

平成 24 年度 修士論文

# 突合せレーザー溶接部の溶込形状に及ぼす 偏光の影響



三重大学大学院工学研究科

博士前期課程 機械工学専攻

森 智哉

## 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 レーザ光の偏光状態の種類                | 2  |
| 1-3 レーザ切断における偏光の影響              | 3  |
| 1-4 レーザ溶接における偏光の影響              | 4  |
| 1-5 研究目的                        | 5  |
| 第2章 実験装置および実験方法                 | 6  |
| 2-1 供試材                         | 6  |
| 2-2 実験装置の構成                     | 7  |
| 2-3 実験手順                        | 8  |
| 2-4 実験条件                        | 8  |
| 2-5 溶接速度の検証                     | 9  |
| 2-6 溶込形状の測定方法                   | 11 |
| 2-6-1 研磨及び腐食方法                  | 11 |
| 2-6-2 ビード幅, 溶込み深さ, ビード断面積の測定方法  | 11 |
| 2-6-3 アスペクト比の測定方法               | 12 |
| 2-6-4 ビード傾斜角の測定方法               | 12 |
| 第3章 実験結果及び考察                    | 13 |
| 3-1 溶込形状に及ぼす相対角度 $\psi$ の影響     | 13 |
| 3-1-1 溶込み深さに及ぼす相対角度 $\psi$ の影響  | 13 |
| 3-1-2 ビード幅に及ぼす相対角度 $\psi$ の影響   | 14 |
| 3-1-3 アスペクト比に及ぼす相対角度 $\psi$ の影響 | 16 |
| 3-1-4 ビード断面積に及ぼす相対角度 $\psi$ の影響 | 17 |
| 3-1-5 ビード傾斜角に及ぼす相対角度 $\psi$ の影響 | 18 |
| 3-2 限界溶接断速度に及ぼす相対角度 $\psi$ の影響  | 20 |
| 第4章 直線偏光レーザーの特性                 | 21 |



|     |                           |    |
|-----|---------------------------|----|
| 第5章 | 偏光が溶込形状に影響を及ぼすメカニズムに関する考察 | 23 |
|-----|---------------------------|----|

|     |                |    |
|-----|----------------|----|
| 5-1 | 溶込み深さに及ぼす偏光の影響 | 23 |
|-----|----------------|----|

|     |               |    |
|-----|---------------|----|
| 5-2 | ビード幅に及ぼす偏光の影響 | 24 |
|-----|---------------|----|

|     |                   |    |
|-----|-------------------|----|
| 5-3 | ビード傾斜角現象に及ぼす偏光の影響 | 24 |
|-----|-------------------|----|

|     |                             |    |
|-----|-----------------------------|----|
| 5-4 | 直線偏光レーザの溶接部の溶込形状に与える溶接速度の影響 | 25 |
|-----|-----------------------------|----|

|     |    |    |
|-----|----|----|
| 第6章 | 結言 | 27 |
|-----|----|----|

参考文献

謝辞

## 第1章 緒言

### 1-1 研究背景

#### 1-1-1 レーザ加工の特徴

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

- 1) 高いエネルギー密度が得られるので，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，従来の工作機械では得がたい長所を持っている<sup>1)</sup>．

#### 1-1-2 レーザ溶接の特徴

レーザ溶接は，集光したレーザ光を被加工物に照射して，金属を局所的に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，以下の特徴がある<sup>2)</sup>．

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

これらの特徴と装置の高出力化なども伴い，レーザ溶接は現在，自動車などの生産ライン等で広く利用されている．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<sup>2)</sup>．

- 1) スポット径が微小であるために、継手間の厳密なギャップ管理、レーザー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側面をもっており、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。
- 2)及び 3)であげられているように、レーザー加工において金属材料に対するビーム吸収率は大きな課題とされており、これを向上させる因子の一つとして偏光が挙げられる。

## 1-2 レーザ光の偏光状態の種類

レーザー光は電磁波の一種であり、電界と磁界からなる横波である。電場と磁場の変位は互いに直角になっており、それぞれの変位はレーザー光の進行方向にも直角になっている。以下では話を単純にするために電界の振動のみを考える。

電球や太陽光のように電界の振動方向が様々に混合している状態を無偏光またはランダム偏光という。一方、電界の振動方向がある方向に偏っている場合を偏光しているという<sup>2)</sup>。

Fig.1-1 に、円偏光と直線偏光の電界の振動について示す<sup>1)</sup>。レーザー光は  $z$  軸方向に照射されており、偏光の電場の振動ベクトルを  $x$  方向の振動  $E_x$  と  $y$  方向の振動  $E_y$  に分解して表している。Fig.1-1(a)に示すように、直線偏光では両ベクトル成分の位相にずれがなく、合成ベクトルは直線を描く。一方、Fig.1-1(b)に示すように、円偏光では両ベクトルの成分が  $1/4$  波長ずれており、合成ベクトルは円を描く。

通常用いられるレーザ光の偏光状態は上記に示した直線偏光や円偏光などのエミートガウスビームであるが，特殊な光学素子を用いることで，ラジアル偏光やアジマス偏光といった極めて特徴的で有用な偏光状態を得ることができる<sup>3)</sup>。

Fig.1-2 に直線偏光及び，ラジアル偏光、アジマス偏光の偏光状態を示す。Fig.1-2(a)に示すように直線偏光は空間的に均一な偏光軸を持つのに対し，Fig.1-2(b)及び，Fig.1-2(c)に示すようにラジアル偏光での偏光軸は放物線上に分布し，アジマス偏光は同心円状に偏光軸が分布している。このため，ラジアル偏光及び，アジマス偏光は軸対称偏光ビームと呼ばれる。近年，ラジアル偏光はレーザ加工や高分解顕微鏡，及び光ピンセットなどへの応用研究が進められている。しかし，これらの軸対称偏光ビームを生成するためには特殊な光学素子が必要であり，導入コストが高くなることに加え，光学素子による熱損失が生じる。

### 1-3 レーザ切断における偏光の影響

通常レーザ切断では，円偏光レーザを用いるが，直線偏光レーザを用いると切断方向の相対角度を選択することにより限界切断速度を向上することができる。さらに，に直線偏光レーザを用いた切断では，Fig.1-3 に示すようにカーフ(切断溝)が傾斜することが報告されている。

美馬らは，1kW の低出力 CO<sub>2</sub> レーザで 1mm 厚の SUS304 ステンレス鋼板の切断を行った。このとき，レーザ光の偏光状態は直線偏光であり，切断方向と偏光方向が垂直となる条件に比べ，それらが平行となる条件では限界切断速度が 75% 向上した。また，切断方向と偏光方向の相対角度が 45° となる条件では，カーフが傾斜し，その傾斜角は切断速度の増加に伴い増加していき，最大で 16.7° 傾くことが報告されている<sup>4)</sup>。

#### 1-4 レーザ溶接における偏光の影響

レーザ溶接においても，通常円偏光レーザを用いるが，直線偏光レーザを用いると偏光方向と溶接方向の相対角度を選択することにより，溶込み深さが増加することが報告されている．

新井らは，出力 5kW の  $\text{CO}_2$  レーザを用い，板厚 52.6mm の鋼板にビードオンプレート溶接を行った．このとき，レーザ光の偏光状態は直線偏光であり，溶接速度が 4m/min 以上になると，溶接方向と偏光方向が平行のとき，溶込み深さが増加し，それらが垂直のとき，溶込みが浅くなり，ビード幅が広がることが報告されている<sup>2)</sup>．

また，佐藤らは板厚 6mm の A5083 アルミニウム合金に出力 5kW の  $\text{CO}_2$  レーザでビードオンプレート溶接を行った．レーザ光の偏光状態は直線偏光であり，シールドガスに He を用いた場合、溶接方向と偏光方向が平行のとき，溶込みが増加し，それらが垂直ときでは，溶込みが浅くなることが確認された．しかし，このときビード幅への偏光による影響は確認されなかった<sup>5)</sup>．

また，過去の研究において 1kW の低出力  $\text{CO}_2$  レーザで 1.5mm 厚の SUS304 ステンレス鋼板にビードオンプレート溶接をおこなった．このとき、レーザ光の偏光状態は直線偏光であり，偏光方向と溶接方向が平行となる条件では，狭く深い溶込みが得られ，それらが垂直となる条件と比較して溶込み深さが 70% 増加した．また，偏光方向と溶接方向が垂直のとなる条件では広く浅い溶込みが得られ，それらが垂直となる条件と比較してビード幅が 22% 増加した．さらに，偏光方向と溶接方向の相対角度が  $45^\circ$  となる条件では，ビードの傾斜現象が確認でき，その傾斜角は溶接速度の増加に伴い増加していき，最大で  $11.2^\circ$  傾くことがわかっている<sup>6)</sup>．

### 1-5 研究目的

上記に示したように，レーザの偏光はビードオンプレート溶接においてその溶込形状に影響を与える．特に，溶込み深さについては最大で 70% も上昇しており，偏光がレーザ光と母材のエネルギー結合率へ大きく影響を与えているといえる．しかし，直線偏光レーザを実際の溶接継手に用いた報告例は無く，その詳細は不明である．そのため，本研究では直線偏光レーザを用いて，その偏光方向と溶接方向の相対角度を変化させ，SUS304 ステンレス鋼板の突合せ溶接を行い，偏光が溶接部の溶込形状に与える影響を調査すると共に，偏光が溶込形状に影響を与えるメカニズムについても検討した．

## 第2章 実験装置および実験方法

### 2-1 供試材

供試材として板厚 0.8mm 及び, 1.5mm のオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 (寸法: 20×100mm) 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, レーザ突合せ溶接において, 供試材の開先形状は溶込みに大きく影響を与えると考えられる. そのため, 予備実験としてシャーリング加工された板厚 0.8mm のステンレス鋼を供試材として用い, 偏光方向と溶接方向が平行となる条件で突合せレーザ溶接を行った. このときの実験条件を以下に示す.

#### 予備実験条件

|         |     |            |
|---------|-----|------------|
| レーザ出力   | ．．． | 900W       |
| レンズ焦点距離 | ．．． | 127mm      |
| 焦点はずし距離 | ．．． | ±0mm       |
| 溶接速度    | ．．． | 40, 80mm/s |
| 溶接長     | ．．． | 90mm       |

Fig.2-1 に溶接後の断面写真及び, 溶接前の開先の断面写真を示す. Fig.2-1(a) に示すように, 溶接速度が比較的遅い 40mm/s においては, 溶込形状に及ぼす開先形状の影響は確認できなかった. しかし, Fig.2-1(b)に示すように, 溶接速度が比較的速い 80mm/s においては, シャーリング加工のだれが開先に存在しているため, 溶接部には不安定なビードが形成されている. また, Fig.2-1(c)に示すようにシャーリング加工では, その開先面が試験片表面に対して垂直に形成されておらず, 傾斜している. そのため, 開先を突合せた際, 開先ギャップが生じやすく, Fig.2-1(b)の断面写真のようにアンダーフィルが形成されやすい.

これより, シャーリング加工された試験片では, 偏光が溶込形状に与える影響を正確に調査することができないと考え, 本研究では理想的な I 型開先を得

るために、試験片の開先にフライス加工した後、平面研削した。平面研削後の断面写真を Fig.2-2 に示す。加工によるバリはほとんど無く、Fig.2-3 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）によってバリ高さを計測したところ、Fig.2-2(a)に示すように板厚 0.8mm では板厚方向に最大で 10 $\mu$ m 程度のバリが確認されたが、Fig.2-2(b)に示すように板厚 1.5mm ではバリは確認できなかった。Fig.2-4 に溶接前の突合せ部の断面写真を示す。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

レーザ発振器には、定格出力 1 kW、波長 10.6 $\mu$ 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 ZnSe 製レンズにより集光され、突合せ部に照射される。

本研究で用いたレーザ溶接装置の構成を Fig.2-5 に示す。本研究では偏光方向と溶接方向の相対角度を変化させて溶接を行うため、図中の a に溶接方向を変化させる治具を設置した。その概略図を Fig.2-6 及び Fig.2-7 に示す。この治具は図のように A 及び、B の 2 つの部品から構成されており、共にレーザ光が中心を通過する  $\phi 30$  の穴が開けられている。A は定盤に固定され、B のみがその  $\phi 30$  の穴を中心に回転する仕組みになっている。また、A 及び、B にはそれぞれ  $\phi 10$  の穴が多数開けてあり、それらは B が水平方向から 45°毎に回転したところで一致するようになっており、M10 のボルトナットで固定することで、B を 45°毎に回転させることができる。本研究ではこの構造を使うことで溶接方向を回転させ、偏光方向と溶接方向の相対角度を変化させた。

Fig.2-6 に示した回転治具の B には、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）が取り付けられる。電動スライダはレーザ光の照射に同期して直線移動し、その動作は接続されているコントローラにより制御される。コントローラへの動作プログラム



の入力は、接続されたパソコンのアプリケーション（ハイパーターミナル）により行い、この動作プログラムにより溶接速度や溶接長を設定した。

また、この電動スライダには試験片固定用の治具が設置され、その図面を Fig.2-8 に示す。この治具の試験片を固定する部分は、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.2-8(a)に示すように  $36^\circ$  ごとに放射状に線が計 10 本引かれている。これによってレーザーが突合せ部に照射されるように調節した。

決められた設定時間だけ、レーザー光を突合せ部に照射するため、Fig.2-5 に示したように、レーザー発振器と集光レンズの間にレーザー光遮断装置を設置した。この遮断装置には下向き  $45^\circ$  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、レーザー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、レーザー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、供試材表面及び、開先表面をアセトンで拭き取り脱脂した後、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、レーザー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 実験条件

本研究では、直線偏光がレーザー突合せ溶接部の溶込形状に及ぼす影響を検討するために、偏光方向と溶接方向の相対角度  $\phi$  を定義し、相対角度及び溶接速度を変化させて実験を行った。

本実験で用いたレーザー光の偏光方向は Fig.2-9 に示すように垂直方向から時計回りに  $45^\circ$  傾いた面にある．そのため，レーザービームの照射方向を  $z$  軸，偏光方向を  $x$  とする  $xyz$  座標系を試験片上に定義した．実験は常にこの  $x$ - $y$  平面上で行った．また，Fig.2-10 に示すように，偏光方向と溶接方向の相対角度を  $\phi$  と定義し， $x$  軸から  $y$  軸方向への回転を正の回転角度とした．試験片を  $xyz$  座標系に対して  $\phi$  だけ回転した試験片上に， $z$  軸と  $\xi$  軸を同一とする  $\xi$   $\eta$   $\zeta$  座標系を新たに定義し，相対角度  $\phi = 0^\circ$  ,  $45^\circ$  ,  $90^\circ$  ,  $315^\circ$  について実験を行った．溶接は常に  $\xi$  軸の正方向となるように行った．実験条件を以下にまとめて示す．

|                 |     |  |
|-----------------|-----|--|
| レーザー出力          | ．．． | 900W   |
| レンズ焦点距離         | ．．． | 127mm  |
| 焦点はずし距離         | ．．． | $\pm 0$ mm   |
| レーザーが照射されてから    |     |  |
| スライダが動き出すまでの時間  | ．．． | 0.5sec   |
| 溶接速度 (板厚 0.8mm) | ．．． | 60～160mm/s   |
| (板厚 1.5mm)      | ．．． | 40～120mm/s   |
| 溶接長             | ．．． | 90mm   |
| 相対角度            | ．．． | $\phi = 0^\circ$ , $45^\circ$ , $90^\circ$ , $315^\circ$ |

## 2-5 溶接速度の検証

本研究では，電動スライダに設置されているテーブルの移動速度が実験における溶接速度となる．また，Fig.2-8 に示した試験片固定用治具の重量を測定したところ，7.5kg であった．本実験では溶接方向を変化させるため，テーブルを移動させる際，この治具の重量が電動スライダに与える負荷の方向が変化する．そのため，各溶接方向において電動スライダを移動させた際，設定した速度に達しているかを確認した．治具の移動速度を測定には高速度カメラ (KEYENCE VW-5000) を使用し，治具を固定した電動スライダの側面にスケー

ルを張り付け、高速度カメラを用いて 1 秒間に 15 コマ撮影することで、治具が動き出した時刻及び 10mm 進んだ地点までの時刻を測定し、それより移動速度を算出した。それ以降も同様の方法で 10mm 毎の移動速度を算出し、治具の移動距離が 40mm または 50mm に到達するまで測定を行った。測定条件を以下に示す。

#### 測定条件

|             |     |   |
|-------------|-----|---|
| 治具の移動速度の設定値 | ・・・ | 160mm/s   |
| 治具の移動距離の設定値 | ・・・ | 100mm   |
| 相対角度 $\phi$ | ・・・ | $0^\circ$ , $45^\circ$ , $90^\circ$ , $315^\circ$ |

測定結果を Fig.2-11 に示す。Fig.2-11(a)は  $\phi=0^\circ$  , (b)は  $\phi=45^\circ$  , (c)は  $\phi=90^\circ$  及び(d)は  $\phi=315^\circ$  の移動速度を示す。これより、すべての相対角度で、治具の移動距離が 10mm 地点では移動速度の設定値に達していないことが確認された。しかし、治具の移動距離が 20mm の地点では、その移動速度は  $\phi=0^\circ$  では 161mm/s,  $\phi=45^\circ$  では 163mm/s,  $\phi=90^\circ$  では 161mm/s 及び  $\phi=315^\circ$  では 160mm/s と移動速度の設定値に達していることが確認できる。さらに、その後の移動距離 30mm 及び 40mm, 50mm の地点においても目標の移動速度に達していることが確認できる。また、移動速度の設定値と測定値には  $\pm 3\text{mm/s}$  ほどの誤差があった。しかし、この誤差は 160mm/s において 2%程度の誤差であるため、本研究ではこの誤差を無視した。

これより、使用する電動スライダでは、本実験の最大溶接速度である 160mm/s が得られることが確認できた。よって、他のすべての溶接速度においても、治具の移動速度が溶接速度の設定値に達していると見なし、実験を行った。

## 2-6 溶込形状の測定方法

ビード断面から溶込形状の測定を行うため、溶接された試験片をリファインカッターにより溶接開始点から 50mm の位置で切り出した。溶接開始点は、Fig.2-12 に示すようにビード外觀において、レーザが照射されてスライダが動き出すまでにできた円形状の溶融部の中心とした。

### 2-6-1 研磨及び腐食方法

切り出した試験片をベークライト樹脂に埋め、その断面を#240～#1200 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、鏡面仕上げした。その後、これらを常温の 35% $\text{HCl}$  溶液に 1 時間程浸してエッチングした。

### 2-6-2 ビード幅、溶込み深さ及びビード断面積の測定方法

ビード断面から溶込み深さ、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.2-3 で示した、光学顕微鏡とマイクロメータ及びデジタルカウンタ付きステージを用いて、ビード断面の輪郭の 2 次元座標を測定した。溶込み深さ、ビード幅及び、ビード断面積の測定方法を Fig.2-13~14 に示す。Fig.2-13 はビード幅及び溶込み深さの測定方法を示しており、Fig.2-13(a)に示すように、完全溶込みが得られた条件のビード幅は、それぞれ試験片の表面(レーザ照射側)と裏側において測定し、Fig.2-13(b)に示すように、部分溶込みの条件では上部のみ測定した。

溶込み深さは、Fig.2-13(a)のように完全溶込みが得られた条件では、その試験片の板厚を溶込み深さとし、Fig.2-13(b)のように不完全溶込みの条件では、2 次元座標において母材表面からビードの最深部までの深さを測定し、溶込み深さとした。

ビード断面積の測定は Fig.2-14(a)に示すように、完全溶込みが得られた条件では、試験片表面から裏面まで、板厚方向に 0.05mm 刻みに測定したビードの輪郭を、板厚方向に 0.05mm 毎に台形近似した面積を  $s_n$  とし、それらの和  $S$  を全体のビード断面積とした。また、Fig.2-14(b)に示すように、部分溶込みが得られた条件では、試験片表面から板厚方向に 0.05mm 毎のビードの輪郭点及び最深部となる 1 点の座標を測定する。ビードの先端部を除くビード断面積は台形近似し、その面積を  $s_i$  とした。また、ビードの先端部は三角形近似し、その面積を  $s'$  とした。そして、これらの面積  $s_1 \sim s_i$  と  $s'$  の和  $S'$  を全体のビード断面積とした。

#### 2-6-3 アスペクト比の算出方法

ビード断面のアスペクト比は以下の式を用い算出した。

$$\text{アスペクト比}[-] = \frac{\text{溶込み深さ} [mm]}{\text{表面のビード幅} [mm]}$$

#### 2-6-4 ビード傾斜角の測定方法

直線偏光レーザを用いたビードオンプレート溶接において、ビードの傾斜が確認されたため、本研究においても溶接部のビード傾斜角を測定した。

レーザ突合せ溶接後のビード断面の例を Fig.2-15(a)に示す。これは  $\phi = 315^\circ$  のものであり、ビードの傾斜現象が確認できる。この断面より Fig.2-15 に示すように、試験片表面から 0.05mm 間隔に測定し、各ビード幅の中心点を求め、最小二乗法によりそれらの近似直線求め、この近似直線の傾きを  $\tan\theta$  とし、ビードの傾斜角  $\theta$  を算出した。このとき、 $\xi$  方向が溶接方向であり、 $\zeta$  軸から  $\eta$  軸方向へ回転したビード傾斜角をとした。

### 第3章 実験結果及び考察

#### 3-1 溶込形状に及ぼす相対角度 $\phi$ の影響

Fig.3-1 及び Fig.3-2 にビード断面を示す．ここで，Fig.3-1 は板厚 0.8mm のときのビード断面であり，Fig.3-2 は板厚 1.5mm のときのビード断面である．これより，どの板厚においても相対角度  $\phi$  を変化させることで，溶込形状の変化が確認できる．よって，これらのビード断面より得られた測定結果を以下に述べる．

##### 3-1-1 溶込み深さに及ぼす相対角度 $\phi$ の影響

Fig.3-3 に板厚 0.8mm を用いたときの，各相対角度  $\phi$  における溶接速度と溶込み深さの関係を示す．相対角度  $\phi$  を変化させることで，溶込み深さに変化が生じている．また，相対角度  $\phi$  の変化による溶込み深さの変化は，溶接速度が 100mm/s 以上の条件で顕著となり，その変化量は溶接速度の増加に伴い増加している．特に，溶接速度 160mm/s の条件では， $\phi=90^\circ$  と  $\phi=0^\circ$  のときの値に大きな差が確認でき， $\phi=90^\circ$  のときの溶込み深さが 0.39mm であったのに対し， $\phi=0^\circ$  では 0.71mm の溶込み深さが得られ，85%程溶込み深さが増加している．また，偏光方向と溶接方向のなす角が  $45^\circ$  となる  $\phi=45^\circ$ ， $315^\circ$  のときの溶込み深さは，溶接速度が 120mm/s 以上の条件で， $\phi=0^\circ$  と  $\phi=90^\circ$  の間の値となった．

Fig.3-4 に板厚 1.5mm を用いたときの各相対角度  $\phi$  における溶接速度と溶込み深さの関係を示す．板厚 0.8mm のときと同様，板厚 1.5mm の場合でも各相対角度  $\phi$  を変化させることで溶込み深さに変化が生じている．板厚 1.5mm の場合では，溶接速度 80mm/s 以上の条件で偏光の影響が顕著となり，板厚 0.8mm のとき同様，その変化量は溶接速度の増加に伴い増加した．溶接速度 120mm/s の条件において，相対角度  $\phi$  の変化による溶込みの増加は最大となり， $\phi=90^\circ$  のときの溶込み深さが 0.51mm であったのに対し， $\phi=0^\circ$  では 0.82mm の溶込みが得られ，61%程溶込み深さが増加した．また，板厚 1.5mm においても偏光

方向と溶接方向のなす角が  $45^\circ$  となる  $\phi = 45^\circ, 315^\circ$  のときの溶込み深さは、溶接速度  $80\text{mm/s}$  以上の条件で、 $\phi = 0^\circ$  と  $\phi = 90^\circ$  の間の値となった。

以上より板厚が変化しても、偏光が突合せ溶接部の溶込み深さに影響を与えることが確認された。しかし、溶込み深さに与える偏光の影響が顕著となる溶接速度は板厚によって異なっていた。このことについて検討するために、Fig.3-5 に各板厚における  $\phi = 0^\circ$  及び  $\phi = 90^\circ$  での溶接速度と溶込み深さの関係を示す。これより、板厚  $0.8\text{mm}$  において、全ての相対角度で完全溶込みが得られた溶接速度  $60\sim 80\text{mm/s}$  では、板厚の違いにより溶込み深さの差が存在しているが、溶接速度が増加すると、その差は減少していき、溶接速度  $120\text{mm/s}$  に達すると、板厚の違いによる溶込み深さの変化はほとんど確認できない。また、板厚が変化しても、溶接速度  $120\text{mm/s}$  における  $\phi = 0^\circ$  と  $\phi = 90^\circ$  の溶込み深さの差にほとんど変化がないことが確認できる。板厚の違いによる溶込み深さの差は、板厚  $0.8\text{mm}$  の低速域での溶接において、完全溶込みとなることで、溶込み深が板厚より大きくならないため生じたと考えられる。よって、突合せレーザ溶接では、母材の板厚が変化しても、偏光が溶込み深さに与える影響は同様であると思われる。一方、板厚の変化により、溶込み深さに偏光の影響が顕著となる溶接速度に違いがあった。これは板厚  $0.8\text{mm}$  では溶接速度  $80\text{mm/s}$  のとき、 $\phi = 0^\circ$  及び  $\phi = 90^\circ$  で完全溶込みが得られているため、溶込み深さにおける偏光の影響が確認できなかったといえる。しかし、板厚  $1.5\text{mm}$  では溶接速度  $80\text{mm/s}$  以上で  $\phi = 0^\circ$  と  $\phi = 90^\circ$  の溶込み深さに差が存在している。よって、本研究では溶接速度が  $80\text{mm/s}$  以上の条件で突合せ溶接部の溶込み深さに偏光の影響が顕著になることが確認できた。

### 3-1-2 ビード幅に及ぼす相対角度 $\phi$ の影響

Fig.3-6 に板厚  $0.8\text{mm}$  を用いたときの、各相対角度  $\phi$  における溶接速度と表面及び裏面ビード幅の関係を示す。これより相対角度  $\phi$  の変化による表面及び裏面ビード幅の変化が確認できた。溶接速度  $60\sim 80\text{mm/s}$  及び  $140\sim 160\text{mm/s}$  の速度域では、相対角度  $\phi$  の変化による表面のビード幅の著しい変化は確認できなかったが、溶接速度  $100\sim 120\text{mm/s}$  の速度域では、相対角度  $\phi$  の変化によって表

面のビード幅に変化が生じている．特に，溶接速度 100mm/s において大きな変化が確認でき， $\phi=0^\circ$  のとき，表面のビード幅が 0.45mm であったのに対し， $\phi=90^\circ$  では 0.57mm の表面のビード幅が得られ，27%程表面のビード幅が増加した．また，溶接速度 60~80mm/s 及び 140~160mm/s の速度域で，相対角度  $\phi$  の変化による表面のビード幅の著しい変化は確認できなかったが，全ての溶接速度において  $\phi=0^\circ$  の表面のビード幅は他の相対角度よりも低い値を示している．そのため， $\phi=0^\circ$  では狭いビードが形成されたと考えられる．一方，裏面のビード幅については，全ての相対角度において溶接速度 60~80mm/s で比較すると，溶接速度 60mm/s において， $\phi=0^\circ$  のとき，裏面のビードが 0.41mm であったのに対し， $\phi=90^\circ$  では 0.34mm の裏面のビード幅が得られ，20%程裏面のビードが増加している．また，偏光方向と溶接方向のなす角が  $45^\circ$  となる  $\phi=45^\circ$ ， $315^\circ$  の裏面のビード幅は， $\phi=0^\circ$  と  $\phi=90^\circ$  の間の値となった．しかし，溶接速度 80mm/s では，相対角度の変化による裏面のビード幅の変化は確認できなかった．

