

1945 年の日本人体型を精緻に再現し 原爆被爆者の臓器線量を再評価

佐藤 達彦

Sato Tatsuhiko

1. はじめに

原爆被爆者の健康影響に対する疫学調査結果は、国際放射線防護委員会（ICRP）が放射線防護に関する勧告を策定する際、最も重要な基礎データとして利用されている。その疫学調査には、各人の被爆状況に合わせた詳細な臓器線量評価が不可欠となり、放射線影響研究所（以下、放影研）では、原爆被爆者線量推定システムを数十年にわたって整備・改良してきた。現在のシステムには、2002 年に発表された線量推定システム DS02¹⁾ に補正を加えた DS02R1²⁾ が採用されている。このシステムでは、原子爆弾から放出された放射線である光子と中性子の空気中での挙動を地形の影響を考慮して詳細に模擬しており、爆心地から半径 2.5 km 以内の場所における光子や中性子のフルエンスを精度よく推定す

ることが可能となっている。

一方、計算した光子や中性子の強度からその地点にいた被爆者の臓器線量を推定するためには、人体内部での放射線挙動をコンピュータ内で再現し、各臓器に放射線によって付与されるエネルギーを正確に計算する必要がある。現在のシステムでは、その計算に 1980 年代に開発された 3 つの年齢群に対する数式人体模型と、当時の計算機性能でも動作可能な近似式を多く含む放射線挙動解析コードが採用されていた³⁾。しかし、近年の放射線防護研究や医学物理計算では、CT 画像等から構築した詳細な人体模型や近似を使わずに第一原理に基づいて個々の放射線挙動を追跡するモンテカルロ計算コードの利用が増えてきており、原爆被爆者の臓器線量推定システムでもそれら最新の計算技術を用いた再評価が望まれていた。



図1 日米共同研究プロジェクトの実施体制と各機関の役割

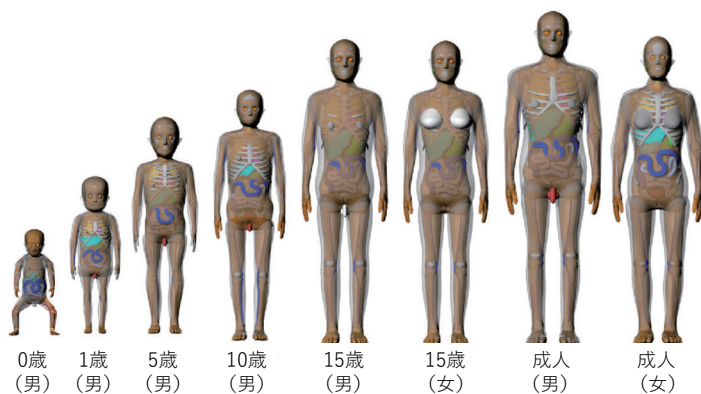


図2 1945年の日本人標準体型に調整した成人男女及び年齢別小児男女に対する人体模型

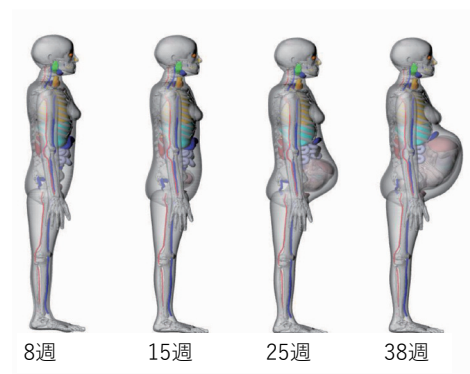


図3 1945年の日本人標準体型に調整した在胎週別妊婦に対する人体模型

2. 原爆線量再評価の流れ

このような背景から、筆者らは、図1に示す日米共同研究体制を確立し、最新の計算科学技術を用いて代表的な被爆条件に対する臓器線量を再評価した。具体的には、①1945年の日本人標準体型に調整した成人男女及び年齢別小児男女に対する人体模型の開発（図2参照）⁴⁾、②1945年の典型的な日本人標準体型に調整した在胎週別妊婦に対する人体模型の開発（図3参照）⁵⁾、③それら人体模型と最新の放射線挙動解析コードを組み合わせた代表的な被爆条件に対する臓器線量計算、④様々な照射条件に対する臓器線量データセットの整備⁶⁾を実施した。

①及び②の人体模型開発では、フロリダ大学及び米国国立がん研究所で開発したNURBSとポリゴンメッシュを組み合わせ、詳細に臓器形状を表現したハイブリッド人体模型を、放影研が調査した1945年の日本人平均身長、体重、及び座高と一致するように調整した。③の計算では、原子力機構が中心となって開発した放射線挙動解析コードPHITS⁷⁾や米国ロスアラモス研究所で開発したMCNP⁸⁾を用いて、光子や中性子のみならず、従来手法では追跡が困難であった電子の挙動も解析した。④のデータセット整備では、原子力機構の大型計算機を用い、原爆被爆者線量推定システムで採用している27,840照射条件（480角度×58エネルギー群）の膨大なシミュレーションを成人男女人体模型それぞれに対して実施した。

