日本溶接協会 2025年度
「次世代を担う研究者助成事業」成果報告

溶接固有ひずみの分布傾向の把握によるX線回折を用いた3次元残留応力の推定精度の向上

小川　雅
工学院大学 工学部 機械システム工学科

1　はじめに

抵抗スポット溶接は比較的短時間で効率的に接合でき，自動車の車体や家電製品の製造に広く用いられている。しかし，溶接部には比較的大きな残留応力が生じることが知られており，引張残留応力は部材の疲労強度に影響を及ぼす。3次元残留応力を非破壊に評価することができれば，残留応力の固体差がわかるため，製品ごとの余寿命の予測精度が向上し，その信頼性を高めることができる。従来の残留応力の非破壊評価手法として，X線回折法や中性子回折法などがある。しかし，X線回折法は部材表面の応力しか測定することができない。中性子回折法は部材内部の3次元残留応力を非破壊に評価することができるが，専用の施設でしか利用できず，現場での実用化には制約がある。

そこで，著者らはX線回折法と固有ひずみ理論[1),2)]とを組み合わせた3次元残留応力推定法[3)]（以下，本手法と呼ぶ）を提案している。この方法では部材表面の弾性ひずみをX線回折法により計測し，その値から逆問題解析により残留応力の原因である3次元固有ひずみを推定する。そして，推定した固有ひずみを有限要素モデルに入力することで部材全域の3次元残留応力分布を導く。本手法においては，部材表面の計測情報から3次元の固有ひずみを推定するため，そのままでは計測情報に対して未知数が比較的多く，精度よく推定することが難しい。そこで，固有ひずみ分布の関数近似により適切に未知数を削減することが重要である。そこで，本研究では抵抗スポット溶接シミュレーションを実施し，その部材全域の物理量を利用して，その残留応力場を再現する固有ひずみ分布を推定することを目的とする[4)]。これにより，抵抗スポット溶接に伴う固有ひずみの分布傾向を把握し，より適切な関数により固有ひずみを近似できるようにすることで，本手法の抵抗スポット溶接材に対する推定精度の向上を目指す。

2　研究方法

2.1　抵抗スポット溶接シミュレーション

対象とするモデルは半径120mm，厚さ2mmの2つの円板を重ね合わせたものである。モデルは円周方向に5度の範囲をとった軸対称の1/72モデルである。要素数は3,200，節点数は2,718である。本数値シミュレーションでは，温度が1500℃を超えた部位において接合されるように設定したが，このときすでにある節点同士を結び付けるための要素を設定している。そのため，要素の数が節点数よりも多い。溶接手順は，まず半径6.5mm，接触部の半径3.3mmの2つの電極により挟み込み，電極による圧力を与える。つぎに，電流を上昇させて通電させ，電流停止後も圧力を保持し，その後圧力を除荷して冷却した。これにより，実際の溶接におけるプレス・通電・冷却といった一連の流れを再現した。ただし，本数値解析では簡単のため相変態を考慮していない。溶接条件は**表1**に示す通りである。解析には，有限要素解析ソフトANSYS（Ver. 2022 R1）を用いた。

2.2　固有ひずみの逆解析条件

本研究では，溶接シミュレーションにより出力された部材全域の物理量から3次元固有ひずみ分布を推定する。具体的には，全節点における6方向成分の応力と6方向成分の弾性ひずみを用いて，全節点における3方向成分の固有ひずみ分布を推定する。固有ひずみにも6成

表1　溶接条件

通電時間	0.6[s]
電流値	10400[A]
電極加圧力	40[MPa]
伝熱係数	9.4[W/(m^2・K)]
雰囲気温度	21[℃]
冷却水温度	10[℃]

