

(論文)

鋼 / アルミニウム合金のスクラムリベットMIG溶接

Applying Scrum Rivet MIG Welding Process to Steel / Aluminum Alloy Joints

小橋泰三*
Taizo Kobashi村井康生*
Yasuo Murai松本克史**
Katsushi Matsumoto武田実佳子**
Mikako Takeda武田裕之**(工博)
Dr. Hiroyuki Takeda

Increasing amounts of aluminum alloys are being used in transport machinery, including automobiles, to reduce overall vehicle weight. In order to use aluminum alloys more effectively, it is important to develop a metal welding process that is effective for dissimilar metals, in particular steels and aluminum alloys. At present, no such process exists. Kobe Steel has developed a new dissimilar metal welding process, called Scrum Rivet MIG Welding, to weld steel and aluminum alloy together. The welding method is a lap welding process: the upper sheet is steel and the lower sheet is an aluminum alloy. The steel sheet has pores along the welding line. Aluminum melted by MIG penetrates the steel sheet through the pores and adheres to the lower aluminum alloy sheet.

まえがき = 近年、自動車をはじめとする輸送機器で、環境の面から部材の軽量化が推し進められている。その中のひとつの手段として、必要な箇所に必要な性能の材料を用いる構造体のマルチマテリアル化が挙げられる。その際、異材接合が必須となり、材料の特質が異なるゆえに接合には困難が伴う。

鋼に代わる材料として現在最も用いられている材料のひとつにアルミニウム合金（以下アルミ合金）が挙げられる。アルミ合金は、密度が鋼の約40%で比強度も高く錆びにくいことなどから、他の非鉄材料に比べ実用化が進んでいる。鋼とアルミ合金の接合法は、摩擦圧接法や爆発圧接、近年では摩擦攪拌接合やレーザ溶接など多くの溶接・接合プロセスによって研究がなされている。

鋼とアルミ合金の異材接合で重要な要素のひとつとして挙げられるのが、鋼とアルミ合金の接合界面に生成される金属間化合物である。Fe（鋼）とAl（アルミ合金）の金属間化合物（ Al_3Fe 、 Al_5Fe_2 など）は脆い性質であるため、通常のアーク溶接を行うと溶接部に割れが発生することが多い。

摩擦圧接や爆発圧接などの固相接合で生成される金属間化合物は薄く、1 ~ 2 μm 程度のときに最も高い強度が得られるとされている¹⁾。一方、レーザ溶接²⁾ やブレイジング(ろう付け)³⁾などは金属間化合物をなるべく薄く生成させるように低入熱で接合を行う。しかし、必要最低限の入熱を制御するには困難が伴う。

本稿では、通常のアーク溶接で鋼とアルミ合金を接合することを目的として開発されたスクラムリベットMIG溶接について、その概要と特徴を実験結果とともに紹介する。

なお、本研究は、財団法人金属系材料研究開発センターが平成16年度エネルギー使用合理化革新的温暖化対

策技術開発（自動車軽量化のためのアルミニウム合金高度加工・形成技術の開発事業）として経済産業省より委託を受けたものである。

1. スクラムリベット MIG 溶接法

1.1 スクラムリベット MIG 溶接法の概要

スクラムリベットMIG溶接の概要を図1に示す。継手形状は、重ね継手で上板が鋼、下板がアルミ合金であり、鋼板には溶接線に沿って孔が開けられている。この鋼板の上から、アルミ合金ワイヤを用いてMIG溶接を行い、鋼板の孔を介して下板のアルミ合金との間で溶込みを得る。

鋼を溶かさないう程度で低電流で溶接を行い、下板のアルミ合金との間で溶込みを得るため、金属間化合物は大きな問題にならない。

基本的には、いわゆるリベット接合同様の継手形状となるが、“リベット”を作るのにMIG溶接を用いていることが本溶接法の特徴である。

1.2 他の溶接法との比較

他の異材接合法と施工能率などを比較した結果を表1に示す。スクラムリベットMIG溶接は、リベットに比

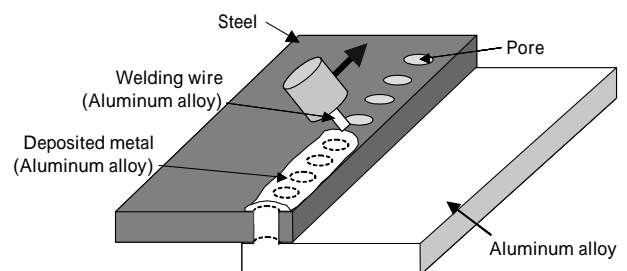


図1 スクラムリベットMIG溶接法の概要

Fig. 1 Schematic illustration of "scrum rivet" MIG welding process

*神戸溶接サービス(株) 技術調査部 **(株)神戸製鋼所 技術開発本部 材料研究所

表1 スクラムリベット MIG 溶接と他の異材接合との比較
Table 1 Comparison between "scrum rivet" MIG welding and other dissimilar metal weldings

	Rivet welding	Friction pressure welding	Scrum rivet MIG welding	Arc welding
Operating efficiency	×			
Joint geometry	Sheet	Circular Cylinder	Sheet	Sheet
Weight saving	×			-

× Good ○ Poor

べれば工程は少なくともすむが、アーク溶接などに比べると、孔開け加工が必要というデメリットがある。

また、近年では固相接合法で板の突合せ継手が接合できる摩擦攪拌接合、アーク溶接法ではCMT⁴⁾など、いくつかの鋼とアルミ合金の異材接合法が開発されている。しかし、これらの方法も鋼とアルミ合金における接合の問題点をすべて解決したとはいえず、現在も様々なアプローチが行われている。

その点、本溶接法は、孔さえ開けてしまえば通常のMIG溶接で比較的簡単に溶接を行えるというメリットがある。

以下に各種行った試験結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 供試材料

590MPa 級鋼板 (板厚 1.2 mm)、980MPa 級鋼板 (板厚 1.2 mm) および 5182 アルミ合金板 (板厚 1.0 mm、1.6 mm、3.0 mm) を用い、表面をアセトンで脱脂後、溶接を行った。

2.2 溶接条件

直流逆極性 (棒マイナス) で、電流、電圧、溶接速度をそれぞれ、70~90A、9~14V、溶接速度を 30~130 cm/min の範囲で変化させた。シールドガスには、100% アルゴンを用いた。特徴的なパラメータとして、孔径および孔と孔との距離 (以下ピッチ) があり、これらについて条件の選定を行った。

2.3 引張試験方法

溶接継手から図2に示す短冊状の試験片を採取加工し、引張試験を行った。引張試験結果は、基本的に幅 30 mm あたりの最大引張荷重で表記することとした。

3. 実験結果および考察

3.1 ビード外観と断面マクロ組織

孔径 4 mm、ピッチ 6 mm の孔を加工した 590MPa 級鋼 (板厚 1.2 mm) とアルミ合金 (板厚 1.6 mm) の組合せに対し、電流 70A、電圧 10V、溶接速度 70 cm/min で溶接を行った。ビード外観を図3、溶接方向に平行な断面マクロ組織を図4に示す。

溶接ビードは、孔を十分に埋めており良好な外観を呈している。さらに、下板のアルミ合金まで十分な溶込みが得られていることがわかる。

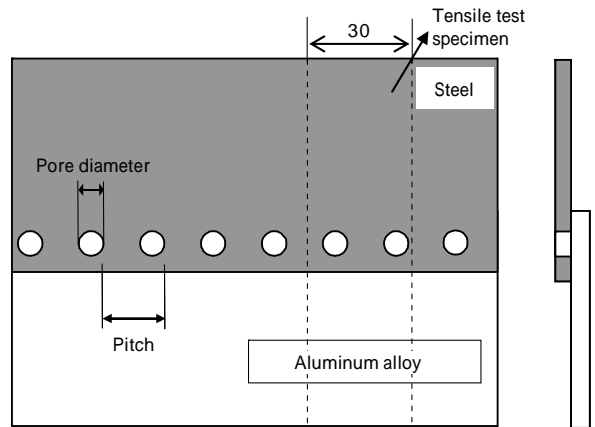


図2 引張試験片形状 (ポア径、ピッチ)
Fig. 2 Tensile test specimen configuration (Pore diameter, pitch)

