

[課題番号 22039]

高エネルギー放射光と中性子との相補的応力測定

Stress Measurements by Complementary Use of Neutrons and Synchrotron Radiations

鈴木賢治^{†A)}, 三浦靖史^{B)}, 菖蒲敬久^{C)}, 諸岡 聡^{C)}
Kenji Suzuki^{†A)}, Yasufumi Miura^{B)}, Takahisa Shobu^{C)}, Satoshi Morooka^{C)}

^{A)} Faculty of Education, Niigata University

^{B)} Central Research Institute of Electric Power Industry

^{C)} Japan Atomic Energy Agency

Abstract

A double exposure method (DEM) is a stress measurement method for coarse grained materials using hard synchrotron X-rays. The detailed residual stress maps can be obtained by the DEM. However, the measuring objective for the DEM is limited to a plate specimen. On the other hand, a strain scanning method with neutrons is suitable for triaxial stress measurements due to a deep penetration but has a low spatial resolution. As the countermeasure, we propose a new stress analysis. It is that the detailed stress map under a triaxial stress state is obtained by a complementary use of synchrotron radiations and neutrons. In this study, the residual stress distributions of the butt-welded pipe of an austenitic stainless steel were measured by neutrons. In addition, the detailed strain maps of the plate specimen of the welded root were measured using the DEM with hard synchrotron X-rays. The detailed welded residual stress maps could be created from the residual stress distribution and the strain maps of both.

Keyword: stress measurement, butt-welded pipe, austenitic stainless steel, residual stress, detailed stress map, DEM

1. はじめに

研究炉の中性子を利用した残留応力測定においては、優れた透過力による3軸応力下の実応力解析が得意としている。しかし、その空間分解能が大きな課題であった。

近年、放射光による応力測定の開発は目覚ましい。それは、新たな検出器の開発とそれを利用した測定法が功を奏している。特に、二重露光法の開発[1,2]によって、これまで放射光で測定不可能とされていた粗大粒材や溶接材の詳細な応力マップの測定が可能となり、放射光による応力測定に残された難問は解決された。しかし、二重露光法では、対象となる試験片が平板に限られているので、平面応力問題しか測定することができなかった。

本課題では、中性子と放射光の応力測定の問題を解決するために、高エネルギー放射光X線と中性子を相補的に利用して、詳細な溶接残留応力マップ作成したので報告する。

2. 実験方法

2.1 試験体

本実験に使用した試験体は、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316 の突合せ溶接配管(150A, 板厚 14 mm)である。60 度の開先加工をした後、インサートリングを介して、GTAW で 4 パス(4 層)、SMAW で 4 パス(3 層)の突合せ溶接をした。その後、余盛部を削除し、溶接配管試験体とした。

さらに、同試験体から無ひずみ試験片および放射光測定用の試験片を取り出した。またその取り出し部分を中性子応力測定用のビームパスとして利用した。

2.2 中性子応力測定

中性子応力測定の手続きと測定条件の設定に、前

年度の課題(21032)を実施したことが大いに役立った。中性子応力測定法はひずみスキニング法を用いた。中性子応力測定は、日本原子力研究開発機構原子力科学研究所の研究炉 JRR-3 の中性子を利用した。同施設に設置している中性子応力測定装置 RESA-1 を利用して試験体の溶接残留応力分布を測定した。

溶接配管試験体の測定の様子を Fig. 1 に示す。回折格子面 d の測定方位は、Fig. 1 に示すように円周方向(hoop)、半径方向(radial)および軸方向(axial)の3方向である。各方向の回折角 θ からブラッグ条件により回折格子面間隔 d を求め、無ひずみの回折格子面 d_0 からひずみ $\varepsilon (=d/d_0-1)$ を計算した。

計測においては、粒間ひずみの影響を受けず、信頼性の高い、 γ -Fe の 311 回折を使用した。波長は 1.71Å であった。回折弾性定数は Kröner モデルで計算し、ヤング率 $E=182.5$ GPa, ポアソン比 $\nu=0.3067$ を用いた[4]。

