

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K15796

研究課題名（和文）LET依存性を考慮した放射線治療中の体内線量評価法の開発

研究課題名（英文）Development of In vivo dosimetry technique for radiotherapy in consideration of liner energy transfer

研究代表者

松本 真之介（Matsumoto, Shinnosuke）

東京都立大学・人間健康科学研究科・准教授

研究者番号：10742744

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：球状のSi半導体検出器におけるLinear energy transfer (LET)の依存性を評価し、同等のLET値の放射線場で校正することで、どのようなLET値の放射線場においても1%程度の誤差で測定が可能な技術を開発したことが本研究の主たる成果である。当該測定手法で10.40 keV/umから101.45 keV/umまでのLETに対する線量応答を評価したところ、測定値は1%未満から最大1.5%程度の誤差で測定可能な事を示した。この結果は、従来の技術の限界を突破するための重要な一歩であり、さらなる研究や実験を通じて、さらに高精度な測定手法の開発に向けた重要な基盤となりうる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、Linear energy transfer の高い放射線種を利用したMulti-ion beam therapyという放射線治療が活発に研究されている。この照射技術はC-ion beam単体の治療と比較して非常に高精度な照射が要求される。高精度な照射に対しては、In-vivo dosimetry (IVD)という放射線治療中の患者体内の放射線量を測定することで、測定の正確さを監視しながら放射線治療を実施し、照射精度を担保する事が行われる。本研究の成果を利用することで、Multi-ion beam therapyでIVDを実施することができ、安全で安心な治療の実施に寄与する。

研究成果の概要（英文）：The primary outcome of this research is the development of a technique that enables measurement within an approximate 1% margin of error for any radiation field, by evaluating the dependency of Linear Energy Transfer (LET) in spherical Si semiconductor detectors and calibrating in radiation fields with equivalent LET values. Using this measurement method, the dose response to LET values ranging from 10.40 keV/um to 101.45 keV/um was assessed, demonstrating that the measurement error remains below 1% to a maximum of approximately 1.5%. These findings represent a significant step towards overcoming the limitations of existing technologies, providing a crucial foundation for developing even more precise measurement methods through further research and experimentation.

研究分野：医学物理

キーワード：放射線治療 重粒子線治療 放射線計測

## 1. 研究開始当初の背景

複数のイオン種を用いて腫瘍内の Liner Energy Transfer(LET)値の最適化を目的とした Multi-ion radiotherapy(MIRT)は局所制御率が低い体積の大きな腫瘍の治療効果を高める効果が期待されている。この MIRT は複雑な照射野を組み合わせることで線量分布を作るため、治療中の患者の動きによる放射線線量への影響を In-vivo dosimetry(IVD)によって確認することで、局所制御率の向上を見込むことができる。しかしながら、現在、炭素線の IVD に利用している小型 Si 線量計は、炭素より LET 値の大きいイオン種に対応した線量評価法が確立されていない。

### 【本研究の学術的背景】

Multi-ion radiotherapy について

- 粒子線の飛程に沿って Liner Energy Transfer(LET)値は変化し飛程の終端で最大値になるため、粒子線治療では腫瘍中央部の LET 値は小さくなる。申請者らは炭素線治療における LET 分布と腫瘍の制御率の関係性を評価し、腫瘍の中央部の LET 値が低い場合は制御率が低くなることを報告した[Matsumoto, 2020]。
- Multi-ion radiotherapy(MIRT)は上記の LET の低下による制御率の低下を克服するために、量子科学技術研究開発機構(QST)が開発中の治療手技である。MIRT は LET が異なる複数のイオン種を用いて腫瘍内の LET を最適化することで、生物学的効果の向上を目指す。
- MIRT は、複雑な照射野を組合せて治療計画を立案するため、要求される照射精度は高い。したがって照射中の大きな患者の動きは、飛程誤差により腫瘍への線量過少や正常組織への線量過多が生じるため、MIRT 中に線量送達のエラーを検出することの重要性は高い。

