

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：12301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26860395

研究課題名(和文) 可変スポットサイズスキヤニング照射法の開発

研究課題名(英文) Development of variable spot size scanning irradiation

研究代表者

想田 光 (Souda, Hikaru)

群馬大学・大学院医学系研究科・助教

研究者番号：30523162

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：粒子線治療において、複数のビームサイズで照射を行うことにより平坦度を保ちつつ線量集中性を向上させる可変ビームサイズ照射法を開発した。複数のビームサイズを安定に使い分けられるパラメータ調整を行った上で、複数のビームサイズとスポットに対する多次元の線量最適化計算を実施し、照射実験を行った。実験の結果、平坦度を許容範囲内に保ちつつ、単一ビームサイズでは得られなかった良好な側方線量分布を得ることができ、提案した手法の原理検証に成功した。

研究成果の概要(英文)：Variable spot size scanning irradiation method was developed for further concentrated dose distribution with sufficient flatness. Machine parameters were optimized for multiple beam size with stabilized beam positions. Irradiation plan was calculated by optimizing the parameters of particle number weights of multiple beam size and multiple beam spots. In the results of irradiation experiments, the dose flatness was kept within the tolerance for treatment and dose outside the target was clearly reduced. The proof of principle of variable spot size scanning irradiation was successfully achieved.

研究分野：加速器物理学

キーワード：粒子線治療 スキヤニング照射 遅い取り出し 可変ビームサイズ 線量最適化計算 ペナンブラ

1. 研究開始当初の背景

粒子線治療は、ブラッグピークによる深度方向への線量集中性が高く正常組織への影響を最小化できることと、炭素線においてはX線や陽子線に比べて生物学的効果比(RBE)が2~3倍高く、放射線抵抗性の腫瘍にも高い効果が得られる治療法である。粒子線治療の照射法の中でも、細いビームで標的を塗りつぶすスキニング照射法は、拡大照射野を形成して不要部分を切り捨てるブロードビーム法に比べ標的の形状を正確に再現できる高度な照射法であるが、もともとのビームサイズが大きいと側方への余分な線量が増えることが欠点であり、逆にビームサイズが小さいと照射時間が増大し、臓器の動きの影響を受けやすくなるという問題がある。正常臓器に近接した標的への照射など、現在より更に重粒子線治療の適用範囲を広げるため、照射野外線量の低減と頑健性の確保を両立させる手法の開発が望まれていた。

2. 研究の目的

本研究では、この二律背反を解消するために、通常1種類のビームサイズだけで行うスキニング照射を複数のビームサイズを使い分けて行う方法を提案した。

複数のサイズのビームによって線量分布を改善したさらなる高精度照射を実現するため、複数のビームサイズを用いることにより線量分布の改善と平坦度などの頑健性の確保を両立させる事が可能であることを実験的に示すことを目的とした。

複数のビームサイズを安定に使い分けられるパラメータ調整、機器構築を行った上で、複数のスポットサイズを使い分ける線量計算を行い、その計算に基づいて照射実験を行い、線量分布の向上を実測することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究は、群馬大学重粒子線医学センターの重粒子線治療装置(核子あたり最大400MeVのシンクロトロン)および高度化設備照射ポートを用いて実施した。

(1) ビームサイズの調整

本研究を行う上で複数サイズのビームを使用するため、そのパラメータ調整およびデータ取得を実施した。研究開始前の単一サイズのビーム照射では、ビーム位置の変動をステアリング磁石によるフィードフォワード制御で抑制したが、複数サイズ照射には対応できないため、シンクロトロンからのビーム取り出しを改良し位置変動を小さく保ってステアリングによる補正を行わずに安定した照射ができるようにした。サイズの調整については、

(2) 複数サイズビームを用いた線量最適化計算

複数サイズのビームを用いた線量最適化

計算を行った。手法として最も目的関数の変化量が大きいパラメータを順に補正するMICADOアルゴリズムを利用し、補正量は二分探索を用いて実施した。これをスポット数×サイズ数の多次元空間に適用して最適なパラメータの組を算出した。

