

放影研における被爆者の DS02 線量計算

藤田正一郎*、H. Cullings、D. Preston、船本幸代、
寺西幸子、E. Grant、渡辺忠章
放射線影響研究所

1. 序

放射線影響研究所（以下、放影研と略、前身は ABCC）では、原爆放射線の健康後影響の調査を行っており、その主要調査には寿命調査（Life Span Study、LSS と略）がある⁽¹⁾。この調査集団に属する個々の被爆者が浴びた被曝線量を推定するために、日米の物理学者がその時点で最善と考えられる線量推定方式を構築してきた⁽²⁻⁵⁾。これまで DS86 と呼ばれる方式が用いられてきたが、この方式が導入された時から熱中性子放射化に関する計算値と測定値に矛盾があることが指摘されており、その後約 15 年にわたりこの問題を中心に DS86 の再評価が行なわれてきた^(6,7)。2003 年に日米実務研究班（班長は日本：葉佐井博己、米国：Robert Young）により新たに DS02 と呼ばれる線量推定方式が開発された^(8,9)。ここでは、放影研に導入された DS02 の概要および方式を、LSS を中心とする放影研の調査対象者に適用する方法について説明し、計算結果を DS86 との比較により見てみる。

2. 線量計算の対象者

放影研における主要な調査には、寿命調査（LSS）、胎内被爆者の調査、被爆二世調査がある。その他の調査対象者も含めて約 25 万人のデータベースを整備してきた。放影研では、原爆の炸裂時に爆心から 10km 以内にいた人を被爆者と定義しており、線量計算の対象者は、このうちの約 14 万人の被爆者である。また胎内被爆者の場合はその母親、被爆二世の場合はその父親および母親が線量計算の対象となる。現寿命調査は約 12 万人で構成されており、うち被爆者は 1950 年国勢調査で確認された約 28 万人の生存被爆者から選ばれた約 9.4 万人となっている。

図 1（広島）・図 2（長崎）は、放影研の寿命調査を中心とする調査対象者のうち 1966 年時点で T65D 被曝線量が計算されていた被爆者一人一人の原爆時の位置を示している⁽¹⁰⁾。T65D は、LSS 全体に始めて適用された線量推定方式で、線量計算はこの時点では詳しい遮蔽情報が分かっている被爆者（爆心地から約 2km まで）に限られていたが、その後の工夫により計算可能な範囲を拡大していった。T65D の計算は 1968 年時点で完了し、健康後影響の量的な評価が可能となった⁽³⁾。

3. 線量計算方法の歴史的経緯

被爆者の被曝線量が推定されなかった初期の調査研究では、相対的な被曝の程度を決めるのに、爆心からの距離、大まかに分けた遮蔽の軽重、放射線症状の重篤度の組み合わせによる指標が用いられた。1956 年以降、米国オークリッジ国立研究所（Oak Ridge National Laboratory、ORNL と略）保健物理部により被爆者一人一人の線量評価のための物理学的な方法の開発が進められた⁽¹¹⁾。1963 年以降、日本の放射線医学総合研究所も独自の研究を行ってきた。

1957 年に最初の個人被曝線量推定方式 T57D（暫定 1957 年線量）が開発され、爆心からの距離別の線量（空気中カーマ）曲線が作成され、放射線の木造家屋による遮蔽効果の計算がガンマ線および中