In-vivo dosimetry について

- In-vivo dosimetry(IVD)は、放射線治療中の患者体内の放射線量を測定するもので、治療中の患者の動き等で生じる線量送達のエラーを検出するのに有用である
- QST は炭素線治療中に患者体内の吸収線量を測定出来る小型 Si 線量計を開発した[Matsufuji, 2019]。一般に半導体検出器による高 LET 放射線の測定は電荷収集の限界により過小評価を生じるが、この小型 Si 線量計の LET 依存性は治療で利用される炭素線の LET 領域では線量評価に影響がないレベルであることは確認された。しかし、MIRT で利用する Ne イオン線等の更なる高 LET 領域に対する線量計の LET 特性は評価されていない。

## 2. 研究の目的

- 本研究の目的は、現在までに報告されていない、MIRT における小型球形 Si 線量計の特性を評価すること。さらに、得られた特性を基に MIRT 中の小型球形 Si 線量計を用いた線量評価法を開発することである。
- 本研究によって、MIRT 中の IVD が実現すれば、治療中の患者の動きによる線量誤差を評価し回避することが出来るため、更に腫瘍の制御率の向上が見込める。

## 3. 研究の方法

炭素線より高い LET をもつ放射線 (O-ion beam 及び Ne-ion beam) を用いて、小型球形 Si 線量計における、LET 値毎の放射線損傷特性及び線量応答特性を評価した。さらに、この結果を基に広い LET 値に適応可能な放射線評価法を開発した。

詳細を以下に示す

高 LET 放射線に対する小型 Si 線量計の特性評価

- 小型 Si 線量計の損傷特性の評価  
本研究では、小型 Si 線量計に対する Ne イオン線等の更に LET が高い放射線による積算線量-放射線損傷特性を取得し放射線損傷特性を評価した。さらに、この結果を基に高 LET 放射線による放射線損傷を考慮した放射線評価法を開発した。
- 小型 Si 線量計の LET 特性の評価  
本研究では、小型 Si 線量計に対する Ne イオン線等の更に LET が高い放射線による深さ-線量分布を取得し、LET 特性について評価した。さらに、この結果を基に高 LET 放射線による LET 依存性を考慮した放射線評価法を開発した。

高 LET 放射線に対する線量評価法の開発

本研究で開発した高 LET 放射線に対する、放射線損傷及び LET 依存性を考慮した線量評価法は次のとおり。

- 放射線による小型 Si 線量計の損傷の影響を考慮するために、治療照射の前後に校正を行う。さらに、LET による感度低下の補正係数を LET 値の関数で取得し、幅広い LET 値に適応させた。これらと治療時に得られた電荷量から次のように線量を算出する。
- 感度補正係数を  $K_{LET}$ 、校正照射で得た (Gy/nC) の平均値を A、治療時に得られた出力電荷を  $C_{out}$  としたとき、測定線量  $D_{meas}$  は以下の式から求める。

$$D_{meas} [Gy] = K_{LET} \times A [Gy/nC] \times C_{out} [nC]$$

#### 4. 研究成果

高 LET 放射線に対する小型 Si 線量計の特性評価

- 小型 Si 線量計の損傷特性の評価

図 1 に積算線量に対する収集電荷量を示す。C, O, 及び Ne-ion 線に対してそれぞれ 3 つの小型 Si 線量計を用いて評価した。結果はそれぞれのイオンに特徴的な損傷特性はなく、どの線種に対しても同様に校正できることが示された。

