

# TRACER

## 実効線量を理解するために

多田 順一郎

Tada Jun Ichiro

### 1. 歴史的な背景

放射線防護の目安量として使われている実効線量の起源は、ICRPが1977年の基本勧告(Publication 26)で採用した実効線量当量に遡ります。ただし、“実効線量当量”という名称は、1978年にストックホルムで開かれたICRPの会議で採択され声明の形で発表されたものなので、1977年勧告の本文には記載されていません。放射線の種類に応じた生物作用の強さの違いを表す係数と、組織や器官の放射線に対する感受性の違いを表す係数とによって、組織や器官の吸収線量を全身の主な組織や器官にわたって加重平均するという概念<sup>\*1</sup>は、その後二度の修正を経て、今日の実効線量まで引き継がれています。この項では、その歴史の流れを簡単に振り返ります。なお、実効線量に関連する諸量には、定義が変更されても同じ記号を使い続けているものがありますから、ICRPの1990年勧告以前の量<sup>(I)</sup>と、1990年勧告(Publication 60)で定義された量<sup>(II)</sup>と、2007年勧告(Publication 103)で定義された量<sup>(III)</sup>を、上付きのローマ数字で区別することにしました。

実効線量当量を導くために使われる二種類の

加重係数のうち前者(線質係数)には、荷電粒子(非荷電粒子放射線の場合は二次荷電粒子)の水中における制限のない線エネルギー付与 $L_{\infty}$ の関数 $Q^I(L_{\infty})$ と、様々な $L_{\infty}$ 成分の荷電粒子が吸収線量Dに寄与する割合で重み付けした線質係数の平均値 $\bar{Q}^{*2}$ の二種類が導入され、一般には、もっぱら後者が使用されました。 $Q^I(L_{\infty})$ は、1990年勧告のときにマイクロドシメトリの理論を応用して導かれた関数 $Q^{II}(L_{\infty})$ に差し替えられ、それに対応して再計算された平均量は放射線加重係数 $w_R^{II}$ と命名されました。なお、線質係数の平均値 $\bar{Q}$ は、“吸収線量を与えた放射線の種類とエネルギー”に応じて値を決めていましたが、外部被ばくに関する放射線加重係数 $w_R^{II}$ は“人体に入射する放射線の種類とエネルギー”に応じて値を決めるとされ、組織や器官内の各点の吸収線量ではなく、組織や器官の“平均吸収線量”を修飾するように定められました。

この変更は、1985年に、ファントム内の特定の点の線量当量によって実効線量を定義したICRUの考え方との間に若干の不整合をもたらしました。ICRUは、線量の実測可能性と点特異性の観点から、“着目している点に吸収線量を与えた放射線”の種類やエネルギーに基づく重み付けにこだわり、線質係数を $Q^I(L_{\infty})$ から $Q^{II}(L_{\infty})$ に変更しただけで、放射線加重

<sup>\*1</sup> ただし、実効線量当量は、組織や器官内の各点の吸収線量に線質係数を乗じて得られる“線量当量”を、個々の組織や器官で平均し、それを組織加重係数で全身の組織や器官にわたって加重平均した量として定義されていたので、組織や器官の平均吸収線量から出発する実効線量とは、少し意味合いを異にしていた。

<sup>\*2</sup>  $\bar{Q} \equiv (1/D) \int_0^{\infty} Q^I(L_{\infty}) \{dD/dL_{\infty}\} dL_{\infty}$

係数  $w_R^I$  には依存しない実効線量の定義を維持し続けました。

放射線加重係数の値は、ICRP の 2007 年勧告で人体ファントームに基づく線質係数の平均値を再評価した結果に基づく値  $w_R^I$  に修正され、今日に至っています。

一方、組織や器官の放射線に対する感受性の違いを表す組織加重係数の値も、1977 年勧告で導入されたものが、1990 年勧告と 2007 年勧告の際、二度にわたって改訂され、改訂のたびに対象となる組織や器官の種類も増加してきました。これらの改訂は、それぞれの組織や器官に係わる放射線影響に対するリスク評価の変化に対応するものでした。

ICRP が 2007 年勧告で行った実効線量の再定義は、実効線量の“マイナー・チェンジ”であったと考えられがちですが、本質的な概念の変更を含んでいました。なぜならば、実効線量が“標準人：reference person”と呼ばれる成人男女のボクセル・ファントームに基づく量であると明確に規定されたからです<sup>\*3</sup>。それまで、筆者らは暗黙の了解として、実効線量（実効線量当量）は、それを評価する個人の体型や放射線を受けたときの姿勢などに応じて定義されている——言い換えるならば、同じ放射線に曝されたとき、メタボな A さんとスレンダーな B さんと子供の C ちゃんの実効線量はそれぞれ異なるし、立っているときと屈んでいるときでは異なる——と考えていました。しかし、2007 年勧告の再定義は、そうした“真の実効線量”の存在に対する幻想を打ち砕きました。

