

平成 21 年 6 月 5 日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19760506
 研究課題名（和文） 鋼／アルミニウム突合せレーザ接合板のマルチスケール接合構造に関する基礎的研究
 研究課題名（英文） Fundamental Study on the Multi-scale Structure near Weld Interface in Steel/Aluminum Hybrid Sheet Welded by Butt Laser Welding
 研究代表者
 飯塚 高志 (IIZUKA TAKASHI)
 京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・准教授
 研究者番号：60335312

研究成果の概要：本研究では、加圧突合せレーザ接合による鋼／アルミニウム合金接合材の接合界面領域におけるマルチスケール構造に注目し、その構造－強度－成形性の基礎的な関係を調査した。実験より、接合条件による界面近傍の生成化合物、接合界面（マイクロ構造）および接合界面近傍の外形（マクロ構造）と接合強度の変化をそれぞれ求めた。接合強度の向上には、界面の複雑化とたる形形状が重要と考えられる。また、接合板の成形性に関する基礎的な知見を得ることができた。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2007年度 | 1,200,000 | 0 | 1,200,000 |
| 2008年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 2,200,000 | 300,000 | 2,500,000 |

研究分野：塑性工学

科研費の分科・細目：材料工学 ・ 材料加工・処理

キーワード：(1) 材料加工・処理 (2) 接合 (3) 板材成形 (4) 機械材料・材料力学
(5) 構造・機能材料

1. 研究開始当初の背景

異種材料同士を接合した材料は、接合界面近傍において明確なマルチスケール構造を持った材料である。これは金属間化合物、結晶粒、界面形状、板厚などのマクロな構造からなる。これらが相関を持って接合材の強度や変形特性に影響を与える因子となる。

ここでは、異種金属として社会で広く使用されている鋼とアルミニウムを選択し、それらの突合せ接合板について考える。このような異種材料を適材適所に配し、それらを接合した板（テーラードブランク）を成形するこ

とができれば、加工工程を増やすこともなく軽量化が図れることになる。したがって、鋼板とアルミニウム板の突合せ接合板を成形する技術を確立する意義は大きい。

本研究室では、これまでに薄板の加圧突合せレーザ接合装置を作製し、鋼板とアルミニウムのレーザ接合を試みている。結果として、母材強度を有する SPCC/A1050 突合せ接合板を作製することができている。しかしながら、アルミニウム合金に対しては、これまでのところアルミニウム母材の 50%～70% の接合強度しか得られておらず、テーラードブ

ランク成形は困難な状態である。

ここにおいて、この接合法によって得られる接合材の接合界面領域におけるミクロからマクロまでのマルチスケール構造を明らかにすることによって、それらがもたらすそれぞれの強度に及ぼす影響を一度バラバラにし、またそれらの相関を把握することが重要と考えられる。本研究ではこれによって、鋼／アルミニウム合金の系に対してSPCC/A1050-Oの系において得られたような界面構造の再現およびそれによる接合強度の向上とテーラードブランク成形の可能性を検討することを目的としている。

2. 研究の目的

本研究は、加圧突合せレーザー接合による鋼／アルミニウム合金接合材の接合界面領域におけるマルチスケール構造に注目し、その構造－強度－成形性の関係を明らかにすることを目的とする。それぞれの構造因子が強度に及ぼす影響およびそれらの相関を明らかにし、さらに、成形性との関連を考える。

このうち、今回は基礎的な研究ステップとして、接合材の基本的な構造と強度の関係を明らかにすることに重点を置いた以下の課題に取り組む。

- (1) 接合界面および界面近傍の基本的なミクロ構造の調査
- (2) 接合界面近傍のマクロ構造の調査
- (3) 加圧突合せレーザー接合による接合界面の形成メカニズムの検討
- (4) SPCC／アルミニウム合金突合せレーザー接合材のテーラードブランク成形の可能性の検討

3. 研究の方法

具体的な研究方法を、設定した小課題ごとに以下にそれぞれ示す。

- (1) 接合界面および界面近傍の基本的なミクロ構造の調査

SPCC/A1050-Oの接合に用いた装置を改良してSPCC/A5052-Oの加圧突合せレーザー接合用の装置を作製する。作製した装置を用いて、接合条件（レーザー出力、レーザー移動速度、圧力など）を変化させて接合実験を行う。また、得られた試験片の強度試験および界面近傍の顕微鏡観察から基本的なミクロ構造の状態を把握する。

- (2) 接合界面近傍のマクロ構造の調査

接合界面近傍の材料の減少およびたるみ変形の具合を板厚分布測定などによって調査し、異種金属接合材としての基本的なマクロな形状を把握する。また、強度試験によって得られた試験片から破断部の状況を調査

する。

さらに、接合条件およびアルミニウム合金の種類を変化させてSPCC／アルミニウム合金の加圧突合せレーザー接合実験を行い、得られた試験片の接合強度および界面近傍マクロ構造に関するデータの収集を行う。

- (3) 加圧突合せレーザー接合による接合界面の形成メカニズムの検討

接合条件と接合時の温度変化の関係を調べ、接合時に生じる現象を調査・検討する。また、接合界面のミクロ構造の観察および元素の拡散状態などのデータを収集し、接合界面の形成のメカニズムを検討する。

これらの結果および(1)、(2)から得られた結果を合せて接合部のマクロ構造（材料の減少およびたるみ変形）とミクロ構造（界面形状および元素分布）および接合強度の関連を整理し、接合部に存在するマルチスケール構造と接合強度の関連を整理する。

- (4) SPCC／アルミニウム合金突合せレーザー接合材のテーラードブランク成形の可能性の検討

SPCC/A1050-O 成形用接合板の作製を行い、成形性試験（引張試験、エリクセン試験、深絞り試験 等）によって板材成形性を調査する。結果から異種金属テーラードブランク成形の可能性を検討する。

4. 研究成果

- (1) 接合界面および界面近傍の基本的なミクロ構造の調査

まず、SPCC/A1050-Oの接合に用いた加圧突合せレーザー接合用の装置を改良して、アルミニウム合金の接合に利用できる高圧力（～360MPa）の負荷が可能な装置を作製した。作成した装置を図1に示す。

図に示すように、3本のエアシリンダによって治具に荷重を加え、2つの治具間で板を突合せ状態で圧縮できる。幅20mm、厚さ

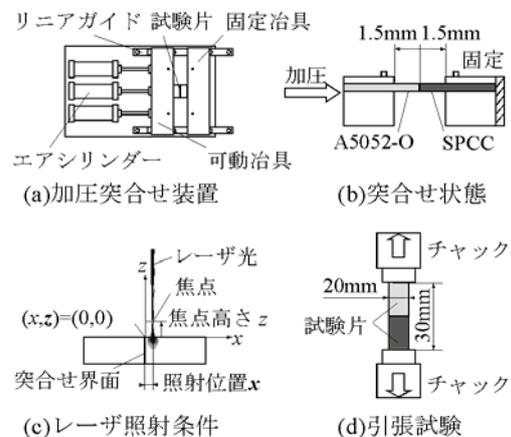


Fig.1 加圧突合せレーザー接合

1.0mmの試験片を用いて、接合条件を変化させてSPCC/A5052-H34の接合実験を行い、得られた試験片の強度試験から基本的な接合特性を把握した。主な試験条件は、出力と加圧力および、レーザー照射位置（接触界面からの距離）である。レーザー照射には、パルス発振式の炭酸ガスレーザー加工機を用いた。出力 S は 500W, 600W および 700W の3種類で、加圧力 P は、0 MPa~280MPaの間で10段階に変化させた。レーザー照射位置 x は、0 ~ 0.5 mmの間で0.05 mm間隔で変化させ実験を行った。その他の接合条件を Table 1 に示す。

