

〔報告〕 移動が困難な文化財の調査を目的とした X線イメージセンサーの開発

犬塚 将英・房安 貴弘*・越牟田 聡*²・忽滑谷 淳史*³・阿部 圭一*²
・田中 義人*・浜垣 秀樹*³

1. はじめに

文化財の科学調査では、資料採取が許されず、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線を用いた調査方法は保存科学、文化財科学の歴史の中で重要な役割を担ってきた。例えば文化財の内部構造を調べるために、X線透過撮影が行われてきた。

調査対象である文化財が比較的小さく、輸送が可能であれば、X線透過撮影のための設備を有する研究機関に持ち込むことにより、その文化財の内部構造を調べることができる。一方、様々な事情や制約により移動が困難な文化財も多い。しかし、X線透過撮影用の機器は大型かつ高価であるため、移動が困難な文化財の現地調査は一般的に容易でないのが現状である。

移動が困難な文化財として、塑像や建造物など、美術工芸品などと比較すると物質量が大きい調査対象も想定される。このような文化財の内部構造を調査するためには、高いエネルギーのX線を用いる必要が生じるが、そのようなエネルギー領域における検出効率が高いことも測定器に求められる。さらに、実際の調査の現場では、撮影後にX線画像をその場で確認できることが望ましい。このように、高エネルギーX線に対しても高い検出効率を保ち、リアルタイムで画像を確認することができる可搬型のX線測定器はまだ実用化されていないのが現状である。

素粒子・原子核物理の分野などを中心に開発研究が進んでいるガス電子増幅フォイル (Gas Electron Multiplier foil, 以下 GEM と略す)²⁻⁵⁾を利用することにより、筆者らは簡便、安価かつポータブルなX線検出器の開発研究を行ってきた⁶⁻⁸⁾。本研究では、高エネルギーX線を効率良く検出するために改良を施した GEM 検出器に対して、新たに開発を行った信号の読出し方法を適用した。ここでは、東京文化財研究所のX線撮影室で行った基礎実験の結果を報告する。

2. X線検出器の概要と信号読出しの方法

2-1. X線検出器の概要

今回開発をし、東京文化財研究所のX線撮影室にて実験を行ったX線検出器の概要を図1に示す。検出器本体は GEM フォイル (2-2) と光電コンバータ (2-3) で構成されており、アルミニウム製の筐体 (337mm×297mm×38mm) に収められている (総重量は約 4 kg)。検出器本体に入射したX線を検出し、増幅した電気信号は XY ストリップパッドを経て信号読み出しボードにてデジタル化される (2-4)。このように処理された信号はイーサネットを通じて、制御用 PC へ送られる。

*長崎総合科学大学

*²サイエナジー株式会社

*³東京大学大学院理学系研究科

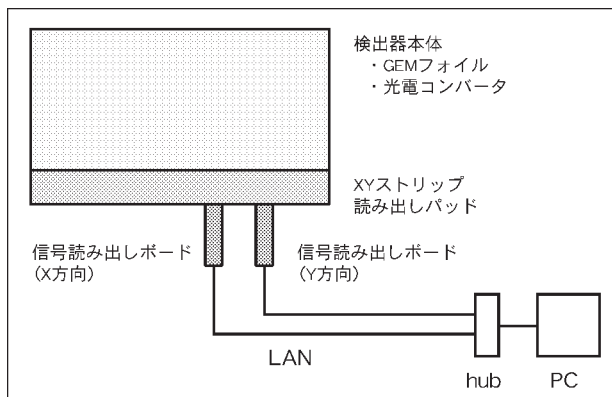


図1 X線検出器の概要

2-2. GEM を用いた X 線検出器

ガス電子増幅フォイル (GEM) とは高い耐熱性と機械強度, 低い誘電率を有する高分子フィルムの両面を銅で被覆し, $\phi 50\mu\text{m}$ 程度の孔が $100\mu\text{m}$ 程度のピッチで開けられている構造をしている²⁻⁵⁾。これまでに GEM を用いて製作した X 線検出器の概念図を図 2 に示す⁷⁾。増幅ガス (ここではアルゴンと二酸化炭素の混合ガス) で満たされたチャンバーの中に設置した GEM の両銅電極に数百 V 程度の電圧をかけると, 光電効果により増幅ガス中で発生した電子が GEM を通過する時に増幅される, というのが従来の GEM 検出器の動作原理である。

2-3. 光電コンバータ

現地調査では, 塑像や建造物などの物質質量が大きい文化財の内部構造を知りたい場合がある。対象物の物質質量によっては, 透過画像のコントラストを得るために, 数百 keV 程度の入射 X 線を用いる必要が生じる。しかし, このような高エネルギー X 線を入射させた場合, 増幅ガス中の光電効果のみを利用した従来型の検出器 (図 2) では, 十分な検出効率 (10% 程度) を得るためには, GEM の上流に光電コンバータを設置する必要がある。本研究では, 図 3 に示すように, HIDAC 型⁹⁾の変換方法を利用した光電コンバータを 2 層の GEM の上流に設置した検出器を製作し, 基礎実験を行った。

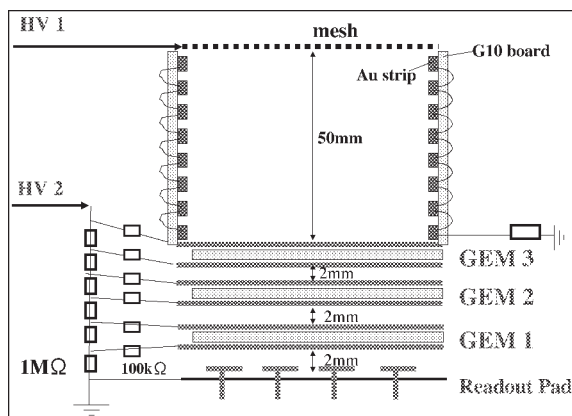


図2 従来の GEM 検出器の概念図

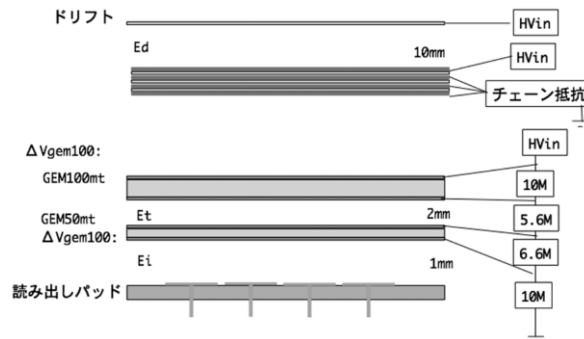


図3 光電コンバータを搭載したGEM検出器の概念図

図4は光電コンバータの構造と動作原理を示した概念図である。光電コンバータは鉛層と絶縁層とのサンドウィッチ構造となっている。密度が大きい鉛が用いられている理由は、高エネルギーX線が入射した時に起こる光電効果の確率を高くするためである。また、サンドウィッチ構造となっている理由は、光電効果によって発生した電子を効率よくGEM領域へ誘導するための電場勾配を設けるためである。

検出器に入射した高エネルギーX線は、光電コンバータで効率よく電子に変換され、その電子はGEMを通過する時に雪崩現象により（2-4で説明する読み出し部分で検出可能なレベルにまで）増幅される。

2-4. 信号の読み出し方法

本研究で開発している可搬型検出器の読み出しパッド及び読み出しボードは、小型かつ低価格であることが必要である。一方、検出器の解像度は数百 μm 程度であれば充分である。以上を検討した結果、図5と図6（概念図）に示すような、X方向とY方向のストリップ（ストリップのピッチは1.56mm）を印刷した基板を用いて信号読み出しを行うことにした。ピクセル型の読み出し方法と比較すると、2次元のストリップ構造にすることにより、読み出しのためのチャンネル数を大幅に抑えることができるので、小型かつ低価格な読み出しシステムが実現する。検出器に入射したX線のX方向、Y方向の位置は、隣接したストリップに誘起された電荷量の

