

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月24日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K01349

研究課題名(和文) 制動輻射による照射位置モニタリング手法の陽子線治療への応用

研究課題名(英文) Application of the monitoring method of irradiation positions measuring bremsstrahlung for proton therapy

研究代表者

山口 充孝 (Yamaguchi, Mitsutaka)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 放射線生物応用研究部・主幹研究員(定常)

研究者番号：10375404

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：陽子線を水ファントムに入射した際に放出される二次電子制動輻射をピンホール型X線カメラにより実測した。次に、二次電子制動輻射の発生量分布を正確に取り入れたモンテカルロシミュレーション環境を用いて、実験結果とシミュレーションの相関を確認した。このシミュレーション環境を用いて、バックグラウンド削減手法を検討した結果、コリメータ及び放射線遮蔽壁の材質を銀及び錫、もしくはそれらを主成分とする合金とすることで、大幅な削減が可能であることを明らかにした。この結果を基に、銀合金及び錫を、それぞれ、コリメータ及び放射線遮蔽壁に用いたX線カメラのプロトタイプ装置を製作し、性能評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

粒子線治療施設の大多数は陽子線施設が占めているため、本研究により本手法の適用範囲が大きく広がる。また、本研究により得られる知見は炭素線のバックグラウンド成分削減に関する研究にも役立つため、炭素線における制動輻射によるモニタリング手法の精緻化も加速される。さらに、イオンの体内深部位置をリアルタイムモニター可能になるため、照射位置のずれを治療中に修正できる可能性が生まれる。照射位置を治療照射終了後に確認すること、リアルタイムで照射位置を確認しながら治療することは、医療行為としての信頼性が本質的に異なるため、本手法は医療技術の信頼性を大幅に向上させる。

研究成果の概要(英文)：We measured secondary electron bremsstrahlung emitted when proton beams were incident on a water phantom using a pinhole X-ray camera. Next, correlation between experimental and simulation results was confirmed using a Monte Carlo simulation environment that accurately incorporates emission distribution of secondary electron bremsstrahlung. Using this simulation environment, we studied a background reduction method. It was shown that the material of silver and tin or alloys based on them could significantly reduce the background by using the camera component, such as collimator and radiation shielding wall. Based on this result, We manufactured a prototype X-ray camera using silver alloy and tin for the collimator and the radiation shield, respectively. And performance evaluation was conducted.

研究分野：放射線検出技術

キーワード：ビームモニタリング 粒子線がん治療 二次電子制動輻射 モンテカルロシミュレーション 可視化

1. 研究開始当初の背景

(1) 粒子線モニタリング技術は、粒子線がん治療技術の信頼性を大幅に向上させる可能性があることから、様々な手法が提案され、世界的に研究されている。申請者は研究開始当初に、粒子線の軌跡から放出される二次電子制動輻射を、粒子線モニタリングに利用する独自手法を提案し、炭素イオンビームに対して本手法の有用性の実証研究を実施していた（文献 ）。

(2) 申請者等が提案した上記手法は二次電子制動輻射の計測に基づいているが、その発生量は入射粒子の原子番号の二乗に比例する（文献 ）。つまり、陽子線の場合、二次電子制動輻射の発生量が炭素イオンビームの 36 分の 1 と非常に少なく、本手法を陽子線に適用するには二次電子制動輻射に対するバックグラウンド成分の影響評価及びその削減が必須であった。

2. 研究の目的

(1) 陽子線における二次電子制動輻射計測によるリアルタイムモニタリングの実現を目指す。これを実現するために、陽子線を水ファントムに入射した際に水ファントムから放出される二次電子制動輻射及びバックグラウンド成分（電子制動輻射以外の放射線に由来するイベント）の放出量分布を、ピンホール型 X 線カメラを用いて効率的に実測する。また、実験結果をモンテカルロシミュレーションと比較し、バックグラウンド成分の分析を行う。

(2) バックグラウンド成分の分析結果を基に、その削減方法を検討する。具体的には、遮蔽物質を含む検出器周囲物質の素材等の最適化によるバックグラウンド成分の削減を検討する。さらに、検討結果を基にプロトタイプ装置を作成してバックグラウンド削減効果を評価し、陽子線における本手法の実用性を検証する。

3. 研究の方法

(1) 陽子線を水ファントムに入射した際に放出される二次電子制動輻射を、ピンホール型ガンマカメラにより実測する。次に、二次電子制動輻射の発生量分布を正確に取り入れたモンテカルロシミュレーション環境を用いて、実験結果とシミュレーションの相関を確認する。

(2) 前述の実験及びシミュレーションを通してバックグラウンド成分の分析を行い、その削減方法を検討する。さらに、プロトタイプ器を製作して性能評価を行い、本手法の実用性を検証する。

4. 研究成果

(1) まず、水ファントムに陽子線を入射した際に放出される二次電子制動輻射発生量分布の、ピンホール型ガンマカメラによる実測実験を実施した。実験は名古屋陽子線治療センターにて行

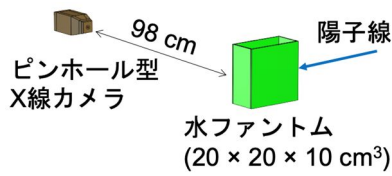


図1 実験セットアップ

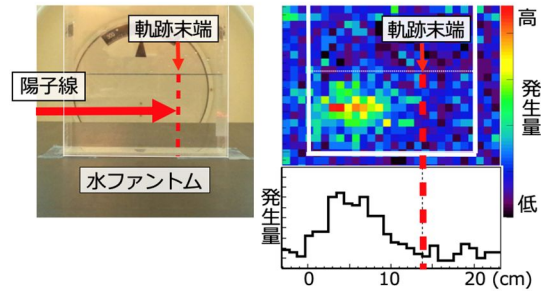


図2 発生量分布の実測結果。陽子線の軌跡に沿って発生量の高い領域が確認された。

った。実験セットアップの概略図を図1に示す。入射エネルギー139 MeV (水中飛程 13.8 cm) の陽子線を、ビーム軸方向に 20 cm の厚さを持つ水ファントムに入射し、ビームからの距離 98 cm の位置に配置したピンホール型 X 線カメラを用いて、ビーム軸に対して垂直方向に放出される二次電子制動輻射の発生量の分布を計測した。その結果、陽子線の水中軌跡に沿って発生量の高い領域が分布することが分かった (図2 参照)。また、ビーム軌跡の周囲に存在するバックグラウンドイベントの分布についても実測することが出来た。

(2) 次に、(1) において得られた実験結果について、モンテカルロシミュレーションとの比較を行った。シミュレーションには Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 2.82 を用いた。エネルギーの低い二次電子制動輻射を正しく計算するには、シミュレーションにおいて輸送させる電子のエネルギー下限値を二次電子制動輻射と同程度まで低くすることが必要となるが、これを行うと電子の輸送に係る計算量が非常に大きくなり、利用している大型計算機の年間計算許容量を大きく超える可能性があった。そこで、計算量削減のため、「荷電粒子による二次電子発生を抑制したシミュレーション」と「二次電子制動輻射を初期粒子としたシミュレーション」を行い、計算後に両者の和を取ること

で全体の結果を導出した。これにより、計算量の多い二次電子の輸送を排除し、大幅な計算量の削減を達

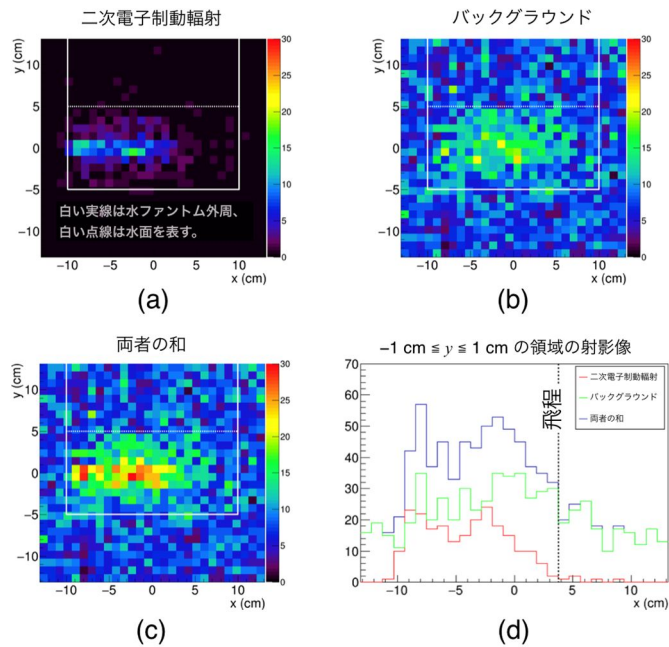


図3 発生量分布のシミュレーション結果。(a),(b)及び(c)はそれぞれ、二次電子制動輻射成分、バックグラウンド成分及び両者の和。(d)は(c)の $-1 \text{ cm} \leq y \leq 1 \text{ cm}$ 領域の x 軸への射影像。

成できた。シミュレーションは、日本原子力研究開発機構の大型計算機「ICE X」を用いて実施した。シミュレーションの結果を図3に示す。(a),(b)及び(c)は、それぞれ、二次電子制動輻射による成分、二次電子制動輻射以外のバックグラウンド成分、及び、両者の和を表している。また、(d)は(c)について、ビーム軸の近傍(-1 cm y 1 cm)の領域をx軸へ射影した像である。(a)に示された二次電子制動輻射による成分は、ビームの軌跡に沿った領域の発生量が高くなることが示された。(b)で示されたバックグラウンド成分は、核反応を経由して生成されており、水の存在する領域全体に広くなだらかに分布することが示された。実験とシミュレーション結果を比較した結果、(a)の二次電子制動輻射成分については、分布の形状、絶対値、共に良く一致することが分かった。一方で、(b)のバックグラウンド成分は、分布の形状はほぼ一致するが、絶対値についてはシミュレーション結果が実験結果を2倍程度過大に評価することが分かった。以上の結果を査読付論文誌に投稿し受理された(主な発表論文等[雑誌論文])。引き続き、3つの陽子線のエネルギーについて、同様の実験及びシミュレーションスタディを実施した。その結果、入射エネルギーの変化に伴うビーム軌跡長の変化を、本モニタリング手法により明確に観測できることが明らかになり、この結果を査読付論文誌で発表した(主な発表論文等[雑誌論文])。

(3) シミュレーション結果にある程度の信頼性があることを(2)で明らかにできたので、このシミュレーション環境を用いてバックグラウンド削減方法の検討を進めた。(2)のシミュレーション条件に変更を加えながら追加の分析を行った結果、X線カメラの放射線検出部の周囲に配置されている「コリメータ」及び「放射線遮蔽壁」の材質によって、バックグラウンド成分が増減することが分かった。そこで、コリメータと放射線遮蔽壁の材質を、鉛、銅、タングステン、錫、鉄、黄銅、銀の7種類の金属にした場合について、それぞれモンテカルロシミュレーションを行い、バックグラウンドの材質依存性を調べた。その結果、銅、鉄、真鍮については、連続エネルギーを持つバックグラウンド成分が多くなり、材質として適さない事が分かった。また、鉛、タングステンの場合は、連続エネルギーを持つバックグラウンド成分は少ないが、大量の特性X線が計測されるため、これをエネルギーウィンドウから外すことで、バックグラウンドをより削減できることが明らかになった。さらに、錫及び銀は、連続エネルギーを持つバックグラウンド成分が少なく、かつ、特性X線も少ないため、最適な材質であることが示された。(1)で使用したピンホール型X線カメラは、コリメータ及び放射線遮蔽壁にタングステンをを用いているが、これを、錫また

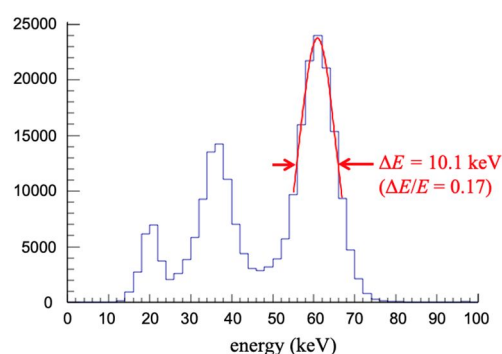


図4 Am-241からのX線のエネルギースペクトルの計測結果。全てのピクセルについての和のスペクトルを載せた。59.5 keVにおけるエネルギー分解能は半値全幅で17%。

