

(技術資料)

自動車生産向け新アルミ接合技術（抵抗スポット溶接、摩擦撈拌接合、DASW）の開発

後藤崇志*¹・奥田真三樹*²・戸田 要*³

Development of New Aluminum Joining Techniques for Automobile Manufacturing (Resistance Spot Welding, Friction Stir Welding, Dissimilar Metals Arc Spot Welding)

Takashi GOTO・Masaki OKUDA・Kaname TODA

要旨

本稿では、当社が取り組むアルミニウム（以下、アルミと記載）向け接合技術の開発例として、抵抗スポット溶接、摩擦撈拌（かくはん）接合、および異種金属アークスポット溶接（DASW；Dissimilar metals Arc Spot Welding）に関する技術の概要と改良例を解説する。抵抗スポット溶接では通電時間が接合強度の安定化に影響することがわかり、これによりアルミ抵抗スポット溶接部の信頼性向上が期待できる。摩擦撈拌接合では不可避的に発生するバリを“一工程で除去”しつつ接合できる新設計のツールを見出した。また、DASWは異種金属接合の新たなアプローチとして既存のアーク溶接機を活用しながら高強度の接合を可能にする技術であり、接合部の継手強度は、アルミ抵抗スポット溶接のJIS規定強度を上回った。

Abstract

This paper gives an overview and examples of the improvement of aluminum joining technologies developed by Kobe Steel in such areas as resistance spot welding (RSW), friction stir welding (FSW), and dissimilar metals arc spot welding (DASW). It has been found that in resistance spot welding, the weld time affects the stability of the joining strength, which is expected to improve the reliability of the aluminum resistance spot weld. For friction stir welding, a newly designed tool has been confirmed to remove burrs, which inevitably occur, in one step while joining. Additionally, DASW is a new approach to dissimilar metals joining, a technology that enables high-strength joining while utilizing existing arc welding machines. The DASW joint strength exceeds the strength specified by JIS for aluminum resistance spot welding.

検索用キーワード

アルミ合金、抵抗スポット溶接、摩擦撈拌接合、異種金属接合、アーク溶接、継手強度

ま え が き = 現代社会において、地球環境への配慮は避けずには通れない課題であり、とくに自動車産業における温室効果ガス（CO₂）を含む環境負荷物質の削減は重要視されている¹⁾。自動車の燃費向上は、この課題に対処するための主要なアプローチとされている。自動車の燃費向上には、素材を鋼材から軽量のアルミ材へ置換することが有効である²⁾。しかしながら、この素材置換は、自動車組み立ての接合工程に影響を与える。とくに、アルミ材の熱軟化、および鋼材との異種金属接合時に形成される硬くもろい金属間化合物に起因する接合強度の低下など、多くの課題が存在する。例えば、アルミ材の抵抗スポット溶接では、鋼材の抵抗スポット溶接と比較して接合強度が不安定になりやすいことが課題である³⁾。摩擦撈拌（かくはん）接合では、外観に悪影響を及ぼす接合時のバリ発生が課題の一つとして挙げられる⁴⁾。いっぽう、アルミ材と鋼材の異種金属接合では、Self Piercing Rivet (SPR) や Flow Drill Screw (FDS) といった機械的締結法が用いられる。しかしながら、これらの技術は専用設備を必要とし、コストが高くなることが課題である⁵⁾。

本稿では、これらアルミ材接合技術の課題に対処するための技術開発について紹介する。

1. 抵抗スポット溶接

1.1 抵抗スポット溶接の基本原則と課題

抵抗スポット溶接は、被溶接材料を水冷銅電極で挟んで加圧し、ここに数kA～数十kAの大電流を瞬間的に流すことで溶接部に発生するジュール発熱を熱源とする溶接方法である⁶⁾。この技術の主要な特徴として、高い生産性、リベットといった副資材が不要であることなどが挙げられる。これらの特徴を活かし、自動車の車体組み立てにおいて広く利用されている。鋼材と比較しアルミ材は熱伝導率が高く、低い電気抵抗率を有するため、短い通電時間と高い溶接電流が必要となる。

ここで、鋼材同士とアルミ材同士の抵抗スポット溶接の比較から、アルミ材の接合強度の安定性が劣ることが明らかにされている³⁾。とくに、接合面に対して垂直方向に剥離する場合の強度の安定性が劣ることが示されており、溶接径と強度の関係は必ずしも一致しないことが確認されている^{7), 8)}。この現象は、溶接径以外の未解明

*¹ 技術開発本部 ソリューション技術センター *² 事業開発部 *³ 溶接事業部門 技術センター 溶接開発部

の因子が強度に影響していることを示唆しており、この因子の同定と強度の安定化が求められていた。

1.2 通電時間の適正化による十字引張強さの安定化とそのメカニズム

供試材には、AA6022相当アルミ合金板材（板厚2 mm）を用いた。溶接には、R形（電極径19 mm、先端曲率半径100 mm、クロム銅製）の電極を用いて、JIS Z 3137に準拠し十字引張強さ（Cross tension strength, 以下CTSと記載）を評価した。

図1に、溶接中の電極加圧力は5 kN、溶接後の電極加圧力（鍛圧）を8 kNとした条件で通電時間の変化がCTSに与える影響を示す。通電時間が75~100 msecの範囲でCTSが高い水準で安定した。通電時間がこの範囲より短くなるとCTSが低下した。これは、通電時間を過度に短くしたことで溶融が安定せず溶接径が低下したためと考えられる。また、通電時間が過度に長い場合も同様にCTSが低下することが確認された。これらのことから、通電時間には適正範囲が存在すると考えられる。

筆者らは、CTSに与える通電時間の影響として、通電時間を200 msecに設定し、その後400 msecにわたり溶接電流値を直線的に低下させるダウンスロープを適用した「過剰通電」と、通電時間を100 msecに設定した「適正通電」という条件下でビッカース硬さをナゲット内部、端部において比較した⁹⁾。過剰通電の場合、同一の溶接条件で作成された試験体において、ナゲット内部のビッカース硬さのばらつきが、適正通電と比較して相対的に大

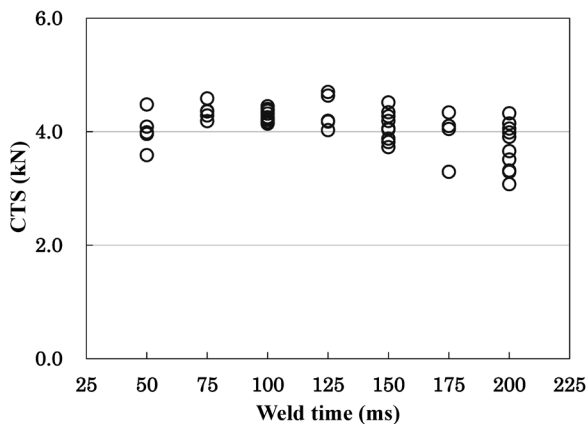
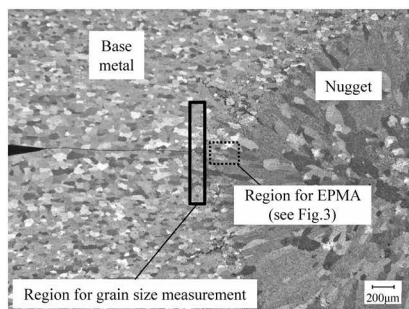
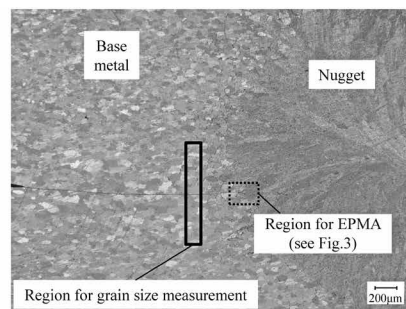


図1 通電時間と十字引張強さの関係

Fig.1 Relationship between weld time and cross tension strength



(a) Optimal welding



(b) Excessive welding

図2 ナゲット端部の断面マクロ写真
Fig.2 Cross section photos near nugget edge

きいことが示されている。そして、このナゲット内部のビッカース硬さのばらつきは、CTSのばらつきに影響していることが数値シミュレーションから説明されている。また、ナゲット端の熱影響部のビッカース硬さが適正通電と比較して相対的に低く、この低いビッカース硬さの部分が十字引張時のき裂進展の起点となり、CTSの低下を引き起こすことが示されている¹⁰⁾。

上記の過剰通電でナゲット端の熱影響部のビッカース硬さが低下した要因について、結晶粒径、および析出物の観点から調査した。図2にナゲット端近傍の断面マクロ写真を示す。ナゲット端の熱影響部の結晶粒径に有意な差は見受けられなかった。ナゲット端の熱影響部の結晶粒径に着目した理由は、十字引張試験時の破断進展経路がナゲット端部を通過するプラグ破断であったためである。次に、ナゲット端部のEPMA観察結果を図3に示す。Si,およびMgマッピングの結果から、析出物はMg₂Siだと考えられ、ナゲット端部,および縁のビッカース硬さの変化はMg₂Siの分散状態に起因するものだと推定した。

過剰通電では、長い通電時間とダウンスロープの適用により冷却速度が低下し、それに伴い強度に寄与しない粗大な析出物がナゲット端、および縁部で多く析出した。この結果、これら部位における溶質元素の固溶量が低下し、過剰通電では適正通電と比較してビッカース硬

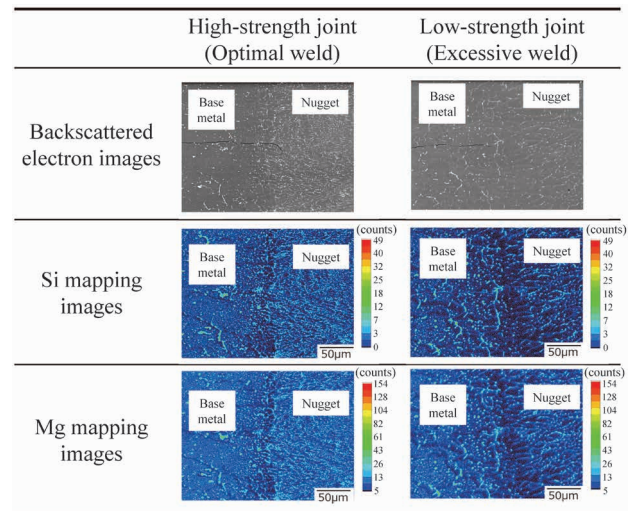


図3 ナゲット端部のEPMA画像

Fig.3 EPMA images of nugget edge

さが低下したと考えられる。したがって、この硬さ低下により、低い荷重で破断が発生したものと推察された。

過剰な通電時間がCTSの低下を引き起こすことを明らかにし、そのメカニズムを調査した。これらの知見が、自動車生産の抵抗スポット溶接における条件適正化に活用されることを期待する。

2. 摩擦攪拌接合

2.1 摩擦攪拌接合の基本原則と課題

図4に摩擦攪拌接合の概略図を示す。摩擦攪拌接合は回転させた摩擦攪拌接合ツールを下げつつ、力を加えることで材料に挿入し、ツールから材料に圧力をかけたまま材料内を移動することで二つ以上の材料を塑性流動させながら攪拌し、接合させる方法である。材料を溶融させずに攪拌するため、接合に要するエネルギーが少ない。摩擦攪拌接合は、この特徴を活かし、CO₂排出量削減の観点からも適用の増加が期待される。とくにアルミ材の摩擦攪拌接合においては、安価な工具鋼を用いたツールが使用できるため、近年適用が拡大している。

図5に摩擦攪拌接合を適用し、アルミ材を突合せ接合したサンプルの外観写真を示す。摩擦攪拌接合では、材料を塑性流動により攪拌させるために、ツールを材料に押し付ける。ツールには攪拌された材料があふれないように保持する機構（ショルダ）を有しているが、加圧力などの施工条件が適正でない場合攪拌された材料の一部は攪拌部からあふれ、バリとして接合部端部に残留する。バリは製品の外観や安全性などに悪影響を与えるため、一般的には接合後に切削もしくはブラシなどにより除去される。

