

(論文)

鋼板とアルミ合金の異種金属接合法 = ダボスポット溶接法 =

New Dissimilar Metal Joining Method for Steel Sheet and Aluminum Alloy Using Resistance Spot Welding, Dimple Spot Welding



橋村 徹*¹ (博士(工学))
Toru HASHIMURA



勝間 秀人*²
Hideto KATSUMA



岩谷 二郎*³
Jiro IWAYA

To enable multi-material use in automotive bodies, we have developed a new method called dimple spot welding (DSW), for joining the dissimilar metals steel and aluminum alloy. The DSW results in a laminated structure of Fe-Al-Fe and uses a dimpled sheet and backing plate, both made of steel, to perform welding. We conducted a tensile-shear test and cross-tensile test. The following results were obtained: 1. The joining strength of DSW is strongly affected by the dimple height and hole diameter in the aluminum sheet, and 2. The joining strength of DSW is equal to or greater than that of the existing mechanical joining methods used in automobile manufacture.

まえがき = 輸送用機器が排出するCO₂量を削減・規制する取組みが進められている。自動車分野では各国で燃費規制が強化される傾向にあり、エンジン・パワートレインの高効率化と並行して、車体の軽量化が進められている。また、自動車の衝突安全基準の強化も重要な課題である。安全基準の強化に対応するには、車体骨格の強度やエネルギー吸収特性の強化ないし追加が必要となり、必然的に質量の増加を招く。すなわち、車体構造の強化は軽量化と相反する点があるため、これまで以上に材料や構造を見直した合理的な骨格構造が求められている。

近年、鋼板とアルミ合金板や樹脂複合材等を適材適所に用いた、いわゆるマルチマテリアル構造のボデーの採用が欧州自動車メーカーを中心に、生産台数の比較的多い車でも本格化してきた¹⁾。今後、日系自動車メーカーでも採用事例が増えてくるものと考えられている。

このようなマルチマテリアル化には、異なる材料を接合する技術が必要となる。とくに、これまで車体骨格の中心材料であった鋼板と、軽量化材料の中でも比較的低コストな金属材料であるアルミ合金板との接合技術のニーズが高いと考えられる。

いっぽう、鋼板とアルミ合金板の異種金属接合^{2)~4)}は融点や熱伝導率の違いにより直接的な溶融接合が難しい。また、鋼板とアルミ合金板の界面に脆弱(ぜいじゃく)な金属間化合物層が生成されるため、十分な継手強度を得るのが難しいなど技術的課題がある。現状では、鋼板とアルミ合金板の異種金属接合部に機械的接合法が多く使われている。欧州車で主に使われている機械的接合技術には、SPR (Self-Pierce Riveting) に代表されるリベットを使った接合法、タッピンねじ類似のリベットを使った接合法などがある。また、ポンチとダイスで金

属板同士をかshめて接合するクリンチングも高い強度が不要な箇所に使われている。

これらの新しい機械的接合法を導入するには新規の設備投資が必要であり、採用にはハードルがある。現在の車体接合で使用されている主要な設備は、抵抗スポット溶接機やアーク溶接機であり、これらの設備を活かす工夫が求められる。このため、我々は既存の抵抗スポット溶接機を用いた新しい異種金属接合法を開発した。これは、小さな突起形状をプレス成形で付与した鋼板を穴の開いたアルミ合金板と合わせ、裏側に鋼製当て金を用いてアルミ合金板を挟み込む方法でスポット溶接するものである。この接合法をダボスポット溶接 (Dimple Spot Welding, 以下DSWという) と呼ぶ。DSW工法の継手強度や接合メカニズムについて概説し、さらに他の異種金属接合法との強度比較結果について述べる。なお、本記事は文献5) に一部修正を加えたものである。

1. 実験

本章では、DSW工法評価のために行った試験体製作の詳細と評価の方法について説明する。

1.1 供試材と機械的性質

図1に供試材製作に用いる素材の形状を示す。また、

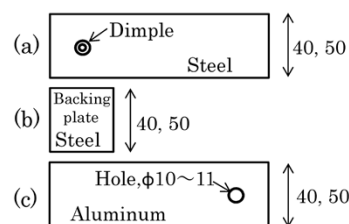


図1 ダボスポット接合の試験材サイズ
Fig. 1 Specimen size for dimple spot welding

*¹ 技術開発本部 自動車ソリューションセンター *² 自動車ソリューションセンター (現 鉄鋼事業部門 技術開発センター 鋼板開発部) *³ 鉄鋼事業部門 薄板商品技術部

表1に供試材の板厚と機械的特性を示した。図1(a), (b)は引張強さ590 MPa級の合金化溶融亜鉛めっき鋼板(以下, GA590という)を用いた。(a)には次節で詳説するダボ形状を付与し, (b)は平板のままとした(当て板, Backing plate)。同図(c)は, A5052アルミ合金板(以下, アルミ板という)で, (a)のダボを嵌合(かんごう)させるための穴を事前に開けておく。

1.2 ダボ形状の付与とアルミ板穴径

図2に概要を示す金型を用いて, プレス成形により鋼板にダボ形状を付与した。ダボ高さ(図3参照)は, パンチの突き出し量で変化させた。今回の試験では, ダボ高さを2.0 mm, 2.2 mm, 2.4 mmと変化させた。また, アルミ合金板の穴径 ϕ は10.0 mm, 10.5 mm, 11.0 mmと変化させた。

1.3 引張試験片

引張せん断試験片を図4(a)に示す形状寸法で製作した。JIS Z3136に準拠し, GA590(長さ82.5×幅40 mm)とアルミ板の端部40 mmを重ね, GA590に付与したダボ形状をアルミ板の穴に嵌合させて, 裏側から図1(b)で述べた当て板でアルミ板を挟み, 鋼板-アルミ板-鋼板の積層とした。積層部にある鋼板製ダボ形状と当て板との間で鋼板間同士のスポット溶接を行い, 鋼板とアルミ板の異種金属接合体を作った。作成した試験片を用いて, 静的に引張せん断強度(Tensile shear strength, 以下TSSという)を求めた。

また, 十字引張試験片形状を図4(b)に示す。JIS Z3137に準拠し, 長さ150×幅50 mmのGA590板中央部のダボ形状とアルミ板試験片中央部の穴を嵌合し, 当て板でアルミ板を挟み込んで同様に積層構造にした。積層した部位のダボ形状と当て板との間をスポット溶接で接合した。この試験片を用いて十字引張強度(Cross tension strength, 以下CTSという)を求めた。引張試

験速度はTSSおよびCTS試験ともに5 mm/minとした。

1.4 スポット溶接条件

溶接に用いた抵抗スポット溶接機の電極形状を図5に示す。DR形(元径: ϕ 19.0 mm, 先端曲率半径: ϕ 9.5 mm, 先端径: ϕ 6.0 mm)で, クロム銅製の溶接電極である。

溶接にあたり, 電極間の加圧力を4.5kNと一定に保持し, 初期立ち上がりスロープなしで電流8.5kA, 通電時間10 cycles(60Hz)で通電し, 次に10.5 kA - 10 cycles, 最後に11.5 kA - 10 cyclesと段階的に電流を上げた。引張せん断試験片の抵抗スポット溶接施工の概略図を図6に示した。また, 図6のA-A断面写真の例を図7に示した。

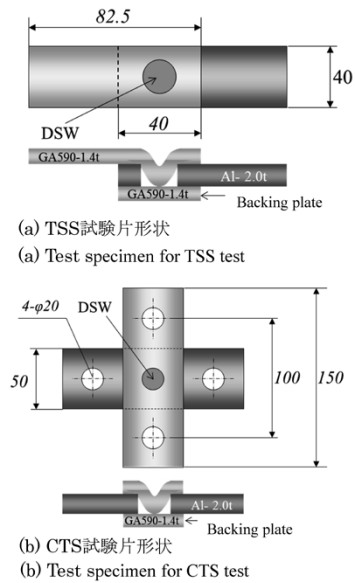


図4 ダボスポット溶接の試験片形状
Fig. 4 Specimen for dimple spot welding

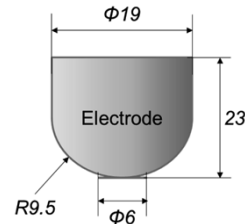


図5 スポット電極形状 (DRタイプ)
Fig. 5 Shape of electrode tip (DR type)

