

## 第25回計測分科会 教育講演 発表抄録

## X線診断領域における線量評価のためのモンテカルロシミュレーション

金沢大学大学院医学系研究科保健学専攻医療科学領域量子医療技術学 越田 吉郎

医療現場での被曝において、医療スタッフあるいは患者への評価は重要であり、放射線管理のためにも、またその対策のためにも不可欠である。さらに新技術における手技と被曝評価は技術開発における両輪として念頭に置かれることが望ましく、放射線技術開発のコンセンサスを得られることの一般論として定着化されることが期待される。それらを目指して放射線計測の技術開発が近年進展している。放射線計測技術は、放射線物理学、放射線計測学、そして計測器の開発がいままで根幹をなしていた。これらに加えて近年、シミュレーション技術が発展している。シミュレーション技術は、計測器での測定のにくい状況や種々のエネルギーが混在し特定が困難な場合、さらに微小領域での放射線の挙動を推定するのに非常に有効である。

シミュレーションには、ほとんどがコンピュータの利用となっている。高級言語を駆使し研究者が独自のプログラム作成する場合や、一般論的に開発されたプログラムを利用する場合がある。利用する者にとって、数値やパラメータを入力するだけで最終結果が出せるソフトが便利である。ImPACT CT<sup>1)</sup>、NDD法<sup>2)</sup>などはその典型であり、利用者も多くいるであろう。IVRではケアグラフなどは利用価値が高いと考えられる。しかし、個々の放射線機器装置でのケースにおいて、使用者の検査手技や医師あるいはスタッフの特殊性により、施設ごとの検査手技が異なることが多いので、一般性を求めた簡易ソフトによる結果が必ずしも有効とは言えないことがある。また、現時点における手技を改良するための問題点の解析に乏しくなることがある。やはり、個々の検査で求めたいことは、個々の事例で解析できることが望まれる。それには、個々の事例における装置配置を含めたパラメータを尊重で

きるシミュレーションが必要になってくる。そこで、高エネルギー加速器研究機構(KEK)で中心的に用いられているEGS (Electron Gamma Shower) について紹介し、診断領域における線量評価としてのシミュレーションで、どこまで踏み込めるかを報告する。

線量評価およびそのコードのさまざまな種類を表1に示す。外部被曝線量評価コードは原子力施設の遮へい計算や放射線被ばく時の体内線量分布評価などに用いられていて100種類ほどあるが、簡易計算コードと詳細計算コードに大別できる。詳細計算コードはさらにディスクリット・オーディネートコードとモンテカルロコードに分類することができる。EGSはこのモンテカルロコードを利用したもので、汎用の電磁カスケードモンテカルロコードである。その利点は、対象とした照射を受ける遮へい体・人体・検出器などの幾何学的条件と、物質との相互作用する放射線の挙動の追跡を独立的に扱えることにある。このため三次元的な広がりをもつ人体組織をも扱えることになる。

モンテカルロコードは、放射線が物質中において相互作用を起こしながら移動する様子を追跡するために、微分断面積の個々のデータに基づいた確率分布を乱数の発生から模擬的に行なう手法である。その放射線の挙動やその放射線によって生じる粒子の移動を追跡するとき、初期のエネルギーが有用なエネルギー以下になったらその追跡を終了させるが、その過程で得た放射線の挙動をヒストリーという。対象とする放射線は光子、電子、陽電子である。

物質との相互作用において光子は光電効果、レイリー散乱、コンプトン散乱(ドップラー広がりも含む)、電子対生成(トリプレットも含む)、直線偏光光子散乱、特性X線発生(オージェ電子

表1 種々の線量評価とそのコード

線量評価	
外部被ばく線量評価	
全身	BRHGAM (外部X線ビームによる吸収線量計算)、CARI (線量当量算定)、DISDOS (ファントム中の吸収線量計算)
皮膚	QUINCE、VARSKIN-2
胸部	BRA (X線マンモグラフィ、放射線治療時の胸部の線量計算)
線量換算係数	DOSFACTER-DOE (環境汚染時の線量換算係数の計算)
宇宙船内の線量計算等	ASTROS、CAMERA/CAM、SHIELDOSE、SIGMA/B
その他	ELBA (Al板に電子が入射したときの制動放射線による線量計算)、GFXやGAMP1 (大地からの自然放射線による線量計算)、REBEL-3 (室内における線量計算)
内部被ばく線量評価 (12種類以上)	
リスク・ドトリメント評価 (3種類以上)	
被ばく経路の総合的な線量・リスク評価 (63種類以上)	
遮へい計算	
簡易計算コード	G33-GP (1回散乱法)、QAD-CGGP (点減衰核法)
詳細計算コード	
DOT	(ディスクリット・オーディネート:Sn法)
EGS4	(電子-光子、モンテカルロ法)、EGS5
ETRAN	(電子-光子、モンテカルロ法)
ITS	(電子-光子、モンテカルロ法)
MORSE-CG	(中性子-光子、モンテカルロ法)
MCNP	(中性子-光子、モンテカルロ法)
HETC	(高エネルギー対応モンテカルロ法)
LAHET	(高エネルギー対応モンテカルロ法)

