

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26460723

研究課題名(和文) 小型陽子線写真装置によるCT撮像実験

研究課題名(英文) CT imaging with a small proton imaging device

研究代表者

泉川 卓司 (Izumikawa, Takuji)

新潟大学・研究推進機構・准教授

研究者番号：60282985

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では陽子線による断層写真撮影のための高速化したシリコンストリップ位置検出器とエネルギー検出器からなるシステムを構築し、断層写真撮像原理の検証と分解能向上のための撮像技術画像解析技術の向上を目的として行われた。計数速度の大幅な向上を目指し、FPGAを用いた読み出し回路の改良とエネルギー検出器として高速シンチレーターであるYAPを導入し、放射線医学総合研究所のHIMAC加速器にて実験的研究を行った。YAPはエネルギー検出器として低レートでの測定では十分な性能を持つことが確認された。また、シリコン検出器は、ノイズもしくはパイルアップが多いものの400kHzまで動作することが確認された。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop a small detection apparatus for proton computed tomography using silicon strip detectors and a calorimeter. We have improved the electronic circuits and FPGA program for the readout of SSD signals in order to enhance the speed of the system. The YAP (YAlO₃(Ce) perovskite), which is one of the fast inorganic scintillators, was also tested. It was confirmed that the energy resolution of YAP has enough performance at low-beam intensities and the SSD worked up to a beam intensity of 400 kHz. It was found there were more noises or pulse pileups than expected. They were caused by high-intensity beams.

研究分野：放射線物理学、医学物理学

キーワード：陽子線写真 画像診断 シリコンストリップ検出器

1. 研究開始当初の背景

粒子線治療の際にはX線による画像診断により腫瘍の位置や物質密度を測定して、治療の際に与える放射線量を決定している。しかしながら、粒子線とX線では人体や物質との相互作用が異なるため、X線CT値から推定された線量分布には数パーセントの不定性が残ってしまう。そこで、X線ではなく粒子線を用いて電子密度を直接に測定できれば、この不定性が取り除かれることから、より精度の高い線量分布予測が可能となり、より適切な治療計画を策定することができる。このような観点から、粒子線を用いた断層写真に関する研究は、1988年に筑波大グループによりKEK陽子線加速器を用いて行われて以来、世界各地でなされている。

我々も平成22年～24年度科学研究費補助金(C)「シリコンストリップ検出器を用いた小型陽子線断層写真装置の開発」などを得て粒子線断層写真装置の開発研究を実施してきた。この研究では、近年の微細加工技術の向上により実現された高精細なシリコンストリップ検出器を使用して、小型の陽子線写真および陽子線断層写真撮影装置の開発を行うとともに、作成した装置による撮影実験を実施した。従来の同種の装置と比べると、シリコンストリップ検出器を用いることにより、より小型で位置分解能の優れた装置を開発することが出来た。また、図1に示すように、測定対象物の前方と後方の粒子軌跡を完全に追跡する事が可能であり、軌跡情報を用いた画像解析の方法の研究も行ってきた。これまでの研究で図2に示すように通過物質の電子密度を表す陽子線写真を得ることが出来た。しかしながら、測定システムの動作速度が非常に遅いことが、これまでの装置における問題点となっていた。すなわち、限られた加速器の使用時間内で十分なデータを得るためには装置の高速化が求められることとなった。

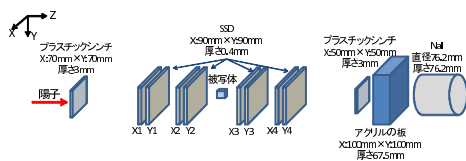


図1 実験装置セットアップ

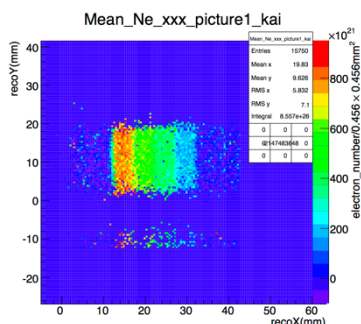


図2 2次元電子数密度分布

2. 研究の目的

本申請課題では、断層写真の撮像を最終目標とし、これまでの研究を更に推し進めた。すなわち、検出器の高速化等の改良およびその特性の測定、複数の材質からなる試料の電子密度の測定、また、新しい画像解析方法の開発などを行った。

3. 研究の方法

(1) 検出器システムについて

シリコンストリップ検出器は、大きさ 9cm × 9cm、厚さ 400 μm、ストリップ間距離は約 228 μm ピッチの物を使用した。但し、データ収集回路の単純化・高速化のために、使用領域は約 4.5cm × 1.5cm に制限、また、信号の読み出しは1本飛ばしに行った(すなわち 456 μm ピッチで読み出した)。各ストリップからの信号読み出しはASICを用いた自作インターフェースを介して、一般的なPC用AD変換ボードにて行った。また、読み出し回路を新たに開発することにより、装置の高速化を試みた。

(2) 実験セットアップ

陽子線ビームライン上に図1に示す様に各検出器を配置した(図1)。90度の角度で交差させたX方向用とY方向用のストリップ検出器の組を一組として、被写体の前方に2組、後方にも2組を配置し、被写体前後での粒子線の軌跡を正確に測定し、最後部に置かれたエネルギーカロリメーターにより粒子のエネルギーを測定する。これら粒子の軌跡とエネルギーの情報から粒子線透過像を得ることができる。

エネルギーカロリメーターとして、これまでNaIシンチレーターを用いていたが、高速化を図るため高速シンチレーターであるYAPシンチレーター(YAlO₃(Ce) perovskite)を用いる事とした。

ビーム実験は放射線医学総合研究所のがん治療装置HIMACを利用した。ビームエネルギーは160MeV、ビーム強度は約1000pps～1Mppsであった。

4. 研究成果

複数の異なる物質からなる被写体の電子密度分解能を調べるために、電子密度の似通った物質(アクリルとポリエチレン)を用いた実験を行った。アクリルとポリエチレンの厚さはどちらも10mmである。図3に上流側のX座標を横軸、陽子の残余エネルギーを縦軸とした相関図を示す。0<x<10mm付近が物質無し、10<x<22mm付近がポリエチレン、22<x<35mm付近がポリエチレンとアクリルを重ねた領域、35<x<40mm付近がアクリル10mmのみを配置した領域である。測定結果をポリエチレンの電子数で規格化して解析したところ、アクリルの電子数を0.2%の精度で再現することが出来、十分な密度分解能を持つことが分かった。

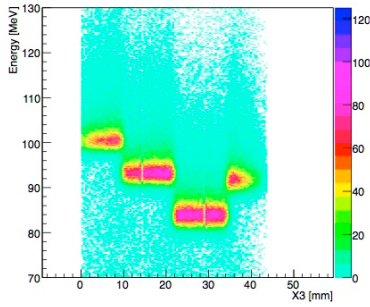


図3 アクリル10mm、ポリエチレン10mm 通過後の残余エネルギー

その他、水、骨、脳など異なる物質のイオン化ポテンシャルの違いの電子数密度導出に対する影響を見積もるために、モンテカルロシミュレーションを行った。同じイオン化ポテンシャルの値を用いても、電子数密度は1~2%程度以下の精度で再現できることが分かった。

次に、空間分解能の向上のために新たな画像構成の方法を試みた。すなわち、上流側下流側の軌跡を被写体のビーム軸方向の中間面まで外挿し、上流側軌跡の中間面との交点と下流側のそれとの中点を画像構成点とする方法である(図4(c))。この方法では空間分解能は(b)の場合よりも向上している。小さな被写体であるから可能な方法だと思われるが、分解能の向上が見られた。空間分解能を数値的に見るために、空気と被写体の境界を誤差関数で解析すると、境界部のぼやけの広がりを示すパラメータ σ は、aでは約1mm、bでは約0.45mm、cでは約0.33mmであった。

これまでの測定システムの問題点として、データ収集時間が200Hz程度と遅い点があげられる。原因は、各ストリップからの信号をマルチプレクサ回路で順次AD変換して読み出す、という読み出し方式にある。これを改めて、各ストリップの信号を平行に読み出す方式に変更し高速化した回路を試作した。読み出しのフロントエンド用LSIとしてBelle II実験のために開発されたASD(Amp-Shaper-Discriminator)チップを利用した。本研究で新たに開発した回路では、高速処理のために各ストリップからの信号はコンパレータによる弁別のみを行い、全ストリップからのデジタル信号を同時に(平行に)読み取り、FPGAを使ったインターフェースを介してPCに取り込んだ。

このチップ8個を用い、合計64stripの読み出しを行う検出器を作成し、HIMAC 2次ビーム照射室にてテスト実験を行った。ビームエネルギーは160MeVとし、ビーム強度は 4×10^3 ppsから 4×10^6 ppsまで変化させた。図5に 4×10^5 ppsでのy軸方向のビーム形状の測定結果を示す。ノイズと信号の分離が余り良くなく、ノイズによるオフセットが見られる。

このオフセット成分を除くとビームラインに常設されているプロファイルモニターによる測定とほぼ一致する(図5)。また、少なくとも400kHz程度の高レートのビーム強度下においても動作することが確認された。ノイズが多いことは今後改善を要する点である。

また、陽子線CTシステム全体の高速化のためにはカロリメーターの高速化も必須となる。そこで、高速なシンチレータであるYAPの特性測定実験を行った。YAPはシンチレーション光の減衰時間は30nsと高速であり、また耐放射線性能も良好なシンチレータである。陽子ビームの強度が低い場合(~3k/Spill)には、YAPのエネルギー分解能は良好であり、陽子線エネルギー80MeV以下で1~2%程度であった。しかしながら、ビーム強度を上げると陽子線のエネルギースペクトルのピークは著しく広がってしまう結果を得た。これは、光電子増倍管のブリー