* FUJITA Shoichiro, Radiation Effects Research Foundation; fujita@rerf.or.jp

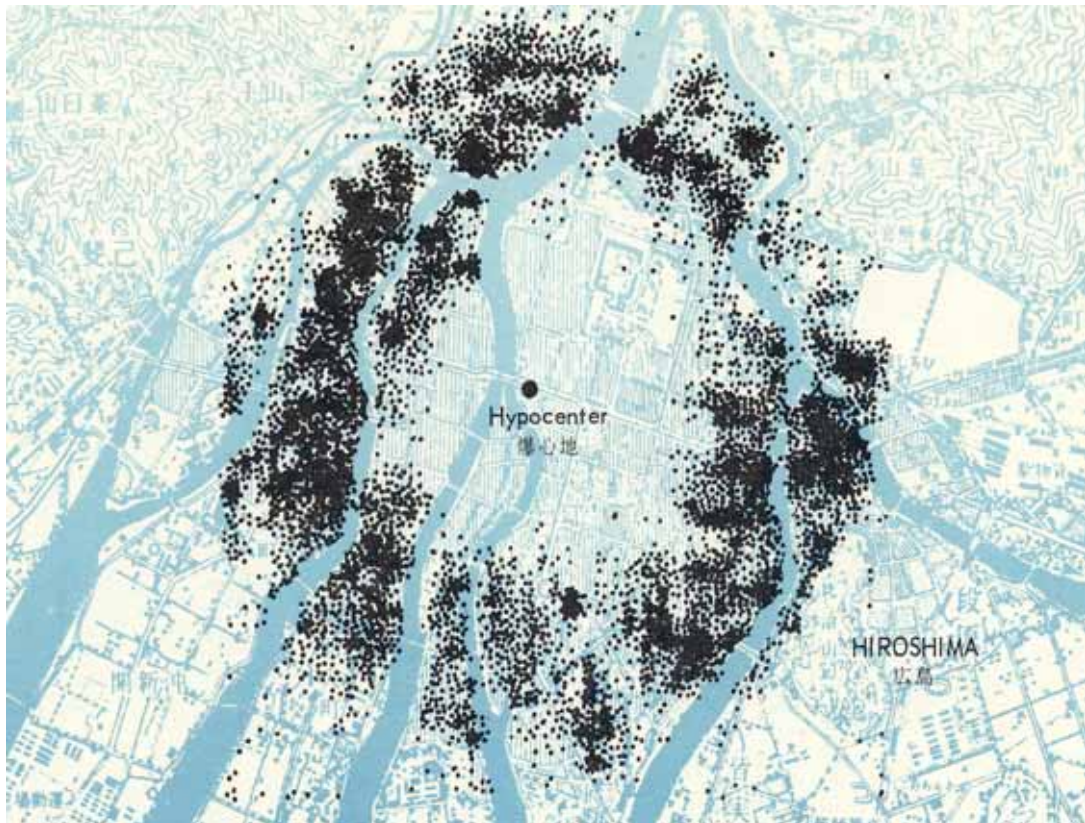


図1 1966年までにT65Dが計算された被爆者の被爆位置の分布、広島。

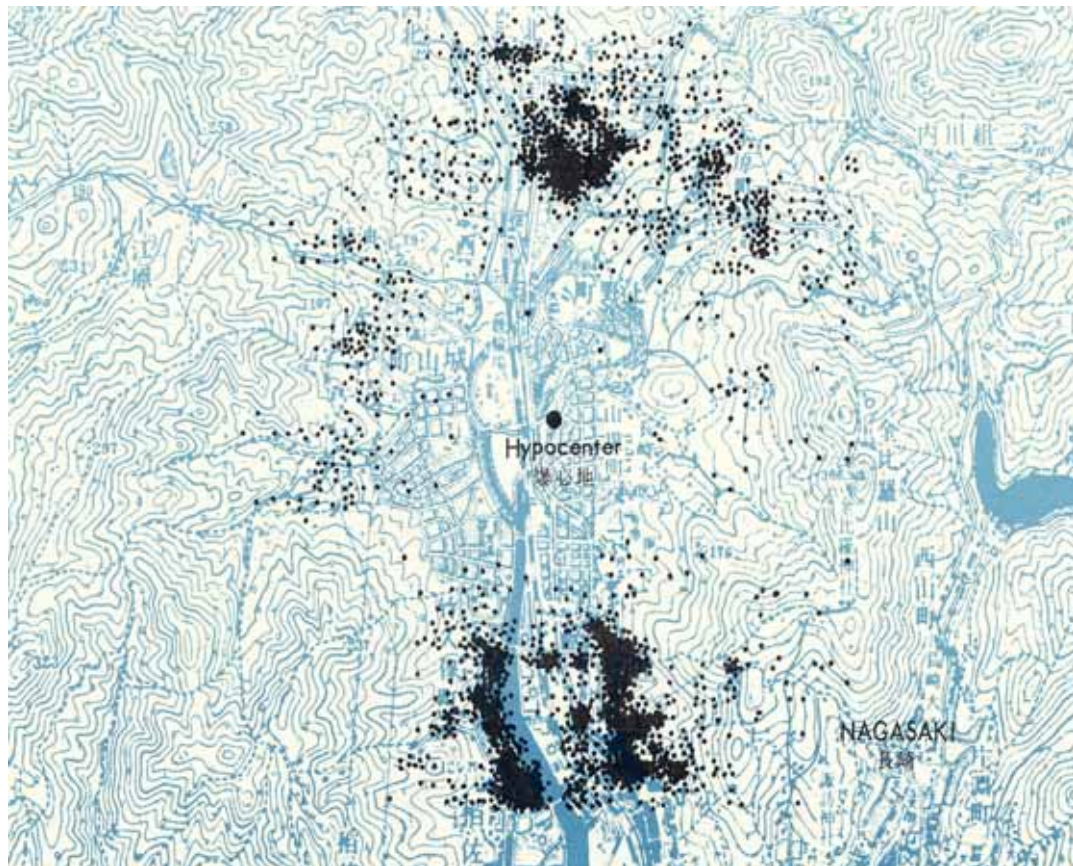


図2 1966年までにT65Dが計算された被爆者の被爆位置の分布、長崎。

性子別にできるようになった⁽²⁾。その後、この方式が改善されて1965年にT65D（暫定1965年線量）と呼ばれる方式が開発され、この個人被曝線量がその後約20年間健康後影響の評価に使われてきた。

T57D、T65D は共に米国での核実験などの実験に基づく計算式により線量計算をおこなうものである。

1978 年に到りこの T65D に対する疑問が提起され、これをきっかけに日米の物理学者が共同で原爆被曝放射線量推定方法の再評価を行った。1986 年に新しい線量推定方式 DS86(1986 年線量評価体系)が開発された^(4,5)。導入された時から熱中性子放射化に関する計算値と測定値に矛盾があることが指摘されており、その後約 15 年にわたりこの問題を中心に DS86 の再評価が行なわれてきた。2003 年に日米実務研究班(班長は日本:葉佐井博己、米国:Robert Young)により新たに DS02 と呼ばれる線量推定方式が開発された^(8,9)。

