

体幹部定位照射においてコンボリューション法による  
線量計算の精度を高める手法の開発

(研究課題番号：18591375)

平成18年度～平成19年度科学研究費補助金（基盤研究（C））

研究成果報告書

平成20年3月

研究代表者 岩崎 晃

(弘前大学・大学院保健学研究科・教授)

## 目 次

I. まえがき	1 頁
II. 研究組織	2 頁
III. 研究経費	2 頁
IV. 研究の経過	3 頁
V. 今後の課題	4 頁
VI. まとめ	5 頁
VII. 研究発表リスト	5 頁
VIII. 研究成果資料	6 頁

## I. まえがき

X線が高エネルギーになるにつれて、発生する二次電子の運動エネルギーが高くなり、その飛程が特に低密度媒体内で長くなる。この場合、水ファントムで得られた線量をもとに、不均質媒体の存在に起因する線量増加又は減少を補正係数法 (correction-based method) でもっては、一般に精度高く評価できなくなる。特に小照射野の場合、この傾向が強まる。

放射線治療は、外科手術を伴わないメリットを有する。特に頭頸部領域など機能の温存が重視されている部位での治療に有効である。しかし、線量補正係数法に基づく線量評価に依存すると、頭頸部腫瘍に対する高エネルギーX線照射の放射線治療成績は他の部位と比較し、必ずしも所定の成果が得られないことがある。その一因として、補正係数法では、低密度不均質の一種である気道に対する不均質補正が精度高く行うことができないことにある。肺癌治療の胸部照射においても、同様な現象が起きる。不均質が高原子番号（歯の詰め物など）場合にも、それを取り巻く軟組織においての線量評価の精度低下が起こる。

コンボリューション法 (convolution/superposition method) は、モデル・ベース法 (model-based method) のひとつである。この方法は、2次電子の振る舞いを直接的に考慮して線量計算を行うので、2次電子平衡の崩れの程度を線量計算に反映させることができる。2次電子平衡の崩れは、ビーム入射面領域、不均質境界面領域、照射野辺周辺領域で起こる。この方法で、一般に線量計算精度の向上を図ることができる。この計算原理が単純であるが故に、汎用性はあるが、入れるべき基礎データの良し悪しに計算結果が大きく作用されることも事実である。この方法を採用している市販の治療計画装置では、照射野が小さい場合、必ずしも精度の高い線量計算に至っていない。このことは、小照射野になる程、X線発生装置固有の特性が表れるためである。

定位照射においては、MLC (multi-leaf collimator) による小不整形照射野を多用する。MLCを構成する各リーフは複雑な構造になっている。この場合、MLCを単なるX線遮蔽体として扱うことができない。なぜならば、一定なジョウ照射野のもとで、MLC照射野の変化でX線出力が一般的に変わるからである。また、MLCを漏洩するX線による線量評価も重要健康組織に対しては重要である。これらの問題に関連されると、オープン・ジョウ照射野でのX線出力計算法、ジョウ・コリメータと組み合ったMLC照射野でのX線出力計算法、並びに軸外距離と共に変わるX線スペクトルの取得法の確立が重要となることが理解される。

昨今、コンピュータの高速化により「モンテカルロ法」が重宝され、線量分布計算にも用いられるようになりつつあるが、その計算原理はさらに単純であり、より汎用性はある

が、入れるべき基礎データの良し悪しに、計算結果がさらに大きく作用されるはずである。モンテカルロ法は、精度の高い線量計算が可能であるが、現段階では余りにも長い計算時間を必要とするので、治療現場では特別な場合を省いて利用しがたい状況にある。

本研究では、体幹部定位照射において、コンボリューション法による線量計算の精度を高める手法の開発を行った。当初予定した研究時間が取れなかったため未着手の研究項目が残念ながら存在する。この冊子には、社会人大学院生4人と共に得られた研究成果を取りまとめ、「第15回放射線治療におけるコンピュータ利用に関する国際会議(ICCR 2007, カナダ・トロント, 2007年6月4-7日)」に提出したプロシーディング4編と、社会人大学院生4人との共同研究成果の資料4編とが含まれている。これをもって、科学研究費の責務に答えるものである。

なお、本研究にあたり、弘前大学医学部附属病院放射線部、青森県立病院放射線科、青森市民病院放射線科、並びに三沢市民病院放射線科の関係者に物心両面にわたって多大なご協力を頂いた。ここに感謝の意を表します。

## II. 研究組織

研究代表者： 岩 崎 晃 (弘前大学・大学院保健学研究科・教授)  
研究分担者： 廣 田 淳 一 (弘前大学・大学院保健学研究科・准教授)  
研究分担者： 久保田 護 (弘前大学・大学院保健学研究科・助教)  
研究分担者： 阿 部 由 直 (弘前大学・大学院医学研究科・教授)

### 補足的な研究組織

社会人大学院生：木 村 重 伸 (青森市民病院)  
社会人大学院生：清 野 守 央 (弘前大学病院)  
社会人大学院生：駒 井 史 雄 (青森県立病院)  
社会人大学院生：笹 森 真 実 (三沢市立病院)