男女の標準人が受ける線量を更に男女間で平均し、体格や年齢や性別とは無関係な量として ICRP が実効線量を再定義したことに對して、

<sup>\*3</sup> 2007 年勧告以前も、内部被ばくを評価するために開発された MIRD ファントームの転用に始まり、さまざまな人体ファントームが、実効線量モドキ（実効線量当量モドキ）を評価するために使われていたが、それらのファントームは、何れも実効線量や実効線量当量を定義するものではなかった。

「それでは、必要に応じて実効線量を詳細に評価できなくなる」と異議を唱えられた方々がいまいました。しかし、よく考えてみると、“実効線量を詳細に評価する”必要のある状況など、そもそもあり得ません。大量の放射線を受けて詳細な線量評価が必要な状況は、放射線の確率的影響を念頭に考案された実効線量の適用範囲外であり、そうした状況での健康影響の評価は、組織や器官の吸収線量に基づかざるを得ません。また、二つの加重係数の値は、科学的な議論だけでなく、数値的な厳密さを議論しようのない放射線防護のための“価値判断”も含めて決められたものですから、実効線量を 2 桁以上の有効数字で“詳細に評価”すること自体、意味のない努力だと言えるでしょう。

## 2. 実効線量の今日的な意味

それでは、ここまで抽象化してしまった実効線量には、どのような意味があるのでしょうか。今年の 3 月 3 日に公開された文部科学省の“放射線副読本”では、実効線量の単位であるシーベルトを“人体が受けた放射線による影響の度合いを評価する”単位だと子供たちに説明しています。筆者もかつてはそのような理解の下に、あちこちで説明をした覚えがあります。しかし、2007 年の実効線量の再定義は、そうした理解の根底にあった錯誤を白日の下に曝け出してしまいました。問題は、標準人と個人の体型の違いだけではありません。仮に、標準人と全く同じ体型の人がいたとしても<sup>\*4</sup>、同じ実効線量から受ける“影響の度合い”は、アレルギー反応や生活習慣病の発症と同様に、一人ひとりの遺伝的形質や後天的形質に大きく左右されるからです。同じ実効線量の放射線を受けても生じる影響に大きな個人差があり得るのに、実効線量で一人ひとりの受ける“影響の度合い”を表せるはずがありません。

<sup>\*4</sup> この議論では、標準人が成人男女の“平均”だという点も目を瞑ることにする。

そのため、ICRPの2007年勧告は、実効線量の用途を、非常に限定的な形で規定しています。すなわち、(1)放射線防護の選択肢の比較検討するための線量予測評価と、(2)実効線量で表示される線量制限に適合していることを実証する一言い換えるならば、使われている放射線防護の方策が適切か否かを検証する一手段の二つです。そして、疫学的評価や個人がすでに受けてしまった放射線の影響(リスク)評価に使うことは、明示的に否定(not recommended)されました。

ICRPが実効線量の用途を基本勧告の中でこれほど具体的に制限せざるを得なかったのは、実効線量の不適切な使い方があまりにも氾濫し過ぎてしまったからでしょう。また、ICRPが実効線量を、抽象的な“標準人”の線量として再定義せざるを得なかったのも、実効線量に関する様々な誤解を断ち切る意図が込められていたと解すべきでしょう。

### 3. 実効線量と実効線量

実効線量に関する議論を混乱させている原因の一つは、様々な種類の“実効線量”の存在です。実効線量自体は、ICRPの1977年勧告に記載された線量当量指標に遡りますが、実効線量が世の中に混乱をもたらした始めたのは、ICRUが1985年に4種類の実効線量を“定義”してしまってからです(ICRU Report 39)。実効線量は、“人の全身にわたる加重平均線量”という実測不可能な実効線量当量を、ファントム内の“特定の点の線量(線量当量)”で近似することで、実効線量当量による線量制限の体系を測定で支えようとしたものです(図1)。

今の時点から見ると、ICRUの実効線量は、実効線量当量(のち実効線量)を近似的に測定したり評価したりするための“統一的な手順”を規定したものに過ぎなかったのですが、1985年からの20年間くらいは、誰もが、放射線防

