CdTe ピクセル検出器による応力評価の実証的研究

鈴木 賢治* 城 鮎美** 豊川 秀訓***
佐治 超爾*** 菖蒲 敬久****

A Feasibility Study on X-Ray Stress Measurement with CdTe Pixel Detector

by

Kenji SUZUKI*, Ayumi SHIRO**, Hidenori TOYOKAWA***,
Choji SAJI*** and Takahisa SHOBU****

In this paper, we proposed a double exposure method using synchrotron white X-rays (DEM-WX) to measure strains of coarse-grained materials, and examined its feasibility. The X-ray diffractions were measured by a CdTe pixel detector. The CdTe pixel detector can resolve photon energy by changing a threshold voltage. Calibrating each pixel of the detector using characteristic X-rays of Pb and W foils, the images by threshold X-ray energy were obtained. The difference image, which is like a diffraction image with mono-chromatic X-rays, could be calculated by the difference between the images by the threshold X-ray energy. The material of the bending specimen was an austenitic stainless steel with a grain size of 300 μm . The strains of the bending specimen were measured using the DEM-WX, and the results corresponded to the applied strains measured by the strain gauge.

Key words:

CdTe pixel detector, X-Ray stress measurement, Coarse grain, Double exposure method, Synchrotron white X-rays

1 緒 言

高エネルギー放射光単色X線を利用したひずみスキャニング法は、内部の応力評価法として普及している¹⁾。しかし、粗大粒材においては連続環が得られないことから、0次元検出器を利用するひずみスキャニング法を適用することは困難である。著者らは、その解決策として2次元検出器を利用する回折斑点追跡法(DSTM)を提案し、粗大粒を持つ材料の応力評価として有効であることを示した²⁾。DSTMは、複雑なスリット系である回転スリットを必要とし、その解析にも労力を要するなどの問題もある。また、より簡便な粗大粒のひずみを評価方法として二重露光法(以下、DEMと称する)を提案し、DEMが粗大粒のひずみ評価に有効であることを示した³⁾。この方法で用いた2次元検出器PILATUSは、Siが検出媒体に用いられており、30 keVでは計数効率10%以下に減弱してしまう。そのため、高エネルギーX線の透過力を利用した内部応力評価には適していない⁴⁾。ゆえに、理想的なDEMの実現には、高エネルギー放射光X線に適した2次元検出器の開発が重要な課題である。

さて、シンクロトロン放射光白色X線は高エネルギーかつ高輝度なマイクロビームを特徴としている。放射光白色X線のビームラインでは、これまで半導体検出器を

用いてエネルギー分散により応力測定が試みられている^{5),6)}。しかし、半導体検出器は0次元検出器であり、二重露光法には利用できない。2次元検出器で高エネルギーX線の計測に利用できる検出器として、蛍光体を検出媒体とするX線イメージインテンシファイアもあるが⁷⁾、積分型の検出器はX線エネルギーの分解能がないので、これらの検出器を白色X線と組み合わせて利用することは困難がある。

近年、広いエネルギー範囲で高い計数効率を有し、かつ、高いエネルギー分解能を有する2次元検出器として、CdTe半導体を検出媒体に用いたピクセル検出器が開発された⁸⁾。この検出器は高エネルギーX線を計数できるので、高エネルギーX線の透過力とマイクロビームを活用した二重露光法による応力評価の新しい展開が期待できる。本研究では、新たに開発したCdTeピクセル検出器を用いて、二重露光法による粗大粒の応力測定の実証性について研究を行った。

2 実験方法

2.1 二重露光法

粗大粒からのX線回折は斑点状になるので、2次元検出器の利用が最も適している。Fig. 1(a)のように座標系、白色X線、試料および検出器を配置する。なお、 z 軸が

† 原稿受理 令和元年8月14日 Received Aug. 14, 2019

©2020 The Society of Materials Science, Japan

* 正会員 新潟大学 教育学部 〒950-2181 新潟市西区

Faculty of Education, Niigata University, Nishi-ku, Niigata, 950-2181.

** 正会員 量子科学技術研究開発機構 関西光科学研究所 放射光科学研究センター 〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町

Kansai Photon Science Institute, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148.

*** 高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町

Japan Synchrotron Radiation Research Institute, Sayo-gun, Hyogo 679-5198.

**** 正会員 日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 物質科学研究センター 〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町

Material Sciences Research Center, Japan Atomic Energy Agency, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148.

(a) Coordinate system and configuration of detector

(b) Intersection of X-ray and diffracted beams

Fig. 1 DEM using synchrotron white X-rays.

X線ビームと一致するように座標を設定する。P₁, P₂の2カ所で回折斑点を測定し、斑点のピーク位置P₁(x₁, y₁, z₁), P₂(x₂, y₂, z₂)が得られる。P₁およびP₂から回折ビームの直線lが決定できる。それぞれの回折半径は、

$$r_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}, \quad r_2 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2} \quad (1)$$

で表される。P₁とP₂の移動距離をL(=z₂−z₁)とすると、回折角2θは次式から得られる。

$$2\theta = \arctan\left(\frac{r_2 - r_1}{L}\right) \quad (2)$$

Fig. 1(b)は、X線ビームの直線l_Xと回折ビームの直線lの交差を示している。直線l_Xおよびlの単位ベクトルe_Xおよびeを

$$e_X = (0, 0, 1) \quad (3)$$

$$e = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1) \frac{\cos 2\theta}{L} \quad (4)$$

と表記できる。ただし、両直線が交差する位置をP_Cとする。P_Cで両直線に直交するベクトルP_CO_Xは、

$$\overrightarrow{P_C O_X} = \overrightarrow{O O_X} - \overrightarrow{O P_C} = -l_0 e_X - (P_C - l_1 e) \quad (5)$$

で定義され、線分P_CO_Xは、直線l_Xとlに直交することから、それぞれの内積は0になる。それを利用して未知数l₀およびl₁を求めることができ、その結果、

$$l_0 = \frac{\cot^2 2\theta}{L} [(x_2 - x_1)x_1 + (y_2 - y_1)y_1] \quad (6)$$

$$l_1 = \frac{\cot^2 2\theta}{L \cos 2\theta} [(x_2 - x_1)x_1 + (y_2 - y_1)y_1] \quad (7)$$

となる。最終的に、2直線の交差位置P_C(x_C, y_C, z_C)は、

$$x_C = x_1 + \frac{z_C}{L} (x_2 - x_1) \quad (8)$$

$$y_C = y_1 + \frac{z_C}{L} (y_2 - y_1) \quad (9)$$

$$z_C = -\frac{\cot^2 2\theta}{L} [(x_2 - x_1)x_2 + (y_2 - y_1)y_2] \quad (10)$$

が得られる。

2.2 CdTe ピクセル検出器

SP8-04F10Kは、Alショットキーバリアダイオードと計数型集積回路で組み合わされたCdTeピクセル型検出デバイスであり、検出面積20×19 mm²、ピクセルサイズ0.2×0.2 mm/pixelである⁸⁾。本実験に供したCdTeピクセル型検出器はSP8-04F10Kを2×2で構成し、各SP8-04F10Kの間に1画素に相当する0.2 mmのギャップを設けているので、検出面積は40.2×38.2 mm²になる。検出画像は、201×191画素で構成される。

