

## 2020年度 博士前期課程学位論文要旨

### 学位論文題名

炭素線治療ビームに対する電離箱線量計の線質変換係数に関する研究

学位の種類： 修士（放射線学）

東京都立大学大学院

人間健康科学研究科 博士前期課程 人間健康科学専攻 放射線科学域

学修番号 19897704

氏名： 浦郷 由佳

（指導教員名： 齋藤 秀敏）

炭素線治療は高い生物学的効果やブラッグピークと呼ばれる線量の局所集中特性などから、正常組織の障害を低減し、がん病巣に対して集中的に高線量を付与する放射線治療方法として近年注目されている。炭素線においても光子線と同様に、空気に対する水の平均制限質量衝突阻止能比 $(L/\rho)_{w,air}$ 、空気中で1イオン対生成に消費される平均エネルギー $W_{air}$ 、電離箱線量計による擾乱に対する補正係数 $P$ によって線質変換係数 $k_Q$ が算出される。IAEAのTRS-398や外部放射線治療における水吸収線量の標準計測法(標準計測法12)では、炭素線に対するこれらの値の不確かさは $(L/\rho)_{w,air}$ で2.1%、 $W_{air}$ で1.5%、 $P$ では円筒型で1.0%、平行平板型で1.8%と大きい数字となっている。そのため、炭素線の $k_Q$ の標準不確かさは円筒型で2.8%、平行平板型で3.2%と大きく、これにより炭素線の水吸収線量計測の不確かさは円筒型で3.0%、平行平板型で3.5%と、光子線や電子線の1.5%、陽子線の2%よりも大きく見積もられている。したがって、大きい不確かさの主要な原因である $k_Q$ の不確かさの低減が求められている。 $k_Q$ の評価には一般的にモンテカルロシミュレーションが使用されるが、炭素線については依然として行われていない。また、モンテカルロコードGeant4では炭素線に対するシミュレーション精度の検証やシミュレーションパラメータの最適化もほとんど行われていないのが現状である。

本研究では、炭素線による水吸収線量評価の不確かさを低減させることを目的とし、各種電離箱の $k_Q$ をモンテカルロシミュレーションで評価し、実験的に算出した $k_Q$ および文献値と比較した。炭素線の電離箱シミュレーションを行うための最適な物理モデルやパラメー

タ設定を決定するため、粒子輸送アルゴリズムの精度を検証するための厳格なテストとして知られる Fano cavity test を行った。

Fano cavity test では、物理モデルや輸送アルゴリズム、パラメータの値を変更しながら Geant4 における炭素線の condensed history 輸送の精度を検証し、炭素線に対するシミュレーションパラメータの最適化を行った。水と水蒸気の層で構成された幾何学的形状を炭素線の線状線源で照射し、水蒸気層中での Energy deposition を算出して評価に用いた。検証の結果、0.1 %の精度での炭素線シミュレーションが可能なパラメータを決定した。特に電離箱線量計のような薄い層を持つジオメトリでは、*GeomFactor* を調整することで低エネルギーでのシミュレーション精度を改善できることを明らかにした。

各種電離箱の  $k_Q$  の評価は、測定とシミュレーションの2つのプロセスで行った。測定では、水中に電離箱線量計を設置して計測し、基準線量計に対する  $k_Q$  の比の形で算出した。ビームの入口付近の平坦な部分においては、使用した全ての電離箱線量計において測定値は文献値と一致し、文献値の信頼性を確認した。シミュレーションでは水吸収線量および電離空洞内の空気吸収線量を計算し、 $k_Q$  から  $W_{\text{air}}$  を除いた  $f_Q$  を求め、基準線量計に対する  $k_Q$  の比、および各電離箱線量計の  $k_Q$  を算出した。算出した各電離箱線量計の  $k_Q$  は、使用した全ての線量計で TRS-398 や標準計測法 12 の値と一致した。Burigo らの最新のモンテカルロ計算による値や Osinga-Blattermann らによる水カロリメータでの測定値ともよく一致し、本研究の手法で高精度に  $k_Q$  を算出することが可能であることが示された。

本研究において、Geant4 での炭素線シミュレーションのための最適なパラメータ設定を決定し、各種電離箱の  $k_Q$  をシミュレーションで求めた。使用した全ての電離箱線量計について高精度に  $k_Q$  を算出でき、文献値や測定値と一致する結果が得られた。