

(技術資料)

溶接残留応力の測定技術

永井卓也*¹ (博士(工学))

Methods of Measuring Welding Residual Stress

Dr. Takuya NAGAI

要旨

残留応力は、一般的に疲労や腐食など実機損傷の要因として作用することが多く、その大きさや位置を正しく評価する必要があり、いくつかの方法が提案されている。本稿では、残留応力測定法の中でも工業的に広く利用されているひずみゲージ切断法とX線回折法に加え、内部残留応力を測定可能な改良型深穴せん孔法(MIRS法)とその特徴を概説する。また、近年注目を集めているアーク溶接技術を利用した積層技術WAAM(Wire and Arc-based Additive Manufacturing)で作製された積層造形物の内部を含めた残留応力分布について、MIRS法およびひずみゲージ切断法で実測した事例を紹介する。

Abstract

In general, residual stress often acts as a factor in mechanical damage such as fatigue and corrosion, and its magnitude and location must be correctly evaluated. To address this, several methods have been proposed. This paper outlines the characteristics of the strain gauge method and the X-ray diffraction method, both of which are widely used in the industry for measuring residual stress. Also outlined is the modified internal residual stress (MIRS) method and its features, this method being capable of measuring internal residual stress. A case study is presented in which the MIRS method and strain gauge method have been used to measure the residual stress distribution, including the inside of an additively manufactured object produced by wire and arc-based additive manufacturing (WAAM), a lamination technique using arc welding technology, which has been attracting attention in recent years.

検索用キーワード

溶接残留応力, ひずみゲージ, X線回折法, 深穴せん孔法, MIRS法, WAAM

まえがき = 構造物において、とくに溶接部近傍の残留応力は継手の疲労強度や応力腐食割れなどに大きな影響を与えるため、その分布状態を把握することは極めて重要である。一般的に、部材表面の圧縮残留応力はき裂の開口を抑える方向に作用するため、問題にならないことが多いが、部材表面の引張残留応力はき裂の開口を助長する方向に作用するため、予想もしなかった破壊の原因となることもある。これら表面の残留応力に対して、内部の残留応力は、その分布状態によってき裂の伝搬進路や変形に影響することが知られている。このため、構造物の設計において、溶接部周辺など大きな力が作用すると思われる箇所は、表面だけでなく内部の残留応力分布を把握することが求められている¹⁾。

本稿では、工業的に広く用いられるひずみゲージ切断法とX線回折法に加え、内部の残留応力を測定できる改良型深穴せん孔法(Modified Internal Residual Stress, 以下MIRS法という)を紹介する。また、近年注目を集めているアーク溶接技術を利用した積層技術WAAM(Wire and Arc-based Additive Manufacturing, 以下WAAMという)で作製された積層造形物の残留応力に対して、ひずみゲージ切断法およびMIRS法を適用した事例を紹介する。

1. ひずみゲージ切断法

ひずみゲージ切断法は、測定対象に接着したひずみゲ

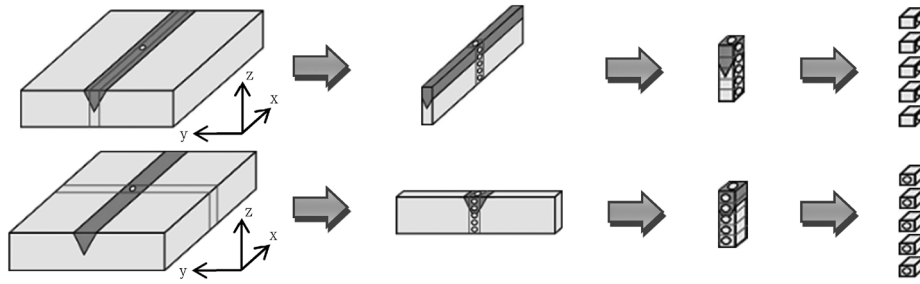
ージの周囲を切断することで解放される弾性ひずみを計測し、残留応力に換算する手法である。ここでひずみゲージとは、ひずみ変化を金属箔の抵抗値の変化として検出するものである。ひずみゲージは測定対象とする材質や用途によって多数の種類が市販されており、安価であるため幅広く利用されている。

