

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19591463

研究課題名（和文） 投与線量検証を可能にする高精度光子ビーム照射シミュレーション実用化に関する研究

研究課題名（英文） A feasibility study on Monte Carlo simulation for delivered dose verification of photon precision radiotherapy

研究代表者

齋藤 秀敏 (SAITOH HIDETOSHI)

首都大学東京・人間健康科学研究科・教授

研究者番号：50196002

研究成果の概要：

我々は高精度吸収線量計算システム構築を研究目的として、超並列コンピュータシステムを利用した外部放射線治療のためのシミュレーションシステムの開発を行っている。このシステムの計算精度、計算速度および利便性を向上させ、ファントムと線量計を使用して行っている現状の投与線量検証をシミュレーション可能にするため、主に次の研究を行った。

- (1) ターゲットから放出される光子治療ビームの特性解析
- (2) 治療ヘッドによる散乱現象解析
- (3) モニタ設定値計算法開発
- (4) 計算の高速化のためのハードウェア

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：内科系臨床医学・放射線科学

キーワード：放射線治療物理学、放射線治療計画、線量計算、モニタ設定値、ヘッド散乱係数、モンテカルロシミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

我々は、超並列コンピュータシステムを利用し、高精度吸収線量計算システム構築を研究目的の一つとした、「放射線治療遠隔支援のための線量計算システム」に関する研究に参加してきた。(科学技術振興機構、戦略的

創造研究推進事業応募研究領域、研究課題名「放射線治療の高度化のための超並列シミュレーションシステムの開発」研究代表者 日本原子力機構 齋藤公明 平成14年度～平成19年度)

この研究は、超並列計算機によるモンテカ

ルロシミュレーションを基本アルゴリズムとする吸収線量分布計算プログラムの開発と、高速ネットワークによる遠隔、共同利用のインフラストラクチャなど情報科学的分野の発展に重心をおいた研究であった。

この研究プロジェクトは終了したが、医学利用のためにはさらにその精度、計算速度、利便性を向上させる必要があることが明らかになってきた。

このため、本研究では主に以下の項目を目的とした。

- (1) ファントムと線量計のみで行う現在の投与線量の検証における測定器の空間分解能、エネルギー特性などに理論的な裏づけを与えること。
- (2) 線量計算プログラムと計算パラメータを最適化すること。
- (3) これらによって、現在のファントムと線量計のみによる検証の不確かさを補う異なる検証システムへ発展させること。

## 2. 研究の目的

我々は、超並列コンピュータシステムを利用し、高精度吸収線量計算システムに関する研究を行っている。本研究では医学利用のための精度、計算速度、利便性の向上を図り、ファントムと線量計のみで行う現在の投与線量検証における測定器の空間分解能、エネルギー特性などに理論的な裏づけを与え、さらにこれまで開発した線量計算プログラムと計算パラメータを最適化し、現在のファントムと線量計のみによる検証の不確かさを補う異なる検証システムへ発展させるため、次の研究を行った。

- (1) 照射ヘッドからの治療ビームの特性を明らかにすることを目的に、ターゲットから放出される光子のエネルギー、放出方向に関する研究を行い、スリット法による実験データを裏付けるデータを提供した。
- (2) 計算精度を向上させるため、ヘッド散乱の解析と新たな散乱係数算出法の提案を行った。
- (3) モンテカルロ法によるモニタ設定値計算のための絶対吸収線量計算法とコミッションング方法の提案を行った。
- (4) モンテカルロ法線量計算の高速化と計算費用軽減のため、グラフィックスプロセッシングユニット (GPU) を利用した計算システムの提案を行った。

