原 著

モンテカルロ法による多重散乱線を考慮したX線スペクトルの計算(I) 水ファントムへの単色X線入射

京都工芸繊維大学 電気工学科

中 森 伸 行・金 森 仁 志

(論文受付 昭和54年7月26日)

(Code No. 21124, 223)

A MONTE CARLO STUDY OF X-RAY SPECTRA CONSIDERING MULTIPLY-SCATTERED PHOTONS (I); MONOENERGETIC X-RAY INCIDENCE ON A WATER PHANTOM

By NOBUYUKI NAKAMORI and
HITOSHI KANAMORI

Department of Electrical Engineering,
Kyoto Technical University,
Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto 606

(Article received; Jul. 26, 1979)

Summary

The accurate imaging of the internal structure of the body and the accurate measurement of absorbed dose in the patient are limited by multiple interaction of X-ray photons with atoms in the body.

For incident monoenergetic photon energies from 50 to 150 keV and for uniform water phantoms ($30 \times 100 \times t$ cm³; $t = 2.5 - 30$ cm), we calculated the X-ray spectra including multiply-scattered photons using Monte Carlo simulation methods.

The results indicate the following facts;

- 1) A photon scatters about 3 times in average in the 10-cm water layer. About 2.5% of the incident photons are scattered more than 11 times for 100-keV incident beam.
- 2) Over 50% of the scattered photons are those multiply scattered.
- 3) As water layer thickness increases, the ratio of absorbed energy fluence to incident energy fluence gradually saturates, because of the saturation of the fraction of backscattering.
- 4) In high incident photon energy region, absorbed energy fluence calculated using the Monte Carlo method is greater than that using the linear absorption coefficient, whereas the former is less than the latter in low energy region. These facts are due to the existing of scattered photons.

To evaluate the image quality and to obtain the accurate dose in the patient, it is necessary to consider the multiply-scattered photons.

1. 緒 言

放射線撮影で、被写体を通過したX線は、散乱X線と非散乱X線を含んでいる。散乱X線は、X線情報で雑音となり、解像力やコントラストの低下といった悪影響をおよぼす。X線画像情報をよくするため、散乱したX線光子がどの程度情報に影響をおよぼしているかを解析し、散乱X線成分を少なくする条件を見い出すことは重要な問題である。

また、被写体内で吸収されるX線量を評価する場合、細い平行ビームを用いた実験で求められた減弱係数あるいは吸収係数を利用することが多い。しかし、実際の被写体内での吸収線量は、散乱線のため、上記の評価とは異なっている。

このように散乱X線は、X線画像情報や被写体内での吸収線量に大きな影響をおよぼしている。しかし、被写体内でのX線光子と原子の多重相互作用のため、その解析は非常に複雑である。また、散乱線は、被写体の形状、撮影条件あるいはフィルムなどの像記録系の構成に大きく依存している。

最近、Motzら¹⁾、Dickら²⁾や古巻ら³⁾は、実験により散乱X線がX線画像に与える影響を測定し、また加藤⁴⁾は、被写体内での一次散乱線の効果を考慮し、実効吸収エネルギー係数を報告している。

本論文では、モンテカルロ法を用いて個々の光子を追跡し、光子の多重散乱が、被写体内での吸収線量や散乱線にどのような影響をおよぼしているかを、入射X線光子エネルギーと水層厚を変数にして解析したので報告する。

2. 理 論

X線が物質中を通過するとき、X線光子は、物質内の原子と相互作用を起こす。X線光子と原子との相互作用過程には、

- 光電効果 (Photoelectric effect)
- 干渉性散乱 (Coherent scattering)
- 非干渉性散乱 (Incoherent scattering)
- 電子対創成 (Pair creation)

がある。電子対創成は、光子エネルギーが1.02 MeV以上の場合に生じる過程である。本研究では、普通の医療用X線装置の電圧範囲に限るため、電子対創成の過程を除いた。

- 光電効果 (減弱係数: τ)

光電効果によりエネルギー E_0 の光子が電子に与える

エネルギーの割合 (エネルギー転移係数) は

$$\tau(1-\delta/E_0) \quad \dots\dots\dots(1)$$

である。ここで δ は特性X線の平均エネルギーである。水のような低原子番号の物質では特性X線の平均エネルギーは小さく、かつ二次電子による制動放射もほとんど無視できる。したがって今回の計算では、光電効果を起こした光子のエネルギーは100%水層内で吸収されるとした。

