

平成 24 年度 修士論文

突合せレーザー溶接の照射位置裕度に及ぼす  
焦点はずし距離の影響



三重大学大学院工学研究科

博士前期課程 機械工学専攻

赤井 隆介

## 目次

第1章 緒言	
1-1 研究背景	・・・1
1-1-1 レーザ加工の特徴	・・・1
1-1-2 レーザ溶接の特徴	・・・1
1-1-3 開先ギャップ裕度の拡大方法	・・・2
1-2 焦点はずし距離がレーザ溶接部に与える影響	・・・3
1-3 研究目的	・・・4
第2章 実験装置及び実験方法	
2-1 供試材	・・・5
2-2 実験装置の構成	・・・5
2-3 実験手順	・・・6
2-4 ずらし量 $\delta$ の定義及びレーザ照射の位置決め方法	・・・6
2-4-1 ずらし量 $\delta$ の定義	・・・6
2-4-2 レーザ照射の位置決め方法	・・・7
2-5 実験条件	・・・7
2-6 レーザのスポット径	・・・8
2-7 溶接部の評価方法	・・・9
2-7-1 ビード断面の観察方法	・・・9
2-7-1-1 試験片の切断方法	・・・9
2-7-1-2 研磨及び腐食方法	・・・9
2-7-2 ビード幅及びビード断面積の測定方法	・・・10
2-7-2-1 ビード形状の測定方法	・・・10
2-7-2-2 ビード幅の測定方法	・・・10
2-7-2-3 ビード断面積の測定方法	・・・10
2-8 熱サイクルの測定	・・・11
第3章 照射位置裕度に及ぼす焦点はずし距離の影響	
3-1 溶接部の外観及び断面の観察結果	・・・12
3-2 溶接部の分類による照射位置裕度の調査	・・・12
3-3 ビード形状	・・・13
3-4 ビード幅の測定結果	・・・14
3-5 ビード断面積の測定結果	・・・16
第4章 熱履歴の測定と考察	
4-1 熱履歴の測定結果	・・・19
4-2 移動熱源の理論による熱履歴の推定	・・・19



第5章 結言

．．． 22

参考文献

謝辞

## 第 1 章 緒言

### 1-1 研究背景

#### 1-1-1 レーザ加工の特徴

レーザ加工は指向性，集光性に優れたレーザ光をレンズやミラーを用いて微小スポットに収束させ，それによって得られる高いエネルギー密度を利用する非接触の熱加工法である．最近ではレーザ発振器の出力・性能が飛躍的に向上したことで，レーザ加工の実用化が進み，切断，溶接，微細加工など，幅広く利用されている．レーザ加工の特徴として，

- 1) 高いエネルギー密度の熱源が得られるので，難加工材料に適用できる．
- 2) 光学系を利用しているため，加工時の制御が容易である．
- 3) 非接触加工であるため工具の摩耗がなく，加工歪みが少ない．
- 4) コンピュータとの接続性が良い．

などがあり，従来の工作機械では得がたい長所を持っている．

#### 1-1-2 レーザ溶接の特徴

レーザ溶接は，集光したレーザ光を被加工物に照射して，金属を局所的に熔融させて接合を行う溶接法であり，高エネルギー密度の熱源を利用するため，従来の溶接法と比較して，

- 1) 高速深溶込み溶接であり，局所での溶接や異種材料間での溶接が可能である．
- 2) 熱影響層，熱歪みが少なく，溶接部の性状や品質において優れている．
- 3) 溶接のフレキシビリティが高く，制御性に優れている．

などの特徴がある<sup>1)</sup>．これらの特徴とレーザ装置の高出力化なども伴い，レーザ溶接は現在，自動車産業等で広く利用されている．例えば，自動車産業において，テーラードブランクと呼ばれる，板厚や強度の異なる鋼板を突合せて溶接した部材を作製する際は，レーザ溶接が他の溶接法と比べ

て特に多く使われている<sup>2)</sup>。これは、レーザ溶接には、アーク溶接やプラズマ溶接に比べて溶接速度が速く、低入熱で、溶接変形が抑制できるという利点があるためである。同様に、レーザ溶接は連続線溶接のため、自動車の生産ラインで主流となっているスポット溶接に比べ、剛性、静的・疲労強度や衝突強度も飛躍的に向上すると言われている。例えば、車体の全溶接長の約45%にレーザ溶接を適用した結果、従来車に比べて曲げ剛性が35%、ねじり剛性が80%と向上することが確認されている<sup>3)</sup>。

しかしその反面、レーザ溶接は以下のように留意すべき点もある。

- 1) スポット径が微小であるために、突合せ継手や重ね継手などの継手において溶接を行うとき、厳密なギャップ管理、レーザ照射位置の正確な設定、ならびに溶接の接触面を広く保つための前加工等が必要である。
- 2) レーザ溶接は母材の材質及びその材料の表面状態に左右されるため、金、銀、銅、アルミニウムなどの電気伝導度の高い金属材料はビーム吸収率が低く、溶接しにくい。また材料の表面粗さや表面の酸化皮膜によっても吸収率が変化するので、これらを考慮する必要がある。
- 3) レーザ光は材料表面での反射率が高く、溶接用として用いるにはより高いエネルギーが必要となるため、システムが大型化し、導入コスト、生産コストが他の溶接法と比べ高い。

これらは、レーザ溶接の適用範囲の拡大を阻害する大きな要因となっている。

### 1-1-3 開先ギャップ裕度の拡大方法

以上の問題を克服するため、現在、レーザ溶接と従来のアーク溶接を複合させたハイブリッド溶接法の研究や開発が行われている。このハイブリッド溶接の熱源の組合せとしては、CO<sub>2</sub>レーザとTIGアーク、またはMIGアークや、YAGレーザとTIGアークなどがある。従来のアーク溶接の特徴である、溶接欠陥の少ない良好な溶接外観が得られるが、溶込みが浅く高速溶接には不向きであるといった点と、前述したレーザ溶接の欠点とをそ

れぞれ相互補完するためや、レーザ溶接のコストパフォーマンスを上げて、その実用場面や生産効率を増すために、これらの研究が行われている。

また、従来のレーザ溶接では、母材そのものを溶融し、溶接するのが一般的であるが、フィラーワイヤや金属粉末などの充填剤を突合せ部に添加しながら溶接を行う、フィラーワイヤ添加型のレーザ溶接法も研究されている。王ら<sup>4)</sup>による報告によれば、レーザ・MIGアークハイブリッド溶接にフィラーワイヤを添加したレーザ溶接によって、溶接速度 4m/min, ギャップ 1mm を有する板厚 2mm のアルミニウム合金 A5052 の突合せ継手および重ね継手の溶接を行っており、開先のギャップ裕度の拡大に成功している。

また、藤長ら<sup>5)</sup>による報告によれば、フィラーを添加した YAG レーザ溶接において、溶接速度 5mm/s, ギャップ幅 1mm を有する板厚 5mm の SUS304 鋼の突合せ溶接が行われ、健全な溶接継手が得られている。これらのように、開先のギャップ裕度の拡大については、ハイブリッド溶接などの研究で種々報告されている。

## 1-2 焦点はずし距離がレーザ溶接部に与える影響

照射位置をずらして溶接した際に、突合せ溶接部にどのような影響を与えるかについては、前報において報告されており、レーザのスポットが 2 枚の試験片に当たっている場合と、片側のみに当たっている場合とでは溶接部の形成過程が異なることから、スポット径が照射位置裕度に影響を与える因子として提案された。

スポット径を変化させる方法として、焦点はずしを行うことが考えられ、焦点はずし距離がレーザ溶接部の溶込み形状に与える影響についてこれまで研究されてきた。Nawi ら<sup>6)</sup>による報告によれば、2.5kW の Nd:YAG レーザを用いて SUS304 のスポット溶接を行った場合、焦点はずし距離を大きくしていくと、溶込み深さが徐々に減少し、ビード幅が増加することがわかった。

また、張らは<sup>7)</sup>高出力ファイバレーザによる低溶接溶接速度領域での溶接

特性，溶込み現象について検討し，SUS316Lを用いてビードオンプレート溶接を行った場合，焦点はずし距離が $-7\text{mm}$ のときに，最大溶込み深さ $18.2\text{mm}$ が得られることを明らかにした．

他に，焦点はずし距離が溶接欠陥に与える影響についても種々報告されている．山口ら<sup>8)</sup>は $20\text{kW}$ ファイバレーザを用いた時のスパイク発生傾向を調査し，溶込み深さ位置におけるパワー密度が大きいほどスパイクが発生しやすいということを明らかにした．また，柿本ら<sup>9)</sup>は矩形波のレーザ溶接によるポロシティの発生について研究し，パルス幅を長くして焦点はずし距離を大きくすることで，溶込み深さを確保したままポロシティの発生を抑制することができる可能性を示した．

### 1-3 研究目的

以上のように焦点はずし距離がレーザ溶接部に影響を与えることがわかっており，それらのいくつかはスポット径の変化によるものであるという考察がなされている．

そこで本研究では，前報において提案された，スポット径が照射位置裕度にどのような影響を与えるかについて，焦点はずし距離を変化させることで調査した．そのために，焦点はずしを行い低炭素鋼およびオーステナイト系ステンレス鋼のI型突合せ溶接を行った．その際，突合せ部からレーザ照射位置をずらしレーザ溶接を行い，各焦点はずし距離および溶接速度における照射位置裕度の調査を行った．また，溶接後の試験片のビード外観および断面の観察により，レーザ照射位置のずらし量および焦点はずし距離が突合せレーザ溶接部の形成に与える影響について検討した．さらに，熱電対による溶接中の熱サイクルの測定を行い，レーザ照射位置のずらし量および焦点はずし距離の変化による，2枚の供試材への入熱比率の変化について検討した．

## 第 2 章 実験装置および実験方法

### 2-1 供試材

供試材として冷間圧延鋼板 SPCC およびオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 を使用した。寸法はいずれも  $10 \times 100 \times 0.8 \text{mm}$  である。SPCC および SUS304 の化学組成の規格値を Table 2-1 に、主要な熱的な物性値を Table 2-2 に示す。なお、これらの供試材の端部にはシャーリング加工によるだれが存在しており、その断面を Fig.2-1 に示す。このだれを光学顕微鏡、マイクロメータ付きステージ（ニコン社製 MHS 2×2）およびデジタルカウンタ（ニコン社製 カスタム Fit）によって計測したところ、SPCC は  $0.39 \text{mm}$  に渡ってだれが続き、最大で  $0.062 \text{mm}$  であった。SUS304 は  $0.46 \text{mm}$  に渡ってだれが続き、最大で  $0.10 \text{mm}$  であった。Fig.2-2 に溶接前の突合せ部の断面写真を示す。これらの突合せ部に対して、図の方向からレーザーを照射して、溶接を行った。

### 2-2 実験装置の構成

本研究で用いたレーザー溶接装置の構成を Fig.2-3 に示す。レーザー発振器には、定格出力  $1 \text{kW}$ 、波長  $10.6 \mu \text{m}$ 、ビーム径  $20 \text{mm}$ 、連続発振型の炭酸ガスレーザー発振器（アマダ社製 OLC-1000P）を用いた。発振されたレーザー光は焦点距離  $127 \text{mm}$  の ZnSe 製レンズにより集光され、突合せ部に照射される。

次に、突合せレーザー溶接用の治具の図面を Fig.2-4 に示す。この治具の供試材を固定する部分は、上部にあるピッチ  $1 \text{mm}$  のネジにより吊り上げられた状態になっており、ネジの頭部には Fig.2-4(a)に示すように  $36^\circ$  ごとに放射状に線が計 10 本引かれている。これによって突合せ部をレーザー照射位置から  $0.1 \text{mm}$  ずつ上下に調節した。また、Fig.2-4 に示したように、突合せレーザー溶接用治具は、有効ストローク  $500 \text{mm}$ 、分解能  $0.01 \text{mm}$  の電動スライダ（オリエンタルモータ社製 EZ limo EZHS6C-50）に取り付けら

れ、レーザ光の照射に同期して直線移動する。電動スライダの動作は接続されているコントローラにより制御される。コントローラへの動作プログラムの入力は、接続されたパソコンのアプリケーション（ハイパーターミナル）により行い、この動作プログラムにより溶接速度および溶接長を設定した。

決められた設定時間だけ、レーザ光を突合せ部に照射するため、Fig.2-4に示したように、レーザ発振器と集光レンズの間にレーザ光遮断装置を設置した。この遮断装置には下向き45°の角度でモリブデン製の反射鏡が取り付けられており、圧搾空気で作動する駆動シリンダーにより上下に動作する。なお、この駆動シリンダーの上下方向の動作は時間設定器により制御されており、反射鏡が最下部にあるときには、反射鏡が光路内に進入することにより、レーザ光は下方に反射され、下部の耐火レンガに照射される。一方、反射鏡が最上部にあるときには、反射鏡は光路内になく、レーザ光は集光レンズに到達し、溶接加工を行うことができる。

### 2-3 実験手順

溶接前処理として、供試材をアセトンで拭き取り、脱脂した後に、供試材を治具に固定した。その後、電動スライダの動作プログラムで溶接速度を設定し、レーザ光遮断装置と同期させることで溶接を行った。また、溶接中は集光レンズの保護のために、窒素ガスを20l/minで噴出させた。

### 2-4 突合せ部の検出方法およびずらし量 $\delta$ の定義

#### 2-4-1 ずらし量 $\delta$ の定義

本研究では、Fig.2-5に示すように、I型突合せ溶接継手の突合せ部から、レーザの照射位置をずらして溶接した。そこで、突合せ部からレーザ照射位置をずらしたときのずらし量を $\delta$ と定義した。また、 $\delta$ の値はFig.2-6に示すように、突合せ部から上方を正、下方を負とした。横向姿勢におい

て、 $\delta$  を 0.1mm ずつ増加させ、溶接長全体が溶接不可になるような条件まで実験を行った。

#### 2-4-2 突合せ部の検出方法

レーザー照射の位置決めには、レーザー発振器に装備されている赤色のガイドレーザーである He-Ne レーザを利用した。Fig.2-7 に示すように、突合せ継手の開先に He-Ne レーザを照射すると、一部の光が開先を透過する。そこで、Fig.2-4 に示したレーザー突合せ溶接用治具の上部にあるネジを回し、供試材の位置を調整したときに、この透過光が最も強まる位置を突合せ部とした。

#### 2-5 実験条件

本研究では、溶接速度及び焦点はずし距離の変化が突合せ部の形成に与える影響を検討するため、これらを変化させて実験を行った。SPCC における実験条件を以下にまとめて示す。

レーザー出力	・・・ 900W
レンズ焦点距離	・・・ 127mm
焦点はずし距離	・・・ $df = -2\text{mm} \sim +2\text{mm}$
レーザーが照射されてから スライダが動き出すまでの時間	・・・ 0.5sec
レーザー照射位置のずらし量 $\delta$	・・・ $\delta = -0.6\text{mm} \sim +0.8\text{mm}$
溶接長	・・・ 100mm
溶接速度	・・・ 20, 40mm/s
溶接姿勢	・・・ 横向
溶接方向	・・・ 右進

焦点はずし距離は試験片のレーザー照射側表面を 0mm とし、焦点を集光レンズ側に移動させた時を正、試験片側に移動させた時を負とした。

SPCC の実験結果から、溶接速度がより高速のときに焦点はずしによる



影響が出やすいと考え，SUS304の実験条件を以下のように設定した．

レーザー出力	・・・ 900W
レンズ焦点距離	・・・ 127mm
焦点はずし距離	・・・ $df = -2\text{mm} \sim \pm 0\text{mm}$
レーザーが照射されてから スライダが動き出すまでの時間	・・・ 0.5sec
レーザー照射位置のずらし量 $\delta$	・・・ $\delta = -0.4\text{mm} \sim +0.6\text{mm}$
溶接長	・・・ 試験片の端 100mm
溶接速度	・・・ 60, 80mm/s
溶接姿勢	・・・ 横向
溶接方向	・・・ 右進

## 2-6 レーザのスポット径

レーザーのスポット径は，レーザー溶接特性に多大な影響を与える因子であり，前報においては照射位置裕度に影響を与えることが指摘された．本研究ではスポット径を変化させるために焦点はずしを行ったため，その際のスポット径の理論値を計算した．

光の集光には，レンズの回折が影響することから，回折限界まで収差補正されたとしたとき，回折限界によって求まるレーザーの理論スポット径  $d_0$  は，Airyの公式から次式により計算することができる<sup>5)</sup>．

$$d_0 = 2.44 \frac{\lambda f}{D}$$

$\lambda$ : レーザの波長

$f$ : 集光レンズの焦点距離

$D$ : ビーム径

ここで，本実験における値をそれぞれ代入すると ( $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ,  $f = 127\text{mm}$ ,  $D = 20\text{mm}$ )， $d_0 \doteq 0.160\text{mm}$  と求まる．また，焦点はずしを行った際のスポット径を，レーザービーム全体を双曲線として近似し，以下の式で計算した．

$$r = \sqrt{r_0^2 + \left(\frac{\lambda}{\pi r_0}\right)^2 z^2}$$

$r_0$ :回折限界

$z$ :焦点はずし距離

$\lambda$ :レーザの波長

この式より，焦点はずし距離  $z = \pm 2\text{mm}$  では  $r \approx 0.165\text{mm}$  と求まる．

これらはいくまでも理論値であり，ビームウエスト近傍でレーザ光が回折限界まで収束されたときのスポット径の値である．実際のレーザのスポット径はこれ以上に大きな値になり，本研究で用いたレーザのスポット径もこれ以上の大きさを持つことが予想される．

## 2-7 溶接部の評価方法

### 2-7-1 ビード断面の観察方法

#### 2-7-1-1 試験片の切断方法

ビード断面観察を行うため，溶接された試験片をリファインカッター()によりそれぞれ約 5mm 幅で切り出した．

全域で完全溶込みが可能であった試験片については，溶接開始点から 50mm の位置で切断し，後述のビード幅及びビードの断面積の測定を行った．

全域で完全溶込みが得られなかった条件の試験片については，溶込みが見られた箇所，または全域完全溶込みが可能であった試験片と同様に溶接開始点から 50mm の位置で切り出し，断面観察を行った．

#### 2-7-1-2 研磨及び腐食方法

切り出した試験片の断面を #400～#2000 までの耐水研磨紙で湿式研磨した後，研磨の最終仕上げとして酸化クロム粉末を用いてバフ研磨を行い，

鏡面仕上げをした。SPCCは常温の3%ナイトール溶液に30秒程、SUS304は常温の35%塩酸に30分程浸してエッチングした。

## 2-7-2 ビード断面形状の測定方法

### 2-7-2-1 ビード断面形状の測定方法

ビード断面形状を測定するため、光学顕微鏡（ニコン社製 MHS 2×2）、マイクロメータ及びデジタルカウンタ付きステージ（ニコン社製 カスタム Fit）を用いて、Fig2-8 に示すように、試験片表面から試験片裏側まで板厚方向に0.1mm刻みでビードの輪郭をプロットし、これをビード断面形状とした。

### 2-7-2-2 ビード幅の測定方法

Fig2-8 において、試験片表面のプロット間の距離を表のビード幅、試験片裏側のプロット間の距離を裏のビード幅とした。

### 2-7-2-3 ビード断面積の測定方法

ビード断面積の測定は、Fig.2-8 で測定したビードの輪郭を基に、Fig2-9 に示すように、ビード断面を突合せ部が存在した箇所で二分し、それらを板厚方向に0.1mm毎に台形近似した面積  $s_{p1} \sim s_{p8}$  および  $s_{m1} \sim s_{m8}$  のうち、 $\delta$  の+側に当たる面積  $s_{p1} \sim s_{p8}$  の和を  $S_p$ 、 $\delta$  の-側に当たる面積  $s_{m1} \sim s_{m8}$  の和を  $S_m$  とし、それぞれのビード断面積とした。そしてこの面積  $S_p$  と  $S_m$  の和を  $S$  とし、全体のビード断面積とした。また、ビード幅と同様に、添字として焦点はずし距離の数値を付け足した。溶接長全域で完全溶込みが可能でなかったときの試験片のビード断面積についても同様の方法で測定した。

## 2-8 熱サイクルの測定方法

焦点はずし距離を変化させたときに，熱サイクルにどのような変化が生じるかを確認するため，熱電対により溶接中の熱サイクルを測定した．

実験条件は以下の通りである．

供試材	・・・ SPCC(100×20×0.8mm)
レーザー出力	・・・ 900W
レンズ焦点距離	・・・ 127mm
焦点はずし距離	・・・ $df=-2\text{mm} \sim \pm 0\text{mm}$
レーザーが照射されてから スライダが動き出すまでの時間	・・・ 0.5sec
溶接速度	・・・ 40mm/s
溶接長	・・・ 100mm
溶接姿勢	・・・ 横向
溶接方向	・・・ 右進
ずらし量 $\delta$	・・・ $\delta = -0.3 \sim +0.3\text{mm}$
熱電対の取り付け位置	・・・ 突合せ部から約 2mm, 3mm, 4mm 離れた位置の供試材表面

熱電対にはアルメル・クロメル線を使用し，れパーカッション溶接機により，2枚の供試材に対して，計6箇所溶接した．これらの熱電対の取り付け位置を Fig.2-10 に示す．あらかじめ熱電対の取り付け位置をハイトゲージでけがき，その位置を狙って溶接したが，その位置がずれてしまうことがあった．そこで，熱電対の取り付け後には，突合せ部から取り付け位置までの距離を読み取り顕微鏡により測定し，その正確な熱電対の取り付け位置を記録した．

### 第3章 照射位置裕度に及ぼす焦点はずし距離の影響

#### 3-1 溶接部の外観及び断面観察

レーザー照射位置，焦点はずし距離，および溶接速度を変化させて突合せレーザー溶接した際の SPCC の溶接部の外観写真を Fig.3-1～Fig.3-3，断面写真を Fig.3-4 の～Fig.3-6 に，SUS304 の溶接部の外観写真を Fig.3-7～Fig.3-8，断面写真を Fig.3-9～Fig.3-10 に示す。なお，溶接速度 20mm/s， $\delta = -0.5\text{mm}$  および  $+0.7\text{mm}$  の条件では，不安定なビードが形成された。このときの溶接部の断面形状は観察する場所によって大きく異なったため断面観察は行わなかった。同様の理由から， $df = +2\text{mm}$  において断面観察が困難であったものは観察対象から除外した。

溶接部外観を目視により観察したところ，不安定なビードが形成されたものを除き，表側では  $\delta$  および焦点はずし距離による違いは見られなかった。裏側では， $\delta$  が大きいときに不完全溶込みが見られた試験片があった。

ビード断面観察を行ったところ，各条件においてビード形状や溶込みの状態に様々な違いが見られた。そこで，以降の節においてビード断面観察に関する考察を行った。

#### 3-2 溶接部の分類による照射位置裕度の調査

各溶接速度において，レーザー照射位置，焦点はずし距離を変化させたとき，SPCC の溶接可否の結果を Fig.3-11 に示す。溶接可否は Fig.3-1～Fig.3-6 に示した溶接部の外観および断面観察により，溶接条件を以下の3種に分類した。○は溶接長の全域において完全溶込みが得られた条件であり，適正な溶接条件とした。△は一部溶接されているが，不完全溶込みなどの溶接欠陥が発生した条件，×は溶接長の全域において溶接が不可能であった条件を示している。Fig.3-11 において○の範囲で示される照射位置裕度は，溶接速度 20mm/s では  $df = 0\text{mm}$  および  $df = -2\text{mm}$  において  $-0.3\text{mm} \sim +0.5\text{mm}$ ，溶接速度 40mm/s では  $df = 0\text{mm}$  のとき  $-0.2\text{mm} \sim +0.2\text{mm}$ ， $df = -2\text{mm}$  のとき  $-0.2\text{mm} \sim +0.3\text{mm}$  となった。 $df = +2\text{mm}$  のときは，いずれの溶接速度においても適正な溶接条件は得られなかった。このときの溶接

部は、Fig.3-3 に示したように、ビードの形成が所々不安定であったり、Fig3-6 に示したように、ほぼ全てにおいて不完全溶込みが観察され適正な溶接条件が得られなかった。焦点はずし距離を正側に外すと、ビード波目の乱れの不安定なビードが形成されたり<sup>7)</sup>、溶込みが浅くなる<sup>1)</sup>と言われており、本研究においてもそれらの傾向が見られた。そのため、以降の考察および SUS304 での実験は  $df=+2\text{mm}$  のものを除外して行った。

SUS304 の溶接可否を Fig3-12 に示す。Fig3-7~Fig.3-8 に示した溶接部を SPCC の場合と同様に分類した。Fig3-12 より、照射位置裕度は、溶接速度  $60\text{mm/s}$  では  $df=0\text{mm}$  および  $df=-2\text{mm}$  において  $-0.1\text{mm}\sim+0.3\text{mm}$ 、溶接速度  $80\text{mm/s}$  では  $df=0\text{mm}$  および  $df=-2\text{mm}$  のとき  $-0.1\text{mm}\sim+0.2\text{mm}$  となった。

以上の結果より、SPCC において  $40\text{mm/s}$  で溶接を行った場合のみ、焦点はずし距離の変化により照射位置裕度に差が生じることがわかった。

### 3-3 ビード形状

レーザ照射位置および焦点はずし距離の変化が溶接部におよぼす影響について検討するため、ビード断面形状の測定を行った。Fig.3-13 に SPCC を溶接速度  $20\text{mm/s}$  で溶接した際のビード断面形状を  $\delta$  ごとに示す。この図において、青線が  $df=\pm 0\text{mm}$ 、赤線が  $df=-2\text{mm}$  のときのビード形状を示しており、黒の太線は開先を示している。また、レーザは図の右から照射されたものとする。 $df=0\text{mm}$  と  $df=-2\text{mm}$  を比較したとき、 $\delta=-0.2\sim+0.4\text{mm}$  の範囲では、ビード形状に大きな違いは見られなかった。一方、 $\delta=+0.5\text{mm}$  では  $df=-2\text{mm}$  の時に上板のビードが、 $df=0\text{mm}$  の場合と比較して全体的に狭くなっており、 $\delta=-0.3\text{mm}$  では下板のビードが全体的に狭くなっている。つまり、 $\delta$  の絶対値が大きいとき、負側に焦点はずしを行うことで、レーザをずらして照射した側の板のビードが狭くなるということである。

Fig.3-14 に SPCC を溶接速度  $40\text{mm/s}$  で溶接した際のビード形状を  $\delta$  ごとに示す。 $df=0\text{mm}$  と  $df=-2\text{mm}$  のビード断面形状を比較すると、 $\delta=-0.1\sim+0.1\text{mm}$  の範囲では、表面のビード幅はほとんど変わ

らないが，板厚方向にいくにつれ  $df=-2\text{mm}$  の方が狭くなる傾向が見られた． $\delta=\pm 0.2\text{mm}$  および  $\pm 0.3\text{mm}$  ではレーザをずらして照射した側の板のビード幅が狭くなり，もう一方の板のビード幅は広くなった．

Fig.3-15 に SUS304 を溶接速度  $60\text{mm/s}$  で溶接した際のビード形状を  $\delta$  ごとに示す． $df=0\text{mm}$  と  $df=-2\text{mm}$  のビード断面形状を比較したとき， $\delta=+0.2\text{mm}$  および  $\delta=-0.1\text{mm}$  のときは，ほとんど違いは見られなかった．一方， $\delta=\pm 0\text{mm}$  および  $\delta=+0.1\text{mm}$  では， $df=-2\text{mm}$  の方が全体的にビード幅が広くなった．これは，開先がシャーリング加工したままの状態であるため，開先に微小なギャップが生じ，そこからレーザが漏れ出てしまうことが原因であると思われる．その漏れが，強度分布が最大である中央により集中している  $df=0\text{mm}$  の場合の方が多くなるため上記のような傾向が見られたと考えられる． $\delta=\pm 0.3\text{mm}$  および  $\pm 0\text{mm}$  ではレーザをずらして照射した側の板のビード幅が狭くなり，もう一方の板のビード幅は広くなった．

Fig.3-16 に SUS304 を溶接速度  $80\text{mm/s}$  で溶接した際のビード断面形状を  $\delta$  ごとに示す． $\delta=+0.1\text{mm}$  の場合は  $df=-2\text{mm}$  のとき， $df=0\text{mm}$  と比較して全体的にビード幅が広くなった．これは溶接速度  $60\text{mm/s}$  のときと同様にレーザの漏れが原因であると考えられる． $\delta=\pm 0.2\text{mm}$  ではレーザをずらして照射した側の板のビード幅が狭くなり，もう一方の板のビード幅は広くなるというこれまでと同様の傾向が見られた．

以上の結果より，焦点はずし距離  $df$  を  $0\text{mm}$  から  $-2\text{mm}$  にすることで，ビード断面形状が変化する場合があることが分かった．これらの変化を定量的に扱うため，本研究ではビード幅およびビード断面積を測定し考察を行った．

### 3-4 ビード幅の測定結果

溶接後のビード断面において，レーザ照射側にあたる表面のビード幅，および裏面のビード幅をそれぞれ測定した．それらを全体のビード幅，上板と下板に分けたビード幅を溶接速度ごとにまとめた．

Fig.3-17に溶接速度 20mm/sにおける狙い位置と全体のビード幅の関係を示す。溶接速度 20mm/sでは焦点はずし距離を変化させても、表面と裏面のビード幅に変化は見られなかった。又、Fig.3-18に溶接速度 20mm/sに狙い位置と上板および下板のビード幅との関係をそれぞれ示す。焦点はずし距離を変化させても上板と下板それぞれのビード幅に対する影響は見られなかった。

Fig.3-19に溶接速度 40mm/sにおける狙い位置と全体のビード幅の関係を示す。焦点はずし距離を変化させたとき、表面のビード幅は  $df=-2\text{mm}$ の方がわずかに大きくなり、裏面のビード幅は  $df=-2\text{mm}$ の方が小さくなる傾向が見られた。Fig.3-20に溶接速度 40mm/sにおける狙い位置と上板および下板のビード幅との関係をそれぞれ示す。 $df=0\text{mm}$ と  $df=-2\text{mm}$ を比較すると、板の表面ではレーザをずらして照射した側の板、つまり  $\delta>0$ のときの  $T_{0U}$ と  $T_{-2U}$ 、および  $\delta>0$ のときの  $T_{0L}$ と  $T_{-2L}$ にはほとんど差は見られなかった。しかし、それらと反対の板では、 $df=0$ の方が若干増加するという傾向が見られた。

Fig.3-21に溶接速度 60mm/sにおける狙い位置と全体のビード幅の関係を示す。焦点はずし距離を変化させても、表面と裏面のビード幅にほとんど差は見られなかった。Fig.3-22に 60mm/sにおける狙い位置と上板および下板のビード幅との関係をそれぞれ示す。表面では焦点はずし距離を変化させても上板、下板ともにほとんど変化は見られなかった。裏面でも同様に焦点はずし距離による影響はほとんど見られなかった。

Fig.3-23に溶接速度 80mm/sにおける狙い位置と全体のビード幅の関係を示す。焦点はずし距離を変化させても、表面と裏面のビード幅に差は見られなかった。Fig.3-24に溶接速度 80mm/sにおける狙い位置と上板および下板のビード幅との関係をそれぞれ示す。表面では焦点はずし距離を変化させても上板、下板ともにほとんど変化は見られなかった。

以上の結果より、溶接速度 40mm/sを除いてビード幅に大きな違いは見られなかった。焦点はずしを行うことでスポット径が大きくなり、表面のビード幅は増加することが予想されるが、溶接速度が 20mm/sと比較的遅いときには、溶融部の形成に熱伝導が関与するため、大きな違いが生じなかったものと思われる。また、裏



側のビード幅に変化が生じなかったのも同様の理由であると考えられる。溶接速度が 60mm/s および 80mm/s の場合も同様に，熔融部の形成に熱伝導が関与するため，ビード幅に変化が見られなかったと考えられる。

溶接速度 40mm/s では， $df = -2\text{mm}$  の方が  $df = \pm 0\text{mm}$  のときよりも裏側のビード幅が狭くなっているが照射位置裕度は広がった。一般にビード幅が広い方が照射位置裕度は広くなることが予想されるが，Fig3-12 においてそうになっていないのは，照射位置裕度に影響する因子がビード幅よりもむしろ，入熱が大きく関与しているのではないかと考えられる。そこで入熱の影響を明らかにするために，次節においてビード断面積を測定し考察した。

### 3-5 ビード断面積の測定結果

焦点はずし距離を変化させたとき，各条件での上板およびした板への入熱の偏りを調査するため，ビード断面積の測定を行った。こちらにもビード幅と同様に，全体の断面積および，上板と下板に分けた断面積を溶接速度ごとにまとめた。

Fig.3-25(a)に溶接速度 20mm/s における狙い位置と全体の断面積の関係を示す。また，Fig.3-25(b)に溶接速度 20mm/s における狙い位置と上板および下板の断面積との関係をそれぞれ示す。この溶接速度においては，ほとんどの  $\delta$  において焦点はずし距離を変化させてもビード断面積に変化は見られなかった。ただし， $\delta$  がプラス側に大きいときは，焦点はずし距離を  $df = -2\text{mm}$  にすることでビード断面積は減少し，上板において減少していることが分かった。

Fig.3-26(a)に溶接速度 40mm/s における狙い位置と全体の断面積の関係を示す。また，Fig.3-26(b)に溶接速度 40mm/s における狙い位置と上板および下板の断面積との関係をそれぞれ示す。 $\delta < 0$  のときには断面積は  $df = -2\text{mm}$  の方が  $df = 0\text{mm}$  よりも小さくなった。しかし， $\delta > 0$  のときにはほぼ同じか  $df = -2\text{mm}$  の方が大きくなった。また， $\delta$  の絶対値が大きいときには，焦点はずし距離を  $df = -2\text{mm}$  にすることで，レーザをずらして照射した側のビード断面積が減少し，もう一方の板では増加した。

Fig.3-27(a)に溶接速度 60mm/s における狙い位置と全体の断面積の関係を示す。また、Fig.3-27(b)に溶接速度 60mm/s における狙い位置と上板および下板の断面積との関係をそれぞれ示す。この溶接速度では 20mm/s の場合と同様の傾向が見られた。従って、溶接速度が比較的遅い時は、物性値によらず焦点はずし距離の影響が小さいことが分かった。これは加熱時間が長いため、表面のビードが熱伝導によって形成されたため、焦点はずし距離の影響が小さかったのではないかと考えられる。

Fig.3-28(a)に溶接速度 80mm/s における狙い位置と全体の断面積の関係を示す。また、Fig.3-28(b)に溶接速度 80mm/s における狙い位置と上板および下板の断面積との関係をそれぞれ示す。全体の断面積は焦点はずし距離を変化させてもほとんど変化は見られなかった。また、 $\delta=+0.3\text{mm}$  を除き溶接速度 40mm/s の時と同様の傾向が見られた。

以上の結果より、SPCC において溶接速度が速く、 $\delta$  の絶対値が大きいときに、焦点はずし距離を 0mm から -2mm にすることで、照射位置をずらしたときの入熱の偏りが少なくなることがわかった。照射位置をずらしてレーザを照射したとき、照射された側の板に入熱が偏り、反対側の板よりも多く溶融する。この入熱の偏りが大きくなりすぎると、照射されてない側の板への入熱が少なくなり、溶接不可となる。しかし、焦点はずし距離を 0mm から -2mm にすることで、この偏りを小さくすることができる条件があるということがわかった。その結果、照射されてない側の板の溶融が  $df=\pm 0\text{mm}$  よりも  $df=-2\text{mm}$  の方が多くなるため、SPCC を溶接速度 40mm/s で溶接した際の照射位置裕度が広がったと考えられる。

溶接速度 80mm/s においても 40mm/s のときと類似した傾向が見られたが、照射位置裕度に変化が見られなかったのは、入熱が変化するといってもかなり微小な量であったため、ずらし量が 0.1mm 間隔では広く、それより小さい範囲で照射位置裕度が変化している可能性が考えられる。

入熱の偏りが小さくなった原因として焦点はずし距離が変化したことによる、板表面に照射されるレーザの強度分布が変化することが考えられる。突合せ溶接における、スポット径が変化した場合のレーザの強度分布の変化の概略図を Fig3-29 に示す。青線が

$df=\pm 0\text{mm}$  のときのレーザの強度分布, 赤線が  $df=-2\text{mm}$  のときのレーザの強度分布を示す. まず Fig3-29(a) に示す  $\delta =\pm 0\text{mm}$  のときは, どちらの焦点はずし距離においても入熱が上板と下板に半分ずつであることが分かる. また, 溶融面積も上板と下板でほぼ同じになると考えられる. 次に, Fig3-29(b) に示す  $\delta$  が正側に大きいときは, 照射されてない側の板への入熱が  $df=-2\text{mm}$  の方が  $df=\pm 0\text{mm}$  よりも黒の斜線で示した分だけ大きくなることが分かる. また, 出力が同じであれば, 反対の板への入熱は  $df=-2\text{mm}$  の方が  $df=\pm 0\text{mm}$  よりも小さくなる. このことにより, 焦点はずしを行うことで入熱の偏りが少なくなったため, Fig.3-のように断面積が変化し, また照射位置裕度にも影響を与えたと考えられる. また, 入熱の偏りの変化は,  $\delta$  が負のときでも同様であると考えられる.