(3) 可変サイズビーム照射実験

最適化計算を行ったパラメータセットを用いて照射実験を行い、単一サイズで照射した場合との線量分布の比較を蛍光板と冷却CCDカメラからなるプロファイル分析装置およびラジオクロミックフィルムを用いて行った。

4. 研究成果

(1) ビームサイズの調整

ビームサイズの最小化については延長ノズルの使用などによりガウス分布の $\sigma=1.3\text{mm}$ を達成したが、実際の照射においてはビーム位置の安定化が分布の平坦度に大きく寄与ことがわかった。これを改善するために水平方向のRF強制励振によるビーム取り出しを構築した。ビームサイズの調整は四重極磁石の電流を照射システムに連動させる計画であったが、装置側の制御システムの変更ができなかったため、散乱体を用いてビームサイズを変化させる機構を構築した。

本研究で行ったビーム調整の結果得られたパラメータは、コリメータを用いた微小標的照射(カーボンナイフ)の開発にも活用している。また、ゲル線量計を用いたスキニングビームの線量測定の開発にも活用している。

(2) 複数サイズビームを用いた線量最適化計算

線量最適化計算プログラムをpython(scipy)を用いて構築し、最適化計算を行った。スポット数361(40×40mm)、ビームサイズ種類2種類($\sigma=2.3, 3.3\text{mm}$)の実験条件において $\pm 2\%$ 以内の平坦度に1分以内に収束することができた。この際の各照射位置での照射粒子数の分布図を図1に示す。

また、この最適化計算は単一サイズビームでの照射にも有効であり、それまで100×28mmの照射野に対して、100×72mmの一様照射をコリメートして均一な線量分布を作成していたが、最適化の結果100×42mmの照射で均一な線量分布が実現でき、生物実験の効率を1.5倍高めることができた。

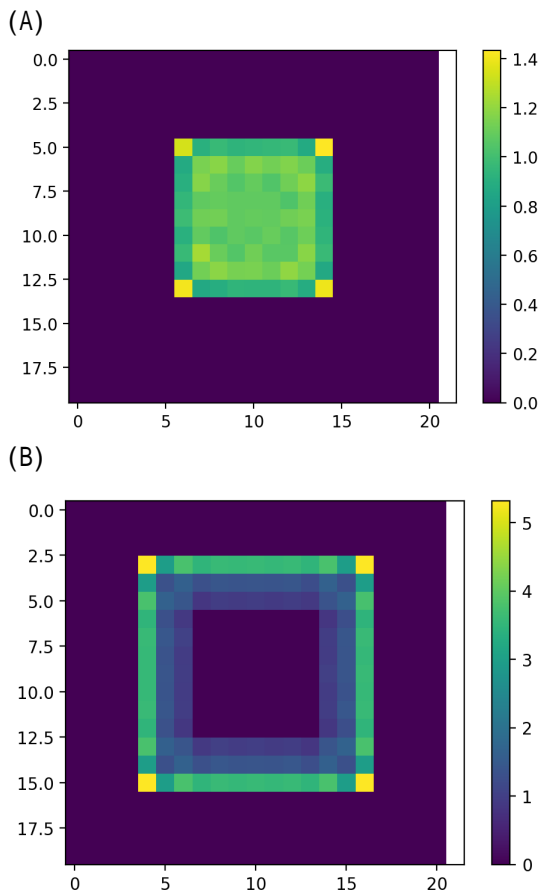


図 1: 2 種類の可変サイズ照射での照射粒子数分布。(A) $\approx 3.3\text{mm}$ 成分、(B) $\approx 2.3\text{mm}$ 成分

(3) 可変サイズビーム照射実験

線量最適化結果を元に可変サイズビーム照射実験を行った。照射結果の平面内線量分布を図 1 に示す。大きいビームサイズ単一の照射に比べて、可変サイズ照射は辺縁部のボケが少なく、線量集中性の高い分布となっている。

解析として、側方のビーム広がりを表すペナンブラ(線量が中心の 80% から 20% になるまでの距離)と、照射野内の平坦度(peak-to-peak)を算出した。ペナンブラについては、照射野中心の直線上のプロファイルを取得したところ図 2 のようになり、単一ビームサイズ $\approx 3.3\text{mm}$ の場合が 5.1mm 、単一ビームサイズ $\approx 2.3\text{mm}$ の場合が 3.7mm であったが、可変ビームサイズ照射は 2.7mm となり、小さいビームサイズでの単一サイズ照射よりも大幅に集中した線量分布を実現することに成功した。

平坦度については、一様照射の場合は $\pm 1.0\%$ であったが、可変サイズ照射では $\pm 2.0\%$ となった。複数サイズのウェイトが大きく変化する箇所凹凸が見られているため、最適化計算の段階で平坦度が悪化していた可能性が考えられる。今回の結果は治療照射における線量平坦度許容量である $\pm 2.5\%$ 以内には収まっているが、より平坦度が高い照射が可能となるよう、今後さらに最適化計

算の収束条件等の改善を行う予定である。

以上により、本研究の成果として、可変ビームサイズでの照射により平坦度を許容範囲内に保ちつつ、単一ビームサイズでは得られなかった良好な側方線量分布を得ることができ、提案した手法の原理検証に成功した。

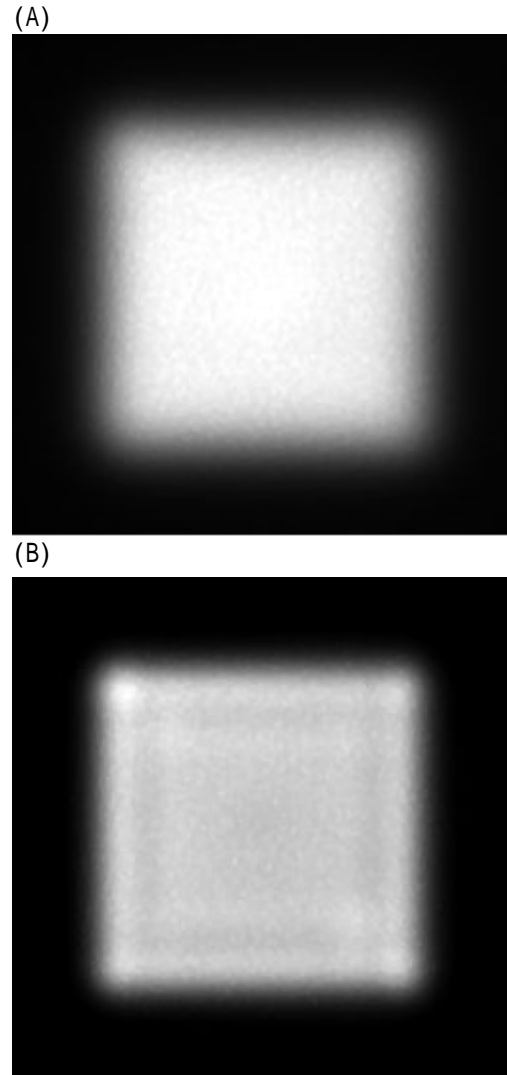


図 2: $\approx 3.3\text{mm}$ 単一サイズ照射(A)と可変サイズ照射(B)の平面内線量分布。

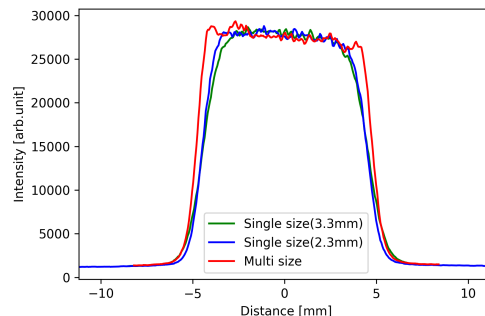


図 3: 単一サイズ照射と可変サイズ照射での線量分布評価。

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 12 件)

Hikaru Souda, Tatsuaki Kanai, Satoru Yamada, Tetsuya Fujimoto, Yoshiki Kubota, Ken Yusa, Mutsumi Tashiro, Hirofumi Shimada, Akihiko Matsumura, Akito Saito, Kyohei Fukata, Kota Torikai, Eri Takeshita, Yosuke Kano, Kazushi Hanakawa, Yoshikazu Ishikawa, Yasuto Kishii, Taizo Honda, Yusuke Sakamoto, Development of Scanning Irradiation in Gunma University Heavy Ion Medical Center, Proc. 11th Part. Accel. Sco. Jpn. 2014, 890-892 (査読無)
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SAP1/SAP126.pdf

Tetsuya Fujimoto, Hikaru Souda, Masami Torikoshi, Tatsuaki Kanai, Satoru Yamada, Koji Noda, Energy compensation of slow extracted beams with RF acceleration, Nucl. Instrum. Meth. A812, 2016, 68-72 (査読有)
DOI: 10.1016/j.nima.2015.12.044

H. Souda, T. Fujimoto, H. Kikuchi, K. Torikai, K. Yusa, M. Tashiro, H. Shimada, A. Matsumura, Y. Kubota, E. Takeshita, S. Yamada, T. Kanai, M. Torikoshi, Improvement of Scanning Irradiation In Gunma University Heavy Ion Medical Center Proc. of 7th Int. Part. Accel. Conf., 2016, 1914-1916 (査読無)
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2016/papers/tupoy006.pdf>

Mintra Keawsamur, Akihiko Matsumura, Hikaru Souda, Yosuke Kano, Masami Torikoshi, Takashi Nakano and Tatsuaki Kanai Development of stereotactic radiosurgery using carbon beams (carbon-knife) Physics in Medicine & Biology 63, 2018, 045024 (査読有)
DOI: 10.1088/1361-6560/aaaa4d

他 8 件

[学会発表](計 9 件)

Hikaru Souda, Tatsuaki Kanai, Tetsuya Fujimoto, Kota Torikai, Yoshiki Kubota, Akihiko Matsumura, Hirofumi Shimada, Mutsumi Tashiro, Ken Yusa, Satoru Yamada, Eri Takeshita, Yosuke Kano, Kazushi Hanakawa, Yoshikazu Ishikawa, Yasuto Ando, Taizo Honda, Yusuke Sakamoto, Hisashi Harada, Katsuhisa Yoshida, and Takashi Nakano, DEVELOPMENT OF SCANNING IRRADIATION IN GUNMA UNIVERSITY HEAVY ION MEDICAL CENTER, Part. Therapy Co-Op. Group

53, 2014

想田 光, 酒井 真理, 深田 恭平, 石居 隆義, 前山 拓哉, 福西 暢尚, 石川 顕一、ゲル線量計を用いた重粒子線スキャニングビームの線量測定、第 110 回日本医学物理学学会学術集会 2015

Hikaru Souda, Ken Yusa, Mutsumi Tashiro, Hirofumi Shimada, Akihiko Matsumura, Yoshiki Kubota, Kota Torikai, Tatsuaki Kanai, Masami Torikoshi, Evolution of Carbon Ion Therapy in Japan, Asian Forum for Accelerators and Detectors 2017

Hikaru Souda, Compact Carbon Ion Accelerator: Operation achievement and Future Development, Tsukuba Innovation Arena Symposium: The Next Generation of Hadron Cancer Therapy and Its Beam Driver, 2018

他 5 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]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

想田 光 (SOUDA, Hikaru)
群馬大学・大学院医学系研究科・助教
研究者番号: 30523162

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

藤本 哲也 (FUJIMOTO, Tetsuya)
菊池 遥 (KIKUCHI, Haruka)
前山 拓也 (MAEYAMA, Takuya)
加納 洋介 (KANO, Yosuke)