表1 試験供試材の機械的特性
Table 1 Mechanical properties of test specimen

Materials	Thickness (mm)	YS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)
GA590	1.4	405	622	28.2
Al-A5052	2.0	213	261	12.2

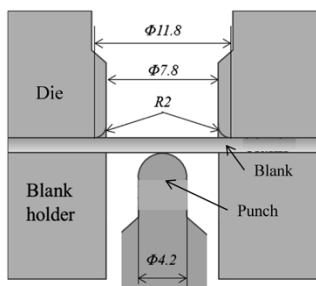


図2 ダボ形状の製作ダイス断面
Fig. 2 Cross section drawing of dimple forming die

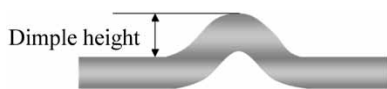


図3 成形後のダボ形状の概念図
Fig. 3 Schematic cross section drawing of dimple shape after forming

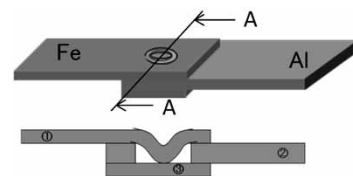


図6 ダボスポット溶接されたTSS試験片の概念図
Fig. 6 Schematic drawing of TSS test specimen of DSW
① Steel, ② Aluminum, ③ Steel backing plates

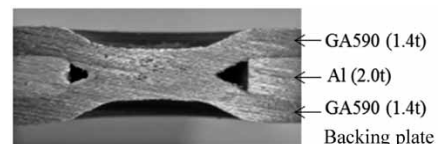


図7 図6のA-A断面のマクロ写真
Fig. 7 Macro-photograph of cross section A-A in Fig. 6

2. 実験結果

2.1 引張せん断強度

ダボ高さを変化させて作成した供試材の種類、および試験後の破断形態 (B: Base metal fracture, P: Plug fracture, I: Interface fracture) を表2に示した。また、TSS試験における破断形態Bの継手母材破断の外観例を図8に示した。

試験で得られたTSS (N数2の平均値) とダボ高さ、アルミ板穴径の関係を図9に示した。TSSはアルミ板穴径が大きくなるほど高くなる。穴径φ11.0 mmにおけるダボ高さ2.4 mmの一部を除いた試験体でアルミ板材の破断が生じた。穴径φ10.0 mmのときにはTSSは低く、溶接部の界面破断が生じた。いずれのアルミ板穴径の場合においても、ダボ高さが大きくなるほどTSS値は低い傾向が見られた。とくに、穴径φ10.5 mmの場合で顕著であった。

2.2 十字引張強度

CTS試験後の継手溶接部の破断面 (破断形態P, I) を図10, CTS (N数2の平均値) と1.2節で示したダボ

表2 試験片板組みと破断状態

Table 2 Combination of base metal and fracture appearances

No.	GA590		Al		Test items / Fracture appearance	
	Dimple height (mm)	Al-hole diameter (mm)	Tensile shear test (N=2)	Cross tension test (N=3)		
1	2.0	10.0	I, P	I, I, I		
2		10.5	B, B	P, P, P		
3		11.0	B, B	P, P, P		
4	2.2	10.0	I, I	I, P, P		
5		10.5	P, I	P, I, P		
6		11.0	B, B	P, P, P		
7	2.4	10.0	I, I	I, P, I		
8		10.5	P, P	P, I, P		
9		11.0	B, P	I, P, P		