- 干渉性散乱 (σ_{coh})

干渉性散乱は、X線光子エネルギーの低い領域で起こる確率が高く、Thomson による散乱断面積の式と比較的よく一致するため、Thomson 散乱とも呼ばれる。また散乱により光子のエネルギーが変化しないため、弾性散乱とも呼ばれる。

干渉性散乱の起こる確率は、光電効果や非干渉性散乱の起こる確率と比較して小さいと見なされ、計算上無視されることが多い。しかし、Hubbell⁵⁾の水素と酸素のデータから計算した水に対する光電効果、干渉性散乱および非干渉性散乱の断面積の比は、X線光子エネルギー20 keVを例にとると、66:11:23である。また、非干渉性散乱と異なり光子が散乱でエネルギーを失わないため、光子が吸収されるまでに進む距離が大きくなる。したがって、散乱線を考慮するとき、干渉性散乱過程を無視することは出来ない。

この過程で光子が散乱される角度 θ の分布を Thomson 散乱の式

$$\frac{d\sigma_{coh}(E)}{d\theta} \propto \sigma_{coh}(E) \cdot (1 + \cos^2 \theta) \cdot \sin \theta \quad \dots\dots\dots(2)$$

を用いて計算した。

- 非干渉性散乱 (σ_{incoh})

光子エネルギーが高くなると、X線の波長が原子の大きさより小さくなり、散乱X線は干渉しなくなる。この時、一部の光子エネルギーが電子に移るため非弾性散乱、または、発見者の名前をとって、Compton 効果とも呼ばれている。被写体が水の時、X線光子エネルギーが30 keV以上で、この過程が光電効果より大きくなる。この過程で光子が散乱される角度 θ の分布を、Klein-仁科の式

$$\frac{d\sigma_{incoh}(E)}{d\theta} \propto \sigma_{incoh}(E) \cdot \left(\frac{E}{E_0}\right)^2 \cdot \left(\frac{E_0}{E} + \frac{E}{E_0} - \sin^2 \theta\right) \times \sin \theta \quad \dots\dots\dots(3)$$

を用いて計算した。ここで E_0 は散乱前の光子エネルギーであり、 E は散乱後の光子エネルギーで

モンテカルロ法による多重散乱線を考慮したX線スペクトルの計算(I) (中森・金森)

$$E = \frac{E_0}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)}, \quad \alpha = \frac{E_0}{m_0 c^2} \quad \dots\dots\dots(4)$$

である。 $m_0 c^2$ は電子の静止質量で 511keV である。この散乱により電子が吸収したエネルギー E_{ab} は

$$E_{ab} = E_0 - E \quad \dots\dots\dots(5)$$

で求まる。

線減弱係数 $\mu(E)$ は上記の過程の和として

$$\mu(E) = \tau(E) + \sigma_{coh}(E) + \sigma_{incoh}(E) \quad \dots\dots\dots(6)$$

となる。今回の計算に用いた各過程に対する減弱係数として、Hubbell⁶⁾のデータ表より、最小自乗法を用いて多項式に近似して使用した。Fig. 1 は上記の多項式で求めた各減弱係数の光子エネルギー依存性を示している。近似式の 5 keV から 200 keV の光子エネルギー範囲で、Hubbell のデータ点での近似式の誤差は 2% 以下である。

Fig. 1 Attenuation coefficients for water.

3. 計算方法

被写体を Fig. 2 に示す。 $30 \times 100 \times th \text{ cm}^3$ ($th = 2.5 \sim 30 \text{ cm}$) の水ファントムとし、その中心に光子エネルギー 10 keV ~ 150 keV の単色 X 線を入射するようなモデルを

考えて解析を行った。

Fig. 3 に計算のフローチャートを示す。以下で、これについて説明する。

光子が被写体内で相互作用を起こすまでに進む距離 r (自由行程) を、

$$r = -\frac{1}{\mu(E_0)} \ln R \quad \dots\dots\dots(7)$$

Fig. 2 Scattering scheme of photons in a water phantom.

Fig. 3 Flow diagram of the Monte Carlo program.

