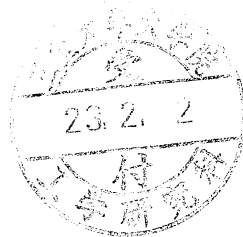


平成 22 年度 修士論文

突合せレーザー溶接部の形成におよぼす
照射位置のずれの影響



三重大学大学院工学研究科
博士前期課程 機械工学専攻
後藤 治彦

目次

第1章 緒言	1
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
1-2 研究目的	3
第2章 実験装置および実験方法	4
2-1 供試材	4
2-2 実験装置の構成	4
2-3 実験手順	5
2-4 ずらし量 δ の定義及びレーザ照射の位置決め方法	5
2-4-1 ずらし量 δ の定義	5
2-4-2 レーザ照射の位置決め方法	6
2-5 実験条件	7
2-6 レーザのスポット径	7
2-7 溶接部の評価方法	8
2-7-1 ビード断面の観察方法	8
2-7-1-1 試験片の切断方法	8
2-7-1-2 研磨及び腐食方法	8
2-7-2 ビード幅、ビード断面積の測定方法	9
2-7-2-1 ビード幅の測定方法	9
2-7-2-2 ビード断面積の測定方法	9
2-7-3 引張試験方法	10
2-8 ビードオンプレート溶接	10
2-9 熱サイクルの測定	10
第3章 突合せレーザ溶接部の形成に及ぼす照射位置のずれの影響	12
3-1 溶込み状態による溶接部分類	12
3-2 各溶接姿勢における適正な溶接条件	12
3-3 ビード幅の測定結果	13
3-4 ビード断面積の測定結果	14
3-5 溶接姿勢がビード幅及びビード断面積に及ぼす影響	15
3-6 ビードオンプレート溶接との比較	16
3-7 引張試験	16

3-8	ビード外観及び断面写真	17
-----	-------------	----

第4章	熱サイクルの測定と考察	18
-----	-------------	----

4-1	熱サイクルの測定	18
-----	----------	----

4-2	熱サイクルの測定結果	18
-----	------------	----

4-3	突合せレーザー溶接部の形成過程の推定	20
-----	--------------------	----

4-3-1	ガウス分布の近似によるレーザーのパワー密度分布	20
-------	-------------------------	----

4-3-2	○の溶接条件のときの形成過程の推定	21
-------	-------------------	----

4-3-3	△の溶接条件のときの形成過程の推定	21
-------	-------------------	----

4-3-4	×の溶接条件のときの形成過程の推定	22
-------	-------------------	----

4-4	δ_c に関する考察	22
-----	-------------------	----

第5章	結言	24
-----	----	----

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

レーザー加工は指向性，集光性に優れたレーザー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．最近ではレーザー発振器の出力・性能が飛躍的に向上したことで，レーザー加工の実用化が進み，切断，溶接，微細加工など，幅広く実用的に利用されている．レーザー加工の特徴として，

- 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ので，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

レーザー溶接は，集光したレーザー光を被加工物に照射して，金属を局所的に溶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．
- 2) 熱影響層，熱ひずみが少なく，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．これらの特徴とレーザー装置の高出力化なども伴い，レーザー溶接は現在，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，テール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，レーザー溶接が他の溶接法と比べて特に多く使われている¹⁾．これは，レーザー溶接には，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で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²⁾。

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。こ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法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、CO₂レーザとTIGアーク、および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、母材そのものを熔融し、溶接するのが一般的であるが、フィラ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レーザ溶接を行う、フィラワイヤ添加型のレーザ溶接法も研究されている。王らによる報告によれば³⁾、レーザ・MIGアークハイブリッド溶接にフィラ

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，藤長らによる報告によれば⁴⁾，フィラーを添加した YAG レーザにおいて，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．

1-2 研究目的

以上のように，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．しかし，レーザ照射位置の正確な管理，設定についての報告例は少なく，溶接線を突合せ部に正確に追従させる，開先倣い（シームトラッキング）技術等が報告されているものの，このシームトラッキング技術の導入は，元々レーザ装置のコストが高い上に，更にそのコストを圧迫してしまう恐れがある．また，そもそもレーザ照射位置が突合せ部からずれた際に，突合せ溶接部にどのような影響を与えるかについては，これまであまり報告がなされていない．

そこで本研究では，I 型突合せ継手において，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 δ と定義し， δ を変化させてレーザ溶接を行った．その際，溶接速度を変化させて溶接を行い，溶接後の試験片のビード外観・断面の観察，および各溶接速度において溶接可能な δ の最大値の調査により，レーザ照射位置のずれ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をした．また， δ を変化させたときに 2 枚の供試材の入熱比率変化について検討するために，熱電対により溶接中の熱サイクルの測定を行った．

第2章 実験装置および実験方法

2-1 供試材

供試材にはオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 (寸法: 10×100mm、板厚: 0.8mm) を使用した。SUS304 の化学組成の規格値を Table 2-1 に、主要な物性値を Table 2-2 に示す。なお、この供試材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 Fig.2-2 に示す光学顕微鏡と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、0.7mm に渡ってだれが続き、まただれは最大で 0.15mm であった。Fig.2-3 に溶接前の突合せ部の断面図を示す。この突合せ部に対して、図のようにレーザを照射して、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溶接装置の構成を Fig.2-4 に示す。(a)は溶接姿勢が横向時であり、立向時には(b)のように治具を用いて電動スライダを垂直に設置して同様に溶接を行った。

レーザ発振器には、定格出力 1 kW, 波長 10.6 μ m, ビーム径 20mm, 連続発振型の炭酸ガスレーザ発振器 (アマダ社製 OLC-1000P) を用いた。発振されたレーザ光は焦点距離 127mm の Zn-Se 製集光レンズにより集光され、突合せ部に照射される。

次に、レーザ突合せ溶接用の治具の装置図面を Fig.2-5 に示す。この固定治具の供試材を固定する部分は、上部にあるピッチ 1mm 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.2-5(a)に示すように 36° 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ねらい位置から 0.1mm ずつ上下に調節した。Fig.2-4 に示したようにレーザ突合せ溶接用治具は、有効ストローク 500mm, 分解能 0.01mm 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

して直線移動するため，横向姿勢時には水平方向に，立向姿勢時には鉛直方向に動く．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，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や溶接長を設定した．

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，供試材表面をアセトンで拭き取り，脱脂した後に，治具に供試材を固定した．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，溶接中に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 ずらし量 δ の定義及びレーザ照射の位置決め方法

2-4-1 ずらし量 δ の定義

本研究では，Fig.2-6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 δ と定義した．また，各溶接姿勢における δ のずらし量の方向を，Fig.2-7に示すように設定した．横向姿勢においては，

+側と-側の両方にそれぞれ δ を増加させて溶接を行い、立向姿勢においては、+側の方向のみに δ を増加させて溶接を行った。 δ は0.1mmずつ増加させ、全域で溶接不可になるような条件まで実験を行った。

2-4-2 レーザ照射の位置決め方法

レーザ照射の位置決めには、レーザ発振器に装備されている赤色のガイドレーザである He-Ne レーザを利用した。Fig.2-8 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後ろに透過する。そこで、Fig.2-5 に示したレーザ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所を突合せ部とした。しかし、この He-Ne レーザの照射位置と実際のレーザ照射位置は微小なずれが存在するため、以下の予備実験により、実際のレーザ照射位置と突合せ部が一致する基準点を求めた。

レーザ出力	．．．	1kW
レンズ焦点距離	．．．	127mm
焦点はずし距離	．．．	± 0 mm
レーザが照射されてから		
スライダが動き出すまでの時間	．．．	0.5sec
溶接長	．．．	90mm
溶接速度	．．．	80mm/s
溶接姿勢	．．．	横向、立向
溶接方向	．．．	右進（横向溶接）、上進（立向溶接）

ここでは、溶接速度を 80mm/s とし、溶接長を 90mm とした。Fig.2-9 に、溶接後の試験片の外観、及びその拡大写真の例をそれぞれ示す。溶接長を 90mm とし、試験片の端を残したので、両端には開先が溶接されずに残っており、この開先からビードの中心部までの距離を Δ とした。レーザ照射位置を 0.1mm ずつ変化させて溶接を行うことにより、 Δ の値を測定した。横向溶接時に現れる鉛直方向の差を Δ_v 、立向溶接時に現れる水平方向の差を Δ_h と

したとき，これらの測定結果を Fig.2-10 に示す．これより，それぞれの差が最も小さくなる箇所は，横向溶接では実際の He-Ne レーザ照射位置より +0.7mm ずらした箇所，立向溶接では -0.3mm ずらした箇所であった．よって，この箇所を突合せ部の基準点，つまり $\delta = \pm 0\text{mm}$ とした．

2-5 実験条件

本研究では，溶接速度及び溶接姿勢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．実験条件を以下にまとめて示す．

レーザ出力	．．．	1kW
レンズ焦点距離	．．．	127mm
焦点はずし距離	．．．	$\pm 0\text{mm}$
レーザが照射されてから		
スライダが動き出すまでの時間	．．．	0.5sec
レーザ照射位置のずらし量 δ	．．．	最大で $\delta = -1.2\text{mm} \sim +1.0\text{mm}$ まで
溶接長	．．．	試験片の端 100mm
溶接速度	．．．	20~80mm/s
溶接姿勢	．．．	横向，立向
溶接方向	．．．	右進（横向溶接），上進または下進（立向溶接）

溶接姿勢については，水平方向に溶接線が走る横向溶接，鉛直方向に溶接線が走る立向溶接の２種類で行った．横向については，右進溶接で行い，立向については上進溶接及び下進溶接の両方を行った．

2-6 レーザのスポット径

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⁽⁵⁾．

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

λ :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、本実験で用いた値をそれぞれ代入すると($\lambda=10.6\mu\text{m}$, $f=127\text{mm}$, $D=20\text{mm}$), $d_0 \approx 0.16\text{mm}$ と求まるが、これはあ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、溶込みがみられた箇所や、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#320～#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．これらを常温の 35% HCl 溶液に 1 時間程浸してエッチングした．

2-7-2 ビード幅及びビード断面積の測定方法

2-7-2-1 ビード幅の測定方法

ビード断面からビード幅，及びビード断面積を測定するため，本研究では Fig.2-2 で示した，光学顕微鏡（ニコン社製 MHS 2×2）と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，ビード幅の 2 次元座標を測定した．このビード幅の測定法を Fig.2-11 に示す．ビード幅はそれぞれ断面の上部と下部（レーザ照射側の試験片表側及び裏側に当たる）で測定した．

溶接の熱ひずみによる板幅の収縮を測定したところ，溶接前後で 0.05mm 以下と微小であった．また，供試材の幅 10mm についても，溶接前に測定した所，そのばらつきは 0.01mm 程度であったため，本研究では，溶接前の突合せ部の位置として，溶接後の試験片の全幅の長さを測定し，その中心値を溶接前に突合せ部が存在した箇所とし，撮影した断面写真に中心線を引いた．

また，この溶接前に突合せ部が存在した箇所と，表側と裏側のビード幅の中心位置との差を d として定義した．ここで， d は δ の正負の方向と一致させており，その差が正側に生じるときは正で表わし，反対に負側にその差が生じるときは，負で表わしている．

2-7-2-2 ビード断面積の測定方法

ビード断面積の計測は，Fig.2-12 で示すように，ビード断面を溶接部が存在した箇所で二分し，試験片裏側から試験片表面まで，板厚方向に 0.1mm 刻みにビードの輪郭を測定する．それらを板厚方向に 0.1mm 毎に台形近似した面積 $s_{p1} \sim s_{p8}$ ， $s_{m1} \sim s_{m8}$ のうち， δ の＋側に当たる面積 $s_{p1} \sim s_{p8}$ の和を S_p ， δ 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．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にて近似を行い，その値を測定した．

2-7-3 引張試験方法

全面で完全溶込みが可能であった試験片のうち，溶接姿勢が横向姿勢で， δ を＋側に増加させた試験片の条件のものについて，継手強度を測定するために，継手の引張試験を行った．本研究では引張試験機として，島津製作所製 Auto Graph AG-10TC を使用した．Fig.2-13 にこの概略図を示す．本装置は試験片取り付け部，引張負荷装置部および制御部から成り立っており，試験片取り付け部に 5mm 幅に切り出した試験片を取り付け，引張試験を行った．その際に生じる荷重はロードセルにより測定され，そのデータは PC に取り込まれる．

2-8 ビードオンプレート溶接方法

本研究では，溶接姿勢がビード幅及びビード断面積にもたらす影響を検討するために，レーザによるビードオンプレート溶接も行った．

実験条件は 2-4 で示した条件と同じであり，同じ供試材を用いて，供試材の中心部にレーザを照射し，ビードオンプレート溶接した．このときの図を Fig.2-14 に示す．溶接姿勢及び方向は，横向姿勢は右進溶接，立向姿勢は上進溶接及び下進溶接とした．

2-9 熱サイクルの測定

δ を変化させたときに，2 枚の各供試材の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に，熱電対による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．

レーザ出力 . . . 1kW

レンズ焦点距離	・・・	127mm
焦点はずし距離	・・・	±0mm
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	・・・	20,40mm/s
溶接長	・・・	100mm
溶接姿勢及び溶接方向	・・・	横向姿勢（右進溶接）
ずらし量 δ	・・・	溶接速度 20mm/s のとき $\delta = -1.2 \sim +1.0\text{mm}$ まで 溶接速度 40mm/s のとき $+0.2\text{mm}, 0\text{mm}, -0.2\text{mm}$

熱電対の取り付け位置・・・突合せ部から約 3mm, 4mm, 5mm 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、2 枚の供試材にそれぞれパークッション溶接機を用いて、計 6 つ溶接した。この熱電対の取り付け位置を Fig.2-15 に示す。あらかじめ取り付け位置をハイトゲージでけがき、その位置を狙って熱電対を取り付けたが、その位置が約 0.5mm 以内で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、取り付け位置と突合せ部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 突合せレーザー溶接部の形成に及ぼす照射位置のずれの影響

3-1 溶込み状態による溶接部分類

各溶接条件により作製した試験片のビード外観及びビード断面を観察することにより、溶接部の溶込み状態を調査し、以下の3つにその溶接条件を分類した。

- (1)溶接長全域で完全溶込みが可能であった条件（適正な溶接条件）
- (2)溶接長の一部で溶接欠陥が発生した条件
- (3)溶接長全域で溶接不可であった条件

本研究では以下、(1)を○、(2)を△、(3)を×の溶接条件とそれぞれ定義する。ここで、これらのビード外観及びビード断面の例を Fig.3-1 にそれぞれ示す。○の条件では、ビード外観及びビード断面に溶接欠陥は見られず、試験片の板厚全ての領域に渡って溶込みが得られている。△の条件では溶接欠陥が確認され、突合せ部の一方の板材が溶融せず一部残ったままとなり、ビード外観に穴あきが見られ、溶融部が板幅方向に膨張して一時的に溶接がなされる箇所と、穴が空く箇所とが交互に繰り返される。×の条件では、供試材の一方のみしか溶融せず、溶接長全域に渡って溶接が不可能であった。また、 δ の値を増加させると○、△及び×の溶接条件が順次現れた。

3-2 各溶接姿勢における適正な溶接条件

上記の分類に沿った、各溶接姿勢における適正溶接条件を Fig.3-2~3 に示す。Fig.3-2 は横向姿勢のときの、Fig.3-3 は立向姿勢の上進・下進溶接の結果をそれぞれ示しており、立向姿勢では、上進・下進溶接の結果が同じとなった。

いずれの溶接姿勢においても、溶接速度が増加すると、適正な溶接条件である○の領域は狭まる傾向にあり、各溶接速度における○の溶接条件となる限界値(δ とする)は減少した。また、溶接欠陥が発生する△の条件は、溶接速度が 20mm/s と入熱が大きいとき、その範囲は最も広くなったが、溶接速

度が増加し、入熱量が減少するにつれて徐々に狭まった。

全域で溶接不可である×の条件があらわれたのは、横向姿勢のとき、溶接速度 20mm/s で $\delta = 0.9\text{mm}$, -1.2mm であり、40mm/s で $\delta = 0.6\text{mm}$, -0.7mm , 60mm/s では $\delta = 0.4\text{mm}$, -0.5mm , 80mm/s では $\delta = 0.3\text{mm}$, -0.4mm であった。また、立向姿勢のとき、溶接速度 20mm/s で $\delta = 1.0\text{mm}$, 40mm/s で $\delta = 0.6\text{mm}$, 60mm/s 及び 80mm/s では $\delta = 0.4\text{mm}$ であった。

各溶接速度において全域で完全溶込み可能な δ の限界値 δ_c は、横向姿勢において、溶接速度が 20 及び 40mm/s のとき、+側でそれぞれ $\delta_c = +0.2\text{mm}$, -側で $\delta_c = -0.4\text{mm}$ であり、溶接速度が 60mm/s のときは、それぞれ $\delta_c = +0.1\text{mm}$, -0.3mm , 80mm/s では、 δ_c は $+0.1\text{mm}$, -0.2mm であった。

立向姿勢の上進・下進溶接の場合は、溶接速度が 20 及び 40mm/s のとき $\delta_c = 0.3\text{mm}$, 溶接速度が 60 及び 80mm/s の場合は $\delta_c = 0.2\text{mm}$ であった。

溶接速度の増加により、各溶接速度における δ の限界値 δ_c が減少するのは、溶接速度が増加すると、入熱量が減少をするためであると考えられる。

3-3 ビード幅の測定結果

前述の適正な溶接条件である○の条件で溶接した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。これらを溶接姿勢毎にまとめた図を Fig.3-4~9 にそれぞれ示す。なお、△の溶接条件になると、ビード幅は、板厚方向に溶融部が膨張し、楕円形や球形に近いビード断面になるものが現れ、表面及び裏面のビード幅の測定が不可能になるため、ビード幅の測定は○の溶接条件でのみ行った。

ここで、Fig.3-4,6,8 はそれぞれの溶接速度におけるビード幅を示し、Fig.3-5,7,9 には、溶接前の突合せ部の位置とビード幅の中心位置との差を d とし、これを示した。また、Fig.3-4~Fig.3-5 が横向姿勢時で、Fig.3-6,7 が立向上進溶接、Fig.3-8,9 が立向下進溶接の測定結果を示している。

δ を増加させていくと、 d も増加を示すが、ビード幅は δ によらずおおよそ一定である。また、表側と裏側のビード幅を比較した場合、いずれの溶接姿勢においても、溶接速度が 20,40mm/s と低速のとき、ビード幅は表側と裏

側であり差はみられずほぼ同じか、もしくは裏側の方が若干狭くなった。溶接速度を増加させると、表側と裏側のビード幅の差は増加した。これは溶接速度を増加させることで、入熱量が減少し、熔融金属が減少したためであると考えられる。

3-4 ビード断面積の測定結果

ビード断面より、 δ が+側のビード断面積 S_p 、 δ が-側のビード断面積 S_m 、及びこれらの和である全体のビード断面積 S をそれぞれ測定した結果を、溶接姿勢別に、Fig.3-10~Fig.3-13 に示す。Fig.3-10,11 が横向溶接で、Fig.3-12 が立向上進、Fig.3-13 が立向下進溶接のときのデータをそれぞれ示している。ここで、△の条件のものについては、溶接された箇所を選び、そこを切り出して測定した。どの溶接姿勢においても $\delta = 0$ において、 S_p 及び S_m の断面積差はごくわずかであり、ほぼ均等に二枚の板が熔融していることが分かった。また、 δ の絶対値を増加させると、 δ を+側へと増加させた場合では、+側の断面積 S_p が増加をし、逆に-側の断面積 S_m は減少を示す。同様に、 δ を-側へと増加させた場合では、-側にある断面積 S_m が増加をし、 S_p は減少を示す。つまり、 δ を増加させると、増加させた δ と同じ側の断面積が増加をし、増加させた δ に対して、反対側の断面積は減少をすることが示された。また、△の溶接条件で測定された S は、増加させた δ 側にある S_p 及び S_m の断面積が S のほとんどを占めており、増加させた δ 側とは反対側の断面積は極めてわずかであることが示された。

次に、各溶接姿勢において、 δ の変化による全体のビード断面積 S の変化についてまとめた図を Fig.3-14,15 に示す。Fig.3-14 は横向溶接で、Fig.3-15(a) は立向上進溶接を、Fig.3-15(b) は立向下進溶接のときのデータをそれぞれ示している。

いずれの溶接姿勢においても、○の溶接条件内では、+側及び-側の断面積 S_p 及び S_m は、前述したように、 δ が変化するにつれ増減をしていたが、全体のビード断面積 S としては大きな変化がみられなかった。これは、○の溶接条件であれば、突合せ部からレーザの照射位置をずらしたとき、それぞれ

+側及び-側の板が溶融する比率は変化するが、ビード断面積全体としてはあまり変化がないことが分かった。

一方、 Δ の範囲内にある条件のビード断面積をみると、 \circ のときと比べ、ビード断面積は増加している。 Δ の溶接条件は、前述のように、ビードが不安定になり、溶融部が板幅方向に膨張して一時的に溶接がなされる箇所と、穴が空く箇所とが交互に繰り返される箇所がある。これは、溶融した液体金属の表面張力により、この一時的に溶接がなされる箇所に付近の溶融金属が移動したために、溶接なされた箇所はビード断面積が一時的に大きくなったと考えられる。逆に、それ以外の箇所では溶融金属が移動してしまったために、穴が空いてしまったと思われる。この Δ の条件において、一時的に溶接がなされた箇所の断面積が大きくなる傾向は、いずれの溶接姿勢においても、溶接速度が遅い場合に特に顕著であった。これは、入熱が大きいため、より多くの金属が溶融金属となり、これが周期的に凝集するからであると考えられる。一方、溶接速度が速い場合は、 Δ の範囲では、 δ の絶対値が増加すると断面積が若干増加するものの、入熱が小さく溶融金属が少なく、表面張力で集まる溶融金属も少ないためか、溶接速度が低い場合と比べて急激な増加とはならなかった。

また、 Δ の条件内においても、 δ の絶対値が大きくなり、より \times 側の条件に近づくにつれて、ビード断面積は増加した。 δ の絶対値を大きくすることで供試材の片側により入熱が偏り、溶融金属が増えるために断面積が増加していくのではないかと推測される。

次に、全体のビード断面積中に占める δ が+側の断面積の割合を各溶接姿勢毎に Fig.3-16~Fig.3-17 に示す。 δ の値を大きくすることで、全体のビード断面積に占める δ が+側の断面積の割合は増加した。また、 δ の限界値は、その割合が80%前後になるときであることが分かった。

3-5 溶接姿勢がビード幅及びビード断面積に及ぼす影響

溶接姿勢が、ビード幅及びビード断面積にもたらす影響を検討するために、 $\delta = 0$ のときのビード幅、及びビード断面積を溶接姿勢毎にまとめた図を

Fig.3-18~19 に示す。また、ビードオンプレート溶接でも同様にして溶接姿勢を変えて実験を行い、そのビード幅及びビード断面を測定した。その結果を、Fig.3-20~21 に示す。Fig.3-18,19 に見られるように、突合せ溶接時にはビード幅及びビード断面積に若干の差があるもののその差は小さく、ビードオンプレート溶接時にはビード幅、ビード断面積の溶接姿勢による差はほとんどないことが分かった。

溶接姿勢による影響を考えると、横向溶接では、溶融金属が溶接方向に対して下向きに重力を受け、立向下進溶接では溶融金属が溶接方向と同じ向きに重力を受けるため、ビード幅が広くなることが考えられる。しかし、本実験では供試材の板厚が 0.8mm と小さいため、溶融金属が少なく、溶接姿勢の違いがビード幅やビード断面積に及ぼす影響は少ないと考えられる。

また、前述のように、突合せ溶接の際の溶接姿勢によるビード幅及びビード断面積の差は、供試材のだれの影響や突合せ部に存在する、微小ギャップの影響によるものであると思われる。

3-6 ビードオンプレート溶接との比較

突合せ溶接時で $\delta = 0$ のときのビード幅及びビード断面積と、ビードオンプレート溶接のときのそれらをそれぞれ比較した図を Fig.3-22~3-23 に示す。ビード幅について示した図が Fig.3-22 で、ビード断面積について示した図が Fig.3-23 である。いずれの溶接姿勢でも、ビード幅については突合せ溶接とビードオンプレート溶接の間ではあまり差が見られない。一方、ビード断面積については、ビードオンプレート溶接に比べ、突合せ溶接の方が小さいことが分かった。これもまた、突合せ部に存在する微小ギャップ及び、シャーリング加工によるだれの影響によるものであると考えられる。

3-7 引張試験

レーザ照射位置のずれが継手強度に及ぼす影響について検討するために、全域で完全溶込みが可能であった○の溶接条件のうち、横向姿勢で δ を+側に

ずらして溶接した試験片について引張試験を行い、その最大引張強さを測定した結果を Fig.3-24(a)に示す。いずれの溶接速度においても、最大引張強さはほぼ 600MPa 付近であることが確認された。また δ の値が増加しても、最大引張強さに大きな変化は見られず、全域で完全溶込みが可能な条件であれば、 δ が継手強度にもたらす影響は少ないと考えられる。

次に、破断箇所を推定するために、破断面の写真の一例を Fig.3-(b)に示す。いずれの試験片も、このように溶接金属中で破断していることが確認された。本実験では前述のように、I 型突合せ継手で溶接されており、ビードに微小なアンダーフィルが存在した。このアンダーフィルは当初存在した突合せ部付近に生じており、この箇所で応力集中がおき、破断に至ったと考えられる。また、本試験で用いた引張試験片の幅が 4mm と非常に小さく、引張試験機のチャックでビードから 5mm の位置近くまで掴む必要があったため、溶接部にとって厳しい試験であったこともこの結果に影響していると思われる。

引張試験は、上記の条件の試験片のみにしか行っていないが、全域で完全溶込みした条件であれば、横向姿勢で δ を一側にずらしたものでも、立向上進および下進溶接であっても、同様の結果になるのではないかと考えられる。

3-8 ビード外観及び断面写真

本章の最後に、ビード外観の観察で用いたビード外観写真、及びビード断面の観察で用いたビード断面写真のうち、主要なものを Fig.3-25~40 に示す。Fig.3-25~32 がビードの外観の一例を示しており、Fig.3-33~40 がビード断面の一例を示している。ビード断面については、溶接条件が○のものには、当初存在した突合せ部の位置を点線で示している。また溶接条件が△のものでは、一時的に溶接がなされた箇所、もしくは溶接されなかった箇所のいずれかを掲載した。

第4章 熱サイクルの測定と考察

4-1 熱サイクルの測定

前章のビード断面の測定結果より，突合せ部からレーザをずらして照射することで，2枚の供試材間でビードの断面積比率が変化することが確認された．これは， δ を変化させることで，2枚の供試材間で入熱比率が変化したためであると推測される．そこで，本章は δ を変化させたときに，2枚の各供試材の熱サイクルにどのような変化が生じるかを確認し，突合せ溶接部にけるレーザ照射位置のずれの影響について検討するために，熱電対による溶接中の熱サイクルを測定した．実験条件等は2-10に示した通りである．

4-2 熱サイクルの測定結果

Fig.4-1~Fig.4-15 に，実験により得られた熱サイクルを示す．Fig.4-1~Fig.4-12が溶接速度20mm/sで，Fig.4-13~15が40mm/sのときであり，(a)は供試材の δ が+側の板の熱サイクルを，(b)は δ が-側の板の熱サイクルを示す．

その熱サイクルはいずれも，取り付けた熱電対に熱源が近づくにつれ，供試材表面の温度は急激に増加し，熱源が最も近づいたときに最高温度に到達した．また熱源が遠ざかった後は，緩やかに低下した．また，どの条件においても，突合せ部に最も近い位置に取り付けた熱電対がその板の中で最も高い温度を示し，逆に最も離れているものが低い温度を示しているのが分かる．これは突合せ部に近いほど熱源に近いためである．

温度勾配は熱源に近づくにつれ急になるため，取り付けられた熱電対は，突合せ部からの距離が近い方がより温度が上昇した．例えば，Fig.4-1の $\delta=0\text{mm}$ のとき， δ が+側に取り付けた熱電対のうち，突合せ部からの距離が2.3mmのものは800℃付近まで温度が上昇しているが， δ が-側の突合せ部からの距離が2.9mmのものは600℃付近までしか上昇していない．これらは，熱電対の取り付け位置までの距離に，突合せ部から0.6mm程度の差があり，

この差によって 200°C 近い温度の差が出ていると考えられる。逆に熱源から離れるに従い、温度勾配は緩やかになるため、突合せ部から遠い側にある熱電対は、その取り付け位置の差による温度差も少なくなった。Fig.4-1 中で、突合せ部から最も遠い熱電対が記録した温度は、上板で 350°C 程度、下板で 300°C 程度であり、これらの熱電対はそれぞれ突合せ部から 4.9mm , 4.4mm に設置されていた。つまり、突合せ部からの距離の差は 0.5mm 程度あるが、測定された最高温度の差は 50°C と、前述の 200°C と比較すると小さくなった。

次に、これらの結果から求めた、各熱電対の突合せ部からの距離とその位置で記録された最高到達温度との関係を Fig.4-16~Fig.4-23 に示す。この図には、熱源位置、つまりレーザーのスポット径が突合せ部からどの位置にあるかを推定し、また δ を変化させることでこの熱源位置がどのように変化するか調べるために、各供試材温度で測定された 3 点の最高到達温度を指数関数で近似した曲線を共に示した。ここで、本実験は突合せ溶接のため、突合せ部に存在する微小なギャップが熱伝導的の障壁となることが予測されるが、この近似曲線ではその突合せ面による熱損失を無視した。

この 2 つの曲線の交点をみると、 δ が 0mm のとき、突合せ部付近にその交点が位置していることから、この曲線の交点付近に熱源が存在しているものと考えられ、実際の熱源の位置 ($\delta = 0\text{mm}$) と一致した。それぞれの曲線の交点が熱源の位置にあたると仮定すると、レーザー照射位置を突合せ部からずらしていくと、この交点の位置はずらした側の δ に移動することが分かる。また、 δ を増加させるにつれ、交点は突合せ部から徐々に遠ざかっており、レーザー照射位置を突合せ部からずらすことによる、熱源位置の移動と一致した。

また、2 枚の板を比較すると、照射位置をずらした側の板の最高到達温度が、より高くなることがわかり、この傾向は δ が増加することでより顕著になるため、照射位置をずらした側にある板に入熱が偏っていくことが確認できた。

この熱サイクルによって得られた実験結果を、 δ が \bigcirc , \triangle , \times にある溶接条件の中でそれぞれ比較すると、Fig.4-16, 19 に示すように、 \bigcirc の範囲においては、 δ を変化させたとき、 δ をずらした側の板へと入熱状態が若干の偏りを示すが、 \triangle や \times に比べればそれは顕著ではない。しかし、 δ が大きくなり、

△の溶接条件下に入ると、Fig.4-17,18,20,21 に示すように、この2枚の板における入熱の偏りは○に比べて顕著になり、特にずらした側の板にある熱電対のうち、最も突合せ部に近い箇所のは非常に高い温度を示した。特に、Fig.4-21 に示すように、 $\delta = -1.0\text{mm}$ では、熱電対の取り付け位置まで供試材が溶融したため、 1600°C 付近にまで温度が上昇したと考えられる。

×の溶接条件では、Fig.4-18,21 に示すように、照射位置をずらしたとは反対側にある板への入熱は、○、△のときと比べてかなり低く、ほとんど入熱していないことが分かる。また、 δ の絶対値が増加するにつれて、近似曲線より求まる交点は、実際の δ のずらし量と比べると、その差が広がる傾向にあり、×では、その交点は突合せ部から4mmと遙かに遠ざかってしまう。これは、2枚の供試材の間での熱の偏りが大きくなるためであると考えられる、

つまり、 δ を増加させていくことで、単に熱源が移動していくと理想的に考えたとき以上に、レーザー照射位置のずらし量 δ が2枚の供試材に与える入熱量への影響は非常に大きいことを示していると考えられる。

4-3 突合せレーザー溶接部の形成過程の推定

4-3-1 ガウス分布の近似によるレーザーのパワー密度分布

熱サイクルによる測定結果より、 δ を変化させていったときに、溶接部の形成にどのような差異が生じるかをここで推定し、考察する。

ここで理想的なレーザービームの強度がガウス分布で近似できるものと仮定し、そのパワー密度を考えると⁽⁶⁾、表面からの深さ z での強度 I は、

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z}$$

I_0 : 材料表面($z=0$)での強度

α : 材料内部の吸収係数

で表わされ、この近似にから、Fig.4-24 のように示される。パワー密度はこのレーザーのスポット径内に集中し、スポット径より離れると、パワー密度は極端に低下することが分かる。

4-3-2 ○の溶接条件のときの形成過程の推定

○の溶接条件の範囲においては，前述のようにレーザの照射位置をずらした側の板に入熱が若干偏りながらも，二枚の最高到達温度はほぼ同様となることが確認されている．従って，これはレーザのスポット径が2枚の供試材の両方に当たっていると予測される．レーザのスポット径が突合せ部から微小にずれている場合でも，レーザのスポット径内に突合せ部が含まれているため，このスポットから直接入熱が起こり，二枚の板が十分に溶融することにより，溶接されたと予測できる．

4-3-3 △の溶接条件のときの形成過程の推定

一方，ビードが不安定になり，局所的に溶融金属が膨張して2枚の板が溶け込んだ△の条件では，スポット径が片側の供試材にしか当たっておらず，スポット径内に突合せ部が含まれていない場合であると考えられる．スポットが片側の板にしか当たらないような位置までレーザ照射位置が突合せ部から外れているため，このスポットから入熱が起こると推定される．このとき，レーザが照射された側の板は突合せ部，つまり端面まで熱が伝わるが，突合せ部では微小なギャップが存在するため，これが熱伝導の障壁となってしまう．よって，この影響を受け，もう一方の板に熱は伝わるものの，その板はレーザ照射側にある板より幾らか減少して熱が伝わるため，供試材の融点まで温度上昇が起こらず，溶融しない．反対に，レーザ照射側にある板は端面まで溶融されるため，端面付近で溶融した金属は，熱源の移動に伴って，表面張力によりビード内のある箇所で凝集をし，逆に表面張力により溶融金属がなくなった箇所では大きく穴が空いてしまう．そして，この表面張力により溶融金属が局所的に凝集する箇所で，溶融金属が膨張することにより，もう一方の板に接触して熱が伝わる．すると，微量ではあるが，スポットが当たっていない板も溶込み，この箇所でのみ一時的に2枚の板が溶込んで接合されるのではないかと考えられ，このスポットがある側の板の溶融金属の体積は， δ が増加するにつれ片側の板に入熱が偏るために増加し，よって表面張

力に伴い一箇所凝集する溶融金属の体積もまた大きくなり、一時的に接合された膨張部分が大きくなったと思われる。同様にして、溶接速度の違いによっても、溶接速度が低い場合は、より入熱が大きいために、溶融金属の体積が溶接速度の高い場合と比べて大きくなり、 δ を増加させたときにこの Δ の条件が長く続くと思われる。

4-3-4 Xの溶接条件のときの形成過程の推定

さらに δ を増加させていくと、ある値で溶接長の全域でどの箇所も溶込まなくなるXの条件となる。実験結果では、2種類のXが存在していることが分かり、端面が溶融している場合としていない場合とがそれぞれ確認された。これは、レーザのスポットが突合せ部から大きく外れすぎているために、スポットがある側の板も端面が溶融せず、よって Δ のように表面張力によって凝集と離散を繰り返す溶融金属が形成されず、その溶融金属による熱伝導もないため、全面で溶接不可にいたったと推定される。この溶融金属が端面まで溶融しなかったものは、溶接速度が低い20mm/s, 40mm/sで多くみられている。

一方、溶接速度が高い場合では(60mm/s 及び 80mm/s)、スポットがある側の板でも、端面まで溶融するものの、Xの条件になっている。これは入熱が少ないために、端面が溶融していても溶融金属の体積は、溶接速度が低い場合に比べて小さく、凝縮する体積も小さいために、反対側の板に凝集し、接触するだけの溶融金属を得るにいたらなかったと推定される。

4-4 δ_c に関する考察

レーザ溶接部の形成過程の推定をもとに、 δ_c について考える。 δ_c は前述のモデルに沿って考えると、スポット径による影響が大きいと考えられる。溶接姿勢が横向のときの溶接速度と○の溶接条件であった δ の範囲との関係を Fig.4-25 に示す。溶接速度が増加するにつれ、この○の条件範囲は若干減少した。このことから○の条件範囲はスポット径だけに依存するわけではなく、

供試材に投入された入熱にも影響を受けていると考えられるが、溶接速度の変化に比べてこの○の範囲の減少は小さく、やはりレーザーのスポット径による影響が強いと考える。

δ_c は横向姿勢の+側と-側でその値がそれぞれ、 $\delta = +0.2\text{mm}, -0.4\text{mm}$ とその値にずれが生じている。これは、Fig.2-3 に示したように、突合せ部にシャーリング加工によるだれが生じており、このだれによる隙間を、溶融した金属が埋める形でビード断面が傾斜しているものがビード断面より観察されている。このシャーリングによる前加工の影響で突合せ部が厳密に平行ではないため、+側と-側で差が生じたと思われる。

第 5 章 結言

突合せレーザー溶接部の形成に及ぼす照射位置のずれの影響を検討した結果、以下の結論を得た。

- 1) 溶接長の全域で完全溶込みが得られる突合せ部からのレーザー照射位置のずらし量は、溶接速度を増加させると減少した。また、溶接長の全域で溶接可能な突合せ部からのレーザー照射位置の最大ずれ量は、横向姿勢で照射位置を鉛直下側にずらしたときで、最大 0.4mm まで全域で完全溶込みが得られた。
- 2) 溶接姿勢が横向のとき、溶接速度 20mm/s 及び 40mm/s では突合せ部からのレーザー照射位置のずれが鉛直上側では 0.2mm まで、鉛直下側では 0.4mm まで溶接長の全域で完全溶込み溶接が可能で、溶接速度 60mm/s では鉛直上側では 0.1mm、下側では 0.3mm まで、80mm/s では鉛直上側では 0.1mm、下側では 0.2mm まで全域で完全溶込み溶接が可能であった。
- 3) 溶接姿勢が立向のとき、溶接速度 20mm/s 及び 40mm/s では突合せ部からの照射位置のずれが 0.3mm まで溶接長の全域で完全溶込み溶接ができ、溶接速度 60mm/s 及び 80mm/s では 0.2mm まで全域で完全溶込み溶接が可能であり、上進・下進溶接で同一の結果となった。
- 4) 溶接長の全域で完全溶込みが得られる溶接条件においては、ビード幅、ビード断面積、及び継手強度の変化は少なく、照射位置のずれがそれらにあたえる影響は少ない。
- 5) 突合せ部からレーザー照射位置をずらしてレーザー突合せ溶接を行うことにより、2 枚の供試材の熱サイクルの変化を確認した。

参考文献

- 1)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
- 2)Loeffler,klaus ら:第 64 回レーザ加工学会論文集 2005,pp.1-16
- 3)王 静波ら:アルミニウム合金のフィラー・レーザ・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,
- 4)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
- 5)新井 武:レーザ加工の基礎工学,91,2007, 丸善
- 6)新井 武:レーザ加工の基礎工学,pp117-127,2007, 丸善

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．

Table 2-1 Chemical compositions of material used

(mass %)

Material	C	S i	M n	P	S	N i	C r
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 SUS304

Material	Specific heat capacity [J/kg · K]	Thermal conductivity [J/m · s · K]	Thermal diffusivity [m ² /s]	Melting point [°C]
SUS304	494	14.7	0.234	1499

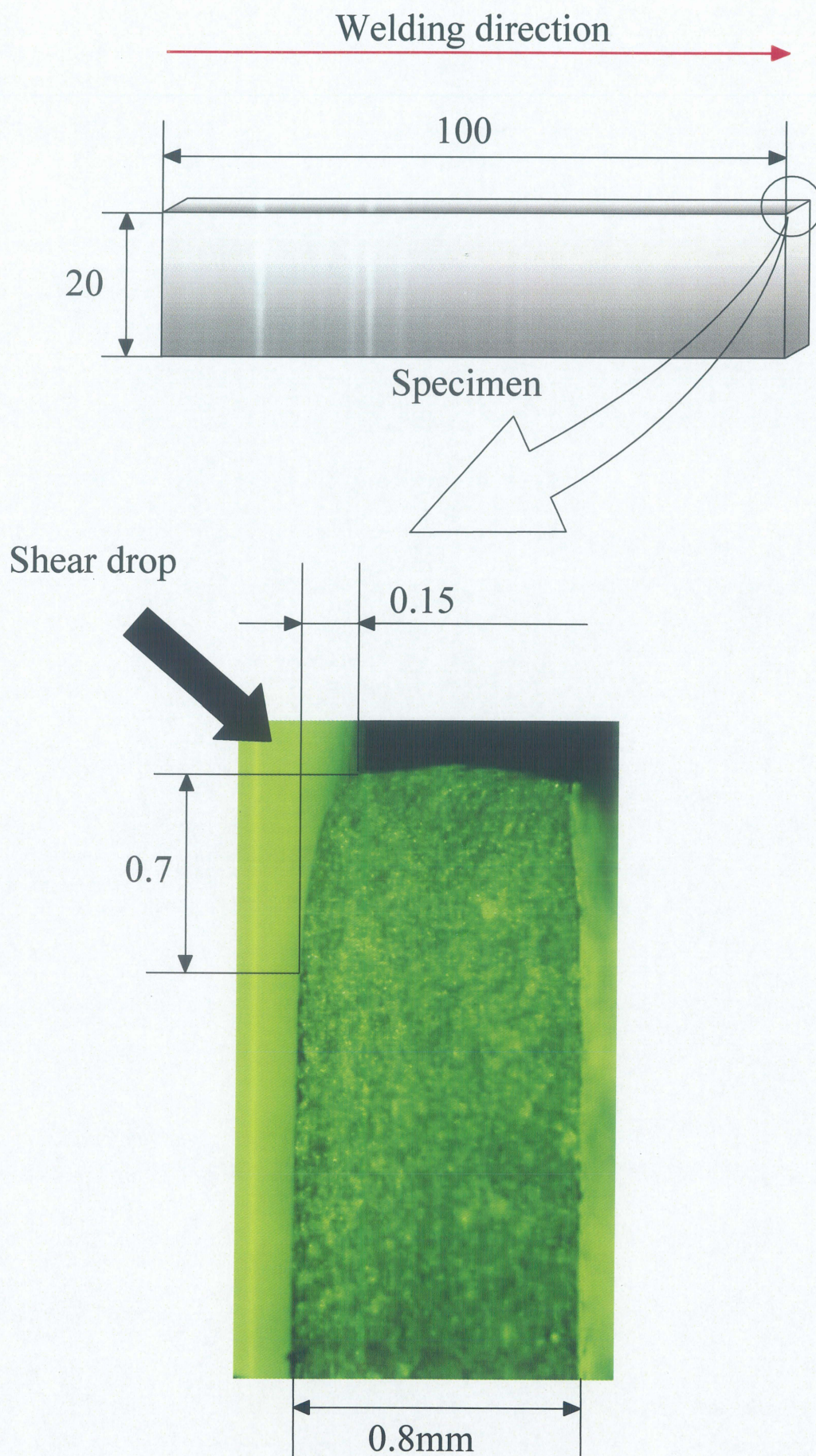


Fig.2-1 Cross-section of material used

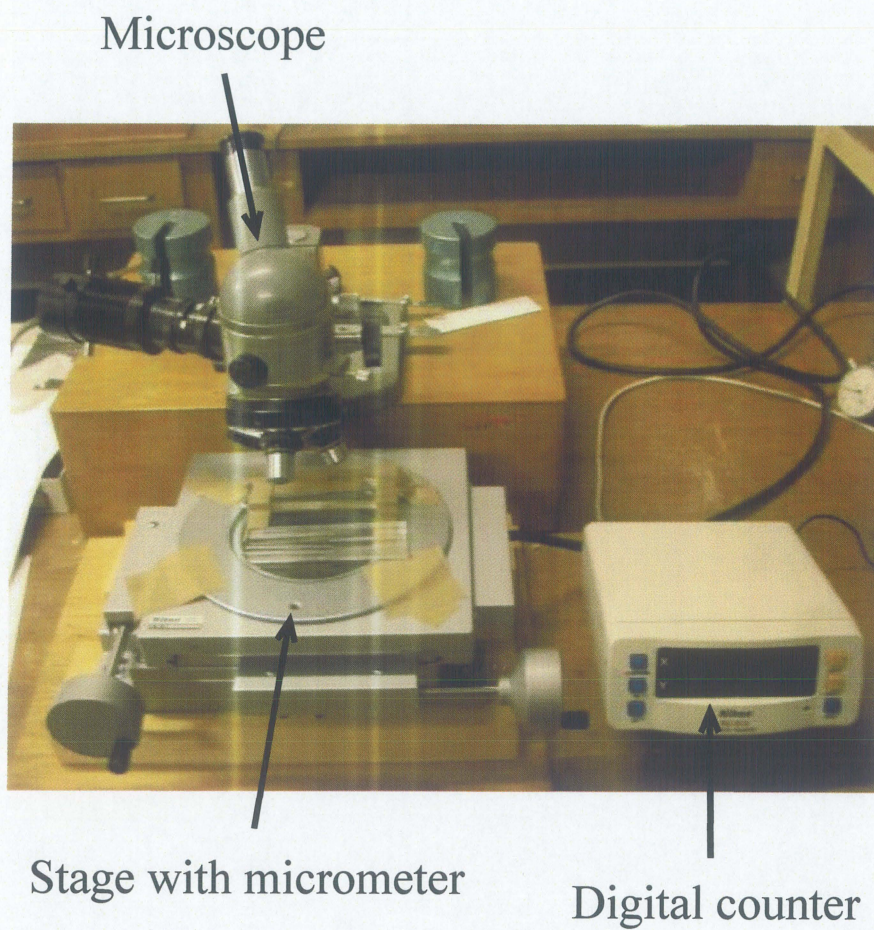


Fig.2-2 Appearance of measuring device

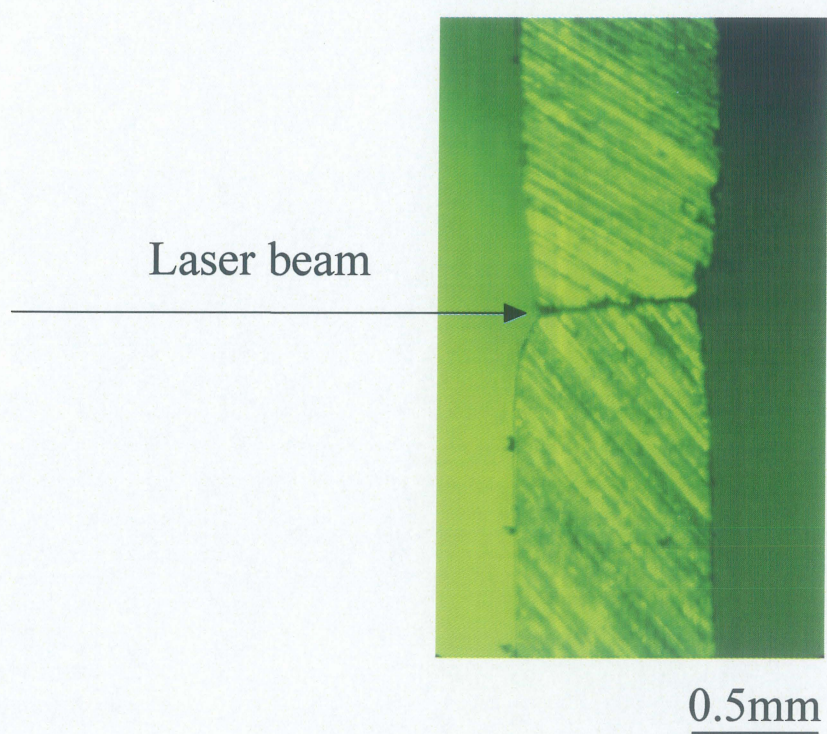
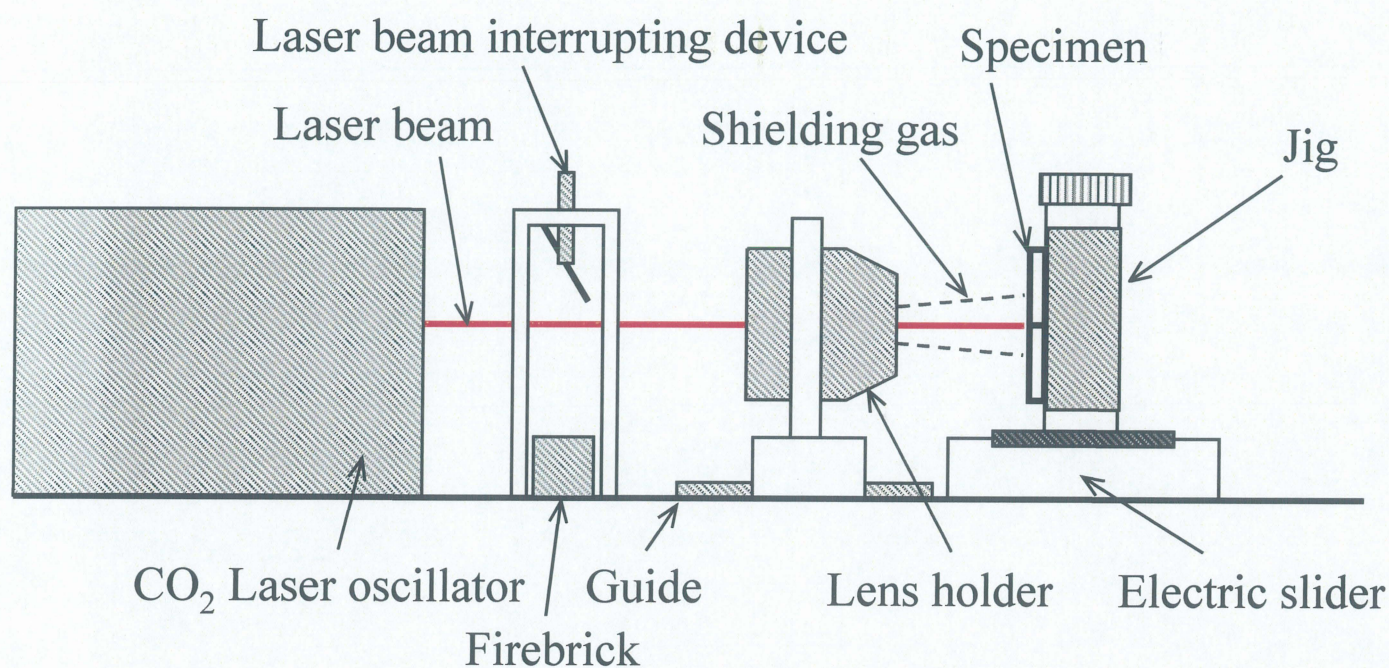
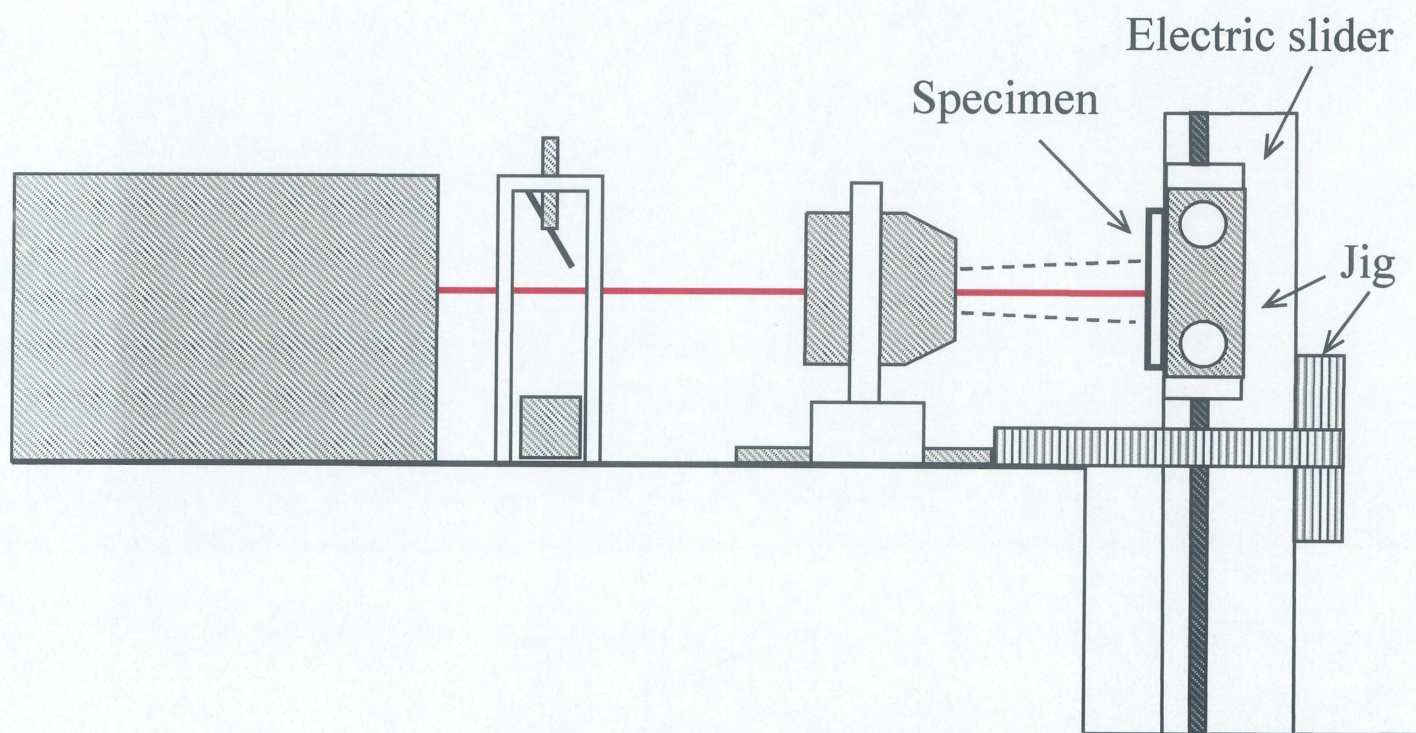


Fig.2-3 Cross-section of butt joint

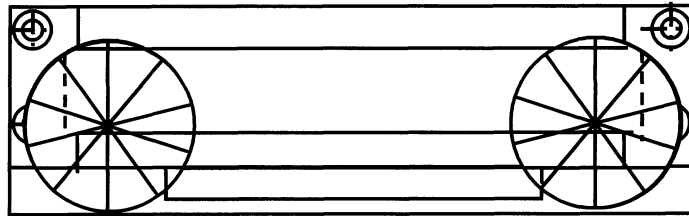


(a) Horizontal welding

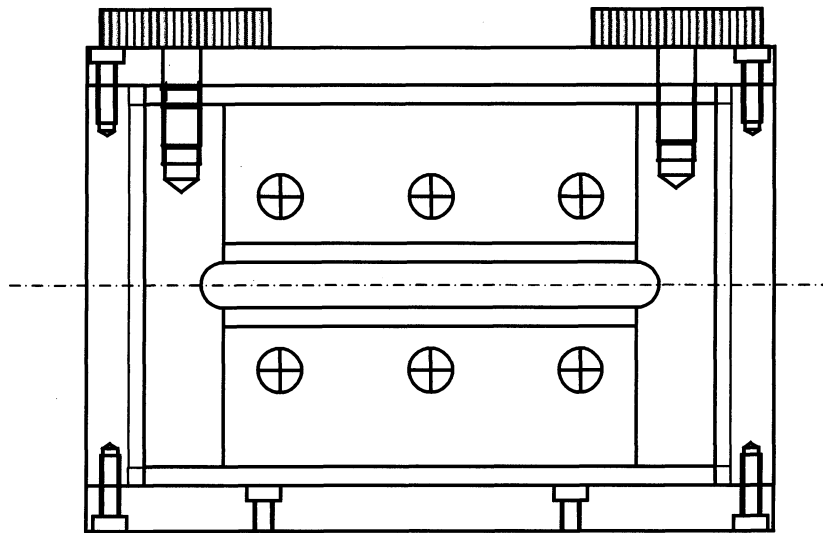


(b) Vertical welding

Fig.2-4 Schematic diagram of laser welding equipments



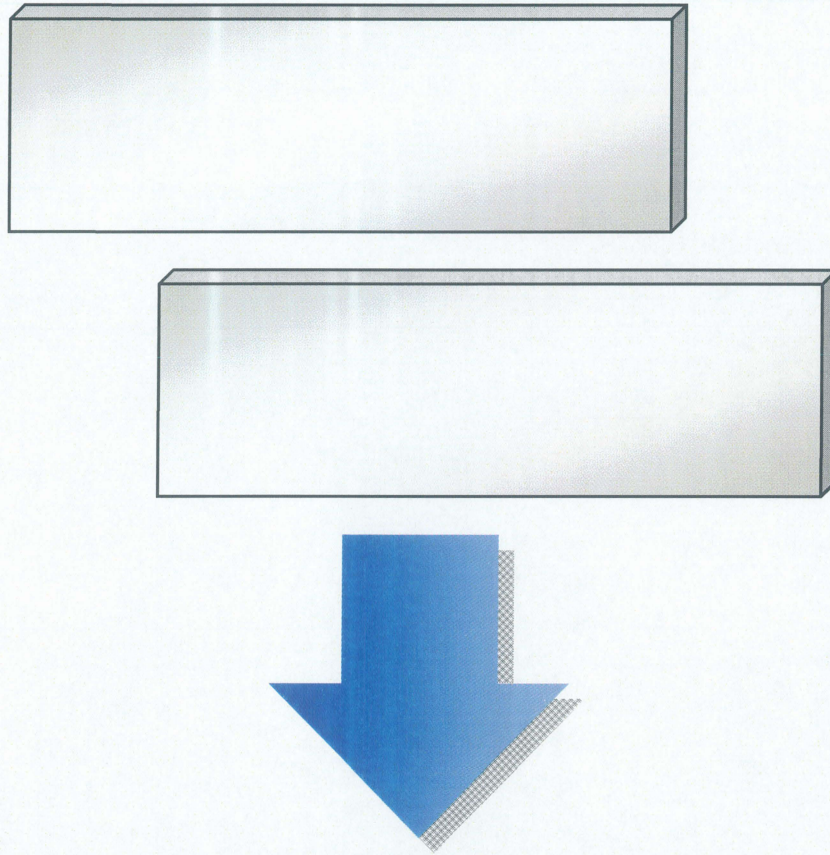
(a) Top view



(b) Front view

Fig.2-5 Schematic drawing of jig for laser butt welding

SUS304 plates



Laser irradiated line (weld line)

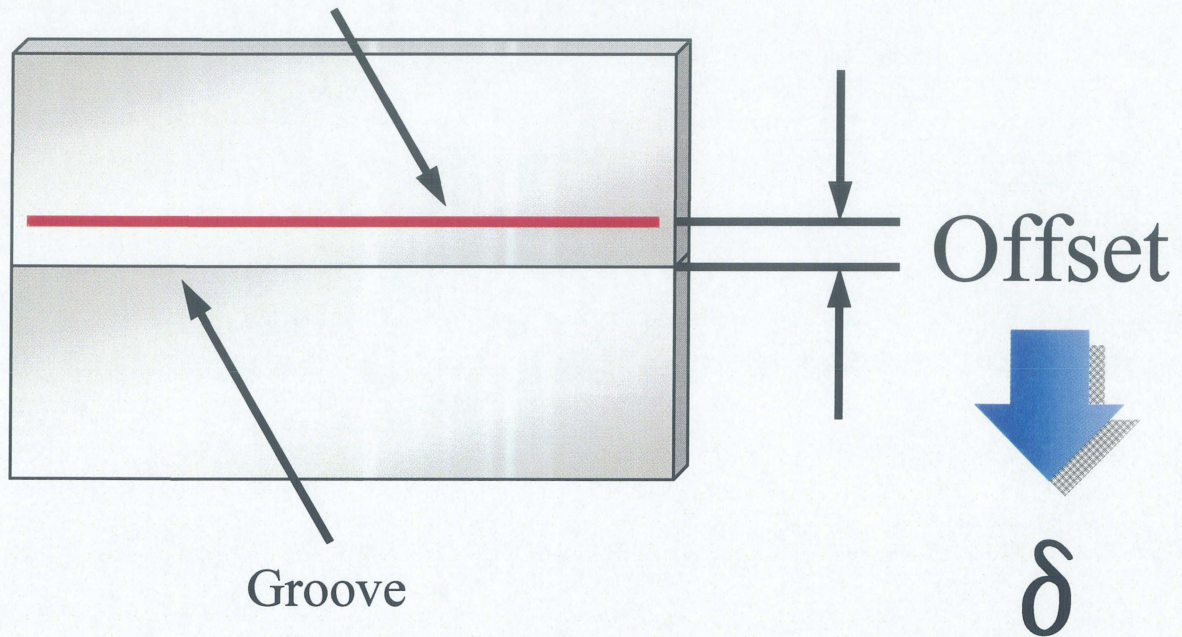
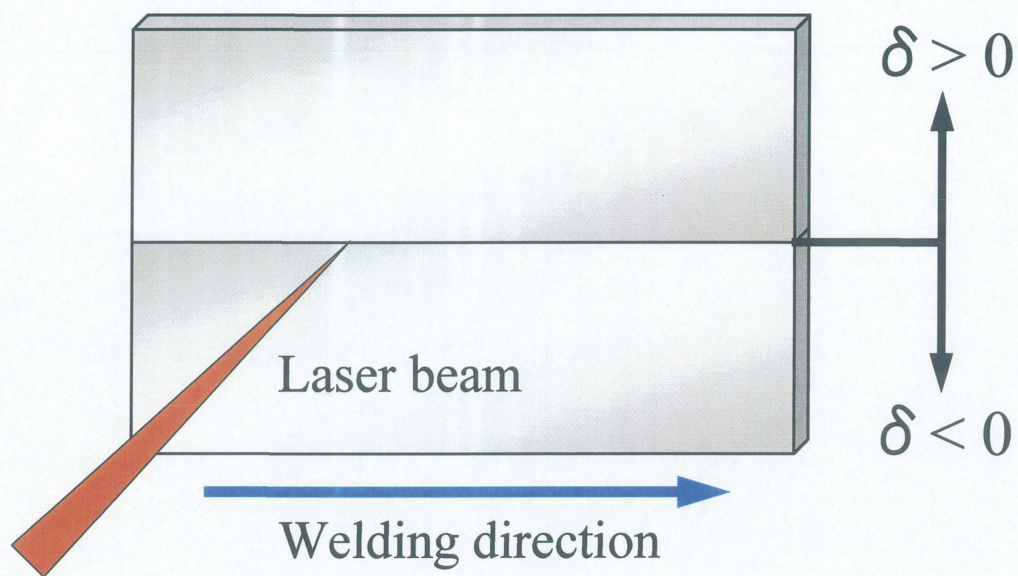
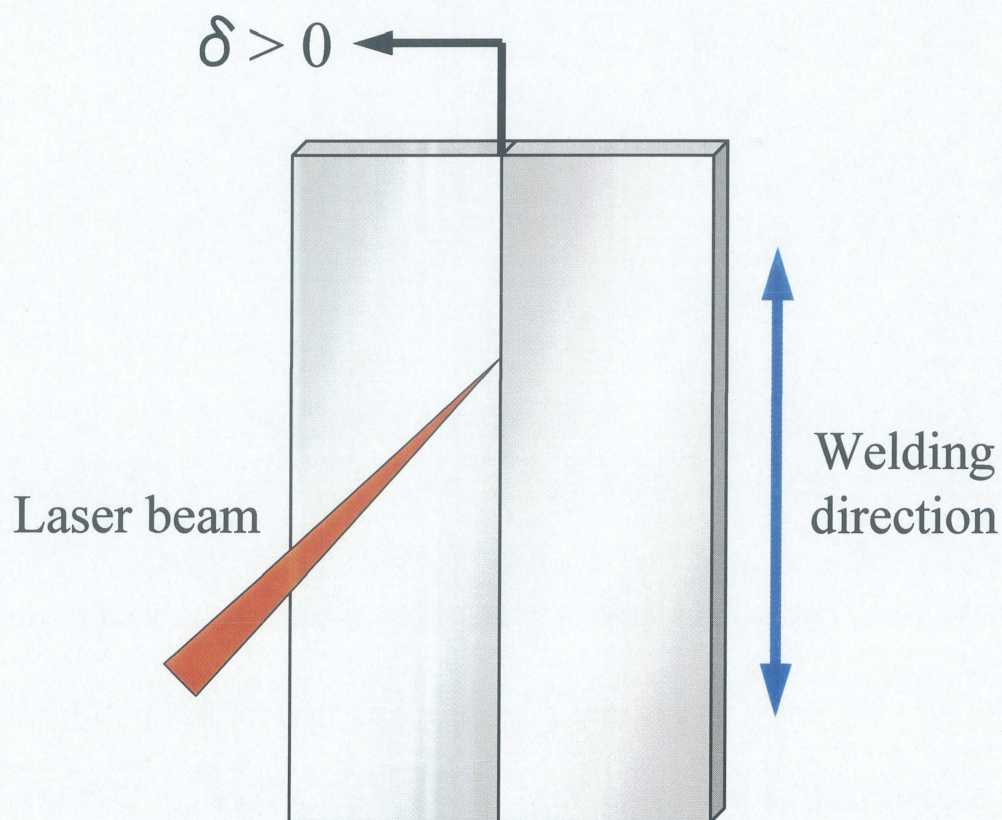


Fig.2-6 Definition of offset; δ



(a) Horizontal welding



(b) Vertical welding

Fig.2-7 Definition of offset direction

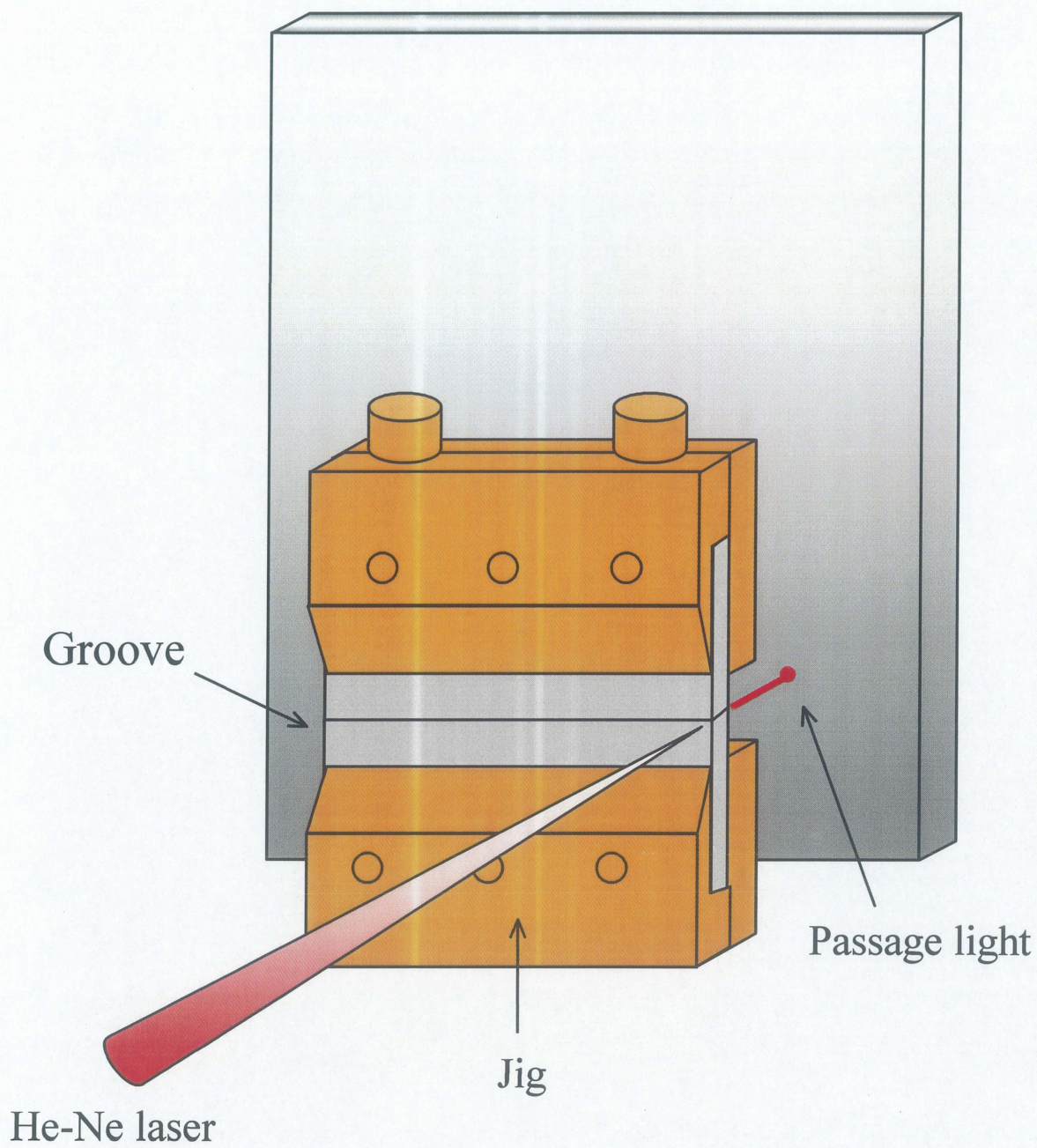
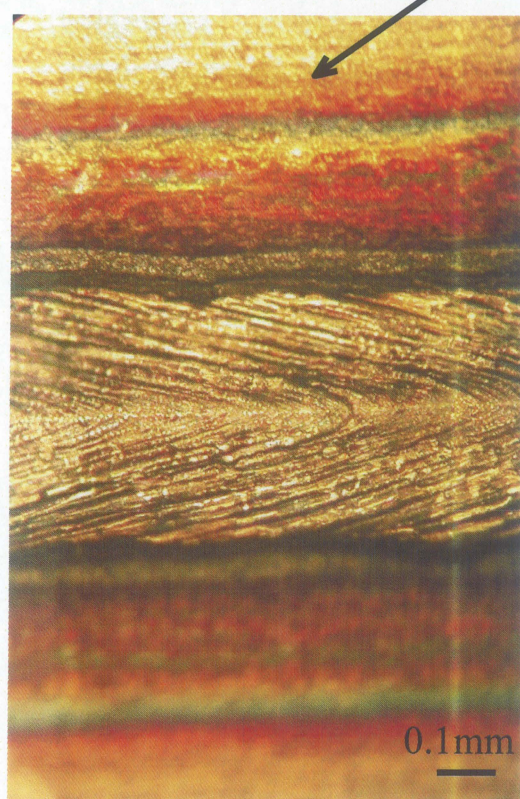


Fig.2-8 Schematic diagram of experimental set-up

(a) Appearance of laser butt welded specimen

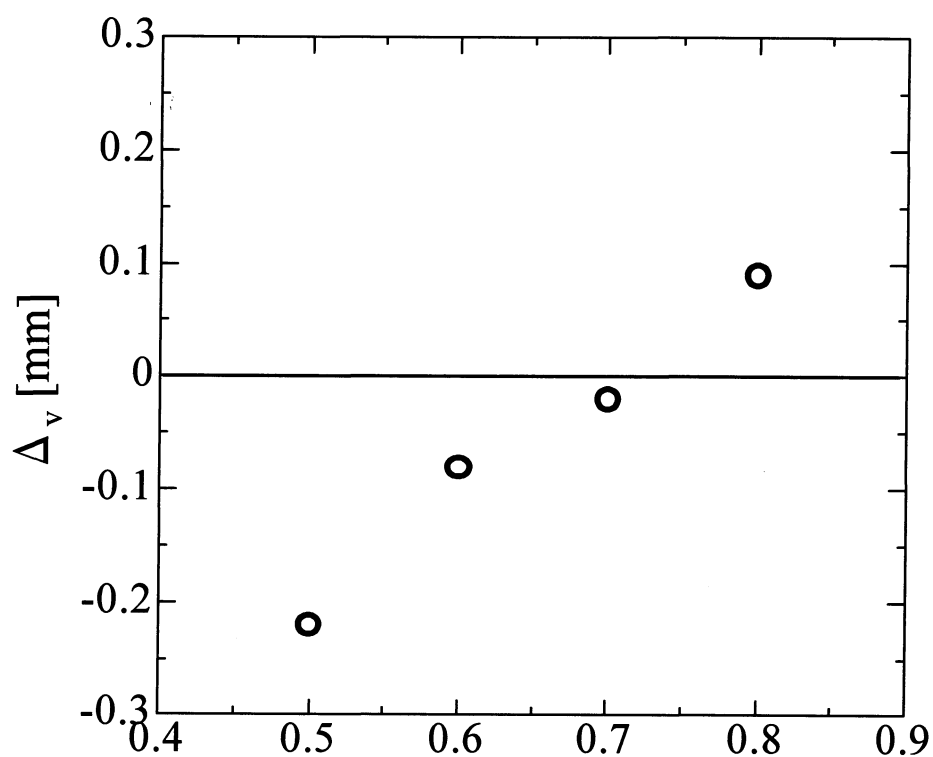


(b) Appearance of weld at high magnification

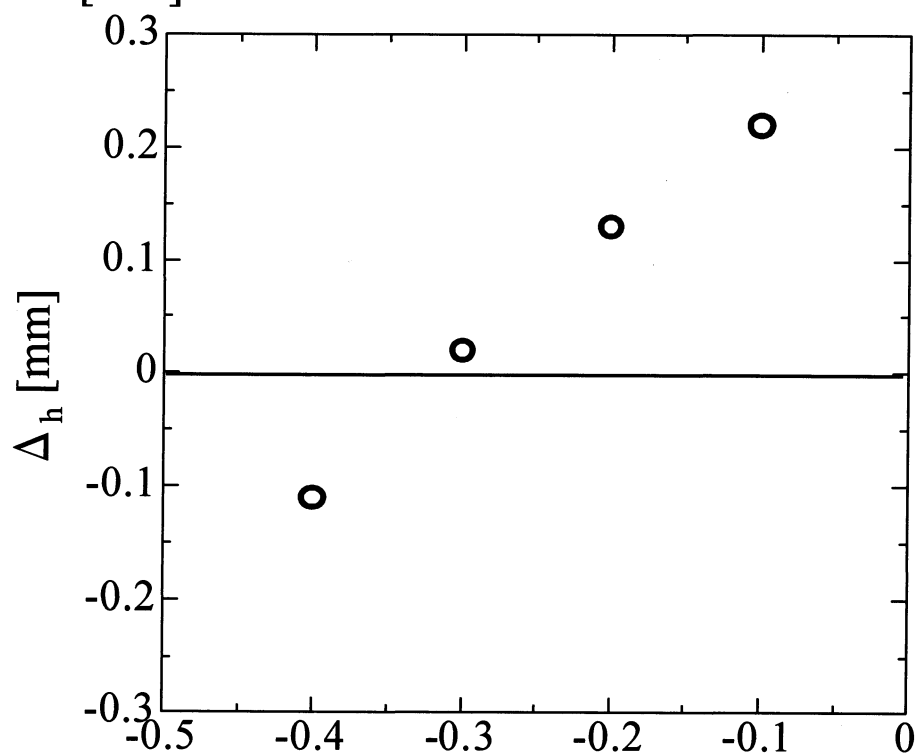


(c) Appearance of groove at high magnification

Fig.2-9 Appearance of laser butt welded specimen in preliminary experiment



Distance between laser irradiated position of He-Ne laser and groove [mm]



Distance between laser irradiated position of He-Ne laser and groove [mm]

