資料

論文受付
2011年6月21日論文受理
2011年8月30日

Code No. 810

診断領域 X 線の線質表現法として用いられる
実効エネルギーの問題点加藤秀起・林 直樹・鈴木昇一・安藤 翔
宮本まみ・若杉奈央・鈴木志津馬

藤田保健衛生大学医療科学部放射線学科

緒言

X 線診断で人体に照射される X 線の線質を一意的に表現する唯一の方法は“X 線スペクトル”を示すことである。しかし、X 線スペクトルを表現するためには膨大な数値データが必要となる。X 線質を簡便に一つの数値で表す方法として“実効エネルギー”(実効電圧と表現される場合もある)が一般的に用いられてきた。“実効エネルギー”は本来、一次 X 線束の物質透過率を基にした線質表現法である“半価層”から派生した概念であるが、両者ともに一元的に線質を決定するものではない。これらを用いて線質を表現する場合、少なくとも管電圧、整流方式、第 1 半価層 t_1 と

第 2 半価層 t_2 の比(均等係数 $=t_1/t_2$)などを併記する必要がある¹⁾。しかし、最近一部の学会発表などを見ると“実効エネルギー”のみが独り歩きをし、その X 線束の物理特性を議論するうえでの絶対的な数値であるかのごとく取り扱われている感が否めない。

実効エネルギーで X 線質を表現することの問題点として、次の 2 項目が考えられる。

(1) ある一つの X 線束に対して、半価層測定に用いる吸収板の材質によって実効エネルギーは異なる。つまり、一つの X 線束に対して実効エネルギー値は一つではない。

(2) 同じ実効エネルギー(もしくは半価層)を持つ X 線

Problems of the Effective Energy Used as a Quality Expression of Diagnostic X-ray

Hideki Kato, Naoki Hayashi, Shoichi Suzuki, Sho Ando, Mami Miyamoto,
Nao Wakasugi, and Shizuma Suzuki

Faculty of Radiological Technology, School of Health Sciences, Fujita Health University

Received June 21, 2011; Revision accepted August 30, 2011; Code No. 810

Summary

The effective energy has been generally used as a method of handily expressing an X-ray quality by one numerical value. The effective energy is a concept derived from “Half Value Layer (HVL)” that is the expressing parameter of beam quality based on the attenuation of the primary X-ray by a material. When beam quality is expressed by using HVL and / or the effective energy, it is necessary to describe the tube potential, the rectification method, and the homogeneity coefficient, etc. in parallel. However, recently feelings are that the effective energy should be handled like an absolute numerical value to physical characteristics of X-rays. In this paper, it was theoretically clarified that the effective energy had a different value depending on the absorber material used for the HVL measurement. In addition, the errors when physical characteristics of the X-rays were evaluated using the effective energy was also examined. Physical characteristics, such as interactions to the material of mono-energetic X-ray, are not equal to that of X-rays with a wide energy spectrum. It is not an easy comparison to express the quality of the diagnostic X-rays, and to calculate physical characteristics of the X-rays by using the effective energy. It is necessary to design a new method of expressing the quality of X-rays that takes the place of the “effective energy.”

Key words: diagnostic x-ray, beam quality, half value layer, effective energy

別刷資料請求先: 〒470-1192 豊明市沓掛町田楽ヶ窪 1-98
藤田保健衛生大学医療科学部放射線学科 加藤秀起 宛

Fig. 1 Attenuation curves by aluminum and copper absorbers (a), and spectra penetrated through each HVL of absorbers (b). Tube potential is 60 kV.

a | b

束は複数存在する。

このうち(2)については既に報告した^{2,3)}。本稿では(1)の問題について議論する。更に、実効エネルギー値を用いて、そのX線束が持つ物理特性を評価した場合の誤差についても検討した。

