

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：23903

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24601013

研究課題名(和文)強度変調陽子線治療のためのフル3次元線量分布測定システムの開発

研究課題名(英文)Development of a full three dimensional dose distribution measurement system for intensity modulated proton therapy

研究代表者

歳藤 利行(TOSHITO, Toshiyuki)

名古屋市立大学・医学(系)研究科(研究院)・研究員

研究者番号：30377965

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文):強度変調陽子線治療の品質管理のためのフル3次元線量分布測定システムの開発を行った。直径500 μm のシンチレーションファイバー約18000本を積層し、90 mm x 62 mm x 107 mmのブロック形状とした検出器を作成した。照射実験は名古屋陽子線治療センターの陽子線ビームを用いて行った。放射線検出器としての基礎特性を測定した後、検出器を10°ピッチで回転駆動させスポットスキニング法で形成する照射野を測定した。コンピュータ断層撮影法で用いられるML-EM法による線量分布の再構成プログラムを開発し、1 mmピッチでの線量分布を再構成した。

研究成果の概要(英文):We developed fully three-dimensional dose distribution measurement system for the purpose of quality assurance for intensity modulated proton therapy. A scintillating fiber block was used as a detector. We manufactured it by stacking approximately 18000 500 μm -diameter-scintillating fibers. It measures 90 mm x 62 mm x 107 mm. We conducted beam test to measure basic characteristics of the detector by using proton beam at Nagoya Proton Therapy Center. Measurements of dose distribution for double-scattered and spot scanning irradiation were carried out by taking images with the 10 degree step rotation of the detector system. A software to reconstruct three-dimensional dose distribution using a Maximum-Likelihood Expectation Maximization algorithm was developed. Finally we obtained 1 mm pitch dose distribution by using this system.

研究分野：医学物理学

キーワード：強度変調陽子線治療 シンチレーションファイバー 品質管理

1. 研究開始当初の背景

(1)全世界で約 30 施設、日本でも 10 に近い施設で粒子線治療が行われていた。粒子線治療は陽子線・炭素線を利用した治療法が主であり、ビームが止まる直前に形成されるブラッグピークを利用することで腫瘍に線量を集中させるという特徴を持っている。照射方法も従来は腫瘍のサイズまで幅を拡げたビームを用いるブロードビーム法が主流であったが、さらなる線量の集中性を得るために数 mm 幅のペンシルビームを腫瘍の形状に合わせて走査するスキニング法を導入する新規施設がここ数年急増している。スキニング法は照射の自由度が高く、個々のペンシルビームごとに強度を変調させ、さらに多門で線量分布を最適化することで、より一層線量を集中させることが可能となる。この治療法は強度変調放射線治療(IMRT)の陽子線版に相当し、強度変調陽子線治療(IMPT)と呼ばれる。IMPT は今後、陽子線治療の最先端技術として広まることが予想されたが、そのためには効率のよい品質管理の手法を確立することが不可欠であった。

(2)IMPT は照射の自由度が高いゆえに、線量分布も一様ではなく複雑な 3 次元構造をもつ。また時間構造をもった照射となるため、その品質管理としての線量分布測定は 3 次元的に多数の測定点を 1 mm オーダーの空間分解能で測定し、さらに高速であることが要求される。

(3)他方、素粒子実験の分野では直径 500 μm のシンチレーションファイバーを使った検出器が 20 年以上も前に開発されており、その技術を応用することにより、IMPT の品質管理に役立つ 3 次元線量分布測定器システムを構築するという着想を得ていた。

2. 研究の目的

IMPT の品質管理に向けて、組織等価ファントム中の粒子線 3 次元線量分布を高空間分解能かつ短時間で測定するシステムの開発研究を行う。シンチレーションファイバーをファントムかつ線量計としてブロック構造に組み上げ、CT の原理を応用することにより、数 100 万個からなる 1 mm ボクセル中の吸収線量の測定を実現する。本研究においてはシンチレーションファイバー検出器の作成、光読み出し CCD カメラシステム、検出器の回転駆動機構および 3 次元線量分布再構成ソフトウェアを開発する。

3. 研究の方法

ハードウェアとしては名古屋大学大学院理学研究科において 1990 年代にニュートリノ実験(CERN WA75 CHORUS 実験)で使用したシンチレーションファイバーを再利用して検出器を組み上げる。さらに画像読み出し用冷却 CCD カメラシステムおよび検出器回転駆動シ

ステムを開発する。ソフトウェアとしては 3 次元線量分布再構成アルゴリズムとプログラムを開発する。名古屋市立西部医療センター陽子線治療センターの陽子線ビームを使用し、データの取得とシステムとしての性能検証を行う。

4. 研究成果

(1)フル 3 次元線量分布測定システムの検出器として、シンチレーションファイバーブロックを作成した。材料の調達と組み立ては名古屋大学大学院理学研究科の担当であり、CERN WA75 CHORUS 実験で使用したものを分解、再利用した。直径 500 μm のファイバーを積層したかたまりから、長さ 11 cm で切り出し、90 mm x 62 mm x 107 mm のブロック形状とした(図 1)。

