

MPPC を用いた低被曝かつ三次元カラーX線 CT システムの開発

早稲田大学大学院 先進理工学研究科 物理学及应用物理学専攻
修士2年 森田 隼人

本論文の概要

本論文では半導体光増幅素子 MPPC を用いた革新的フォトンカウンティング CT システム (PC-CT) を考案し、その開発と実証試験を行った。これにより、従来型 CT で問題とされてきた医療被ばくを $\sim 1/100$ まで低減し、かつエネルギー情報を用いた多色イメージングが可能であることを示した。さらに、実際の臨床応用を見据え、多系統の高速信号処理を可能とする PC-CT 専用アナログ LSI を独自に設計し、世界初となる MPPC ベースのアレイ型 CT システムの開発を行った。本論文では実際に被写体の「三次元」かつ「カラーイメージング」に成功し、その有用性が検証できた。またこの MPPC による PC-CT システムは、既存の CT 装置に最小限の変更を加えるだけで実現可能なため、臨床応用の面からも非常に優れており、本論文が医療業界にもたらす影響は極めて大きいといえる。

X線 CT (Computed tomography) は、医療画像診断の一種で人体を切開することなく内部の状態を観察することが出来る装置である。X線 CT は現代医療の根幹をなす重要技術であり、急性疾患などの緊急時のみならず、患者の経過観察としても頻繁に利用されている。しかし、鮮明な CT 画像を取得するためには 10^8 cts/s/mm² もの膨大な X 線を人体に当てる必要があり、その被ばく量は一回の撮影で 10mSv にも及ぶ。そのため妊婦や小児には使用が強く制限されており、X線 CT の低被ばく化は現在の CT 業界において最重要な課題であるといえる。更に、このような高線量下では個々の X 線パルスがパイルアップし、エネルギー情報が失われてしまう。その結果、得られる CT 画像は白黒 (モノクロ) となり、X線吸収係数が近い物質は識別できず、正確な物質弁別が困難となる。そこで近年、これらの問題を打開する方法として、フォトンカウンティング CT (PC-CT) と呼ばれる技術が注目を浴びており、世界的に CdTe や CZT などの半導体検出器を中心に精力的な研究が進められている。しかしながら、これらの半導体検出器は増幅機能をもたないこと、またキャリアの移動が遅いことに加え、コストや技術面でも多くの課題を抱え実現に至っていない。

そこで我々は、「そもそもなぜ高線量もの X 線照射が必要か?」という疑問を持ち、それが検出器の S/N の低さに原因があると考えた。従来型 X 線 CT はシンチレータ (Gd_2O_2S) とフォトダイオード (PD) で構成されており、生じた電荷を一定時間蓄積した後、電流で信号を読み出している。PD の暗電流値は ~ 10 pA/mm² にも及ぶため、ノイズに打ち勝つ信号電流を得るには十分な照射線量が不可避となる。それならば、素子内部に増幅機能を有し PD に比べ S/N が格段に高い光センサーに変えれば、照射線量を抑えながらも鮮明な画像が取得可能となる CT システムが構築できるのではないかと考えた。本論文ではその作業仮説に則り、Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) と高速シンチレータを用いた「低被ばく」かつ「多色」撮影が可能新たな PC-CT システムを提案し、上記作業仮説の実証実験を行った。MPPC は数 100 万倍といった大きな内部増幅機能を有する半導体光素子で、微弱信号への感

度が極めて高い。この大きな内部増幅により従来型 CT より遥かに低い線量で同等以上の S/N を実現し、一方ではその高いフォトンカウンティング性能からエネルギー情報の取得が可能になると期待できる。

● **MPPC 単素子での実証実験：低被ばく化**

MPPC の内部増幅がもたらす画像 S/N の改善を調べるため、1mm 角の単素子光センサーとシンチレータを用いて CT 実験を行い、従来型 CT の光センサーである PD と内部増幅のあるアバランシェフォトダイオード (APD) で取得した CT 画像と比較した。MPPC では従来型 CT と同じ読み出し方法である電流値を信号とする電流モードと信号をパルスとして読み出すパルスモードの二つを行った。パルスモードでは高計数率に耐えるため、シンチレータには時定数の短い Ce:YAP を用いた。PD, APD, MPPC [電流モード] では、臨床でよく使用される GOS シンチレータを用いている。

被写体に水とアルコールが入ったアクリル容器を用いて CT 撮影を行った。照射 X 線の管電圧を 120kV、管電流値を 0.2mA とした時に得られた CT 画像結果を図 1 に示す。