以上について報告する。

## 3. 研究の方法

前项目的で示した以下の4テーマのための研究方法は次のとおりである。

- (1) ターゲットから放出される光子治療ビームの特性解析  
照射ヘッド内、特にターゲットから発生す

る X 線治療ビームの解析は、照射ヘッドをモデル化したシミュレーションとイメージングプレートを使用したスリット法を併用した。ターゲットから発生する 1 次光子とターゲットに入射する電子の空間分布の関係を明らかにするため、モンテカルロ法により電子をターゲットへ入射させ、ターゲットから発生する光子をシミュレートした。さらに、スリット法による測定とシミュレーションから得られた結果の比較により、ターゲットへの入射電子の空間強度分布とターゲット射出面での光子の空間強度分布の関係を明らかにした。

### (2) 治療ヘッドによる散乱現象解析

照射野に入射する光子の全エネルギーフルエンス  $\Psi_{\text{total}}$  は 1 次光子のエネルギーフルエンス  $\Psi_p$  と散乱光子のエネルギーフルエンス  $\Psi_s$  の和であり、次式で示すことができる。

$$\Psi_{\text{total}} = \Psi_p + \Psi_s \quad (1)$$

散乱光子は治療ヘッド各構造物、プライマリコリメータ、フラットニングフィルタ、照射野コリメータおよびその他のコンポーネントから発生する。一次光子は照射野によらず一定で、散乱光子のみが照射野に依存するため、リアックからの照射野による出力の変化、ヘッド散乱係数  $S_h$  は次式で算出できる。

$$S_h(A) = \frac{\Psi_p + \Psi_s(A)}{\Psi_p + \Psi_s(A_{\text{ref}})} \quad (2)$$

このことから、各ヘッドコンポーネントからの散乱光子の発生効率と散乱角等の特性を、照射ヘッドをモデル化したシミュレーションにより解析した。

また解析結果から、散乱光子はプライマリコリメータ (pcol) およびフラットニングフィルタ (ff) から発生すること、これらはビーム軸からの距離  $r$  の関数  $d\Psi(A)$  として表わせることが明らかになり、次式で散乱光子のエネルギーフルエンス  $\Psi_s$  を求めることが可能である。

$$\Psi_s(A) = \int_A \{d\Psi_s^{\text{pcol}}(r) + d\Psi_s^{\text{ff}}(r)\} dr \quad (3)$$

これによりヘッド散乱係数  $S_h$  がマルチリーフコリメータを利用した複雑な照射野形状でも計算可能であることを検証した。

### (3) モニタ設定値計算法開発

モンテカルロ法による線量計算では、計算ヒストリーに対する吸収線量の積分値、あるいは単位フルエンス当たりの吸収線量を求めることが多い。しかし、標的へ処方線量を投与するためのモニタ設定値  $MU$  算出方法の開発が必要である。

深さ  $d$  にあるターゲットに対して照射野  $A$  の条件での条件で処方線量  $D$  [Gy] を照射す

る場合、現状の治療装置では最も単純な式で表現するとモニタ設定値  $MU$  を次式で計算できる。

$$MU = \frac{D}{TPR(d, A) S_p(A) S_h(A) DMU} \quad (4)$$

ここで、 $S_h$  はヘッド散乱係数、 $S_p$  はファントム散乱係数、 $DMU$  はモニタ線量計校正定数である。

一方、モンテカルロ法から得られる吸収線量  $D^{MC}$  は単位フルエンス当たりの吸収線量で表わされる。この  $D^{MC}$  から  $MU$  を算出するため、本研究では治療装置のモニタ校正定数から、単位  $MU$  当たりに照射される光子フルエンスを変換係数  $k_\phi$  として以下の式で算出した。

$$k_\phi = \frac{DMU}{D^{MC}(d_r, A=10\text{cm} \times 10\text{cm})} \quad (5)$$

これらから、任意の深さ  $d$ 、照射野  $A$  で標的に対して処方線量  $D$  を投与するために必要なモニタ設定値  $MU^{MC}$  を次式で算出できることを示し、検証した。

