



## 2次元検出器による内部ひずみ評価法

### Evaluation of Internal Stresses using Area Detectors

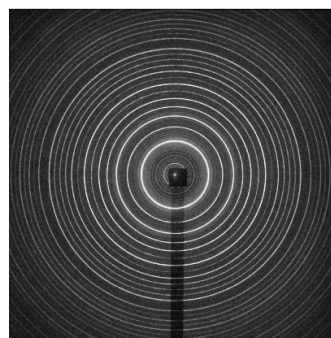
新潟大学	鈴木 賢治	Kenji SUZUKI	Member
日本原子力研究開発機構	菖蒲 敬久	Takahisa SHOBU	Non-member
徳島大学大学院	城 鮎美	Ayumi SHIRO	Non-member
高輝度光科学研究センター	豊川 秀訓	Hidenori Toyokawa	Non-member

An area detector technique has to be applied to the strain scanning method for materials with coarse grains. A new rotating slit system was designed for a 2-dimensional (2D) detector strain scanning method. The rotating slit system can focus the 2D detector on the center of the goniometer, and the gauge volume is made by the rotating slit system. The stress measurements were examined with the rotating slit and 2D detector. The measured diffraction spots shifted for the 2D strain scanning. The magnitude of the shift of the diffraction spot was very large as compared with the shift due to the strain. This phenomenon was caused by interaction between the gauge volume and the coarse grain. That is a coarse grain effect. To overcome the coarse grain effect, we propose a diffraction spot trace method (DSTM), which is constructed by the rotating slit and the PILATUS detector. The bending stress distribution of the coarse grain aluminum alloy was measured by DSTM. The measured stress was consistent with the applied stress.

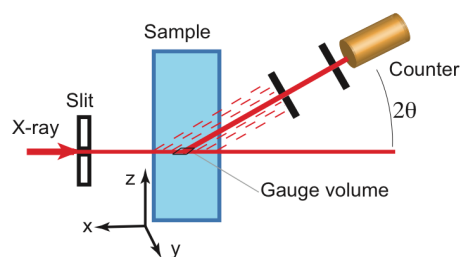
**Keywords:** X-Ray Stress Measurement, Synchrotron, Rotating-slit, Area Detector

### 1. 緒言

材料の実応力を知ることは、構造健全性や製造物の信頼性において重要である。近年、材料の内部の実応力を中性子や高エネルギー放射光を用いて評価するひずみスキャンニング法がある<sup>[1]</sup>。この新しい光源を利用した応力評価方法が急速に発展してきたことにより、内部の応力分布測定の手法も確立しつつある<sup>[2]</sup>。高エネルギー放射光は、透過力では中性子よりも劣るが、空間分解能に優れており、表面付近の応力分布測定に適している。細粒の材料であれば、Fig. 1 (a)に示すようなきれいな回折環を得ることができるので、Fig. 1 (b)に示すダブルスリット光学系とシンチレーションカウンターのような0次元X線検出器で、回折中心にあるゲージ体積の応力を測定することが可能である。つまり、回折装置の0次元検出器をスキャンニングして、Fig. 1 (a)の回折環の回折角 $2\theta$ の変化からブラッグ条件を用いてゲージ体積の格子ひずみを求める。さらに、試料ステージを $xyz$ 方向にスキャンニングすることで、3次元の実応力マップを作成することができる。ダブルスリット光学系と0次元検出器の組合せでは、Fig. 1 (b)



(a) Diffraction rings



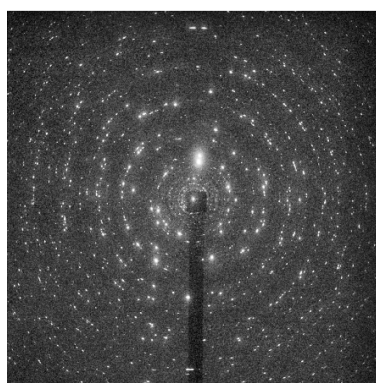
(b) Strain scanning method by point detector

**Fig. 1 Conventional strain scanning method.**

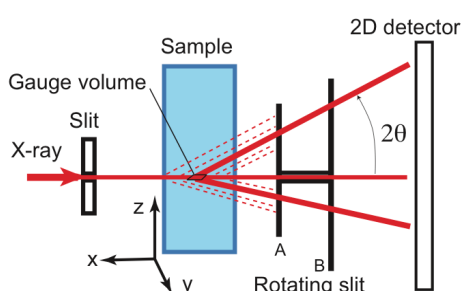
に示すように試料の厚さに関係なく、ゲージ体積(回折中心)のひずみを計測できる利点がある。

さて、溶接や加工による引張り残留応力は応力腐食割

連絡先: 鈴木賢治、〒950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050 番地、新潟大学教育学部、  
E-mail: suzuki@ed.niigata-u.ac.jp



