

デジタルカメラを用いた溶接面内変形のIn-situ全視野計測*

柴原 正和**, 山口 晃司***, 恩田 尚拔****, 伊藤 真介*****, 正岡 孝治*****

Studies on In-situ Full-field Measurement for In-plane Welding Deformation Using Digital Camera*

by SHIBAHARA Masakazu**, YAMAGUCHI Koji***, ONDA Takahiro****,
ITO Shinsuke***** and MASAOKA Koji*****

The technique which can measure the transient welding deformation directly is very important to investigate the mechanism of welding deformation. In this study, in-situ displacement measurement method using digital camera is self-developed. This system is non-contact type and it doesn't need any complicated optical systems but it can measure the in-situ displacement over the full-field in high accuracy by using digital image correlation technique. Therefore, it is considered to be useful and easy to apply to practical problems. The number of measuring points that can be obtained at a time is more than 10 million. It is the same as the available pixels of the digital camera. Furthermore, since the active light source is not necessary in this system, the influence of the fluctuation of the atmosphere caused by the high temperature area is small.

In this study, the detail of the proposed system is performed and it is applied to the transient in-plane deformation problem under very high brightness lightened by welding arc. Through the comparison between the experiment and Thermal-elastic-plastic FE analysis, the validity of the transient transverse shrinkage distribution which is measured by proposed system is verified. The residual deformation is also investigated to check the accuracy and usefulness of the proposed system.

Key Words: In-situ measurement, Digital image processing, Digital image correlation, Full field measurement, Normalized correlation, sub-pixel matching, Welding deformation, Transient deformation

1. 緒 言

溶接中における変位挙動は、溶接変形や溶接残留応力の発生メカニズムを知る上で、非常に重要な情報である。これまで、その挙動を知るためには、熱弾塑性解析による有限要素法に代表される数値解析により予測するのが一般的であり、直接測定法としては、目黒らによる ESPI システム¹⁾によりその可能性が示されているのみである。ただし、ESPI システムを用いた手法では、変位増分を高精度に計測できる一方で、レーザー光源や精密な光学系を必要とするため高価であり、測定範囲等の測定条件における制約が多い。また、レーザー光を計測対象部に照射し、その反射光を精確に受光する必要があるため、アークによる強光度下での計測は、困難であると考えられる。

そこで本研究では、実用的かつ実施工への適用が容易な

方法として、安価でかつ特殊な装置を必要としない、デジタルカメラを用いた変位挙動の測定法を独自に構築した。本手法の特徴としては、非接触かつ撮影した画像全域に渡り変位挙動を時系列に沿って計測可能である点が挙げられる。また、計測装置が非常に簡便で、かつレーザー等の特殊な光源を必要としないため、溶接時の温度上昇に伴う大気の影響を受けにくく、さらに画像照合法²⁻⁵⁾の技術を基に画像解析しているため、大変形の計測においても適用可能である。その上、すべての画素を計測点として用いることができるため、一度に取得可能な計測点数は、カメラの有効画素数と同じ1000万点以上であり、カメラの画素分解能の向上と共に計測精度の向上が見込まれるため、将来性にも期待できる手法である。

本研究では、構築された計測法を、アークによる強光度下における変位挙動の時系列計測に適用し、結果として得られた横収縮分布の時時刻歴について、熱弾塑性有限要素法を用いて妥当性検証を行った。さらには、残留変形についても検討し、本手法のもつ計測精度および有用性について検証した。

2. デジタルカメラを用いた In-situ 全視野変形計測システム

本手法では、時刻歴に沿って連続する複数枚のデジタル画像を撮影し、取得した画像を基に、画像相関法を用いて、画像の微小移動量すなわち変位量をピクセル単位で算出する。また、計測された変位の精度をピクセル単位以下に向

*受付日 平成20年12月10日 受理日 平成21年4月12日

**正 員 大阪府立大学大学院工学研究科 Member, Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

*** 研究当時, 大阪府立大学大学院工学研究科 Graduate school of Engineering, Osaka Prefecture University

**** 大阪府立大学工学部 School of Engineering, Osaka Prefecture University

*****正 員 大阪大学大学院工学研究科 Member, Graduate School of Engineering, Osaka University

***** 大阪府立大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

上させるため、ピクセル位置における輝度相関値の分布を曲面近似し、得られた相関曲面の最大値をサブピクセル変位⁶⁻⁸⁾とする。ここで得られたサブピクセル変位量を基に、2.4 節では、溶接面内変形を全視野に亘り In-situ 計測するシステムを提案する。

2.1 画像照合法

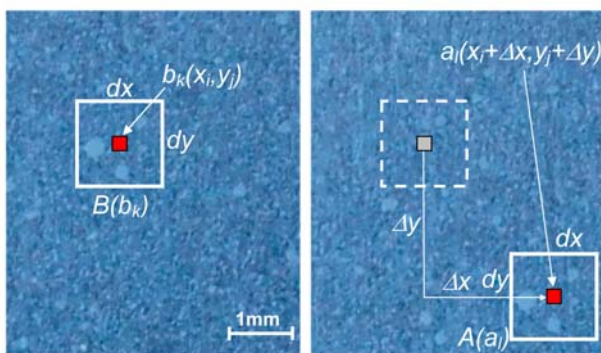
本手法では、2 枚の画像中の各画素点の移動量を画像照合法²⁻⁵⁾により算出する。具体的には、Fig. 1 (a) に示すような変形前の画像である基準画像における微小領域と、最も類似性の高い領域を、Fig. 1 (b) で示される変形後の画像である比較対象画像において検出する。その方法を以下に示す。

