

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題	溶接部材の表面情報から非弾性ひずみを逆解析する固有ひずみ法の精度向上指針の提案
Title	Proposal of an Inverse Analytical Method to Evaluate Welding Eigen-Strain more accurately from Surface Information alone
著者	宮良大地, 中村春夫
Authors	Daichi MIYARA, Haruo NAKAMURA
出典	関東学生会第57回学生員卒業研究発表講演会論文集, pp. 1-5
発行日 / Pub. date	2018, 3

# 溶接部材の表面情報から非弾性ひずみを逆解析する 固有ひずみ法の精度向上指針の提案

## Proposal of an Inverse Analytical Method to Evaluate Welding Eigen-Strain more accurately from Surface Information alone

○学 宮良 大地<sup>\*1</sup>, ◎正 中村 春夫<sup>\*1</sup>  
Daichi MIYARA<sup>\*1</sup>, Haruo NAKAMURA<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> 東京工業大学 Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo

**Key Words** : Inverse Problem, Welding Deformation, Residual Stresses, Eigen-Strain

### 1. 緒言

エネルギー関連機器などの高い信頼性が求められる構造物に対して、設計から施工および供用期間中検査まで一貫した健全性評価を行うという、構造健全性保証の考え方が取り入れられてきている。溶接構造物の溶接変形や残留応力はその加工精度や強度特性に大きく影響を及ぼすが、これらの同時評価手法として固有ひずみ法が提案されている<sup>(1)</sup>。その1つである画像相関法（以下 DIC）を用いた変位とひずみとを入力情報とする手法においては、突合せ平板における3次元分布を考慮した適用例がある程度確立されているが<sup>(2)</sup>、数値シミュレーションで仮定した正解値を参照して推定を行っており、現場での実現性が低いことが問題であった。

そこで、本研究では DIC を用いた手法を拡張し、正解値を参照せずに溶接変形と残留応力とを推定する手法を提案し、数値シミュレーションによりその有効性を示す。

### 2. 提案手法

#### 2・1 固有ひずみ法

本研究における固有ひずみとは、内部残留応力や変形などを再現できるよう仮定された非弾性ひずみ（いわゆる Eigen-strain）である。部材に不均一な固有ひずみ $\{\varepsilon^*\}$ が負荷されたとき、固有ひずみと変位 $\{u\}$ とは式(2.1)のような線形関係が成立する。

$$\{u\} = [R_u]\{\varepsilon^*\} \quad (2.1)$$

ここで、 $[R_u]$ は弾性応答マトリクスと呼ばれ、弾性有限要素解析によって得られる。変位の計測値 $\{u\}_{measured}$ が得られたとき、 $[R_u]$ の一般化逆行列 $[R_u]^+$ を用いて式(2.2)のように推定固有ひずみ $\{\hat{\varepsilon}^*\}$ が求められる。

$$\{\hat{\varepsilon}^*\} = [R_u]^+\{u\}_{measured} \quad (2.2)$$

同様に、固有ひずみと全ひずみとの間にも式(2.3)のような線形関係があり、全ひずみの計測値を用いて式(2.4)のようにして推定固有ひずみが求められる。

$$\{\varepsilon_e\} = [R_e]\{\varepsilon^*\} \quad (2.3)$$

$$\{\hat{\varepsilon}^*\} = [R_e]^+\{\varepsilon_e\}_{measured} \quad (2.4)$$

本研究においては、変位と全ひずみの両方を計測による入力情報として利用して、これらの式(2.2)および式(2.4)を結合した式(2.5)を用いて固有ひずみを逆解析する。ここで、入力情報の各成分が推定に及ぼす影響を考慮するため、全ひずみの入力情報のみに重み係数 $\beta$ をかけている。

$$\{\hat{\varepsilon}^*\} = \begin{bmatrix} R_u \\ R_e \end{bmatrix}^+ \begin{Bmatrix} u \\ \beta \varepsilon_e \end{Bmatrix}_{measured} \quad (2.5)$$