## 第4章 溶接熱サイクルの測定

### 4-1 溶接熱サイクルの測定結果

レーザ照射位置および焦点はずし距離を変化させ、SPCCを突合せレーザ溶接した際の、板表面における熱サイクルを測定した結果を、Fig.4-1～Fig.4-14に示す。今回は、照射位置裕度が増加した条件である溶接速度40mm/sにおいて、溶接熱サイクル測定を行った。これらの図において(a)が上板、(b)が下板の熱サイクルであり、凡例の値は開先から熱電対までの距離である。

この測定結果から、熱電対を取り付けた位置の最高温度を読み取り、それをグラフにしたものを $\delta$ ごとにFig.4-15～Fig.4-18に示す。これらの図より、焦点はずし距離が $df=-2\text{mm}$ の時はほとんどの $\delta$ において、 $df=0\text{mm}$ よりも温度が低くなった。

しかしながら、 $\delta$ の絶対値が大きいときは、レーザ照射をずらした方向と反対側の板の温度が $df=-2\text{mm}$ のときの方が $df=0\text{mm}$ のときよりも高いか、ほぼ同じになった。この結果より、 $\delta$ の絶対値が大きいときに、焦点はずし距離を $df=-2\text{mm}$ にすることで入熱の偏りが少なくなるという推論が証明できた。これもまた、Fig.3-に示すように、スポット径の変化によるレーザの強度分布の変化が原因であると考えられる。

### 4-2 移動熱源の理論による溶接熱サイクルの推定

Rosenthalによって移動熱源の理論から溶接中の温度分布を解析する式が提案された。本研究ではレーザ溶接におけるこの式の妥当性を評価するために、板の任意の位置での熱サイクルを計算し、実験値と比較した。本研究で用いたローゼンタールによって求められた式を次に示す<sup>7)</sup>。

$$T - T_0 = \frac{q}{2\pi k} e^{-\lambda v \xi} \sum_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-\lambda v R_n}}{R_n} \quad \dots \dots \dots (4.1)$$

$$R_n = \sqrt{\xi^2 + y^2 + (z \pm 2ng)^2} \quad \dots \dots \dots (4.2)$$

$$\lambda = \frac{c\rho}{2k} \quad \dots \dots \dots (4.3)$$

上式において  $T$ :温度 [K],  $T_0$ :初期温度 [K],  $q$ :入熱速度 [J/s],  $k$ :熱伝導率 [W/mK],  $C$ :比熱 [J/kgK],  $\rho$ :密度 [ $\text{kg/m}^3$ ],  $v$ :溶接速度 [m/s],  $g$ :板厚 [m],  $\lambda$ :熱拡散率 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],  $\xi$ ,  $y$ ,  $z$  は熱源を原点としたときの板表面の座標で, それぞれ溶接方向, 板幅方向, 板厚方向の座標である. また,  $n$  は鏡像法の繰り返し数で  $n=10$  とした. また, レーザ溶接中における吸収率を 70% とし, 4.1 式で求めた温度  $T$  に 0.7 を乗じた.

Fig.4-19 に溶接速度 40mm/s,  $df=0\text{mm}$ ,  $\delta = \pm 0\text{mm}$  の時の, 各板の熱源に一番近い位置での実験値と計算値の比較を示す. この図において, (a) は上板で, 熱電対の位置は開先から 2.2mm, (b) は下板で熱電対の位置は開先から 2.1mm である. プログラムの都合上溶接過程の一部しか計算することができなかったが, 計算結果と実験結果との差異について確認することができた. 立ち上がりは計算値が実験値に比べ緩やかで, 冷却速度は計算値がかなり遅くなることがわかった. これは, ローゼンタールの方では, 板からの輻射などによる熱損失が考慮されていないことが原因であると考えられる. そのため, 本研究では熱サイクル中の最高温度についてのみ検討した.

Fig.4-20~Fig.4-27 に各条件における熱サイクル中の最高温度の計算値と実験値の比較を示す. これらの図より, ほとんどの条件で計算値と実験値に差が見られた. 特に,  $\delta$  が負のときには計算値よりも実験値が全体的に低くなった. しかし,  $\delta$  が正の時にはそのような傾向がみられていない. これは, 計算の際に仮定した吸収率が実際と異なっていることが予想され,  $\delta$  が正のときと負のときで吸収率に違いがある可能性が考えられる.

以上の推論は, 熱サイクルが計算値と実験値で類似しているときに言えることである. しかし, 実際にはそれらが異なっているデータもある. これは, 理論式で用いた仮定と, 実際の測定における条件が大きく異なるためだと考えられる. 例えば Fig.4-19 に示すように冷却速度が大きく異なっていることから, 熱源から遠い位置での計算結果は実験結果と大きく異なると思われる. また, 本式では熱源を点熱源と仮定して計算しているが, 焦点はずし距離による影響を議論するためには, スポット径の変化を考慮する必要があるため, 熱源を面熱源として計算し直す必要がある.

以上のことより，4.1 式をレーザ溶接に適用するにはいくつか考慮すべき問題があることが分かった．しかしながら，4.1 式によって板内の任意の点の温度から入熱を計算することが可能である．そのため 3 章で述べた，焦点はずしによる入熱の偏りを理論的に証明できる可能性がある．そのためには，この理論を実際の条件にあうように拡張していくことが必要だと思われる．

## 第5章 結言

SPCC と SUS304 の突合せレーザー溶接において、焦点はずし距離を変化させたとき、照射位置裕度およびビード断面形状に与える影響を検討した結果を以下にまとめる。

- ① SPCC における照射位置裕度は、溶接速度 20mm/s では  $df=0\text{mm}$  及び  $df=-2\text{mm}$  において  $\delta=-0.3\text{mm}\sim+0.5\text{mm}$ 、40mm/s では  $df=0\text{mm}$  において  $\delta=-0.2\text{mm}\sim+0.2\text{mm}$ 、 $df=-2\text{mm}$  において  $\delta=-0.2\text{mm}\sim+0.3\text{mm}$  の範囲となり、焦点はずしを行うことで溶接速度 40mm/s において、照射位置裕度が広がった。なお、 $df=+2\text{mm}$  においては、両溶接速度において完全溶込みが得られる条件はなかった。
- ② SUS304 における照射位置裕度は、溶接速度 60mm/s では  $df=0\text{mm}$  及び  $df=-2\text{mm}$  で  $\delta=-0.1\text{mm}\sim+0.3\text{mm}$ 、80mm/s では  $df=0\text{mm}$  及び  $df=-2\text{mm}$  で  $\delta=-0.1\text{mm}\sim+0.2\text{mm}$  となり焦点はずし距離による影響は小さかった。
- ③ 焦点はずし距離を  $df=0\text{mm}$  から  $df=-2\text{mm}$  にすることで、溶接速度が速い場合および、溶接速度が遅いときの  $\delta$  の絶対値が大きい場合にビード形状が変化した。
- ④ 焦点はずし距離を  $df=0\text{mm}$  から  $df=-2\text{mm}$  にした時、溶接速度 20mm/s、60mm/s および 80mm/s、では試験片の表面と裏面のビード幅にほとんど変化は見られなかった。溶接速度 40mm/s では表面のビード幅はほとんど変化が見られなかったが、裏面のビード幅は減少する傾向が見られた。
- ⑤ 溶接速度 40mm/s では、 $\delta$  の絶対値が大きいとき、焦点はずし距離を  $df=0\text{mm}$  から  $df=-2\text{mm}$  にすることで、レーザーをずらして照射した側の板のビード幅が減少し、反対側の板のビード幅が増加した。

- ⑥ 溶接速度が 20mm/s および 60mm/s では，焦点はずし距離を変化させても，ビード断面積に大きな違いは見られなかった．
- ⑦ 溶接速度が 40mm/s および 80mm/s では，焦点はずし距離を変化させても，全体のビード断面積に大きな違いは見られなかった．しかし， $\delta$  の絶対値が大きいところでは， $df=0\text{mm}$  よりも  $df=-2\text{mm}$  の方が，レーザをずらして照射した板と反対側の板の断面積が大きくなった．
- ⑧ 溶接熱サイクルの測定により， $df=-2\text{mm}$  の方が  $df=0\text{mm}$  よりも最高温度が低くなる傾向が見られた．また，この差は  $\delta$  の絶対値が大きいときに，レーザをずらして照射した板と反対側の板で小さくなることが分かった．
- ⑨ 溶接熱サイクルの測定値と移動熱源の理論による計算値を比較したところ，立ち上がりと冷却速度に差異が見られた．これは理論で用いた仮定と，実際の条件が大きく異なっているためである．



参考文献

- 1)新井武：レーザー加工の基礎工学,91,2007, 丸善
- 2)Yoshitake akihide ら:車体軽量化を支える高張力鋼板利用技術に関する展望  
JFE 技術 No.16,pp.6-11
- 3)Loeffler,klaus ら:第 64 回レーザー加工学会論文集 2005,pp.1-16
- 4)王静波ら：アルミニウム合金のファイラー・レーザー・MIG アークハイブリッド溶接(FLA 溶接法)のビード形成およびギャップ裕度に関する検討 溶接学会全国大会講演概要, 86(2010),pp.150-151,
- 5)藤長茂樹ら：YAG レーザによるフィラワイヤ添加全姿勢突合せ溶接技術の開発 溶接学会論文集 第 22 号 第 3 号(2004),pp.369-374
- 6)I.N.Nawi, et al：Nd:YAG Laser Welding of Stainless Steel 304 for Photonics Device Packaging, Procedia Engineering,8(2011),pp374-379
- 7)張旭東, 他：10kW ファイバレーザの低溶接速度領域における溶込み特性, 溶接学会全国大会講演概要, 第 81 集(2007-9), pp336-337
- 8)山口篤, 他：20kW ファイバレーザによるアルミニウム合金のビードオンプレート溶接特性, 兵庫県産学インキュベート事業：大出力ファイバレーザを用いた厚板アルミニウム合金の溶接に関する研究, 24, pp42-43
- 9)柿本和俊, 他：矩形波のレーザー溶接によるポロシティの発生, 齒科材料・器械, Vol.24 No.6(2005), pp421-430
- 10)Rosenthal：Theory of Moving Sources of Heat and Its Application to Metal Treatments 1946,pp849-854

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり，終始懇切なご指導を賜りました三重大学工学部 鈴木実平教授，川上博士准教授，尾崎仁志助教に深く感謝致します．特にまた，本研究を遂行するにあたり多大なご協力を頂きました材料機能設計研究室の院生，学部生の皆様方に深く感謝致します．

最後に，幾多のご協力を頂きながら，ここに御氏名を掲載できなかった方々に対し，その非礼をお詫びすると共に，謹んで御礼申し上げます．

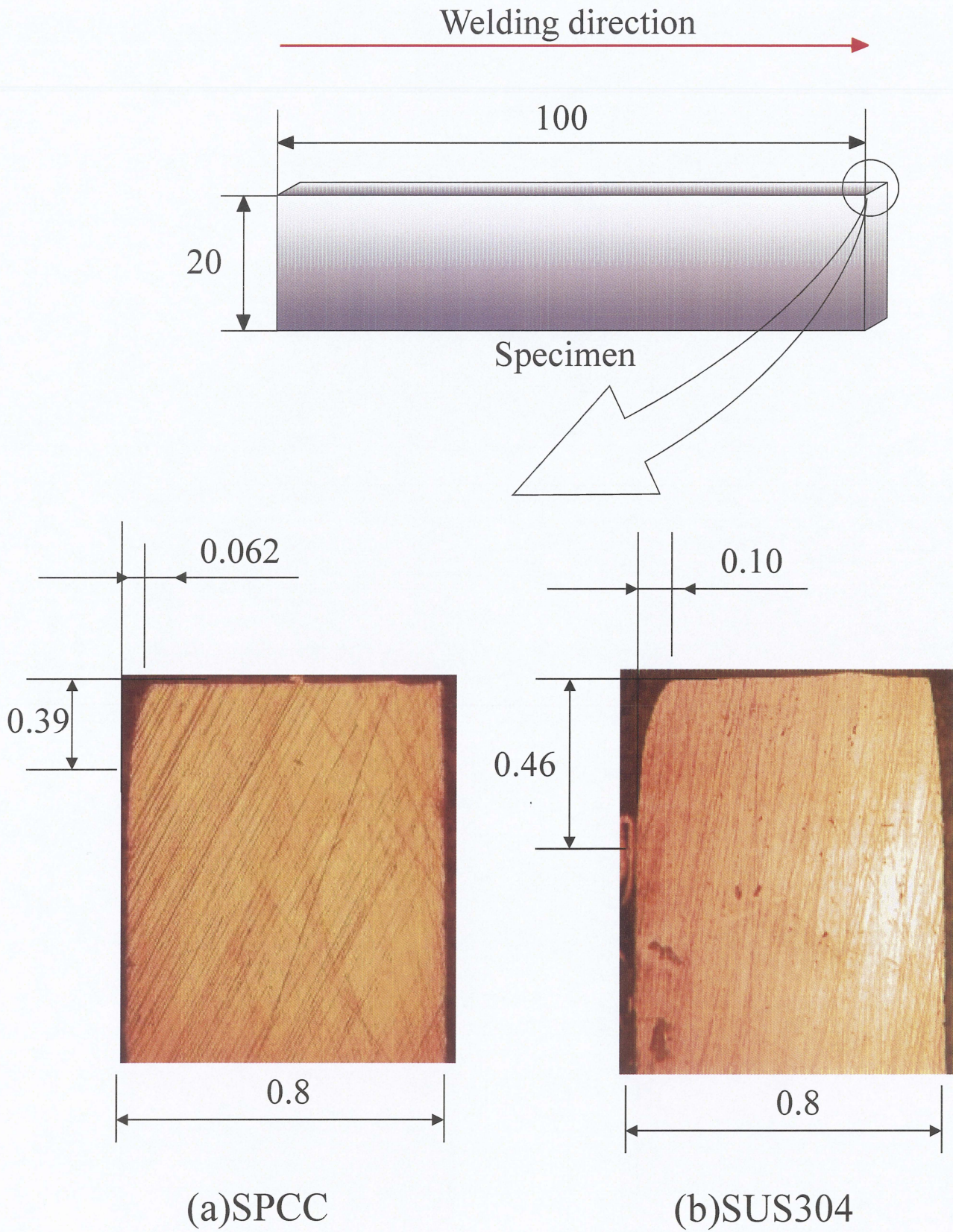


Fig.2-1 Cross-section of material used



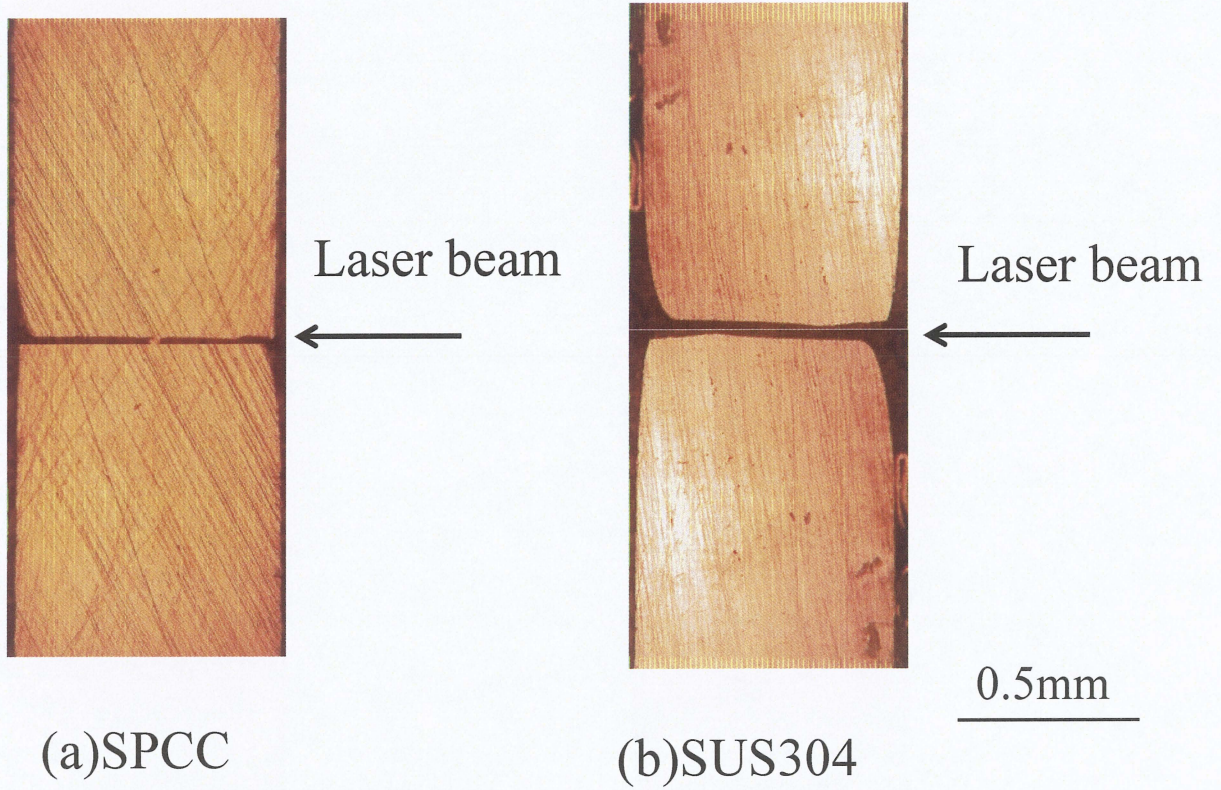


Fig.2-2 Cross-section of butt joints



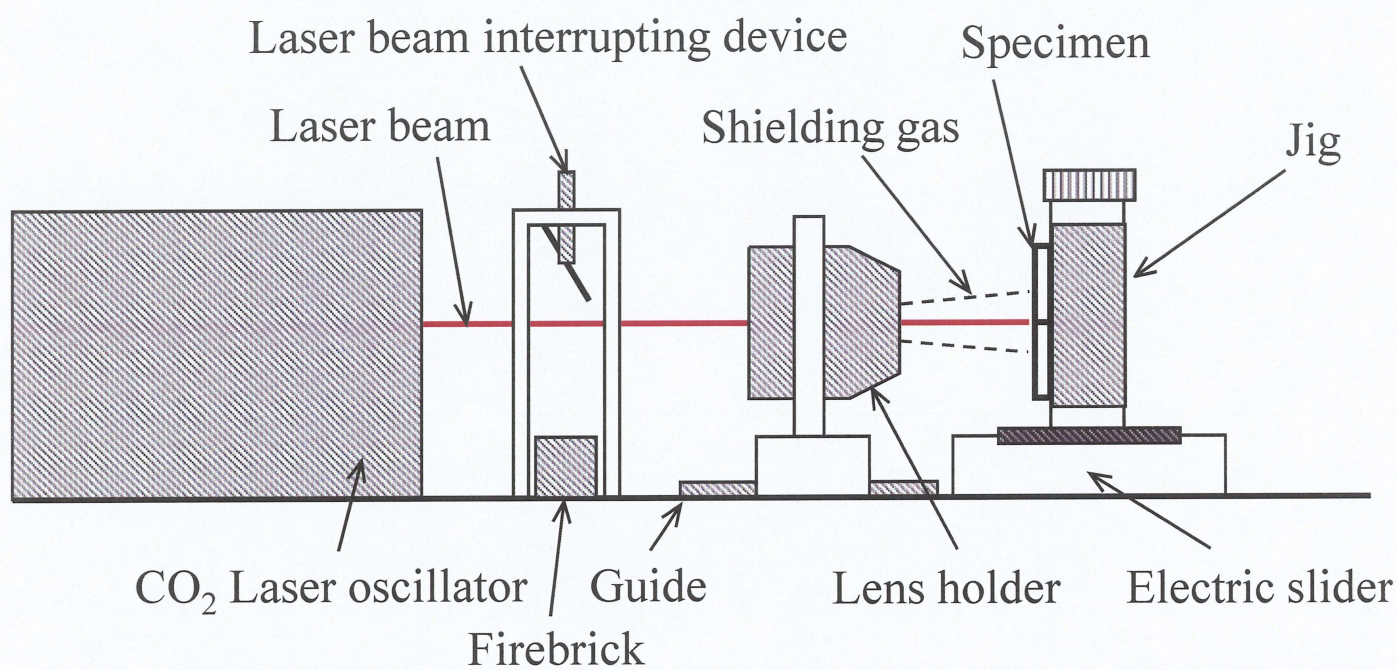
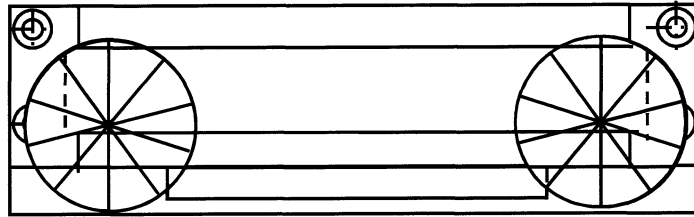
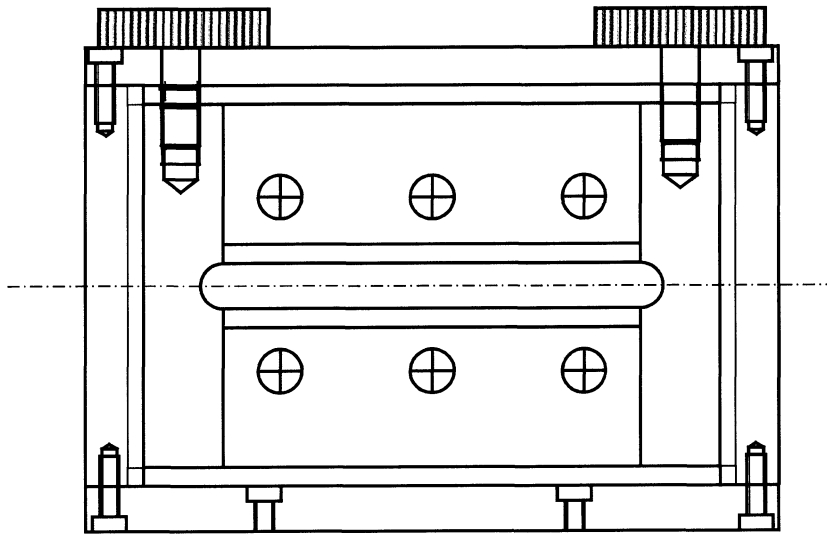


Fig.2-3 Schematic diagram of laser welding equipments



(a) Top view

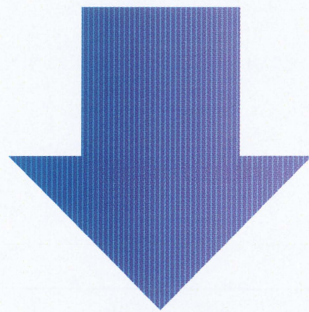
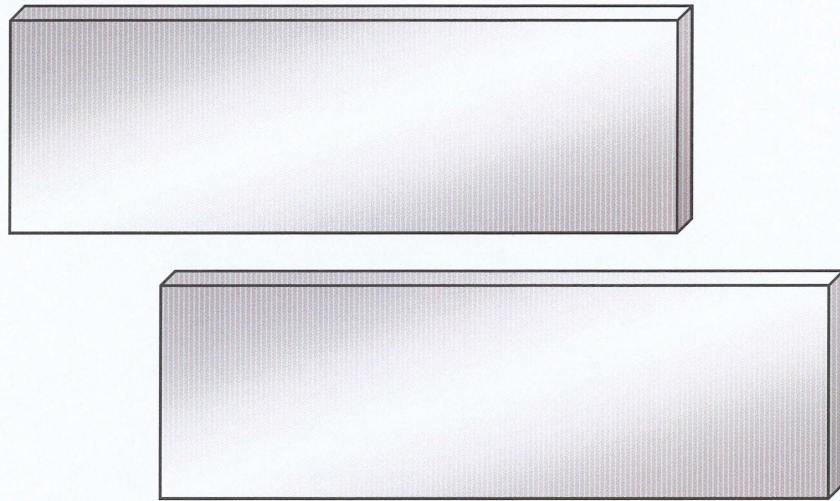


(b) Front view

Fig.2-4 Schematic drawing of jig for laser butt welding



Steel plates



Laser irradiated line (weld line)

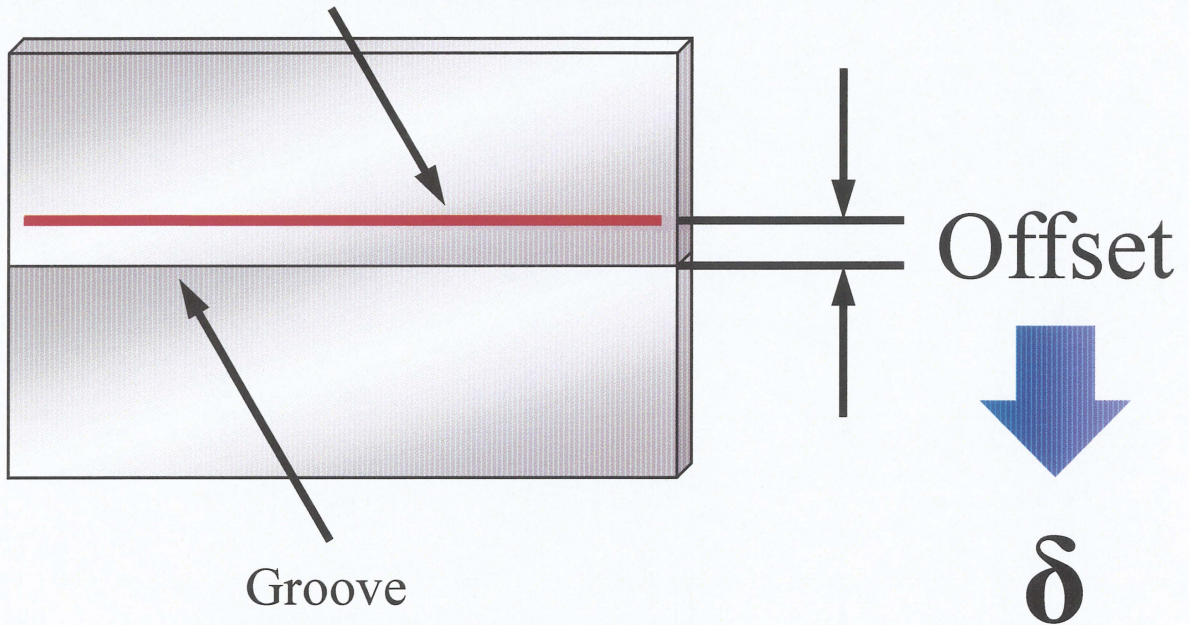


Fig.2-5 Definition of offset;  $\delta$



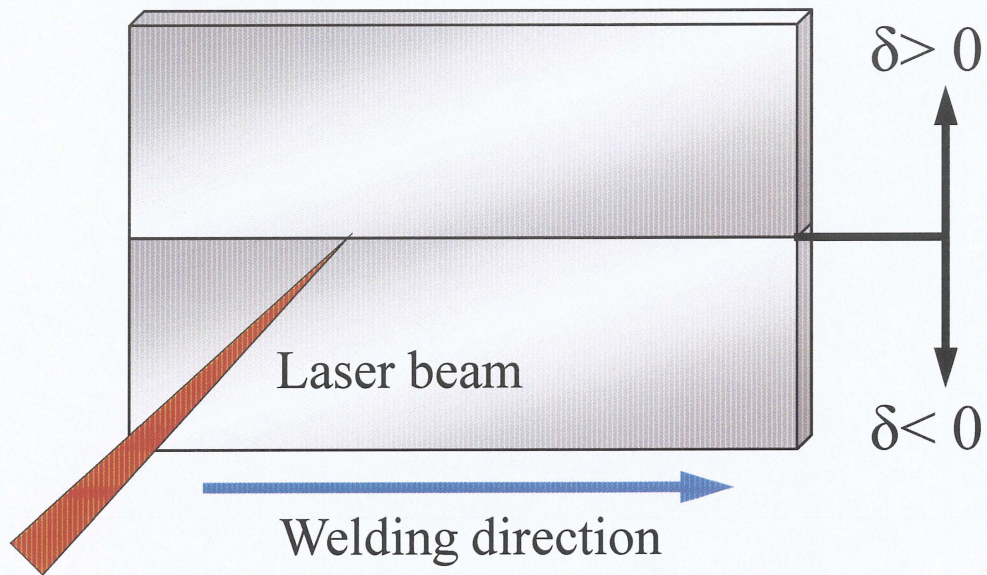


Fig.2-6 Definition of offset direction



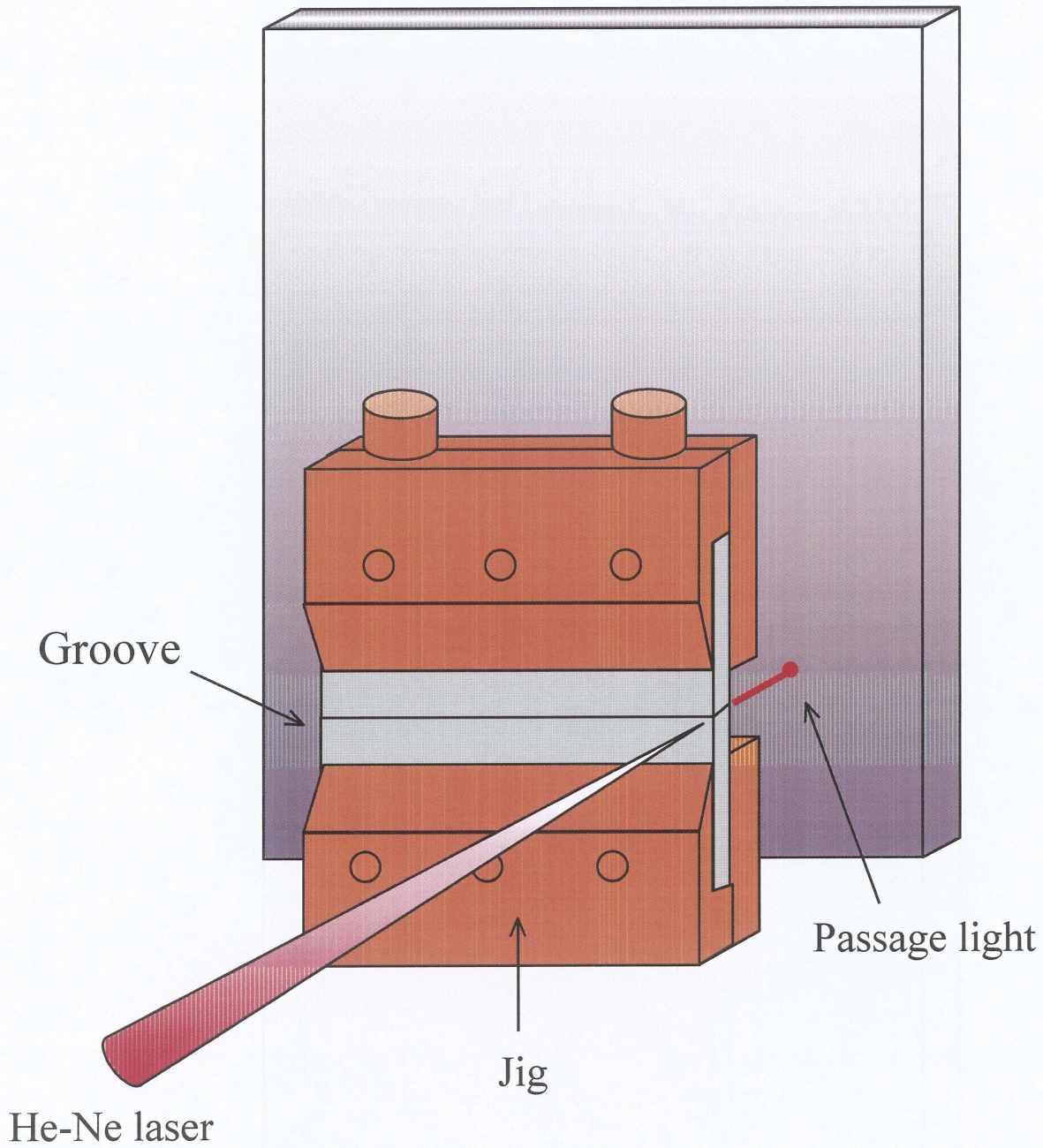


Fig.2-7 Schematic diagram of positioning method of laser irradiation



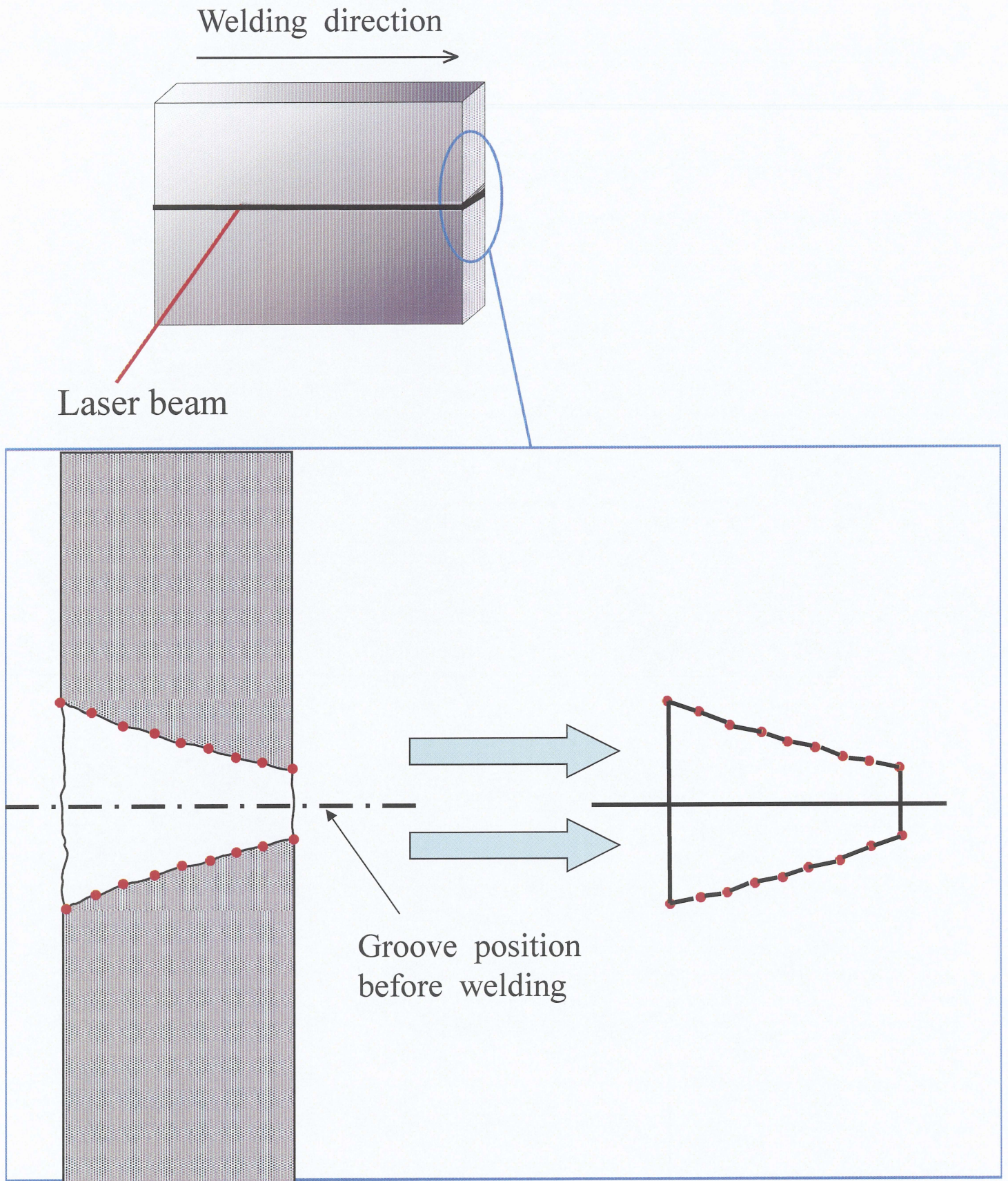


Fig.2-8 Schematic diagram of measurement of bead cross-sectional shape



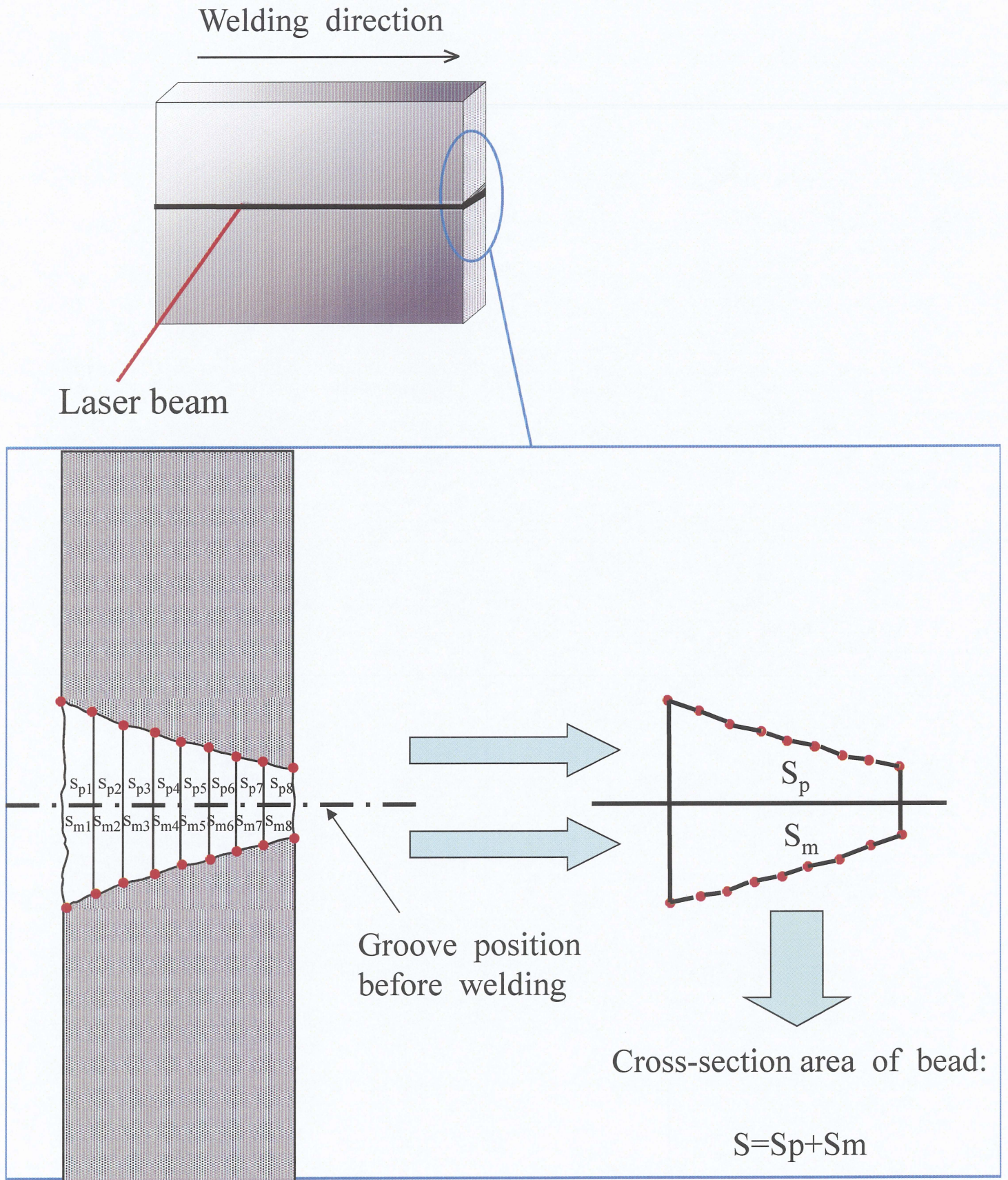
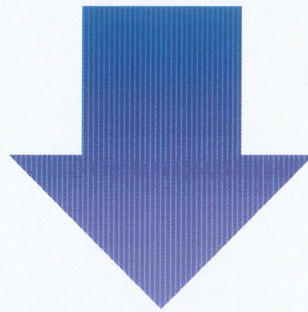
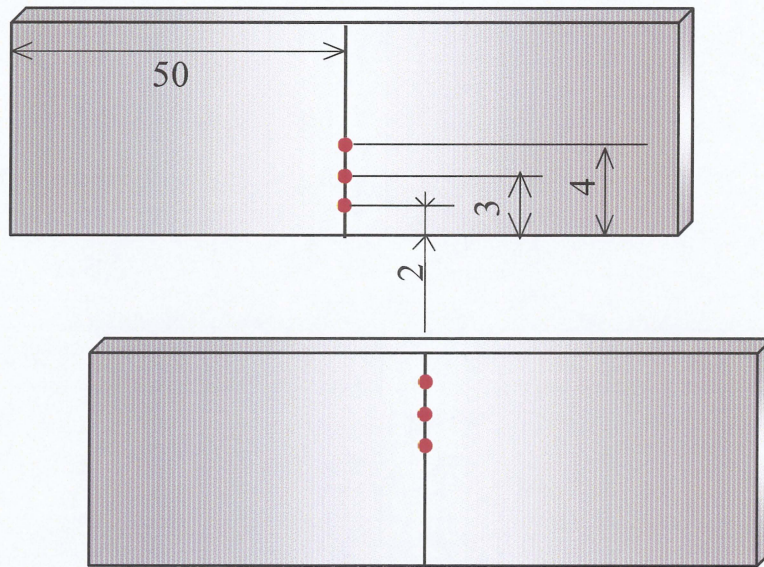


