

[2023105204]

小口径ステンレス鋼溶接配管の溶接残留応力のハイブリット実応力解析 Hybrid Actual Stress Analysis of Austenitic Stainless Steel Welded Piping with Small Bore

鈴木賢治^{1,A)}, 三浦靖史^{B)}, 諸岡聡^{C)}, 菖蒲敬久^{C)}
Kenji Suzuki^{#,A)}, Yasufumi Miura^{B)}, Morooka Satoshi^{C)}, Takahisa Shobu^{C)}

^{A)} Faculty of Education, Niigata University

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

^{C)} Materials Sciences Research Center, Sector of Nuclear Science Research, Japan Atomic Energy Agency

Abstract

A pipe of austenitic stainless steel (100A schedule 120) was butt-welded by TIG. The experiments of the neutron diffraction were performed at JRR-3, and the welding residual stress distribution in the welded piping were measured using a strain scanning method with neutrons. On the other hand, the plate specimen of the welded part of the welded piping was cut off with electric discharge machining. The detailed residual stress maps of the plate specimen were measured using a double exposure method with high-energy synchrotron radiations. We completed an actual stress map with high spatial resolution by hybridizing the residual stresses of both neutrons and synchrotron radiations.

Keyword: residual stress, butt-weld piping, strain scanning method, austenitic stainless steel, quantum beam

1. はじめに

これまでに沸騰水型炉 (BWR) のステンレス鋼製大口径配管の SCC が問題となり、中性子残留応力測定が実施された。最近では、小口径の大飯発電所 3 号機加圧器スプレライン配管やフランスの PWR の大口径配管の溶接部等、加圧水型 (PWR) においてもステンレス鋼の SCC によるき裂が問題となっている[1]。国内 PWR のステンレス鋼配管溶接部は基本的に応力改善措置が実施されておらず、また、国内 BWR の配管溶接部は大口径管を中心に応力改善措置が実施されているが、小口径配管では寸法の制限等により溶接後の応力改善措置が実施できない場合がある。そのため、炉形を問わず小口径配管の溶接残留応力の実応力を知ることが、原子力発電設備の安全や安定稼働に不可欠であるが、その残留応力の実測例は限られている。

著者らは、放射光を利用した二重露光法を開発し、これまで測定できなかった溶接部の二次元実応力測定を可能にした[2]。最近、その二次元応力マップと中性子による三軸応力解析とを組み合わせ、詳細な三次元の実応力解析に成功した[3]。この手法を量子ビームハイブリッド実応力解析と呼ぶ。

本報告では、100A 配管の中性子応力測定を実施し、量子ビームハイブリッド実応力により溶接配管の詳細な残留応力マップを作成した。

2.1 材料および溶接配管

中性子回折により残留応力を測定する配管は、オーステナイト系ステンレス鋼配管 SUS316TP, 100A, スケジュール 120 (外形 114.3 mm, 厚さ 11.1 mm) である。この配管に 60° の開先を取り、インサートリングを介して TIG にて突き合わせ溶接した。溶接は、各層 1 パスにて溶接し全 7 層とした。突き合わせ溶接配管の全長は長さ 300 mm である。

最初、溶接配管に中性子のパスを通すために穴を開けずに中性子回折を測定しようと試みたが、円周方向の回折が測定困難となった。特に、100A 配管のようにある程度径が小さくなると、透過距離が位置によっては極度に長くなる配置が生じて、回折が測定できなかった。そのため、中性子の透過できるように放電加工で穴を開けた。

2.2 中性子応力測定

中性子回折を利用して応力を測定した。中性子回折は、研究炉 JRR-3 の核分裂中性子を減速して熱中性子を取り出し、中性子導管を用いて散乱施設に取り出した。中性子をモノクロメータにより波長 λ を 1.5794 Å に整えた。応力測定には、粒間ひずみの影