(a) Diffraction spots



(b) Strain scanning method by 2D detector

Fig. 2 2D strain scanning method

れ(SCC)の一因である。また、SCC き裂の進展を予測するには、溶接内部の残留応力分布を知る必要があり、内部応力を知ることは保全において重要な意味がある。数値解析により溶接残留応力を得る方法もあるが、それを実測した残留応力と比較することで数値計算の信頼性や機器の安全性も確保できる。しかし、溶接部は、凝固組織と熱影響による粒成長などにより粗大粒となり、粗大粒の応力は測定困難とされている。その原因は、測定対象が粗大粒を持つ材料であるために回折環が得られず、Fig. 2(a)に示すような回折スポット像となる。この回折スポット中心を通るように 0 次元検出器を走査することは困難である。回折スポットを捉えるためには、0 次元でなく 2 次元の検出器が不可欠である。2 次元検出器による一般の測定においては、試料が薄いので試料と検出器の間には光学系は必要ない。しかし、厚みのある試料に対しては Fig. 2(b)に示すように、検出部が回折中心を視準する光学系を新たに開発する必要がある。

本研究では、それを解決するために Fig. 2(b)に示す 2 次元検出器による測定法である 2 次元ひずみスキャン法を検討する。特に、回転スリット(rotating slit)の有効性と 2 次元検出器の精度などの基礎的研究について報告

する。また、計数型 2 次元検出器と回転スリットを組み合わせ、粗大粒の内部応力を評価する手法を提案し、その有効性を実証する。

## 2. 2次元検出器による内部応力評価方法

### 2.1 回転スリット

回折装置の 0 次元検出器では、Fig. 1 (b)のようにカウンターの前にダブルスリットが用意され、回折中心をカウンターが自動的に見るようになっている。その結果、ダブルスリットで作られるゲージ体積の回折を測定することができる。これと同様の原理で、2 次元検出器に対してもゲージ体積を作る方法を考えなければならない。Fig. 2 (b)に示したようにスリット系がなければ、あらゆる場所の X 線が 2 次元検出器に入り、検出部の位置と回折中心が一致することはない。

2 次元検出器用のスリットについては、これまでコンカルスリットおよびスパイラルスリットが開発され、応力測定に応用されている。コンカルスリットは円すいの単一のスリットを利用してゲージ体積を作り、スキャンングすることで内部の応力を評価する手法であるが、単一スリットのため測定対象の回折角に対応したスリットを作成しなければならない、任意の回折角に対して対応することができない<sup>[3,4]</sup>。また、従来のスパイラルスリットは、スリットの方角角により、ゲージ体積の位置が違ふことを利用して内部応力分布を測定する利点があるが、方角角により深さが変わり解析が煩雑である<sup>[5,6]</sup>。

本法では、Fig. 2 (b)で示したように 2 次元検出器のあらゆる面がすべて回折中心に焦点を結ぶようなスリットを開発する。方位角  $\varphi$  (2 次元検出器の回折環の円周角度)に依存せずに検出器の半径から回折角  $2\theta$  が求められるスリットを設計すればよい。著者らは、Fig. 2 (b)の回転スリット A と B が相似なスリット曲線を持ち、かつそれらの相似形のスリットが同軸回転することで検出器のあらゆる面がすべて回折中心に焦点を結ぶことができることを提案する。つまり、回折中心から出た X 線がスリット A を通過し、さらにスリット B を通過する条件は、スリット B が A と相似な形を持つことで実現できる。

本研究では、2 次元検出器に適した曲線としてアルキメデス螺旋およびインボリュート曲線を採用した。アルキメデス螺旋は、極座標  $(r, \varphi)$  で示すと次式となる。

$$r_A = a\varphi, \quad r_B = b\varphi \quad (1)$$

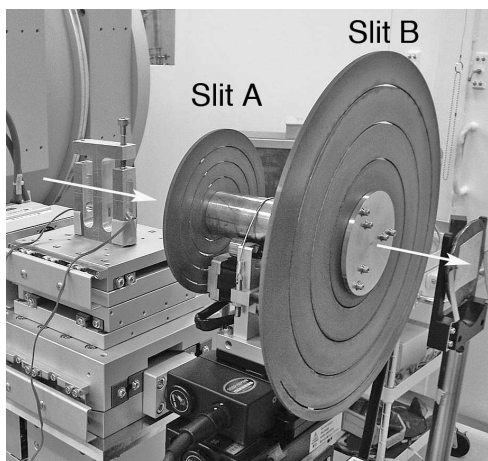
ただし、 $r_A$  および  $r_B$  は回転スリット A, B のそれぞれの半径、 $\varphi$  は方位角である。回転に比例して半径が大きくなる

渦巻き型のスリットとなる。製作したアルキメデス・スリットを Fig. 3 (a) に示す。このアルキメデス・スリットは剛性が低いので、高速で回転させると変形しやすいので、0.017 Hz にて回転させた。

