

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：13301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H07266

研究課題名(和文) 低被ばく多色X線CTシステムへ向けた基盤技術の確立

研究課題名(英文) Establishment of core technology for low-dose and multi-color X-ray CT system

研究代表者

有元 誠 (Arimoto, Makoto)

金沢大学・数物科学系・助教

研究者番号：40467014

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：X線CTは、現代医療を支える根幹技術でありながら、その放射線被ばくが大きな課題となっている。本研究では、従来用いられていたX線CTのX線センサー部であるフォトダイオードに代わり、新たにマルチピクセルフォトンカウンター(MPPC)を用いたX線CTのシステムを開発を行い、 $\sim 1/100$ の低被ばく化の可能性を示すことに成功した。また多色イメージングの成功に加え、多系統MPPCアレイシステムの構築に成功し、次世代MPPC式X線CTに向けた基盤技術の構築を行うことができた。

研究成果の概要(英文)：X-ray CT is a basic technology to support the modern healthcare, but a large radiation dose by X-ray CT is a serious issue. To overcome the difficulty, we newly developed an X-ray CT system using multi-pixel photon counters (MPPCs), instead of photodiodes which have been used for conventional X-ray CT. We found that the MPPC CT system can drastically reduce the radiation dose by a factor of ~ 100 compared with the conventional X-ray CT, thereby indicating great potential for low-dose CT imaging. Furthermore, we demonstrated the multi-color X-ray CT imaging and successfully developed a multi-channel MPPC array system. These results show that we succeeded in establishment of the core technology for future low-dose and multi-color X-ray CT using MPPCs.

研究分野：放射線検出器

キーワード：X線CT MPPC LSI 多色 低被ばく

1. 研究開始当初の背景

【X線CTによる被ばくとアーチファクト】

放射線によるイメージングでは、PET やコンプトンカメラなど多数の手法があるが、体内の病変を精度よく位置同定を行える実現可能な技術としては、X線CTが3次元かつ高解像度(0.2mm)を実現できる。加えて、幅広く医療診断に用いられているため、現代医療を支える上で根幹の技術である。ただ一方で、現在のX線CTでは、一度のX線CTイメージングにより、その被ばく量が数m~数10mSvと大変高く、さらに病変の経過観察や治療のために複数回の実施が多い。そのため、治療目的で行ったX線CTによる被ばくが間接的に人体に及ぼす影響も無視できず、高頻度でのX線CTを用いた診断・治療は限られていた。特に小児や妊婦といった放射線被ばくリスクの高い人々には、X線CTの受診が制限されるなど、大きな課題となっている。

この高い被ばく量の理由として、X線CTシステムの基礎となるセンサーは信号の内部増幅機能を持たないフォトダイオードが用いられていることが挙げられる。フォトダイオードは、センサー固有のノイズ(暗電流)に比べて、X線の信号強度が微弱となる。そのため、本来のX線を有意に検出するためには、高線量のX線照射が必要となる。加えて、X線光子の個々の信号を分離することが出来ず、それらが積分された電流値として画像を取得している。このため、X線のエネルギー情報が失われており、物質の正確な同定ができないという問題が生じていた。特に密度の高い骨の場合、入射したX線が骨に吸収されやすいために、骨同士に囲まれた領域でビームハードニングと呼ばれるアーチファクトが生じており、正確な診断を妨げていた(図1)。

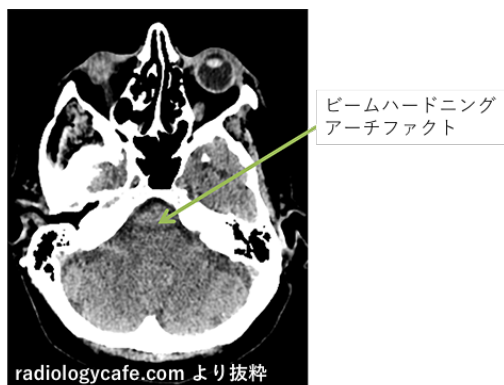


図1：ビームハードニングアーチファクトの例。密度の高い物質間で影が生じる。

2. 研究の目的

そこで本研究は従来のフォトダイオードに代わり、高い内部増幅機能を持つ次世代半導体素子マルチピセクルフォトンカウンター(MPPC)を採用することで、高いS/N比で個々のX線を検出し、劇的な低被ばく

化と多色化を両立したMPPC式X線CTのプロトタイプの開発を目指す。特に、実践的なCTシステムを実現するにあたり、X線CTセンサーの多チャンネル化が必須となる。それに加え、高いX線照射レート(数MHz/mm²)に備えるために、高速での信号処理も求められる。そこで双方を実現するエレクトロニクス開発を目標とする。

3. 研究の方法

①単素子ベースの実証試験

単素子MPPCを用いた場合でのX線CTイメージングの性能評価を徹底的に行い、本研究で提案する方式により、低被ばく化と多色化をどの程度まで実現できるかを見極める。これにより、本研究が目標とする多系統信号処理エレクトロニクスに対し、必要または改善すべき機能を洗い出し、実装すべき機能を全て列挙することが可能となる。

②超高速多チャンネル処理への挑戦

高速信号処理大規模集積回路(Large-Scale Integrated circuit: LSI)の開発を行い、大面積でのセンサーアレーの構築および、X線CTイメージの取得を目指す。ここでは、SpiceシミュレーションをベースにLSI回路設計を進めて行く。その後シミュレーション上での検証を重ねた上で、製作とその性能評価を実施し、超高速での多チャンネルのMPPC信号処理を実現する。

4. 研究成果

①MPPC単素子での実証実験を行い、低被ばく化の検証を行なった。ここでは、フォトダイオード(PD)、アヴァランシェフォトダイオード(APD)、MPPCの3種で比較を行い、線減弱係数の近い水とアルコールを用いた。その結果、従来のPDに比べ、MPPCが圧倒的に高いコントラストを達成することを見出した(図2)。

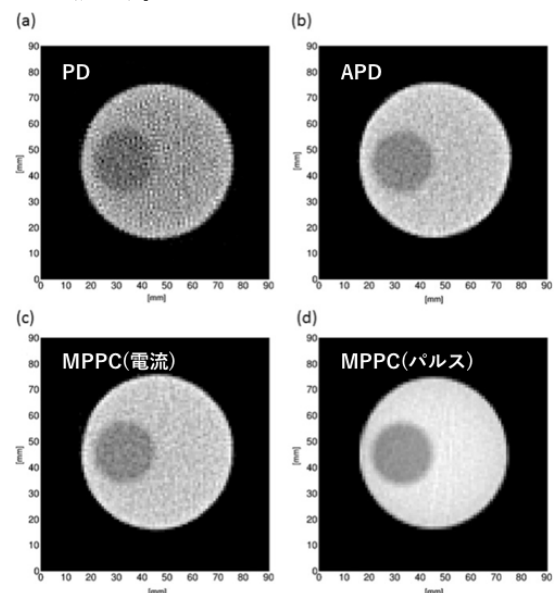


図2：水の中にアルコールを配置し、PD、APD、MPPC(電流モードおよびパルスモード)で比較

さらに、MPPC では信号を積分した電流モードおよび個別のパルスを検出するパルスモードの双方で比較を行った。コントラストを、コントラスト対ノイズ比 (CNR) という指標で定量化した結果を図3に示す。この結果から明らかなようにパルスモードでのMPPCが最も良好なCNRを示していることがわかる。また従来CTの性能を代表するフォトダイオード(PD)とMPPCを比較したところ、MPPC方式では、PDでのX線照射量のおよそ1/100倍で、PD方式と等価なコントラストが得られることがわかった。これは従来のX線CTに対し、光子カウンティングCTでは圧倒的に高い低被ばく効果を示す重要な結果である(Morita et al. 2017)。

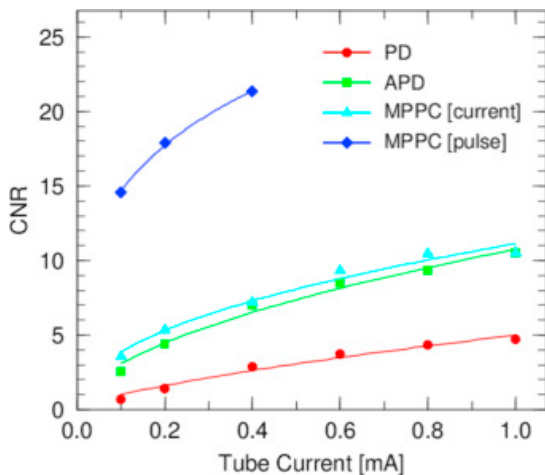


図3: PD、APD、MPPC (パルスモードと電流モード)での管電流値に対するCNR値。MPPC (パルスモード)が最も高い値を示す。

また多色イメージングの性能を示す実験を実施した(図4)。Alのような大きな密度を持つ間隙において、低エネルギー側のイメージではビームハードニング効果を大きく受けた影が見ることができ、一方で、高エネルギーのX線を用いて、同様のイメージを行ったところ、ビームハードニング効果を大きく抑えることができている。

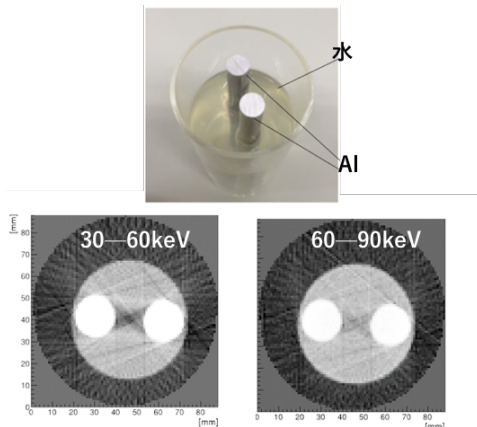


図4: Al柱を用いたビームハードニング効果の実験。高エネルギーX線を用いることで、アーチファクトを低減

MPPC方式のCTイメージングの有用性を検証することができた(Morita et al. 2017)

これらの実験で得られた知見をもとに、高速信号処理を実現するLSI開発を行った(Arimoto et al. 2018)。実際に開発したLSIボードを図5に示す。

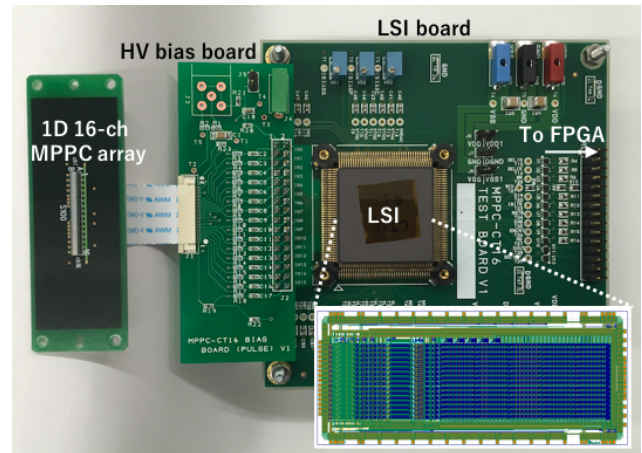


図5: 本研究で開発したMPPC方式CT用のLSIボード。16系統を有し、アナログ・デジタル処理機能を有する

このプロトタイプLSIボードを用いて、テストパルスを用いた高速応答を検証した結果を図6に示す。電荷注入に対して数10ns程度の高速応答性能を確認した。この結果、数MHz以上の高レートでのX線信号に対して十分なアナログ処理を有しており、設計時の性能を発揮していることがわかった。またデジタル信号処理も正確に行われていることを確認し、>25 MHz/pixelの高速信号に対して、アナログデジタル変換が行われていることを確認した。

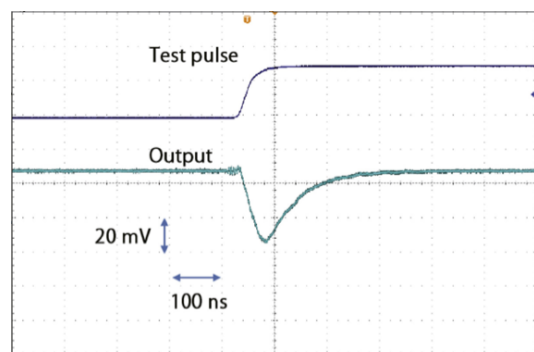


図6: テストパルスによる電荷注入に対し、高速なアナログ信号応答を実現している

アナログ波形の時間応答に加え、波高値がエネルギー情報として、重要な情報を持つ。これに関しては、注入した電荷量と出力された波高値の関係を調べ(図7)、X線CTで想定している信号ダイナミックレンジの中で、良好な線型性を示していることを確認した。またチャンネル間のばらつきが少ないという点も特筆すべき点である。

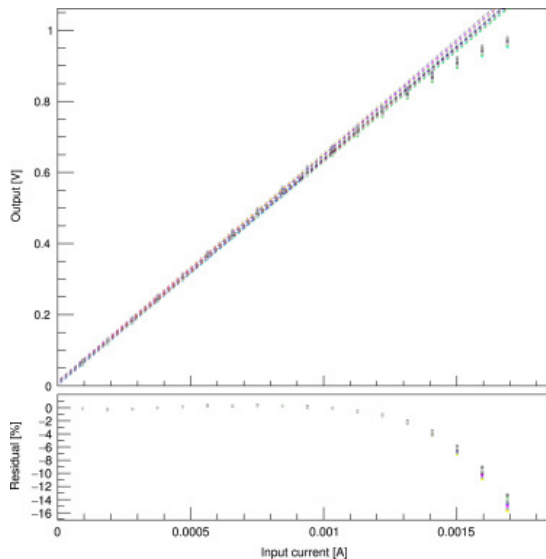


図 7: 16 系統 LSI での単位時間あたりの入力電荷に対する電圧信号出力

LSI の単体での性能に加え、X 線を検出する際にシンチレータと組み合わせた性能が非常に重要となる。特に、本研究では多色イメージングを目標とするため、入射したエネルギー情報を得る必要がある。図 8 に示すように、1 次元 16 系統 MPPC アレー (ピクセルサイズ $1 \times 1 \text{ mm}^2$) に対し、YGAG シンチレータアレーを製作し、それらを組み合わせてエネルギー分解能の特性を調べた。