3. 再評価結果の例

代表的な被爆条件に対して、本研究と現在使われている線量推定システムで計算した臓器線量の差を図4に示す。図より、多くの臓器に対して、両者は10%の範囲内で一致することが分かる。これは、現在の線量推定システムが様々な近似を導入しているものの十分な精度を有していることを改めて示した結果と言える。一方、新しい人体模型と現在のシステムが採用している人体模型では臓器位置が大きく異なる結腸や、最新の計算手法では海綿体等複雑な臓器構造を考慮可能な骨組織に対しては、両者の差は最大で±15%に達することが分かった。また、PHITSを使うことにより人体内で2次的に発生する電子の挙動も追跡可能となり、その効果で体の深部

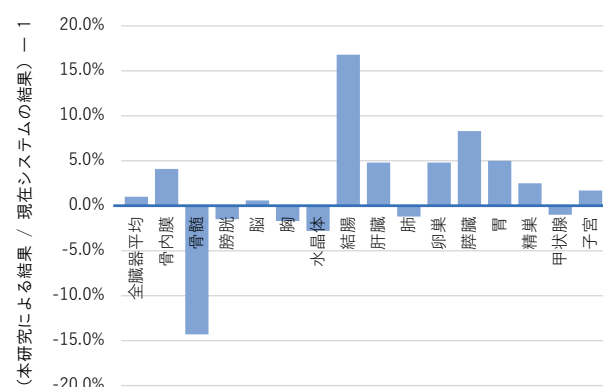


図4 代表的な被爆条件に対して、本研究と現在使われている線量推定システムで計算した臓器線量の差分

ここで、代表的な被爆条件とは、爆心地からの距離や遮蔽状況の異なる12条件に対して平均した結果を表す

にある臓器の線量が2~3%程度大きくなることも分かった。更に、現在のシステムでは個別に評価していなかった皮膚や胎児の臓器線量は、疫学調査で一般的に使われてきたそれらの代用線量（空気の線量及び成人女性の子宮線量）と比較して最大で20%程度小さいことが分かった。これは、自分自身や母体による自己遮蔽効果に起因すると考えられる。

4. 本研究の意義と今後の予定

本研究により、最新の計算科学技術を用いて各原爆被爆者の臓器線量を再評価する準備が整った。また、代表的な被爆条件に対して本研究と現行の線量推定システムで計算した臓器線量を比較し、現行システムの妥当性を確認すると共に、一部の臓器に対しては臓器線量の再評価により疫学調査の信頼性を向上できることが分かった。ただし、その差は最大でも±15%程度であり、再評価によって従来の疫学調査結果やそれに基づくリスクモデルが大幅に修正されることはないと考えられる。

今後は、成人男女以外に対する臓器線量データセットも整備し、本研究成果を線量推定システムに組み込むための準備を進めていく予定である。また、正座や横臥位の状態の人体モデルも開発し、各人の被爆条件をより再現した臓器線量評価を可能にしたい

と考えている。これらの研究開発が完遂し、この改訂版原爆被爆者線量推定システムが採用されれば、疫学調査結果やそれに基づくリスクモデルを更新することができ、より放射線防護指針の策定・改訂に繋がると期待できる。

謝辞

本解説は、放影研、フロリダ大学、米国国立がん研究所、原子力機構を中心として実施した日米共同研究プロジェクトの研究成果をまとめたものです。

参考文献

- 1) Reassessment of the atomic bomb radiation dosimetry for Hiroshima and Nagasaki-Dosimetry System 2002 (DS02), Radiation Effects Research Foundation (2005)
- 2) Cullings, *et al.*, *Health Phys.*, **112**, 56-97 (2017)
- 3) US-Japan joint assessment of atomic bomb radiation dosimetry in Hiroshima and Nagasaki-Final report, Radiation Effects Research Foundation (1987)
- 4) Griffin, *et al.*, *Radiat. Res.*, **191**, 369-379 (2019)
- 5) Paulbeck, *et al.*, *Radiat. Res.*, **192**, 538-561 (2019)
- 6) Sato, *et al.*, *Radiat. Res.*, **194**, 390-402 (2020)
- 7) Sato, *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **55**, 684-690 (2018)
- 8) Pelowitz, MCNP6 user's manual version 1.0. Los Alamos National Laboratory (2013)

((国研)日本原子力研究開発機構)