

溶接材料内部の応力評価および検出法の比較実験

Internal Residual Stress in Welded Part using Area Detector

鈴木 賢治¹⁾ 池田 達哉¹⁾ 熊倉 和也¹⁾
Kenji SUZUKI Tatsuya IKEDA Kazuya KUMAKURA
菖蒲 敬久²⁾ 城 鮎美²⁾ 張 朔源²⁾
Takahisa SHOBU Ayumi SHIRO Shuoyuan ZHANG

1) 新潟大学 2) 原子力機構

これまで粗大粒の内部応力測定のために技術開発を続けてきたスパイラルスリットおよび2次元検出器 PILATUS を組み合わせた回折斑点追跡法 (DSTM: diffraction spot trace method) をマグネシウム合金 AZ31 の溶接材の断面の残留応力分布に応用した。その結果、これまで測定できなかった溶接断面の残留応力マップを得ることに成功した。

キーワード：溶接、残留応力、回折斑点追跡法、マグネシウム、内部応力測定

1. 目的

2012A 期において2次元検出器 PILATUS および改良型スパイラルスリットを組み合わせて、申請者らが開発した回折斑点追跡法 (DSTM) を利用して、実際に粗大・集合組織を持つ Mg 合金部材の残留応力分布測定に挑戦し、その有効性と高精度測定を確認した。しかし、PILATUS 検出器のノイズ発生が原因で、溶接材の内部応力の測定を完了するまでは至らなかった。加えて、DSTM で詳細に内部応力を測定するには、効率的な測定手法が課題として残った。

本実験では、DSTM を溶接部材の内部応力測定に応用する。溶接材内部の残留応力測定を実現するために溶接線方向と溶接線垂直方向の2方向に PILATUS 検出器を設置して、2方向のひずみを測定する。なお、CCD 検出器は PILATUS 検出器と比較するとダイナミックレンジ検出速度は劣るものの、シンチレータを工夫することで高エネルギーに対する検出効率を高くすることが可能であることから、静的な材料評価においては PILATUS 検出器よりも効率のよい計測が期待できる。本研究では PILATUS 検出器と CCD 検出器とのひずみ計測における性能も合わせて比較・検討する予定であったが、CCD 検出器の調子が悪かったので、PLATUS 検出器による応力分布計測のみとした。

福島第一原子力発電所の事故を受け、その安全基準は炉心溶融を前提とした過酷事故に備える時代を迎え、ストレステストのように発電設備の限界強度を評価することも迫られている。これからは計算に留まらず、溶接部の実応力測定も視野に入れる必要がある。本実験グループでは、その解決策として DSTM を提案し、それを溶接部の応力評価に適用する。なお、DSTM についての原理については、既報の文献¹⁾ に詳細に述べている。

2. 方法

2・1 X線条件および装置系の幾何学決定

図1に実験装置の構成を示す。X線が左側から入射し、制限スリットを経てサンプルに入り、その後ろにスパイラルスリットを用意した。検出器はx方向のひずみを測定する水平テーブルとy方向ひ

表 1: X-Ray conditions

Bleam line	BL22XU in SPring-8
Wave length	0.413418Å (29.99keV)
Material	AZ31 (Magnesium alloy)
Spiral slits	120 rpm
PILATUS 300K	487 × 618pixel, 0.172mm/pixel
Beam dimensions	0.2 × 0.2 mm ²
Beam center on PILATUS	(156.835, 309.153)
L_h, α_h	1023.81 mm, -0.4233°
L_v, α_v	1023.61 mm, 0.1631°
Exposure time	5min

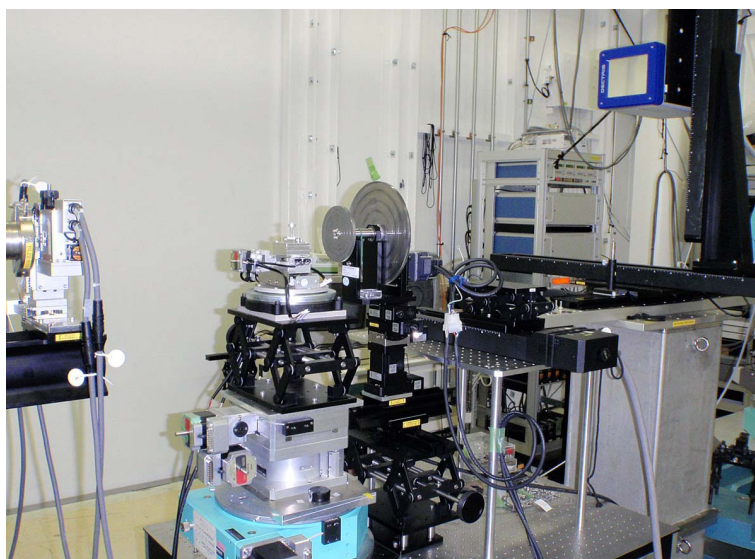


Fig. 1: Adjustment to apparatus

ずみを測定する鉛直テーブルを用意した。その x - y テーブルに PILATUS-300K を載せた。

検出器の角度が入射 X 線に対して垂直であることが理想的である。特に、2次元検出器で2方向のひずみをサー測定する場合、検出器の位置と姿勢は測定精度にとって重要となる。図2に示すように α だけ傾いている場合を考える¹。検出器の高さは $h \cos \alpha$ となり、検出器の位置と回折中心は $L + \sin \alpha$ となるので、真の回折角 2θ は次式となる。

$$\tan 2\theta = \frac{h \cos \alpha}{L + h \sin \alpha} \quad (1)$$

この式を展開して

$$\frac{1}{h} = \frac{\cos \alpha}{L} \cdot \frac{1}{\tan 2\theta} - \frac{\sin \alpha}{L} \quad (2)$$

¹角度変数 α は符号を含んでおり、正負の方法は図の通り。

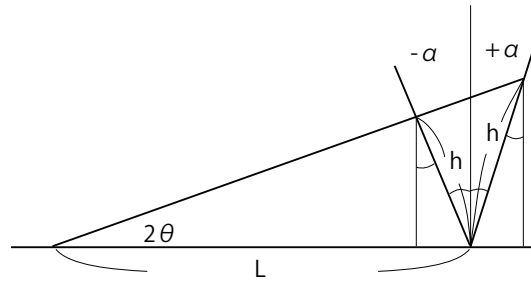


Fig. 2: Tilt angle of area detector.

セリアの各回折線の回折角 2θ から計算した $\frac{1}{\tan 2\theta}$ に対して², 測定された検出位置 h から $\frac{1}{h}$ について図に描き, その直線の傾き $a = \frac{\cos \alpha}{L}$ および y 軸切片 $b = -\frac{\sin \alpha}{L}$ から, 次の関係が得られる.

$$\alpha = \arctan \left(\frac{-b}{a} \right) \quad (3)$$

$$L = \frac{\cos \alpha}{a} \quad (4)$$

以上により検出器に関するパラメータとして光軸距離 L および検出器ステージ傾き α が決まる. L , α が決定したら, 正確な回折角 2θ は, 次式から得られる.

$$2\theta = \arctan \left(\frac{h \cos \alpha}{L + h \sin \alpha} \right) \quad (5)$$

以上の方法により, 表1のパラメータを決定した.

2・2 溶接試験片

試験片材料は Mg 合金 AZ31 とし, 板厚 10mm の押出された平板材を幅 95mm, 長さ 195mm に切り出した後, 図3に示すように, 試験片の中央部に TIG 溶接を行った. 溶接条件は, 電流 100 A, Ar ガス流量 8ℓ/min, 溶接速度 3.0 mm/s である. 図4に溶接部断面の写真を示す.

DSTM で測定した断面の位置は図3に示すように, 溶接終端側の上辺から 111.4mm の位置であり, 水平切断面の溶接線中心 ($x = 0$ mm) から $x = 22$ mm までの間を表面 ($z = 0$ mm) から 0.3mm ステップでひずみスキャンした.

2・3 応力測定手順

1. 試験片を図5のように立て, ステージを X線入射方向 (板厚方向) 動かして $\varepsilon_h = \varepsilon_x$ を回折スポット追跡法 (DSTM) にて測定する. ゲージ体積は, 試験片の溶接表面側から裏側に向かい移動するようにした. すなわち $\varepsilon_x(z)$ の測定となる.
2. 溶接残留応力は対象であると仮定して, 溶接線中心から試験片の左 L 側を測定した.
3. 水平方向の PILATUS 検出器の移動は, table x=15900puls (318mm) である.
4. 露光時間は 5min とした.

²セリアのデータ CeO₂ のデータは $a_0 = 5.411 \text{ \AA}$ を用いた.

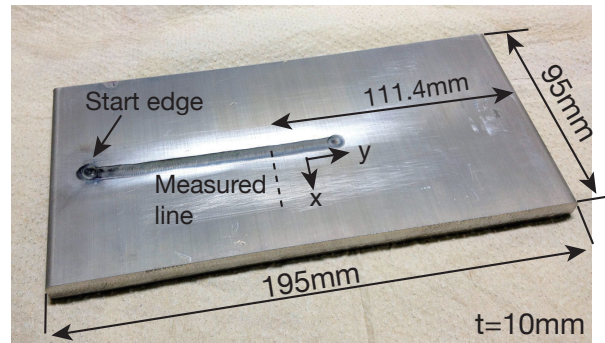


Fig. 3: Welding specimen

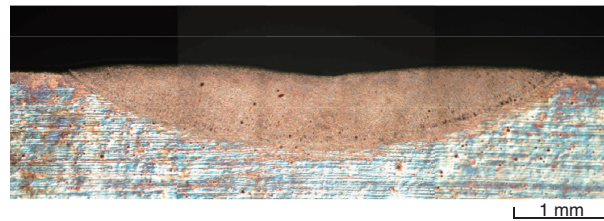


Fig. 4: Cross section of welding specimen

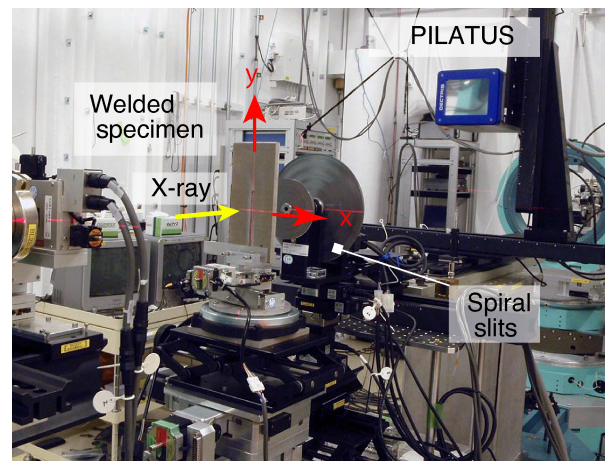
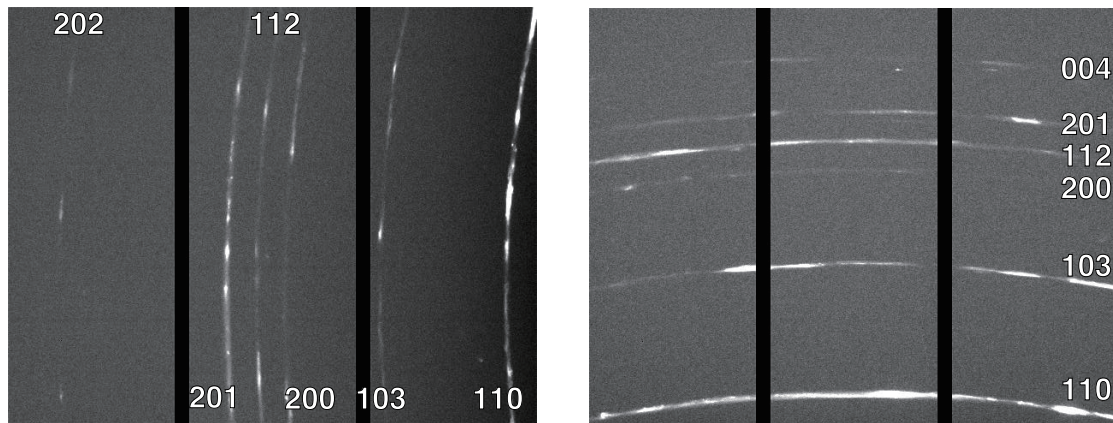


Fig. 5: Measurement of residual stress using DSTM.

5. メガトルクモータ揺動ステージを用いて $\pm 5^\circ$ の揺動をかけながら測定した。
6. $z = 0\text{mm}$ の表面から $0.3\text{mm}/\text{step}$, 9.9mm まで 34 個のファイルを測定する。
7. $x = 0, 1, 2, 3, 4, 6, 10, 14, 18, 22\text{ mm}$ の 10 ライン。

なお、CCD 検出器を用意したが、測定範囲が狭いこと、焦点の調整ができないことから、高精度のひずみ測定が困難と判断し、今回は PILATUS-300K で測定することとした。PILATUS-100K と比較して今回の 300K では検出領域が 3 倍となり、多くの回折が入るので、測定の信頼性が期待できる。測定した試験片の位置と座標系を図 5 に示す。



The directions on PILATUS are as follows, X ↑→ Y.

(a) x-direction (horizontal)

(b) y-direction (vertical)

Fig. 6: Images with PILATUS-300K

1. 垂直方向の PILATUS 検出器の移動は, table z=14600puls (292 mm) である.
2. 露光時間は 4min とした.
3. メガトルクモータ揺動ステージを用いて $\pm 5^\circ$ の揺動をかけながら測定した.
4. 深さ $z = 0\text{mm}$ の 溶接面から 0.3mm/step , 9.9mm まで 34 個のファイルを測定する.
5. $x = 0, 1, 2, 3, 4, 6, 10, 14, 18, 22\text{ mm}$ の 10 ライン.

d_0 サンプルについては, 573K, 30min 焼鈍した AZ31 材の試料を用いて, 無ひずみの回折角 $2\theta_0$ を測定した. PILATUS のステージのバルス数はひずみ測定と同じ設定 ($x = 15900, y = 14600\text{ puls}$) とした. まず, y に 0.2 mm ステップで 5 mm (25 点), 露光時間 2 分とした. 次に x 方向に同様にステップスキャンした. なお, 無ひずみで回折幅が小さくなり粗大化し, 回折スポット数が減少していた.

3. 結果および考察

3・1 回折斑点追跡法によるひずみ分布

図 6 (a) に水平方向 (ε_x) の回折像を PILATUS で測定した結果を示す. Mg の 004 回折を除く 110 回折から 202 回折が同時に測定できた. 回折角が大きいかつ回折スポットが測定できる 201 回折を用いてひずみの分布を測定した. 同様に図 6 (b) に垂直方向 (ε_y) の回折像を PILATUS で測定した結果を示す. 図中の X ↑→ Y は ImageJ の座標系を示している. 粗大粒により回折スポットが現れ, 0 次元検出器では測定が困難であり, 応力評価には DSTM が適している.

試験片材料 AZ31 の無ひずみの回折角 d_0 の値は, 573K, 30min で焼鈍した同一材の Mg 201 回折の平均を使用した. ただし, 表面効果を避けるため深さ $0\sim 2\text{ mm}$ のデータは除いた. また, 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. 測定された 201 回折の d_0 の値は, x 方向で 1.339363 \AA , y 方向で 1.337925 \AA となった.