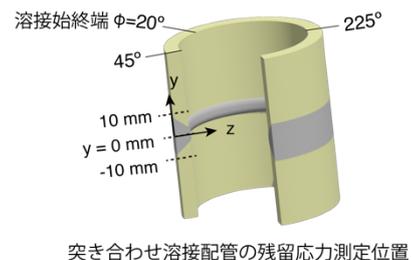
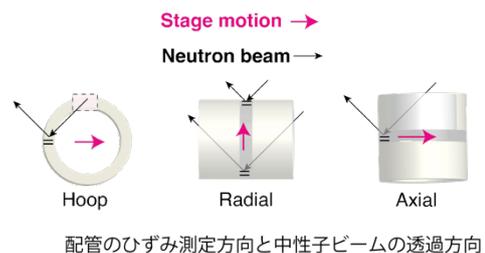


図 1 配管の回折測定の配置と測定位置

¹ suzuki@ed.niigata-u.ac.jp

[2023105204]

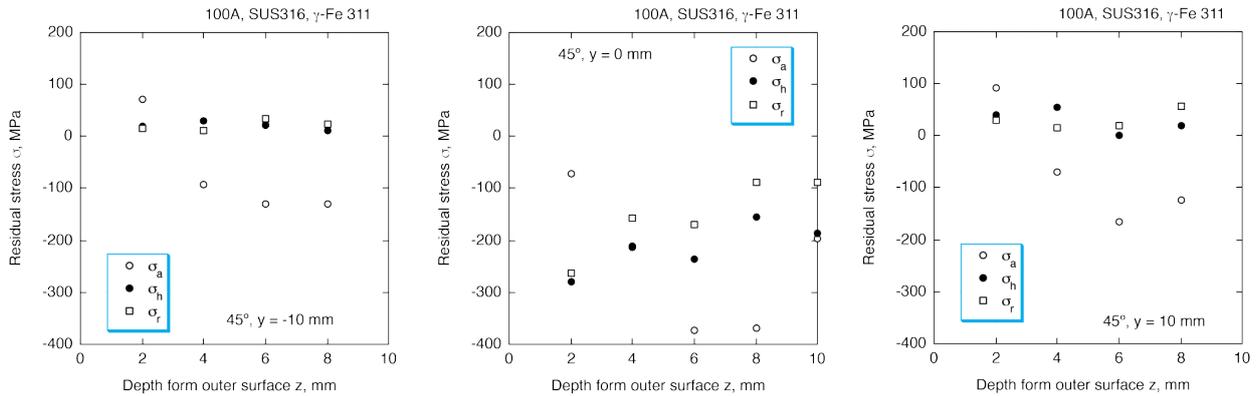


図 2 $\phi=45^\circ$ の中性子による残留応力分布測定

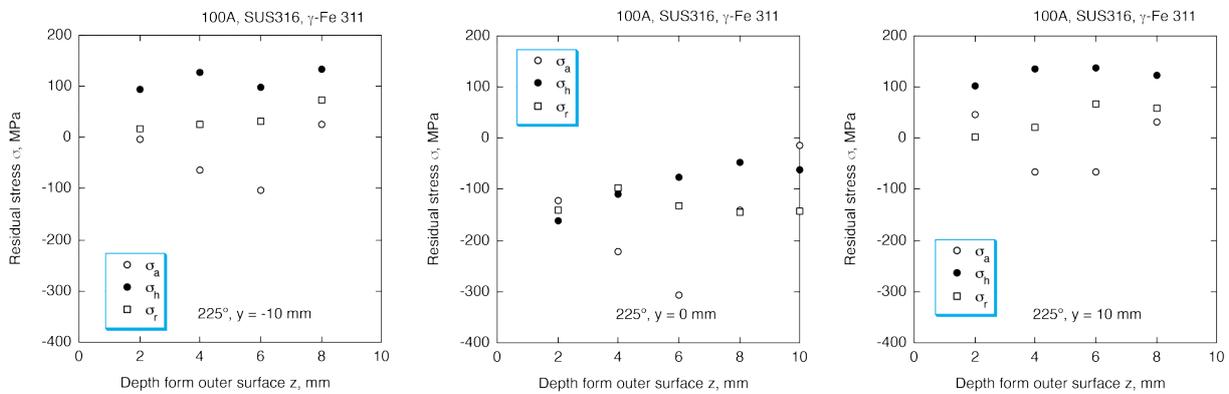


図 3 $\phi=225^\circ$ の中性子による残留応力分布測定

響が少なく機械的弾性定数に近いオーステナイト (γ -Fe) の 311 回折を利用した。測定した回折角 θ と無ひずみの回折角 θ_0 を用いてブラック条件から、ひずみ ε を $\varepsilon = \sin \theta / \sin \theta_0 - 1$ により求めた。

シンクロトロン放射光を用いて二重露光法で溶接残留応力を測定するために放電加工で切り出した板厚 5 mm の試験片を用意した。その試験片の溶接線から 50 mm 離れた場所は残留応力の影響が少なく、測定した回折角がよく一致していたので、それらの 3 方向の平均値を θ_0 の値とした。

残留応力測定はひずみスキニング法とし、ゲージ体積は 2 mm になるようにした。回折の測定は、JAEA 物質科学センターの中性子応力測定装置 RESA を使用した。入射中性子ビームと溶接配管の向き、回折の測定の位置関係を図 1 の上段に示す。