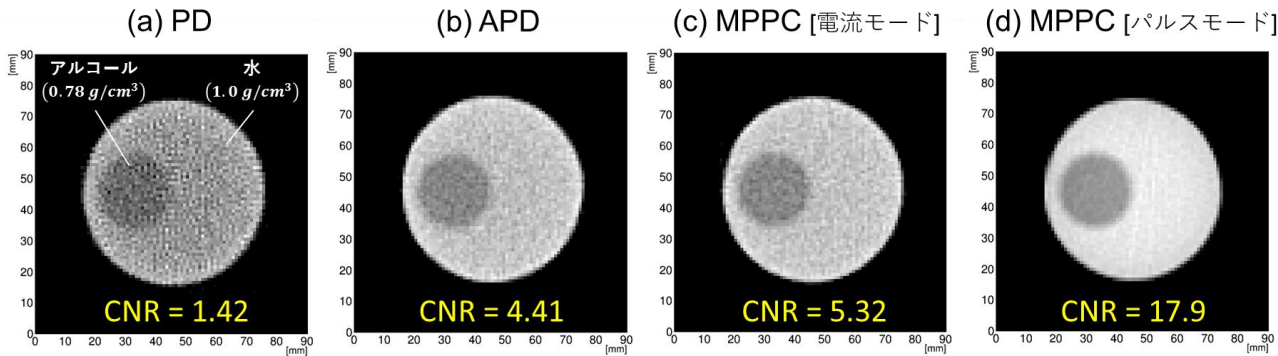


図 1. 各検出器で取得した CT 画像

APD, MPPC では PD に比べ高い CNR (Contrast Noise Ratio) を有する画像の取得に成功した。これは素子の内部増幅により暗電流 (ノイズ) が著しく低減されるためである。ここで用いた CNR は CT 画像において低コントラスト分解能の定量値として使用される値であり、以下の式から算出できる。

$$CNR = \frac{\mu_{alcohol} - \mu_{water}}{\sigma_{water}}$$

ここで、 $\mu_{alcohol}$, μ_{water} は CT 画像上の各減弱係数の平均値、 σ_{water} は水の減弱係数の標準偏差である。改めて、各 CT 画像の CNR を比較すると、MPPC [パルスモード] では PD で取得した画像に比べ、10 倍以上もの高い CNR の取得に成功した。これは前述した素子の内部増幅機能の影響に加えて、信号をパルスで読み出すことで設定したエネルギー閾値以下のノイズをカットすることが出来るためである。一般的に CT 画像上の画素のバラつき σ は照射線量の二乗に比例する。つまり CNR は上式より、線量の二乗に反比例するため、この結果は MPPC を用いることで従来型 CT の PD に比べて、線量を ~1/100 程度まで低減できる可能性を示唆している。

● **MPPC 単素子での実証実験：多色イメージング**

更に MPPC は信号をパルスで読み出すことで、X 線パルス一つ一つのエネルギー情報を取得することが出来る。その結果、様々なエネルギー域で CT 画像の取得が可能となり、エネルギー情報を用いた多色イメージングが期待できる。本論文では、その実証実験として「画像コントラストの向上、アーチ

ファクトの低減、K-edge イメージング、物質同定」など様々なイメージングに試み、その有用性について確認することが出来た。その一つとして、低エネルギー情報を用いた画像コントラストの向上結果について以下に示す。

一般的に低エネルギー側では X 線の減弱度が大きく、物質同士の差が拡大する。つまり、この低エネルギー域のみを用いて画像再構成することで、より鮮明に物質を弁別することが出来る。検証実験として管電圧を 120kV、閾値を 20,40,60,80keV と設定し画像を取得した。図 2 に低エネルギー域 (20-40keV) のみで取得した画像と、比較対象として全エネルギーから取得した画像の二つを示す。