で計算する。ここで $\mu(E_0)$ は光子エネルギー E_0 での水の全減弱係数、 R は $[0.1]$ の一様乱数である。

r が被写体厚より大きければ、この光子を被写体を通過した非散乱光子として計数する。 r が被写体厚より小さければ、光子は原子と相互作用を起こす。光子が r cm と $r+dr$ cm の範囲で相互作用を起こす確率 dP/dr は、

$$\frac{dP}{dr} = -\mu \cdot e^{-\mu \cdot r} = -(\tau + \sigma_{\text{coh}} + \sigma_{\text{incoh}}) \cdot e^{-\mu \cdot r} \quad \dots\dots\dots(8)$$

であり、どの過程で相互作用が起こったかは、各過程の断面積の比に依存する。すなわち、新しい $[0.1]$ の一様乱数 R^* に対し、

- (i) $0 \leq R^* < \tau/\mu$ のとき光電効果
- (ii) $\tau/\mu \leq R^* < (\tau + \sigma_{\text{coh}})/\mu$ のとき干渉性散乱
- (iii) $(\tau + \sigma_{\text{coh}})/\mu \leq R^* \leq 1$ のとき非干渉性散乱

と区別する。

このとき、光電効果が起これば、光子の全エネルギーは電子に移る。干渉性散乱のとき、光子はエネルギーを失うことなく(2)式の分布を示す角度で散乱する。非干渉性散乱のとき、(3)式の分布を示す角度で光子は散乱する。このとき散乱後の光子のエネルギーは(4)式となる。

散乱した光子については、散乱後の光子エネルギー E に対する減弱係数 $\mu(E)$ を使い、(7)式で自由行程を

計算する。この自由行程の値から光子の位置を算出し、光子が被写体の内部にあるか外部に出るかを判定する。外部に出た光子について、出た時の散乱角度が入射方向に対して90度以下か以上かに分けて、それぞれ、前方散乱光子あるいは後方散乱光子として計数する。

このプログラムでは、個々の光子が、被写体外に散乱されるか、光電効果によりエネルギーが全て吸収されるか、あるいは、そのエネルギーが5 keV 以下になるまで計算する。

光子数スペクトルおよびエネルギースペクトルを光子エネルギー間隔1 keV 毎に積算した。一つのスペクトルの計算で発生した光子数は、200,000個で、京大の大型計算機 FACOM M-190 を使用した。

4. 結果と考察

4.1 被写体内での相互作用回数

物質内に入射したX線光子は、2節で述べた過程で何回か原子と相互作用を起こす。光子エネルギー 50, 100 および 150 keV の単色X線を厚さ10cmの水層に入射したとき、個々のX線光子が水層外に散乱されるか、または、光電効果により光子の全エネルギーが水層内で吸収されるまでに原子と何回相互作用を起こすかをシミュレーションで求めた。その結果を Table 1 にまとめた。

Table 1 Percentage of n th interacted photons to incident photons for the 10-cm water layer.

	no interaction	1	2	3	4	5	6
50 keV	10.34	28.96	18.77	13.23	9.58	6.74	4.60
		18.40 10.56	10.03 8.74	6.08 7.16	3.77 5.80	2.26 4.48	1.30 3.30
		42.40 22.83	23.11 18.89	14.01 15.46	8.69 12.54	5.22 9.68	3.00 7.14
100 keV	18.04	24.08	15.65	11.37	8.44	6.23	4.66
		22.79 1.29	14.22 1.43	9.77 1.60	6.68 1.76	4.57 1.66	3.08 1.58
		34.25 8.37	21.37 9.27	14.68 10.38	10.04 11.41	6.87 10.77	4.63 10.25
150 keV	22.40	24.32	15.09	10.48	7.49	5.53	4.06
		23.94 0.38	14.59 0.50	9.86 0.62	6.76 0.73	4.73 0.81	3.21 0.85
		34.55 4.56	21.06 6.00	14.24 7.44	9.76 8.76	6.82 9.72	4.63 10.20
	7	8	9	10	MORE	*	
50 keV	3.05	1.94	1.20	0.72	0.87	Ni/T	
	0.73 2.31	0.38 1.55	0.21 0.99	0.12 0.61	0.11 0.75	Si/T Ai/T	
	1.69 5.00	0.82 3.36	0.49 2.14	0.27 1.31	0.24 1.65	Si/TAi/AT	
100 keV	3.35	2.54	1.84	1.27	2.53		
	2.02 1.33	1.31 1.23	0.86 0.98	0.53 0.74	0.71 1.82		
	3.04 8.63	1.97 7.98	1.29 6.36	0.80 4.80	1.07 11.80		
150 keV	2.99	2.28	1.64	1.21	2.51		
	2.13 0.86	1.52 0.77	0.98 0.66	0.63 0.58	0.94 1.57		
	3.08 10.32	2.19 9.24	1.41 7.92	0.91 6.96	1.35 18.85		