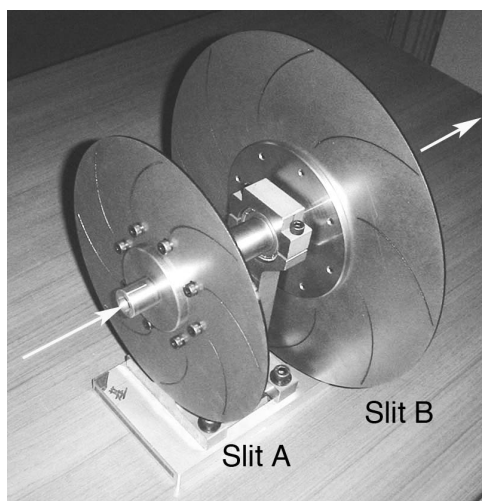
他方、インボリュート曲線は基礎円から糸を解いたときの曲線であり、歯車によく使われる曲線型である。インボリュート曲線を極座標  $(r, \varphi)$  で示すと

$$r_A = a(1 + \varphi)^{1/2}, \quad r_B = b(1 + \varphi)^{1/2} \quad (2)$$

で表される。ただし、 $a, b$  はそれぞれの回転スリットの基礎円半径である。製作したインボリュート・スリットを Fig. 3 (b) に示す。インボリュート・スリットは剛性が高いので、回転速度 1 Hz で回転させた。速い現象にはインボリュート・スリットが有利であるが、製作の複雑さを解決する必要がある。



(a) Archimedes slits



(b) Involute slits

Fig. 3 Rotating slit system

これらのスリット曲線の  $a, b$  の値とスリット間隔  $L$  により、スリット A と焦点 O との距離  $F$  は、

$$F = aL / (b - a) \quad (3)$$

となる。この式は、これらの曲線では焦点間距離  $F$  が方位角  $\varphi$  に無関係であり、2次元検出器のすべての位置  $(x, y)$  が焦点 O を向くことを数理的に証明したことを意味する。同位相に回転スリット A と B を組立て、同一軸で回転をすることで、2次元検出器全面に焦点(ゲージ体積)からの回折像を得ることができる。

本実験の回転スリットの諸元は、アルキメデス・スリットについては、 $a = 5\pi$  mm、 $b = 10\pi$  mm、 $L = F = 100$  mm である。スリット材料は板厚 2 mm のタンタル製で、スリット幅は 1 mm である。

インボリュート・スリットについては基礎円  $a = 50$  mm、 $b = 70$  mm、 $L = 115$  mm、 $F = 287.5$  mm で製作した。スリットは板厚 2 mm の鋼製、スリット幅は 1 mm である。

## 2.2 2次元検出器

ひずみを測定するには 2次元検出器の精度および性能も重要である。実際の実験を想定すると、ひずみ測定に求められる検出器の性能は、露光と読取り時間を合わせた測定効率、ひずみ測定に相応しい空間分解能の両者が要求される。本実験では、2次元検出器としてイメージングプレート(IP: imaging plate)およびパルス計数型 X 線画像検出器(PILATUS: pixel apparatus for the SLS)を用いた<sup>7)</sup>。

IP は低エネルギー X 線から高エネルギー X 線に対しても検出効率がよく、検出器面積が  $400 \times 400$  mm<sup>2</sup> と広く、解像度が 0.1 mm/pixel の優れた空間分解能を持っており、ひずみ測定の 2次元検出器として期待できる。また、回折中心と IP との距離  $L_0$  は 450.01 mm である。その反面、露光、読み取り、消去の処理があるので、測定時間を要する。また、測定のたびに IP を着脱するので誤差要因になる。IP は積分型の検出器でバックグラウンドも含めたすべての X 線をカウントするので、長時間の測定には適していない。

一方、PILATUS 検出器(100K)の検出部面積は約  $84 \times 34$  mm<sup>2</sup> で IP より狭く、空間分解能 172  $\mu$ m/pixel で  $487 \times 195$  pixel を持つ 2次元アレイである。回折中心と PILATUS 検出器までの距離  $L_0$  は、1,603.6 mm である。X 線エネルギー 10 keV から 30 keV に対しては検出効率が 90% 以上であり、波高弁別ができるのでノイズなしで回折光子をカウントできる利点を持つ。さらに、検出器を固定したま