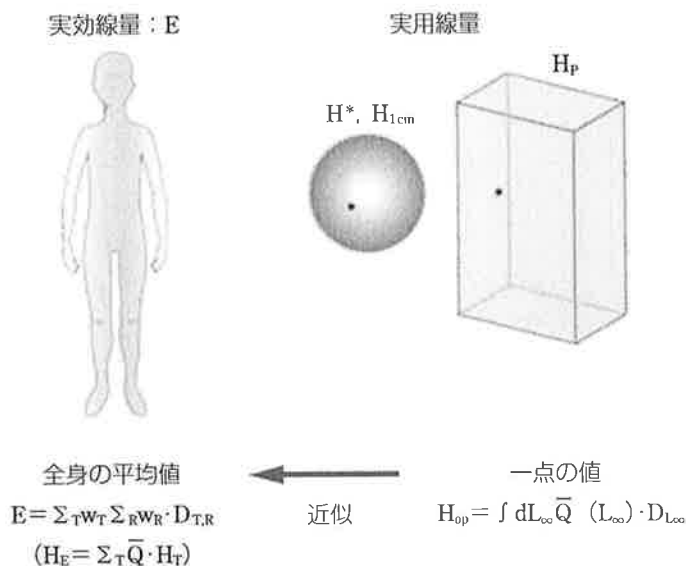


図1 実効線量と実効線量

護で用いる“新たな線量概念”が導入されたのだと誤解してしまいました。我が国の法令が、“放射線の量”を排他的に“1センチメートル線量当量”で測定するよう規定してしまったのも、そうした錯誤に基づくものだったと言えますし、4種類の実効線量を導入したICRUの委員の側も、同様の錯誤に囚われていたのではなかったかと推察されます。

錯誤のベールを剥がしてしまえば、実効線量と実効線量に係わる混乱の内容は、いかにも他愛ないものに見えてきます。どの種類の実効線量で測定し評価しようと、得られた値は“実効線量の近似値”であって、特定の名称で呼ばれる実効線量の値であることを主張する必要などありません。また、近似法が異なれば違う値が得られるのは当たり前で、いずれの実効線量が“より正しいか”という議論は、ともに“許容範囲内”であることが了解されている近似法の優劣を論じているに過ぎません。そもそも近似される実効線量が、詳細な値の違いを論ずるに足りない量であることを想起すれば、得られた近似値の2割や3割の相違に“目くじら”を立てるのは、将に蝸牛角上の争いと言うべきでしょう。

#### 4. 空間線量率からの評価と個人線量計での測定値

福島第一原子力発電所の事故で放射性セシウムによる汚染を受けた地域では、空間線量率から評価される実効線量に対して、個人線量計で測定される実効線量が半分くらいの値になるので、一体どちらが正しい値なのかという声が上がりました。中には、国が空間線量管理から個人線量管理にシフトするのは「除染の値切りだ」と批難する人たちもいます。

サーベイメータなどで測定される空間線量は、“1センチメートル線量当量： $H_{1cm}$ ”ないし“周辺線量当量： $H^*(10)$ ”と呼ばれる実用線量に対して較正されています。 $H_{1cm}$ や $H^*(10)$ は、いずれも直立した標準人が、全ての放射線を体の正面方向から一様に受けているときの実効線量 $E_{AP}$ を近似する実用線量です。そのような実用線量がサーベイメータの較正に使われているのは、ヒトの重要な器官の多くが体の前面寄りにあり、正面から放射線を受けたときに一番大きな実効線量になるので、安全（過大評価）側の測定値が得られるからです。素性の良いサーベイメータは、放射線がどちら側から来てもできるだけ同じ感度を持つように設計されていますから、そうしたサーベイメータの測定値は、検出器にいろいろな方向から飛び込んで

きた放射線の全てで“体の正面から一様に照射された場合”の実効線量 $E_{AP}$ を近似的に表します（図2）。

しかし、放射性セシウム汚染を受けた地域では、放射線はあらゆる方向からやって来ます。標準人が四方八方から均等に放射性セシウムの $\gamma$ 線を受けたときの实効線量 $E_{ROT}$ は、同じ量の $\gamma$ 線を正面だけから受けた場合の実効線量 $E_{AP}$ に対して3割くらい小さくなります。つまり、サーベイメータで測定される空間線量は、周囲の放射線セシウム汚染から受ける放射線に関して、常に3割くらい過大評価した“実効線量の近似値”を示していることとなります。