これまで、DEMに利用していた2次元検出器PLATUSは、30 keV以上のX線エネルギーでは検出効率が急激に低下した⁹⁾。これに対して、本実験に用いたCdTeピクセル検出器は、CdTeを利用しているので高エネルギーX線の検出が可能であること、エネルギーの識別が可能であることが特徴となる。CdTeピクセル検出器は検出面積が小さいので、自動ステージに搭載してCdTeピクセル検出器を移動することで検出面積を広げることにした。CdTeピクセル検出器は、コンパレータのしきい値電圧で検出する光子エネルギーのしきい値を調整できるので、本研究では、本検出器を利用することで、放射光白色X線とDEMを組み合わせて回折を測定することを試みる。これは、白色X線による応力測定に新たな道を拓く試みである。

2.3 放射光実験

本研究では、大型放射光施設SPring-8の量子科学技術研究開発機構専用ビームラインBL14B1を使用した(Fig. 2)。BL14B1では、偏向電磁石による放射光白色X

Fig. 2 Experiment of DEM using synchrotron white X-rays at BL14B1 in SPring-8.

線を光源として利用した。入射X線ビームは、4象限スリットにて 0.1×0.1 mmの寸法に絞られ、透過法で試験片に入射された。

ひずみ測定に供した試験片は、鍛造により製造されたオーステナイト系ステンレス鋼 SUSF316L である。長さ45 mm、高さ6 mm、幅7 mmに加工した後、焼きなまし熱処理した。組織観察により実測した粒径は、 $300 \mu\text{m}$ の粗大粒であった。Fig. 2に示すように、この試験片を4点曲げの治具に組み込んで、曲げひずみを負荷した。引張側表面に貼り付けたひずみゲージにより負荷ひずみを計測しながら、弾性変形の範囲内の $762 \mu\epsilon$ (148 MPa 相当)の曲げひずみを負荷した。X線ビームは曲げ試験片の幅方向に透過させて回折を測定した。圧縮表面を $\zeta = 0$ mmとして、測定部位は、 $\zeta = 0.2 \sim 5.7$ mmまで0.5 mm間隔で12点を測定した。

Fig. 2に示すように、CdTe ピクセル検出器を3軸自動ステージに搭載し、前方 P_1 で 2×3 枚、後方 P_2 で 4×5 枚で回折斑点を測定した。 P_1 と P_2 の距離 L は500 mmである。

3 結果および考察

3.1 検出器のエネルギー較正

まず、本研究で重要な検出器であるCdTe ピクセル検出器のX線エネルギー認識のしくみについて説明する。Fig. 3に示すように、コンパレータのしきい値電圧を変化させることにより、各ピクセルの計数する光子のしきい値エネルギーを変化させることができる。例えば、

Fig. 3 Mechanism to distinguish photon energy by the CdTe pixel detector.

Fig. 4 Laue patterns measured by CdTe pixel detector. (a) Image measured with threshold voltage of -130 mV. (b) Image measured with threshold voltage of -80 mV.

しきい値電圧 -200 mV のときは、X線エネルギーの大きな光子をカウントするので、計数される光子は少ない。これに対して、しきい値電圧を -60 mV にすると、図のように高エネルギーから低エネルギーまでの多くの光子を計数できるので、大きいカウント数になる。CdTe ピクセル検出器は、前述のようにして各ピクセルごとにエネルギー識別ができる特徴を持つ。

Fig. 4は、実際に検出器で測定した回折像である。Fig. 4 (a)はしきい値電圧 -130 mV で測定した像であり、しきい値電圧が低く高エネルギーの成分だけが計測されるので、カウント数は少なく暗い画像となる。それに対して、Fig. 4 (b)はしきい値電圧 -80 mV で測定された場合であり、高エネルギーから低エネルギーまでの成分を含んだ光子が計測されるので、各ピクセルのカウント数は大きくなり明るい画像が得られる。本実験では、検出器のしきい値電圧を $-210 \sim -70$ mV の範囲で1 mV 間隔で1 sの露光時間で141枚の画像を測定した。

(a) Pb-foil

(b) W-foil

Fig. 5 Relation between threshold voltage and photon counts for a pixel.