Table 1 レーザー接合条件

| | |
|----------------------|-----|
| パルス周波数 B / Hz | 200 |
| デューティー比 T / % | 50 |
| 加工速度 F / mm/min | 600 |
| 焦点高さ z / mm | 1.5 |
| アシストガス | 空気 |
| アシストガス流量 f / l/min | 30 |

得られた接合材については、Fig.1(d)に示すように変位速度 1 mm/min, チャック間距離 30 mm の条件で引張試験を行った。得られた最大公称応力を接合強度 s として評価した。得られた結果をまとめたものを Fig.2 に示す。

図の s_{max} は各条件においてレーザー照射位置を変えて得られた接合強度の最大値である。図より高圧力の負荷によって接合強度の向上は見られず、逆に過大な圧力負荷では減

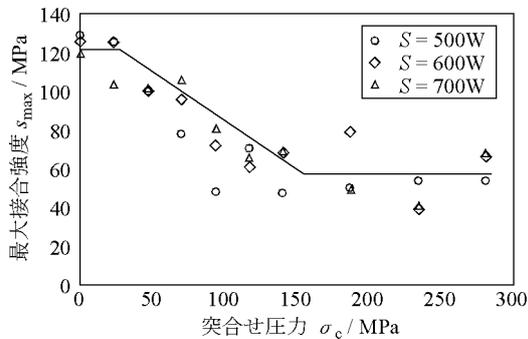


Fig.2 突合せ圧力と接合強度の最大値の関係

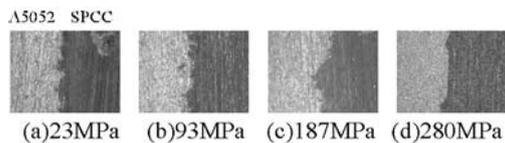


Fig.3 突合せ圧力による界面形状の変化

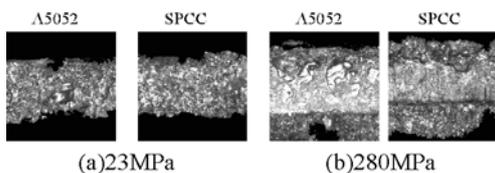


Fig.4 突合せ圧力による破断面状態の相違

少する傾向が得られた。接合強度は最大 130MPa 程度であった。

また、接合材の界面近傍を顕微鏡観察した様子を Fig.3 に、引張試験後の破断面の様子を Fig.4 に示す。Fig.3 から接合界面が低圧力負荷では入り組んだ形状になることが確認できた。高圧力側ではフラットな状態となっており、これが接合強度の減少と関係があると考えられる。また、Fig.4 から断面には大きな溶融析出物を考えられる塊状の部分が観察された。したがって、破断は母材ではなく界面の化合物層に沿って生じているものと考えられる。

(2) 接合界面近傍のマクロ構造の調査

SPCC/A5052-H34 接合材の接合界面近傍の材料の減少およびたる変形の具合を板厚分布測定などによって調査した。

突合せ圧力による試験片形状の変化および、試験片外形とビッカース硬さの関係をそれぞれ Fig.5 および Fig.6 に示す。図より、突合せ圧力の増加によって一度溶接痕が大き

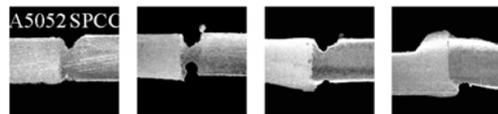
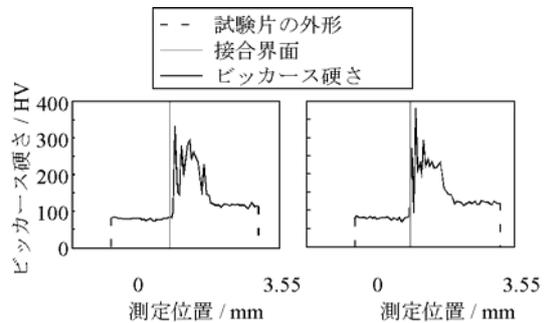
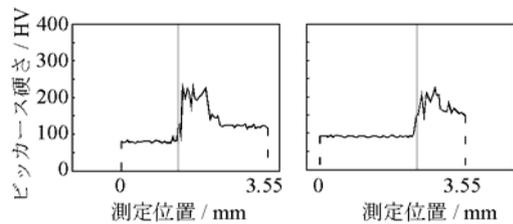