発生も含む)、電子・陽電子では電子制動放射、陽電子制動放射、陽電子消滅(消滅放射線発生を含む)、メラー散乱(電子-電子散乱)、パーバース散乱(陽電子-電子散乱)、弾性散乱(モリエール多重散乱モデル)、電離損失、電子衝突電離である。EGSで扱えるエネルギー領域は、光子では約1keV以上、電子では約10keV以上であり、上限は数千GeVとされているので、通常の診断領域や放射線治療領域では十分扱える。ただ、近年重荷電粒子線治療が注目されているので、陽子線や炭素線が検討できれば有用であると思われるが、まだそこまで検討されていない。モンテカルロコードによる計算では、ランダムな

乱数を利用するので、乱数の繰り返しが頻繁に起こるものは利用価値が低く、また、乱数を用いるための統計誤差を小さくするために入射粒子の個数も多くしなければならない。通常のパソコンには乱数発生機能はあるが、統計学上の有用性を求める場合、不十分である。

毎年、夏に開催されているEGS研究会<sup>3)</sup>(つくば市KEK)での発表内容をみると、原子力関連の解析や遮へい計算での発表が中心であったが、近年は高エネルギー機器装置からの放射線による線量評価および解析、小線源による放射線治療線量分布、電離箱の放射線のエネルギー特性、さらに診断領域における線量評価や散乱線評価などが目立って多くなってきている。昨年のEGSの国際大会ではX線の発生にまでシミュレーション研究が及んでいる。

すべての事例を紹介できないが、放射線遮へいにおける教育プログラム、人体内線量分布計算コード、検出器のエネルギー特性、散乱線解析などについて検討した中から供覧したい。また、KEKが開発した低エネルギー領域対象のコードを有効に利用するために、X線のスペクトルの組み込みも検討した。EGSによるシミュレーションで、RIの放射能が既知であればかなり線量評価に誤差は少なくなるが、X線管球からの出力は実測による検証がまだ不可欠である。しかし、ヒストリー解析の一部である二次電子あるいは散乱線の解析は非常に有効と考える。

まず、EGS研究会で使用しているプログラムの流れを図1に示す。基本的な流れとしては8段階のステップを踏んでいる。Step1ではマクロ

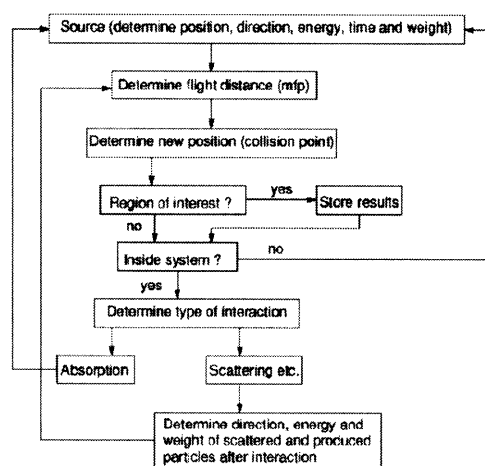


図1 シミュレーションの流れ

変更、乱数、境界までの距離などを設定。Step2ではカットオフエネルギー、制動放射の放出角度などを設定。Step3では物質データの読込。Step4では幾何形状を規定。Step5ではAUSGABでの初期化。Step6では入射粒子のパラメータの入力。Step7では設定したヒストリー数SHOW、統計処理。Step8では結果の出力、といった具合である。Step4における物質の形状定義では2通り設定でき、プログラム中で定義する場合とジオメトリ表示プログラムCGVIEWで定義する場合がある。以下、シミュレーション結果を示す。

