

(解説)

一般的な異種金属接合法の種類と比較

Comparison of Methods for Joining Dissimilar Metals



小橋泰三*¹
Taizo KOBASHI



岩瀬 哲*²
Tetsu IWASE



前田恭兵*³
Kyohei MAEDA

The regulations on carbon dioxide emissions have become increasingly stringent to protect the environment, and efforts are being made to further reduce the weight of automobiles. Multi-material structures are being increasingly employed in European and other countries as a way of realizing weight reduction, and various technologies are being used for joining dissimilar metals. Hence, we conducted a comparative study on several dissimilar-material joining methods in practical use, namely, SPR, Tuk-Rivet[®], FDS[®], RIVTAC[®] and EJOWELD[®]. The results have revealed that these methods have differences in types of materials and the application range of the strength class, as well as in their joining performance.

まえがき = 地球環境保護の観点から二酸化炭素の排出制限の規制が各国で厳しくなっており、自動車をはじめとする輸送機器における軽量化の要求は年々高まっている。いっぽう、自動車に求められる安全性に関する基準も一層厳しくなり、搭乗者や歩行者に対する被害の軽減が求められ、補強部材の追加など重量増の要因となっている。

これらの相反する要求を満たすべく、必要な性能に対して最適な材料を用いるマルチマテリアル設計が指向されつつある。具体的には、最も使用されている軟鋼や高張力鋼に加え、さらに高強度化した超ハイテン鋼やホットスタンプ用鋼、密度が小さい非鉄材料としてアルミニウム合金、マグネシウム合金やCFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) などが挙げられる。

ここに挙げた様々な素材を成形加工した後は、ほぼ接合の工程が必要となる。しかし、異材接合は非常に難しいことが多い。例えば、最も多い組み合わせとして鋼とアルミニウム合金を接合しようとする場合、溶融接合法ではFeとAlの金属間化合物が生成し、その性質が極めて脆(もろ)いため溶接部がはがれやすく、事実上溶接が不可能であることは良く知られている。

この問題に対し、アルミニウム合金側は溶接材料と溶融接合せ、鋼とアルミニウム合金間は溶接材料と溶けあうことのない“ろう付”を行うレーザーブレイジング溶接^{1), 2)}や、溶接入熱の制御により金属間化合物の厚さを制御し抵抗スポット溶接を行う方法³⁾などの報告がある。しかしながら、これらの技術は接合条件範囲の狭さなどの問題から実用化には至っていない。

いっぽう、固相接合は溶融溶接と異なり金属間化合物が生成しにくいいため、一定の性能を持つ継手を形成することができる⁴⁾。自動車において実用化されている固相

接合の異材接合技術として、FSW (Friction Stir Welding) がある。点溶接形のFSWはトランクリッドへの適用例⁵⁾がある。また、線溶接形のFSWでは足回り部材のサブフレームへの適用例⁶⁾がある。このように、固相接合を適用することで鋼とアルミニウム合金を接合することは可能である。しかし、そのためには高度な圧力制御が必要となり、製品を組み立てる際の部品形状や精度の工業的なばらつきを考慮に入れて施工することは困難を伴う。

このように国内では異材の直接接合が指向されているのに対し、欧州を中心に広がりを見せているのが、リベットなどの鋳(びょう)を用いる機械締結による接合技術である。代表的な技術であるSPR (Self-Pierce Riveting) をはじめとして様々な種類が実用化されてきている。本報では異種金属接合用機械締結法の技術について調査した結果を述べる。

1. 異種金属機械締結法の種類

異種金属を締結する最もシンプルな手段は、被接合体である鋼やアルミニウム合金の両者を鋳でかしめることである。また、別の手段として、アルミニウム合金をかした鋼製の鋳と鋼板材を溶接・接合するという方法がある。

1.1 SPR (Self-Pierce Riveting)

SPRは最も一般的な機械締結法であり、自動車においては異材接合部だけでなく、アルミニウム合金同士の接合にも適用される方法である。フランジが付いた管状のリベット(図1(a))を反対側にダイスをセットした状態で重ねた継手に対して圧力を加えて打ち込み、板厚内部で塑性変形させ、板同士がリベットを介してかしめられる機構である(図1(b))。従来は、打込荷重の不足