さて, Fig. 4 の測定されたままの像は, 各ピクセルのしきい値電圧による像であり, X線エネルギーとの対応は不明であり, そのままでは, ひずみ測定には利用できない. そのため, まず各ピクセルについてしきい値電圧とX線エネルギーのしきい値との関係を求めなくてはならない. 本実験では, Pb と W の箔に白色X線を照射して蛍光X線を発生させ, それぞれの特性X線を CdTe ピクセル検出器で測定し, 全ピクセルのエネルギー較正を試みた.

CdTe ピクセル検出器のしきい値電圧を変化させながら, Pb および W からの蛍光X線をそれぞれ計測した結果を Fig. 5 に示す. この図は, 一例として CdTe ピクセル検出器のあるピクセル (No. 3000) の結果を示している. Fig. 5 (a) は Pb 箔の蛍光X線を照射しながらしきい値電圧を -140 mV から -60 mV まで変化させながらX線強度を測定した結果を示している. 黒線で示すX線強度は, -140 mV を過ぎたところで立ち上がり, さらに -120 mV 付近でさらに急増する. X線カウントのしきい値電圧による差分を赤線で示すと, Pb- $K\beta$ と Pb- $K\alpha$ のピークが現れる. なお, Fig. 5 の中に Sn- $K\alpha$ 線, Ta- $K\alpha$ 線が現れた原因として, Ta- $K\alpha$ 線はスリット材質の Ta 由来の特性X線の成分が現れている可能性があるが, Sn- $K\alpha$ 線については, その原因は不明である. Fig. 5 (a) の差分を見ると, その他の特性X線も混ざっているように見受けられる. Fig. 5 (b) には, W 箔の特性X線を測定した結果を示す. Pb 箔のときと同様に, X線カウントのしきい値電圧による差分には, W- $K\beta$ と W- $K\alpha$ のピークが現れる.

Pb- $K\alpha$ と W- $K\alpha$ のピークが明瞭なので, 各ピクセルのエネルギー較正には, これらの2点のピークを利用する. すべてのピクセル i に対して, しきい値電圧 V_i (mV) と蛍光X線のエネルギー E_i (keV) との関係が線形であることを仮定して,

$$E_i = a_i V_i + b_i \quad (11)$$

の直線近似を行った. Pb- $K\alpha$ および W- $K\alpha$ を利用して, 全ピクセルに対してエネルギー較正式の係数 a_i と b_i の

Fig. 6 Distribution of coefficients a_i and b_i for energy calibration of CdTe pixel detector.

係数を求めた. その係数 a_i と b_i の分布を Fig. 6 に示す.

その分布を見ると, 係数 a_i は概ね -1 付近であるが, 正の値も一部あることから, 較正が十分されていないピクセルもあり, まだ改善の余地がある. CdTe ピクセル検出器のゲイン調整およびエネルギー較正は, ひずみ測定の精度に直結するので, それらの改善は今後の課題である.

3.2 波長エネルギー像の作成

画像処理の次の手順は, 前述の係数 a_i と b_i のデータベースを利用して, エネルギー較正した画像をしきい値電圧による画像から作成することにある. 任意のX線エネルギー E_i (keV) を決定し, 各ピクセルごとに a_i と b_i の関係から相当するしきい値電圧 V_i (mV) を決定し, そのピクセル位置のカウントを拾い出す. この操作を全ピクセルについて行うことで, 目的の E_i (keV) 像が完成する. 測定したしきい値電圧像の全イメージ群のピクセルデータから逐次X線エネルギー像 (keV による像) を作成する. 例えば, P_2 の画像は, 201×191 ピクセルを20枚で構成され, $-210 \sim -70$ mV のデータがあるので, 1.08×10^8 のデータから各しきい値エネルギー像を作成する. この作業は, その計算に膨大な処理時間を要する. このようにして作成されたしきい値エネルギー画像群は, 白色X線による二重露光法 (DEM-WX) のデータ処理の核となる.

