

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：72602

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24601017

研究課題名(和文)プラスチックシンチレータを用いた4次元線量分布測定器の開発

研究課題名(英文)Four-dimensional dose distribution measurement using plastic scintillator

研究代表者

橋本 成世 (Hashimoto, Masatoshi)

公益財団法人がん研究会・有明病院 放射線治療部・医学物理士

研究者番号：40375845

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：線量分布を経時的に変化させる照射法が普及しているが、3次元線量分布の時間変化である4次元線量分布が測定できる検出器の開発は十分では無い。申請者達は新たにプラスチックシンチレータから得られるシンチレーション光を外部からカメラを用いて取得し、収集光量の時間変化を追うことで4次元線量分布が取得できる測定器を開発した。動的に線量分布が変化する照射において、十分な信号強度で線量分布に対応する光量分布が検出できることを確認した。本検出器を用いることで、シンチレーション光の観測から線量分布の変化に対応する光量が観測でき、4次元線量分布測定が行えることを示した。

研究成果の概要(英文)：Irradiation methods with dynamically changing field-shape and dose-rate have been widely used recently, however there is no detector to measure four-dimensional (4D) absorbed dose distribution which consists of time-dependent three-dimensional dose distributions. Our research group developed the detector to measure 4D absorbed dose distributions using a cylindrical plastic scintillator, a conical reflection grass and a CCD (charge coupled device) camera. The detector enables to detect scintillation lights corresponding to dose distributions in the scintillator frame by frame. Furthermore, 4D absorbed dose distributions can be reconstructed by the measured 4D signal of the scintillation lights detected by CCD camera.

研究分野：医学物理

キーワード：放射線治療 外部照射 放射線測定 プラスチックシンチレータ

## 1. 研究開始当初の背景

放射線治療の進歩は著しく、高精度放射線治療である強度変調放射線治療 (IMRT) が普及しはじめている。また、線量分布に傾斜を与える手法として、JAW や多分割コリメータ (MLC) を移動させながら照射を行う非物理ウェッジと呼ばれる照射法も日常多く用いられている。これらの照射法は時間と共に線量分布を変化させる手法であり、主に正常組織に与える線量を減らすため使用される。

経時的に線量分布が変化する照射法において、計画通りの照射が行われているかを詳細に検証するには、3次元線量分布の時間変化である4次元線量分布を確認することが最も良い手段となり得る。線量分布測定法のゴールド・スタンダードは電離箱線量計を用いた方法である。この方法は、水ファントム中で電離箱線量計を走査させて線量分布を取得する。精度が高い測定が可能だが、基本的にはポイント線量の測定であり、走査を自動で行える装置を使用しても測定には多大な時間を要する。また、フィルムは比較的簡単に線量分布が測定できる為に良く用いられる。この方法は空間分解能が優れることと、1回照射で2次元線量分布の測定が完了するという利点を持つ。これら2つの方法は良く用いられているものの、基本的には積算線量の測定であり、線量分布の時間変化を測定することは難しい。このように4次元線量分布測定の需要があるにも関わらず、測定器の開発は遅れている。

## 2. 研究の目的

上記背景の下、プラスチックシンチレータから得られるシンチレーション光を外周からカメラを用いて取得し、収集光量の時間変化を追うことで4次元線量分布が取得できる測定器を提案した。本研究の目的は、4次元線量分布が測定できる検出器を開発することである。

## 3. 研究の方法

本研究の目的を達成するため、はじめにカメラで検出される光量の基礎特性を評価し、次に本検出器で得られる光量プロファイルと線量プロファイルの比較を行った。検討にはVARIAN社製のCLINAC 21EXを使用し、治療計画装置にはEclipseを用いた。

### (1) 検出器の構成

図1に検出器の構成を示す。円柱形状のプラスチックシンチレータ、円錐形状の鏡及び平面形状の鏡から構成される。プラスチックシンチレータは、X線を照射すると吸収線量に対応したシンチレーション光を発生する特性を持つ。本検出器では、プラスチックシ