溶接部への適用にあたっては、切断時の剥離防止のためのコーティング技術や凹凸部の研磨処理技術が必要となる。また、試料表面の残留応力測定が基本になるが、突合わせ継手などの単純形状で残留応力が対称分布をもつと考えられるような場合、切断順序や切断寸法を考慮することにより内部残留応力を測定する手法も提案されている。図1は、試験体2体を用い、溶接線方向と溶接線直角方向に薄板を切り出し、そのときに解放される応力とその板に残っている応力の和として残留応力を求める方法²⁾について、切断順序を示したものである。薄板を切り出すときに解放される応力は、板切断時の板の長手方向の解放ひずみが板厚に沿って直線分布すると仮定して求めている。切り出す板の長さが板厚の3倍以上あり、長手方向に一樣な残留応力場が存在する場合にはこの仮定が成立するという点に注意が必要である。

2. X線回折法

X線回折法は、応力による格子面のひずみをX線回折角の変化として検出し、残留応力に換算するものであ

*1 コベルコ溶接テクノ(株) ソリューション技術部



$$\sigma_x = E \left\{ \left[\Delta \varepsilon_{xB} + (\Delta \varepsilon_{xT} - \Delta \varepsilon_{xB}) Z / h \right] + \nu \cdot \left[\Delta \varepsilon_{yB} + (\Delta \varepsilon_{yT} - \Delta \varepsilon_{yB}) Z / h \right] \right\} / (1 - \nu^2) + (\sigma_{xR} + \nu \cdot \sigma_{yR}) / (1 - \nu^2) \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\sigma_y = E \left\{ \left[\Delta \varepsilon_{yB} + (\Delta \varepsilon_{yT} - \Delta \varepsilon_{yB}) Z / h \right] + \nu \cdot \left[\Delta \varepsilon_{xB} + (\Delta \varepsilon_{xT} - \Delta \varepsilon_{xB}) Z / h \right] \right\} / (1 - \nu^2) + (\sigma_{yR} + \nu \cdot \sigma_{xR}) / (1 - \nu^2) \quad \dots \dots \dots (2)$$

- σ_x : その板厚深さにおける溶接線方向 (=x方向) の残留応力
- σ_y : その板厚深さにおける溶接線直角方向 (=y方向) の残留応力
- E : ヤング率
- ν : ポアソン比
- h : 板厚
- Z : 裏面からの板厚方向の距離
- $\Delta \varepsilon_{xT}$: x方向に切り出すときの板の表面におけるx方向のひずみ変化量
- $\Delta \varepsilon_{xB}$: x方向に切り出すときの板の裏面におけるx方向のひずみ変化量
- $\Delta \varepsilon_{yT}$: y方向に切り出すときの板の表面におけるy方向のひずみ変化量
- $\Delta \varepsilon_{yB}$: y方向に切り出すときの板の裏面におけるy方向のひずみ変化量
- σ_{xR} : x方向に切り出した薄板に残っているx方向の応力
- σ_{yR} : y方向に切り出した薄板に残っているy方向の応力

図1 ひずみゲージ切断法による内部残留応力測定手順²⁾

Fig.1 Cutting procedure of internal residual stress measurement by using strain gauge

る。測定手法としては主に $\sin^2 \psi$ 法と $\cos \alpha$ 法が用いられる。 $\sin^2 \psi$ 法では、回折面法線と試料面法線のなす角 ψ を変化させ、各 ψ に対する回折角(格子面間隔)の関係を取得することにより応力を決定する(図2)。

いっぽう、近年対応する装置が拡大している $\cos \alpha$ 法では、一つのX線入射角度について得られた回折環から応力を決定する。複数回の測定を必要としないため、測定時間を短くすることができる。また、入射角の制御が不要であるため、測定装置の小型化も可能となり、現場測定では $\cos \alpha$ 法による測定が主流となっている。

なお、溶接部への適用については、溶接金属を避けて止端部を測定する場合が多い。結晶粒が粗大であると回折に寄与する結晶粒数が少なくなり、均一な回折環が得られなくなることで、残留応力を算出するための式が等方弾性体を想定して導出されており、異方性をもつ部位では誤差が大きくなることが理由である。重ね溶接継手の止端部を測定した事例³⁾を図3に示す。一般的な軟鋼ソリッドワイヤで作製した試験体(CW)よりも、低変態温度溶接材料で作製した試験体(LTTW)の方が、溶接後の冷却過程における室温付近での変態膨張効果により、大きな圧縮残留応力となっていることがわかる。

3. X線回折法改良型深穴せん孔法(MIRS法)

深穴せん孔法(Deep Hole Drilling, 以下DHD法という)を発展させたMIRS法を、(株)山本金属製作所、大阪大学と当社の3機関で開発した⁴⁾。MIRS法は、内部

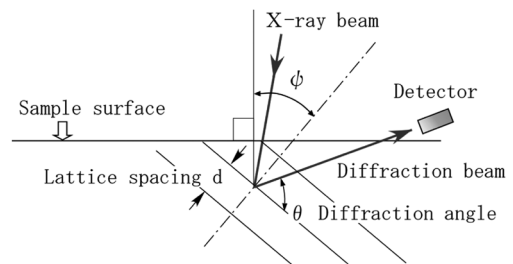


図2 試料に対するX線回折
Fig.2 X-ray diffraction of sample

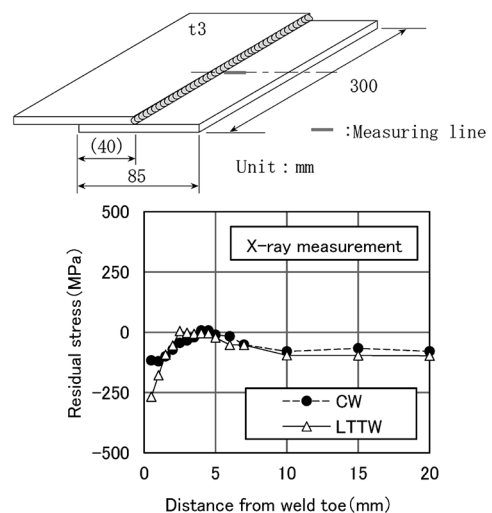


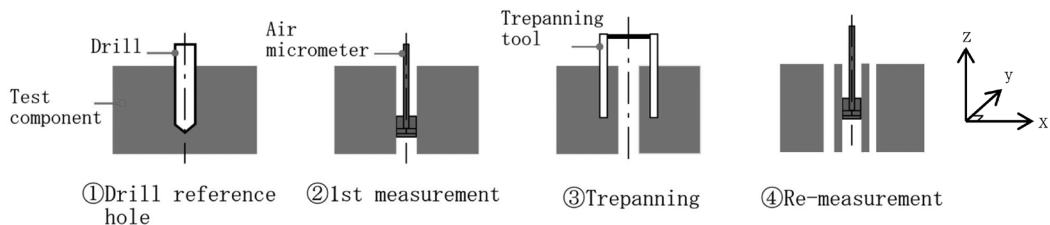
図3 X線回折法による重ね溶接継手の残留応力測定³⁾
Fig.3 Residual stress of fillet welded lap joints measured by using x-ray diffraction method

の残留応力を実測できる数少ない測定法の一つである。測定対象物の厚さが100 mm以上であっても測定でき、複雑な形状にも適用できる。測定は図4に示す手順で行う。測定位置にせん孔を行って参照孔を作製した後、参照孔を中心に円筒状に切り出し（トレパニング）、参照孔周辺の残留応力を解放する。残留応力は、トレパニング前後の参照孔径の変化量から求められる。DHD法との違いは、深穴加工の精度が大幅に向上している点である。具体的には、穴あけ工程の一部に回転工具をらせん状に移動させながら穴を繰り広げていくヘリカル加工を取り入れ、実績値として真円度0.007 mm、真直度0.005 mm/35 mm程度の精密加工を達成している。基準となる穴径にばらつきを無くすことによりエアマイクロメータによる計測範囲を確保でき、高精度な計測につながっている。溶接部への適用事例も複数報告されている^{5)~7)}。

4. WAAM積層造形物の残留応力測定⁵⁾

近年、金属を対象とした積層造形技術が注目を集めている。WAAMは、パウダーベッド方式に比べて高溶着なため、効率的に積層造形物が作製できるという利点がある。また、箱形の装置を必要とせず造形サイズに制限がないため、大型構造物への適用にも期待されている。いっぽう、アーク溶接技術がベースになっているが、一般的な溶接とは異なり溶着金属のみで構造物が形成されることになるため、WAAMは造形物の品質保証については十分な検証が必要である。疲労強度の低下、応力腐食割れ、加工精度の低下等につながる残留応力の把握およびその制御も重要課題の一つである⁸⁾。