$$MU^{MC} = \frac{D}{D^{MC}(d, A) S_h(A) k_\phi} \quad (6)$$

#### (4) 計算の高速化のためのハードウェア

従来、モンテカルロシミュレーションの高速化は、超並列コンピュータシステムの利用環境を整備することで対応できるとして、「放射線治療遠隔支援のための線量計算システム」の開発を行ってきた。しかし、コンピュータを超並列化した場合には大量のデータ転送が発生し、高速のバックボーンネットワークを必要とし、期待される計算速度が得られないことが明らかになった。さらに、計算センター、病院情報システム間のセキュリティポリシーの相違、個人情報セキュリティ、各治療施設の状況に応じた個別化、処理の分散、等が必要であり、状況は各治療施設が所有する高速シミュレーションシステムが必要となっている。

このため、3次元計算を専門に行うビデオカード (Graphics Processing Unit; GPU) の利用、転送データのリアルタイム圧縮によるシミュレーションの高速化を試みた。

#### 4. 研究成果

##### (1) ターゲットから放出される光子治療ビームの特性解析

図1に Sommerfeld の理論式による制動放射線の角度分布とリニアック (Clinac 21EX, Varian 社) のターゲットモデルを用いた Monte Carlo シミュレーションによるターゲットから発生した制動放射線の角度分布の比較を示した。同図は、Sommerfeld のターゲ

ット物質が非常に薄い場合にのみ利用できる理論式であり、リニアックで使用する厚いターゲット内での電子の多重散乱、光子の散乱、減弱を再現できないことを示している。この結果から、ターゲット射出面での空間強度分布のサンプリング方法が高精度シミュレーションの重要な課題の一つであることが明らかになった。

ターゲット射出面での空間強度分布のサンプリング方法として、従来低エネルギーで利用されていたスリット法を改良し、治療エネルギーでの応用を試みた。図2はターゲット射出面での X 線空間強度分布の一例である。

このターゲット射出面での X 線空間強度分布から逆コンボルーションにより求めたターゲット入射電子の空間強度分布を図3に示した。従来、入射電子の空間強度分布はガウス関数で近似できるとされてきたが、すそ野での形状が異なることが明らかになった。

[学会発表2, 他2篇]

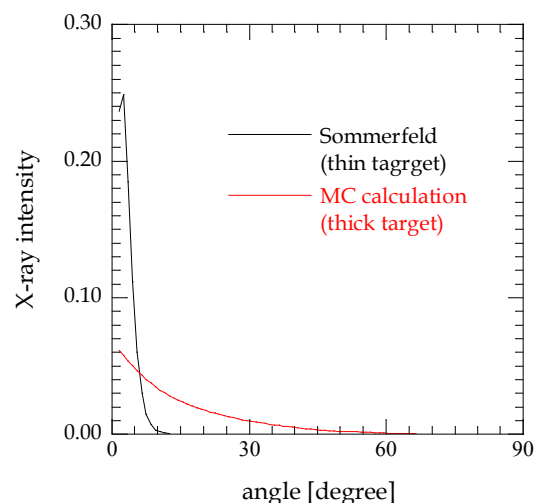


図1 Sommerfeld の理論式とシミュレーションによる制動放射線の角度分布の比較 (6 MeV)