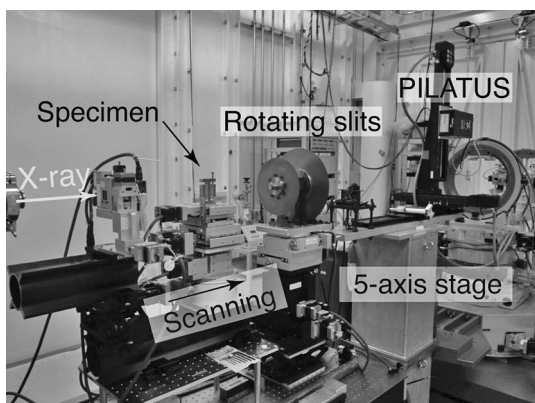


Fig. 4 Experiment with rotating slit and PILATUS

まで効率よく測定できる。PILATUSは、IPの持つ弱点を克服した検出器といえる。

Fig. 4に実際の測定装置の一例を示す。入射したX線は4象限スリットで $0.2 \times 0.2 \text{ mm}^2$ に絞られ、試料を透過する。試験片からの回折X線は、回転スリットにより回折中心からのX線が検出器に入る。回転スリットは、5軸ステージを調整して回転軸が入射ビームと一致するように、また回転スリット焦点と回折中心が一致するように調整した。図中の検出器はPILATUS検出器であり、検出器面積が小さいので目的の回折が測定できる位置に移動できるように、PILATUSを2軸ステージに載せている。図中の試験片はxyzステージに載っており、スキャンすることで応力分布を測定する。本実験では大型放射光施設Spring-8のBL19B2およびBL22XUの2カ所のビームラインにて複数回の実験を行い、2次元検出器によるひずみ測定の基礎的実験を実施した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 2次元検出器による細粒の内部応力評価

まず、2次元検出器IPが、高エネルギー放射光によるひずみ測定に対して十分な精度を持つか、理想的な結晶材料の連続回折環で精度を検証した。板厚2mm、幅15mmのS45C焼きなまし平板試験片(フェライト粒径約25 $\mu\text{m}$ )を用意して、油圧ピストンにより引張り試験をしながらIPにて回折環を測定して負荷応力をその場測定した。

S45C平板試験片の引張り試験結果をFig. 5に示す。平板試験片に貼り付けたひずみゲージにて機械的負荷ひずみ $\epsilon_A$ を測定した。油圧ピストンに装着した荷重変換器にて引張り荷重を測定して、機械的応力 $\sigma_A$ を求めた。IPの回折環は、211回折から521回折まで11個の連続環が測定できた。IPで測定した回折ひずみ $\epsilon_{hkl}$ とKronerモデル

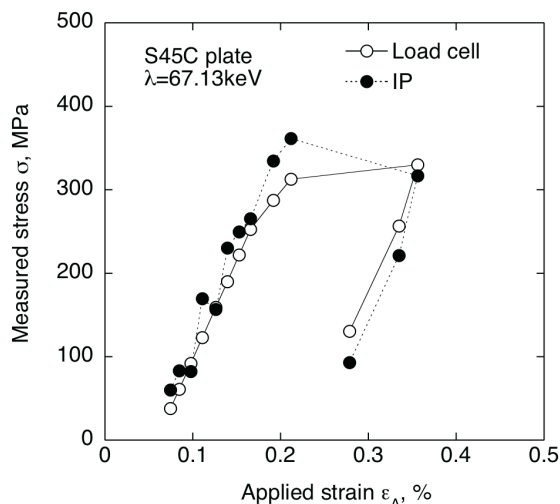


Fig. 5 Stress measurement of plate specimen by IP

から計算した理論的回折弾性定数 $E_{\{hkl\}}$ からX線応力 $\sigma_{hkl}$ を求めた。これらのX線応力 $\sigma_{hkl}$ の平均値をIPによる測定応力 $\sigma$ として図に示した。引張り試験の典型的な応力-ひずみ関係が測定され、機械的測定値とIPによる測定値はよく一致している。このことから67 keVの高エネルギー放射光による低い回折角( $2\theta = 10 \sim 20^\circ$ )でも、IPを利用して応力を測定することは可能であり、2次元検出器の測定精度に問題はない。この実験においては、使用したビームラインはBL22XU、ビームサイズは $0.2 \times 0.2 \text{ mm}^2$ 、露光時間2分である。

さて、回転スリットを利用してひずみスキャン法で内部応力分布が測定できるかを実験的に試みた。その結果をFig. 5に示す。板厚10mmのS45C試験片に曲げ応力分布を与え、圧縮側から引張り側までひずみスキャンした。負荷した曲げ応力は、試験片の圧縮と引張り側に貼ったひずみゲージから求めた。用いた検出器はPILATUSであり、X線エネルギーは70.23 keVである。測定されたS45Cの回折は良好な連続環で、 $\alpha\text{-Fe}$ の211、220、310回折が測定できた。ただし、PILATUS検出器の高エネルギーX線に対する計数効率が低いために露光時間が40分で、最も強い211回折でもそのピーク高さは約70カウントであった。しかし、積分型検出器のIPと違い、バックグラウンドはほとんどなく、パルス計数型検出器の優れた特性を確認できた。高エネルギーX線の測定効率の高いパルス計数型2次元検出器の開発が望まれる。

Fig. 6に示すように、310回折を用いて得られた応力分布は、破線で示した負荷応力とよく対応し、応力分布が測定できる。しかし、211回折および220回折による応力

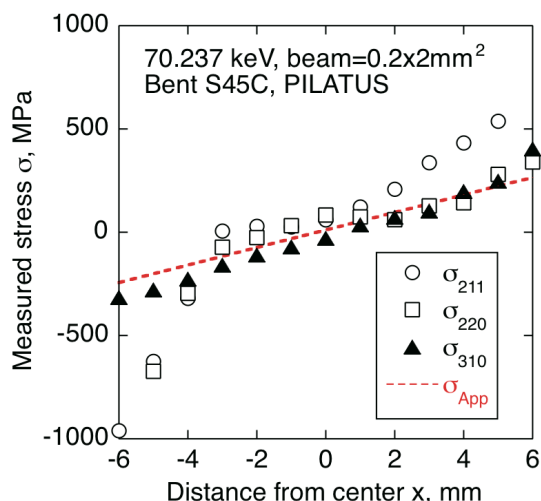


Fig. 6 Internal stress measurement by PILATUS

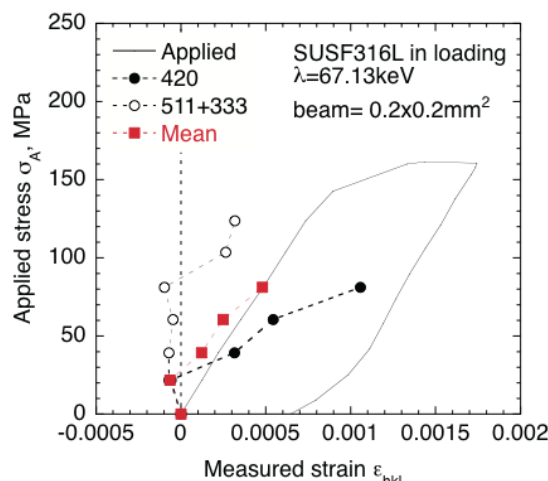


Fig. 7 Strain of stainless steel measured by IP

値は中心から圧縮・引張り側の表面に近くなると、負荷応力から急激に外れてくる。これは、回転スリットで構成されるゲージ体積に試験片の表面が入ってくるために回折の中心がゲージ体積の中心と異なるために生じる表面効果である<sup>8)</sup>。回転スリットは円板に垂直にスリットを切っているため、回折角が高いほど角度のコリメーションが厳しく、低回折角ほどコリメーションが甘くなる。その結果、211回折や220回折ではゲージ体積が大きくなり、表面効果が顕著に表れている。ただし、コリメーションを厳しくすると回折環が得られなくなるので、この問題はコリメーションを厳しくするだけでは解決できない。

### 3.2 粗大粒の応力評価

前述の実験では2次元検出器のひずみ測定精度を検討するために、細粒の試験片からの連続回折環を用いて応力を測定した。一方、粗大粒の場合は回折スポットを2次元検出器で測定して、ひずみを評価する必要がある。

まず、粒径170 μmを持つオーステナイト系ステンレス SUSF316Lの板厚2 mmの平板試験片を用意した。前節と同様に、この平板試験片の両端に油圧シリンダーにて引張り負荷を与えた。負荷応力は油圧シリンダーにセットした荷重変換器で計測し、機械的ひずみを試験片に貼ったひずみゲージから求めた。X線波長エネルギーは67.13 keVで、X線ビーム寸法は0.2×0.2 mm<sup>2</sup>である。放射光X線ビームを試験片に透過させ、IPにて回折スポットを撮影した。IPの露光時間は2分にて測定した。

粗大粒の回折の測定は0次元検出器では測定困難であったが、2次元検出器を用いることで測定できた。しかし、引張り負荷過程を計測できる回折としては、420回折およ

び511+333回折のみであった。2次元検出器を使ったとしても、ある一定の回折スポット数が必要である。測定された420回折および511+333回折を利用して測定した結果をFig. 7に示す。図では、IPにて測定したX線的ひずみ $\epsilon_{hkl}$ を横軸に、荷重変換器から計測した負荷応力 $\sigma_A$ を縦軸に取った。図中の実線は、ひずみゲージと荷重変換器により測定した機械的引張り試験の結果である。Fig. 7の各回折は、引張り負荷による結晶粒の変形挙動を示しているが、フックの法則に従った挙動からかけ離れている。420回折と511+333回折の平均を取ると、機械的弾性挙動の実線と対応している。個々の結晶粒は、周囲の結晶との関係を受け変形するので、1つの結晶粒が短軸引張りのフックの法則に従わなが、複数の結晶の平均的挙動は連続体の挙動に近づくことを示唆している。

以上のように粗大粒を測定する場合は、ある一定数の回折スポットを測定し平均することで機械的な応力を評価することができる。回折に寄与する結晶が極端に少なくなる場合は、個々の結晶の変形挙動を評価することから、機械的な弾性挙動と必ずしも一致しない。

### 3.3 回折スポット追跡法

粗大粒を持つ材料の内部の応力を評価するために、3.1項で用いた試験片と同じ寸法の片持ち曲げ試験片を平均粒径約100 μmのアルミニウム合金(A5052)で製作した。これに所定の曲げ負荷をかけてひずみスキャンすることにした。PILATUSの検出効率を考慮してX線波長エネルギーを30 keVとした。測定ビームラインはSPRING-8の原子力機構専用ビームラインBL22XUで行った。板厚10 mmのアルミニウム合金試験片を透過するには波長エネルギー30 keVで十分である。ビーム寸法は0.2×0.2