Fig.5 突合せ圧力による試験片形状の変化



(a) $P = 23$ MPa (b) $P = 70$ MPa



(c) $P = 140$ MPa (d) $P = 280$ MPa

Fig.6 試験片形状とビッカース硬さ分布

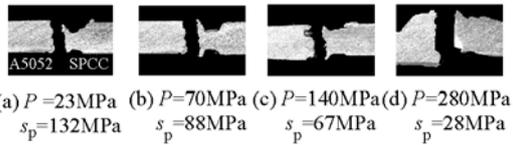


Fig.7 突合せ圧力による破断面形状の変化

くなり ($P=70\text{MPa}$)、その後圧力の増加に伴い、溶接痕が小さくなる傾向がわかる。また、 $P=140\text{MPa}$ 以上では、界面近傍のアルミニウムが大きくたる形に変形する様子が見られたが、同時に座屈も発生しておりこれが界面の平坦化と関連がある可能性がある。このような座屈は試験片の配置の精度を上げることによって抑制できると考えられる。

また、硬さに関しては、界面近傍に生成化合物と焼入れが原因と考えられる硬さの増加領域が確認できた。このうち、生成化合物が原因と思われる界面近傍の硬さの極大ピークは加圧力が大きくなるほど不鮮明になった。

Fig.7 に突合せ圧力による破断面形状の変化を示す。図より、引張試験後の試験片の破断面の状態が主に2種類に分けられることがわかった。また、突合せ圧力が大きい場合、破断面に平らな箇所が見られた。

次に、SPCC/A5052-H34に加えて、SPCC/A5052-Oの加圧突合せレーザー接合実験を高圧力負荷領域で行い、得られた試験片の接合強度を評価した。結果をFig.8に示す。

図において、接合強度および加圧力はそれぞれのアルミニウム母材のJISに定められた

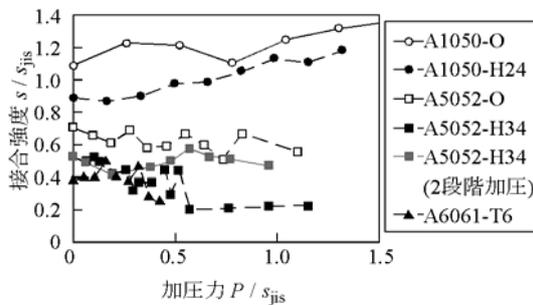


Fig.8 合金種ごとの加圧力による接合強度の変化

最小引張強さ s_{jis} によって標準化された値として示されている。結果において、A5052-Oの場合、A5052-H34のときのような加圧力の増加に伴う大幅な強度低下は見られなかったものの、A1050のときのような強度の増加傾向も見られなかった。

SPCC/A5052-Oの場合に対して、界面近傍マクロ構造に関する調査を行った結果、たる形形状になっているものの試験片の座屈は観察されなかった。代わりに、加圧力が大きい場合に表面への材料(アルミニウム合金)のかぶりが発生していることが観察された。このような材料のかぶりが強度の増加を妨げている原因と考えられる。

(3) 加圧突合せレーザー接合による接合界面の形成メカニズムの検討

接合後の界面近傍に関して、XRDによる破断面の生成金属間化合物の同定およびXPSによる界面近傍の元素分布の調査を行った。Fig.9にFig.4に示された破断面のXRD解析結果を示す。図に示された回折パターンは横軸は散乱角 2θ ($^\circ$) を表し、縦軸は強度(cps)を表す。

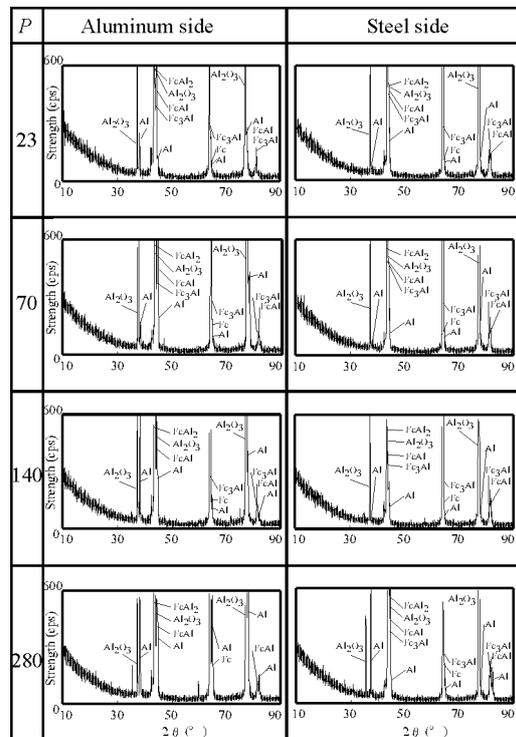


Fig.9 破断面に存在する化合物の同定結果

図より、生成化合物はアルミニウム側、鋼側ともにAl, Al_2O_3 , FeAl_2 , FeAl , Fe_3Al およびFeが主なものと考えられる。 $P=23, 70$ および 140MPa の場合アルミニウム側、鋼側ともにAl, Al_2O_3 , FeAl_2 , FeAl , Fe_3Al およびFeの存在の可能性が示唆された。過大な圧力の負荷では、アルミニウム側では Fe_3Al の存在が確認できず、原子拡散が十分でないことが接合強度低下の原因であることが示唆された。また、接合界面のミクロ構造として、界面近傍の元素分布をXPS解析によって測定した。元素分析の結果では測定精度が十分でなかったことから、詳細な分布を得ることができなかった。ただし、結果から高圧を負荷することによってアルミニウム側への鉄の拡散が生じやすくなるような傾向がみられた。このことから、接合材の破断がアルミニウム側の鉄リッチな箇所から生じている可能性が強くなった。

また、接合時の温度変化を調べた結果、接合時に界面の温度がおおよそ $700^\circ\text{C} \sim 1400^\circ\text{C}$ になることがわかった。レーザーの移動速度が

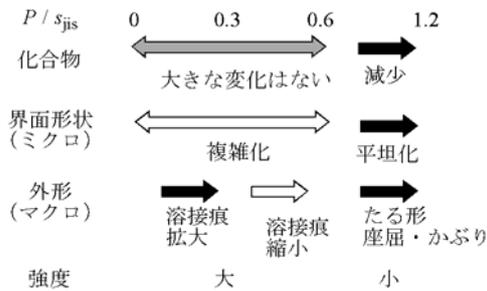


Fig.10 接合界面のマルチスケール構造と強度

500mm/min~1000mm/minの間であれば、このような高温の状態にあるのは1秒未満であると考えられる。

本研究では、解析の精度や接合時の座屈・かぶりの発生などに課題が残ったが、暫定的に接合部のマクロ構造とマイクロ構造および接合強度の関連を整理した。

基本的に生成化合物には大きな相違が見られず、マイクロな界面形状の複雑化が主に接合強度の増加に寄与していると考えられる。マクロな外形に現れる溶接痕形状の変化は、鋼側であるため、強度に及ぼす影響は大きくない。接合時の加圧が大きくなると座屈やかぶりといった接合や圧縮に悪影響を及ぼす現象が生じ、これがマイクロな界面形状の平坦化をもたらす原因と考えられる。界面を複雑にして、外形を有効的たる形にすることによって接合強度の向上が可能と考えられる。

このような観点から、より適切な接合部のマルチスケール構造を得る方法として、圧力負荷を2段階に変化させた接合を試みた。対象は、SPCC/A5052-H34である。まず、接合前に高圧力を負荷し、たる形状与え、その後低圧力の負荷で界面の複雑化を期待する。結果をFig.11に示す。図より、初期圧として140MPaを負荷して接合を行ったとき、140MPa近くの接合強度を得ることができた。このようにより適切な界面およびその近傍のマルチスケール構造を得ることで接合強度の向上が期待できる。

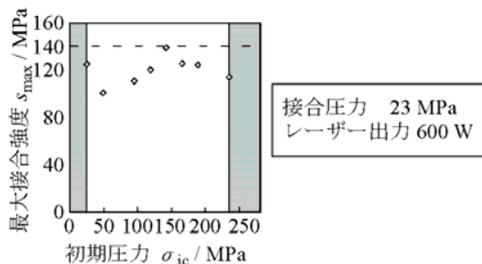


Fig.11 2段階加圧による接合強度の変化

(4) SPCC/アルミニウム合金突合せレーザー接合材のテーラードブランク成形の可能性の検討

SPCC/A1050-O 成形用接合板の作製を行い、成形性試験(引張試験, エリクセン試験,

深絞り試験等)によって板材成形性を調査した。1mm×90mm×44.5mmの板同士をつき合わせることによって、1mm×90mm×89mmのハイブリッド板に接合する。主な接合条件は、公称出力500W、パルス周波数200Hz、デューティ比50%および接合速度600mm/minである。また、接合時に接触界面と垂直方向に圧縮力94MPaを負荷した。試験片の形状をFig.12に示す。

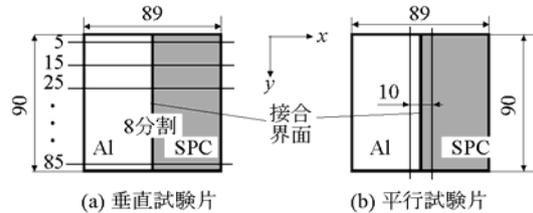


Fig.12 引張試験片の形状

Fig.12に示すように、得られた接合板に対してまず引張試験をいった。接合界面に垂直に10mm幅に採取した試験片に対してレーザー移動方向における接合強度分布を調べた結果をFig.13に示す。結果から、レーザーの入射側から30mm以降の位置でおよそ80MPa程度のほぼ様な接合強度が得られており、ある程度の再現性が確認できた。Fig.14にビードと垂直および平行方向の引張試験から得られた公称応力-ストローク線図を比較している。垂直方向の試験片はアルミニウム母材の強度とほぼ同等で伸びが減少する。平行方向の試験片では、強度は鋼とアルミニウムの平均となっており、また伸びも比較的大きい。

次にこの条件で作製した試験片を用いてエリクセン試験、平頭張出し試験および深絞り試験を行った。試験条件をFig.15に示す。まず、張出し試験に関して、試験結果をTable2

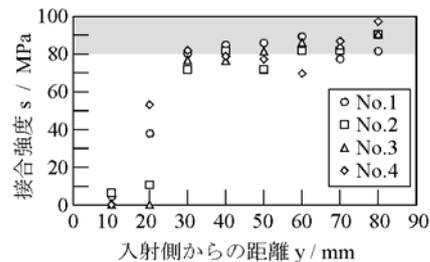
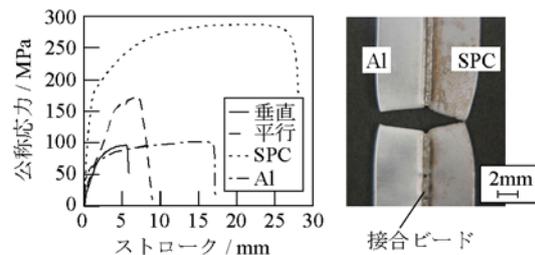


Fig.13 ビードに垂直方向の引張り試験結果



(a) 塑性曲線の比較 (b) 破断例 (平行)
Fig.14 ビード方向による引張試験結果の比較



Fig.15 平頭張出しおよび深絞り試験方法

Table 2 張出し試験結果

| 材料 | エリクセン値 /mm | 平頭張出し量 /mm |
|----------|------------|------------|
| Al | 11.34 | 7.55 |
| SPC | 13.37 | 8.90 |
| SPC / Al | 2.30 | 4.25 |

に示す。いずれの試験においても、基本的にビードに平行方向に界面で割れを生じた。特にエリクセン値は母材に比べてかなり低い値となった。これは界面に垂直方向の強度が小さいためと考えられる。これに対して平頭張出しでは、母材との張出し量の差が小さくなっている。この場合、ポンチ肩部の曲げによるビード部の伸び量が成形限界の指標のなってくるものと考えられる。

最後に完全潤滑に近い条件で深絞り試験を行った。深絞り試験では圧延方向を考慮した4つの組合せに関して接合板を作製した。

絞り比と最大ポンチ荷重および深絞りの成否をまとめたものを Fig.16 に示す。図より接合材は母材間の SPC よりの関係を示した。また、本実験では、およそ 1.7 の絞り比まで深絞りが可能であった。試験片の破断が全てビードに平行方向に接合界面で生じたことから、接合強度を改善することで限界絞り比の向上が期待できる。

深絞り容器の外観を Fig.17 に示す。写真から絞り変形を受けるフランジ部で SPC が大きく Al 側に入りこんでいることが確認でき

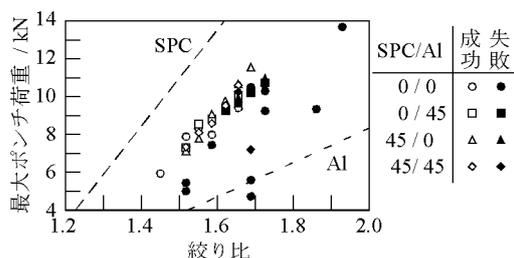
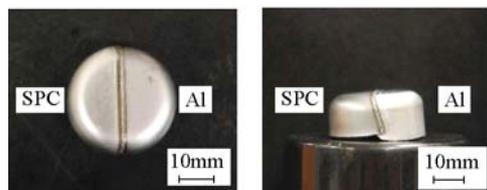


Fig.16 絞り比と最大ポンチ荷重の関係



(a) 上面 (b) 側面
Fig.17 深絞り容器の外観 (絞り比1.65)

る。また、容器の耳に関して調査した結果、圧延方向の組合せによって耳の数が3個から5個に変化する挙動が確認できた。

このような鋼/アルミニウムのレーザー突合せ接合板の成形性実験に関する報告は、国内外においてこれまでにない。接合板の強度に課題があるものの、貴重な実験結果であるといえる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 3 件)

(1) 飯塚 高志, 齋藤 武弘, 高倉 章雄, “軟鋼/アルミニウム加圧突合せレーザー接合に関する研究 (第 6 報: 接合性に及ぼすシールドガスの影響)”, 第 59 回塑性加工連合講演会, 2008.11.9, 広島県東広島市。

(2) 飯塚 高志, 大西 遼, 高倉 章雄, “軟鋼/アルミニウム加圧突合せレーザー接合板の成形性に関する基礎的研究”, 第 59 回塑性加工連合講演会, 2008.11.8, 広島県東広島市。

(3) 飯塚 高志, 陸野 宗一郎, 高倉 章雄, 山口 克彦, “軟鋼/アルミニウム合金の加圧突合せレーザー接合法の開発 (第 5 報: 高圧負荷時における SPCC/A5052 の接合性)”, 第 58 回塑性加工連合講演会, 2007.10.27, 北海道札幌市。

6. 研究組織

(1)研究代表者

飯塚 高志 (IIZUKA TAKASHI)
京都工芸繊維大学・工学科学研究科・
准教授
研究者番号: 60335312

(2)研究分担者

()

研究者番号:

(3)連携研究者

()

研究者番号: