

令和元年6月24日現在

機関番号：22604

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K15348

研究課題名(和文)電子線とX線のハイブリッドによる新しい高エネルギー画像生成法

研究課題名(英文)New high energy imaging method by using electron beam and x-ray hybrid

研究代表者

明上山 温(Myojoyama, Atsushi)

首都大学東京・人間健康科学研究科・准教授

研究者番号：90347279

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では電磁石を用いた磁界による電子線からの光子の効率的発生を目的とした高コントラスト画像の取得を研究テーマとした。加速器のヘッド下部に電子線の収束電磁石と偏向磁石を設置し、電子線をスキャンニング制御することで画像を取得する方法を提案した。偏向結果についてEPIDによる画像および電離箱線量計による測定結果を示した結果、最小で1 mm程度の電子の収束できることが確認された。また電源装置のプログラムによる制御で自由な照射位置の設定が可能であることも示した。これに加え高線量率の放射線場で300 keV以上のエネルギーの光子を正確に測定できる検出装置を提案し新しい画像生成法の基礎部分完成された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

X線撮像において極小照射野X線のスキャンニングによる画像取得は、理論的には多くの発表があるがそれを実現することは困難であった。本研究ではそれを医療用直線加速装置の電子線スキャンニングという簡便な方法で実現することに成功している。この手法の応用により、さらなる画質向上や線量削減、散乱線の解析による3次元画像再構成等に応用可能であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we focused on the acquisition of high-contrast images for the efficient generation of photons from electron beams by magnetic fields using electromagnets. A method of acquiring images by scanning the electron beam using focusing electromagnets and deflection electromagnets was proposed. By the results, it showed that the convergence of the electron of about 1 mm was possible at the minimum as a result of the EPID images and the ionization chamber. It has also been shown that setting of the irradiation position is possible by control of the power supply device by programming. In addition to this, we proposed a detection device that can accurately measure photons with energy of 300 keV or more, and completed the basic part of the new image generation method.

研究分野：放射線治療物理学

キーワード：スキャンニング 電磁石 ソレノイド

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

現在の高精度放射線治療では原体照射、がん病巣にピンポイントで照射する定位放射線治療、強度変調放射線治療 (IMRT)、そして治療中の透視画像等を用いて病巣をより正確に狙う画像誘導放射線治療 (IGRT) が行われるようになった。このような照射法を使用して高精度放射線治療を実現するためには、がん患者を寝台に乗せた時点での腫瘍とリスク臓器 (Organ at Risk, OAR) の正確な位置を検出する必要がある。現在は、治療期間中の患者の腫瘍位置と OAR 位置の確認は骨造影や金マーカー造影を用いて診断用と同じエネルギー X 線のポータルイメージ撮影で行われているが、体幹部骨盤周辺の腫瘍は MRI のように正確に形状を抽出することは困難である。本研究者は X 線照射可能な直線加速装置の多くが電子線照射を行うことも可能であることに着目し、直線加速装置の電子線照射モードによる X 線高画質ポータルイメージの撮像法を提案し、画像の取得が可能であることを示したが、画像撮像のための発生 X 線の不足が課題であった。そこで、本研究では電磁石を用いた磁界による電子線からの光子の効率的発生を目的とした高コントラスト画像の取得を研究テーマとした。

### 2. 研究の目的

本研究では、臨床で用いられる直線加速装置の構造を変更することなく、加速器ヘッドおよびヘッドに対向して設置された EPID (Electronic Portal Imaging Device) に部品を装着するだけで人体軟部組織、特に腫瘍を高コントラストに検出可能なポータルイメージ・Mega Voltage CT 撮像を実現する方法を提案する。本手法は電子線照射が可能な直線加速装置全てで利用可能であり、寝台上的患者の腫瘍位置の高精度な認識や放射線治療患者の新しいポータルイメージによる治療計画の可能性についての研究を行う。医療用加速器の電子線モードで画像を取得する上で問題となる被ばく線量の増加を、磁界を用いた電子線の制御による光子の発生率の増加および表面線量の削減により解決することが研究の目的である。

### 3. 研究の方法

本研究では、画像の取得方法は小さな画素ブロック領域ごとに行ういわゆるスキヤニング方式を採用した。必要とする X 線は単色に近く直径がミリメートル程度のものである。事前に行ったシミュレーションにより医療用直線加速装置で得られる公称エネルギー 4 - 15 MeV の電子線による硬 X 線程度のエネルギーの光子の発生は、加速器ヘッドに設置できるサイズで製作することは困難であることが確認された。本研究で必要とする光子のエネルギーは 300 keV 以上であるため、Cu などターゲットを用いて発生する制動 X 線を用いる方法も実施したが、ヘッド下部のターゲットで発生した X 線は指向性が悪く、加速器の X 線モードよりも画質が低下した。そこで、電子線を電磁石で曲げ、それを直接体表面に照射する手法に切り替えた。ロス・アラモス研究所が開発した電磁界シミュレーションソフトである Poisson-Superfish により 4 - 15 MeV までの電子線を偏向制御できる電磁石を計算した結果、市販の電磁石でも十分に電子線の出力方向を制御できることが確認され、最大印加電圧 160 V、5 A 程度で使用する電磁石を 4 つ用いて偏向磁石とした。医療用直線加速装置は加速電子を散乱箔で広げて照射しているため、電子線の再収束が必要となったが、これは偏向磁石の上に収束電磁石として 2 段の四重極電磁石を用いて試した。この装置を用いた電子線の偏向結果について EPID による画像および電離箱線量計による測定結果を示した。

### 4. 研究成果

電子線の収束に用いた四重極電磁石のシミュレーション結果を図 1-1、図 1-2 に示した。これらの結果より電磁石を選択し実装した。さらに電子線を収束させるためにソレノイドコイルを作成し、最小で直径約 1 mm の照射が可能であることを確認した。この手法により照射野内で光子の分布を細かく制御できることを確認した。これをファントムに入射したときの偏向電磁石の印加電圧の違いによる電子線の偏向結果を EPID で取得したものを図 2-1 に、照射野中心付近の分布を図 2-2 に示した。電圧の変化により分布が移動していることが確認された。

平成 29 年度に購入した GPU シミュレーション用のコンピュータを用い、Los Alamos National Laboratory の磁界シミュレーションソフトウェアである Poisson Super fish を用いて電磁石と磁界との精密なシミュレーションを可能とし、電磁石の設計を見直した結果、従来よりも 1/3 の重量で同様の磁界を発生させる装置を設計した。この設計をもとに電磁石を購入し、以前より小型の電子線偏向システムを作成した。このシステムに新たに購入したプログラムで電圧制御可能な電源装置を 2 台組み合わせることにより、即座に任意の位置に電子線を照射可能とした。このシステムを用いて 4 MeV から 15 MeV まで電子線のエネルギーを変化させ観測したところ、どのエネルギーでも照射野内の任意の位置に電子を偏向させることが可能であることを確認した。この電子線を銅ターゲットに当て、制動 X 線を発生させて画像生成に用いる構造したことにより、コンパクトでありながら照射野内で任意に光子の分布を変化させることが可能となった。このシステムを用いてファントムを撮像し画質を確認した結果、1/5 の線量で同画質の画像が得られることを確認した。

本手法では、光子のエネルギーを正確に取得できる検出器があれば散乱線を弁別することができ、さらに画質の向上が期待できる。半導体やシンチレータなどエネルギースペクトルを取得できる検出器は存在するが、本研究で用いる直線加速装置のような高線量率の場合、どれもパイ

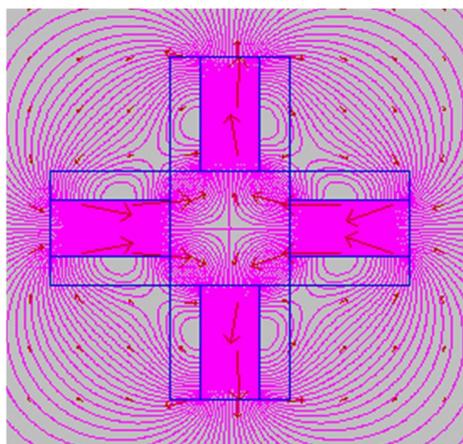


図 1-1 Poisson-Superfish による四重極電磁石の磁束の分布

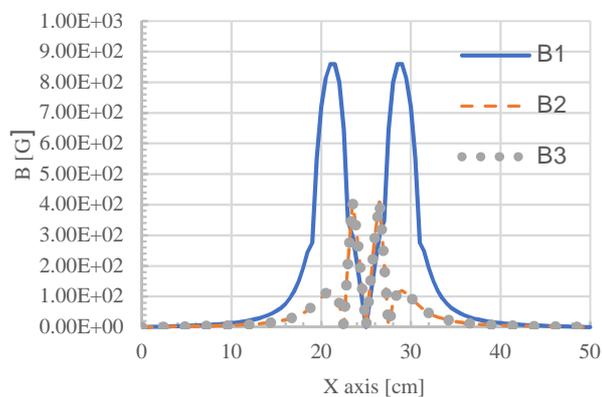


図 1-2 四重極中心付近の磁石の違いによる磁束密度の変化

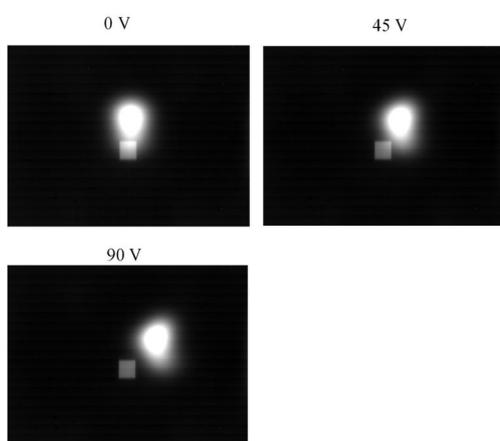


図 2-1 偏向電磁石による電子線の偏向電磁石の磁界

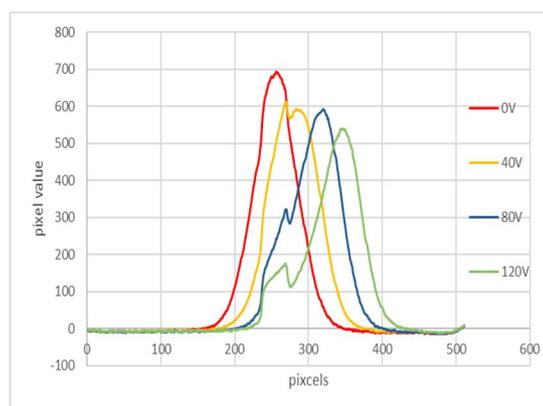


図 2-2 印加電圧の違いによる分布の変化

ルアップ等で正確なエネルギーの測定が困難である。そこで、高線量率の放射線場で光子のエネルギーを特定できる新しい検出装置を考案した。(以下、産業財産権の相談中)

X線撮像において極小照射野 X線のスキャンニングによる画像取得は、理論的には多くの発表があるがそれを実現することは困難であった。本研究ではそれを医療用直線加速装置の電子線スキャンニングという簡便な方法で実現することに成功している。この手法の応用により、さらなる画質向上や線量削減、散乱線の解析による3次元画像再構成等に应用可能であると考えられる。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表](計7件)

- 1) Atsushi Myojoyama and Hidetoshi Saitoh: Electron beam control of linear accelerator using electromagnet, 8th JKMP, Osaka(Japan), 2017年9月.
- 2) Takatomo Ezura, Atsushi Myojoyama and Hidetoshi Saitoh: Development of face authentication system for radiation therapy, 8th JKMP, Osaka(Japan), 2017年9月.
- 3) Kyohei Morita and Atsushi Myojoyama: Measurement of an energy spectrum of  $^{60}\text{Co}$  using UVC camera, 8th JKMP, Osaka(Japan), 2017年9月.
- 4) Ryo Imai and Atsushi Myojoyama: Development of the equipment to control electron beam by using electromagnets, JJMP, Vol.38 Supplement No.1, pp.122, 2018年4月.
- 5) Ryo Imai and Atsushi Myojoyama: Development of the equipment to control electron beam by using electromagnets, JJMP, Vol.38 Supplement No.1, pp.122, 2018年4月.
- 6) Kyohei Morita, Takahito Chiba and Atsushi Myojoyama: Comparison between MC

simulation and histogram of photon output from Cs-137, JJMP, Vol.38 Supplement  
No.1, pp.154, 2018年4月.

- 7) Atsushi Myojoyama, Hidetoshi Saitoh, Takahito Chiba and Ryo Imai: 2D electron beam control of linear accelerator using electromagnet, WC2018, Prague(Czech Republic), 2018年6月.

〔産業財産権〕

出願状況(予定 1 件)

名称: エネルギースペクトル測定のための小型半導体検出装置

発明者: 明上山 温

権利者:

種類:

番号:

出願年:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

特になし

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

0名

### (2)研究協力者

研究協力者氏名: 今井 諒

ローマ字氏名: Ryo Imai

研究協力者氏名: 森田 恭平

ローマ字氏名: Kyohei Morita

研究協力者氏名: 中尾 美波

ローマ字氏名: Minami Nakao

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。