

令和元年6月17日現在

機関番号：82502

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K15812

研究課題名（和文）スキャンニング照射装置におけるインターロック機構の最適化

研究課題名（英文）Design of beam interlock system for scanning irradiation technique in particle radiotherapy

研究代表者

丹正 亮平（Tansho, Ryohei）

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所 加速器工学部・研究員（任常）

研究者番号：80735126

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、粒子線がん治療に使われるスキャンニング照射装置において、ビームインターロック機構の閾値を線量分布の定量的な評価に基づいて決定することである。そのため、スキャンする粒子ビームの計画値からの偏差量と線量分布への影響をシミュレーションから調べるための計算環境を構築した。この計算ツールを使って、ビームサイズの計画値からの偏差量が与える線量分布への影響を定量的に評価し、その結果から異なるビームサイズにおける偏差量の許容値を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

粒子線がん治療への社会的関心は年々高まっており、その治療施設の数も世界的に増加している。また、本邦においては近年一部症例について保険適応となり、今後も治療患者は増加していくと予想される。スキャンニング照射装置のインターロックは、腫瘍への線量分布を担保するための重要な機構であり、この作動条件を適切に設計することは、今後増加していく治療患者の安全性を高めることに寄与する。また作動条件の厳格化による過度な治療中断を防ぐことで、装置の運用効率を高め、より多くの患者を治療できる環境を提供する。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is the design of beam parameter threshold to interlock a scanning irradiation system for particle radiotherapy. Since the threshold has been determined conventionally, we design the threshold based on quantitative evaluation between an individual pencil beam parameter and a dose distribution formed by superposing the individual pencil beams. We developed the simulation tool to calculate the effect of the difference of beam parameter from planned parameter on dose distribution. Using this simulation tool, we quantitatively evaluated the effect of beam size difference from planned size on dose distribution. Then we determined the threshold of beam size interlock based on the evaluation result.

研究分野：医学物理学

キーワード：粒子線がん治療 スキャンニング照射法 ビームインターロック

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 炭素イオン線を使ったがん治療において、加速器から取り出した細いビーム（ペンシルビーム）を3次的に走査し、腫瘍を塗りつぶすように照射するスキニング法が現在主流の照射法である。スキニング法では、腫瘍をビーム進行方向に対してスライスという単位で分割し、ビーム進行方向と垂直な面内でスポットという単位に分割する。そして、ペンシルビームを各スポットに対して適切な重みで照射し、これを重ね合わせることで腫瘍に対して3次的に均一な線量分布を形成する（図1）。

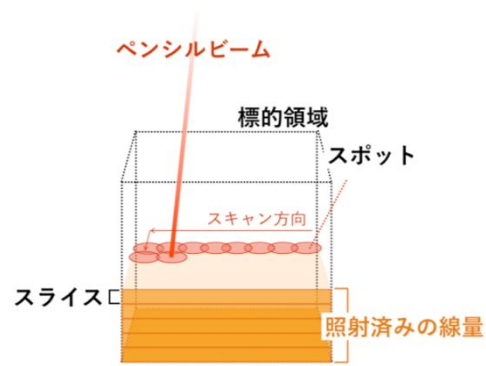


図1: スキニング法による照射野形成

(2) スキニング法ではスポット線量の照射精度が腫瘍全体への線量分布均一性に直結する。よって、照射中のペンシルビームの位置、サイズ、スポット線量の大きさについて計画値からの偏差量を監視し、これらの偏差量が許容範囲から逸脱した場合には、直ちに照射を停止できるインターロック機構を設けることが必須である。各ビームパラメータのインターロック作動のための閾値は、計画値との偏差がこれ以上大きくなると、線量分布の均一性が許容範囲外になると判断される値にすべきである。しかし、現状は慣用的な閾値が使われている[1]。

(3) この閾値の根拠が乏しい場合、線量分布の均一性を担保するために、厳しい閾値を設定せざる得なくなる。しかし、厳しすぎる閾値は照射の中断回数を増加させ、かえって患者の不利益となると同時に治療効率の低下も招く。治療効率を維持しつつ、線量分布を担保するためにインターロック作動のための閾値と線量分布の関係を明らかにすることは重要である。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究では、インターロック作動のための閾値と線量分布の関係を明らかにし、インターロックの作動条件、閾値の最適化を目指す。

### 3. 研究の方法

(1) 最適なインターロックの作動条件、閾値を探するためには、照射に意図的な誤差を与えて、それらの誤差が線量分布にどの程度の影響を与えるか定量的に把握することが重要である。これを実験的に行うことは、時間と労力がかかりすぎるため、シミュレーション上で実行できるよう計算環境を構築する。

(2)(1)で構築した計算ツールと実際の患者を模擬したビームパラメータを使って、ペンシルビームの照射位置やサイズ、スポット線量などの計画値からの乖離が線量分布に与える影響を調べる。

(3)(2)のシミュレーションを多数の照射条件について実行し、それらの定量的な評価結果から、監視対象とするペンシルビームのパラメータに対して、インターロック作動の閾値を設定する。全照射条件にたいする普遍的な閾値を見出すことは困難な可能性もあるが、例えば照射部位による類似性があると考えられる。よって、照射部位毎などある程度のグループ分けを行い、グループ毎に閾値を設定することも検討する。

### 4. 研究成果

(1) 最初に、(1)で構築した計算ツールの精度を検証するために、臨床を模擬したある照射条件で実際に測定した線量分布とその照射ログ（実際に照射したペンシルビームのサイズや位置、線量が記録されている）を使ってシミュレーションした線量分布の比較評価を実施した。その結果を図2, 3に示す。スライス単位での2次元の線量分布について、測定とシミュレーションを行い、比較評価した。図2は評価に使用した線量分布のあるスライスにおける相対的な分布の比較結果である。図3は各スライスの分布について、解析[2]を使って定量的に評価した結果である。全てのスライスにおいて、シミュレーション結果が測定値をよく再現していることを確認した。

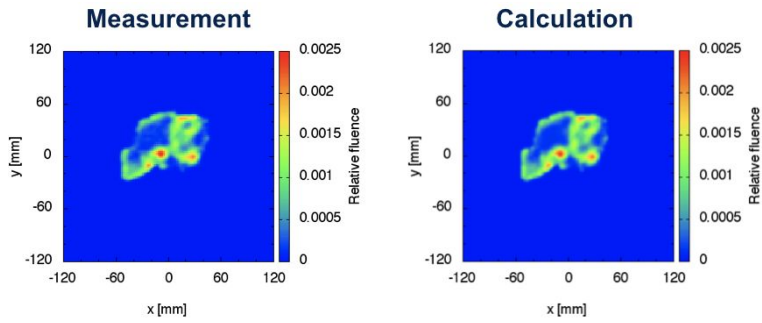
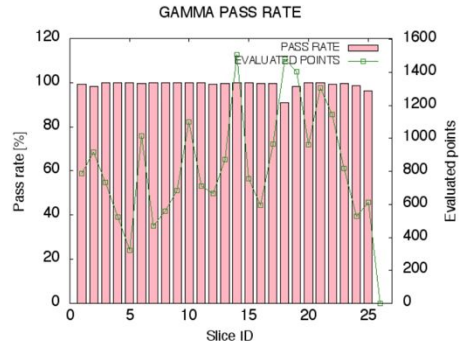


図 2: 2次元スライスの線量分布の測定値とシミュレーションの結果。

図 3: 臨床を模擬した照射条件において、各 2 次元スライスの線量分布の測定値とシミュレーションの比較結果。各スライスにおいて、解析による評価を実施した。図 2 の線量分布は図 3 中の Slice ID = 10 における比較である。



(2)次にペンシルビームのパラメータのうち、ビームサイズに着目し、これを計画値から意図的に変動させたときの線量分布への影響を調べた。通常円形状でパラメータ化される側方ビームサイズに対して、これが楕円形状であるとした場合の線量分布をシミュレーションした。図 4 に矩形の線量分布について評価した結果を示す。図中の x 方向に対して y 方向のビームサイズを相対的に拡げることで分布のペナブラ領域に大きな影響を与えることがわかった。図 5 は y 方向のビームサイズの偏差量と 解析のパスレートをマッピングした結果である。解析のパスレートの許容値を 90%以上（典型的な許容値）とした場合、異なるビームサイズに対して図 5 中のラインがビームサイズ偏差量の許容値と定義できる。このようにペンシルビームのパラメータの偏差と線量分布への影響の定量的な関係から、インターロックを作動させるべき閾値を求めることができた。

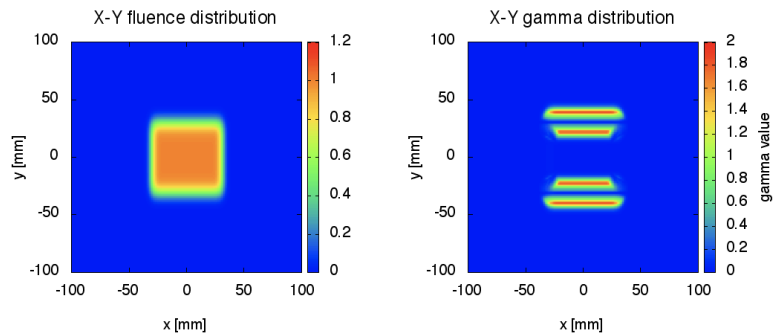
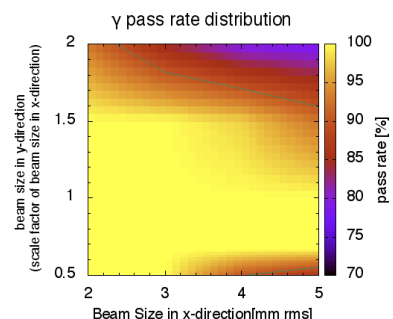


図 4: (左図) x 方向のビームサイズを 3 mm 、 y 方向のビームサイズを 6 mm とした場合の矩形型の 2 次元フルエンス分布の計算結果。(右図)左図の分布に対して、x, y 方向のビームサイズが両方 3 mm とし計算した分布と 解析で比較評価した場合の 分布。

図 5: 矩形型の分布において、異なるビームサイズに対するビームサイズの偏差量 (x 方向のサイズに対する y 方向のサイズの相対的な偏差量) と 値のパスレートのマッピング結果。



## <引用文献>

- [1] S.Giordanengo, M.A.Garella, F.Marchetto *et al*, “The CNAO dose delivery system for modulated scanning ion beam radiotherapy”, *Med. Phys.* 42, 263-5682 (2014).
- [2] D.A.Low, W.B.Harms, S.Mutic *et al*, “A technique for the quantitative evaluation of dose distributions”, *Med. Phys.* 25, 656-661 (1998).

## 5 . 主な発表論文等

### [雑誌論文](計1件)

Yoshiyuki Iwata, Takashi Fujita, Tetsuya Fujimoto, Takuji Furukawa, Yousuke Hara, Kiminori Kondo, Kota Mizushima, Takeshi Murakami, Masayuki Muramatsu, Mamiko Nishiuchi, Estuo Noda, Koji Noda, Hironao Sakaki, Naoya Saotome, Yuichi Saraya, Shinji Sato, Toshiyuki Shirai, Ryohei Tansho, “Development of Carbon-Ion Radiotherapy Facilities at NIRS”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 28, 2018, pp.1-7, 査読有, 10.1109/TASC.2017.2785835

### [学会発表](計6件)

Sung Hyun Lee, Ryohei Tansho, Kota Mizushima, Takuji Furukawa, Yousuke Hara, Yuichi Saraya, Naoya Saotome, Toshiyuki Shirai, “The effect of general ion recombination on dose measurement for high-dose rate carbon ion scanning beam”, 13th European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology, 2019

Kota Mizushima, Takuji Furukawa, Yoshiyuki Iwata, Masayuki Muramatsu, Shinji Sato, Yousuke Hara, Ryohei Tansho, Yuichi Saraya, Naoya Saotome, Toshiyuki Shirai, Koji Noda, Experimental verification of beam switching operation for multiple-ion therapy application at HIMAC, 13th European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology, 2019

Yousuke Hara, Naoya Saotome, Takuji Furukawa, Kota Mizushima, Ryohei Tansho, Yuichi Saraya, Toshiyuki Shirai, Experimental verification of small field with low energy carbon-ion scanning in NIRS-HIMAC, 13th European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology, 2019

皿谷 有一、古川 卓司、原 洋介、水島 康太、早乙女 直也、丹正 亮平、岩田 佳之、白井 敏之、野田 耕司、回転ガントリーのためのビームアライメント手法とその検証、第15回日本加速器学会、2018

水島 康太、古川 卓司、岩田 佳之、原 洋介、丹正 亮平、早乙女 直也、皿谷 有一、村松 正幸、白井 敏之、強度変調マルチイオン照射のためのシンクロトロン運転の検討、第15回日本加速器学会、2018

片桐 健、稲庭 拓、岩田 佳之、早乙女 直也、佐藤 眞二、皿谷 有一、高田 栄一、丹正 亮平、原 洋介、古川 卓司、村松 正幸、水島 康太、白井 敏之、川島 祐洋、勝間田 匡、小林 千広、藤本 哲也、若勇 充司、HIMAC 加速器の現状報告、第15回日本加速器学会、2018

## 6 . 研究組織

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。