

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：13101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656083

研究課題名(和文)測定困難材の内部応力評価への挑戦

研究課題名(英文)Challenge to evaluation of internal stress for materials with coarse grains

研究代表者

鈴木 賢治 (SUZUKI, Kenji)

新潟大学・人文社会・教育科学系・教授

研究者番号：30154537

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：改良型回転スリットおよび2次元検出器(PILATUS)を用いて、粗大粒の内部応力を測定するために回折斑点追跡法(DSTM)を提案した。回転スリットの性能を炭素鋼(S45C)の連続環から曲げ応力を求め、性能を確認した。アルミ合金及びマグネシウム合金の曲げ応力を測定し、DSTMが粗大粒の内部応力測定方法として有効であることを確認した。さらに、マグネシウム合金の溶接材の残留応力マップをDSTMで測定し、DSTMの有効性が確認された。

研究成果の概要(英文)：A diffraction spot trace method (DSTM) was proposed. The DSTM is a new technique to measure internal stresses, which combined a special rotating slit system and an area detector (PILATUS). The enough collimation of the special rotating slit system was examined from measuring the bending stresses in a specimen of S45C. The bending stresses in the specimens of aluminum and magnesium alloys were measured using the DSTM. The obtained stress distributions corresponded with the applied stresses. The DSTM was applied to the measurement of the welding residual stresses. The residual stress map by the DSTM corresponded with the simulated results by a finite element method.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：残留応力 粗大粒 溶接材 シンクロトロン放射光 回折斑点追跡法

### 1. 研究開始当初の背景

X線は高エネルギーになると(短波長になると)透過力が大きくなる。大型放射光施設 SPring-8 の高輝度かつ高エネルギー放射光を利用すれば、材料内部の応力測定が可能であり、申請者はその手法を集大成してきた。また、集合組織を持った材料の応力測定も研究してきた。しかし、X線応力測定において粗大粒、集合組織および溶接部は俗に「三大悪魔」と言われ、測定困難材として長年未解決のままである。等方・均質かつ細粒であれば、理想的な連続な回折環が得られ、回折装置により0次元検出器を任意の半径方向に走査して回折曲線を容易に測定できるが、測定困難材では回折像はスポットになり、2次元検出器を用いた新しい手法を開発することが、課題となっていた。

その対策として、回転スリットを用いて、2次元検出器に対応したコリメーション手法を確立することは準備してきた。しかし、粗大粒や溶接材などの測定困難材に対応した内部応力評価法が確立していない。

### 2. 研究の目的

代表者らは、平成23年度にコリメーションの向上を達成できる改良型の回転スリットシステムを完成させている。本研究では、改良型回転スリットおよび回折スポット追跡法(DSTM: diffraction spot trace method)を利用して、SPring-8にて高エネルギー放射光による測定困難材の内部応力測定を行う。粗大粒、集合組織および溶接材を対象とし、回転スリットとDSTMとを組み合わせた手法の実験を敢行し、有効性および問題点を明らかにした上で、本手法を確立させる。

本研究の特色は、回転スリットの開発および回折中心にある結晶粒を特定できる解析方法としてDSTMを提案し、その有効性を実証することである。これらを組み合わせることで、測定困難材の内部応力測定を確立することが目的である。これまで測定困難材として内部応力が測定できなかったものに対して、実応力を評価できることは画期的であり、学術的意義および産業界への波及効果は大きい。

### 3. 研究の方法

(1) 図1に示すような相似なスリットを持つ円板を同期して回転することにより、検出器のあらゆる位置がすべて回折中心にコリメーションされる。この回転スリットが、2次元計数型検出器(PILATUS)に対して十分なコリメーション性能を持つかを調べるため、S45Cの連続回折環を測定して、曲げ応力分布を求めた(X線エネルギー70 keV)。

