



モンテカルロシミュレーションによる 全身カウンタの計数効率評価

栗原 治 高崎 浩司 百瀬 琢磨

東海事業所 放射線安全部

Evaluation of Counting Efficiencies for Whole-Body Counter by Monte-Carlo Simulation

Osamu KURIHARA Koji TAKASAKI Takumaro MOMOSE

Radiation Protection Division, Tokai Works

物理ファントムに代わる全身カウンタの校正手法として、モンテカルロシミュレーションが有効であることが幾つかの研究で示されている。本研究では、核燃料サイクル開発機構東海事業所（以下、サイクル機構東海）で開発した可動式Ge半導体検出器を有する全身カウンタに対して、汎用輸送コードであるA General Monte Carlo N-P Transport Code（以下、MCNP）を用いたモンテカルロシミュレーションの適用を試みた。物理ファントムの計算を行うにあたり、Ge結晶内部の有感領域を適切にモデリングするため、電極近傍に不感層を仮定し、実験的にこれを評価した。このモデリングに基づき、物理ファントムに対する計算を行った結果、モンテカルロシミュレーションにより得られた計数効率は実験値と良く一致し、その妥当性が示された。加えて、年齢による体格の変化を模擬したMIRD数学ファントムに対するシミュレーションを行い、計算効率の体格依存性を明らかにした。

As an alternative method to a physical phantom for calibration of a whole-body counter, some studies have showed that the Monte-Carlo simulation would be applicable for use. In this study the Monte-Carlo simulation was attempted for a whole body counter with movable Ge semiconductor detectors, which was originally developed at the Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC) Tokai Works. A general Monte-Carlo transport code, MCNP was used in this study. In prior to simulation for the phantom, the thicknesses of the dead layers which are assumed to exist at the electrodes inside the Ge crystal, were evaluated experimentally in order to construct proper modeling for the sensitive regions of the detectors. As a result of the simulation for the physical phantom, the calculated counting efficiencies were fairly consistent with the measured values and the validity of the simulation was confirmed. In addition, a simulation using the MIRD mathematical phantoms which simulate subjects with different ages was also performed in this study and the result clarified that the counting efficiency for the phantom was considerably dependent on its size.

キーワード

全身カウンタ，モンテカルロシミュレーション，Ge半導体検出器，計数効率，MCNP，ファントム，MIRD数学ファントム，不感層，電極

Whole-Body Counter, Monte Carlo Simulation, Ge Semiconductor Detector, Counting Efficiency, MCNP, Phantom, MIRD Mathematical Phantom, Dead Layer, Electrode



栗原 治

線量計測課個人線量管理
チーム所属
副主任研究員
内部被ばく管理に係る業務
及び研究開発に従事
第一種放射線取扱主任者，
第一種公害防止管理者（大
気）



高崎 浩司

線量計測課個人線量管理
チームリーダー
個人被ばく管理に係る業務
及び研究開発に従事
第一種放射線取扱主任者



百瀬 琢磨

線量計測課長
個人被ばく管理及び放射線
管理機器の点検，校正に係
る業務の総括
第一種放射線取扱主任者，
核燃料取扱主任者

1. はじめに

全身カウンタ (Whole-body Counter) は、体内に取り込まれた放射性核種を検出し、その放射エネルギーを定量するための機器である。全身カウンタは、感度の良い放射線検出器 (主な測定対象として γ 線) と遮蔽体から構成され、被検者の全身を測定対象とすることから、この名前が付けられている¹⁾。

全身カウンタにより放射エネルギーを定量するためには、計数効率の評価が必要であるが、通常は既知の放射エネルギーを含む人体形状を模擬した線源 (以下、物理ファントム) が用いられる。物理ファントムは、被検者個人の体格に忠実に製作されることが理想であるが、現実には不可能であるため、平均的な体格を模擬した物理ファントムが用いられ、国際規格等において仕様が与えられている²⁾。

しかしながら、過度な内部被ばく事故時には、精度の高い線量評価が必要になると思われる。この場合、物理ファントムと被検者の体格差に起因する計数効率の誤差が問題となることから、それを評価しておくことが必要となる。