B: Base metal fracture, P: Plug fracture, I: Interface fracture

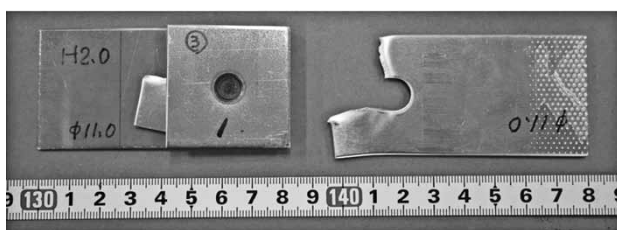


図8 TSS試験後の母材破断の例

Fig. 8 Basemetal fracture appearance after TSS tests

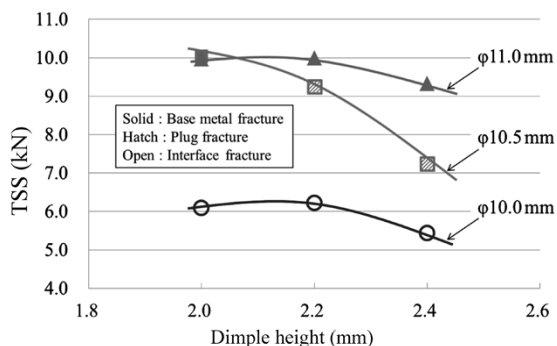


図9 TSSに及ぼすダボ高さ及びアルミ板穴径の影響

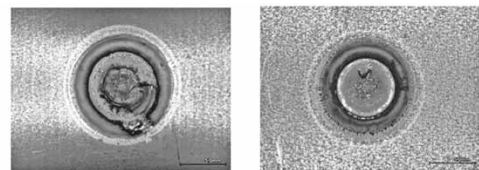
Fig. 9 Effect of dimple height and Al-hole diameter on TSSs

高さ、アルミ板穴径の関係を図11に示した。ダボ高さ2.2 mmの一部を除き、アルミ板穴径が大きくなるほどCTSは高い傾向が見られる。破断形態は穴径が大きくなるにつれ界面破断からプラグ破断に移行している。また、ダボ高さが2.0 mmではCTSの最大値と最小値との差は約5.0 kNであるが、ダボ高さが2.4 mmでは、CTSの最大値と最小値との差は小さい。

3. 考察

3.1 溶接メカニズム

DSW工法の開始時には、ダボ形状と当て板間は点接触状態となっている (図12 (a))。双方ともに鋼板のため、鉄-鉄間の抵抗スポット溶接が行われる。溶接の初期段階には局所的な点接触の部位が発熱し、この発熱により接触部位から溶融が始まると考えられる。つぎに、上下電極の加圧によって溶融部の軟化した鋼板が変形して接触部位が、図12 (b) の横矢印方向に広がる。接触部位面積の増加に伴う発熱の低下を抑えるために段階的な電流上昇を行うことにより発熱を高く保持でき、増大した接触部位をさらに溶融できる。最終的には電極での加圧保持によって、溶融した接触部位を固めて接合が完了となる (図12 (c))。なお、本溶接条件では、鉄-Al界面に溶融は生じず、金属間化合物も確認されていない。このようにDSW工法には、ダボ形状の変形プロセ



(a) Plug fracture (b) Interface fracture

(a) No.3: Dimple height 2.0mm, Al-hole diameter φ11.0mm
(b) No.1: Dimple height 2.0mm, Al-hole diameter φ10.0mm

図10 CTS試験後の破断状況の例

Fig.10 Fracture appearance after CTS tests

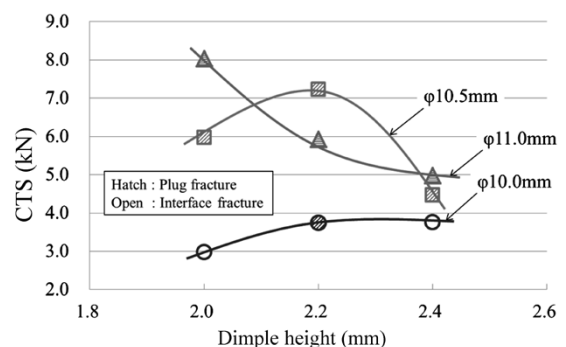


図11 CTSに及ぼすダボ高さ及びアルミ板穴径の影響

Fig.11 Effect of dimple height and Al-hole diameter on CTSs

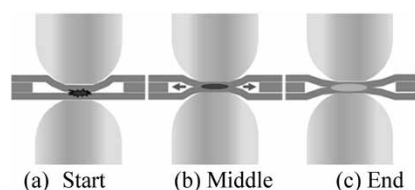


図12 ダボスポット溶接プロセスの概念図

Fig.12 Image of dimple spot welding process

スを理解し、ダボ高さと穴径の適切な量を把握することが肝要である。この二つのパラメータの最適値とダボ変形プロセスに着目して以下の検討を進めた。

3.2 引張せん断強度

アルミ板穴径がφ11.0 mmのときには、ダボ高さに関係なく、約10.0 kNとほぼ一定のTSSを示している。また、ダボ高さ2.4mmの一部を除いて、ほとんどの試験体でアルミ板材が破断した。アルミ板の穴径がφ10.5 mmでは、ダボ高さ2.0 mmのときにアルミ板材が破断した。この場合には、TSSはアルミ板材の強度に依存していると考えられる。いっぽう、アルミ板穴径がφ10.0 mmのときには、ダボ高さに関係なくすべて界面破断した。アルミ板穴径が小さくなるとダボ形状と当て板間の溶接面積が小さくなり、この部位から界面破断が生じてTSSが低下したと思われる。これらの結果から、穴径φ10.5 mmにおける最適なダボ高さは2.0 mm、穴径φ11.0 mmにおける最適なダボ高さは2.0~2.4 mm程度であるとされる。

3.3 十字引張強度

図11では、穴径φ10.0 mmにおいてはいずれもCTSが低くなっている。この原因は、穴径が小さいために必要なサイズの溶接面積を確保できなかったためと考えられる。

また、ダボ高さが2.0 mmのときには、ダボ頂点部と当て板は点接触状態となっている(図13鎖線部分)。このため、通電時に鋼板が軟化して溶接部を段階的に大きくでき、結果として積層しているアルミ板を強固に挟み込むことができる。この状態でアルミ板穴径を大きくするほどCTS値が大きくなったと考えられる。

いっぽう、ダボ高さ2.4 mmのときは、ダボの断面線長(図13中の実線部分)が長く、適正サイズであるダボ高さ2.0 mmと同じ溶接条件でこのダボを溶接しても、線長の長い分を圧接するための電流や加圧力が不足する。このため、ダボ高さ2.4 mmのときにはダボが潰しきれず、接合力が不十分で、積層しているアルミ板を強固に挟み込むことができない。この結果、穴径に関わらずCTSが低くなったと考えられる。

以上の結果から、ダボ側の板とアルミ板および当て板との間に隙間がなく、かつダボ形状と当て板が点接触している状態が、溶接前の姿として好ましいことがわかった。また、この場合には接合部の鋼板どうしの接合力が強くなった結果としてCTS強度が高くなると考えられ

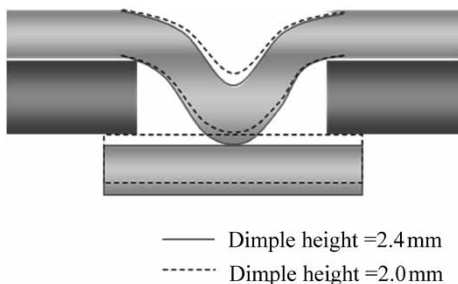


図13 ダボ高さの差による断面の差異概念図

Fig.13 Schematic cross section drawing for difference of dimple height

る。

3.4 異種金属接合強度の比較

DSWのTSSおよびCTSでは破壊形態が比較的安定しており、かつ比較的高い強度を有しているダボ高さ2.0 mmでアルミ板穴径はφ11.0 mmとφ10.5 mmの平均値を代表値として以下の議論を進めることにする。

自動車の骨格に用いられている他の異種金属接合法には、クリンチング³⁾ やリベット系の接合法 (SPR, ImpAcT[®]⁶⁾, FDS⁷⁾, FSSW³⁾ など、あるいは接着剤を使った方法^{3), 9)} などがある。公開文献やウェブサイトから取得した鋼板とアルミ板の接合データの板組み例を表3に示した。表3中の接合方法欄に付記した番号は引用文献名を示している。これらの文献から得られたそれぞれのTSS, CTSとDSW法の強度を以下の方法で比較して、図14および図15に示した。

