

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 11 日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820005

研究課題名(和文) X線回折を用いた3次元溶接残留応力分布の非破壊的な評価

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

研究代表者

小川 雅(Ogawa, Masaru)

横浜国立大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：90635236

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：中性子を用いず、現場で利用できるX線回折を用いて、余寿命評価のためのき裂進展予測に必要な部材全域の3次元残留応力分布を非破壊的に定量評価する方法が提案されている。本研究では、本手法の実際の構造物に対する有効性を示すことを目的として、溶接継手を対象として、その推定精度の評価を行った。

その結果、溶接接合時に熱源を揺動させる場合には、求める非弾性ひずみが比較的複雑になると考えられることがわかった。他方、自動溶接により接合された継手に対しては、比較的精度よく残留応力分布を推定することができた。

研究成果の概要(英文)：A nondestructive method to evaluate three-dimensional residual stresses by using X-ray diffraction and the eigenstrain methodology has been proposed. This method makes it possible to estimate three-dimensional residual stresses on-site without neutron diffraction. This study aims to evaluate the effectiveness of this method for actual welded joints. The estimation accuracy of this method has been evaluated for ferritic welded plates and friction stir welded joint. Residual stresses, especially on a welded plate jointed by automatic welding system, could be estimated with higher accuracy. When heat source is oscillated during welding, inelastic strains, as a source of residual stresses, are intricately distributed.

研究分野：機械材料・材料力学

キーワード：逆問題 非破壊 残留応力 X線回折 固有ひずみ 溶接 有限要素法

### 1. 研究開始当初の背景

疲労や応力腐食割れ (SCC) に晒される機械構造物の余寿命を評価するためには、検出したき裂の進展速度を評価する必要がある。そのためには、部材全域の3次元残留応力分布を現場で非破壊的に評価することが重要な課題となっている。

しかし、現在使われている非破壊 X 線回折法<sup>1)</sup>では、部材の表面しか測定できない。他方、中性子回折法<sup>2)</sup>であれば、深さ数十ミリまでの評価が可能であるが、中性子は専用の照射施設でのみ適用できるため、現場での非破壊検査ができない。また、DHD (Deep Hole Drilling) 法<sup>3)</sup>などの破壊を伴う方法は、供用期間中検査に適用できない。熱弾塑性有限要素法 (FEM) によるシミュレーションは、定性的な傾向の把握には有効であるが、同じような施工方法でもバラつきが大きい場合には、個々の定量評価が求められる。

著者は X 線回折法を用いて非破壊に計測した部材表面の弾性ひずみから、固有ひずみ (Eigenstrain) 理論<sup>4)</sup>に基づいて、部材全域の3次元残留応力分布を推定する手法を考案し、その有効性を数値解析により示してきた<sup>5) 6)</sup>。この方法は、現場で3次元残留応力分布を非破壊的に推定することのできる方法であるため、その実証実験に対する要求が高まっている。この方法が確立されれば、合理的に補修の有無を決定できるため、高い品質保証と経済性とを両立させることができると考えられる。

なお、中性子や放射光により非破壊に測定した弾性ひずみの値から、固有ひずみ理論に基づく逆問題解析により、部材全域の3次元残留応力分布を推定する手法<sup>7) 8)</sup>も提案されている。しかし、上述の通り、中性子や放射光を用いるためには専用の照射施設が必要であるため、現場での非破壊計測を実施することが困難である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、中性子を用いず、現場で利用可能な X 線回折法を用いて、部材全域の3次元残留応力分布を非破壊的に定量評価する方法について、実際の溶接構造物に対する実証実験を行い、その有効性を示すことである。

### 3. 研究の方法

(1) 実際の突合せ溶接平板を対象として、本手法を適用し、その推定精度の評価する。具体的には、まず溶接余盛を除去する前の溶接部材と、溶接余盛を除去した後の部材表面の弾性ひずみを X 線回折法により計測する (図1参照)。ここで、溶接余盛を除去することは、き裂の発生起点になりやすい溶接止端部を除去することになるため、むしろ好ましい措置であり、本質的に非破壊であると言える。次に、その測定値から本手法により残留応力分布を推定し、直接 X 線回折法により測定し

