

令和 2 年 5 月 19 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06044

研究課題名（和文）X線回折を用いた3次元残留応力分布の完全非破壊評価

研究課題名（英文）Non-destructive estimation of three-dimensional residual stresses using X-ray diffraction

研究代表者

小川 雅（Ogawa, Masaru）

工学院大学・工学部・准教授

研究者番号：90635236

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：製品の残留応力がわかれば、き裂の進む速度がわかるため、製品の余寿命を推定することができる。本研究の目的は、独自に開発したX線を用いる方法により、ポータブルの機器のみを用いて、完全非破壊に部材全域の残留応力を推定できることを実証することである。本研究では、航空機用の接合材を対象に提案手法を適用し、その推定精度を示した。また、本手法の推定精度を向上させる方法についても溶接継手を用いて検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、専用の施設でしか、内部の残留応力分布を非破壊に評価することができなかったが、本手法により、可搬型のX線回折装置を用いて、現場で完全非破壊に残留応力分布を推定することができることを示すことができた。これにより、抜き取り検査を行うことなく、製品の余寿命を予測することができる。また、本手法は数値シミュレーションのような定性評価とは異なり、定量評価を行うため、製品の個体差を評価することができる。

研究成果の概要（英文）：If residual stresses of the product can be estimated non-destructively, it is possible to estimate the safe remaining lifetime. We have proposed a non-destructive technique for estimating three-dimensional residual stresses using portable X-ray diffractometers. This study aims to demonstrate the effectiveness of this method for actual joints.

In this study, residual stresses of a friction stir welded plate are estimated using the proposed method. We also worked on improving the estimation accuracy of the proposed method using a welded joint.

研究分野：機械材料・材料力学

キーワード：逆問題 X線回折 残留応力 溶接 摩擦攪拌接合 固有ひずみ 有限要素法 疲労

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

航空機や自動車の製造において、摩擦攪拌接合 (FSW) の導入による、品質向上と製造コスト低減が期待されている。接合時に発生する3次元残留応力の非破壊評価が可能になれば、品質を実証できるだけでなく、余寿命がわかるため、安全性と経済性との両立が実現できる。従来の非破壊 X線回折法では部材表面しか測定できない。超音波法では、厚さ方向の残留応力の平均値しかわからない[1]。また、中性子回折法は厚さ方向に数十ミリまで残留応力分布の非破壊評価が可能であるが、中性子照射施設へ部材を切り出して持って行く必要があるため、現場での非破壊測定ができない[2]。DHD(Deep Hole Drilling)法[3]や切断法[4]などの破壊を伴う方法は、製造時や使用時の検査に採用することができない。熱弾塑性有限要素解析などの定性評価方法では、温度に依存するパラメータの設定が難しいという問題があり、また溶接のように同じような施工方法でもバラツキの大きなものに対しては、残留応力の定量評価が求められる。

そこで、報告者は、現場で利用可能な X線回折法を用いて、3次元残留応力分布を評価する方法を発明した(図1参照)。また、数値解析により手法の推定精度を示すだけでなく、実際の溶接継手に対する手法の有効性を示した[5]。しかし、この方法では、溶接余盛の除去など、何らかの加工プロセスを行うため、完全非破壊的な方法であるとは言えない。

残留応力評価法	現場利用	3次元	非破壊
X線回折	○	×	×
中性子回折	×	○	×
切断法	×	×	○
本手法	○	○	○

図1 本手法による残留応力評価の特徴

2. 研究の目的

報告者は、完全非破壊に部材全域の3次元残留応力分布を評価する方法を開発した。この方法では、部材の表面などの一部を X線回折により非破壊計測し、その値から逆問題解析により残留応力の原因となる固有ひずみを推定することで、部材全域の残留応力分布を推定する。本研究の目的は、本提案手法の実証実験を行い、現場で完全非破壊に3次元残留応力分布を正しく評価できることを示すことである。さらに、手法の推定精度を向上させる方法について提案し、その有効性を検証する。

