

# 放射光による溶接材の内部残留応力評価

## Evaluation of Residual Stresses in Welded Part using Hard Synchrotron X-Rays

|       |       |                |            |
|-------|-------|----------------|------------|
| 新潟大学  | 鈴木 賢治 | Kenji SUZUKI   | Member     |
| 原子力機構 | 菖蒲 敬久 | Takahisa SHOBU | Member     |
| 原子力機構 | 城 鮎美  | Ayumi SHIRO    | Member     |
| 原子力機構 | 張 朔源  | Zhang Shuoyuan | Non Member |

The spiral slit-system and DSTM (diffraction spot trace method) are under development in order to evaluate internal stresses of materials with coarse grains. The spiral slit-system was improved so that the length of the gauge volume is independent of the diffraction angle. The bending stress in the specimen with coarse grains was measured in order to confirm performance of this advanced spiral slit-system. The distribution of the measured bending stress coincided with the applied bending stress. As a result, it was proved that the combination of the advanced spiral slit-system and the DSTM is useful for the internal stress measurement of materials with coarse grains. The welded specimen of a Mg-alloy plate was prepared by melt-run with TIG welding. The residual stress map in the cross-section of the specimen was made using the DSTM. On the other hand, the residual stresses of the welded specimen were simulated by a finite element method. Although the measured residual stresses were similar to the simulated results, the residual stresses due to extrusion were measured also using the DSTM. The DSTM is an excellent technique for the stress measurement of weld parts.

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

### 1. 緒 言

材料内部の実応力を非破壊的に評価することは、構造部材の安全・信頼性を得る上で重要である。その手法として、中性子や高エネルギー放射光X線を利用したひずみスキニング法が提案され、応力評価に利用されている<sup>[1]</sup>。ひずみスキニング法は、入射、受光スリットによりゲージ体積を作り、そのゲージ体積をスキニングにより操作して材料内部の格子ひずみを回折装置と0次元検出器を利用して測定する。ひずみスキニング法は、回折像が連続環の材料に対して適用可能である。しかし、粗大粒、集合組織を持つ材料や溶接部においては回折像が斑点状となるために、ひずみスキニング法は適用できない。

著者らの研究成果として、測定材料の内部からの回折斑点を2次元検出器でとらえるための特殊な受光スリットを考案した<sup>[2]</sup>。このスパイラルスリットには、A, Bの2枚の回転円板に互いに相似形のアルキメデス螺旋のスリットが設けてあり、この2枚のスリットにより、回折中心にゲージ体積を作ることができる。また、スリットが同期して回転することで、2次元検出器の全面に回折像を結ぶことができる。従来考案されてきたコニカルスリットやスパイラルスリットは、スリットが回転しないので2次元検出器の全面に結像することはなく、本スリットの機構とは異なる<sup>[3-6]</sup>。本スパイラルスリットにより内部応力を評価した実験では、スリットを回転円板に垂直に切ったために、ゲージ体積が回折角度により変化する問題があった。

一方、粗大粒を持つ材料の回折斑点をスパイラルスリットで測定することはできるが、スキニングによりゲージ体積中を結晶粒が移動するのに伴い回折角度も移動するので、ひずみを決定するための回折角を一意的に決定することができない<sup>[1]</sup>。それを解決するために、PILATUS 検出器<sup>[7]</sup>を用いた回折斑点追跡法 (DSTM: diffraction spot trace method) を提案し、その有効性も実証した。

本研究では、ゲージ体積が回折角度に依存する問題を解決するために、改良型のスパイラルスリットを新たに製作した。また、この改良型スリットとDSTMを利用して、粗大粒を持つ材料の曲げ応力を測定し、改良型スパイラルスリットの性能を確認した。さらに、DSTMを溶接材内部の残留応力分布測定をはじめて適用したので報告する。