4. 被爆者の遮蔽情報

放影研の調査対象者について、初期においては基礎情報として被爆位置と簡単に分類された個々の遮蔽状況のみが記録されている。その後、1950 年代を中心に被爆者との面接調査により、原爆投下前後の航空写真を利用して被爆者が被爆時にいた正確な位置を街区図に示し、家屋の間取り図や断面図を作成するなど正確な遮蔽状況の把握に努め、加えて被爆時の姿勢と爆心に対する向きについてもより詳細な遮蔽情報を記録してきた(遮蔽歴と呼ぶ)。爆心地から 2 km 以内の全調査対象被爆者を目標としたが、広島は作業量の都合で途中から 1.6 km に縮小された。現在までに約 2 万 8 千人(広島 2 万人、長崎 8 千人)の詳細な遮蔽歴が得られている。

木造家屋内で被曝した場合、遮蔽状況は 9 つの数値に要約してコード化され、T65D 線量の計算に用いられた。この数値は「9 - パラメ - タ」デ - タと呼ばれる。この対象となる遮蔽歴は両市で約 1 万 8 千件ある。9 つのパラメ - タとは、階層数、直接透過距離(家屋入射点より被爆者までの距離)、内部前壁数、内部側壁数、前方遮蔽建築物の有無、その大きさ、爆心方向の遮蔽されていない窓からの距離、床上の高さである。遮蔽歴のうち遮蔽状況の部分を図 3 に例示する⁽¹⁰⁾。戸外にいて木造家屋

