

## 5. 1 線量の定義の不確定要因について

## On Uncertainties in Definition of Dose Equivalent

小田啓二

Keiji Oda

神戸商船大学

Kobe University of Mercantile Marine

## 1. はじめに

11月中頃、本研究会世話人の山口氏より標記タイトルの講演を依頼された。若輩者が論ずるにはあまりに大きなテーマであると同時に、自分の無知を露呈してしまうことになるので最初は躊躇したが、「問題提起ですから」という巧みな誘い言葉に釣られて承諾してしまった。その後、現時点での自分なりの考えを整理したり文献を読んだりしてかなりの時間を費やしたにも拘らず、このテーマに関して考えれば考えるほど「不確かさに対する結論」が見えなくなってしまい、結局「結論に対する不確かさ」が増すという皮肉な結果となってしまった。

そもそもこうなった原因は、ICRP 1990年勧告<sup>1)</sup>で提案された諸量に関する考察を述べた拙論<sup>2)</sup>の導入部を書いた「素朴な(?)疑問」が山口氏の目に止まったからであり、また本稿における大きな命題でもあるので、まずそれを再掲しておく。

『…… こうした物理計測から入ってきた筆者は、以下の疑問を常に抱いてきた。「たとえば3 MeV 中性子場において組織等価型電離箱による吸収線量の測定値が $1.02 \pm 0.01$  mGyであったとすると、線量当量は $10.2 \pm 0.1$  mSv としてよいか」という疑問である。10.2であろうか、それとも11とすべきであろうか。筆者は10または20だと考えているのだが。……』

つまり、誤差伝播の法則から考えると、「吸収線量の精密測定に労力を費やしても、これに乗じる係数に精密さがなければ意味がないのでは」という疑問である。線量当量という量はどこまで正確に(accurately)、また精密に(precisely)評価すれば良いのだろうか。と言うより、どこまで評価できる量なのだろうか。放射線計測に限らず、測定量にある係数を掛けて別な量を算出することはどの分野でも日常茶飯事である。しかし、例えば[フルエンス] × [相互作用係数(断面積等)] = [吸収線量] や [計数率] ÷ [検出効率] = [粒子放出率] などの図式と比べると、[吸収線量] × [線質係数] → [線量当量] はあまりに違うような気がする。

さて、ここまで述べた動機から推察して頂けるように、タイトル中「線量」は「線量当量」(及び Equivalent Dose) のことにしたい。勿論「吸収線量」の定義においても、例えば特殊な時空間におけるエネルギー付与の解釈など問題が皆無であるとは言えないだろうが、本稿で扱う問題とは大きく次元が異なるので、以後は「線量当量」に絞ることにする。また、頂戴したタイトルは「定義の不確定要因」となっているが、測定(モニタリング)において許容され

る「不確かさ (Uncertainty)」も一緒に考えることにしたい。

以下、筆者が整理した順に紹介していくが、このように本稿の内容がタイトルからずれてしまうことに加えて、生来の文章表現の稚拙さのため文体も通常の学術論文から逸脱してしまうことをご容赦頂きたい。

## 2. ICRUおよびICRP刊行物における Uncertainty に関する記述

まず、「線量当量」や「線質係数」の定義などに関するICRPやICRUのレポートの中に見られる記述の内、uncertainty に関する部分のいくつかを紹介したい。『 』で囲んだ所が引用文であり、原意を損なわないように原文とした。この中のアンダーラインだけが筆者が手を加えた箇所である。

### 2.1. 線質係数に関する記述

少し古いが、ICRPの1965年勧告の後に一部修正として、1969年 "Report on amendments to ICRP Publication 9" というタイトルの報告<sup>3)</sup>の中に興味ある記述がある。

『 In ICRP Publication 9, para. 17, the Commission recommended a value of 1.7 as being the appropriate Quality Factor for  $\beta^-$ ,  $\beta^+$  and  $e^-$  radiations with maximum energy  $\leq 0.03$  MeV. The Commission has reviewed the biological and physical evidence related to this point, and concludes that a value of unity is appropriate within the degree of precision required for the purposes of radiological protection. The Commission therefore recommends that QF be taken as 1 for all  $\beta^-$ ,  $\beta^+$ ,  $e^-$ ,  $\gamma$  and X-radiations, and for conversion electrons.』

