

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：33916

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22791227

研究課題名（和文） 新しい陽子線治療装置の照射精度の向上と評価に関する研究

研究課題名（英文） Research for evaluation and improvement of proton delivery precision on new proton therapy system.

研究代表者

林 直樹（NAOKI HAYASHI）

藤田保健衛生大学・医療科学部・講師

研究者番号：00549884

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、新しい陽子線治療システムを利用する際の照射精度を評価するための手法を確立することである。本研究期間では、モンテカルロ法による陽子線ビームラインのシミュレーション、品質保証に使用する検出器やフィルムの特性の検証を行った。モンテカルロシミュレーションによる計算の結果、照射ポート部での吸収や散乱によって照射関心点に至るまでに陽子線エネルギーを損失することが分かった。また、放射線感受性ゲル線量計やラジオクロミックフィルムの陽子線に対する反応を調査し、これらは陽子線の計測のために有効であることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to establish the procedure for evaluating/improving the delivery precision using a new proton therapy system. Firstly, we investigated the radiologic behavior of proton beam by use of Monte Carlo simulation. Secondly, we evaluated several detectors for measuring the radiation dose from proton beam. As results, we estimated that the energy-loss of proton beam was happened at the irradiation-port of proton therapy system. Furthermore, we particularly made sure the characteristics of radiosensitive polymer gel dosimeter and radiochromic films. In conclusion, these tools are useful for proton beam dosimetry.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
2012 年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：放射線科学

科研費の分科・細目：内科系臨床医学・放射線科学

キーワード：陽子線治療、品質管理、照射精度、線量測定

1. 研究開始当初の背景

平成 19 年(2007 年)のがん対策基本法の施行に伴って放射線治療と化学療法の発展に重点が置かれ、切らないがん治療に対する国民の関心は高かった。そのような中、国内における粒子線治療施設の設置計画は全国各地

において雨後の筈のごとく立案され、陽子線治療にかかる期待は大きい。

(1) 新しい陽子線治療装置の登場
従来の陽子線治療装置は電磁石を使って陽子線ビームを拡大させる技術を用いていた。その一方で、近年では電磁石を用いずに 2 つ

の散乱体を用いて陽子線ビームを拡大させる方法を採用した新しい陽子線治療装置が開発された。この装置は一つ目の散乱体に陽子線ビームの有効長(深)を瞬時に変えることの出来る有効長(深)変調回転体(Range Modulation Wheel: RMW)を採用し、この機構を有効に利用することで将来的には強度変調陽子線治療法(Intensity Modulated Proton Therapy: IMPT)の実現が可能である。この装置は本邦で初めて中部地区に導入され、市民はその利用への期待が高まっていた。

(2) 陽子線治療装置の品質保証・品質管理体制の構築待望論

一般的に外部放射線照射による放射線治療とは高エネルギー엑クス線や高エネルギー電子線によるものであり、陽子線治療法は広く普及していない。高エネルギー엑クス線や電子線による外部放射線治療は本邦において 50 年以上の歴史があり、患者への照射の技術や放射線治療機器の品質保証(QA)や品質管理(QC)の手法は既に確立している。また QA/QC に関するガイドラインも出版され、その情報は共通認識として放射線治療に従事する者に広く浸透している。しかしながら、陽子線治療に関しては医学、工学および技術的にも発展過程の時期であり、陽子線治療装置も改良が進んでいる。従って、情報の共有と統一化を図るのは難しく、照射技術や陽子線治療装置の QA/QC の手技や体制は構築されているとは言いがたい。

2. 研究の目的

二重散乱体法を採用した新しいタイプの陽子線治療装置を用いた陽子線治療において、陽子線治療装置の特性を把握し、その性能評価に関する検討を行う。これにより、陽子線照射精度の向上を目指すとともに、新しいタイプの装置によって可能となる強度変調陽子線治療(Intensity modulated proton therapy: IMPT)の実現可能に向けた研究を遂行する。

3. 研究の方法

本研究期間では、次の項目を実施した。

(1) モンテカルロ法による陽子線治療ビームラインのシミュレーション

陽子線を計測することに先立ち、高速演算コンピュータを用いてモンテカルロシミュレーションコード GEANT4 を用いて陽子線ビームラインのシミュレーションを行った。陽子線の発生箇所を陽子線治療装置の照射ポート入り口とし、照射ポート内での二次放射線の発生やエネルギー損失の推定を行った。また、この結果を踏まえて照射ポート出口で陽子線を発生させ、水中に入射したとき