Fi.g.3-7 に板厚 1.5mm を用いたときの各相対角度  $\phi$  における溶接速度と表面及び裏面ビード幅の関係を示す．板厚 1.5mm においても相対角度  $\phi$  の変化による表面及び裏面のビード幅の変化が確認できた．表面のビード幅については，溶接速度 110~120mm/s の速度域でその変化が顕著に確認でき，特に，溶接速度 120mm/s において， $\phi=0^\circ$  の表面ビード幅が 0.47mm であったのに対し， $\phi=90^\circ$  では 0.58mm の表面ビード幅が得られ，23%程表面ビード幅が増加した．また，裏面ビード幅については，溶接速度 40mm/s において， $\phi=0^\circ$  のとき，裏面のビード幅が 0.25mm であったのに対し， $\phi=90^\circ$  では 0.17mm の裏面のビード幅が得られ，47%程裏面のビードが増加している．

板厚の違いによる表面のビード幅の変化について検討するために，Fig.3-8 に各板厚における  $\phi=0^\circ$  及び  $\phi=90^\circ$  での溶接速度と表面のビード幅の関係を示す．溶接速度 110~120mm/s の領域では，板厚の違いによる表面のビード幅の変化はほとんど確認できなかった．溶接速度 110~120mm/s の速度域は偏光の影響が突合せ溶接部の表面ビード幅に顕著に表れる領域である．これより，板厚が変化しても，偏光がビード幅に与える影響は同様と考えられる．



### 3-1-3 アスペクト比に及ぼす相対角度 $\phi$ の影響

Fi.g.3-9 に板厚 0.8mm を用いたときの各相対角度  $\phi$  における溶接速度とビードのアスペクト比の関係を示す。これより、相対角度  $\phi$  の変化によるアスペクト比の変化が確認できる。溶接速度 60~80mm/s のとき、相対角度  $\phi$  の変化によるアスペクト比の著しい変化は確認できなかったが、溶接速度が 100mm/s 以上の条件ではアスペクト比の変化が顕著となっている。 $\phi=0^\circ$  のときのアスペクト比は、他の相対角度より大きい値を示しており、溶接速度の増加に伴い  $\phi=0^\circ$  と他の相対角度とのアスペクト比の差は増加している。特に、溶接速度 160mm/s の条件で大きな変化が確認でき、 $\phi=90^\circ$  のときのアスペクト比が 0.88 であったのに対し、 $\phi=0^\circ$  では 1.68 のアスペクト比が得られ、約 1.9 倍になっている。これは、 $\phi=0^\circ$  では他の相対角度に比べ、溶込みが深く、ビード幅が狭かったことが原因と考えられる。

Fi.g.3-10 に板厚 1.5mm を用いたときの各相対角度  $\phi$  における溶接速度とビードのアスペクト比の関係を示す。板厚 1.5mm においても、相対角度  $\phi$  の変化によるアスペクト比の変化が確認でき、溶接速度 100mm/s 以上の条件では、 $\phi=0^\circ$  のアスペクト比が他の相対角度より大きい値を示し、溶接速度の増加に伴い  $\phi=0^\circ$  と他の相対角度のアスペクト比の差は増加している。特に、溶接速度 120mm/s の条件で大きな変化が確認でき、 $\phi=90^\circ$  のときのアスペクト比が 0.88 であったのに対し、 $\phi=0^\circ$  では 1.72 のアスペクト比が得られ、約 2 倍になっている。

板厚の違いによるビードのアスペクト比の変化について検討するため、Fig.3-11 に各板厚における  $\phi=0^\circ$  及び  $\phi=90^\circ$  での溶接速度とアスペクト比の関係を示す。これより、溶接速度 80~120mm/s の速度域では、板厚の違いによるアスペクト比の変化はほとんど確認できなかった。よって、板厚が変化しても、偏光がアスペクト比に与える影響は同様であると思われる。

### 3-1-4 ビード断面積に及ぼす相対角度 $\phi$ の影響

Fi.g.3-12 に板厚 0.8mm を用いたときの、各相対角度  $\phi$  における溶接速度とビード断面積の関係を示す。すべての相対角度  $\phi$  において、溶接速度の増加に伴い、ビード断面積が減少していることが確認できる。溶接速度 60~100mm/s の速度域では、相対角度の変化による断面積の著しい変化は確認できなかったが、溶接速度が 120mm/s 以上になると相対角度の変化によるビード断面積の変化が確認でき、その変化量は溶接速度の増加に伴い増加した。特に、溶接速度 160mm/s では、 $\phi=0^\circ$  と  $\phi=90^\circ$  において大きな変化が確認でき、 $\phi=90^\circ$  のときのビード断面積が  $0.12\text{mm}^2$  あるのに対し、 $\phi=0^\circ$  では  $0.20\text{mm}^2$  ビード断面積が得られ、67%程ビード断面積が増加していた。これより、偏光方向と溶接方向の相対角度  $\phi=0^\circ$  の突合せレーザ溶接では、溶接速度が 120mm/s 以上になると、 $\phi=45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $315^\circ$  の溶接に比べ母材に吸収されるレーザエネルギーの量が増加していることが分かる。しかし、溶接速度が 60~100mm/s の速度域では、相対角度の変化によるビード断面積の著しい変化は確認できなかったにもかかわらず、溶接速度 100mm/s では完全溶込みが得られる相対角度と部分溶込みとなる相対角度があった。よって、この速度域では、相対角度  $\phi$  を変化させても母材に吸収されるレーザエネルギーの量は著しく変化せず、溶込形状のみが変化すると考えられる。

Fig.3-13 に板厚 1.5mm を用いたときの、各相対角度  $\phi$  における溶接速度とビード断面積の関係を示す。板厚 1.5mm においても、すべての相対角度  $\phi$  における溶接において、溶接速度の増加に伴い、ビード断面積が減少していることが確認できる。しかしながら、板厚 1.5mm の突合せ溶接部には、相対角度の変化による断面積の著しい変化は確認できなかった。

板厚の違いによるビード断面積の変化について検討するため、Fig.3-14 各板厚における  $\phi=0^\circ$  及び  $\phi=90^\circ$  での溶接速度とビード断面積の関係を示す。板厚 0.8mm において、全ての相対角度で完全溶込みが得られた溶接速度 60~80mm/s では、板厚の違いにより断面積に差が確認できるが、溶接速度が増加すると、それらの差は減少していき、溶接速度が 120mm/s に達すると、板厚

の違いによるビード断面積の差は無くなっている。これは板厚 0.8mm で完全溶込みが得られた条件では、キーホールが母材の裏側まで達し、レーザ光の一部が試験片を通過することで、板厚 1.5mm に比べ母材の溶融に使われたレーザエネルギーが少なくなったと考えられる。そのため、各板厚間で母材の溶融に使われるレーザエネルギーに差が生じたことで、ビード断面積の値に差が生じたと考えられる。また、溶接速度 120mm/s では、板厚の違いによるビード断面積に差は無く、 $\phi=0^\circ$  及び  $\phi=90^\circ$  のビード断面積の値は一致していた。よって、板厚が変化しても、偏光がビード断面積に与える影響は同様と思われる。

### 3-1-4 ビード傾斜角に及ぼす相対角度 $\phi$ の影響

Fig.3-15 に板厚 0.8mm を用いたときの各相対角度  $\phi$  における溶接速度とビード傾斜角の関係を示す。 $\phi=45^\circ$  のときの溶接部では負方向へのビードの傾斜が確認され、 $\phi=315^\circ$  のとき溶接部では正方向への傾斜が確認された。これより突合せ溶接においても、ビードオンプレート溶接と同様にビードの傾斜現象が確認できた。 $\phi=45^\circ$  及び  $\phi=315^\circ$  では溶接速度 60mm/s からビードの傾斜現象が確認でき、いずれの相対角度についても、溶接速度の増加に伴いビード傾斜角の絶対値が増加する傾向が確認できた。正方向へのビード傾斜角の絶対値は、 $\phi=315^\circ$  で溶接速度 140mm/s のとき最大値  $10.3^\circ$  となり、負方向へのビードの傾斜角の絶対値は、 $\phi=45^\circ$  で溶接速度 160mm/s のとき最大値  $14.1^\circ$  となった。正方向と負方向のビード傾斜角の絶対値で最大値を比較すると、正方向よりも負方向への傾斜の方が約  $4^\circ$  大きい結果となった。これに対し、 $\phi=0^\circ$  及び  $\phi=90^\circ$  での溶接部では、著しいビードの傾斜現象及び、溶接速度の増加に伴うビード傾斜角度の増加は確認できなかった。

これらのビード傾斜現象における傾向は、直線偏光レーザを用いた切断におけるカーブ傾斜現象の傾向と一致しており、切断においても、偏光方向と切断方向の相対角度が  $45^\circ$  となる条件でカーブ傾斜現象が確認され、切断速度の増加に伴いカーブ傾斜角の絶対値が増加する傾向が確認された。また、切断の場合では、正方向と負方向のカーブ傾斜角度の絶対値で最大値を比較すると、正方向よりも負方向への傾き斜が約  $5^\circ$  大きい結果となり、突合せ溶接における

ビードの正方向と負方向への傾斜角度の違いとほとんど一致している。さらに、偏光方向と切断方向が平行及び垂直となる切断では、カーフの著しい傾斜現象は確認されず、切断速度の増加に伴うカーフ傾斜角度の増加も確認されなかった<sup>4)</sup>。よって、切断のカーフ傾斜現象と同様のメカニズムで突合せ溶接部のビード傾斜現象が起きていると考えられる。

Fig.3-16 に板厚 1.5mm を用いたときの各相対角度  $\phi$  におけるビード傾斜角と溶接速度の関係を示す。板厚 1.5mm を用いた場合においても、 $\phi=45^\circ$  のときの溶接部では負方向へのビードの傾斜が確認され、 $\phi=315^\circ$  のときの溶接部では正方向への傾斜が確認された。 $\phi=45^\circ$  及び  $\phi=315^\circ$  では溶接速度 40mm/s からビードの傾斜現象が確認でき、いずれの相対角度についても、溶接速度の増加に伴いビード傾斜角の絶対値が増加する傾向が確認できた。正方向へのビード傾斜角の絶対値は、 $\phi=315^\circ$  で溶接速度 110mm/s のとき最大値  $7.0^\circ$  となり、負方向へのビードの傾斜角度の絶対値は、 $\phi=45^\circ$  で溶接速度 110mm/s のとき最大値  $6.5^\circ$  となった。これより、板厚 1.5mm を用いた場合では、正方向と負方向のビード傾斜角の絶対値において、最大値にほとんど差が見られなかった。また、板厚 1.5mm においても  $\phi=0^\circ$  及び  $\phi=90^\circ$  のときの溶接部では、著しいビードの傾斜現象、及び溶接速度の増加に伴うビード傾斜角の増加は確認できなかった。

板厚の違いによるビード傾斜角の違いについて検討するため、Fig.3-17 に各板厚における  $\phi=45^\circ$  及び  $\phi=315^\circ$  での溶接速度とビードの傾斜角度の関係を示す。これより、溶接速度 100~120mm/s の領域では、板厚の違いによってビード傾斜角にほとんど差が確認できなかった。溶接速度 100~120mm/s の速度域は偏光の影響が突合せ溶接部の溶込形状に顕著に表れる速度域である。そのため、偏光が突合せ溶接部のビード傾斜現象に及ぼす影響は、板厚が変化しても同様であると思われる。

### 3-2 限界溶接速度に及ぼす相対角度 $\phi$ の影響

本研究では溶接長 90mm で実験を行い，溶接開始点から 50mm の位置の断面を観察した．溶接は各条件につき 3 回行い，3 回とも完全溶込みが得られた最大の溶接速度を限界溶接速度とした．

Fig.3-18 に各板厚における，相対角度  $\phi$  と限界溶接速度の関係について示す．これより，板厚 0.8mm の溶接では，相対角度  $\phi$  を変化させることで限界溶接速度に変化が生じている．限界溶接速度は  $\phi = 90^\circ$ ， $315^\circ$  で最小値 80mm/s となり， $\phi = 0^\circ$  で最大値 140mm/s となった．限界溶接速度が最大となる  $\phi = 0^\circ$  の溶接は，限界溶接速度が最小となる  $\phi = 90^\circ$ ， $315^\circ$  の溶接と比較して約 75% 溶接速度が向上した．また， $\phi = 45^\circ$  の溶接では限界溶接速度は 100mm/s となった．これより突合せ溶接においてもビードオンプレート溶接同様，偏光は溶込形状に影響を与えることが分かる．また，限界溶接速度の最小値から最大値への向上率は，直線偏光レーザを用いた切断における限界切断速度の最小値から最大値への向上率と一致している．

しかし，Fig.3-1 に示すように，板厚 0.8mm では  $\phi = 0^\circ$  のときの限界溶接速度が  $\phi = 90^\circ$  及び  $\phi = 315^\circ$  のときの限界溶接速度に比べ約 75% 向上していたにもかかわらず，板厚 1.5mm の溶接の場合では，相対角度の変化による限界溶接速度の変化は確認されなかった．これは 3-1-1 節で述べたように，偏光が突合せ溶接部の溶込み深さに対し顕著に影響を与える溶接速度は 80mm/s 以上であり，母材の板厚が変化しても，偏光が溶込み深さに与える影響は同様であると思われる．よって，板厚 1.5mm の突合せ溶接では，各相対角度において，偏光の影響が顕著に表れる溶接速度域でない溶接速度 40mm/s で限界溶接速度となったため，限界溶接速度の向上が確認できなかったと考えられる．

## 第4章 直線偏光レーザーの特性

第3章より，突合せレーザー溶接部の溶込形状においても偏光の影響が確認できた．この現象にはレーザー光の材料への吸収特性が関係していると考えられる．そこで，本章では直線偏光レーザー光の材料への吸収特性について述べる．

レーザー溶接は，レーザー光を被加工物内部まで伝達し加工するものである．そのため，Fig.4-1(a)に示すように入射角  $i$  のレーザー光  $E$  は加工部の金属面  $M$  において反射するレーザー光  $E'$  と屈折角  $r$  で吸収されるレーザー光  $E''$  とに分かれる<sup>7)</sup>．このとき Snell の法則によって，

$$\sin i = n \sin r \cdots \cdots (1)$$

ここで， $n$  は金属の屈折率で，誘導率  $\epsilon$  の平方根であり，複素数の形になる．

また，Fig.4-1(b)に示すように，直線偏光レーザーが材料に対して斜めに入射するとき，入射面に対して平行な面内で振動する直線偏光を  $p$  偏光，入射面に対して垂直な面内の偏光成分である  $s$  偏光という<sup>8)</sup>．ここで，レーザー光の入射面に平行なベクトルを  $\vec{E}_p, \vec{E}_p'$ ，また垂直なベクトルを  $E_s, E_s'$  とすると，

$$\frac{\vec{E}_p'}{\vec{E}_p} = \frac{\tan(i-r)}{\tan(i+r)}, \quad \frac{\vec{E}_s'}{\vec{E}_s} = -\frac{\sin(i-r)}{\sin(i+r)} \cdots \cdots (2)$$

したがって，入射レーザー光と反射レーザー光の強度の比，すなわち反射率は次のようになる．入射面に対し平行成分の反射率を  $R_p$  とすると

$$R_p = \frac{\tan^2(i-r)}{\tan^2(i+r)} \cdots \cdots (3)$$

入射面に対し垂直成分の反射率を  $R_s$  とすると

$$R_s = \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} \cdots \cdots (4)$$

式(1)及び式(3)，(4)から各偏光成分の反射率が求められる．これらの計算結果から，Olsen は入射角と反射率の関係を Fig.4-2 のように示した<sup>9)</sup>．ここで，試験片は鉄，実験温度は室温，熱源は  $\text{CO}_2$  レーザである．入射角が小さいときには  $R_p$ ， $R_s$  の差はほぼ無いが，入射角が増加するに従って  $R_p$ ， $R_s$  の差は大きくなる．Fig.4-2 に示すレーザー切断時のように試験片表面への入射角がほぼ  $90^\circ$  となるような場合には， $R_p$  と  $R_s$  の差は約 0.8 となり， $R_p$  に比べて  $R_s$  の反射率が非常に高いことが分かる．

また, 試験片表面における平行成分の吸収率を  $Ap$ , 垂直成分の吸収率を  $As$  とすると,

$$Ap = 1 - Rp, \quad As = 1 - Rs \dots \dots \dots (5)$$

となる. 各偏光成分の吸収率の入射角依存性を  $Ap/As$  とすると式(3), (4)及び式(5)から

$$\frac{Ap}{As} = \frac{1}{\cos^2(i-r)} \dots \dots \dots (6)$$

となる.

以上のことから, 金属材料に対する入射角が大きくなるほど,  $Rp$  と  $R_s$  の差が顕著となるので偏光特性の影響が出やすいことになる.

## 第5章 偏光が溶込形状に影響を及ぼすメカニズムに関する考察

第3章のより，突合せレーザー溶接部の溶込形状においても偏光の影響が確認できた．また，第4章にて，直線偏光レーザーが持つ材料への吸収特性について述べた．本章では，それらに基づき偏光が突合せ溶接部の溶込形状に影響を及ぼすメカニズムについて検討した．

### 5-1 溶込み深さに及ぼす偏光の影響

Fig.3-2 及び Fig.3-3 に示したように，偏光方向と溶接方向の相対角度を変化させることで，溶込み深さの変化が確認された．特に板厚 0.8mm では，溶接速度が 160mm/s のとき， $\phi=90^\circ$  のときの溶込み深さが 0.39mm であったのに対し， $\phi=0^\circ$  では 0.71mm の溶込み深さが得られ，85%程溶込み深さが増加していた．第4章で述べたように，直線偏光は p 偏光と s 偏光が存在し，本研究においては， $\phi=0^\circ$  のとき p 偏光が溶接方向と一致し， $\phi=90^\circ$  のとき s 偏光が溶接方向と一致する．Fig.5-1 に直線偏光レーザーを用いた溶接におけるレーザー照射位置での試験片表面のエネルギー吸収の模式図を示す<sup>1)</sup>．Fig.5-1 中に W で示される矢印は溶接方向を，P で示される矢印は偏光方向を示している．Fig.5-1(a)は偏光方向と溶接方向が平行，つまり  $\phi=0^\circ$  の溶接であり，溶接方向には p 偏光が作用する．これに対して，Fig.5-1(c)は偏光方向と溶接方向が垂直，つまり  $\phi=90^\circ$  の溶接であり，溶接方向には s 偏光が作用する．Fig.4-2 より，p 偏光はエネルギー吸収率が高く，これに対して s 偏光は吸収率が低い，そのため， $\phi=0^\circ$  ではキーホール前方へエネルギー吸収が起こりやすく， $\phi=90^\circ$  ではキーホール前方へエネルギー吸収が起こりにくい．よって， $\phi=0^\circ$  ではキーホール前方にレーザー加熱が集中し，側方への熱の拡散が減少することで，他の相対角度に比べ深い溶込みが形成され， $\phi=90^\circ$  ではキーホール側方が強く加熱されるため，側方に熱が拡散し溶込みが浅くなったと考えられる．これらの現象のを図示したものを Fig.5-2 に示す<sup>2)</sup>．また，Fig.3-2 に示したように，溶込み深さに偏光の影響が顕著に確認できる条件では，偏光方向と溶接方向の成す角度が  $45^\circ$  となる  $\phi=45^\circ$ ， $315^\circ$  のとき，その溶込み深さは  $\phi=0^\circ$  と  $\phi=90^\circ$  のときの間の値となっ



ていた. Fig.5-1(b)に示すように,  $\phi = 45^\circ$ ,  $315^\circ$  の溶接のとき, キーホール前方には p 偏光が溶接方向と  $45^\circ$  の角度を成す方向へ作用する. そのため, 溶接方向に対し  $45^\circ$  の角度を成す方向へレーザ加熱が集中することで,  $\phi = 45^\circ$ ,  $315^\circ$  のときの溶込み深さは  $\phi = 0^\circ$  と  $\phi = 90^\circ$  のときの間の値となったと考えられる.

## 5-2 ビード幅に及ぼす偏光の影響

Fig.3-7 及び Fig.3-8 に示したように,  $\phi = 0^\circ$  と  $\phi = 90^\circ$  では相対角度の違いにより, 表面のビード幅に顕著な変化が確認された. 特に, 板厚 0.8mm では, 溶接速度 100mm/s において,  $\phi = 0^\circ$  のときの表面のビード幅が 0.45mm であったのに対し,  $\phi = 90^\circ$  では 0.57mm となり, 27%程表面ビード幅が増加していた. Fig.5-1(a)に示したように,  $\phi = 0^\circ$  では溶接方向の側方に s 偏光が作用する. それに対し,  $\phi = 90^\circ$  では Fig.5-1(c)に示したように, 溶接方向の側方に p 偏光が作用する. p 偏光はエネルギー吸収率が高く, s 偏光は吸収率が低いため,  $\phi = 0^\circ$  ではキーホール側方への熱の拡散が少なく狭いビード幅が形成され, 一方,  $\phi = 90^\circ$  ではキーホール側方が強く加熱され, 側方へ熱が拡散することで広いビード幅が形成されたと考えられる.

## 5-3 ビード傾斜現象に及ぼす偏光の影響

Fig.3-16 及び Fig.3-17 に示したように,  $\phi = 45^\circ$  では負方向へのビードの傾斜が確認され,  $\phi = 315^\circ$  では正方向への傾斜が確認された. ビードの傾斜が確認されたこれらの相対角度は, 偏光方向と  $45^\circ$  の角度を成す方向への溶接である.

この現象を説明するため, Fig.5-3 にビード傾斜現象を図示する. Fig.5-3(a)は偏光方向が溶接方向に対して  $45^\circ$  傾いた方向に作用している溶接, つまり  $\phi = 315^\circ$ での溶接を表している. (a)は溶接方向と偏光方向の関係を上から見た状態を, (b)はキーホール内でのレーザビームの反射状態を表している. レーザ溶接ではレーザ光が溶接中に形成されるキーホール内に入射し, その中で多重反射することでレーザエネルギーが母材に吸収され, 深い溶込みを得ることがで

きる。また、直線偏光レーザーでは、その偏光方向にエネルギー吸収率の高い p 偏光が、垂直方向にエネルギー吸収率の低い s 偏光が存在する。このとき、Fig.5-3(b) に示すように、キーホール壁面の A 点では p 偏光、B 点では s 偏光となる。よって A 点では p 偏光がほぼ反射されず溶融池の右側に吸収され、反射する  $R_p$  のレーザー強度は弱くなり、A'点でのレーザー加熱が弱くなる。一方、B 点では s 偏光がほぼ吸収されず、 $R_s$  として反射され、B'を強く加熱する。よって、キーホール内の A 点は p 偏光により高温になることからレーザー光を吸収しやすい状態となり、B 点でほぼ吸収されず反射された s 偏光が、レーザー光を吸収しやすい状態となったキーホール底部の右壁に入射することで、傾斜が形成されたと考えられる。

#### 5-4 直線偏光レーザーの溶接部の溶込形状に与える溶接速度の影響

突合せレーザー溶接部の溶込形状に及ぼす偏光の影響は、溶接速度が比較的低速である 40~60mm/s においては小さかったが、溶接速度の増加に伴いその影響は顕著に現れた。そのため、溶込形状に及ぼす偏光のメカニズムに溶接速度が大きく影響をしていると考えられる。そこで、レーザービームがキーホール前壁に入射する様子を図示した Fig.5-4 を用い、溶接速度の影響について考察する。レーザー溶接ではその高いエネルギー密度からキーホールが形成される。5-1 節及び 5-3 節で述べたように、偏光が突合せ溶接部の溶込形状に与える影響は、相対角度を変化させることで、キーホール前壁に p 偏光及び s 偏光が作用する方向が変化することにより現れると考えられる。また、p 偏光と s 偏光の吸収率の差は入射角が小さいときにわずかであるが、入射角が大きくなることでその差は増大する。そのため、偏光の影響が現れる条件には、レーザー光の入射角が大きいという条件が必要である。レーザー溶接中はレーザー光の高いパワー密度によりキーホールが形成され、レーザーの照射方向に対し、接速度が比較的遅い条件では、レーザー光はキーホール内に入り、その底部に照射される。このとき、キーホール底部に対してレーザー光は低い入射角で照射されるため、p 偏光と s 偏光の吸収率の差が小さい、一方溶接速度が速い条件では、Fig.5-4(b)に示されるように、レーザー光はキーホール上部の前壁に照射される。このとき、レーザー

光はキーホールの前壁に大きい入射角で照射される<sup>10)</sup>。そのため、p 偏光と s 偏光の吸収率に差が生じ、キーホール内の場所によってエネルギー吸収に差が生じ、溶込形状が大きく変化したと考えられる。

また、偏光が溶込形状に与える影響は溶接速度が増加することで顕著になった。これは、p 偏光及び s 偏光の吸収率の温度依存性が原因と考えられる、Fig.5-5 に試料の温度を変化させた際の直線偏光ビームの入射角と反射率の関係を示す<sup>10)</sup>。これより、p 偏光 s 偏光共に試料表面温度が低下するにつれて吸収率は低下し反射率が増加している。高速度域での溶接では入熱が減少するため、溶接速度が比較的低い条件よりキーホール内の温度が低下する。これより、レーザーの反射率の高い s 偏光の反射はより大きくなるが、p 偏光が作用する場所ではその高いエネルギー吸収率により比較的溫度は高い状態となり、反射されるレーザー光を吸収しやすい状態となる。よって、溶接速度の増加に伴い、偏光が溶込形状に与える影響が顕著になったと考えられる。

## 第6章 結言

偏光方向と溶接方向の相対角度を変化させることにより，突合せレーザ溶接部の溶込形状に及ぼす偏光の影響を検討した結果，以下の結論を得た．

- 1) 板厚 0.8mm の突合せレーザ溶接では，偏光方向と溶接方向が平行のとき，他の相対角度により速い溶接速度で完全溶込みが得られ，限界溶接速度 140mm/s を得た．板厚 1.5mm の突合せ溶接では，相対角度の変化による限界溶接速度の変化は確認できなかった．
- 2) 偏光方向と溶接方向が平行のとき，溶接速度 80~160mm/s において他の相対角度より溶込みが深くなり，偏光方向と溶接方向が垂直のときと比べると最大で 85% 程溶込み深さが増加した．
- 3) 偏光方向と溶接方向が垂直のとき，溶接速度 100~120mm/s において他の相対角度より広いビード幅が得られ，偏光方向と溶接方向が平行のときと比べると最大で 27% 程ビード幅が増加した．
- 4) 偏光方向と溶接方向が平行のとき，溶接速度 80~160mm/s において他の相対角度より高いアスペクト比が得られ，偏光方向と溶接方向が垂直のときと比べると最大で約 2 倍のアスペクト比が得られた．
- 5) 偏光方向と溶接方向が平行のとき，溶接速度 140~160mm/s において他の相対角度より広いビード断面積が得られ，偏光方向と溶接方向が垂直のときと比べると最大で 67% 程ビード断面積が増加した．
- 6) 偏光方向と溶接方向の成す角が 45° となる突合せ溶接では，ビードの傾斜現象が確認でき，その傾斜角は溶接速度の増加に伴い増加し，最大で 14.1° となった．また，偏光方向と溶接方向が平行または垂直のときビードの傾斜現象は確認できなかった．