- (1) 基準画像中におけるある画素位置 $b_k(x_i, y_j)$ を中心とする $dx \times dy$ の微小領域を設定する。この領域をサブセット領域と称し $B(b_k)$ と定義する。
- (2) 比較対象画像においても、同様にして、画素位置 $a_i(x_i + \Delta x, y_j + \Delta y)$ を中心にした $dx \times dy$ の微小領域である比較対象画像中のサブセット領域 $A(a_i)$ を設定し、 $B(b_k)$ と $A(a_i)$ の輝度相関値 $R(b_k, a_i)$ を、画像相関法を用いて求める。
- (3) $A(a_i)$ を 1 画素ずつずらしながら画像領域内全域の輝度相関値 $R(b_k, a_i)$ を求める。

2.2 正規化相関法

サブセット領域同士の相関性を評価する手法は、画像照合分野で数多く提案されているが、本研究では、照合時において、各ピクセルの輝度値からサブセット内の平均輝度値を引くことで、残差自乗和相関⁹⁾等と比べて光源位置の変化や光量変化時等の照度変化に対するロバスト性が高いと考えられる正規化相関法⁹⁻¹²⁾を採用した。次式に正規化相関法における輝度相関値 $R(b_k, a_i)$ を示す。

$$R(b_k, a_i) = \frac{\sum_{s=-n}^n \sum_{t=-m}^m \{a_i(x_i + \Delta x + s, y_j + \Delta y + t) - a_i^*\} \{b_k(x_i + s, y_j + t) - b_k^*\}}{\sqrt{\sum_{s=-n}^n \sum_{t=-m}^m \{a_i(x_i + \Delta x + s, y_j + \Delta y + t) - a_i^*\}^2} \sqrt{\sum_{s=-n}^n \sum_{t=-m}^m \{b_k(x_i + s, y_j + t) - b_k^*\}^2}} \quad (1)$$



(a) Base image (b) Corresponding image
Fig. 1 Basic procedure of digital image correlation.

ただし、 $2n=dx-1$, $2m=dy-1$ であり、 a^* , b^* はサブセット内における輝度の平均値である。なお、輝度相関値 $R(b_k, a_i)$ の値は 1 に近づく程相関が高い、つまり類似性が高いと言える。

2.3 曲面近似を用いたサブピクセル変形計測法

2.2 節で紹介した方法を用いて計測できる変位はピクセル単位であるが、実構造物の変形計測においてはより高い精度が要求される。そこで、画像相関法により得られた変位解の精度をピクセル単位以下、すなわちサブピクセルにする方法について説明する。

前節により得られた輝度相関値 $R(b_k, a_i)$ が最大、すなわち相関性の最も高いピクセル単位の照合位置 $(x_i + \Delta x, y_j + \Delta y)$ を基準として、 x, y 方向の ± 1 画素ずつをそれぞれ加えた計 3×3 点における輝度相関値を用いて、次式により示される最小自乗曲面 $g(x, y)$ を作成する。

$$g(x, y) = ax^2 + bx + cy^2 + dy + exy + f \quad (2)$$

ただし $a \sim f$ は最小自乗法により得られる係数である。これを x 方向のみについて模式的に示した図が Fig. 2 である。この曲面 $g(x, y)$ が最大となる時の座標 (x_k, y_k) が、サブピクセル単位での照合位置であり、また、基準画像中における画素位置 $b_i(x_i, y_j)$ との差がサブピクセル計測変位 (u_k, v_k) である。以上の方法を基準画像の全画素について繰り返し適用することにより、画像内全体のサブピクセル計測変位分布 $\{u\}$ が得られる。

2.4 変位増分型変形計測システムと全変位型変形計測システム

本研究において構築したデジタルカメラを用いた In-situ 全視野変形計測システムの流れを模式的に示した図が Fig. 3 である。本研究においては、2 通りの変形計測システムを提案する。1 つ目は、溶接開始前から溶接中を経て冷却後に至る N 枚の画像を撮影し、それらを時系列に沿って並べ、

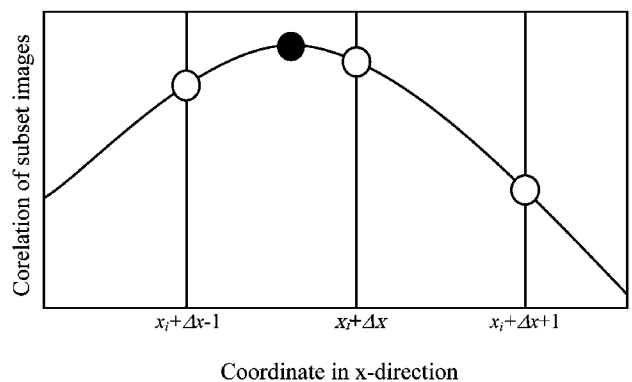


Fig. 2 Basic procedure of curve approximation for sub-pixel measurement.

連続する2枚の画像を用いて画像解析することにより変位増分ベクトルを算出し、その後、それらを足し合わせて変位ベクトル $\{u\}$ を得る変位増分型変形計測システムである。一方、2つ目の手法は、溶接開始前に取得した変形前の画像を基準にし、上述と同様にして得られた複数枚の画像すべてとの間で画像解析することにより直接的に全変位量を求める全変位型変形計測システムである。

変位増分型変形計測システムは、大変形時のように画像の変形が大きく、画像照合が困難な場合に有効であるが、撮影環境等の影響で、変位増分が途中で途切れるような場合には、その後の計測が不可能になるといった欠点を有する。一方、全変位型変形計測システムは、変形前の画像の性質により精度が影響されやすい点に注意が必要であるが、溶接途中の画像それぞれを独立に扱うため、一度、計測不能になった箇所でも、その後の計測が可能になるという利点を有する。