表3の複数の文献データでは、鋼板およびアルミ板の材質や板厚など、板組みが統一されていない。一般的にスポット溶接法では、ナゲット径と接合強度に相関があると言われているが、表3のRSW-A, RSW-Bは鋼板とアルミ板を抵抗スポット溶接で直接異種金属接合したも

表3 文献から得られた各種異種金属接合の板組
Table 3 Material combination in various dissimilar metals joints obtained from literature

	Joining methods	Steel/ Aluminum	Thickness(mm)
Spot Welding	RSW-A ⁽⁴⁾ (Resistance spot welding)	SPCC	1.0
		A-6K21	1.0
	RSW-B ⁽⁴⁾ (Resistance spot welding)	Aluminized Steel	1.0
		A-6K21	1.0
	DSW (Dimple spot welding)	GA590	1.4
A-5000 series		2.0	
Mechanical Joining	SPR ⁽³⁾ (Self Pierce Rivet)	Mild Steel	1.0
		A-5000 series	1.0
	ImpAcT ⁽⁶⁾ (Rivtac [®])	H340LAD(steel)	2.0
		AlMg ₃	1.2
	FDS ^{* (8)} (Flow Drill Screw)	A-AC300	1.5
		A-AC300	3.0
	FSSW ⁽³⁾	Super Dyma(steel)	0.7
		A-6000 series	1.0
Clinching ⁽³⁾	CR270	unknown	
	A-5000 series	unknown	
Adhesive Bonding	Adhesive ^(3), 9)	SPC270	0.8
		A-6000 series	1.2

* Al-Al similar metals joining

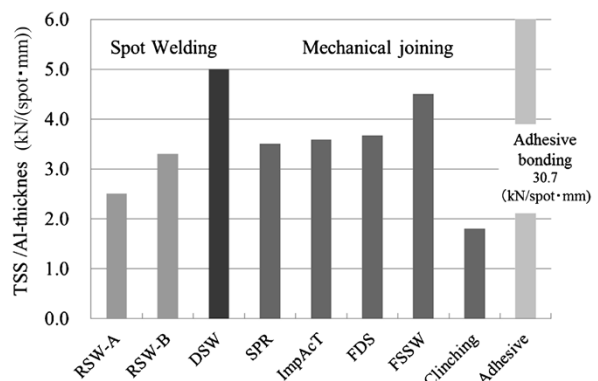


図14 各種異種金属接合試験体のTSS
Fig.14 TSSs of various dissimilar metals joints

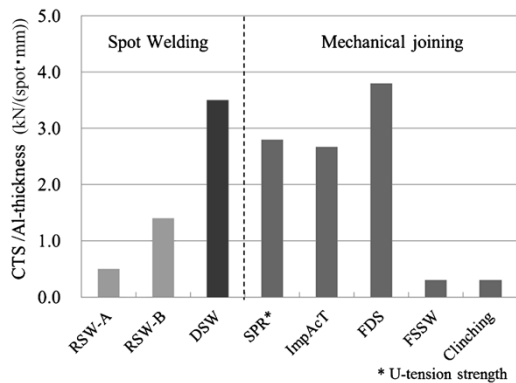


図15 各種異種金属接合試験体のCTS
Fig.15 CTSs of various dissimilar metals joints

のである。いっぽう、DSWは鋼板同士のスポット接合のため、ナゲット径で両者を直接比較する意味は小さいと思われる。このため、ここでは表3の中で材料強度が低いAl材の板厚で除算した単位板厚あたりのスポット一点の強度とした。また、DSW継手強度も同様にして図14および図15で比較した。リベット系接合法もリベット径や材質、板厚などの板組みが異なり一様ではない。しかし、それぞれの接合法固有の得意な板厚や板組みが存在し、文献にはそれらの代表値が掲載されているものと考えた。このため、同様にアルミ板厚で除して一点あたりの強度として算出し、比較を行った。なお、文献中に板厚が記載されていない場合は、1.0 mmと仮定した。