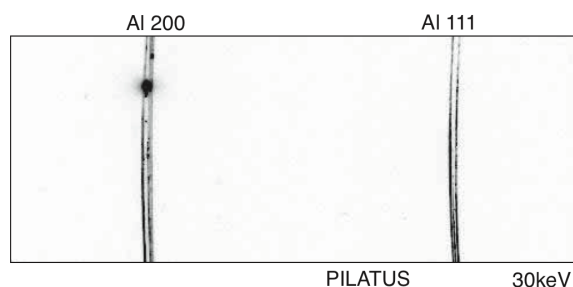


Fig. 8 Diffraction image of Al specimen by PILATUS

mm<sup>2</sup>で、露光時間は 60 秒である。

Fig. 8 に PILATUS で測定した Al 試験片の X 線回折スポットの動画の一コマを示す。図に示すように、Al の 200 回折および 111 回折が測定された。PILATUS イメージでは、Fig. 1 および 2 (a) の IP 検出器と異なり黒い所が X 線強度の大きい所である。例えば、図中の Al 200 回折線の所に黒く濃いスポットが 1 個だけである。これが粗大粒からの回折スポットである。この図のような回折スポットはスキヤニングとともに輝度に変化し、やがて粗大粒がゲージ体積から外れると回折スポットは消えてなくなる。回転スリットは、高い回折角ではコリメーションが厳しくなるので、ゲージ体積も小さくなり空間分解能も高い。ゆえに、回折スポットが得られる 200 回折を利用して回折角  $2\theta$  を計測した。

ひずみスキヤニングに伴う回折角  $2\theta$  の変化を Fig. 9 に示す。本図には、測定した 200 回折スポットの  $2\theta$  をすべて示した。スキヤニングに伴い出現し、消えて行く回折スポットごとに図中のプロットの種類をそれぞれ変えて

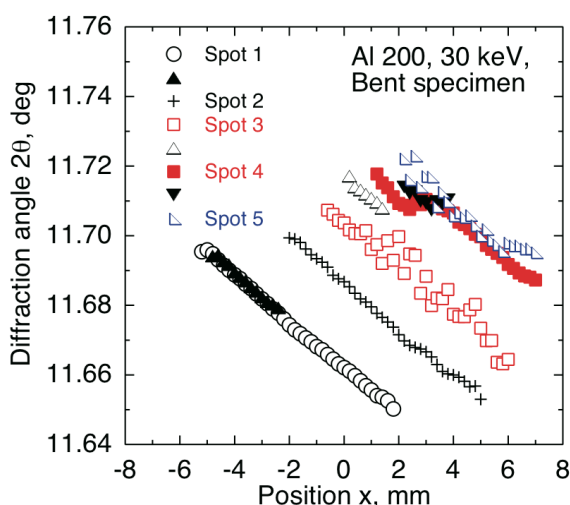


Fig. 9 Measured diffraction angle by 2D strain scanning method.

いる。図からわかるように、各回折スポットは、スキヤニングに伴い回折角  $2\theta$  が徐々に減少し、やがて消えてゆく。それとは別な位置に回折スポットが現れて、同様に  $2\theta$  が減少して消えてゆく。このような挙動を繰り返してスキヤニングが終了する。スキヤニングに伴いスポットの回折角  $2\theta$  が系統的に減少し、回折強度は極大を示して消えて行く挙動がみられた。このような回折スポットの典型的挙動を示した回折スポットは合計 5 個あり、図中にスポット番号を付けた。なお、回折強度の極大挙動を示さず、すぐに消失した回折スポットについては、図中で Spot 番号を付けていない。前述のような回折スポットの挙動についてのメカニズムについては、以下のように説明できる。

回折に関係する結晶粒が、スキヤニングに伴いゲージ体積中を移動する様子を Fig. 10 に示す。ステージが移動して試験片が A から B, C と移動することを考える。図のように、A においては回折結晶粒がゲージ体積の左側にあり、その時の回折角は検出器の上側にある A の回折スポットから計算されるので、見かけの回折角  $2\theta$  は、真の  $2\theta$  より大きくなる。つまり、回折計中心 O と検出器との距離  $L_0$  は一定と仮定しているので、A のスポット高さから回折角  $2\theta = \arctan(h_A/L_0)$  を計算する。そして、結晶粒が図中の B の位置にあるときは、正確な  $2\theta$  を与える。スキヤニングに伴いその結晶粒はゲージ体積中を移動して、C 点に至ると回折角  $2\theta$  は、正しい回折角度より低い値を与える。このようにして、回折スポットはゲージ体積の右側を通過してゲージ体積から消える。粗大粒とゲージ体積との相互作用からスキヤニングに過程において、回折スポットが出現して回折角  $2\theta$  が減少しながら回折強度が最大を示した後、回折スポットは消失する。

