2次元検出器を用いた応力測定法の現状と今後の展開

2. 放射光を利用した2次元検出器による応力評価の最前線[†]

鈴木賢治* 菖蒲敬久**

Current Methods and Future Developments of Nondestructive Stress Measurement with Two-Dimensional Detectors

II: A New Stress Evaluation Method by Area Detector Using Synchrotron X-Rays

by

Kenji SUZUKI* and Takahisa SHOBU**

Key words: Synchrotron X-rays, Internal stress, Coarse grain, Diffraction spot trace method, Rotating slit-system, Welding residual stress

1 はじめに

連載 No. 1 では、主にホームラボの X 線で 2 次元検出器を利用した応力測定法の現状について紹介した。本連載 No. 2 では、放射光における 2 次元検出器を利用した応力測定法について紹介する。

放射光は、光速に近い電子が磁力により曲げられた際に接線方向に発生する電磁波 (X 線) である。その特徴は、ホームラボの X 線と比べて、高輝度、高強度、高指向性、そしてエネルギー可変なことから夢の光とも言われ、世界各地で 60 以上の放射光施設が稼働し、これらの特徴を生かして、物性研究、生命研究、近年では産業利用への応用と幅広く活用されている。国内においても SPring-8 を中心に 10 弱の放射光施設で幅広い研究が展開されている。応力測定についても例外ではなく、残留応力から実環境を模擬したその場観察まで鉄鋼材料、金属ガラスや樹脂などを対象とした多くの研究が行われ、それらを測定するための手法開発も進んでいる。

放射光による応力測定として最も注目されているのは、おそらく材料内部の局所応力測定である。一般的に、X 線はそのエネルギーが高くなると材料に対する吸収が小さくなる。つまり、高エネルギー X 線は材料に対する透過力が増す。具体的には、30 keV の X 線を鉄に照射した場合、透過 X 線の強度が入射 X 線の強度の $1/e$ になる厚さは約 0.3 mm、70 keV では 1.4 mm となる。ただし、実際には入射 X 線の強度が非常に高いため、70 keV では鉄 10 mm 程度を透過して、材料内部局所応力が $0.2 \times 0.2 \times 2.0 \text{ mm}^3$ の空間分解能で計測可能である。そして、この局所応力を計測する方法がひずみスキャニング法であり、残留応力測定の方法として非常に役立っている。

る^{1),2)}。ひずみスキャニング法では、入射および回折 X 線をスリットで制限することで試料内部にゲージ体積を形成する。そのゲージ体積からの X 線回折を測定し、ブラッグ条件から格子面間隔を求めて、ゲージ体積のひずみを得る方法である。試料をスキャニングしながら回折角を測定することで、ひずみ分布が得られる。また、試料の測定軸を変えれば、3 軸方向のひずみ分布を得ることができ、材料内の応力マップが求められる。

しかし、粗大粒、集合組織または溶接部などに対しては、ひずみスキャニング法では測定が困難な場合も出現する。図 1 に 2 次元検出器で測定した高エネルギー放射光 X 線を照射した材料からの X 線パターンを示す。ランダム配向で結晶粒が細かい場合には、図 1 左上に示すように連続環となるが、前述の場合は図 1 中央に示すように斑点状となる。放射光では、ホームラボの X 線で計測困難な微小部の計測を目的とした高指向性かつ照射領域が小さい X 線ビームを利用するので、粒径が $50 \mu\text{m}$ を超えると回折にあずかる結晶粒の数の減少、言い方を変えれば粗大粒の影響とも解釈される回折斑点として観測され、これが内部応力測定に対する問題となっている。なぜなら、現行のひずみスキャニング法では、シンチレーションカウンタなどの 0 次元検出器を使用しており、図 1 中の矢印で示すように中心から半径方向の制限された領域からの回折強度のみしか測定できないため、矢印上に回折斑点がない場合には回折プロファイルを得ることができず、ひずみ、そして応力が算出できない。現在、この対策として、揺動法や回転揺動を利用した $\cos^2 \chi$ 法などの手法も研究されている^{3),4)}。しかしながら、これらの測定法は本当の意味での微小部測定とはいえないこ

[†] 原稿受理 平成 26 年 12 月 4 日 Received Dec. 4, 2014 © 2015 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 日本原子力研究開発機構量子ビーム技術応用部門 〒 679-5148 兵庫県佐用郡佐用町, Quantum Beam Science Directorate, Japan Atomic Energy Agency, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148.

