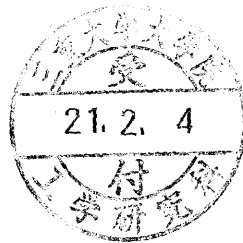


複写可

平成20年度 修士論文

鉄-アルミニウムレーザー溶接部の
継手性能の検討



三重大学大学院工学研究科
博士前期課程 機械工学専攻
蒔田 光明

三重大学大学院 工学研究科

目次

第 1 章	緒言	… 1
1-1	鉄鋼材料とアルミニウムの接合	… 1
1-2	鉄鋼材料とアルミニウムの接合法	… 1
1-2-1	スポット溶接	… 2
1-2-2	摩擦攪拌接合	… 2
1-2-3	レーザ溶接	… 3
1-3	研究目的	… 5
第 2 章	実験装置及び実験方法	… 6
2-1	実験装置の構成	… 6
2-2	供試材	… 7
2-3	実験方法	… 7
2-4	ビード断面観察及び顕微鏡組織観察	… 8
2-5	引張せん断試験	… 8
2-6	硬さ試験	… 8
2-7	SEM 観察及び EPMA 分析	… 9
第 3 章	1 パスのレーザ溶接部における継手性能の検討	… 11
3-1	ビード断面観察及び顕微鏡組織観察	… 11
3-2	硬さ試験結果	… 12
3-3	溶接部の SEM 観察及び EPMA 分析結果	… 13
3-4	継手の引張せん断試験結果	… 15
3-5	化合物層生成過程の考察	… 16
第 4 章	2 パスのレーザ溶接部における継手性能の検討	… 19
4-1	実験条件	… 19
4-2	引張せん断試験結果	… 19

第 5 章 結言

… 23

参 考 文 献

謝 辞

第1章 緒言

1-1 鉄鋼材料とアルミニウムの接合

鉄鋼材料とアルミニウムは現代の工業を支える主要な金属材料である。両者の機械的特性、物理的および化学的性質は対照的であり、両者を組み合わせて利用することで様々な応用が期待できる。その利用方法の一つとして、自動車の構造を鉄鋼材料とアルミニウムのハイブリッドとする構想が検討されている。この構想を実現するためには、鉄鋼材料とアルミニウムの異種金属継手を高い信頼性と生産性で接合する技術が必要不可欠である。ところが、従来の熔融溶接による異種金属接合は、各材料間に物性の違いがあり、接合界面に脆性な金属間化合物が生成するなど、接合が困難である。Fig.1-1にFe-Al系平衡状態図を示す¹⁾。この図から、Fe-Al系には金属間化合物であるFeAl、FeAl₃などが存在することが分かる。次に、Fe-Al系金属間化合物の圧縮試験の結果をFig.1-2に示す²⁾。この図から分かるように、FeAl及びFe₃AlといったFeリッチな金属間化合物はある程度の延性を示し、破断強度も500MPaを超える。一方、FeAl₃及びFe₂Al₅といったAlリッチな金属間化合物は伸びがなく、低強度で破断しているように非常に脆性である。鋼とアルミニウムの異種金属の接合において問題となるのは、まさにこれらの脆性な金属間化合物である。

1-2 鉄鋼材料とアルミニウムの接合法

鉄とアルミニウムの接合は様々な接合法で試みられている。ここでは三つの接合法を紹介する。

1-2-1 スポット溶接

抵抗溶接であるスポット溶接は、比較的薄い金属板を重ね電極チップで加圧しておき、材料に電圧を加えて直接電流を流し、材料自体の抵抗および接触面の接触抵抗によるジュール発熱によって加熱して局部的に融解させて溶接する方法である。抵抗溶接では、通電時間が短く、発生したエネルギーは有効にナゲットの生成に消費されるため、発熱は局部的であり、しかも発生したエネルギーの余分は電極に吸収されるため母材に与える熱影響は極めて少ない。消耗品が電力だけで、生産コストが他の溶接方法に比べ低くできる。溶接スイッチを押すだけで一連の溶接工程が自動で行われるため溶接結果が作業者の技量に左右されることがない。などの利点を持っているため金属薄板を短時間で大量に接合することに適しており、自動車の製造や鉄道車両、航空機、家電製品など多様な分野において使用されている。また、一台の抵抗溶接機で多種多様な金属を簡単に溶接することが可能であるため、大量生産の現場以外の工場でも活用されている³⁾。

スポット溶接による異種金属接合の例として、渡辺らはSS400(板厚:0.8mm)とAl-Mg合金板A5052-H24(Al-2.84at%Mg, 板厚:1.2mm)とのスポット溶接を行っている⁴⁾。その際、インサート材としてA1050を挿入し、生成する金属間化合物層の厚さを $2\mu\text{m}$ 以下に抑制することで、十字引張試験で1300Nの十字引張荷重でボタン破断した。

1-2-2 摩擦攪拌接合

摩擦攪拌接合(以後FSW)とは、先端に突起のある円筒状の工具を回転させながら強い力で押し付けることで突起部を接合させる部材(母材)の接合部に貫入させ、これによって摩擦熱を発生させて母

材を軟化させるとともに，工具の回転力によって接合部周辺を塑性流動させて練り混ぜることで複数の部材を一体化させる接合法である．FSWの大きな特徴として，板材を固相のまま溶かさずに接合できることが挙げられる．このことで，従来の溶接法にはなかった多くの利点が生まれる．例えば，従来の溶接法による接合部は母材と比較して弱いとされてきたが，FSWによる接合部は動的再結晶によって結晶粒が微細化し，母材よりも強度が増加する例が多く見られる．また，スパッタが発生せず接合部外観が良好で，入熱量が少ないことから溶接変形が抑制され，残留歪みが少ないこと，合金組成の変化が抑制されることなどから，品質に優れた接合部を得られることも特徴である．そのため，ジュラルミンや，アルミニウム casting 材，マグネシウム合金など，溶接が難しい金属材料の接合が可能といわれており，大きな注目を集めている⁵⁾．

異種金属接合の例として，宮川らは低炭素鋼SPC270Cとアルミニウム合金A5052をFSWを用いて接合している⁶⁾．SPC270CとA5052の界面に生成した金属間化合物層の厚さは1 μ m程度であった．十字引張試験，引張せん断試験の結果はそれぞれ最大0.55kN，2.7kNであった．

1-2-3 レーザ溶接

レーザー加工は指向性，集光性にすぐ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熱加工法である．最近ではレーザーの性能が向上して，レーザー加工の実用化が進み，切断，溶接，半導体の微細加工など幅広く利用されるようになった．レーザー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．

レーザー溶接法は，各種接合法の中でロボット化，自動化，システム化，ライン化，省力化などが可能な高品質・高精度・低変形・高柔軟性・高速・高生産性の接合法である．このような背景から，レーザー溶接法による異種金属材料の接合に対するニーズが増加している．レーザー溶接法は，高エネルギー密度のビーム熱源の高指向性と短時間加熱・高冷却速度の特長を生かし，異材継手の熔融制御により金属間化合物形成の抑制が容易であると考えられる．

本研究で用いたのは，このレーザー溶接法である．

異種金属接合の例として，杳名，尾崎らはSPCC 低炭素鋼（板厚：0.5mm）とA5052 アルミニウム合金（板厚：1mm）をファイバーレーザーとローラを組合せたレーザーロール溶接法を用いて重ね継手を作製している⁷⁾．レーザーによる急熱急冷の熱サイクルにより脆弱な金属間化合物の生成を抑制し，引張せん断試験において高い継手強度を得ることができたことを報告している．最大の引張せん断強さを出した試験片は，金属間化合物層の厚さが10 μ m以下で，SPCC母材で破断した．

Sierraらは，YAGレーザーを用いてキーホール溶接を行い，DC04鋼（板厚1.2mm）と6016-T4アルミニウム合金（板厚1mm）の重ね継手を作製している⁸⁾．その際，強度の増加を目的に平行な2本のレーザー溶接部を形成する2パスでのレーザー溶接を試み，1パス，2パスの溶接で，それぞれ溶込み深さ200 μ mで最大150N/mm，250N/mmの引張せん断荷重値を得ており，継手強度が増加することを報告している．しかし，レーザー溶接部の2パスの間隔が継手強度に与える影響については検討されていない．

1-3 研究目的

レーザを用いたキーホール溶接でFeとAlの溶融量を制限し，金属間化合物層の成長を抑制することで，機械的特性の優れた．しかし，鉄鋼材料とアルミニウムのレーザを用いたキーホール溶接は報告例が少なく，金属間化合物層についてはあまり検討されていない．

そこで本研究ではアルミニウムへの鉄鋼材料の溶込みを抑制し，FeとAlの溶融混合量を制限したレーザ重ね継手をキーホール溶接によって作製した．その際に，溶接速度を変化させて実験を行い，引張せん断試験，溶接金属部及び接合界面での，溶込み状態，元素の混合状態，生成相，硬さ特性などを調べることで継手性能に及ぼす溶接速度の影響，接合界面に生成する化合物層と継手強度の関連性について検討した．

また文献を調べた結果，継手強度の増加を目的にビードを2パス作製した場合に，ビード間隔が継手強度に与える影響について検討されていないことから，ビードの間隔が継手性能に及ぼす影響についても検討した．

第 2 章 実験装置及び実験方法

2-1 実験装置の構成

本研究で使用したレーザ溶接装置の構成を Fig.2-1 に示す。レーザ発振器は、定格出力：1kW，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 ZnSe 製集光レンズによって集光され，被加工材表面に照射される。集光レンズの焦点距離の調整を行うため，集光レンズ台は前後にスライドするようにガイドを設けてある。レーザ発振器とレンズホルダーの間にレーザ遮断装置を設置した。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可動する。この駆動シリンダーの上下運動は時間設定器によって制御する。レーザビームは反射鏡が最下部にあるときには下方に反射され下部の耐火レンガに照射され，最上部にあるときには反射鏡で反射されずに集光レンズに到達する。

次に試験片の固定治具の装置図面を Fig.2-2 に示す。固定治具の試験片を固定する部分は上部にあるピッチ 1mm のネジにより吊られた状態になっており，ネジの頭に 36°ごとに引かれた線によって試験片の位置を 0.1mm ずつ上下に調節することができる。固定治具は左右に可動な，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）の上部に取り付けられ，レーザ光の照射に同期して左右に動作する。電動スライダの動作は接続された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に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）により行われる。この動作プログラムにより溶接速度や溶接長を設定する。

2-2 供試材

供試材として、冷間圧延鋼板（以下 SPCC）と工業用純アルミニウム（以下 A1050）を用いた。試験片の形状を Fig.2-3 に示す。それぞれの材料の化学組成を Table2-1 に、主要な物性値を Table2-2 に示す。

2-3 実験方法

Fig.2-4 に示す様にレーザー入射側に SPCC を、裏側に A1050 を取り付けた後、レーザー発振器の操作パネルでレーザー出力の調整を行い、電動スライダの作動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実行した。溶接中はレンズの保護のため窒素ガスをシールドガスとして使い、ガス流量は 20l/min とした。またレーザーを照射してから電動スライダが動き出すまでの時間を 1sec とし、焦点は試験片表面で結ばれるようにレンズ位置を調整した。

本研究においては以下の条件で溶接実験を行った。

レーザー出力	・・・	1 kW （一定）
材質	・・・	SPCC （レーザー入射側母材） A1050 （裏側母材）
板厚	・・・	1.0 mm （SPCC） 1.5 mm （A1050）
溶接速度	・・・	20, 30, 40 mm/s
レンズ焦点距離	・・・	127 mm
焦点はずし距離	・・・	±0 mm

重ね幅	・・・	13 mm
溶接長	・・・	100 mm

2-4 ビード断面観察及び顕微鏡組織観察

エメリー研磨紙(#80～#2000)で研磨，バフ研磨し鏡面仕上げをした後，3%ナイトルに10秒浸しエッチングをした．その後，光学顕微鏡でビード断面及び顕微鏡観察組織を観察した．

2-5 引張せん断試験

継手強度を測定するために用いた引張試験機を Fig.2-5 に示す．引張試験機中央部の鋼板(Central plate)とロードセル(Load cell)に固定した治具(Jig)に5mm幅に切り出した継手を取り付ける．試験機の両端の柱はねじ切りされており，上部にあるモーターによって歯車を回し，中央部の鋼板を上方向へ移動し，接合部に引張張力を負荷する．この際に生じる荷重をロードセルにより測定し，試験片のせん断荷重を求めた．

2-6 硬さ試験

溶接金属，接合界面に形成された化合物の硬さを，マイクロビッカース硬度計(ミットヨ製 MODEL-MVK TYPE D)を用いて測定した．本実験では荷重を50gとした．用いた計算式を下に示す．

$$\begin{aligned}
 H_v &= \frac{\text{Applied load [kg]}}{\text{Contact area of indenter [mm}^2\text{]}} \\
 &= \frac{2 P \sin \theta / 2}{d^2} \times 1000 \\
 &= 1854.37 \frac{P}{d^2}
 \end{aligned}$$

H_v : Vickers hardness number [kg/mm²]

P : Applied load [g]

θ : Angle between opposite faces [136°]

d : Diagonal indentation [mm]

2-7 SEM 観察及び EPMA 分析

本実験では走査電子顕微鏡 (SEM : Scanning Electron Microscope JEOL 製 JXA-8900R) を用いて、接合界面付近の顕微鏡組織観察を以下の手順で行った。

- ① 銅粉樹脂に埋め込んだ試験片をエメリー研磨紙 (# 80 ~ # 2000) で研磨し、その後バフ研磨し鏡面仕上げをした。
- ② エタノールで洗浄した後、SEM により観察した。

同時に電子プローブマイクロアナライザー EPMA (Electron Probe (X-ray) Micro Analyzer JEOL 製 JXA-8900R) を使用して溶接金属、化合物を調べた。EPMA は固体試料表面に細く絞られた (ミクロンからサブミクロンの大きさ) 電子線 (プローブ) を照射して、試料と電子線との相互作用により発生する特性 X 線を効率よく検出することにより、試料を構成している元素とその量 (重量パーセント : wt%) を知ることができる分析機器である。分析しようとする試料表面上の任意、あるいは特定の場所に存在している元素の定性・定量分析、すなわち、目的とする分析場所 (μm オーダー) にどのような元素 (${}^4\text{Be} \sim {}_{92}\text{U}$ の構成) が、どのような割合 (0.001 wt% 以上)

で存在しているかを知ることができる。その分析手段方法として、点分析、線分析、面分析（広域カラーマッピングを含む）があり、いずれも、それぞれの最小分析（情報）領域は $1\mu\text{m}^3$ である（たとえばサブミクロンの大きさの電子線を照射しても、発生する特性 X 線の最小領域は $1\mu\text{m}^3$ である）。加速電圧 15kV, ビーム電流 $3.0 \times 10^{-8}\text{eV}$ の条件で分析した。

第 3 章 1 パスのレーザ溶接部における継手性能の検討

3-1 ビード断面観察及び顕微鏡組織観察

溶接金属及び重ね継手の溶込み形状の観察を行った。溶接ビード断面のマクロ組織を Fig.3-1 に示す。図の (a), (b), (c) はそれぞれ溶接速度 20, 30, 40mm/s のものである。また、写真の上部が SPCC 材、下部が A1050 材である。

全ての場合において溶接金属の断面形状はワインカップ状であり、レーザ照射側の SPCC 材表面側にお椀型の溶接金属が形成され、SPCC 材板厚中央部から A1050 材との界面部へかけて幅の狭い溶接金属が形成されている。溶接速度の増加に伴って溶接入熱が減少するので、溶接部の溶融量が減少している。特に A1050 材の溶融量が溶接速度の増加に伴って減少している。溶接速度と溶込み深さの関係を Fig.3-2 に示す。写真に示すように溶接金属の上下方向の長さを溶込み深さとした。溶接速度 20mm/s の条件では、溶込み深さは 1.4mm 程あるが、溶接速度が 30, 40mm/s になると、溶接入熱が減少して溶融量が減少するため 1.2mm, 1.1mm 程度まで減少する。Fig.3-3 は、写真に示すように、界面上の溶接金属の幅を溶融幅として、溶接速度と溶融幅の関係を示したグラフである。溶接速度 20mm/s の条件では、溶融幅は 0.8mm 程あるが、溶接速度が 30, 40mm/s になると 0.4mm, 0.3mm 程度まで減少する。溶込み深さ、溶融幅ともに、溶接速度の増加つまり入熱の減少に伴って減少する。

SPCC/A1050 界面部近傍の断面組織を Fig.3-4 に示す。溶接金属と SPCC 材との溶融線は滑らかな溶融線であるが、溶接金属と A1050 材との境界（溶接金属底部のボンド部）に大きい凹凸のある層が観察された。

3-2 硬さ試験結果

溶接金属，凹凸のある層内の硬さ測定を行い，硬さ分布を調べるとともに，得られた硬さから凹凸のある層内に生成する金属間化合物の類推を行った．Fe-Al 金属間化合物の硬さ²⁾を Table3-1 に示す．SPCC 及び A1050 母材のビッカース硬さは 110Hv 及び 40Hv(実測値)程度である．

Fig.3-5 に示す位置で溶接金属内の硬さ測定を行った．溶接金属部中央(a)の硬さ分布，SPCC と A1050 重ね部から SPCC 側に 200 μ m と A1050 側に 50 μ m の場所で板厚方向に垂直な方向(b)の硬さ分布を測定した．まず溶接金属部中央の上下方向の硬さ分布を Fig.3-6 に示す．溶接金属部では，約 400Hv に硬化していた．一部，溶接金属と A1050 との境界で約 800Hv の硬化層が見られた．これは FeAl₃ に相当する硬さである．また A1050 母材部で界面近傍では 30Hv 程度であるが離れるにつれて 40Hv 程度まで増加した．これは，界面近傍では溶接熱により，HAZ 部(熱影響部)で回復，再結晶が生じ，転位密度が減少したため軟化したのだと考えられる¹⁰⁾

次に界面から SPCC 側に 200 μ m の場所の板厚方向に垂直な方向の硬さ分布を Fig.3-7 に示す．縦軸にビッカース硬さ，横軸に溶接金属中心線からの距離をとっている．SPCC 側の溶接金属内の硬さ分布は，溶接金属内で硬さが高くなっておりそれぞれ母材硬さより高い値を示している．溶接速度 20mm/s の条件で，350~400Hv 程度であり，これは金属間化合物 Fe₃Al に相当する硬さを示している．溶接速度 30, 40mm/s の条件でも約 330~400Hv 程度とそれに近い値を示している．SPCC の HAZ 部で硬さが 200~250Hv 程度まで増加している．これはレーザ溶接の急熱急冷の熱サイクルを受けて，母材の HAZ 部が焼入効果によって硬化したためだと考えられる¹⁰⁾．

次に界面から A1050 側に 50 μ m の場所のレーザ照射方向と水平方

向の硬さ分布を Fig.3-8 に示す. A1050 側の溶接金属内の硬さ分布は, 中央部では溶接速度 20mm/s で 420Hv 程度, 溶接速度 30, 40mm/s で 360Hv 程度と SPCC 側での値より高い値を示した. 界面付近で溶接速度 30mm/s において 800Hv 程度の高い値を示した. これは FeAl_3 に相当する値を示している. また, 溶接速度 30, 40mm/s で 600Hv 程度の硬さを示している. しかし, 圧痕の対角線の長さが硬い箇所でも約 $11\mu\text{m}$ あり, 圧痕の大きさでの平均的な硬さを示しているだけで, 生成する金属間化合物そのものの硬さを示していない. したがって, Al リッチな金属間化合物相当の硬さを示しているが, それらのみが生成しているとは特定できない. そこで, より詳しく調べるために EPMA で化学組成を調査した.

3-3 溶接部の SEM 観察及び EPMA 分析結果

溶接金属及び接合界面に生成した凹凸のある層の組成を推定するため EPMA によって化学組成を調査した. Fe-Al 金属間化合物の組成を Table3-2 に示す. Fig.3-9 に溶接速度 20mm/s における溶接部の SEM 写真および EPMA 点分析結果を示す. 明るい領域は Fe 地であり, 暗い領域は Al 地である. Line I では界面から SPCC 材側に $200\mu\text{m}$ の位置, Line II では A1050 材側に界面から $50\mu\text{m}$ の位置で板厚方向に垂直な方向へ点分析した結果を示す. Line I では溶接金属部において全体的に 20at% を超える Al が検出された. これは溶融された A1050 材が希釈されたために検出されたのだと考えられる. SPCC 母材部ではほとんど Al は検出されなかった. Line II では中央部で Line I と同様 20at% ほどの Al が検出されているが A1050 母材に向けて Al の値が上昇しているのが分かる. また Al が 40at% を超える値が界面付近の凹凸のある層内で検出された.

Fig.3-10 に溶接部の SEM 写真と溶接金属のほぼ中央をビード中心

線に沿って EPMA 点分析を行った結果を示す。SPCC 材表面では 10at%程度の Al が 700 μ m の位置から A1050 母材に向けて Al の値が上昇しているのが分かる。界面付近では Al 含有量 60at%を超える Al リッチな層が検出された。この金属間化合物だと考えられる Al リッチな層を詳しく調べるため界面付近の EPMA 面分析，点分析を行った。Fig.3-11 に(a)，(b)，(c)に示す界面部の面分析結果を示す。Fe と Al の分析結果から，境界部に Al 含有量が高い箇所が観察された。面分析では濃度の定量化が不十分であり，界面部に形成される凹凸のある層の組織を定量できない。そこで，Fig.3-12 に示す 1～16 の箇所について EPMA 点分析を行った。分析結果より No. 3，6 は溶接金属と同等の組成であり，No. 4，5，7，8，13，14，15 は Fe 含有量が約 50～60at%と多く，Fe リッチな比較的延性のある FeAl であると考えられる。つまり，溶接金属中に Fe リッチな金属間化合物が生成していることが考えられる。A1050 との境界付近の No. 1，2，10，11，12，16 では Al 含有量が約 65～84at%と多く，Al リッチの脆性な金属間化合物である FeAl_2 ， Fe_2Al_5 ， FeAl_3 だと考えられる。Al リッチな層の厚さは場所により様々でおよそ 10～30 μ m の幅があった。

同様に Fig.3-13～3-16 に溶接速度 30mm/s の EPMA 分析結果を示す。溶接金属部では Al 量は SPCC 側で 15at%程，A1050 側で 20at%程であり A1050 側に近づくにつれて増加する。Fig.3-16 の界面付近の EPMA 点分析結果より約 60～80at%の Al が検出された。Al リッチな層の厚さはおよそ 10～20 μ m であった。

Fig.3-17～3-20 に溶接速度 40mm/s の EPMA 分析結果を示す。溶接金属部では Al 量は SPCC 側で 4at%程，A1050 側で 10at%程であった。Fig.3-20 の界面付近の EPMA 点分析結果より約 60～80at%の Al が検出された。Al リッチな層の厚さは他の条件と比べて薄くおよそ 5～10 μ m であった。

測定結果より凹凸のある層で、溶接金属中に比較的延性の高い金属間化合物 FeAl が検出され、A1050 母材側で脆性な金属間化合物 FeAl_2 , Fe_2Al_5 , FeAl_3 が検出された。つまり凹凸のある層は溶接金属中に Fe リッチな金属間化合物が生成した層と、A1050 側では Al リッチな金属間化合物層が存在すると考えられる。以下、この2つの層をまとめて混合層と呼ぶ。また Al リッチな金属間化合物層の厚さは溶接速度が高速になるにつれて減少しているのが分かる。

3-4 継手の引張せん断試験結果

異材継手の引張せん断試験を行い、その最大引張荷重値を測定した結果を Fig.3-21 に示す。溶接金属の溶融幅、溶込み深さと同様に溶接速度が高速になるにつれて最大引張荷重値が減少しているのが分かる。これは溶接入熱が小さくなるにつれて接合面積が減少したためだと考えられる。溶接速度 20mm/s で最大荷重 540N が得られた。

次に破断経路を調べるため継手の破断状況を Fig.3-22 に示す。実線で囲まれている部分が溶接金属部である。写真から分かるように全ての条件で、溶接金属底部のボンド部で分離していることが分かる。このことから、溶接金属底部のボンド部の脆性な金属間化合物層で破断していると考えられる。

次に引張せん断試験片の 5mm の幅と Fig.3-3 に示した溶融幅との積がせん断荷重を負担する面積と考え、最大引張荷重値を面積で除した値を継手強度とし、応力換算したものを Fig.3-23 に示す。応力換算したものでは荷重値とは反対に溶接速度が高速になるにつれて値が増加している。つまり、単位面積当たりの破断荷重は入熱を小さくすると増加する。

従来報告されている鉄鋼材料とアルミニウムの接合は金属間化合物層を薄く抑制することに注視している¹¹⁾。入熱を小さくすること

でせん断面積当たりの破断荷重が増加していることに混合層もしくは、Alリッチの脆弱な金属間化合物層の厚さが関係しているのではないかと考え、Fig.3-24に混合層の厚さ、Alリッチの脆弱な金属間化合物層と溶接速度の関係を示す。写真に示す斜線の部分を混合層とし厚さの平均をとった。溶接速度が高速になるにつれて混合層と脆弱な金属間化合物層の厚さ、が減少している。入熱を小さくすることで、FeとAlの溶融混合量が減少し混合層、脆弱な金属間化合物層の成長が抑制され、混合層、脆弱な金属間化合物層の薄くなることで、単位面積当たりの破断荷重が増加したと考えられる。

3-5 化合物層生成過程の考察

Fig.3-4に示したように溶接金属とA1050母材との境界(溶接金属底部のボンド部)には大きな凹凸がいずれの条件でも観察された。またナイトル液による腐食で腐食程度が大きく異なる組織が観察された。凹凸の大きい領域内は腐食されにくい性質があり、組織内に粒界などが観察されにくい。溶接金属のワインカップ脚部分は、A1050材の希釈によってFeとAlが混合されているはずである。凹凸部がA1050材の不完全な混合に起因する物であるかどうかを確認するために、SPCC/SPCCの重ね継手溶接と、厚いSPCC板のビードオンプレート溶接を以下の条件で行った。

SPCC/SPCC		
レーザー出力	・・・	1 kW (一定)
材質	・・・	SPCC (レーザー入射側母材) SPCC (裏側母材)
板厚	・・・	1.0 mm
溶接速度	・・・	20, 30, 40 mm/s

ビードオンプレート溶接

レーザー出力	・・・	1 kW (一定)
材質	・・・	SPCC
板厚	・・・	1.6 mm
溶接速度	・・・	20, 30, 40 mm/s

Fig.3-25 に溶接ビード断面マクロ組織を示す。図の上側から順に SPCC(t=1.0mm)/A1050(t=1.5mm) , SPCC(t=1.0mm)/SPCC(t=1.0mm) での重ね継手溶接, SPCC(t=1.6mm)でのビードオンプレート溶接の組織を示す。左側から順に溶接速度 20mm/s, 30mm/s, 40mm/s の順に並べてある。SPCC 同士の重ね継手は間に界面を一つ挟むため、ビードオンプレート溶接に比べて溶込み量が少ないが、溶接金属の形状は類似している。溶接金属底部はどちらも SPCC 材と A1050 材の異材溶接で観察された形状とは異なり、滑らかな境界線である。つまり、溶接金属底部に観察される凹凸は本異材接合の特徴と考えられる。