### 2. 実験方法

#### 2.1 曲げ試験片

改良型スパイラルスリットとDSTMとを利用して本方法による応力評価の信頼性を確認するために、既知の曲げ応力を測定する。本目的を達成するために図1に示す曲げ試験片を製作した。材質はマグネシウム合金(AZ31)の押出し材である。DSTMで用いる2次元計数型検出器PILATUSは、X線エネルギーが30 keVを超えると急激に検出効率が低下する。そのため、30 keVのX線エネルギーで15 mmの厚さを透過してPILATUSで検出できる材料を選定する必要がある。そこで本研究では、マグネシウム合金を選択した。

マグネシウム合金押出し材の厚さ10 mmの板から放電加工にて、図1の試験片を取り出した。試験片の上にある負荷ボルトを回すことで、縦はりに曲げと引張

<sup>0</sup>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, 電話 025-262-7087, E-mail: suzuki@ed.niigata-u.ac.jp

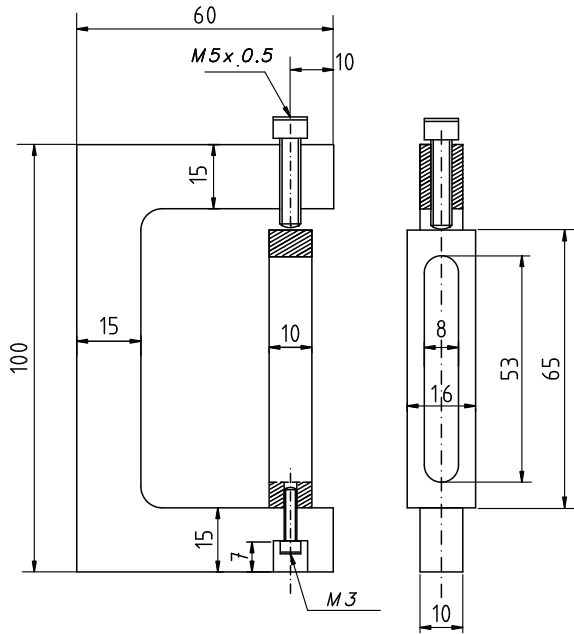


Fig. 1. Bending specimen.

応力を負荷できる。実際の負荷応力分布は、縦はりの圧縮側と引張側の両面に貼ったひずみゲージから測定できる。入射X線ビームは、負荷ボルトの下にある部品の穴を通過して、厚さ 15 mm の縦はりを透過する。回折したX線は図の縦はり試験片の圧縮側(左側)から検出する。

## 2.2 溶接試験片

前述の曲げ試験片で改良型スパイラルスリットの性能を確認した上で、DSTMを溶接材の残留応力測定へ適用して、その有効性を検証する。そのための溶接試験体として、曲げ試験と同じマグネシウム合金押し材を用意した。平板の上にTIG溶接のトーチを走行させ、メルトラン溶接試験体を製作した。

溶接試験体は、幅 95 mm、長さ 195 mm および板厚 10 mm の平板である。TIG溶接の条件は、電流 100 A、Arガス流量 8 l/min として、TIG溶接のトーチを速度 3.0 mm/s で移動させた。その試験体を図 2 に示す。溶接残留応力は対称であると仮定して、溶接線中心から試験片の  $x$  の + 側を測定した。試験体の座標系は、図 2 に示すように  $x$  方向は溶接線垂直、 $y$  方向は溶接線平行となる。また、板厚方向が  $z$  方向となる。

DSTMによる溶接試験体のひずみ測定は、試験体の溶接側の表面から深さ方向にゲージ体積をスキャンする。その位置は、図にあるように溶接終端側の試験片の端から 111.4 mm の位置で、 $x = 0, 1, 2, 3, 4, 6, 10, 14, 18, 22$  mm の 10 ラインについて、それぞれ  $z$  方向(板厚方向)に  $z = 0$  mm の溶接表面から 0.3 mm/step で試験片の裏側までスキャンした。 $x$  および  $y$  方向のひずみを測定した。

参考のために、溶接試験体の溶接部の断面の様子を

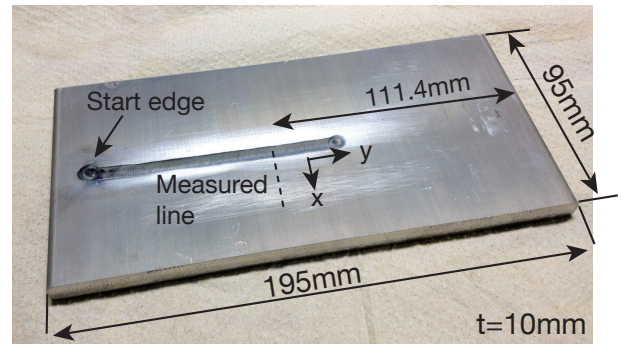


Fig. 2. Welding specimen.

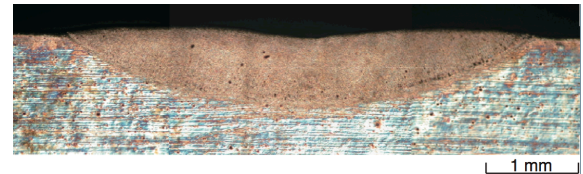


Fig. 3. Cross section of welding specimen.

図 3 に示す。溶融部の断面形状は、おおよそ幅 4.9 mm、深さ 0.9 mm である。

## 2.3 放射光実験

放射光実験は、大型放射光施設 SPring-8 の日本原子力研究開発機構専用ビームライン BL22XU にて実施した。BL22XU は、挿入光源による高輝度かつ高エネルギーX線を利用できるので、DSTMを実施するのに適したビームラインである。

曲げ試験片の応力測定では PILATUS-100K、また溶接試験体では PILATUS-300K を検出器として利用した。PILATUS の空間分解能は 0.172 mm/pixel である。露光時間は 5 min とした。実験に使用した波長エネルギーは約 30 keV である。入射X線ビームの寸法は 4 象限スリットにより作られ、曲げ試験片に対しては  $0.2 \times 1.0$  mm<sup>2</sup>、溶接試験体の実験に対しては、 $0.2 \times 0.2$  mm<sup>2</sup> した。

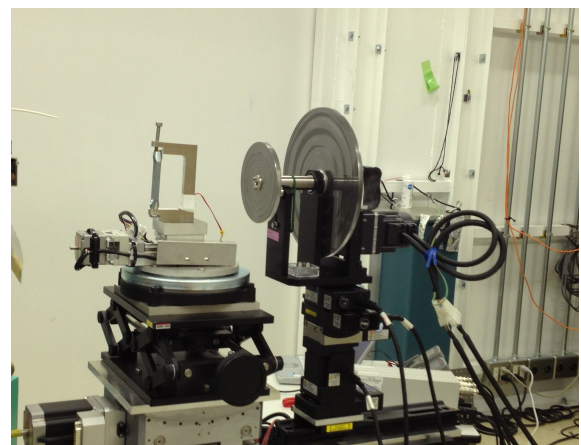


Fig. 4. Experiment of bending stress measurement.

図4に曲げ試験片の実験の写真を示す。写真の左側から入射したX線は、試料を透過してスパイラルスリットの中心を抜けてビームセンターを作る。図中の改良型スパイラルスリットによりゲージ体積を作り、その回折像はPILATUS検出器にて測定する。スパイラルスリットの回転速度は2 Hzである。試料ステージは、粗大粒対策のためにメガトルクモータを利用した揺動台の上に設置した。揺動台の揺動角度は $\pm 5^\circ$ である。図4には示されていないが、PILATUS検出器は2軸ステージに装着され、予めビーム中心を測定しておく。PILATUS検出器と回折中心までの距離 $L$ は約1400 mmである。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 曲げ応力

まず、改良型スパイラルスリットの性能確認とDSTMの有効性の実証を目的にして、曲げ試験片の応力測定を実施した。曲げ試験片に既知の曲げを与え、曲げ負荷によるひずみをDSTMで実測した。試料ステージを0.2 mm/stepで引張側から圧縮側までスキャンしながら逐次回折像をPILATUS-100Kで測定した。測定で得られた回折像を見ると、回折斑点があることから粗大粒であることが確認できた。粗大粒のほか一部回折環が得られるものの、0次元検出器で回折角を測定するには困難な状態であった。粗大粒の回折強度は強いので、材料内部の回折を得るのに回折斑点を利用することは効率的である。

図5は、Mg 201回折から得られたひずみを用いて応力を計算した結果である。図中の○印はDSTMによる結果であり、●印は回折環から測定した結果である。また、図中の破線は引張・圧縮の両表面に貼ったひずみゲージから計算した応力分布を示したものである。なお、無ひずみの回折角 $2\theta_0$ は負荷ひずみが0になる位置 $x$ の回折角を用いた。図4からわかるように、測定された応力分布は既知の負荷応力分布とよく対応しており、DSTMにより内部応力を精度よく算出できることが実証された。

その他、Mg 201回折以外の回折斑点(100, 101, 112, 200回折)もあり、それらについてもDSTMを利用して曲げ応力分布を測定したが、201回折と同様の結果を得ることができた。これは、スパイラルスリットを改良し、ゲージ体積の長さが回折角度によらず一定となることにより達成できたものである。

#### 3.2 溶接残留応力測定

PILATUS-300Kで測定されたマグネシウム合金溶接試験体のX線回折像の一例を図6に示す。粗大粒により一様な連続環は得られず、回折斑点が現れているのでDSTMが適している。高回折角側(左から)202, 201, 112, 200, 103, 110回折が測定できた。本研究では、高回折角で回折斑点の多い201回折を利用した。

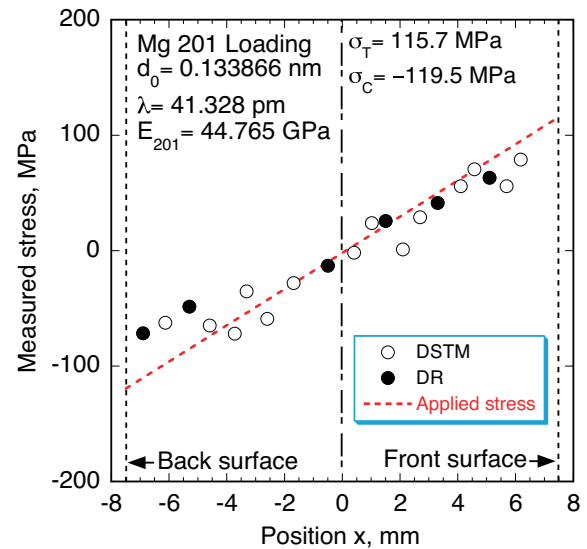


Fig. 5. Distribution of bending stress.

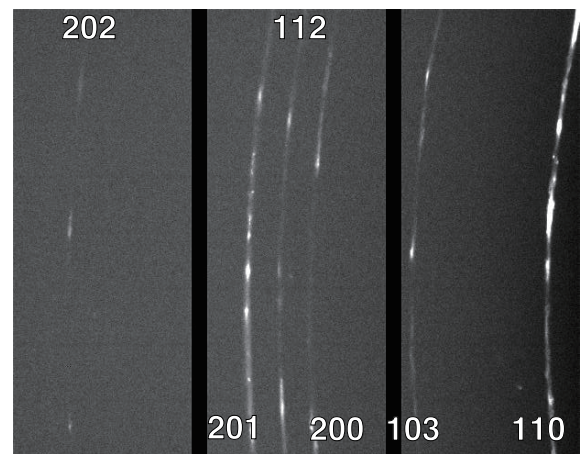


Fig. 6. X-Ray diffraction image of Mg bending specimen by PILATUS-300K.

無ひずみの格子面間隔 $d_0$ は、573 K, 30 minの焼鈍をした同一材のMg 201回折の平均を使用した。ただし、表面効果<sup>[8]</sup>を念のため避けて表面から0~2 mmのデータを除いた。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。

DSTMにより測定した $x$ 方向および $y$ 方向の回折角 $2\theta$ から格子面間隔 $d$ を求め、無ひずみの格子面間隔 $d_0$ から $x$ 方向および $y$ 方向のひずみ $\epsilon_x, \epsilon_y$ を求めた。しかし、同一点で $\epsilon_x, \epsilon_y$ の両者のひずみを都合よく得ることはできない。その解決策として、スキャンラインの測定ひずみ分布をスプライン関数で近似して、その近似関数から深さ1 mmステップでひずみの値を計算した。さらに、 $z = 0 \sim 10$  mmの各1 mm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、 $x = 0 \sim 22$  mm,  $z = 0 \sim 10$  mmの断面においてそれぞれ1 mm間隔の格子点におけるひずみ $\epsilon_x$ お

よび  $\varepsilon_y$  を計算した。

本実験では  $\varepsilon_x$  および  $\varepsilon_y$  の 2 軸方向のひずみを測定したが、 $z$  方向については X 線の経路が長くなり、ひずみを測定できなかった。そのため便宜上、平面応力状態  $\sigma_z = 0$  を仮定し、各応力を次式で求めた。

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

ただし、 $E$  および  $\nu$  はマグネシウムの X 線の弾性定数である。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新たに作成し<sup>[9]</sup>、Mg の 201 回折の値として  $E = 44.77$  GPa,  $\nu = 0.290$  を得た。なお、X 線の弾性定数の計算に用いたスティフネスは、 $c_{11} = 59.40$ ,  $c_{12} = 25.61$ ,  $c_{13} = 21.44$ ,  $c_{33} = 61.60$ ,  $c_{44} = 16.40$  GPa,  $c/a = 1.623$  であり、それらの値は文献<sup>[10]</sup> から引用した。

以上の手続きにより、得られた残留応力分布を図 7 に示す。これらの図は溶接線垂直断面であり、図の左上、すなわち  $(x, y) = (0, 0)$  が溶接線中心になり、下部 ( $z = 10$  mm) が溶接裏面となる。

図 7 (a) に示す溶接線垂直方向の応力  $\sigma_x$  の分布を見ると溶接面で引張残留応力があり、それにバランスして裏面に圧縮の残留応力が生じている。本溶接試験片では、溶接部は平板を貫通していないので、モーメントのバランスは非溶接部で受け持っている。溶接線を横断する方向で切り出すと、モーメントの拘束がなくなり、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、溶接線平行方向の応力  $\sigma_y$  の分布を図 7 (b) に示す。溶接部付近に大きな引張残留応力があり、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。溶接部を中心とする引張残留応力を囲むようにバランスして圧縮残留応力が生じている。 $x = 22$  mm 付近では、最も大きな圧縮残留応力が生じている。

以上のように、DSTM で測定した応力分布は鮮明でないようにも見えるが、今まで見ることはできなかった粗大粒を持つ溶接材の断面の応力像をはじめ測定できたことの意義は大きい。また、押し出し材であるために残留応力分布を持っているので、実際の残留応力分布は複雑である。いずれにしても、回折斑点追跡法 (DSTM) により粗大粒を持つ溶接材の残留応力を測定することが実証できた。なお、実験時間の制約から DSTM のスキニ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 0.2 mm の方が回折斑点強度の放物近似に適していた。結晶粒径に対応したスキニング幅を検討することも大切である。