一方、個人線量計（ガラスバッジやクイックセルや電子式ポケット線量計など）は、放射線作業員が作業中に受ける放射線の実効線量を測定するための道具です。放射線作業員は、たいていの場合、放射線の源に向かって作業しますので、体の前面に個人線量計を装着して作業中に受ける放射線の量（個人線量当量： $H_p$ ）を測定します。そのため、個人線量計は、それを着用した人の体から散乱される放射線も併せて測定したとき実効線量の良い近似値を示す——つまり、個人線量計と人の体が一体となって測定器を構成したときに適切な性能を発揮する——よう設計されています。

その個人線量計を、人体が放射線を散乱したり吸収したりする状況を模擬するための厚さ15cmのアクリルの板の表面に取り付けて放射性セシウムの $\gamma$ 線で照射すると、同じ量の $\gamma$ 線を四方八方から均等に照射した場合の測定値 $H_{p,ROT}$ は、正面だけから照射した場合の測定値 $H_{p,AP}$ より3割くらい小さくなります。この減少割合は、人の体が正面から照射された場合 $E_{AP}$ に対する四方八方から均等に照射された場合 $E_{ROT}$ の実効線量の減少分にはほぼ一致します。したがって、個人線量計を体の前面に着用していれば、放射性セシ

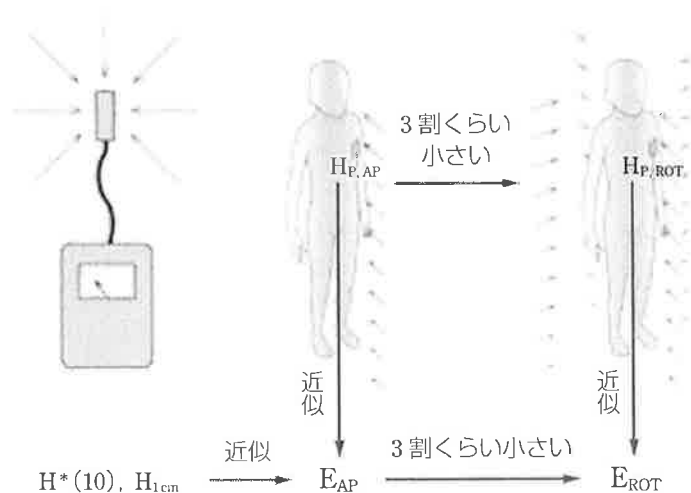


図2 空間線量から評価する実効線量と個人線量計の測定値

ウムの $\gamma$ 線を体の正面だけから受ける場合も( $H_{p,AP} \approx E_{AP}$ )、四方八方から受ける場合も( $H_{p,ROT} \approx E_{ROT}$ )、あまり過大評価や過小評価にならない実効線量の近似値を測定できることとなります。

空間線量率からの評価される実効線量と個人線量計の測定値の違いには、更に大きな原因があります。それは、空間線量率から実効線量を評価するとき、“1日のうち8時間を戸外にいて、残り16時間を木造の屋内で過ごす”というシナリオが使われているからです。1日に8時間もの間、戸外の同じ場所に立ち尽くしている人はいませんし、木造より遮蔽の効くコンクリートの家にお住まいの方もいらっしゃるでしょう。そして、昼間、学校やオフィスその他の比較的遮蔽の良い建物内にいるときに受ける放射線は、戸外に比べてずいぶん少ないはずで、そのような訳で、空間線量率から実効線量を評価するシナリオは、かなりの過大評価を引き起こします。個人線量計は、その線量計を着けた人と行動を共にしますから、そうしたシナリオに起因する過大評価を免れています。

つまり、周囲の放射性セシウムで汚染から放

射線を受ける環境では、空間線量率からの評価は実効線量を原理的に過大評価しますが、個人線量計の測定値は、原理的にあまり過大評価も過小評価もしませんし、空間線量率からの実効線量を評価する際に使われる“過大評価のシナリオ”とも無関係ですので、より現実的な実効線量の近似値となります。

福島第一原子力発電所の事故が起きてから暫くの間は、住民の個人線量を測定する仕組みがありませんでした。そうした時期に、避難や除染の優先度などを判断するには、空間線量率のモニタリングに基づく実効線量の評価に頼らざるを得ませんでした。しかし、時間の経過とともに、伊達市のように、全市民の個人線量を1年間にわたって継続的に測定する自治体も現れ、より現実的な実効線量の評価が明らかになってきました。国が空間線量管理から個人線量管理へシフトすることを決めたのは、決して“除染の値切り”ではなく、帰還を希望している人々に、より広い選択肢を提供するよう意図したものだとして理解すべきでしょう。

(NPO 法人放射線安全フォーラム)