

〔報告〕ガス電子増幅フォイルを用いた文化財の X線透過撮影のための検出器の開発 II

犬塚 将英

1. はじめに

文化財保存科学では、文化財を構成する材料と製作技法を科学的に解明することが重要な研究課題のひとつである。しかし文化財の調査では、試料採取が許されず、非破壊・非接触を大前提とした手法を要求されるケースが多いことから、X線透過撮影、X線回折、蛍光X線分析などのX線を用いた調査方法は保存科学の歴史の中で重要な役割を担ってきた¹⁾。さらに今後は、現地調査を余儀なくされる文化財も多いことから、可搬な測定装置の必要性が高まっていくだろう。

このような状況を鑑みて本研究では、ガス電子増幅フォイル (Gas Electron Multiplier foil, 以下GEMと略す)²⁻⁴⁾を用いた文化財調査用のX線検出器の開発を行ってきた⁵⁾。X線透過撮影を行うためには、検出した信号から2次元画像を構築する必要がある。このような目的のために、GEM検出器の読み出し方法としてC-MOS技術を導入した⁶⁾。従来のX線フィルムと比較すると、本検出器を用いればデジタル化された画像データとして記録することができる。また、イメージング・プレートやフラットパネルディテクタと比較すると、測定システム全体の規模を大幅に縮小できる可能性がある。

以上のような実験を行ってきて、2次元画像としてのX線検出に成功したので、ここでは速報を行う。

2. 実験方法

2-1. GEM検出器とC-MOSセンサーモジュール

GEM及びGEMを用いて製作した検出器の本体に関する詳細は前回の報告など^{5,6)}を参照されたい。今回は検出器内にアルゴンと二酸化炭素の混合ガス (Ar(70%)-CO₂(30%)) を流して実験を行った。3層構造に設置をした各GEMには、それぞれ365Vの電圧を供給した。読み出し部分に到達するまでのガス増幅率は約2000倍に相当する⁶⁾。

GEMによって増幅された電気信号から2次元画像を得るために、アクロラド社製のC-MOSセンサーモジュールをGEM検出器の信号読み出し部分に設置した。図1の左図はセンサー表面の写真であり、右図が積分回路やホールド回路で構成されるセンサー裏面の写真である。センサー表面には、80 μ m角の電極が100 μ mピッチで微細ASIC (Application Specific Integrated Circuit, 特定用途向けIC) 上に実装されている。電極に集められた電荷はASIC内で電荷積分回路 (積分時間=558msと設定した) と電荷ホールド回路を経た後で、電圧に変換されて外部に出力される。ここまでの信号処理は全画素あたり100Hzで行われる。一枚あたりのASICの面積は23.0mm $\times$ 12.5mmであり、図1に示されているように検出器中央部に4枚並べて23.0mm $\times$ 50.0mmの領域をカバーするように配置した。ASICの後段では、AD変換器によりアナログ信号からデジタル信号へと変換される。そして、後段のFPGA (Field Programmable Gate Array) によってASICが制御される。以上のシステムはUSBケーブルを介してコンピューターに接続されていて、専

用ソフトウェアによってデータが記録される。記録されるデータは各ピクセルの位置情報と各ピクセルに蓄積された電荷情報（4.8pCを12bitで表示）である。

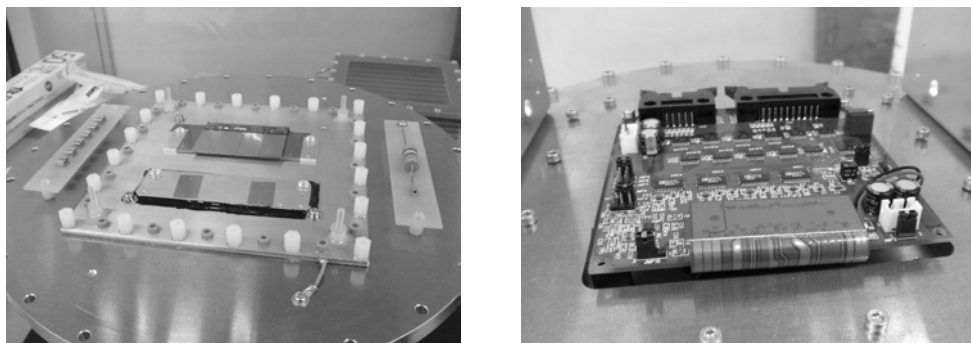


図1 GEM検出器に設置したC-MOSセンサーモジュールの写真。左はセンサー表面であり、右は積分回路、ホールド回路などで構成されるセンサー裏面である。

2-2. X線照射実験

検出器の入射窓から770mmの距離に、タングステンをターゲットとしてX線を照射させる可搬型X線管球を設置した。図2は実験時のセットアップを示した写真である。以下で示される照射実験時の管電圧と管電流はそれぞれ40kVと3mAとした。