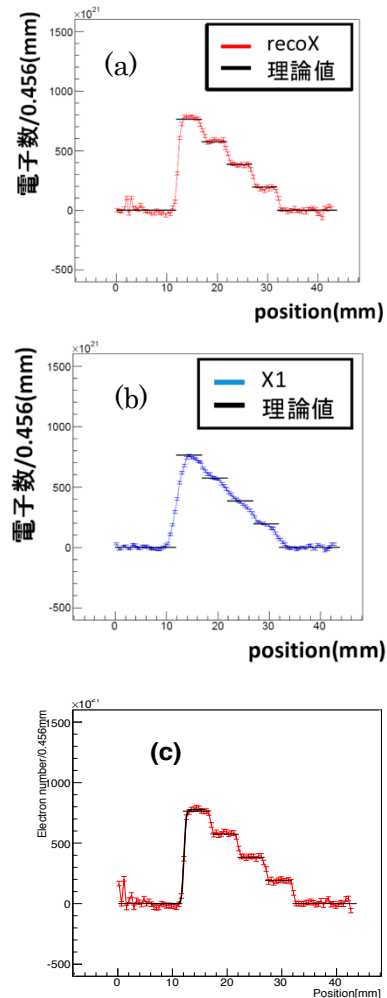


図4 1次元電子数分布。(a) 被写体前方の位置情報だけを用いた場合。(b) 前方、後方の交点を位置座標とした場合。(c) 上流側下流側軌跡を被写体中間面まで外挿し、中間面とそれぞれの交点の中点を位置座標とした場合。

ダー回路の最適化が不十分であったことと、また、陽子線のパイルアップによるものであると考えられる。

今回の研究では当初目標としていた断層像写真の撮像には至らなかったが、この研究で得られた知見を生かして、今後、断層写真の撮像に向けて更なる研究を継続する予定である。

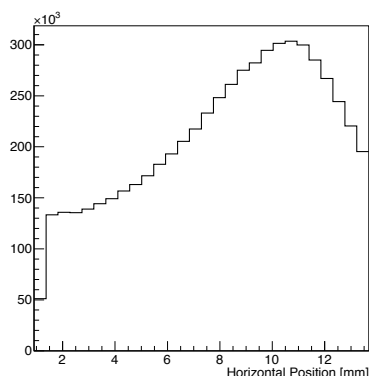


図5 高速検出器によるビームプロファイルの測定

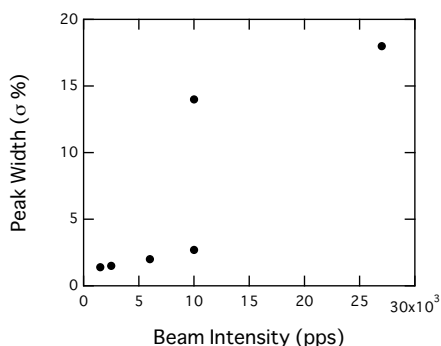


図6 YAPのピーク幅

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1件)

① “Study of spatial resolution of proton computed tomography using a silicon strip detector”, Y. Saraya, T. Izumikawa, J. Goto, T. Kawasaki and T. Kimura, Nucl. Instr. Meth. A, 735C (2014), 485-489.

〔学会発表〕(計 7件)

① 「粒子線 CT:測定器開発による医学と物理のシナジー」川崎健夫, 北里大学がんプロフェッショナル養成基盤推進プランセミナー「放射線科学の新展開」, 2015年9月30日

② 「プロトンCTシステムの開発研究」泉川卓司, 新潟大学医学物理合同研究セミナー, 2015年8月22日

③ “Study of a material density resolution at proton CT”. T. Kawasaki, T. Izumikawa,

J. Goto, Y. Saraya. IEEE Medical Imaging Conference, 2014/11/08-15, Washington State Convention Center, Seattle, USA 2014. 11.

④ 「粒子線 CT の空間分解能と電子密度測定の研究」川崎健夫 第2回熊本大学医工連携フォーラム・招待講演 2014年10月29日, 熊本大学.

⑤ “Study of Spatial resolution and Electron density Measurement for Proton Computed Tomography”, Y. Saraya, T. Izumikawa, T. Kawasaki, J. Goto 第108回日本医学物理学会学術大会 (The 7th Korea-Japan Joint Meeting on Medical Physics), 2014年9月25~27日, Bexco, Busan, Korea.

⑥ 「陽子線透過像撮影における電子密度の精密測定」, 泉川卓司, 川崎健夫, 皿谷有一, 後藤 淳 第75回応用物理学会秋季学術講演会, 2014年9月17~20日, 北海道大学.

⑦ 「粒子線 CT 実用化に向けた、高速シリコン位置測定器の開発」川崎健夫, 泉川卓司, 後藤 淳, 皿谷有一 第75回応用物理学会秋季学術講演会, 2014年9月17~20日, 北海道大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

泉川 卓司 (IZUMIKAWA TAKUJI)
新潟大学・研究推進機構・准教授
研究者番号：60282985

(2) 研究分担者

・川崎 健夫 (KAWASAKI TAKEO)
北里大学・理学部・教授
研究者番号：00323999

・後藤 淳 (GOTO JUN)
新潟大学・研究推進機構・助教
研究者番号：90370395