物理ファントムに代わる全身カウンタの校正手法として、近年モンテカルロシミュレーションによる適用例が報告され、その有効性について示されている³⁾⁴⁾⁵⁾。シミュレーションでは、物理ファントムでは製作が不可能な複雑な形状をモデリングすることが可能であるため、計算機の性能向上に伴い、その有効性は今後さらに向上していくものと思われる。

本研究では、サイクル機構東海で開発した可動式のゲルマニウム (Ge) 半導体検出器を有する全身カウンタ (以下、スキャン型全身カウンタ) に対して、モンテカルロシミュレーションによる物理ファントムの計数効率を評価し、その妥当性を検証した。加えて、放射線防護の目的で広く用いられている Medical Internal Radiation Dose (以

下、MIRD) 数学ファントムに対するシミュレーションを行い、計数効率の体格依存性について考察した。

本スキャン型全身カウンタは、可動式の Ge 半導体検出器を有するという点において特殊であり、モンテカルロシミュレーションの適用により、測定精度の向上に関する知見が得られることが期待される。

2. 実験の方法

2.1 スキャン型全身カウンタ

サイクル機構東海では、内部被ばく線量評価の測定精度向上のため、可動式の検出部を有するスキャン型全身カウンタを開発した。本機器は、既存肺モニタとの統合システムとしても開発がなされており、再処理施設における混合核種 (アクチニド核種及び核分裂生成物核種) による内部被ばくに対して、同時測定による迅速な対応が可能である。なお、本システムは、自然放射線による影響を低減させるため、厚さ 20cm の鉄室 (内側寸法 2.0m (幅) × 2.0m (高) × 2.5m (奥行)) 内に設置されている。

スキャン型全身カウンタの検出部は、エネルギー分解能の優れた Ge 半導体検出器 (EG&G ORTEC GMX-50S) で、検出器の入射窓は厚さ 0.5mm の Be 膜である。検出器は 2 式あり、通常は被検者用ベッド下部のハウジング内に収められている。ハウジングには鉛コリメータが備えられており、必要に応じて脱着することが可能である。ハウジングはパルスモータによって制御され、被検者の体軸方向に沿って移動し、ハウジングの移動速度、スキャン範囲は、それぞれ 1 cm/min ~ 20 cm/min, 0 cm (頭側) ~ 190 cm (足先側) で、プログラムにより任意に設定することができる。図 1 に、スキャン型全身カウンタの外観を示す。



図 1 スキャン型全身カウンタ (中央) の外観

2.2 ファントム

シミュレーションの検証に、校正用の物理ファントムを用いた。この物理ファントムは、合計11個の円筒形状の体積線源で構成され、それぞれの線源がヒトの各部位を模擬している(頭、首、胸、腹、腰、腕×2、大腿×2、下肢×2)。それぞれの体積線源は、厚さ5mmのポリメタクリル樹脂(アクリル)製の容器に、放射性核種(^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{40}K)を含む組織等価密度の媒質を封入したものである。これらの容器は、緩衝のために厚さ5mmの塩化ビニールで覆われている。形状と線源容積については表1に示すとおりであり、放射能強度、媒質の元素組成及び密度に対しては、製造メーカーによる検定がなされている。本ファントムは、身長170cm、線源体積56.7literであり、成人男性の平均的な体格をおおむね模擬している。

また、本研究では、MIRD数学ファントムに対するシミュレーションも行った。MIRD数学ファントムは、数式で体格や臓器の形状を定義したモデル上のファントムであり、放射線防護の目的で広く利用されている。本研究では、Cristy(1986)⁹⁾らの開発した年齢別MIRD数学ファントムに基づき、外形のみを考慮した軟組織で満たされた全身均一線源に対する計数効率の計算を行った。

モンテカルロシミュレーションの検証では、物理ファントムに対する計数効率を計算により求め、これを実験値と比較検証して行った。なお、本研究では、計数効率を全エネルギーピーク効率とし、測定で得られた γ 線スペクトルから、市販の解析用ソフトウェア(SEIKO製ガンマスタジオ⁹⁾)を用いて求めた。 γ 線スペクトルは全4,096チャンネルであり、MCA(Multi Channel Analyzer)上で1チャンネルあたり約0.5keVのエネルギー領域となるように設定している。

表1 物理ファントム各部位の外側寸法と線源体積

部位	長径 (cm)	短径 (cm)	高さ (cm)	線源体積 (ℓ)
頭	22	22	22	6.2
首	11	11	11	0.65
胸	32	22	22	9.4
腹	32	22	22	10.0
腰	32	22	22	10.0
腕	11	11	51	3.0
大腿	16	16	30	4.2
下肢	12	12	41	3.0

3. 計算の方法

3.1 モンテカルロシミュレーション

本研究では、計数効率の計算にモンテカルロシミュレーションコードMCNP (Version4C)⁹⁾を用いた。MCNPは、種々の断面積及び散乱角に関する連続エネルギーデータライブラリを有する汎用輸送コードであり、電子輸送、特性X線の生成及び制動放射線を伴う物質中の光子輸送をシミュレートすることができる。さらに、MCNPでは、放射線検出器の応答関数を計算するのに最適なpulse height tally(F8 tally)が組み込まれており、計数効率の計算にはこれを用いた。エネルギー領域の分割は測定と同様に行い、計算結果の統計誤差が5%以下となるようにヒストリ数を決定した。

MCNPのモデリングは、スキャニング型全身カウンタの検出部、筐体及びファントムに対して行った。計数効率の計算は、物理ファントム中に含まれる4核種の主要な光子エネルギー(81.0, 276.4, 302.9, 356.0, 383.9, 661.6, 1,173.2, 1,332.5及び1,460.8keV)について行った。

3.2 検出器のモデリング

検出部であるGe半導体検出器のモデリングは、表2に示す製造メーカーの仕様に基づき、可能な限り忠実にを行った。しかしながら、結晶の不完全性や格子間の不純物の存在による電荷キャリアのトラップなどの要因により、Ge結晶全体が有感領域とはならないために、本研究では中村ら^{9),10)}の手法にならない、元々放射線感度を有さない電極を含めた一定の厚さを持つ不感層を仮定し、適当な不感層の厚さを評価した。図2に、Ge半導体検出器のモデリングを示す。

スキャニング型全身カウンタに用いられているGe半導体検出器は、n型の同軸型検出器(Coaxial Detector)であり、検出面側の表面電極(p⁺電極)と電極ピン側の中心電極(n⁺層)の2つの電極が

表2 Ge半導体検出器の仕様

各種パラメータ	寸法 (mm)	
	検出器 # 1	検出器 # 2
結晶直径	63.8	65.3
結晶長さ	73.3	77.7
エンドキャップからBe膜までの長さ	4	
Be膜の厚さ	0.5	
表面電極の厚さ	0.0003	

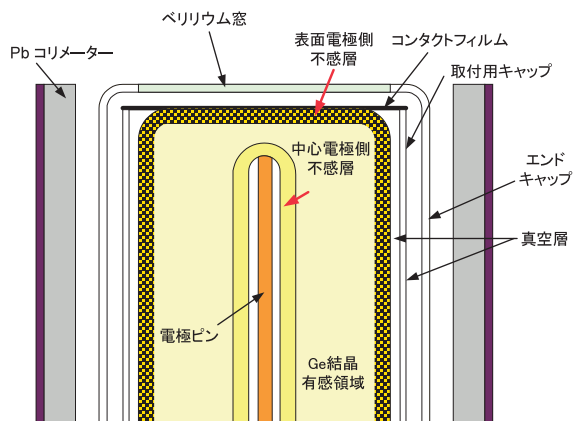


図2 Ge検出器のモデリング

存在する。典型的な電極の厚さとしては、表面電極が0.3μm程度、中心電極が0.5～1mm程度であるとされている¹¹⁾。

3.3 ファントムに対する計数効率の計算

MCNPでは、複数の線源を同時に計算することができないため、各部位ごとに計算を個別に行い、次式により物理ファントムの計数効率 ε_w を与えた。

$$\varepsilon_w = \frac{\sum_k A_k \cdot \varepsilon_k}{\sum_k A_k}$$

上式において、 A_k と ε_k は、それぞれ物理ファン

トム部位 k の放射能強度と計数効率である。なお、 ε_w は検出器の位置によって変化するため、図3に示すように、物理ファントムの身長方向に沿って等間隔（10等分）に分割した検出器位置において計数効率を求めた。また、物理ファントムを検出器が頭部から足先までスキャンした際の計数効率 ε_s は、次式により与えた。

$$\varepsilon_s = \frac{\left(\frac{\varepsilon_w(1)}{2} + \sum_{i=2}^{10} \varepsilon_w(i) + \frac{\varepsilon_w(11)}{2} \right)}{10}$$

ここで、 $\varepsilon_w(i)$ は、図3に示す検出器位置（ i 番目）における物理ファントムの計数効率である。なお、検出器は2式あるため、検出器ごとに ε_w 、 ε_s を求め、これらを合算したものを実験値との比較検証に用いた。

ピーク効率 ε_s を得るには、膨大な計算（検出器数×検出器位置数×エネルギー数×ファントム部位数）を行う必要があるため、本研究では、計算作業を容易にするためのツールを開発した。本ツールでは、計算条件の設定（検出器位置、物理ファントムの配置及びヒストリ数など）、MCNPの計算実行及び計算結果の出力（応答関数及び計数効率）までの一連の操作を、画面上で簡便に行うことができる（図4）。なお、MIRD数学ファントムに対する計算についても、前述した物理ファ

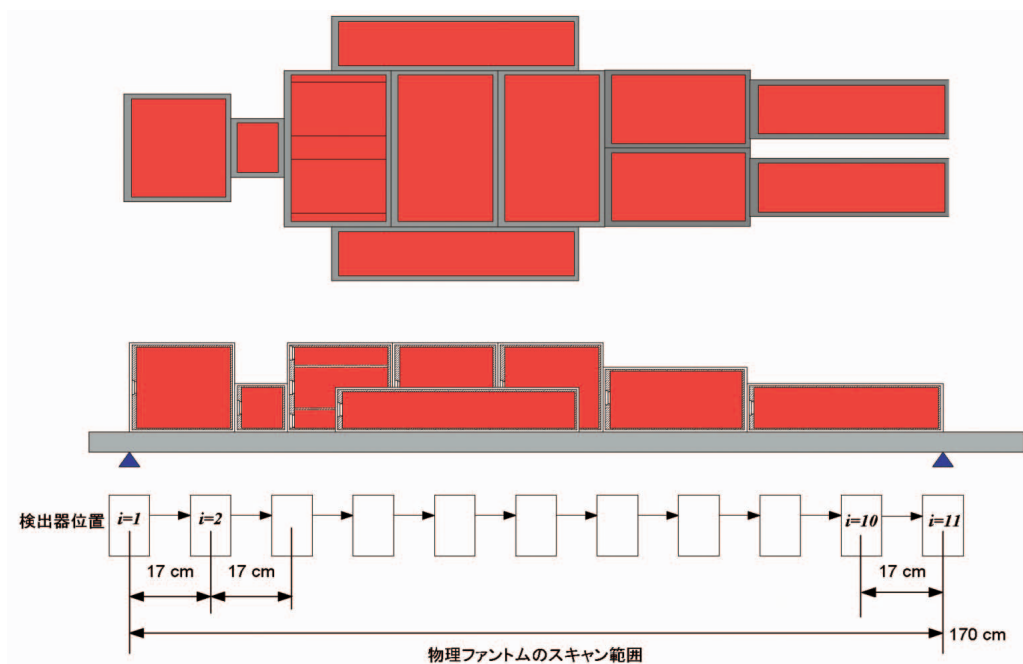


図3 物理ファントム計数効率評価の検出器位置

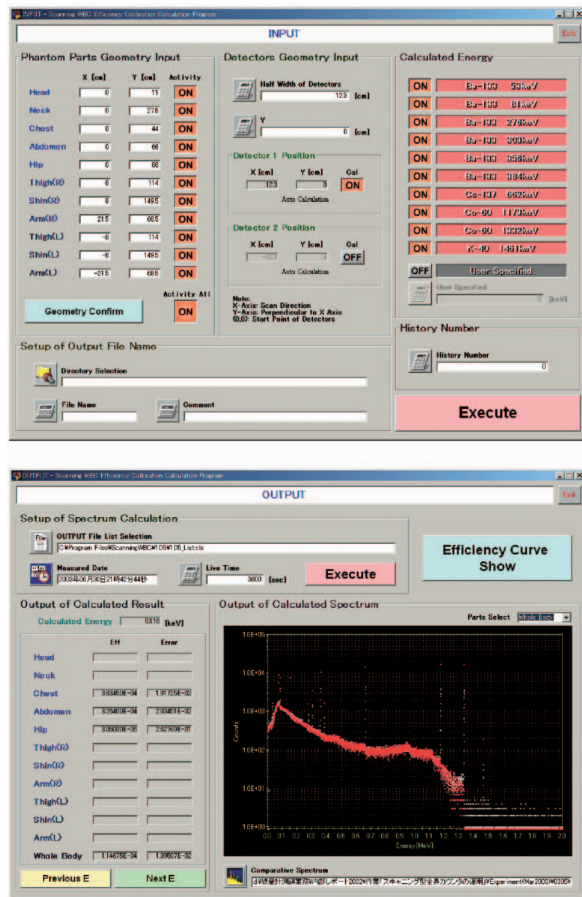


図4 MCNP計算ツール

ントムと同様に行った。ただし、MIRD数学ファントムの各部位（頭部，胴体，脚部（左右），性器，胸）の放射能強度は，その体積に比例するとした。

4. 結果と考察

4.1 物理ファントムに対するシミュレーション

(1) Ge結晶中の不感層厚さの評価

Ge結晶中の不感層の厚さを評価するのに，物理ファントムの首部位の線源を用いた。この理由は，首部位と検出器の入射窓の径が他の利用可能な体積線源に比べて最も近く，種々のエネルギーに対する計数効率の検証が可能であるからである。この首部位の線源を，スキャニング型全身カウンタのベッド上に配置し，これを計算体系としたシミュレーションにより，不感層厚さと計数効率の関係式を求め，実験値と等しくなるような不感層の厚さを評価した。表面電極と中心電極の不感層の厚さは，それぞれ ^{133}Ba の81.0keVと ^{60}Co の1,332.5 keVの計数効率を利用した。表3に，上述した方

法により評価したGe結晶中の不感層の厚さを示す。なお，この不感層の厚さを用い，他のエネルギーに対する計数効率を計算した結果，実験値と計算値の差異は数%以内であった。

(2) 物理ファントムの計数効率

評価した結晶内部の不感層厚さを検出器のモデリングに反映し，物理ファントムの計算を行った。図5に，異なる検出器位置における物理ファントムの計数効率 ε_{μ} に対する実験値と計算値を比較した。同図には，81.0keVと1,332.5keVの計数効率を代表で示した。幾つかの検出器位置では，実験値と計算値とに差異が見られるが，比較した全てのエネルギーに対して，約10%以内であった。差異の原因としては，実験における物理ファントムの配置誤差や物理ファントム内媒質の不均一性が考えられる。

図6には，物理ファントムを全身にわたりスキャンした際の計数効率 ε_s に対する実験値と計算値を示した。図6中の150keVの計数効率は計算値のみであるが，効率曲線を得るのに追加した。図6に示すように，実験値と計算値は非常に良く一致しており，両者の差異は3%未満であった。

これらの結果より，MCNPによる物理ファントムの計数効率評価は，十分妥当であると考えられる。

表3 評価した不感層厚さ

検出器番号	表面電極不感層(mm)	中心電極不感層(mm)
検出器#1	4.76×10^{-2}	2.75
検出器#2	3.97×10^{-2}	2.09

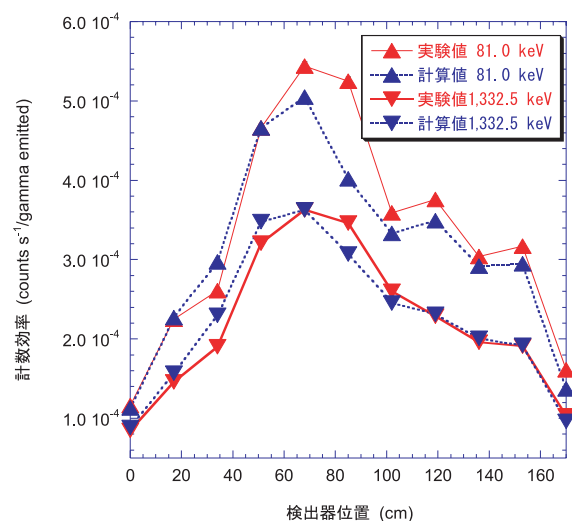


図5 検出器位置の変化に伴う物理ファントムの計数効率に対する実験値と計算値の比較

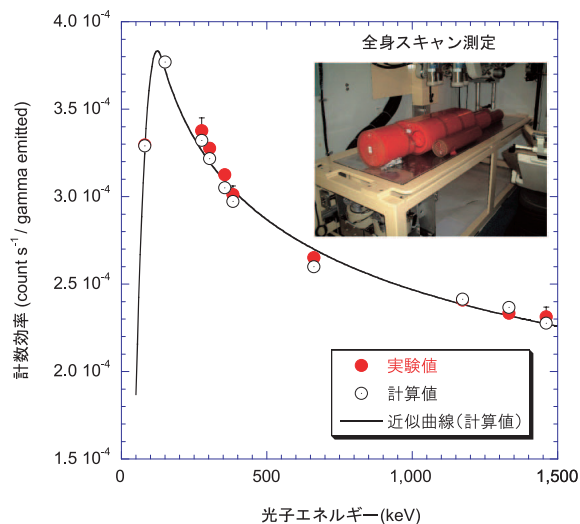


図6 全身スキャン測定における物理ファントムの計数効率に対する実験値と計算値と比較

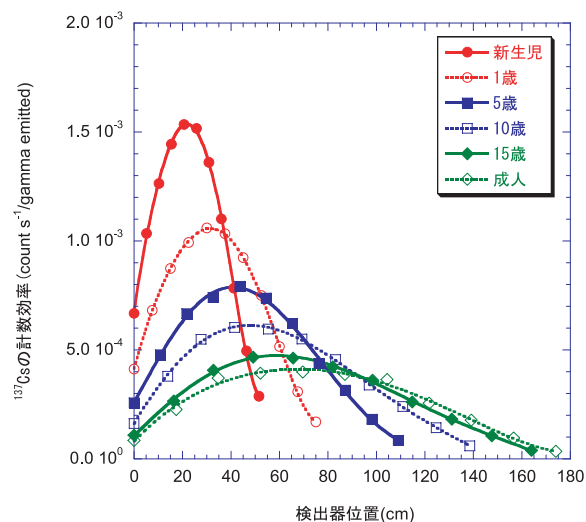


図7 検出器位置の変化に伴うMIRD数学ファントムの計数効率

4.2 MIRD数学ファントムに対するシミュレーション

(1) MIRD数学ファントムの計数効率

物理ファントムの結果を踏まえ、年齢別MIRD数学ファントム(0歳児, 1歳児, 5歳児, 10歳児, 15歳児, 成人)に対する計数効率を計算した。各MIRD数学ファントムの身長と体重は、表4に示すとおりである。なお、MIRD数学ファントムに対する計数効率の計算は、物理ファントムのシミュレーションと同様に行った。検出器モデリングについても、物理ファントムの場合と同一である。

^{137}Cs の光子エネルギー(661.6keV)に対するMIRD数学ファントムの計数効率を、各ファントムの身長方向に等分割(10等分)した検出器位置において計算した結果を図7に、ファントム全身をスキャン測定した場合の計数効率を図8に示す。

図7及び図8に示されるように、計数効率は体格によって異なり、スキャン測定では体格が大きくなるほど計数効率が小さくなる傾向が明らかと

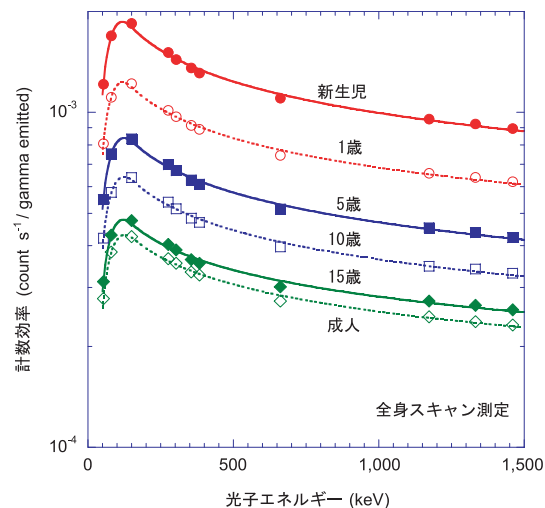


図8 全身スキャン測定におけるMIRD数学ファントムの計数効率

なった。同様な計数効率の体格依存性については、他のベッドジオメトリの全身カウンタにおいても報告されている^{5),12)}。また、表5に、光子エネルギーごとの成人のMIRD数学ファントムに対する他の年齢のMIRD数学ファントムの計数効率の比を示す。計数効率の体格依存性は、光子エネルギーによって顕著に変化しない結果が得られた。

(2) 計数効率の体格補正式の導出

実務上の観点から、簡便に計数効率の補正を行えることは有用である。ここでは、前述したMIRD数学ファントムの結果を用いて、身長と体重を変数とした計数効率の体格補正式を導出することを試みた。図9には、成人のMIRD数学ファントム

表4 MIRD数学ファントムの体格形状

	身長(cm)	体重(kg)
新生児	51.49	3.67
1歳	74.96	9.78
5歳	109.02	19.85
10歳	138.58	33.18
15歳(成人女性)	163.99	56.50
成人	174.00	73.61

表5 成人MIRD数学ファントムに対する計数効率比

エネルギー	新生児	1歳児	5歳児	10歳児	15歳児
81.0keV	4.41	2.89	1.96	1.51	1.12
150.0keV	4.33	2.86	1.96	1.50	1.12
276.4keV	4.13	2.77	1.91	1.48	1.10
302.9keV	4.06	2.74	1.89	1.46	1.10
356.0keV	4.06	2.73	1.88	1.45	1.09
383.9keV	4.00	2.72	1.87	1.43	1.08
661.6keV	4.04	2.72	1.88	1.45	1.10
1173.2keV	3.89	2.68	1.84	1.42	1.12
1332.5keV	3.89	2.69	1.84	1.44	1.12
1460.8keV	3.86	2.67	1.82	1.42	1.11

の計数効率に対する他年齢のMIRD数学ファントムの計数効率比 σ を、身長を横軸にとってプロットしたグラフであるが、次式により良く近似されることが示された。

$$\sigma(H) = 346.76 \times H^{-1.1232} (r = 0.998)$$

上式において、 H は身長(cm)、 σ は ^{137}Cs の光子エネルギーに対する計数効率比、 r は相関係数である。

なお、体重を変数としても同様な近似式が導出できることが分かった。

5. 結論

本研究では、サイクル機構東海で開発したスキャニング型全身カウンタに対し、MCNPを用いたモンテカルロシミュレーションにより、ファントムの計数効率を評価した。モデリングでは、Ge

