

溶接中における三次元変形の時系列全視野計測*

柴原 正和**, 恩田 尚拓***, 伊藤 真介****, 正岡 孝治*****

Full-field Time-series Measurement for 3-Dimensional Deformation under Welding*

by SHIBAHARA Masakazu**, ONDA Takahiro***, ITOH Shinsuke**** and MASAOKA Koji*****

Displacement during welding provides important information to understand the mechanisms of welding deformation and residual stress. In particular, if welding deformation can be measured sequentially and the displacement distribution over full-field can be measured such as the results obtained by finite element analysis, they can be valuable information. Therefore, in this study, 3-dimensional deformation (in-plane and out-of-plane deformation) measurement method is developed using a digital camera, which requires no special equipment. This method is a non-contact method and it can sequentially measure over the entire photographed image. Furthermore, since image analysis is based on the technique of image matching, the method is applicable even when measuring deformation is large. In addition, since it is possible to use all pixels as measuring points, the number of available measuring points at one time is the same as the number of effective pixels of the camera. This is currently more than 15 million points, and the measuring precision is expected to increase as the camera pixel resolution continues to increase. Therefore, this method is expected to have future potential.

In this study, proposed method is applied to the sequential measurement of displacement under the strong lighting levels in arc welding. By comparing the time history of transverse shrinkage, longitudinal shrinkage and angular distortion with the results of FEM thermo-elastic plastic analysis, the qualitative validity of the proposed method is verified. To investigate the measurement precision and usefulness of the method, a 3-dimensional shape measurement system (LAT-3D) using a laser displacement gauge and digital caliper are used. The distributions of residual transverse shrinkage and residual angular distortion are measured by the proposed method, LAT-3D and digital caliper. Through the comparison of the results measured by these methods, quantitative validity of the proposed method is also verified.

Key Words: 3D measurement, Digital image processing, Digital image correlation, Stereo imaging technique, Welding deformation, Angular distortion, Transverse shrinkage

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。特に広範囲に亘り、時系列的に溶接変形を計測することができ、有限要素法の解析結果として得られるような計測対象全域に亘る変位分布を計測することができるならば、その結果を基に溶接時の変形状態を把握することにつながり、非常に多くの有益な情報を得ることができると考えられる。

そこで本研究では、実用問題に対し、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三次元変形計測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る三次元的な変位挙動すなわち面内変形および面外変形を時系

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流れ等の影響を受けにくく、さらに画像照合法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、1500万点以上であり、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、アーキ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量、縦収縮量、角変形量の時間履歴と、FEM熱弾塑性解析の結果とを比較することにより本手法の定性的な妥当性について検討した。また、構築された計測法により得られた残留横収縮分布および、残留角変形分布について、レーザー変位計を用いた3次元形状測定システム (LAT-3D) およびデジタルノギスを用いて、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. 三次元変形の時系列全視野計測

2.1 三次元変形時系列計測システム

本システムは、溶接前および溶接中において連続して撮

*受付日 平成22年4月8日 受理日 平成22年8月10日 平成21年11月溶接構造シンポジウム2009で発表

**正 員 大阪府立大学大学院 Member, Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

***学生員 大阪府立大学大学院 Student Member, Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

****正 員 大阪大学大学院 Member, Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

***** 正岡技術開発 Masaoka Technical Development

影した画像を用いて、三次元変形量を時系列的に算出するものである。その概要を Fig. 1 に示す。本手法では、まず、計測対象物の変形前の写真を 2 台のカメラを用いて撮影する。2 台のカメラの位置関係において、光軸が平行でなおかつ光軸周りのカメラ角が一致する場合には、ステレオ画像法の原理を用いて、計測対象物の三次元座標を得ることができ、この方法を広範囲な領域に対し適用することで、計測対象領域内の三次元形状を得ることができる。また、ステレオ画像法においては、2 枚の画像における位置どうしの対応付けを行う必要があるが、本研究ではその対応付けにサブピクセル処理を施した画像相関法¹⁻³⁾を適用した。この方法を、時系列に並べた画像に対し繰り返し適用することで、溶接前の任意の画素位置における三次元座標からの移動量、すなわち三次元変位量を算出することができる。ただし、一般的に変形前の任意の画素位置の点は変形後において画素間に移動する。そこで、変形前と変形後における同一カメラ (左カメラ) から撮影された 2 枚の画像を用いて、サブピクセル処理を施した画像相関法を適用することで、変形前後における対応点の探索を可能とした。

以上の手順を溶接開始時から冷却終了時まで繰り返すことにより、本研究の目的である三次元変形の時系列全視野計測を行うことができる。

2.1.1 ステレオ画像法の基礎原理

ステレオ画像法は、複数の異なる視点から同一の対象物の画像を撮影し、それらの視差から三角測量の原理を用いて対象物までの三次元座標を取得する手法である。本研究ではステレオ画像法の中でも特にシステム構成が単純でカメラパラメータによる誤差が少ないという利点を持つ両眼視差法を採用した。

両眼視差法は Fig. 2 に示すように、2 つの異なる方向から撮影した画像を用いる手法である。図中の f はレンズの焦点距離、 B は画像を取得する際のカメラ間距離である。ただし焦点距離の等しい 2 台のカメラを用いる必要がある。

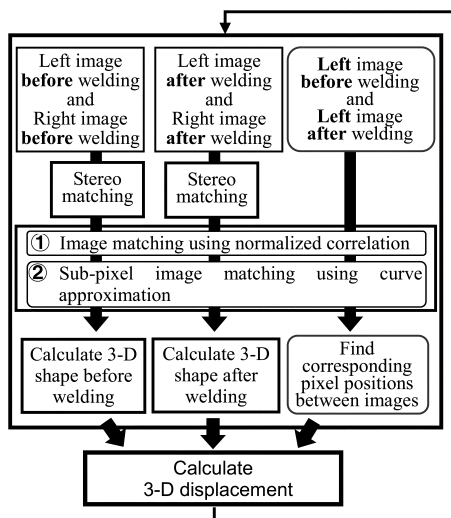


Fig. 1 Flow of proposed measurement method.

ここで、左右画像に投影される同一計測点の y 座標値は必ず等しくなるようカメラを設置するため、 $y_L=y_R$ となる。次に、左右のカメラ位置からの投影位置のずれである視差 x_L-x_R を d とおくと、三次元座標 (X, Y, Z) は次式で表される。

$$X=B(x_L+x_R)/2d \tag{1}$$

$$Y=By_L/d \tag{2}$$

$$Z=Bf/d \tag{3}$$

上式において、焦点距離 f とカメラ間の距離 B は計測時には自明となるので、両画像の対応点を正確に探索することにより、三次元座標を求めることができる。

2.1.2 正規化相関による画像相関法

本手法では、時刻歴に沿って連続する 2 枚の画像中の各画素点の移動量を画像照合法⁴⁻⁷⁾により算出する。具体的には、Fig. 3 (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. 3 (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) 基準画像中において、任意のある画素位置 $b_k(x_i, y_j)$ 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。サブセット領域同士の相関性

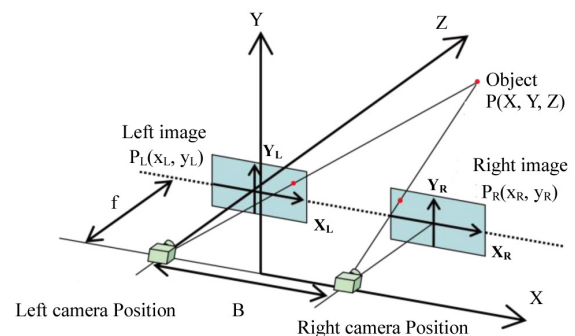


Fig. 2 Schematic illustration of binocular parallax.

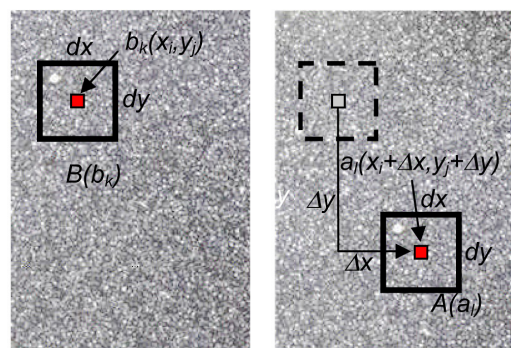


Fig. 3 Basic procedure of digital image correlation.

を評価する手法は、画像照合の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⁾等と比べて用い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⁸⁻¹⁰⁾を採用した。次式に正規化相関法における輝度相関値 $R(b_k, a_l)$ を示す。

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

(4)

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を示す。なお、輝度相関値 $R(b_k, a_l)$ の値は1に近づく程相関が高い、すなわち類似性が高いことを意味するものである。また、画像の変形や回転が大きな場合には、文献^{12, 13)}に示すアルゴリズムを導入する必要があるが、本研究においてはそれらの影響は小さいと考え、本項で示すアルゴリズムを採用した。

2.1.3 曲面近似を用いたサブピクセル処理

前項の手法で算出される視差は、ピクセル単位である。

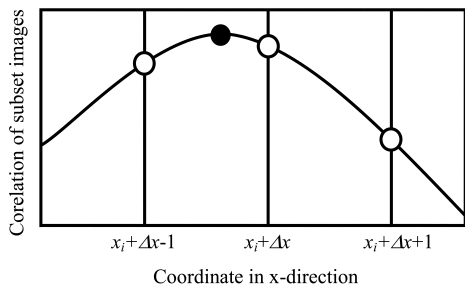


Fig. 4 Basic procedure of curve approximation for sub-pixel measurement.