今回の計測では、溶接トーチにより、溶接部付近の画像が遮断される場合があり、また、溶接時において強光度なアーク光の存在により、試験片表面における変位場が乱れる場合があることを予備実験の段階で確認したため、以後の計測においては、全変位型変形計測システム（以下、画像計測と称す）を用いることにした。

3. 溶接面内変形の In-situ 全視野計測

次に本手法の適用性について検討するため、本手法をビ

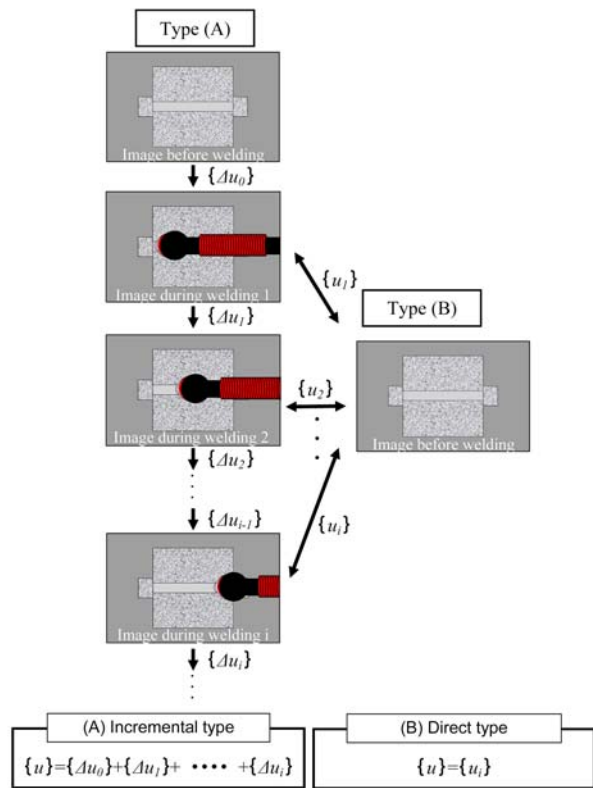


Fig. 3 Two types of displacement measurement method using digital images.

ードオンプレート溶接中およびその冷却過程に適用し、溶接面内変形の In-situ 計測を実施した。また、参考までに、実験と試験片寸法および溶接条件等がほぼ対応した FEM 熱弾塑性解析を実施し、溶接中における変形履歴の定性的傾向について検証を行った。解析に用いた材料定数の温度依存性を Fig.4 に示す。ただし、各定数は、以下の通りである。

α : 線膨張係数, E : ヤング率, σ_y : 降伏応力, ν : ポアソン比, c : 比熱, ρ : 密度, λ : 熱伝導係数, β : 熱伝達係数

なお、同図に示した材料定数は一般的な軟鋼材の材料定数であるため、実験に使用した SM490 材の材料定数とは一致していないが、溶接による熱サイクルに伴う変形傾向を知る上では有用であると考え、比較対象として用いた。

3.1 実験および溶接条件

試験片の形状および寸法を Fig. 5 に示す。試験片寸法（長さ $L \times$ 幅 $B \times$ 厚さ h ）は $120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ であり、始末端部には $10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ のタブ板を設置している。また、今回の計測では面内変形のみを計測対象とするため、単位溶接長あたりの入熱量を、板厚に対して比較的大きい $Q_{net} = 597.4 \text{ J/mm}$, $Q_{net} = 697.0 \text{ J/mm}$, $Q_{net} = 786.4 \text{ J/mm}$

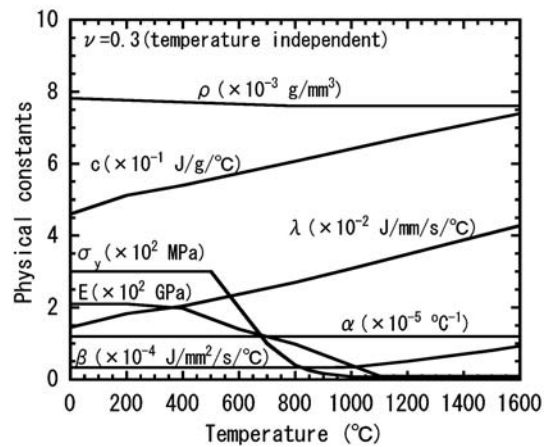


Fig. 4 Temperature dependent physical constants used in FEM.

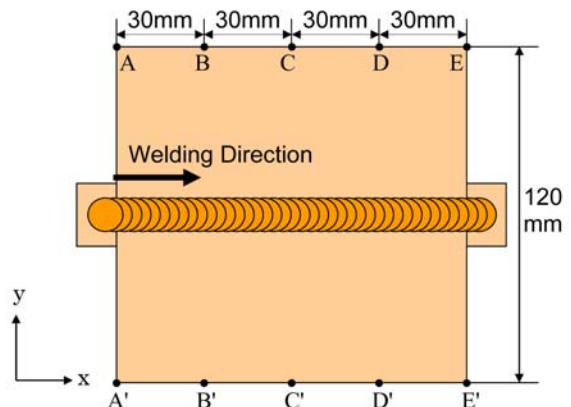


Fig. 5 Shape and size of welding test specimen.

