

令和 6 年 4 月 5 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K07620

研究課題名（和文）粒子線治療用ヘリウムイオン(Helium Ion)CT画像システムの新規開発

研究課題名（英文）Development of Helium Ion CT Image System for Particle Therapy

研究代表者

王 天縁 (WANG, TIANYUAN)

神戸大学・医学研究科・医学研究員

研究者番号：90757288

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）：本研究は、粒子線治療の計画段階における粒子の飛行距離の不確か性を解消するための新しい取り組みである。兵庫県立粒子線医療センターのシンクロトロン加速器で生成される150 MeV/uのエネルギーを持つヘリウム粒子を使用し、コーンビームの投影データを一度に収集する拡大照射法により撮影時間の短縮が可能な新しいICTシステムの開発を目指している。暗箱システムに搭載したCMOSカメラの最適な位置を検討し、中性子ノイズの影響を抑えた高解像度のICT画像の取得に成功した。得られたICT画像の再現性と直線性を評価し、治療計画の精度向上に寄与することが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでのイオンCT研究は主に陽子線を使用するシミュレーションにとどまっていた。陽子は物質中の多重クーロン散乱により空間分解能の改善が難しい。過去のICTシステムは複数のシンチレータ検出器を必要とし、長時間の測定時間と高額な費用を要していた。申請者らの提案するシステムは、通過粒子の堆積線量から水等価厚を直接推測し、撮影時間を1時間程度に短縮できる。費用対効果に優れ、将来的な臨床応用が期待される。

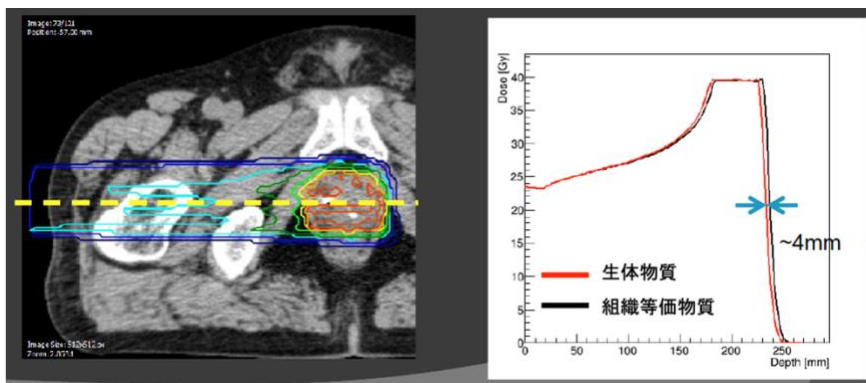
研究成果の概要（英文）：This research aims to address particle range uncertainties in therapy planning. The goal is an ion CT (ICT) system using helium, which experiences less scattering and fragmentation than protons/carbon, for high-resolution imaging. Experiments use a 150 MeV/u helium synchrotron at Hyogo. A cone-beam approach allows fast data acquisition. Neutron noise was reduced by optimizing the CMOS camera and shielding. Reconstructed 3D images showed good reproducibility and linearity of water-equivalent thickness. ICT can directly measure particle interactions, eliminating x-ray CT Hounsfield-to-stopping power uncertainties. This could enable tighter treatment margins and more conformal plans. Next steps include system refinements, range accuracy validation, and assessments of improved treatment planning with ICT. This innovation has potential to advance particle therapy by providing more accurate anatomical information for safer, more effective cancer treatments.

研究分野：放射線治療

キーワード：helium CT

## 1. 研究開始当初の背景

粒子線は体の中をある程度進んだあと、急激に高いエネルギーを周囲にあたえ(ブラッグピーク)、そこで消滅するという物理学的特性を持っている。粒子線治療はその性質を利用し、病巣部周囲のみに高いエネルギーが与えられ、病巣部後方や側方に存在する正常臓器にはエネルギーを付与しないように調整されている。また、粒子線は通常の X 線より生物学的効果が強い(1.1 倍～3 倍)、腫瘍には強い治療効果を発揮するが、正常組織にもより強い副作用が生じる。そのため、腫瘍と正常臓器の間の線量勾配が非常に激しい粒子線治療では、わずか数 mm だけの粒子飛程の不確かさで、腫瘍線量カバレッジの低下や、近隣正常臓器の許容線量の超過など、臨床的に大きい影響を及ぼすとされている。申請者らの臨床経験上、リスク臓器の直前で粒子線飛程がギリギリ止まる症例において、予想以上の副作用が見られたことがある。その要因として粒子線



阻止能比の誤差により生じる飛程の不確かさだと考えられた(左図)。粒子飛程の不確かさの要因として、粒子阻止能比の誤差、治療時位置合

わせ誤差と、呼吸など生理的活動による誤差などが挙げられるが、位置合わせ誤差と生理的活動誤差は、ターゲットマージンと呼吸移動管理などで十分対策可能である。しかし、治療計画時に使う粒子阻止能比の誤差は、今までの X 線 CT 法では解決出来ないため、申請者らはその解決策求めた結果が今回の研究を発想するに至った経緯である。申請者らは予備実験で初めて開発したコンパクトな ICT 撮影システムで、ヘリウム CT 画像の取得に成功している。引き続き高空間分解能の粒子検出器と画像処理再構成法の開発の推進により、我々が提案したイオン CT システムが臨床応用レベルに達することに実現する可能性を示している。

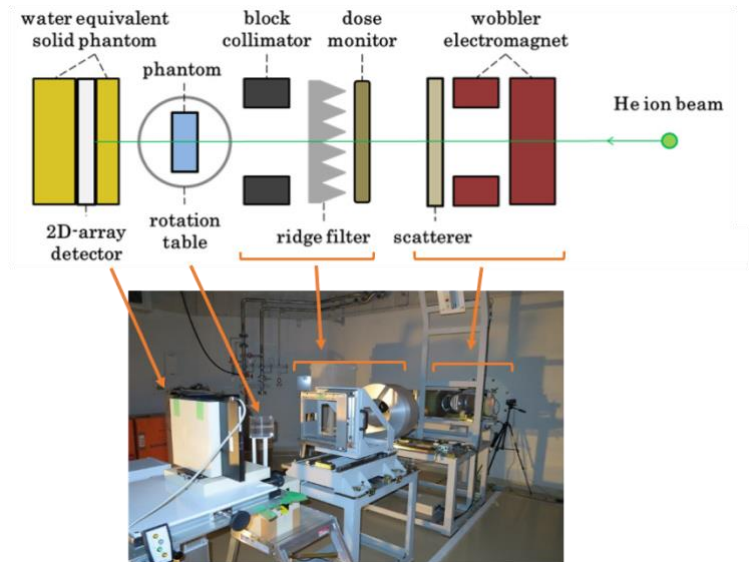
## 2. 研究の目的

本研究はこれまで改善出来なかった粒子線治療計画時粒子飛程不確かさ問題の解決に向け、臨床治療に用いられる粒子線に基づくイオン CT 画像システムの開発を目的とする。

## 3. 研究の方法

申請者らは兵庫県立粒子線医療センターのシンクロトロン加速器により生成される 150 MeV/u エネルギーのヘリウム粒子を使う(下図)。このシステムは拡大照射法であり、コーンビームの投影データを一気に収集できる。これにより撮影時間を短縮することが出来る。粒子線の照射ポー

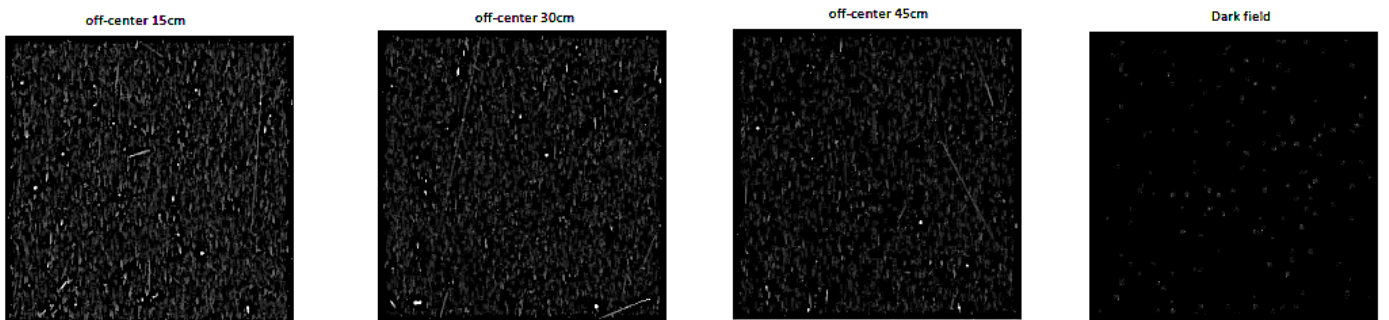
トが水平方向に固定されているため、ローテーションテーブルを用いて、数度ごとに投影データを取得する。予備実験では PTW 社製の 2 次元検出器(電極が 5mm<sup>2</sup>)を使用した。空間分解能の良い投影データを得ることが出来なかった。本申請では空間分解能の高い投影データを取得するため、シンチレーションと CMOS カメラを組み合わせた暗箱を作成する。シンチレーションには線エネルギー移行量(LET)に対する直線性に優れているジンクセلفアイド(ZnS)を使用する。これによって線量を低いところまで正確に測定し、且つ検出器の空間分解能を 0.5mm<sup>2</sup> 程度にまで向上させる。



#### 4. 研究成果

##### (1) カメラシステム構築位置最適化

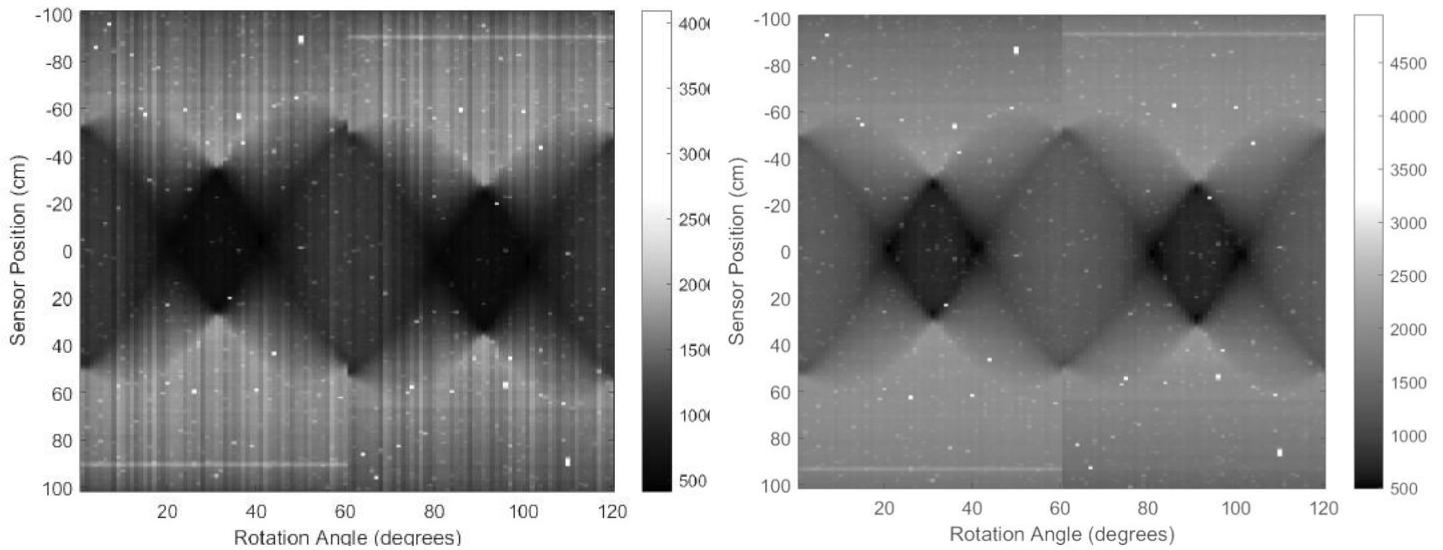
申請者らはシンチレーションと CMOS カメラを組み合わせた暗箱を製作し、構築された暗箱システムを用いて、小型水ファントムを撮影した。粒子線プロジェクション画像を確認した。最初得られた粒子線プロジェクション画像を確認し、中性子によるノイズが画像に影響することが判明した。CMOS カメラの位置をビームライン中心から 15cm, 30cm と 45cm の距離を取って、撮影したプロジェクション画像のノイズを定量的に評価した(下図)。45cm の位置から得られた画像は中心位置から得られた画像より、ノイズの量が 1/3 まで減少したことがわかった。この結果により、構築された暗箱システムの CMOS カメラの位置を最適化し、ノイズの少ない実験画像がえられるようになった。



##### (2) ファントムによる撮影と再構成

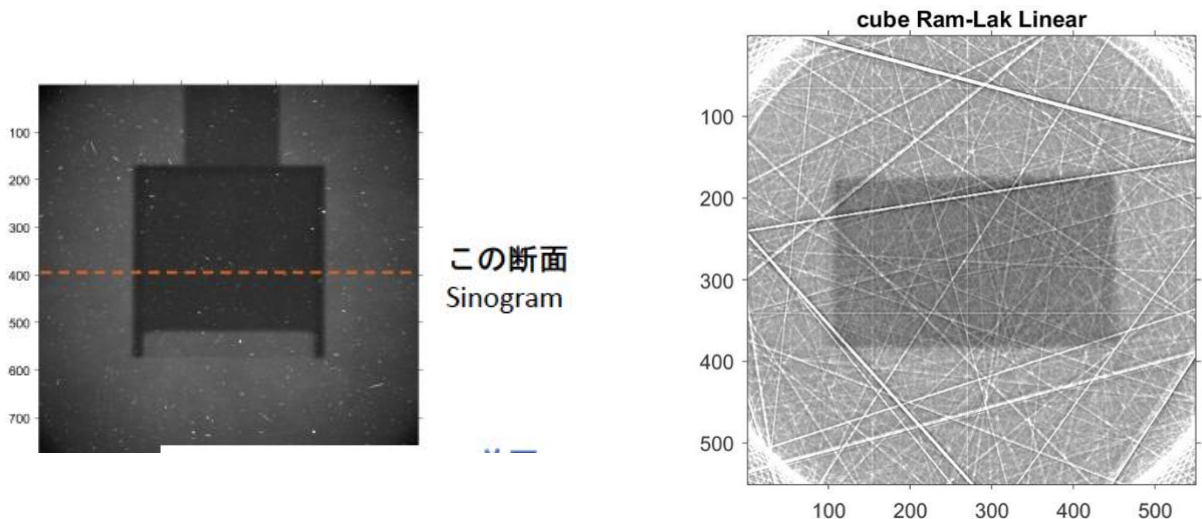
撮影実験はシンクロトロン加速器で生成される 150 MeV/u のエネルギーを持つ粒子を使用した。このシステムは、コーンビームの投影データを一度に収集する拡大照射法を採用しており、撮影時間の短縮が可能である。粒子線の照射ポートは水平に固定されているため、ローテーションテーブルを使用して、数度ごとに投影データを取得した。初期段階では、比較的軽い質量の陽子線

によるプロジェクション画像を確認しました。しかし、中性子によるノイズが画像に影響することが判明し、この問題を解決するために、暗箱システムの CMOS カメラの位置を最適化し、さらにアルミニウムと真鍮の遮蔽ブロックを使用して、中性子ノイズの影響を最小限に抑えました。カーボンイオンとヘリウムイオン線によるプロジェクション画像を撮影し、陽子線よりも画像ノイズが軽減される現象を確認しました。上記の撮影条件を考慮して、小型水ファントムの投影データから 3 次元 CT 画像を再構成する実験を行いました。下図は初期取得した投影データ(左)とノイズリダクション後の投影データ。



### (3) ICT 画像再構成

本研究では 60 個のプロジェクションデータから再構築した ICT 画像の水等価厚の再現性と直線性を評価した。しかし現時点の画像はノイズの影響で質が満足できるレベルには至っていない。さらなる中性子遮蔽と再構成アルゴリズムの改良が必要だが、高解像度の ICT 画像取得に初期的な成功を収めた。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
研究分担者	沖本 智昭  (OKIMOTO TOMOAKI)  (20295067)	神戸大学・医学研究科・客員教授   (14501)	
研究分担者	佐々木 良平  (SASAKI RYOUHEI)  (30346267)	神戸大学・医学部附属病院・教授   (14501)	
研究分担者	出水 祐介  (DEMIZU YUSUKE)  (50452496)	神戸大学・医学研究科・客員准教授   (14501)	
研究分担者	赤城 卓  (AKAGI TAKASHI)  (50500005)	大阪大学・大学院医学系研究科・招へい准教授   (14401)	
研究分担者	徳丸 直郎  (TOKUMARU SUNAO)  (90304899)	神戸大学・医学研究科・客員教授   (14501)	
研究分担者	松尾 圭朗  (MASTUO YOSHIROU)  (90749201)	神戸大学・医学研究科・医学研究員   (14501)	

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
---------	---------