

## 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	2 頁
V. 今後の課題	4 頁
VI. まとめ	5 頁
VII. 研究発表リスト	7 頁
(原著論文, プロシーディング, 学会発表)	
VIII. 原著論文, プロシーディング	11 頁

## I. まえがき

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、頭頸部腫瘍の高エネルギーX線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、低密度不均質の一種である気道の存在によって生ずる2次電子平衡（前方及び側方）不成立のために（発生する二次電子のエネルギーが高く、その飛程が長いためである）、特に小照射野の場合、気道内表皮付近においては、補正係数に基づく線量計算法（correction-based method; 2次電子の振る舞いを考慮しない）では、実際の値よりも5%以上の過大評価している。肺癌治療の胸部照射においても、癌表面付近において同様な現象が起きている。不均質が高原子番号（歯の詰め物など）の場合は、それを取り巻く付近の軟組織においては、逆に線量の過小評価になっている。

コンボルーション法(convolution/superposition method)は、モデル・ベース法(model-based method)のひとつであり、2次電子の振る舞いを考慮して線量計算を行う。しかし、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。定位照射においては小照射野を用いる。強度変調放射線治療(IMRT)においては小さく分割された区画ごとに放射線強度を変える。当然、これらの照射法に対しても、市販の治療計画装置では、同じような否定的現象が現れる。なお、モンテカルロ法は、精度の高い線量計算が可能であるが、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。

本研究課題では、3層コルクファントムを用いて、4-15 MVエックス線に対して、照射野 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ までの小照射野に対して、岩崎が提案したカーネル（一次線量拡散分布、散乱線量拡散分布）が精度の高い線量結果を与えることが判った。他方、この期間中、反復摂動原理に基づいて、X線スペクトルを測定が容易な透過線量でもって再構築する方法も開発した。これにより、例えば水から鉛まで広い範囲の原子番号の媒体に対して、X線減弱の正確な計算が可能となった。この2点が大きな収穫である。

現在市販されている治療計画装置が採用しているカーネル（一次線量拡散分布、散乱線量拡散分布）は、無限層水ファントム内の一点にX線ビームが作用することによって得ている。岩崎の提案によるコンボルーション法では、半限層水ファントムを用いて、カーネルを得ている（これらのカーネルの形は互いに、明らかに異なっている）。市販されている治療計画装置では、小照射野での線量計算が正確に遂行できない理由は、使用しているカーネルが不適當である

と想像（確信）する。

現時点で、時間の関係で未整理・未発表の重要資料が存在するが、可能な限り研究成果を取りまとめ、この期間中に本研究に関連して発表した論文を添付、本冊子として公表し、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の関係者（阿部部長、工藤技師長、藤森主任技師、須崎主任技師）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・医学部・教授）
研究分担者：	松 谷 秀 哉	（弘前大学・医学部・講師）
研究分担者：	久保田 護	（弘前大学・医学部・助手）

## Ⅲ. 研究経費

平成13年度	2,400千円
平成14年度	500千円
平成15年度	400千円
平成16年度	300千円
計	3,600千円

## Ⅳ. 研究の経過

この研究の4年間（平成13年度～16年度）で、本大学病院に設置されているトリプレット・エネルギー・エックス線（4MV，10MV，15MV）を発生するリニアック装置を用いて、以下の実験的・理論的研究を行った。

- （1）媒体厚の関数として表した透過X線強度データに基づいて、X線スペクトルを求める方法、並びにその計算ソフトを開発した。
- （2）アクリル製ビルドアップキャップを被せた電離箱を用いて、各種媒体（アルミ、アクリル及び水等価物質）の厚さの関数として測定した透過X線強度データに基づいて、ライナックX線のスペクトルをビーム中心軸からの距離の関数で求めた。なお、再構築されたX線スペクトルは、少なくとも水から鉛までの媒体に対して適応することを強調したい。また、

X線スペクトル再構築法の確立によって、楔、補償フィルターなどの設置による一次X線スペクトル変化及び被照射体内での一次X線スペクトル変化の評価を容易にし、精密な線量計算が可能となった。