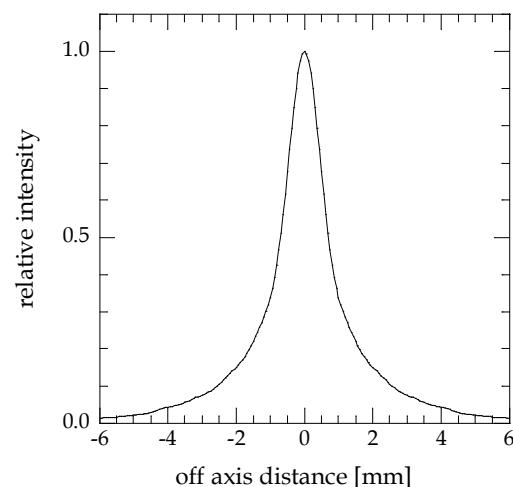


図2 ターゲット射出面での X 線空間強度分布の一例

(2) 治療ヘッドによる散乱現象解析

シミュレーションにより、照射ヘッドコンポーネントごとの散乱光子の発生効率、エネルギースペクトル、散乱角などのサンプリングを行った。このデータの一例として、図4に照射野による一次光子と散乱光子のフルエンスの変化を示した。一次光子は照射野に依存せず、散乱光子のみが照射野に依存することが示されている。

図5は、治療ヘッドコンポーネントごとの散乱光子フルエンスの照射野による変化である。散乱光子はプライマリコリメータとフラットニングフィルタから発生することが示されている。解析結果から、散乱光子はプライマリコリメータおよびフラットニングフィルタから発生するとして、これらをビーム軸からの距離  $r$  の関数  $d\psi(A)$  として表わし、式(3)によって散乱光子エネルギーフルエンス  $\psi_s$  を求め、さらに一次光子フルエンスからヘッド散乱係数  $S_h$  を算出した。

さらに、散乱光子の分布はガウス関数で近似できるとして、照射野をアイソセンタを中心として等角度に  $N$  等分し、照射野辺縁までの距離  $r$  から散乱光子によるエネルギーフルエンスを求め、照射野について積分する、次のような半実験式も開発し、その有用性を示した。

$$S_h = (a_1 \cdot c_{eq} + 1) \sum_{i=1}^N [1 + a_2 \operatorname{erf}(r_i / \sigma^2)] / H_0 \quad (7)$$

当初、ヘッド散乱係数はヘッドコンポーネントから照射野に到達する散乱光子の変化のみに依存するとして研究を進めたが、測定値との乖離があった。この原因を究明した結果、照射野コリメータからモニタ線量計への後方散乱もヘッド散乱係数を決定する要因であることが判明した。図6は、照射野コリメータからモニタ線量計への後方散乱線の照射野による変化の一例である。

以上から、複雑な MLC 不整形照射野のためのヘッド散乱係数計算法を提案した。  
[学会発表 3, 4, 5, 7, 8]

(3) モニタ設定値計算法開発

単位フルエンス当たりのモンテカルロ法から得られる吸収線量  $D^{MC}(d, A)$  の正しさの一例を、深さ 10 cm における照射野によるファントム内の吸収線量の変化、ファントム散乱係数として図7に実験と計算と比較して示した。また、ヘッド散乱係数については前項に示した結果によって、高い精度で求められる段階になった。

したがって、単位 MU 当たりに照射される光子フルエンス変換係数  $k_{\Phi}$  を用いることで、モンテカルロ法による線量計算からモニタ設定値  $MU$  算出が可能であることを示した。今後、より複雑な形状の照射野、IMRT でのモ