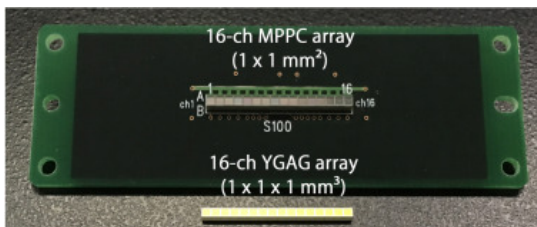


図 8: 1 次元 16 系統 MPPC アレーと YGAG シンチレータアレー

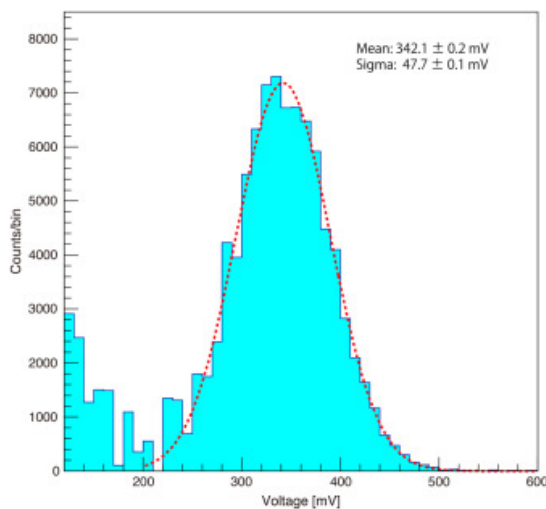


図 9: 本研究で開発した CT アレーを用いて測定した ^{241}Am (60 keV) の X 線スペクトル

そのスペクトルを図 9 に示す。得られたエネルギー分解能は、32% (FWHM, 60 keV) であり、本研究が目標とする多色性能を満足する結果を得ることができた。またエネルギー分解能のチャンネル依存性も 1% 以内と極めて良好な結果を得ることができた。

実践的な X 線 CT イメージングを行う上で、センサーの大有効面積化は必須であり本研究で開発した MPPC 式 X 線 CT アレーがその大きな一助となる。そこで大サイズのファントムを用いて、3 次元 CT イメージを取得した (図 10)。イメージから明らかなようにファントムの詳細構造を 1 mm 程度の精度で分解した画像を得ることに成功した。

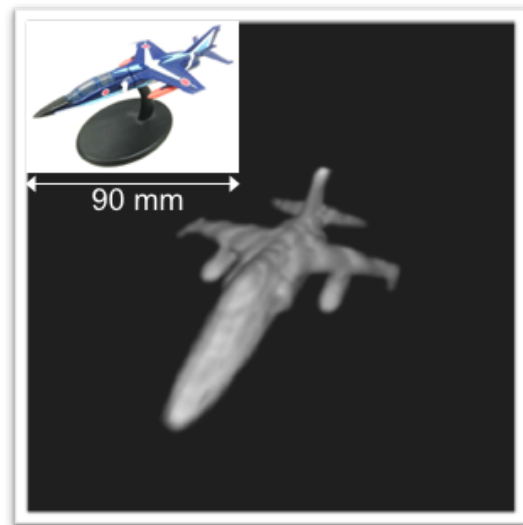


図 10: 16 系統 MPPC 式 CT アレーで撮影した 3 次元 CT イメージ

今後は人体を模したファントムや造影剤を用いたイメージング実験を進めていく予定である。特に重要なのが、線減弱係数のエネルギー依存性を利用した物質同定である。血管のような微細な構造を鮮鋭にイメージングするために、X 線 CT ではヨウ素やガドリニウムを用いた造影剤を体内に注入する方法がとられている。そこで、造影剤のみをイメージとして得ることができれば、血管の構造のみを抽出することが可能となる。本研究で開発したセンサーを用いて、この物質同定のイメージングに挑戦していく。

また本研究の知見を生かし、陽子線 CT の開発も行った。ここで陽子線 CT は、がんの放射線治療を正確に行う上で必須の技術である。本研究では、シンチレータシートと CCD を組み合わせた簡便なセットアップでありながら、 $\sim 2 \text{ mm}$ の空間分解能を達成することができ、軟部組織を模したアルコールや水などの物質同定にも成功した (Takabe et al. 2018: 図 11)。特に陽子線を用いる場合、X 線と大きく異なり、物質内での散乱が大きく寄与する。そのため、得られた画像に著しくボケが生じてしまうが、独自の散乱補正技術を開発することで、精細な画像を得ることに成功した。

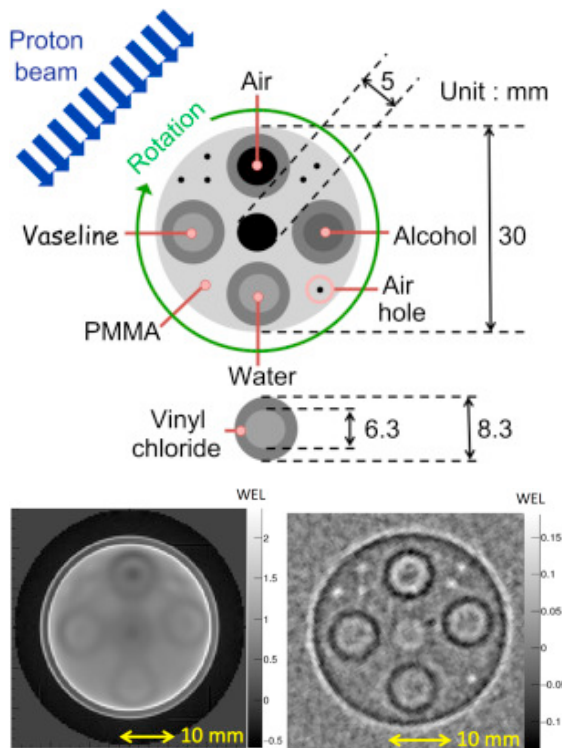


図 11: (上)陽子線 CT に用いたファントム、(左下)補正前の陽子線 CT 画像、(右下)散乱補正後の陽子線 CT 画像

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 4 件)

① 有元誠、片岡淳、"増幅型光センサーMPPCを用いた低被ばく・多色 CT への挑戦"、Isotope News、Vol. 755、pp. 25-29

② M. Arimoto, H. Morita, K. Fujieda, T. Maruhashi, J. Kataoka, H. Nitta, H. Ikeda, "Development of LSI for a new kind of photon-counting computed tomography using multipixel photon counters", NIM-A (出版中)

doi.org/10.1016/j.nima.2017.11.031

③ M. Takabe, T. Masuda, M. Arimoto, J. Kataoka et al., "Development of simple proton CT system with novel correction methods of proton scattering", NIM-A (出版中)

doi.org/10.1016/j.nima.2018.05.034

④ H. Morita, T. Oshima, J. Kataoka, M. Arimoto, H. Nitta, "Novel photon-counting low-dose computed tomography using a multi-pixel photon counter", NIM-A, Vol. 857, pp. 58-65 (2017)

doi.org/10.1016/j.nima.2017.02.015

[学会発表] (計 7 件)

① 丸橋拓也、片岡淳、有元誠、森田隼人、藤枝和也、新田英雄、"マルチチャンネルMPPCを用いた低被ばくかつ多色 X 線 CT の構築と評価", 2018 年応用物理学会春季学術講演会、早稲田大学(2018 年 3 月)

② M. Arimoto, H. Morita et al., "Design and Development of LSI for new photon-counting computed tomography with multi-pixel photon counters", 2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Atlanta, USA (Oct. 2017)

③ H. Morita, J. Kataoka, M. Arimoto et al., "Novel photon-counting low-dose computed tomography using a multi-pixel photon counter", 2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Atlanta, USA (Oct. 2017)

④ M. Arimoto, H. Morita et al., "Development of an LSI for a new kind of photon-counting computed tomography with multi-pixel photon counters", New Developments In Photodetection 2017, Tours, France (Jul. 2017)

⑤ H. Morita, T. Oshima, J. Kataoka, M. Arimoto et al., "Novel photon-counting low-dose computed tomography using a multi-pixel photon counter", New Developments In Photodetection 2017, Tours, France (Jul. 2017)

⑥ 大島翼、森田隼人、片岡淳、有元誠、新田英雄、"MPPCを用いた革新的スペクトラル CT の開発 -低被ばくかつ多色化の実証-", 2017 年応用物理学会春季学術講演会、パシフィコ横浜(2017 年 3 月)

⑦ 有元誠、森田隼人、大島翼、片岡淳、新田英雄、池田博一、"MPPCを用いた革新的スペクトラル CT の開発 -多系統 MPPC 用 LSI の開発-", 2017 年応用物理学会春季学術講演会、パシフィコ横浜(2017 年 3 月)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

有元 誠 (ARIMOTO, Makoto)

金沢大学・理工研究域・数物科学系・助教
研究者番号： 40467014