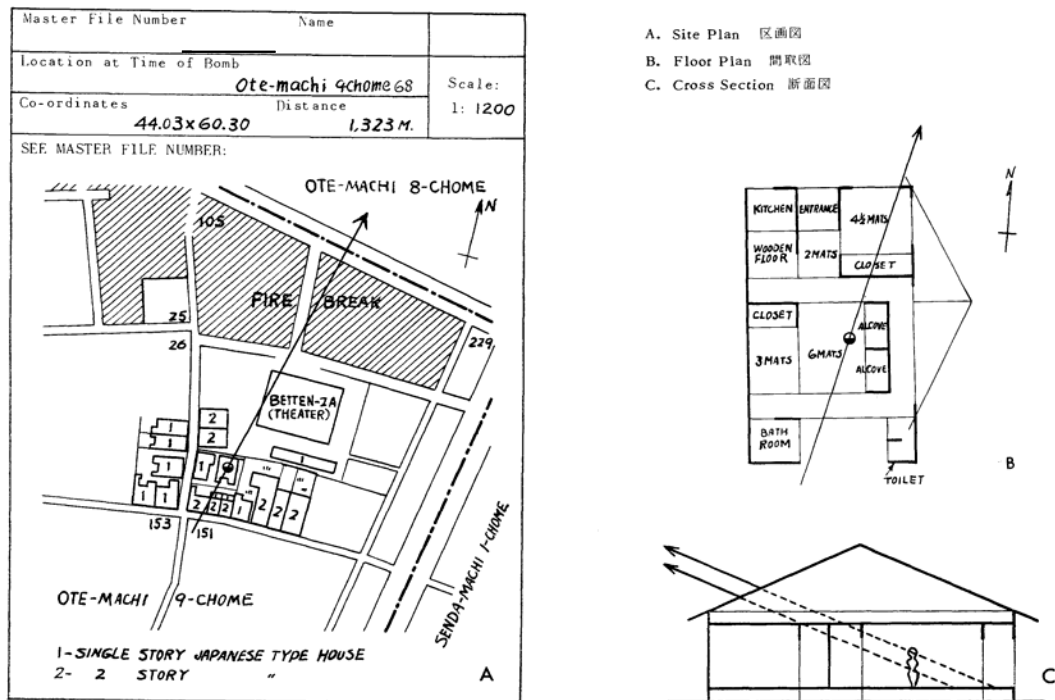


図 3 被爆者の詳細な遮蔽状況の例。

により遮蔽されていた場合には、被爆者を中心とする球面上で遮蔽された部分の割合を再現データをもとに計算し、「グロ - ブ」デ - タとしてコード化された。このケースは約 4 千件ある。その他の線量計算に必要な情報もすべてコンピュータで使用できるようにコード化され、T65D 線量の計算に使われた。DS86 線量推定方式開発の際も、被爆者に関するこの詳細な遮蔽データベースの活用を前提に遮蔽効果の計算方法が開発された。DS02 についても同様であるが、遮蔽効果の計算を改善する際に不可欠な情報を遮蔽記録等から新たに抜き出して遮蔽データベースに追加した。

5 . DS86/DS02 方式

DS86 は核物理学の理論に基づくコンピュータ・シミュレーションにより線量計算をおこなう。DS02 も同様で DS86 を改良したものと考えられる。便宜上、DS86/DS02 方式と呼ぶことにする。線量計算の方法を、木造家屋内での被曝の場合を例にとって示す(図 4 参照)。線源(原爆)から数万個の放射線粒子を放出し、大気・家屋・人体組織(すべて実物に似せたコンピュータ模型を使用)を通過して特定の臓器に到達するまで一個一個の放射線粒子を追跡することにより特定の臓器が受けた臓器線量が計算できる。DS86/DS02 方式では、大気、家屋(被爆者の外部の遮蔽)、人体組織(特定臓器に達するまでの被爆者自身の組織を遮蔽と考える、自己遮蔽と呼ぶことにする)のそれぞれについて別個に放射線粒子の追跡計算を行い、その後それらを結合できるように工夫されている。遮蔽カ - マは、人体模型の部分を考えずに、大気・家屋を通過して被爆者のいた地点の地上 1 m の所まで到達した放射線による線量(カ - マ)である。空気中カ - マは、更に家屋模型の部分も考慮からはずした状態で、同一点まで大気を通して到達した放射線によるカーマ線量である。DS86/DS02 方式はこのシミュレーションを行なうためのコンピュータ・プログラムとデータベースからなるが、放影研への導入には工夫がなされた。