1. 吸収板の材質の違いによる実効エネルギーの差異

同じX線束で、吸収板にアルミニウムを用いた場合および銅を用いた場合の減弱曲線を作成し、得られた半価層から実効エネルギーを求めて比較した。

1-1 方法

Tuckerら⁴⁾による近似計算式を用いてX線スペクトルを求め、次式により減弱曲線を作成した。

$$X(t) = \sum_{E=0}^{E_m} \phi(E) \cdot E \cdot (\mu_{en}/\rho)_{air,E} \cdot e^{-\mu(E)t} \dots\dots\dots (1)$$

ここで $X(t)$: 吸収板厚 t を透過した(照射線量)減弱率

ただし $X(0)=1$ とする。

$\phi(E)$: E から $E+dE$ の間のエネルギーをもつ光子フレンス

(本計算では $dE=0.5$ keV とした)

$(\mu_{en}/\rho)_{air,E}$: 光子エネルギー E に対する空気の実質量エネルギー吸収係数

$\mu(E)$: 光子エネルギー E に対する吸収板の線減弱係数

E_m : 最大光子エネルギー(値は管電圧に等しい)

吸収板厚 t を 0 から漸増させて $X(t)$ を計算し、それらを基に減弱曲線を作成した。作成した減弱曲線から半価層 T を決定し、次式から実効線減弱係数 μ_{eff} を計算して、線減弱係数データ上で μ_{eff} に対応す

る光子エネルギー(実効エネルギー) E_{eff} を求めた。

$$\mu_{eff} = -\ln(0.5)/T \dots\dots\dots (2)$$

質量エネルギー吸収係数、線減弱係数は Seltzer らのデータ^{5,6)}を使用し、各エネルギーに対応する値は log-log 直線補間法を用いて算出した。

X線スペクトルは、定電圧波形、ターゲット角度 12° 、総ろ過 2.5 mm アルミニウム当量一定とし、管電圧 60, 80, 100, 120 kV について計算した。減弱曲線作成に用いた吸収体はアルミニウム(密度 2.699 g/cm³)および銅(密度 8.960 g/cm³)である。

(X線スペクトルから減弱曲線、実効エネルギーの算出法については文献(3)も参照されたい。)

1-2 結果

管電圧 60, 80, 100, 120 kV のX線束に対する減弱曲線および半価層 T を透過した時点の一次X線スペクトルを Fig. 1(60 kV), Fig. 2(80 kV), Fig. 3(100 kV), Fig. 4(120 kV)に示す。各管電圧のX線束に対するアルミニウムおよび銅の半価層、それらから算出した実効エネルギー、第2半価層、均等係数を Table 1 に示す。

吸収板にアルミニウムを用いた場合と、銅を用いた場合では、減弱曲線の形状が大きく異なり、半価層厚を透過したX線スペクトルの形状も異なっている。減弱曲線およびスペクトル形状から、吸収板に銅を使用した場合、アルミニウムを使用した場合に比べて低エネルギー成分が早く減弱していることが観測され、この傾向は均等係数に反映している。

半価層から求めた実効エネルギー E_{eff} は、銅を吸収板に使用した方がアルミニウムに比べて数%大きく、管電圧が高いほど両者の相対差は大きくなる傾向にある。

Fig. 2 Attenuation curves by aluminum and copper absorbers (a), and spectra penetrated through each HVL of absorbers (b).
Tube potential is 80 kV.

Fig. 3 Attenuation curves by aluminum and copper absorbers (a), and spectra penetrated through each HVL of absorbers (b).
Tube potential is 100 kV.

Fig. 4 Attenuation curves by aluminum and copper absorbers (a), and spectra penetrated through each HVL of absorbers (b).
Tube potential is 120 kV.

Table 1 First half value layers (HVL), effective energy obtained from HVLs, second HVLs and homogeneity coefficients for each tube potential X-rays

Tube potential (kV)	Absorber	1st half value layer (mm)	Effective energy (keV)	2nd half value layer (mm)	Homogeneity coefficient
60	Al	2.065	28.95	2.856	0.723
	Cu	0.067	29.39	0.098	0.684
80	Al	2.689	32.17	4.021	0.669
	Cu	0.091	32.85	0.158	0.576
100	Al	3.309	35.10	5.161	0.641
	Cu	0.119	36.11	0.235	0.506
120	Al	3.948	37.80	6.256	0.631
	Cu	0.152	39.35	0.330	0.461

Fig. 5 Graph showing exposure to absorbed dose conversion factors in water for mono-energetic photons.

