

## 中性子回折法による鋼材溶接部の残留応力評価技術

## Residual Stress Measurement of Welding Area by Neutron Diffraction Method

鈴木 環 輝\*  
Tamaki SUZUKI杉 山 昌 章  
Masaaki SUGIYAMA及 川 初 彦  
Hatsuhiko OIKAWA野 瀬 哲 郎  
Tetsuro NOSE今 福 宗 行  
Muneyuki IMAFUKU友 田 陽  
Yo TOMOTA鈴 木 裕 士  
Hiroshi SUZUKI盛 合 敦  
Atsushi MORIAI

## 抄 録

抵抗スポット溶接技術は自動車の車体組み立て等に用いられる技術である。このスポット溶接技術では、疲労き裂が溶接部の内部から発生することがあり、疲労寿命の観点で重要な課題となっている。その原因として、内部の応力状態の影響が予想されているが、非破壊での測定が困難なため、これまでスポット溶接内部の応力状態は不明のままであった。本研究では、中性子回折法を用いて、ゲージ体積0.5mm×0.5mm×0.5mmで計測を行い、スポット溶接内部の局所領域の応力状態を明らかにした。

## Abstract

Resistance spot welding technique is extensively applied to join the body steel sheets in the manufacturing process for the automobile industry. It is known that the fatigue crack initiates occasionally inside of the spot-welded zone in this material, which is a serious issue of the fatigue life. Although this phenomenon is supposed to be related to internal residual stress, the actual residual stress distribution inside of the spot-welded zone is not clear up to now. In this study, a neutron diffraction residual stress measurement technique with well-defined sub-mm<sup>3</sup> square gauge volume is applied in order to clarify the internal three dimensional residual stress distribution just below the spot-welded part of the steel sheets.

## 1. 緒 言

構造物、特に溶接部で発生する疲労や破壊現象を理解するためには、溶接部周辺部を含む領域で残留応力分布を知ることが必須であるが、非破壊評価を前提とするために、一般にはX線、放射光や中性子を用いた計測法が用いられる。また、軽金属に比べ鉄鋼材料の場合、透過能の観点からX線では表層数十 $\mu$ m程度しか測定が出来ない。高エネルギーX線である放射光を用いた場合でも、深さは数mm程度まで測定可能なものの、低角度入射になるため一方向に測定領域が広がり、結果としてゲージ体積の増大を招く。このため、鉄鋼材料の数mm深さの残留応力を計測する手法として、高い透過能を持っている中性子回折法に期待がかかる。

しかしながら、中性子回折法は、原理的にビームを絞ることが困難である。そこで、入射スリットが用いられるが、その一辺を0.3mmに絞った例<sup>2)</sup>はあるものの、この場

合十分なシグナル強度を得るために、入射スリットのもう一辺を広げている。この場合の最小のゲージ体積は約1mm<sup>3</sup>である。

最近の自動車用の鋼板接合では、ナゲット接合に加えて、スポット溶接法が用いられている。車両特有の溶接部疲労強度が問題になるが、従来の測定試料を切断してから残留応力を測定する手法では応力開放の問題を払拭することができず、測定上の課題となっていた。スポット溶接は通常、接合する鋼板同士を上下から加圧して行うため、内部の残留応力の異方性が予測される。また、ナゲット内部で疲労き裂が発生したり、伝播偏向することがある。このため、局所領域の残留応力計測手法の確立が望まれている。

そこで、産発プロジェクト展開鉄鋼研究の“中性子利用鉄鋼評価技術の基礎検討に関わる研究”等を通じて、日本原子力研究開発機構が中心となり、測定の高速度ならびに高精度化のために必要な装置改良が検討され、0.5mmのラ

\* 先端技術研究所 解析科学研究部 主任研究員 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-3144

リアルコリメータ，中性子一次元検出器の導入が行われた。本研究ではこれらを適用し，中性子回折法を利用した局所領域の残留応力測定技術により，スポット溶接部の残留応力の評価に取り組むこととした。