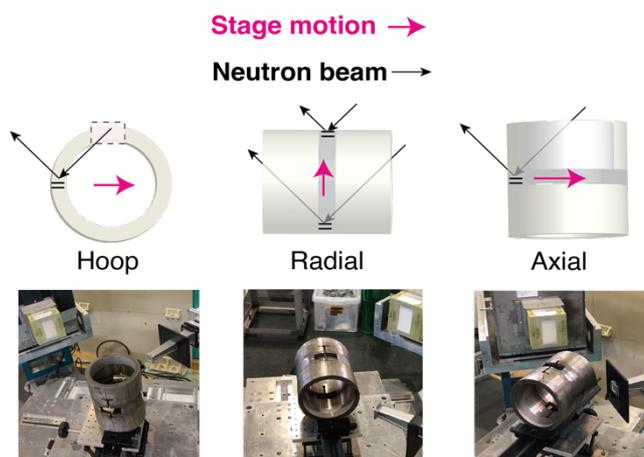


Fig. 1: Configuration of neutron beam and butt-welded pipe in strain scanning method.

[†]suzuki@ed.niigata-u.ac.jp

[課題番号 22039]

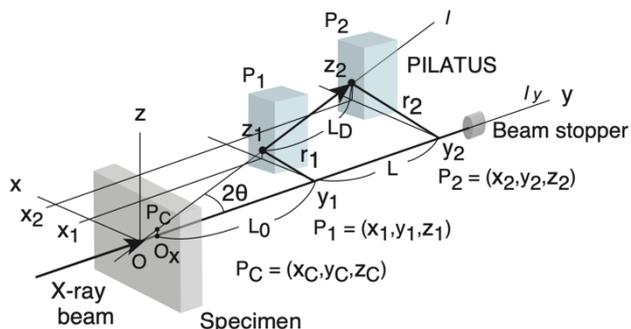


Fig. 2: Double exposure method with hard synchrotron radiations.

2.3 二重露光法による応力測定

放射光による二重露光法は、大型放射光施設 SPring-8 の量子科学技術研究開発機構専用ビームライン BL14B1 で実施した。ここでは、二重露光法の概略的な説明を行う。細粒の回折環と異なり、粗大粒、溶接部からの回折は回折パターンが斑点になったり、斑点が重なるために回折曲線が歪んだりする。この場合、回折粒の回折中心が粒の位置によりばらつく。そのため、回折中心を仮定する回折装置による測角法では正しい回折角度が測定できない。

この解決策として、Fig. 2 に示す二重露光法を提案した。二重露光法では図のように、検出器を前後に L の距離で移動させ同一の回折パターンを $P1$ および $P2$ の 2 箇所測定する。 $P1$ および $P2$ の回折半径を r_1, r_2 を計測し、その相対距離 $r (= r_2 - r_1)$ から回折角度 2θ を次式で求める。

$$2\theta = \arctan\left(\frac{r}{L}\right) = \arctan\left(\frac{r_2 - r_1}{L}\right) \quad (1)$$

例えば、Fig. 3 に示すように、溶接金属の回折パターンの回折半径 r_1, r_2 は激しく変動し、その変化はひずみの範囲を遥かに超えている。しかしながら、 r_1 と r_2 は互いに同期しているので、溶接組織の回折半径を $r = r_2 - r_1$ より計測すれば、その変動をキャンセルして正確な回折半径が得られるはずである。

放射光によるマイクロビームとその透過力を利用して溶接部平板試験片の溶接底部の配管の軸方向と半径方向の残留ひずみの詳細なマップをつくる。二重露光法では平面応力になってしまうので、円周方

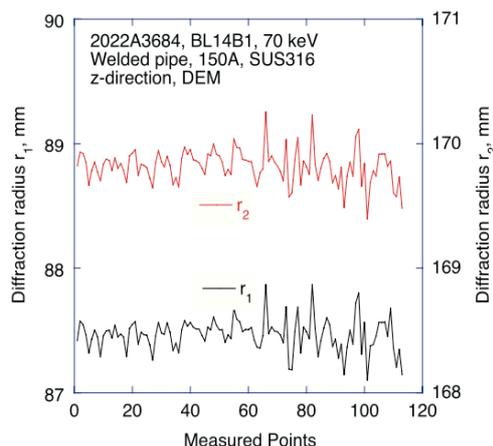


Fig. 3: Fluctuation of diffraction radii of r_1 and r_2 measured using double exposure method.