Fig. 6 Graph showing exposure to absorbed dose conversion factors in water for X-rays, calculated with spectral data and effective energies.

2. 実効エネルギー値を用いて X 線束がもつ物理特性を評価した場合の誤差

実効エネルギー値を用いて算出されている代表的なものに、照射線量から吸収線量を求める際の吸収線量変換係数がある⁷⁾。診断領域 X 線の吸収線量変換係数を、X 線スペクトルデータをそのまま利用して計算した値と、実効エネルギーを用いて算出した値との差異を調べた。

2-1 方法

単一エネルギー光子 E に対する吸収線量変換係数 C_f は次式で計算できる。

$$C_f(E) = \left(\frac{\bar{W}_{air}}{e} \right) \cdot \frac{(\mu_{en}/\rho)_{med,E}}{(\mu_{en}/\rho)_{air,E}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで $\bar{W}_{air}$: 空気中に 1 イオン対をつくるのに要する平均エネルギー, 33.97(eV)。

e : 電子素量

$(\mu_{en}/\rho)_{m,E}$: エネルギー E の光子に対する物質 m の質量エネルギー吸収係数

光子エネルギーに対応する水の吸収線量変換係数 C_f を Fig. 5 に示す。

連続スペクトルをもつ X 線束に対する吸収線量変換係数 C_f は次式で計算できる。

$$C_f = \left(\frac{\bar{W}_{air}}{e} \right) \cdot \int_0^{E_m} X(E) \cdot \frac{(\mu_{en}/\rho)_{med,E}}{(\mu_{en}/\rho)_{air,E}} \cdot dE \quad \dots\dots (4)$$

ここで $X(E)$: 単位照射線量のうち、エネルギーが E から $E+dE$ の間の光子束に起因する照射線量の割合

E_m : X 線束の最大エネルギー

Fig. 1～4 に示したスペクトルをもつ X 線束について、それらの実効エネルギー (Table 1) を用いて (3) 式で計算した水の吸収線量変換係数 C_f と、X 線スペク

トルから (4) 式を用いて直接計算した C_f とを比較した。

2-2 結果

実効エネルギーを用いて計算した水の吸収線量変換係数 C_f と、X 線スペクトルから直接計算した C_f の比較を Fig. 6 に示す。

実効エネルギーから算出した C_f は、管電圧が変化してもほとんど変化しないのに対し、X 線スペクトルから直接計算した C_f は、管電圧の上昇とともに増大し、両者の差異は管電圧とともに大きくなる傾向にある。

3. 考察

医用 X 線の半価層測定時の吸収板材として、日本工業規格 (JIS)⁸⁾ には実効エネルギーが 40 keV 以下の場合にはアルミニウム、30～200 keV では銅、100 keV～1 MeV では錫を使用するように記載されている。つまり半価層を測定し実効エネルギーを計算した結果を基に、吸収板材を決定する必要がある。また、30～40 keV の範囲ではアルミニウムと銅が混在することになる。清水ら^{9,10)} は JIS 規格に基づいて放射線測定器の性能試験に用いる X 線標準場の評価を行っているが、結果として 8～30 kV でアルミニウム、30～60 kV ではアルミニウムもしくは銅、60 kV 以上では銅を用いている。このように、半価層測定に使用する吸収板の材質は、必ずしも明確に区分されているわけではなく、同じ X 線束を異なった材質の吸収板で半価層、実効エネルギーを算出することも考えられる。このような場合、同一 X 線束にもかかわらず、Table 1 に示したように異なる実効エネルギー値が算出されることになる。

吸収板物質が異なるとなぜ実効エネルギーは異なるのか、単純化したモデルで考える。Fig. 7 に示すよ

Fig. 7 Graph showing a simple model of X-ray spectrum to explain difference of effective energy due to absorber materials.

