

小口径ステンレス鋼配管溶接部の残留応力分布のばらつきに関する実験的検討

Experimental study on the variability of residual stress distribution in small-bore stainless steel pipe weld

三浦 靖史¹⁾

Yasufumi MIURA

鈴木 賢治²⁾

Kenji SUZUKI

¹⁾一般財団法人電力中央研究所²⁾新潟大学

呼び径 100A の SUS316 製配管溶接部を対象とし、板厚方向の溶接残留応力分布の周方向位置依存性の評価を目的として、溶接熱影響部および溶接金属部を対象に、中性子によるひずみスキニング法を用いて応力測定を実施した。測定は溶接始末端を 0° と定義した場合の 45° と 225° の 2 つの位置で実施した。測定された板厚方向の応力分布のプロファイルは類似した傾向を示したが、45° 位置において 225° 位置よりも有意に低い値を示した。本傾向は同一材料、同一溶接施工により作製した別個体についても同様であったことから、45° 位置が溶接始末端近傍に存在する特異領域（低応力を示す範囲）に含まれたことによるものと推定された。

キーワード：ステンレス鋼配管，溶接残留応力，中性子，ひずみスキニング法

1. 目的

軽水炉プラントで広く使用されるオーステナイト系ステンレス鋼は優れた材料特性を有するものの、応力腐食割れ (SCC) に感受性を持つことが知られている。配管の SCC 頻発部位は溶接部であり、これは溶接残留応力が SCC 発生・進展の主要な駆動力であることに起因する。残留応力は配管の健全性評価においても特に重要なパラメータである。近年合理的な評価手法として注目を集めている確率論的破壊力学 (PFM) 評価においても、溶接残留応力分布は SCC の発生・進展評価における重要な入力パラメータとなる。PFM 評価では溶接残留応力を確率分布として設定する必要があるものの、その与え方に関して、同一溶接部でのばらつき（例えば周方向位置の依存性）や、個体間のばらつきをどのように考慮するかについては、明確な指針が得られていない状況にある。本研究では、溶接残留応力の周方向依存性を実験的に検討するために、TIG 溶接によって作製した呼び径 100A の SUS316 配管溶接部を対象とし、2 つの周方向位置で板厚方向の応力分布を測定した。

2. 方法

測定対象の溶接配管試験体は TIG 溶接（7 層 7 パス）によって施工した後、外面の余盛をグラインダー加工で平滑化したものである。母管の外径は 114.3 mm、板厚は 11.1 mm である。溶接線中心から両側の約 45 mm の範囲の板厚は、溶接前の内径合わせ加工により約 10 mm となっており、溶接線中心の裏波部を含めた厚みは約 12.5 mm である。本測定では、溶接始末端部を 0° と定義した場合の 45° 位置と 225° 位置を測定対象とし、測定において中性子のフライトパスを確保するために配管の中央と端部にそれぞれスリットを設けた。測定に用いた配管試験体の写真を図 1 に示す。測定は日本原子力研究開発機構の JRR-3 に設置されている応力測定装置 RESA により実施し、手法にはひずみスキニング法を用いた。 γ -Fe の 311 回折を測定対象とし、配管軸方向、周方向、径方向の 3 方向を測定した。ひずみスキニング法は無ひずみの回折角 θ_0 を必要とするため、同配管の 90° 位置付近から厚さ 2 mm の部材を 2 枚採取し、2 mm 間隔で配管内面側および外面側から交互にスリット加工を実施した。本加工には加工ひずみを生じさせないワイヤカット放電加工を用いた。このようにして作製した 2 枚の部材を粘着テープにより固定した試験片を θ_0 の測定用として用いた。当該試験片の写真を図 2 に示す。測定には 2 mm のラジアルコリメータを使用し、検出器を $2\theta = 91.686^\circ$ に配置して実施した。入射側スリットは、配管試験体の軸方向および径方向測定では周方向に長い 2.0 mm×10.0 mm とした。周方向測定では 3.0 mm×3.0 mm とした。 θ_0 測定用試験片に関しては、軸方向と周方向で 2.0 mm×3.7 mm のスリットを、径方向では 2.0 mm×3.0 mm のスリットを用いた。配管測定時の各方向の測定における実験配置概略を図 3 に示す。測定点は図 4 に示す

通りであり、配管試験体では計 21 点の測定を実施した。 θ_0 測定用試験片については $X=-10$ mm（母材）と $X=0$ （溶接金属）の 11 点を測定した。なお、 45° 位置の測定と 225° 位置はそれぞれ別のビームタイムで実施したため、 θ_0 測定用試験片についてはビームタイムごとに測定を実施した。得られた配管試験体と θ_0 測定用試験片のプロファイルをガウス近似することで回折角を決定してひずみを求め、フックの法則により応力を算出した。