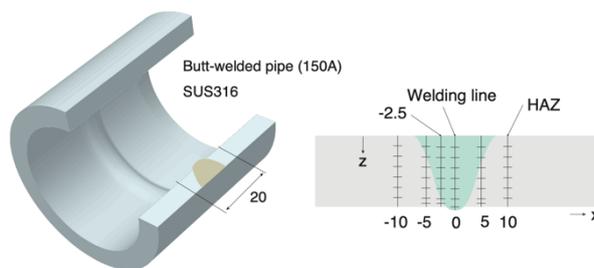


Fig. 4: Measured points using neutrons.

向の残留応力が解放されている。それを補正するために、中性子による三軸応力下の円周方向の残留応力を利用して補正を行うことで、3 軸応力状態に近い詳細な残留応力マップを得ることを検討する。

3. 実験結果

3.1 溶接配管の残留応力

JRR-3 を利用して 5 日間×2 回で測定できる箇所は限られている。本課題で測定した位置を Fig. 4 に示す。溶接線を $x=0$ として ± 10 mm の範囲で十字で示した位置を測定した。

前述のひずみスキニング法により 3 軸方向の残留応力を測定した結果を Fig. 5 に示す。Fig. 4 の x のマイナス方向が Fig. 5 の上の方になる。Fig. 5 からわ

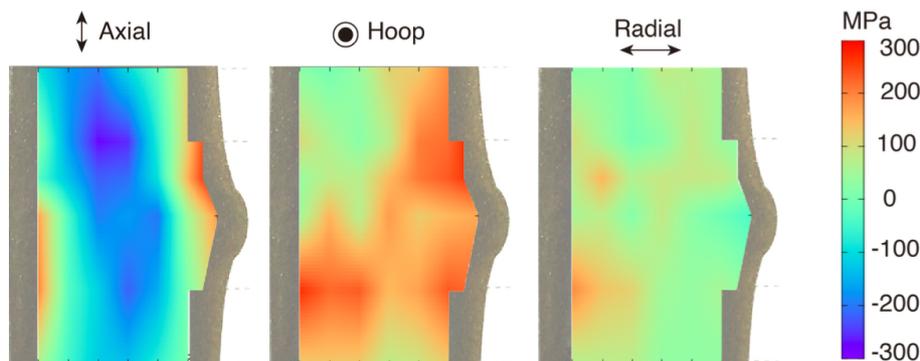


Fig. 5: Residual stress maps of butt-welded pipe measured using strain scanning method with neutrons.

[課題番号 22039]

かるように、突き合わせ溶接配管の残留応力が測定された。一般には、突き合わせ溶接では溶接線に対して対称の応力分布を仮定されるが、本結果では溶接線に対して非対称の分布を示している。これは最後の余盛の7層目が2回のパスで作られており、それが溶接線の下下になっていることが影響している。本測定結果から、最終パス側の配管内側に大きな軸方向の引張残留応力が形成される。

軸方向の残留応力 σ_a は溶接底部に大きな引張が発生している。しかし、ゲージ体積が大きいため表面近くの残留応力を測定できなかった。これについては、放射光による測定を活かすことが肝要である。また、外表面に引張の残留応力が見られる。これは、余盛部を削除した際に機械加工により残留応力が導入されたものと、後述の俵紋りによるものかは判別が難しい。

円周方向の残留応力 σ_h は、溶接部に引張の残留応力があり、それらが配管の内側と外側で大きくなる傾向がある。この円周方向の引張残留応力の領域が配管を縛り上げるように作用して、溶接部の絞り変形の原因になっている。特に薄い配管では、これが大きく影響するという報告もある[5]。