うな光子エネルギー E_1 および E_2 の 2 本の線スペクトルからなる X 線束(相対照射線量を、それぞれ 0.5 とする)を想定し、Fig. 8 に示すような線減弱係数 μ を持つ物質(med-1 および med-2)を吸収板として、半価層および実効エネルギーを計算する。 E_1 と E_2 の間の線減弱係数は med-1 および med-2 ともに光子エネルギー E に直線比例し、次式で表されるものとする。

$$\begin{aligned}\mu(E) &= \mu(E_1) \cdot \frac{1-r}{E_1-E_2} \cdot E + \mu(E_1) \cdot \left\{ 1 - (1-r) \cdot \frac{E_1}{E_1-E_2} \right\} \\ &= \mu(E_1) \cdot \frac{1-r}{E_1-E_2} \cdot \left(E + \frac{E_1-E_2}{1-r} - E_1 \right) \quad \dots\dots (5)\end{aligned}$$

ここで $r = \frac{\mu(E_2)}{\mu(E_1)}$ であり、med-1 と med-2 では

r は異なる。

(5)式を変形すると E は次式で表される。

$$E = E_1 - \frac{E_1 - E_2}{1-r} \cdot \left(1 - \frac{\mu(E)}{\mu(E_1)} \right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

一方、半価層を T とすると次式が成り立つ。

$$\begin{aligned}0.5 \cdot e^{-\mu(E_1)T} + 0.5 \cdot e^{-\mu(E_2)T} &= 0.5 \\ e^{-\mu(E_1)T} + e^{-\mu(E_2)T} &= 1 \quad \dots\dots\dots (7)\end{aligned}$$

ここで $x = e^{-\mu(E_1)T}$ とおくと、(5)式は

$$x + x^{\mu(E_2)/\mu(E_1)} = 1 \quad \text{すなわち} \quad x + x^r = 1 \quad \dots\dots (8)$$

で表される。

最終的に算出される実効エネルギーを E_{eff} とすると、次式が導出される。

$$\begin{aligned}T &= \frac{-\ln x}{\mu(E_1)} = \frac{-\ln 0.5}{\mu(E_{\text{eff}})} \\ \mu(E_{\text{eff}}) &= \mu(E_1) \cdot \frac{\ln 0.5}{\ln x} \quad \dots\dots\dots (9)\end{aligned}$$

Fig. 8 Graph showing a simple model of linear attenuation coefficients of med-1 and med-2 materials.

Fig. 9 Graph showing the variation of x and k , when r changed from 0.1 to 1.4.

これを(6)式に代入すると、実効エネルギー E_{eff} が次式で計算できる。

$$\begin{aligned}E_{\text{eff}} &= E_1 - \frac{E_1 - E_2}{1-r} \cdot \left(1 - \frac{\mu(E_1) \cdot \frac{\ln 0.5}{\ln x}}{\mu(E_1)} \right) \\ &= E_1 - (E_1 - E_2) \cdot \left(\frac{1}{1-r} \right) \cdot \left(1 - \frac{\ln 0.5}{\ln x} \right) \\ \left(\frac{1}{1-r} \right) \cdot \left(1 - \frac{\ln 0.5}{\ln x} \right) &= k \quad \text{とすると} \\ E_{\text{eff}} &= E_1 - (E_1 - E_2) \cdot k \quad \dots\dots\dots (10)\end{aligned}$$

吸収板の材質が異なっても、実効エネルギー値が等しくなるためには、(10)式の k が r の値に関係なく一定値をとる必要がある。

(8)式の x についての一般解を求めるのはほとんど不可能なので、(8)式で r に具体的な数値(0.1 から 1.4 まで 0.1 間隔)を代入した場合の x および k の値を計算した。

