

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：12301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K15541

研究課題名（和文）がん治療用炭素線の線質測定用半導体検出器の開発

研究課題名（英文）Development of semiconductor detector for radiation quality measurement of therapeutic carbon beams

研究代表者

松村 彰彦（Matsumura, Akihiko）

群馬大学・重粒子線医学推進機構・助教

研究者番号：90600453

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）：本研究では、がん治療で用いられる炭素線の線量と線質が測定可能な半導体検出器を開発し、臨床で用いている炭素線場の評価を行った。

既存の半導体検出器を用いて炭素線に対する応答調査を行い、ノイズ源の特定及びデータ収集系の改良を実施し、1次粒子の炭素線から核破砕片まで幅広いエネルギーの放射線を計測できるシステムを構築した。これを用いて治療用炭素線ペンシルビームの動径方向の線質の変化や、拡大ビーム法における照射野サイズによる線質の影響を測定し、生物学的効果を評価する線量平均エネルギー付与の変動について調査を行った。本研究で構築したシステムを用いることで治療用炭素線場の理解がさらに進むと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

がん治療で用いられる炭素線は生物学的効果が大きく、X線や陽子線では効きにくかった種類のがんに対しても効果が期待できる。一方で、その効果を推定するエネルギー付与の分布（線質）は照射範囲内で均一ではなく、複雑に変化している。

本研究で構築した有感領域の小さい半導体検出器は、複雑に変化する炭素線場の線質評価に優れており、今後様々な条件下での測定に応用することによって、治療用炭素線場の生物学的効果の理解が一層進むと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a semiconductor detector that can measure both the dose and radiation quality of carbon beams used in cancer therapy and evaluated the carbon beam fields used in clinical practice.

Response to carbon beams was investigated using an existing semiconductor detector, noise sources were identified, and improvements were made to the data acquisition system to create a system capable of measuring a wide range of radiation energies, from primary carbons to secondary fragments. Using this system, we have measured the radial radiation quality variation of the therapeutic carbon pencil beam, the effect of irradiation field size on radiation quality in the broad beam method, and investigated the variation of dose-averaged energy transfer to evaluate the biological effects. The system constructed in this study will further advance our understanding of the therapeutic carbon beam field.

研究分野：医学物理

キーワード：半導体検出器 重粒子線 線質

1. 研究開始当初の背景

炭素線を用いた重粒子線がん治療は、生物学的効果比が高く、正常組織へのダメージも少ないため、より患者の“生活の質”を重視した低侵襲のがん治療法として近年大きな注目を集めている。放射線治療では、照射する“線量”が基本となるパラメータだが、重粒子線治療では生物学的効果を評価する指標の一つである“線質”も重要なパラメータである。“線質”は放射線が付与するエネルギー (Linear Energy Transfer; LET) 分布によって表すことができるが、放射線の種類やそのエネルギーによって変化する。重粒子線治療場では、一次粒子の炭素線や核反応によって生成された核破砕片が混在し、複雑な線質変化をもたらす。不均質な体内の複雑な生物学的な効果を定量的に評価し、治療計画の高度化や副作用を含む治療効果予測の高精度化を達成するためには、小型で LET 分布測定が可能な検出器開発が必要不可欠である。

治療用炭素線場の LET 分布測定は、プラスチックシンチレータや組織等価型比例計数管等を用いて行われてきたが、検出器の有効面積が 1cm を超えるため、線量集中性が高く急峻な勾配の線量分布の詳細な測定が困難であった。シリコン半導体検出器は、小型が比較的容易でエネルギー分解能も高いため、治療用炭素線場の LET 測定用の検出器の有力な候補のひとつである。

2. 研究の目的

本研究では、臨床応用を見据えて、線量と線質が測定可能な半導体検出器を開発し、新たな測定基盤技術を構築することを目的としている。

この技術は、日々の QA/QC の定量性の向上や副作用を含む治療効果予測の高精度化に大きく寄与するのはもちろん、治療技術のさらなる高度化のための基礎データを収集することができる。例えば、より高度な治療計画装置の開発が飛躍的に進むと考えられる。現在の治療計画装置はペンシルビーム法を用いて、炭素と仮定して散乱を計算している。近年フラグメントと炭素線の分布の差を考慮した線量計算アルゴリズムの開発が進んでいるが、これらのモデルの検証に用いることができる。