## III. 研究経費

平成18年度	2,400千円
平成19年度	1,000千円
計	3,400千円

#### IV. 研究の経過

平成18、19年度の2年間は、本題（体幹部定位照射において、コンボリューション法による線量計算の精度を高める手法の開発）に関して、主に社会人大学院生（4名）との共同研究に終わった。彼らが所属していた弘前大学病院、青森県立病院、青森市立病院、三沢市民病院に設置されているX線発生装置（リニアック）を中心に用いて実験的及び理論的研究を行った。臨床に直結した研究は、時間的余裕がなかったため遂行できなかったが、今回の研究は、本題に向けて基本的に重要な要素を含む。以下に、社会人大学院生と共に研究した内容の概要を5項目に分けて記す。

- (1) 10個程度のエネルギービンでもって、水などの低原子番号媒体から鉛などの高原子番号媒体に適用するX線スペクトルを再構築するにあたり、X線スペクトルが軸外距離と共にどのような特性でもって変化するかを調べた。調べたX線発生装置は6種類に及んだ。その結果、X線発生装置ごとに、又同じX線発生装置でも加速電圧が変わるつど、一般にその特性が変わることが分かった。この事実は、X線スペクトルの軸外距離に関して内外挿する手法は一律には決まらないことを意味する。
- (2) 使用する一次及び散乱線量カーネルは、一連の半限層水ファントムを用いて、微分線量法に基づいて作成している。このカーネルを用いると、媒体が均質な水であれば、ある単純化した条件下（平行ビーム照射で、媒体内で一次光子線質変化がない場合）では、計算した一次線量と散乱線量とは、それぞれの期待値（理論値）に完全に一致することが証明されている。
- (3) X線スペクトルのエネルギービンごとの一次及び散乱線量カーネルをモンテカルロ法により作成した。その結果、特に一次線量カーネルは、従来のそれと比較して、光子作用点付近において比較的小さな値を示すことが分かった。この事実は、微分線量法に基づいて得られた一次及び散乱線量カーネルは、オープン・ジョウ照射野及びMLC照射野周辺当たりの線量の計算精度を高めることにつながる。
- (4) 空中X線強度の計算を、「線源OCR」と「軸外コリメータ散乱係数」との積で表すことを提案する。「線源OCR」は、無限照射野を想定した空中X線強度を表す。「軸外コリメータ散乱係数」の計算においては、X線ターゲット面及び平坦化フィルタ面において、それぞれ異なった定数値を有する誤差関数を用いる方法を開発した。この場合、オープン・ジョウ照射野においては、計算点からジョウ・コリメータを介しての視野に誤差関数を適用する。MLC照射野に関しては、リーフ出力差分法を新たに導入し、計算点からジョウ・コリメータ及び各MLCリーフを介しての視野に誤差関数を適用する。これにより、空中X線強度の計算精度は、オープン・ジョウ照射野のみならずMLC照射野においても、従来の方法に比して、より高くなることが分かった。（なお、この計算では、上段ジョウ・コリメータと下段ジョウ・コリメータの開きを区別して行っている。）

- (5) 10 MV X線ビームによる水ファントム照射（オープン・ジョウ照射野  $5 \times 5 \sim 15 \times 15 \text{ cm}^2$ ）において、エネルギービンごとに得られた一次及び散乱線量カーネルをそれぞれの代表光子エネルギーの一次水衝突カーマに作用させて重量積分で計算したビーム中軸線量（組織ファントム線量比）は、実測値と比較して $\pm 1\%$ 以内に収まることが分かった。つまり、エネルギービンごとの一次・散乱線量カーネル、並びに一次光子強度を用いることにより、カーネル及びX線ビーム線質硬化現象を考慮する必要がなくなることが分かった。また、同様に軸外距離を関数にした軸外線量比も照射野内外において比較的精度の高い結果が得られた。このことによっても、空中X線強度は、「線源OCR」と「軸外コリメータ散乱係数」との積でもって精度高く計算できることが分かった。

## V. 今後の課題

以下の研究項目は、時間の不足で行うことが出来なかった。これらに関しては、この2年間共同研究してきた4人の社会人大学院生を巻き込んで、今後の課題としたい。

- (1) 患者体内での線量計算では、MLC、楔、補償フィルター、カウチ（照射治療台）などからの2次電子及び散乱X線に起因する線量を考慮する予定であった。特に、楔からの2次電子及び散乱X線に起因する線量は、患者体内での浅い領域で、その影響が大きく現れることが知られている。よって、MLCからの影響も線量分布上に強く表れるのではないかと想像できる。今後の課題としたい。
- (2) 不均質ファントムにおける線量分布の特異性、特に、高原子番号媒体（骨、歯の詰めのもなど）の存在で起こる線量分布のホットスポット、コールドスポットを調べる。なお、これらの研究では、コンボリューション法による線量分布の計算に加えて、線量分布の測定、モンテカルロ法による計算も行う。
- (3) 提案したコンボリューション法に基づく線量計算ソフトを3次元CT画像に対応できるように構築する。人体により近い構造を有する不均質ファントム（胸部、頭頸部など）を作成し、極小電離箱、X線フィルムなどを用いて線量を実測し、これを計算値と比較する。
- (4) 提案したコンボリューション法による線量分布を、現在市販されている治療計画装置（クラークソン法、コンボリューション法）がつくる線量分布と比較する。
- (5) 本法は、MLC並びに補償フィルターを用いた強度変調照射（IMRT）に対する3次元線量計算にも対応可能である。これに関する研究を、さらなる今後の課題としたい。