このように、1965年勧告では0.03MeV以下の電子の線質係数は1.7としていたが、放射線防護の目的として要求される精密度では1が適当であると述べている。線質係数には少なくとも70%の誤差が含まれて当然であると言うことなのだろうか。

この後、線質係数が衝突阻止能(LET)の関数として与えられたことは周知の通りである。放射線防護に用いられる用語をまとめて解説したICRP Publication 42<sup>4)</sup> (1984年, para. 9)には、

『... It is assumed to be dependent of the energy imparted per average track length in the tissue of interest and to be independent of the type of effect or endpoint. The value of Q has therefore been precisely defined by the Commission as a function of the collision stopping power,  $L_{\infty}$  in water at the point of interest. ...』

とある。ここでは、「precisely に定義されている」と書かれている。

ところが、1990年勧告<sup>5)</sup>では、radiation weighting factor の導入に当たり、一転して次のように述べている(para. 25)。

『... The values of  $w_R$  are broadly compatible with the values of Q, which are related to the quantity linear energy transfer (LET), a measure of the density of ionisation along the track of an ionising particle. This relation-

ship was originally intended to do no more than provide a rough indication of the variation of the value of  $Q$  with changes of radiation, but it was often interpreted to imply a spurious precision which the Commission hopes will not be inferred from the new radiation weighting factors. …』

どうやら我々は、「 $Q(L)$ という関係が、spurious(偽りの) precision を有している」と誤解していたらしいのである。上の2つの記述に矛盾はないだろうか。かつて、precisely に定義した $Q(L)$ は、実は偽りであったということだろうか。

## 2.2. 線量当量測定上の accuracy に関する記述

放射線計測に限らず、一般に「計測」には誤差を伴うことは常識である。では、放射線防護の目的のために、最終的に評価する線量当量の値にはどの位の幅が許されるのだろうか。以下に、筆者の気づいた2つの記述を紹介する。

まず、ICRU(1971年)<sup>6)</sup>は、

『 Because the dose limits recommended ICRP have been conservatively derived, great accuracy in radiation protection measurements appears unwarranted. It is suggested that when the MADE is comparable to the maximum permissible dose, an accuracy of  $\pm 30\%$  be achieved. When the MADE is considerably less than the MPD, less accuracy is acceptable (e.g. at a level equal to 0.1 of the MPD an uncertainty of as much as a factor of three seems acceptable).』

と述べている(I.C.6)。MADEはMaximum Dose Equivalent、MPDはMaximum Permissible Doseの略である。このように、MPDと同オーダーなら $\pm 30\%$ の accuracy が達成されることを示唆している。この数値の根拠は記載されていないが何となく理解できる気もする。

一方、ICRP(1982年)<sup>6)</sup>は、

『…… If these quantities are of the order of the relevant annual limits, the uncertainties should not exceed a factor of 1.5 at the 95% confidence level. Where they amount to less than 10mSv an uncertainty of a factor of 2 at the 95% confidence level is acceptable. This uncertainty includes errors due to variations in the dosimeter sensitivity with incident energy and direction of incidence, as well as intrinsic errors in the dosimeter and its calibration. It does not include uncertainties in deriving tissue or organ dose equivalents from the dosimeter results.』

年制限値と同オーダーなら、uncertaintyは信頼度95%でファクター1.5を超えないようにと言っている(para.109)。おおよそ $\pm 50\%$ の誤差は許されるということだろうか。

いずれも、その数値の導出に関する記述は見当たらない。「 $\pm 30\% \sim \pm 50\%$ というのが許容できる最大で、実際には(ALARAに)小さくするように努力すべきである」というのが放射線防護計測の常識であるなら良いが、もし「このような幅に収まれば良い」と言うだけであれば、あるいは「このような幅でしか意味がない」のならば大きな問題である。