(2) 高エネルギーでのPILATUS検出器の検出効率の低下に配慮して、X線エネルギー30 keVにて回転スリットの性能を試験した。ま

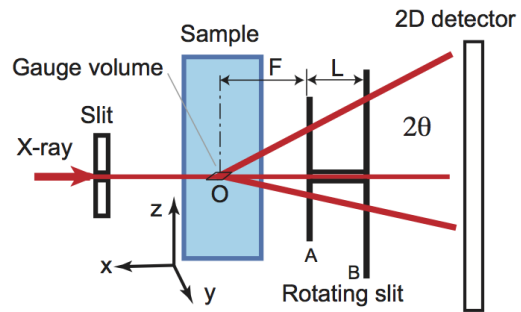


図1 回転スリットのしくみ

た、粗大粒での実験をするために、アルミニウム合金(A5052)を用いた。

(3) コリメーションが回折角に依存しないように、スリットの切り込み角度を回折角に対応させた改良型回転スリットを用意して、その性能を調べた。また、PILATUSの検出効率に配慮した30 keVのX線エネルギーでの実験に対応して、X線の透過力を上げるために、軽金属(マグネシウム合金AZ31)試験片(厚さ15 mm)に曲げ応力を与え、粗大粒材の内部応力を測定した。図2は、そのときの実験を示している。図のように入射X線はマグネシウム合金製の曲げ試験片を透過した後、改良型回転スリットを通り、PILATUS検出器にて回折像を検出する。

(4) 改良型回転スリットを利用したDSTMが、粗大粒材の内部応力分布に十分な精度を持っていることから、本手法をAZ31溶接材(厚さ10 mm)の残留応力測定に応用した。図3にその試験片を示す。溶接試験片の変形を抑えるためにメルトランによる溶接線の長さを短くしてある。図中のx方向が溶接線垂直方

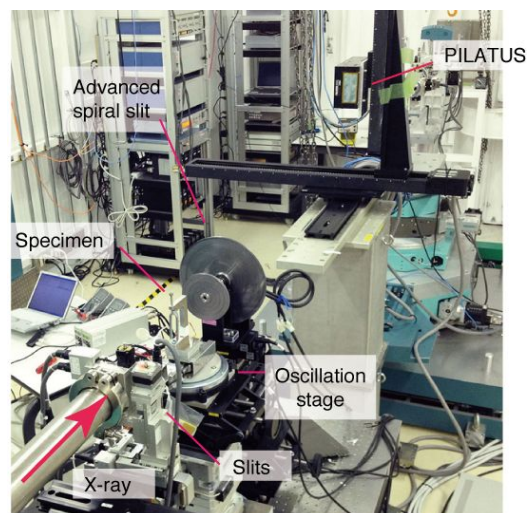


図2 改良型回転スリットとDSTM  
実験の様子

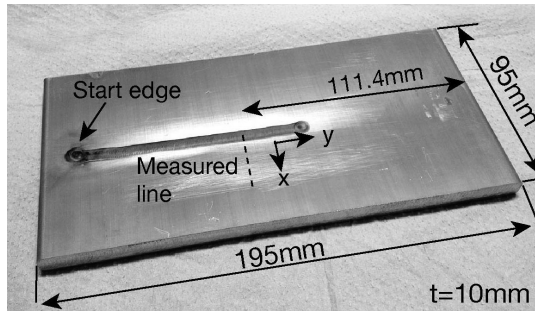


図3 マグネシウム合金溶接試験片

向, y 方向が溶接線方向となる。

#### 4. 研究成果

研究成果の番号は研究方法の番号と対応している。

(1) S45C 材では, きれいな回折環を得ることができ, 細粒のために, 連続的応力分布が得られたので, 回転スリット機構は 2 次元のコリメーション方法として有効であることを検証できた。ただし, コリメーションが回折角に依存するので, 改良が必要である。また, 70 keV では PILATUS 検出器の検出効率が低下し, 45 分の露光時間を要した。

(2) 回転スリットの有効性が粗大粒の回折斑点を測定において確認された。また, X 線エネルギー 30keV に対する PILATUS の検出効率が格段によく, 試料のスキャンニングに適していることがわかった。また, 粗大粒試験片をスキャンニングに伴い回折角度がシフトする特有の現象が見られた。この特異な現象か

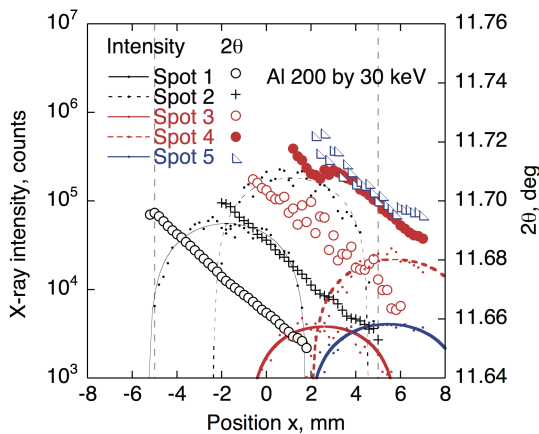


図4 スキャンニングしながら粗大粒の回折斑点を追跡したときの回折角と回折強度の挙動。各粗大粒の回折強度最大にあたる位置の回折角が回折中心における回折角度を与える。この結果から回折斑点追跡法(DSTM)が発明された。

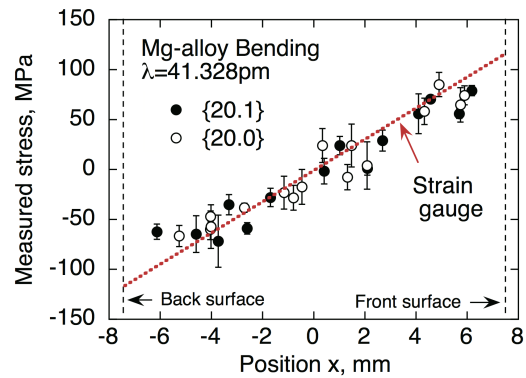


図5 DSTM により測定したマグネシウム合金中の曲げ応力分布。破線で示す負荷曲げ応力(ひずみゲージにより測定)と DSTM による測定結果が一致する。

ら回折斑点追跡法の原理を思いついた。そのときの実験結果を図4に示す。DSTM を用いることで, これまで困難とされていた粗大粒材の応力測定の問題を解決できた。

(3) マグネシウム合金 AZ31 の曲げ応力を精度よく測定でき, 粗大粒の内部応力評価に DSTM が有効であることを実証した。そのときの結果を図5に示す。30keV の X 線エネルギーに対する PILATUS の検出効率も高く, 1~2 分の露光時間で十分なカウント数を確保できた。改良した回転スリットでは, コリメーションが一定のため, 多数の回折面が利用でき粗大粒に対して効果があった。

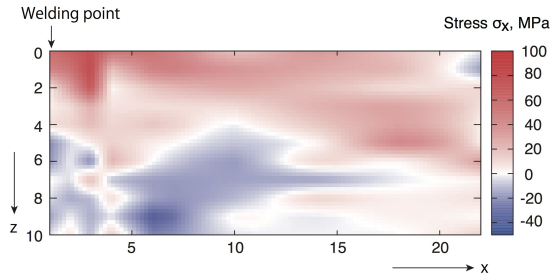
(4) 改良型回転スリットを利用した DSTM により測定した溶接部断面の残留応力マップが得られた。その結果を図6に示す。板厚方向のひずみを測定できないので, 平面応力状態を仮定して, 溶接線垂直方向(x)の残留応力(図6(a))と溶接線方向(y)の残留応力(図6(b))を得ることができた。方向の表示は図3の試験片に示した方向と同一である。

DSTM により得られた残留応力分布の信頼性を検討するために, 有限要素法によるシミュレーションを行った。図7は, 溶接時の温度分布の解析例を示したものである。その残留応力分布を図8に示す。数値計算結果と DSTM による残留応力のプロファイルはよく対応しており, DSTM は粗大粒を持つ材料の内部応力測定方法として, 優れた性能を持つことが実証された。

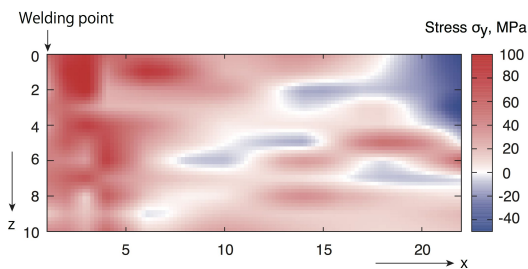
以上の成果により, 本研究の目的は十分に達成された。

成果(4)をもとに, オーステナイト系ステンレスの溶接材(厚さ 9 mm)に DSTM を応用したところ, X 線エネルギー 70 keV に対する PILATUS の検出効率が低いため十分な測定点が得られず, 正確な溶接残留応力マップが