Fig.2-10 Difference of irradiated position between He-Ne laser and CO₂ laser

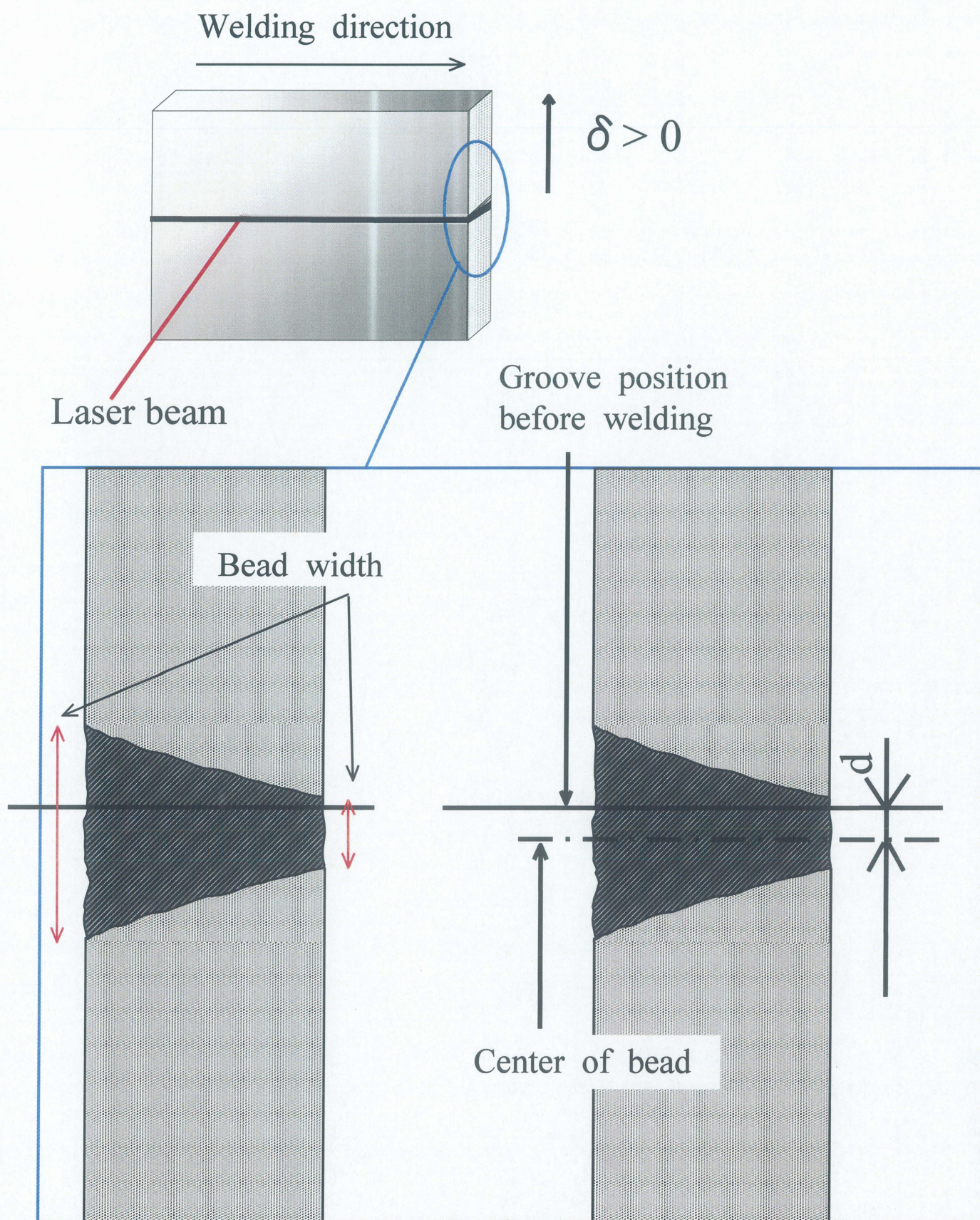


Fig.2-11 Schematic diagram of bead width

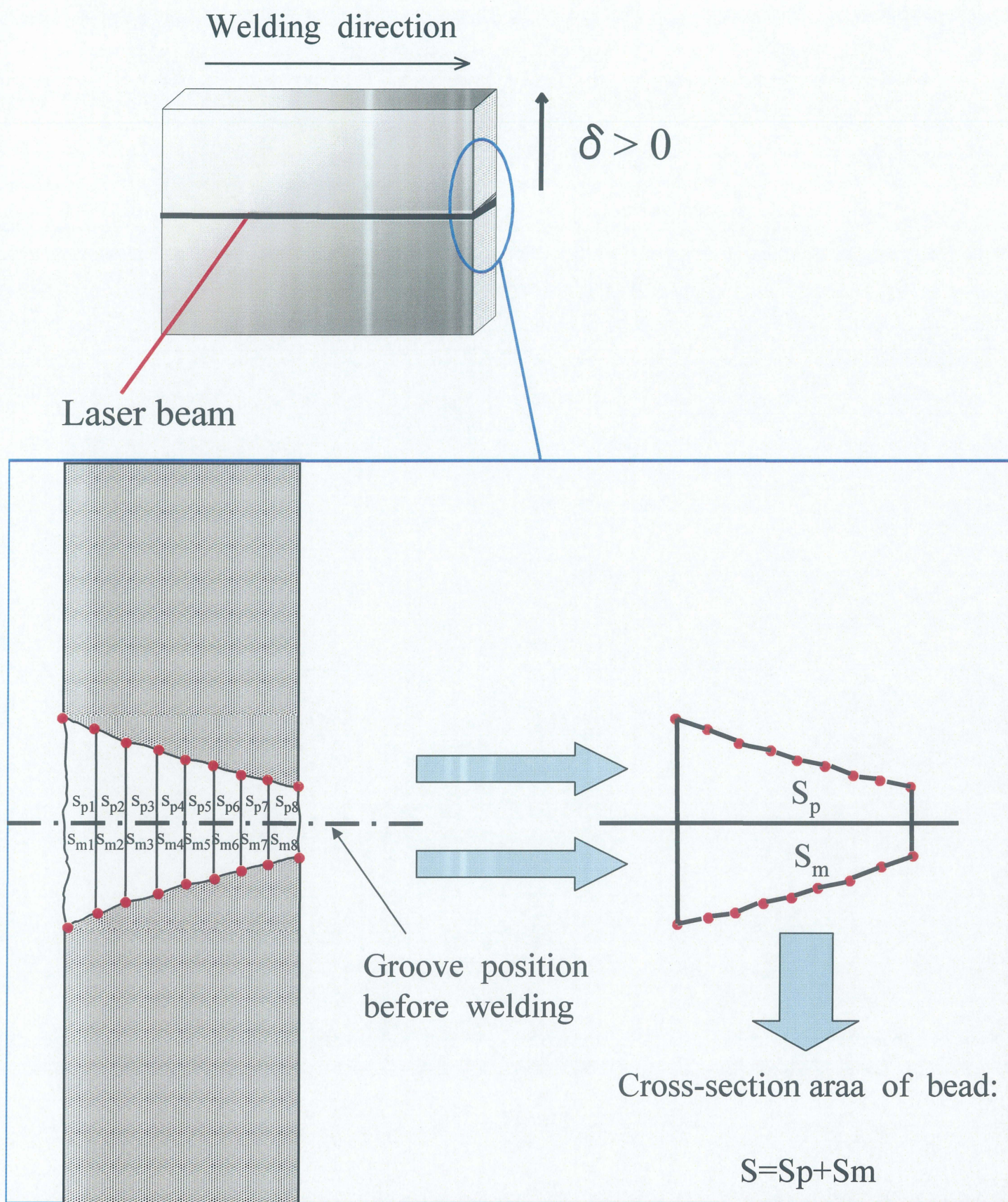


Fig.2-12 Schematic diagram of cross-section area of bead

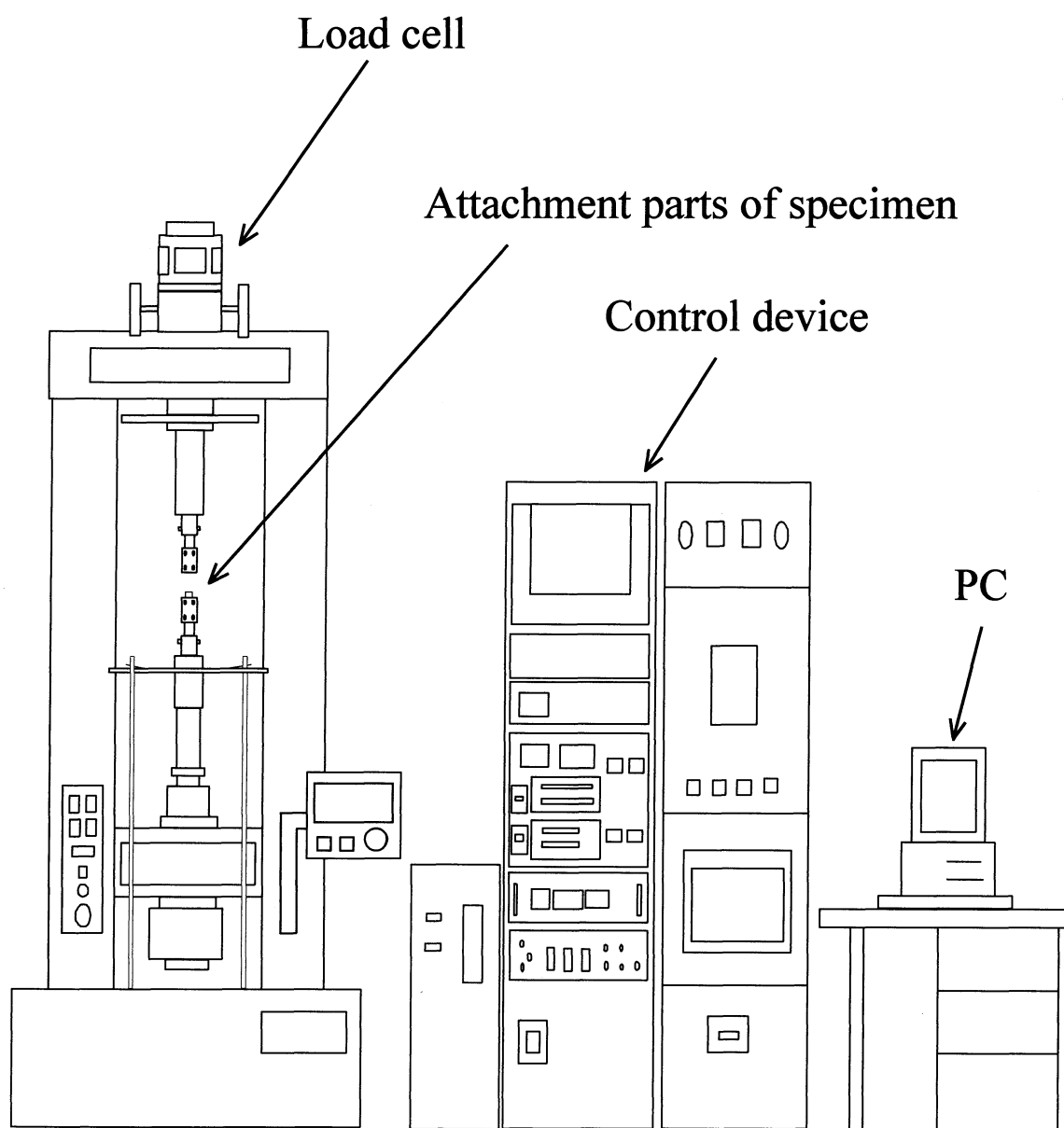


Fig.2-13 Schematic diagram of tensile tester

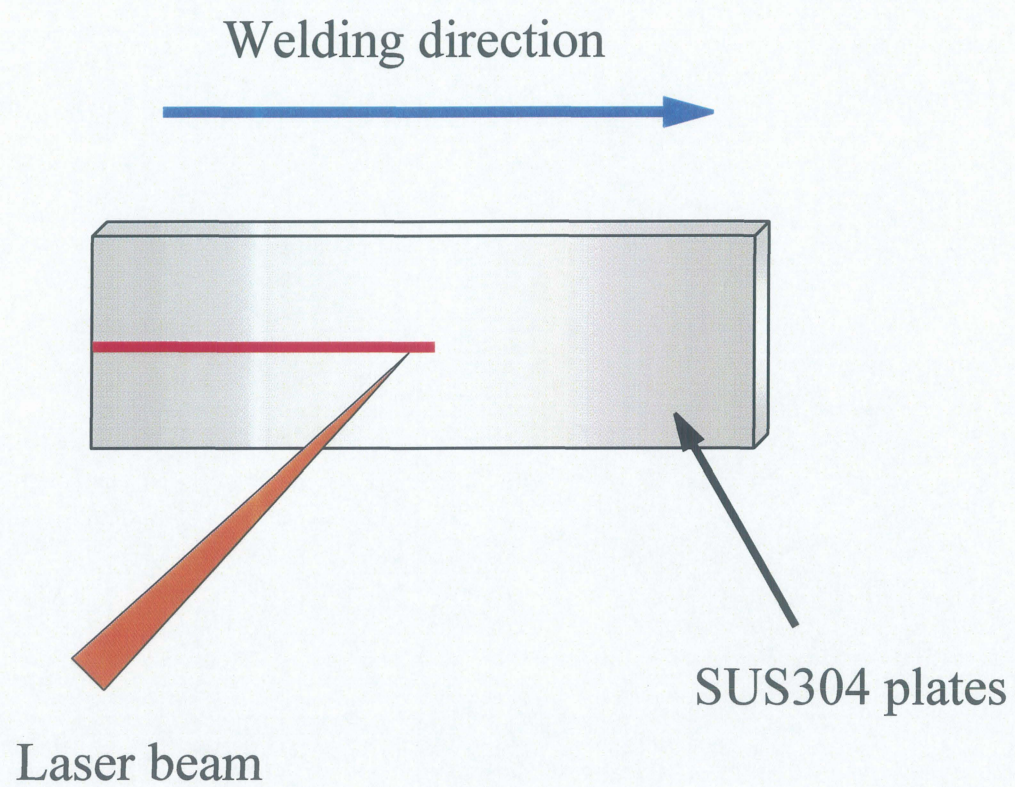


Fig.2-14 Schematic diagram of bead-on-plate welding

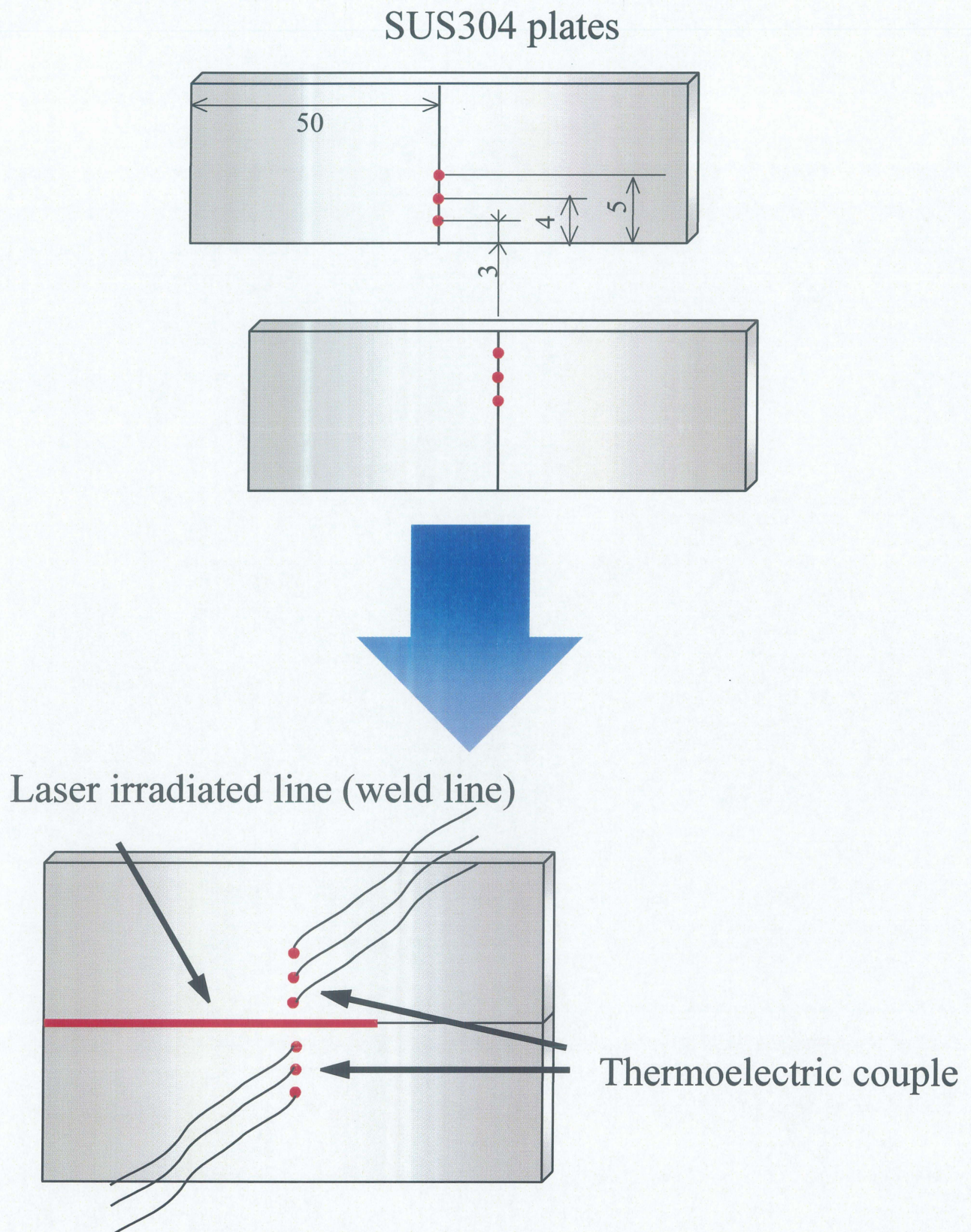


Fig.2-15 Schematic diagram of setting up Thermoelectric couple

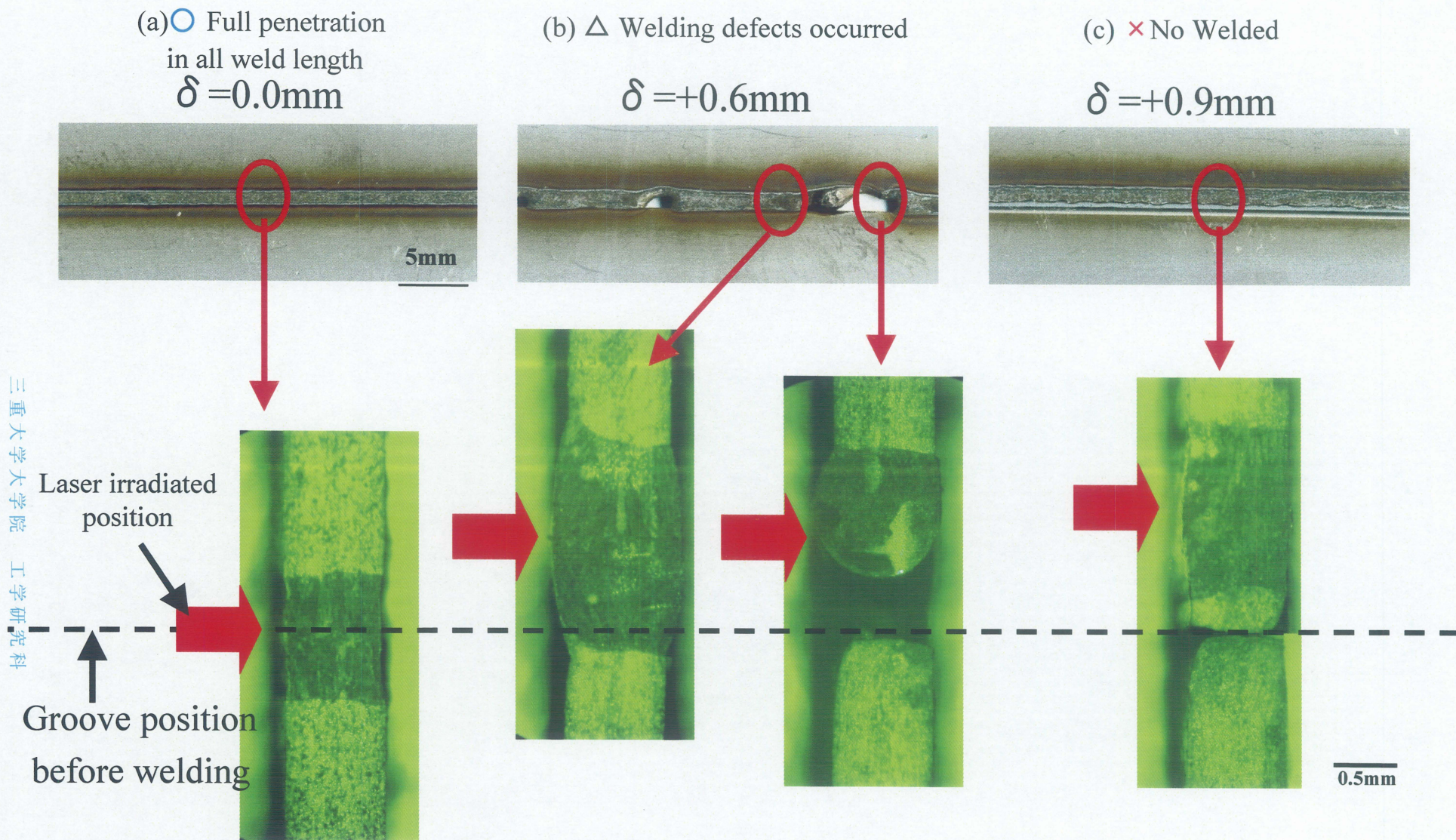


Fig.3-1 Classification of welding condition according to observation weld penetration ; Welding speed 20mm/s, horizontal position

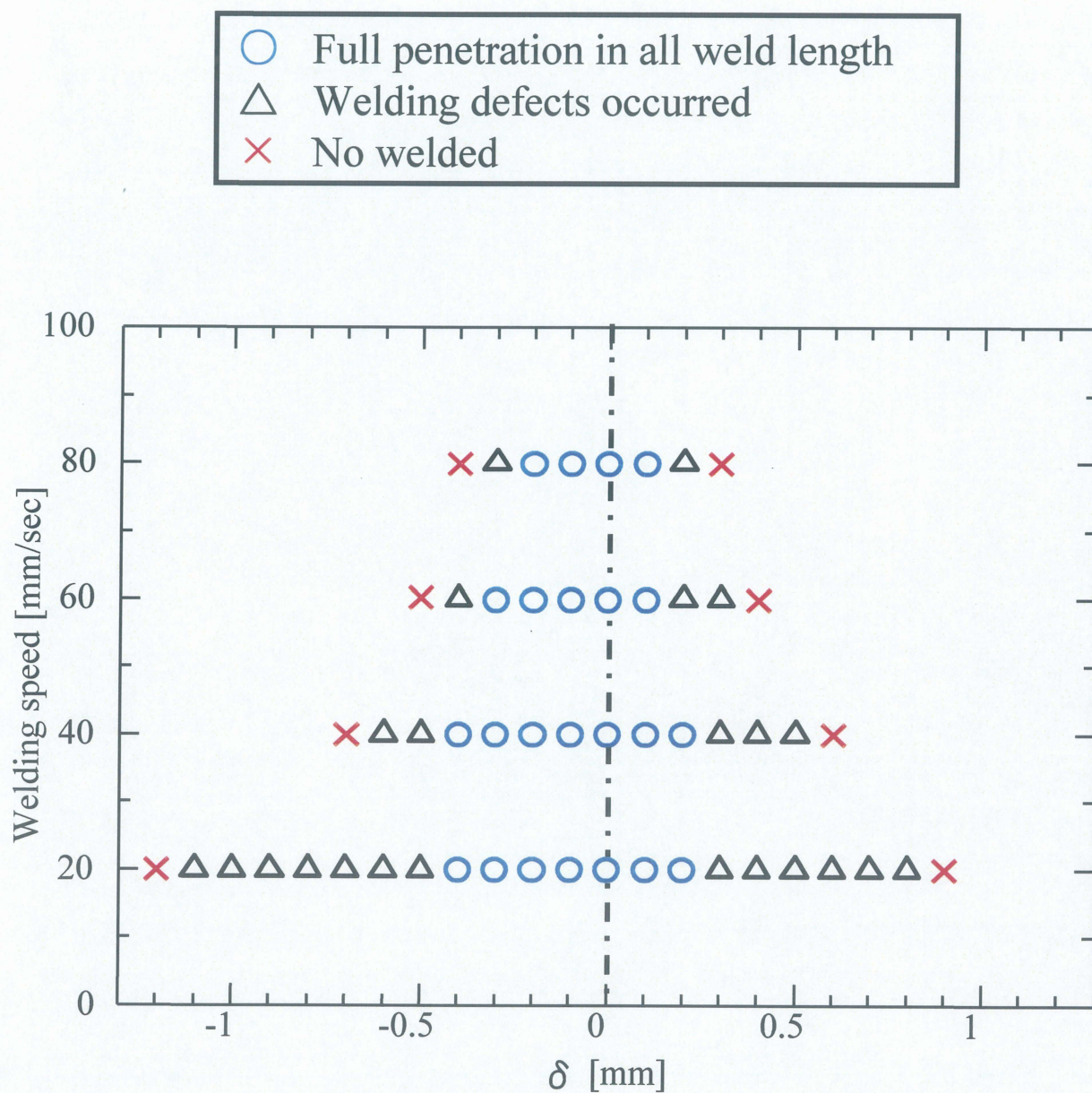
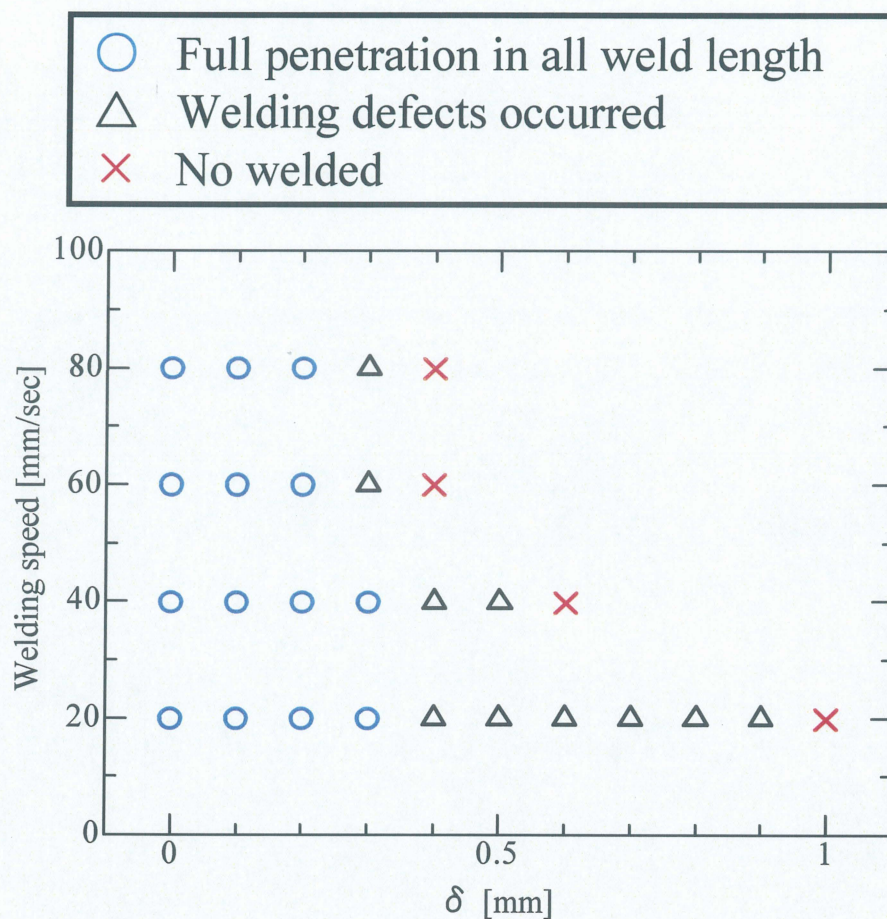
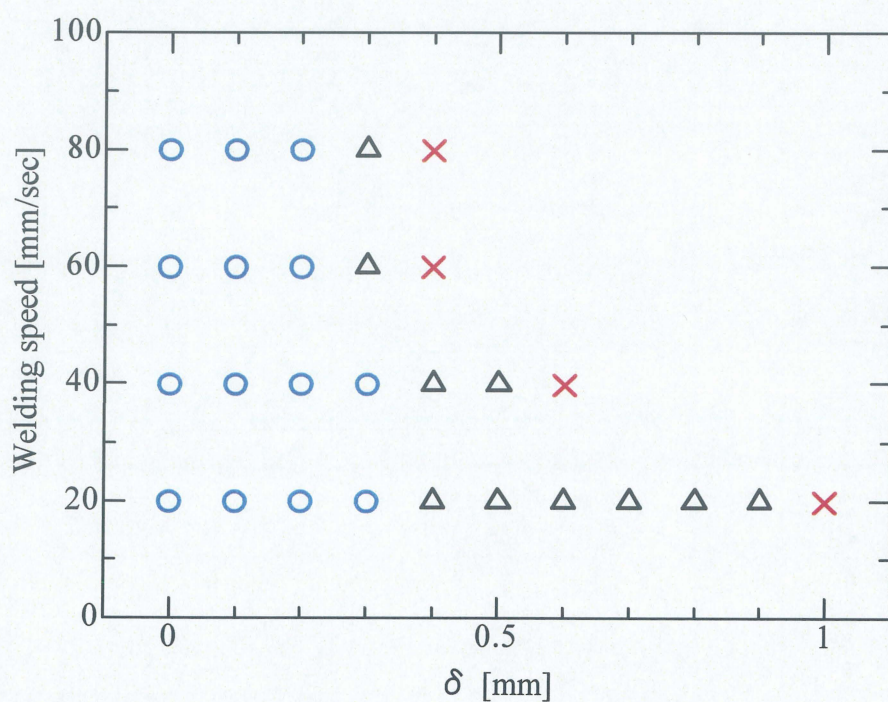


Fig.3-2 Process window for laser butt welding in horizontal position

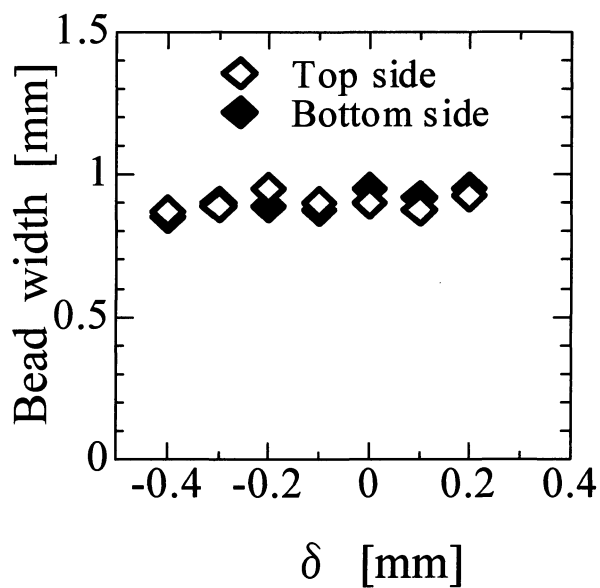


(a) Upward welding

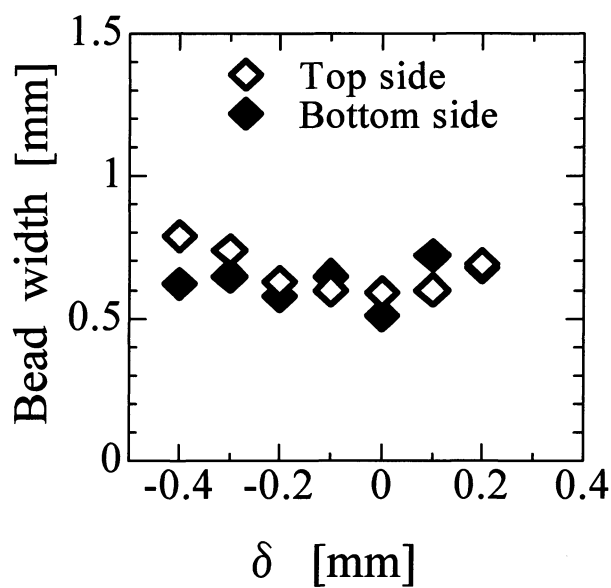


(b) Downward welding

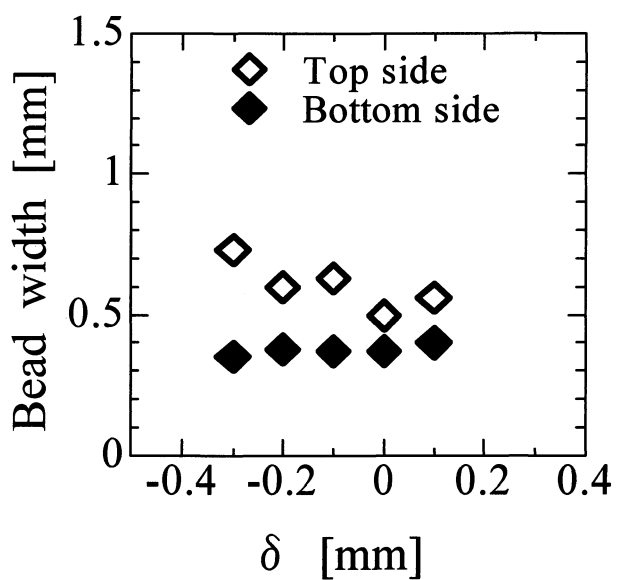
Fig.3-3 Process window for laser butt welding in vertical position



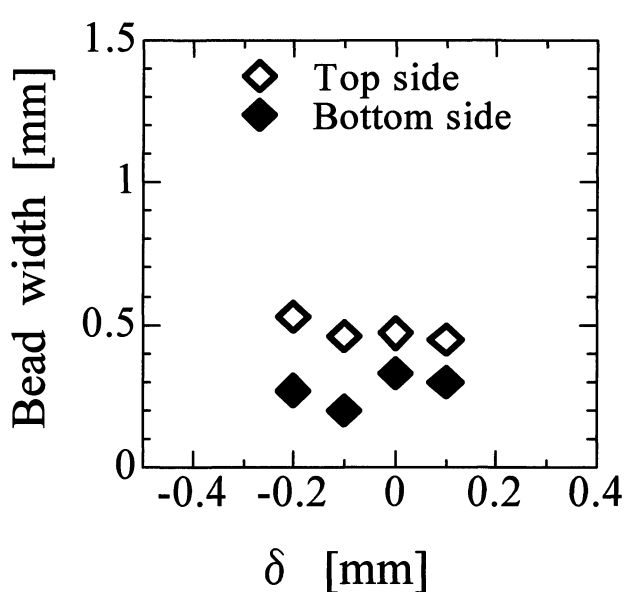
(a) Welding speed: 20mm/s



(b) Welding speed: 40mm/s

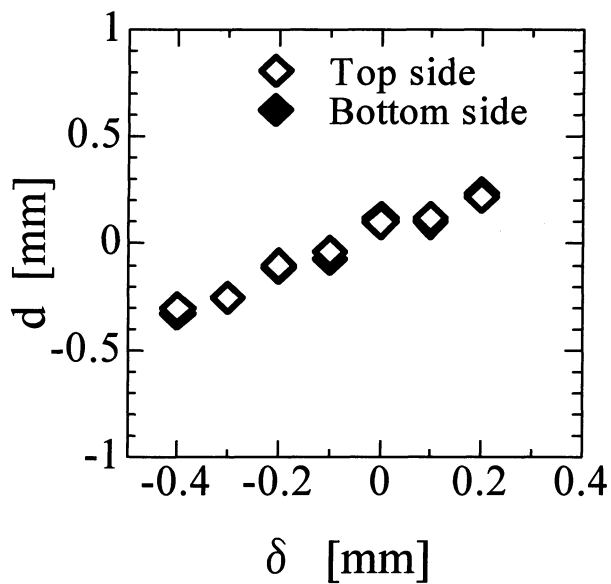


(c) Welding speed: 60mm/s

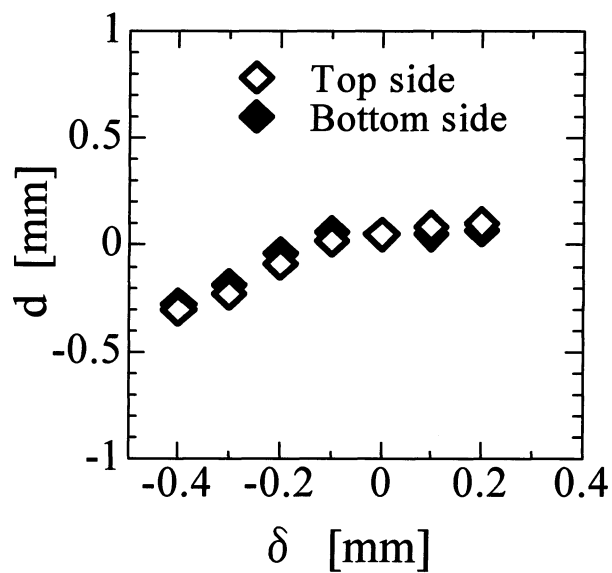


(d) Welding speed: 80mm/s

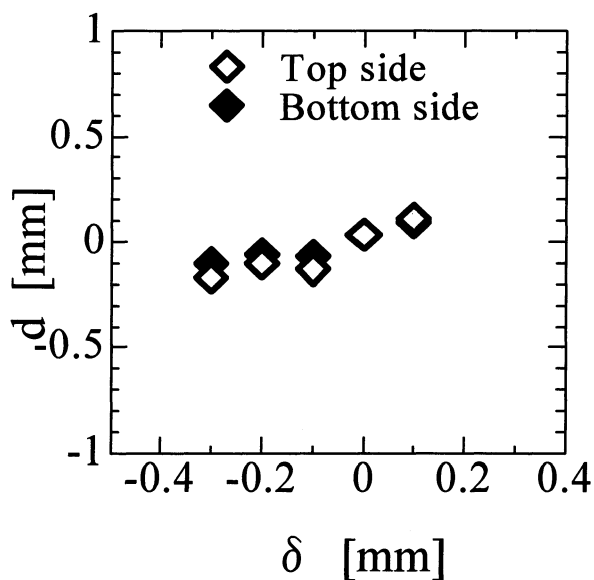
Fig.3-4 Relationship between δ and bead width at different welding speed in horizontal welding



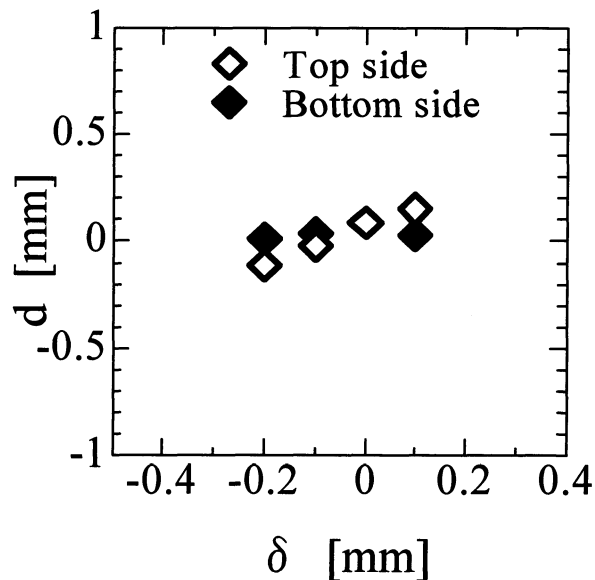
(a) Welding speed: 20mm/s



(b) Welding speed: 40mm/s

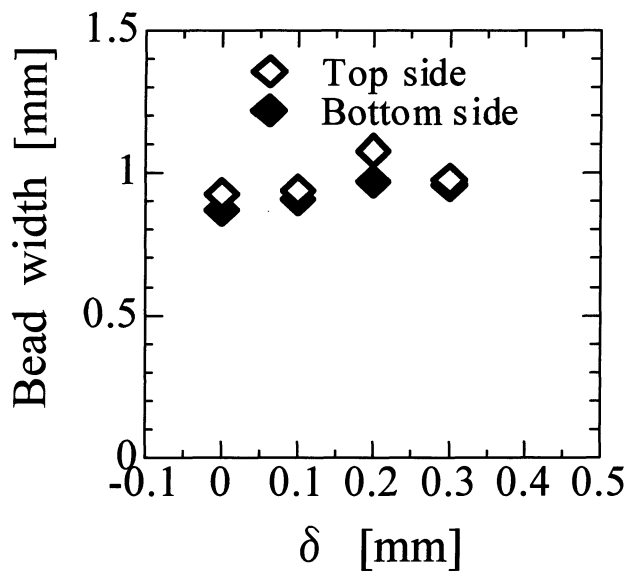


(c) Welding speed: 60mm/s

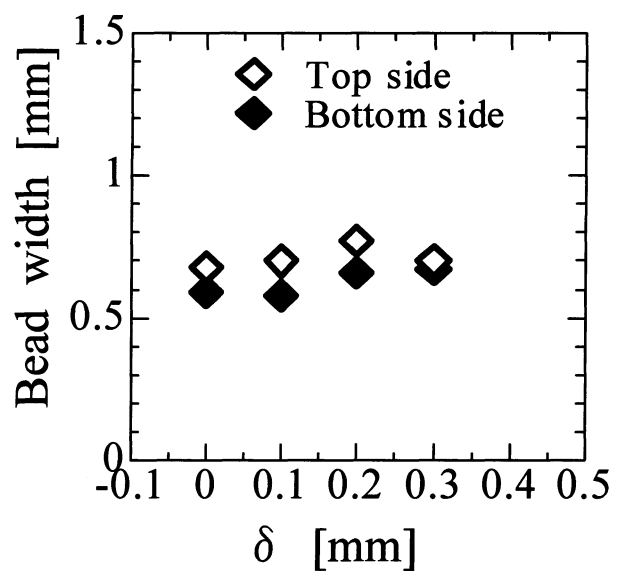


(d) Welding speed: 80mm/s

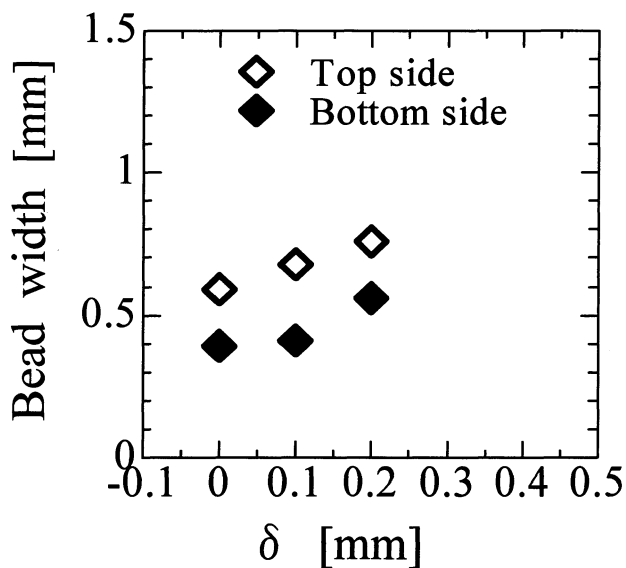
Fig.3-5 Relationship between δ and d at different welding speed in horizontal welding



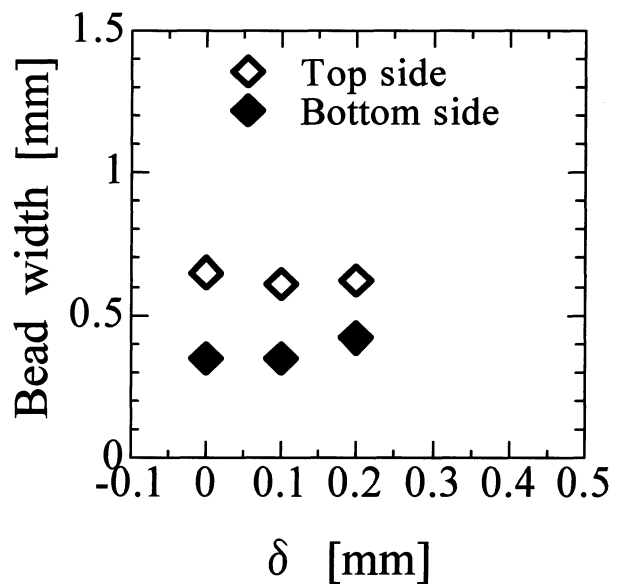
(a) Welding speed: 20mm/s



(b) Welding speed: 40mm/s

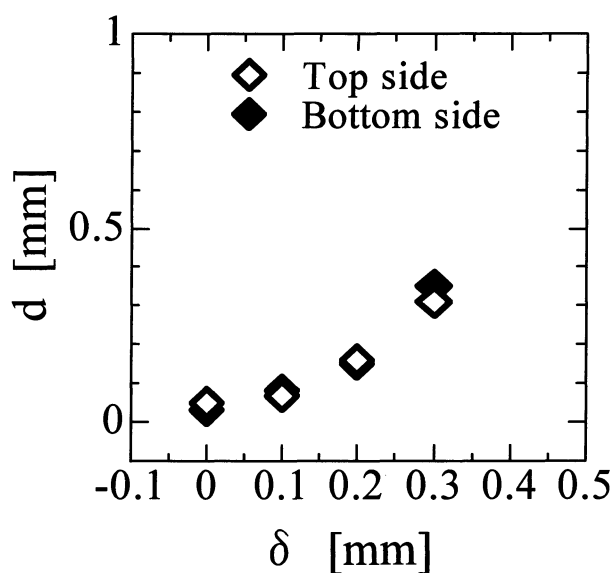


(c) Welding speed: 60mm/s

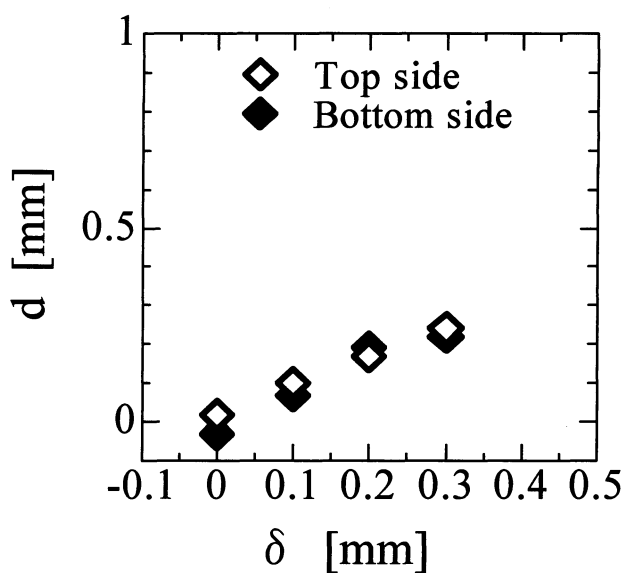


(d) Welding speed: 80mm/s

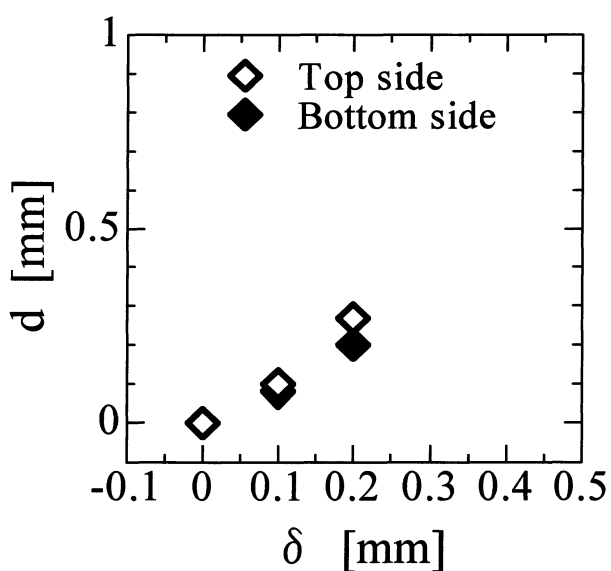
Fig.3-6 Relationship between δ and bead width at different welding speed in vertical upward welding



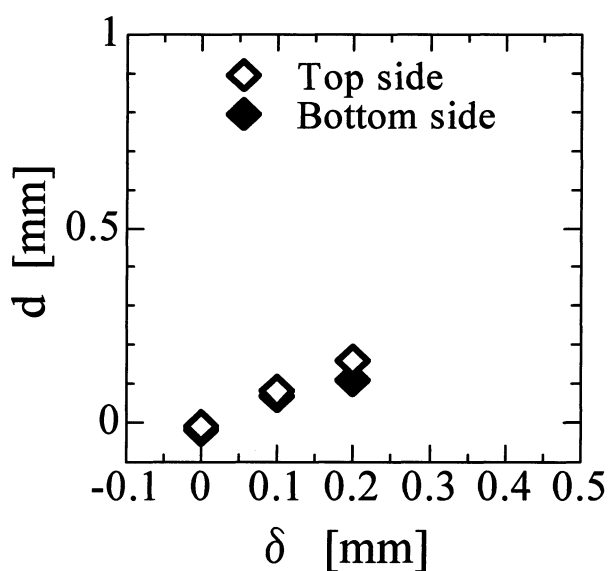
(a) Welding speed: 20mm/s



(b) Welding speed: 40mm/s

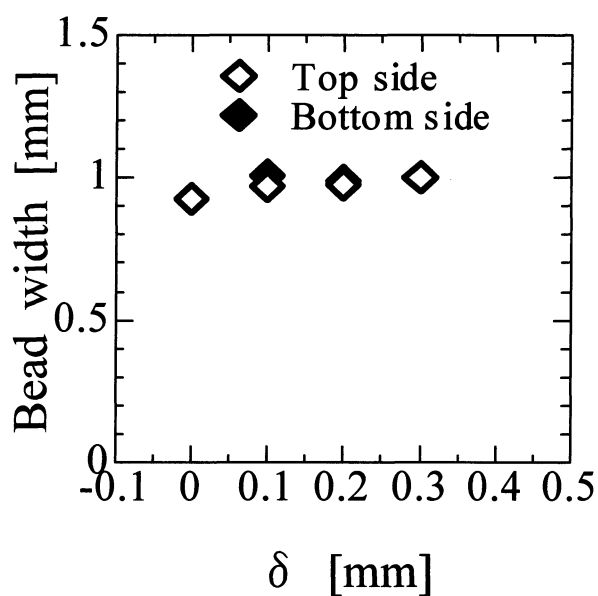


(c) Welding speed: 60mm/s

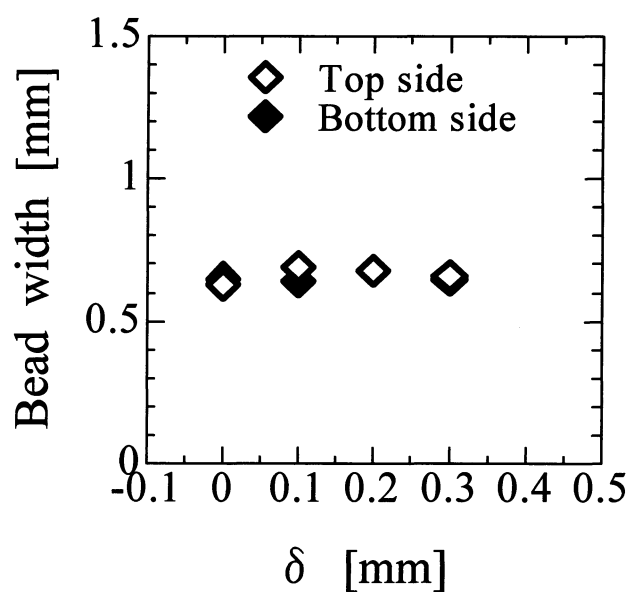


(d) Welding speed: 80mm/s

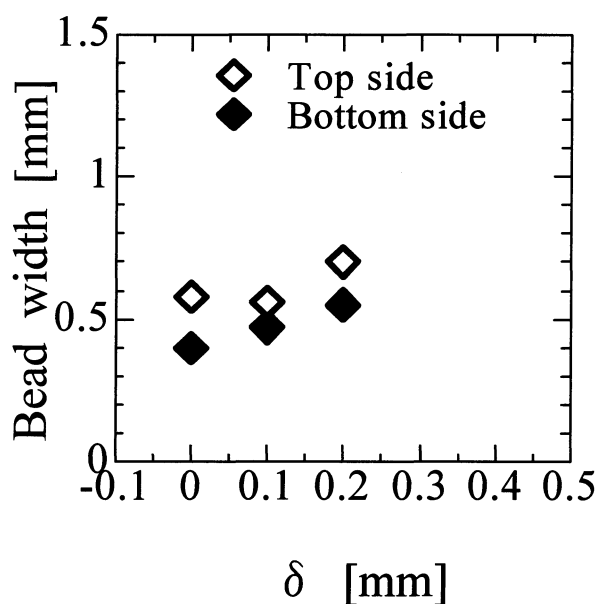
Fig.3-7 Relationship between δ and d at different welding speed in vertical upward welding



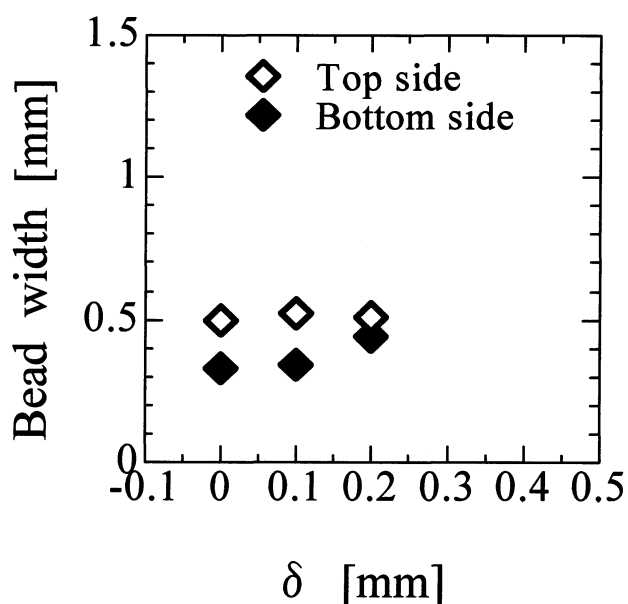
(a) Welding speed: 20mm/s



(b) Welding speed: 40mm/s

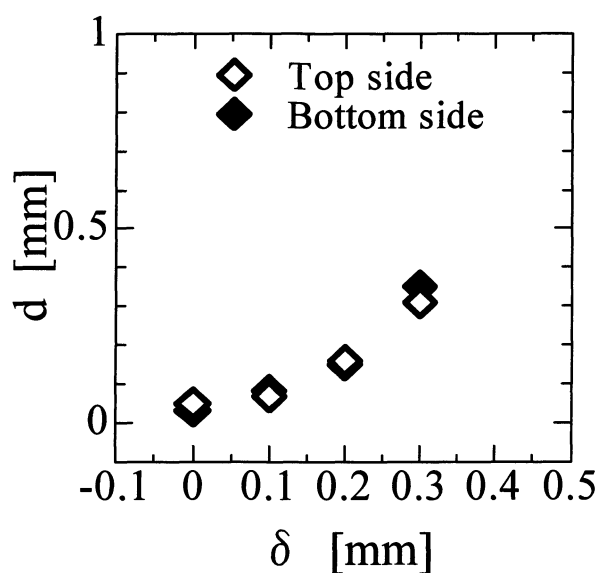


(c) Welding speed: 60mm/s

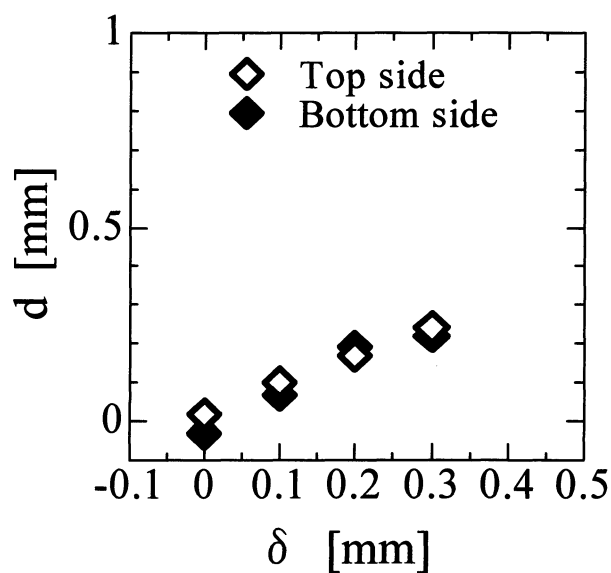


(d) Welding speed: 80mm/s

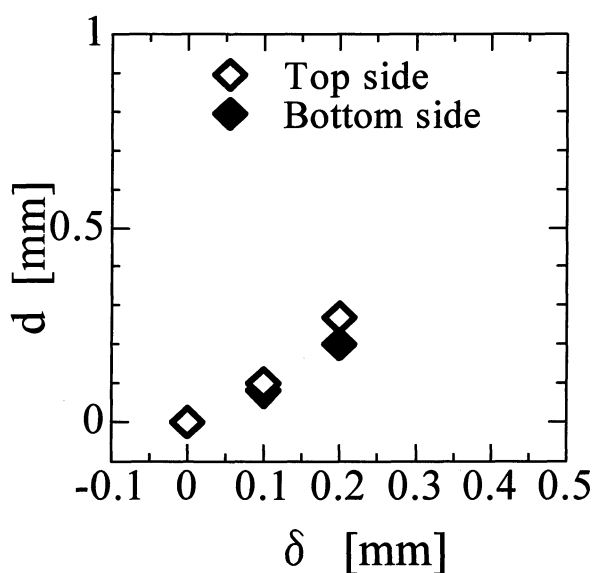
Fig.3-8 Relationship between δ and bead width at different welding speed in vertical downward welding



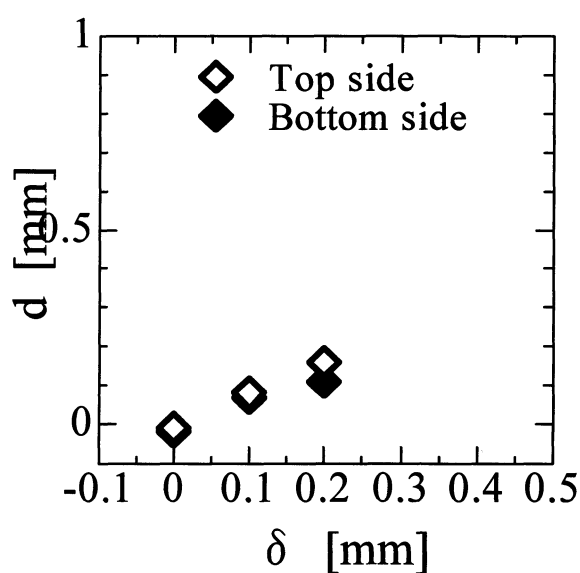
(a) Welding speed: 20mm/s



(b) Welding speed: 40mm/s

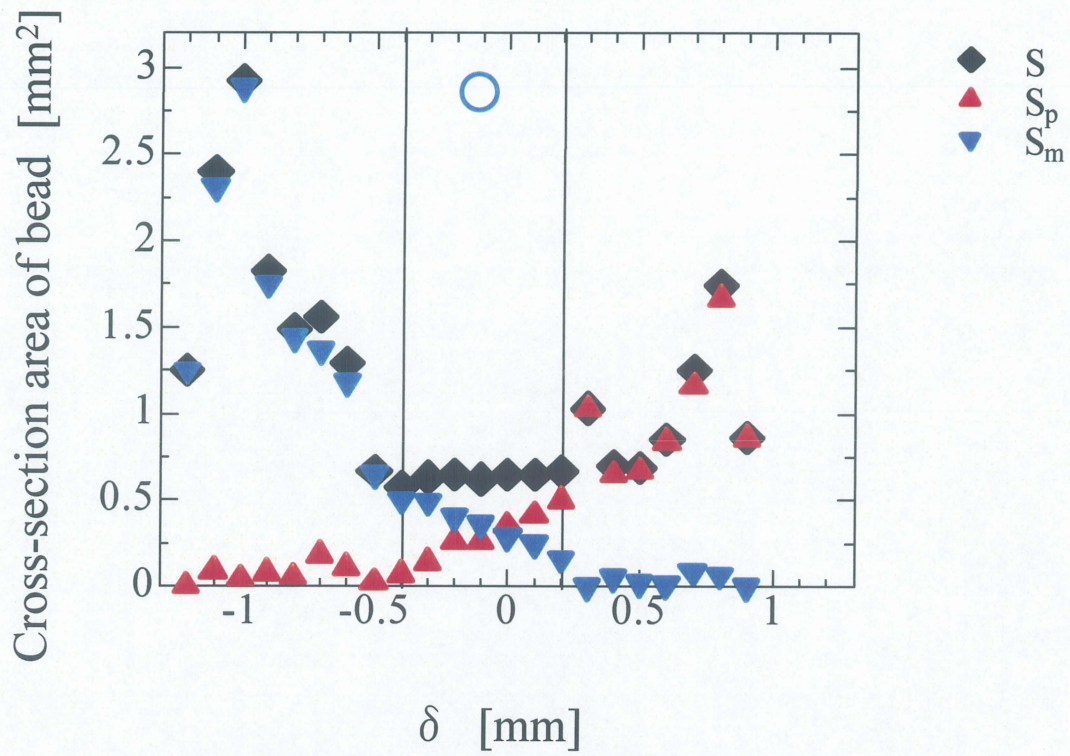


(c) Welding speed: 60mm/s

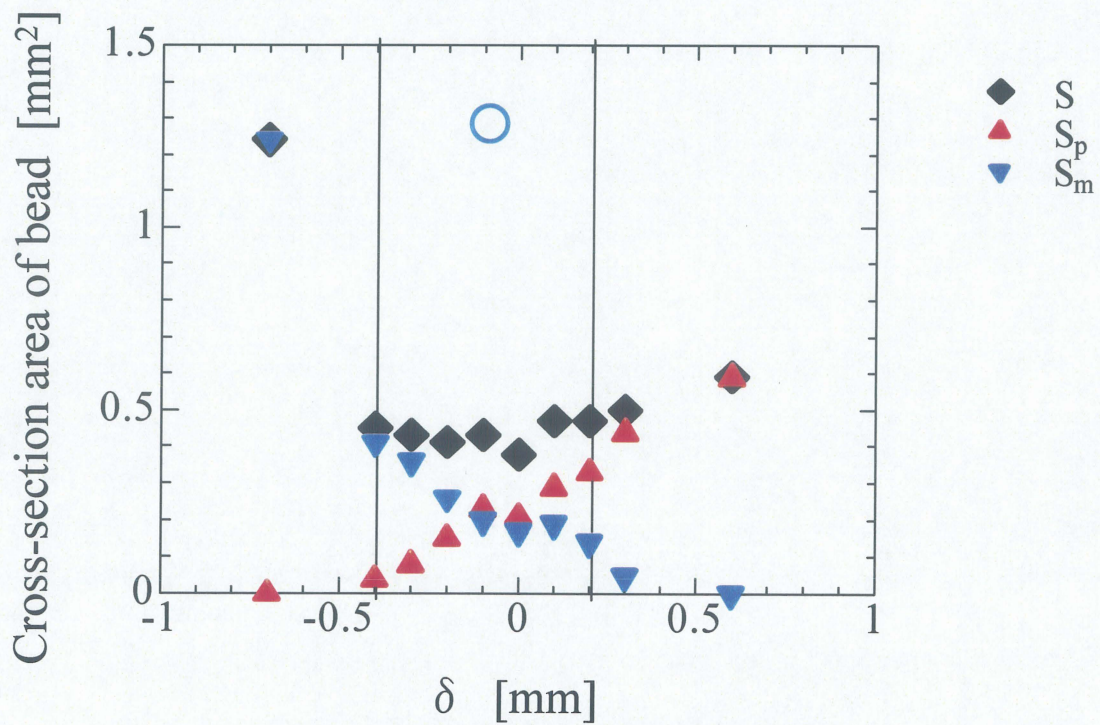


(d) Welding speed: 80mm/s

Fig.3-9 Relationship between δ and d at different welding speed in vertical downward welding

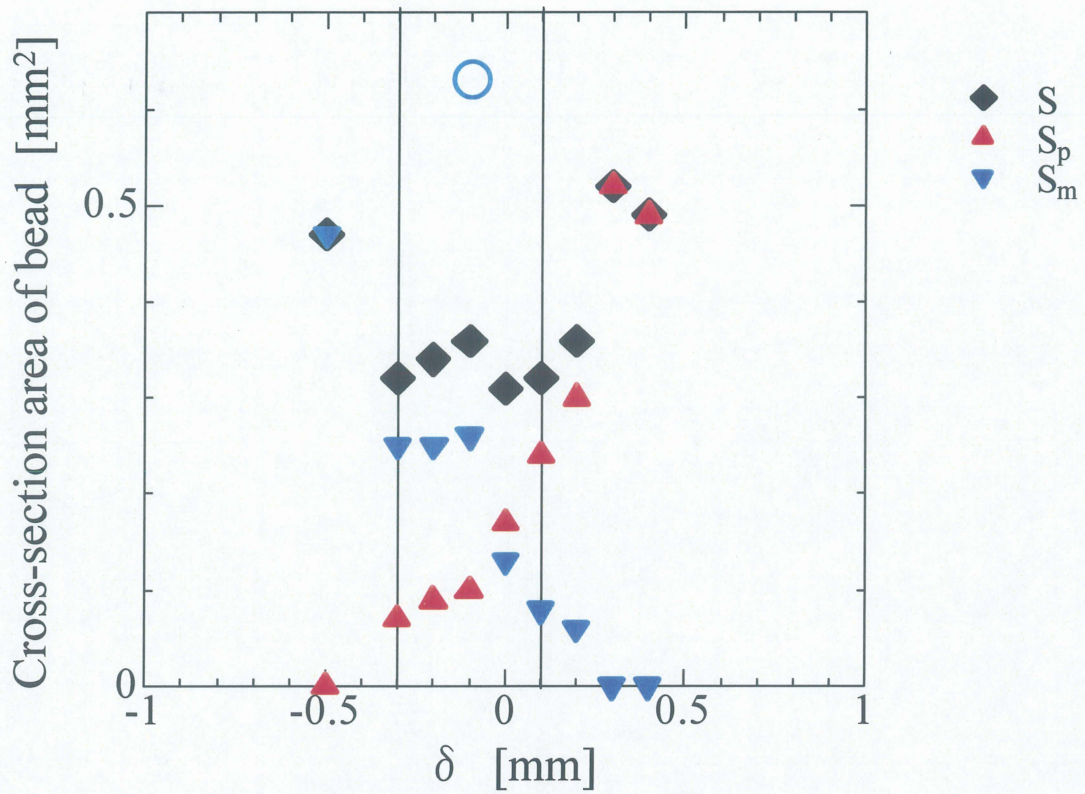


(a) Welding speed: 20mm/s

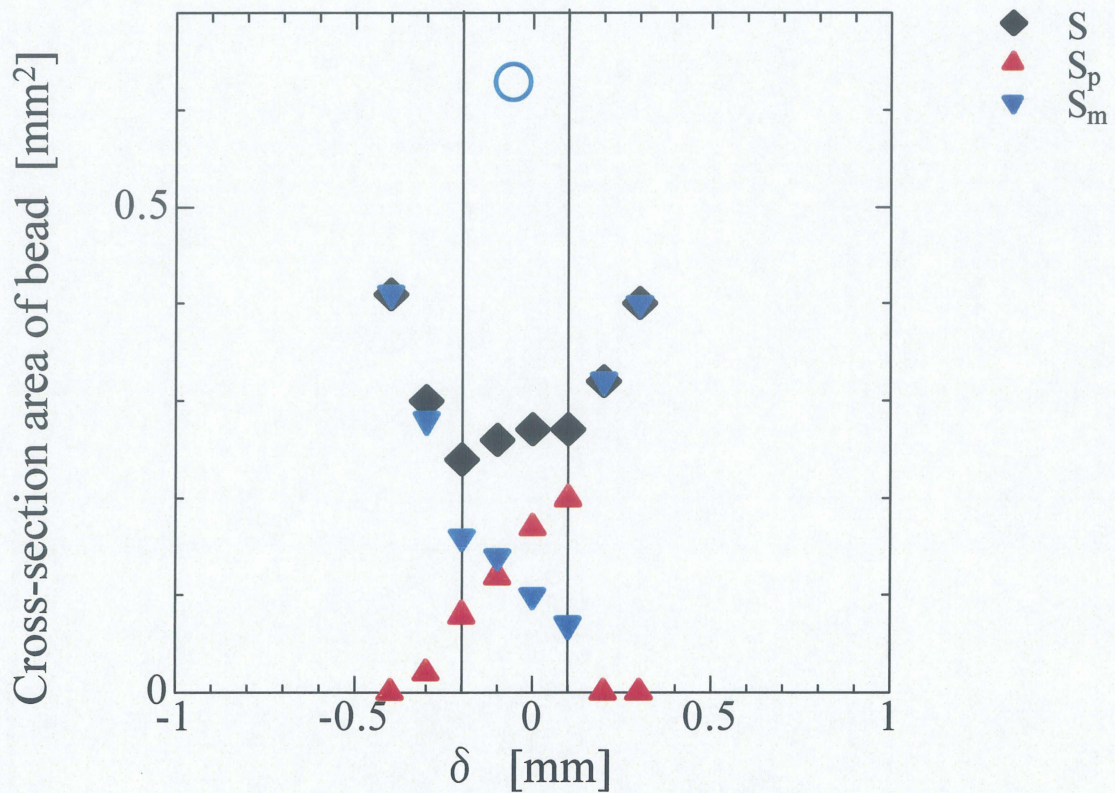


(b) Welding speed: 40mm/s

Fig.3-10 Relationship between δ and d Cross-section area of bead in horizontal welding

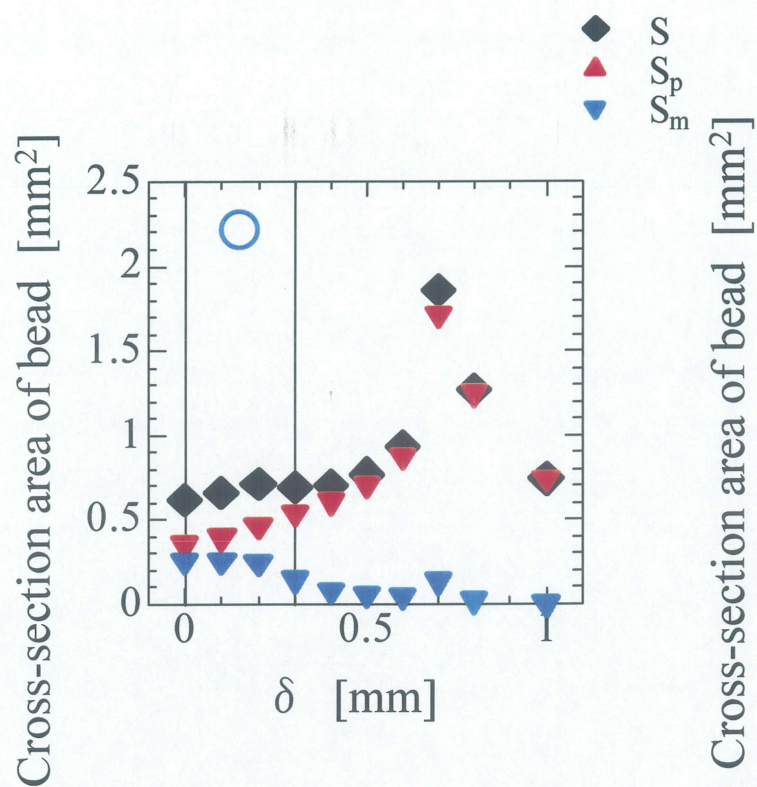


(a) Welding speed: 60mm/s

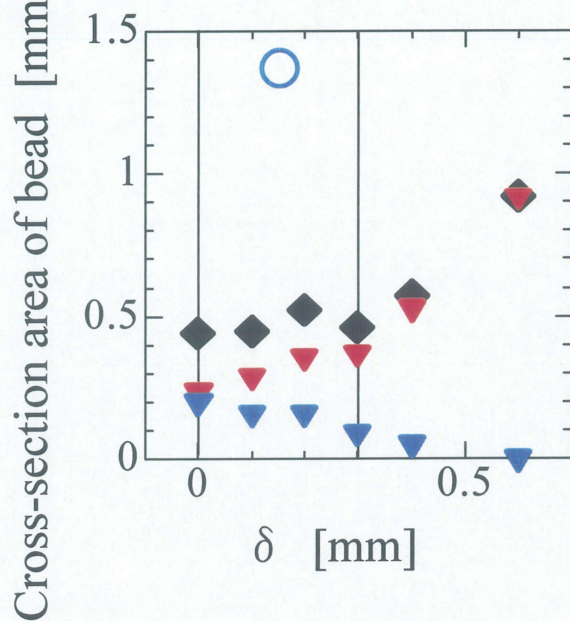


(b) Welding speed: 80mm/s

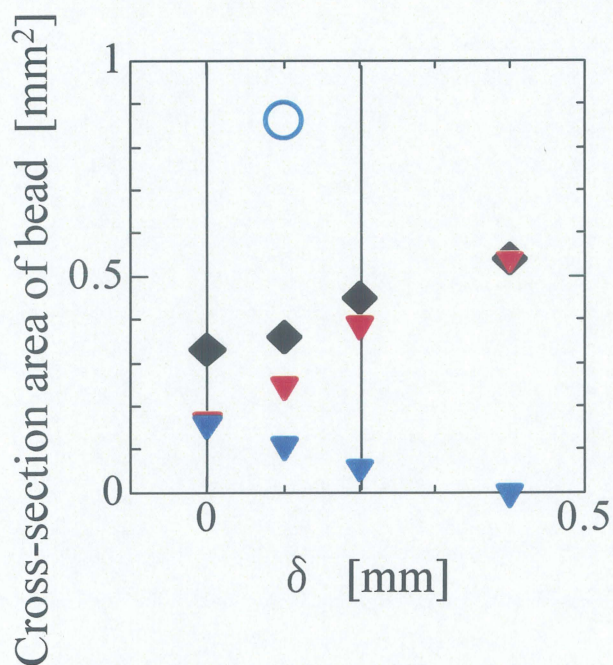
Fig.3-11 Relationship between δ and d Cross-section area of bead in horizontal welding



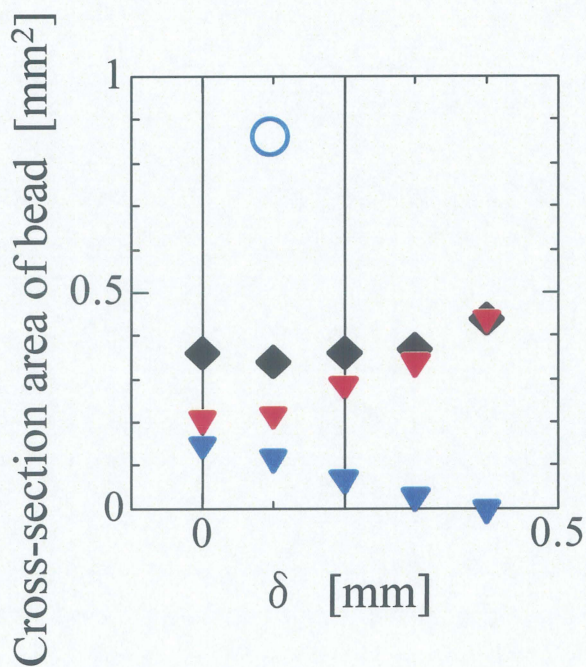
(a) Welding speed: 20mm/s



(b) Welding speed: 40mm/s

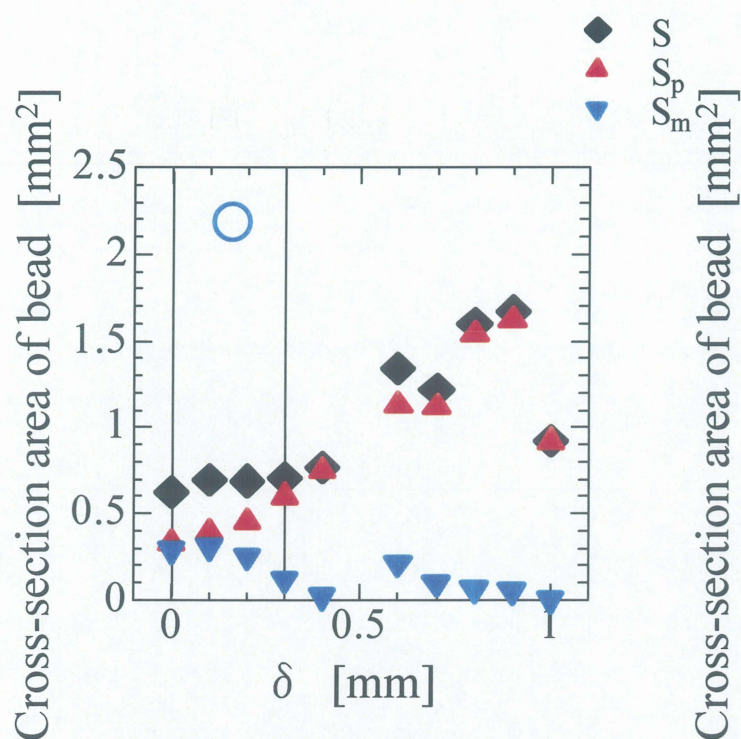


(c) Welding speed: 60mm/s

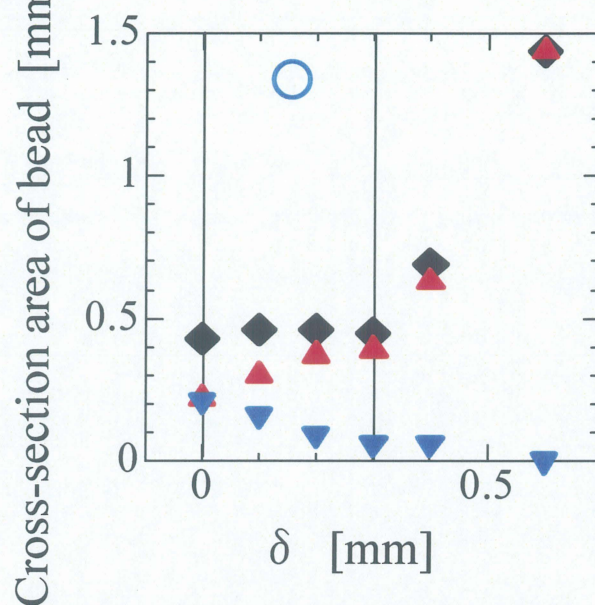


(d) Welding speed: 80mm/s

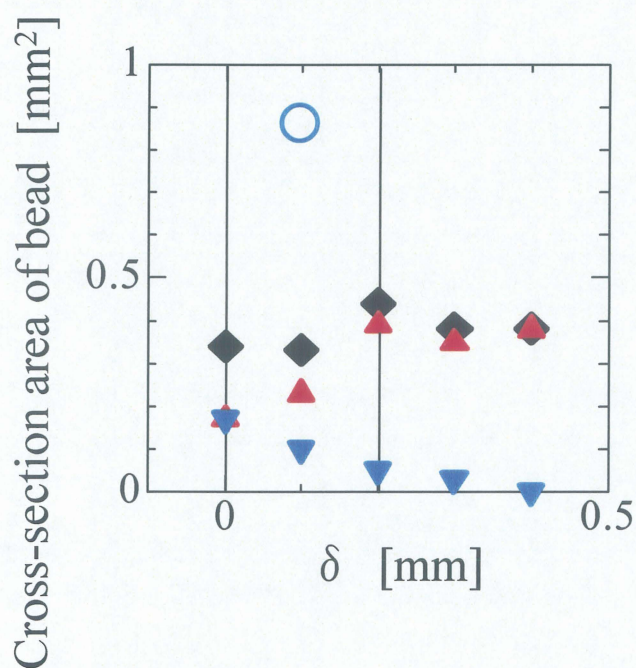
Fig.3-12 Relationship between δ and Cross-section area of bead in vertical upward welding



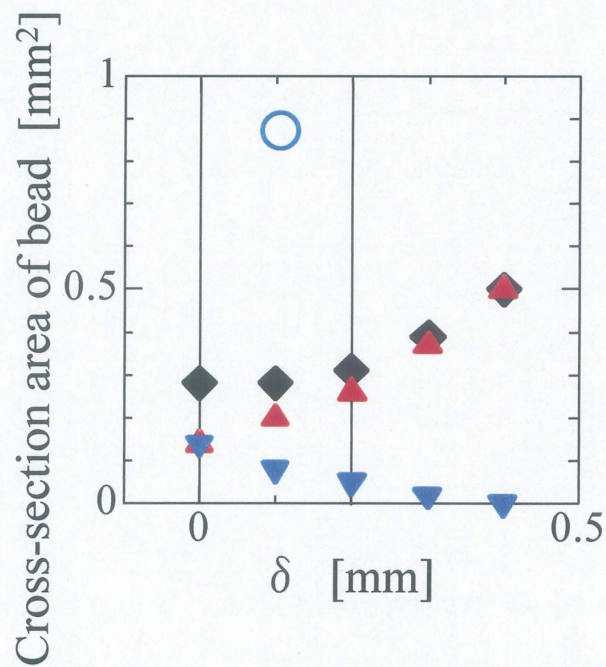
(a) Welding speed: 20mm/s



(b) Welding speed: 40mm/s



(c) Welding speed: 60mm/s



(d) Welding speed: 80mm/s

Fig.3-13 Relationship between δ and area of cross-section in vertical downward welding

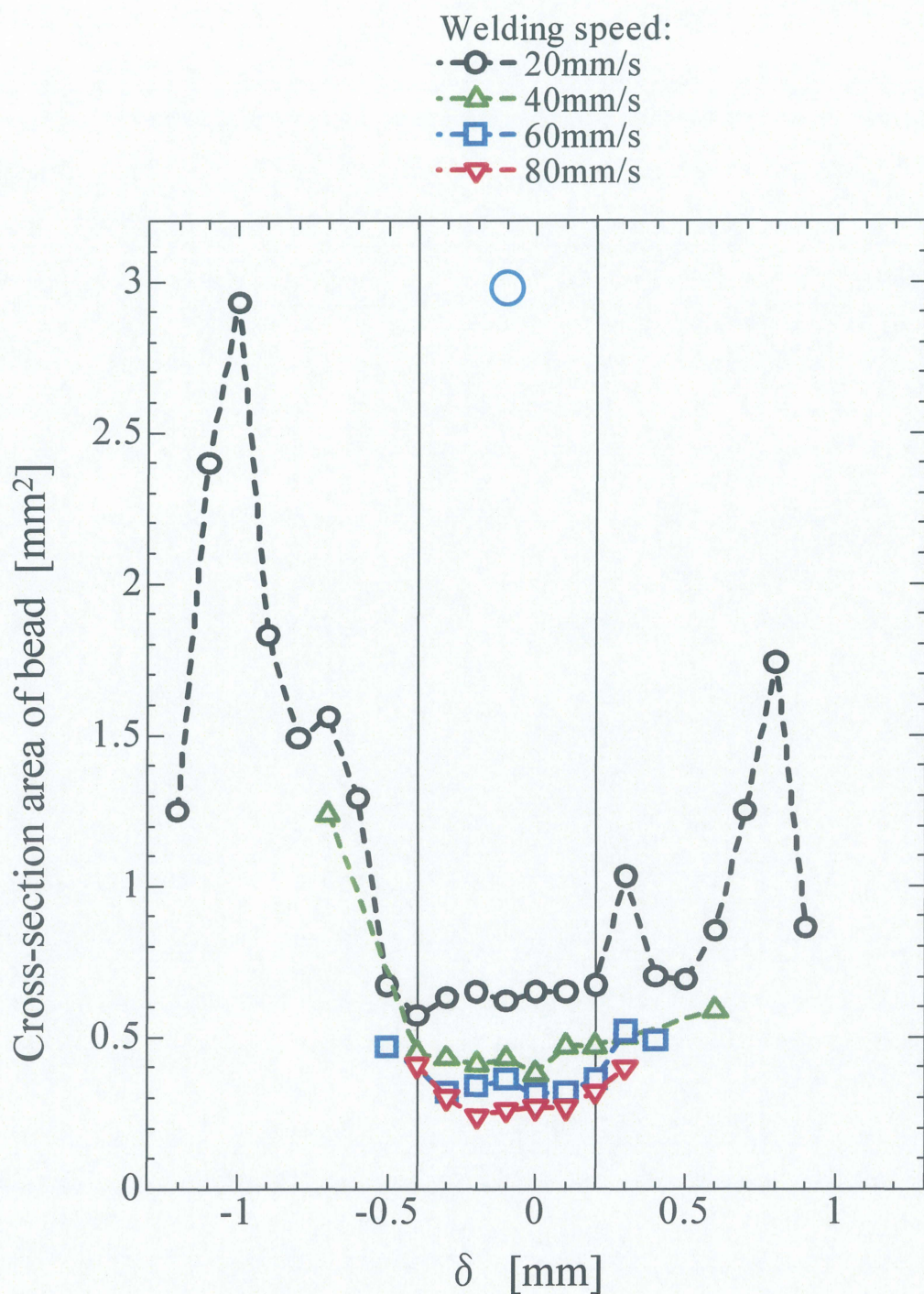
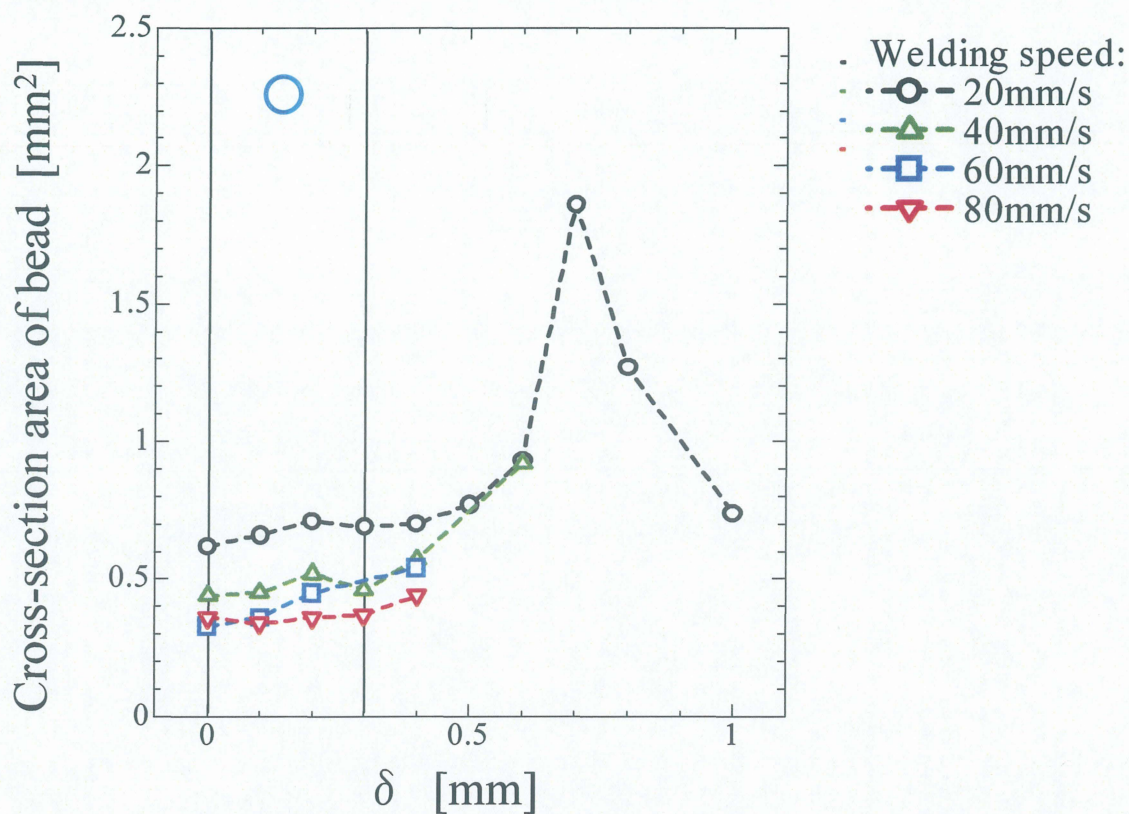
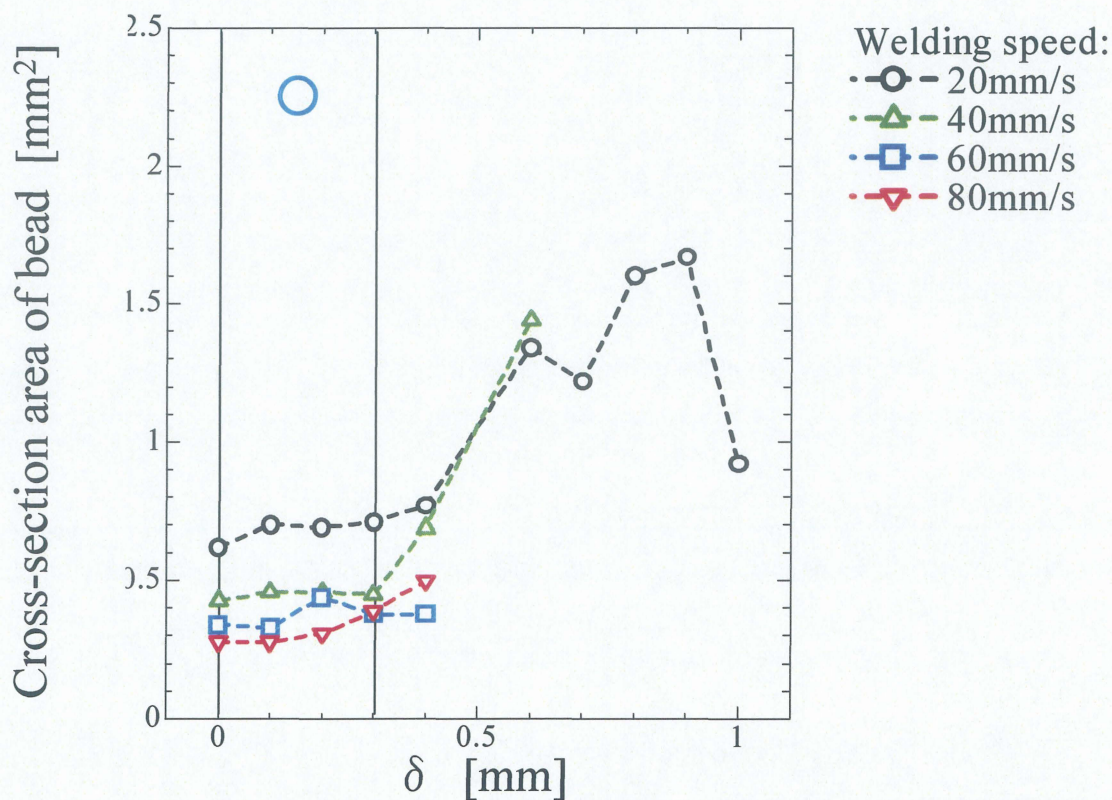


Fig.3-14 Relationship between δ and cross-section area of bead at different welding speed in horizontal welding



(a) Upward Welding



(b) Downward welding

Fig.3-15 Relationship between δ and cross-section area of bead at different welding speed in vertical welding

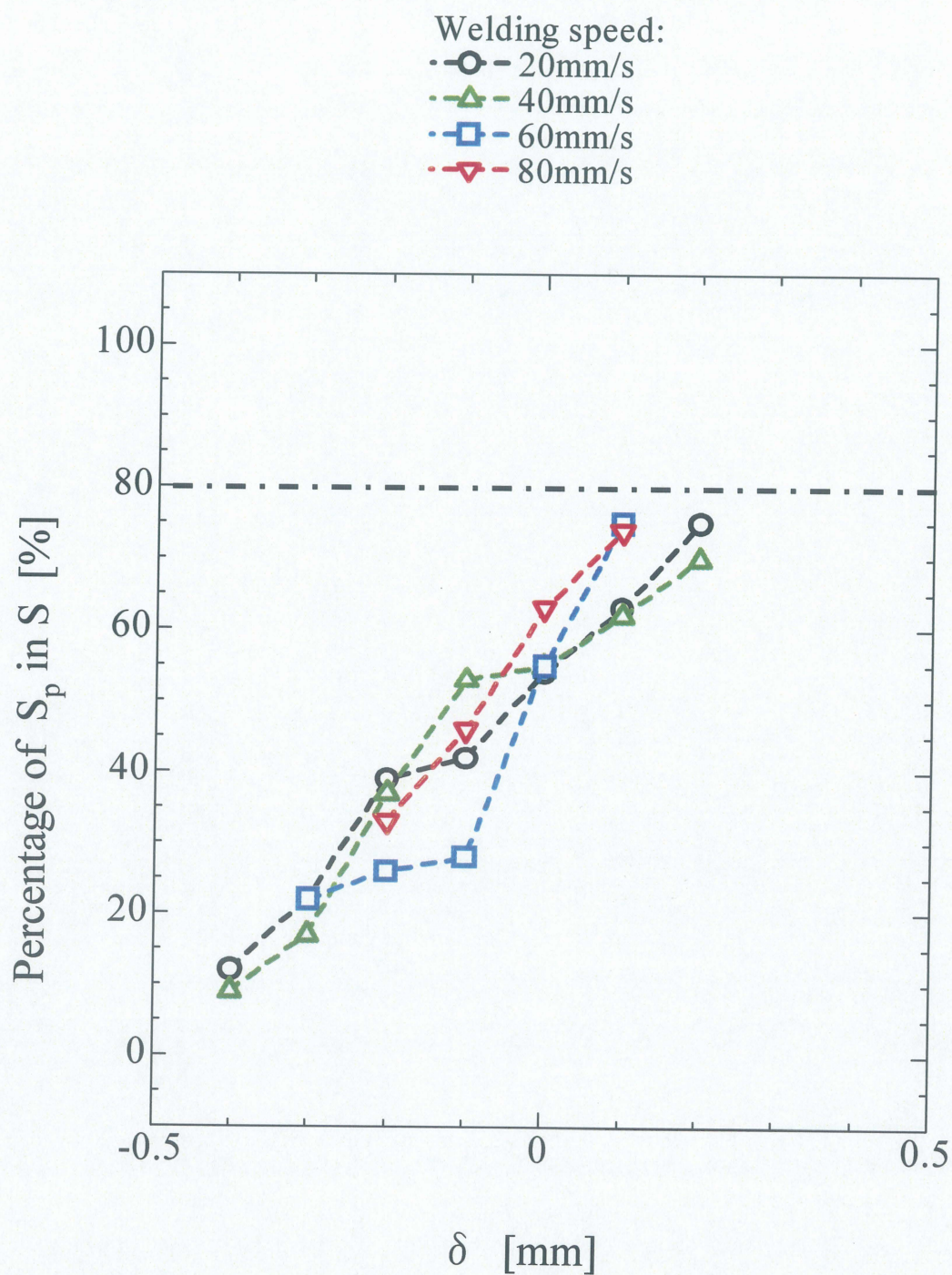
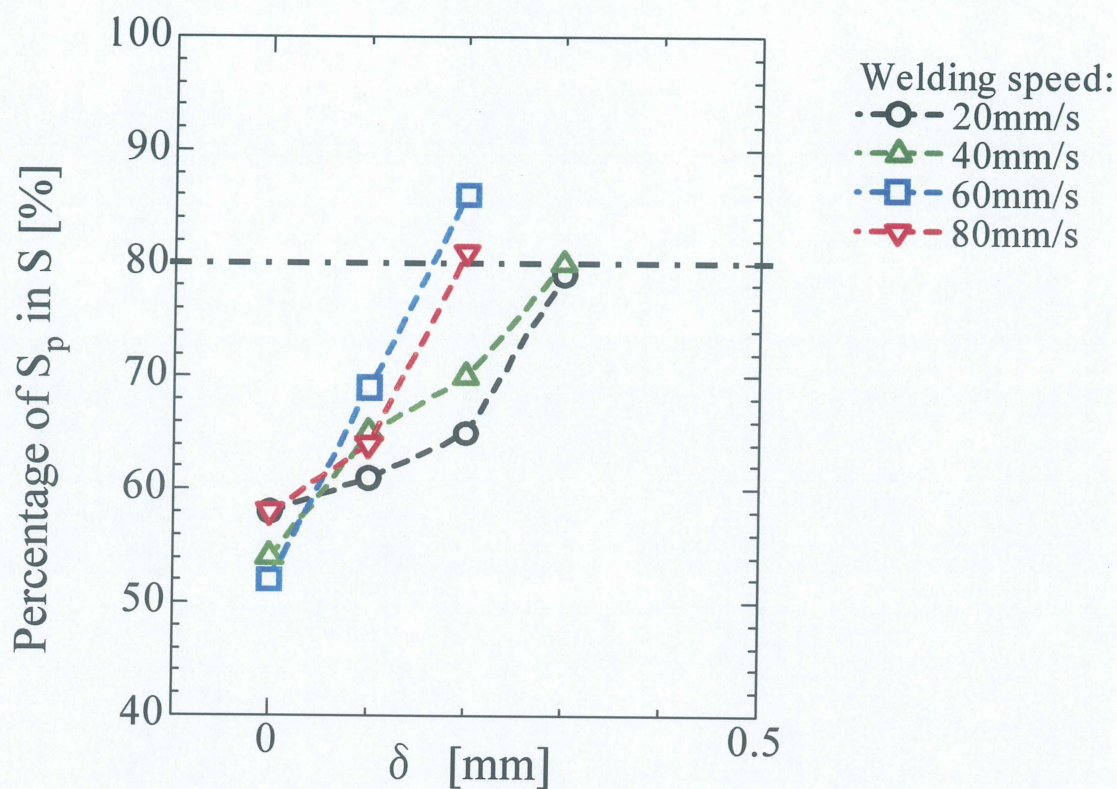
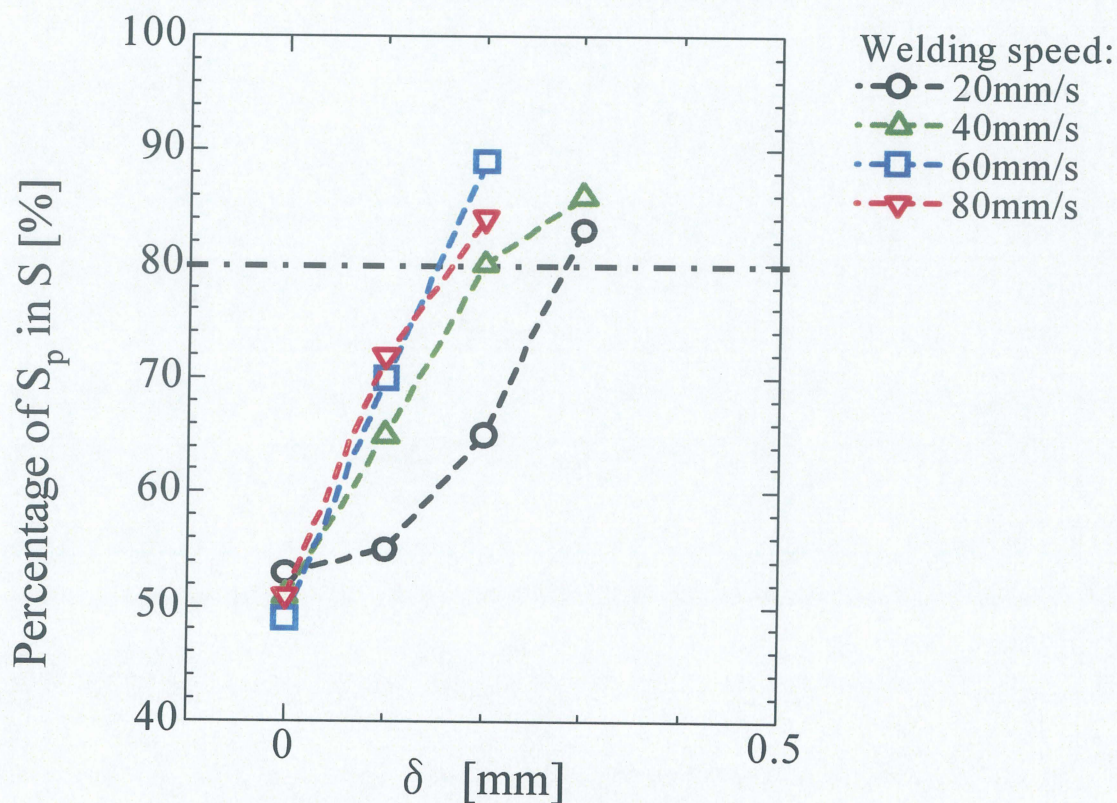


Fig.3-16 Relationship between δ and percentage of S_p in S at different welding speed in horizontal welding

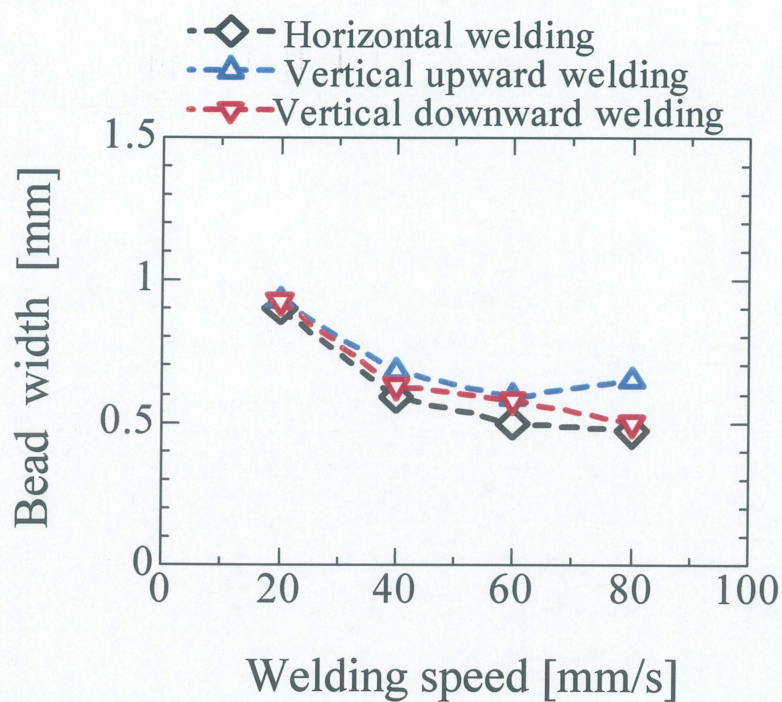


(a) Upward Welding

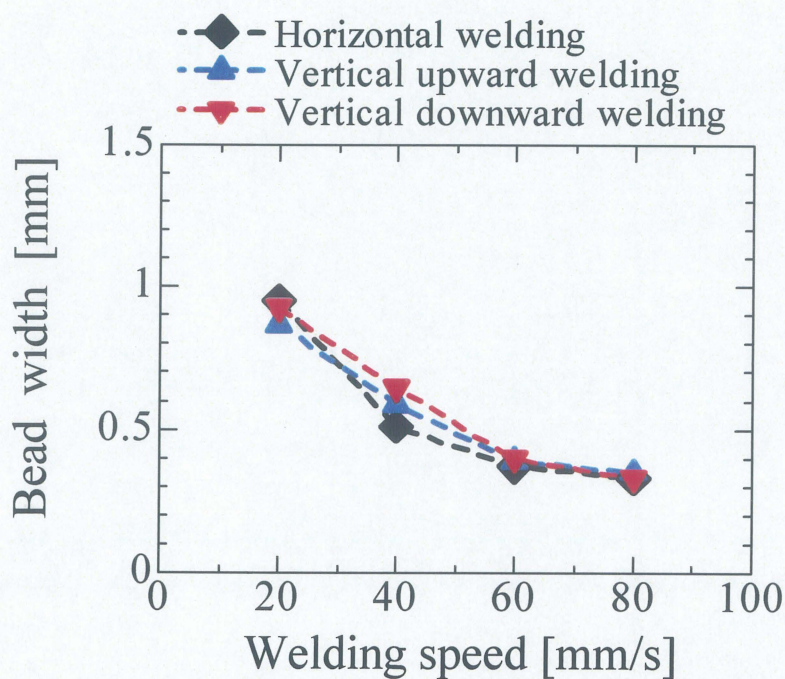


(b) Downward welding

Fig.3-17 Relationship between δ and percentage of S_p in S at different welding speed in vertical welding



(a) Top side



(b) Bottom side

Fig.3-18 Relationship between Welding speed and bead width at different welding position in butt welding ; $\delta = 0$

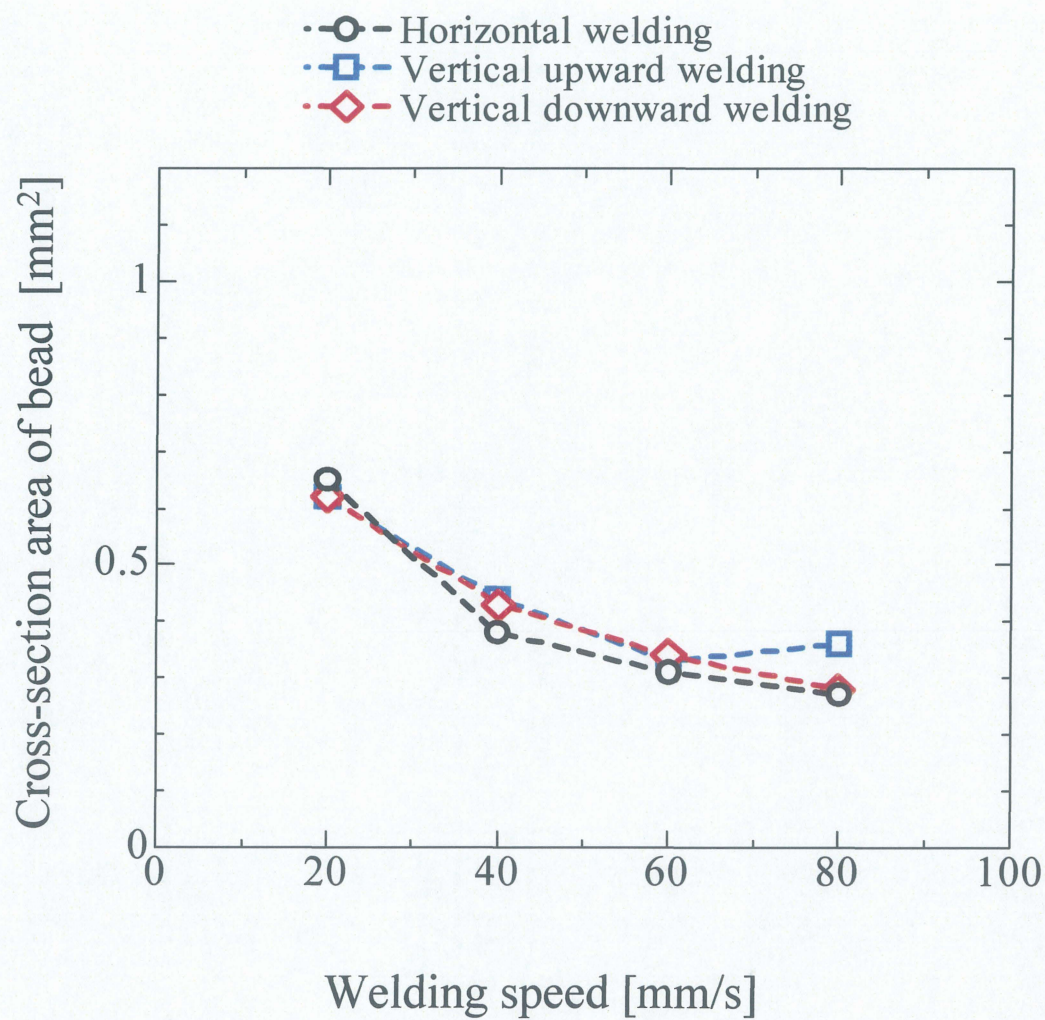
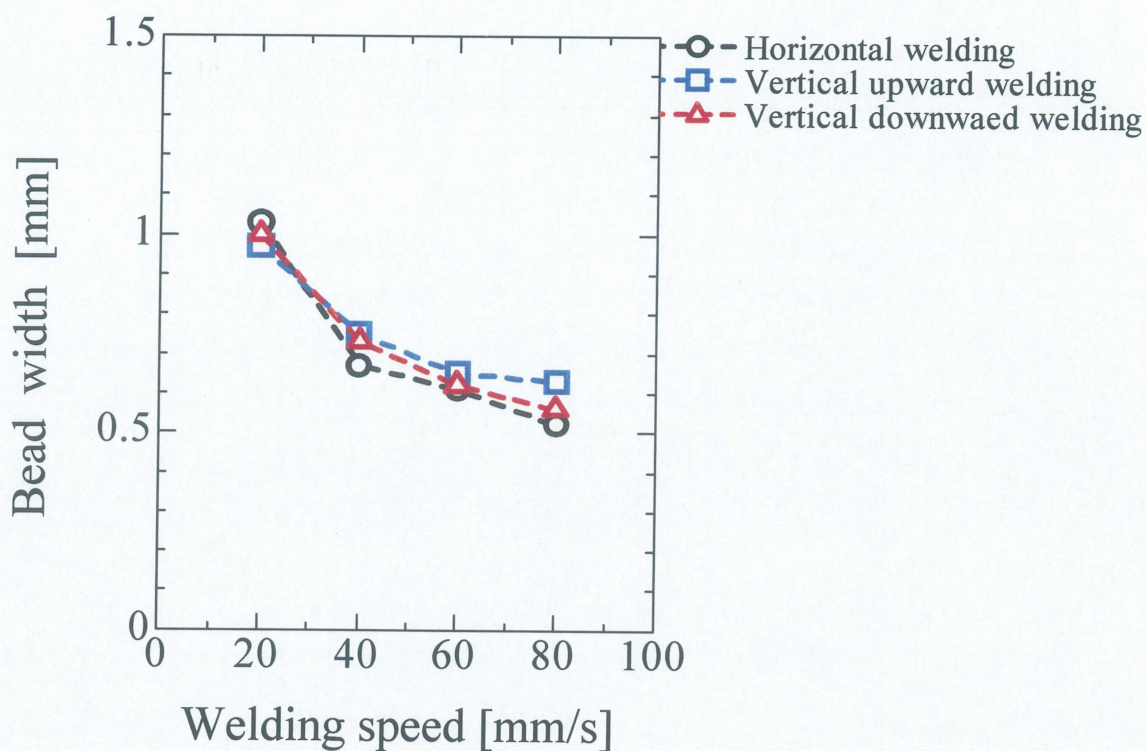
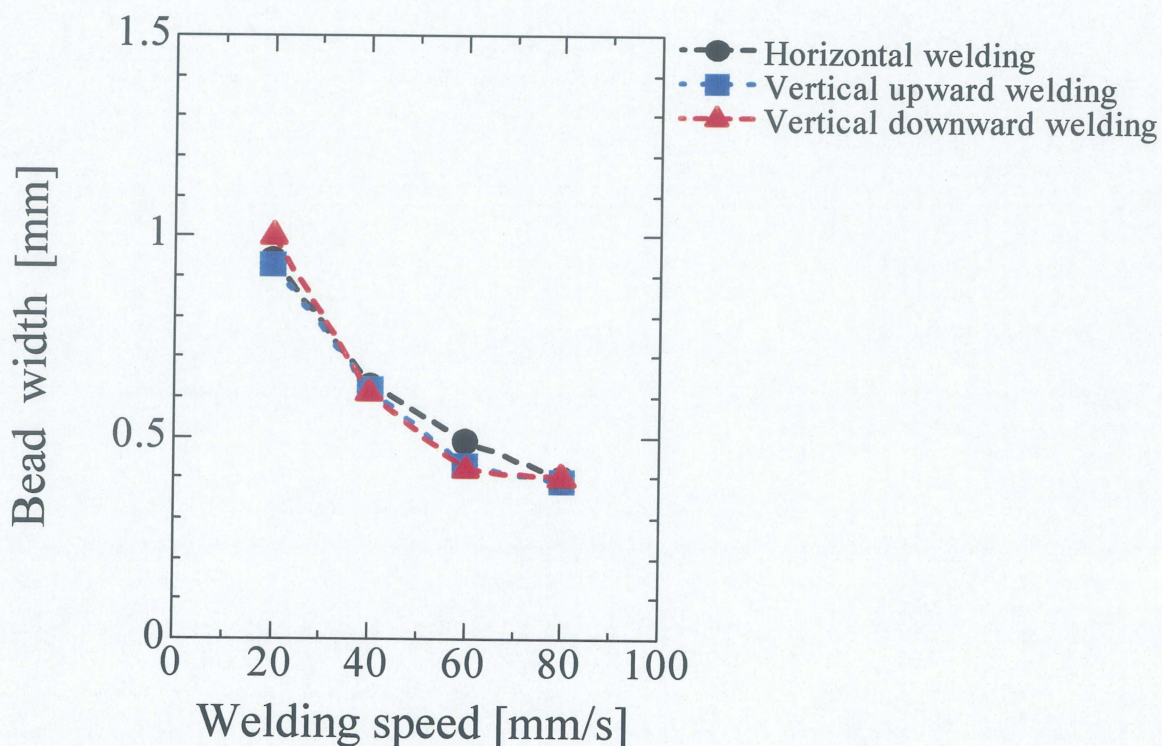


Fig.3-19 Relationship between Welding speed and cross-section area of bead at different welding position in butt welding : $\delta = 0$



(a) Top side



(b) Bottom side

Fig.3-20 Relationship between welding bead width and bead width at different welding position in bead-on-plate welding

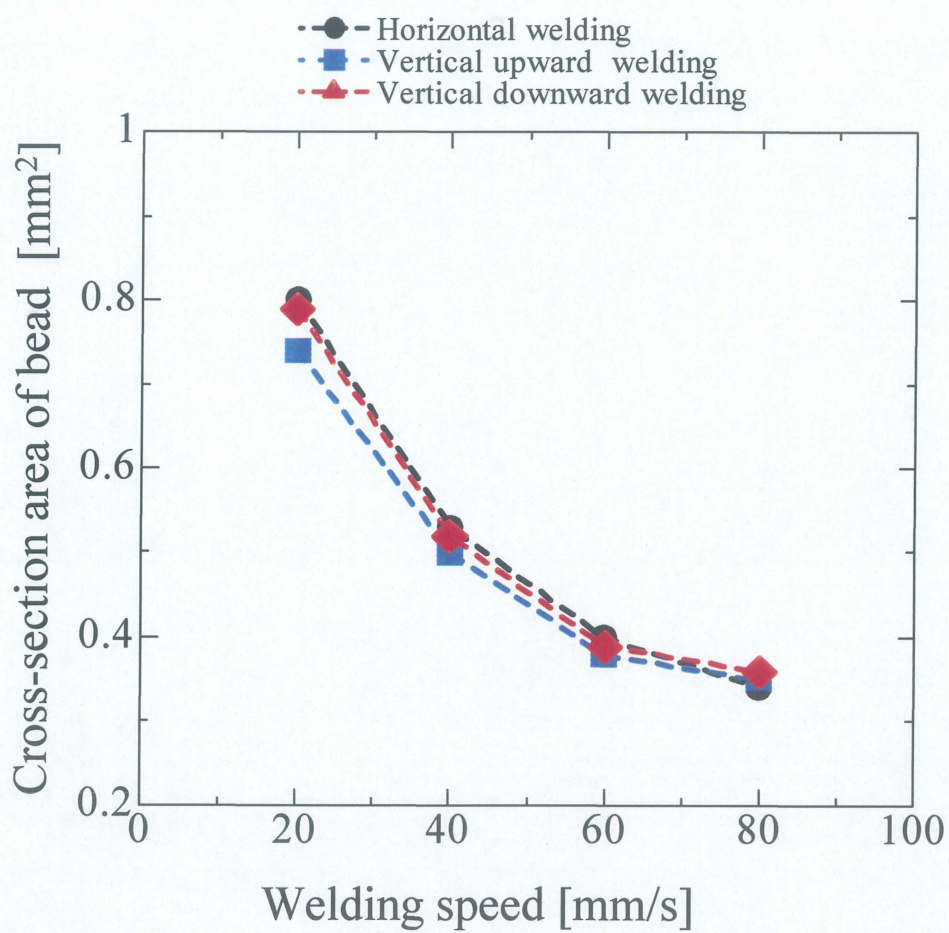
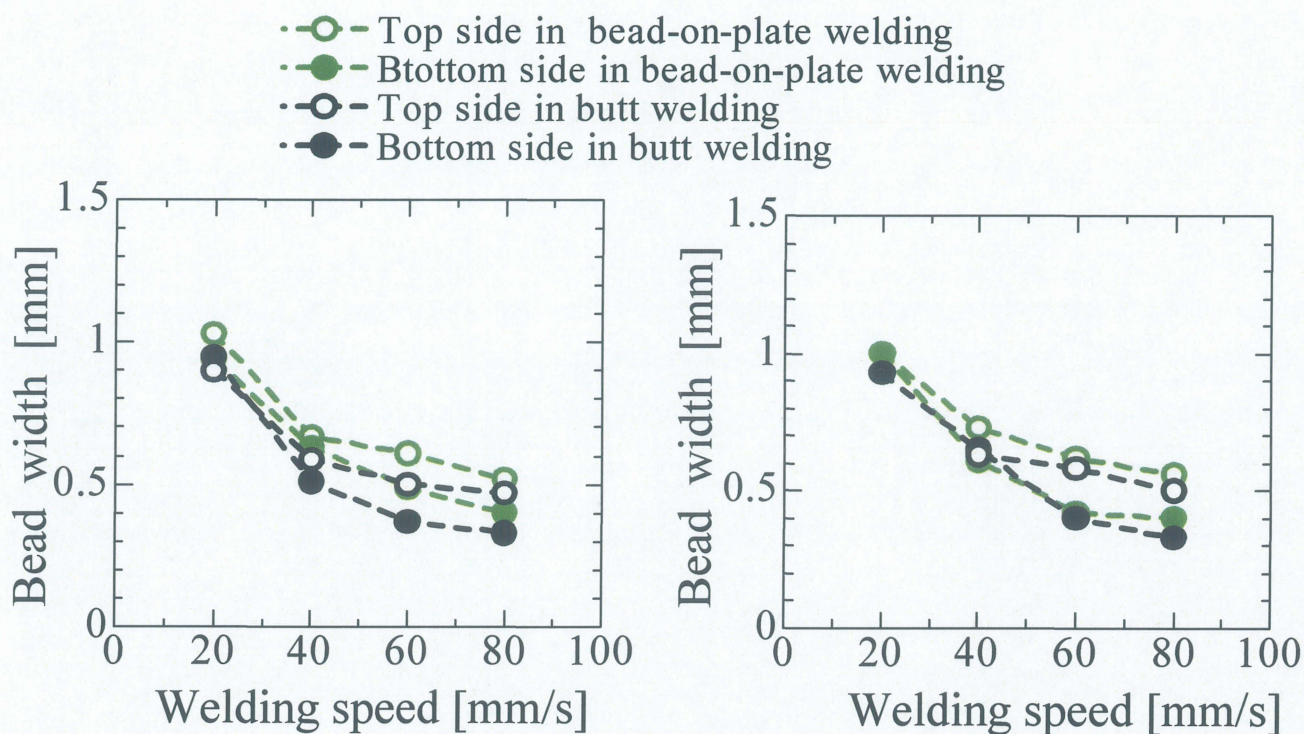
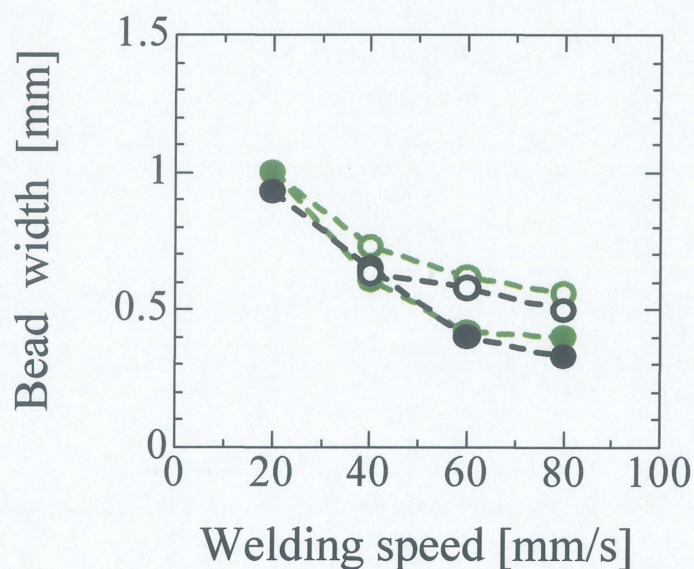


Fig.3-21 Relationship between welding speed and area of cross-section at different welding position in bead-on-plate welding



(a) Horizontal welding

(b) Vertical upward welding



(c) Vertical downward welding

Fig.3-22 Relationship between welding speed and bead width and in butt welding and bead on plate welding

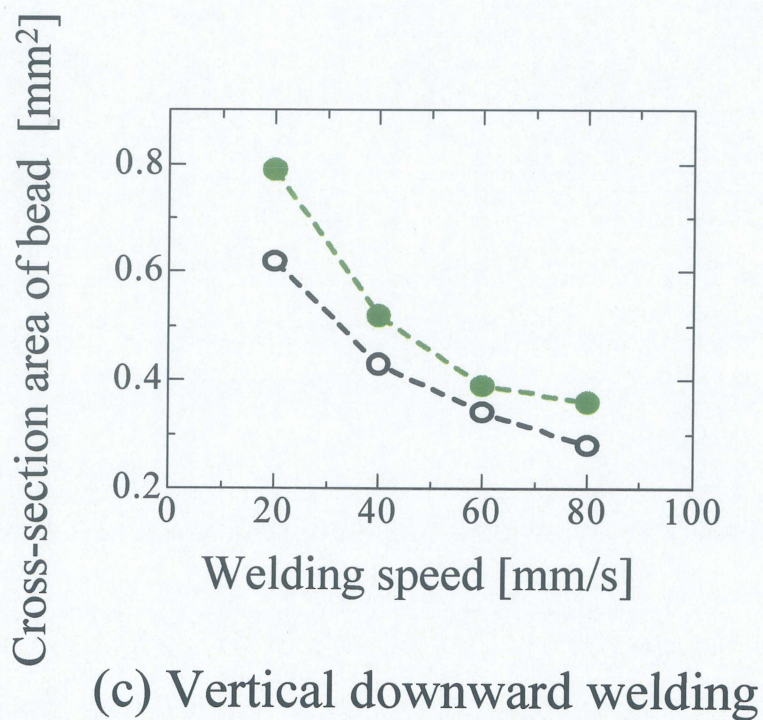
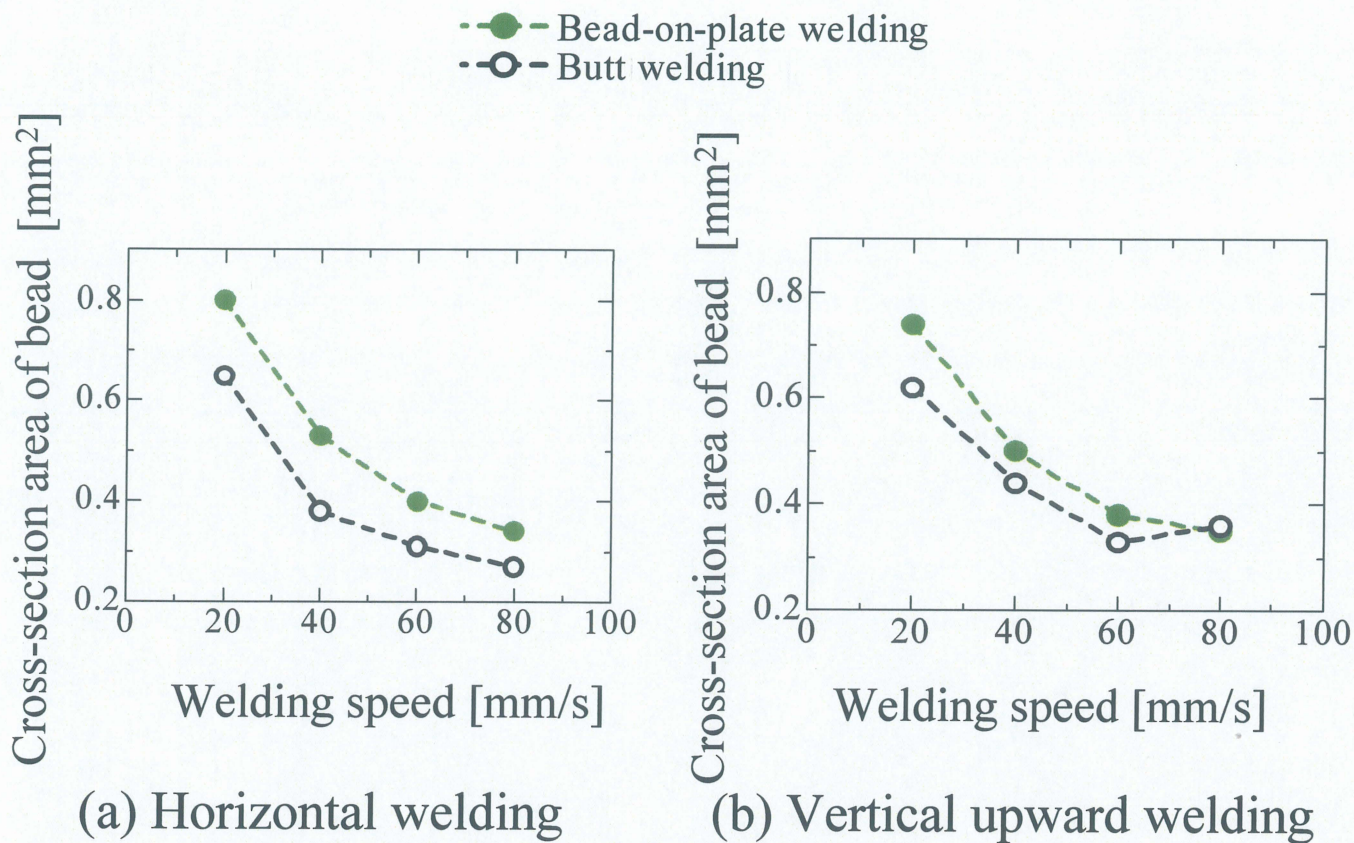
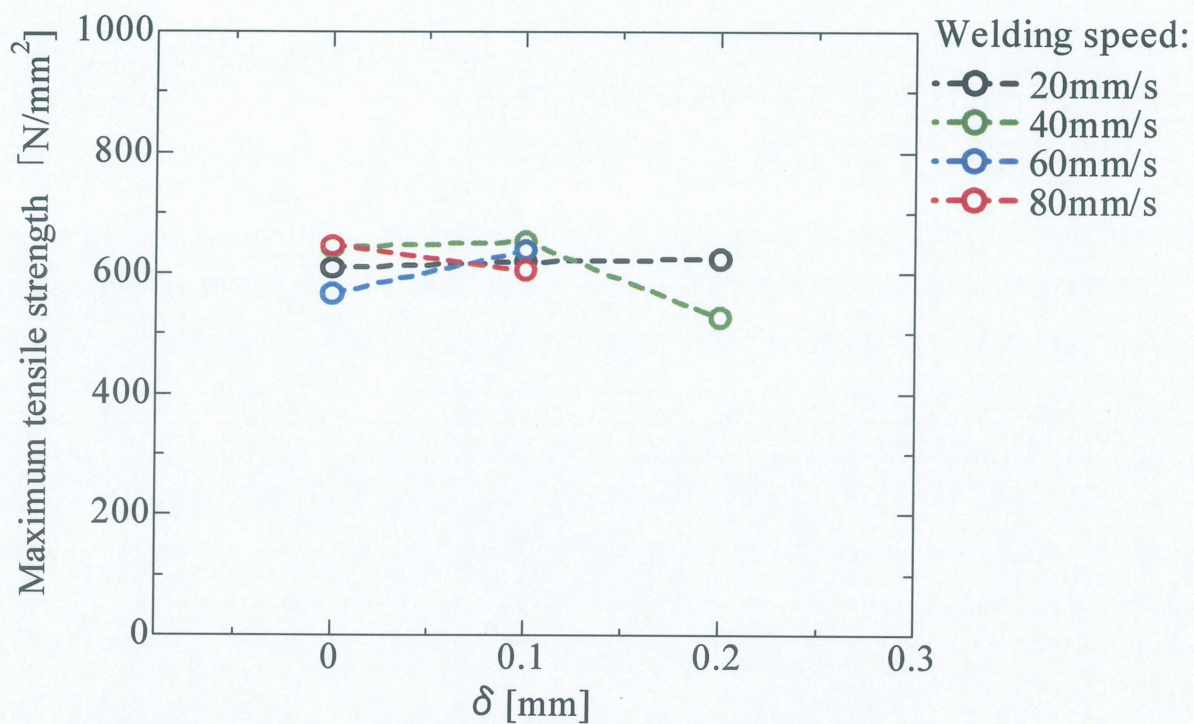
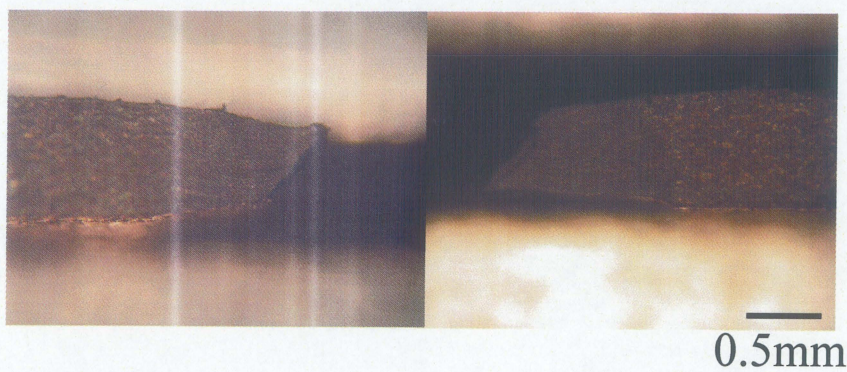


Fig.3-23 Relationship between welding speed and cross-section area of bead in butt welding and bead on plate welding

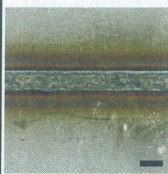
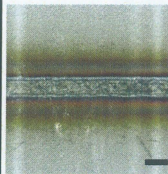
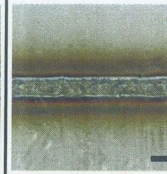

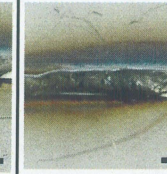

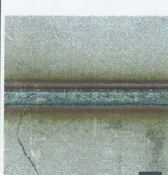




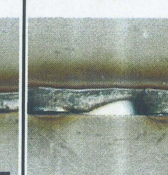
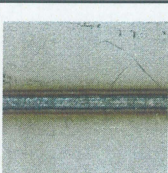



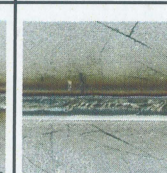
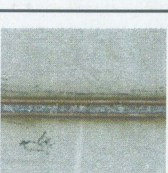

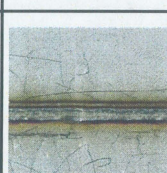
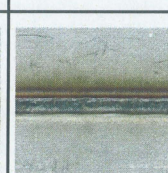


(a) Relationship between δ and maximum tensile strength at different welding speed in horizontal welding



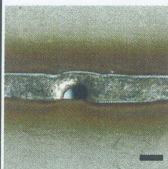

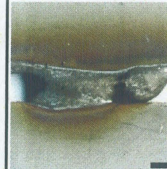
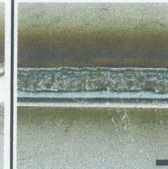
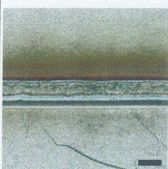
(b) Fractured part of specimen after tensile test

Fig.3-24 Results of tensile test

		δ [mm]					
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

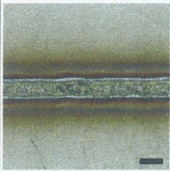
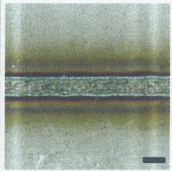
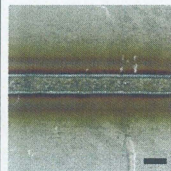
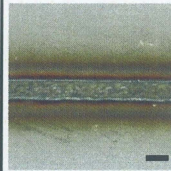
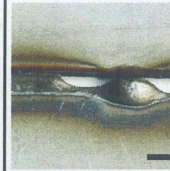
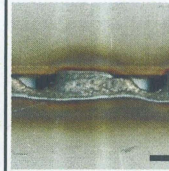
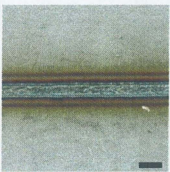
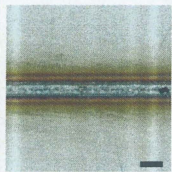
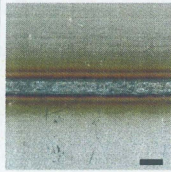
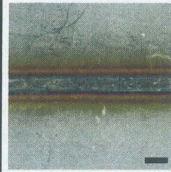
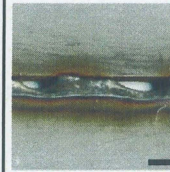
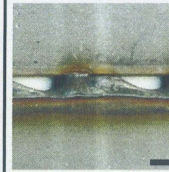
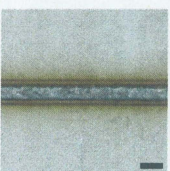
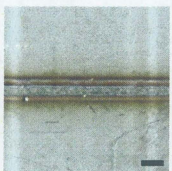
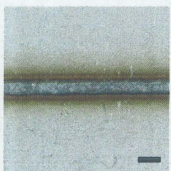
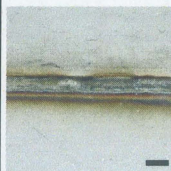


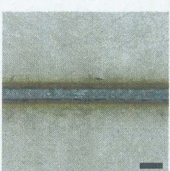
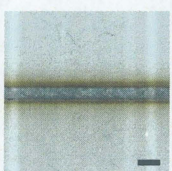
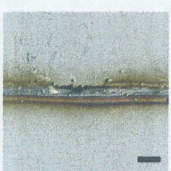
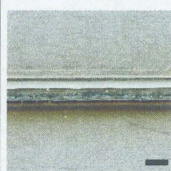
1mm

Fig.3-25 Bead appearance of laser butt weld,
 $\delta = 0 \sim 0.5 \text{ mm}$ in horizontal welding

		δ [mm]					
		0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

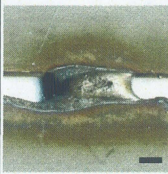
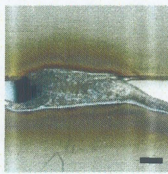
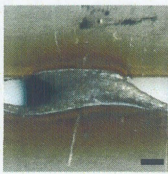
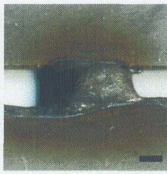
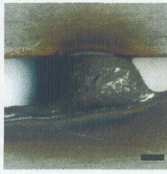
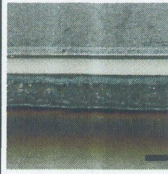
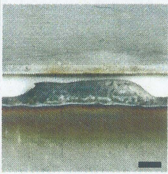
1mm

Fig.3-26 Bead appearance of laser butt weld,
 $\delta = 0.6 \sim 1.1 \text{ mm}$ in horizontal welding

		δ [mm]					
		-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

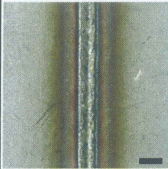
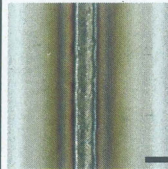
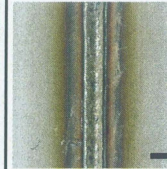
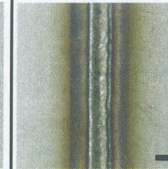
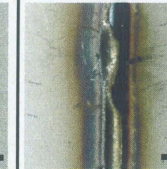
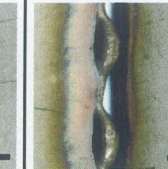
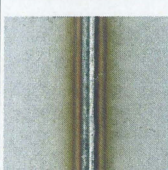

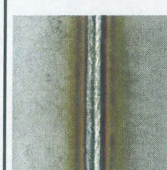
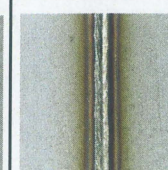
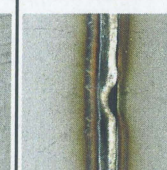
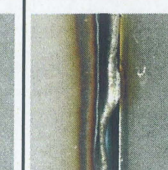
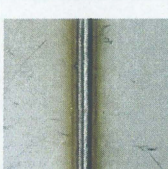



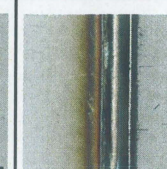
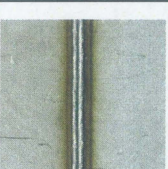
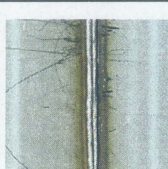



1mm

Fig.3-27 Bead appearance of laser butt weld,
 $\delta = -0.1 \sim -0.6$ mm in horizontal welding

		δ [mm]					
		-0.7	-0.8	-0.9	-1.0	-1.1	-1.2
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

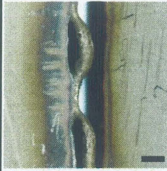
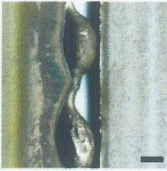
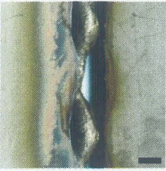
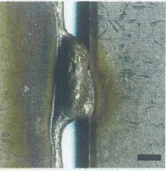
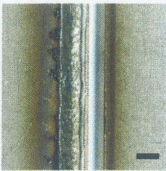
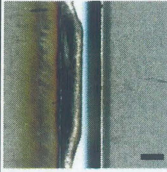
1mm

Fig.3-28 Bead appearance of laser butt weld,
 $\delta = -0.7 \sim -1.2$ mm in horizontal welding

		δ [mm]					
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

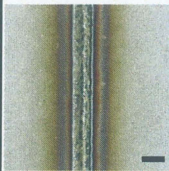
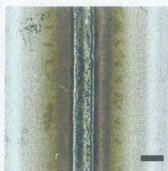
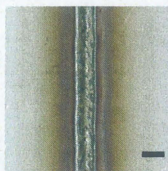
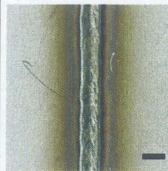
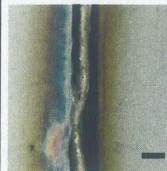

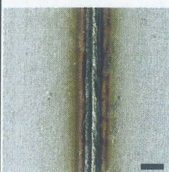
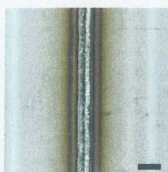
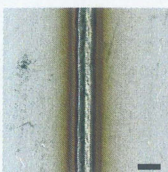
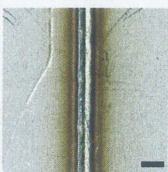

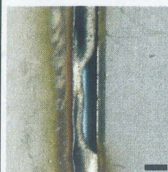
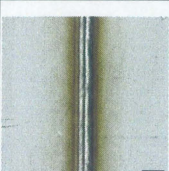
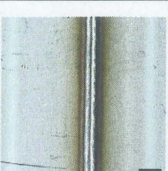
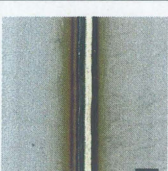

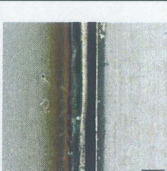

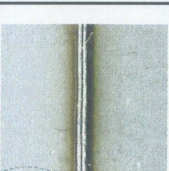
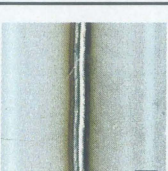
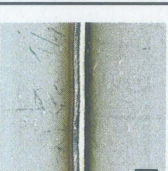


1mm

Fig.3-29 Bead appearance of laser butt weld,
 $\delta = 0 \sim 0.5 \text{ mm}$ in vertical upward welding

		δ [mm]					
		0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

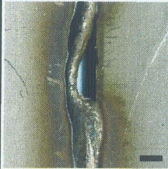
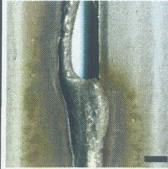
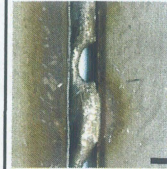
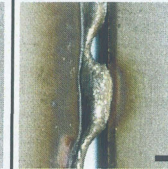
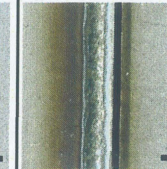
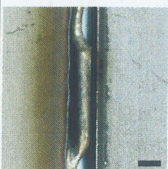
1mm

Fig.3-30 Bead appearance of laser butt weld,
 $\delta = 0.6 \sim 1.1 \text{ mm}$ in vertical upward welding

		δ [mm]					
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

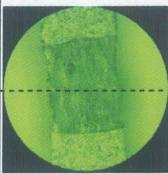
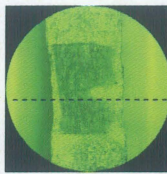
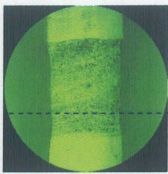
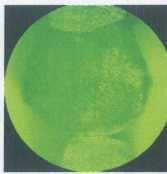
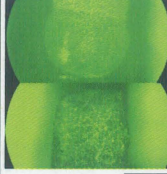
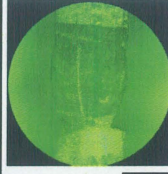
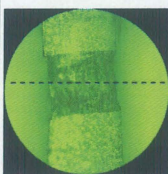
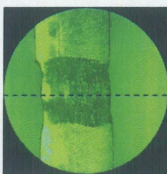
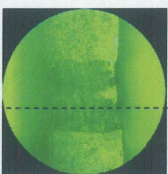

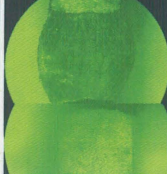
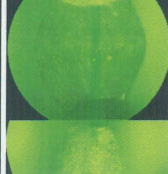
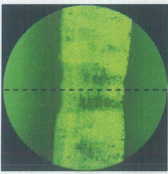
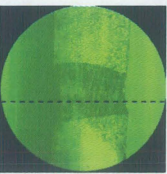
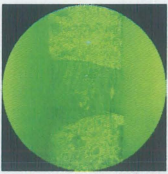
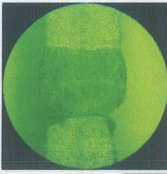

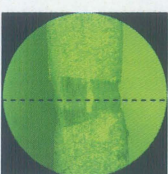
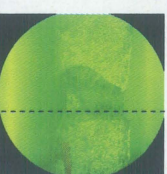
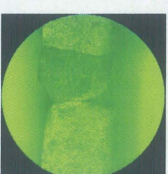

1mm

Fig.3-31 Bead appearance of laser butt weld,
 $\delta = 0 \sim 0.5 \text{ mm}$ in vertical downward welding

		δ [mm]					
		0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

1mm

Fig.3-32 Bead appearance of laser butt weld,
 $\delta = 0.6 \sim 1.1$ mm in vertical downward welding

		δ [mm]					
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

0.5mm

Fig.3-33 Cross-section of weld bead,
 $\delta = 0 \sim 0.5 \text{ mm}$ in horizontal welding

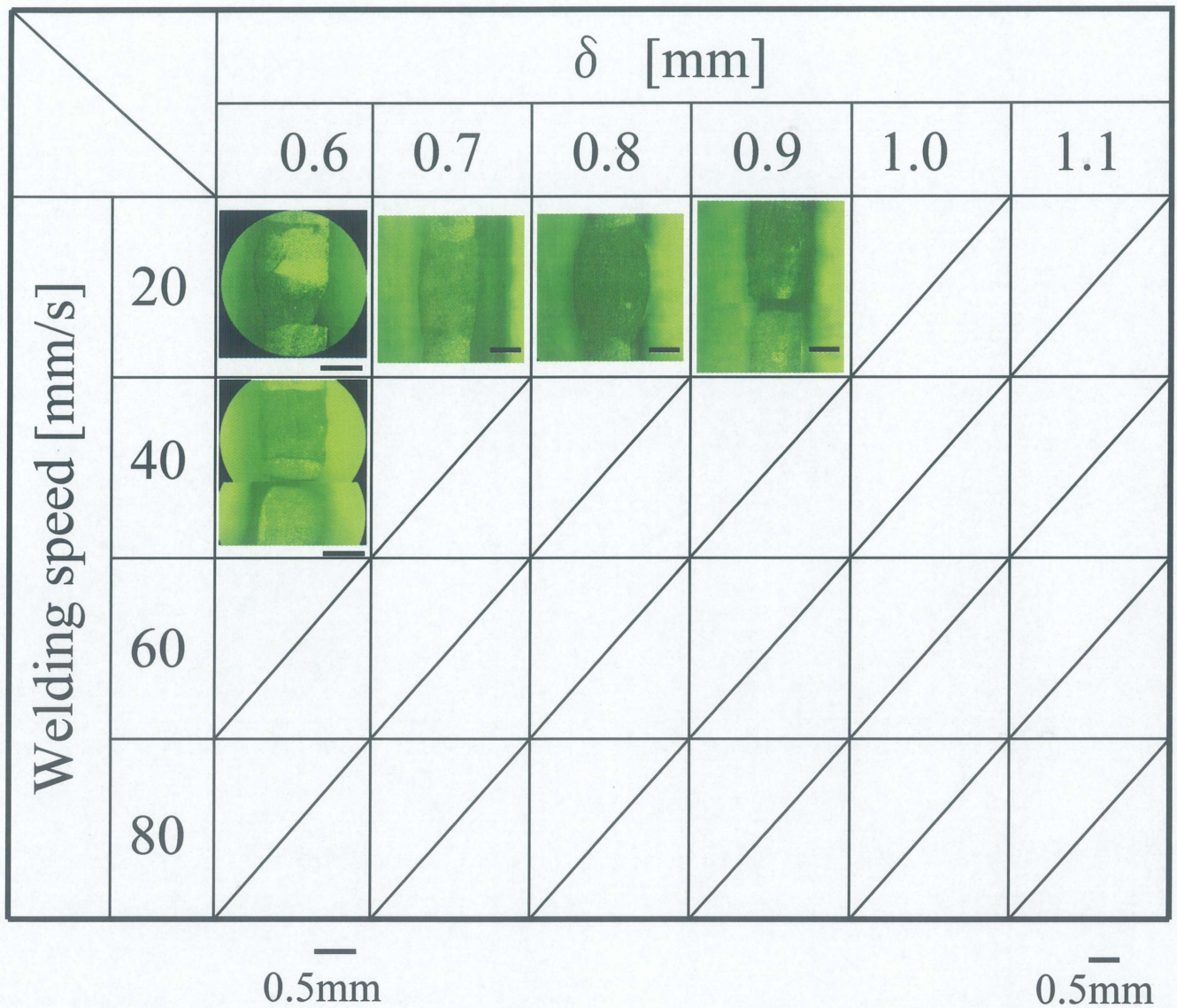


Fig.3-34 Cross-section of weld bead,
 $\delta = 0.6 \sim 1.1$ mm in horizontal welding

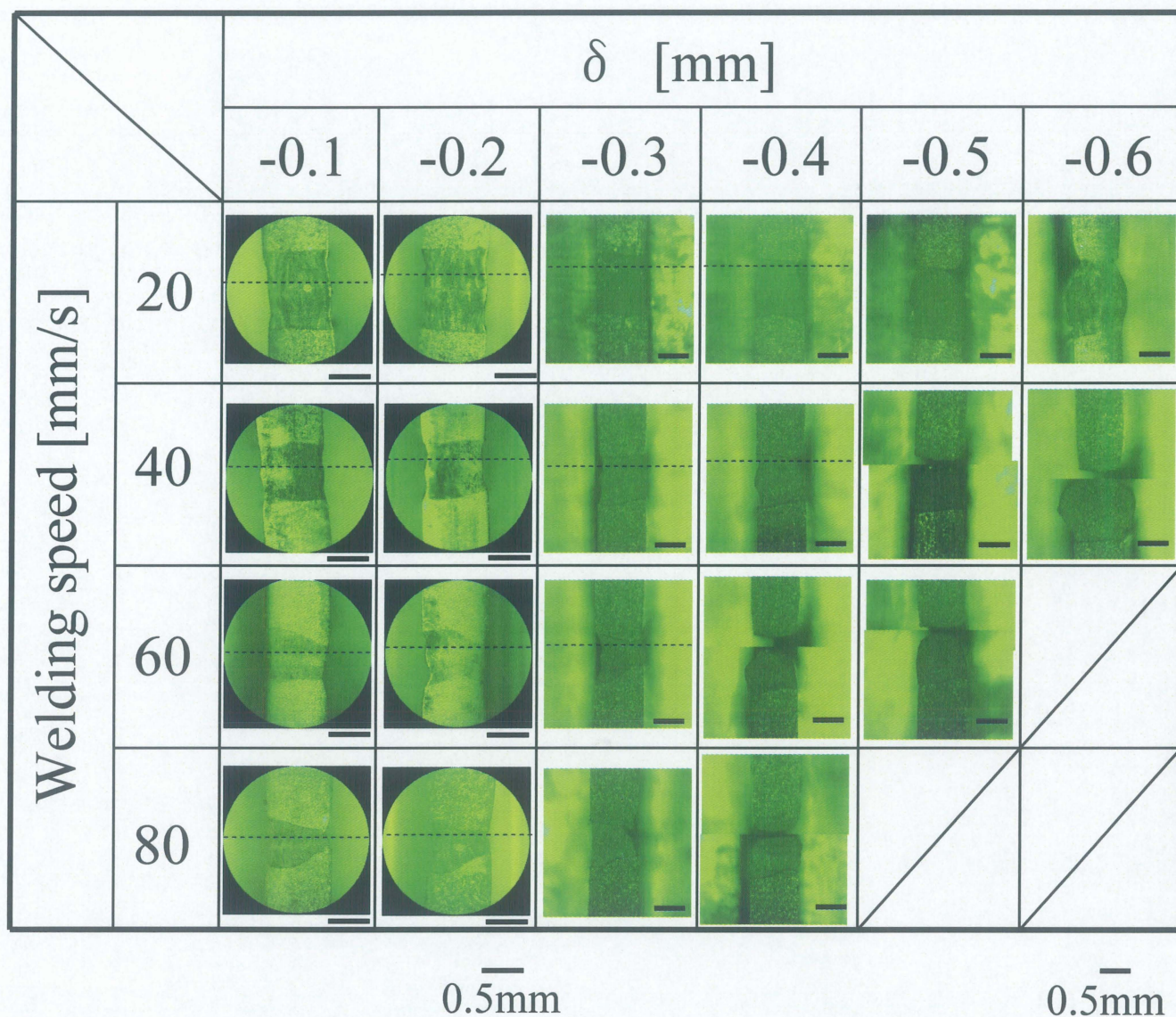
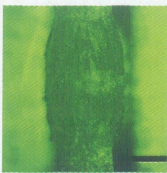
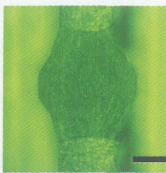
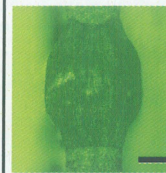
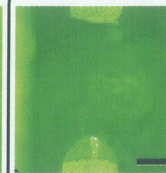
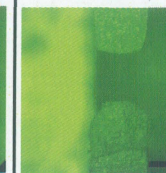


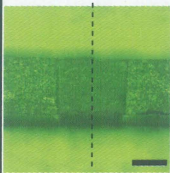
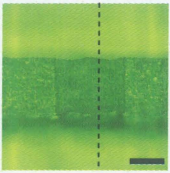
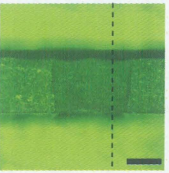
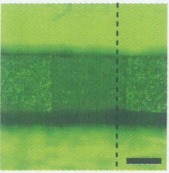
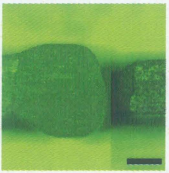
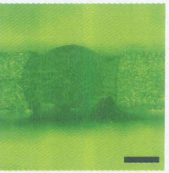
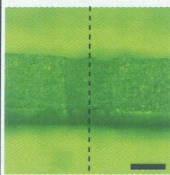
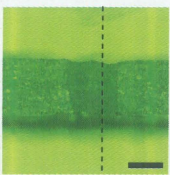
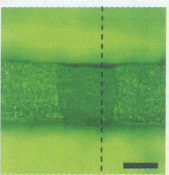
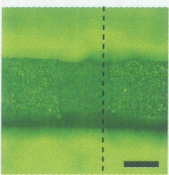
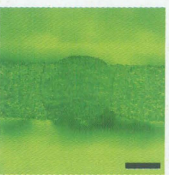
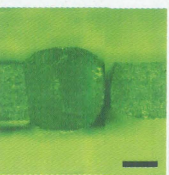
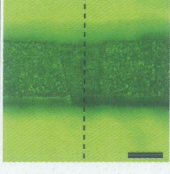
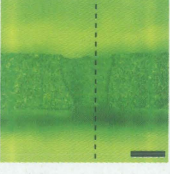
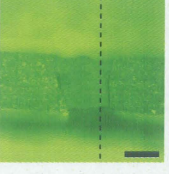
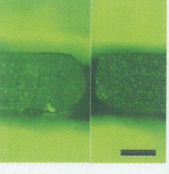
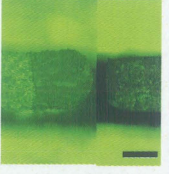
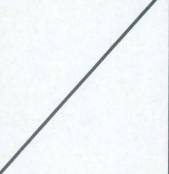
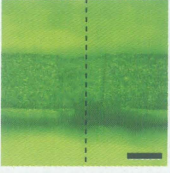
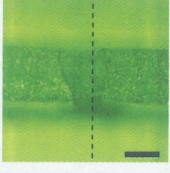
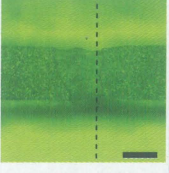
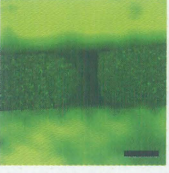
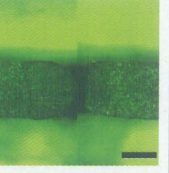
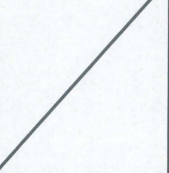


Fig.3-35 Cross-section of weld bead,
 $\delta = -0.1 \sim -0.6\text{mm}$ in horizontal welding

		δ [mm]					
		-0.7	-0.8	-0.9	-1.0	-1.1	-1.2
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

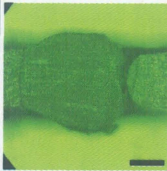
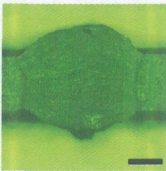
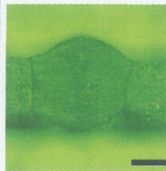
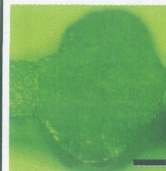
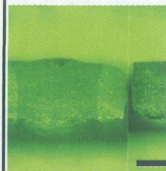
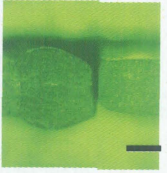
0.5mm

Fig.3-36 Cross-section of weld bead,
 $\delta = -0.7 \sim -1.2$ mm in horizontal welding

		δ [mm]					
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

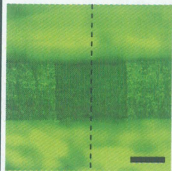
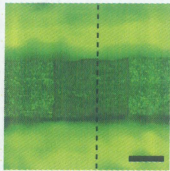
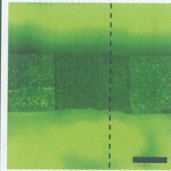
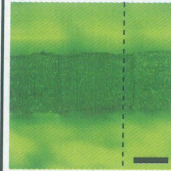
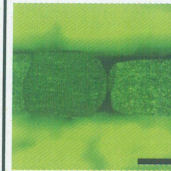
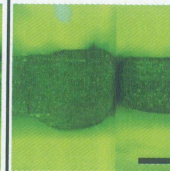
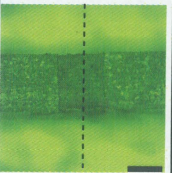
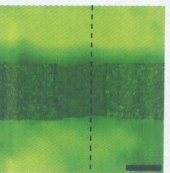
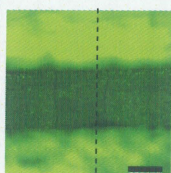
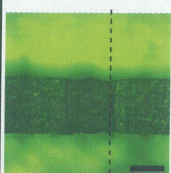

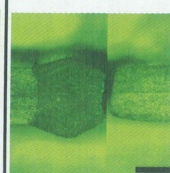
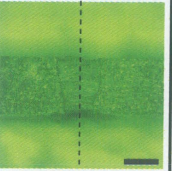
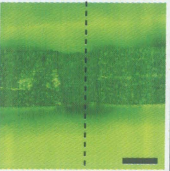
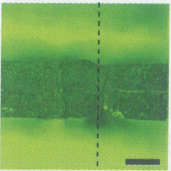
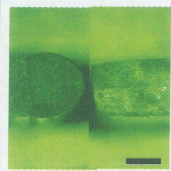
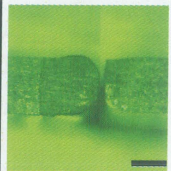
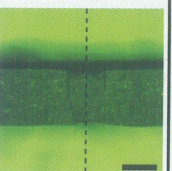
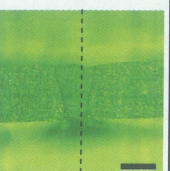
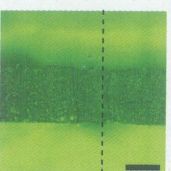
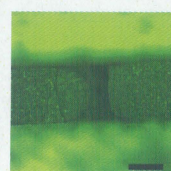
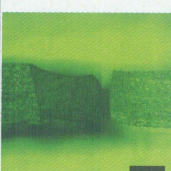
0.5mm

Fig.3-37 Cross-section of weld bead,
 $\delta = 0 \sim 0.5 \text{mm}$ in vertical upward welding

		δ [mm]					
		0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

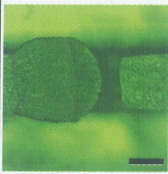
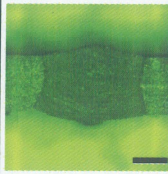
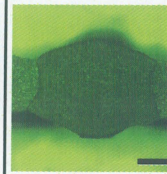
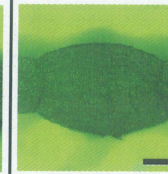
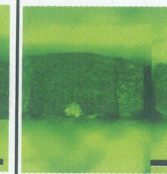
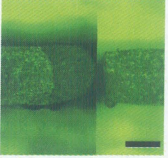
0.5mm

Fig.3-38 Cross-section of weld bead,
 $\delta = 0.6 \sim 1.1$ mm in vertical upward welding

		δ [mm]					
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

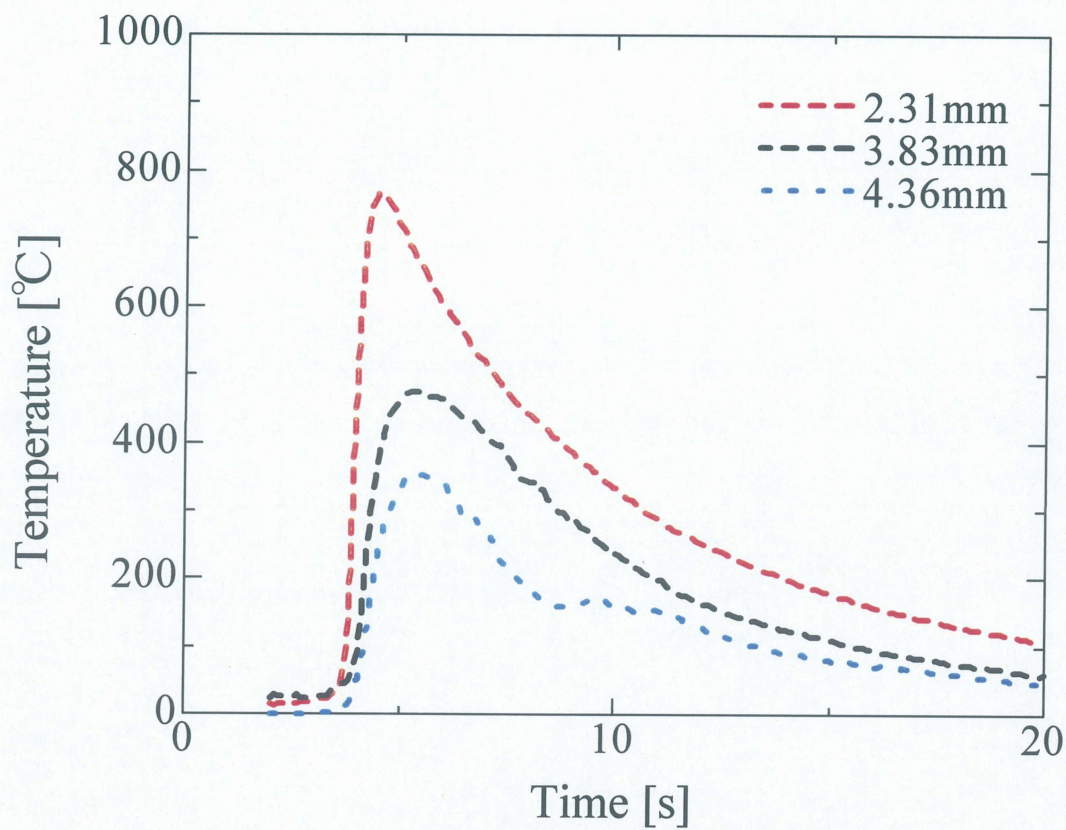
0.5mm

Fig.3-39 Cross-section of weld bead,
 $\delta = 0 \sim 0.5 \text{ mm}$ in vertical downward welding

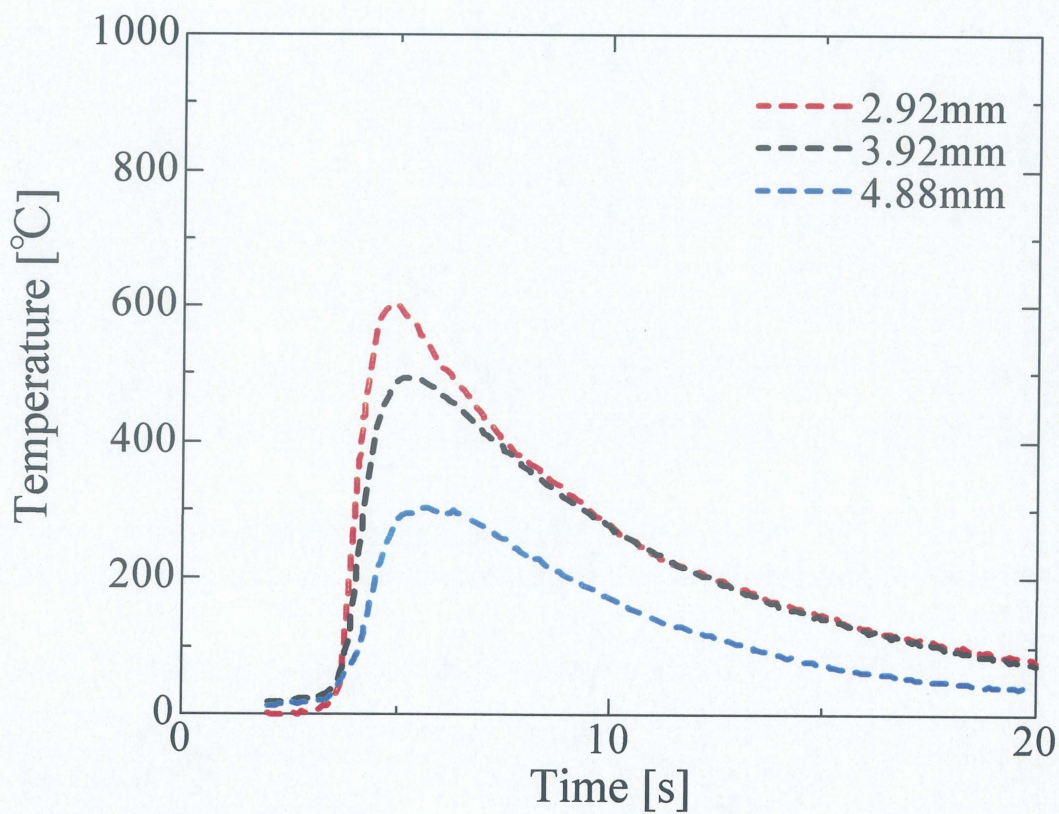
		δ [mm]					
		0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

0.5mm

Fig.3-40 Cross-section of weld bead,
 $\delta = 0.6 \sim 1.1$ mm in vertical downward welding

