

低エネルギー光子と物質の相互作用を計算する Monte Carlo コードの開発

山 口 千 里*

Development of a Monte Carlo simulation code for low energy photons

Chiri YAMAGUCHI

A Monte Carlo simulation code to calculate 5 ~ 150 keV photon trajectories and absorbed dose in a tissue equivalent phantom has been developed. The code is written in FORTRAN77 and run on IBM workstations.

1. 緒言

医療診断分野で使われる X 線管球および CT (計算機断層撮影) 装置のエネルギーは通常 150 keV 以下である。又、PET (陽電子放出断層撮影) 装置では陽電子が消滅するときに互いに反対方向に放出される 511 keV の γ 線を検出することで、放射線核種の位置を決定し、これにより、陽電子放出核を取り込んだ組織の場所が特定できる。さらに、世界の幾つかの高エネルギー物理学の研究所では、十年以上前から、シンクロトロン放射線を利用した環状動脈の差分血管造影法の技術が研究されており、筆者もその研究に携わってきた [1,2]。これはヨウ素の K 吸収端 (33.17 keV) の上下 400 eV のシンクロトロン放射線を用いて血管像を撮影した後、両者の差をとってバックグラウンドを差し引く方法である。

本論文では、患者への診断医療被曝線量を Monte Carlo 法で計算するプログラムを開発した。電子と光子の輸送をシミュレーションする Monte Carlo コードとしては、いくつかのものが開発されている [3~6]。中でも EGS [4] は汎用の電子光子輸送コードとして広く用いられているが、対象エネルギーが数 keV ~ TeV 以上と広範囲で、低エネルギー領域専用のコードの必要を感じていた。

2. 計算方法

2.1 ファントム

計算に使うファントムは、表 1 に示す組織等価物質 (A-150) またはルサイトで出来た一辺が 20 cm の立方体である。ビームは細い光子ビーム又は立方体前面に垂直な平行ビーム (図 1) とし、光子ビームに対するファントムの線エネルギー吸収係数は、Storm と

* 経営工学科

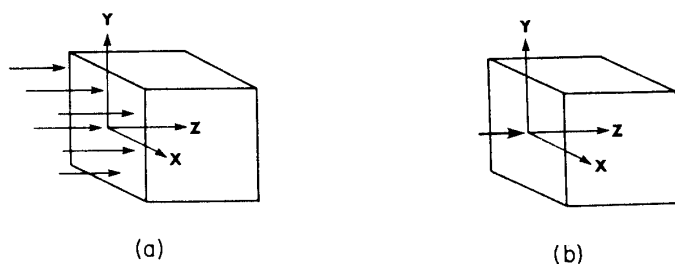


図1 計算に用いた組織等価及びLuciteファントムの形状

	A-150	Lucite
O	5.2	32.0
H	10.1	8.0
C	77.6	60.0
N	3.5	
Ca	1.8	
F	1.7	

表1 ファントムの元素構成

Israel [8] による各元素の線エネルギー吸収係数に元素構成比を加重して求めた。図2に組織等価物質に対する線エネルギー吸収係数を示す。

2.2 散乱光子数の計算

電子によるX線の散乱 (Compton散乱) の断面積はKlein - 仁科の式 [9] で表される。この式は入射X線の波長が長い (エネルギーが低い) 時、Thomson散乱の式と一致する。

一般に、Thomson散乱を含めてCompton散乱と呼ぶこともあるが、特に区別する必要がある場合は、Thomson散乱を除いた部分を狭義のCompton散乱と言う。ここでは光電効果、インコヒーレント散乱、コヒーレント散乱の断面積データに従って、これらの相互作用を決定した。光電効果の場合は、全エネルギーが相互作用の場所で吸収されたとした。インコヒーレント散乱の場合は、ファントム中のインコヒーレント散乱関数 [10-12] で修正を加えたKlein - 仁科の式を用いて、散乱光子の角度とエネルギーを決めた。反跳電子は相互作用を起こした場所で吸収されたとした。コヒーレント散乱に対しては、適当な形状因子 [13,14] で補正したThomsonの式を用いて散乱角を決めた。光子がファントム外に出るか、そうでなくとも光子エネルギーが5keV以下になると、光子のヒストリを終了させ、次の新しい光子に対する計算を始めた。入射光子のエ

