

組織等価ファントム中のタングステン管球 X線スペクトルの Monte Carlo シミュレーション

山 口 千 里*

Monte Carlo Simulation of Tungsten X-ray Tube Spectra in the Tissue Equivalent Phantom

Chiri YAMAGUCHI

The propagation of photons in a tissue equivalent phantom was simulated using the Monte Carlo code EGS to obtain radial and longitudinal dependence of the photon spectra. The input spectrum incident on the phantom was based on the measurement. Trajectories of 20 and 80 keV monoenergetic photons were also plotted. Moreover, the contribution to the measured energy spectra from the photons scattered in the collimator system in the measurement was investigated.

1. 緒言

診断用X線スペクトルの知識は画質や患者被曝線量の評価の際の重要な情報の一つである。これまでも筆者らを含め多くの研究者が、Si (Li) や度高純度の Ge (HPGe) 検出器を用いてスペクトルを測定している。

筆者らは以前、タングステン (W) 標的X線管球と種々の厚さのW吸収端フィルタ (AEF) を組み合わせて測定した診断用X線スペクトルに基づき、スペクトル、画質、患者被曝線量へのAEFの影響を報告した [1]。本論文では電磁シャワーコードEGSを用いて、測定した光子エネルギースペクトルの組織等価 (TE) ファントム透過をシミュレートした。

単色エネルギー光子および120keVの制動放射線のファントム中の飛跡もシミュレートした。さらに、ピンホールコリメータ (直径0.03 mm) の後ろの横方向のエネルギースペクトルも調べた。

2. Monte Carlo シミュレーション

2.1 電磁シャワーコードEGS

EGS (Electron-Gamma-Shower) はSLACのFordとNelson [2] の開発した電磁シャワーシミュレーション用のMonte Carloコードで、ここではそのVersion 4 (EGS4) [3] を用いた。ユーザが領域 (region) に分割した対象の、各領域の沈積エネルギーを計算し、出力する。筆者らは、このコードを修正し、光子のエネルギースペクトルが得られるようにした。

* 経営工学科

2.2 入カスペクトルとファントム

入カスペクトルは以下のようにして求めた：まず、測定したエネルギースペクトルのWのK吸収端（69.52 keV）以下の領域を3次の多項式関数で近似した。次に、0と1の間の均等分布乱数 R_n を発生させ、連続な制動放射スペクトル $N(E)$ をつくった：

$$N(E) = f_1(E)_{E < E_0} + f_2(E)_{E > E_0} \quad (1)$$

$$E = R_n (E_{\max} - E_{\min}) + E_{\min} \quad (2)$$

ここに、 f_1 と f_2 は上記の多項式関数、 E_0 は吸収端エネルギー、 E_{\max} と E_{\min} は入カスペクトルの最大（120 keV）および最小（15 keV）の光子エネルギーである。次に、核データ [3] を基に、各スペクトル上にX線のピークを重ねた。各ピークの半値幅（FWHM）は1 keVとした。

3次元ファントムは一辺が20cmの立方体で、組織等価（TE）の物質を用いた。EGS計算に必要なTE物質データはEGSコードパッケージに付属のPEGSコードで計算した。光子はX-Y平面に垂直のZ軸方向

