

## 溶接中および冷却過程における鋼材の変形・ひずみ挙動の

### 光学的全視野計測と三次元熱弾塑性 F E 解析

Digital image correlation method and 3D thermal-elastic-plastic FE analysis  
of deformation and strain behavior of steel member in welding and cooling process

出水 享\*, 松田 浩\*\*, 藤野 義裕\*\*\*, 伊藤 幸広\*\*\*\*, 趙 程\*\*\*\*\*

Akira Demizu, Hiroshi Matsuda, Yoshihiro Fujino, Yukihiro Ito, Cheng Zhao

\*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, 大学院工学研究科 (同上)

\*\*\*学士 (工学), 長崎大学大学院生産科学研究科 (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), 同济大学講師, 土木工程学院 (〒200-092 中国上海四平路1239号)

The welding is a technique for connecting two materials by partially heating and melting. Therefore, the welding deformation is inevitably caused by thermal expansion and shrinkage non-uniformly caused. It is important for the quality control of the welding member to understand the deformation and the strain that arises on the surface of the steel member while welding. In this study, the deformation and the strain behavior caused on the surface of the steel member in welding and cooling process were verified by digital image correlation method (DICM) and 3D thermal-elastic-plastic FE analysis.

*Key Words : digital image correlation method, 3D thermal-elastic-plastic FE analysis, welding, cooling*

キーワード: デジタル画像相関法, 熱弾塑性FE解析, 溶接, 冷却

## 1. 序 論

溶接とは局部的に加熱およ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材表面に発生する変形・ひずみを把握することは, 溶接物の品質管理, 残留応力や欠陥発生などの情報を取得する上で重要である.

現在, 溶接などの熱変形シミュレーションは熱伝導解析とその温度履歴に基づく弾塑性解析からなる熱弾塑性

FE 解析が多く利用されている. その理由として, 解析対象物の変位・ひずみ・応力分布を解析対象全域に亘り時系列に算出できることや予測精度が比較的高いことが挙げられる<sup>1)</sup>.

一方, 筆者らは, 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光学的全視野ひずみ計測法の一つデジタル画像相関法(以後, DICM と略記)を用いた溶接中および冷却過程の変形・ひずみ挙動の測定に関する研究を行ってきた<sup>2)</sup>. 結果として, DICM と赤外線サーモグラフィを用いることによ

り、溶接中および冷却過程における鋼板表面に生じる変形・ひずみと温度の関係を評価することができ、本手法の現場溶接への適用性が示された。しかし、DICM の計測値の妥当性については、疑問が残るところである。

そこで、本研究では、溶接中および冷却過程における鋼部材表面に生じる変形・ひずみの時系列変化を熱弾塑性 FE 解析の結果と比較することにより DICM の計測値の妥当性について検討した。

## 2. デジタル画像相関法 (DICM)

### 2.1 原理

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<sup>3)</sup>。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位の大きさと方向を求めることができる手法である。

DICM の特長としては、2 台のカメラを使用することで 3 次元変形・ひずみの計測が可能となることや、高速度カメラを利用することで測定物の瞬間的な変形・ひずみが計測可能となる。さらに、レーザ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<sup>4)</sup>。

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測定対象物表面の変位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))。計測対象物に変形を与えると、変形後

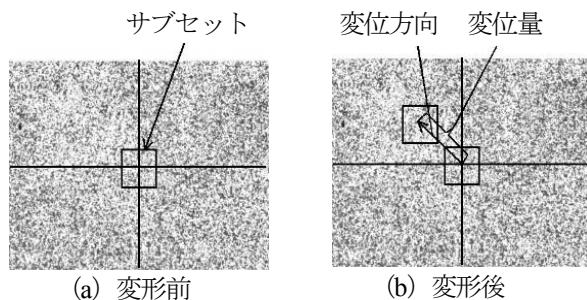


図-1 変形前と変形後のデジタル画像

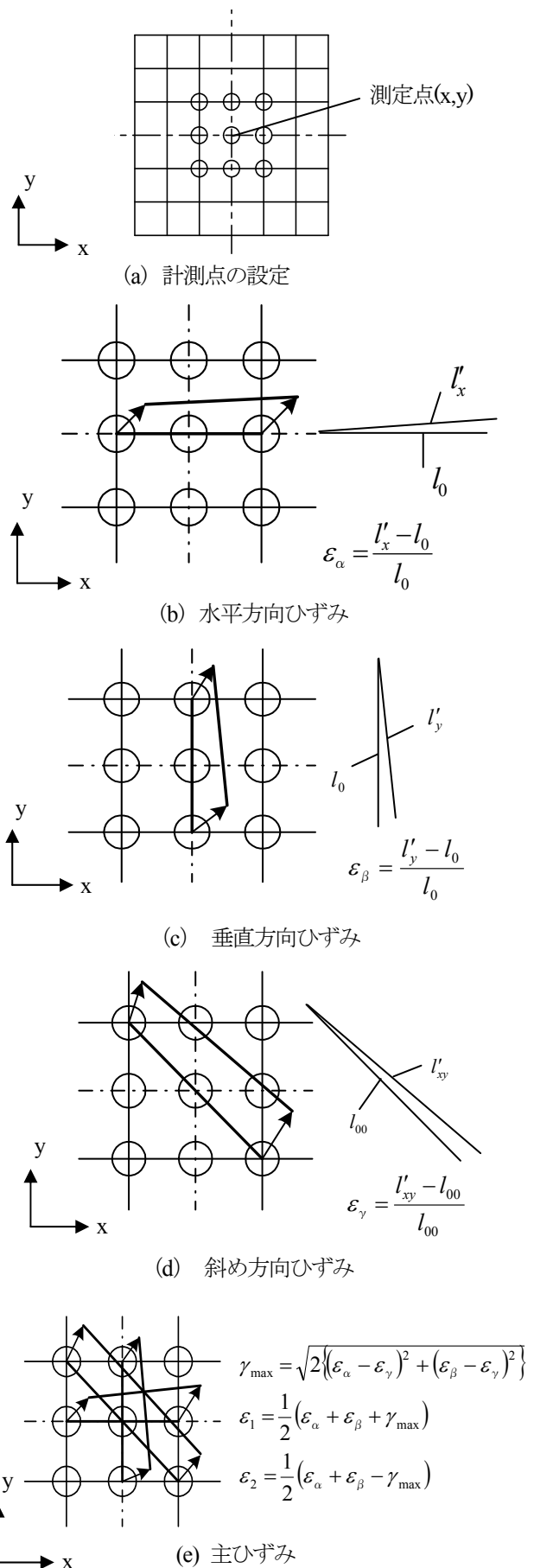


図-2 ひずみ解析

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値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位方向, 変位量を算出する. 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を得ることができる.