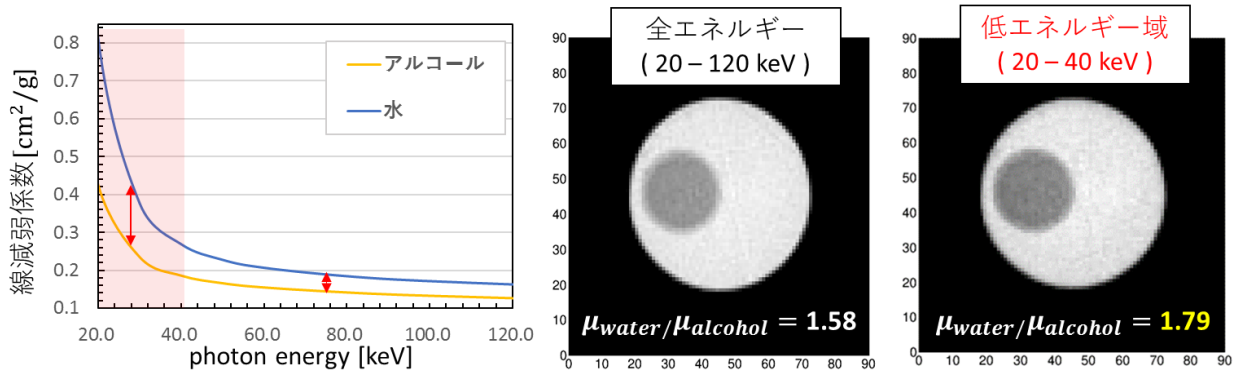


図 2. 低エネルギー域を用いた画像コントラストの向上

全てのエネルギー域を用いた従来型の CT 画像と比べると、低エネルギー域のみを用いた右側の画像の方がよりアルコール部分が黒くなり、コントラストが 13%向上していることが分かる。このようなイメージングは低エネルギー側でしか減弱係数差がない軟部組織の弁別に大変有効である。

● LSI を用いた多チャンネル PC-CT システムの開発

臨床応用を見据えた次のステップとして、16 系統の高速信号処理を可能とする PC-CT 専用アナログ LSI を独自に設計し、世界初となる MPPC ベースのアレイ型 CT システムの開発を行った。図 3 に 16ch の検出器アレイと設計した PC-CT 専用高速アナログ LSI の外形及び内部処理の概要を示す。

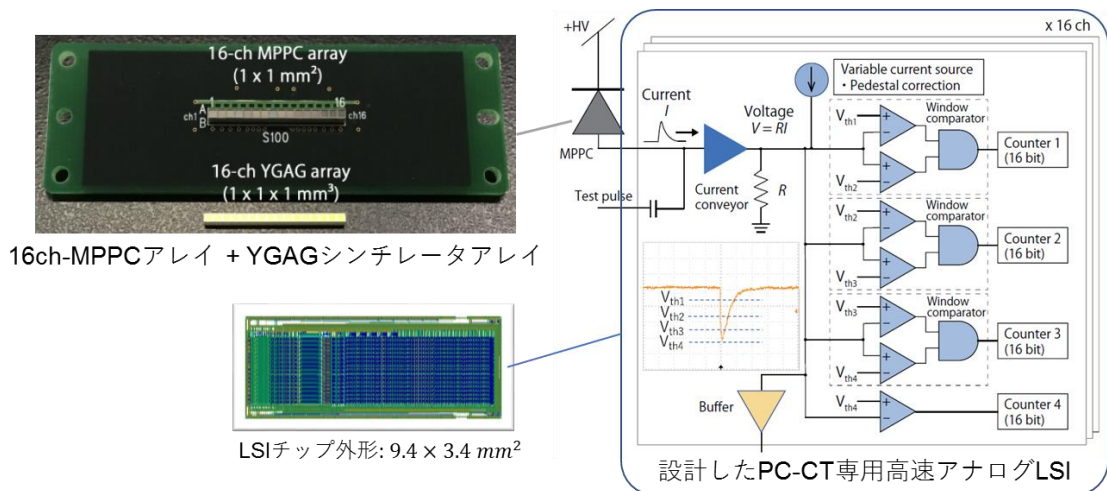


図 3. 開発した 16 系統 PC-CT システム (16ch 検出器アレイ + 高速アナログ LSI)

LSI 内部にて閾値の異なる 4 つのコンパレータを介しそれぞれのパルス数をカウントすることで、一度の X 線照射で最大 4 つのエネルギー域で X 線のエネルギー情報を取得することが可能となる。まず