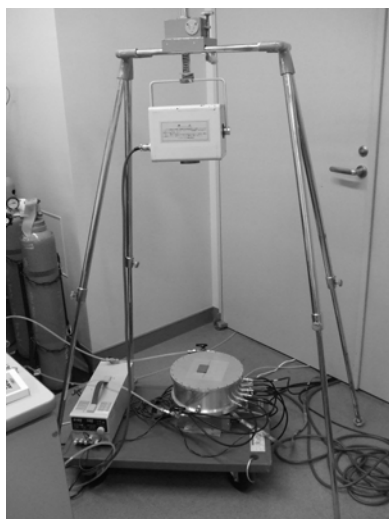


図2 X線管球を用いた照射実験の様子

GEM検出器とC-MOSセンサーモジュールによって、X線の2次元情報が得られることを確認するために、以下のような2通りの被写体を選択して実験を行った。

- ① 4枚のセンサーのうち2枚を覆うように、厚さが16mmの鉛のブロックを設置した。管球から照射されるX線はこの鉛ブロックによって十分に遮蔽されるはずである。鉛ブロックの

有無と信号の有無を照らし合わせることで、X線による信号が検出されているのかを確認した。

- ② 化成オプトニクス社製のX線テストチャート (Type10) を検出器の入射窓に設置して実験を行った。このテストチャートは0.1mmの厚さの鉛シートに図3に示されているようなパターンが刻まれている製品である。



図3 X線テストチャート

3. 実験結果

3-1. 鉛ブロックを用いた実験結果

ここでは便宜上、4枚のセンサーを順にPad1, Pad2, Pad3, Pad4と呼ぶことにする。Pad3とPad4に相当する位置に鉛ブロックを置き、Pad1とPad2にのみX線が照射されるようにした時に各ピクセルに記録された電荷情報のヒストグラムは図4左図のようになった。このヒストグラムを作成するにあたっては、あらかじめX線を照射せずにデータを取り、その時得られた各ピクセルにおけるペDESTAL値を差し引くことにより作図をした。このヒストグラムから、Pad1とPad2には電荷信号が記録され、Pad3とPad4には記録されないことが確認できた。

一方、Pad1とPad2に相当する位置へ鉛ブロックを移動させた時に得られたヒストグラムは図4右図のようになった。ここでは、Pad3とPad4には電荷信号が記録され、Pad1とPad2には記録されないことが確認できた。以上の結果から、X線が照射される位置にのみ信号が検出されることが確認できた。

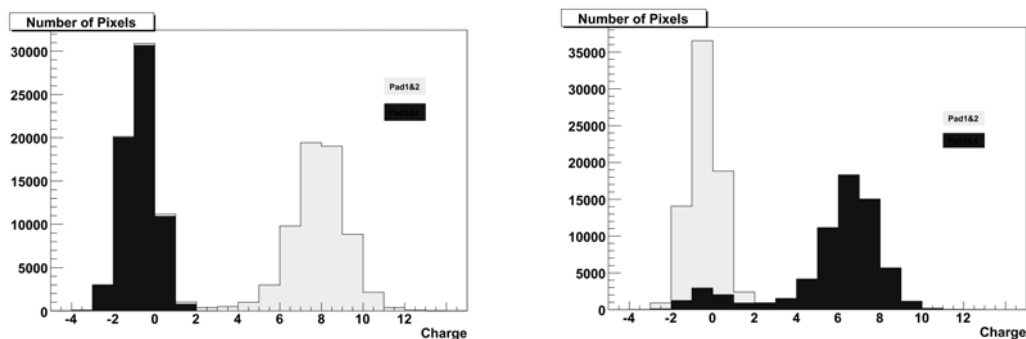


図4 鉛ブロックを用いた時の信号のヒストグラム。薄いヒストグラムはPad1とPad2, 濃いヒストグラムはPad3とPad4上のピクセルで記録された信号の大きさの分布である。