ンチレータをファントムとして使用し、円錐形状の鏡の中心に配置した。そして、プラスチックシンチレータ側面から放出されるシンチレーション光を円錐形状の鏡で下方に投影し、さらに平面形状の鏡で側方に投影するよう鏡を配置し、カメラでシンチレーション光を検出した。このように測定することで、プラスチックシンチレータ全周から得られるシンチレーション光の投影像を一度に得ることが可能となる。本研究ではカメラには1フレームあたり16bitの階調で画像が保存できる冷却型の電化結合素子 (CCD) カメラを使用した。

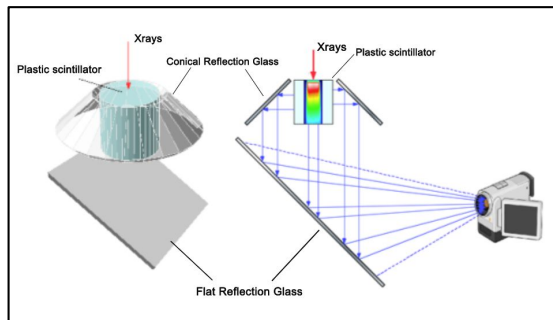


図1 4次元線量分布測定器の模式図。

図2に3cm×3cm照射野のX線照射で得たシンチレーション光の画像の例を示す。中心にプラスチックシンチレータ、その外周に円錐形状の鏡の領域が描出される。鏡の領域にはシンチレーション光の投影像が描出される。

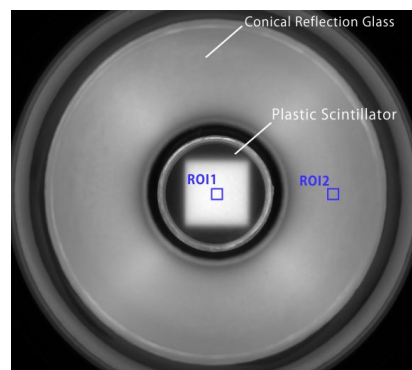


図2 3cm×3cmの矩形照射野で得られたシンチレーション光の例。関心領域 (ROI) をプラスチックシンチレータと鏡の領域に配置して光量の測定に使用した。

### (2) 基礎特性

#### 収集光量の線量依存

照射 MU を変化させて照射を行い、収集光量の積算値と照射 MU の関係を求めた。

#### 集取光量の線量率依存

照射 MU 固定で線量率を変化させた時の収集光量の変化を測定した。

#### 収集光量の時間変化

100秒間連続照射中のフレーム毎の光量変化を測定した。

### (3) 光量プロファイルと線量プロファイルの比較

光量プロファイルと Eclipse で計算した線量プロファイルと比較した。図 3 に示す A~C の 3 つの点線上の光量プロファイルを使用した。A は深さ方向の光量プロファイルであり、深部線量分布と比較した。B は等深度を通る光量プロファイルである。図 4 に示すように実線上における計算線量の積算値を求め、角度毎に光量と比較した。C は横方向の光量プロファイルであり、軸外線量比と比較した。時間と共に MLC 位置が変化する DMLC フィールドの照射で得られた光量プロファイルと比較に用いた。

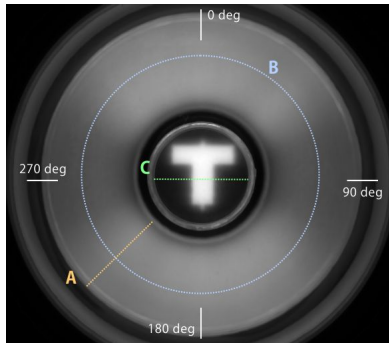


図 3 DMLC フィールドの照射で得られた 1 フレームあたりのシンチレーション光。点線 A~C の光量プロファイルと線量プロファイルと比較した。0 時方向を 0 度として投影角度を定義した。

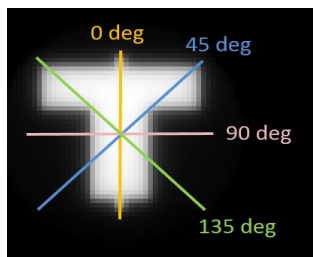


図 4 比較に使用した計算線量の例。実線上の線量積算値を角度毎に求め、図 3 の B 等深度の光量プロファイルと比較した。

## 4. 研究成果

### (1) 基礎特性

図 5 に収集光量の線量依存性の結果を示す。10 × 10 pixels (1pixel = 0.39 × 0.39 mm<sup>2</sup>) の ROI を図 2 に示すように配置して収集光量を計測した。両領域ともに光量と照射 MU は良い直線関係があり、光量から線量を求めることが可能であった。

