

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K19240

研究課題名(和文)高精度重粒子線治療のためのフラットパネル検出器による粒子線画像化システムの研究

研究課題名(英文) Feasibility of particle imaging using flat panel detector for the carbon ion radiotherapy

研究代表者

三木 健太郎 (Miki, Kentaro)

広島大学・病院(医)・病院助教

研究者番号：90732818

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：重粒子線ブラッグピークの飛程シフトに着目し、フラットパネルとレンジシフタを用いた検出器構成により、飛程シフト量を検出する事による粒子線の画像化の実現可能性を検討した。ブラッグピークのレンジシフトが高精度で検出されれば、それを用いた画像化は十分可能である事が示唆された。一方、体内の軟部組織によるレンジのシフト量は小さく、機械的なレンジシフタを作成して識別するのは困難である事が分かった。レンジシフトの検出には奥行き方向の検出器が有効である。本研究では、画像化装置としてのフラットパネルの可能性と、粒子線検出器及び散乱線検出器としてのMPPCの性能を確認した。

研究成果の概要(英文)：The aim of study is the feasibility of particle imaging using range shift of Bragg peak, which detected by using flat panel and mechanical range shifter, in the carbon ion radiotherapy. In case of the range shift of Bragg peak will be detected with accuracy, it would be able to make the particle image. However, it is difficult by using the mechanical range shifter, because the amount of range shift difference would be small on the soft tissue. To detect the range shift, it would need additional detector in the depth direction. In this study, we confirmed the method of image generation using range shift, possibility of flat panel for the range shift detection of Bragg peak, and basics of Multi Pixel Photon Counter (MPPC) as the next generation devices.

研究分野：医学物理学

キーワード：医学物理学 重粒子線 放射線治療 MPPC 検出器

1. 研究開始当初の背景

重粒子線によるがん治療は、放射線照射技術の進歩により、従来よりも治療ビームを腫瘍に集中させる事が出来るようになった結果、他の手法に劣らない優秀な治療成績が報告されるようになった。重粒子線はX線に比べてビームが標的に与える生体効果が高いため、その有用性が注目される治療法であるが、一方で計画した放射線の標的位置と実際の照射領域とに差異が生ずれば、腫瘍に当たらずの放射線が周囲の正常組織に当たってしまうので、正常組織への副作用はより大きい。照射時の高精度な患者の位置合わせのみならず、体内臓器の位置関係や日々の変化の把握、呼吸性移動対策などは重粒子線治療において現在も大きなテーマである。

重粒子線治療では治療に先立ち、X線CT撮影を行う。X線と重粒子線の相互作用の差異を補正し、体内での治療ビームの振る舞いをシミュレーションするため、画像のCT値は電子密度へ変換され、人体の不均一性を考慮に入れた治療ビームの照射計画を作成する。しかしX線CT画像を基にした粒子線治療計画は電子密度変換に対し一定の誤差が含まれる。また患者位置合わせは骨構造を基準とするため、場合によっては腫瘍と治療ビームの位置関係が再現されず、治療ビームが正確に腫瘍へ照射されない事が起こりうる。もし体内の状態変化を照射中に把握する事ができれば、ビームの照射方法の方を調整する事により、または照射した分布を評価して後続の照射を再計画する事により、処方すべき線量を腫瘍に投与する事ができる。粒子線を用いて作成した画像はこれらの情報がX線より直接的に得られるが、コントラストがX線より付きづらい事が長年課題であった。

2. 研究の目的

粒子線は体内電子との散乱では dE/dx が小さくほとんどエネルギーを落とさないが、物質の阻止能は速度の2乗に反比例するため、静止する付近において多くのエネルギーを放出し、その結果落としたエネルギーのピークは鋭くなる(ブラッグピーク)。ブラッグピーク以前のプラトー部分でも一定のエネルギーは減少し、その分ブラッグピークは深さ方向にシフトする。このシフト量は体内で粒子が静止する位置の深さ方向のシフトに対応する。従ってブラッグピークの飛程シフトを検出すれば、体内の状態変化に伴う粒子線の飛程変化を計算する事ができる。そこで粒子線ブラッグピークの飛程シフトに着目し、フラットパネルとレンジシフタを用いた検出器構成により、飛程シフト量を検出する事による粒子線の画像化の実現可能性を検討する事を目的とした。粒子線の飛程シフトをシミュレーションで模擬し、組織密度差を検

出するために必要な検出器の分解能及び画像化法の検証を行った。

粒子線を用いた画像化の実現は、体内での直接的な相互作用に関する情報が得られるため、高精度な医療への応用が以前より期待されてきた。荷電粒子のエネルギーは、電磁力ロリメータのような検出器による測定が原子核物理学などでは一般的であり、エネルギー測定による粒子線の画像化は先行研究がある。しかしこれでは非常に高価な機器と専門知識が必要であるため、一般の治療システムへ組み込む事は現実的ではない。一方フラットパネル検出器は多くの施設で導入されており、扱いも簡便である事から成果物として施設への導入は比較的容易であると思われた。

本研究では検出器としてフラットパネルの使用を想定しているが、体内組織による飛程シフト量が微量の場合は検出能が十分でない可能性もある。そこで近年注目されるMPPCという素子を用いた検出器の研究開発も視野に入れた。MPPCとシンチレータを用いたシンチレータ検出器で、流入するX線の強度を測定し、これをビーム軸方向へ多段に配置した多層式検出器を構成する事で、レンジシフタを使わずに深さ方向の位置情報が取得可能となる。ここでは粒子線によるシンチレータの発光量、MPPCの応答特性、検出器の積層数などの最適化、及びMPPC検出器の基礎特性について検証を行った。

3. 研究の方法

放射線治療における粒子線を用いた画像化システムを構築するため、シミュレーションを用いて飛程シフト量を画像化する方法について検討した。人体ファントムを通常のCT装置で撮像し、そのCT画像を水透過厚に変換し、2Dガウシアンでぼかした粒子線ビームを打ち込む。CT画像を通過した粒子線ビームの飛程シフト量を取得し、カラーマップで表示する事で画像化を行った。ピークの位置検出法として、ピーク付近のカウント値を平均値化する方法(アベレージ法)と、フィッティングによりピークを関数化する方法(アンダーリング法)とで行った。

上記の計算にはまだ粒子の検出に関してはシミュレーションに組み込んでいない。実際には飛程シフトの検出器が必要である。フラットパネルは2次元検出器であり、深さ方向への位置検出が出来ないので、ブラッグピークをフラットパネルの検出面に入射させるために、検出器前面にレンジシフタを設置する事にした。上記シミュレーションコードにレンジシフタを設置し、レンジシフタの材質や厚さを変えながら、レンジのシフト量について観察し、必要な検出器の条件について

の検討を行った。フラットパネル検出器とレンジシフトを用いた飛程検出器から得られる情報を用いて同様に画像化を行い、分解能やコントラストについての検討を行った。

MPPC 検出器の検討においては、シンチレータを用いた光検出器を試作し、X 線 CT からの X 線、及び小線源治療用アフターローディングシステムに搭載の線源を用い、その応答特性や性能についての検証を行った。MPPC とは浜松ホトニクス社から提供されている Multi Pixel Photon Counter の略で、アバランシェフォト ダイオード (APD) と呼ばれる素子を、ガイガーモードで 1mm^2 当たり数 100 から数 1000 個並べた素子で、この単位を 1 チャンネルとして読み出しする。特徴は 1 個程度の微小な光子から検出可能な高ゲイン検出器である事で、フォトマル管のような高電圧が必要なく、素子を密に配置できるため画像化に適しており、読み出しに高価なアンプが不要、安価、常温で使用可能、高磁場中で使用可能などである。本研究では温度補償回路、電圧補償回路が内蔵されたモジュールを使用する事により、素子に対して安定した環境を整えた。シンチレータとしては発光の立上がりと立ち下りが早く、時間分解能に優れる GSO と LGSO を用いた。MPPC とシンチレータを、オプティカルグリスを用いて接着し、遮光した。電源には $\pm 5\text{V}$ の定電圧モジュールを用いた。シグナルの観測にはオシロスコープを用いた。

