

第19回EGS研究会 アブストラクト集

平成24年8月1日 8月3日

(会場) 研究本館小林ホール

(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

EGS5 における計算時間短縮を図る並列計算技術 MPI の効果の検証	1
	羽場 友信
MPI 通信を用いた EGS5 の大規模並列計算化 ~ EGS5-MPI の概要と運用方法の紹介 ~	2
	清水 森人
EGS5 による空気シャワーのシミュレーション.....	3
	桶井 一秀
EGS5 コードによるマルチカスケード崩壊核種の検出効率の算出.....	4
	海野 泰裕
EGS5 を用いた X 線実効エネルギー測定器の諸特性の検証	5
	近藤 晋平
ガンマカメラ用コリメータのジオメトリが定量値に与える影響の解析.....	6
	吉野 浩生
散乱線の影響を考慮した X 線 CT.....	7
	竹本 和馬
^{201}Tl 経鼻投与による内部被ばく評価 ~ 前鼻道領域の光子・電子比吸収割合 ~	8
	木名瀬 栄
X 線 CT 自動露出機構による被ばく低減効果の詳細な検証 ~ EGS5 を用いた臓器・組織での評価 ~	9
	林 大貴
小児頭部 X 線 CT 検査における被ばく低減について ~ EGS5 を用いた検討 ~	10
	石井 崇倫
EGS5 を用いたマンモグラフィにおける乳腺線量分布の推定	11
	沼元 瞳
High Definition Multileaf Collimator の物理的特性の検証	12
	岩本 康史
有効密度法による治療計画装置と検証用測定器間の誤差改善	13
	熊谷 仁
EGS5 を用いたコリメータ散乱係数 S_c とファントム散乱係数 S_p の解析	14
	良知 寿哉
小線源治療における AAPM TG-43 に基づく治療計画とシミュレーションとの比較	15
	辻 修平
EGS5 を用いた小線源治療線量計算法の有効性検証	16
	田中 憲一

EGS5 における計算時間短縮を図る並列計算技術 MPI の効果の検証

所属略称：名大院医

発表者：羽場友信、近藤晋平、林大貴、竹内瑛彦、石井崇倫、沼元瞳、小山修司

(1) 目的

近年、EGS5 を始めとしたモンテカルロシミュレーションを用いた線量計算は広く用いられている。モンテカルロシミュレーションの長所としては実測が困難な体系において非常に有用であるという点が挙げられるが、一方で短所として膨大な計算時間が必要という点が挙げられる。ところで、プログラミングの技術には、計算処理を複数のコアに分散することにより計算時間の短縮を図る並列計算という技術がある。そこで、本研究ではマルチコア CPU を有する 1 台の PC 上で並列計算を EGS5 コードに組み込むことによる計算時間の短縮及びその際の精度を検証する。

(2) 方法

今回用いた並列計算技術は MPI(Message Passing Interface)である。シミュレーション条件は医療診断分野における胸腹部 CT 撮影を想定した。人体ファントムは CTU-41(京都科学)、X 線 CT 装置は Aquilion64(Toshiba)を用いた。上述のシミュレーションを使用するコア数毎に計算し、計算時間及び臓器線量を算出した。使用したコア数は 1~6 であり、臓器線量は肺・食道・肝臓などを算出した。また、計算時間短縮に寄与する因子として PC のクロック周波数、キャッシュ容量、RAM メモリ容量を検討するため、4 種類の PC を用いて同様のシミュレーションを行った。

(3) 結果

上述のシミュレーション結果では、いずれのコア数においても、使用したコア数が 1 の時を基準として、計算時間は「1/コア数」に短縮されていた。各コア数毎の臓器線量の差異は 0.01%以内であった。また、4 種類の PC で比較したところ、クロック周波数は計算時間短縮と比例関係であった。キャッシュ容量もわずかに計算時間短縮に寄与するが、RAM メモリ容量は計算時間短縮には寄与しないという結果が得られた。

(4) 考察

計算時間は「1/コア数」に短縮されており、並列計算の理論と一致した。臓器線量の計算精度も良好であった。これより、並列計算技術は正確に EGS5 コードに組み込まれていると考えられる。また、計算時間の短縮にはクロック周波数が大きく影響するので、優先して性能を上げるのが望ましいと考えられる。本研究では並列計算技術を用いることによって、計算時間を最大で 34 時間から 6 時間程度に短縮することができ、今後 EGS5 を使用していく上で有用な手法になると期待できる。

MPI通信を用いたEGS5の大規模並列計算化 ～EGS5-MPIの概要と運用方法の紹介～

清水森人

独立行政法人 産業技術総合研究所 計測標準研究部門 量子放射科

今年の秋より10PFLOPSの演算能力を持つ京コンピュータの運用が開始されるのをはじめとして、東京大学や京都大学の大型計算機が更新され、我が国ではPFLOPS級の大型計算機を保有する施設が増えつつある。大型計算機はノード数、コア数の増加、メモリの大容量化が進み、1万プロセスを超える並列計算が当たり前の時代を迎えようとしている。加えてコスト面も大幅に改善され、計算機利用料は非常に安価となり、無料あるいは1万円程度の負担で利用できる計算機施設もある。

EGSなどのモンテカルロ計算の高速化には共有メモリ型並列計算やGPUを利用した並列計算などの努力が行われてきた。しかし、上記のように計算機が比較的安価となり、多数のノードを利用した並列計算が主流となっている現在、シングルプロセス、シングルスレッドを前提として開発されてきた計算コードを並列化する手法として、MPIを用いた分散メモリ型並列計算の実装は最も安価かつ容易な手段の一つである。

そこで、本研究では分散メモリ型並列計算の通信規格であるMPI (Message Passing Interface) を用いて、EGS5を並列化する拡張パッケージEGS5-MPIを開発した。EGS5-MPIは並列モンテカルロ計算において重要な乱数管理やrank管理、同期処理などのサブルーチンをパッケージ化したものであり、ユーザーはこれを用いて、既存のEGS5プログラムを容易に並列化できる。

EGS5-MPIはOpenMPIやMPICH2で動作し、動作OSもCygwin, Linux, Mac OSXなどで動作を確認している。現在、最大動作プロセス数は1044プロセスであり、一般のマルチコアCPUを搭載した計算機から、大型計算機まで幅広く動作するため、デスクトップPCで開発したコードをそのまま大型計算機でコンパイル、実行できるという大きな利点を持っている。

当日はEGS5-MPIの概要と共に実際にEGS5のサンプルプログラムsamppcgの並列化手順を説明し、Mac OSX上でのデモンストレーションを行う。また、EGS5-MPIを用いた医療用リニアックからの高エネルギーX線の特性計算について紹介し、大型計算機における運用上のポイントなどを説明する。

