

## 2次元 CdTe 検出器を用いた二重露光法による応力測定法の開発 A Feasibility Study on Double Exposure Method for Stress Measurements using CdTe Pixel Detector and White X-rays

鈴木 賢治<sup>a</sup>, 真木田 晶<sup>a</sup>, 豊川 秀訓<sup>b</sup>, 佐治 超爾<sup>b</sup>, 梶原 聖太郎<sup>b</sup>, 米村 光治<sup>c</sup>  
Kenji Suzuki<sup>a</sup>, Sho Makita<sup>a</sup>, Hidenori Toyokawa<sup>b</sup>, Choji Saji<sup>b</sup>, Kentaro Kajiwara<sup>b</sup>, Mitsuharu Yonemura<sup>c</sup>

<sup>a</sup>新潟大学, <sup>b</sup>高輝度光研究センター, <sup>c</sup>日本製鉄株式会社

<sup>a</sup>Niigata University, <sup>b</sup>Japan Synchrotron Radiation Research Institute, <sup>c</sup>Nippon Steel Corporation

粗大粒かつバルク材の X 線回折は斑点となるために、0 次元、1 次元検出器による X 線応力測定は困難である。その解決策として白色 X 線、CdTe ピクセル検出器および二重露光法を組み合わせた手法を提案し、その可能性について研究調査を実施した。

**キーワード：** 白色 X 線、二重露光法、CdTe ピクセル検出器、エネルギー較正、応力測定

### 背景と研究目的：

これまで、単色 X 線を利用した二重露光法による X 線応力測定を提案かつ実施して、塑性曲げ残留応力やくさびを打ち込んだ塑性変形材の残留応力を測定に有効な手法であることを実証することができた[1,2]。二重露光法を産業利用に適用するためには、実用部材の内部応力を測定する必要がある。そのためには、より高エネルギー X 線の透過力と白色 X 線の高輝度を活用することが最もふさわしい。それに挑戦するためには、高エネルギー白色 X 線とそれに対応した検出器が必要となる。

本課題においては、二重露光法の光源を単色から白色 X 線に変え、それに対応して検出器を新たに CdTe ピクセル検出器に変更し、高エネルギー X 線を利用できる課題に取り組む。さらに、白色 X 線を利用することで、単色 X 線よりも粗大粒の回折条件に有利な光学条件を実現できる。本実験では、以上により 2 次元 CdTe 検出器のエネルギー較正手法と CdTe 検出器を利用した二重露光法による応力測定法の開発を行う。

本手法の可能性が実証されるならば、これまで応力測定が測定困難であった実用材の粗大粒、集合組織、溶接材および微小領域の応力測定の領域に新たな道を開くことができる。

### 実験：

本実験では、ビームライン BL28B2 において偏向電磁石による白色 X 線を利用した。ビームサイズは、4 象限スリットにより調整した。

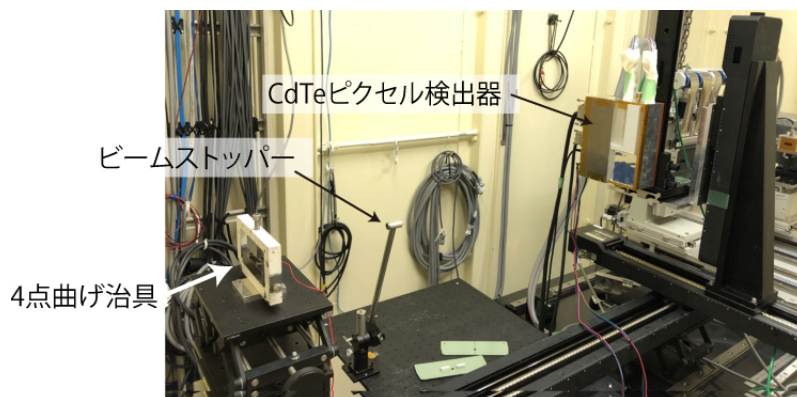


図 1. 二重露光法による 4 点曲げ応力測定の実験

装置のレイアウトは、図 1 に示すように 5 軸ステージの上に試料台を載せて、ビームストッパーをセットしている(写真の左側から右側に X 線ビームが照射される)。さらに、下流側に検出用の長尺の 3 軸ステージを配置した。長尺の z 軸ステージに CdTe ピクセル検出器を設置した。図 1 は、はりの 4 点曲げ試験の様子を示しており、図の左下側に曲げ治具がある。二重露光法は、検出器を前の P1 と後ろ P2 の 2 カ所で測定した。試料面を原点として、P1 は下流側に 300 mm、P2 は下流側に 800 mm の位置に設定した。

検出器は、JASRI が開発した CdTe ピクセル検出器を用いた[3]。ピクセルサイズ  $0.2 \times 0.2$  mm/pixel である。検出面積は  $40.2 \times 38.2$  mm<sup>2</sup> になる。検出画像は、 $201 \times 191$  画素で構成される。位置 P1 では検出器 4 (=2×2) 画面、位置 P2 では検出器 16 (=4×4) 画面で測定した。

試料は、連続環を持つ材料を想定した S45C の曲げ試験片(焼鈍材、1073 K、10 分)および粗大粒による回折斑点を想定した SUSF316L の曲げ試験片(焼鈍材、1173 K、8 時間、粒径 300 μm)を用意した。これらの試験片にひずみゲージを見ながら曲げを負荷して、曲げ試験片の幅方向に透過 X 線を入射し、回折像を P1, P2 で検出した。

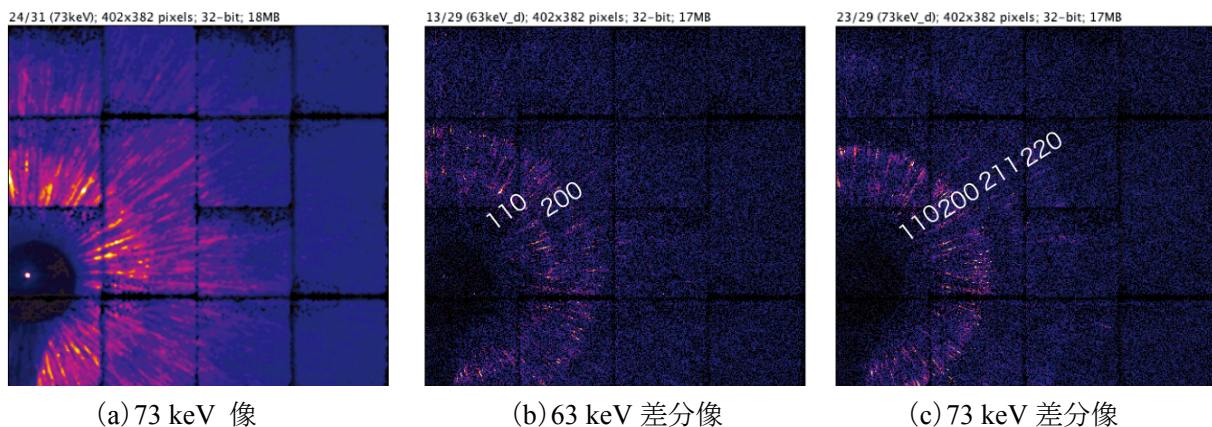


図 2. CdTe ピクセル検出器データを処理して得られた S45C の回折像

### 結果および考察：

CdTe ピクセル検出器は、エネルギー識別能力を持つ優れた 2 次元検出器であり、白色 X 線の高エネルギーに対しても計数が可能である。エネルギー較正は、蛍光 X 線の Pb-K $\alpha$  および W-K $\alpha$  の計測を行い、各ピクセルの閾値電圧  $V$  と X 線エネルギー  $E_i$  の関係を一次式で近似した。これを利用して回折像図 2(a) が得られる。この図は 73 keV 以下の光子をカウントした像に相当する。

各 X 線エネルギーの像の差分を取ることで、単色 X 線 (keV) で撮影した像と同等の画像が得られる。図 2(b) および (c) は X 線エネルギー 63 keV と 73 keV に相当する。図 2 は S45C の曲げ試験片の透過 X 線像であるから、試験片の板幅 (5 mm) に相当する幅のある回折像が得られる。おおよその指数付けをした結果を図 (b) と (c) に記した。図 (b) の 110 回折と 200 回折の半径が、図 (c) では縮んでいる象になっている。また、図 (b) の回折像で 211 回折や 220 回折が見えにくいのは、63 keV の低エネルギーによる吸収の影響である。図 2 は、同一位置の P1 の画像であり、P2 についても同様の解析をした。

前述の各処理には、膨大な量のデータについて複雑な手続きをして計算しなければならない。そのために、効率よく測定結果を処理するためのツールとシステムを作成する必要がある。その準備を充実するために、プログラムのバージョンを少しずつアップしている。それらのツールとシステムは新潟大学のサイトにアップされている[4]。これらのツールでは、画像の処理は ImageJ のマクロを利用し、計算などのシステムは gfortran を利用している。

### 参考文献：

- [1] K. Suzuki, et al, *Materials Research Proceedings*, **6**, pp. 69-74 (2018).
- [2] 鈴木賢治, その他, *材料*, **68**, pp. 312-317 (2019).
- [3] H. Toyokawa, et al, *Proc. 2nd Int. Symp. on Radiation Detectors and Their Uses (ISR2018)*, **24**, 011015 (2019).
- [4] <http://kikai.ed.niigata-u.ac.jp/CdTe/>