

第14回EGS研究会 アブストラクト集

平成19年8月7日—8月9日

(会場) 3号館セミナーホール

(主催) 高エネルギー加速器研究機構放射線科学センター

目次

3. 2～14 MeV 電子の後方散乱：方法と精度を顧みる.....	1	
		多幡 達夫
電子後方散乱実験の文献調査.....	2	
		桐原 陽一
Goldstein 級数によるモリエール角分布とその応用.....	3	
		中塚 隆郎
多重クーロン散乱による曲がり角と横拡がりの同時分布.....	4	
		桶井 一秀
Testing the K, L shell fluorescent yield and Coster-Kronig coefficients from EADL with EGS5 Monte Carlo Code.....	5	
		Orion Itzik
PHITS と EGS の統合による汎用モンテカルロコードの開発.....	6	
		岩瀬 広
EGS5 コードへの電磁場の組み込み.....	7	
		鳥居 建男
CGVIEW の改良.....	8	
		杉田 武志
治療用フィルムの線量分布測定における基礎的検討 II	9	
		捩垣 智博
乳癌の術中電子線照射に使用する金属プレートの検討.....	10	
		大島 隆嗣
コバルト 60 遠隔治療装置のシミュレーションを通しての EGS5 と GEANT4 の比較.....	11	
		柴田 洋希
ボクセルマウスの臓器線量評価.....	12	
		木名瀬 栄
媒質の異なる微小領域内の電子・光子輸送計算条件設定の一試行.....	13	
		佐藤 裕一
X線校正における外部散乱線の影響.....	14	
		黒澤 忠弘
Flat Panel Detector のエネルギー感度特性 ー直接変換方式と間接変換方式の比較ー.....	15	
		越田 吉郎
X線 CTにおけるファントム中のエネルギー変化についての検討.....	16	
		笹田 裕也

診断X線領域における後方散乱係数算出に適する検出器厚の検討.....	17
	阪井 洋平
比例計数管による単色化放射光測定と EGS5 シミュレーションとの比較.....	18
	桐原 陽一
レーザーコンプトン γ 線の生成とシンチレータの光出力応答.....	19
	今村 稔
比例計数管モンテカルロシミュレーションによるポリマーゲル線量計の基礎特性の評価.	20
	羽根田 清文
EGS4 を用いた馬の核医学検査における人間の外部被曝線量評価（その2）	21
	小林 枝里子
獣医核医学検査におけるイヌ体外の線量分布の評価.....	22
	西岡 真希

3.2 ~ 14 MeV 電子の後方散乱：方法と精度を顧みる

阪府大 & データ評価解析研 多幡達夫

40 年前に発表した電子の後方散乱係数の測定値¹⁾が EGS コードの厳密なチェックのためのベンチマークとして役立つと聞き、その信頼性を再考するため、当時の実験方法と誤差の推定について振り返る。われわれが測定した電子の電荷堆積分布も、高精度のベンチマークとなることを付言する。

後方散乱の実験方法：旧大放研の線型加速器からの電子線を分析電磁石を通して測定室へ導いた。電子線は一对の四重極電磁石で 5.5m 先の散乱槽手前のコリメータ入口に収束させた。ターゲットでのエネルギー幅は 1%、角度の発散は 0.05° 以下である。分析電磁石のエネルギースケールは Cs¹³⁷ の転換電子と Cu⁶³ (, n) 反応のしきい値の測定から、1.1%の精度で校正した。散乱槽は内径 50cm、高さ 30cm、上半分が固定で、検出孔を持つ下半分が回転するようになっており、入射電子線の両側 20 ~ 160° での測定が可能である。使用したターゲットの純度は 99.5%以上である。後方散乱電子は検出用コリメータと 3.5mg/cm² のマイラー窓を通した後、電離箱で検出した。電離箱は Van de Graaff²⁾ らが開発した X 線補償型のもので、その増幅率は、後方散乱電子の平均エネルギー (Wright and Trump³⁾ の実験から外挿して推定) のみの関数と仮定し、Au ターゲットからの後方散乱電子のファラデー箱式検出器での測定結果と比較して校正した。入射電子電流は、ターゲット電流に後方散乱電子電流の半空間での積分値を加え、別途測定した 2 次電子電流の補正をして求めた。ターゲット電流はカレントインテグレータ (CI) へ導き、検出器電流はピコアンメータ (PA) を通して同じく CI へ導いて計測した。電離箱で補償し切れないバックグラウンド (BG) は、検出器手前のシャッターを閉じて、また、ターゲットなしのランを行って測定した。

後方散乱係数の誤差：可能な系統的誤差は次の 6 種類からなると考えた (数字はいずれも記述してある因子自体の誤差)。(1) 電離箱増幅率 ±2.9 ~ 8.1%、(2) 検出の立体角 ±1.8%、(3) 2 次電子放出係数 ±10%、(4) BG 測定にかからない BG による後方散乱電子電流の誤差 ±1%、(5) ターゲット電流測定に関わる誤差 ±0.5%、(6) CI と PA の相対指示の誤差による散乱電子電流対ターゲット電流比の誤差 ±1.5%。これらのそれぞれの誤差の、後方散乱係数の誤差への寄与を求め、その合計を後方散乱係数の誤差とした (6.7 ~ 14%)。顧みたと、とくに問題はないと判断される。

他のベンチマークデータ：われわれは同じ実験装置を使って (ただし、ターゲットアセンブリーは散乱槽を突き抜けた場所の空気中におく)、実効的に半無限の媒質中での電子の電荷堆積分布 (停止する点の深さ分布) を測定した^{4,5)}。この結果も精度の高いものであり、ベンチマークとして有用と考えられる。

文 献

- 1) T. Tabata, Phys. Rev. 162, 336 (1967).
- 2) R. J. Van de Graaff, W. W. Buchner, and H. Feshbach, Phys. Rev. 97, 1071 (1955).
- 3) K. A. Wright and J. G. Trump, J. Appl. Phys. 33, 687 (1962).
- 4) T. Tabata, R. Ito, S. Okabe, and Y. Fujita, Phys. Rev. B 3, 572 (1971).
- 5) T. Tabata, P. Andreo, K. Shinoda, and R. Ito, Nucl. Instr. Meth. B 95, 289 (1995).

電子後方散乱の文献調査

桐原 陽一

総合研究大学院大学 加速器科学研究科

これまで多くの電子後方散乱の実験が行われている。下記にその一部を示す。

No.	実験者	入射エネルギー [MeV]	ターゲット	測定方向	検出器
1	Dressel[1]	0.68~9.76	Be,C,Al,Cu,Sr,Mo,Ag,Ba,W, Pb,U	100~180° (垂直入射 5点)	ファラデーカップ
2	Tabata[2]	3.2~14	Be,C,Al,Cu,Ag,Au,U	100~160° (垂直入射 7点)	電離箱
3	Rester, Derrickson[3]	1.0	Al,Fe,Sn,Au	102.5~162.5° (垂直入射 8点)	Si(Li) 検出器
4	Hunger, Küchler[4]	0.004~0.04	B,C,Mg,Si,Ti,V,Cr,Fe,Co,Ni, Cu,Zn,Ge,Zr,Ag,Cd,Sn,Sb, Te,Sm,Hf,Ta,W,Pt,Au,Bi,U	後方全域	電子線マイクロプローブアナライザー (EPMA)
5	Ebert, Lauzon[5]	4.0~12.0	C,Al,Cu,Ag,Ta,U	後方全域	ファラデーカップ
6	Neubert, Rogaschewski[6]	0.015~0.06	Be,C,Al,Ti,Fe,Cu,Nb,Ag,Ta, Au,U	後方全域	ファラデーカップ ¹
7	Wright, Trump[7]	1.0~3.0	Be,Mg,Al,Cu,Zn,Cd,Au,Pb,U	後方全域	熱量測定法

本発表は、1~7の電子後方散乱の実験方法を調べ実験データを比較し、より信頼性のある値を見いだすことを目的とする。図1は実験1~7のターゲット(左:Al、右:Au)での電子の入射エネルギーによる後方散乱係数(電子数)を示す。

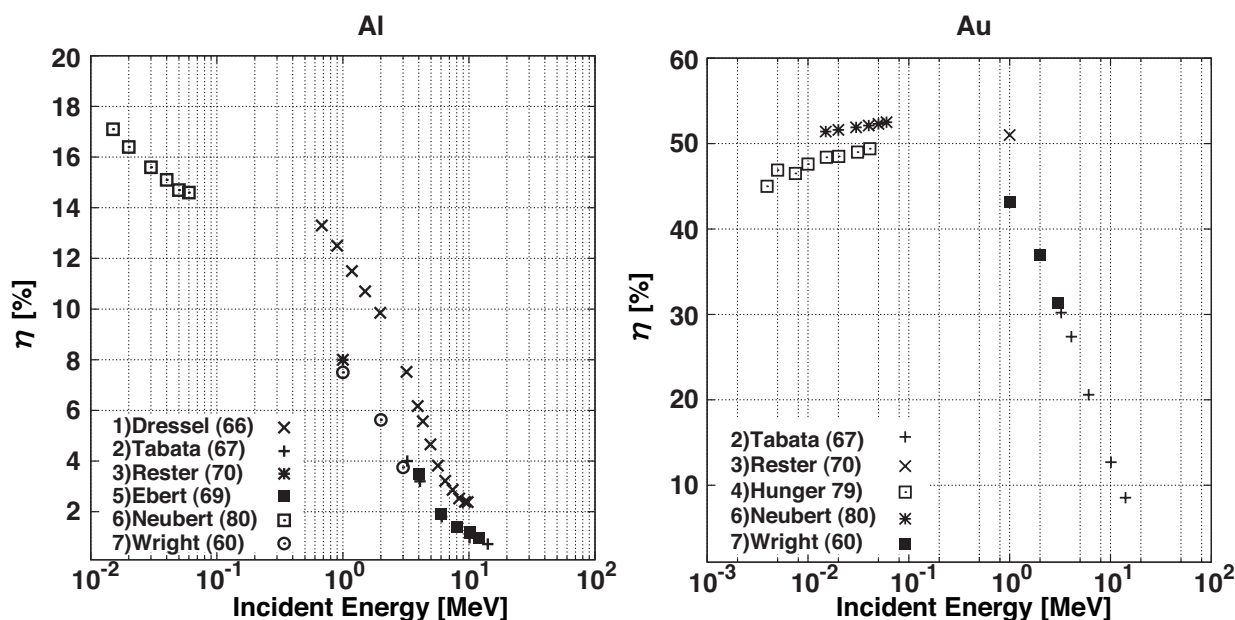


図 1: ターゲット (左:Al、右:Au) 半無限厚での電子の後方散乱係数 (電子数)

- [1] R. W. Dressel, Phys. Rev. **144**, 332 (1966).
- [2] T. Tabata, Phys. Rev. **162**, 336 (1967).
- [3] D. H. Rester and J. H. Derrickson, Nucl. Inst. and Meth. **261**, 86 (1970).
- [4] H. J. Hunger and L. Küchler, Phys. Stat. Sol. (a) **56**, K45 (1979).
- [5] P. J. Ebert, A. F. Lauzon, and E. M. Lent, Phys. Rev. **183**, 422 (1969).
- [6] G. Neubert and S. Rogaschewski, Phys. Stat. Sol. (a) **59**, 35 (1980).
- [7] K. A. Wright and J. G. Trump, J. Appl. Phys. **31**, 1483 (1960).

¹このとき電圧をかけた二つのターゲットを用い、片方にビームを照射させ、もう一方は2次電子や壁からの散乱を測定する。この二つの電流値の差を後方散乱の値としている。

Goldstein 級数によるモリエール角分布とその応用

中塚隆郎、 桶井一秀[†]

岡山商科大商、 川崎医大情報[†]

Mollière 角分布

$$f(\vartheta) = f^{(0)}(\vartheta) + B^{-1}f^{(1)}(\vartheta) + B^{-2}f^{(2)}(\vartheta) + \dots \quad (1)$$

の展開関数

$$f^{(n)}(\vartheta) = \frac{1}{n!} \int_0^\infty y dy J_0(\vartheta y) e^{-\frac{y^2}{4}} \left(\frac{y^2}{4} \ln \frac{y^2}{4} \right)^n \quad (2)$$

について、我々は定積分による一般解

$$f^{(n)}(\vartheta) = 2e^{-\vartheta^2} \frac{\Gamma^{(n)}(n+1)}{\Gamma(n+1)} \sum_{j=0}^n {}_n C_j \frac{(-\vartheta^2)^j}{j!} + 2e^{-\vartheta^2} \int_0^1 \left\{ \frac{(1-t)^n}{t^{n+1}} e^{\vartheta^2 t} \right\}^* \sum_{j=0}^{n-1} {}_n M_j \left(\ln \frac{t}{1-t} \right)^{n-1-j} dt \quad (3)$$

を得た、ここに

$${}_n M_j \equiv {}_n C_{j+1} (-)^j \sum_{k=0}^{[j/2]} {}_{j+1} C_{2k+1} \frac{\Gamma^{(j-2k)}(n+1)}{\Gamma(n+1)} (-\pi^2)^k \quad (4)$$

で、 $f^*(z)$ は関数 $f(z)$ の領域内の極の負べきの項を除いたものである。

$n = 2$ での定積分のこれ以上の分析に窮して Bethe は Max Goldstein の級数解を紹介した。我々はこの表現を一般の n の場合にも適用した。それによると解 (3) の定積分は、 $x \equiv \vartheta^2$ として

$$I_n = \sum_{k=0}^{\infty} {}_n C_k (-)^k \sum_{l=0}^{\infty} \frac{x^{n+l+1-k}}{(n+l+1-k)!} \sum_{j=0}^{n-1} Q_{lj} {}_n M_{n-1-j} = \sum_{l=0}^{\infty} G_{ln} \sum_{k=0}^n {}_n C_k \frac{(-)^k x^{n+l+1-k}}{(n+l+1-k)!} \quad (5)$$

のように表わされた、ここに

$$Q_{lj} \equiv \int_0^1 t^l \left(\ln \frac{t}{1-t} \right)^j dt, \quad \text{and} \quad G_{ln} \equiv \sum_{j=0}^{n-1} Q_{lj} {}_n M_{n-1-j}. \quad (6)$$

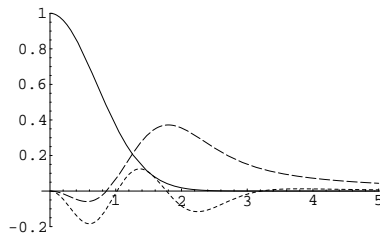
Goldstein 形式の Mollière 角分布では不定積分が容易に求まる;

$$F(\vartheta) \equiv \int_\vartheta^\infty f(\vartheta) \vartheta d\vartheta = \frac{1}{2} \int_x^\infty f(\vartheta) dx = F^{(0)}(\vartheta) + B^{-1}F^{(1)}(\vartheta) + B^{-2}F^{(2)}(\vartheta) + \dots \quad (7)$$

$n \geq 1$ では $F^{(n)}(\vartheta)$ は

$$F^{(n)}(\vartheta) = \frac{\Gamma^{(n)}(n+1)}{\Gamma(n+1)} e^{-x} \sum_{k=1}^n \frac{x^k}{k!} \sum_{j=k}^n {}_n C_j (-)^j + e^{-x} \sum_{l=0}^{\infty} G_{ln} \sum_{k=l+2}^{n+l+1} \frac{x^k}{k!} \sum_{j=0}^n {}_n C_j (-)^j. \quad (8)$$

$n = 0, 1, 2$ の $F^{(n)}(\vartheta)$ を下図に示す。これはニュートン法による効率的なサンプリングに役立つと思われる。



多重クーロン散乱による曲がり角と横拡がりの同時分布

桶井一秀[†]、中塚隆郎[‡]

[†] 川崎医科大学

[‡] 岡山商科大学

荷電粒子が物質中を通過するとき、クーロン散乱によってその進行方向が曲げられ、角度や横方向のずれの主な原因となる。多くのモンテカルロアプリケーションでは、すべてのクーロン散乱をそのままシミュレートすると、膨大な計算時間がかかるので、通常は多重散乱理論による近似的な取り扱いがなされる。

モリエール理論 [1, 2, 3] は、高エネルギー荷電粒子の多重クーロン散乱を扱う、最も正確なものの一つであり、これまでに多くのアプリケーションで利用されてきている [4, 5] が、解析的に得られているのは、曲がり角 θ_x のみの分布 $f(\theta_x)$ または横広がり l_x のみ分布 $f(l_x)$ だけであり、同時確率密度分布 $f(\theta_x, l_x)$ は得られていない。

近似の妥当性は、各アプリケーション毎に使用者によって検討されるべきものであり、より正確な解を知ることが重要である。しかし、例えば、多数のラザフォード散乱をサンプリングしたものと、多重散乱のサンプリングを比較するといったモンテカルロ同士の比較は、問題となるステップサイズが長い時、現実的ではない。

そこで、今回は高速フーリエ変換 (FFT) による $f(\theta_x, l_x)$ の数値解 [6] と、断面積分割法 [7] および EGS5 [8] による多重クーロン散乱サンプリングの同時分布を比較した。EGS5 シミュレーションでは、CHARD 変数を設定しない (default) 場合と、する場合でのサンプリング回数と分布の違いを調べた。EGS5 の default 設定で、サンプリング回数がほぼ 1 回になるような物質の厚みでシミュレーションした結果、default 設定の EGS5 のサンプリングでは、同時分布および横分布の誤差が大きくなったが、断面積分割法と、CHARD 変数を物質に厚みの値に設定した場合の EGS5 のサンプリングでは、FFT による同時分布とほぼ一致した。また、CHARD 変数を設定したときは、default の場合よりもサンプリング回数が多くなった。

参考文献

- [1] G. Molière, Z. Naturforsch. **2a**, 133 (1947).
- [2] G. Molière, Z. Naturforsch. **3a**, 78 (1948).
- [3] H.A. Bethe, Phys. Rev. **89**, 1256 (1953).
- [4] W.R. Nelson, D.W.O. Rogers and H. Hirayama, The EGS4 Code System, Stanford Linear Accelerator report SLAC-265 (1985).
- [5] GEANT Detector Description and Simulation Tool, CERN Program Library Long Writeup, PHYS325 (1993).
- [6] T. Nakatsuka and K. Okei, *Proc. 13th EGS User's Meeting in Japan*, KEK Proceedings 2006-4, 18 (2006).
- [7] K. Okei and T. Nakatsuka, *Proc. 3rd International Workshop on EGS*, KEK Proceedings 2005-7, 57 (2005).
- [8] H. Hirayama et al., The EGS5 Code System, SLAC-R-730 (2005) and KEK Report 2005-8 (2005).

Testing the K, L Shell Fluorescence Yield and Coster-Kronig Coefficients from EADL with EGS5 Monte Carlo System

I. Orion^{*}, Y. Namito, Y. Kiriwara and H. Hirayama

*KEK High Energy Accelerator Research Organization
Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-0801, Japan*

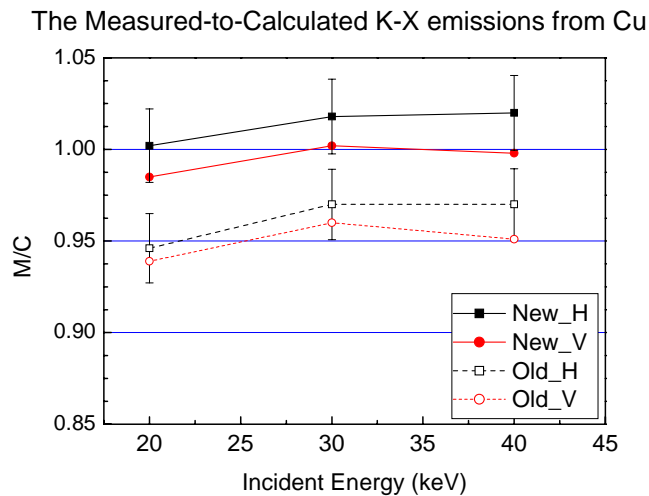
During the recent years, the low-energy photons transport, compared with measurements, became one of the most detailed processes in the EGS4 Monte Carlo code for X-rays simulations.

Several routines were added to the code in order to simulate low-energy photons. Tabulated data was required in addition to the new routines, such as the X-rays and the Auger electrons energies and their transmission rates. The latest data in use was adopted from *The Table of Isotopes eighth edition* (Firestone and Shirley, *The Table of Isotopes*, Wiley 1996). Since the fluorescence and Coster-Kronig yields from the Table of Isotopes were taken from several previous sources, it became reasonable to inspect these yields with a more updated database.

In this work, we report the results of the fluorescence yields comparisons performed between the data from The Table of Isotopes and the new data from the Livermore Evaluated Atomic Data Library – EADL (Perkins and Cullen 1994). From a wide view of all elements, it was found that the newly library showed more detailed yields, correspondent to the sub-shell structure versus the atomic number.

The EADL data, in general, showed several percents difference in comparison with the previously used data and in some points the difference was tremendous.

The updated database in EGS5 was tested and compared to previous simulation results for K-X-rays emission spectra of copper and iron targets. The total counts of each fluorescence emission was calculated using EGS5 and was compared with experimental measurements results (Namito, Hirayama, KEK proc. 2005-3 2005) for polarized photon beams with incident energies of 20, 30 and 40 keV. The use of EADL database for atomic fluorescence X-rays emission in the simulations, improved the matching between measured-to-calculated counts ratios.



^{*} Permanent address: Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva, Israel email: iorion@bgu.ac.il

PHITSとEGSの統合による汎用モンテカルロコードの開発

KEK 放射線科学 岩瀬広

近年国内外で建設もしくは予定されている加速器施設は高エネルギー化と大強度化が進んでおり、これはそのまま二次粒子の高エネルギー・大強度化をもたらし、遮へい設計をより困難なものとしている。この問題に対し近年ではモンテカルロコードで総合的に対処することが主流になりつつある。

日本を中心に開発が進められている粒子・重イオン輸送計算コード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) は評価済み核データと信頼のおけるモデルを利用することにより、重粒子・核子 (ハドロン) の物質内の輸送および核反応を精度良く再現し、理研の RI-ビームファクトリーや 原科研-KEK の J-PARC、ドイツ GSI の FAIR、米国 MSU の RIA などいずれも国家プロジェクトの物理研究施設設計において使用されてきた実績を持つ。

しかしながら PHITS は電磁カスケードを組み込んでおらず、遮へいや材料損傷などの分野からそのモデル導入が望まれていた。EGS5 は KEK、SLAC と UM で開発が進められている高精度の電磁カスケードコードで世界中で広く利用されている。この EGS と PHITS の統合計画という夢のコラボレーションが原科研と KEK の共同研究により実現した。

この統合ではさらに光核反応も導入する。これらによってこれまで別々のコードで計算されてきた、電子、電磁波、核子 (ハドロン) そして核のいかなる組み合わせの相互作用が一つのコードで連続して扱えるようになる。言い換えれば、これは核・ハドロン・電磁全カスケード計算コードであり、すなわちあらゆる放射線と物質との相互作用を一次粒子のみならずその二次、三次粒子以降の反応まですべて総合的に扱うものである。本研究はこの巨大統合コードを高い計算精度で完成させることを目標としており、物理、放射線工学、宇宙開発、材料、医学などの幅広い分野へ、これまでよりも深く貢献しうるものである。

この統合は物理モデルの充実のみならず、EGS5 に PHITS の入力 (体系定義、グラフィックなど) と出力 (多種タリー) 機能を提供するという意味も持つ。

本研究会ではこの統合計画の概要と統合の進行状況について発表する。

EGS5 コードへの電磁場の組み込み

鳥居建男（原子力機構）、杉田武志（科学システム研）

近年、雷活動に起因すると考えられる放射線レベルの上昇が日本の冬季雷や山岳雷、及び米国での夏季雷でも観測されている。また、雷雲上空でも TGF (Terrestrial Gamma-ray Flash) と呼ばれる放射線バーストが X・ γ 線観測衛星によって観測されている。

そこで、TGF 事象の解析を目的として、雷雲電場や地球磁場に対する電子の影響を解析するモジュール類の開発とサブルーチン ELECTR の変更を行い、EGS5 コードに組み込んだ。さらに、EGS5 では物質密度は計算領域毎の設定であるが、地球大気を模擬して密度を連続的に変化できるようにした。

本発表では、EGS5 コードでの電磁場影響の評価方法について報告するとともに、EGS5 コードによる雷雲電場内での電子・光子挙動、及び超高層領域での電子挙動の解析結果について報告する。

CGVIEW の改良

○杉田武志¹⁾、波戸芳仁²⁾、平山英夫²⁾、高村篤¹⁾

1)SSL、2)KEK

要旨

EGSコード⁽¹⁾⁽²⁾の使用を補助するために、粒子の軌跡とジオメトリーを表示するプログラムCGVIEW⁽³⁾が作成され、EGSコードとともに有効に使用されている。

今回は、EGSコードの時間情報処理機能に対応した粒子の軌跡表示と、重複領域や未定義領域の画面確認機能等を追加し、CGVIEWの高度化を図った。

改良点

- 1) 時間情報を追加した軌跡ファイルからの動画表示
EGSコードの時間情報処理機能に対応した粒子の軌跡動画表示を可能にした。
- 2) 印刷画面で「ファイルに出力」オプションの追加
印刷画面に「ファイルに出力」オプションを追加し、画面印刷の簡便化を図った。
- 3) エラー発生点の画面表示
重複領域や未定義領域が発生した点を画面表示し、視覚的判断の向上を図った。
- 4) 未定義領域の点を包含する形状の検索ルーティン
未定義領域が発生した点をどの領域に含めるべきかを判断する情報として、その点を包含する形状をリストアップする機能を追加した。

