

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21560870

研究課題名（和文）

密封シート線源を用いたホールボディカウンタ校正法の開発

研究課題名（英文）

Development of Sealed Sheet Sources for Calibration of Whole-body Counters

研究代表者

石樽 信人 (ISHIGURE NOBUHITO)

名古屋大学・医学部保健学科・教授

研究者番号：70159713

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、ホールボディカウンタ校正用密封シート線源作製法を開発することである。密封シート線源を用いた校正用ファントムとは、ランドファントムのような人体形状ファントムのスライス間に薄い密封シート線源をサンドウィッチしたものである。このファントムには従来の樹脂容器ファントムとは異なり、(a)人体の実際の形状により近い、(b)種々の体内分布に対応できる、(c)種々の核種に交換可能である、などの長所がある。本研究においては、インクジェットプリンタを用いて、人体横断面と同程度の面積を有する複雑な放射能面密度パターンを用紙にプリントする方法を考案した。放射能面密度の測定、オートラジオグラフィによる視覚的評価、浸漬試験による密封性の評価及びダストモニタによる空気汚染の評価を行った結果、本方法により、ホールボディカウンタ校正用ファントムに用いる密封シート線源を安全に作製できることが示された。さらに、シート線源の計数効率をモンテカルロ法によって評価し、その結果を、最も典型的な樹脂容器ファントムであるBOMABファントムと比較し、両者の計数効率に殆ど違いの無いことを明らかにした。本研究の成果は、ホールボディカウンタの校正に新しい方法論をもたらすことが期待される。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop a new-type phantom for calibration of whole-body counters, in which sealed sheet sources are sandwiched between sections of a sliced anthropomorphic phantom such as the Rando phantom. Unlike conventional vessel-type phantoms, the proposed phantom has several advantages: (a) the morphological similarity to human body, (b) the flexibility in the in vivo distribution, (c) the easiness in the replacement of radionuclides and so on. We invented a method to draw intricate patterns on paper with radioactive solutions using an ink-jet printer. Through the measurement of surface concentration of radioactivity, the autoradiographic evaluation of the pattern, the immersion test of the sources and the air monitoring during the printing, it was demonstrated that sealed sheet sources for the calibration phantom can be prepared safely by the present method. In addition, calibration coefficients for sealed sheet sources were evaluated by Monte Carlo simulation and compared with those for the BOMAB phantom, the most commonly used vessel-type phantom. The result showed that the differences of them between the two phantoms were negligibly small. It is expected that the achievement of this study will bring a new methodology to the calibration of whole-body counters.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：放射線防護

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：放射線防護、ホールボディカウンタ、内部被ばく評価、ファントム、校正

## 1. 研究開始当初の背景

ホールボディカウンタは、体内に沈着している放射性核種からの放射線を体外に配置された検出器で直接計測する装置であり、放射線事故への医療対応、あるいは個人被ばく管理における線量測定・評価において重要な役割を果たしている。

体内で放出された放射線のうち、人体組織を透過し体外に配置された検出器に到達できるのは一部である。そのため放射線のエネルギー、核種の体内分布等に応じて放射性核種の量と計数値の換算係数を装置ごとにあらかじめ求めておく必要がある。この換算係数を求める操作を校正という。校正を行うためには既知量の放射性核種を含む体積線源が必要である。このようなホールボディカウンタに用いられる人間を模擬した体積線源はファントムと呼ばれている。

装置の校正に用いられているファントムには様々なものがある。代表的なものは、直方体、円柱等の単純な形状の樹脂容器を組み合わせて全身を表現したもので、校正時には、各樹脂容器に既知量の線源水溶液を満たして使われている。しかしながらこれらのファントムに対しては、以下に記す問題が指摘できる。まず、単純な形状の容器で構成されているため人体の実際の形状とは異なっている。また、 $\gamma$ 線のエネルギーが低い場合、ファントム内での $\gamma$ 線の減弱は人体内のそれと異なったものとなる。次に、容器に線源水溶液を満たして使用するため、線源の全身均一分布にしか対応できない。実際の人体内の分布は均一ではなく、また、その分布自体が、摂取した放射性核種の化学形や摂取後の時間によって変化する。こうしたファントム内の核種分布に関する大きい制約もまた不確かさの要因となる。これら測定の信頼度の観点に加え次の問題を指摘することができる。まず、容器内封入核種を別の核種の線源水溶液に交換するのは容易ではなく、ファントム一体につき単一核種か、あるいは放出する $\gamma$ 線のエネルギーが十分離れている場合限り複数核種の混合溶液を封入できるだけである。このようなファントムは、放射線事故への対応を目的とした場合には不十分である。さらに、溶液を取り扱うため、使用中、あるいは輸送の際、漏洩による検出器あるいは環境を汚染する恐れがある。

## 2. 研究の目的

本研究では、上記で指摘した樹脂容器ファントムにおける問題点を解決するため、新し

い考え方に基づくホールボディカウンタ用校正ファントムの作製法を開発する。線源は、従来のファントムのような樹脂容器を用いる体積線源ではなく密封シート線源である。現在、ランドファントムその他数 cm の厚さにスライスされた人体形状の物理ファントムが存在している。本方法は、こうしたファントムの各スライスの間密封された薄いシート線源をサンドウィッチし、校正用ファントムを構築しようとするものである。

## 3. 研究の方法

この方法の開発に当たって次のような具体的な検討課題を順次解決してゆく。

(I) 胴体の断面のサイズで均一性の高い密封シート線源の作製法の開発

(a) シート線源基材の検討

シート線源基材としては、次の性質が要求される。

- ・薄いこと (0.4mm 程度以下)

- ・胴体の断面サイズで自己保持可能な強度を持つこと

- ・化学的耐久性 (耐薬品性) があること

- ・線源を均一に分散させられること

(b) シート内の所定の領域に放射性核種を均一に分布させる方法の検討

(c) 密封方法の検討

このシート線源は、免除レベルをはるかに下回る管理の容易な密封小線源であることが特長のひとつである。(a)、(b)で確立した方法により作製したシート線源の放射性核種が剥離あるいは漏洩して検出器等を汚染しないよう密封する方法を確立する

(II) 計算シミュレーション手法による体積線源とシート線源の計数効率の比較検討

この検討の目的は、ホールボディカウンタの校正において、シート線源が体積線源を十分な精度で代替できることを証明すること、あるいは、十分な精度で代替できる条件、例えば線源間隔の許容範囲、計測ジオメトリに対する制約等を確定することである。具体的には、次の手順を踏んで検討を進める。

(a) 光子の輸送過程の計算シミュレーション手法の確立

モンテカルロコードを使用したホールボディカウンタを想定した計算体系における光子の輸送過程の計算シミュレーション手法を確立する。

(b) 計数効率における体積線源とシート線源の線源間隔による差異の検討

確立したシミュレーション手法を楕円柱等比較的単純な形状の数学ファントムに適

用し、種々の線源間隔に対する体積線源とシート線源の計数効率の差異を検討し、どの線源間隔までシート線源は体積線源を代替できるかを明らかにする。

(c) 計数効率の検出器配置との関係の検討

計数効率の異同が、検出器配置、たとえば全身走査型と立位型によってどのように変化するか、あるいは、検出器と人体との距離によってどのように変化するか等を検討し、シート線源による構成法の計測ジオメトリに対する制約条件を明らかにする。

4. 研究成果

(I) 胴体の断面のサイズで均一性の高い密封シート線源の作製法の開発

シート線源作製法として、インクジェットプリンタにより、複雑な放射能分布パターンを用紙にプリントする方法を試みた。

<作製手順>

放射性核種の水溶液とインクとを遠沈管に入れて混合し、超音波洗浄装置の振動を利用して十分に攪拌させた。その放射性溶液を、事前に洗浄・乾燥させておいたインクタンクに注射針を用いて充填した。充填したインクタンクをプリンタにセットし、画像処理ソフトウェアによってカラー濃度を設定して、厚さ 0.10 mm のインクジェット専用紙に印刷した。乾燥後その用紙を熱接着性のラミネートフィルムで密封した。なお、印刷時はプリンタをフード内に設置した状態で作業した。

<放射能面密度の均一性の評価>

一定のカラー濃度で A4 サイズのインクジェットプリンタ専用紙一面に放射性溶液をプリントした。乾燥後、その用紙の全面から 24 箇所を偏りがないように選び、それぞれの箇所に直径 1cm の正円を打ち抜き試料とした。これらの試料の放射能面密度を測定した結果、用紙の印刷場所による放射能面密度の変動は、相対標準偏差で 2.2% と評価され、実用上十分に均一な面線源の得られることが示された。

<放射能面密度の調整と測定>

画像処理ソフトウェアのカラー濃度調整機能による放射能面密度のコントロールの可能性を検討した。カラー濃度を 10~100 % の範囲で 10% 間隔に設定し、それぞれのカラー濃度で大きさ 3cm×3cm の正方形の枠内に放射性溶液をプリントした。乾燥後、イメージングプレート (IP) に密着させてオートラジオグラムを作成するとともに直径 2cm の正円をそれぞれの正方形の枠内から打ち抜き、放射能面密度を測定した。図 1 にオートラジオグラムを、図 2 にカラー濃度設定値とプリンタで印刷された放射能面密度との関係を示す。本研究で使用した放射性溶液の放射能濃度は 860000 Bq/mL であった。図 2 より、例えば濃度設定値が 60% ならば放射能面

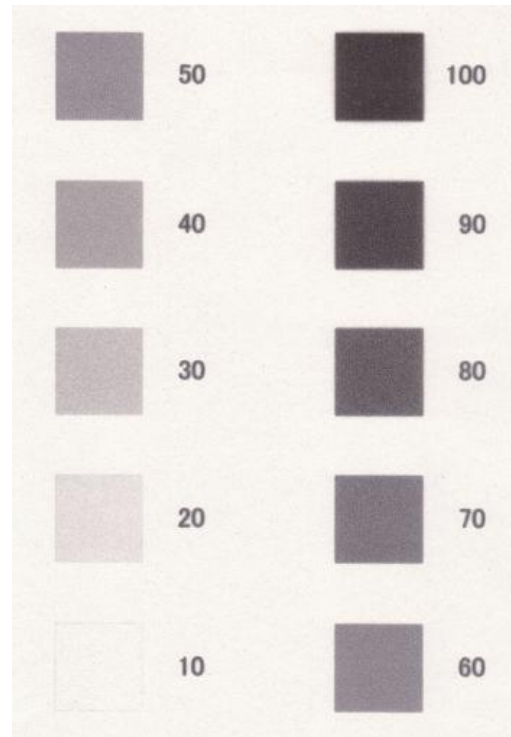


図 1 IP によるオートラジオグラム  
図中の数字も放射性溶液により  
プリントされたものである。

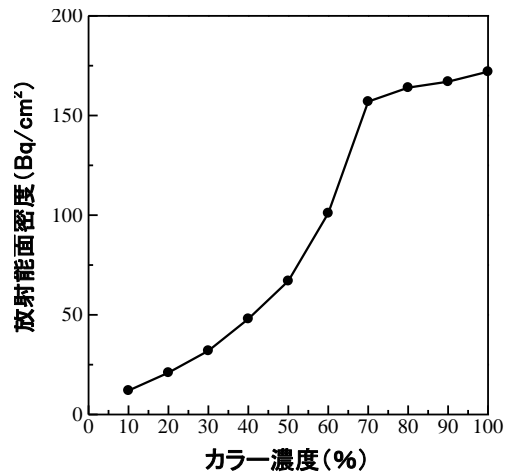


図 2 カラー濃度設定値とプリント  
される放射能面密度との相関関係

密度が 120 Bq/cm<sup>2</sup> の面線源が作製されるということになる。逆に、同じ放射能濃度の放射性溶液に対し、例えば 60 Bq/cm<sup>2</sup> の放射能面密度の線源を作製する場合、カラー濃度設定値を 40% にすればよいということが分かる。つまり、本実験で得られた図 2 のグラフにより、同じプリンタと同じ画像処理ソフトウェアを用いて、同じ作製手順を踏めば放射性溶液の放射能濃度の調整とカラー濃度の設定により所定の放射能面密度のパターンを描くことが可能であることが示された。

<放射能分布の視覚的評価>

治療用人体等価ファントムの胸部 CT 画像を用いて肺と軟組織にそれぞれ 25% と 100% のカラー濃度を持つように濃度設定し、放射性溶液をインクジェット用紙にプリントし、ラミネートフィルムで密封後、IP によりオートラジオグラムを作成した (図 3)。

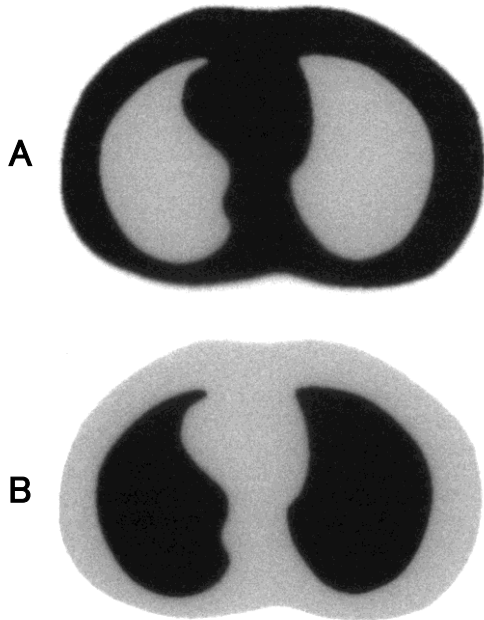


図 3 IP によるオートラジオグラム  
A カラー濃度：軟組織 100%、肺 25%  
B カラー濃度：軟組織 25%、肺 100%

図 3 の A は肺よりも軟組織に、B は軟組織よりも肺に放射性物質が高濃度に集積した場合をそれぞれ模擬したものであるが、境界近傍に濃度のムラが描出されることが無く、プリンタ設定そのままの画像の描出が可能であることが確認できた。

#### <密封性の評価>

A4 用紙一面にプリントした線源をラミネートフィルムで密封後、蒸留水を満たしたバットに 4 日間にわたり浸した。浸漬水を経時的に採取し放射能を測定したが、いずれの試料の計数値もバックグラウンドと有意な差がなく、放射能の漏れは確認できなかった。また、視覚的にもシート線源に蒸留水が浸潤していないことが確認された。以上により、ラミネートフィルムによる密封が十分になされると判断した。

#### <作製時の空気汚染の評価>

放射性溶液をプリントする際、固定ダストモニタの集塵用ろ紙をプリンタの用紙排出部の直上に設置しダストを捕集した。ろ紙の放射能を測定した結果、有意な空気汚染が確認されたがその空気中濃度は法令の空気中濃度限度よりも 3 桁以上低い値であり、プリンタがフード内に設置されていることとプ

リントに要する時間が短いことから、この作業は十分に安全であると判断した。

以上の実験及び考察から、本研究により、ホールボディカウンタ校正用ファントムに用いるための胴体の断面のサイズで均一性の高い密封シート線源の作製法を開発することができたと言える。

#### (II) 計算シミュレーション手法による体積線源とシート線源の計数効率の比較検討

シート線源を用いるファントムでは、線源の配置はファントム内で離散的となる。このことが、ファントム外部での  $\gamma$  線フルエンスの空間分布、ひいては計数効率にどのような影響を及ぼすかを検討する必要がある。シート線源が体積線源を十分な精度で代替できることを証明することと十分な精度で代替できる条件、例えば線源間隔の許容範囲、計測ジオメトリに対する制約等を確定することのため、計算シミュレーション手法による体積線源とシート線源の計数効率の比較検討を行った。

#### <モンテカルロコードと計算体系>

放射線輸送計算用モンテカルロコードには様々な種類があるが、本研究では、電子と光子の輸送計算コードとして優れた実績のある EGS5 を使用した。計算体系のうちのファントムとして、最も典型的な樹脂容器ファントムである BOMAB ファントムの胸部及び腹部を模擬した体系データファイルを作成した。このファントム容器内に線源溶液が一樣に充填された状態を体積線源、シート線源が一定の間隔でファントム容器に挿入された状態を改めてシート線源と呼ぶことにする。検出器は、直径 3 インチ及び 5 インチ、厚さ 3 インチの NaI (Tl) シンチレーション検出器とし、その周囲が厚さ 5 cm の鉛円筒で遮蔽されている状態を模擬した体系データファイルを作成した。

#### <シート線源間隔依存性>

シート線源をファントムに挿入する場合、線源間隔は、スライス厚さの倍数で選択することが可能であるが、線源間隔を広げることによって線源配置の離散性が計数効率に強く影響し、体積線源との一致性が低下する可能性が想定された。そこで、シート線源間隔を色々と変えて計数効率を計算し、体積線源の値と比較することにより、体積線源を代替できるシート線源間隔の範囲を検討した。光子のエネルギーは  $^{137}\text{Cs}$  線源を想定した 662 keV とした。シート線源間隔は 1cm、2.5cm、4cm、5cm、6cm、7cm、8cm とし、検出器のファントム表面からの距離は、2cm、4cm、6cm、8cm、10cm、12.5cm、15cm、20cm とした。図 4 に、線源配置の離散性の影響が最も強く見られた表面からの距離 2cm の場合の結果を示す。この図より、シート線源間隔が 5cm までは両者の計数効率は一致しており、少なくと

もこの間隔までは密封シート線源が体積線源をきわめて正確に模擬していることを示すことができた。

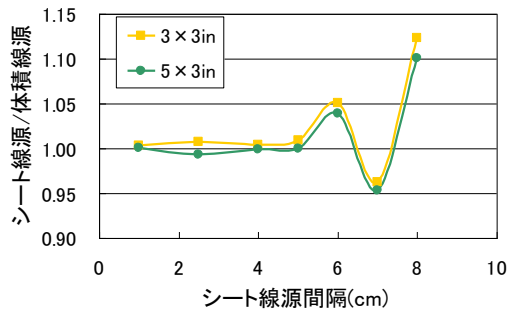


図4 計数効率の比のシート線源間隔依存性

<γ線エネルギー依存性>

ホールボディカウンタにおける測定対象核種は様々である。光子エネルギーを100から1000 keVまで変化させ、各々の光子エネルギーにおける計数効率を体積線源、シート線源で求め比較した(図5)。

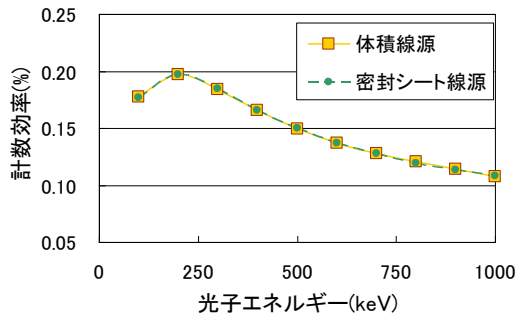


図5 計数効率の光子エネルギー依存性

この図が示すように、体積線源と密封シート線源とで計数効率はきわめて良い一致を示した。また、両線源の計数効率は、100keVから200keVまでは上昇し、200keV以上では減少する傾向が示されたが、その理由は、光子エネルギーが低い領域ではファントム内での自己吸収により検出器に入射する光子の割合が減少し、一方、光子エネルギーが高くなるとNaI結晶内で相互作用を起こすことなく検出器を通過してしまう光子数の割合が増加するためであると推察された。これらの結果より、密封シート線源は<sup>137</sup>Cs以外の様々なエネルギーの光子を放出する核種においても適用可能であり、線源核種に左右されず密封シート線源の作製が可能であることが示すことができた。

<計数効率に影響する他の因子>

計数効率に影響すると考えられるその他の因子についても検討した。すなわち、(a)シート線源の対軸方向位置依存性、(b)ファントム表面-検出器窓面間の距離依存性、(c)シンチレーション検出器口径サイズ及び

結晶厚さ依存性、(d)シンチレーション検出器の対軸方向位置依存性、を検討したがその結果、体積線源による計数効率と密封シート線源による計数効率とは非常に良く一致することを示すことができた。

以上、ホールボディカウンタの計数効率の校正に本研究で開発した密封シート線源作製法が適用できることを示すことができた。今後密封シート線源の普及を図ることにより、ホールボディカウンタ校正法の整備および校正ツールが一層充実することが期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ①石樽信人: 内部被ばくにおける防護量とその評価方法, 日本放射線安全管理学会誌, 査読無, 11巻, 2012, 28-30.
- ②Ryuji Kouno, Nobuhito Ishigure, Counting Efficiency of Sealed Sheet Sources for Calibration of Whole-Body Counters by Monte Carlo Simulation, KEK Proceedings, 査読無, 2011-6, 2011, 26-29.

[学会発表] (計11件)

- ①河野竜司, 石樽信人: ホールボディカウンタの校正に用いる密封シート線源の適用性に関するシミュレーションによる検討, 日本保健物理学会第45回研究発表会, 2012年6月17日, 名古屋市.
- ②石樽信人: 内部被ばくにおける防護量とその評価方法, 日本放射線安全管理学会第10回学術大会, 2011年12月1日, 横浜市.
- ③河野竜司, 石樽信人: ホールボディカウンタ校正に用いる密封シート線源のシミュレーションによる検討, 日本保健物理学会第44回研究発表会, 2011年10月17日, 水戸市.
- ④河野竜司, 石樽信人: ホールボディカウンタ校正用密封シート線源の計数効率のシミュレーション, 第18回EGS研究会, 2011年8月10日, つくば市.
- ⑤河野竜司, 石樽信人: ホールボディカウンタの校正に用いる密封シート線源の作製法の確立およびその適用, 日本保健物理学会第5回学生発表会, 2010年12月17日, 名古屋市.
- ⑥宮本真衣, 石樽信人: シート線源によるホールボディカウンタの校正 - 線源に要求される放射能面密度パターン, 日本保健物理学会第43回研究発表会, 2009年6月4日, 大阪市.

[図書] (計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石樽 信人 (ISHIGURE NOBUHITO)  
名古屋大学・医学部保健学科・教授  
研究者番号：70159713

### (2) 研究分担者

緒方 良至 (OGATA YOSHIMUNE)  
名古屋大学・医学部保健学科・助教  
研究者番号：70185502

### (3) 連携研究者

仲野 高志 (NAKANO TAKASHI)  
独立行政法人放射線医学総合研究所・主任  
研究員  
研究者番号：70198159