

連携記事

アーク溶接と機械的接合機構を組み合わせた超ハイテン鋼板に好適な新異種材接合技術

New Dissimilar Materials Joining Technology Combined with Arc Welding Process and Mechanical Joining Mechanism Suitable for Ultra-high Strength Steel Sheet

鈴木 励一
Reiichi Suzuki

(株) 神戸製鋼所 技術開発本部
ソリューション技術センター 接合研究室
室長

1 概要

近年、自動車の軽量化を目的としたマルチマテリアル化指向と共に、それを達成するための手段の一つとして、異種材接合法の重要性が注目されている。学術的には異種材接合は特段珍しい分野ではなく、過去から精力的に取り組まれている。しかし、自動車という分野での実用化を目指した研究となると、とりわけ直接溶接系は①能率、②ロボット搭載性、③コスト、④ロバスト性（有効溶接条件範囲の広さ）、⑤品質保証性などの点から現実的適用には至らず、極めて実例が少なくなる。それに対して、機械的接合や接着といった、非溶接系の接合技術分野が自動車用異種材接合技術の主役の座を占めてきた。

アルミと鋼の溶接による直接異種材接合は、事実上、金属間化合物（以下IMC、図1）の制御という科学研究の域を今も脱していない。一方、機械的接合法は近年の自動車用鋼板で顕著な冷間圧延超高張力鋼板やホットスタンプ鋼板といった超ハイテン鋼板との接合に課題を抱えている。

このような状況から、接合の機構として直接接合から間接接合へ溶接の活用を思想転換すると、IMCの呪縛から解き放

たれ、かつ超ハイテン鋼板とアルミ合金などとの異種材接合では主役の一つに躍り出る可能性がある。実際、後述するように異種材接合法評価の国家プロジェクトでもそれがはっきりと確認された状況である。

本稿では当社が開発した、機械的接合機構にアーク溶接を組み合わせた間接的異種材接合法である「Element Arc Spot Welding（以下EASW）」について、その実用化手法も含めて詳述する。

2 異種材接合法の分類と特徴

異種材接合法の分類手法はいくつかの切口があるが、鋼とアルミニウム合金の接合を念頭に、上述の直接接合と間接接合に分けてその特徴を示す。

2.1 直接接合

異なる原子間に作用する金属結合のエネルギーを接合として利用するものである。ただし、母材金属が溶け混ぜ合ったIMCが生成すると、これ自体が極めて脆いため、接合強度はほとんど失われる。金属結合を得るためには、熱による界面の活性化や新生面の生成が必要であるが、活性化しすぎるとIMCを作ってしまうため、いわば相反性の限界を目指した追求となる。具体的手段としては、抵抗スポット^{1,2)}、ガスシールドアークブレージング（ろう付け）、フィラー添加レーザブレージング³⁾、摩擦圧接⁴⁾、摩擦攪拌接合（FSW, FSSW）^{5,6)}、爆発接合（爆着）⁷⁾といった技術が知られている。爆着は直接接合の理想型とも言うべき界面状態を呈し、接合強度も高く、造船業では爆着接合体を継手の中間材として用いる手段として古くから実用化されている⁸⁾。しかし、これ以外の手

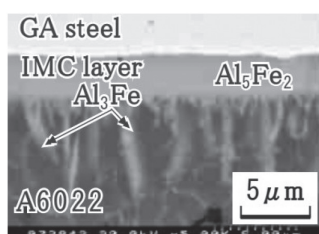


図1 金属間化合物（IMC）の観察例¹⁾

段は、現時点ではロバスト性、品質安定性がまだ不十分であり、接合後の全数検査が実質的に不可能な自動車業界の生産工程ではその適用事例は極めて少ない。

また、上手く接合出来たとしても、異種材ブレージング、異種材抵抗スポット、異種材FSSWの継手強度はせん断方向には比較的高い強度を示すが、はく離方向の強度が極端に低いという、強度の異方性を強く持っていることも、実用化の障害要因である。これらの典型的試験法であるせん断引張試験値 (JIS Z3136, TSS, 図2) と十字引張試験値 (JIS Z3137, CTS, 図3) が10:1以上に開くことも珍しくない。

2.2 間接接合

一般的に消耗材を用い、嵌合や摩擦などの機械的締結力、あるいは化学的結合力を接合として利用するものである。前者の代表はボルト&ナット (図4) やリベット (図5)、後者の代表はエポキシ系などの接着剤 (図6) である。いずれも接合出来ない固体は存在しないとも言えるほどの汎用性を有しているのが特徴である。また、接合欠陥や不良も起きにくく、施工難易度が低い。特にボルト&ナットやリベットは、溶接とは異なって気密・水密といったシール性が無いことを除けば、品質的信頼性が高く、メカニズム的にも明快であり、強度の異方性も小さい。

