

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：33916

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870872

研究課題名(和文)レンジ可変型陽子線治療における新しい呼吸同期照射に関する研究

研究課題名(英文)Research for new respiratory-gated irradiation on variable range proton therapy

研究代表者

林 直樹 (HAYASHI, Naoki)

藤田保健衛生大学・医療科学部・講師

研究者番号：00549884

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、エネルギーレンジ可変型呼吸同期システムを提案し、そのシステムの妥当性評価を行うことである。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、様々な検出器を用いた呼吸同期照射の検証とモニタユニット計算ソフトウェアの開発を行った。モンテカルロシミュレーションによる計算の結果、ビーム拡大法による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、呼吸同期照射の検証では25%同期率以上の条件にて十分に照射精度は確保できていた。モニタユニット計算ソフトは、誤差2%未満の計算精度を確認した。

研究成果の概要(英文)：The purposes of this study were to establish the variable energy modulated proton therapy system and to verify the feasibility of the system. In this term of the research, we carried out several contents: Monte Carlo simulation for proton beam system, the dosimetric verification of respiratory-gated irradiation by use of various detectors, and development of monitor-unit calculation software. As the results, we estimated the energy-loss of passive proton beam with a broad beam method by use of range modulation wheel at the point of interest. The delivery precision was feasible with the gating rate of over 25%. The developed our program could calculate the monitor unit of proton beam and the error was less than 2%.

研究分野：医学物理学・放射線技術学分野

キーワード：陽子線治療 呼吸性移動 モニタユニット 同期照射 シミュレーション エネルギー変調

1. 研究開始当初の背景

陽子線治療は放射線治療法の一つであるが、X線をを用いた放射線治療法とは異なり、陽子線の体内で強度が増強するブラッグピークの特性を生かして腫瘍へ放射線を集中照射することができ、X線に比べて腫瘍死滅効果の高い治療法である。国内では放射線医学研究所や兵庫粒子線センターといった施設で運用され、その効果は学会や論文誌などで報告されている。陽子線治療システムは全国的に設置数が増えており、2012年現在で設置計画も含めると15施設を数えていた。

(1) レンジ可変機構を備えた陽子線治療システム

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が、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)(レンジ)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、任意のレンジを瞬時に作成することができる。

(2) 呼吸性移動を考慮した陽子線照射

海外における先行研究において、呼吸性移動を考慮した陽子線治療の報告はなされてきたが、これは陽子線束を腫瘍移動方向に対する追尾や腫瘍移動を鑑みた同期照射などの措置による腫瘍移動方向への考慮であり、腫瘍の存在する深さ方向への考慮はなされていなかった。これは従来までの陽子線治療では拡大ブラッグピークの形成はリッジフィルタで行われており、レンジの深さ位置はレンジシフトによって決定されていたため、照射時間中に深さ方向の調整はできなかったためである。

(3) 陽子線治療線量のモニタユニット制御
リニアックによる通常の光子線治療においては、放射線の出力は加速器のヘッド部に取り付けられたセンサからの信号による制御という形式を取られていることが多い。これをモニタユニット制御という。一方、陽子線治療に於いてはこの形態はとらずに、放射線治療医が定める実際の臨床治療計画に定められた線量計画に従い、治療前に実測することによって出力線量を確認、決定する。しかし、二重散乱体を用いる新しい陽子線治療装置においては、加速器がセンシング機構を設けているため、これを利用したモニタ線量計

算を行うことができる。陽子線治療装置でのモニタユニット制御は今後期待される分野である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、回転型陽子線レンジ可変機構を搭載した陽子線治療装置において、呼吸認識装置を搭載したエネルギーレンジ可変型呼吸同期システムの提案とその運用をすることである。

3. 研究の方法

本研究期間に行った研究内容は次の通りである。

(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

モンテカルロコード PHITS(Particle and Heavy Ion Transport code System)と PHITS に Electron Gamma Shower: EGS のシミュレーションコードを追加したコード (PHITS-EGS)ならびに、EGS5 による放射線治療装置におけるビームラインのシミュレーションを行った。陽子線治療装置のシミュレーションをする前に、それぞれのモンテカルロコードの計算精度を確認するために、それぞれのモンテカルロコードに適応するように汎用のリニアックのジオメトリを作成し、シミュレーションを実施した。その結果を踏まえ、陽子線治療装置を想定したシミュレーションを行った。

(2) 呼吸モデルを用いた呼吸同期照射の実測
陽子線治療装置 ProBEAT-III(Hitachi)から出力される陽子線ビームと任意の呼吸信号を作成、動作できる呼吸信号装置(Quasar Phantom, 大西メディカル社製)、水等価ファントムを用いて呼吸同期照射の投与線量と線量分布の計算精度検証を行った。呼吸信号は単純 sin 波と人体の呼吸信号に近い \cos^2 波を想定した。呼吸性移動の幅を 2, 5, 10, 20, 30 mm と変動させることを想定し、それに対して移動しない条件を基準として評価点線量と線量分布について比較を行った。また、そのそれぞれについて呼吸同期の有無の条件の違いについても比較した。呼吸同期の条件は、同期なし、25%同期率、50%同期率の3条件とした。

評価点線量の測定は電離箱線量計を、線量分布の測定はラジオクロミックフィルムを用いて計測を行った。計測ジオメトリは図1の通りである。



図 1 ファントム設置図

(3) モニタユニット計算ソフトの開発

陽子線治療装置のヘッド構造部(ビーム照射系)で検出される信号を元に算出されるモニタユニットは基準条件に準じている。一方、実際の照射においては照射野の形状は基準条件と異なるため、補正が必要である。補正については Sahoo ら(2008 年, Med Phys 35)の提唱する計算式を参考に、モニタユニットの計算式を改良した。改訂した式をもとに、プログラム言語 Visual Basic によって独立計算ソフトを作成した。作成したソフトの計算精度を検証するために、模擬条件によって実測した結果と比較した。

4. 研究成果

本研究期間に実施した項目(1)~(3)の中で、(1)モンテカルロ法による計算と(3)モニタユニット計算ソフトの開発のプログラム構築に関しては藤田保健衛生大学において全研究期間全てをかけて実施した。項目(2)呼吸モデルを用いた実測と(3)モニタユニット計算ソフトの精度検証については名古屋陽子線治療センターにおいて平成 26 年度の研究期間に実施した。その成果は次の通りである。

(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

陽子線治療装置のシミュレーションに先立って実施した汎用医療用加速器のシミュレーションの結果では、PHITS コードは光子線の二次散乱などの影響を計算する精度が PHITS-EGS や EGS コードに比べ、低かった。この影響により、同じビームをシミュレーションしたにもかかわらず、ビルドアップ深の値が異なる結果が現れた。この影響により、陽子線のシミュレーションをする際に陽子線と物質との相互作用によって発生する二次線の影響を十分に考慮できない可能性がある。この研究結果については、PHITS 研究会において発表した。しかしながら、粒子線の輸送計算をする際には EGS コードよりも PHITS の方が望ましく、EGS の輸送カスケードがビルトインされた PHITS-EGS は発展性があることから、陽子線のモンテカルロ計算は PHITS を用いるこ

ととした。また、計算ワークステーションの性能のため、研究期間中に計算完了できなかった陽子線のモンテカルロ計算も存在する。この結果はデータがまとまり次第、発表する予定である。

(2) 呼吸モデルを用いた呼吸同期照射の実測評価点線量の比較については、呼吸同期をかけない場合の方が呼吸同期をする群よりも線量が高かった。また、移動量が大きいほど関心点での線量は大きかった(図 2)。

線量分布の比較では、95%線量領域と半影について評価した。結果として同期をかけずに呼吸性移動がある場合には移動幅が大きいほど 95%線量領域は小さく、同期をかけることによって 95%線量領域は基準状態に近づいた。今回の条件の中ではその差は最大 1.5% であった。次に半影については、今回の条件の中では 30 mm 異常動作させた時のみ顕著に半影が大きく、その他は動きが大きいほど半影は大きいという傾向はあるものの、顕著な差は得られなかった。このことから、呼吸同期照射の推奨条件を提示することができる可能性が示唆された。実際には臨床的評価が必要であり、今後の課題項目である。これらの研究結果については、平成 27 年 4 月の日本放射線技術学会において発表した。

(3) モニタユニット計算ソフトの開発

Visual Basic 2010 を用いて独立 MU 計算プログラムを作成した。計算式は Sahoo の提唱するモデルを踏襲したものを利用したが、今回想定する二重散乱法での陽子線治療装置は Sahoo の想定する構造と異なるため、実測のデータを鑑みてデータの合わせこみを行った。これにより、単純条件では線量計算を精度高く行うことができることを確認した。また、本研究期間では照射野の大きさに依存する FSF(Field size factor)が計算結果に与える影響について、重点的に検討した。FSF の計算は光子線と同様に等価正方形照射野を算出することで得ているが、その算出方法は今までルート A 法を用いてきた。しかし、不整形照射野ではその計算精度は低下することがわかった。そのため、我々が作成した MU 計算プログラムにはルート A 法に加えて、クラークソン法による等価正方形計算手法も導入した。これにより、ルート A 法で計算精度が低下する症例も、十分に対応できるように変化し、実測の値とも 2%未満の誤差に収まった。ただし、ペンシルビームによるスキニング照射には対応しておらず、研究課題として今後も継続する必要がある。これらの結果は、平成 27 年 4 月の日本医学物理学会において発表した。

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3件)

1. Dosimetric verification for intensity-modulated arc therapy plan by use of 2D diode array, radiochromic film and radiosensitive polymer gel.
Hayashi N, Malmin RL, Watanabe Y. Journal of Radiation Research Vol.55(3) 541-552. 2014. 査読あり
2. 脊椎照合法を用いた体幹部画像誘導放射線治療における総合精度の検討. 中澤寿人, 内山幸男, 小森雅孝, 林直樹. 日本放射線技術学会雑誌 第70巻5号 439-444頁, 2014年. 査読あり
3. Radiochromic film dosimetry on total body irradiation with photon and electron beams.
Hayashi N, Yamazaki K, Maeda M, Yamakawa T, Sarara R, et al. The Asia-Oceania Congress of Medical Physics Proceedings Vol.13, 28-28, 2013. 査読あり

〔学会発表〕(計8件)

1. Hamano H, Hayashi N, Yamakawa T, Yasui K, Kato H
Basic physical verification of respiratory-gated spot scanning proton therapy
第71回日本放射線技術学会総会学術大会, 2015年4月(横浜・パシフィコ横浜)
2. Yamakawa T, Hayashi N, Hamano H, Yasui K, Kuroki R, Adachi Y, Kato H
The calculation of the field size factor using the Clarkson integration method in the MU calculation of proton therapy
第109回日本医学物理学会学術大会, 2015年4月(横浜・パシフィコ横浜)
3. 桂田昌輝 林直樹 黒木燎平 濱野裕, 山川哲弘, 一瀬佑允, 辻祥子, 長尾江梨香
汎用モンテカルロにおける並列計算の最適化に関する検討
第7回中部放射線医療技術学術大会, 2014年11月(名古屋・名古屋国際会議場)
4. Hamano H, Hayashi N, Yamakawa T, Yasui K, Kuroki R, Kato H
Commissioning of respiratory gating irradiation with spot scanning proton therapy unit : a fundamental study
14th Asia-Oceania Congress of Medical Physics, 2014.10, (Vietnam, Saigon Hotel)
5. Yamakawa T, Hayashi N, Kuroki R, Hamano H, Yasui K, Adachi Y, Kato H
Independent monitor unit verification

for passively proton therapy.

- 14th Asia-Oceania Congress of Medical Physics, 2014.10, (Vietnam, Saigon Hotel)
6. 濱野裕, 黒木燎平, 山川哲弘, 桂田昌輝, 加藤秀起, 林直樹
各シミュレーション条件による並列計算の最適化
PHITS研究会, 2014年9月(茨城・日本原子力研究開発機構リコッティ)
7. 黒木燎平 林直樹 松永卓磨 濱野裕, 山川哲弘, 加藤秀起
リニアックX線シミュレーションにおけるモンテカルロコード EGS5 と PHITS 間の比較
PHITS研究会, 2014年9月(茨城・日本原子力研究開発機構リコッティ)
8. 林直樹
専門講座:放射線治療におけるラジオクロミックフィルムドジメトリ
第70回日本放射線技術学会学術大会, 2014年4月10-13日,(横浜・パシフィコ横浜)

〔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(HAYASHI Naoki)

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