3. 研究の方法

本研究では、まず航空機用アルミニウム合金の摩擦攪拌接合材料(図2参照)を対象に本手法を適用し、その推定精度を評価する。ここで、摩擦攪拌接合により施工された接合材料には溶接余盛がなく、溶接余盛を除去する準破壊的な手段を講じることができないため、本手法による完全非破壊手法の適用が必要となる。推定精度を評価するための方法としては、X線回折法により部材表面の残留応力計測を行い、その値から本手法により推定した部材裏面の残留応力の値と、部材裏面を直接 X線回折により測定した値とを比較する。

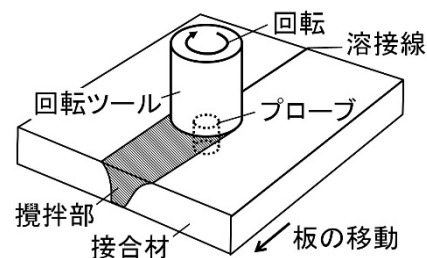


図2 FSW 接合の概要

また、本手法の推定精度を向上させる方法について検証する必要があるが、推定精度を詳細に評価するためには、部材のあらゆる箇所において推定値と実測値とを比較することが重要である。しかしながら、対象とするアルミニウム合金においては、X線回折法による母材部の計測精度が比較的低いという問題がある。そこで、比較的良好な計測精度が得られる鉄鋼材料の接合材を対象とすることで、詳細に手法の推定精度を評価する。これにより、推定精度を向上させる方法の評価が可能となると考えられる。

4. 研究成果

まず対象とする継手は、320mm×240mm×板厚5mmの摩擦攪拌接合材料であり、部材表面の弾性ひずみを X線回折法により計測し、本手法によって部材全域の残留応力分布を推定した。その際、残留応力の原因となる固有ひずみの未知推定量の数を適切に削減するために、接合時に生じる固有ひずみ分布が溶接線方向と厚さ方向に均一に分布するものとした。また、溶接などの接合材料においては、固有ひずみ分布は溶接線付近で比較的大きく、そこから離れるにしたがって小さくなる傾向があることが知られているため、本研究では4種類の形状のロジスティック関数と呼ばれる関数を利用して固有ひずみの関数近似を行った[7][8]。本手法による残留応力の推定結果と直接 X線回折法により計測した値との比較を図3に示す。図の赤色は計測値、図の緑色は摩擦攪拌部で計測した弾性ひずみから推定した残留応力の推定結果、青色は摩擦攪拌部に加え、比較的低い母材部の計測値を加えたものから推定した結果を示す。この結果から、概ね分布の傾向は再現できているものの、さらに推定精度の改善が必要であることがわかる。また、母材部の計測値を加えてもあまり推定結果は変わらなかった。

次に、推定精度を向上させるために、固有ひずみ分布の厚さ方向分布の考慮を行った。これまで、固有ひずみが厚さ方向に均一であるという仮定のもとで推定したが、接合部の断面を見ると、摩擦攪拌部がツール挿入側ほど広く、深さ方向に進むにつれてその範囲が小さくなって

いた。そこで、より適切に固有ひずみの厚さ方向分布を表現することにより、推定精度を向上させることができると考えた。固有ひずみの厚さ方向分布を表現するパラメータを導入し、その値を応答曲面法により推定した結果を図3の桃色の線で示す。しかしながら、十分に推定精度を向上させることはできなかった。更なる推定精度の向上に向けて、より適切な固有ひずみ分布の近似が求められるが、計測した残留応力分布は溶接線中央部 ($x=160\text{mm}$) を中心に概ね対称であるため、固有ひずみはさほど溶接線方向 (x 方向) に分布していないと考えられる。そのため、さらに推定精度を向上させるためには、固有ひずみの溶接線垂直方向 (y 方向) の分布、つまりロジスティック関数の関数形状を最適化する