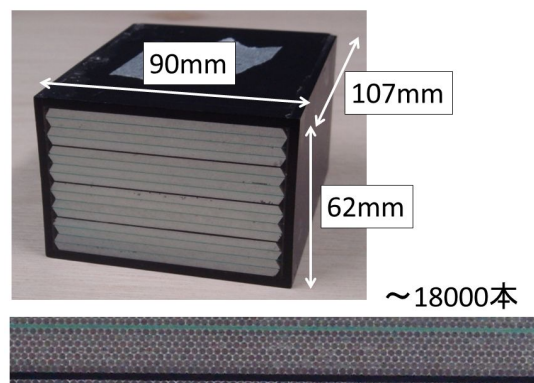


図 1. シンチレーションファイバーブロック

(2)名古屋陽子線治療センターにおいては平成 24 年 12 月よりに二重散乱体法による最大エネルギー 250 MeV の陽子線ビームが使用可能となった。

ファイバーブロックへの照射実験を行い、放射線検出器としての基礎特性を調べた。シンチレーションファイバーブロックを粒子線治療の線量分布の測定に用いるという前例のない試みであったが、シンチレーションファイバーは治療に用いる線量の 1/10 程度の線量(0.2 Gy)であっても十分な発光量があり、また撮影した画像も個々のファイバーの発光量を測定するために十分な解像度をもっており、粒子線に特徴的なブラッグピークや照射装置で形成した拡大ブラッグピークも鮮明にとらえることができた。これらの結果により作成したファイバーブロックがフル 3 次元線量分布測定システムの検出器として十分な性能を持つ見通しがたった。

(3)回転駆動による照射実験を行った。名古屋陽子線治療センターの二重散乱体法による陽子線ビームを使用し、マルチリーフコリメータとボラスを装着したブロードビーム照射野を形成した。治療用ベッドの回転を利用して、 -90° から $+90^\circ$ まで 30° ごとに検出器の

角度を変えて全 7 角度からの照射を行った (図 2)。

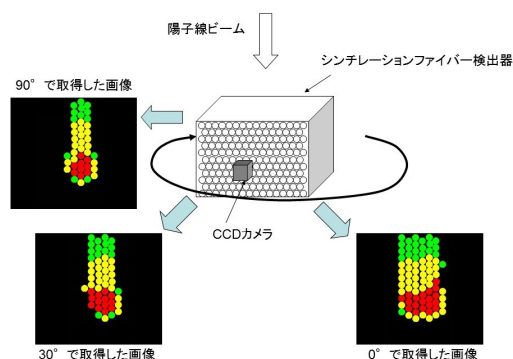


図 2. 回転駆動による測定の概念図

取得した画像は線量の投影積分値そのものである。治療計画装置を使って線量の投影積分値を計算し両者を比較した。図 3 に示すように測定データと計算結果はよく一致しており、その結果を第 106 回日本医学物理学会学術大会にて口頭発表した。飛程の末端付近の分布に不一致がみられ、測定値の方がぼやける傾向がみられた。個々のファイバーの断面が円形であることが原因であると考えている。

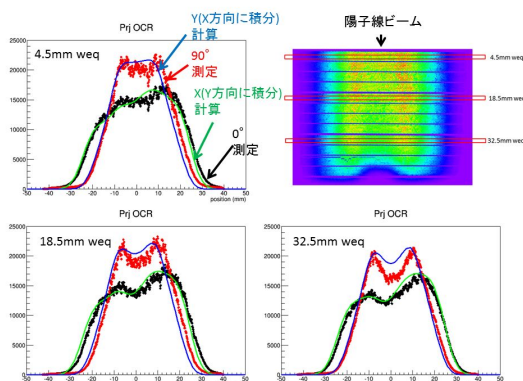


図 3. 投影積分線量(3 深さ、左上、左下、右下)の比較。右上はある角度での画像。

(4) 検出器中の線量分布を検出器の構造を考慮しながらモンテカルロシミュレーションの手法で計算するためのプログラムの開発に着手した。Geant4 モンテカルロシミュレーションツールキットを利用した。二重散乱体法によるブロードビーム用とスキャンニング用のノズルのジオメトリを構築した。実臨床での線量分布計算にも利用し、その結果を The 7th KOREA-JAPAN Joint Meeting on Medical Physics で発表した。

(5) 名古屋陽子線治療センターにおいて平成 25 年 9 月より陽子線スポットスキャンニングビームの照射が使用可能となった。これにより本研究で必要となる IMPT 用のビームを照射

することが可能になった。本センターのスキャンニング照射装置を中心に、ブロードビーム法を含めた治療装置全体について論文にまとめて投稿した。

ファイバブロック検出器システムの性能試験を行うために、模擬プランを作成し、ビーム照射およびデータ収集を行った。検出器の角度は -90° から +90° まで 10° ごとに变化させ全 19 角度での画像収集を行った。