## 2. 中性子回折法による応力の測定方法

中性子は，電荷を持たないため，物質中で電子との相互作用がなく，材料深くまで侵入でき，鉄でも数十mm程度の透過能を持っている。このため鋼材内部の歪みを非破壊で測定することが可能である。図1に示すように入射スリットと反射スリットで限定される材料内部の測定領域において，特定結晶面からのブラッグ反射を精密に測定することにより，特定領域の格子面間隔を決定することができる。

中性子応力測定法は，材料内部の応力を非破壊で求めることができるため，溶接部材の内部応力測定方法として利用されている。但し，中性子線を利用するには，大型設備が必要となり，国内においては，日本原子力研究開発機構の研究用原子炉 JRR-3 や J-PARC 等を利用する必要がある。

中性子回折による応力測定法には，角度分散法と飛行時間法の2つに大別される。

角度分散法は，図2のように，研究用原子炉等から生成される白色の中性子からモノクロメータを用いて特定の波長の中性子線を取り出し，これを試料に入射し，反射する回折角  $2\theta$  を測定することにより，格子面間隔を精密測定する手法であり，上記 JRR-3 で行うことができる。

飛行時間法は，図3のように，加速器等で得られる白色のパルス状中性子をそのまま試料に照射し，検出器と入射中性子線の角度を一定に保ち，中性子の飛行時間から格子面間隔を測定する手法であり，上記 J-PARC で行うことができる。

