

(技術資料)

サーキュラーエコノミー実現に貢献する異種金属接合技術 — SP-ray™ —

前田恭兵*¹ (博士(工学))

Dissimilar Metal Joining Technology, SP-ray™, for Realizing Circular Economy

Dr. Kyohei MAEDA

要旨

近年、サーキュラーエコノミー実現のため、産業界において材料のリサイクルが一層重要視されている。自動車における異種金属の接合法としては、機械締結法が主流である。これらは高い継手強度が得られる反面、接合部を解体する作業が煩雑であり、リサイクルに必要な材料分別の観点では最適な接合法とは言えない。このような背景から、高い継手強度を実現しつつ、易解体性を有する異種金属接合法として、コールドスプレー皮膜を中間層として利用したレーザー接合技術SP-ray™を開発した。本稿では、SP-ray™継手において機械締結法と同等の継手強度が得られること、熱処理により鋼部とアルミニウム部とを分離可能であることを明らかにしたので、その結果を紹介する。

Abstract

The industrial sector has recently placed increasing importance on material recycling to realize a circular economy. Mechanical fastening is the mainstream jointing method for dissimilar metals in automobiles. Although this method assures high joint strength, disassembly of these joints is complicated. It is not the optimal jointing method from the viewpoint of the material separation required for recycling. Against this backdrop, a laser joining technology, SP-ray™, which uses cold spray coating as an intermediate layer, has been developed as a dissimilar metal joining method that achieves high joint strength together with assuring ease of disassembly. This paper presents the results which show that SP-ray™ joints can achieve joint strength equivalent to that achieved by mechanical fastening, and that heat treatment renders the steel and aluminum parts separable.

検索用キーワード

高張力鋼, アルミニウム合金, 異種金属接合, レーザ, コールドスプレー, 解体性, サーキュラーエコノミー, リサイクル

ま え が き = 世界的に脱炭素社会の実現に向けた取り組みが推進されており、欧米や日本では2050年カーボンニュートラル（以下CNと記載する）を目指すと言われて¹⁾。自動車は鉄道や船舶と比較して、単位輸送量あたりのCO₂排出量が多く、日本における総排出量の約15%を占める²⁾。ゆえに、自動車が地球温暖化に与える影響は大きく、より一層のCO₂排出量低減が求められている。そのような背景から、近年自動車の電動化が進んでおり、モータのみで走行する電気自動車（以下EVと記載する）が急速に普及しつつある。EVは走行時の環境負荷低減が小さいいっぽうで、従来の内燃機関自動車と同等の航続距離を確保するためには、60~100 kWhレベルの大容量電池を搭載する必要がある³⁾。大容量電池は高重量であるため、動力性能を低下させることから、バッテリーを含む車体全体での軽量化がEVにおける課題のひとつとなっている^{3), 4)}。

自動車の大半は鋼製部品で構成されていることから、鋼板を高強度化し、部品板厚を低減することによる軽量化が図られている。最近では、とくに欧米の高級車を中心にアルミニウム合金などの軽量の材料を高強度鋼板と併用するマルチマテリアル構造が普及している。例え

ば、アルミニウム合金の板材はフードやドアなどの蓋物部品、押出材はバンパーレインフォースやドアビームなどの補強部品、ダイキャスト材はサスペンションタワーやサブフレームなど複雑な形状を有する部品へそれぞれ適用されている^{5), 6)}。EVでは、バッテリーケースにアルミ押出材やダイキャスト材が積極的に活用されている^{7), 8)}。