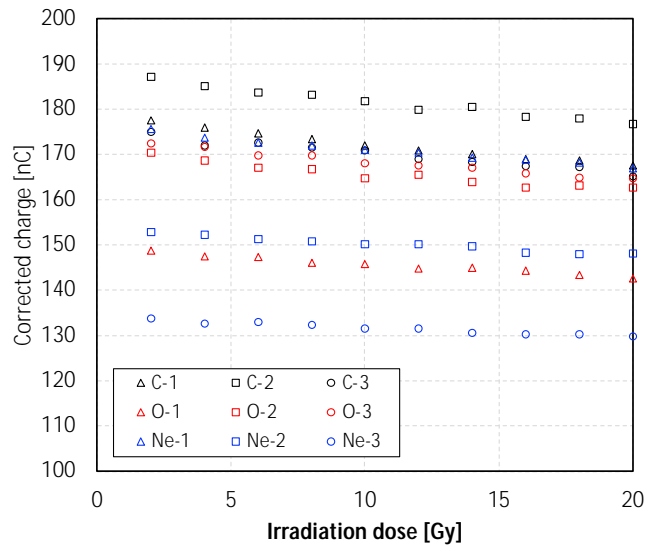


図 1 小型 si 線量計の損傷特性

- 小型 Si 線量計の LET 特性の評価

図 2 に小型 Si 線量計の LET に対する線量の測定誤差を C, O, 及び Ne-ion 線に対してそれぞれ示した。当該測定手法で 10.40 keV/um から 101.45 keV/um までの LET に対する線量応答を評価したところ、測定値は 1%未満から最大 1.5%程度の誤差で測定可能な事を示した。

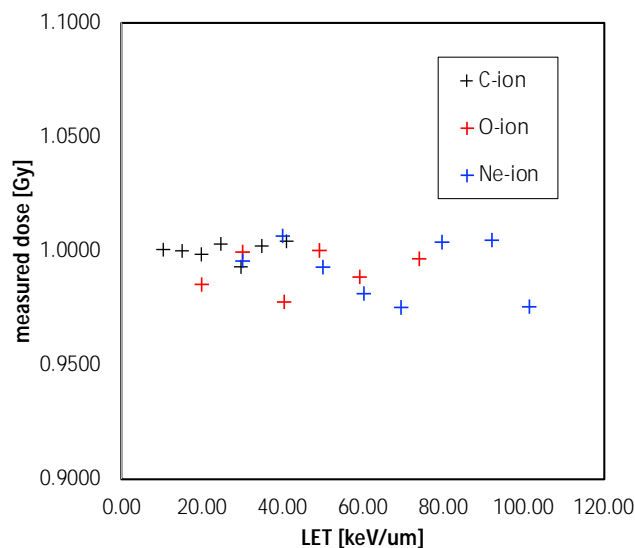


図 2 小型 Si 線量計の LET に対する線量測定誤差

図 3 に小型 Si 線量計の LET に対する線量測定誤差の標準偏差を C, O, 及び Ne-ion 線に対してそれぞれ示した。線量の誤差は LET が高ければ高いほど大きく標準偏差は 10.40 keV/um の場合 0.003 で、101.45 keV/um の場合 0.012 であった。

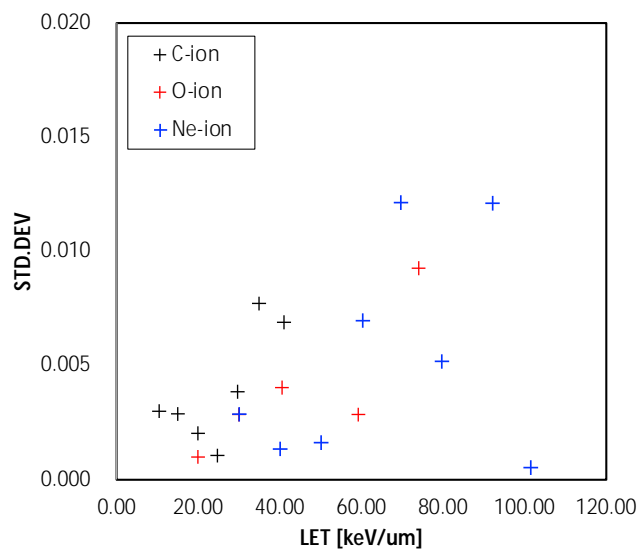


図 3 小型 Si 線量計の LET に対する線量測定誤差の標準偏差

これらの結果は、従来の技術の限界を突破するための重要な一歩であり、さらなる研究や実験を通じて、さらに高精度な測定手法の開発に向けた重要な基盤となりうる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 MATSUMOTO SHINNOSUKE、MATSUFUJI NARUHIRO、KOBAYASHI YUSUKE、TSUJII HIROSHI	4. 巻 43
2. 論文標題 <i>In Vivo</i> Dosimetry in the Urethra During Prostate Carbon Ion Radiotherapy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Anticancer Research	6. 最初と最後の頁 2259 ~ 2264
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21873/anticancerres.16389	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松本真之介
2. 発表標題 小型球形半導体を用いたin-vivo線量測定
3. 学会等名 医療放射線技術研究会（招待講演）
4. 発表年 2023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
---------	---------