## 2・2 変位と応力の同時推定のための固有ひずみ成分の特定

残留応力の推定に主眼をおいた従来研究においては、固有ひずみの垂直成分 $\varepsilon_x^*$ 、 $\varepsilon_y^*$ のみを用いれば十分な精度が得られることがわかっていたが<sup>(3)</sup>、溶接変形の推定を考慮する際、突合せ溶接平板の変形モードの1つである面内せん断変形を再現するには、固有ひずみのせん断成分 $\gamma_{xy}^*$ の考慮が不可欠であることがわかっている<sup>(4)</sup>。また、固有ひずみのy方向成分 $\varepsilon_y^*$ に起因する角変形のような大きな板厚方向変位が発生する場合を考慮し、固有ひずみの板厚方向(z方向)分布の考慮も必要であるとされている<sup>(2)</sup>。よって本研究で求める未知固有ひずみは $\varepsilon_x^*(y)$ 、 $\varepsilon_y^*(x,y,z)$ 、 $\gamma_{xy}^*(y)$ の3成分とする。

## 2・3 提案手法

本研究においては表側表面の溶融部の変位情報はDIC法によっては計測できないため、入力情報が限られ、問題の不適切性が高くなる。このような場合の適切化手法として、特異値分解による階数低下法(以下TSVD法)を用いた平滑化が有効であるが、変位の推定と応力の推定とで最適なランクが異なることが確認されており<sup>(2)</sup>、変位と応力とを同時に精度よく推定できるような等価固有ひずみ分布を求める必要がある。そこで、TSVD法を用いた推定結果の変位および全ひずみを先験情報とした制約条件式を用いることで、これらを同時に精度よく推定できるような等価固有ひずみを求める。

$$\Pi = \left\| \begin{bmatrix} R_u \\ R_e \end{bmatrix} \{\varepsilon^*\} - \begin{Bmatrix} u \\ \varepsilon \end{Bmatrix}_{\text{measured}} \right\|^2 + \alpha \left\| [R_{\text{full}}] \{\varepsilon^*\} - \begin{Bmatrix} u_{\text{Lcurve}} \\ \varepsilon_{\text{est-300}} \end{Bmatrix} \right\|^2 \quad (2.6)$$

式(2.6)における汎関数 $\Pi$ が最小となるような固有ひずみ $\{\varepsilon^*\}$ を求める。ここで、 $\alpha$ は処罰係数、 $[R_{\text{full}}]$ は固有ひずみから全節点の変位・ひずみを求める弾性応答マトリクスである。 $\{u_{\text{Lcurve}}\}$ はLカーブ法を用いた推定解の変位ベクトル、 $\{\varepsilon_{\text{est-300}}\}$ は応力のノルムを参照する新しい手法を用いた推定解の全ひずみベクトルであり(詳細は後述)、また $\alpha$ は先験情報に対する重み係数である。

## 3. 数値シミュレーションによる有効性の検証

### 3・1 数値実験概要

本手法の有効性の検証のため数値シミュレーションを行った。適当に条件を設定した熱弾塑性溶接シミュレーションによって正解の固有ひずみを設定し、これを初期ひずみとして負荷した弾性解析によって正解の変位および残留応力の分布を得る。得られた分布の変位および全ひずみに模擬計測誤差を加えたものを測定データとし、式(2.5)に基づく逆解析によって推定固有ひずみを求める。これを再び弾性解析した推定変位および推定残留応力を正解値と比較することで、手法の有効性を検証する。正解値との比較には二乗平均平方根(RMS)を用いる。RMS値が低いほど高精度である。

本研究における解析モデルは、図3.1に示す突合せ溶接平板であり、対称性から平板の半分を解析する。総要素数は1280、総節点数は1785である。溶接シミュレーションでは4パスV字開先溶接を想定し、溶融部の片幅は9.375 mmとする。DIC法による計測を想定するため、この溶接部の領域は測定できないとする。入力情報は1836個、未知変数は1056個となる。計測誤差として、平均0、標準偏差3.3  $\mu\text{m}$ (変位)、30  $\mu\text{m}$ (全ひずみ)の正規分布に従う乱数を正解の分布に加え、計測値を模擬した。