- 7) 偏光が突合せレーザー溶接部の溶込形状に及ぼす影響は，母材の板厚に依存しない．

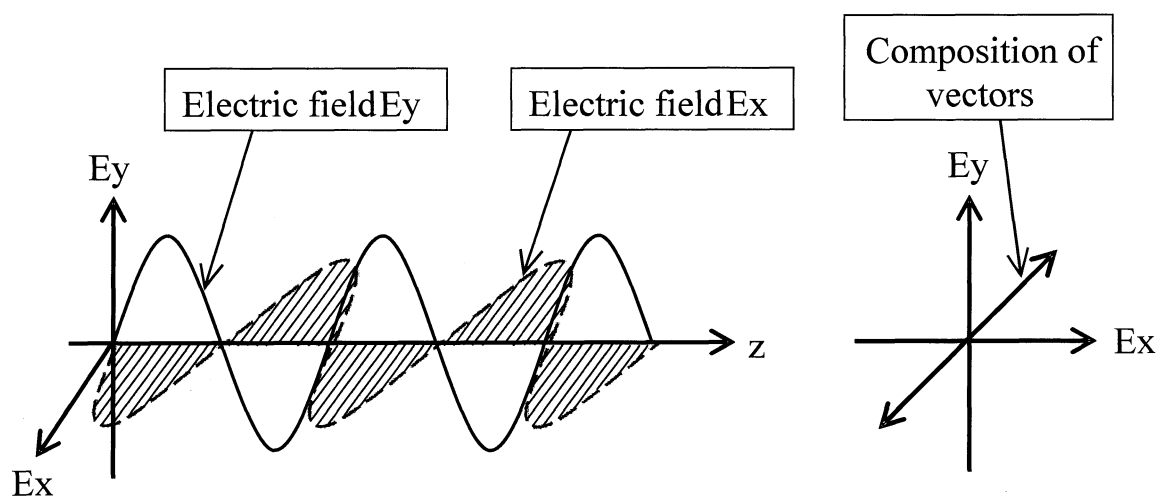
## 参考文献

- 1) 新井 武二, 丸善株式会社: レーザ加工の基礎工学
- 2) 新井 武二, マシニスト出版: レーザ溶接加工  
(レーザー加工入門シリーズ)
- 3) 前川 晃, Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society  
of Japan: ラジアル偏光レーザービームの生成と加速器応用  
33, (2008-8), 945-947
- 4) 美馬 貴仁, アシストガスを用いないレーザー切断における  
溝傾斜現象に関する検討 平成21年度 修士論文
- 5) 佐藤 俊一, 溶接学会全国大会講演概要: CO<sub>2</sub>レーザービームの偏光が  
アルミニウム合金の溶融特性に与える影響 第58集, (1996-4), 210-211
- 6) 森 智哉, 溶接学会全国大会講演概要: レーザ溶接部の溶込形状に及ぼす  
偏光の影響 第91集, (2012-9), 38-39
- 7) 金岡 優, 日本機械学会論文集: レーザ切断精度に及ぼす偏光度の影響  
57巻544号, C編(1991-12), 257-261
- 8) 新井 武二, マシニスト出版: レーザー切断加工  
(レーザー加工入門シリーズ)
- 9) Olsen.F.O., DVS-berichte: Cutting with polarized laser beams  
DVS-berichte, 63 (1980), 197
- 10) 片山 聖二, 社団法人 日本溶接協会: 溶接接合教室, 41-54

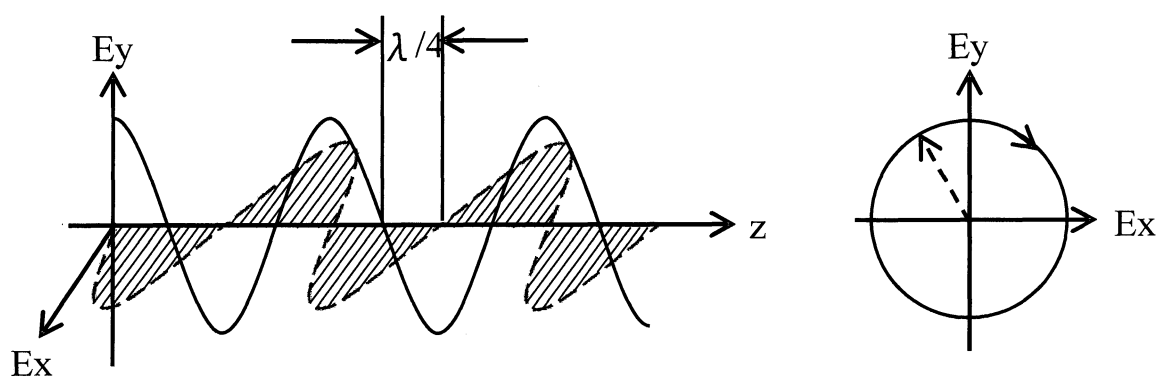
## 謝 辞

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大学院工学研究科 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実習工場の職員の方々と材料機能設計研究室の学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．



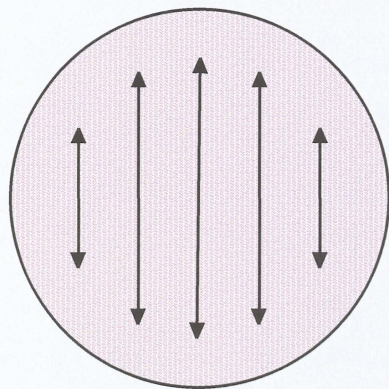
(a) Linear polarization



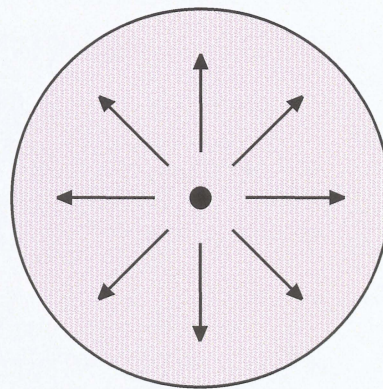
(b) Circular polarization

Fig.1-1 Electric field vector of linear polarization and circular polarization

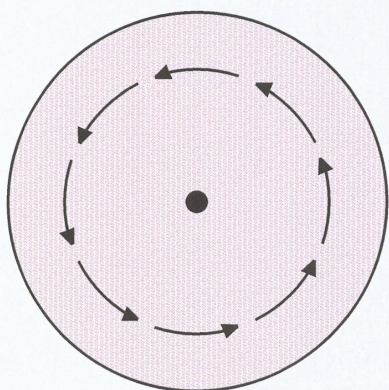




(a) Linear polarization



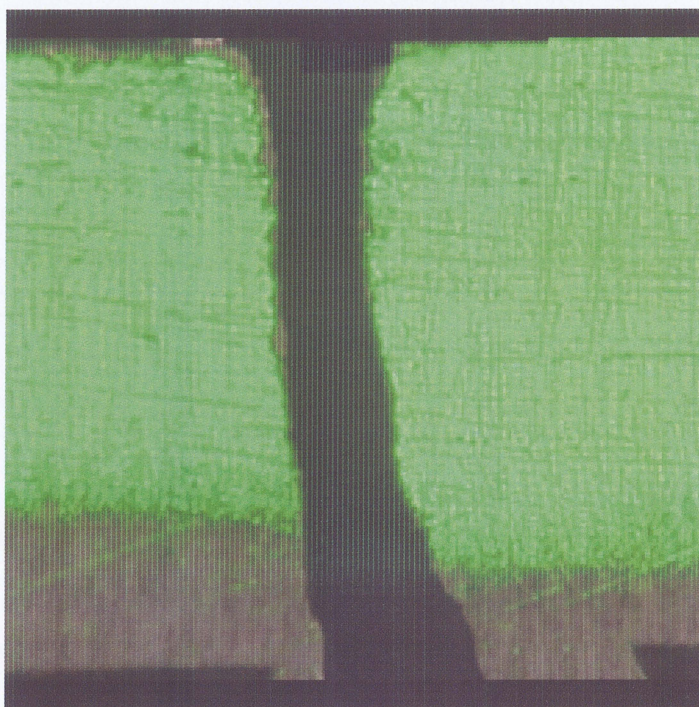
(b) Radial polarization



(c) azimuth polarization

Fig.1-2 Schematic diagram of polarization state of linear polarization , radial polarization and azimuth polarization





200  $\mu$  m

Fig.1-3 Cross-section of slanted kerf in laser cutting  
by linear polarized laser

Table 2-1 Chemical compositions of material used

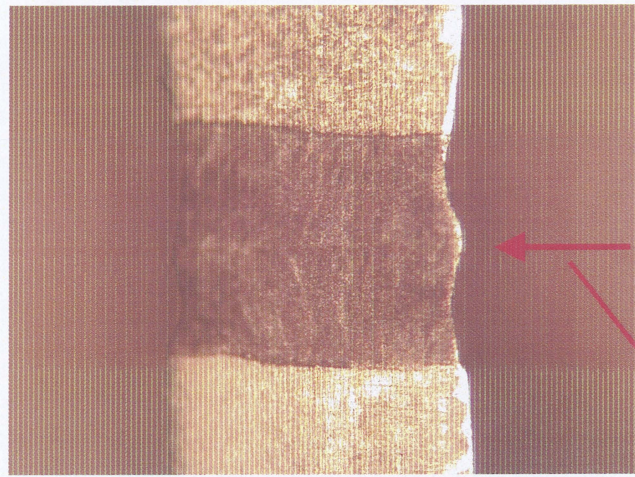
(mass %)

| Material | C           | S i         | M n         | P            | S            | N i        | C r         |
|----------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|------------|-------------|
| SUS304   | $\leq 0.08$ | $\leq 1.00$ | $\leq 2.00$ | $\leq 0.045$ | $\leq 0.030$ | 8.00~10.50 | 18.00~20.00 |

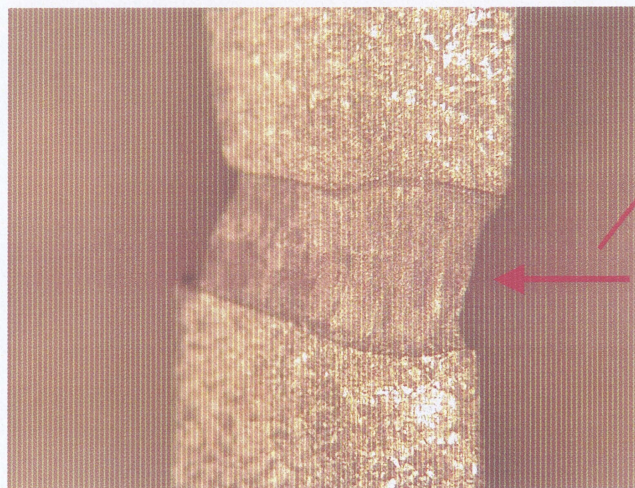
Table 2-2 Thermophysical properties of SUS304

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





(a) Welding speed 40mm/s



(b) Welding speed 80mm/s



(c) Specimen

Laser beam

0.5mm

Fig.2-1 Cross-section of weld beads and specimen



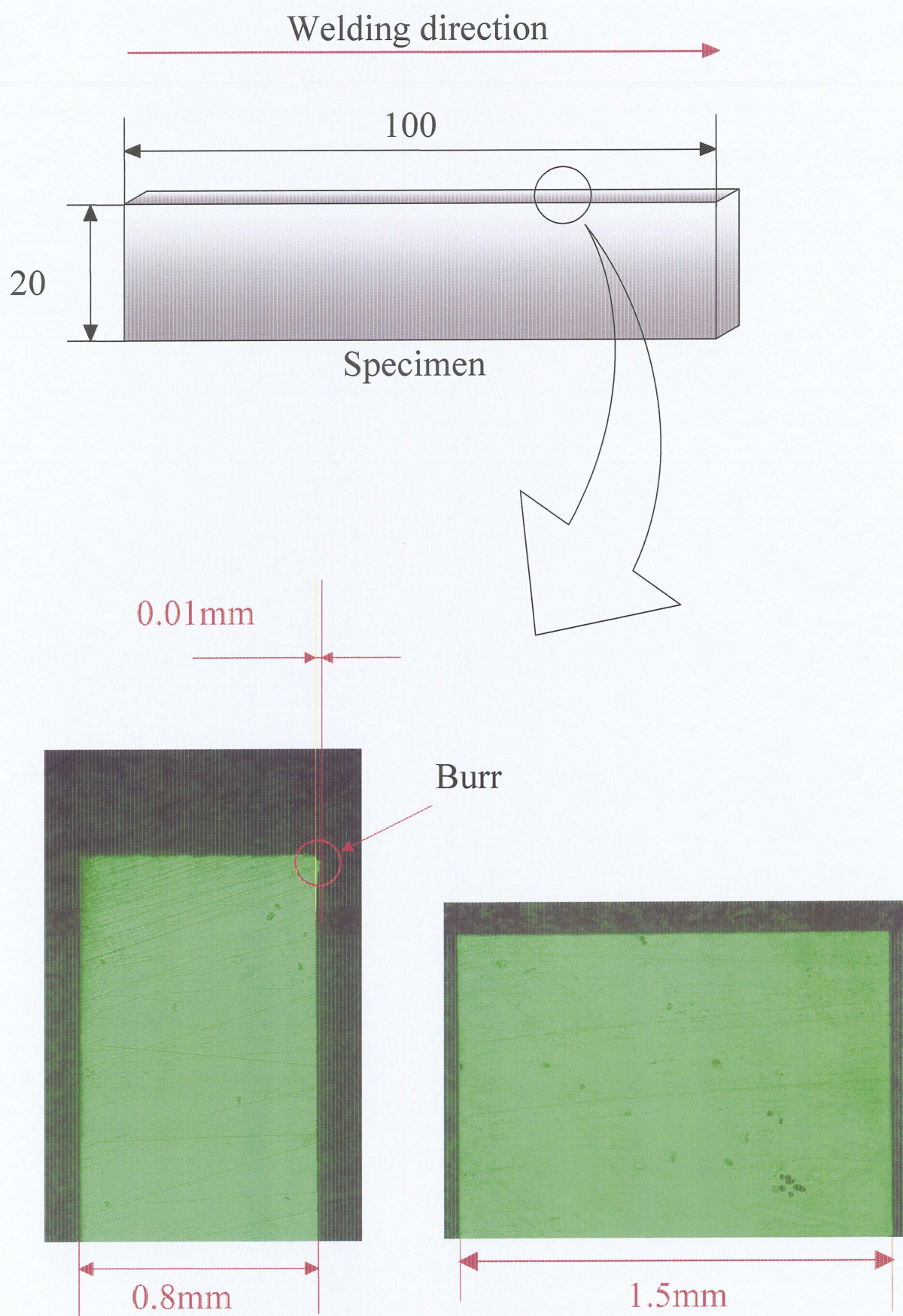


Fig.2-2 Cross-section of materials used



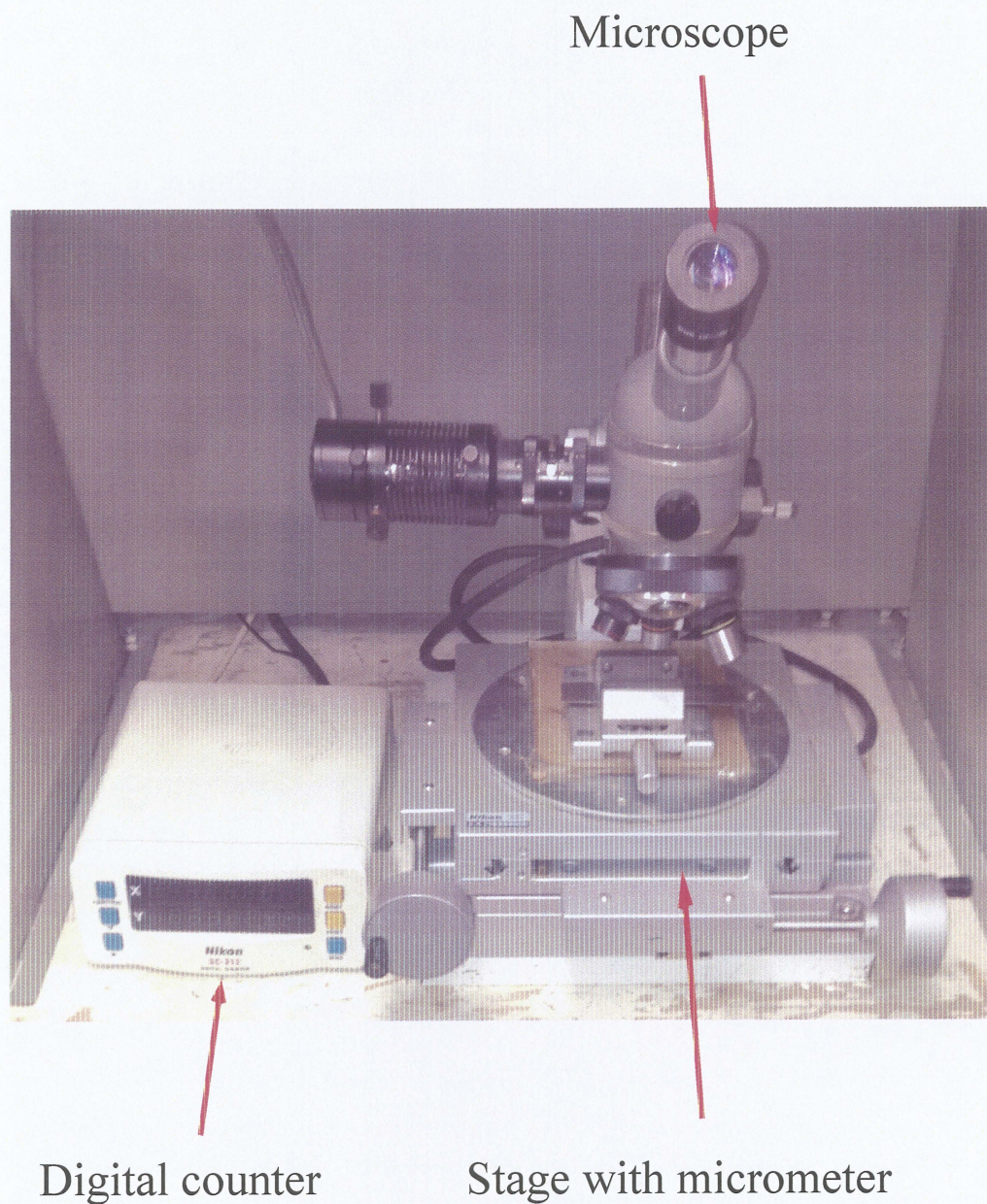


Fig.2-3 Appearance of measuring device



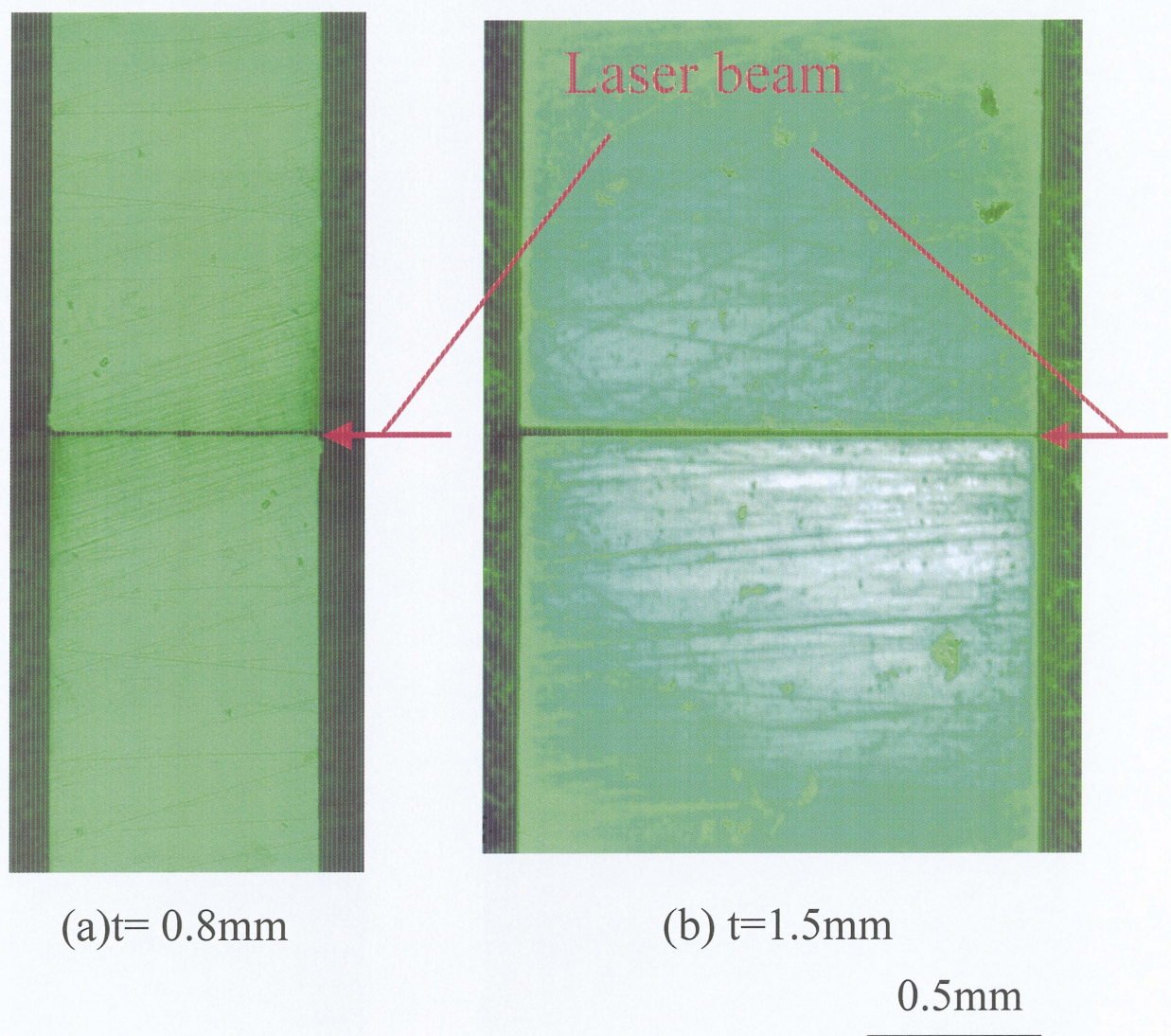


Fig.2-4 Cross-section of butt joints



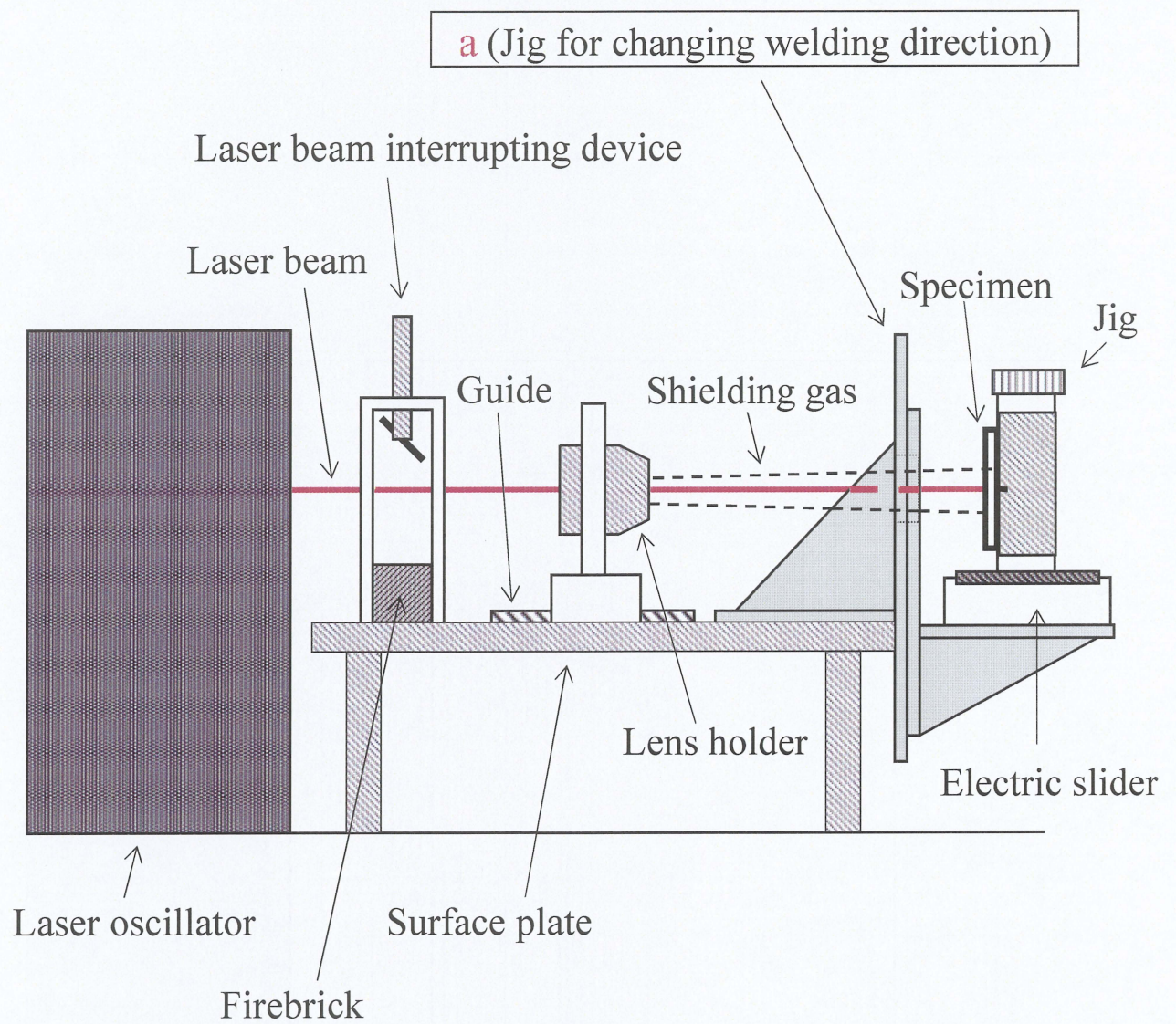
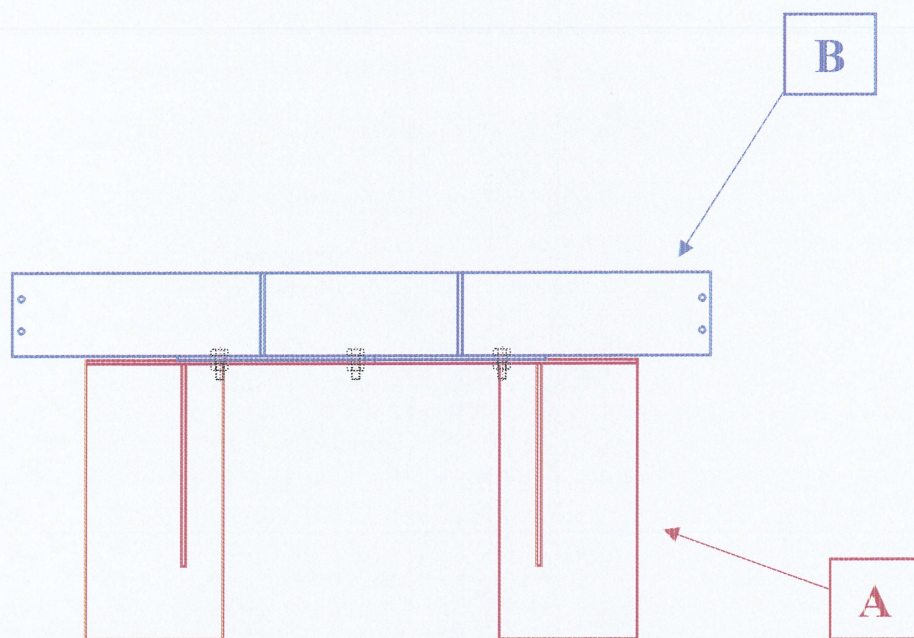
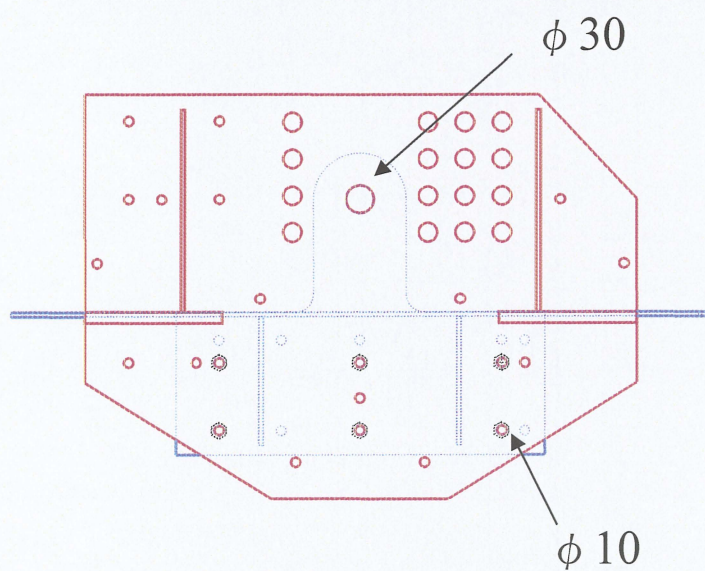