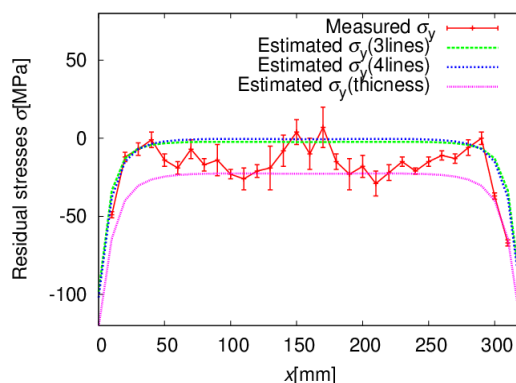
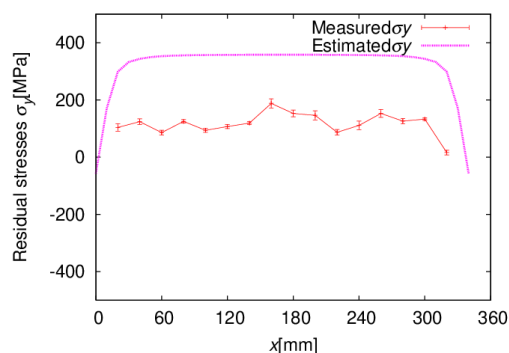


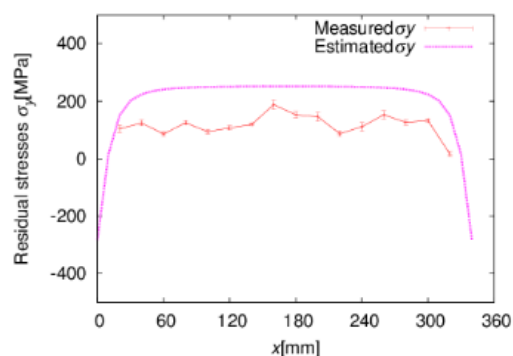
図3 残留応力の推定値と計測値

必要があると考えられる。しかし、本研究で用いたアルミニウム合金の母材部の計測精度が比較的低いため、推定精度の検証を十分に行うことができない可能性がある。

そこで、本手法の推定精度を向上させる方法について検証するために、X線回折装置で比較的高い計測精度が得られやすいフェライト系ステンレス鋼 SUS430 の溶接継手を対象とする。さらに、比較的大きな残留応力場を得るために、板厚 20mm の厚板の試験片に大電流で加工を行うサブマージアーク溶接をビードオン溶接することとした。大入熱を発生させ、しかもビードオン溶接をすることにより、比較的大きな拘束力が生じるため、非弾性ひずみが生じやすいと考えた。そして、その溶接開始部と終端部を切除した 343mm×300mm×板厚 20mm 試験片を対象として、従来の4種類のロジスティック関数を適用して固有ひずみの関数近似を行い、推定した残留応力分布を図4(a)の桃色の破線で示す。赤で示した実測値に対して、推定精度が比較的低いことがわかる。ここで用いた従来の4本のロジスティック関数の形状は、一般的な溶接継手において固有ひずみの分布範囲が溶接線からせいぜい 40mm 程度であること[7]を考慮して、経験的に決定された関数形状である。一方、対象とする試験片は、大電流のサブマージアーク溶接を施しており、比較的大きな入熱条件であるため、固有ひずみが比較的大く分布していると考えられる。そこで、1本のロジスティック関数を最適化して推定した残留応力分布を図4(b)の桃色の線で示す。図4(a)と図4(b)の比較から、これまで4本のロジスティック関数により固有ひずみを近似した場合よりも、最適化した1本のロジスティック関数だけから推定した方が、比較的高い推定精度を実現できることがわかる。よって、固有ひずみの近似関数を最適化するアプローチにより、本手法の推定精度を向上させることができることがわかった。