DSTM では同一点で $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ の値を都合よく得ることはできないので, 測定した深さ方向のひずみの値をスプライン関数で近似して, その近似関数から深さ 1mm ステップでひずみを計算した. さらに,

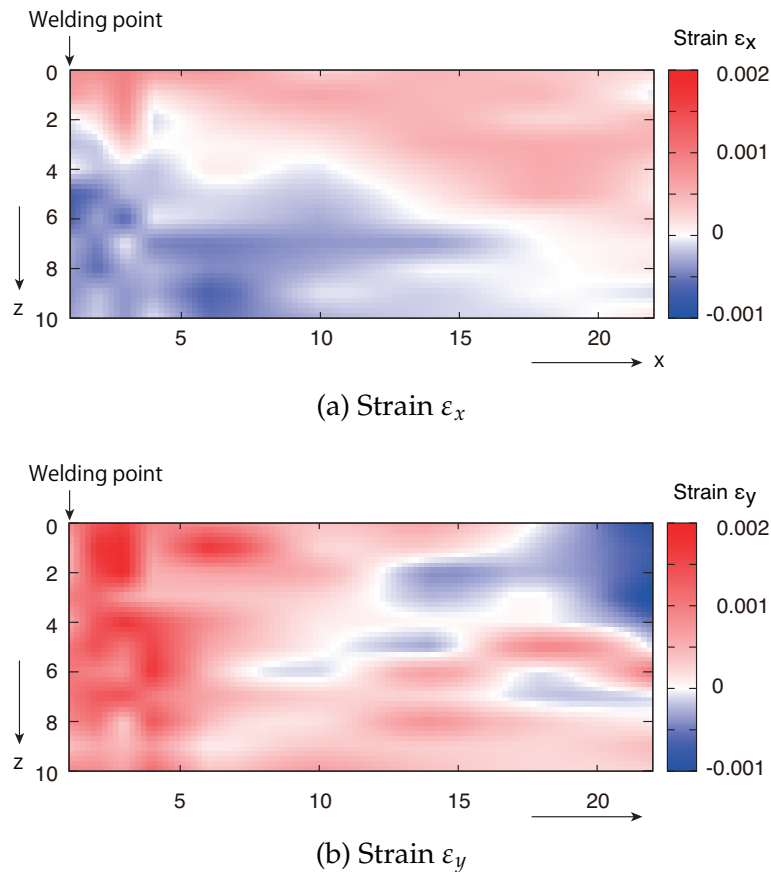


Fig. 7: Measured strain map approximated with spline curve.

$z = 0 \sim 10$ mm の各 1mm 間隔のひずみの値から $x = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 14, 18, 22$ mm におけるひずみ分布をスプライン関数で近似した。これらの結果から、 $x = 0 \sim 22, z = 0 \sim 10$ の断面においてそれぞれ 1 mm 間隔でひずみ $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ を構成した。その結果を図 7 に示す。

図 7 (a) の ε_x を見ると、溶接面に引張りひずみが分布して溶接裏面には圧縮ひずみが残っている。また、図 7 (b) の ε_y を見ると、溶接部に大きな溶接線方向の引張りひずみがあり、それにバランスして 22 mm 離れたところに圧縮のひずみが生じている。

3・2 残留応力分布

応力を計算する方法として、3 軸方向のひずみを測定できなかったので、本実験では $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ の 2 軸方向のひずみを測定し、平面応力問題として応力を求める。平面応力のとき、各応力は次式で得られる。

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y) \quad (6)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x) \quad (7)$$

なお、X 線的弾性定数は Kröner モデルから計算し²⁾、Mg の 201 回折の値として $E = 44.77$ GPa, $\nu = 0.290$ を得た。用いたステイフネス c_{ij} は文献から引用し、 $c_{11} = 59.40, c_{12} = 25.61, c_{13} = 21.44, c_{33} = 61.60, c_{44} = 16.40$ GPa, $c/a = 1.623$ の値を用いた³⁾。

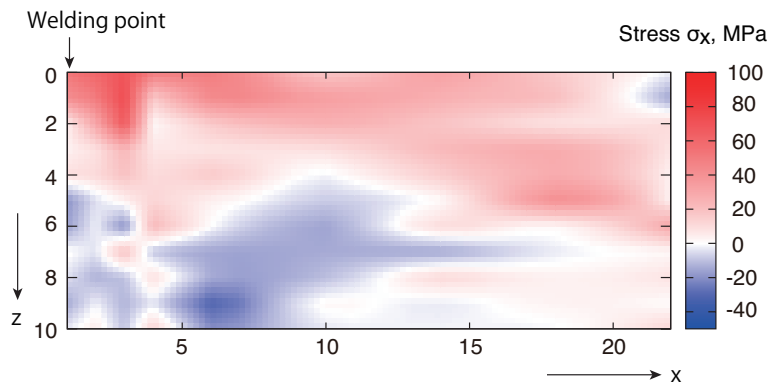
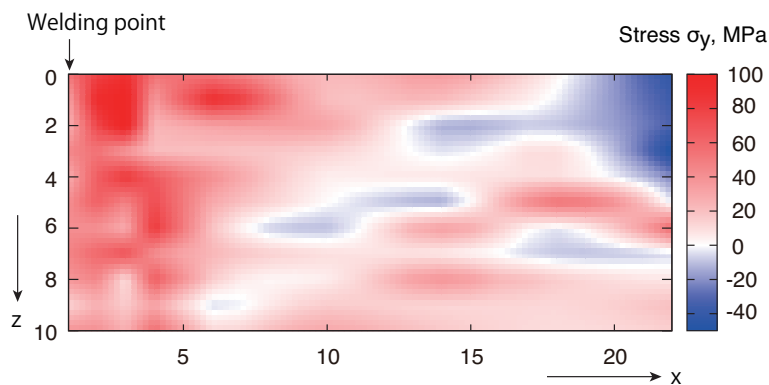
(a) Residual stress σ_x (b) Residual stress σ_y

Fig. 8: Measured residual stress map approximated with spline curve.

以上の手続きにより、得られた残留応力分布を図8に示す。図8(a)に示す σ_x の分布を見ると溶接面引張りで裏面に圧縮の残留応力がある。溶接線を横断する方向で切り出すと、溶接側にくの字に曲がることから、得られた残留応力分布と対応している。

一方、図8(b)の溶接線方向の応力 σ_y の分布を見ると、溶接部に大きな引張り残留応力があり、これは溶接から冷却する過程の収縮で生じた引張り残留応力である。その引張り残留応力にバランスして溶接線から離れたところでは圧縮残留応力が生じている。

4. まとめ

2012Aでは、PILATUS-100Kのノイズ問題で溶接材の測定ができなかったが、2012Bでは溶接材内部の残留応力分布を測定することができた。本実験により得られた結果を以下にまとめる。

1. DST法を利用することで粗大粒や溶接材の残留応力の評価が可能であることが実証できた。
2. 得られた残留応力分布も溶接残留応力の分布と対応していた。
3. DST法のステップは0.2mmくらいが適している。
4. 同時に2方向準備できれば、効率的である。
5. 他の実験の都合によりCCD検出器の利用ができなかった。

PILATUSの検出器効率が30keVを超えると急激に低下することから、X線エネルギーを30keVにした。30keVのX線でも透過できるように、本実験では敢えてMg合金の溶接材を対象とした。69keV相当の高エネルギーX線に適した2次元検出器としてはCCDが期待できる。次回においては、CCD検出器を利用してオーステナイト系ステンレス鋼の溶接部の残留応力マップを作成し、スパイラルスリットとDSTMとを組み合わせた高エネルギー放射光による内部応力評価法を完成させたい。

5. 参考文献

- 1) 鈴木賢治, 菖蒲敬久, 城 鮎美, 豊川秀訓, 保全学, Vol. 11, No. 2, pp. 99-106 (2012).
- 2) E. Kröner, Zeitschrift für Physik, Vol. 151, pp. 504-518 (1958).
- 3) L.J. Slutsky and C.W. Garland, Physical Review, Vol. 107, No. 4, pp. 972-976 (1957).