*Ni: the number of n th interacted photons, T: total number of incident photons,

Si: the number of photons ejected from water after n th interaction,

Ai: the number of photons absorbed in water for n th interaction,

TS: $\sum Si$, TA: $\sum Ai$

モンテカルロ法による多重散乱線を考慮したX線スペクトルの計算(I) (中森・金森)

Table 1 の上半分の 2 列目は、入射光子数に対する非散乱透過光子数の百分率である。3 列目から下半分にかけては、 n 回相互作用を起こした光子数の百分率で、次のように五つに分けて示している。最上部には入射光子数に対する n 回相互作用光子数の百分率、中・左には入射光子数に対して n 回相互作用後被写体外に散乱した光子数の百分率、下・左には全散乱光子数に対して n 回相互作用を起こした光子数の百分率、中・右には入射光子数に対して n 回目の相互作用で吸収された光子数の百分率、下・右には全吸収光子数に対して n 回目の相互作用で吸収された光子数の百分率を示している。

Table 1 から分るように、X 線光子は水層内で多重の相互作用を起こす。1 個の X 線光子が水層外に散乱されるか、または、水層内で吸収されるまでに原子と相互作用を起こす平均回数は、50keV で 2.7 回、100keV で 2.8 回、150 keV で 2.6 回である。また、100 および 150 keV では、相互作用の回数が 11 回以上の X 線光子が 2.5% もある。散乱 X 線光子中で、一次散乱光子の割合は、50keV で 42.4%、100keV で 34.3%、150 keV で 34.6% であり、その残りとして半数以上は多重散乱光子であることが分る。光電効果で吸収される光子が吸収されるまでに散乱される回数は、光子エネルギーが大きくなるほど多くなる。150 keV 光子では 5~8 回散乱される光子の割合がほぼ 10% であり、18% 以上の光子は 11 回以上も散乱されている。

この結果、被写体内での吸収線量や散乱線量を解析するとき、一次散乱線だけでなく、高次散乱線も考慮する必要のあることがわかる。

Fig. 4 Spectral distributions of photons forward-scattered from the 10-cm water layer.

Fig. 5 Spectral distributions of photons backscattered from the 10-cm water layer.

4.2 散乱X線光子数スペクトル分布

Fig. 4, 5 は、光子エネルギー 50, 100 および 150 keV の単色 X 線が厚さ 10 cm の水層に入射したとき、水層の前方および後方に散乱される X 線光子数スペクトル分布を示している。(4)式から分るように、Compton 効果で散乱された光子のエネルギーは、散乱角が 180 度の時 (後方散乱) に最小となる。この値は、入射 X 線光子エネルギー 50, 100 および 150 keV に対し、それぞれ、

Fig. 6 Dependence of forward-scattered photons upon the thickness of water layer for 100 keV monoenergetic X-rays.

41.8, 71.9 および 94.5 keV である。しかし, Fig. 4, 5. から分るように二つの分布では, 上記の値以下の光子エネルギー領域にも多数の散乱光子が存在する。これは, 4.1 で述べたように, 多くの X 線光子が原子と 2 回以上相互作用を起こしていることを示している。

Fig. 6, 7 は, 光子エネルギー 100 keV の単色 X 線が厚さ 5, 10, 20 および 30 cm の水層に入射したとき, 前方および後方に散乱される X 線光子数スペクトル分布を示している。(後方散乱光子数スペクトル分布では, 20 cm と 30 cm の差がほとんどないため, 30 cm の結果を省いた。) 前方散乱でエネルギーが 72 keV 以上の散乱光子数は, 水層厚が増すにつれ, 急激に減少している。これは, 水層内での多重散乱と吸収により, 一次散乱線が急激に減少していることを示している。72 keV 以下のエネルギー領域では, 水層厚が増すと, 多重散乱のため低エネルギー側に分布が移っている。このように, 水層厚の増加に対し, 低エネルギー側の多重散乱光子の割合は増加するが, 吸収される光子数も増加するため, 高エネルギー側と比較して変化は小さい。

後方散乱で, 光子エネルギーが 72 keV 以上の X 線光

Fig. 7 Dependence of backscattered photons upon the thickness of water layer for 100 keV monoenergetic X-rays.

