

光学的手法による鋼部材の加熱・冷却過程におけるひずみ分布計測

Strain Distribution in Heating and Cooling Process of Steel Member by the Digital Image Correlation Method

出水 享*, 松田 浩**, 伊藤 幸広***, 森田 千尋****, 藤野 義裕*****

Akira Demizu, Hiroshi Matsuda, Yukihiro Ito, Chihiro Morita, Yoshihiro Fujino

*修士 (工学), 長崎大学大学院生産科学研究科 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)

**工学博士, 長崎大学教授, 工学部構造工学科 (同上)

***博士 (工学), 佐賀大学准教授, 大学院工学系研究科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

****博士 (工学), 長崎大学准教授, 大学院生産科学研究科 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)

*****学士 (工学), 長崎大学大学院生産科学研究科 (同上)

The strain distribution behavior of the steel member during heating and cooling process in the welding of steel is very important information to know the generating process of the welding deformation. In this study, using the digital image correlation method (DICM), the measurement of strain distribution in the steel surface produced during heating and cooling process in the welding of steel was carried out. In addition, to examine the relationship between temperature and strain distribution, the temperature measurement was also performed by the infrared thermography equipment.

Key Words : digital image correlation method, welding, heating and cooling, strain measurement

キーワード : デジタル画像相関法, 溶接, 加熱・冷却, ひずみ計測

1. はじめに

溶接とは材料を局部的に加熱及び溶融することにより、二つの材料を接合する手法である。そのため、不均一な熱膨張・収縮により必然的に溶接変形が生じる。特に溶接中および冷却過程における鋼部材のひずみをリアルタイムに測定することは、溶接物の品質管理、残留応力や欠陥発生などに関する情報取得の上で重要である。しかし、溶接部は一時的に1000°C以上の高温に曝されるため、歪ゲージなどの接触法ではひずみを測定することが困難である。また、溶接部は広い範囲にわたり急熱・急冷による動的ひずみを受けるため、連続的なひずみ測定には、このひずみ変化に追従できる高い応答性が必要である。

一方、数値シミュレーション技術の進歩及びコンピューター能力の向上に伴い、FEMによる溶接構造解析は実用上十分な精度で解析出来つつある。しかし解析対象

が大規模で、かつ複雑な形状の場合には、要素分割などプリプロセッシングに多くの時間を消費する必要があり、問題となっている。そこで、MLPG法をはじめとするメッシュレス法が開発されている¹⁾。

最近では、光学的全視野計測法の一つである電子スペックルパターン干渉法により溶接変形計測が実施されている^{2)~4)}。電子スペックルパターン干渉法は変位を高精度に計測できる一方で、高温時の測定空間の空気の揺らぎで計測結果が乱れるというデメリットがある。さらに、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、測定物理量のレンジが狭いなどの測定条件における制約が多く実用的ではない。

本研究では、実用的かつ簡易にひずみ計測が可能な手法である光学的全視野計測法の一つデジタル画像相関法(以後、DICMと略記)により、溶接およびその冷却過程における鋼板表面に生じるひずみ分布の計測を実施し

た。さらに、ひずみ発生の原因である温度分布の変化も全視野的に捉えて、ひずみ分布との関連性を調べることが目的として、赤外線サーモグラフィ装置により温度分布計測も実施した。なお、本研究では、700℃程度の温度領域に着目して研究を行った。

2. デジタル画像相関法 (DICM)

2.1 概要

DICMの技術は、1980年代初頭に South Carolina 大学の研究者によって紹介された⁵⁾。DICMは、測定対象物表面の模様ランダム性を基にして、変形前後の測定対象物表面を CCD カメラなどで撮影したデジタル画像を画像処理することにより、計測範囲全体にわたって変形の大きさと方向を求めることができる手法である。DICMの特長として、レーザー干渉を利用した計測法と比べると測定空間の揺らぎに優位性があることが挙げられる⁶⁾。DICMの適用事例としては、機械・材料分野では集積回路の熱膨張や窒化ケイ素のき裂開口機構の解明をはじめ、多岐にわたる研究に活用されている⁷⁾。また、農学分野では、栄養生長期の小麦における植被率に関する研究に用いられている⁸⁾。医療分野においても、X線CTによる生体組織内部の非侵襲力学場計測の応用として用いられている⁹⁾。また、建設分野では、橋梁のたわみ計測¹⁰⁾をはじめ、初期不整を付与した薄肉円筒の座屈メカニズム¹¹⁾、合成桁の変形挙動¹²⁾や曲げ加工した異形鉄筋の変形特性¹³⁾の把握に用いられている。

2.2 原理

DICMを行う際に重要になるのが、任意の点の移動量の算出である。DICMの解析原理は、デジタル画像が一般的に256濃度階調で表現される画像から構成された濃淡のある画像であることを利用したものである。まず、測定対象物表面の模様ランダム性を基にして測定対象物の変形前後をデジタルカメラ等で撮影し、得られたデジタル画像の輝度値分布から試料表面の変形量と方向を同時に求める方法である。

まず、変形前の画像において、任意の点(1画素)を中心とした $N \times N$ 画素の任意領域(サブセット)を指定する(図-1(a))。計測対象物に変位を与えると、変形後の画像でのサブセットの位置は変化する(図-1(b))。変形後のサブセットを対象に、変形前のサブセットの輝度分布と高い相関性を示すサブセットを数値解析で探索する。このサブセット中心の点の移動より変形方向、変形量を算出する。この処理を全ての小領域で繰り返す事によって、全視野の変形データが得ることができる。

