

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19760579
 研究課題名（和文）デジタルカメラを用いた画像処理による非接触式残留応力評価法の開発
 研究課題名（英文）Development of Non-contact Residual Stress Measurement Using Digital Camera with digital camera
 研究代表者
 柴原 正和 (SHIBAHARA MASAKAZU)
 大阪府立大学・工学研究科・准教授
 研究者番号：20350754

研究成果の概要（和文）：本研究では、デジタルカメラを用いた画像処理による非接触式残留応力評価法の開発を行った。本手法を基礎試験であるビードオンプレート問題に適用することにより、本手法の妥当性について検証を行った。その結果、本手法を用いることで、残留応力評価が可能であることを示した。さらに、レーザー変位計やノギス等を用いて得られた結果と比較することにより、本手法を用いる事で、面内変形および面外変形共に、良好な精度で予測できることを示した。

研究成果の概要（英文）：In this study, non-contact residual stress evaluation method was developed by using image processing technique with digital camera. The validity of the proposed method was verified by applying to the bead on plate problem that is a basic welding test. In addition, the results of the in-plane deformation and the out-of-plane deformation obtained by the proposed method are good agreement with those of digital caliper and laser displacement meter.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	0	1,100,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	540,000	3,440,000

研究分野：溶接力学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：画像処理、溶接残留応力、デジタルカメラ、溶接変形、逆解析

1. 研究開始当初の背景

溶接金属部周辺は溶接により表面状態が変化しているため、応力分布を直接計測するのは困難である。このことは、ひずみゲージを用いた従来型の計測方法でも同様であり、溶接金属部の残留応力を推定するには、溶接

後に溶接金属部にひずみゲージを貼付し、その部分を切断した際のひずみの解放量から応力を算出する応力解放法が最も主流である。ただし、この方法では、残留応力の基となる固有ひずみ(塑性ひずみ等の永久ひずみ)の値は精確に算出されるが、溶接部を切断す

る必要があり、溶接継手部の保守・管理の面からは好ましくない方法であると考えられる。本研究では、この点を考慮し、非破壊・非接触で溶接金属部およびその周辺の残留応力を評価する手法を開発する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、申請者が独自に開発を進めている画像処理によるサブピクセル変形・応力計測法を用いて、溶接時に構造物に発生する、変位分布、固有ひずみ分布および溶接残留応力分布を、大型構造から小型構造まで広範囲に渡って高精度に評価できる計測手法を開発することである。

3. 研究の方法

研究の方法、手順は、以下に示すとおりである。

- (1) 画像処理によるサブピクセル変形・応力計測法のさらなる高精度化
- (2) 画像処理によるサブピクセル変形・応力計測法の高速化
- (3) ステレオ画像法の導入による三次元変形・応力計測法の開発
- (4) 基礎試験への適用による三次元変形・応力計測法の精度検証
- (5) 三次元変形・応力計測法の大型構造への適用とその精度検証
- (6) 逆解析による固有ひずみ・溶接残留応力評価システムの開発
- (7) 溶接基礎試験による本手法の精度検証
大型構造および小型構造への適用による本手法の適用範囲検証
- (8) 溶接部の保守への本手法の適用における工夫および改善策についての検討

4. 研究成果

4.1. 逆解析手法の概要

4.1.1 逆解析手法の提案

一般的に、ひずみは弾性ひずみ ε^e 、固有ひずみ ε^p 、熱ひずみ ε^T に分類できる。すなわち、

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^e\} + \{\varepsilon^p\} + \{\varepsilon^T\} \quad (1)$$

となるが、溶接後の完全冷却した状態を考慮にいと熱ひずみはゼロとすることができ、

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon^e\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^p\}) \quad (2)$$

となる。ここで $[D]$ 、 $\{\sigma\}$ はそれぞれ材料定数 E 、 ν により構成される弾性応力-ひずみマトリックスおよび残留応力である。式(2)より固有ひずみ $\{\varepsilon^p\}$ が既知であれば弾性順解析で残留応力が計算できることが分かる。

そこで本研究では、溶接前後の変形量を計測し、それをもとに、固有ひずみ分布や残留応力分布を

算出する逆解析手法の開発を行うことを目的とする。なお、本研究では熱弾塑性解析で算出された数値実験結果を、実際の実験結果と想定して逆解析を行った。

4.1.2 固有ひずみ分布の関数表示法

一般に 3 次元弾性体に存在する固有ひずみ成分 ε^p は x, y の関数であり、その分布は次式で示すような級数で表現することができる³⁾⁴⁾。すなわち、

$$\varepsilon^p(x, y) = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M A_{ij} h_i(x) f_j(y) \quad (3)$$

ここで、 $h_i(x), f_j(y)$ は固有ひずみ成分の xy の分布関数であり、 A_{ij} は分布関数に対応する未知係数である。 L, M は分布関数の最高次数である。分布関数については、種々の関数が提案されており、各種の溶接継手、溶接法ごとに、適切な関数を選べば、未知係数の数が非常に少なくして高精度な固有ひずみ分布を再現することが可能である。固有ひずみ成分 ε^p に対して、式(4)をベクトルで表すと次式となる。

$$\{\varepsilon^p(x, y)\} = \{P\}_p^T \{A\}_p \quad (4)$$

ここで、 $\{P\}_p$ と $\{A\}_p$ はそれぞれ固有ひずみ成分 ε^p の分布を決める分布関数ベクトルおよび未知係数ベクトルである。

4.1.3 弾性応答マトリックス $[H_A]$ の導出方法

固有ひずみの分布を関数表示する場合の未知係数ベクトル $\{A\}_p$ と計測変位 $\{u\}_m$ の対応関係は、次式で与えられる。

$$\{u\}_m = [H_A]_{mp} \{A\}_p \quad (5)$$

$$\text{ただし、} \{\varepsilon^p\} = \{P\}_p^T \{A\}_p \quad (6)$$

また、式(5)の $[H_A]_{mp}$ は固有ひずみ分布の未知係数と計測変位との関係を与える弾性応答マトリックスである。この関係式(5)において、マトリックス $[H_A]_{mp}$ の成分 H_{Aij} は

$$\{A\}_p = \{0, \dots, 0, A_j (=1), 0, \dots, 0\}^T \quad (7)$$

と仮定した時、すなわち、 $A_j = 1$ に対応する固有ひずみの分布を弾性体に与えるときの弾性体の i 点に生じた計測変位 $\{u\}_m$ の大きさを表す。したがって、このマトリックスは有限要素法による弾性解析を p 回繰り返すことにより作成できる。

4.1.4 固有ひずみ関数表示の未知数の推定

上述のように、マトリックス $[H_A]_{mp}$ が算出できた後は、以下の流れで固有ひずみを算出する。

式(5)は

$$[H_A]_{mp} \{A\}_p = \{u\}_m \quad (8)$$

上記の方程式は、 $m \geq p$ で条件式の数 m が未知数の数 p よりも大きい場合もあり、一般には、 $\{u\}_m$ が誤差を含んでいるので、方程式を満足する解は存在しない可能性がある。そこで、上式で得られる残差の 2 乗和を最小とする固有ひずみ関数 $\{A\}_p$ を最適解として採用する方法について説明する。まず、上式の誤差を $\{e\}$ とすれば、 $\{e\}$ は次式で定義される。

$$\{e\} = \{u\}_m - [H_A]_{mp} \{A\}_p \quad (9)$$

上式に示された誤差 $\{e\}$ は $\{u\}_m$ を計測する際の測定誤差、および $[H_A]_{mp}$ を有限要素法で作成する際のモデリング誤差を含んでいる。誤差の 2 乗和 $E\{A\}_p$ は次のように表される。

$$E\{A\}_p = \{e\}^T \{e\} = (\{u\}_m - [H_A]_{mp} \{A\}_p)^T (\{u\}_m - [H_A]_{mp} \{A\}_p) \quad (10)$$

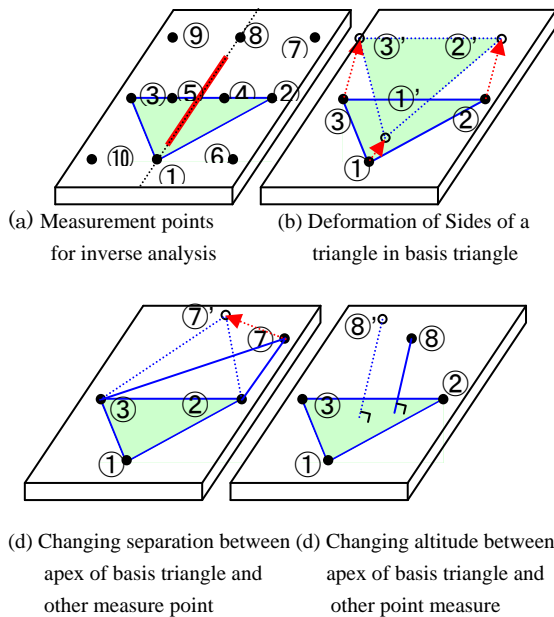


Fig.1 Method of identification in inverse analysis
L=400mm

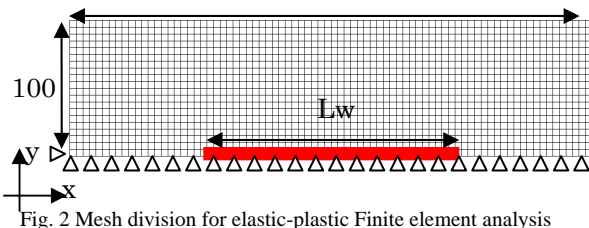


Fig.2 Mesh division for elastic-plastic Finite element analysis

ここで誤差の 2 乗和 $E\{A\}_p$ が最小となる条件は、 $E\{A\}_p$ の $\{A\}_p$ に関する 1 次微分がゼロになる事であるから、次式が得られる。すなわち、

$$([H_A]^T [H_A]) \{A\}_p = [H_A]^T \{u\}_m \quad (11)$$

上式の係数行列 $([H_A]^T [H_A])$ は正方行列であるので、固有ひずみベクトル $\{A\}_p$ の各成分が独立であれば式を $\{A\}_p$ について解く事ができる。すなわち、

$$\{A\}_p = ([H_A]^T [H_A])^{-1} [H_A]^T \{u\}_m \quad (12)$$

未知係数ベクトル $\{A\}_p$ が決定されると、式(6)を用いて固有ひずみ分布 $\{\epsilon^p\}$ を決定することができ、式(2)を用いて溶接残留応力分布 $\{\sigma\}$ を算出することができる。

4.1.5 固有変形の同定方法

上記で示した解析方法をもとにして、複数からなる計測点での溶接前後の二次元座標から、固有変形を同定する。その方法は以下に示すとおりとする。また、Fig.1 に示すように 10 点で計測した場合について説明することとする。

- (I) 基準三角形 (①、②、③) を定める。
- (II) 基準三角形の三辺それぞれの長さの変化より、3 条件が得られる。{①②③が①'②'③'に移動したため、三辺それぞれの長さが変化する。} (a)
- (III) その他の計測点では、基準三角形内の二点からの距離の変化より $2(m-3)$ 条件が得られる。{⑦が⑦'に移動したため、⑦から基準三角形の 2 点までの距離が変化する。} (b) また、基準三角形が作る面から垂直距離の変化より $m-3$ 条件が得られる。{⑧が⑧'に移動したため、⑧から基準三角形面までの距離が変化する。} (c)
- (IV) 上記より合計 $(3m-6)$ 条件が得られ、固有変形を同定することができる。

4.2.提案手法の妥当性の検証

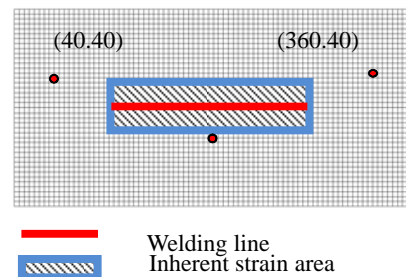
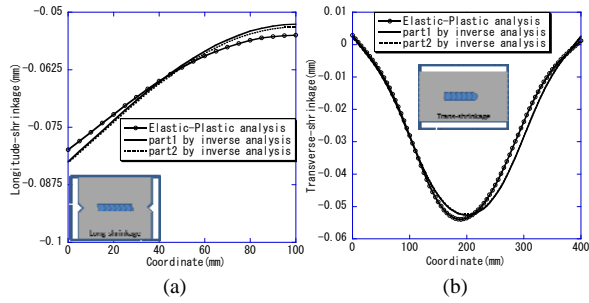


Fig.3 FE Mesh divisions for inverse analysis



(a) Distribution of long-shrinkage
(b) Distribution of trans-shrinkage

Fig.4 Distribution of displacement analyzed by elastoplastic analysis or inverse analysis

4.2.1 解析モデルおよび解析条件

Fig.2 に二次元熱弾塑性解析モデルを示す。解析対象モデルは長さ 400mm、幅 100mm、板厚 2mm とした。分割数は溶接線方向に 80 分割、幅方向に 20 分割とした。なお、節点数は 1701、要素数は 1600 である。解析対象は対称性を有するため、Fig.2 に示す解析モデルの下端を対称軸とする対称問題として解析を行った。太線で示す部分を溶接トーチが移動し、溶接を実施することとする。なお、解析対象として溶接長さ 200mm と仮定した部分溶接モデルと 400mm と仮定した全長溶接モデルを採用した。また、解析で用いた幾何学的境界条件は、Fig.2 に示すとおり、下端の全ての節点を y 方向に拘束し、左端部における下端部の 1 節点を x 方向に拘束している。溶接条件は以下の通りであり、電流、電圧および溶接速度はそれぞれ 50 A、17 V、6.67 mm/sec である。Fig.3 に逆解析モデルを示す。寸法および分割数は熱弾塑性解析のモデルと同様であり、対称性を考慮した。なお、逆解析手法において必要となる変計測情報は溶接線の上下、すなわちモデル全体の情報とした。具体的には、対称性を考慮して行った熱弾塑性解析で得られた 1701 点での計測データを逆側にも同様に与えた計 3321 点での計測データとして解析を行っている。拘束条件などの解析条件は熱弾塑性解析の場合と同様とした。その際、Fig.3 に示す 3 点を、基準三角形を構築する 3 点と決めた。なお、この 3 点の位置を変えたモデルについても解析を行った。その条件を table 1 に示す。また、Fig.3 の太線は溶接線、斜線で示した範囲は溶接によって発生した固有ひずみ分布領域である。また、実際の溶接では、溶接線近傍で溶接前後の変形計測が行えない。そのため、斜線で囲んだ領域に関しては、変形量が

Table 1 Parameter for inverse analysis

	Part1	Part2	Part3	Part4
coordinate of basis triangle	(40,40) (200,-30) (360,40)	(0,100) (0,-100) (100,100)	(40,40) (200,-30) (360,40)	(30,40) (200,-30) (370,40)
Welding Length	200mm	200mm	400mm	400mm

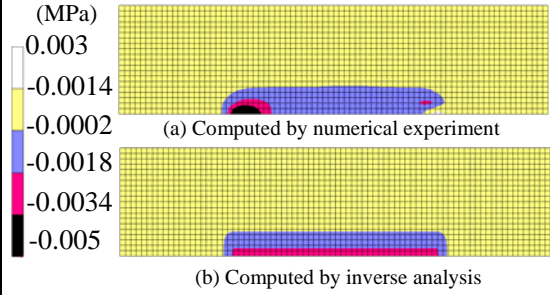


Fig.5 Distribution of inherent strain ϵ_x

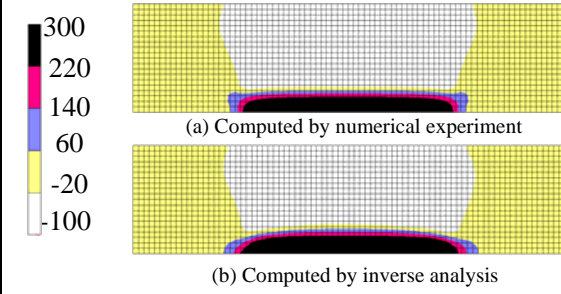
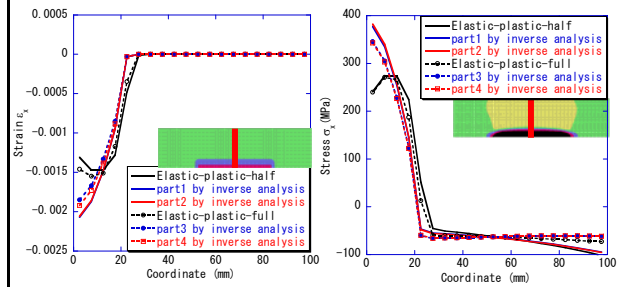


Fig.6 Distribution of stress σ_x



(a) Inherent strain ϵ_x (b) Residual stress σ_x
Fig.7 Distribution of strain & stress

計測できなかったと想定し、計測データを用いず、その他の部分だけで、逆解析を行うこととした。なお、ヤング率は 210(GPa)、ポアソン比は 0.3 とした。

4.2.2 固有ひずみ分布の関数近似

本研究では、固有ひずみ分布に、より一般性を持たせるため、固有ひずみ分布を関数近似することとした。近似関数として、次式に示される三角関数を用いた。各項の係数を未知推定パラメータとした。

$$\epsilon_x^p = A_i \cos \frac{\pi}{2B_{inh}} y \quad (13)$$

$$\epsilon_y^p = -B_i y + 1$$

4.2.3 解析結果

Fig.4 には、それぞれ熱弾塑性解析による数値実験結果と提案手法である逆解析で算出した縦収縮と横収縮の分布を示す。それぞれの結果を比較すると、その分布形状お

よび大きさが良好に一致していることが確認できる。Fig.5(a)、(b)には熱弾塑性解析および逆解析における x 方向塑性ひずみ分布を、Fig.6(a)、(b)には x 方向残留応力分布を示す。また、Fig.7(a)、(b)には解析モデル中央部(L=200)における固有ひずみ分布および残留応力分布を示す。Fig.5 および Fig.6 の結果より、熱弾塑性解析と逆解析でそれぞれの解析結果が良好に一致している事が確認できる。また、Fig.7 より固有ひずみおよび残留応力の大きさが概ね一致していることから、大きさについても推定できると考えられる。

これらの結果は、固有ひずみの発生領域すなわち溶接線近傍のように変形量を計測することができない領域が存在したとしても、その他の点で溶接前後の変形量を計測し、逆解析することで、固有ひずみおよび残留応力の分布やその大きさを算出することが可能であることを示唆する結果となった。このことは、実際の溶接を実施し、溶接前後の変形量をデジタルカメラなどを用いて計測することによって、実溶接継手の残留応力分布を、対象物を破壊することなく、かつ短時間に評価することができることを示唆するものである。

4.3. 結言

本研究では、変形計測結果から、溶接残留応力を推定する逆解析手法を開発し、その妥当性について検証を行った。その結果として、以下の結論が得られた。

- 1) 熱弾塑性解析による数値実験結果を用いて、提案手法を検討した結果、実際の変形量と仮定して本解析手法を適用した結果、算出した固有ひずみおよび応力分布は、定量的・定性的に妥当であると結論づけることができる。
- 2) 提案手法を用いることで、溶接近傍付近を除いた部分の変形量情報からでも、残留応力の推定が可能であることを示した。

参考文献

- 1) 梁偉：固有変形の逆解析を用いた大型構造物の溶接変形予測法に関する研究,2005年大阪大学学位論文
- 2) 梁偉,曾根慎二,村川英一,加藤国男：逆解析を用いた種々の溶接継手における固有変形の同定,2003年3月,関西造船協会論文集,第243号,pp71-77
- 3) 麻寧緒：固有ひずみ分布の関数表示法と3次元残留応力分布の測定法に関する研究,1993年大阪大学学位論文
- 4) 上田幸雄,麻寧緒：固有ひずみの関数表示法および推定法,溶接学会論文集,第11巻,第1号1993年,pp189-195
- 5) 熊谷克彦,中村春夫,小林英男：余盛り除去による溶接残留応力の解析援用非破壊評価,日本機械学会論文集(A編)65巻629号1999年

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3件)

① 柴原正和、河村恵里、生島一樹、伊藤真介、望月正人、正岡孝治：ステレオ画像法による三次元溶接変形計測法の開発、溶接学会論文集、28、1、108-115、2010(査読有)

② M.Shibahara, E.Kawamura, T.Onda, S.Itoh, M.Mochizuki, K.Masaoka : Measurement of Three-dimensional Welding Deformation Using Digital Image Correlation Technique、Proceedings of the International Conference on Welding Science and Engineering 2009 (WSE'09)、148-157、2009(査読無)

③ M.Shibahara, K.Yamaguchi, T.Arimura, T.Onda, K.Masaoka, H.Murakawa : Full-field Measurement of In-plane Deformation During Welding Using a Digital Camera、Proceedings of the International Conference on Welding Science and Engineering 2009 (WSE'09)、148-157、2009(査読無)

[学会発表] (計6件)

① 伊藤真介、柴原正和、朝岡直広、望月正人：二相流分離器のパイプ溶接継手における溶接変形画像計測、溶接学会春期全国大会講演概要、Vol.86, pp.158-159、2009年11月17日、大阪

② 生島一樹、柴原正和、伊藤真介、正岡孝治：理想化陽解法FEMによる溶接力学解析法の開発、溶接構造シンポジウム 2009、509-516、2009年11月17日、大阪

③ 恩田尚弘、柴原正和、伊藤真介、正岡孝治：溶接中における三次元変形の全視野計測、溶接構造シンポジウム 2009、173-180、2009年11月17日、大阪

④ 柴原正和、河村恵里、生島一樹、正岡孝治、伊藤真介、望月正人：ステレオ画像法による三次元溶接変形計測法の開発、溶接学会春期全国大会講演概要、Vol.84, pp.22-23、2009年11月17日、大阪、2009年9月9日、徳島

⑤ 恩田尚弘、柴原正和、伊藤真介、正岡孝治：デジタルカメラを用いた三次元溶接変形のIn-situ全視野計測法の開発、溶接学会秋期全国大会講演概要、Vol.85, pp.56-57、2009年9月9日、徳島

⑥ 伊藤真介、柴原正和、望月正人、村川英一：二相流分離器における成形鏡板とパイプ溶接部の変形予測、溶接学会秋期全国大会講演概要、Vol.85, pp.54-55、2009年9月9日、徳島

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://blade04.marine.osakafu-u.ac.jp/~lab03/index.htm>

6. 研究組織

(1)研究代表者

柴原 正和 (SHIBAHARA MASAKAZU)

大阪府立大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20350754