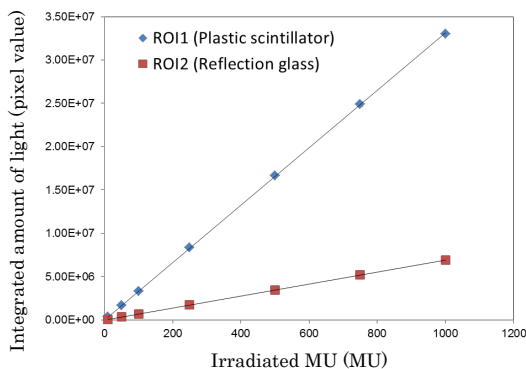


図 5 収集光量の線量依存性。

線量率依存性の結果を図 6 に示す。線量率の変化に伴う収集光量の変化は 1%以下であった。これは、1 フレームあたりの光量に依存したカメラの感度変化は非常に小さいことを意味する。この結果から、カメラ感度の補正は必要ないことが確認できた。

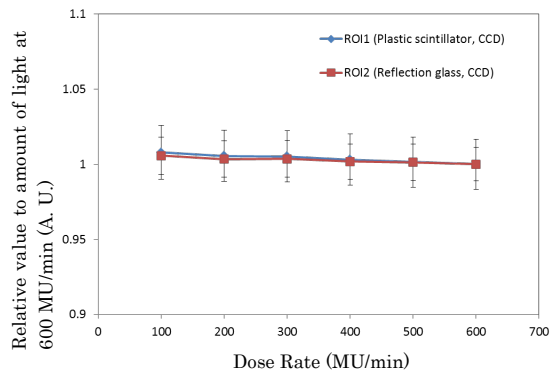


図 6 収集光量の線量率依存性。

図 7 に収集光量の時間変化の結果を示す。連続照射中の光量に大きな傾向の変化は認められなかったが、周期的な光量の低下が観測された。これは線量率に依存して周期が変化することから、ビームパルスに依存した光量低下だと考えられた。ビームパルスによる線量の低下が見られる測定器は限られており、本検出器は十分な時間分解能を有しているといえる。一方でビームパルスゲート信号に使用することで、光量低下を含まない光量収集の可能性も示唆された。

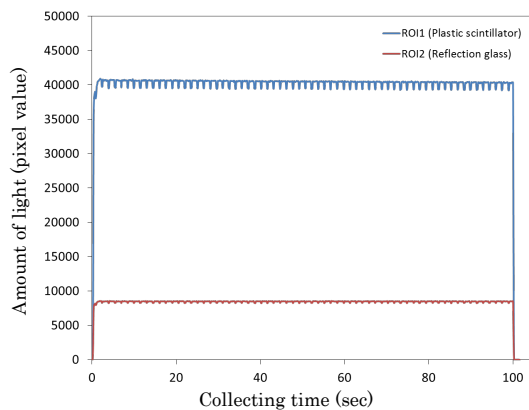


図 7 収集光量の時間変化。

### (2) 光量プロファイルと線量プロファイルの比較

DMLC フィールド照射中に取得された 1 フレームの光量プロファイルの比較結果を以下に示す。図 3 に示す T 形状の照射野になった際の光量プロファイルの比較である。

図 8 に深さ方向の結果を示す。ピーク深以降において両者は同様の形状を示し、光量プロファイルから X 線の減弱が測定できると分かった。ピーク深より浅部における両者の乖離は、シンチレータ表面におけるシンチレーション光の散乱が影響していると考えられる。