図1 高エネルギー放射光透過X線像

とから新たな測定手法の提案が望まれている。

粗大粒を持つ材料の内部応力を根本的に解決するためには、図1に示すように回折斑点を取りこぼすことなく計測可能な2次元検出器を利用したX線応力測定方法が有効である。そして近年、2次元検出器を利用した回折斑点追跡法 (DSTM: diffraction spot trace method) が提案され、粗大粒や溶接材の残留応力測定に有効な手法であることが実証され、今後の発展が期待されている^{6),7)}。本稿では、DSTMの原理と応用について解説する。

なお、粗大粒、集合組織または溶接部のX線応力測定の問題は、ホームラボのX線においても発生している。このうち、溶接部に関してはX線材料強度部門委員会として2次元検出器に至る前に溶接部の残留応力測定に対するガイドライン策定のための小委員会活動を展開し、最終報告書を平成22年(2010年)7月に発行し、実用化されている⁵⁾。

2 2次元検出器を利用したひずみスキャンニング法

本節では、回折斑点追跡法を実現するための光学系について説明する。回折斑点を測定するための2次元検出器として、イメージングプレート(IP)、X線CCDカメラ、フラットパネルセンサー、マルチワイヤ2次元検出器および計数型2次元検出器など、多種類の検出器がある。IPは積分型で不感帯(読み落とし)がなく、広い測定面積で空間分解能も優れ、高解像度でダイナミックレンジも大きいという長所が挙げられる。しかし、ノイズや蛍光も含めてカウントしてしまう、撮影、読み取りおよび消去のプロセスを要するので、高速撮影には向かないという短所もある。他の検出器にもそれぞれ長所、短所があり、検出面積、読み取り速度、検出X線エネルギー特性など、測定の用途に応じた検出器利用が必要がある。なお、近年では、X線エネルギーが30 keV以下であれば、計数型2次元検出器PILATUSが読み取り速度や解像度においても十分な性能を発揮している⁸⁾。特に、ノイズ

図2 回転スリットの原理

フリーでエネルギー弁別ができるので、高精度の検出が可能であることから、相変態などの現象解明に利用されており、応力評価においてもPILATUSがよく用いられている。

2次元検出器を利用したひずみスキャンニング法を実現させたのは、試料と検出器の間に設置するスリットの工夫である。透過X線による回折を2次元検出器で測定する例を図2の上側に示す。図中のA,Bの円板スリットにより回折中心Oからの回折または散乱線のみが検出器に到達し、それ以外の回折は円板スリットで遮へいされる。しかし、これだけではスリット像形の散乱線と一部の回折斑点が検出器で測定されるだけである。そこで、スリット円板を回転させることにより、各円板のスリット曲線でコリメーションされた領域が2次元検出器の全面を均一に覆うことを可能にした。しかも、図の下側のように検出面の全位置が、回折中心Oに焦点を結んでいることから、2次元検出器でもダブルスリットで測定したように正確な回折角を測定できる^{9),10)}。

これまでに高エネルギー放射光を利用した2次元検出器用の曲線を利用したスリットとして、スパイラルスリットやコンカルスリットなどが提案されている^{11),12)}。しかし、これらのスリットは回転しないため、コリメーションした回折領域を2次元検出器全面で撮影できないことから、本提案の回転スリットの機構とは本質的に異なる。具体的には、回転スリットの方位角 ϕ (2次元検出器の回折環の円周角度, azimuth)および回折角 2θ に関係なく、検出器の半径 r がすべて回折中心を向くスリットを実現するには、図2下の図から自明のように、回転スリットAとBが互いに相似なスリット曲線を設計すればよい。著者らは、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

図3 回転スリット (アルキメデス螺旋)

ルキメデス螺旋は、次式となる。

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

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、 ϕ は方位角である。また、インボリュート曲線の場合は

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

で表され、 a, b はそれぞれの回転スリットの基礎円半径である。これらのスリット曲線のパラメータ 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、

$$F = \frac{aL}{b-a} \quad (3)$$

となる。つまり、焦点間距離 F は方位角 ϕ や関数形に依存せず、曲線のパラメータ a, b およびスリット間距離 L により一意的に決まることを数理的に証明したことになる。回転スリット A と B を同一位相に組立て、同一軸で回転することで、焦点 (ゲージ体積) からの回折像を2次元検出器で得ることができる。この回転スリットを利用することで、2次元検出器でもダブルスリットを持つ回折装置で測定したときと同じようにコリメーションすることができる。

以上のように、回転スリットの光学系が開発されたことで、0次元検出器によるひずみスキャンニングと同じことを2次元検出器でも実現できるようになった。

一例として、アルキメデス螺旋を用いた回転スリットを図3に示す。図に示すように回転スリット A, B は同一軸状で回転する。その回転軸は5軸ステージの上に載せ、X線ビームの光軸と一致させなければならない。図3に示すアルキメデス螺旋を利用した回転スリットの材質は、高エネルギーX線の遮へいを考慮してタンタルを用いた。スリットの板厚は2 mm、スリット幅は1 mmである。

図4の左側に回転スリットに対して垂直にスリット加工した回転円板の断面を示す。この場合、スリットが回

転円板に対して垂直に加工されているので、回折角 2θ が低いとコリメーションが甘く、回折角 2θ が大きくなるに従いゲージ体積が小さくなり、回折に寄与する回折斑点の数が減少する。このように、ゲージ体積が回折角 2θ に依存することは好ましくない。この解決策として、回折曲線のスリットの切削角度が、図4の右側に示すように回折角度 2θ と同じになるように改良した。著者らの開発した改良型回転スリットシステムの完成により、2次元検出器でもコリメーションが一定となり、ゲージ体積が回折角に依存しない光学系が完成した。その結果、バルク材でも2次元検出器により回折角度が測定できるようになり、粗大粒の内部ひずみを2次元検出器により計測する光学系が確立した。なお、改良型回転スリットの材料はタンタルを用い、板厚は1 mm、スリット幅は0.2 mmになる。回転スリットの改良による効果は、図6の改良前の像と改良後の図11とを比較すると歴然としている。このことは、弛まめ装置の改良という地道な努力の積み重ねの上に、実験手法が確立できることを物語っている。

3 回折斑点追跡法

回転スリットシステムを用いて試験片内部のひずみ分布を測定する実験の様子を図5に示す。4象限スリットを通った放射光ビームは、2軸ステージの上に設置した曲げ試験片を透過する。ゲージ体積からの回折は、回転スリットを通過して検出器に到達する。この試験片をスキャンニングすれば、原理的には内部のひずみ分布が測定できる。

アルミニウム合金 (JIS A5052) の曲げ試験を製作した。なお、加工した後の試験片に573 K、30分の焼なましを行った。粒径は約170 μm である。図6はアルミ合金の曲げ試験片の回折を回転スリットを利用して2次元検出器 (PILATUS-100K) で測定した回折像で、これが典型的な粗大粒による回折像である。PILATUS-100Kの空間分解能は172 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 、検出領域は83×43 mm² (487×195 pixel) となる。Alの200回折では、100 MPaの応力変化に対するピークシフトは2.7 pixelに相当する。図5に破線で示した回折リングに対して検出領域が小さいために、回折リングの一部しか測定されていないが、Alの200および111回折の斑点は観測されている。Alの200回折

図4 改良型回転スリット

図5 回転スリットを用いた応力測定の様子

図6 Al合金の粗大粒を回転スリットで測定したX線回折像

を例にとると、ゲージ体積の寸法は、長さ 3.7 mm、高さ 0.2 mm、幅 0.2 mm となる。Al の 200 および 111 回折の位置に環のように見えるものは回折ではなく、スリットのエッジ効果によるものと思われる。ちなみに、改良型の回転スリットでは同様の環は現れていない。図6で得られた回折斑点から回折角 2θ を得るには、回折中心からの距離 h および回折中心と 2 次元検出器との距離 L_0 から

$$2\theta = \arctan\left(\frac{h}{L_0}\right) \quad (4)$$

で計算できる(図8参照)。スキニングすると検出器の画像に回折斑点が現れ、明るく輝きやがて消滅する。その中から輝度の増減が明瞭な回折斑点を選んで、それぞれの回折斑点のX線強度と回折角をプロットすると図7が得られる。各回折斑点が区別しやすいようにスポット番号を付け、区別した。回折斑点は同時にすべて見えるのではなく、スキニングの過程で現れては消えるので、図6のように回折斑点が一つしか見えないこともある。図7を見るとわかるように、どの回折斑点においてもX線強度が最大を示す挙動となる。このような挙動のメカニズムがわかれば、粗大粒のひずみの測定法が見つけれられるはずである。

スキニングに伴い、粗大粒が回転スリットで作られたゲージ体積を通過する様子を図8に示す。ある粗大粒が、A、B、Cとゲージ体積中を移動するとき、 L_0 は一定と見なしているの、2次元検出器で測定される回折斑点の高さ h はスキニングに伴い図8のように減少する。一方、粗大粒がゲージ体積に完全に覆われているとき、

図7 スキニングに伴う回折角と回折強度の変化

図8 回折斑点追跡法の原理

回折強度は最大を示す。ゆえに、回折斑点の強度が最大の位置にあるとき、粗大粒はゲージ体積の中心、すなわち回折中心に位置する。回折斑点の強度変化を追跡しながら、回折強度が最大になる位置で、回折角 2θ を決定すれば、真の回折角 2θ を得ることができる。便宜的に回折斑点の強度を放物線で近似して、その頂点の位置に対応する回折角を真の回折角 2θ として決定する。この手法が、先に述べた回折斑点追跡法 (DSTM) である¹⁰⁾。

マグネシウム合金 (AZ31) の押出し材から図9に示す厚さ 15 mm の曲げ試験片を作製し、残留応力を除去するために試験片を 573 K、30 分の焼なましを施した。マグネシウム合金の試験片の測定では、改良型回転スリットを利用したので、そのゲージ体積の寸法は、長さ 1.28 mm、幅 0.2 mm、高さ 0.2 mm となる。その曲げ応力を DSTM で測定し、有効性を検証した結果を図10に示す^{6), 7)}。図中の○印が DSTM で測定した応力である。また、位置によっては回折環も測定できたので、その回折環を利用して回折角を決定し応力を求めた値を●印で示している。破線は試験片の両表面に貼ったひずみゲージより算出した負荷応力分布である。DSTM により測定した応力は、負荷応力とよく対応し、DSTM が粗大粒の内部応力測定法として有効であることが実証できた。

図9 曲げ試験片

図11 マグネシウム合金溶接材と溶接部断面

図10 回折斑点追跡法による測定された曲げ応力分布

以上のように、回転スリットシステムと2次元検出器(PILATUS)を用意して、試料内部をスキャンしながらDSTMにより粗大粒の回折角 2θ を測定することで、粗大粒の内部応力分布を精度よく得ることができる。

4 溶接材の内部残留応力

DSTMが粗大粒を持つ材料の内部応力評価法として優れていることが実証できたので、DSTMを溶接材の残留応力評価に応用することを試みた。溶接試験片は前述と同じマグネシウム合金AZ31の押出し材で、その溶接試験片の外観と寸法を図11に示す。板厚は10 mmである。溶接変形を極力抑えるために、TIG溶接にトーチで板材の中心をメルトラン法で溶接を施し、溶接を途中で停止した。溶接部断面の写真を図10の下側に示す。図11に示すように、溶接線垂直方向を x 、溶接線方向を y とする。溶接線($x = 0$ mm)から $x = 22$ mmまでの範囲について図中の破線部に沿って断面の残留応力を測定した。

放射光実験は、SPRING-8のビームラインBL22XUで実施した。改良型回転スリットおよび2次元検出器(PILATUS-

図12 マグネシウム合金溶接部の回折像

300K)を設置して、30 keVのX線ビームを試験片に垂直に入射して、透過した回折リングの一部を測定した。試験片がマグネシウム合金であるため、30 keVのX線エネルギーでも十分に10 mm厚さのマグネシウム合金の板を透過し測定することができる。PILATUSにより測定した回折像の一例を図12に示す。弱い回折環も見られるが、回折斑点を主とする粗大粒組織の様相を呈している。スキャンにおける1ステップでのPILATUSの露光時間は1分であり、効率よく測定することができた。図12に示すように、高回折角、回折斑点の多い{20.1}回折を利用して、DSTMによる応力測定を実施した。無ひずみの格子面間隔 d_0 は、焼なまし(573 K, 30 min)した同一材のMg {20.1}回折の平均値を使用した。ただし、表面効果を避けるため表面から0 ~ 2 mmのデータを除いている。また、圧延の影響も考慮し、垂直方向および水平方向については各方向の d_0 を使用した。

ひずみから応力を算出する場合には、本来は直交する3方向のひずみからフックの法則を利用して直交する3方向の応力を求める。しかしながら、本試験片のような平板試料において、法線方向(z 方向)のひずみを測定する場合、回折角が低いため、試料内部からの回折線は光

図13 マグネシウム合金溶接部(溶接線方向に垂直な断面)のDSTMによる残留応力分布

路長が長く、回折強度が非常に弱くなるために測定が困難となるので、法線方向のひずみが得られない。そこで本実験では ε_x , ε_y の2軸方向のひずみを測定し、平面応力状態 ($\sigma_z = 0$) を仮定し、溶接線方向垂直の応力 σ_x と溶接線方向の応力 σ_y を次式により求めた。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y) \\ \sigma_y &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

なお、Mgの回折弾性定数 E および ν は、六方晶のX線の弾性定数を Kröner モデルにより計算するシステムを作成して計算し¹³⁾、Mgの $\{20.1\}$ 回折の値として $E = 44.77$ GPa, $\nu = 0.290$ を得た。X線の弾性定数の計算に用いたスティフネスの値は文献から引用した¹⁴⁾。

図14 溶接残留応力の有限要素シミュレーション結果

図13にDSTMにより測定したマグネシウム合金溶接材の残留応力分布を示す。図(a)に示される溶接線方向垂直の残留応力 σ_x は、溶接部に大きい引張応力が生じ、溶接部の下には圧縮応力領域が発生している。また、溶接中心から17 mm離れた板の内部にやや引張応力の領域が存在している。

一方、図13(b)に示す溶接線方向の残留応力 σ_y は、溶接部付近に大きな引張応力が観測されている、これは溶接部が凝固・冷却する過程で収縮し、その結果として生じた引張残留応力であると考えられる。その引張残留応力にバランスして溶接部を囲むように引張りの残留応力が生じている。さらに $x = 22$ mm 付近では、最も大きな圧縮残留応力が生じている。

DSTMにより粗大粒を持つ溶接材の内部残留応力を測定できた。本実験では、実験時間の制約からDSTMのスキャンングステップを溶接材では0.3 mmとしたが、曲げ試験片の時のスキャンングステップ0.2 mmの方が回折斑点強度の放物近似に適していたことから、結晶粒径に対応したスキャンング幅を検討することも必要である。

本実験で製作したMg溶接試験片を模擬した有限要素解析を行い、前節で測定した結果とシミュレーションとを比較検討する⁶⁾。 σ_x および σ_y の応力を計算した結果を図14に示す。溶接線方向垂直の応力 σ_x については、試験片の溶接部に引張応力が生じ、弱い引張応力が溶接側に広がっている。また、引張応力にバランスするように溶接裏面にも弱い引張応力が働いている。図14(a)の σ_x のシミュレーション結果と図13(a)の実測結果を比較すると、溶接部に大きい σ_x が発生し、さらに極小さな引張応力が溶接側に広がっており、この傾向は測定結果とよく一致している。注目すべきは、測定結果では $(x, z) = (17, 5)$ の付近にも引張応力があり、溶接とは関係のない残留応力もあることがわかる。

溶接線方向の残留応力 σ_y については、シミュレーションでは溶接部に強い引張応力が発生し、それを取り囲むように弱い引張応力が発生している。図14(b)と図13(b)とを比較すると、測定結果では溶接部の引張応力領

域がシミュレーションより広く、かつ $(x, z) = (17, 8)$ の付近にも引張応力がある。このように、DSTMを利用することで、押し出されたMg合金材では、内部に溶接以外の残留応力を持っている様子もとらえることができる。

5 おわりに

本稿で述べたように、高エネルギー放射光による回折斑点追跡法(DSTM)は、粗大粒をもつ材料内部の応力評価法として有力な手法として期待できる。しかし、2次元検出器PILATUSは、X線エネルギーが30 keVを越えると急激に検出効率が低下する問題もある。イメージングプレート(IP)は、高エネルギーX線に対しても感度がよいことからより高いエネルギーのX線利用では、IPを利用することが望ましいが、時分割測定やスキニング法に対して不向きである。ゆえに、今後は鉄鋼材料に適用できる70 keV相当の高エネルギーに対応した2次元検出器による研究が課題となっている。2次元検出器の開発は日進月歩であり、これから新たな検出器が開発され、空間分解能、検出効率、読み取り速度も高性能となることは間違いない。このような情勢を俯瞰すれば、2次元検出器を利用した応力評価の新たな研究が必要であることは、論を待つまでもない。

一方、本連載ではDSTMについて紹介したが、放射光における2次元検出器を利用した応力(ひずみ)評価法として、3D-XRD法が近年最も注目されている¹⁶⁾。これは1結晶ごとの結晶方位やひずみを計測する方法であり、EBSD(後方散乱電子線回折)の3次元バージョンと理解していただくとわかりやすい。コンピュータの進歩、第3世代放射光の出現により誕生した測定手法であり、今後さらに放射光と2次元検出器を組み合わせた測定手法はさらに進化することが期待したいところである。

現段階においては、2次元検出器を利用した応力測定法は、個人レベルの研究やメーカーによる測定装置にとどまっている。産業界における2次元検出器の利用と普及を考えれば、2次元検出器による応力測定法の解析方法や手順標準についての共通認識を形成する必要がある。また、2次元検出器を利用した応力評価を0次元や1次元検出器では測定困難な材料へ拡張する挑戦も続けないとではない。

最後に、本稿に関係する一連の実験は、SPRING-8の独立行政法人日本原子力研究開発機構専用ビームラインBL22XUを利用したものであり、日本原子力研究開発機構による施設供用研究課題(2008B-E15, 2009A-E06, 2009B-E15, 2010A-E04, 2010B-E10, 2012A-E02, 2012B-E12, 2013A-E07)および公益財団法人高輝度光科学研究センターによる一般供用課題(2011B3721, 2012A3721, 2012B3721)の援助を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1) K. Suzuki and K. Tanaka, "Measurement of strain distribution in thermal barrier coating using hard X-rays", SPRING-8 Research Frontiers, Ed. by S. Kikuta,

JASRI, pp. 112-113 (2003).

- 2) 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, pp. 170-189 (2003), Taylor & Francis.
- 3) T. Shobu, H. Konishi, J. Mizuki, K. Suzuki, H. Suzuki, Y. Akiniwa and K. Tanaka, "Evaluation of subsurface distribution of residual stress in austenitic stainless steel using strain scanning method", Materials Science Forum, Vols. 524-525, pp. 691-696 (2006).
- 4) K. Suzuki, T. Shobu, J. Shibano and K. Uesugi, "Stress measurement of coarse grains using hard synchrotron X-rays", Bulletin of the Faculty of Education (Natural Sciences) Niigata University, Vol. 1, No. 2, pp. 157-163 (2009).
- 5) T. Kurimura, Y. Sano and S. Ohkido, "The final report of sub-committee on residual stress measurement of weld section", JSMS committee on X-ray study of mechanical behavior of materials (2010).
- 6) 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).
- 7) K. Suzuki, T. Shobu, A. Shiro and H. Toyokawa, "Evaluation of internal stresses using rotating-slit and 2D detector", Materials Science Forum, Vol. 772, pp. 15-19 (2014).
- 8) C. Brönnimann, E.F. Elikensberry, B. Henrich, R. Horisberger, G. Huelsen, E. Pohl, B. Schmitt, C. Schulze-Briesse, M. Suzuki, T. Tomizaki, H. Toyokawa and A. Wagner, "The PILATUS 1M detector", Journal of Synchrotron Radiations, Vol. 13, pp. 120-130 (2006).
- 9) K. Suzuki, T. Shobu, A. Shiro and S. Zhang, "Internal stress measurement of weld part using diffraction spot trace method", Materials Science Forum, Vol. 777, pp. 155-160 (2014).
- 10) K. Suzuki, T. Shobu, A. Shiro and H. Toyokawa, "Evaluation of internal stress using area detectors", Maintenance, Vol. 11, No. 2, pp. 99-106 (2012).
- 11) 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, A527, pp. 4779-4787 (2010).
- 12) S.F. Nielsen, A. Wolf, H.F. Poulsen, M. Ohler, U. Lienert and R.A. Owen, "A conical slit for three-dimensional XRD mapping", Journal of Synchrotron Radiations, Vol. 7, pp. 103-109 (2000).
- 13) <http://www.rigaku.co.jp/app/index10.html>
- 14) L.J. Slutsky and C.W. Garland, "Elastic constants of magnesium from 4.2 K to 300 K", Physical Review, Vol. 107, No. 4, pp. 972-976 (1957).
- 15) K. Suzuki and S. Nishikawa, "The activity report of working group on evaluation of residual stresses", Maintenance, Vol. 13, No. 1, pp. 51-52 (2014).
- 16) X. Fu, H.F. Poulsen, S. Schmidt, S.F. Nielsen, E.M. Lauridsen and D.J. Jensen, "Non-destructive mapping of grains in three dimensions", Scripta Materialia, Vol. 49, pp. 1093-1096 (2003).