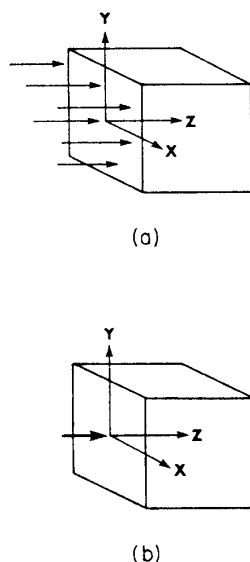


図 1

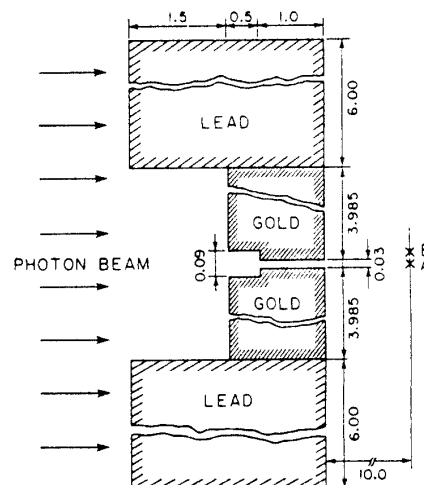


図 2

から平行入射した（図 1 a）。入射平面上の入射点は乱数によりランダムに選んだ。

2.3 ピンホールコリメータ

X線管球からの放出スペクトルを測定する場合には、検出器に入る光子数を少なくしてパイルアップを抑える為に、ピンホールコリメータを含むコリメータ系を検出器の前に置く。コリメータ系の散乱によるスペクトルへの寄与を調べるために、図 2 に示したジオメトリで同様のシミュレーションを行った。ピンホールコリメータは金製で、直径 8 mm、厚さ 1.5mm、孔の直径は 0.03mm である。コリメータ系に垂直に開口部と同じ幅の光子ビームを入射した（図 1 b）。

3. 結果と考察

3.1 ファントム中の縦方向の光子スペクトル

図3の点線はW標的X線管球からの光子エネルギースペクトルを表す。その他の実線はファントム中の1-2 cm, 10-11 cm, 18-19 cmの深さでの光子エネルギースペクトルを示す。入力スペクトルは $K\alpha$ -IIのピークを100に規格化してある。AEFを用いないと、スペクトル中の40keV付近に集中した多くの光子はX線フィルムに到達する前に、ファントム中で吸収されてしまうことが分かる。より高いエネルギーの光子がファントム中で散乱する結果、スペクトルの低いエネルギー部分に寄与する影響も無視できない。

図4はX線管球の前面に厚さ0.15mmのAEFを取付けた場合のスペクトルである。点線は入力スペクトル、実線はファントム中の深度5-6 cm, 10-11 cm, 19-20 cmの領域（ビン）のスペクトルを示す。70 keV付近の鋭いピークはAEFのK吸収端の効果を表す。入力スペクトルは図2のものよりも「準単色」で、40-70 keVの光子が画像に寄与することを示している。

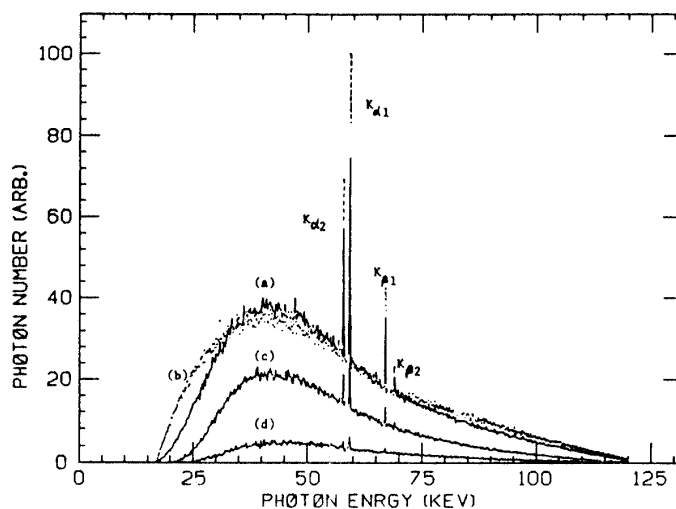


図3

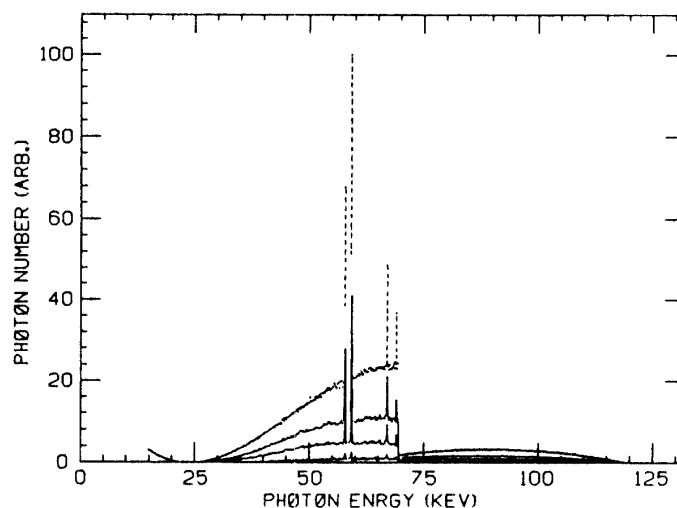


図4

3.2 スペクトルの動径方向依存性

図5 (a, b, c) はファントムの前面中心に垂直に光子ビームを入射した場合の、入力スペクトル、 $R=0-0.01$ cm (最も強度の強い動径方向の領域) と $R=1.0-1.5$ cm のスペクトルで、a) $Z=5-6$ cm, b) $Z=10-11$ cm, c) $Z=19-20$ cmの縦方向領域に対応する。これらの図から、散乱光子は $Z=5$ cmの深度までに集中していることがわかる。