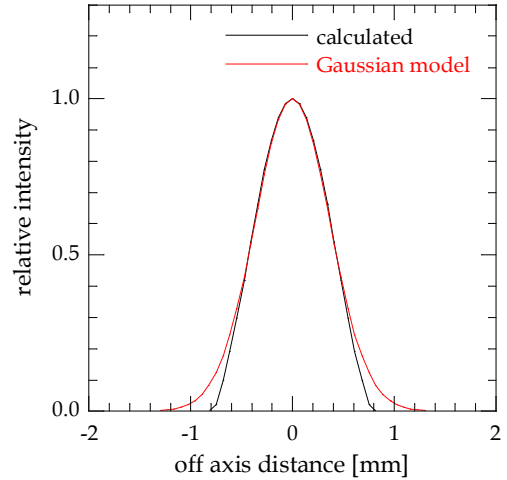


図3 ターゲット射出面の X 線空間強度分布から算出したターゲット入射電子の空間分布とガウス分布との比較

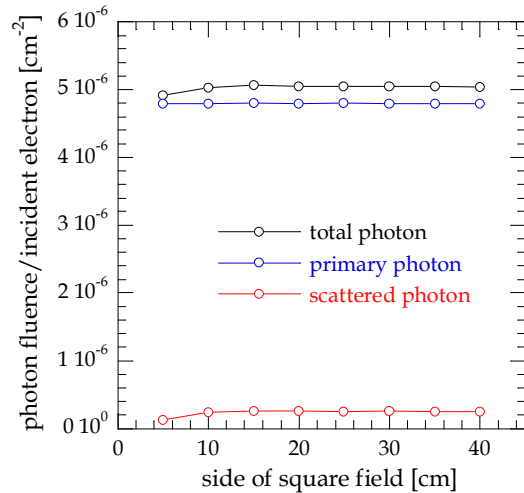


図4 照射野による1次および散乱光子フルエンスの変化

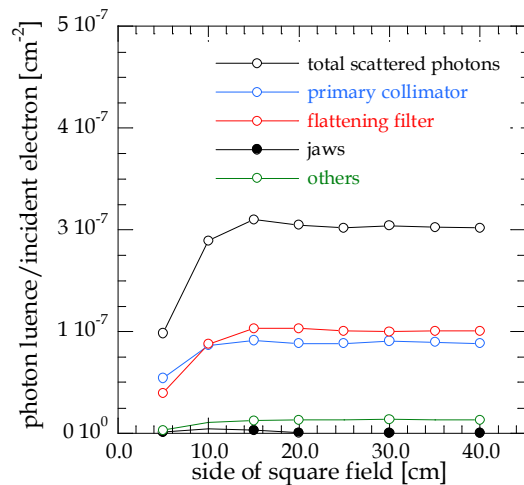


図5 散乱光子発生部位ごとの照射野によるフルエンスの変化

ニタ設定値計算の可能性について研究を進める予定である。

[学会発表 6]

(4) 計算の高速化のためのハードウェア

CPU、GPU によるリアルタイム圧縮により、出力される線量分布データ転送の高速化が可能となることが確認された。本方法は PC のネットワーク間データ転送の高速化のみではなく、PC 内でのデータ転送に利用することにより、モンテカルロ計算の更なる高速化が可能であることが示唆され、今後の検討課題ある。

[学会発表 1, 他 3 篇]

