。そして仁科氏により集められた土壌試料を岡野真治氏が保管されていることを知った。これらの試料は 1992 年に広島市に返還された。我々は低バックグラウンドガンマ線スペクトロメータを使用して ^{137}Cs の測定を行い、爆心から 5km の範

圏内のフォールアウトの分布を調べた。そして、宇田雨域および増田雨域との比較を行い、旧広島市内においては降雨域は増田雨域により近いと推定されることを示すとともに、フォールアウトによる放射線量の推定²⁰⁾を行った。試料の採取位置と、ガンマ線スペクトルの例を図4に示す。また、降雨地域との比較を図5に示す。しかしながら、仁科試料においても、もっともフォールアウトの激しかった、己斐、高須付近のサンプルは無かった。最も近いのは己斐橋付近(図4のNo.7)であったので、そこでの測定をもとに己斐、高須付近でのフォールアウトを推定した。

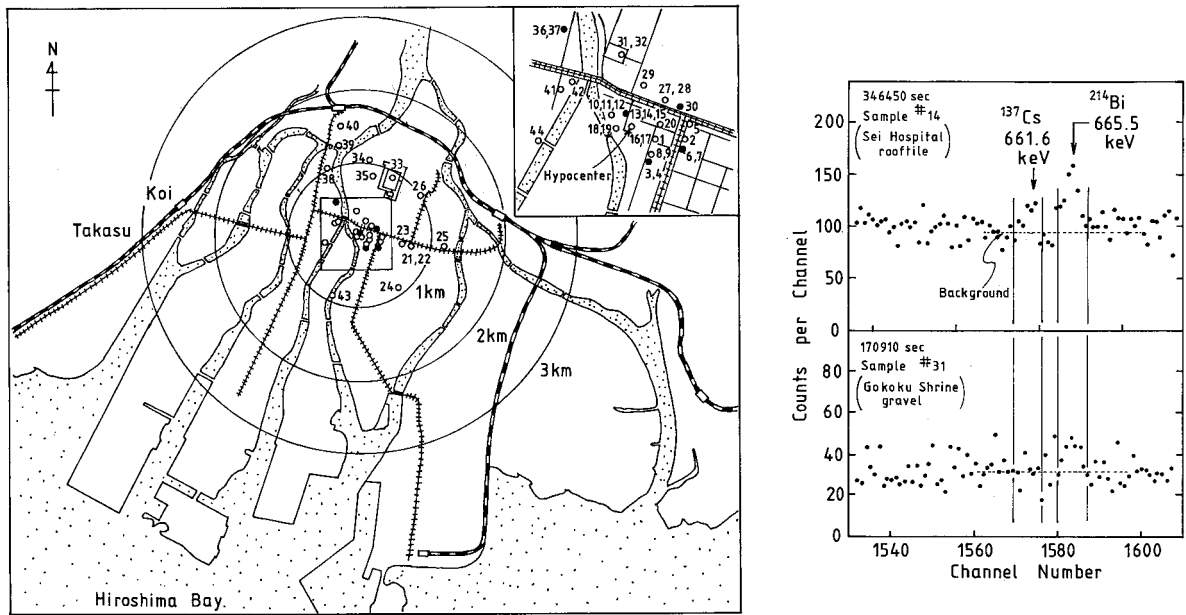


図3 理学部岩石学教室の被爆試料とガンマ線スペクトルの例¹⁹⁾

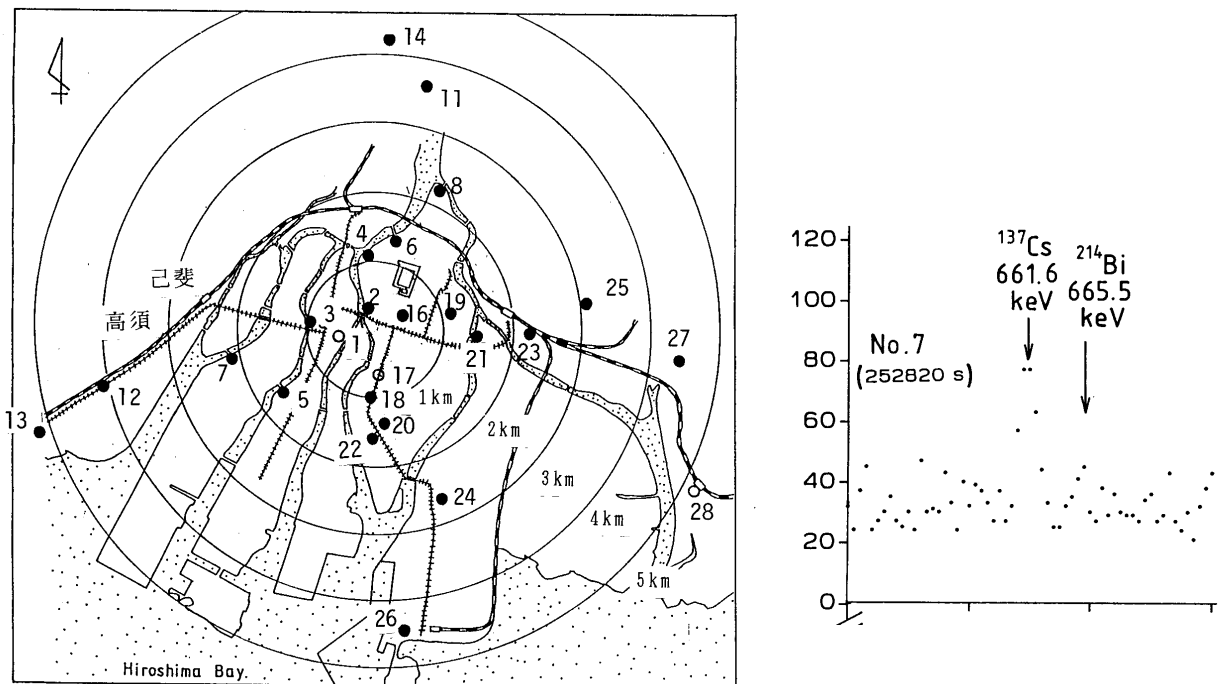


図4 仁科芳雄博士らにより集められた土壌試料(白丸は現存しない試料)