作成された各X線エネルギー (keV) 像の一例を Fig. 7 に示す. Fig. 7 のX線像は, CdTe ピクセル検出器から測定されたしきい値エネルギー 73 keV 像であり, 高エネルギーから 73 keV までの積分像である. X線エネルギー 73 keV の単色X線の像ではないので注意を要する. しきい値エネルギー像の回折斑点は, 波長に依存して回折角度も変化するので, ビームセンターから放射状に斑点が伸びる形を示しており, 単色X線の回折斑点像とは異なる.

Fig. 7 Laue pattern for 73 keV processed by energy calibration.

Fig. 8 Examples of processed images at P1. (a) Differential image for X-ray energy with 74 keV. (b) Peak position of diffraction spots. Peak positions are indicated with a cross mark.

る。

しきい値エネルギー像から単色X線エネルギー像を作成することを試みた。例えば、 $i-1$ と $i+1$ (keV) とのしきい値エネルギー像 $I_{th}(i-1)$, $I_{th}(i+1)$ の中間差分から、 i keV の差分像 $I(i)$ を計算した。

$$I(i) = \frac{1}{2} \{I_{th}(i-1) - I_{th}(i+1)\} \quad (12)$$

この差分像の例を Fig. 8 (a) に示す。Fig. 8 (a) は、X線エネルギー 74 keV の回折像であり、まさしく単色X線回折斑点像が得られている。その回折像の各斑点のピークトップの7割の領域の輝度の重心を回折斑点の位置とした。その結果を Fig. 8 (b) に示す。本研究では、この差分処理を連続して行い 60 ~ 80 keV の回折像 I を得た。

60 ~ 80 keV の一連の差分像の斑点のピーク強度と位置の挙動を観察すると、波長の変化と共に回折斑点は移動しながら、ピーク強度が大きくなり、やがて最大値を示して消えて行く挙動が見られた。その様子を Fig. 9 に示す。各回折ピークが出現してからピーク強度の増分を z 軸に示している。このような回折強度の変動は、各結晶粒の格子面の方位と波長の関係によるものであり、

Fig. 9 Change in peak intensity of diffraction spots with increase in X-ray energy.

回折斑点のピーク強度が最大値を示す時のX線エネルギーが、ブラック条件を最もよく満足している。ゆえに、斑点ピークが最大を示すX線エネルギーの 때가、各回折斑点の最適な波長であると定義した。

本研究においては、位置 P_1 において各斑点の強度が最大値を示すX線波長の条件を探し、そのX線波長の位置 P_2 の回折像の中から P_1 斑点の対を探す。この P_1 と P_2 の斑点对から、DEM で回折位置 P_C と回折角 2θ を求めた。

P_1 と P_2 の斑点の対を探すとき、実際には多数の組み合わせがある。さらに、回折位置が異なる上に回折格子面 (hkl) の組み合わせはいくつか考えられる。単色X線の画像では、一律の hkl 回折格子面を使用するので、 P_1 と P_2 の回折像が1対1に対応するが、白色ではそれが成立しないので、単純なマッチングは適用できない。また、検出器の較正にムラがあることも考えられる。本研究では、 P_1 の斑点のX線エネルギーに対応する P_2 像のあらゆる回折斑点の中から、以下の条件に合う P_2 の斑点を選択した。

1. $(x_C^2 + y_C^2)^{1/2} \leq 5$, すなわち交差位置が光軸から 5 mm 以内。
2. 交差位置 z_C が, $-170 \sim -330$ mm の範囲内。
3. 測定された格子面間隔 d が, f. c. c. の回折格子面 (hkl) と整合性のある斑点。