マルチマテリアル車体の製造における課題の一つが異種金属接合である。従来、鋼製車体の組み立てでは抵抗スポット溶接やレーザー溶接が使用されてきたが、鋼とアルミニウム合金を溶接すると、FeAl₃やFe₂Al₅などの脆弱（ぜいじゃく）な金属間化合物（IMC）が生じ、高い継手強度を得ることが困難である。そのため、現在では接合部を溶融させない機械締結を用いるのが一般的である。最も普及している接合法は、図1に示すSPR（Self-Piercing Rivet）とFDS[®]（Flow Drill Screw, EJOT GmbH & Co. KGの登録商標）である。車種によって異なるが、車体1台の製造につき、SPRは数千点、FDS[®]は数百点用いられている。SPRはパンチとダイを使用してリベットを被接合体へ打ち込む接合法であり、近年では高強度鋼板を含む板組に対しても対応可能となっている。いっ

*¹ 技術開発本部 ソリューション技術センター（現 技術戦略企画部）

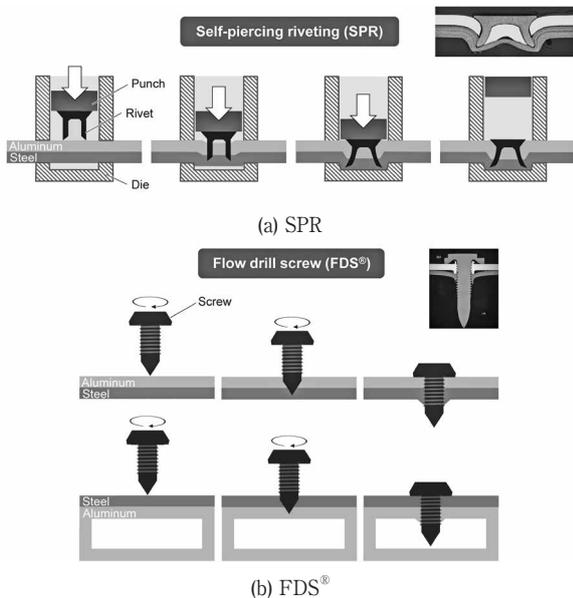


図1 (a) SPR, (b) FDS[®]のプロセス模式図
Fig.1 Schematic illustrations of (a) SPR, (b) FDS[®]

ばうで、アルミ押出材のような中空部品に対しては、パンチやダイを空間内部に挿入するのが困難となり、適用できない場合がある。このような材料に対しては、片側アクセスの接合法であるFDS[®]が用いられる。FDS[®]はロバスト性が高く、強度が安定するメリットを有する反面³⁾、接合時間が2~3秒程度と比較的長いこと⁹⁾、高強度鋼板に対しては下穴を設ける必要があること、接合部でネジの頭部と軸部がともに飛び出すためフラットな面が得られないことなどの課題がある。しかしながら、自動化可能な片側アクセスの接合法は限られ、現状高強度鋼板とアルミニウム合金中空部品の接合ではFDS[®]を使用するのが主流となっている。

材料のリユース、リサイクルもマルチマテリアル構造における大きな課題である。自動車におけるCO₂排出量を評価する際、走行時の排出量のみ注目する“Tank-to-Wheel”や燃料製造時の排出量も含めた“Well-to-Wheel”といった考え方が広く用いられている。さらに近年では、原料の調達、部品や車体の製造、車体の解体・廃棄に至る全過程で生じるCO₂排出量を評価するLCA (Life Cycle Assessment) の考え方も一般化しつつある。アルミニウム合金と鋼の新塊製造時のCO₂排出量を比較すると、発電方法により異なるが、アルミニウム合金のほうが鋼と比較して4~5倍となる場合がある。また、アルミニウム合金のリサイクル材製造時のCO₂排出量は新塊製造時と比較して90%以上少ない¹⁰⁾。このように、LCA視点で考えると、アルミニウム合金のリユース、リサイクルは極めて重要であることが分かる。既に一部車種において、リサイクルアルミの適用が開始されている⁶⁾。

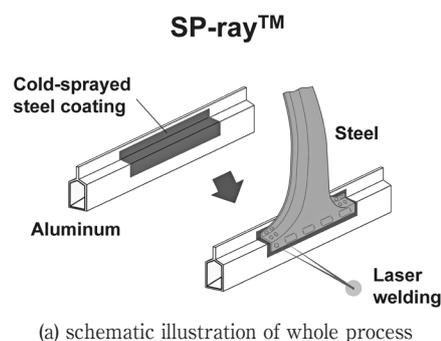
ここで、マルチマテリアル車体からアルミニウム合金を取り出すためには、異種金属接合部の解体が必須となる。先述した機械締結が用いられている場合、1点ずつ

接合部を解体する必要があるため、大変な労力を要すると想定される。あるいは、解体性接着剤¹¹⁾を利用して異種金属同士を接合する手法も考えられるが、自動車製造では通常、部品表面に防錆油やプレス潤滑油が付着しており、接着に適した表面状態の確保は困難である。また、接着剤の性能維持のため低温保持しなければならず、保管や管理が煩雑になるなどの課題がある¹²⁾。

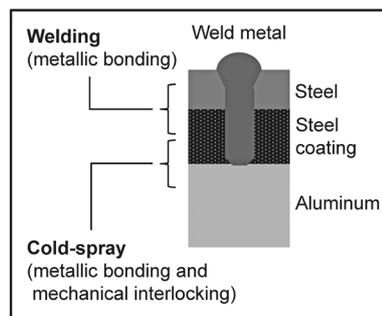
上述した様々な課題を解決するため、強度と解体性に優れ、さらには片側アクセスかつ高速施工、高強度鋼板に対応可能な異種金属接合法として、コールドスプレー皮膜を中間層として利用し、鋼とアルミニウム合金を間接的にレーザ接合するSP-rayTM^{注1)}を開発した。本稿では、SP-rayTMの基本コンセプトおよび継手強度、解体性について説明する。

1. SP-rayTMの基本コンセプト

図2 (a) はSP-rayTMのプロセスを模式的に示した図である。はじめにアルミニウム合金表面に対して溶射法の一つであるコールドスプレーにより鋼皮膜を形成し、その上から鋼板を重ね、皮膜とレーザ溶接する。つまり、本手法では図2 (b) に示すように、皮膜を鋼板、アルミニウム合金それぞれに対して別個の機構で強固に接合することで、レーザ溶接におけるアルミニウム合金の過度な熔融を不要としつつ、高い継手性能の実現を図っている。コールドスプレーではほかの溶射法と異なり、粉末が熔融しない温度で施工するため、酸化のほとんどない溶接に適した皮膜を得られる。材料や施工条件にもよるが、50~100 MPa程度の密着強度が得られ、これは従来の代表的な溶射法であるプラズマ溶射と比較して高い値である¹³⁾。コールドスプレーにおける皮膜の密着機構



(a) schematic illustration of whole process



(b) joining mechanism

図2 SP-rayTMの (a) プロセス模式図, (b) 接合機構

Fig.2 (a) Schematic illustration of whole process, (b) joining mechanism of SP-rayTM

脚注1) SP-ray は当社の登録商標 (第6738793号) である。

に関しては統一の見解が得られていないが、界面で何らかの固相接合やメカニカルインタロック(アンカー効果)が生じているとされている¹⁴⁾。なお、SP-rayTMと同様に溶接を利用する異種金属接合技術としては、溶接と接着剤を併用するウェルドボンドが挙げられるが、先述の通り接着剤は管理が煩雑なことに加え、接着剤の接合強度は30 MPa程度¹⁵⁾とコールドスプレーの密着強度と比較して低いことから、当社ではSP-rayTMを優先して検討している。

2. SP-rayTMの継手特性およびコールドスプレー皮膜中間層の効果

図3は1.5 GPa級鋼板(板厚1.4 mm)とコールドスプレーサンプルをレーザー溶接し作製したSP-rayTM継手の断面写真を示す。比較として、コールドスプレー皮膜を用いない直接接合の断面写真もあわせて図中に示す。コールドスプレーサンプルは、AA7204-T6(板厚3 mm)の表面に純鉄粉を用いて膜厚2 mmの鋼皮膜を形成したものである。コールドスプレーの作動ガスには窒素を使用し、作動ガス温度および圧力はそれぞれ1,273 K、5 MPaとした。直接接合については、SP-rayTM継手と総板厚を合わせるため、板厚5 mmのAA7204-T6を用いた。レーザー発振機には波長1,070 nmのファイバーレーザーを使用し、表1に示す条件で溶接をおこなった。直接接合継手ではピットや割れが溶接金属に散見されるのに対し、SP-rayTM継手では溶接欠陥のほとんどない健全な溶接部が得られていることが分かる。SP-rayTMおよび直接接合の継手強度を図4に示す。SP-rayTMでは直接接合と比較して、せん断引張強度(TSS)が約2倍、十字引張強度(CTS)に至っては約4.5倍となっており、

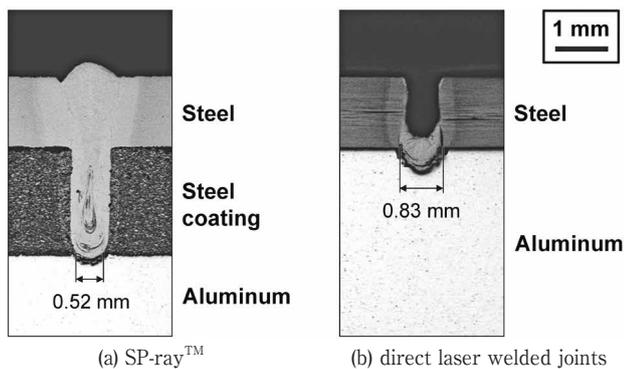


図3 (a) SP-rayTM, (b) レーザ直接接合継手の断面写真
Fig.3 Cross-section image of (a) SP-rayTM, (b) direct laser welded joints

表1 レーザ溶接条件
Table 1 Laser welding conditions

Spot size (μm)		330
Power density (×10 ⁶ W/cm ²)	Without coating	2.6
	With coating	4.4
Scanning speed (mm/s)		67
Bead shape		Circle
Weld diameter (mm)		φ12

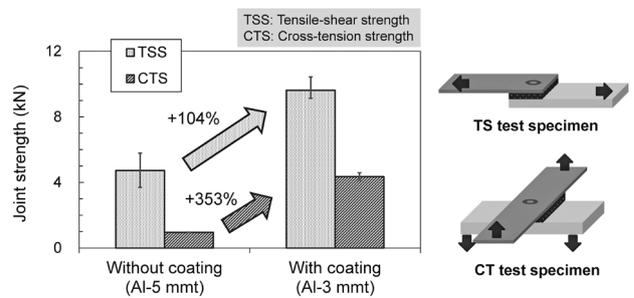


図4 SP-rayTMとレーザー直接接合の継手強度比較
Fig.4 Comparison of joint strengths between SP-rayTM and direct laser welding

大幅に継手強度を向上することが可能である。先行研究において、板厚1.0~1.6 mm、母材強度0.6~1.5 GPa級の高張力鋼と板厚3.0 mmのアルミニウム合金の板組におけるFDS[®]継手のせん断引張強度は6~10 kNと報告されている¹⁶⁾。SP-rayTMではFDS[®]同等のせん断引張強度が得られることが分かる。

3. SP-rayTMの解体性

3.1 大気炉を用いた加熱による解体

SP-rayTMで用いるコールドスプレーサンプルは基材がアルミニウム合金、皮膜が鋼であるため、高温加熱すると、図5に示すように界面で数十μmオーダーの厚いIMCが生成する。この特性を利用することで、接合した鋼とアルミニウム合金を分離することが可能となる。図6は2章と同一の板組で作製したSP-rayTM継手に対して、大気炉を用いて600℃で15~60分の熱処理を実施した後の外観写真および断面写真である。30分以上の加熱で鋼皮膜とアルミニウム合金界面で剥離が生じ、継手を鋼とアルミニウム合金に分離することが可能である。図7は皮膜側の剥離界面を電子線マイクロアナライザ(EMPA)によりマッピング分析した結果である。広範囲においてAlが検出されており、IMC内で破壊が生じていることを示唆している。また、EPMAによる点分析の結果、このIMCはFeAl₃やFe₂Al₅などに代表されるFeに比べてAlの組成比が大きい脆弱なIMC層であると推定された。なお、Alは約400℃以上においてFe中へ拡散することが知られており¹⁷⁾、自動車の製造工程で想定される170℃×数十分程度の塗装焼付け処理では皮膜とアルミニウム合金の界面でIMCは生成しないと考えられる。

以上のことから、SP-rayTM継手を高温で熱処理すると、時間経過にともない脆弱なIMCが成長し、さらに鋼皮膜-アルミニウム合金界面で線膨張係数の差に起因する熱応力が働くことで、IMC内で破壊が生じ、鋼とアルミニウム合金を分離できると推察される。図8に示すような多点溶接したサンプルに対しても本手法は有効であり、一度の熱処理で多数の接合部をまとめて解体可能である。

3.2 高周波加熱を用いた解体

前節にて、熱処理にてSP-rayTM接合部を解体可能であることを示したが、コストや環境負荷低減の観点か

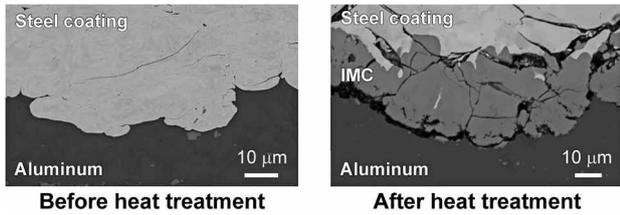
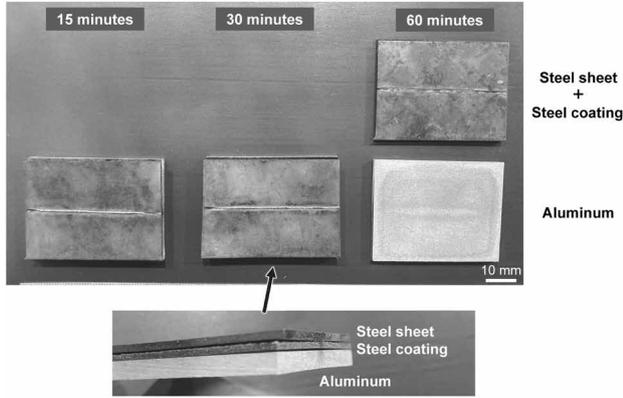
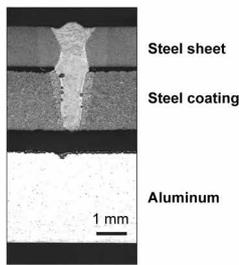


図5 熱処理前後でのコールドスプレー皮膜-アルミニウム界面のSEM写真
 Fig.5 SEM images of interface between cold-spray coating and aluminum before and after heat treatment



(a) surface



(b) cross-section images

図6 熱処理後のSP-ray™継手の (a) 外観, (b) 断面写真
 Fig.6 (a) surface, (b) cross-section images of SP-ray™ joint after heat treatment

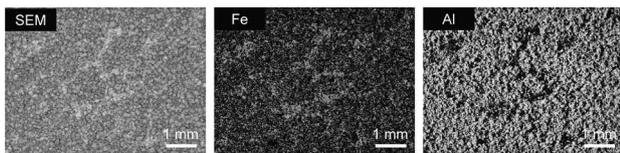
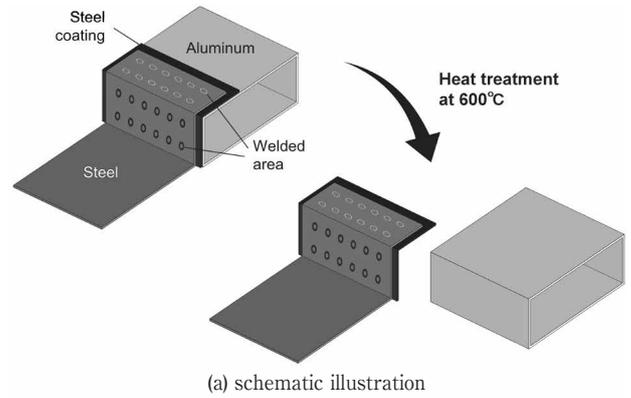
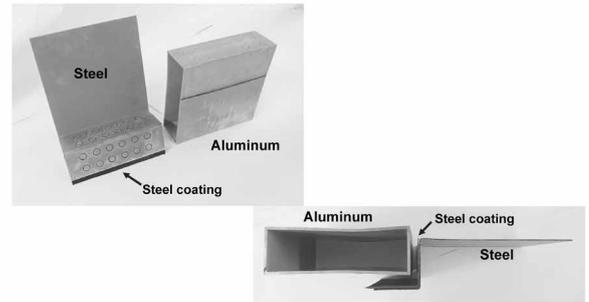


図7 アルミニウムから剥離したコールドスプレー皮膜表面のマッピング分析結果
 Fig.7 Result of mapping analysis at surface of cold-spray coating, peeled from aluminum

ら、熱処理時間は極力短縮できることが望ましい。そこで、大気炉と比較して急速加熱が可能な高周波加熱の適用を検討した。図9に高周波加熱装置の外観を示す。SP-ray™継手の板組は2章と同一とし、試験片サイズはいずれも100 mm × 20 mmとした。継手長手方向中央部35 mmの範囲をコイル内に挿入し、高周波加熱を施した。温度制御用の熱電対は、1.5 GPa級鋼板の表面に取り付けた。熱電対の設置箇所は長手方向中央部とした。固定のため、継手の片方の端部は銅製ジグで把持しており、当該箇所付近に関してはジグによる抜熱のため所定の温度まで上昇していないと推察される。図10は



(a) schematic illustration



(b) surface view after heat treatment

図8 レーザ溶接を24点でおこなったSP-ray™接合体の分解：
 (a) 模式図, (b) 熱処理後外観
 Fig.8 Decomposition of SP-ray™ joint with 24 laser welded areas:
 (a) schematic illustration,
 (b) surface view after heat treatment

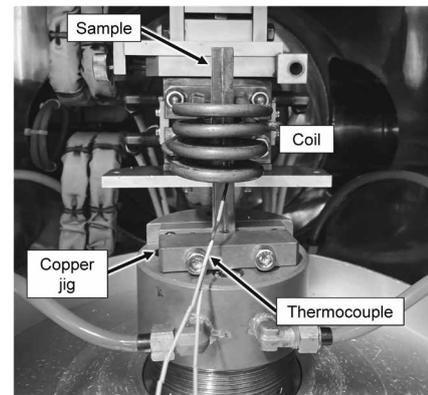


図9 高周波加熱装置の外観
 Fig.9 Appearance of high-frequency induction heating machine

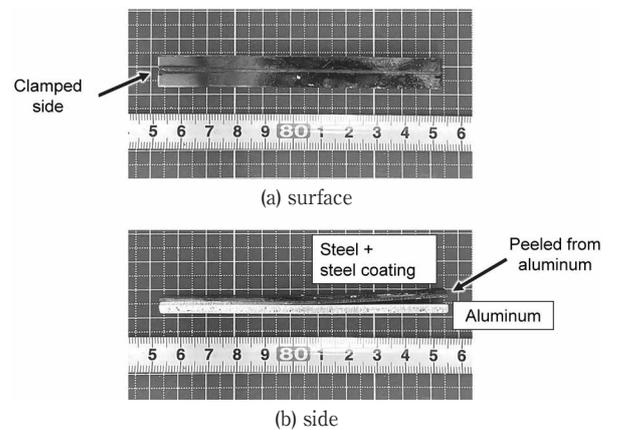


図10 高周波加熱試験後のSP-ray™継手外観：(a) 表面, (b) 側面
 Fig.10 Surface view of SP-ray™ joint after high-frequency induction heating: (a) surface, (b) side

600℃で15分の熱処理を実施した後の外観写真であるが、ジグから十分離れた箇所では皮膜がアルミニウム合金から剥離しており、高周波加熱を用いることで炉加熱よりも短時間で解体が実現できる可能性を示している。

むすび = 1990年代以降、地球温暖化を防止するため世界中の自動車メーカーがエンジンの高効率化や車体軽量化、さらには電動化や燃料電池車の実用化に取り組んできた。今後カーボンニュートラルを実現するにあたり、これら取り組みはより一層強化されていくであろう。衝突安全性を確保しつつさらなる軽量化を図っていくうえで、マルチマテリアル化はキー技術の一つになると考えられ、鋼とアルミニウム合金それぞれの長所・短所を理解し、適材適所で使いこなしていくことが求められる。その中で、当社は数少ない鋼、アルミニウム合金両方を提供するメーカーとして、材料のみならず自動車に関連する様々なソリューションの提案を進め、CO₂削減に貢献していきたいと考えている。本稿で紹介したSP-rayTMは、高信頼性と易解体性を兼ね備えた異種金属接合法であり、本技術が自動車の安全・軽量化を支援し、さらにサーキュラーエコノミー、ひいてはカーボンニュートラル社会実現の一助になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 環境省HP. https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/about/, (参照2023-04-21).
- 2) 国土交通省HP. https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html, (参照2023-04-21).
- 3) 樽井大志. 自動車に適用されるマルチマテリアル技術. 軽金属, 2022, Vol.72, No.3, p.99-106.
- 4) 櫻井健夫. 自動車の電動化とアルミ化技術の変貌. 軽金属, 2022, Vol.72, No.12, p.713-716.
- 5) 内藤純也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.1, p.60-64.
- 6) 嬉野欣成. 表面技術, 2022, Vol.73, No.8, p.380-383.
- 7) S. Enderle et al. Audi e-tron. Euro Car Body, 2019.
- 8) M. Rössinger et al. Volkswagen ID.4, Euro Car Body, 2020.
- 9) J.D. Skovron et al. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2015, Vol.137, No.5, 051019.
- 10) 青木昇二. 軽金属, 2013, Vol.63, No.7, p.260-270.
- 11) 佐藤千明. 日本接着学会誌, 2008, Vol.44, No.4, p.136-141.
- 12) 氷室雄也ほか. 日本接着学会誌, 2017, Vol.53, No.8, p.283-289.
- 13) 清水保雄. 表面技術, 1990, Vol.41, No.10, p.968-973.
- 14) 榊 和彦. 表面技術, 2008, Vol.59, No.8, p.490-494.
- 15) 佐藤千明. ネットワークポリマー論文集, 2018, Vol.39, No.2, p.91-96.
- 16) L. Kim et al. Journal of Manufacturing Processes, 2020, Vol.57, p.400-408.
- 17) 杵名宗春ほか. 溶接学会論文集, 2003, Vol.21, No.2, p.282-294.

本稿の一部は2023年7月発行の自動車技術Vol.77, No.7 No.20234354 (公益社団法人自動車技術会)に掲載され、同誌の許可を得て転載(一部修正・追記)したものである。