ひずみ分布は, 以上の方法により得た変位量を利用して算出する. これは, 図-2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.

## 2.2 キャリブレーションについて

一般に, デジタルカメラのレンズは曲面となっているため, 撮影された画像はひずみを持っている. また, 2台のカメラでステレオ撮影する場合は, カメラ画像の位置合わせを行う必要がある. ここでは, 計測前において2台のCCDカメラで写真-1に示すキャリブレーションプレートを用いて, 位置や角度を変えながら複数枚(20枚から30枚程度)撮影することで, 画像のひずみ補正やカメラの位置合わせを行う.

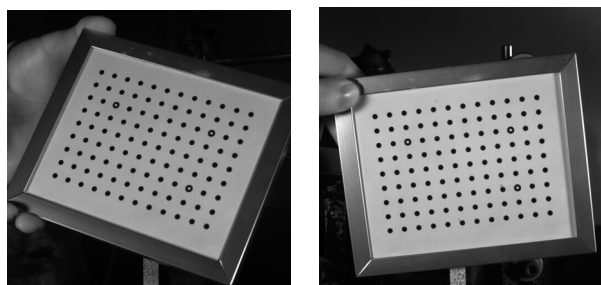


写真-1 キャリブレーション画像



写真-2 計測システム

本計測システムの写真, 概要図, 仕様を写真-2, 図-3, 表-1にそれぞれ示す. 図-3から確認できるように本システムは, 2台のCCDカメラ, レンズ, ノートパソコン, それらを接続するケーブルのみで構成されるため, 簡易なシステムかつ軽量であることから持ち運びが容易である.

本研究では, DICM解析プログラムCorrelated Solutions Vic-3D 2009<sup>5)</sup>を用いて計測を行った. 本研究では, 初期状態(無载荷状態)の画像を常に基準画像として各段階の変形画像を数値像解析し, 各段階間の変位やひずみを算出している.

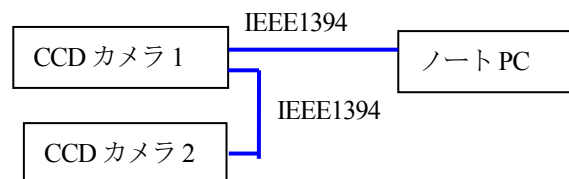


図-3 システム概要図

表-1 計測器仕様

CCD カメラ	型番: Point Grey Research 社 GRASS-50S5M/C 撮像素子: Sony ICX625 CCD 解像度: 2448×2048pixel (500 万画素) 画素サイズ: 3.45 × 3.45μm デジタル画像: モノクロ 8 ビット シャッター形式: 電子シャッター シャッター速度: 0.02ms ~ 10s 最大フレームレート: 15fps レンズマウント: C マウント型 インターフェイス: 9pin IEEE-1394b 重量: 100g
レンズ	Schneider Kreuznach 社 Xenoplan 2.8/ 50mm 重量: 80g
LED ライト	Suntech 社 PL130 光源: 高輝度白色 LED130 個 照度: 3520 lx (50cm・full) 絞値: f11+2/10 (ISO400・1/30 秒・ 50cm・Full) 色温度: 約 5500 K 照射角度: 44 度 *フィルターなしの条件
計測・解析 用 PC	OS: Windows XP Pro CPU: Intel(R) Core(TM)i7 CPU Q 820 @1.73GHz (8CPUs) HD: 300GB メモリ容量: 3.5GB RAM 重量: 3.7kg
赤外線 サーモ	FLIR SC620 解像度: 640×480pixel 測定精度: ±2℃もしくは読値の±2% 測定波長: 7.5~13μm

### 3. 実験概要

試験片概要図を図-4 に示す。試験では、寸法（長さ×幅×厚さ）は、600mm×150mm×9.0mm の SM400A（引張強度 445N/mm<sup>2</sup>、降伏強度 304N/mm<sup>2</sup>、伸び 29%、炭素量 0.15%）を用いた。溶接により発生する変形・ひずみの基本的性質を調べるために、開先等を設けない一枚の試験片とし、ビードオン溶接とした。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 での計測のために、写真-3 に示すように、試験片に黒色のスプレーで下地を塗布し、乾燥後、白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℃～1093℃）を使用した。なお、一般的に耐熱スプレー（特に黒色）は、放射率が高く赤外線サーモグラフィでの温度測定の際に有効な塗料である。

溶接は、1 パスのみとし、溶接長さは試験片の幅 150mm とした。溶接条件として、電流値 85A、電圧値 35V、その試験片を立てて、下端を 2 点固定し、試験片中央部を薄板・軽量鉄骨溶接棒（引張強度 480N/mm<sup>2</sup>、降伏強度 430N/mm<sup>2</sup>、伸び 23%、炭素量 0.08%）を用いてアーク手溶接を横方向に行った。また、溶接速度を約 4.55mm/s とした。

溶接中および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 0.66 m の距離から撮影を行い、カメラ間の距離は約 0.22m とした。1 ピクセル当りの画像の大きさは、約 0.085 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-4 に示す。温度分布を把握するために、赤外線サーモグラフィ（FLIR SC620）を用いて溶接中および冷却過程における溶接面裏側の鋼表面温度分布も計測した。

計測システムと赤外線サーモグラフィを同時刻に設定し、溶接作業直前から同時に 1 秒間隔で計測を開始し、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で撮影した温度分布画像は装置本体の HD に保存した。赤外線サーモグラフィ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。

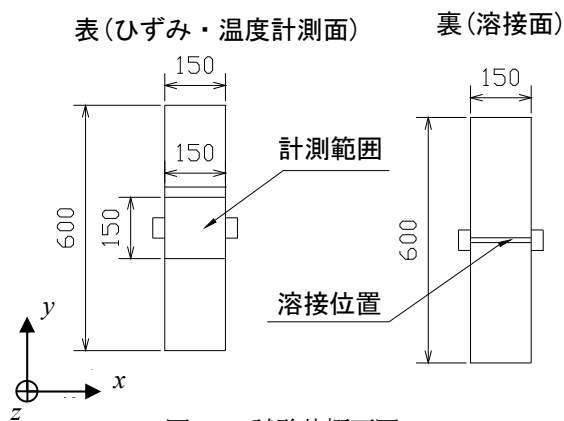


図-4 試験片概要図(mm)