4. 研究成果

粒子線の深さ方向の線量分布をシミュレーションするため、GEANT を用い、ブラッグピークの分布をモンテカルロで作成した。データの解析コードは Matlab を用いて構築した。CT データから水等価のマップに変換し、2D のガウス分布で鈍らせた画像を作成した。ブラッグピークの深さ方向の位置を、水等価マップに応じてシフトさせ、そのシフト量を用いて再度画像を再構成した。もともとの CT 画像と比較すると、3mm 程度のレンジの差が確認できた。本計算を 2D ガウスの分散を変化させながら繰り返し、再構成画像に与える影響について考察した。本研究により、上記方法による画像化が問題なく実現可能であることを確認した。尚、本計算は 1 画素毎の計算を繰り返す設計であり、計算コストが高くて実用的ではないため、計算の並列化や効率的な計算コードの作成は現在も継続中である。

次にフラットパネルに効率よくブラッグピークを入射させるのに必要なレンジシフトの材質や厚みを最適化する事について検討を行った。シミュレーション上にてフラットパネルにブラッグピークを入射させるレンジシフトを構築し、レンジシフトの厚さ

を飛程シフト量と関連付けて 2D のマッピングを行った。本計算は特にアニーリング法における計算負荷が高く実用的ではなかったため、計算の並列化やコードの最適化を実施して高速化を図った。しかしながら体内の軟部組織によるレンジのシフト量は小さく、機械的なレンジシフトを作成して識別するのは困難である事が分かった。また散乱線の影響も大きく、仮想的な重粒子線コリメータを検出器の前方に設置する事で、ブラッグピーク付近の分布が鮮明になる事が確認されたが、この方法は現実的ではない。そこで方針を若干変更し、2 次元検出器と奥行き方向の検出器の導入検討へ主軸を移す事とした。

ブラッグピークのシフト検出器として本研究で期待していた、MPPC を用いたシンチレータ検出器の開発と基礎特性評価を行った。研究員の所属機関変更に伴い、粒子線ビームラインの使用が困難になったため、放射線源として X 線 CT と小線源治療用アフターローディングシステムを主に用いた。MPPC に流入する線量を可能な限り抑え、連続的な X 線照射をオシロスコープにて観察したが X 線管の出力を十分に抑えた上でも、MPPC 検出器出力のオーバーフローは制御が困難であった。一方、小線源照射装置からのガンマ線は、線源からの距離を適切に確保する事で、パイルアップのないシグナルを観測する事が可能であった。また X 線照射野に散乱体を設置する事で、散乱線の検出は十分可能であったため、散乱体検出器としての用途が示唆された。これは粒子線を用いた画像化のみならず、小線源治療中の線源位置確認用検出器としての用途や、外部 X 線治療時における照射位置確認用検出器としての用途も期待できると思われる。現在は粒子線への応用のため、MPPC とシンチレータを奥行き方向に多段に配置し、レンジシフトを排した粒子線検出器のシミュレーションを行ない、必要な MPPC チャンネル数の最適化を行っている。同時に散乱線検出器として、CT 撮影時や Linac での X 線治療時における、患者体内からの散乱線検出器としての用途、及び小線源治療時における、線源位置同定のための用途を模索している。

本研究において、重粒子線によるブラッグピークのレンジシフトが高精度で検出されれば、それを用いた画像化は可能である事が示唆された。それには散乱線の影響も十分考慮する必要がある。また画像化装置としてのフラットパネルの可能性と、粒子線検出器及び散乱線検出器としての MPPC を用いたシンチレーションカウンターの性能を確認した。機械的なレンジシフトを用いた方法ではビーム軸方向の制御が困難であった。MPPC は自然放射線測定器やフォトンカウンティング CT への応用など多くの分野で注目されている素材であり、扱いが容易で画像化に用いる検出器としても適している。本研究では主に

シミュレーションによる検討と、X線やガンマ線を用いた検討を行った。いくつかの環境および方針の変更により、研究期間中の論文等での結果報告が困難となったが、重粒子線のみならず外部X線照射治療時、小線源治療におけるMPPC検出器の用途など、今後の発展に期待できる副次的な発見もあった。重粒子線を用いた画像化の試みは次世代の高精度医療において依然として重要であると考えており、継続して研究を行いたい。また機会を見て、重粒子線や陽子線のビームラインを用いて実験を行い、本研究で得られた計算結果と比較検討した成果を論文としてまとめる作業を続ける。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三木 健太郎 (Miki Kentaro)

広島大学・病院・病院助教

研究者番号：90732818

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし