

第 4 章

鋼部材の溶接および冷却過程における 温度，変形，ひずみ計測

4.1 概要

溶接とは、材料に応じて接合部が連続性を持つように、熱または圧力もしくはその両者に加え、さらに溶加材を加え、部材を接合する方法である。しかし、溶接では、局所的な熱膨張・収縮やそれに伴う塑性変形が原因で溶接変形や残留応力の発生が不可避である。特に、溶接残留応力は構造物の座屈・塑性崩壊強度、脆性破壊強度、疲労強度、腐食環境における強度に対して大きな影響を及ぼすことが知られている^{1)~6)}。このようなことから溶接変形や残留応力は溶接構造物の強度的な信頼性を損なうため、これらを予測し低減することは、健全な構造物を設計する上で重要となる。

溶接変形を予測する手法としては、有限要素法を用いた熱弾塑性解析^{7)~12)}が、最も多く用いられている。熱弾塑性解析は、熱伝導解析とその温度履歴に基づく弾塑性解析を行う手法であり、解析対象全域に亘り、刻々と変化する溶接の変形過程を解析できることや溶接に伴う力学的現象を詳細かつ高精度にシミュレートできる特徴をもつ。しかし、解析を行う場合には、解析対象物を要素に分割する必要がある。その解析精度は要素の集積度や性質に大きく影響されるため、解析対象物が大規模かつ複雑な形状を有している場合には、要素分割を主とするプリプロセッシングに多くの時間を消費する。さらに、大変形問題やき裂進展問題のように解析途中において要素再分割を必要とする問題では特に多くの労力と計算コストを要する。そのため、MLPG (Meshless Local Petrove-Galerkin Method)法をはじめとするメッシュレス法^{13)~16)}などの研究・開発が行われている。

一方、溶接継手ごとの固有変形量が事前に求められている場合には、弾性解析により構造物全体の溶接変形を予測できた固有ひずみ法を用いることができる。この手法は、短時間に溶接変形を予測することができるが、高精度に固有変形を求める方法が必要であり、村川ら¹⁷⁾¹⁸⁾は、試験片に正確に円孔を設け、その中心座標を接触式三次元形状計測装置にて計測することにより、固有変形4成分を計測する方法を確立している。

溶接部は一時的に1000°C以上の高温に晒されるため、溶接部近傍においてはひずみゲージや変位計などの接触式センサは、耐火性の問題から変位やひずみ計測は不可能である。入熱量によって異なるが、通常、溶接の面内変形はサブミリのオーダーであることが多く、面内変形を計測するためには、高い精度が要求される。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^{19)~24)}が実施されているが、この手法は室内など外乱の影響がない状況下において高精度に計測できる一方で、高温時の計測空間の空気の揺らぎで計測結果に乱れが生じる他に計測物理量のレンジが狭い、レーザ光源や精密な光学系を必要とするため計測システムが高価であるなどの問題が多くある。

そこで本研究では、溶接中の変形・ひずみの基本的な挙動を把握するため、DCIMを用いて溶接中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および面外方向の変位の計測を実施した。さらに、ひずみ発生の原因である温度分布の変化を全視野的に捉えるため、赤外線サーモグラフィ装置（以下サーモと呼ぶ）により温度分布計測も行った。また、熱弾塑性FE解析を実施し、DICMの計測値の妥当性について検討を行った。

4.2 計測概要

試験で使用する材料の物性値を表 4.2.1 に、試験片概要図を図 4.2.1 に示す。試験では、長さ 300mm、幅 150mm、厚さ 9mm、12mm、16mm の SM400A を用い、それぞれ 3 枚ずつ計測を行った。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、開先など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。

試験片を写真 4.2.1 に示す。DICM を用いた計測のために、試験片の表面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²⁵⁾ (704°C~1093°C) を使用した。(写真 4.2.2)

その試験片を立てて、下端の 2 点をボルトで固定し、試験片中央部を被覆アーク溶接棒 (JIS Z 3211 E 4313) を用いてアーク手溶接を横方向に行った。溶接状況および計測状況を写真 4.2.3、写真 4.2.4 に示す。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 115A、電圧値 30V 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 465mm の距離から計測を行った。この計測条件下での画像解像度は、約 0.08 mm/pixel となる。例えば 10mm の長さは、約 125pixel で構成されることになる。また、温度状態を全視野で確認するために、高温レンジ計測モード (20°C~1500°C の範囲内) を搭載しているサーモ (FLIR SC620)²⁶⁾ 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。サーモの仕様を表 4.2.2 に示す。

計測では、ノートパソコンとサーモを同時刻に設定し、溶接作業直前から同時に計測を開始し、それぞれ 1 秒間隔で計測を行い、サーモ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。

また、DICM の面外方向の変位計測精度の確認のため、計測終了後 (1200 秒以降) に接触式変位計による計測を行った。

表 4.2.1 物性値一覧

項目	引張強度 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	伸び (%)	炭素量 (%)
9mm 試験片	496	341	29	0.15
12mm 試験片	487	345	32	0.14
16mm 試験片	483	341	32	0.15
溶接棒	480	430	23	0.08

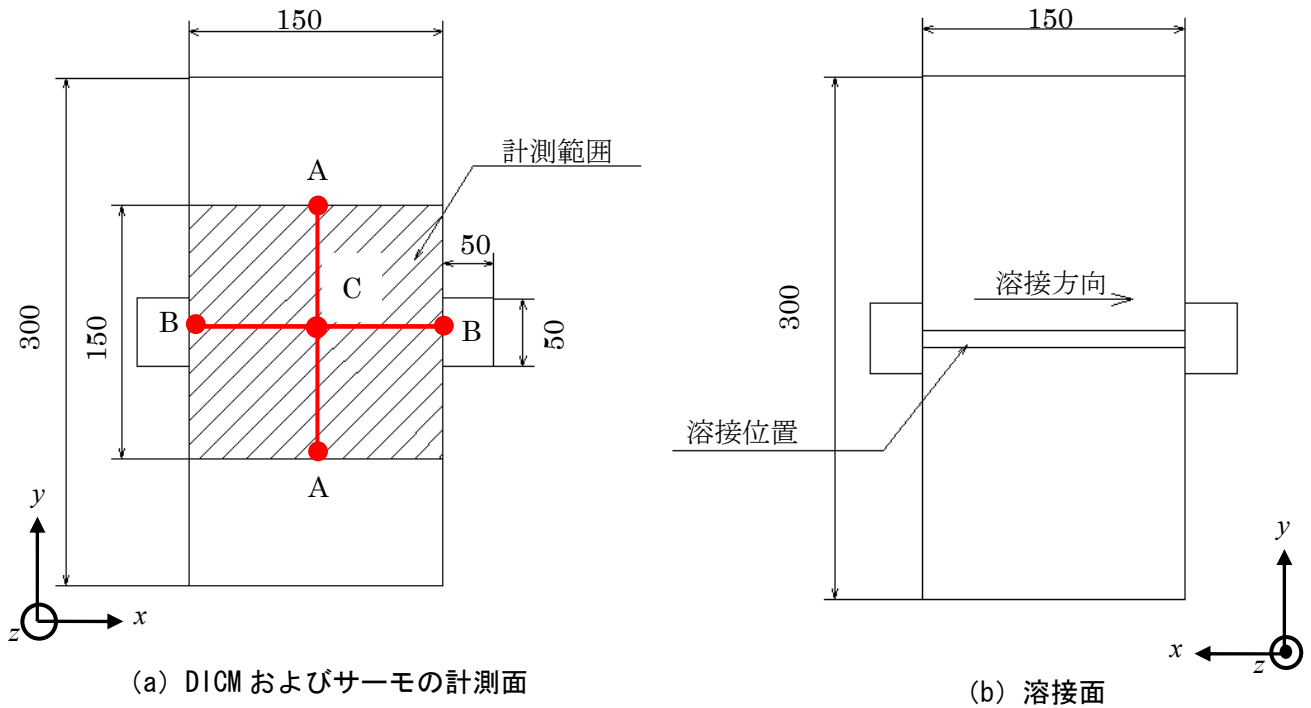


図 4.2.1 試験片概要図 (mm)

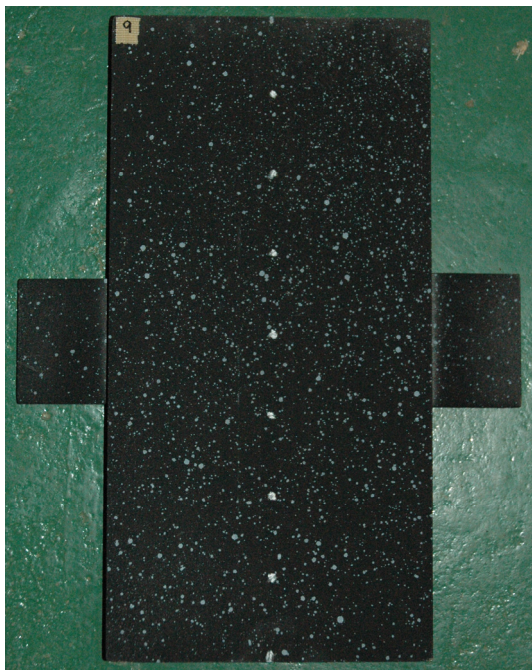


写真 4.2.1 試験片



写真 4.2.2 耐熱スプレー²⁵⁾



写真 4. 2. 3 溶接状況

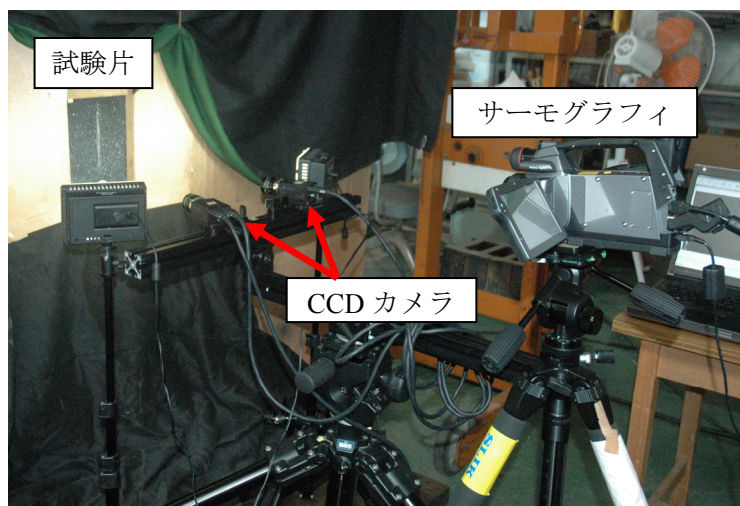


写真 4. 2. 4 計測状況

表 4. 2. 2 サーモグラフィ仕様²⁶⁾

機種名	FLIR SC620
温度計測範囲	20℃～1500℃
検出素子	非冷却マイクロボロメータ
解像度	640×480pixel
計測精度	±2℃もしくは読値の±2%
計測波長	7.5～13μm
放射率	調整範囲：0.01～1.00
最低焦点距離	0.3m
視野角	24°×18°

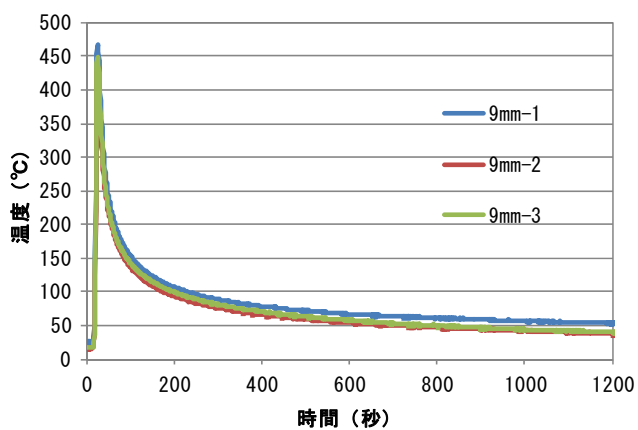
4.3 計測結果

DCIM およびサーモによる溶接中およびその冷却過程における鋼板表面に生じる温度，変形，ひずみの計測結果を以下に示す．DICM による変形，ひずみの算出は溶接を行っていない無負荷時を初期画像として，溶接中ならびに冷却過程における変形画像から算出した．

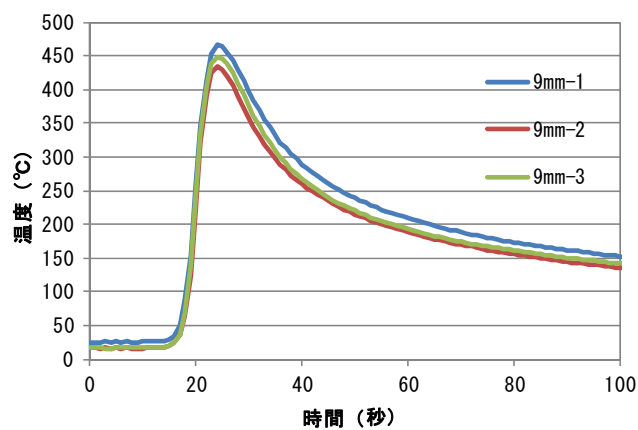
4.3.1 温度について

サーモにより得た図 4.2.1 の C 点における 9mm，12mm および 16mm 試験片の温度経時変化を図 4.3.1～図 4.3.3 に示す．図より，試験片ごとに最高温度に若干の差異が確認されたが，温度上昇から低下の挙動を計測できた．最高温度は，9mm 試験片では約 450℃，12mm 試験片では約 330℃および 16mm 試験片では約 230℃となっており，試験片が薄くなるにつれて最高温度が高いことが確認できた．また，いずれの試験片においても溶接開始から 1200 秒後は試験片の温度が 50℃程度に低下しており，試験片が厚ければ温度が低下しにくいことが確認できた．

サーモにより得た 9mm，12mm および 16mm 試験片の温度分布を図 4.3.4～図 4.3.6 に示す．なお，図中にはアークの位置を丸（点線）で示す．図中の (a)～(f) は，溶接開始からの経過時間を表し，(a) は溶接棒の位置が図 4.2.1 の B' と C 点の中間部に位置するとき，(b) は溶接棒の位置が C 点に位置するとき，(c) は溶接棒の位置が B と C の中間部に位置するとき，(d) は溶接終了時，(e) は冷却過程，(f) は計測終了時を示す．図より，時間の経過に伴い溶接棒直下の最高温度領域が楕円形状を保ちながら， x 方向に移動しているのが確認できた．また，最高温度領域の通過直後その温度が y 方向に広がっているのが確認され，1200 秒で温度が全体的に均一になっているが確認できた．

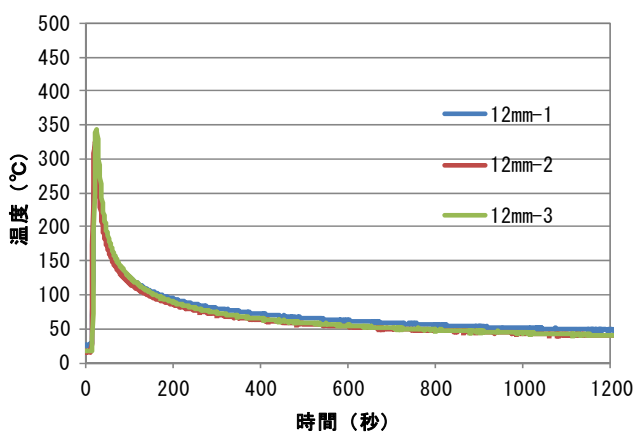


(a) 0~1200 秒間

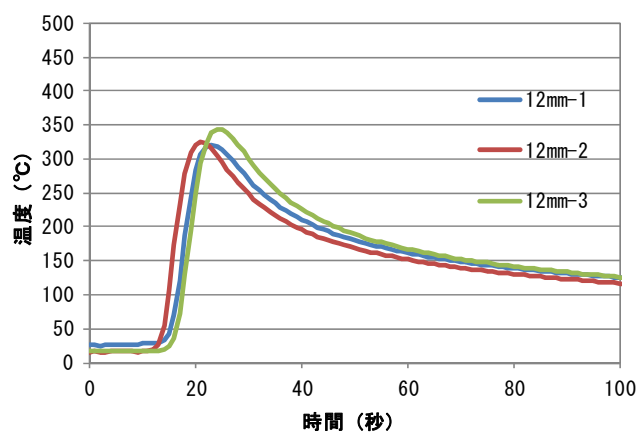


(b) 0~100 秒間

図 4.3.1 温度経時変化 (サ一モ 9mm)

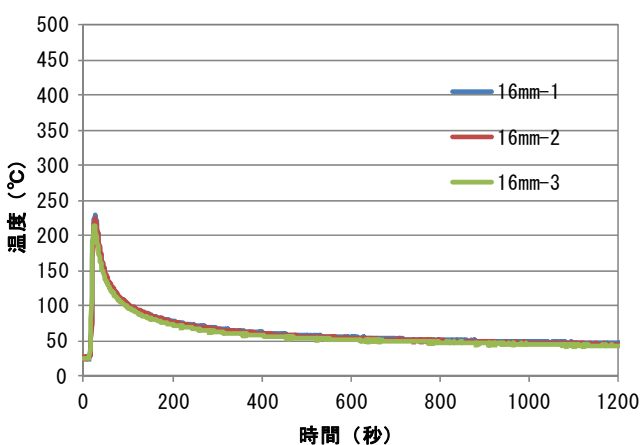


(a) 0~1200 秒間

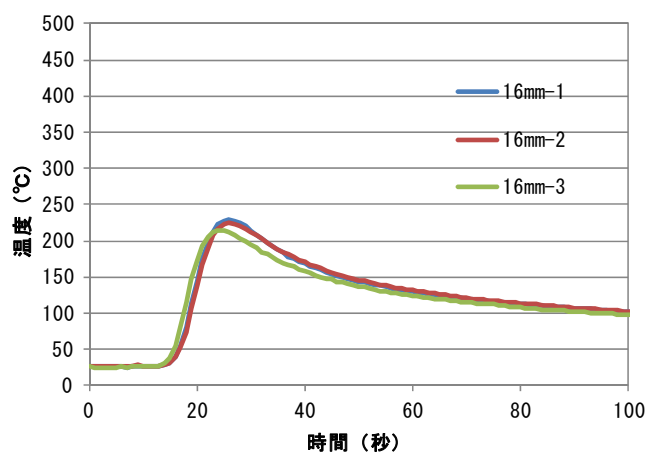


(b) 0~100 秒間

図 4.3.2 温度経時変化 (サ一モ 12mm)



(a) 0~1200 秒間



(b) 0~100 秒間

図 4.3.3 温度経時変化 (サ一モ 16mm)

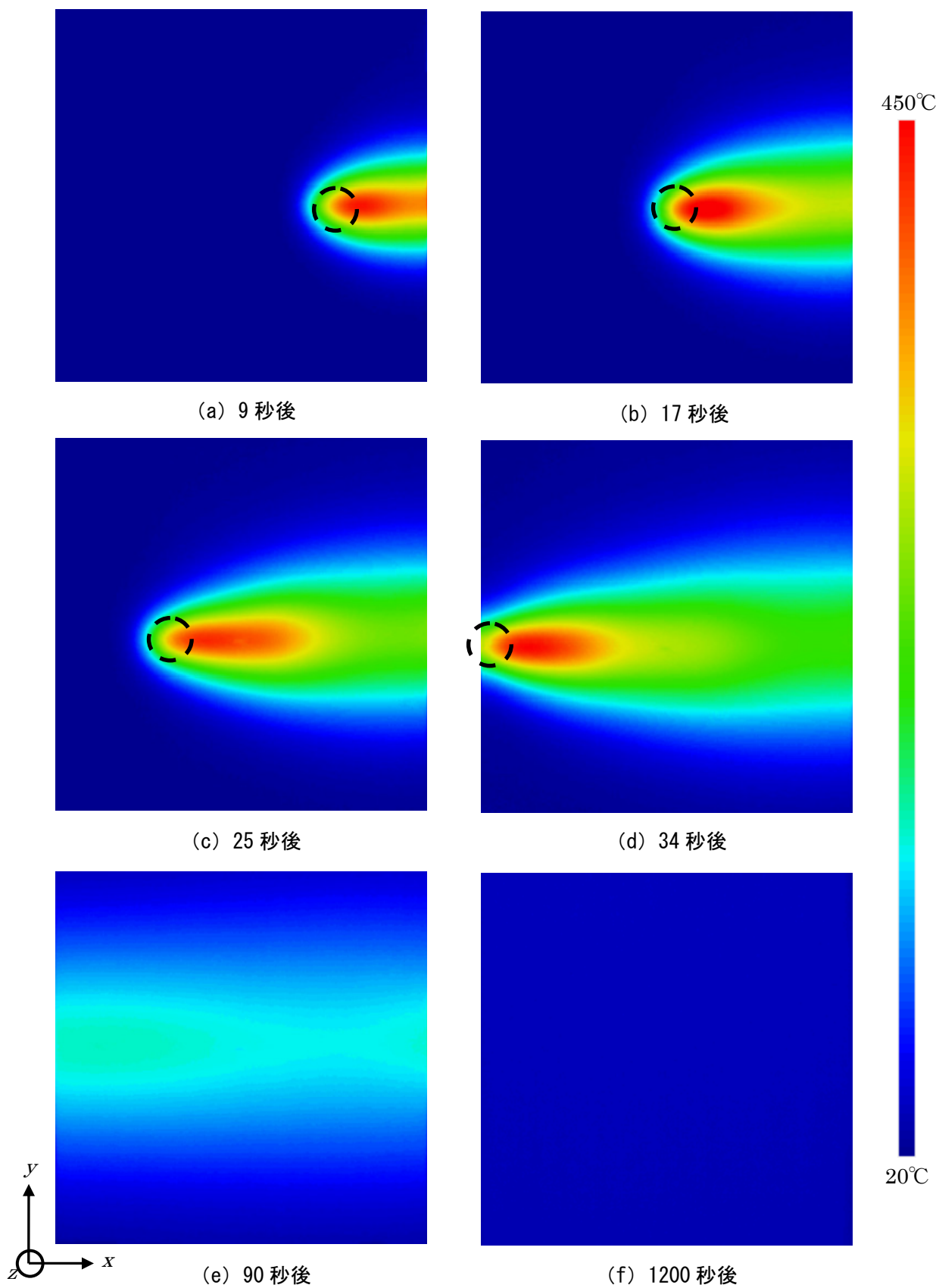


図 4.3.4 温度分布(サーモ 9mm)