この一次元検出器を 1D スキャナーのように利用し、被写体(ライター)のレントゲン撮影を試みた。

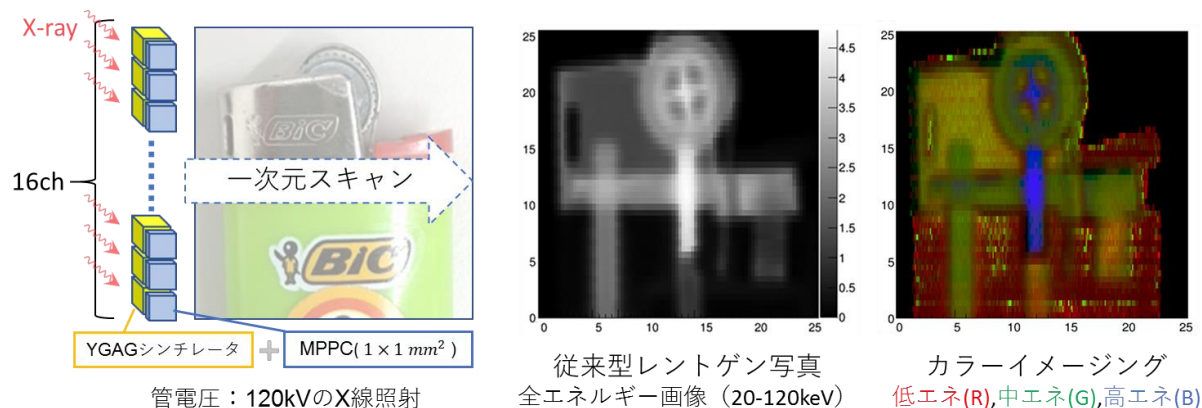


図 4. 16ch-MPPC アレイ+LSI を用いた一次元ラインスキャン

複数のエネルギー域を組み合わせ、プラスチック部・軽金属部・重金属部をそれぞれ赤・緑・青と色分けすることで、物質を明確に識別することに成功した。従来型の白黒レントゲン写真と比較しても格段に物質情報を反映していることが分かる。

更に、このアレイ検出器を使用することで一度に複数の CT スライスを取得できる。これらを組み合わせ三次元再構成を施すことで、被写体の三次元イメージングが可能となる(図 5)。三次元再構成により、YZ,XZ 平面など様々な角度のスライス画像が取得でき、より詳細な内部構造を観察できるようになる。また上記のレントゲン写真同様、色分けすることで物質の識別を明確にし、被写体の「三次元」かつ「カラーイメージング」に成功した。

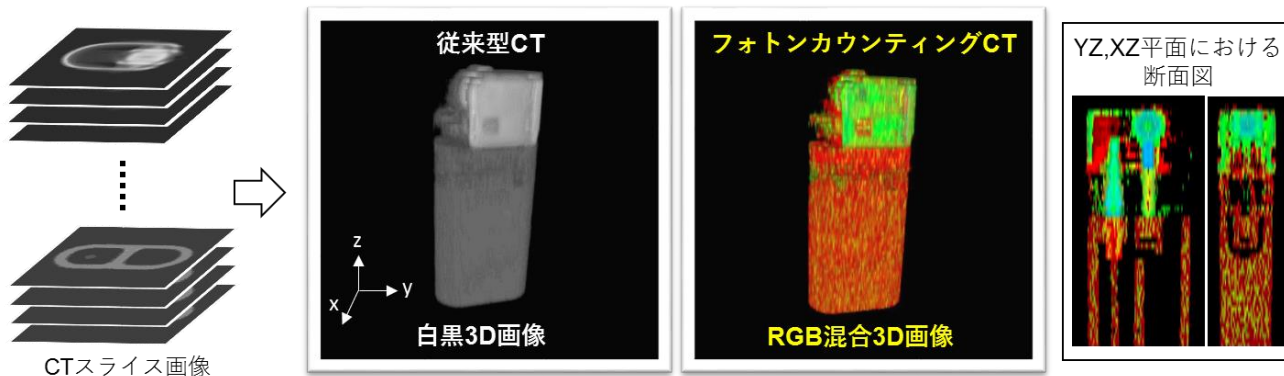


図 5. 三次元 CT 画像 + カラーイメージング

本論文で提案した MPPC ベースの新たな PC-CT システムで、従来型 CT の最大の問題とされていた CT 撮影時の高い医療被ばくを $\sim 1/100$ 程度まで低減できることを実証した。更にエネルギー情報を用いた様々な多色イメージングが可能となることを示した。本論文はその実証実験のみに留まらず、多系統の高速信号処理を可能とする PC-CT 専用アナログ LSI を独自に設計し、臨床応用を見据えたアレイ型検出器の開発を試みた結果、「三次元カラーイメージング」の有用性についても検証できた。またこの MPPC ベースの PC-CT システムは、既存の CT 装置に最小限の変更を加えるだけで実現可能なため、臨床応用の面からも非常に優れており、本論文が医療業界にもたらす影響はことさら大きいといえる。今後は更なる検出器の大幅面積化を行ったうえで、小動物を対象としたフォトンカウンティング CT 撮影を行っていく予定である。