3.3 4点曲げひずみの測定

DEM-WXで測定された P_1 と P_2 の斑点の対から DEM-WX で回折角 2θ を求め、 hkl 格子面間隔 d_{hkl} を決定する。格子面間隔 d_{hkl} では、そのまま比較することができないので、次式

$$a = \frac{d_{hkl}}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (13)$$

により格子面間隔 d_{hkl} をすべて格子定数 a に変換して規格化した。

Fig. 10 に示すように、式 (13) で得た格子定数 a は、回折ベクトルの方位 $\varphi\psi$ に相当する。そこで、単純曲げの応力条件 ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) および無ひずみの格子定数 a_0 を用いて、応力-ひずみの関係から測定した $\varphi\psi$ 方位の格子定数 $a_{\varphi\psi}$ を試験片長手方向の格子定数 a_1 に変換した。その変換式は、次式となる。

$$a_1 = \frac{a_{\varphi\psi} - a_0}{(\cos^2 \varphi - \nu \sin^2 \varphi) \sin^2 \psi - \nu \cos^2 \psi} + a_0 \quad (14)$$

Fig. 10 Relation between diffraction vector and principal strains.

Fig. 11 Lattice constants measured using DEM-WX. a_1 is the lattice constant in the direction of a length of the specimen.

ただし、ポアソン比 ν の値は単結晶のスティフネス c_{ij} を用いて¹⁰⁾、斑点の回折面 hkl ごとに Kröner モデルから計算した^{11),12)}。このようにして、各回折斑点から得られた格子定数 $a_{\varphi\psi}$ を曲げ応力に対する格子定数 a_1 の変化として捉えることができる。Fig. 11 に DEM-WX で測定した格子定数 a_1 を示す。図の ζ は圧縮側表面からの距離を示している。図中のプロットは、回折斑点から得られた各測定値位置 ζ における平均値である。この各プロットの平均値は計測した 141 枚のデータから得られた回折強度が最大値の中から、 P_1 と P_2 の回折斑点の対が得られ、かつ適切な回折面が得られた回折斑点の平均値である。測定された回折角のばらつきはあったが、平均値は直線関係を示し、曲げ応力分布を反映している。4 点曲げ試験片の中立面 ($\zeta = 3.0$ mm) は無ひずみであるので、Fig. 11 のプロット点を直線近似して $\zeta = 3.0$ mm の a_1 の値を無ひずみの格子定数 a_0 と仮定して、 $a_0 = 3.57985$ Å を得た。

Fig. 12 Strains measured using DEM-WX under 4-point bending.

本来は、 P_1 の斑点は、 P_2 の斑点と 1 対 1 に対応するはずであるが、それがすべて利用できた訳ではない。これは、CdTe ピクセル検出器のエネルギー較正が不充分であり、検出面積のすべてが精度よく利用できていないことが原因である。また、 P_1 と P_2 では、CdTe ピクセル検出器を移動させて大きな領域を構成しているため、実際の有効な面積は限られているかもしれない。

さて、前述の手続きで得られた無ひずみの格子定数 a_0 を利用して、DEM-WX で測定した曲げひずみの関係を示したのが Fig. 12 である。ひずみゲージから得られた曲げひずみを破線で図中に合わせて示した。DEM-WX で測定されたひずみは、負荷ひずみによく一致している。この結果は、DEM-WX によるひずみ測定の可能性を証明するものである。DEM-WX を利用して粗大粒の応力測定ができること、白色 X 線による透過力と微小領域の応力測定ができることなど、今後の X 線応力測定の新たな展開が期待できる。

4 結 言

本研究では、放射光白色 X 線と二重露光法を利用して粗大粒のひずみの測定の可能性を研究した。ラウエ斑点を CdTe ピクセル検出器で測定し、回折を計測することを試みた。得られた結果を示すと以下のようである。

- (1) Pb, W の特性 X 線を利用して、CdTe ピクセル検出器のエネルギー較正を行い、波長エネルギー較正した像を作成することができた。その差分像から単色 X 線による回折像と等価な像を得ることができた。
- (2) 波長の変化に伴い、各回折斑点の強度は最大を示す挙動を示す。その最大を示す波長が、その結晶粒の最適な回折条件である。
- (3) 回折斑点の最適波長での回折斑点の対を用いて、二重露光法により回折角を決定し、4 点曲げのひずみを求めた。その結果、DEM-WX によるひずみは、ひずみゲージから得られた負荷ひずみとよく一致した。

なお、本研究は平成 29 年度学術研究助成基金助成金基盤研究 (C) 課題番号 17K06046 の援助によるものである。また、本実験は QST 施設共用 2018B-H13, JASRI 利用課題 2018A3653, 2018B3653, 2018B3684 および文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業 (A-18-QS-0032) の支援を受けた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) P.J. Withers, "Use of synchrotron X-ray radiation for stress measurement", Analysis of Residual stress by Diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation, Ed. by M.E. Fitzpatrick and A. Lodini, Taylor & Francis, pp.170-218 (2003).
- 2) K. Suzuki, T. Shobu, A. Shiro and S. Zhang, "Stress evaluation in material with coarse grains using area detector", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol. 63, No. 7, pp. 527-532 (2014).
- 3) K. Suzuki, T. Shobu and A. Shiro, "Stress measurement of coarse grains using double exposure method", Journal of the Society of Materials Science, Japan,

- Vol. 68, No. 4, pp. 312-317 (2019).
- 4) K. Suzuki, T. Shobu, A. Shiro and S. Zhang, "Evaluation of welding residual stresses using diffraction spot trace method", *Advanced Materials Research*, Vol. 996, pp. 76-81 (2014).
 - 5) J. Shibano, K. Kajiwarra, T. Tsukamoto, H. Kawai, S. Miura, S. Zhang, T. Shobu and M. Kobayashi, "Evaluation of ductile damage progress of aluminum single crystal with prior activity of single slip system under tensile loading by using synchrotron white X-ray", *Material Science Forum*, Vol. 777, pp. 176-181(2014).
 - 6) D.J. Weidner, M.T. Vaughan, L. Wang, H. Long, L. Li, N.A. Dixon and W.B. Durham, "Precise stress measurements with white synchrotron x rays", *The Review of scientific instruments*, Vol. 81, 013903, (2010).
 - 7) N. Tamura, A.A. MacDowell, R. Spolenak, B.C. Valek, J.C. Bravman, W.L. Brown, R.S. Celestre, H.A. Padmore, B.W. Battermana and J.R. Patel, "Scanning X-ray microdiffraction with submicron white beam for strain/stress and orientation mapping", *Journal of Synchrotron Radiation*, pp. 37-43 (2003).
 - 8) H. Toyokawa, C. Saji, M. Kawase, K. Ohara, A. Shiro, R. Yasuda, T. Shobu, A. Suenaga and H. Ikeda, "Development of CdTe pixel detectors for energy-resolved X-ray diffractions", *Proceedings of 2nd International Symposium on Radiation Detectors and Their Uses (ISRD2018)*, *JPS Conference Proceedings* Vol. 24, 011015 (2019).
 - 9) K. Suzuki, T. Shobu, A. Shiro and S. Zhang, "Evaluation of welding residual stresses using diffraction spot trace method", *Advanced Materials Research*, Vol. 996, pp. 76-81 (2014).
 - 10) H.M. Ledbetter, "Predicted single-crystal elastic constants of stainless-steel 316", *British Journal of NDT*, Vol. 23, pp. 286-287 (1981).
 - 11) E. Kröner, "Berechnung der elastischen Konstanten des Vierkristalls aus den Konstanten des Einkristalls", *Zeitschrift Physik*, Vol. 151, pp. 504-518 (1958).
 - 12) K. Suzuki, X-ray and mechanical elastic constants for cubic system by Kröner model,
<http://www.rigaku.co.jp/app/kroner/kroner.c.html>
(accessed Nov. 20, 2019).