ひずみ分布は、以上の方法により得た変形量を利用して算出する。これは、図-2(a)に示すように、あらかじめ求めたい点を中心として、ある画素数だけ離れた点の変位を基に、変形後の二点間の長さの変化を求め、計測

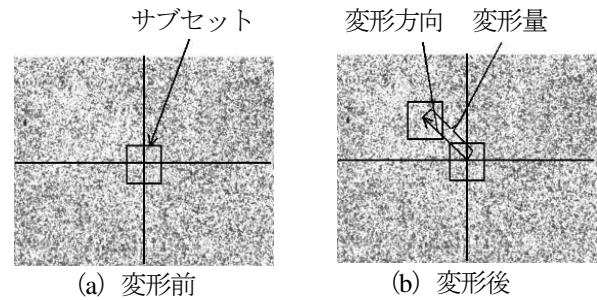


図-1 変形前と変形後のデジタル画像

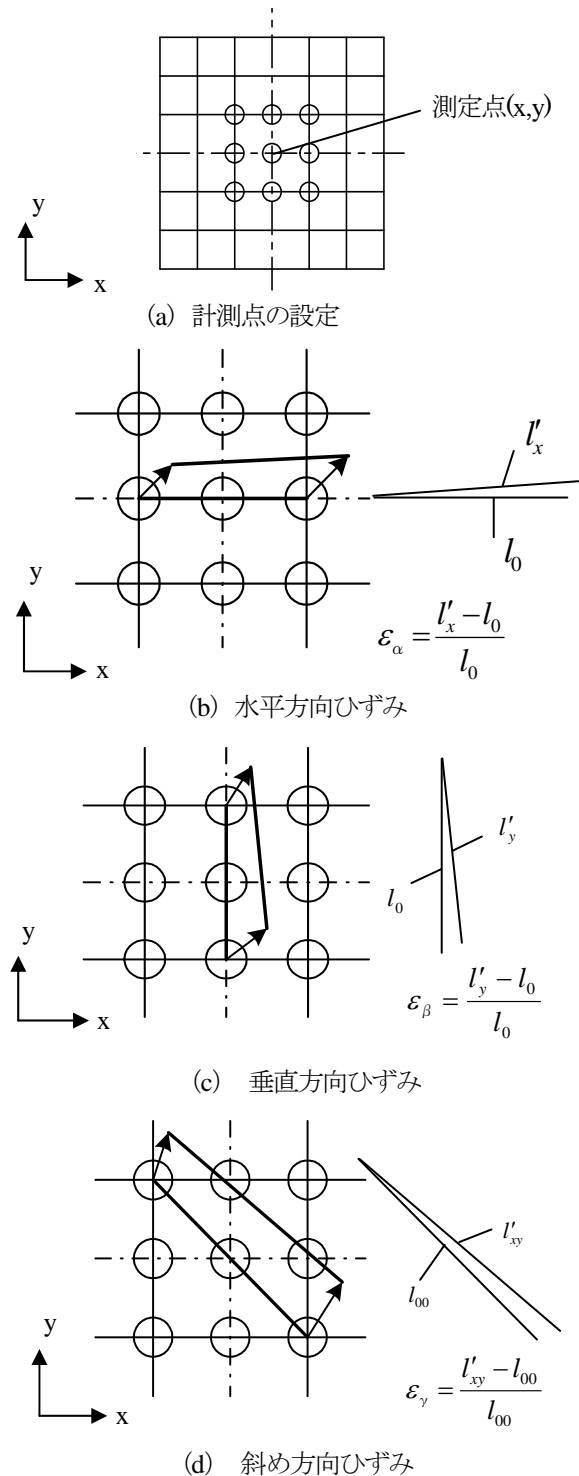


図-2 ひずみ解析

点のひずみとする解析手法である。この解析手法の特長として、水平、垂直、斜め方向ひずみの値を求めることが可能であること、任意に解析点の距離を変えること、すなわちゲージ長の自由な選択が可能となること、などが挙げられる(図-2(b)~(d))。本研究では、DICM 解析プログラム Correlated Solutions VIC3D 2009^{12,13)}を用いてひずみ分布を算出した。本計測装置と計測システムの仕様を写真-1 と表-1 にそれぞれ示す。



写真-1 本計測装置

表-1 計測器仕様

CCD カメラ	1380×1034 ピクセル AVT 社製 Marlin F-145B2
計測感度 (高温環境化も同様)	ピクセル間距離の 1/10~1/100 変位: 100mm の視野で 20 μ m ひずみ: 0.01%
計測レンジ	数百%の変形まで可
出力形式	三次元形状, 変位, ひずみ