3. 研究の方法

群馬大学重粒子線医学センター (GHMC) において既存の半導体検出器とデータ収集系を用いて炭素線に対する応答調査を行った。治療用炭素線場は様々な放射線が混在し、その線質評価は高 LET の炭素線から低 LET のフラグメントまで、様々なエネルギーの放射線を計測する必要がある。そのため、既存の半導体検出器で問題となっていた電気ノイズの除去とデータ収集系のダイナミックレンジの調整を行い、炭素線場の線質測定に最適な半導体検出器システムを構築した。

つぎに、このシステムを用いて治療用炭素線の評価を行った。ひとつは、大阪重粒子線センター (HIMAK) でスキャンニング法による照射で用いているペンシルビームに対して、動径方向の線質評価を行った。もう一つは、GHMC で用いている拡大ビーム法において、照射野サイズを変更した際の線質変化を行った。

4. 研究成果

既存の半導体検出器とデータ収集系を用いて炭素線に対する応答調査を行った。その結果、懸案事項の一つであった測定系の電気ノイズが、水厚可変型の水槽の電源由来であったことが特定できた。測定時に水槽の電源を切り、さらに検出器の接地を強化するとによって、より低い線 LET の領域まで測定できることが確認できた。また、マルチチャンネルアナライザのダイナミックレンジを最大限利用できるようにプリアンプの増幅率の調整を行った。これらの結果により、低 LET のフラグメント粒子からプライマリ炭素線までの幅広い LET 分布測定が可能であることを確認できた。

Fig. 1 に HIMAK で測定した炭素線ペンシルビームの動径方向の LET 分布の変化を示す。測定はプラトー領域で行った。20 keV/ μm 付近の信号は一次炭素線に起因するもので、低 LET 領域に見られるのは陽子やヘリウム核等のフラグメント起因の信号である。ビーム軸からの距離が離れるほど全体に収量が下がるが、炭素/フラグメント比も大きく減少することがわかった。例えば、 $r=0.6$ mm では炭素/フラグメント比は 6.6 であったが、 $r=5.6$ mm では 2.3 であった。これは、炭素とフラグメントの角度分布の違いを示して、より軽く電荷も小さいフラグメントの方が分布が広がっていることが確認できた。Fig. 2 はブラッグピーク手前での動径方向の LET 分布の変化を示す。こちらも同様の傾向であったが、炭素/フラグメント比は $r=0.6$ mm で 3.0、 $r=5.6$ mm では 1.4、 $r=10.6$ mm では 0.2 となり、プラトー領域よりも減少率は緩やかであることが確認できた。これは、エネルギーを失った炭素線の散乱角が大きくなり、より広い範囲に分布していることを示している。

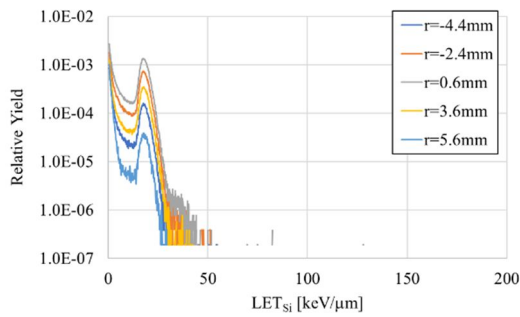


Figure 1 プラトー領域で測定した
ペンシルビーム動径方向 (r) の LET 分布

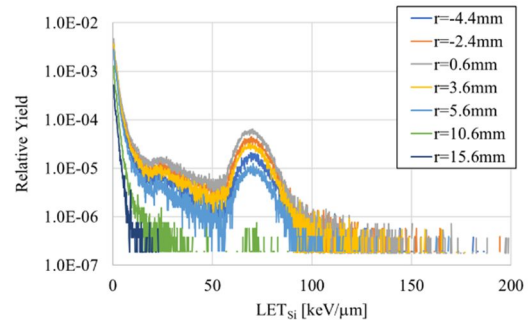


Figure 2 ブラッグピーク手前で測定した
ペンシルビーム動径方向 (r) の LET 分布

Fig. 3 と Fig. 4 はプラトー領域とブラッグピーク手前で、線量・線量平均 LET プロファイルを示す。プラトー領域では、今回の測定範囲では大きな変動が見られなかった。炭素線とフラグメントの空間的な広がりやの差が比較的小さいためだと考えられる。一方でブラッグピーク手前では、特に炭素がほぼ観測されなかった $r=10.6$ mm より大きい領域で線量平均 LET が大きく減少した。これは、炭素とフラグメントの LET に大きな差があることを示している。

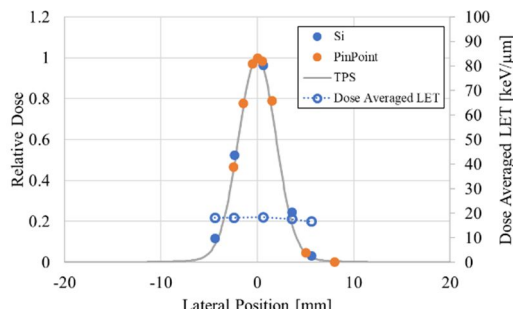


Figure 3 プラトー領域の線量・LET
プロファイル

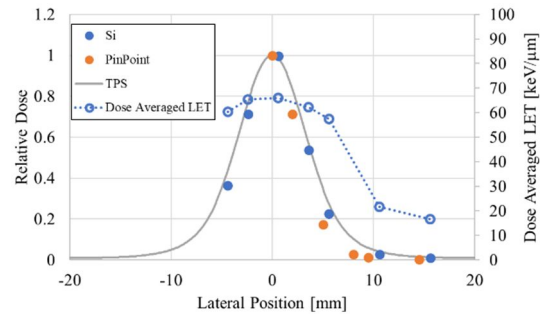


Figure 4 ブラッグピーク手前での
線量・LET プロファイル

拡大ビーム法における照射野サイズを変更した際の LET 分布を Fig. 5 に示す。この測定では GHMC で治療で用いている拡大ブラビーム幅 60 mm のビーム条件を用いて拡大ブラッグピーク中心で LET 分布を測定した。横軸が 350 チャンネル付近のピークが炭素線の信号であり、300 チャンネル以下はフラグメント起因の信号である。照射野サイズを変更しても炭素線の量は大きく変わらなかった。一方、フラグメントは照射野サイズが小さい時に低 LET 領域で減少が見られたが、変化はわずかであり、生物学的な影響もほぼ変わらないことがわかった。

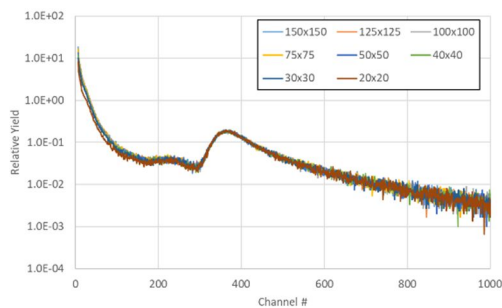


Figure 3 照射野サイズ毎の LET 分布

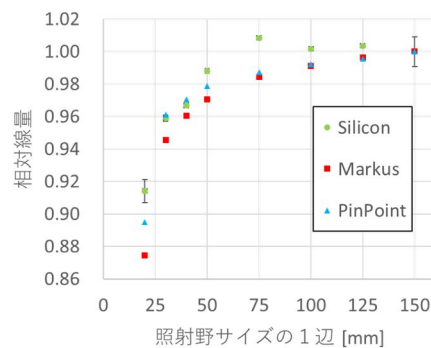


Figure 6 炭素線の照射野効果

Fig. 6 は今回測定した LET 分布から算出した、炭素線の照射野効果を、比較用の電離箱の測定

結果とまとめて示した。照射野効果の差は検出器の大きさによって見え方が変わるため、もっとも有感体積の小さい半導体検出器が小さな線量減少率を示している。また、今回の研究では半導体検出器で繰り返し測定を行いそのバラつきを調査した。LET 分布測定は、個々の放射線によって発生した信号を計測するため、測定時間が長くなり、統計的なバラつきも電離箱に比べて大きくなると考えられていた。今回の結果では、測定のバラつきはおよそ 1%程度であることがわかり、臨床的に十分な精度で線質測定が可能であることがわかった。

以上のように、線量と線質が測定可能な半導体検出器を開発し様々な条件で治療用炭素線場の評価を行った。本研究で構築した測定システムは、今後炭素線癌治療のさらなる発展に貢献できると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鳴海 克希
2. 発表標題 炭素線照射野効果の検出器サイズ依存性
3. 学会等名 第58回群馬放射線腫瘍研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Katsuki Narumi
2. 発表標題 Evaluation of Radiation Quality Variation for Broad Beam Method of Carbon Ion Radiotherapy
3. 学会等名 第121回日本医学物理学学会学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akihiko Matsumura
2. 発表標題 Radial LET Measurements for Therapeutic Carbon Pencil Beam
3. 学会等名 第121回日本医学物理学学会学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kohei Osaki
2. 発表標題 Measurement of LET distributions for scanning carbon ion beams with a small silicon detector
3. 学会等名 第116回日本医学物理学学会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------