

論文の内容の要旨

論文題目

Beam ON-LINE PET による照射領域画像情報を用いた高精度陽子線治療に関する研究

氏名 宮武 彩

1. 研究背景と目的

放射線治療は、がんの治療法として外科治療、化学治療と並び三大治療法の一つとなっている。世界的にがん患者数は増加傾向にあり、患者の治療予後改善（Quality of Life : QOL）の向上の観点からして、放射線治療が果たす役割は大きいと考えられる。がんの放射線治療において、従来の X 線及び電子線による治療に加え、近年、陽子線や炭素線などの粒子線による治療が目ざされている。陽子線を含む粒子線治療は、ブラッグピークによる線量集中性に優れた線量分布特性に加え、光子線や電子線とは異なった放射線の生物学的効果を持つことから、放射線難治性の腫瘍に対しても高い治療効果が得られる可能性があることが示唆されている。粒子線治療への期待と需要は、今後更に高まることが予想される。

高い線量集中性という陽子線治療の特徴を最大限に活かすためには、腫瘍に陽子線が的確に照射されたかどうかを確認できることが非常に重要である。近年、陽子線治療の品質保証、管理及び高精度化のために、陽子線照射によって患者体内で起こる標的原子核破砕反応により生成されるポジトロン放出核の分布・強度を PET システムで測定し画像化する研究が盛んである。国立がんセンター東病院では陽子線治療における患者体内での照射領域の可視化のため、照射室内のビームライン上に、高位置分解能を持つ planar type の検出器を設置した Beam ON-LINE PET system mounted on a rotating gantry port (BOLPs-RGp) を開発し、世界で初めて実臨床で利用している。現在、陽子線治療中の全患者に対して、その治療期間中、日々の治療毎に、BOLPs-RGp による activity 分布の実測を行っている。初回の治療で取得される activity 分布画像をリファレンスとして、日々の治療で測定される activity 分布画像との相違を比較することで、患者体内中における照射領域の位置を確認し腫瘍への照射精度を担保する利用法である。陽子線が腫瘍へ的確に照射されたかを定量的に評価するには、患者体内における陽子線の線量分布と activity 分布の相関を正確に把握する必要がある。生成されるポジトロン放出核の種類・位置・強度を精度良く算出しなければならない。この activity 分布のシミュレーションを実施する方法の一つに、患者体内で生じる標的原子核破砕反応の反応断面積値を組み込んだモンテカルロ法がある。モンテカルロ法に組み込まれている反応断面積の値は、陽子線のエネルギー及び生成核種に大きく依存する。しかしながら、現在までに報告されている反応断面積データの量及び

精度は不十分な状況にある。また、乱数を利用した統計的計算法により膨大な計算データを必要とするモンテカルロ法によって患者体内の activity 分布を計算する場合、計算時間に数日を要する。そのため、多数の患者治療を実施しなければならない医療現場において、モンテカルロ法の利用は不可能である。そこで、高精度の陽子線治療を患者へ提供するため、臨床利用が十分可能な計算速度・精度を実現する、新たな activity 分布の計算アルゴリズムの研究開発が必要である。

本研究は、実臨床で利用可能な治療計画照射領域の activity 分布シミュレーションシステムの構築において、それを実現させることが可能な高速・高精度の activity 分布の計算アルゴリズムの研究開発を目的とする。

2. ペンシルビーム法を用いた activity 分布計算アルゴリズム

本研究では、activity 分布の計算アルゴリズム法として、標的原子核破砕反応で対象となりうる人体構成原子核より生成される activity 分布の計算を、化合物中での陽子線の多重クーロン散乱効果を考慮してペンシルビームカーネル化させて取扱う手法を考案した。陽子線線量計算アルゴリズムとしてよく用いられるペンシルビーム法を、activity 分布計算に応用する新たな手法である。

本手法で利用する反応断面積情報は、人体を構成する主成分の ^{12}C 、 ^{16}O 、 ^{40}Ca 核を数多く含むポリエチレン、水及び酸化カルシウムの化合物に陽子線を照射し、化合物中で生成されたポジトロン放出核の深部依存（エネルギー依存）の activity 分布を、全て BOLPs-RGp で実測することで得る。つまり、ある標的原子核と陽子核との全ての反応チャンネルにおける反応率情報が含まれたデータを利用する本手法は、データ量及び精度と共に不十分であった反応断面積の値を利用するモンテカルロ法に対して精度の向上が期待できる。また、取得した activity 分布をペンシルビームカーネル化して取り扱うことで、計算時間の大幅な短縮が可能となる。従って、本研究で考案したペンシルビーム法を利用した activity 分布計算法では、モンテカルロ法の課題であった精度と計算時間の両方が改善され、実臨床での利用が見込まれた。

3. Activity 分布のペンシルビーム化

考案した activity 分布のペンシルビーム化のために、様々な検証を通して確立した測定条件の下、3種類のターゲットに陽子線を照射し、標的原子核とした ^{12}C 、 ^{16}O 、 ^{40}Ca 核の情報を含む3種類のターゲットの activity データを BOLPs-RGp によって実測した。

深部 activity 分布の実測では MONO エネルギーの陽子線を利用するが、実臨床では患者毎及び照射方向毎にビーム進行方向の腫瘍の大きさに合わせた拡大ブラッグピーク（Spread Out of Bragg Peak : SOBP）を利用して治療が実施されている。そのため、activity 分布計算で利用する

データも、SOBP ビームを照射した際に取得される activity 分布データである必要がある。SOBP ビームは、MONO エネルギーの陽子線をアルミ製のリッジフィルタに透過させることで形成される。そこで、リッジフィルタの形状情報を利用し、MONO ビームによる実測結果から SOBP ビームで取得される activity 分布への変換法を考案し確立した。変換係数を導出して利用するこの手法の確立によって、照射条件毎に必要な実装データの測定時間が大幅に短縮できた。

また、ターゲットに照射して実測した activity 分布データから、目的とした3種類の原子核の深部 activity 分布を取得する手法を確立した。更に、治療毎及び患者毎に異なる照射時間を想定し、activity 分布形状の時間依存性も考慮した深部 activity 分布データとした。それらを多重クーロン散乱効果によって側方向への拡大をガウス関数で近似することで activity 分布をペンシルビーム化し、activity 分布計算で必要とされる ^{12}C 核、 ^{16}O 核、 ^{40}Ca 核に対する activity 分布を全て整備した。

4. 結論

本研究では、照射領域可視化を利用した陽子線治療において、activity 分布計算を高精度・高速で実施可能な activity 分布のペンシルビームをカーネル化する新しい手法の計算アルゴリズムを考案した。本手法により、実臨床での利用は不可能であると考えられたモンテカルロ法による activity 分布シミュレーションシステムの課題を解決することが出来る。考案した activity 計算アルゴリズムを搭載したシミュレーションシステムを構築することで、照射領域可視化を利用した高精度陽子線治療を患者へ提供することが可能になる。陽子線照射領域可視化の研究において、このような例は無く、今後、需要が高まることが予想される陽子線治療において、本研究で開発した activity 分布計算アルゴリズムを搭載した照射領域可視化シミュレーションシステムの実用が照射領域可視化を利用した陽子線治療においてスタンダードになると期待できる。