### 3. 線量当量とは？ 線質係数とは？

線量当量や線質係数の「不確かさ」について考えれば考えるほど、これらの実体がますます不明になってくる。大学教育の一端に携わっている筆者は、これまで「放射線計測」の講義や放射線を扱う学生実験において、「線量当量を放射線に対する危険度の目安として用いる」と説明してきたが、よく考えるとこれは筆者の独断的解釈であり、刊行物にはこのような具体的記述は何処にも書かれていない。レポートでは、単に『「吸収線量」と「線質係数」の積として定義する』という味気ないものである。幸い、「定義はわかったが、では線量当量とは具体的にどのようなもの？」と質問してくる学生は今までいなかったが、この解答ができなければ大学教官としては失格である。

そこで2つの案を考えてみたが、いずれにも現行の体系に当てはめるには難点があり、完全な解答になっていない。以下これらを紹介して、批判・指導を仰ければ幸いである。

#### 3.1. 「線量当量は危険度の目安を表す」

ひとつは、やはり線量当量に意味を与えることである。つまり、「放射線被曝によって生じるかも知れない障害に対する危険度の目安を表す」と考える。この中では「危険度」という表現に諸々の曖昧さを隠したつもりである。

これを認めると、線量当量の導出に用いる線質係数も何らかの意味を持つことになろう。もし漠然とは言え意味を持つならば、許容できる不確かさを考えておく必要があるのではないだろうか。これまでの線質係数の決め方や推奨値の変更を見ていると、「せいぜい±30%以内の不確かさしかない」とは到底考えられない。

このように話を進めて行くと、線量当量の不確かさは予想以上に大きい（有効数字1桁も怪しい）という結論になってしまう。線量当量は本当にそういうものなのだろうか。さらに、線量当量の単位  $J \cdot kg^{-1}$  にも問題が残る。危険度の目安を表すならば、次元を持つことはおかしいからである。

「線量当量自体に大きな不確かさがある」と言うことでついでに言及するが、もしそうならば、現在の線量体系を（1990年勧告を受けて）変えなければならないほど現システムに問題があるとは思えない。同様な議論が過去にあったことは記憶に新しい。1988年の現行法令公布の後、どちらかと言えば計測を中心とする応用物理学会と日本医学放射線学会物理部会（現日本医学放射線物理学会）では各々特集や見解を述べて問題点を指摘した。前者では、学会でのシンポジウムや『「実効線量当量」の有意計測は可能か』というテーマで、測定器メーカーを含む各分野の専門家による紙上討論<sup>7)</sup>があり、少なくとも放射線管理上は変更する意味がないことも指摘されている。後者では、日本医学放射線学会物理部会の見解として強く異議を唱えた<sup>8)</sup>。これらの盛り上がりに対して、法令にもっとも密接に関連する日本保健物理学会の会誌を読む限り、解説や勉強会の報告はあるが線量体系に関する活発な議論が見られなかったことは残念であるとともに、ICRP 1990年勧告の今後の取扱いに危惧を感ずる。

#### 3.2. 「線量当量は管理量でしかない」

もうひとつの有力な案は、線量当量に全く意味を持たせない、つまり放射線管理という目的

のためだけに存在する量だと捉えることである。

この場合、線質係数も必然的に意味を持たず、単に吸収線量から線量当量への換算係数となるので、全く不確かさは無いことになる。つまり、衝突阻止能によって決まる $Q(L)$ の表、図または式そのものが定義となる。

この案は、勿論乱暴ではあるが、逆にすっきりはする。線量当量という名称も「Equivalent Dose」でも良いし、目的を表すために「管理量」や「規則量」でも良いだろう。ただ、 $J \cdot kg^{-1}$ 単位を持つことへの疑問は残るとともに、学術用語から消えることになりはしないだろうか。

### 3.3. 刊行物に見られる見解の一例

参考のために、線量当量及びその単位に関する記述をICRUレポート(1973年)<sup>9)</sup>から拾ってみた。以下は、 $H = DQN$ という定義を述べた後、“Statement on Dose Equivalent”という節での議論の一部である。

『... However, the formulation given can be subject to various interpretations including that in which  $H$  is considered to have the dimension of absorbed dose and that in which it is considered to represent risk and to be dimensionless. If the equation were to represent risk properly, it would need to incorporate, among other things, the relative radiosensitivity of the different body tissues (targets) and the relative hurt or suffering from the radiation effects in such tissues. Such a scheme was considered in ICRP Publication 14, but its use was not considered practical. That publication pointed out that the information on relative radiosensitivity of the different parts of the body is limited and that a common scale of hurt or suffering has not been developed.