参考文献

- (1) W.R.Nelson, H.Hirayama and D.W.O.Rogers, SLAC-265, SLAC(1985)
- (2) H.Hirayama et al, THE EGS5 CODE SYSTEM, SLAC Report number: SLAC-R-730, KEK Report number: 2005-8, August 6, 2006
- (3) Y.Namito et al, EGS4 Particle Trajectory and Geometry Display Program cgview, KEK internal 2003-9, December 2003 R

治療用フィルムの線量分布測定における基礎的検討

捫垣智博¹⁾、青山裕一^{1),2)}、下郷智弘^{1),3)}、田伏勝義⁴⁾

1) 名古屋大学大学院 2) 名大附属病院
3) 浜松医大附属病院 4) 名古屋大学医学部保健学科

Abstract

フィルムを用いた線量分布測定において、線束中心とフィルムをずらして測定することが一般的に行われている。しかし、線束中心からどれだけずらすか、またずらしたことによりどのような影響があるかを知る必要がある。そのため、ずらしたことによる影響を実測と EGS とによって検証する。

VARIAN 製 LINAC の 10 MV X 線を用いて実測の分布を測定した。SSD は 100 cm、照射野は 10 cm × 10 cm とした。実験の配置として、ファントム表面からフィルムが上方にはみ出している場合と、ファントムの表面とフィルムの上縁を一致させた場合の 2 通りで行った。ファントムにはタフウォータファントムを用い、フィルムの両側にそれぞれ 15 cm ずつ配置した。フィルムの校正方法として、MU 値を 30、50、80、100、150、200、250、300、350 と変化させ、10 cm の深さにおいて、フィルムと電離箱両方で測定を行い、濃度値を線量に変換した。線束中心からフィルムをずらす距離は、0 mm (線束中心直下)、10 mm、20 mm とした。全てのフィルムは、DD システムを用いてデジタル化を行った。その後、線量校正を行い、PDD を取得した。フィルムにより得られた PDD は、電離箱により取得された PDD と比較した。同条件のジオメトリを EGS により再現し、同様のシミュレーションを行った。

Fig. 1 に、タフウォータファントムにおける電離箱の実測と、シミュレーションによる PDD の結果を示した。両者はよく一致しており、タフウォータファントムによるシミュレーションが可能であることを示している。

これを基に、実測とシミュレーションにおいてフィルムにより取得された PDD を比較検討した。

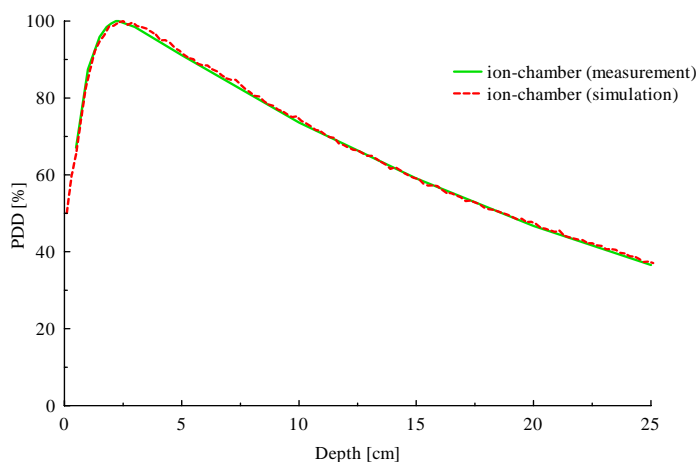


Fig. 1 タフウォータファントムにおける電離箱による実測とシミュレーションの比較

乳癌の術中電子線照射に使用する金属プレートの検討

大島隆嗣、田伏勝義、青山裕一¹⁾

名大・大学院、名大・附属病院¹⁾

Abstract

はじめに

現在、乳癌の治療において、腫瘍を切除した後の腫瘍床に対して術中電子線照射が行われることがある。この時、電子線の飛程領域内に大胸筋が含まれてしまうため、大胸筋に障害が発生することがある。過去の論文において、乳房と大胸筋の間にアクリルプレートを入れるなどにより大胸筋の線量を減らす試みが行われているが、プレートの厚さには限界があり、アクリルのみによって大胸筋の線量を減少させることは難しい。そこで、金属を用いて乳房を透過してきた電子線を遮蔽し、アクリルを金属の電子線入射側に置くことによって正常組織をアクリルに置き換え、金属から発生する後方散乱を吸収させることで大胸筋への線量を減少させることを考えた。本研究では、EGS5を用いて、電子線を遮蔽する金属の種類および後方散乱を吸収するアクリルの厚さを変化させ、その最適な組み合わせを探った。

方法

面積 $30 \times 30 \text{ cm}^2$ の水槽で、電子線のPDDが90%になる深さ(d_{R90})にプレートの上面がくるようにして電子線を照射した。プレート下方の水槽の深さは、プレート付近の線量や散乱線に影響のないよう、十分な深さをとった。金属は、アルミニウム、銅、鉛を使用し、アクリル(PMMA)は金属の電子線入射側に置いた。電子線のエネルギーは、6、12 MeVを使用した。金属厚は、6 MeVで3 mm、12 MeVで6 mmとし、各エネルギーにおいてPMMA厚を5 mmと10 mmとして計算した。また、後方散乱は金属表面から入射方向と反対に進む全ての粒子とした。

結果および考察

金属毎の散乱線の影響を評価するため、計算によって得られた各金属、エネルギーにおける、全吸収線量(Total Dose)から後方散乱による線量(Back Scatter Dose : BSD)を引いたものの最大値を100%として規格化し、それらにおける後方散乱線量の最大値、後方散乱線量が1%を下回る点までの金属後表面(入射側表面)からの距離(d_B)および前方への透過線量が1%を下回る点までの金属前表面からの距離(d_F)をグラフより求め、比較した。

BSDの最大値は、6、12 MeVのどちらでもアルミニウム、銅、鉛の順に大きくなり、 d_B の値も同様の順に大きくなっていった。 d_F の値は、アルミニウムにのみ認められた。PMMA厚に対する d_B の値は、6 MeVでは5 mm以内であったが、12 MeVでは5 mmを超えていた。しかし、PMMA 10 mmでは d_B の値は10 mmに達していなかった。

今回選択した金属の中で、透過線量がアルミニウムにのみ認められたため、アルミニウムの遮蔽能力は十分ではないと考えられる。したがって、銅と鉛が使用可能であると考えられる。一方、乳房と大胸筋の間に挿入するプレートとしては薄いほうが良いと考えられ、 d_B の値が大きく、より厚いPMMAを必要とする鉛は好ましくない。

したがって、乳癌の術中電子線照射に使用する金属としては銅が最も適しており、後方散乱を吸収するためのPMMAは、5 mmより厚く10 mmより薄いものが良いと考えられる。

コバルト 60 遠隔治療装置のシミュレーションを通しての EGS5 と GEANT4 の比較

柴田洋希、田伏勝義、捫垣智博

名古屋大学大学院

Abstract

近年、粒子線治療施設の増加に伴い、粒子線治療が一般に知られるようになってきており、今後、粒子線治療の件数も増えていくと考えられる。このような状況を受け、当研究室でも粒子線治療のモンテカルロシミュレーションに対応する必要があると考えた。

現在、粒子線を扱えるモンテカルロコードとして GEANT や PHITS といったコードが知られているが、当研究室では GEANT4 を導入中である。GEANT4 では、光子、電子、陽電子に加え、陽子線や炭素線、中性子線、可視光といった種々の粒子や各粒子に関する相互作用を利用することができる。またジオメトリは EGS の CG と似た手法で構築するため、複雑なジオメトリを組むのに適しているといえる。しかし、EGS に比べ、計算時間が長くなるという面ももっている。

GEANT4 の導入にあたって、EGS との構造、言語などの違いから、EGS5 や実測と、GEANT4 の結果を比較する必要があると考えた。比較のためのモデルとして、実測データの取りやすい当校のコバルト 60 遠隔治療装置のヘッドを選択し、これを再現して EGS5 と GEANT4 でシミュレーションを行った。シミュレーションでは、SSD 80 cm、照射野 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ として、ヘッドからタフウォータファントムに入射し、PDD、OCR、およびファントム表面でのスペクトルを取得している。計算が終了次第、EGS5 と GEANT4、および実測データ間での比較・検討を行う。