得ることができなかった．高エネルギー X 線



(a) 接線方向垂直の残留応力



(b) 溶接線方向の残留応力

図6 DSTMによるマグネシウム合金の溶接残留応力測定結果．各残留応力マップの右上が溶接線，溶接線を垂直断面の残留応力を示している．なお，平面応力状態，すなわち板厚保方向(z)の応力はないと仮定した．

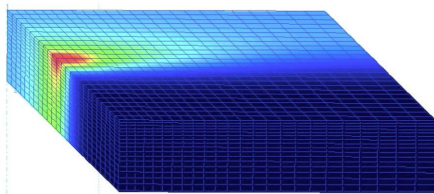


図7 溶接シミュレーション

に適した 2 次元検出器が開発された暁には，鉄鋼材料の溶接部の残留応力測定を試みた．

最後に，本研究に係わる一連の実験は，大型放射光施設(SPring-8)の原子力機構専用ビームライン BL22XU において実施した．また，本実験は原子力機構の施設供用課題(No. 2010A-E04, 2010B-E10, 2011A-E15, 2012A-E02, 2012B-E12, 2013A-E07)として援助を受けた．

## 5. 主な発表論文等

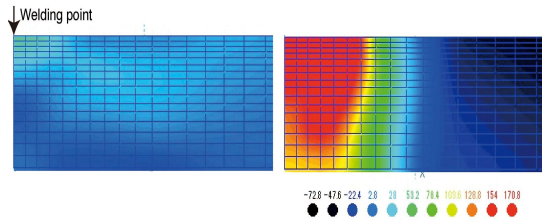


図8 マグネシウム溶接試験片の残留応力の FEM 解析結果．左側のマップが溶接線垂直方向の残留応力  $\sigma_x$ , 右側のマップが  $\sigma_y$  方向になる．

〔雑誌論文〕(計 5 件)

K. Suzuki, T. Shobu, A. Shiro and S. Zhang, Internal stress measurement of weld part using diffraction spot trace method, Materials Science Forum, 査読有, Vol. 777, 2014, pp. 155-160.

K. Suzuki, T. Shobu, A. Shiro and H. Toyokawa, Evaluation of Internal Stresses using Rotating-Slit and 2D Detector, Materials Science Forum, 査読有, Vol. 772, 2014, pp. 15-19.

K. Suzuki, T. Shobu and A. Shiro, Characteristics of Residual Stress by Water-Jet Peening, Materials Science Forum, 査読有, Vols. 768-769, 2014, pp. 564-571.

鈴木賢治, 菖蒲敬久, 城鮎美, ウォータージェットピーニングを受けたオーステナイト系ステンレス鋼の残留応力, 材料, 査読有, Vol. 62, No. 7, 2013, pp. 437-442.

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, 査読有, Vol. 11, No. 2, 2012, pp. 99-106.

〔学会発表〕(計 5 件)

K. Suzuki, T. Shobu and A. Shiro and S. Zhang, Internal stress measurement of weld part using diffraction spot trace method, The 7th International Conference on Mechanical Stress Evaluation by Neutron and Synchrotron Radiation (Sep 10, 2013), Crown Plaza Hotel, Sydney, Australia.

放射光による溶接材の内部残留応力評価, 鈴木賢治, 菖蒲敬久, 城鮎美, 張 朔源, 日本保全学会 第 10 回 学術講演会, (2013/7/24-26), 大阪市ホテル阪急エキスポパーク, 大阪市.

鈴木賢治, 菖蒲敬久, 城 鮎美, 張 朔源, 2次元検出器を利用した粗大粒の内部応力評価, 第 47 回 X 線材料強度に関するシンポジウム, (2013/7/18-19), 国立オリンピック記念青少年総合センター, 東京都渋谷区

鈴木賢治, 菖蒲敬久, 城 鮎美, 張 朔源,

回折斑点追跡法による粗大粒の内部応力評価，第 13 回 機械・構造物の強度設計，安全性評価に関するシンポジウム，(2013/2/22)，日本材料学会，京都市。

K. Suzuki, T. Shobu and A. Shiro, Characteristics of Residual Stress by Water-Jet Peening, The 9th International Conference on Residual Stresses, (Oct 7-9, 2012), Congress-Centre, Garmisch-Partenkirchen, Germany.

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

鈴木 賢治 (SUZUKI, Kenji)  
新潟大学・人文社会・教育科学系・教授  
研究者番号：30154537

以上