た値とを比較することで、推定精度の評価を行う。

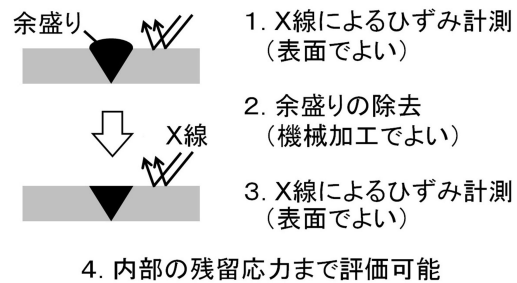


図1 本手法による残留応力評価手順

(2) 本手法の推定精度を高めるために、溶接接合条件に合う非弾性ひずみの分布パラメータを設定し、その値を応答曲面法により解く。また、接合条件に合わせた固有ひずみの関数近似法<sup>9)</sup>を工夫することにより、適切に未知推定量の数を削減する。

### 4. 研究成果

(1) 2%のクロムと1%のモリブデンを含むフェライト系ステンレス鋼の溶接継手を対象として、本手法の推定精度の評価を行った。対象とした溶接平板図2に示す。

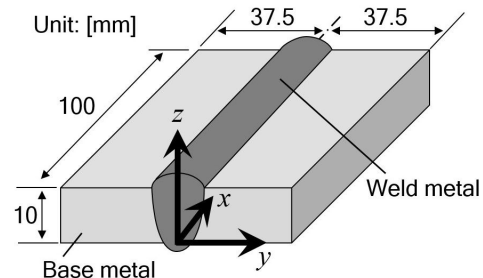


図2 対象とする溶接平板

また、溶接平板の上側 ( $z=10$  mm) における本手法の残留応力の推定値と、X 線回折法による実測値との比較を図3と図4に示す。図の赤線が X 線回折による実測値、緑の点線が本手法による推定値である。この緑の推定値を算出するために、「溶接継手に生じた非弾性ひずみが、溶接線方向にも厚さ方向にも一定である」という単純な過程を行った。しかし、実際の溶接継手は U 字開先を有しており、また溶接線方向にも溶接焼けが不均一に表れていたことから、求める固有ひずみの溶接線方向分布と厚さ方向分布を考慮し、その分布パラメータを応答曲面法により決定した。その結果を図3と図4の青色で示す。この結果より、赤で示す実測値の傾向に近づけることができた。

しかしながら、図3と図4の赤で示す実測値を十分に再現できていないとは言えない。この理由として、この試験片の製作において、開先幅が溶融プールに対して比較的広かつ

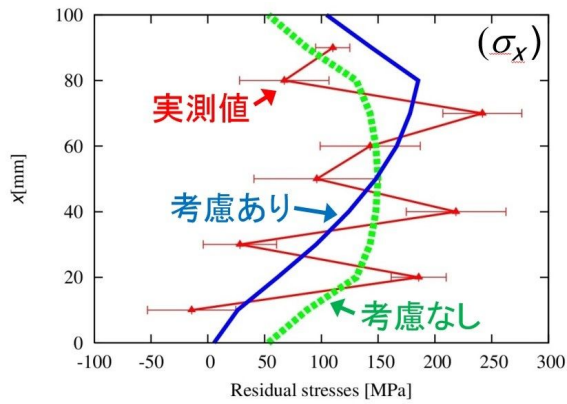


図3 残留応力の推定値と実測値 ( $\sigma_x$ )

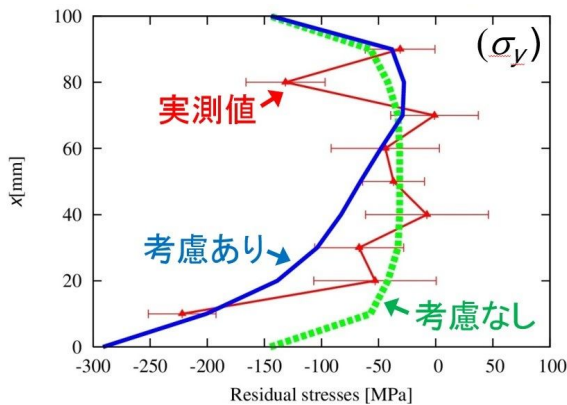


図4 残留応力の推定値と実測値 ( $\sigma_y$ )

たため、溶接接合時に熱源を溶接線に対して垂直方向に揺動させ、溶け込み不良を防止したことが挙げられる。つまり、求めるべき非弾性ひずみの分布が比較的複雑になってしまったと考えられる。