ボクセルマウスの吸収割合評価

日本原子力研究開発機構

○木名瀬 栄 齋藤 公明

放射性医薬品の創薬研究において、マウスなどのような実験動物には信頼性の高い線量評価が必要である。それは、実験動物の線量が、ヒトの線量を予測「実験動物の線量-反応関係からヒトの線量-反応関係へ外挿」する上で、基本的な量になるからである。従前、実験動物の線量評価は、回転楕円体などで表現された簡易幾何形状動物ファントムと点減衰核法などによる簡易計算の組み合わせにより、経験的に行われてきた。しかし、近年、コンピュータ技術などの発達により、高分解能画像データをもとに構築したボクセルファントムやボクセル幾何形状を評価対象にする計算コードが開発されたため、ヒトのみならずマウスのような小動物についての信頼性の高い線量評価が可能になった。こうした状況を踏まえ、本研究では、マイクロ CT 画像データを利用して構築されたボクセルマウスについて、電磁カスケードコードである EGS4 により、光子および電子に対する、マウスおよびヒトの肝臓、腎臓および脾臓の自己吸収割合 (self-AFs) を評価した。計算には、 $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ の高分解能ボクセルからなるマウスファントム (Digimouse) と日本人成人男女ファントム (Otoko, Onago) を用いた。線源は、光子、電子ともに、 10keV - 4MeV のエネルギー範囲で単色とし、臓器内均一分布を仮定した。本研究の結果、非透過性である低エネルギー光子、電子の場合、腎臓のような臓器の吸収割合は、ヒトとマウス間で大きな相違がないことを確認した。しかし、光子、電子ともに、そのエネルギーが大きくなるにしたがい、ヒト、マウスの臓器吸収割合は、臓器の大きさなどに影響され、固有の値になることが分かった。

EGS5 による媒質の異なる微小領域内の電子・光子輸送計算条件設定の一試行

佐藤 裕一¹、山林 尚道¹、中村 尚司^{1, 2} (¹千代田テクノロ 大洗研究所、²東北大サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター)

【背景・目的】 昨年の第 13 回 EGS 研究会において、「マウスを模擬したファントム内⁹⁰Y β線の吸収線量の計算による検証」の演題で発表し、概ね、小型ガラス線量計で測定した小型物理ファントム内線量分布の傾向を EGS5 の計算値により概ね推定が可能とわかった。しかし、実測値（ガラス線量計読取值）に対するその計算値（β線寄与分・制動放射線寄与分合計吸収線量）の比では、1.04~4.86 倍と大きくばらついていたため、その相違の原因の追求が課題として残った。

ところで、EGS5 では、電子輸送の新しい物理モデルとして、エネルギー損失ステップ間のエネルギー損失を、乱数を用いてステップ内の一ヶ所で集中的に行う多重散乱ランダムヒンジモデルが採用されている。この多重散乱のステップサイズのコントロールに関連するユーザーコード内のパラメータは、Chard (Characteristic dimension) である。

本研究に用いた小型物理ファントム内の領域は、媒質の異なる微小領域で構成されているため、粒子輸送等に関わるパラメータの設定が重要になってくると考えられた。そこで、今回、ユーザーコード内のパラメータ Chard の条件設定について、推奨された方法にて設定した chard 値（第 13 回 EGS 研究会発表時に実測値と比較したときに用いた chard 値）による吸収線量分布と、Chard の値を種々変化させたときのその線量分布を比較し、計算条件の設定値がその相違の原因になるのか、その検討を行った。

【方法】 (1) シミュレーション用小型物理ファントムのジオメトリは、昨年発表した値を用いた（物理ファントム (Tough-Water; 30mm x 30mm x 42mm) の中心部に、⁹⁰YCl₃ 溶液（照射開始時放射エネルギー；6.6 MBq、溶液量 267.7mg）を封入した同材質のカプセルを線源として埋め込み、小型ガラス線量計 (Dose Ace) をその線源周囲 24 ヲ所に埋め込んでその測定値によりファントム内線量分布を把握)。(2) EGS5 用ユーザーコードは、β線直接からの電子によるエネルギー吸収と制動放射線発生後の光子の振る舞いによるエネルギー吸収とを識別し、吸収線量を算出できるものを用いた。(3) ユーザーコード内の計算条件設定は、特に、媒質ごとに設定が要求される Characteristic dimension に着目し、その値を変化させた。

【結果】 媒質ごとに割り当てられる Characteristic dimension について、ガラス線量計のガラス素材の領域、ファントム素材の領域、その他の領域も含め、Characteristic dimension の最適な値として推奨されている値の前後の値について、吸収線量の分布を求めた。

その結果、当該物質で構成する領域に対応する大きさの最短距離を chard の値とするという推奨されている方法について、ほぼ妥当な結果が得られ、実測による吸収線量分布と計算による吸収線量分布の相違の遠因にはなっていないのではないかと考えられた。現在、更に検討中である。

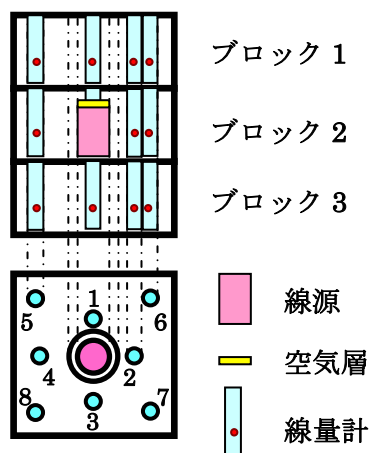


図 1. ファントムブロックと線量計配置

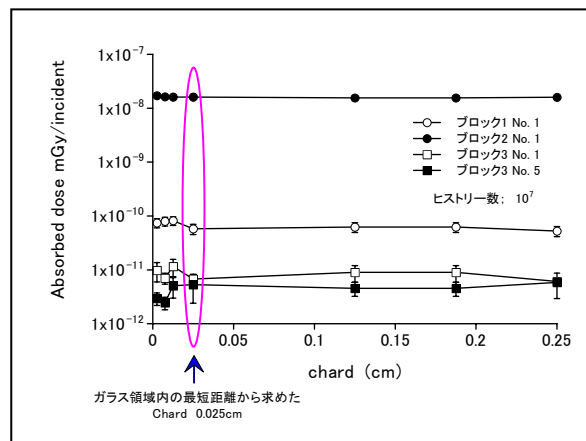


図 2. ガラス領域における Characteristic dimension (Chard) と吸収線量

X線標準場における外部散乱線の影響

産総研：黒澤忠弘 松本 健 森下雄一郎 齋藤則生

1. 緒言 産総研では、X線空気カーマを自由空気電離箱を用いて絶対測定している。使用するX線場は、その実効エネルギーを変化させるため様々な材質・厚さのフィルターを用い、また線量率や照射野を変えるために校正位置を 1.2m から 5m まで移動可能に、またコリメータ径も変更することができる。しかし以前からの経験で、校正位置やコリメータサイズを変えると校正定数が変化する現象が確認されていた。これらの変化の影響が外部散乱、主にフィルターからの散乱線の影響ではないかと考え、校正定数の位置依存、コリメータ依存の測定を行い、これらの影響を補正する新たな補正係数の検討を行った。

2. 測定 Exradin A6 チェンバーを用いて、実効エネルギーが 175keV, 105keV, 52.5keV、X線管-検出器間距離が 2.0, 2.5, 3.0 m、またコリメータのサイズを大中小と3つ変えた場合の校正定数の測定を行った。結果の一部を図1に示す。自由空気電離箱は、その実効体積を決めるために入射X線を絞る入射口がある。そのため被校正器に比べ外部で散乱された光子が入射しづらい構造となっている。一方被校正器は、特にコリメートせずに測定しているため、外部散乱光子も測定しており、その違いにより校正定数が変化してしまうと考えられる。

3. 新しい補正係数の検討 測定によって観察された違いがフィルターによる散乱線が主であると考え、散乱線成分を EGS5 によって評価し、補正係数の検討を行った。その結果、補正することによって校正定数の変化が小さくなり正しい方向に補正されることが分かった。