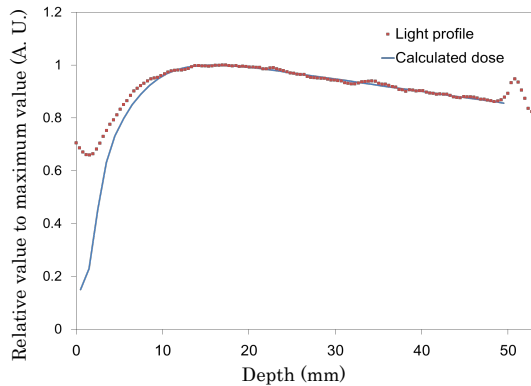


図 8 深部方向における線量プロファイルと光量プロファイルの比較。

図 9 に等深度プロファイルの結果を示す。両者ともに同様の形状を示した。シンチレータ表面でコリメートされたシンチレーション光が円錐形状の鏡に投影されていることを意味する。この結果から、光量分布から深さ毎の照射野形状が取得できることが分かった。

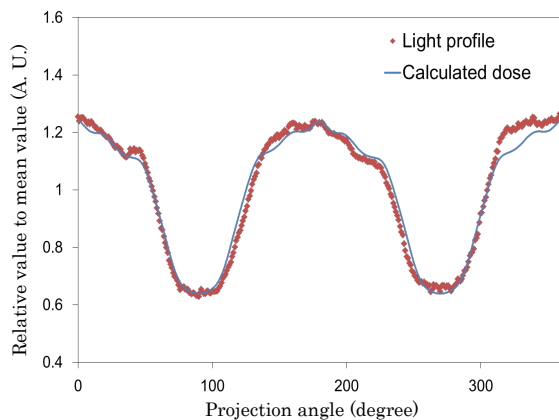


図 9 30 mm 深における等深度プロファイルの比較。

図 10 に横方向プロファイルの結果を示す。両者共に同様の形状を示しており、シンチレーション光の横方向プロファイルから全深度を加算した線量分布が取得できると分かった。

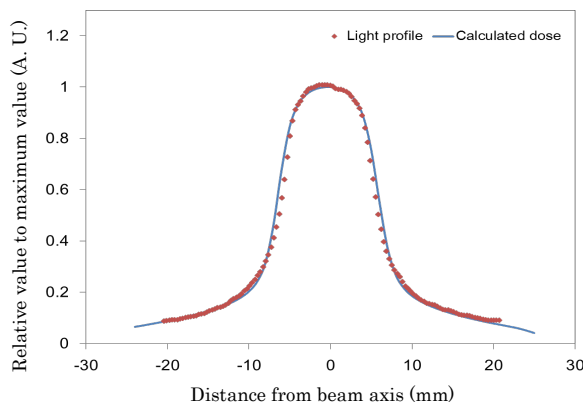


図 10 横方向における線量プロファイルと光量プロファイルの比較。

以上の結果から、本測定器を用いることで X 線の減弱及び深さ毎の照射野形状の時間変化を直接に観測することができ、4 次元線量分布を測定できることが実証された。

## 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)

A. Haga, T. Magome, S. Takenaka, T. Imae, A. Sakumi, A. Nomoto, H. Igaki, K. Shiraishi, H. Yamashita, K. Ohtomo, and K. Nakagawa, Independent Absorbed Dose Calculation Using the Monte Carlo Algorithm in Volumetric Modulated Arc Therapy, Radiation Oncology, 9, 2014, 75, 査読有.

A. Haga, K. Nakagawa, C. Maurer, K. Ruchala, E. Chao, D. Casey, S. Kida, D. Sakata, M. Nakano, T. Magome and Y. Masutani, Reconstruction of the treatment area by use of sinogram in helical tomotherapy, Radiation Oncology, 9, 2014, 252, 査読有.

松林史泰、橋本成世、上原隆三、高橋良、伊藤康、五月女達子、関谷結子、中島大、北村望、佐藤智春、小塚拓洋、小口正彦、呼吸性移動を伴う肺癌に対する VMAT における適切な線量計算パラメータ決定方法、日本放射線技術学会雑誌、71、2015、301-307、査読有.

[学会発表](計 10 件)

橋本成世、西尾禎治、芳賀昭弘、花田剛士、株木重人、小塚拓洋、小口正彦、プラスチックシンチレータと冷却 CCD カメラを用いた 4 次元線量分布測定、第 109 回日本医学物理学会学術大会、2015 年 4 月 16 日、パシフィコ横浜.

A. Haga, Four-dimensional dose reconstruction by use of in-treatment data set, OSAKA, INDIANA, GRONINGEN symposium on Medical Physics, 2014 年 10 月 25 日, University of Groningen, Netherlands.

M. Hashimoto, T. Nishio, A. Haga, T. Hanada, S. Kabuki, T. Kozuka, M. Oguchi, Four-Dimensional Dose Distribution Measurement using Plastic Scintillator, 56<sup>th</sup> Annual Meeting of the American Association of

Physicists in Medicine, 2014 年 7 月 20 日, Austin, USA.

A. Haga, K. Nakagawa, C. Maurer, K. Ruchala, E. Chao, D. Casey, S. Kida, D. Sakata, T. Magome, M. Nakano, Y. Masutani, Reconstruction of the Treatment Area by Use of Sinogram in Helical Tomotherapy, 56<sup>th</sup> Annual Meeting of the American Association of Physicists in Medicine, 2014 年 7 月 20 日, Texas, USA.

玉木聖一、畑中星吾、水野統文、遠藤春奈、神崎扇洋、橋本成世、花田剛士、西尾禎治、発光波長の異なるプラスチックシンチレータを用いた 4 次元線量分布測定器の試作機の開発、第 67 回東京部会春期学術大会、2013 年 5 月 8 日、駒沢大学駒沢キャンパス.

玉木聖一、岩本涼太郎、中村哲志、畑中星吾、橋本成世、花田剛士、西尾禎治、発光波長の異なるプラスチックシンチレータを用いた 4 次元線量分布測定器の開発、第 105 回日本医学物理学学会学術大会、2013 年 4 月 11 日、パシフィコ横浜.

橋本成世、伊藤康、中島大、北村望、五月女達子、大友結子、上原隆三、小塚拓洋、小口正彦、VMAT における腫瘍の呼吸性移動を考慮した線量再構成、第 105 回日本医学物理学学会学術大会、2013 年 4 月 11 日、パシフィコ横浜.

西尾禎治、玉木聖一、中村哲志、畑中星吾、橋本成世、動的放射線照射に対応した 4 次元線量分布計測システムの開発、日本放射線腫瘍学会第 25 回学術大会、2012 年 11 月 23 日、東京国際フォーラム.

M. Hashimoto, A. Haga, R. Takahashi, M. Nakajima, T. Hashimoto, S. Saotome, T. Sato, K. Nakagawa, T. Kozuka, M. Oguchi, Verification of MLC position using electric portal imaging device during VMAT delivery, 54<sup>th</sup> Annual Meeting of the American Society for Radiation Oncology, 2012 年 10 月 28 日, Boston, USA.

玉木聖一、中村哲志、畑中星吾、橋本成世、西尾禎治、プラスチックシンチレータを用いた 4 次元線量分布測定器の開発、第 104 回日本医学物理学学会学術大会、2012 年 9 月 13 日、つくば国際会議場.

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

橋本成世 (HASHIMOTO Masatoshi)  
がん研究会・放射線治療部・医学物理士  
研究者番号：40375845

### (2)研究分担者

西尾禎治 (NISHIO Teiji)  
国立がん研究センター東病院・臨床開発センター粒子線医学開発分野・ユニット長  
研究者番号：40415526

花田剛士 (HANADA Takashi)  
慶応義塾大学・医学部・助教  
研究者番号：30571054

芳賀昭弘 (HAGA Akihiro)  
東京大学・医学部附属病院・助教  
研究者番号：30448021

### (3)連携研究者

株木重人 (KABUKI Sjigeto)  
東海大学・医学部・講師  
研究者番号：00402777

坂田洞察 (SAKATA Dousatsu)  
東京大学・医学部附属病院・研究員  
研究者番号：00709562

作美明 (SAKUMI Akira)  
東京大学・医学部附属病院・特任助教  
研究者番号：30360556

小塚拓洋 (KOZUKA Takuyo)  
がん研究会・放射線治療部・副部長  
研究者番号：00402777

小口正彦 (OGUCHI Masahiko)  
がん研究会・放射線治療部・部長  
研究者番号：50169257