Fig.2-5 Schematic diagram of laser welding equipment

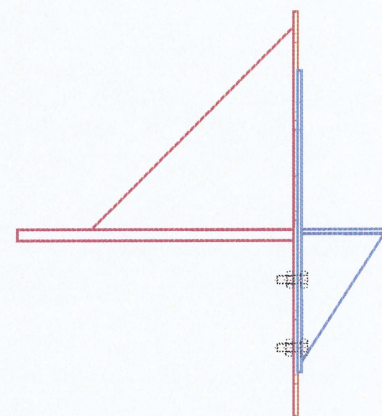




(a) Top view



(b) Front view



(c) Side view

Fig.2-6 Schematic drawing of jig for changing welding direction



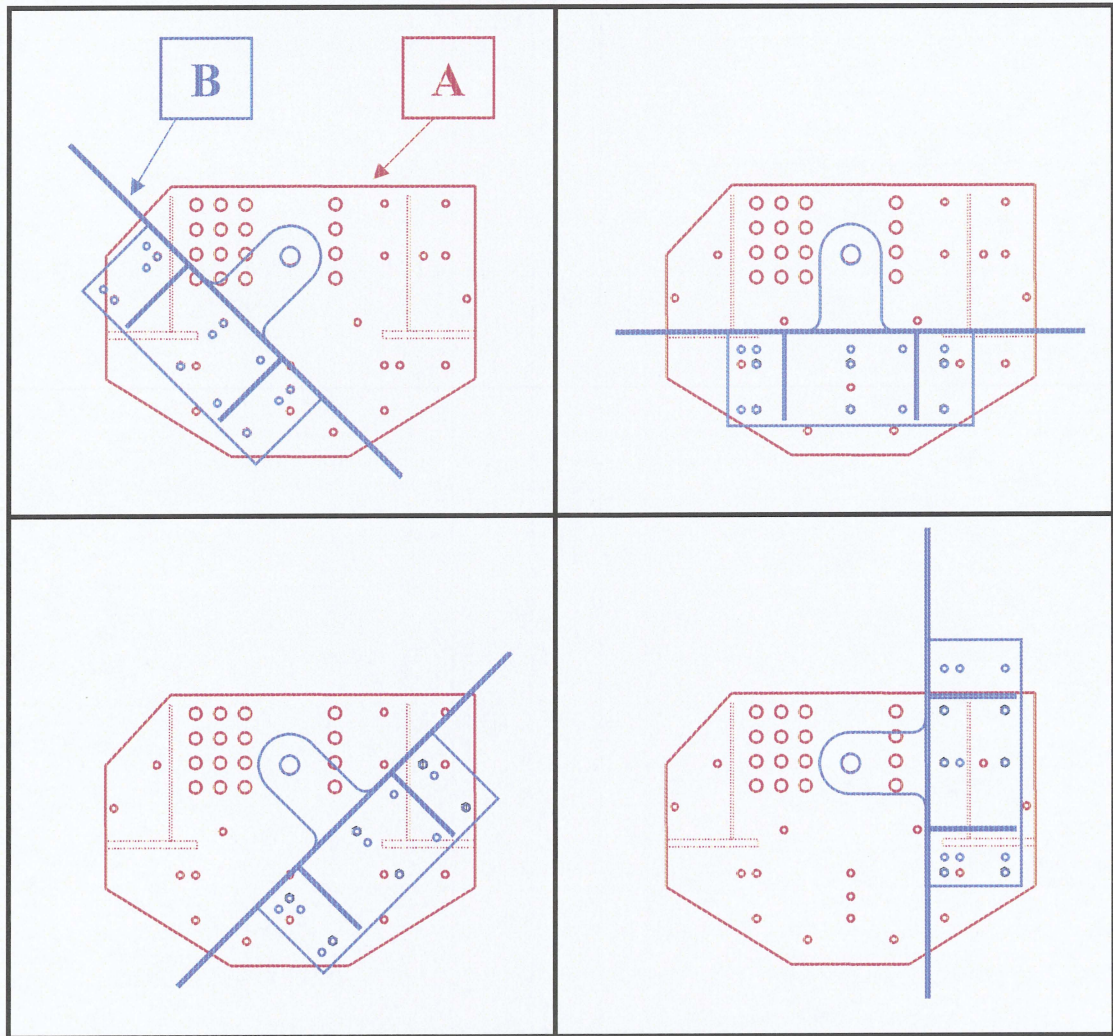
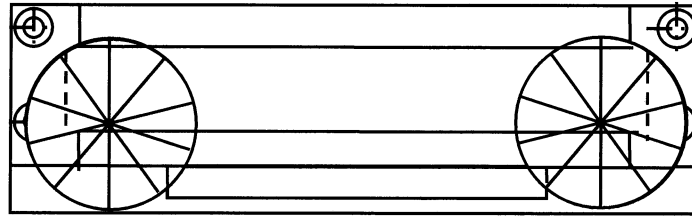
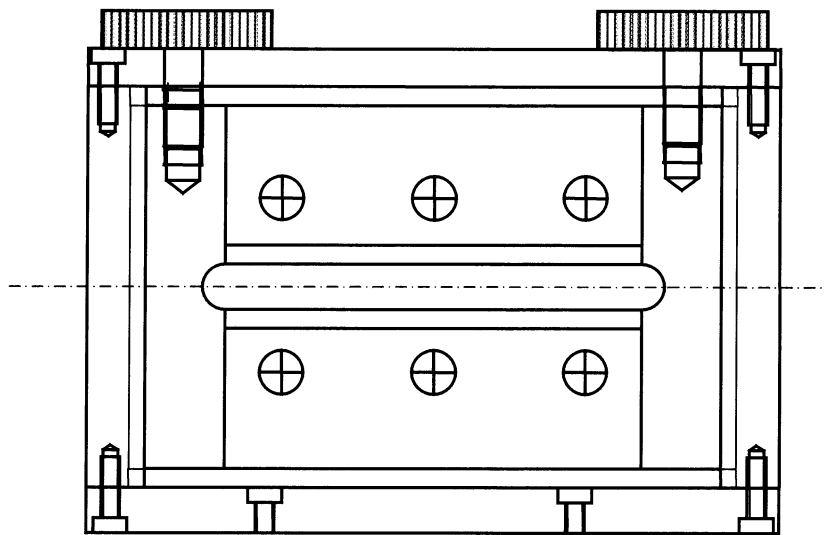


Fig.2-7 Structure of jig for changing welding direction



(a) Top view



(b) Front view

Fig.2-8 Schematic drawing of jig for laser butt welding



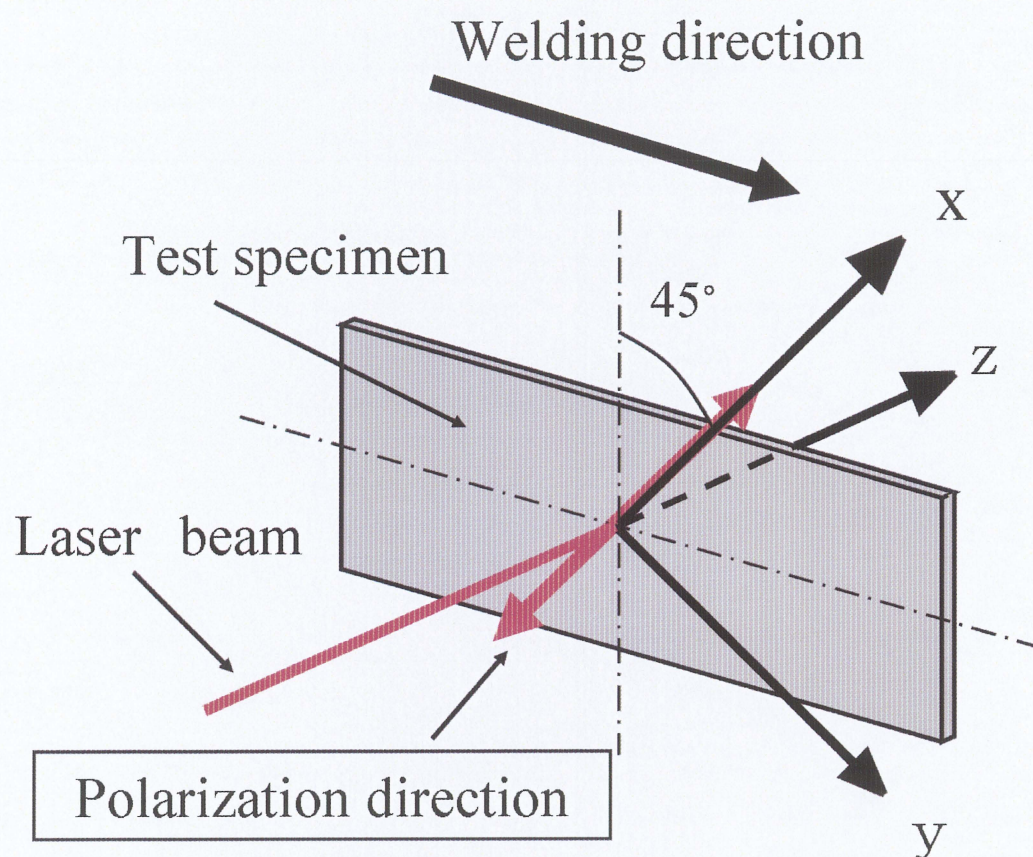


Fig.2-9 Schematic diagram of polarized direction of laser and xyz coordinate system



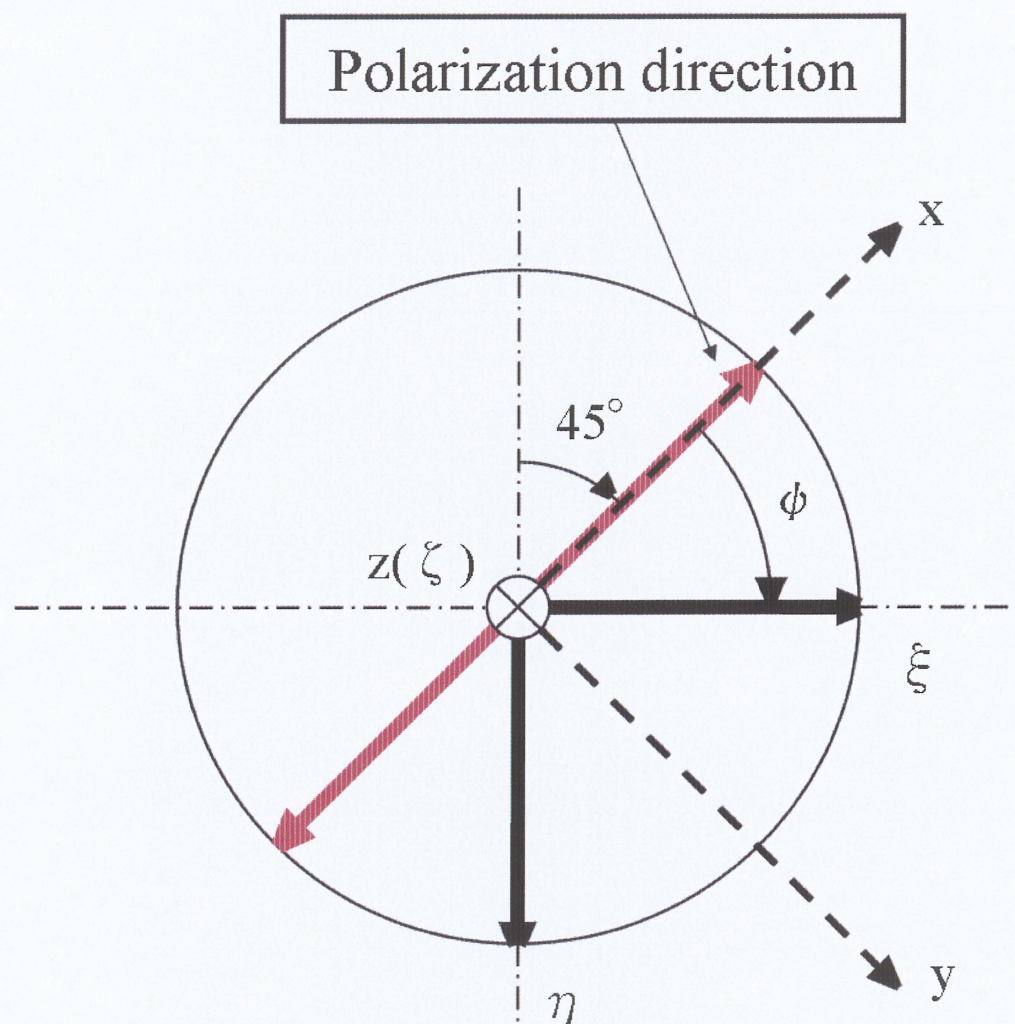
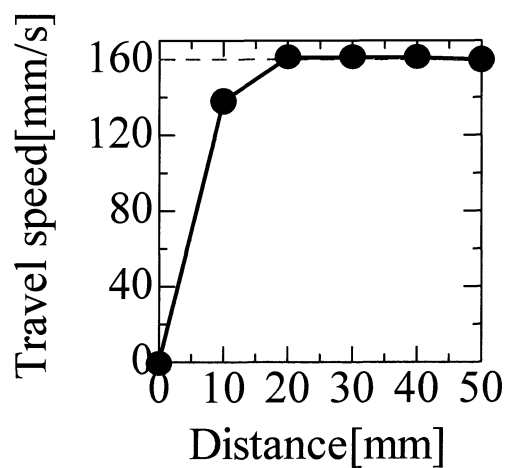
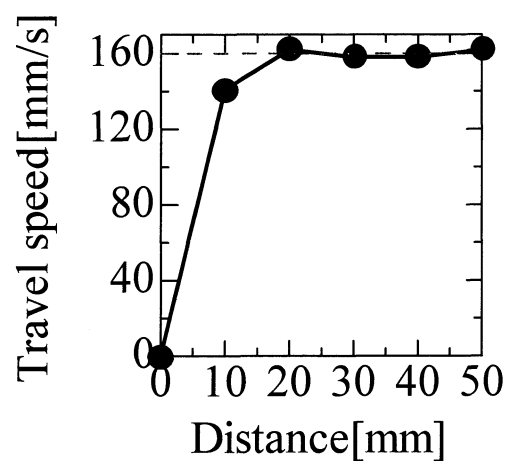


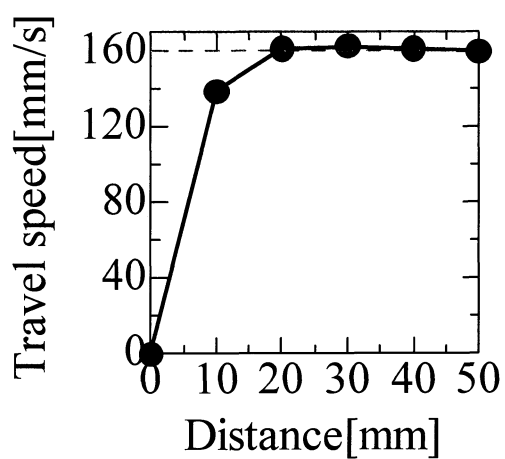
Fig.2-10 Schematic diagram of relative angle  $\phi$  and  $\xi \eta \zeta$  coordinate system



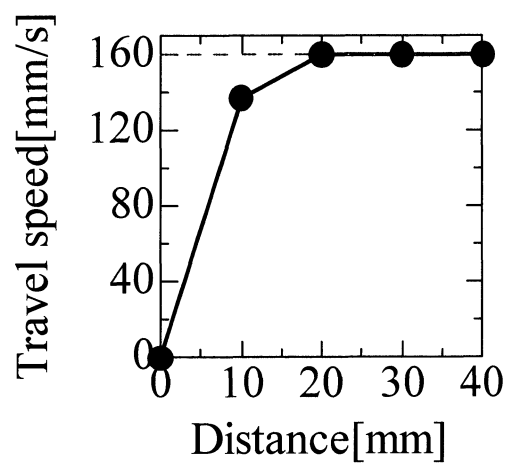
(a)  $\phi = 0^\circ$



(b)  $\phi = 45^\circ$



(c)  $\phi = 90^\circ$



(d)  $\phi = 315^\circ$

Fig.2-11 Verification of travel speed of jig for different relative angle  $\phi$



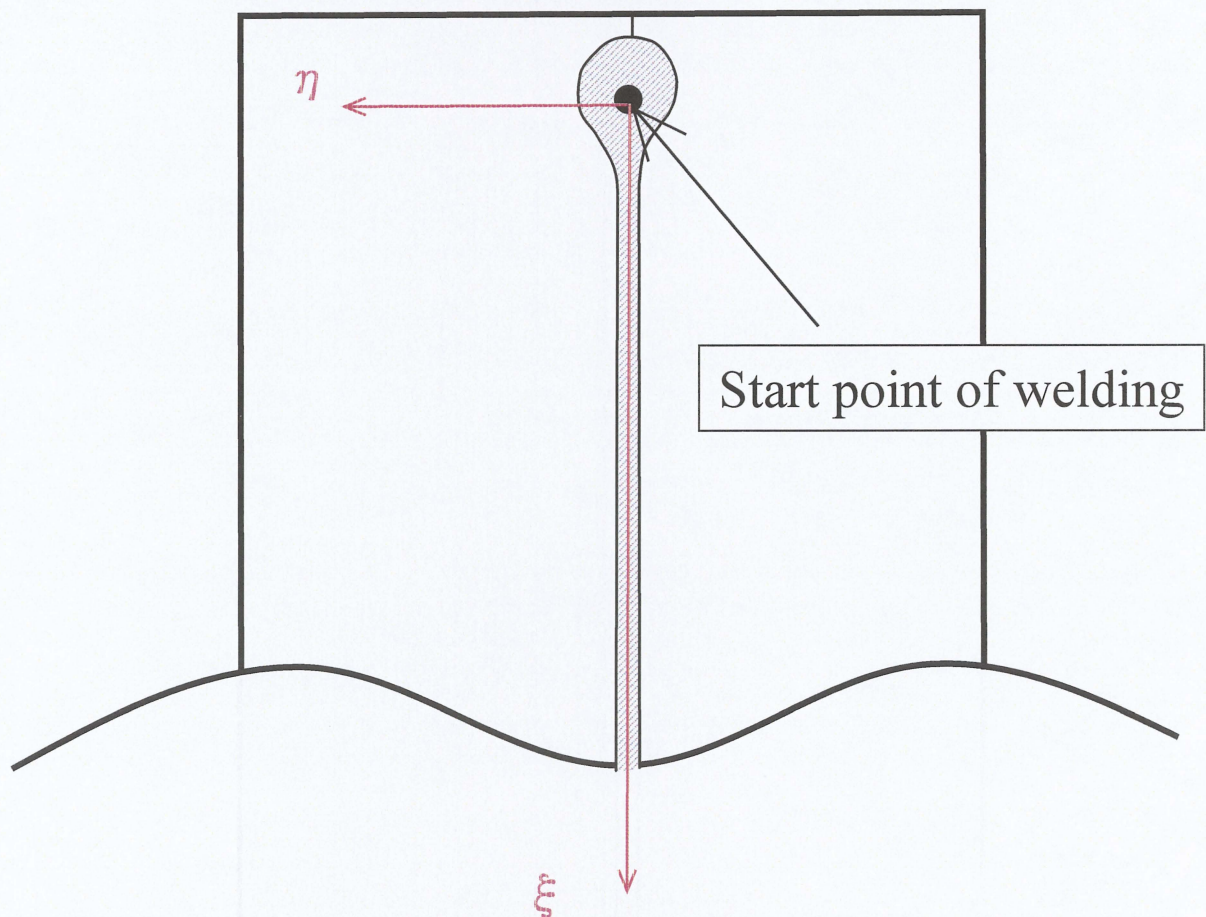
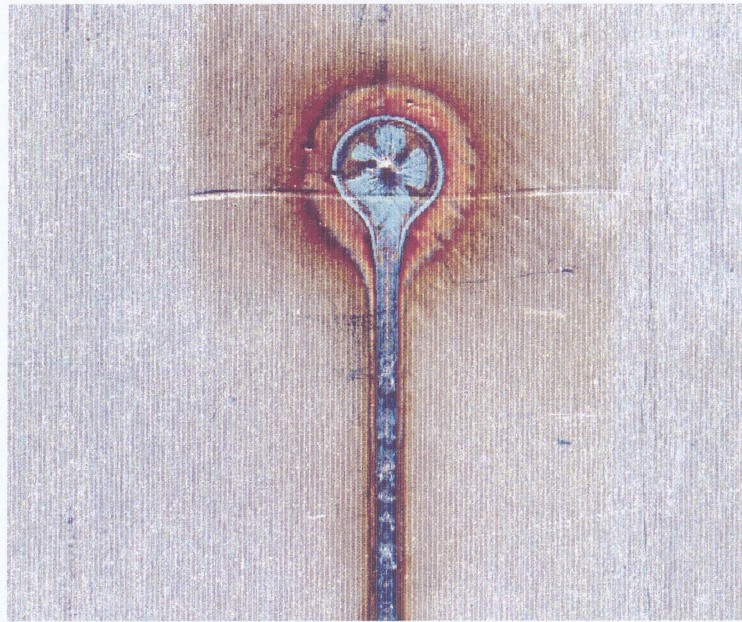


Fig.2-12 Schematic drawing of start point of welding



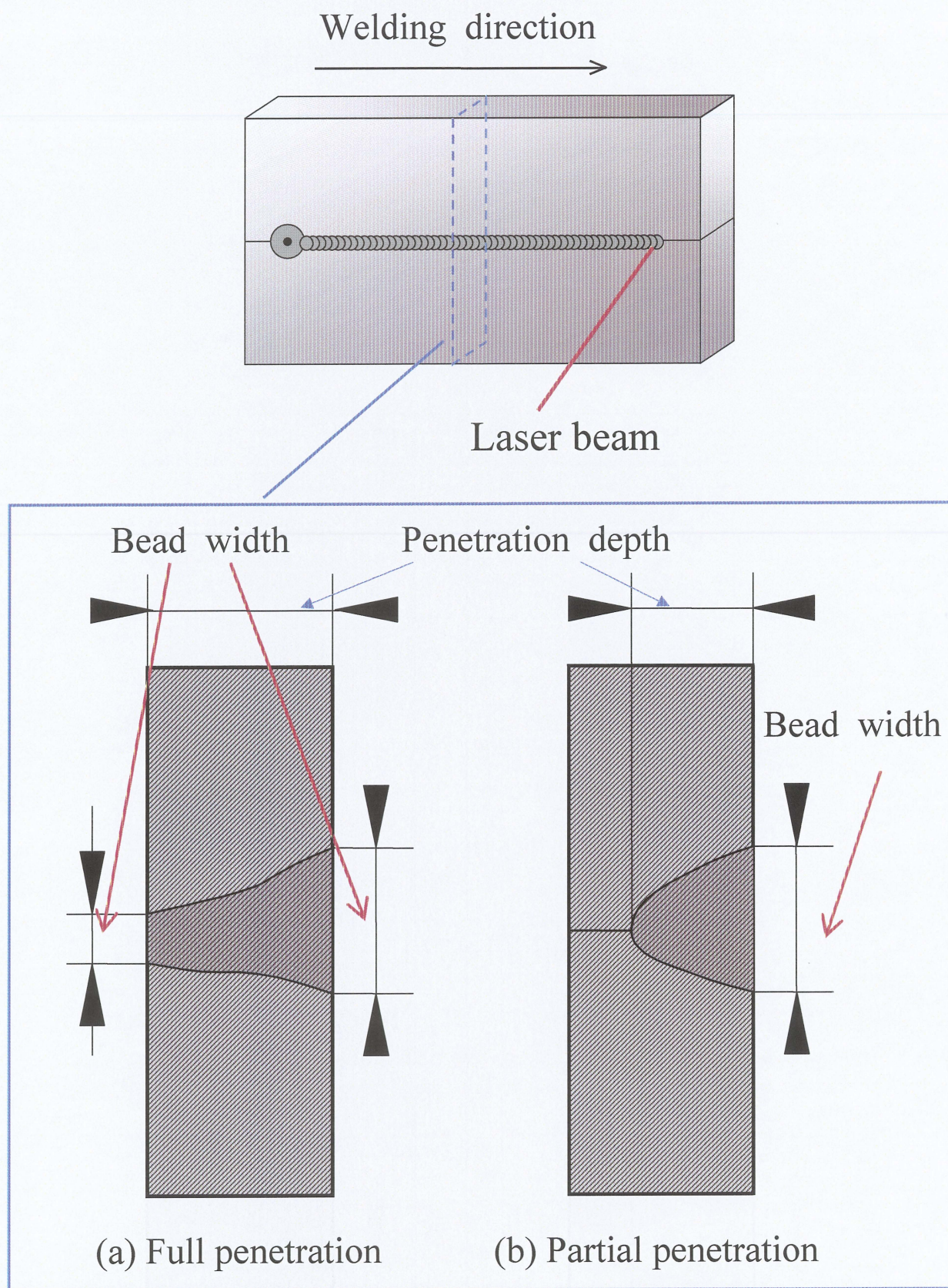
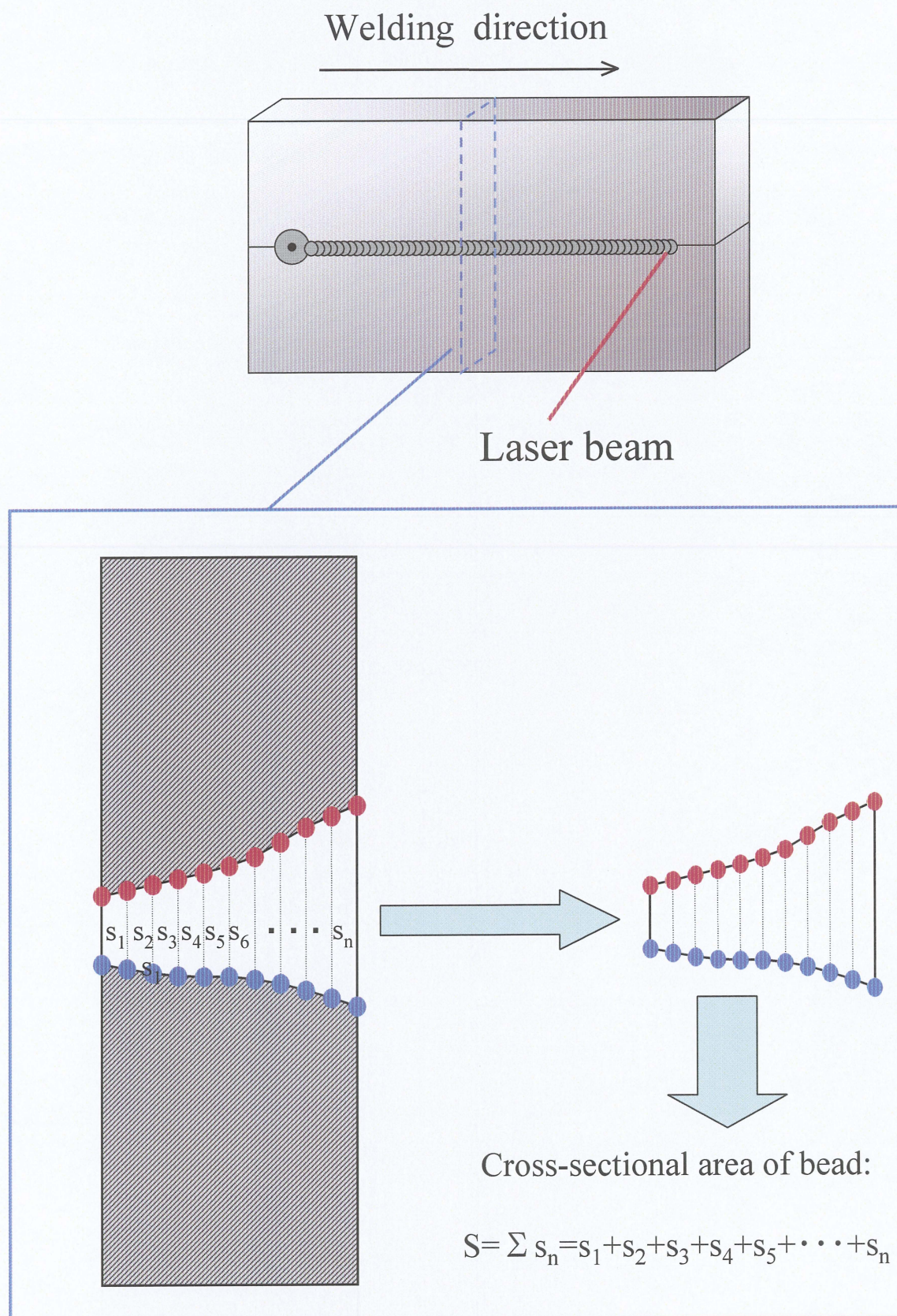


Fig.2-13 Schematic diagram of penetration depth and bead width





(a) Full penetration

Fig.2-14 Schematic diagram of cross-sectional area of bead



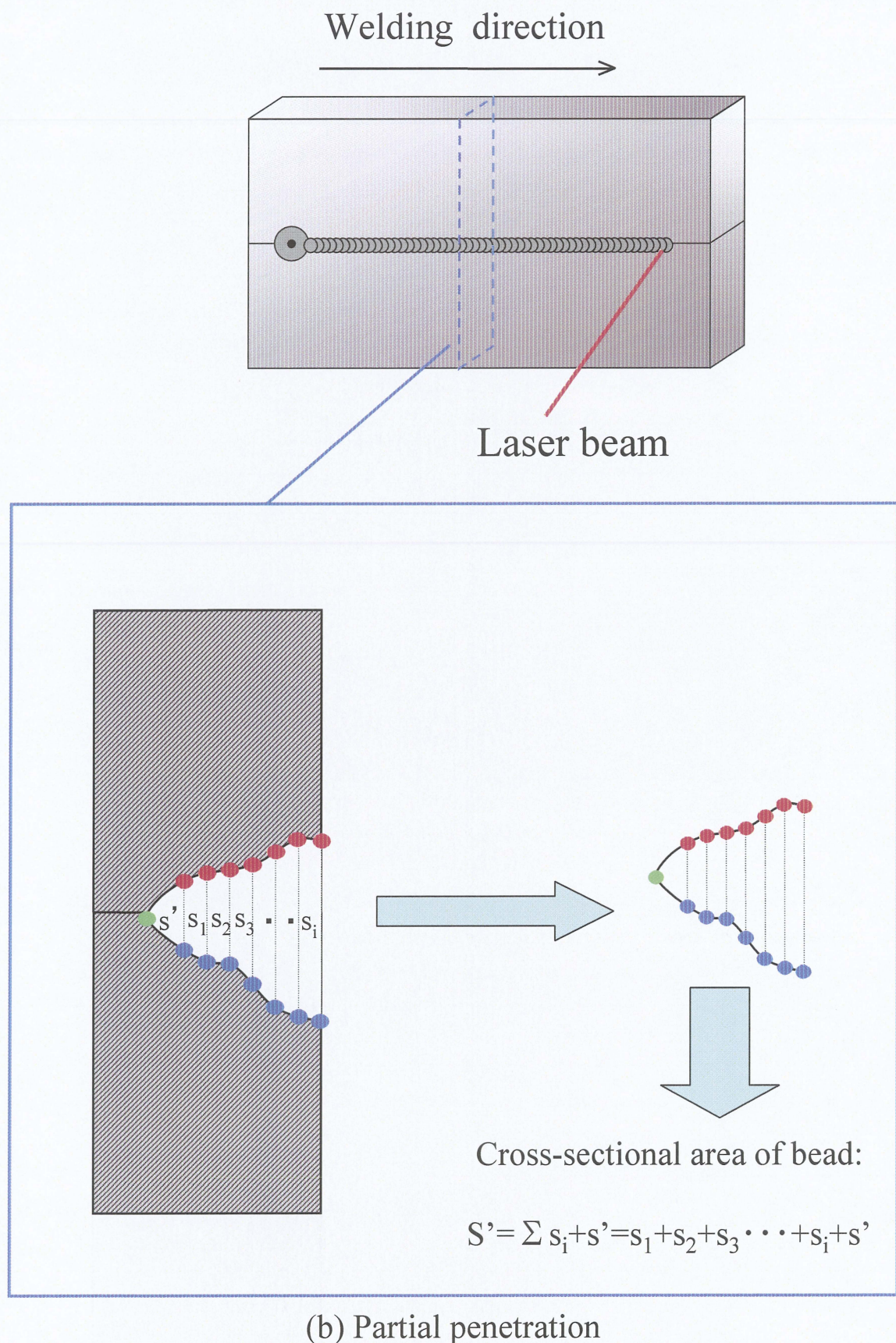


Fig.2-14 Schematic diagram of cross-sectional area of bead



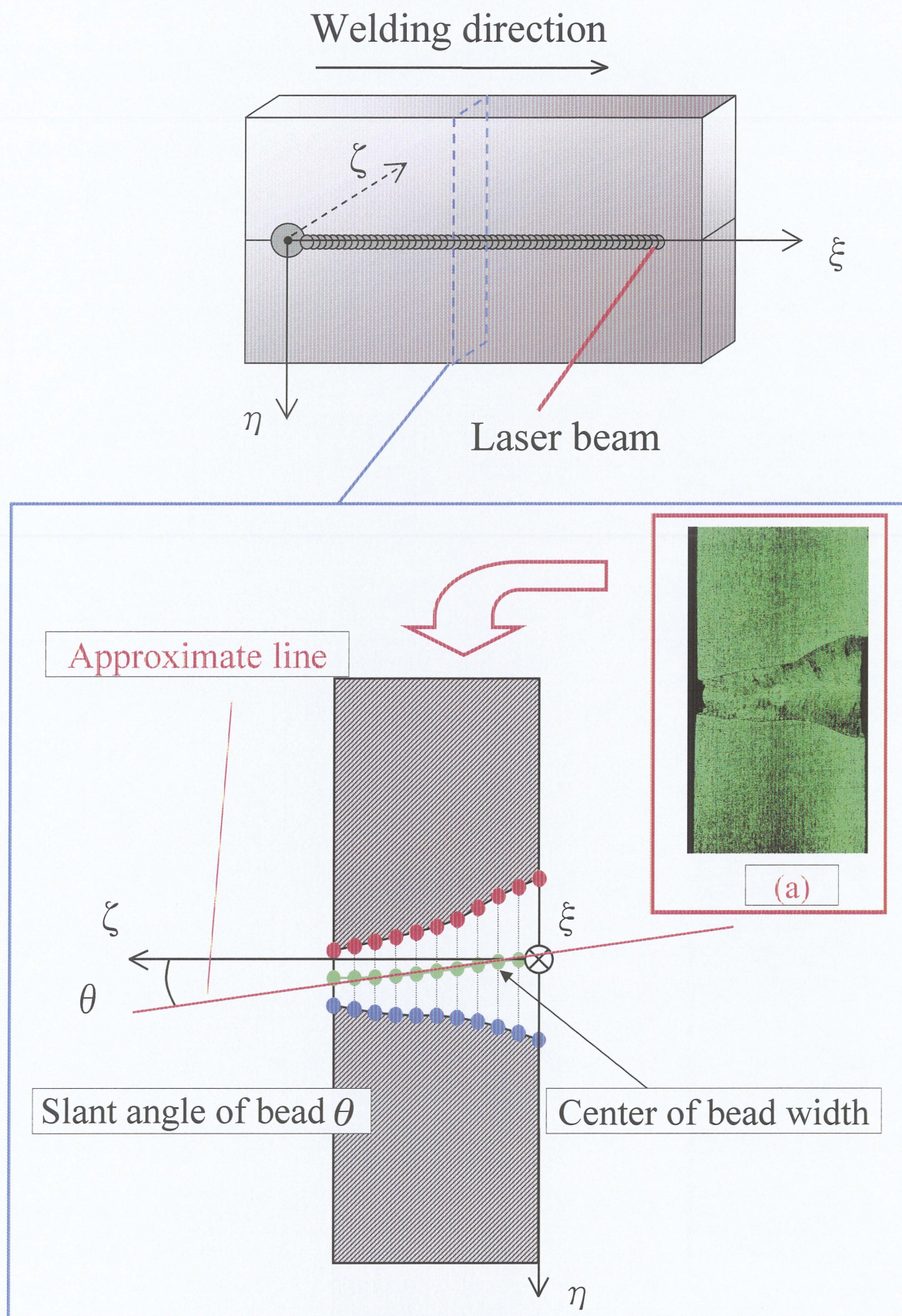


Fig.2-15 Definition of slant angle of bead  $\theta$



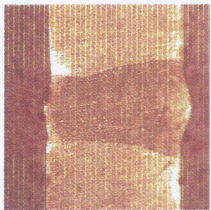
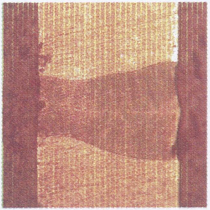
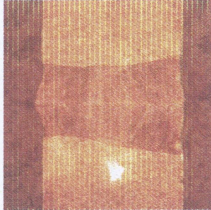
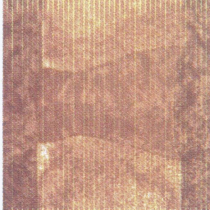
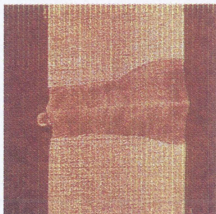
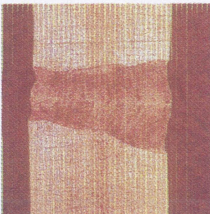
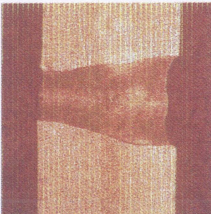
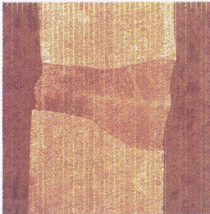
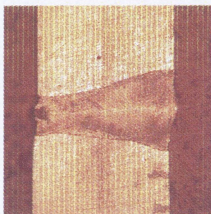
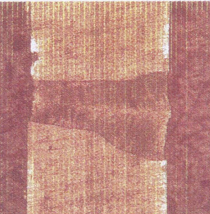
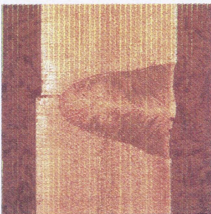
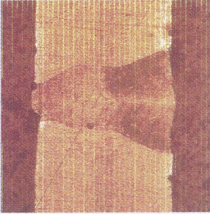
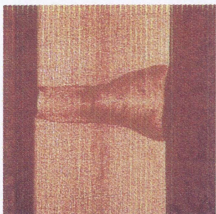
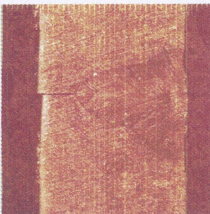
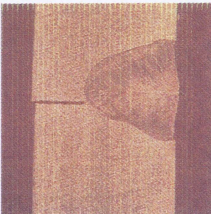
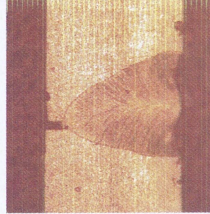
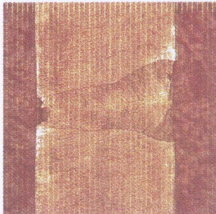
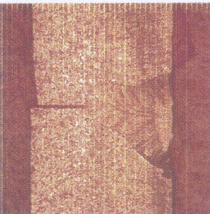
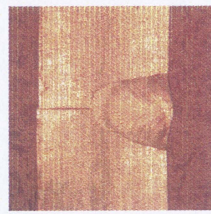
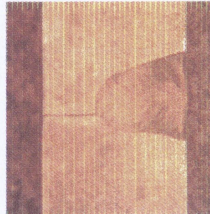
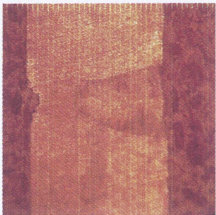
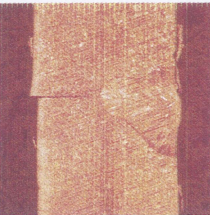
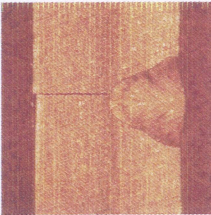
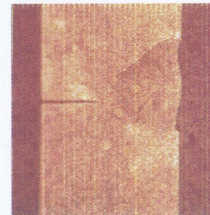
| Welding speed<br>(mm/sec) | Relative angle $\phi$ (deg.)  |   |  |   |
|---------------------------|---|---|--|---|
|                           | 0   | 45  | 90   | <u>0.5mm</u><br>315   |
| 60                        |    |    |    |    |
| 80                        |    |    |    |    |
| 100                       |   |   |   |   |
| 120                       |  |  |  |  |
| 140                       |  |  |  |  |
| 160                       |  |  |  |  |

Fig.3-1 Cross-section of weld bead with  $\phi = 0^\circ$  ,  $45^\circ$  ,  $90^\circ$  ,  $315^\circ$   
; plate thickness = 0.8mm


















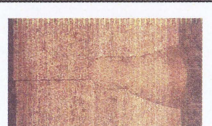
















| Welding speed<br>(mm/s) | Relative angle $\phi$ (deg.)  |   |  |   |
|-------------------------|---|---|--|---|
|                         | 0   | 45  | 90   | <u>1.0mm</u><br>315   |
| 40                      |    |    |    |    |
| 60                      |    |    |    |    |
| 70                      |    |    |    |    |
| 80                      |    |    |    |    |
| 90                      |  |  |  |  |
| 100                     |  |  |  |  |
| 110                     |  |  |  |  |
| 120                     |  |  |  |  |

Fig.3-2 Cross-section of weld bead with  $\phi=0^\circ$  ,  $45^\circ$  ,  $90^\circ$  ,  $315^\circ$   
; plate thickness =1.5mm



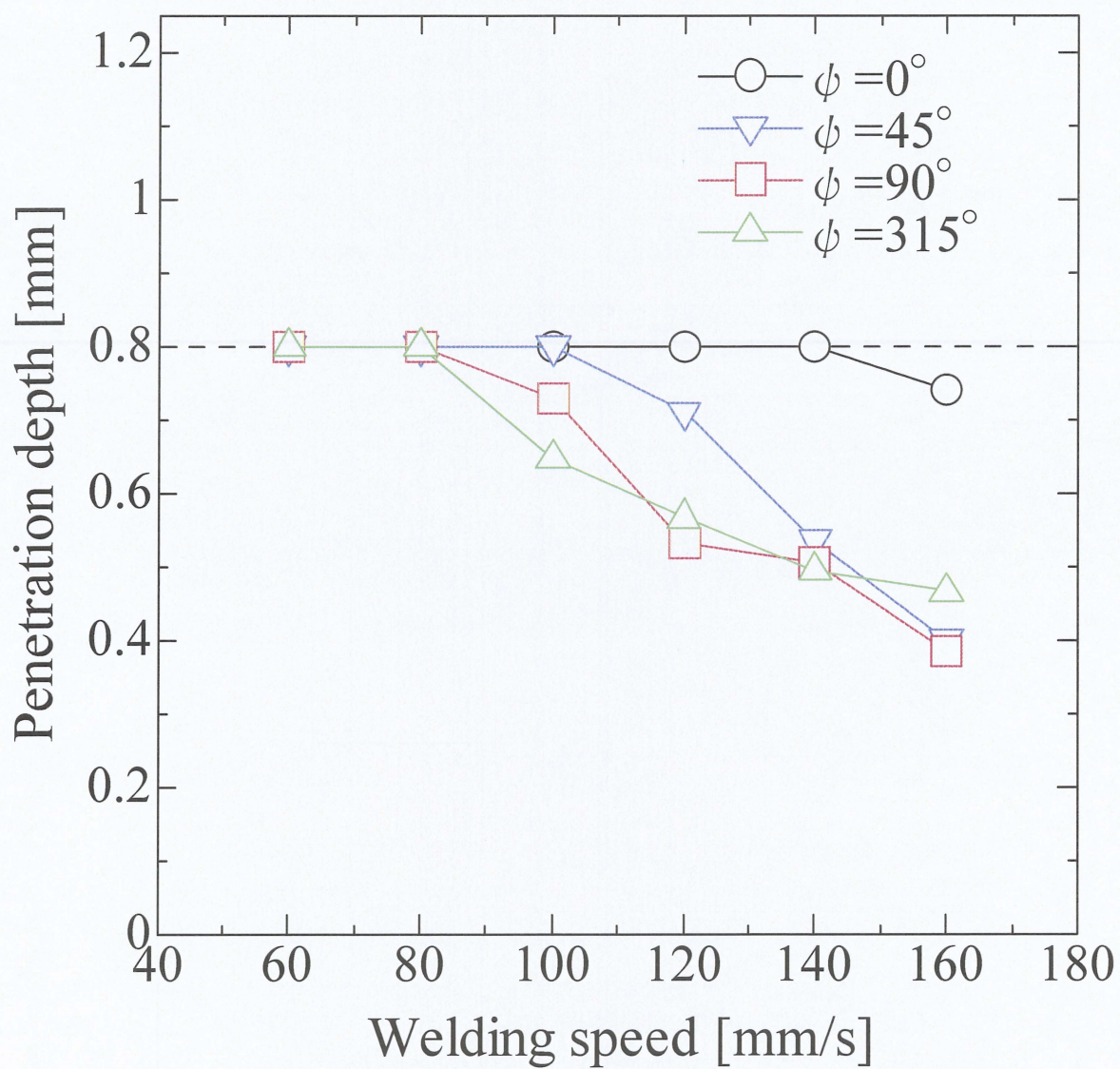


Fig.3-3 Relationship between welding speed and penetration depth for different relative angle ; plate thickness 0.8mm



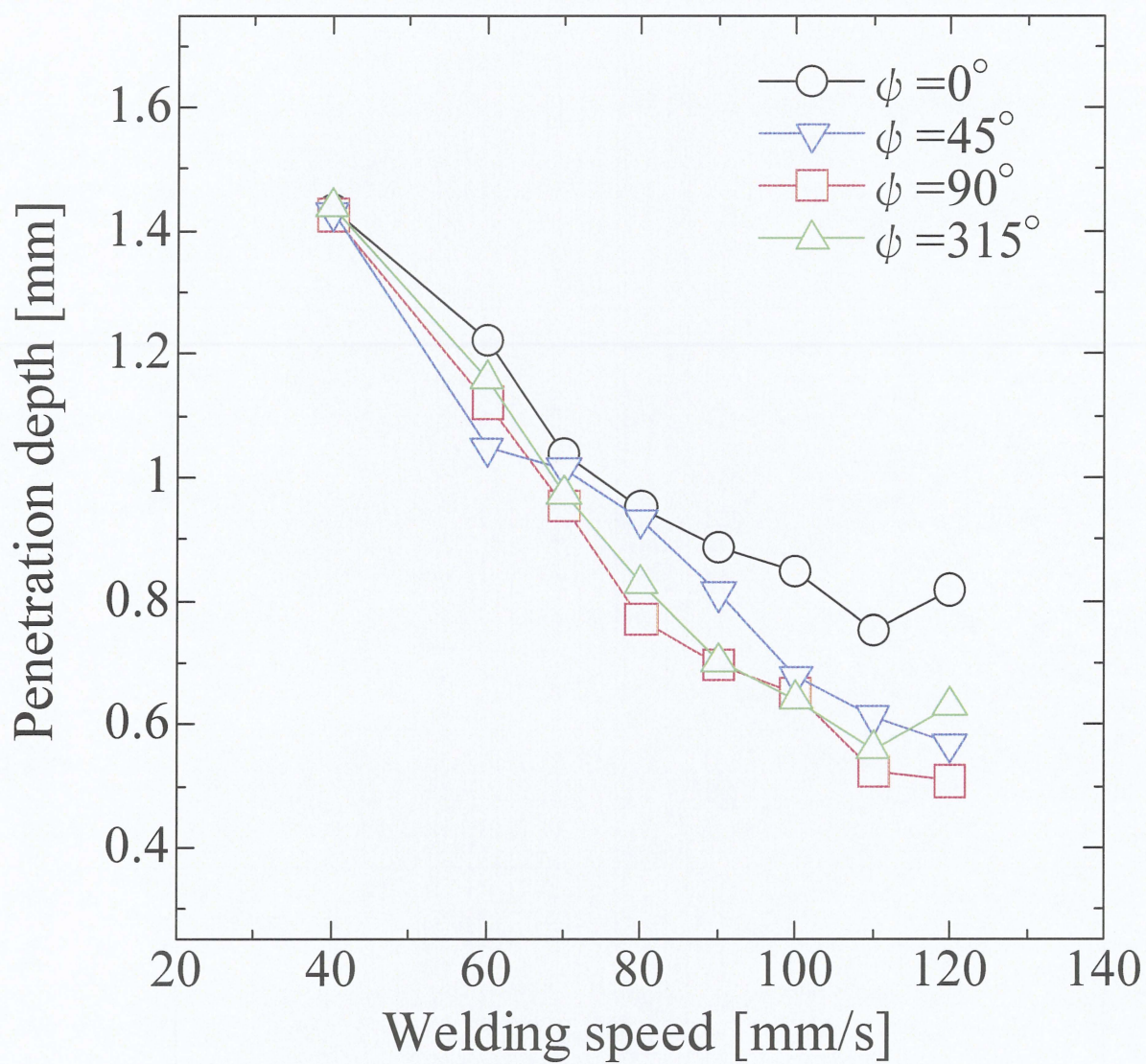


Fig.3-4 Relationship between welding speed and penetration depth for different relative angle ; plate thickness = 1.5mm



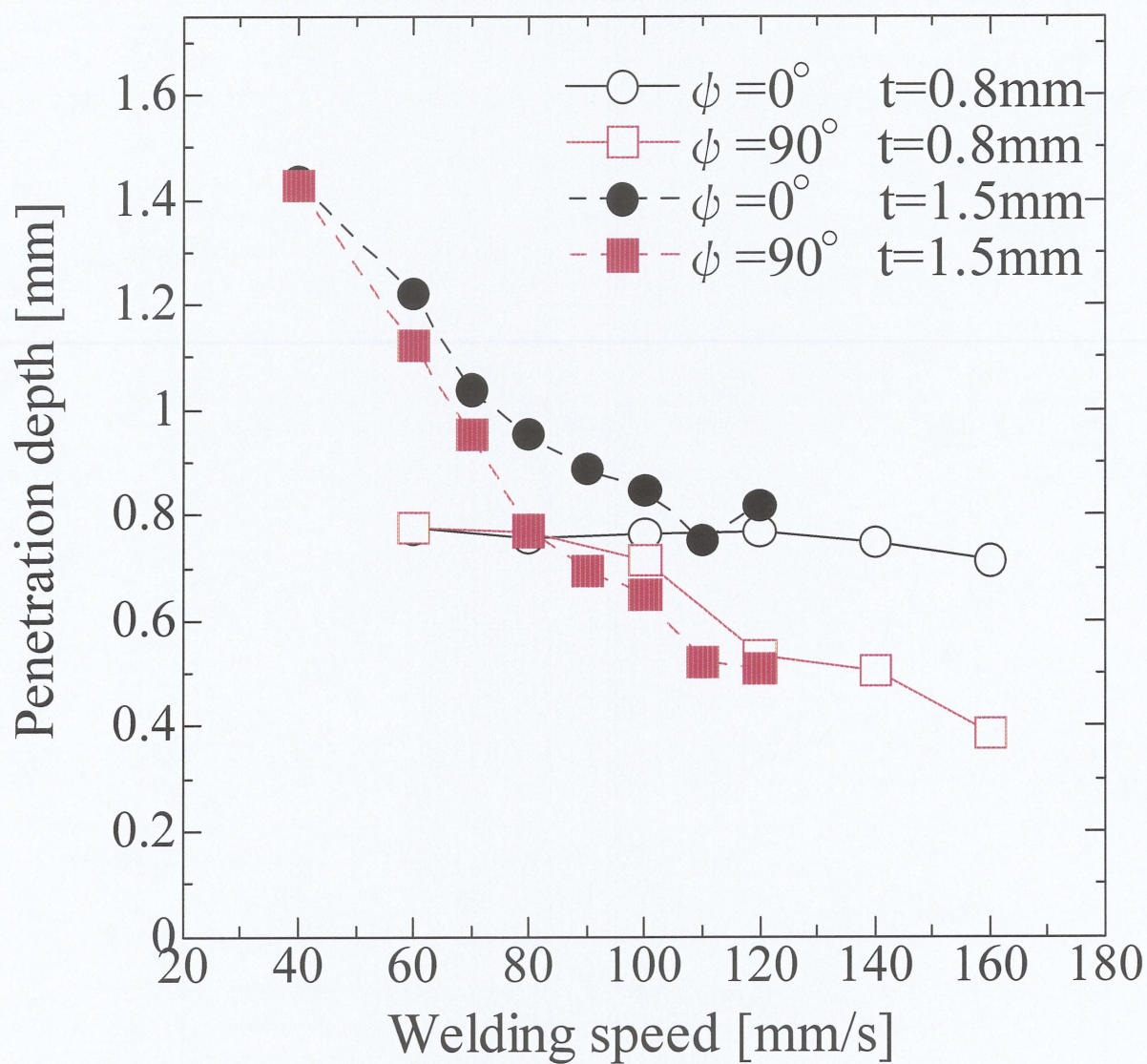


Fig.3-5 Relationship between welding speed and penetration depth for different relative angle and plate thickness



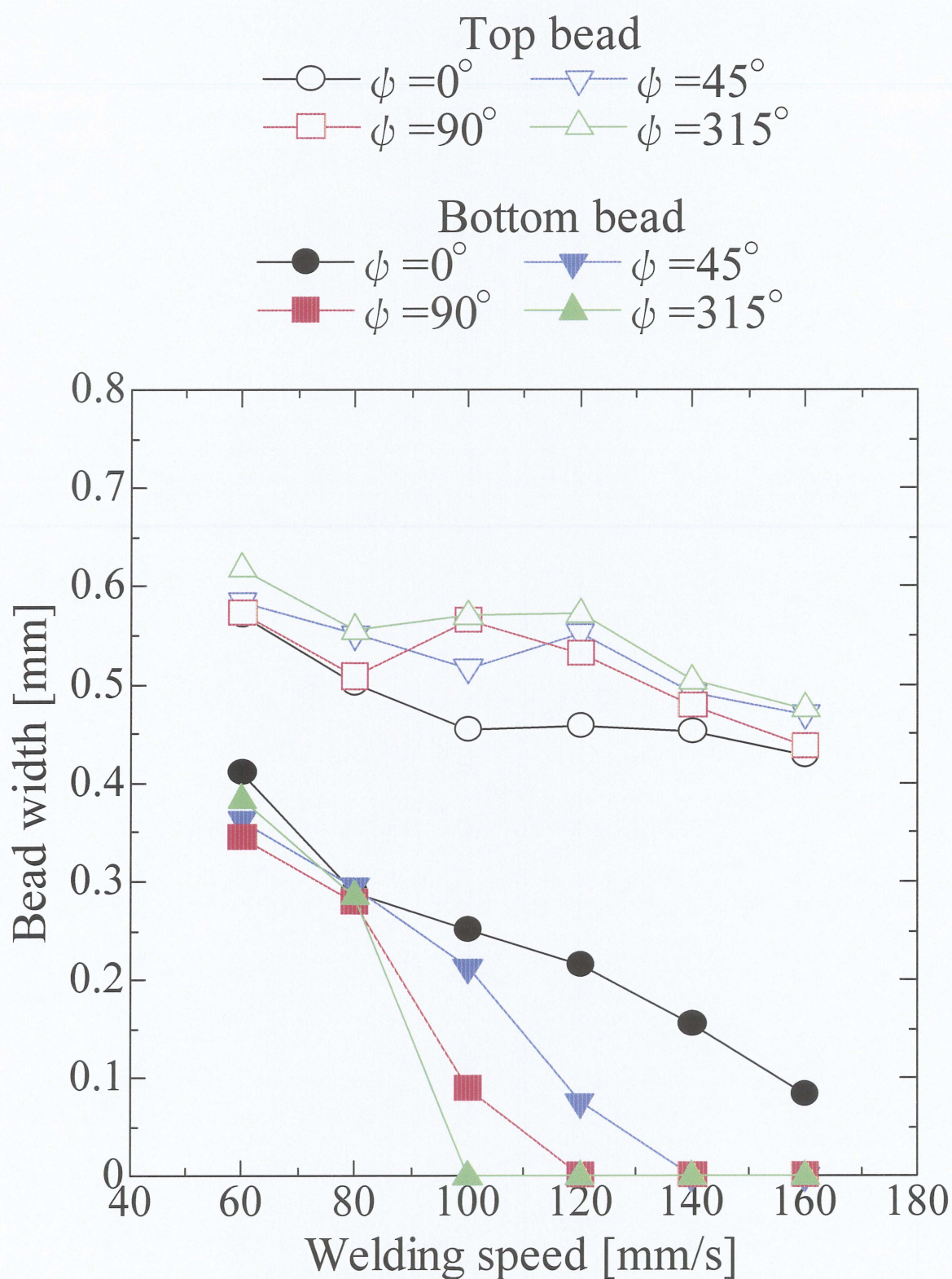


Fig.3-6 Relationship between welding speed and top and bead width for different relative angle ; plate thickness =0.8mm



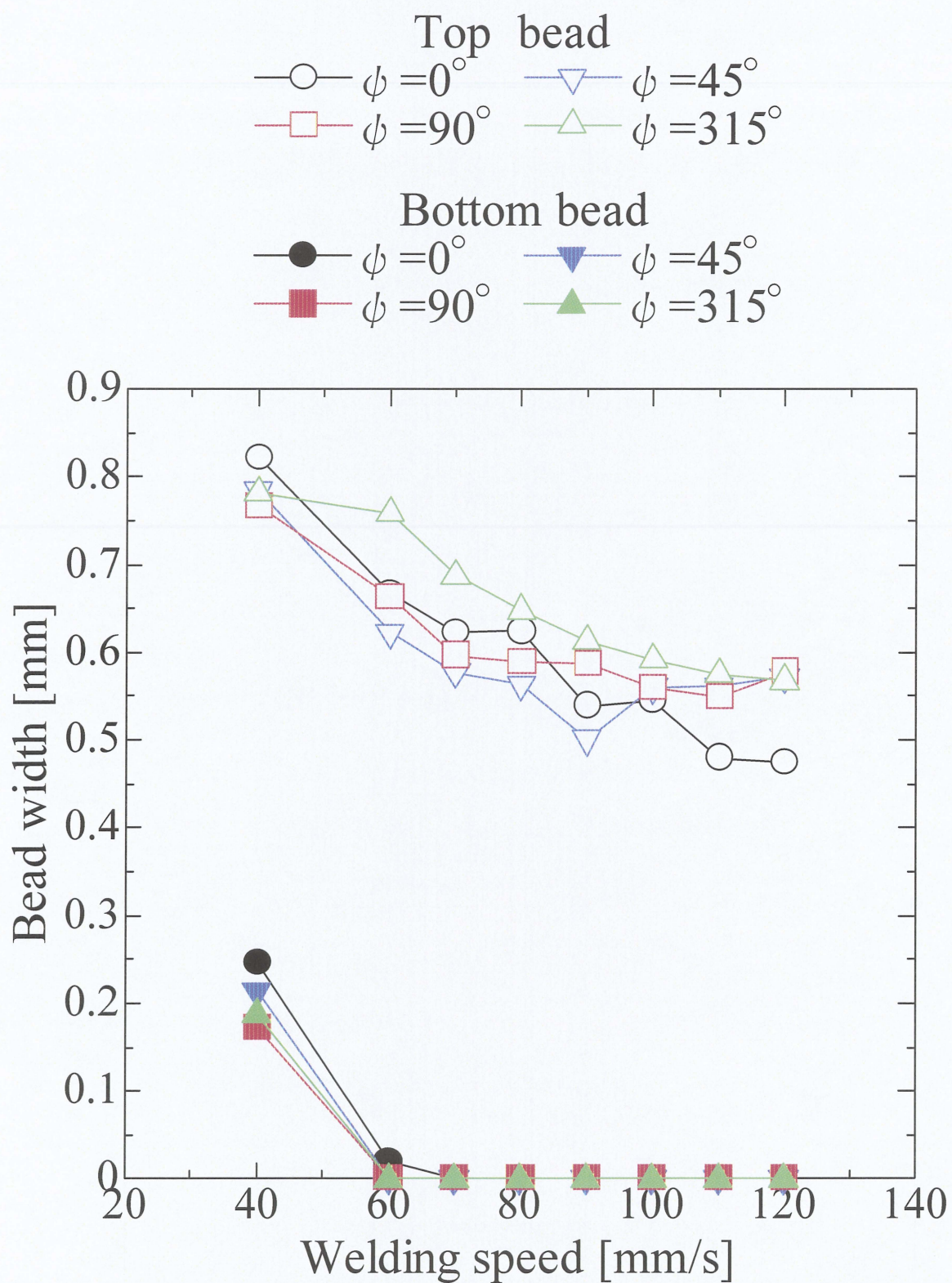


Fig.3-7 Relationship between welding speed and bead width for different relative angle ; plate thickness =1.5mm



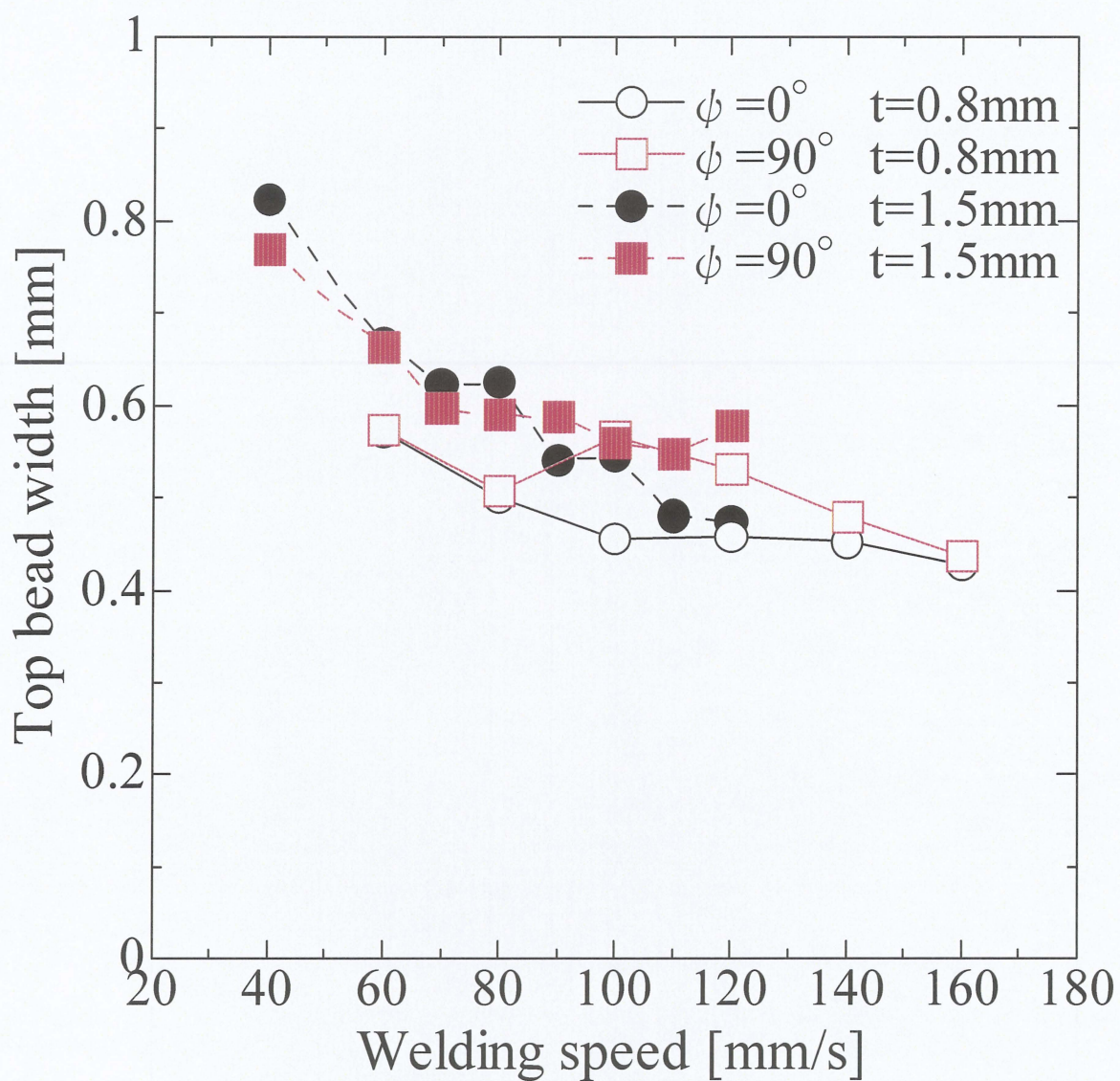


Fig.3-8 Relationship between welding speed and bead width for different relative angle and plate thickness



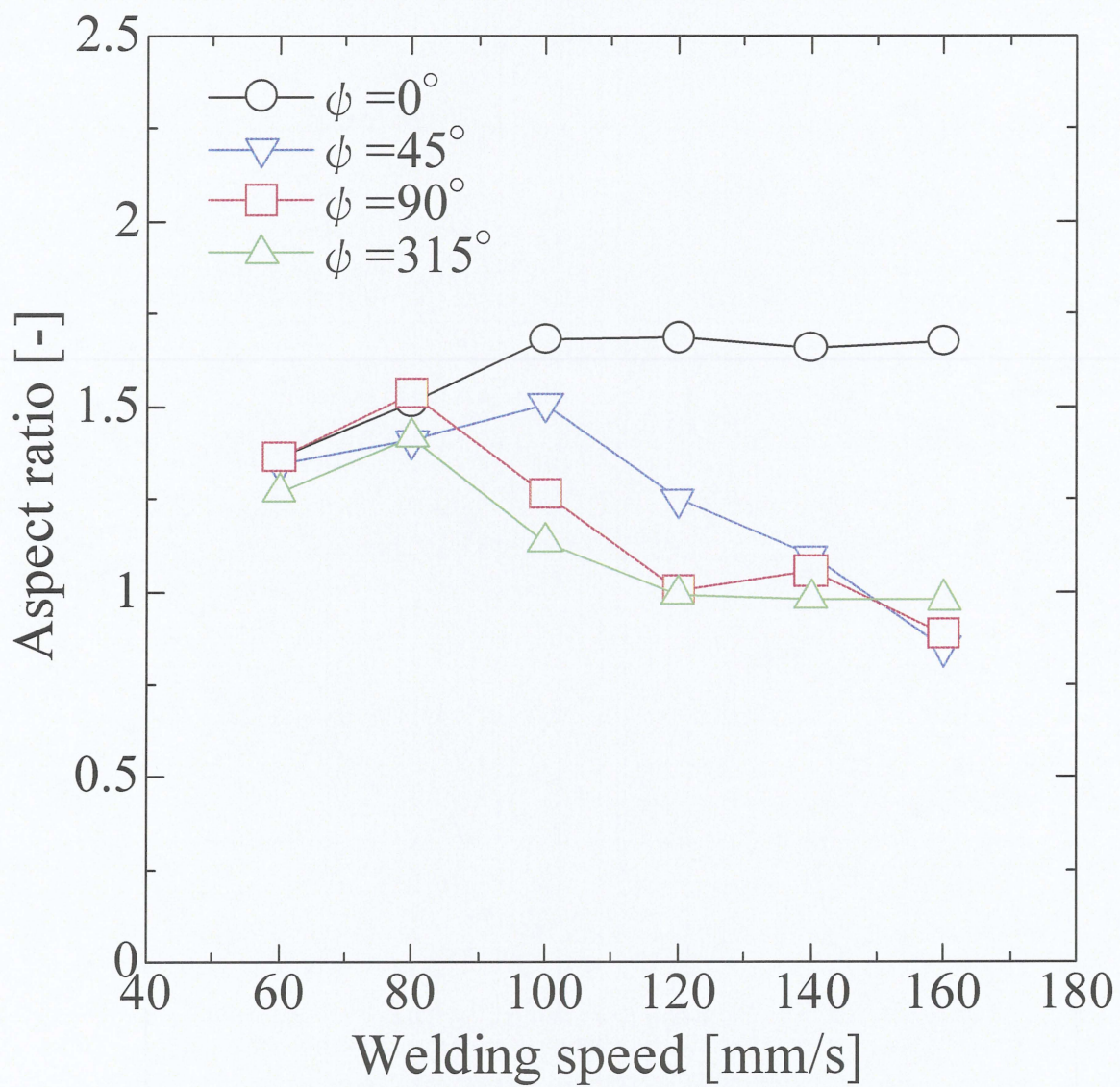


Fig.3-9 Relationship between welding speed and aspect ratio for different relative angle ; plate thickness =0.8mm



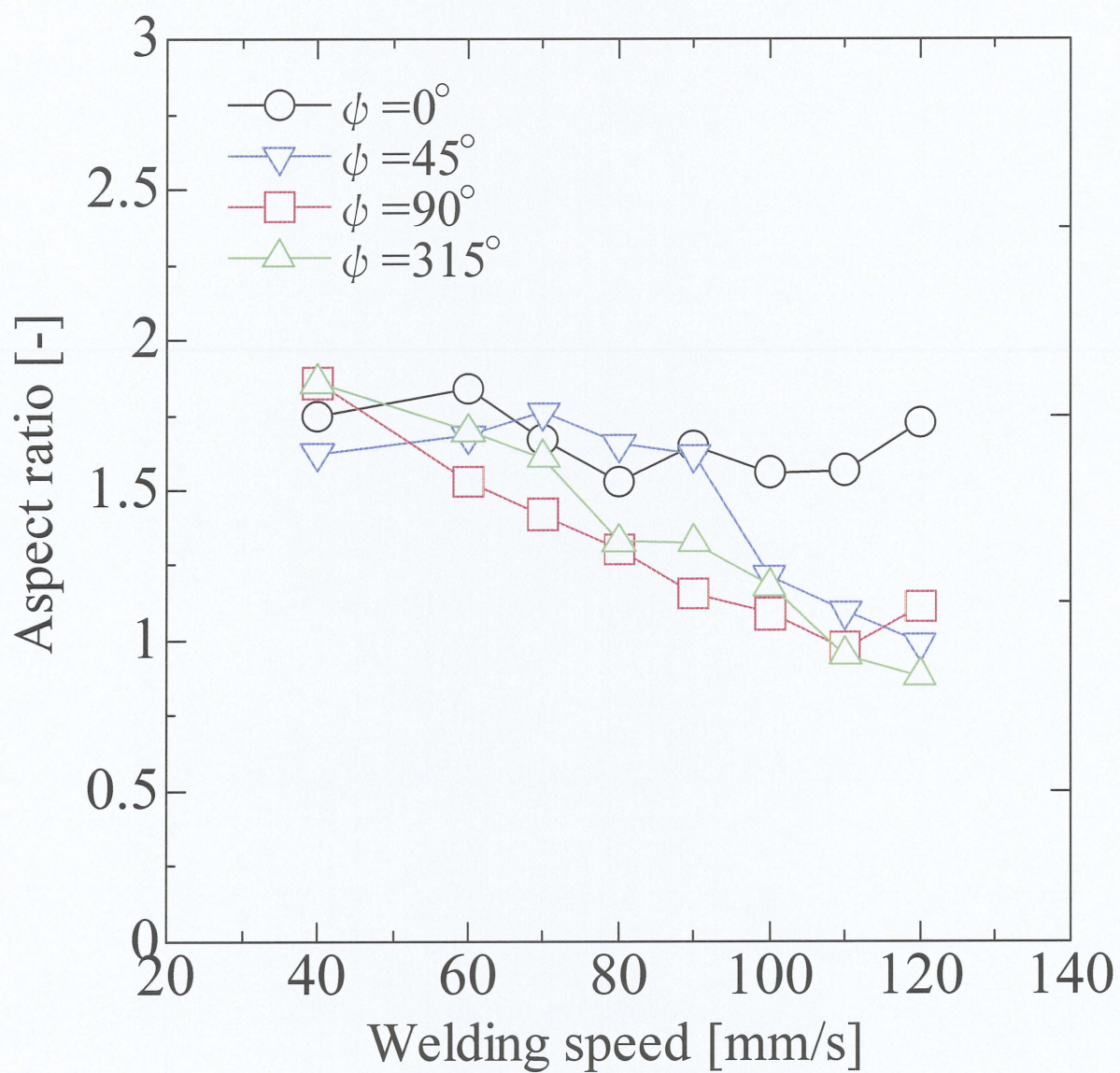


Fig.3-10 Relationship between welding speed and aspect ratio for different relative angle ; plate thickness =1.5mm



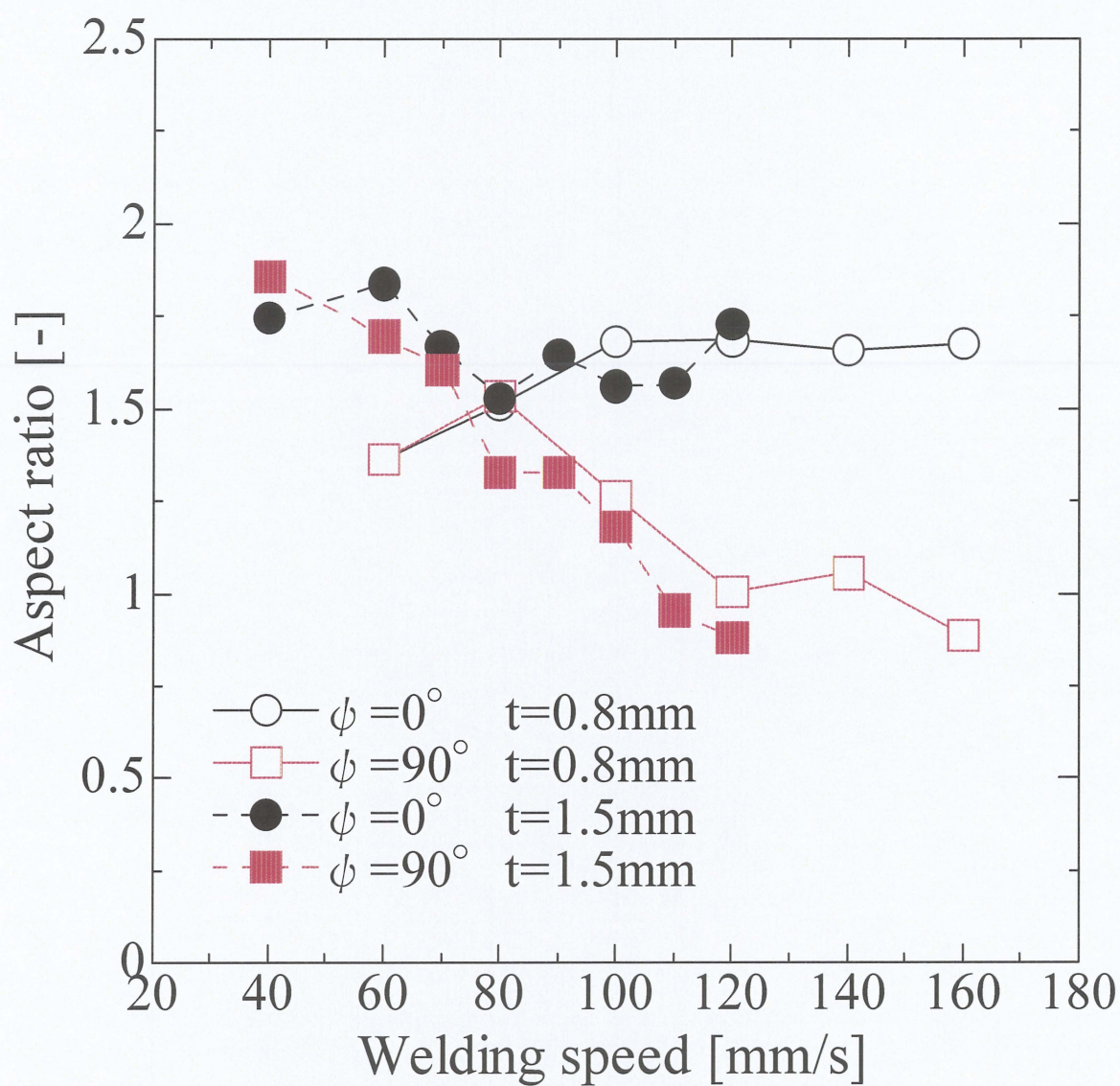


Fig.3-11 Relationship between welding speed and aspect ratio for different relative angle and plate thickness



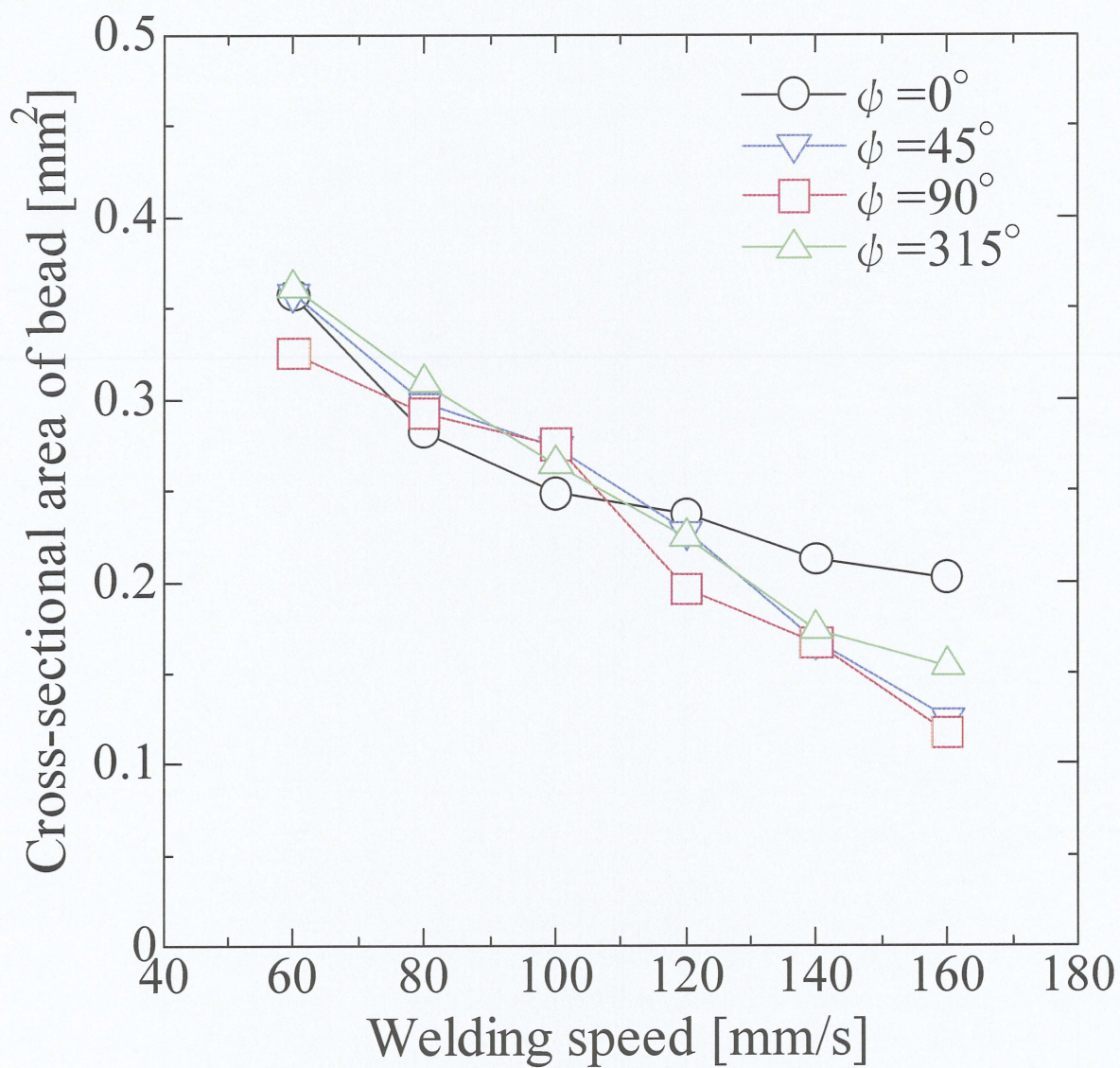


Fig.3-12 Relationship between welding speed and cross-sectional area of bead for different relative angle ; plate thickness =0.8mm



