

平成 27 年度 修士論文

レーザーロール溶接の継手強度におよぼす 溶接条件の影響

— マグネシウム合金と低炭素鋼の異材接合 —

三重大学大学院工学研究科

博士前期課程 機械工学専攻

海道 和貴

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
1-1-3 マグネシウム合金と鉄鋼との異種金属間接合	・ ・ ・ 2
1-2 レーザロール溶接法の概要	・ ・ ・ 2
1-3 研究目的	・ ・ ・ 3
第 2 章 実験装置および実験方法	・ ・ ・ 4
2-1 供試材	・ ・ ・ 4
2-2 実験装置の構成	・ ・ ・ 4
2-3 溶接条件	・ ・ ・ 4
2-4 ビード外観観察法	・ ・ ・ 5
2-5 顕微鏡組織観察法	・ ・ ・ 5
2-6 硬さ試験方法	・ ・ ・ 6
2-7 SEM 観察および EPMA 分析方法	・ ・ ・ 6
2-8 引張試験方法	・ ・ ・ 7
2-9 温度履歴測定方法	・ ・ ・ 7
第 3 章 溶接可否及び溶接継手観察	・ ・ ・ 8
3-1 溶接可否	・ ・ ・ 8
3-2 ビード外観観察	・ ・ ・ 8
3-3 ビード断面マクロ観察	・ ・ ・ 9
3-4 顕微鏡組織観察	・ ・ ・ 9
3-5 ビード断面における硬さ試験	・ ・ ・ 10
3-6 接合界面の SEM 観察及び EPMA 分析結果	・ ・ ・ 10
3-6-1 各溶接条件における接合界面の EPMA 面分析	・ ・ ・ 10
3-6-2 接合界面に生成される組織	・ ・ ・ 11
第 4 章 継手強度におよぼす溶接条件の検討	・ ・ ・ 13
4-1 継手の引張せん断強さ	・ ・ ・ 13
4-1-1 破断形態の分類	・ ・ ・ 13

4-1-2 各溶接条件における引張せん断試験結果	．．． 13
4-2 引張せん断強さに及ぼす接合面積の影響	．．． 14
4-2-1 界面破断後の接合部表面に存在する未接合部	．．． 14
4-2-2 各溶接条件における接合面積	．．． 14
4-3 溶接条件が温度履歴におよぼす影響	．．． 15
4-4 溶接条件が引張せん断強さに与える影響	．．． 16
第 5 章 結言	．．． 17

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．最近ではレーザ装置の出力・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¹⁾．

1-1-2 レーザ溶接の特徴

レーザを用いた溶接加工は，集光スポットが微小になるほど速い溶接が可能であり，その結果，熱歪みの小さい溶接を行うことができる利点がある．

レーザ溶接は従来の溶接法と比較して，装置が高価であることや溶接前仕上げに手間がかかることから，加工単価や施工コストが高くなり，実際の加工現場での普及率は低いものであった．しかし，最近では装置の高出力化により加工速度が増加し，熱影響部の小さい効率的な溶接が可能となり，レーザのフレキシビリティやコストパフォーマンスが向上した．そのため，自動車産業などの高速溶接に使用されるようになってきた²⁾．加工速度の増加に加え，コンピュータによる緻密な制御が容易であること，高エネルギー密度により，融点の異なる異種材料や板厚の異なる材料同士の溶接も可能にしたことなども，レーザ溶接が採用され始めたきっかけとなった．

1-1-3 マグネシウム合金と鉄鋼との異種金属間接合

マグネシウム及びその合金は、低密度、高比強度といった特性を持つことから、自動車、鉄道車両、航空宇宙産業などの、軽量化が要求される輸送産業での使用が提案されている。また、鋼は近代産業で最も一般的な金属材料である。軽量であるマグネシウム合金と高強度である鋼の異種金属間接合は、両材料の利点を得ることができるため、各種輸送産業分野で幅広く適用できる見通しを持っており、注目を集めている。

しかしながら、マグネシウム合金と鋼の異種金属間接合にはいくつかの問題が存在する。それは、主に、両材料の融点（マグネシウム 649℃と鉄 1535℃）⁴⁾に大きな差があることや、マグネシウムと鉄は非混和性であり、二元化合物を形成しないことに起因する。このため、従来の溶融接合法では接合が困難となる。現在は主に、拡散接合、摩擦攪拌溶接、抵抗スポット溶接法を用いた、鋼とマグネシウム合金の異種金属間接合に関する研究が行われている。以下にいくつか例を示す。荒木らは、インサート材に Ag を用い、極低炭素鋼とマグネシウム合金の液相拡散接合を行った⁴⁾。作製された継手の強度はマグネシウム合金母材強度の約 78%であった。渡辺らは、回転ピンを用い、軟鋼とマグネシウム合金の固相接合を行った⁵⁾。作製された継手の強度はマグネシウム合金母材強度の約 70%であった。L.Liu らは溶融亜鉛めっき鋼とマグネシウム合金の抵抗スポット溶接を行った⁶⁾。作製された継手の強度はマグネシウム合金母材強度の約 70%であった。Li らは溶加材にマグネシウム合金を用い、軟鋼とマグネシウム合金のレーザブレージングを行った⁷⁾。作製された継手の強度はマグネシウム合金母材の 43%であった。以上、これらの方法による溶接継手強度は母材強度に達しておらず、依然として満足できるものではない。

1-2 レーザロール溶接法の概要

レーザロール溶接法の概略図を Fig.1-1、溶接手順を Fig.1-2 に示す。沓名ら⁸⁾によって開発された本溶接法は、Fig.1-1 に示すように、レーザ発振器と加圧装置から構成され、主に異種金属間の重ね継手の作製に用いられる。上板に照射されたレーザによる入熱を、加圧ローラにより下板に伝熱させるのがこの装置の特徴である。同図に示すように被加工材は上側に高融点金属 (A)、下側に低融点金属 (B) をセットし、以下の順序 (Fig.1-2 参照) により行われる。

- ① 金属 A にレーザを照射し、加熱する。

② 加圧ローラにより金属同士を密着させ、その熱を金属 B に伝熱させる。

③ 金属 B のみを積極的に溶融させ、自然冷却により凝固させることで接合が完了する。

この一連の動作の繰返しにより、継手が作製される。

1-3 研究目的

本研究で用いるレーザロール溶接法は、過去の研究においてアルミニウム合金と低炭素鋼⁹⁾などの各種異種金属接合を可能としており、その継手も母材破断することが確認されている。このことから、本溶接法は異種金属接合に対して有用であると考えられ、マグネシウム合金と鋼の接合及び継手性能に期待できる。そこで、本研究では、異種金属接合に有効とされるレーザロール溶接を適用してマグネシウム合金と鋼の接合を試み、マグネシウム合金と鋼の継手の強度に溶接速度やローラ加圧力などの溶接条件が与える影響について検討することで、本溶接法による両者の接合に関する知見を得ることを目的とする。

第2章 実験装置および実験方法

2-1 供試材

供試材として、冷間圧延鋼板 SPCC（寸法 $40 \times 150 \times 0.8\text{mm}$ ）と、Mg 合金板 AZ31B（寸法 $40 \times 150 \times 1.0\text{mm}$ ）を用いた。Table 2-1 に各材料の化学組成を示す。溶接前処理として、レーザを照射する鋼表面には、レーザの吸収率を高めるためにグラファイト（Acheson Aero 504 溶接スパッタ付着防止剤）を塗布した。また両板材の接合面をエメリー紙（#400）で研磨した後、エタノールで脱脂処理をした。

2-2 実験装置の構成

Fig.2-1 に示すように、レーザ加工ヘッドに平面反射ミラーおよびローラ加圧装置を組合せた、レーザロール溶接装置を使用した。レーザ装置は、定格出力 2kW、波長 $10.6\mu\text{m}$ の連続発振型 CO_2 レーザ発振器（ダイヘン社製 EL-2201）を用いた。発振されたレーザ光を、焦点距離 200mm の ZnSe 製集光レンズによって集光し、平面反射ミラーにて反射させた後、角度をつけて板材へと照射させた。レーザ光とローラとの干渉を避けるため、平面反射ミラーの角度は板材に対し 56.5 度とした。また、この際のビームスポットは溶接方向に対し長辺が 3.5mm、短辺が 2.5mm の楕円に近い形状である。

ローラは高温強度が必要なため、SUS304 ステンレス鋼で作製し、直径を 55mm、加圧部の幅を 4mm とした。レーザスポットの中心とローラ加圧軸との距離は 25mm で一定とした。

供試材は、SPCC 鋼が上、Mg 合金が下になるように、重ね幅 4mm で設置した。本研究で用いるレーザ装置は、XY テーブル制御装置と同期しており、供試材を設置したテーブルが移動することにより溶接を行う。

2-3 溶接条件

レーザ出力は 2kW で一定、レーザ照射位置は重ね代の中心とし、ローラ加圧力を 0.5~1kN、溶接速度を 0.3~2.0m/min の範囲で変化させ実験を行った。溶接中は集光レンズの保護および溶接継手の酸化防止を目的としてシールドガスに Ar を用い、流量は 20l/min とした。以下に、実験条件をまとめて記す。

レーザ出力	・・・ 2kW
レンズ焦点距離	・・・ 120mm
溶接長	・・・ 120mm
供試材重ね幅	・・・ 4mm
溶接速度	・・・ 0.3~2.0m/min
ローラ加圧力	・・・ 0.5~1kN
レーザスポットとローラ間距離	・・・ 25mm
シールドガス	・・・ 20l/min

2-4 ビード外観観察方法

ビード外観観察のため、作製した継手をエタノールで洗浄し、グラファイトなどを除去した後、イメージスキャナー（EPSON 製 PMA-850）によりビード表面および裏面を撮影した。

2-5 顕微鏡組織観察方法

継手の断面観察を行うため、観察用試料を以下の手順で作製した。

- ① 継手の溶接方向に対し垂直にリファインカッターによって切断した後、ベークライトに埋める。
- ② エメリー紙（＃400～＃1500）、精密仕上げ用研磨フィルム（＃2000～＃6000）の順で、湿式研磨を行う。その後、エタノールにより洗浄する。
- ③ 鋼側の観察を行う場合は 5%ナイトールに 30s 浸しエッチングする。マグネシウム側の観察を行う場合は、ピクリン酸 6g、酢酸 10ml、エタノール 50ml、蒸留水 5ml の溶液に 40S 浸しエッチングする。
- ④ 光学顕微鏡（OLYMPUS 製 BHM）により、継手の断面観察を行う。

2-6 硬さ試験方法

溶接後試験片断面の硬さ分布を調査するため、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 10g とし加圧時間を 30sec とした。用いた計算式を以下に示す。

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

Hv : Vickers hardness number [kg/mm²]

P : Applied load [g]

θ : Angle between opposite faces (136°)

d : Diagonal indentation [mm]

2-7 SEM 観察および EPMA 分析方法

本実験では走査型電子顕微鏡 SEM（Scanning Electron Microscope, JEOL 製 JXA-8530F）を用いて接合界面付近の顕微鏡組織観察を行った。SEM 観察に用いる試料は、顕微鏡観察で使用したものを用いる。試験片表面は Pt 蒸着装置（AUTO FINE COATER, JEOL 製 JFC-1600）を用い Pt を蒸着する。その後、カーボンシートを試験片 Pt 蒸着部と観察用治具にかかるように貼付け通電を確保した。SEM 観察と同時に、電子プローブアナライザ（EPMA : Electron Probe Microanalyser, JEOL 製 JXA-8530F）を使用して、接合界面における元素の濃度分布を調査した。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、照射部分から発生する特性 X 線を検出し、その波長から試料を構成している元素や分布および量を知ることができる分析機器である¹⁾。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、調査目的とする箇所にとどのような元素がどのくらいの割合で存在しているかを知ることができる。その分析手段として、点分析、線分析、面分析があり、いずれもそれぞれの最小分析領域は 1 μm³である。分析は加速電圧 15kV、ビーム電流 3.0×10⁻⁸A の条件で行った。

2-8 引張試験方法

継手の強度を測定するために、万能引張試験機（島津製作所製 オートグラフ AG-20KNG）を用いて、引張せん断試験を行った。作製した継手から 10mm 幅で短冊状に溶接方向に対し垂直に切出した試験片を、チャック間距離 20mm で取付け、クロスヘッド速度 1mm/min で接合部に引張せん断荷重を与えた。その際の最大荷重をロードセルにより測定した。

また、本研究では引張せん断試験における最大荷重を試験片幅(10mm)で除したものを、溶接長 1mm 当たりの引張せん断強さ N/mm として示した。これは、溶接条件によって継手の引張せん断試験後の破断形態が異なるためである。

2-9 温度履歴測定方法

レーザロール溶接中の熱サイクルを調査するため、接合界面および温度履歴を $\phi 0.2$ の K 型熱電対およびデータロガー（KEYENCE 製 GR-3500）を用い測定した。接合界面の温度履歴を測定する場合は Fig.2-2(a)に示すように、AZ31B の重ね幅中心(接合端部から 2mm)に $\phi 1$ の穴を開け、熱伝対を通し SPCC 裏側にパーカッション溶接により取付けた。AZ31B 裏側の温度履歴を測定する場合、熱伝対を取付ける位置は Fig.2-2(b)に示すように接合界面測定時に穴を開ける位置と同一である。

第3章 溶接可否及び溶接継手観察

3-1 溶接可否

溶接速度およびローラ加圧力を変化させた実験によって得られたプロセスウインドウを Fig.3-1 に示す。図中○印は継手から引張せん断試験片を作製できた条件であり，△印は鋼が過剰に溶融してしまった条件，また×印は入熱不足で接合が不可能であった条件である。どの加圧条件においても，溶接速度が低速度になるほど，入熱過多により鋼が溶融してしまい，同溶接継手中において接合している箇所と接合していない箇所が発生する。そのため，継手から引張せん断試験片を切り出す際，剥離するので溶接可能条件から除外した。ローラ加圧力を増加させると接合可能となる溶接速度範囲が拡大する。一方，ローラ加圧力が低いほど材料同士の密着性は小さくなるため，溶接速度が遅い場合は，Mg 板への伝熱が滞り，鋼表面に熱が溜まることで過剰に溶融してしまうと考えられる。溶接速度が速い場合はローラによる伝熱が不十分となり，接合が不可となる。

3-2 ビード外観観察

Fig.3-2 にローラ加圧力 1kN，Fig.3-4 に 0.75kN，Fig.3-5 に 0.5kN における各溶接速度のビード外観写真を示す。また，各写真左側に表面ビードを示し，上部が SPCC，下部が AZ31B，右側に裏面ビードを示し，上部が AZ31B，下部が SPCC である。Fig.3-1 のプロセスウインドウにおいて△印で示した溶接条件は，前述のとおり鋼が過剰に溶融しているのがわかる。鋼が溶融する箇所は，Mg 板への伝熱がよく行われず，継手裏面ビードより Mg 板が溶融していないのが観察できる。

Fig.3-1 において○印で示した溶接可能条件においては，どの加圧力においても低速度側ほど AZ31B 裏側まで溶融しているのが観察できる。一方，高速度側ほど同溶接ビードにおいて Mg 板裏側まで溶融していることが観察できる箇所と，できない箇所が混在している。

また，SPCC はレーザの入熱による熱影響部が観察できるが，溶接速度の増加に伴い入熱が減少するため，その幅は小さくなる。

ローラ加圧力 1kN の溶接速度 1.1~1.5m/min，およびローラ加圧力 0.75kN の溶接速度 1.1m/min において，重ね部から継手の表側に約 $\phi 1\sim 3$ の球状に突出している物体が見られた。この物体にはローラが通過した痕跡が見られ，溶融した Mg が凝固前にローラにより押出され形成されたと考えられる。

3-3 ビード断面マクロ観察

Fig.3-5 に各溶接条件における断面マクロ写真を示す. 写真上部が SPCC で下部が AZ31B である. 溶接速度が低, 中速度では, Mg 板端部が丸みを帯びているのが多く観察できるが, 高速度になるにつれ Mg 板端部の変形具合は減少しているようである.

溶接条件による板材の変形具合を定量化するため, 溶接前後の SPCC と AZ31B 各材料の板厚の比を継手断面より計測した. Fig.3-6 に各板材の溶接前後の板厚の比を, 溶接条件ごとに示す. 溶接前の板厚は溶接部から離れた母材において計測し, 溶接後の板厚は重ね幅の中心において計測した. 板厚比は, ローラ加圧や溶融による変形があるため, 1 を超える場合がある. 図より, SPCC の板厚比は, 溶接条件による変化が小さいのに対し, AZ31B は変化が大きく, 特にどの加圧力においても中速度域での板厚の変化が顕著である. ローラ加圧力 1kN 及び 0.75kN に関しては, 中速度域で Mg が継手表面に球状に発生する現象が, 板厚比の変化に影響を与えている可能性がある.

3-4 顕微鏡組織観察

Fig.3-7 にローラ加圧力 1kN の各溶接速度におけるビード断面について鋼側の腐食後の顕微鏡組織を示す. 表面において極わずかに溶融した形跡があるのみで, レーザ照射側の SPCC は溶融していないことがわかる.

Fig.3-8 に, ビード断面 Mg 側を腐食した際の, 典型的な微細組織を示す. 溶接条件はローラ加圧力 1kN, 溶接速度 0.6m/min である. Fig.3-8(a)は AZ31B 母材の顕微鏡組織で等軸結晶粒組織であった. Fig.3-8(b)は Mg 溶接金属と熱影響部の境界付近の顕微鏡組織を示しており, 左側が熱影響部, 右側が溶接金属である. 熱影響部の組織は母材組織の結晶粒と比較して入熱により粗大化しているのがわかる. Fig.3-8(c)は溶接金属の顕微鏡組織を示しており, 凝固組織が観察できる.

Fig.3-9 にローラ加圧力 1kN の各溶接速度におけるビード断面について Mg 側の顕微鏡組織を示す. 溶接金属は凝固組織である柱状晶が接合界面方向に向いていることから, 凝固が Mg 板裏面から界面方向に行われたことがわかる. 溶接速度 0.5 および 1.1m/min では Mg 板裏面まで溶融しているのが観察できるが, 溶接速度が増加するにつれ入熱が減少するため, 溶接速度 1.7m/min では裏面まで溶融していない. また, Fig.3-10 には溶接速度 1.1m/min の各ローラ加圧力におけるビード断面について Mg 側の顕微鏡組織を示す. 本実験で用いた溶接条件中, 最も低いローラ加圧力である 0.5kN においても, Mg 板裏面まで溶融しているのが観察できた. ローラ加圧力 0.5kN でも溶接速度によっては十分にローラによる伝熱を行うことが可能である.

