

新積分型 SOI ピクセル 検出器を用いた X 線残留応力の精密測定と CT 測定法の開発

Precised X-ray Residual Stress (RS) Measurement and Development of RS CT Measurement method, using New Integration-type SOI pixel detector

西村龍太郎^{1,*}, 岸本俊二¹, 新井康夫¹, 三好敏喜¹, 佐々木敏彦², 三井真吾³, 新谷正義⁴, 神谷好郎⁵, 村田 次郎⁶, 若田真来⁶, 今井皓⁶, 菊地武⁶

¹ 高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

² 金沢大学, 〒920-1192 金沢市角間町

³ 滋賀大学, 〒522-8522 滋賀県彦根市馬場 1 丁目 1-1

⁴ 石川県工業試験場, 〒920-8203 金沢市鞍月 2 丁目 1 番地

⁵ 東京大学, 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

⁶ 立教大学, 〒171-8501 東京都豊島区西池袋 3-34-1

Ryutaro NISHIMURA^{1,*}, Shunji KISHIMOTO¹, Yasuo ARAI¹, Toshinobu MIYOSHI¹, Toshihiko SASAKI², Shingo MITSUI³, Masayoshi SHINYA⁴, Yoshio KAMIYA⁵, Jiro MURATA⁶, Maki WAKATA⁶, Kou IMAI⁶ and Takeshi KIKUCHI⁶

¹ High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

² Kanazawa University, Kakumamachi, Kanazawa, Ishikawa, 920-1192, Japan

³ Shiga University, 1-1-1 Banba, Hikone, Shiga, 522-8522 Japan

⁴ Industrial Research Institute of Ishikawa, 2-1 Kuratsuki, Kanazawa, Ishikawa, 920-8203, Japan

⁵ University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033, Japan

⁶ Rikkyo University, 3-34-1, Nishi-Ikebukuro, Toshima-ku, Tokyo Japan

1 はじめに

本課題は KEK 素核研・新井教授を中心とする SOIPIX グループにおいて開発された積分型 SOI ピクセル検出器 INTPIX シリーズの性能評価、及び、残留応力測定への応用を目的として行うものである。

本課題においては

- ・ INTPIX シリーズ、及び、INTPIX4 を基に商用化を視野に入れて再設計された検出器 INTPIX4NA に関する性能評価と新たな測定への応用の探索
- ・ INTPIX シリーズによる金属材料等の高速・高精度な残留応力測定と新手法 (残留応力分布回復法、課題採択時仮称“CT 測定法”) の検証の 2 つを主な研究目的とした。

2 実験

■新検出器 INTPIX4NA の性能評価

新たに開発した検出器 INTPIX4NA (832×512 ピクセル、17μm ピッチ正方面素搭載[1]) について、BL-14A、BL-14B を用いてエネルギー分解能、ゲイン特性、解像特性、最小セトリング時間の評価を実施した。エネルギー分解能については、BL-14A において、検出器上の特定ピクセルに対して φ3μm ピンホールによる細径ビームを入射し、周辺 8 ピクセル (光子由来の電荷拡散範囲) との合算のアナログ出力値

のピーク分布を測定し、1 光子由来のピークの半値全幅 (FWHM、Full Width at Half Maximum) とピーク中央値 (Hpeak) によって定義されるエネルギー分解能 $R = FWHM/Hpeak \times 100$ (%) を求めることによって評価を行った。ゲイン特性についてはエネルギー分解能測定の数値より光子数毎のピークについてピーク中央値と収集光子数を換算して得られる収集電荷量の対応関係から電荷量当たりのアナログ出力値を求めることによって評価を実施した。解像特性については、BL-14B において、ニッケルメッキが施されたステンレス針によって得られたエッジ像を斜めエッジ法によって解析し、MTF (Modulation Transfer Function) を求めることによって評価した。最小セトリング時間 (特定ピクセル選択後アナログ出力応答が安定するのにかかる時間) については、BL-14A において、エネルギー分解能測定と同様の試験についてセトリング時間を変更して繰り返し実施し、エネルギー分解能が一定の値に収束する最小時間の探索を行った。BL-14A、BL-14B におけるセトアップの写真をそれぞれ図 1、図 2 に示す。

