

## 論文の内容の要旨

論文題目 放射線治療における品質保証に関する研究

指導教員 中川恵一 准教授

東京大学大学院医学系研究科

平成 19 年 4 月入学

医学博士課程

生体物理医学 専攻

氏名 橋本 成世

はじめに

医療技術の発展は著しく、新規装置が次々と導入されている。これに伴い、今まで放射線治療で行われてきた品質保証 (QA) が時代遅れとなり、さらに QA が確立していない新規放射線治療装置が導入される場面が多くなってきた。本論文は最新の医療技術に関する放射線治療の QA について研究を行った。本論文は 2 部で構成される。第 1 部ではイメージングプレート (IP) を用いた線量プロファイル測定に関する研究について述べる。これは、放射線治療の QA の中でも最も基礎的な役割の一つである、線量分布の新測定技術に関する研究である。この新測定技術は高精度放射線治療時代における放射線治療計画システム (RTPS) 登録用データの測定や線量分布の経時的な変化の観測に応用が可能となる。第 2 部では強度変調放射線治療 (IMRT) の検証に関する研究として、ヘリカルトモセラピーのマルチリーフコリメータ (MLC) 動作検証法について述べる。ヘリカルトモセラピー

は連続回転型の IMRT 専用機であり、本研究ではこの IMRT の QA に対する新たな MLC 動作検証法を提案する。

## 第 1 部

コンピューテッドラジオグラフィ (CR) の普及に伴い、放射線治療においてフィルムを用いた線量測定が不可能となる施設が多くなってきている。これに対応するため、CR で用いる IP をフィルムの代わりに線量測定に使用する研究が行われている。一般的に CR を導入している施設では IP を所持していることになるために、IP がフィルムの代わりに使用できるようになれば、この手法がすぐに普及する土壌がある。このように IP を使った QA ツールはフィルムの代替品の候補として期待されるものであったが、IP はバリウムといった高原子番号物質を含むことにより生じるエネルギー依存のため、誤差が生じるという問題点があった。このエネルギー依存による誤差を金属フィルタで補正できるという先行論文はあるが、補正に用いる金属フィルタについて、十分な精度で検討がなされていない。本研究では IP のエネルギー依存を補正するための金属フィルタについて、様々な材質や厚さをシミュレートできるようモンテカルロシミュレーション (MC シミュレーション) を用い、軸外線量比 (OAR) 測定に着目して検討を行い、IP を用いた線量プロファイル測定において 4MV X 線に対するフィルタの最適な材質・厚さ・位置を見つけ出すことを目的とした。

MC シミュレーションの計算コードは GEANT4 を使用した。シミュレーションに用いる X 線スペクトルは Schiff が求めた理論式から作成し、IP は富士フィルム株式会社製の

ST-VN を模擬して作成した。ここで作成した X 線スペクトルと IP が現実と大きく異なっている場合には計算精度に問題が生じるため、始めに条件設定の妥当性を評価した。妥当性評価はシミュレーションと実測の深部量百分率と OAR を比較することで行い、両者とも良く一致していることを確認した。

次に金属フィルタの材質・厚さ・位置を変化させてシミュレーションを行った。フィルタの厚さと位置を固定させて原子番号および密度を変化させたところ、高原子番号、高密度の材質でフィルタ効果が高くなることが分かった。原子番号と密度が大きく、放射線分野で良く使用される材質であり、且つ現実的に扱いやすいことから、金属フィルタとしては鉛が最適だと考えられる。また、フィルタと IP の間隔をあけるとフィルタ効果が小さくなり、フィルタ厚を厚くすることでフィルタ効果は大きくなるということが分かった。本研究の結果、水吸収線量で計算した OAR に最も一致したフィルタの条件は、2 mm 厚の鉛を 5 mm の間隔をあけて IP の両側に配置させた時及び、間隔をあけずに 1 mm 厚の鉛を IP の両側に配置させた時であった。これらのフィルタを用いて線源-表面間距離 100 cm、表面照射野  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 、10 cm 深において OAR 測定を行った場合、照射野内においては両者とも 2.0% 以内、照射野外においてはそれぞれ 1.1%、0.6% 以内で一致した。こうして、本研究により IP を用いた線量プロファイル測定において誤差を改善するフィルタの材質、厚さ、位置を示すことができた。このフィルタ条件を用いることにより、フィルムを用いている線量プロファイルの経時変化や新規装置導入時のデータ測定に対し、IP を使用することが可能だと考えられる。

## 第 2 部

IMRT は腫瘍に線量を集中させ、その周囲の線量を抑えて照射することができる利点がある。従来の放射線治療と比較して、IMRT は複雑な線量分布を形成するため、計画通りの治療が実際に行われるかどうかを実測によって事前に検証を行うことが必須となっている。ヘリカルトモセラピーの検証はフィルムによる 2 次元線量分布の測定と電離箱線量計による絶対線量を測定する方法が一般的であるが、これらは基本的には積算線量の測定だけ行われる。ヘリカルトモセラピーはガントリの回転と共に MLC が動作するために、ガントリの角度によって MLC が計画通り動作しているかを確認することが重要である。しかしながら、これを測定できる測定器は現在のところ存在しない。

そこで、プラスチックシンチレータ (PS) とデジタルビデオカメラ (DV) を用い、ヘリカルトモセラピーの回転照射中の MLC 動作測定法を新たに考案した。PS は X 線を照射すると X 線束に応じたシンチレーション光を発光する特性を持つ。このシンチレーション光を DV で観測することによって、回転照射中の MLC の動作を外部から測定でき、ガントリ動作と MLC 動作を直接に測定できると考えた。第 2 部では、ヘリカルトモセラピーの回転照射中における MLC 動作測定を本測定法によって実現することを目的とした。

本研究では直径 20 cm、長さ 10 cm の円柱状の PS を用いた。この PS をガントリの中心に配置して 100 cm 離れた位置から DV を用いてシンチレーション光を収集した。シンチレーション光からリーフ動作を観測するために各リーフ番号に対応した関心領域 (ROI) を配置した。そして ROI で得られる収集光量から MLC 動作を記述したファイルであるサイノグラムを構成し、照射に用いたサイノグラムとの比較を行った。MLC 動作の実測は 2

つのサイノグラムを使用した。1 つは単純プランとして強度変調を行わないサイノグラムである。もう 1 つは臨床プランとして前立腺 IMRT の照射に使用した強度変調を行ったサイノグラムである。

まず、収集光量からサイノグラムを構成するために必要な基礎試験を行った。項目は、収集光量とリーフ開閉時間の関係、収集光量の X 軸方向のプロファイル、照射時間による収集光量の変化、収集光量の照射野依存性、ガントリ回転速度の測定である。収集光量とリーフ開閉時間の関係は直線関係にあり収集光量からリーフの開閉時間を求めることが可能であることが示された。X 軸方向プロファイルは、中心にピークがあり、中心から離れるに従い信号値は減少し、飽和する傾向を示した。次に、300 秒の連続照射を行ったところ、収集光量は直線的に減少する傾向を示した。この傾向は電離箱線量計による結果でも見られることから、収集光量の増減は X 線出力の変化を反映しているものであり、シンチレーション光自体の発光量には変化が見られないと結論した。照射野サイズを変化させた場合、収集光量は照射野サイズが大きくなるに従い増加する傾向があった。また、ガントリの回転速度は、ガントリ回転時間によらず等速であることが確認できた。

上記、基礎試験で得られた結果から収集光量に補正を行い、本測定法によるサイノグラムを構成した。強度変調を行わない単純プランの MLC 動作測定においては、計画上動作するリーフを正しく認識したリーフの割合（感度）は 0.998、計画上動作しないリーフを正しく認識したリーフの割合（特異度）は 0.989 であった。また、リーフの開閉時間は  $-2.8 \pm 10.5\%$  の誤差で測定可能であった。臨床プランでは、感度と特異度はそれぞれ 0.994 と 0.997 であり、リーフの開閉時間は  $-7.0 \pm 15.8\%$  の誤差で測定可能であった。残余誤差の原因

としては、リーフパターンに依存するシンチレーション光の散乱に関する補正を行わなかったことがあげられる。一方で、簡便に利用可能な PS のブロックと DV を用い、煩雑な処理をせずに、実際に臨床で使用する照射においても 0.99 以上の感度・特異度、および  $-7.0 \pm 15.8\%$  の精度での開閉時間の測定が可能である。すなわち、動作しないリーフが動作する、あるいは動作するリーフが動作しないといった異常が生じた時には本測定法で十分検出可能である。本測定法を用いることにより、従来行われているフィルムや電離箱線量計では確認できない MLC の動作を検出でき、より高精度に検証を行うことが可能となった。さらに、簡便で安価な装置ということで、様々な施設においても QA ツールとして利用可能であり、汎用性が高いと考えられる。

## 結語

本研究では、主として医療技術の変化に伴う放射線治療の QA について述べた。第 1 部では、金属フィルタを用いることで IP を用いた線量プロファイル測定が精度良く行えることを示した。第 2 部では、ヘリカルトモセラピーの回転照射中の MLC 動作検証法について検討を行い、円柱型の PS と DV という比較的簡便に使用できる方法で、回転照射中の MLC 動作について観測できることを実証することができた。医療技術あるいは放射線治療装置の進歩が医療や社会に与えた影響は大変大きい。しかしながら、複雑化した照射法の検証作業ができていないために生じた照射事故も少なくはない。照射事故を未然に防ぐには、現状までの放射線治療の質を保ちつつ、新たな照射法に対応する QA ツールを常に考察していくといった気持ちが、医療従事者として大切な心構えである。本研究ではフィル

ムの代わりになり得る測定法の精度を高めることに成功し、さらに今後普及していくであろうヘリカルトモセラピーの MLC 動作の測定法を初めて実現した。これは今後の臨床的に大きな意義があると思われる。