とし溶接速度は $v=100 \text{ mm/min}$ とした。

3.2 実験方法

計測装置、溶接装置および試験片等の配置を Fig. 6 に示す。あらかじめ、試験片表面には画像照合精度の向上のため、白色スプレーによりランダムパターンを塗布した。また、同図に示すように、デジタルカメラに対し試験片全体が水平になるように設置した。また、比較的自由に变形できるように、試験片の拘束は特にせず銅板上に設置した。なお、画像は溶接トーチによる加熱面と同じ側から撮影するため、溶接中にはアーク光による強光度下に曝されることになる。

計測時には、まず、基準画像として、溶接前の画像を撮影した。次に、溶接を開始し、約 8 秒間隔に溶接中の画像を撮影した。その後、同間隔で撮影を続け 330 秒後に撮影

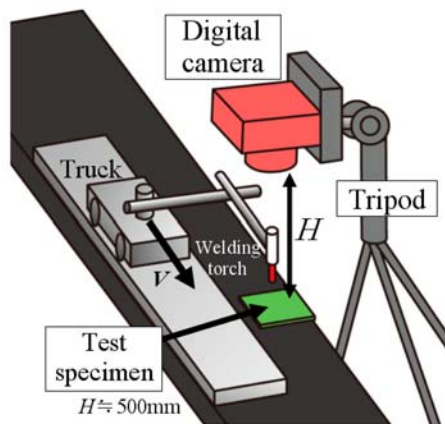


Fig. 6 Experimental equipment.

を終了した。なお、実験に用いたデジタルカメラの解像度は約 1210 万画素であり、撮影画像の 1 ピクセルあたりの大きさは約 $44 \mu\text{m}$ である。また、第 2 章で示したサブセットの大きさは $dx \times dy = 30 \times 30$ ピクセル、すなわち、約 $1.32 \text{ mm} \times$ 約 1.32 mm とした。

なお、FEM 熱弾塑性解析においては、Fig. 7 に示す要素分割および拘束条件を用い、熱源としては、溶接線方向長さ $10 \text{ mm} \times$ 幅 6 mm の矩形領域の移動熱源を仮定した。

3.3 溶接面内変形の In-situ 全視野計測結果

3.3.1 溶接中における変位分布

Fig. 8 に、本実験において撮影された $Q_{net} = 597.4 \text{ J/mm}$ の場合における画像の一部を示す。(a) は、溶接前における撮影画像（基準画像）であり、(b)~(d) は、溶接中における撮影画像である。また、(e)~(g) は冷却過程における撮影画像

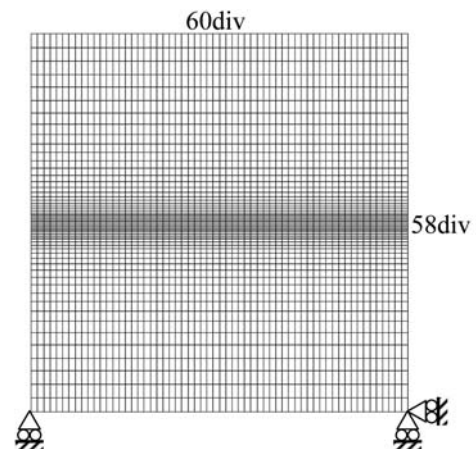


Fig. 7 FE mesh division and geometrical boundary condition.

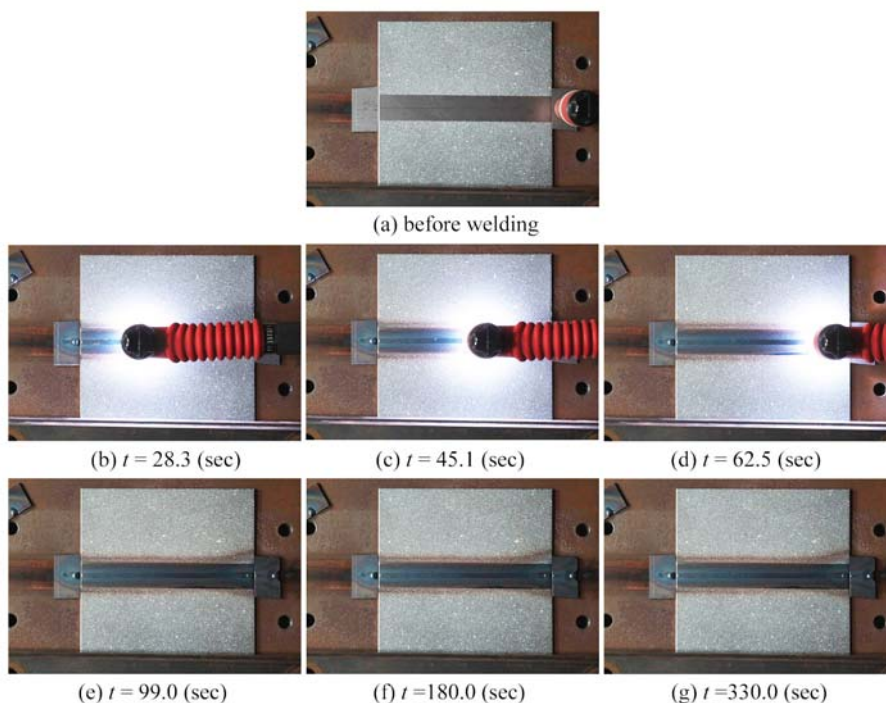


Fig. 8 Sample photos used in measurement.

である。なお t は、溶接開始時からの経過時間を示す。(b)～(d)より、溶接中におけるトーチの移動が確認でき、強光度であるアーク光の影響で、トーチ周辺が白く光っていることが確認できる。また、(e)～(g)より、冷却過程における試験片は、一見したところ変化が無いように見える。

Fig. 9 (a) に、画像計測により得られた溶接中における y 方向変位分布を变形図と共に示す。Fig. 9 (b) には、参考のため、FEM 熱弾塑性解析から得られた y 方向変位分布を变形図と共に示す。Fig. 9 (a) は、FEM 熱弾塑性解析結果との比較のため、境界条件が一致するよう座標変換を行った。すなわち、計測領域の右下端点において $x=0, y=0$ とし、左下端点において $y=0$ とした。同図より、溶接トーチおよびそれを支える治具が比較対象画像に写っている部分については、画像照合ができておらずその周辺の変位分布にバラツ

キが見られるが、それ以外の部分については、連続的な変位分布が計測できていることが分かる。また、図中 A で示される始端部付近における熱膨張や、図中 B で示される溶接トーチの通過直後における収縮変位分布が検出できていることが確認できる。この収縮変位分布の検出結果は、高温割れの基となる凝固直後の収縮ひずみ分布や相変態ひずみ分布を計測できる可能性を示唆するものであると考えられる。さらに、Fig. 9 (a) および Fig. 9 (b) から画像計測による結果と FEM 熱弾塑性解析の結果が、試験片全体の变形傾向という点において、良好に一致していることが確認できる。

次に、Fig. 9 の場合と同時刻における x 方向の変位分布を Fig. 10 (a) に示す。Fig. 10 (b) には、FEM 熱弾塑性解析の結果を示す。Fig. 10 (a) の結果より、 x 方向変位分布は、 y 方

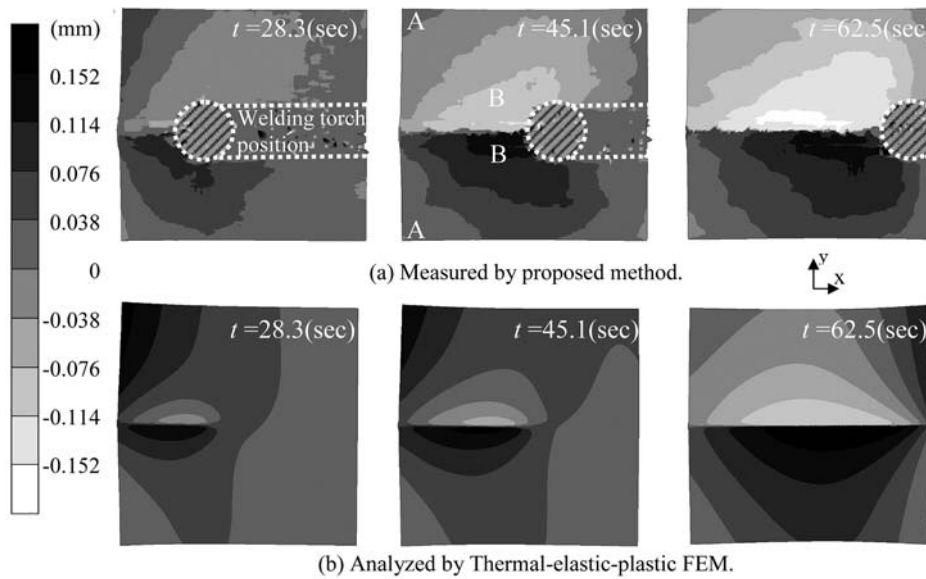


Fig. 9 Distribution of displacement in y direction during heating.

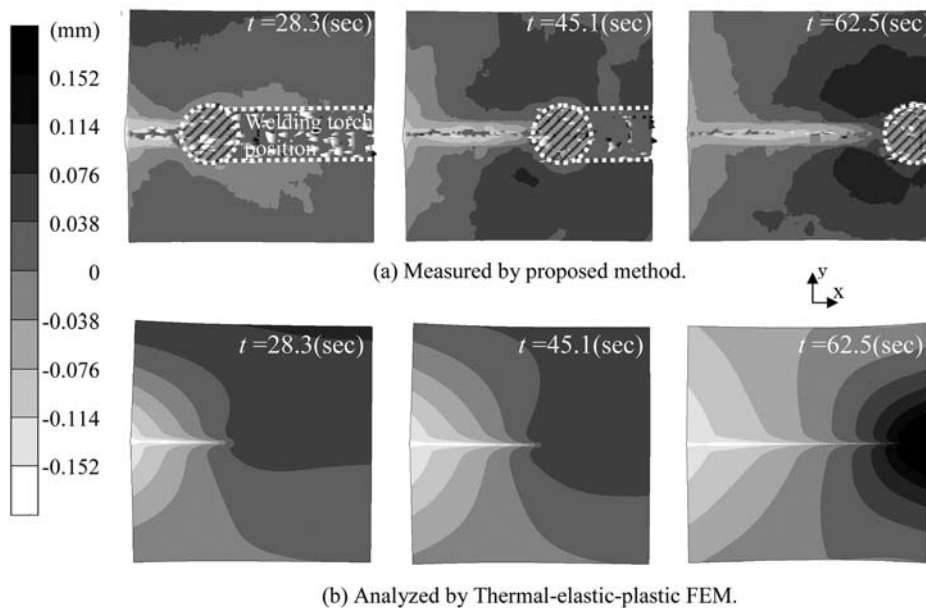


Fig. 10 Distribution of displacement in x direction during heating.

向変位分布に比べて変位量が小さい分だけバラツキが大きいが、画像計測の結果と FEM 熱弾塑性解析の結果は変形傾向という点において良好に一致していると言える。なお、今回の解析において、変形前後の画像計 2 枚を画像照合するのに必要な時間は PentiumD 2.4 GHz, メモリ 2 GB の PC を用いて 90 秒程度である。

3.3.2 冷却過程における変位分布

Fig. 11 (a) に、画像計測により得られた冷却過程における y 方向変位分布を示す。この結果より、冷却が進行するにつれて、溶接線より上部における y 方向変位が負方向に増加し、横収縮している様子が確認できる。また、この現象は、終端部ほど顕著であることが確認できる。この傾向は、Fig. 11 (b) に示す FEM 熱弾塑性解析の結果と非常に良く一致することが確認できる。

次に、画像計測により得られた冷却過程における x 方向

の変位分布を示した図が Fig. 12 (a) である。この結果も、FEM 熱弾塑性解析結果である Fig. 12 (b) と良く対応していると言える。

以上により、本手法を用いることで、溶接開始時から冷却過程を経て冷却後に至るまで、アーク光による強光度下を含め、撮影領域ほぼ全域に亘り滑らかな変位分布を取得できることが分かった。