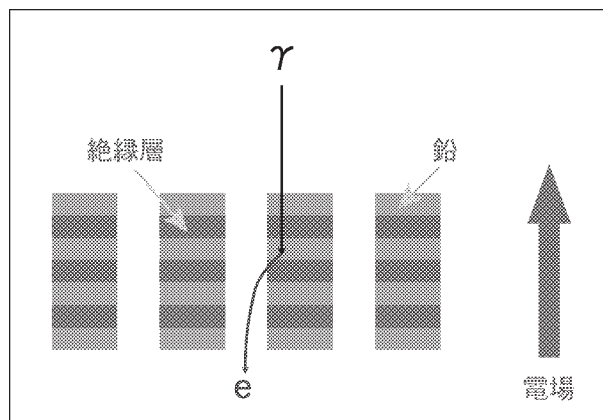


図4 光電コンバータの構造と動作原理

荷重平均から算出する。

ストリップを用いた2次元読み出しの問題点としては、図6に示されているような異なる2点に入射があった場合に疑似画像が生じる「ゴースト現象」が挙げられる。しかし、電荷に加えて信号の到達時刻も測定すれば、この問題を回避することができて、検出効率が向上する。本研究では、電荷情報と時間情報の両方を処理することができるLSIチップ¹⁰⁾を開発し、このLSIチップを搭載した信号読み出しボード(図7左)を上述の信号読み出しパッドに接続することにより信号の読み出しを行う(図7右)。信号読み出しボード1枚あたり、32ストリップ分の入力信号処理を行う。信号読み出しボード上では、各ストリップに誘起された電荷をASICでデジタル化し、その後FPGAで処理した信号をイーサネットでPCへ送る。将来的には200mm×200mmの領域におけるイメージングを行う予定であり、Xストリップ読み出し用で4枚、Yストリップ読み出し用で4枚の信号読み出しボードを用いて信号を処理する予定である。

3. X線照射実験

3-1. 東京文化財研究所・X線撮影室でのX線照射実験

本研究では、高エネルギーX線を効率よく検出するためにGEM検出器に改良を施し(2-3)、リアルタイムで画像を確認するための信号の読み出し方法を開発した(2-4)。この測定系全体の動作を確認し、性能を評価するために、2011年11月8日~10日に東京文化財研究所のX線撮影室にて、X線照射実験を行った。今回の実験ではエクスロン社製MG325型X線透過撮影装置を用いて、表1に示されているような条件でX線を照射した：

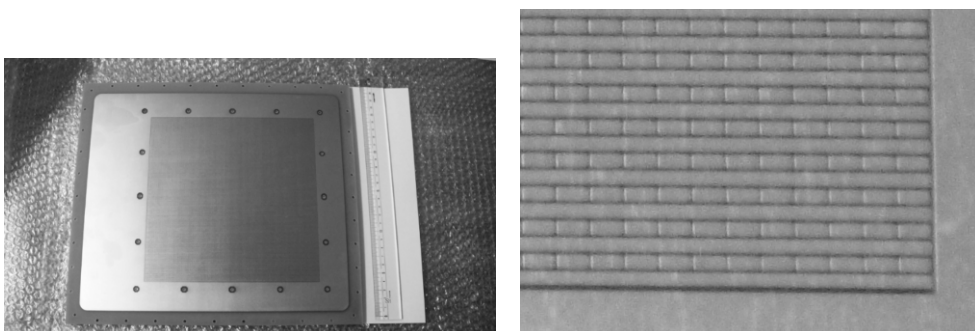


図5 XYストリップ読み出しパッドの外観(左)と拡大写真(右)

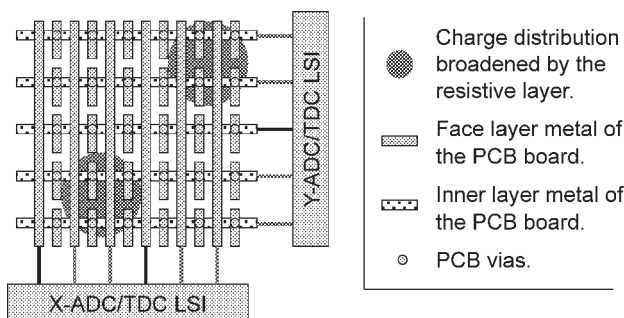


図6 XYストリップ読み出しの概念図

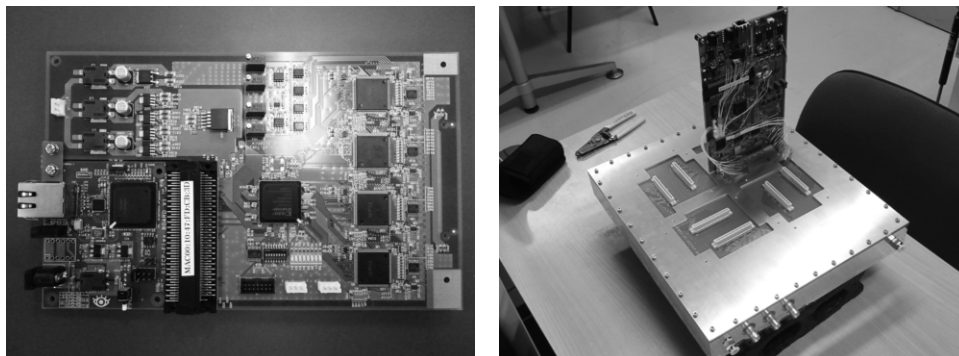


図7 信号読み出しボード（左）を検出器の信号読み出しパッドに接続した様子（右）

表1 X線の照射条件

管電圧	50kV
管電流	1 mA
照射時間	30秒
検出器までの照射距離	120cm

3-2. 信号の読み出しとデータ解析の方法

2-4で示したように、将来的には本検出器を用いて200mm×200mmの領域におけるイメージングを行う予定であり、Xストリップ読み出し用で4枚、Yストリップ読み出し用で4枚の信号読み出しボードを用いて信号を処理する予定である。しかし今回は、信号読み出し方法の基本的な性能評価を行うことが目的であることから、Xストリップ読み出し用1枚、Yストリップ読み出し用1枚のみの信号読み出しボードを用いて、50mm×50mmの領域におけるイメージングの評価を行った。

各信号読み出しボードとノートPCとはイーサネットケーブルで接続し、X線撮影室に隣接している操作室にて、信号読み出しボードの制御、データの転送と蓄積を行った。このようにしてXストリップ、Yストリップから得られたエネルギー情報、時間情報に関する数値データを解析することにより、2次元的な画像の構築を行った。

3-3. 実験結果

検出器と信号読み出し部分の動作確認を行うために、今回の実験では被写体として、正方形(1.5mm×1.5mm)の孔を開けた厚さ2mmの鉛板を用意した。この被写体を検出器に乗せて(図8左)、上方からX線を照射することにより、X線透過撮影を行った。この時、正方形の辺が信号読み出しパッド上のX、Yストリップと平行な方向となるように被写体を設置した。厚さが2mmである鉛板の場合、50keVよりエネルギーが小さいX線はほとんど透過しない。撮影結果は図8右のようになり、予想通り、孔の位置する場所に相当する領域だけでX線が検出されるような2次元画像が得られた。

しかし、図8右の画像では、正方形の孔の輪郭が明瞭であるとは言えない。次に、被写体を45°回転し、正方形の辺がストリップと45°の角度で交差するように設置して(図9左)、X線透過撮影を行った。その結果、得られた画像は図9右のようになったが、輪郭が不明瞭であるために、図8右との明確な差は見られなかった。ハードウェア、ソフトウェアの両面から改良を

加えて、解像度を向上させることが今後の課題のひとつである。

4. まとめと今後の予定

X線透過撮影を行うことにより移動が困難な文化財の内部構造を調査するためには、高エネルギー領域における検出効率が十分に高く、リアルタイムで画像を確認することができる可搬型のX線測定器の実用化が求められる。

本研究では、高エネルギーX線を効率良く検出するために改良を施したGEM検出器に対して、新たに開発を行った信号の読み出し方法を適用し、X線照射実験を行った。管電圧を50kVとして実験を行ったところ、得られた2次元画像からは、厚さ2mmの鉛板の有無を識別することが可能であると評価できた。しかし現段階では、目標としていた数百 μm 程度の解像度に到達していないので、今後、各ストリップの増幅率の検量及び較正、ソフトウェアの改良を行っていく。信号読み出しの方法を改良するとともに、今後以下のような実験を行う予定である：

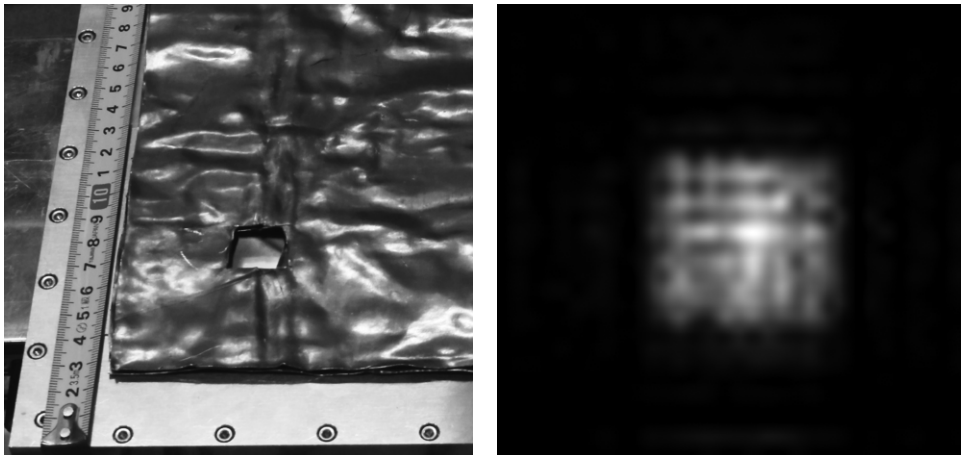


図8 厚さ2mmの鉛板に1.5mm×1.5mmの孔を開けた被写体（左）と撮影結果（右）

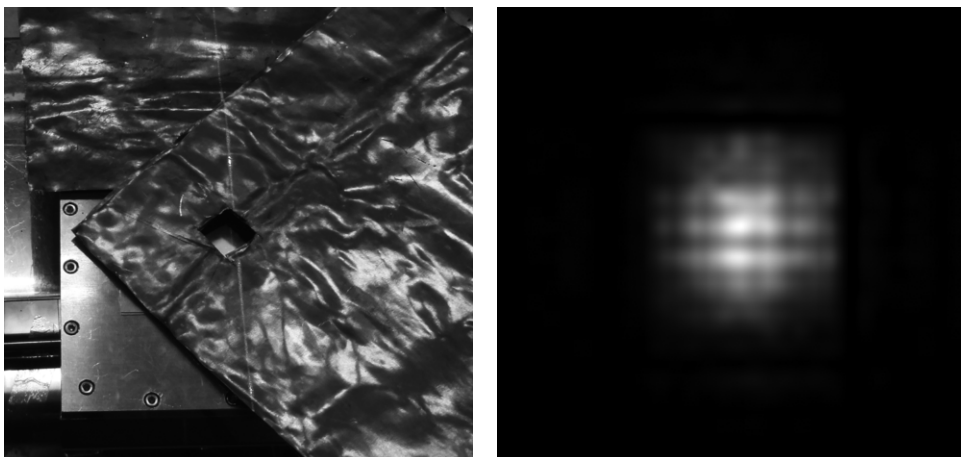


図9 図7と同じ被写体を45°傾けて撮影した様子（左）と撮影結果（右）

- ・今回はX線照射装置の管電圧を50kVと設定して実験を行ったが、高エネルギーX線を照射した時の性能を調べるために、管電圧を段階的に320kVまで上げていき、測定系の性能を評価する。
- ・今回の実験ではXストリップ読み出し用4枚、Yストリップ読み出し用4枚のみの信号読み出しボードを用いて、200mm×200mmの領域をイメージングすることができる検出器を完成させて、同様の性能評価のための基礎実験を行う。

謝辞

本研究は科学技術振興機構（JST）の先端計測分析技術・機器開発事業「GEMによる超高感度・大面積ガンマ線イメージセンサー」によるものです。

参考文献

- 1) 三浦定俊：『古美術を科学する』，廣濟堂出版，(2001)
- 2) F.Sauli: GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A386, 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 (2006)
- 5) 宇野彰二：MPGDを用いた中性子・硬X線画像装置開発，高エネルギーニュース Volume 30 66-72 (2011)
- 6) 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)
- 7) 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)
- 8) 犬塚将英：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，保存科学，47，173-178 (2008)
- 9) A.Jeavons, et al.: A 3D HIDAC-PET camera with sub-millimeter resolution for imaging small animals, IEEE Trans. Nucl. Sci. 46, 468-473 (1999)
- 10) Takahiro Fusayasu, et al.: A Frontend LSI for Large-Area Gamma-Ray Imaging Detectors with Gas Electron Multipliers, IEEE 2009 Nuclear Science Conference record N19-5 1100-1102

キーワード：X線透過撮影 (X-ray radiography)；可搬型検出器 (portable detector)；コンバータ (convertor)；X-Yストリップ読み出し (X-Y strip readout)

Development of X-ray Image Sensor for *In-situ* Investigation of Cultural Properties

Masahide INUZUKA, Takahiro FUSAYASU*, Satoshi KOSHIMUTA*²,
Atsushi NUKARIYA*³, Keiichi ABE*², Yoshito TANAKA*
and Hideki HAMAGAKI*³

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

For this purpose, the requirements for the new detector are as follows:

- It has high detection efficiency for high energy X-rays.
- The X-ray image can be checked immediately on-site.
- It should be a portable detector.

In this study, an X-ray radiography system was developed. It is composed of Gas Electron Multiplier foils, a new convertor to obtain high efficiency for high energy X-ray, and an X-Y strip readout board. This system was evaluated by irradiating with X-ray tube voltage of 50kV. The X-ray image of 2mm lead sheet with a square hole of 1.5mm by 1.5 mm was obtained by this system in this experiment.

*Nagasaki Institute of Applied Science **SciEnergy Co., Ltd

**Graduate School of Science, The University of Tokyo