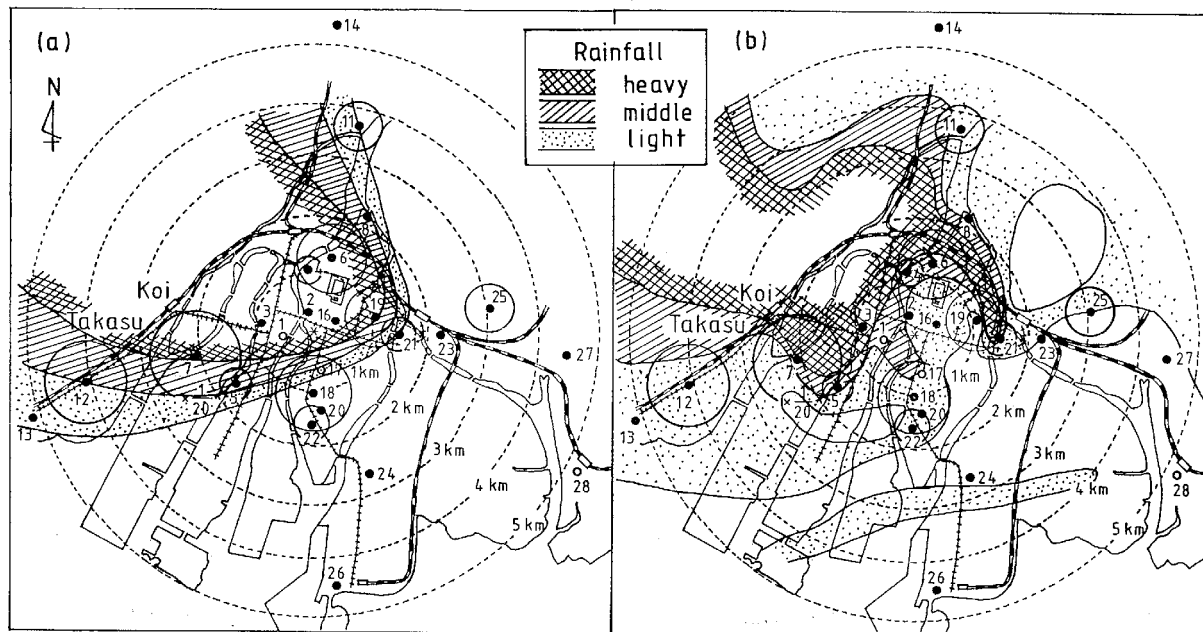


図5 広島市内における¹³⁷Csの分布と宇田雨域（左）および増田雨域（右）との比較

3.3 原爆資料館の「黒い雨」壁面

現在、原爆資料館（平和記念資料館）には黒い雨の痕跡の残る壁が2つ所蔵されている。いずれも広島市西区高須の八島秋次郎氏（故人）から寄贈されたものである。原爆による爆風で八島氏宅の屋根がずれ、屋根と洋間の内側の壁の間に隙間ができて、そこから黒い雨が降り込んで壁に跡が残った。雨は粘着性が強く、跡は少し厚みがあった。その跡を雑巾で拭いたので、現在は平らになっている。昭和42年に自宅改装の際、壁の一部が切り取られて原爆資料館に寄贈された。

その後、昭和60年にNHKにより黒い雨の特集番組が製作・報道された。その際、壁の一部が切り取られた。この壁の写真を図6に示す。そして、イメージングプレートを用いてオートラジオグラフィを行った結果、黒い雨に原因する放射線像が検出された²¹⁾。この壁は平成12年5月に原爆資料館に寄贈された。我々はこの壁について1)高須地区の黒い雨の痕跡を残していることから、己斐・高須地区における¹³⁷Csの降下量を推定できること、2)広島原爆に由来する濃縮ウランが検出できる可能性があることの2点を研究目的として調査を行った。広島原爆は濃縮したウラン²³⁵(U-235)を使用した唯一の爆弾であった。使われたウランは約51kgであり、そのうち核分裂を起こしたのは1kg程度で残り約50kgは爆弾のケース、核分裂片とともにガス化し、原子雲に含まれて飛散したと考えられている。黒い雨に原爆由来のウランが含まれていれば²³⁵Uと²³⁸Uの原子数比が天然比(0.00726)よりも高くなることが予想される。ウランの原子数比を測定するには誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)が最適であるので、広島の黒い雨地域の土壌の分析を試みていた藤川陽子氏(京都大学原子炉実験所)と共同研究を進めた。まず、この壁の端から耳搔き一杯程度の小片(重量0.017g~0.275g)を採取した。採取位置を図6に示す。これらの試料をガンマ線検出器で測定することにより、黒い雨部分から¹³⁷Csが検出された。

平成14年に原爆資料館の展示がリニューアルされた。このとき、西館に展示されている壁面の一部から6個の小片を採取することの許可を得た。この壁の写真と試料の採取位置を図7に示す。これ

らの試料には、壁の前面だけでなく、天井との間にあった部分から採取した試料（No. 3）が含まれている。この部分は前面からは見ることはできないので、拭き取られずに黒い雨のあつた当時のままで残った部分である。この部分からは高い濃度の ^{137}Cs が検出された。