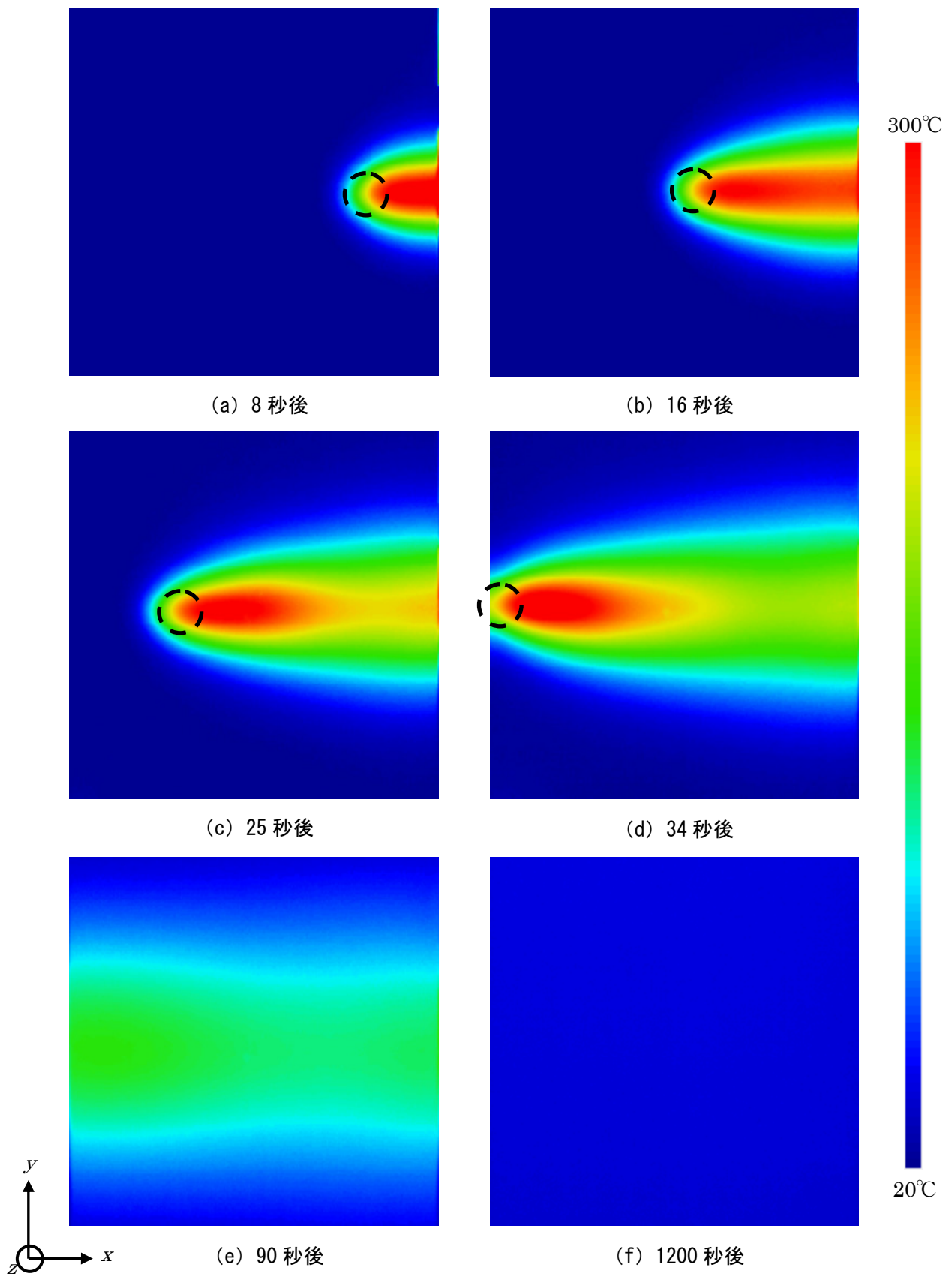


図 4.3.5 温度分布(サ一モ 12mm)

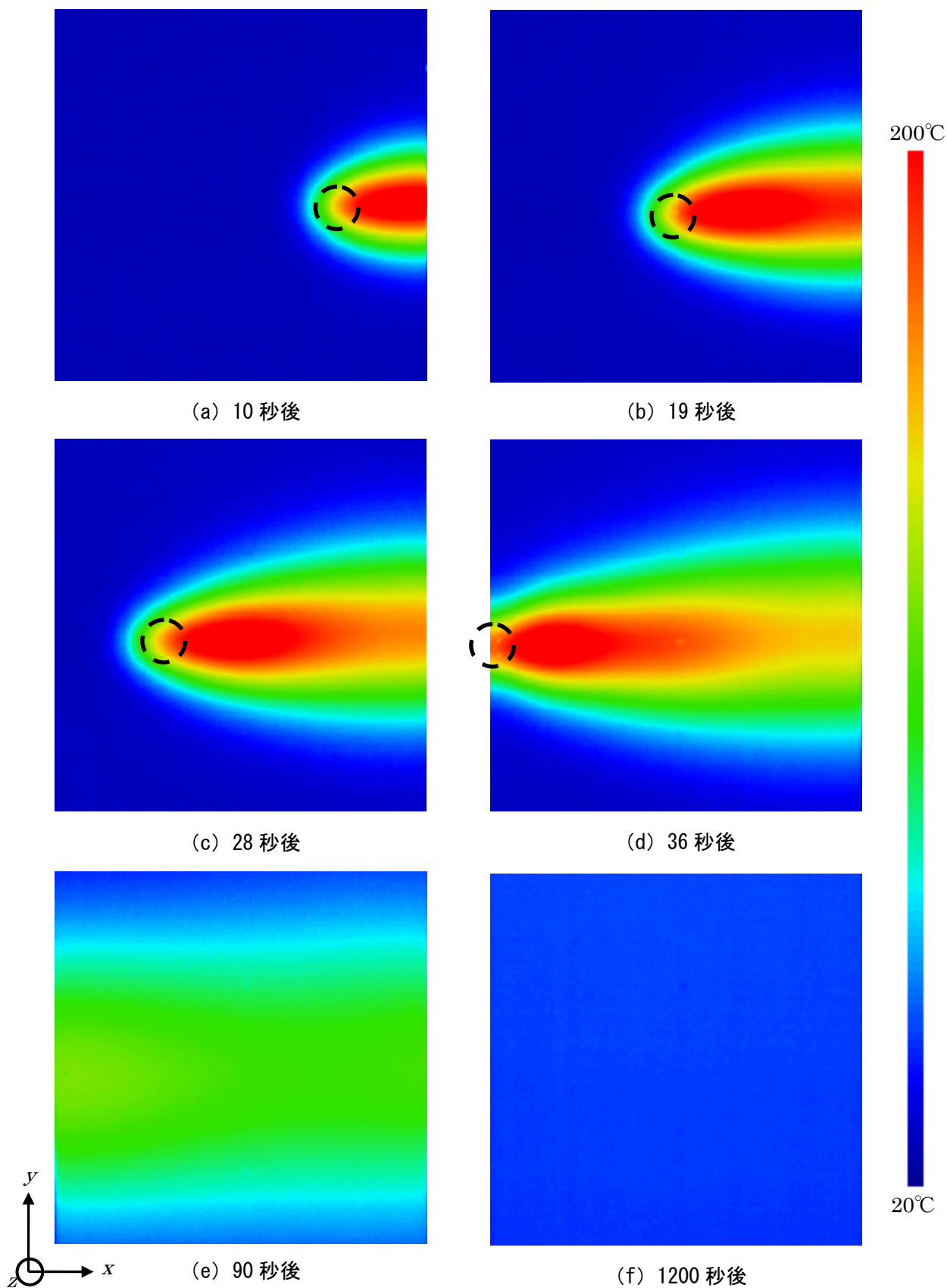


図 4.3.6 温度分布(サ一モ 16mm)

4.3.2 面外方向 (z方向) 変位について

変位計およびDICMより得た9mm, 12mm および16mm 試験片の計測終了時(1200秒)の図4.2.1のA-C-A'の面外方向(z方向)の変位を図4.3.7に示す. 図より, A点の面外変位は, 9mm 試験片は約1.4mm, 12mm 試験片は約1.0mm および16mm 試験片は約0.6mm であり, 試験片が厚くなるにつれて面外方向の変位が減少した. また試験片中央(C点)を境に, 試験片が変形していることが確認できた. 全試験片においても変位計とDICMの結果はほぼ一致しており, DICMの面外方向変位の計測精度が高いことが確認できた.

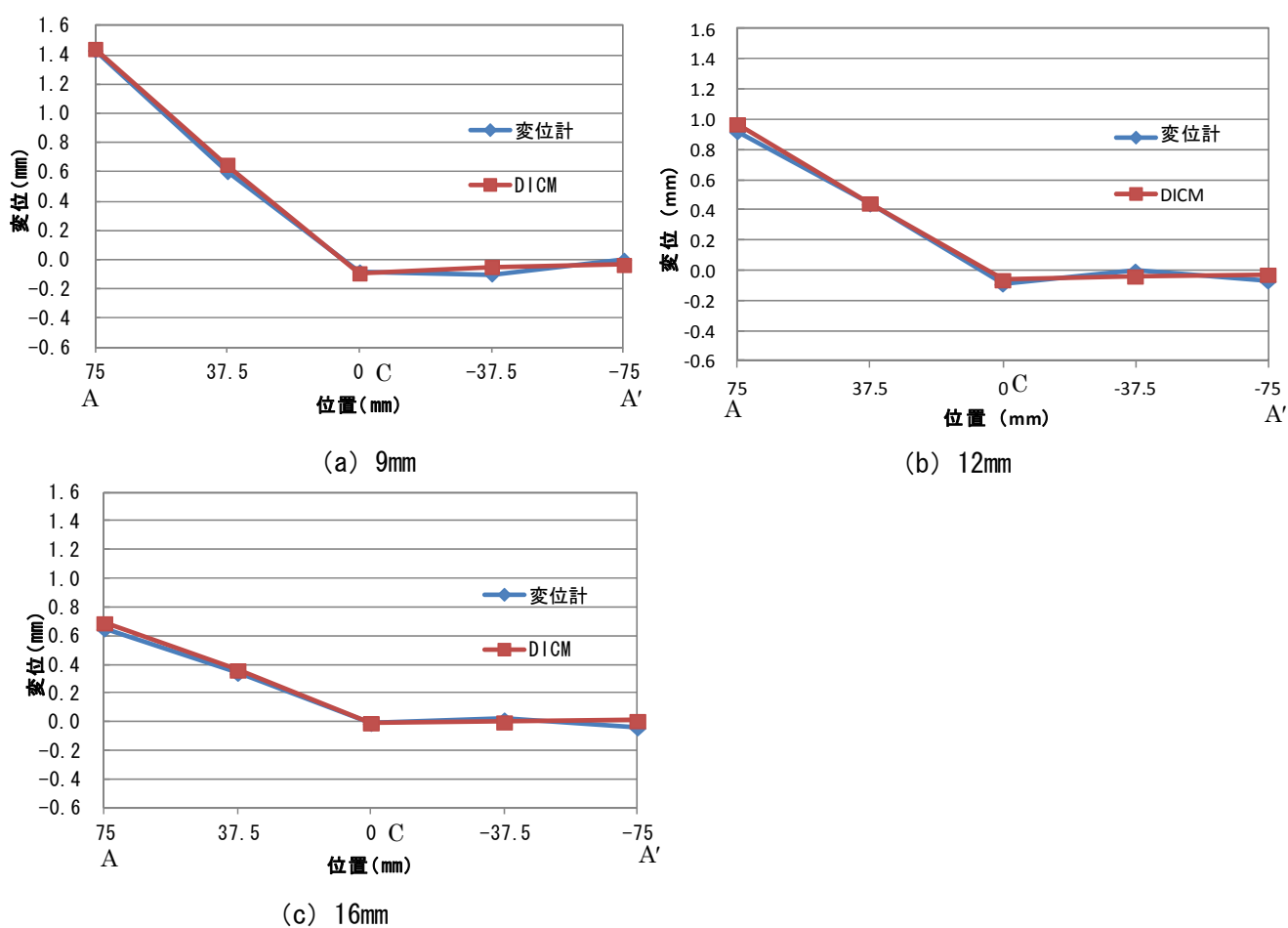
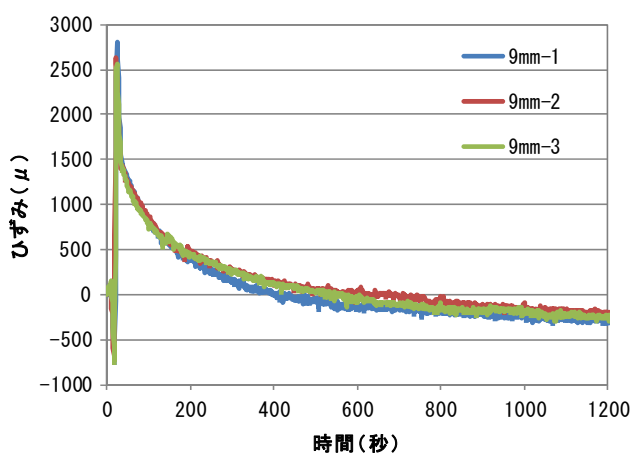


図 4.3.7 z方向変位の比較

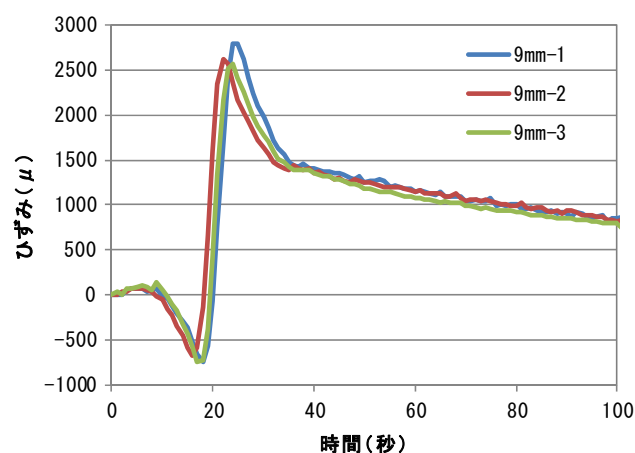
4.3.3 x方向ひずみについて

DICMにより得た9mm，12mmおよび16mm試験片の図4.2.1のC点におけるx方向ひずみの経時変化を図4.3.8～図4.3.10に示す。図より，全試験片において溶接開始から約20秒で圧縮ひずみが発生し，その後，急激に引張ひずみに推移し約25秒で引張ひずみは最大となった。その後，引張ひずみは溶接終了時の約35秒まで急激に低下し，その後，緩やかに低下した。全試験片において，最大圧縮ひずみは -500μ 程度。最大引張ひずみは，9mm試験片は約 2500μ ，12mm試験片は約 $1700\sim 2000\mu$ ，16mm試験片は約 1500μ であった。また溶接開始から1200秒後のひずみに着目すると，9mm試験片は約 -250μ となり，圧縮ひずみが確認された。一方，12mm試験片は約 0μ ，16mm試験片は約 500μ であった。これより，試験片が薄くなると，最大引張ひずみが増加し，定常状態のひずみが減少する傾向，つまり，最大引張ひずみと定常状態のひずみの差が大きくなることが確認された。また，各試験片のひずみの推移に若干の差異が確認され，その差異は試験片が厚くなるにつれて増加する傾向を示した。これは，手溶接のため，ビードの形状が一定でなかったこと，溶接速度が一定に保てなかったこと，C点直下にビードが形成されていないこと，などが原因であると考えられる。

DICMで得た9mm，12mmおよび16mm試験片のx方向ひずみ分布を図4.3.11～図4.3.13に示す。なお，図中にはアークの位置を丸(点線)で示す。図中の(a)～(f)は，溶接開始からの経過時間を表し，(a)は溶接棒の位置が図4.2.1のB'とC点の中間部に位置するとき，(b)は溶接棒の位置がC点に位置するとき，(c)は溶接棒の位置がBとCの中間部に位置するとき，(d)は溶接終了時，(e)は冷却過程，(f)は計測終了時を示す。図より，ビード直下の前方に圧縮ひずみ，直下および後方に引張ひずみが確認される。この引張ひずみは，アーク熱により発生した膨張ひずみであり，その膨張の影響で圧縮ひずみが発生したと考えられる。また，ビード直下に発生した引張ひずみは時間の経過とともに，y方向に広がっているのが確認される。そして，1200秒において，その引張ひずみが全体的に低下しているのが確認された。

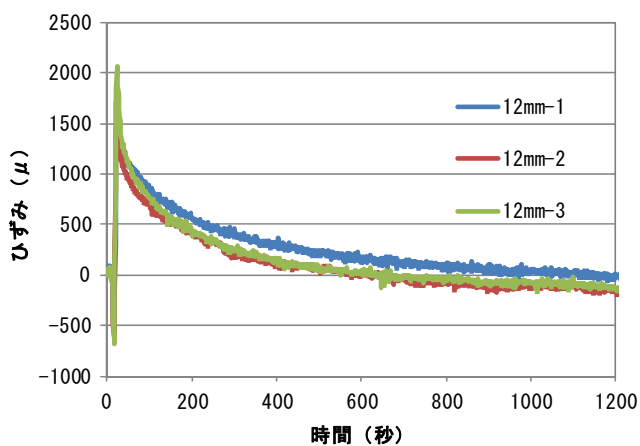


(a) 0~1200 秒間

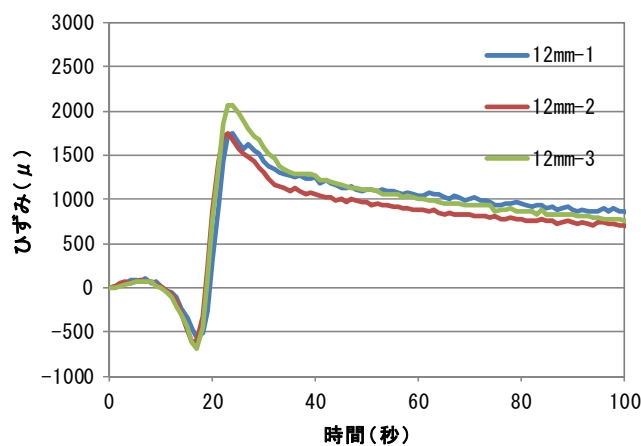


(b) 0~100 秒間

図 4.3.8 x方向ひずみ経時変化 (DICM 9mm)

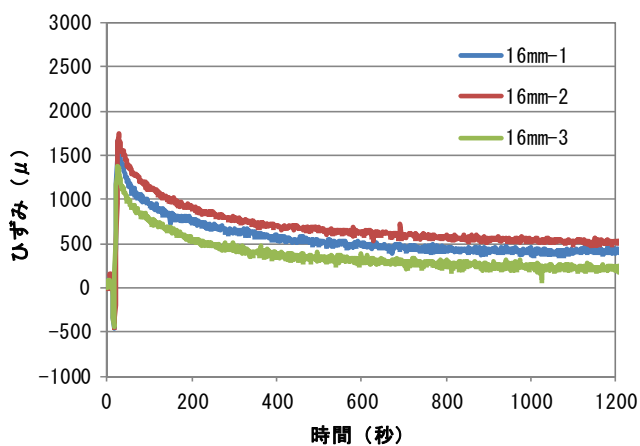


(a) 0~1200 秒間

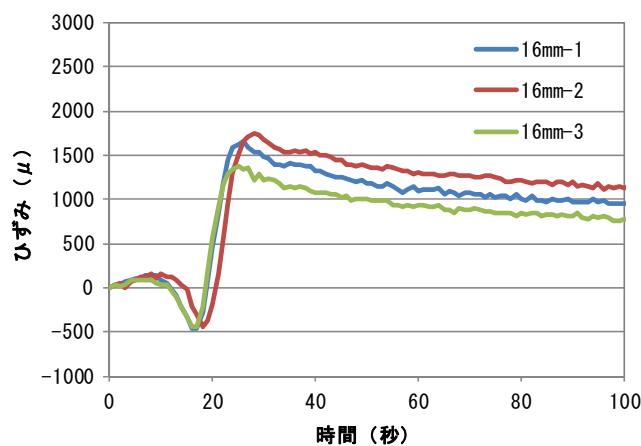


(b) 0~100 秒間

図 4.3.9 x方向ひずみ経時変化 (DICM 12mm)

