

軽量高機能化に貢献するアルミニウム合金の接合技術*

熊谷 正樹**

Joining Technologies of Aluminum Alloys for Weight Reduction and High Functionality*

Masaki Kumagai**

Keywords: aluminum alloy, arc welding, friction stir welding, dissimilar joining, brazing

1. はじめに

近年、地球環境保護とエネルギー危機の観点から、輸送機器の軽量化がますます重要になってきている。中でも自動車の燃費改善には軽量材料の使用が最も有効であり、ボデーおよび部品へのアルミニウム合金の適用が盛んである。Fig. 1に自動車の軽量化と高機能化の概念を示す。二酸化炭素排出量規制が厳しくなり軽量化ニーズが高まっているが、一方では安全や快適性が強く求められるようになったため電子機器や制御機器の搭載が増え、車両重量が増える要因になってい

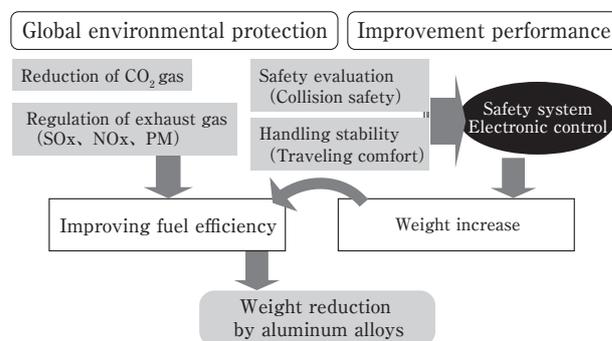


Fig. 1 Demand impacts on lightweight and high performances.

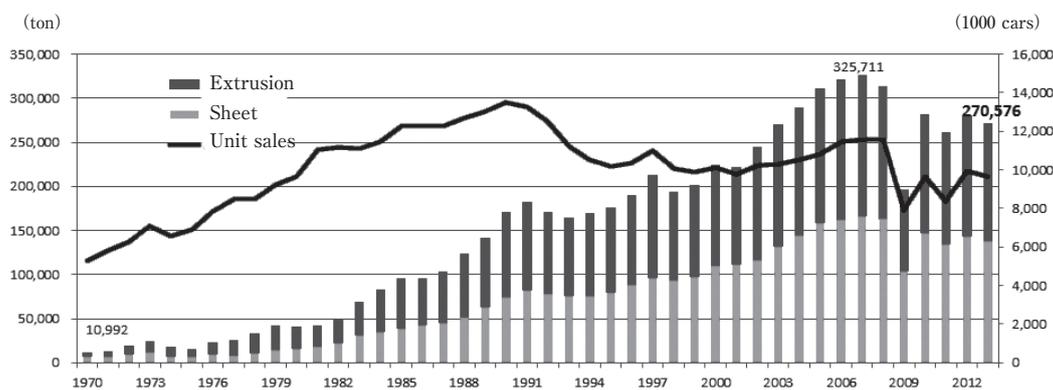


Fig. 2 Demand of wrought aluminum alloys for automotive use in Japan.

* 本稿は、名古屋大学グリーンモビリティ連携研究センターと中部産業連盟主催、次世代自動車地域産学官フォーラムの協力による「第2回次世代自動車公開シンポジウム～超軽量化技術の進化を目指して～」で講演し、ホームページに掲載された資料に加筆したもの
This paper is the revision of the manuscript which was lectured and published in the website in “The 2nd Next-generation Mobility Symposium -Toward Further Progress in Ultra-lightweight Technology-” organized by The Green Mobility Collaborative Research Center (GREMO) at Nagoya University and The Central Japan Industries Association (ChuSanRen), and supported by The Next-generation Mobility Forum for Regional and Industry-academia-government Cooperation.

** (株)UACJ 技術開発研究所 名古屋センター 第五部
No. 5 Department, Nagoya Center, Research & Development Division, UACJ Corporation

る。更なる軽量化のためには、アルミニウム合金の特長を十分に活かした利用が重要であり、他素材との接合技術の最適化が大きな課題となっている。Fig. 2に示すように、日本では自動車の生産量は大きな増加はないが、自動車用のアルミニウム合金の板および押出材の増加は著しく、自動車1台当たりのアルミニウム合金の使用割合が増えている¹⁾。世界的にも、高張力鋼による軽量化には限界があり、大型車やピックアップトラックを中心に今後大量のアルミニウム合金の需要が見込まれている。

車体や部品用のアルミニウム合金板や押出材の接合法では、融接に代えて熱影響や歪みの少ない固相接合の適用が増えつつあり、摩擦攪拌接合 (FSW: friction stir welding)²⁾、FDS (flow drill screw)³⁾などがその工法例として挙げられる。アルミニウムと鋼、アルミニウムと樹脂の異種金属、あるいは異種材料の接合技術も多種多様なものが開発されており、要求に合わせて日々進歩している。

また、Fig. 3に示すように、自動車の駆動システムも進化し、ガソリン車からハイブリッド車への代替により、二酸化炭素排出量が大幅に削減できる¹⁾。さらに、電気自動車や燃料電池車への移行も進み、新しい駆動システムに要する大電流の配線や制御機器とそれらのヒートマネジメントが重要になってきた。電気伝導性・熱伝導性に優れ軽量のアルミニウム合金への銅からの置き換えが進められており、高性能の熱交換器の組み立てや現行部位の銅との異種金属接合も重要な課題となっている。

ここでは、軽量化と同時に機能性を求められるよう

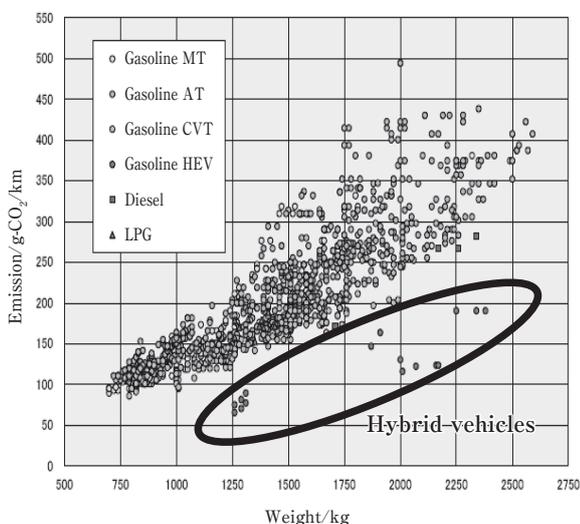


Fig. 3 CO₂ emissions on 10-15 modes of passenger vehicles in Japan.

になってきたアルミニウム合金の用途と、その加工の要となる接合技術について総括することを目的とした。

2. 自動車

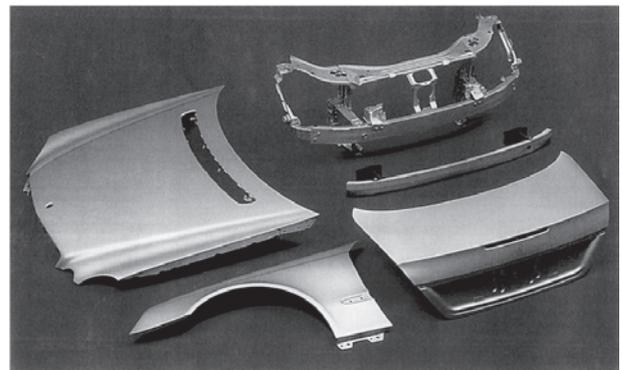
2.1 モノコック構造の接合

Fig. 4に自動車の外板にアルミニウム合金板が利用された例を示す¹⁾。Benz E Classのように、蓋ものと称されるフード、フェンダー、トランクなどは本体への取り付けがヒンジおよびボルトを介して行われ、アルミ化しやすいため鋼からの代替が進んでいる。Jaguar XJの例はオールアルミ製モノコック構造の車体であるが、アルミニウム合金同士の接合であるため電食や熱歪みの心配が少ない。

日本では初期のオールアルミ車としてホンダNSXがあるが、車体には、プレス成形時には軟らかく、焼付け塗装の加熱時に時効させることにより高い強度が得られる、バークハード性に優れた6000系アルミニウム合金板が開発され採用された。その合金板はプレス成形され、鋼板と同じく抵抗スポット溶接でアセンブリされた。当初、母材がアルミニウム合金の場合、溶接機側のクロム銅製電極と共晶融解を生じ易く、電極の損耗が激しく連続打点寿命が短い問題があった。対策として、母材、溶接機および電極の改良により解決が図られた。中でも生産工程の変更が最も少ない電極



(a) Benz E Class



(b) Jaguar XJ

Fig. 4 Outer closure parts manufactured of aluminum sheets.

材料の改良が有効で、具体的には、クロム銅に比べて導電率が高く、耐熱性に優れた抵抗溶接用電極材料が開発されている⁴⁾。

アルミニウム合金の板プレス品の接合には、摩擦攪拌点接合 (FSSW : friction stir spot welding) が用いられるようになってきた⁵⁾。鋼製の回転工具を、重ねたアルミニウム板に挿入・攪拌し、塑性流動にて上下の板を一体化して回転工具を抜き去るだけで抵抗スポット溶接並みの接合強度が得られ、日系自動車メーカーで多用されている。Fig. 5 にマツダRX-8のフードおよびリアドアに採用された例を示す⁶⁾。6000系合金板の接合部表側にはツール形状の穴と少々バリが生じるが、裏面は平坦であり、継手強度は安定している。既

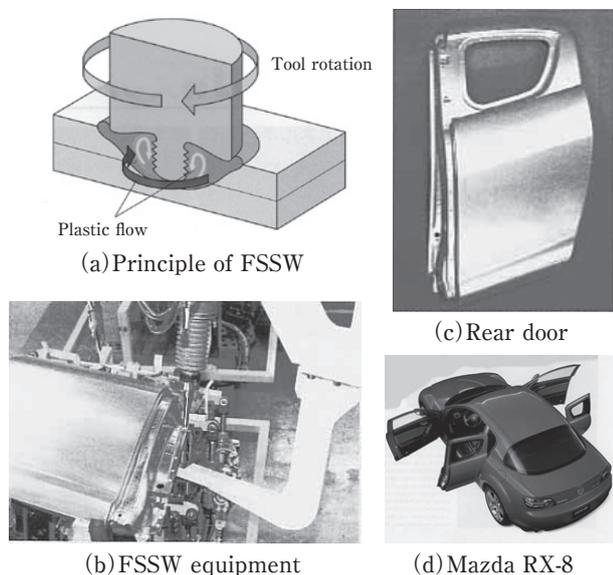


Fig. 5 Friction stir spot welding for hoods and doors.

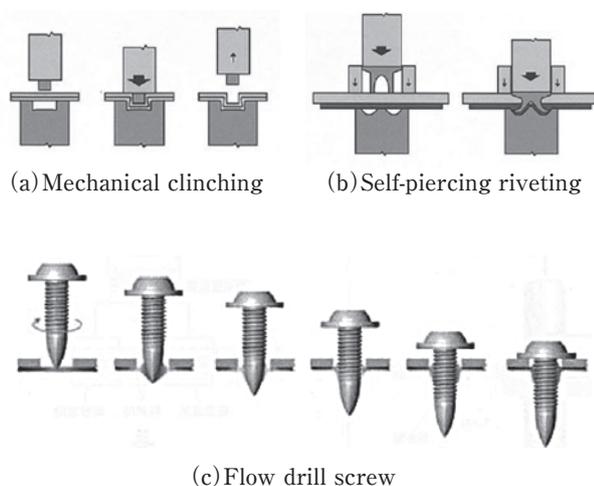


Fig. 6 Various mechanical joining methods for auto bodies.

に多数のロボットガンが稼働しており、ツールを交換することなく、数十万点の連続打点性が期待できる。

欧州では、Fig. 6 に示すメカニカルクリンチ¹⁾、セルフピアシングリベット¹⁾、フロードリルスクリューなどの機械的接合がよく用いられている。継手強度は比較的弱いが締結部品が不要なクリンチングは、外周部に窪みのあるダイとポンチで重ねた母材を挟んで加圧することにより、上板が押し込まれながら広がって下板から抜けにくくなる特長がある。継手強度を確保するため接着との組合せも前述のJaguar XJなどで用いられている。

セルフピアシングリベットは、頭頂面を持つ筒状の鋼製リベットを重ねた母材に工具で挟んで押し込み、リベットの筒状の先端が広がって上下板を締結する。先穴加工が不要で継手強度も高く、鋼板とアルミニウム合金板の接合も可能であるため、AudiやBMWなどで多くの実績がある。セルフピアシングリベットも、接着だけでは信頼性が満足できない場合に、接着と併用されることが多い。

最近では、Fig. 6 (c) に示すように先端の尖ったねじが高速回転しながら板を突き破り、最後は回転数を緩めて上下板を締め付けて締結するフロードリルスクリューが、Audi TTを初め鋼板との締結部位を含めて多くの車種に用いられている。

鋼板のボデーでは、車体構造の各部にレーザ溶接が多用されているが、アルミニウム合金でも、Audi A2でピラー部などにYAGレーザ溶接が用いられたのを初めとして、A6などではドアインナーの分割部に半導体レーザ溶接が用いられている。YAGレーザではアルミニウム合金に対する反射率が高いため、高パワーのレーザ溶接機を要したが、追って開発された半導体レーザはアルミニウムへの吸収率が高い波長の光を発振源にするためエネルギー効率のよい溶接が可能である。複数の車種でトランクリッドの上下が6000系合金の別プレス品として成形され、それらがへり継手などでファイラー入り半導体レーザ溶接され、外観では判らないほどの流麗なレーザブレイジングにより一体化されて

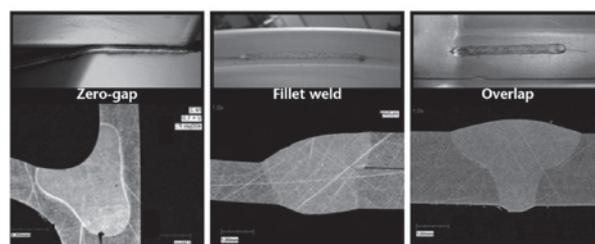


Fig. 7 Diode laser welds for a trunk lid and a door inner⁷⁾.

いる (Fig. 7)⁷⁾。また、2分割でプレス成形したトランクリッドの接合はレーザ溶接の他に、見えない部分をクリンチングで補強した接着で行っているものもあり、部位・部品の要件によって最適な接合技術が選定されている。

テラードブランクは板厚または材質の異なる板を予め接合しておき一体プレス成形の素材とするもので、材料の歩留りが良く、複数の金型でプレス成形し、トリミングした後に接合する手間が省ける。銅板ではレーザ溶接によるテラードブランクが広く実用化されているが、従来のレーザ溶接によると、アルミニウム合金では固液相間での水素溶解度の差が大きいことから、ポロシティが発生しやすく、それが起点となりプレス成形時に破断し易く継手の成形性が安定しない問題があった。その対策として、接合品質の安定した固相接合のFSWによるテラードブランクが開発されている⁸⁾。Fig. 8に厚さ0.8 mmと1.4 mmの5182-O板を予め突合せFSW線接合し、ドアインナーにプレス成形した試作例を示す。ここでは表面側に段差が来るように板を突合せ、ツールを段差に合わせて傾斜させて接合し、プレス成形に影響のない滑らかな継手としている。

2.2 スペースフレーム構造の接合

スペースフレーム構造は、均質一様な断面の柱でボデー骨格を形成するもので、Fig. 9は前部にアルミニ

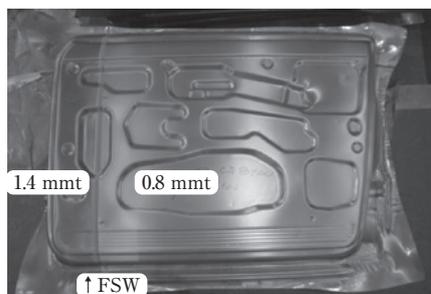


Fig. 8 FSW tailored blanks for a prototype door inner of 5182-O-0.8/1.2 mm.