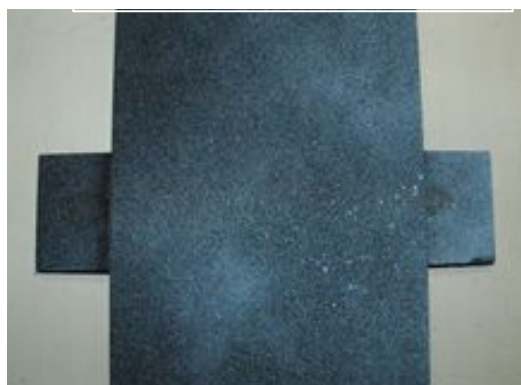


写真-3 試験片写真

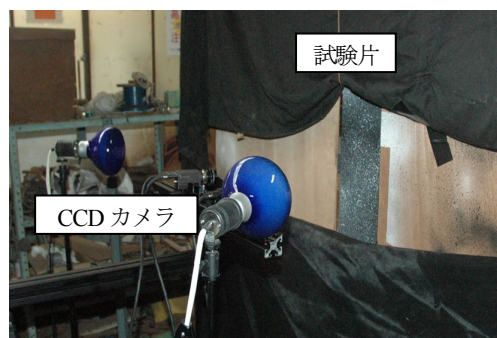


写真-4 計測状況

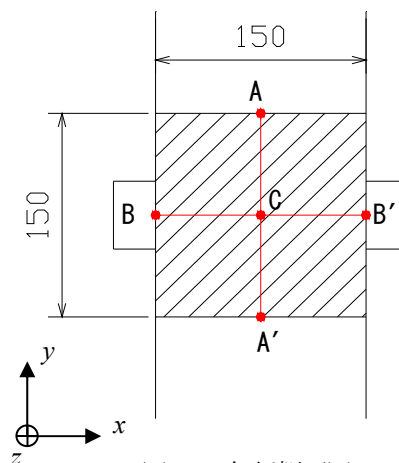


図-5 解析概要図(mm)



#### 4. 解析概要

DICM の計測値の妥当性について検証するために、前節で示した実験と試験片寸法および溶接条件等がほぼ対応した熱弾塑性 FE 解析（以後、解析と略記）による解析結果と比較した。解析には、汎用有限要素解析コード Marc を用いた。図-6 にメッシュ分割図を示す。解析モデルは、8 節点ソリッド要素を用い、全体モデルとした。また、母材中央部左右の SM 材、ビードはモデル化を行い、スラグは、モデル化を行わなかった。ビードは、溶接後にスラグを除去し、その外形状をダイヤルゲージで計測しその形状の平均断面としモデル化を行った。簡易なモデルとするため、溶融部や熱影響部の材料物性の変化は考慮せず、母材と同じ材料物性値とした。

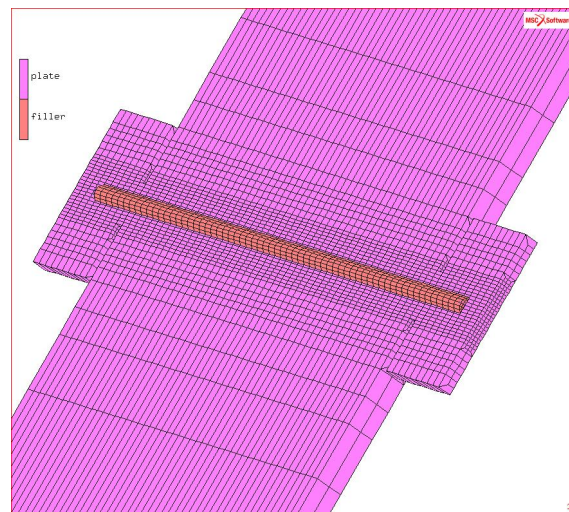
Marc の溶接解析の入熱境界条件<sup>6)</sup>は、電力(=電流×電圧)、熱効率、溶接速度の定義による熱流束条件もしくは融点温度を定義した固定温度境界条件の両者があるが、赤外線サーモグラフィの測定結果を解析に反映させるために後者の条件を用いた。ここでの固定温度境界条件とは、ビード要素を溶接速度で入熱・生成させることを意味する。ビード要素生成時の入熱温度と鋼材の表面熱伝達率は、図-5 に示す C 点が最高温度に達したときの A-C-A' 間、B-C-B' 間の温度分布の推移と C 点の温度履歴が、赤外線サーモグラフィの計測結果に一致する値をパラメトリック解析により決定した。これらの手法を用いた理由として実験に近い入熱条件を再現するためである。また、表面熱伝達率に関する文献が不足していることもその理由の一つである。

解析で使用したパラメーターを表-2 に示す。降伏強度、静弾性係数、比熱、熱伝導率は、温度依存性を考慮し、ポアソン比、線膨張係数、比重に関しては、温度依存性を考慮しなかった。

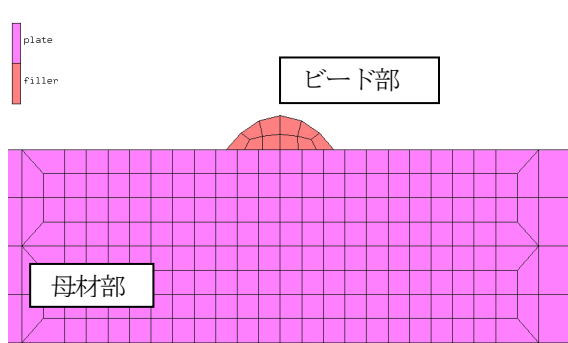
図-7 に 0℃時の母材とビードの応力ひずみ関係を示す。ビードと母材の応力ひずみ関係は、降伏強度以降において一定値とする完全弾塑性モデルとした。図-8 に降伏強度と静弾性係数の温度依存性を示す。溶接時の挙動を模擬するために力学的強度を持たなくなると考えられる温度を力学的溶融温度とし、それ以上での静弾性係数、降伏強度は 0 に近い値を用いた。静弾性係数は文献<sup>7)</sup>、降伏強度は文献<sup>8)</sup>を参考にして力学的溶融温度を 750℃とし、0℃から 750℃まで直線的に低下し、750℃以上は 0℃時の 1%の値を保つようにした。

比熱と熱伝導率の温度依存性を図-9、10 にそれぞれ

示す。ビード（炭素量 0.08%）は、炭素量が同じ材料物性値のデータ<sup>9)</sup>を使用した。母材（炭素量 0.15%）に関しては、文献<sup>9)</sup>より炭素量 0.08%と 0.23%のデータから線形補完して算出した。ビード及び母材の 1200℃以上の値に関しては、1000℃～1200℃のデータから外挿して算出した。鋼材の初期温度と周辺温度は、赤外線サーモグラフィと熱電対により計測した値を用いた。