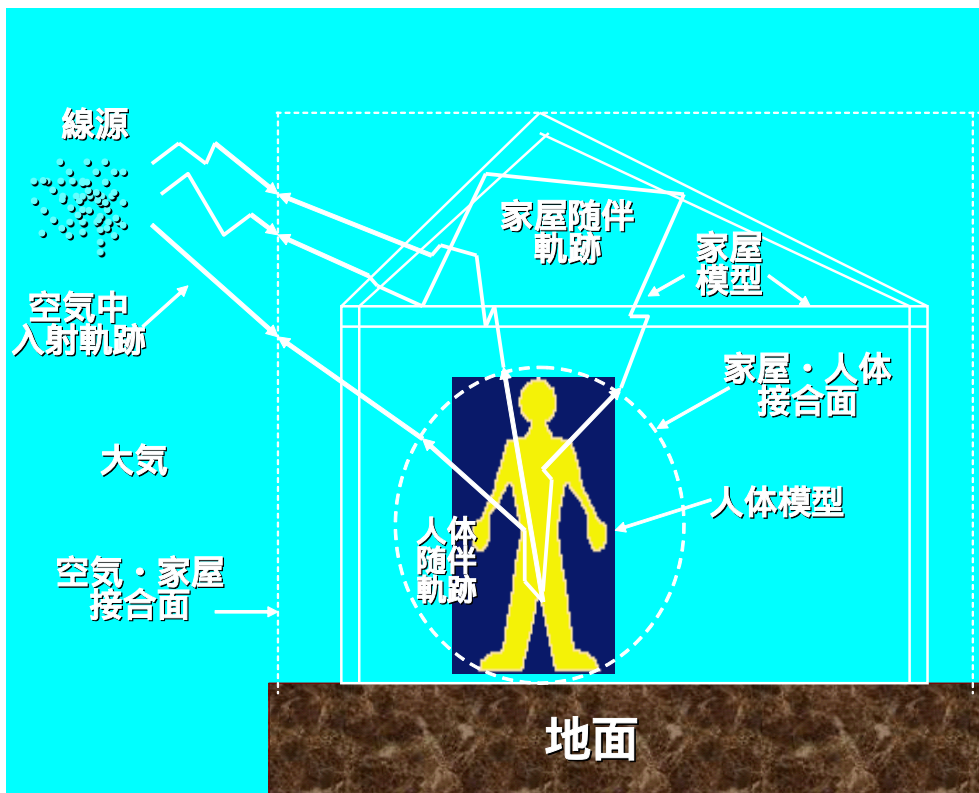


図 4 DS86/DS02 方式による個人被曝線量の計算方式 .