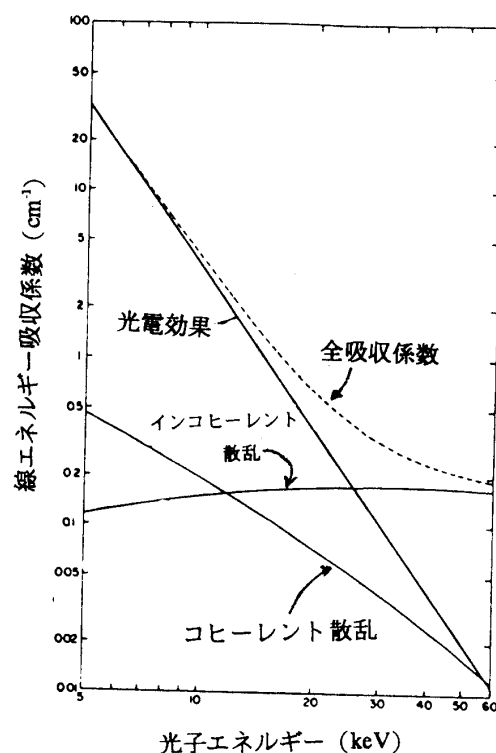


図2 組織等価物質に対する線エネルギー吸収係数

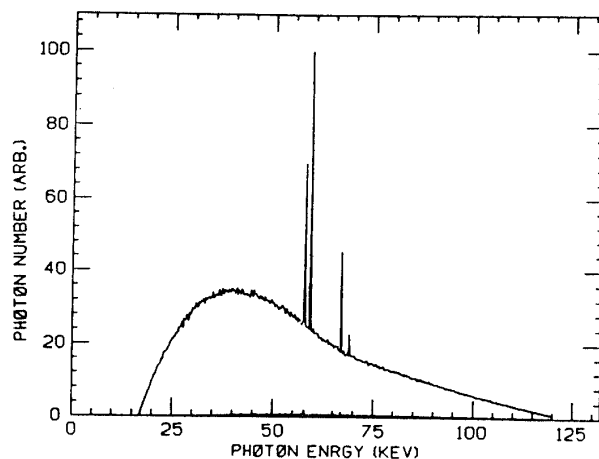


図3 X線管球からの制動放射線

ルギーは単色または図3に示すX線管球からの制動放射線（最大エネルギー E_{\max} ） [15] とした。計算にはIBM Power Server 320Eを用いた。

2.3 光子数から線量の計算

荷電粒子平衡が成り立つとき、Gy (= 1J/kg) で表した吸収線量Dは光子束 ϕ から次式で計算される。

$$D = 1.60 \times 10^{-10} \sum \phi_i E_i (\mu_{\text{en}} / \rho)_i t \quad (1)$$

ここに、 ϕ_i はi番目の光子束 ($\text{cm}^{-1}\text{s}^{-1}$)、 E_i はi番目の光子のエネルギー (MeV)、 $(\mu_{\text{en}} / \rho)_i$ はi番目の光子の質量エネルギー吸収係数 (cm^2g^{-1})、t は照射時間 (s) である。右辺の係数は Gy への変換の為に、残りの項はkerma (kinetic energy of charged particles released in material) から制動放射によるエネルギー損失を引き去ったものである。

質量エネルギー吸収係数 μ_{en} / ρ は次式で与えられる。

$$\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} = \frac{1}{\rho} \left[\tau(1-f) + \sigma \frac{\bar{E}}{h\nu} + \kappa \left(1 - \frac{2mc^2}{h\nu} \right) \right] (1-G) \quad (2)$$

ここに、 τ は光電効果断面積、 σ は全Compton断面積、 κ は対生成断面積、 f は蛍光X線割合、 G は制動放射過程の二次電子により失われたエネルギーである。

3. 結果と考察

3.1 ファントム中の光子の飛跡

図4はファントム正面中心に200個の40keVの単色光子ビームと1000個の最大エネルギー

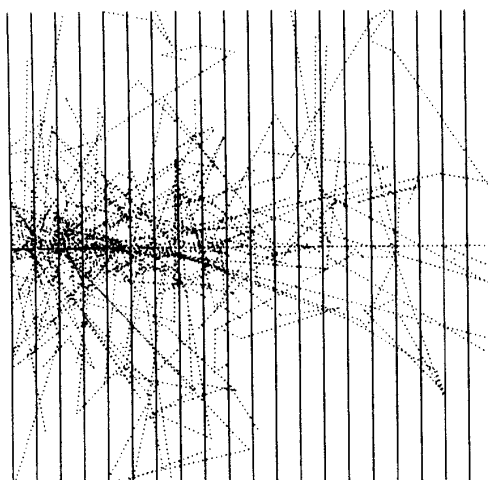


図4 ファントム正面中心に200個の40keV光子を入射したときの光子の飛跡

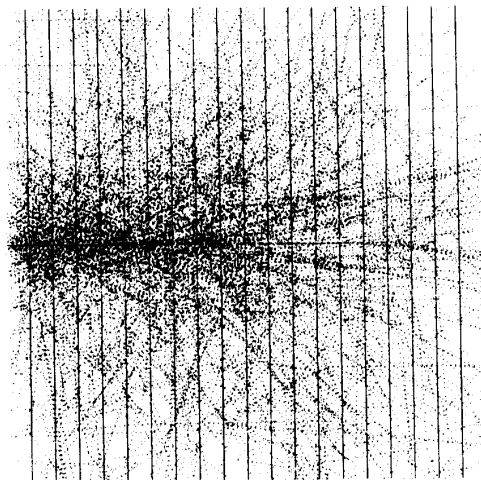


図5 ファントム正面中心に最大エネルギー120keVの制動放射線を入射したときの光子の飛跡

120keVの制動放射線を入射したときのファントム中の光子の飛跡を示す。図5は平行な120keVの制動放射線を入射したときのファントム中の光子スペクトルである。図6は組織等価ファントム中に細い40keV光子ビームを入射したときの散乱光子の吸収エネルギーを、入射点からの動径距離の関数で表したもので、●はファントム正面から0-1cm、▲は4-5cmの深度に対するものである。散乱光子は深度5cm以下では高度に方向性があり、深度10cm以上では大部分が散乱してしまうことが分かった。このことは既報の結果[15]を追認するものである。

つくばの高エネルギー物理学研究所のフォトンファクトリ(PF)からのシンクロトロン放射線(SR)を用いて、冠動脈の差分血管造影の研究が進められているが、SRは線変更した光子ビームである。EGS[4]の第4版であるEGS4[5]にたいする低エネルギー光子輸送の部分については、これらを考慮して、波戸ら[16-20]が改良を加えている。

参考文献

- 1) T. Takeda, M. Akisada, C. Yamaguchi, et al., "Subtraction Angiography of the Rabbit Coronary Arteries", J. Cardiovasc. Technol. 9 (1990) 203-211
- 2) K. Ueda, K. Umetani, C. Yamaguchi, et al., "A Cine K-Edge Subtraction Angiographic System for Animal Studies", Rev. Sci. Instr., 60 (1989) 2272-2275
- 3) J. Persliden and G.A. Carlsson "Energy imparted to water slabs by photons in the energy range 5-300 keV. Calculations using a Monte Carlo photon transport model", Phys. Med. Biol., 29 (1984) 1075-1088
- 4) R. L. Ford and W. R. Nelson, "The EGS Code System", SLAC-210 (1978) Stanford Linear Accelerator Center, CA, USA
- 5) W. R. Nelson, H. Hirayama, D. W. O. Rogers, "The EGS4 Code System", SLAC-265 (1985) Stanford Linear Accelerator Center, CA, USA
- 6) R. Mohan and C. Chui, "Differential pencil beam dose computation model for photons", Med. Phys. 13 (1) (1986) 64-73
- 7) J.M. Fernandez-Vareea, D. Liljequist, S. Csillag, et al., "Monte Carlo simulation of 0.1-100 keV electron and positron transport in solids using optical data and partial wave methods", Nucl.