図 1 溶接配管試験体

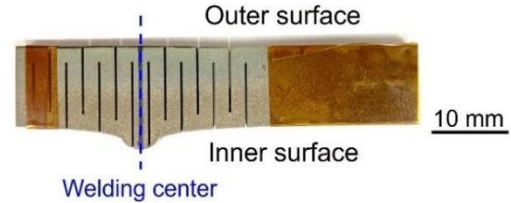
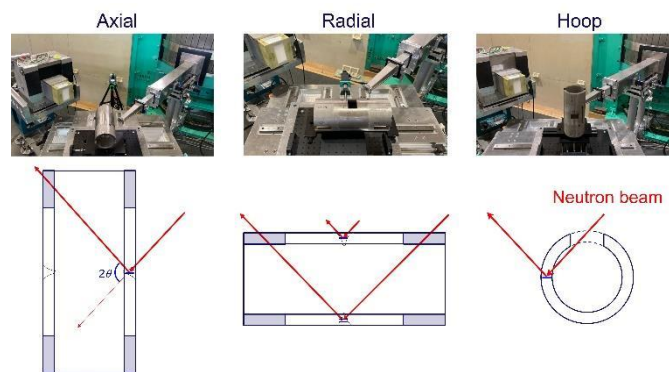
図 2 θ_0 測定用試験片

図 3 実験配置概略図

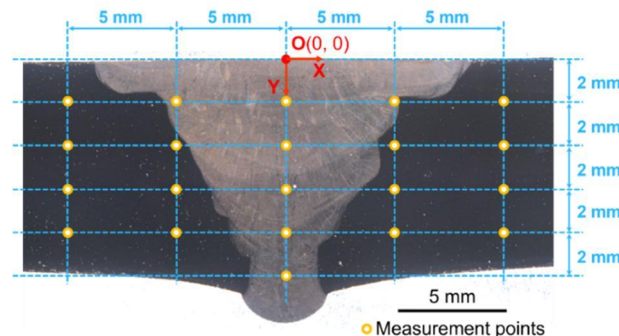


図 4 測定点

3. 結果及び考察

θ_0 測定用試験片の測定において、1 回目と 2 回目の測定値の間には、回折計の誤差によるものと見られる系統的な差が認められた一方で、板厚方向の分布については再現性のある結果が得られた。また、軸方向と周方向の測定では、母材部 ($X=-10$ mm) と溶接金属 ($X=0$ mm) では有意な差が認められたが、母材、溶接金属ともに板厚方向で顕著な変動はなく、ほぼ一定の値を示した。これに対し、径方向に関しては、板厚方向で測定値の変動が認められた。図 2 に示すように、試験片は径方向に関してはスリット加工を実施していないため、径方向のひずみ開放が不十分であった可能性が考えられる。軸方向と周方向はどの測定点についても近い値を示したが、軸方向については内外表面近傍で一部 4 mm の長さとなっている部分を測定体積内に含む形となる。このため、本研究では全測定点で測定方向の板厚が 2 mm で一定となる周方向の測定値をひずみ算出に用いる θ_0 の値として採用した。なお、前述の通り、板厚方向には変動がなくほぼ一定であったことから、母材部では 4 点の測定値の平均値を、溶接金属部では 5 点の測定値の平均値をそれぞれの θ_0 とした。また、図 4 に示すように、 $X=\pm 5$ mm 位置の $Y=2$ mm および 4 mm の測定点では、測定体積に溶接金属と母材の両者が含まれることから、これらの測定点の θ_0 には母材と溶接金属の平均値を採用した。