## VI. まとめ

コンボリューション法は、2次電子平衡の崩れの程度を線量計算に反映させることができるので、小不整形照射野を多用する定位照射における線量計算には威力を発揮する。しかし、この方法では、入力すべき基礎データの良し悪しに、計算結果が大きく作用されることも事実である。

本研究では、X線スペクトルが軸外距離と共にどのように変化するか、オープン・ジョウ照射野及びMLC照射野における空中X線強度が照射野内外でどのように変化するかを解析した。この研究で開発したコンボリューション法では、X線スペクトルのエネルギービンごとに、媒体内における一次X線強度を一次及び散乱線量カーネルで重畳することによって、それぞれ一次及び散乱線量を算出する。よって、このコンボリューション法では、一次X線ビームのX線ビーム強度制御体（楔、補償フィルター、MLCなど）による線質変化の影響、一次X線ビームの媒体内線質変化の影響、線量カーネルの媒体内線質の影響を受けることが全くないので、従来のコンボリューション法に比して、計算精度が高まることが期待できる。

使用する一次及び散乱線量カーネルは、一連の半限層水ファントムを用いて作成している。このカーネルを用いると、媒体が均質な水であれば、ある単純化した条件下（平行ビーム照射で、媒体内で一次光子線質変化がない場合）では、計算した一次線量と散乱線量とは、それぞれの期待値（理論値）に完全に一致する。このカーネルの使用により、特に小照射野での線量計算の精度が高まると期待している。

## VII. 研究発表リスト

- (1) Shigenobu Kimura, Akira Iwasaki, Kohji Sutoh, Morio Seino, Fumio Komai, Makoto Sasamori: Calculation of MLC in-air outputs using a leaf-field output subtraction method. In *"The Proceedings of the 15th International Conference on the Use of Computers in Radiation Therapy (Volume I)"*, pp. 425-429, 2007.
- (2) Fumio Komai, Akira Iwasaki, Shigenobu Kimura, Morio Seino, Makoto Sasamori: Introduction of an off-axis collimator scatter factor ( $S_C$ ) and a source off-center ratio ( $OCR_{source}$ ) for calculation of off-axis in-air outputs. In *"The Proceedings of the 15th International Conference on the Use of Computers in Radiation Therapy (Volume I)"*, pp. 445-449, 2007.
- (3) Akira Iwasaki, Shigenobu Kimura, Morio Seino, Fumio Komai, Makoto Sasamori: Proposals to improve the accuracy of convolution-based dose calculation. In *"The*

*Proceedings of the 15th International Conference on the Use of Computers in Radiation Therapy (Volume I),* pp. 450-454, 2007.

- (4) Makoto Sasamori, Akira Iwasaki, Hidetoshi Saitoh, Shigenobu Kimura, Morio Seino<sup>1</sup>, Fumio Komai: Monte Carlo simulation for constructing dose kernels based on the differential dose concept. In *"The Proceedings of the 15th International Conference on the Use of Computers in Radiation Therapy (Volume II),"* pp. 137-141, 2007.

## VIII. 研究成果資料

以下に、「資料Ⅰ：第15回放射線治療におけるコンピュータ利用に関する国際会議 (ICCR 2007, カナダ・トロント, 2007年6月4-7日) に提出したプロシーディング4編」並びに「資料Ⅱ：社会人大学院生との共同研究成果4編」を添付する。

(1) 資料Ⅰ： 第15回放射線治療におけるコンピュータ利用に関する国際会議 (ICCR 2007, カナダ・トロント, 2007年6月4-7日) に提出したプロシーディング (4編)

- (1) Calculation of MLC in-air outputs using a leaf-field output subtraction method
- (2) Introduction of an off-axis collimator scatter factor ( $S_c$ ) and a source off-center ratio ( $OCR_{source}$ ) for calculation of off-axis in-air outputs
- (3) Proposals to improve the accuracy of convolution-based dose calculation
- (4) Monte Carlo simulation for constructing dose kernels based on the differential dose concept

(2) 資料Ⅱ： 社会人大学院生との共同研究成果 (4編)

- (1) Waggener-Iwasaki 反復摂動法に基づいて再構築した高エネルギーX線スペクトル
- (2) コンボリューション法に用いる高エネルギーX線一次及び散乱ドーズカーネルの開発
- (3) 軸外コリメータ散乱係数及び線源軸外線量比を導入して空中X線出力を計算する方法
- (4) リーフ出力差分法を用いた Jaw および MLC 照射野の空中出力計算に関する研究