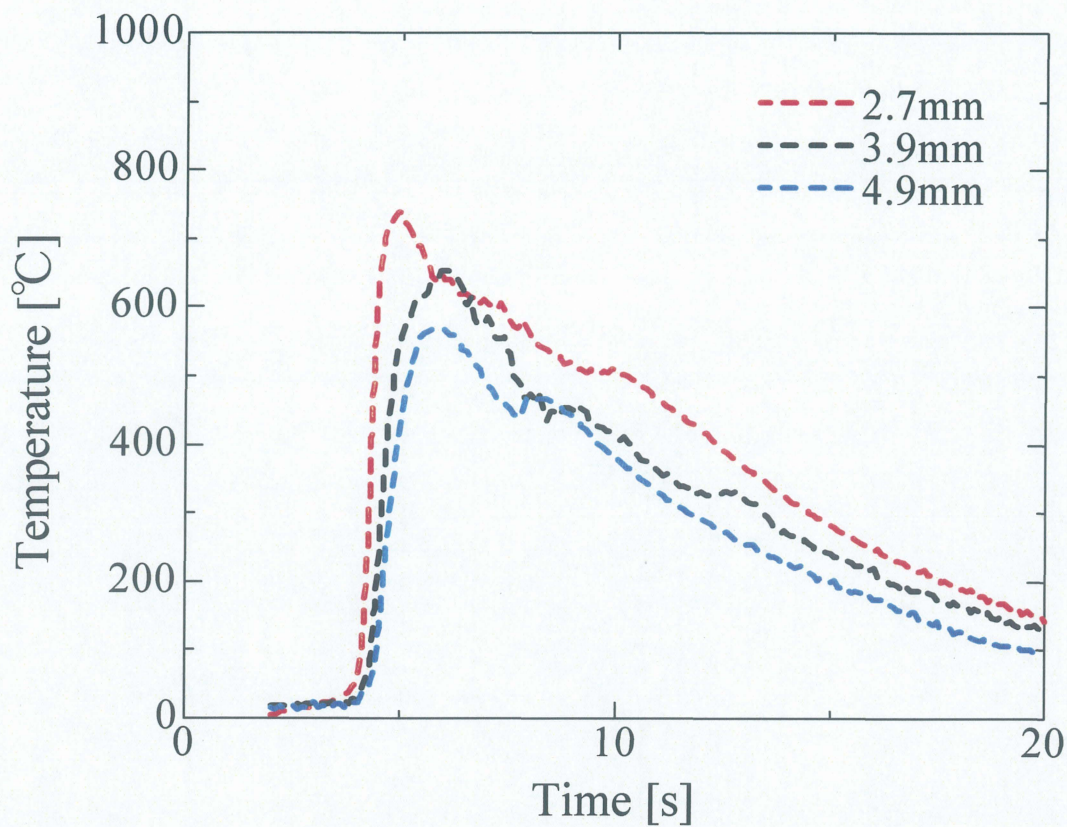


(a) Upper plate

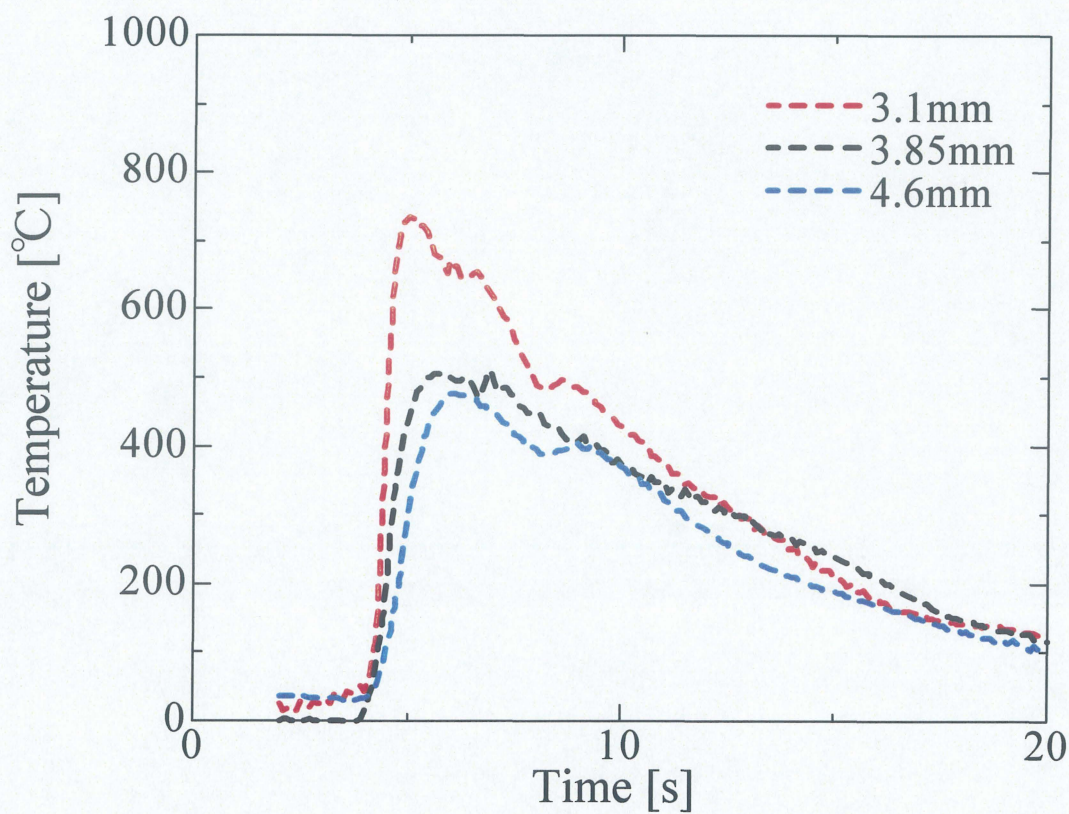


(b) Lower plate

Fig.4-1 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 20mm/s $\delta = 0\text{mm}$

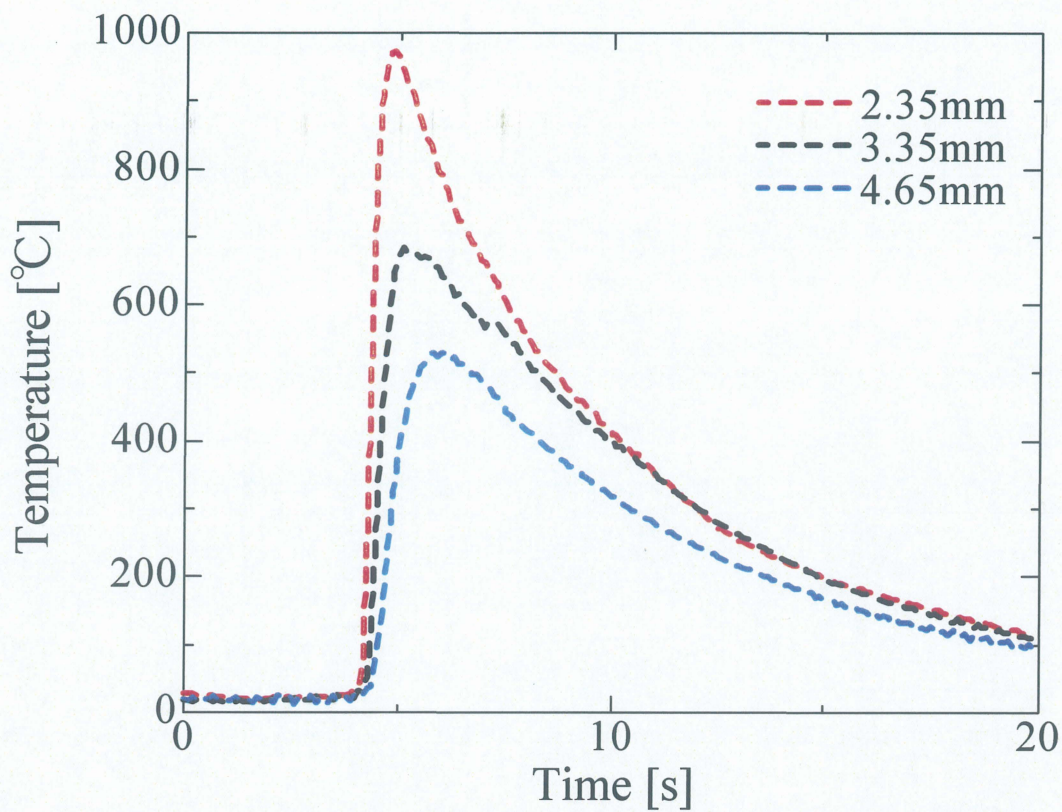


(a) Upper plate

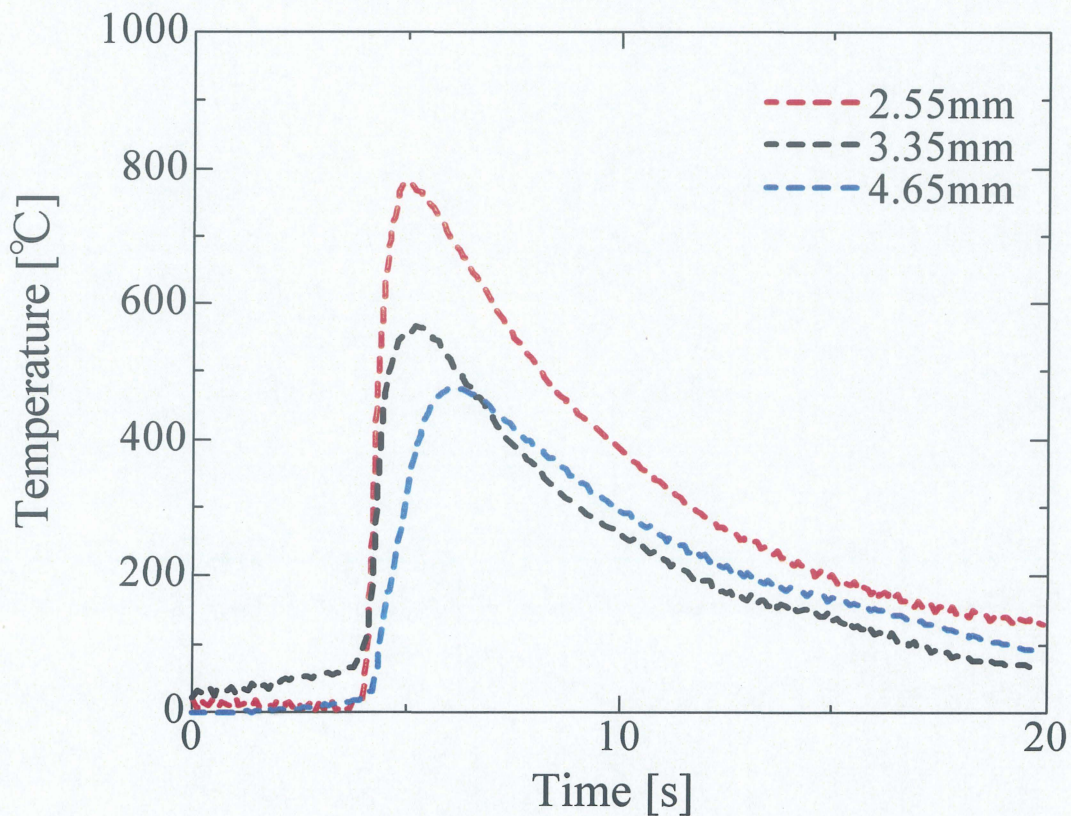


(b) Lower plate

Fig.4-2 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 20mm/s $\delta = +0.2\text{mm}$

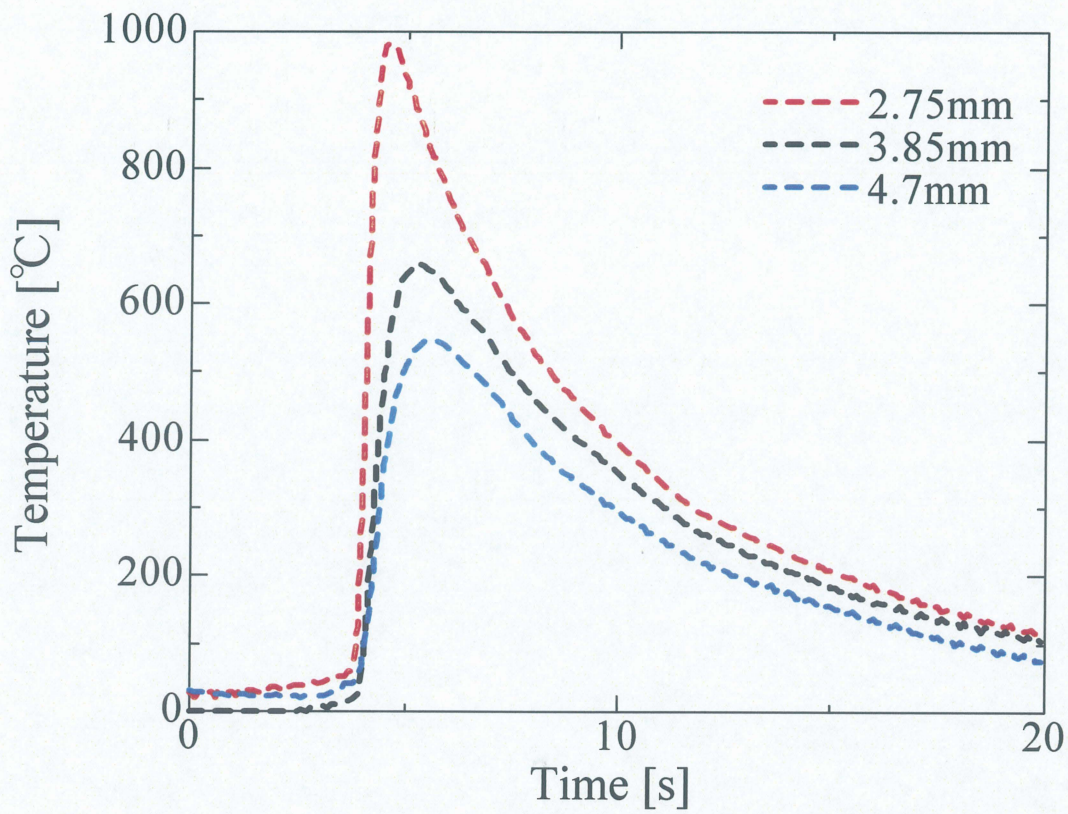


(a) Upper plate

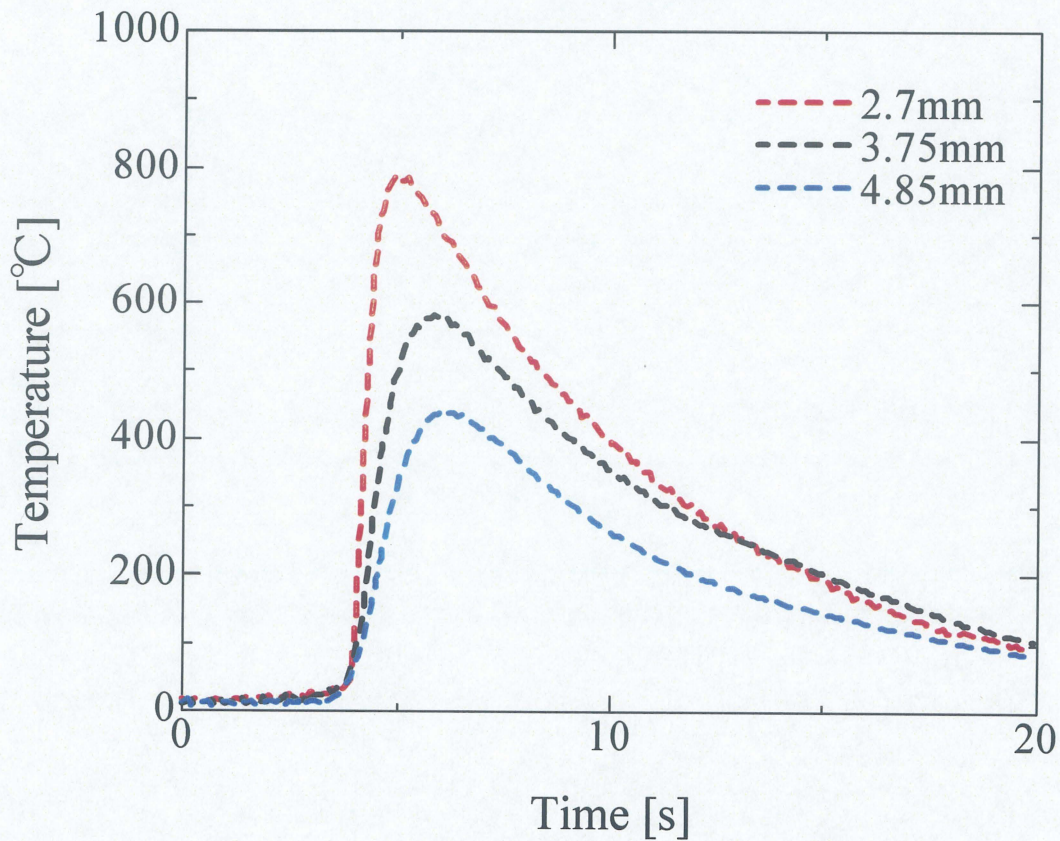


(b) Lower plate

Fig.4-3 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 20mm/s $\delta = +0.4\text{mm}$

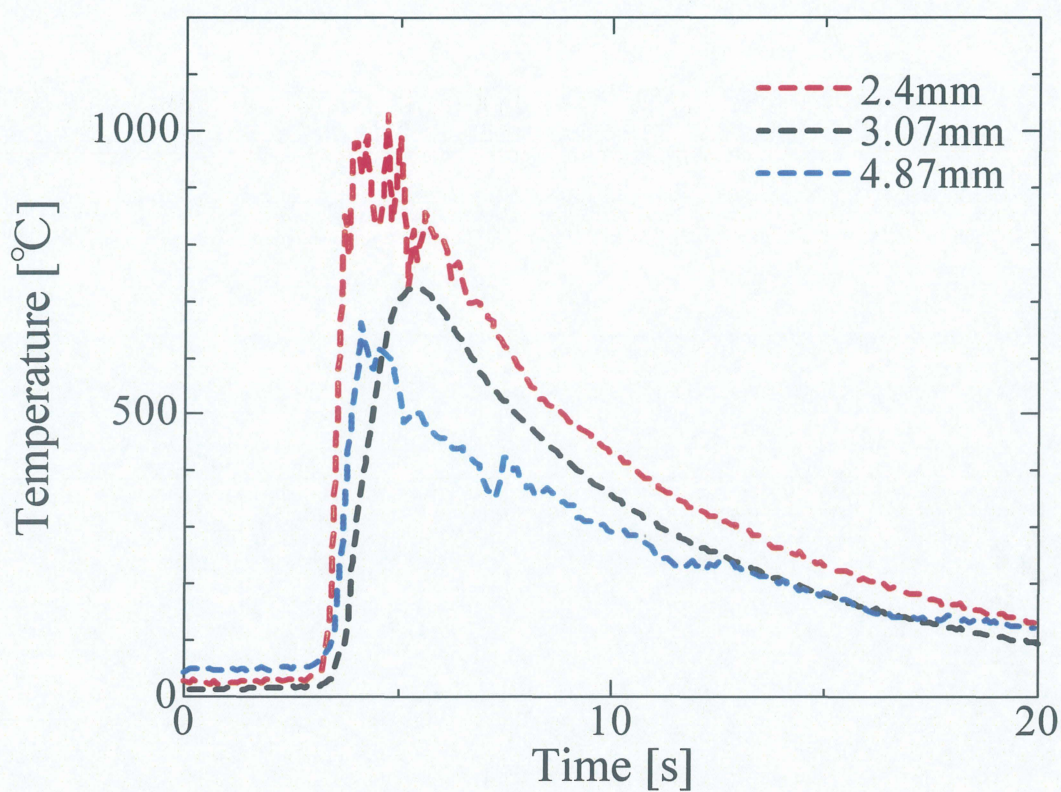


(a) Upper plate

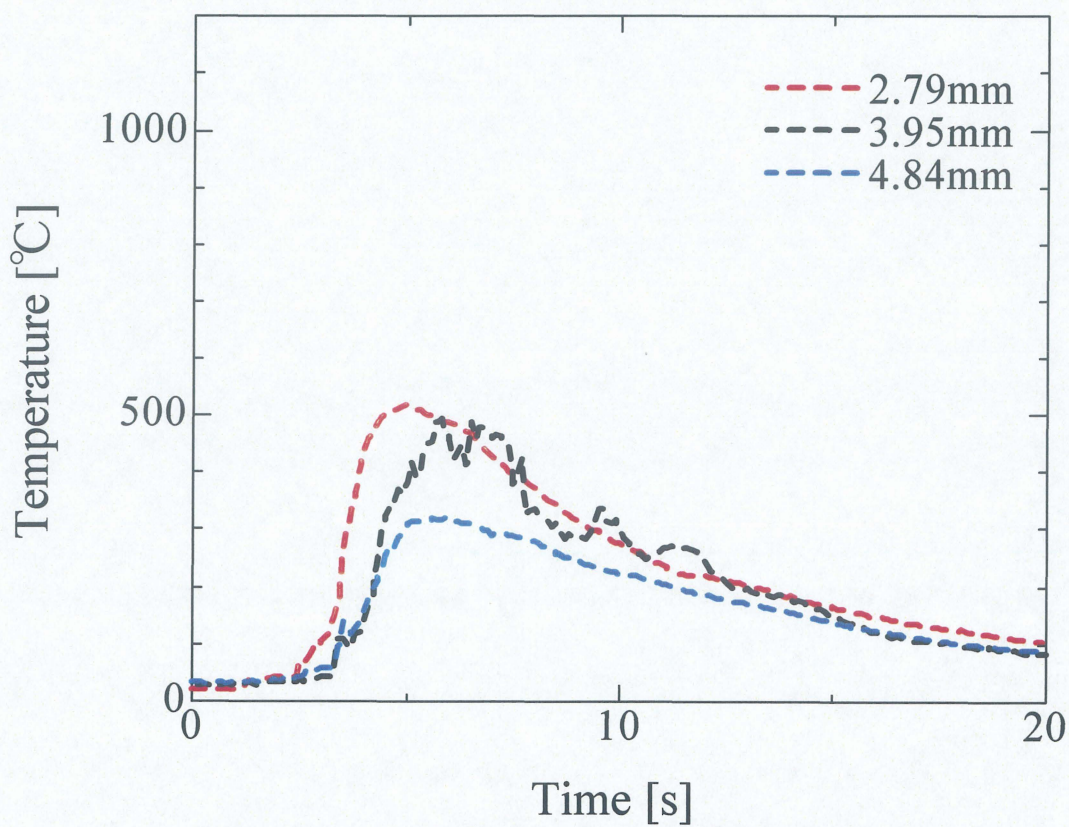


(b) Lower plate

Fig.4-4 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 20mm/s $\delta = +0.6\text{mm}$

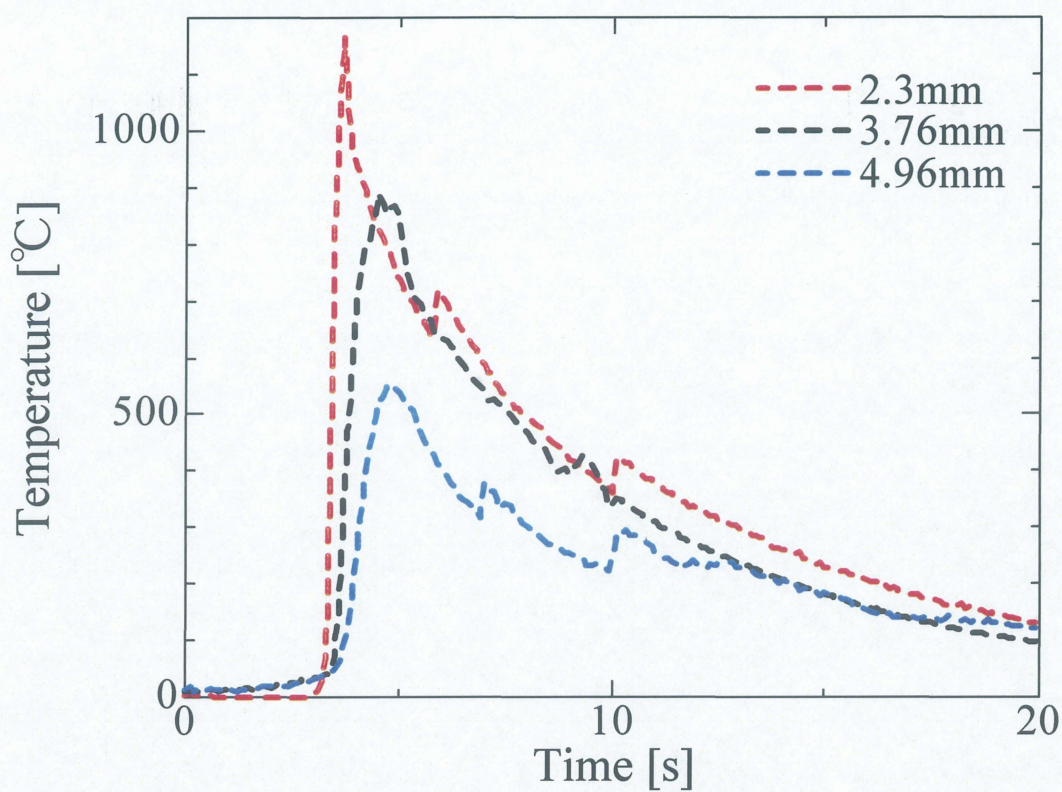


(a) Upper plate

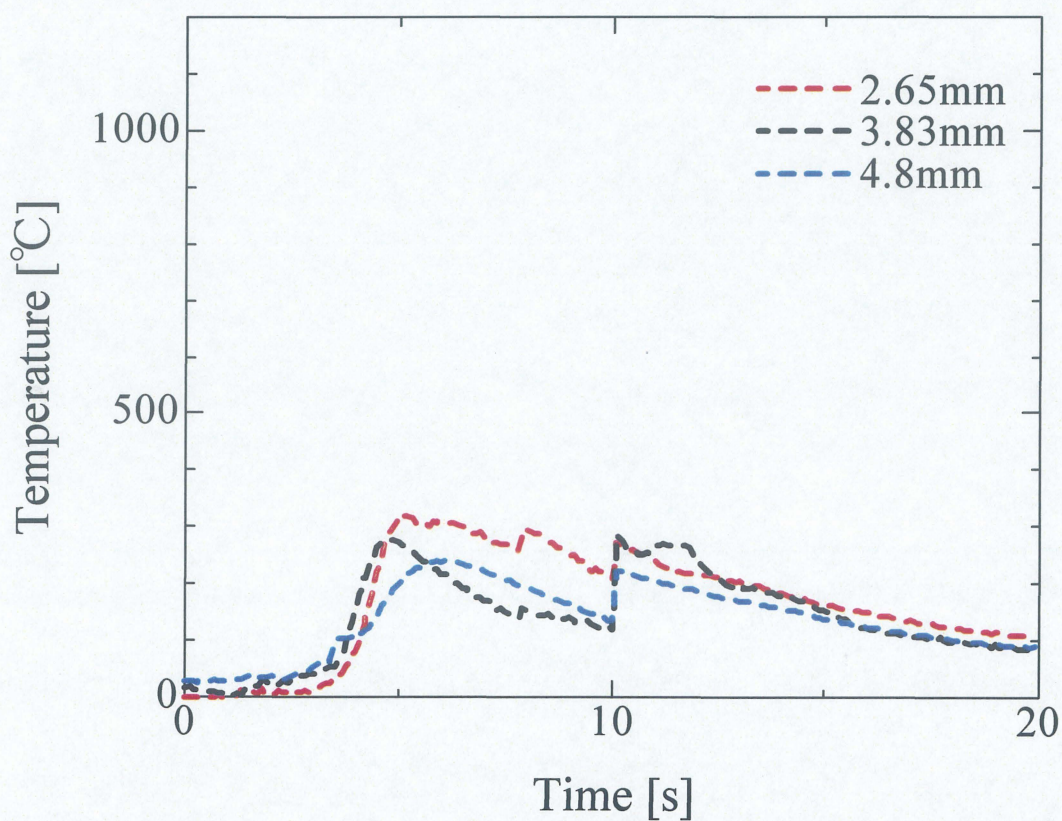


(b) Lower plate

Fig.4-5 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 20mm/s $\delta = +0.8\text{mm}$

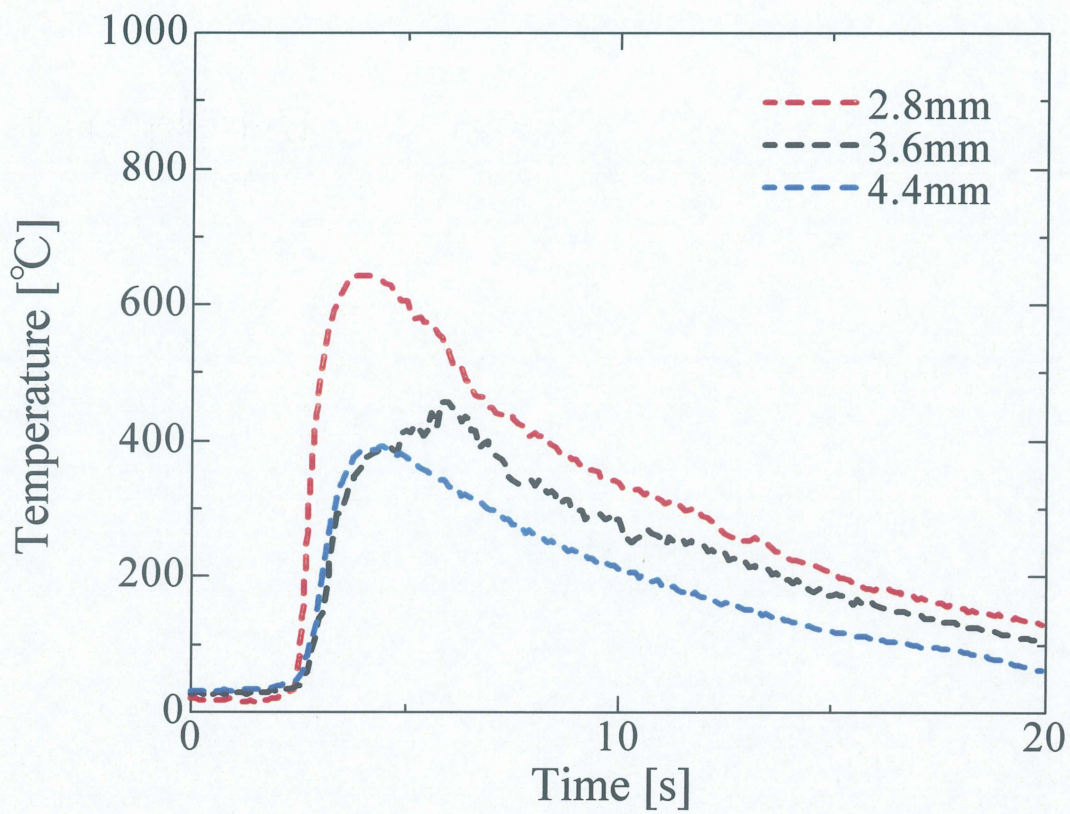


(a) Upper plate

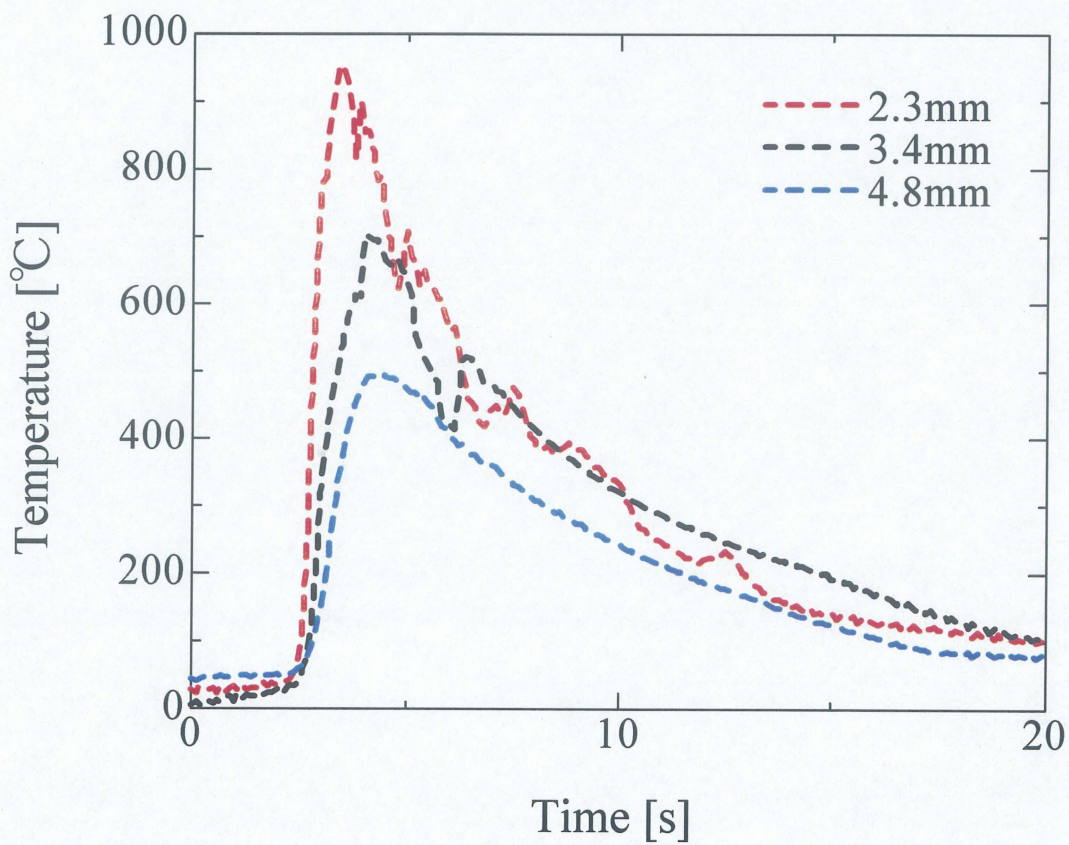


(b) Lower plate

Fig.4-6 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 20mm/s $\delta = +1.0\text{mm}$

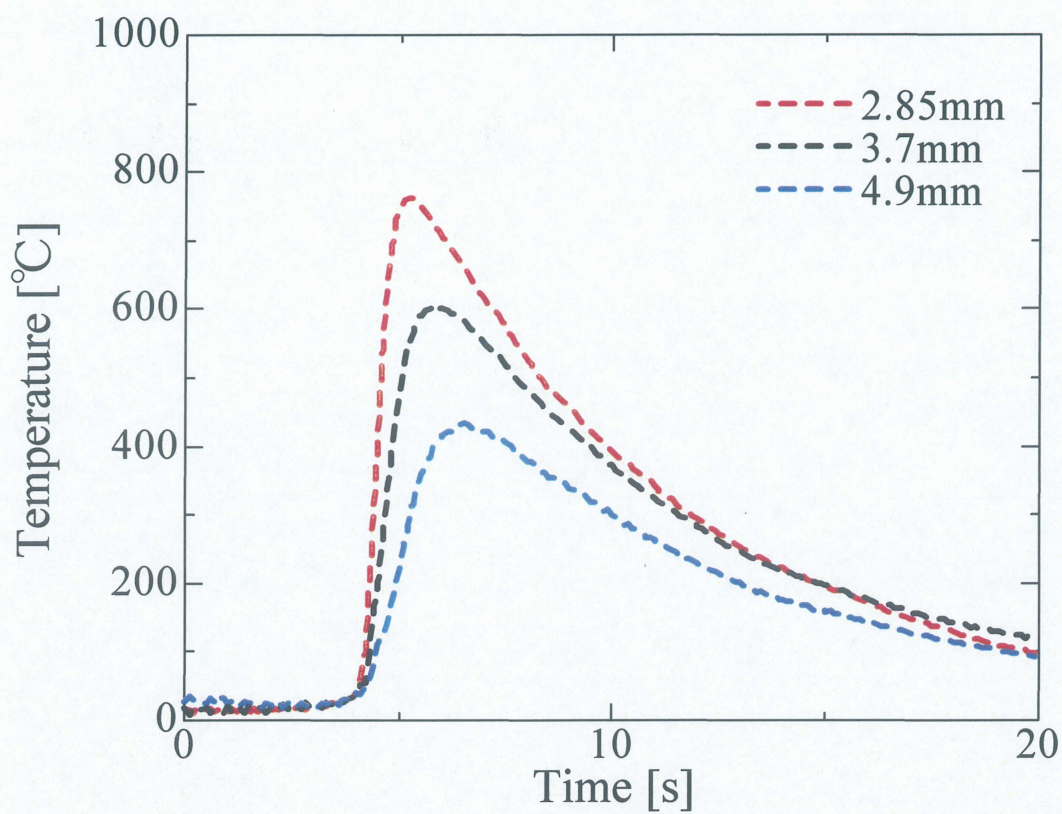


(a) Upper plate

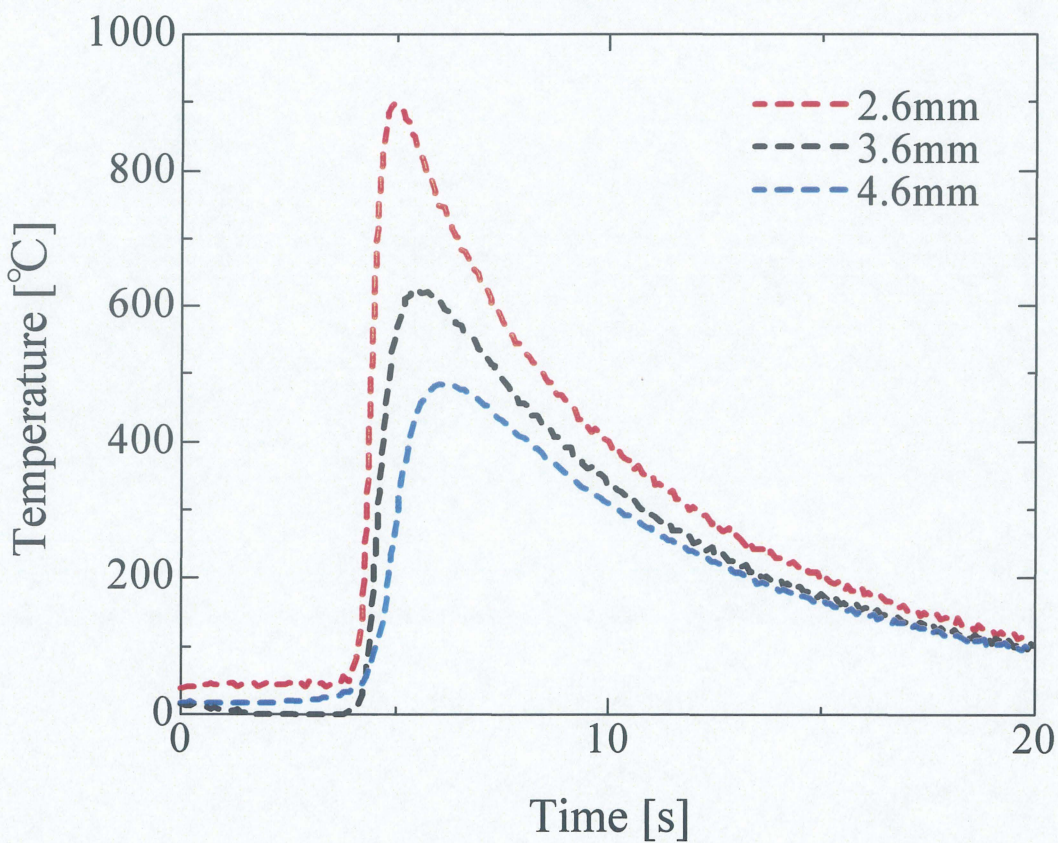


(b) Lower plate

Fig.4-7 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 20mm/s $\delta = -0.2\text{mm}$

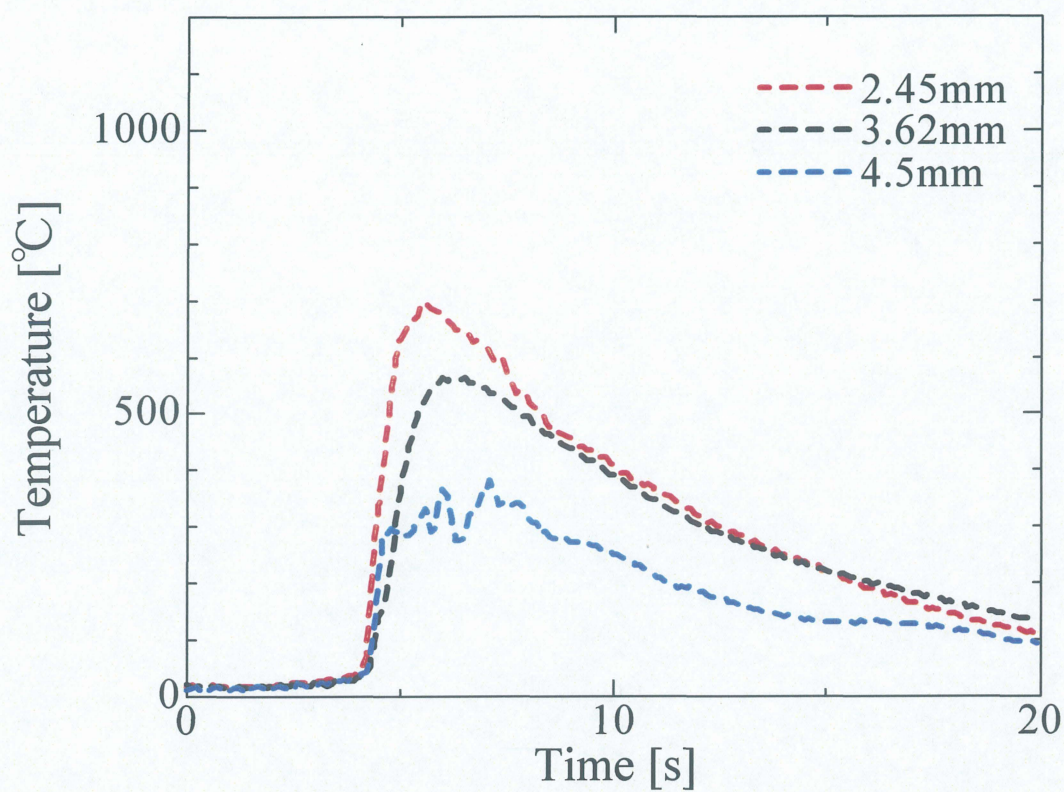


(a) Upper plate

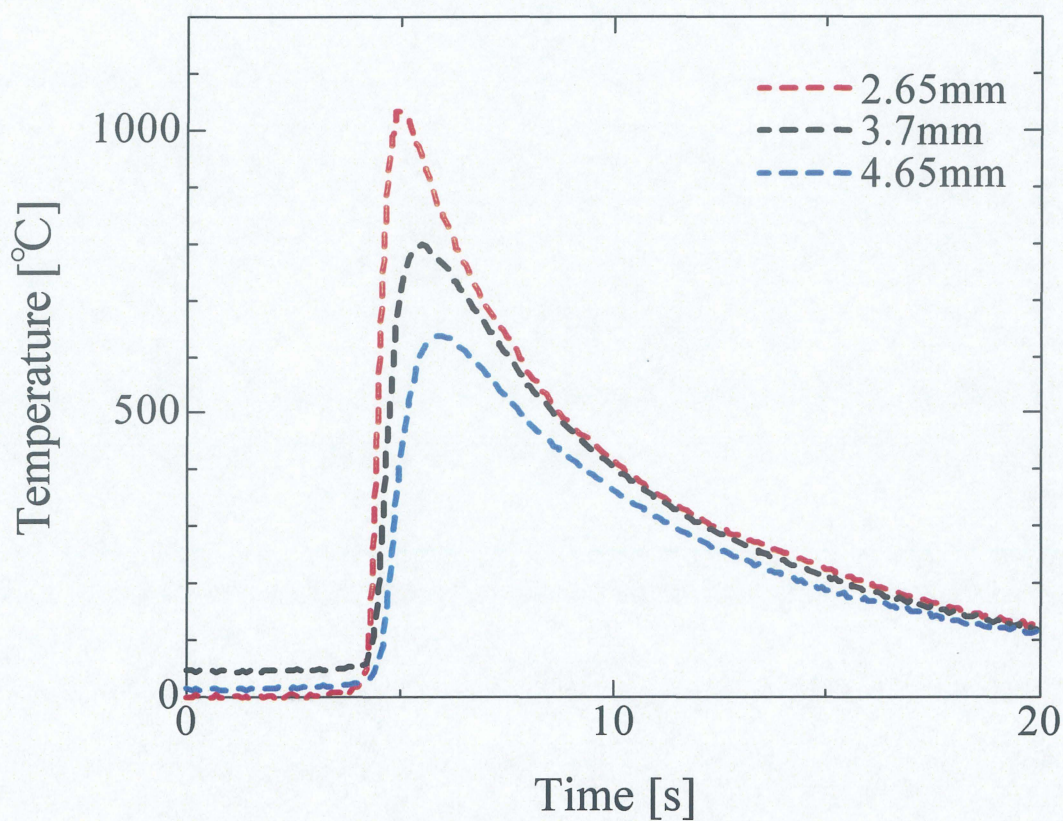


(b) Lower plate

Fig.4-8 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 20mm/s $\delta = -0.4\text{mm}$

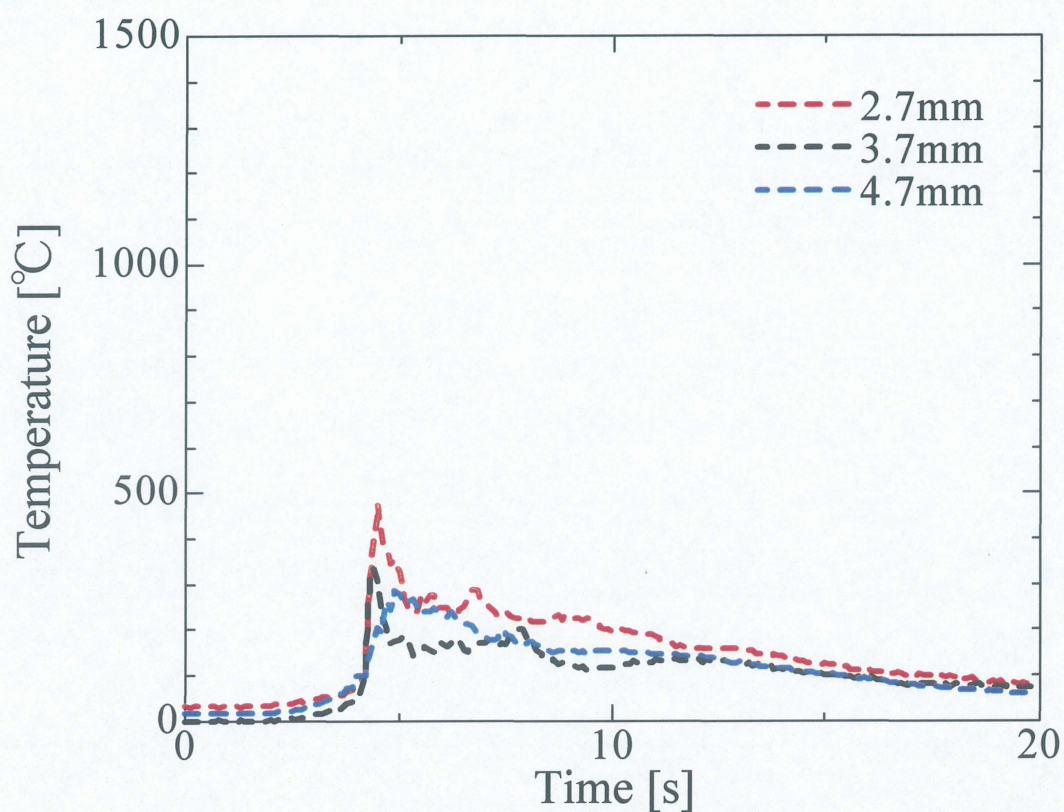


(a) Upper plate

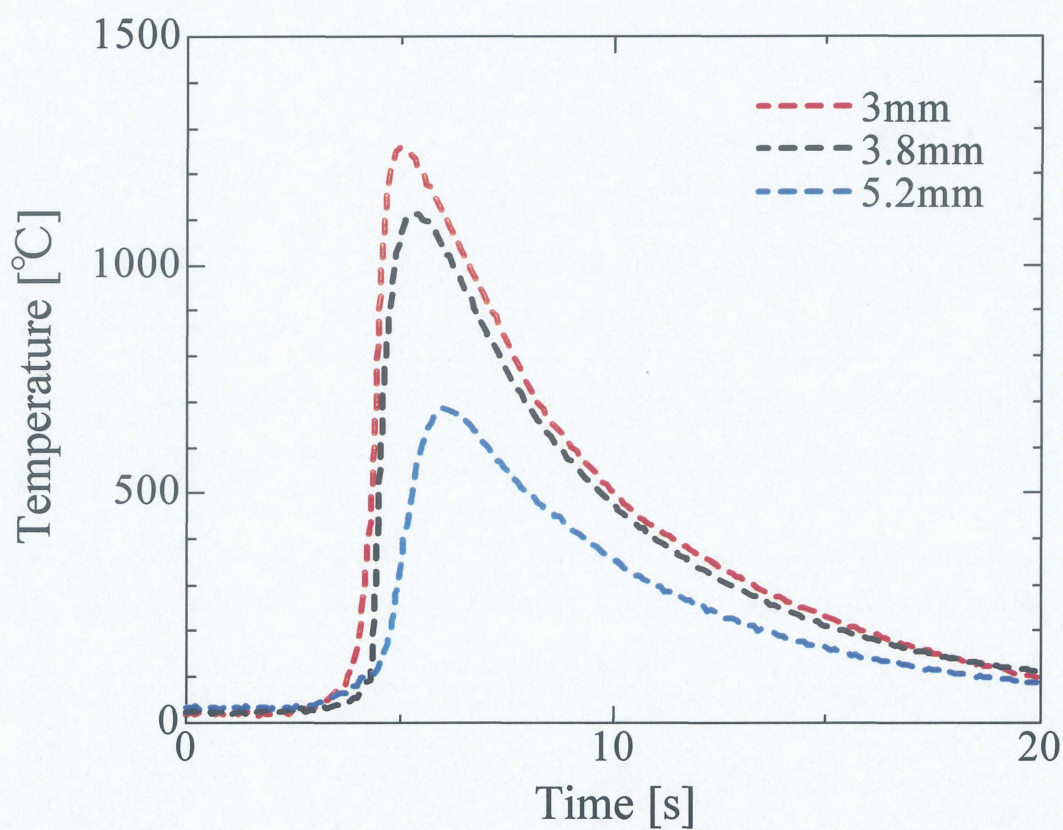


(b) Lower plate

Fig.4-9 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 20mm/s $\delta = -0.6\text{mm}$

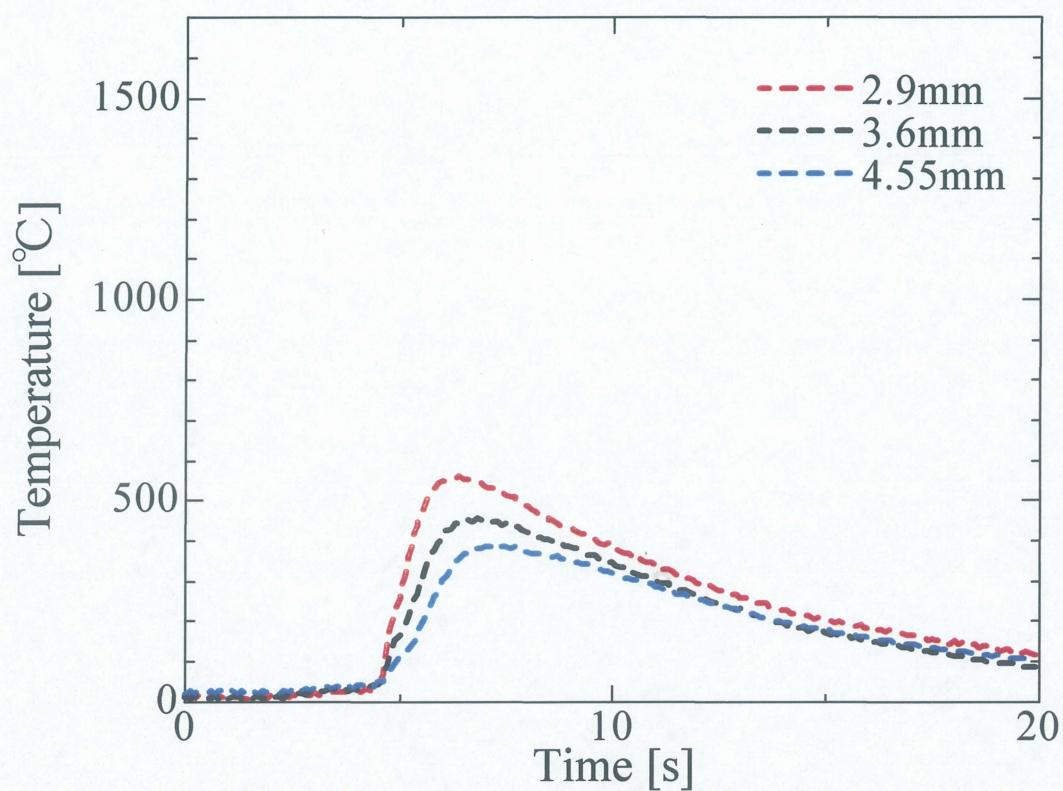


(a) Upper plate

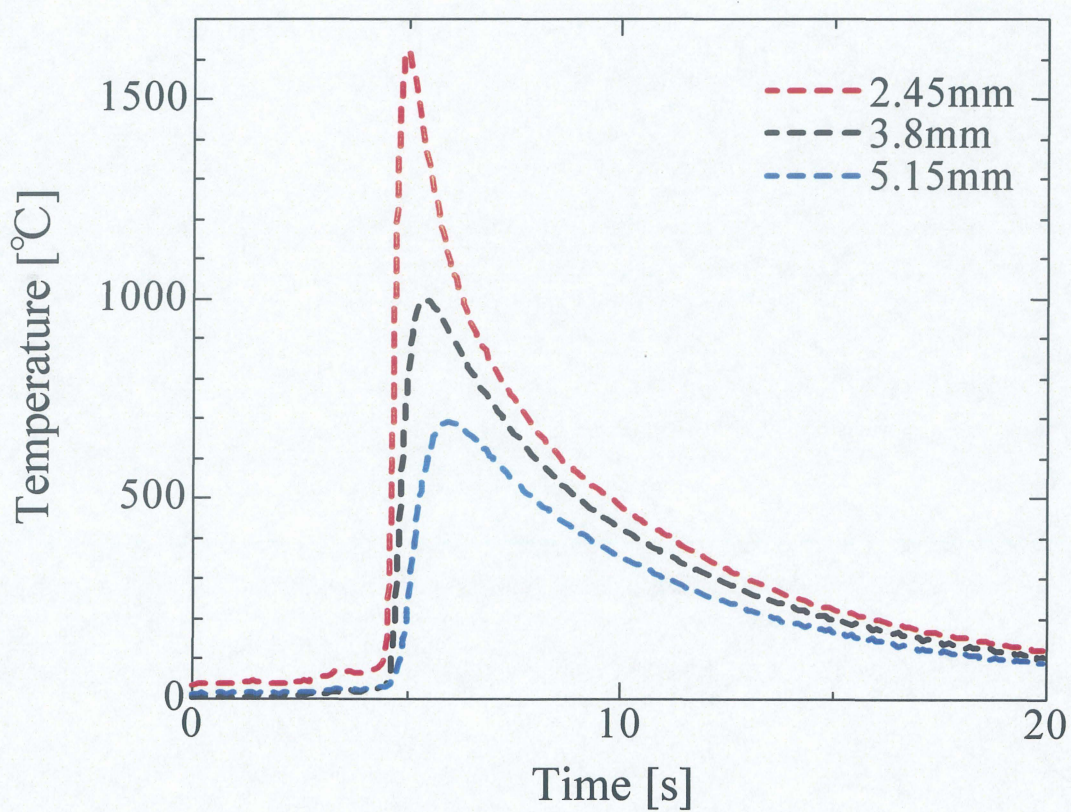


(b) Lower plate

Fig.4-10 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 20mm/s $\delta = -0.8\text{mm}$

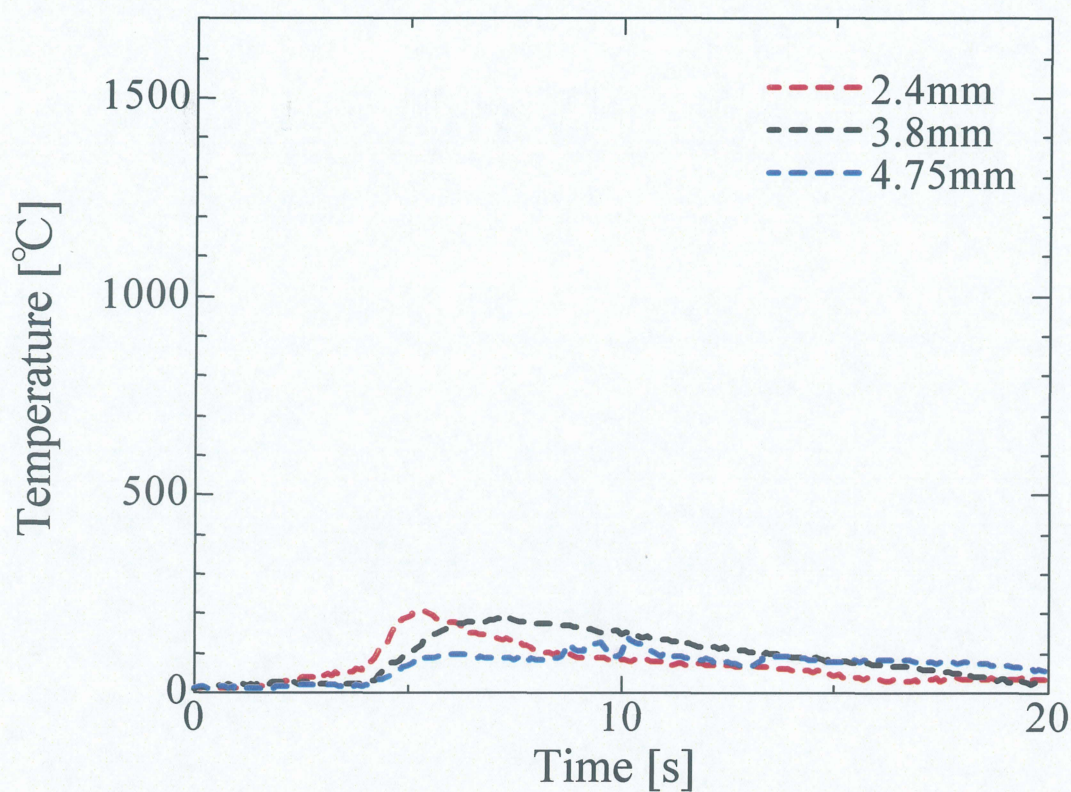


(a) Upper plate

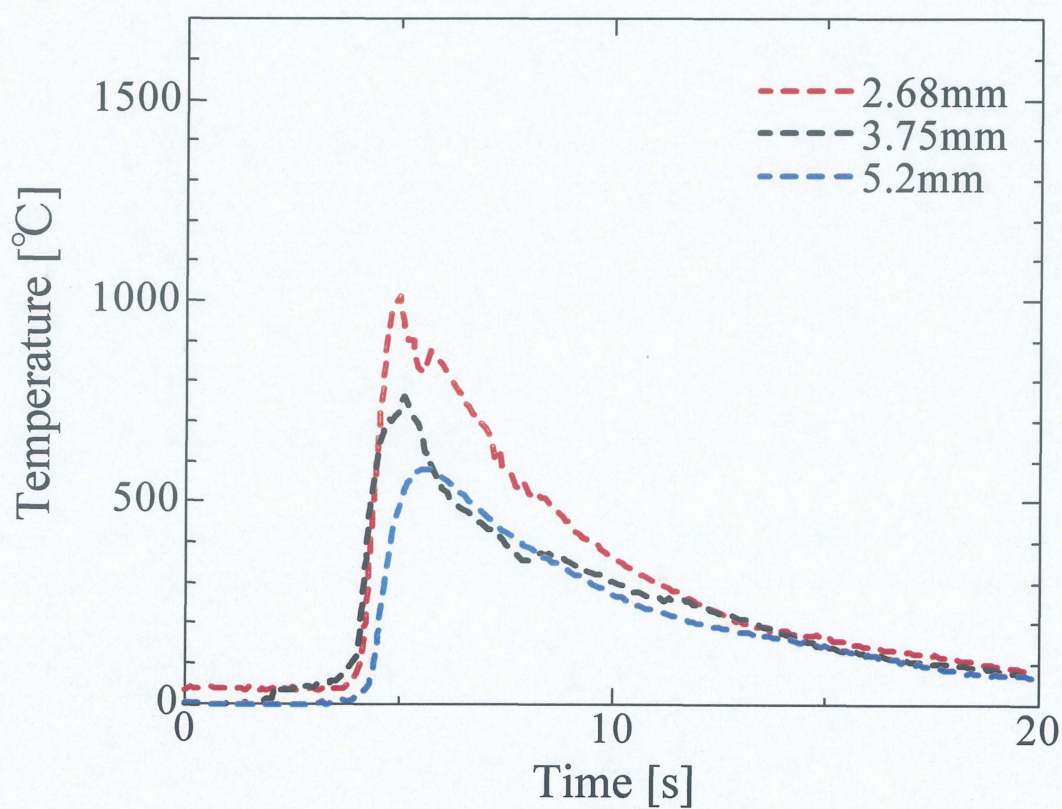


(b) Lower plate

Fig.4-11 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 20mm/s $\delta = -1.0\text{mm}$

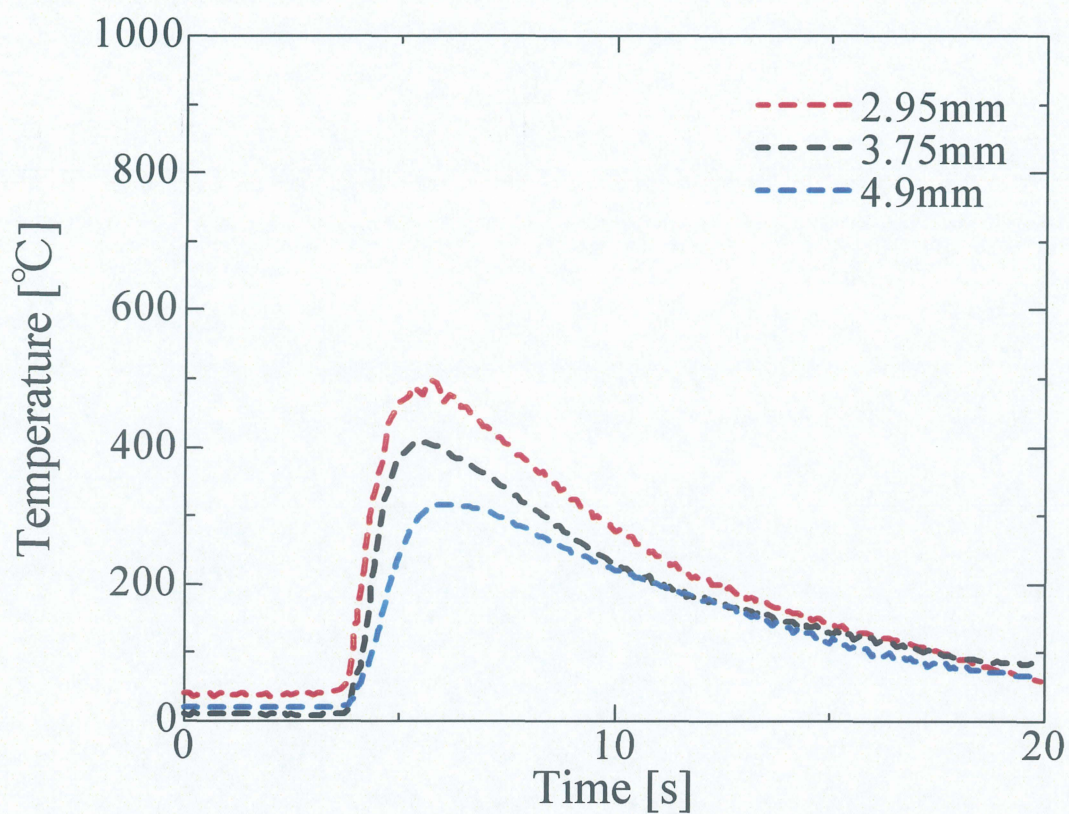


(a) Upper plate

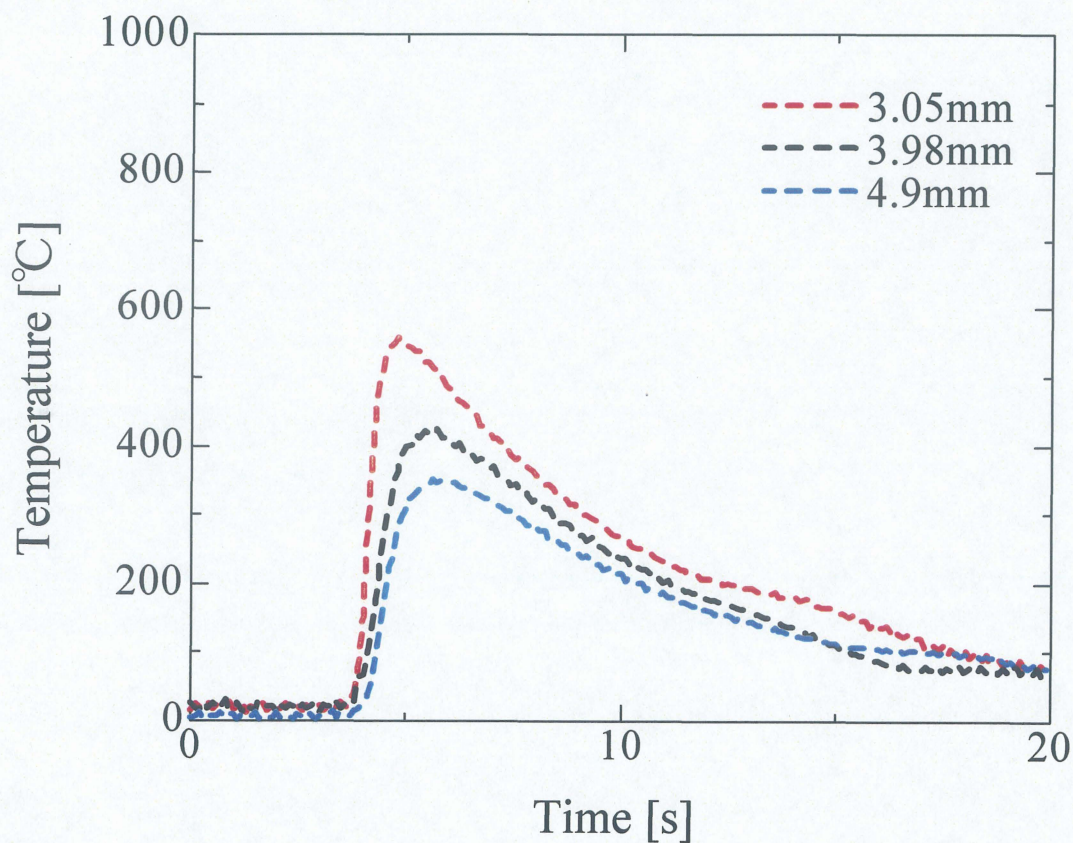


(b) Lower plate

Fig.4-12 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 20mm/s $\delta = -1.2\text{mm}$

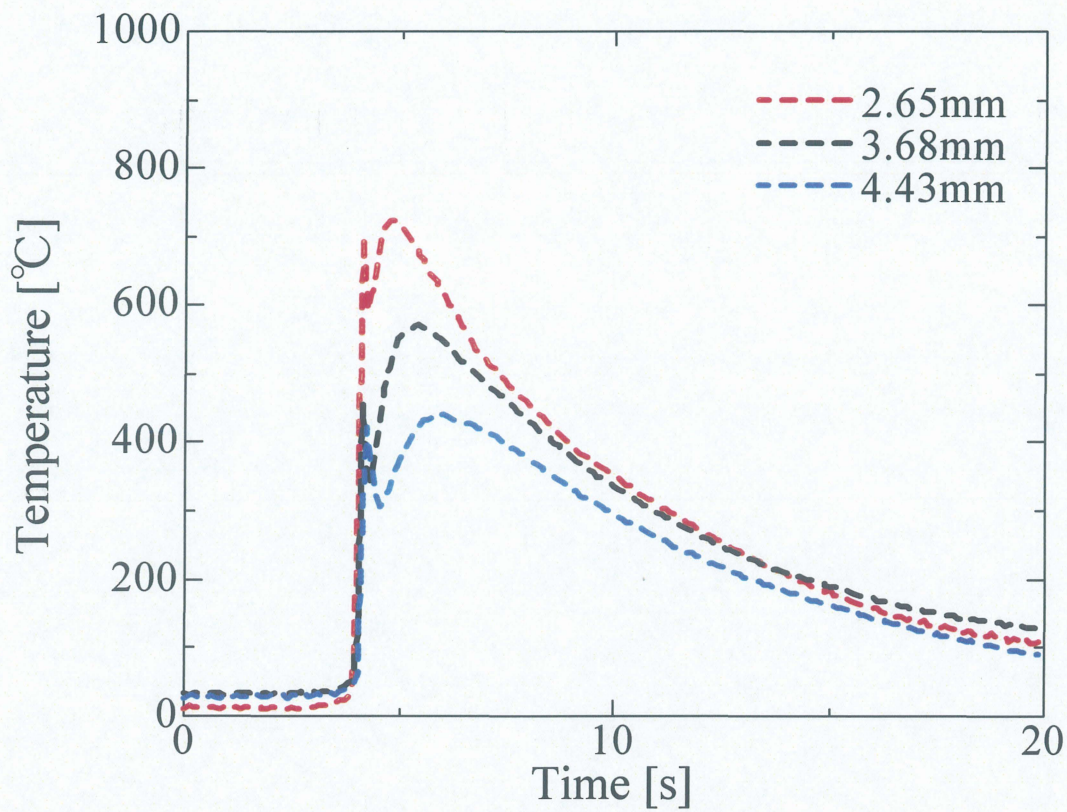


(a) Upper plate

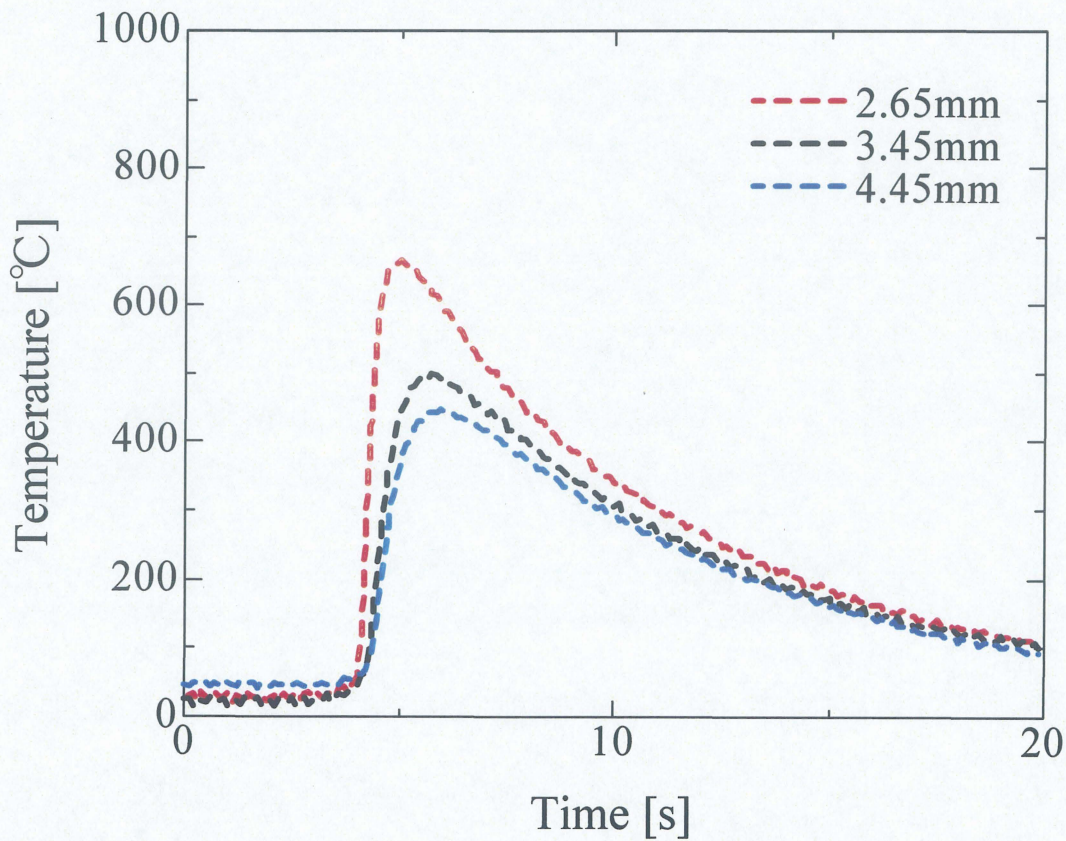


(b) Lower plate

Fig.4-13 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 40mm/s $\delta = 0\text{mm}$

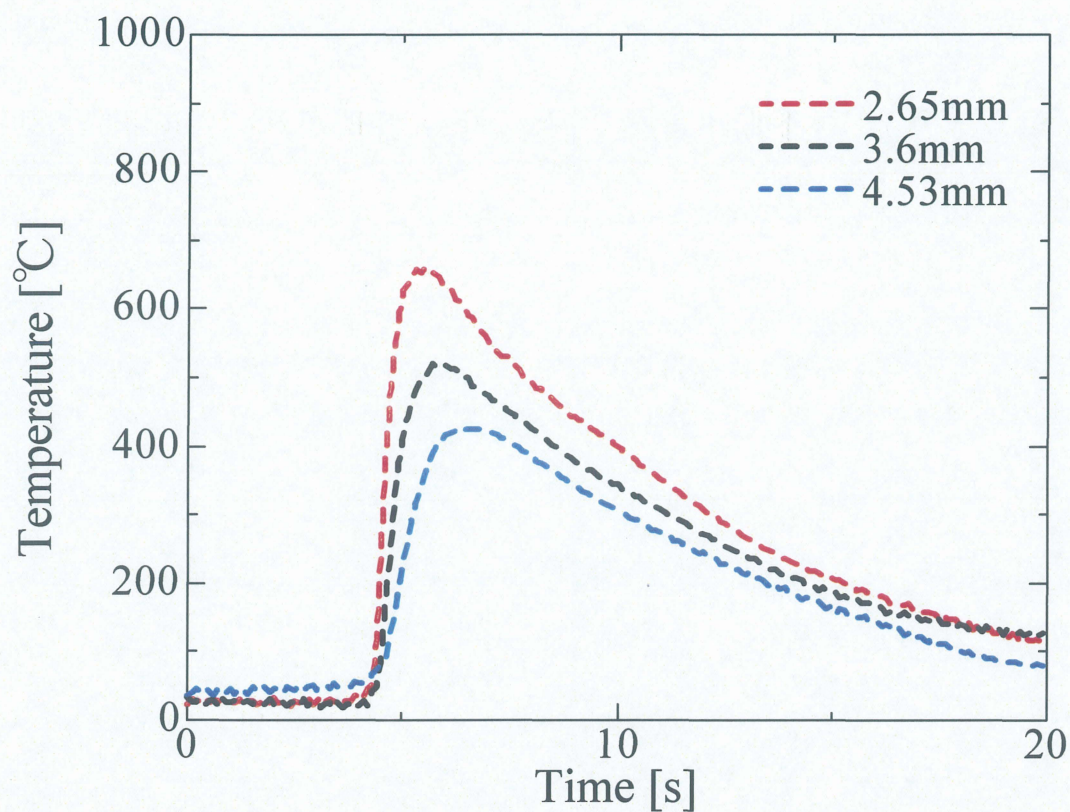


(a) Upper plate

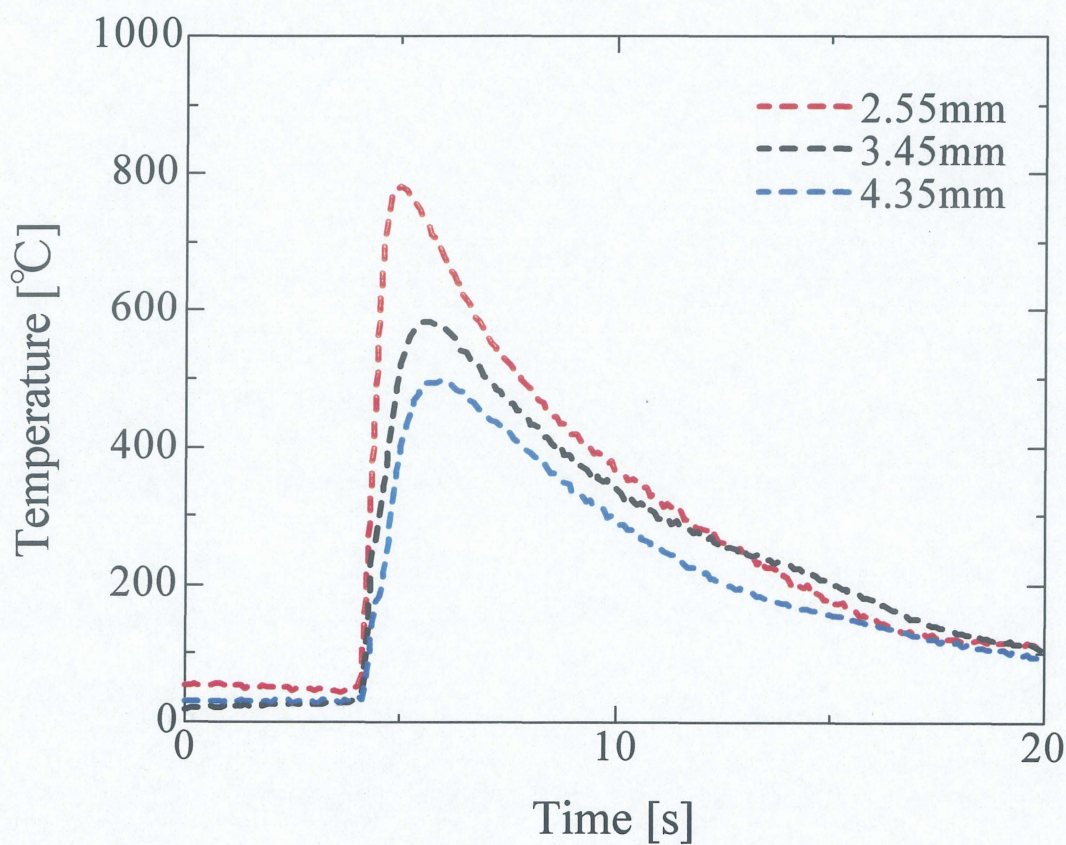


(b) Lower plate

Fig.4-14 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 40mm/s $\delta = +0.2\text{mm}$