Fig.2-9 Schematic diagram of cross-section area of bead



SPCC plates



Laser irradiated line (weld line)

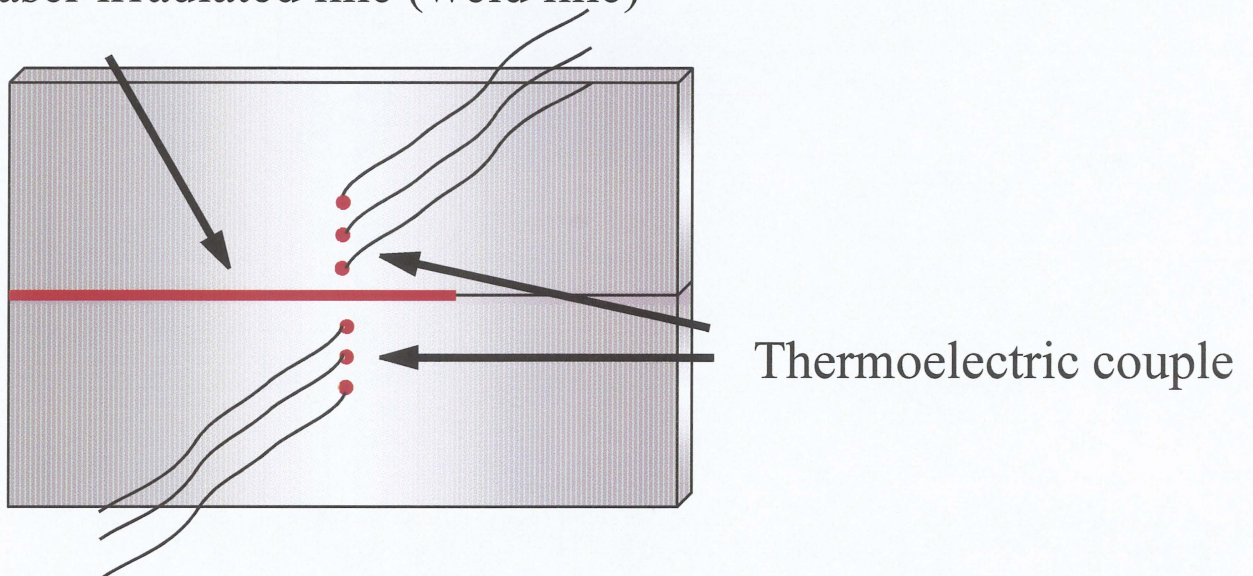


Fig.2-10 Schematic diagram of welded location of thermoelectric couples

Table 2-1 Chemical compositions of materials used

(mass %)

Material	C	Si	Mn	P	S
SPCC	≤0.15	≤1.00	≤0.6	≤0.1	≤0.05

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS304	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	8.00~10.50	18.00~20.00

Table 2-2 Thermophysical properties of materials used

Material	Specific heat capacity[J/kg·K]	Thermal conductivity[J/m·s·K]	Surface tension[N/m]	Melting point[°C]
SPCC	480	60.4	1.75	1530
SUS304	494	16	2.5	1420



		$\delta$ [mm]					
		-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1
Welding speed[mm/s]	20						
	40						

		$\delta$ [mm]					
		0	+0.1	+0.2	+0.3	+0.4	+0.5
Welding speed[mm/s]	20						
	40						

		$\delta$ [mm]		
		+0.6	+0.7	+0.8
Welding speed[mm/s]	20			
	40			

20mm

---

Fig.3-1 Appearance of laser butt weld of SPCC for different laser irradiation position  $\delta$  and  $df=0\text{mm}$ .



		$\delta$ [mm]					
		-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1
Welding speed[mm/s]	20						
	40						

		$\delta$ [mm]					
		0	+0.1	+0.2	+0.3	+0.4	+0.5
Welding speed[mm/s]	20						
	40						

		$\delta$ [mm]		
		+0.6	+0.7	+0.8
Welding speed[mm/s]	20			
	40			

20mm

---

Fig.3-2 Appearance of laser butt weld of SPCC for different laser irradiation position  $\delta$  and  $df=-2\text{mm}$ .












		$\delta$ [mm]					
		-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0	+0.1
Welding speed[mm/s]	20						
	40						













		$\delta$ [mm]				
		0	+0.1	+0.2	+0.3	+0.4
Welding speed[mm/s]	20					
	40					



20mm

Fig.3-3 Appearance of laser butt weld of SPCC for different laser irradiation position  $\delta$  and  $df=+2\text{mm}$ .



		$\delta$ [mm]					
		-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1
Welding speed[mm/s]	20						
	40						

		$\delta$ [mm]					
		0	+0.1	+0.2	+0.3	+0.4	+0.5
Welding speed[mm/s]	20						
	40						

		$\delta$ [mm]		
		+0.6	+0.7	+0.8
Welding speed[mm/s]	20			
	40			

0.5mm  
—

Fig.3-4 Cross-section of laser butt weld of SPCC for different laser irradiation position  $\delta$  and  $df=0$ mm.



		$\delta$ [mm]					
		-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1
Welding speed[mm/s]	20						
	40						

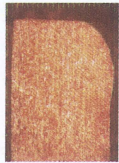







		$\delta$ [mm]					
		0	+0.1	+0.2	+0.3	+0.4	+0.5
Welding speed[mm/s]	20						
	40						

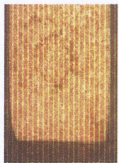




		$\delta$ [mm]		
		+0.6	+0.7	+0.8
Welding speed[mm/s]	20			
	40			

0.5mm  
—

Fig.3-5 Cross-section of laser butt weld of SPCC for different laser irradiation position  $\delta$  and  $df=-2\text{mm}$ .



		$\delta$ [mm]					
		-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0	+0.1
Welding speed[mm/s]	20						
	40						

		$\delta$ [mm]				
		+0.2	+0.3	+0.4	+0.5	+0.6
Welding speed[mm/s]	20					
	40					

0.5mm  
—

Fig.3-6 Cross-section of laser butt weld of SPCC for different laser irradiation position  $\delta$  and  $df=+2\text{mm}$ .



		$\delta$ [mm]					
		-0.3	-0.2	-0.1	0	+0.1	+0.2
Welding speed[mm/s]	60						
	80						

		$\delta$ [mm]		
		+0.3	+0.4	+0.5
Welding speed[mm/s]	60			
	80			\

20mm

---

Fig.3-7 Appearance of laser butt weld of SUS304 for different laser irradiation position  $\delta$  and  $df=0$ mm.



		$\delta$ [mm]					
		-0.3	-0.2	-0.1	0	+0.1	+0.2
Welding speed[mm/s]	60						
	80						







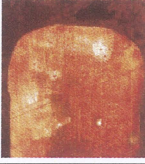





		$\delta$ [mm]		
		+0.3	+0.4	+0.5
Welding speed[mm/s]	60			
	80			


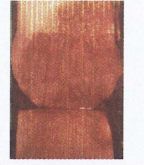



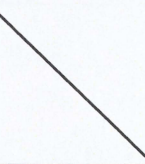
20mm

---

Fig.3-8 Appearance of laser butt weld of SUS304 for different laser irradiation position  $\delta$  and  $df=-2\text{mm}$ .















		$\delta$ [mm]					
		-0.3	-0.2	-0.1	0	+0.1	+0.2
Welding speed[mm/s]	60						
	80						





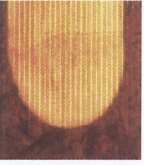
		$\delta$ [mm]		
		+0.3	+0.4	+0.5
Welding speed[mm/s]	60			
	80			

0.5mm  
—

Fig.3-9 Cross-section of laser butt weld of SUS304 for different laser irradiation position  $\delta$  and  $df=0\text{mm}$ .



		$\delta$ [mm]					
		-0.3	-0.2	-0.1	0	+0.1	+0.2
Welding speed[mm/s]	60						
	80						

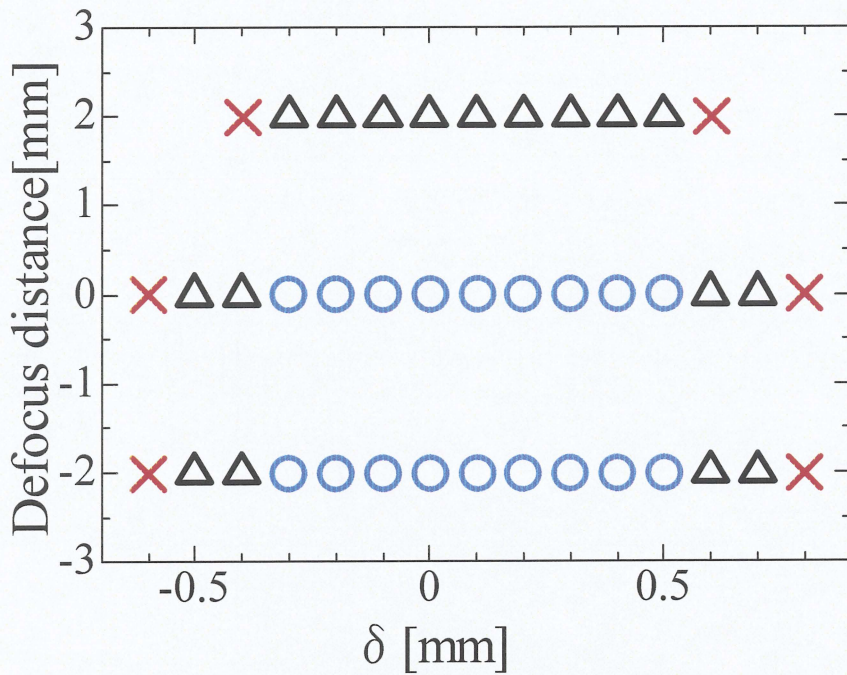
		$\delta$ [mm]		
		+0.3	+0.4	+0.5
Welding speed[mm/s]	60			
	80			/

0.5mm  
—

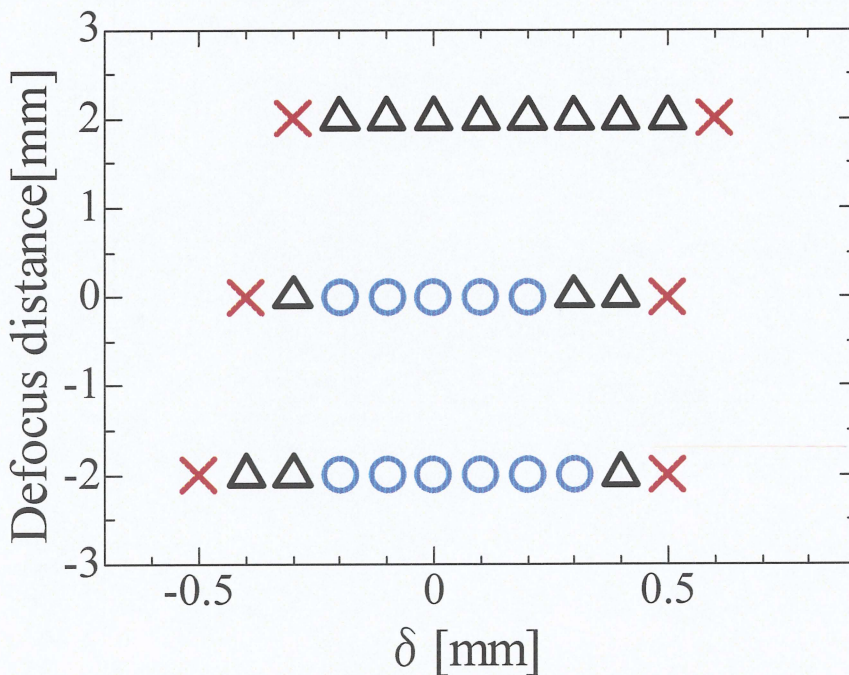
Fig.3-10 Cross-section of laser butt weld of SUS304 for different laser irradiation position  $\delta$  and  $df=-2$ mm.



- Full penetration in all weld length
- △ Welding defect generation
- × No welded



(a) Welding speed 20mm/s

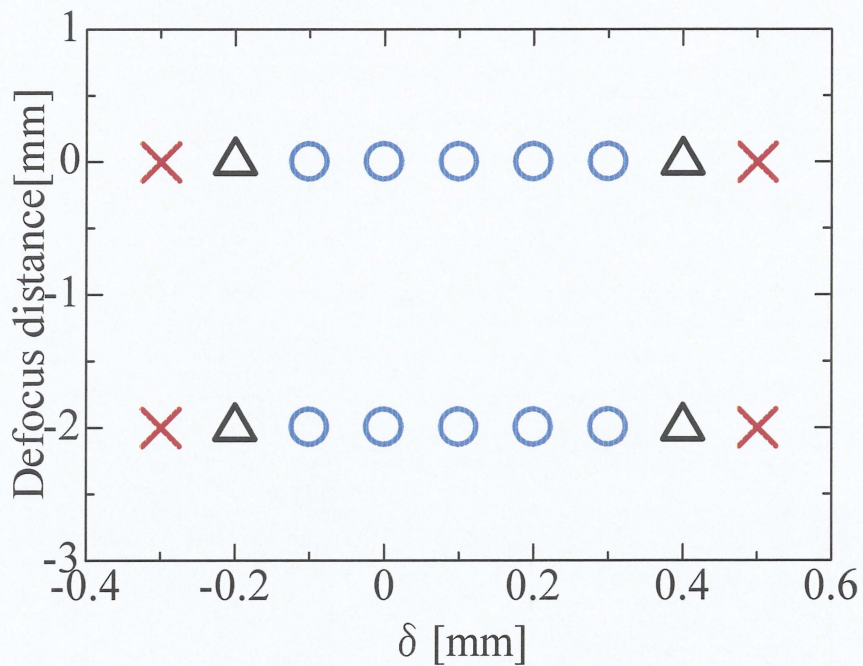


(b) Welding speed 40mm/s

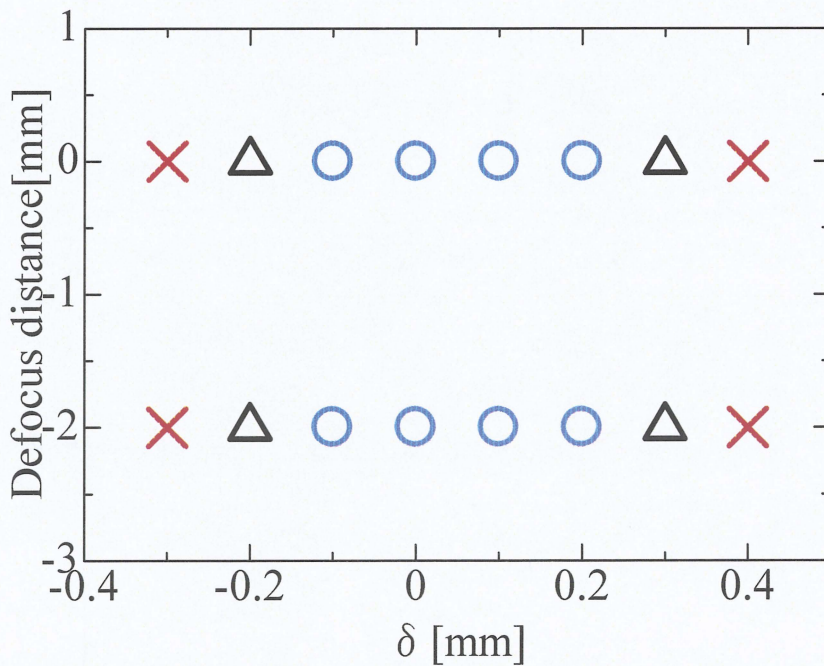
Fig.3-11 Process windows for laser butt welding of SPCC for different welding speed.



- Full penetration in all weld length
- △ Welding defect generation
- × No welded



(a) Welding speed 60mm/s



(b) Welding speed 80mm/s

Fig.3-12 Process windows for laser butt welding of SUS304 for different welding speed.



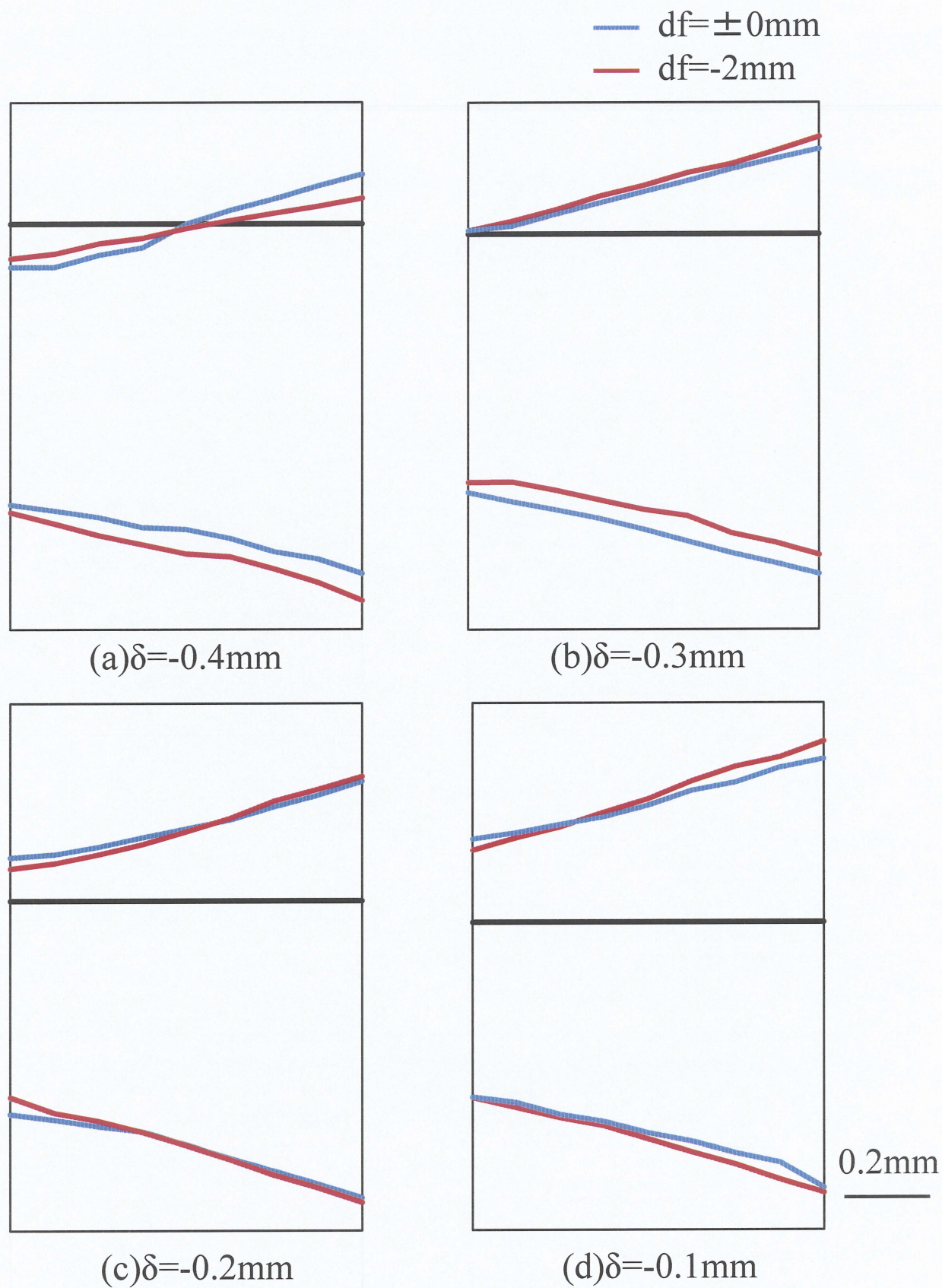
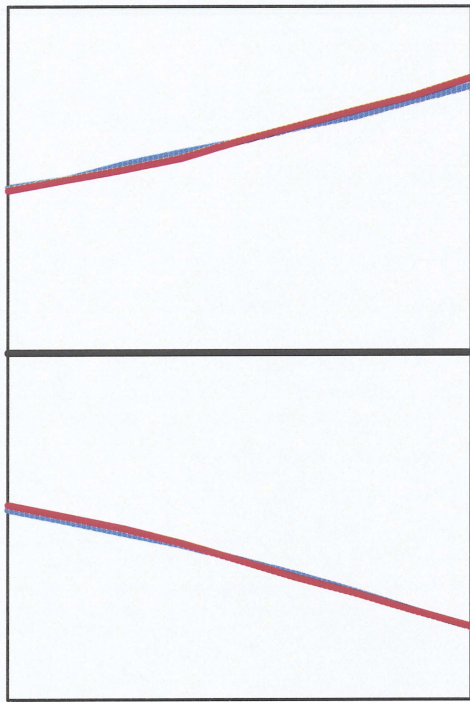


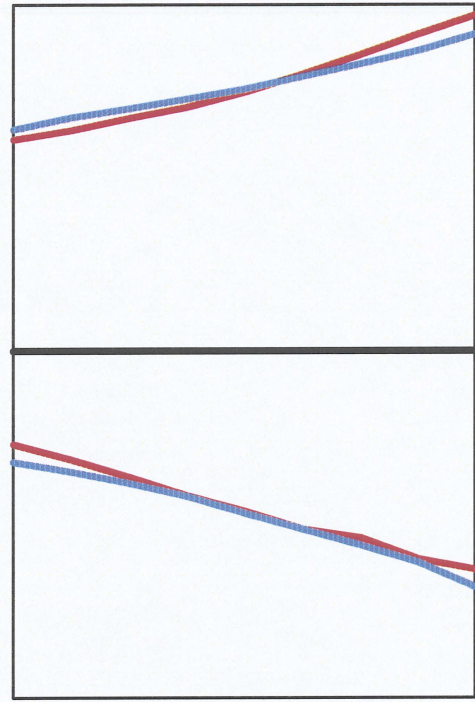
Fig.3-13 Cross-sectional shape of bead of SPCC for defocusing distance at welding speed 20mm/s.



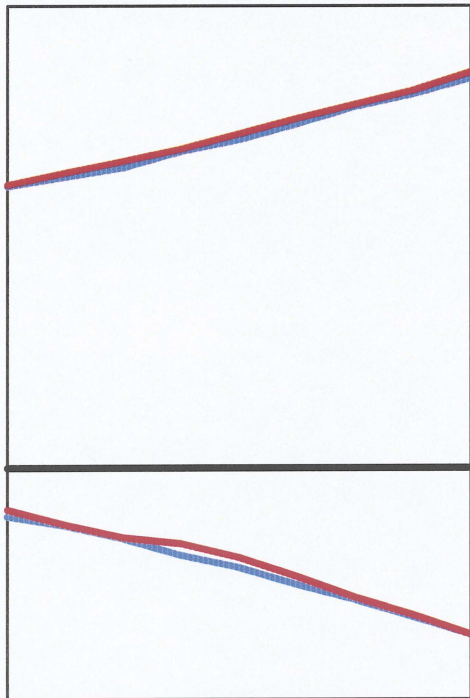
—  $df = \pm 0\text{mm}$   
—  $df = -2\text{mm}$



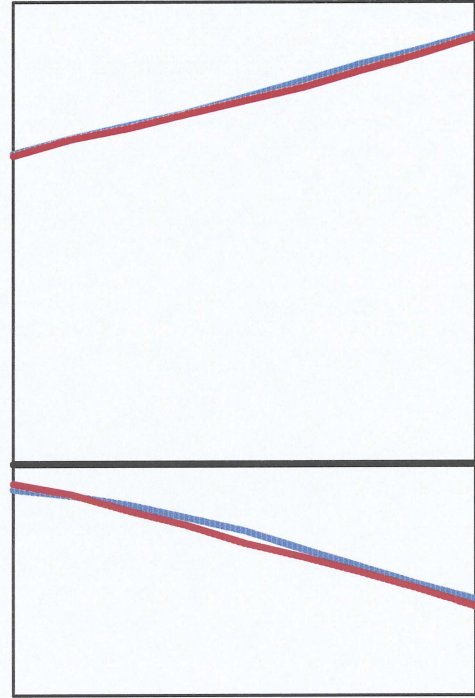
(e)  $\delta = \pm 0\text{mm}$



(f)  $\delta = +0.1\text{mm}$



(g)  $\delta = +0.2\text{mm}$



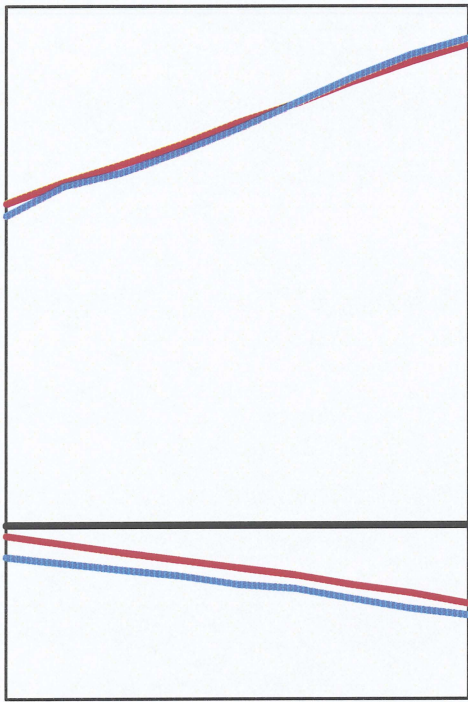
(h)  $\delta = +0.3\text{mm}$

0.2mm

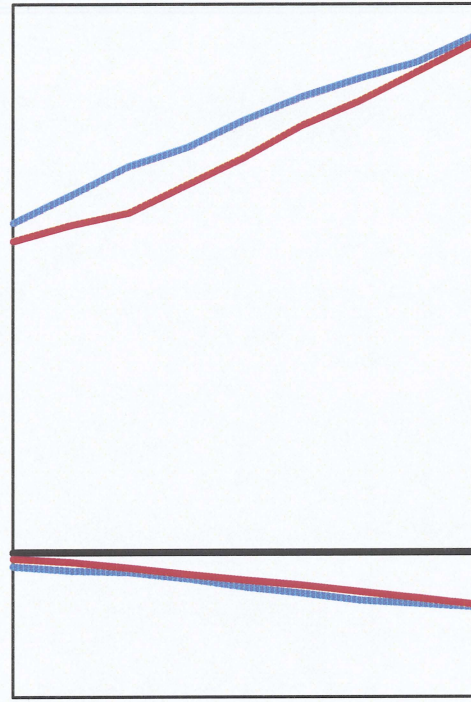
Fig.3-13 Continued.



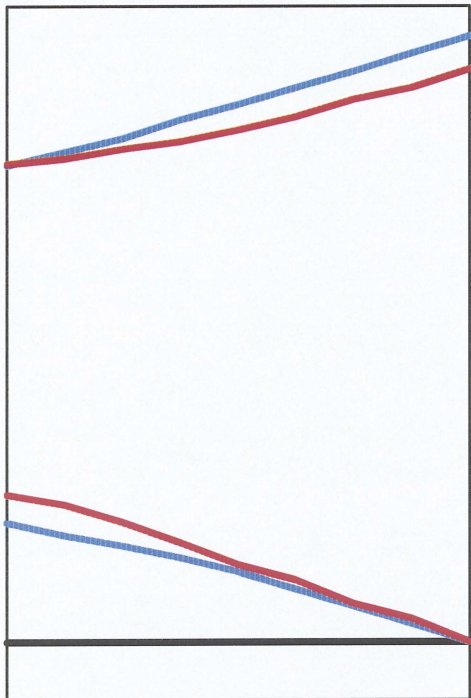
—  $df = \pm 0\text{mm}$   
—  $df = -2\text{mm}$



(i)  $\delta = +0.4\text{mm}$



(j)  $\delta = +0.5\text{mm}$



(k)  $\delta = +0.6\text{mm}$

0.2mm  
—

Fig.3-13 Continued.



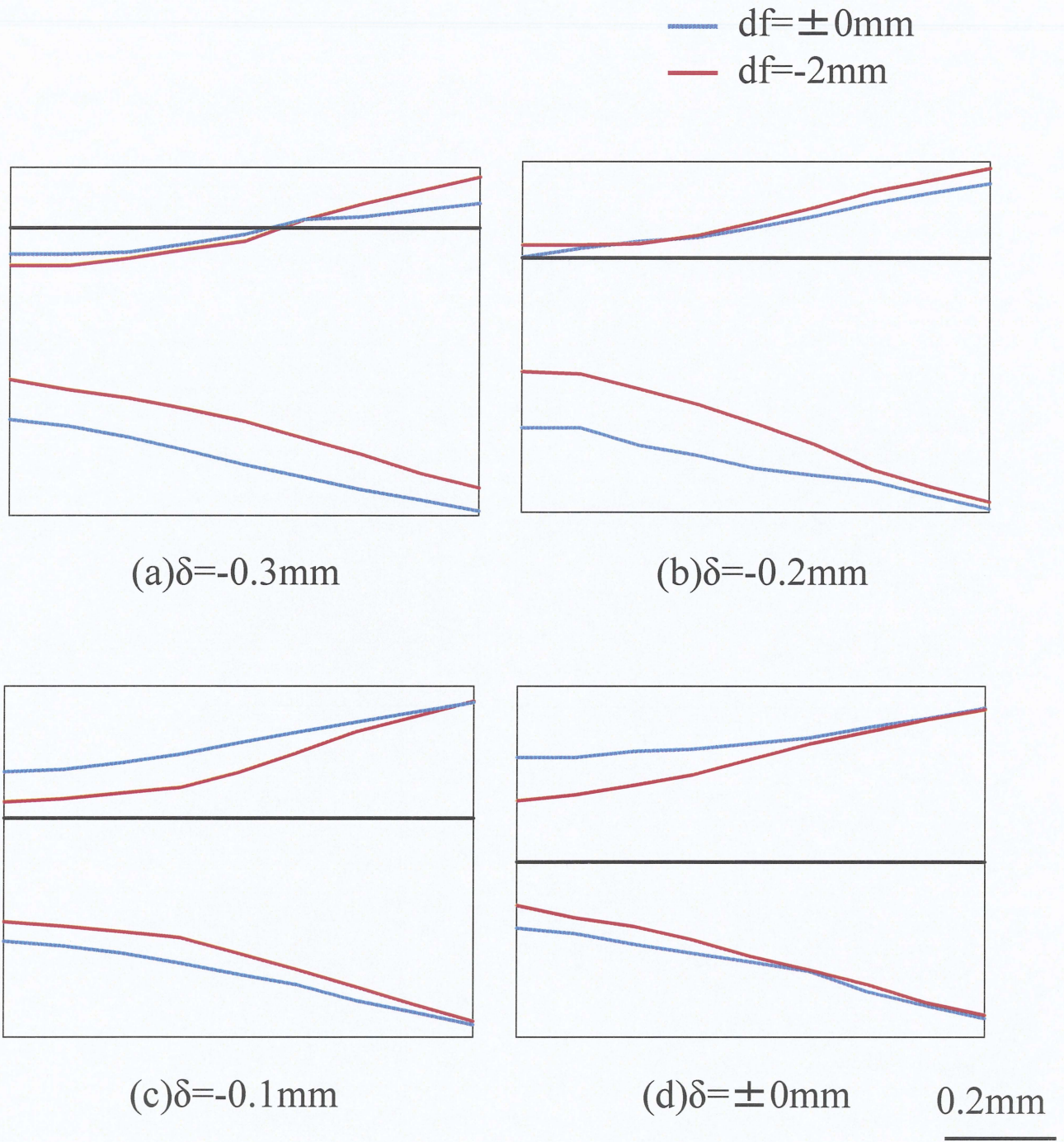
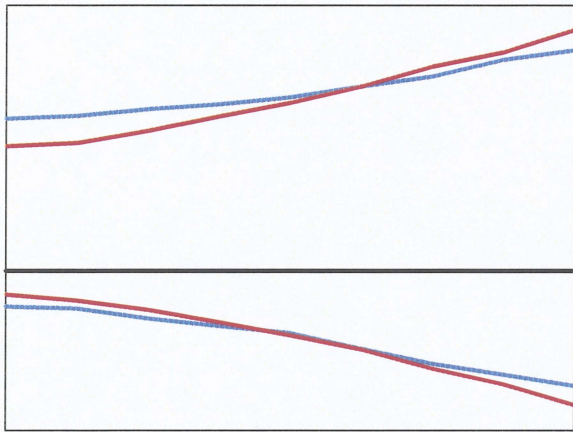
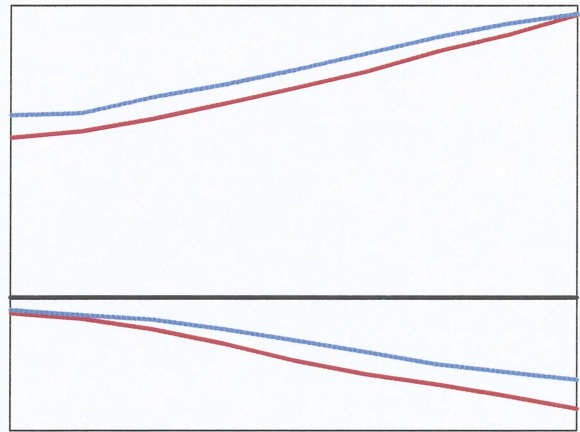


Fig.3-14 Cross-sectional shape of bead of SPCC for defocusing distance at welding speed 40mm/s.

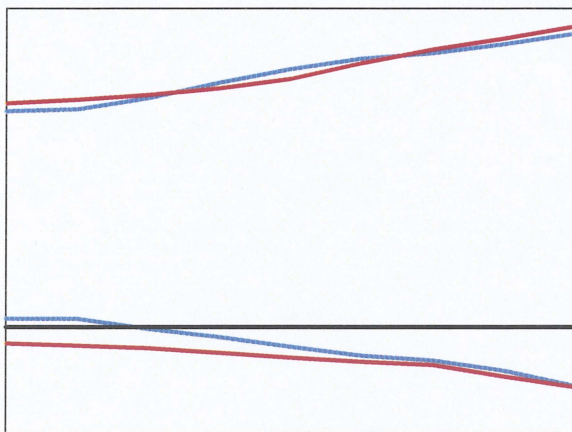
—  $df = \pm 0\text{mm}$   
—  $df = -2\text{mm}$



(e)  $\delta = +0.1\text{mm}$



(f)  $\delta = +0.2\text{mm}$



(g)  $\delta = +0.3\text{mm}$

0.2mm  
—

Fig.3-14 Continued.