溶接金属とアルミニウム母材との境界において溶接金属がアルミニウム母材に凸状に入り込む現象は、次のような機構と推定される。通常、溶接部の温度分布は加熱源に近い位置ほど高温に加熱されている。一方、通常の溶接では母材金属と熔融金属とは同一か、あるいはほぼ同一の化学組成であるから、熔融開始温度以上に加熱される領域（溶接金属となる領域）は、加熱源からの熱流束にしたがって熱源に近い領域に形成される。Fig.3-26 は溶接金属底部の実際の温度分布と被溶接材の液相線温度分布を模式的に示した説明図である。熱源は鉄系材料側からのレーザー照射によるものであるから、実際の温度は深さの増加に伴って低下すると予想される。溶接金属の

温度が鉄系材料の液相線温度より高い範囲（Fig.3-26の位置Aより左側）では，通常の溶接金属が形成される．位置Aより右側では実際の温度が鉄系材料の液相線温度より低いため，未溶融の領域（A～B）が存在する．位置Bより右側はアルミニウムであるため，B点では液相線温度が不連続に低下する．一方，温度分布は連続した金属であるからB点でも連続している．（なお，B点では熱伝導率，比熱，密度などの材料の物理物性も大きく変化するので，温度分布は図示したような滑らかな曲線にはならないかもしれないが，温度は必ず連続している．）このため，位置B～Cの範囲は実際の温度が材料の液相線温度より高くなり，溶融することになる．位置Cより右側のアルミニウム母材では温度が液相線温度より低く，溶融は全く生じない．すなわち，溶接金属底部の異材境界部では，アルミニウムの液相線温度が鉄系材料に比べて著しく低いために，溶接金属底部の境界の鉄系材料側温度が鉄系材料の液相線温度に達していない状態で，界面のアルミニウム側温度がアルミニウムの液相線温度以上に加熱される状況が発生する．すなわち異材材料界面部の溶融時には，凝固時における溶質原子のミクロ偏析に起因する組成的過冷却（Constitutional super-cooling）現象¹¹⁾に似た不安定現象が生じる．凝固と溶融という加熱・冷却の向きが反対であるから，組成的過熱（Constitutional super-heating）と呼ぶことにする．組成的過熱のために界面のエネルギー的安定が大きく崩れ，溶融境界部に特異な組織が形成されるのではないかと推定される．

第 4 章 2 パスのレーザー溶接部における継手性能の検討

4-1 実験条件

2パスのビードの間隔が継手強度に与える影響の知見を得るため、以下の条件で溶接を行った。

レーザー出力	・・・	1 kW (一定)
材質	・・・	SPCC (レーザー入射側母材) A1050 (裏側母材)
板厚	・・・	1.0 mm (SPCC) 1.5 mm (A1050)
溶接速度	・・・	20, 30, 40 mm/s
レンズ焦点距離	・・・	127 mm
焦点はずし距離	・・・	±0 mm
重ね幅	・・・	13 mm
溶接長	・・・	100 mm
ビード間隔	・・・	0.5～3.5 mm (0.5mm 刻み)

Fig.4-1 に溶接後の試験片の外観写真を示す。写真に示すように SPCC 端面より 2mm の位置に 1 パス目の溶接部を作製し、そこから 0.5～3.5mm (0.5mm 刻み) の間隔をあけ、十分冷却した後 2 パス目の溶接部を作製した。

4-2 引張せん断試験結果

Fig.4-2-1～4-2-6 に引張せん断試験前の溶接ビード断面写真を示す。左側が1パス目のビードで右側が2パス目のビードである。ビード間隔の狭い条件では溶接金属部，HAZ部が重なっており，ビード間隔が広がるにつれて溶接金属部，HAZ部の重なりが無くなるのが分かる。

Fig.4-3 に2パスでのレーザ重ね溶接の引張せん断試験の結果を示す。横軸に2つのビードの間隔を，左側縦軸にせん断荷重値を，右側縦軸に界面における溶接金属の溶融部幅を示す。図中の○，●は荷重値を，△，▲は溶融部幅である。また，○は1パスの場合，●は2パスの場合の結果である。溶融部幅の△は1パス目のビードの溶融部幅で，▲は2パスのビードの溶融部幅の合計を表している。溶接速度20mm/s，ビード間隔0.5mmの条件で1パス目の溶融部幅がないのは，間隔が近すぎてビードが重なって計測が不可能であったためである。溶接速度30mm/s，ビード間隔3.0mmで約800Nのせん断荷重値が得られ，溶接速度40mm/sにおいてはビード間隔1.5mm以上の条件で約600Nのせん断荷重値が得られた。1パスの条件での値と比べると2倍程のせん断荷重が得られた。またグラフからビード間隔の増加に伴い溶融部幅はほとんど変化しないが，せん断荷重が増加していることがわかる。

Fig.4-4 に示すのは，(a)が溶接速度30mm/s，ビード間隔0.5mmの条件での引張せん断試験後の試験片の断面写真，(b)が溶接速度30mm/s，ビード間隔3.0mmの条件での引張せん断試験後の試験片の断面写真である。写真から見て取れるように(a)ではA1050が屈曲しているのがわかる。この現象はビード間隔の狭い継手に見られた。この現象がビード間隔を広げるにつれてせん断荷重が増加することに関係するのではないかと考えられる。そこで，Fig.4-5 に示すように変形した試験片の角度を変形角と定義して計測した。溶接速度20mm/sの条件はA1050母材部で破断したため計測が出来なかった。

Fig.4-6 に結果を示す。グラフより変形角が減少するにつれて、破断荷重が増加している。引張せん断試験の際に、ビード間隔が狭い条件では試験片が屈曲することで純粋なせん断の力だけではなく、剥離する方向にも力が加わることでせん断荷重が小さくなったものと考えられる。

Fig.4-7 に 2 パスのせん断荷重値を応力換算したものを示す。△, □は 1 パス, ▲, ■は 2 パスでの値である。溶接速度 20mm/s の条件は接合界面での破断ではないので溶接速度 30, 40mm/s の条件のものと比較することが出来ない。そのため、溶接速度 30, 40mm/s の条件のみグラフに示す。グラフより、2 パスにおいても単位面積当たりのせん断荷重はレーザ入熱が小さい方が大きいことがわかる。これは、2 パスにおいても 1 パスと同様、溶接入熱が増加することで溶融量が増加し混合層が成長したためだと考えられる。また、ビード間隔の増加に伴って、継手強度が上昇し 1 パスでの値に近づく。ビード間隔が狭い条件では 1 パスでの継手強度より低い値になっている。これは、ビード間隔が狭い条件では試験片が変形し、高い継手強度が得られなかったためだと考えられる。一方、溶接速度 30, 40mm/s の 1 パスの試験片は Fig.3-6 より変形しておらず、ほとんど剥離の力がかからず引張られたため高い継手強度が得られたのだと考えられる。

Fig.4-8-1~4-8-6 に引張せん断試験後の破断部の写真を示す。2 パスの継手は右側が 1 パス目のビード、左側が 2 パス目のビードである。Fig.4-8-1 より溶接速度 20mm/s の(a)1 パス,(b)ビード間隔 0.5mm の条件では界面部で破断しているが、ビード間隔 1.0mm 以上では 1 パス目のビードで界面破断した後、A1050 母材で破断しているのが分かる。これは 1 パス目側の A1050 母材が変形するため、1 パス目の界面で剥離の力がかかり界面で破断し、その後、溶接速度 20mm/s の条件ではレーザ入熱が大きく軟化した A1050 母材で破断するのだ

と考えられる。溶接速度 30, 40mm/s ではすべての条件において界面部で破断している。

第5章 結言

鉄-アルミニウムレーザー溶接部の継手性能を検討した結果、以下の結論を得た。

- ① 溶接金属の断面形状はワインカップ状であり、溶接金属と A1050 材との境界（溶接金属底部のボンド部）に、溶接金属中に Fe リッチな金属間化合物が生成した層と、Al リッチな金属間化合物層が観察された。
- ② レーザ入熱を小さくすることで、単位面積当たりのせん断荷重は増加する。
- ③ 溶接金属内の硬さはほぼ一定で、溶接金属と A1050 の界面において、溶接金属と比べて硬い Al リッチな金属間化合物層が確認された。
- ④ 溶接速度が増加するにつれ、溶接金属内の Al 含有量が減少した。Al リッチな金属間化合物層の厚さは溶接速度が高速になるにつれて減少した。
- ⑤ 2 パスでの重ね継手のせん断荷重はビードの間隔の増加に伴い増加する。

参考文献

- 1) T. B. Massalski: Binary Alloy Phase Diagrams Volume 1, American Society for Metals, (1986), 148.
- 2) 泰山正則ら：アルミクラッド鋼インサート抵抗溶接法の検討 -鋼/アルミニウムの異材接合に関する研究（第1報）-
溶接学会論文集 14-2(1996)314-320.
- 3) 岡村和哉：抵抗スポット溶接のチリ発生におよぼす加圧方式の影響
(平成19年度 修士論文)
- 4) 渡辺健彦ら：軟鋼と Al-Mg 合金の抵抗スポット溶接
溶接学会論文集 23-3(2005)491-495
- 5) 福田哲夫ら：摩擦かくはん溶接 (FSW) 技術
溶接学会誌 69-7(2000)560-576
- 6) 宮川堅ら：摩擦攪拌作用を用いた Al 合金/低炭素鋼の重ね点接合
溶接学会論文集 26-1(2008)42-47
- 7) 杓名宗春ら：2kWファイバーレーザーを用いた低炭素鋼とアルミニウム合金のレーザーロール溶接
溶接学会論文集 25-4(2007)473-479
- 8) G. Sierra, et al. : WHICH LASER PROCESS FOR STEEL TO ALUMINIUM JOINING? ,Proc.ICALEO2006,Arizona,(2006),CD-ROM
- 9) 片山聖二ら：アルミニウムと鉄のレーザー重ね溶接 -異種金属材料のレーザー溶接性（第2報）- 溶接学会誌 61(1996)52-53
- 10) 溶接学会：溶接・接合工学の基礎
(丸善)
- 11) 片山聖二ら：レーザー圧接法によるアルミニウム合金と低炭素鋼の接合
溶接学会論文集 22-4(2004)572-579
- 12) 有光隆：入門材料力学
(技術評論社)

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．また，本論文中の検討に用いたデータは三重大学工学部平成20年度卒業の松本洋二氏との共同研究によるものです．ここに記して深く感謝致します．さらに本研究を遂行するにあたり，EPMA分析で多大なご協力を頂きました中村昇二氏，材料機能設計研究室の院生，学部生の皆様方に深く感謝致します．

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

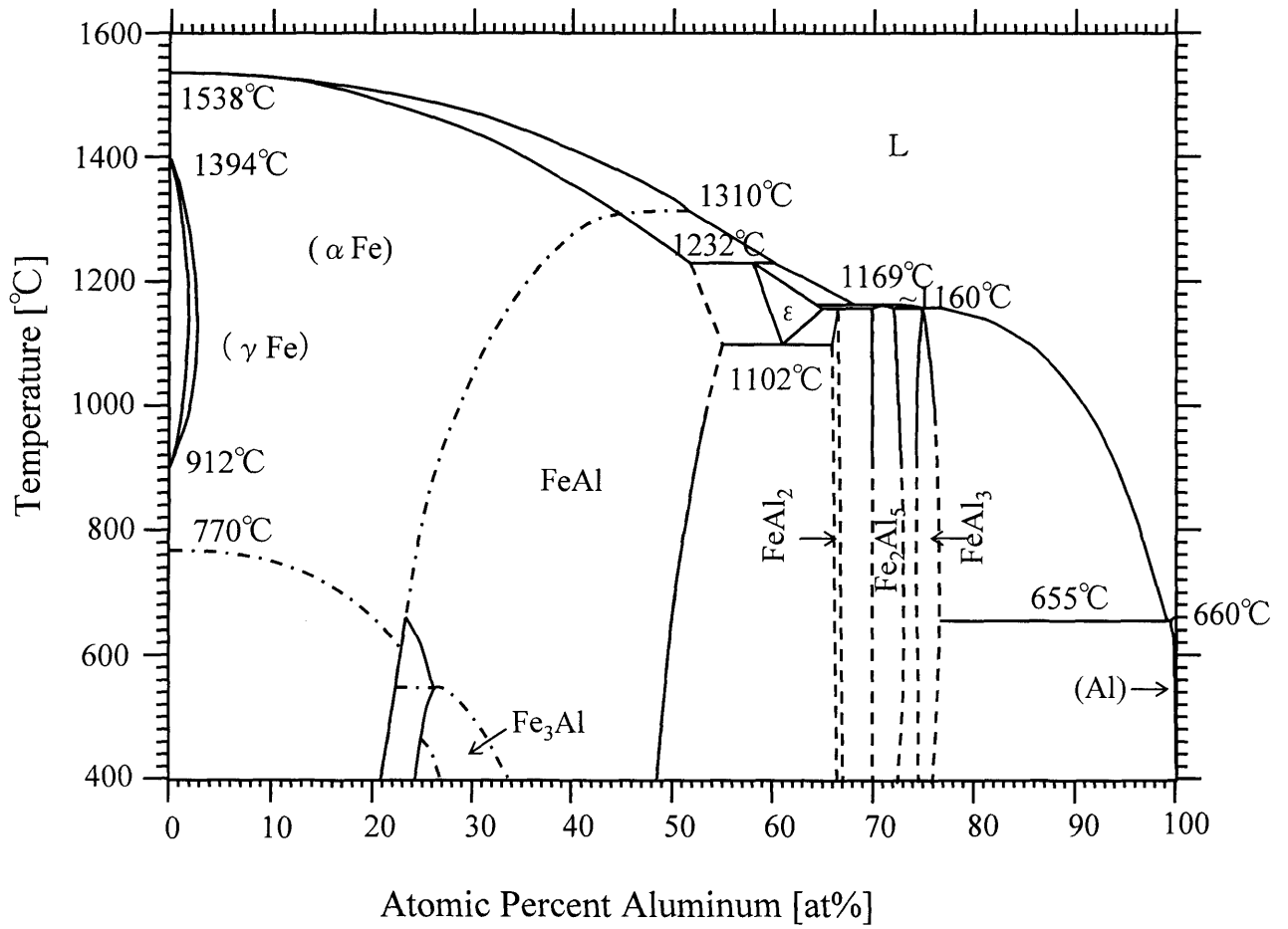


Fig.1-1 Fe-Al binary equilibrium diagram.

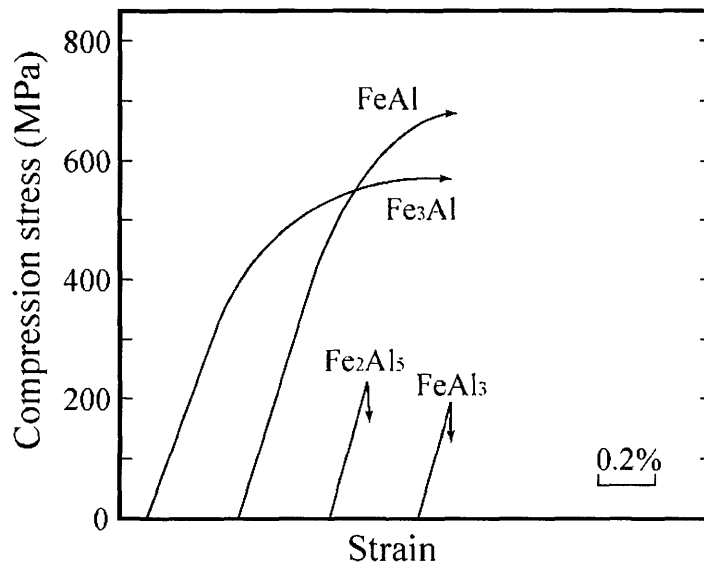


Fig. 1-2 Flow curve in compressive test of Fe-Al intermetallic compounds.

Table 2-1 Compositions of materials used. (mass%)

Material	C	Si	Mn	P	S
SPCC	<0.12	-	<0.50	<0.040	<0.045

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Others	Al
A1050	<0.25	<0.4	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.03	<0.03	Bal.

Table 2-2 Mechanical properties of materials used.

Materials	Tensile strength (MPa)	Elongation(%)	Young's modulus (GPa)	Melting point (°C)
SPCC	344	33.5	200	1536
A1050	75	39	69	646

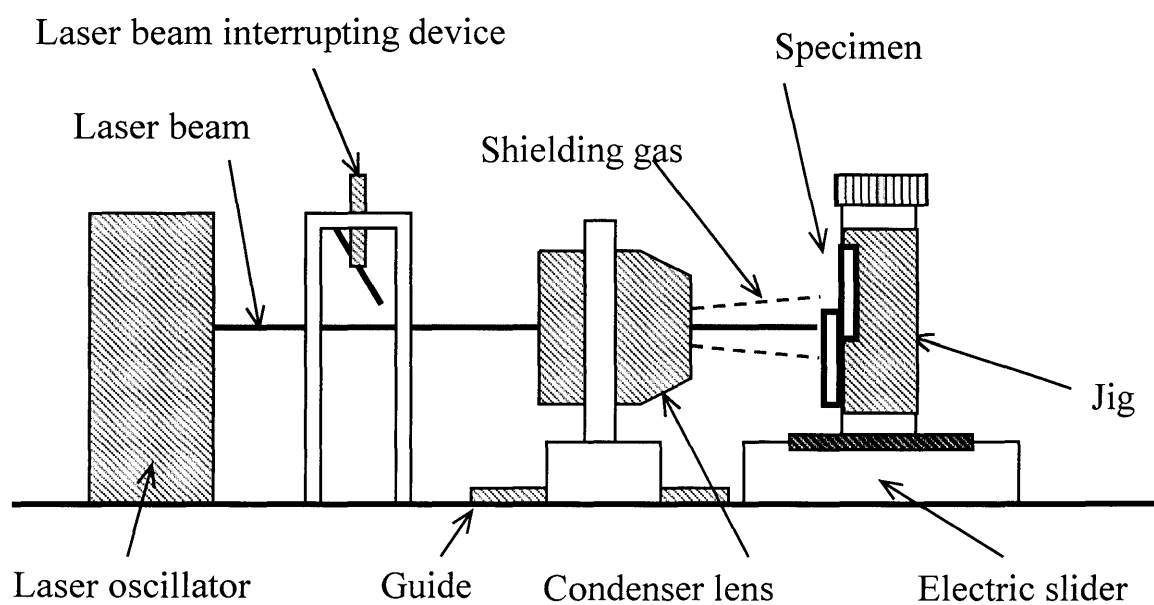
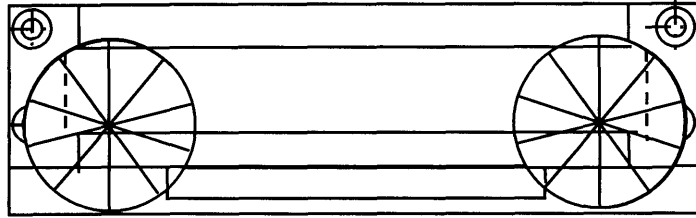
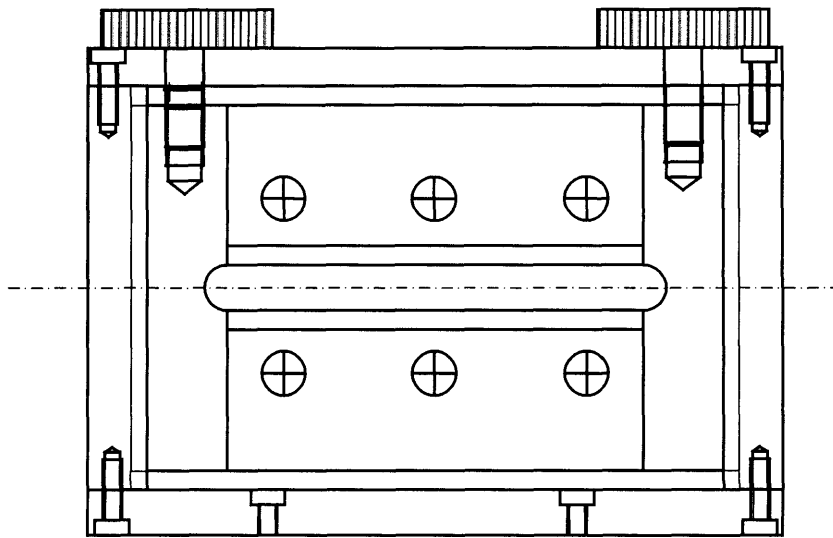


Fig.2-1 Schematic diagram of laser welding equipment.



(a) Top view



(b) Front view

Fig.2-2 Schematic illustration of jig.

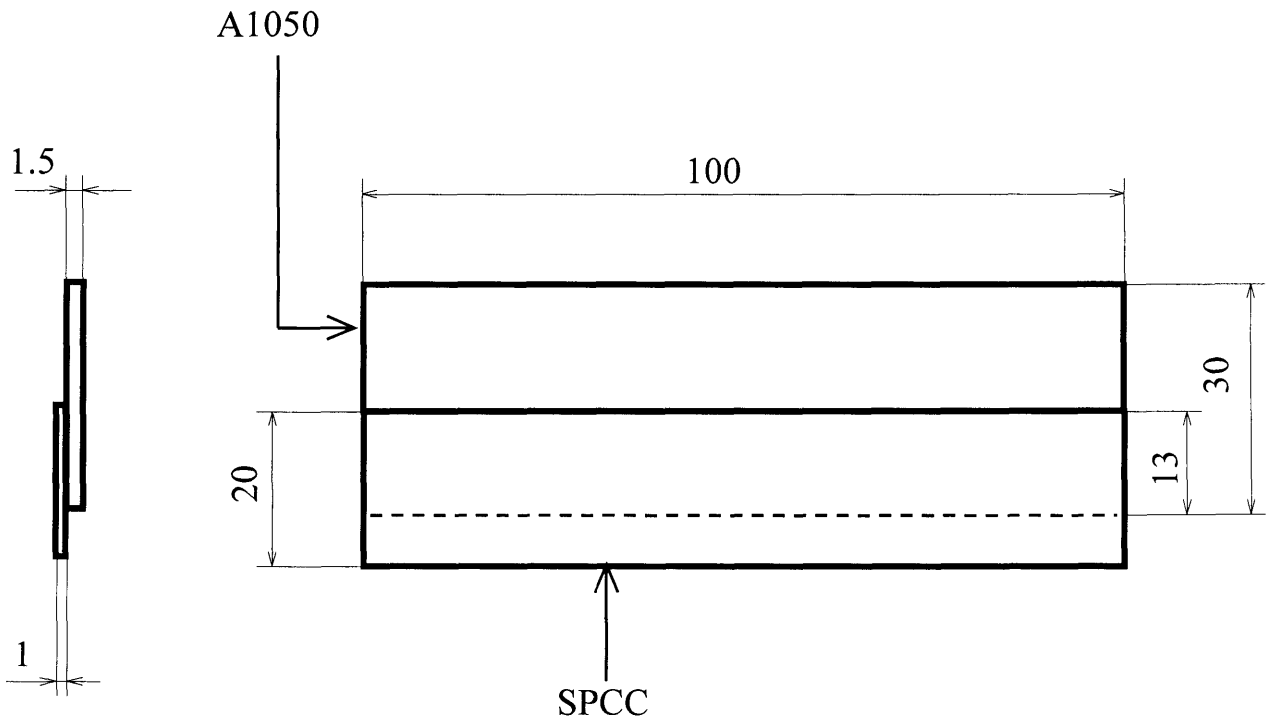


Fig.2-3 Setup of specimens.

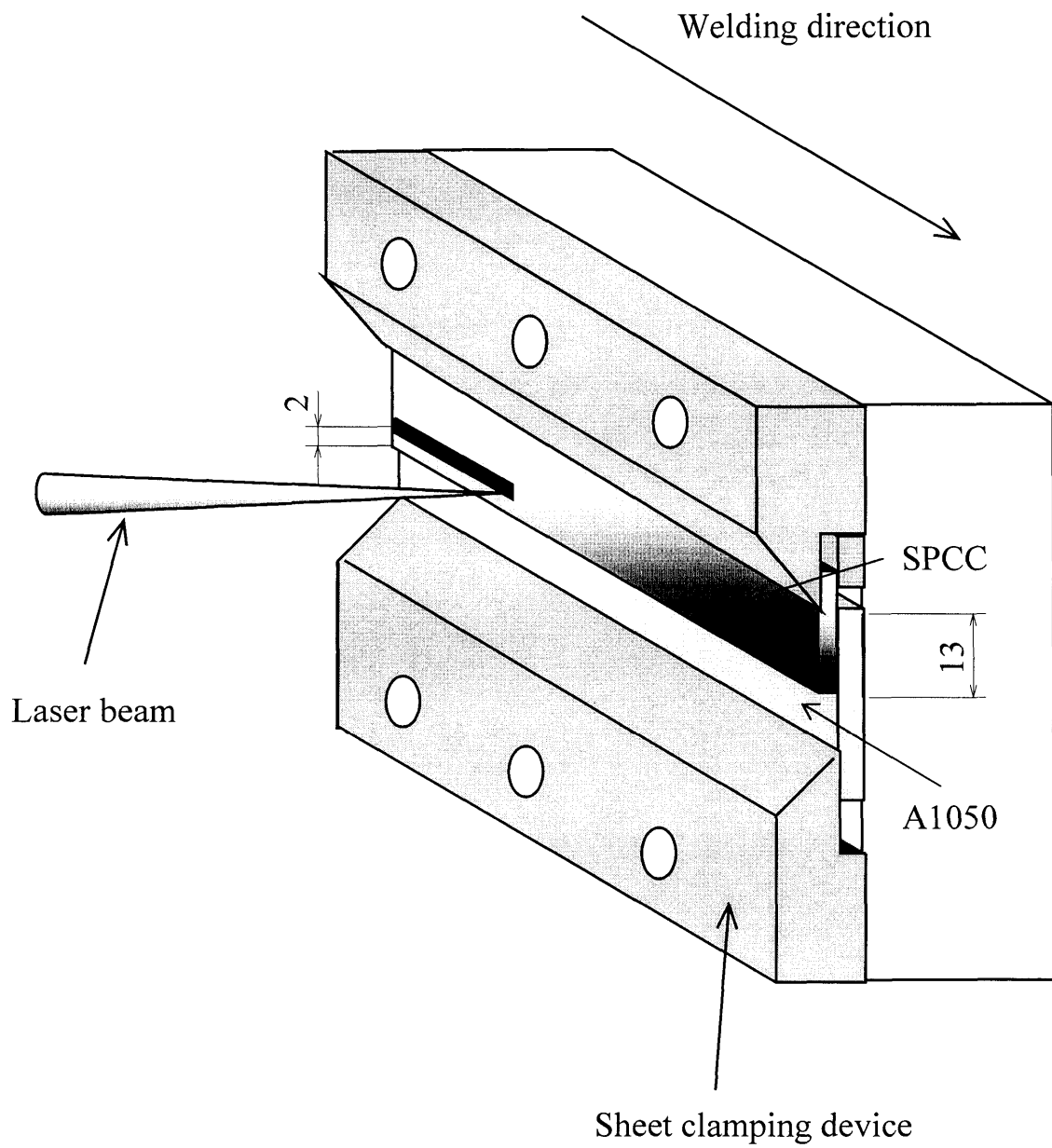


Fig.2-4 Schematic of the experimental setup.

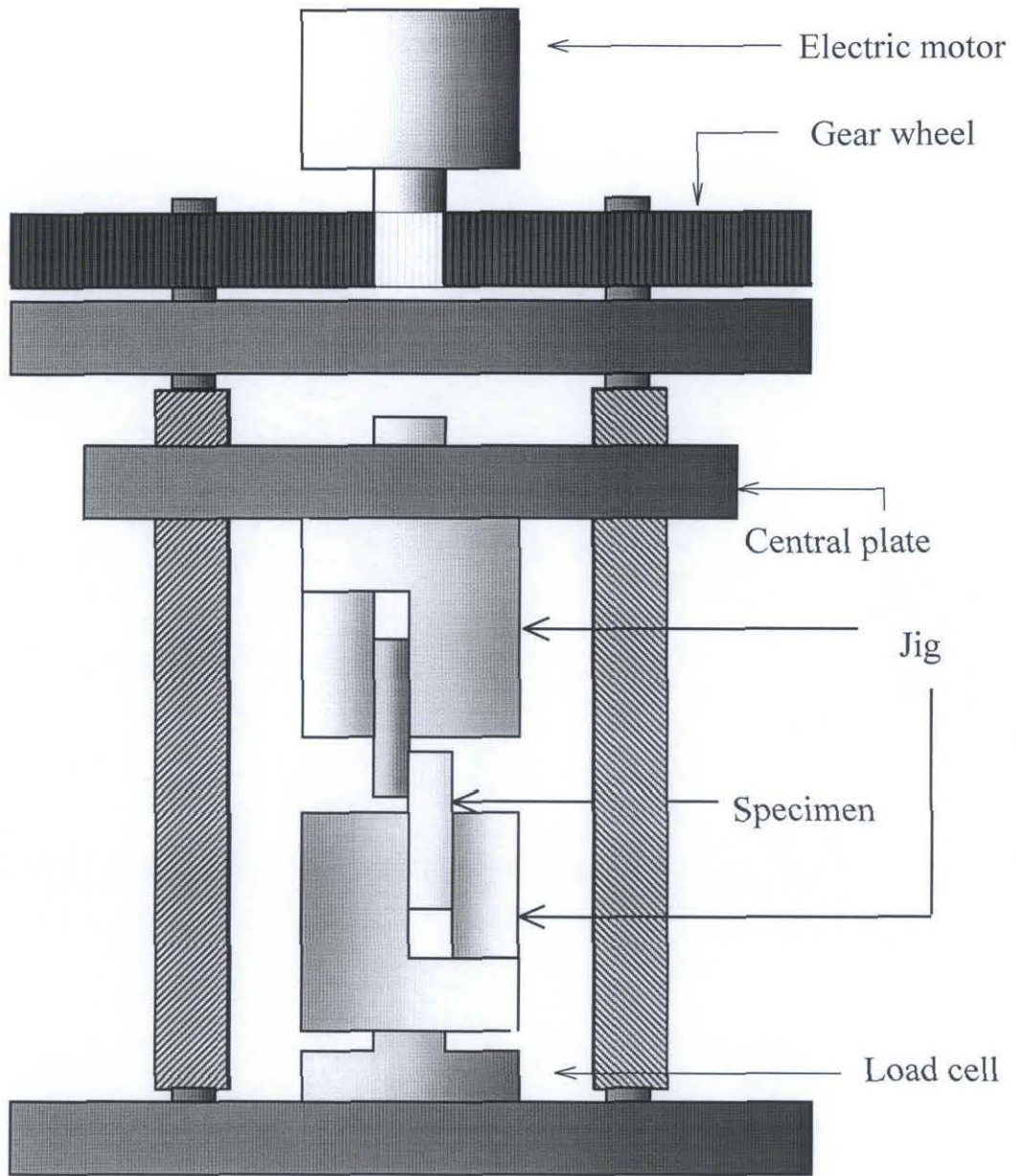


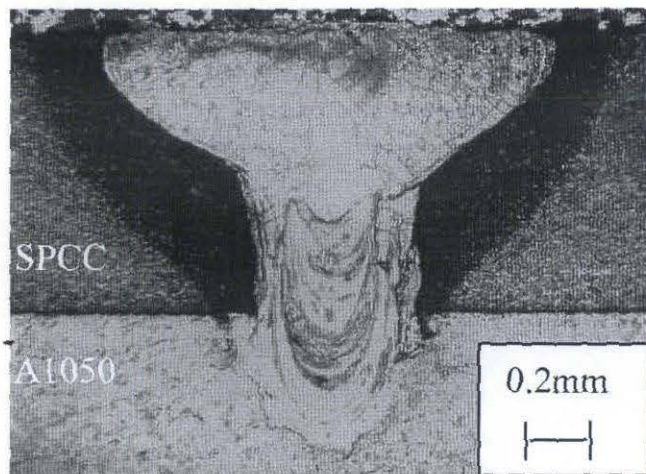
Fig.2-5 Schematic diagram of tensile tester.

Table3-1 Mechanical properties of Fe-Al intermetallic compounds.

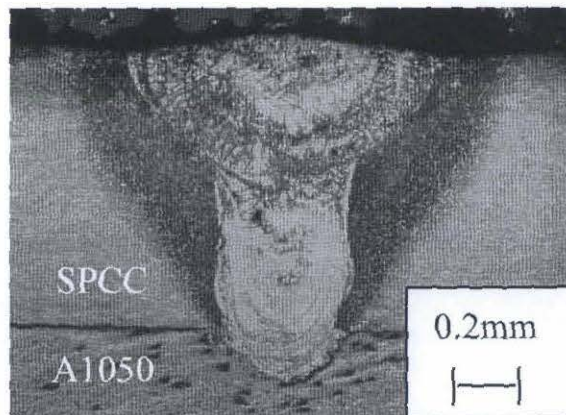
Type of intermetallic compound	Vickers hardness
FeAl ₃	892
Fe ₂ Al ₅	1013
FeAl	470
Fe ₃ Al	330

Table3-2 Compositions of Fe-Al intermetallic compounds.

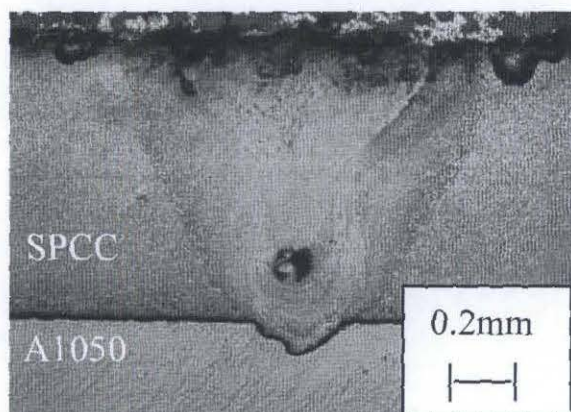
Type of intermetallic compound	At% of Fe	At% of Al
FeAl ₃	25.0	75.0
Fe ₂ Al ₅	28.6	71.4
FeAl ₂	33.3	66.7
FeAl	50.0	50.0
Fe ₃ Al	75.0	25.0



(a) Welding speed = 20mm/s



(b) Welding speed = 30mm/s



(c) Welding speed = 40mm/s

Fig.3-1 Macrostructures of the welds of SPCC/A1050.

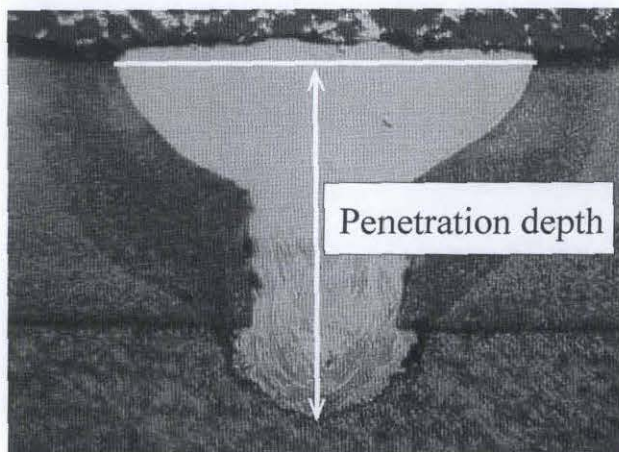
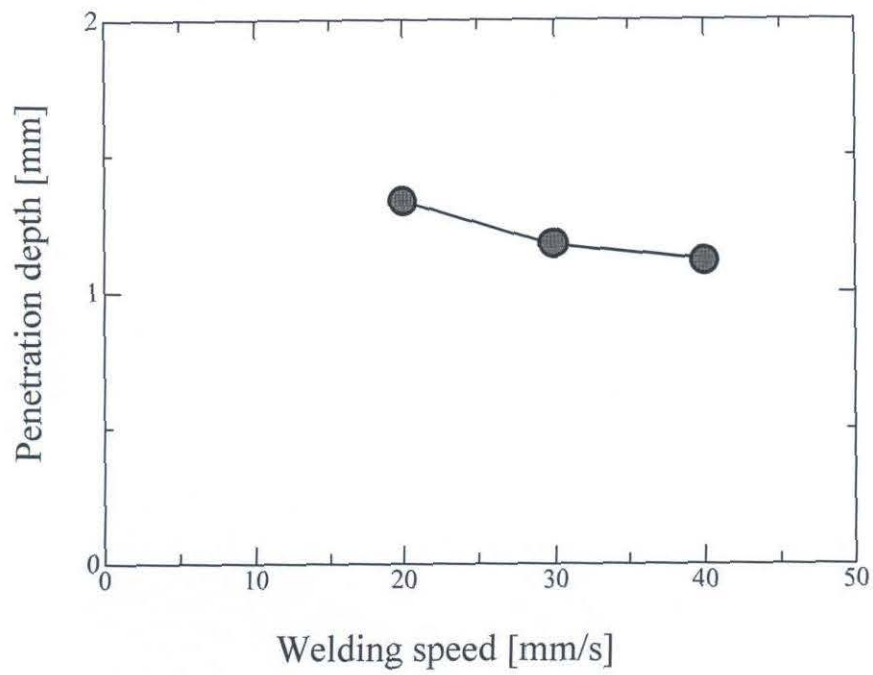


Fig.3-2 Effect of welding speed on penetration depth of SPCC/A1050 dissimilar laser lap joint.

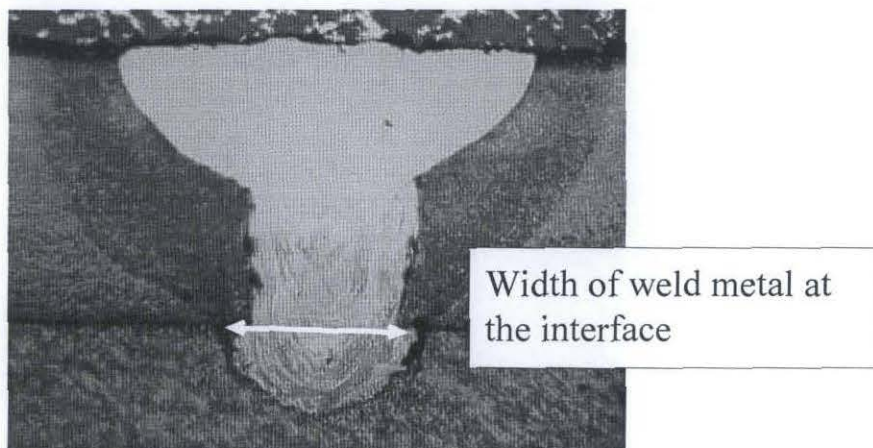
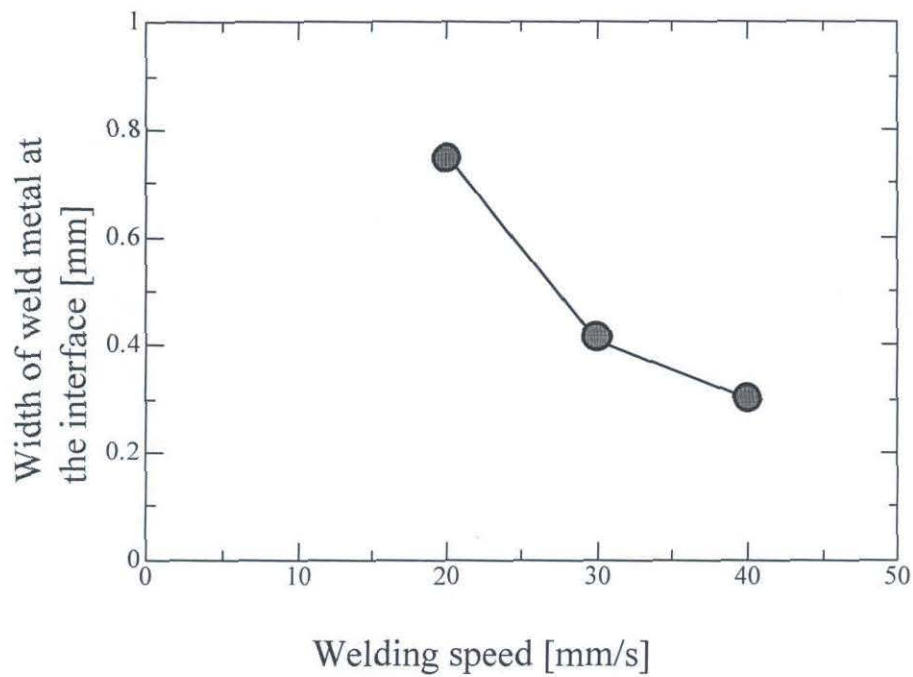
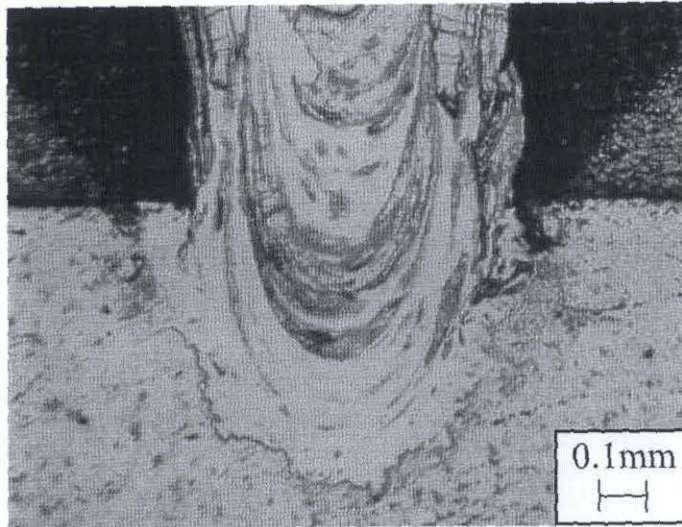
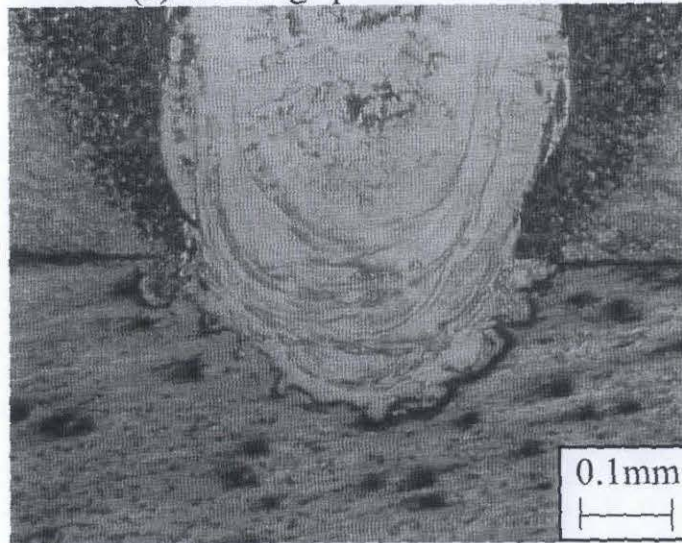


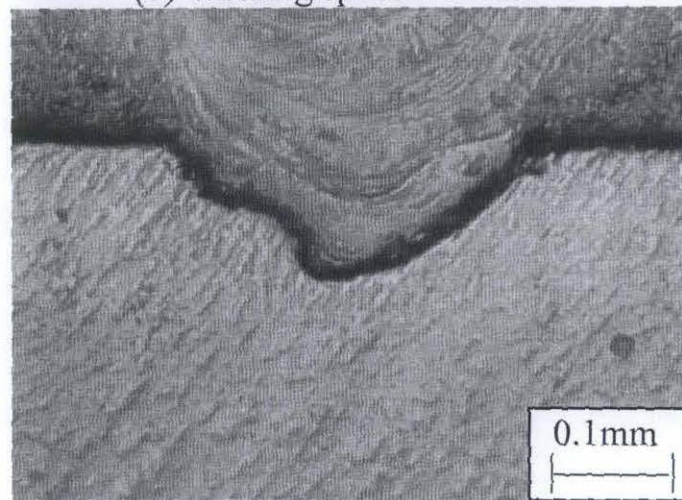
Fig.3-3 Effect of welding speed on the width of weld metal at the interface of SPCC/A1050 dissimilar laser lap joint.



(a) Welding speed = 20mm/s

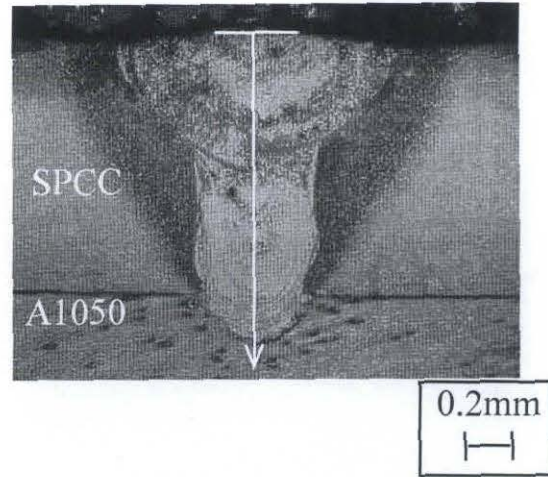


(b) Welding speed = 30mm/s

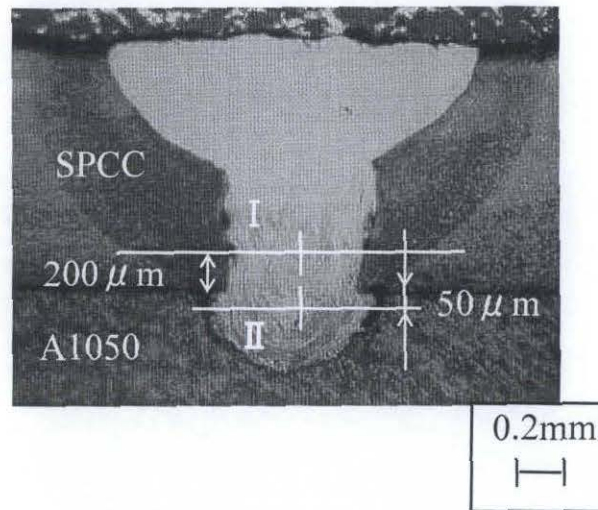


(c) Welding speed = 40mm/s

Fig.3-4 Macrostructures of the weld metal near the interface of the lap joint.



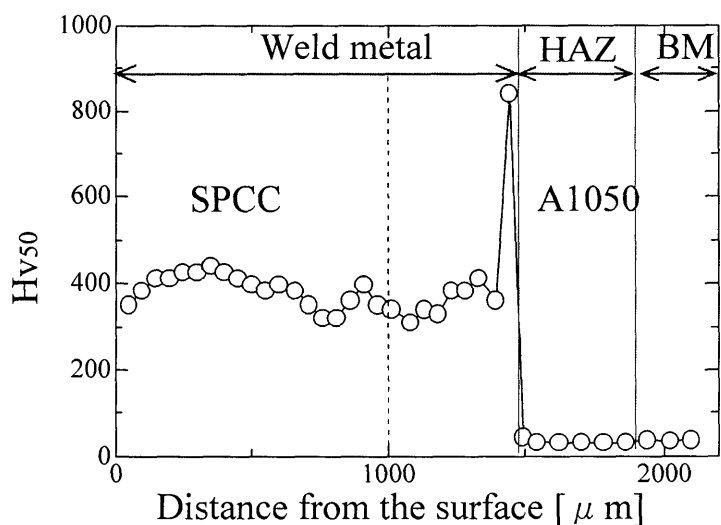
(a) Center of weld metal.



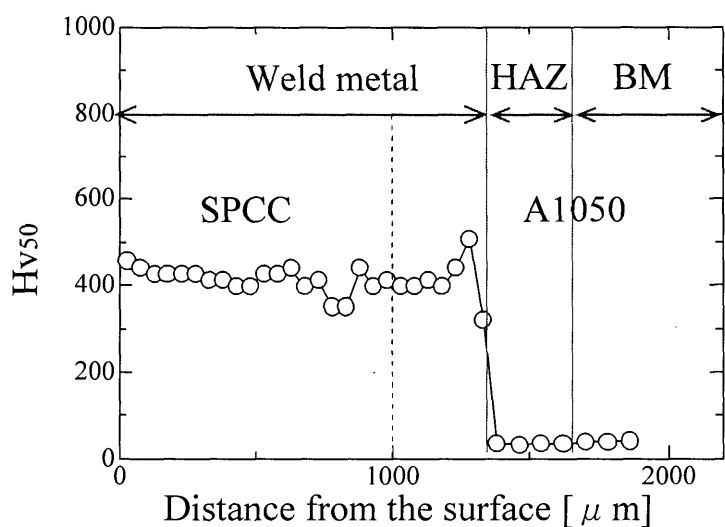
(b) Direction perpendicular to through-thickness direction.

Fig. 3-5 Position where Vickers hardness test was carried out.

(a) Welding speed
= 20mm/s



(b) Welding speed
= 30mm/s



(c) Welding speed
= 40mm/s

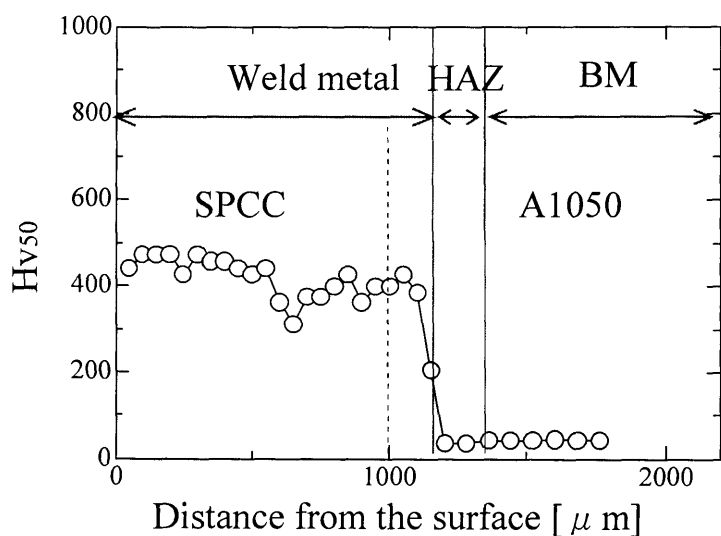
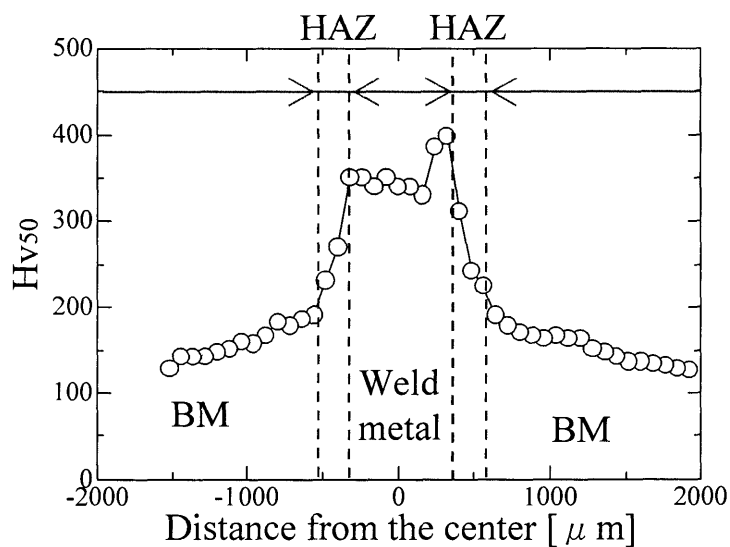
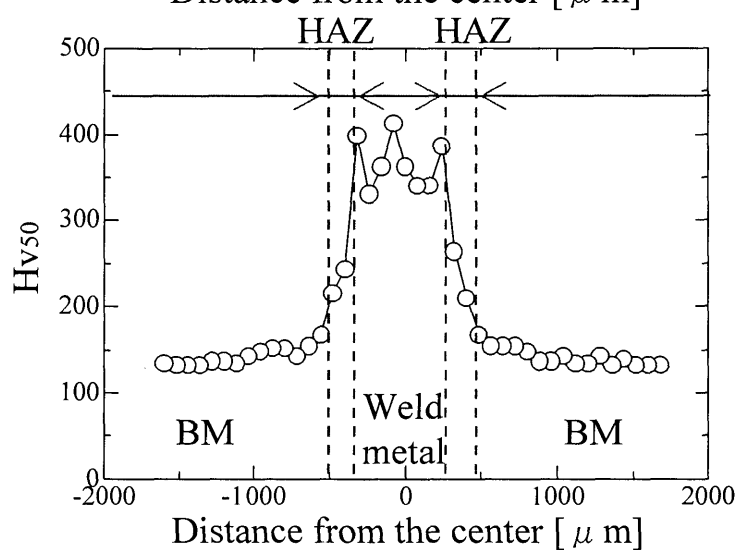


Fig.3-6 Vickers hardness distribution from top to bottom in laser lap weld between SPCC and A1050.

(a) Welding speed
= 20mm/s



(b) Welding speed
= 30mm/s



(c) Welding speed
= 40mm/s

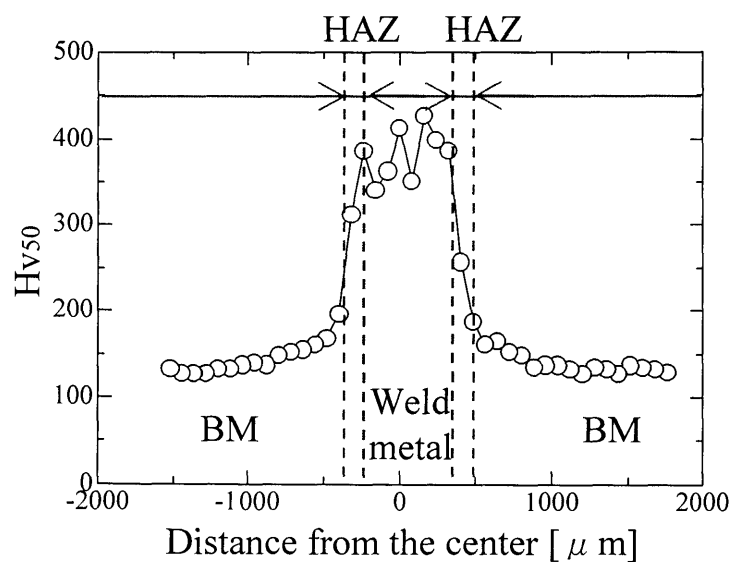
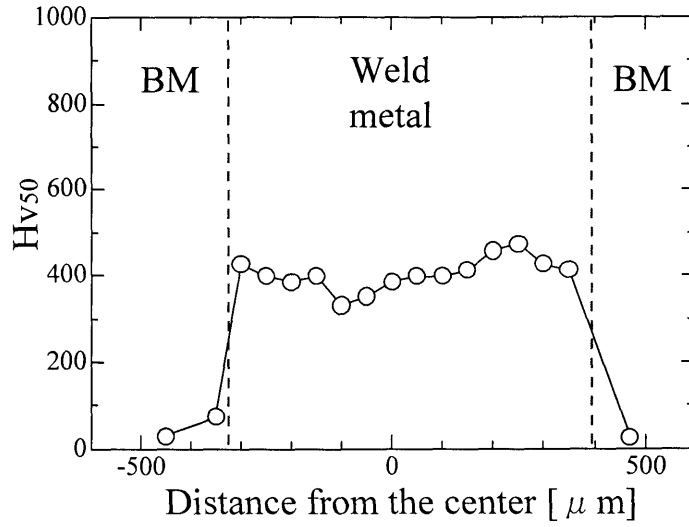
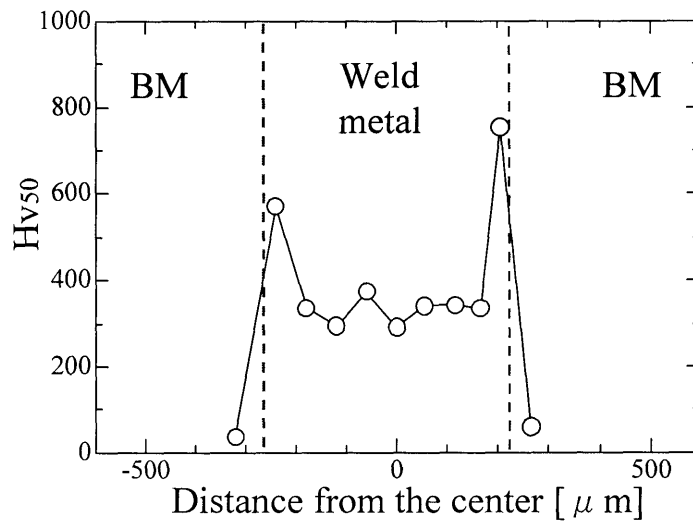


Fig.3-7 Vickers hardness distribution in laser lap weld between SPCC and A1050.(SPCC side, distance from interface = 200μm)

(a) Welding speed
= 20mm/s



(b) Welding speed
= 30mm/s



(c) Welding speed
= 40mm/s

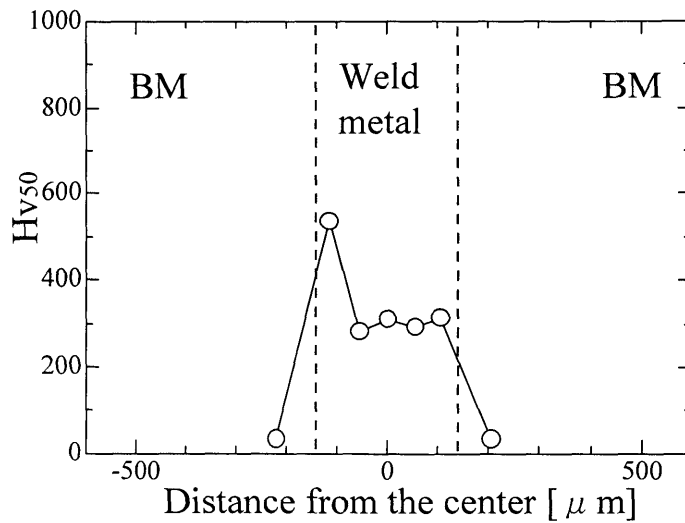
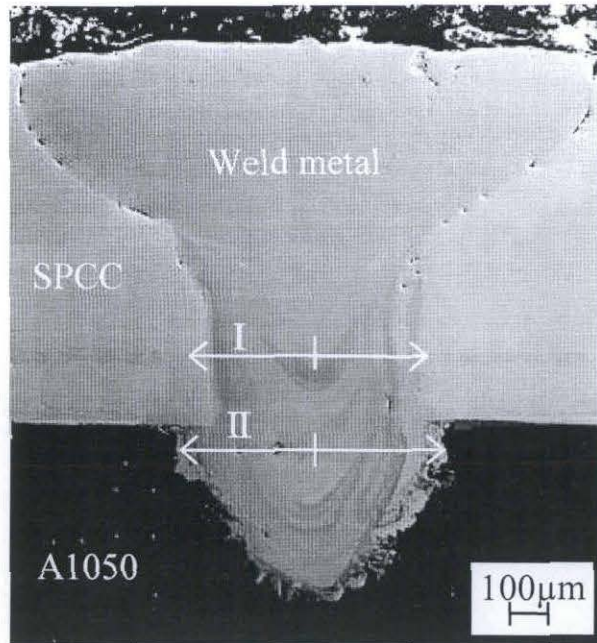
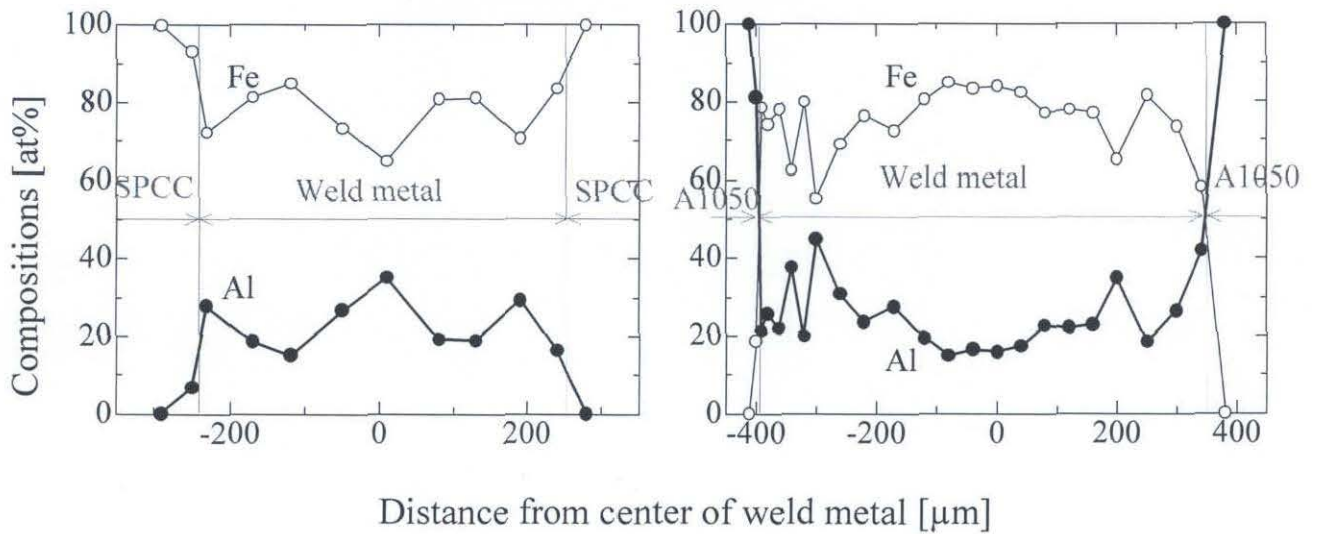


Fig.3-8 Vickers hardness distribution in laser lap weld between SPCC and A1050.(A1050 side, distance from interface = 50 μm)



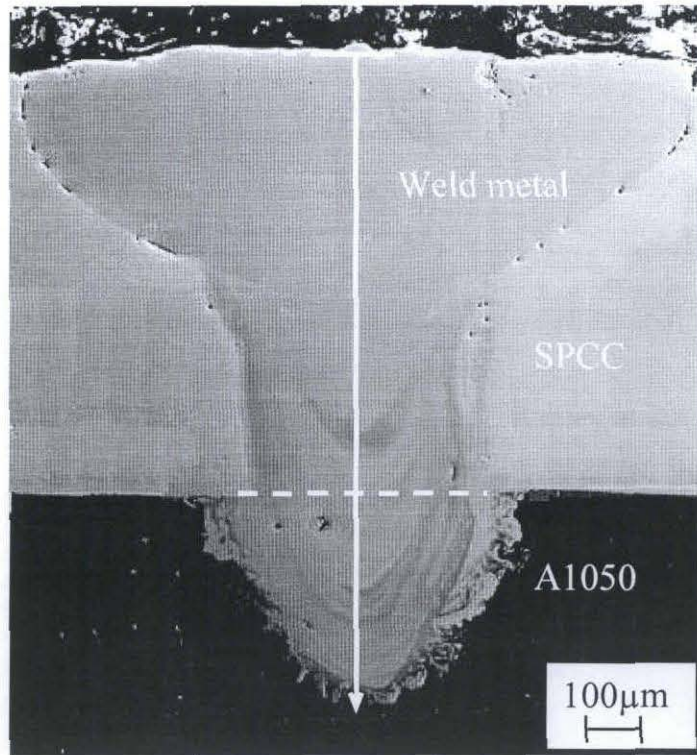
(a) Macrostructure of weld metal
(Welding speed = 20mm/s)



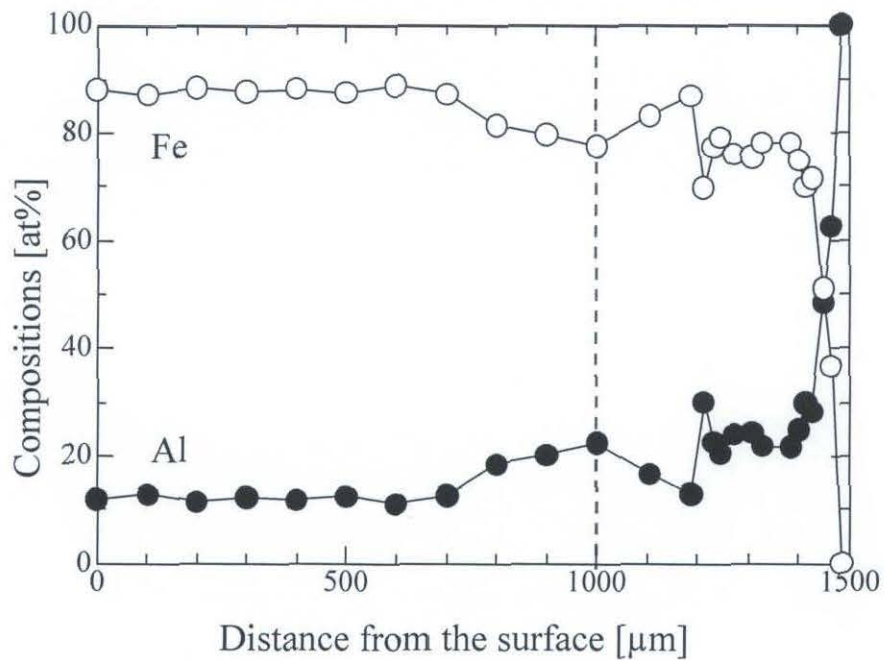
(b) Line I
SPCC side
(Distance from interface=200μm)

(c) Line II
A1050 side
(Distance from interface=50μm)

Fig.3-9 Results of EPMA spot analysis of SPCC/A1050 joint (Welding speed = 20mm/s)



(a) Macrostructure of weld metal
(Welding speed = 20mm/s)



(b) Results of EPMA spot analysis from top to bottom.

Fig.3-10 Results of EPMA spot analysis of SPCC/A1050 joint (Welding speed = 20mm/s)

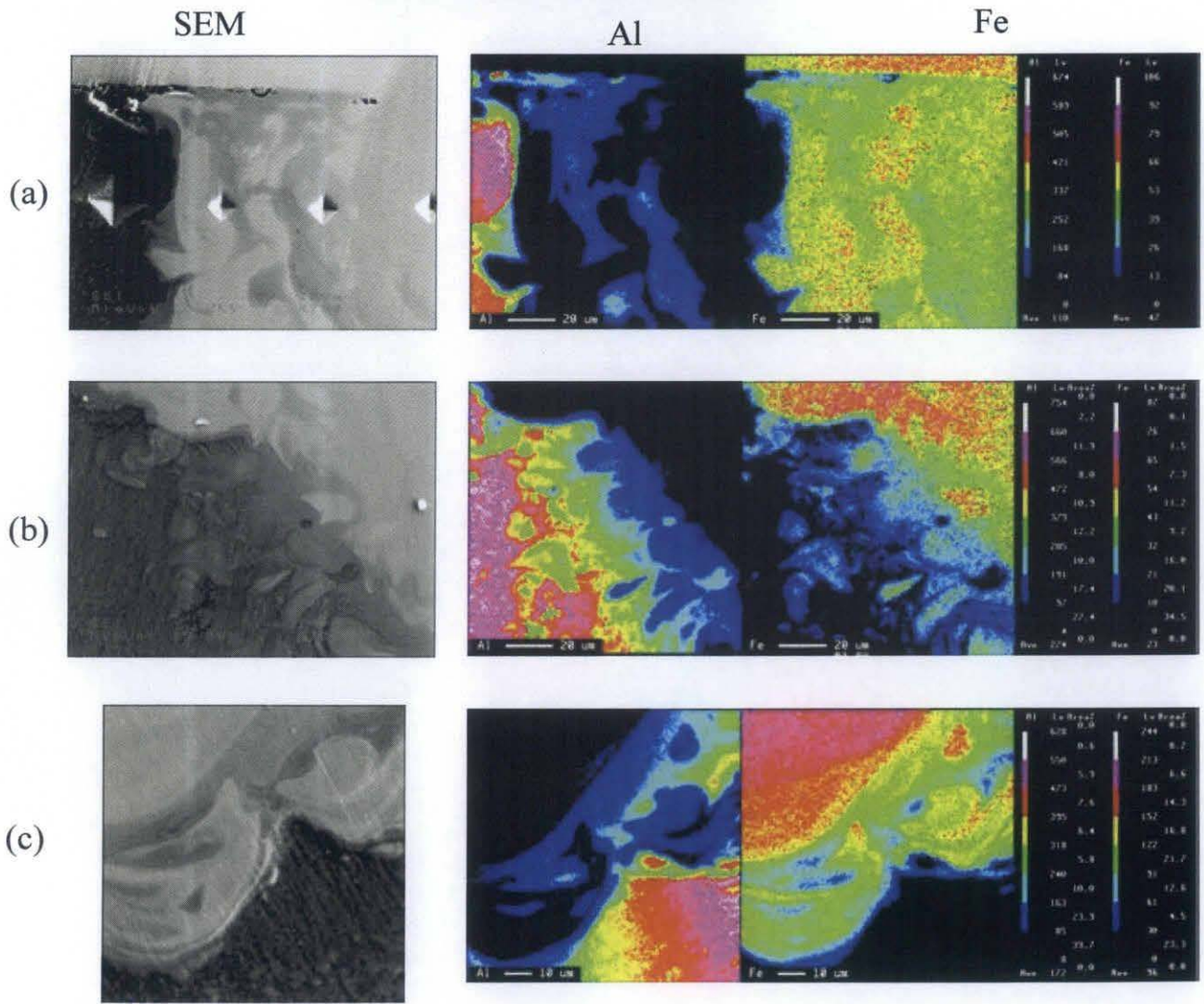
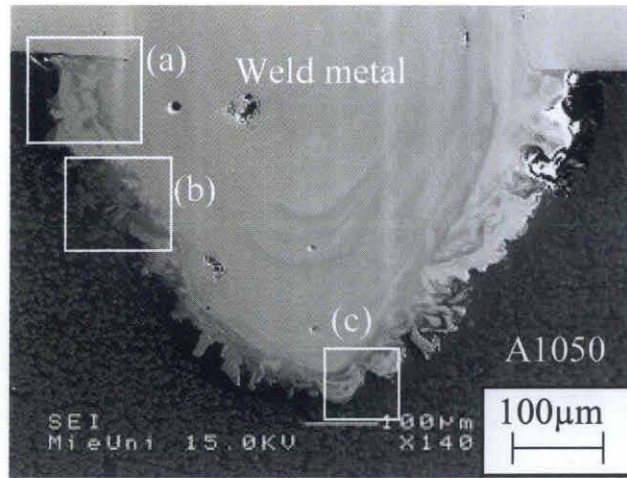
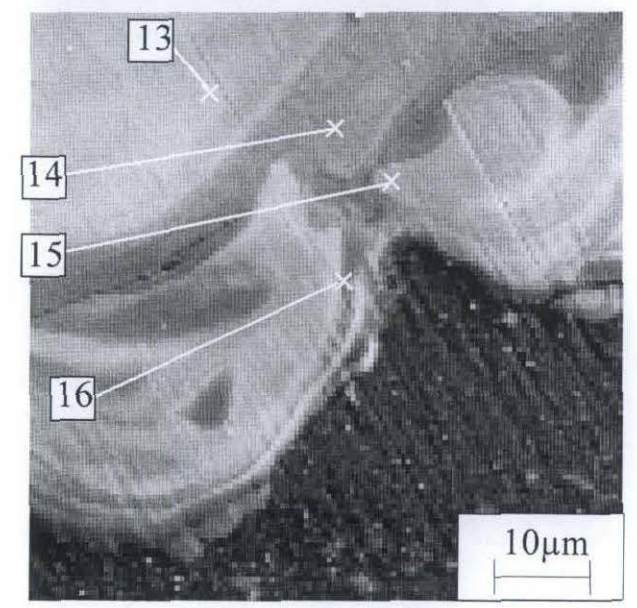
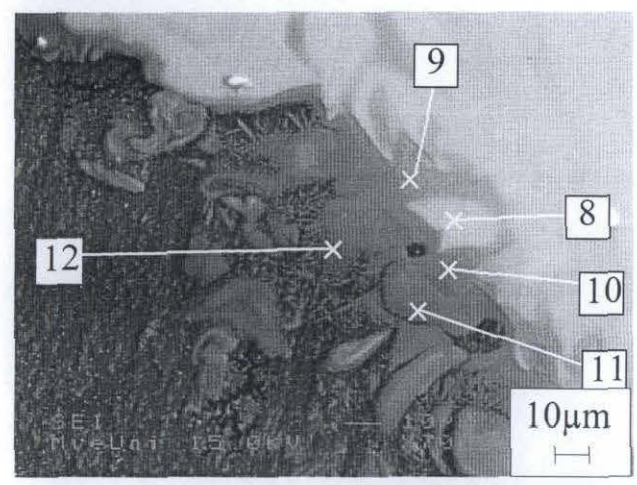
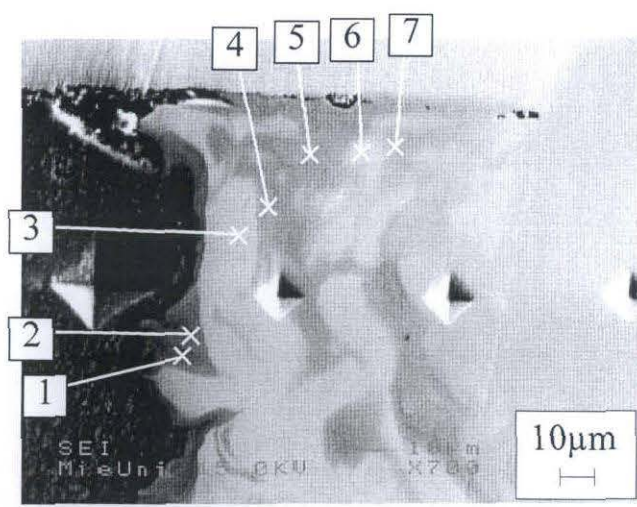
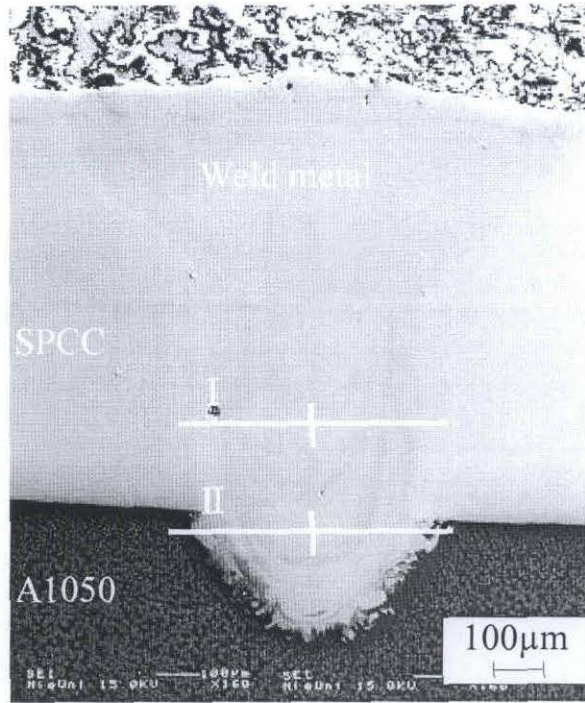


Fig.3-11 SPCC/A1050 surface analysis of Fe and Al at the interface region. (Welding speed = 20mm/s)

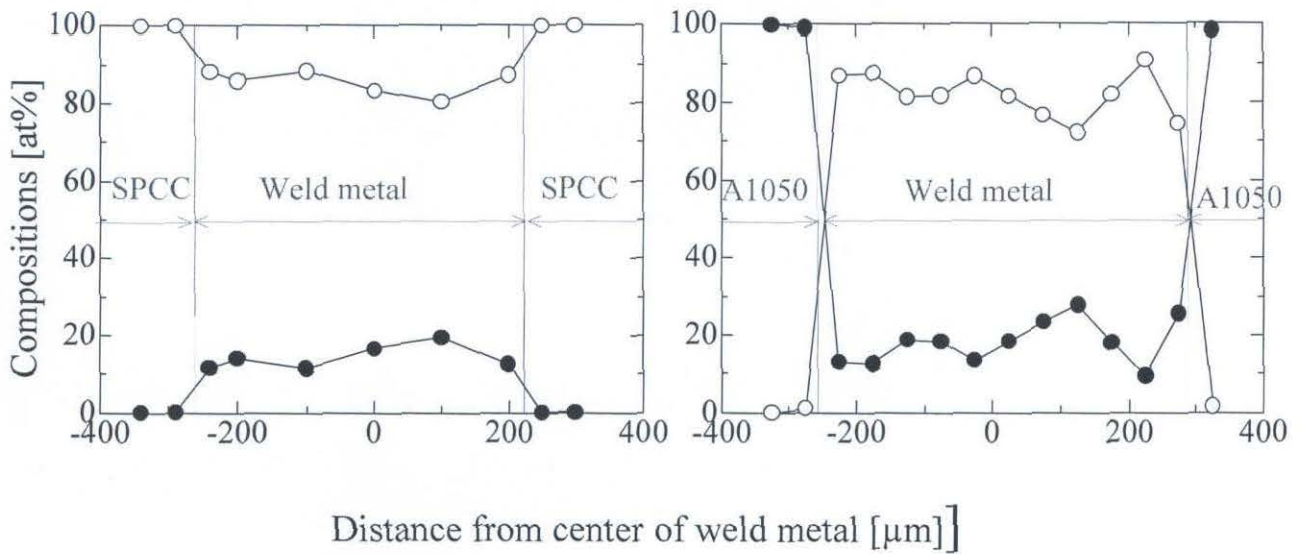


Pos.	Compositions .at%	
	Fe	Al
1	26.0	74.0
2	34.8	65.2
3	75.4	24.6
4	46.7	53.3
5	50.9	49.1
6	83.5	16.5
7	59.0	41.0
8	74.4	25.6
9	36.1	63.9
10	27.1	72.9
11	17.7	82.3
12	15.5	84.5
13	53.8	46.2
14	50.9	49.1
15	67.3	32.7
16	37.0	63.0

Fig.3-12 SEM image at the interface region of SPCC/A1050 and the results of spot analysis of this region. (Welding speed = 20mm/s)



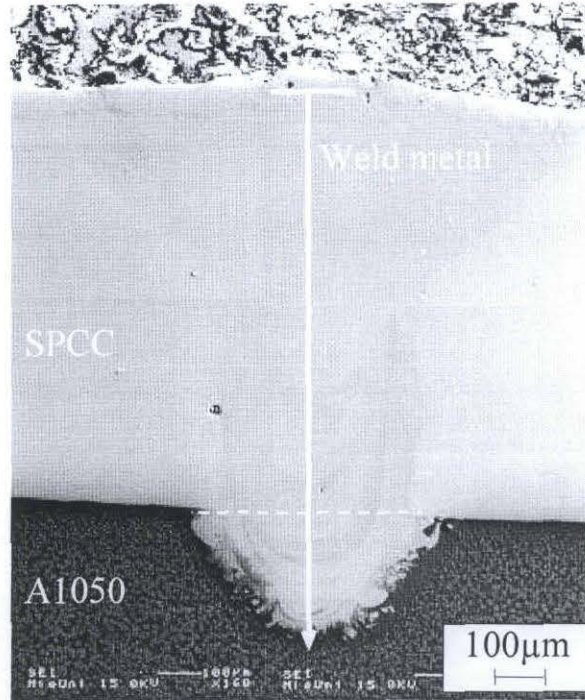
(a) Macrostructure of weld metal
(Welding speed = 30mm/s)



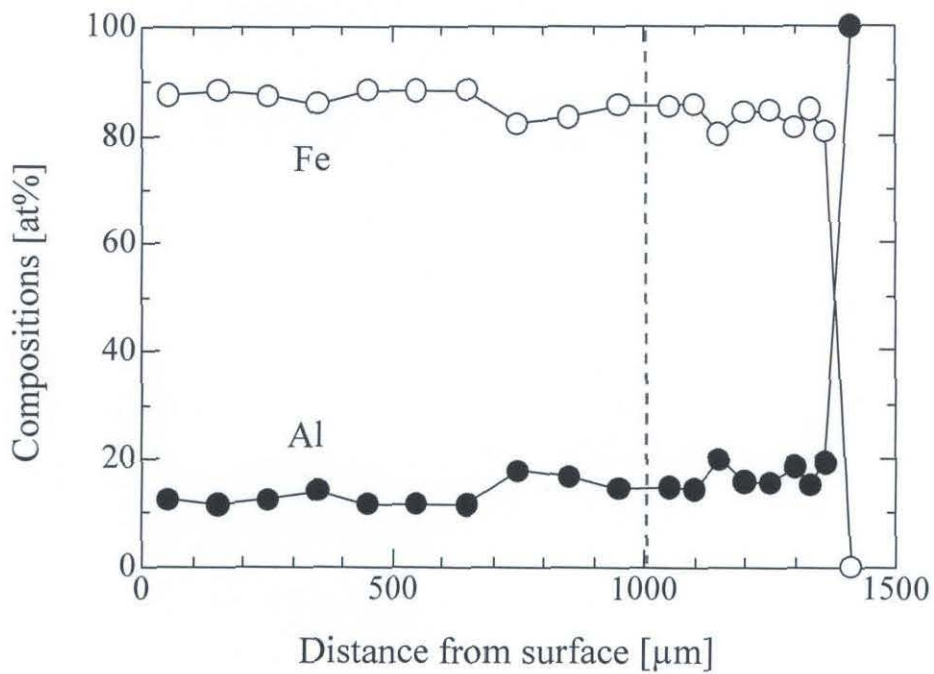
(b) Line I
SPCC side
(Distance from interface = 200 μm)

(c) Line II
A1050 side
(Distance from interface = 50 μm)

Fig.3-13 Results of EPMA spot analysis of SPCC/A1050 joint (Welding speed = 30mm/s)



(a) Macrostructure of weld metal
(Welding speed = 30mm/s)



(b) Results of EPMA spot analysis from top to bottom.

Fig.3-14 Results of EPMA spot analysis of SPCC/A1050 joint (Welding speed = 30mm/s)

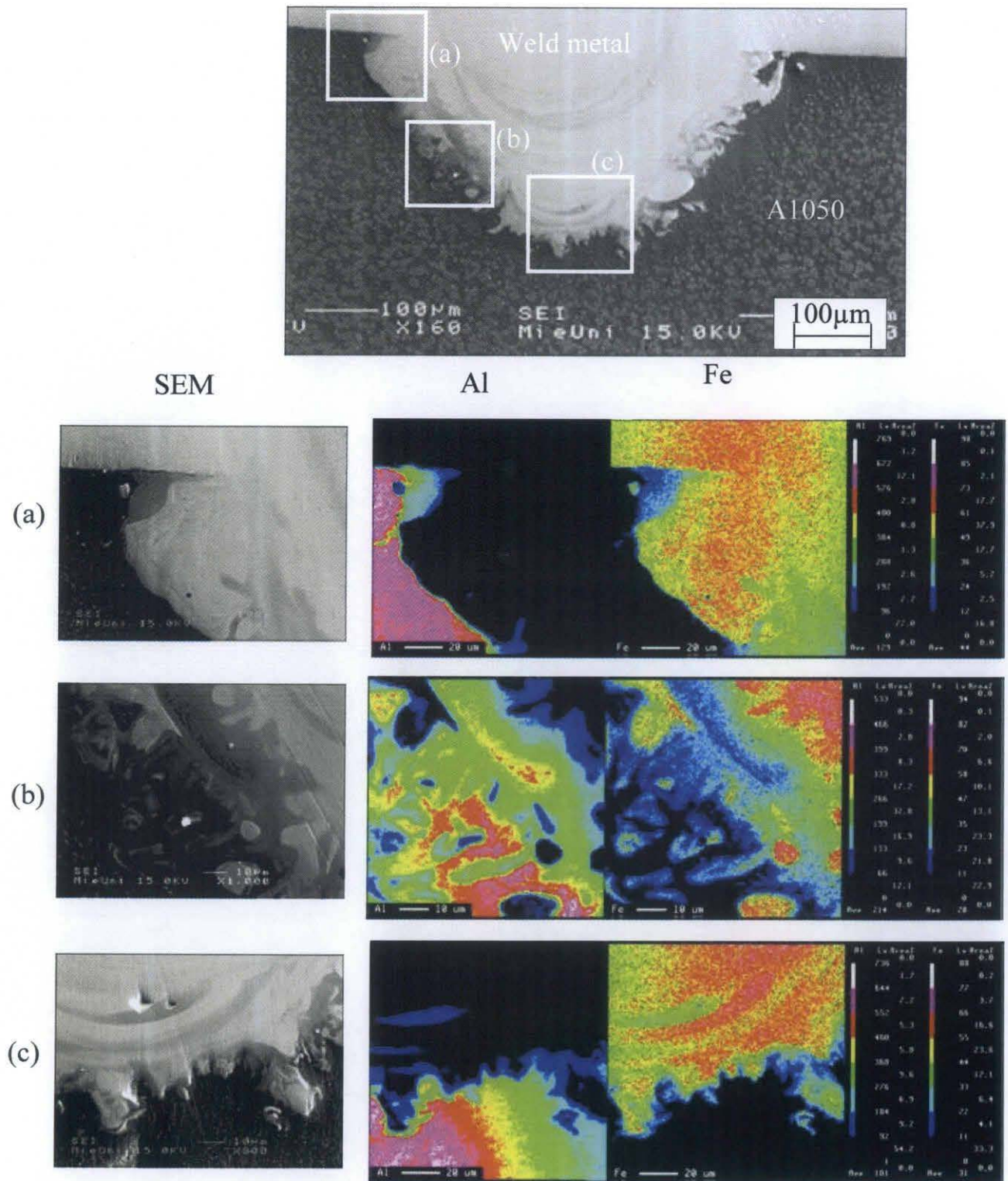
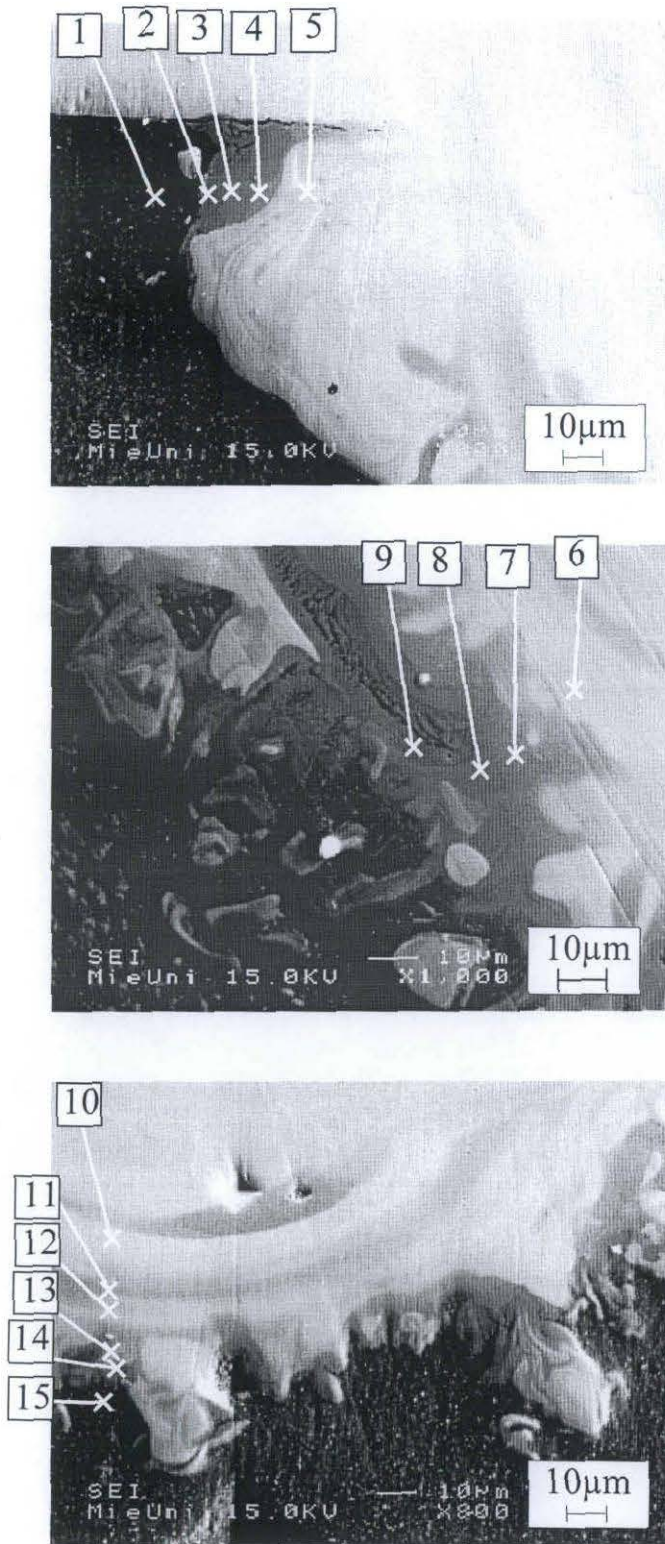
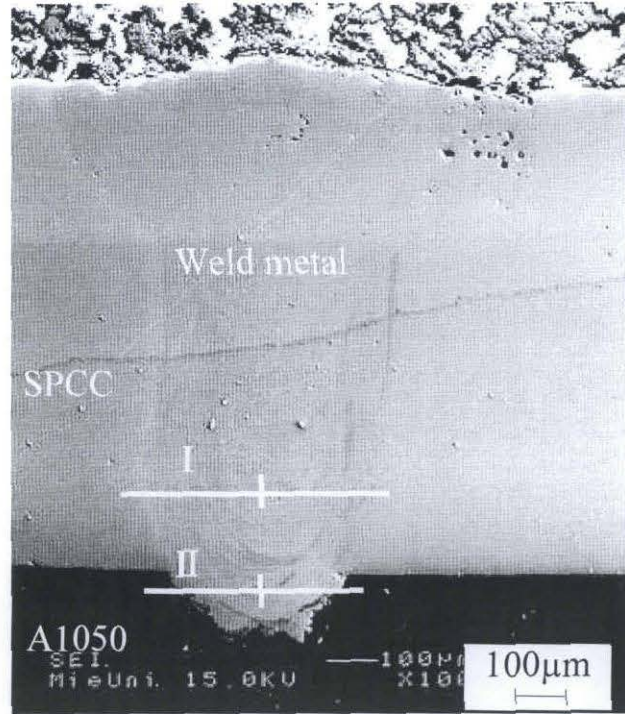


Fig.3-15 SPCC/A1050 surface analysis of Fe and Al at the interface region. (Welding speed = 30mm/s)



Pos.	Compositions ,at%	
	Fe	Al
1	0.6	99.4
2	19.0	81.0
3	21.6	78.4
4	29.0	71.0
5	66.8	33.2
6	82.1	17.9
7	39.7	60.3
8	27.7	72.3
9	23.4	76.6
10	81.1	18.9
11	45.3	54.7
12	67.7	32.3
13	52.8	47.2
14	18.9	81.1
15	1.7	98.3

Fig.3-16 SEM image at the interface region of SPCC/A1050 and the results of spot analysis of this region. (Welding speed = 30mm/s)



(a) Macrostructure of weld metal
(Welding speed = 40mm/s)

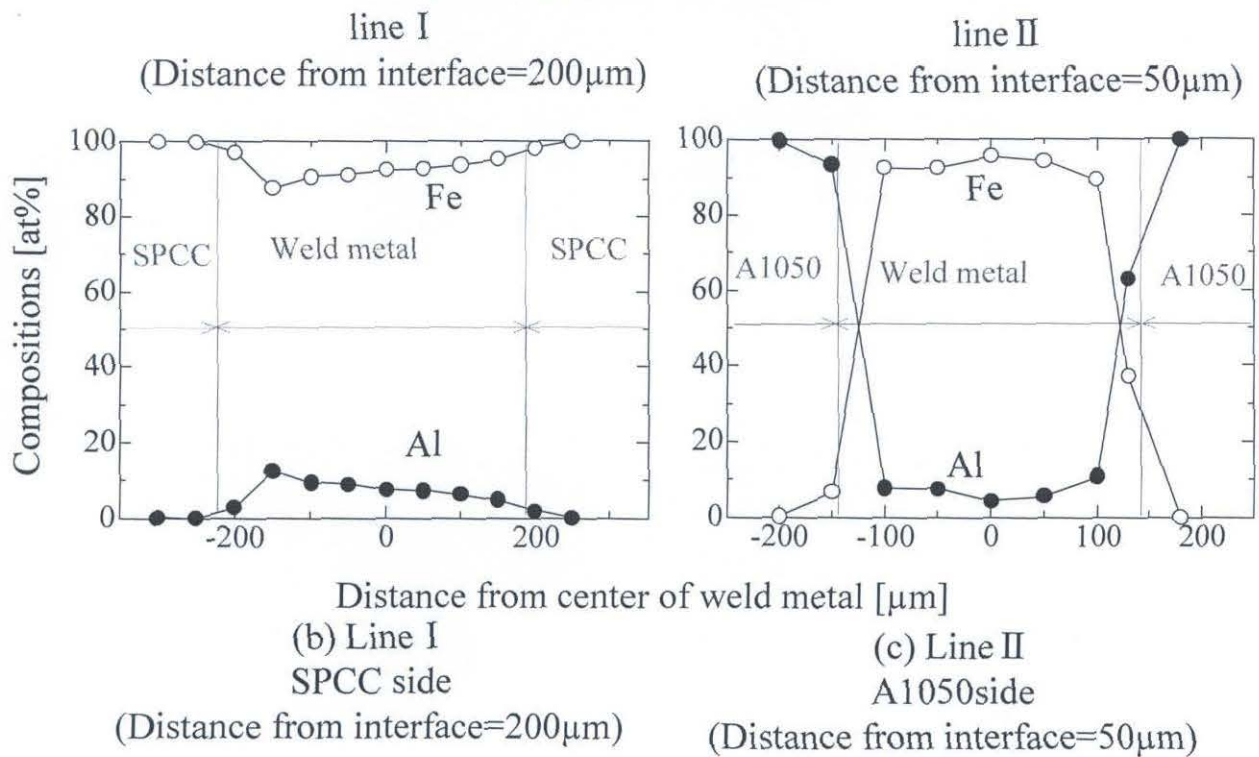


Fig.3-17 Results of EPMA spot analysis of SPCC/A1050
joint (Welding speed = 40mm/s)

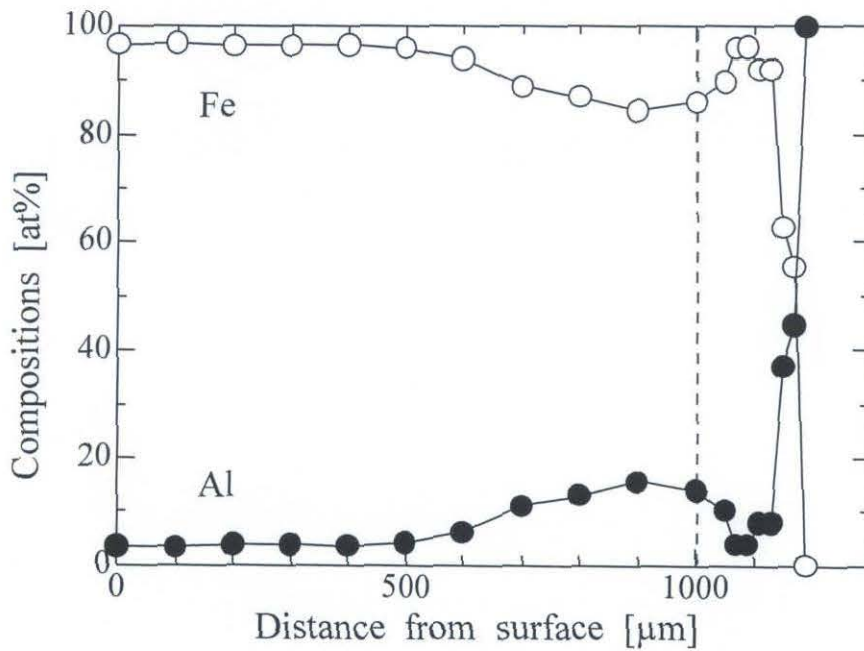
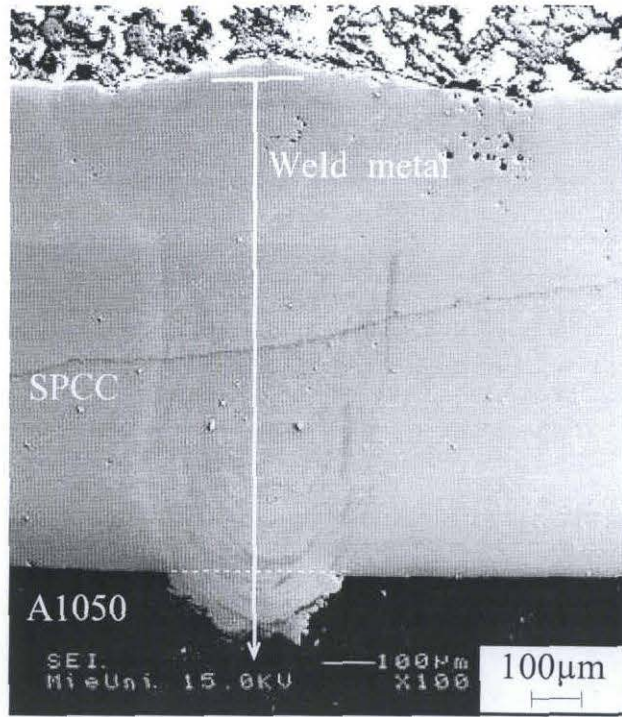


Fig.3-18 Results of EPMA spot analysis of SPCC/A1050 joint (Welding speed = 40mm/s)

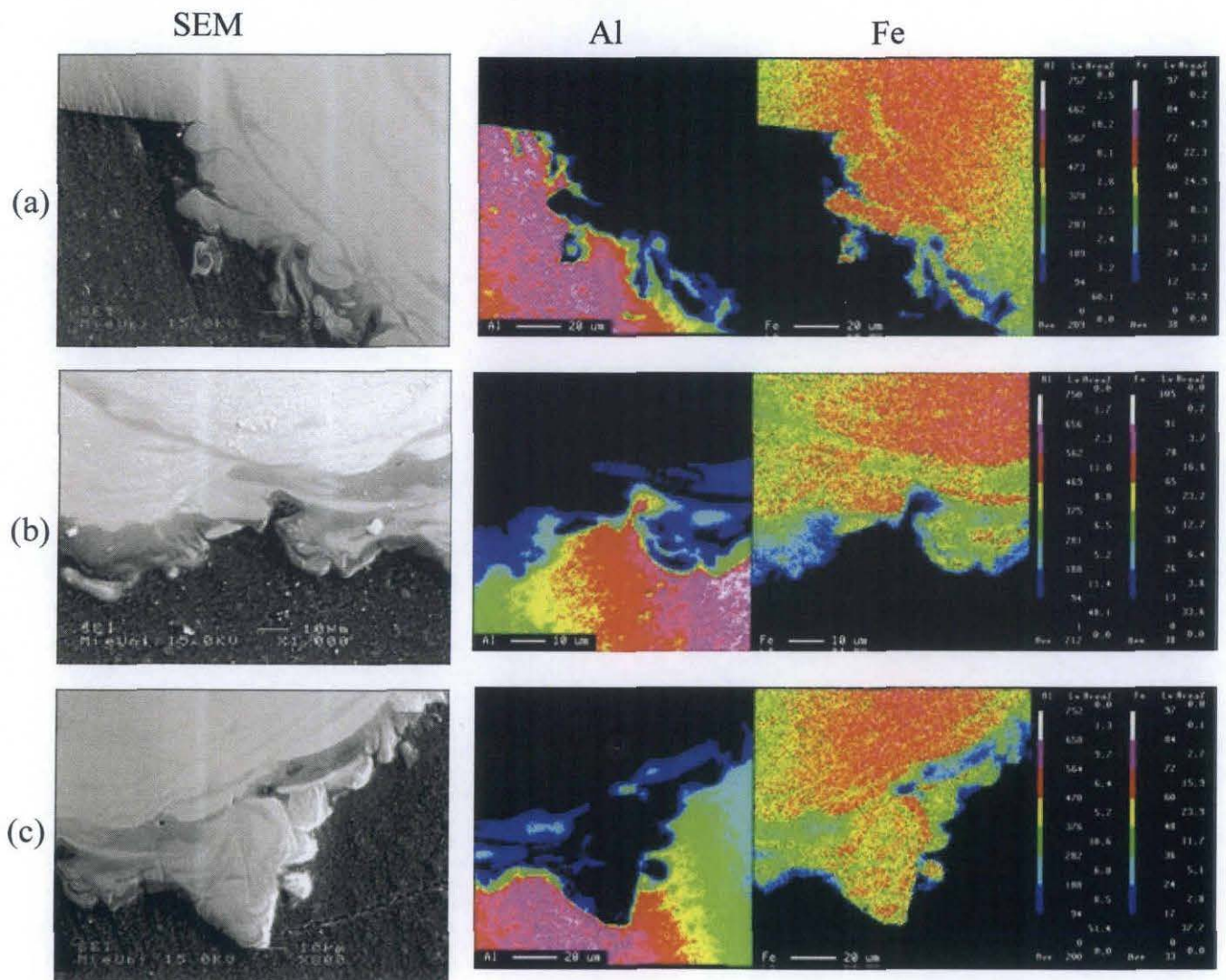
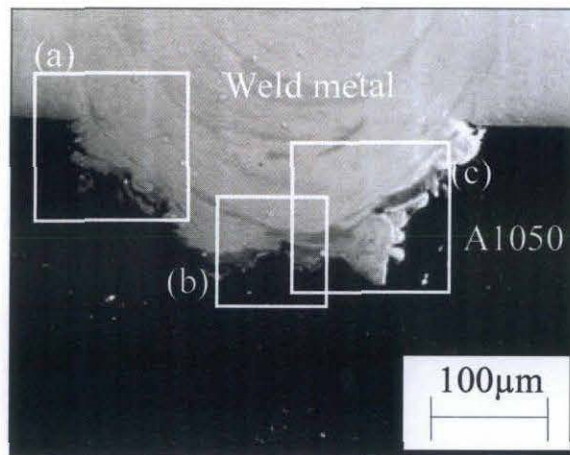
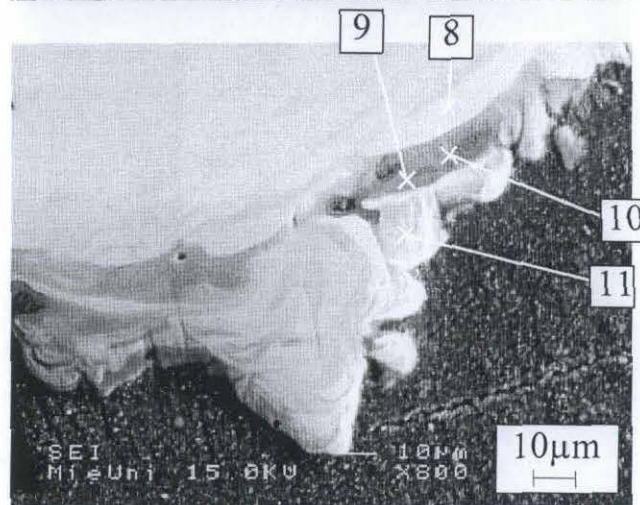
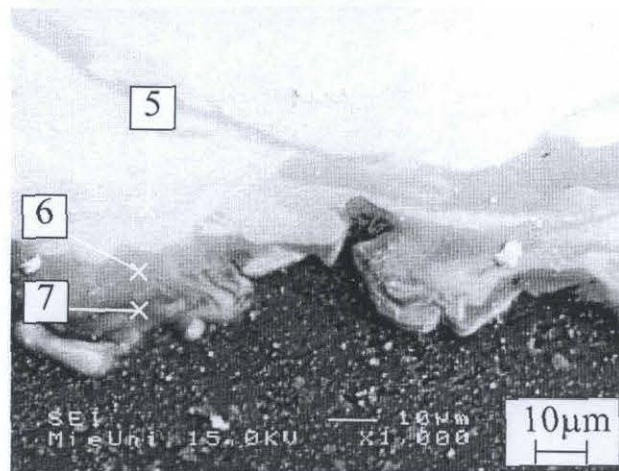
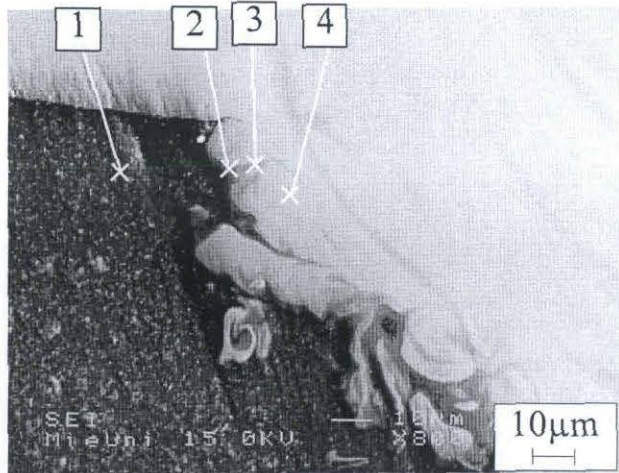


Fig.3-19 SPCC/A1050 surface analysis of Fe and Al at the interface region. (Welding speed = 40mm/s)



Pos.	Compositions ,at%	
	Fe	Al
1	3.9	96.1
2	16.5	83.5
3	53.7	46.3
4	90.5	9.5
5	92.7	7.3
6	36.3	63.7
7	21.1	78.9
8	83.7	16.3
9	21.0	79.0
10	16.4	83.6
11	42.7	57.3

Fig.3-20 SEM image at the interface region of SPCC/A1050 and the results of spot analysis of this region. (Welding speed = 40mm/s)

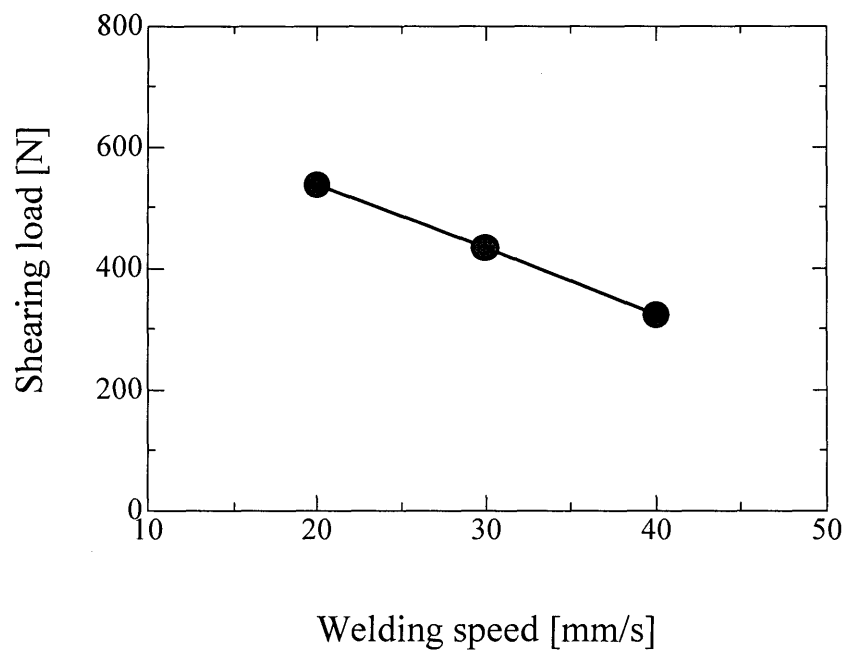
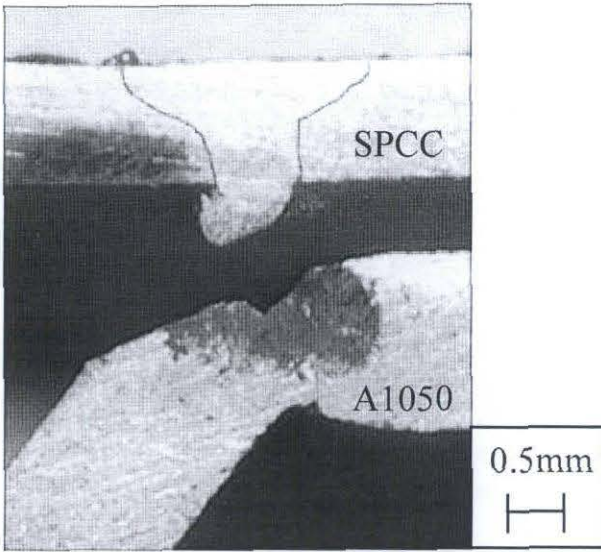
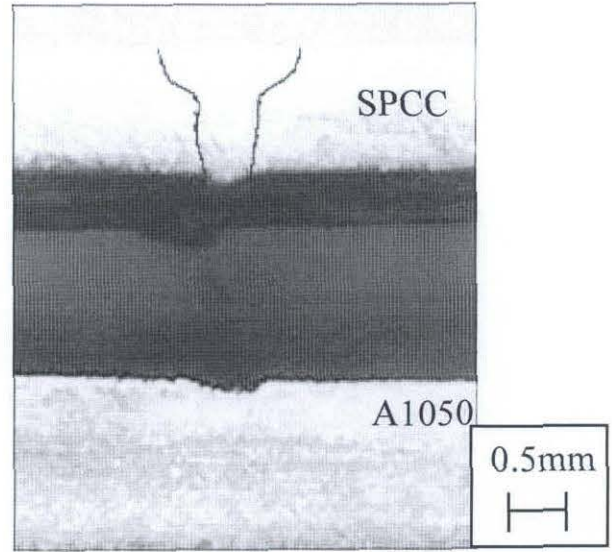


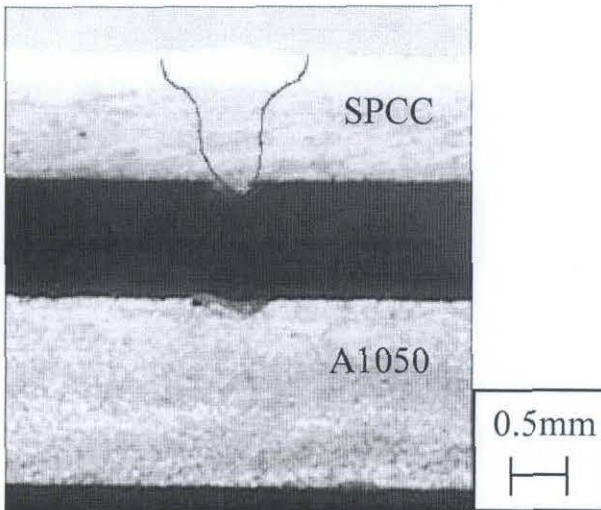
Fig.3-21 Effect of welding speed on the shearing load of SPCC/A1050 dissimilar laser lap joint.



(a) Welding speed = 20mm/s



(b) Welding speed = 30mm/s



(c) Welding speed = 40mm/s

Fig.3-22 Tensile shear specimens after testing of SPCC/A1050.

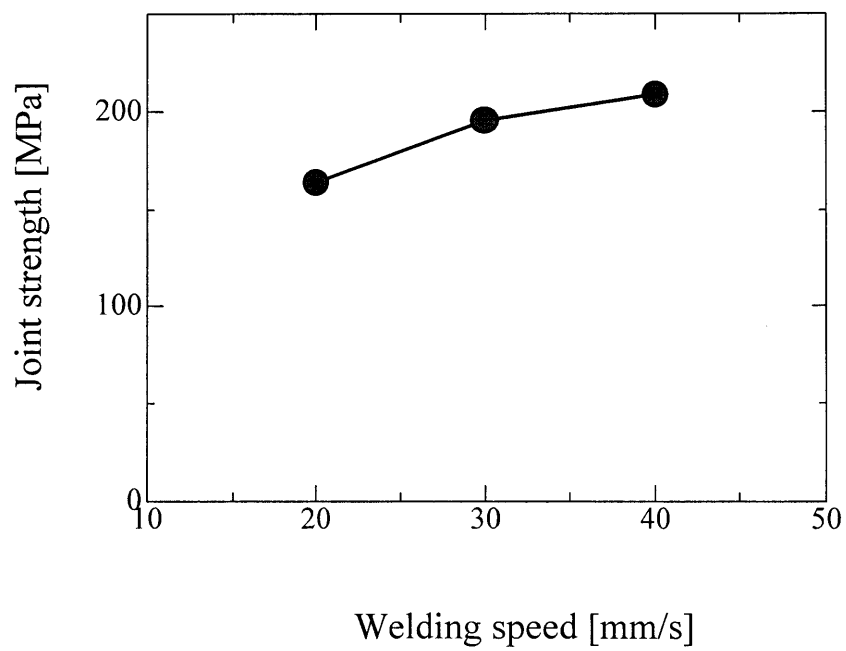


Fig.3-23 Effect of welding speed on the joint strength of SPCC/A1050 dissimilar laser lap joint.

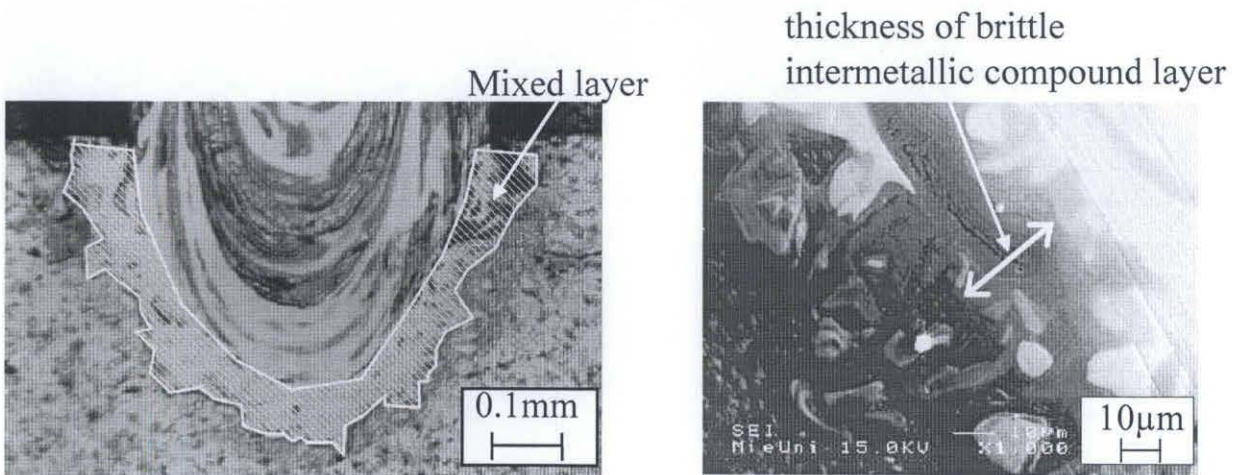
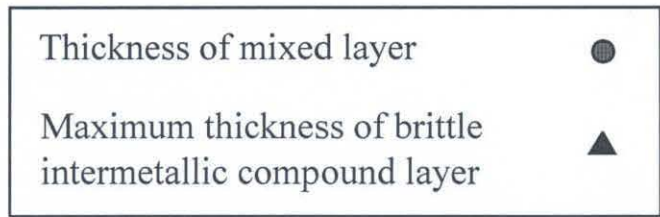
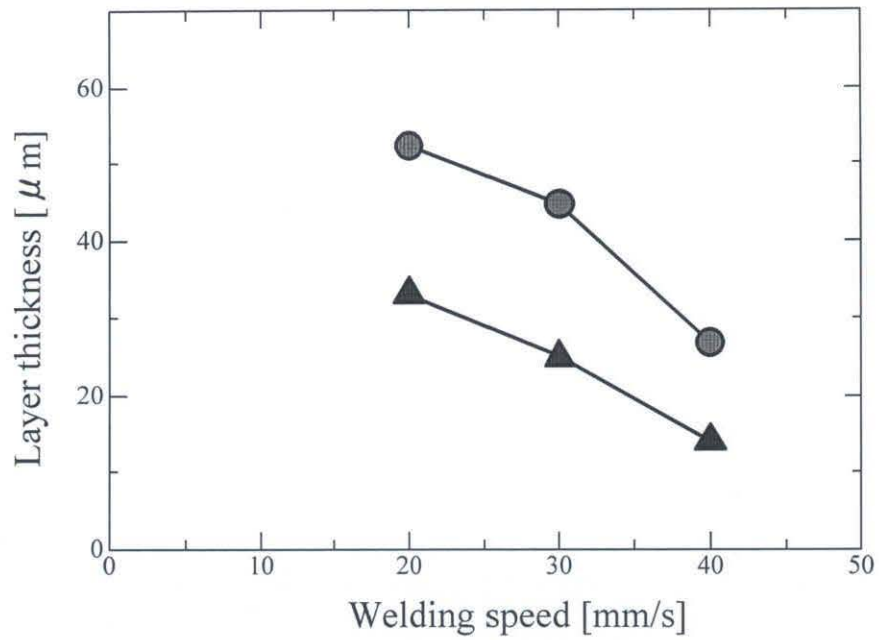
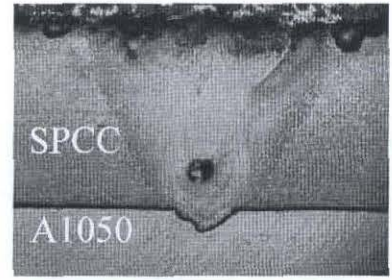
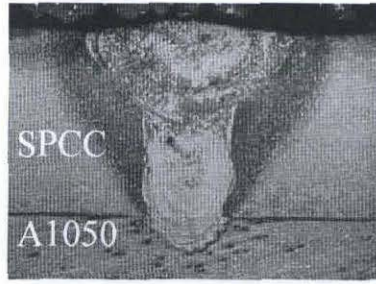
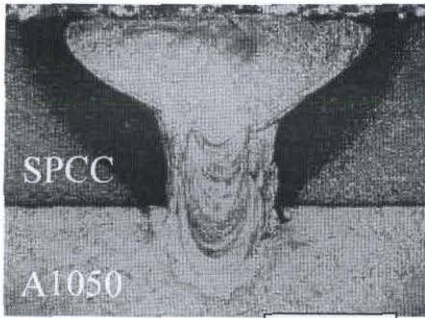


Fig.3-24 Effect of welding speed on thickness of mixed layer and maximum thickness of brittle intermetallic compound layer at joint interface.

Welding speed = 20mm/s

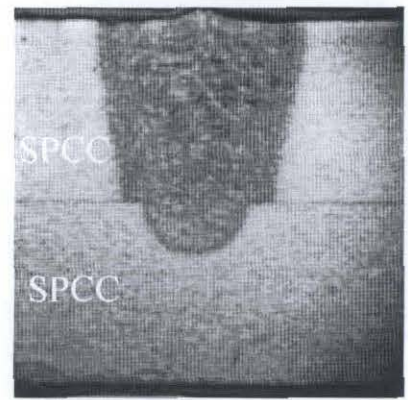
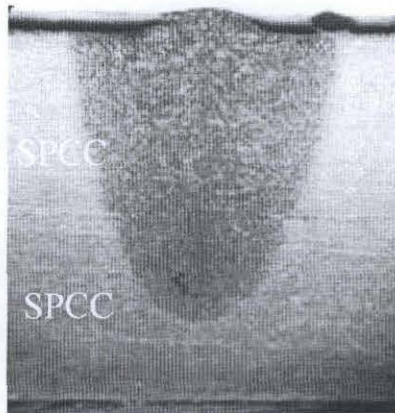
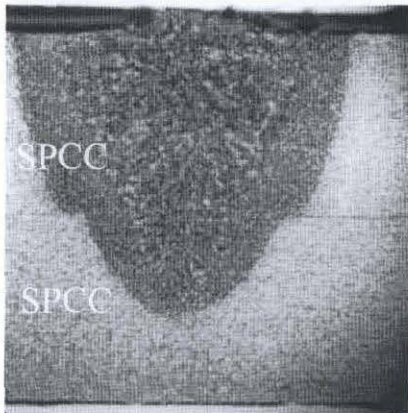
Welding speed = 30mm/s

Welding speed = 40mm/s



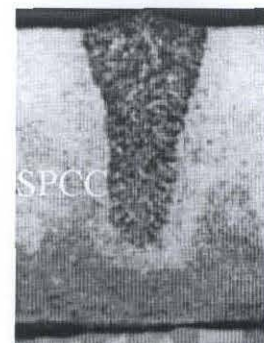
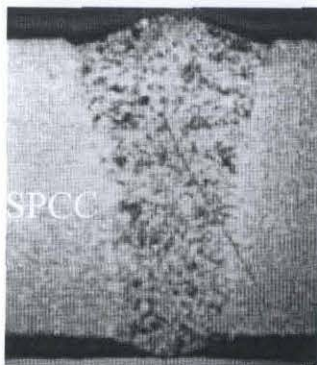
0.2mm
┆

SPCC (t=1.0mm)/A1050 (t=1.5mm)
lap joint



0.2mm
┆

SPCC (t=1.0mm)/SPCC (t=1.0mm)
lap joint



0.2mm
┆

SPCC (t= 1.6mm)
bead on plate welding

Fig.3-25 Macrostructures of the welds of SPCC/A1050 ,
SPCC/SPCC lap joint and SPCC bead on plate.

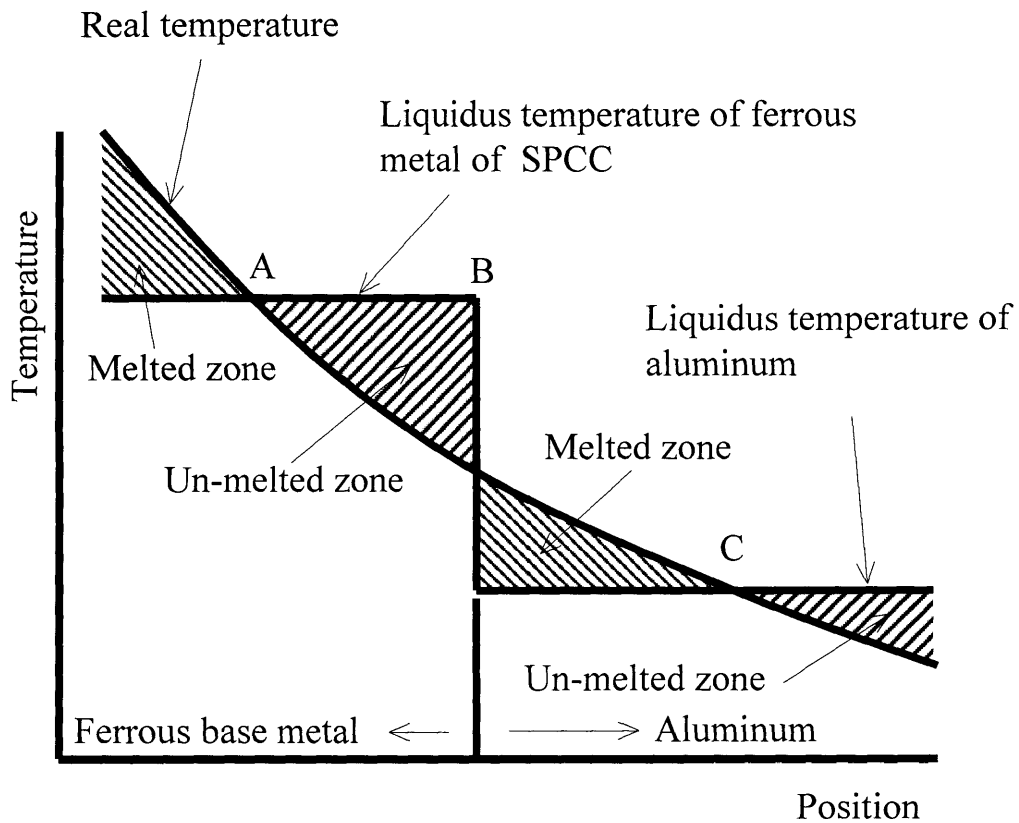


Fig.3-26 Schematic drawing representing the thermal relationship between the real thermal distribution and liquidus temperature in the vicinity of the interface of the dissimilar metal joint.

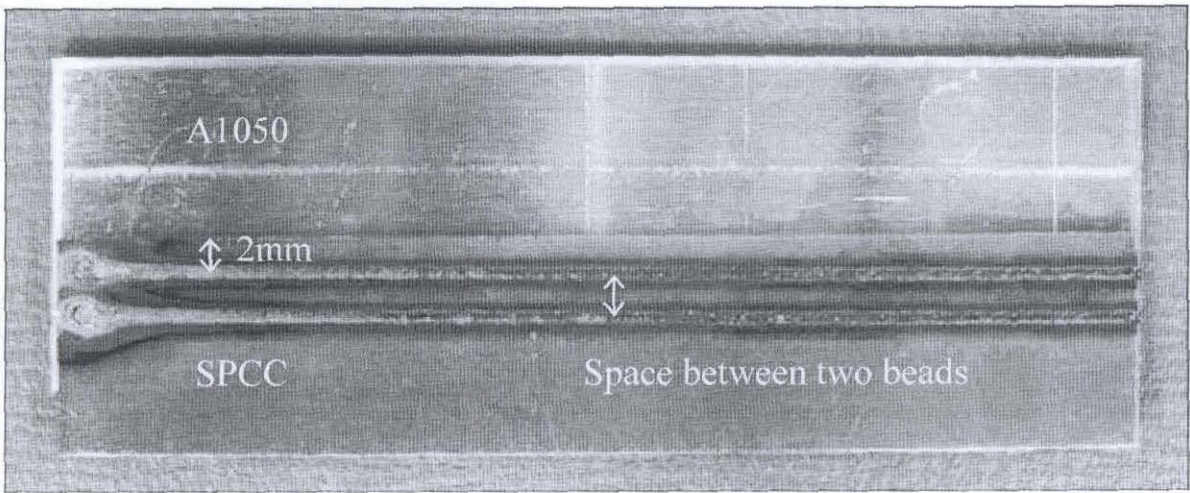
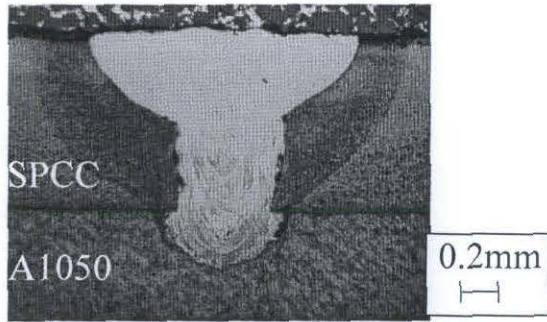
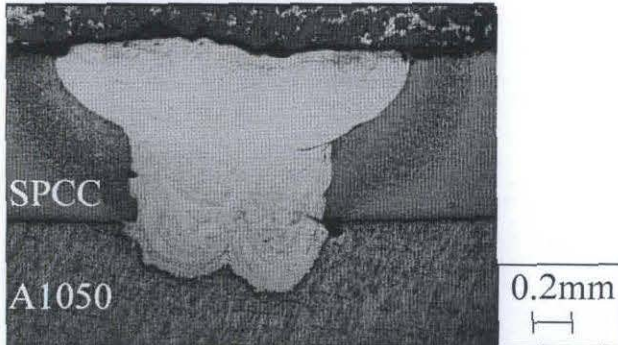


Fig.4-1 Bead appearance of SPCC/A1050 laser welded joint .(2 pass)



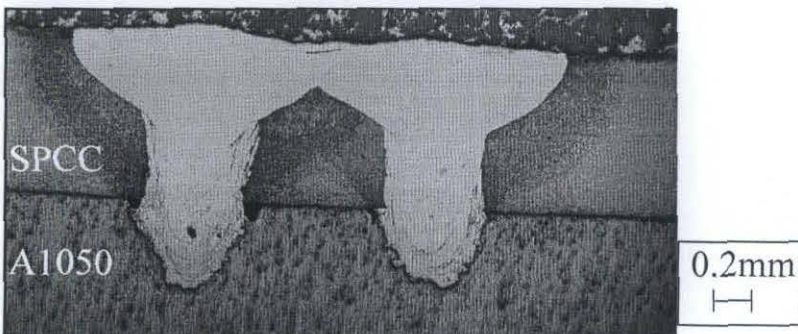
(a) 1 pass



(b) Space between two beads = 0.5mm

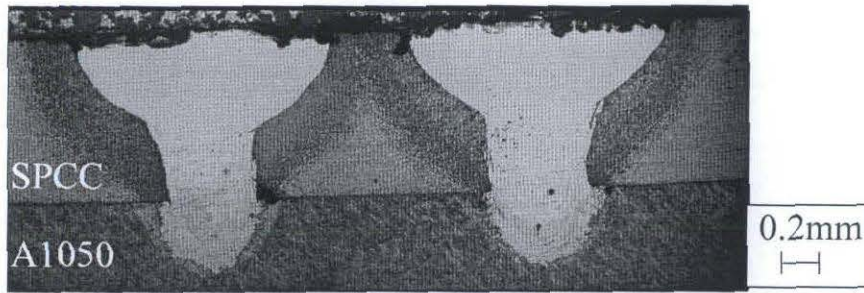


(c) Space between two beads = 1.0mm

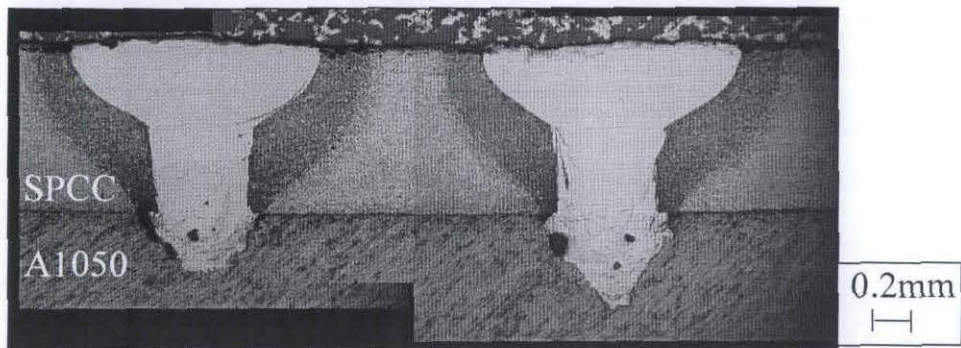


(d) Space between two beads = 1.5mm

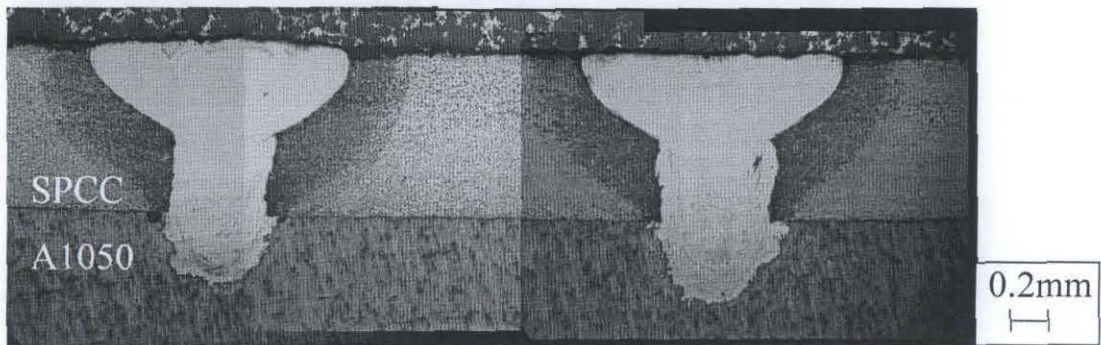
Fig.4-2-1 Macrostructures of the welds of SPCC/A1050.
(Welding speed = 20mm/s, 1pass,
space between two beads = 0.5mm~1.5mm)



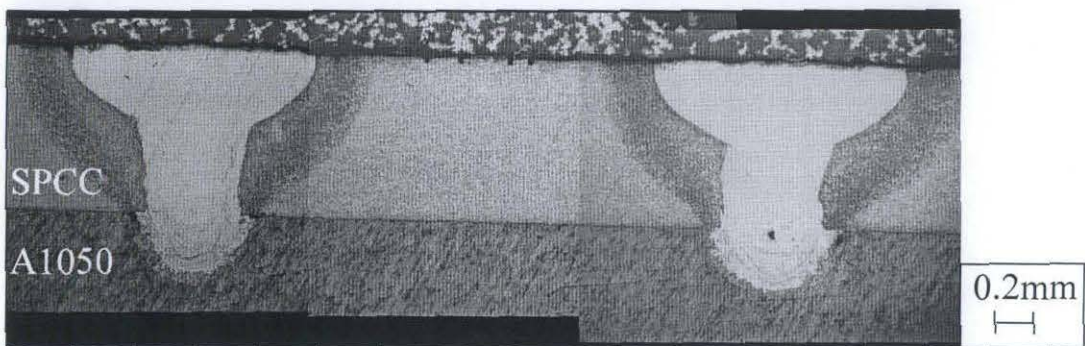
(a) Space between two beads = 2.0mm



(b) Space between two beads = 2.5mm

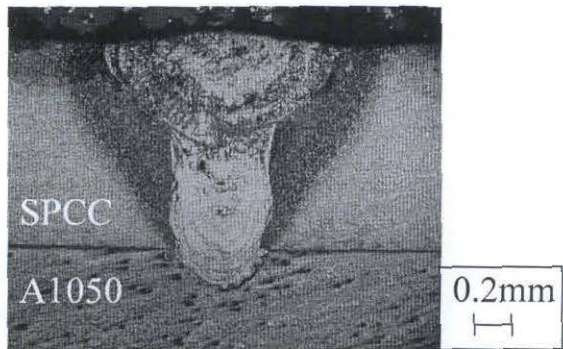


(c) Space between two beads = 3.0mm

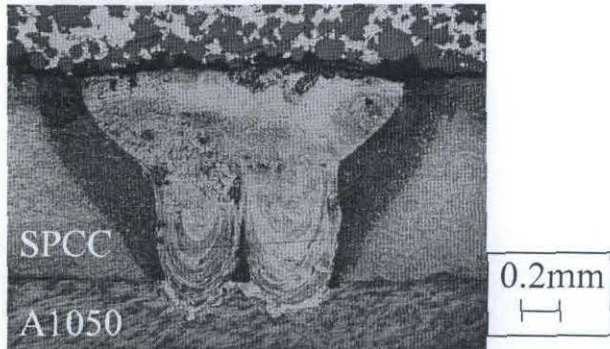


(d) Space between two beads = 3.5mm

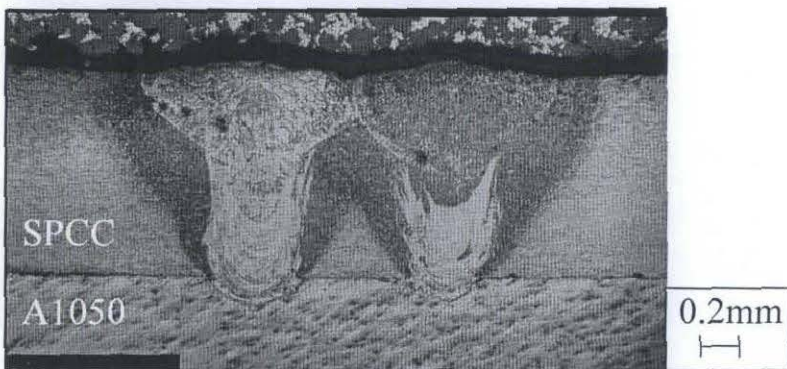
Fig.4-2-2 Macrostructures of the welds of SPCC/A1050.
 (Welding speed = 20mm/s,
 space between two beads = 2.0mm~3.5mm)



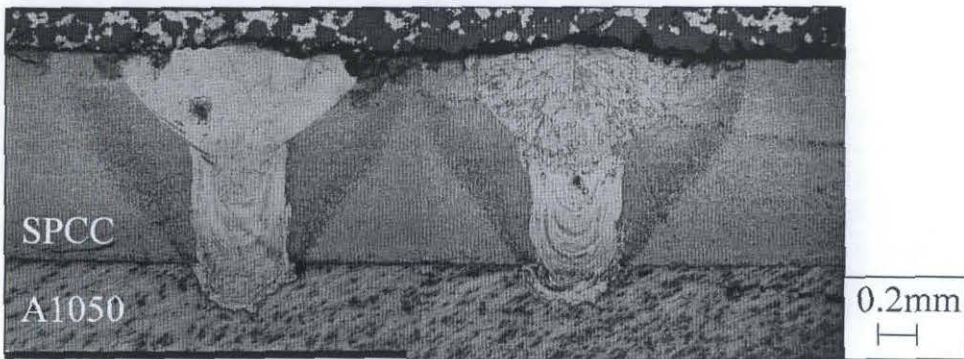
(a) 1 pass



(b) Space between two beads = 0.5mm

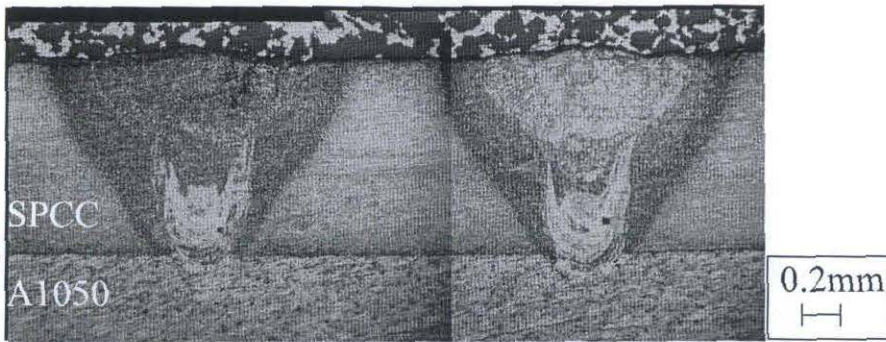


(c) Space between two beads = 1.0mm

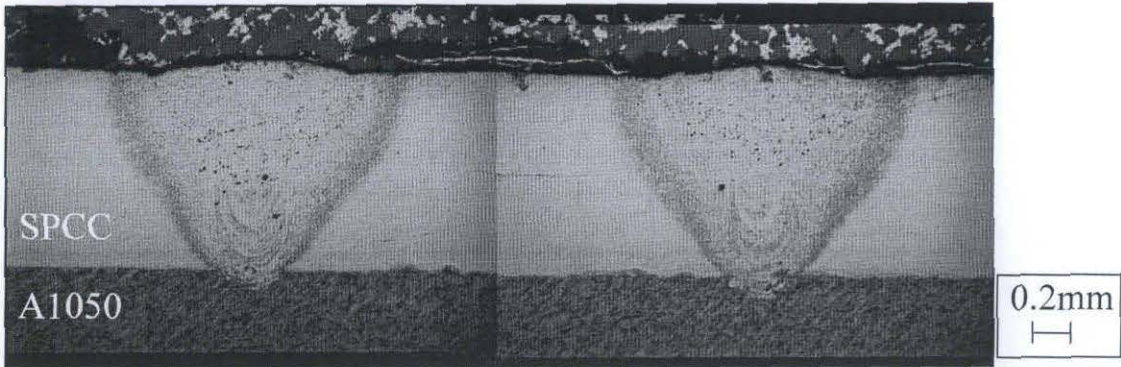


(d) Space between two beads = 1.5mm

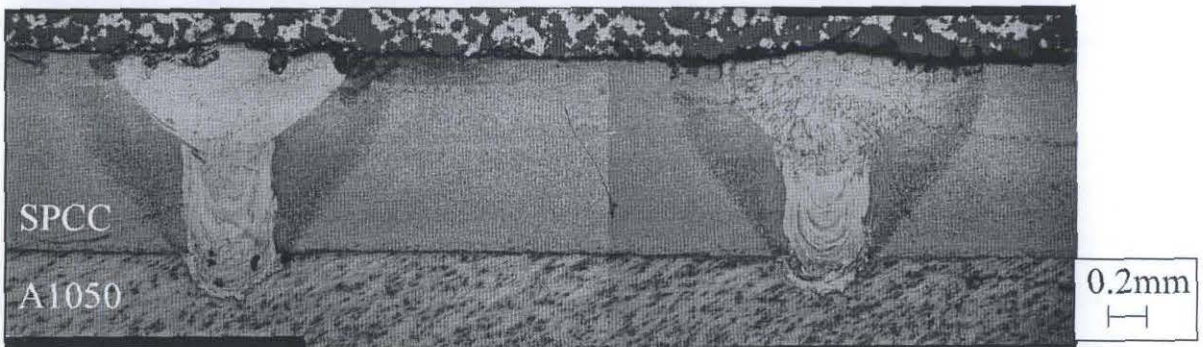
Fig.4-2-3 Macrostructures of the welds of SPCC/A1050.
(Welding speed = 30mm/s, 1pass,
space between two beads = 0.5mm~1.5mm)



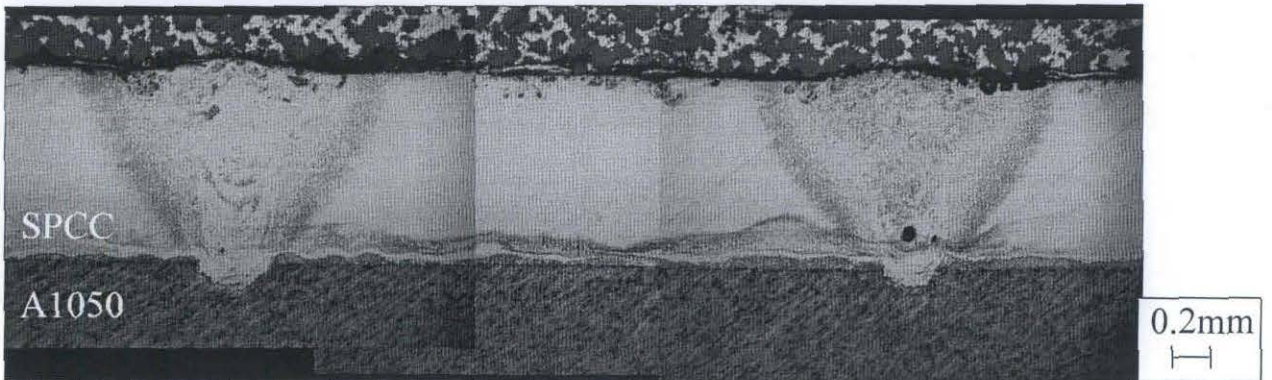
(a) Space between two beads = 2.0mm



(b) Space between two beads = 2.5mm

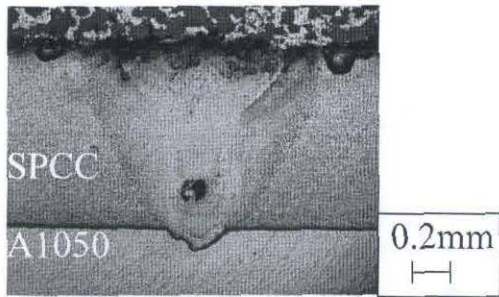


(c) Space between two beads = 3.0mm

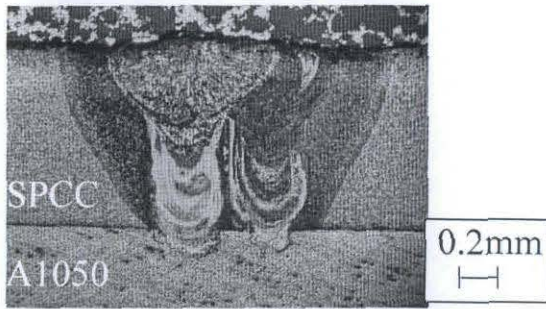


(d) Space between two beads = 3.5mm

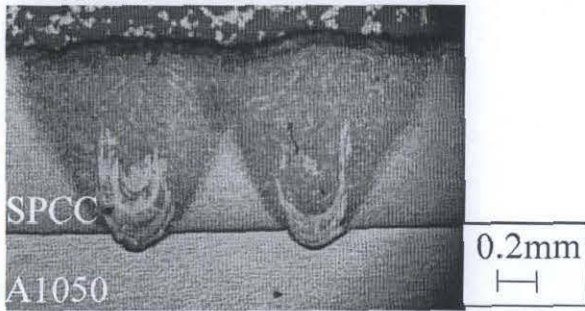
Fig.4-2-4 Macrostructures of the welds of SPCC/A1050.
 (Welding speed = 30mm/s,
 space between two beads = 2.0mm~3.5mm)



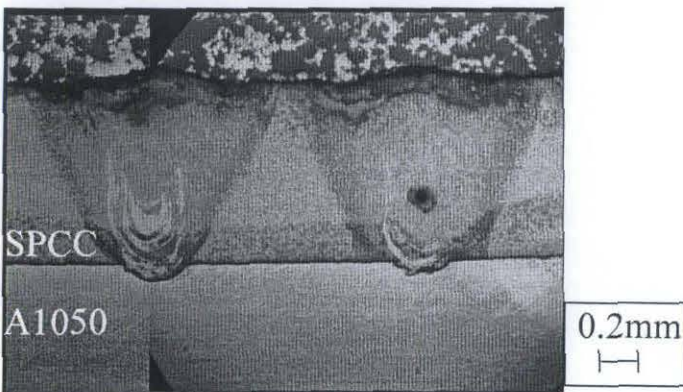
(a) 1 pass



(b) Space between two beads = 0.5mm

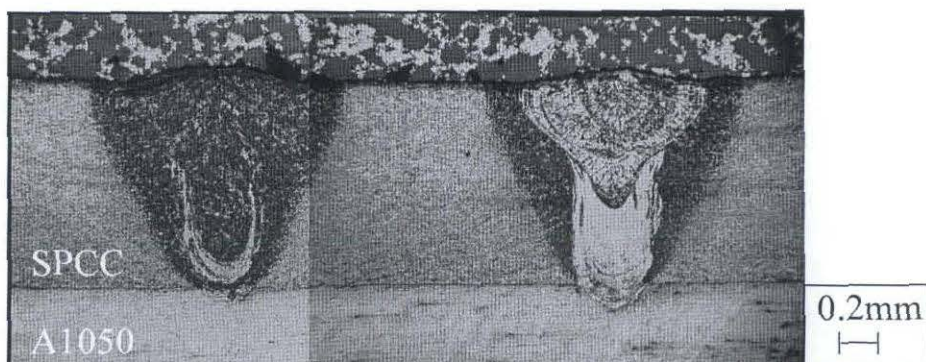


(c) Space between two beads = 1.0mm

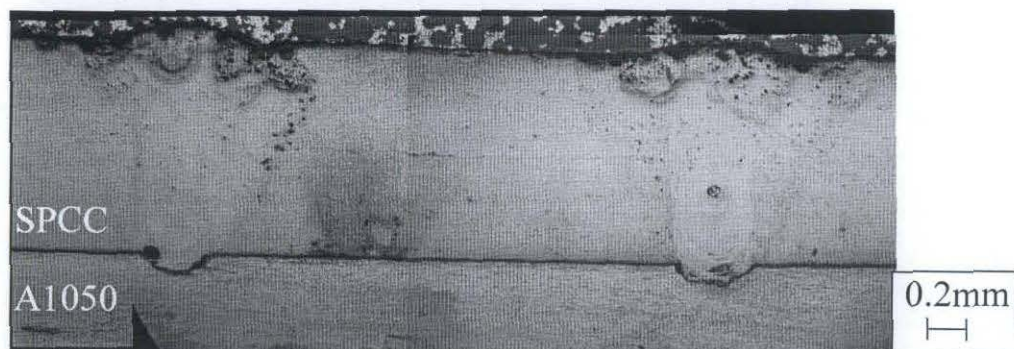


(d) Space between two beads = 1.5mm

Fig.4-2-5 Macrostructures of the welds of SPCC/A1050.
(Welding speed = 40mm/s, 1pass,
space between two beads = 0.5mm~1.5mm)



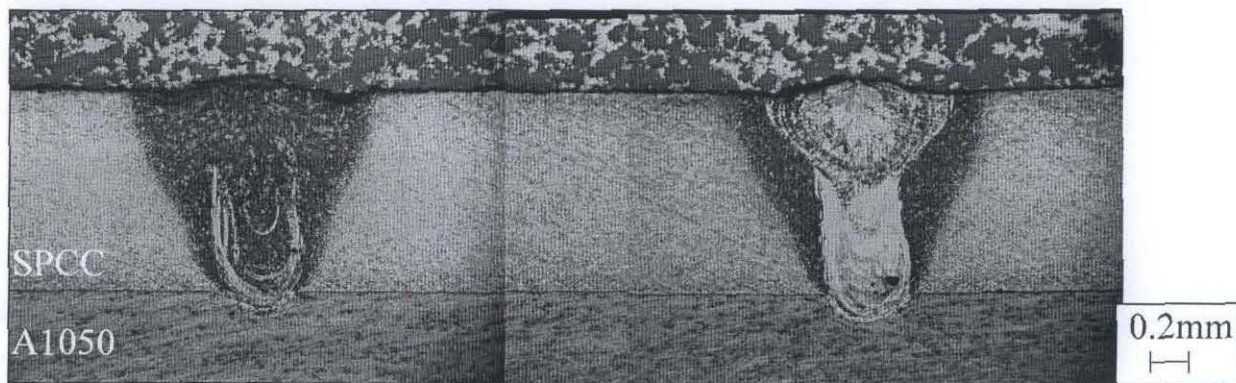
(a) Space between two beads = 2.0mm



(b) Space between two beads = 2.5mm



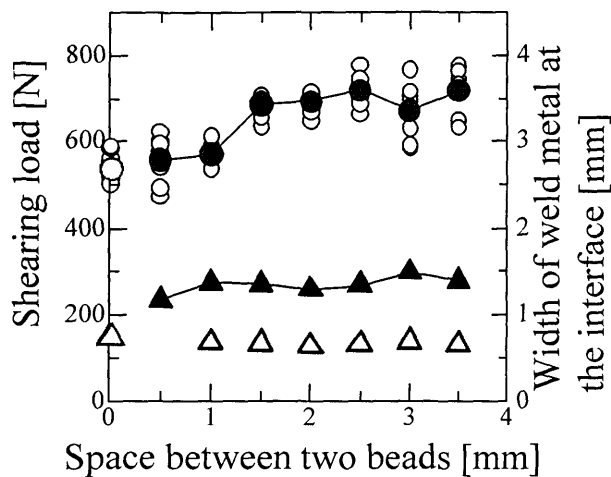
(c) Space between two beads = 3.0mm



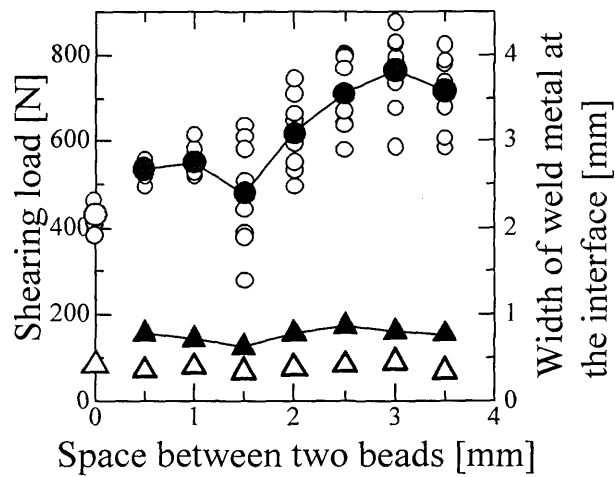
(d) Space between two beads = 3.5mm

Fig.4-2-6 Macrostructures of the welds of SPCC/A1050.

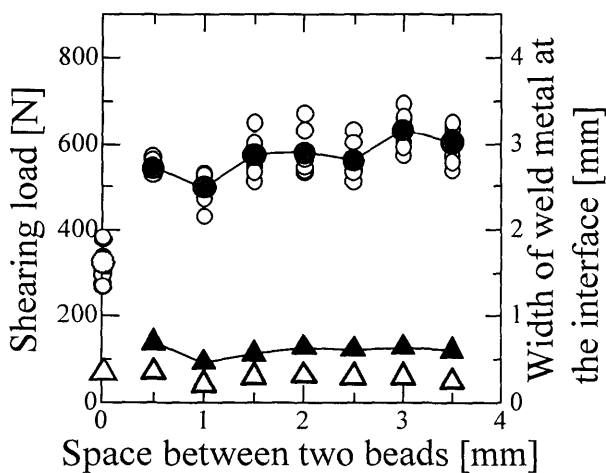
(Welding speed = 40mm/s,
space between two beads = 2.0mm~3.5mm)



(a) Welding speed = 20mm/s



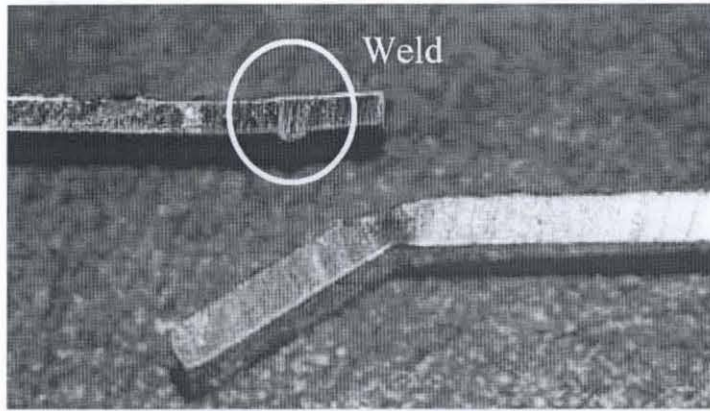
(b) Welding speed = 30mm/s



(c) Welding speed = 40mm/s

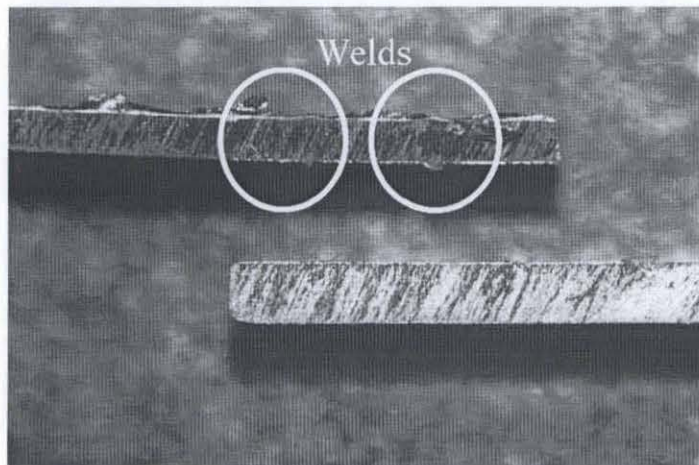
	1 pass	2 pass
Shearing load	○	●
Width	△	▲

Fig. 4-3 Effect of space between two beads on the shearing load and the width of weld metal at the interface of SPCC/A1050 dissimilar laser lap joint.



(a) Welding speed =30mm/s

Space between two beads = 0.5mm



(b) Welding speed =30mm/s

Space between two beads = 3.0mm

Fig.4-4 Tensile shear test specimen of SPCC/A1050.
(welding speed = 30mm/s,
space between two beads = 0.5mm, 3.0mm)

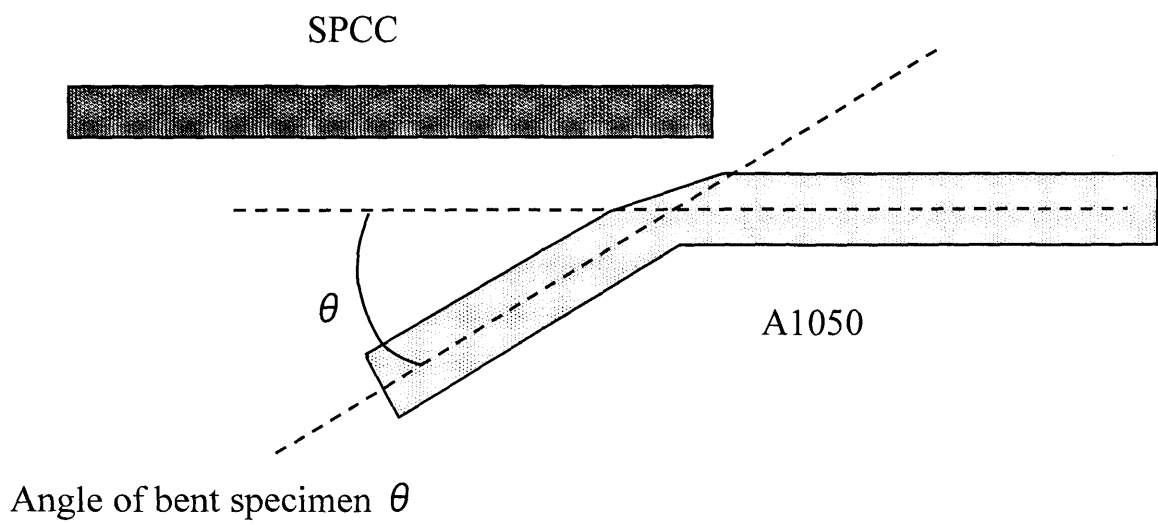


Fig.4-5 Schematic diagram of angle of bent specimen.

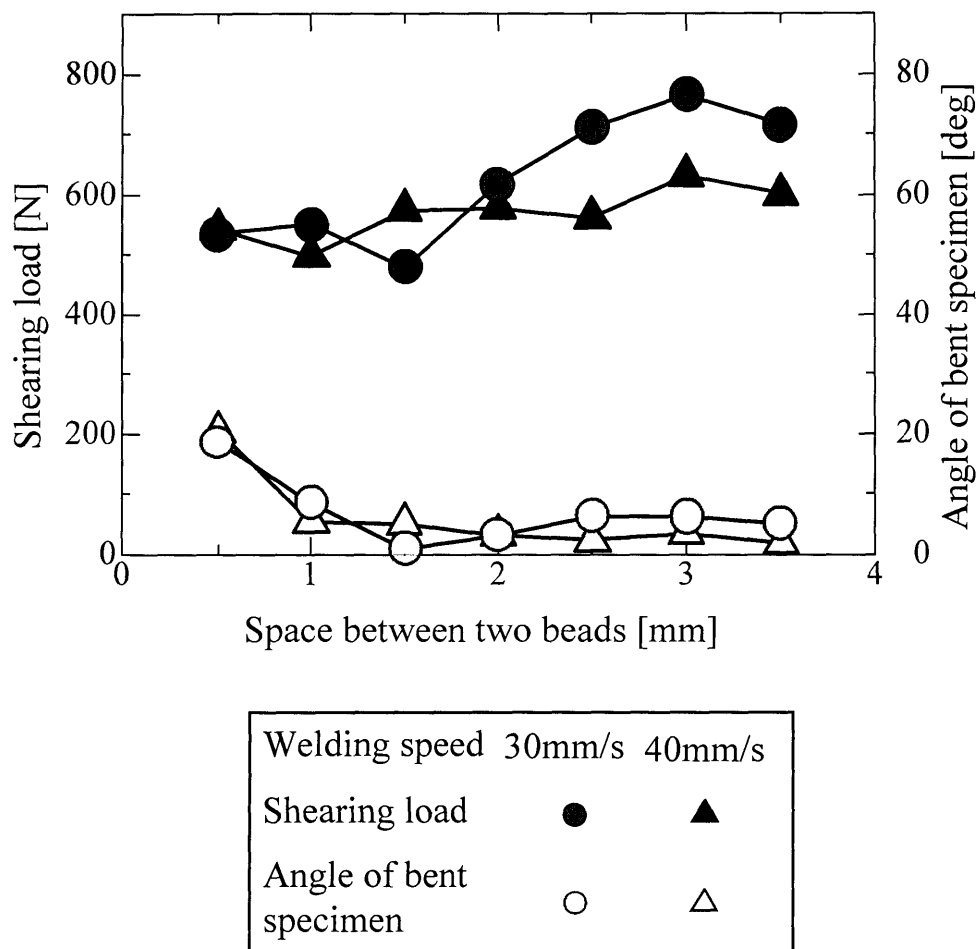


Fig.4-6 Effect of space between two beads on shearing load and angle of bent specimen.