子数分布は, 5 cm 以上の厚さの水層に対し厚さ依存性をほとんど示していない。これは, この範囲の X 線光子が 5 cm 以下の比較的浅い層からの一次散乱線によることを示している。72 keV 以下のエネルギー領域の X 線光子は多重散乱したものであるため, 水層厚の増加につれ, 散乱光子数が増加している。しかし, 深い層からの散乱光子は水層内で吸収されるため, 水層厚が大きくなるとスペクトルの水層厚の差による変化は小さくなる。今回の計算で 20 cm と 30 cm の間には, ほとんど差はなかった。

4.3 吸収 X 線エネルギースペクトル分布

Fig. 8 は, 光子エネルギー 50, 100 および 150 keV の単色 X 線を厚さ 10 cm の水層に入射したとき, 水層で吸収される X 線エネルギースペクトル分布を示している。図から, 各スペクトルは次の四つの光子エネルギー領域に分けられる。(i) 各入射光子エネルギーに対し, それぞ

モンテカルロ法による多重散乱線を考慮したX線スペクトルの計算(I) (中森・金森)

Fig. 8 Energy spectra of radiation absorbed in the 10-cm water layer.

Fig. 9 Dependence of absorbed energy spectra in water layer upon the thickness of water layer for 100 keV monoenergetic X-rays.

光子エネルギー領域で、吸収は主に Compton 効果である。(ii) 上記の Compton 端の光子エネルギーから、それぞれ、41.8, 71.9 および 94.5 keV までの光子エネルギー領域で、多重散乱光子が最終的に光電効果により吸収される領域である。(iii) (ii)の上限から入射光子エネルギー未満の光子エネルギー領域で、主に Compton 効果による一次散乱線が2度目の相互作用の光電効果で吸収される領域である。(iv)入射光子エネルギー値で、入射光子が光電効果により吸収される。

入射X線光子エネルギーが大きくなると(i)の領域の吸収量

が増加し、Compton 効果が吸収の主な原因となることが分る。

Fig. 9 は、入射X線光子エネルギー 100 keV の単色X線が、厚さ 5, 10, 20 および 30 cm の水層内で吸収されるX線エネルギースペクトルを示している。予想されるように水層が厚くなるにつれ、吸収エネルギーの増加が見られる。また、Compton 効果あるいは光電効果による吸収で、水層厚が増すと、低光子エネルギー領域での吸収エネルギーの増加が、高光子エネルギー領域での増加より大きい。この原因も多重散乱のため、水層厚の増加につれ、低エネルギーの光子の割合が増加することを示している。

4.4 入射X線全エネルギーの配分と水層厚の関係

Fig. 10(a), (b), (c)は、それぞれ入射X線光子エネルギー 50, 100 および 150 keV の単色X線の全エネルギー (光子エネルギー×発生個数) が、どのような割合で吸収または散乱に配分されるかを水層厚を変数として示している。

図で、p は散乱されずに透過したX線エネルギーの割合、f.s.は前方散乱したX線エネルギーの割合、b.s. は後方散乱したX線エネルギーの割合である。したがって、水層内で吸収されたX線エネルギーの割合は $(1-p-f.s.-b.s.)$ である。また、 μ および μ_{en} は各X線光子エネルギーに対する水の線減弱係数および線吸収係数である。

単色X線を入射させているので非散乱透過X線の割合は、モンテカルロ法を用いた計算と、線減弱係数の計算

れ、8.2, 28.1 および 55.1 keV (Compton 端) 以下の

Fig. 10 Dependence of the energy fraction upon the thickness of water layer for incident photon energy; (a) 50 keV, (b) 100 keV and (c) 150 keV.

とで一致する。前方散乱線の割合は、水層厚の増加につれ増加し、特定の厚さで最大となり、それ以上の厚さでは単調減少する。入射光子エネルギー50, 100および150 keVに対し、最大となる厚さは、それぞれ、5, 7および8 cmである。

後方散乱線の割合は、水層厚の増加につれ一定値に近づく。その値は、各光子エネルギーとも、入射全エネルギーの約25%にあたる。

水層内で吸収されるX線エネルギーの割合は、散乱線の吸収があるため線吸収係数の計算値より大きい。また、加藤⁴⁾の一次散乱線を考慮した計算結果と比較した場合、今回の計算値の方が吸収線量の割合は小さい。これは、加藤の計算では二次以上の散乱線は全て吸収されること、

水層が横方向に無限に広がっているためである。また、吸収線量の割合は、水層厚の増加につれ、線吸収係数 μ_{en} で指数関数的に単調増加するのではなく、水層を通過するX線の割合が小さくかつ後方散乱線の割合が一定となるため、一定値に漸近する。