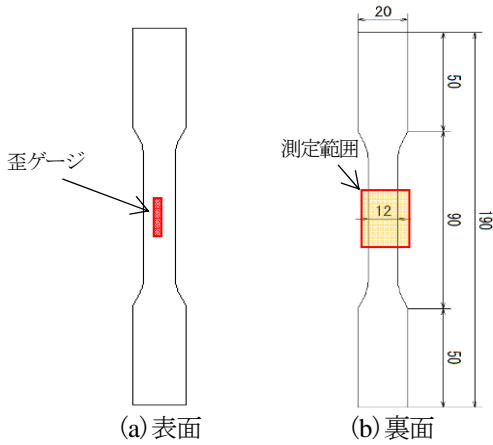


図-3 試験片概要図

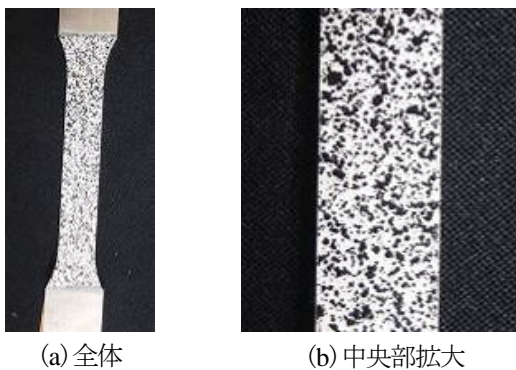


写真-2 試験片

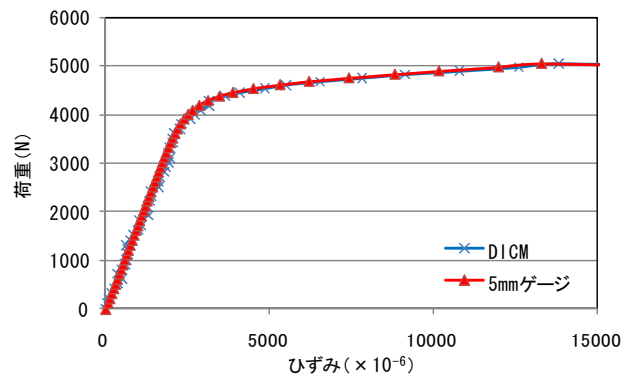
2.3 性能照査試験

DICM のひずみ測定精度を確認するために、歪ゲージを貼付したアルミニウム合金 (JIS Z 2201 13号試験片3枚) を用いて、一軸引張試験を行い、歪ゲージ値と DICM の測定値を比較することで性能照査試験を行った。

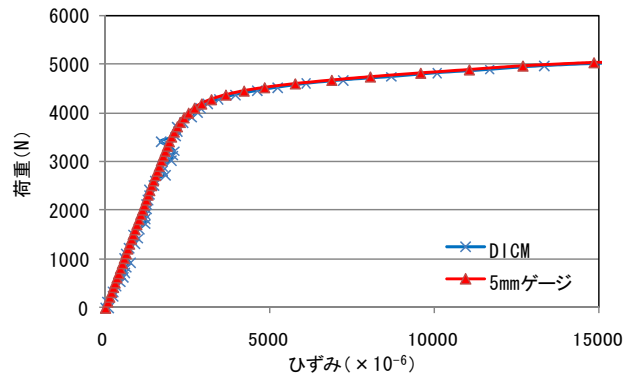
試験では、試験片中央部にゲージ長 5 mm の歪ゲージを貼付し、ゲージを貼付した裏側の面を DICM によりひずみを測定した。DICM の測定面には、白色のスプレー

表-2 材料物性

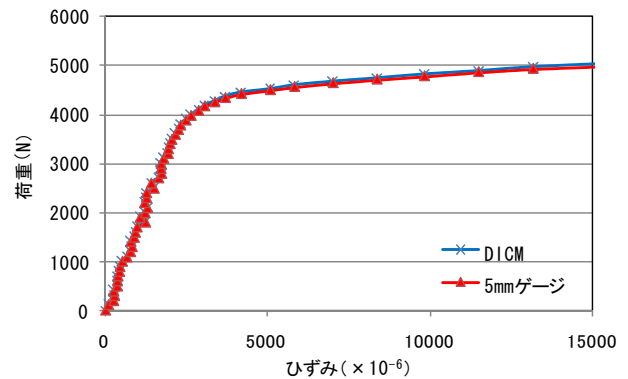
規格	静弾性係数	引張強度	伸び
アルミニウム合金 5052	70 kN/mm ²	248 N/mm ²	6%



(a) No.1 試験片



(b) No.2 試験片



(c) No.3 試験片

図-4 荷重-ひずみ曲線

で下地を塗布し、後に黒色のスプレーでランダムパターンを設けた。そして、塗料が乾燥した後に一軸引張試験を実施した。試験は歪ゲージが約 15000 μ ひずみに達した時点で計測を終了させた。試験片概要図、試験片写真を図-3 と写真-2 にそれぞれ示す。また、試験片の材料特性を表-2 に示す。

歪ゲージと DICM により得られた計測結果を図-4 に示す。なお、DICM により得られるひずみ値は基準長さを任意に取ることができるため、DICM によるひずみ値は、貼付した歪ゲージ長と同じ長さである 5mm の平均ひずみ値とした。1 ピクセル当りの画像の大きさは、約 0.08 mm である。図-4 (a) ~ (c) より弾性域および塑性域においても DICM によって得られたひずみ値は歪ゲージによる値とほぼ一致している。以上より、DICM による測定精度は、歪ゲージとほぼ同程度であることが確認できた。

3. 試験概要

試験片概要図を図-5 に示す。試験では、寸法（長さ×幅×厚さ）は、600mm×200mm×4.5mm の SM400A（引張強度 465N/mm²、降伏強度 303N/mm²）を用いた。溶接により発生するひずみの基本的性質を調べるために、開先等を一切設けない一枚の試験片とした。そして、溶接作業をスムーズに行うために、試験片の溶接開始位置と終点位置に試験片と同じ材質の 50mm×50mm の SM 材を取り付けた。DICM でのひずみ計測のために、写真-3 に示すように、試験片の表面に白色のスプレーで下地を塗布し、乾燥後、黒色のスプレーでランダムパターンを散布した。なお、溶接時の耐熱性を考慮して、VHT 社耐熱スプレー（704 $^{\circ}$ C~1093 $^{\circ}$ C）を使用した。