- (3) X線スペクトルに基づいて、水中での減弱係数をビーム中心軸からの距離及び深さの関数で数式化した。これを用いて、ビーム中心軸からの距離の関数でもって、水中での零照射野TMR（組織最高線量比）を関数化した。この関数式に入る諸定数の一部は、一次線量・散乱線量拡散分布（カーネル）関数を組み立てる際に利用される。
- (4) 水ファントム及び3層コルクファントム内でのTPR（組織・ファントム線量比）を照射野  $4 \times 4 \text{ cm}^2$ ,  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ ,  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ,  $15 \times 15 \text{ cm}^2$  に対して測定した。水ファントム及び3層コルクファントム内での線量OCR（軸外線量比）を照射野  $4 \times 4 \text{ cm}^2$ ,  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ ,  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ,  $15 \times 15 \text{ cm}^2$  に対して測定した。これら二つの測定データは、コンボリューション法による線量計算に必要な基本関数（一次線量拡散分布関数、散乱線量拡散分布関数、電子汚染強度関数、コリメータOCR関数）の決定に利用される。
- (5) 主コリメータの遮蔽効果を表す「コリメータOCR」の導入方法を確立した。これは、円形照射野の関数としたコリメータ散乱係数（ $S_c$ ）にセクター法を適用して求める。他方、無限照射野を想定したX線強度分布の評価は、「線源OCR」の導入で行った。アクリル、アルミ、鉛ビルドアップキャップでの空中線量の測定値にX線スペクトルの軸外距離による相違を考慮すると、いずれのビルドアップキャップに対してもほぼ同じ線源OCR曲線が得られた。有限な照射野における任意点での入射X線強度は、軸外距離の関数である「線源OCR」と「コリメータOCR」の積でもって表す。
- (6) マルチリーフコリメータ（MLC）、楔、遮蔽ブロック、カウチなどを被照射体の一部と見なして線量計算する方向を定めた。
- (7) 現段階においては、3次元線量計算ソフトの開発に入っている。本格的な線量計算ソフトは、計算速度が非常に遅いので、その高速化の試みも行っている。その手法のひとつに、クラークソン法を取り入れた高速化の開発に着手している。この計算原理は、岩崎の開発した一次線量拡散分布関数式、散乱線量拡散分関数式が共に解析的に積分可能であることを利用している。

## V. 今後の課題

### 1. 高原子番号媒体の存在での線量分布

高原子番号媒体（骨、歯の詰めものなど）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。岩崎の提案している一次線量拡散分布関数は、前方及び後方線量の拡散を個別に表すことができるので、その理論的解析が可能である。なお、これの実証には、線量分布の測定もあるがモンテカルロ計算も利用する。

### 2. マルチリーフコリメータ（MLC）使用によるX線出力強度の変化

このことに関しては、種々報告がある。しかし、多くの報告における測定では空中で行われるが、MLCからの散乱X線に関する影響の排除がなされていない。我々の線量計算ソフトでは、MLCを被照射体の一部とみなしているので、X線強度を評価する際には、MLCからの散乱X線を排除しなければならない。そのような条件下で定めたX線出力強度を測定・計算する方法を開発する（この場合の空中線量の測定は、検出器を線源から遠ざけて行うのが合理的であると思っている）。

### 3. X線スペクトルの精度に関する検討

我々の線量計算ソフトのみならず、現在市販されている治療計画装置（コンボリューション法）にも、軸外距離の関数としたX線スペクトルが入力されている。3D線量計算する場合、入力するX線スペクトルの精度はどの程度必要なのかを実験的に検討する。

### 4. CT画像を用いての線量計算システムの構築

コンボリューション法による線量計算ソフトを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。特に、不均質（肺、空洞、骨、歯の詰めものなど）境界領域及び照射野周辺領域での線量比較を重点的に行う。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の比較も行う。

### 5. 基本ソフトの開発

我々のコンボリューション法で使用する計算ソフトには、いくつかの特別な基本ソフトが存在し、それらに入る諸定数の決定が必要となる。その自動化を計

ることを目標に設定し、以下の研究を行う。

- (1) 一次線量拡散分布及び混入電子の線量拡散分布の関数形に必要な定数は、零照射野TMR（組織最大線量比）に基づいて決定している。深さと共に変わるX線の線質変化を考慮に入れた線減弱係数（X線スペクトルに基づいて得られる）の入った零照射野TMR関数式に必要な各種定数を自動的に決定するソフトを開発する。
- (2) 散乱線量拡散分布の関数形に必要な定数は、深さと共に変わるX線の線質変化を考慮に入れた線減弱係数（X線スペクトルに基づいて得られる）に基づいて決定している。それらの基本定数を自動的に決定するソフトを開発する。
- (3) 「線源OCR」は、無限大照射野を想定したX線強度分布を表す。これは、ビルドアップキャップ（アクリル、アルミ、鉛など）をかぶせた電離箱で得られたデータに軸外距離を関数にしたX線スペクトルを考慮に入れて算出する。これを構築するソフトを開発する。
- (4) 「コリメータOCR」は、コリメータの存在で変化するX線強度分布を表す。これは、円形照射野半径を関数にしたコリメータ散乱係数( $S_0$ )で求まる。これを構築するソフトを開発する。

## 5. 市販の治療計画装置との比較

各種ファントムを用いて、線量分布、特定な点における絶対線量に関して、市販の治療計画装置との比較を行う。

## VI. まとめ

研究期間中（平成14年度）、あるメーカとの共同研究の機会を得て、本コンボリューション法を3D線量治療計画装置に組み入れることになった。これに関する研究が進行中であるが、諸般に事情で進行が遅れ気味となっている。そのため、当初予定していた人体ファントム（胸部ファントム、頸部ファントムなど）を用いた照射実験は、現段階では今後の課題となる恐れがある。

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。しかし、この方法では、精度の高い基本データの使用のみで優れた威力を発揮する。以下に、岩崎の提案によるコンボリューション法の特徴を整理して見る。

- (1) 線量計算で使用する基本データは、すべて電離箱による測定で求まる。
- (2) X線スペクトルは、ライナックX線装置ごとに軸外距離（off-axis distance）の関数として得る。

- (3) 媒体（人体）内での減弱はすべて、X線スペクトルに基づいて計算している。
- (4) 照射野内でのX線スペクトル変化を考慮する。
- (5) マルチリーフコリメータ（MLC）、楔、補償フィルターなどによるX線スペクトル変化を考慮する。これらの器具は、通常、高原子番号の材質で作られるので、これらによるX線スペクトルの変化は一般に大きい。
- (6) 使用するカーネルは、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、小照射野での線量計算の精度が高まると想像・期待している。このことは、定位照射及び強度変調照射（IMRT）における線量計算の精度向上につながると思う。
- (7) 使用しているカーネルは、関数式で組み立てられている。この事実により、三次元線量計算において、 $R$ 方向の数値積分は、比較的広範囲にわたり、解析的処理が可能となり、計算精度をそんなに落とさずに線量計算時間を大幅に短縮できる可能性がある。なお、線量計算点と照射野辺間で解析的積分を行うと、クラークソン法の計算手法と同じになり、さらに計算速度を高めることができる。
- (8) 一次線量、散乱線量と混入電子による線量は、それぞれのカーネルを使用して個別に計算する。
- (9) 上部コリメータと下部コリメータの開きを区別してX線出力を計算し、それを線量計算に反映させる。
- (10) 線量計算には、「コリメータOCR (off-center ratio)」を導入し、コリメータ開度で決まるX線出力の特性（ライナック装置で異なる）を反映させる。
- (11) 線量計算には、「線源OCR (off-center ratio)」を導入し、無限照射野を想定してX線線源強度分布（平坦化フィルターで変わる）を線量計算に反映させる。
- (12) マルチリーフコリメータ（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。
- (13) 楔からの2次電子及び散乱X線に起因する線量は、ファントム内での浅い領域で、その影響が大きく現れることが計算上判った。この結果より、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している。これが事実であれば、特に強度変調照射（IMRT）における線量分布の計算において、特に重要な要素となると思う。

- (14) 本法は、定位的放射線照射及び強度変調照射（IMRT）法による照射に対する3次元線量計算にも対応可能である。

## VII. 研究発表リスト

### (1) 原著論文

1. 岩崎 晃：コンボルーション法で用いる一次及び散乱線量拡散分布に関する考察. 日本医学物理学会機関誌, 第21巻, 第2号, pp.106-110, 2001.
2. A. Iwasaki, T. Nara, M. Kubota, A. Fujimori, K. Suzaki, S. Sato, T. Morita, Y. Abe: Calculation of 10 MV x-ray beam-axis doses in layered cork heterogeneity phantoms using a convolution method. *Bulletin of Health Sciences Hirosaki*, Vol. 1, pp. 61-82, 2002.
3. 奈良鉄造, 岩崎 晃, 佐藤和彦, 駒井史雄, 福士英人, 洞内美明：矩形照射野コリメータ散乱係数に対する等価正方形評価法. 日本放射線技術学会雑誌, 第58巻, 第6号, 848-857頁, 2002.
4. A. Iwasaki: A method for 10 MV X-ray scatter dose-spread kernel construction based on the Bjarngard scatter factor formulation. *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 64, No. 2, pp. 89-98, 2002.
5. A. Iwasaki: 10 MV X-ray central-axis dose calculation in thorax-like phantoms (water/cork) using the differential primary and scatter method. *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 65, No. 1, pp. 11-26, 2002.
6. A. Iwasaki: Comments of the primary and scatter dose-spread kernels used for convolution methods. *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 65, No. 6, pp. 595-597, 2002.
7. A. Iwasaki, H. Matsutani, M. Kubota, A. Fujimori, K. Suzaki, S. Sato, T. Morita, Y. Abe: A method for obtaining 4 and 10 MV X-ray spectra using the iterative perturbation principle. *Bulletin of Health Sciences Hirosaki*, Vol. 2, pp. 61-72, 2003.
8. A. Iwasaki, H. Matsutani, M. Kubota, A. Fujimori, K. Suzaki, Y. Abe: A practical method for estimating high-energy X-ray spectra using the iterative perturbation principle proposed by Waggner. *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 67, No. 2, pp. 81-91, 2003.
9. 奈良鉄造, 岩崎 晃, 佐藤和彦, 駒井史雄, 福士英人, 洞内美明：コリメ



ータ散乱係数( $S_c$ )および ファントム散乱係数( $S_p$ )を用いた 10MV X線不整形照野線量評価法. 日本放射線技術学会誌, 第 60 巻, 第 1 号, 87-100 頁, 2004.

- 1 0. 奈良鉄造, 岩崎 晃, 駒井史雄, 佐藤和彦, 福士英人, 洞内美明: コリメータ散乱係数( $S_c$ )およびファントム散乱係数( $S_p$ )を用いた 4 MV X線不整形照射野線量評価法. 日本放射線技術学会誌, 第 60 巻, 第 11 号, 1592-1603 頁, 2004.
- 1 1. A. Iwasaki, M. Kubota, A. Fujimori, K. Suzuki, Y. Abe, H. Ono, K. Nishimura, H. Yokoyama: Formulation of spectra-based attenuation coefficients in water as a function of depth and off-axis distance for 4, 10, and 15 MV X-ray beams. *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 72, No. 6, pp. 657-661, 2005, in press.
- 1 2. 岩崎 晃, 久保田 護, 廣田淳一, 伊藤雅信, 藤森 明, 須崎勝正, 青木昌彦, 阿部由直: ワガナーの反復摂動原理に基づいて開発した高エネルギーX線スペクトル推定法の特性. 日本放射線腫瘍学会会誌, 投稿中, 2004.
- 1 3. A. Iwasaki, M. Kubota, J. Hirota, M. Itoh, A. Fujimori, K. Suzuki, M. Aoki, Y. Abe: Characteristic features of a high-energy X-ray spectra estimation method based on the Waggener iterative perturbation principle. *Radiation Physics and Chemistry*, submitted, 2004.

## (2) プロシーディング

1. A. Iwasaki, H. Matsutani, M. Kubota, A. Fujimori, K. Suzuki, Y. Abe: A practical method for estimating high-energy X-ray spectra using the iterative perturbation principle of Waggener. In "The Proceedings of the Third Korea-Japan Joint Meeting on Medical Physics and The Second Asia Oceania Congress of Medical Physics", pp. 263-266, 2002.
2. Iwasaki A, Kubota M, Fujimori, A, Suzuki K, Abe Y: Formulation of spectra-based attenuation coefficients as a function of depth and off-axis distance for 4, 10, and 15 MV X-ray beams. In "The Proceedings of the 14th Inter. Confer. on the Use of Computers in Radiation Therapy", pp. 145-148, 2004.