3.3.3 横収縮の時間履歴

次に、Fig. 5 に示す試験片の A-A', B-B', C-C', D-D', E-E' における横収縮の時間履歴を画像計測により算出した。横収縮とは、A 点, B 点, C 点, D 点および E 点における y 方向変位量から A' 点, B' 点, C' 点, D' 点および E' 点における y 方向変位を引いた量と定義した。その結果を Fig. 13 に示す。この結果より、始末端部付近すなわち A-A' および E-E' においては、y 方向の拘束が小さいため、熱源到達時

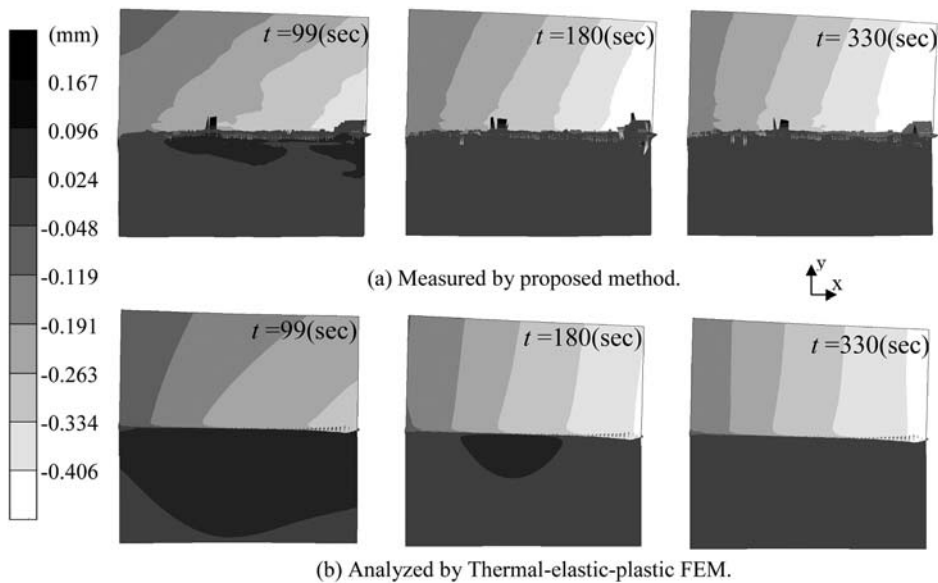


Fig. 11 Distribution of displacement in y direction during cooling.

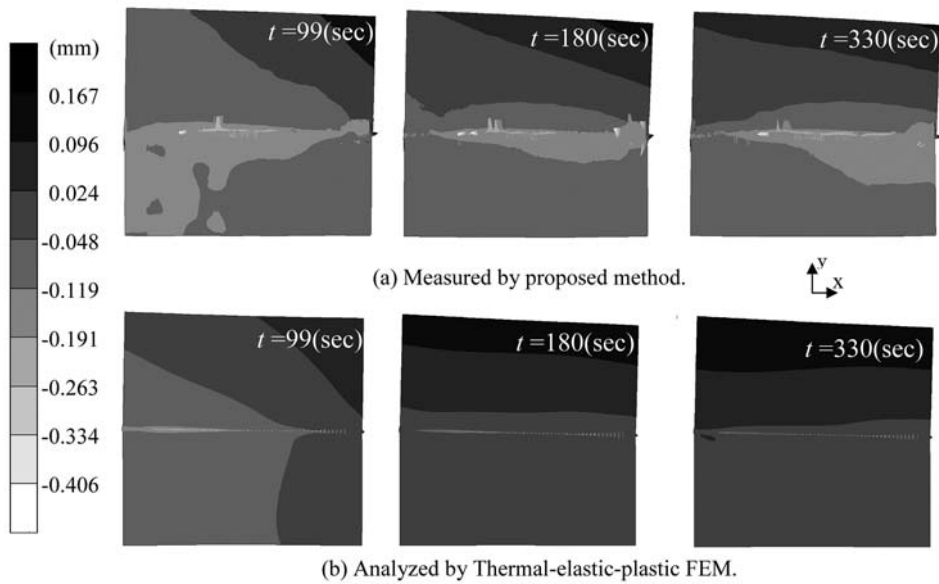


Fig. 12 Distribution of displacement in x direction during cooling.

に熱膨張が顕著に現れていることが分かる。また、どの計測点においても、ほぼ連続的な横収縮の時間履歴が計測できていることが確認できる。さらに、Fig. 14には、Fig. 13に対応するFEM熱弾塑性解析結果を示す。この結果からも、熱源到達時における始末端部の膨張が確認できる。また、画像解析結果およびFEM熱弾塑性解析結果の両者より、終端部ほど残留収縮量が大きくなっているという同様の結果が得られた。以上の結果は、本手法が溶接変形のメカニズムを知る上で、有効な手段になり得ることを示唆するものである。

3.3.4 残留横収縮分布

本手法の定量的な妥当性検証のために、冷却過程における画像計測後しばらく計測を続け、試験片全体が完全冷却した後に残る残留横収縮分布について調べた。その結果をFig. 15に示す。また、図中の実線は入熱量が $Q_{net}=597.4$ J/mmの場合を示し、破線が $Q_{net}=697.0$ J/mmの場合、点線が $Q_{net}=786.4$ J/mmの場合を示す。これらの結果より、いずれのケースにおいても収縮量は始端で小さく、終端で大きいことが確認できる。この理由としては、溶接速度が $v=100$ mm/minと比較的遅く、トーチ前方への熱拡散により終端部