散乱光子の飛跡を図6 (a,b) にしめす。a) は20 keV、b) は80 keVの光子をそれぞれ200個、ファントムの表面中心点に垂直入射したものである。縦の線は1 cmの間隔を表す。図5 (a) と図3で深度5 cmでの特性X線を比べると、零幅のビームを入射した前者の方が相対ピーク強度が高い。後者では平行で幅の広いビームを入射したために、種々の部分からの

散乱光子からの寄与が多いため、相対ピーク強度が下がる。

3.3 ピンホールコリメータ後方の光子スペクトル

コリメータ系からの散乱が測定スペクトルに与える影響をみるために、2.3項で述べたシミュレーションを行った。図2のB点(コリメータの後方1 cmで開口部のすぐ上)での光子スペクトルを図7に示す。入射スペクトルは図2のものと同じであるが、縦軸は535倍に拡大

してある。入射スペクトルと図2のA点(開口部の真後ろ)でのスペクトルには差はなかった。以上から、リメータ系からの散乱が測定スペクトルに与える影響は無視できることが分かった。

4. 結論

T E ファントム中の連続 ($E_{\max}=120 \text{ keV}$) および単色エネルギーの光子ビームの伝搬を Monte Carlo 法でシミュレートし、ファントム中の種々の縦方向および動径方向の位置での光子エネルギースペクトルを求めた。その結果、測定から示唆した吸収端フィルタ (AEF) を用いた場合の患者への被曝線量の低減を確認した。散乱光子は5 cmの深度以下では高度に方向性があり、10 cm以上では大部分散乱してしまうことが分かった。これによりX線フィルム上の画質の低下が起こり、診断用にはより単色のX線源の利用が望ましい。

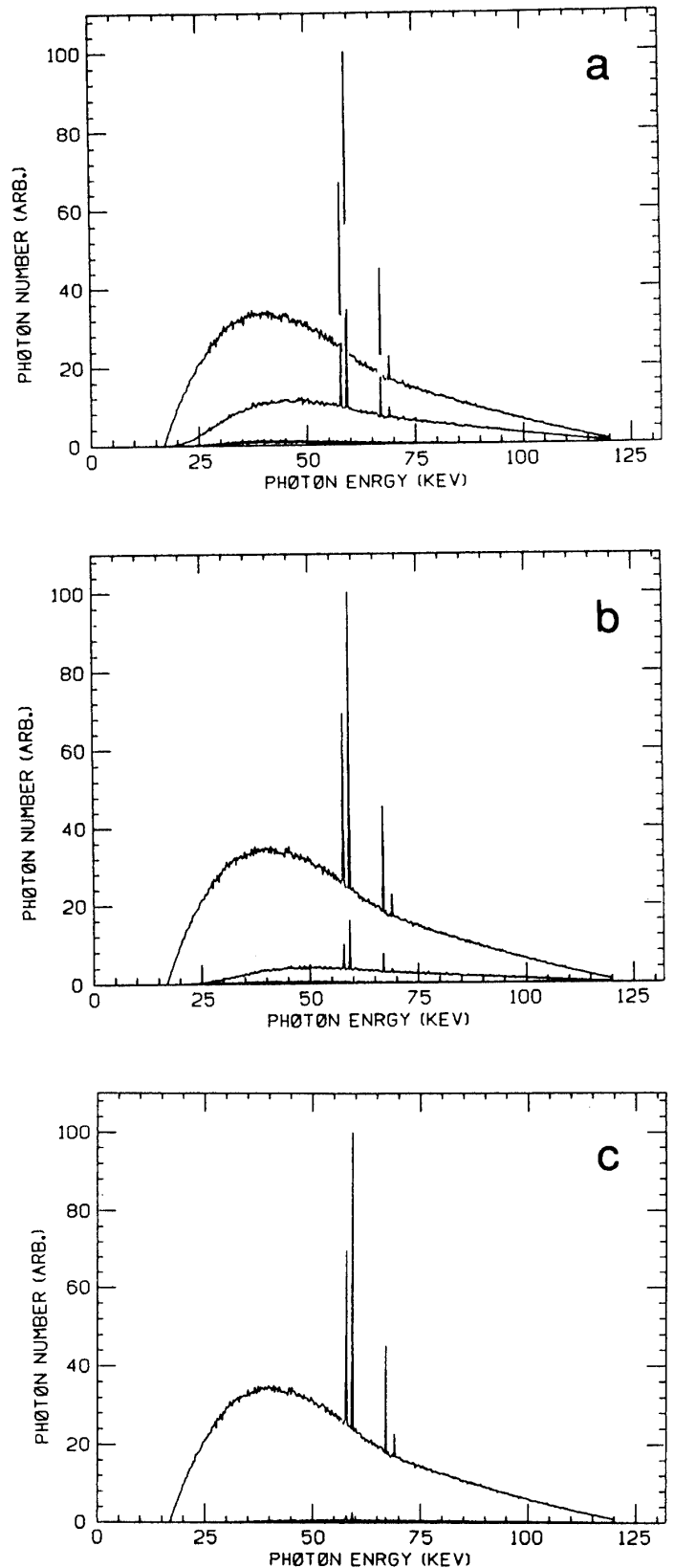


図 5

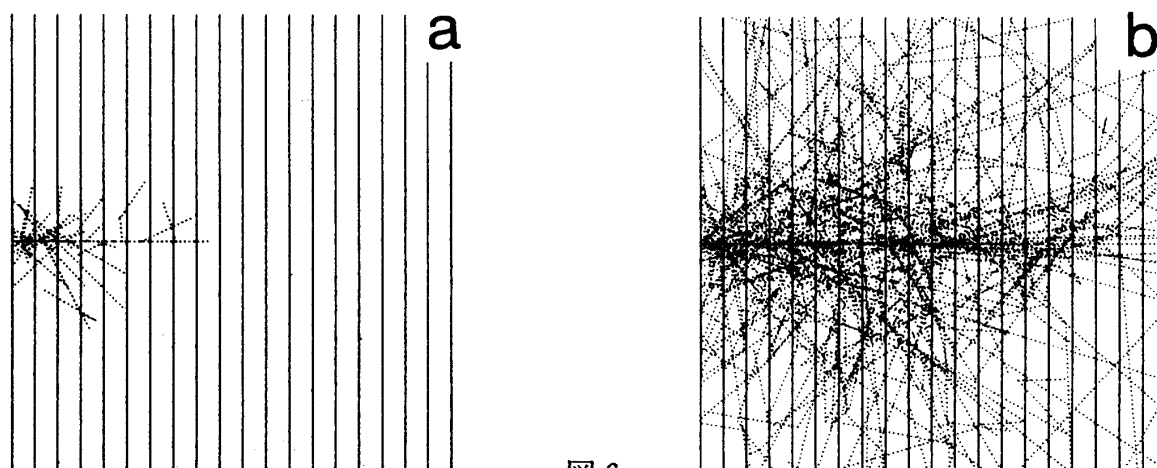


図 6

また、光子スペクトル測定に於ける、コリメータ系からの散乱が測定スペクトルに与える影響は無視できることが分かった。

参考文献

- 1) C. Yamaguchi, T. Yamamoto, H. Terada, and M. Akisada, Effect of Tungsten Absorption Edge Filter on Diagnostic X-ray Spectra, Image Quality and Absorbed Dose to the Patient, Phys. Med. Biol. 28 (1983) 223- 232
- 2) R.L. Ford and W. R. Nelson, The EGS Code System : Computer Program for the Monte Carlo Simulation of Electromagnetic Cascade Showers, Stanford Linear Accelerator Center, University of California, SLAC Report No. 210
- 3) W. R. Nelson et al, The EGS-4 Code System, SLAC-265 (1985)
- 4) C. M. Lederer and V. S. Shirley, Table of Isotopes, 7th Edn. (New York : Wiley) 1978

(平成 6 年12月16日受理)