

## 臭化タリウムによる直接変換 X 線イメージングセンサ技術



島添 健次\*<sup>1</sup>  
Shimazoe Kenji



モー ハムダン\*<sup>1</sup>  
Moh Hamdan



野上 光博\*<sup>2</sup>  
Nogami Mitsuhiro



人見啓太郎\*<sup>2</sup>  
Hitomi Keitaro

### 1 はじめに

X 線イメージングセンサ技術は、産業用途では異物検査や内部構造の検査等広範囲で利用され、医療用途ではレントゲンによる肺の検査やマンモグラフィ、CT (computed tomography) また他の複数の科学目的でも必要とされる必須の技術である。特に、近年は従来の IP (imaging plate) に加えてリアルタイムに画像化が可能なデジタルラジオグラフィが主流となりつつある。このようなデジタルラジオグラフィシステムでは FPD (flat panel detector フラットパネル検出器) が重要な役割を果たしている。

X 線 FPD においては、一般にシンチレータで X 線を光に変換した後に光センサで電荷量を計測する間接変換方式と X 線を直接的に電子正孔対に変換する直接変換方式が存在する。信号の読出は大型イメージングセンサ実現のため、大型化が可能なディスプレイ技術の 1 つである TFT (thin film transistor) を利用した電荷の蓄積とスイッチング読出により実

現されている (図 1)。

これまで、X 線を可視光領域の光に変換するシンチレータとピクセル型のフォトダイオードマトリクスを組み合わせた間接変換型の FPD が多く開発され、利用されてきた。

このような検出器では高分解能や低被ばくを実現可能な CsI (ヨウ化セシウム) やより低価格・高密度な GOS (酸化硫化カドミニウム) セラミック等が用いられることが多く、それぞれ広く使われている。

直接変換型の FPD としては融点が 221 °C と低く、大面積化が可能な a-Se (アモルファスセレン) を用いた開発が行われている。直接変換型のメリットとしては一般的に、間接変換型のような光広がり少なく、高解像度化が可能とされている。一方で、より電子正孔対エネルギー ( $\epsilon$  値) が小さく高感度化が可能な CdTe (テルル化カドミニウム) を用いたシリコン半導体集積回路と組み合わせたピクセルセンサの開発も進んでいる<sup>1)</sup> が、CdTe は 1041 °C と高融点のため、バンプ接合が必要であり大型化や低コスト化に大きな課題がある。

このような背景から、筆者らの研究開発グループでは TlBr (臭化タリウム) に着目し、高解像度化、高感度化、大面積化が原理的に可能な直接変換型 X 線イメージングセンサの開発を実施してきた。その概要について次章から紹介する。

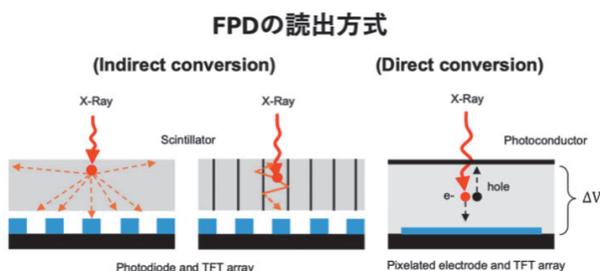


図 1 間接変換 (indirect) と直接変換 (direct) 方式の Flat panel detector (FPD)

## 2 X線イメージングセンサ

臭化タリウムは臭素 (Br Z=35) とタリウム (Tl Z=81) から成る, 化合物半導体結晶である。高い密度 (7.56 g/cm<sup>3</sup>) であり, これまで特に $\gamma$ 線スペクトロスコーピー用途で開発されてきており<sup>2)</sup>, 室温において 622 keV の $\gamma$ 線に対し半値幅が 1% 程度の良好なエネルギー分解能を有することが確認されている。また近年, チェレンコフ光を用いた時間分解にも利用可能なこと<sup>3)</sup> が示され, 時間分解能, エネルギー分解能の両方に優れた素子としても注目されている。

X線 FPD で用いられている各素子の大きな比較を表 1 に示す。臭化タリウムが高い密度 (~高い

表 1 X線イメージングセンサ各素材の比較

	密度 g/cc	発光量 ph/keV	$\epsilon$ 値 eV	融点 ℃
CsI	4.53	64	-	-
GOS	7.34	55 (半透明)	-	-
a-Se	4.3	-	50	221
CdTe	5.85	-	4.43	1041
TlBr	7.56	-	5.5	460

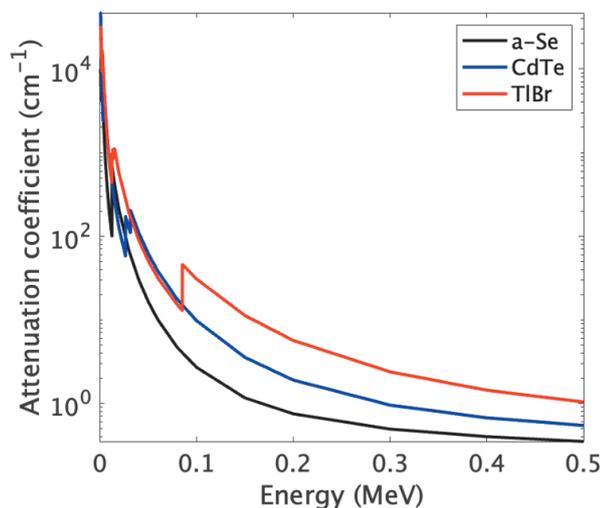


図 2 直接変換材料の減衰係数比較

表 2 FPD に用いられる TFT 技術

	a-Si	LTPS	IGZO
電子移動度	-1cm <sup>2</sup> /Vs	> 100cm <sup>2</sup> /Vs	-25cm <sup>2</sup> /Vs
リーク電流	高	低	極低
コスト	低	高	中

X線変換効率) と小さい電子正孔対生成エネルギー ( $\epsilon$  値~高い信号雑音比), 低融点 (460℃~大面積化) と良好な性質を有していることが分かる。

一般に, 間接変換型は既知の発光量 (photon/keV) からシリコンの  $\epsilon$  値 3.6 eV で除算した値が記録される最大信号電荷量となるため, 直接変換型の値と比較すると 1 桁以上信号生成量が少ないことが分かる。すなわち直接変換材料は信号が大きく信号雑音比の高いセンサを作ることには適していると言える。

また, 直接変換材料の光子エネルギーに対する線減衰係数の比較を図 2 に示す。大面積化が可能な a-Se と比較して臭化タリウムは高い減衰係数を有しており, CdTe と比較しても高エネルギー領域で高い感度を有することが確認できる。

信号処理部分のトランジスタである TFT には a-Si (アモルファスシリコン), ポリシリコン, IGZO (indium gallium zinc oxide) 等が用いられる (表 2)。ここでは詳細には触れないが, 本研究では JDI (Japan Display) 社の協力を得て, 移動度の高い低温ポリシリコン (LTPS) 技術を用いたフラットパネル検出器読出フロントエンド回路を用いた。

## 3 臭化タリウム X線イメージングセンサ

本研究では, 原理検証としてピクセルサイズ 235  $\mu$ m  $\times$  235  $\mu$ m の 126  $\times$  168 ピクセルで構成される 29.61 mm  $\times$  39.48 mm サイズの LTPS TFT 技術で作成されたフラットパネルを用いた。パネルの直接変換膜とのコンタクト電極は 10 nm 厚の ITO (indium tin oxide) で構成している。本フラットパネル上に, 東北大学で精製・作成された臭化タリウム結晶をもとに, 400~500℃で真空蒸着により 50  $\mu$ m 程度までの蒸着膜を形成した。その後に上部電極として金を蒸着し, 臭化タリウム変換膜を有する X線フラットパネル検出器を作成した。図 3 に開発した X線イメージングセンサの外観を示す。上部のパネルからの読み出しは FPC (Flexible Printed Circuit) により AFE (Analog Front End) 回路に伝送され, 最終的に FPGA (Field Programmable Gate Array) で構成した DAQ (Data Acquisition) システムにより画像化する。上部の金電極と GND 間に電圧を印加することで動作を行う。