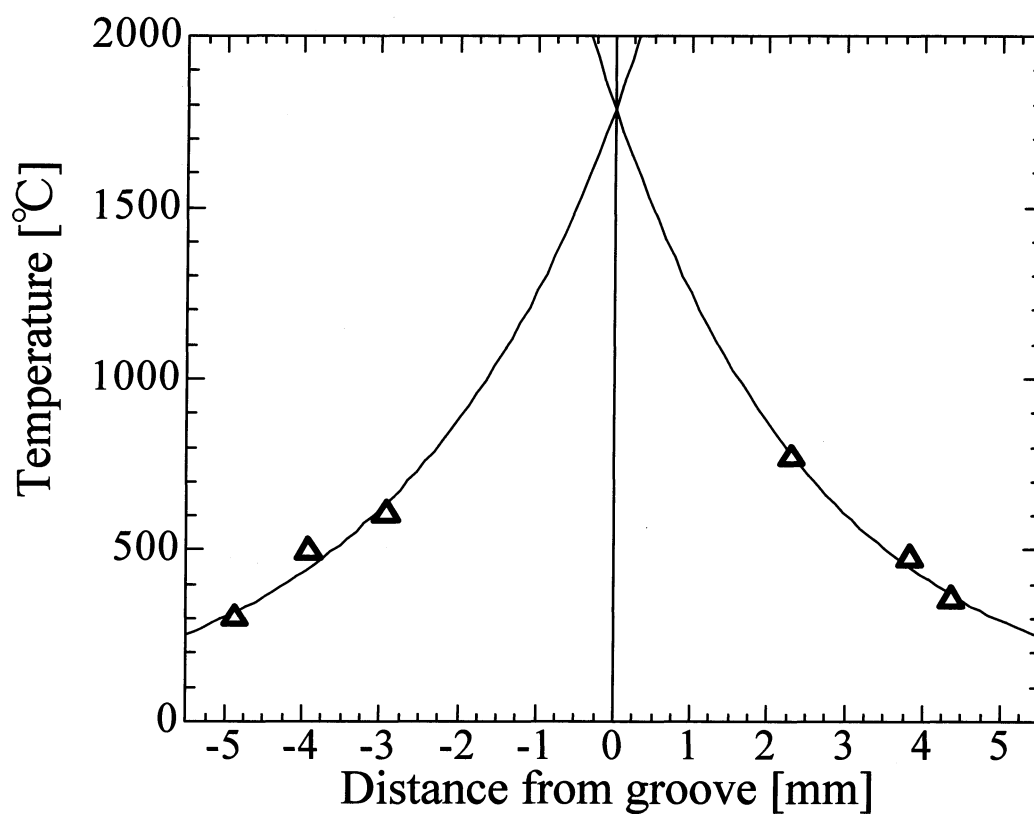


(a) Upper plate

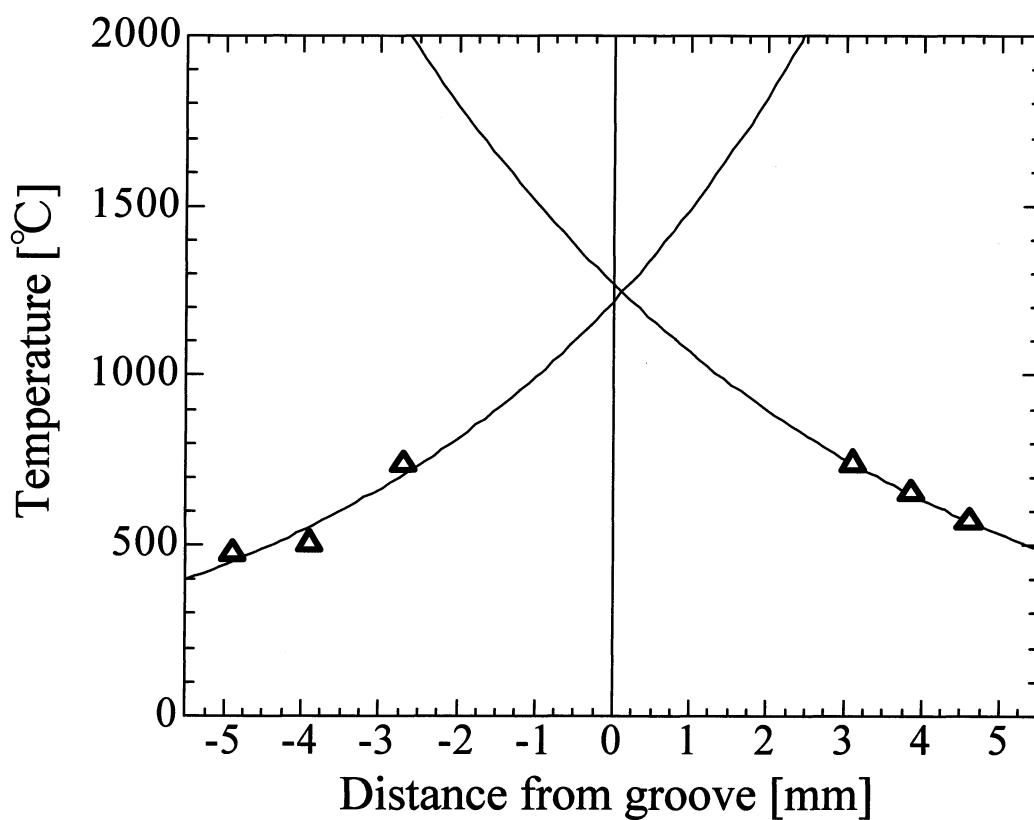


(b) Lower plate

Fig.4-15 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 40mm/s $\delta = -0.2\text{mm}$

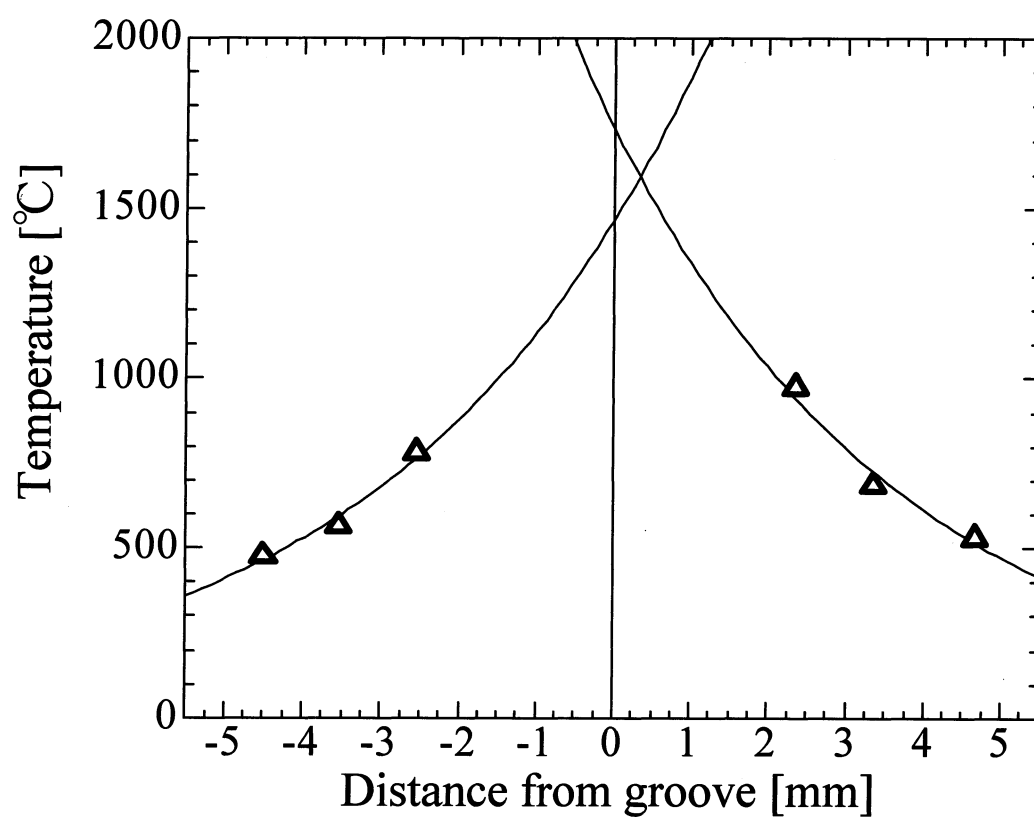


(a) 20mm/s $\delta = 0\text{mm}$

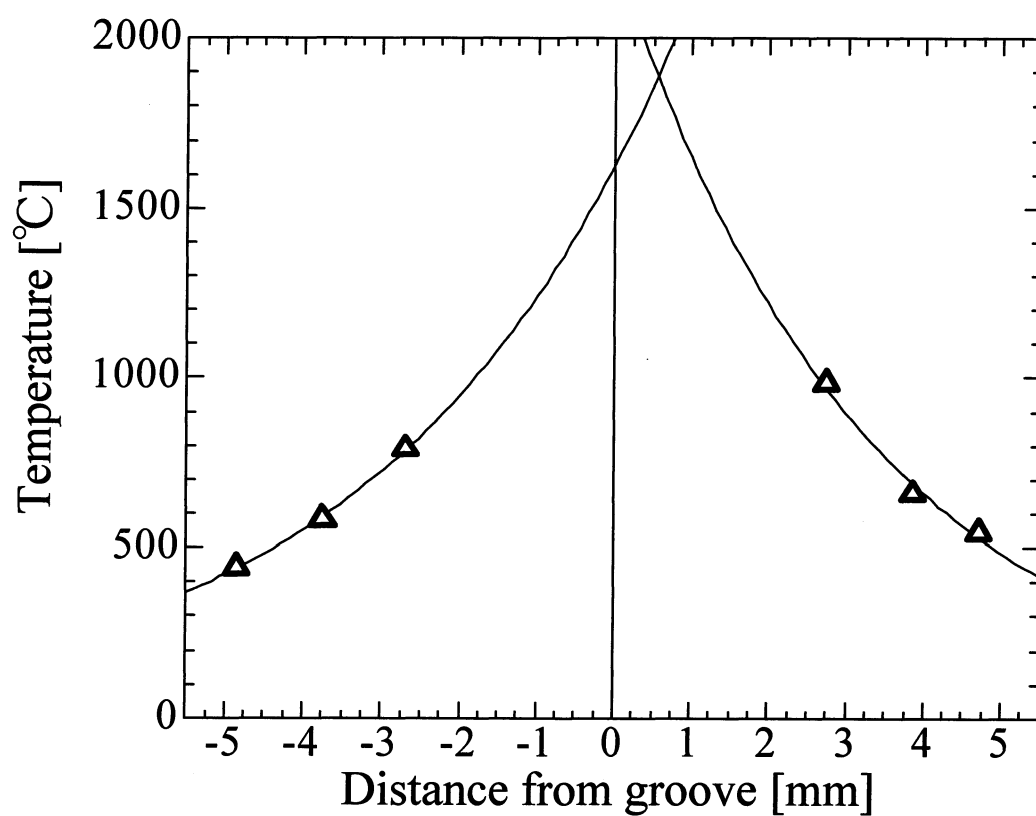


(b) 20mm/s $\delta = +0.2\text{mm}$

Fig.4-16 Relationship between distance from groove to temperature measuring point and maximum temperature ; Welding speed 20mm/s, $\delta = 0\text{mm}$, $+0.2\text{mm}$

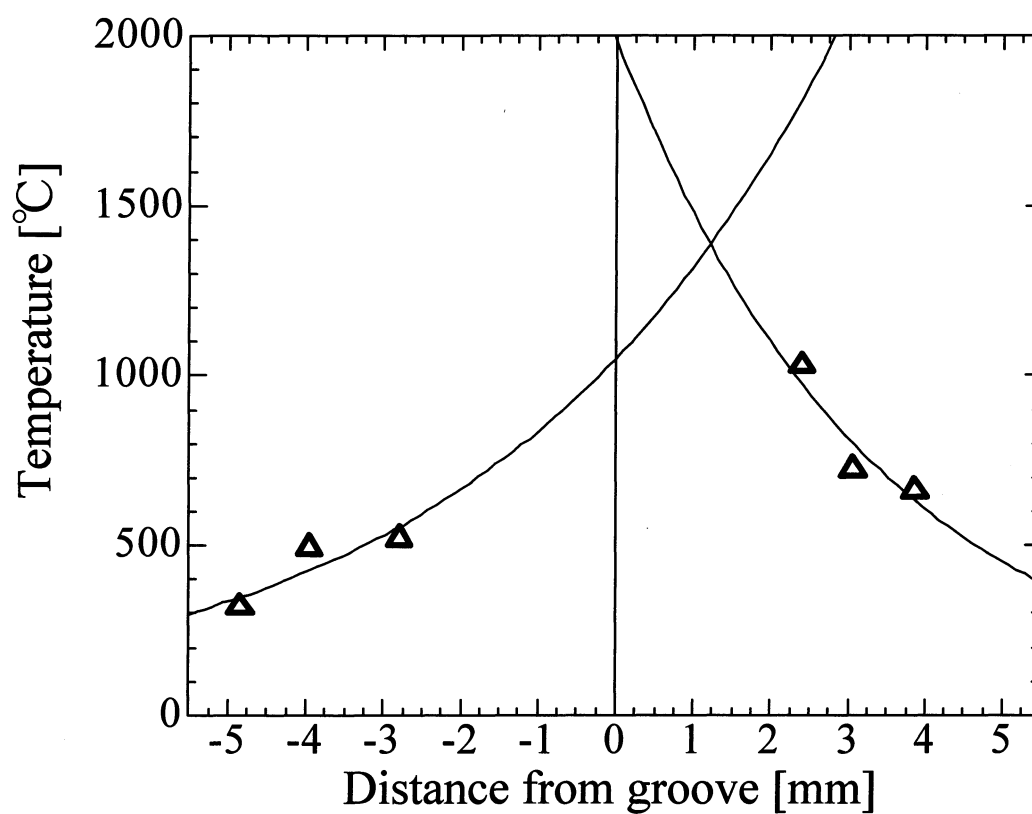


(a) 20mm/s $\delta = +0.4\text{mm}$

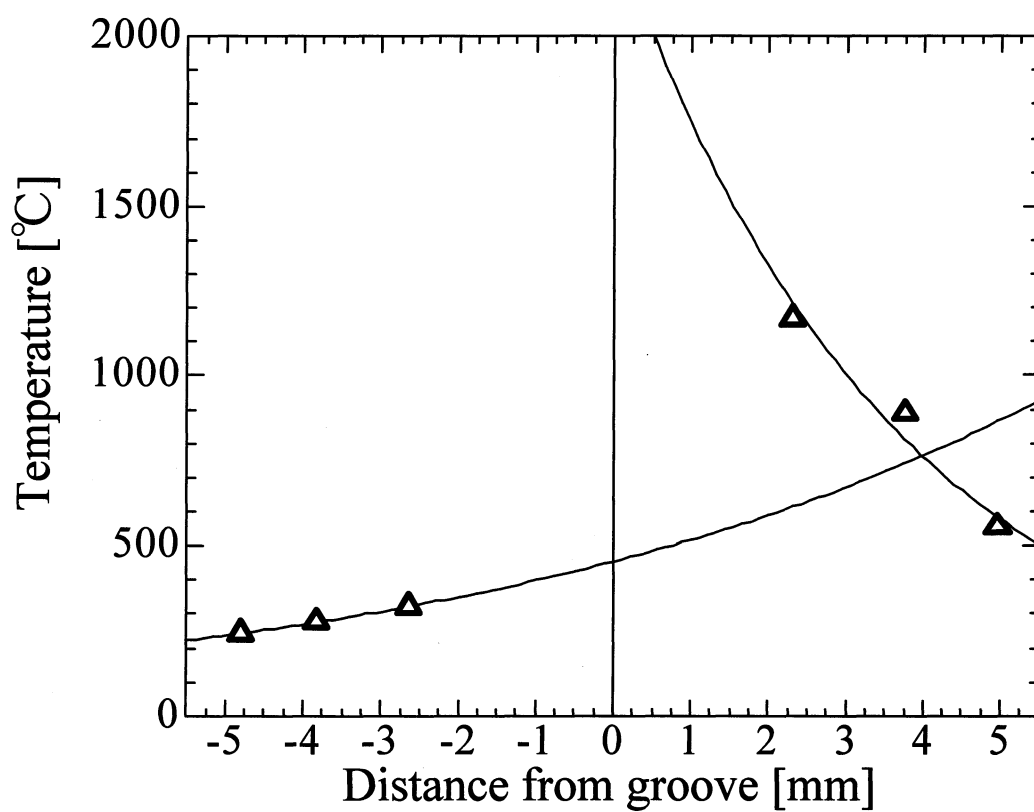


(b) 20mm/s $\delta = +0.6\text{mm}$

Fig.4-17 Relationship between distance from groove to temperature measuring point and maximum temperature ; Welding speed 20mm/s, $\delta = +0.4\text{mm}, +0.6\text{mm}$

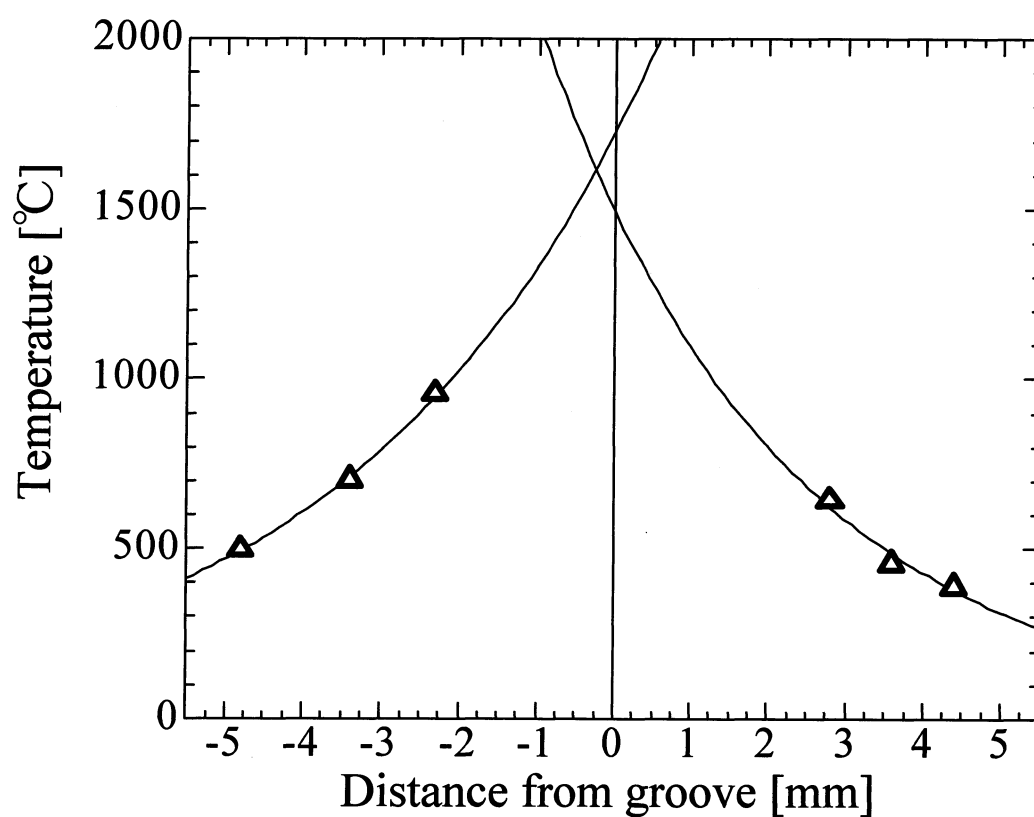


(a) 20mm/s $\delta = +0.8\text{mm}$

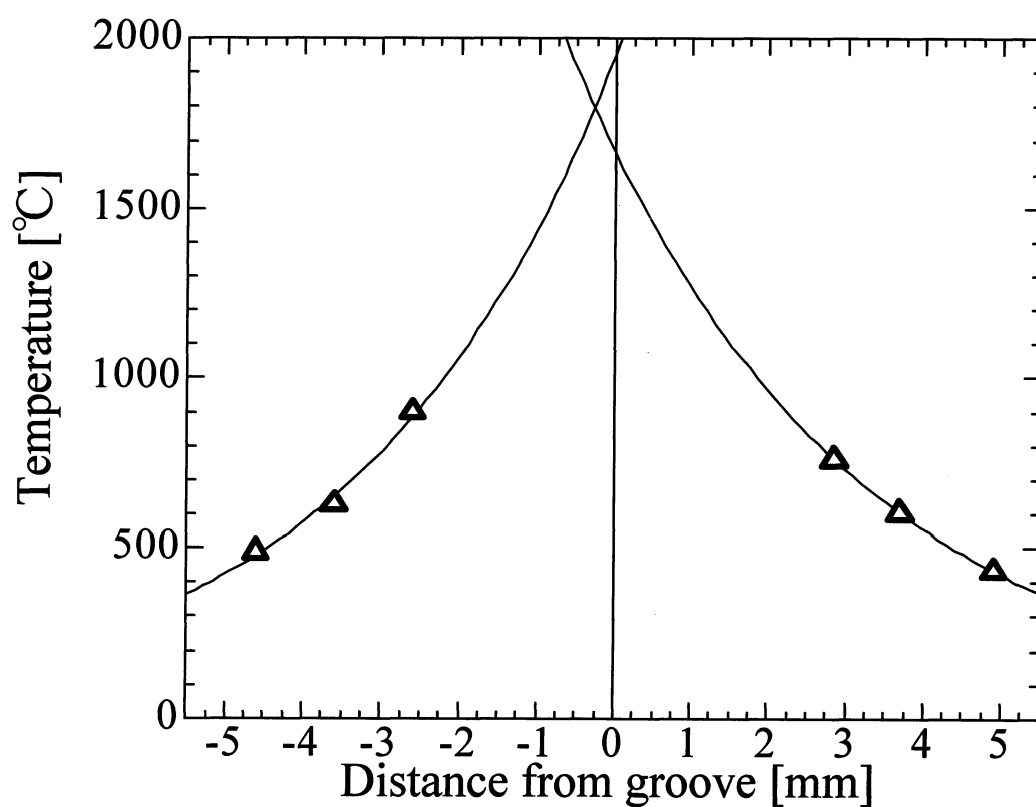


(b) 20mm/s $\delta = +1.0\text{mm}$

Fig.4-18 Relationship between distance from groove to temperature measuring point and maximum temperature ; Welding speed 20mm/s, $\delta = +0.8\text{mm}, +1.0\text{mm}$

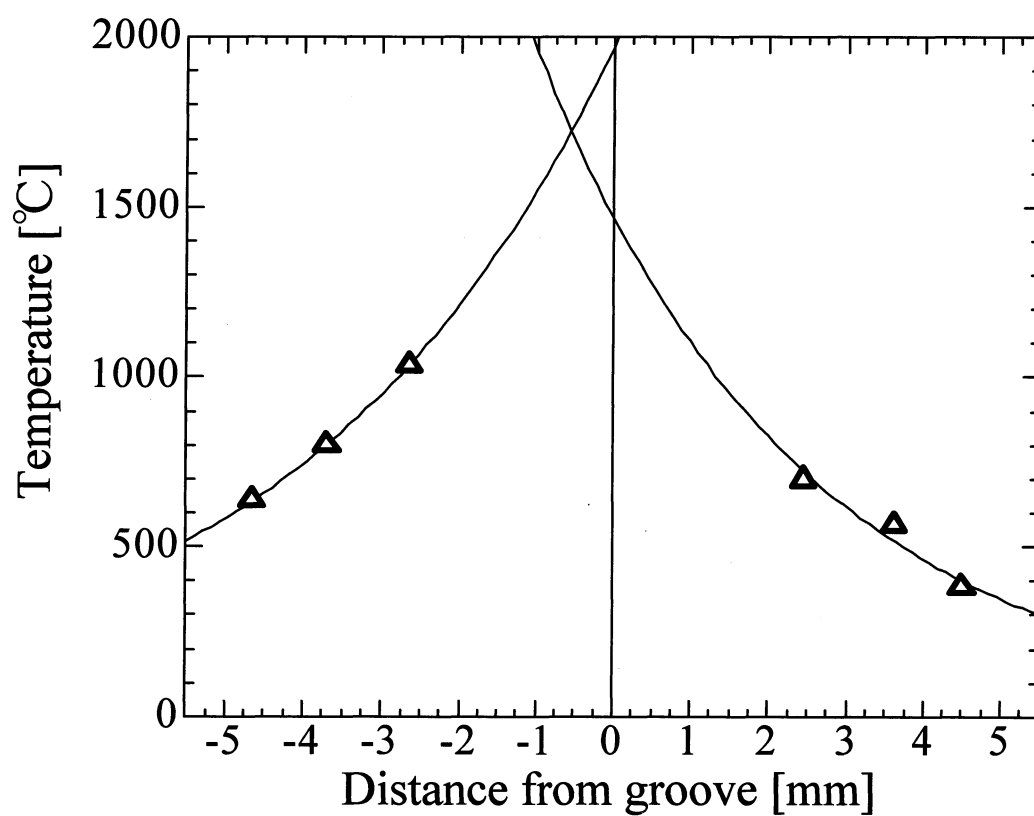


(a) 20mm/s $\delta = -0.2\text{mm}$

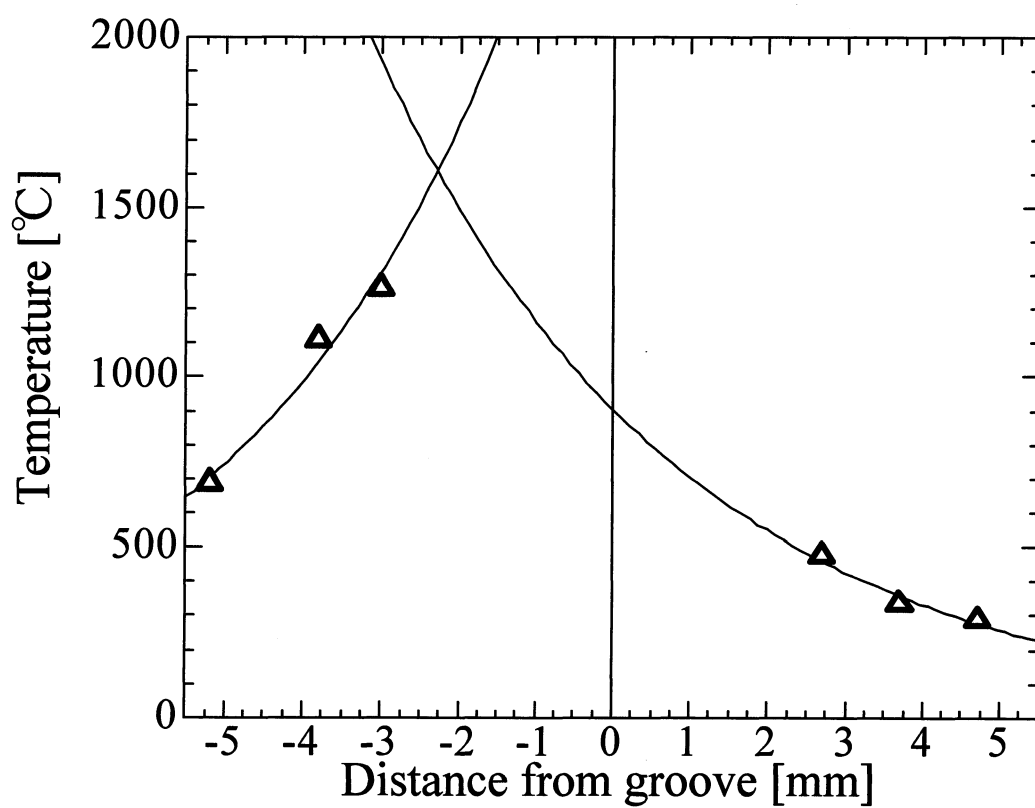


(b) 20mm/s $\delta = -0.4\text{mm}$

Fig.4-19 Relationship between distance from groove to temperature measuring point and maximum temperature ; Welding speed 20mm/s, $\delta = -0.2\text{mm}, -0.4\text{mm}$

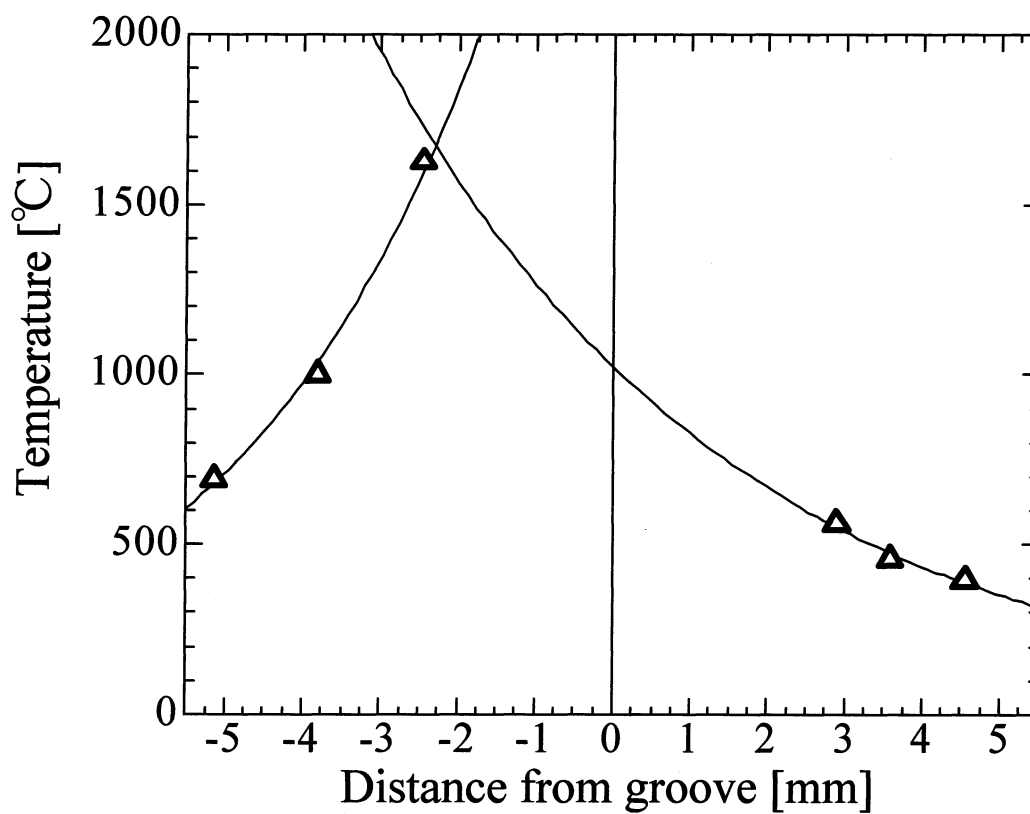


(a) 20mm/s $\delta = -0.6\text{mm}$

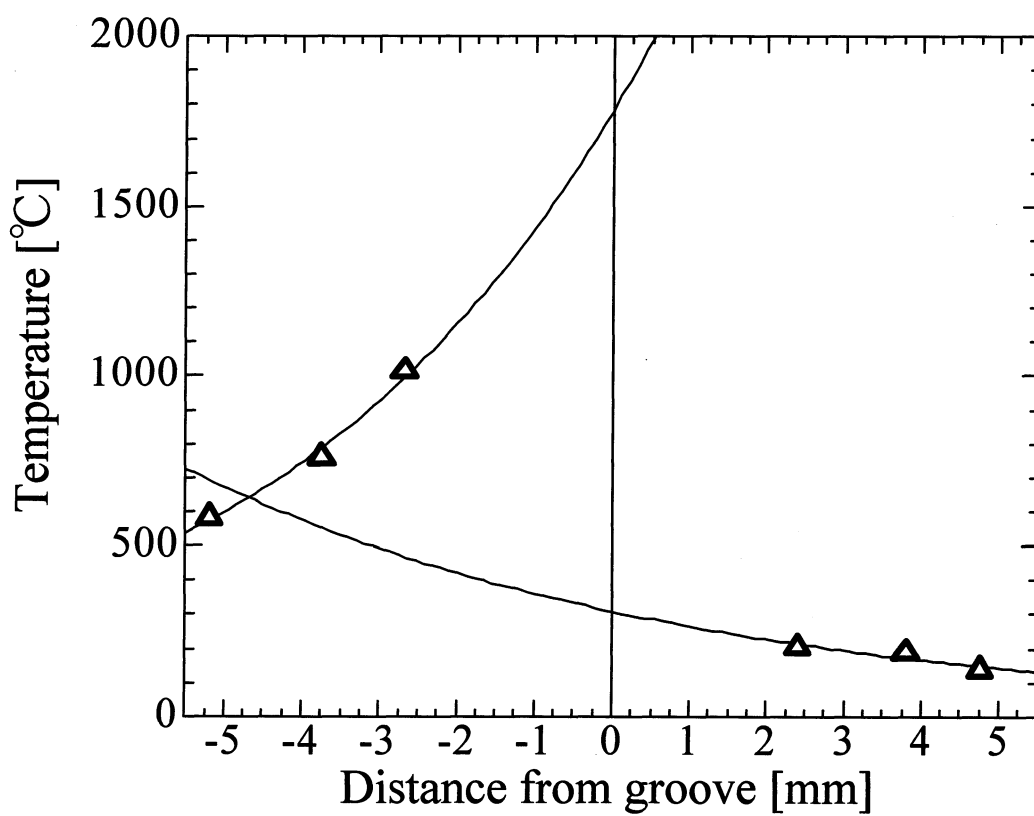


(b) 20mm/s $\delta = -0.8\text{mm}$

Fig.4-20 Relationship between distance from groove to temperature measuring point and maximum temperature ; Welding speed 20mm/s, $\delta = -0.6\text{mm}, -0.8\text{mm}$

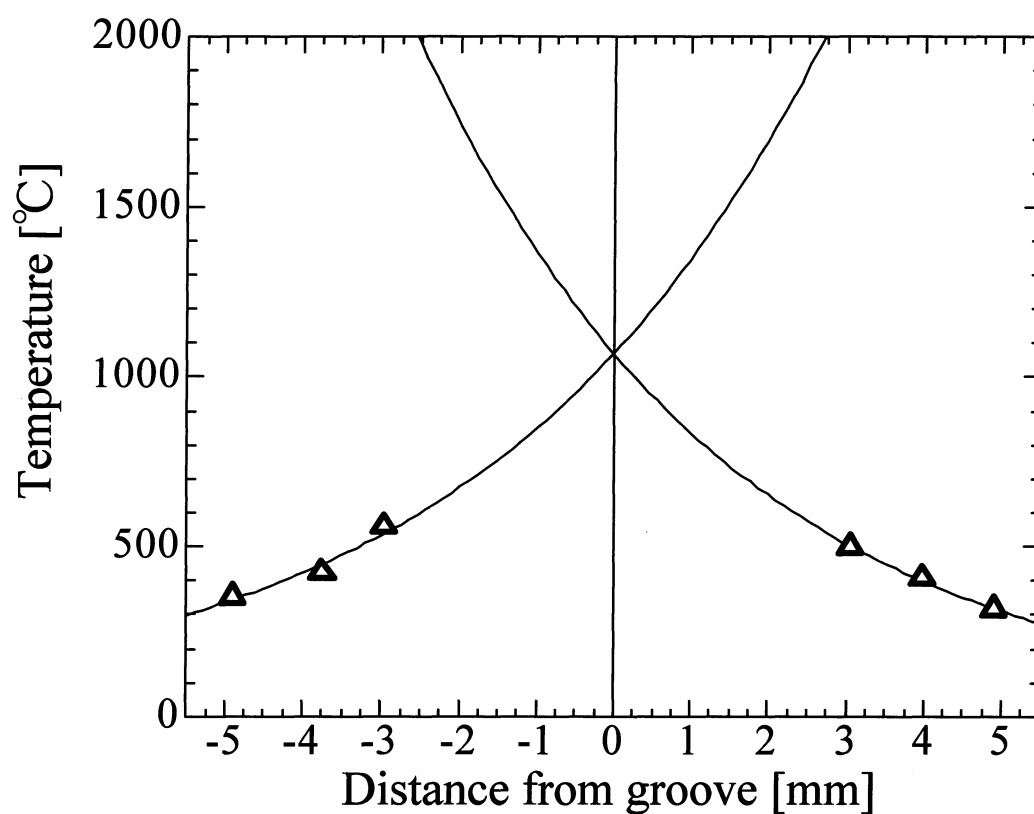


(a) 20mm/s $\delta = -1.0\text{mm}$

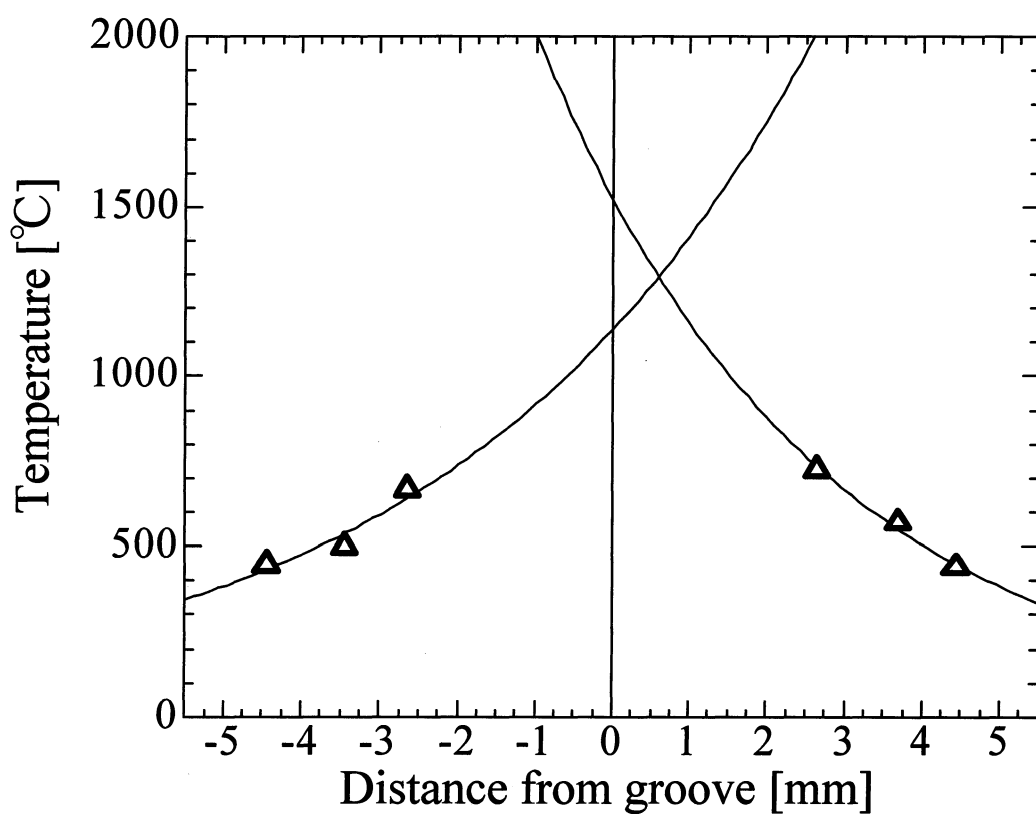


(b) 20mm/s $\delta = -1.2\text{mm}$

Fig.4-21 Relationship between distance from groove to temperature measuring point and maximum temperature ; Welding speed 20mm/s, $\delta = -1.0\text{mm}, -1.2\text{mm}$

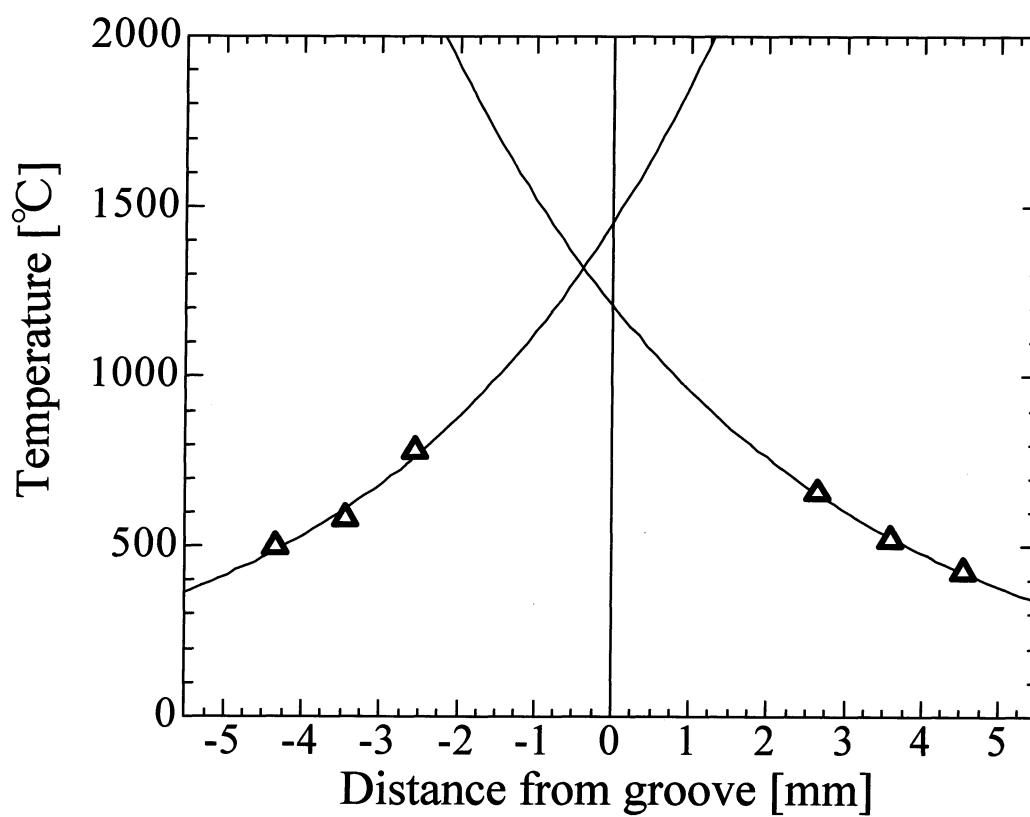


(a) 40mm/s $\delta = 0\text{mm}$



(b) 40mm/s $\delta = +0.2\text{mm}$

Fig.4-22 Relationship between distance from groove to temperature measuring point and maximum temperature ; Welding speed 40mm/s, $\delta = 0\text{mm}, +0.2\text{mm}$



(a) 40mm/s $\delta = -0.2\text{mm}$

Fig.4-23 Relationship between distance from groove to temperature measuring point and maximum temperature ; Welding speed 40mm/s, $\delta = -0.2\text{mm}$,

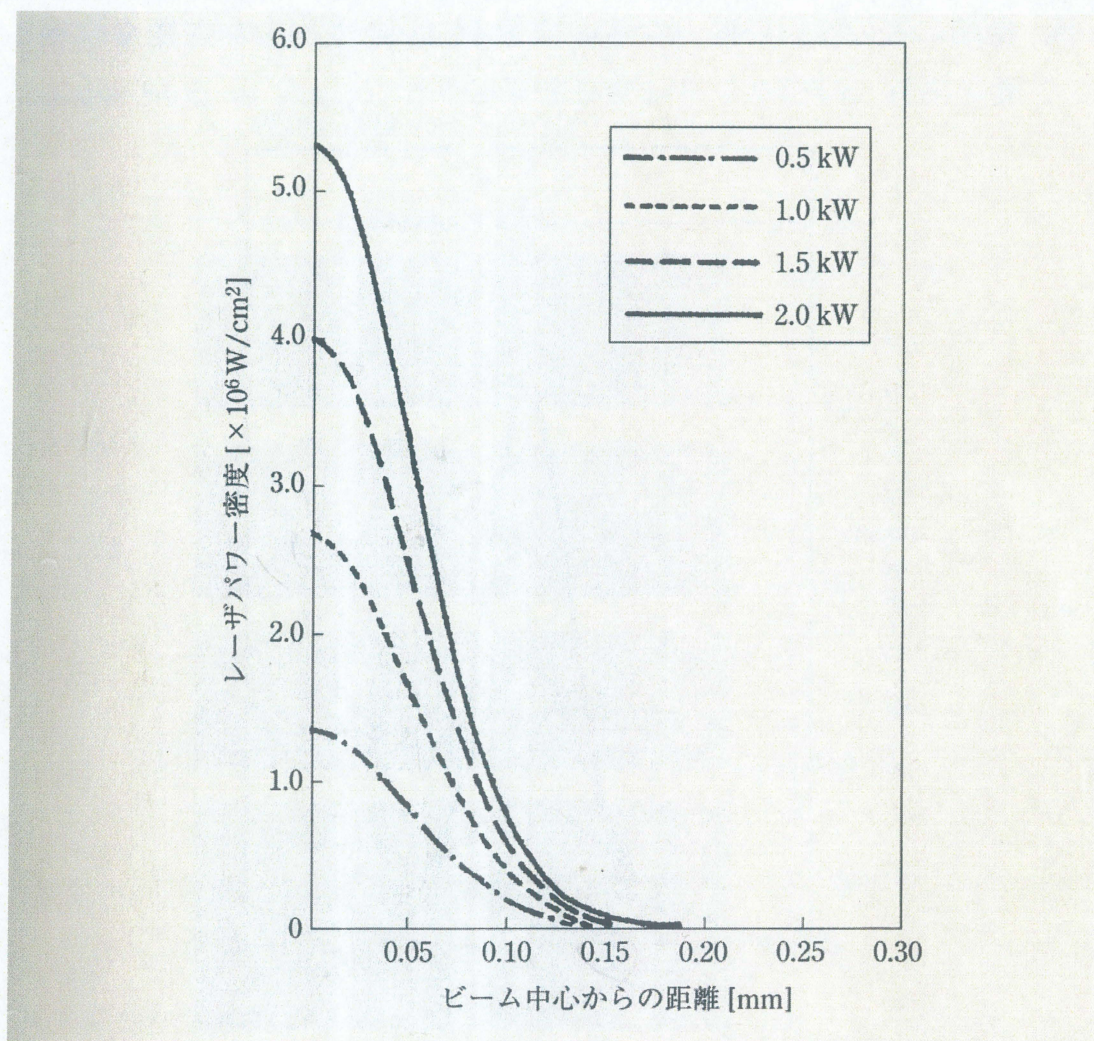


Fig.4-24 Relationship between distance from laser spot and Power Density in gauss distribution at different power

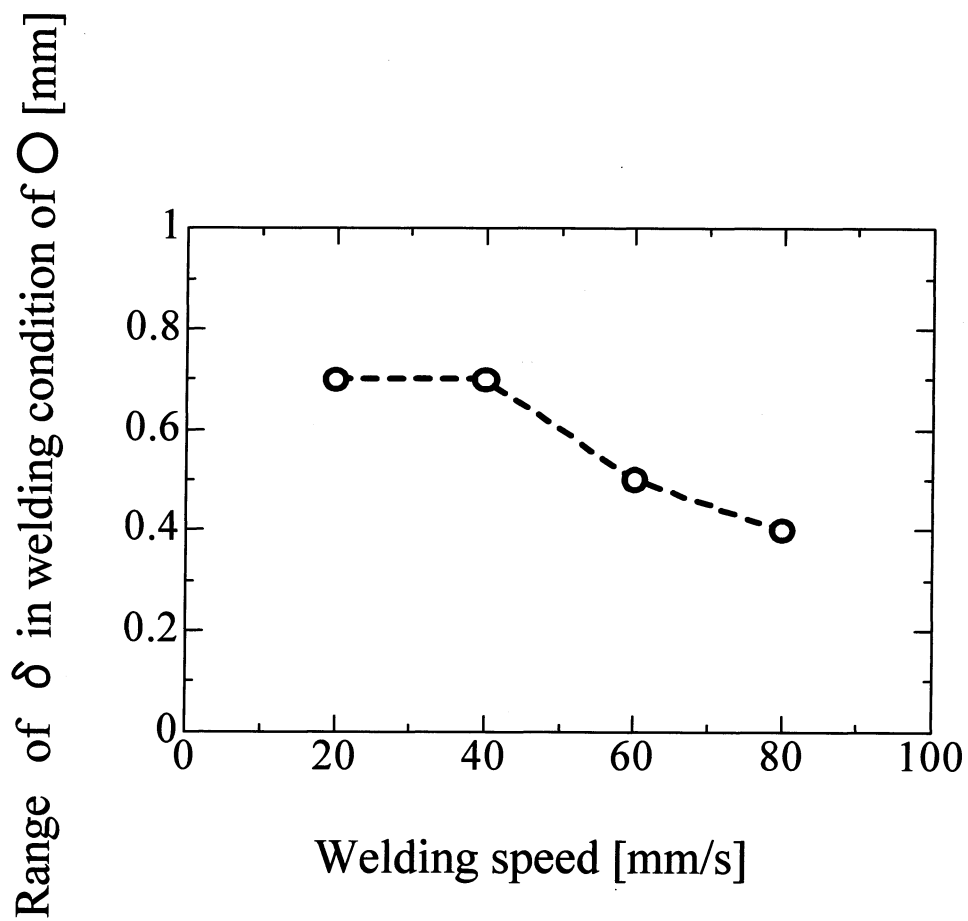


Fig.4-25 Relationship between welding speed and range of δ in welding condition of O in horizontal welding

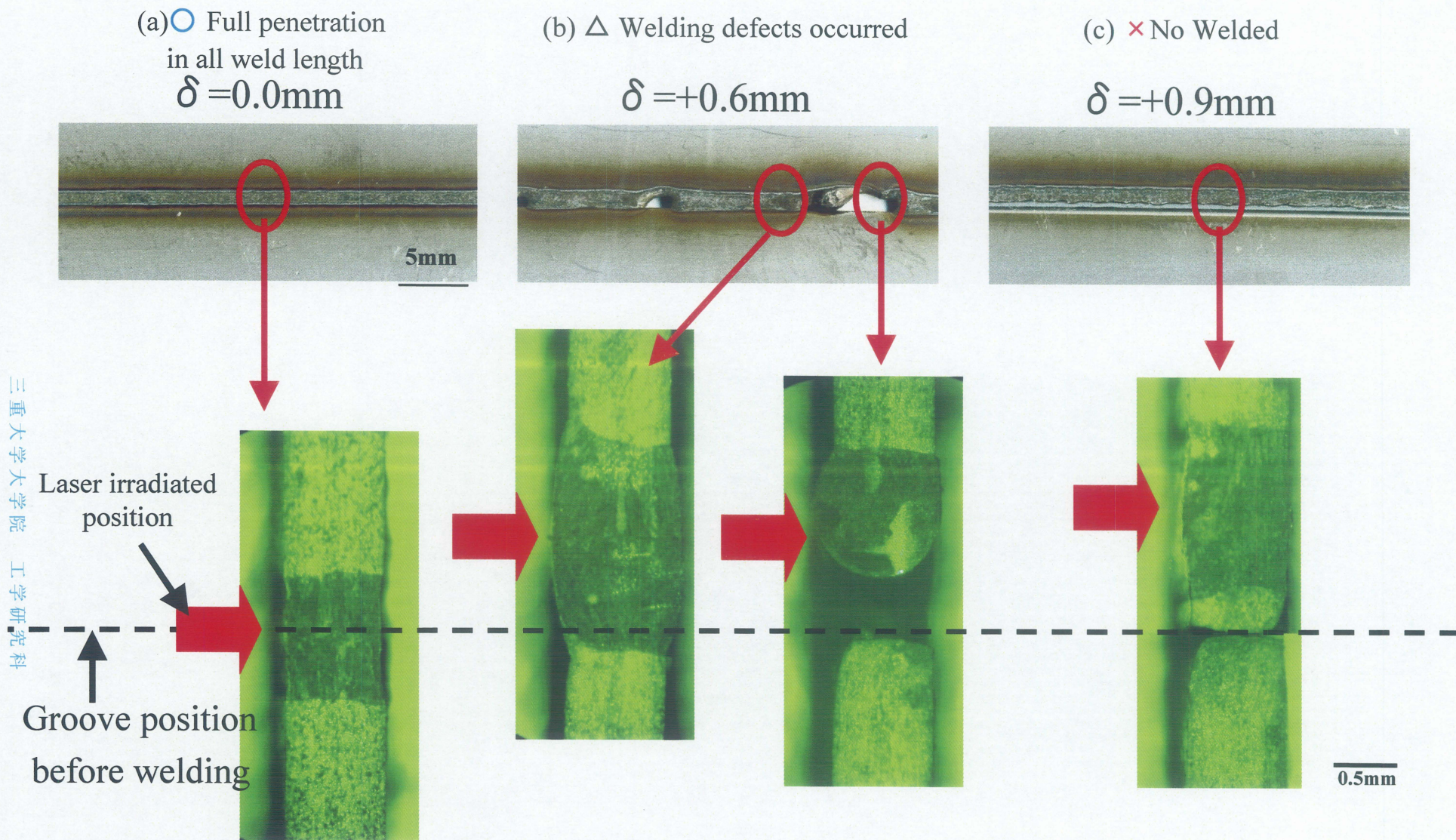


Fig.3-1 Classification of welding condition according to observation weld penetration ; Welding speed 20mm/s, horizontal position

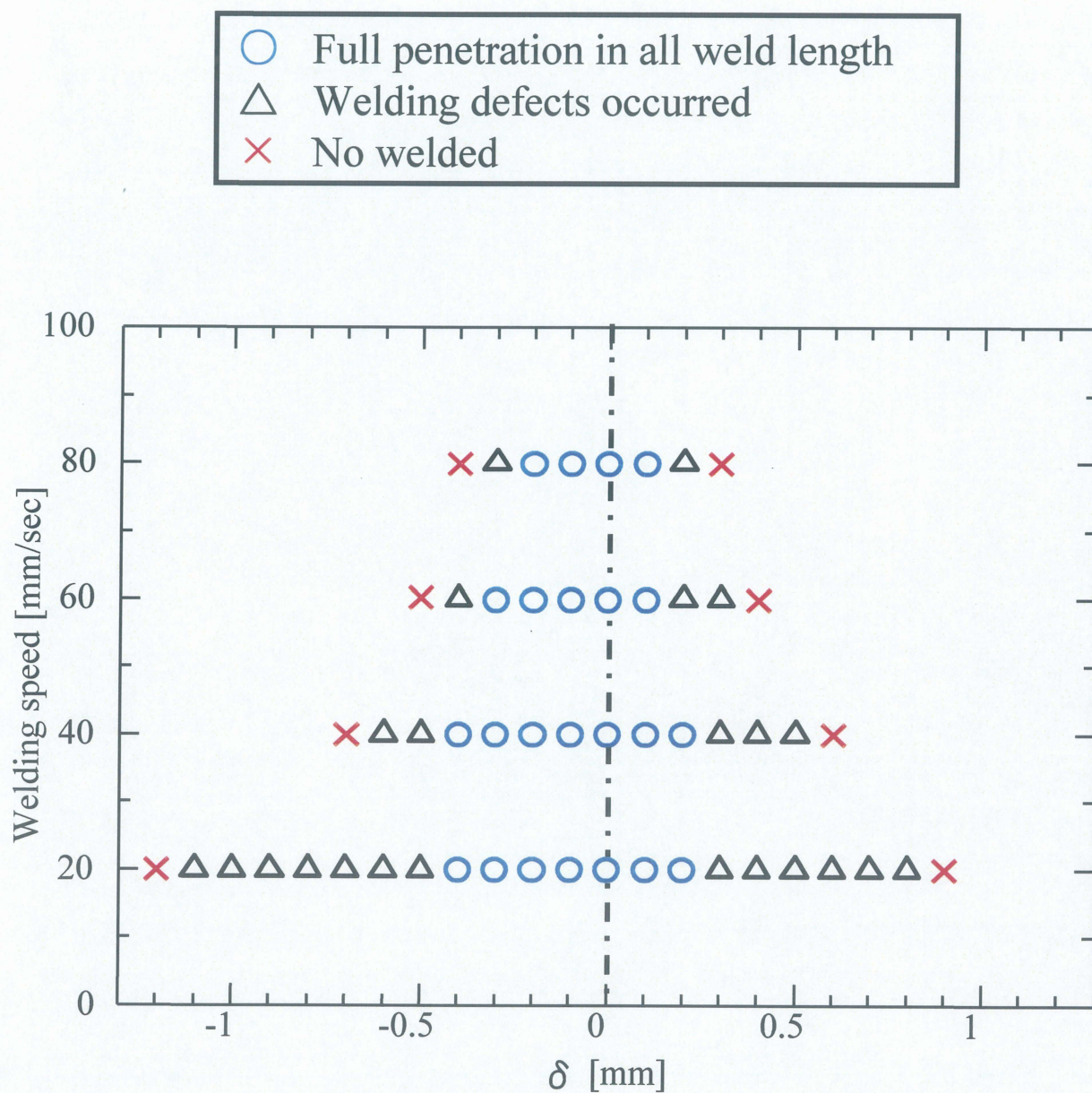
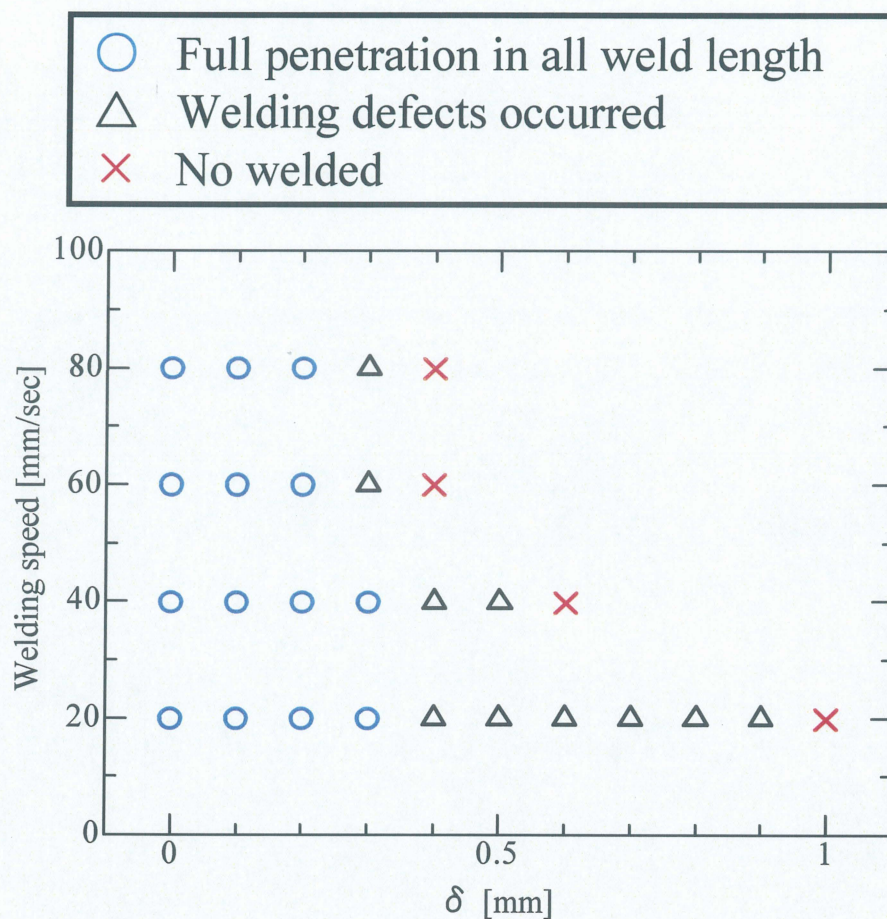
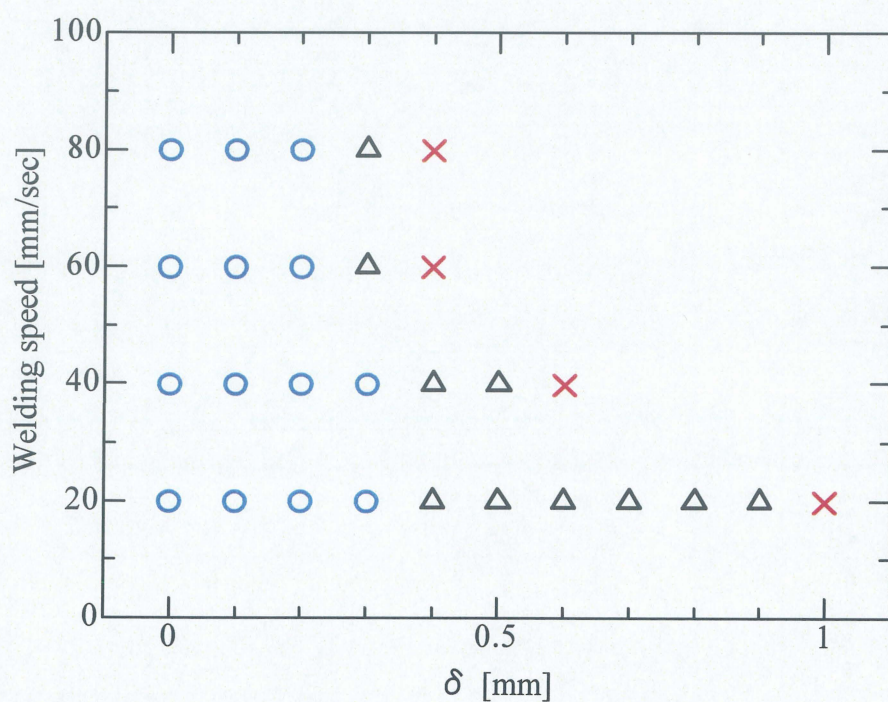


Fig.3-2 Process window for laser butt welding in horizontal position

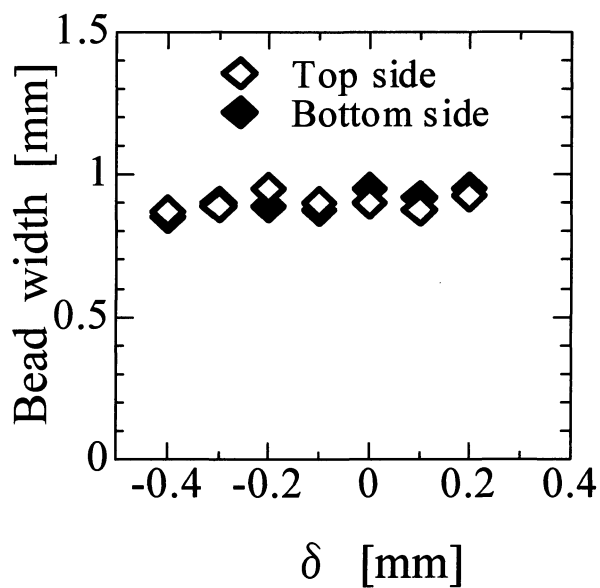


(a) Upward welding

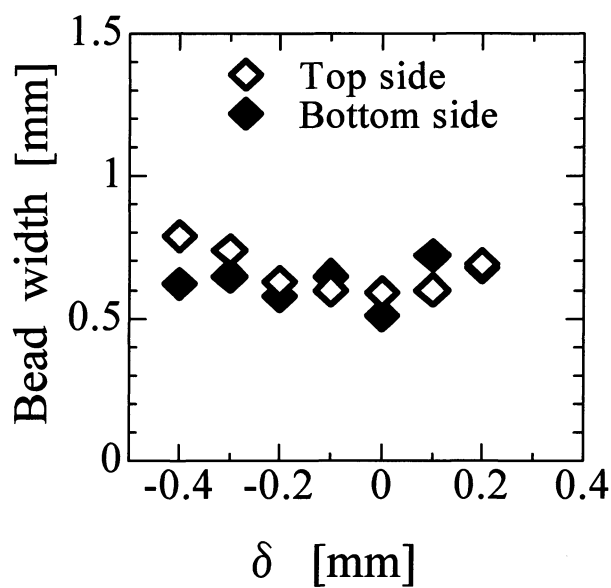


(b) Downward welding

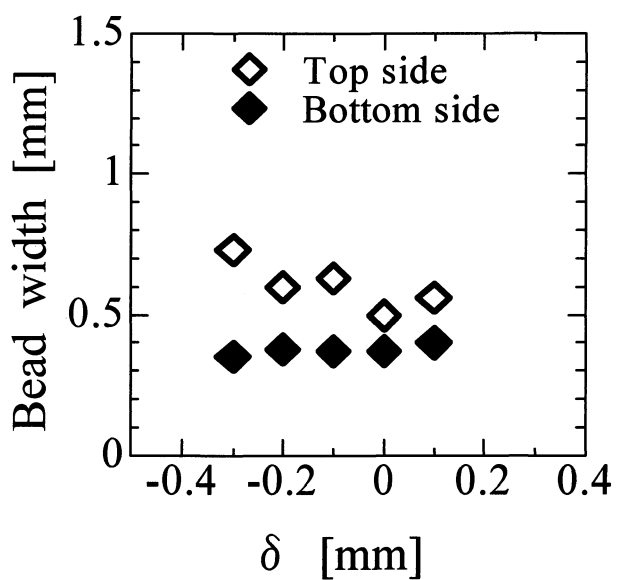
Fig.3-3 Process window for laser butt welding in vertical position



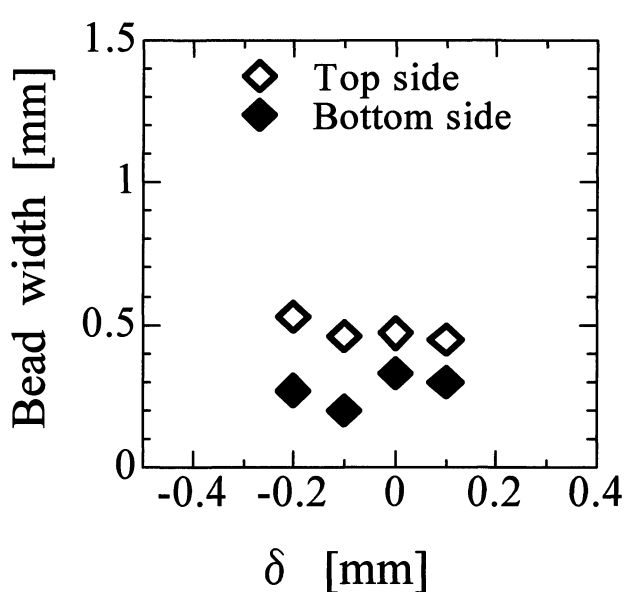
(a) Welding speed: 20mm/s



(b) Welding speed: 40mm/s

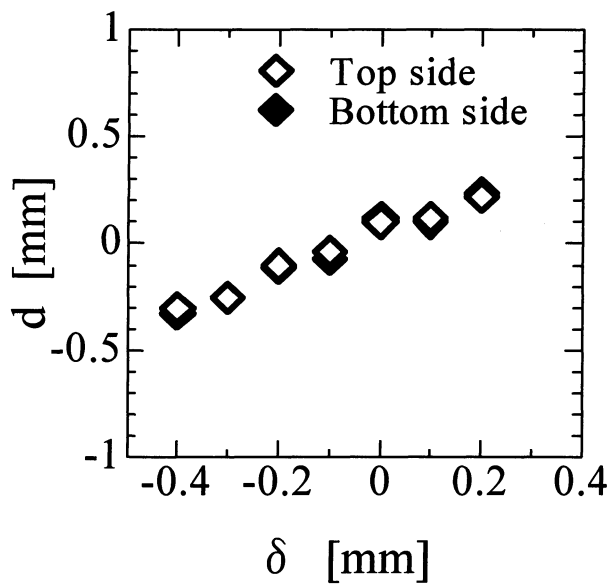


(c) Welding speed: 60mm/s

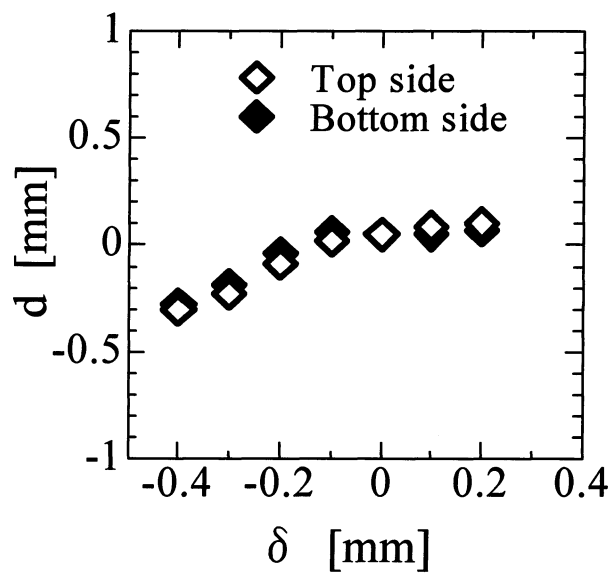


(d) Welding speed: 80mm/s

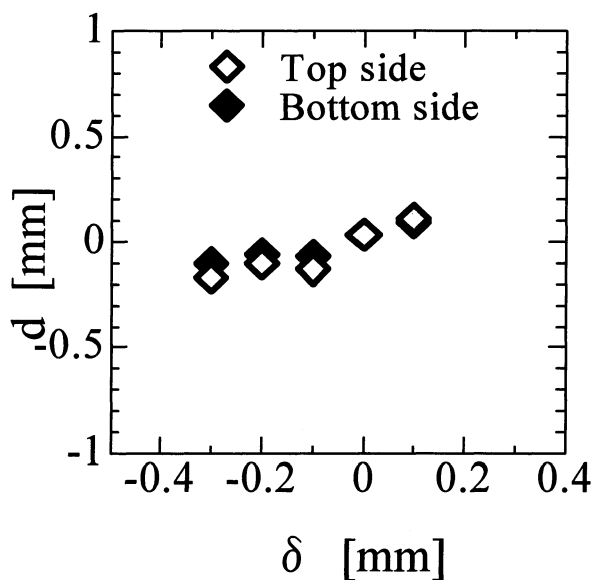
Fig.3-4 Relationship between δ and bead width at different welding speed in horizontal welding



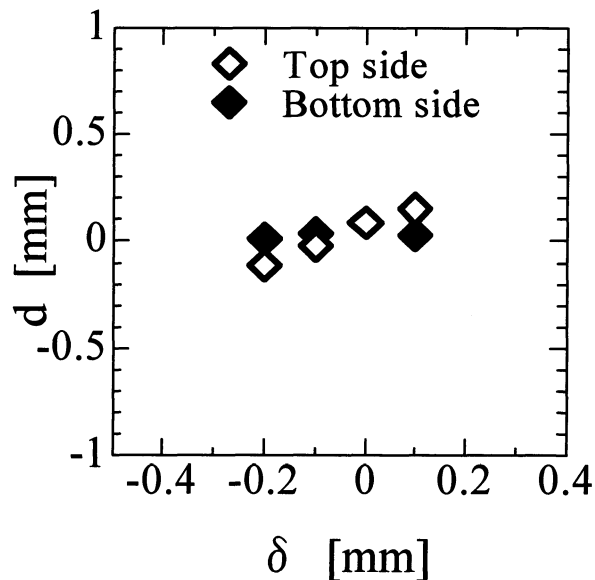
(a) Welding speed: 20mm/s



(b) Welding speed: 40mm/s

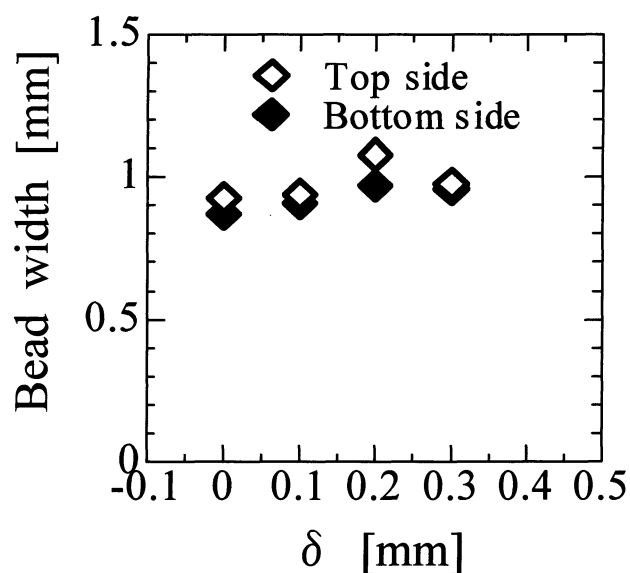


(c) Welding speed: 60mm/s

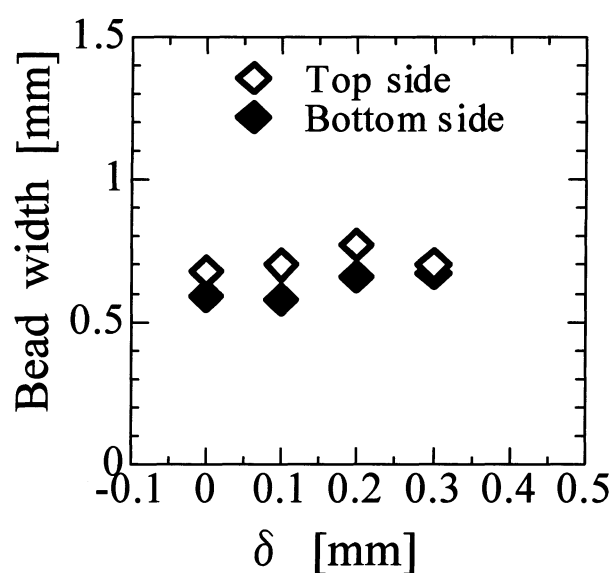


(d) Welding speed: 80mm/s

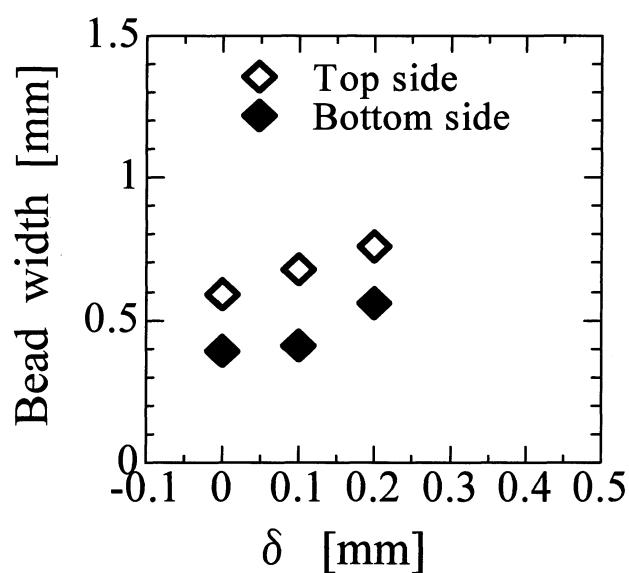
Fig.3-5 Relationship between δ and d at different welding speed in horizontal welding



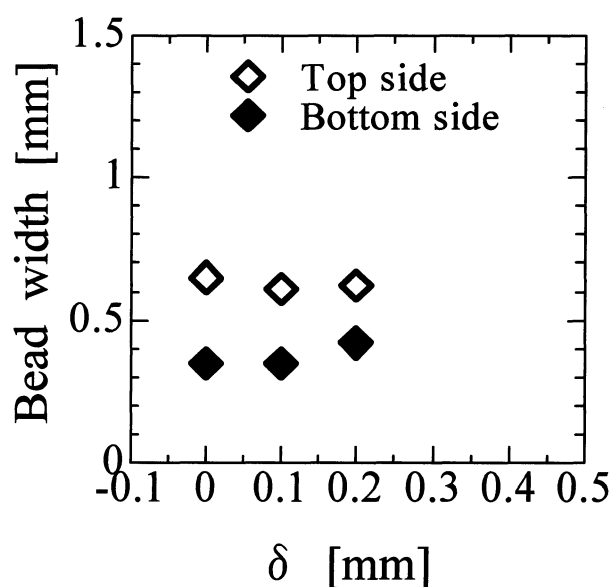
(a) Welding speed: 20mm/s



(b) Welding speed: 40mm/s

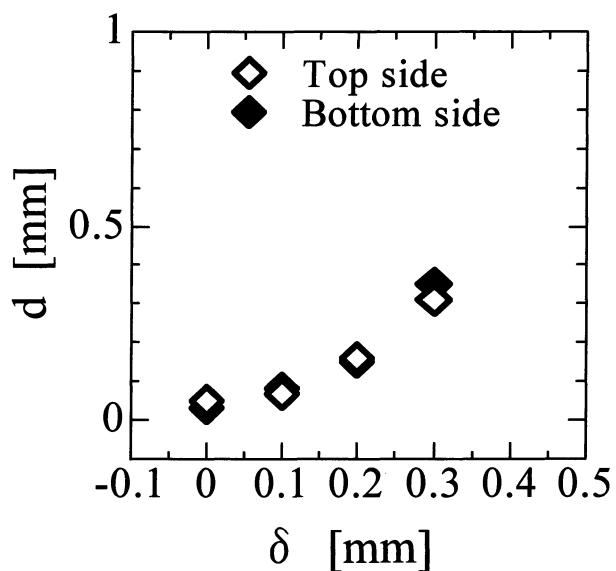


(c) Welding speed: 60mm/s

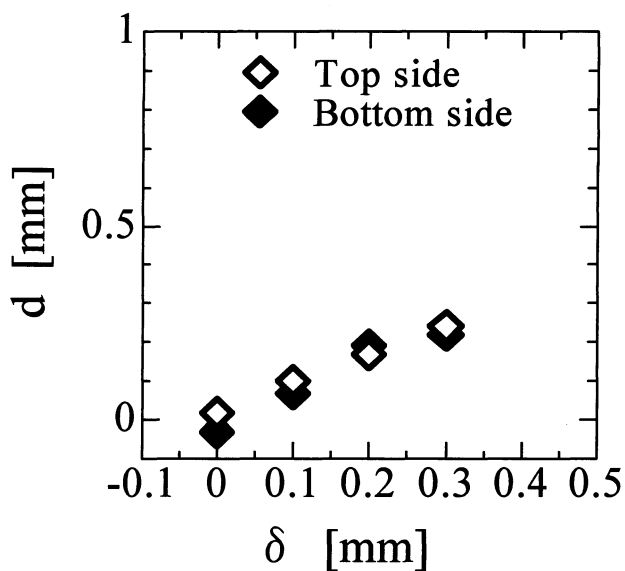


(d) Welding speed: 80mm/s

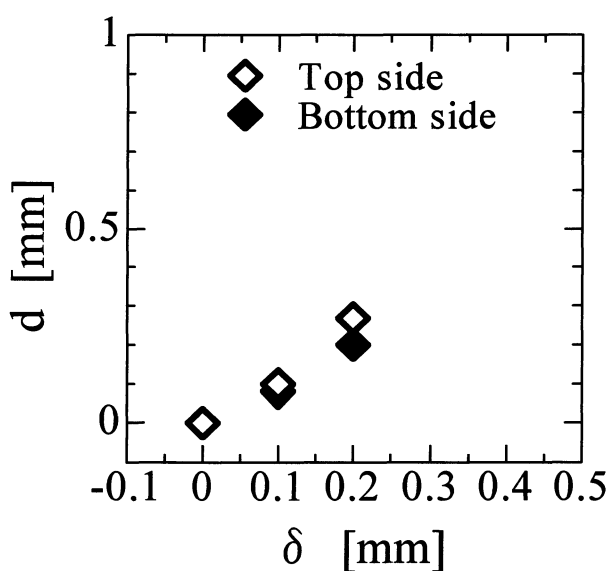
Fig.3-6 Relationship between δ and bead width at different welding speed in vertical upward welding



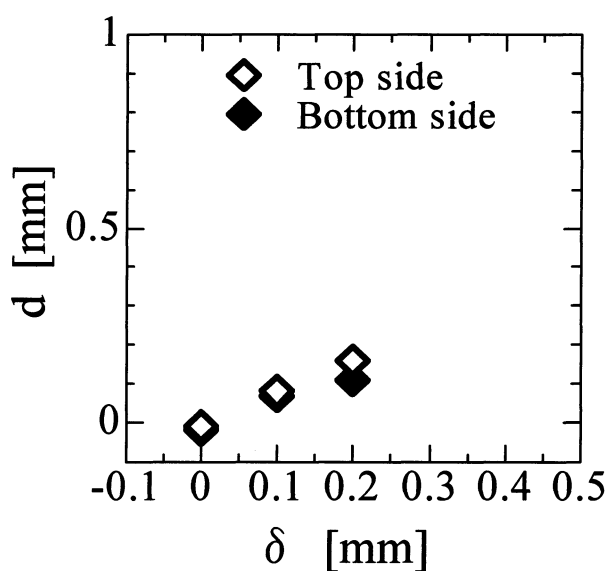
(a) Welding speed: 20mm/s



(b) Welding speed: 40mm/s

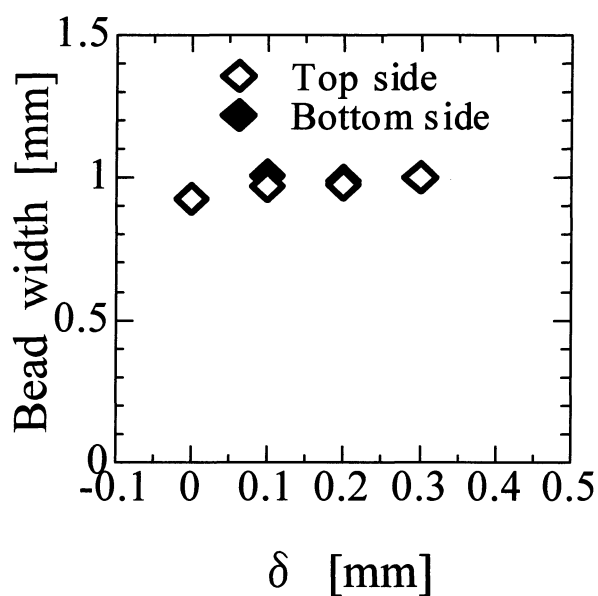


(c) Welding speed: 60mm/s

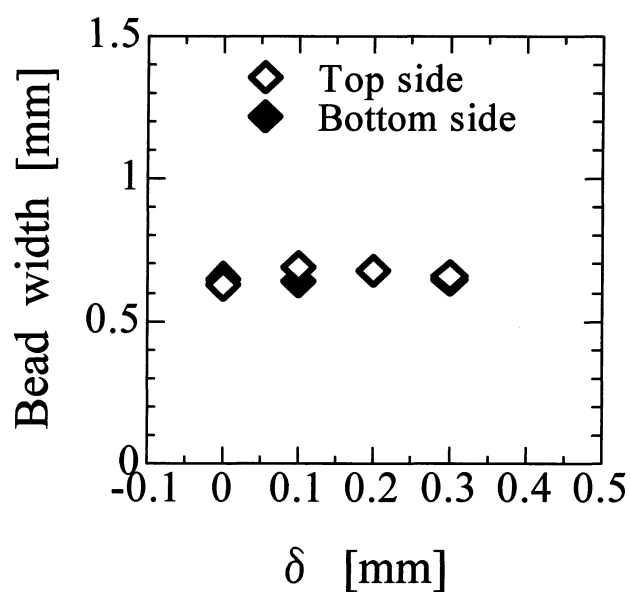


(d) Welding speed: 80mm/s

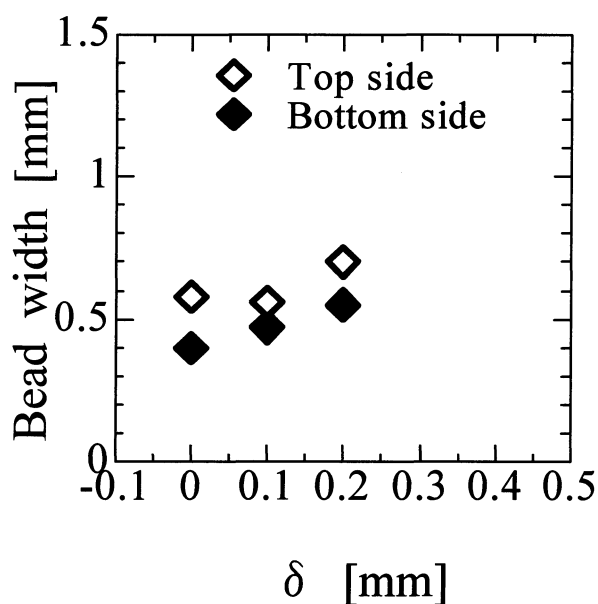
Fig.3-7 Relationship between δ and d at different welding speed in vertical upward welding



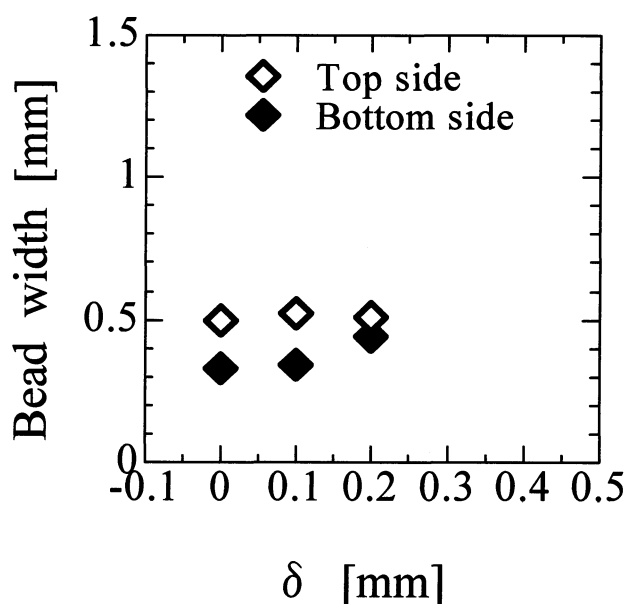
(a) Welding speed: 20mm/s



(b) Welding speed: 40mm/s

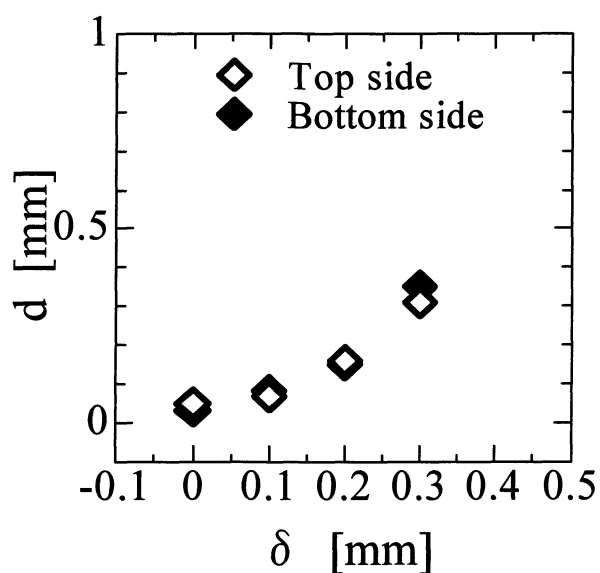


(c) Welding speed: 60mm/s

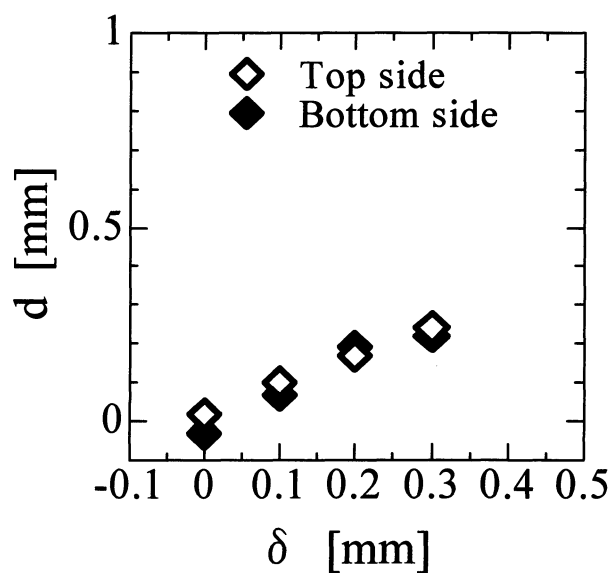


(d) Welding speed: 80mm/s

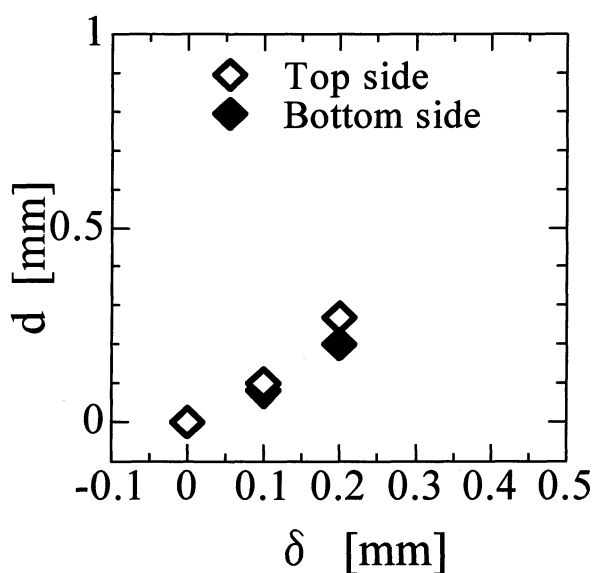
Fig.3-8 Relationship between δ and bead width at different welding speed in vertical downward welding



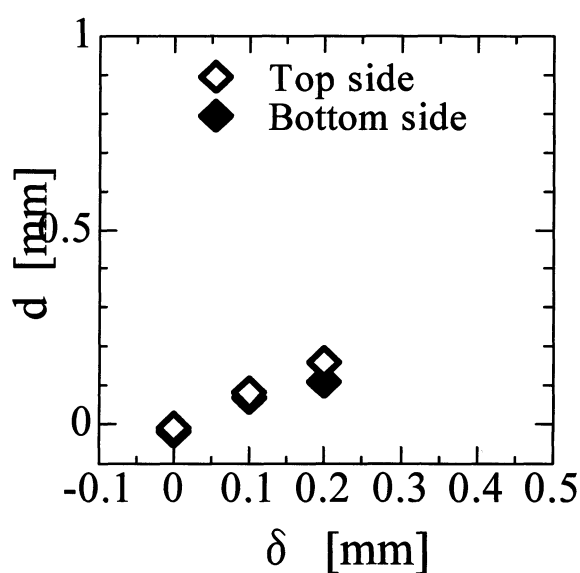
(a) Welding speed: 20mm/s



(b) Welding speed: 40mm/s

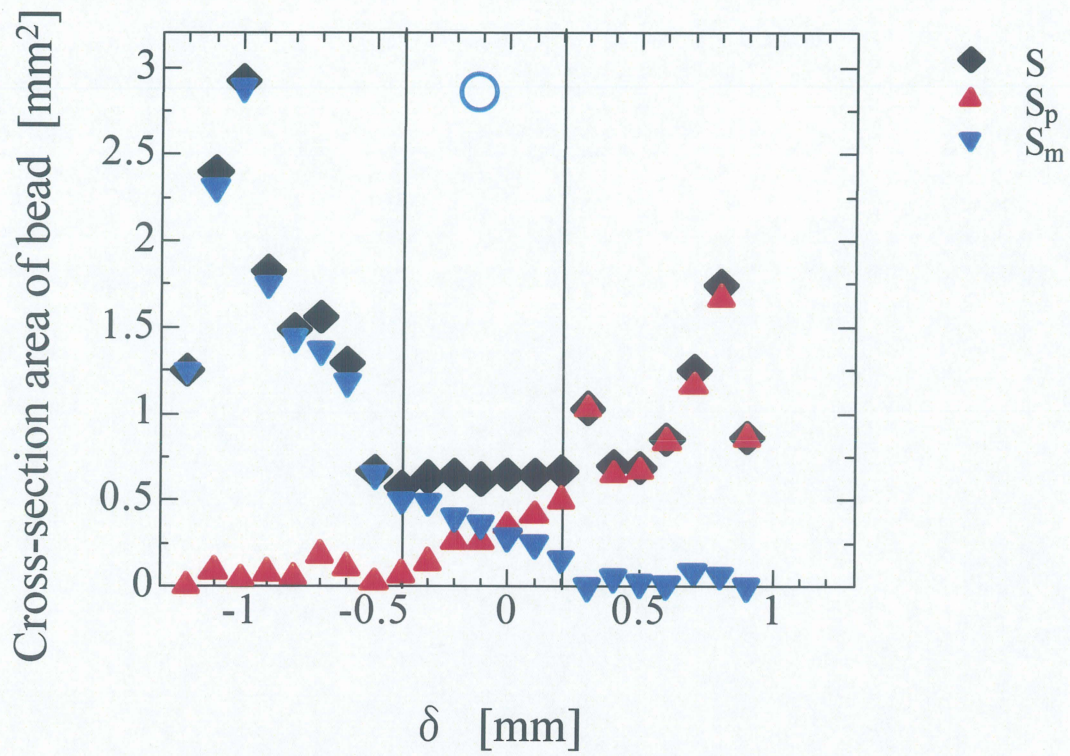


(c) Welding speed: 60mm/s

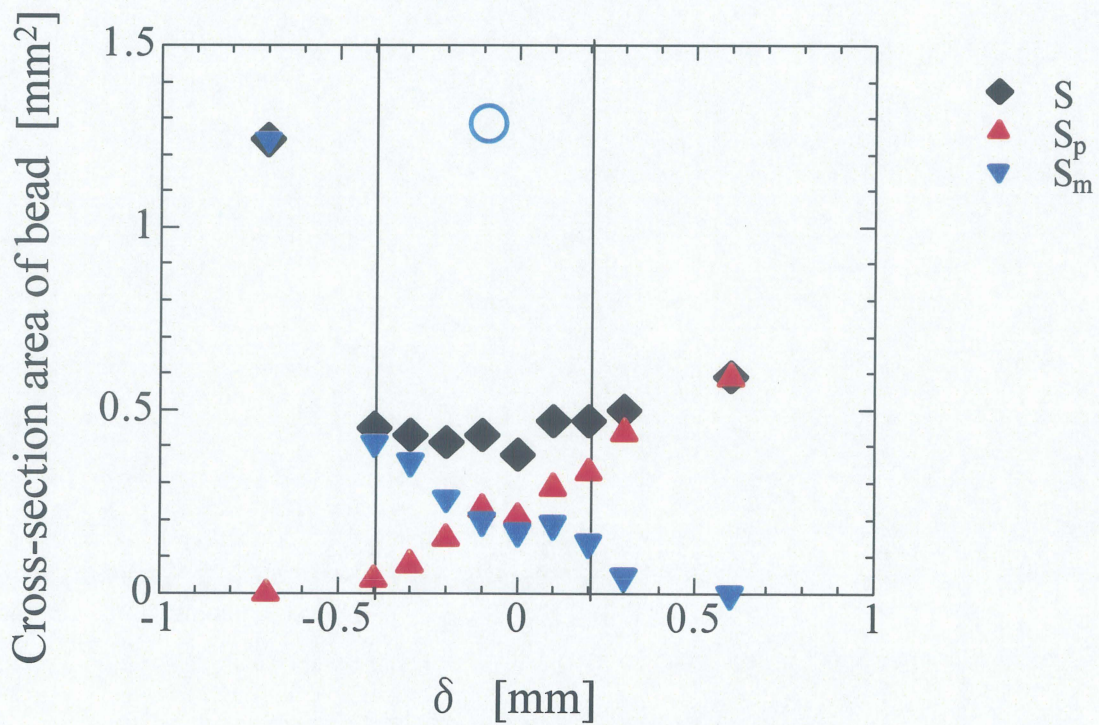


(d) Welding speed: 80mm/s

Fig.3-9 Relationship between δ and d at different welding speed in vertical downward welding

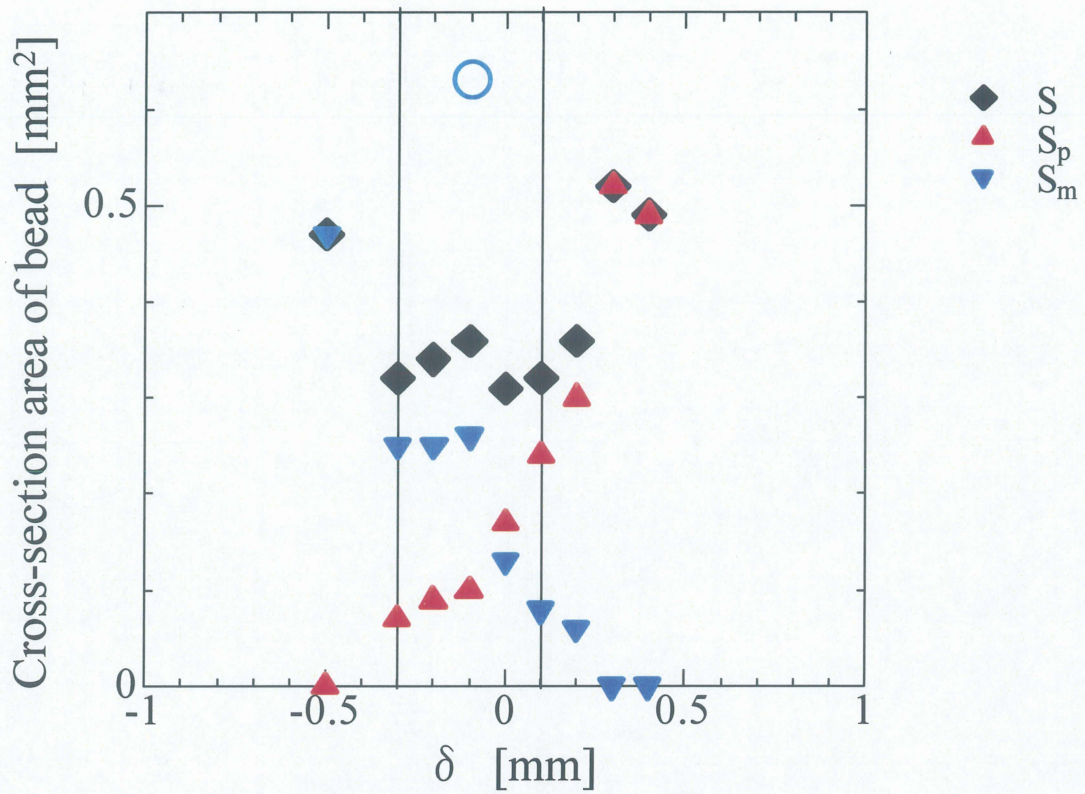


(a) Welding speed: 20mm/s

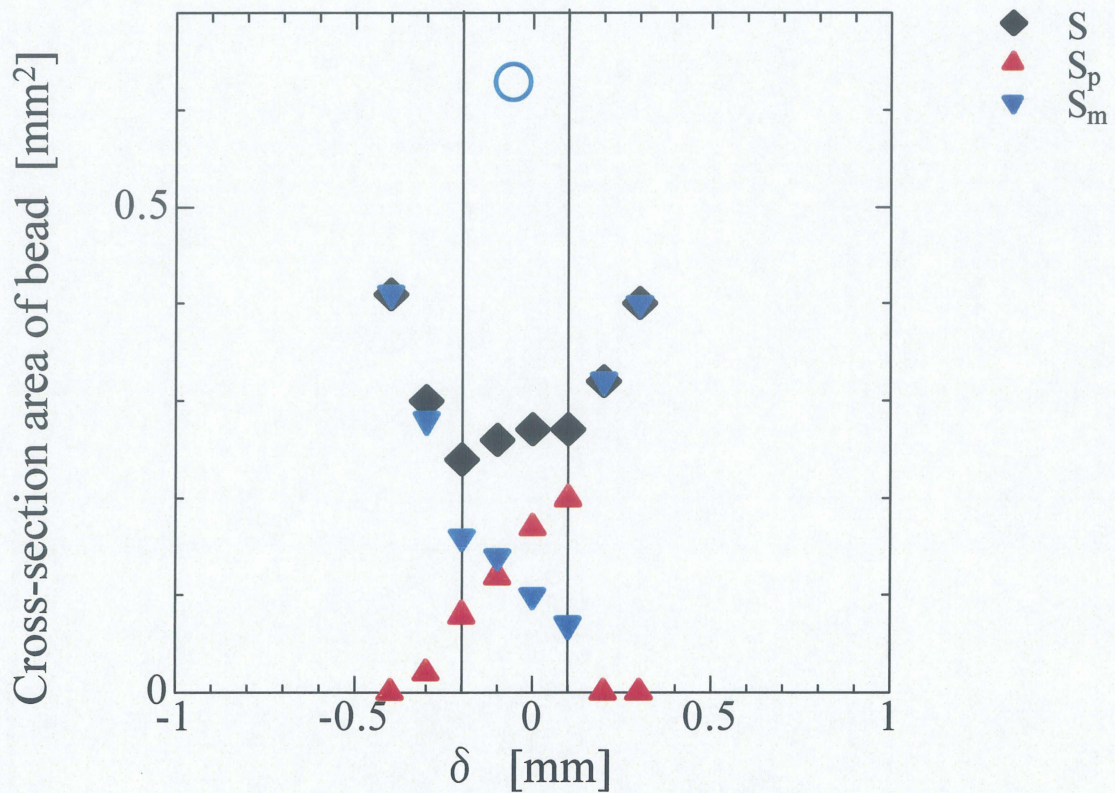


(b) Welding speed: 40mm/s

Fig.3-10 Relationship between δ and d Cross-section area of bead in horizontal welding

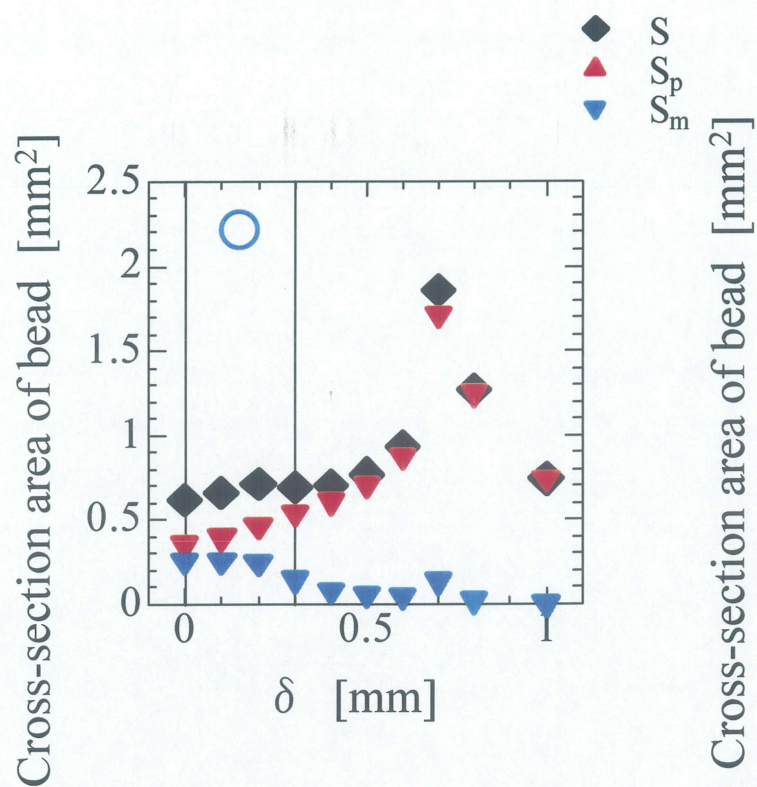


(a) Welding speed: 60mm/s

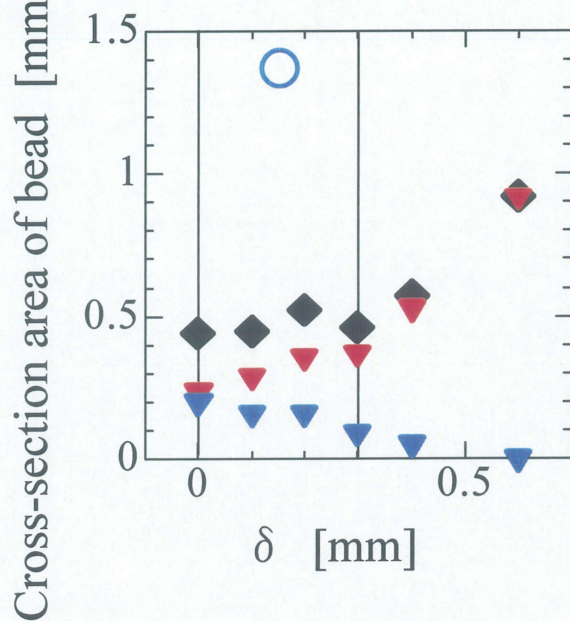


(b) Welding speed: 80mm/s

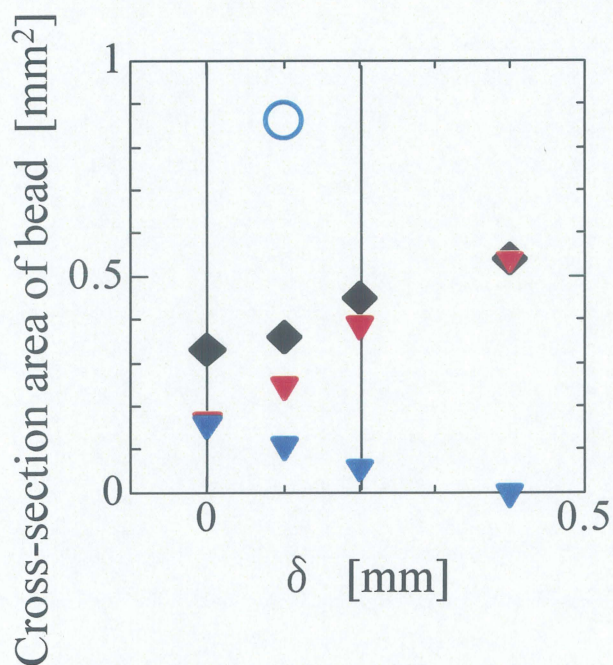
Fig.3-11 Relationship between δ and d Cross-section area of bead in horizontal welding



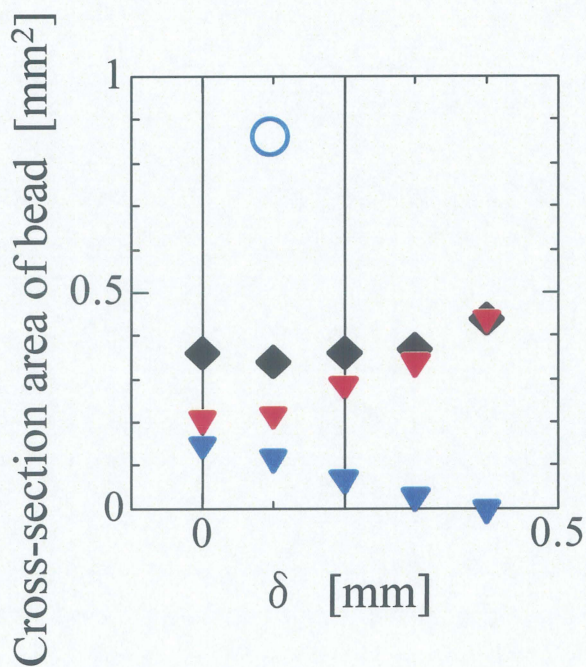
(a) Welding speed: 20mm/s



(b) Welding speed: 40mm/s

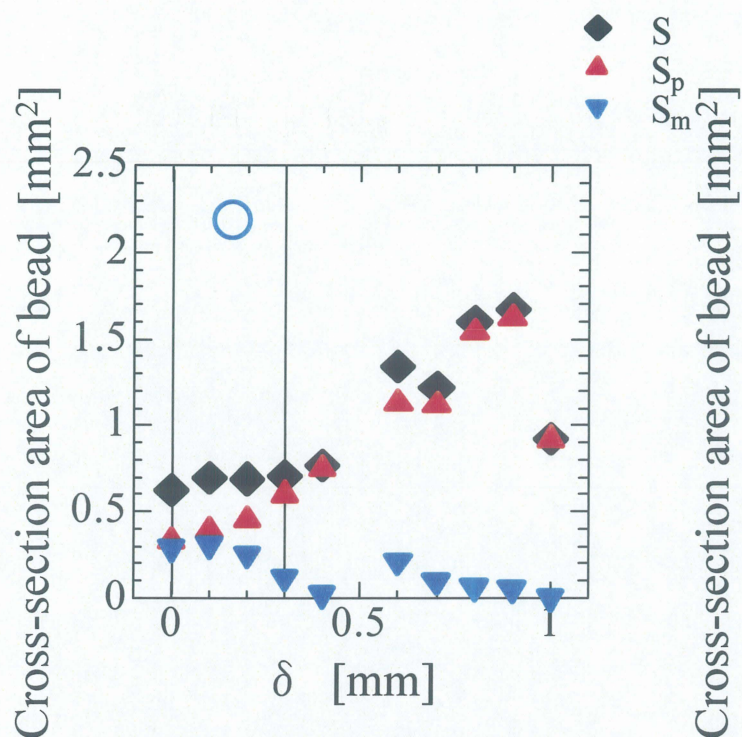


(c) Welding speed: 60mm/s

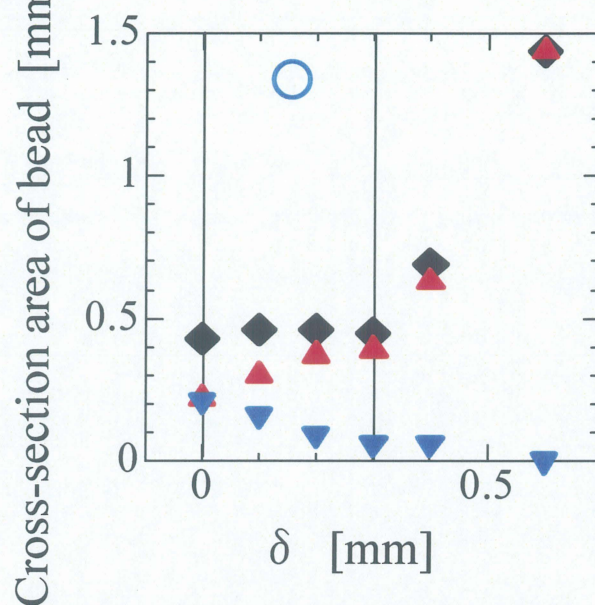


(d) Welding speed: 80mm/s

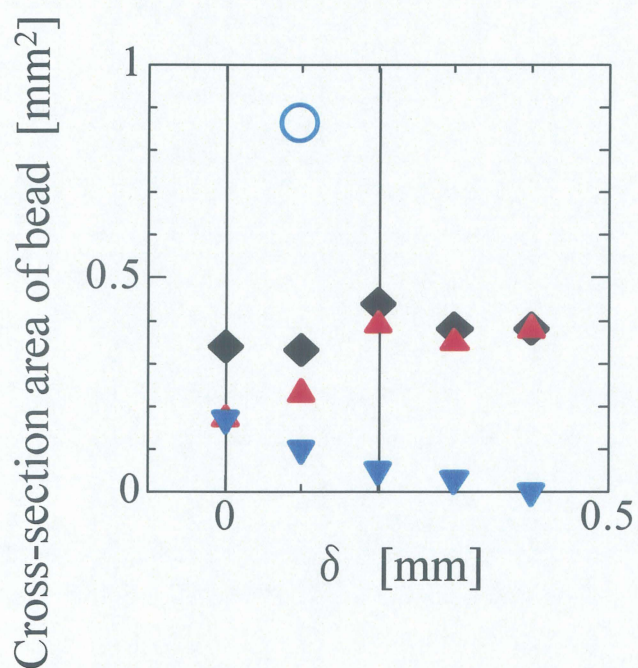
Fig.3-12 Relationship between δ and Cross-section area of bead in vertical upward welding



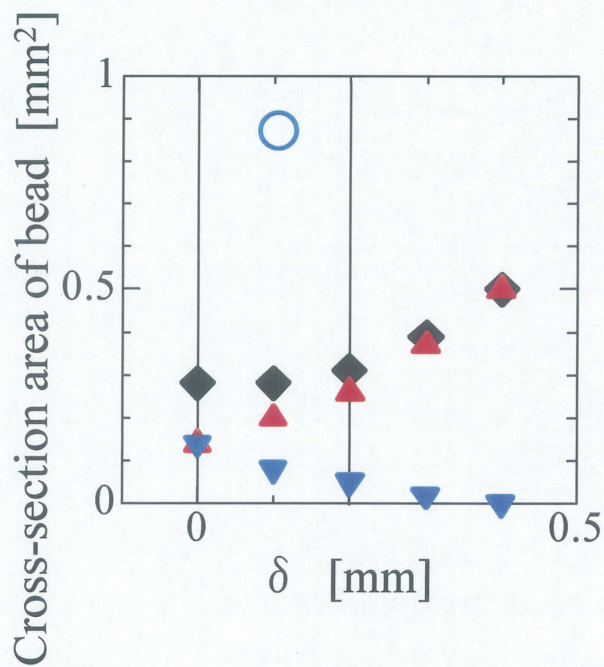
(a) Welding speed: 20mm/s



(b) Welding speed: 40mm/s



(c) Welding speed: 60mm/s



(d) Welding speed: 80mm/s

Fig.3-13 Relationship between δ and area of cross-section in vertical downward welding

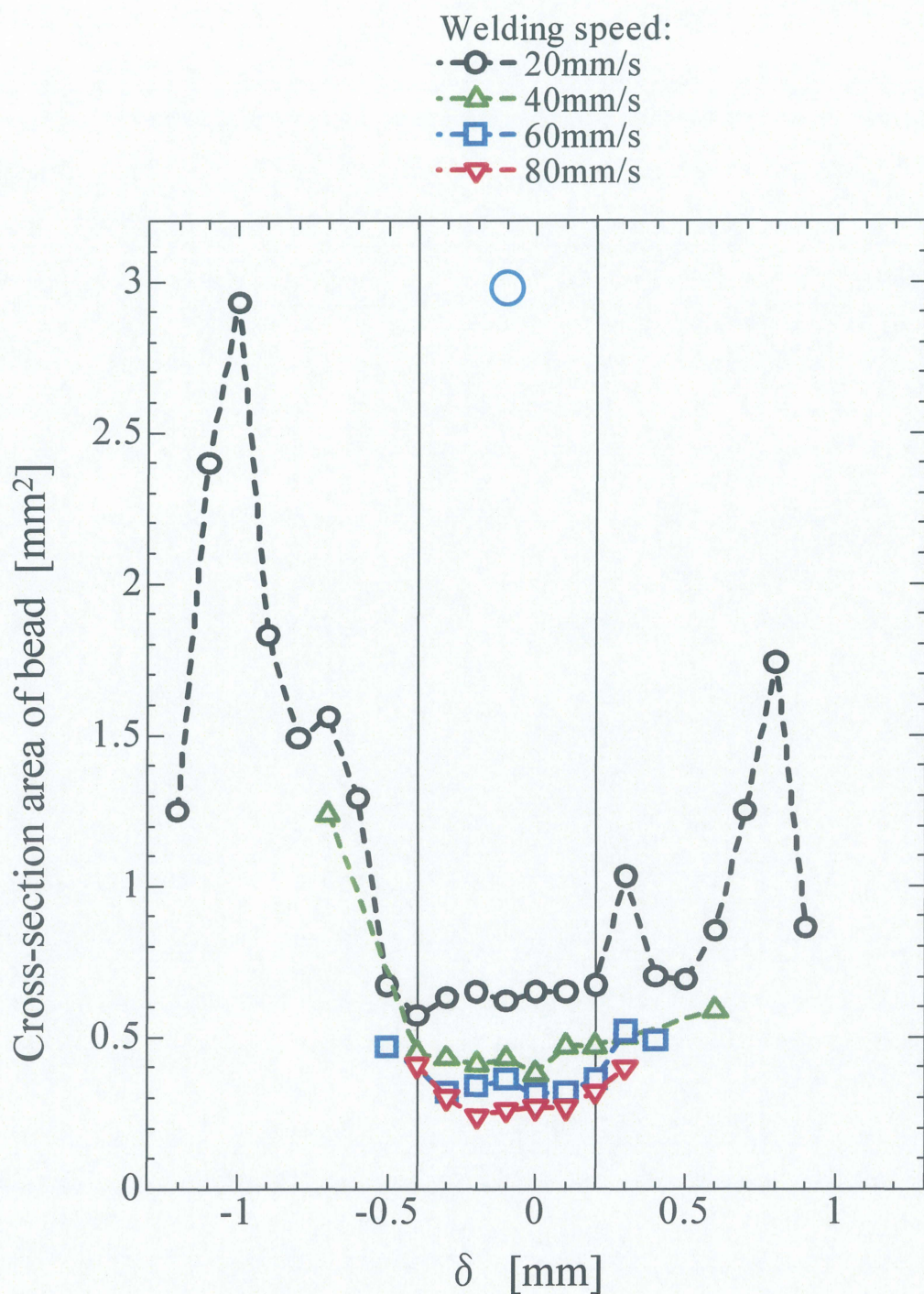
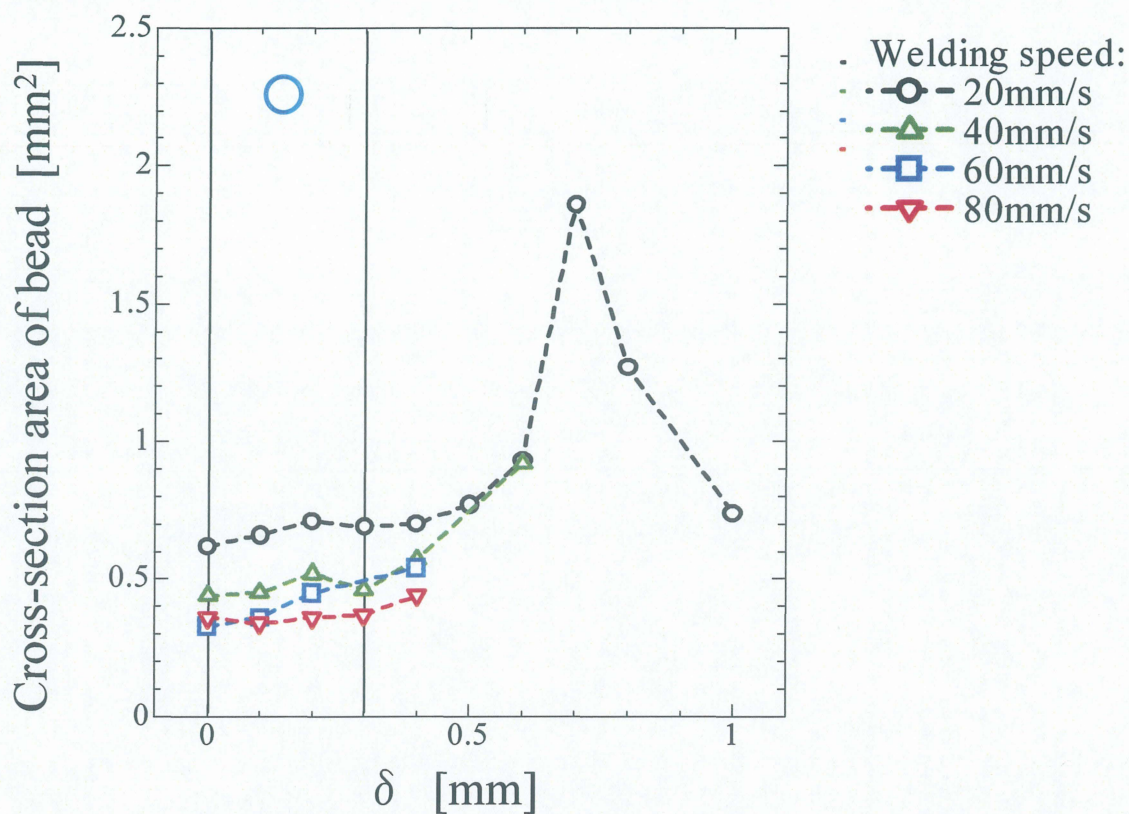
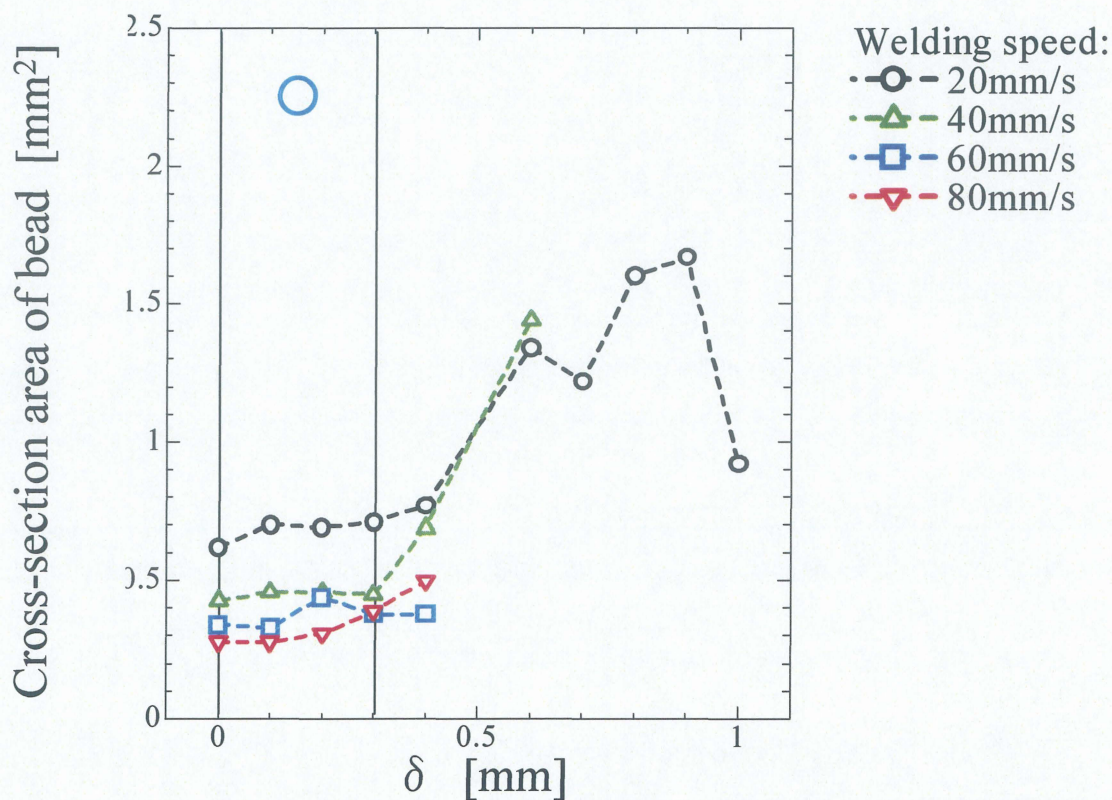


Fig.3-14 Relationship between δ and cross-section area of bead at different welding speed in horizontal welding



(a) Upward Welding



(b) Downward welding

Fig.3-15 Relationship between δ and cross-section area of bead at different welding speed in vertical welding

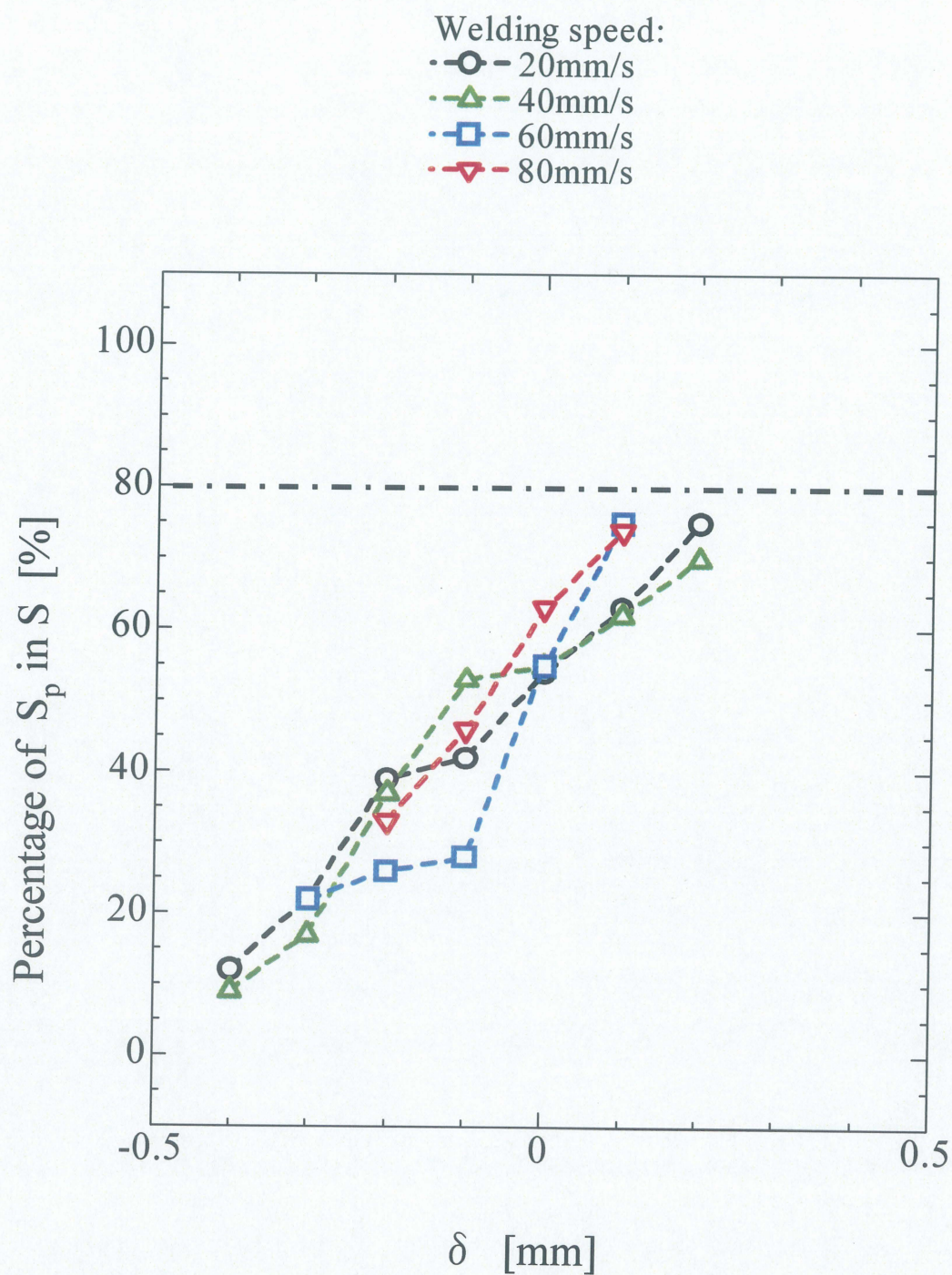
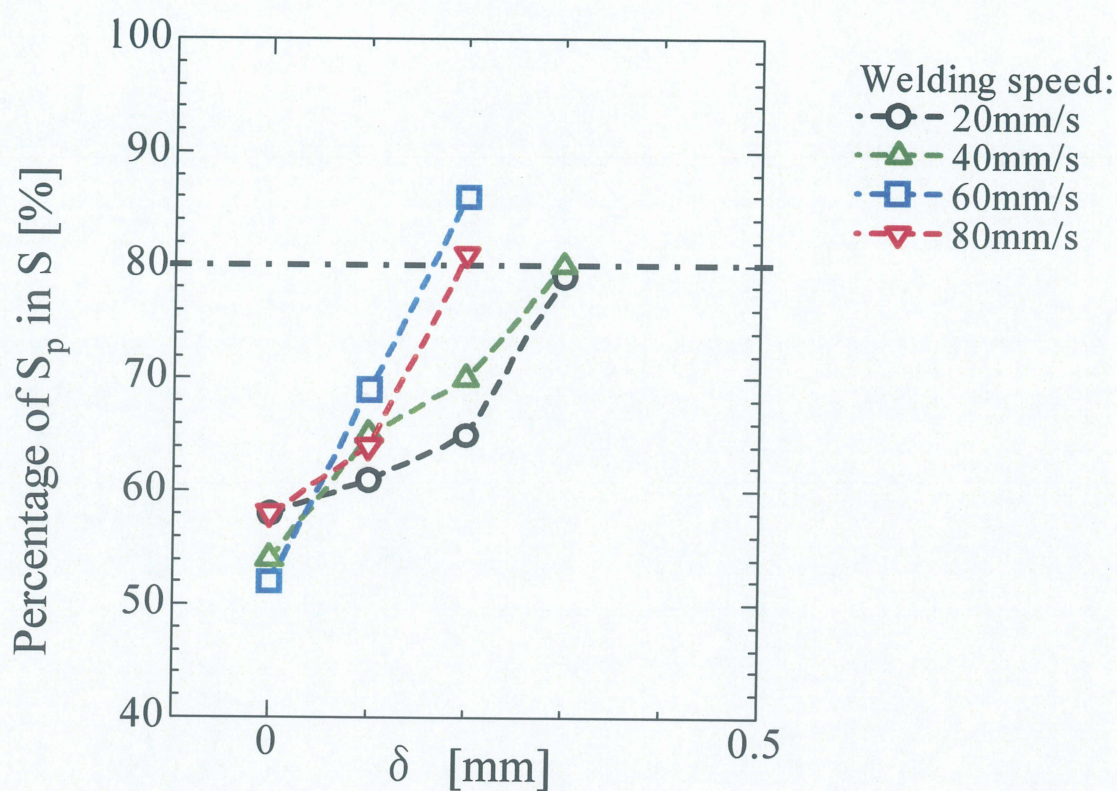
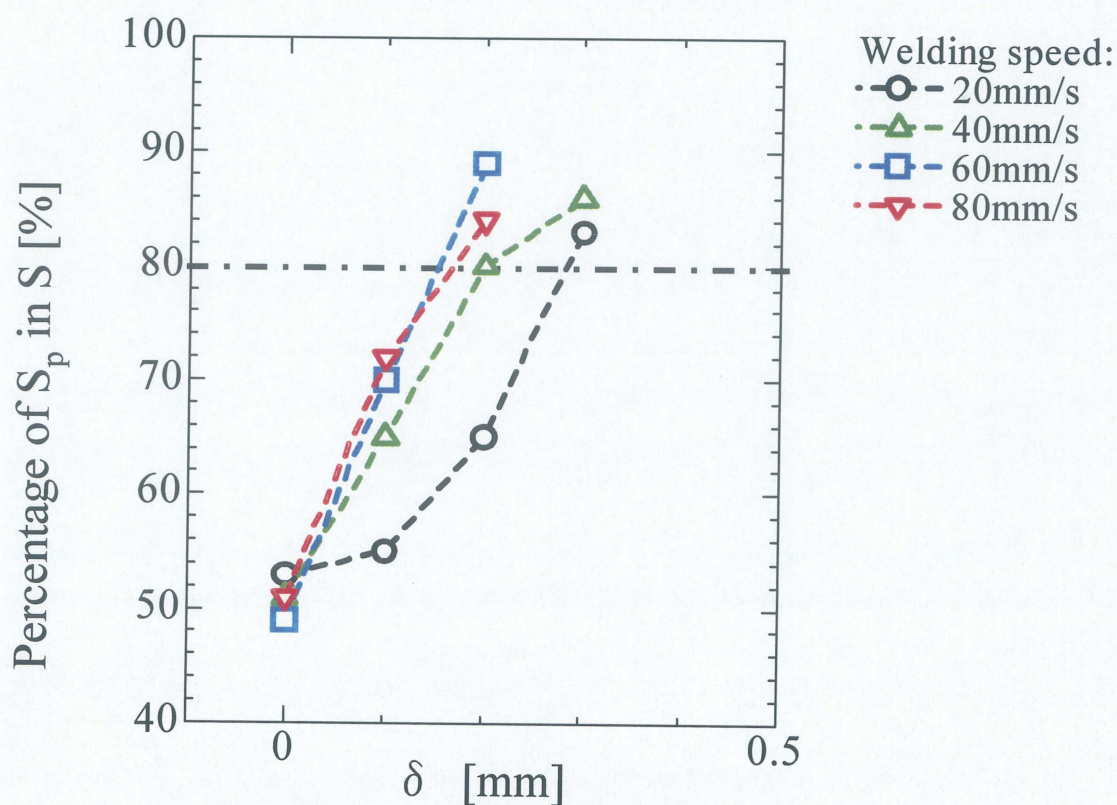


Fig.3-16 Relationship between δ and percentage of S_p in S at different welding speed in horizontal welding

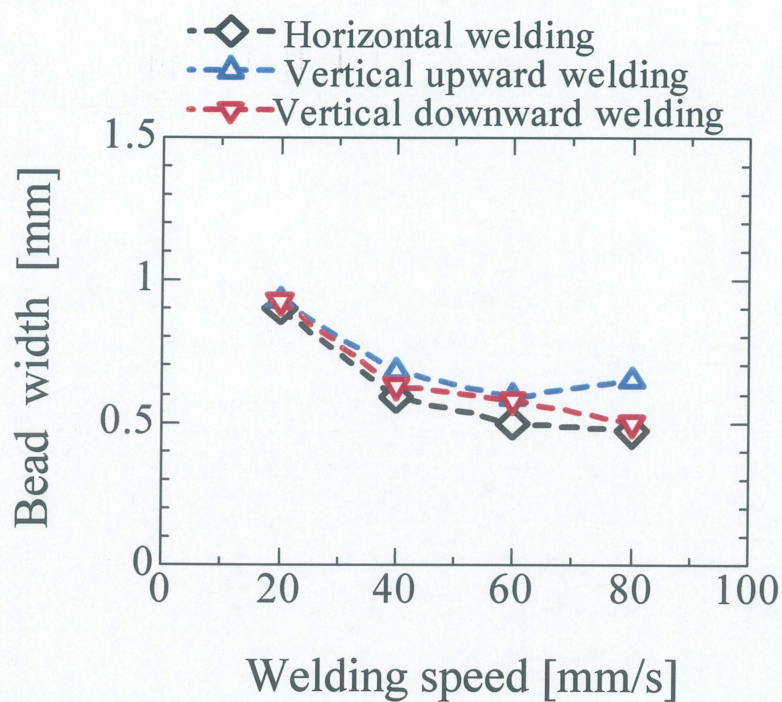


(a) Upward Welding

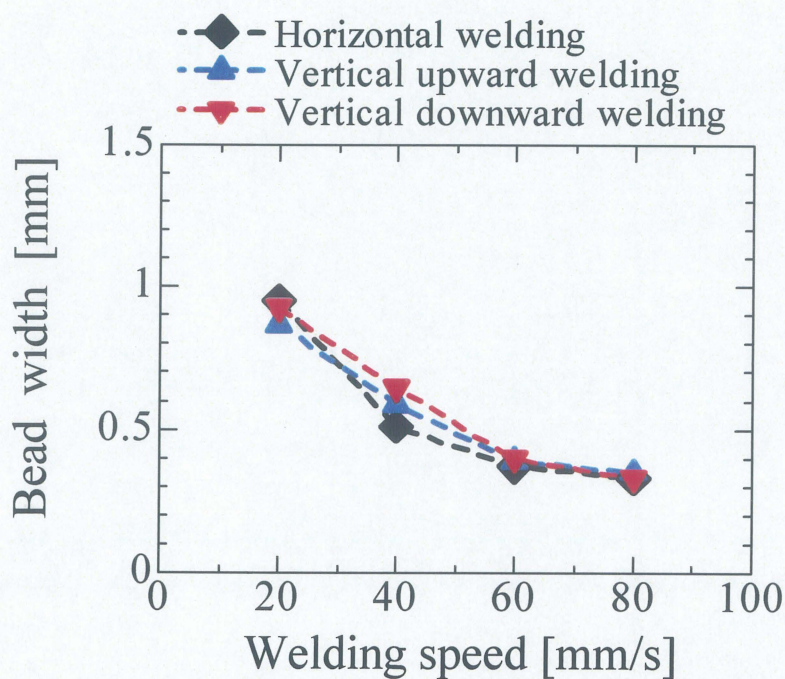


(b) Downward welding

Fig.3-17 Relationship between δ and percentage of S_p in S at different welding speed in vertical welding



(a) Top side



(b) Bottom side

Fig.3-18 Relationship between Welding speed and bead width at different welding position in butt welding ; $\delta = 0$

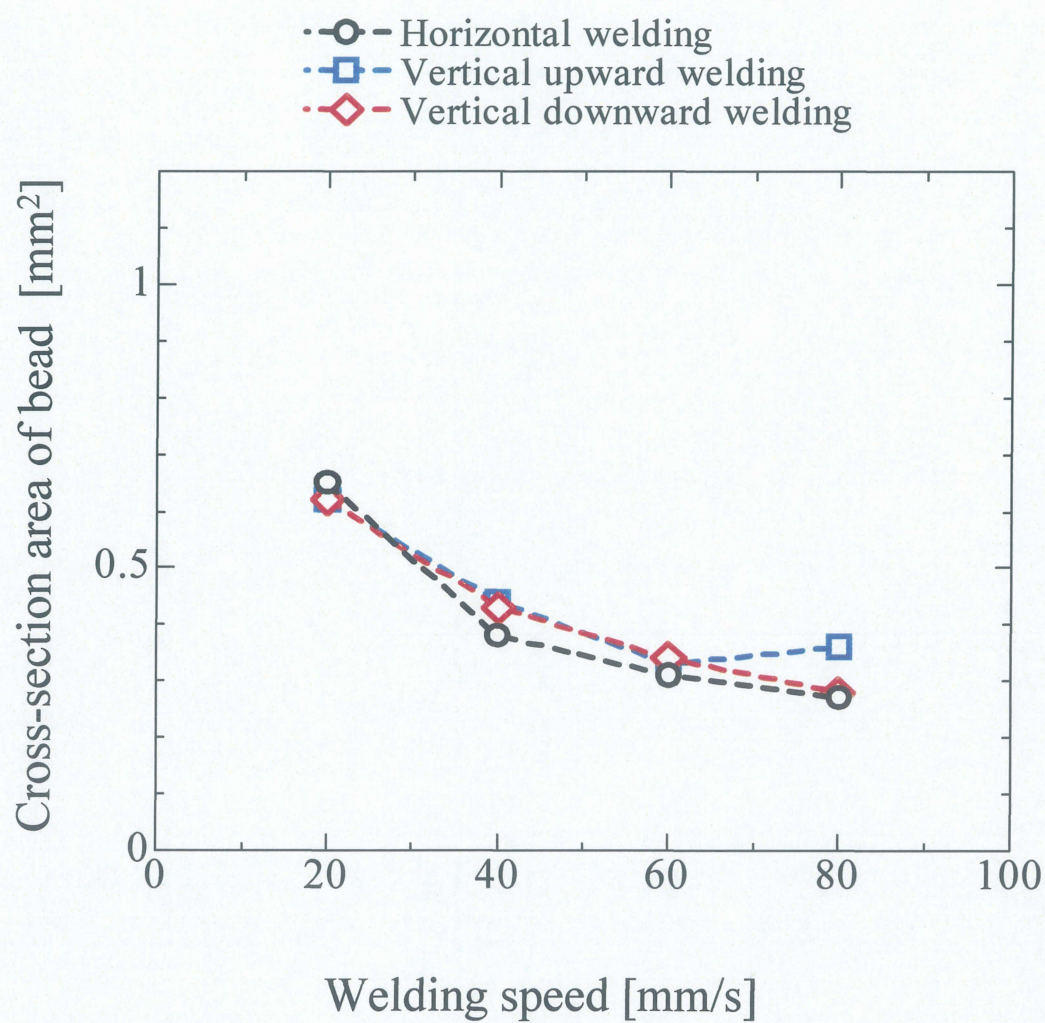
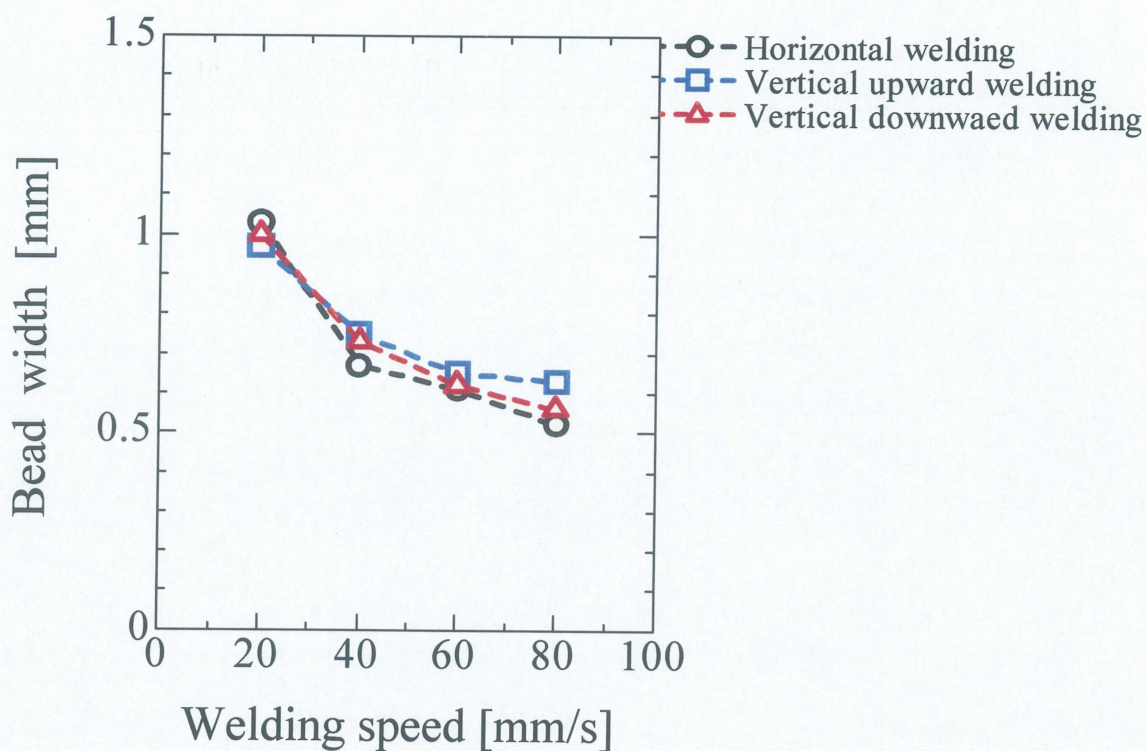
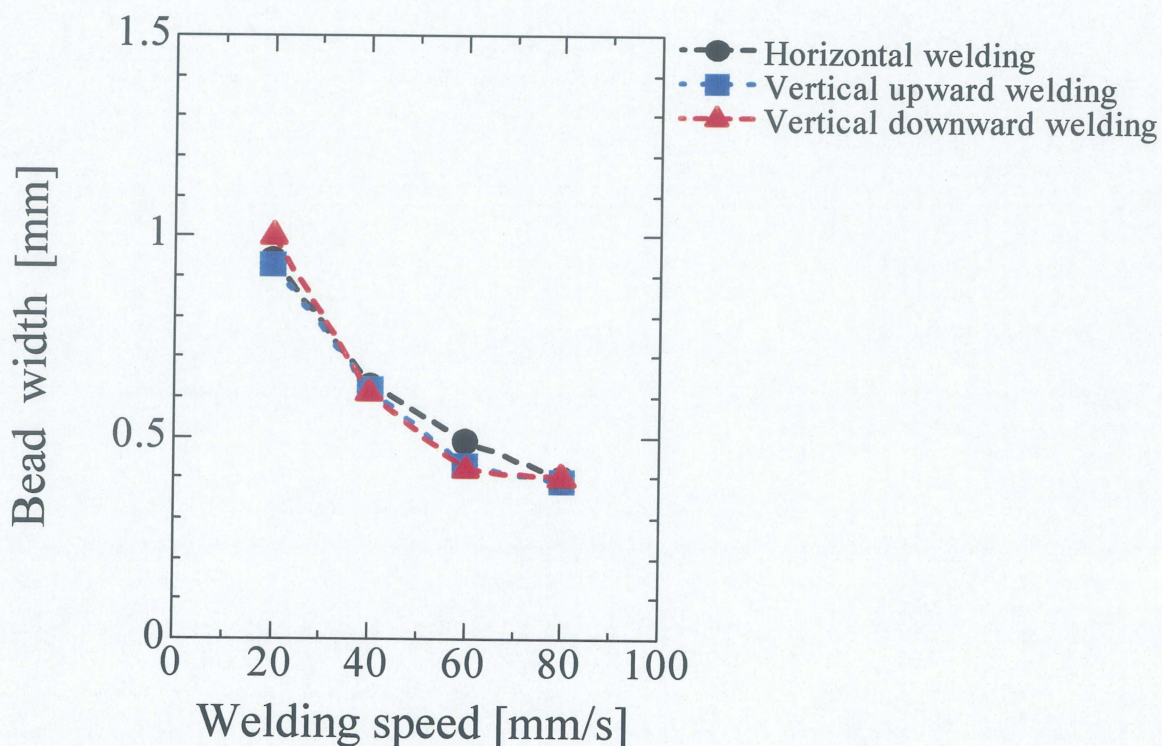


Fig.3-19 Relationship between Welding speed and cross-section area of bead at different welding position in butt welding : $\delta = 0$



(a) Top side



(b) Bottom side

Fig.3-20 Relationship between welding bead width and bead width at different welding position in bead-on-plate welding

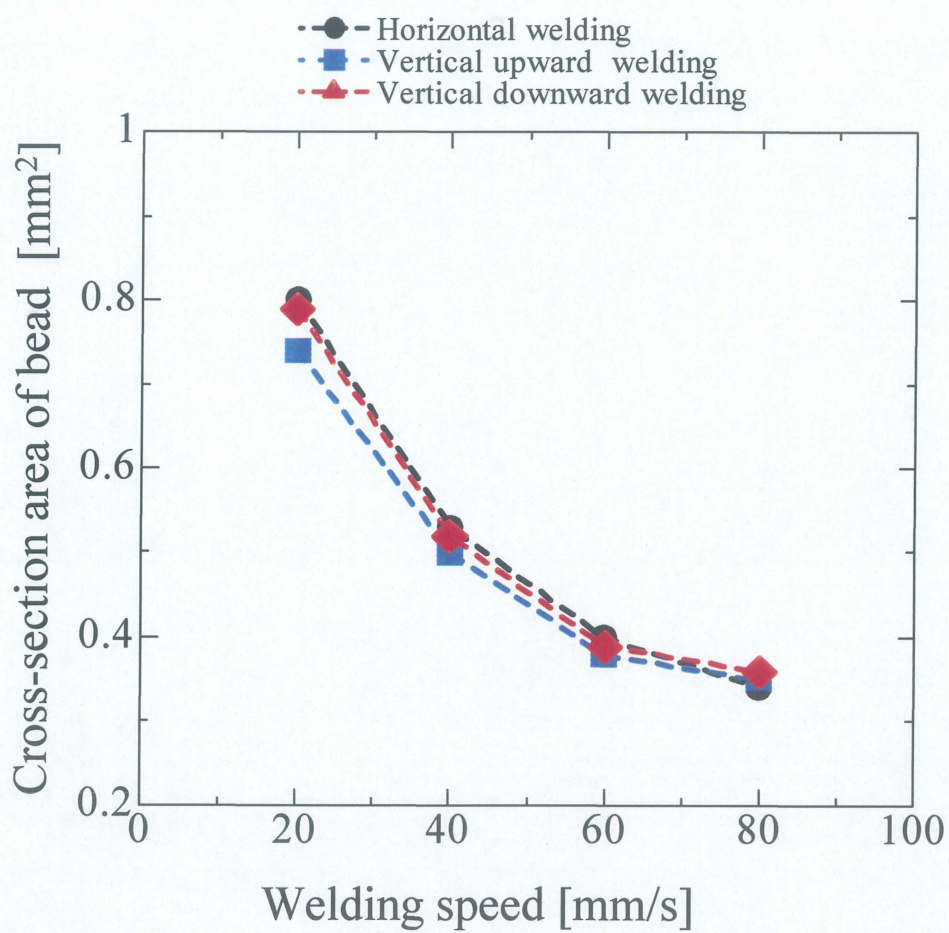
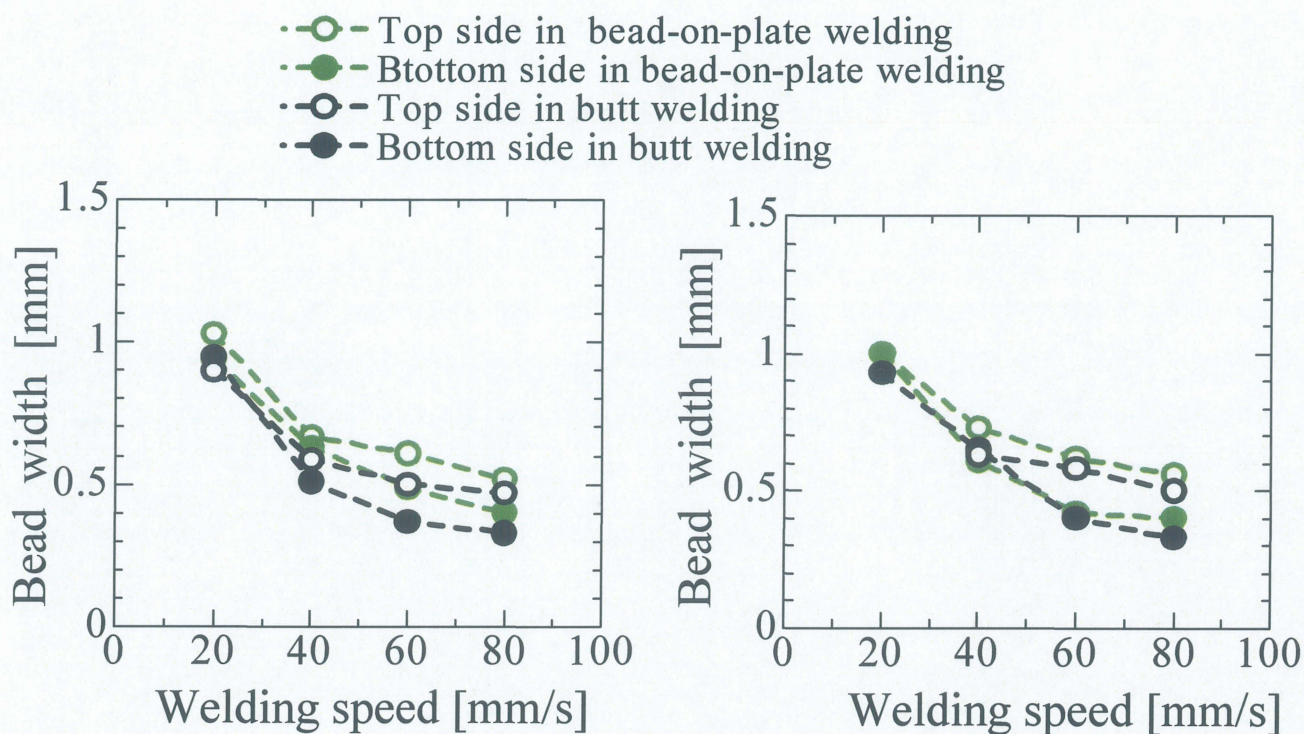
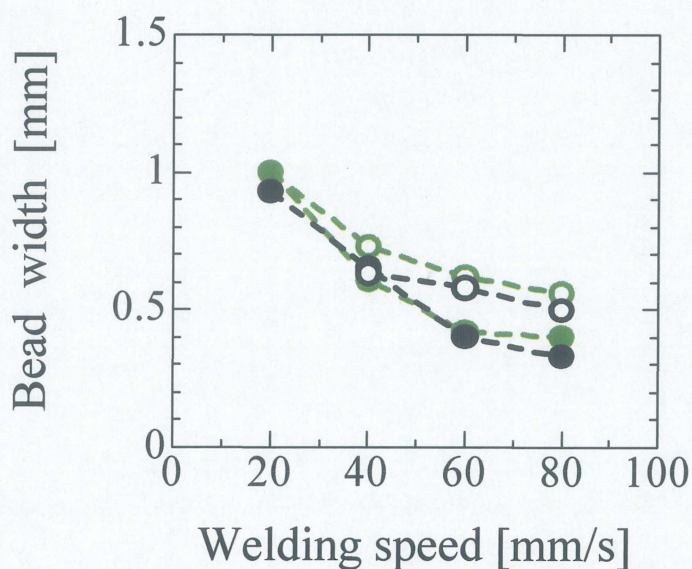


Fig.3-21 Relationship between welding speed and area of cross-section at different welding position in bead-on-plate welding



(a) Horizontal welding

(b) Vertical upward welding



(c) Vertical downward welding

Fig.3-22 Relationship between welding speed and bead width and in butt welding and bead on plate welding

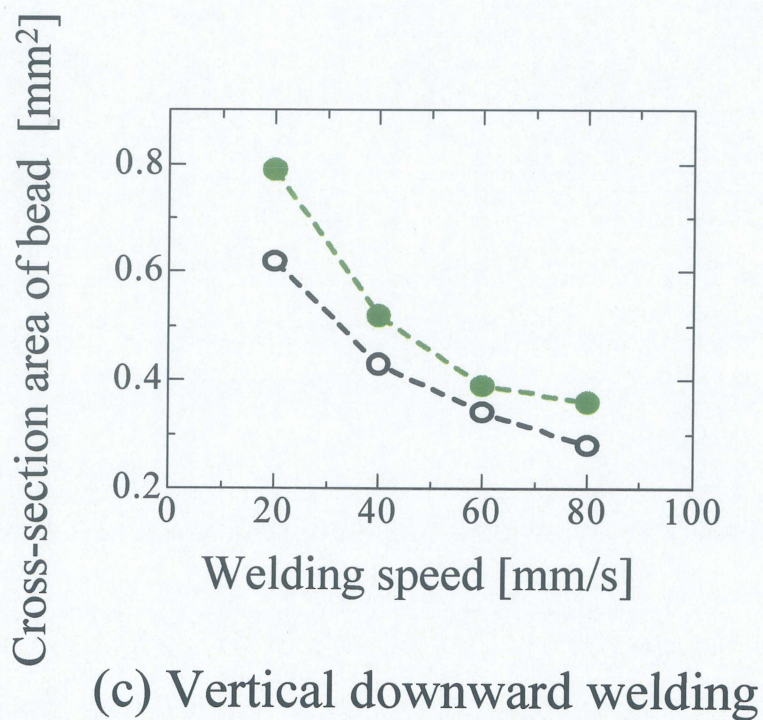
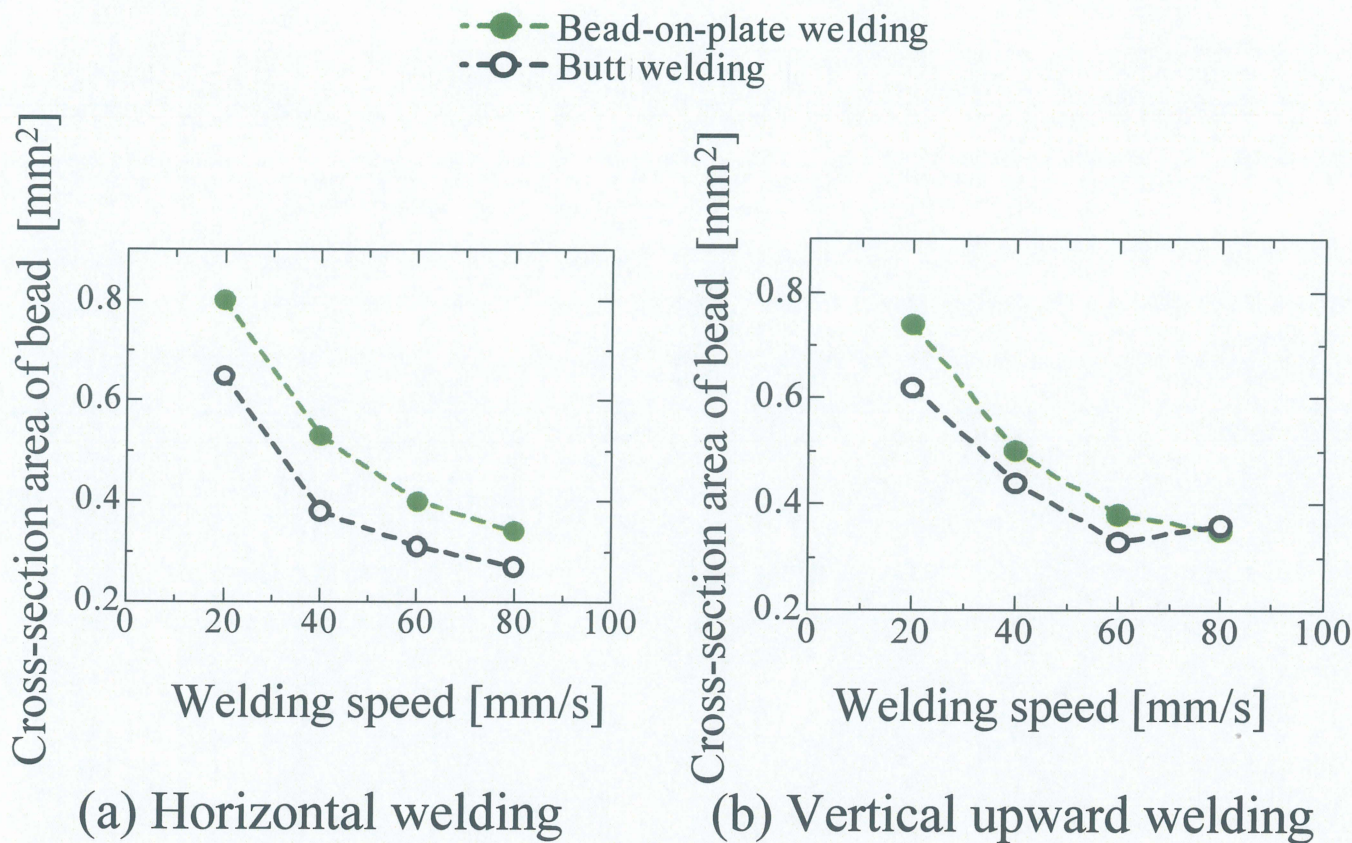
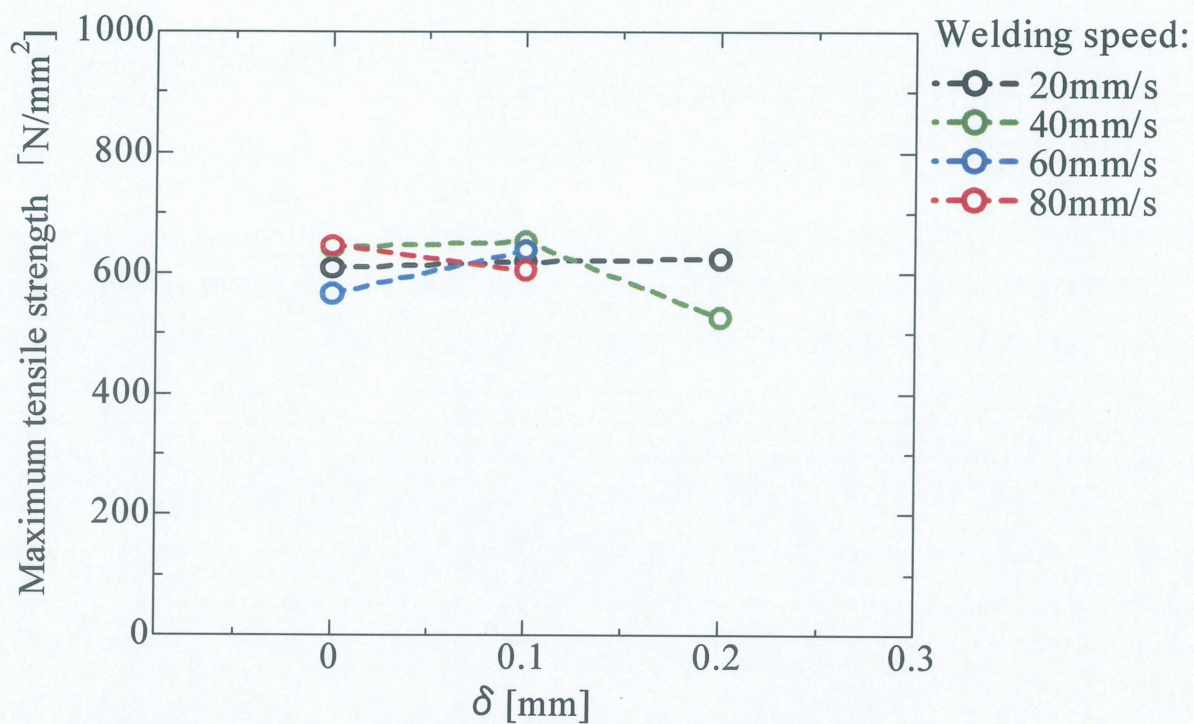
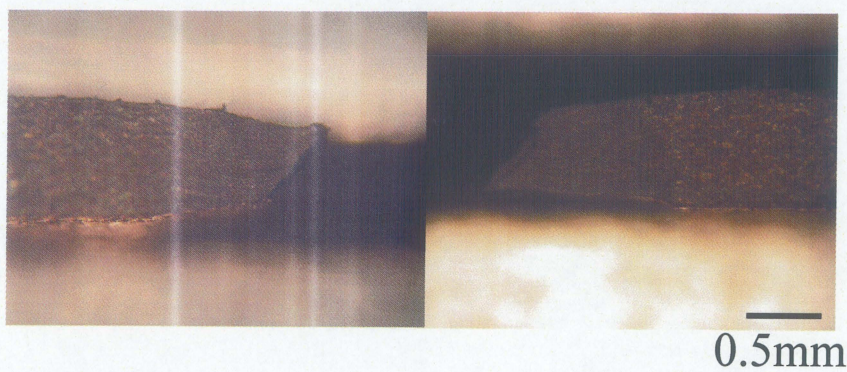


Fig.3-23 Relationship between welding speed and cross-section area of bead in butt welding and bead on plate welding

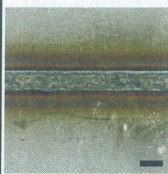
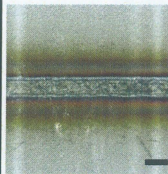
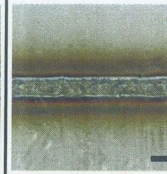

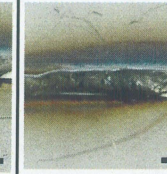

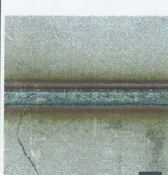




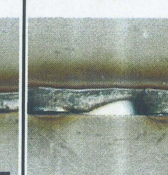
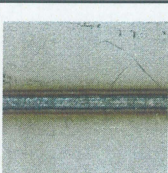



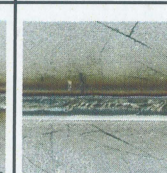
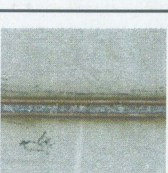

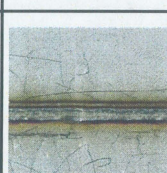
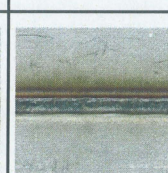


(a) Relationship between δ and maximum tensile strength at different welding speed in horizontal welding



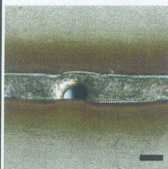

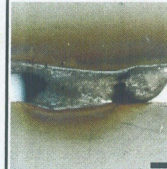
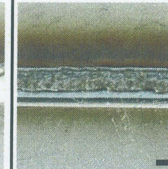
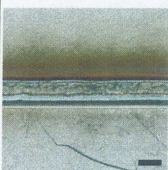
(b) Fractured part of specimen after tensile test