の深部線量分布の計算を実施した。これらのシミュレーションは従来の装置も想定して計算させ、新しい装置との比較を行った。

(2) 陽子線の線量計測に利用する検出器の特性評価

陽子線治療における三次元的な線量分布計測を想定し、放射線感受性ポリマーゲル線量計とラジオクロミックフィルムの特性を把握するための試験を行った。放射線感受性ポリマーゲル線量計に関しては高磁場・高分解能の核磁気共鳴画像装置(MRI)を利用して物質情報を取得することによって線量情報に変換した。ラジオクロミックフィルムに関しては、読み取り時の色認識の違いによる線量安定性を比較するために、光吸収スペクトロスコピーを実施し、色分解方式および読み取り色チャンネルの違いが線量認識に及ぼす影響について評価した。これらの実験は米国ミネソタ州にあるミネソタ大学医学部ツインシティー校にて実施した。

ミネソタ大学から帰国後、本邦において放射線感受性ポリマーゲル線量計やラジオクロミックフィルムの特性把握のための実験を基に、他の検出器との比較を実施した。

4. 研究成果

(1) モンテカルロ法による陽子線治療ビームラインのシミュレーション

高速演算コンピュータを設計・購入し、モンテカルロシミュレーションコード GEANT4 によって陽子線治療ビームの計算を実施した。シミュレーションを実施するにあたって、従来のワブラ電磁石によるブロードビーム法を採用した陽子線治療装置と二重散乱体法によるブロードビーム法を採用した新しい陽子線治療装置の幾何学配置を描写した。これらの幾何学デザインを踏襲して入射粒子 1 億個で計算したところ、新しい陽子線治療装置では第一散乱体である RMW での散乱および吸収によってエネルギーを損失していることが分かった。また RMW での散乱が原因となって従来の装置に比べて中性子の発生が多いと推定される(図 1)。

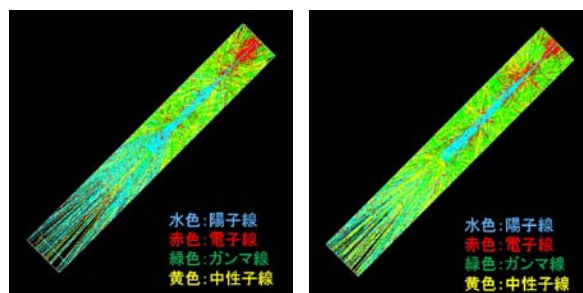


図 1 モンテカルロ法による陽子線ビームのシミュレーション
(左：二重散乱体法、右：ワブラ電磁石法)

(2) 陽子線の線量計測に利用する検出器の特性評価

陽子線の線量計測には電離箱線量計、半導体線量計、放射線感受性ポリマーゲル線量計、ラジオクロミックフィルムなどを用いる。ここで、電離箱線量計や半導体線量計を用いた線量計測法は世界でたびたび報告されているため、本研究では放射線感受性ポリマーゲルとラジオクロミックフィルムを用いた陽子線計測を重点に置き、これらの特性把握のための実験を行った。

放射線感受性ポリマーゲル線量計の物質変化を線量情報に変換する方法では MRI による方法を採用したが、MRI の撮像法を比較検討した結果、線量情報変換への正確度や再現性などを考慮した最適な方法はマルチエコーシーケンスの一つである CMRR(Carr Purcel Meiboon Gill)法であることが分かった。ゲル線量計は組成が水に近いので、水吸収線量にの計測に近い状態で陽子線の計測が可能で、三次元の線量計測が出来る点でアドバンテージが大きい。簡易的な線量計測は難しい。これらの点は今後も研究の余地があると考えられる。