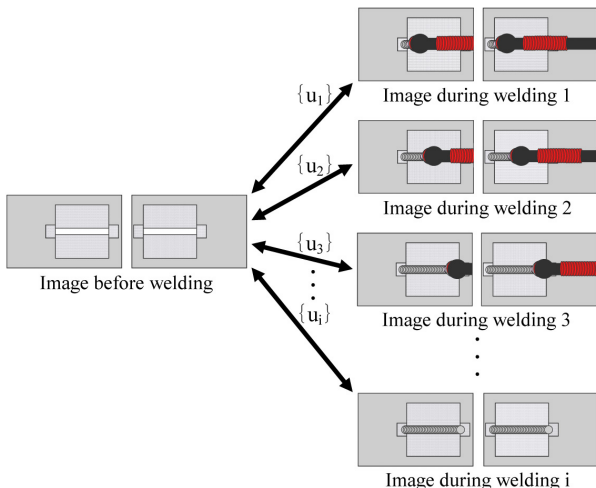


Fig. 5 Total displacement type of measurement method.

しかし一般に対応点はピクセル間に存在するので、三次元計測精度の向上のためにはピクセル単位以下、すなわちサブピクセル単位での対応点探索が要求される。本研究では輝度相関値 $R(b_k, a_l)$ の分布を最小自乗曲面に近似し、対応点探索を行った。以下にその方法について説明する。

まず、ピクセル単位で得られた対応点 $(x_i + \Delta x, y_j + \Delta y)$ と、その点を基準にして x, y 方向にそれぞれ ± 1 ずつずらした基準点周囲の画素の計9点の位置における輝度相関値を用いて次式で示される最小自乗曲面 $g(x, y)$ を作成する。

$$g(x, y) = ax^2 + bx + cy^2 + dy + exy + f \tag{5}$$

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. 4 である。この最小自乗曲面 $g(x, y)$ を最小値とする時の座標 (x, y) がサブピクセル単位での対応点である。以上の手法を全画素において繰り返し適用することにより画像全域におけるサブピクセル単位での対応点を算出することが可能となる。

2.2 全変位型変形計測システム

Fig. 5 に本研究で採用した全変位型変形計測システムの流れを示す。本手法では、溶接開始前に取得した変形前の画像を基準にし、溶接中を経て冷却後に至る 2N 枚の画像を撮影して得られたすべての画像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ことができる。

全変位型変形計測システムは、変形前の2枚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。

3. 溶接中における三次元変形の全視野計測

3.1 実験方法および実験装置

本節では、ステレオ画像法を用いた溶接変形その場計測を実施するにあたり、必要な実験システムについて説明する。本システムでは、カメラ2台、三脚2台およびアルミニウム製梁を Fig. 6 のように組み上げ、試験片上方から試

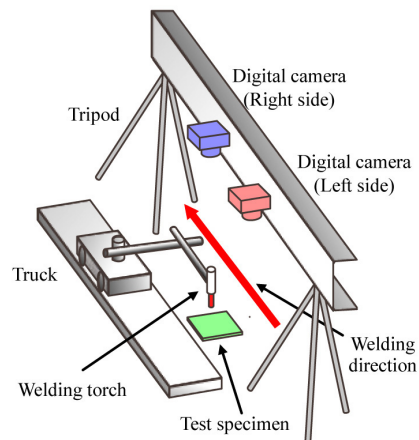


Fig. 6 Experimental equipment.

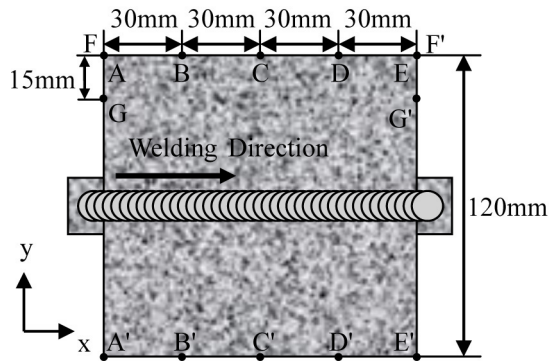


Fig. 7 Shape and size of welding test specimen.

験片に正対する形で撮影する。それを時系列ごとに、左右 2つのカメラから変形前後 2枚ずつ撮影することにより、試験片の三次元的な変形を計測する。用いた試験片には、水性スプレーを塗布することによりランダムパターンを付与し、画像照合時の照合精度を高める工夫をした。

使用した試験片の寸法を Fig. 7 に示す。試験片の長さは 120 mm、幅は 120 mm、板厚は 5.8 mm である。材料は、SM490A を用いた。また、溶接トーチを等速走行台車に固定し、溶接トーチから試験片へ安定して入熱されるようにした。試験片の設置に関しては、比較的無拘束かつ、試験片の表裏面全体から熱伝達するよう、試験片の下部を三点支持するよう治具を用いて工夫し、次節で示す FEM 熱弾塑