Fig.3-24 Results of tensile test

		δ [mm]					
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

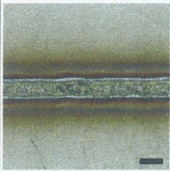
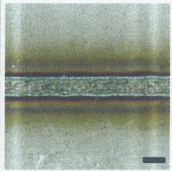
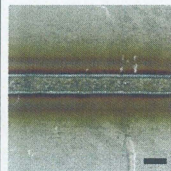
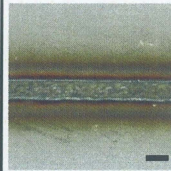
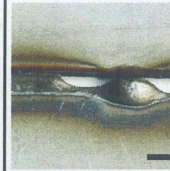
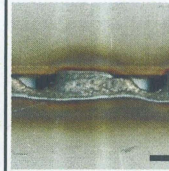
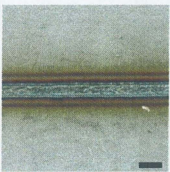
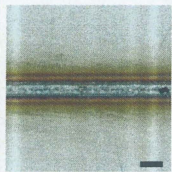
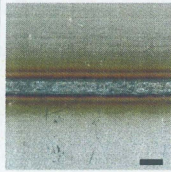
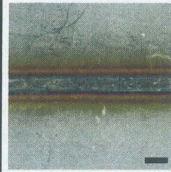
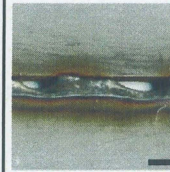
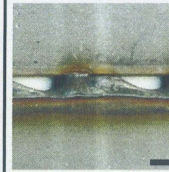
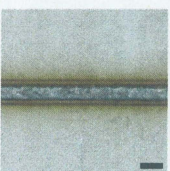
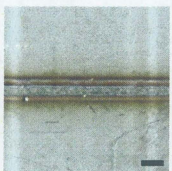
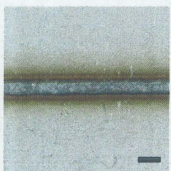
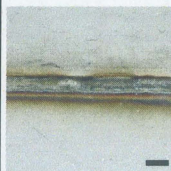


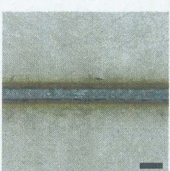
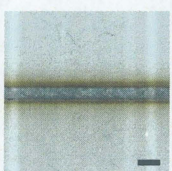
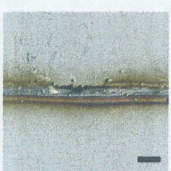
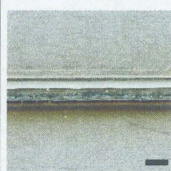
1mm

Fig.3-25 Bead appearance of laser butt weld,
 $\delta = 0 \sim 0.5 \text{ mm}$ in horizontal welding

		δ [mm]					
		0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

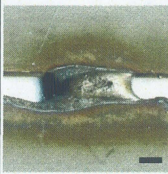
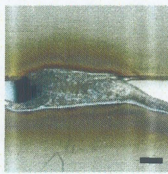
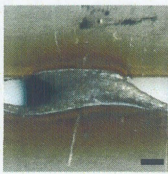
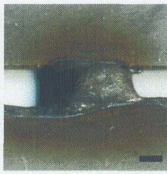
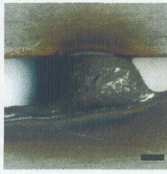
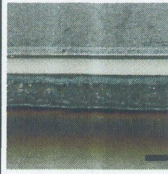
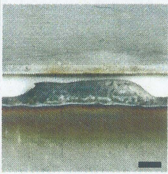
1mm

Fig.3-26 Bead appearance of laser butt weld,
 $\delta = 0.6 \sim 1.1 \text{ mm}$ in horizontal welding

		δ [mm]					
		-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

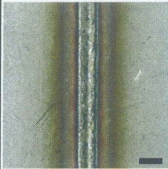
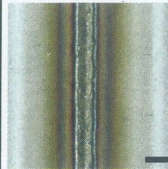
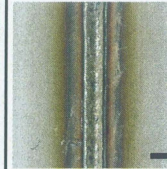
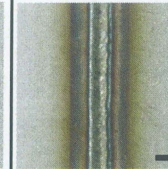
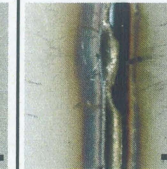
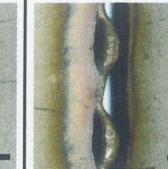
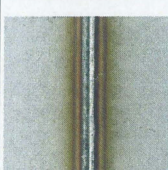

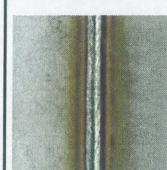
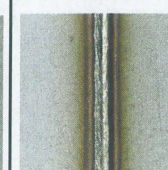
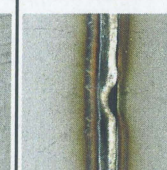
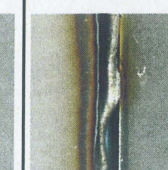
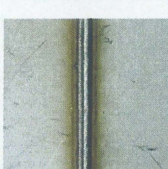



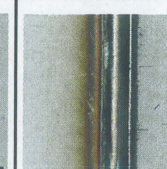
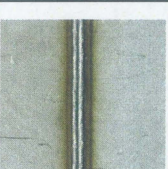
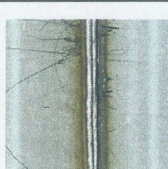



1mm

Fig.3-27 Bead appearance of laser butt weld,
 $\delta = -0.1 \sim -0.6$ mm in horizontal welding

		δ [mm]					
		-0.7	-0.8	-0.9	-1.0	-1.1	-1.2
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

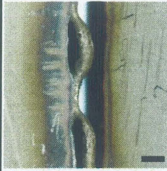
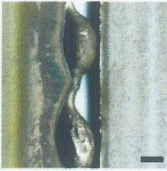
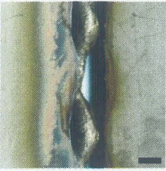
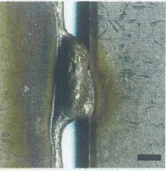
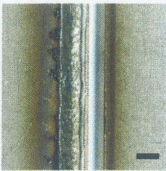
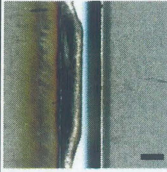
1mm

Fig.3-28 Bead appearance of laser butt weld,
 $\delta = -0.7 \sim -1.2$ mm in horizontal welding

		δ [mm]					
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

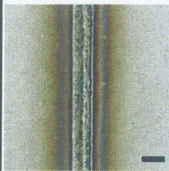
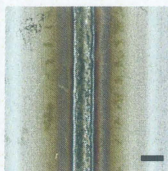
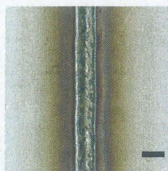
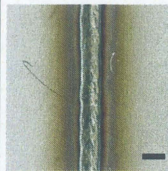
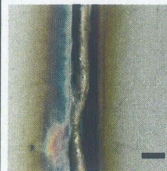

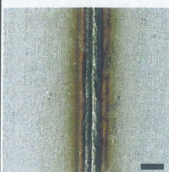
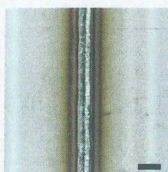
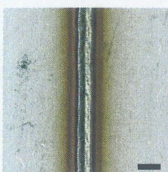
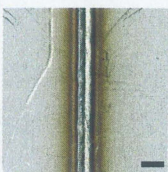

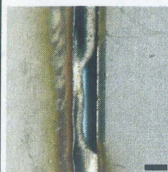
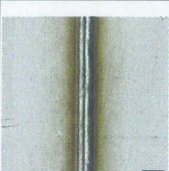
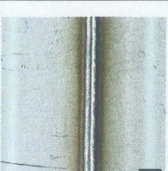
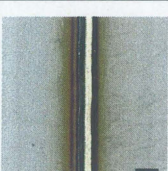

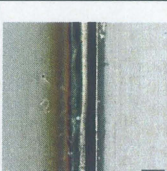

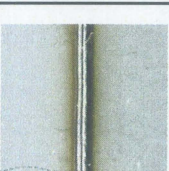
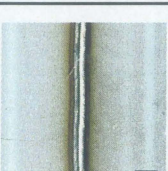
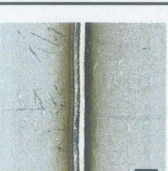


1mm

Fig.3-29 Bead appearance of laser butt weld,
 $\delta = 0 \sim 0.5 \text{ mm}$ in vertical upward welding

		δ [mm]					
		0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

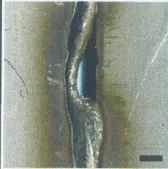
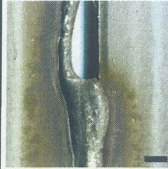
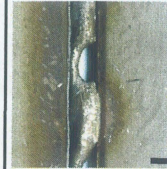
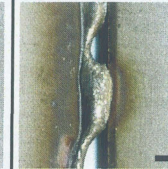
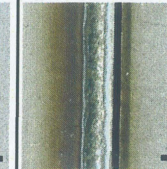
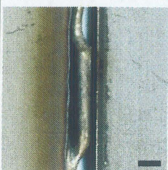
1mm

Fig.3-30 Bead appearance of laser butt weld,
 $\delta = 0.6 \sim 1.1 \text{ mm}$ in vertical upward welding

		δ [mm]					
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

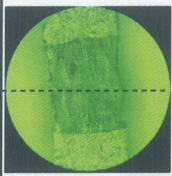
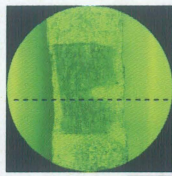
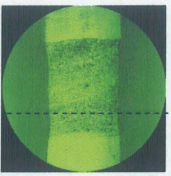
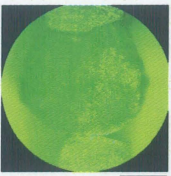
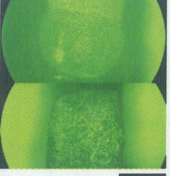

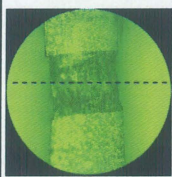
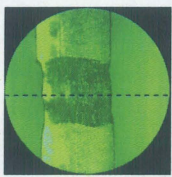
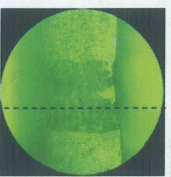
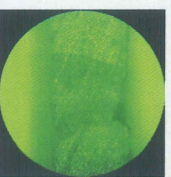

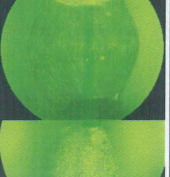
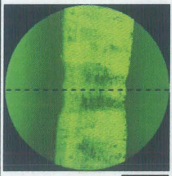
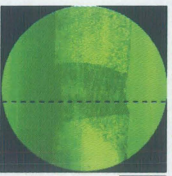
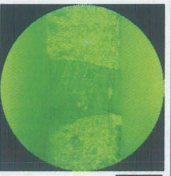
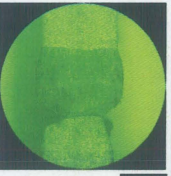
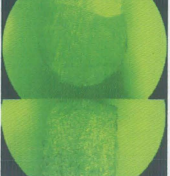
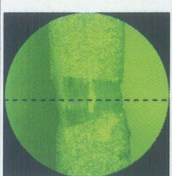
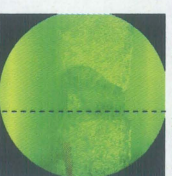


1mm

Fig.3-31 Bead appearance of laser butt weld,
 $\delta = 0 \sim 0.5 \text{ mm}$ in vertical downward welding

		δ [mm]					
		0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

1mm

Fig.3-32 Bead appearance of laser butt weld,
 $\delta = 0.6 \sim 1.1$ mm in vertical downward welding

		δ [mm]					
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

0.5mm

Fig.3-33 Cross-section of weld bead,
 $\delta = 0 \sim 0.5 \text{ mm}$ in horizontal welding

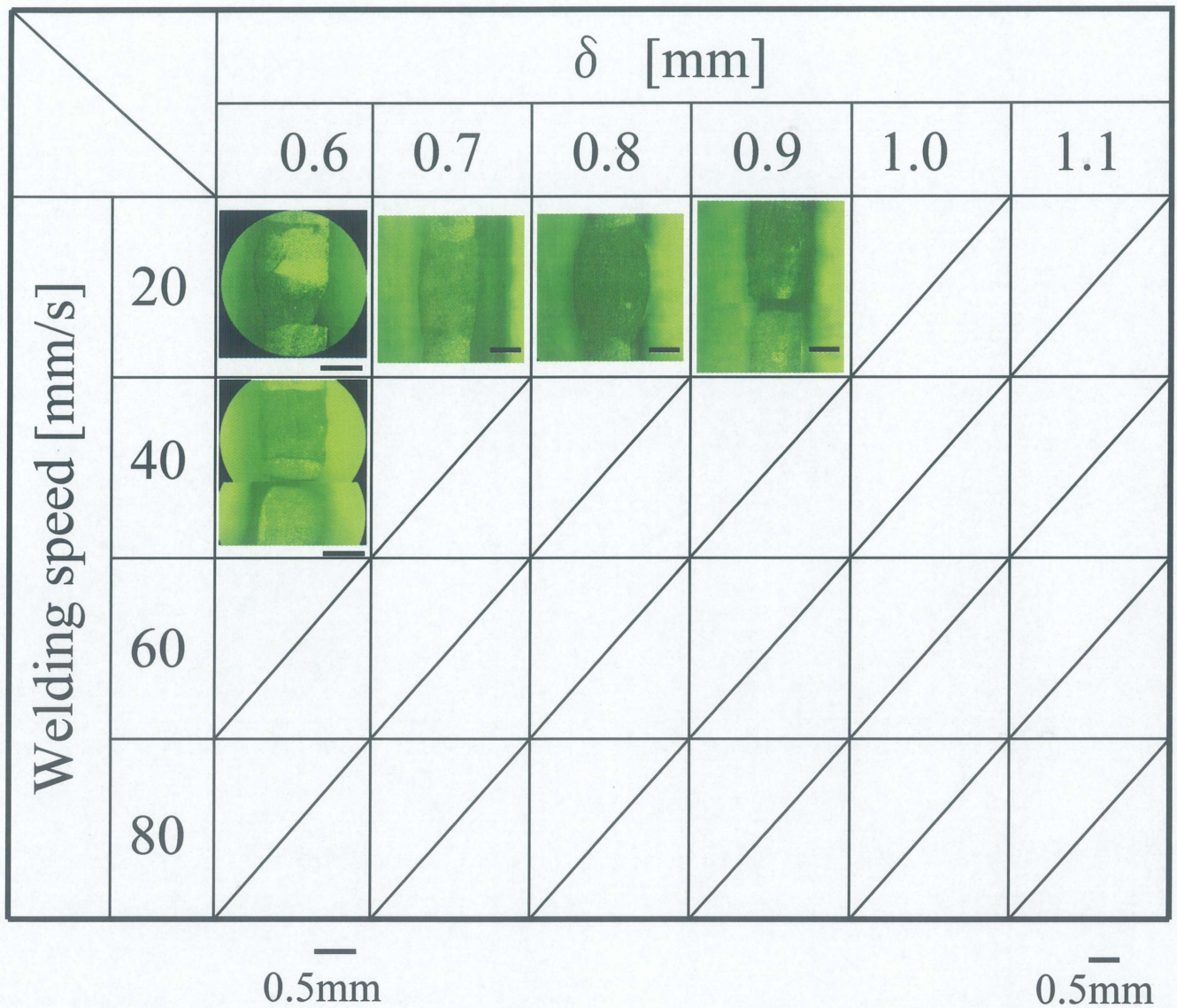


Fig.3-34 Cross-section of weld bead,
 $\delta = 0.6 \sim 1.1$ mm in horizontal welding

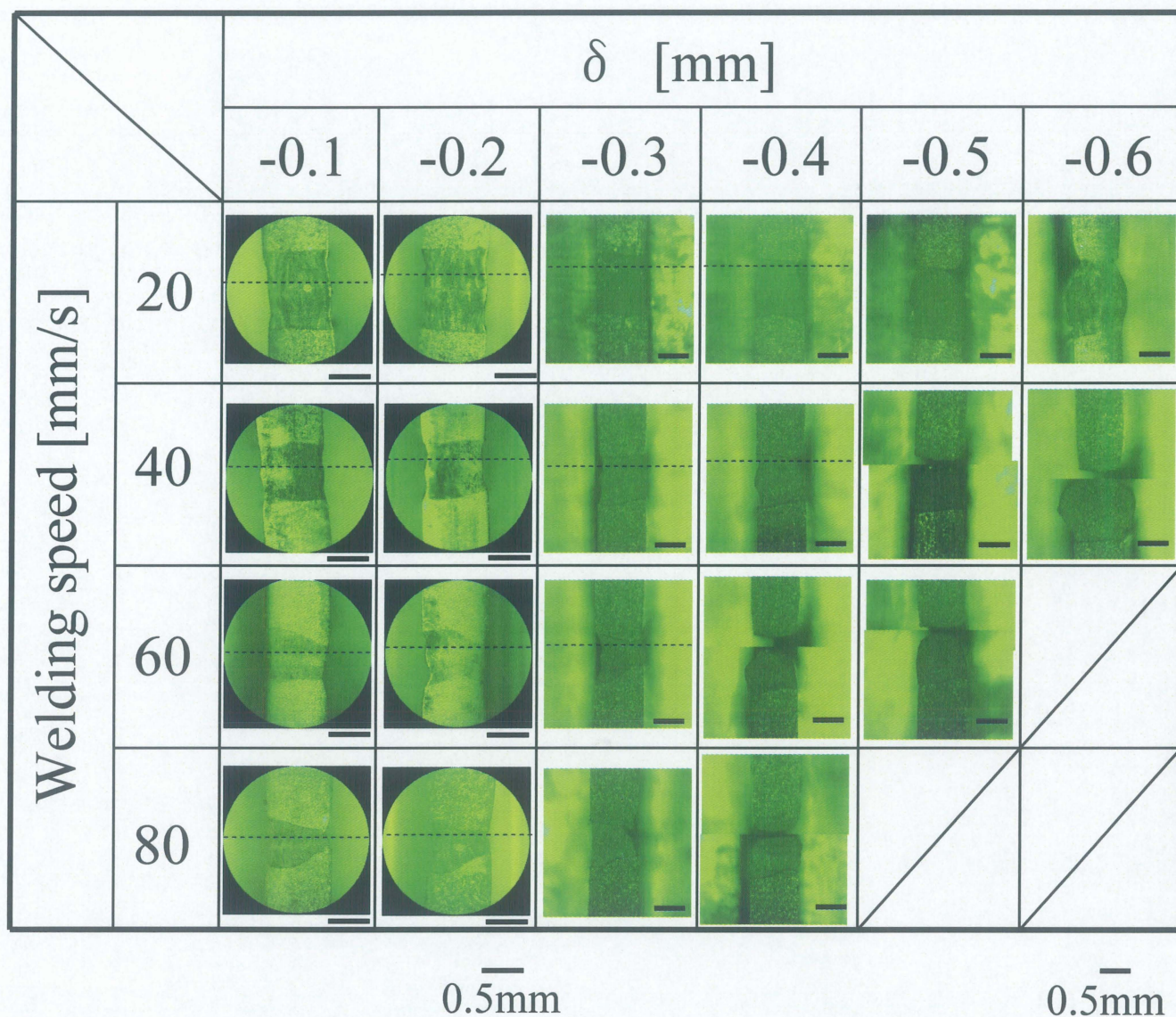
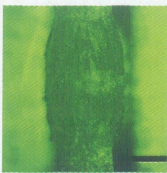
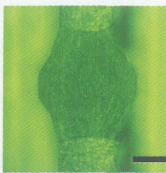
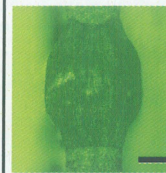
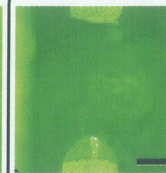
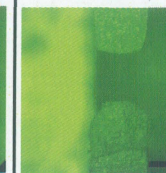


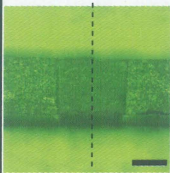
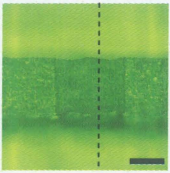
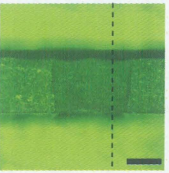
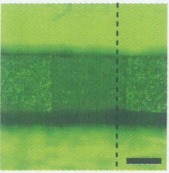
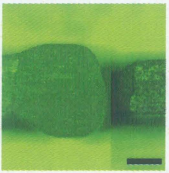
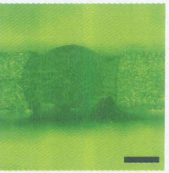
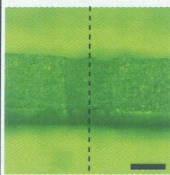
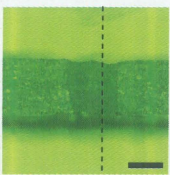
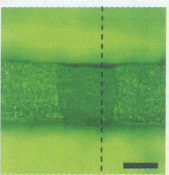
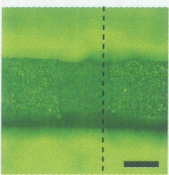
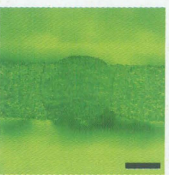
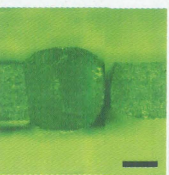
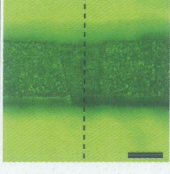
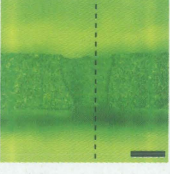
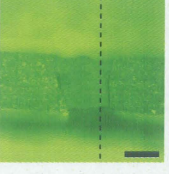
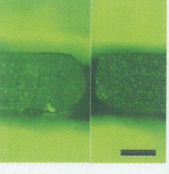
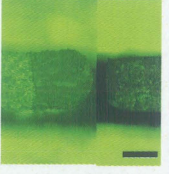
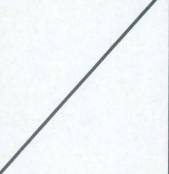
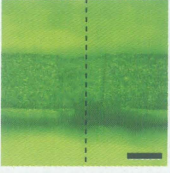
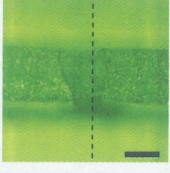
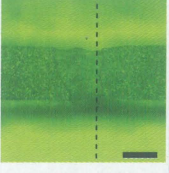
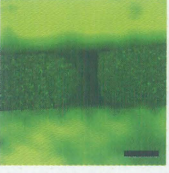
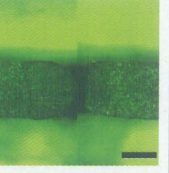
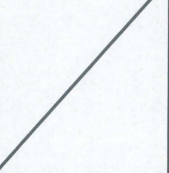


Fig.3-35 Cross-section of weld bead,
 $\delta = -0.1 \sim -0.6 \text{mm}$ in horizontal welding

		δ [mm]					
		-0.7	-0.8	-0.9	-1.0	-1.1	-1.2
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

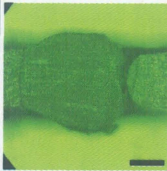
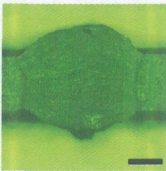
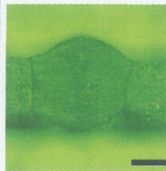
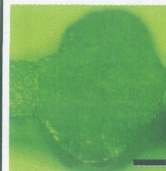
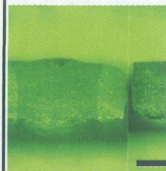
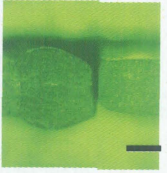
0.5mm

Fig.3-36 Cross-section of weld bead,
 $\delta = -0.7 \sim -1.2 \text{mm}$ in horizontal welding

		δ [mm]					
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

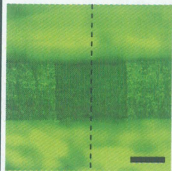
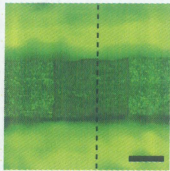
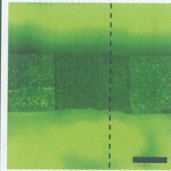
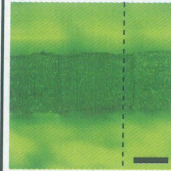
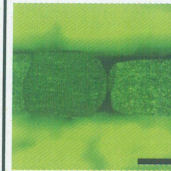
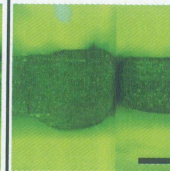
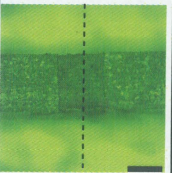
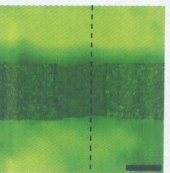
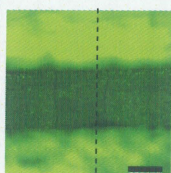
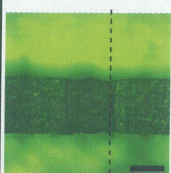

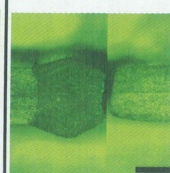
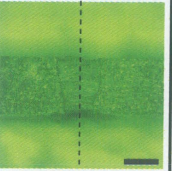
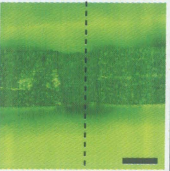
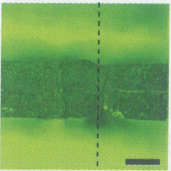
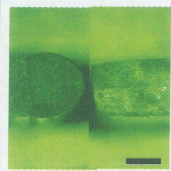
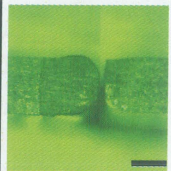
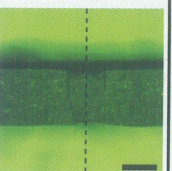
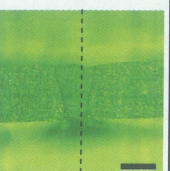
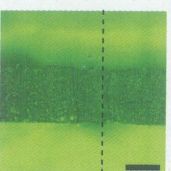
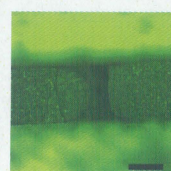
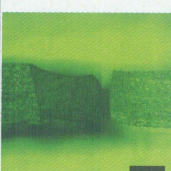
0.5mm

Fig.3-37 Cross-section of weld bead,
 $\delta = 0 \sim 0.5 \text{mm}$ in vertical upward welding

		δ [mm]					
		0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

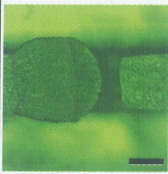
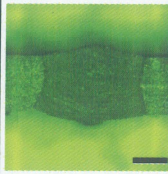
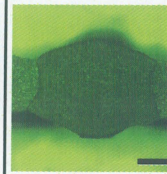
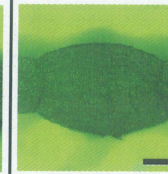
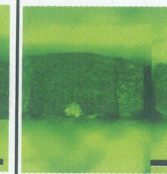
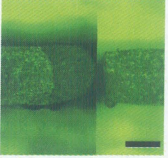
0.5mm

Fig.3-38 Cross-section of weld bead,
 $\delta = 0.6 \sim 1.1$ mm in vertical upward welding

		δ [mm]					
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

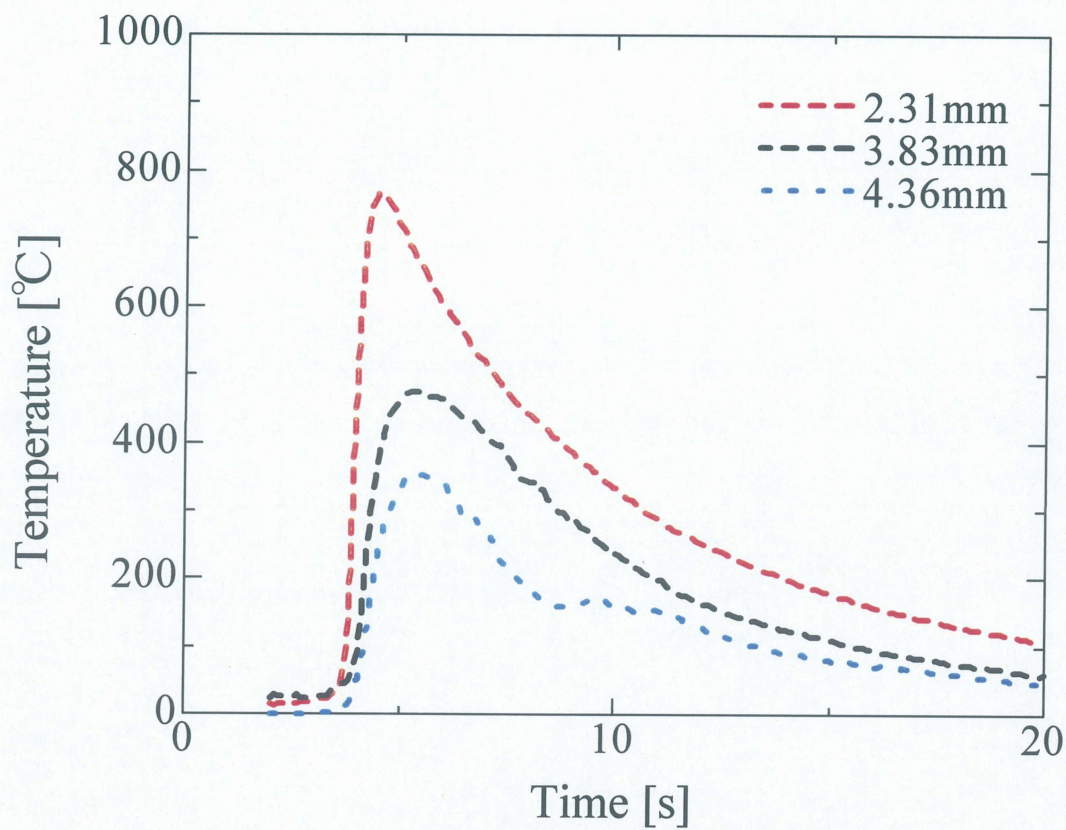
0.5mm

Fig.3-39 Cross-section of weld bead,
 $\delta = 0 \sim 0.5 \text{ mm}$ in vertical downward welding

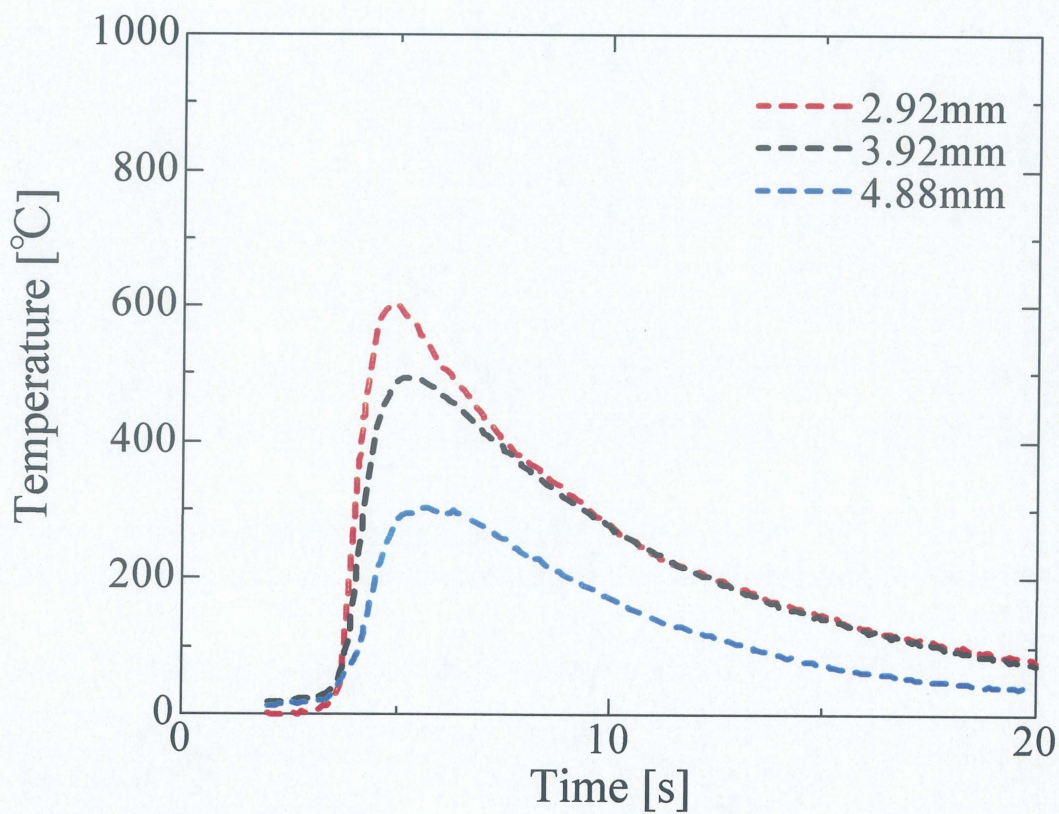
		δ [mm]					
		0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
Welding speed [mm/s]	20						
	40						
	60						
	80						

0.5mm

Fig.3-40 Cross-section of weld bead,
 $\delta = 0.6 \sim 1.1 \text{ mm}$ in vertical downward welding

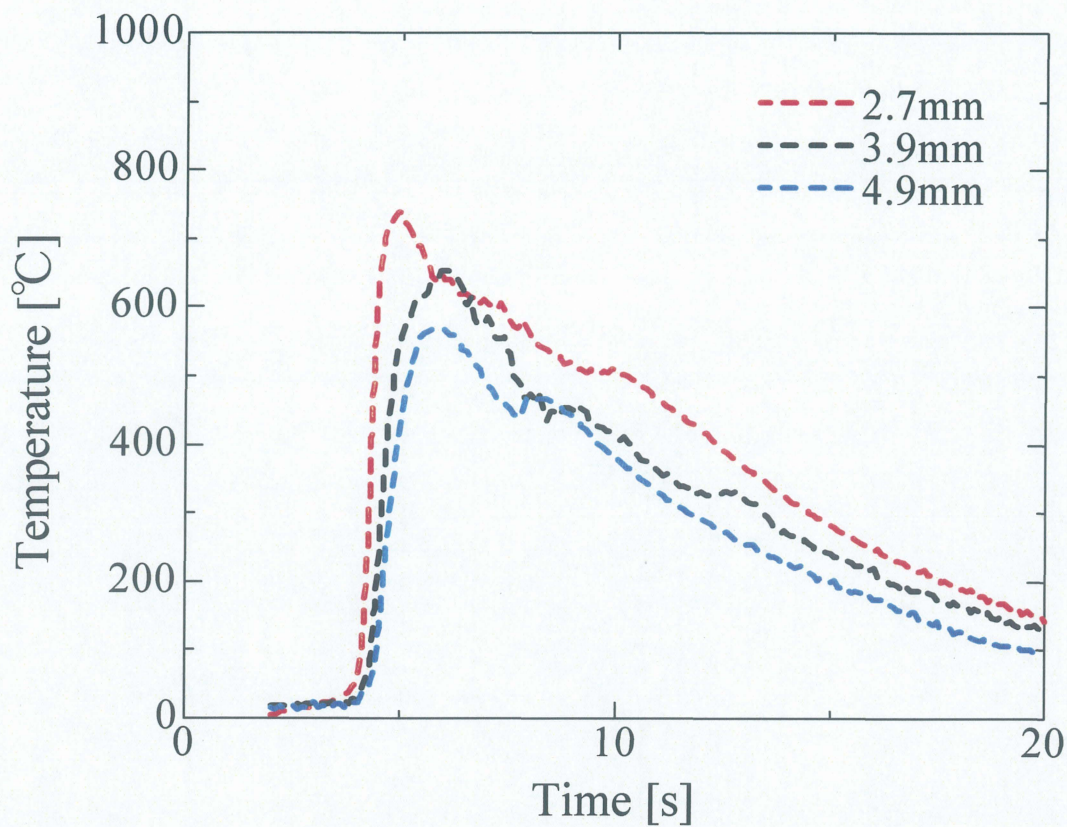


(a) Upper plate

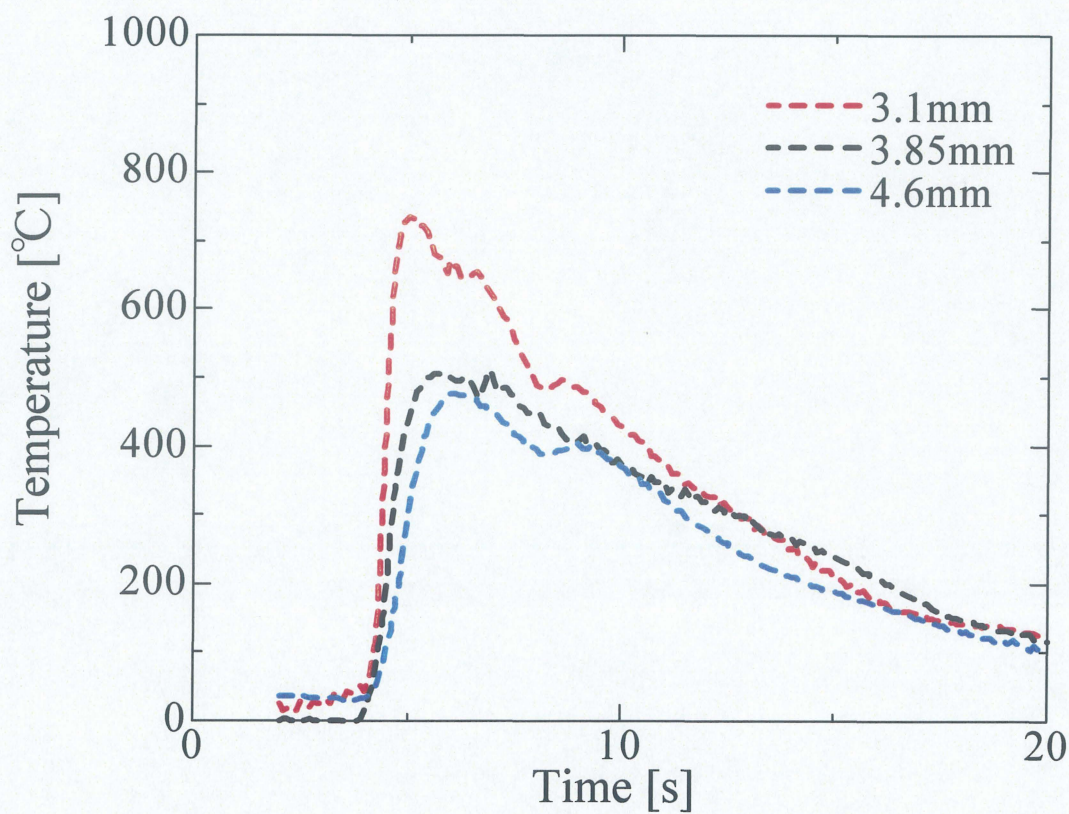


(b) Lower plate

Fig.4-1 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 20mm/s $\delta = 0\text{mm}$

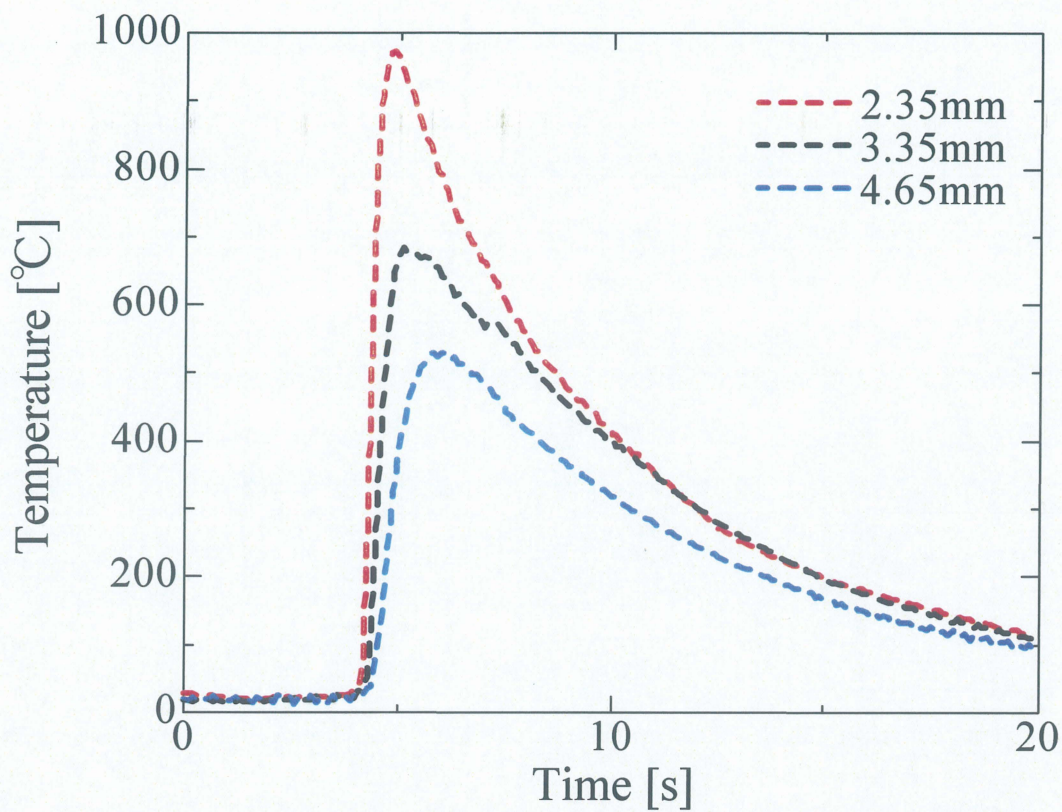


(a) Upper plate

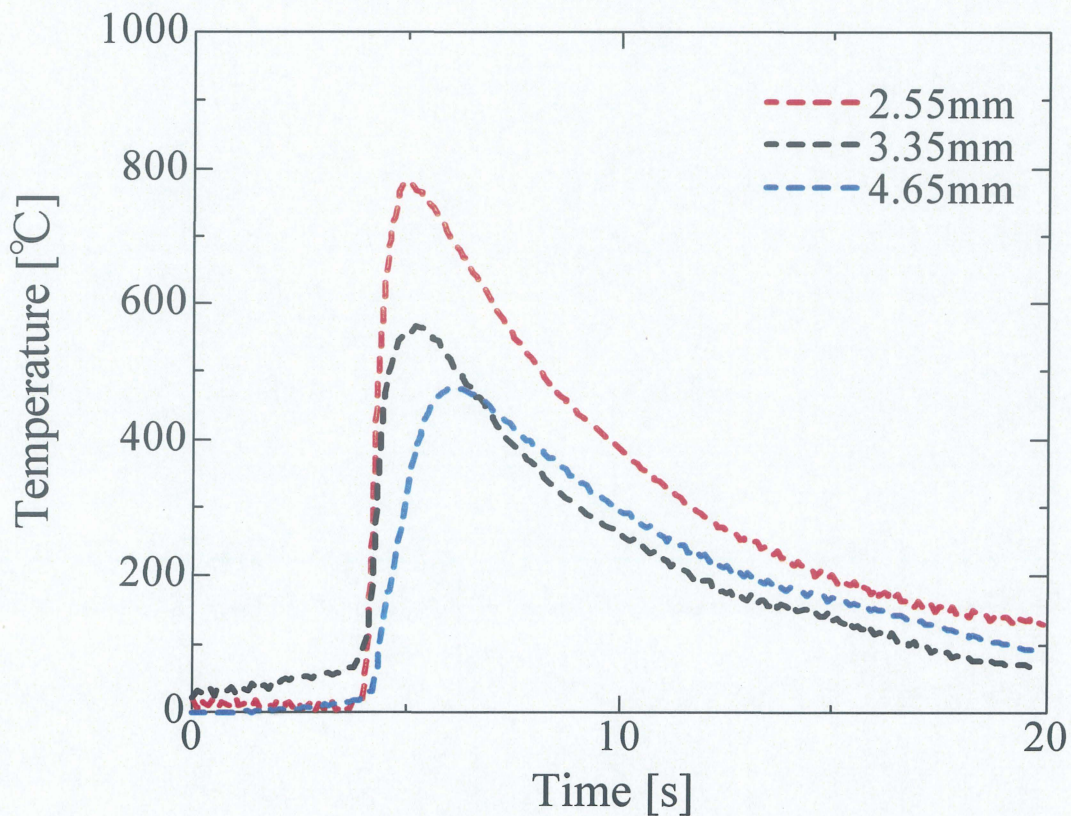


(b) Lower plate

Fig.4-2 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 20mm/s $\delta = +0.2\text{mm}$

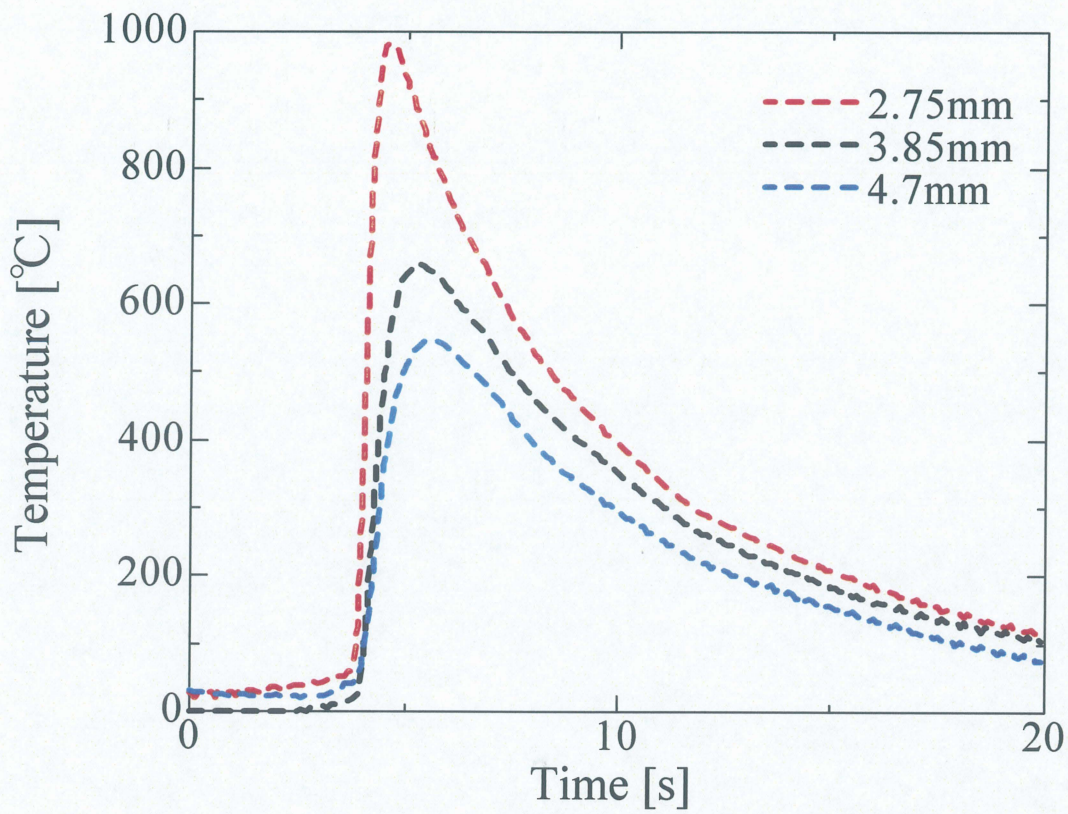


(a) Upper plate

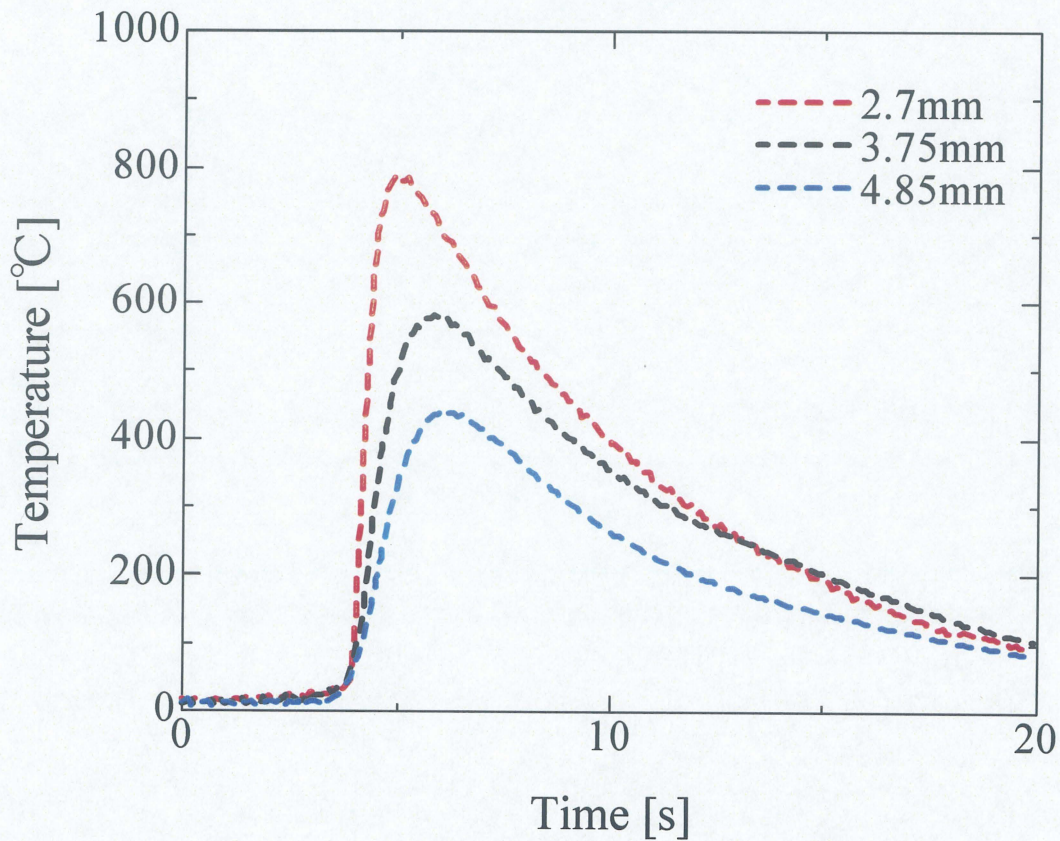


(b) Lower plate

Fig.4-3 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 20mm/s $\delta = +0.4\text{mm}$

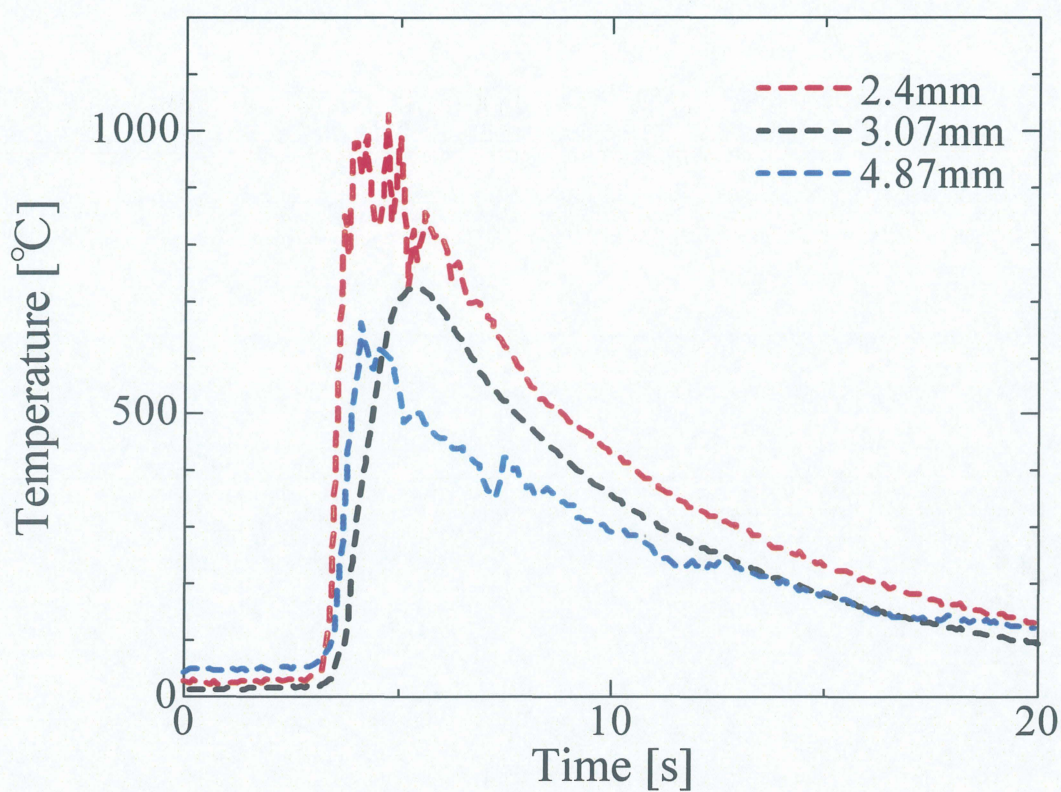


(a) Upper plate

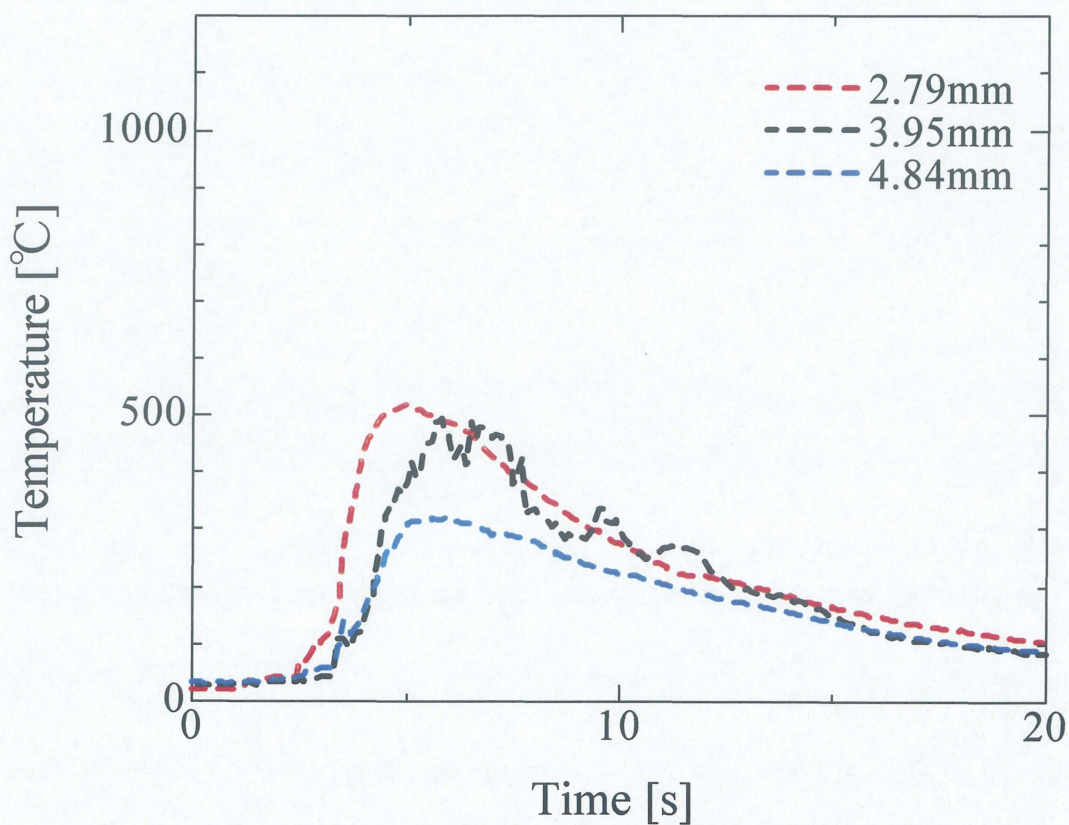


(b) Lower plate

Fig.4-4 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 20mm/s $\delta = +0.6\text{mm}$

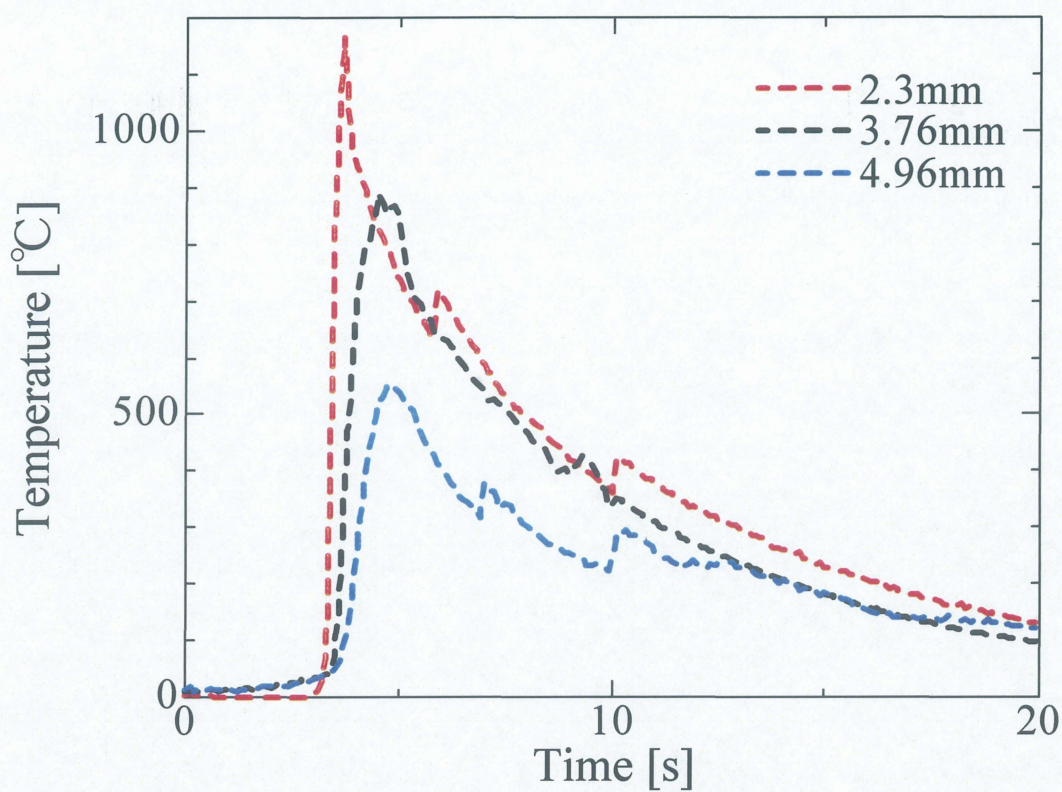


(a) Upper plate

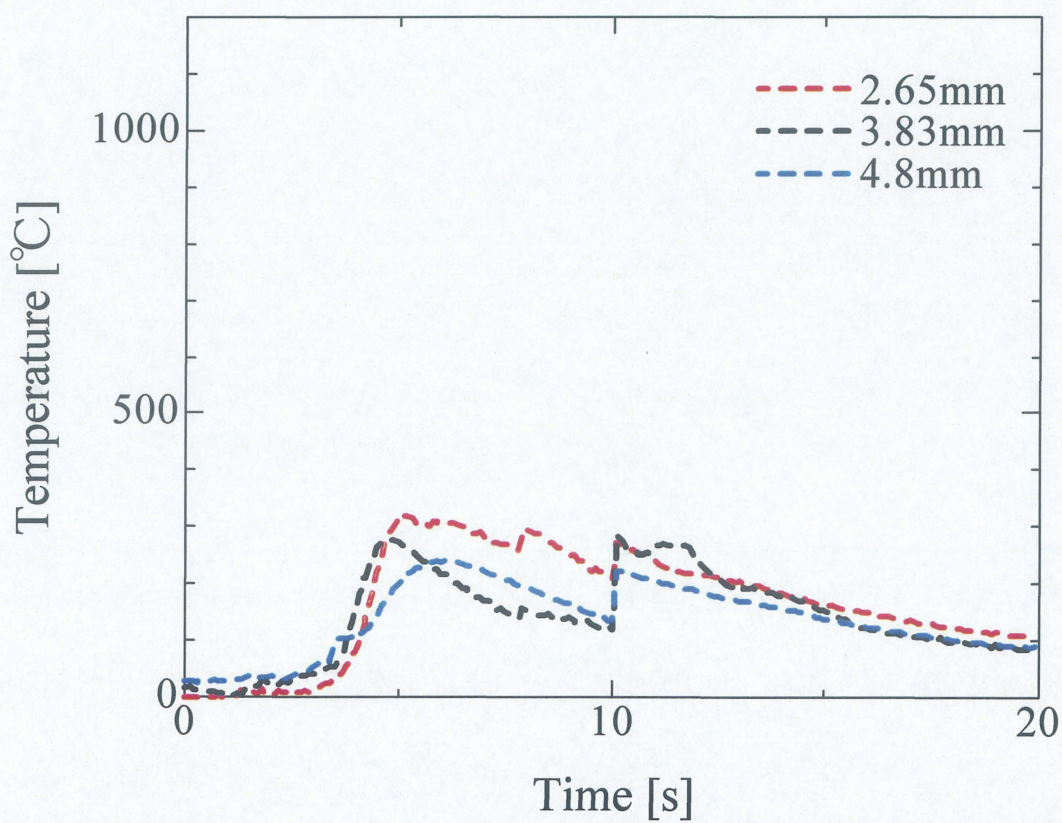


(b) Lower plate

Fig.4-5 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 20mm/s $\delta = +0.8\text{mm}$

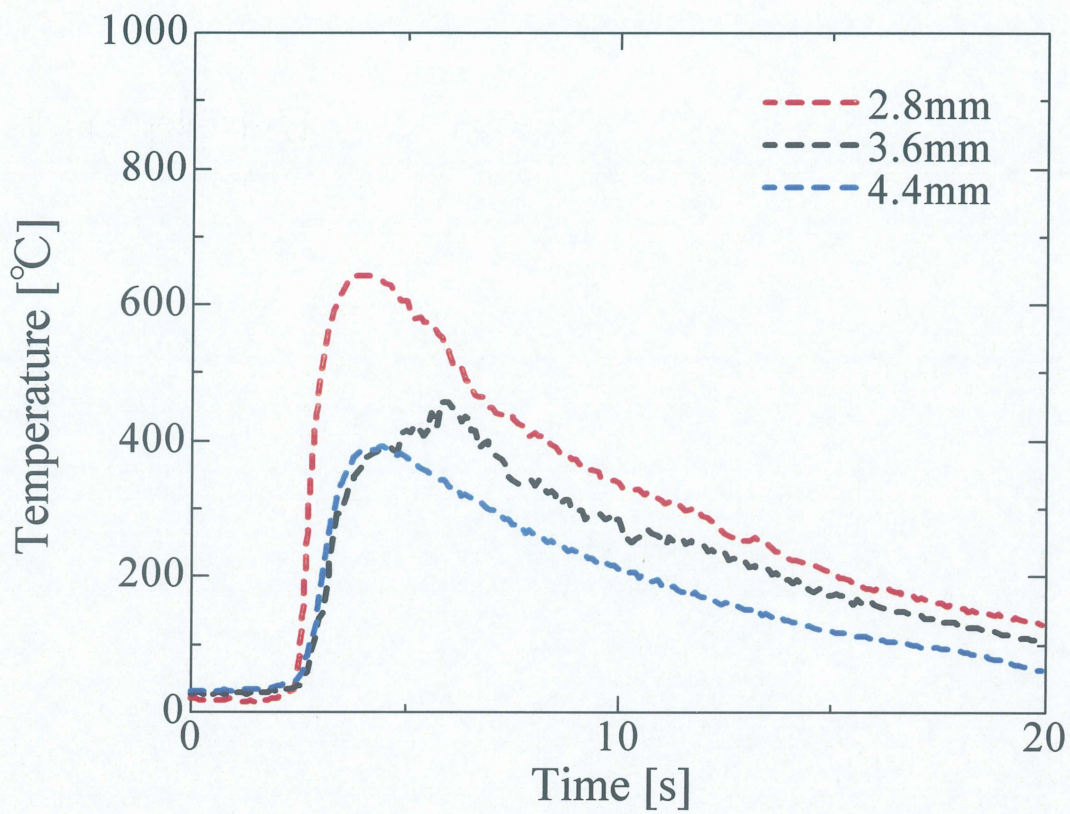


(a) Upper plate

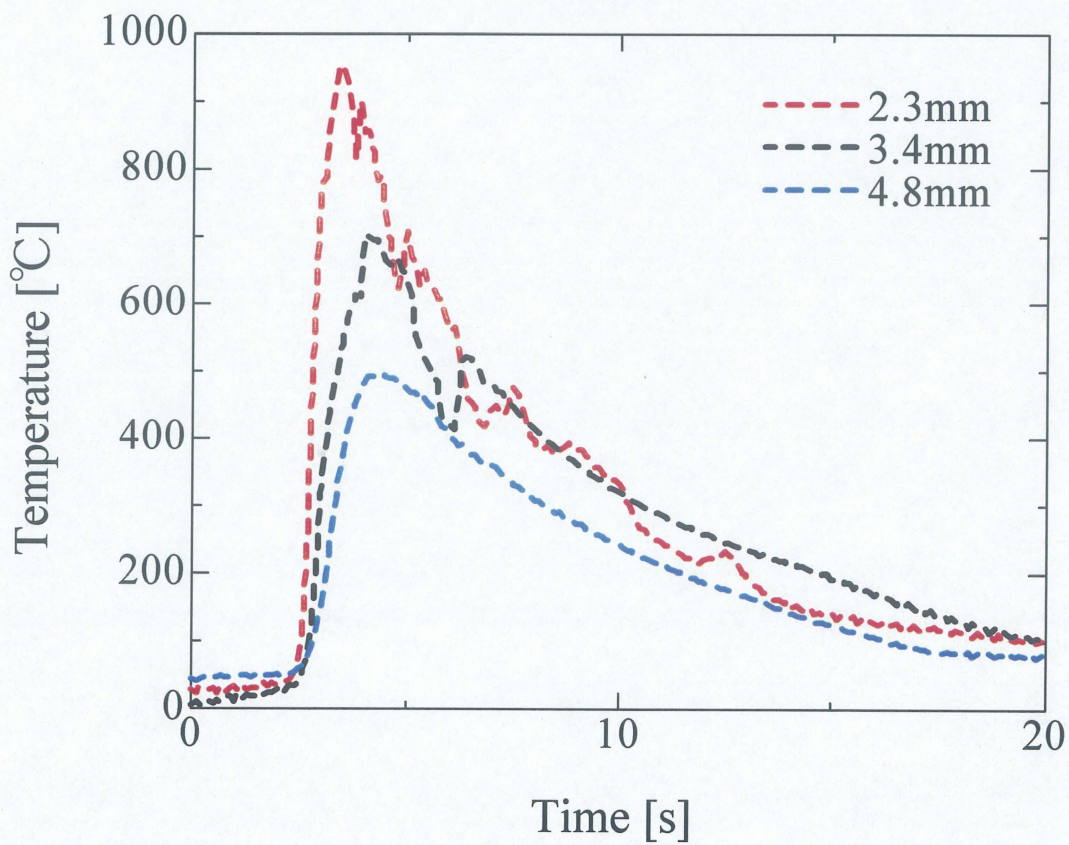


(b) Lower plate

Fig.4-6 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 20mm/s $\delta = +1.0\text{mm}$

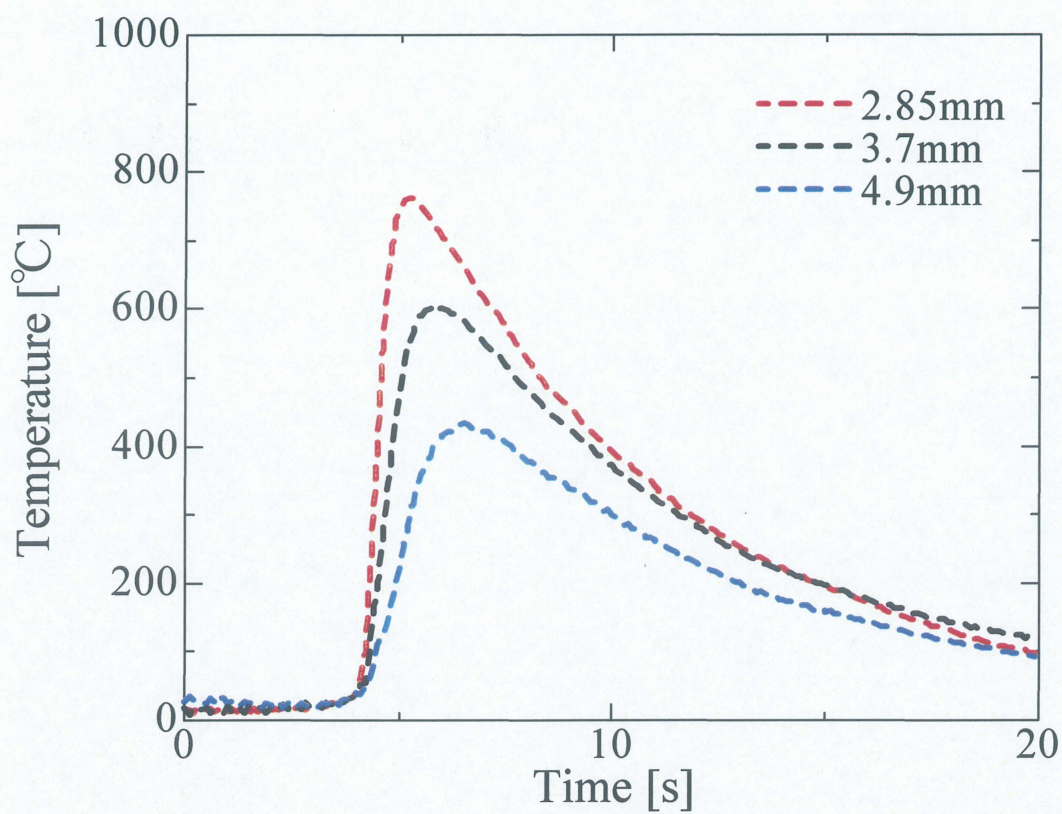


(a) Upper plate

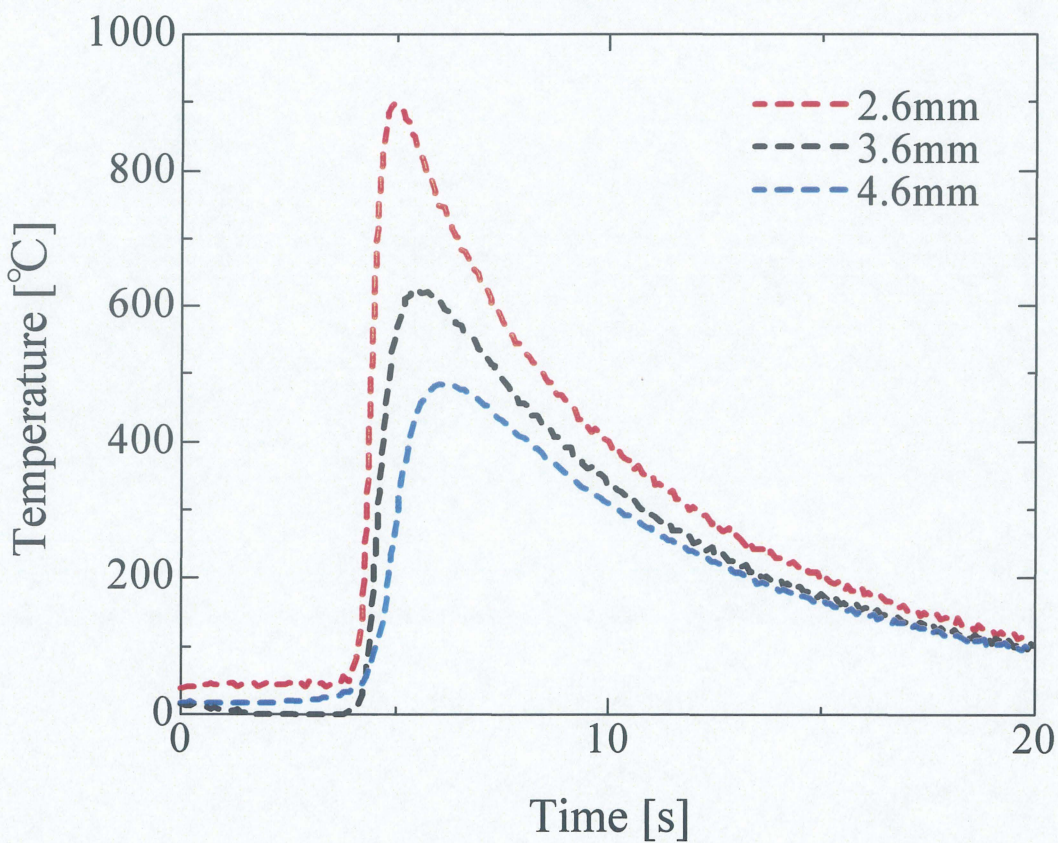


(b) Lower plate

Fig.4-7 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 20mm/s $\delta = -0.2\text{mm}$

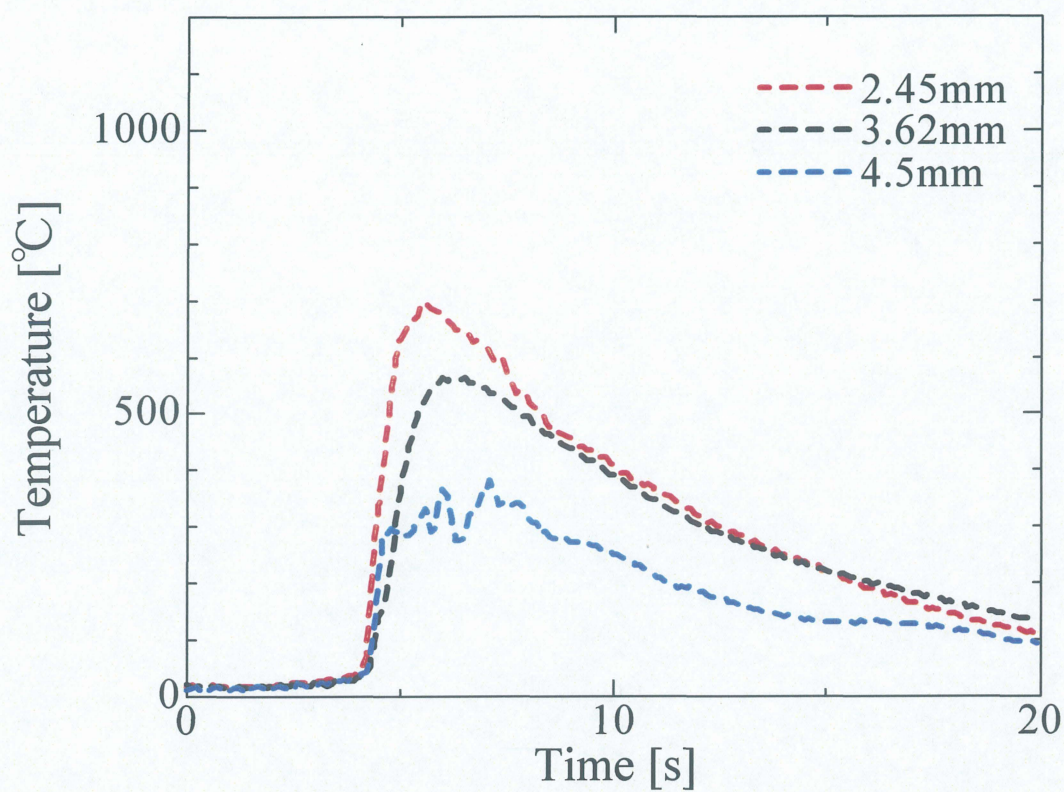


(a) Upper plate

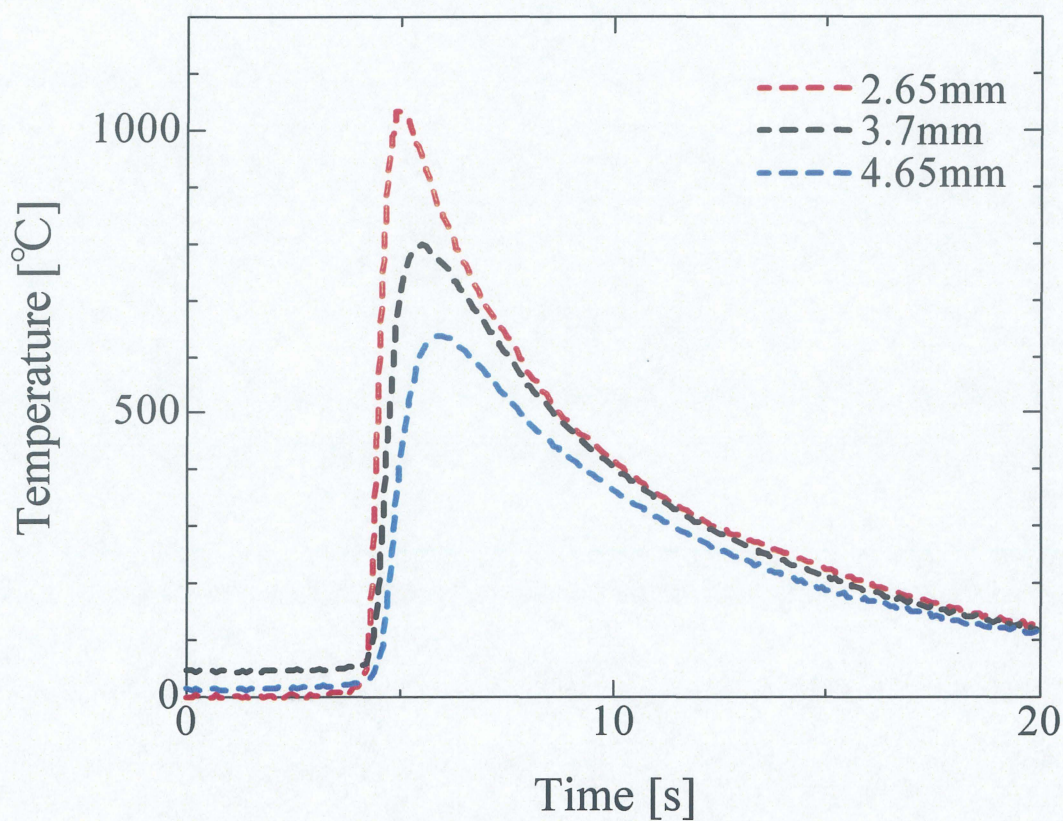


(b) Lower plate

Fig.4-8 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 20mm/s $\delta = -0.4\text{mm}$