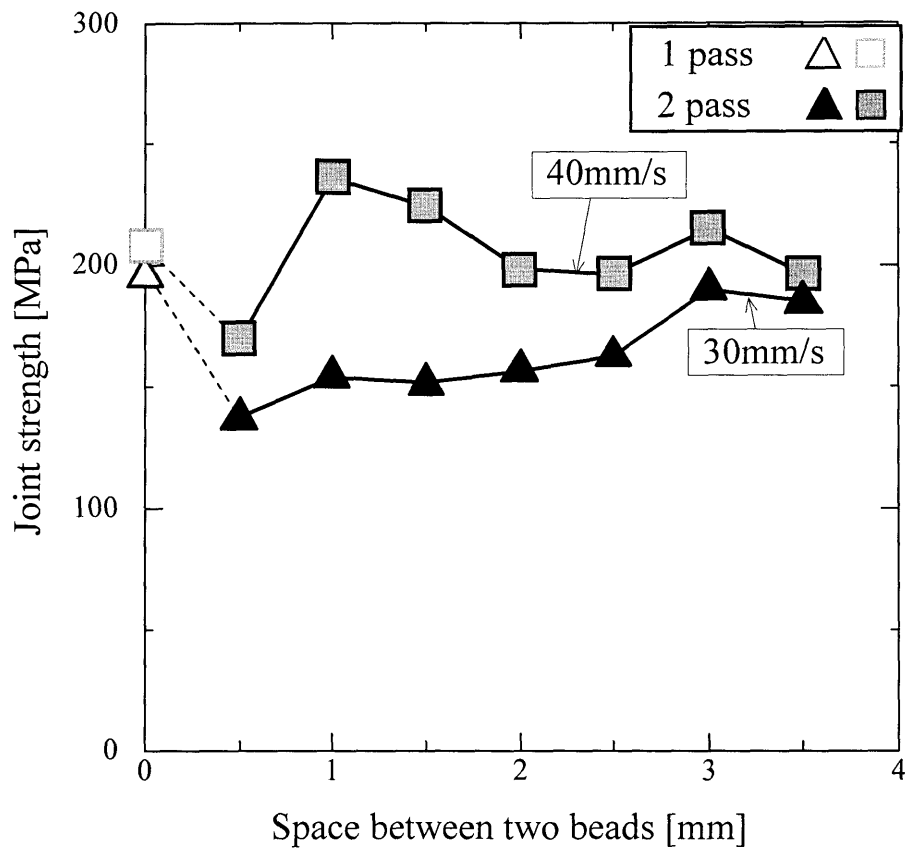
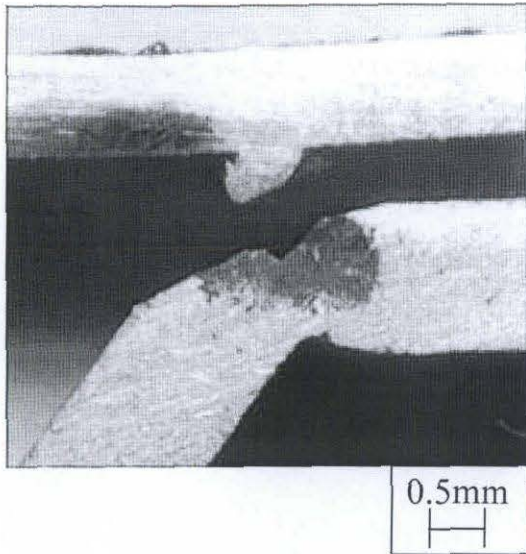
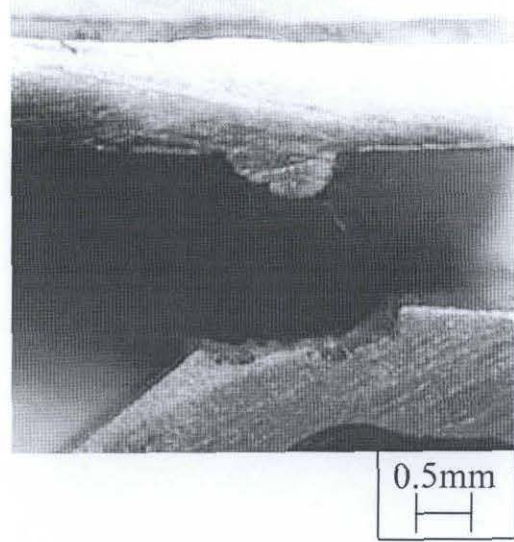


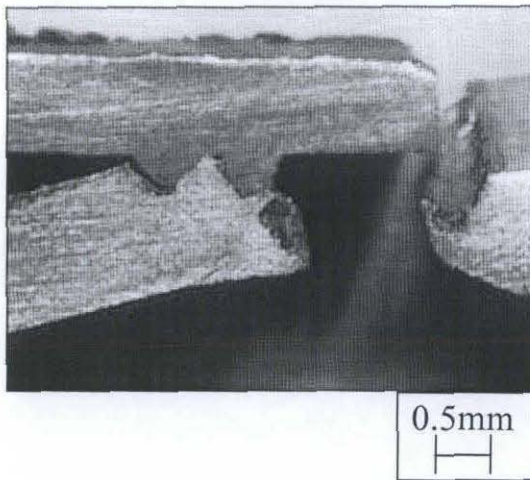
Fig. 4-7 Effect of space between two beads on the joint strength of SPCC/A1050 dissimilar laser lap joint.



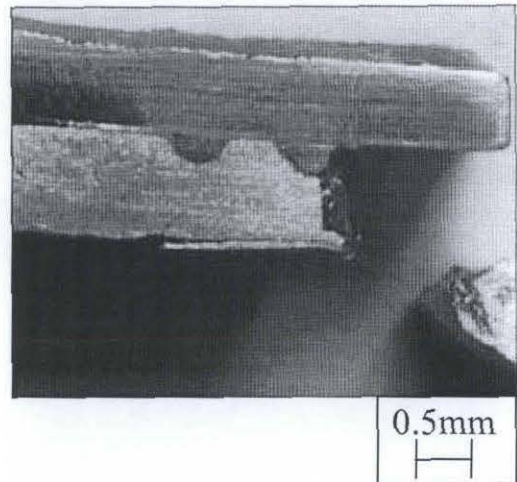
(a) 1 pass



(b) Space between two beads = 0.5mm

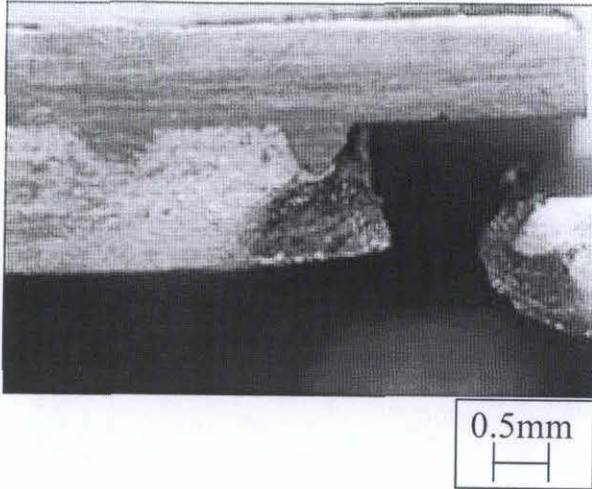


(c) Space between two beads = 1.0mm

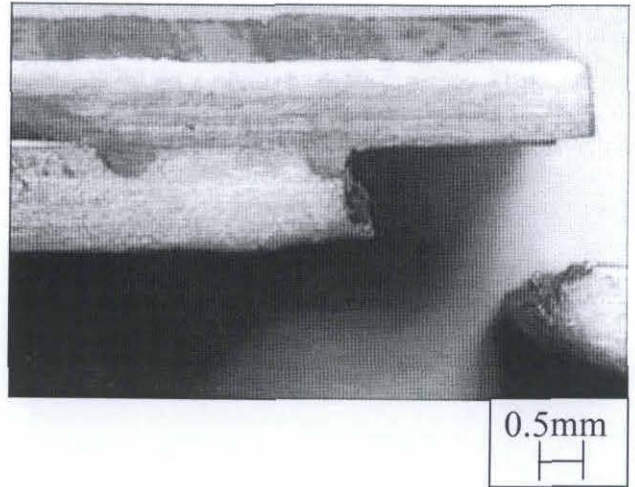


(d) Space between two beads = 1.5mm

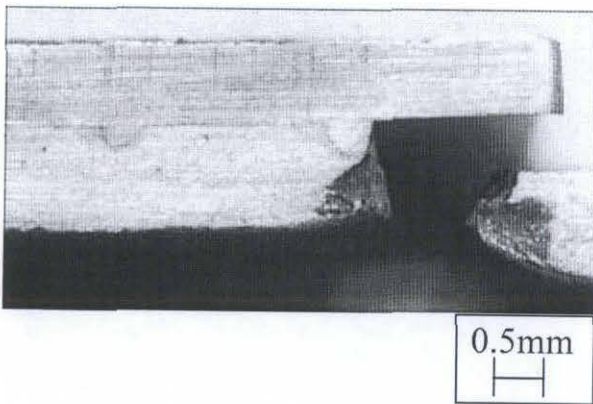
Fig.4-8-1 Tensile shear test specimens after testing of SPCC/A1050.
(Welding speed = 20mm/s, 1pass,
2pass space between two beads = 0.5mm~1.5mm)



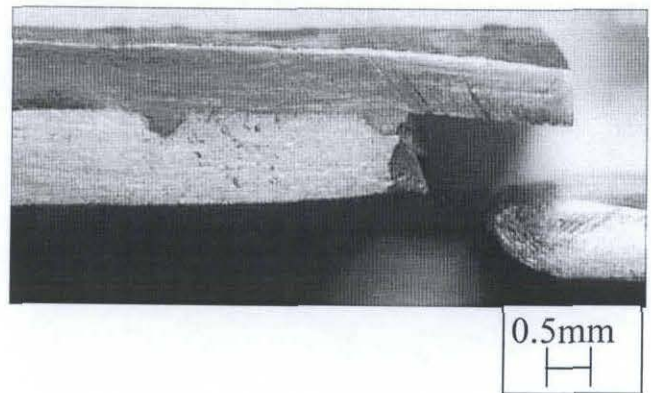
(a) Space between two beads = 2.0mm



(b) Space between two beads = 2.5mm

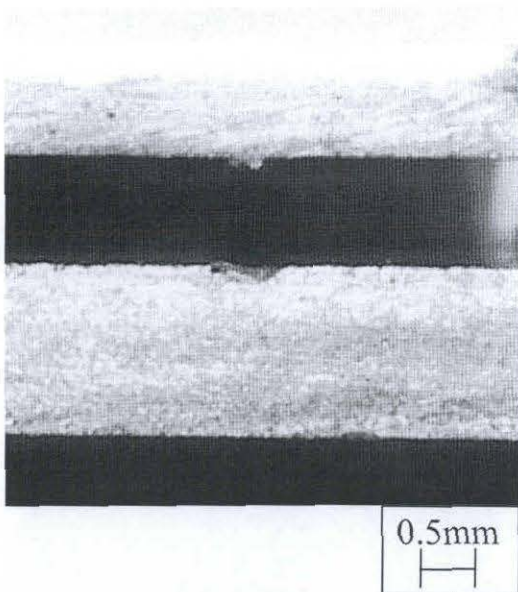


(c) Space between two beads = 3.0mm

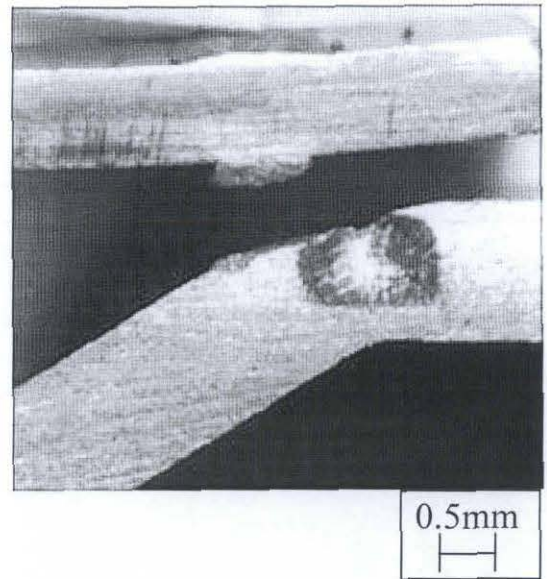


(d) Space between two beads = 3.5mm

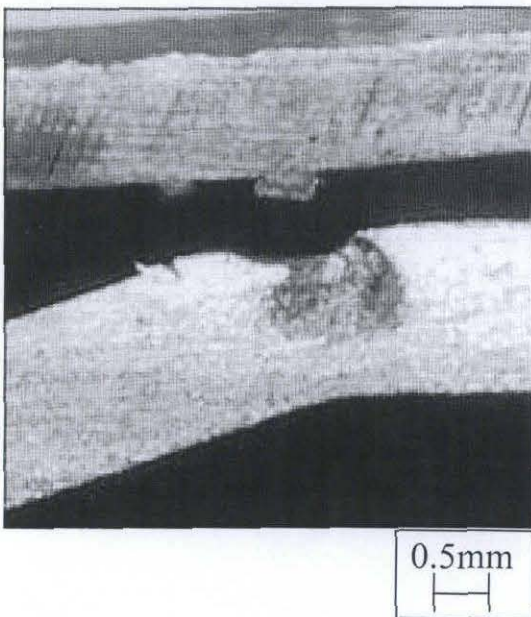
Fig.4-8-2 Tensile shear test specimens after testing of SPCC/A1050.
(Welding speed = 20mm/s,
space between two beads = 2.0mm~3.5mm)



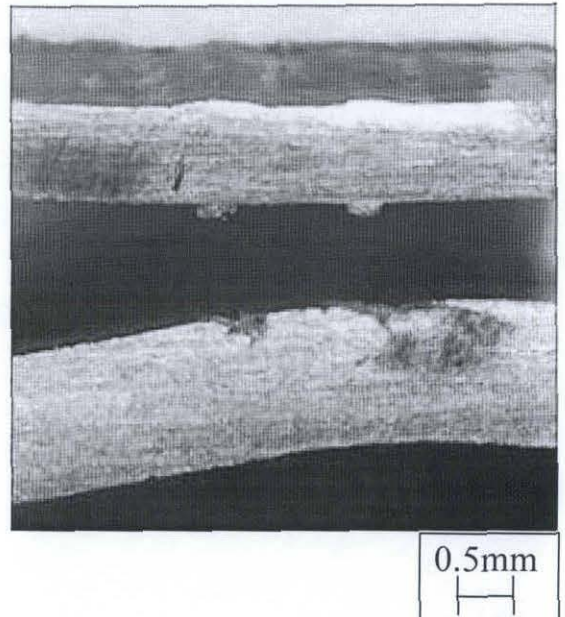
(a) 1 pass



(b) Space between two beads = 0.5mm

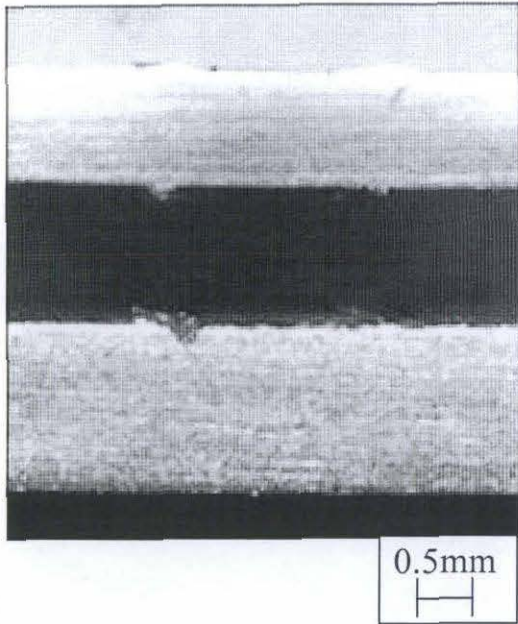


(c) Space between two beads = 1.0mm

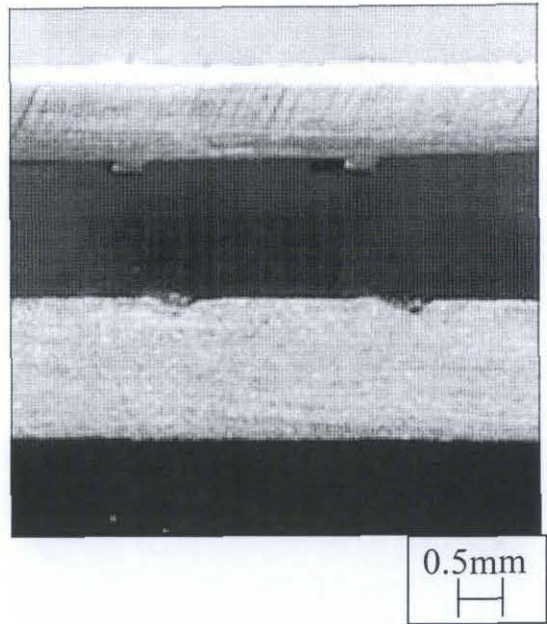


(d) Space between two beads = 1.5mm

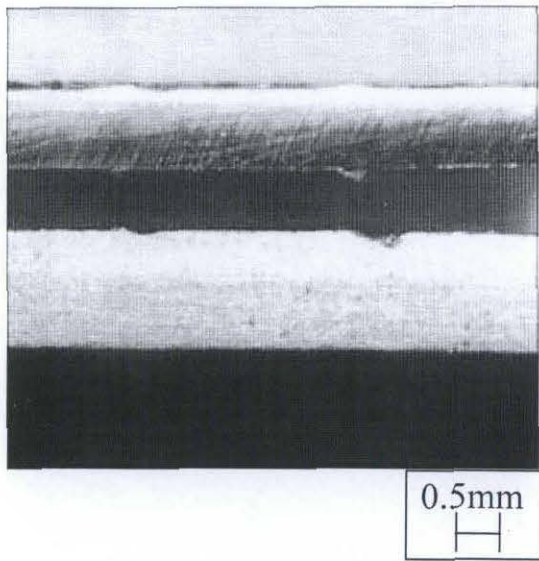
Fig.4-8-3 Tensile shear test specimens after testing of SPCC/A1050.
(Welding speed = 30mm/s, 1 pass,
2pass space between two beads = 0.5mm~1.5mm)



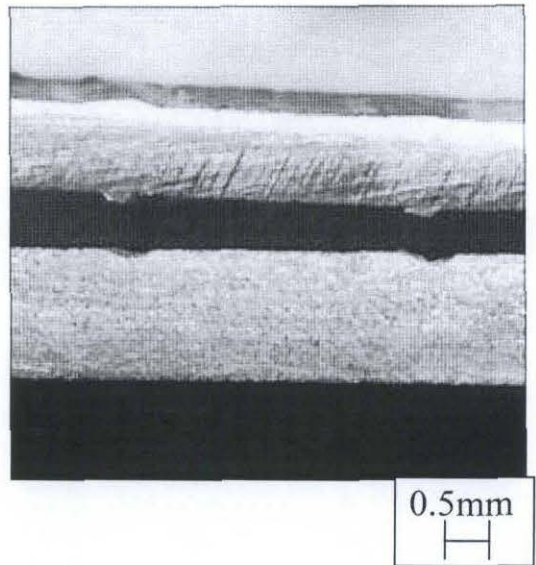
(a) Space between two beads = 2.0mm



(b) Space between two beads = 2.5mm

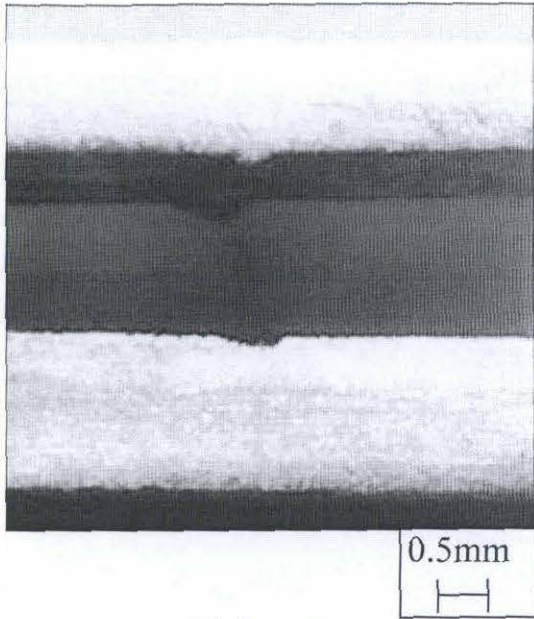


(c) Space between two beads = 3.0mm

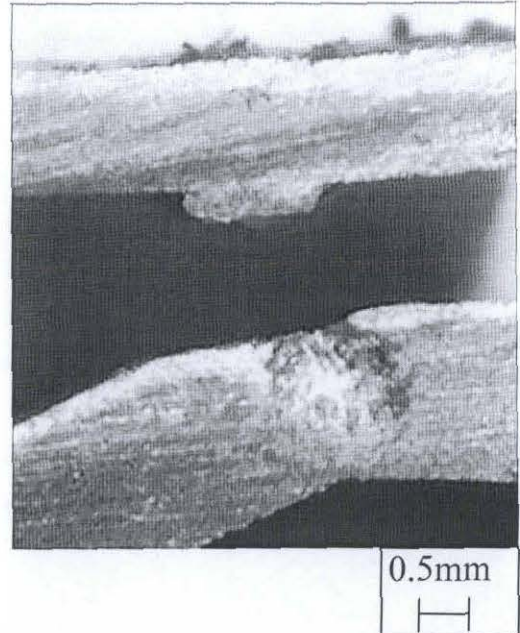


(d) Space between two beads = 3.5mm

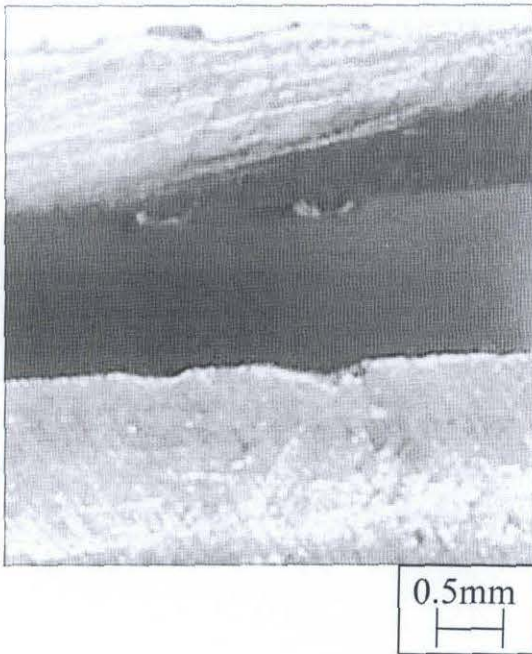
Fig.4-8-4 Tensile shear test specimens after testing of SPCC/A1050.
(Welding speed = 30mm/s,
space between two beads = 2.0mm~3.5mm)



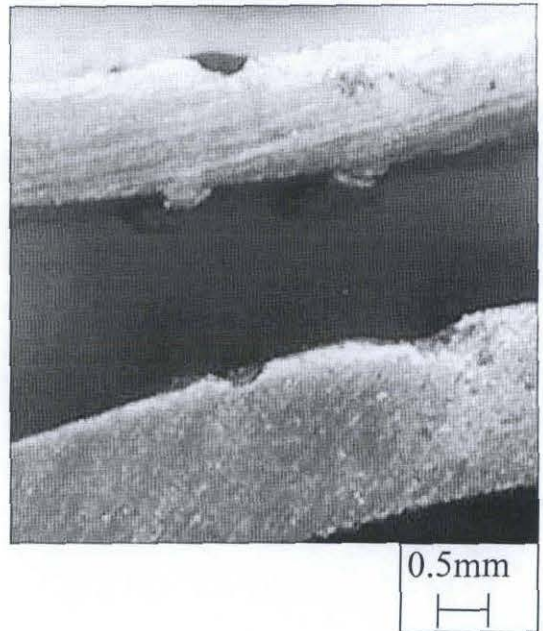
(a) 1 pass



(b) Space between two beads = 0.5mm

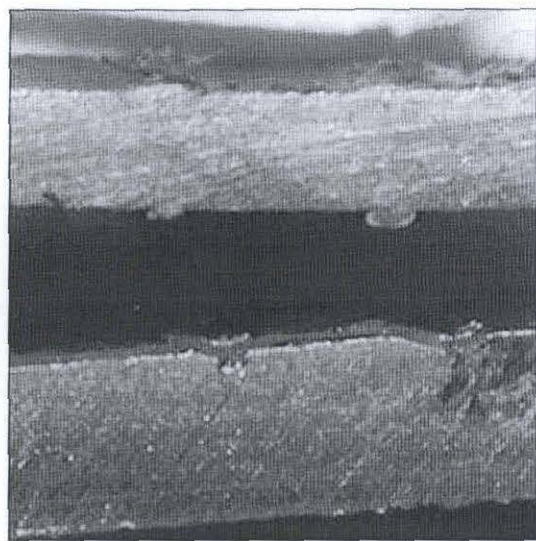


(c) Space between two beads = 1.0mm



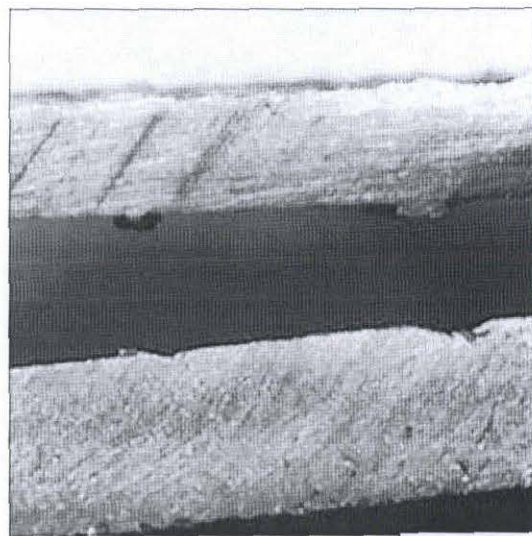
(d) Space between two beads = 1.5mm

Fig.4-8-5 Tensile shear test specimens after testing of SPCC/A1050.
 (Welding speed = 40mm/s, 1pass,
 2pass space between two beads = 0.5mm~1.5mm)



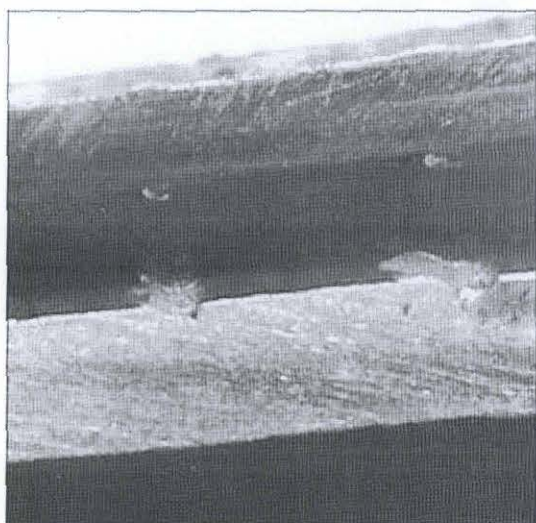
0.5mm
H

(a) Space between two beads = 2.0mm



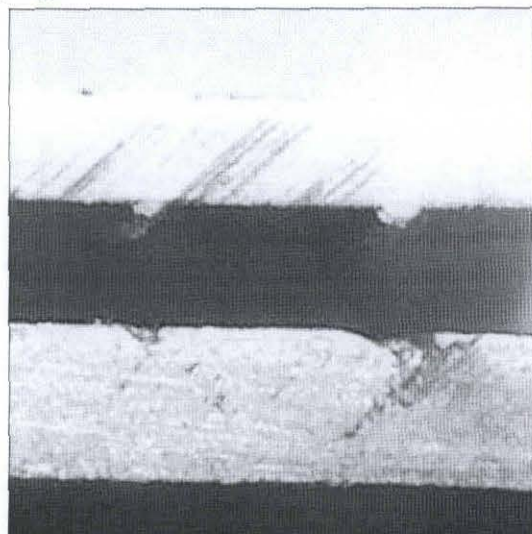
0.5mm
H

(b) Space between two beads = 2.5mm



0.5mm
H

(c) Space between two beads = 3.0mm



0.5mm
H

(d) Space between two beads = 3.5mm

Fig.4-8-6 Tensile shear test specimens after testing of SPCC/A1050.
(Welding speed = 40mm/s,
space between two beads = 2.0mm~3.5mm)