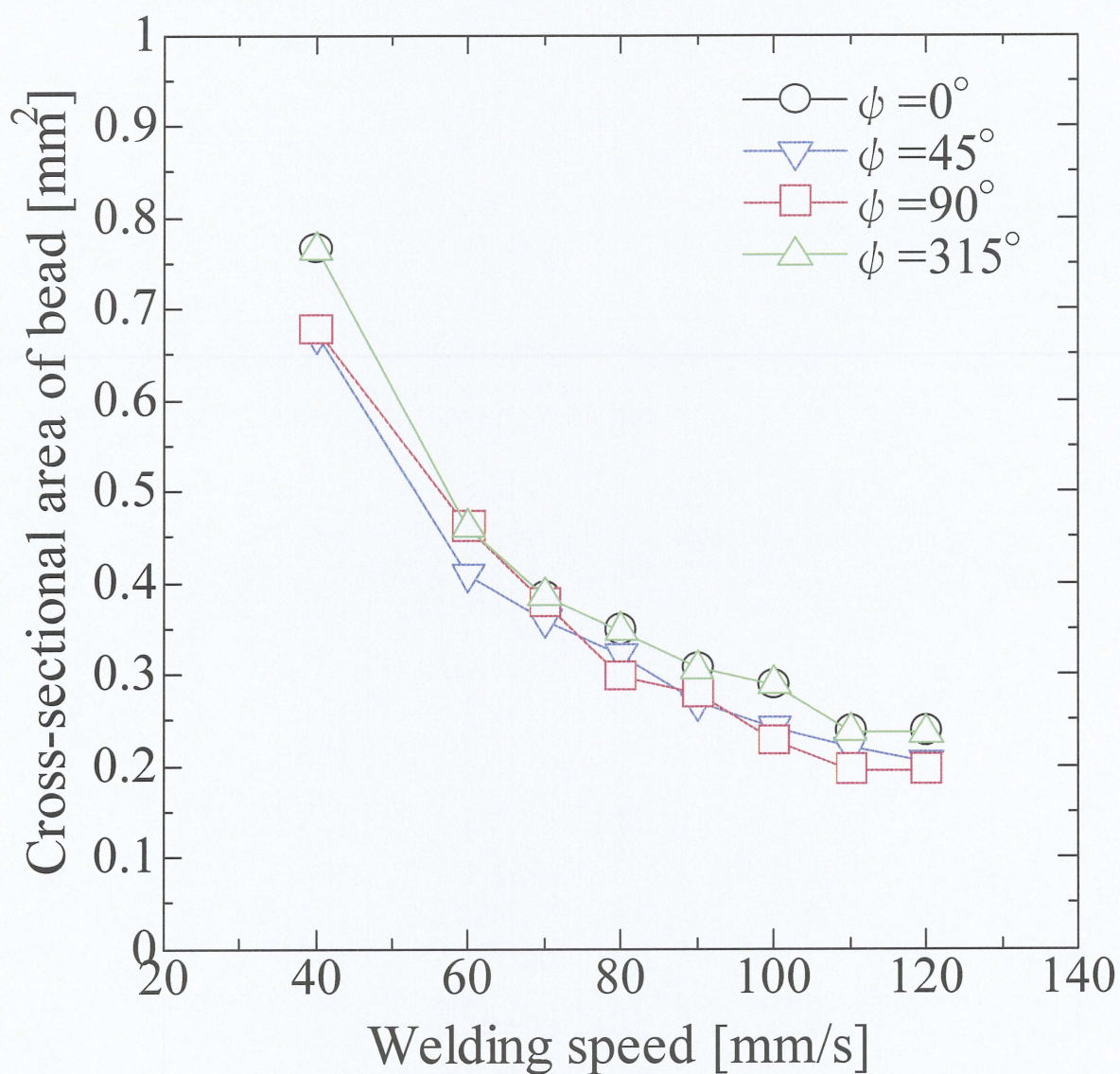


Fig.3-13 Relationship between welding speed and cross-sectional area of bead for different relative angle ; plate thickness =1.5mm



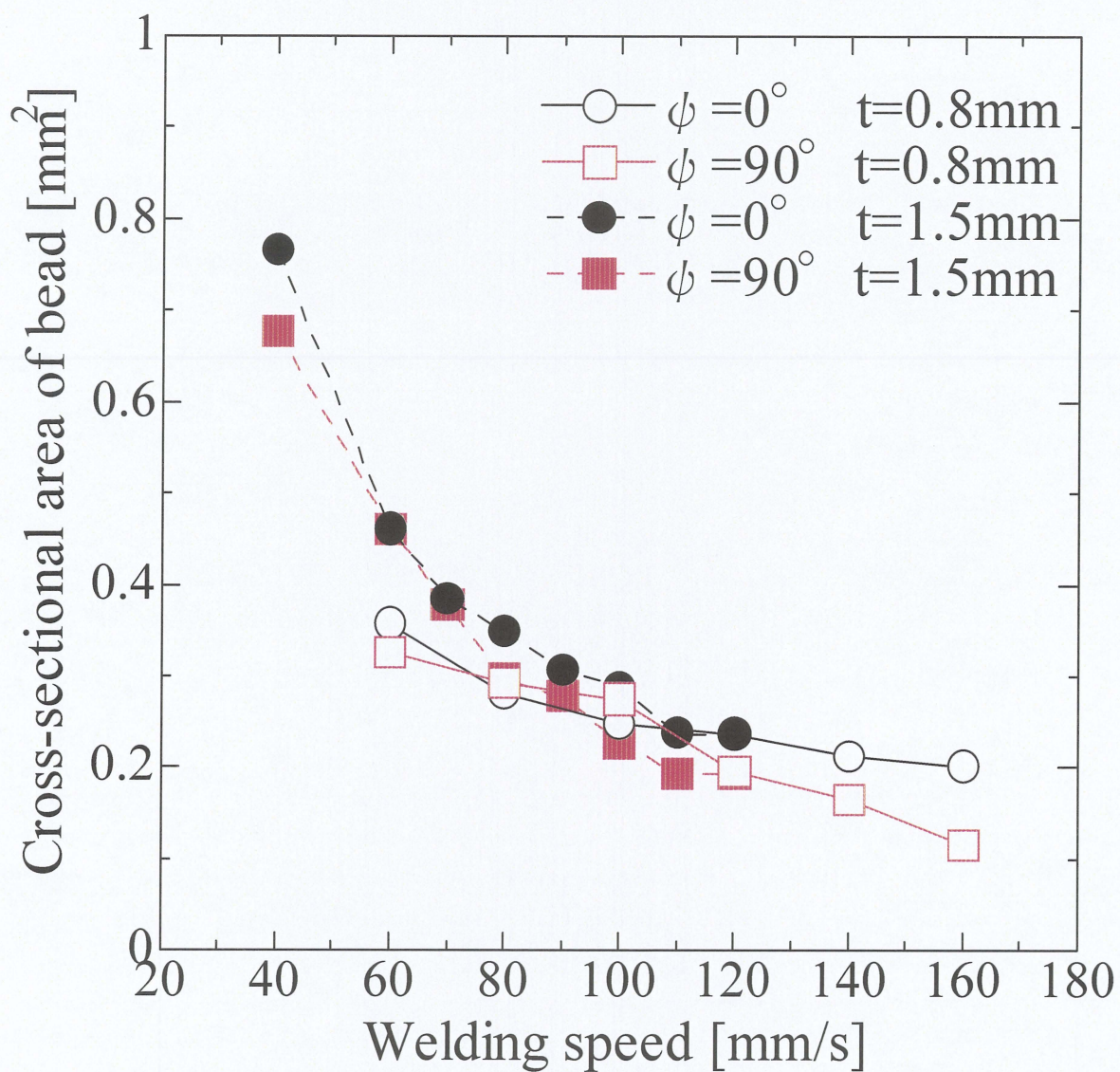


Fig.3-14 Relationship between welding speed and cross-sectional area of bead for different relative angle and plate thickness



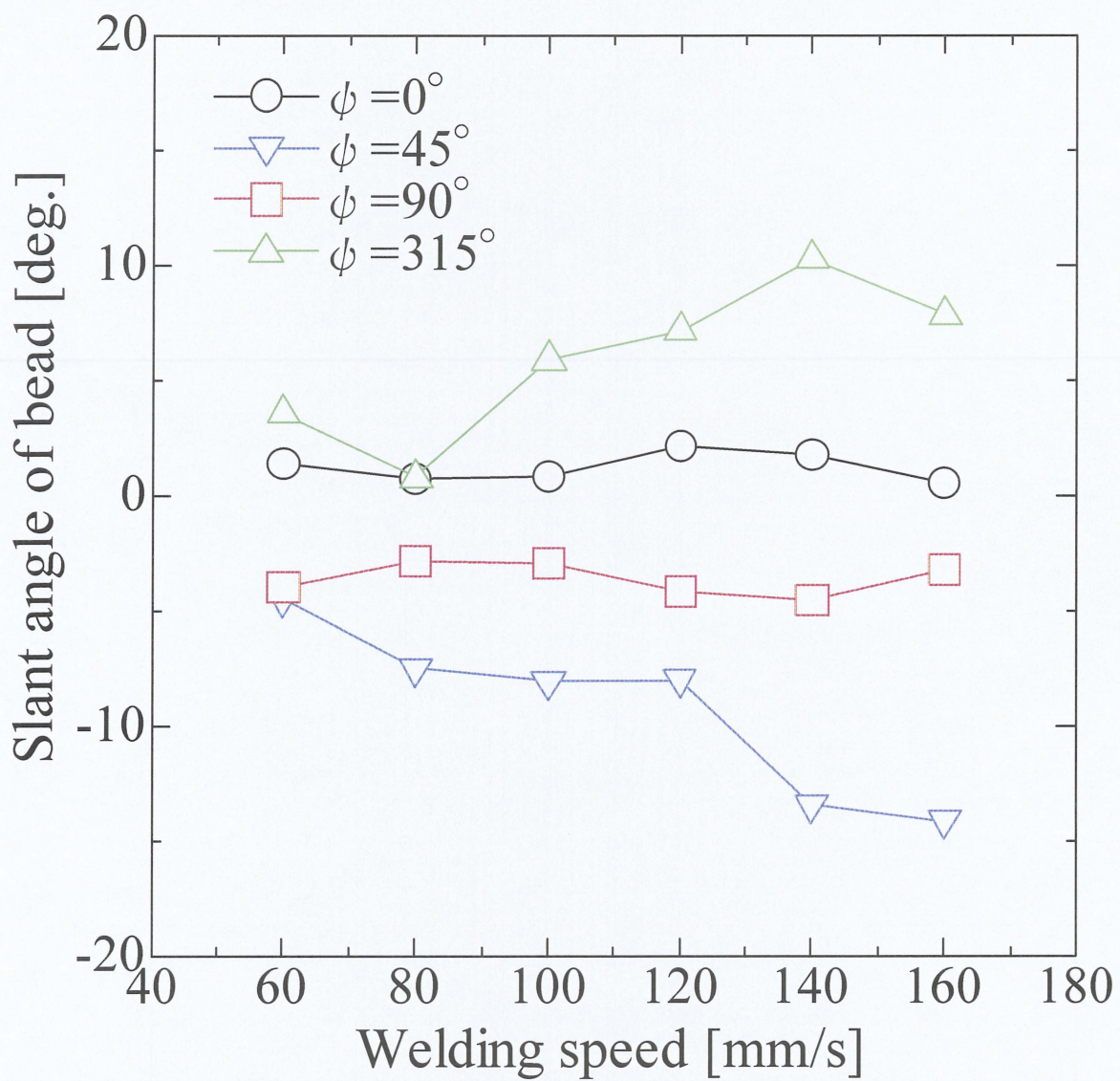


Fig.3-15 Relationship between welding speed and slant angle of bead for different relative angle ; plate thickness =0.8mm



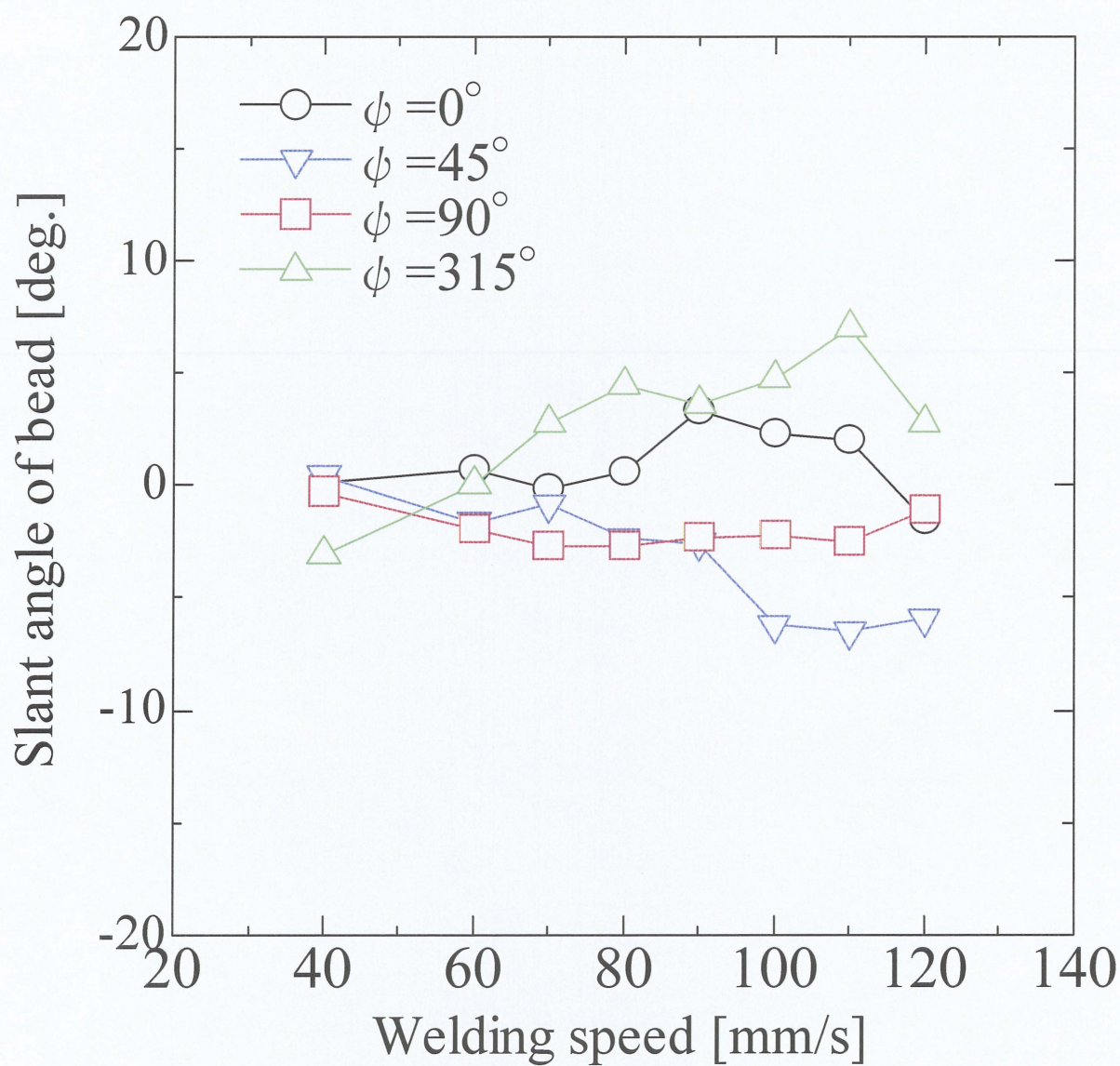


Fig.3-16 Relationship between welding speed and slant angle of bead for different relative angle ; plate thickness =1.5mm



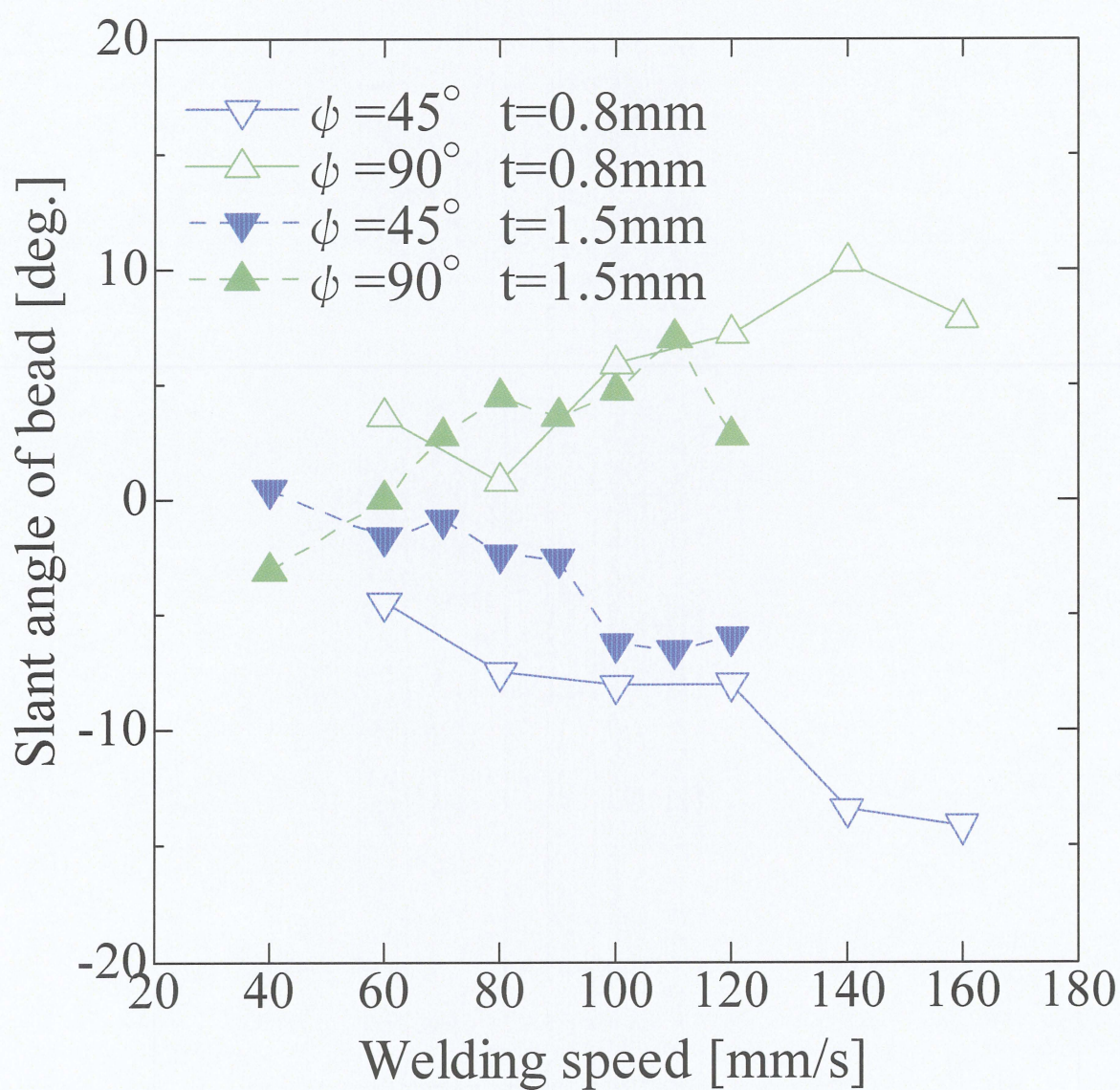


Fig.3-17 Relationship between welding speed and slant angle of bead for different relative angle and plate thickness

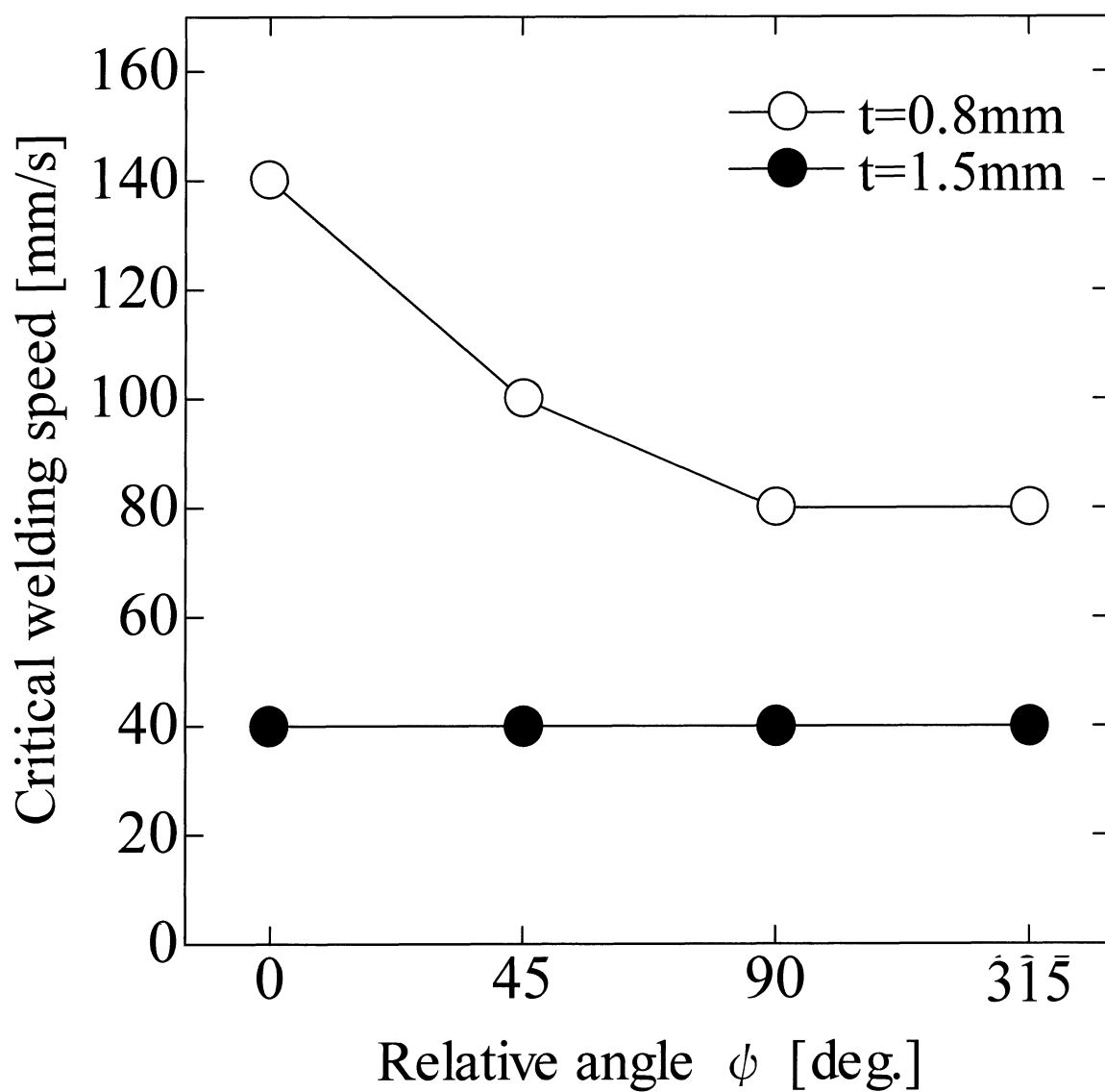
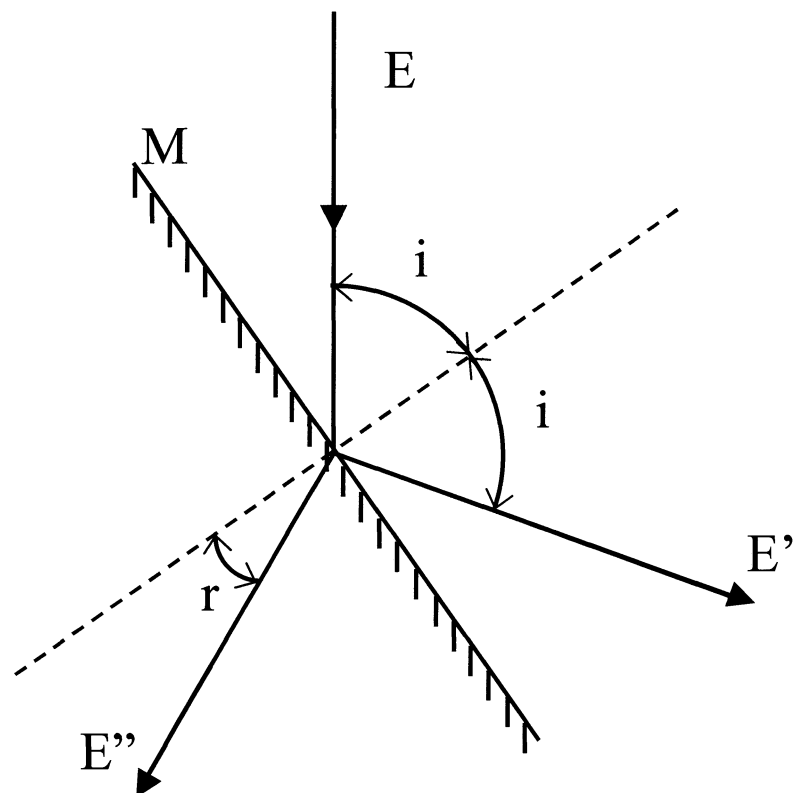
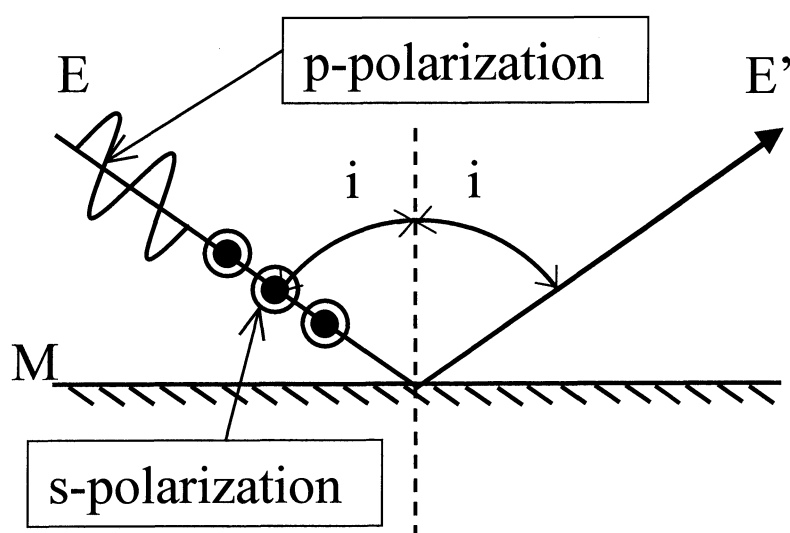


Fig.3-18 Relationship between relative angle  $\phi$  and critical welding speed



(a) Schematic diagram of incident angle , reflection angle and refraction angle on metallic surface