は銀、もしくはこれらを主成分とする合金に変更することで、バックグラウンド成分を削減できる可能性がある。

(4) (3)の結論を基に、銀合金および錫を、それぞれ、コリメータ及び放射線遮蔽壁に用いた X 線カメラのプロトタイプ装置を製作した。製作に若干の時間を要したため、粒子線を用いた最終性能評価が遅れているが、現状でチェックソース (Am-241) を用いた性能評価を完了しており、全ピクセルのエネルギースペクトルの和において、半値全幅で 17% のエネルギー分解能が得られることが確認できた (図 4)。シミュレーションの結果が正しければ、バックグラウンド成分の 50% 程度の削減が期待できる。今年度の 7 月末に実施する粒子線の水中軌跡の実測実験によって、完成した装置の空間分解能、感度及びバックグラウンド削減効果の評価を行う予定である。

< 引用文献 >

Mitsutaka Yamaguchi, Kota Torikai, Naoki Kawachi, et al., Beam range estimation by measuring bremsstrahlung, Phys. Med. Biol., Vol. 57, 2012, pp. 2843-2856

K. Ishii and S. Morita, Continuum x rays produced by light-ion-atom collisions, Phys. Rev. A, Vol. 30, 1984, pp. 2278-2286

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

Mitsutaka Yamaguchi, Yuto Nagao, Koki Ando et al., Imaging of monochromatic beams by measuring secondary electron bremsstrahlung for carbon-ion therapy using a pinhole x-ray camera, Phys. Med. Biol., 査読有, Vol. 63, 2018, Art. Num. 045016
DOI:10.1088/1361-6560/aaa17c

Koki Ando, Mitsutaka Yamaguchi, Seiichi Yamamoto et al., Development of a low-energy x-ray camera for the imaging of secondary electron bremsstrahlung x-ray emitted during proton irradiation for range estimation, Phys. Med. Biol. 査読有, Vol. 62, 2017, pp. 5006-5020
DOI:10.1088/1361-6560/aa7166

Mitsutaka Yamaguchi, Yuto Nagao, Takahiro Satoh et al., Monte Carlo simulation of photon emission below a few hundred kiloelectronvolts for beam monitoring in carbon ion therapy, Review of Scientific Instruments, 査読有, Vol. 88, 2017, Art. Num. 014301
DOI: 10.1063/1.4973986

Mitsutaka Yamaguchi, Yuto Nagao, Naoki Kawachi et al., Detection of a gas region in a human body across a therapeutic carbon beam by measuring low-energy photons,

Int. J. PIXE, 査読有, Vol. 26, 2016, pp.61-72

DOI:10.1142/S0129083516500078

Mitsutaka Yamaguchi, Yuto Nagao, Koki Ando et al., Secondary-electron-bremsstrahlung imaging for proton therapy, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 査読有, Vol. 833, 2016, pp. 199-207

DOI:10.1016/j.nima.2016.07.034

[学会発表](計6件)

山口充孝、長尾悠人、河地有木、二次電子制動輻射計測により得られる陽子線画像を用いた機械学習によるブラッグピークのずれの推定、第66回応用物理学会春季学術講演会、2019

Mitsutaka Yamaguchi, Yuto Nagao, Koki Ando et al., Imaging of a monochromatic beam by measuring secondary electron bremsstrahlung for carbon-ion therapy, Micro-Mini & Nano-Dosimetry & Innovative Technologies in Radiation Therapy (MMND&ITRO), 2018
Mitsutaka Yamaguchi, Yuto Nagao, Takahiro Satoh et al., Imaging of a monochromatic beam by measuring secondary electron bremsstrahlung for carbon-ion therapy, IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2017

Mitsutaka Yamaguchi, Yuto Nagao, Takahiro Satoh et al., A simulation study on detection of a cavity across a therapeutic carbon beam using secondary electron bremsstrahlung, IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2016

山口充孝、長尾悠人、菅井裕之 他、低エネルギー光子測定による治療用炭素ビーム軌道上の空洞検出のシミュレーションによる評価、第63回応用物理学会春季学術講演会、2016

Mitsutaka Yamaguchi, Yuto Nagao, Naoki Kawachi et al., Detection of a Gap Across a Particle-Beam Track by Measuring 63-68 keV Photons, IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2015

[産業財産権]

出願状況(計1件)

名称: 粒子線モニタリング装置、粒子線モニタリング方法、粒子線モニタリングプログラム

発明者: 酒井真理、中野隆史、荒川和夫、菊地美貴子、山口充孝 他

権利者: 群馬大学、量子科学技術研究開発機構

種類: 特許

番号: 特願 2017-215079

出願年: 2017年

国内外の別: 国内