以上の研究成果の一部は〔雑誌論文 1〕にて発表した。また日本医学物理学会学術大会教育講演資料として、総論として〔雑誌論文 2〕にて発表した。

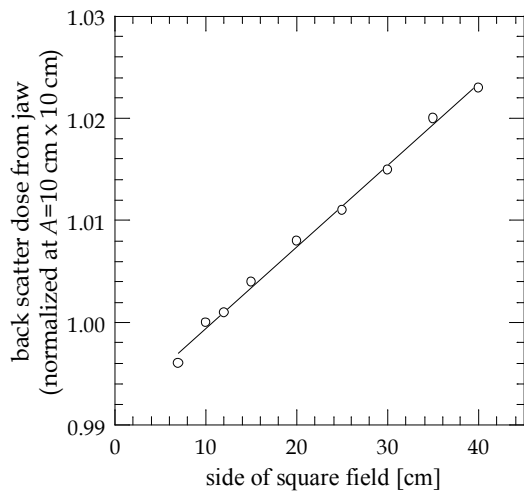


図 6 照射野コリメータからモニタ線量計への後方散乱線量の照射野による変化

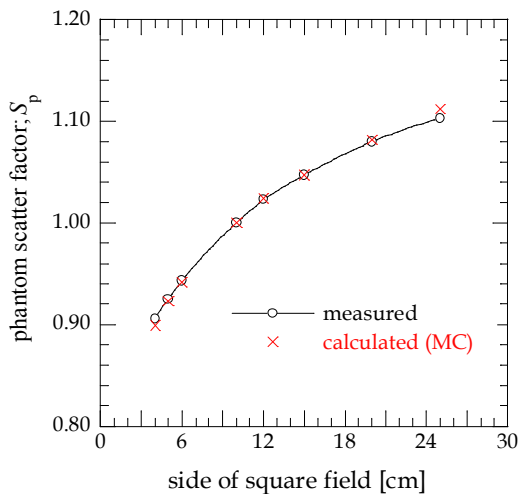


図 7 ファントム散乱係数の測定と計算の比較

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 T. Kawachi, H. Saitoh, M. Inoue, T. Katayose, A. Myojoyama, K. Hatano, Reference dosimetry condition and beam quality correction factor for CyberKnife beam, Medical Physics, 査読有, 35 巻 10 号, 4591-4598, 2008.
- ② 齋藤秀敏, モンテカルロシミュレーションと放射線治療物理, 医学物理, 査読無, 29 巻サブプリメント 1, 21-39, 2008.

[学会発表] (計 14 件)

- ① A. Myojoyama, H. Saitoh, GPU-Based Monte Carlo Calculation for Accurate 3D Dose Distribution, 5th Korean-Japan Joint Meeting on Medical Physics, 2008. 9. 10, 韓国 済州島.
- ② S. Hatanaka, T. Fujisaki, A. Myojoyama, Y. Fujita, H. Saitoh, Spatial intensity distribution of photons from target, 5th Korean-Japan Joint Meeting on Medical Physics, 2008. 9. 11, 韓国 済州島.
- ③ 宮下久之, 明上山温, 畑中星吾, 藤田幸男, 齋藤秀敏, モンテカルロ法を用いたヘッド散乱係数の算出, 第 21 回日本放射線腫瘍学会学術大会, 2008. 10. 17, 札幌.
- ④ 野武亮一, 前原正義, 種市陽子, 畑中星吾, 明上山温, 齋藤秀敏, ガウス関数を用いたヘッド散乱係数の計算法, 第 95 回日本医学物理学会学術大会, 2008. 4. 9 横浜.
- ⑤ 野武亮一, 齋藤秀敏, 中心軸外での空中軸外線量比を用いた MU 計算の検討, 第 20 回日本放射線腫瘍学会学術大会, 2007. 12. 24, 福岡.
- ⑥ 鈴木裕也, 齋藤秀敏, 藤田幸男, 他,  $\gamma$  評価法を用いた 3 次元のコミッショニングの検討, 第 20 回日本放射線腫瘍学会学術大会, 2007. 12. 24, 福岡.
- ⑦ 宮下久之, 明上山温, 齋藤秀敏, フラットニングフィルタからの 1 次・散乱光子比を用いた等価正方形照射野の決定, 第 94 回日本医学物理学会学術大会, 2007. 9. 28, 新潟.

- ⑧ 大山生乃, 明上山温, 齋藤秀敏, ヘッド  
散乱係数のコリメータ反転効果に対する  
幾何学的検討, 第94回日本医学物理学会  
学術大会, 2007.9.28, 新潟.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

齋藤 秀敏 (SAITOH HIDETOSHI)

首都大学東京・人間健康科学研究科・教授  
研究者番号: 50196002

### (2) 研究分担者

藤崎 達也 (FUJISAKI TATSUYA)

茨城県立医療大学・保健医療学部・准教授  
研究者番号: 00285058

国枝 悦夫 (KUNIEDA ETSUO)

慶応義塾大学・医学部・講師

研究者番号: 70170008

明上山 温 (MYOJOYAMA ATSUSHI)

首都大学東京・人間健康科学研究科・助教  
研究者番号: 90347279

藤田 幸男 (FUJITA YUKIO)

首都大学東京・人間健康科学研究科・リサーチアシスタント  
研究者番号: 10515985