Fig. 9 All aluminum spaceframe of Mercedes Benz SLS AMG.

ウム合金押出形材が採用された例である¹⁾。押出形材は一工程で複雑な閉断面の中空部材を得ることができるため、衝撃吸収能を要する部材への適用や部品点数削減に有効である。日本では、初代のホンダインサイトがアルミニウム合金押出形材を用いたスペースフレームで軽量構造を達成している。Audiの高級車種にはアルミ押出形材のスペースフレーム構造が多用されており、初期は、高品質鋳物の継手を介してミグ溶接で組み立てていたが、最近では形材同士を直接ミグ溶接している。安定した品質の継手を得るには、曲げた形材同士のギャップによる溶け落ちやオーバーラップなどの抑制が重要である。

スペースフレーム構造では押出性の良い6000系合金を不活性ガスアーク溶接する機会が多いが、凝固割れ防止のため溶加材にとも金ではなく4000系または5000系合金を用いたミグ溶接で組み立てられる。6000系合金の強度を上げようとする強度に寄与するMg₂Si量を増やさねばならない。その場合、溶加材の選定を間違えなければ溶接金属には割れは生じないが、溶融部に隣接する母材の熱影響部では溶接時の応力や入熱過多により粒界に析出した低融点のMg₂Siに起因する粒界割れ(マイクロフィッシャー)が生じることがある。マイクロフィッシャーの生じにくい溶接構造用材料として結晶粒を微細均一にした押出材が推奨される。

Fig. 10に衝突安全機能を有する6000系押出材の断面形状と、バンパーへの適用例を示す¹⁾。バンパーのリインフォースとクラッシュボックスは、衝突時のエネルギー吸収の機能が重要であるが、これらの肉厚2~3 mm程度の押出形材の溶接品質がバンパーシステム全体の機能に影響するため、薄肉材の溶接技術が重要である。交流パルスミグ溶接⁹⁾は、溶け落ちが少なく、ギャップ裕度に優れているため、自動車の骨格に板を溶

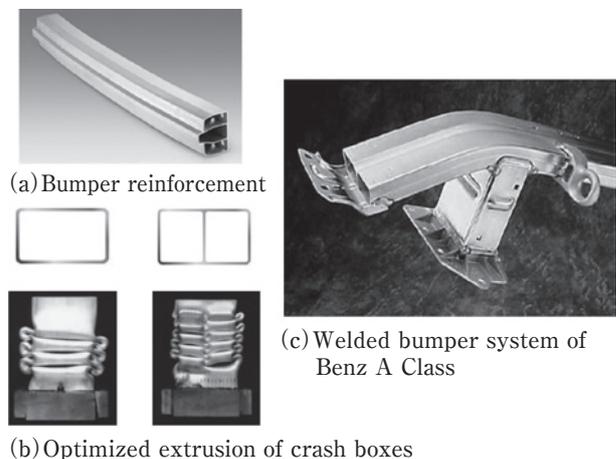


Fig. 10 Crash absorbing bumper systems.

接するなどの薄ものの接合に適している。また、低周波パルスミグ溶接¹⁰⁾も溶け落ち防止やギャップ裕度に優れた溶接法である。数100 Hzのパルス電流に1~10 Hz程度の低周波を重畳し、アーク長を変化させながら溶接でき、溶け込みの制御が容易で、熔融池の攪拌作用によりブローホールの発生が抑えられる。これらの薄板溶接技術とデジタル制御技術の進歩により、さらに安定した溶接品質が得られることが期待される。