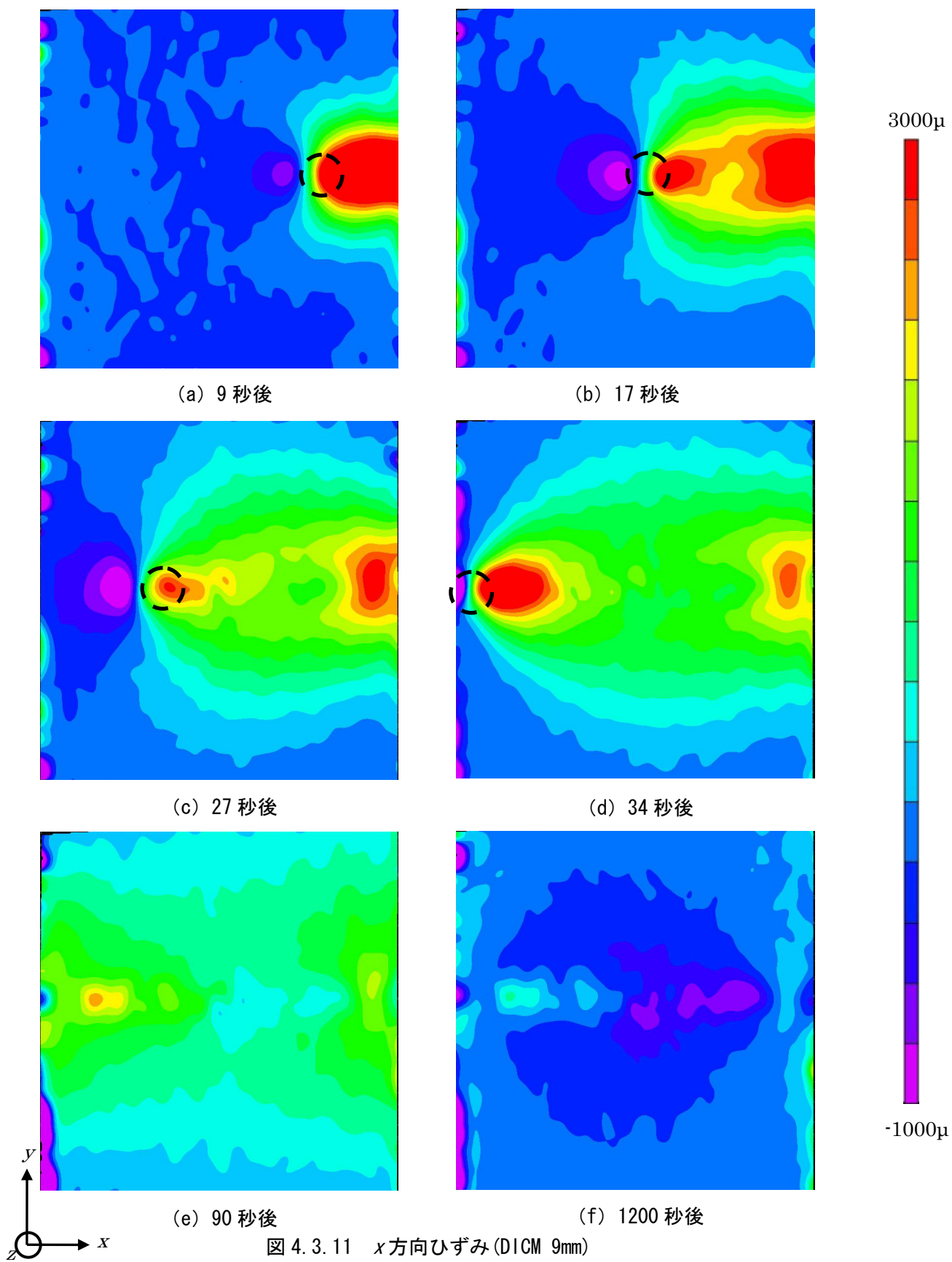


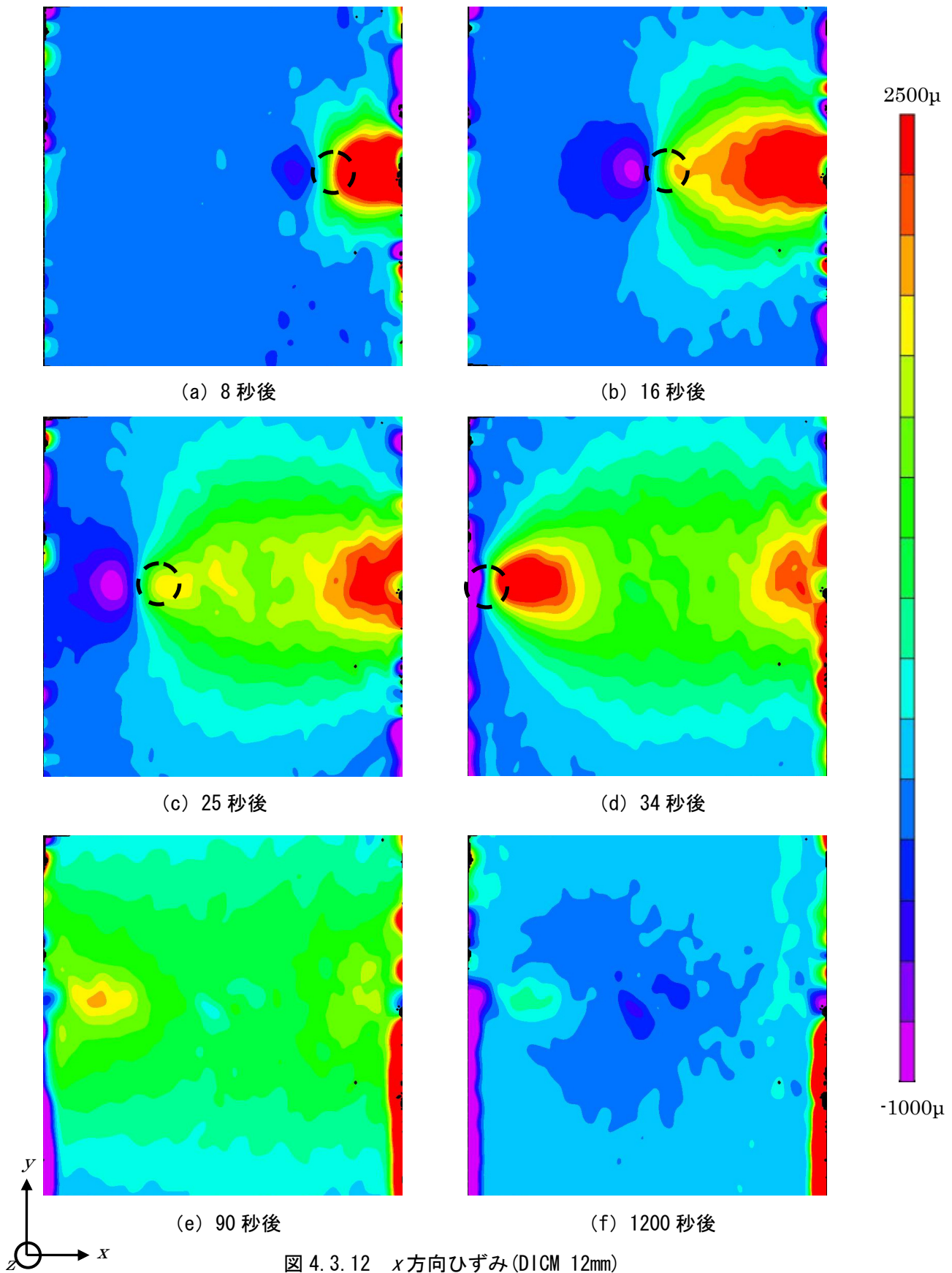
(a) 0~1200 秒間

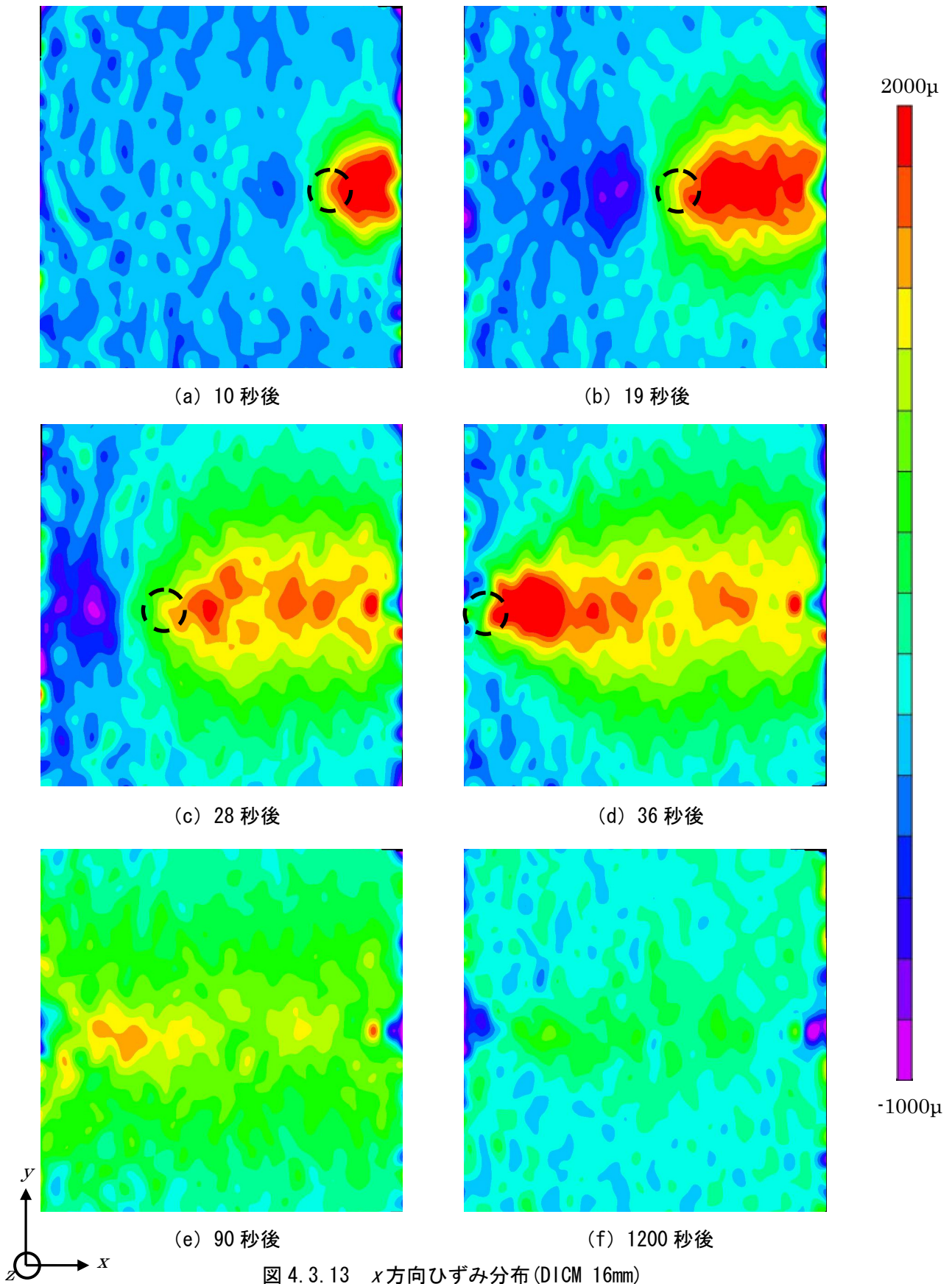


(b) 0~100 秒間

図 4.3.10 x方向ひずみ経時変化 (DICM 16mm)



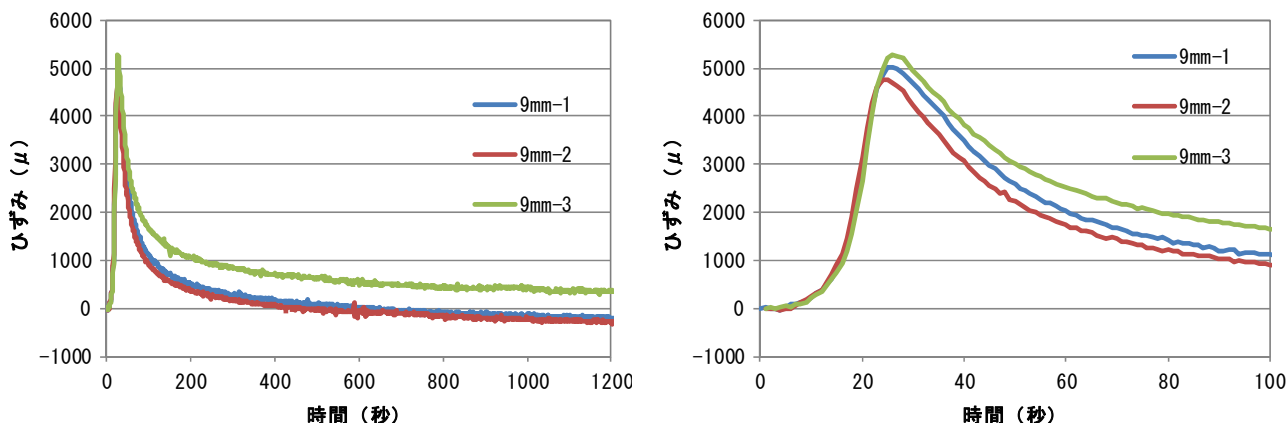




4.3.4 y方向ひずみについて

DICMにより得た9mm, 12mm および16mm 試験片の図4.2.1のC点におけるy方向ひずみの経時変化を図4.3.14~図4.3.16に示す。図より、全試験片において約25秒付近で最大引張ひずみが確認できた。これは、x方向の最大引張ひずみが発生した時間と同じである。その後、引張ひずみは時間の経過とともに低下し1200秒後には定常状態を保っている。最大引張ひずみは、9mm, 12mmの試験片は約5000 μ , 16mm試験片は約3800 μ であった。また溶接開始から1200秒後のひずみに着目すると、9mm試験片は約-100 μ ~400 μ となり、圧縮ひずみが発生する試験片も確認された。12mm, 16mm試験片は約1700 μ であった。これより、試験片が薄くなると、最大引張ひずみが増加し、定常状態のひずみが減少する傾向、つまり、最大引張ひずみと定常状態のひずみの差が大きくなることが確認された。また、各試験片のひずみの推移に若干の差異が確認されるのは、手溶接のためビードの形状が一定でなかったこと、溶接速度が一定に保てなかったこと、C点直下にビードが形成されていないことなどが原因であると考えられる。

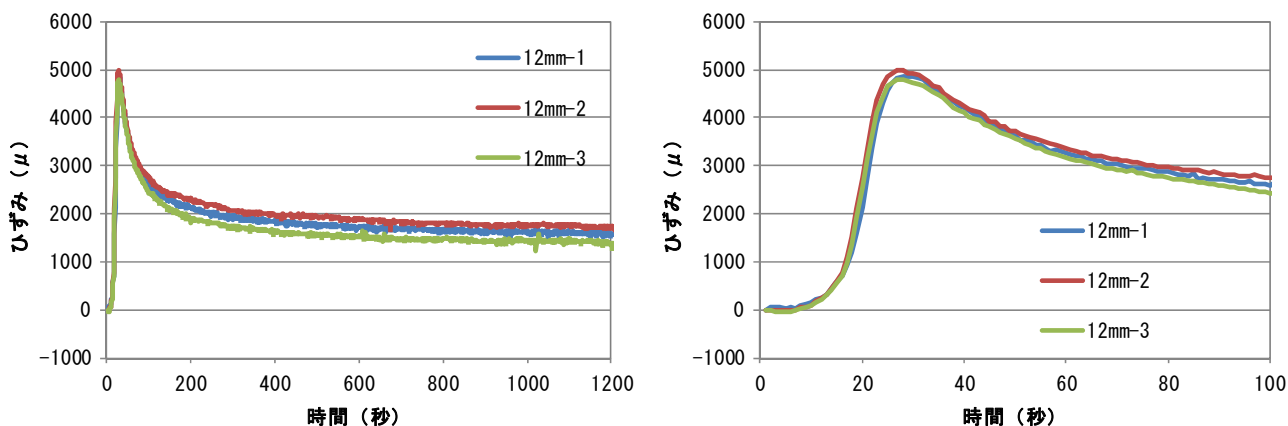
DICMにより得た9mm, 12mm および16mm 試験片のy方向ひずみ分布を図4.3.17~図4.3.19に示す。なお、図中にはアークの位置を丸(点線)で示す。図中の(a)~(f)は、溶接開始からの経過時間を表し、(a)は溶接棒の位置が図4.2.1のB'とC点の中間部に位置するとき、(b)は溶接棒の位置がC点に位置するとき、(c)は溶接棒の位置がBとCの中間部に位置するとき、(d)は溶接終了時、(e)は冷却過程、(f)は計測終了時を示す。図より、ビード直下に引張ひずみが確認される。この引張ひずみは、アークの熱膨張により発生したひずみである。また、引張ひずみはビード通過直後、y方向に広がっているのが確認され、1200秒においては、その引張ひずみが低下しているのが確認される。図4.3.11(e)の点線の範囲において、圧縮ひずみ領域が確認される。それは、12mm, 16mm試験片では確認されなかった。



(a) 0~1200 秒間

(b) 0~100 秒間

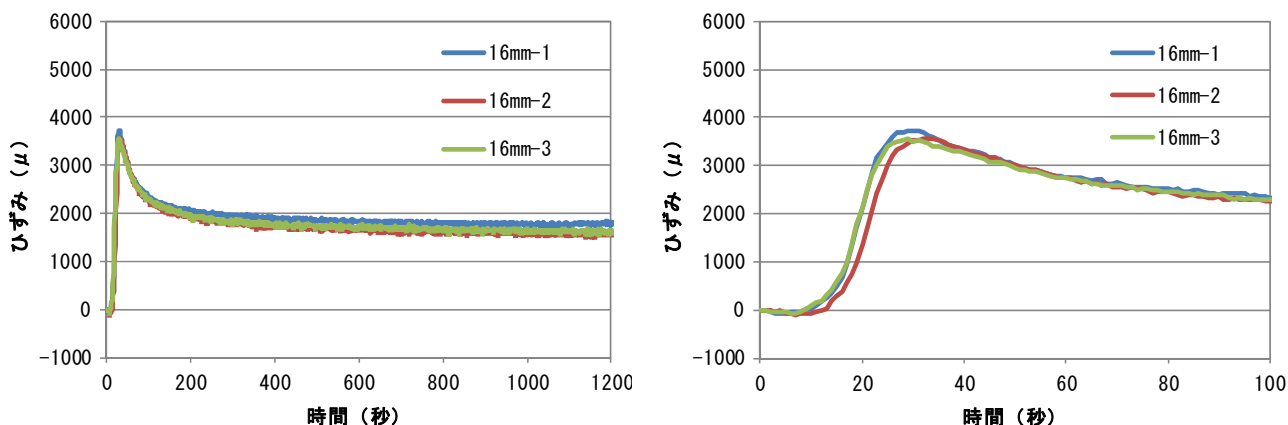
図 4.3.14 y 方向ひずみ経時変化 (DICM 9mm)



(a) 0~1200 秒間

(b) 0~100 秒間

図 4.3.15 y 方向ひずみ経時変化 (DICM 12mm)



(a) 0~1200 秒間

(b) 0~100 秒間

図 4.3.16 y 方向ひずみ経時変化 (DICM 16mm)

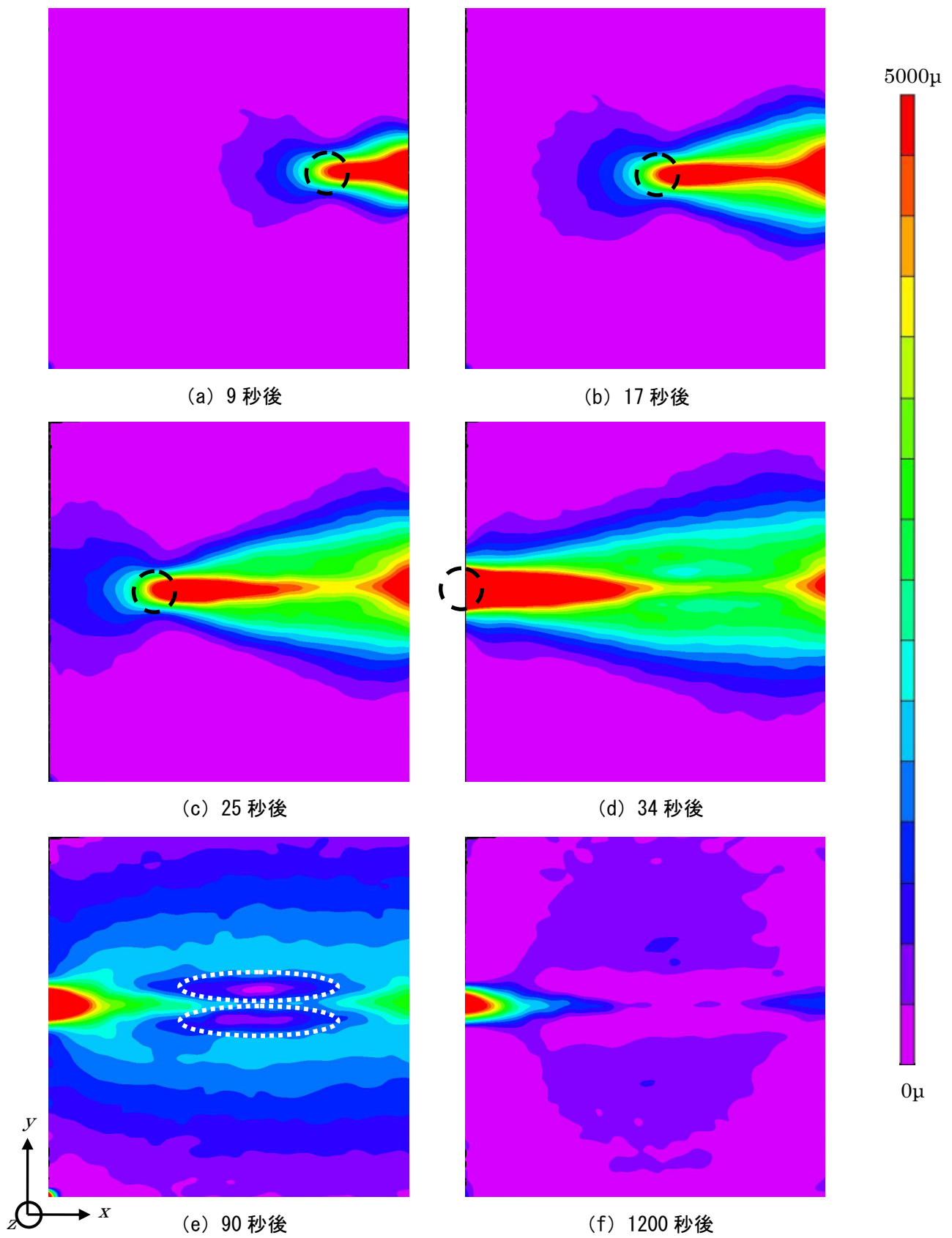


図 4.3.17 y 方向ひずみ分布(DICM 9mm)

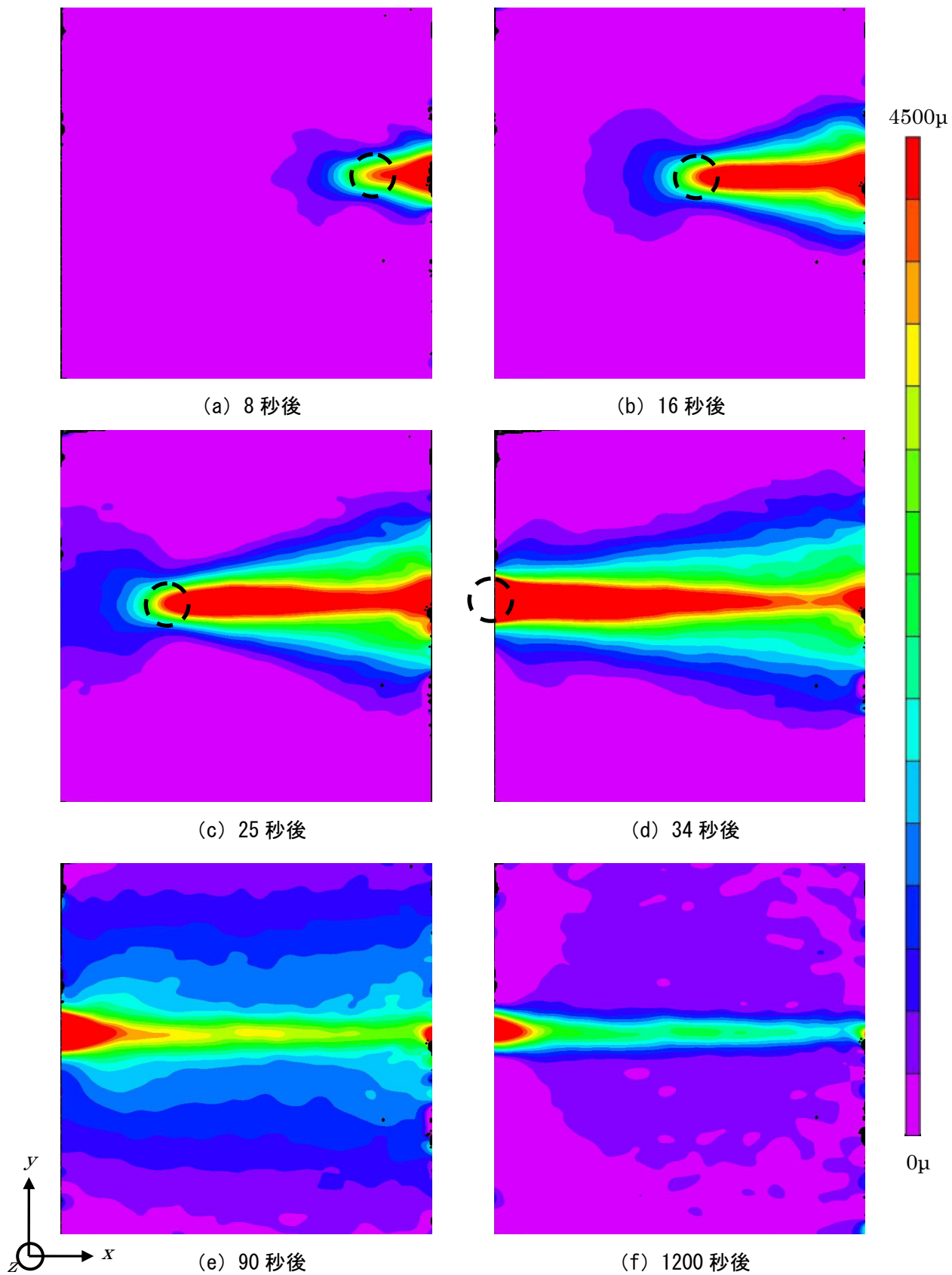


図 4. 3. 18 y 方向ひずみ分布 (DICM 12mm)

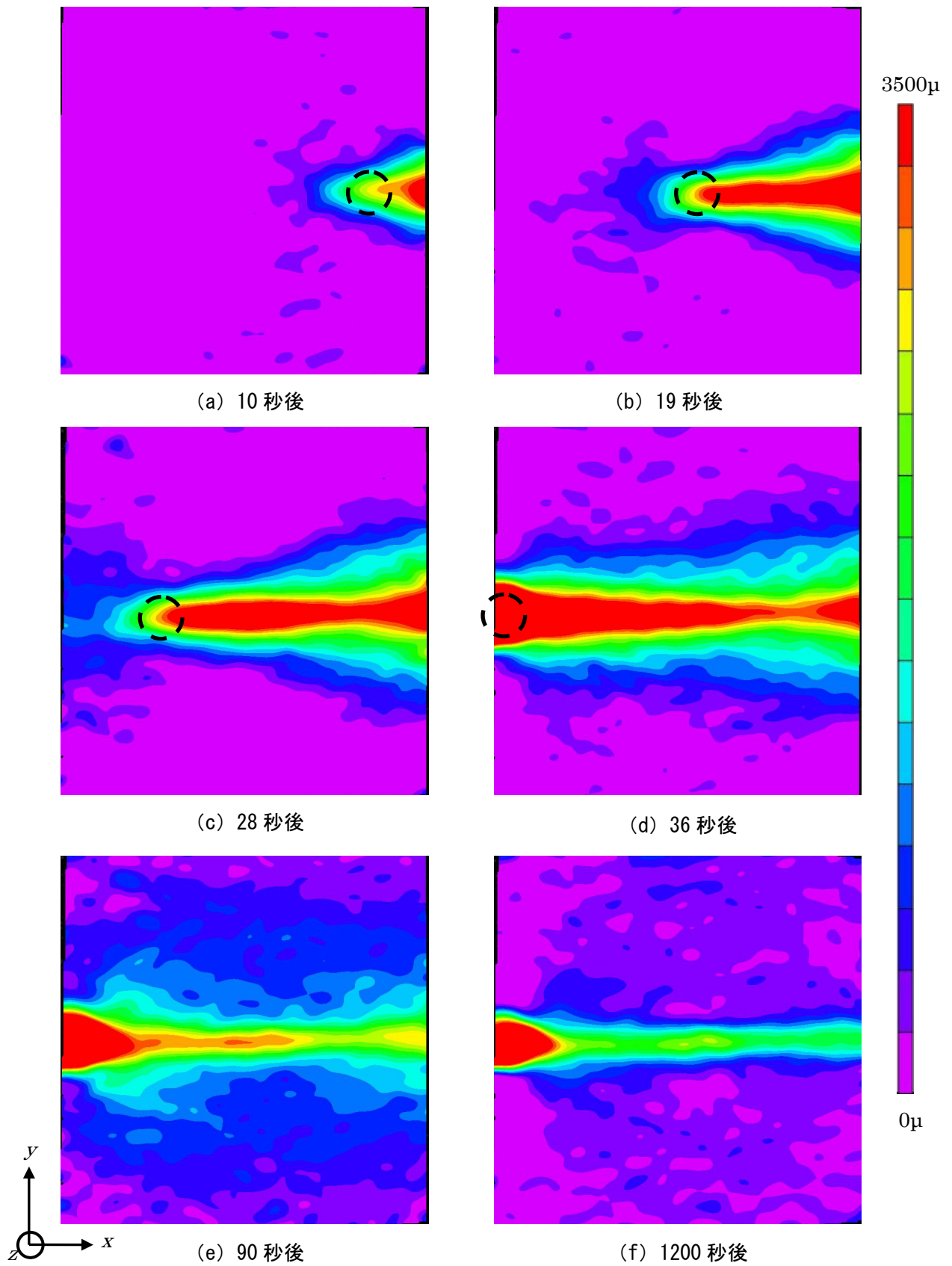


図 4.3.19 y 方向ひずみ分布 (DICM 16mm)

4.4 解析概要

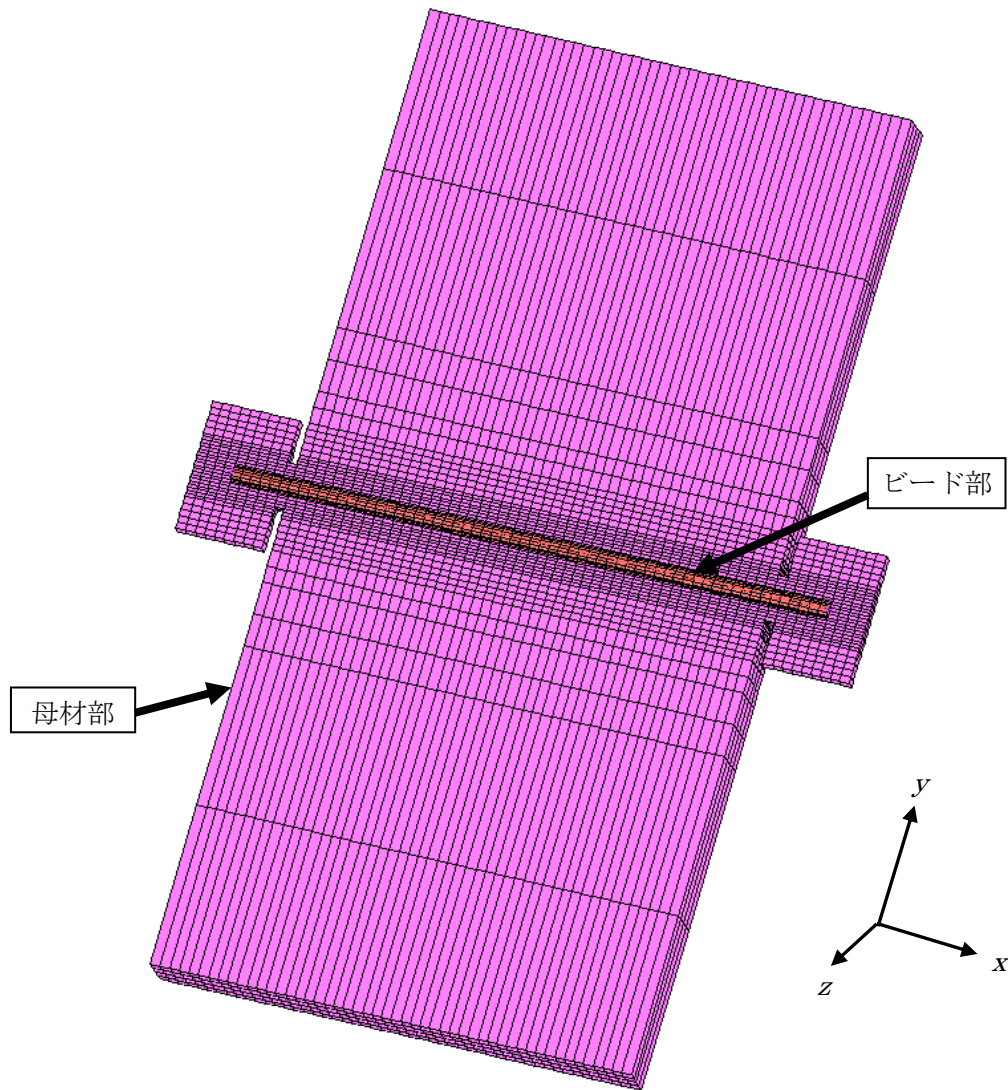
DICM の計測精度の妥当性を検討するため熱弾塑性 FE 解析を行った。解析には、汎用有限要素解析コード MSC.Marc2010²⁷⁾ を用いた。解析モデルは、8 節点ソリッド要素を用い、全体モデルとした。図 4.4.1 に全体モデルとビード部拡大のメッシュ分割図を示す。ビード近傍は熱の影響を大きく受けるため、要素分割を細かくし、寸法を約 1mm で構築した。また、溶接部から離れた位置は、要素分割を粗くした。また、母材中央部左右に取り付けた SM 材、ビード部に関してはモデル化を行い、スラグはモデル化を行わなかった。溶接終了後の試験片の写真を写真 4.4.1 に示す。写真中の点線からビードの形成が一定ない箇所があることが確認できる。ビードは、溶接終了後にスラグを除去し、その外形状をノギスで幅と高さを複数点計測し、その平均値を用いてモデル化を行った。また簡易的なモデルとするため、溶融部や熱影響部の材料物性は母材と同じ値とした。各解析モデルにおける母材およびビード部の要素数を表 4.4.1 に示す。部材が厚くなると要素数が増加し、16mm 試験片の要素数は約 15000 である。

Marc の溶接解析の入熱境界条件²⁷⁾ は 2 通りあり、1 つ目は電力 (電流×電圧)、熱効率および溶接速度の定義による熱流束条件、2 つ目は融点温度を定義した固定温度境界条件がある。今回の解析では、サーモの計測結果を熱伝導解析に反映させるため、固定温度境界条件を採用し、解析を行った。固定温度境界条件とは、ビード要素を溶接速度で入熱し、生成させることである。ビード要素生成時の入熱温度と表面熱伝達率は、図 4.4.2 に示す C 点 (試験片中央点) の温度計測結果に一致する値を逆解析により決定した。これらの手法を用いた理由として、実験値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。

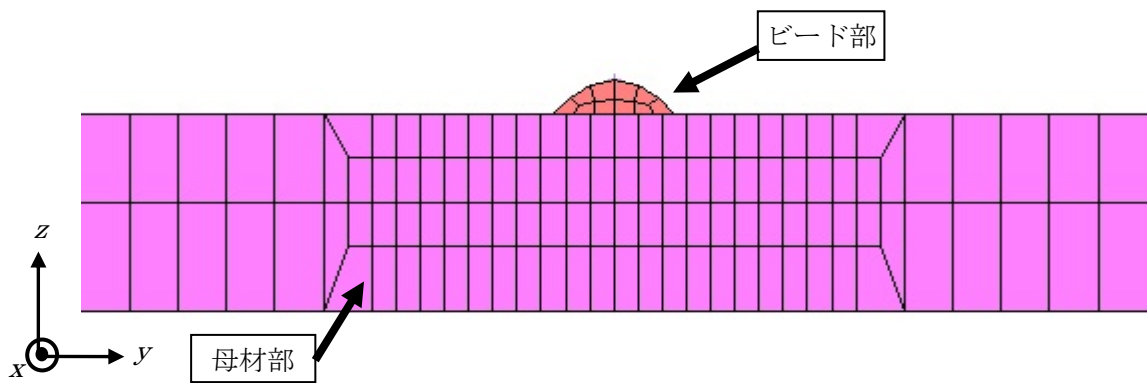
解析で使用した各種パラメータを表 4.4.2 に示す。静弾性係数、降伏強度、比熱および熱伝導率に関しては、温度依存性を考慮した。ポアソン比、熱膨張率、比重に関しては、温度依存性を考慮しなかった。

図 4.4.3 に 0°C 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 4.4.4 および図 4.4.5 に降伏強度と静弾性係数の温度依存性を示す。溶接時の熱の影響を正確にシミュレートするため、力学的強度が大幅に低下すると考えられる温度を力学的溶融温度とし、それ以上の降伏強度および静弾性係数は 0 に近い値を用いた。降伏強度は文献²⁸⁾、静弾性係数は文献²⁹⁾をそれぞれ参考にして力学的溶融温度を 750°C とし、0°C から 750°C まで直線的に低下し、750°C 以上の値は 0°C 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 4.4.6、図 4.4.7 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³⁰⁾を使用した。母材 (炭素量約 0.15%) は、適当な値が記載されていなかったため、文献³⁰⁾より炭素量 0.08% と 0.23% のデータから線形的に補完して算出した値を使用した。母材およびビードの 1200°C 以上の値に関しては、データがないため 1000°C ~ 1200°C のデータの傾きから推定した値を使用した。鋼材の初期温度と周辺温度は、サーモと室温計により計測した値を用いた。



(a) 全体



(b) ビード部拡大 (9mm)

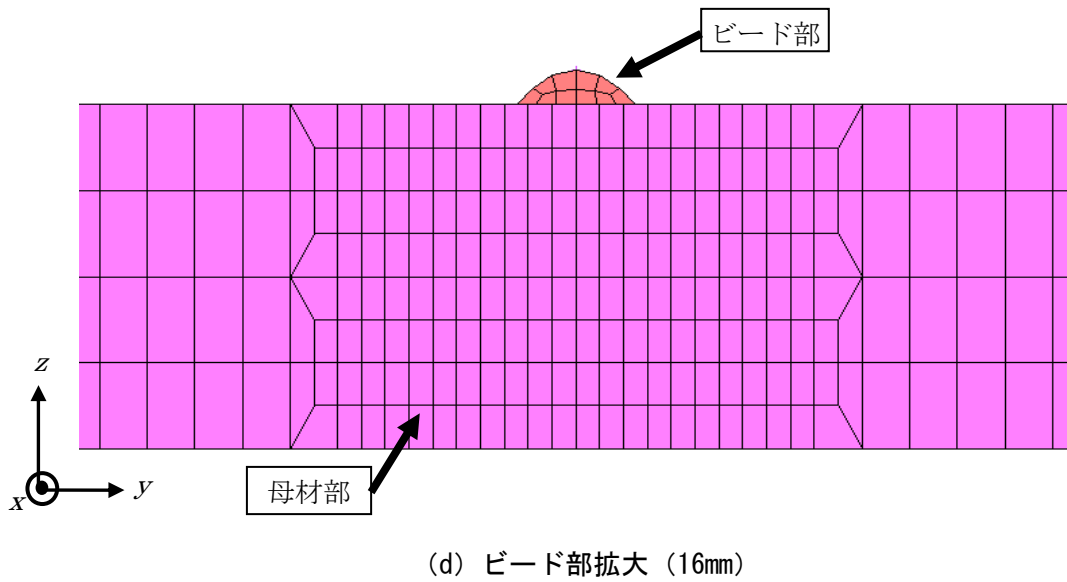
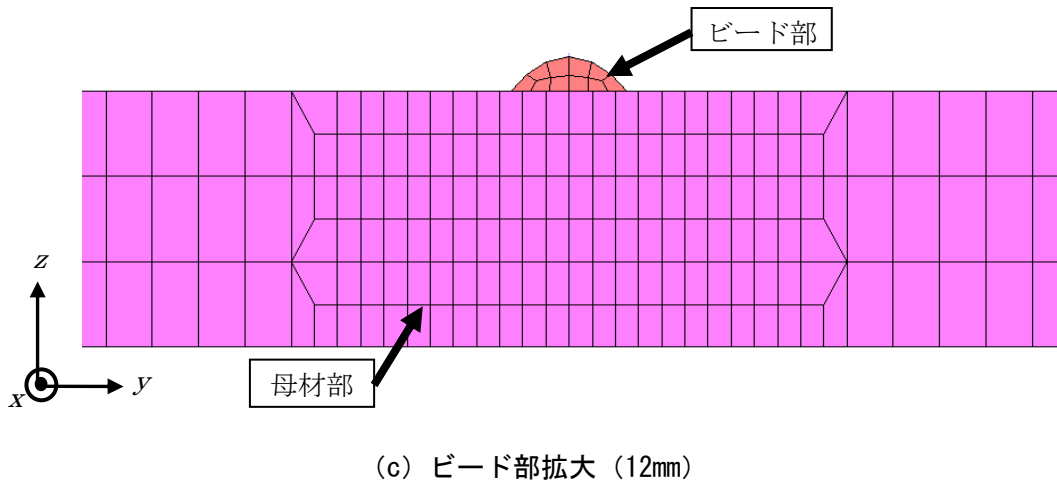


図 4.4.1 解析モデル

表 4.4.1 解析モデル要素数 (個)

解析モデル	母材	ビード
9mm	7628	620
12mm	10928	620
16mm	14228	620

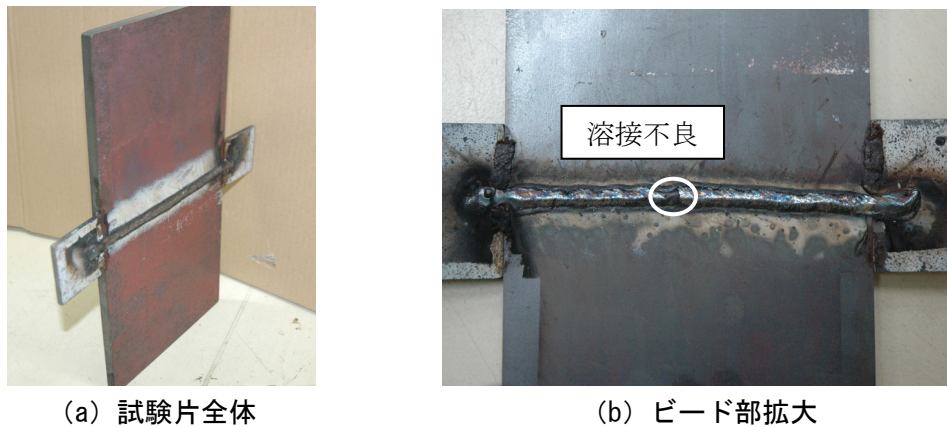


写真 4.4.1 試験片 (溶接後)

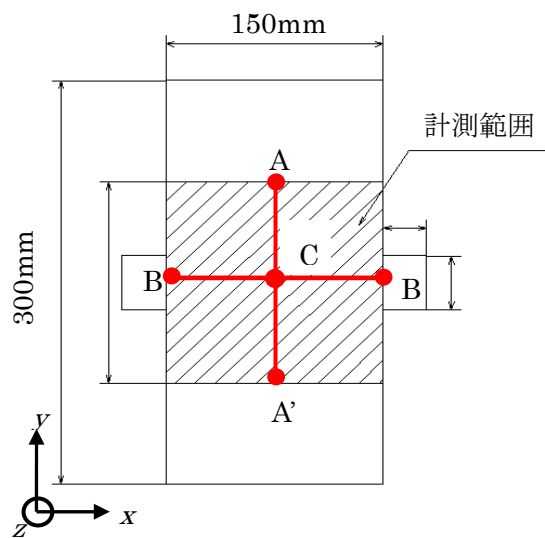


図 4.4.2 DICM およびサーモの計測面

表 4.4.2 解析パラメータ

物理量	単位	温度依存考慮	入力値
降伏強度	N/mm ²	○	図 4.4.3, 図 4.4.4
静弾性係数	N/mm ²	○	図 4.4.5
比熱	J/ton・°C	○	図 4.4.6
熱伝導率	W/°Cmm	○	図 4.4.7
熱膨張率	/°C	×	1.2×10 ⁻⁵
比重	ton/mm ³	×	7.85×10 ⁵
ポアソン比	—	×	0.3
初期温度	°C	—	22.0
周辺温度	°C	—	22.0
溶接速度	mm/s	—	約 4.10

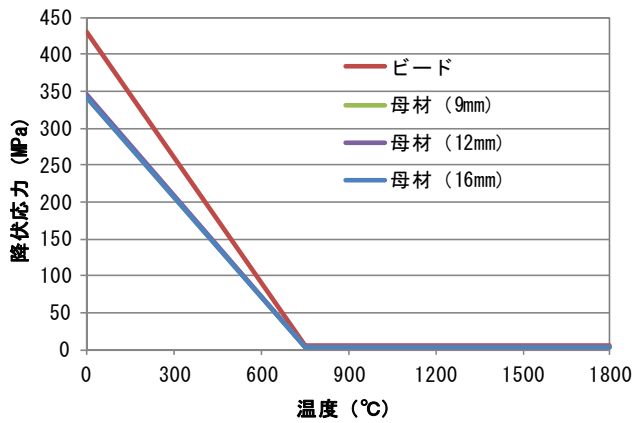


図 4.4.3 応力-ひずみ関係

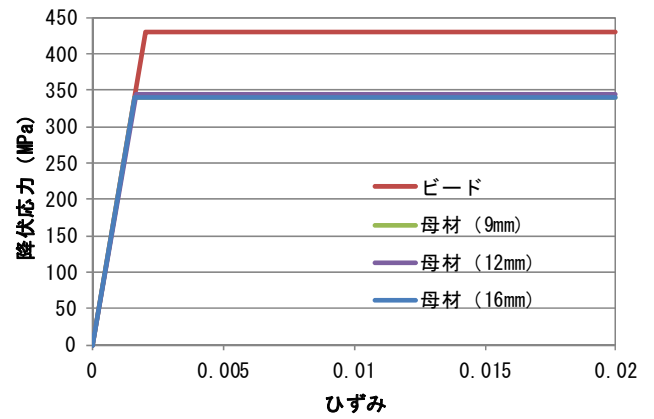


図 4.4.4 降伏強度の温度依存性

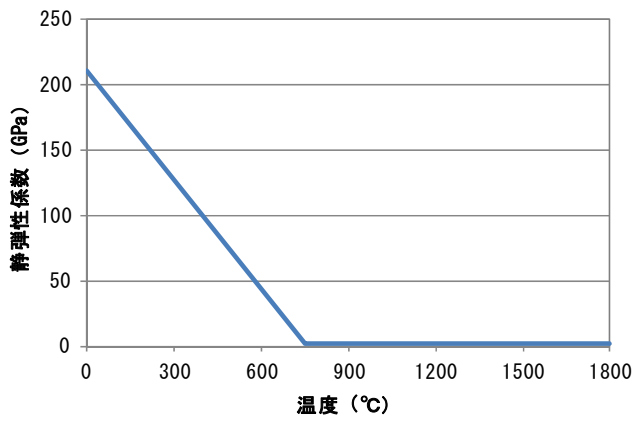


図 4.4.5 静弾性係数の温度依存性

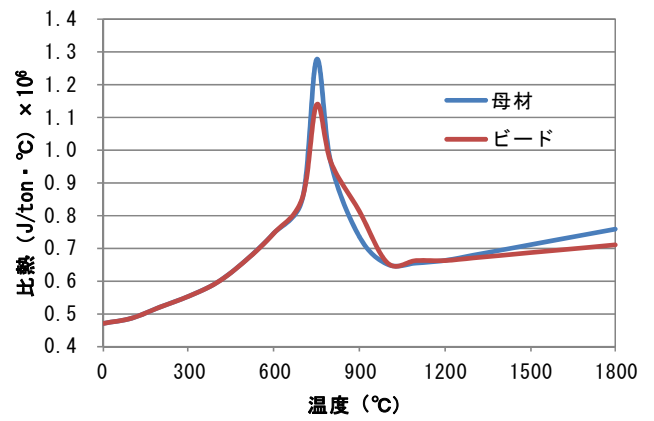


図 4.4.6 比熱の温度依存性

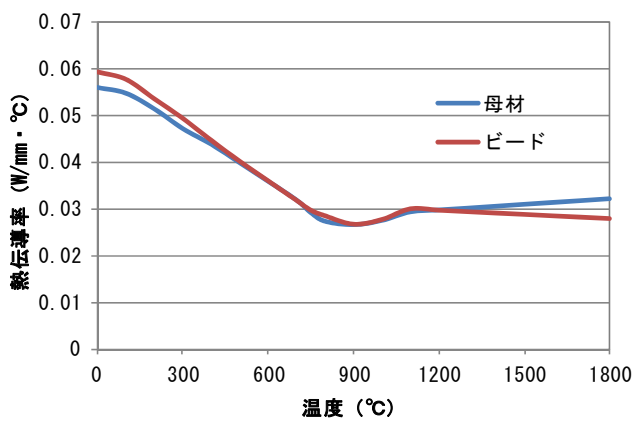


図 4.4.7 熱伝導率の温度依存性

4.5 解析結果

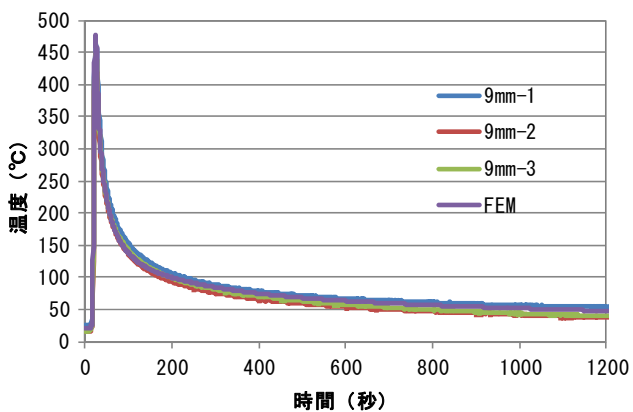
サーモ、DICM および熱弾塑性 FE 解析（以下 FEM と呼ぶ）により得た溶接中およびその冷却過程における鋼板表面に生じる温度、変形、ひずみの結果を示す。

4.5.1 温度について

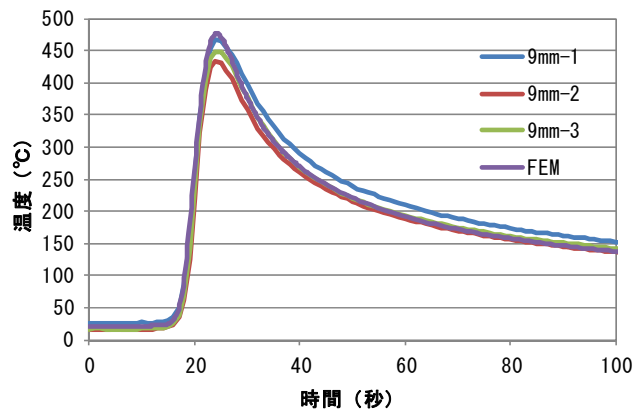
入熱温度と表面熱伝達率を決定するために逆な解析を行った結果、入熱温度 1780°C、表面熱伝達率 10 W/mm²・°C の際にサーモの計測結果とほぼ一致した。そのときの FEM およびサーモにより得た 9mm、12mm および 16mm 試験片の図 4.4.2 の C 点の温度経時変化を図 4.5.1～図 4.5.3 に示す。図より、FEM の最高温度は、9mm 試験片は約 430°C、12mm 試験片は約 330°C および 16mm 試験片は約 230°C となっており、試験片が薄くなるにつれて最高温度が高いことが確認された。また、全試験片においても溶接開始から 1200 秒後は試験片の温度が 50°C 程度に低下しており、試験片が厚ければ温度が低下しにくいことが確認できた。これは、サーモとほぼ同じ挙動を示しており、FEM は温度の経時変化を精度よくシミュレートできた。

図 4.5.4～図 4.5.6 に FEM により得た 9mm、12mm および 16mm 試験片の温度分布を示す。図より時間の経過に伴い溶接棒直下の最高温度領域が楕円形状を保ちながら、x 方向に移動しているのが確認できた。また、最高温度領域の通過直後その温度が y 方向に広がっているのが確認され、1200 秒で温度が全体的に均一になっているが確認された。これは、サーモと同じ挙動を示しており、FEM は温度分布を精度よくシミュレートできた。

以上から、DICM と FEM の温度の結果はほぼ定性的・定量的に一致していることが確認できた。

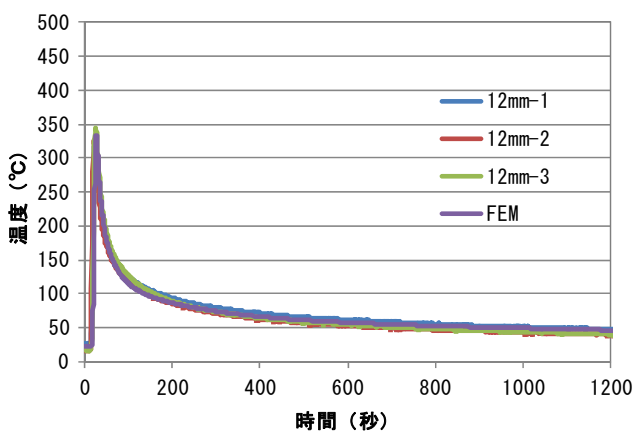


(a) 0~1200 秒間

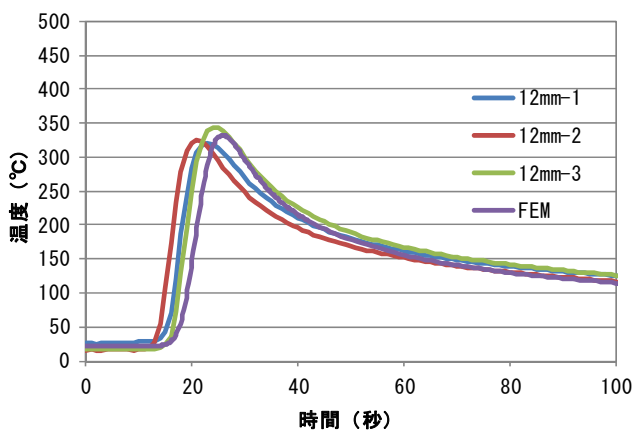


(b) 0~100 秒間

図 4.5.1 温度経時変化の比較 (9mm)

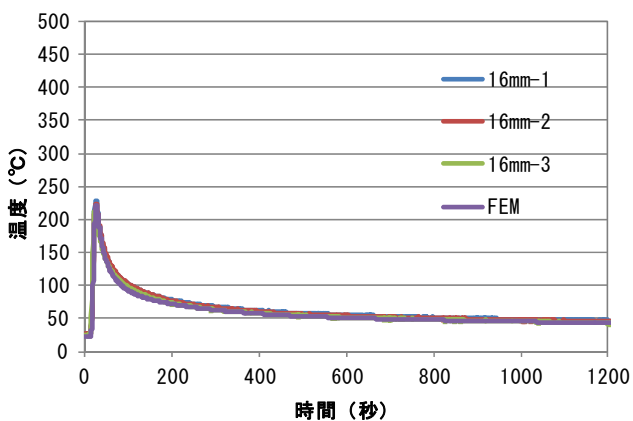


(a) 0~1200 秒間

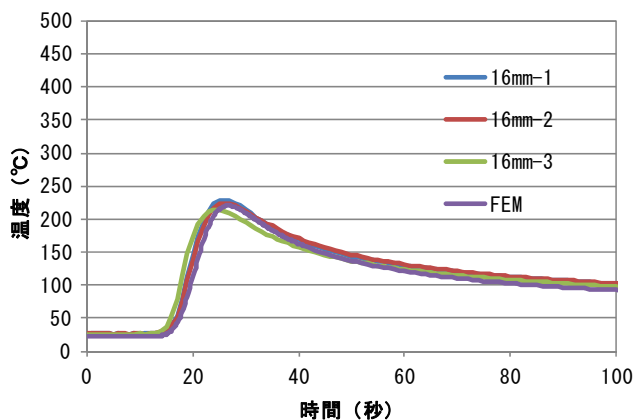


(b) 0~100 秒間

図 4.5.2 温度経時変化の比較 (12mm)



(a) 0~1200 秒間



(b) 0~100 秒間

図 4.5.3 温度経時変化の比較 (16mm)

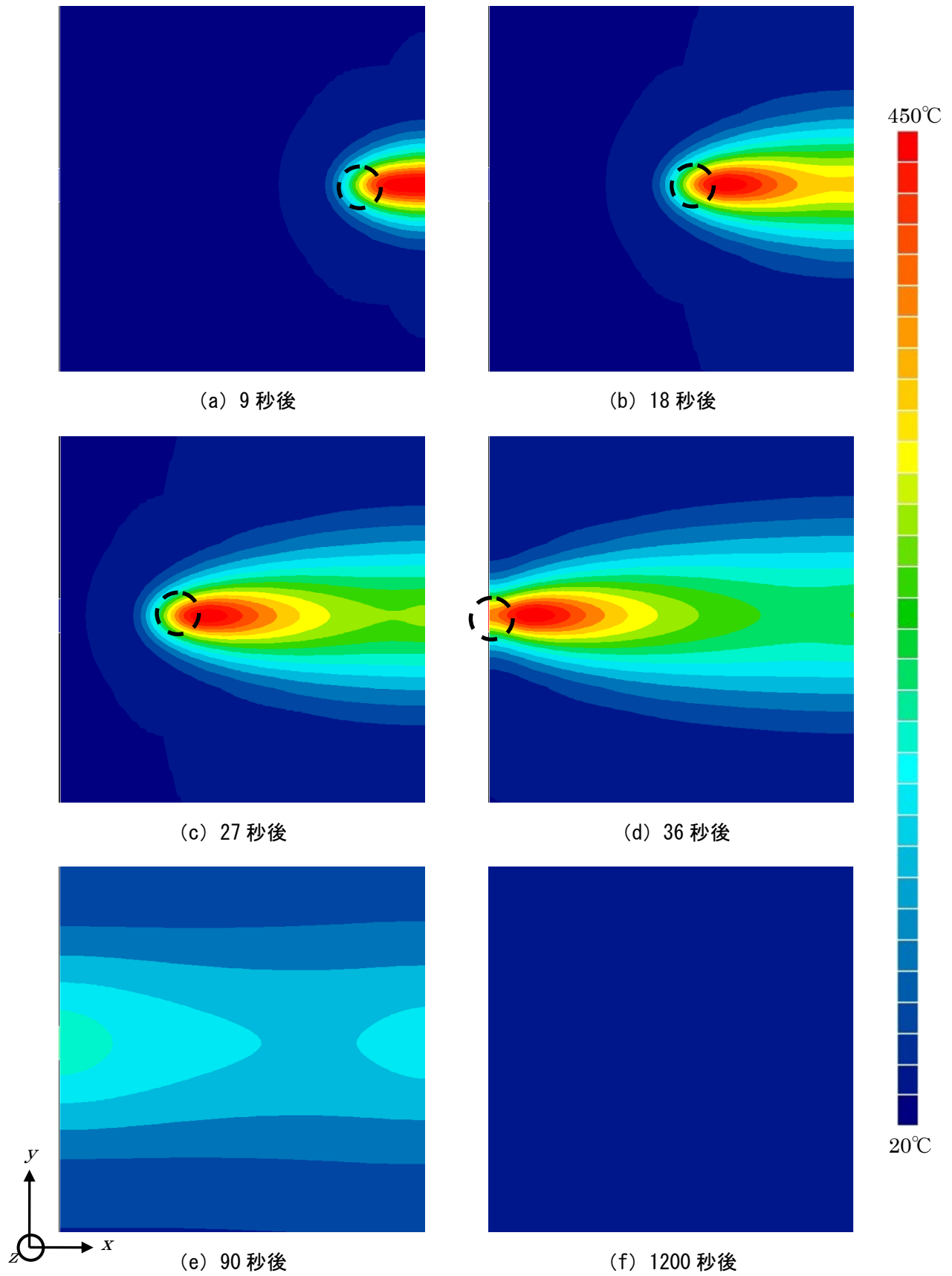


図 4.5.4 温度分布 (FEM 9mm)

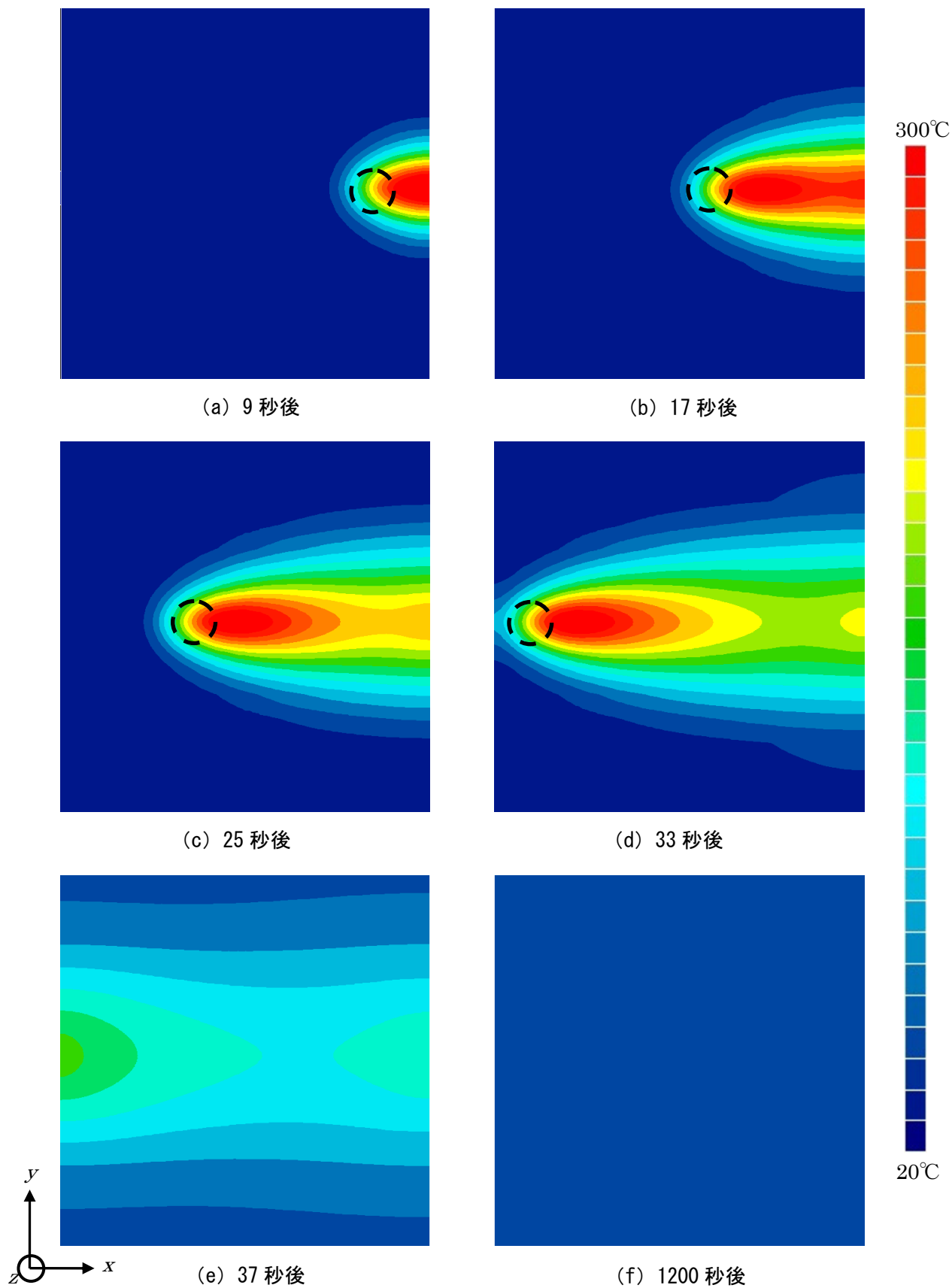


図 4.5.5 温度分布 (FEM 12mm)

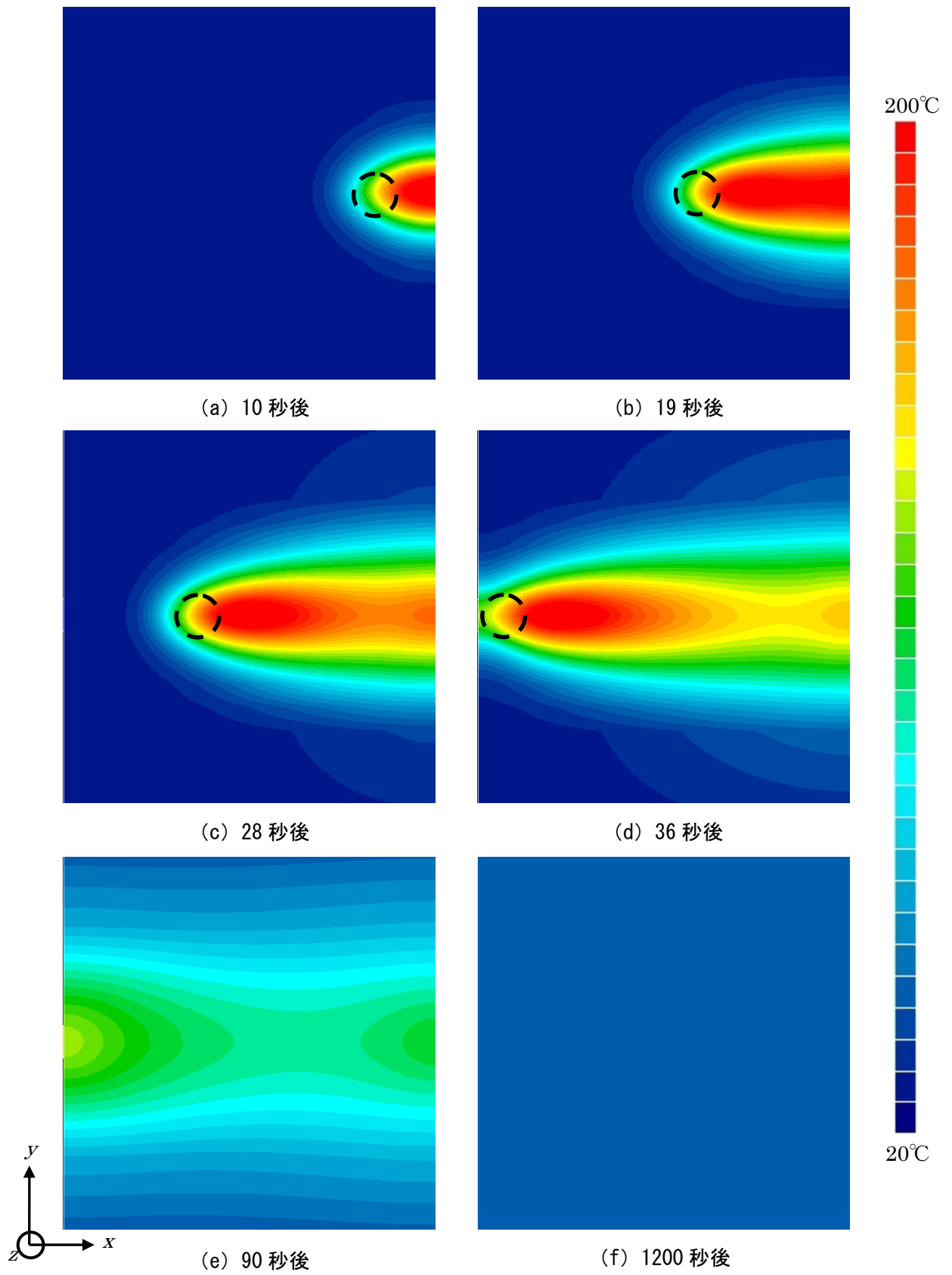


図 4.5.6 温度分布 (FEM 16mm)

4.5.2 面外方向（z方向）変位について

FEMおよびDICMより得た9mm、12mmおよび16mm試験片の計測終了時（1200秒）の図4.4.2のA-C-A'間の面外方向（z方向）の変位を図4.5.7に示す。図より、FEMのA点における面外変位は、9mm試験片は約1.4mm、12mm試験片は約1.0mmおよび16mm試験片は約0.6mmであり、試験片が厚くなるにつれて面外方向の変位が減少した。また、試験片中央（C点）を境に、試験片が変形していることが確認された。

FEMおよびDICMより得た9mm、12mmおよび16mm試験片の図4.4.2のA点の面外方向（z方向）の変位経時変化を図4.5.8～図4.5.10に示す。図より、FEMのA点の面外方向変位の推移は、溶接開始から約50秒まで線形的に変形していること、それ以降は変形が定常状態であることが確認された。これはDICMと同じ挙動を示しており、FEMは面外方向変位の経時変化を精度よくシミュレートできた。

以上から、FEMとDICMの結果が若干の差異が確認されたが、FEMは面外方向変位を精度よくシミュレートできた。

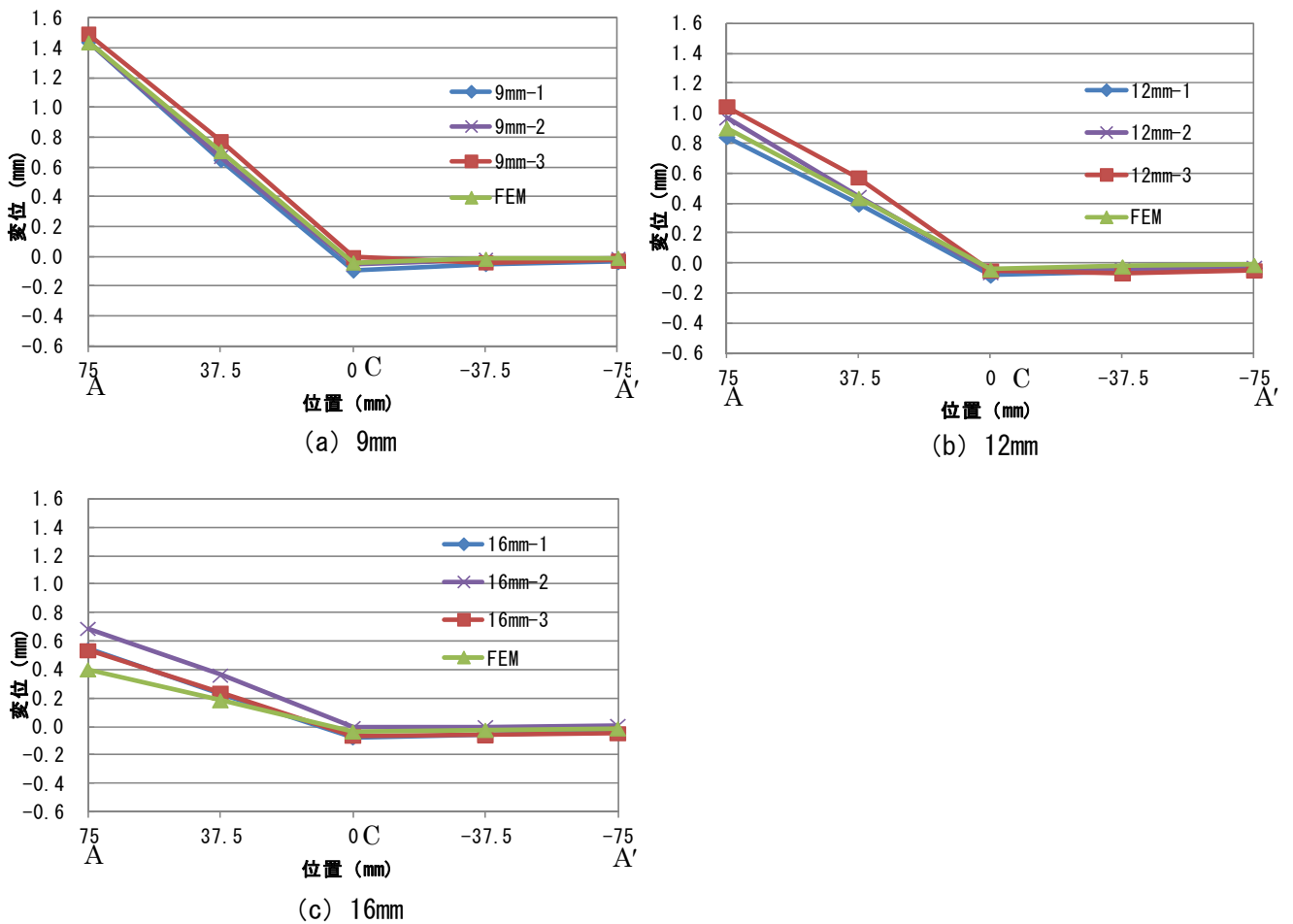


図 4.5.7 z方向変位の比較（1200s）

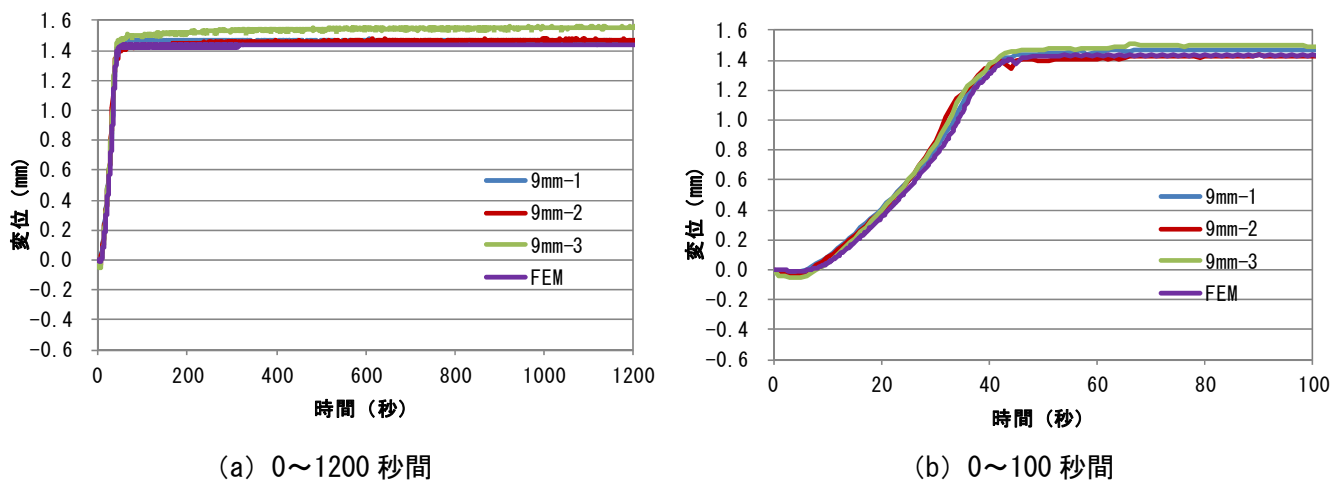


図 4.5.9 z 方向変位経時変化の比較 (9mm)

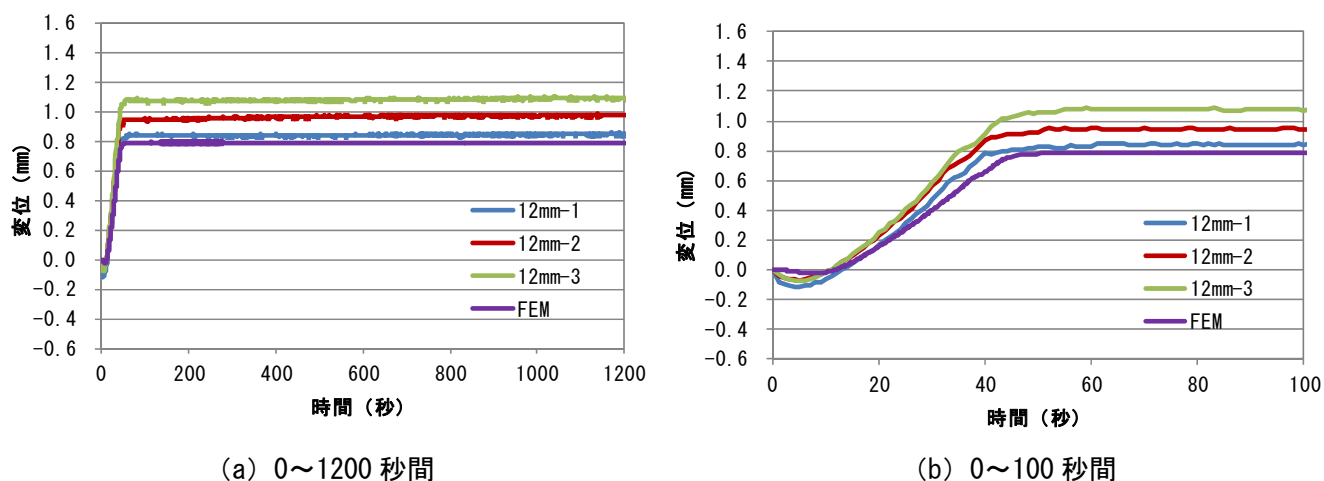


図 4.5.10 z 方向変位経時変化の比較 (12mm)

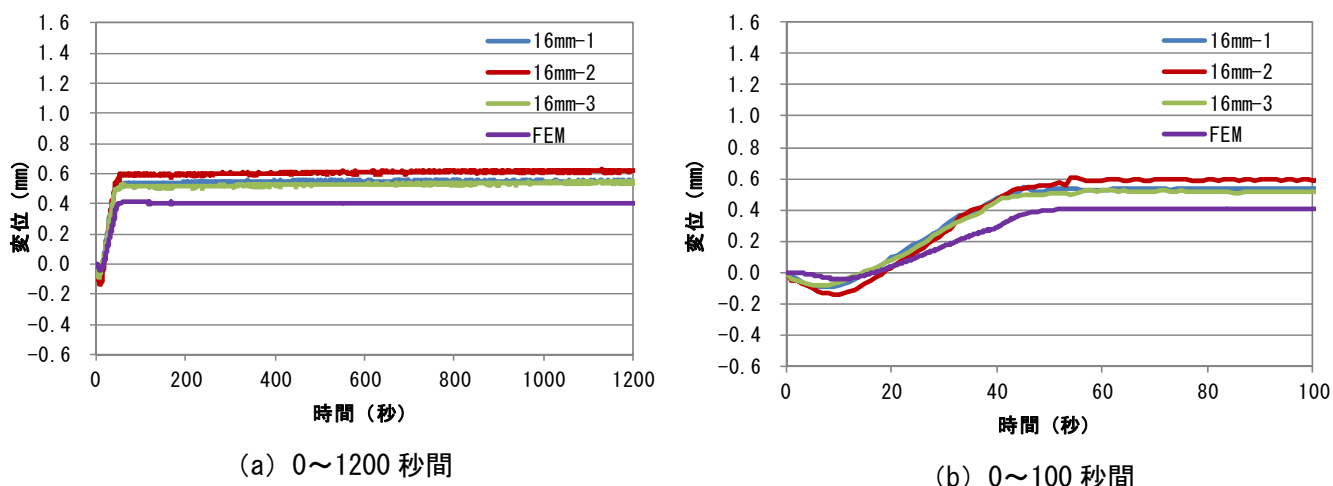


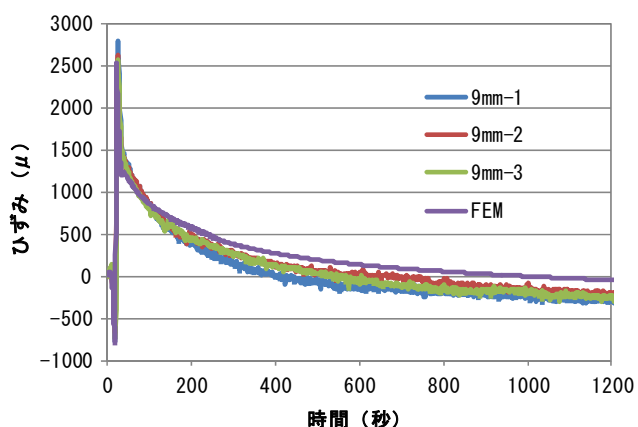
図 4.5.11 z 方向変位経時変化の比較 (16mm)

4.5.3 x方向ひずみについて

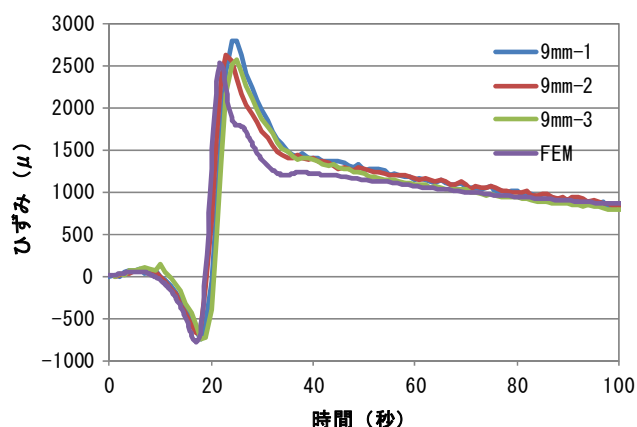
FEM および DICM より得た 9mm, 12mm および 16mm 試験片の図 4.4.2 の C 点における x 方向ひずみ履歴変化を図 4.5.11～図 4.5.13 に示す。図より，FEM は溶接開始から約 20 秒で圧縮ひずみが発生し，その後，急激に引張ひずみに推移し約 25 秒で引張ひずみは最大となった。その後，引張ひずみは溶接終了時の約 35 秒まで急激に低下し，その後，緩やかに低下した。全試験片において，最大圧縮ひずみは -500μ 程度である。また，最大引張ひずみは，9mm 試験片では約 2500μ ，12mm 試験片では約 1700 および 16mm 試験片では約 1300μ であった。また溶接開始から 1200 秒後の定常状態のひずみに着目すると，9mm 試験片は約 -50μ となり，圧縮ひずみが確認された。一方，12mm 試験片では約 250μ ，16mm 試験片では約 200μ であった。これより，試験片が薄くなると，最大引張ひずみが増加し，定常状態のひずみが減少する傾向，つまり，最大引張ひずみと定常状態のひずみの差が大きくなることが確認された。これは，DICM とほぼ同じ挙動を示しており，FEM は x 方向ひずみの経時変化を精度よくシミュレートできた。

FEM により得た 9mm, 12mm および 16mm 試験片の x 方向ひずみ分布を図 4.5.14～図 4.5.16 に示す。図より，ビード直下の前方に圧縮ひずみ，直下および後方に引張ひずみが確認された。この引張ひずみは，アーク熱により発生した膨張ひずみであり，その膨張の影響で圧縮ひずみが発生したと考えられる。また，ビード直下に発生した引張ひずみは時間の経過とともに，y 方向に広がっているのが確認された。そして，1200 秒において，その引張ひずみが全体的に低下しているのが確認される。これは，DICM とほぼ同じ分布を示しており，FEM は x 方向ひずみ分布を精度よくシミュレートできた。

以上から，若干の差異は確認されたものの DICM と FEM の x 方向ひずみの結果はほぼ定性的・定量的に一致していることが確認できた。

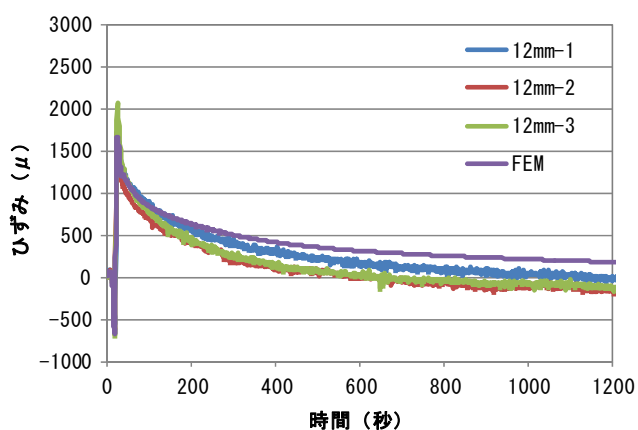


(a) 0~1200 秒間

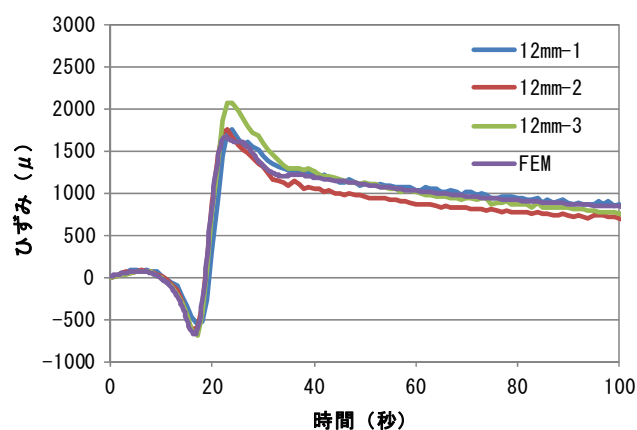


(b) 0~100 秒間

図 4.5.11 x 方向ひずみ経時変化の比較(9mm)

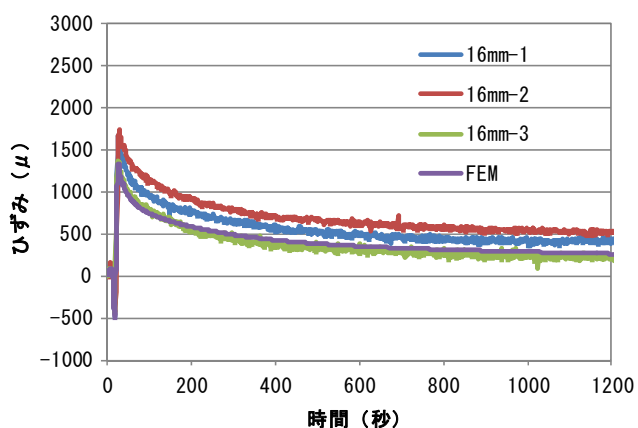


(a) 0~1200 秒間

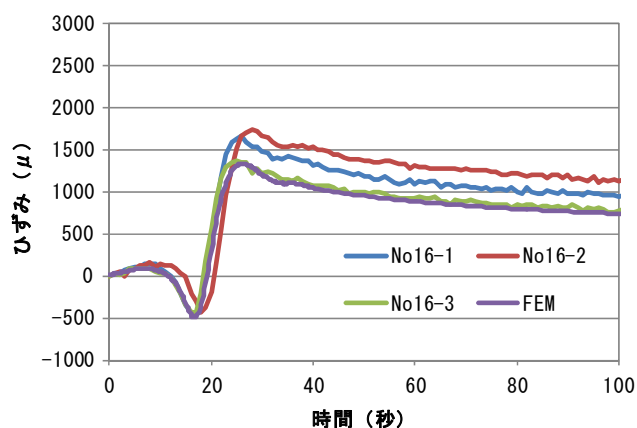


(b) 0~100 秒間

図 4.5.12 x 方向ひずみ経時変化の比較(12mm)



(a) 0~1200 秒間



(b) 0~100 秒間

図 4.5.13 x 方向ひずみ経時変化の比較(16mm)

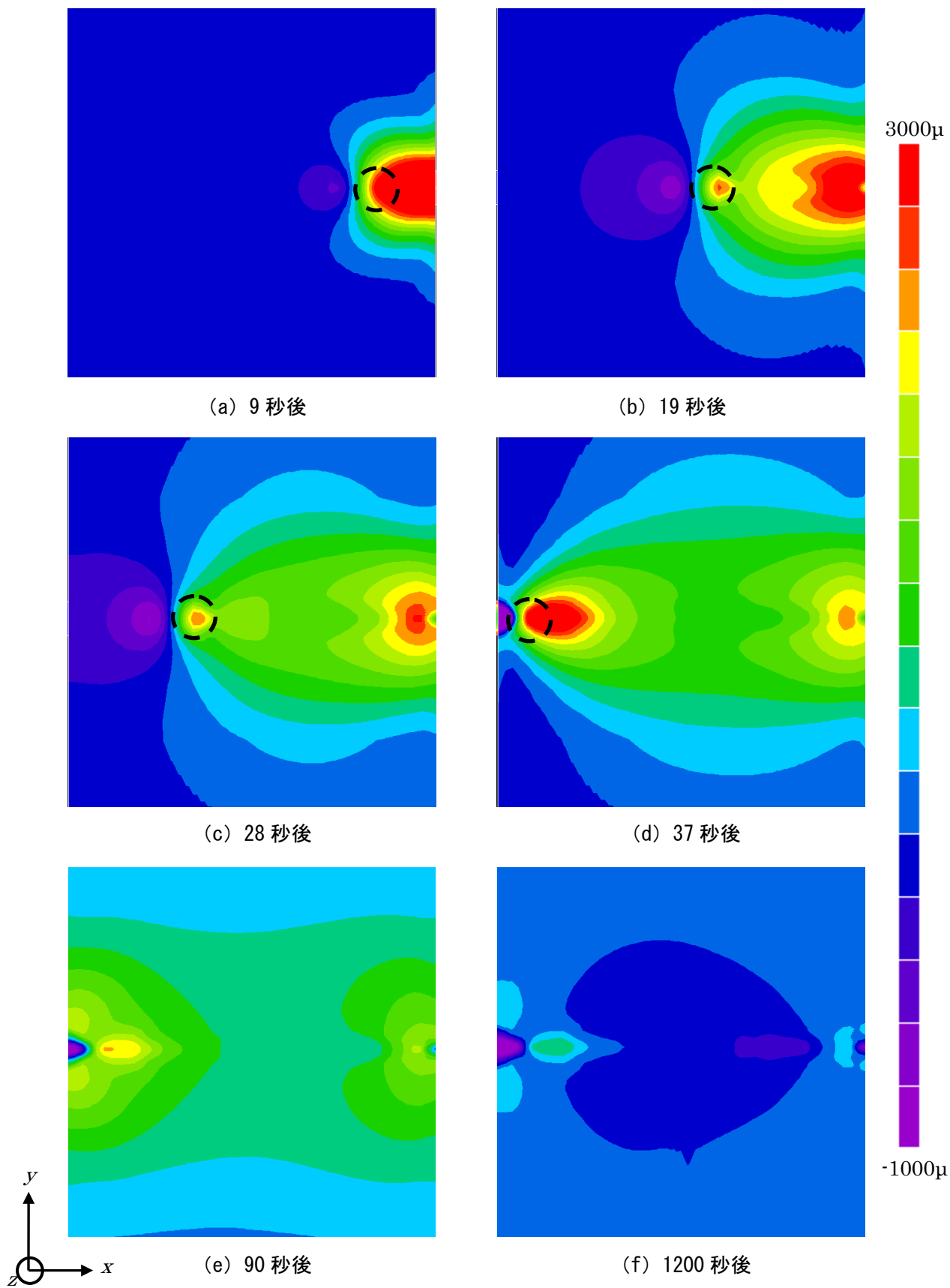


図 4.5.14 x 方向ひずみ分布 (FEM 9mm)

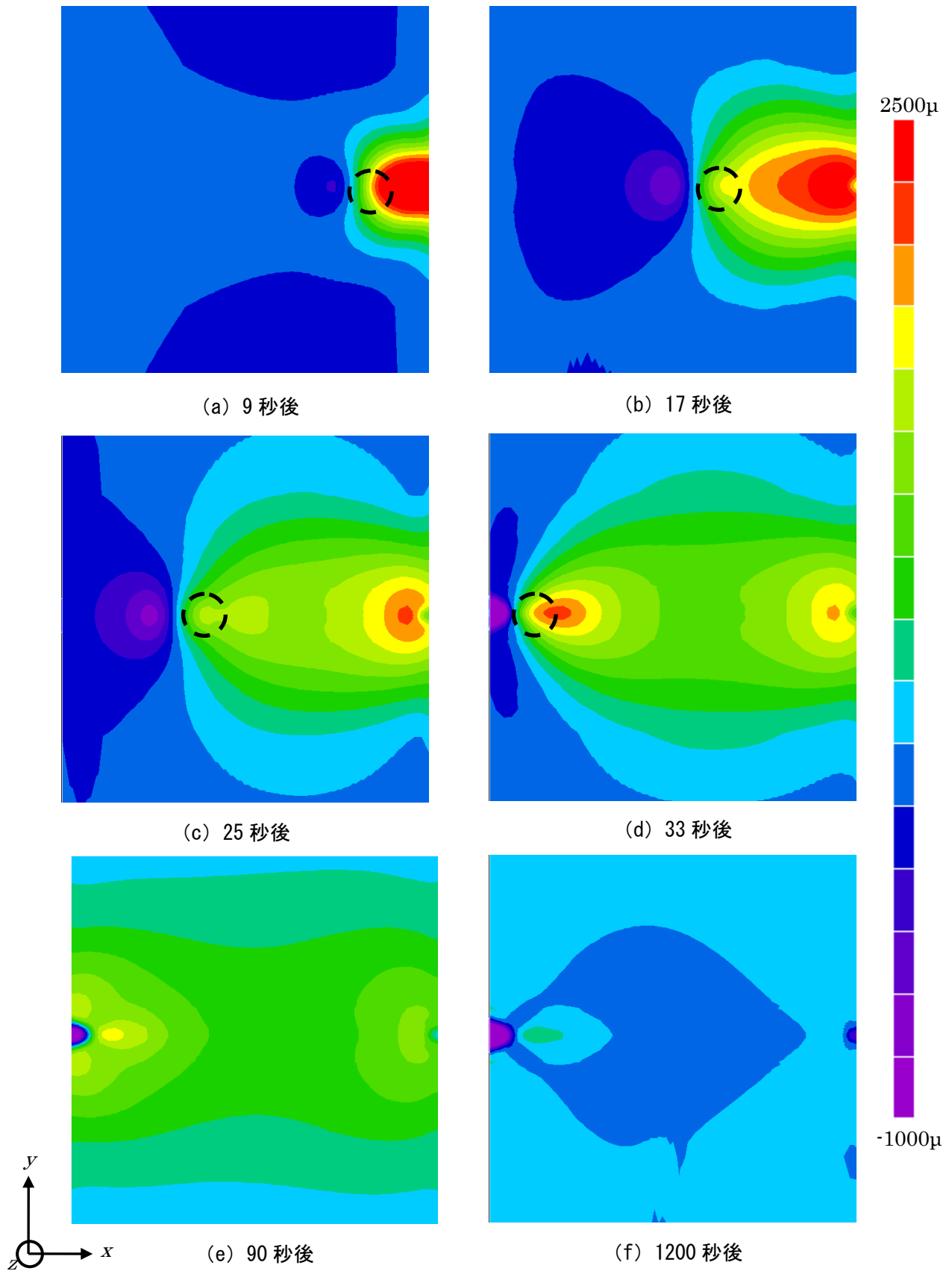


図 4.5.15 x 方向ひずみ分布 (FEM 12mm)

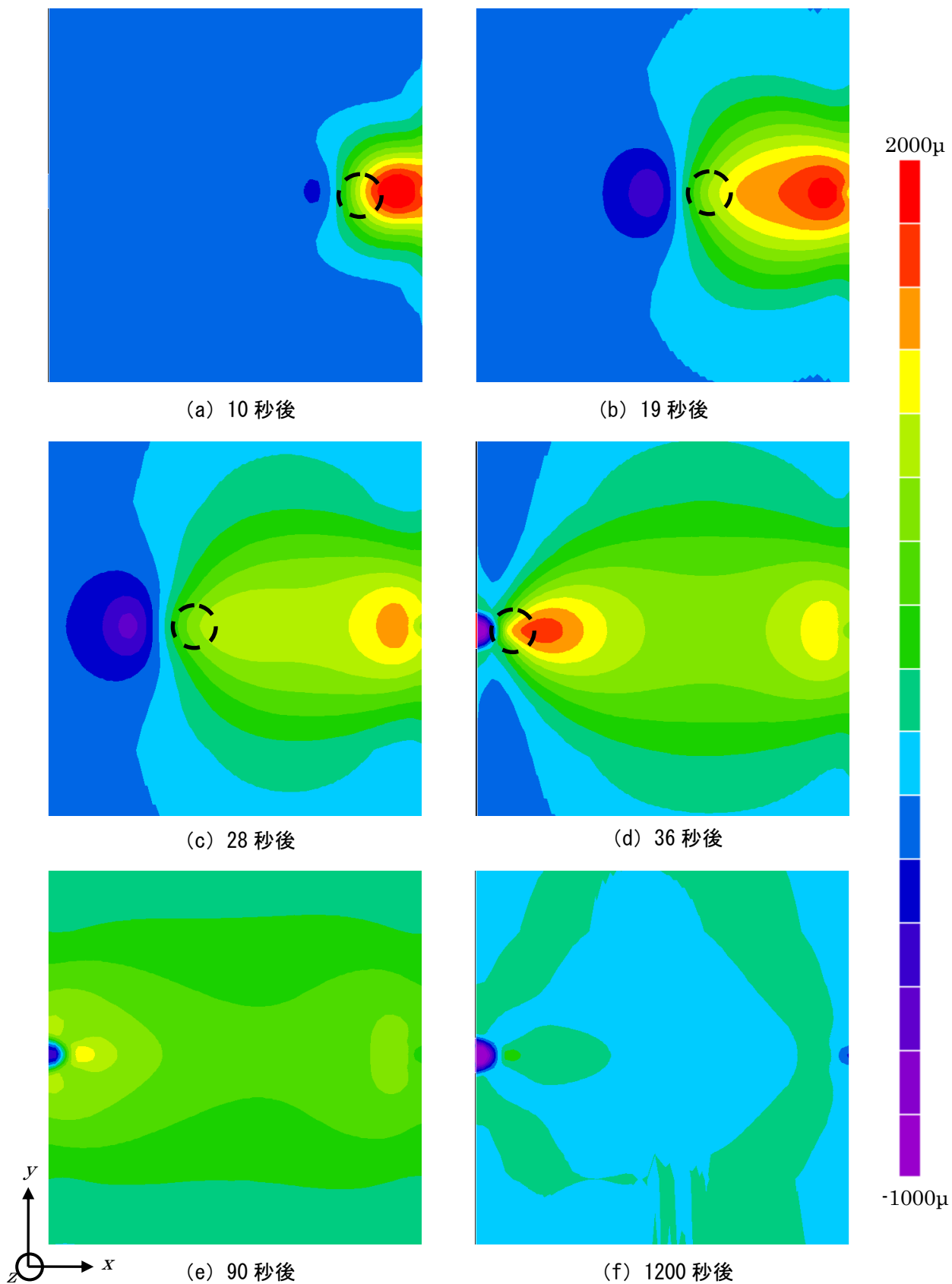


図 4.5.16 x 方向ひずみ分布 (FEM 16mm)

4.5.4 y方向ひずみについて

FEM および DICM より得た 9mm, 12mm および 16mm 試験片の図 4.5.2 の C 点における y 方向ひずみ経時変化を図 4.5.17～図 4.5.19 に示す。図より、FEM は全試験片において約 25 秒付近で最大引張ひずみが確認できた。その後、引張ひずみは時間の経過とともに低下し 1200 秒後には定常状態を保っている。最大引張ひずみは、9mm, 12mm の試験片は約 5000 μ および 16mm 試験片は約 3800 μ であった。また溶接開始から 1200 秒後のひずみに着目すると、9mm 試験片は約 900 μ 、12mm 試験片は約 2500 μ および 16mm 試験片は約 1800 μ であった。これより、試験片が薄くなると、最大引張ひずみが増加し、定常状態のひずみが減少する傾向、つまり、最大引張ひずみと定常状態のひずみの差が大きくなることが確認された。9mm と 12mm 試験片の最大引張ひずみ以降のひずみの推移に FEM と DICM で差異が確認され、12mm 試験片が 9mm 試験片よりその差異が大きかった。今回、解析モデルを簡易的なモデルとするため、溶融部や熱影響部の材料物性は母材と同じ値としており、試験片厚が薄いほどその影響を大きく受けることが原因と考える。しかし、DICM とほぼ同じ挙動を示しており、FEM は y 方向ひずみの経時変化をシミュレートできた。

FEM により得た 9mm, 12mm および 16mm 試験片の y 方向ひずみ分布図を図 4.5.20～図 4.5.22 に示す。図より、ビード直下に引張ひずみが確認される。この引張ひずみは、アークの熱膨張により発生したひずみである。また、引張ひずみはビード通過直後、y 方向に広がっているのが確認され、1200 秒においては、その引張ひずみが低下しているのが確認される。特徴的なひずみ分布として、図 4.5.22(e) の点線の範囲において、圧縮ひずみ領域が確認される。それは、12mm, 16mm 試験片では確認されなかった。これは、DICM とほぼ同じ分布を示しており、FEM は y 方向ひずみ分布を精度よくシミュレートできた。

以上から、9mm, 12mm の経時変化で差異は確認されたものの、DICM と FEM の y 方向ひずみの結果はほぼ定性的・定量的に一致していることが確認できた。

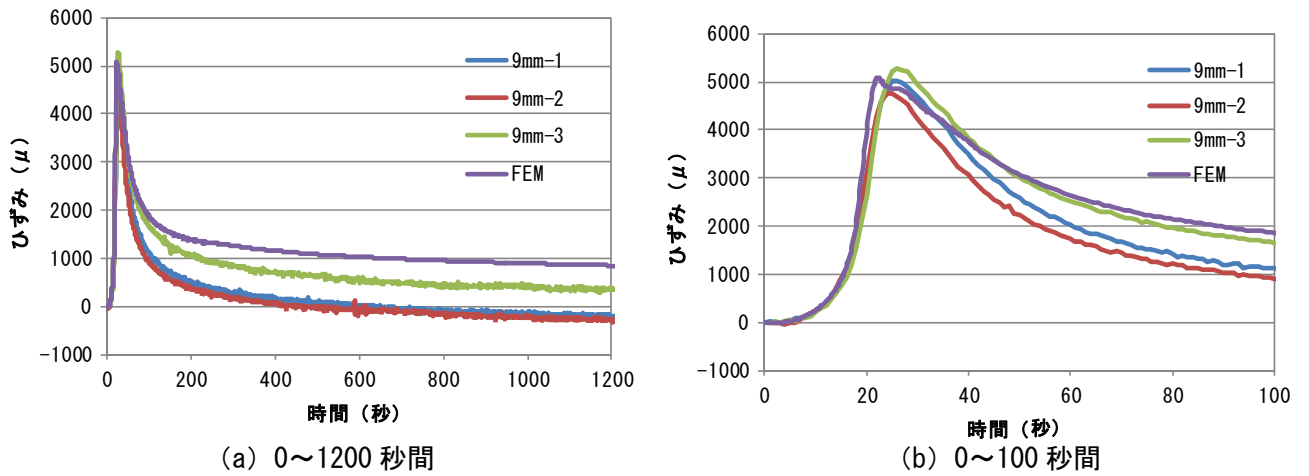


図 4.5.17 y 方向ひずみ経時変化の比較(9mm)

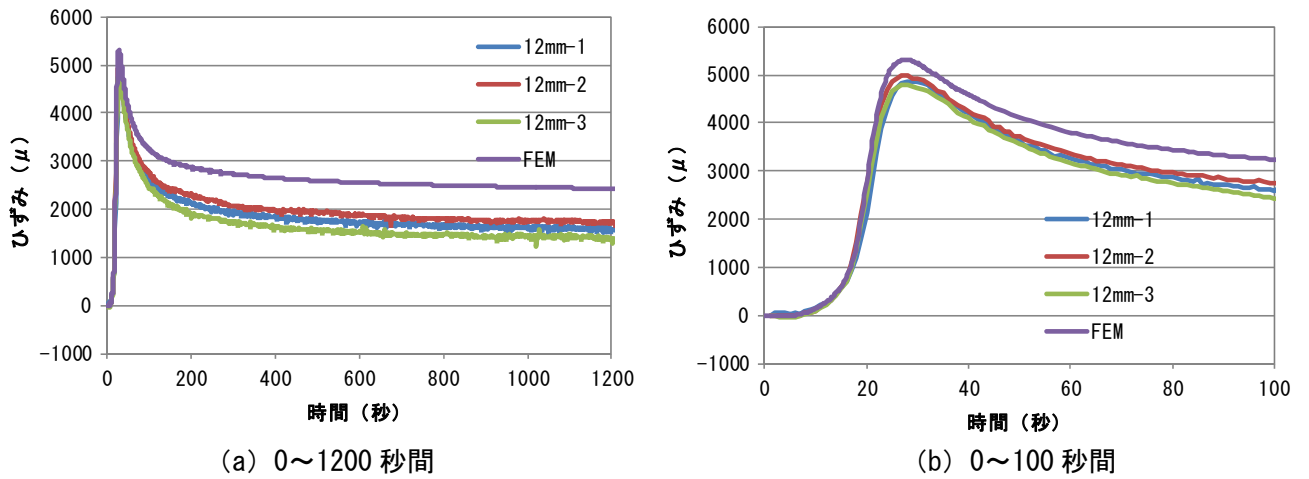


図 4.5.18 y 方向ひずみ経時変化の比較(12mm)

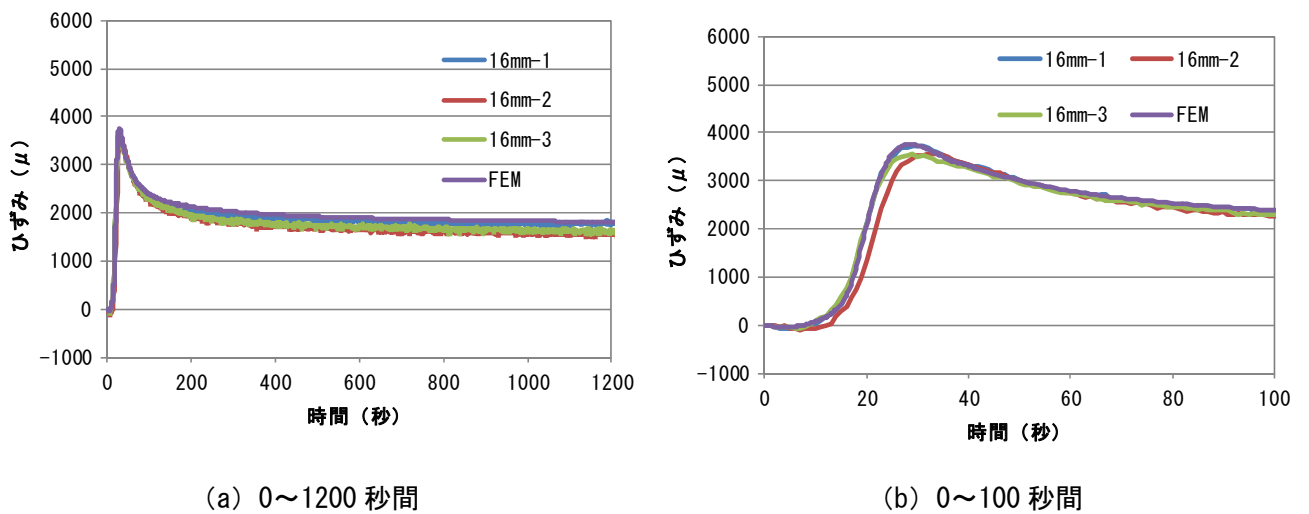


図 4.5.19 y 方向ひずみ経時変化の比較(16mm)

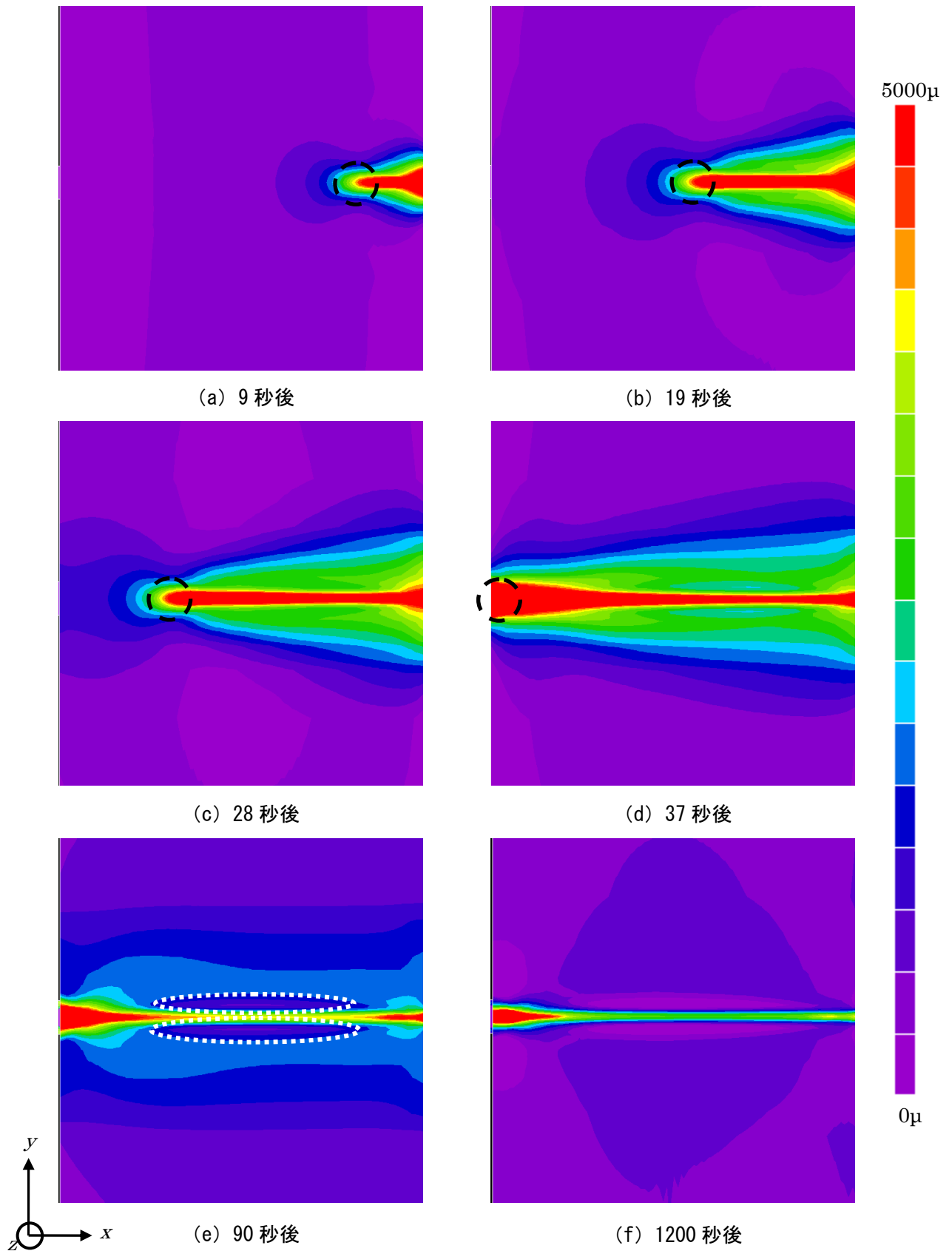


図 4.5.20 y 方向ひずみ分布 (FEM 9mm)

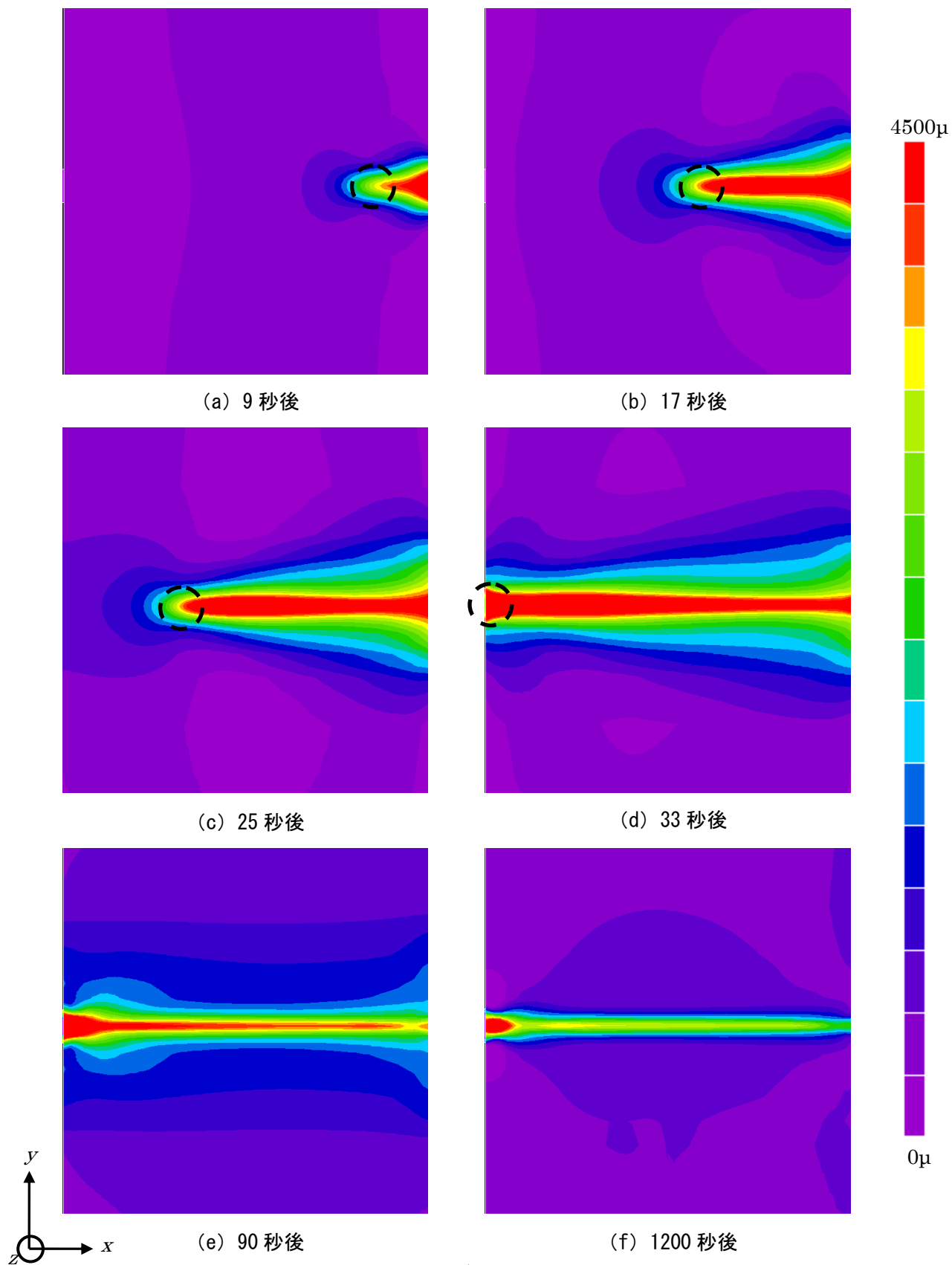


図 4.5.21 y 方向ひずみ分布 (FEM 12mm)

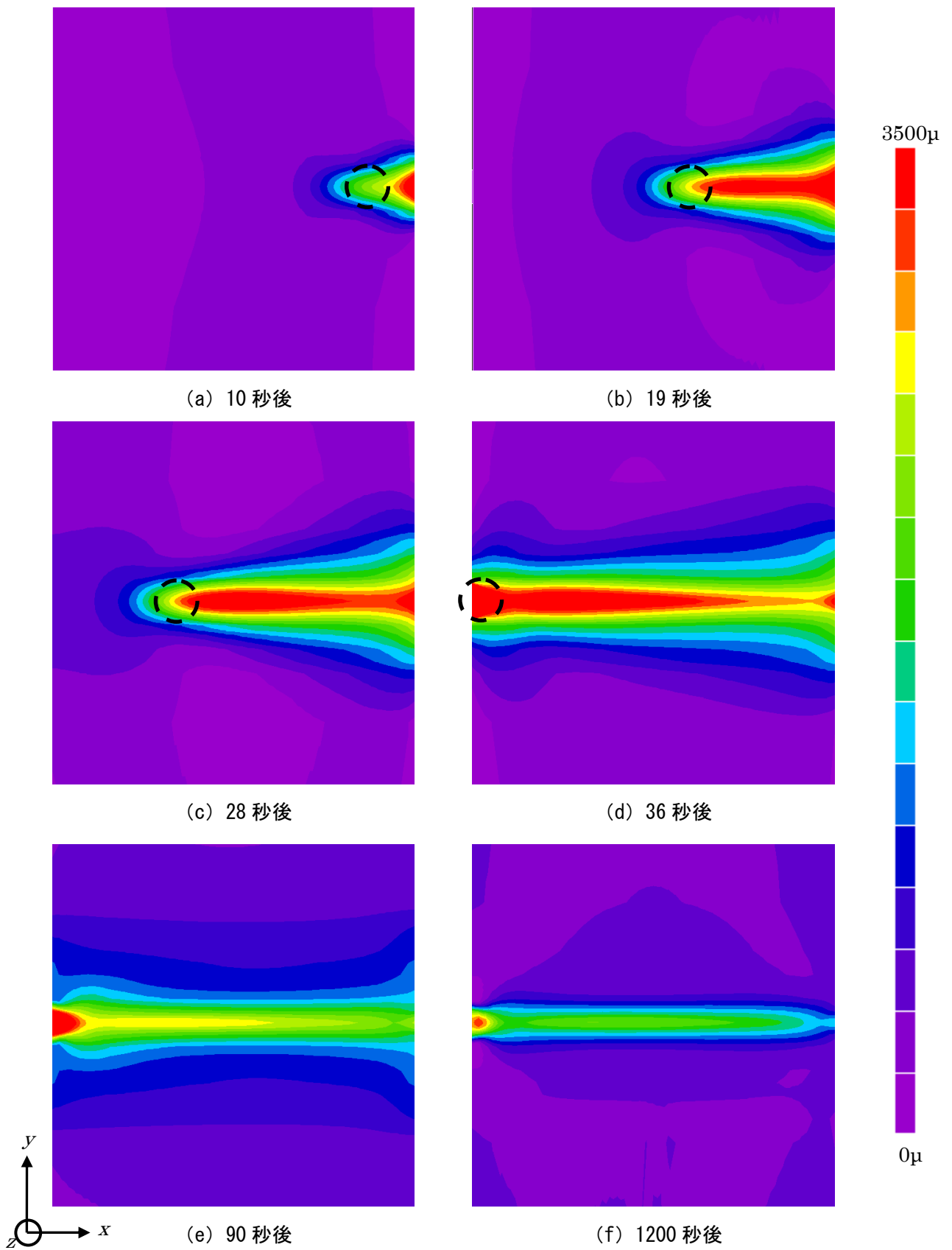


図 4.5.22 y 方向ひずみ分布 (FEM 16mm)

4.6 まとめ

DICM および赤外線サーモグラフィにより鋼部材の溶接中およびその冷却過程における変形，ひずみ，温度の計測を行い，それらの結果の妥当性を評価するために熱弾塑性 FE 解析を実施した．得られた所見を以下に示す．

・計測結果について

- (1) 溶接中および冷却過程における DICM によるひずみ分布の推移とサーモによる温度分布の推移を可視化することができた．
- (2) 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た．
- (3) 厚さの異なる試験片を用いることで，温度，ひずみ，面外方向の変形の違いを確認することができた．
- (4) 試験片の厚さが大きくなるにつれ，面外方向の変形は小さく，また，温度およびひずみの最大値は小さくなることが確認できた．
- (5) DICM により計測した面外方向の変位は変位計と一致した．

・解析結果について

- (1) サーモより計測した温度分布や温度経時変化に一致するような入熱温度，表面熱伝達率を逆解析により算出することができた．
- (2) 逆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・定量的におおむね一致した．

以上から，DICM により計測した変形，ひずみは，信頼できる値と言える．

【参考文献】

- 1) 仲威雄：溶接と収縮とき裂，小峰工業出版，1950.
- 2) 木原博，増淵興一：溶接変形と残留応力，溶接叢書第2巻，産報出版，1955.
- 3) 渡辺正紀，佐藤邦彦：溶接力学とその応用，朝倉書店，1965.
- 4) 佐藤邦彦，向井善彦，豊田政男：溶接工学，理工学社，1979.
- 5) 佐藤邦彦，上田幸雄，藤本二男：溶接変形・残留応力（溶接全書-3），産報出版，1979.
- 6) 溶接学会：溶接工学の基礎，丸善，1982.
- 7) John A.Goldak, and Mehdi Akhlaghi: COMPUTATIONAL WELDING MECHANICS, Springer, pp.1-64, 2006.
- 8) 佐藤邦彦，上田幸雄，藤本二男：溶接変形・残留応力，産報出版，1979.
- 9) 上田幸雄，中長啓治，金裕哲，村川英一：溶接残留応力の解析と測定の方法学（第I編 熱伝導解析の概説），溶接学会誌，Vol.55, No.6, pp.336-348, 1986.
- 10) 上田幸雄，中長啓治，金裕哲，村川英一：溶接残留応力の解析と測定の方法学（第II編 熱弾塑性クリープ解析法の概説），溶接学会誌，Vol.55, No.7, pp.399-410, 1986.
- 11) 上田幸雄，中長啓治，金裕哲，村川英一：溶接残留応力の解析と測定の方法学（第III編 残留応力測定法の基礎理論），溶接学会誌，Vol.55, No.8, pp.458-465, 1986.
- 12) 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，Vol.63, No.612, pp.1675-1680, 1997.
- 13) Atluri S.N., and Zhu T: A new meshless local Petrov-Galerkin(MLPG) approach in computational mechanics, Comput Mech, Vol.22, pp.117-127, 1998.
- 14) Atluri S.N., Kin H.G., and Cho J.Y.: A critical assessment of the truly Meshless Local Petrov-Galerkin(MLPG),and Local Boundary Integral Equation(LBIE) methods, Computational Mechanics, Vol.24, pp.348-372, 1999.
- 15) 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.
- 16) 堀友則，柴原正和，正岡孝治：MLPG（メッシュレス法）による溶接力学解析法の開発とその応用，溶接構造シンポジウム講演論文集，pp.501-508, 2009.
- 17) 梁偉，曾根慎二，芹澤久，村川英一：逆解析を用いた溶接固有変形の簡易測定法，関西造船協会講演概要集，No.22, pp.97-100, 2004.
- 18) 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ぎ手における固有変形の同定，関西造船協会論文集，No.243, pp.71-77, 2004.
- 19) 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，Vol.24, No.3, pp.247-252,

2006.

- 20) 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，Vol.20，No.4，pp.531-538，2002.
- 21) 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，Vol.14，No.4，pp.741-743，1996.
- 22) 目黒奨，村松由樹：ESPI システムによる溶接途上の変位分布の測定と数値計算の検証(GS-A2 一般セッション(製造関連解析技術)，計算力学講演会講演論文集，Vol.18，pp.779-780，2005.
- 23) 目黒奨，村松由樹：ESPI システムによる溶接ビード表面の変位測定(アーク溶接法(II))，溶接学会全国大会講演概要，Vol.77，pp.146-147，2005.
- 24) 村松由樹，黒田聖治，山本純司：ESPI システムによる溶接途上の相変態の検出，溶接学会全国大会講演概要，Vol.73，pp.340-341，2003.
- 25) VHT 社ホームページ
(<http://www.vhtpaint.com/>)
- 26) フリアーシステムズジャパン株式会社ホームページ
(<http://www.flir.com/thermography/apac/jp/>)
- 27) MSC.Marc2010 マニュアル，MSC Software，2010.
- 28) 上田幸雄，村川英一，麻寧諸：技術者のための溶接変形と残留応力攻略マニュアル，pp.53-58，2012.
- 29) 上田幸雄，山川武人：有限要素法による熱弾塑性挙動の解析，溶接学会誌，Vol.42，No.6，pp.567-577，1973.
- 30) (社) 日本鉄鋼協会編：第3版 鉄鋼便覧，丸善株式会社，1981.