水層を通過したX線は、散乱成分と非散乱成分を含んでいる。X線写真やX線検出器で被検体の情報を得る時、散乱成分の影響を極力小さくするため、グリッドやコリメータを使用したり、グレーデル法を使用したりする。

上の方法により入射全エネルギーに対する通過X線の割合は、グリッドやコリメータの形状や被検体とフィルムの距離により、散乱線を全く含まないpから前方散乱線を100%含むp+f.s.の範囲で変化する。

4.5 入射X線全エネルギーの配分と入射X線光子エネルギーの関係

Fig. 11は、厚さ10 cmと30 cmの水層に単色X線を入射したときその全エネルギーがどのような割合で吸収または散乱に配分されるかを入射光子エネルギーを変数として示している。

吸収線量の割合で、モンテカルロ法の結果と指数法則の結果とに顕著な差がみられる。厚さ10 cmと30 cmの水層に対し、それぞれ、27および46 keV以下の光子エネルギー領域では、モンテカルロ法の計算値が指数法則

モンテカルロ法による多重散乱線を考慮したX線スペクトルの計算(I) (中森・金森)

Fig. 11 Dependence of the energy fraction upon the incident photon energy for 10-cm (dotted line) and 30-cm (solid line) water layer.

から得た計算値よりも小さく、逆に上記の光子エネルギー以上では両者の計算値は逆の関係となる。これはモンテカルロ計算では、低光子エネルギーを入射した場合でも、後方散乱される光子が存在するため、吸収線量の割合が低下するためである。逆に、高光子エネルギー領域では、散乱線が水層内で吸収されるため割合が増加する。

後方散乱線の割合は、入射光子エネルギーの増加につれて特定の値まで増加し、それ以上では減少する。

5. 結 論

X線光子が被写体に入射したとき、光子と原子は複雑な相互作用を起こしている。今回モンテカルロ法を用いて個々の光子を追跡することにより、多重相互作用が被写体内での吸収線量や散乱線量にどのような影響をおよぼしているか、水層厚および光子エネルギーを変数として検討した。

以下に今回得た結果をまとめておく。

1) 水層内で光子は原子と何回か相互作用を起こし、そ

の回数が10回を越える光子も少くない。光子エネルギー100 keV、水層厚10 cmでは、平均相互作用の回数は2.7回である。

2) 水層外に散乱される光子中、水層内で2回以上散乱された光子は、半数を越える。光子エネルギー100 keV、水層厚10 cmで、水層内で2回以上散乱された光子の割合は、65.7%にも達する。

3) 入射全エネルギーの中で、後方散乱X線のエネルギーの割合は、水層厚が増加するにつれて一定値に漸近する。その値は、50, 100 および 150 keV の入射X線光子エネルギーに対し約25%である。

4) 被写体内で吸収されるX線エネルギーの割合は、指数法則で得た値に比べ、入射X線光子エネルギーが低いとき小さく、高いとき大きくなる。

今回単色X線入射の場合について計算し、被写体内での吸収線量や散乱線量に多重散乱線が大きな影響をおよぼしていることがわかった。

また、現実には使用されているX線は連続線であるが、連続線は単色X線の重ね合わせたものであるため、今回の単色X線に対する結果が連続X線を水層に入射した時の多重散乱線の影響を予想する基礎データとなると考える。

なお本研究の要旨を第35回日本放射線技術学会総会で発表した。

文 献

- 1) J. W. Motz, C. E. Dick: *X-ray scatter background signals in transmission radiography*, Med. Phys., **2**(5), 259-267 (1975).
- 2) C. E. Dick, C. G. Soares, J. W. Motz: *X-ray scatter data for diagnostic radiology*, Phys. Med. Bio., **23**(6), 1076-1085 (1978).
- 3) 古巻隆夫, 宮原諄二: 被写体散乱線の画像への影響 (第1報). 散乱線によるスクリーンの発光特性, 第34回日放技学会総会抄録集, 412~413 (1978)
- 4) 加藤秀起: 実効エネルギー吸収率の計算, 日放技学誌, **34**(4), 350-355 (1978).
- 5) J. H. Hubbell: *Photon mass attenuation and mass energy-absorption coefficients for H, C, N, O, Ar, and seven mixtures from 0.1 keV to 20 MeV*, Radiat. Res. **70**, 58-81 (1977).