配管の測定位置については、図 1 の下段に示すように配管の外表面から内側に $z=2, 4, 6, 8$ mm の 5 点を測定した。測定方位は軸方向(a)、周方向(h)、半径方向(r)の 3 方位である。測定位置は、溶接線を $y=0$ mm として、 $-10, 0, 10$ mm の 3 ラインとした。図 1 に示すように、溶接始末端はおおよそ $\phi=20^\circ$ であり、 $\phi=45^\circ$ および 225° の面で残留応力を測定した。

3. 結果および考察

3.1 ひずみスキニングによる残留応力分布

測定した軸方向ひずみ ε_a 、周方向ひずみ ε_h 、半径方向ひずみ ε_r から次式を用いて、軸方向応力 σ_a 、周方向応力 σ_h 、半径方向応力 σ_r を求めた。

$$\sigma_a = \frac{E}{1+\nu} \left[\varepsilon_a + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_a + \varepsilon_h + \varepsilon_r) \right]$$

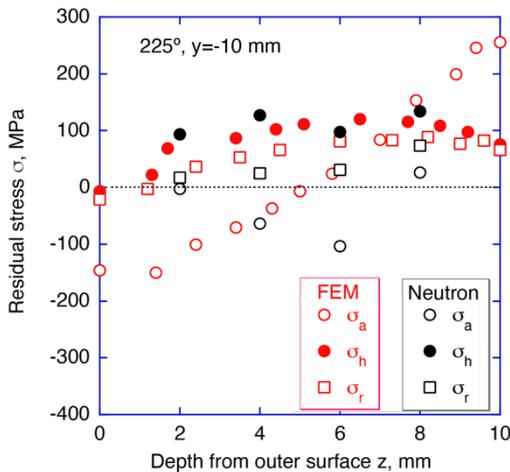
$$\sigma_h = \frac{E}{1+\nu} \left[\varepsilon_h + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_a + \varepsilon_h + \varepsilon_r) \right]$$

$$\sigma_r = \frac{E}{1+\nu} \left[\varepsilon_r + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_a + \varepsilon_h + \varepsilon_r) \right]$$