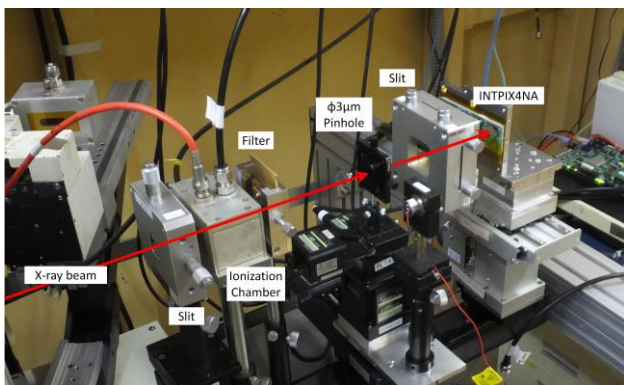


図1 BL-14A INTPIX4NA 設置セットアップ

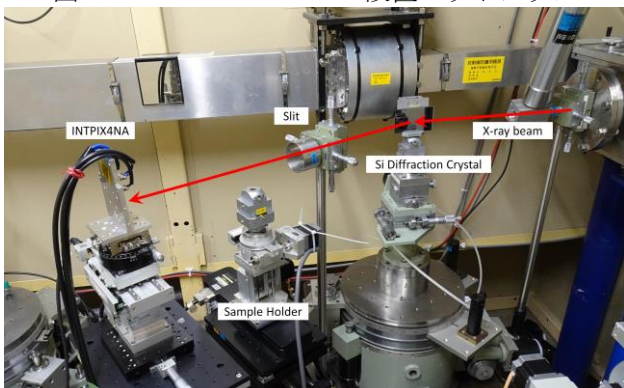


図2 BL-14B INTPIX4NA 設置セットアップ

■金属材料の高精度な残留応力分布の測定・新手法(残留応力分布回復法)の確立

INTPIX4NA と X-Y 軸自動ステージを用いた残留応力分布測定用セットアップ(図3)をBL-14Aに構築し、金属試料の測定を実施した。本セットアップにおいては、E=5.1-18.5 keV、φ1mm程度の細径単色光X線ビームが使用可能である。

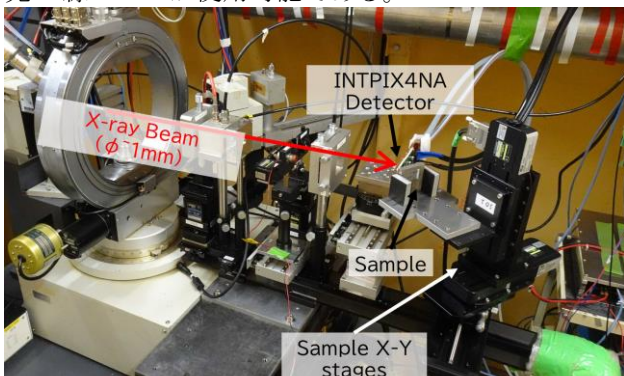


図3 BL-14A 残留応力分布測定セットアップ

本セットアップにおいては、従来実施されてきた1測定点毎のメッシュ測定[2]に加えて、ビームを照射しながら自動ステージによる揺動を行い、揺動範囲の平均応力値を測定する手法も実施可能である。新手法(残留応力分布回復法)においては、この揺動測定法を用いて試料面のあらゆる方向に十分に細かいピッチで揺動測定を繰り返し実施(図4)し、各方向の平均応力値を取得する。得られた各方向の平均応力値を応力分布の投影像であるとみなして、X線

CT等でも用いられる逆投影法を用いて再構成することによって元の応力分布を復元することを試みる。本手法は、従来の測定法ではビーム照射範囲内の結晶数が不足するために残留応力測定が難しかった試料に対しても測定を可能とする手法となる。

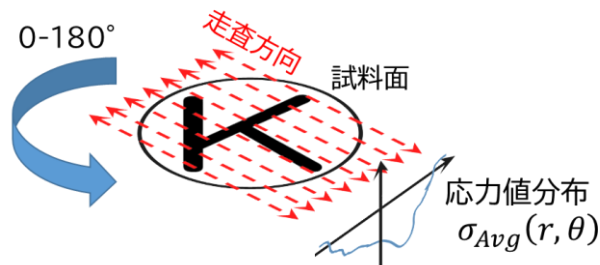


図4 揺動測定による試料の各走査方向の応力値分布取得の概略

3 結果および考察

■新検出器 INTPIX4NA の性能評価

○エネルギー分解能

測定結果を図5~7に示す。一部の測定については素子特性の評価データ取得のために2019G608の課題内において実施したものが含まれるが、後述のゲイン計算に用いているため併せて示す。