## 4. 結果および考察

### 4・1 TSVD法を用いた推定結果

解の発散を抑えるため、TSVD法を適用する。式(2.5)に示す弾性応答マトリクスの階数は1056であり、これを適切なrankまで低下させて解析を行う。上記の条件のもとで式(2.5)を用いて重み係数 $\beta$ を0.1~2.0まで0.1刻みで変化させ、適切なrankと $\beta$ を、正解値を参照しながら探索した結果を表4.1の左側に示す。しかし、実際の推定においては正解値を知ることができないため、正解値を参照せずにこれらのrankおよび $\beta$ の値を探索する手法が必要である。

その手法として1つの候補であるLカーブ法は、式(4.1)に示す残差ノルム(*ResidualNorm*)を横軸に、式(4.2)に示す解ノルム(*SolutionNorm*)を縦軸にそれぞれとり、各*rank*における値をプロットし、両者の値がともに小さくなる点における*rank*を最適化ランクとする手法である。これにより、正解値を参照せずに最適な*rank*を得ることができる。

$$ResidualNorm = \left\| \begin{bmatrix} R_u \\ R_e \end{bmatrix} \{\varepsilon^*\} - \begin{Bmatrix} u \\ \varepsilon \end{Bmatrix}_{measured} \right\| \quad (4.1)$$

$$SolutionNorm = \|\{\varepsilon^*\}\| \quad (4.2)$$

この手法によって得られた最適化ランクは*rank* = 785となった。なお式(4.1)においては重み付けを行っていないため、 $\beta = 1.0$ である。このときの分布を図4.1に示す。推定結果は変位に関しては良好な結果を与えているが、応力に関しては精度が低い。よって、応力に関しては*rank*および $\beta$ をLカーブ法以外の手法によって求める必要がある。

正解値を参照した推定結果から、各*rank*に対する*RMS*の増減と応力の推定値の解ノルム $\|\sigma^*\|$ の増減との間に高い相関関係が見受けられた。また、異なる $\beta$ に対する探索の結果から、*rank*が300周辺、あるいは500周辺において特異的に結果が良好になる様子も観察された。以上のことから、*rank*が200~400の範囲において、 $\|\sigma^*\|$ が最小となるような*rank*および $\beta$ を、最適化ランクとして決定する新しい手法を試みた。これより*rank*および $\beta$ はそれぞれ*rank* = 287、 $\beta = 0.1$ となった。このときの分布を図4.2に示す。以上の結果の*RMS*値を表4.1の右側に示す。これらの結果から、正解値を参照せずとも、表4.1左側の結果に近い結果が得られたため、本手法の有効性が示された。

#### 4・2 制約条件式による推定結果

4・1節で得られた結果を先験情報とし、式(2.6)を用いて $\alpha$ を $10^{-8} \sim 10^0$ まで指数的に変化させ、解析を行った。なお、適切な $\alpha$ の値は正解値を参照して決定した。TSVD法を用いた推定結果との比較を表4.2に示す。また $\alpha=10^{-4}$ ときの分布を図4.3に示す。変位の推定精度は悪化しているが、残留応力の推定精度は正解値を参照した結果よりも良好となった。これにより、正解値を参照せずとも、先験情報の導入によって、推定が困難であった変位と残留応力とを精度良く同時推定することが可能になったことが示された。

### 5. 結言

表面の変位とひずみの情報のみから、溶接変形・残留応力の同時推定を行う逆解析手法の精度向上の手法を提案し、数値実験によりその有効性を検証した。本研究により得られた内容を以下に記す。

1. *rank*および $\beta$ などの適切化係数の選択の際、変位ではLカーブ法を、また残留応力ではその解ノルム $\|\sigma^*\|$ が最小であるよう選択する手法をそれぞれ用いることで、変位と残留応力を別々に精度良く推定できることが示された。
2. 上記の結果を先験情報とする制約条件式により、正解値を参照しなくとも、変位と応力を同時に精度良く推定できることが示された。

なお、制約条件式における係数 $\alpha$ の決定手法については、今後の課題とする。また、応力の解ノルム望小の手法について、特定の*rank*の範囲内(200~400)であることが解析モデルなどの実験条件に依存している可能性があり、これについても今後の課題とする。

#### 参考文献

- (1) 上田 幸雄, 福田 敬二, 谷川 良一, “固有ひずみ論に基づく3次元残留応力測定法”, 日本造船学会論文集, No. 145 (1979), pp. 203-211.
- (2) M. Ogawa, T. Yamasaki, and H. Nakamura, “Estimation of welding deformations and residual stresses based on the eigen-strain methodology”, Mechanical Engineering Letters, Bulletin of the JSME, The Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 2, No. 16-00247 (2016), PP. 1-5.

- (3) 増田 浩太郎, 中村春夫, ”溶接シミュレーション援用による溶接変形・残留応力の逆問題解析手法の精度向上 (第2報: 設計への適用のための変形・応力推定)”, 日本機械学会論文集 (A 編), Vol. 76, No. 769(2010), pp. 1186-1194
- (4) 増田 浩太郎, 中村春夫, ”溶接シミュレーション援用による溶接変形・残留応力の逆問題解析手法の精度向上 (第1報: ビードフラッシュ法への適用)”, 日本機械学会論文集 (A 編), Vol. 76, No. 767(2010), pp. 881-892

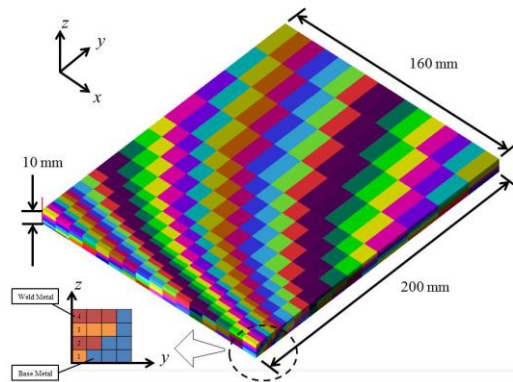


Fig. 3.1 FEM Analysis Model

Table 4.1 Result with Applying TSVD Method

	Referring to Correct Solution			Proposed Method		
	$\beta$	rank	RMS	$\beta$	rank	RMS
All nodes						
$u$	0.9	753	$3.96 \times 10^{-2}$ mm	1.0	785	$4.16 \times 10^{-2}$ mm
$\sigma$	1.2	12	75.7 MPa	0.1	287	129.0 MPa
Vicinity of weld line on back surface ( $y \leq 9.375$ )						
$u$	1.1	778	$9.16 \times 10^{-2}$ mm	1.0	785	$9.30 \times 10^{-2}$ mm
$\sigma$	1.2	20	163.6 MPa	0.1	287	183.7 MPa

Table 4.2 Result with Considering Constraint Condition

	Result using Eq. (2.6)		Result with TSVD Method
	$\alpha$	RMS	RMS
All nodes			
$u$	$10^{-5}$	$1.45 \times 10^{-1}$ mm	$3.96 \times 10^{-2}$ mm
$\sigma$	$10^{-4}$	73.9 MPa	75.7 MPa
Vicinity of welded line on back surface ( $y \leq 9.375$ )			
$u$	$10^{-2}$	$2.60 \times 10^{-1}$ mm	$9.16 \times 10^{-2}$ mm
$\sigma$	$10^{-4}$	144.3 MPa	163.6 MPa

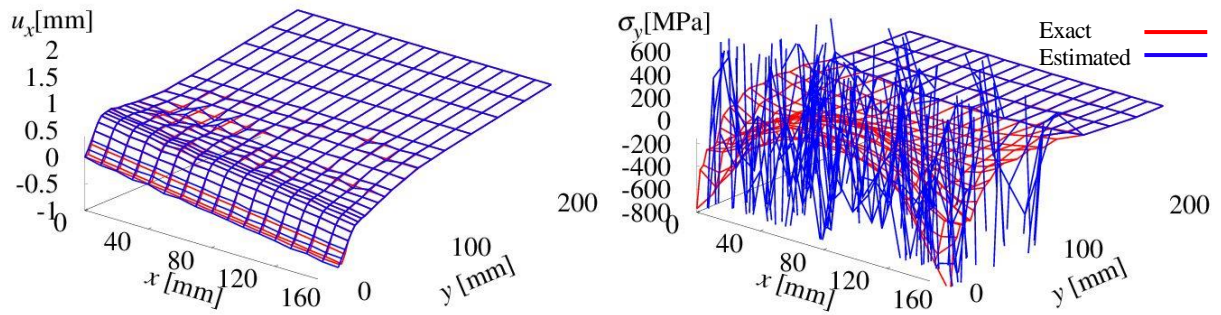


Fig. 4.1 Distribution of  $u_x$  and  $\sigma_y$  on Back Surface (Result by L-curve Method)

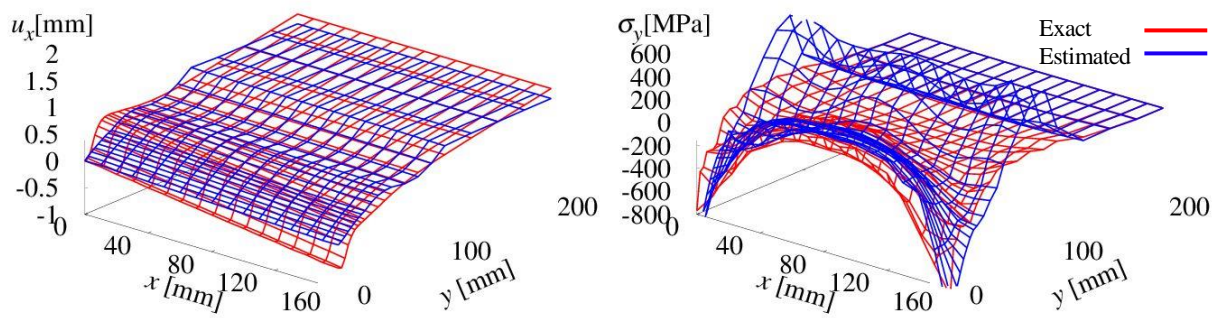


Fig. 4.2 Distribution of  $u_x$  and  $\sigma_y$  on Back Surface (Estimated by Minimizing  $\|\sigma^*\|$ )

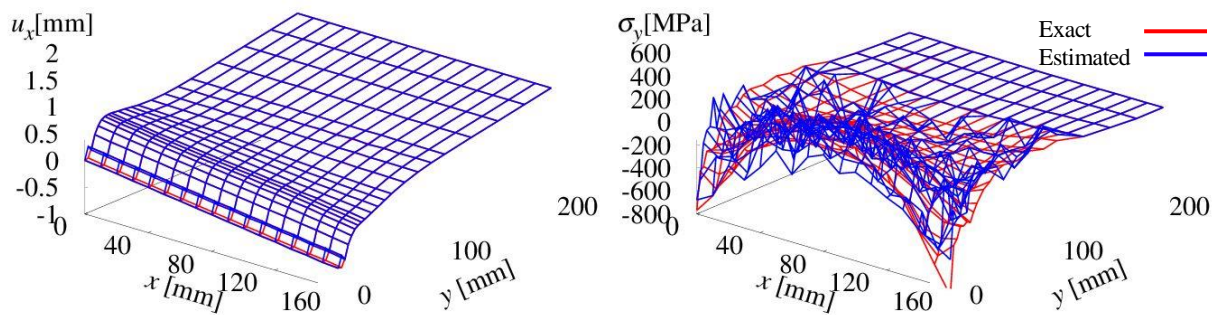


Fig. 4.3 Distribution of  $u_x$  and  $\sigma_y$  on Back Surface (Result using Eq. (2.6))