本測定により得られた $X=-10\sim 10$ mm 位置における板厚方向応力分布を図 5 に示す。溶接線から

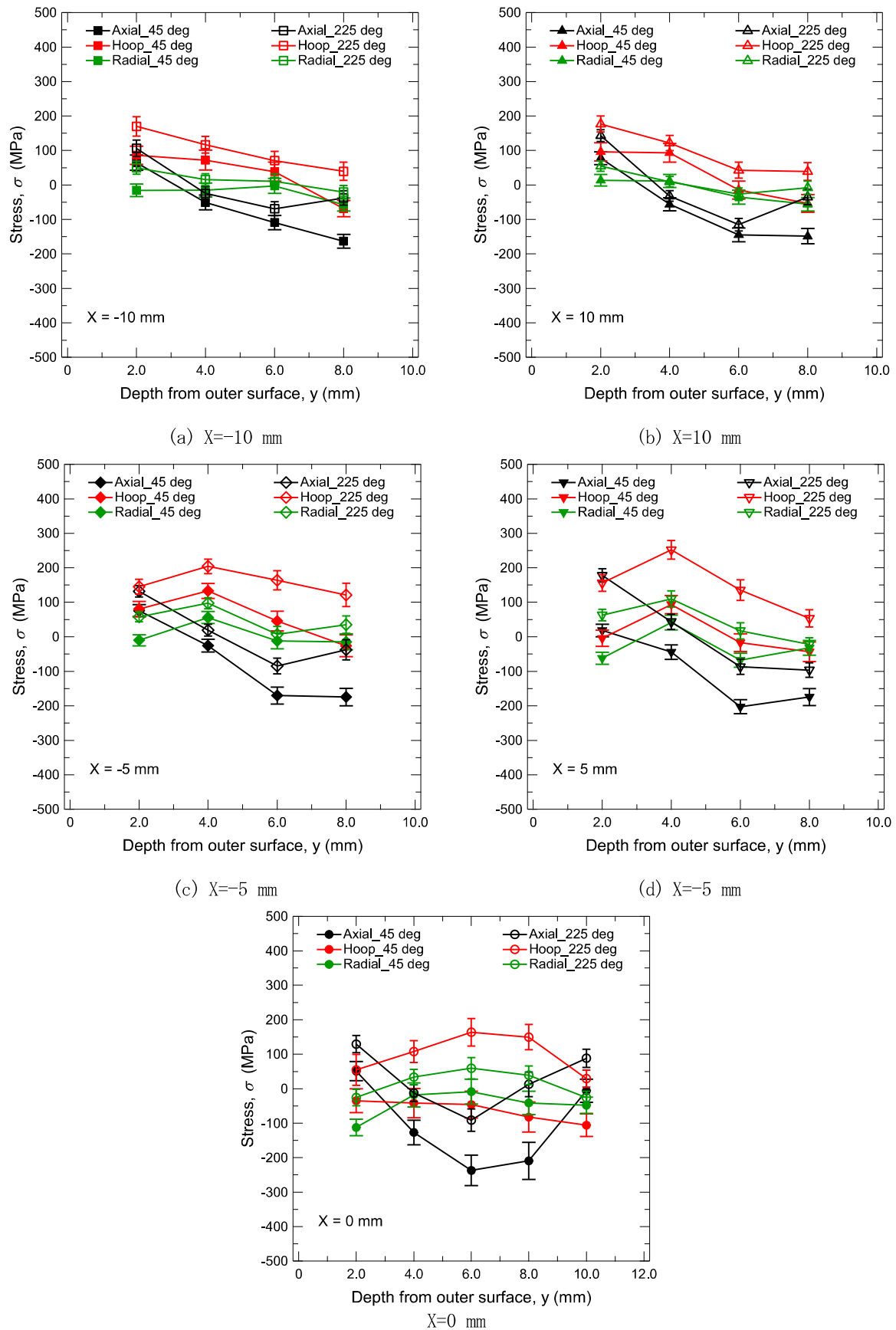


図5 板厚方向応力分布

※図中のエラーバーは回折角決定時のガウス近似による係数決定時の誤差から求めた誤差範囲である

等距離の測定結果 ($X=\pm 10\text{ mm}$ および $X=\pm 5\text{ mm}$) に注目すると、両者は絶対値、分布形状ともに、よい一致が認められる。本溶接配管試験体は全層を 1 パスで溶接していることから、溶接部両側に存在する母材部は同様の熱履歴を受けていると思われ、その結果溶接線から等距離の測定点では似た分布になったものと考えられる。

45° 位置と 225° 位置の測定値の差に着目すると、全測定点において 45° 位置の値が 225° 位置の値よりも小さいことがわかる。本傾向は本測定に用いた溶接配管と同一材料かつ同一溶接施工によって作製した別個体でも認められている^[1]ことから、本配管試験体に限定された特徴ではなく、本溶接条件の場合に生じる共通の周方向位置依存性と考えられる。両測定位置の大小関係から、これは配管の溶接始末端部で生じる応力特異性^[2, 3]によって生じたものと推定される。本測定で設定した 45° 位置および 225° 位置は、応力特異性の範囲ではない定常部を想定して設定したものであるが、特に小口径の配管の場合では、この特異性の範囲が 60° 程度まで広がるような数値解析例^[4]が存在する。この溶接残留応力の特異性は、溶接開始点から定常部に至るまでの範囲で定常部よりも残留応力の値が小さく、溶接条件次第では圧縮となり、定常部から終端部にかけては定常部より高引張応力となるものである。本測定における 45° 位置の測定結果はこの低応力側の特異部の端部に相当したと考えられる。したがって、今回は測定位置として設定しなかったものの、溶接終端部から低角度側の一定範囲では、定常部よりも高応力が生じていると考えられることから、SCC を考慮した健全性評価の観点からは、これらの周方向依存性の考慮に加え、溶接の終端部付近に着目した検査や評価を行うことが重要となる可能性がある。

4. 引用(参照)文献等

[1] 三浦靖史, 鈴木賢治, 中性子回折による SUS316 小口径配管溶接部の残留応力測定, 日本保全学会第 20 回学術公演会予稿集, pp. 388-413, 2024

[2] 岡野成威, 望月正人, 円周多層溶接配管継手内表面における軸方向圧縮残留応力生成のための適正溶接施工法の検討, 圧力技術, Vol. 48, No. 2, pp. 86-96, 2010.

[3] 岡野成威, 望月正人, オーステナイト系ステンレス鋼多層溶接配管継手における残留応力分布の数値解析と測定, 日本保全学会第 20 回学術公演会予稿集, pp. 406-413, 2024

[4] 山口義仁, 真野晃宏, 勝山仁哉, 眞崎浩一, 宮本裕平, 李銀生, 原子炉配管に対する確率論的破壊力学解析コード PASCAL-SP2 の使用手引き及び解析手法 (受託研究), JAEA-Data/Code 2020-021, 2021.