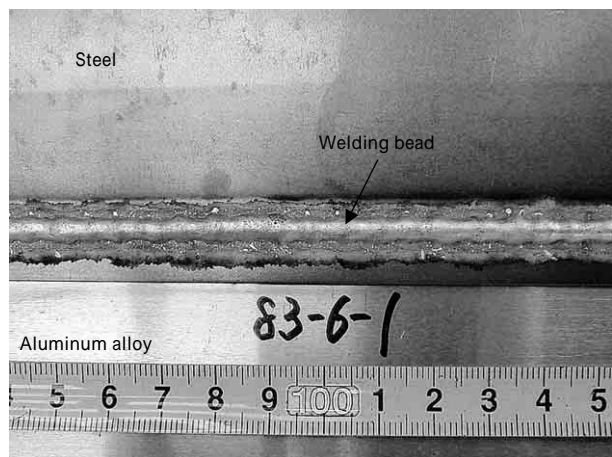


図3 溶接ビード外観
Fig. 3 Welding bead appearance

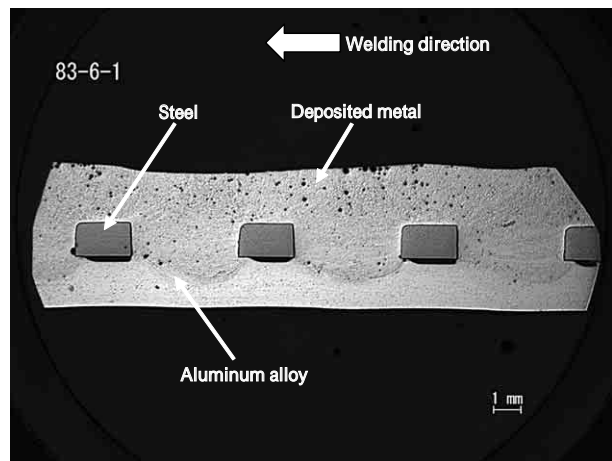


図4 断面マクロ組織
Fig. 4 Macrostructure of longitudinal section

3.2 機械的性質

3.2.1 孔径の影響

孔径が過小な場合、下板への溶込みが不十分になりやすい。逆に孔径が大きいと下板への入熱が過大となり、溶落ちが発生しやすくなる。しかし、溶落ちを防ぐために低電流で溶接を行うと、孔を十分に埋めるための溶着金属量が得にくくなる。また、接合する材料の組合せや、その継手に求められる性能にもよるが、一般に孔径が大きいと継手の強度は得られやすい。そのため、基本的には、下板のアルミ合金板が厚くなれば孔径を大きく

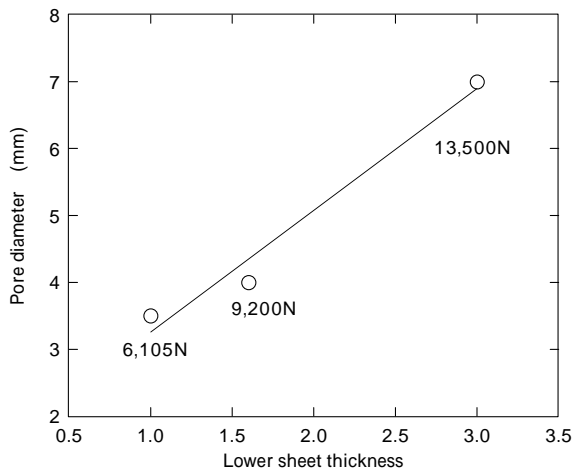


図5 下板の厚さと最適な孔径の関係

Fig. 5 Relationship between lower sheet thickness and suitable pore diameter

し、板厚が薄くなれば孔径を小さくするべきで、板厚に応じて孔径を決めることが肝要である。

下板の厚さと最適な孔径の関係を図5に示す。図中の数値は、溶接ワイヤ5183を用いたときの引張試験における最大引張荷重を示しており、すべての条件について、孔と孔の間隔を孔径の半分としている。図5によると、ほぼ板厚に比例して、孔径も大きくなっていることがわかる。

3.2.2 ピッチの影響

孔のピッチが継手部の引張強度におよぼす影響を確認するため、孔径 4 mm (鋼板厚: 1.2 mm / アルミ合金板厚 1.6 mm) で、ピッチのみを変えて溶接試験体を製作し、引張試験を行った。引張試験結果を最大引張荷重 (N) および引張強さ (MPa: 最大引張荷重 / 破断時の該当位置での面積) で表したものをそれぞれ図6および図7に示す。図6の結果、ピッチが広がるにつれて最大引張荷重が低下している。これはピッチが広がると、溶接線方向の単位長さあたりの孔面積が小さくなるためである。図7ではピッチが6 mm と7 mm を比べると引張強さは、ほとんど変わっていないが、ピッチが8 mm の場合は引張強さが低下する傾向がみられた。これは、ピッチ6 mm および7 mm では、十分な溶込みが得られているのに対し、ピッチが長くなると鋼板上にアークが当たっている時間が長くなり、ピッチが6 mm および7 mm の場合に比べ、アルミ合金板の温度が上がりにくくなり、溶込みが浅くなったためと考えられる。

これらのことから、孔間の鋼部がリベット部より強度が低くならない範囲で、できるだけピッチを短くすることによって、高い強度が得られることがわかる。

3.2.3 溶接ワイヤの影響

アルミ合金溶接ワイヤには、主に4000系および5000系がある。その中で、4043, 4047, 5554, 5356, 5183の5種類について、鋼板(板厚: 1.2 mm) / アルミ合金(板厚 1.6 mm), 孔径4 mm, ピッチ6 mm で溶接を行い、リベット部の強度を評価した。

各ワイヤの溶接施工性に大きな差はなく、いずれのワイヤでも良好な溶込みが得られた。引張試験結果を図8

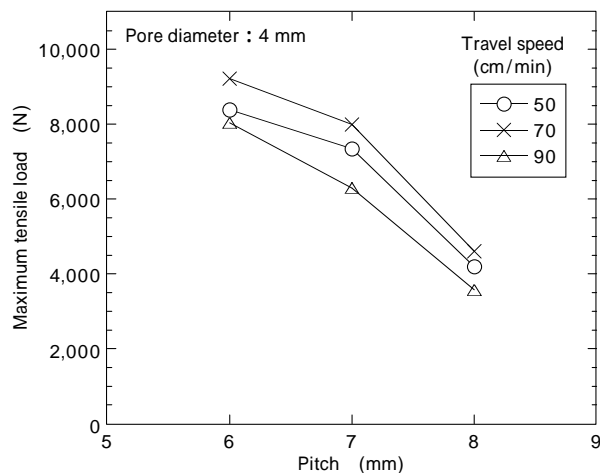


図6 ピッチと最大引張荷重の関係

Fig. 6 Relationships between pitch and maximum tensile load

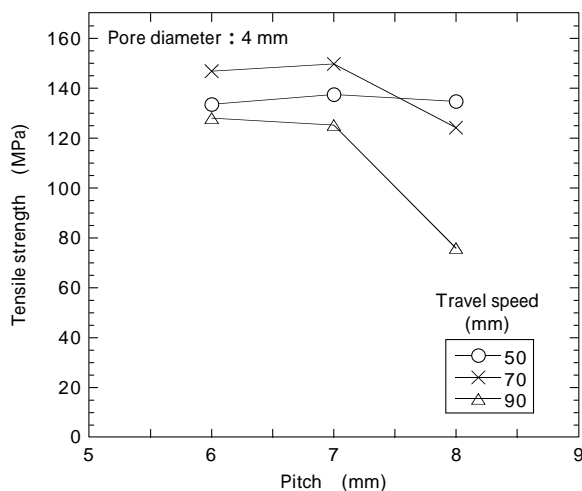


図7 ピッチと引張強さの関係

Fig. 7 Relationships between pitch and tensile strength

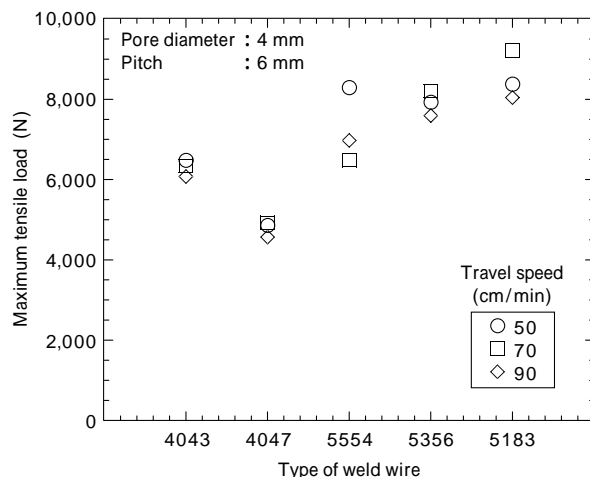


図8 ワイヤ別の最大引張強度

Fig. 8 Maximum tensile loads of each welding wire

に示す。溶着金属の強度が高いワイヤほど引張強度も高くなっており、5183で最大引張荷重9,200 Nが得られた。この場合の継手効率は71%である。

溶接ワイヤ5183で溶接を行った試験体のリベット部 (Al) と鋼板 (Fe) の界面における面分析結果を図9に示す。また、比較対象として溶接ワイヤ4043で溶接を行った試験体 (No.43-8-3) の面分析結果を図10に示す。

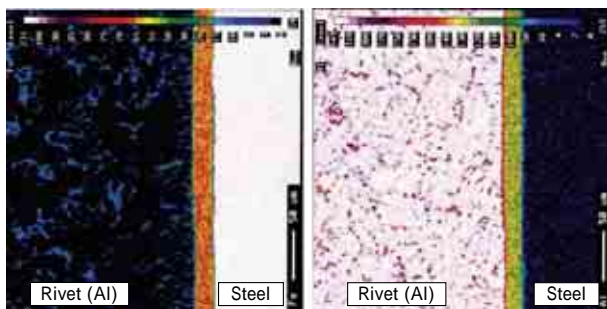


図9 EPMA 観察結果 (ワイヤ: 5183)
Fig. 9 Observations with EPMA (Wire: 5183)

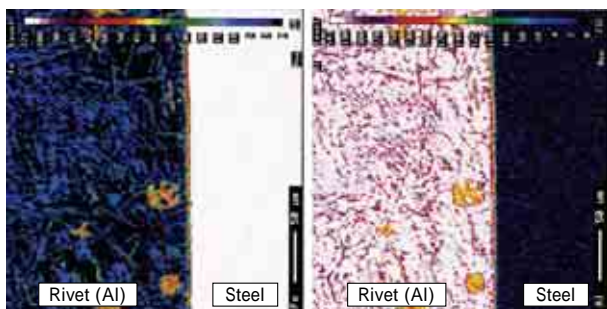


図10 EPMA 観察結果 (ワイヤ: 4043)
Fig.10 Observations with EPMA (Wire: 4043)

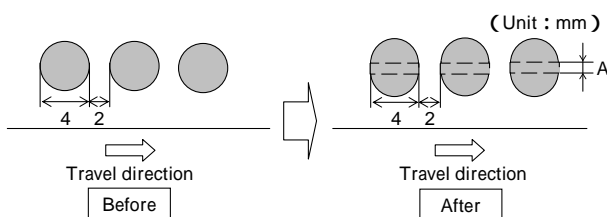


図11 孔形状の改良
Fig.11 Improved pore geometry

No.83-6-1 の界面には、約 $18\ \mu\text{m}$ の金属間化合物が観察され、No.43-8-3 の界面では、約 $5\ \mu\text{m}$ の金属間化合物層が観察された。5000 系アルミ合金 (Al-Mg 系) に添加されている Mg は、Fe-Al 間の金属間化合物の生成を促進させる働きがあることが知られている⁵⁾。本溶接においても、5000 系ワイヤに比べ 4000 系ワイヤの方が金属間化合物の生成が少ない。しかしながら、本溶接はリベット部と鋼板の界面における金属間化合物が継手強度に影響を及ぼすことはない。

3.2.4 孔形状の影響

継手強度の向上を目標として真円とは異なる孔形状の検討を行った。その結果、図11に示すように、真円に溶接方向と直角方向に幅 A mm の平行部を加えることが継手強度の向上に有効であった。

鋼板厚 1.2 mm / アルミ合金板厚 1.6 mm に溶接ワイヤ 5183 を用いた溶接試験では、A が 1 mm で最大引張荷重 11,600N (改良前: 9,200N) となり、継手効率も 71% から 89% に改善された。一方、A が 2 mm の場合は孔を埋めることとアルミ合金板の溶落ち防止を両立できず、溶接が困難であった。さらに、裏当材を用いて溶接を行ったが、最大引張荷重は 10,800N (継手効率 83%) にとどまった。これは、過大な入熱により、アルミ合金板に形成された熱影響部で破断したためである。

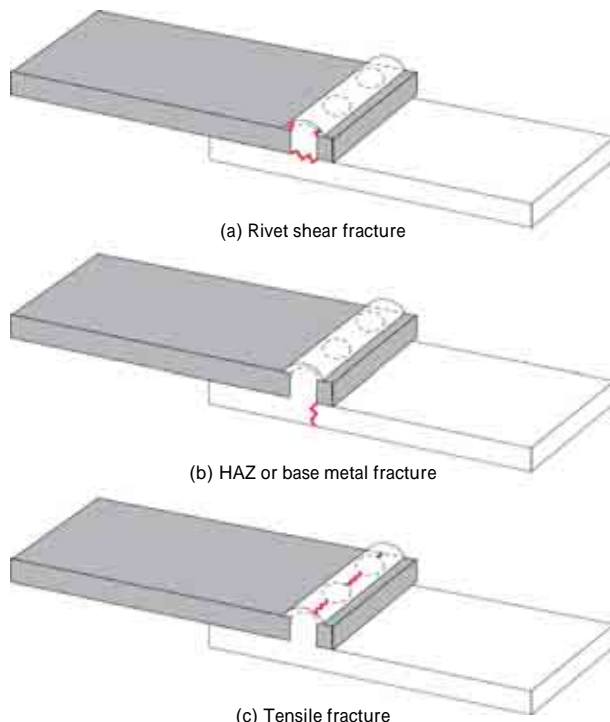


図12 破断箇所
Fig.12 Fracture locations

以上の結果から、限界はあるものの、真円に溶接方向と直角方向に幅 A mm の平行部を加えることによって適正なピッチのまま孔面積は大きくなり、継手強度を改善できることがわかる。

3.3 引張試験片の破断形態

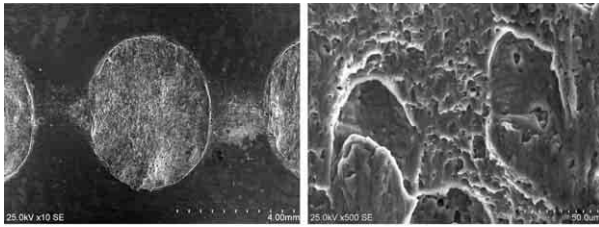
スクラムリベット MIG 溶接継手の破断部は、基本的にリベット部 (アルミ合金溶着金属部) アルミ合金母材の熱影響部または原質部、孔と孔の間の鋼部、の3種類が考えられる (図12)。

本溶接は、リベット部で破断することを前提としている。リベット部の主な破断箇所には2種類あり、多くの場合、アルミ合金板との溶込み部分で破断するが、溶着金属量が不足した場合にはリベットの頭部で破断することがある。このような破壊は、下板のアルミ合金板が薄いために低電流で溶接し、十分な溶着金属量が得られていない場合に起こりやすい。

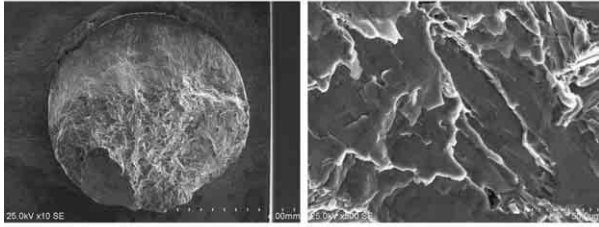
リベット部に十分な強度がある場合はアルミ合金板の熱影響部で破断することが多い。析出強化合金 (2000 系や 6000 系) や加工硬化材の熱影響部は軟化し、強度が低下するため破断しやすい。孔と孔の間で破断することがまれにあるが、これは孔間距離が小さすぎるために、この箇所の強度が不十分なことによる。また、溶接中の熱で孔間の鋼が溶けてしまい、この部分で破断することもある。上記のような破断を避けるために孔間距離を適正に維持することが必要である。

3.4 引張試験片の破面形態

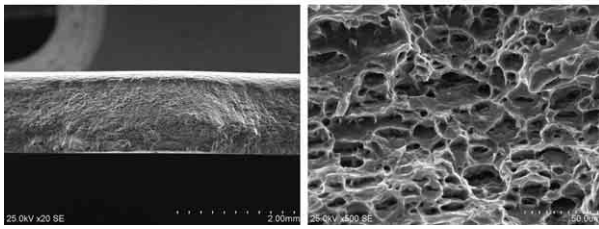
スクラムリベット MIG 溶接部から採取した引張試験片の破面観察結果を図13に示す。はリベット部で破断しており、伸長ディンプルが認められた。これは、孔に対してせん断応力がかかり破断したことを示している。一方、はアルミ合金板の HAZ (熱影響部) で破断



Rivet shear fracture
(Heat input : 1,166 J/cm)



Rivet shear fracture
(Heat input : 2,400 J/cm)



HAZ fracture

図13 引張試験片破面

Fig.13 Fracture surface of tensile test specimens

しており、等軸ディンプルが観察された。

また、はと同様にリベット部で破断しているが、とは異なり脆性破面を呈していた。およびの破面にそれぞれEDX(成分分析)を行ったところ、はに比べFeを多く含有し、の溶接金属に比べ脆い組成で

あることがわかった。これは、同じ板厚の鋼板に対し、の方がよりも入熱が大きく(入熱1,166 J/cm、入熱2,400 J/cm)、溶融した鋼板成分が溶着金属に混入したためと考えられる。このことから、同じ板厚の鋼板でアルミ合金の板厚のみが厚くなる継手の場合は、入熱が過大にならないように注意する必要があるといえる。

むすび=鋼/アルミ合金の異材溶接法として、スクラムリベットMIG溶接法を紹介した。本溶接法の特徴である孔のサイズおよびピッチを適切に選ぶことによって、良好な継手を得られることが確認された。また、鋼板厚1.2mm/アルミ合金板厚1.6mmの継手では、継手効率が89%を示した。

本溶接が他の鋼/アルミ合金の異材接合法と異なる点は、アーク溶接法にもかかわらず、鋼種(めっき鋼板など)やアルミ合金の材質に関係なく、溶接できる点が挙げられる。ただし、使用する材料の板厚や性能に応じて適正な溶接条件の選定が重要であり、今後も汎用的なデータの積み重ねが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 黒田晋一ほか：溶接学会論文集, Vol.17-3 (1999) p.484.
- 2) 中川幾太郎ほか：日本機械学会機械材料・材料加工技術講演会講演論文集, Vol.9th, p.53.
- 3) 武田実佳子ほか：溶接学会全国大会講演概要, Vol.75 (2004) p.262.
- 4) 古川一敏：溶接技術, Vol.53, No.8 (2005), p.94.
- 5) 今枝裕貴ほか：溶接学会全国大会講演概要, Vol.2005(2005) p.318.