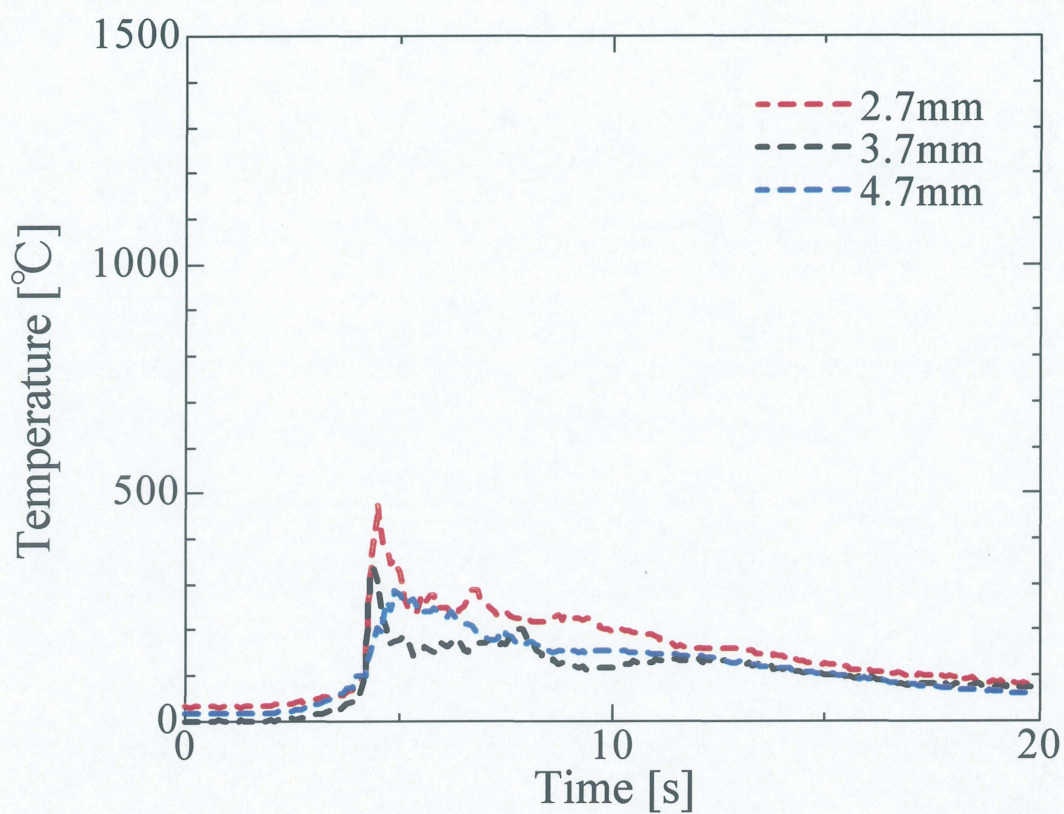


(a) Upper plate

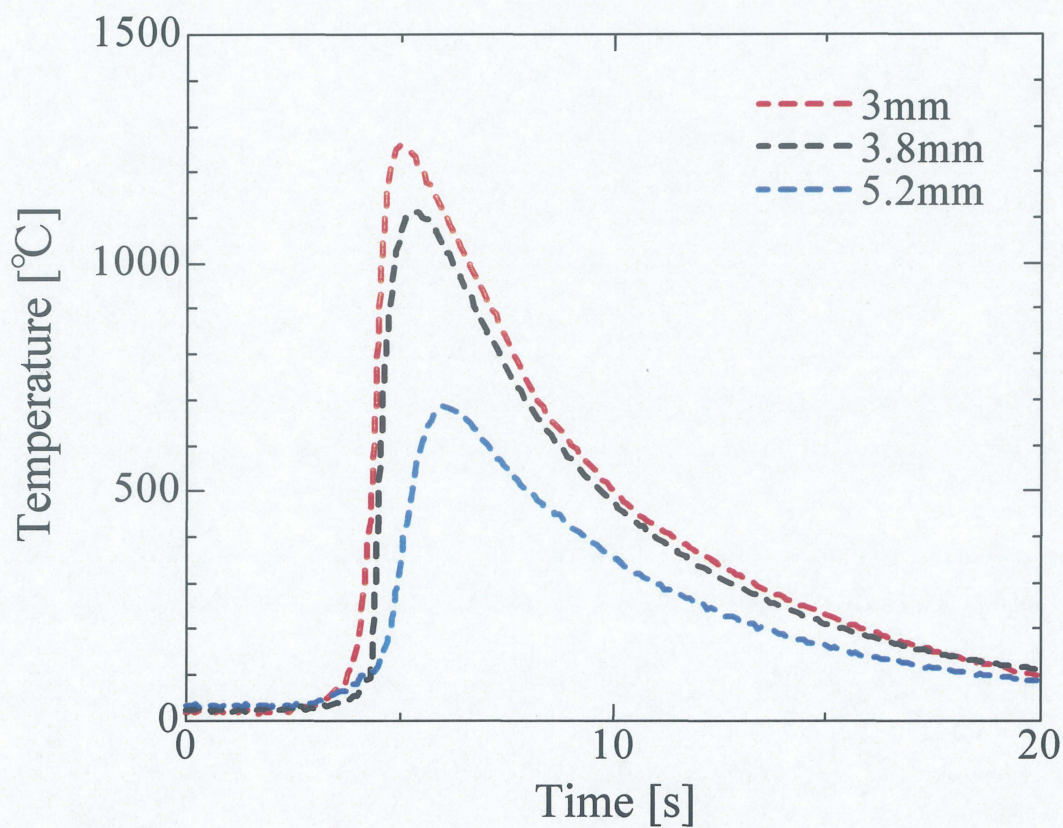


(b) Lower plate

Fig.4-9 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 20mm/s $\delta = -0.6\text{mm}$

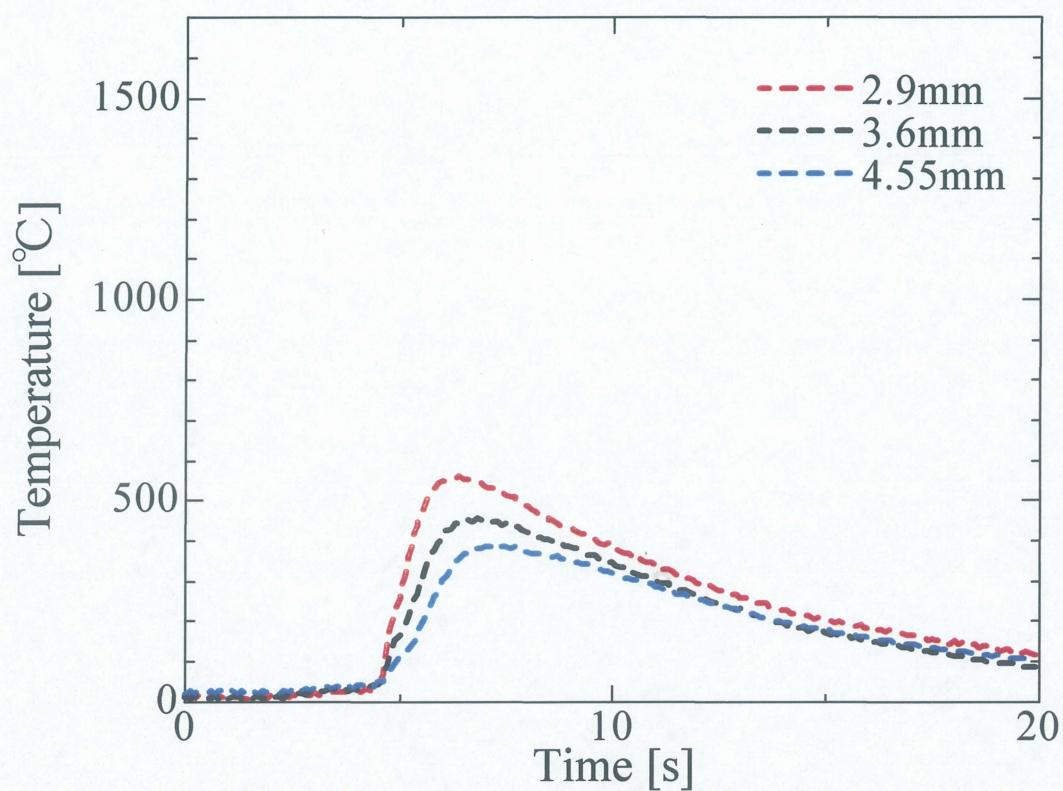


(a) Upper plate

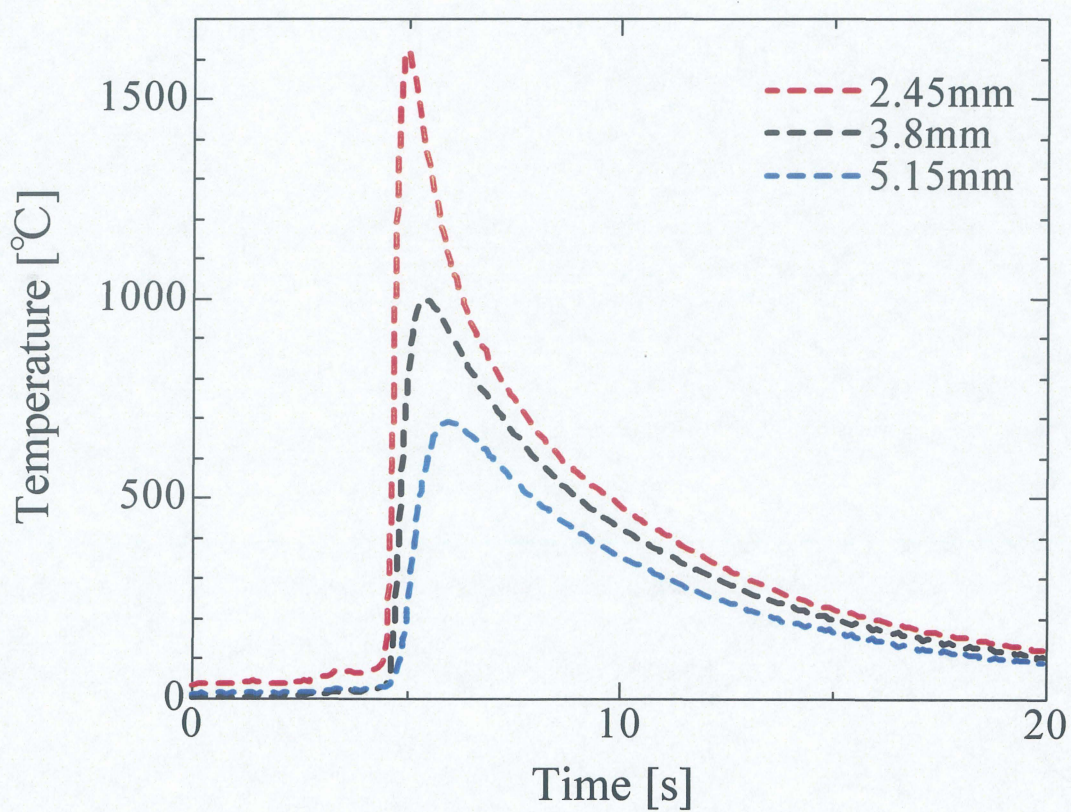


(b) Lower plate

Fig.4-10 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 20mm/s $\delta = -0.8\text{mm}$

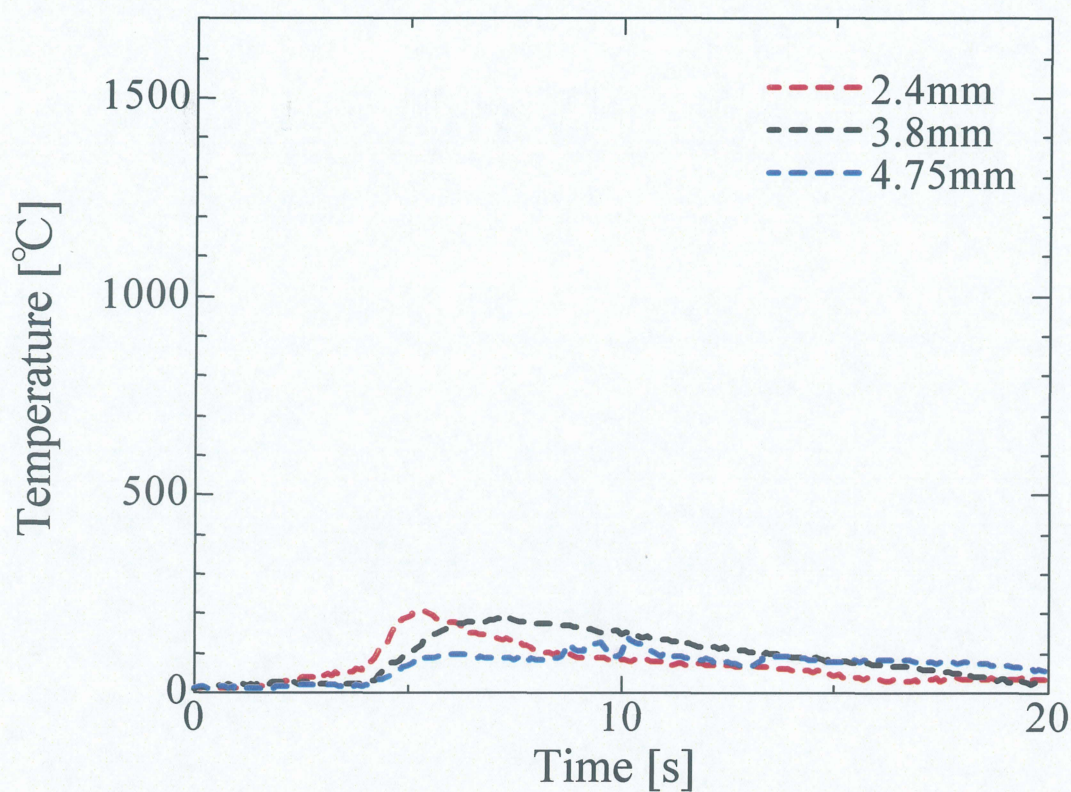


(a) Upper plate

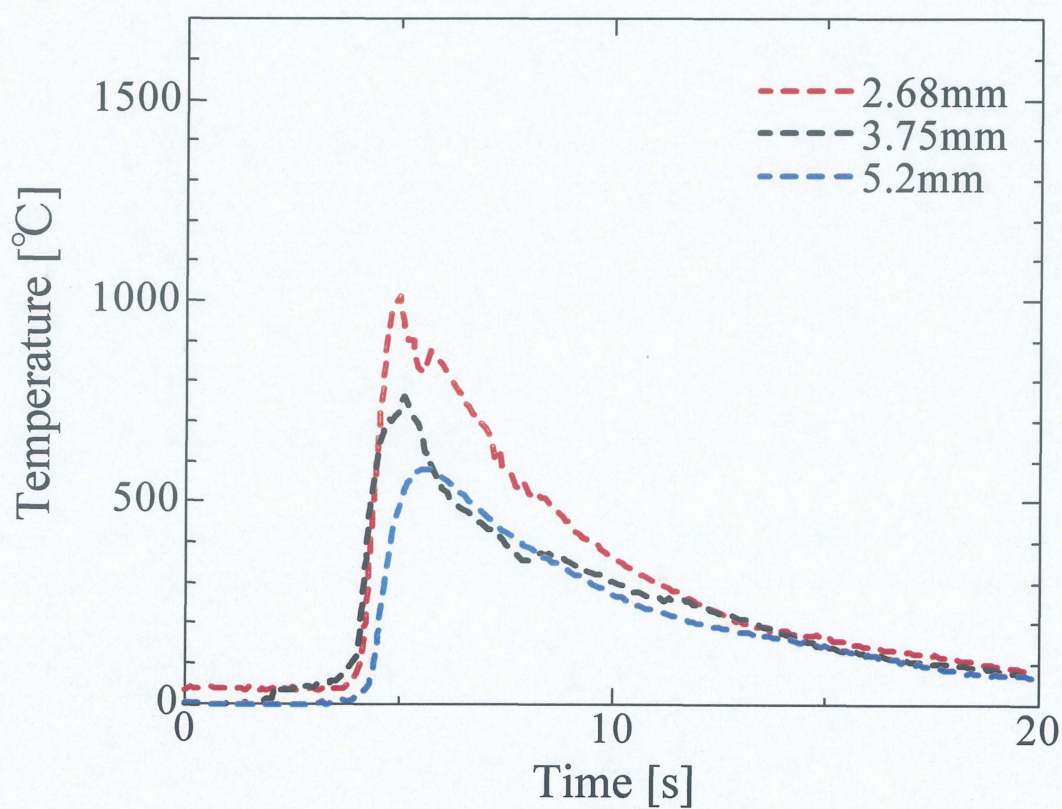


(b) Lower plate

Fig.4-11 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 20mm/s $\delta = -1.0\text{mm}$

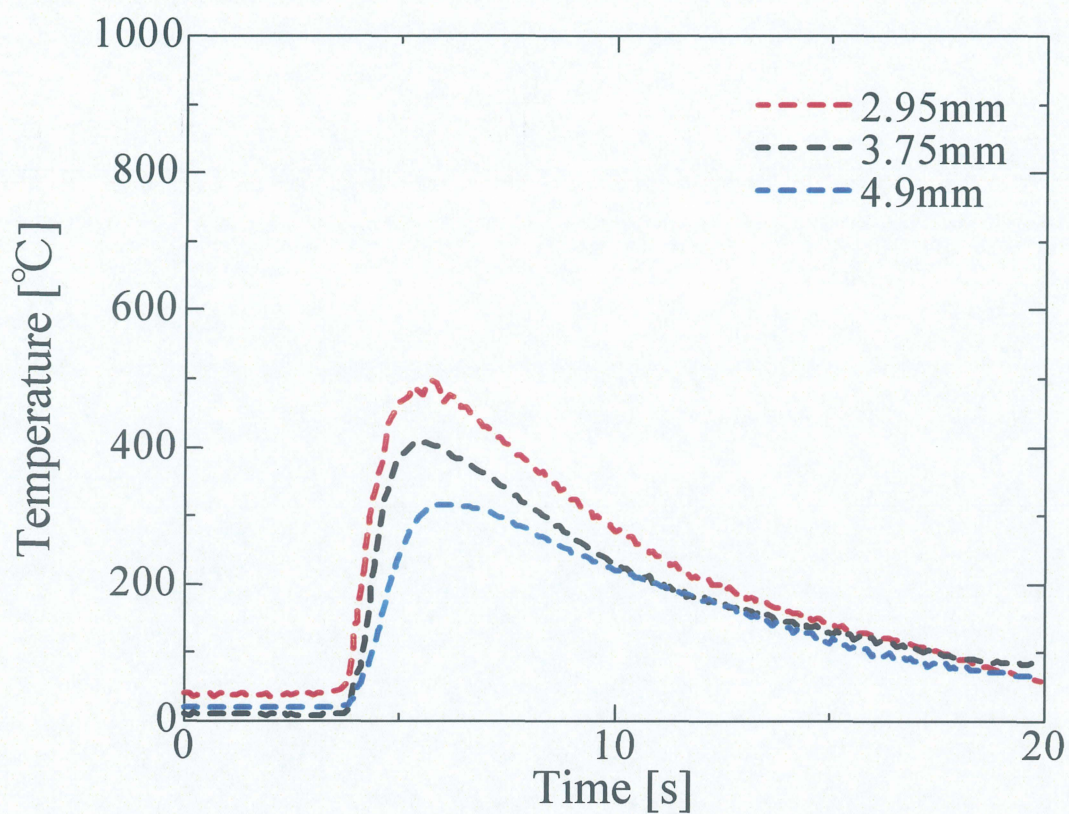


(a) Upper plate

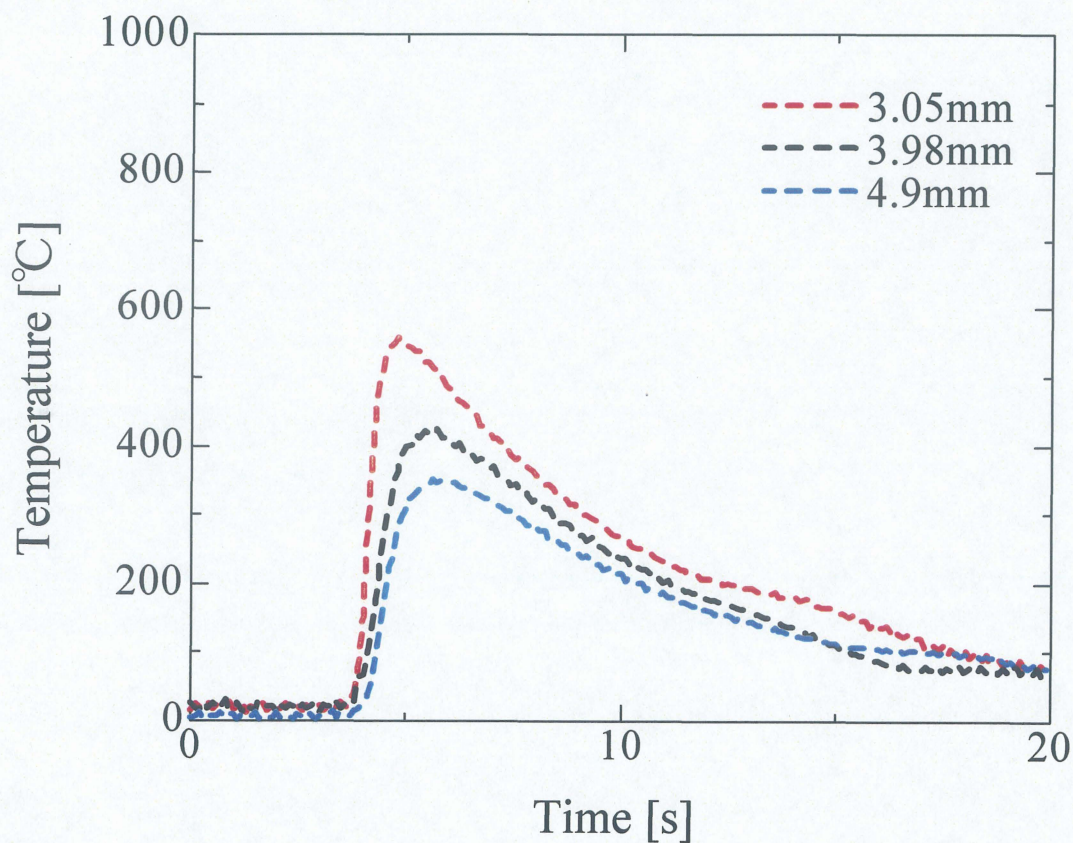


(b) Lower plate

Fig.4-12 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 20mm/s $\delta = -1.2\text{mm}$

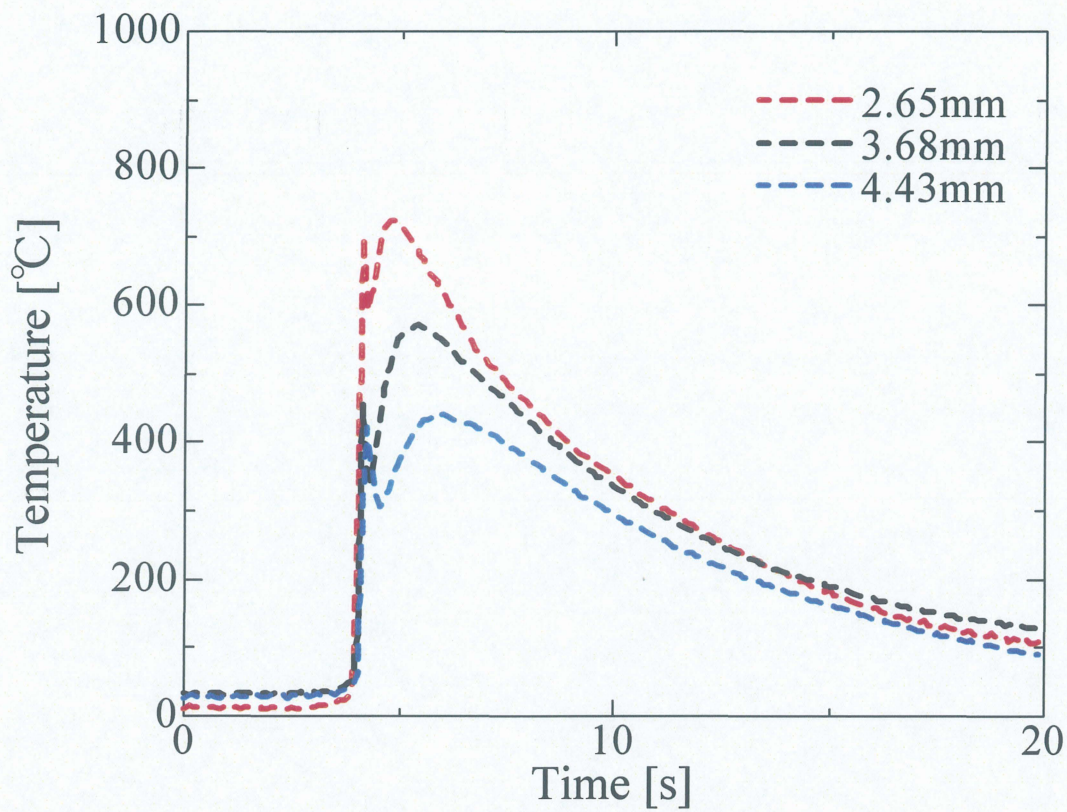


(a) Upper plate

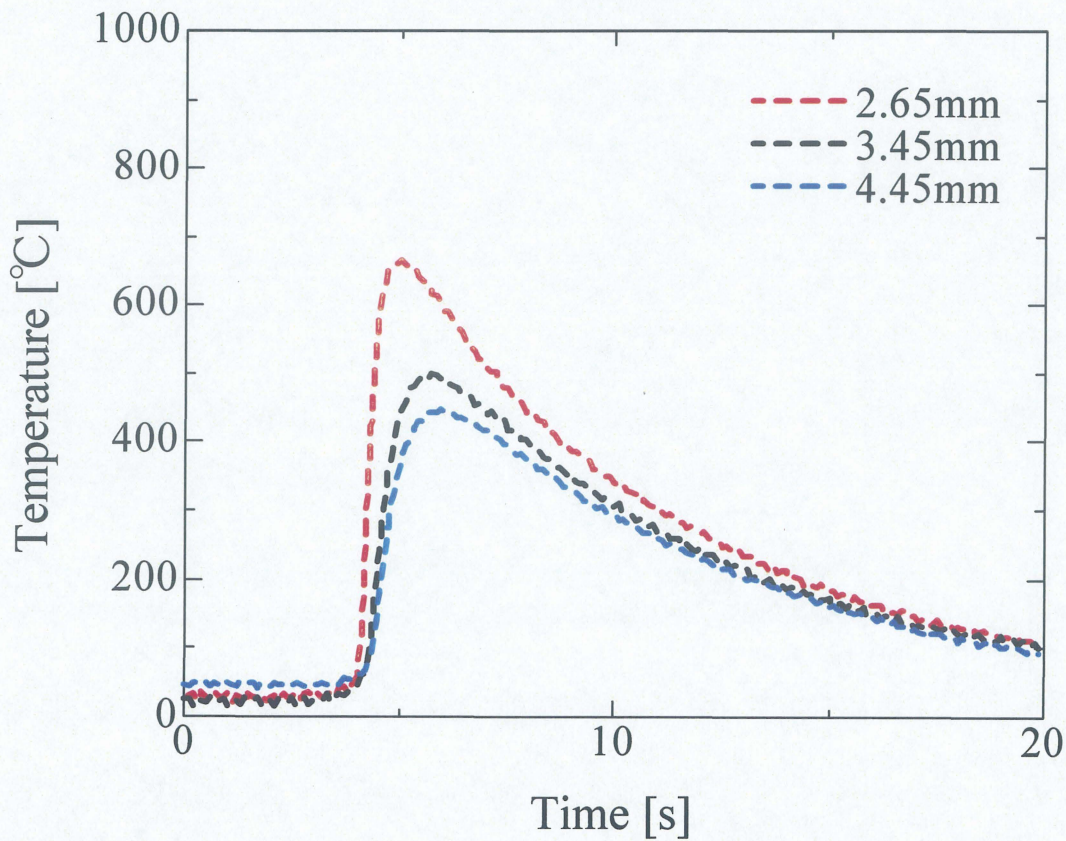


(b) Lower plate

Fig.4-13 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 40mm/s $\delta = 0\text{mm}$

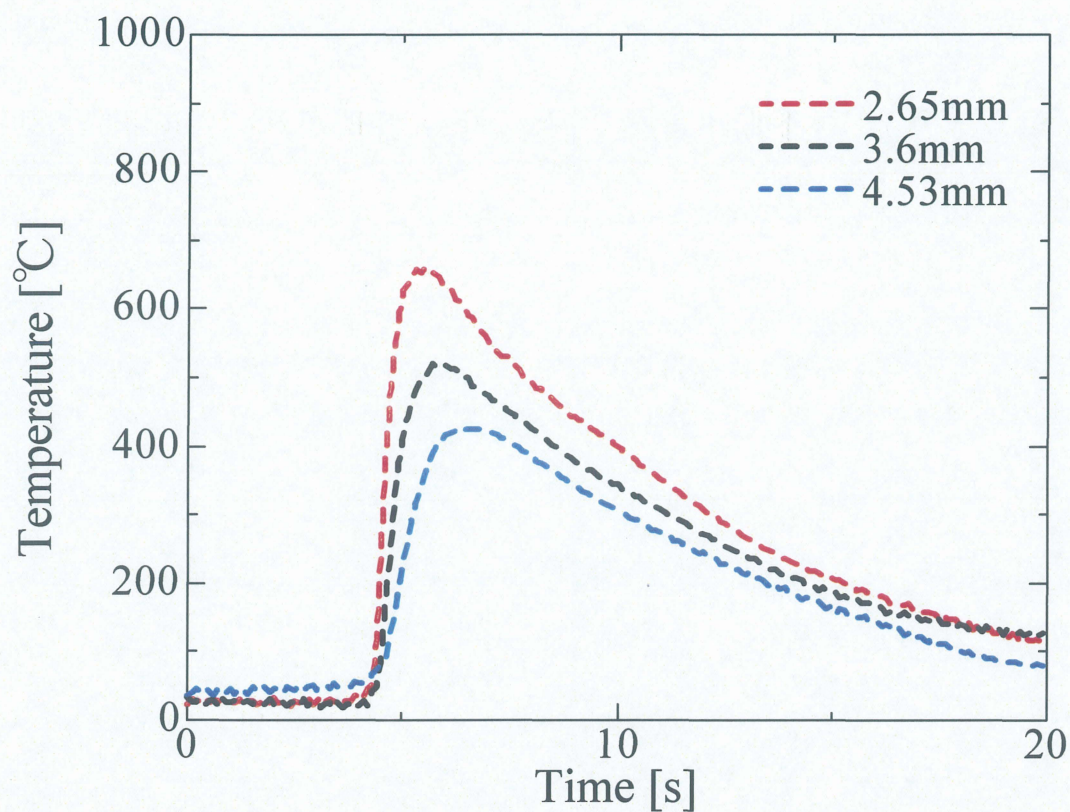


(a) Upper plate

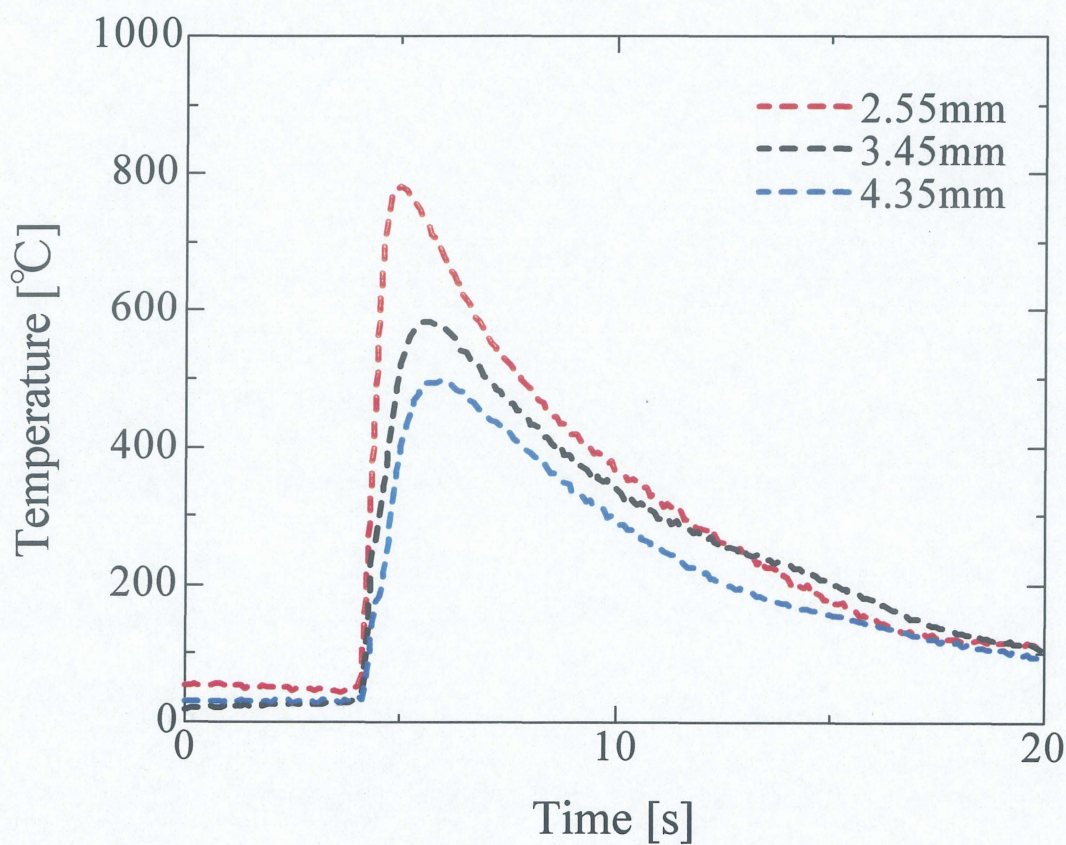


(b) Lower plate

Fig.4-14 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 40mm/s $\delta = +0.2\text{mm}$

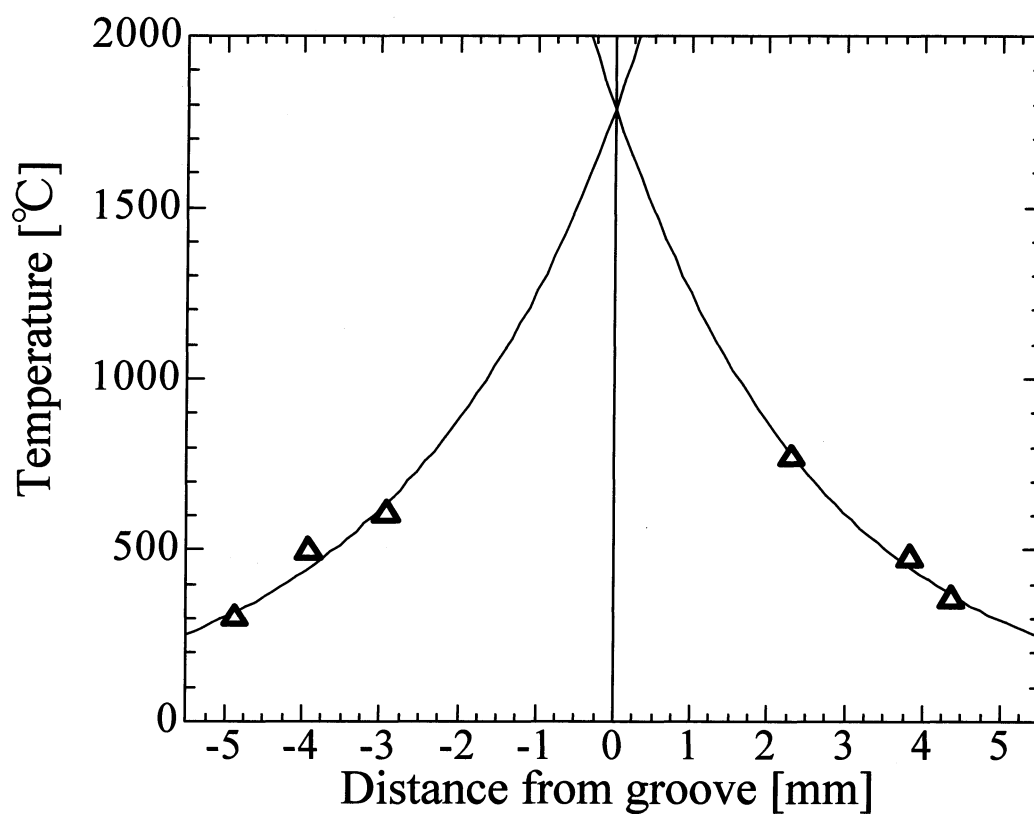


(a) Upper plate

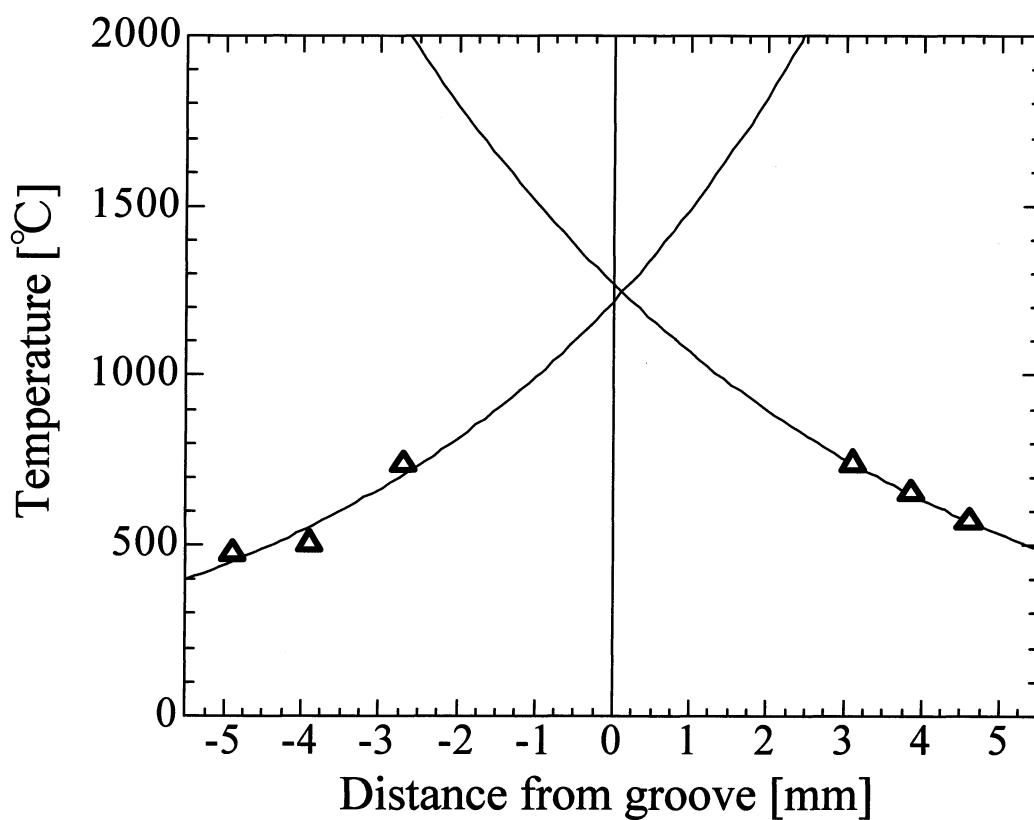


(b) Lower plate

Fig.4-15 Thermal cycles on SUS304 surface of laser irradiated side at different measuring points; Welding speed 40mm/s $\delta = -0.2\text{mm}$

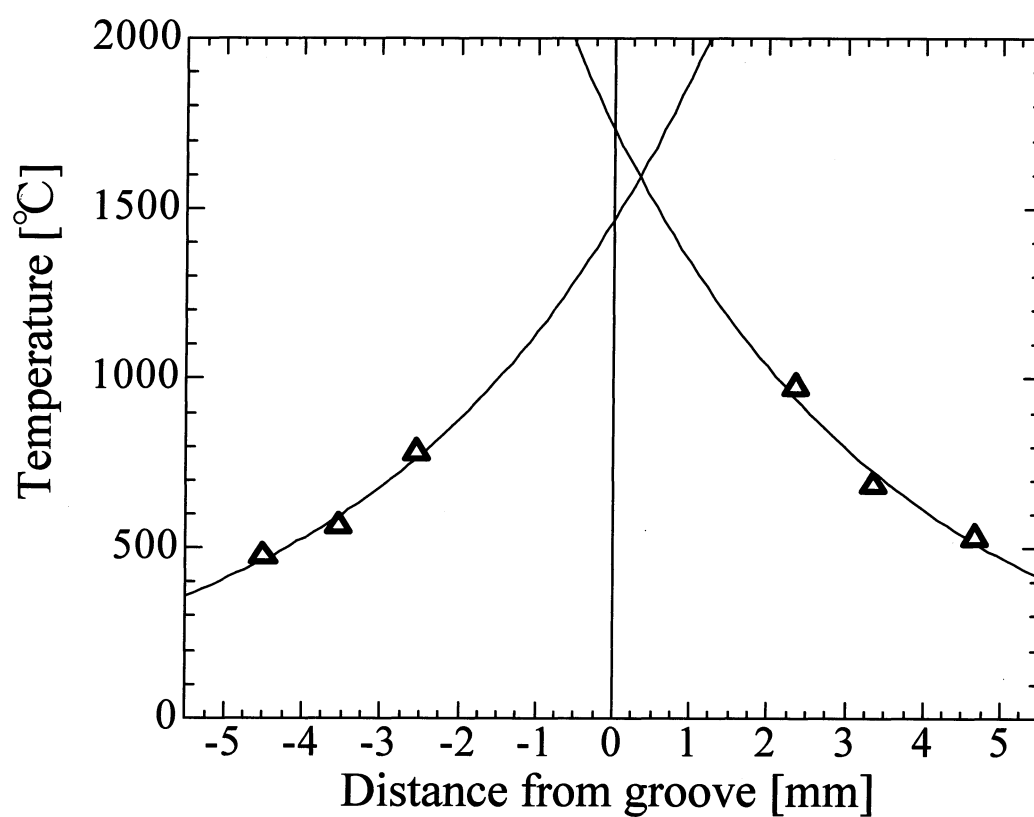


(a) 20mm/s $\delta = 0\text{mm}$

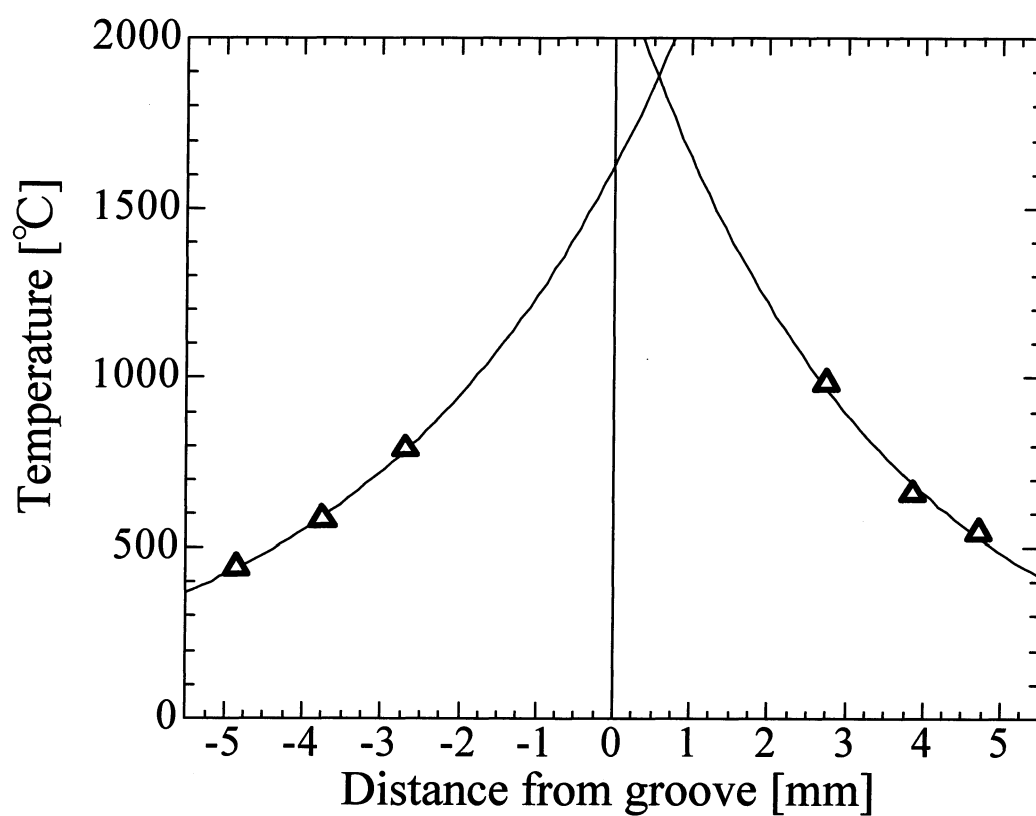


(b) 20mm/s $\delta = +0.2\text{mm}$

Fig.4-16 Relationship between distance from groove to temperature measuring point and maximum temperature ; Welding speed 20mm/s, $\delta = 0\text{mm}$, $+0.2\text{mm}$

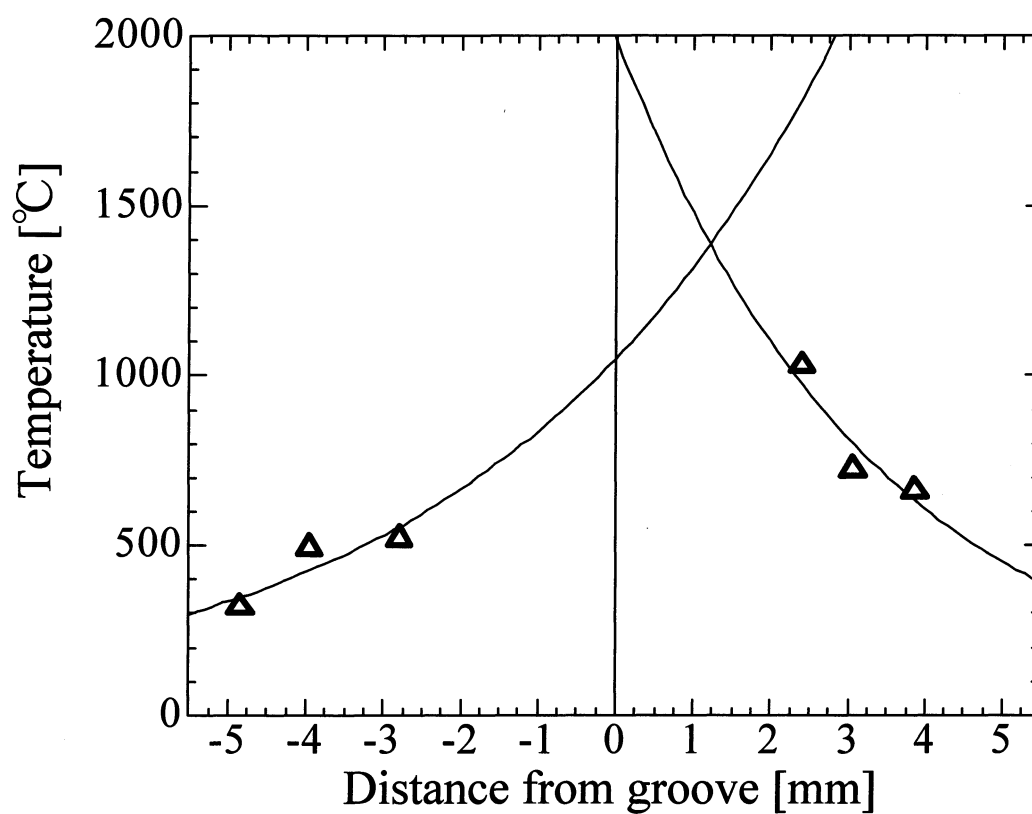


(a) 20mm/s $\delta = +0.4\text{mm}$

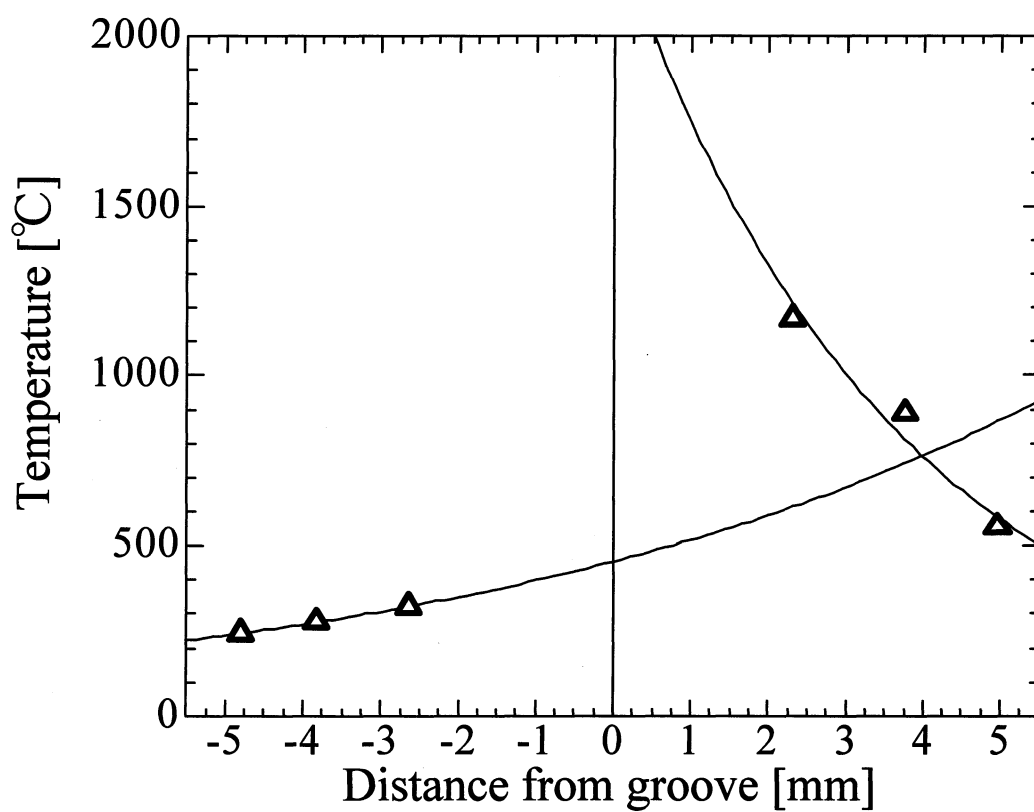


(b) 20mm/s $\delta = +0.6\text{mm}$

Fig.4-17 Relationship between distance from groove to temperature measuring point and maximum temperature ; Welding speed 20mm/s, $\delta = +0.4\text{mm}, +0.6\text{mm}$

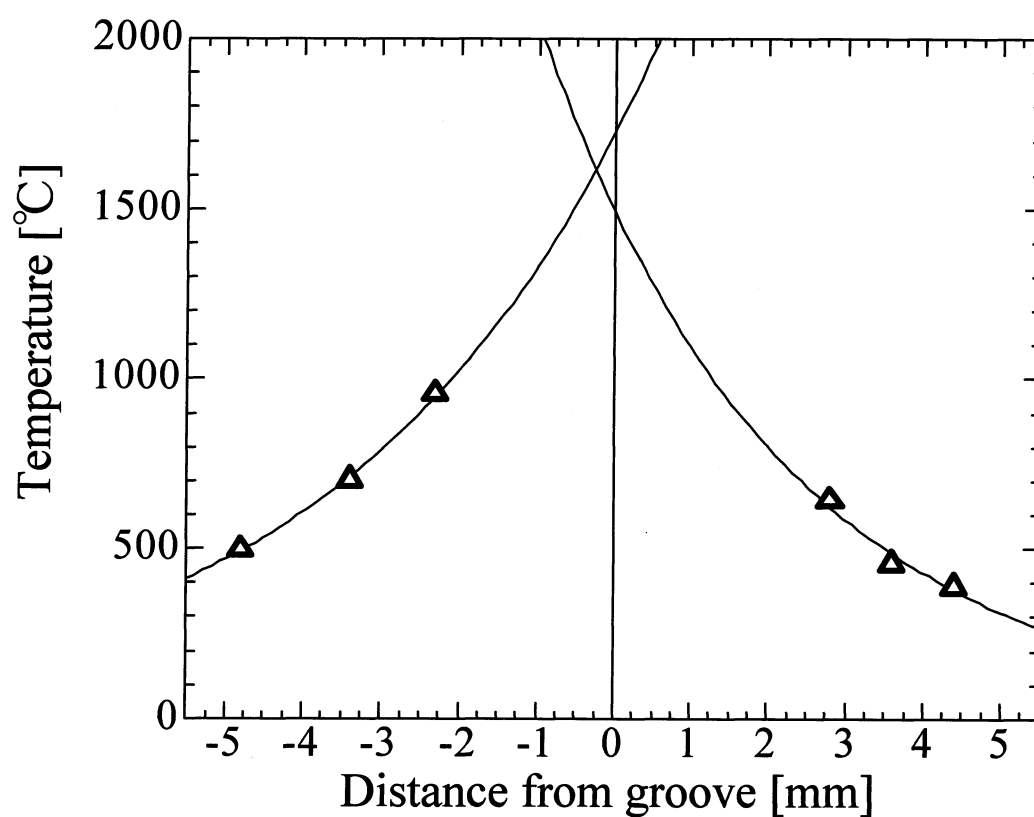


(a) 20mm/s $\delta = +0.8\text{mm}$

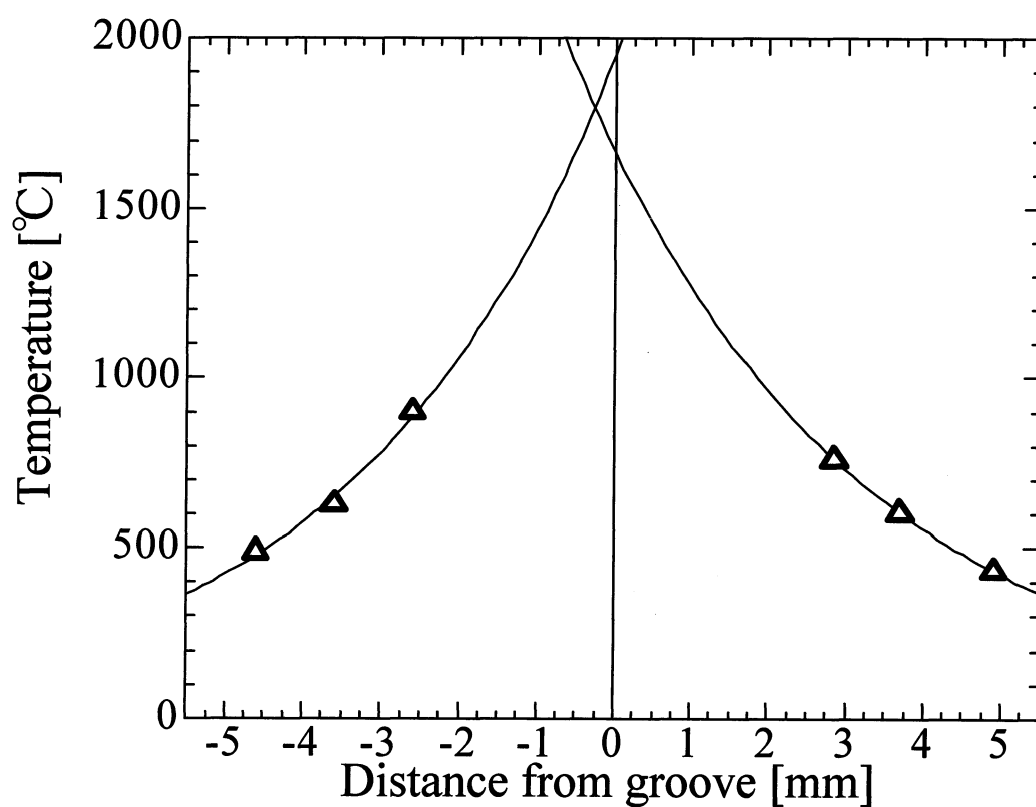


(b) 20mm/s $\delta = +1.0\text{mm}$

Fig.4-18 Relationship between distance from groove to temperature measuring point and maximum temperature ; Welding speed 20mm/s, $\delta = +0.8\text{mm}, +1.0\text{mm}$

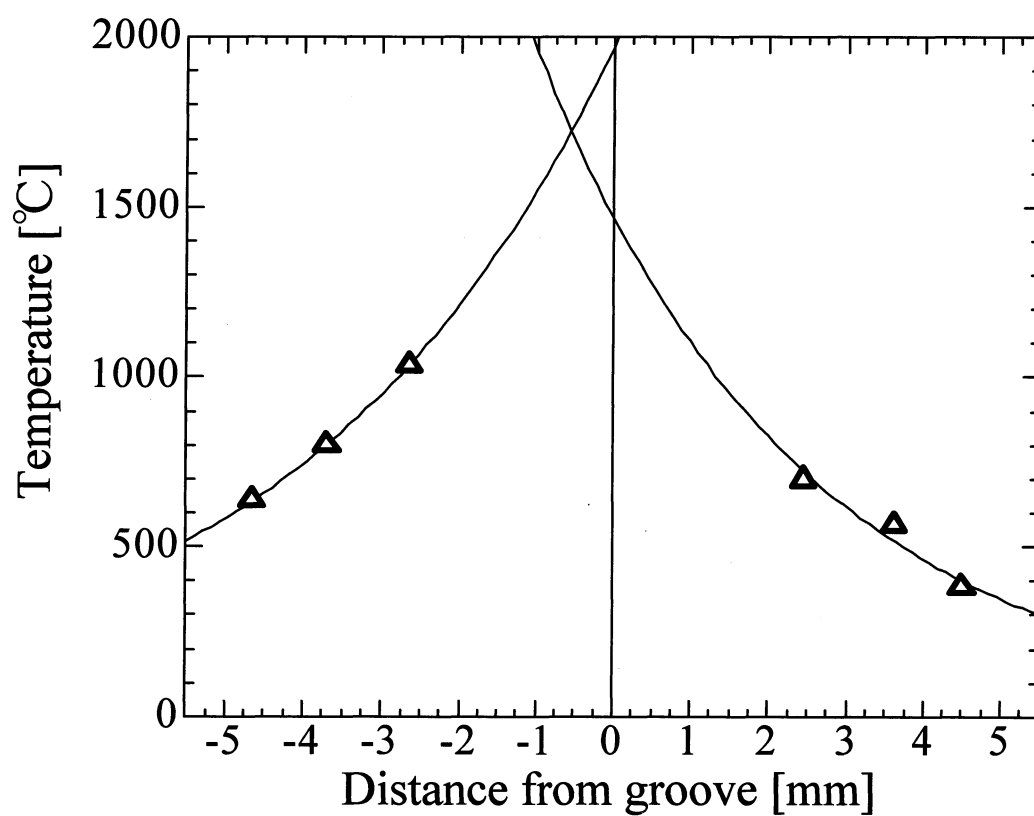


(a) 20mm/s $\delta = -0.2\text{mm}$

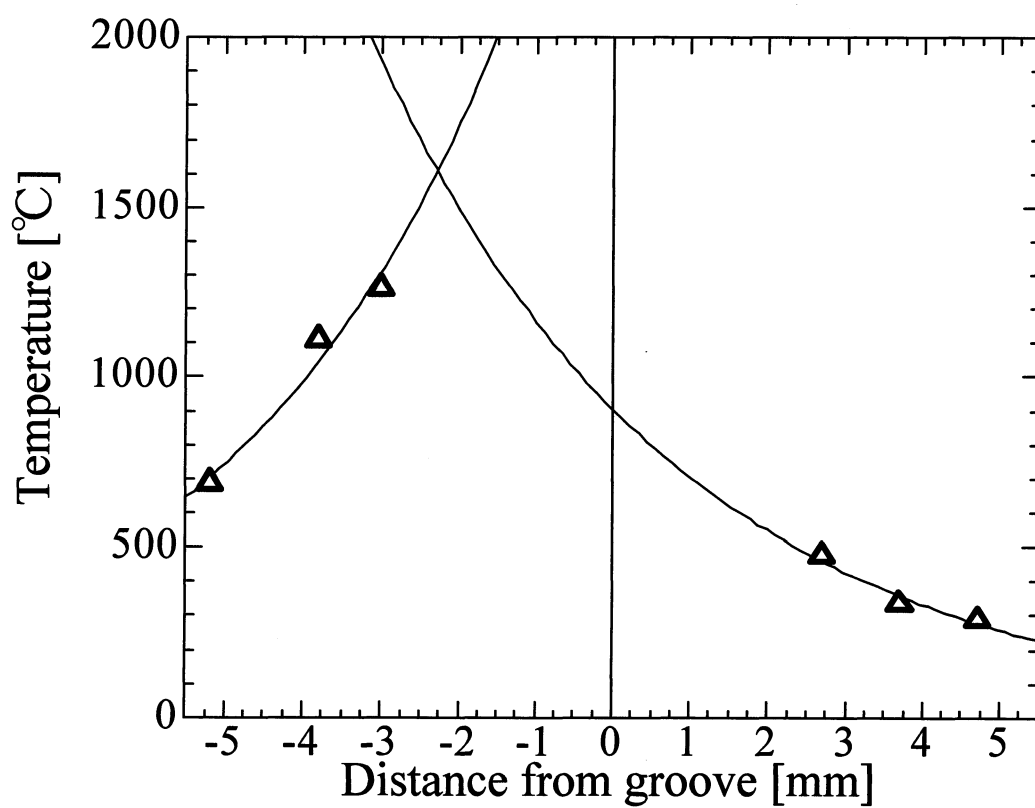


(b) 20mm/s $\delta = -0.4\text{mm}$

Fig.4-19 Relationship between distance from groove to temperature measuring point and maximum temperature ; Welding speed 20mm/s, $\delta = -0.2\text{mm}, -0.4\text{mm}$

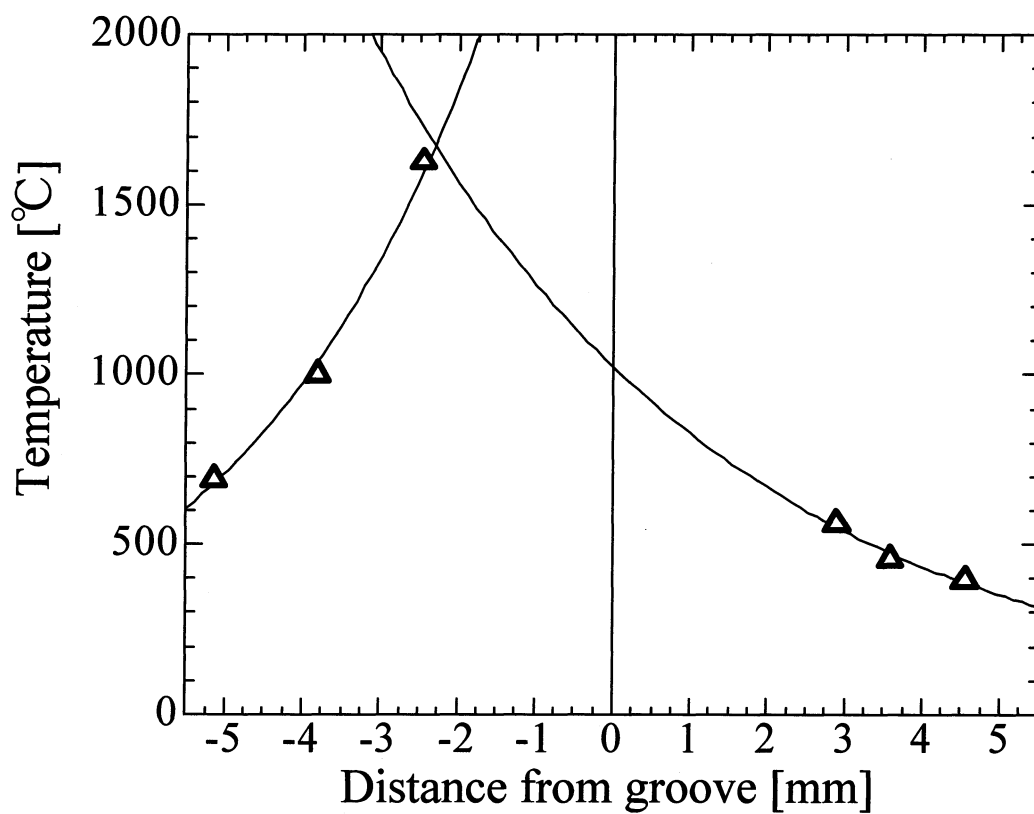


(a) 20mm/s $\delta = -0.6\text{mm}$

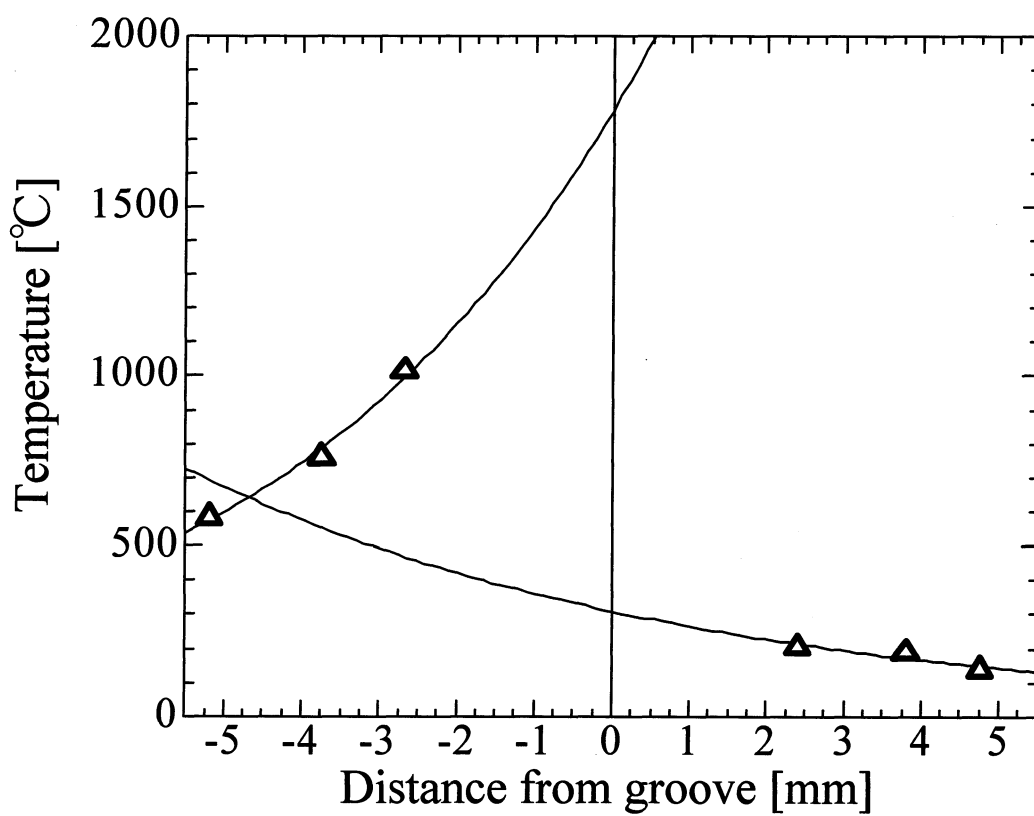


(b) 20mm/s $\delta = -0.8\text{mm}$

Fig.4-20 Relationship between distance from groove to temperature measuring point and maximum temperature ; Welding speed 20mm/s, $\delta = -0.6\text{mm}, -0.8\text{mm}$

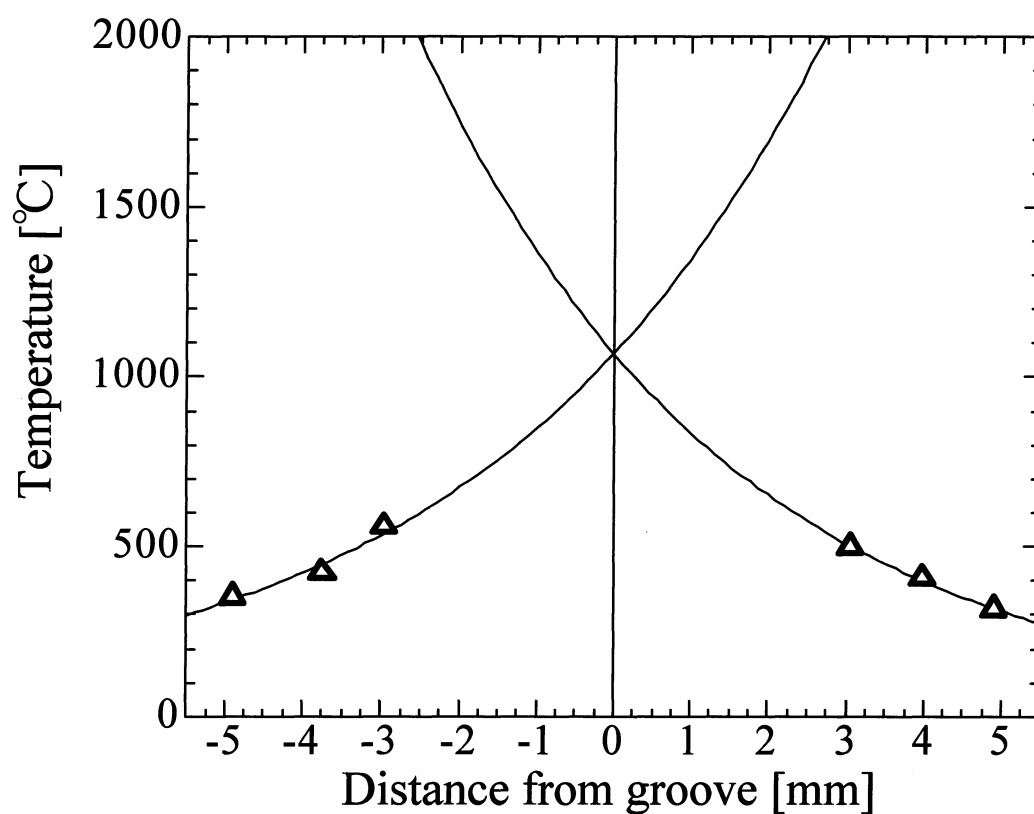


(a) 20mm/s $\delta = -1.0\text{mm}$

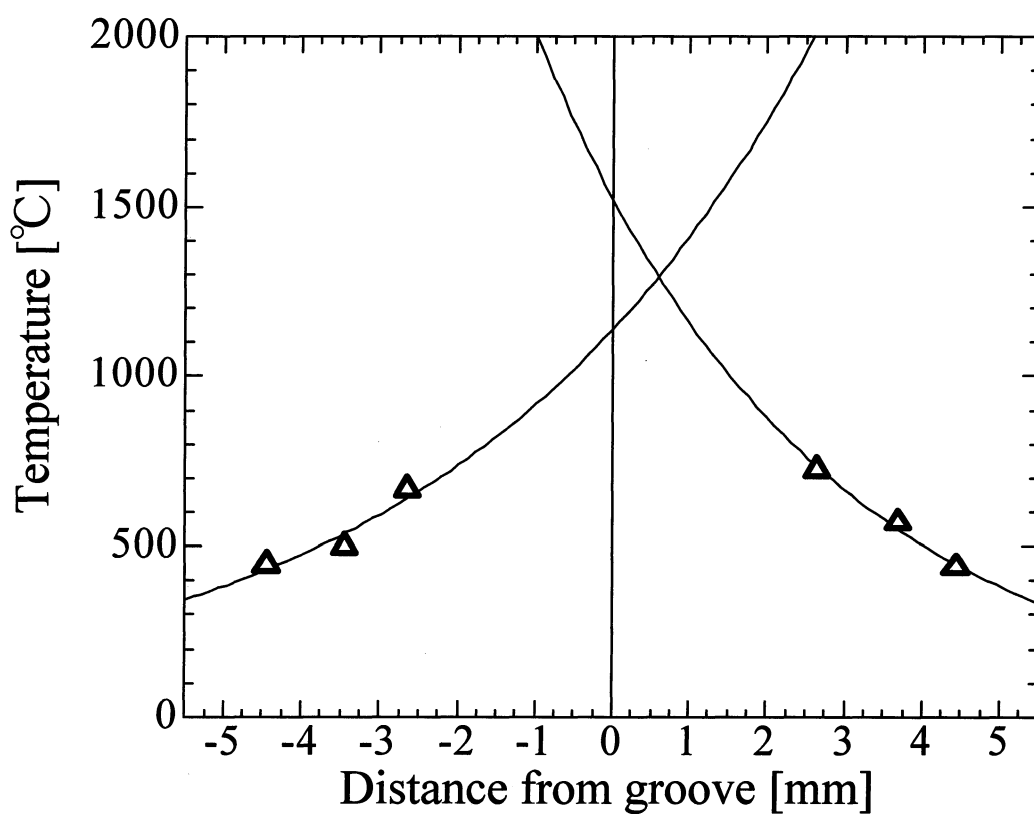


(b) 20mm/s $\delta = -1.2\text{mm}$

Fig.4-21 Relationship between distance from groove to temperature measuring point and maximum temperature ; Welding speed 20mm/s, $\delta = -1.0\text{mm}, -1.2\text{mm}$

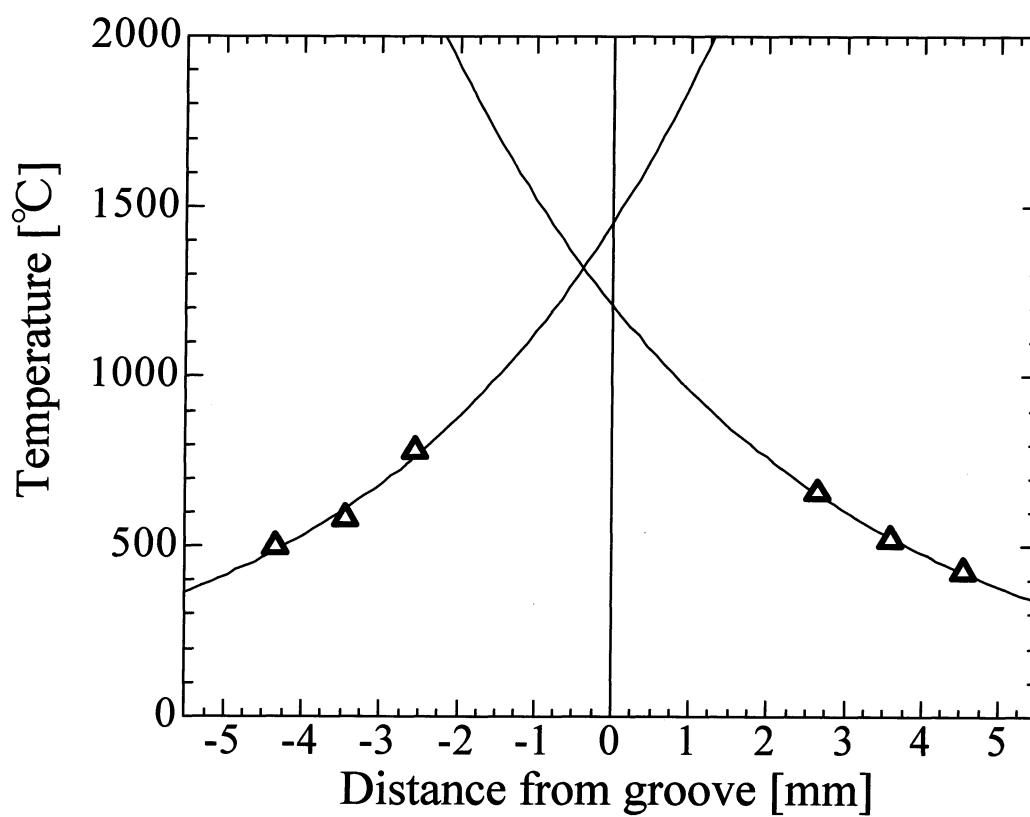


(a) 40mm/s $\delta = 0\text{mm}$



(b) 40mm/s $\delta = +0.2\text{mm}$

Fig.4-22 Relationship between distance from groove to temperature measuring point and maximum temperature ; Welding speed 40mm/s, $\delta = 0\text{mm}, +0.2\text{mm}$



(a) 40mm/s $\delta = -0.2\text{mm}$

Fig.4-23 Relationship between distance from groove to temperature measuring point and maximum temperature ; Welding speed 40mm/s, $\delta = -0.2\text{mm}$,

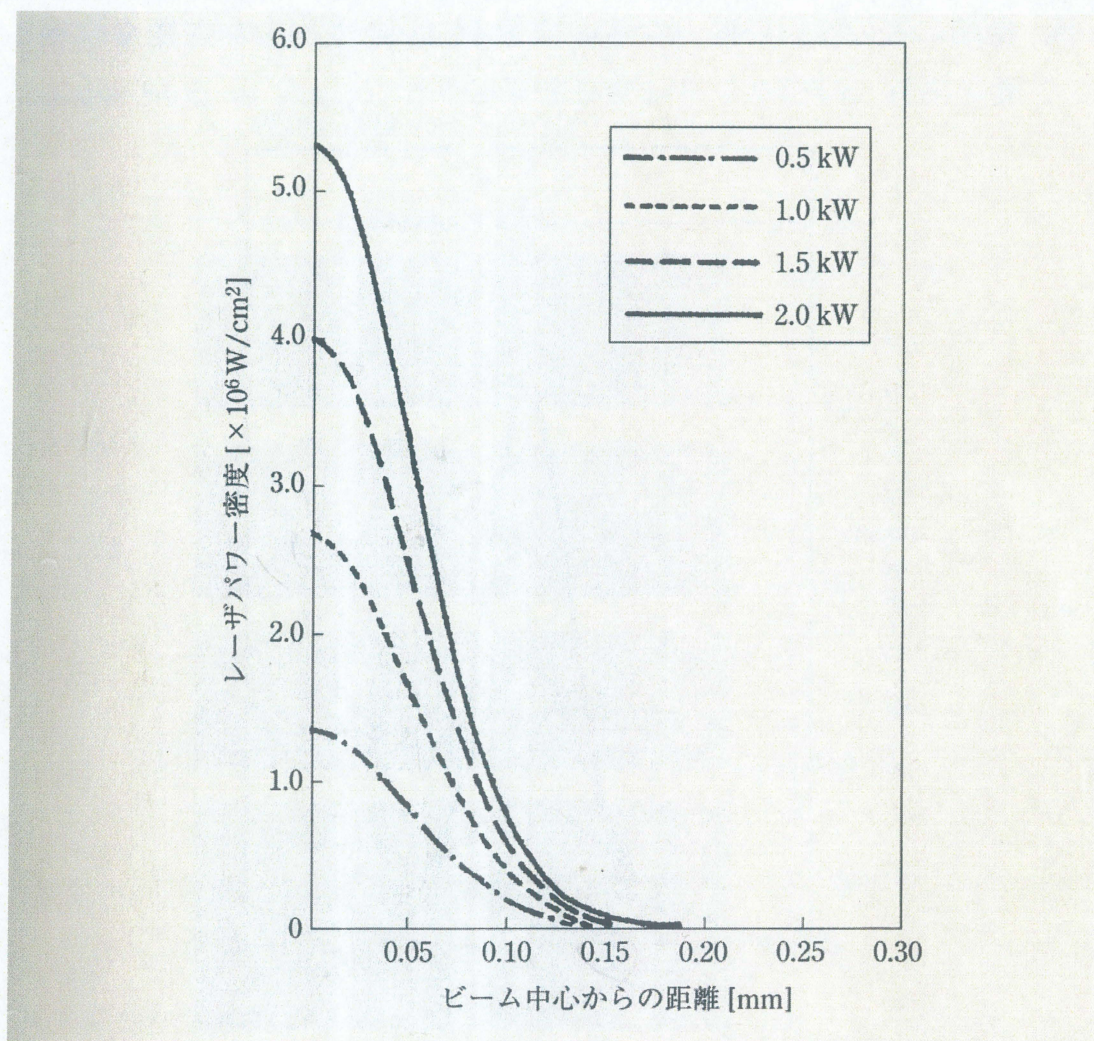


Fig.4-24 Relationship between distance from laser spot and Power Density in gauss distribution at different power

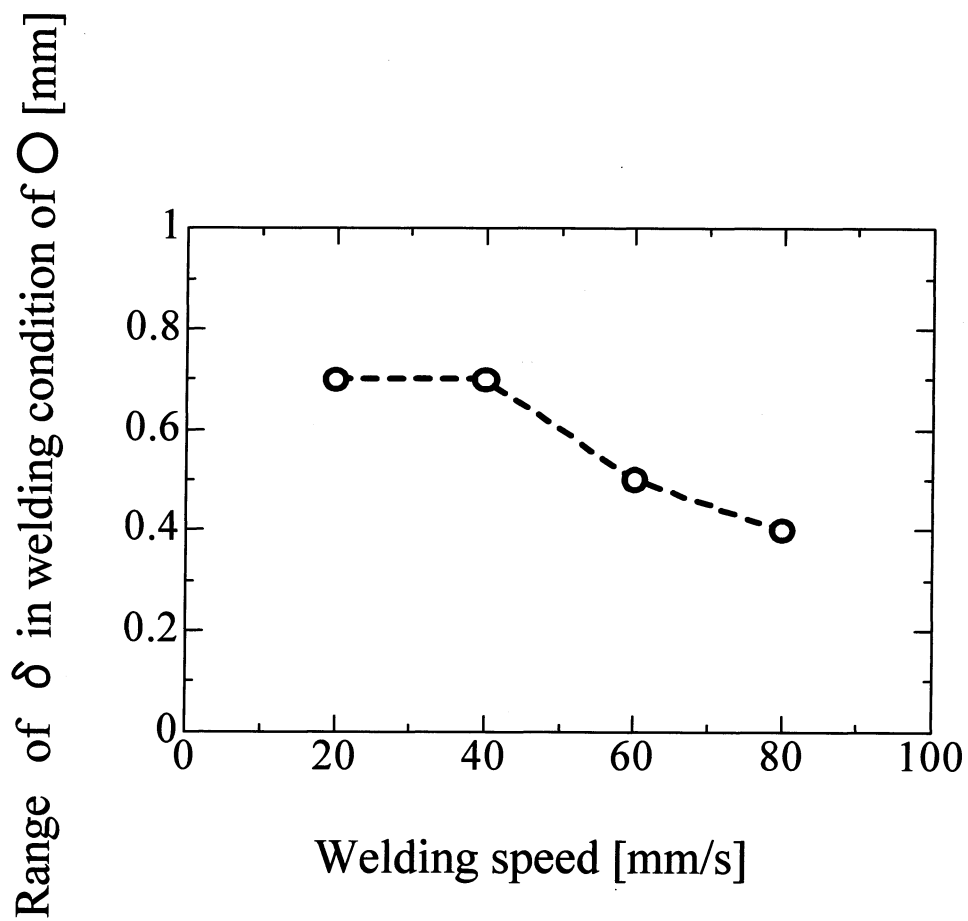


Fig.4-25 Relationship between welding speed and range of δ in welding condition of O in horizontal welding