

氏名	水谷 昌平
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第 7662 号
学位授与年月日	平成 28 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	

陽子線スキャニング照射法の治療計画への簡易モンテカルロ法の適用

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	群馬大学特任教授	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

放射線治療の中でも陽子線治療は近年世界的に注目され、多くの陽子線治療施設が建設されている。スキャニング照射法は、加速器から取り出した細いビームを三次元的に制御し走査することで腫瘍を塗りつぶすように照射する方法であり、新たに導入する施設が増加している。陽子線治療では信頼出来る線量計算法により線量分布を予測し、最適な治療計画を設計することが重要である。現在治療計画では、その計算精度と計算速度のバランスが良いことから一般的に **Pencil Beam Algorithm (PBA)** が使われている。しかし、不均質媒質中ではその計算精度が大きく劣化することが指摘されている。一方、計算精度に優れた **Full Monte Carlo (FMC)** 法は膨大な計算時間を要し、日常的に臨床で使用される治療計画への適用は困難である。そこで計算精度を向上させ同時に計算速度を向上させる方法が求められている。この目標を実現する手段として、**Simplified Monte Carlo (SMC)** 法が開発された。**SMC** 法は、個々の粒子を追跡するモンテカルロ法の特徴を持つため、不均質媒質中で **PBA** 法よりも正確な計算が可能であり、**FMC** 法と比べて計算が高速にできる。本研究の目的は、国立がん研究センター東病院で開発中のスキャニング照射法の治療計画に **SMC** 法を適用し、人体のような不均質媒質中での線量分布計算精度を向上させることにある。

**SMC** 法の計算精度の評価を、不均質ファントム中での線量分布を **FMC** 法を用いた場合と比較することで行い、**SMC** 法と **FMC** 法の計算モデルの違いを明らかにした。しかし、そのような細かい違いがあるにも関わらず、不均質ファントム中の線量分布は実用的な誤差範囲内で良く一致し、同時に **FMC** 法と比べて約 900 倍高速に計算可能であった。

我々は、スキャニング照射法の治療計画の線量分布計算に **SMC** 法を適用して線量計算の精度を向上

させることを提案し、その開発を行った。臨床環境で SMC 法を利用することの優位性の検証のため、SMC 法と PBA 法との治療計画結果の比較を行った。体内不均質の大きな対象では両者の線量分布に大きな差異が見られ、PBA 法をこのような対象に適用することの問題点が明らかになった。我々は、またこのような対象に SMC 法を使えばより实际的で最適な治療計画が可能であることを示した。計算時間に関しては、実際に GPU (Graphic Processing Unit)を用いた計算を行って 10 分以内での治療計画が行うことが可能であること実演した。こうして我々は、SMC 法をスキヤニング照射に適用することにより、複雑な臨床対象に対して従来使用されてきた PBA 法の治療計画結果の問題点を明らかにするとともに、それを解決する実用的な手段を提示することができた。

SMC 法の更なる精度向上を目的に、水素原子核との弾性散乱による二次陽子の生成プロセスを SMC 法のアルゴリズムに実装し、その評価を行った。この結果、側方線量分布に裾を作成でき、より現実的な線量分布形成が可能となった。原子核反応には、この他に酸素原子核との弾性散乱、非弾性散乱により二次粒子が生成されるプロセスもあるため、これらのモデルを SMC 法に実装することは課題として残った。今後、これらの反応についても早急にモデル化を行い、真に計算精度の高い SMC 法の開発を引き続き行っていく。

## 審 査 の 要 旨

[批評]

陽子線治療用の照射野形成法の一つにビームスキヤニング法がある。この方法は、細い陽子ビームが作る Bragg peak (以下ではこれをスポットと呼ぶ)を照射標的の内やその境界近傍で動かして標的全体を塗り潰すような照射法であり、線量が患部により集中できるため近年採用する施設が急増している。この方法では、スポット位置に対応した陽子ビーム(これを以下ではスポットビームと呼ぶ)の重みを決定する必要がある。そのためには、単位強度のスポットビームが作る線量分布(これを線量カーネルという)を出来るだけ正確に計算する必要がある。従来、この目的で使用されている線量計算モデルは、ペンシルビームアルゴリズムという方法で複数本の細いビームが作る線量分布を、その入射方向上にある物質に対して計算する方法である。この方法は計算が簡単なため計算時間が短く臨床に使用するための実用性がある一方、不均質の大きな対象に対しては、その線量分布予測精度に課題があることが指摘されてきた。一方、モンテカルロ法による線量計算は、関連する物理過程を正確に扱えるため精度の高い計算法として知られてきた。しかしモンテカルロ法は大量の計算が必要なため計算時間がかかるため、個々の患者の治療計画に適用できないという問題点を抱えている。筆者が提案した簡易モンテカルロ法による線量カーネルの計算法は、従来のモンテカルロ法(以下フルモンテカルロ法とよぶ)のうち、不均質媒質中の線量分布を再現するために最も重要な陽子の多重クーロン散乱により軌道の揺動を個々の陽子に対して取り入れる一方で、陽子と標的原子核との相互作用の効果は個々の陽子に対して追いかけるのではなく測定された(側方に積分された)深部線量分布を用いることで線量付与の計算を行うという手法である。この新たな手法は不均質媒質中での線量計算精度の大幅な改善、大幅な計算時間の短縮を同時に達成した。これは、個々の患者の治療計画にこの手法を適用でき、かつ線量計算精度が向上することを意味し、実用上大きな意味をもつ。学術的には、(1)フルモンテカルロ法による線量計算との比較によりその

相違点を明らかにし、それが線量分布に与える影響を定量的に評価していること、(2)この方法の精度をより高めるための手法の提案や予備的な試行を行った、点が評価できる。またいくつかの臨床例を示して、従来法の線量計算法が見かけ上は優れた線量分布を提示するが、それが実際には予測と大きく離れたものになり標的への過大線量、過小線量のリスク、周辺重要臓器の障害リスクの増加につながる場合があることを示し、筆者が開発した新たな手法を使えば前もって実際に近い線量分布を提示できるためより最適な治療計画を実現できる可能性が増える点が注目に値する。一方、今回の研究はフルモンテカルロ法との比較による精度検証に限定されているので、実際の測定結果との比較が今後求められる。また現在の簡易モンテカルロ法による線量カーネルの計算法の問題点として、いわゆる照射野効果(照射野が小さくなると線量が低下する効果)をうまく再現できないという課題がある。これは原子核との相互作用を無視した結果、側方線量分布の裾を再現できていないことに起因する。この新たな計算法の改良の試行的な取り組みの結果、計算時間をあまり増やさずに陽子と標的原子核との散乱を系統的に取り扱うことで部分的にこの問題を解決したことは評価できる。今後は、その手法の詳細な精度検証や、非弾性核散乱の効果のモデル化をすることが課題として認識された。

#### 〔最終試験結果〕

平成 28 年 2 月 17 日、数理物質科学研究科学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。