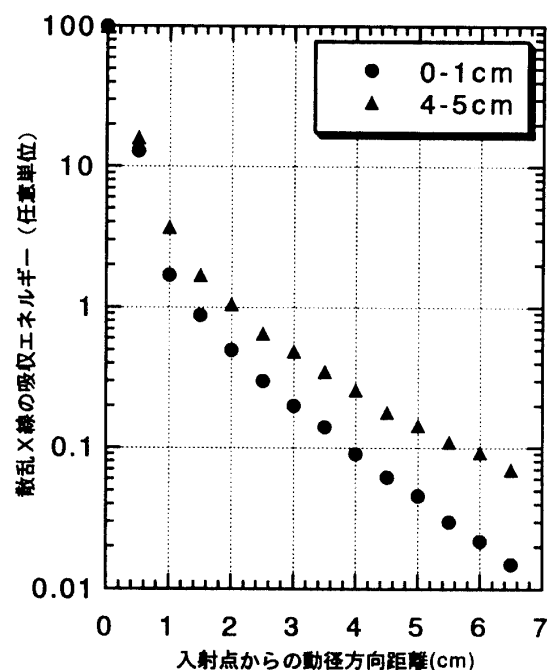


図6 組織等価ファントム中に細い40keV光子ビームを入射したときの散乱光子の吸収エネルギー。●はファントム正面から0-1cm、▲は4-5cmの深度に対するものである。

Instr. Methods in Phys. Res. B 108 (1996) 35-50

8) E. Storm and H.I. Israel, "Photon cross section from 1 keV to 100 MeV", Nuclear Data Tables A7 (1970) 565-681

9) O. Klein and Y. Nishina, "Ueber die streuung von Strahlung durch freie Elektronen nach der neuen relativistischen Quantendynamik von Dirac", Z. Phys. 52 (1929) 853-868

10) G. White-Grodstein "X-ray attenuation coefficient from 10 keV to 100 MeV", Washington D.C., U.S. National Bureau of Standards, Circular No. 583 (1957)

11) D.T. Cromer "Compton scattering factors for spherically symmetric free atoms", J Chem. Phys. 47 (1967) 1892-1893

12) D.T. Cromer "Compton scattering factors for aspherical free atoms", J. Chem. Phys. 50 (1969) 4857-4859

13) D.T. Cormer, "Atomic scattering factor for x-rays", International Tables of X-rays Crystallography", Birmingham, Eng., Kynoch, 1974, vol.4, pp71-147

14) H.P. Hanson, F. Herman, J.D. Lea, et al. "HFS atomic scattering factors", Acta Cryst 17 (1964) 1040-1044

15) C. Yamaguchi "Monte Carlo simulation of tungsten target x-ray spectra in the phantom", KEK Rep. 85-1 (1985)

16) Y. Namito, S. Ban, H. Hirayama, "Implementation of linearly-polarized photon scattering into the EGS4 code", A332 (1993) 277-283

17) Y. Namito, S. Ban, H. Hirayama, "Implementation of the Doppler broadning of a Compton-scattered photon into the EGS4 code", Nucl. Instr. Methods in Phys. Res., A349 (1994) 489-494

18) Y. Namito, S. Ban, H. Hirayama, N. Nariyama, et. al., "Compton scattering of 20- to 40-keV photons", Phys. Rev. A, 51 (1995) 3036-3043

19) Y. Namito, S. Ban, H. Hirayama, "LSCAT: Low Energy Photon-Scattering Expansion for the EGS4 Code", KEK Internal Rep. 95-10 (1995)

20) Y. Namito, S. Ban, H. Hirayama, "Effects of Linear Polarization and Doppler Broadening on the Exposure Buildup Factors of Low-Energy Gamma Rays", Nucl. Sci. Eng., 120 (1995) 199-210

(平成8年12月17日受理)