*¹ 神鋼溶接サービス(株) 技術調査部 *² アルミ・銅事業部門 技術部 *³ 技術開発本部 自動車ソリューションセンター

でリベットを十分に打ち込めなかったり、リベットが高強度材料に対して座屈したりするため、590MPa級鋼を超える高強度の材料には適用できない短所があった。しかし近年は改良され、980MPa級鋼やそれをを超える強度の材料にも適用されるようになってきている。

1.2 Tuk-Rivet[®]^{注1)}

SPRの打込部が管状であるのに対し、中実の円柱にフランジが付いた形状をした鉚（図2 (a))を打ち込むのがTuk-Rivet[®]である。SPRと同様に自己せん孔型のリベットであるため、中実リベットのSPRとして分類されることもある。本リベットは継手素材を打ち抜いた後、その場所に鉚を置換するような構造となる（図2 (b))。そのため、リベットにはねじのような溝が施されている場合が多く、その形状によって板との間にかしめ構造を形成して接合する。打込側およびその反対側においても板面に対してフラットな状態とすることができるため、ルーフやピラーの周辺などの美観が求められる箇所に用いられることが多い。

1.3 FDS[®]^{注2)} (Flow Drilling Screw)

SPRやTuk-Rivet[®]は継手の表裏からはさみ込む、いわゆる両面アクセス法である。これに対して図3に示すFDS[®]は、裏側にツールを侵入させる必要がない、いわゆる片面アクセスの施工法である。そのため、被接合部材が角材やパイプのような閉断面部材でも適用可能である。鉚はねじのような形状の鉚を回転させながら挿入し、完全に貫通させて締結させる。上板が高張力鋼の場合は板を貫通させることが困難となるため、あらかじめ穴を開けておいて施工する。SPRと同様、比較的汎用的な施工法として知られており、異材だけではなくアルミニウム合金同士の接合にも用いられる。

1.4 ImpAcT (Impulse Accelerated Tacking)

メルセデスベンツで採用されたことで知られるようになった技術であり¹⁰⁾、商品名のRIVTAC[®]^{注3)}の名でも

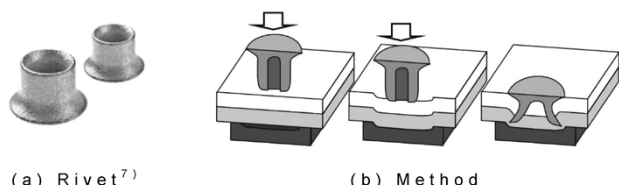


図1 SPR (Self-Pierce Riveting)
Fig. 1 SPR (Self-Pierce Riveting)

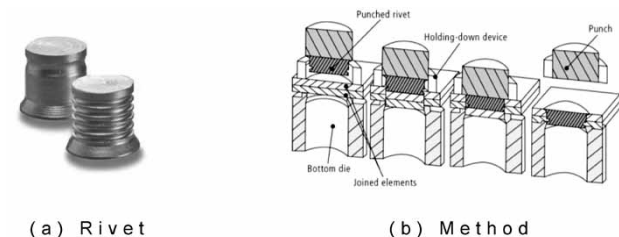


図2 Tuk-Rivet[®]⁸⁾
Fig. 2 Tuk-Rivet[®]⁸⁾

脚注1) Tuk-Rivet[®]はKerb-Konus-Vertriebs-GmbHの登録商標である。

脚注2) FDS[®]はEJOT GmbH & Co. KGの登録商標である。

周知されている。鉚は釘（くぎ）とほぼ同様な形状となっている（図4 (a)）。施工法としても回転させることなく打ち込むだけというシンプルなものである（図4 (b)）。FDS[®]と同様に片面施工が特長であり、高速で打ち込むことから施工時間も比較的短く高効率となっている。また、超高張力鋼にも打ち込むことが可能で、あらかじめ穴を開ける必要はなく、材料や強度の観点では適用範囲が広い。ただし、大きな打撃音の発生が短所とされる。

1.5 FEW (Friction Element Welding)

エジョット社の開発したEJOWELD[®]^{注4)}はAudiのQ7に初めて採用されたことで知られる技術である¹²⁾。施工法は2種類（図5）あり、一つは、フランジに円柱状の軸が付与された鋼製のリベットを回転させながら上板のアルミニウム合金に圧入させ、下板の鋼板面に接合する両面アクセス法（CFF）である。もう一つは、先端が釘のようにとがっているリベットを回転させながら上板のアルミニウム合金および下板の鋼板を貫通させ、リベット軸の周囲と鋼板を接合させる片面アクセス法（CFP）である。リベットと下板鋼板の接合原理は摩擦圧接と同様であり、金属結合による接合となっているこ

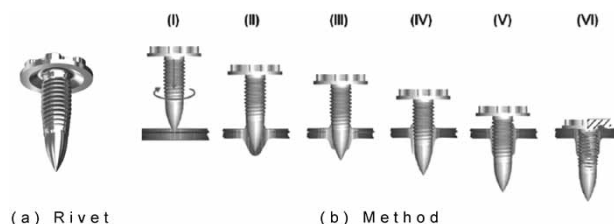


図3 FDS[®] (Flow Drilling Screw)⁹⁾
Fig. 3 FDS[®] (Flow Drilling Screw)⁹⁾

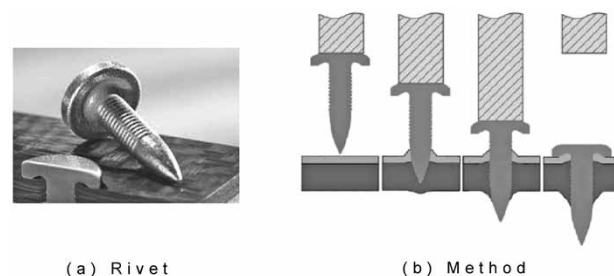


図4 RIVTAC[®]¹¹⁾
Fig. 4 RIVTAC[®]¹¹⁾

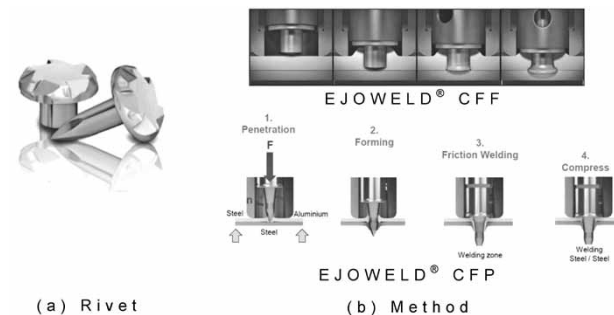


図5 FEW (Friction Element Welding)¹³⁾
Fig. 5 FEW (Friction Element Welding)¹³⁾

脚注3) RIVTAC[®]はBöllhoff Automation GmbHの登録商標である。

脚注4) EJOWELD[®]はEJOT GmbH & Co. KGの登録商標である。

とから、接合部の強度は高い。なお、上板がアルミニウム合金の場合は予備穴なしで接合できるが、樹脂の場合はあらかじめ穴を開けておく必要がある。

2. 各接合法の比較試験とその条件

各接合法の接合性能を把握するため、同一基準で継手を作製し、強度などの試験を行った。

2.1 接合法

接合法は、SPR、Tuk-Rivet[®]、FDS[®]、RIVTAC[®]、EJOWELD[®] CFF、CFPの6種類とした。

2.2 継手種類

表1に継手種類を示す。アルミニウム合金はAA6022-T4とし、1水準だけ(No.1)板厚を1.2mmとし、それ以外の板厚は2.0mmとした。鋼は母材の引張強さが590MPa級、980MPa級、1500MPa級の3水準とし、それらを組合せた。SPR、Tuk-Rivet[®]、およびFDS[®]は軸径が同一のφ5mmの鉚を選定した。RIVTAC[®]、EJOWELD[®] CFF、およびCFPはサイズが1種類であり、それぞれφ3mm、φ4.55mm、φ3.2~3.4mm(テーパ状)である。また、鉚の材質やダイスの形状などは被接合部材に応じて選定した。また、一部、接着材を併用した場合に継手に及ぼす影響を調査するため、No.2の条件と板組は同じで接着材を併用した条件No.3を実施した。なお、接着剤はエポキシ系のDOW製BETAMATETM1630を用い、鉚を中心にφ40mmの円弧状に塗布し、その後150℃まで昇温して固化させた。