半径方向には残留応力 σ_r はあまり発生せず、一様な応力分布になっている。

3.2 突き合わせ溶接底の応力マップ

前述の二重露光法を用いて溶接残留応力のX線応力測定を実施した。5 mm の溶接部試験片を透過させるためにX線エネルギー70 keVとし、入射X線ビームサイズを0.2×0.2 mm²とした。溶接底部の領域に1 mm 間隔でX線ビームを入射して二重露光法で軸方向ひずみ ϵ_a と半径方向のひずみ ϵ_r を測定した。使用した回折面は中性子測定と同様に、 γ -Fe の 311 回折である。

測定した各応力 σ_a 、 σ_r を Fig. 6 に示す。得られた各ひずみを Fig. 5 の中性子で測定された残留応力のマップと比較するとその傾向は一致しており、中性子と放射光による測定の再現性が確認できる。

3.3 ハイブリッド実応力解析

前述の放射光による二重露光法で得られた軸方向ひずみ ϵ_a および半径方向ひずみ ϵ_r 場に、放射光試験片で解放された円周方向の残留応力を補正することを考える。中性子で得られた円周方向応力 σ_h を平面

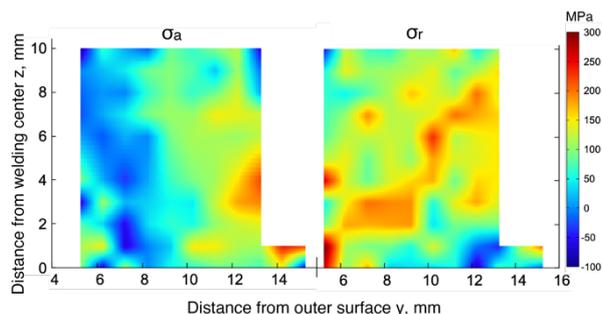


Fig. 6: Stress maps measured using double exposure method with hard synchrotron X-rays of 70 keV.

ひずみの仮定のもとで加えると、次式が得られる。

$$\sigma_a = \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_a + \epsilon_r) + \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_h \quad (2)$$

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_r + \epsilon_a) + \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_h \quad (3)$$

ただし、 E および ν は回折弾性定数のヤング率とポアソン比であり前述のKrönerモデルで計算したものと同じである。これを用いて得られた結果を Fig. 7 に示す。

Fig.7の軸方向の残留応力のマップをみると、溶接底部で溶接線から10 mmほど上に大きな引張が発生している。この結果は、実際の溶接配管からの応力腐食割れ発生位置および進展方向とよく対応している。また有限要素法解析も同様の応力分布を示しており、測定結果の信頼性は高い。