ほど力学的溶融領域が大きくなっているためと考えられる。

次に、得られたy方向変位分布の妥当性について検証を行う。ただし前述の通り、本手法以外の方法で、面内の連続的な変位分布を詳細に得ることは容易では無いため、ここでは、面外方向の形状測定によく用いられる、三次元形状計測システム（面内移動精度 $25\mu\text{m}$ ）を使用し横収縮量を測定した。その測定方法としては、Fig. 16中の右下図に示すように、LAF-3Dのx-yステージを揺動させながらA-E部およびA'-E'部を移動させ、固定してあるレーザー変位計により溶接前後におけるA-E部およびA'-E'部それぞれの外形を求め、得られた外形線を差し引くことにより横収縮分布を求める方法を採用した。その結果をFig. 16に示す。Fig. 15およびFig. 16の両者を比較すると、終端部ほど収縮量が大きくなる点、および始末端部における横収縮量がほぼ一致する点において、両者は良好に一致していると言え、本手法により得られた横収縮分布は妥当であると考えられることができる。

以上、本研究より得られた結果は、本手法を用いることで、これまでFEM熱弾塑性解析等の数値解析的手法のみでしか予測することしかできなかったアークによる強光度下

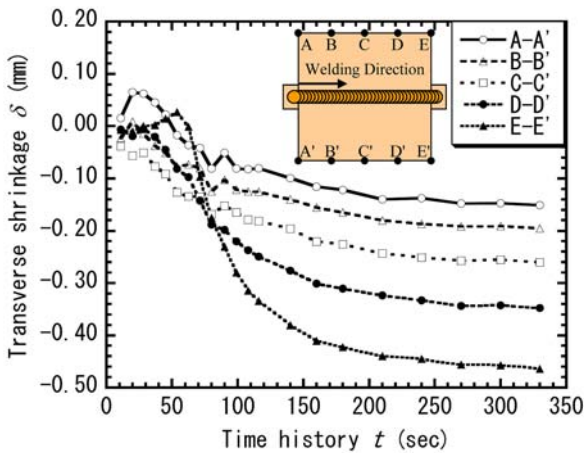


Fig. 13 Time history of transverse shrinkage measured by proposed method.

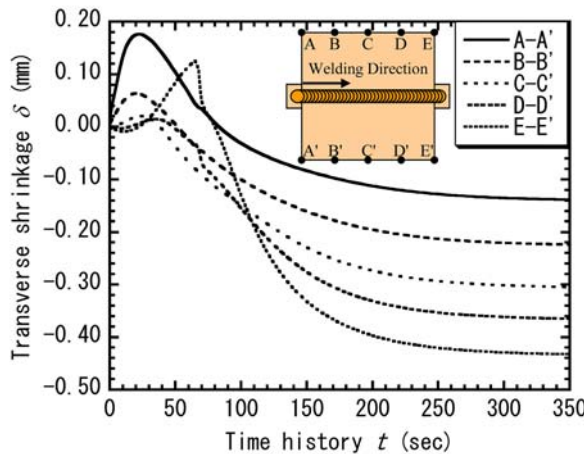


Fig. 14 Time history of transverse shrinkage computed by Thermal-elastic-plastic FEM.

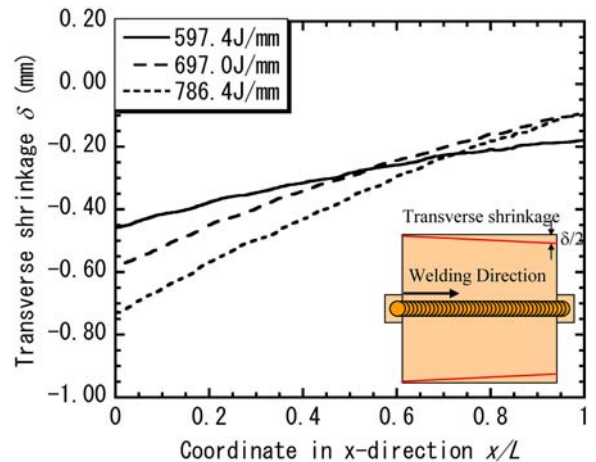


Fig. 15 Transverse shrinkage distribution measured by proposed method.

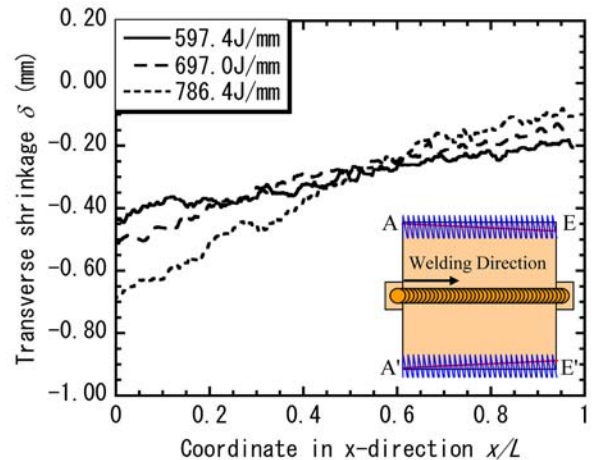


Fig. 16 Transverse shrinkage distribution measured by Laser Displacement Sensor.

における高温部の変位挙動を、非接触かつほぼ全視野に亘り高精度に実測可能なことを示しており、例えば、溶接トーチ通過直後に発生する可能性のある高温割れに関する高温ひずみ^{13, 14)}および凝固収縮ひずみ¹⁵⁾の定量的評価や高温割れのリアルタイム検出、さらには、冷却過程における相変態挙動の検出¹⁶⁻¹⁸⁾においても効果を発揮する可能性があると考えられる。また、溶接途中における溶接変形の定量的評価が可能になるため、溶接変形発生メカニズムの検討においても強力な手段になり得ると考えられる。その上、これまで困難であった、溶接過渡期におけるFEM熱弾塑性解析結果の定量的な妥当性検証手段としても利用可能であると考えることができ、本手法の今後の発展に期待が持てると考えられる。

4. 結 言

本研究では独自に開発したデジタルカメラを用いた In-situ 全視野変形計測システムを、溶接中、冷却過程および冷却後における変位分布の計測に適用した結果、以下の結論を得た。

1. 提案手法を用いることで、溶接時における変位挙動を、ほぼ全視野に亘り非接触かつ高精度に計測可能なことを示した。
2. 提案手法を用いて、溶接中および冷却過程における横収縮分布および縦収縮分布を計測した結果、変形傾向という点において、FEM熱弾塑性解析結果と良好に一致することが確認できた。
3. 提案手法を用いることで、横収縮分布の時刻歴が計測可能であることを示した。
4. 残留横収縮分布において、提案手法による結果と実測値が定量的に一致することを確認した。

謝 辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金(若手研究(B), 課題番号16760655)の援助で行った。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) S. Meguro and Y. Muramatsu: Application of ESPI System to Welding, Quar. J. JWS, 24-3 (2006) 247-252. (in Japanese)
- 2) H. Hasegawa and E. Shimizu: Discussion on Face Image Identification using Pattern Matching, ITEJ Technical Report, 16-47 (1992) 49-56. (in Japanese)
- 3) T. Ryugo, S. Kaneko, S. Igarashi, A. Miyamoto and S. Kamewada: Robust Registrations by Rank and its Application to Estimating Velocity Field of Underground Water, Technical report of IEICE. PRMU, 101-124 (2001) 47-52. (in Japanese)
- 4) K. Machida and T. Hirano: Stress Analysis around the Crack-Tip of Homogeneous Material by Speckle Photography and Image-

- Processing, Transactions of the Japan Society of Material Engineers 66-641 (2001), 137-143. (in Japanese)
- 5) K. Murata, M. Masuda and M. Ichimaru: Analysis of Radial Compression Behavior of Wood Using Digital Image Correlation Method, Mokuzai Gakkaishi, 5-45, (1999), 375-381. (in Japanese)
- 6) M. Uneda, M. Shibahara, M. Matsuishi, S. Iwata, K. Kitamura and K. Ishikawa: Studies on Non-Contact Deformation and Measurement Technique of Structures using Sub-pixel Image Processing, Journal of the Japan Society of Precision Engineering 3-72, (2006) 360-365. (in Japanese)
- 7) M. Hagiwara and M. Kawamata: Detection of Subpixel Displacement for Image Using Phase-Only Correlation, IEICE technical report, (2001) 79-86. (in Japanese)
- 8) M. Hagiwara and M. Kawamata: Performance Evaluation of Subpixel Displacement Detection for Images Using Phase-Only Correlation, 第16回デジタル信号処理シンポジウム講演論文集, 3-6, (2001), 517-522. (in Japanese)
- 9) M. Ikeda, S. Yoshida, K. Nakashima, K. Katsura and H. Yoda: A Method for Termination of Normalized Correlation Operation to Accelerate Template Matching, 2, (1997), 439-440. (in Japanese)
- 10) F. Saito: Image Template Matching by Selecting Block Areas Based on Normalized Correlation Rates, Journal of the Japan Society of Precision Engineering, 67-8, (2001), 1271-1275. (in Japanese)
- 11) T. Sato and M. Anan: Template Matching in Color Image, IEICE technical report. Pattern recognition and understanding, 94-294, (1994), 1-6. (in Japanese)
- 12) M. Ikeda, S. Yoshida, K. Nakashima, N. Hamada and H. Yoda: High Speed Template Matching by Monotonized Normalized Correlation, 83-D-II-9, (2000), 1861-1869. (in Japanese)
- 13) K. Shinozaki, M. Kitamura, M. Yamamoto, A. Takata, S. Kamikariya, Y. Otori and M. Shirai: Three Dimensional Thermal Elastic-plastic Strain Analysis for Laser Welding: Prediction of Hot Crack Initiation of Laser Weldment of Ni-base Superalloys (Report 3), Pre-Prints of the National Meeting of JWS, 75, (2004), 54-55. (in Japanese)
- 14) K. Shinozaki, M. Kitamura, M. Yamamoto, A. Takata, S. Kamikariya, Y. Otori and M. Shirai: Study on Evaluation Method of Liquation Crack Initiation using Elevated Temperature Strain: Prediction of Hot Crack Initiation of Laser Weldment of Ni-base Superalloys (Report 4), Pre-Prints of the National Meeting of JWS, 75, (2004), 56-57. (in Japanese)
- 15) T. Inoue, Y. Ohmi and S. Sawamoto: Laser Weldability of High Carbon Steels, Denso Technical Review, 5-2, (2000), 48-53. (in Japanese)
- 16) Y. Muramatsu, S. Kuroda and H-G. Grob: Detection of Strain Behavior during Phase-transformation in Welds by the Laser Speckle Method: Application of the Laser Speckle Method to Strain Measurement in the Welding Process (Report 3), Quar. J. JWS, 14-4 (1996) 741-747. (in Japanese)
- 17) M. Mochizuki, S. Matsushima, Y. Morikage, T. Kubo and M. Toyoda: Study on Residual Stress Reduction by Using Phase Transformation Phenomena in Welding Material: Studies on Numerical Simulation of Temperature, Microstructure, and Thermal Stress Histories during Welding Process and Their Application to Welded Structures (Report 2), Quar. J. JWS, 23-1 (2005) 112-121. (in Japanese)
- 18) Y. Ueda, Y. C. Kim, C. Chen and Y. M. Tang: Mathematical Treatment of Phase Transformation and Analytical Calculation Method of Restraint Stress-Strain, Quar. J. JWS, 2-1 (1984) 89-91. (in Japanese)