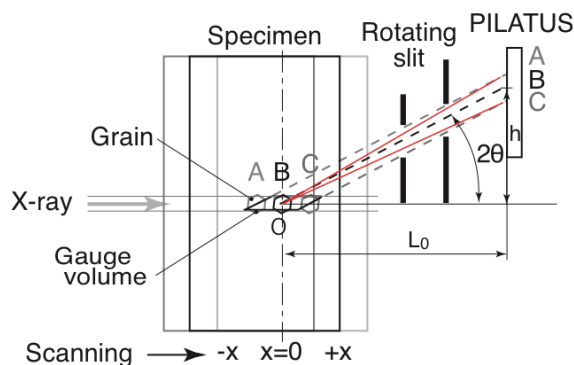


Fig. 10 Grain going through gauge volume.

ここでは、ゲージ体積と粗大粒とが影響して変化する現象を「粗大粒効果」と呼ぶ。回転スリットのコリメーションを厳しくすることで、粗大粒効果を小さくすることができる。しかしながら、コリメーションを厳しくすると、回折に係わる結晶粒の数が減り、そして回折強度も減少するので、応力測定には不利である。ゆえに、ゲージ体積をある程度大きくしても粗大粒効果を解決できる測定方法を考えなければならない。その解決策として、本研究では回折スポット追跡法を提案する。

回折スポット追跡法は、Fig. 10 のようにゲージ体積中を回折に係わる結晶が通過するとき、その回折強度は徐々に大きくなり、極大を示した後に減少してゲージ体積から消失する。スキャンニングにより回折角  $2\theta$  の変化したときの回折強度の変化を Fig. 11 に示す。図中の曲線が各スポットの回折強度の変化、そしてプロットが回折角を表している。この図では Fig. 9 に示した中でも X 線強度が極大を示したものを取り出している。結晶がゲージ体積の中心にあるとき、最大の回折強度を示すはずである。ゆえに、回折強度が最大の位置の回折角  $2\theta$  の値を使うことで、真の回折角  $2\theta$  とする。本研究では、PILATUS 検出器の読み出し速度が速いことを利用して、細かいステップでステージを動かし、回折強度の変化と回折角の変化を測定した。各回折スポットに対して回折強度とステージ位置との関係を放物線で近似して、その頂点位置を決定し、その頂点位置に対応する回折角  $2\theta$  を決定した。この方法を回折スポット追跡法(diffraction spot trace method, DST 法)と呼ぶ。

なお、粗大粒が連続していても結晶方位が異なるので、回折スポットが連続して現れる確率は少なく、実際に回

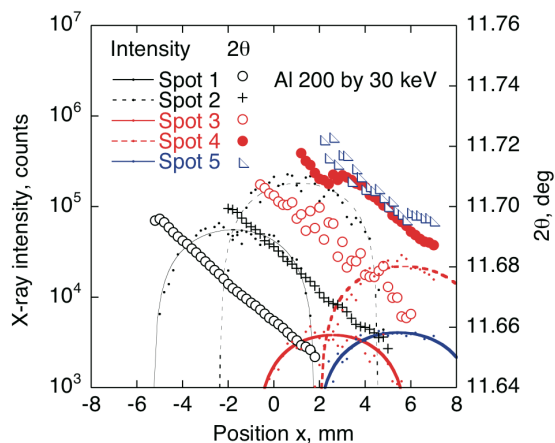


Fig. 11 Diffraction spot trace method.

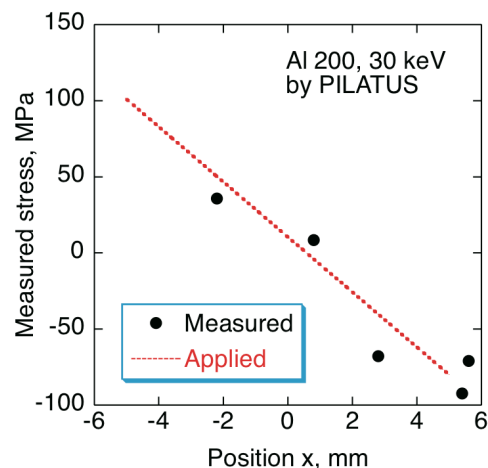


Fig. 12 Measured stress distribution by DST method.