## (3) 学会発表

1. 岩崎 晃: コンボルーション法で用いる一次及び散乱線量拡散分布に関する

- る考察. 第 82 回日本医学物理学会大会, 2001 年 9 月 27 日-29 日, 吹田市 (大阪大学医学部保健学科)
2. 岩崎 晃: Comments on the Primary and Scatter Dose-spread Kernels Used for Convolution. 日本放射線腫瘍学会第 14 回学術大会, 2001 年 11 月 22-24 日, 大阪府 (千里ライフサイエンスセンター)
  3. Iwasaki A, Matsutani H, Kubota M, Fujimori A, Suzaki K, Abe Y: A practical method for estimating high-energy x-ray spectra using the iterative perturbation principle of Waggener. The 3rd Korea-Japan Joint Meeting on Medical Physics and The 2nd Asia Oceania Congress of Medical Physic, September 26-28, 2002 (Kyongju TEMF Hotel, Gyeongju, Korea).
  4. 岩崎 晃, 松谷秀哉, 久保田 護, 藤森 明, 須崎勝正, 佐藤幸夫, 森田竹史, 阿部由直: 反復摂動原理に基づいて高エネルギー X 線スペクトルを推定する実用的方法. 日本放射線腫瘍学会第 15 回学術大会, 2002 年 11 月 21 日-11 月 23 日 (東京都, 日本都市センター会館)
  5. 阿部由直, 青木昌彦, 場崎 潔, 近藤英宏, 松谷秀哉, 岩崎 晃, 佐藤幸夫, 藤森 明, 須崎勝正: 呼吸位相同期システムと超高速 CT による定位体幹部照射について. 日本放射線腫瘍学会第 15 回学術大会, 2002 年 11 月 21 日-11 月 23 日 (東京都, 日本都市センター会館)
  6. 奈良鉄造, 佐藤和彦, 駒井史雄, 福士英人, 山田陽子, 洞内美明, 岩崎 晃: コリメータ散乱係数( $S_c$ )およびファントム散乱係数( $S_p$ )を用いた不整形照射野の線量評価法. 日本放射線技術学会第 59 回総合学術大会, 2003 年 4 月 11 日-4 月 13 日 (横浜市, パシフィコ横浜)
  7. 奈良鉄造, 佐藤和彦, 駒井史雄, 福士英人, 徳差久恵, 洞内美明, 岩崎 晃: 4, 10 MV X 線エネルギーの違いによる MLC の特性, 北奥羽十和田カンファレンス, 2003 年 8 月 30 日 (十和田プリンスホテル)
  8. 岩崎 晃, 久保田 護, 藤森 明, 須崎 勝正, 森田竹史, 阿部由直: コンボリューション法で X 線線量を計算する際に導入するコリメータ軸外線量比について. 日本放射線腫瘍学会第 16 回学術大会, 2003 年 11 月 20-23 日 (東京ファッションタウンホール (TFTHホール))
  9. 岩崎 晃, 久保田 護, 藤森 明, 須崎 勝正, 森田竹史, 阿部由直: ワガナー法による高エネルギー X 線スペクトルを簡易に求める方法. 日本放射線腫瘍学会第 16 回学術大会, 2003 年 11 月 20-23 日 (東京ファッションタウンホール (TFTHホール))
  10. Iwasaki A, Kubota M, Fujimori, A, Suzaki K, Abe Y: Formulation of spectra-based attenuation coefficients as a function of depth and

off-axis distance for 4, 10, and 15 MV X-ray beams. *The 14th Inter. Confer. on the Use of Computers in Radiation Therapy*, May10-13, 2004, Seoul, Korea (Hotel Lotte).

- 1 1. 岩崎 晃, 久保田 護, 廣田淳一, 藤森 明, 須崎勝正, 青木昌彦, 阿部由直: X線スペクトル, コリメータOCR, 線源OCRを導入したコンボリューション法について. 日本放射線腫瘍学会第17回学術大会, 2004年11月18-20日(幕張プリンスホテル)
- 1 2. 岩崎 晃, 久保田 護, 廣田淳一, 藤森 明, 須崎勝正, 青木昌彦, 阿部由直: 高エネルギーX線スペクトルを取得する計算ソフトの開発. 日本放射線腫瘍学会第17回学術大会, 2004年11月18-20日(幕張プリンスホテル)