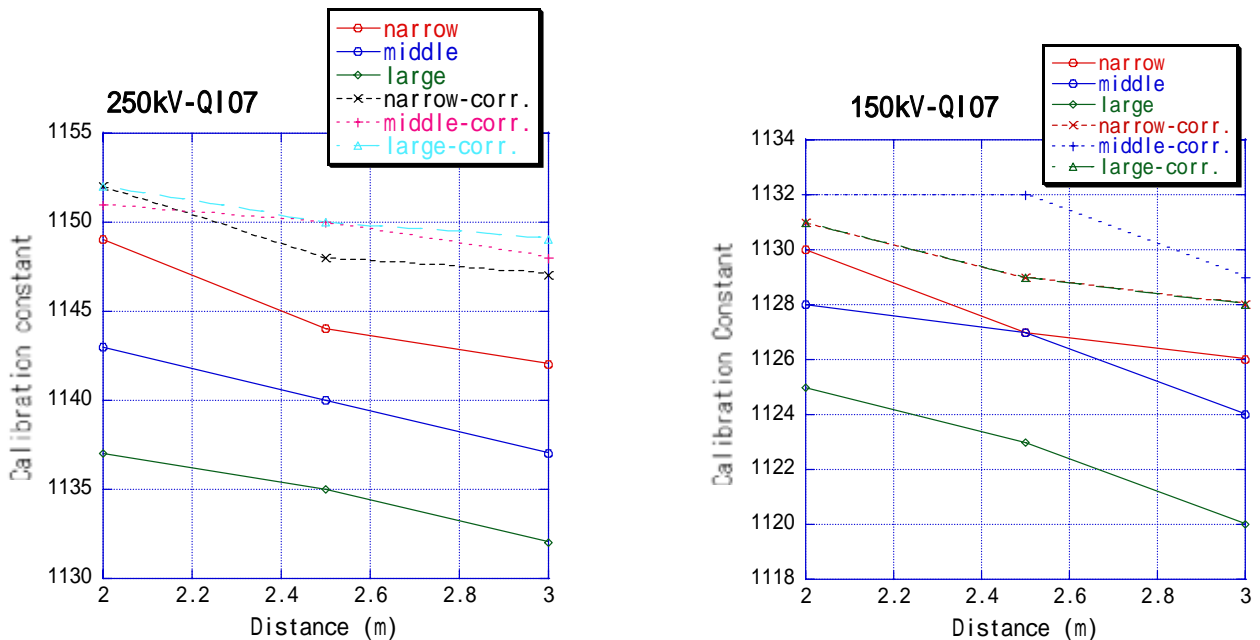


図1 管電圧 250kV (左) 及び 150kV における各位置、各コリメータサイズにおける A6 チェンバーの校正定数と EGS5 によって評価した新しい補正係数によって補正した後の校正定数

Flat Panel Detector のエネルギー感度特性 —直接変換方式と間接変換方式の比較—

越田吉郎、高田光雄、鈴木陽、能登公也
金沢大学大学院医学系研究科保健学専攻

【目的】

近年、放射線医学の発展に伴い、長年使われていたアナログ方式をデジタル化への移行が進み、フィルムレス化への傾向が強い。しかし、こうした状況の中でデジタル機器の Computed Radiography や Flat Panel Detector(FPD)研究はまだ不十分であり、一般撮影の撮影条件は、以前のアナログ式の条件を用いていることが多いのが現状であり、デジタル化に対応した条件を確立できれば有効性が向上する。そこで、EGS 4 コードを用い、FPD の直接変換法と間接変換法のエネルギー感度特性を検討し、エネルギーと線量の関係を調べた。

【使用機器】

FPD 装置としては、直接変換方式の 島津製作所製 (RADIOTEX Safire)、間接変換方式として SIEMENS 社製 (AXIOM AristosMX/NX) を用いた。線量計の測定には、東洋メディック株式会社製 RAMTEC-1000D を使用した。EGS コードは、高エネルギー加速器研究機構(KEK)から提供されている EGS4 コードを用いた。IEC61267 で公表された Al 付加後の連続エネルギー50,70,90,120 kV を対象線源とした。その線源を表 1 に示す。

Table 1

RADIATION QUALITY NO.	管電圧[kV]	半価層[mm]	付加の Al[mm]
RQA 3	50	4	10
RQA 5	70	7.1	21
RQA 7	90	9.1	30
RQA 9	110	11.5	40

IEC 61267 : 1994

【方法】

1) シミュレーション

表 1 で示した線質の X 線により、直接変換方式においては検出器 α -Se、間接変換方式については検出器 CsI について、それぞれのエネルギー特性を調べた。シミュレーションの照射条件は、ターゲット角度 : 12° 、総ろ過 : 2.5 mmAl 当量、ターゲットから直接変換法、間接変換法のそれぞれの検出器の距離を 1m、標準偏差を 10%以下にするため光子の数を 50 万個とした。検出器と同じ位置における空気カーマと、検出器 (α -Se と CsI) の吸収線量の比を感度とした。吸収線量としての比較を行ったが、直接変換法においては α -Se のイオン収集率を考慮しておらず、間接変換法においては CsI 発光効率および α -Si 蛍光収率を考慮していない。

2) 計測

タイムスケール法による入出力特性を測定した。測定は焦点-検出器表面間距離150cmで行い、線量計は検出器の手前 50cm に配置し、検出器の入射線量は距離の逆二乗則から計算で求めた。最も入出力特性の傾きが大きい管電圧の入出力特性の傾きを基準にして、そのほかの管電圧での入出力特性の傾きの比を求めた。

【結果】

感度が良かったのは、直接変換法においては 70~100 kV の管電圧、間接変換法においては 80~120 kV の管電圧であった。直接変換法、間接変換法どちらにしても、70 kV 以下では急激に感度が落ちた。シミュレーションと実測との比較では、数%以内であり、大きい誤差でも 13.91% であった。シミュレーションの精度は良いといえる。今後、骨や肺の透過後のスペクトルを用いることにより、骨条件、肺野条件での感度の最適エネルギーが推測される。以上は感度としての結果であり、画質上については MTF や WS,DQE の結果を求める必要がある。

X線 CTにおけるファントム中のエネルギー変化についての検討

笹田 裕也・小山 修司*

名古屋大学大学院医学系研究科

* 名古屋大学医学部保健学科

【目的】

X線 CTの技術発展により、体軸方向のビーム幅が広がっている。この場合、CT用電離箱では検出長が100mmと十分でないため、比較的エネルギー依存性の大きいTLDや半導体検出器などのポイント型線量計での測定が必要であると考えられる。本研究の目的は、ファントム中各点におけるエネルギースペクトルを分析し、これらの検出器における正確な補正について検討することである。

【方法】

モンテカルロ法の一つであるEGS4の低エネルギー拡張版(LSCAT)を用いて計算を行った。計算に用いた体系は、直径32cm、体軸方向に長さ40cmのPMMA製の円筒型ファントム、JISの胸腹部ファントムに則った体系とし、円筒型ファントムについては材質を水とした場合についても、ファントム内各点のエネルギースペクトルの分析を行った。ここで、線源-回転中心間の距離を60cmで、線源を10度ごとに回転させてシミュレーションを行った。ビームは体軸方向に10mmとし、入射スペクトルについては管電圧120kVで、Birchの式により発生させたものを利用した。光子に対するカットオフエネルギーは5keVとした。

【結果】

PMMA製の円筒型ファントムについて検討した結果、入射X線スペクトルに対し、回転中心部でのX線スペクトルは低エネルギーと高エネルギーの光子数がわずかに低下し、全体として実効エネルギーは低くなった。これにより比較的エネルギー依存性の大きいTLD素子の補正を入射X線の線質で行う場合、補正後の吸収線量値が Mg_2SiO_4 や $CaSO_4$ で数%過小評価される可能性があることがわかった。また材質を水とした場合の円筒型ファントムでの中心の実効エネルギーについても同様の傾向が見られた。

診断領域X線における後方散乱係数算出に適する検出器厚の検討

阪井洋平 小山修司*

名古屋大学大学院医学系研究科 *名古屋大学医学部保健学科

Abstract

医療診断において被曝低減を考えていく上で被曝線量を正確に評価することが必要である。被曝線量評価の際に用いられる皮膚線量は入射面での皮膚吸収線量を測定することで求める方法が推奨されている。そのとき、皮膚面での照射野と入射X線の線質に対応する後方散乱係数 (Back Scatter Factor : BSF) が必要である。

BSF は理論的に無限小の点における評価が必要であるが、実際に無限小の点で求めることは不可能であり、EGS4 において計算する上で検出器のサイズをどのように取り、データを蓄積するかということが問題となる。その厚みは計算の精度と EGS4 を用いる上での計算時間に大きく関与すると考えられる。ここでは後方散乱係数を算出するために検出器の厚みと BSF の関係を EGS4 を用いることによって求め、BSF 算出の基礎とする。

50cm × 50cm × 50cm の水ファントムに SSD100cm の位置から、任意の照射野とエネルギーを持つ X 線を EGS4 上でシミュレートした。ファントム入射面に 1mm × 1mm の面積を持つ正方形の検出器を配置し、その厚みを 0.5mm、1mm、3mm、5mm、10mm と変化させた。そしてその位置での 1 次線と散乱線のエネルギーの沈着を求め、1 次線のみ値と 1 次線と散乱線の和の値との比をとり、BSF を求めた。またその値から、外挿することにより無限小の点である厚み 0mm の値を求めた。

0.5mm、1mm、3mm、5mm、10mm と検出器の厚みが大きくなるにつれて、BSF の値は大きくなる傾向となった。これは検出器が厚みをもつことにより、側方散乱の影響が強くなるものと考えられる。BSF の算出は前述したように無限小の点で行われることが理想であり、幾何学的に側方散乱の影響がより大きく出るとは問題となる。よってこの 0.5mm、1mm、3mm、5mm、10mm の検出器の厚みから得られた BSF のデータより外挿し厚み 0mm のデータを求め、既存の BSF のデータと比較した。