3-2. X線テストチャートを用いた実験結果

ここでは、図3に示されるX線テストチャートを被写体として、3-1と同じ条件でX線を照射した。図4で示されているヒストグラムから、電荷量が3以上と記録された場合をシグナルとみなし、シグナルを有するピクセルの位置を散布図として示したのが図5である。図5に示されている通り、X線テストチャートに刻まれているパターンを反映した2次元情報を得ることができた。

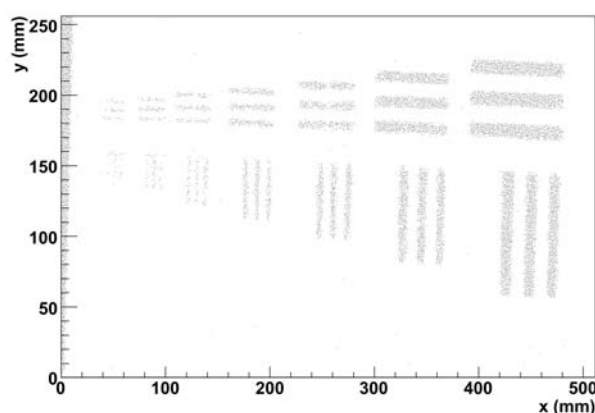


図5 X線テストチャートを被写体とした時の2次元情報

4. まとめと今後の予定

文化財のX線透過撮影を目的とした可搬型の検出器の開発を行ってきた。GEMでガス増幅を行う検出器の読み出し部分にC-MOSセンサーモジュールを設置して実験を行った。鉛ブロックとX線テストチャートを被写体とした実験結果から、X線が照射された部分からX線による信号が検出されることを確認した。

今回は電荷信号が記録されたピクセルの位置情報を散布図として示した。しかし、図4からわかる通り、現段階では2次元画像上に濃淡を表すための十分なダイナミックレンジが得られていない。今後さらに様々な照射条件での実験を行い、定量的な評価をすることにより、検出器の改善を行っていく予定である。

謝辞

本研究は平成19年度文部科学省科学研究費補助金若手研究(A)「文化財の透過撮影および材質調査を目的とした新しいX線検出器の開発」によるものです。

C-MOSセンサーモジュールの製作および信号評価に関して、アクロラド株の三戸美生氏、玉城充氏からご協力とご助言をいただきました。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 三浦定俊：『古美術を科学する』，廣済堂出版，(2001)
- 2) F.Sauli: GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 386, 531-534 (1997)

- 3) M.Inuzuka, et al.: Gas electron multiplier produced with the plasma etching method, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A525, 529-534 (2004)
- 4) T.Tamagawa, et al.: Development of Gas Electron Multiplier Foil with Laser Etching Technique, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A560, 418-424 (2005)
- 5) 犬塚将英：ガス電子増幅フォイルを用いた文化財調査用X線検出器の開発, 保存科学, 45, 121-132 (2006)
- 6) 犬塚将英, 李栄篤：ガス電子増幅フォイルを用いた文化財のX線透過撮影のための検出器の開発, 保存科学, 46, 95-104 (2007)

キーワード：ガス電子増幅フォイル (Gas Electron Multiplier foil, GEM) ; X線透過撮影 (X-ray radiography) ; 可搬型検出器 (portable detector) ; 2次元画像 (2-dimensional imaging) ; C-MOSセンサー (C-MOS sensor)

Development of Detectors for X-ray Radiography of Cultural Properties Using Gas Electron Multiplier Foil, Part II

Masahide INUZUKA

X-ray radiography has played an important role in the field of conservation science of cultural properties. Moreover, the demand for *in-situ* analysis will increase further. In this situation, it is valuable for conservation scientists to develop new X-ray detectors that are suitable for their own studies.

A prototype detector, essential part of which is composed of Gas Electron Multiplier foil (GEM), for X-ray radiography has been produced. In order to obtain two dimensional images, a C-MOS sensor module was installed in the detector. The sensor covers an area of 23.0mm by 50.0mm and the pixel size is 100 μ m.

A lead block and an X-ray test-chart were selected as objects and two dimensional images were obtained by irradiating X-ray. From the result of data analysis, it is verified that signals due to X-ray were detected by using the GEM detector and C-MOS sensor module.