2.3 評価項目

作製した継手に対して、断面マクロ試験(JIS Z 3139)、引張せん断試験(JIS Z 3136)、および十字引張試験(JIS Z 3137)を行った。これらは抵抗スポット溶接では基本的な評価方法であり、同様の評価を行うこととした。

3. 各接合法の比較試験結果

3.1 施工性

すべての接合法の施工結果を表2に示す。SPRは今回行った条件では、上板が鋼の場合980MPa級まで接合が可能であったが、下板が鋼の場合980MPa級は鉚が下板に十分に刺さらず締結することができなかった。

Tuk-Rivet[®]はほとんどの条件で施工することが可能であった。しかしながら、下板に鋼を配置した場合は鉚と鋼板間でかしめがなされていないことが、後述する断面マクロ試験で分かった。

FDS[®]は、下板が鋼の場合590MPa級まで締結可能であったが、980MPaを超える材料については鉚が材料を貫通することができず、締結することができなかった。いっぽう、上板が鋼の場合、鉚が上板を貫通するときに発生するバリを抑えることが困難であった。そのため、あらかじめ上板に穴を開けた状態で接合し、すべての種類の継手について試験体を作製した。

RIVTAC[®]は今回行ったすべての条件で施工が可能であった。ただし、1500MPa級鋼を施工した場合は火花

表1 継手種類
Table 1 Joint type

No.	Upper sheet (type, thickness)	Lower sheet (type, thickness)	Adhesive
1	AA6022, 1.2 mm	590MPa-class steel, 1.4 mm	without
2	AA6022, 2.0 mm	590MPa-class steel, 1.4 mm	without
3	AA6022, 2.0 mm	590MPa-class steel, 1.4 mm	with
4	590MPa-class steel, 1.4 mm	AA6022, 2.0 mm	without
5	AA6022, 2.0 mm	980MPa-class steel, 1.4 mm	without
6	980MPa-class steel, 1.4 mm	AA6022, 2.0 mm	without
7	AA6022, 2.0 mm	1500MPa-class steel, 1.4 mm	without
8	1500MPa-class steel, 1.4 mm	AA6022, 2.0 mm	without

表2 施工性の評価結果
Table 2 Evaluation results of each methods

No.	Upper sheet (type, thickness)	Lower sheet (type, thickness)	SPR	Tuk-Rivet [®]	FDS [®]	RIVTAC [®]	EJOWELD [®]	
							CFF	CFP
1	AA6022 1.2 mm	590 steel 1.4 mm	○	△	○	○	○	△
2	AA6022 2.0 mm	590 steel 1.4 mm	○	△	○	○	○	○
4	590 steel 1.4 mm	AA6022 2.0 mm	○	○	○*	○	—	—
5	AA6022 2.0 mm	980 steel 1.4 mm	×	△	×	○	○	×
6	980 steel 1.4 mm	AA6022 2.0 mm	○	○	○*	○	—	—
7	AA6022 2.0 mm	1500 steel 1.4 mm	×	—	×	○	○	×
8	1500 steel 1.4 mm	AA6022 2.0 mm	×	○	○*	○	—	—

○:Success ~ △ ~ ×:failure

—:Exclusion from application, *:With pre-hole

が散るのが目視で確認された。

EJOWELD[®] CFFは、基本的には下板が鋼の継手でしか使用できない工法であり、今回行った範囲ではすべての継手で施工が可能であった。いっぽう、CFPについてはNo.1およびNo.2しか接合できなかった。これらの結果より、施工条件の特徴によって適用可能な継手種類が異なることを確認した。

3.2 断面マクロ試験

No.2の各接合方法の断面マクロ試験結果を図6に示す。なお、図6(c), (e), (f)はピクリン酸アルコールでエッチングを施しているが、それ以外はエッチングなしで観察している。

図6(a)のSPRは、鋸のフランジ部が板表面まで打ち込まれているうえに、鋸の脚が下板にささっていることが確認でき、理想的な結合状態になっている。図6(b)のTuk-Rivet[®]はフランジ部が板表面まで打ち込まれているものの、鋸のねじ部と下板の鋼との間にすき間があり、その間のかしめ状態が十分ではない。図6(c)のFDS[®]は上板のアルミニウム合金が塑性流動によって穴部にねじ山を形成し、相互にかみ合った状態になっている。しかし、鋼板側についてはTuk-Rivet[®]と同様に鋸のねじ部と下板の鋼との間にすき間がある状態になっており、かしめ状態が不十分となっている。図6(d)のRIVTAC[®]はそのフランジ内部の脚部が上板のアルミニウム合金に十分に接触した状態になっている。また、リベットが貫通した部分に板が盛りあがって王冠状を呈し、理想的なかしめ状態となっている。図6(e)のEJOWELD[®] CFFは、鋸のフランジ内部に上板のアルミニウム合金が塑性流動して入り込んだ状態になっている。また、鋸と鋼の界面には不連続部のない健全な接合界面が得られていることが確認できる。いっぽう、図6(f)のEJOWELD[®] CFPは、鋸と板との間の接合界面に一部不連続部が観察されており、それは継手強度に影響を及ぼすものと考えられる。

3.3 継手引張試験

3.3.1 継手強度の比較

引張せん断試験および十字引張試験結果の一部(表1に示した継手種類のNo.2, No.5, No.7)を図7および図8に示す。なお、引張せん断強さおよび十字引張強さの値は、No.2のSPRの値を“1.0”とした相対値である。

SPRは、下板が590 MPa級鋼では健全な継手が得られたが、それ以外の鋼種についてはリベットが十分に刺さらなかったため省略している。いっぽう、上板が鋼の場合は980 MPa級鋼まで接合ができています。破断位置はすべて下板からリベットが外れている。引張せん断強さは、下板がアルミニウム合金の場合の方が逆板組の場合よりも大きい。したがって、リベットは下板がアルミニウム合金の場合により強固にかしめられていると推測される。また、十字引張強さも同様に、下板からリベットがはずれる破断形態となっているものの、引張せん断試験結果と異なり、上下の板の組み合わせの影響をあまり受けない。

Tuk-Rivet[®], RIVTAC[®]はSPRと比べるとやや強度

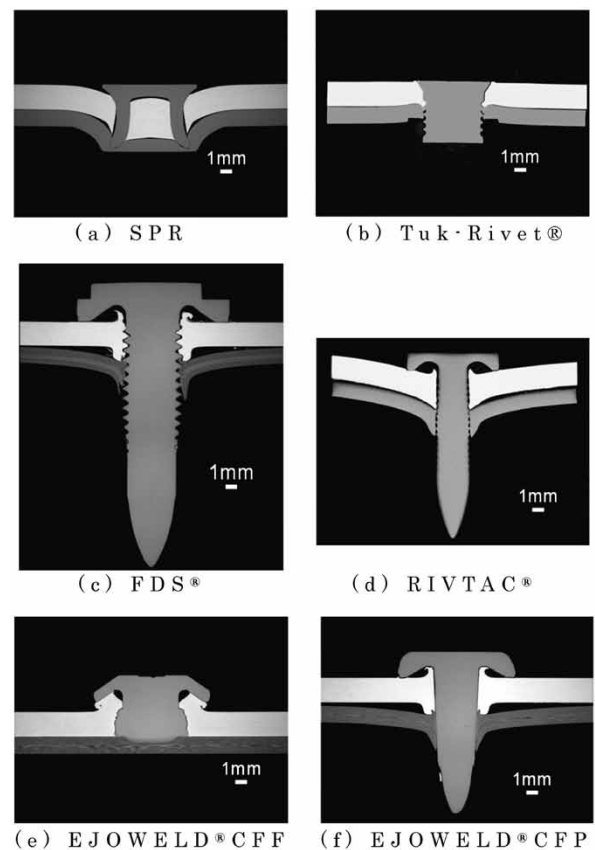
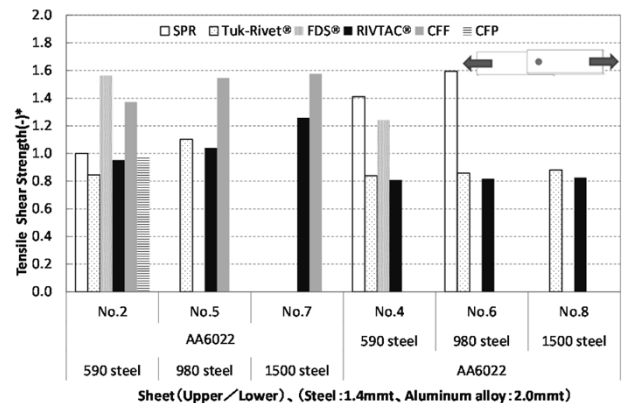


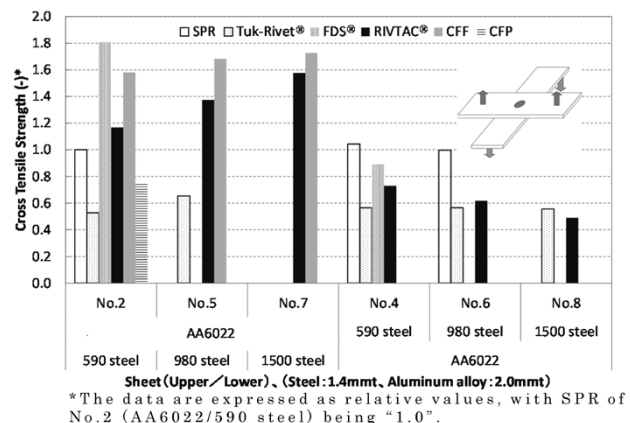
図6 各継手の断面マクロ試験 (No.2)
Fig. 6 Macrostructure of each joining (No.2)



*The data are expressed as relative values with SPR of No.2 (AA6022/590 steel) being "1.0".

図7 引張せん断試験結果

Fig. 7 Results of tensile shear strength test



*The data are expressed as relative values, with SPR of No.2 (AA6022/590 steel) being "1.0".

図8 十字引張試験結果

Fig. 8 Results of cross tension test

が低い傾向があるが、多くの継手で安定した強度が得られていることがわかる。

FDS[®]は一部の条件で施工できないものの、接合されている場合の継手強度は他の接合法に比べ高い結果となっている。その原因としては、図6に示した断面マクロ試験からも分かるように、今回用いた鋸の中ではFDS[®]の鋸サイズが最も大きいことが挙げられる。鋸のフランジ部が大きく上板への抑えが効いているうえ、軸径も比較的大きく鋸が破壊しにくいと考えられる。

EJOWELD[®] CFFは下板が鋼であるという制約があるものの、鋼板強度にかかわらず高い継手強度が得られている。なお、破断形態は接合界面以外が破断箇所となる、いわゆるプラグ破断となっており、安定した継手強度が得られた要因と考えられる。

EJOWELD[®] CFPは、今回試験した中では下板が590 MPa級の場合だけ施工することができ、SPRと比べて引張せん断強さはほぼ同じ、十字引張強さはやや低い値となっている。

3.3.2 破断形態

継手強度試験の破断形態としては大きく3種類あり、①母材破断、②鋸抜け、③鋸破断に分けられる。一例としてSPRにおける継手強度試験の破断形態を表3に示す。今回の試験においては、母材破断形態はNo.1の条件でみられた。No.1の条件はアルミニウム合金が薄く母材の強度が低い。そのため、鋸の板へのかしめ強度より母材強度が低く、鋸周辺の母材部が塑性変形して破断

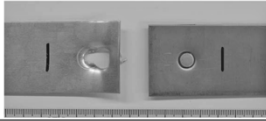

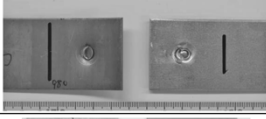
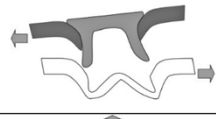
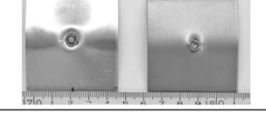
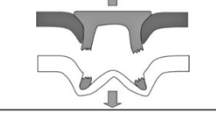
に至っている。いっぽう、ほとんどの試験片は下板から鋸が抜ける破断形態であった。SPRやTuk-Rivet[®]は下板に鋸が差し込まれている量(深さ)で強度が決まるといわれており、十字引張試験の一部で、鋸破断がみられた。これは、鋸が十分に下板にかしめられていたため、このような破断形態になったと思われる。

3.3.3 接着剤との併用効果

鋼とアルミニウム合金においては、お互いが接触していると電位差が生じて腐食が進むことが知られている。そのため、実際に異材接合を行う場合には、これを防止するために鋼とアルミニウム合金との間に緩衝機能や水密性を得るために接着剤を使用する場合がある。接着剤は当然継手強度にも大きく寄与し、機械締結法に併用することで自動車全体の剛性を高め、快適な乗り心地を実現させる効果があるとされる。

図9にTuk-Rivet[®]とRIVTAC[®]に接着剤を併用した場合と併用しない場合の引張せん断試験結果を示す。いずれの接合方法でも接着剤を併用した継手強度が大きく向上している。このときのRIVTAC[®]の引張せん断試験のストローク試験力線図をみると、弾性域と考えられる直線が現れた後、塑性域と思われる曲線が現れ、接着剤が破断する。これは、接着剤を併用した場合は構造用接着剤のせん断試験のひずみ-応力線図と同様である。その後、RIVTAC[®]の強度試験結果を示す曲線が現れた後に破断する。今回用いた接着剤が比較的硬く伸びが低いため、このような現象になったものと考えられる。

表3 継手強度試験の破断形態
Table 3 Failure modes of joint strength tests

Failure mode	Appearance of test piece	Conceptual diagram
Parent material failure		
Rivet off		
Rivet failure		

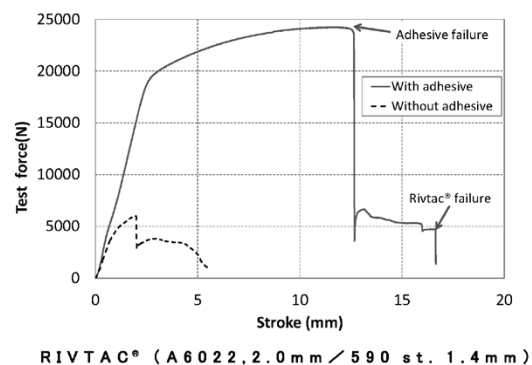
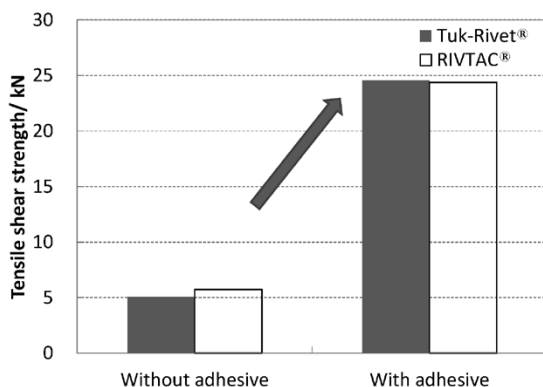


図9 引張せん断試験結果
Fig. 9 Results of tensile shear strength test

むすび=自動車の軽量化技術の一つとして、異材接合技術の種類およびその特徴について述べた。今回紹介したものはいずれも自動車へ実際に適用されている技術であり、それぞれの長所・短所を考慮して、適材適所で適用されている。現在、欧米で自動車のマルチマテリアル化は進んでいるが、今後は国内でも広がっていくと考えられる。その際に、今回紹介した内容が理解の一助になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) Corus. Welding and Cutting. 2007, Vol.2, p.64.
- 2) 松本剛ほか. 軽金属溶接. 2010, 48巻, 1号, p.15-19.

- 3) 武田実佳子ほか. R&D神戸製鋼技報. 2007, Vol. 57, No.2, p.69-73.
- 4) 池内建二. 軽金属学会シンポジウム. 2008, Vol.84, P. 1-7.
- 5) 玄道俊行ほか. 日本金属学会誌. 2006, Vol.70, p.870-873.
- 6) 宮原哲也ほか. 自動車技術. 2013, Vol.67, No.3, p.114-115.
- 7) ベルホフ社カタログ. RIVSET[®].
- 8) ケー・ケー・ヴィ社カタログ. Tuk-Rivet[®].
- 9) 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).
- 10) Schubert Holger. Welding and Cutting. 2012, No.4, p.229-231.
- 11) ベルホフ社カタログ. RIVTAC[®].
- 12) Bernd Mlekushch. Automotive Circle International Insight Edition, 2014.
- 13) エジヨット社カタログ. EJOWELD[®].