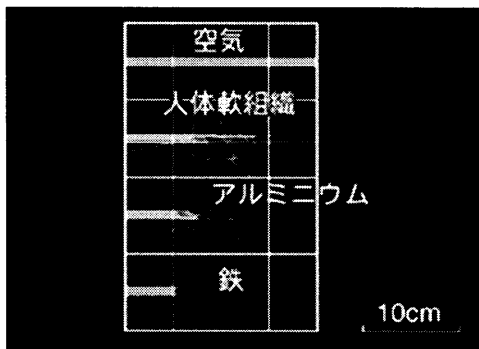


図2 物質中での300keV光子のふるまい

放射線遮へいにおける教育プログラムにおいて、飛跡表示システムEGSPICT32を用いた結果を図2に示す。厚さ10cmの空気、人体軟組織、アルミニウム、鉄中での300keV X線のふるまいをシミュレーションしている。図3に、PMMA中における30keV~120keV光子のふるまいを示す。

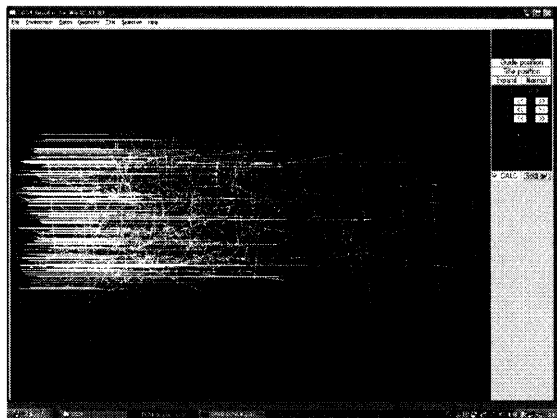


図3 30keV~120keV光子のふるまい

遮へい効果だけでなく、光子のふるまいをシミュレーションすることによって、エネルギーの領域を特定しながら、効率的な遮へい対策が講じら

れやすくなるものと考えられる。

図4にX線管ターゲットから発生するX線を物質に入射させたシミュレーションを示す。また、図5に照射野10cm×10cmにおけるMix-Dp中における線量の分布を示す。

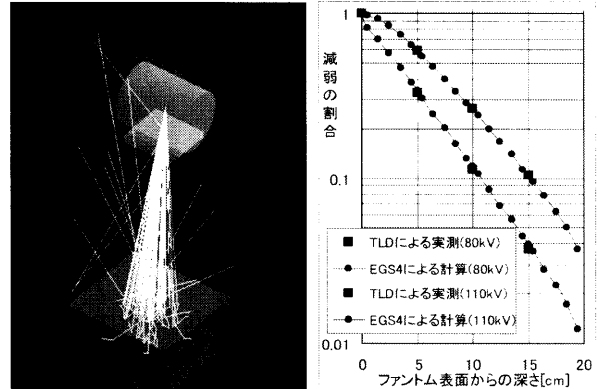


図4 物質中へのシミュレーション 図5 物質中での線量分布

TLDとの比較では±7%以内で一致していた。このとき、Mix-Dp内での任意の線量分布を求めることができる。図6に求める領域とその分布を示す。

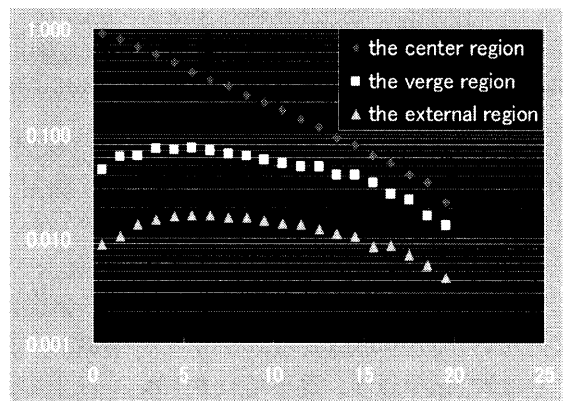
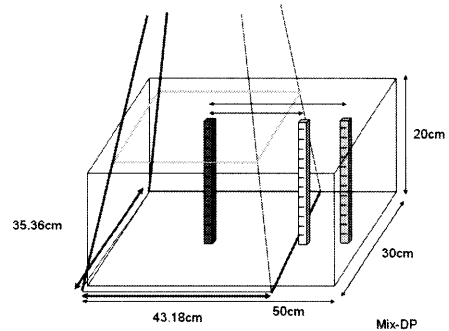


図6 任意領域における線量分布

CTimageから作成したボクセルファントムへの光子入射ができるので、図7に示す。管電圧110kVとして表面までの距離を150cm、照射野は肺野領域としてあるが、任意で設定できる。

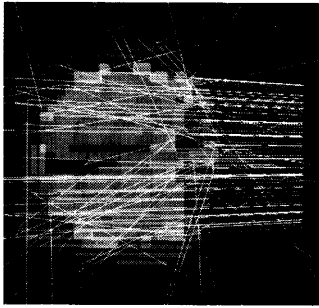


図7  
CTimageによるボクセルファントムへの光子入射シミュレーション

IVR領域での被ばくあるいは防護が検討されている。実測は最優先であるが、被ばくを回避するための検討では実測のみでtrial&errorでは時間的にも経費的にも浪費が多くなる。その点、シミュレーションは便利なツールである。図8にIVRでのシミュレーション例<sup>4)</sup>を示す。

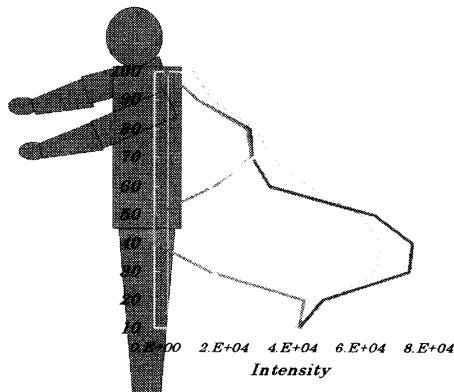


図8 腹部検査での術者被ばくシミュレーション

そのとき、散乱線のスペクトルもシミュレーションで推定できる。図9にその様子を示す。

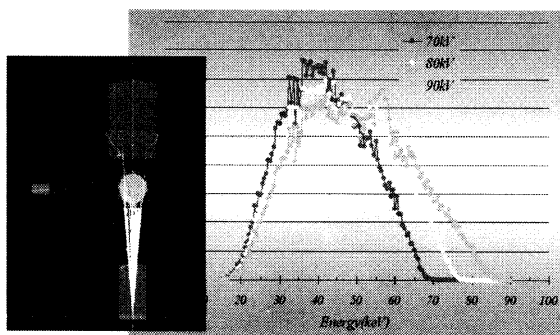


図9 散乱線スペクトルのシミュレーション

これらのシミュレーションには乱数が使用されている。その乱数は、まったくの乱数というものは非常に難しいので、擬似乱数が用いられている。なかでもD.H.Lehmer が提唱した線形合同法が最も広く使われている。以下にその擬似乱数を示す。

$$R_{n+1} = \text{mod}(aR_n + b, m)$$

:  $\text{mod}(aR_n + b, m)$  は、 $aR_n + b$  を  $m$  で割ったときの余りである。 $a, b$  及び  $m$  は、正の整数で  $m$  は、コンパイラで使用可能な整数の最大値である。

EGSのSLACRAN6では、 $a: 663608491$ 、 $b=0$ 、 $m=2^{31}$ の値を用いている。

シミュレーションはそれ自体単独で、線量評価への有意性をまだ実証できない分野であり、実測という検討がなされて初めて有意性が論議できる。しかし、retrospectiveあるいはprospectiveなものを追求するのに有用性があると考えられるので、シミュレーション技術の本領発揮といえる。また、新技術開発において、空間的にも経費的にもムダを最小限に抑えることができる。現在、UNIX系の利用者が増えていることを考慮し、C言語を前提としたEGS5へのグレードアップが進んでおり、2004年のEGS研究会で初公開された。今後、この領域に携わる研究者が増加し、様々なアイデアを提案する者と有用なプログラム開発者が輩出することを願う。

最後に、EGSで参考となる海外のホームページ<sup>5)</sup>を幾つか列挙しておくので、参照してほしい。

#### 参考文献

- [1] ImPACT CT Patient Dosimetry Calculator, <http://www.impactscan.org/dosesurvey.htm>
- [2] X線診断領域における患者の表面入射線量簡易換算式, <http://sunshine.ne.jp/~iart/ndd.htm>
- [3] <http://rcwww.kek.jp/egs4cinf/>
- [4] 越田吉郎、曾田卓実、能登公也、福田篤志、松原孝祐、中川浩人、川端千香子、腹部血管造影検査におけるX線防護衣の遮へい評価, 日放技学誌, 61, 7, 989-996, 2005.
- [5] <http://www.slac.stanford.edu/egs/>  
[http://www.slac.stanford.edu/egs/egs4\\_source.html](http://www.slac.stanford.edu/egs/egs4_source.html)  
[http://www.sao.nrc.ca/inms/irs/EGS4/get\\_egs4.html](http://www.sao.nrc.ca/inms/irs/EGS4/get_egs4.html)  
<http://tide.guillemet.org/mc/>  
[http://ccwww.kek.jp/kek/rad/center/egs4\\_japan.html](http://ccwww.kek.jp/kek/rad/center/egs4_japan.html)