(2) 著者は、数値解析における検討結果から、余盛除去後の溶着金属部の計測情報を取り入れることで、比較的推定精度が向上することを明らかにした。具体的には、図5に示す厚さ 10 mm の溶接継手に対して本手法を適用し、図6の残留応力の厚さ方向分布の推定結果を得た。図6の実線が先行研究<sup>5)</sup>をもとに設定した正解の残留応力、点線が母材部のみ計測した場合の推定結果、一点鎖線が溶着金属部も計測した際の推定値である。

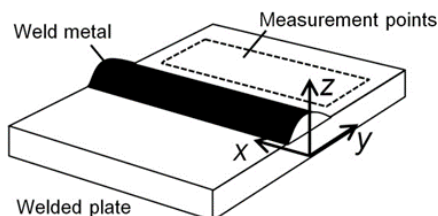


図5 数値解析において対象とした継手

この結果から、溶着金属部も計測することで、推定精度を改善できていることがわかる。

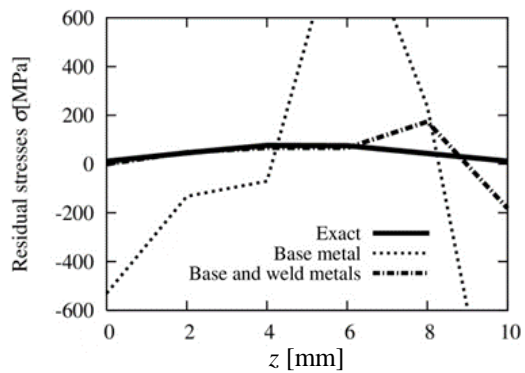


図6 厚さ方向の残留応力

そこで、比較的溶着金属部の X 線計測が容易なフェライト系ステンレス鋼 SUS430 の溶接継手を用意し、本手法により部材全域の 3 次元残留応力分布を推定した。その結果、大幅に推定精度を改善することができることを確認することができた。ただし、この溶接継手の製作においても、溶接時に熱源を揺動させたため、比較的複雑な残留応力分布となった。

(3) 前述の通り、溶接時に熱源を振動させてしまうと、求めるべき非弾性ひずみの分布が複雑となるため、その分推定精度が低下すると考えられる。そこで、自動溶接により熱源を揺動させずに接合した場合について、本手法の推定精度を評価した。自動溶接継手として、摩擦攪拌 (FSW) 接合材の突合せ平板を用意し、部材表面の X 線回折法による計測結果から、本手法によりその裏面の残留応力分布を推定し、直接 X 線回折により実測した値との比較を行った。その結果の 1 つを図7に示す。図の赤で示すのが X 線回折法による実測値、青の点線が本手法による推定値である。

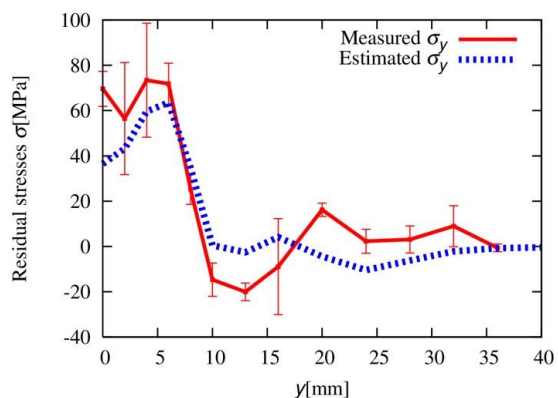


図7 FSW 接合材に対する本手法の残留応力推定結果と実測値との比較

FSW 接合材はもともと溶接余盛がなく、完全非破壊に評価した結果であるが、比較的精度よく推定することができている。現時点での FSW 接合材に対する本手法の残留応力の推定精度は、およそ 30~50 MPa 程度である。