この凝固組織が観察できる領域を溶融面積として, 各溶接条件におけるビード断面写真

より計測した結果を Fig.3-11 に示す。ローラ加圧力増加するほど溶融面積も増加し、溶接速度が速いほど、溶融面積は減少する傾向にある。これはローラ加圧力が増加するほど、Mg 板への伝熱量が促進され、また、溶接速度が速くなるほど入熱が減少するためであると考えられる。

3-5 ビード断面における硬さ試験

ローラ加圧力 1kN におけるビード断面の硬さ分布を Fig.3-12 に示す。図中に示す横線はそれぞれ SPCC と AZ31B の母材硬さの実測値で、それぞれ 158Hv と 75Hv である。鋼板側はどの条件においても硬さ分布が不均一であるが、加熱による焼入れ効果によって 200~250Hv 程度まで増加している。また、接合界面を介して鋼の硬さから Mg 板母材の硬さまで減少する。接合界面において金属間化合物層が生成されているならば、硬さ試験よりその存在が推定できるが、今回の試験では確認できなかった。

3-6 接合界面の SEM 観察及び EPMA 分析結果

3-6-1 各溶接条件における接合界面の EPMA 面分析

継手の接合界面に生成される組織を明らかにするため、EPMA 分析を行った。Fig.3-13(a)~(c)にそれぞれローラ加圧力 1kN、溶接速度 0.5m/min、1.1m/min および 1.8m/min における重ね幅の中央付近の SEM 画像及び EPMA 面分析結果を示す。SEM 画像よりどの溶接条件においても、光学顕微鏡では確認できなかった、1 μ m 程の白色の層のようなものが観察でき、界面層が形成されている可能性がある。溶接速度 0.5m/min のとき、界面層において Al 元素の濃度が高くなっているのがわかる。溶接速度 1.1m/min のときも同様に、界面層において Al 元素の濃度が高くなっているが、0.5m/min のときほど顕著ではない。溶接速度 1.8m/min のとき、界面層において Al 元素濃度の上昇は確認されなかった。界面層において Al 元素の濃縮が発生する要因として、凝固偏析が挙げられる。溶融した Mg は Mg 板底部から凝固し始め、最終凝固層である界面付近に Al 元素が偏析し濃縮が発生すると考えられる。また、この界面層には Fe 元素も分布していることから、Fe-Al 系の金属間化合物が生成されていると予想される。

3-6-2 接合界面に生成される組織

界面層に生成される組織を明らかにするため、EPMA 点分析を行った。Fig.3-14 はローラ加圧力 1kN，溶接速度 0.5m/min の界面層付近の EPMA 点分析結果を示しており，Fe-Al 系化合物の存在が予測されることから，Fe 元素と Al 元素を定量分析した。No.1 は Fe 含有量が 98.8%であることから，鋼/Mg 合金界面における SPCC 境界部であることがわかる。界面層にあたる No.2~4 は Fe 含有量が 60~70at%と多く，Fe リッチな金属間化合物が生成されていると考えられる。よって，SEM 画像において白色に見える層は，Fe リッチな金属間化合物層であることが明らかとなった。Mg 合金側に位置する No.5 は Al 含有量が 74.5%と多く，Al リッチな金属間化合物が生成されていると考えられる。Fe-Al 系の化合物は Fig.3-15 に示す状態図¹⁰⁾より，FeAl，Fe₃Al，FeAl₂，Fe₂Al₅，および FeAl₃といった種類がある。含有量から金属間化合物を推測すると，Fe リッチな界面層は FeAl 及び Fe₃Al で，Mg 合金側の Al リッチな金属間化合物は FeAl₃であると考えられる。

また，Miao らが行った鋼と Mg 合金のレーザ溶接では，接合界面に Fe-Al 系化合物以外に Mg-Al 系化合物も生成されると報告している¹¹⁾。そこで接合界面において Fe，Al，Mg 元素の定量化を試みた。Fig.3-16 はローラ加圧力 1kN，溶接速度 0.5m/min において，Fe リッチな金属間化合物が生成される層に沿って EPMA 分析した結果を示している。Fe 元素の含有量は 55~65at%と多く，SEM 画像において白色に見える界面層は Fe リッチな金属間化合物層である。一方，Mg 元素も含有量は 6~10at%と Fe および Al 元素含有量と比較して少ないが検出された。よって，この層において Mg-Al 系化合物も存在する可能性がある。

次に，接合界面に対して垂直方向に EPMA 点分析を行った結果を Fig.3-17 に示す。溶接条件は先程と同様で，図中 SEM 画像中の左端赤○を分析開始点としている。グラフ中において□で示す箇所は界面層を示しており，横軸は分析点の X 軸座標を示す。分析結果より，界面層では Fe リッチな金属間化合物が確認でき，界面層の Mg 合金近傍は Al リッチな金属間化合物が確認できた。溶接速度 1.1m/min，1.8m/min においても同様に分析を行った。その結果を Fig.18，Fig.19 に示す。溶接速度 0.5m/min のときと同様に，Fe リッチな金属間化合物が確認できたが，溶接速度が増加するにつれその含有量は減少する。点分析の結果では Fe-Al 系の金属間化合物が界面層より Mg 側にずれて確認できるが，これは界面層の厚さが薄すぎるため，EPMA 分析における最小分析領域約 1μm³を下回ることが原因として考えられる。

以上 EPMA 分析結果より，鋼/Mg 合金接合界面において Fe-Al 系金属間化合物の存在が確認でき，接合が鋼中の Fe 元素と Mg 合金中の Al 元素の界面反応によって達成されたと

考えられる．界面層は Fe リッチな金属間化合物が生成されており，界面層 Mg 側は Al リッチな金属間化合物が生成されていた．また界面層の厚さはローラ加圧力 1kN，溶接速度 0.5m/min において $1\mu\text{m}$ 程度で，溶接速度の増加によりその厚さは薄くなると考えられる．

第4章 継手強度におよぼす溶接条件の検討

4-1 継手の引張せん断強さ

4-1-1 破断形態の分類

作製した重ね継手の引張せん断試験を行った。試験片は重ね継手を溶接線に対して垂直に幅 10mm で切断し作製した。Fig.4-1 に引張せん断試験後の試験片を示す。破断形態は図に示す通り(a)Mg 合金中での破断、(b)接合界面の剥離による破断、および(c)両方の破断形態を含む複合型の破断の 3 種類が存在した。Mg 合金中破断においては、重ね幅の端に位置する Mg 溶融部で破断しているのが確認できた。溶融部内で軟化している箇所が存在している可能性を考え、Mg 溶融部での硬さを計測した。Fig.4-2 に Mg 溶融部の硬さ分布を示す。溶接幅中心を 0 点とし、Mg 板幅方向に計測を行った。また、グラフ中の横線は AZ31B の母材硬さを示している。図中グラフより、溶融部内において軟化は確認できず、Mg 合金中の破断箇所は軟化部ではなかった。よって、Mg の溶融による変形により、板厚が減少した箇所で破断していると考えられる。

4-1-2 各溶接条件における引張せん断試験結果

各加圧力における継手の引張せん断試験の結果を Fig.4-3 に示す。本研究では、引張せん断試験における最大荷重を試験片幅 (10mm) で除したものを、溶接長 1mm 当たりの引張せん断強さ N/mm として示す。また、○印は Mg 合金側での破断、×印は界面破断、△印は両方の破断形態を含む複合型を示す。また、実線は AZ31B 母材の引張強度を示しており、破線は SPCC 母材の引張強度を示す。

(a)はローラ加圧力 1kN での引張せん断試験結果を示しており、引張せん断強さは最大 190.1N/mm で、SPCC 母材強度の 82%程度に相当する。(b)はローラ加圧力 0.75kN での結果を示しており、引張せん断強さは最大 212.6N/mm で SPCC 母材強度 91%程度に相当する。(c)はローラ加圧力 0.5kN での結果を示しており、引張せん断強さは最大 192.9N/mm で、SPCC 母材強度の 83%程度に相当する。

ローラ加圧力 1kN では低速度域において Mg 合金中破断や複合型の破断が多く見られ、0.5 および 0.75kN 各条件における低速度域でも、これらの破断形態は多く見られる。界面破断に関しては、1kN においては高速度域に集中しているのに対し、0.5 および 0.75kN ではあらゆる速度域で発生している。

また、どのローラ加圧力においても同溶接速度で、ばらつきが発生しており溶接条件による傾向が不明瞭である。このばらつきを評価するため、引張せん断強度の標準偏差を溶接速度ごとに Fig.4-4 に示す。図中グラフ左縦軸に、各溶接速度における引張せん断強度の平均値を示し、右縦軸に標準偏差を示す。どの加圧力においても、溶接可能範囲全域にばらつきが発生しているのが確認できる。

4-2 引張せん断強さに及ぼす接合面積の影響

4-2-1 界面破断後の接合部表面に存在する未接合部

界面破断となる場合、Fig.4-5 の○印に示すように、剥離後の SPCC 接合部表面に Mg 合金と思われる付着物が外観観察より確認できた。この付着物が Mg 合金であることを明らかにするために、EPMA 面分析を行った。Fig.4-6 に、Fig.4-5(b)に示した○印内における SEM 画像と EPMA 分析結果を示す。具体的な測定箇所は、SEM 画像中□枠内に示す箇所である。分析結果より、Mg 元素の存在を確認することができた。よって、外観観察より確認できる付着物は Mg 合金であり、この箇所で接合が行われていたと考えられる。

また Fig.4-5(a)に示すように、溶接速度 0.6m/min の方は広範囲に Mg 合金が付着しており、連続的に接合が行われていることがわかる。対して Fig.4-5(b)に示す、溶接速度 1.6m/min の方は Mg 合金の付着が局所的で、未接合部が存在している。Fig.4-7~Fig.4-9 に各溶接条件における界面破断した SPCC 側の接合部表面を示す。一つの継手から 3 つの引張せん断試験片を切り出すため、それぞれ No.1~3 と表す。図より同溶接条件であっても Mg 合金の付着している接合部領域は一樣ではない。よって同溶接継手中において未接合部が点在していることとなり、継手の引張せん断強度のばらつきに影響をおよぼすと考えられる。

4-2-2 各溶接条件における接合面積

Fig.4-4 の○印に示す箇所は Mg 合金が付着していることが明確となった。この付着する Mg 合金の面積を接合面積として計測し、Fig.4-10 に各ローラ加圧力における引張せん断強さにおよび接合面積の影響を示す。基本的に、接合面積が増加すると引張せん断強さも増加することが確認でき、引張せん断強さは接合面積に依存することがわかった。よって未接合部を減少させることは引張せん断強さの増加をもたらす、ばらつきの減少に繋がると考えられる。

次に、各溶接条件における引張せん断強さを Fig.4-11 に示す。各プロットは界面破断となった引張せん断試験片から測定した接合面積を示しており、(a)はローラ加圧力 1kN、(b)は 0.75kN、(c)は 0.5kN である。グラフよりローラ加圧力 1kN の溶接速度 1.3, 1.4m/min を除いて、接合面積 25mm² 以下で界面破断となる可能性が高い。反対に接合面積が 25mm² より大きくなると、界面破断以外の破断形態となる可能性がある。溶接速度が接合面積に及ぼす影響については、同溶接条件において破断形態に違いがあり、界面破断以外の試験片は接合面積が計測できないため、検討し難い。そこで、Mg 合金中破断および Mg 合金中破断+界面破断の場合については、引張試験片幅 10mm×重ね幅 4mm の面積 40mm² を接合面積の最大値として仮定し、溶接速度ごとに接合面積を平均することで比較し易くしたグラフを Fig.4-12 に示す。グラフより各ローラ加圧力においての高速度域側の接合可能限界速度に近づくほど、接合面積が低下する傾向にあるのが確認できる。引張せん断強さは接合面積に依存するため、溶接速度は引張せん断強さに影響を与えることになる。各ローラ加圧力における差については不明瞭であった。

4-3 溶接条件が温度履歴におよぼす影響

レーザロール溶接中の界面における温度履歴を各溶接条件において計測した。その結果を Fig.4-13 に示す。Fig.4-13(a)~(c)はそれぞれローラ加圧力 1kN、溶接速度 0.6, 1.1 および 1.8m/min における温度履歴を示す。また破線は AZ31B の融点を示し、溶接開始線および溶接終了線を縦線に示す。最高到達温度はレーザ通過時で、0.6m/min のとき 1280℃、1.1m/min のとき 1049℃、1.8m/min のとき 1016℃と、溶接速度の増加に従い低下する。これは溶接速度の増加による入熱の減少によるものである。また、どの溶接速度においても、Mg 合金の融点以上、鋼の融点以下であった。また、マグネシウムの沸点は 1095℃³⁾であるため溶接速度 0.6m/min においては、界面付近の一部の Mg は蒸発している可能性がある。

次に溶接速度 1.1m/min、のときの各ローラ加圧力における、Mg 板裏側で計測した温度履歴を Fig.4-14 に示す。加圧力を変化させても同様な温度履歴が得られた。また、どの条件においても Mg 合金の融点を超えており、Mg 板裏側まで十分に溶融しているのがわかる。

4-4 溶接条件が引張せん断強さに与える影響

引張せん断試験より得られた継手強度の結果は、どのローラ加圧力においても同溶接速度で、ばらつきが発生しており溶接条件による傾向が不明瞭であった。このばらつきは同溶

接継手中における未接合部の存在が影響しており、その面積に引張せん断強さは依存する。未接合部が点在することにより、引張せん断試験を行う箇所によって接合面積が変化するため、継手強度に大きな差が生じることとなる。よって安定した継手強度を得るためには、未接合部を減少させることが必須である。

マグネシウム合金は酸化皮膜 (MgO) を作りやすく、溶接を阻害することが知られている¹²⁾。本溶接による未接合部の存在においても酸化皮膜による影響が想定されるが、本溶接法は加圧ローラを使用するため、溶接中において酸化皮膜を除去していると考えられる。加圧ローラにより全ての酸化皮膜が除去できるわけではなく、除去できなかった箇所が未接合部となり継手強度に影響を与える。Fig.4-4 より、ローラ加圧力 0.5kN と比較して低速側は比較的ばらつきが小さく、引張せん断試験においても Mg 合金中破断が多く確認できる。これは溶接中における加圧時間が長いほど、より多くの酸化皮膜除去でき、未接合部を減少させることができるからであると考えられる。また、本溶接は界面において、SPCC 中の Fe と Mg 合金中の Al が反応することにより、金属化合物を生成することで達成されていることがわかっている。よって加圧時間が長いほど、反応時間も長くなり、未接合部の減少に繋がっていると考えられる。

第5章 結言

低炭素鋼とマグネシウム合金のレーザロール溶接継手強度に及ぼす溶接条件の影響を検討した結果、以下の結論を得た。

- 1) ローラ加圧力を増加させると、接合界面における材料同士の密着性が増加し、接合可能となる溶接速度範囲が拡大する。
- 2) 鋼/Mg 合金界面において、Fe リッチな金属間化合物が生成することにより、接合が達成されることが確認された。
- 3) ローラ加圧力 0.75kN、溶接速度 0.8m/min にて、最高 212N/mm の引張せん断強さを得た。これは板厚 0.8mm の SPCC 母材引張強度の 91%程度に相当する。
- 4) 溶接継手中には未接合部が点在するため、同溶接条件であっても引張せん断強さに差が生じる。
- 5) 界面破断となる場合、接合面積が増加すると継手強度も増加することが確認された。
- 6) 各加圧力において、高速度側の接合可能限界速度に近づくほど、接合面積は減少することが確認された。

参考文献

- 1) 新井 武二：レーザー加工の基礎工学，丸善株式会社
- 2) 新井 武二：実用レーザー切断・溶接加工，日刊工業新聞社
- 3) 日本マグネシウム協会：金属材料シリーズ マグネシウム，丸善出版
- 4) 荒木 俊雄：マグネシウム合金／鋼の液相拡散接合，溶接学会全国大会講演概要，5-5，(2009)
- 5) 渡辺 健彦：回転ピンによる鉄鋼とマグネシウム合金の固相接合ー回転ピンによる異種金属の固相接合，溶接学会論文集，第 24 巻，(2006)，108-115
- 6) L.Liu：Microstructure and fatigue properties of Mg-to-steel dissimilar resistance spot welds, Materials & Design, 45, (2013), 336-342
- 7) Liqun.Li：Comparative study on microstructure and mechanical properties of laser welded-brazed Mg/mild steel and Mg/stainless steel joints, Materials & Design, 43, (2013), 59-65
- 8) 杵名 宗春：ステンレス鋼とアルミニウム合金のレーザーロール溶接による異種金属接合，溶接学会全国大会後援概要，83，(2008)，248-249
- 9) 尾崎 仁志：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，(2007)，473-479
- 10) 蒔田 光明：鉄 - アルミニウムレーザー溶接部の継手性能の検討
(平成 20 年度 修士論文)
- 11) Yugang Miao：Phase constitution in the interfacial region of laser penetration brazed magnesium-steel joints, Materials Characterization, 93, (2014), 87-93
- 12) 軽金属溶接技術会：軽金属溶接，49，(2011)

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いたします．加えて，多大なご協力を頂きました生体システム工学研究室の吉川高正准教授に深く感謝いたします．

なお，本研究で用いたデータは三重大学工学部機械工学科の齋藤健伍氏との共同研究によるものです．ここに記して，諸氏に深く感謝致します．さらに本研究を遂行するにあたり多大なご協力を頂きました材料機能設計研究室の院生の方々，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，個々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ともに，謹んで御礼申し上げます．

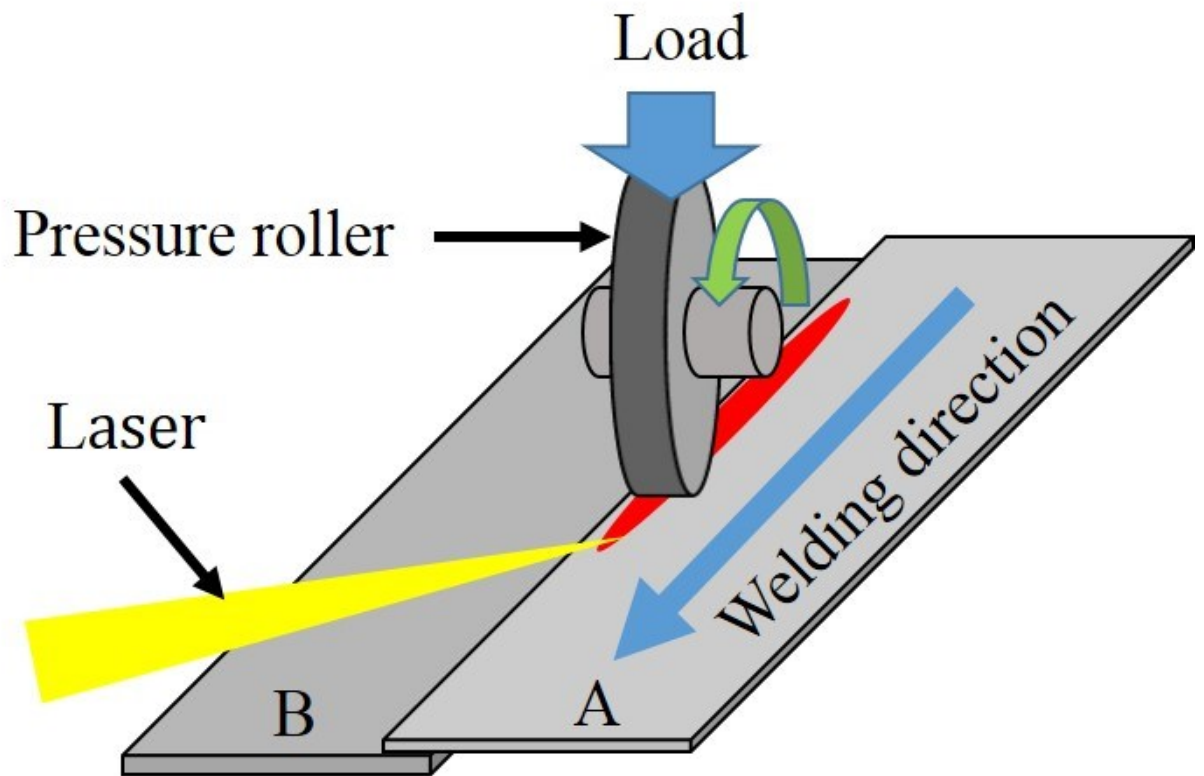
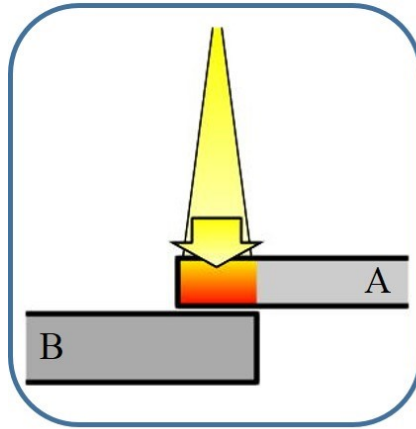
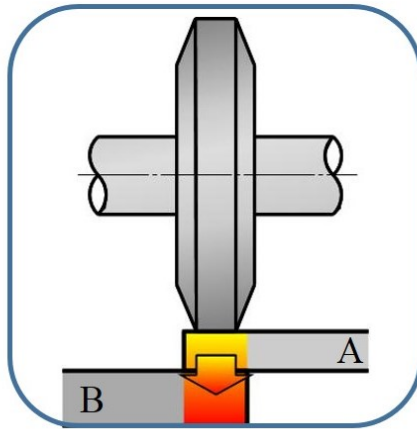


Fig.1-1 Schematic illustration of laser roll welding

① Heated by laser



② Heat transfer by pressure roller



③ Completion of welding

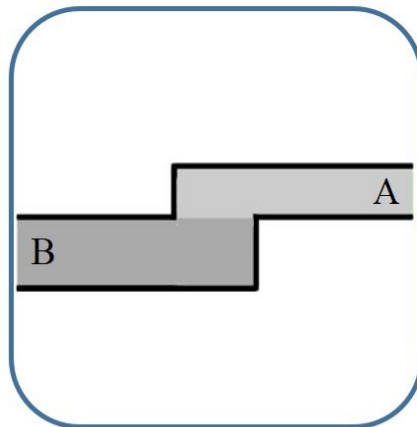


Fig.1-2 Welding procedure of laser roll welding

Table 2-1 Chemical compositions of materials used

Material	C	Si	Mn	P	S	Fe	(mass%)		
SPCC	≤0.12	—	≤0.5	≤0.04	≤0.045	Bal.			

Material	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	Mg
AZ31B	3.02	0.98	0.3	0.03	0.0023	0.0004	0.0001	Bal.

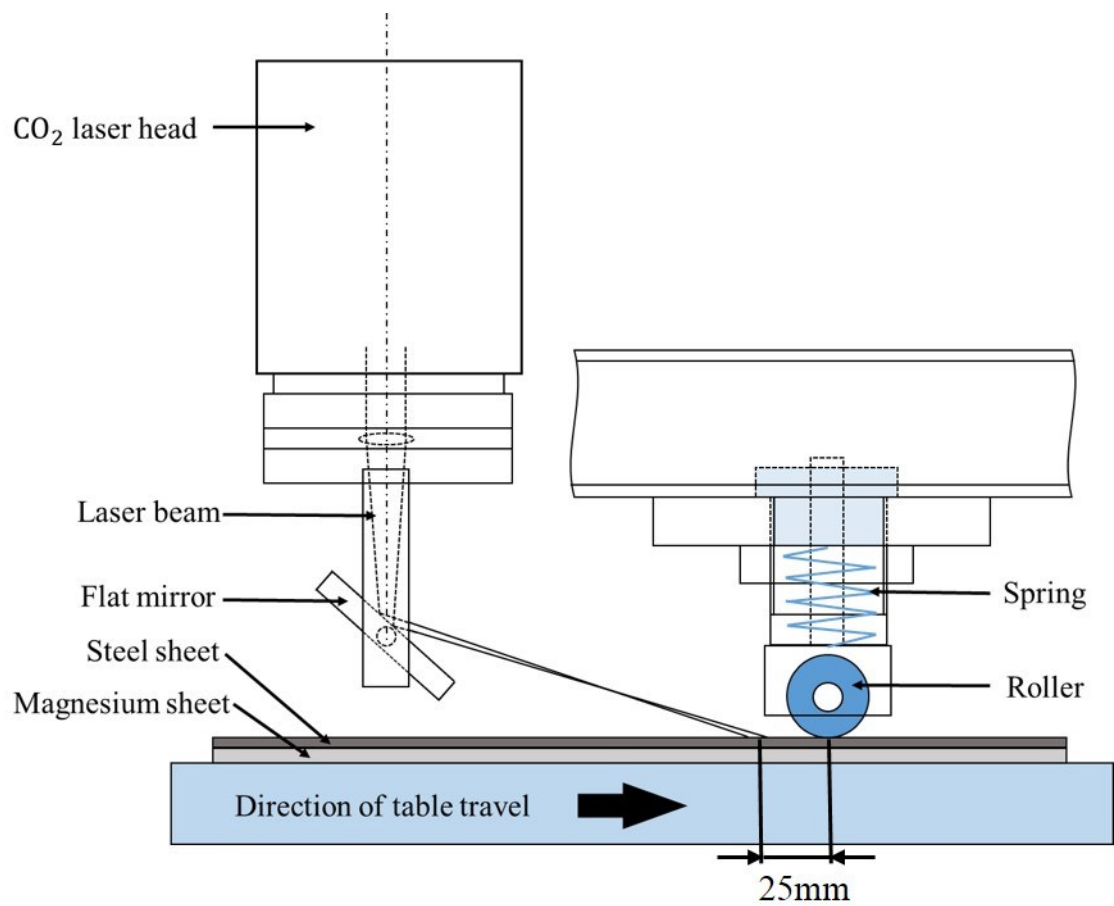


Fig.2-1 Schematic diagram of laser roll welding equipment

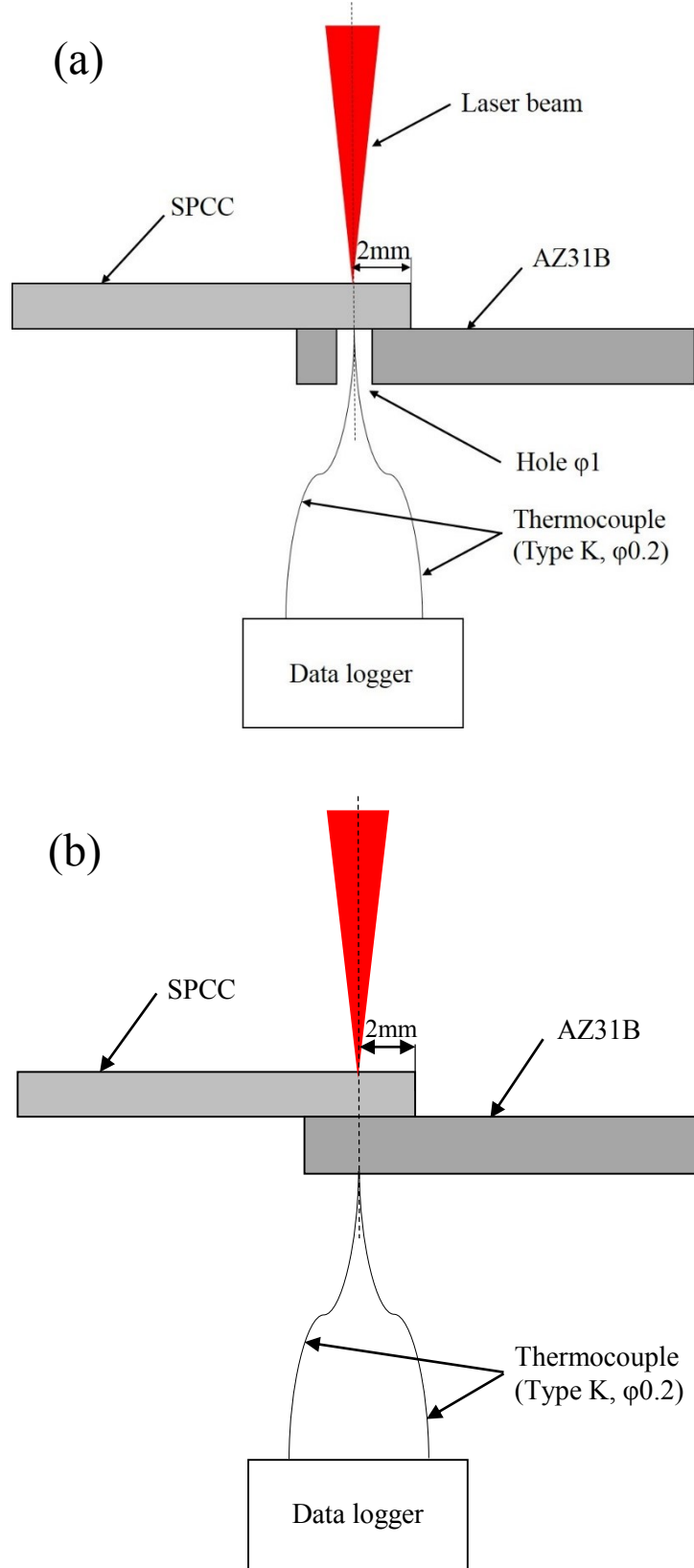


Fig.2-2 Schematic illustration of temperature measurement

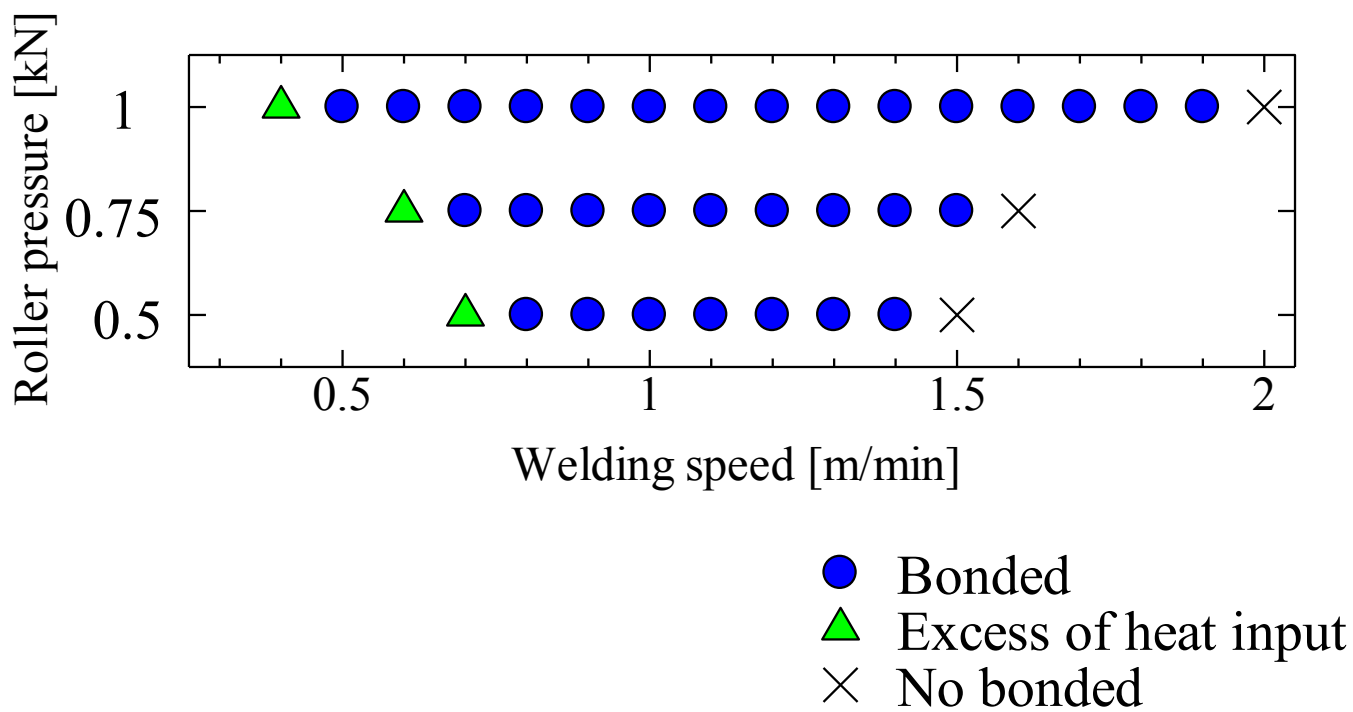


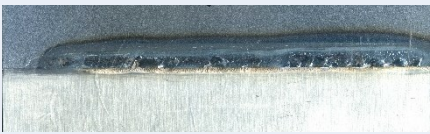
























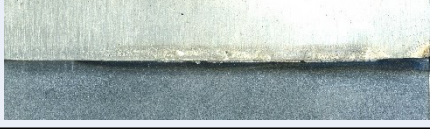


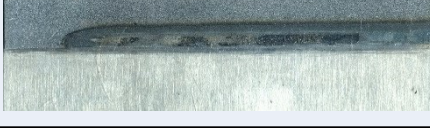
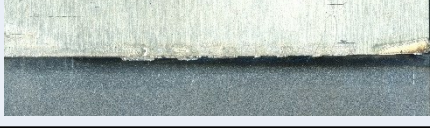


Fig.3-1 Process window for laser roll welding of SPCC and AZ31B

1kN		Top bead	Bottom bead
Weldingspeed [m/min]	0.4	SPCC  AZ31B	AZ31B  SPCC
	0.5		
	0.6		
	0.7		
	0.8		
	0.9		
	1.0		
	1.1		


 20mm

Fig.3-2 Bead appearance of SPCC/AZ31B joints
 Roller pressure:1kN

1kN		Top bead	Bottom bead
Weldingspeed [m/min]	1.2	SPCC  AZ31B	AZ31B  SPCC
	1.3		
	1.4		
	1.5		
	1.6		
	1.7		
	1.8		
	1.9		




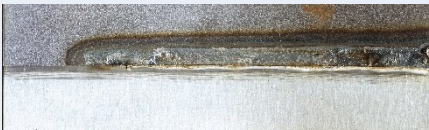















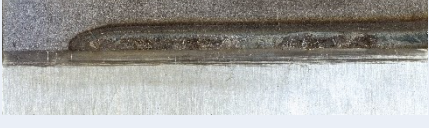

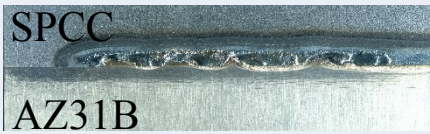




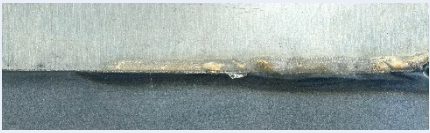


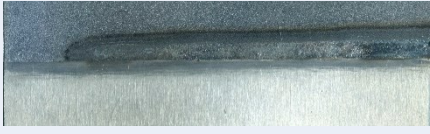



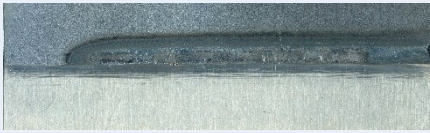




 20mm

Fig.3-2 Continued

0.75kN		Top bead	Bottom bead
Weldingspeed [m/min]	0.6	 <p>SPCC AZ31B</p>	 <p>AZ31B SPCC</p>
	0.7		
	0.8		
	0.9		
	1.0		
	1.1		
	1.2		
	1.3		
	1.4		
	1.5		

—
20mm

Fig.3-3 Bead appearance of SPCC/AZ31B joints
Roller pressure:0.75kN

0.5kN		Top bead	Bottom bead
Weldingspeed [m/min]	0.7	SPCC  AZ31B	AZ31B  SPCC
	0.8		
	0.9	 <i>0.10mm</i>	
	1.0		
	1.1		
	1.2		
	1.3		
	1.4		



 20mm

Fig.3-4 Bead appearance of SPCC/AZ31B joints
 Roller pressure:0.5kN

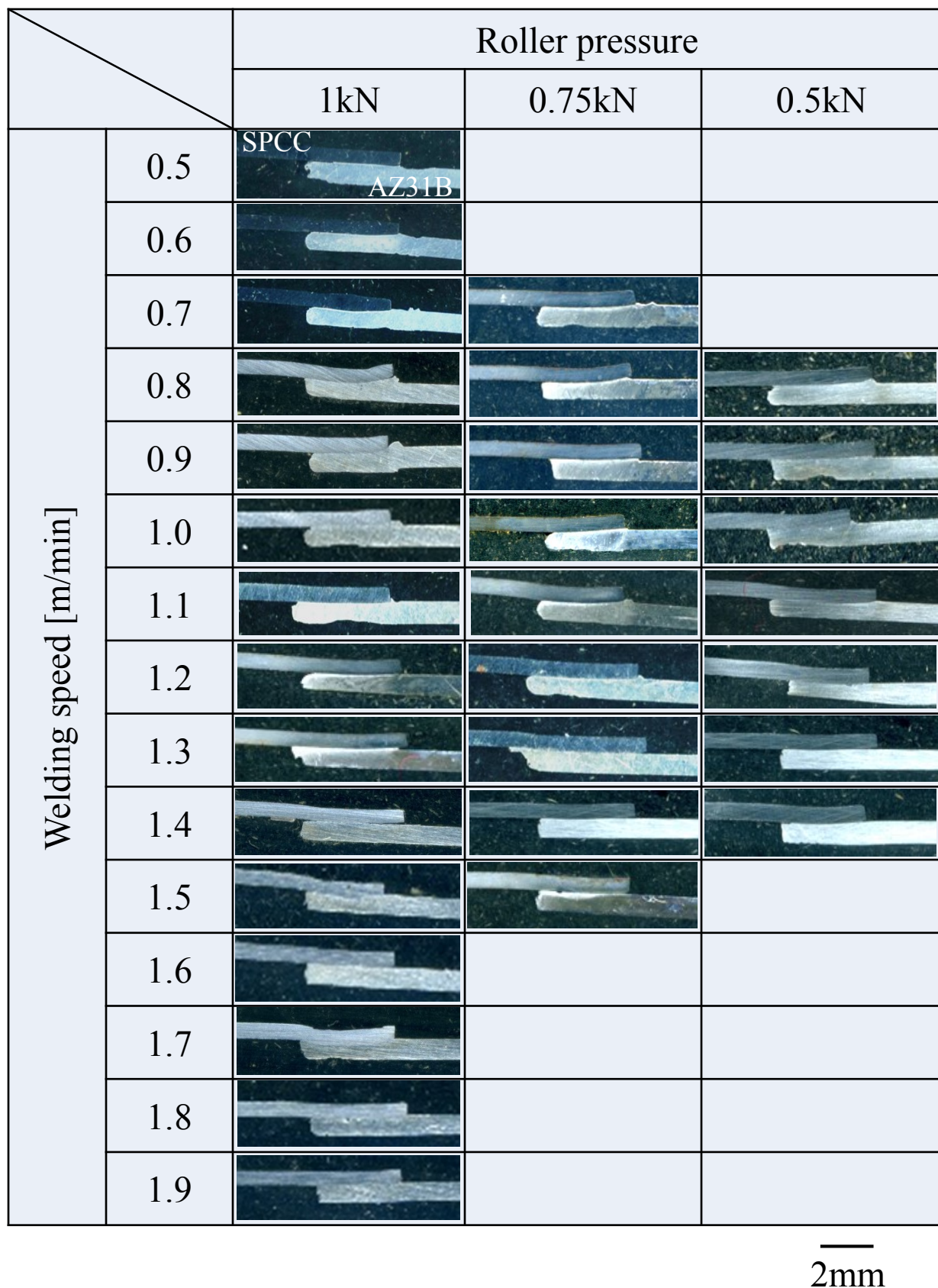
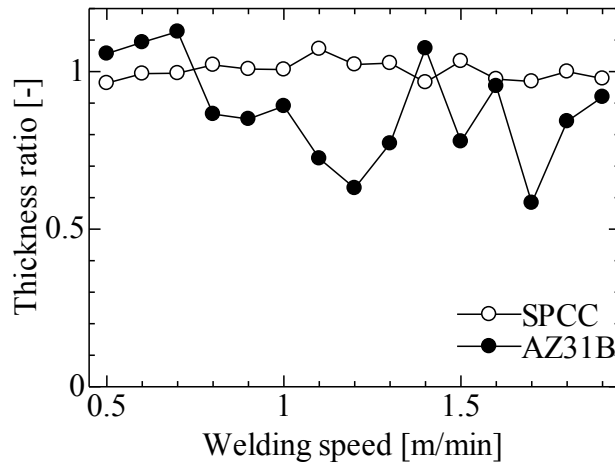
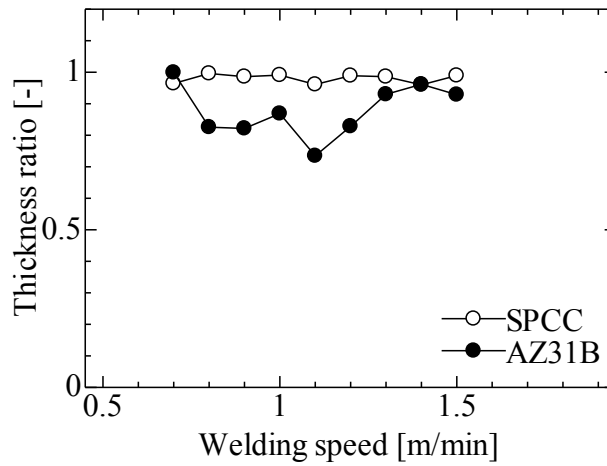


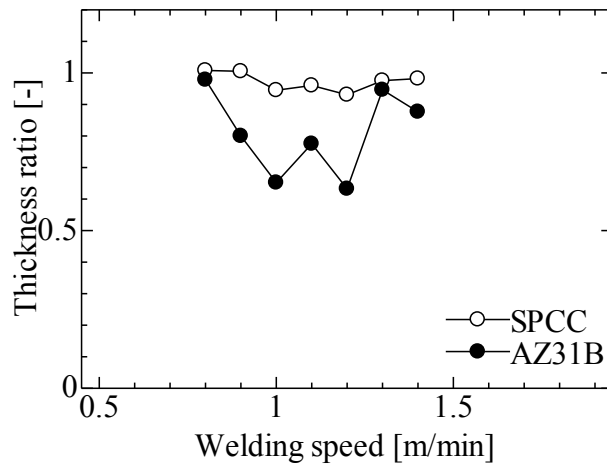
Fig.3-5 Bead cross section of SPCC/AZ31B joints



(a) Roller pressure : 1kN

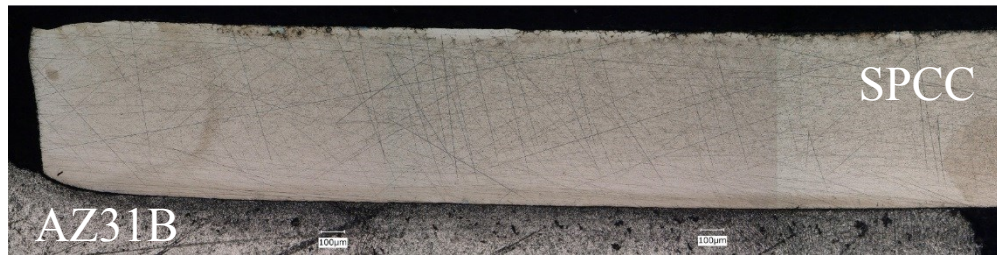


(b) Roller pressure : 0.75kN



(c) Roller pressure : 0.5kN

Fig.3-6 Relationship between welding speed and thickness ratio between before and after welding and prior to welding



(a) Welding speed : 0.7m/min



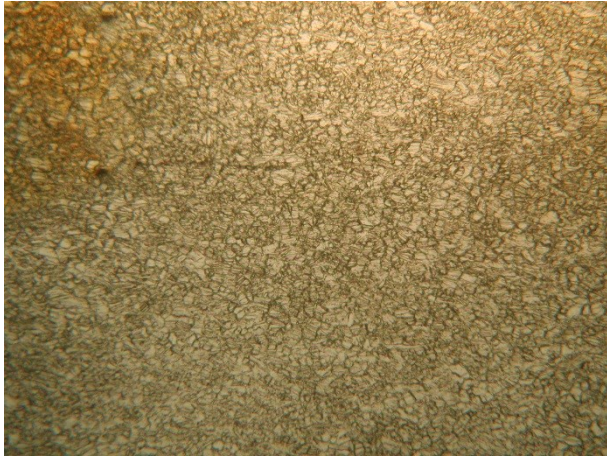
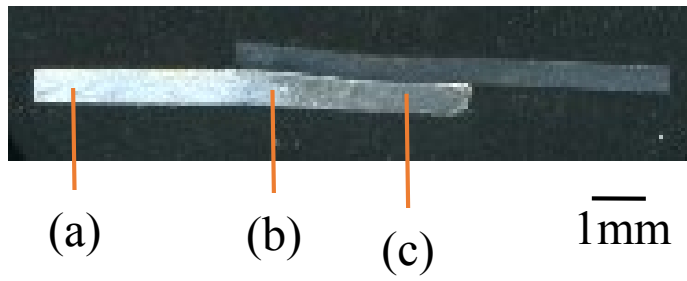
(b) Welding speed : 1.0m/min



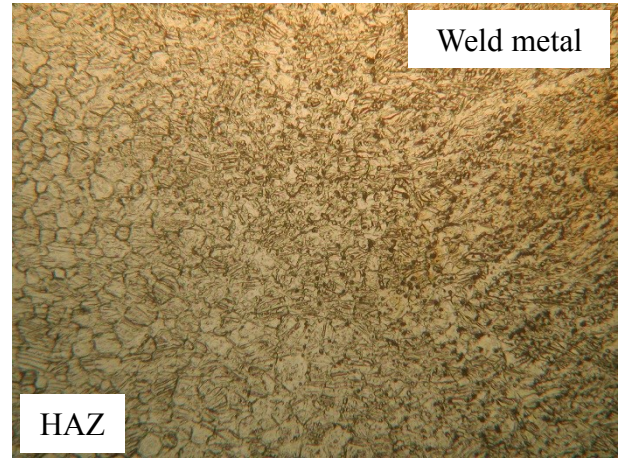
(c) Welding speed : 0.9m/min

1mm

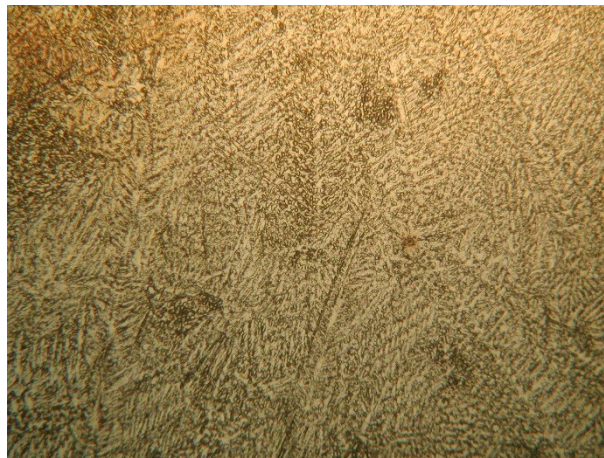
Fig.3-7 Microstructure of bead cross-section of joints at SPCC side
Roller pressure : 1kN



(a) Base metal



(b) HAZ and weld metal



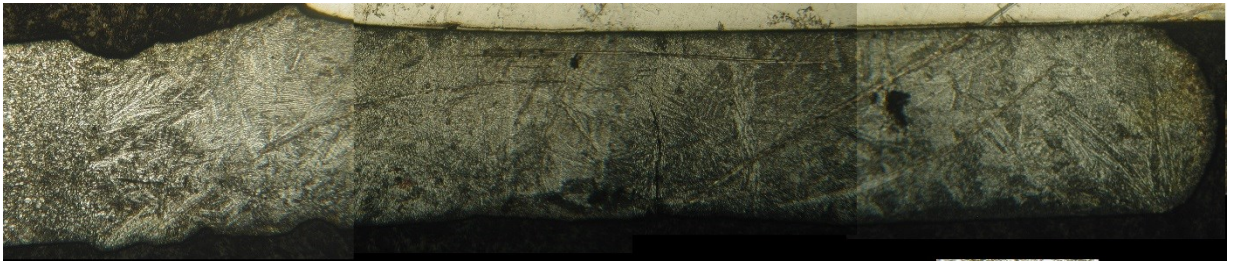
(c) Weld metal

0.1mm

Fig.3-8 Microstructures of AZ31B



(a) Welding speed : 0.5m/min



(b) Welding speed : 1.1m/min



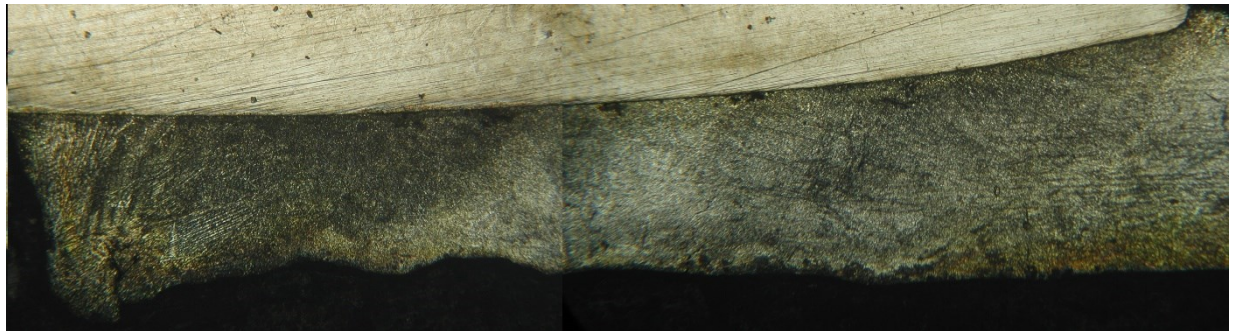
(c) Welding speed : 1.7m/min

1mm

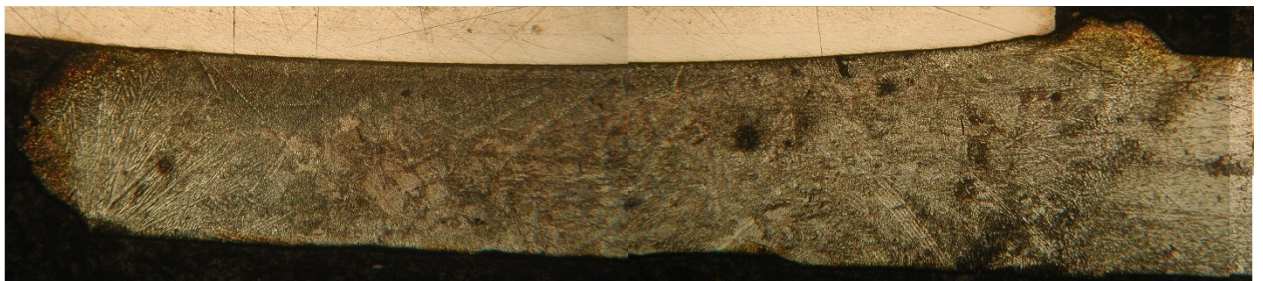
Fig.3-9 Microstructure of bead cross-section of joints at AZ31B side
Roller pressure : 1kN



(a) Roller pressure : 1kN



(b) Roller pressure : 0.75kN



(c) Roller pressure : 0.5kN

1mm

Fig.3-10 Microstructure of bead cross-section of joints at AZ31B side
Welding speed : 1.1m/min

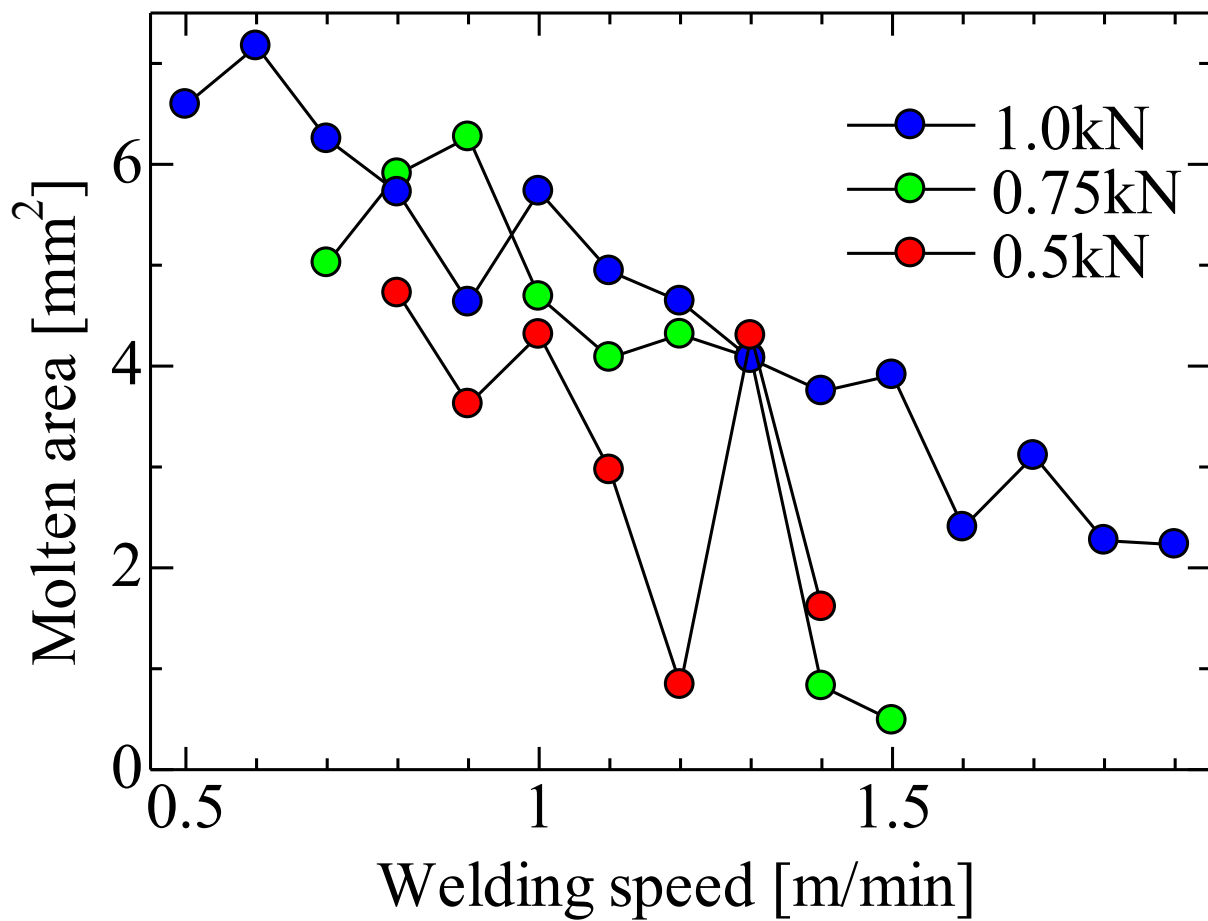
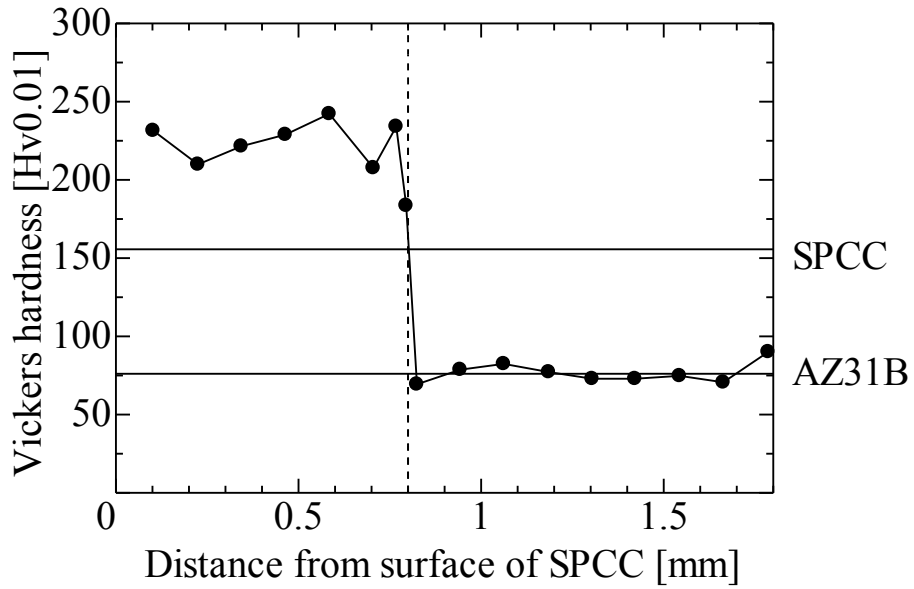
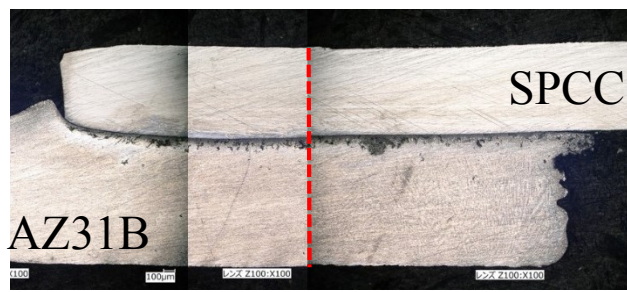
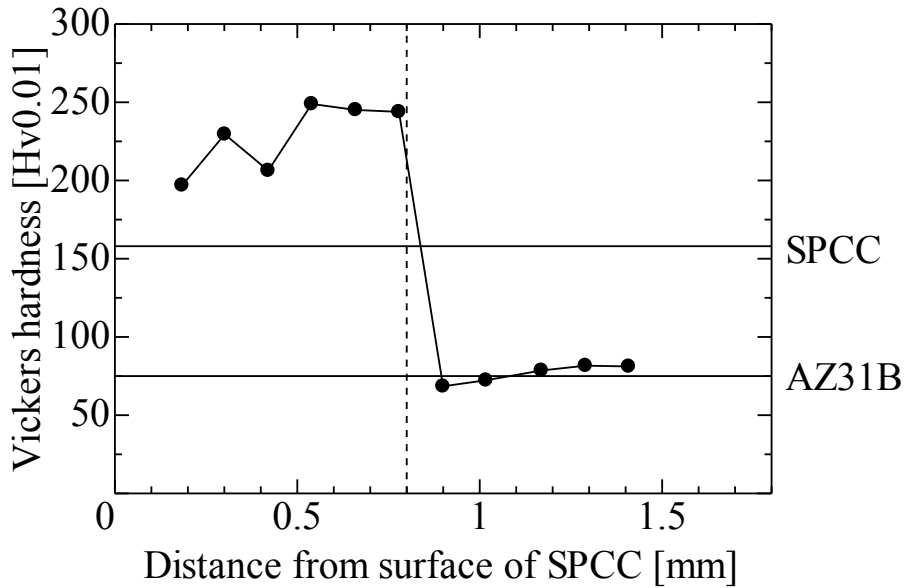


Fig.3-11 Relationship between welding speed and molten area in AZ31B for different roller pressure

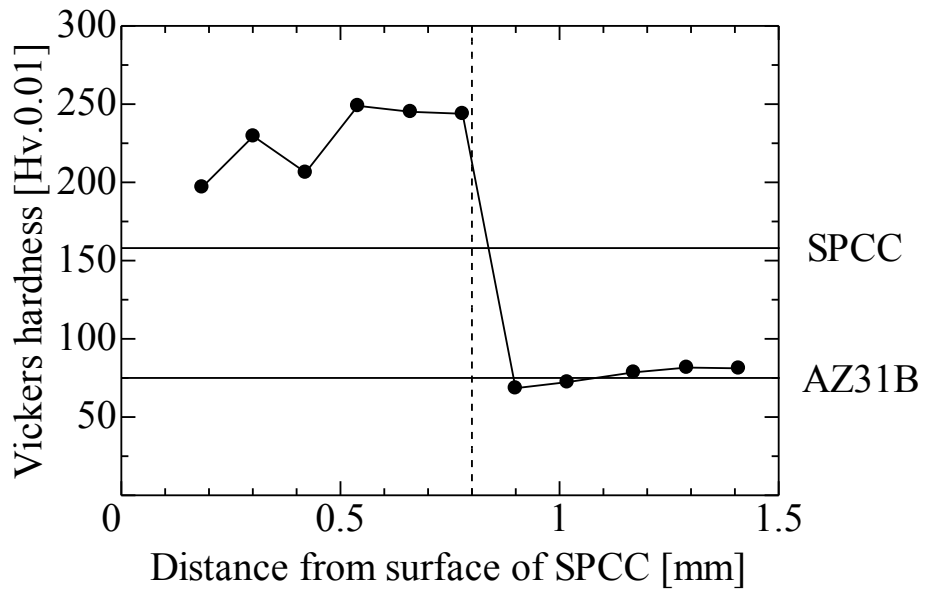


(a) Welding speed : 0.6m/min

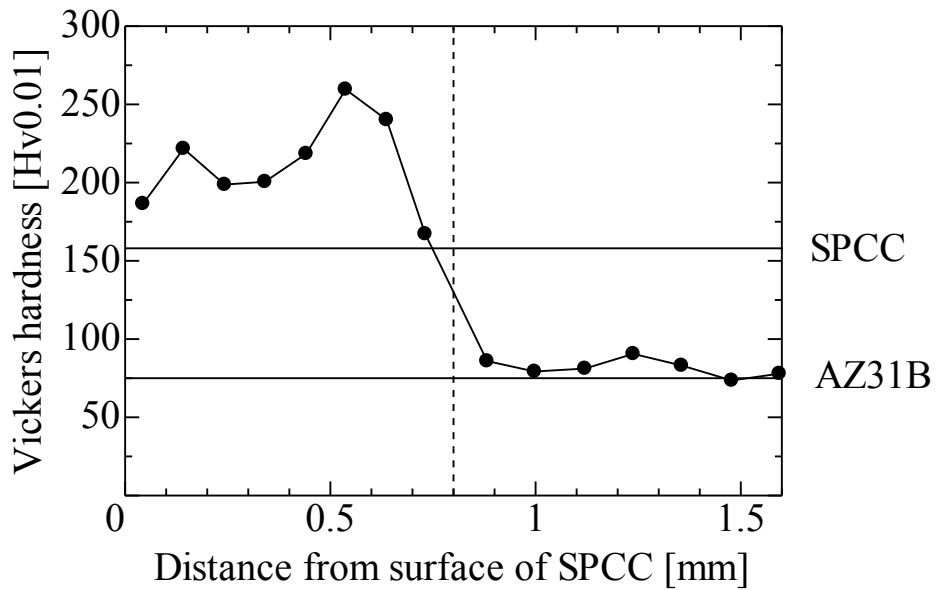


(b) Welding speed : 0.8m/min

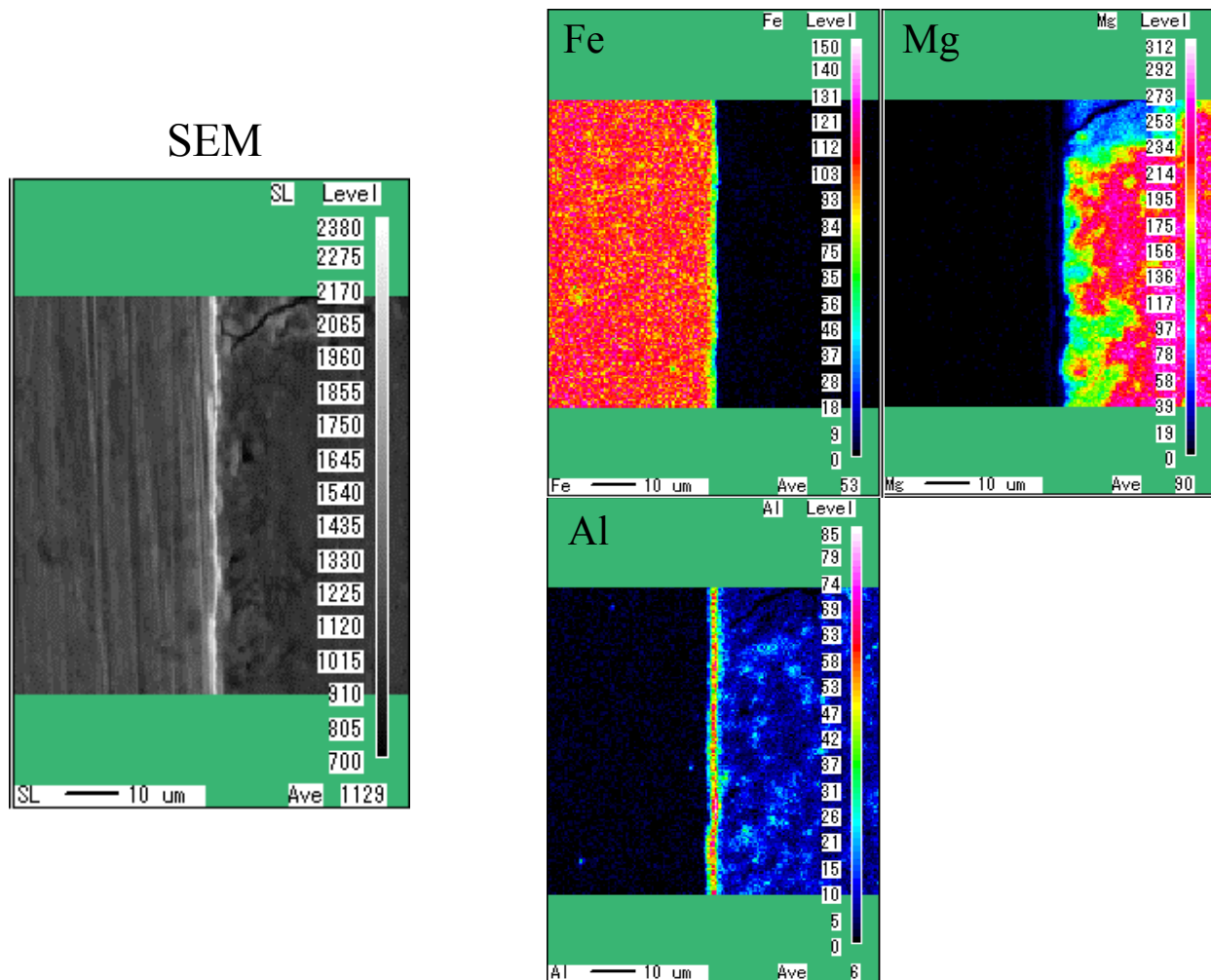
Fig.3-12 Vickers hardness distribution in laser lap weld between SPCC and AZ31B



(c) Welding speed : 1.0m/min

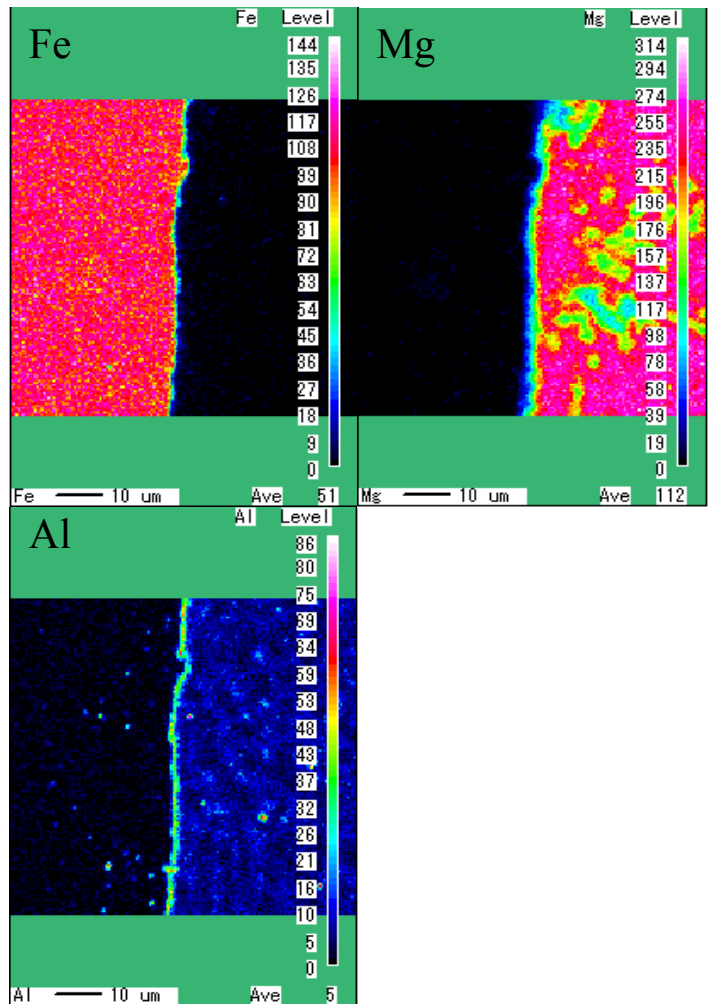
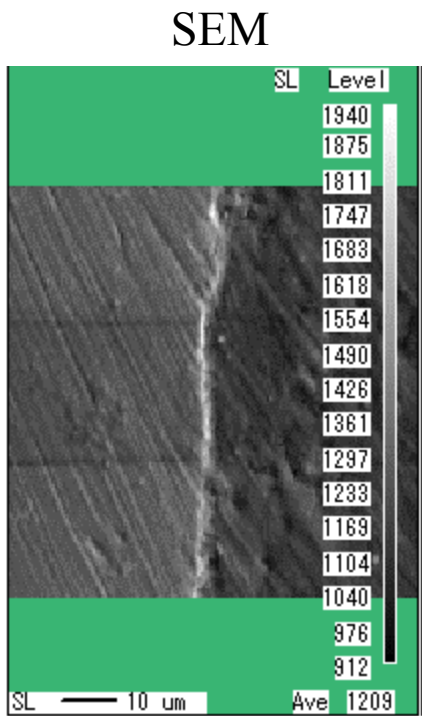


(d) Welding speed : 1.3m/min



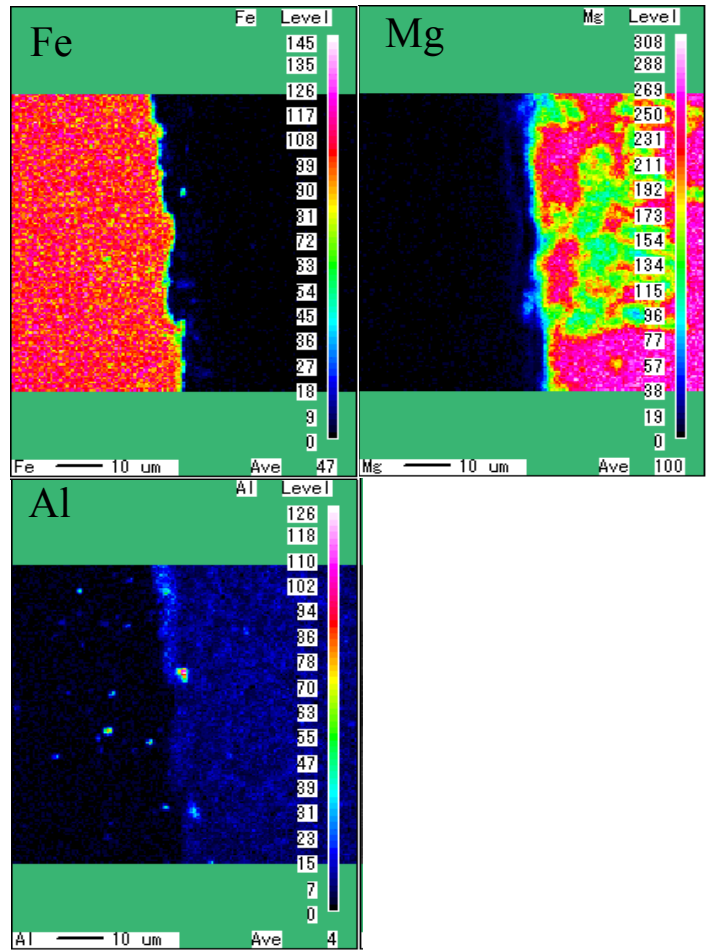
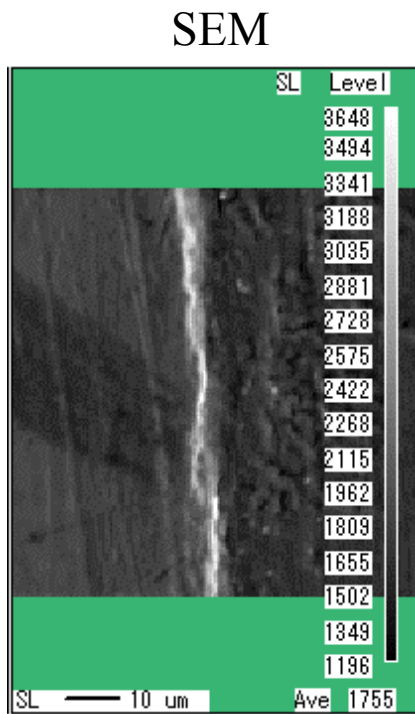
(a) Welding speed : 0.5m/min

Fig.3-13 SPCC/AZ31B surface analysis of Fe, Mg, Al
at the interface region.
Roller pressure : 1kN



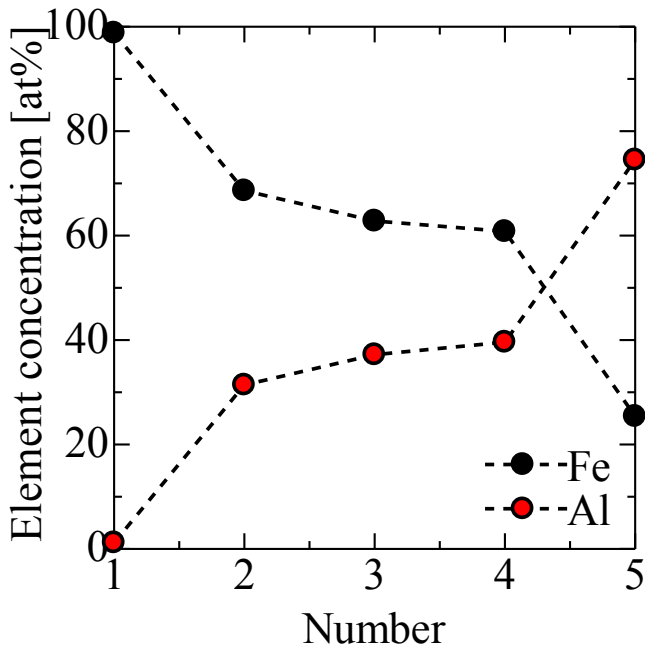
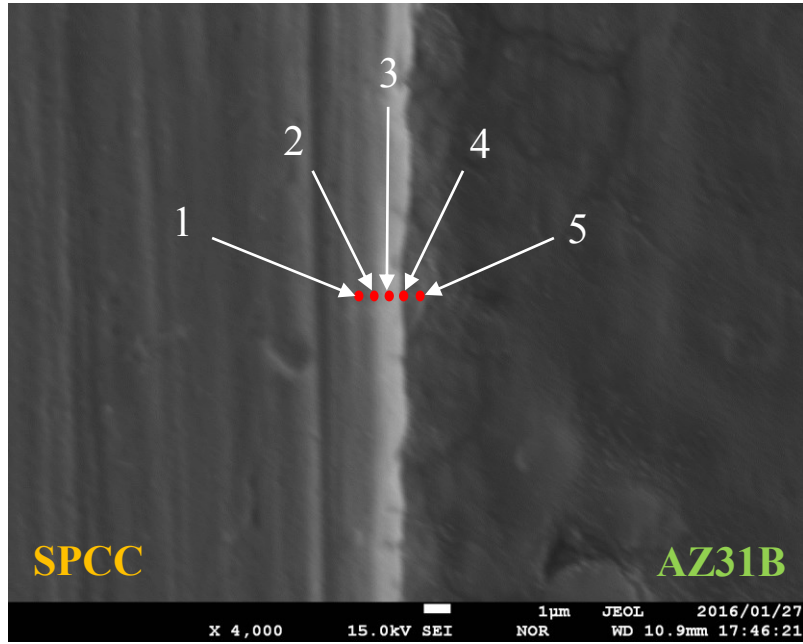
(b) Welding speed : 1.1m/min

Fig.3-13 Continued



(c) Welding speed : 1.8m/min

Fig.3-13 Continued



No.	Concentration [at%]	
	Fe	Al
1	98.8	1.2
2	68.6	31.4
3	62.8	37.2
4	60.8	39.6
5	25.4	74.5

Fig.3-14 EPMA point analysis of Fe and Al at interface region
Welding speed : 0.5m/min

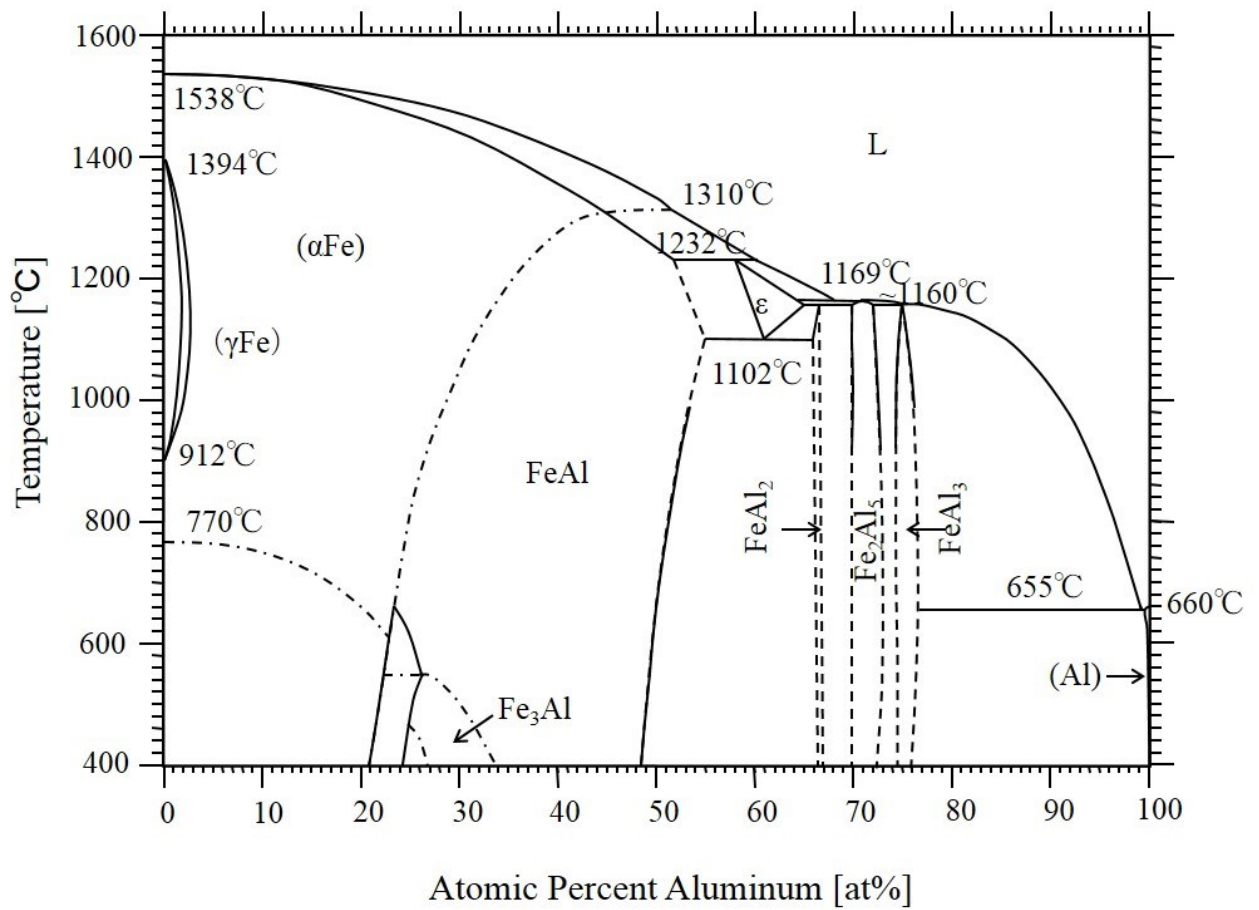
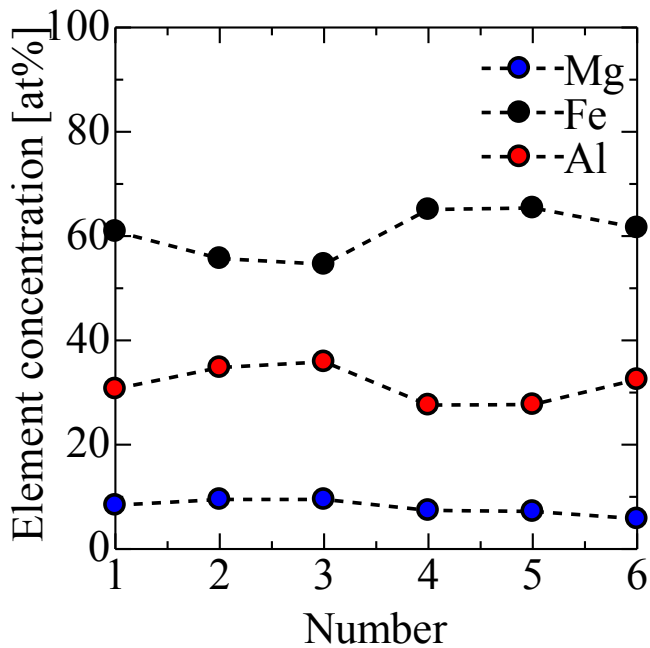
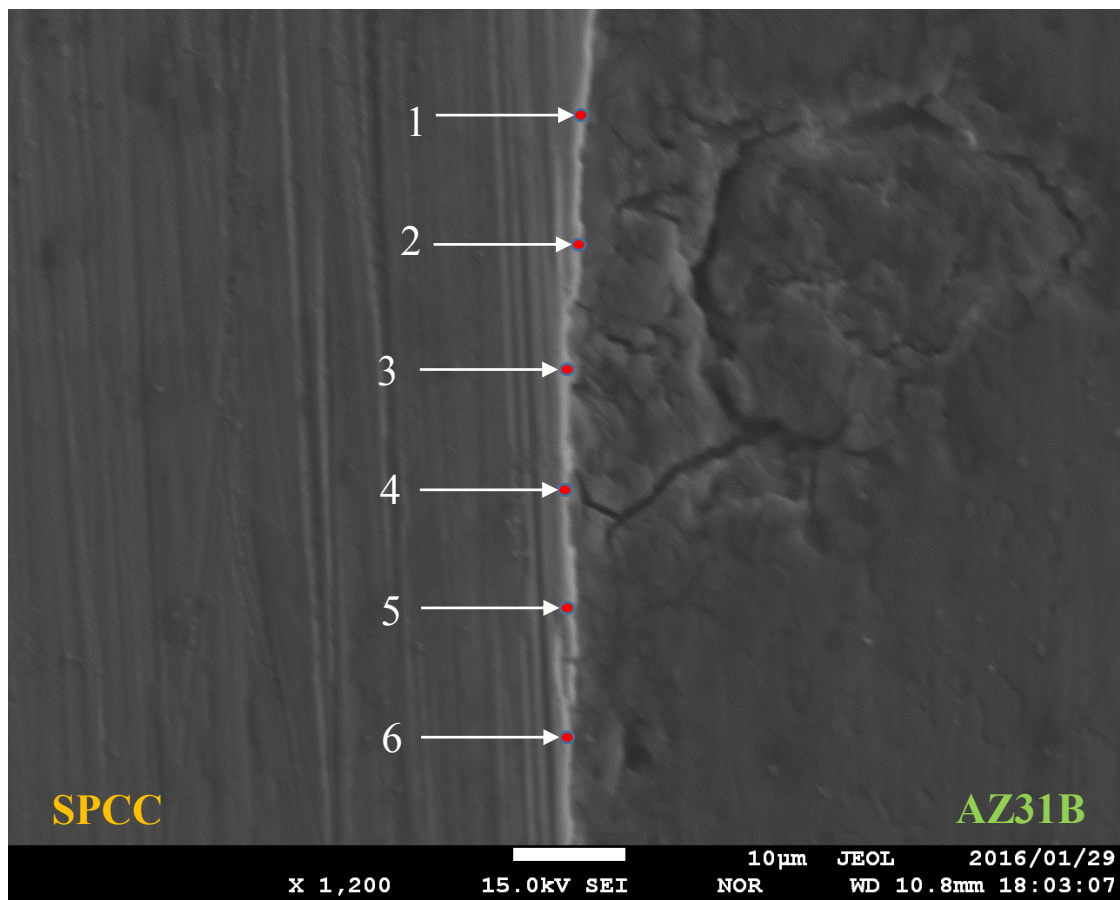
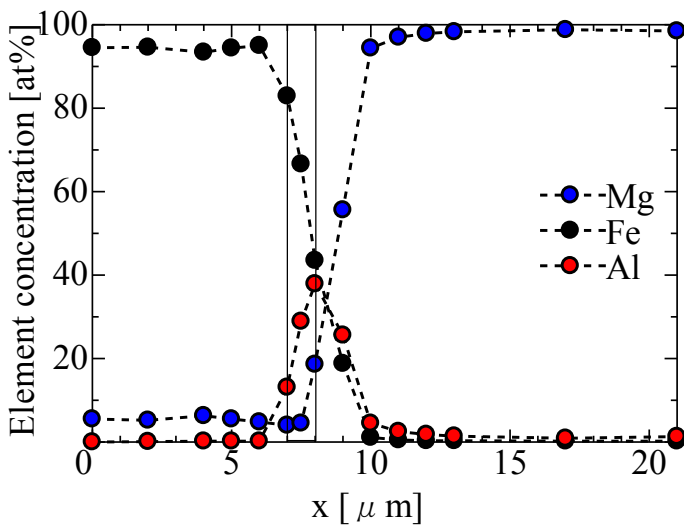
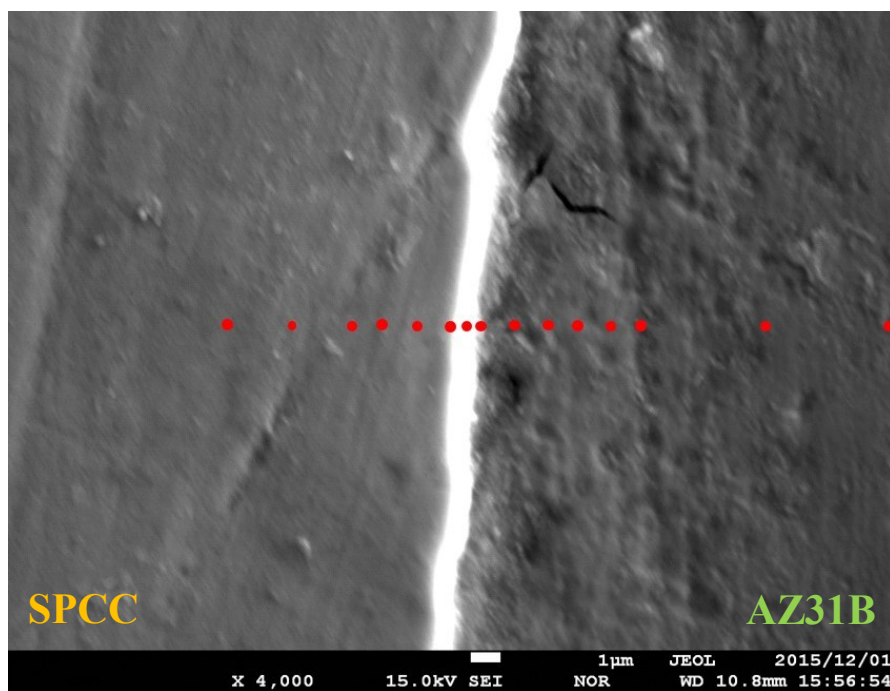


Fig.3-15 Fe-Al binary equilibrium diagram



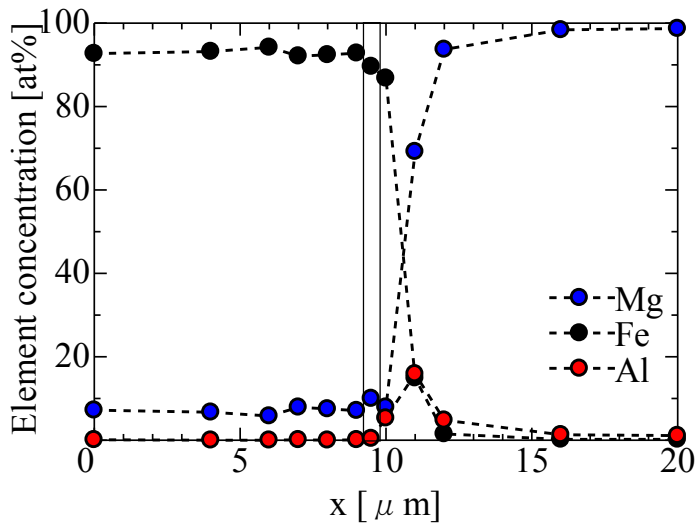
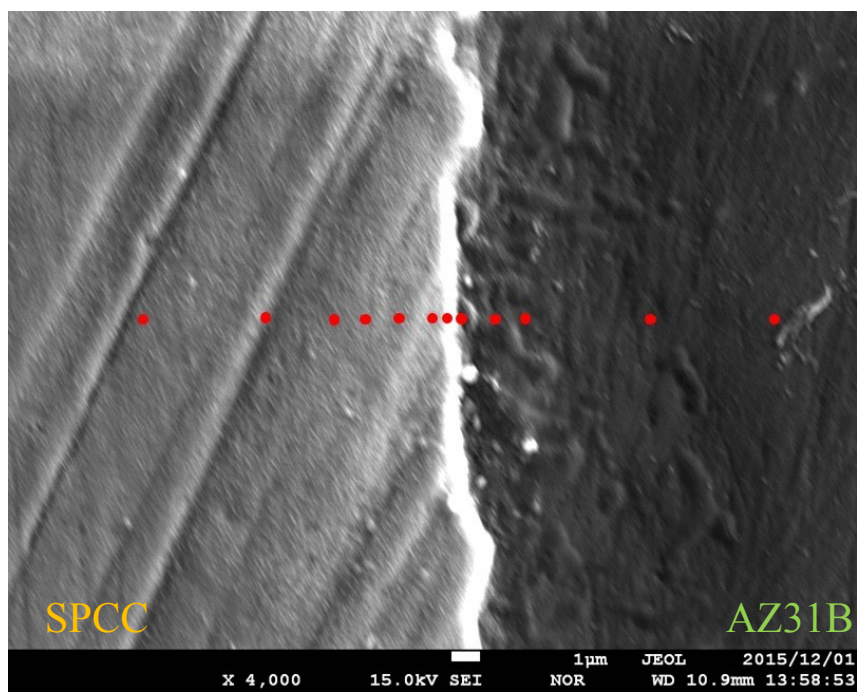
No.	Concentration [at%]		
	Mg	Fe	Al
1	8.4	60.9	30.7
2	9.5	55.7	34.8
3	9.5	54.6	35.9
4	7.4	65.1	27.6
5	7.2	65.4	27.7
6	5.8	61.6	32.5

Fig.3-16 EPMA point analysis along interface layer
Welding speed : 0.5m/min



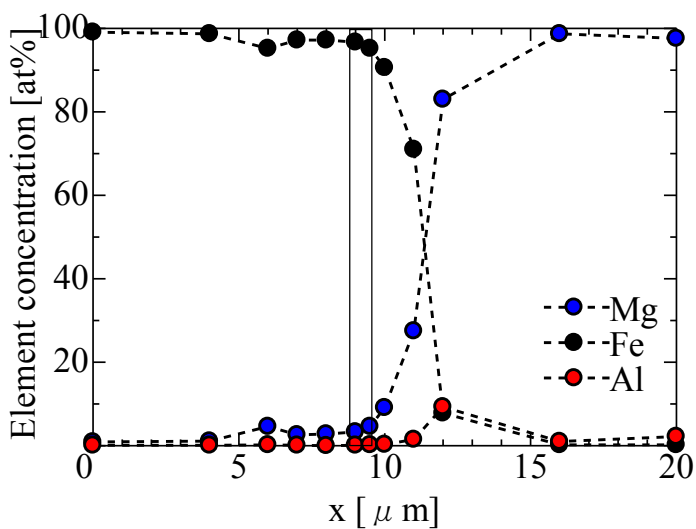
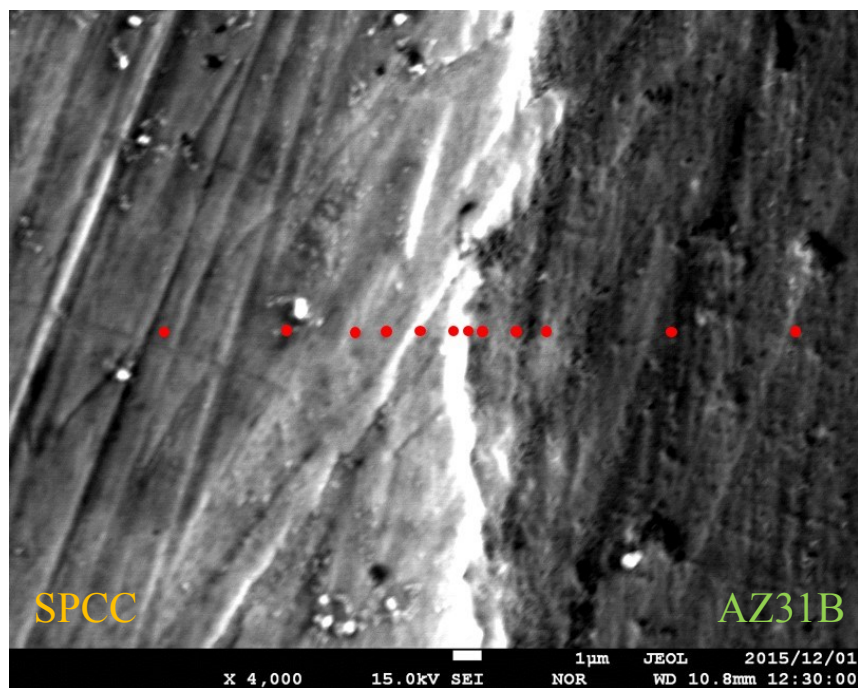
x [μm]	Concentration [at%]		
	Mg	Fe	Al
0	5.5	94.5	0.0
2	5.2	94.6	0.1
4	6.3	93.4	0.2
5	5.5	94.4	0.2
6	4.8	95.0	0.2
7	4.0	82.9	13.1
7.5	4.5	66.6	28.9
8	18.6	43.5	37.9
9	55.6	18.8	25.6
10	94.4	1.1	4.5
11	97.0	0.5	2.5
12	97.9	0.3	1.8
13	98.3	0.3	1.4
17	98.8	0.2	0.9
21	98.5	0.2	1.3

Fig.3-17 EPMA point analysis of across the interface layer
Welding speed : 0.5m/min



x [μm]	Concentration [at%]		
	Mg	Fe	Al
0	7.2	92.7	0.1
4	6.7	93.2	0.0
6	5.8	94.2	0.0
7	7.9	92.1	0.1
8	7.5	92.4	0.0
9	7.1	92.8	0.1
9.5	10.0	89.6	0.4
10	7.9	86.8	5.3
11	69.2	14.9	15.9
12	93.7	1.5	4.8
16	98.4	0.2	1.3
20	98.7	0.2	1.1

Fig.3-18 EPMA point analysis of across the interface layer
Welding speed : 1.1m/min



x [μm]	Concentration [at%]		
	Mg	Fe	Al
0	0.9	99.1	0.1
4	1.1	98.7	0.1
6	4.6	95.2	0.2
7	2.6	97.2	0.1
8	2.8	97.2	0.0
9	3.3	96.7	0.1
9.5	4.6	95.2	0.2
10	9.1	90.6	0.3
11	27.5	71.0	1.5
12	83.0	7.8	9.3
16	98.7	0.2	1.0
20	97.6	0.2	2.2

Fig.3-19 EPMA point analysis of across the interface layer
Welding speed : 1.8m/min

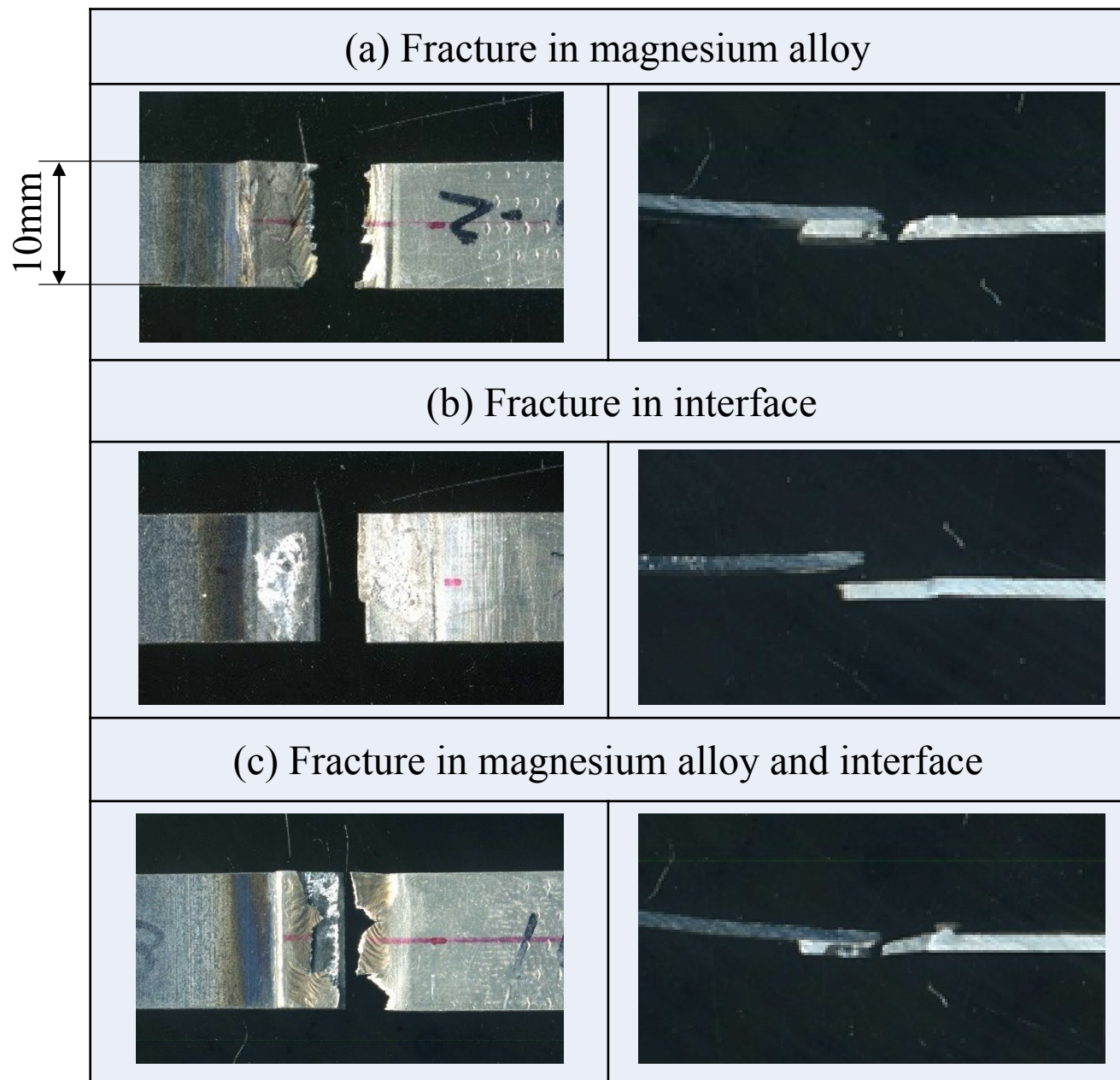


Fig.4-1 Appearance of fracture type of specimen after tensile shear test

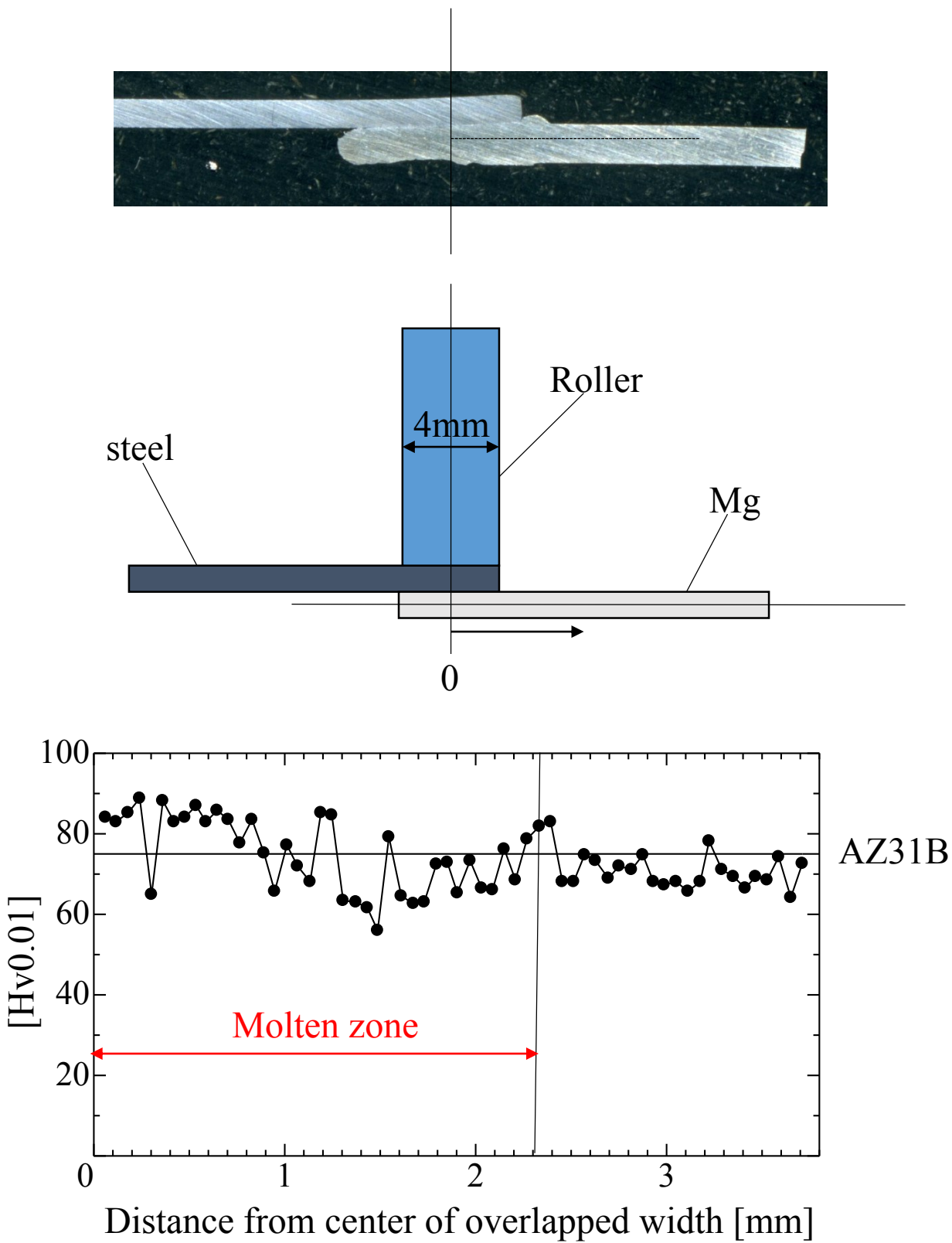
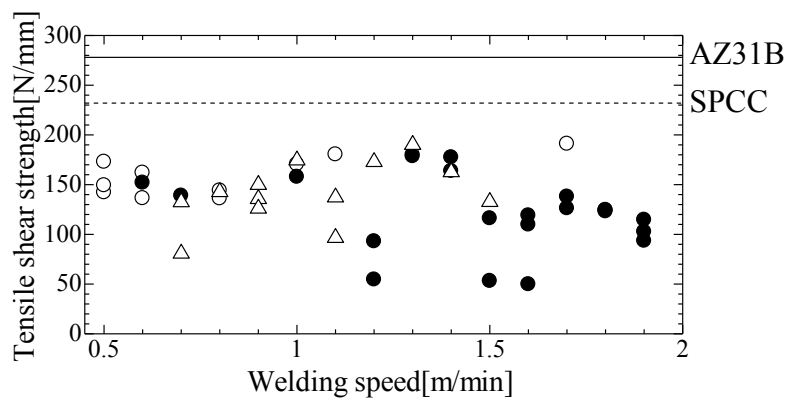
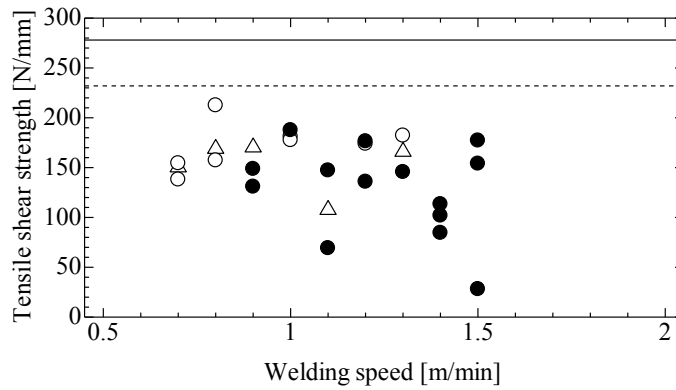


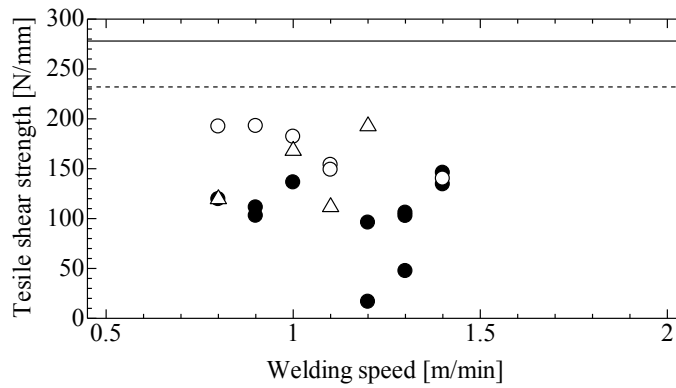
Fig.4-2 Vickers hardness distribution in molten zone



(a) Roller pressure : 1kN



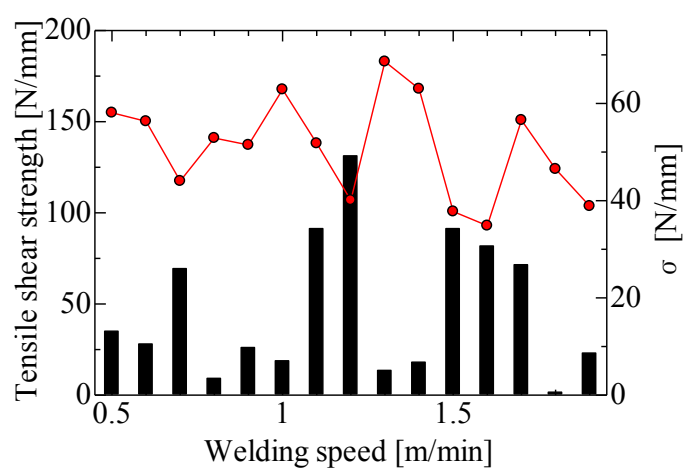
(b) Roller pressure : 0.75kN



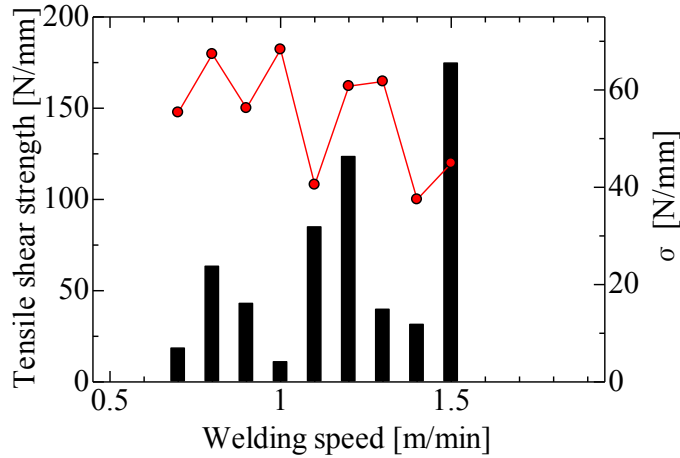
(c) Roller pressure : 0.5kN

- Fracture in magnesium alloy
- Fracture in interface
- △ Fracture in magnesium alloy and interface

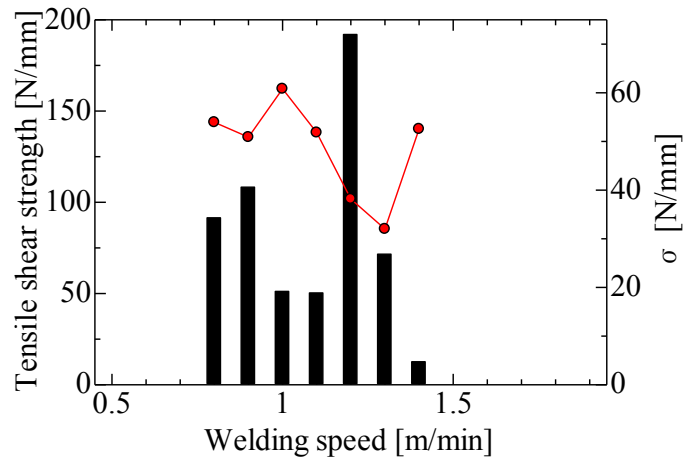
Fig.4-3 Effect of welding conditions on tensile shear strength



(a) Roller pressure: 1kN



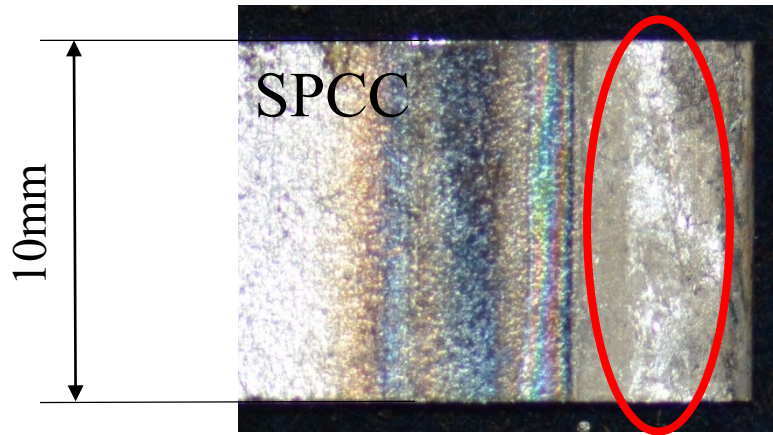
(b) Roller pressure : 0.75kN



(c) Roller pressure : 0.5kN

● Average of Tensile shear strength
■ Standard Deviation

Fig.4-4 Relationship between welding speed and standard deviation of tensile shear strength for different roller pressures



(a) Welding speed : 0.6m/min



(b) Welding speed : 1.6m/min

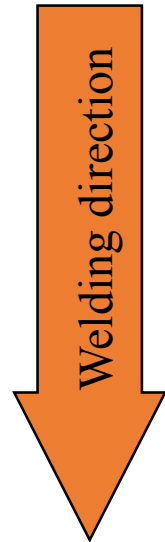
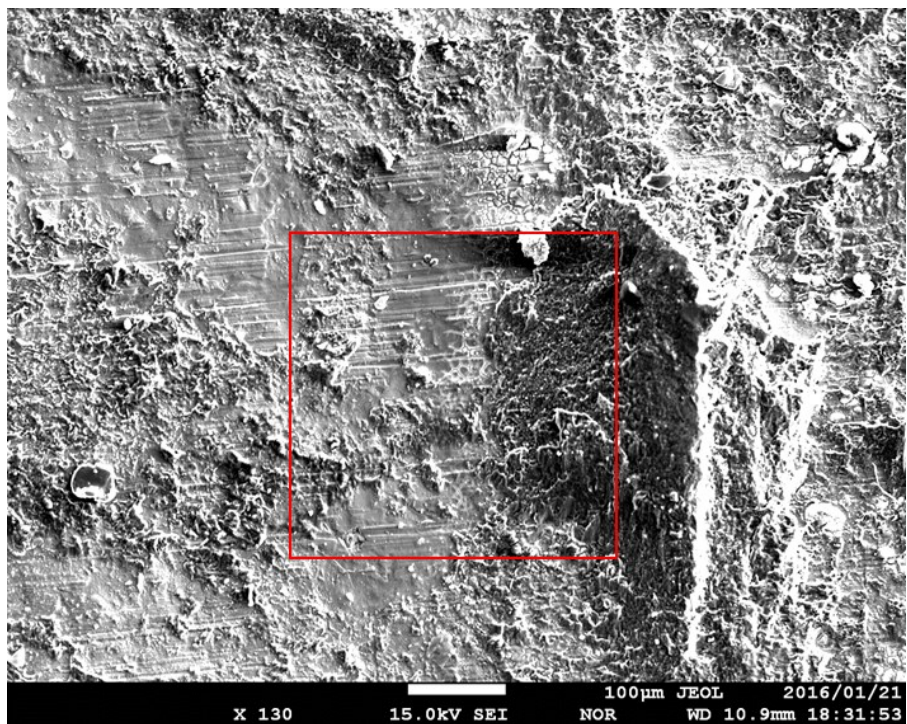


Fig.4-5 Appearance of the joint SPCC side surface
Roller pressure : 1kN



Mg

Fe

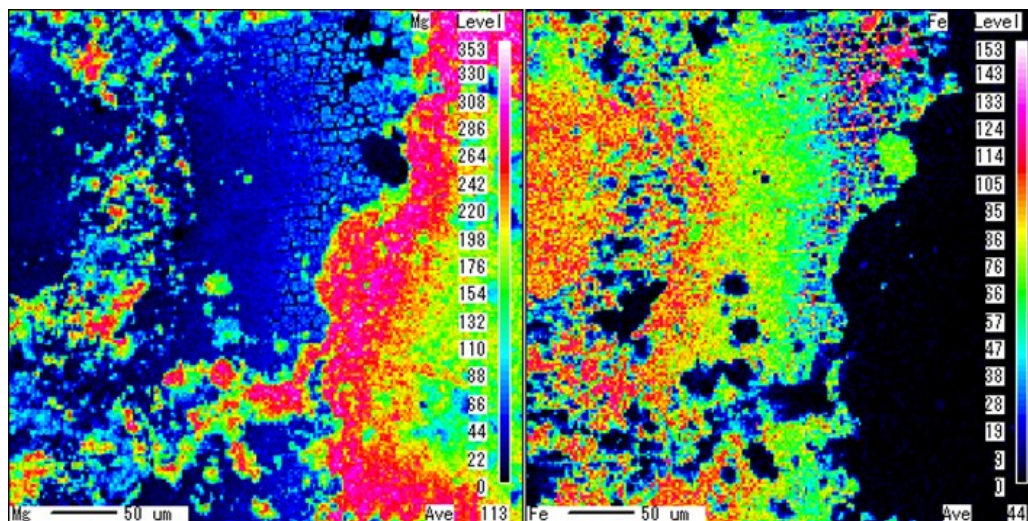
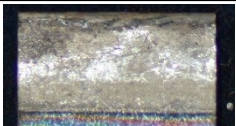
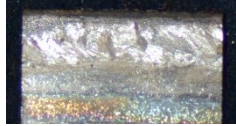



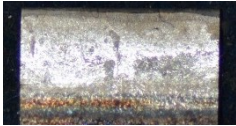









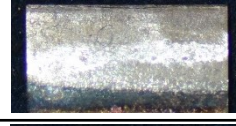

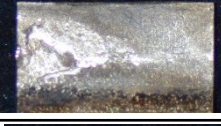

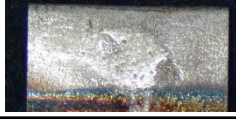
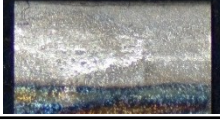






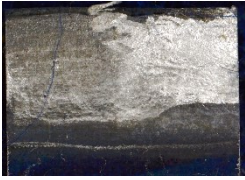


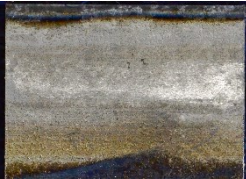






Fig.4-6 Analysis of fracture surface after the interface fracture

Tensile shear test pieces number				
Welding speed [m/min]		No.1	No.2	No.3
	0.6			
	0.7			
	1.0			
	1.2			
	1.3			
	1.4			
	1.5			
	1.6			
	1.7			
	1.8			
	1.9			












10mm

Fig.4-7 Appearance of the joint SPCC side surface
Roller pressure : 1kN

Tensile shear test pieces number				
Welding speed [m/min]		No.1	No.2	No.3
	0.9			
	1.0			
	1.1			
	1.2			
	1.3			
	1.4			
	1.5			

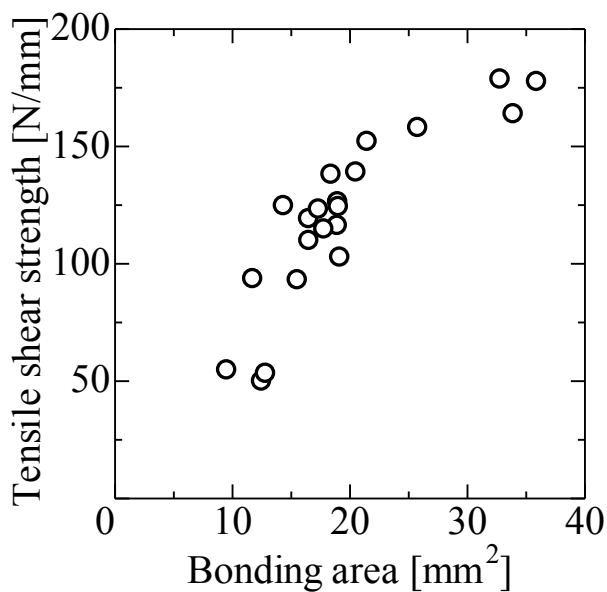
10mm

Fig.4-8 Appearance of the joint SPCC side surface
Roller pressure : 0.75kN

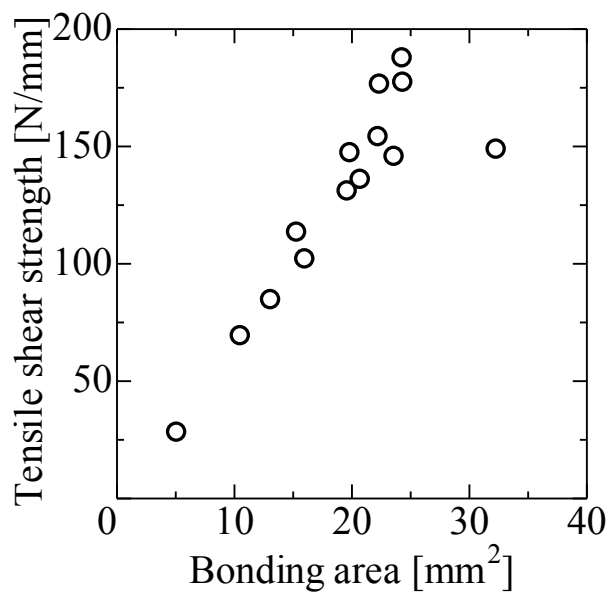
Tensile shear test pieces number				
Welding speed [m/min]		No.1	No.2	No.3
	0.8			
	0.9			
	1.0			
	1.2			
	1.3			
	1.4			

10mm

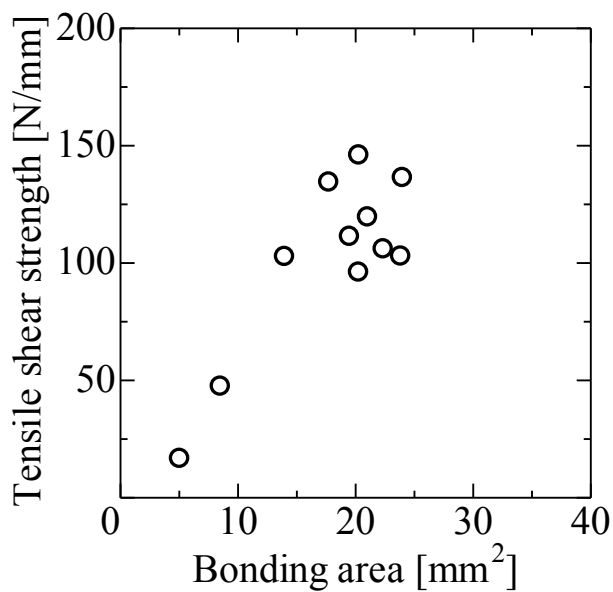
Fig.4-9 Appearance of the joint SPCC side surface
Roller pressure : 0.5kN



(a) Roller pressure : 1kN

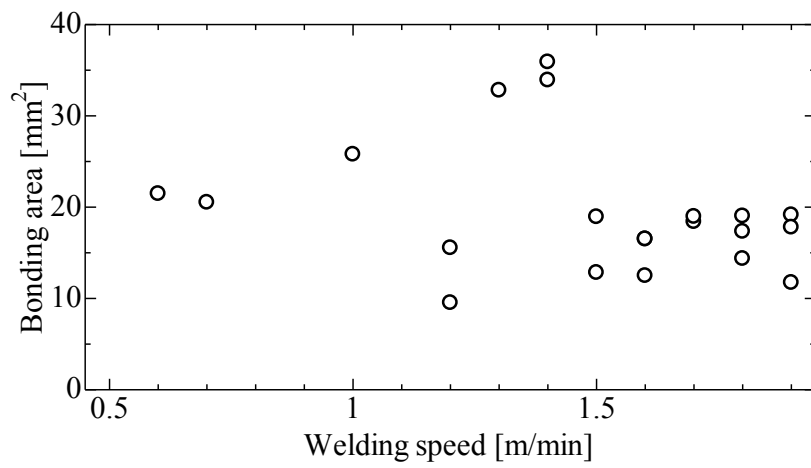


(b) Roller pressure : 0.75kN

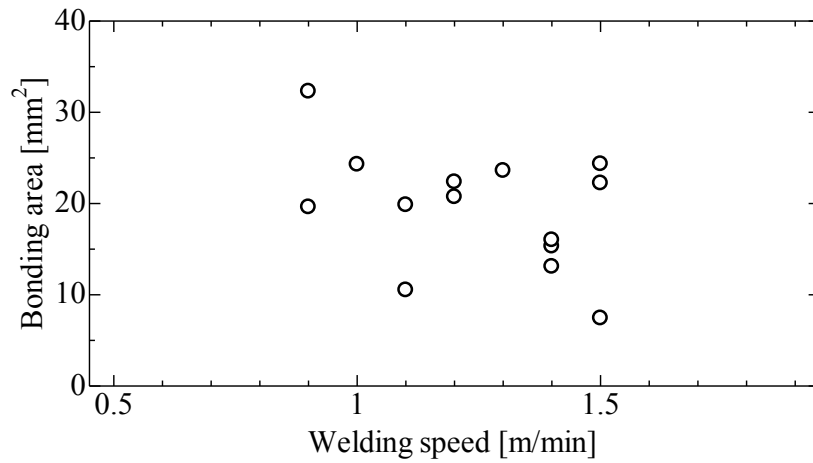


(c) Roller pressure : 0.5kN

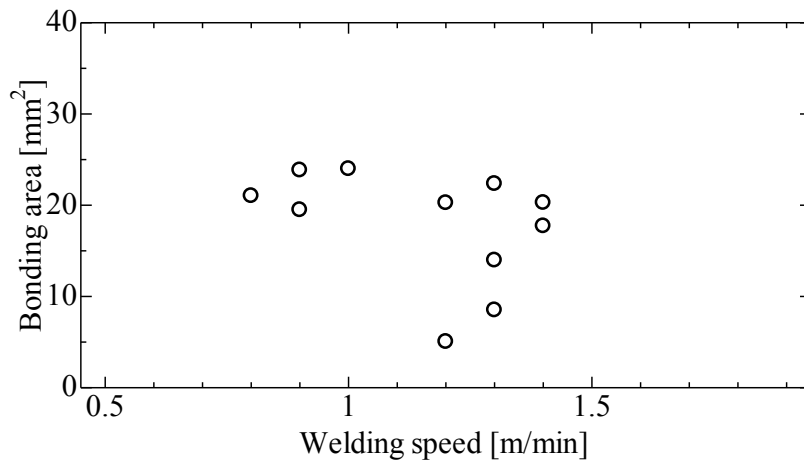
Fig.4-10 Effect of bonding area on tensile shear strength



(a) Roller pressure : 1kN



(b) Roller pressure : 0.75kN



(c) Roller pressure : 0.5kN

Fig.4-11 Effect of welding conditions on bonding area

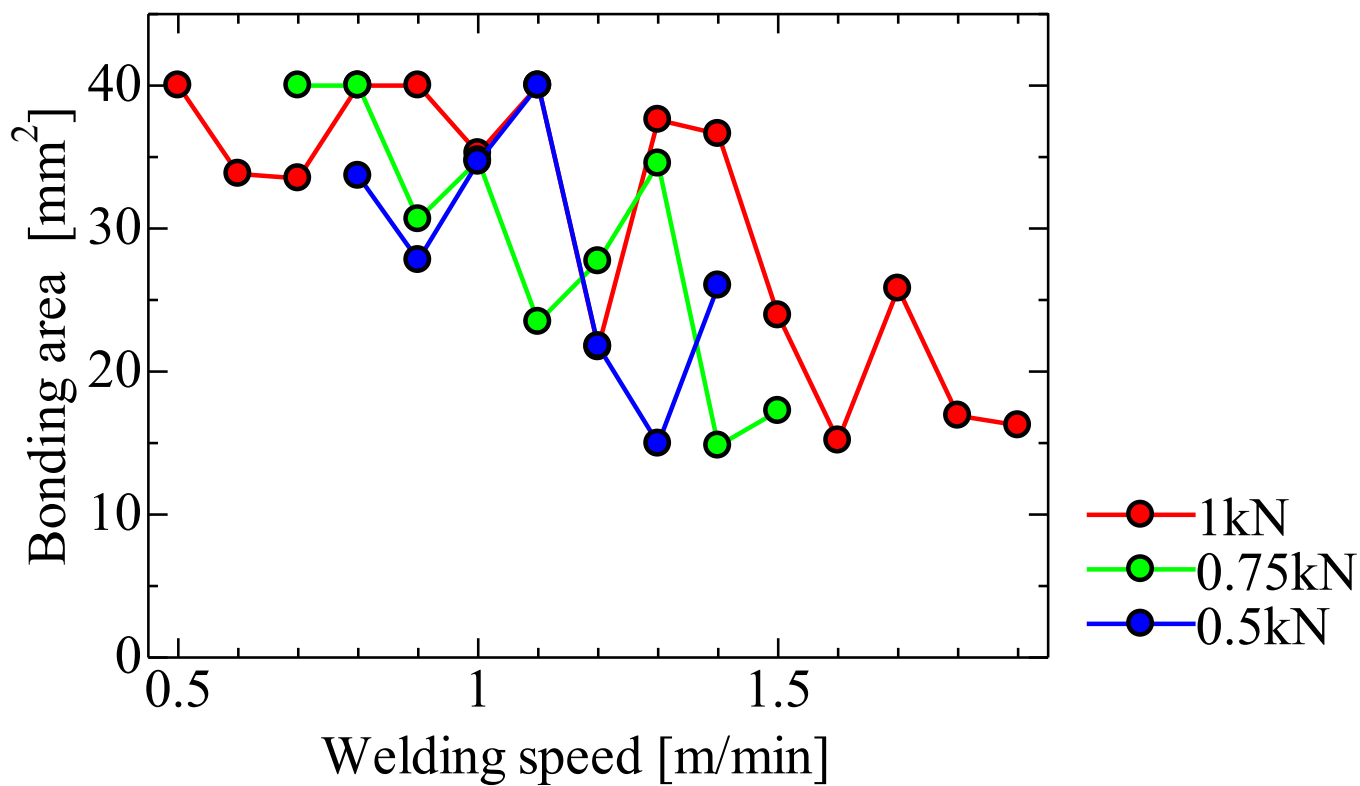
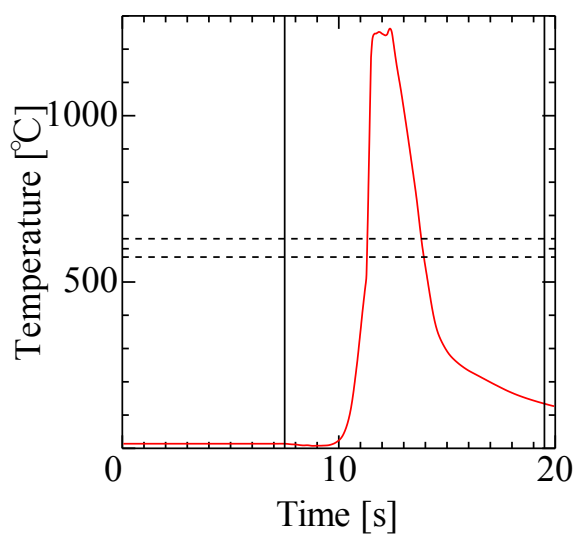
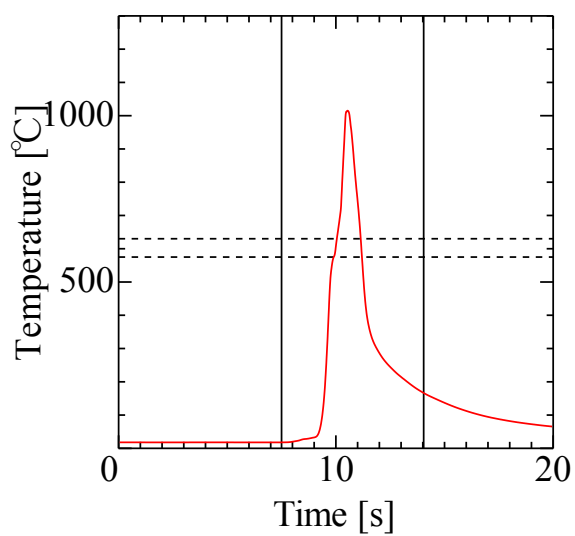


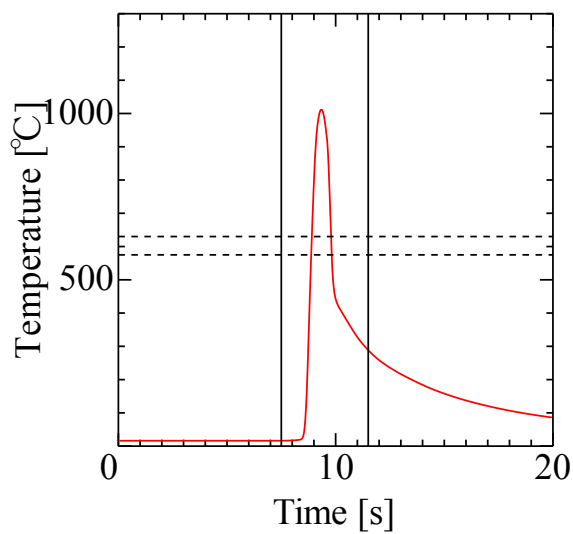
Fig.4-12 Effect of bonding area on tensile shear strength



(a) 0.6m/min



(b) 1.1m/min



(c) 1.8m/min

Fig.4-13 Results of temperature measurement at weld interface
Roller pressure : 1kN

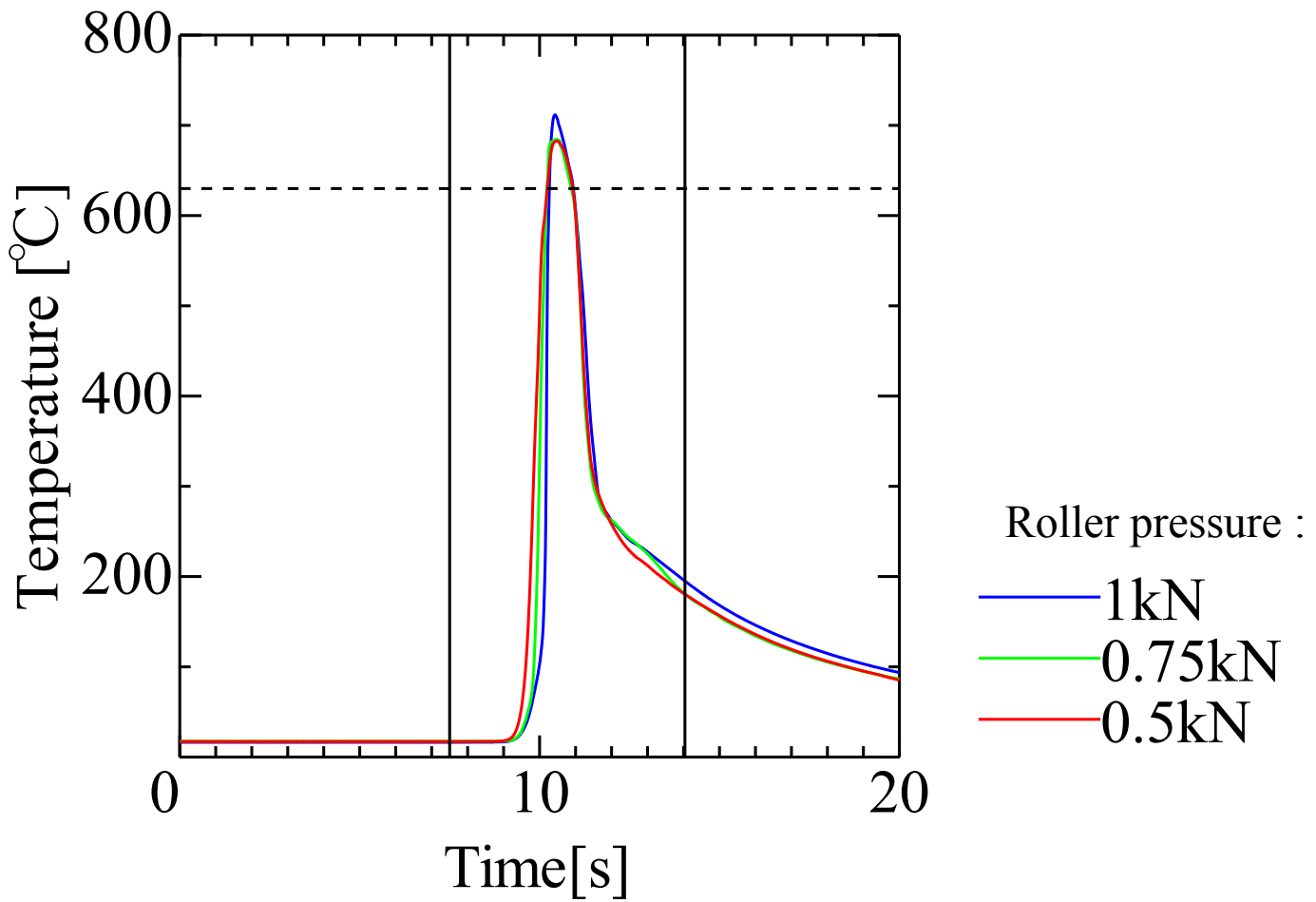


Fig.4-14 Results of temperature measurement at bottom surface of AZ31B
Welding speed : 1.1m/min