一方、構造用接着剤はあらゆる接合技術分野の中で近年、最も伸長してきた分野と思われるが、面接合ゆえの気密、水密、絶縁、防食、防振、剛性向上といった、他の接合法にはない沢山の利点を持っているのが特徴である⁹⁾。品質保証性やメカニズムの理解にまだ難があり、かつ直接接合法のように強度異方性を持つことが短所であるが、機械的締結法と接着

を併用すると、双方の短所を補い合うことができる。異種材接合には強度の問題以外に、電食 (ガルバニック腐食) の問題もあるが、接着は電食対策として欠かせぬ対策法ともなっている。

3 機械的締結法の課題

代表的な機械的締結法であるボルト&ナットやリベットは高い信頼性を持つが、自動車向けとしては短所を抱えている。それは自動化に不適なことである。共に、両板の同じ場所に予め貫通穴あけが必要であり、この作業や精度合わせが第一に難しい。また、ロボットによる自動化も難しく、ほとんどの場合、手作業である。したがって、生産性が悪く、コスト的にも高い。ボルト&ナットは重たいという問題も抱える。これらの短所から、自動車向けではロボット搭載が可能な自動化機械的接合法が開発、実用化されてきた。それが、Mechanical Clinch, Self Piercing Rivet (SPR), Flow Drill Screw (FDS) (図7) といった、かしめ系の機械的接合技術である。これらが現在の自動車用異種材接合法のスタンダードとなっている。既に一台当たり、合計2,000点以上使われて



図4 ボルト&ナット

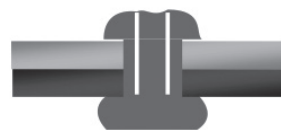


図5 リベット



図2 せん断引張試験

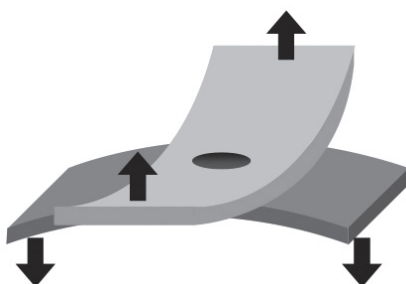


図3 十字引張試験 (はく離モード試験)



図6 接着剤

いる車種もある¹⁰⁾。

しかし、接合メカニズムをかしめに変更したことで、ボルト&ナットやリベットに対して失われた特性がある。それは、離強度の低下と、超ハイテン鋼板への対応性である。前者は形状的な原因、後者は材質的な原因である。かしめ系機械接合法は超ハイテン鋼板に強い局部変形を加えることが困難なため、適用困難となる場合がある¹¹⁾。

また、Mechanical ClinchやSPRはC型クランプを用いて部材を挟み込む必要があり、機器侵入性の点から適用箇所に制限が生じる。FDSは片側からのアクセスで接合可能であるが、長大な突起が生じるため、やはり適用箇所に制限が生じる。

4 EASWの基本的メカニズム

EASWは上記の既存異種材接合法の課題を鑑みて開発した新たな異種材接合法であり、分類としては鋼製エレメント

と称する消耗材を用いた間接接合法に属する。しかし、純粋な機械的接合法と異なり、鋼を変形あるいは貫通させることなく、代わりにアーク溶接を利用した溶融と金属充填作用を用いる点が新規思想である^{12,13)}。

具体的な手順は以下のとおりである。

(1) 穴あけしたアルミニウム合金板と鋼板を重ね、(2) 中空の鋼製エレメントを挿入し、(3) 中空部を狙って鋼製溶接ワイヤを挿入してガスシールドアーク溶接を位置固定で一定時間行う、(4) 溶融池が中空部を満たすと共に、エレメント壁と鋼板を溶かし込み、双方強固に溶接される (図8)。この一連のプロセスによってアルミニウム合金板は溶融することなく、金属間化合物も生成することなく、3次元的に拘束され、鋼板と接合された状態となる。プロセスとしてアーク溶接を使うが、接合は溶接ではなく、ボルト・ナットと同じく、物理的嵌合状態を作ることによる機械的機構によって達成される (写真1)。