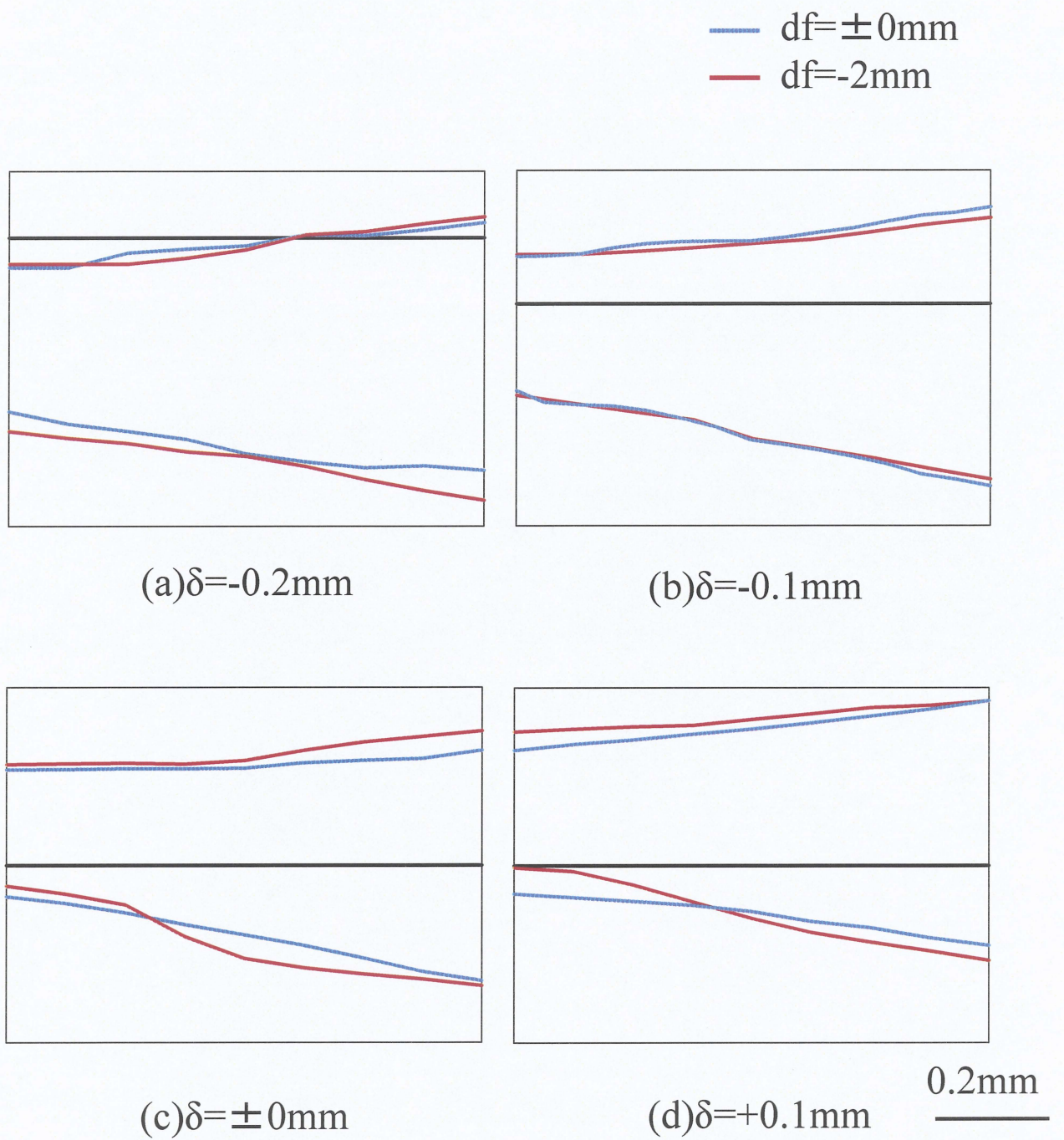
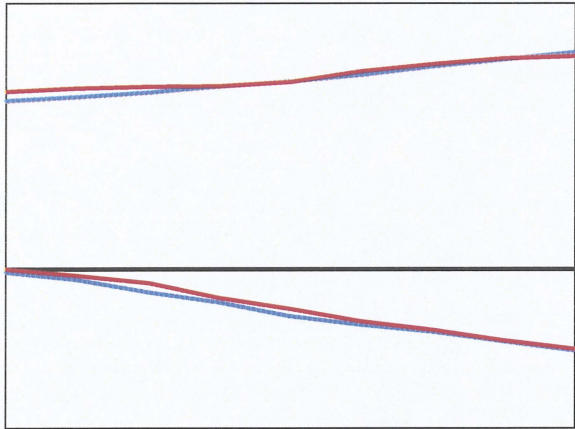


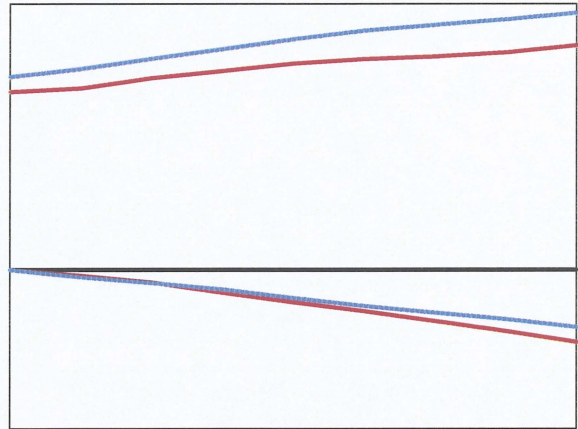
Fig.3-15 Cross-sectional shape of bead of SUS304 for defocusing distance at welding speed 60mm/s.



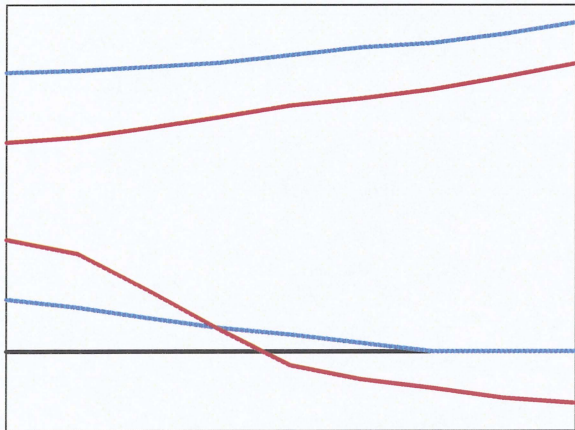
—  $df = \pm 0\text{mm}$   
—  $df = -2\text{mm}$



(e)  $\delta = +0.2\text{mm}$



(f)  $\delta = +0.3\text{mm}$



(g)  $\delta = +0.4\text{mm}$

0.2mm

Fig.3-15 Continued.



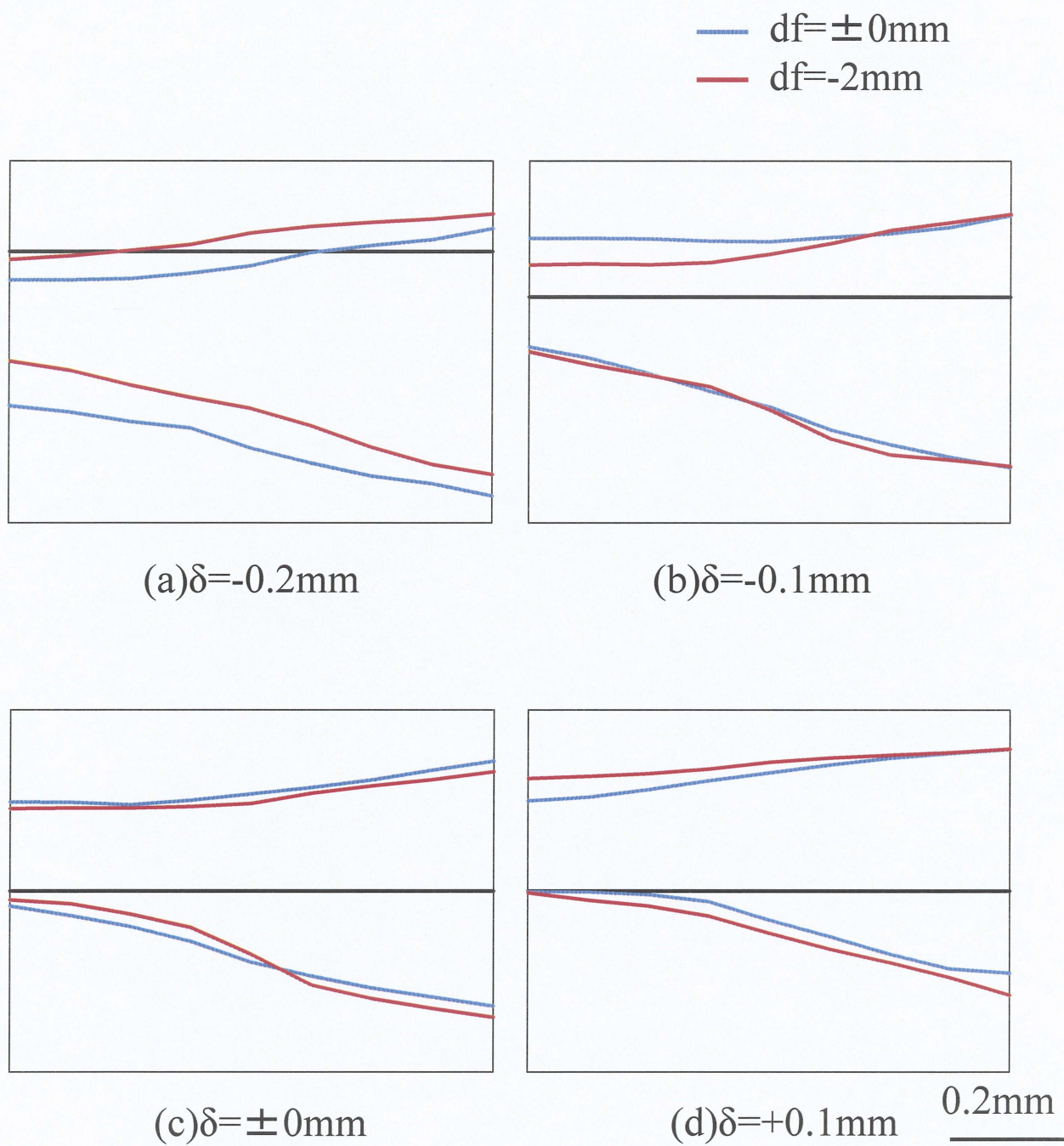


Fig.3-16 Cross-sectional shape of bead of SUS304 for defocusing distance at welding speed 60mm/s.

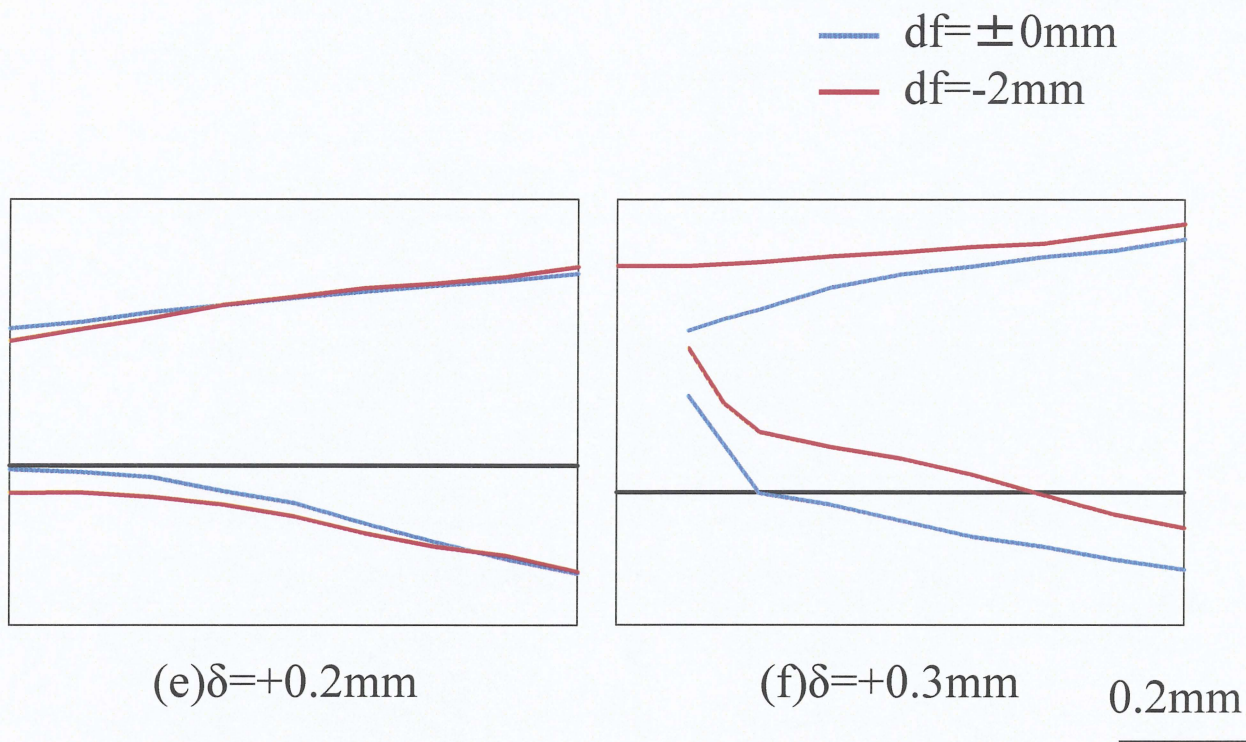


Fig.3-16 Continued.



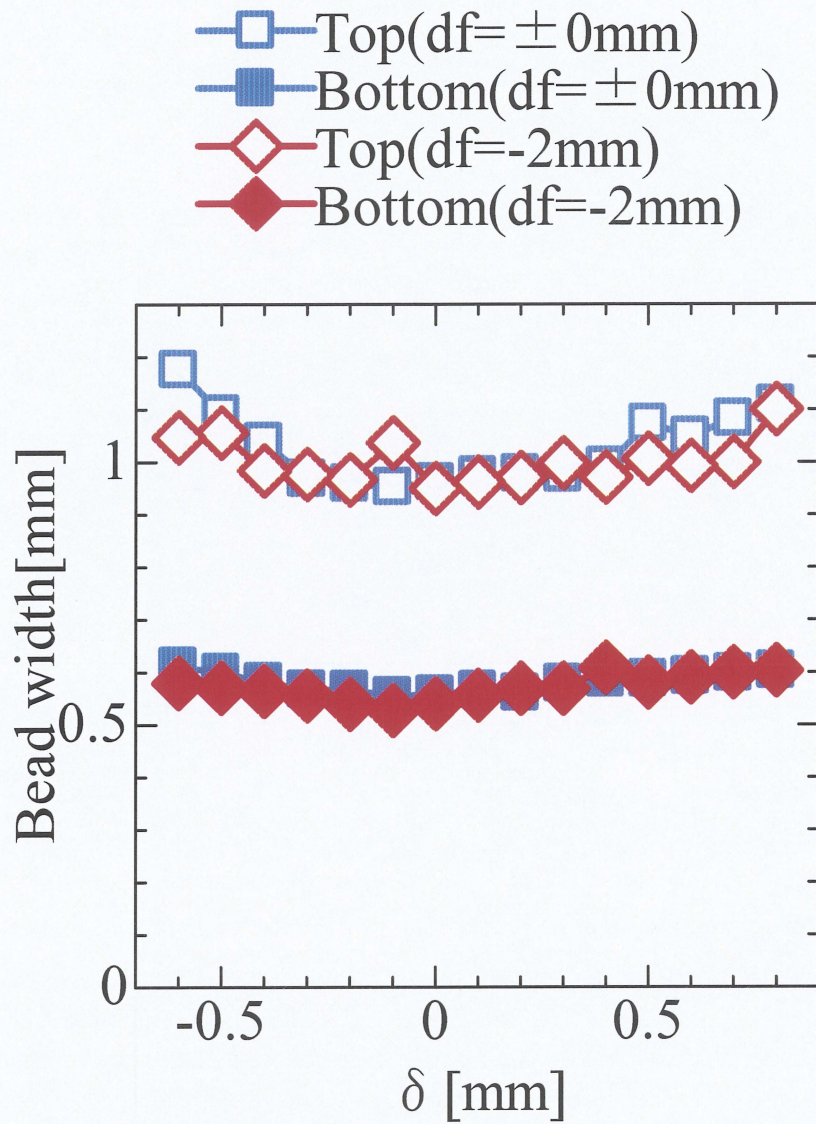
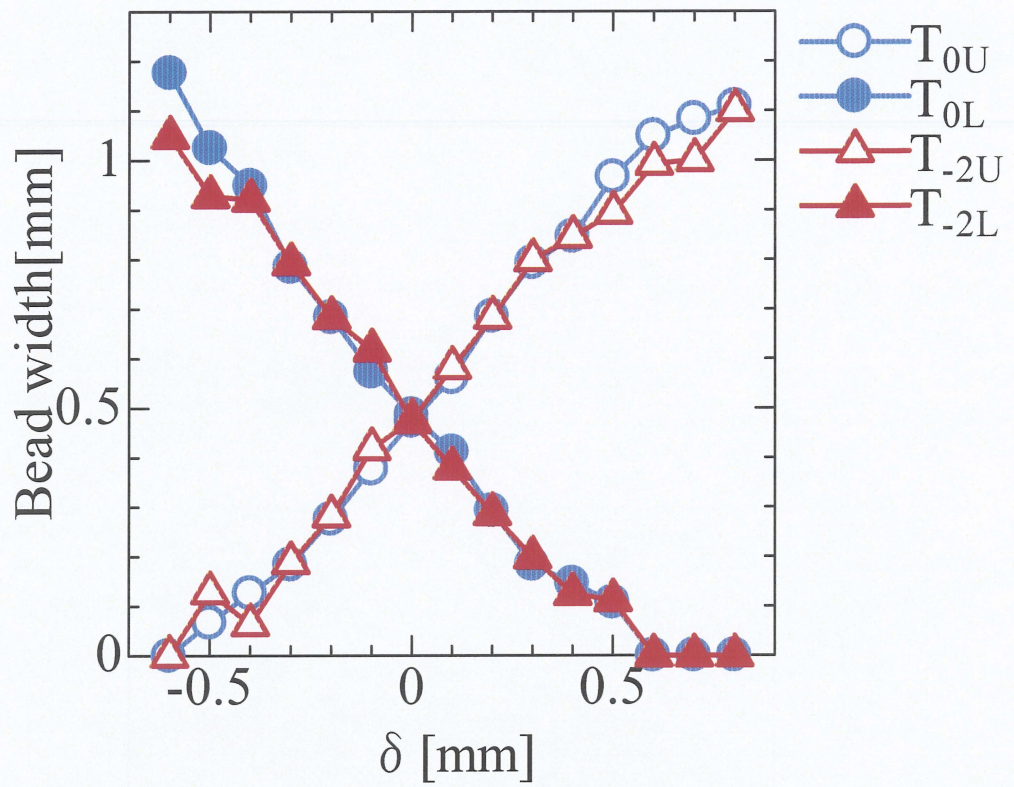
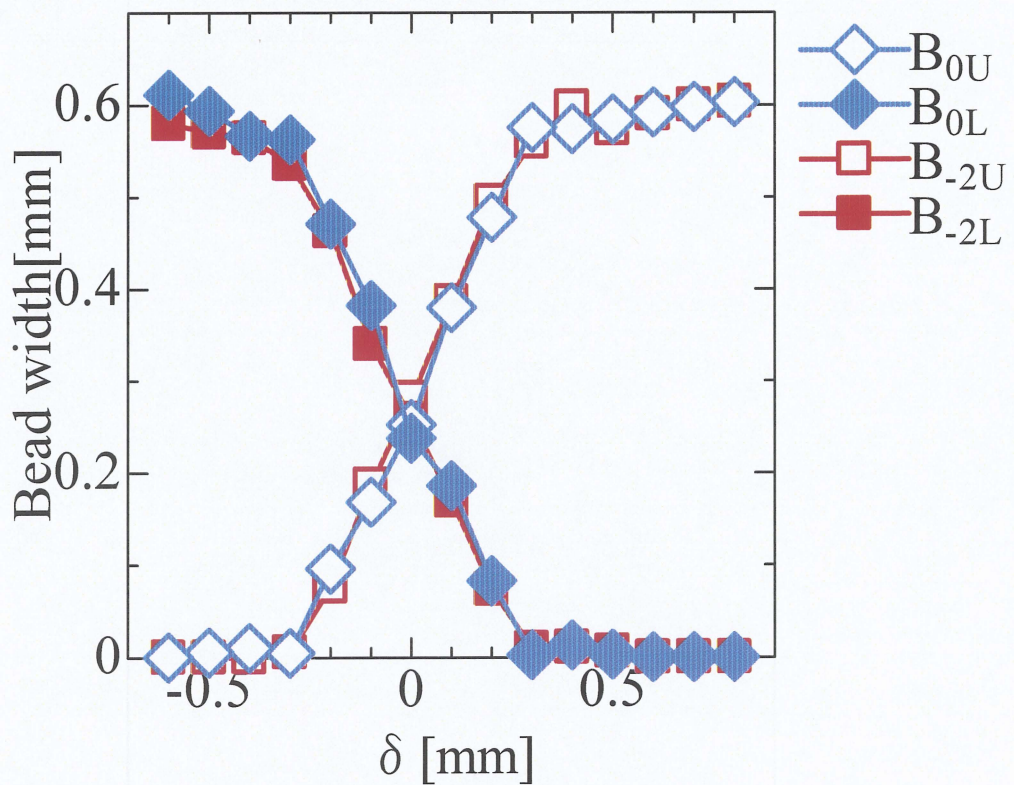


Fig.3-17 Relationship between  $\delta$  and bead width of SPCC for different defocusing distance at welding speed 20mm/s.





(a) Upper plate



(b) Lower plate

Fig.3-18 Relationship between  $\delta$  and bead width in upper and lower plate of SPCC for different defocusing distance at welding speed 20mm/s.



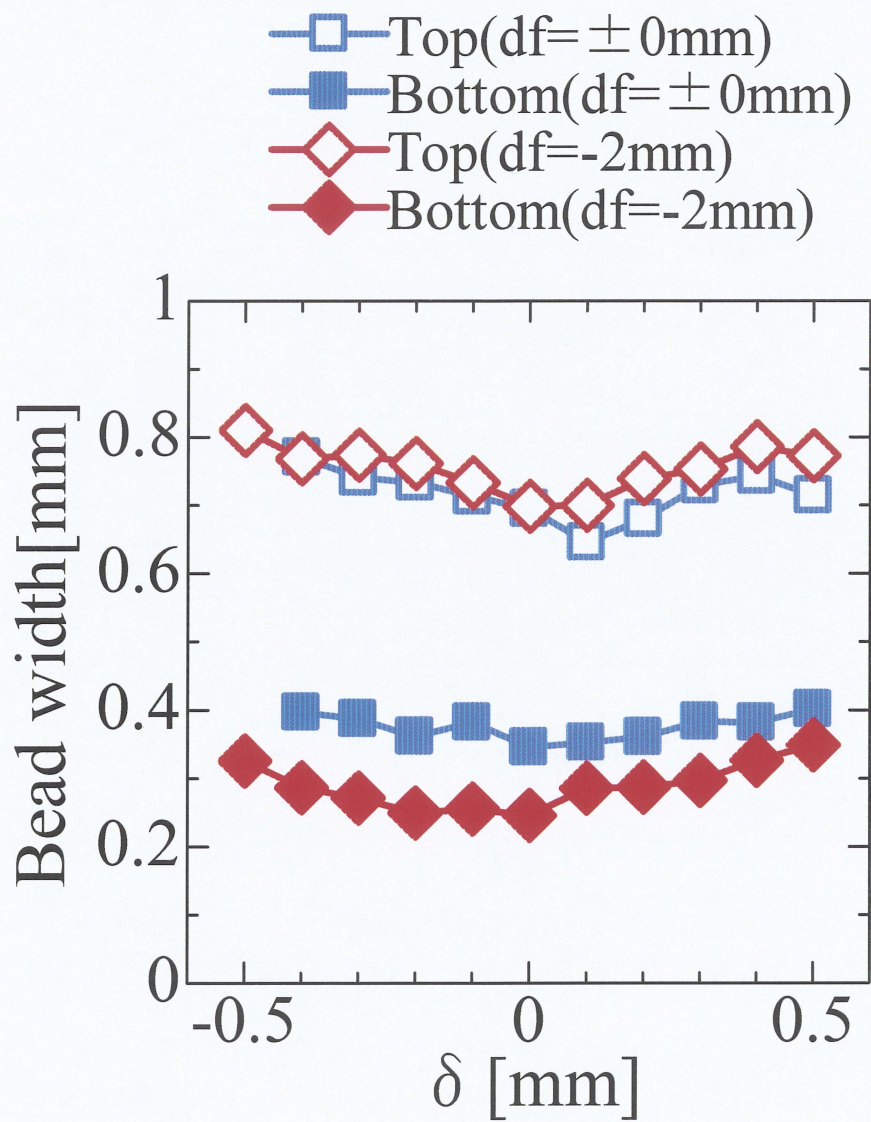
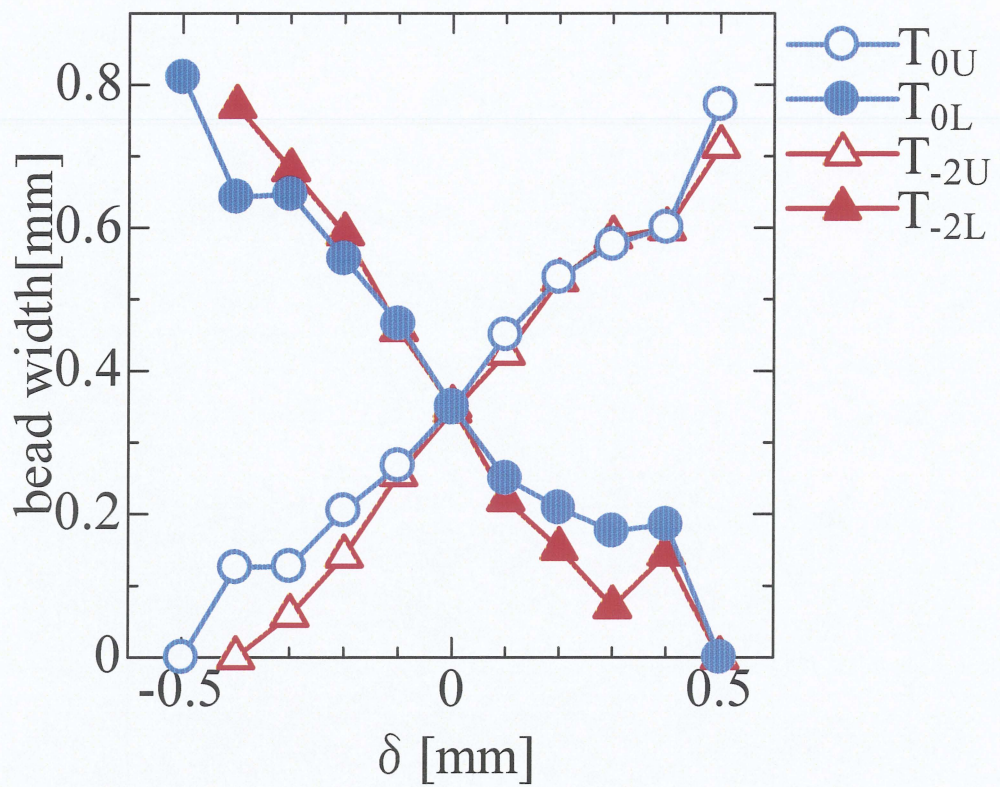
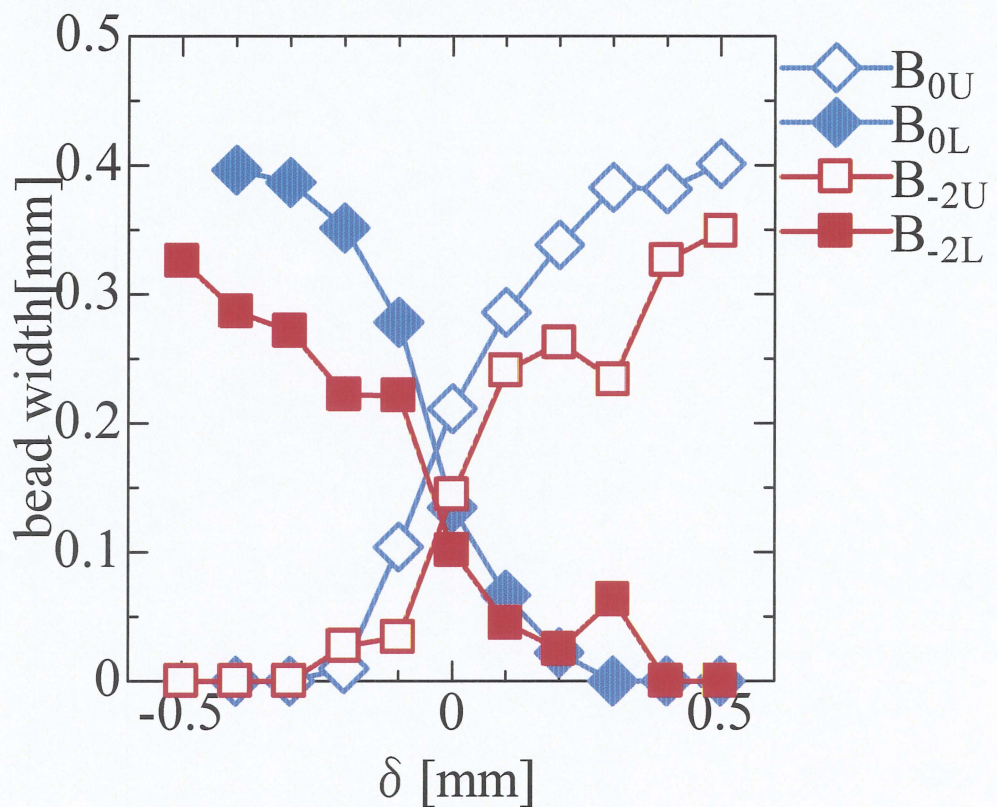


Fig.3-19 Relationship between  $\delta$  and bead width of SPCC for different defocusing distance at welding speed 40mm/s.





(a) Upper plate



(b) Lower plate

Fig.3-20 Relationship between  $\delta$  and bead width in upper and lower plate of SPCC for different defocusing distance at welding speed 40mm/s.



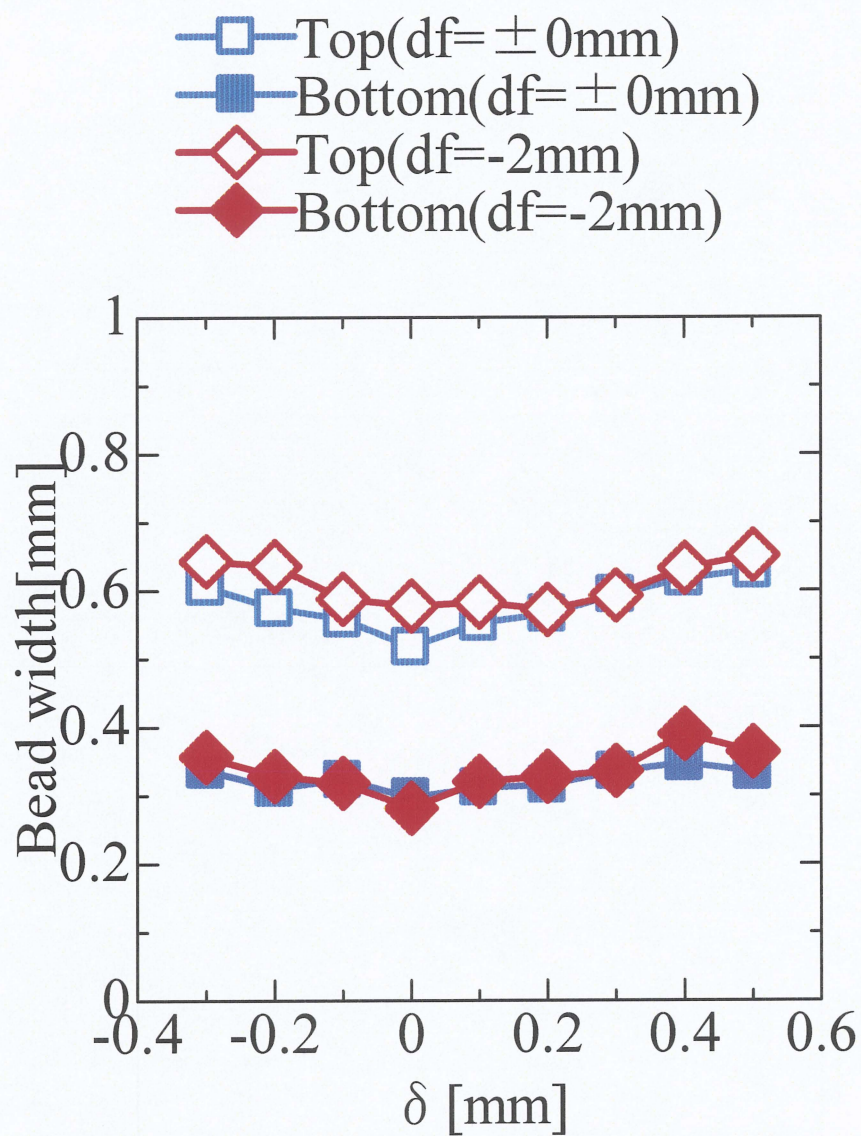


Fig.3-21 Relationship between  $\delta$  and bead width of SUS304 for different defocusing distance at welding speed 60mm/s.



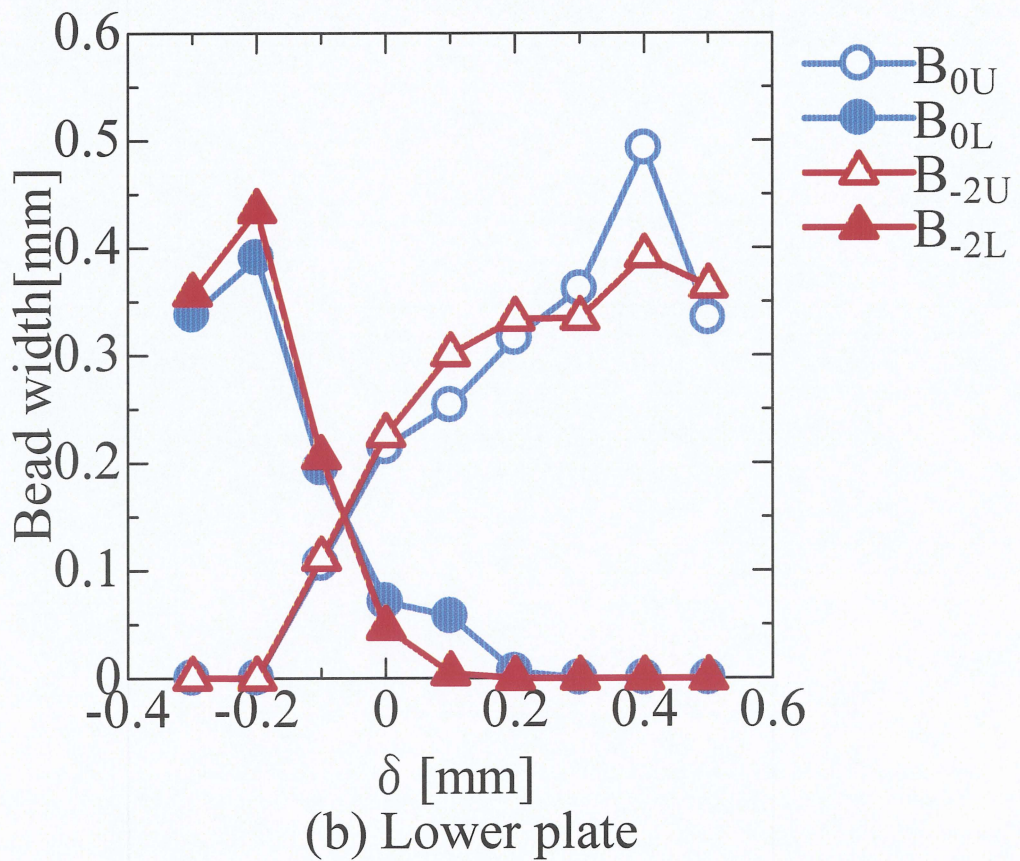
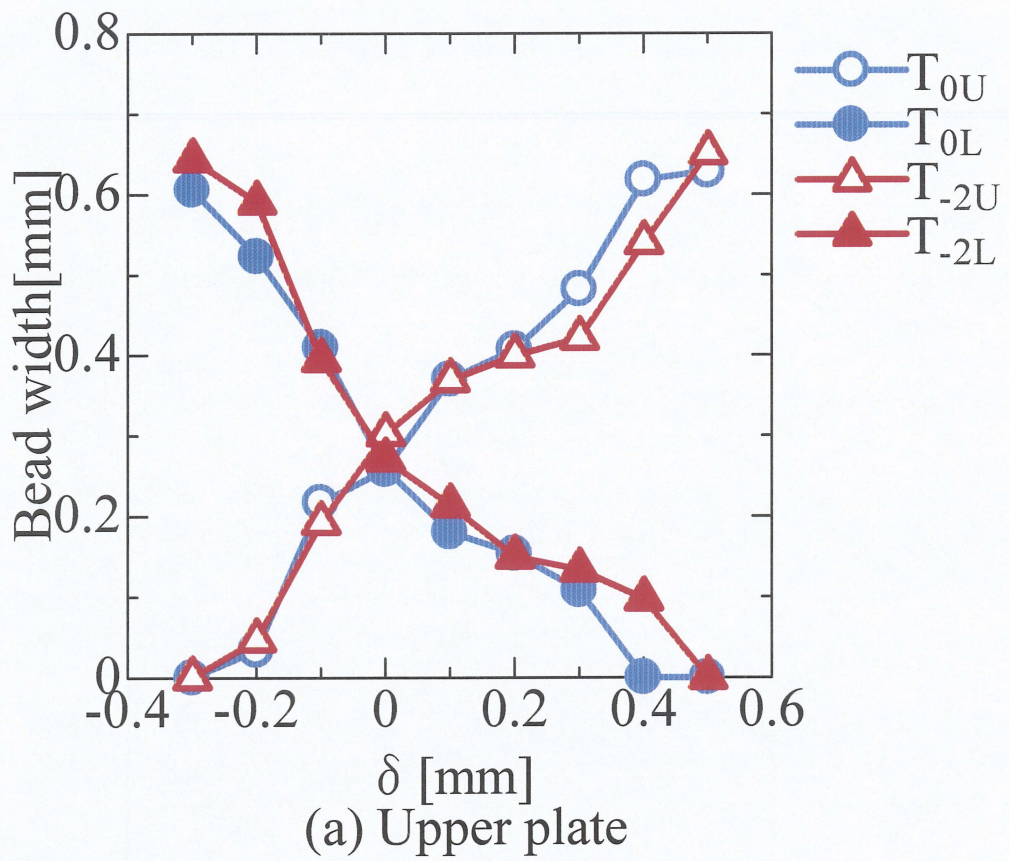


Fig.3-22 Relationship between  $\delta$  and bead width in upper and lower plate of SUS304 for different defocusing distance at welding speed 60mm/s.



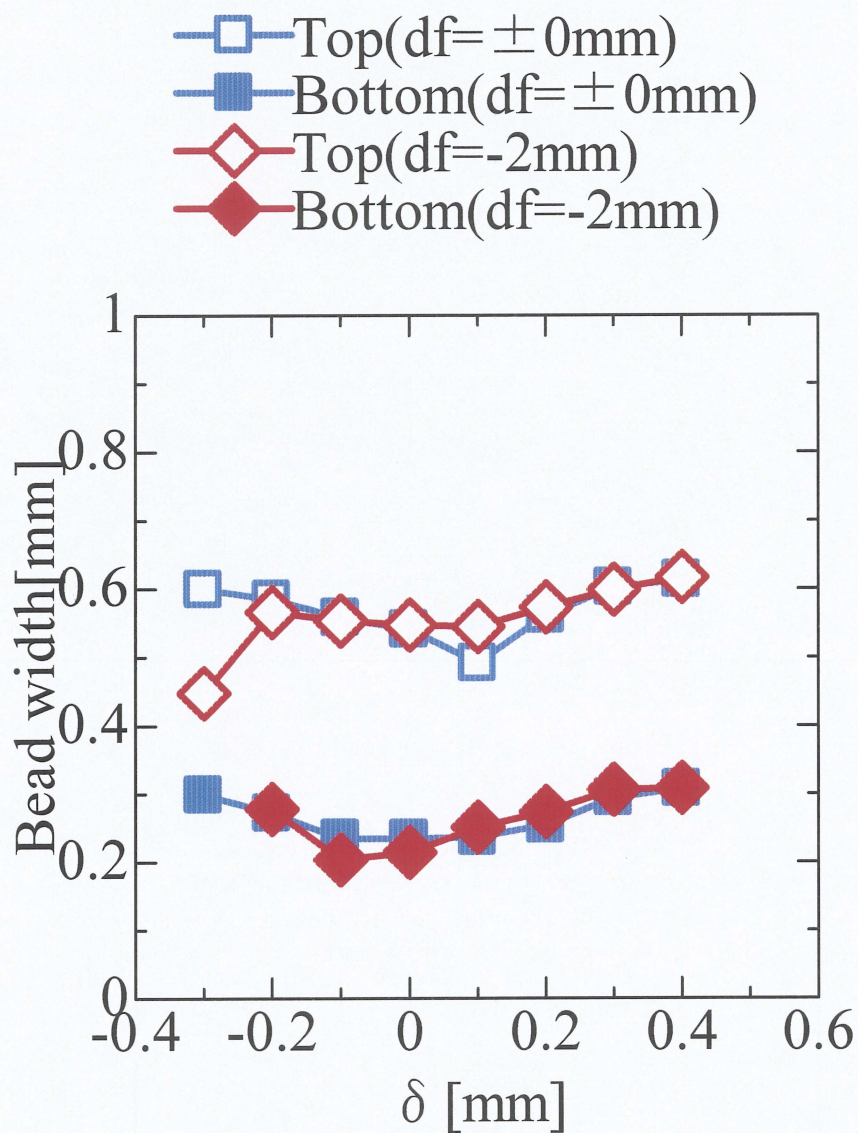


Fig.3-23 Relationship between  $\delta$  and bead width of SUS304 for different defocusing distance at welding speed 80mm/s.



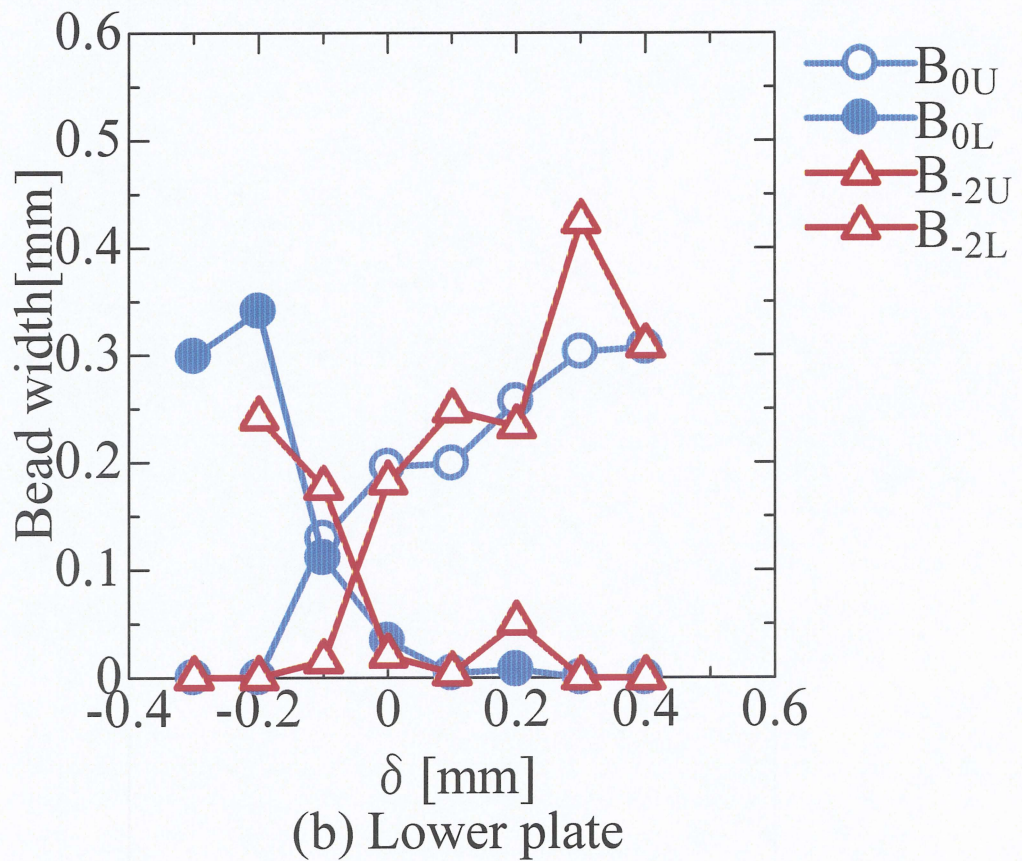
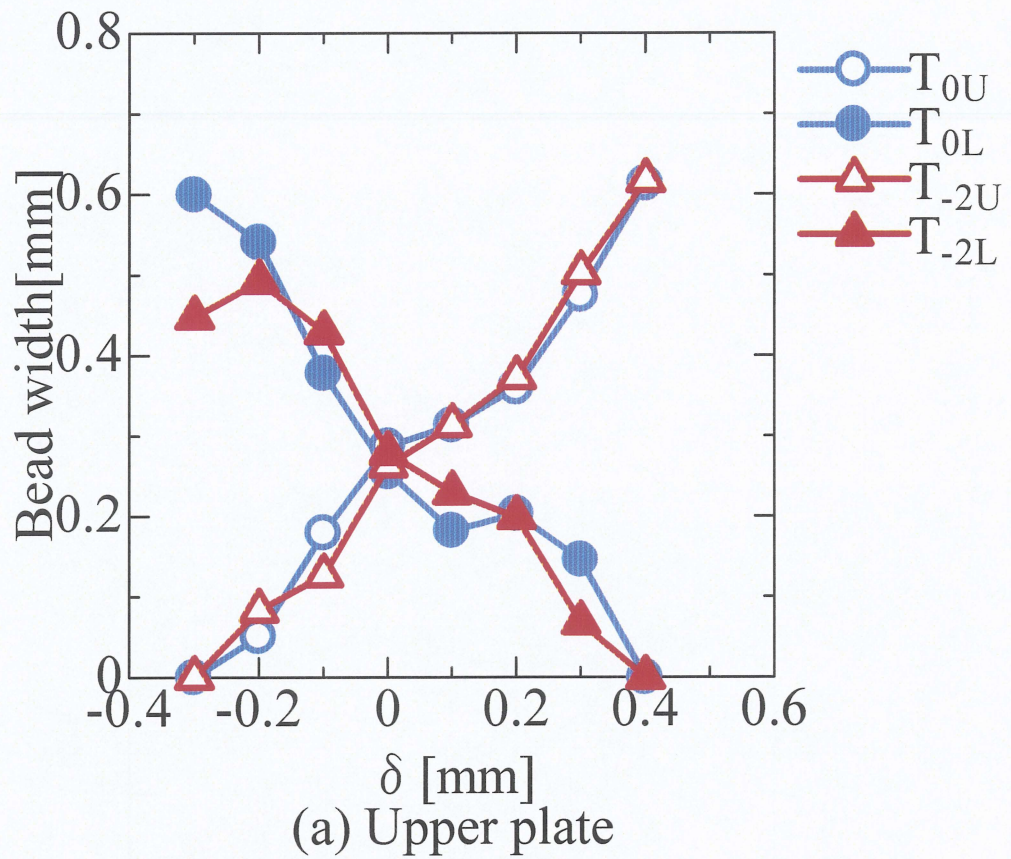


Fig.3-24 Relationship between  $\delta$  and bead width in upper and lower plate of SUS304 for different defocusing distance at welding speed 80mm/s.



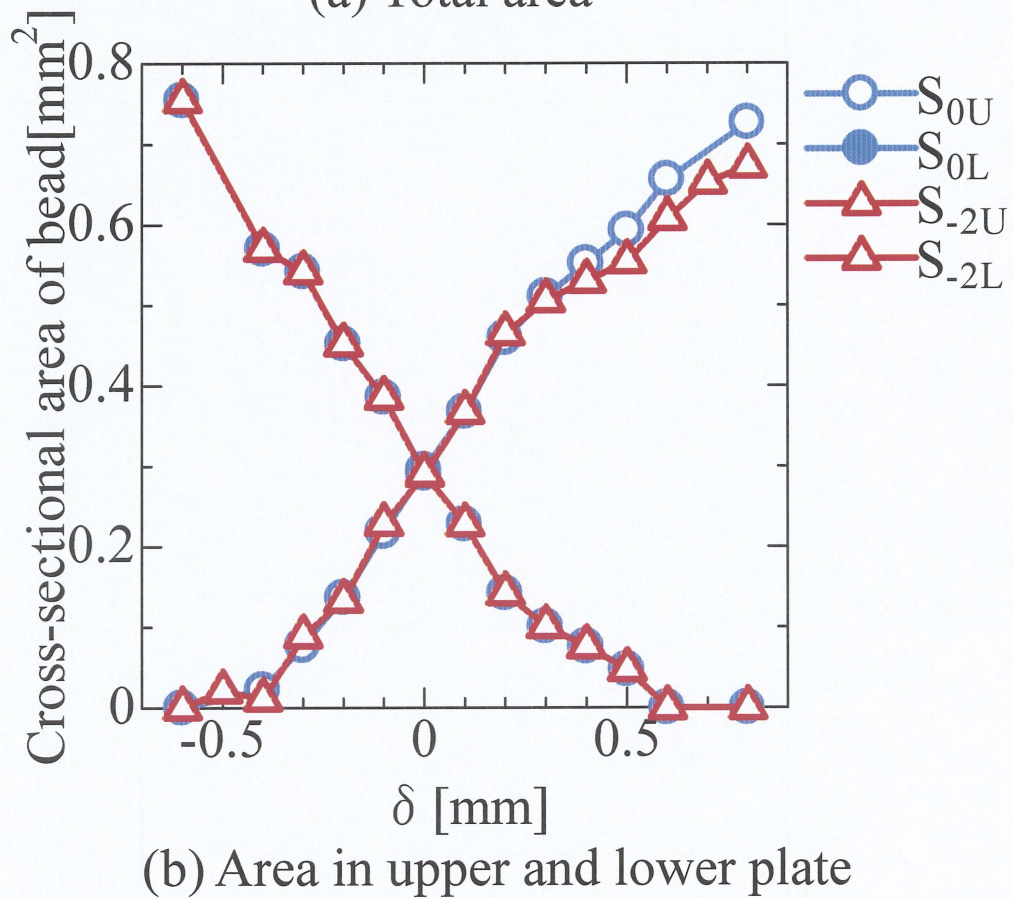
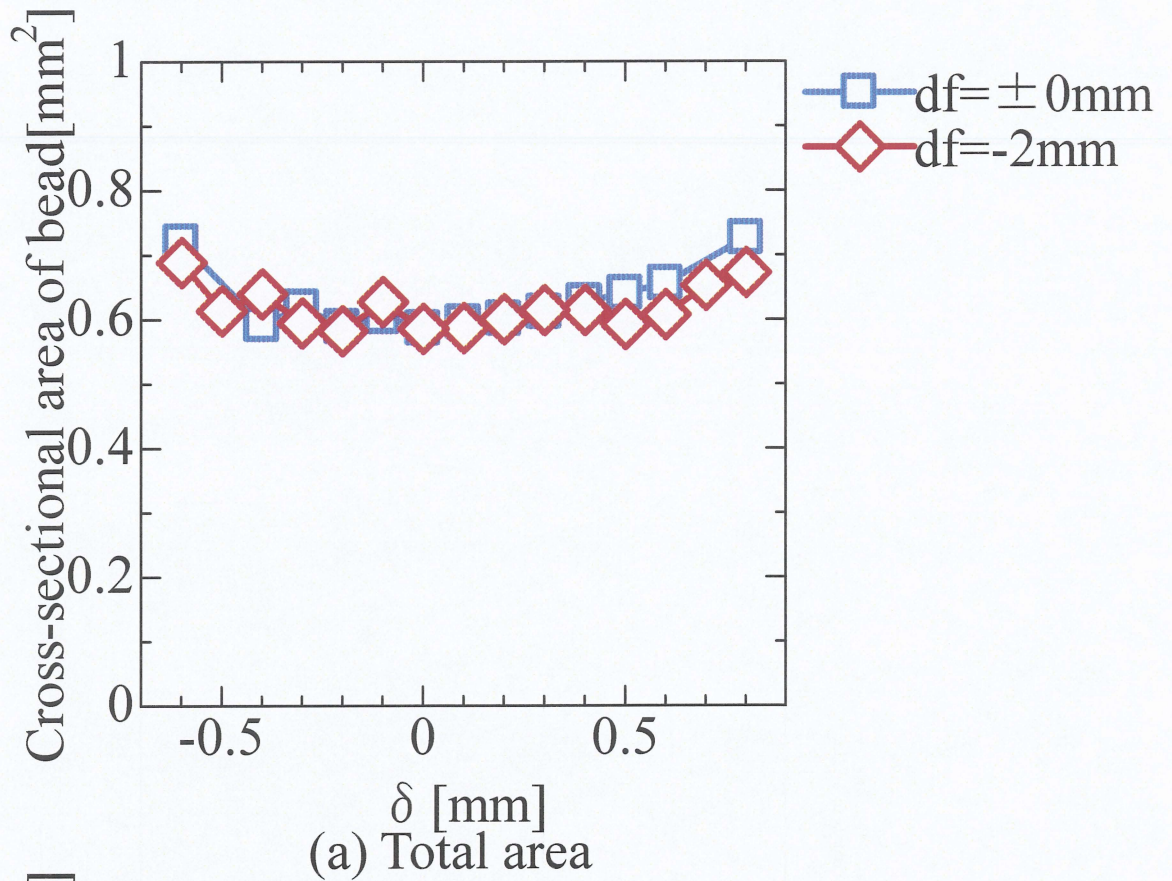
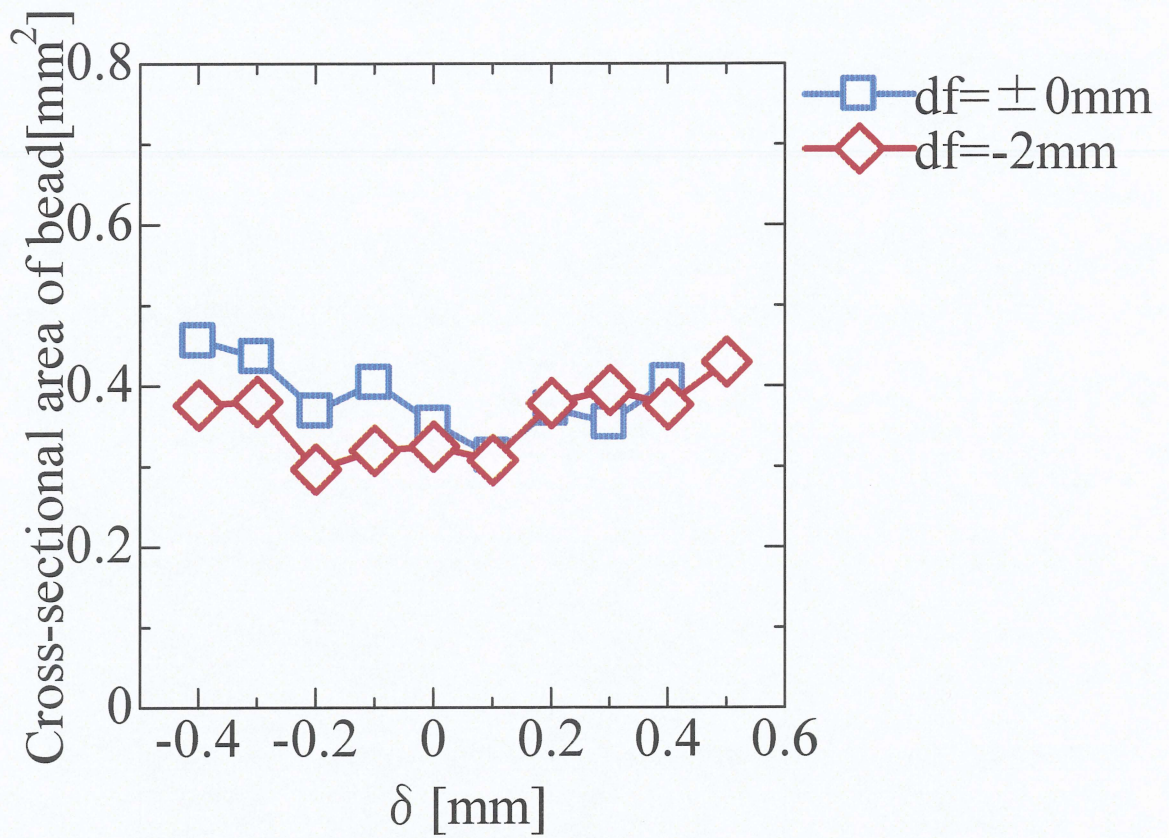
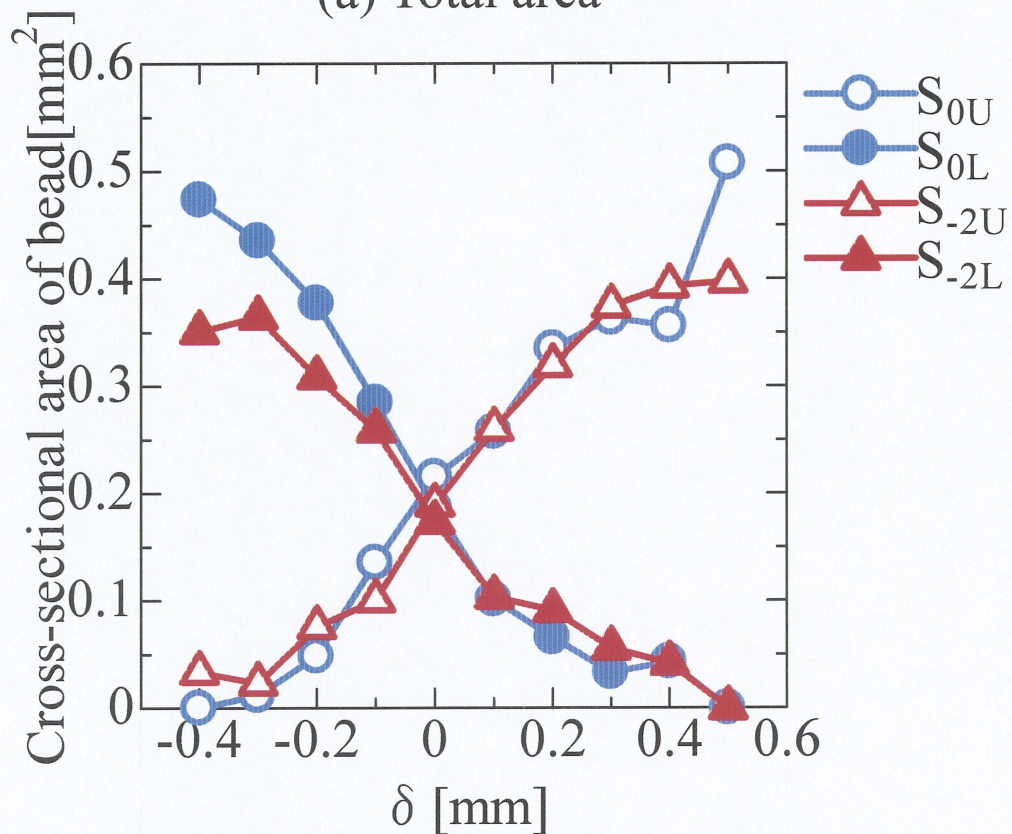


Fig.3-25 Relationship between  $\delta$  and cross-sectional area of bead of SPCC for different defocusing distance at welding speed 20mm/s.





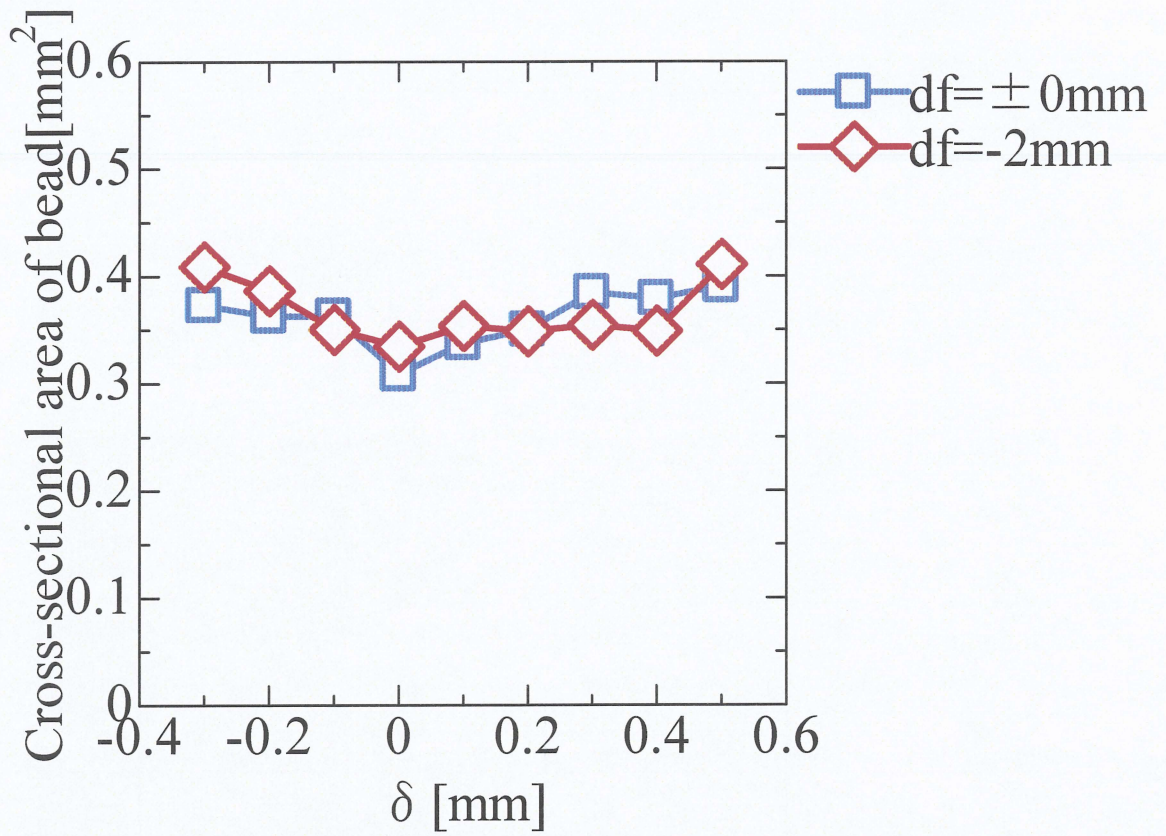
(a) Total area



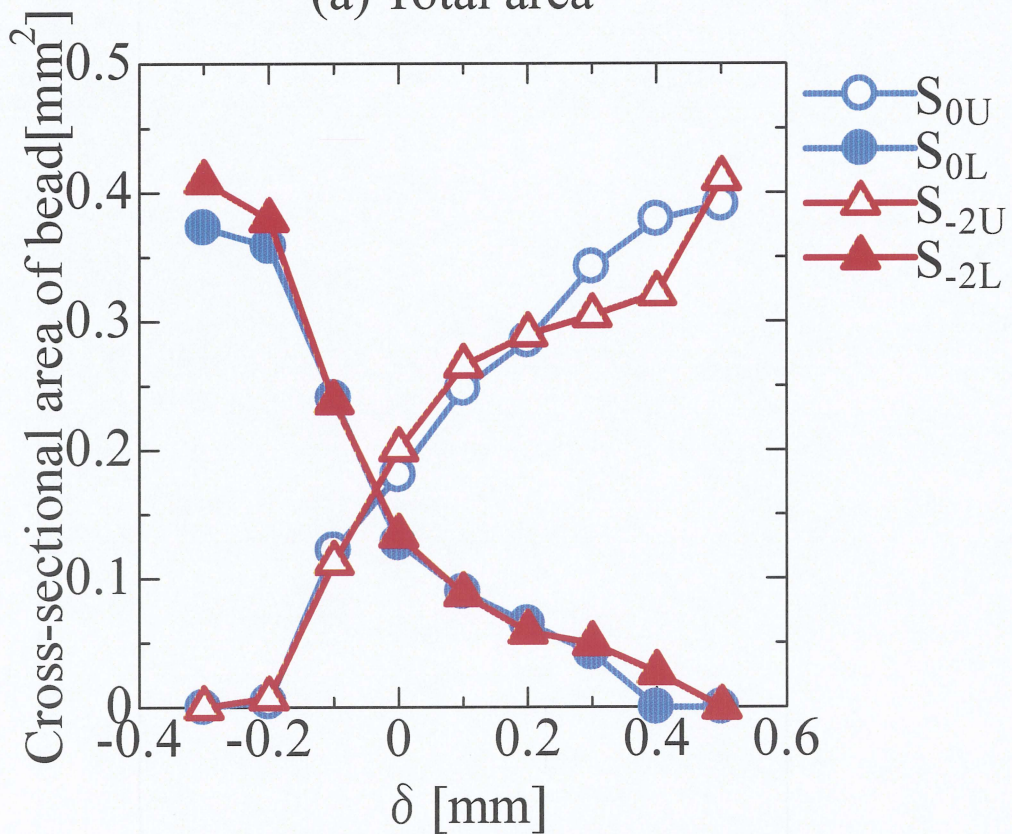
(b) Area in upper and lower plate

Fig.3-26 Relationship between  $\delta$  and cross-sectional area of bead of SPCC for different defocusing distance at welding speed 40mm/s.





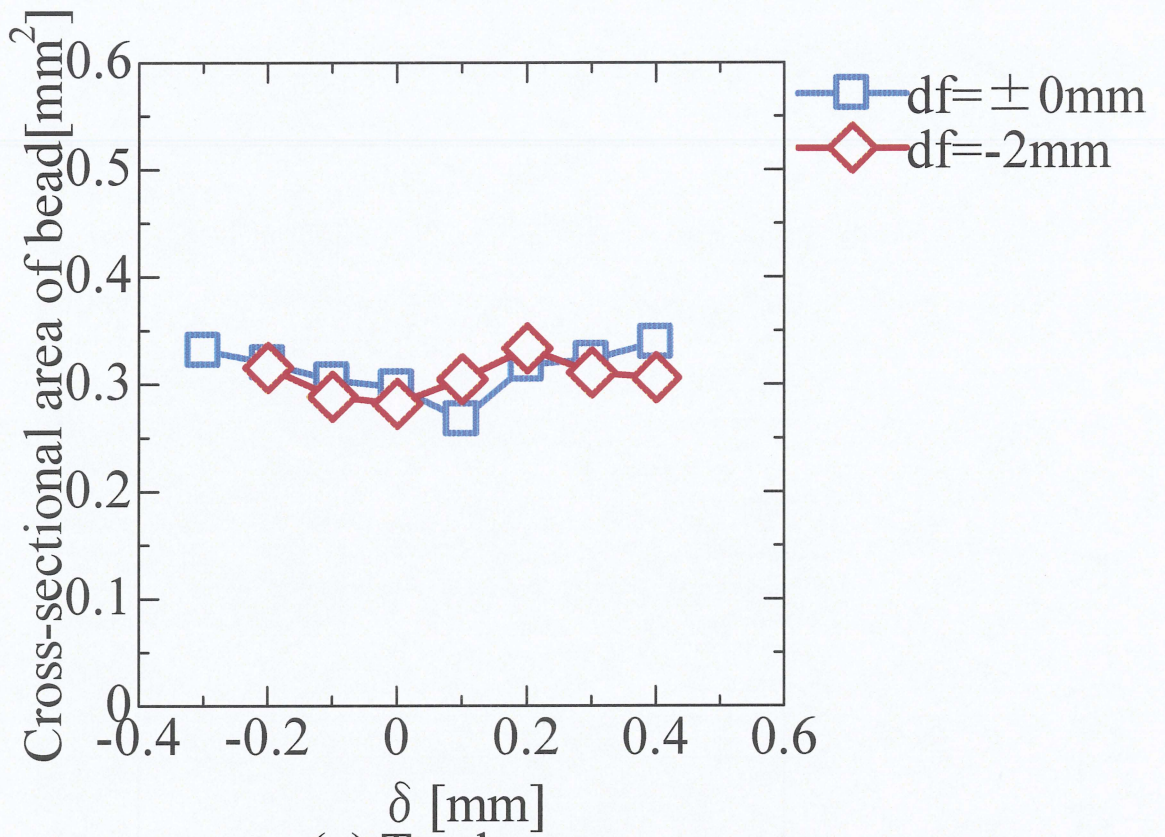
(a) Total area



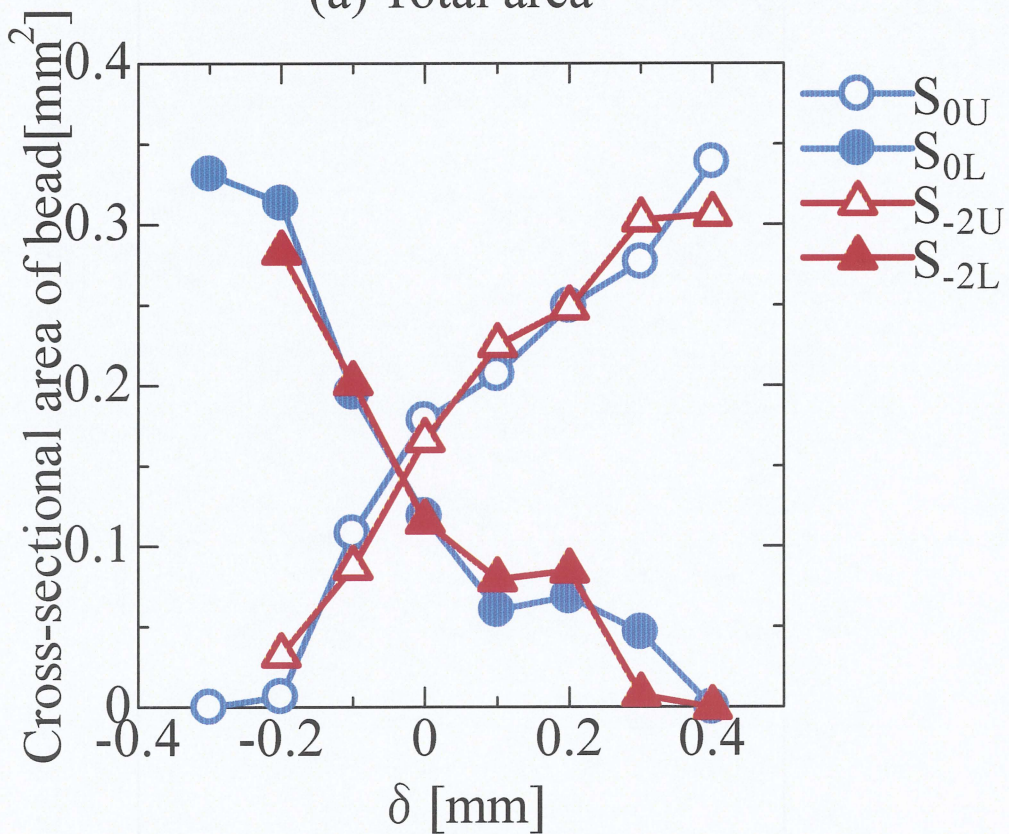
(b) Area in upper and lower plate

Fig.3-27 Relationship between  $\delta$  and cross-sectional area of bead of SUS304 for different defocusing distance at welding speed 60mm/s.





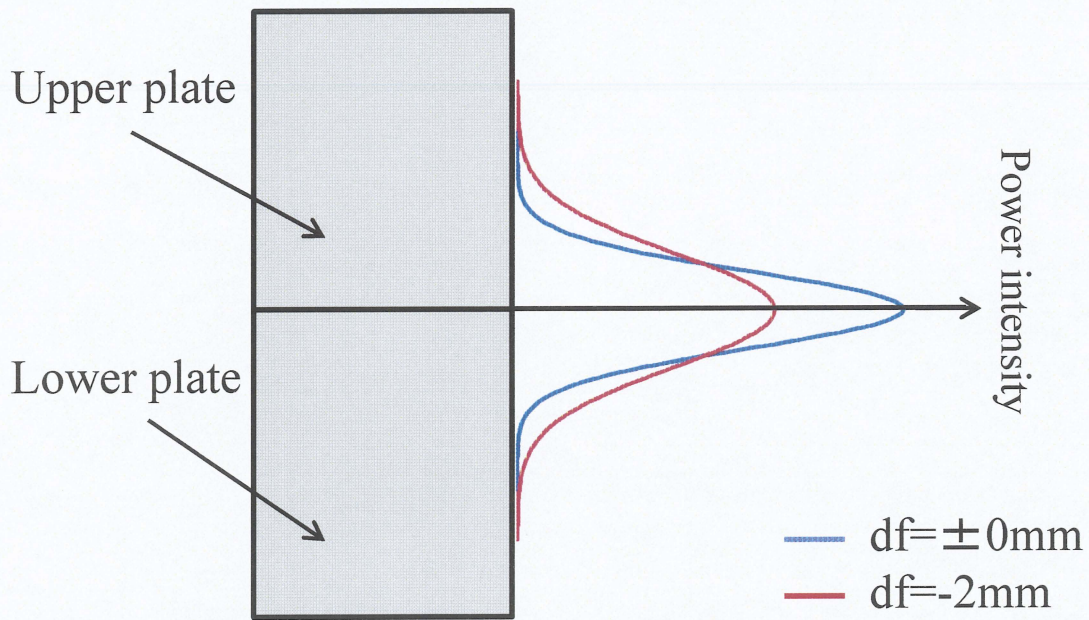
(a) Total area



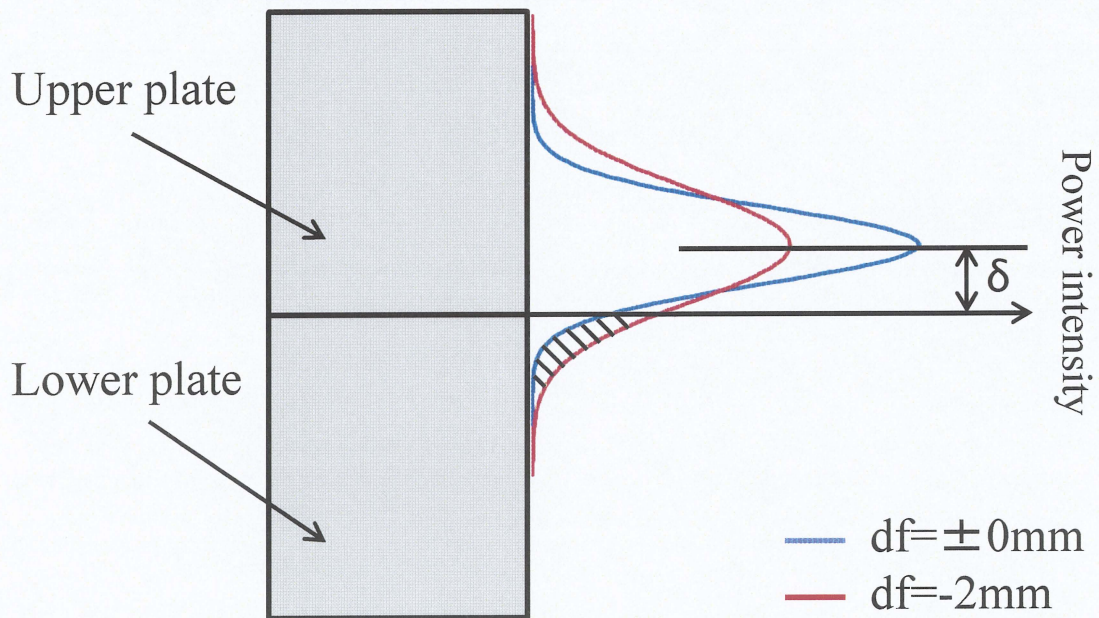
(b) Area in upper and lower plate

Fig.3-28 Relationship between  $\delta$  and cross-sectional area of bead of SUS304 for different defocusing distance at welding speed 80mm/s.





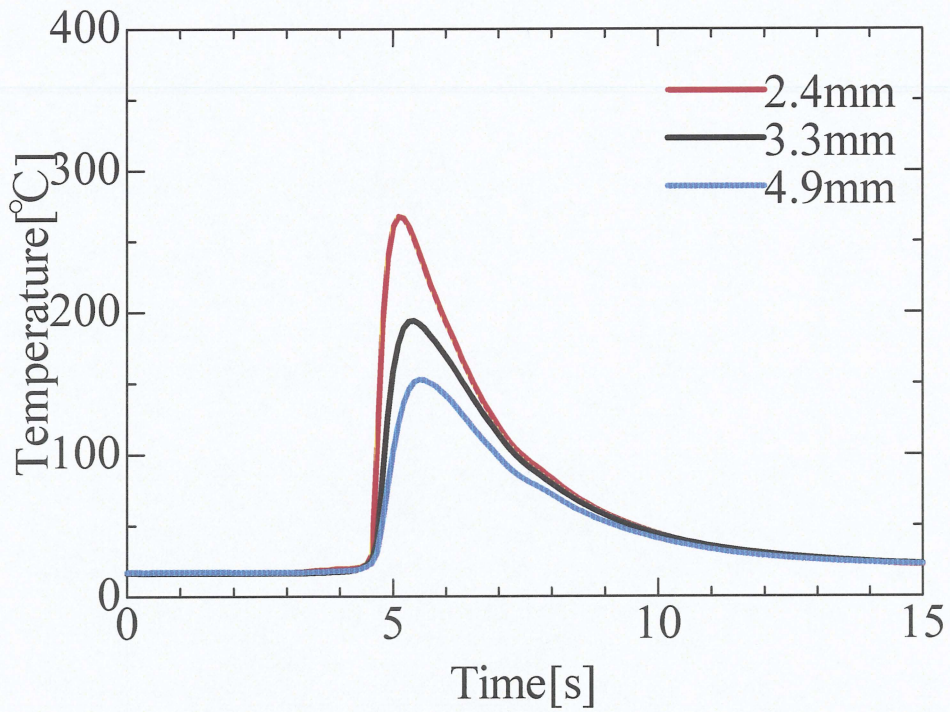
(a)  $\delta = \pm 0\text{mm}$



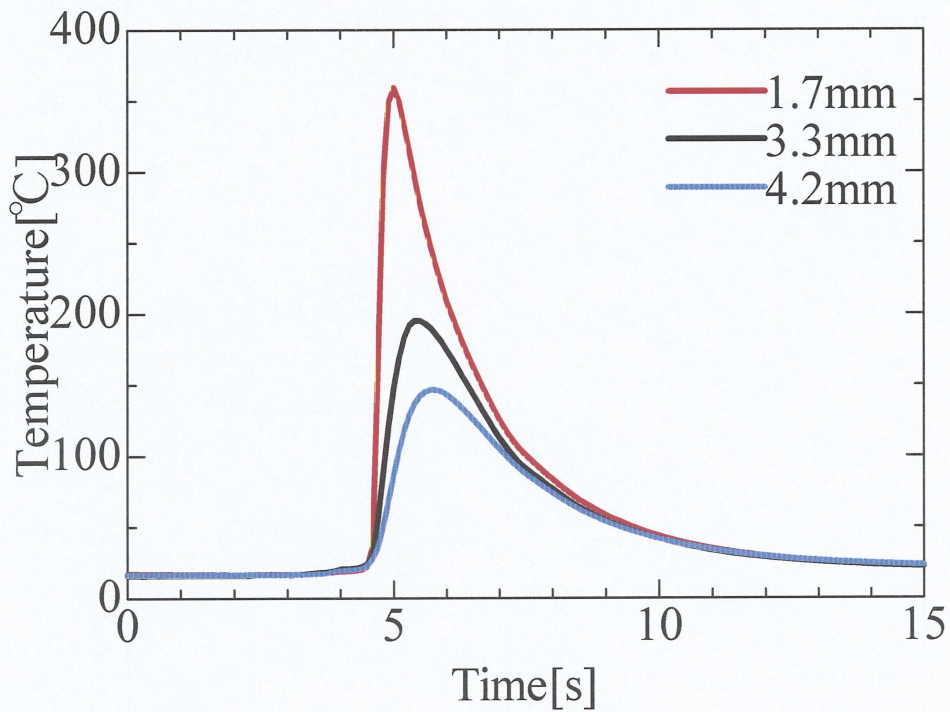
(b)  $\delta$  is positive

Fig.3-29 Changes of power density when defocusing.





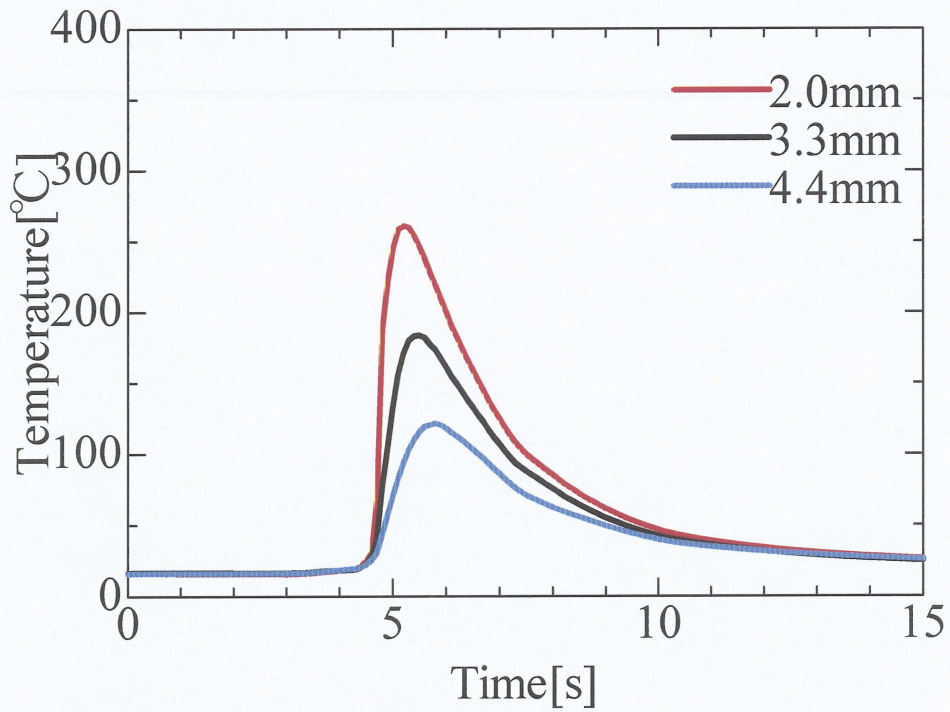
(a)Upper plate



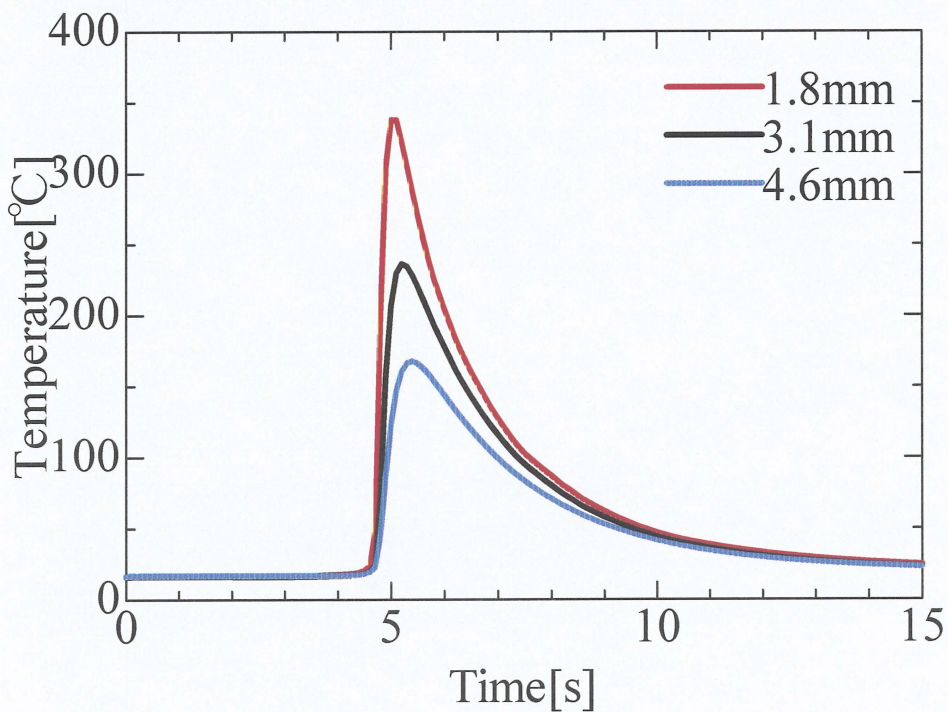
(b)Lower plate

Fig.4-1 Thermal cycles on SPCC surface of laser irradiated side at different measuring points  
;df=±0mm, δ=-0.3mm, welding speed 40mm/s.





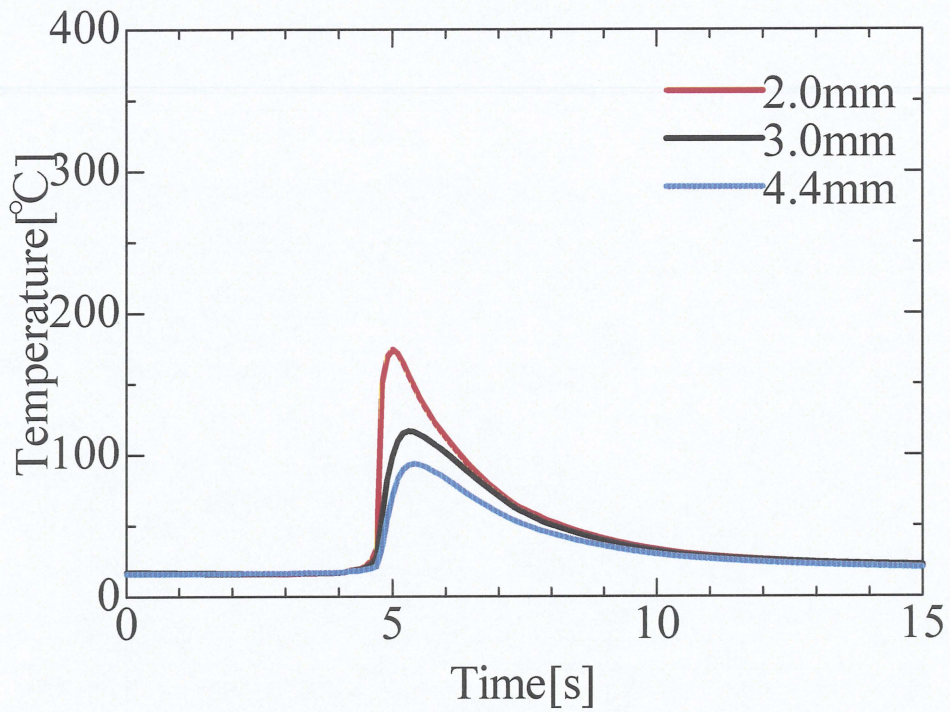
(a)Upper plate



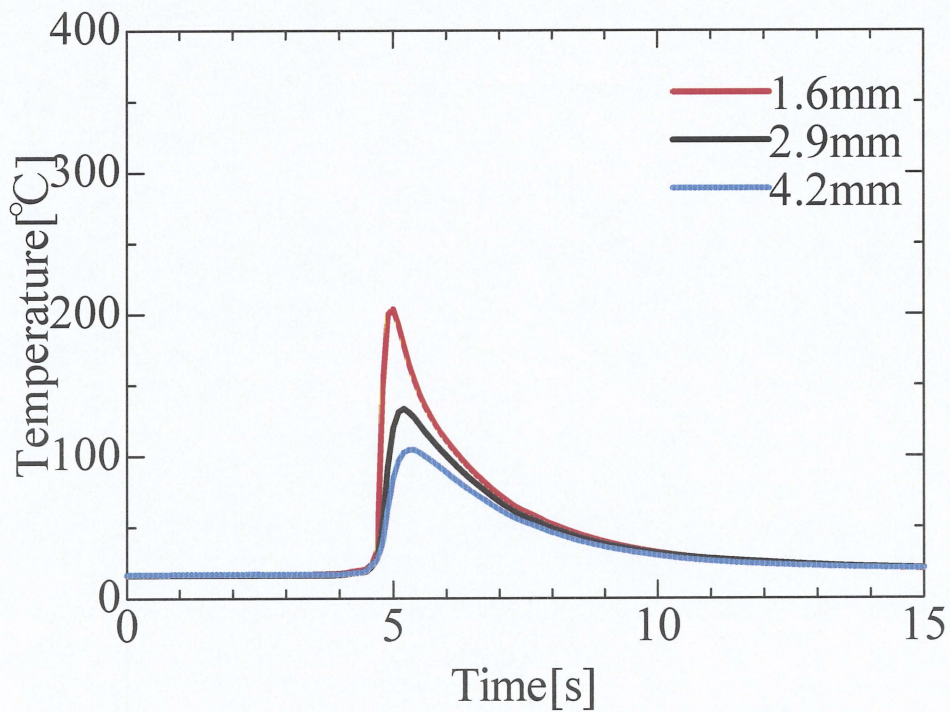
(b)Lower plate

Fig.4-2 Thermal cycles on SPCC surface of laser irradiated side at different measuring points  
;df=±0mm, δ=-0.2mm, welding speed 40mm/s.





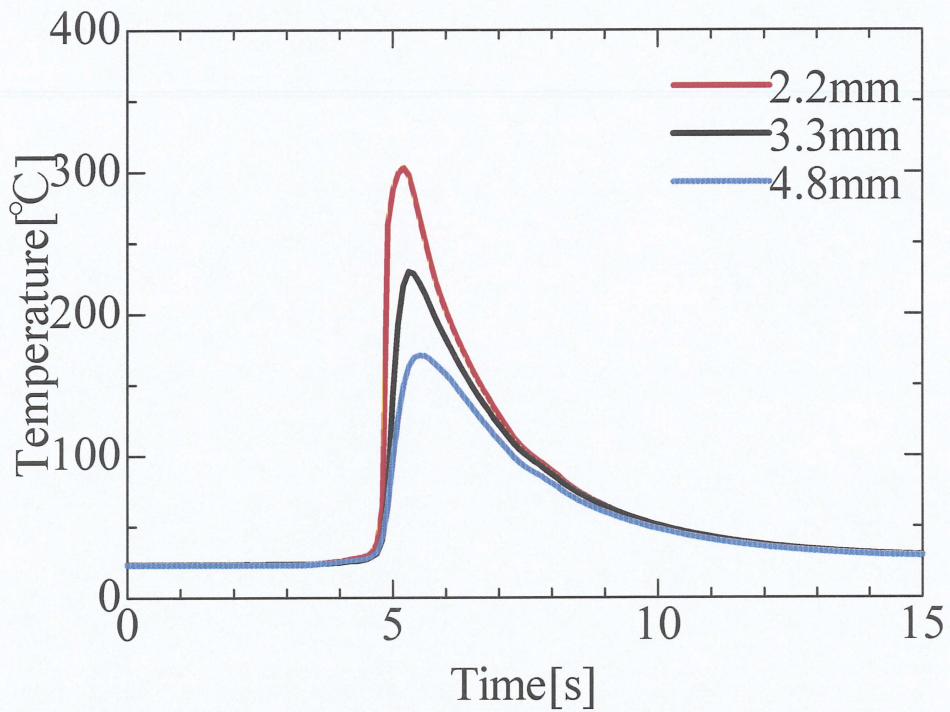
(a) Upper plate



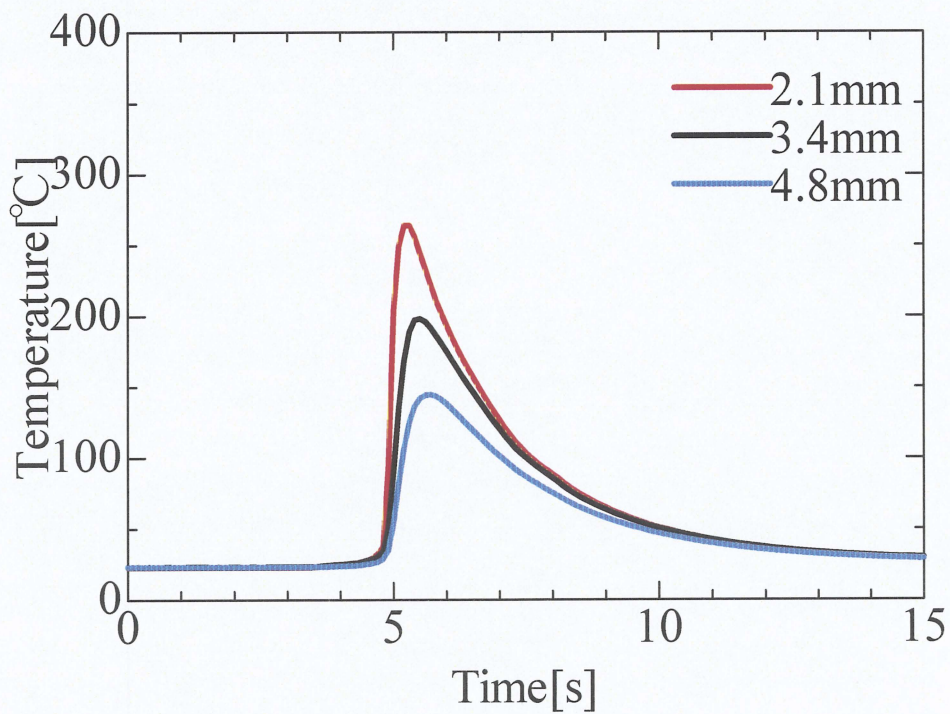
(b) Lower plate

Fig.4-3 Thermal cycles on SPCC surface of laser irradiated side at different measuring points  
 $\delta f = \pm 0\text{mm}$ ,  $\delta = -0.1\text{mm}$ , welding speed  $40\text{mm/s}$ .





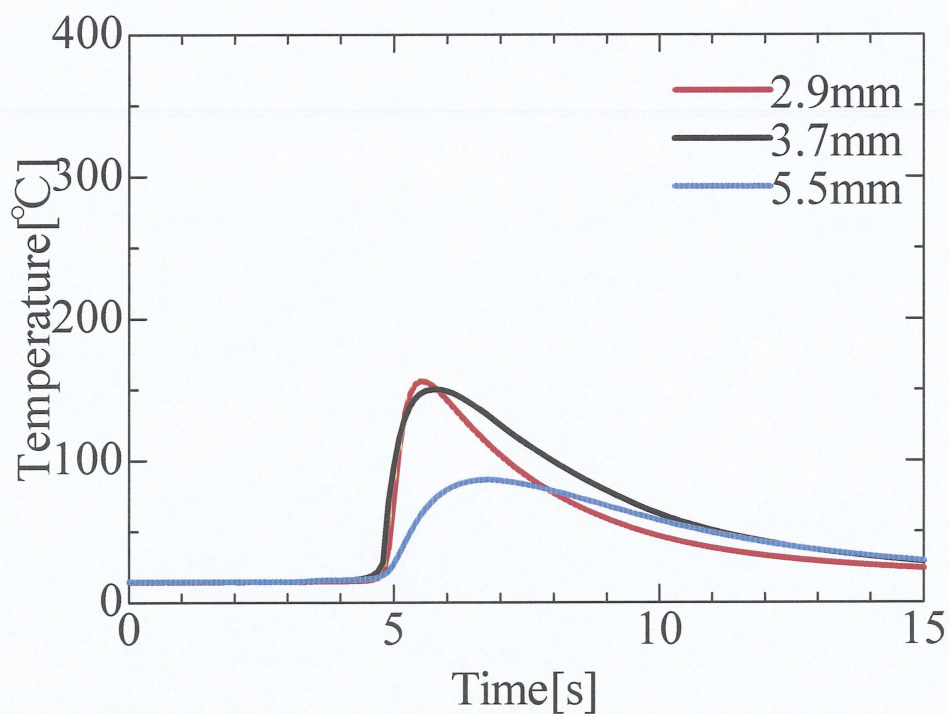
(a) Upper plate



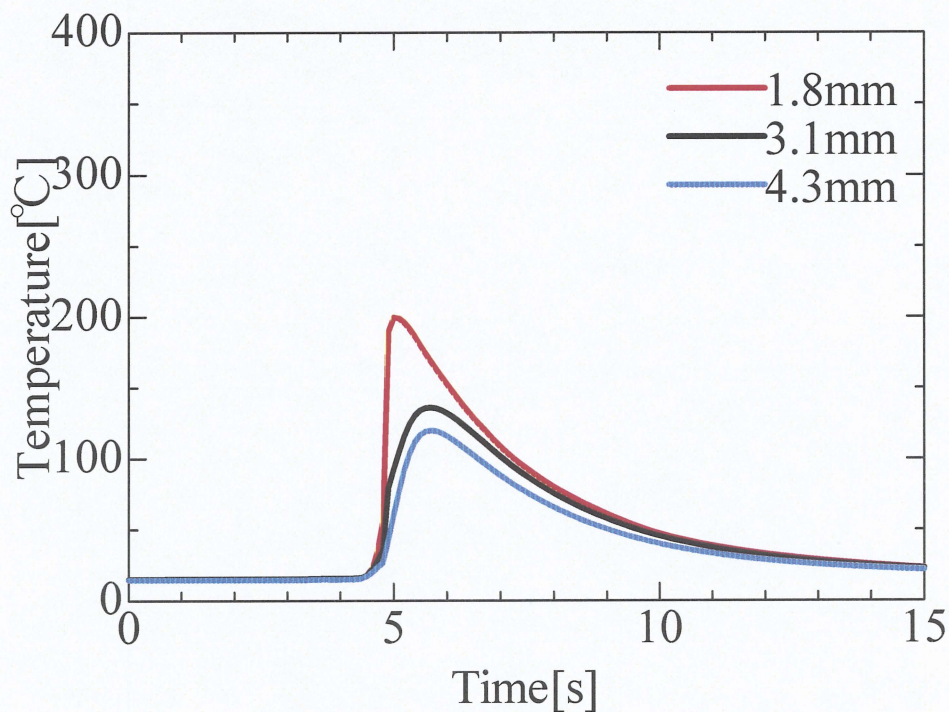
(b) Lower plate

Fig.4-4 Thermal cycles on SPCC surface of laser irradiated side at different measuring points  
;df=±0mm, δ=±0mm, welding speed 40mm/s.





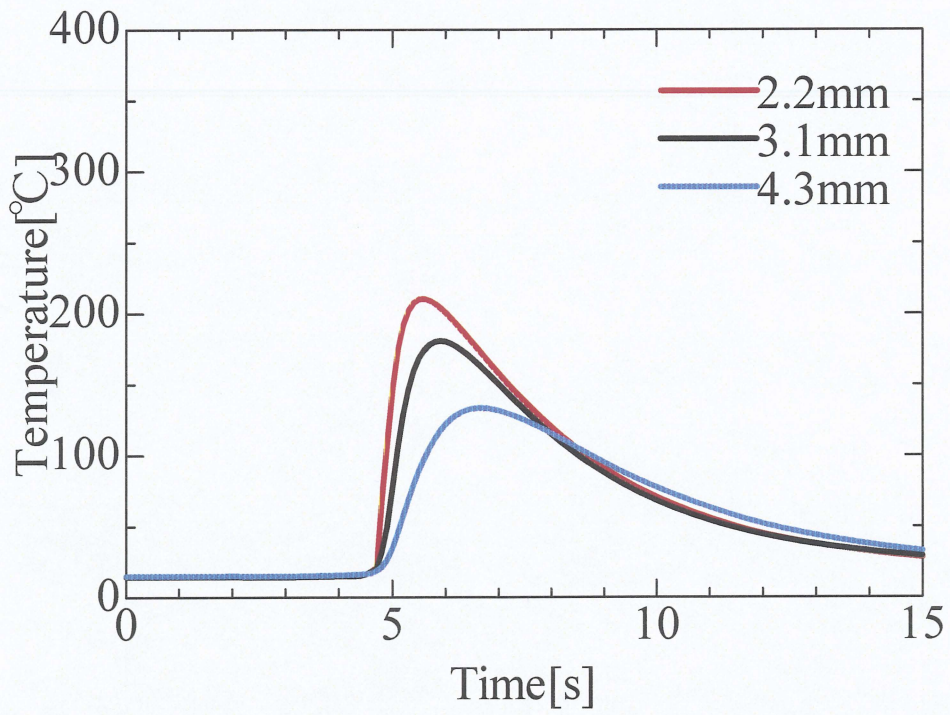
(a)Upper plate



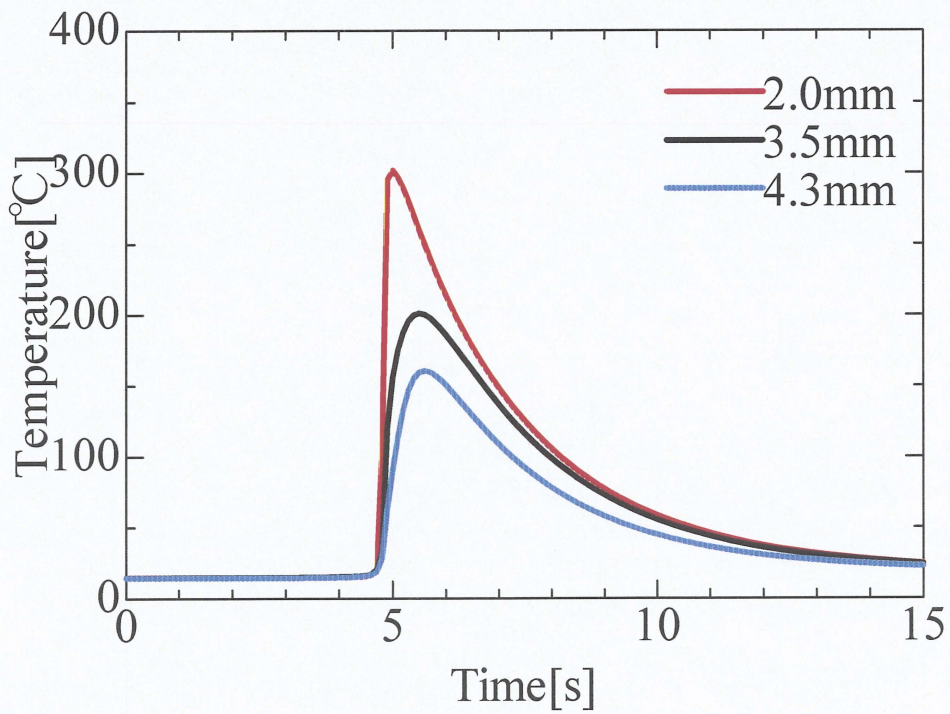
(b)Lower plate

Fig.4-5 Thermal cycles on SPCC surface of laser irradiated side at different measuring points  
 $\delta_f = \pm 0\text{mm}$ ,  $\delta = +0.1\text{mm}$ , welding speed  $40\text{mm/s}$ .





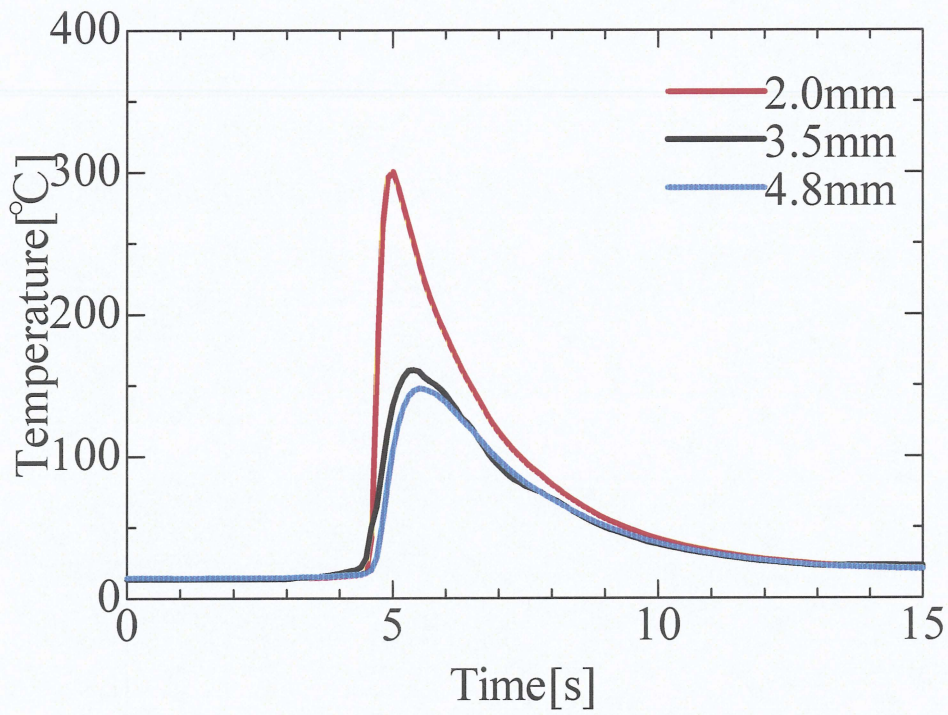
(a) Upper plate



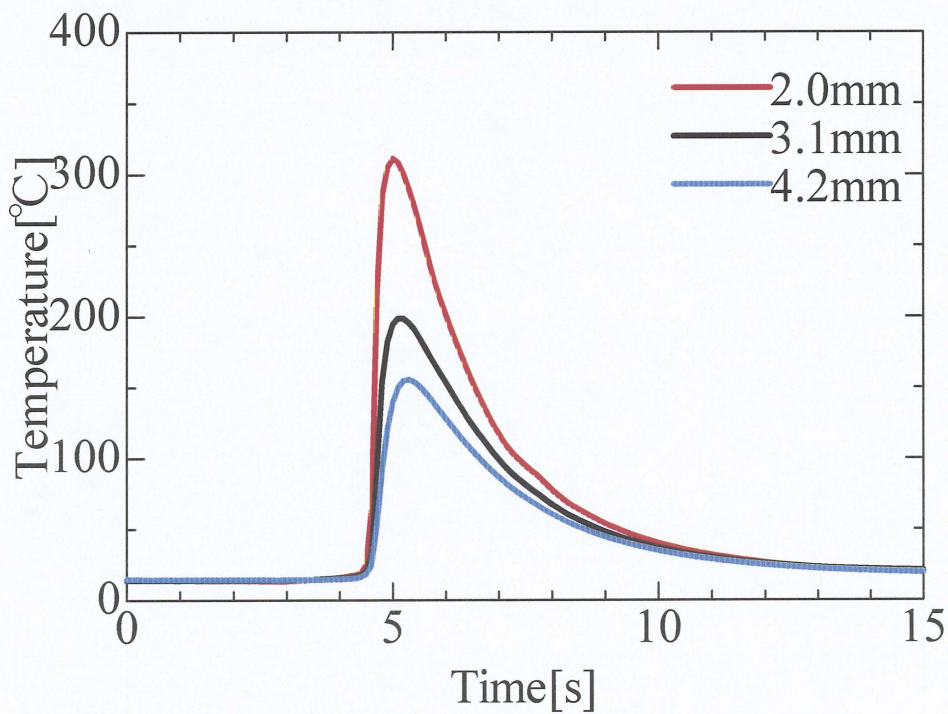
(b) Lower plate

Fig.4-6 Thermal cycles on SPCC surface of laser irradiated side at different measuring points  
;df=±0mm, δ=+0.2mm, welding speed 40mm/s.





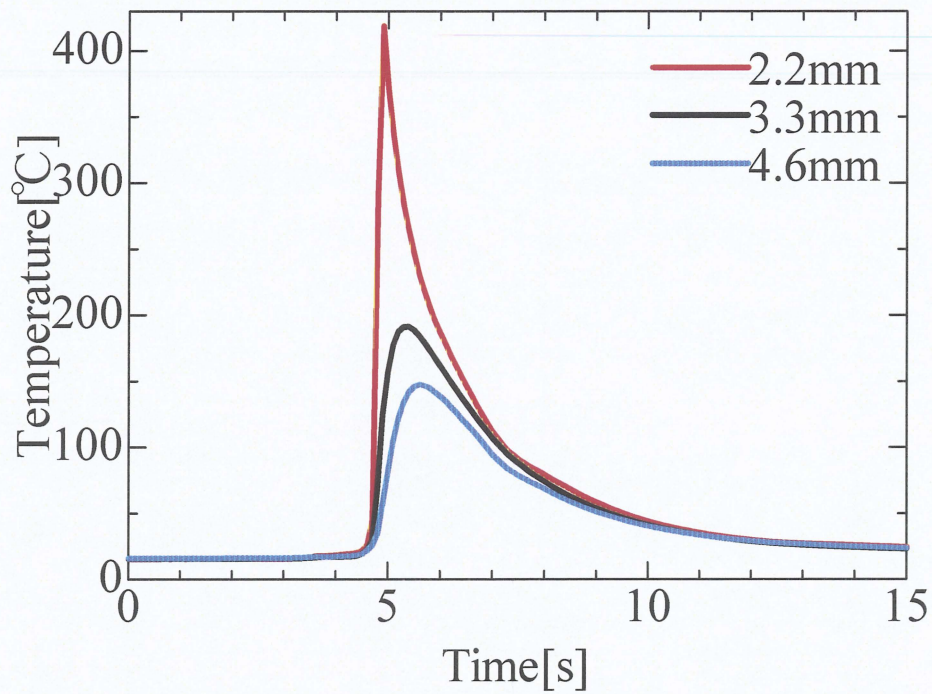
(a) Upper plate



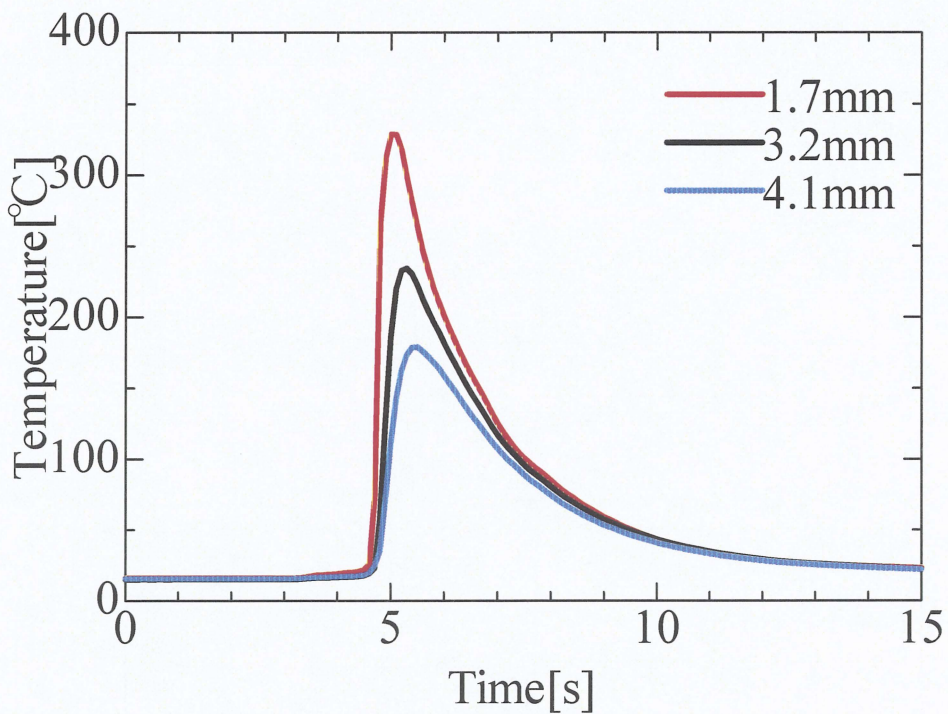
(b) Lower plate

Fig.4-7 Thermal cycles on SPCC surface of laser irradiated side at different measuring points  
;df=±0mm, δ=+0.3mm, welding speed 40mm/s.





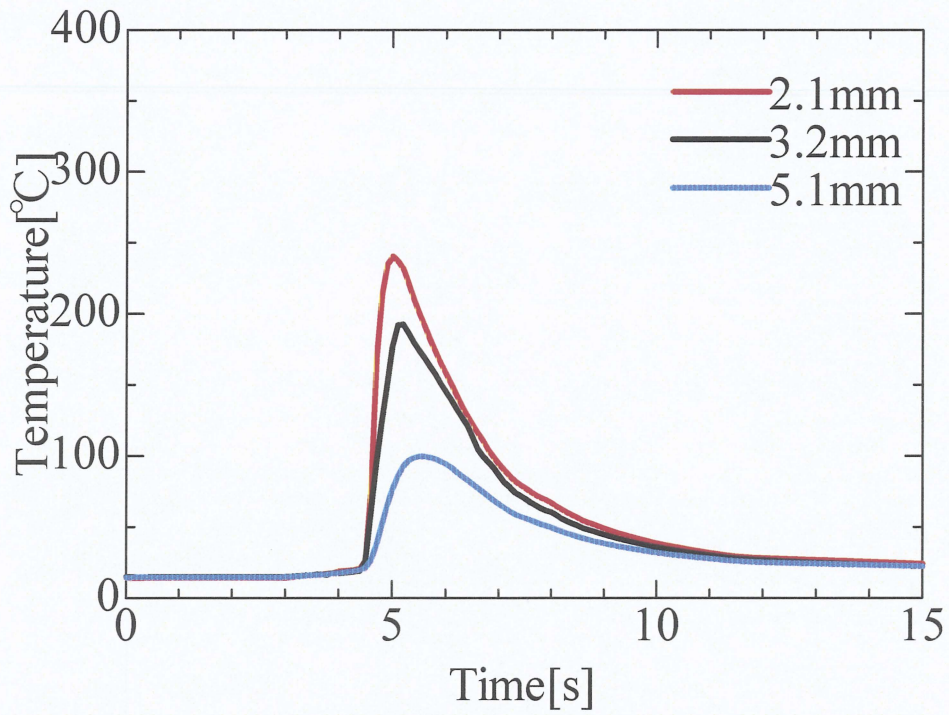
(a)Upper plate



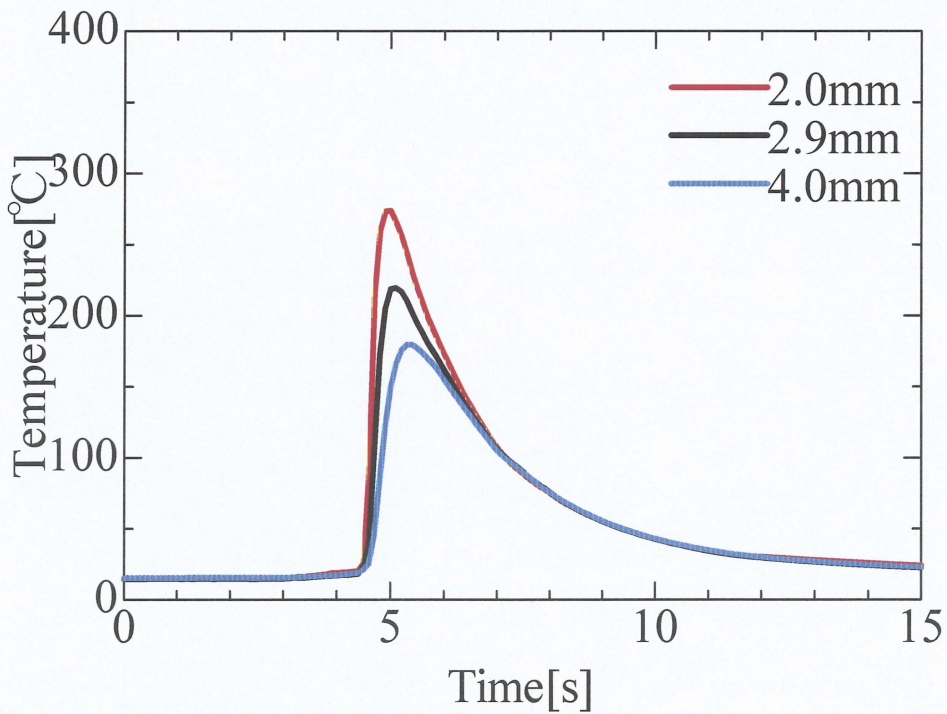
(b)Lower plate

Fig.4-8 Thermal cycles on SPCC surface of laser irradiated side at different measuring points ; $df=-2\text{mm}$ ,  $\delta=-0.3\text{mm}$ , welding speed  $40\text{mm/s}$ .





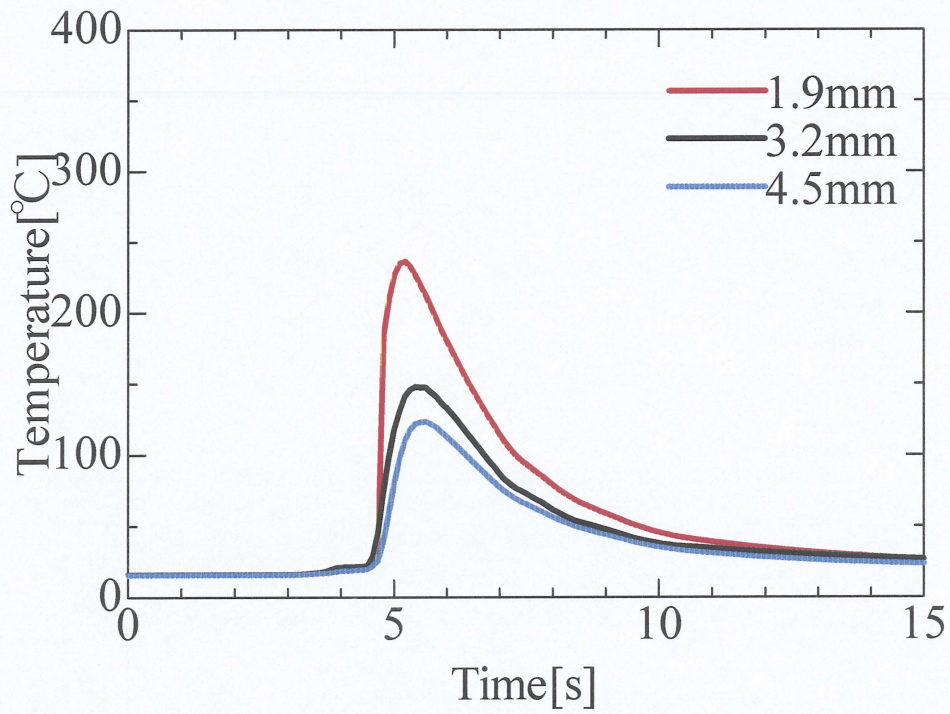
(a)Upper plate



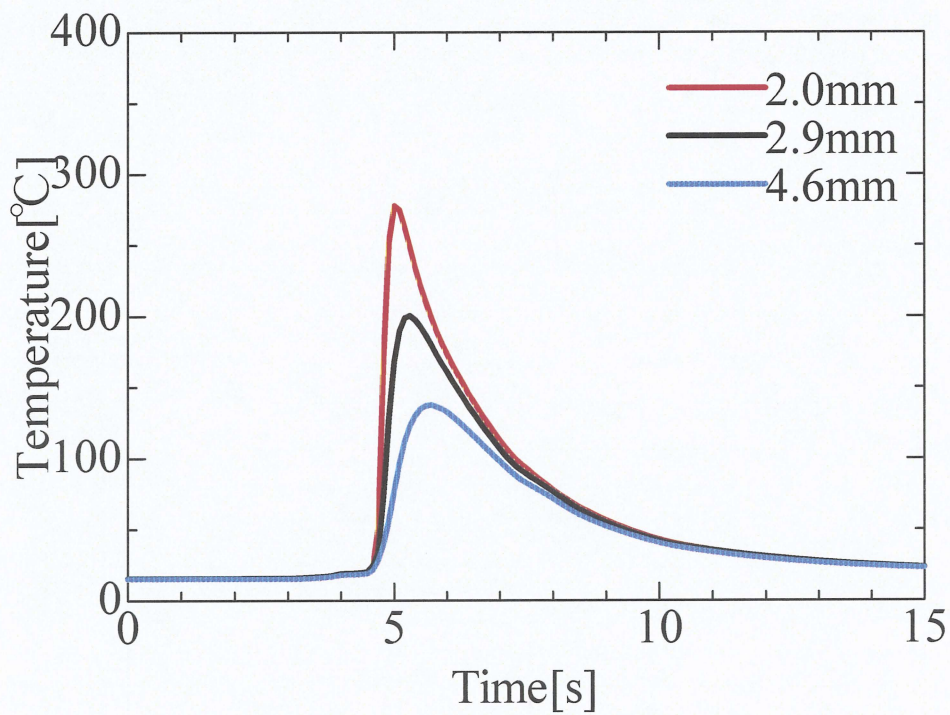
(b)Lower plate

Fig.4-9 Thermal cycles on SPCC surface of laser irradiated side at different measuring points  
;df=-2mm,  $\delta$ =-0.2mm, welding speed 40mm/s.





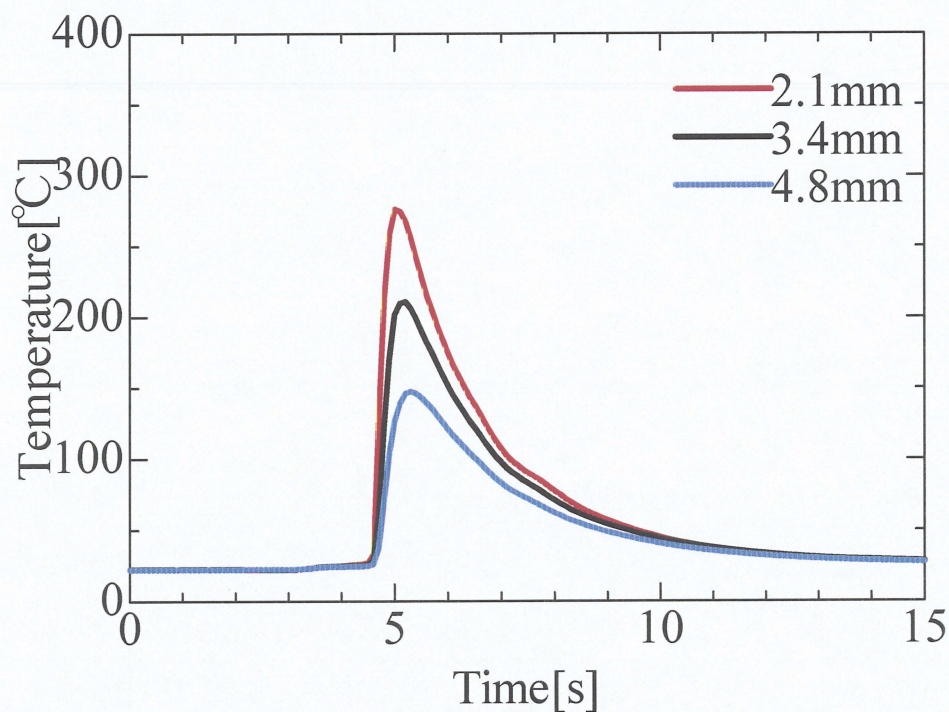
(a)Upper plate



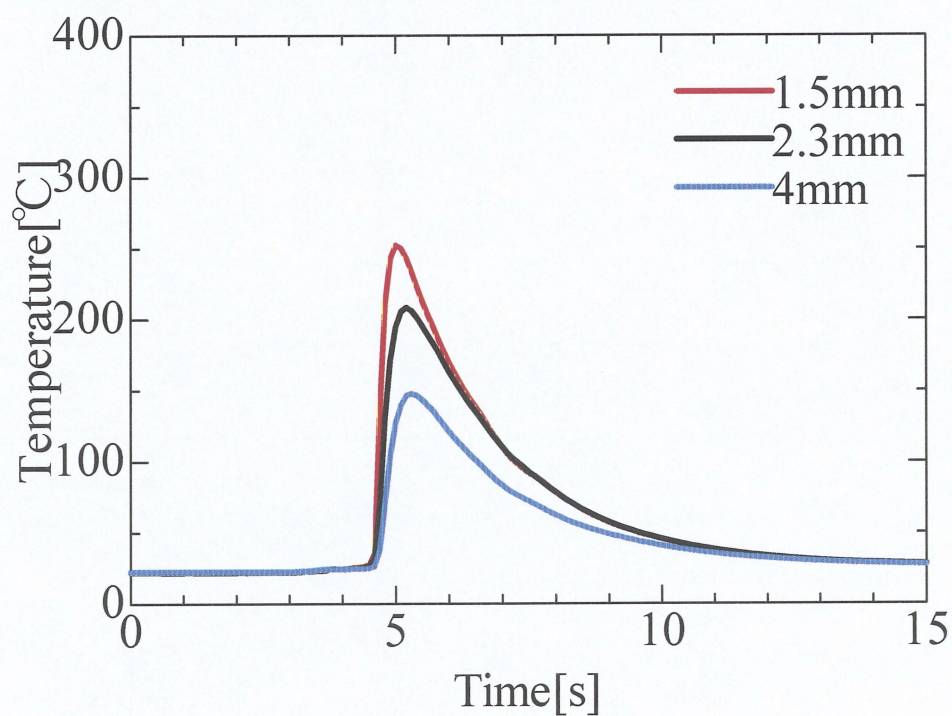
(b)Lower plate

Fig.4-10 Thermal cycles on SPCC surface of laser irradiated side at different measuring points ; $df=-2\text{mm}$ ,  $\delta=-0.1\text{mm}$ , welding speed  $40\text{mm/s}$ .





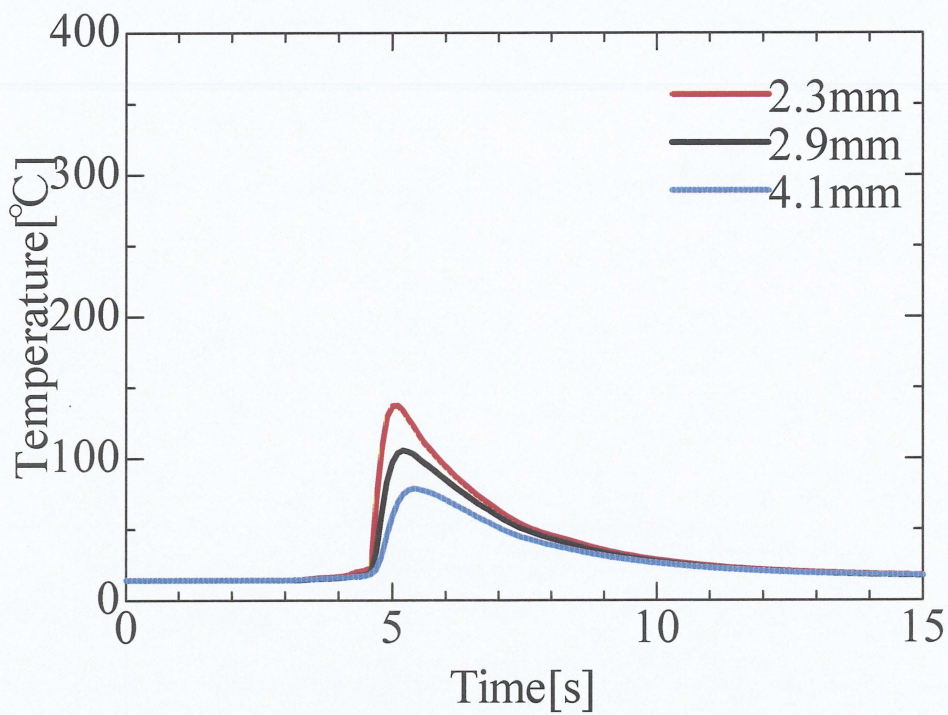
(a)Upper plate



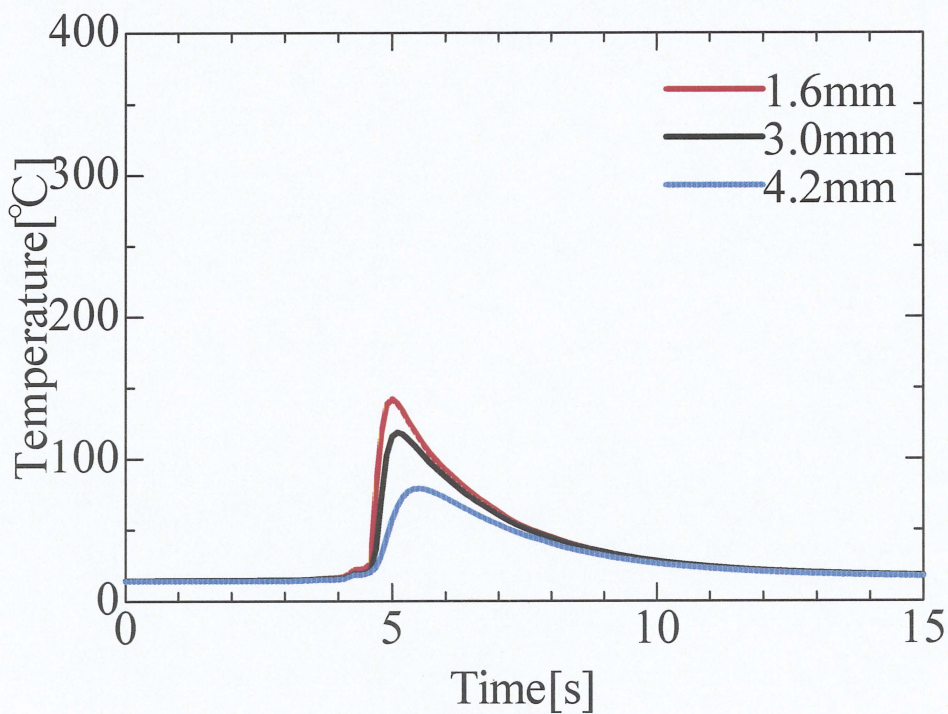
(b)Lower plate

Fig.4-11 Thermal cycles on SPCC surface of laser irradiated side at different measuring points ; $df=-2\text{mm}$ ,  $\delta=\pm 0\text{mm}$ , welding speed  $40\text{mm/s}$ .





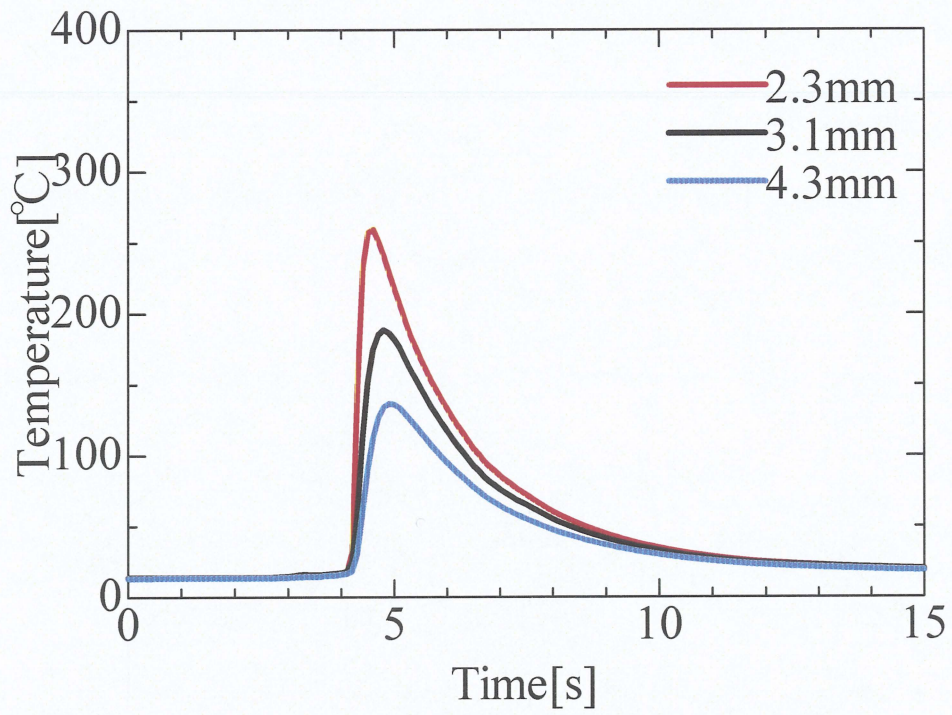
(a) Upper plate



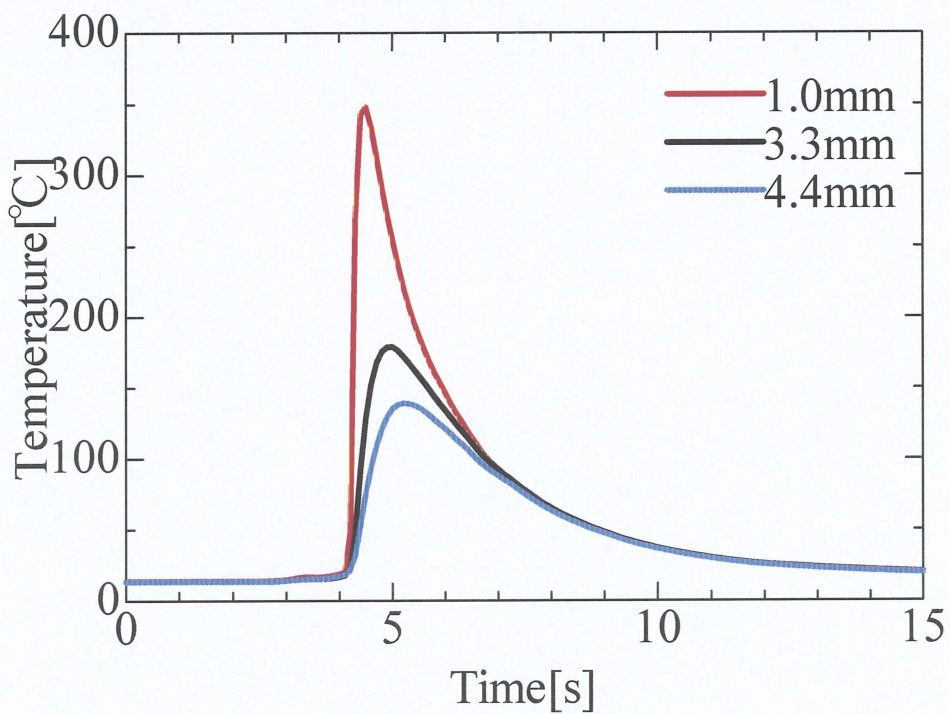
(b) Lower plate

Fig.4-12 Thermal cycles on SPCC surface of laser irradiated side at different measuring points ; $df=-2\text{mm}$ ,  $\delta=+0.1\text{mm}$ , welding speed  $40\text{mm/s}$ .





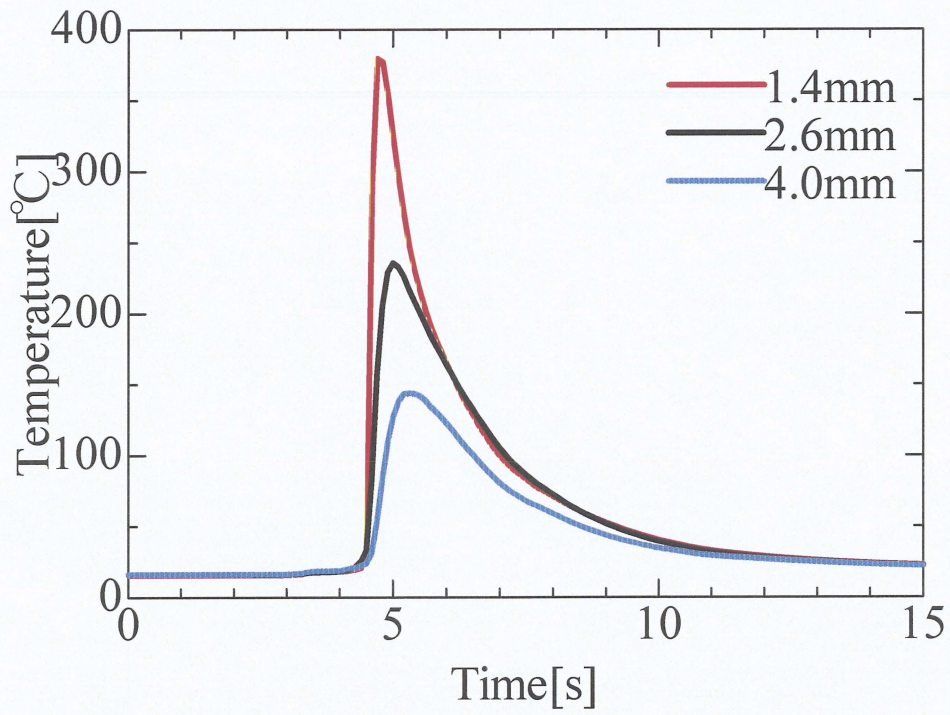
(a) Upper plate



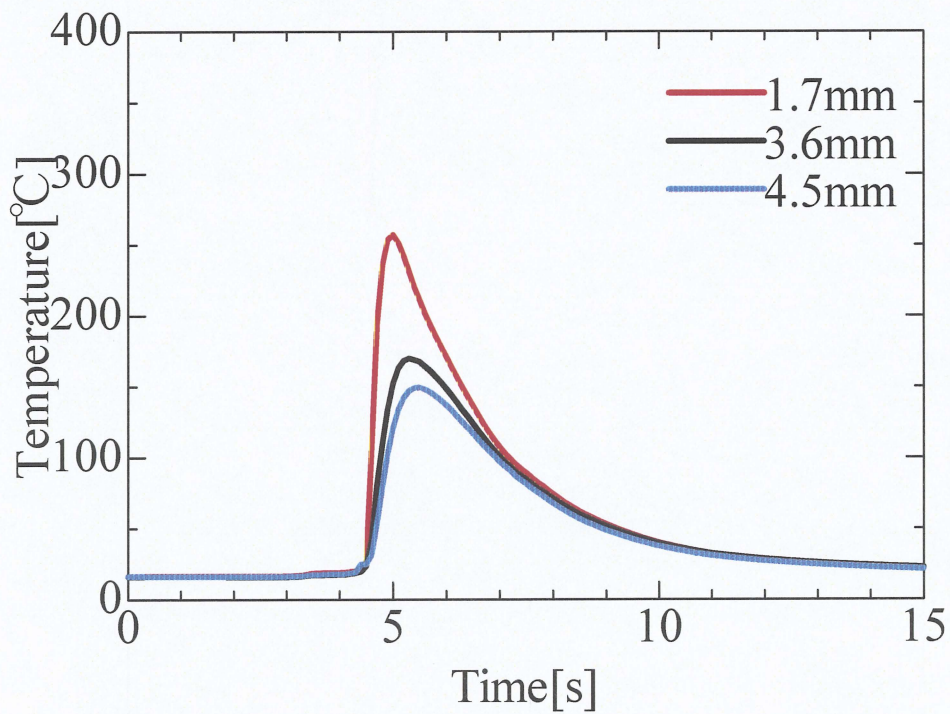
(b) Lower plate

Fig.4-13 Thermal cycles on SPCC surface of laser irradiated side at different measuring points  
;df=-2mm,  $\delta=+0.2$ mm, welding speed 40mm/s.





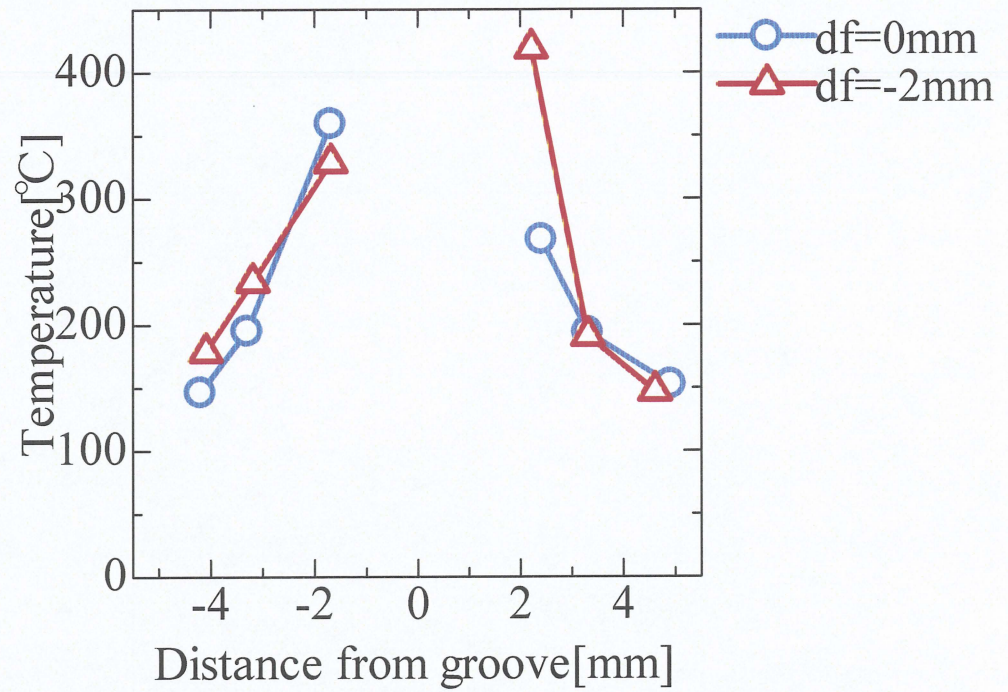
(a) Upper plate



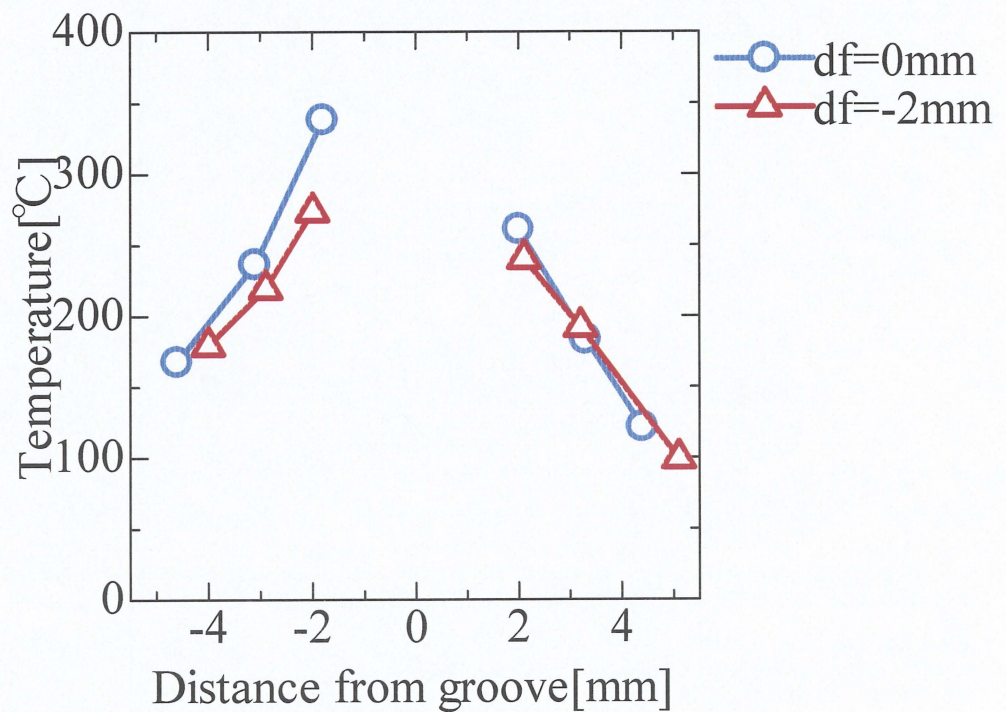
(b) Lower plate

Fig.4-14 Thermal cycles on SPCC surface of laser irradiated side at different measuring points  
;df=-2mm,  $\delta=+0.3$ mm, welding speed 40mm/s.





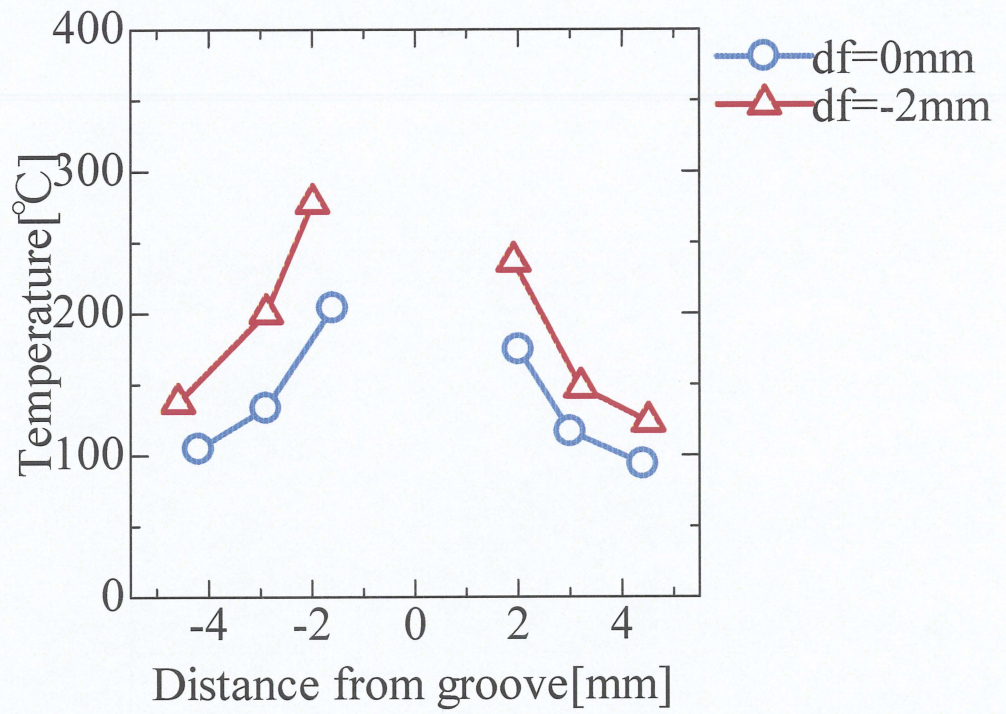
(a)  $\delta = -0.3\text{mm}$



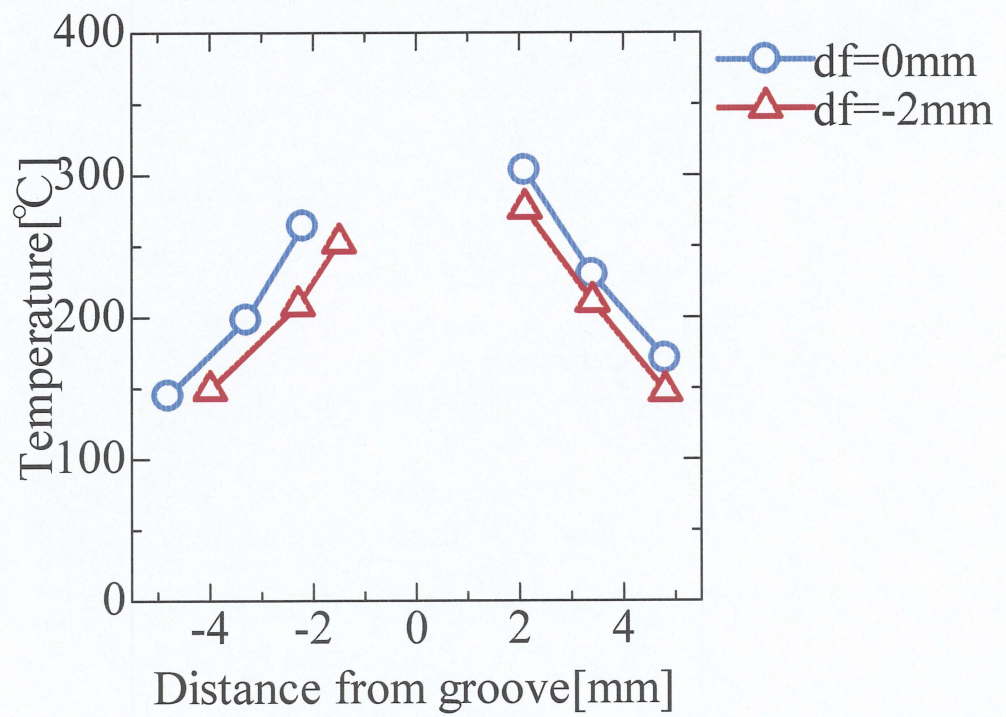
(b)  $\delta = -0.2\text{mm}$

Fig.4-15 Relationship between distance from groove and maximum temperature for difference defocusing distance.  
;welding speed 40mm/s





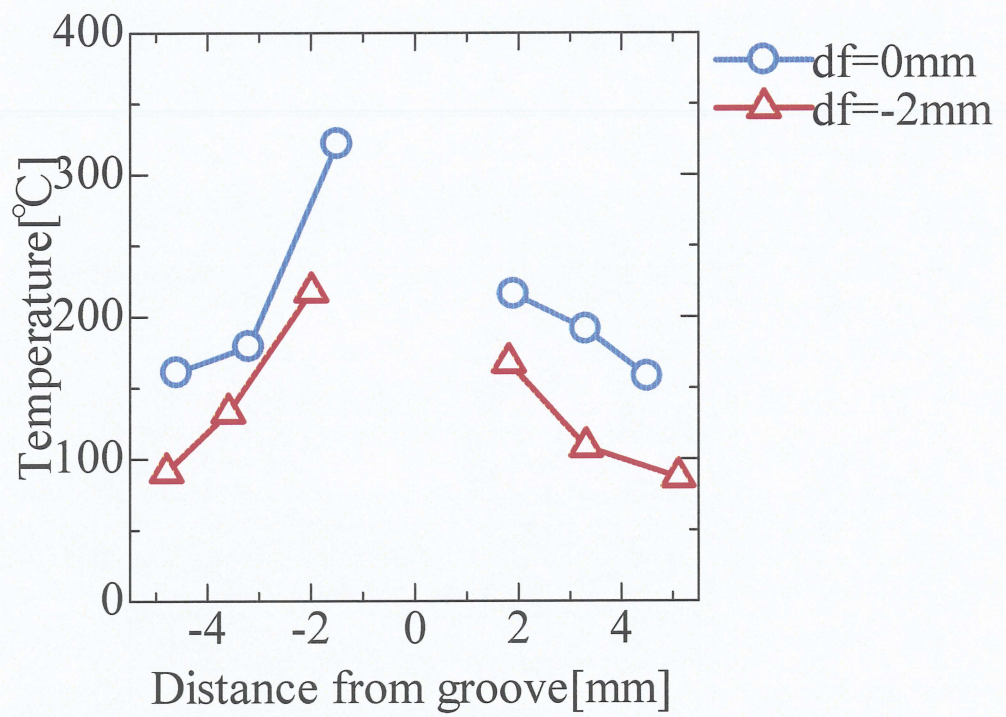
(c)  $\delta=-0.1\text{mm}$



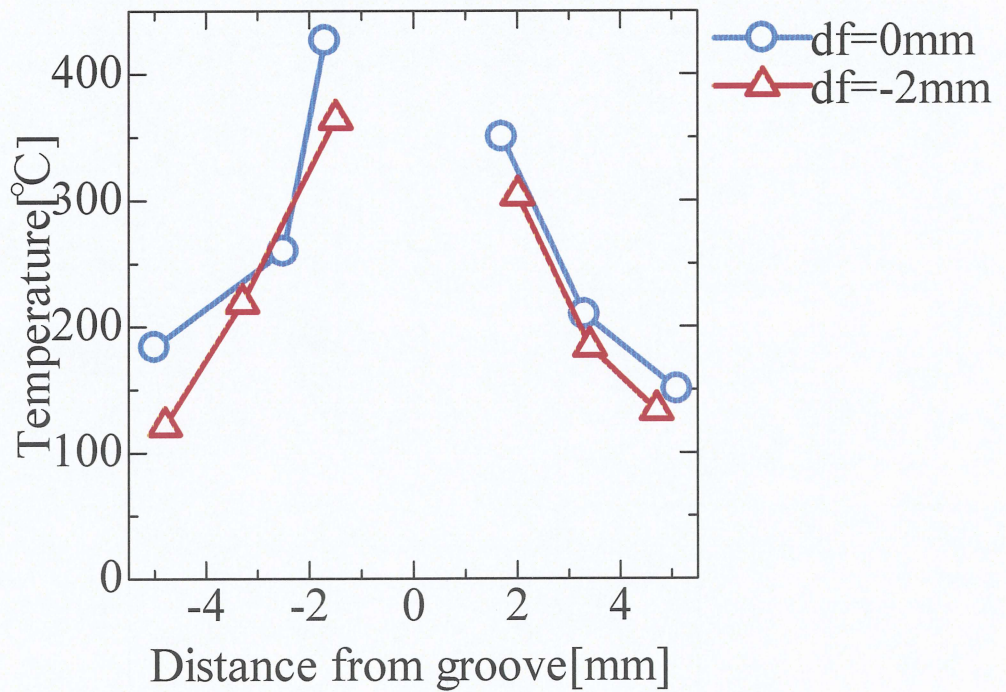
(d)  $\delta=\pm 0\text{mm}$

Fig.4-15 Continued.