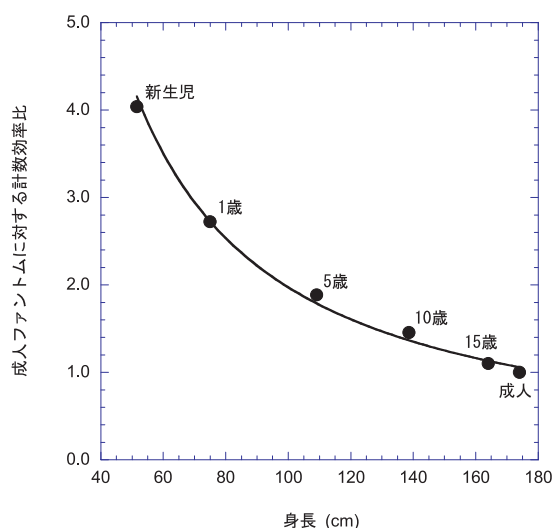


図9 MIRD数学ファントムの計数効率と身長の関係

半導体検出器内の電極近傍に一定の厚さの不感層を仮定し、実効的な有感領域を実験的に評価した。このモデリングに基づき、物理ファントムの計数効率を計算した結果、スキャン測定における計数効率に対する実験値と計算値の差異は3%未満であった。これより、シミュレーションによる計数効率の評価は妥当であり、物理ファントムに代わる校正手法として十分に有効であると結論できる。加えて、年齢別のMIRD数学ファントムに対するシミュレーションでは、計数効率の体格依存性が明らかとなった。スキャン測定での計数効率では、成人と幼児の計数効率に、最大ファクター4程度の差異が生じることが示された。この結果を踏まえ、身長や体重による計数効率の体格補正式を導出し、よく近似できることが分かった。

謝辞

本研究を実施するにあたり、SEIKO EG&Gの高橋幸嗣氏、V.I.C.の峯本浩二郎氏、根本誠氏には、モンテカルロシミュレーションの計算作業において多大なご尽力を賜った。ここに記して、深く感謝する。

参考文献

- 1) R. Toohey and E. Palmer et al.: "Current Status of Whole-Body Counter as a Means to Detect and Quantify Previous Exposures to Radioactive Materials", Health Physics, Vol.60, Sup.1, p.7 (1991)
- 2) HEALTH PHYSICS SOCIETY: "Specifications for the Bottle Manikin Absorption Phantom", ANSI-HPS N13.25-1999 (2000)
- 3) S. Kinase: "Evaluation of Response of Whole-body Counter using the EGS4 Code", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.35, No.12, p.958 (1998)
- 4) S. Kinase, M. Yoshizawa et al.: "Evaluation of Counting Efficiency of a Whole-body Counter using the EGS4 Code", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.37, No.12, p.1103 (2000)
- 5) S. Kinase, M. Yoshizawa et al.: "Application of EGS4 Code to Whole-body Counting", Proceeding of the Second International Workshop on EGS, KEK Proceeding 200-20, p.23 (2000)
- 6) M. Cristy, K. F. Eckerman: "Specific Absorbed Fraction of Energy at Various Ages from Photon Source", ORNL/TM-8381/V1-V7 (1987)
- 7) SEIKO EG&G: "Gamma Studio Operational Manual", (2001)
- 8) J. F. Briesmeister: "MCNP4M A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4C", LA-13709-M (2000)

- 9) T. Nakamura, T. Suzuki: " Monte Carlo Calculation of Peak Efficiencies of Ge(Li) and Pure Ge Detectors to Volume Sources and Comparison with Environmental Radioactivity Measurement ", Nuclear Instrumental and Methods, Vol.205, p.211 (1983)
- 10) S. Kinase, H. Noguchi et al.: " Application of a Ge Semi-Conductor Detector to Whole-body Counter ", Radiation Protection Dosimetry, Vol.105, No.1-4, p.467 (2003)
- 11) 野口正安 : " γ 線スペクトロメトリー ", RADIOISOTOPES, Vol.50, p.1S (2001)
- 12) M. J. Youngman: " Calibration and Evaluation of a Transportable in vivo Monitoring System for Accident Monitoring of Internal Contamination ", Radiation Protection Dosimetry, Vol.107, No.4, p.259 (2003)