(a) 従来のロジスティックを適用



(b) 最適化した関数を適用

図4 残留応力の推定値と計測値

<引用文献>

- [1] Y. Javadi, S. Sadeghi and M. A. Najafabadi, *Materials and Design*, Vol.55, pp.27-34 (2014).
- [2] Man J. Park et al., *Journal of Materials Processing Technology*, 155-156, (2004), pp. 1171-1177.
- [3] A.H. Mahmoudi et al., *Experimental Mechanics*, Vol. 49, (2009), pp. 595-604.
- [4] 小川直輝, 中長啓治, 溶接学会論文集, Vol.28, No. 2 (2010), pp. 208-215.
- [5] M. Ogawa and T. Ishii, *Proceedings of ATEM'15*, (2015), p. 36.
- [6] M. Ogawa, *IJCMSE*, Vol. 3, No. 4 (2014), 1450023.
- [7] 上田幸雄, 麻寧緒, 溶接学会論文集, Vol. 11, No. 1 (1993), pp. 189-195.
- [8] 熊谷克彦, 中村春夫, 小林英男, *日本機械学会論文集 A 編*, Vol. 65, No. 629 (1999), pp. 133-140.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 小川雅（研究協力者：A.M. Korsunsky, 関根真吾, 渡辺大貴）
2. 発表標題 機械製品の疲労寿命予測のためのX線3次元残留応力推定法
3. 学会等名 平成30年度新技術説明会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小川雅（研究協力者：A.M. Korsunsky, 山脇大輝）
2. 発表標題 溶接構造物の疲労寿命予測のためのX線3次元残留応力推定法
3. 学会等名 イノベーションジャパン2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小川雅
2. 発表標題 X線回折を用いた3次元残留応力推定法と今後の逆問題の展望
3. 学会等名 日本機械学会 材料力学部門（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Daiki Yamawaki, Masaru Ogawa, Alexander M. Korsunsky
2. 発表標題 Nondestructive estimation of three-dimensional residual stresses for an FSW joint using X-ray diffraction and the eigenstrain reconstruction method
3. 学会等名 European Conference on Residual Stresses (ECRS 10)（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小川雅（研究協力者：A.M. Korsunsky, 石井丈紘, 古迫誠司, 関根真吾）
2. 発表標題 固有ひずみ理論に基づく3次元残留応力推定法と今後の逆問題の展望
3. 学会等名 日本材料学会塑性工学部門委員会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小川雅（研究協力者：A.M. Korsunsky, 石井丈紘, 古迫誠司, 関根真吾）
2. 発表標題 X線回折を用いた3次元溶接残留応力の非破壊評価
3. 学会等名 第42回（一社）日本船舶海洋工学会 材料・溶接研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小川雅（研究協力者：A.M. Korsunsky, 石井丈紘, 古迫誠司, 関根真吾）
2. 発表標題 X線回折法と固有ひずみ理論を用いた3次元溶接残留応力分布の非破壊評価
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 評価分析解析部会 「鉄鋼分析における誤差因子の検討：ブラックボックス化した分析装置の功罪」フォーラム研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小川雅（研究協力者：A.M. Korsunsky, 山脇大輝）
2. 発表標題 X線回折を用いた3次元溶接残留応力推定法と未溶着部の検出
3. 学会等名 イノベーションジャパン2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小川雅（研究協力者：A.M. Korsunsky, 山脇大輝）
2. 発表標題 X線回折を用いた3次元残留応力分布の非破壊評価
3. 学会等名 テクノトランスファーinかわさき
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

科研費プロジェクト 研究業績 https://lab-dr-ogawa.com/publication/ メンバー紹介 https://lab-dr-ogawa.com/member/ 教員紹介 https://lab-dr-ogawa.com/about/ アクセス https://lab-dr-ogawa.com/access/ Publication https://lab-dr-ogawa.com/en-publication/
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	コルスンスキー アレクサンダー (Korsunsky Alexander)	オックスフォード大学・Department of Engineering Science and Trinity College・Professor	