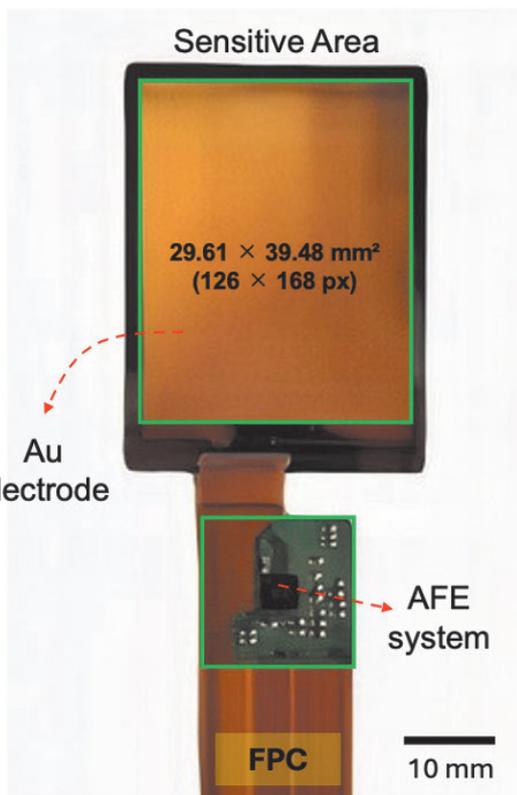


図3 開発した臭化タリウム直接変換 X 線イメージングセンサ

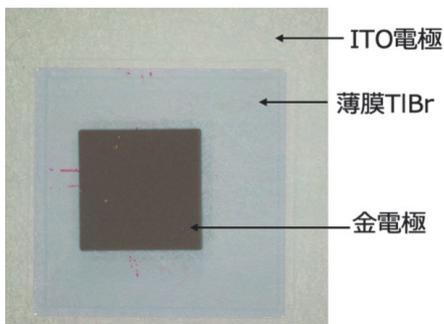


図4 臭化タリウム膜の抵抗値測定体系

#### 4 臭化タリウム X 線イメージングセンサの性能

まず、 $12 \times 12 \text{ mm}^2$  のエリアに  $53 \mu\text{m}$  の厚みで蒸着した臭化タリウム膜の抵抗値を測定した。0~4 V 程度の間ではほぼ線形応答を示しており抵抗値  $1.02 \times 10^8 \Omega$ 、抵抗率  $2.78 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$  が得られた。図4に蒸着膜の写真を示している。

次にピクセル型の臭化タリウム X 線イメージングセンサの空間分解能評価を行った。

図5に Slated Edge 法を用いた空間分解能評価結

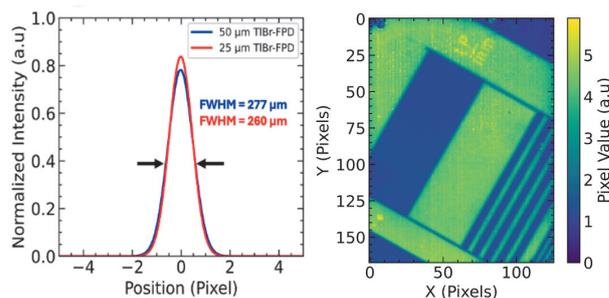


図5 空間分解能評価 (25  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$  厚)

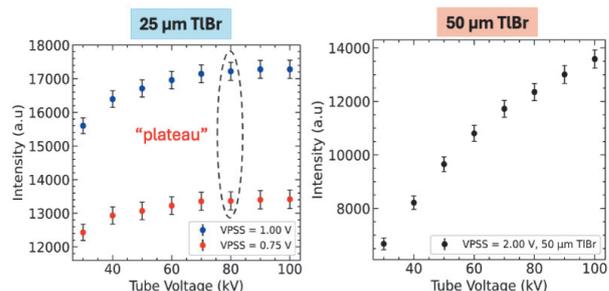


図6 ピクセル値の管電圧依存性

果を示す。X 線発生管の管電圧 / 電流 30 kV/2 mA において、半値幅 (FWHM : full width at half maximum) として、25  $\mu\text{m}$  厚センサで 260  $\mu\text{m}$ 、50  $\mu\text{m}$  厚センサで 277  $\mu\text{m}$  の解像度が得られた。ピクセルサイズが 235  $\mu\text{m}$  であることを考えると妥当な値である。

また、25  $\mu\text{m}$  と 50  $\mu\text{m}$  でのセンサ応答の管電圧依存性を図6に示す。25  $\mu\text{m}$  では 80 kV 程度でピクセル値の飽和が見られるが、50  $\mu\text{m}$  では飽和が見られず、高エネルギー X 線についても感度を有していることが確認できる。

図7に、小型ニボシの臭化タリウムイメージングセンサを用いた撮像例を示す。50  $\mu\text{m}$  厚の臭化タリウム膜、23 kV/0.25 mA の条件で撮像した。骨の細かい形状まで取得できていることが分かり、均一な画像が得られることが確認できた。

#### 5 まとめと将来展望

本研究では、東京大学、東北大学、JDI の協力により臭化タリウム膜の X 線イメージングセンサへの形成技術の確立と撮像性能の検証<sup>4)</sup>を行った。50  $\mu\text{m}$  厚までの臭化タリウムを蒸着した X 線イメージングセンサの開発に成功し、期待される空間解像度が得られている。今後の課題としてより高感度化

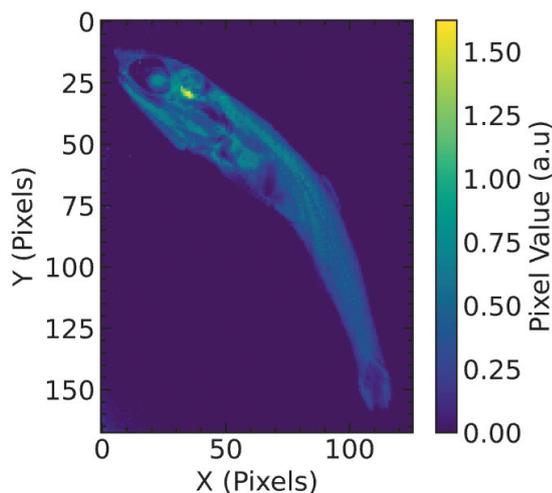


図7 小型ロボットの撮像例 (23 kV / 0.25 mA)

のため 100  $\mu\text{m}$  厚程度までの厚膜化やフラットパネル検出器の低ノイズ化により、更に高い信号雑音比を有し、低線量撮像を可能にする FPD の研究開発を進める。また、臭化タリウムの蒸着は、大面積化への適用が比較的容易であり、同様にメートルサイズまで大型化が可能なフラットパネル技術との相性がよい。超大型 CT 等の開発への応用も期待される。

加えて、従来型のフラットなパネルだけでなく、曲面等のこれまでにない形状を作成可能である点も見逃せない。特殊形状を用いた生体応用等も期待される。また LTPS や IGZO 等の TFT 技術は電子移動度の改善と共に信号処理技術としても可能性<sup>5)</sup>を秘めており、単なる電荷蓄積型センサ以外への応用にも期待ができる。

#### 参考文献

- 1) Ballabriga, Rafael, *et al.*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **878**, 10-23 (2018)
- 2) Hitomi, Keitaro, *et al.*, *Journal of Crystal Growth*, **379**, 93-98 (2013)
- 3) Hamdan, M., *et al.*, *Journal of Instrumentation*, **19**, 11, C11017 (2024)
- 4) Hamdan, Moh, *et al.*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **1064**, 169372 (2024)
- 5) Shimazoe, K., *et al.*, *Journal of Instrumentation* **12**, 02 C02045 (2017)

(\*<sup>1</sup> 東京大学, \*<sup>2</sup> 東北大学)