検出器システムから取得した画像データから 3 次元線量分布を再構成するアルゴリズムについて検討をすすめ、ファイバー中の減衰の効果を取り入れやすい逐次近似法の一つである ML-EM (maximum likelihood-expectation maximization) 法による再構成を行った。ある深さにおける 2 次元線量分布について 1 mm ピッチでの測定値と治療計画装置による計算値を重ねたものが図 4 であり、照射野の形状がよく一致している。

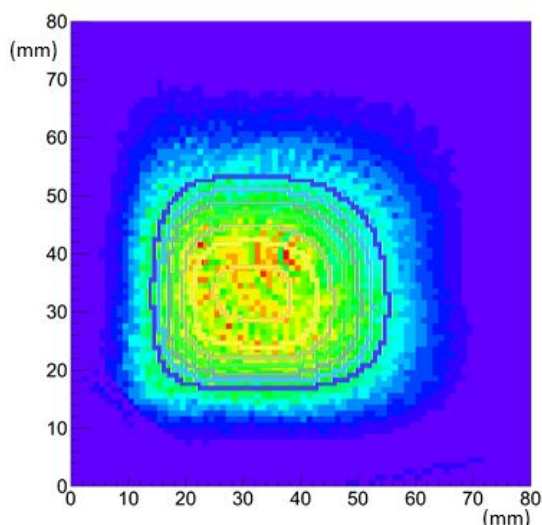


図 4. 飛程の終端近くでの 2 次元線量分布。再構成した値 (カラーピクセル) と治療計画装置による計算値 (等高線) を重ね合わせたもの。

(6) 検出器と再構成プログラムの開発を行い、1 mm 解像度でのフル 3 次元線量分布測定システムとしての原理を実験的に検証することができた。シンチレーションファイバーの形状を隙間なく空間を埋め尽くすことができる四角形や六角形にすることで深さ方向の精度が改良できる。また、検出器の感度むらを補正することでリングアーチファクトの改善が期待できる。

(7) 本研究では治療計画装置の整備の都合により IMPT の照射野での検証はできなかった。システムの改良とあわせて将来の課題としたい。

<引用文献>

A. Lomax, Intensity modulation methods for proton radiotherapy, Physics in Medicine and Biology 44, 1999, 185-205

T. Nakano et al., Research and development of scintillating fiber tracker for μ oscillation experiment, Nuclear Science, IEEE Transactions on 39, 1992, 680-684

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)

S. Yamamoto, T. Toshito, K. Fujii, Y. Morishita, S. Okumura, M. Komori, High resolution Cerenkov light imaging of induced positron distribution in proton therapy, Medical Physics 査読あり 41, 2014, 111913
DOI: 10.1118/1.4898592

S. Yamamoto, T. Toshito, M. Komori, Y. Morishita, S. Okumura, M. Yamaguchi, Y. Sato, N. Kawachi, S. Fujimaki, Monitoring of positron using high-energy gamma camera for proton therapy, Annals of Nuclear Medicine 査読あり 28, 2014, 10
DOI: 10.1007/s12149-014-0936-4

[学会発表](計 6件)

歳藤利行 Calculation method of secondary neutron induced dose in proton scanning beam delivery system using aperture. 第109回日本医学物理学学会学術大会 2015年4月18日 パシフィコ横浜(神奈川)

歳藤利行 Irradiation method for lung and liver cancer and QA using scanning beam: An attempt in Nagoya Proton Therapy Center. 第109回日本医学物理学学会学術大会 2015年4月16日 パシフィコ横浜(神奈川)

歳藤利行 Geant4の概要と医学応用 日本原子力学会春の年会(招待講演) 2015年3月22日 茨城大学(茨城県)

Toshiyuki Toshito, Commissioning of proton beam spot scanning irradiation system with energy absorber and aperture in Nagoya Proton Therapy Center. The 7th KOREA-JAPAN Joint Meeting on Medical Physics 2014年9月27日 プサン(韓国)

Toshiyuki Toshito, Clinical

experience of Monte Carlo dose calculation in proton therapy using spot scanning irradiation system in Nagoya Proton Therapy Center. The 7th KOREA-JAPAN Joint Meeting on Medical Physics 2014年9月26日 プサン(韓国)

歳藤利行 シンチレーションファイバーを用いた粒子線治療のための3次元線量分布測定システム 第106回日本医学物理学学会学術大会 2013年9月16日-9月18日 大阪大学コンベンションセンター(大阪)

[その他]

名古屋陽子線治療センター 論文・研究発表実績
<http://www.nptc.city.nagoya.jp/action/research.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

歳藤 利行 (TOSHITO, Toshiyuki)
名古屋市立大学・大学院医学研究科・研究員
研究者番号: 30377965

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

中村 光廣 (NAKAMURA, Mitsuhiro)
名古屋大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 90183889