ラジオクロミックフィルムを用いた陽子線計測は、ISP 社の GAFCHROMIC フィルムシリーズを用いて行った。ラジオクロミックフィルムの組成は低原子番号の物質を用いていることから、実効原子番号が 6.9 程度と水(7.4)に近い。ゆえにフィルムで生じる放射線との相互作用は水中で測る時と大きな相違がないと推定される。しかし、従来のラジオグラフィックフィルムと比較すると光学濃度の変化は小さく、フィルムをスキャンするときの設定や保管方法などを含めたフィルムの取り扱い方法が線量測定精度に大きく影響する。また、フィルムに対して白色光を投影すると、通過する光のスペクトルは特異性を持っていることが分かった。我々はこの特性に着目し、光吸収スペクトロスコピーを実施し、光子線と陽子線との比較をしたところ、580-600 nm の波長帯で違いがあることが分かった(図 2)。今後はこの特性を利用して三色分解法と併用した最適な線量計測法を構築する予定である。

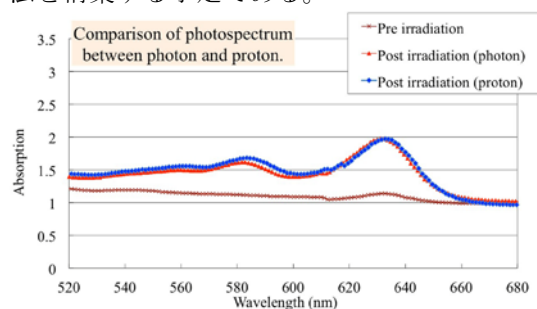


図 2 光吸収スペクトル法による透過色波長

の違い

(3) 品質管理の方法と手順の推奨

モンテカルロシミュレーションによる陽子線ビームの振る舞いの推測と検出器の特性把握のための実験によって、新しい陽子線装置での照射精度を担保するための品質保証の手順の草案は完成した。この草案は米国医学物理学会のタスクグループ報告書(TG-142)に準じて品質保証項目を列挙し、新しい陽子線治療装置用に修正をしたものである。

この手順書によって陽子線治療装置の QA/QC の方法は明らかになったが、現在はまだ実測によるデータが少ない。今後は実機を用いた計測データを蓄積し、この手順書の妥当性を評価することが望ましい。

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 2 件)

1. Hayashi N, Watanabe Y, Malmin R, Kato H. Evaluation of triple channel correction acquisition method for radiochromic film dosimetry. Journal of Radiation Research, Vol.53., pp930-935, 2012.
2. Watanabe Y and Hayashi N. Errors introduced by dose scaling relative dosimetry. Journal of Applied Clinical Medical Physics Vol.13(5), pp269-281, 2012.

[学会発表] (計 13 件)

1. Hayashi N, Kato H, Yada R, Matsunaga T, Ehara I, Adachi Y. Dosimetric characteristics of gafchromic EBT3 films for megavoltage photon and proton beams. The 54th annual meeting of American Association of Physicists in Medicine, July 29-August 2, 2012. Charlotte, NC.
2. Naoki Hayashi, Isao Ehara, Hideki Kato, Ryuichi Yada, Yoshiaki Kato, Rena Yamanaka, Takuma Matsunaga. Dosimetric characteristics of a new radiochromic film (GAFCHROMIC EBT3). 第 103 回日本医学物理学会総会学術大会, 4月12-15日, 横浜, 2012年
3. Naoki Hayashi, Yoichi Watanabe, Ryan Malmin, Andre Micke, Hideki

Kato

Usefulness of triple channel correction for GAFCHROMIC EBT2 film on patient specific quality assurance of IMRT and IMAT.

The 53rd annual meeting of American Association of Physicists in Medicine, July 31- Aug 4, 2011. Vancouver, Canada.

4. Hayashi N, Fukuma H, Shibamoto Y, Nishii Y, Suzuki Y, Kato H, Kawano M. Absorption spectrum analysis of a new radiochromic film. - A comparative study between GAFCHROMIC EBT and EBT2 -.

第 100 回医学物理学会学術大会, 9 月 23-25 日, 東京, 2011 年

5. Hayashi N, Fukuma H, Shibamoto Y, Nishii Y, Suzuki Y, Kato H, Teramoto A and Kawano M.

Absorption spectra of a new radiochromic film for various energies of therapeutic photon and electron beams.

The 52nd annual meeting of American Association of Physicists in Medicine, July 18-22 2010, Philadelphia, PA.

[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]

研究実施状況は次のホームページにおいて公開している。

<http://www.fujita-hu.ac.jp/~hayashi/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 直樹 (NAOKI HAYASHI)

藤田保健衛生大学・医療科学部・講師

研究者番号：00549884

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし