

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：13101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24654063

研究課題名(和文) 超高速デジタル型シリコン位置測定器の開発および粒子線CTへの応用

研究課題名(英文) Development of fast digital readout silicon tracker and application for particle tomography

研究代表者

川崎 健夫 (Kawasaki, Takeo)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：00323999

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：高エネルギー荷電粒子を用いた人体内部の撮像は、将来粒子線治療を高精度化・高効率化できる可能性を持つ。本研究では、高エネルギー加速器実験で開発された測定技術を活用して、粒子線撮像システムを構築した。また将来的に臨床診断での使用を目指して短時間で撮像を可能とするために、超高速の精密位置測定器を開発した。結果として、小型の物体に対して0.3mmの位置分解能と0.2%の精度での電子密度を測定することに成功した。同じく高エネルギー加速器実験で開発されたLSIを用いて、現在のシステムの速度(~200Hz)を飛躍的に向上させ、100kHz以上のレートでビーム形状を測定することに成功した。

研究成果の概要(英文)：The tomography application with high energy charged particle has possibility that cancer therapy become more accurate and more effective. This study aims to develop CT (computed tomography) system with the technology developed for accelerator experiment. It succeeded to show the resolution of 0.3 mm in spatial and 0.2 % in electron density measurement. We have also developed new system which has 1,000 times faster data taking rate in order to shorten the beam exposure time. We succeeded to measure the profile of high rate proton beam (> 100kHz).

研究分野：素粒子物理学実験

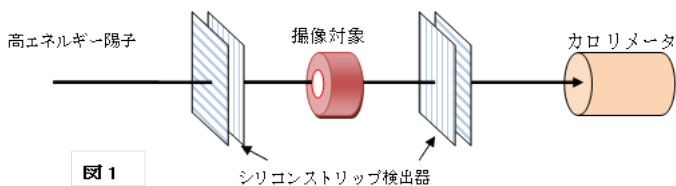
キーワード：陽子線CT シリコン検出器 高速位置測定器

1. 研究開始当初の背景

近年、粒子加速器を用いた腫瘍等の治療は、患部以外の正常細胞への影響を抑えられる治療法として目覚ましい効果をあげている。今後は、この高度な治療を一般化すると同時に、さらに高精度化して副作用を抑えることが求められる。そのためには、照射線量と照射位置のさらなる高精度化が望まれる。

現在、陽子線を照射する患部の位置測定には、一般的にX線CTが用いられることが多い。しかし、陽子とX線の物質に対する反応の違いから、照射線量の計算に5%程度の不定性があることが判っている。そこで、撮像そのものを陽子線が物質中で失うエネルギーの測定によって行うことにより、照射線量の計算が正確になる。これが陽子線CT (Proton Computed Tomography、以降pCTと略記)のアイデアである。

近年、我々の研究グループでは、素粒子実験で培われた高精度粒子測定技術を応用して、陽子線CTの原理検証の研究を進めてきた。このシステム(図1)は、実際に照射治療時にpCT撮像を行うためには、次の2つの点について性能が不十分である。現在のシステムは50ヘルツ程度でのデータ収集が可能であるが、非常に単純な形状の撮像でも1時間以上の測定が必要である(撮像時間の問題)。また、治療用陽子線は、加速器の運転が不安定になるため、極端に強度を下げるのが困難である。しかし不必要に高い強度のビームを用いると、データ収集速度が追いつかないため、得られる情報の割に無駄な被曝量が増えてしまうことになる(被曝線量の問題)。



我々のシミュレーションの結果によれば、実際に患者を対象として現実的な撮像時間(数分以内)でpCTによる画像を得るためには、現有の通常の素粒子実験用のシステムの1000倍以上のデータ収集速度が必要であることが判った。これは現在のシステムの改良・延長で達成することは困難である。

2. 研究の目的

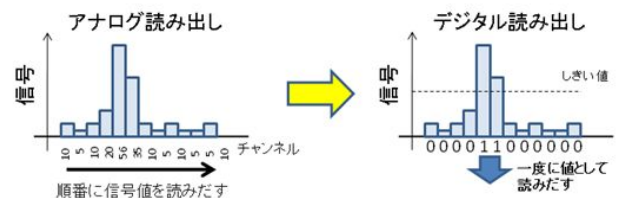
本研究の目的は、多数の信号を一括してデジタル値として読み出すことにより、速度を $10^3 \sim 10^4$ 倍に改善し、1分程度でpCT撮像を行うことを目的とした高速位置測定システムを構築することである。そのため、小規模な検出器システムを試作し、ファントム(疑

似人体)を対象として、実際に陽子線CT撮像を行って原理の検証を行う。

3. 研究の方法

これまでに開発したシリコン位置測定システムよりも $10^3 \sim 10^4$ 倍高速かつ、同程度($\sim 0.5\text{mm}$)の位置分解能を有するシステムを開発する。

これまでに開発したシリコン位置測定器は、素粒子実験で開発された測定回路を応用したため、独自に設計を行わなければならない部分は比較的少なかった。しかし、位置分解能が非常に良い(10ミクロン)半面、大電流・超高頻度である治療用陽子線の測定には、データ収集速度($\sim 100\text{Hz}$)が不足している。現在のシステムは、位置精度を上げるためアナログ読み出しを行っている。これをデジタル読み出しにすることにより、飛躍的に速度があげられる(下図)。位置精度は低下するが、そもそもストリップ間隔が200ミクロン程度の検出器を用いるため全く問題ない(pCTでは0.5mm程度の位置分解能で十分である)。



まず、このようなユニット測定器を開発する。本研究では読み出すストリップを32本程度にとどめ、しきい値を設定する回路部分は、通常のパッケージICを組み合わせることによって、独自に作成する。デジタル信号を処理するために、内部に高度なデジタル回路を組み込むことができるCPLD(Complex Programmable Logic Device)を設置して、高速データ処理を行う。基板の設計・製作と、CPLDの内部ロジックを設計する。

これらのデジタル読み出し部は検出器とほぼ一体化したものであるが、治療用陽子線ビームは高強度であり、電子回路は容易に破壊され得る。そのため、製作する基板のサイズを大きくし、ICとCPLDを含む回路部分を、ビームが照射される検出器から離すように設計する。

製作したユニット測定器は、陽子ビームを照射して、高レートでの動作を確認する。また、複数の測定器(最低2器)を用いて小型のファントム(疑似人体)のpCT撮像を行う。実験場所は、放射線医学総合研究所のビームラインを共同利用として用いる。測定では、陽子の軌跡の再構成による多重散乱の補正方法や、測定データ量とpCT画像のクオリティの関係について詳細に研究する。たとえば、画像のシャープさ(位置分解能)、コントラスト(物質分解能)は、ユニット検出

器の性能だけでなく、取得されたデータの量（陽子の数）に強く依存する。撮像のために必要な測定時間や予想される被曝量は重要な値である。

4. 研究成果

1000 倍以上高速化した新しい位置測定器の開発と、比較的低速ではあるが高い位置分解能を持つ既存のシステムによる粒子線 CT 撮像性能に関する研究を並行して進めた。

(1)当初の研究計画に沿って、システムを構成する各コンポーネント検出器の開発を行った。

シリコンストリップ検出器(SSD)は、現在のシステムで使用している衛星実験用センサー(浜松ホトニクス社製)を利用した。医療診断に必要な0.5mm程度のストリップ間隔と高い放射線耐性を持っているためである。検出器からの信号にしきい値をかけてデジタル信号にするためには、10mV/fC以上の高いゲインと、20チャンネル/cm以上の高密度な集積を両立される必要があるが、このような仕様を満たすものは入手が困難である。そのため、加速器実験(Belle-II)で開発された Amplifier-Shaper-Discriminator チップを採用した。これは、1mV/fC程度のゲインを持つが、デジタル変換部にはさらに15倍のゲインがあり、また使用する160MeV程度の陽子の場合、信号値が20-30fC程度になるため、仕様が可能であると考えたためである。このチップを用いて、SSDの32チャンネルを読み出す回路を製作した。

最下流でのエネルギー測定に用いるカロリメータは、既存のNaIカウンターを使用した。これは、シンチレーション光の減衰時間が比較的長いこと、使用するPMTの出力電流に限度があることから、数百kHz程度までのレート耐性しかない。また、信号波形をすべて積分するADCを用いると、データ変換完了までに時間がかかり、さらに速度が低下する。

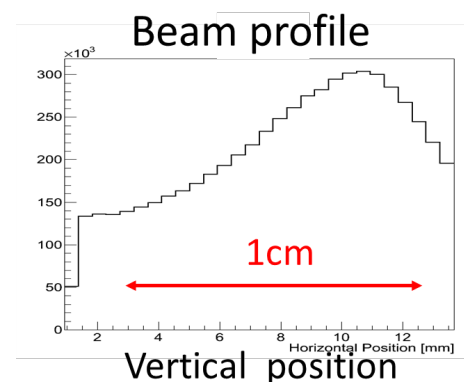
まず、PMTの電圧を下げ、出力電流を低く保って使用することとした。読み出しは、積分時間の短いシェイパーにより、電荷電圧変換を行い、その電圧値をフラッシュ型ADCで読み取る方法を導入して、データ収集速度を改善した。

(2)製作したアンプボードからの64ビットデジタル信号を、FPGAに入力し内部で処理するためのロジックを開発した。データ収集を高速で行うために、計算機のPCI-eバスに直接取り付けられるタイプのFPGAボードを使用した。

内部ロジックは、ヒットしているチャンネルは`1`、それ以外は`0`としていったん保存し、その後ヒットしたチャンネルのアドレス(チャンネル番号)のみを最終メモリに書き込む方式とした。このロジックによりデータサイズが格段に小さくなる。