本実験では、PILATUS 検出器の計数効率を考慮して

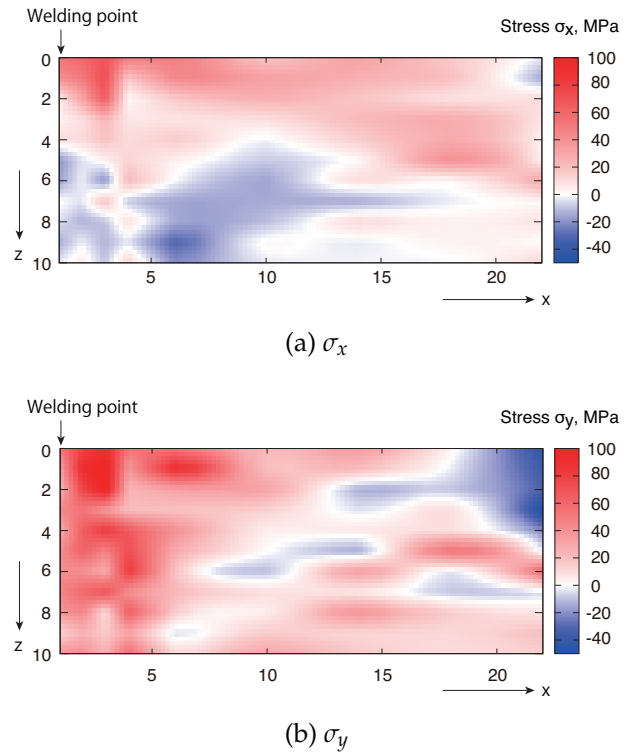


Fig. 7. Measured residual stresses in cross section of welding specimen using DSTM.

30 keV で実験を行ったが、ステンレス鋼などの材料の残留応力を測定するためには、より高エネルギー X 線を利用する必要がある。その場合は、PILATUS から高エネルギー X 線に適した検出器に変更する必要があるが、それに適した検出器の開発が期待される。

### 3.3 溶接残留応力シミュレーション

本実験で製作したマグネシウム合金溶接試験体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の比較を行う。

本シミュレーションに用いた要素モデルを図 8 に示す。溶接試験体と形状・寸法を同一にして、溶接速度も実験と同じにした。このモデルは、溶接線対称に試験片の半分を模擬している。つまり、 $y$ - $z$  面対象モデルである。溶接試験体と同じに軸方向をとり、応力の軸も測定

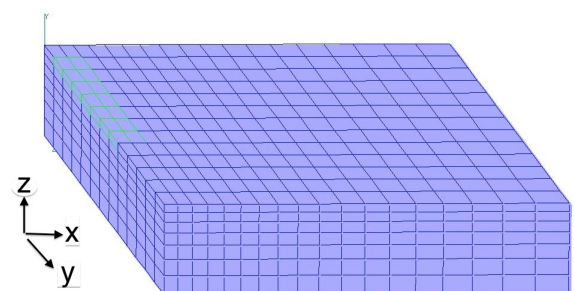
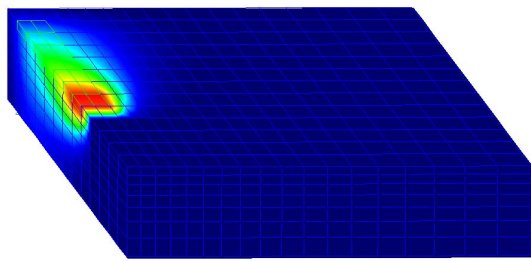
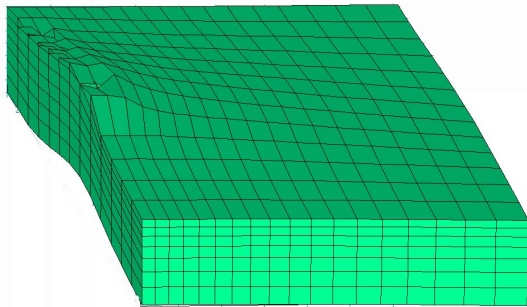


Fig. 8. Finite element mesh of welding specimen.



(a) Temperature in welding process



(b) Displacement after welding

Fig. 9. Simulation of welding process.

した溶接試験体と同じである。試験体を6面体要素でモデリングし、幅方向に18分割、厚さ方向に7分割、溶接線方向に13分割し、総節点数2128点の要素モデルである。有限要素解析ツールとして、3次元溶接変形解析プログラム Quick Welder (計算力学研究所センター) を利用した。

溶接のシミュレーションにおいては、各物性値が温度依存性を持つので、それらを入力データとして必要とする。本研究では、文献の値を参考にして、AZ31のヤング率<sup>[11]</sup>、降伏応力<sup>[12]</sup>、ひずみ硬化率<sup>[13]</sup>、比熱容量<sup>[14]</sup>、熱伝導率<sup>[14]</sup>および熱膨張率<sup>[15]</sup>の値を作成し、シミュレーションに利用した。

シミュレーション結果の例を図9に示す。図(a)は、図の奥から手前に溶接している時の温度の様子を示している。また、図(b)は溶接後の変形を示している。ただし、試験片の溶融部と一致するように入熱条件などを十分に確定していないので、より正確なシミュレーション条件になるように今後研究を進める予定である。

以上の解析を経て $\sigma_x$ および $\sigma_y$ の応力を計算した結果を図10に示す。溶接線垂直方向の応力 $\sigma_x$ については、試験片の溶接部に引張残留応力が生じている。小さな引張が溶接側に広がっている。また、引張残留応力にバランスするように溶接裏面にも弱い引張残留応力が働く。 $\sigma_x$ のシミュレーション結果と図7(a)とを比較すると、

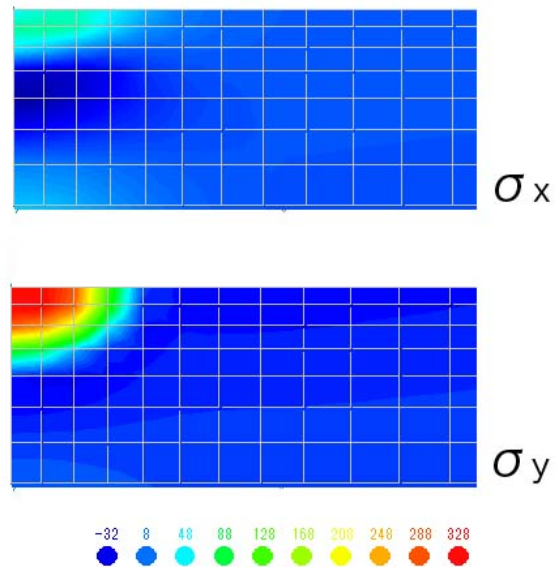


Fig. 10. Simulation results of welding residual stress by finite element method.

溶接部に大きい $\sigma_x$ が発生し、さらに極小さな引張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 $(x,z) = (17,5)$ の付近にも引張残留応力があり、溶接に関係しない残留応力があることを示唆している。

溶接線方向の残留応力 $\sigma_y$ についてみると、シミュレーションよれば、溶接部に大きい引張残留応力が発生し、それを取り囲むように小さな引張残留応力が発生している。図7(b)と比較すると、測定結果では溶接部の引張残留応力領域がシミュレーションより広く、かつ $(x,z) = (17,5)$ の付近にも引張残留応力がある。このように、押し出されたマグネシウム合金材では、内部に残留応力を持ち、それらがバランスを保っている様子がわかる。

以上のように、DSTMによる内部応力測定の結果は、板厚方向の応力 $\sigma_z = 0$ の平面応力を仮定しているが、概略的にはシミュレーションの傾向と一致した。また、DSTMによる内部応力測定によれば、押し出し加工で発生した残留応力の影響も知ることができる。

#### 4. 結 言

本研究では、改良したスパイラルスリットおよび計数型2次元検出器PILATUSを用いて、粗大粒を持つマグネシウム合金内部の曲げ応力および溶接体の残留応力分布を回折斑点追跡法(DSTM)により測定した。得られた結果をまとめると、以下のようになる。

(1) 曲げ試験により既知の曲げ応力を与えた試験片の応力分布をDSTMで測定したところ、ほぼ荷重応力と等しい応力分布を得ることができ、DSTMは粗大粒を持つ材料の内部応力測定法として有効であることを実

証できた。

(2) 厚さ 10 mm のマグネシウム合金平板に TIG 溶接を施した試験片を製作し、DSTM により溶接部および粗大粒を持つ母材内部の残留応力分布を作成し、溶接材に対しても DSTM を適用できることを確認した。

(3) 溶接試験片の残留応力について有限要素解析によるシミュレーションを行った。DSTM により測定された残留応力分布は、シミュレーションによる応力分布と概略的傾向が一致した。さらに、DSTM により測定された残留応力では、シミュレーションにない押し出し加工により発生した残留応力も捉えることができ、DSTM の有効性を確認できた。

最後に、放射光実験は平成 24 年度原子力機構施設共用利用課題 (No. 2012A-E02, No. 2012B-E12) の援助を得た。また、本研究は、学術研究助成基金挑戦的萌芽研究 No.24656083 「測定困難材の内部応力評価への挑戦」によるものである。以上、記して心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] P.J. Withers, "Use of synchrotron X-ray radiation for stress measurement", in: Analysis of Residual Stress by Diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation, ed. by M.E. Fitzpatrick and A. Lodini, Taylor & Francis, 2003, pp. 170-189.
- [2] 鈴木賢治, 菖蒲敬久, 城鮎美, 豊川秀訓, "2 次元検出器による内部ひずみ評価法", 保全学, Vol.11, No. 2, 2012, pp. 99-106.
- [3] S.F. Nielsen, A. Wolf, H.F. Poulsen, M. Ohler, U. Lienert and R.A. Owen, "A conical slit for three-dimensional XRD mapping", J. Synchrotron Rad., 7-2, 2000, pp. 103-109.
- [4] 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, 35-3/4, 2003, pp. 145-152.
- [5] R.V. Martins, "Residual stress analysis by monochromatic high-energy X-rays", in: Neutrons and Synchrotron Radiation in Engineering Materials Science, ed. by W. Reimers, A.R. Pyzalla, A. Schreyer and H. Clemens, Wiley-VHC, 2008, 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ヤ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] [http://x-ray.ed.niigata-u.ac.jp/xdatabase/Kroner\\_model/kroner.h.html](http://x-ray.ed.niigata-u.ac.jp/xdatabase/Kroner_model/kroner.h.html)
- [10] L.J. Slutsky and C.W. Garland, "Elastic constants of magnesium from 4.2 K to 300 K", Physical Review, Vol. 107, No. 4, 1957, pp. 972-976.
- [11] H. Watanabe, T. Mukai, M. Sugioka and K. Ishikawa, "Elastic and damping properties from room temperature to 673 K in an AZ31 magnesium alloy", Scripta Materialia, Vol. 51, 2004, pp. 291-295.
- [12] 寺野元規, 北村憲彦, 深津隆明, "小立方体圧縮試験による棒材の塑性異方性の測定", 塑性と加工, Vol. 52, No. 608, 2011, pp. 1002-1006.
- [13] D.L. Yin, K.F. Zhang, G.F. Wang and W.B. Han, "Warm deformation behavior of hot-rolled AZ31 Mg alloy", Materials Science and Engineering, Ser. A-392, 2005, pp. 320-325.
- [14] A. Belhadj, J. Bessrouer, J-E. Masse, M. Bouhafs and L. Barrllier, "Finite element simulation of magnesium alloy laser beam welding", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 210, 2010, pp. 1131-1137.
- [15] H. Yang, L. Huang and M. Zhan, "Hot forming characteristics of magnesium alloy AZ31 and three-dimensional FE modeling and simulation of the hot splitting spinning process", Magnesium Alloy — Design, Processing and Properties, Ed by F. Czerwinski, In-Tech, 2011, pp. 367-388.