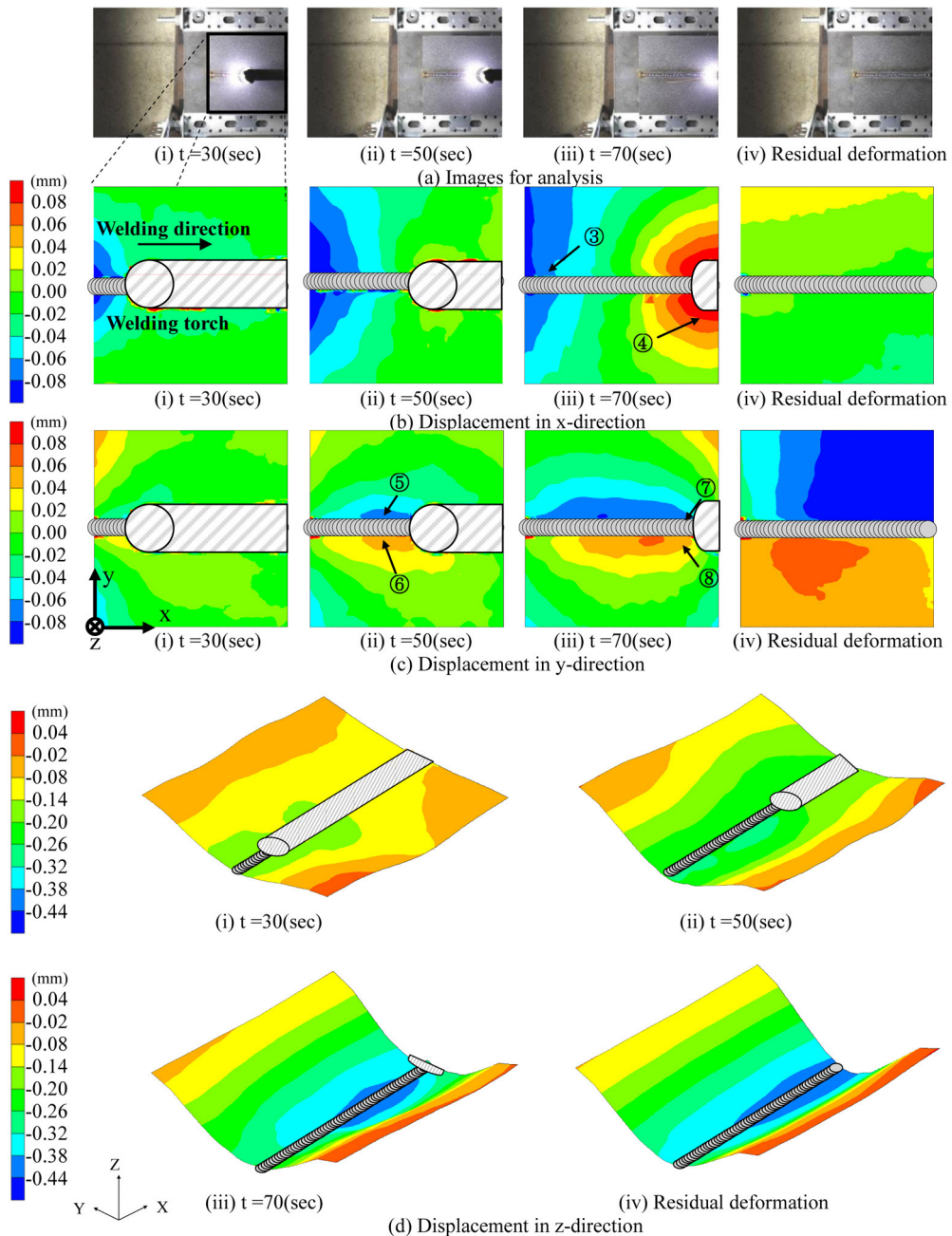


Fig. 8 Distribution of displacement during welding measured by proposed method.

性解析における境界条件とできるだけ等価になるようにした。撮影時においては、左右のカメラの同期をとり、5秒間隔で撮影を行うことにした。なお、実験に用いたデジタルカメラの解像度は約1510万画素であり、撮影画像の1ピクセルあたりの大きさは約62 μ 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=20 \times 20ピクセル、すなわち、約1.25mm \times 約1.25mmとした。溶接条件は、電流値が70A、溶接速度が100mm/minであるが、装置の都合上、電流値は計測していない。

3.2 溶接中における三次元変形の時系列全視野計測

Fig. 8 (a) に溶接中および溶接後における、左カメラから撮影された画像を示す。また、同図 (b)~(d) には、同図 (a) 中における太枠で示される領域について x, y, z 方向成分の変位分布を示す。ここで、(i), (ii), (iii) には溶接開始後30秒, 50秒, 70秒時(溶接終了時)における撮影画像および変形分布を示す。さらに、(iv) には完全冷却後について示している。同図 (a) に示す撮影画像から、溶接トーチ周辺部においてはアーク光に伴う強光度部が存在することが分かる。また、同図 (b) に示す x 方向の変位分布図より、溶接中は溶接始端部③において、負の変位、また、溶接終端部④においては正の変位が分布していることが確認できる。これらは、溶接部付近における熱膨張を示している。また、同図 (b) (iv) に示す最終変形時における変位分布からは、大気への熱伝達がほぼ完了し、溶接中に発生していた溶接線上の熱膨張がほぼ消滅していることが確認できる。溶接中におけるアーク光の影響が大きく出ている領域は、図中 (b)-(d) の斜線で示している部分であり、その領域においては画像照合不良が発生し、変位データが取得できなかった。

次に、同図 (c) (i) に示す溶接開始後30秒時における y 方向の変位分布から、溶接始端部において試験片上部が正の方向に変位し、試験片下部が負の方向に変位していることが分かり、これは、溶接始端部における y 方向への熱膨張を示していると考えられる。また (ii) に示す溶接開始後50秒の変位分布から、トーチの後方⑤の領域には、負の変位量、また、⑥の領域には正の変位が発生していることが確認できる。このことから、トーチ通過直後の溶接線上において、局所的な板幅方向の熱収縮が発生していることが分かる。同様に、同図 (c) (iii) に示す溶接開始後70秒の変位分布からも、トーチ通過直後における局所的な板幅方向の熱収縮⑦、⑧が確認できる。また、同図 (iv) に示す最終変形においては、始端部に比べて終端部の方が、試験片の上部および下部間の変位差すなわち横収縮量が大きくなることが確認できる。さらに、同図 (d) (i) および (d) (ii) に示す z 方向の変位分布からは、トーチが通過した部分から順次、角変形が形成されていく様子が確認できる。また、同図 (iii) および (iv) の変形分布より、溶接終了時に得られた角変形は、時間が経過したとしてもほとんど変化しないことが確認できる。

次に、Fig. 9 に縦収縮の時間履歴を示す。同図の縦軸は縦収縮量を示し、その値がプラスの場合に膨張、マイナスの場合には収縮を示す。また、横軸は溶接開始時からの経過時間を示す。図中のライン F-F', G-G' は、Fig. 7 中の F-F' 間および G-G' 間における縦収縮の時間履歴を示している。また、Fig. 9 中の黒色で示された破線は、母材に対する加熱終了時刻を表している。同図より、溶接開始後しばらくして、F-F' 間、G-G' 間共に溶接線方向に熱膨張することが確

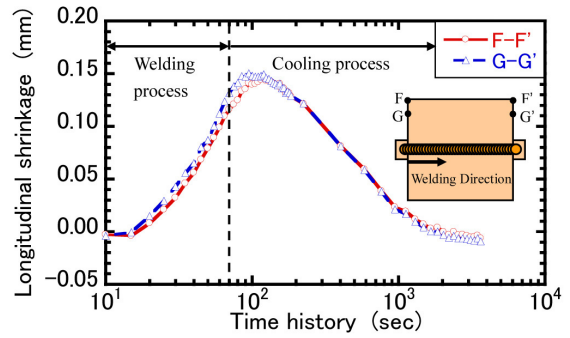


Fig. 9 Time history of longitudinal shrinkage measured by proposed method.

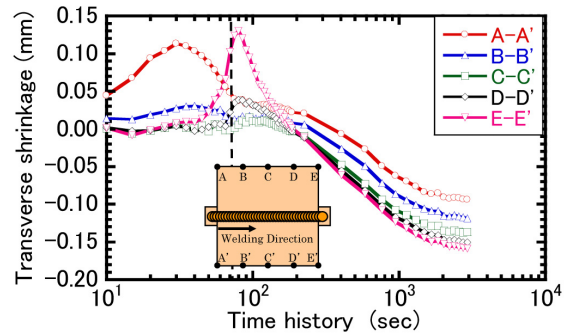


Fig. 10 Time history of transverse shrinkage measured by proposed method.

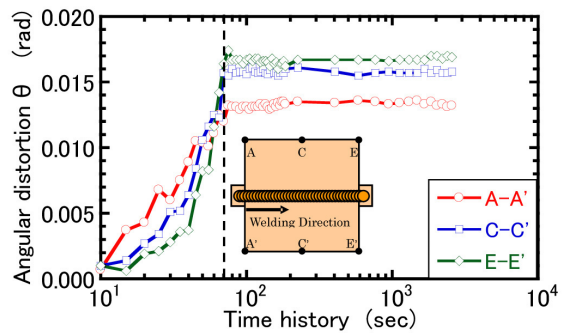


Fig. 11 Time history of angular distortion measured by proposed method.

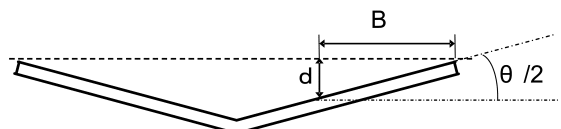


Fig. 12 Definition of angular distortion.

認できる。特に、溶接部に近いG-G'間の熱膨張量の方が大きいことがわかる。この熱膨張は溶接終了直後ではなくしばらくしてから最大値を取ることが分かる。この理由としては、溶接終了後しばらくしてもなお、板幅方向への熱伝導に伴う温度上昇が進行する点が挙げられる。また、冷却過程においては、時間経過と共に試験片が溶接線方向に収縮することが確認できる。さらに、最終変形のみに着目すると、溶接部近傍ほど収縮量が大きく、試験片端部ほど収縮量が小さいことが確認できる。

Fig. 10に横収縮量の時間履歴を示す。縦軸は横収縮量を示し、横軸は溶接開始時からの経過時間を示す。また、図中のA-A', B-B', C-C', D-D', およびE-E'はそれぞれFig. 7に示すように、溶接始端部から溶接線方向に0 mm, 30 mm, 60 mm, 90 mm, および120 mmの位置における横収縮量を示している。横収縮量とは、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方向変位量を引いた量と定義した。この結果より、始終端部付近すなわちA-A'およびE-E'においては、熱源到達に伴う始終端部の溶融による拘束の低下に伴う熱膨張が顕著に現れていることが分かる。これは、始終端部における周囲からの拘束が、試験片中央部に比べて比較的小さいためであると考えられる。また、冷却が進行するに従い、溶接終端部ほど収縮量が大きくなることも確認できる。この理由としては、入熱速度が小さい場合には、熱拡散の影響により、終端部ほど蓄熱されやすい傾向にある点が挙げられる。その分だけ、見かけの入熱量が大きくなり、収縮量が大きくなると考えられる。次に、角変形量の時間履歴をFig. 11に示す。図中のA-A', C-C', E-E'はそれぞれFig. 6に示すように、溶接始端部から終端方向にそれぞれ0 mm, 60 mm, 120 mmの位置における角変形量の時間履歴を示している。ここで角変形量とは、Fig. 12で定義される角度とした。具体的には次式の通り定義した。

$$\theta(\text{rad}) = 2 \tan^{-1}\{d/B\} \quad (6)$$

Fig. 11から、角変形は溶接開始直後に発生し、溶接始端部から順に大きくなることを確認できる。また、溶接終了後は、ほとんど変化しないことが確認できる。

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完全冷却後に至るまで、計測対象領域全視野に亘り滑らかな三次元変位分布を取得できることが分かった。

3.3 FEMによる溶接中における変形傾向の検証

ここで、提案手法である画像計測法による変形傾向の妥当性について検証するために、前節で示した画像計測実験と試験片寸法および溶接条件等がほぼ対応したFEM熱弾塑性解析による解析結果と比較した。なお、溶接条件は、電流値70 A、溶接速度100 mm/minとし、電圧値10 V、熱効

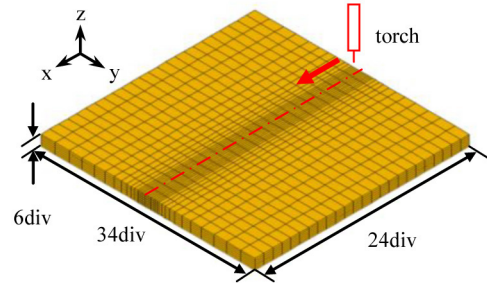


Fig. 13 FE division mesh.

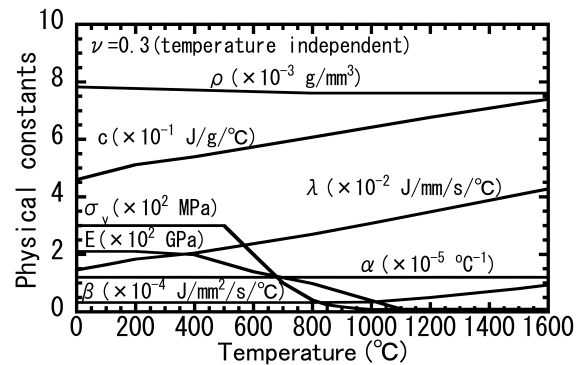


Fig. 14 Temperature dependent physical constants used in FEM.

率0.7と仮定した。また、FEM熱弾塑性解析においては、Fig. 13に示す要素分割を用いた。また、熱源形状を考える場合、熱源の移動速度に対して熱伝導が卓越すると考えられる溶接速度が小さい場合においては、入熱が分布する領域があまり大きくない限り、温度場に与える影響は小さいと考えられる。よって、熱源形状は、熱源領域が十分小さいと見なせる溶接線方向長さ10 mm×幅2 mm×深さ1 mmの領域と仮定した。解析においては材料定数の温度依存性をFig. 14のように仮定した。ただし、各材料定数は以下に示す通りである。

- α: 線膨張係数, E: ヤング率, σ_v: 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

Fig. 15に、Fig. 9に示す画像計測による縦収縮の時間履歴の実験結果に対応する、FEM熱弾塑性解析結果を示す。同図より、試験片端部に比べて、溶接線近傍ほど熱膨張・熱収縮が大きいという、画像計測と同様の傾向が確認できる。さらに、溶接終了後しばらくしてから膨張量が最大となる点や、完全冷却後には溶接線近傍ほど収縮量が大きくなるという点においても画像計測と同様の傾向が得られた。同様に、Fig. 10に対応する、FEM熱弾塑性解析による横収縮の時間履歴をFig. 16に示す。同図中における、A-A'およびE-E'の結果から分かるように、溶接時における溶接始終端部のy方向への熱膨張が他の位置に比べ顕著に現れ、また、最終変形においては始端部と比べて溶接終端部の方が収縮量が大きくなるという、Fig. 10に示す画像計測結果と同様の傾向が確認できる。

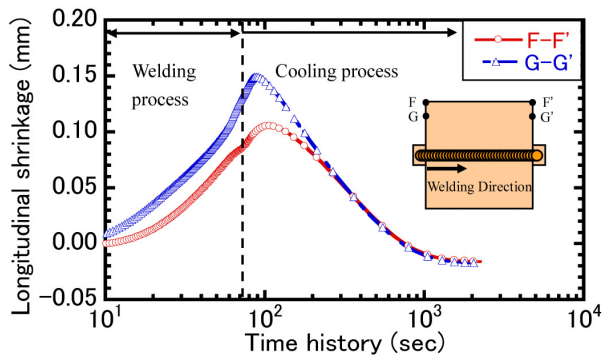


Fig. 15 Time history of longitudinal shrinkage analyzed by Thermal-elastic-plastic FEM.

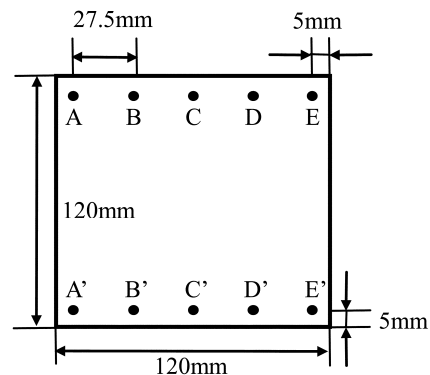


Fig. 18 Shape and size of Test specimen.

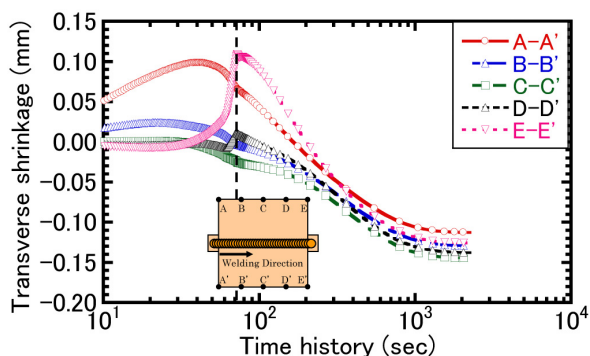


Fig. 16 Time history of transverse shrinkage analyzed by Thermal-elastic-plastic FEM.

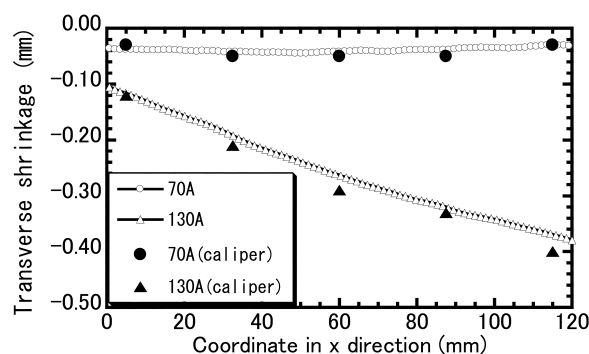


Fig. 19 Distribution of transverse shrinkage.

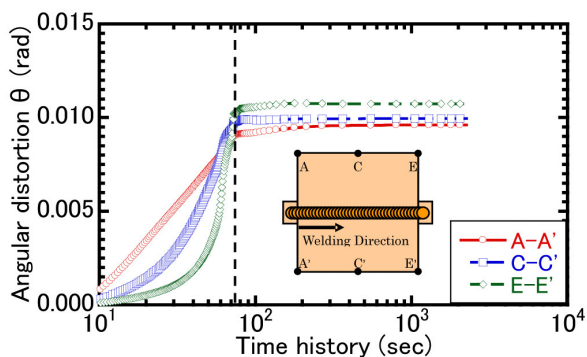


Fig. 17 Time history of angular distortion analyzed by thermal-elastic-plastic FEM.

次に、Fig. 11 に対応する、FEM 熱弾塑性解析による角変形の時間履歴を Fig. 17 に示す。同図についても、溶接開始直後から角変形が大きくなり始め、溶接終了後である冷却過程においては、ほとんど変化しないという Fig. 11 に示す画像計測結果と同様の傾向が確認できる。

以上より、溶接中における提案手法による画像計測結果と FEM 熱弾塑性解析による計算結果が定性的に一致することが確認でき、このことは、提案計測手法の妥当性を示していると考えられる。

3.4 完全冷却後における三次元変形全視野計測結果の精度検証

本節では、本研究で提案されたステレオ画像法を用いた

三次元変形全視野計測結果の精度検証を行う。まずは、Fig. 18 の●印に示すように試験片端部付近に、27.5 mm 間隔で直径 2 mm の円孔を設け、次に、同図の A-A', B-B', C-C', D-D', E-E' に示す 2 点間の距離を溶接前および溶接後においてデジタルノギス (器差: ± 0.02 mm) で測定する。この方法により得られた横収縮分布を、本手法、すなわち画像計測により得られた最終変形時における計測結果と比較することで、本手法の面内変形計測における妥当性検証を行う。

Fig. 19 に電流値が 70 A および 130 A の場合における提案手法とデジタルノギス測定による横収縮量の比較を示す。同図の左端は始端部を示し、右端は終端部を示す。これらの結果より、130 A の場合において、提案手法とデジタルノギス測定の両者とも、終端部ほど横収縮量が大きくなるという定性的に一致する結果が得られた。また、その絶対量に関し両者は、130 A の場合、70 A 共に、始端部から終端部に至るすべての領域において最大でもデジタルノギスの器差程度である 0.02 mm の差という実用上十分な精度で計測できていることが分かる。

次に、面外変形について精度検証するために、画像計測結果と、レーザー変位計を用いた 3 次元形状測定システム (LAF-3D, 保証精度: 0.03 mm) による計測結果を比較検討した。LAF-3D は変形計測システムではなく、物体表面座標を計測する形状測定システムであるので、厳密には画像計測結果と同じ位置の変形を測定することはできないが、

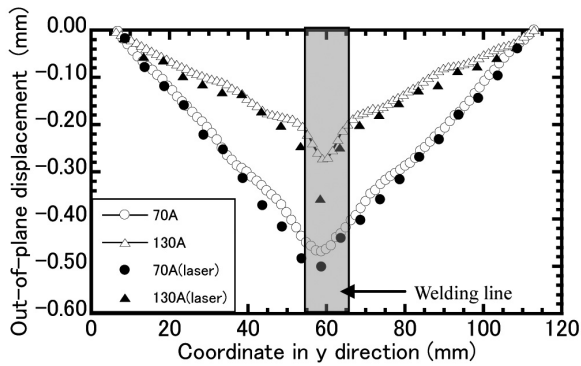


Fig. 20 Distribution of out of plane displacement.

変形前の形状が平坦で、なおかつ面内変形が小さい場合に限り、ほぼ同じ位置を計測可能であると考えられる。Fig. 20に、電流値が70Aおよび130Aの場合における面外変形の画像計測結果、およびLAF-3Dによる計測結果を示す。この結果より画像計測結果およびLAF-3Dによる計測結果の両者は定量的にほぼ一致していることが確認できる。

以上の結果より、提案手法を用いることで、溶接中、冷却過程および完全冷却後における面内、面外変形を良好な精度で計測可能であることが確認できた。このことから、提案手法を用いることで、溶接過渡期における三次元的な変形状態を広範囲に亘り時系列的に把握することが可能となるため、溶接変形発生メカニズムについての検討のみならず、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幅広く適用可能であると考えられ、本手法の今後の応用に期待できる。

4. 結 言

ステレオ画像法に基づく三次元溶接変形の全視野計測法を、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することにより、以下の結論を得た。

1. 提案手法を用いることにより、溶接中および冷却過程における溶接線方向変位分布、板幅方向変位分布および面外方向変位分布を計測可能であることが分かった。
2. 提案手法を用いることにより、縦収縮量、横収縮量および角変形量を時系列に沿って計測可能であることが分かった。
3. 提案手法を用いた計測結果およびFEM熱弾塑性解析結果の両者において、溶接中における三次元変形が定量的に一致することを示した。
4. 提案手法による残留変形計測結果における横収縮量およ

び角変形量と、デジタルノギスおよびレーザー変位計を用いた測定結果とを比較することにより、提案手法による計測が定量的にも高精度に計測可能であることを示した。

参 考 文 献

- 1) 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)
- 2) M. Hagiwara and M. Kawamata: Detection of Subpixel Displacement for Image Using Phase-Only Correlation, *IEICE technical report*, (2001) 79-86. (in Japanese)
- 3) 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)
- 4) H. Hasegawa and E. Shimizu: Discussion on Face Image Identification using Pattern Matching, *ITEJ Technical Report*, 16-47 (1992) 49-56. (in Japanese)
- 5) 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)
- 6) 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)
- 7) 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)
- 8) 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)
- 9) 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)
- 10) T. Sato and M. Anan: Template Matching in Color Image, *IEICE technical report. Pattern recognition and understanding*, 94-294, (1994), 1-6. (in Japanese)
- 11) 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)
- 12) M. Shibahara, K. Yamaguchi, T. Onda, S. Itoh and K. Masaoka: Studies on In-situ Full-field Measurement for In-plane Welding Deformation Using Digital Camera, *Quar. J. JWS*, 27-2 (2009) 154-161. (in Japanese)
- 13) S. Igarashi, S. Hashimoto, A. Miyamoto and S. Kaneko: Rotation-invariant Picture Matching based on Autoregressive Model of Orientation Histogram, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, 67-9, (2001) 1519-1523. (in Japanese)