

審査の結果の要旨

氏名 江頭 祐亮

本論文は陽子線治療における線量分布計算アルゴリズムの高精度化とその臨床利用の研究に関するものである。陽子線の特徴を生かしたより高精度な陽子線治療を患者に提供するため、現在実臨床で用いられている線量分布計算法であるペンシルビーム計算法の精度上の課題が検討され、実臨床で利用可能な陽子線治療計画システムの構築の必要性が熟慮されている。さらにその理念に基づき、シミュレーションシステムの実臨床での利用を可能にする、高速高精度ペンシルビーム計算アルゴリズムの研究開発を行ったものである。

第一章は序論で、医療における放射線の重要性、また陽子線治療の歴史や陽子線治療の放射線治療における位置づけの説明を行っている。

第二章は陽子線治療における物理と臨床について述べている。陽子と人体とのクーロン相互作用による陽子エネルギーの付与や、陽子の進行方向の偏向といった物理現象を説明している。また、陽子線治療システムは加速器システム、ビーム輸送システム、治療計画システムから成ることを踏まえて、治療計画システムにおける線量分布計算の重要性を計算精度と計算時間の観点から説明している。

第三章は陽子線治療の治療計画システムにおける線量分布計算の方法について体系的に説明している。モンテカルロ計算法は、物理の素過程を粒子毎に追跡するという点で高精度な計算が可能であるが、1つの症例に対して数時間にも及ぶ計算時間を要するため、時間の制約上、臨床利用が困難であるという問題点がある。その状況下において、解析的計算手法であるペンシルビーム計算法(PBA法)についての計算アルゴリズムについて述べるとともに、臨床でのPBA法の有用性を論じている。PBA法は測定値をベースとした近似計算法であり、ビームの進行方向に対して側方向の位相空間の変化を考慮し、側方の多重クーロン散乱に対する効果を、ガウス分布近似によって計算を行うといった特徴が

ある．一方で，陽子線治療計画における PBA 法の近似限界を，人体の不均質媒体中での計算精度の観点から示しており，不均質媒体中での線量分布計算精度の向上の必要性が述べられている．そのため，本研究の目的は陽子線治療における治療計画の技術発展を目指した高精度線量分布計算アルゴリズムの開発であることとしている．

第四章では論文の根幹でもあるペンシルビームの再定義計算法(PBRA 法)の概念や実装について論じられている．PBRA 計算法の最大の特徴は，側方向の位相空間の変化に加えて，エネルギーの位相空間の変化を考慮した六次元の位相変化を評価することによって輸送計算毎に PB を再定義することが可能である点である．この PBRA 計算法における物理的特性によって，再定義によって再発生した PB は，従来の PB の軌跡が考慮することのできないビームの軌跡を描くことが可能であることを示している．

また，PBRA 計算法のアルゴリズムとしての妥当性を確認した上で，PB を分割することによる不均質媒体に対する線量分布への影響の評価を行っている．この評価では，人体の不均質を模擬した異なる 2 つのファントムを作成し，PB の深さ毎の分割数が増加するにつれ計算値と測定値の相違が小さくなることを確認し，更に不均質媒体の直上で PB を分けることによって精度が向上することを示している．

続いて，PBRA 計算法による計算結果とファントム測定の結果の比較による精度向上に対する評価を行っている．この評価では，上記の不均質スラブファントムに加えて，より人体の構造に近い模擬人体ファントムを用いており，PBRA 計算法が PBA 法に対して，より人体に近い体系に対して計算精度が向上することを示している．

第五章は，前章までに得られた知見を基に，PBRA 計算法の計算精度に影響する様々な項目について詳細な考察がなされている．更に，アルゴリズムの高速化と，高速 PBRA 計算法を搭載した陽子線治療計画システムの開発を行っている．

第六章は，本論文で提案された陽子線治療における PBRA 計算法の今後の展開と共に結論が述べられており，今後の発展を期待させ，非常に貴重かつ重要な見解であるといえる．

以上のように本論文は，陽子線治療計画システムに関して実臨床で利用可能な高速・高精度である PBRA 計算法を提案したものである．また，提案した線

量分布計算アルゴリズムを搭載した陽子線治療計画システムを構築することで、人体における不均質媒体に対して計算精度を向上させた陽子線治療計画が可能となることが示唆されている。本論文で考案している **PBRA** 計算法を搭載した陽子線治療計画システムの実用が臨床における治療計画技術の発展に多大に寄与することが期待でき、工学、バイオエンジニアリングでの研究成果が国民生活へ貢献可能であることを示した非常に意義のある論文であると言える。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。