It is appropriate, therefore, that for present use, dose equivalent should be considered to have the same dimension as absorbed dose and that  $H$  is obtained by multiplication of the absorbed dose by the two agreed upon dimensionless factors that depend upon the radiation quality and the irradiation conditions. 』

上の段落においては、「線量当量がリスクを表すならば無次元であるはずだが、適切に表せる程の情報もないし共通の物差しも確立されていない」と述べている。これは、「線質係数等のファクターが十分にリスクへ換算できるほど吟味されたものではない」と言っているのと同じである。従って、下の段落で、「無次元の係数倍した吸収線量としか言えない」という結論になっているようだ。

この「線量当量は係数を掛けた吸収線量」という見解がまだ続いているのだろうか。また、これは保健物理学、放射線防護あるいは放射線管理の上ではずっと昔からの常識であったのだろうか。ICRPが1990年勧告において、Equivalent Doseなどを提案する姿勢、またそれを受け入れようとする姿勢とに矛盾はないのだろうか。

#### 4. 問題提起

改めて、次のような質問に対する明解な解答またはヒントや助言を伺えれば幸いである。  
『線量当量あるいは線質係数はどのような意味を持っているのだろうか？』

これに関連する疑問には以下のようなものがある。

「 $Q = 10$ の放射線で $D = 1.02 \pm 0.01$ ならば、 $H$ は？」

「 $H$ は何%以内の不確かさまで許されるのか？」

「 $H$ は  $J \cdot kg^{-1}$  の次元を持つべきか？」

#### 5. おわりに

今回のテーマほど、依頼されてから書き始めるまで時間を要した原稿はなかったような気がする。これは、結局筆者の能力を超えているからであり、この分野をリードしている先生方に任せるべきではなかったかと後悔している。

しかしながら、長い間（しゃべるのが恥ずかしくて）抱いていた疑問を公言することができて胸のつかえがとれたし、このために「線量当量」や「線質係数」についてじっくり考えることができたという点では良い機会であった。筆者が感じている「保健物理学」または「放射線防護計測」における最も不明瞭な点は、まさにこれまで述べてきた問題に集約される。今回のワークショップで納得できる解答か或いはせめて解決の糸口でも掴むことができればと期待している。

最後に、本ワークショップを企画・運営された備後氏はじめ日本原子力研究所保健物理部の皆様、特に色々とお世話頂いた山口氏に感謝致します。

#### 参考文献

- 1) ICRP Publication 60, "1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", Annals of the ICRP 21 [1-3], 1990.
- 2) 小田啓二: "放射線防護に用いられる諸量について", 保健物理 27 [3], 254, 1992.
- 3) "Report on amendments to ICRP Publication 9", Health Phys. 17 [2], 389, 1969.
- 4) ICRP Publication 42, "A Compilation of the Major Concepts and Quantities in use by ICRP", Annals of the ICRP 14 [4], 1984.
- 5) ICRU Report 20, "Radiation Protection Instrumentation and Its Application", 1971.
- 6) ICRP Publication 35, "General Principles of Monitoring for Radiation Protection of Workers", 1982.
- 7) 森内和之, 丸山隆司, 河田 燕・松本 健, 辻本 忠, 佐藤博夫, 武部雅汎: "「実効線量当量」の有意測定は可能か", 応用物理 58 [1], 72, 1989.
- 8) 日本医学放射線学会物理部会: "放射線障害防止法における規則量とモニタリング量についての見解", 日医放物理部会誌 9 [3], 121, 1989.
- 9) ICRU Report 19, "Dose Equivalent", 1973.