EGS5-MPIホームページ

<http://www.nmij.jp/~quant-rad/xg/egs5mpi/index.html>

EGS5による空気シャワーのシミュレーション

桶井一秀[†]、中塚隆郎[‡]、桐原陽一^{*‡}

[†] 川崎医科大学

[‡] 岡山商科大学

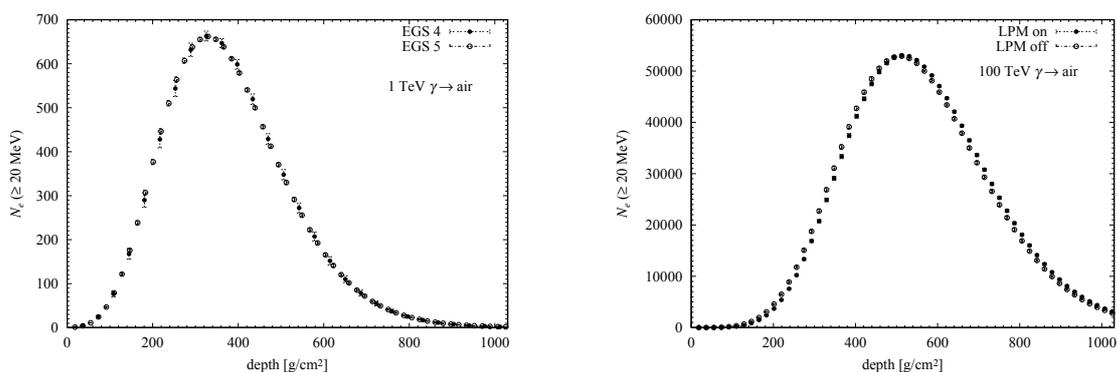
^{*‡} 理化学研究所

一次宇宙線は、エネルギーが大きくなるほどフラックスが減少し、人工衛星での観測が難しくなる。一方、エネルギーが大きくなるほど、大気と反応して引き起こす、空気シャワーが大きくなるので、地上に設置された装置で、空気シャワー現象を観測することにより、間接的に一次宇宙線について調べることが可能となる。

空気シャワーのモンテカルロシミュレーションは、シャワーの観測データから、元になった一次宇宙線のエネルギーを推定したり、観測装置の設計等に、重要な役割を果たすが、エネルギーの高い1次粒子によるシャワーでは、非常に多くの電子や光子が発生し、計算に時間がかかるため、EGSやGeant等の汎用シミュレーションコードではなく、空気シャワー用に特化したコードが利用される場合が多い。

しかし、近年のCPUの高速化やメモリーの増大により、市販PCの計算能力が向上していることと、EGS5ではLPM(Landau Pomeranchuk Migdal)効果を考慮したシミュレーションが可能となっている[1]ことから、今回我々は γ 線空気シャワーのシミュレーションをEGS5で行い、TeV領域におけるLPM効果の影響を調べた。

下図の左は、1 TeVの γ 線が空気(ucbend.inpのデータを流用)に入射したときのシャワー発達曲線を示している(縦軸は、20 MeV以上の電子、陽電子の総数)。黒丸がEGS4による100 showersの平均、白丸がEGS5による1000 showers(LPM効果なし)の平均で、EGS4とEGS5のシミュレーションは互いに矛盾がない結果となっている。右は、100 TeVの γ 線が空気に入射したときのシャワー発達曲線で、EGS5による1000 showersの平均を示している。黒丸、白丸は、それぞれLPM効果を考慮したシミュレーションと考慮しないシミュレーションの結果を示しており、100 TeV程度でも、LPM効果によりシャワーの発達が少し遅くなっているのがわかる。



光子による空気シャワーの発達曲線。左:1 TeV 右:100 TeV

参考文献

- [1] Y. Kiriara, Y. Namito and H. Hirayama, Nucl. Inst. Meth. B268 (2010)p2426

EGS5 コードによるマルチカスケード崩壊核種の検出効率の算出

海野泰裕^{1,2}, 佐波俊哉^{2,3}, 萩原雅之^{2,3}, 佐々木慎一^{2,3}

¹産総研, ²総研大, ³KEK-ARL

1. 緒言 福島原発事故により放出された放射性物質により汚染された試料を対象として、Ge 検出器を用いた γ 線スペクトロメトリ法により放射能濃度を測定してきた。これまでの測定結果から、今後も測定対象とされる核種はCs-134とCs-137であると見られる。Cs-134は同時に複数の γ 線を放出するため、測定試料の密度、組成の違いに起因する自己吸収効果に加えて、サムコインシデンス効果を補正する必要がある。本研究では EGS5 コードによるサムコインシデンス効果の補正量を導出した。また、 β 線発生過程を導入して $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 同時測定法への適用を進めている。

2. 手法 本研究では P 型 Ge 検出器(90 mm ϕ 、深さ 100 mm)を使用した。その検出効率は、独自に用意した点線源と体積線源(U8)、日本アイソトープ協会頒布の体積線源(U8)により校正した。メーカー提供情報に基づく検出器構造・配置を調整し、EGS5 で測定値の γ 線エネルギー特性を再現できるようにした。

図 1 に示す複数の γ 線放出を評価するアルゴリズムを、コードに組み込んだ。このアルゴリズムでは、あらかじめ対象核種の励起準位、遷移パス、 γ 線エネルギー、放出比を読み込み、崩壊スキームに沿って γ 線を発生させる。その結果、検出器への沈着エネルギーを出力し、光電ピーク効率を算出した。

この計算過程の初期励起準位を決定した後、あらかじめ読み込ませた分布に沿って β 線エネルギー、発生方向を決め β 線放出過程を導入し、一連の計算に β 線イベントを加えられる。

3. 評価 図 2 に、検出器直上に置いた U8 体積線源に対する検出効率の実験値と計算値の比較を示す。サムコインシデンス効果がない核種(Cr-51, Sr-85, Cs-137, Mn-54)から求められた検出効率曲線から、サムコインシデンス効果がある核種(Cs-134, Co-60, Y-88)の補正量は 10-15%程度と求められた。計算値と実験値はよく一致しており、本手法による検出効率算出は妥当であると言える。本手法は、福島原発事故直後に採取したサンプル、食品、土、水など多様な試料性状に適用できるだけでなく、 β 線同時発生も取り入れることにより、 $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 同時計数による放射能絶対測定法への適用が可能である。

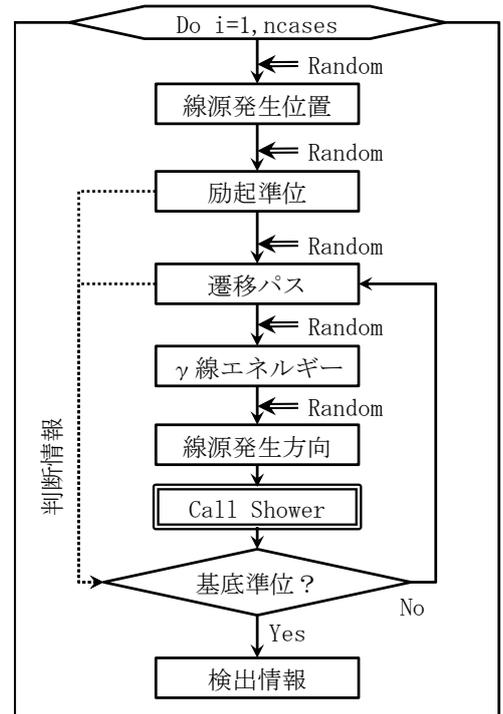


図 1 本手法の γ 線発生アルゴリズム

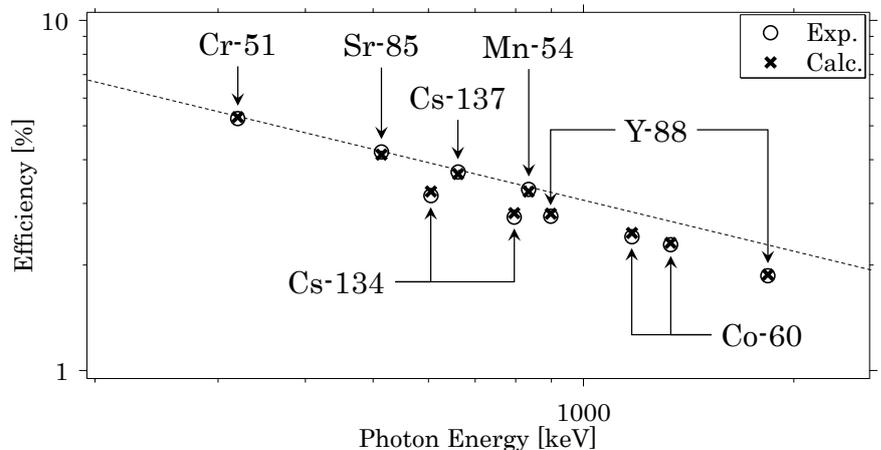


図 2 体積線源の検出効率における実験値と計算値の比較

EGS5 を用いた X 線実効エネルギー測定器の諸特性の検証

名大院医 近藤晋平 羽場友信 林大貴 沼元瞳 石井崇倫 小山修司

1. 目的

モンテカルロシミュレーションを用いて X 線 CT における線量計算を行う際に、入射 X 線の強度分布やエネルギー等の情報は極めて重要となる。そこで我々は、受光素子に PIN フォトダイオードを用いて、入射連続 X 線の実効エネルギーと強度を簡便に測定可能な測定器を作成した。あらかじめ、実効エネルギーが明らかな X 線を用いて測定器の出力を校正することによって、未知の X 線の実効エネルギーを推定することができるものである。しかし、X 線診断領域においては様々なエネルギーとスペクトルの形を持つ X 線が使用されるため、それぞれに対して特性を明らかにするには多くの時間を要する。そこで、EGS5 を用いて、さまざまな実効エネルギーをもつ連続 X 線が照射されたときの、測定器の出力値について、検証を行う。

2. 方法

PIN フォトダイオードを使った測定器を EGS5 に組み込むために、受光物質のシリコン、シリコンのベースである鉄、パッケージのポリエチレン、ベークライト基盤などを、実際の寸法を基に、ジオメトリー作成ツール CGview を用いて忠実に再現した。

入射連続 X 線は、最大エネルギーと実効エネルギーをもとに、Tucker の近似式を用いて複数の診断領域 X 線スペクトルを作成し、シミュレーション内の光子線源として使用した（最大光子エネルギー:40 keV ~ 120 keV, 実効エネルギー:24.7 ~ 71.5 keV）。

CGview を用いて模擬した測定器内のシ

リコンでの付与エネルギーを取得し、それを測定器の出力値として、実測値との比較を行った。

光子線源と検出器間の距離は 100cm、照射野は検出器面において 5cm×5cm とし、いずれも実験の体系と同様に設定した。入射光子数は計算結果の統計誤差が十分に満たされるよう設定した。

3. 結果

シミュレーション計算で得られた、シリコンの付与エネルギーと、実測値とを比較すると入射 X 線の実効エネルギーが低い部分では概ねの一致を示したのに対して、入射 X 線実効エネルギー 70keV 周辺において、最大 7.5% の差異がみられた。測定器の出力値と入射 X 線の実効エネルギーは相関がみられ、二つの関係は連続的な二次関数の近似曲線で表すことができた。この近似曲線は、実測値で確認できる近似曲線とも概ねの一致を示した。線量計の諸特性はシミュレーションにおいても確認することができた。

4. 考察

計算結果より、実験では確認しきれなかった、様々な最大エネルギーをもつ X 線スペクトルに対して、測定器の出力値と入射 X 線の実効エネルギーとの関係をあきらかにすることができた。本測定器は X 線診断領域で使用されるほとんどの X 線スペクトルにおいて、最大エネルギーや形状に関係なく実効エネルギー測定が可能であることが分かった。

ガンマカメラ用コリメータのジオメトリが定量値に与える影響の解析

吉野浩生，大倉保彦，林慎一郎，山本めぐみ
広島国際大学 保健医療学部

[序文]

一般に、核医学検査で用いられるガンマカメラ用のコリメータはカメラのメーカー等によって異なる。このことが定量値に影響を及ぼすため、別の医療機関で検査したり、同じ医療機関でも機器を更新したりすると、その値を直接比較することができなくなる。

たとえば、 ^{123}I を用いた検査では、主に 159 keV の γ 線を用いるが、これ以外に 529 keV などより高エネルギーの γ 線も同時に放出する。このため、従来用いられていた低エネルギー用コリメータに代わって、 ^{123}I 専用設計された中低エネルギー用コリメータが使われている。しかし、コリメータの変更により定量値に影響を与えることが考えられる。

また、異なるメーカーのガンマカメラおよび中低エネルギー用コリメータを用いて、同じ患者の過去の定量値との比較を行う場合、それぞれで得られる定量値の比較に関する信頼性を確保しておくことが望ましい。

[目的]

本研究では、核医学検査に用いられるガンマカメラ用コリメータの設計に関するパラメータが、プラナー像の画質に与える影響について、モンテカルロシミュレーションを用いて、詳細に解析することを目的とする。また、循環器系で画質とつながりの深い、 ^{123}I -MIBG 交感神経シンチにおける心臓と縦隔に関心領域をとる心縦隔比 (H/M 比) を求め、コリメータの違いによる画質への影響を定量的に明らかにする。

[方法]

コリメータの設計に関するパラメータは、コリメータの穴径、壁の厚さ及びコリメータ自体の厚さ(穴の深さ)であるが、まず壁の厚さを変化させながら、画質への影響を調べる。今回、シンチレータとして、 $12.5\text{cm} \times 12.5\text{cm} \times 1\text{cm}$ の NaI を用いる。これを $32 \times 32 (=1024)$ のメッシュに切り、それぞれの枠の中に飛び込んだ光子の数を数える。実際のシンチレータは $50\text{cm} \times 50\text{cm}$ 程度のサイズであるが、まず中心部分である心臓と縦隔のみが入るサイズで考える。

[結果]

壁の厚さを変化させて、画像の変化を確認した。また、壁厚の変化による H/M 比への影響を確認した。今後の課題として、壁厚だけでなく、穴の径、穴の深さも変化させて H/M 比への影響を探っていく。また、シンチレータのサイズを $50\text{cm} \times 50\text{cm}$ (128×128 メッシュ) に拡張し、臨床で利用できるものにする。

散乱線の影響を考慮したX線CT

竹本 和馬¹⁾, 徳元健太¹⁾, 山崎陽一²⁾, 戸田尚宏²⁾

1) 愛知県立大学大学院情報科学研究科 2) 愛知県立大学情報科学部

1 目的

X線CT(CT:X-ray Computed Tomography)において、これまで使用されてきたファンビームは、散乱線の含有割合が比較的低くその影響は小さいものと考えられていた。しかし、近年CTはコーンビーム化へと進んでおり、コーン角の増加に伴い散乱線の含有割合も大きく増加する。[1]しかし、従来の画像再構成法では、計算量等の問題から散乱線について十分考慮されていない。そのため、コーンビームCTにおいては、従来の画像再構成法を用いた場合、散乱線の影響が再構成画像にアーティファクトとして表れてしまう。そこで、EGS5を用いたX線CTのシミュレーションを画像再構成アルゴリズムに取り入れ、散乱線を推定しつつ、尤度と等価なI-Divergence[2, 3]を最適化することで再構成を行う、逐次最適化に基づく画像再構成アルゴリズムを提案し、その有効性を示す。

2 実験

シミュレーション体系としては、第3世代の測定構造を構築するものとする。対象物に照射する総光子数を 10^7 、エネルギーは60[keV]の単色仮定とし、回転角度方向の分割数を128、検出器はアレイ状に配置するものとしその数は64

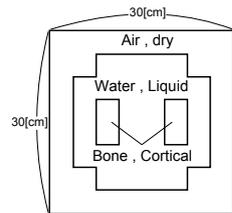
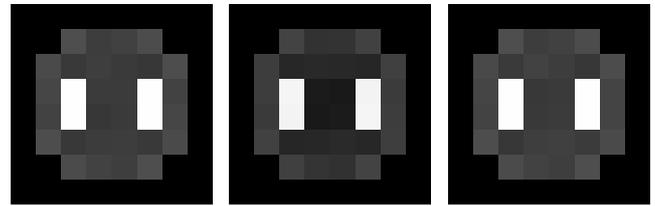


図1: 対象ファントム

とする。測定空間は30[cm] × 30[cm] × 18.75[cm]、測定対象とするファントムは、図1に示すように測定空間を8 × 8に分割したものとする。回転中心までの距離を30[cm]とする。ビーム形状はコーンビームとし、ファン角を90[deg]、コーン角を5[deg]とする。

3 結果

図1に示したファントムに対して実験を行った結果を以下に示す。図2の(a)は散乱線の含まれない測定値に対して従来法を用いた場合、つまり期待される再構成画像、(b)は散乱線の含まれる測定値に対して従来法を用いた場合の再構成画像、(c)は散乱線の含まれる測定値に対して提案手法を用いた場合の再構成画像である。従来法よりも期待される再構成画像に近いことが分かる。また、図3は真の減弱係数と各逐次回数における減弱係数の二乗平均誤差を表したものである。提案手法が良い精度となっているのは、逐次回数1000回毎に推定する散乱線量が図4に示すように精度よく求められているからである。以上の結果より、提案手法の有効性が検証された。



(a) 期待される再構成画像

(b) 従来法

(c) 逐次回数10000回

図2: 再構成画像

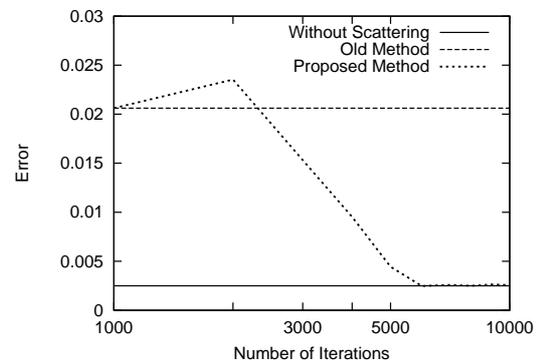
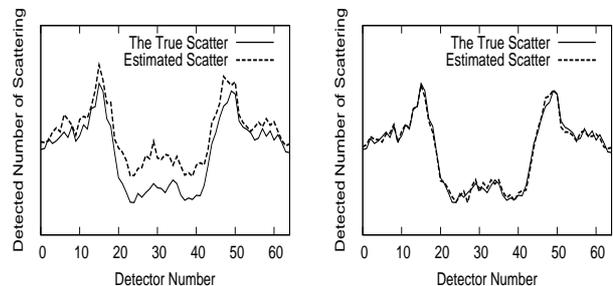


図3: 減弱係数における二乗平均誤差



(a) 逐次回数2000回

(b) 逐次回数10000回

図4: 推定散乱線量

4 考察・課題

EGS5を用いて散乱線を推定する提案手法の優位性を検証した。今後は、様々なファントムを用いること、測定空間の分割数を増加させる。また、エネルギー情報を用いる方法への発展を検討する必要がある。

参考文献

- [1] 徳元健太, 戸田尚宏, 第18回EGS研究会, 2011
- [2] J.A.O'Sullivan, J.Benac, IEEE Trans. Med. Imaging, Vol.26, No.3, pp.283-297, 2007
- [3] 山崎陽一, 戸田尚宏, 電子情報通信学会論文誌D, VolJ94-D, No7, pp.1154-1164, 2011

201Tl 経鼻投与による内部被ばく評価-前鼻道領域の光子・電子比吸収割合-

木名瀬栄¹⁾，鷲山幸信²⁾，志賀英明³⁾，滝淳一⁴⁾，中西勇介²⁾，越田吉郎²⁾，三輪高喜³⁾，
絹谷清剛⁴⁾，天野良平²⁾

1)原子力機構安全研究セ， 2)金沢大保健， 3)金沢医大耳鼻咽喉科・頭頸部外科学， 4)金沢大バイオトレーサ診療学

嗅覚障害の機能診断法の一つとして、²⁰¹Tl をトレーサとする嗅神経イメージング技術(嗅覚シンチグラフィ)が開発されている。²⁰¹Tl を用いた嗅覚シンチグラフィによる診断は、鼻腔に投与した²⁰¹Tl が嗅球へ移行する性質を用いているため、²⁰¹Tl 投与部位である前鼻道から嗅球の位置する脳の内部被ばく線量を適切に評価する必要がある。本研究では、²⁰¹Tl 経鼻投与による内部被ばく評価の一環として、モンテカルロ計算により、光子・電子に対する前鼻道や脳の比吸収割合を評価した。計算には、電磁カスケードコードである EGS4-UCSAF を使い、ICRP/ICRU 成人男女ボクセルモデルを評価対象とした。その結果、ICRP/ICRU 成人男女ボクセルモデルの前鼻道や脳について、10keV から 10MeV の単色光子・電子の比吸収割合を定量的に明らかにし、比吸収割合が光子・電子エネルギー、標的部位の質量に依存することを確認した。

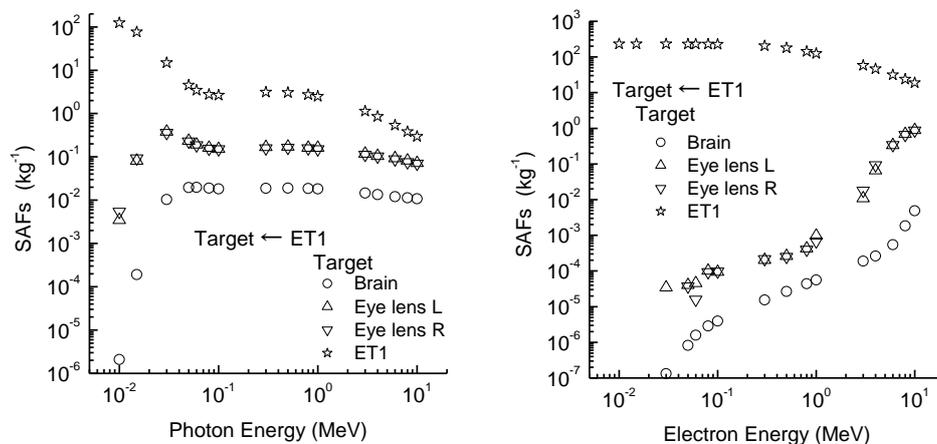


図1 ICRP/ICRU 成人女性ボクセルモデルの比吸収割合.

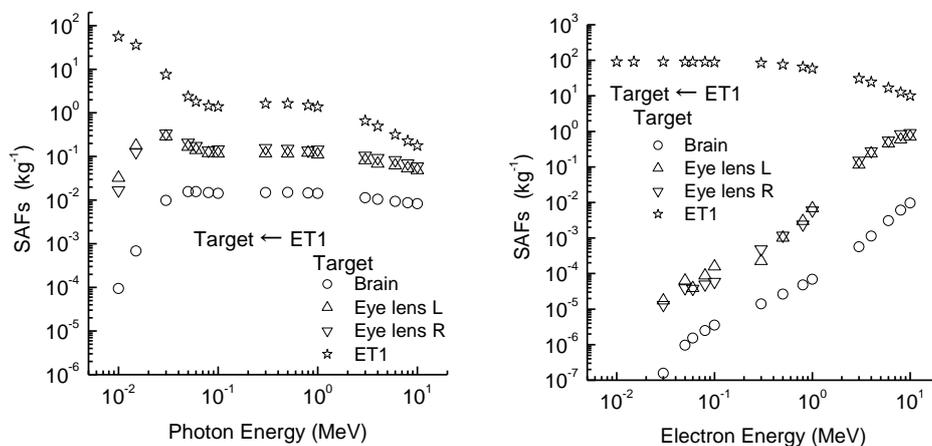


図2 ICRP/ICRU 成人男性ボクセルモデルの比吸収割合.

X線 CT 自動露出機構による被ばく低減効果の詳細な検証 —EGS5 を用いた臓器・組織での評価—

林大貴¹⁾、小山修司¹⁾

1) 名古屋大学大学院医学系研究科

【目的】

X線 CT 検査は優れた画像診断方法であるが、長年に渡って被ばくに対する問題が議論されている。今日の X線 CT 装置には、被検者の体格に合わせて管電流を自動設定し、画質の均一化と被ばくの低減化を担う CT 自動露出機構(CT-AEC)が標準装備されているが、人体被ばくの観点からみた被ばく低減効果についての詳細な報告はない。

人体被ばくの測定方法の一つに、線量計を埋め込んだ人体ファントムによる測定方法があるが、吸収線量を局所的にしか測定できず、臓器全体の被ばく線量評価や、皮膚や筋肉、骨など全身に分布している広範囲の被ばく線量測定は困難である。そこで、EGS5 を用いて CT-AEC による被ばく線量低減効果を各臓器・組織において検証した。

【方法】

実測については、東芝メディカル社製の X線 CT 装置 Aquilion64 を用いて、本学で開発された臓器・組織線量測定システムにより、各臓器・組織吸収線量を CT-AEC の有無に対して測定した。

EGS5 を用いたシミュレーションについては、線量測定システムで用いられる人体ファントムをボクセル化させたものに、日本人成人男性の平均臓器を組み込み、臓器を含有したボクセルファントムを作成した。そのボクセルファントムを、X線 CT 装置に装備されているボウタイフィルタによる線質変化・ベッドによる吸収・X線 CT 検査におけるオーバーレンジを組み込んだ実測と同じ幾何学的条件でシミュレーションを行い、各臓器・組織吸収線量を計算した。

実測とシミュレーションの整合性を確認後、CT-AEC の有無における各臓器・組織の 3D 線量分布図を作成し、CT-AEC による被ばく線量の低減の効果を詳細に検証した。

【結果・考察】

実測と計算の整合性の確認では、各臓器において差異を平均で約 4%以内に収めることができ、CT-AEC、X線 CT 装置の幾何学的条件を正確にシミュレーションできていたことが確認された。全身被ばくの指標である実効線量は、CT-AEC ON で 30.9 mSv、CT-AEC OFF で 36.3 mSv であり、約 17%の低減となっていた。また、作成した皮膚・骨・各臓器の吸収線量分布図により、X線 CT 検査による被ばく線量を把握し、CT-AEC による被ばく低減効果を詳細に検証することができた。

小児頭部 X 線 CT 検査における被ばく低減について—EGS5 を用いた検討—

所属略称：名大院医

発表者：石井崇倫、近藤晋平、羽場友信、林大貴、沼元瞳、小山修司

(1) 目的

X 線 CT 検査は現在の医療現場において欠かすことのできないものとなっている。しかし一方で、他の X 線検査と比べて患者の被ばく線量が大きく、健康への影響が懸念されており、正確な被ばく線量の把握が必要不可欠である。また、年齢による被ばくの影響を考慮することも重要である。特に乳幼児や小児は放射線感受性が成人に比べて高く、その被ばく線量を低減することは非常に重要であると考えられる。被ばく線量の低減化の方法には管電流変調や、低管電圧撮影の他に、防護具を用いた方法がある。本研究では、EGS5 を用いて頭部 CT 検査における臓器の被ばく線量を算出するとともに、防護具を用いた被ばく低減化について検討した。

(2) 方法

シミュレーション体系として、CT 装置は東芝社製 CT 装置 Aquilion64 のビーム情報や幾何学的条件を用い、ファントムは成人、6 歳児相当の小児、及び 0 歳児相等の乳幼児を模したそれぞれの人体等価ファントムを用いた。この人体等価ファントムについては、CT 画像を基に作成したボクセルファントムをシミュレーションに組み込んだ。撮影条件は頭部全脳 CT 検査を想定し、管電圧 120 kV、ビーム幅 32 mm、ピッチ 0.8 とした。種々の臓器・組織の位置と大きさを再現したボクセルファントムの臓器全体に吸収されたエネルギーから臓器線量を取得し、評価を行った。加えて、水晶体防護シートを用いた小児頭部 CT 検査における、水晶体の臓器線量を取得し、被ばく低減効果の検討を行った。

(3) 結果

シミュレーションの結果、上述の撮影条件において放射線感受性臓器である水晶体の相対吸収線量は、成人に比較して小児で 15.4 %、新生児で 60.9 %の増加がみられた。また、小児頭部 CT 検査にビスマスを防護シートに用いた場合、何も使用していない場合に比べて、小児の水晶体の相対吸収線量は 46.6 % 減少した。

(4) 考察

結果より同一条件で撮影した場合、成人に比べて乳児や小児の方が被ばく線量は高くなることが分かった。これは、患者それぞれの体型の違いによるところが大きいと考えられる。医療現場では余分な被ばくを低減するために、年齢や体型に合わせた撮影条件が設定される必要がある。また、防護具を装着することにより、水晶体の線量を十分に低減することができ、その有用性が確認できた。

EGS5 を用いたマンモグラフィにおける乳腺線量分布の推定

所属略称：名大院医

発表者：沼元瞳、羽場友信、近藤晋平、林大貴、石井崇倫、小山修司

(1) 目的

現在マンモグラフィにおける被ばく線量評価は、測定が簡易であることから、乳房表面での照射線量に変換係数を乗じて平均乳腺線量を求めることにより行われている。様々な乳房厚における吸収線量の変化の推定はモンテカルロシミュレーションを用いて行われているが、皮膚層である皮下脂肪厚の違いにおける検討は行われていない。そこで、EGS5 を用いて皮下脂肪厚の違いにおける乳腺吸収線量の違いを推定するとともに、乳腺部分における線量分布を詳細に推定することを本研究の目的とする。

(2) 方法

マンモグラフィ撮影時の装置の配置、及び乳房を模擬した半円筒ボクセルファントムをシミュレーションコード内に組み込んだ。半円筒ボクセルファントムは半径 8.0cm、乳房厚 4.5cm で皮下脂肪厚 0.1cm と 0.5cm、乳房厚 2.0cm で皮下脂肪厚 0.1cm、0.3cm、0.5cm のものを組み込んだ。線源-皮膚表面間距離はそれぞれ 57.25cm、59.75cm とし、基本条件は乳腺:脂肪=50:50、Mo ターゲット Mo フィルタ、管電圧 28kV とした。光子数は 1.0×10^9 でファントム中央部分での統計誤差が 6%未満となるよう計算を行った。

各ボクセルに蓄積されるエネルギーを取得した。その際、実際の撮影で自動露出機構(Automatic Exposure Control : AEC) を用いて X 線の遮断が行われていることを想定し、AEC が位置する撮影台の位置での線量が各計算で同じになるよう正規化を行い、相対吸収線量のグラフを作成した。また、Axial 像、Sagittal 像、Coronal 像ごとに線量分布図を作成した。

(3) 結果

乳房厚 4.5cm と 2.0cm のいずれの場合においても、皮下脂肪厚が薄くなるにつれて乳腺吸収線量が増加した。また、乳腺線量分布図では、乳房内の吸収線量を視覚的に確認することができた。

(4) 考察

乳腺組織の方が皮下脂肪を構成する脂肪組織よりも質量エネルギー吸収係数が大きいために、より多くのエネルギーが吸収される。皮下脂肪厚が薄くなるとその分乳腺組織の容積が増加するので、吸収線量が増加したと考えられる。現在、マンモグラフィ検診のガイドラインでは、平均乳腺線量の推定は皮下脂肪厚 0.5cm で検討が行われている。しかし、実際の臨床情報では約 0.1cm ということがわかっており、皮下脂肪厚 0.5cm では、乳腺吸収線量が過小評価になっているということが示唆された。

撮影状況や乳房内構造の個人差で吸収線量は異なるため、今後はボクセルファントムをより実際の構造に近付け、乳房内部の乳腺組織の含有率、管電圧やターゲットフィルタなどを変化させて比較検討を行っていく必要がある。

High Definition Multileaf Collimator の物理的特性の検証

岩本康史¹⁾、高木等²⁾、橋ノ口信一²⁾、藤原宏²⁾、田村命¹⁾、良知寿哉¹⁾、
小幡康範¹⁾³⁾、下郷智弘⁴⁾、小森雅孝¹⁾

1)名古屋大学大学院医学系研究科、2)大垣市民病院、
3)一宮市立市民病院、4)磐田市立総合病院

[背景]

放射線治療の原体照射や強度変調放射線治療では、Multileaf Collimator(MLC)を制御して正常組織の照射線量を抑えつつ腫瘍部分に放射線を集中して照射する。このときに MLC からの漏れ線量(transmission)や MLC 形状に起因する Tongue and Groove 効果により、線量分布への影響が生じる。

[目的]

今回の研究で、MLC の1つである Varian 社の High Definition Multileaf Collimator(HD MLC)の材質を変え transmission を EGS5 でシミュレーションし、それぞれの変化を比較し検討する。

[方法]

EGS5 にて、CGView を使用して Linac NovalisTX・HD MLC を組み、入射電子エネルギーを 6MV、FWHM を 3%とした。Secondary Collimator(Jaw)と MLC を 22cm×22cm, 10cm×10cm, 4cm×4cm として Percentage Depth Dose(PDD), Off Center Ratio(OCR)を取得し、実測とコミッショニングを行った。Jaw は開いた状態にして HD MLC を閉じることにより、HD MLC からの transmission をシミュレーションし、実測と比較する。また、HD MLC の材質を鉛、ビスマス、タンタルに変更して transmission を評価する。

[結果・考察]

HD MLC の材質をタンゲステンから鉛、ビスマス、タンタルに変えたとき、透過してきた transmission はタンゲステンが最も少なく、タンタル、鉛、ビスマスの順に多くなり、これらの元素に対する光子の質量減弱係数はほぼ変わらないので密度によるものだと考える。論文によりシミュレーションによる計算上でタンゲステンの密度を変えることで、transmission が減らすことができても、Tongue and Groove 効果が大きくなると報告されているので Tongue and Groove 効果の結果についても検討すべきと考えている。

有効密度法による治療計画装置と検証用測定器間の誤差改善

帝京大学大学院 医療技術学研究科 診療放射線学専攻

熊谷 仁 小林 毅範 古徳 純一

帝京大学医学部附属病院 中央放射線部

新井 範一 和賀 浩喜 安田 政美 田中 保

株式会社 ユーロメディテック 瀧本 健二

【目的・背景】

治療計画の検証作業は適切な放射線治療を遂行するうえで重要なプロセスの1つである。しかし、我々が保有する3次元検証測定器 Delta⁴ と治療計画装置 Pinnacle³ の間には2%ほどの無視しがたい系統誤差を示していた。この系統誤差の原因を究明し解決を行うために、EGS5 を使用し簡易的な PDD(Percentage Depth Dose)計算を行い、系統誤差が導けることを確認した。そして誤差の解決方法の手段として有効密度法を示し、誤差改善に有用であることを導いた。

【方法】

我々は Delta⁴ が PMMA ファントムである一方で、Pinnacle³ が Delta⁴ を再現するために水カーネルに対して物理密度の入力によって物質の定義を行っていることに注目をした。

両者の物質の吸収係数の差が系統誤差に繋がることを示唆されるが、単純に吸収係数による比較のみでは一次線の寄与のみを考慮していることになる。そこで EGS5 を用いて計算を行う事で物質中の相互作用に伴う二次線も含めた誤差推定が出来ると考えた。

EGS5 を用いてそれぞれの材質を再現したファントムを作成し、4MV、10MV のエネルギーにおいて深部 21cm まで PDD の計算を行い、相対誤差を算出した。計算用ファントムは2種類作成した。Delta⁴ を再現するために一方は物質組成を C₅H₈O₂(PMMA)、物理密度 1.19 とした。もう一方の Pinnacle³ の水カーネルを

再現するために物質組成 H₂O、物理密度 1.19 とした。history 数は 2×10⁹ とした。

また、系統誤差を改善するために式(1)から PMMA と水の減弱係数が同一になるような密度 ρ_{eff} (有効密度とする)をエネルギー毎に求め、式(2)よりスペクトルの重み付けを行うことで平均有効密度 ρ_{ave} を算出した。

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{water}} \times \rho_{\text{eff}} = \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{PMMA}} \times \rho_{\text{PMMA}} \dots (1)$$

$$\rho_{\text{ave}} = \int_0^{\text{Emax}} \rho_{\text{eff}}(E) \cdot f(E) dE \dots (2)$$

【結果】

PDD から算出された相対誤差は物質深部において 4、10MV 共に約 2%であった。有効密度法により算出した平均有効密度は 4MV で ρ_{ave}=1.155、10MV で ρ_{ave}=1.151 となった。この値を用いて再度 PDD の計算を物質組成 H₂O のファントムで計算を行った場合、2%の誤差は生じず、PMMA を再現できたことが確認できた。

また、平均有効密度を Pinnacle³ へ用いて実際の治療検証を行った場合、検証の指標である γ-index が物理密度を入力した場合と比較し 89.2%から 97.6% (tolerance:95%以上) と大幅に改善した。

EGS5 による計算は簡易な PDD 計算のみだが、実際の臨床業務に関わる問題を解決するような有用な結果を得ることができた。

EGS5 を用いたコリメータ散乱係数 Sc とファントム散乱係数 Sp の解析

良知寿哉、岩本康史、田村命、小幡康範¹⁾、下郷智弘²⁾、太田健児³⁾、小森雅孝

名古屋大学大学院医学系研究科、一宮市立市民病院放射線治療科¹⁾

磐田市立総合病院放射線治療科²⁾、岡崎市民病院医療技術局放射線室³⁾

【目的】

加速器からの X 線出力はコリメータ散乱係数 Sc とファントム散乱係数 Sp によって表される。 Sc は患者到達以前の出力変化を、 Sp は投影された照射野における出力変化を表している。これらは吸収線量を評価するための Monitor Unit (MU) 値に影響するため、その正確性が要求される。現在 Sc は PMMA を用いて測定される。水ファントムを用いて Sc を Monte Carlo simulation (MC) によって算出し、実測値と MC の計算値との比較検討を行った。同様に水ファントム中で Sp も直接計算した。

【方法】

MC にて水ファントム内から一次線量 Dp を計算する。AAPM TaskGroup74 の理論式において、この Dp は比例定数 β を用いることで衝突カーマと比例関係が成り立つ。その比例関係を用いて、水ファントム中より Dp を計算し、理論上の Sc_{sim} を算出した。同様に MC 上で水ファントム中における全吸収線量 D と Dp を使ってファントム散乱係数 Sp_{sim} を計算した。加速器は MC コード EGS5 を用いて Varian 社製 Clinac2100EX のヘッドを再現した。入射電子は 4 MeV である。照射野は一辺が 5,8,10,12,15,20,30cm の正方形で行った。そして MC 上で計算した Scp は、実測の Scp と統計誤差 $\pm 0.3\%$ 以内で一致した。ミニファントムは PMMA であり、直径 4 cm ϕ 、長径 20 cm のものを用いた。カットオフエネルギーは光子 0.01MeV、電子 0.7MeV とした。さらにターゲットからの距離 90cm のところで粒子のスペクトルを取得し、それを用いて水と PMMA の質量エネルギー吸収係数 μ_{en}/ρ と減弱係数 μ を算出した。

【結果】

計算した Sc_{sim} はミニファントムと電離箱を使った実測の Sc より高い値を、計算した Sp_{sim} は実測の全散乱係数 Scp と Sc から算出した Sp より低い値を示した。さらに MC を使った Sc_{sim} 、 Sp_{sim} は特に照射野の大きいところで実測値との相対差が大きくなった。 Sc は水ファントムとミニファントムの材質の違いを補正するため、 μ_{en}/ρ と μ を考慮することで相対差が小さくなり、同様に Sp もそれら補正を考慮することで相対差が小さくなった。

【考察】

実測は電離箱とミニファントムを用いて行い、MC 上の計算は水ファントムを使って計算している。そのため材質の違いによる質量エネルギー係数や減弱係数の違いが生じたものと考えられる。特に照射野の大きいところで相対差が大きくなった理由として、直径 4 cm ϕ のミニファントムは散乱線による影響を完全に再現できていないと考えられる。

今後、ミニファントムで測定した Sc を μ_{en}/ρ や μ を加えて MC で評価することで、より使用価値が高いものになると考えられる。

小線源治療における AAPM TG-43 に基づく治療計画とシミュレーションとの比較

辻 修平, 成廣 直正[†]

川崎医科大学

[†] 川崎医療短期大学

¹⁹²Ir 線源を使用した高線量率放射線治療は、一般に AAPM の TG-43 に従って、治療計画装置により計算され、行われる。TG-43 によれば、任意の位置 r, θ における単位時間当たりの吸収線量 $\dot{D}(r, \theta)$ は、(1) 式のように示される。

$$\dot{D}(r, \theta) = S_k \cdot \Lambda \cdot \frac{G(r, \theta)}{G(r_0, \theta_0)} \cdot g(r) \cdot F(r, \theta) \quad (1)$$

ここで $g(r)$ 関数および $F(r, \theta)$ 関数は、ある一定の大きさ、形状の水ファントムを使い、線源やカプセルの材質、形状ごとに調べられたものである。

川崎医科大学附属病院の高線量治療は、Nucletron 社製の線源 microSelectron-HDR v2 を使用している。治療計画には、同社の Oncentra を使用しており、その計算プログラムは AAPM の TG-43 に従っている。治療計画の計算に用いられている関数は、線源 microSelectron-HDR v2 用の関数を使用している。任意の位置での吸収線量の値は、Daskalov¹⁾ らのデータに準拠している。

Daskalov¹⁾ らの $g(r)$ 関数および $F(r, \theta)$ 関数は、線源を microSelectron-HDR v2 を使用したものであるが、直径 30cm の水球体ファントムに限定して調べた値になっている。よって、治療計画装置の計算では、患者体型にかかわらず、計算されているため、患者体型、すなわち散乱体の大きさ、形状によって線量が変化する。

この高線量率放射線治療は前立腺癌治療に用いられているため、シミュレーションのファントムは、前立腺癌治療を想定した。「高齢者対応機器の設計のための高齢者特性の解明に関する調査研究」のサイト²⁾ には、60 歳から 79 歳までの 206 人の人体寸法データが掲載されている。このデータをもとに、形状が、長径 322mm、短径 229mm、高さ 1308mm の楕円柱で、成分が人体の軟組織成分³⁾ のファントムでシミュレーションを行い、Daskalov らのデータを使った TG-43 をもとに計算された各位置での吸収線量と比較する予定である。

参考文献

- 1) M. Daskalov, E. Loffler, and J. F. Williamson, Med. Phys. 25 2200, (1998)
- 2) 「高齢者対応基盤整備事業トップ」<http://www.hql.jp/project/funcdb2000/>
- 3) AtomicNuclear Properties, Soft tissue (ICRP)
http://pdg.lbl.gov/2012/AtomicNuclearProperties/HTM_PAGES/261.html

EGS5 を用いた小線源治療線量計算法の有効性検証

田中憲一¹⁾、舘岡邦彦¹⁾、浅沼治²⁾、加茂憲一¹⁾、佐藤香織²⁾、武田浩光²⁾、高木克³⁾、晴山雅人³⁾、高田純¹⁾
 札幌医科大学大学院医学研究科¹⁾、札幌医科大学附属病院放射線部²⁾、禎心会 放射線治療研究所³⁾

背景

小線源治療は、病巣に限局して高線量を投与できるという特長を持っている。現状ではAAPM-TG43U1(Rivard et al. Medical Physics 31: 2004, 633-674)に基づいた計算により線量評価がなされている。この場合、線源相互の遮蔽による線量低下や、体表面近傍(5cm以内)での線量減少は考慮されない。本研究においては、この影響を考慮するものとして、EGS5に線源体系を入力して用いる手法の有効性を検証した。

方法

ファントム内外の線量を計算・実験で比較して、計算の有効性を検討した。体系の概要を図1に示す。ファントムは、18cmφ×20cm、肉厚3mmの亚克力製円筒に水を満たしたものである。ファントム中心部に¹²⁵Iシード(Oncra Inc. Oncoseed No. 6711)を、その近傍及びファントム表面にガラス線量計(旭テクノグラス製素子GD-302M)を配置した。ガラス線量計の校正は6MV-X線で行い、吸収線量の媒質変換(ガラス→水)と照射場のエネルギー補正には、質量エネルギー吸収係数比を用いた。

計算は、EGS5で行った。線源体系には、Kennedy et al. (Medical Physics 33: 2010, 1681-1688)を用いた。実験値と同様に、吸収線量の媒質変換(ガラス→水)には、質量エネルギー吸収係数比を用いた。

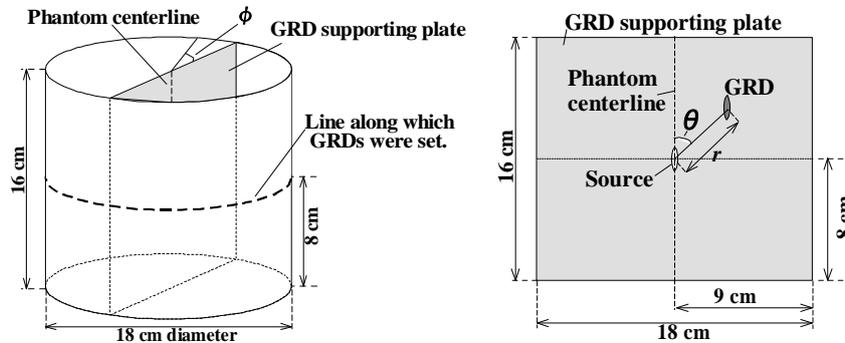


図1 計算・実験の体系概要

結果

EGS 計算値とガラス線量計測定値は、25%内の精度で一致した。これは、日本放射線腫瘍学会が勧告する放射線治療の線量精度5%よりも大きなずれを含む結果となっている。一方、治療の線量計算に現在用いられているAAPM-TG43U1が策定される段階で、線源の個体差や成形の不均一により、数十%程度のずれを内包する可能性が示唆されており、また10~15%程度の精度であるとする報告もある。現在の治療線量精度と照らして、本手法は有用なものと考えられる。

本研究における、線量評価や不確かさ推定の詳細、更にこれを用いた線量評価の可能性について報告する。

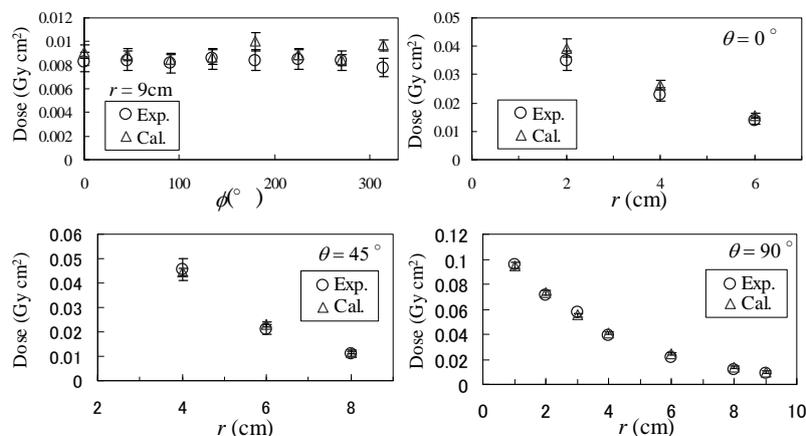


図2 実験と計算の比較の一例

謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金若手研究(B)(21791203)、および、平成22年度札幌医科大学特定医学研究推進事業費による成果の一部である。実験にあたりご支援頂いた札幌医科大学附属病院放射線部、同大学中央工作室の方々に御礼申し上げます。

第19回EGS研究会プログラム

日時:2012年8月2日、3日

場所:高エネルギー加速器研究機構研究本館小林ホール

8月2日(木)

【基礎的技術など】

13:00-14:15

- 羽場 友信 名大医 EGS5における計算時間短縮を図る並列計算技術MPIの効果の検証
清水 森人 産総研 MPI通信を用いたEGS5の大規模並列計算化
～EGS5並列計算パッケージEGS5-MPIの概要と運用方法の紹介～
桶井 数秀 川崎医大 EGS5による空気シャワーのシミュレーション

【放射線検出器】

14:30-16:10

- 海野 泰裕 産総研 EGS5コードによるマルチカスケード崩壊核種の検出効率の算出
近藤 晋平 名大医 EGS5を用いたX線実効エネルギー測定器の諸特性の検証
吉野 浩生 広島国際大 ガンマカメラ用コリメータのジオメトリが定量値に与える影響の解析
竹本 和馬 愛知県大 散乱線を考慮したX線CT

【放射線防護】

16:25-18:05

- 木名瀬 栄 JAEA ^{201}Tl 経鼻投与による内部被ばく評価
～前鼻道領域の光子・電子比吸収割合～
林 大貴 名大医 X線CT自動露出機構による被ばく低減効果の詳細な検証
～EGS5を用いた臓器・組織での評価～
石井 崇倫 名大医 小児頭部CT検査における被ばく低減について
～EGS5を用いた検討～
沼元 瞳 名大医 EGS5を用いたマンモグラフィにおける乳腺線量分布の推定

(懇親会:18時15分-19時45分 研究本館一階ラウンジ)

8月3日(金)

【治療計画】

9:00-10:15

- 岩本 康史 名大医 High Definition Multileaf Collimator の物理的特性の検証
熊谷 仁 帝京大医 有効密度法による治療計画装置と検証用測定器間の誤差改善
良知 寿哉 名大医 EGS5を用いたコリメータ散乱係数 S_o とファントム散乱係数 S_p の解析

【小線源】

10:25-11:15

- 辻 修平 川崎医大 小線源治療におけるAAPM TG-43に基づく治療計画とシミュレーションとの比較
田中 憲一 札幌医大 EGS5を用いた小線源治療線量計算法の有効性検証

(7月26日版)