折スポット追跡法で問題になることは少ない。回折スポット追跡法で決定した  $2\theta$  と X 線波長  $\lambda$  からブラッグ条件により格子面間隔  $d$  ( $=\lambda/2\theta$ ) を求めた。無ひずみの格子定数  $d_0$  は試験片の無負荷時の回折角  $\theta$  から得た。ひずみ  $\varepsilon$  は  $(d-d_0)/d_0$  から計算した。応力  $\sigma$  は、フックの法則 ( $\sigma=E\varepsilon$ ) より求めた。Al の単結晶のステイフネス<sup>[9]</sup> を用いて、Al の 200 回折の X 線の弾性定数を Kröner モデルにより計算し  $E_{200}=66.6$  GPa,  $\nu_{200}=0.354$  を得た。

Fig. 9 の Al 試験片の結果に提案した回折スポット追跡法を適用して応力分布を測定した。その結果を Fig. 12 に示す。図中のプロットが測定された回折スポットから得られた応力値であり、破線が負荷した応力分布を示している。測定スポットが少ないが、測定結果は負荷応力分布とよく対応しており、回折スポット追跡法の有効性が実証された。回転スリットによる内部応力評価法により、粗大粒の応力測定の方法に道を開くことができた。PILATUS 検出器のような高速で読み取ることができる検出器と回転スリットを組み合わせ、回折スポット追跡法により応力評価をすることが期待される。近い将来、高エネルギー X 線に対応した PILATUS 検出器が開発され、ゲージ体積が回折角度に依存せず一定になる回転スリットが製作されれば、粗大粒の内部測定は格段に進歩するであろう。

#### 4. 結言

本研究では、高エネルギー放射光において回転スリットと 2 次元検出器を利用した粗大粒の応力評価について研究した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 高エネルギー放射光を利用した応力測定の検出器と

してイメージングプレートは十分な精度を持っていることが、S45C 平板試験片の応力測定により確認された。特に、各回折の平均値は機械的な変化とよく一致した。一方、粗大粒を持つ SUSF316L 平板試験片の応力評価では、個々の結晶粒の挙動は機械的な値と一致せず、各スポットの平均値が機械的な値に近くなる。

(2) 回転スリットと 2 次元検出器を利用した内部の応力測定は、細粒を持つ材料については、連続な回折環を利用して内部応力を評価することができる。ただし、ゲージ体積と試料表面との表面効果があるので、回転スリットのコリメーションをある程度厳しくする必要がある。

(3) 粗大粒を持つ試験片の内部応力測定においては、回転スリットのコリメーションを厳しくすると回折そのものが得られなくなるので、ある一定のゲージ体積を持つ必要がある。また、ゲージ体積と結晶との関係で粗大粒効果が現れる。その解決のために、PILATUS 検出器と回転スリットを組み合わせた測定システムを利用した回折スポット追跡法を提案し、Al 試験片の内部応力を測定したところ、負荷応力と測定結果が一致し、回折スポット追跡法の有効性を確認した。

## 謝辞

本研究の放射光実験は、日本原子力研究開発機構施設供用研究課題(2008B-E15, 2009A-E06, 2009B-E15, 2010A-E04, 2010B-E10)および高輝度放射光科学研究センター重点産業利用課題(2009B1810)によるものである。本研究の一部は、文部科学省科学研究補助金基盤研究(C) No. 21560081 および発電技術検査協会の支援によるものである。本実験に際して新潟大学教育学部学生の長谷川太一および小林真季子両君の協力を得た。以上の支援と協力に心より感謝の意を表します。

## 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, Talor & Francis, 2003, pp.

170-189.

- [2] 例えば、田中啓介、鈴木賢治、秋庭義明、菖蒲敬久、"放射光による応力とひずみの評価"、2009、養賢堂。
- [3] R.V. Martins and V. Honkimäki, "Depth resolved strain and phase mapping of dissimilar friction stir welds using high energy synchrotron radiation", *Texture and Microstructures*, Vol. 35, No. 3/4, 2003, pp. 145-152.
- [4] R.V. Martins, U. Lienert, L. Margulies and A. Pyzalla, "Determination of the radial crystallite microstrain distribution within an AlMg<sub>3</sub> torsion sample using monochromatic synchrotron radiation", *Material Science & Engineering*, Vol. A402, 2005, pp. 278-287.
- [5] R.V. Martins, "Residual stress Analysis by Mono-chromatic High-Energy X-rays", *Newtrons and Synchrotron Radiation in Engineering Materials Science*, ed. by W. Reimers, A.R. Pyzalla, A. Schreyer and H. Clemens, 2008, Wiley-VCH, pp. 177-194.
- [6] R.V. Martins, C. Ohms and K. Decroos, "Full 3D spatially resolved mapping of residual strain in a 316L austenitic stainless steel weld specimen", *Material Science & Engineering*, Vol. A527, 2010, pp. 4779-4787.
- [7] 豊川秀訓、兵藤一行、イメージを写す III (最新の 2 次元検出器)、放射光、Vol. 22, No. 5, 2009, pp. 256-263.
- [8] 町屋修太郎、秋庭義明、鈴木賢治、田中啓介、栗村隆之、小熊英隆、"高エネルギー放射光を用いたひずみスキニング法による残留応力分布測定"、日本機械学会論文集 A 編、Vol. 71, No.711, 2005, pp. 1530-1537.
- [9] G.N. Kamm and G.A. Alers, "Low-Temperature Elastic Moduli of Aluminum", *J. Appl. Phys.*, Vol. 35, 1964, pp. 327-330.

(平成 24 年 1 月 14 日)