

## II 被曝線量の推定

### 1 物理的線量測定

#### A 被曝線量評価システム2002(DS02)

2003年に被曝線量評価システム1986(DS86)が改訂され、新しい被曝線量評価システム2002(DS02)が完成した。このDS86が採択された際には既に、熱中性子により生成された放射性<sup>60</sup>Co(コバルト60)については、DS86に基づく計算値に比べ、1kmより近距離で測定値が低く、1kmより遠距離で測定値が高くなるという矛盾が指摘されていた。DS86策定後にも引き続き<sup>60</sup>Coに加えて、<sup>152</sup>Eu(ユーロピウム152)などの新たな熱中性子の測定が行われデータが集積されてきた。これらの測定結果とDS86を比較すると、<sup>60</sup>Coと同様に、測定値が近距離で半分くらいとなり、遠距離で5倍くらい高くなっていた。そこで、このDS86との不一致の原因を解明するための検討が開始され、初めは日本側の独自調査として、その後は日米共同で検討作業が行われ、最終的には原爆放射線量評価検討会を作り、そこに日米の実務者委員会が結果を報告し承認する手続きがとられた。

この不一致の原因については、様々な角度から検討された。放射線の発生源である原爆の線源項については、スペクトルやフルエンスが再計算され、輸送計算も再計算された。これらのエネルギーや角度分布についてその区分を増やし精密な計算が行われた。そのことにより計算は精度を高めたが、結果としてDS86と比べて本質的な変更は必要なかった。爆発高度についても過去の橋の欄干などの影から求めた多数の文献があり、それを調査し再検討した。高さについては広島では580mから600mに引き上げられた。長崎では503mのままで変更の必要はなかった。広島での高さを20m引き上げることにより新しい線量評価システムでは計算値が下がり、1km以下の近距離では測定値と一致することがわかった。熱中性子の測定値については新たに<sup>36</sup>Cl、<sup>152</sup>Eu、<sup>60</sup>Co、<sup>63</sup>Niなどの再測定を含めて検討され、近距離では高度を引き上げることで解決できることができたが、遠距離では測定値が高い理由がよくわからなかった。そのため計算値と測定値に関する様々な要因について検討が行われた。2001年に<sup>36</sup>Clの測定結果が、2003年になって<sup>152</sup>Euの測定結果が出て、それらが計算値と一致し、日米の委員会が開かれ、問題が解決したことが合意された。

そのほか、被爆位置の確認には当時最も正確であった第二次世界大戦中の米国陸軍の地図が使われていたが、正確な広島都市計画地図とは場所によっては30m程度のずれが生じる部分もあったのでその違いが補正された。これにより試料や爆心地が正しく表記できるようになった。遮蔽計算では地形による影響や建物の遮蔽について再評価された。また最終的には中性子やγ線すべての測定値および高度の再評価をもとにし、すべてが最適に一致するようなパラメーターを求め、また被爆者個々の被曝線量計算の誤差解析も行われた。

このようにして計算値のDS86との不一致については、1km以内の近距離では爆発高度を20m引き上げることで一致し、それより遠距離では再測定された値と良い一致をみた。DS86と比べてDS02では計算などの精度が格段に良くなつたが、結果として、本質的な変更は必要なかった。放射線影響のリスク推定に影響を及ぼす改訂としてはDS86に比べて、広島・長崎ともγ線が10%程度増加したことである。この結果については放影研で解析された。国際放射線防護委員会で議論された後、放射線のリスクに反映される。

## B 残留放射線

原爆の残留放射線には、土壤などの中に含まれる、① 原爆の中性子により生成した誘導放射能からの放射線と、② 空気中に飛散した核分裂生成物からの放射線の2種類がある。これらの放射能による人々の被曝線量やその影響に関する研究は、被爆直後から現在に至るまで多くの研究者により継続的に進められてきた。直接測定としては、広島旧市街のデルタ地帯の3km程度の近距離の範囲で原爆投下直後に測定された。飛散した放射性物質で核分裂生成物によるものはそれ以遠の30kmくらいまでの黒い雨の降雨地域や、更にそれ以遠の地域で降下したと考えられるが、それらの地域での直接測定は行われてこなかった。そのためこれらの地域での被曝線量評価や人への影響調査としてはDS02のような系統的な調査は存在していない。