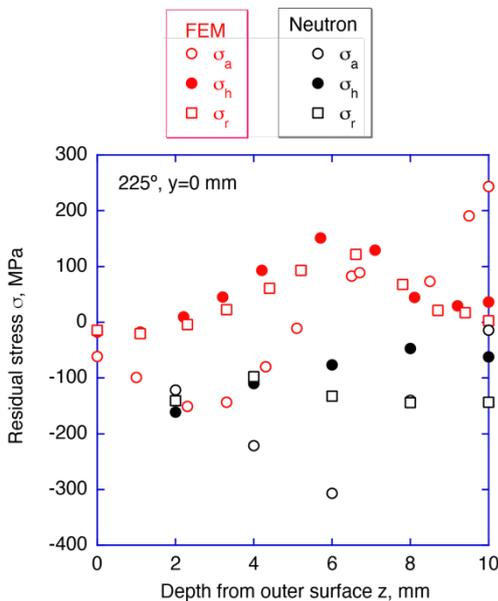
ただし、 E 、 ν は回折弾性定数であり、文献から単結晶の stiffness を引用し[4]、Kröner モデルにより計算して、 $E=182$ GPa、 $\nu=0.307$ の値を得た[5]。

図 2 (a)~(c) に $\phi=45$ deg の面で測定された $y=-10, 0, 10$ mm 位置の各方位の深さ z 方向の残留応力分布を示す。 $y=-10$ mm と 10 mm を比較すると、3 方向の残留応力分布がほぼ同じで、残留応力分布は溶接線対象に近いことがわかる。また、 $y=0$ mm の残留

[2023105204]



(a) 配管母材部(y=-10 mm)



(b) 配管溶接部(y=0 mm, 溶接線)

図 4 中性子測定と FEM 解析の比較

応力分布を見ると圧縮が大きくなっている。軸方向の残留応力 σ_a を見ると圧縮が支配的なように見えるが、バランスを考えると、配管の内・外表面付近で大きな引張残留応力がある可能性もあるが、ゲージ体積 2 mm のために、表面下の残留応力を良い精度で測定できない。

同様にして、図 3 (a)~(c)に $\phi = 225 \text{ deg}$ の面で測定された $y = -10, 0, 10 \text{ mm}$ 位置の各方位の深さ z 方向の残留応力分布を示す。 $\phi = 225 \text{ deg}$ の面は図 2 とちょうど反対側に当たる。ここでも溶接線対称の残留応力分布、溶接線($y = 0 \text{ mm}$)で圧縮領域が支配的なことなど、図 2 と同じ傾向が得られた。図 2 および 3 において、同様の残留応力分布傾向が得られている

ことから、ひずみスキャンによる測定は信頼できる。

以前測定した 150A では、周方向応力 σ_h が大きな引張を示したが、100A の本配管では周方向残留応力はあまり大きくない分布を示した。これは 150A では、後半のパスを被覆金属溶接(SMAW)にて溶接したので、ガスタングステナーク溶接(GTAW)よりも大きな残留応力が発生したものと考えられる。

3.2 残留応力分布と有限要素解析との比較

図 4 (a)に $y = -10 \text{ mm}$ 位置におけるひずみスキャン法によって得られた残留応力の深さ方向の分布と有限要素解析(FEM)によって得られた残留応力とを比較した。両者の周方向応力 σ_h 、半径方向応力 σ_r はよく対応しており、解析と実測で十分な精度で残留応力が評価されている。

軸方向応力 σ_a が両者で一致しないのは、実際の配管では余盛り部を除去するためにグラインダーで外周を研削されている。そのため、外周付近で大きな引張残留応力が発生し、配管板厚内部で圧縮残留応力が生じ、配管内面付近で引張応力が急勾配となることが予想され、実測された σ_a はそれに対応している。FEM では、余盛り除去を考慮していないので、実測した σ_a と異なる。このことから σ_a を除けば、FEM の解析結果と中性子はよく対応していることが確認できる。

同様に、図 4 (b)に $y = 0 \text{ mm}$ の FEM による残留応力分布と中性子測定による残留応力分布を示す。図 4 (a)と異なり、両者の結果が一致しない。ただし、周方向応力 σ_h 、半径方向応力 σ_r の測定値を 150 MPa ほど移動すると FEM の結果とよく一致する。ひずみスキャンでひずみを計算するとき、母材の無ひずみの格子定数を利用したが、そのことが影響している可能性もある。溶接金属の無ひずみの格子定数を母材ではなく溶接金属から得る必要があることを示唆しているかもしれない。