半径方向の残留応力マップは中性子測定の残留応力マップよりも大きな残留応力の存在を示している。円周方向の残留応力マップについては、中性子測定の結果しかない。

放射光による二重露光法が開発され、初めて溶接部の詳細なマップが作成され大義は大きい。また、その結果はこれまでの経験とよく合致しており信頼できる。

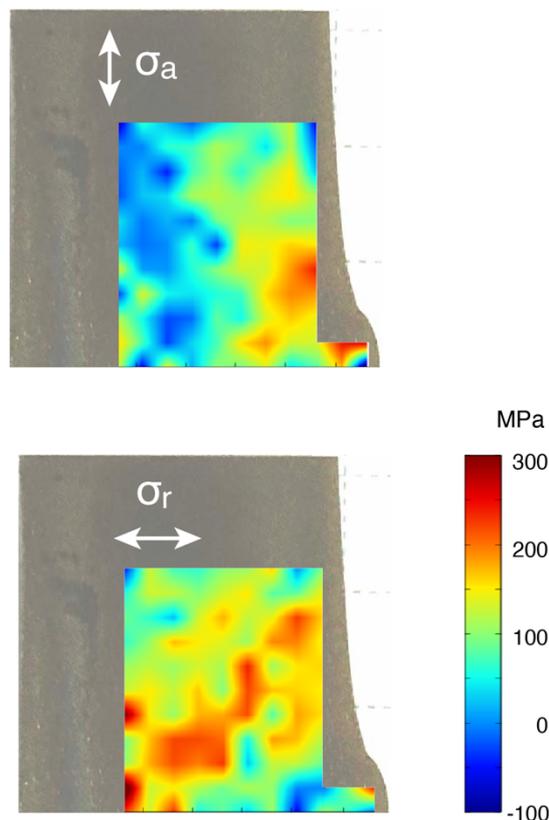


Fig. 7: Residual stress map of butt-welded pipe analyzed by complementary use of neutrons and synchrotron radiations.

[課題番号 22039]

4. まとめ

本課題の実施により、突合せ溶接配管の詳細な残留応力マップを作成する技術が確立した。実は、同様の研究課題が林らによって行われ、配管内部の応力分布が明らかにされている[5]。この研究は画期的研究として高く評価され日本材料学会論文賞を受賞している。それから27年の月日を経て、やっと詳細な残留応力を得る所まで到達した。この間に、大型放射光施設の整備、高エネルギーの二次元検出器の開発、粗大粒の解析手法の発展など多くの課題が克服され、本研究に至っている。これらが、中性子による応力解析と一緒に、本成果が誕生したことは意義深い。

本方法は放射光と中性子の相補的利用という消極的な捉え方でなく、放射光と中性子を積極的に利用して、これまで見えなかった詳細な実応力を解析できることを考えると「量子ビームハイブリッド実応力解析」がふさわしい呼び方と言える。

なお、本報告の詳細については、すでに報告されている文献[6]を参照してほしい。

謝辞

放射光実験においては、量子科学技術研究開発機構・城鮎美博士、高輝度光科学研究センター・豊川秀訓博士、佐治超爾博士からご協力を頂いた。心より感謝いたします。

中性子回折の実験は、東京大学工学系研究科原子力専攻、日本原子力研究開発機構・量子科学技術研

究開発機構施設利用共同研究のもとで、JAEA 研究炉 JRR-3 を用いて実施された(課題番号 21032, 22039)。本研究は令和2年度学術研究助成基金助成金基盤研究(C) 課題番号 20K04156 の援助によるものである。また、放射光実験は量子科学技術研究開発機構施設共用(課題番号 2021A-H15, 2022-H11)、文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業(課題番号 A-21-QS-0015) および QST マテリアル先端リサーチインフラ事業(JPMXP1222QS0011)の支援を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] 鈴木賢治, 菖蒲敬久, 城 鮎美, "二重露光法による粗大粒材の応力測定", 材料, Vol. 68, pp. 312-317, 2019.
- [2] 鈴木賢治, 倉 己萌, 三浦靖史, 城 鮎美, 豊川秀訓, 佐治超爾, 梶原堅太郎, 菖蒲敬久, "二重露光法による溶接部の応力測定の研究", 材料, Vol. 71, pp. 1005-1012, 2022.
- [3] 鈴木賢治, 三浦靖史, 諸岡 聡, 菖蒲敬久, "突合せ溶接配管の残留応力分布", 第56回 X線材料強度に関するシンポジウム(京都市, 7/21), pp. 5-8, 2022.
- [4] <https://japan.rigaku.com/ja/techniques/residual-stress-analysis>
- [5] 林 眞琴, 石渡雅幸, 森井幸生, 皆川宣明, "中性子回折による炭素鋼配管突合せ溶接継手の残留応力", 材料, Vol. 45, pp. 772-778, 1996.
- [6] 鈴木賢治, 三浦 靖史, 城 鮎美, 豊川秀訓, 佐治超爾, 菖蒲敬久, 諸岡 聡, "放射光 X線と中性子を相補的に用いた小口径突合せ溶接配管の実応力解析", 材料, Vol. 72, pp. 316-323, 2023.