残留放射線による被曝線量はDS86やDS02でも検討された。しかしながら、推定された被曝線量が直爆に比べて小さいことや、個人被曝線量評価に必要な情報の取得が困難なことから、DS02には含まれていない。

またこれらの残留放射線による内部や外部被曝については、その被曝線量が推定できたとしても影響が考えられる線量とはならないことが多い。しかしながら2km以遠の遠距離被爆者からは脱毛症状の報告もある。被曝線量評価研究の立場からは残留放射線による内部被曝や $\beta$ 線の影響についてのまだ未解明な部分の研究が引き続き必要と考えられる。

## 2 生物学的線量推定

### 1) 染色体異常

放研成人健康調査集団(AHS)を対象とした染色体調査は1967年に開始された。その時点ですでに被爆後20年以上を経過していたことから、識別の容易な不安定型染色体異常は原爆被爆者の末梢血からほとんど失われており、安定型染色体異常(主として転座)のみが検査対象となった。調査開始から1993年まではギムザ染色法による調査が行われ、1994年からは蛍光in situハイブリダイゼーション(FISH)法による調査が行われている。これらの調査の目的は、染色体異常を指標とした生物学的線量推定を行うことで、被爆情報(爆心地からの距離および遮蔽状況)から計算で求めた個々の被爆者の物理学的推定線量を評価あるいは補完することである。本稿執筆時(2011年)までの調査結果のまとめは次のとおりである：①被爆後60年以上を経過した時点でも被爆者の末梢Tリンパ球には染色体異常が存在しており、②その頻度は被曝線量の増加とともに有意に増加していた。③各個人の染色体データは物理線量に対してかなりの変動がみられ、また遮蔽状況の違いにより線量反応関係に差が認められたことから、線量推定に誤差がある可能性が示唆された。④ギムザ染色法による調査で広島、長崎間に認められていた線量反応関係の差は、FISH法による調査で大きく縮まり、以前の都市間差は研究室間の異常検出率の違いによるところが大きいと示唆された。FISH法による調査は2011年現在も継続中である。

### 2) 齒エナメル質を用いた電子スピン共鳴(ESR)法

電子スピン共鳴(electron spin resonance: ESR)法により歯エナメル質における $\text{CO}_3^-$ ラジカル量を測定することで、放射線による被曝線量の評価ができる。原爆被爆者におけるこれまでの調査結果は、同じ人の血液リンパ球における染色体異常頻度による推定線量と大臼歯エナメル質のESRによる推定線量(ともに $^{60}\text{Co}-\gamma$ 線と等価な線量)は互いに良い相関を示している。他方、ESR推定線量も染色体推定線量も、DS02個人推定線量に対してプロットしてみると相関の度合いが低下する。これは恐らく、DS02の計算に用いられた個人の被爆時情報の不正確さに起因するのではないかと思われるが、DS02個人推定線量の偏りについてはよくわかつていない。

なぜ染色体異常データが個人線量の偏りに関する情報を提供できないかというと、ここで検査している血液リンパ球集団自体が、被曝時の細胞分化段階を異にする(造血幹細胞からリンパ球まで。分化段階によって放射線に対する感受性も異なる)異質な集団であり、個々の細胞がどの分化段階で原爆放射線に被曝したかを調べる方法がなく、したがって染色体異常頻度を原爆放射線量に換算できないからである。他方ESR法は歯の入手という困難さを伴うので、染色体検査のように多数の人を調べることはできないが、得られた $^{60}\text{Co}-\gamma$ 線等価線量(単一エネルギー)を幅広い原爆 $\gamma$ 線のエネルギー分布に従って感度補正することで、原爆 $\gamma$ 線量に換算することができる。この原爆放射線量と同一人について得られている転座頻度との間で回帰解析を行えば、染色体異常頻度から原爆 $\gamma$ 線量を推定する関数が求められる。つまりこれまでに染色体異常の検査が行われた約4,000人の被爆者について原爆 $\gamma$ 線量が推定できることになり、DS02線量の平均的な偏り(方向と量)を評価する道が開けると考えられる。