FPGAボード上で利用できる50MHzのクロックを用いて、1MHzまでのレートで事象を処理することができた。このシステムでは32チャンネルしか読み出していないが、将来的にチャンネルが増えた場合は、処理を並列化することにより速度を改善することができるように内部ロジックを設計した。

(3)製作したシステムにより、放射線医学総合研究所との共同研究として、HIMAC加速器・SB2ビームラインにおいて、4回のビームテストを行った。使用したのは、160MeVの陽子ビームであり、ビーム強度は4kから4Mpps(proton per spill)で行った。下記は、400kppsで取得した、陽子ビームの鉛直方向のプロファイルであり、直上流のビームモニター(電離箱)で測定されたものと矛盾せず、高いレートの陽子線ビームに対して、測定器が動作していることを示す。この結果は、医療画像に関する国際会議において発表された。

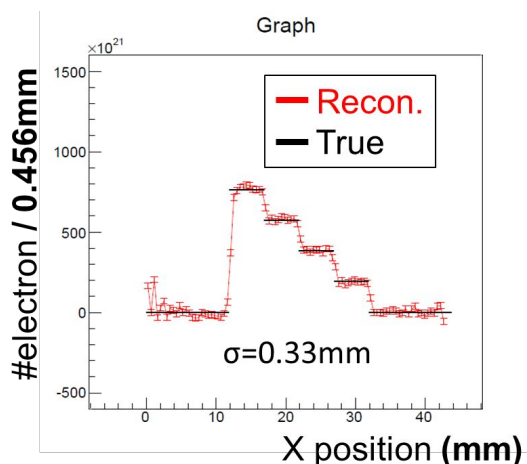


ただ、測定器の陽子に対する検出効率が不明であり、この点においては測定器の性能を十分に評価できるとは言えない。今後は、トリガーカウンターのサイズの調整や、複数のSSDを配置することにより、検出効率を確保することが必要である。

(4)既存の粒子線CTシステムで、小型のポリエチレンファントム(階段状)の撮像を行った。システムが比較的低速なため、撮像のために陽子ビームを9時間照射した。下図は再構成された透過画像(赤線)であり、真値(黒線)とよく一致している。

現在のシステムでは、撮像時間は長くなってしまいが、電子密度を精度よく測定できることが確認できた。また、陽子の飛跡を再構成する手法により、0.33mmという高い位置分解能が得られることも確認した。新しい高速位置測定器では、デジタル型読み出しを行うため、位置分解能が低下する可能性がある。そのため、現有システムのデータを“デジタル型”で読み出されたと考えて処理し、仮想的に性能評価を行ったが、医療診断に必要な位置分解能が実現できることが確認できたことになる。この結果は粒子線・放射線測定

器に関する学術雑誌に掲載された。



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 1 件)

Y.Saraya, T.Izumikawa, J. Goto,
T.Kawasaki and T.Kimura,

Study of spatial resolution of proton
computed tomography using a silicon strip
detector、

Nuclear Instruments and Method、査読有、
A735, 2013, 485-489

〔学会発表〕(計 7 件)

T.Kawasaki, High rate silicon tracker
for proton computed tomography, IEEE
Medical Imaging Conference, 2014 年 11 月
13 日、シアトル(米国)

T.Saraya, Study of spatial resolution
and electron density measurement for
proton computed tomography, The 7th
KOREA-JAPAN Joint Meeting on Medical
Physics, 2014 年 9 月 27 日、釜山(韓国)

川崎健夫、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、第 75 回応用
物理学会秋季学術講演会、2014 年 9 月 18 日、
北海道大学(札幌市)

泉川卓司、陽子線透過像撮影における電子
密度の精密測定、第 75 回応用物理学会秋季
学術講演会、2014 年 9 月 18 日、北海道大学
(札幌市)

皿谷有一、陽子線 CT における空間分解能
改善手法の開発、応用物理学会学術講演会、
2013 年 3 月 27 日、神奈川工科大学(神奈川
県)

皿谷有一、シリコンマイクロストリップ検

出器を使用した陽子線断層撮影システムの
開発、日本物理学会新潟支部会、2012 年 12
月 8 日、日本歯科大学(新潟市)

皿谷有一、Development of proton computed
tomography system using silicon micro
strip detector, 第 8 回国際放射線モニタリ
ングに係る国際ワークショップ、2012 年 12
月 2 日、大洗パークホテル(茨城県)

〔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〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川崎 健夫 (KAWASAKI, Takeo)
新潟大学・自然科学系・准教授
研究者番号：00323999

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

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

後藤 淳 (GOTO, Jun)

新潟大学・研究推進機構・助教
研究者番号：90370395

(4) 研究協力者

皿谷 有一 (SARAYA, Yuichi)
新潟大学・大学院自然科学研究科・博士後
期課程大学院生