(a)全体



(b)ビード部

図-6 メッシュ分割図

表-2 解析パラメーター

物理量		温度依存考慮	入力値
静弾性係数	N/mm <sup>2</sup>	有	図-8
降伏強度	N/mm <sup>2</sup>	有	図-8
ポアソン比	—	無	0.3
比重	ton/mm <sup>3</sup>	無	$7.85 \times 10^{-5}$
線膨張係数	/℃	無	$1.2 \times 10^{-5}$
比熱	J/ton・℃	有	図-9
熱伝導率	W/℃mm	有	図-10
初期温度	℃	—	22.5
周辺温度	℃	—	30.0
溶接速度	mm/s	—	4.55

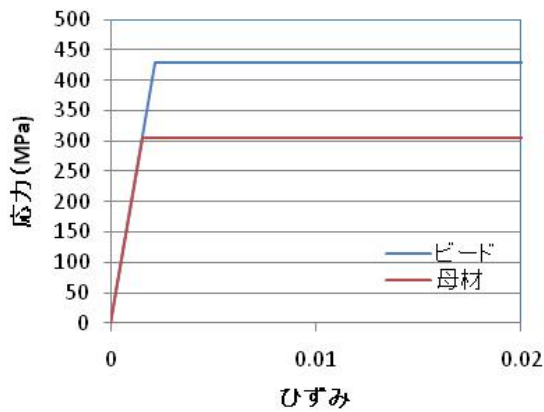


図-7 応力ひずみ関係 (0°C時)

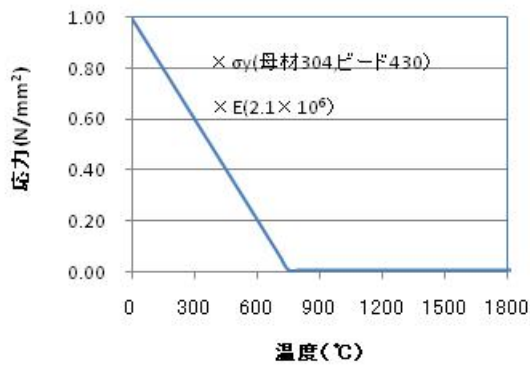


図-8 降伏強度と静弾性係数の温度依存性

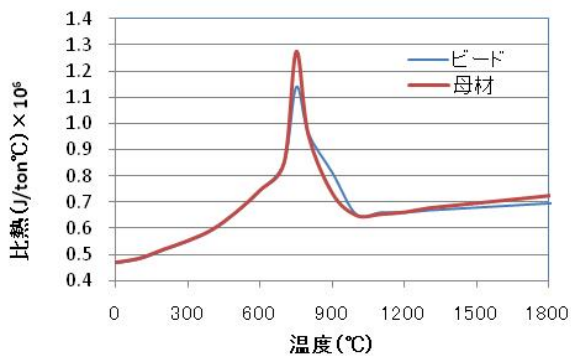


図-9 比熱の温度依存性

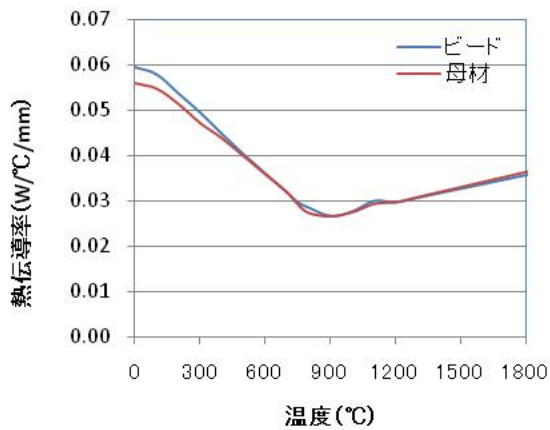
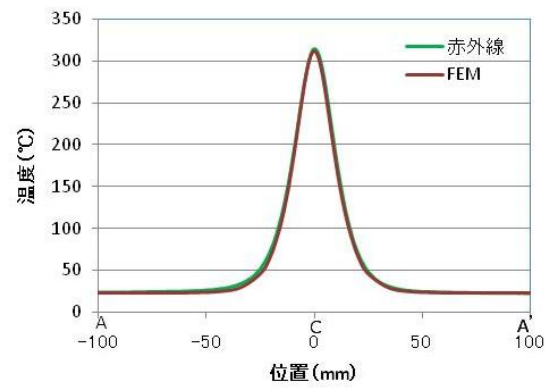
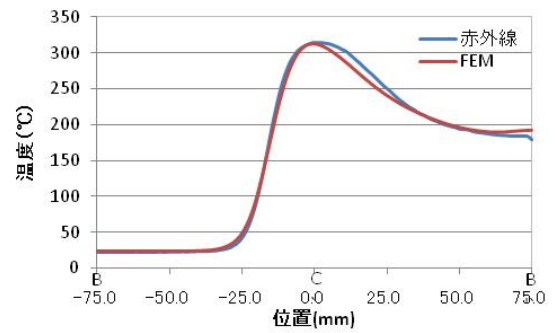