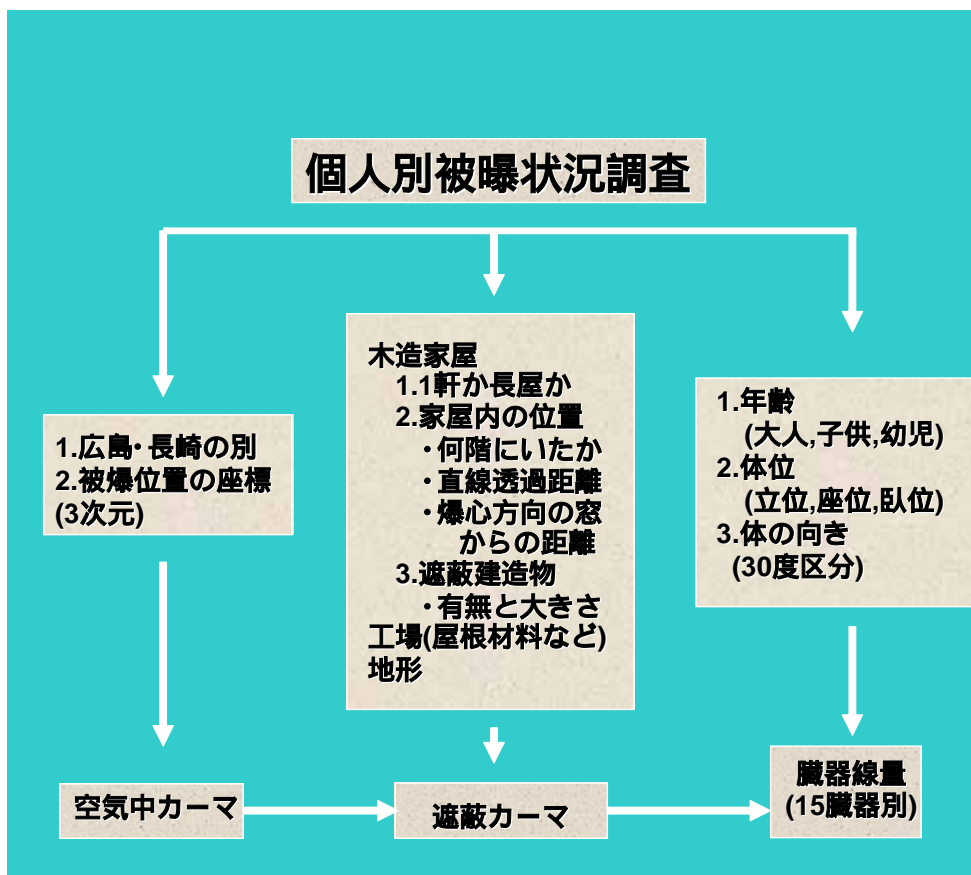


図5 DS86/DS02方式による個人被曝線量の計算。

6. 放影研におけるDS86/DS02の計算方法

DS86が開発された当時の放影研が使用していた中型コンピュータ(現在はユニックス上でPCを使用)ではこの計算を行なうには無理があり、相当な工夫がなされた。放影研に導入されたDS86/DS02方式は、スーパーコンピュータによる計算結果の膨大なデータベースと計算プログラムとからなっている。データベースは、自由空間データベース、家屋遮蔽データベース、臓器遮蔽データベースからなる。自由空間データベースには、広島・長崎別に、爆心地からの距離別(100mから2,500mまで25m毎)、エネルギー別(ガンマ線21群、中性子37群)、角度別(240群)、線量要素別(即発および遅発中性子、即発および遅発ガンマ線)のフルエンスが与えられている。家屋遮蔽データベースには、数千の遮蔽状況(家屋内、戸外で家屋により遮蔽、地形による遮蔽、等)に対応する粒子追跡結果(外部遮蔽別伝達関数)が与えられており、特定の被爆者の遮蔽に対応する結果と上記自由空間データベースからのフルエンスと連結して遮蔽フルエンスを計算する。臓器遮蔽データベースには15の臓器について年齢別(3群)、体位別(立位、座位、臥位)、爆弾に対する向き別(30度毎)に粒子追跡結果(自己遮蔽別伝達関数)があり、遮蔽フルエンスと連結して臓器フルエンスを計算する。DS02では、エネルギー分布の区分がより詳細になっていること、線量要素もより細分されているが、放影研におけるDS02の計算の際は、DS86に用いられた区分に要約されたデータベースが用いられた。別にフルエンスからカーマまたは臓器線量への変換のための加重係数があり、線量を計算する。個々の被爆者の遮蔽状況に関する情報に基づき、個人被曝線量(空気中カーマ、遮蔽カーマ、臓器線量)を計算する過程を図5に示す。

7. DS86 から DS02 へ

新しく導入された DS02 は、DS86 よりも中性子放射化に関する計算値と測定値の一致が特に近距離において良くなった。爆弾の線源およびその空中伝播の推定に変更が加えられたが、特に広島爆弾については、炸裂点高度が 580m から 600m に、出力が 15kt から 16kt に変更された。

個々の被爆者の線量計算に関しては、遮蔽関連の強化が挙げられる。地形として広島は平地であり、DS86 では地形の評価は長崎に限られていた。DS02 では、広島の比治山および長崎の金毘羅山が新たに遮蔽効果の計算が可能な範疇に加えられた。比治山および金毘羅山は爆心地から見て比較的遠方に位置しておりこれまでは推定線量として空気中カーマがそのまま用いられてきた。近年低線量領域における放射線の健康影響への感心が高まり、山による遮蔽効果への考慮が求められていた。個人情報データベースに山の陰にいた被爆者の情報を追加し、DS02 遮蔽カーマ等の計算が行われた。

その他の改善としては、個人の情報をより活用することにより従来の遮蔽効果の計算がより精密に行われた。木造家屋・学校・工場（長崎のみ）内被曝の場合の一部がこれに含まれる。木造家屋内で被曝の場合に爆心地方向にある一定の基準を満たす建造物の遮蔽効果を追加考慮すること、工場内被曝の場合に工場内の被曝位置や設置された作業台の遮蔽効果を考慮すること、木造校舎内被曝は木造家屋内被曝と区別して計算することなどが新たにくわわった。必要な情報は個人の遮蔽記録等から抜き出し数値化して個人情報データベースに加え DS02 に基づく推定線量が計算された。

8. 計算結果の比較：DS02 対 DS86

空気中カーマについて、DS02 の DS86 に対する変動の割合（パーセント）を、爆心地から 2.5km 以内の距離別、広島・長崎別、中性子カーマおよびガンマ線カーマ別に図 6 に示した。データベースのテーブルに示されている値を直接比較してみると、ガンマ線カーマは、広島の爆心地付近（対象となる被爆生存者がいない）を除けば、両市とも 10% の範囲内の増加が見られる。中性子カーマは広島では約 10% の範囲で減少から増加してまた減少しているが、長崎では 10% から 40% へと減少割合が増加している。

2.5km 以内の LSS 対象者一人一人について、実際に外部遮蔽と自己遮蔽を考慮して 15 の臓器について被曝線量の計算を行なった。例として結腸を選び（固形がん全体をまとめて解析する際に結腸線量を使用している）、結果を中性子線量およびガンマ線量別に図 7 に示した。爆心地付近には対象者はいない。ガンマ線量に関しては、図 7 に見るように DS02 結腸ガンマ線量は DS86 線量よりも約 10% 増加している。ガンマ線に対する遮蔽効果の変動が少なく図 6 に見るガンマカーマの変動割合と似ている。長崎の 2km 以遠における DS02 結腸ガンマ線量の減少は、金毘羅山の遮蔽効果を計算に追加した結果を反映している。広島は比治山の影響を受けた対象者の割合が少ない。中性子線量に関しては、空気中カーマの変動に加えて中性子線に対する遮蔽効果も DS02 で増加しており、図 7 に見るように DS02 結腸中性子線量は DS86 線量よりも減少している。

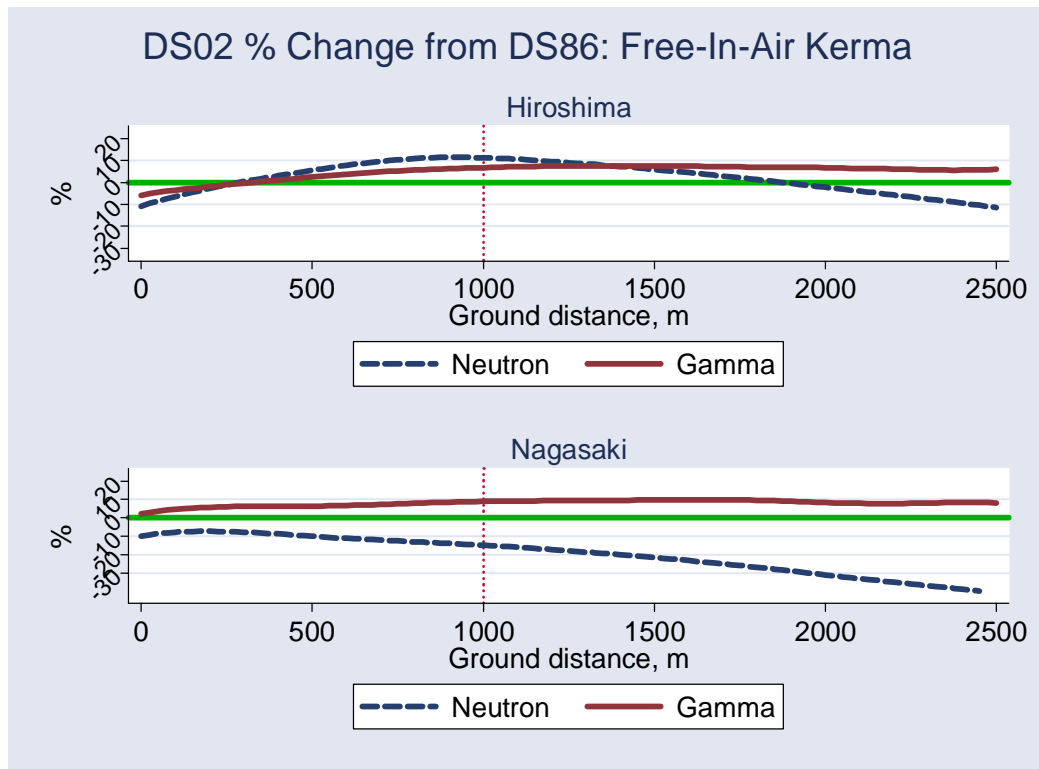


図 6 . DS02 の DS86 に対する変化割合 (%): 空气中カーマ

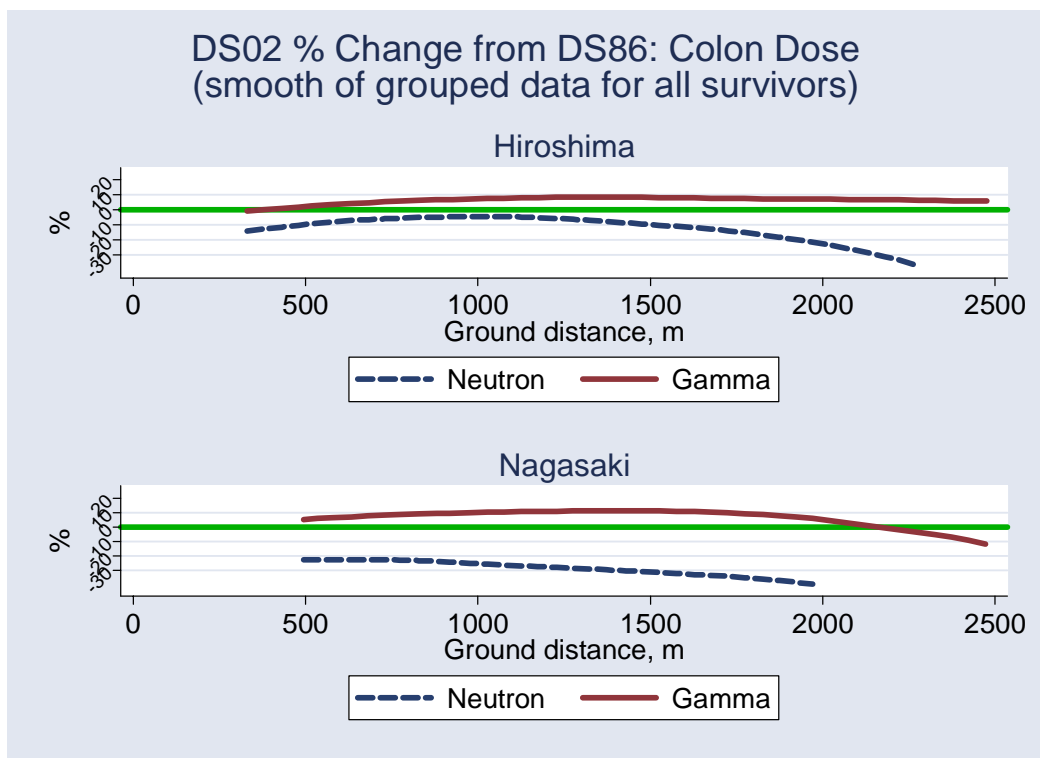


図 7 . DS02 の DS86 に対する変化割合 (%): 結腸線量

参考文献

1. Preston DL et.al. Studies of Mortality of Atomic Bomb Survivors. Report 13: Solid Cancer and Nonsolid Cancer Disease Mortality: 1950-1997. Radiation Research 160:381-407 (2003).
- 2 .Ritchie RH, Hurst GS 核兵器放射線の透過性：広島・長崎調査への応用、ABCC TR 26-59, 1959 .
- 3 . Milton RC, Shohoji T Tentative 1965 radiation dose estimation for atomic bomb survivors, Hiroshima and Nagasaki. ABCC Technical Report 1-68, 1968
- 4 . Roesch WC, (ed). US-Japan reassessment of atomic bomb radiation dosimetry in Hiroshima and Nagasaki: Final Report, vol. 1. RERF Hiroshima, 1987.
- 5 . Roesch WC, (ed). US-Japan reassessment of atomic bomb radiation dosimetry in Hiroshima and Nagasaki: Final Report, vol. 2. RERF Hiroshima, 1988.
- 6 . Fujita S Version of DS86. RERF Update 1(2):3, 1989.
- 7 . Preston DL, Pierce D, Vaeth M. Neutrons and radiation risk: a commentary. RERF Update 4 (3): 5, (1992-93) [Issues]
- 8 . 原爆放射線量評価検討会、「DS02 に関する原爆放射線量評価検討会日米会議報告書」厚生労働省健康局総務課、2003 年 3 月 .
- 9 . US-Japan WG; “Reassessment of the A-bomb Radiation Dosimetry for Hiroshima and Nagasaki – Dosimetry System 2002” (DS02 Report), RERF (in preparation)
10. Noble KB (ed). Shielding survey and Radiation Dosimetry study plan, Hiroshima and Nagasaki. ABCC Technical Report 7-67, 1967
- 11 . Auxier JA. “ICHIBAN: Radiation Dosimetry for the Survivors of the Bombings of Hiroshima and Nagasaki”, TID-27080, 1977.