計算結果を Fig. 9 に示す。 r の値の変化に伴って k の値も変化している。これは、線減弱係数の光子エ

エネルギーに対する変化特性が異なれば、最終的に算出される実効エネルギー値は異なることを表している。つまり半価層測定に用いる吸収板の材質が異なれば、半価層から算出される実効エネルギーは異なる値となる。

実際の X 線束は連続スペクトルであり、線減弱係数と光子エネルギーの関係も Fig. 8 に示すような単純なものではない。実際の X 線束に対して異なる材質の吸収板を用いて半価層を測定し、それらから算出される実効エネルギー値が等しくなるためには、異なる二つの物質について上述の r がすべての光子エネルギーに対して等しくならなければならない。これを満たすような異なる物質は存在しない。以上から、実効エネルギー値は半価層測定に用いる吸収板の材質によって異なり、その X 線束について絶対的な唯一の実効エネルギー値というものはないことが証明できる。

実効エネルギーを用いて吸収線量変換係数を求める方法は、幅広く利用されている^{7, 11~13)}。しかし、Fig. 6 に結果を示したように、X 線スペクトルデータをそのまま用いて算出した吸収線量変換係数値に対し、実効エネルギーから算出した値では誤差が生じる。この誤差は管電圧が大きくなるほど大きくなる。この傾向は同様な報告をしている橘ら¹⁴⁾の結果と一致する。両者に誤差が生じるのは、Fig. 5 に示す吸収線量変換係数のエネルギーによる変化を、実効エネルギーという単一エネルギーではまったく考慮できないためである。

吸収線量変換係数のみならず、光子と物質との相互作用をはじめとするさまざまな物理量は光子エネルギーに大きく依存する。連続スペクトル X 線束がもつ物理特性を、実効エネルギーの線スペクトル X 線束の物理特性で代用する場合、必ず誤差を伴うことを念頭に入れておく必要がある。

“実効エネルギー”は X 線の線質を一つの数値で表

現でき、取り扱いが非常に簡単であるために広く用いられていると思われる。しかし“実効エネルギー”は上述したような問題、および先に報告した「同じ実効エネルギーをもつ X 線束は複数存在する」という問題を含んでおり、診断領域 X 線の線質表示に安易に用いるべきではないと考える。

X 線スペクトルは X 線質を一意的に表現できるが、その測定は容易ではない。さらに X 線スペクトルを表現するには膨大な数値データ処理が必要である。しかし、これまでに公開されている高精度の X 線スペクトル推定式^{4, 15)}を利用すれば、実測に近いスペクトルデータの取得は容易であり、膨大な数値データの取り扱いもパーソナルコンピュータを利用すれば問題とはならない。

その一方、減弱曲線のように測定が比較的簡単で、かつ簡便に表現できる新しい線質表示法を考案することも今後検討していく必要がある。

4. 結 語

本稿では、診断 X 線の実効エネルギーは半価層測定に用いる吸収板材質により異なる値となることを明らかにした。実効エネルギーという指標で X 線質について議論する場合、「はじめに」でも述べたように、管電圧などを併記すると同時に、半価層測定に用いた吸収板材質を明確にしておかないと不毛な議論になりかねない。

幅広いエネルギースペクトルを持つ X 線束と実効エネルギーという単一エネルギー X 線束の物質に対する相互作用などの物理特性は決して同等ではない。“実効エネルギー”を用いて診断 X 線の線質を比較表現したり、その X 線束がもつ物理特性を算出するようなことは安易に行うべきではない。今後、測定が簡単で、かつ簡便に表現できる線質表示法を新しく考案する必要がある。

参考文献

- 1) 小西圭介. 放射線の線質とその測定法. 放射線医学大系 - 放射線物理学 -. 中山書店, 東京, 1984: 79-92.
- 2) 加藤秀起. 微分後方散乱係数を用いた診断 X 線の後方散乱係数算出法. 日放技学誌 2001; 57(12): 1503-1510.
- 3) 加藤秀起. 教育講座 - 画像解析の基礎 - 3. X 線スペクトル. 日放技学誌 2010; 66(3): 238-245.
- 4) Tucker DM, Barnes GT, Chakraborty DP. Semiempirical model for generating tungsten target x-ray spectra. Med Phys 1991; 18(2): 211-218.
- 5) Seltzer SM, Hubbell JH (前越 久 監). 光子減弱係数データブック. 放射線医療技術学叢書(11). 日本放射線技術学会, 京都, 1995.
- 6) Berger MJ, Hubbell JH, Seltzer SM, et al. XCOM - Photon cross sections database (NBSIR 87-3597). National Institute of Standards and Technology, Washington DC, 1998.
- 7) 前越 久, 小山修司, 近藤智昭, 他. 医療被曝測定セミナーテキスト. 日本放射線技術学会中部部会・計測分科会, 名古屋, 1998.
- 8) 日本規格協会. 照射線量測定器及び線量当量測定器の校正方法 - JIS Z 4511 -. JIS ハンドブック. 日本規格協会, 東京, 2002.
- 9) 清水 滋, 藤井克年, 川崎朋克. 放射線測定器の性能試験に用いる国内規格に準拠した軟 X 線標準場の整備. JAEA-Technology 2010-005, 日本原子力開発機構, 2010.
- 10) 清水 滋, 澤島忠広, 梶本与一, 他. 放射線測定器の性能試験に用いる国内規格に準拠した中硬 X 線標準場の整備. JAEA-Technology 2010-009, 日本原子力開発機構,

- 2010.
- 11) 松本光弘, 井ノ上信一, 松澤利絵. 実効エネルギーに基づく患者表面吸収線量推定式. 日放技学誌 2001; 57(12): 1519-1526.
 - 12) 長嶋宏幸, 須永眞一, 見留豊久, 他. X 線 CT 装置の線量評価に不可欠な実効エネルギーの新たな測定および算出法の検討. 日放技学誌 2005; 61(3): 385-391.
 - 13) 飯田泰治, 能登公也, 高田忠徳, 他. 蛍光ガラス線量計を用いた IVR 装置の実効エネルギーと入射表面線量の測定(半価層測定器と測定用ファントムの作製). 日放技学誌 2010; 66(5): 487-494.
 - 14) 橘 昌幸, 泉 隆. X 線スペクトルによる吸収線量変換係数-半価層による方法との比較-. 日放技学誌 2002; 58(3): 383-389.
 - 15) Birch R, Marshall M. Computation of bremsstrahlung X-ray spectra and comparison with spectra measured with a Ge (Li) detector. Phys Med Biol 1979; 24(3): 505-517.

図表の説明

- Fig. 1 アルミニウムおよび銅吸収体による減弱曲線(a)および各半価層透過時のスペクトル(b)
管電圧は 60 kV である.
- Fig. 2 アルミニウムおよび銅吸収体による減弱曲線(a)および各半価層透過時のスペクトル(b)
管電圧は 80 kV である.
- Fig. 3 アルミニウムおよび銅吸収体による減弱曲線(a)および各半価層透過時のスペクトル(b)
管電圧は 100 kV である.
- Fig. 4 アルミニウムおよび銅吸収体による減弱曲線(a)および各半価層透過時のスペクトル(b)
管電圧は 120 kV である.
- Fig. 5 単一エネルギー光子線に対する水の照射線量-吸収線量変換係数を示すグラフ
- Fig. 6 スペクトルデータおよび実効エネルギーから計算された吸収線量変換係数を示すグラフ
- Fig. 7 吸収体物質による実効エネルギーの違いを説明するための単純化した X 線スペクトル
- Fig. 8 物質 1 および物質 2 の単純化した線減弱係数のグラフ
- Fig. 9 r が 0.1 から 1.4 まで変化した時の x と k の変化を示すグラフ

Table 1 各管電圧の X 線に対する第 1 半価層(HVL), HVL から求めた実効エネルギー, 第 2 半価層および均質係数