図14からDSWのTSSは機械的接合法と比較して同等以上の強度を保有することがわかる。また、図15からDSWのCTSはFDSの強度の公表値よりもやや劣るものの、その他の方法と比較して同等以上の継手強度を持つ接合法であることが分かる。欧州車で主に使われている他の機械的接合法の継手強度と同等以上であれば、DSWの使用によって、DSWの利点である接合点数を少なく抑えることができる。

3.5. DSW接合法の課題および発展

DSW接合法は、従来の鋼-鋼間のスポット溶接設備を用いることが可能であり、新規の設備投資を抑えることが期待できる。いっぽうで、DSWはダボ形状をプレス成形する必要や、嵌合させるアルミ合金板側の穴も必要となる。これらの作業は工程増を招く可能性があるが、ダボ形状の付与やアルミ穴加工は、板のプレス工程と同じ工程で対処できると考えている。

また、鋼材とアルミ合金の接触部に生じる電食の抑制は大きな課題であるが、接着剤を両金属の界面間に塗付することで対策が可能である。機械的接合法でも同じ腐食対策が行われており、強度も向上する。ただし、加圧力と通電条件など溶接条件の最適化を別途検証する必

要がある。

本技術は鋼板側の強度に影響されにくいいため、機械的接合法では対応が比較的難しい高張力鋼板とアルミ板の接合部への適用が期待される。また、アルミニウムとステンレス、アルミニウムとチタンなど、他の異種金属接合への適用も可能である。電源をスポット溶接以外に設定することも考えられ、さらなる発展が期待される。

むすび = ダボ形状と抵抗スポット溶接を使ったDSW異種金属接合技術を開発した。DSWの接合条件や接合メカニズムについて検討し、他の接合方法と強度の比較を行った。

特徴と今後の課題、展望を以下にまとめる。

- 1) DSWは従来設備である鋼用の抵抗スポット溶接機を用いて、高張力鋼板等とアルミ合金板の異種金属接合を行うことができる新接合法である。
- 2) DSWは鋼板をプレス成形したダボ形状とし、当て金および下穴を開けたアルミ板を用いて行われる。アルミ板を鋼で挟み込む構造を持ち、その継手強度はダボ高さやアルミ板穴径に影響を受ける。
- 3) ダボ側の板とアルミ板、当て板との間に隙間がなく、かつダボ形状と当て板は点接触している状態がDSW接合前の姿としては最適であった。
- 4) 文献値と比較した結果、DSW接合法のTSSおよびCTSは、従来の機械的接合法と同等またはそれ以上の強度を有する優れた接合法であることが分かった。
- 5) 接合界面に接着剤を塗布することによって、DSW接合部位の電食抑止に対応できると考えられる。この際には、溶接時の電流条件の最適化が課題となる。

参考文献

- 1) 橋村 徹. 自動車技術会フォーラムテキスト. 2016. No.16 FORUM-Y5, p.43-46.
- 2) 宮本健二ほか. 溶接学会論文集. 2014, 第32巻, 第2号, p.83-94.
- 3) 崎山達也ほか. 新日鉄技報. 2012, 第393号, p. 91-98.
- 4) 岩瀬哲ほか. R&D神戸製鋼技報. 2007. Vol.57, No.2, p.56-60.
- 5) 橋村 徹ほか. 自動車技術会論文集. 自動車技術会, 2017. Vol.48, No.5, p.1149-1154.
- 6) BÖLLHOFF, RIVTAC, <https://www.boellhoff.com/files/pdf/rivtac-automation-p-en-6810.pdf>. (参照 2016-03-03).
- 7) エジヨットジャパン合同会社. EJOT FDS®, <http://www.ejot-industries.jp/products/fds/>. (参照2017-05-18).
- 8) H. Schubert, et al. : Flexible material joining technology for tomorrow's innovative lightweight design, Mercedes-Benz, Bad Nauheim, (2012). http://www.european-coatings.com/content/download/106836/1948837/file/016_schubert.pdf. (参照2016. 3. 3)
- 9) Dow Automotive : Technical Datasheet, Dow Europe GmbH, Edition 03, p.1-3, (2012).