図-10 熱伝導率の温度依存性

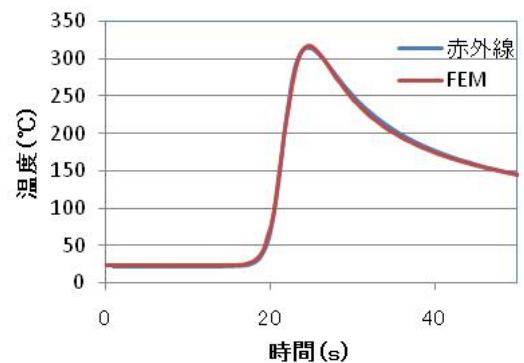


(a) A-C-A' 間

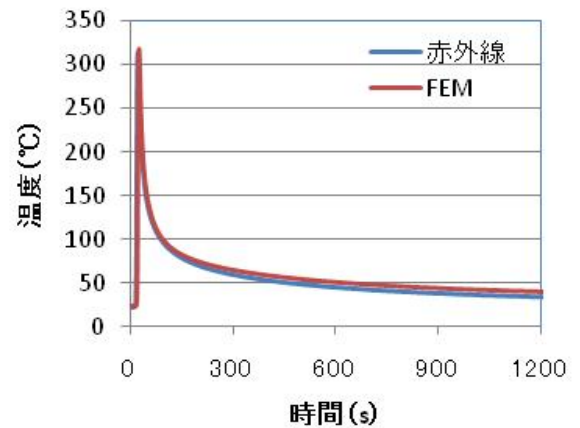


(b) B-C-B' 間

図-11 温度の推移の比較



(a) 0~100s 間



(b) 0~1200s 間

図-12 C 点の温度経時変化の比較

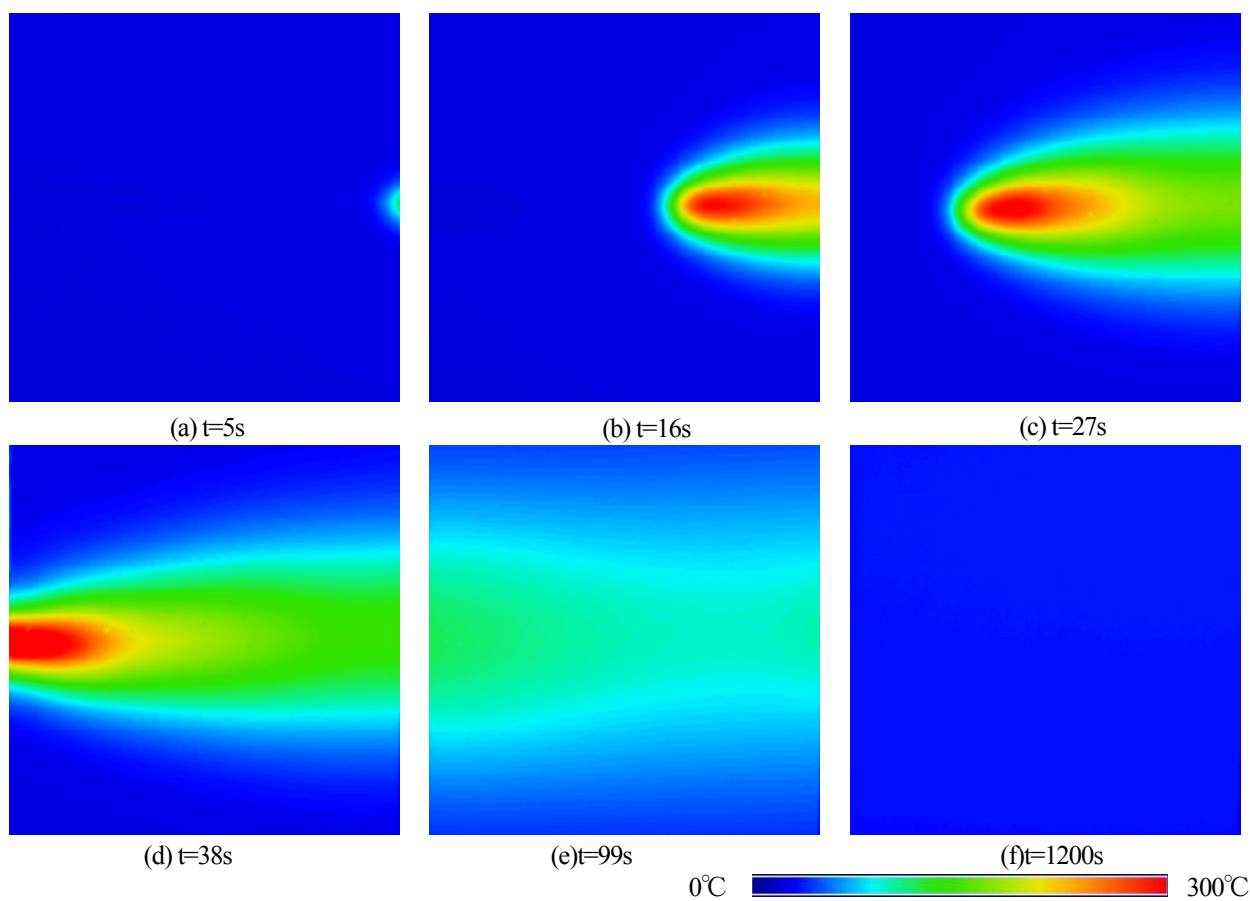


図-13 温度分布 (赤外線)

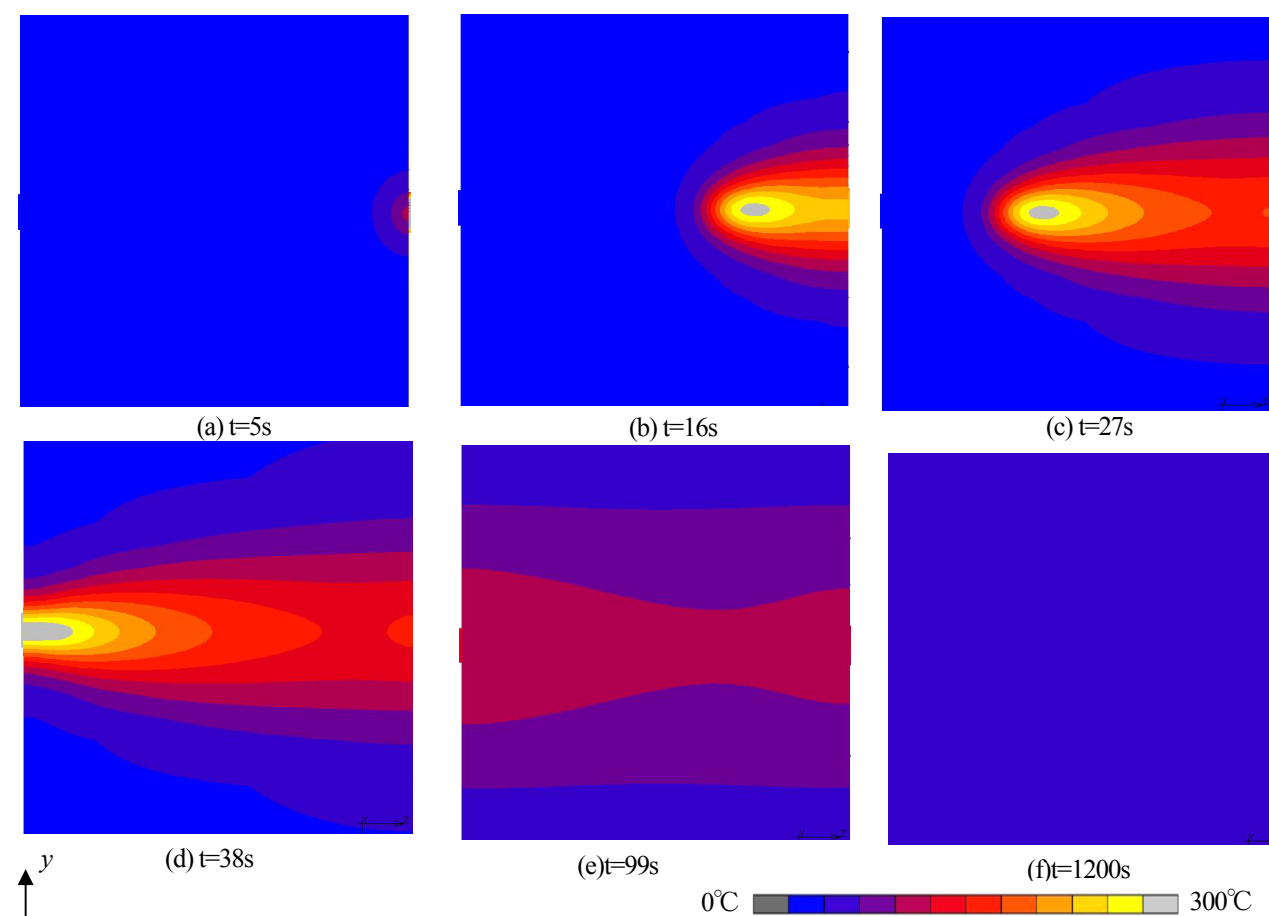
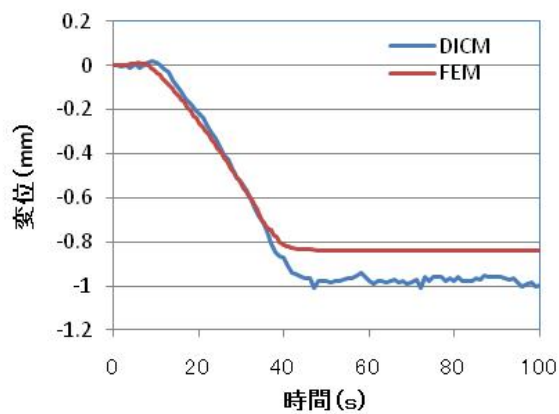
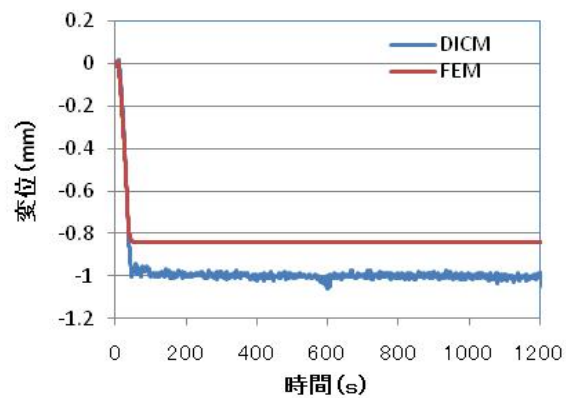


図-14 温度分布 (FEM)

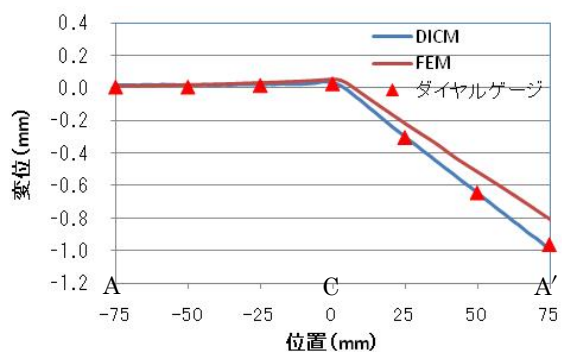


(a) 0s~100s

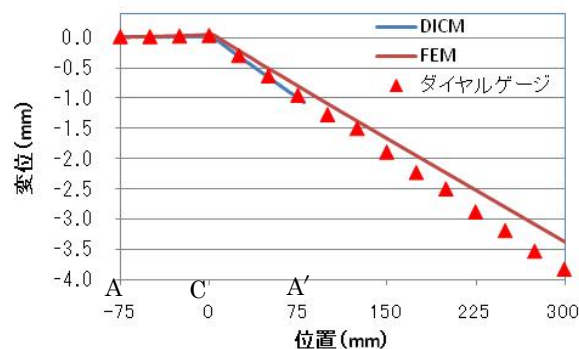


(b) 0s~1200s

図-15 A 点の  $z$  方向変位の経時変化の比較

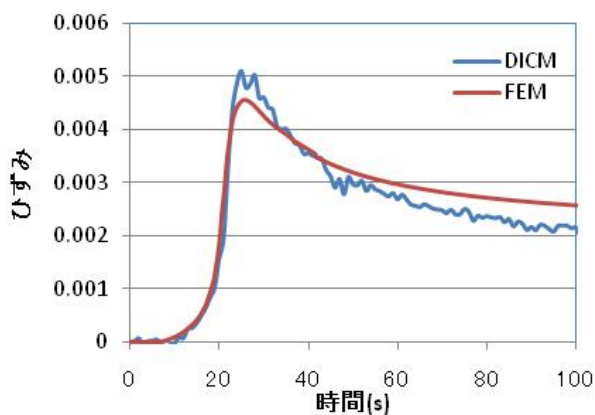


(a) -75mm~75mm 間

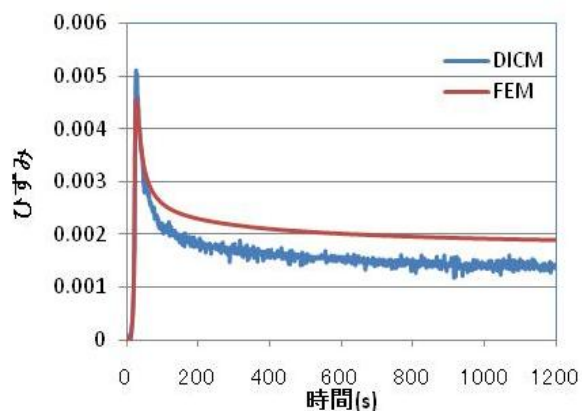


(b) -75mm~300mm 間

図-16  $z$  方向変位の比較(1200s)

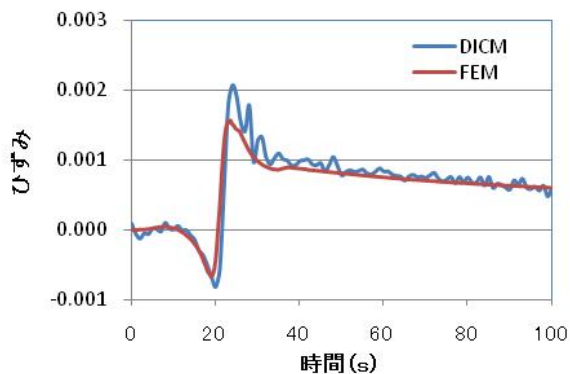


(a) 0s~100s

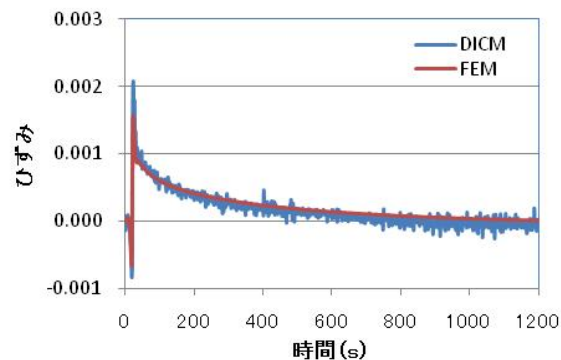


(b) 0s~1200s

図-17 C 点の  $y$  方向ひずみの経時変化



(a) 0s~100s



(b) 0s~1200s

図-18 C 点の  $x$  方向ひずみの経時変化



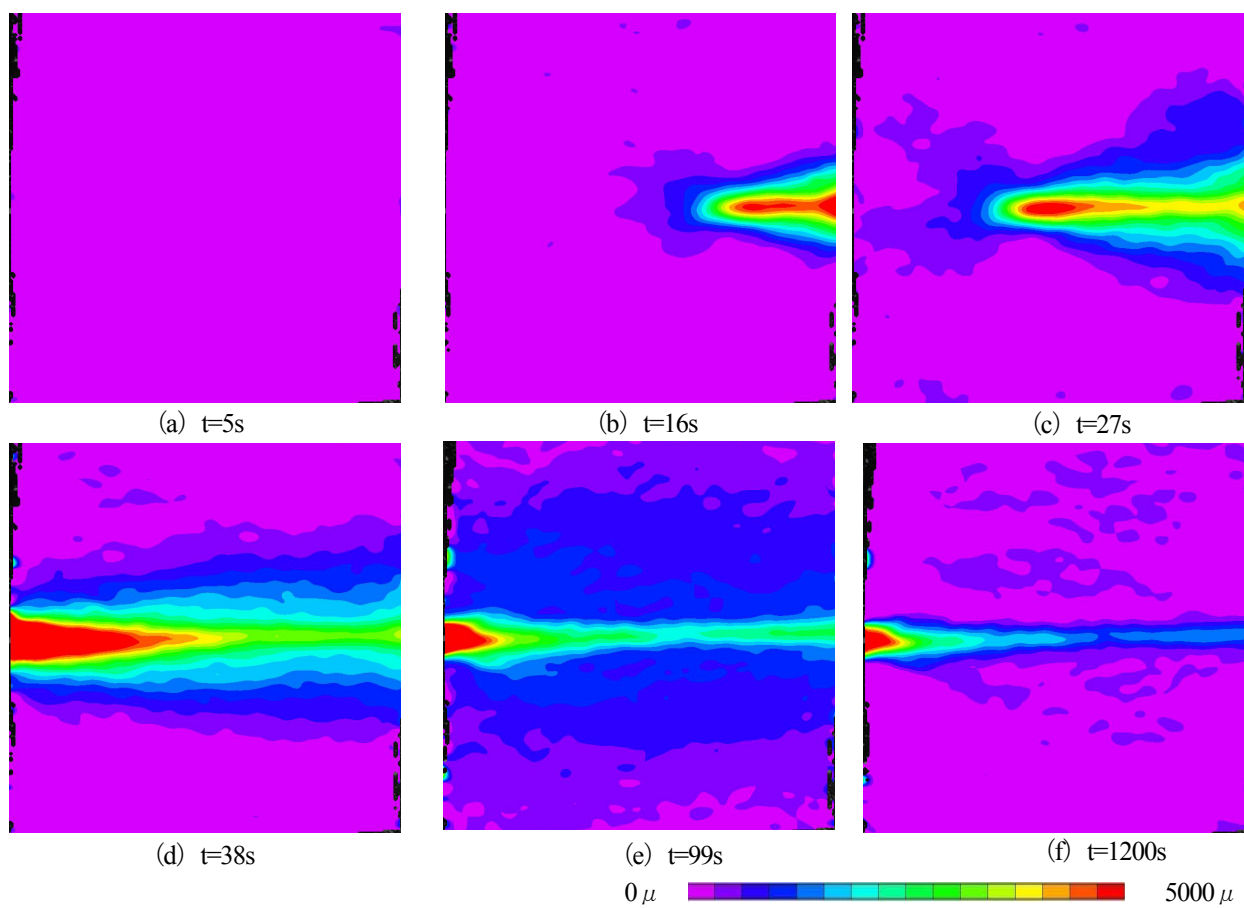


図-19  $y$  方向ひずみ分布 (DICM)

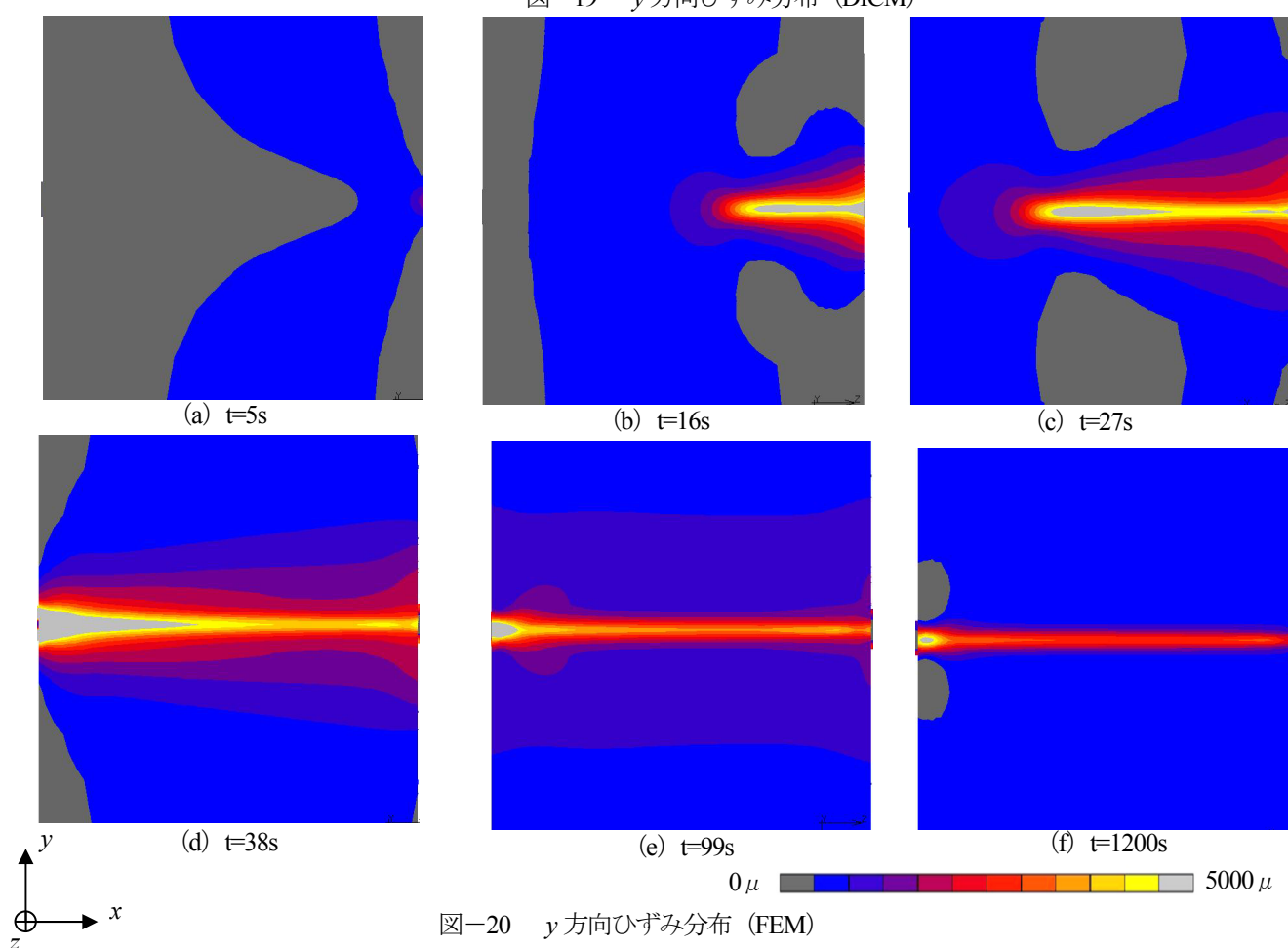


図-20  $y$  方向ひずみ分布 (FEM)

## 5. 考 察

入熱温度と表面熱伝達率を決定するためにパラメトリック解析を行った結果、入熱温度 1780℃、表面熱伝達率 10 W/mm<sup>2</sup>・℃の際に赤外線サーモグラフィの結果とほぼ一致した。その際の図-5 の C 点が最高温度に達したときの A-C-A' 間、B-C-B' 間の温度の推移を図-11、C 点の温度経時変化を図-12 にそれぞれ示す。図-11 より解析は、x 方向、y 方向の温度の広がりとその勾配を精度よく再現できている。また、図-12 においても温度上昇および冷却過程の履歴を精度よく再現できている。

赤外線サーモグラフィと解析による温度分布を図-13、14 にそれぞれ示す。図中の(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し、(a)～(f)の時間(t=5s, 16s, 27s, 38s, 99s, 1200s)は、溶接開始時からの経過時間を表す。カラースケールの色調は異なっているが、溶接開始直後・溶接中・溶接後の冷却過程において、解析は赤外線サーモグラフィの温度分布と定性的に一致していることが分かる。

図-5 の A 点の z 方向変位の履歴、溶接開始から 1200 秒後の z 方向の変位の推移を図-15、16 にそれぞれ示す。図-16 にはダイヤルゲージで計測した結果も合わせて示す。図-15 より溶接開始から 10 秒後に変形が開始し、約 45 秒間でその変形が定常状態であることが確認できる。図-16 より C 点を境に鋼板が変形しているのが確認できる。図-15、16 より DICM に比べて解析が若干小さい値を示したが、0.2mm 程度の差はほとんど僅かであり誤差の範囲内であると考えられるため、おおむねその挙動が一致しているのが分かる。また、図-16 より DICM とダイヤルゲージの値が一致しているのが確認できる。

図-5 の C 点の y 方向、x 方向ひずみの経時変化を図-17、18 にそれぞれ示す。図-17 より溶接開始約 25 秒でひずみが増加し最大(引張)に達し、その後徐々に低下し一定になっている。図-18 より溶接開始約 20 秒でひずみが低下し最小(圧縮)、その 5 秒後にひずみが最大(引張)に達し、その後徐々に低下し一定になっている。

図-15～18 より DICM と解析は、若干の差異が確認された。その原因としては、手溶接であるためビードの形成が一定でないこと、解析では溶融部や熱影響部の材料物性の変化は考慮せず、母材と同じ材料物性値としたためだと考えられる。

DICM と解析による y 方向、x 方向ひずみ分布を図-19、20 にそれぞれ示す。カラースケールの色調が異なっ

ているが、溶接直後・溶接中・溶接後の冷却過程において DICM と解析は定性的に一致していることが分かる。

## 6. 結 論

今回、DICM により計測した変形・ひずみ計測結果の妥当性を評価するために三次元熱弾塑性 FE 解析を実施した。得られた結果を以下に示す。

- ・赤外線サーモグラフィにより計測した温度分布・温度履歴に一致するような入熱温度、表面熱伝達率をパラメトリック解析により算出することができた。
  - ・パラメトリック解析で算出した入熱温度、表面熱伝達率を使用した際の解析結果は、DICM の変形・ひずみ分布および履歴と定性的・定量的にほぼ一致していた。
- 以上から、DICM により計測した変形・ひずみは、ある程度、信頼できる値だと言える。今後、各種条件を変化させた実験を行いこの手法の有効性を検証していく。

## 謝辞

本研究は平成 23 年度笹川科学研究助成の補助により実施しました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 望月 他:溶接残留応力の固有ひずみ解析および熱弾塑性解析とその中性子回折測定による検証,日本機械学会論文集 A 編, 63(612), pp.1675-1680, 1997.
- 2) 出水享 他: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, 構造工学論文集 Vol.57A, pp.86-93, 2011.
- 3) レーザー計測技報:安全の評価のための非接触計測技術について, (株)レーザー計測, pp.1-8, 2006.
- 4) 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, 日本実験力学学会講演論文集合同ワークショップ 2006, No.6-1, pp.36-39, 2006.
- 5) Correlated Solutions: Vic-3D 2009 Reference Manual, correlatedsolutions, 2009.
- 6) MSC.Marc2010 マニュアル, MSC Software, 2010.
- 7) 上田幸雄 他:有限要素法による熱弾塑性挙動の解析, 溶接学会誌 42 巻 6 号, pp.567-577, 1973.
- 8) 上田幸雄, 村川英一, 麻寧緒:技術者のための「溶接変形と残留応力」攻略マニュアル, pp.53-58, 2007.
- 9) 鉄鋼便覧(第 3 版):(社)日本鉄鋼協会編, 丸善, 1981.  
(2011 年 9 月 14 日受付)