ベースプレートに板厚25 mm、幅150 mm、長さ400 mmのSUS304、溶接ワイヤに308系を用いた積層造形物を作製し、残留応力評価した事例を紹介する。溶接トーチの進行方向は図5に示すとおりであり、長手方



$$\frac{d-d_0}{d_0} = -\frac{1}{E} \left[(1+2\cos 2\theta)\sigma_x + (1-2\cos 2\theta)\sigma_y + 4\sin 2\theta\sigma_{xy} \right]$$

- d : トレパニング後の参照孔径 (mm) (④)
- d_0 : 初期の参照孔径 (mm) (②)
- E : ヤング率 (MPa)
- θ : x 軸からの角度 (deg.)
- σ_x : x 方向 (任意) の残留応力 (MPa)
- σ_y : y 方向 (x 方向の直角方向) の残留応力 (MPa)
- σ_{xy} : xy 平面のせん断残留応力 (MPa)

図4 MIRS法による残留応力測定手順³⁾

Fig.4 Residual stress measurement procedure by MIRS method

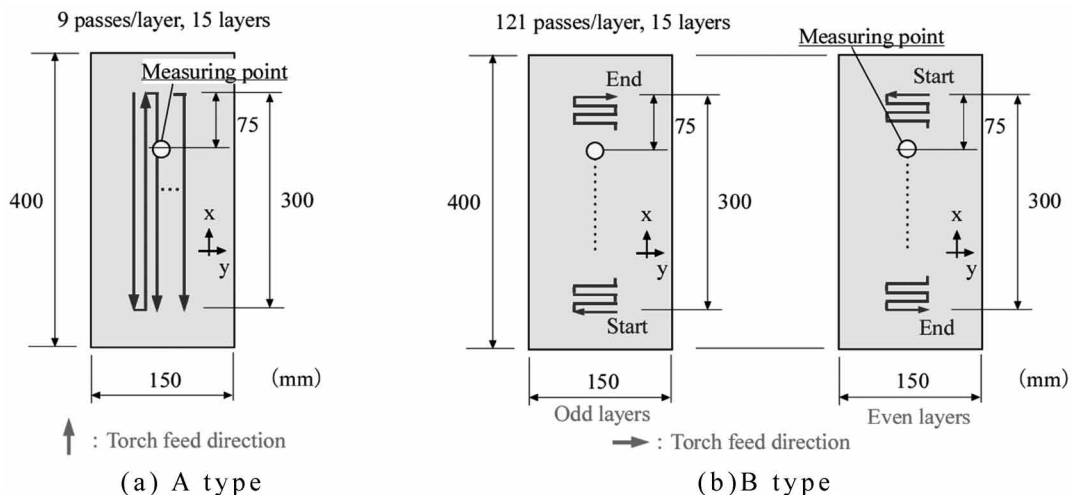


図5 積層方法および残留応力測定位置

Fig.5 Deposition sequence and measuring points of residual stress

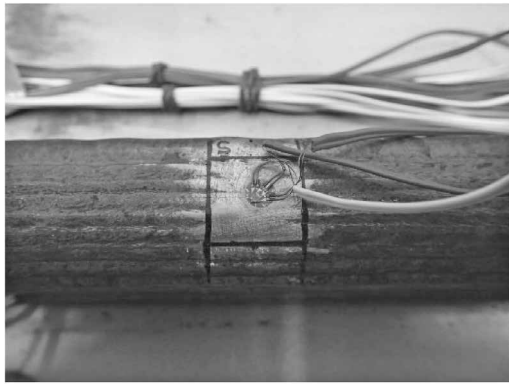


図6 ひずみゲージの貼付け状況
Fig.6 Bonded strain gauge

向 (x方向) に積層する方法 (Aタイプ) とその直角方向 (y方向) に積層する方法 (Bタイプ) の2種類とした。造形条件は、パルスモード、溶接電流200 A、アーク電圧23.5~24 V、溶接速度100 cm/min、パス間温度100℃以下とし、両条件とも造形部は幅約30 mm、高さ約40 mm、長さ300 mmで仕上げた。

図5に示す位置に対して、ベースプレート含めた全厚をMIRS法で測定した。せん孔径を ϕ 2.5 mmとし、深さ方向に1 mmピッチで測定を行った。エアマイクロメータは微小な寸法変位量を高圧の空気の高さや背圧(差圧)を利用して計測する構造のため、エア評価部が完全に参照孔内に入らない表裏面から1 mmの深さは測定範囲外とした。また、比較のためにひずみゲージ切断法でも同位置を測定した。ひずみゲージ切断法では、MIRS法で測定した位置と同じ場所(造形部頂点)にひずみゲージを貼り付け、コーティングを2層行った後、約15 mm角 \times 10 mm高さに切り出し、残留応力を算出した(図6)。