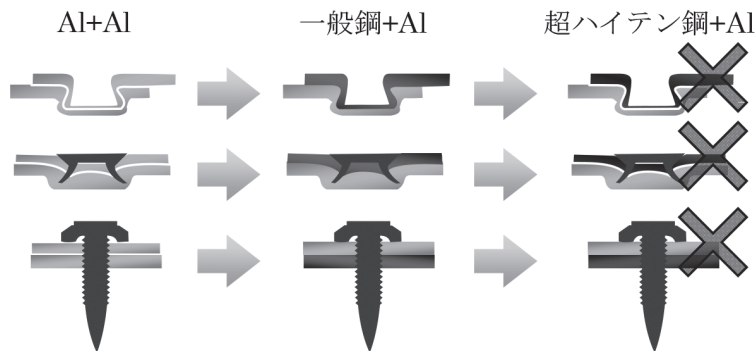


図7 代表的異種材接合法の進化と材質対応性 (上段:Mechanical Clinch, 中段:SPR, 下段:FDS)

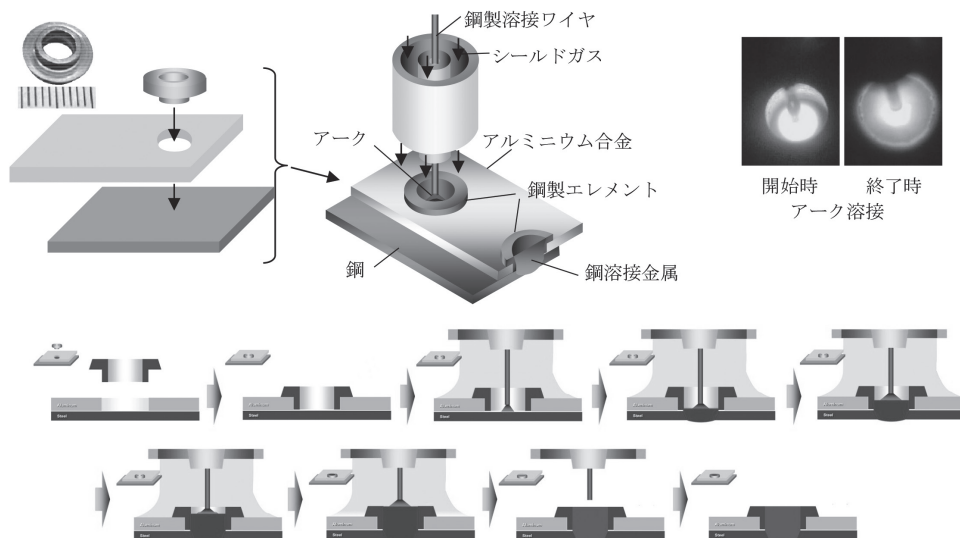


図8 EASWのメカニズムと工程

アーク発生時間は板厚によって多少変わるが、概ね1秒前後である。また、アルミ+銅板+銅板といった3枚重ね継手に対しても、アーク力を制御するパラメータである電流・電圧値、シールドガス組成などを制御することで対応可能である(写真2)。アルミ材がダイキャストのように厚い継手にも適用可能である(写真3)。

EASWの特徴を以下に列記する。

- ① 継手強度がせん断(水平方向)、剥離(垂直方向)モード共に高く、各種異種材接合の中でもトップクラスである(5章後述)。
- ② 板を電極や金型で強固に挟む必要が無く、片側アクセス性を有する。したがって、板同士、板と中空パイプ材の両方に適用可能な希少性を有する。
- ③ 超ハイテン鋼板にも適用可能である。
- ④ 板厚毎にエレメント厚を合わせる必要がなく、ある程度共通化できるので、消耗部材の管理負担が小さい。
- ⑤ 最小限の実施策では、既存のアーク溶接設備があれば良く、異種材接合法としては非常に設備投資額が小さい(6.1節後述)。

これらの他、銅製エレメントの材質は一般的な炭素鋼であり、形状的にはシンプルなので、鍛造法で安価に大量生産可能である。異種材接合法のランニングコストは消耗材のコス

トが占める割合が大きいとされており、実用性の点で重要である。

5 EASWの異種材継手強度

既存の代表的な機械的接合法を同一板組に対して適用し、その継手強度を当社独自に評価した結果を図9に示す¹⁴⁾。なお、板厚や材質の組合せ、他の異種材接合法各々の条件最適化や技術的発達まで考慮すると、必ずしも下記の結果や順列になるとは限らないので、あくまで一例として捉えて頂きたい。他の異種材接合法は、各メーカーもしくはメーカーに準ずる試験会社に条件などを一任した。共通条件である素材は、表側に当社製のアルミニウム合金A6K21(A6022相当)2.0mm、裏側にDual Phase組織設計の980MPa級高張力鋼板1.4mmの2枚組とした。