中性子応力測定方法は，特定面からのブラッグ反射の角

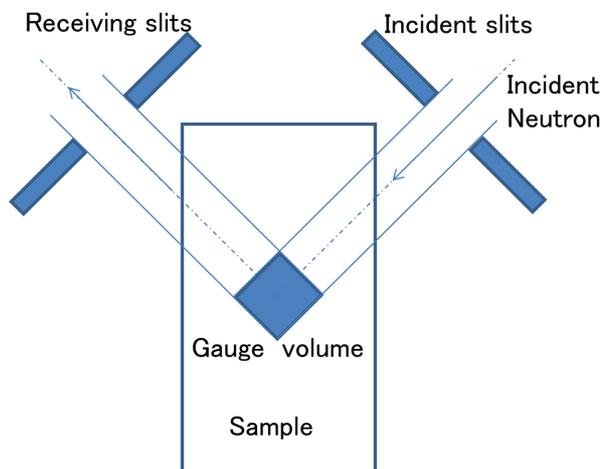


図1 ひずみスキャン法における測定領域  
Gauge volume in strain scanning method

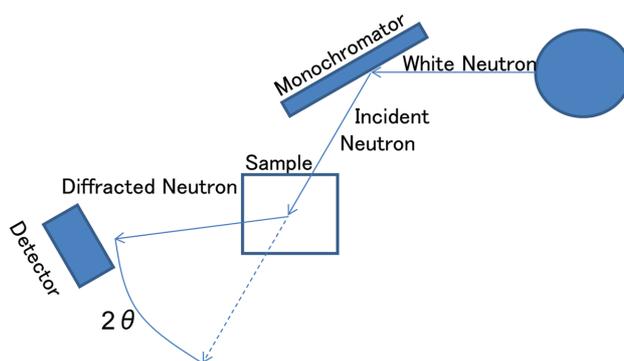


図2 角度分散法  
Angular dispersive method

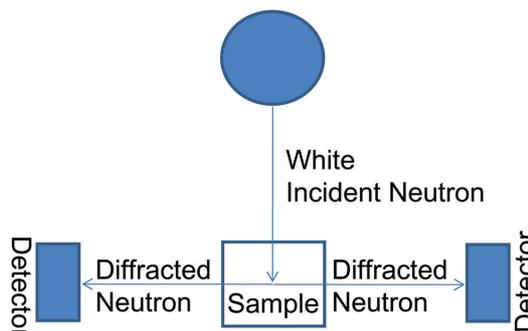


図3 飛行時間法  
Time-of-flight method

度を測定し，ブラッグの式から，格子面間隔を精密に求め，無応力状態での格子面間隔との差分から歪み，応力を求める方法である。

## 3. 実験方法

実験は原子力研究開発機構の残留応力測定装置 RESA にて中性子回折法を用いて非破壊応力測定を行った。本研究では，産発プロジェクト展開鉄鋼研究により高精度化，高速化の目的で導入した一次元位置敏感検出器 PSD を適用した。測定には  $\alpha$ -Fe の 211 回折を用いた。用いた中性子線の波長  $\lambda$  は約  $1.65\text{\AA}$  であり，回折角  $2\theta$  は約  $90^\circ$  であった。入射スリットは  $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$  のスリットを，受光スリットには  $0.5\text{mm}$  のラジアルコリメータを用いた。これらの測定条件により測定位置におけるゲージ体積を約  $0.5 \times 0.5 \times 0.5\text{mm}^3$  とした。スポット溶接用の鋼材は， $1.4\text{mm}$  厚みの軟鋼 JSC270E 材を用い，その引張測定から求めた降伏強度 (YP) および引張強度 (TS) はそれぞれ  $139\text{MPa}$ ， $292\text{MPa}$  である。試料のスポット溶接条件を表1に示す。

残留応力測定は，材料系の主軸に対して X, Y, Z の 3 方向を計測し，適宜，測定点を設定した。各測定点における 3 方向計測は，オイラークレドールを用い，一度のセッティングのみで，同一場所からの回折線を得られるように

表1 スポット溶接条件  
Spot welding conditions

Electrode type	Electrode force	Welding current	Welding time	Hold time
DR6 φ -40R Cr-Cu	3.43kN	7.7kA	16cycles	10cycles (50cycles=1s)

配置した。本ビーム強度では100分/点の測定時間であった。

4. 実験結果

4.1 断面組織

同条件で作製したスポット溶接サンプルを複数枚用意した。そのうちの一枚から、接合部断面組織を光学顕微鏡観察し、組織はマルテンサイトやパーライトを含まないフェライト単一相であることを確認した。溶接熱影響部(HAZ)から離れた平均の結晶粒径は25 μmであった。図4に断面の光学顕微鏡組織写真、及び本中性子回折法により残留応力を測定した位置をA, B, C列として示す。

4.2 無応力状態での格子定数の決定

中性子回折法において、3方向の格子面間隔の測定結果から、3軸応力解析をする場合、無応力状態での格子定数が必要となる。通常は測定試料と同条件で作製した試料について、測定箇所と同じ箇所について、放電加工によりクーポンサンプルを作製して測定した格子定数を無応力状態の格子定数として用いる<sup>3)</sup>。本研究ではサンプルの板厚が1.4mmと薄くこの手法を用いることができないため、実験に用いた鋼材について、600℃で1時間真空焼鈍した試料を作製し、これよりX線回折法を用いて決定した格子定数を無応力状態での格子定数 $a_0$ とした。実験の結果、 $a_0$ は2.865Åとなり、種々の検討の結果、 $a_0$ として妥当であると考えた。

4.3 スポット溶接部の残留応力評価

中性子回折法により得られた回折ピークは、統計精度上の問題からか多少ピーク形状に非対称性が現れているが、汎用的なガウシアンフィッティングによりピーク位置を求め

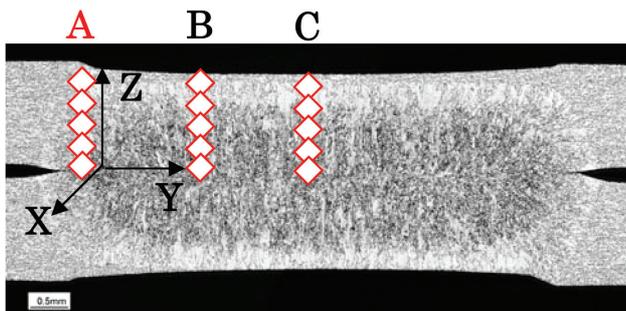


図4 スポット溶接試料の断面光学顕微鏡写真  
Optical micrograph showing cross section of spot welding sheets

た。この位置決定精度が最終的な残留応力値に大きく影響するので、最も慎重に行うべき所である。回折線の一例を図5に示す。

$$\epsilon_i = (a_i - a_0) / a_0 \quad (i = X, Y, Z) \quad (1)$$

$$\sigma_i = E_{211} / (1 + \nu_{211}) \{ \epsilon_i + \nu_{211} / (1 - 2\nu_{211}) (\epsilon_Z + \epsilon_Y + \epsilon_X) \} \quad (i = X, Y, Z) \quad (2)$$

上記手法で決定した格子定数を無応力状態での格子定数 $a_0$ として歪みおよび応力解析を式(1)および式(2)を用いて行った。ここで、 $E_{211}$ および $\nu_{211}$ は211回折のヤング率およびポアソン比であり、それぞれ、 $E_{211} = 224\text{GPa}$ 、 $\nu_{211} = 0.276$ を用いた。また $\epsilon$ は歪み、 $\sigma$ は応力である。

次に(2)式を用いて求めたA, B, C各測定点における3方向(X, Y, Z: 図1参照)の応力分布解析をした結果について、図6(a)(b)(c)にそれぞれ示す。

図6(a)の解析結果より、疲労破壊がおこるA点近傍では、中心位置に近い程、引張の残留応力が大きいことが判ったが、これは溶接の結果から妥当であると考えられる。また、き裂の進展方向も、初めZ方向に進展するものの、時々その進展方向が曲がることを経験しているが、図6(a)のように途中で圧縮が存在することによるものとも考えられる。

B点, C点近傍においては、いずれの位置においても引張の残留応力となっていることを確認した。ここで図6(a)(b)(c)より、A, B, C近傍のいずれの場所においても、X, Y, Zの応力は深さ方向にはほぼ同様な分布を示し、異方性はないように見える。

これに対し、スポット溶接は鋼板を上下から加圧して行うため、残留応力に異方性が存在するとも考えても良い。しかし、発熱による膨張と冷却による収縮、変態による膨張

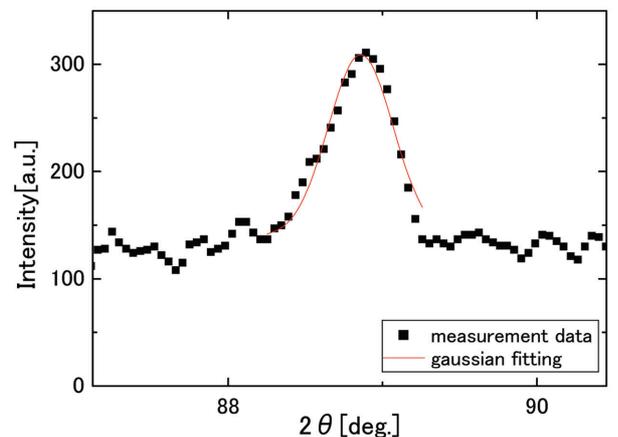


図5 211反射の中性子回折のプロファイル  
Neutron diffraction profile of 211 reflection

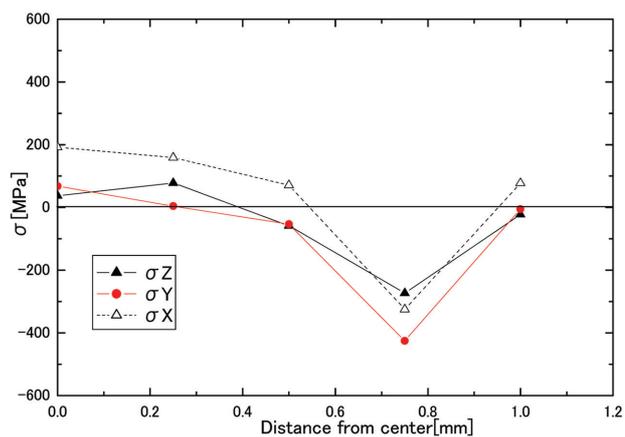


図 6 (a) A点における溶接HAZ部から表面の応力分布  
Resial stress distributon from fusion line to surface at Point A

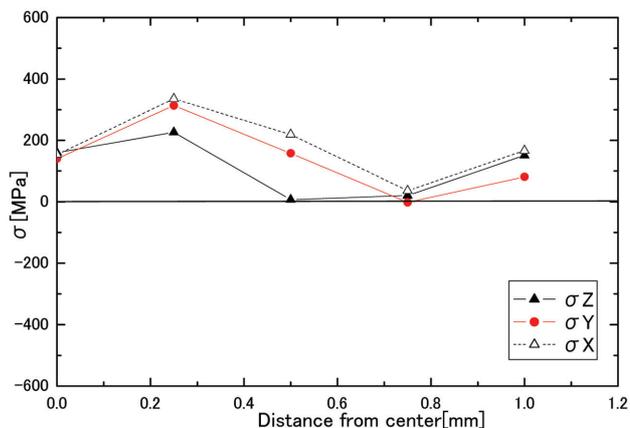


図 6 (b) B点における溶接HAZ部から表面の応力分布  
Resial stress distributon from fusion line to surface at Point B

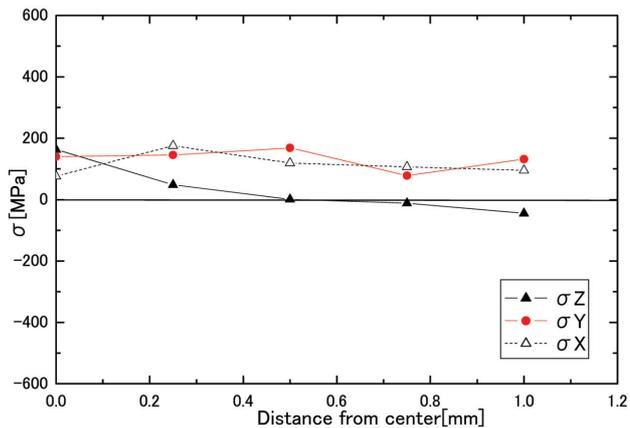


図 6 (c) C点における溶接HAZ部から表面の応力分布  
Resial stress distributon from fusion line to surface at Point C

等がある複雑な過程であり、計算での予測も困難であるため、実状についての議論は難しい。

## 5. 結 言

中性子回折法により、スポット溶接内部の局所残留応力分布の測定技術について検討を行ない、検出系の改良等により、0.5mmの空間分解能を実現することができた。また、疲労破壊の起こる部位近傍では、引張の残留応力が大きいことを確認した。今後、実測値に基づいた有限要素法計算の検討、作製条件の異なる試料について測定を進め、本測定系の妥当性を検証すると共に、スポット溶接部の残留応力分布の詳細を検討していきたい。

## 参考文献

- 1) Matsumoto, K., Shobu, T., Akiniwa, Y., Yagi, T., Yamamoto, M.: J. Soc. Mater. Sci. Jap. 57, 654(2008)
- 2) Machiya, S., Akiniwa, Y., Kimura, H., Tanaka, K., Suzuki, H., Moriai, A., Morii, Y.: J. Soc. Mater. Sci. Jap. 55, 654(2006)
- 3) Suzuki, H., Holden, T.M., Moriai, A., Minakawa, N., Morii, Y.: J. Soc. Mater. Sci. Jap. 54, 685(2005)



鈴木環輝 Tamaki SUZUKI  
先端技術研究所 解析科学研究部 主任研究員  
千葉県富津市新富 20-1 〒 293-8511  
TEL:(0439)80-3144



杉山昌章 Masaaki SUGIYAMA  
先端技術研究所 解析科学研究部 主幹研究員 工博



及川初彦 Hatsuhiko OIKAWA  
鉄鋼研究所 接合研究センター 主幹研究員 工博



野瀬哲郎 Tetsuro NOSE  
鉄鋼研究所 接合研究センター 所長 工博



今福 宗行 Muneyuki IMAFUKU  
東京都市大学 工学部 機械システム工学科  
強度設計システム研究室 教授 工博



友田 陽 Yo TOMOTA  
茨城大学大学院 理工学研究科 応用量子線  
科学専攻 教授 工博



鈴木裕士 Hiroshi SUZUKI  
日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究  
部門 研究員 工博



盛合 敦 Atsushi MORIAI  
日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研  
究部門 技術副主幹