測定対象としたピクセルについて、エネルギー分解能は5.415 keVでは35.3%-46.2%、8 keVにおいては21.7%-35.6%、12 keVにおいては15.7%-19.4%であった。

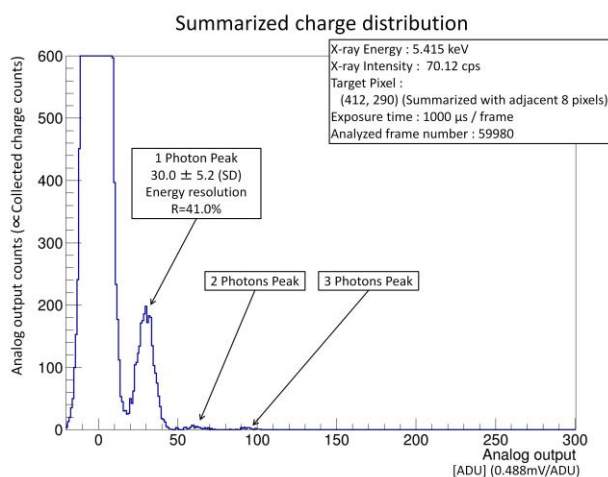


図5 5.415 keV 単色光による光子数別ピーク

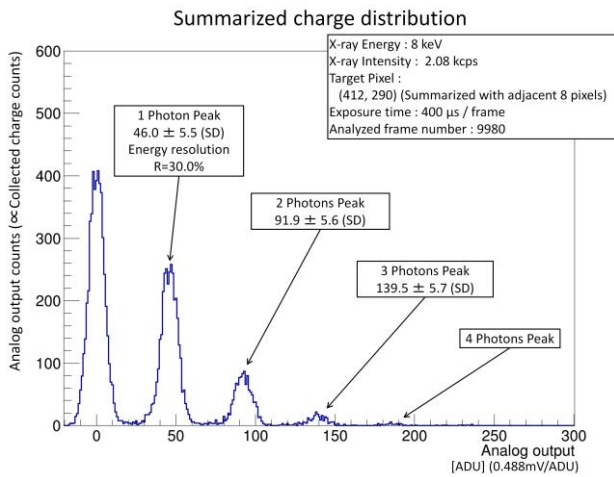


図6 8 keV 単色光による光子数別ピーク

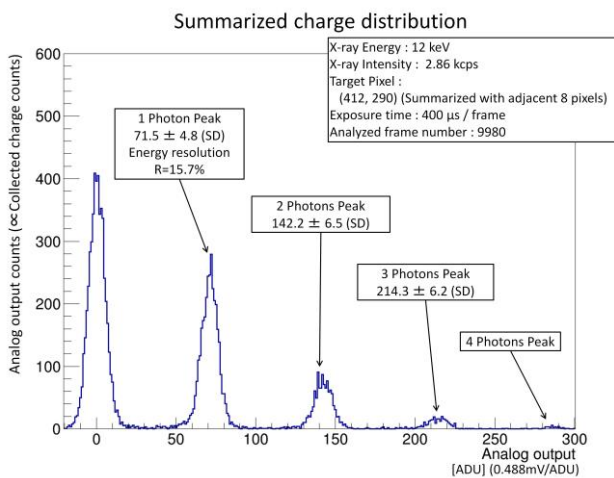


図7 12 keV 単色光による光子数別ピーク

○ゲイン特性

8keV および 12keV において得られた 1~3 光子ピークのデータを用いて算出したゲイン特性を図 8 に示す。測定対象としたピクセルについて、ピクセルゲインは 9.3–10.6 $\mu\text{V}/\text{e}$ であった。使用したピクセルのピクセルアレイ上における位置によってばらつきが確認されたが、いずれも良好な線形性を示しており、簡易な補正処理で対応可能な範囲であった。

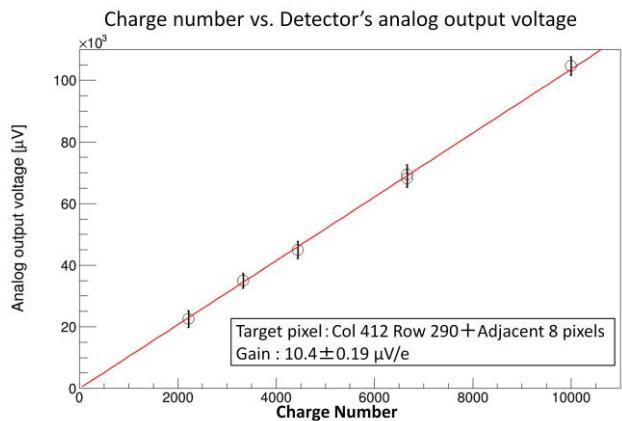


図8 ピクセル(412, 290)付近のゲイン特性

○解像特性

ピクセルアレイ上 Column 方向、Row 方向それぞれの MTF プロットを図 9、図 10 に示す。ナイキスト周波数(29.4 cycle/mm)における MTF はピクセルアレイの Column 方向・Row 方向のいずれにおいても 50% 以上を記録し、また 50% MTF および 10% MTF はナイキスト周波数を大幅に超える値を示した。

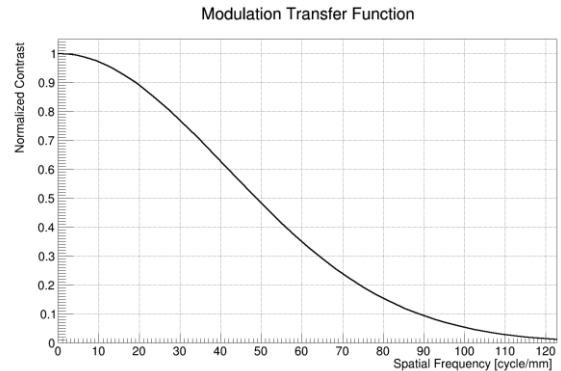


図9 ピクセルアレイ Column 方向の MTF データ

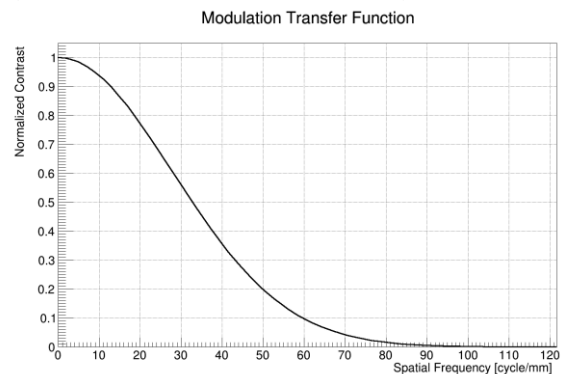


図10 ピクセルアレイ Row 方向の MTF データ

○最小セトリング時間

試験セットアップにおいて、出力特性を維持できる最短のセトリング時間は 1 ピクセル当たり 200 ns であった。これは INTPIX4NA 全体を読みだした場合のフレームレートで 153 fps に相当する。また、出力特性の低下が許容できる場合は 1 ピクセル当たり 80 ns(フレームレート換算 350fps)まで短縮することが可能であることが確認された。セトリング時間とエネルギー分解能のプロットを図 11 に示す。

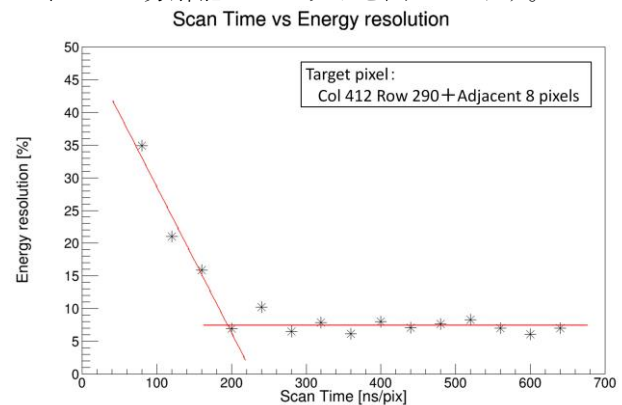


図11 セトリング時間(ScanTime)を変更した場合のエネルギー分解能プロット

■金属材料の高精度な残留応力分布の測定・新手法(残留応力分布回復法)の確立

新手法開発のための測定において、用いた試料は表面にKの字型のショットブラスト加工を施し圧縮応力分布を持たせたSS400材(50mm×50mm、テクノセイキ製、図12)である。 σ_x (サンプルX方向垂直応力)について、直径26mmの測定範囲を設定し、7keV ϕ 1mmビームによる1mmピッチ・26ライン走査を3°ステップで繰り返し実施し、61方向分の分布データを得た。

得られたデータについて測定条件を反映した補正を適用したフィルター関数を用いて逆投影法を行い、図に示す分布復元像を得た(図13)。本分布像において、Kの字型の加工部については-100~-880MPaの範囲の応力値、未加工部については+30~+1000MPa程度の応力値を示している。

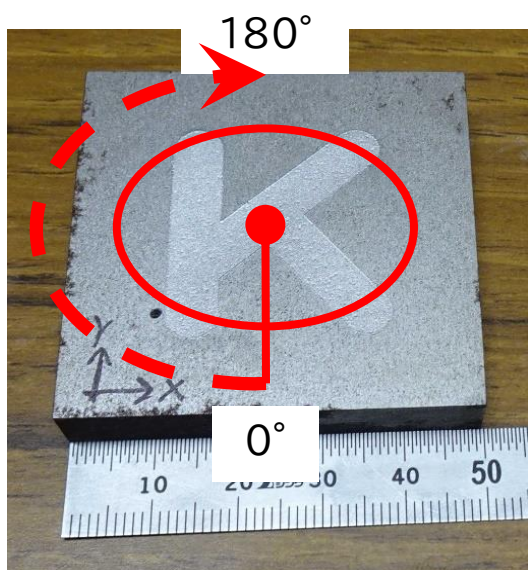


図12 試料写真(測定範囲を赤線で図示)

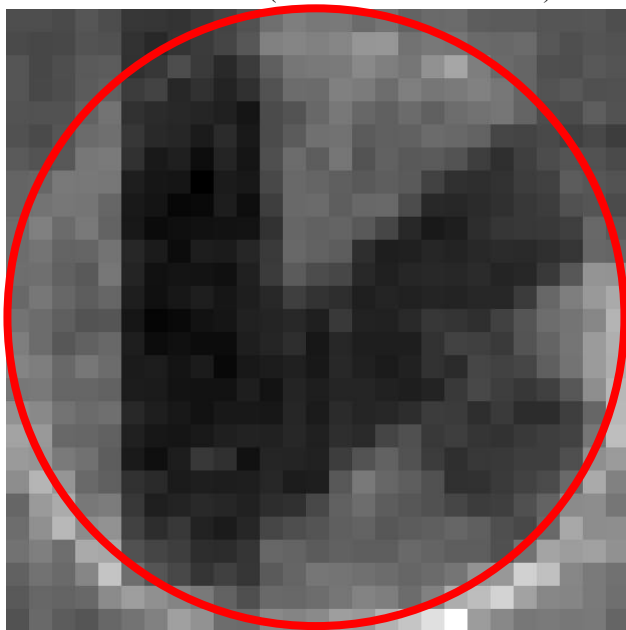


図13 応力分布復元像

4 まとめ

本課題の実施によって、INTPIX4NA検出器の性能評価、および、放射光を用いたX線残留応力測定系の構築と残留応力分布回復法開発を実施した。INTPIX4NA検出器については概ね期待される性能が得られていることが確認された。また、残留応力分布回復法については測定を実施した試料について、加工条件を反映した応力値分布が復元されており、本手法が有効である可能性を示すことができた。今後は2021G614課題の下で試験を継続する予定である。

参考文献

- [1] "INTPIX4NA" — new integration-type silicon-on-insulator pixel detector for imaging application. R.Nishimura et al. s.l. : IOP, 2021, JINST, Vol. 16, P08054.
- [2] Fine residual stress distribution measurement of steel materials by SOI pixel detector with synchrotron X-rays. R.Nishimura et al. s.l. : Elsevier, 2020, NIMA, Vol. 978 164380.

* ryunishi@post.kek.jp