機械的接合の代表であるSPRとFDSは、本鋼板を塑性変形もしくは抜くことが出来なかった。代わりに590MPa級鋼板1.4mmとした継手の値を掲載している。

本結果から言えることとして、間接的接合法はせん断強度とはく離強度の比がいずれも比較的高いことがあげられる。上述したとおり、直接異種材接合法や接着では当比が非常に大きいのにに対し、これらの接合法は強度バランスが良い。次に強度の値を比較すると、純機械的接合法に対して、溶接を利用した接合法のREW, FEW, EASWが高いことがあげられる。(※REWは抵抗発熱利用、FEWは摩擦発熱利用の類似機構技術)中でもEASWは最も高い値を示した。この原因については、本稿では詳細省略するが、入熱量の差が影響していると考えている。

同じく本稿では省略するが、現在流通している最も高い強度の鋼板である1.5GPa級ホットスタンプ鋼1.6mmを下板に用いた場合、EASW継手はTSSが14.8kN、CTSが9.7kNとさ

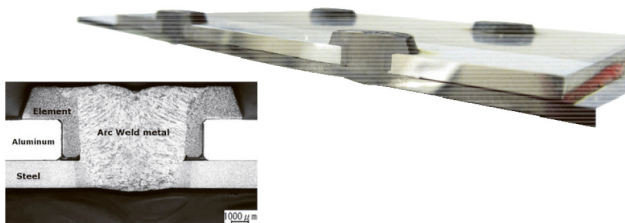


写真1 EASWの外観と断面

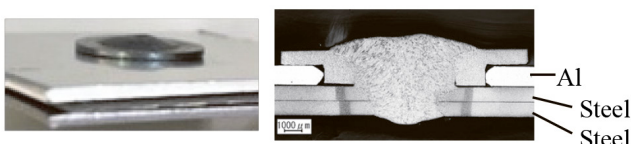


写真2 異種材3枚板組への適用例

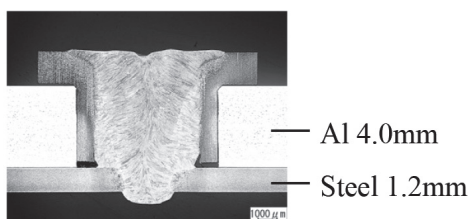


写真3 厚アルミ材と薄鋼板への適用例

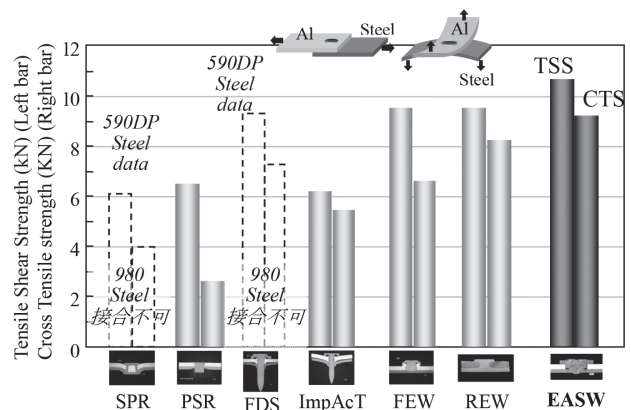


図9 980MPa級鋼板と6000系アルミ材の各種異種材接合法による継手強度試験結果(当社実施)

らに高い結果が得られている¹⁵⁾。

次に、NEDO委託の国家プロジェクトISMA（新構造材料技術研究組合）において2018～2019年にかけて行われた異種材接合法の継手強度比較試験結果の一部を引用紹介する^{16,17)}。図10は表側にアルミニウム合金A5052の2.0mm、裏側にDual Phase組織設計の980MPa級亜鉛めっき高張力鋼板1.4mm（※図9適用材とは異なる）とした継手のせん断強度（TSS）と十字引張強度（CTS）である。グラフにおいてウェルドボンド（※接着剤と抵抗スポット溶接法の併用法）より左側の群は直接接合法であるが、いずれも十字引張強度が著しく低いことが明らかである。一方、グラフ右端のアーケエメントという記載がEASWそのものであり、やはり最も高い強度を示した。

6 EASWの実現手段

EASWは手動法的運用から、部分的に自動化する運用、そして人手を介さないフルオートメーション化を目指した運用といった複数の実現手段を想定している。

6.1 手動法的運用

一品一様品の製作、あるいは補修用としての利用価値がある手段であり、生産速度はさほど求めない代わりに、設備投資の抑制、可能であれば従来設備をそのまま活用できる手軽さが重視される。

EASWの手動法は、片側のみの穴あけ作業をドリルや打抜きなどの前処理手段で行っておけば、一般的なアーケ溶接機を使って実現できる。エレメントは手込めで挿入する。アルミ材と鋼板のギャップが生じる場合は、当社が開発したEASW用シールドノズルを適用し、人手でアルミ材を押し付けながら定点溶接すれば、抑制することが可能となる。（図11）当シールドノズルの先端は鋼製エレメントがフィットするように設計されており、ギャップを抑えるだけでなく、溶接ワイヤを穴中心部に自動的に挿入する機能も付与される。

6.2 溶接前処理作業の機械化

エレメントを挿入するためのアルミ板への穴あけ作業が煩わしい場合、あるいは確実に仮固定させたい場合は、エレメント自身の硬さを利用してパンチングで打抜きと仮固定を

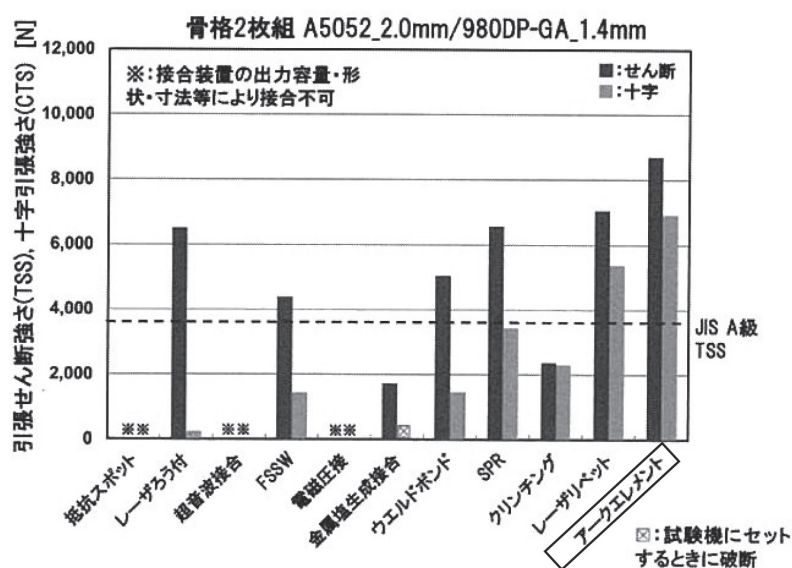


図10 980MPa級鋼板と5000系アルミ材の各種異種材接合法による継手強度試験結果 (ISMA 実施)^{16,17)}

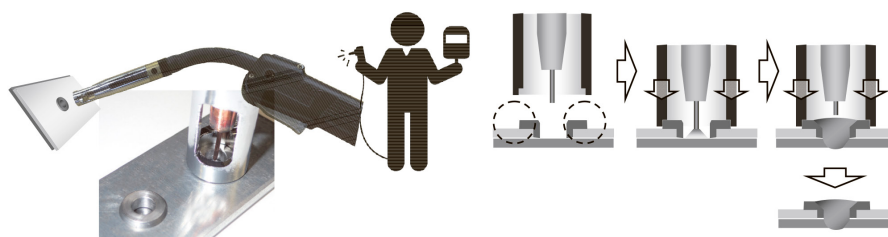


図11 EASWの手動法運用イメージと専用シールドノズル

同時に行う手段がある（図12、写真4）。なお、本手段自体は特に目新しい技術ではない。当社は他社と共同で充電式ハンディ型装置を開発中である（図13）。パンチングで仮固定することにより、横向等のエレメントが落下しやすい姿勢でも安定して接合可能である。

6.3 自動接合ロボット

接合対象が大量生産品となると、接合工程の高能率化が必要となる。自動車製造用には事実上ロボット化の実現が必須となる。穴あけを除く全工程を1台のロボットで確実に接合できる1ステップ式ロボットシステムのコンセプトモデルの開発をファナック（株）の協力を得て行った^{18,23)}。本システム

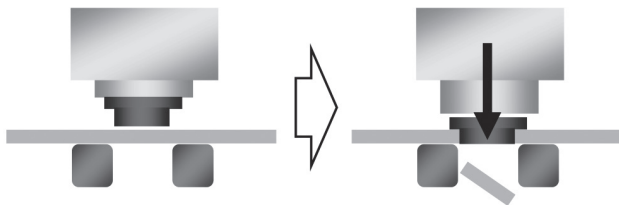


図12 パンチング式の穴あけ・エレメント仮固定方法



写真4 パンチング式で仮固定されたエレメント

開発に当たっての技術的要件を以下に示す。

- (1) エレメントのエア圧送システムとアーク溶接のワイヤ、ガス、電力供給システムを一台のロボットに搭載。
- (2) エレメントの載置ポジションと溶接ワイヤのポジションを同一軸上に配置したツール設計。
- (3) 母材上板に設けた穴位置を、画像センサを用いて検出し、溶接教示位置を自動修正。
- (4) エレメント挿入部径と母材穴径差が極めて小さい条件で確実に挿入。かつ失敗時に備えたりトライ機能。

本要件を実現したロボットシステムの三次元図を図14に、実際の外観を写真5に示す。コンセプトモデルとはいえ、このような思想を実現したシステムは世界初である。

当ロボットシステムでは穴位置検出に、LED照明とCMOSイメージセンサ搭載カメラを用いて、色検出によって輪郭検出する「Vision」と呼ばれる画像センサを用いている。図15に位置検出の様子を示す。スキャン作業は、穴毎は無論、複数の穴を連続して一度に行うことも可能である。

当ロボットを用いた一連の接合動作を写真6と写真7に示す。写真6は便宜的にアークを発生させず、エレメント挿入のみとした運転モードである。現行では、挿入部径6.9mmのエレメントを直径7.1mmの穴に挿入することが可能である。

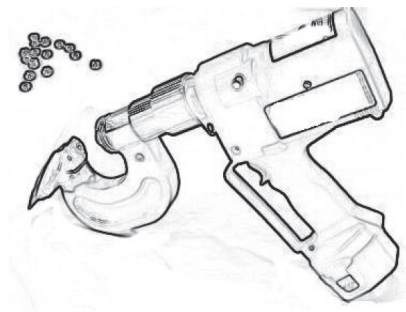


図13 充電式ハンディ型エレメントパンチング装置（開発中）

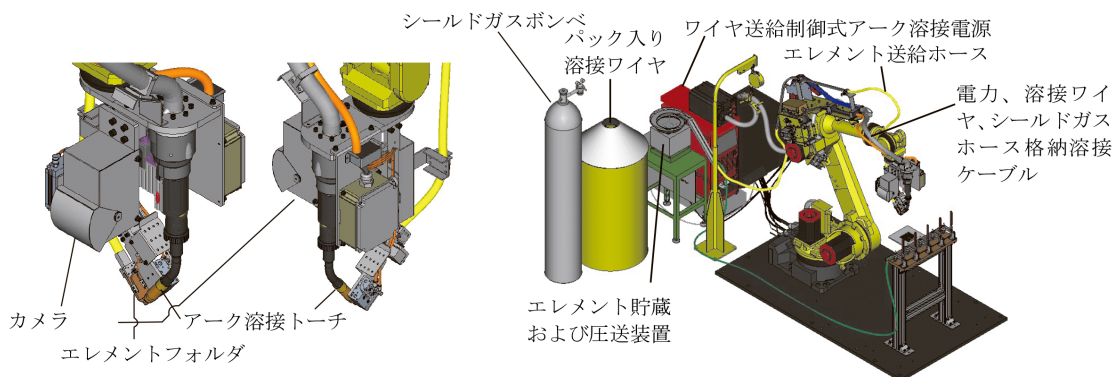


図14 1ステップ法用EASW ロボットシステム（試作版）の3次元図

写真7は実際の運転モードで、エレメント挿入とアーク溶接を連続的に行っている。

なお、当ロボットシステムは副次的機能として、エレメント送給をオフとして教示すれば、通常のアークスポット溶接モードとなり、鋼板同士の溶接にも適用することが可能である。多くの機械的異種材接合法はハイテン鋼板同士の接合が困難である短所を持つことが多いが、本ロボットシステムにより、アルミニウム合金と鋼の混在部品の製造に際して、異種材接合用と鋼同士接合用のロボットシステムを別個に用意する必要がなくなる可能性がある。

現在、本ロボットシステムのコンセプトを継承させて、さらに小型化、高速化、加圧挿入機能をブラッシュアップした販売モデルの開発をファナック（株）と共に進めている。



写真5 EASWロボットシステム（試作版）の実物写真

7 EASWの適用部材

素材の特性を生かして、軽量化、高強度化、高剛性化、低コスト化などのバランスを最適化するマルチマテリアル構造の可能性探求は今後も永続的に続けられるであろう。EASWは超ハイテン鋼板との異種金属接合が可能かつ高強度、さらに片側アクセス法という特徴を生かした新たな構造体の実現に貢献できると考えている。例えば、最近急激に存在感を高めるEV車の電池ケース用として、当社は超ハイテン鋼板製底板+アルミ押出材フレーム+EASW接合の軽量・高強度構造体を提案している²⁴⁾。写真8にEASWを用いた様々な接合サンプルを示す。

8 まとめ

当社考案の異種金属接合法「エレメントアークスポット溶接法」の特徴を紹介した。当社は今後も特徴のある異種金属接合法の考案・開発、および超ハイテン鋼板とアルミ合金材

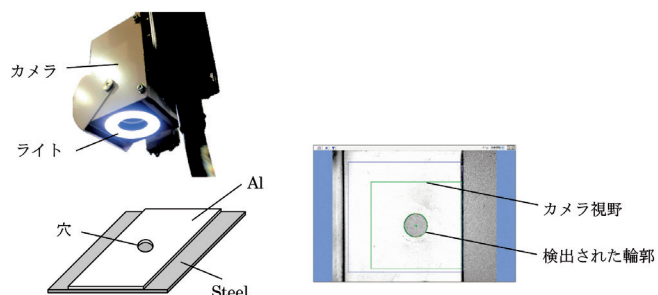


図15 画像処理による予備穴の位置検出

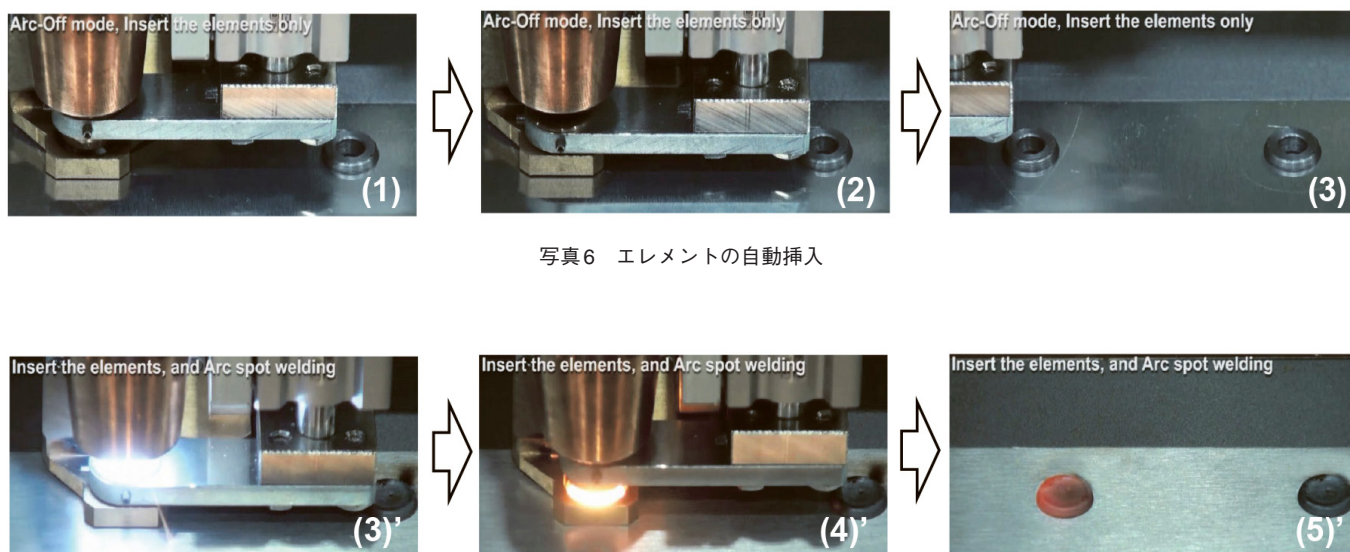


写真6 エレメントの自動挿入

写真7 エレメントの自動挿入とアーク溶接の連続動作による異種材接合

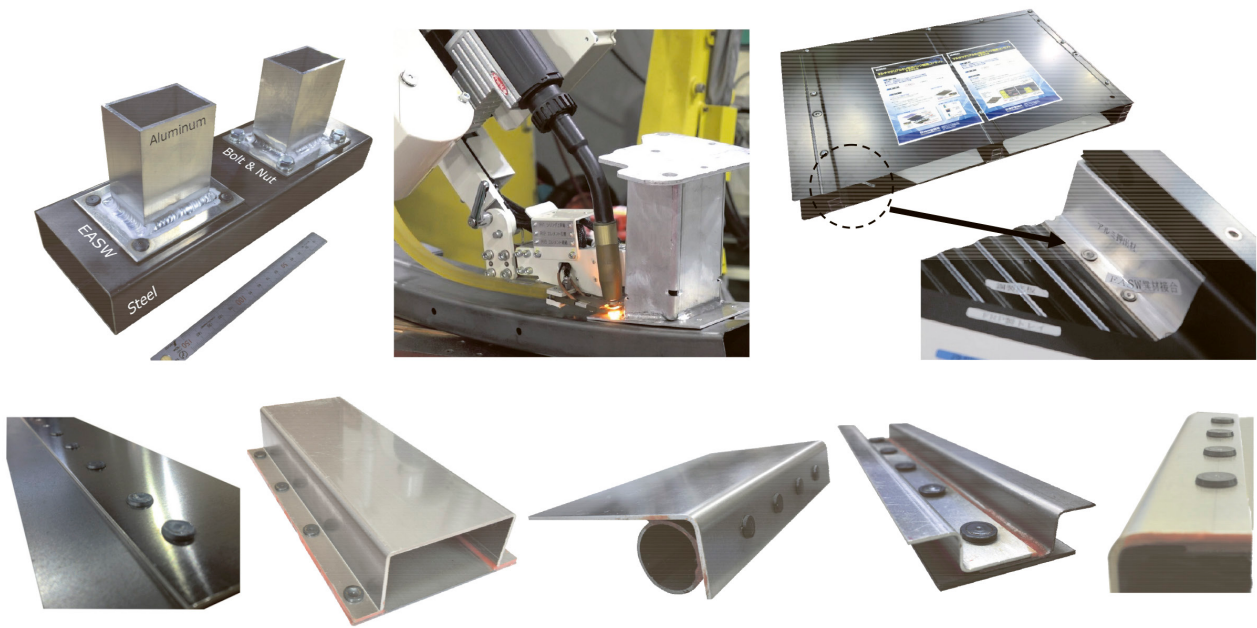


写真8 EASW を用いた異種材接合サンプル

を組み合わせた当社ならではの構造提案を行い、軽量化に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 武田実佳子, 漆原亘, 松本克史, 加藤淳: R & D 神戸製鋼技報, 57 (2007) 2, 69.
- 2) 田中耕二郎, 杉本幸弘, 西口勝也: マツダ技報, (2016) 33, 124.
- 3) 笹部誠二: 東京工業大学 学位論文乙第4047号, (2011)
- 4) 有年雅敏, 沖田耕三: 溶接学会誌, 71 (2002) 6, 20.
- 5) 大橋良司: 溶接学会誌, 87 (2018) 1, 28
- 6) 佐山満: 溶接学会誌, 87 (2018) 1, 71.
- 7) 熊井真次: 溶接学会誌, 87 (2018) 1, 48.
- 8) 河野隆之, 井上好章, 井上克明, 川市克己, 西尾一政: 三菱重工技報, 37 (2009) 5, 244.
- 9) 鈴木敦彦: 溶接技術, 産報出版, (2020) 6, 80.
- 10) Disassembly Report Audi 社: 「Q7」(上) 進化したマルチマテリアル構造, 日経Automotive, (2016) 11, 72.
- 11) 小橋泰三, 岩瀬哲, 前田恭兵: R & D 神戸製鋼技報, 67 (2018) 1, 98.
- 12) 陳亮, 鈴木励一: 溶接学会春季全国大会梗概集, (2017), 78.
- 13) 陳亮, 鈴木励一: R & D 神戸製鋼技報, 67 (2018) 1, 104.
- 14) R.Suzuki and C.Ryo: International Institute Welding annual conference, Doc.XII-2390-18, (2018)
- 15) R.Suzuki and K.Makii: Joining in Car Body Engineering 2017 Conference Proceedings, Module 2, Automotive circle, Germany, (2017), 225.
- 16) 平田好則: 溶接学会誌, 89 (2020) 3, 11.
- 17) 平田好則: 溶接技術, 産報出版, (2020) 6, 54.
- 18) 鈴木励一: プレス技術, 56 (2018) 9, 92.
- 19) 鋼とアルミを接合するロボットカメラで位置決め精度を高める, 日経Automotive, (2018) 9, 30.
- 20) 鈴木励一: 溶接技術, 産報出版, (2019) 5, 36.
- 21) 鈴木励一: 溶接学会誌, 88 (2019) 4, 20.
- 22) 陳亮, 鈴木励一: 軽金属溶接, 57 (2019) 12, 501.
- 23) R.Suzuki and C.Ryo: Welding in the world, (2019) 63, 1733.
- 24) 日経XTECH ニュース解説, 異種材料鋼製のEV向け電池パック, 神戸製鋼が試作品を公開, (2020.01.16)

(2020年6月4日受付)