<引用文献>

- 1) 例えば, 田中啓介, 鈴木賢治, 秋庭義明, 残留応力の X 線評価, 養賢堂, (2006).
- 2) M. 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) T. Mura, Micromechanics of defects in solids, Martinus Nijhoff Publishers, (1987), pp. 1-15.
- 5) 小川雅, 加工時に生じる非弾性ひずみの影響を考慮した固有ひずみ法による残留応力推定手法の提案, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 79, No. 804 (2013), pp. 1266-1277.
- 6) 小川雅, X 線回折を用いた深さ方向の溶接残留応力分布の非破壊評価, 日本機械学会論文集, Vol. 80, No. 815 (2014), SMM0195.
- 7) A.M. Korsunsky, G.M. Regino and D. Nowell, Variational eigenstrain analysis of residual stresses in a welded plate, International Journal of Solids and Structures, Vol. 44 (2007), pp. 4574-4591.
- 8) M.E. Kartal, Y-H. Kang, A.M. Korsunsky, A.C.F. Cocks and J.P. Bouchard, The influence of welding procedure and plate geometry on residual stresses in thick components, International Journal of Solids and Structures Vol. 80 (2016), pp. 420-429.
- 9) 上田幸雄, 麻寧緒, 固有ひずみの関数表示法および推定法: 固有ひずみ分布の関数表示による残留応力の推定法と測定法 (第1報), 溶接学会論文集, Vol. 11, No. 1 (1993), pp. 189-195.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

- 1) 小川雅, 石井丈紘, 古迫誠司, X 線回折を用いた固有ひずみ理論に基づく 3 次元残留応力推定手法の有効性評価, 材料, Vol. 64, No. 11 (2015), pp. 932-939 (査読有).
- 2) M. OGAWA, Three-dimensional welding residual stresses evaluation based on the eigenstrain methodology via X-ray measurements at the surface, International Journal of Computational Materials Science and Engineering, Vol. 3, No. 4 (2014), pp. 1450023 (査読有).

[学会発表](計 8 件)

- 1) 小川雅, 研究協力者: 関根真吾, A.M. Korsunsky, 石井丈紘, 古迫誠司, 固有ひずみ理論に基づく 3 次元溶接残留応力分布の非破壊評価, 第 217 回溶接学会溶接

構造研究委員会, 溶接会館, 2017 年 1 月 24 日.

- 2) M. Ogawa and T. Ishii, Evaluation of the Three-dimensional Welding Residual Stresses Based on the Eigenstrain Methodology via X-Ray Measurements, Materials Research Proceedings, Materials Research Forum LLC, Vol. 2, pp. 329-334. シドニー, 2016 年 7 月 4 日.
- 3) 小川雅, 石井丈紘, 古迫誠司, 固有ひずみ理論に基づく X 線回折を用いた 3 次元溶接残留応力の評価, 平成 27 年度 第 2 回残留ひずみ・応力解析研究会, 中性子産業利用推進協議会, 茨城県中性子利用促進研究会, (一財)総合科学研究機構(CROSS 東海), SPring-8 ユーザー協同体, JAEA 微細構造解析プラットフォーム NIMS 微細構造解析プラットフォーム共催, 研究社英語センター, 2016 年 3 月 1 日.
- 4) 石井丈紘, 小川雅, フェライト系溶接継手に対する X 線回折を用いた 3 次元溶接残留応力推定手法の実証実験, M&M2015 材料力学カンファレンス講演論文集, 日本機械学会, OS0905, 慶応義塾大学, 2015 年 11 月 21 日.
- 5) M. Ogawa and T. Ishii, Evaluation of Three-dimensional Residual Stresses for a Butt-welded Plate via X-ray Measurements on Surface, Proceedings of the International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2015 (ATEM'15), p.36, ロワジールホテル豊橋, 2015 年 10 月 8 日.
- 6) 小川雅, 石井丈紘, 古迫誠司, 固有ひずみ理論に基づく X 線回折を用いた溶接平板の 3 次元残留応力の評価, 第 64 期学術講演会論文集, 日本材料学会, No. 526, 山形大学, 2015 年 5 月 24 日.
- 7) M. Ogawa, T. Ishii and S. Furusako, Experimental Demonstration of the Eigen-strain Method by Using X-ray Diffraction for Determining Three-dimensional Welding Residual Stresses, Proceedings of the Third Japan-China Joint Symposium on Fatigue of Engineering Materials and Structures, JSMS Committee on Fatigue of Materials, pp.29-33, 高山, 2014 年 11 月 6 日.
- 8) M. OGAWA, Three-dimensional welding residual stresses evaluation based on the eigen-strain methodology via X-ray measurements on surface, Proceedings of the 5th International Conference on Computational Methods, Vol. 1, ISSN: 2374-3948, ID# 141, Cambridge, 2014 年 7 月 28 日.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

小川 雅 (OGAWA, Masaru)

横浜国立大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：9 0 6 3 5 2 3 6