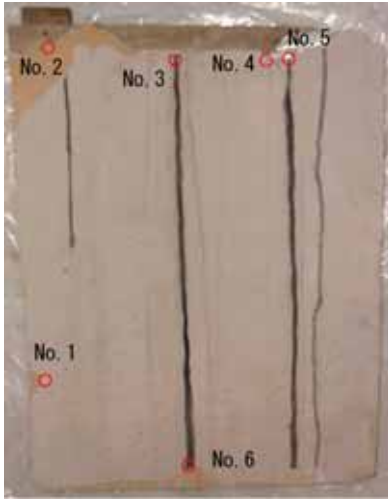


図6 昭和60年に切り取られた壁面

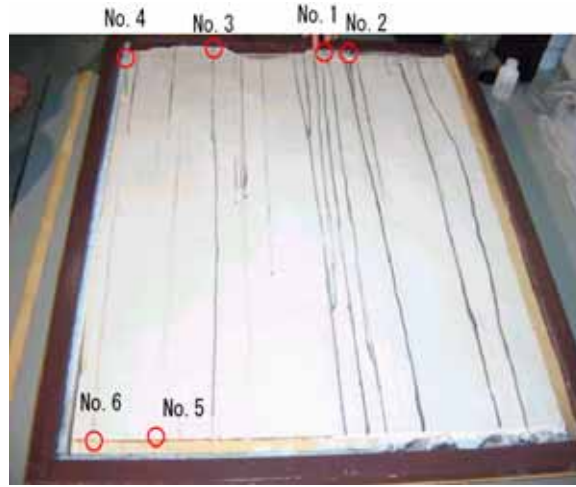


図7 昭和42年に切り取られた壁面

4. 己斐・高須地区のフォールアウトによる集積線量

広島における ^{137}Cs 測定データのまとめを表4に示す。数値は原爆直後に半減期補正をした値である。理学部岩石学教室の被爆試料のうち ^{137}Cs が測定された5サンプルから推定した爆心近くでの ^{137}Cs の降下量は $0.13 \times 10^8 \text{ Bq/km}^2$ であった。理研土壌試料のうち、己斐に近いNo.7を除く試料から推定した ^{137}Cs 降下量は $0.15 \times 10^8 \text{ Bq/km}^2$ であり、前者とよく一致した。次に「黒い雨」壁面から求めた ^{137}Cs の平均表面密度は $4.9 \times 10^8 \text{ Bq/km}^2$ であった。この値は理研土壌試料のうちで、己斐に近いNo.7試料から推定した ^{137}Cs の降下量とよく一致した。

^{137}Cs 降下量の相対的比較のために己斐・高須でのフォールアウト中の ^{137}Cs 降下量を1とすると、土壌試料のうち、No.7を除く試料から推定した旧広島市内の平均値の38倍、核実験フォールアウトの1/8である結果が得られた。

表4 広島における ^{137}Cs 測定データのまとめ

サンプル	^{137}Cs 濃度		強度比
1) 爆心付近	$1.3 \pm 0.7 \text{ mBq/cm}^2$	$0.13 \times 10^8 \text{ Bq/km}^2$	1/37
2) 理研土壌サンプル			
・10サンプル平均 (No.7を除く広島市内)	$1.5 \pm 0.2 \text{ mBq/cm}^2$	$0.15 \times 10^8 \text{ Bq/km}^2$	1/32
・No.7	$49.3 \pm 5.2 \text{ mBq/cm}^2$	$4.9 \times 10^8 \text{ Bq/km}^2$	1
3) 「黒い雨」壁面	$48.5 \pm 22.5 \text{ mBq/cm}^2$	$4.85 \times 10^8 \text{ Bq/km}^2$	1
4) 核実験フォールアウト (1980年以前、北緯30 - 40° UNSCEAR1982)		$37 \times 10^8 \text{ Bq/km}^2$	7.6

次に ICP-MS 分析による U-235/U-238 同位体比として黒い雨の部分で天然比より有意に高い値であることがわかった^{2,2)}。(この結果については本研究会の藤川氏の報告を参照のこと)

¹³⁷Cs の降下量をもとに集積線量の評価を試みた。表 5 にその結果を示す。ここで、中性子誘導放射能による集積線量とは爆心地に無限時間とどまった場合の(最大の)集積線量を表し、表の数値は DS86 報告書からの引用である。フォールアウトについての集積線量のうち、初期調査の線量率データに基づく値は DS86 報告書からの引用である(数値は旧単位 R)。長崎の西山地区では広島己斐・高須に比べて約一桁高いことがわかる。¹³⁷Cs 測定データからの集積線量の推定値も基本的には線量率からの推定値と一致すべき値である。長崎の場合、DS86 報告書の ¹³⁷Cs 測定データからの集積線量の推定値は線量率からの推定値とよく一致している。広島の場合には ¹³⁷Cs 測定データからの集積線量の推定値がこれまで報告されていなかったが、本研究でそのデータを得ることができた。その値は 3.7R となり、線量率からの推定値よりやや高いがほぼ一致している。また、己斐・高須以外の広島市内のフォールアウトの線量は平均として約 0.10 R と推定された。この値は爆心付近での集積線量の約 1/100 であり、爆心から約 2km 付近における誘導放射能による集積線量に相当する。

表 5 広島・長崎の中性子誘導放射能およびフォールアウトによる集積線量の推定

残留放射能	広島		長崎	
	爆心	己斐・高須	爆心	西山
1.誘導放射能	80 R ^a	0	30-40 R ^a	0
2.フォールアウト				
(a) 線量率	-	1-3 R ^a	-	20-40 R ^a
(b) ¹³⁷ Cs	0.10 ± 0.05 R	3.7R		40 R ^a

a: DS86 報告書

参考文献

- 1) Okajima, M., Fujita, S., Harly, J.H. Radiation doses from residual radioactivity. In W.C. Roesh (ed), US-Japan Joint Reassessment of Atomic Bomb Radiation Dosimetry in Hiroshima and Nagasaki, Final report. Hiroshima RERF, Vol.1, pp.205-226, 1987.
- 2) Arakawa, E.T., Residual Radiation in Hiroshima and Nagasaki, Hiroshima, RERF; ABCC TR 2-26 (1962)
- 3) 庄野直美：“残留放射能について” 広島医学 20 巻 No.2.3 号 (1967) pp.75-91.
- 4) Takeshita, K. Dose estimation from residual and fallout radioactivity 1. Areal survey, J. Radiat. Res. Suppl. 24-31(1975)
- 5) Okajima, S. Dose estimation from residual and fallout radioactivity-3. Fallout in the Nagasaki-Nishiyama district, J. Radiat. Res. Suppl. 35-41(1975)
- 6) Takeshita, K., Sunayashiki, T., Takeoka, S., Kato, K. ¹³⁷Cs in soil of the black rain area northwest of the Hiroshima hypocenter. Research Institute for Nuclear Medicine and Biology, Hiroshima University, 1976, 1090-115.
- 7) Takada, J., Hoshi, M., Sawada, S., Sakanoue, M., Uranium isotopes in Hiroshima black rain soil. J. Radiat. Res. 24: 229-236; 1983.

- 8) 橋詰雅他：“広島、長崎の残留放射能について” 広島医学 31 巻 4 号 (1978) pp.455-458.
- 9) 「原子爆弾 広島・長崎の写真と記録」 仁科記念財団 (風光社、昭和 48 年)
- 10) 山岡静三郎、山田正明、桑田岩雄、中田、浅田常三郎、尾崎誠之助：“広島原子爆弾災害報告” 原子爆弾災害調査報告集、第一分冊理工学編 (日本学術振興会、1953) pp.1-4.
- 11) 荒勝文策：“爆発後数日間に行える広島市の放射能学的調査に関する報告” 原子爆弾災害調査報告集、第一分冊理工学編 (日本学術振興会、1953) pp.5-10.
- 12) 山崎文雄：“原子爆弾爆発後、広島西方に残った放射能について” 原子爆弾災害調査報告集、第一分冊理工学編 (日本学術振興会、1953) pp.25-33. および広島原爆戦災誌、第五巻資料編 (広島市、昭和 46 年) p.899.
- 13) 渡辺武男、山崎正男、小島丈児、長岡省吾、平山 健：“広島および長崎両市における原子爆弾災害物の地質学および岩石学的観察” 原子爆弾災害調査報告集、第一分冊理工学編 (日本学術会議、1953) pp.143-158.
- 14) 田賀井篤平編「石の記録 - ヒロシマ・ナガサキ」(東京大学出版会、2004)
- 15) N. Pace, R.E. Smith：“Measurement of the Residual Radiation Intensity at the Hiroshima and Nagasaki Bomb Sites” Hiroshima, ABCC TR26-59, 1959
- 16) 宇田道隆、菅原芳生、北勲：“気象関係の広島原子爆弾被害調査報告” 原子爆弾災害調査報告集、第一分冊理工学編 (日本学術振興会、1953) pp.98-135.
- 17) 増田善信：“広島原爆の黒い雨はどこまで降ったか” 天気、Vol. 35, No.2 (1989) pp.69-79
- 18) W.C. Roesh (ed), US-Japan Joint Reassessment of Atomic Bomb Radiation Dosimetry in Hiroshima and Nagasaki, Final report. Hiroshima RERF, Vol.1 and 2, 1987.
- 19) K. Shizuma, K. Iwatani, H. Hasai, M. Hoshi: Fallout in the Hypocenter Area of the Hiroshima Atomic Bomb, Health Phys. 57 (1989) 1013- 1016.
- 20) K. Shizuma, K. Iwatani, H. Hasai, M. Hoshi, T. Oka and M. Okano: “Cesium-137 Concentration in Soil Samples from an Early Survey of Hiroshima Atomic Bomb and Cumulative Dose Estimation from the fallout” Health Phys. 71 (1996) 340-346.
- 21) 宮原諄二：“オートラジオグラフィとラジオグラフィ” Radioisotopes, 47 (1998)143-154.
- 22) Y. Fujikawa, K.. Shizuma, S. Endo and M. Fukui: “Anomalous U-235/U-238 Ratio and Metal Elements Detected in the Black Rain from the Hiroshima A-Bomb” Health Phys. 84(2003) 155-162.