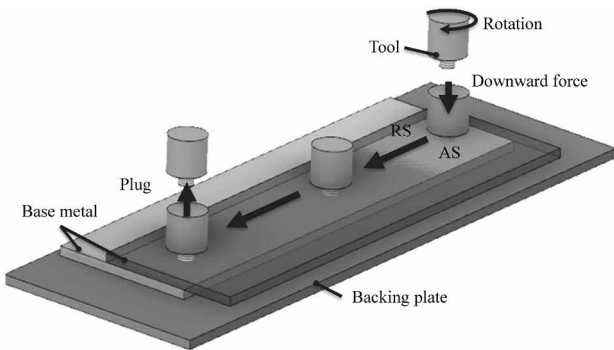


図4 摩擦攪拌接合の模式図
Fig.4 Schematic view of friction stir welding

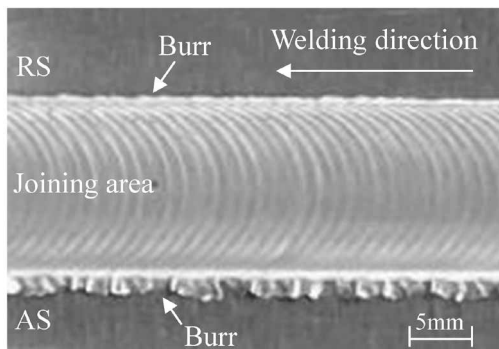


図5 摩擦攪拌接合部の外観写真
Fig.5 Appearance photo after friction stir welding

2.2 摩擦攪拌接合におけるバリの発生傾向

摩擦攪拌接合におけるバリはツールの形状、材料への押し込み量や荷重、また施工における接合速度や回転数などの接合条件などが発生要因であるが、とくに材料へのツールの押し込み量はバリの発生量に大きな影響を与える。図6に、ツール進行方向と回転方向が同じ方向になるAdvancing Side（以下、ASと記載）における押し込み量とバリの高さの関係を示す。押し込み量が増えるにつれてバリの高さが大きくなるのがわかる。ツール進行方向と回転方向が逆方向になるRetreating Side（以下、RSと記載）においても、押し込み量はバリの高さに影響するが、ASよりもその傾向は小さい。また、一般的に摩擦攪拌接合した接合体を観察すると、ツールの投影形状に比べて、実際の接合部の減肉は小さい。これは、RSでは流動した材料がツールの外側でバリになるが、材料の一部は回転するツールへの凝着などにより、攪拌部後方の接合部内に引き込まれるためと推定される。ある程度の傾向はあるものの、バリの発生は複合的な要因による複雑な材料流動によるため、完全に抑制することは難しい。

2.3 切削チップ付き摩擦攪拌接合ツール

バリは後工程での切削などで除去できるものの、そのぶん工程数は増加する。この後工程を省略するために、切削チップを摩擦攪拌接合ツール内部の適切な位置に配置し、接合とバリの除去を同時に実施できる切削チップ付き摩擦攪拌接合ツールを開発した。図7に概要図を示す。切削チップ付き摩擦攪拌接合ツールは、ショルダ部分が二段になっている。プローブ側から二段目のショルダ部分に平らに削られた部位があり、そこに切削チップを取り付けている。回転すると一段目、二段目にて材料を摩擦攪拌させ、さらに二段目ではあふれ出た材料を切削して除去することができる。図8に一般的なツールと開発ツールを用いた接合体の外観と断面マクロ画像の例を示す。一般的な摩擦攪拌接合ツールではバリの残

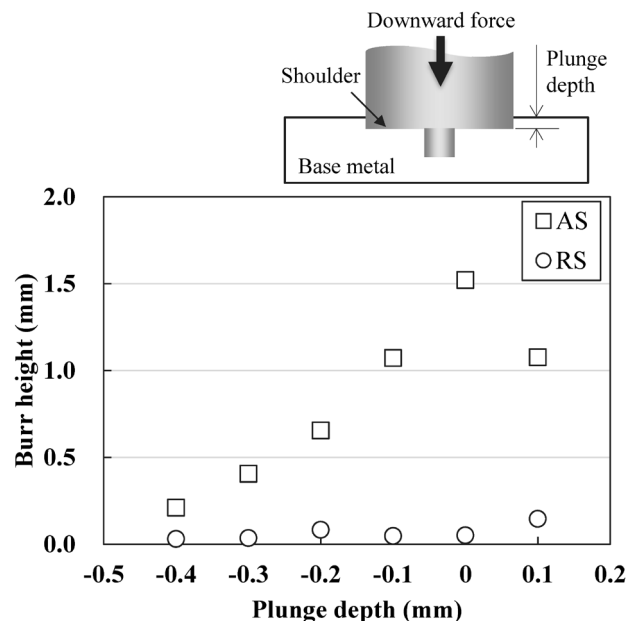


図6 バリ高さに及ぼすツール押し込み深さの影響
Fig.6 Relationship between plunger depth and burr height

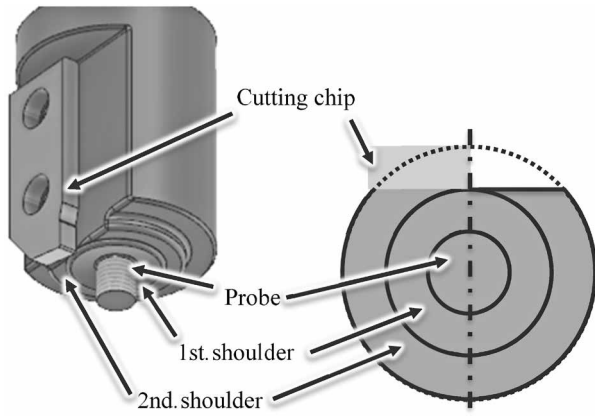


図7 切削チップ付き摩擦攪拌接合ツール
Fig.7 Friction stir welding tool capable of cutting

存が認められるが、開発ツールではバリの除去が確認された。本ツールを用いることで、工程数を増やさずにバリのない接合体を得ることが可能となる。

3. DASW (Dissimilar metals Arc Spot Welding)

3.1 DASWのメカニズム

図9にDASWのメカニズムを示す。上に予備加工穴を設けた鋼材、下にアルミ材を重ねて配置する。つづいて、上の予備穴部を介して下のアルミ材を狙い、アルミ溶接ワイヤを用いたアークスポット溶接によって下板のアルミ材を溶かしながら、アルミ溶接ワイヤから溶融アルミを予備穴内部に供給する。さらに予備穴を覆うように溶融アルミを鋼材表面にぬれ広がらせ、傘状の溶接金属とアルミ材が鋼材を嵌合(かんごう)することで接合が達成される。アーク溶接時間(アークタイム)はおおむね1.0~2.0秒程度である。本手法では接合時に鋼材よりも融点の低いアルミ材を溶融させるため、鋼材の溶融量は少なく、脆性(ぜいせい)的な金属間化合物の生成は抑制される。また、嵌合の接合機構をとるため継手強度には溶接金属の形状が主に影響しており、鋼材とアルミ材の界面に生じる金属間化合物の継手強度への影響は小さいと考えられる。

DASWの適用を想定する材料組合せの例として、上には超ハイテン鋼材や亜鉛めっき鋼材、ステンレス鋼材といった予備穴加工が可能な鋼系の材料、下には圧延板材、押出材、ダイキャストといった溶融溶接可能な種々のアルミ系の材料が挙げられる。接合原理上、アルミ材の溶接金属が接合強度の主な支配因子となるため、アルミの母材および溶接ワイヤの機械的特性が継手強度に与える影響が大きい。また、鋼材の変形能が低い場合、接合部にかかる曲げモーメントが小さくなり、継手強度が高くなる傾向がある。溶接時は、アルミ溶接ワイヤから供給される溶融アルミとアルミ母材間、および溶融アルミと鋼材表面間の濡れ性の違いから、形成される溶接金属の形状(余盛形状)が異なるため、材料の組合せに応じた溶接条件の調整が必要である。

DASWの接合上の利点として、片側アクセスがあげられる。上向き、立向きを含む全溶接姿勢にも対応していることから、設計や生産における自由度が高い。また、

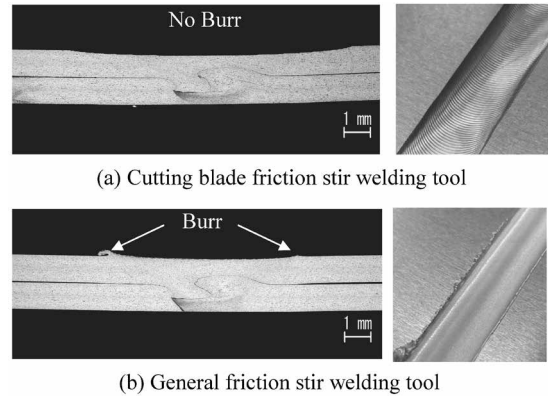


図8 接合体の断面マクロと外観写真
Fig.8 Cross-Sectional and surface photographs of aluminum specimens after friction stir welding

一般的なアルミ材の施工が可能なアーク溶接機とアルミ溶接ワイヤを使用できる。接合前プロセスは鋼材への予備穴加工のみであることから、既存の装置や技術を活用した安価でシンプルな異種金属接合法であるといえる。

3.2 継手強度特性

DASWの継手強度は、JIS Z 3136に準拠した引張せん断試験、JIS Z 3137に準拠した十字引張試験により評価した。引張せん断強さ(Tensile shear strength, 以下TSSと記載)の基準には、JIS Z 3140:2017アルミ合金のスポット溶接部の引張せん断強さ B級 平均値、CTSの基準にはTSSの基準の0.5倍の値を用いた。

供試材には270 MPa級鋼板(板厚1.4 mm)、AA6022相当アルミ合金板(板厚2.0 mm)を用いた。表1に示すA~Dの四種類の継手を作製し、溶接金属の形状が継手強度に及ぼす影響を調査した。溶接金属の形状のうち、溶接径は予備穴径を変えることで、表裏余盛高さ h_1 、 h_2 はそれぞれ溶融亜鉛めっき鋼板(継手D)、銅製のバックプレート(継手B)を使用することで調整した。なお、溶接径と予備穴径はおおむね一致することを確認している。溶接条件は、いずれもアルミ溶接ワイヤJIS Z 3232 A5356-WY(ワイヤ径 ϕ 1.2 mm)を用い、溶接電流156 A、アークタイム2.0 sec、シールドガス100%Arのパルスミグ溶接とし、溶接中のワイヤ狙い位置は予備穴中心で固定した。

図10に試験結果を示す。継手Aと継手Bを比較した結果、継手Aよりも予備穴径が大きく溶接径が大きい継手Bの方が、TSSが約50%高くなり、CTSは数%高くなった。これは同一の負荷荷重において溶接断面にかかる応力が小さくなったためと考えられる。つぎに、継手Cと継手Dを比較した結果、表余盛が高い継手Cが、TSS、CTSともに高くなった。破断形態の違いから、表余盛高さ h_1 が高い場合、表余盛に負荷される応力が小さくなり、表余盛方向へのき裂進展が抑制されることで継手強度が向上したと考えられる。また、継手BとCを比較した結果、裏余盛高さ h_2 が高いと、TSS、CTSともに高くなった。これは、裏余盛がアルミ板を補強する効果をもたらしたためと考えられる。

以上から、DASWの継手強度には溶接金属形状が影響

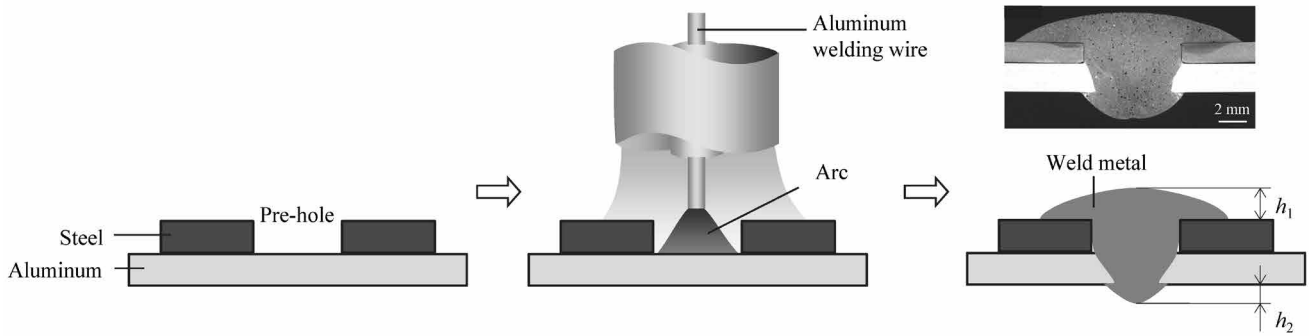


図9 DASWのメカニズム
Fig.9 Joining mechanism of DASW

表1 継手特性
Table 1 Joint characteristics

	Joint A	Joint B	Joint C	Joint D
Pre-hole dia.	5.0	7.0	7.0	7.0
h_1	2.9	2.8	2.4	0.8
h_2	0.0	0.0	1.8	2.7
Note	-	With Backplate	-	GI Steel

(Unit : mm)

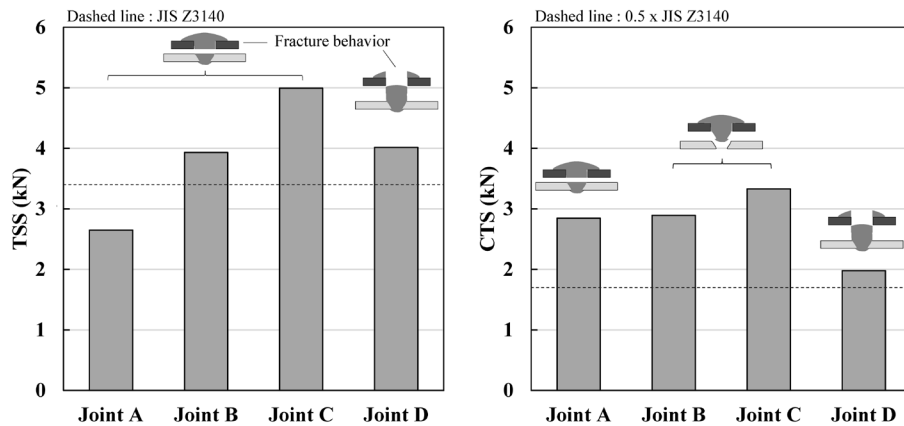


図10 DASWの継手強度
Fig.10 Joint strength of DASW

を与えており、継手強度向上には溶接径および表裏の各余盛高さの増大が効果的であることが示された。また、予備穴径 ϕ 7.0 mmとした場合、いずれの条件においてもアルミ材の抵抗スポット溶接のJIS基準強度以上の継手強度を得ることができた。実際の適用にあたっては、余盛の大きさの制約や継手強度などの要件に応じて溶接条件を選定するのが好ましい。また、レーザ変位計などを用いて余盛形状を測定し分析することで、おおよその継手強度を非破壊で予測することも可能である。

むすび = 自動車製造における新たなアルミ接合技術について、抵抗スポット溶接、摩擦攪拌接合、および異種金属接合法DASWの三つの方法を解説した。

抵抗スポット溶接では、通電時間の適正化が継手強度向上に寄与することを把握できた。摩擦攪拌接合では、新開発ツールによるバリ除去工程省略の可能性を見出すことができた。異種金属接合であるDASWでは新たなアプローチとして、既存の設備を活用しつつ、簡便で強度の高い接合を実現する方法を提案できた。

本稿で紹介した接合技術の改良が、自動車車体および関連部材の軽量化に寄与し、環境負荷物質の削減に貢献できることを期待する。

参考文献

- 1) 西野浩介. 三井物産戦略研究所. 世界で強化される自動車燃費規制とその影響. https://www.mitsui.com/mgssi/ja/report/detail/_icsFiles/afieldfile/2016/10/20/150706i_nishino.pdf. (参照2022-12-14).
- 2) 櫻井健夫. 軽金属. 2018, Vol.68, No.9, p.487-493.
- 3) 今村美速ほか. 溶接学会論文集. 1995, Vol.13, No.1, p.54-64.
- 4) 下田陽一朗ほか. R&D神戸製鋼技報. 2023, Vol.72, No.1, p.123-129.
- 5) 鈴木励一. 溶接学会誌. 2019, Vol.88, No.4, p.240-246.
- 6) 溶接学会軽構造接合加工研究委員会. 薄鋼板及びアルミニウム合金板の抵抗スポット溶接. 産報出版. 2008, p.7.
- 7) 佐藤賢治ほか. 溶接技術. 2018, Vol.66, No.3, p.59-64.
- 8) 青木拓朗ほか. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.1, p.88-91.
- 9) 後藤崇志ほか. 溶接学会誌. 2023, Vol.92, No.6, p.387-391.
- 10) 後藤崇志ほか. 第133回軽構造接合加工研究委員会講演資料. 2021-6-2, 溶接学会軽構造接合加工研究委員会, 2021, MP-696-2021.