結論として計算時間、数値的、幾何学的な問題を考慮した上で検出器厚を選択することが必要であり、今回は 1mm の検出器厚を用いたほうが良いという結果になった。

比例計数管による単色化放射光測定と EGS5 シミュレーションとの比較

桐原 陽一

総合研究大学院大学 加速器科学研究科

1. 背景

X線のエネルギースペクトルの測定には、エネルギー分解能が優れている Ge 検出器がよく用いられる。しかし、Ge 検出器には X 線が入射しても検出できない領域(不感層 $0.3\mu\text{m}$ 程度)が存在するため、数 keV 以下のエネルギー測定では検出効率が低下する。また、数 keV 以下では不感層厚さの誤差の影響を受けやすくなるため、シミュレーションにおける Ge 検出器の効率も、数%以上の誤差を持ちうる。

一方、比例計数管も X 線の測定に用いられる。比例計数管は Ge 検出器に比べてエネルギー分解能は低いが、構造上不感層が存在しないため、数 keV 程度の低エネルギーでも効率が低下することなく、シミュレーションで見積もることができる。この理由から、比例計数管での低エネルギーに単色化された放射光を測定し、Ge 検出器の効率を求めることで不感層の厚さの検討する。本研究では低エネルギーに単色化された比例計数管の EGS5 シミュレーションを行った。

2. 実験および解析

2007年5月に高エネルギー加速器研究機構の放射光施設(KEK-PF) BL14Cにて、比例計数管(LND, Inc. 型番:4244 Xeガス含有)を用いて測定を行った。測定に用いた単色化放射光のエネルギーは10 keV、20 keV、30 keV、40 keVである。まず、これらの入射光子数を自由電離箱で測定した。その後ターゲット(C、Cu、Ti)に照射し、90度方向に散乱されたエネルギースペクトルを測定した(図1参照)。本研究では、比例計数管での実測値と EGSでのシミュレーション結果との比較検討を行う。図2に入射エネルギー40 keVのときの実測値(M)と計算値(C)の比較を示す。このときのC/Mは0.692(0-45 keV)、0.713(30-45 keV)であった。

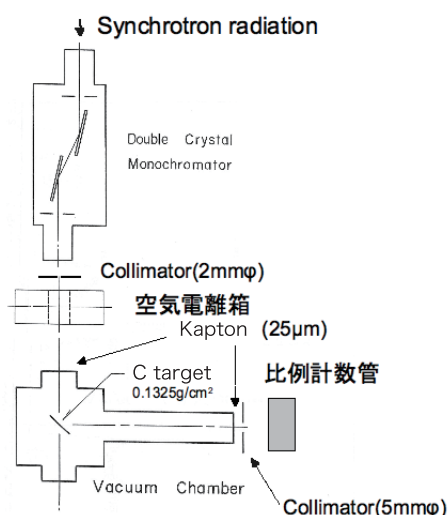


図 1: 単色化放射光測定の実験体系

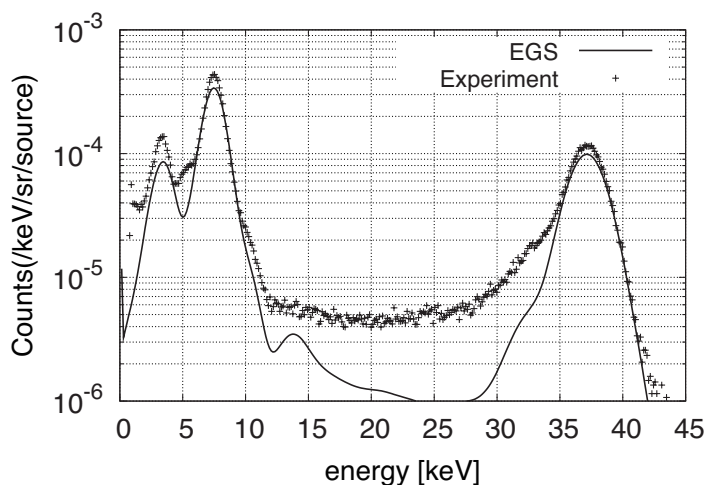


図 2: 40keV の単色光がカーボントーゲットに入射したときの 90 度散乱スペクトル

レーザーコンプトン γ 線の生成とシンチレータの光出力応答

今村稔、福田博明、古場裕介、海堀岳史^A、豊川弘之^A、魚住裕介

九大工、産総研^A

近年レーザーコンプトン散乱を利用した γ 線が、その単色性や高偏極性及びエネルギー可変性の観点から注目を集めている。レーザーコンプトン γ 線源は産総研や SPring-8 等で実用化されており、現在でも世界数カ国で新しい計画が進められ、光核反応データ測定や γ 線 CT 等での利用が期待されている。

本研究では、このレーザーコンプトン γ 線を用いてこれまで測定されなかったエネルギー領域に対するシンチレータの光出力応答の測定を目的とする。使用したシンチレータは NaI(Tl)、GSO(Ce)、CsI(Tl)、LYSO(Ce)の4種である。

実験は産総研電子蓄積リング TERAS にて行った。レーザーには Nd:YVO₄(基本波長 1064 nm)をパルスモード(繰り返し周波数 40 kHz)で用いた。電子のエネルギーとしては 575 MeV, 760 MeV を用い、レーザーは 575 MeV に対しては基本波(1064 nm)のみ、760 MeV に対しては第二高調波(532 nm), 第三高調波(355 nm)も用い、5-30 MeV の γ 線を発生させ、各シンチレータでエネルギースペクトルを測定した。

得られたエネルギースペクトルではピークがみられるが、検出器中では様々な反応が起こっているため、ピークのエネルギーを決定することができない。そこで EGS5 を用いてシミュレーションを行い、実験データと比較することによりピーク位置のエネルギーを決定することにした。

その結果、エネルギーと光出力の関係はどのシンチレータにおいても線形性を示すということがわかった。

モンテカルロシミュレーションによるポリマーゲル線量計の基礎特性の評価

羽根田清文¹⁾、笛吹修治¹⁾、富永孝宏¹⁾、林慎一郎¹⁾、吉岡宗徳¹⁾

奥戸博貴²⁾、常井祐輔²⁾

1) 広島国際大学 2) 広島国際大学大学院

【目的】

ポリマーゲル線量計(ゲル線量計)は、有機モノマーのラジカル重合反応を利用した3次元測定が可能な線量計である。また、ゲル線量計として用いるポリマーゲルは、水等価物質でもあるため線量計としてのみでなく同時に水等価ファントムとして使用することも可能である。

本研究は、ゲル線量計の有用性および新規開発のための基礎データを取得することを目的とし、モンテカルロシミュレーションによるゲル線量計の評価およびゲル線量計を作成し実測との比較を行った。

【方法】

本研究では、ゲル化剤としてゼラチン、有機モノマーとしてメタクリル酸(MAA)、酸素除去剤としてTetrakis(Hydroxymethyl) Phosphonium Chloride (THPC)を用いたゲル(MAA-THPC gel 通称MAGAT)線量計を作成し比較・評価した。

実験に使用したビームパラメータは、照射エネルギーを6 MV-X線および12 MeV-E線とし、焦点媒体表面間距離(SSD) = 98.5 cm、照射野面積 = 10 × 10 cm²とした。シミュレーションは、実測を再現するように設定し、X線のスペクトルは、Schiffの式を用いて作成したX線スペクトルをもとに実験装置から実測により取得した水のPDDと誤差1%未満の近似となるよう修正したX線スペクトル(平均エネルギー: 1.715 MeV)を用いた。ジオメトリはFig. 1に示すように、専用容器(アクリル)にゲルを入れこの専用容器をさらに水槽にいれた構造とした。計算領域は、1.0 × 1.0 × 0.5 cm³の体積を1測定点とした。

【結果および考察】

ポリマーゲル線量計のPDDと水のPDD

との相関は非常に高く、相関値が0.999以上となった。今回のシミュレーションによる統計不確実性を約1%として計算したことを考慮すると、今回シミュレーションから求めたPDDは、水との差がほとんど生じていないと考えられポリマーゲル線量計を使用することにより従来の線量計では測定が困難な3次元線量の測定が容易に可能と考えられる。



図1 ポリマーゲル線量計
(6MV-X線照射後)

EGS4 を用いた馬の核医学検査における人間の外部被曝線量評価（その 2）

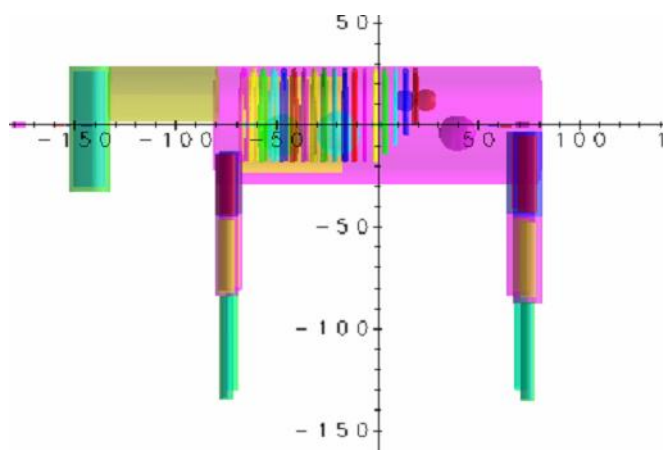
小林 枝里子^{*1}、大野 晃治^{*1}、西岡 真希^{*1}、夏堀 雅宏^{*2}、
波戸 芳仁^{*3}、平山 英夫^{*3}、柿崎 竹彦^{*1}、和田 成一^{*1}、伊藤 伸彦^{*1}
北里大学獣医学部^{*1}、テネシー大学獣医学部^{*2}、高エネルギー加速器研究機構^{*3}

1.Introduction

^{99m}Tc を用いた馬の骨シンチレーション検査は、欧米をはじめアジアの一部でも広く行われている。この検査法は馬の運動器疾患の診断法として非常に有用であり、日本では未だ行われていないが、今後は法整備に伴い実施されるようになると思われる。そこで獣医診療における RI の安全利用の基礎データとするため、馬の核医学検査時の人間の外部被曝線量を EGS4 を用いてシミュレーション計算し、米国テネシー大学で ^{99m}Tc-MDP と ^{99m}Tc-HDP の 2 種類の放射性薬剤を投与した馬の実測値と比較検討を行った。

2.Materials and Methods

馬の全身（体重 468 kg）の数学ファントムを作成した。馬の体重は成長を終えたサラブレッドを想定し、その平均値を参考にした。各臓器の大きさは体重と文献値から算出し、組織の元素組成や密度は人間のデータを用いた。また馬ファントムに組み込んだ臓器は、心臓、肺、肝臓、腎臓、膀胱、筋肉（水等価物質）、骨の 7 種類である。検出領域は空気とし、そこを通過する光子のエネルギーとそのフルエンスから、換算係数を用いて実効線量を求めた。^{99m}Tc の投与量は実際に投与されるより多めに丸めた 5.55 GBq（150 mCi）とした。続いて EGS4 を用いて、投与直後からの馬の周囲の空間線量率を、馬の頭部、胸部、腹部（膀胱付近）の各 0 m、1 m、2 m について求めた。



^{99m}Tc の馬の体内分布は投与後の時間経過によって異なるため、各臓器における体内分布のパターンを大きく 3 種類に分け、それぞれの時間を、投与直後の心肺への分布時間帯（0 分～15 分）、全身の臓器への分布時間帯（15 分～2 時間）、骨等への分布時間帯（2 時間後以降）とした。さらに、排尿の有無による空間線量率の違いについても検討した。このようにして EGS4 で求めた空間線量率と実測値とを比較した。また、馬を退院させた後、放射能がなくなるまでの馬の体表面と 1 m の位置での積算被曝線量の計算を行った。

3.Results and Discussion

EGS4 で求めた空間線量率とテネシー大学での実測値は、個体差はあるもののどれも近い値となった。投与 3 時間までは実測値のばらつきが大きくなったが、これは投与後の各個体の体内分布に個体差があるためだと考えられる。しかし、どの個体においても、投与してからしばらくは胸部の空間線量率が最も高く、しだいに全体的に均一な線量率となっていくことが確認された。つまり獣医師や厩務員は、投与直後には胸部の線量が高いことに留意して作業を行う必要がある。

投与後、半日以上経過した時間帯については、シミュレーション計算値と実測値はほぼ同じ値となった。投与 6 時間以降には、馬は少なくとも一度排尿していると考えられるが、すべての実測値は排尿ありの計算値に近くなった。

空間線量率のシミュレーションの結果、投与 24 時間後における馬の体表面の最大線量率は約 8 μ Sv/h、1 m 離れると 1 μ Sv/h となった。投与 24 時間後に退院させ、それ以降 ^{99m}Tc 原子核が 1 以下となるまでの間、馬の体表面に密着し続けたと仮定した場合の最大の被曝線量は 52 μ Sv で、ICRP 勧告の一般公衆の年線量限度 1 mSv/y の約 1/20 となった。さらに、1 m 離れると被曝線量はその 1/8 程度にまで低下することがわかった。これらのことから、管理区域からの退避を放射性薬剤投与後 24 時間としても、馬からの周囲への被曝の影響はほとんどないと考えられる。

獣医核医学検査におけるイヌ体外の線量分布の評価

西岡 真希^{*1}、大野 晃治^{*1}、小林 枝里子^{*1}、柴田 篤志^{*1}、波戸 芳仁^{*2}、
平山 英夫^{*2}、佐野 忠士^{*1}、柿崎 竹彦^{*1}、和田 成一^{*1}、伊藤 伸彦^{*1}
北里大学獣医学部^{*1}、高エネルギー加速器研究機構^{*2}

1. 背景・目的

現在、日本の獣医療において核医学検査が行われようとしている。核医学検査において放射性医薬品を投与したイヌから受ける人間の外部被曝線量の評価に加え、将来はイヌ自身の内部被曝も検討する必要があると思われる。そのためイヌの体内被曝を検討することを視野に入れ、解剖学的に実際のイヌに近い数学ファントムを作成することに重点を置き、EGS4 によるシミュレーション計算を行い、核医学検査を実施する時のイヌの体外空間線量率を求めた。

2. 材料・方法

イヌの平均的な体重や体型を求めるためビーグル成犬 5 頭の体格測定を行った。内部臓器や骨格に関しては、形状や大きさを解剖学書や CT データから求めた。これにより体重約 11.6kg のイヌの数学ファントムを作成した。イヌの数学ファントムをコンピューター上で幾何学形状を組み合わせることによりジオメトリデータを作成した。各体型・臓器毎に円柱、球形、トーラス（ドーナツ型）の複数の形状から、より現実のイヌに近い体積になるように設定した。これにより、実測値に近い評価を得ることを期待した。今回は、より実体に近づけるために主要臓器（心臓、肝臓、腎臓、膀胱、肺）、骨格に加え、軟部組織、脂肪組織、筋肉組織の領域を設定した。各臓器の元素組成および密度は人間の値を使用した。

本研究では、獣医核医学診断で利用が多くなると予想される放射性薬剤 (^{99m}Tc) による線量を計算した。^{99m}Tc 投与量は、アメリカで実際に骨シンチグラフィーで使用される規定投与量から 300 MBq とした。今回、RI の分布法として、RI は臓器、組織重量に比例して分布する全身均等分布法と、^{99m}Tc -MDP をラットに投与して、投与 2 時間以降に得られた体内分布データからイヌの組織重量や体積をもとに算出した、体内分布考慮法の二通りを仮定し、空間線量率の比較を行った。さらに、排尿の有無による線量率の評価も行った。

検出領域は空気とし、線量計は実際に核医学検査に関わる人間と患犬との距離を予想し、頭部、心臓体幹中心、肝臓、膀胱部位付近にイヌ体表面から 0cm、30cm、100cm の位置に計 15 個設置した。

今回、EGS4 を用いて数学ファントム中に投与した ^{99m}Tc が体内に配分し、検出器領域に入射する光子のエネルギーとそのフルエンスを算出し、更に求めた光子 1 個当たりの実効線量 (Sv) と投与量から空間線量を計算した。

3. 結果・考察

RI 投与 2 時間後の空間線量率を、イヌからの距離や線量計の位置による差異から比較した。特に注目したいのは、体表面から 0cm の膀胱部位での空間線量率の分布の結果で、全身均等分布では、各部位からの線量率に明らかな差は認められなかったが、膀胱に尿をいれた状態で体内分布を考慮した場合、膀胱部位では全身均等分布と比較して約 2.5 倍、空間線量率が増加した。それに比べて、尿を排出した状態の体内分布考慮の線量率は、全身均等分布の約 2 分の 1 であった。

今回、本研究において、距離や線量計の設定部位を変えたとしても、全身均等分布を仮定した場合と、体内分布を考慮した場合では、結果に大きく差が生じることがわかった。さらに、膀胱に尿が存在する場合は、特にイヌから距離が近い位置では、空間線量率に大きな差が生じた。以上の結果より、RI の体内動態、および体外排泄の考慮は、現実的な評価のために重要であると思われる。

今後は、今回の計算結果と実測値を比較し、EGS の有用性を示す必要がある。また、本研究ではラットの体内分布データを用いたが、今後はイヌでの放射性薬剤の体内分布データをもってシミュレーションを行いたい。さらに、放射性感受性の高い骨髄や生殖器を加えたイヌ型数学ファントムを作成することにより、今後はイヌの体内被曝を求め、発ガンリスク評価なども検討したい。