3.3 実応力解析

DEM はシンクロトロン放射光の高エネルギー X 線ビームを試料に垂直に透過させ、高空間分解能で残留ひずみを測定できる。

同一配管から放電加工により板厚 5 mm、溶接線を中心にして約 100 mm の試験片を取り出した。その試験片の溶接底部の残留応力マップを作成するために、大型放射光施設 SPring-8 の量子機構専用ビームライン BL14B1 にて二重露光法(DEM)を用いて溶接底部のひずみマップを作った。

当然のことながら、放電加工により放射光用の試験片を取り出すときに周方向の応力が開放されている。それを補正するために、DEM により得られた軸方向ひずみ ε_a 、半径方向ひずみ ε_r を平面ひずみ条件下で中性子測定の周方向応力 σ_h を作用させて、3 軸応力状態の残留応力マップを作った。その結果を図 5 に示す。

図からわかるように溶接底部の詳細な残留応力マップを作成することができる。軸方向の応力を見ると、配管内面の溶接金属と HAZ 部の境界付近に大き

[2023105204]

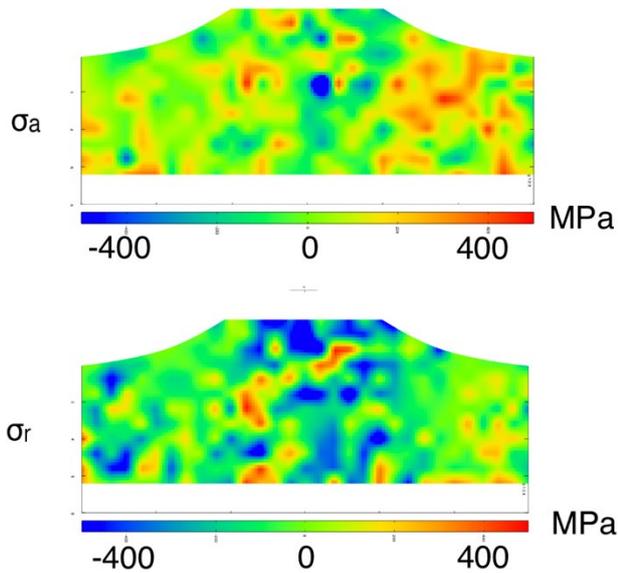


図5 ハイブリッド実応力解析結果

な引張残留応力が発生している。これは、配管の応力腐食割れの発生位置と対応している。

4. まとめ

中性子とシンクロトロン放射光をハイブリッドに利用して、詳細な三軸応力マップを作成することが達成できた。中性子によるひずみスキニング法による残留応力分布は、有限要素解析ともよく一致していたが、溶接金属の位置ではあまり一致していなかった。この原因については、無ひずみの格子定数の違いが影響しているのかを検討する必要がある。

謝辞

シンクロトロン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 2023105204)。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 2023A3684)、文部科学省マテリアル先端リサーチインフラ事業(ARIM 課題番号 JPMXP1223QS0011)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] 大飯発電所3号機の加圧器スプレイライン配管溶接部の傷, 関西電力 (2021).
<http://www.atom.pref.fukui.jp/senmon/dai97kai/no.4.pdf>
- [2] 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, No.2, pp. 312-317 (2019).
- [3] K. Suzuki, Stress Measurements: Stress measurements of coarse-grained materials and welded parts by double 48 exposure method with high-energy monochromatic X-rays, SPring-8/SACLA Research Frontiers 2022, p. 48 (2023).
- [4] H.M. Ledbetter, Predicted single-crystal elastic constants of stainless-steel 316, British Journal of Non-Destructive Testing, Vol.~23, pp.~286-287 (1981).
- [5] <https://x-ray.jsms.jp/kroner/index.html> または <https://japan.rigaku.com/ja/techniques/residual-stress-analysis>