長手方向およびその直角方向について、残留応力測定を行った結果を図7に示す。両積層方法ともに長手方向(x方向)の引張残留応力が大きく、深さ10~20 mm程度の位置で引張残留応力が極大値をとっており、造形部の残留応力も同様の傾向を示した。ベースプレートの残留応力分布には違いがみられたが、溶接変形の差によるものと推察される。長手方向に対する直角方向(y方向)についても、両積層方法ともにおおむね \pm 50 MPaの範囲に収まっており、積層方法の違いによる明確な差はみられなかった。Bタイプの造形部は、幅が30 mm程度しかなく、Aタイプと積層方向を変えたものの、ビード幅30 mmの溶融プールが長手方向に進行しているものと同等であり、両タイプに差があらわれなかったと想定している。ひずみゲージ切断法による測定結果は、MIRS法による表面近傍の測定結果とほぼ一致しており、矛盾のない結果となっている。

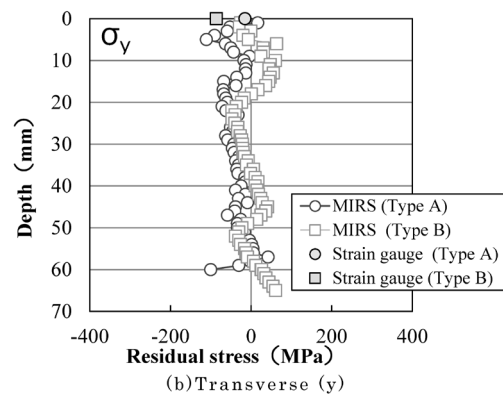
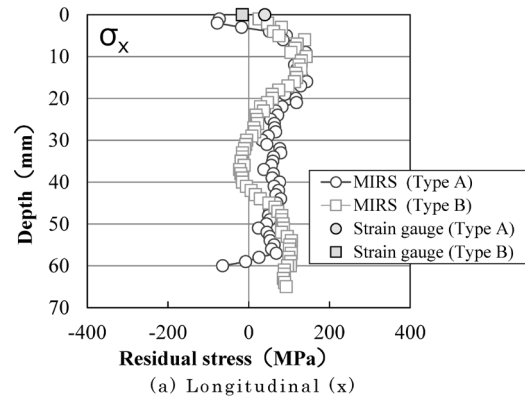


図7 残留応力分布
Fig.7 Residual stress distribution

むすび=溶接部の残留応力測定方法について紹介した。残留応力は溶接をはじめ、切削加工、圧延、鋳造など製造工程全般に係わる重要なパラメータであり、測定対象にあった適切な測定方法を選択し、評価することが必要である。今回紹介した三つの測定方法は、比較的簡便な測定法であり、溶接継手の残留応力を実測するだけでなく、熱処理による応力除去状況の確認やFEM解析結果の妥当性検証等へも活用されている。溶接残留応力測定を検討する際、本稿がその一助になれば幸いである。

なお、WAAM積層造形物の残留応力測定は、(株)山本金属製作所 岡山研究開発センター 村上グループ長、大阪大学大学院工学研究科 望月正人教授、岡野成威准教授のご協力を得て実施した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 望月正人ほか. 材料. 2021, Vol.70, No.4, p.315-322.
- 2) 高橋英司ほか. 溶接学会誌. 1979, Vol.48, No.10, p.865-872.
- 3) 永井卓也ほか. 溶接学会全国大会講演概要. 2017, Vol.100, p.120-121.
- 4) 河合真二ほか. 圧力技術. 2019, Vol.57, No.3, p.162-170.
- 5) 永井卓也ほか. 日本機械学会M&M材料力学カンファレンス. 2021, OS1608.
- 6) 大谷直之ほか. 溶接学会全国大会講演概要. 2018, Vol.103, p.314-315.
- 7) 細田 充ほか. 土木学会論文集A2(応用力学). 2019, Vol.75, No.2, p.I_623-633.
- 8) F. Martina et al. Materials Science and Technology, 2016, Vol.32, No.14, p.1439-1448.