

氏名(本籍地)	丹正亮平(岡山)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第6826号
学位授与年月日	平成26年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	

陽子線治療用のワブラー照射法に対する線量分布計算の高精度化

主査	筑波大学教授	理学博士	高田 義久
副査	筑波大学教授	理学博士	巨瀬 勝美
副査	群馬大学教授	理学博士	金井 達明
副査	筑波大学准教授	博士(理学)	富田 成夫

論 文 の 要 旨

放射線を使ったがん治療のうち、標的への線量集中度が高い陽子線治療への関心が高まっている。陽子線治療では、加速器から取り出した細いビームをビームライン上に配置された照射野形成装置を使って拡大し、整形することで標的に合致した線量分布を作る。この照射野形成法には wobbler 法と 2 重散乱体法があり、国立がん研究センター東病院(以下、東病院)では 2 つの回転 Gantry 照射装置(G1, G2)のうち G1 では wobbler 法、G2 では 2 重散乱体法をそれぞれ使用している。これらの照射装置を使って標的に合致した線量分布を形成するためには、高精度な計算法で線量分布を正確に予測し、最適な治療計画を行うことが重要である。東病院では、現在主流の計算法である Pencil Beam Algorithm (PBA)よりも高精度に線量分布を計算できる Simplified Monte Carlo (SMC) 法が開発され、G2 の治療計画装置に先行して実装された。本研究では、SMC 法を G1 の治療計画装置にも実装し、照射野形成法によらず高精度な線量分布計算を実現することを目的とする。

G1 では照射野の側方 penumbra の大きさが側方の x, y 方向に加えて、使用するコリメータの開口径によっても異なるという、G2 では見られない特性を示す。このような違いは G1 と G2 の照射野形成法の違いによる入射陽子線の位置ごとの角度分布の違いに起因する。よって、G1 では G2 とは異なる wobbler 法に適した正確な入射ビームモデルを構築する必要があり、本研究では陽子線が持つ入射角度分布の側方の非対称性や非ガウス分布性の効果を取り入れた新しい入射ビームモデル Non-Gaussian model with asymmetric variance (NonGMAV)を開発した。これを SMC 法に適用し、線量分布計算の精度検証を行った。

初めに、235 MeV の単一エネルギー陽子線が異なる正方形コリメータを通過後に空気中で作る線量分布を測定し、80-20% 側方 penumbra 幅 (P_{80-20}) の測定値を計算値と比較した。 x, y 方向で異なる P_{80-20} の測定値に対して、角度分布の非対称性を無視した従来の Gaussian model with symmetric

variance (GMSV) は明らかに測定値を再現できなかったが、NonGMAV を使うことで精度よく再現できた。また、側方方向の非対称性を取り入れた Gaussian model with asymmetric variance (GMAV) も非ガウス分布をガウス分布に近似した影響で、コリメータの開口径が小さい条件では再現精度が悪く、NonGMAV が最も精度よく測定値を再現した。

次に、リッジフィルタを使ってエネルギー変調された 235 MeV の陽子線が、レンジシフトと L 型構造を持つポーラスを通過後に作る線量分布を均質なポリエチレンファントム中で測定した。測定値はやはり側方方向で異なる分布を示し、GMSV を使った計算値はこれを再現できなかったが、NonGMAV と GMAV を使った計算値は測定値をよく再現した。NonGMAV と GMAV を使った計算値の比較では、両者の結果に顕著な差はなく、非ガウス分布の効果が線量分布に与える影響は明らかでなかった。G2 と様々な違いを生む G1 の入射角度分布の特性は、2 台の wobbler 電磁石の幾何学的配置と有効線源点の位置関係やサイズにより決まることが明らかになり、この角度分布の側方方向、入射位置に対する依存性から線量分布の特性を説明できた。

最後に、G1 照射室の計算結果と 2 重散乱体法を使った G2 照射室の線量分布の計算値を比較したところ、側方方向の違いによって G1 の方が、x 方向で penumbra 幅が大きく、y 方向でビームの拡大率が大きいことがわかった。特に小照射野条件で penumbra 幅の差が大きくなり、G1 では標的への線量集中性の悪化が懸念される。また、同じ wobbler 法でも炭素イオン線用の長いビームラインでは、角度分布の非対称性や非ガウス分布性の影響が G1 照射室よりも小さく、従来の GMSV が比較的よい精度で使えることがわかった。

NonGMAV を使った SMC 計算は、測定値をよく再現し、陽子線治療用の wobbler 法において有用な計算法である。今後の課題は、この計算法を G1 照射室の治療計画装置に実装し、実際の治療で使用できるようにすることである。

審 査 の 要 旨

[批評]

陽子線治療用照射野形成法としてのブロードビーム法には、二重散乱体法と wobbler 法が広く使われている。それらに対応して治療計画のための高精度線量分布計算が必要である。現在、最も一般的に使われているのはペンシルビーム法であるが、精度上の問題があることが知られている。そこで精度の高いモンテカルロ法による線量計算法が提案されているが、現状では時間がかかりすぎて日常的には使われていない。そこで、陽子の多重クーロン散乱による個々の陽子の軌道を追跡し線量付与は水中で測定された深部線量分布から計算する簡易モンテカルロ法が提案され、二重散乱体法の照射野形成法のビームラインに実際に適用され精度の向上を現実的な時間で達成できることが示された。本研究が、この手法を、別の照射野形成法である wobbler 法に適用できるようにするために、wobbler 法特有の入射ビームモデルを開発し、それと簡易モンテカルロ法を組み合わせることで wobbler 法のビームラインに対応した簡易モンテカルロ法を可能にし、実際にその有効性を実験で検証したことは評価できる。また、wobbler 法特有の位置・角度分布が二重散乱体法とは異なる現象(側方 penumbra の側方非対称性、位置依存性)を引き起こすことを示し、その現象とビームラインパラメータの定量的な関係を明らかにしたこと、また二重散乱体法との違いを明らかにしたことは学術的に評価できる。

〔最終試験結果〕

平成26年 2月18日、数理物質科学研究科学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。