(b) Schematic diagram of p-polarization and s-polarization in liner polarization

Fig.4-1 Polarization property of laser beam

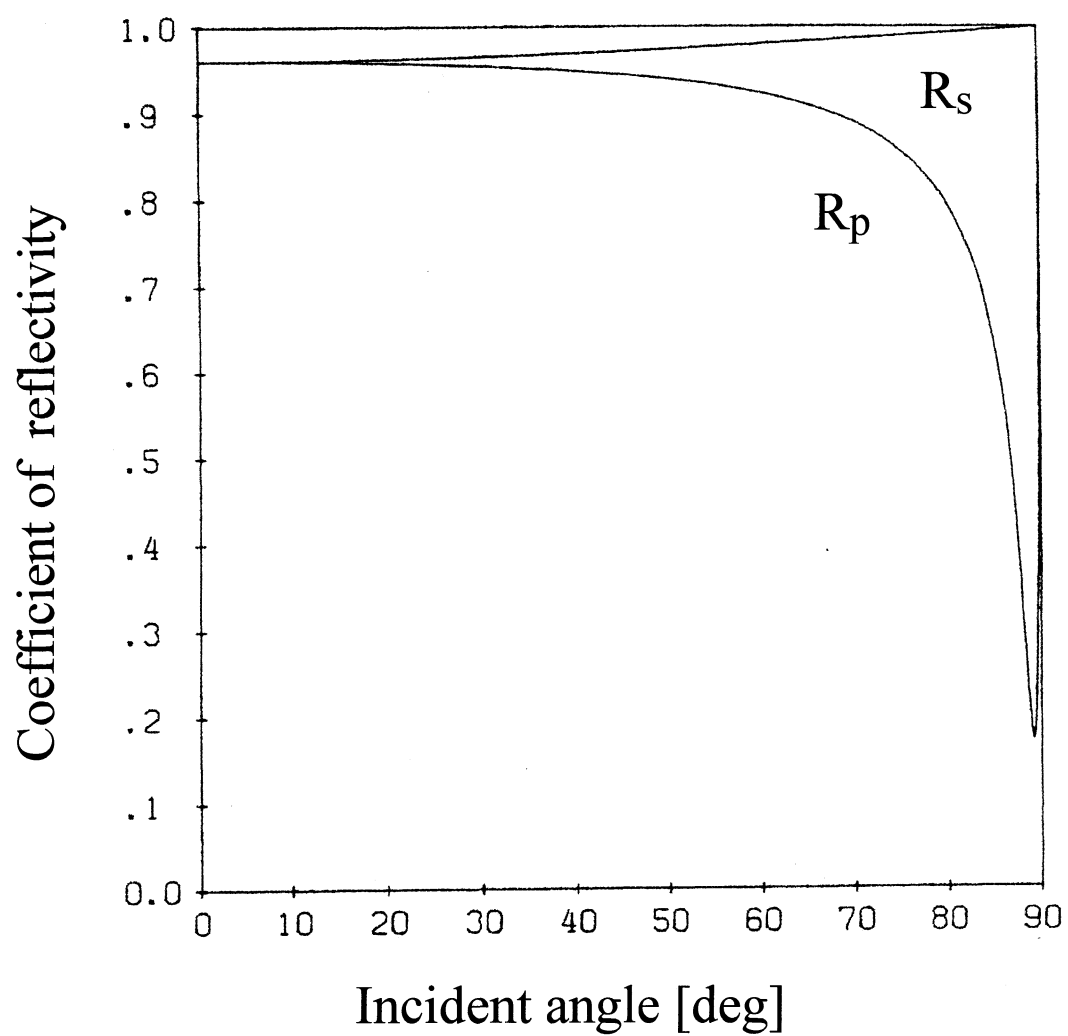
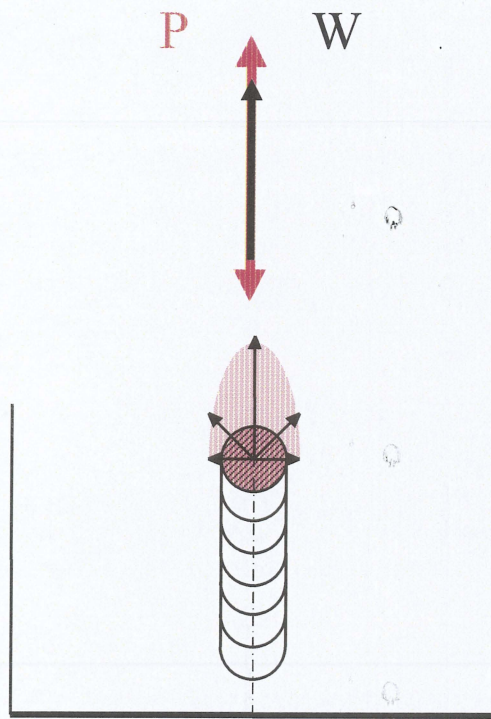
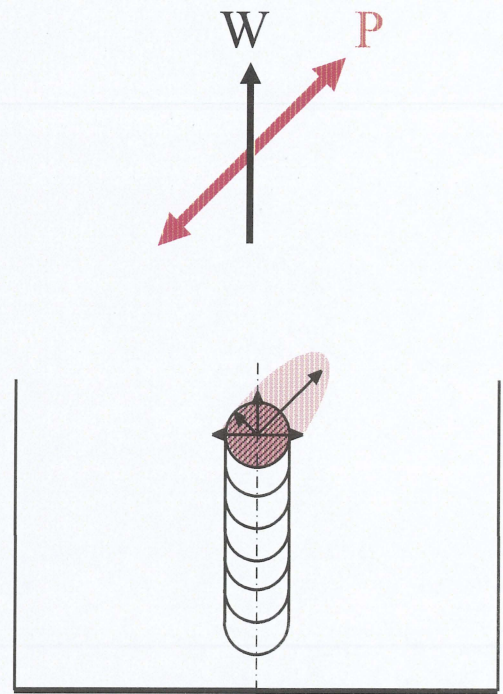


Fig.4-2 Relationship between Incident angle and coefficient of reflectivity

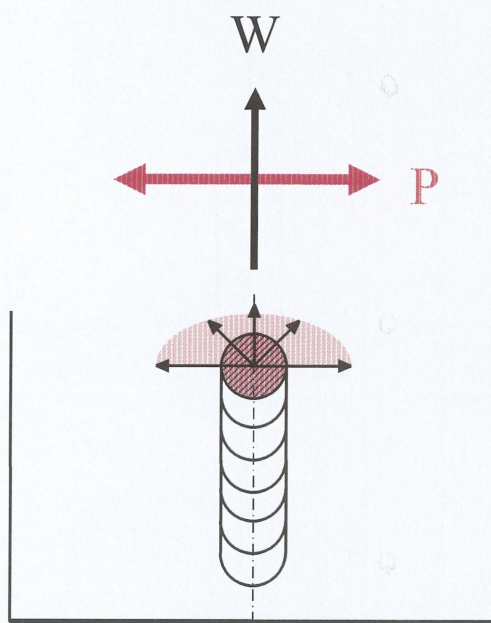




(a)  $\phi = 0^\circ$



(b)  $\phi = 45^\circ$  ,  $315^\circ$

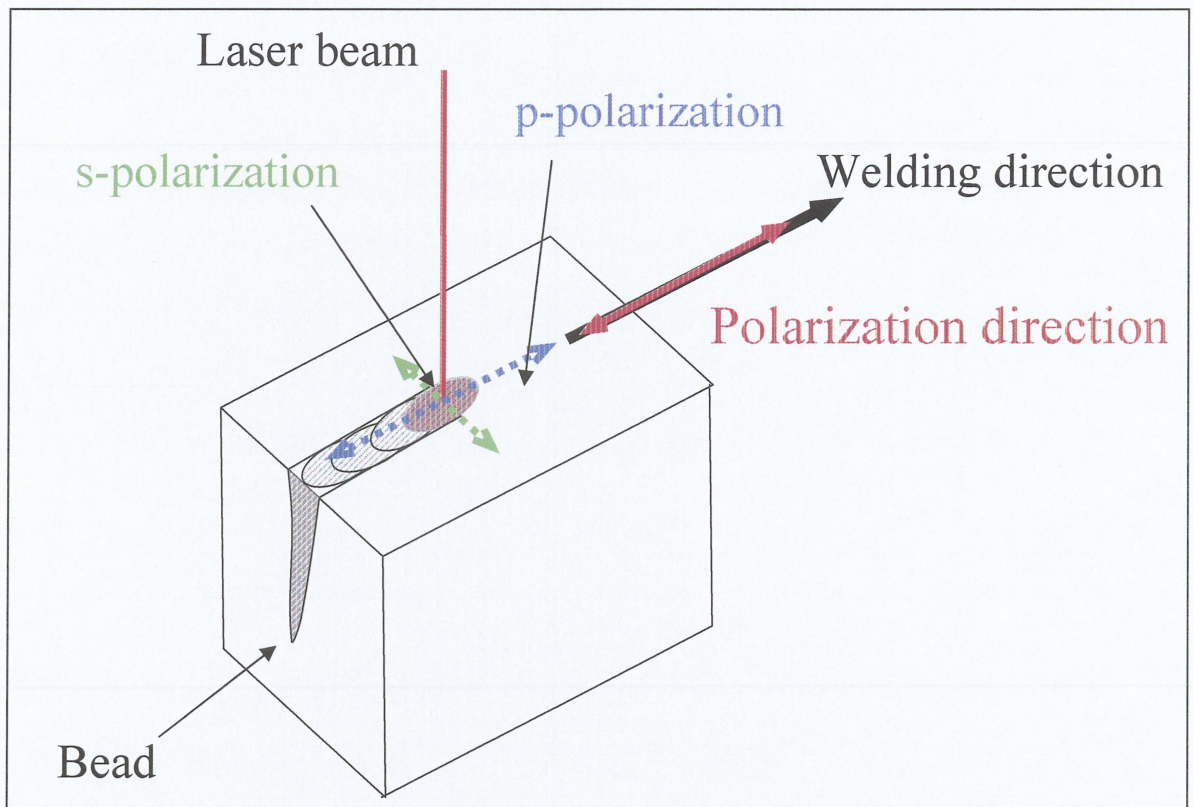


(c)  $\phi = 90^\circ$

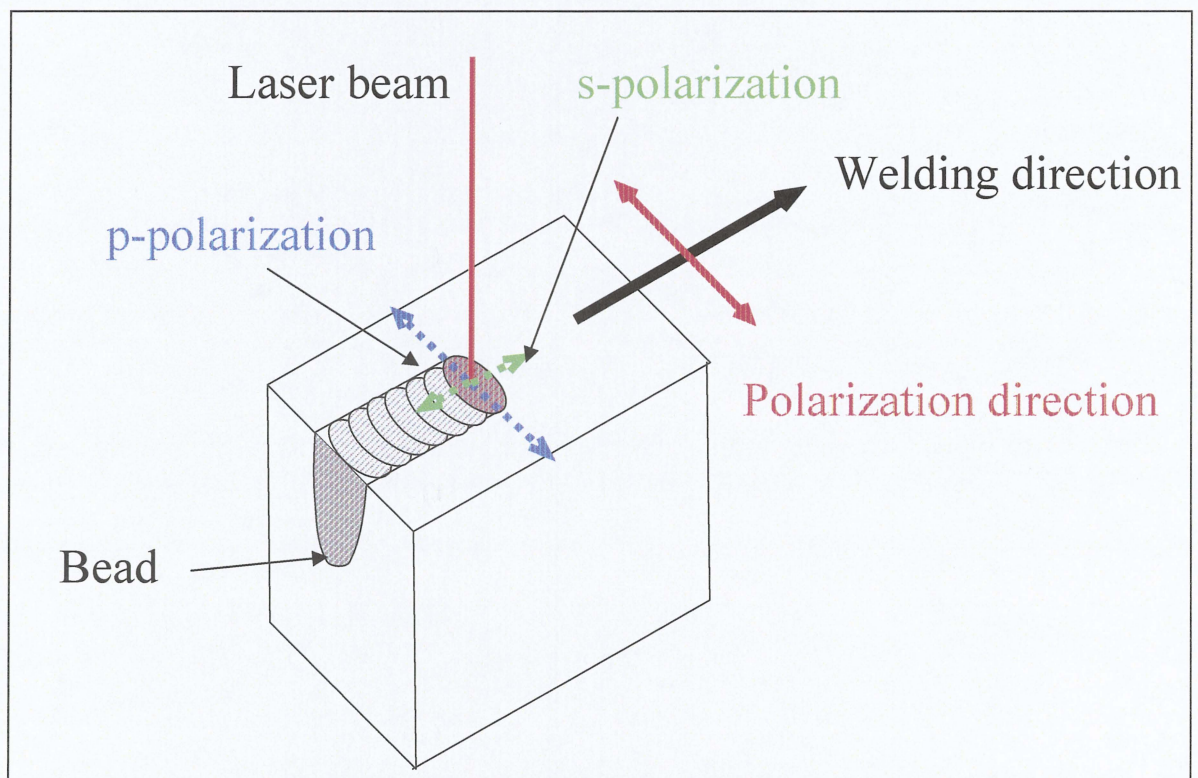
W : Welding direction  
P : Polarizing direction

Fig.5-1 Schematic diagram energy absorption in laser welding by using linearly-polarized laser





(a)  $\phi = 0^\circ$



(b)  $\phi = 90^\circ$

Fig.5-2 Schematic diagram of changing penetration shape for different relative angle by using linearly-polarized laser



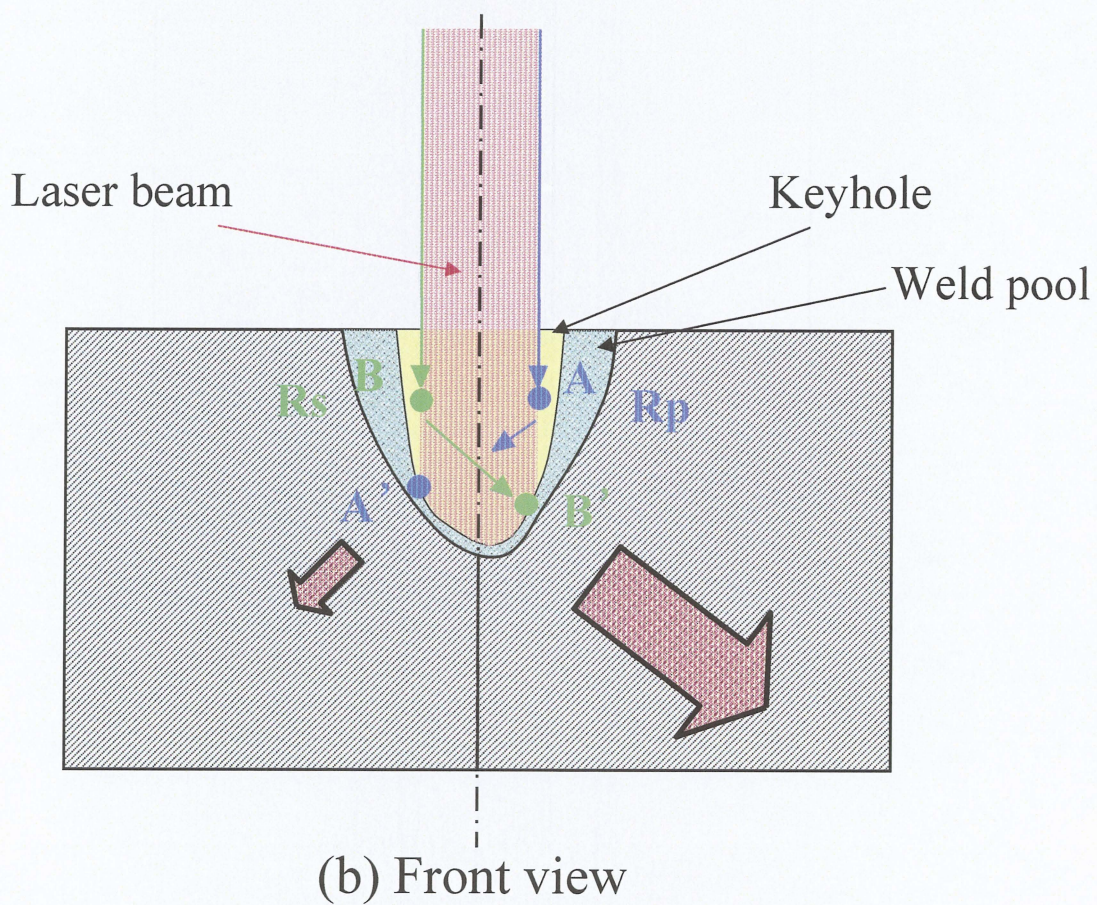
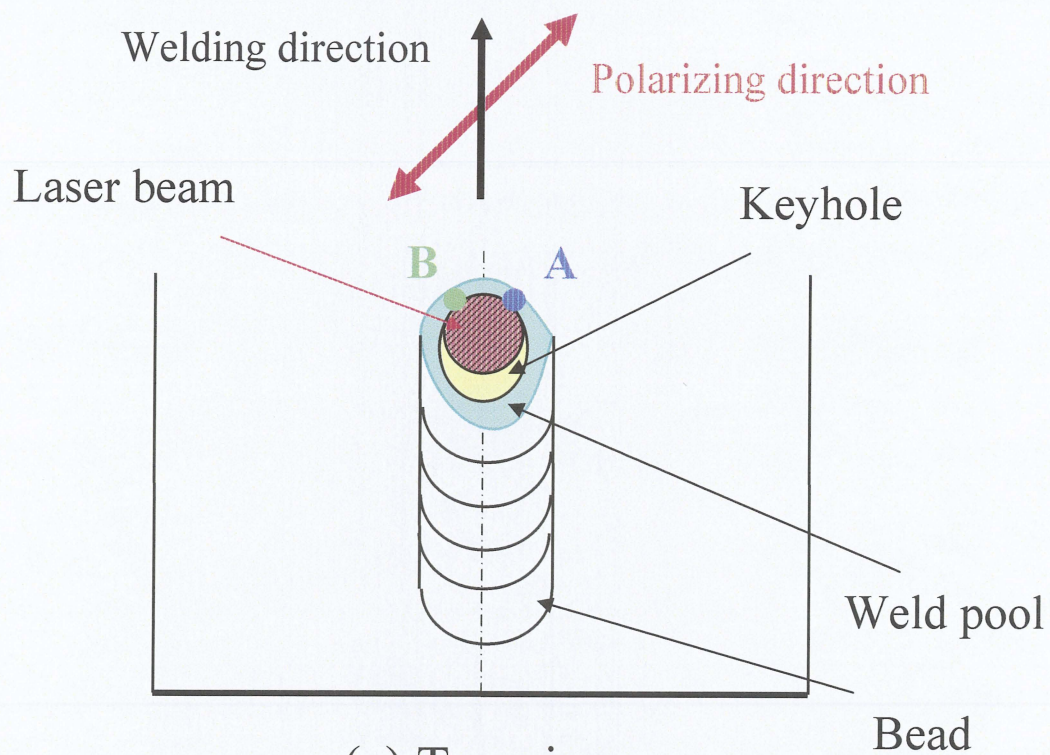
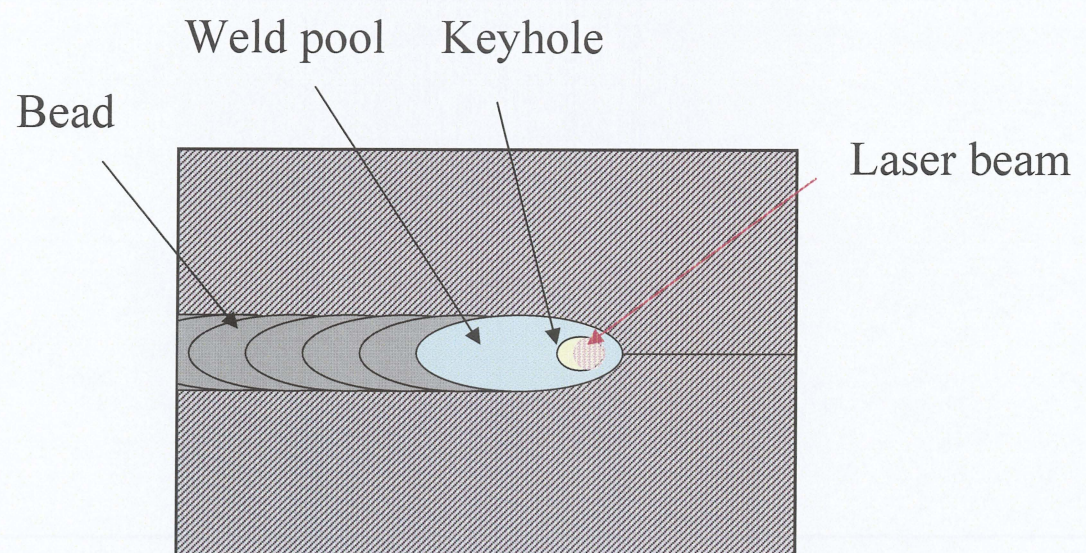
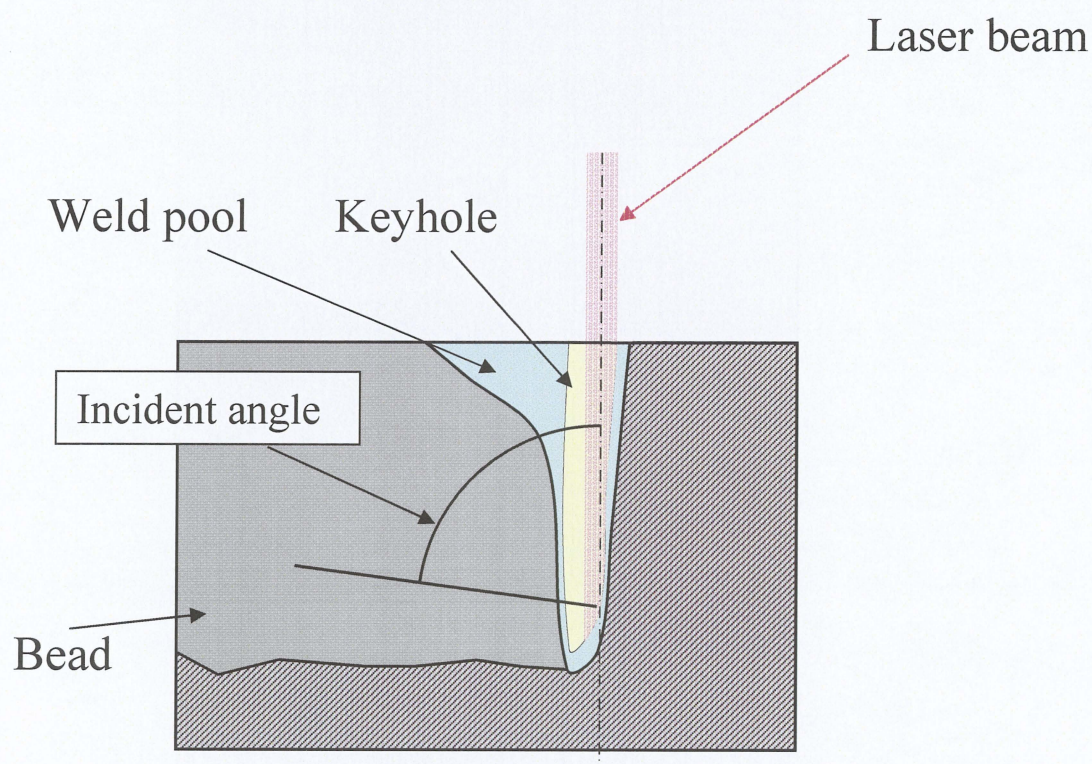


Fig.5-3 Schematic diagram of slant phenomenon of bead





(a) Top view



(b) Side view

Fig.5-4 Incident angle between laser beam and keyhole wall



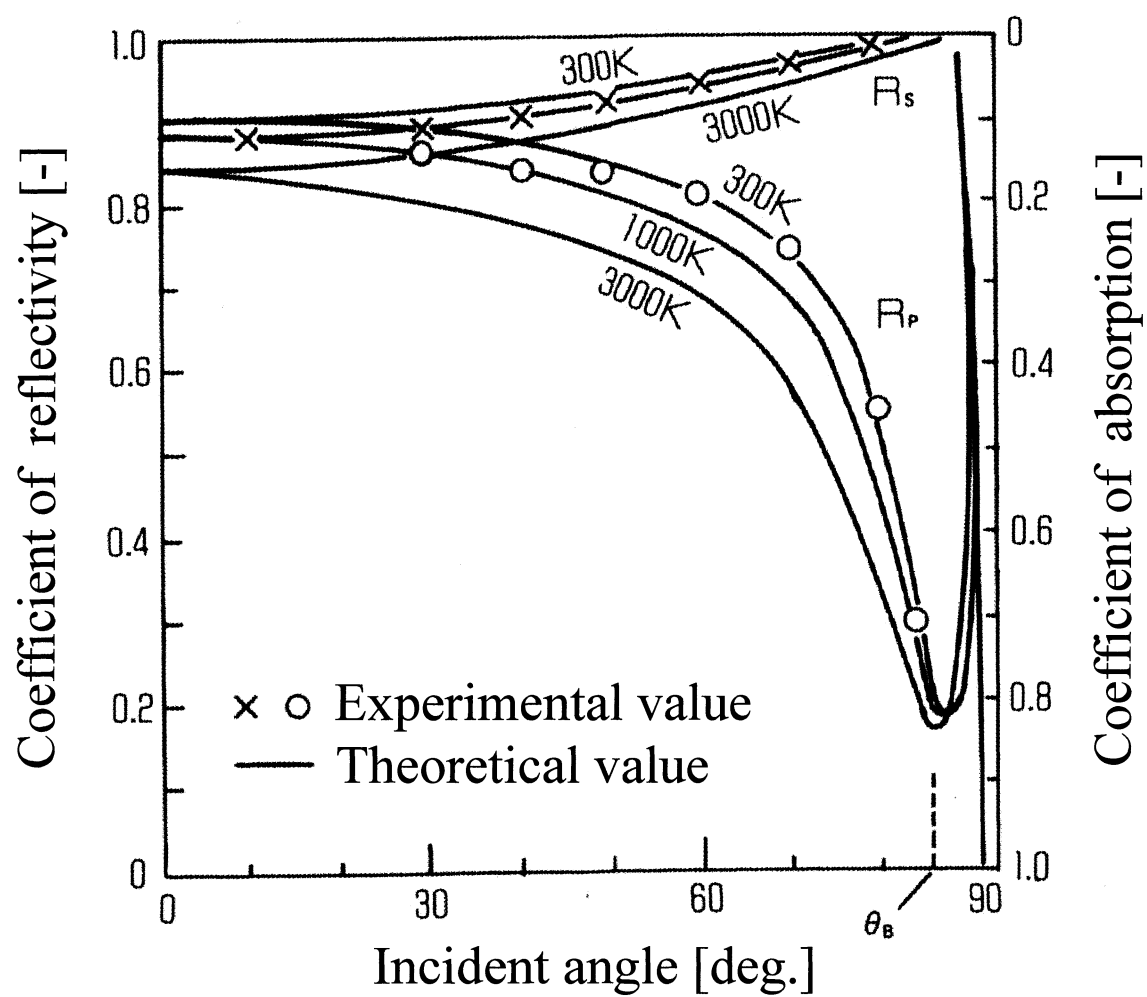


Fig.5-5 Relationship between incident angle and coefficient of reflectivity