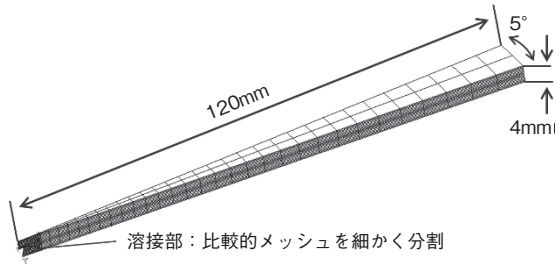

図１　逆解析に用いたFEモデル

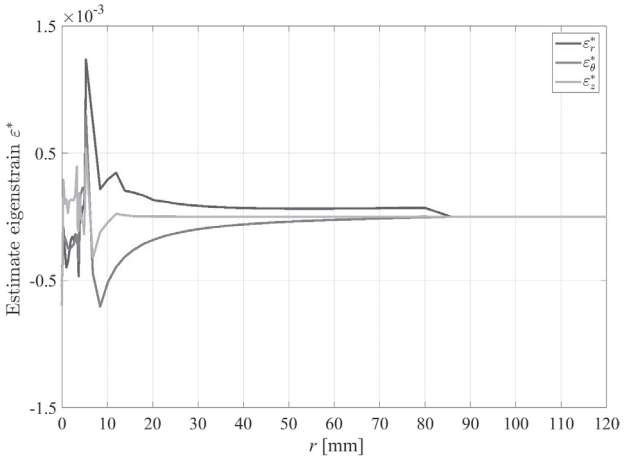

図２　底面（$z=0$mm）における固有ひずみ分布

分存在するが，比較的応力に寄与しないせん断方向成分の固有ひずみを無視した。また，逆解析の際にはチホノフの適切化手法を適用し，その適切化パラメータはLカーブ法を用いて決定した。

なお，推定した固有ひずみ分布の妥当性を評価するために，推定固有ひずみを有限要素モデルに入力することにより，部材全域の残留応力分布を算出し，溶接シミュレーションにより得られた正解の残留応力との比較を行った。逆解析に用いた有限要素モデルを**図１**に示す。

3　主な研究成果

部材全域の物理量から逆解析により３次元固有ひずみ分布を推定したところ，その底面の固有ひずみ分布は**図２**のようになった。また，この推定固有ひずみを有限要素モデルに入力することで求めた底面の残留応力分布は，**図３**に示すように，数値シミュレーションにより算出されたものを比較的よく再現していることがわかる。そのため，この固有ひずみ分布はこの残留応力場を再現するものであると言える。

これまでＸ線回折を用いた３次元残留応力推定法では，固有ひずみの未知数を削減するため，固有ひずみの

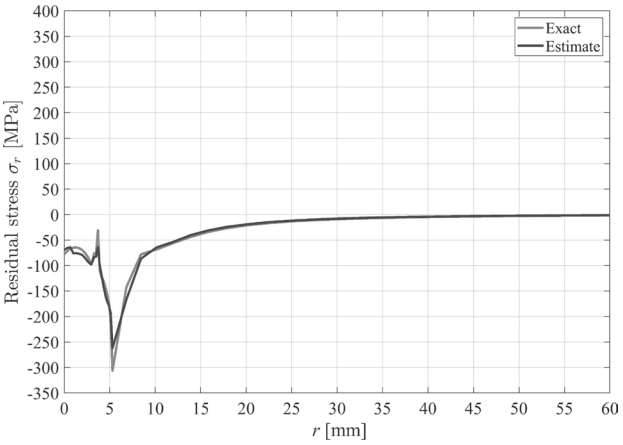

図３　底面（$z=0$mm）における残留応力分布

関数近似を行っていたが，その際，チェビシェフ多項式にガウス関数を重ね合わせた式により固有ひずみ分布を近似していた。とりわけ，抵抗スポット溶接部（$r=0$mm）ほど固有ひずみの値が大きく，そこから離れるにしたがって減衰する傾向のガウス関数を用いていた。しかし，**図２**により算出された固有ひずみ分布は溶接部から少し離れた箇所に固有ひずみの最大ピークの値がある。比較的多くのチェビシェフ多項式を用いる場合には，その傾向を再現することもできるが，未知数が多くなるとその分計測誤差の影響が大きくなる。そのため，近似に用いる関数を少なくし，固有ひずみの最大ピークの位置を最適化することで，残留応力の推定精度を向上させることができる可能性がある。

4　おわりに

本研究では，Ｘ線回折を用いた３次元残留応力推定法の抵抗スポット溶接材に対する推定精度の向上を目指し，スポット溶接シミュレーションにより算出された残留応力場に対して，その固有ひずみの分布傾向を明らかにした。今後は，Ｘ線回折を用いた３次元残留応力推定法において，固有ひずみの未知数を削減する際，抵抗スポット溶接材により生じる固有ひずみの分布傾向を考慮した関数を用いることにより，その推定精度の向上を目指す。

本研究の遂行を力強くご支援いただきました日本溶接協会に厚く御礼申し上げます。

参考文献

1）Mura, T., pp. 1-15, Martinus Nijhoff Publishers.
2）藤本二男，溶接学会誌，Vol. 39, No. 4(1970), pp. 236-252.
3）小川雅, 日本機械学会論文集, Vol. 80，No。 815(2014).
4）井上祐輝, 小川雅, M&M2025 材料力学カンファレンス, 日本機械学会,(2025), OS0204.