その試験片を立てて、下端を 1 点固定し、試験片中央部を薄板・軽量鉄骨溶接棒を用いてアーク手溶接を横方向に行った。溶接状況を写真-4 に示す。溶接は、1 パスのみとし、溶接長さは試験片の幅 200mm とした。溶接条件として、電流値 85A、電圧値 35V、溶接速度 4.2mm/s とした。

溶接中およびその冷却過程において溶接面の裏側を 2 台の CCD カメラにより約 0.9 m の距離から撮影を行った。1 ピクセル当りの画像の大きさは、約 0.19 mm で、ひずみは約 10 mm 間のひずみ値が出力できるように設定した。計測状況を写真-5 に示す。さらに、ひずみ値と温度の関係を調べるために、高温レンジ計測モード（0 $^{\circ}$ C~2000 $^{\circ}$ C の範囲内）を搭載している赤外線サーモグラフィ装置を用いて溶接中およびその冷却過程における溶接面裏側の鋼表面の温度分布も計測した。

パソコンと赤外線サーモグラフィ装置を同時刻に設定し、溶接作業直前から同時に計測を開始し、計測中は、CCD カメラで撮影したデジタル画像はパソコンの HD に、赤外線サーモグラフィ装置で撮影した温度分布画像は

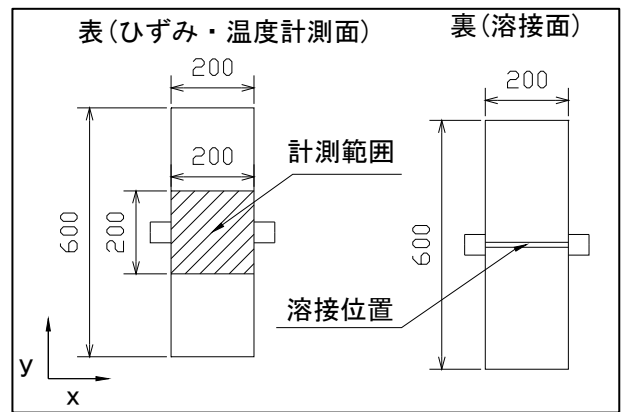


図-5 試験片概要図 (mm)



写真-3 試験片



写真-4 溶接状況



写真-5 計測状況

装置本体のHDに保存した。それぞれ2秒間隔で撮影を行い、赤外線サーモグラフィ装置で鋼表面の温度分布がほぼ落ち着いた約1200秒で計測を終了した。

本研究で使用した赤外線サーモグラフィ装置は、高温レンジ計測モード(0°C~2000°C)での低温領域の温度計測では、装置特有のノイズが混在し温度計測精度が低下することが、事前に分かっていたため、計測範囲内の最大温度が約100°C以下になったことを確認した直後、ノイズが少ない低温計測モード(-60°C~120°C)で温度分布計測を行った。表-3に赤外線サーモグラフィの仕様¹³⁾を示す。

表-3 赤外線サーモグラフィ仕様

機種名	NECAvio 赤外線テクノロジー 型番 H2640
温度測定範囲	レンジ1 -20°C~60°C レンジ2 -40°C~120°C レンジ3 0°C~500°C レンジ4 200°C~2000°C
最小検知温度差	0.06°C以下
検出器	国産2次元非冷却センサ (マイクロボロメータ)
赤外線画像画素数	640 (H) × 480 (V) ドット
測定精度	±2%(読み取り値) または ±2°Cのいずれか大きい方
測定波長	8~13 μm

4. 結果と考察

DICMにより得たx方向、y方向のひずみ分布を、それぞれ、図-6および図-7に示す。また、赤外線サーモグラフィ装置により得た温度分布を図-8に示す。さらに、図-6~8中のA-C間のx方向及びy方向のひずみ分布の推移を、それぞれ、図-9および図-10に示し、また、温度分布の推移を図-11に示す。

図-6~8において、(a)は、溶接開始直後、(b)、(c)は溶接中、(d)は溶接完了時、(e)、(f)は、溶接完了後の冷却過程を示す。図-6~8の(a)~(f)の時間(t=0s, 16s, 32s, 48s, 114s, 1192s)は、溶接開始時からの経過時間(秒)を表す。また、図9~11の凡例も、溶接開始時からの経過時間(秒)を表している。なお、図-6~8の(a)~(d)には溶接棒直下の位置を丸(点線)で示している。

図-6および図-7の(a)~(d)において、溶接棒直下に引張りひずみが確認される。これは、鋼表面がアーク熱により温度膨張しているためである。

図-9よりC点近傍にt=16sでx方向に圧縮ひずみが確認され、その圧縮ひずみが溶接棒通過直後t=32sで引張りひずみに変化している。その引張りひずみは、時間の経過とともに低下し、t=1192sでは圧縮ひずみに変化し、その値は約 -1000×10^{-6} に達していることが確認される。また、t=32s~t=114sでは、C点の上下近傍でC点より大きい引張りひずみが確認できる。

図-7より、時間経過とともにy方向の圧縮ひずみが

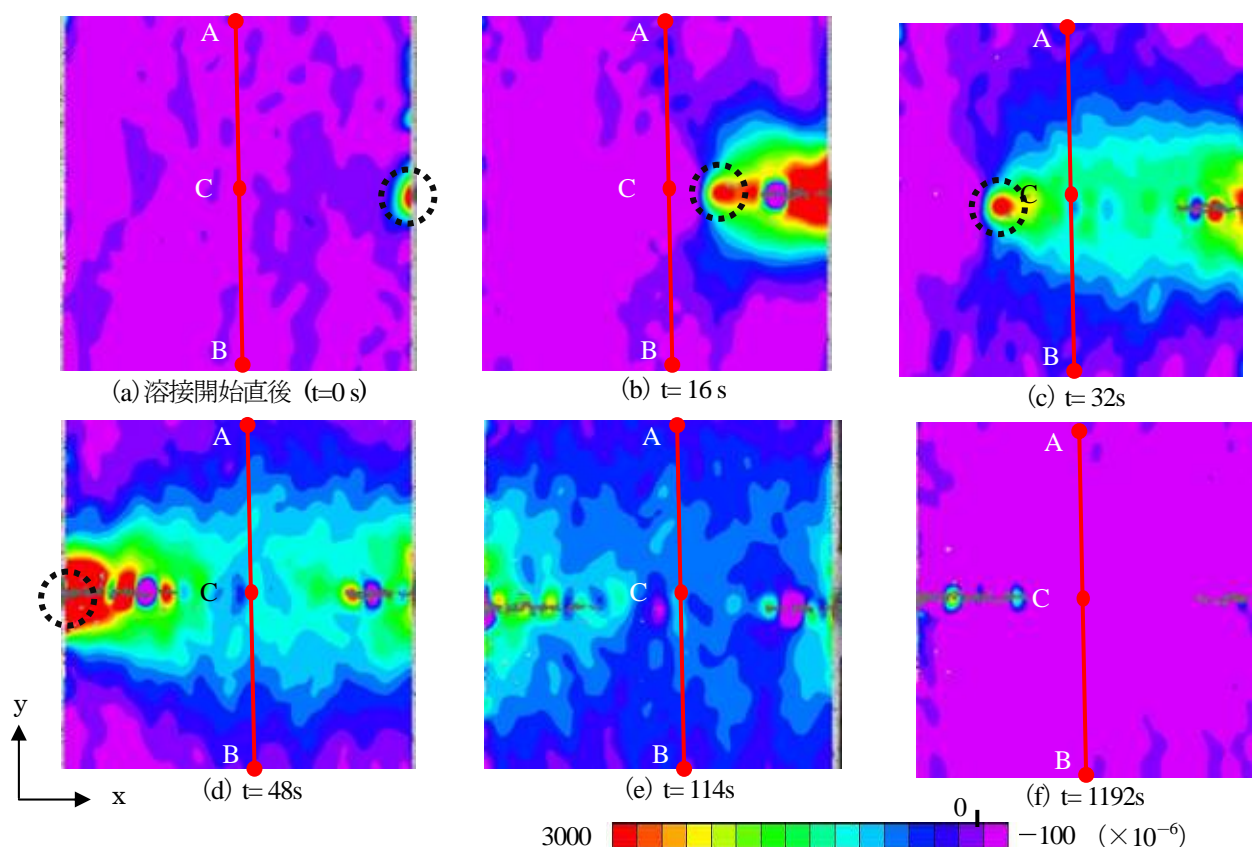


図-6 x方向ひずみ分布

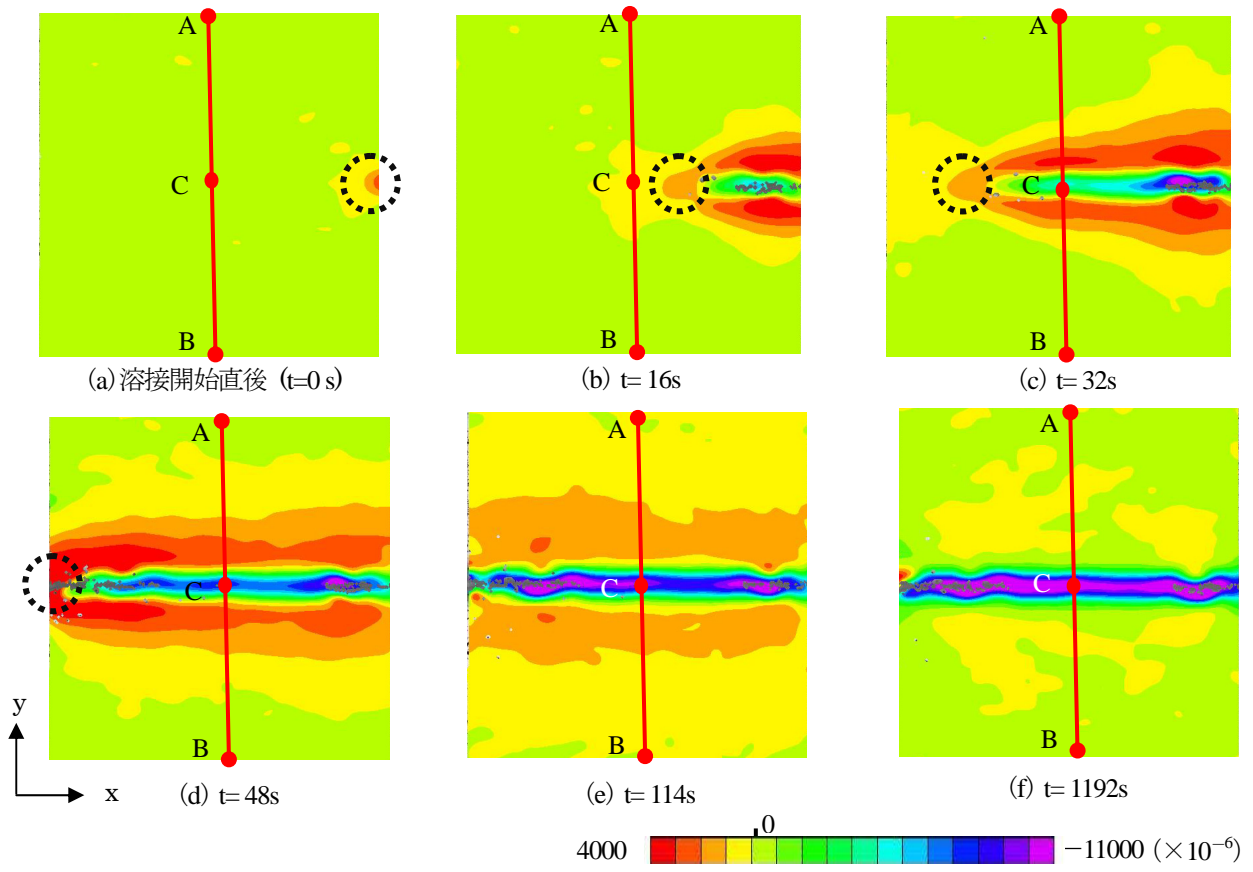


図-7 y 方向ひずみ分布

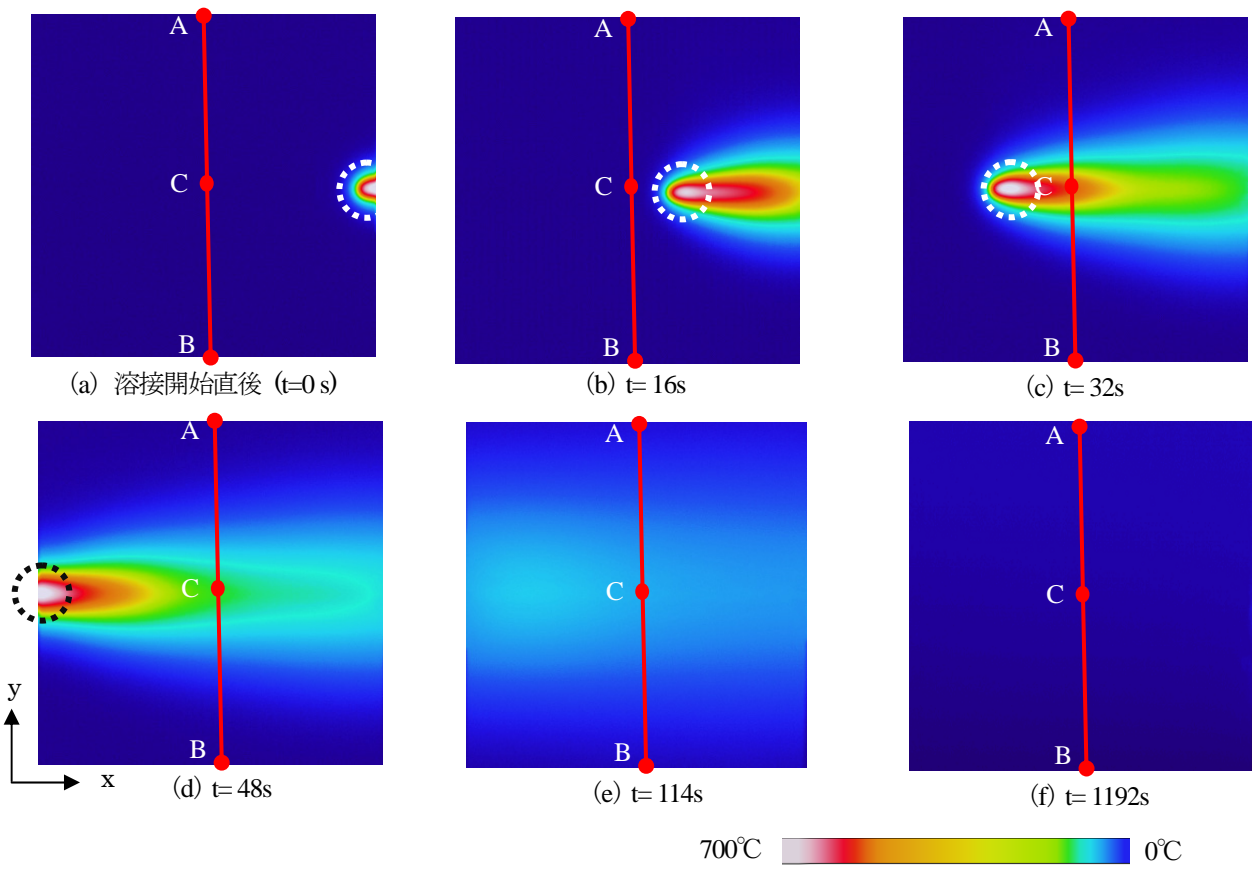


図-8 温度分布

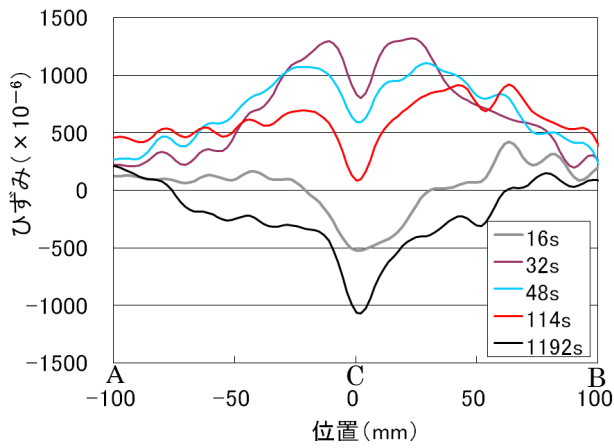


図-9 A-C-B間 x 方向ひずみ

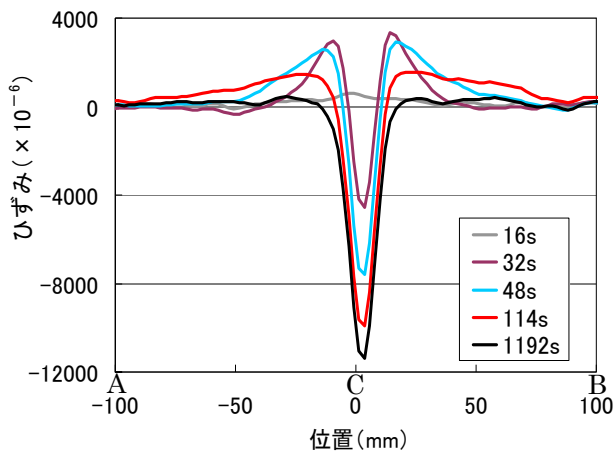


図-10 A-C-B間 y 方向ひずみ

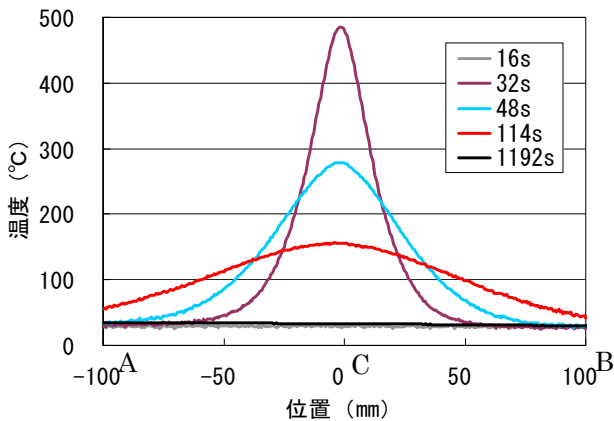
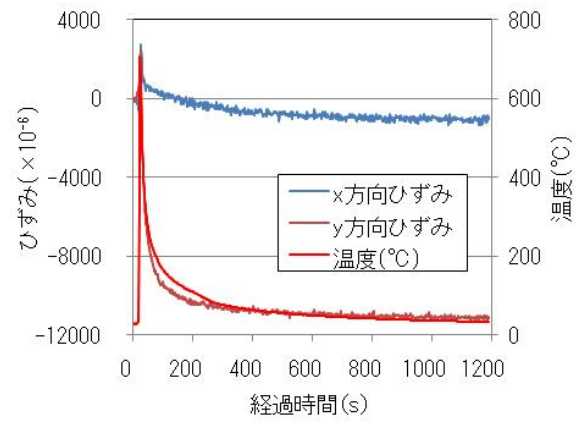


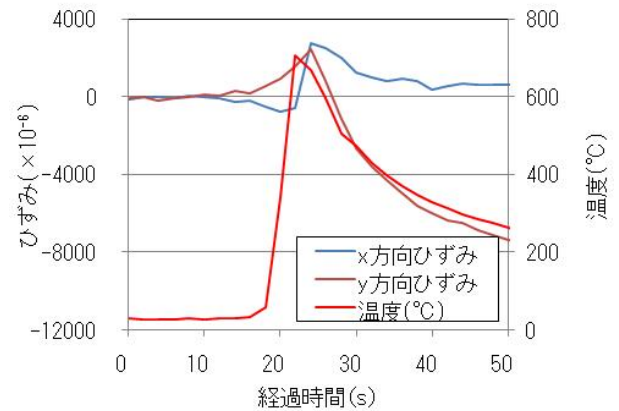
図-11 A-C-B間の温度

溶接方向に伸びていくのが確認できる。これは、溶接作業が進むにつれてビードが形成されそのビードの温度低下により収縮していることを表している。図-10のt=32sでC点近傍にy方向に圧縮ひずみが確認され、その圧縮ひずみが時間経過とともに急激に増加し、t=1192sに約 -11000×10^{-6} に達していることが確認される。

図-10のt=32s~48sにおいて圧縮ひずみの上下近傍に、大きな引張ひずみが確認され、溶接終了直後t=114sでは、その引張ひずみが上下方向に広域に広がっている。



(a) t=0s~1192s



(b) t=0s~50s

図-12 C点の x, y 方向ひずみと温度の経時変化

また、溶接終了後t=1192sでは、溶接終了直後t=114sに比べてその引張ひずみが減少している。これは、図-11の温度変化をみても説明がつく。図-11では、C点に集中した温度が、時間の経過とともに低下しながら、上下方向に広がっていくのが確認できる。そして、t=1192sでは、温度変化がなく初期の温度状態に戻っているのが確認できる。

図-6~8のC点のx方向、y方向ひずみ、温度の経時変化図を図-12に示す。図(a)は溶接開始後のt=0s~1192s間全体の変動を示し、図(b)は変化が大きな溶接開始後のt=0s~50s間のひずみと温度の挙動を拡大して示したものである。図より温度上昇とともにひずみが増加し、その後、約26秒でピークに達している。そして、温度低下とともにひずみも減少しており、約200秒でほぼ定常状態になる。温度下降とy方向ひずみには高い相関関係があることがわかる。なお、温度とひずみのピークが多少異なるのは、ひずみと温度を算出する際に、測定位置を正確に設定することができなかったためである。

図-6, 7において溶接開始直後と溶接終了直後のビード直下に判別不能な色が表示されているのは、ひずみが算出できなかった領域を意味する。実験では、耐熱スプレー(704°C~1093°C)を用いたが、溶接後の試験片を観察す

るとわずかに溶けていたことが確認された。そのためランダムパターンが乱れて、画像相関関係が失われた。この問題は、高耐熱スプレーを用いることで対処できると考える。

5. 結 論

今回、DICM および赤外線サーモグラフィにより溶接中および冷却過程におけるひずみ分布、温度分布計測を行った。得られた結果を以下に示す。

- ・溶接中の加熱および冷却過程における DICM によるひずみ分布の推移と赤外線サーモグラフィによる温度分布の推移を可視化することができた。
- ・溶接中の溶接棒直下ではアーク熱による温度膨張に伴う引張ひずみが生じる。
- ・最終的には、溶接方向 (x 方向) に全体的に圧縮ひずみが生じ、溶接直角方向 (y 方向) には、ビード直下に圧縮ひずみが生じていることが確認できる。
- ・溶接時の加熱及び冷却過程における x 方向、y 方向に発生するひずみが溶接時の温度との関係に相関があること、特に、温度変化と溶接直角方向 (y 方向) のひずみとの相関関係が高いことが確認され、溶接による発生するひずみの基本的性質が把握することができた。

今後は、以下の内容について研究を進めていく予定である。

- ・溶接ひずみと温度の関係を定量的に正確に評価する。
- ・寸法、形状、継手形状の有無、溶接開先形状、入熱量、溶接順序、溶接パス数など溶接条件を変化させて計測を実施する。
- ・溶接作業を熱弾塑性FE解析によりシミュレートし、溶接残留ひずみや残留応力の発生メカニズムを解明する。

謝辞

研究を遂行するにあたって、長崎大学工学部教育研究支援部生産技術室の辻下栄技術職員、久田英樹技術職員には、大変お世話になりました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 旦越雄, 柴原正和, 正岡孝治: MLPG 法による溶接構造解析手法の開発, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, pp.117-120, 2008
- 2) 目黒奨, 村松由樹: ESPI システムの溶接への適用, 溶接学会論文集, 第 24 巻, 第 3 号, pp.247-252, 2006.
- 3) 村松由樹, 黒田聖治, 志賀千晃: 溶接施工途上のひずみ測定—レーザースペックルによるひずみ測定法の溶接への適用—, 溶接学会論文集, 第 20 巻, 第 4 号, pp.531-538, 2002
- 4) 村松由樹, 黒田聖治, H・G グロス: レーザースペックル法による溶接部の相変態途上のひずみ測定, 溶接学会論文集, 第 14 巻, 第 4 号, pp.741-743, 1996.
- 5) 安全の評価のための非接触計測技術について, 株式会社レーザー計測, pp.1-8
- 6) 内野正和: デジタル画像相関法によるひずみ解析法の検討, 日本実験力学会講演論文集合同ワークショップ 2006, No.6-1, pp.36-39, 2006
- 7) 西川出・小倉敬二・M.A.Sutton: DICM による微小変位計測システム, 応用力学研究所研究集会報告 14ME-S4 実験力学における計測・データ処理の問題点・ノウハウ・工夫, pp.43-47, 2002
- 8) 福嶋陽: デジタル画像を利用した栄養生長期の小麦における植被率の簡易推定法, 日本作物学会紀事 vol.70 (別 1), pp.236-237, 2001
- 9) 桑水流理・中本与一・吉川暢宏: X 線 CT による生体内非侵襲力学場評価, 日本機械学会第 15 回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, pp.423-424, 2003
- 10) Yoneyama, S. Kitagawa, A. Iwata, S. Tani, K. and Kikuta H.: Bridge deflection measurement using digital image correlation, Experiment Technique, Vol.31, No.1, pp. 34-40, 2007
- 11) C.Morita,C.Zhao,A.Demizu,K.Makino,H.Matsuda, K.Ichimiya: Proc. of the Fifth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, 3D profile measurement and buckling simulation on thin-walled cylindrical shells under compression by utilizing 3D-digital Image Correlation Method, , IABMAS2010.7
- 12) Goda,H., Uchino,M., Yamaguchi,Y., Hibino, M. and Matsuda,H.: Base study on measure of transformation of concrete structures used by digital image correlation method, Proceeding of IABMAS2010, 2010
- 13) 合田寛基, 原田哲夫, 日比野誠, 永藤政敏: 曲げ戻しを受ける鉄筋の脆性破断に対する感受性の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1315-1320, 2009
- 14) Correlated Solutions: Vic-3D 2009 Reference Manual.
- 15) レーザー計測: レーザー計測技術報「画像相関法によるひずみ測定の精度について」, Vol.1, 2010. 2.
- 16) NECAvio 赤外線テクノロジーホームページ, <http://www.nec-avio.co.jp/>

(2010 年 9 月 16 日受付)