

945 Mcps/pixel の直線応答を持つ 17.4 kHz 動作の次世代 X 線イメージング検出器 CITIUS

初井 宇記 (理化学研究所 放射光科学研究センター)

Email: hatsui@spring8.or.jp

Multi-Bend Achromat (MBA) 型蓄積リングを備えた最新の放射光施設では、最先端のフォトンカウント型検出器であっても、強い入射 X 線への対応が困難であり、性能の限界が顕在化しています。従来の画素内カウント回路では、パイルアップの影響によりカウントレートが数 Mcps/ピクセルに制限され [1]、さらに複数バンチモードでは性能が大きく劣化します [2]。この課題に対処するため、私たちは CITIUS 検出器 (高ダイナミックレンジ・高速動作・電荷積分型イメージングユニット) を開発しました [3]。画素ピッチ 72.6 μm の新しい積分型画素構造により、CITIUS は 10 keV において 945 Mcps/pixel (18 Tcps/cm²) を達成し、従来の検出器を凌駕する性能を示しています。このダイナミックレンジはすべてのバンチモードで維持され、Bragg CDI [4] や ptychography [5–6]、さらに高速・高精度な単結晶 X 線回折において極めて有効です。

CITIUS は 650 μm 厚のシリコンセンサを採用しており、14.4 keV での準弾性散乱分光 [7] に代表される高量子効率求められる用途において、高い感度を発揮します。3D X 線回折 (XRD) 用途においても、35 keV の高エネルギー領域で CITIUS が実用的な検出器として機能することを実証しました。一般に積分型検出器では高速フレームレート動作が求められるため、大量データの取り扱いが課題となります。CITIUS では独自開発の FPGA ベースの圧縮アルゴリズム [8] により、1 週間の実験で得られた 35 PB のデータを 1000 倍以上に圧縮することに成功しており、これが SPring-8 での CITIUS 共用を可能とする基盤技術となっています。

CITIUS はさらに分光イメージングにも対応しており、実験室 X 線 CT [9] や蛍光収量 XAFS などへの応用にも成功しています。標準モードでのノイズフロアは 40 e-rms と低く、この低ノイズ性能により、従来フォトンカウント検出器では対応が難しかったテnder X 線領域においても有効です。現在、東北大学・高橋 幸生教授グループと連携し、この領域における性能評価を進めています。さらに最近では、マルチサンプリングモードにおいて 250 eV FWHM のエネルギー分解能を達成しており、550 eV までの単一光子検出が可能であることを示唆しています。

SACLA では、2024 年より 2,020 万画素システムの展開を開始しました [10]。詳細な解析により、CITIUS 画素においては、ゲイン切替点でアーティファクトが観察されないことが確認されています。現在開発されている多くの積分型検出器では、画素内でゲインを切り替える設計が採用されていますが、切替に伴うアーティファクトが大きく、しばしばゲイン固定モードでの運用が選択されます。CITIUS はゲイン切り替え方式ではなく、新規のゲイン選択方式を採用しています。これが定量性を損なうことなく広ダイナミックレンジ撮像におけるマルチゲイン取得を可能にしており、CITIUS の XFEL 分野における今後の貢献も期待されます。

参考文献

- [1] P. Denes, B. Schmitt, J. Synchrotron Rad., 21 (2014) 1006.
- [2] Y. Imai and T. Hatsui, J. Synchrotron Rad., 31 (2024) 295.
- [3] SPring-8 II Conceptual Design Report, 理研 放射光科学研究センター, 2014.
- [4] M. Grimes, et al., J. Appl. Cryst., 56 (2023) 1032.
- [5] Y. Takahashi, et al., J. Synch. Rad., 30 (2023) 989.
- [6] N. Okawa, et al., Microscopy and Microanalysis, 30(5) (2024) 836.
- [7] M. Saito, et al., Phys. Rev. Lett., 132 (2024) Art. Num. 256901.
- [8] H. Nishino, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 1057 (2023) Art. Num. 168710.
- [9] V. Di Trapani, et al., iWoRiD 2024 発表.
- [10] H. Nishino, SRI2024 発表.