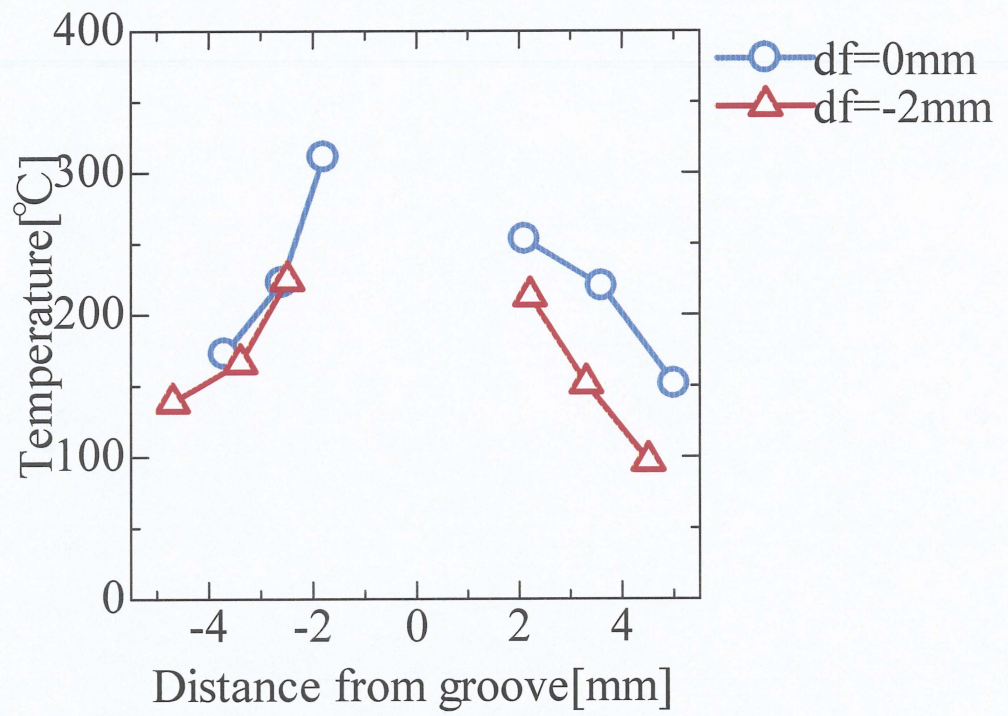
(e)  $\delta = +0.1 \text{ mm}$



(f)  $\delta = +0.2 \text{ mm}$

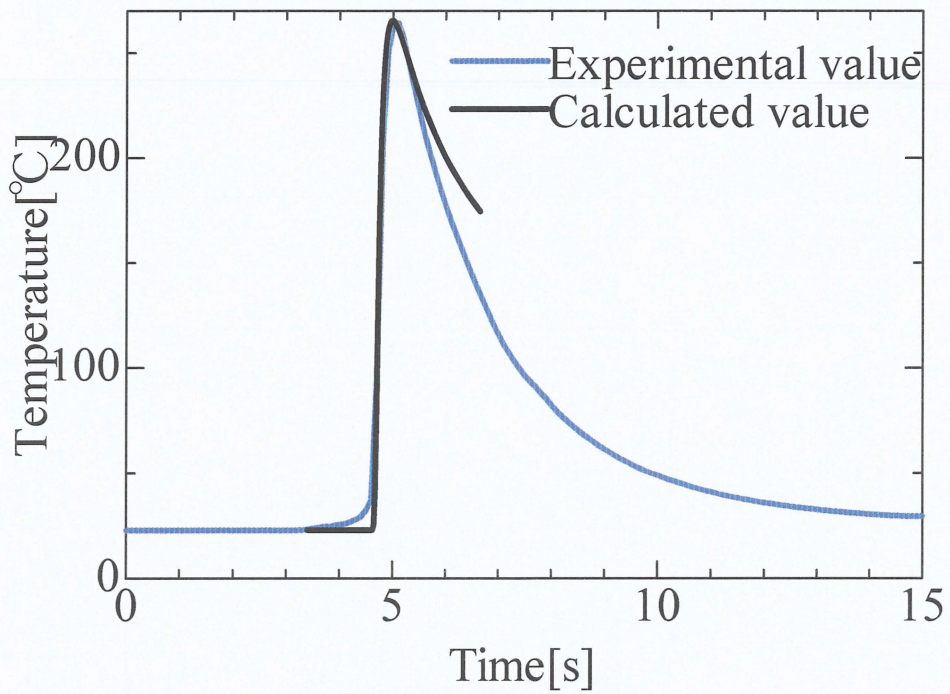
Fig.4-15 Continued.



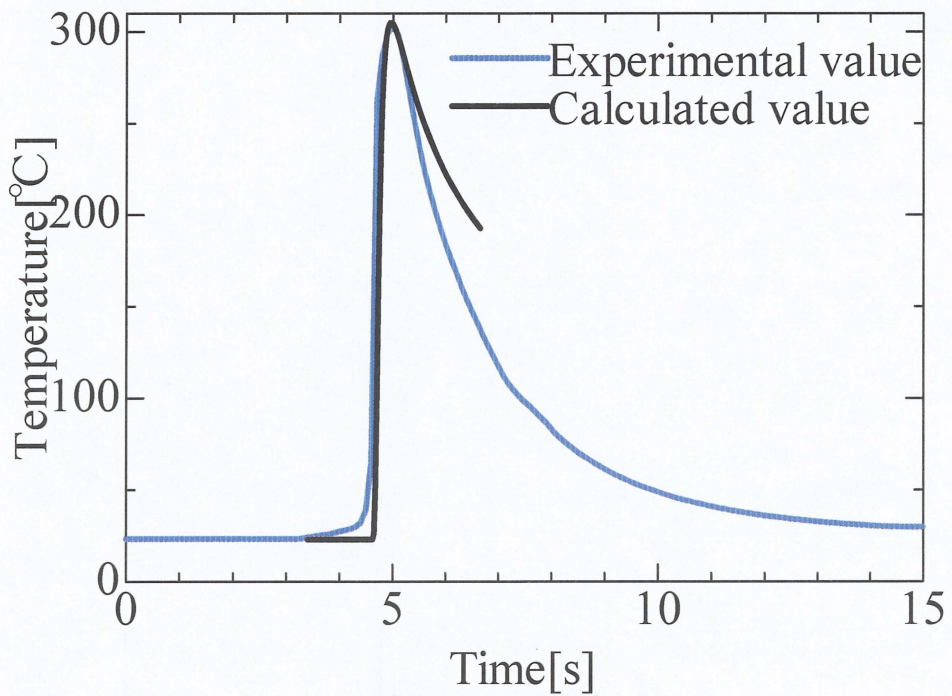


(g) $\delta=+0.3\text{mm}$

Fig.4-15 Continued.



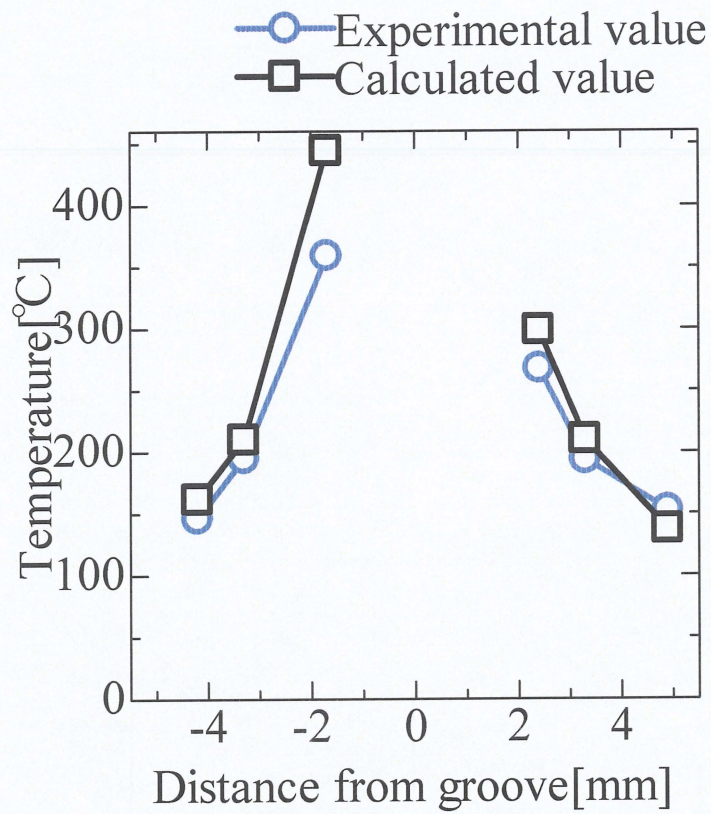
(a) Upper plate



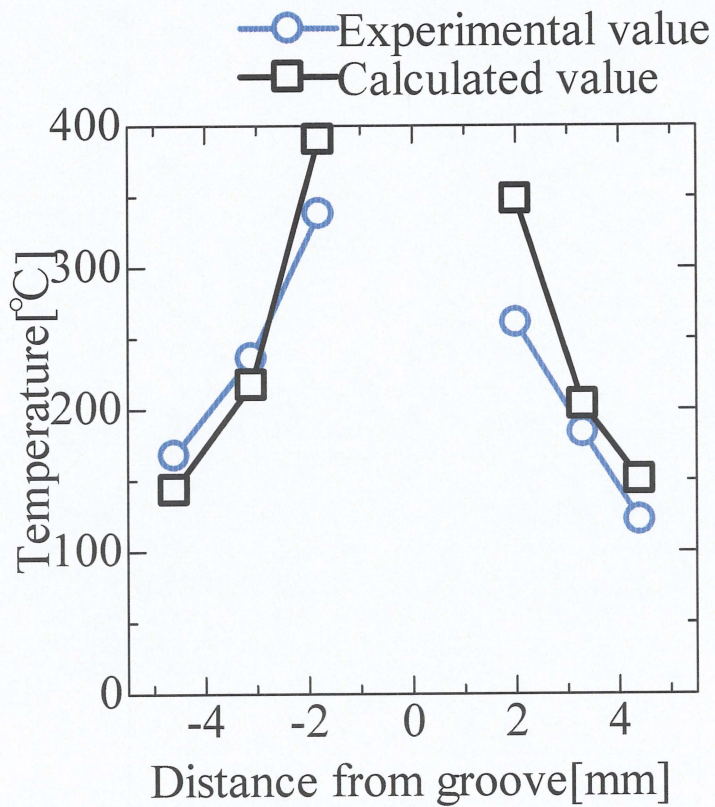
(b) Lower plate

Fig.4-16 Comparison between experimental and calculated values of thermal cycle ; $df = \pm 0\text{mm}$ ,  $\delta = \pm 0\text{mm}$ , welding speed  $40\text{mm/s}$ .





(a)  $\delta = -0.3\text{mm}$



(b)  $\delta = -0.2\text{mm}$

Fig.4-17 Comparison between experimental and calculated values of maximum temperature in thermal cycle. ;welding speed 40mm/s,  $df=0\text{mm}$ .



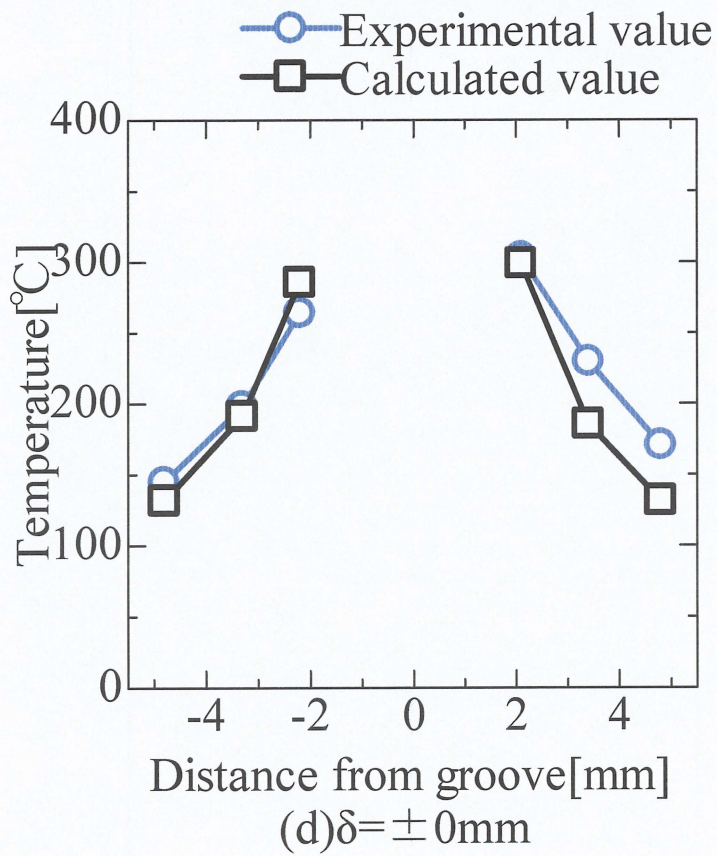
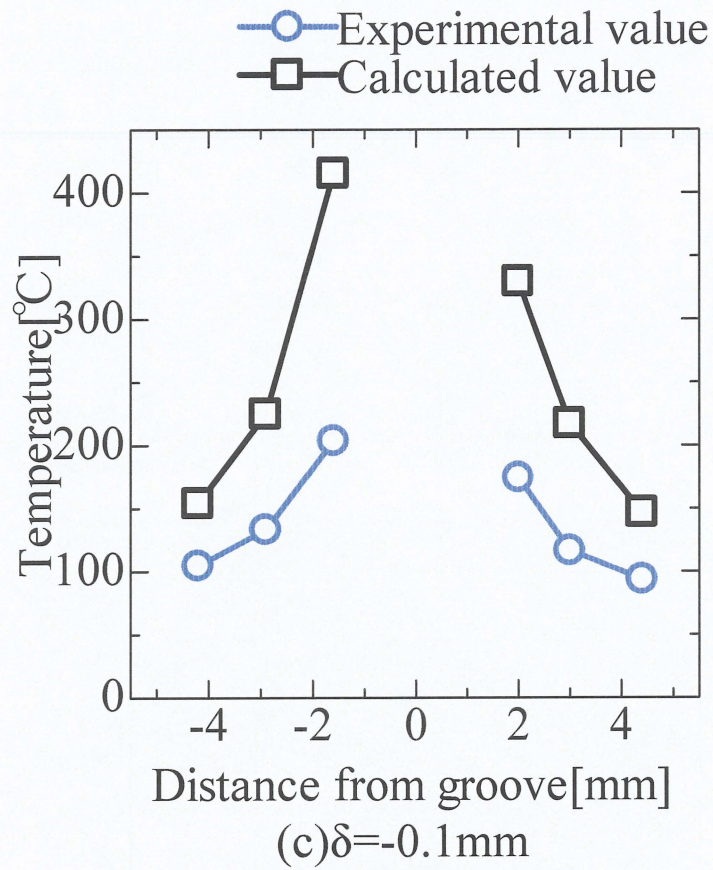
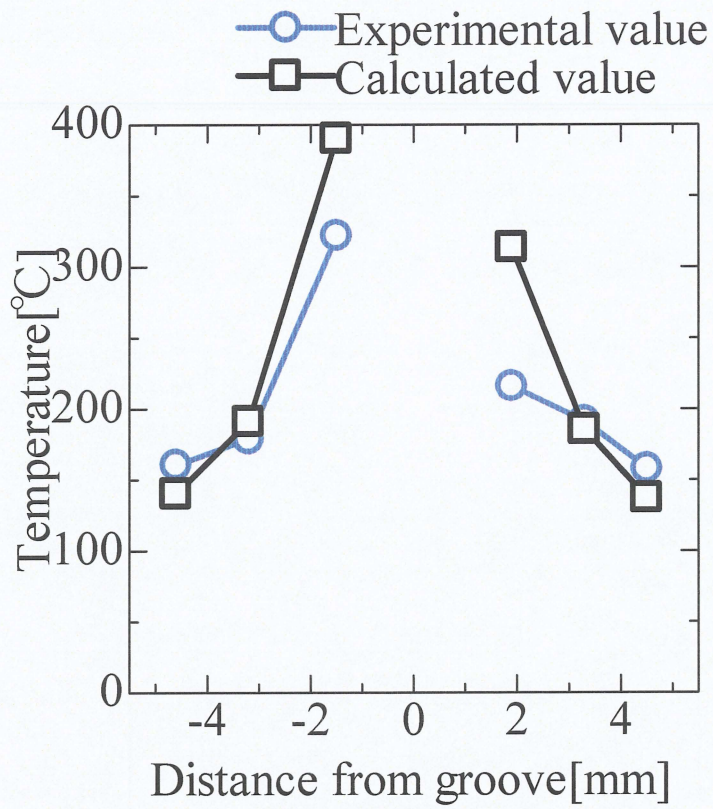
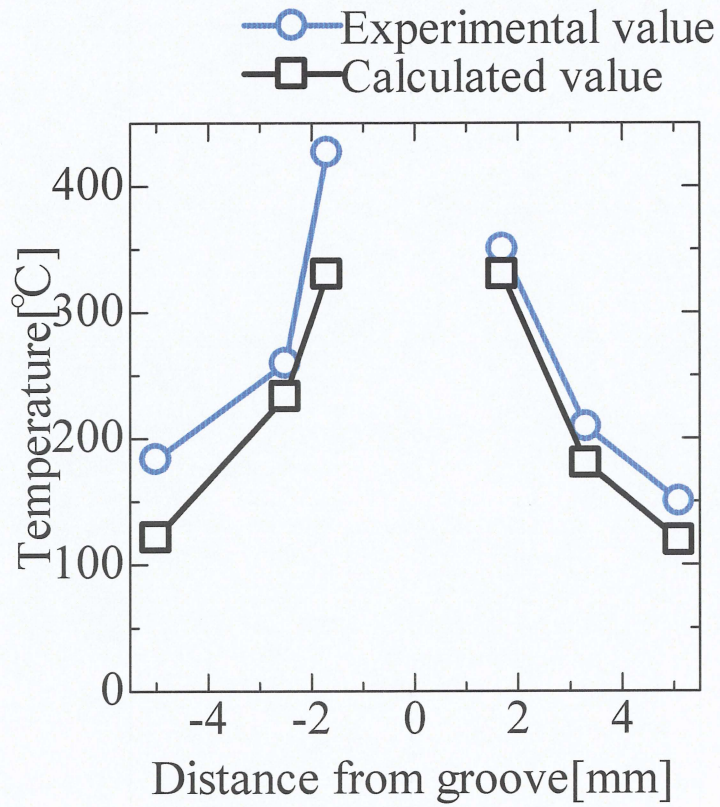


Fig.4-17 Continued.





(e)  $\delta = +0.1 \text{ mm}$



(f)  $\delta = +0.2 \text{ mm}$

Fig.4-17 Continued.



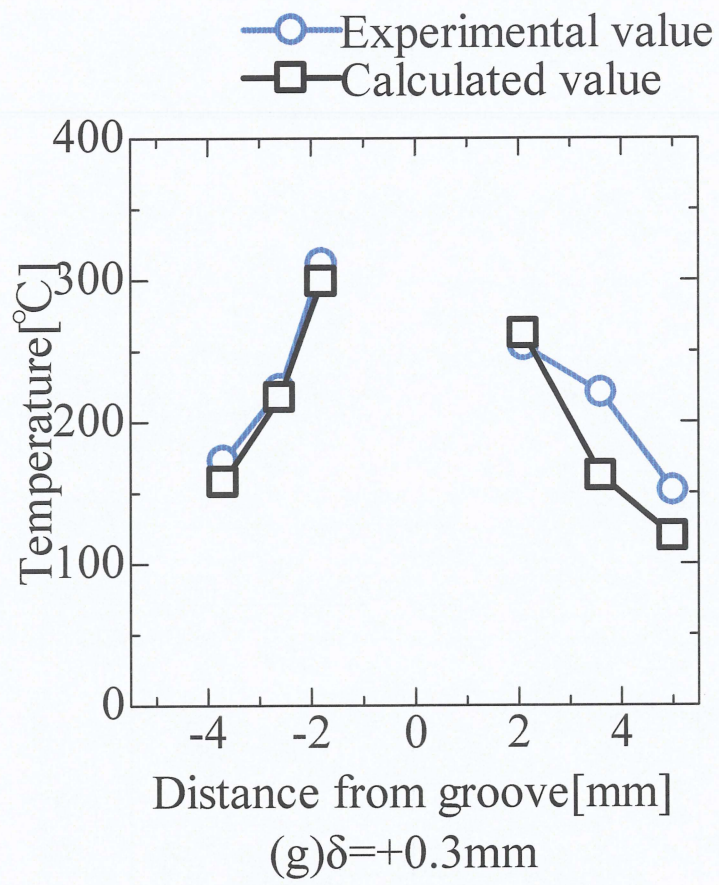


Fig.4-17 Continued.



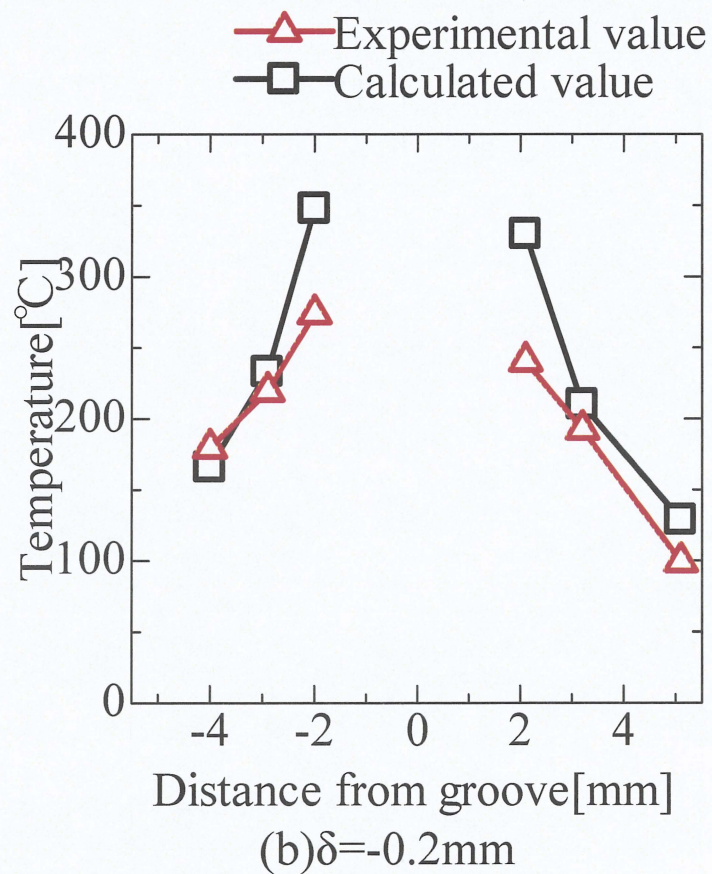
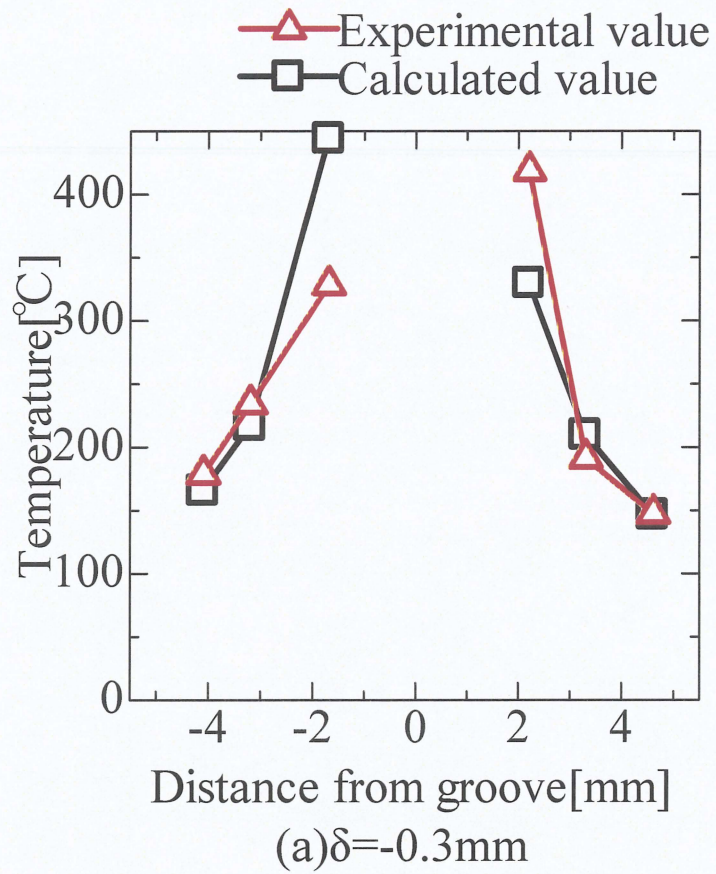
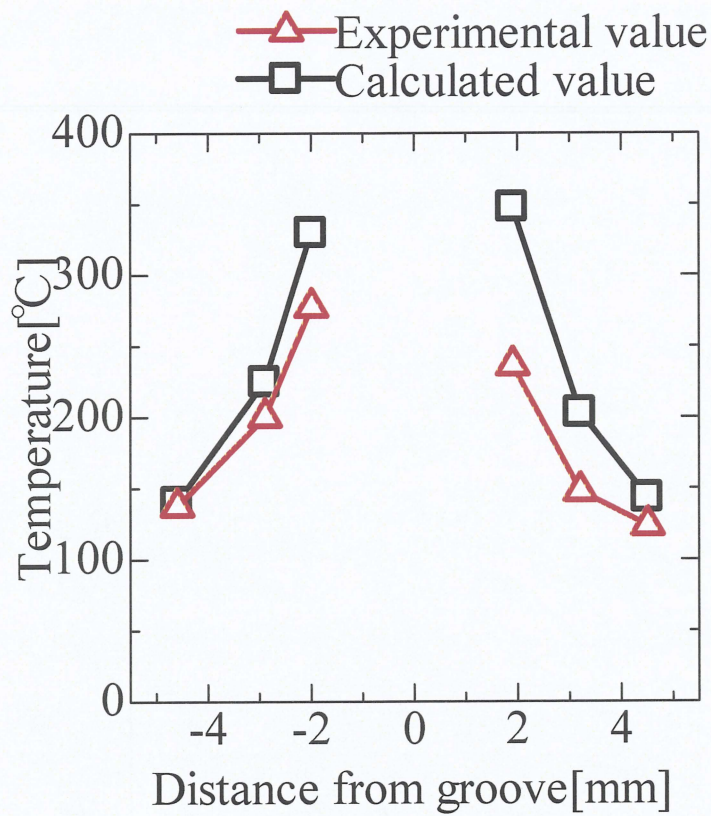
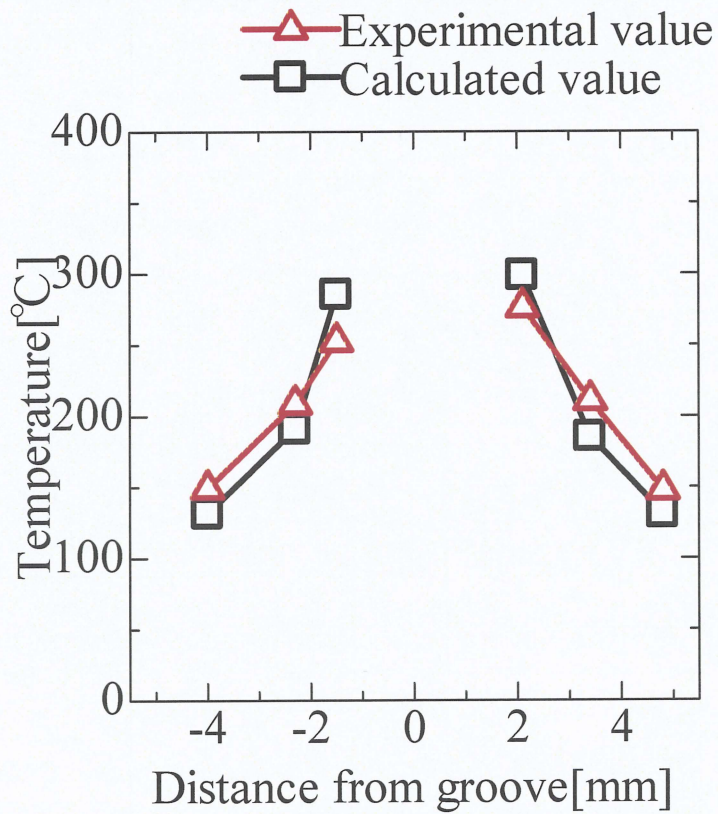


Fig.4-18 Comparison between experimental and calculated values of maximum temperature in thermal cycle. ;welding speed 40mm/s,  $df = -2\text{mm}$  .





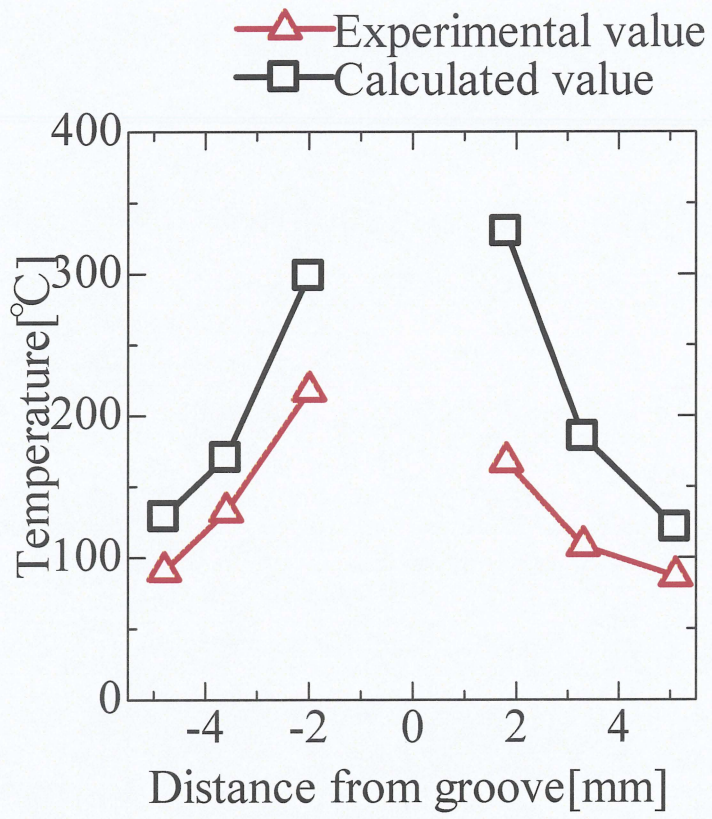
(a)  $\delta = -0.1 \text{ mm}$



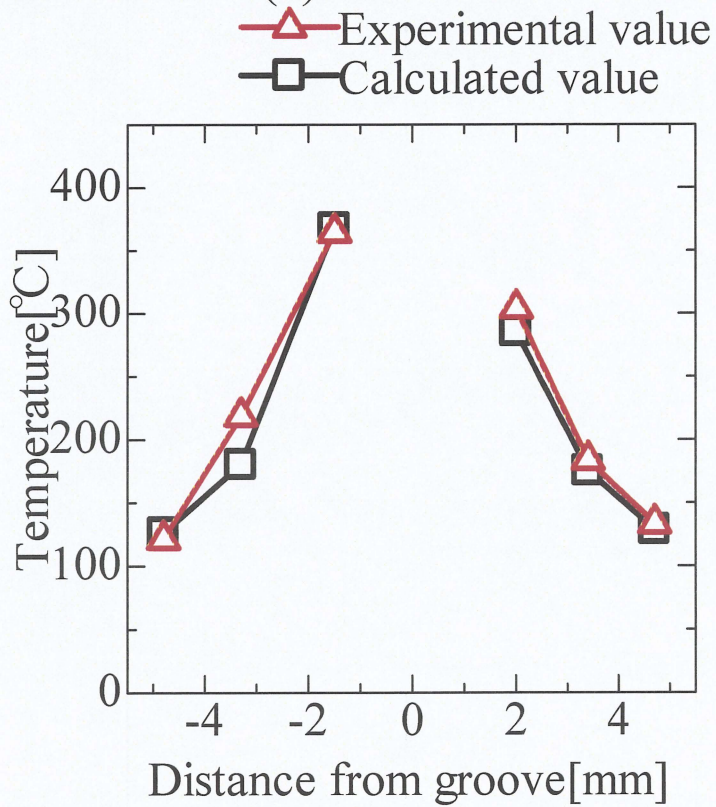
(a)  $\delta = \pm 0 \text{ mm}$

Fig.4-18 Continued.





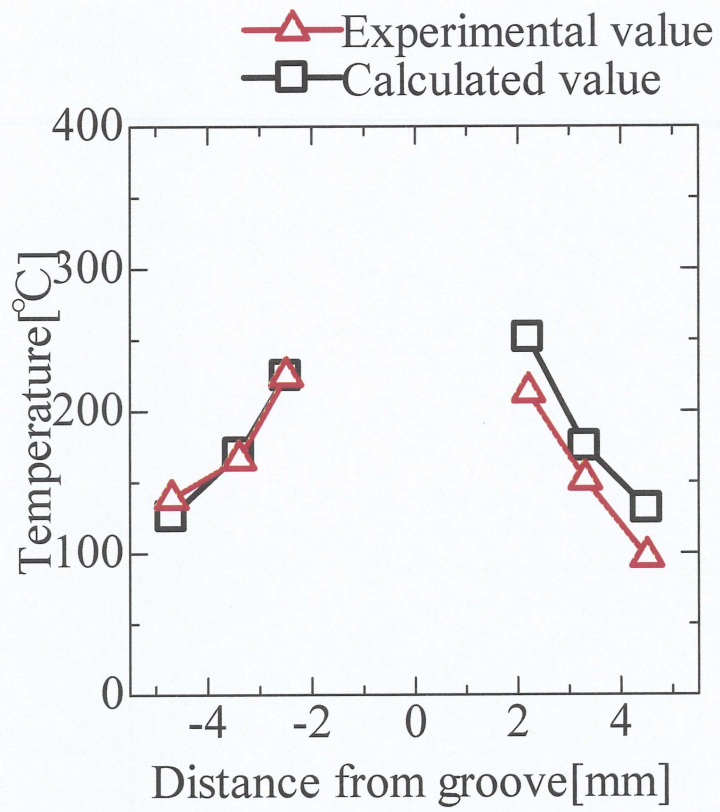
(b)  $\delta = +0.1 \text{ mm}$



(a)  $\delta = +0.2 \text{ mm}$

Fig.4-18 Continued.





(b)  $\delta = +0.3\text{mm}$

Fig.4-18 Continued.