Fig. 11に示すように構造部品にもアルミニウム合金が用いられる。自動車足周り部品であるサブフレームの組み立てにはミグ溶接やFSWが用いられている。日産スカイラインのサブフレームは、高周波溶接した5454合金をハイドロフォームにより異形断面のパイプとし、同種の板プレス品とともにミグ溶接により井桁形状にしている。また、ホンダのFCXクラリティの燃料電池システム搭載用サブフレームは、6000系合金押出材を嵌合しやすい継手形状にして組合せ、FSWによりラダー状に組み立てている¹¹⁾。部品を組み付けた治具を2台のロボットで支持して動かしながら固定したFSW装置で接合している。高剛性で軌跡精度の良いFSWロボットが開発され、曲線や曲面の接合部品の実用例が増えている。ここでも接合技術の適材適所が進んでいる。

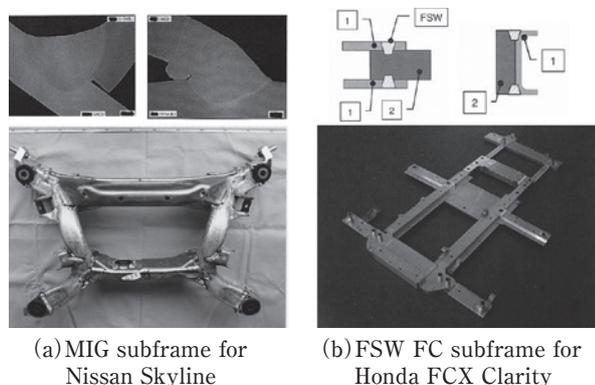


Fig. 11 Subframes manufactured by (1) MIG and (2) FSW.

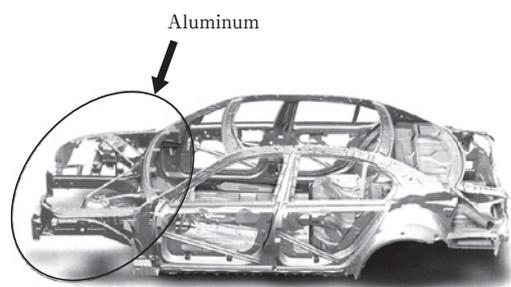


Fig. 12 Hybrid spaceframes manufactured of aluminum and steel of BMW 5 series.

2.3 マルチマテリアル化

近年、車体のマルチマテリアル化が進み、その一つとして車体の前部あるいは上部を鋼板からアルミニウム合金板に変えて操縦安定性を向上させる例がある。Fig. 12に示すように、BMW5シリーズでは、フロントメンバーのアルミニウム合金板と後部の鋼板との接合にセルフピアシングリベットとトランジションピースを用いた異種金属接合が行われた¹⁾。アルミニウム合金と鋼のクラッド材を介して、アルミニウム合金同士はミグ溶接、鋼同士はプロジェクション溶接で接合されている。Audi TTにも、サイドシルに田の字断面の6000系押出材が使われ、他部位にも押出材、板材、鋳物が適材適所に配置されている。アルミニウム合金主体の車体であるが、後部アンダーボデーには鋼板がセルフピアシングリベットにてシール材を介してアルミニウム合金板に重ね接合されている。

Fig. 13に示す例では、アルミニウム合金製のトランクリッドと鋼製のヒンジ部品の異種金属接合がFSSWで行われている¹²⁾。アルミニウム合金板側から回転ツールを鋼との界面直上まで差し込むことで、界面の酸化皮膜や汚れが攪拌部に掃き上げられ、新生面が出る。その状態で融点の8割程度まで発熱しているので相互拡散が生じる。界面には脆い金属間化合物は殆ど形成されず、広範囲に薄いアモルファス層が形成され強固な接合状態が得られる。

最近ではFig. 14に示すように、塗装した鋼板プレス品とアルミニウム合金ダイカスト品を重ねてFSWしたサブフレームがホンダ ACCORDに採用されている¹³⁾。この例では電食防止のため、アルミニウム合金と鋼の間にシール材を置いた状態でFSWを行っている。回転工具はアルミニウム合金側から差し込み、鋼の表面を僅かに擦る程度まで挿入し接合する。なお、レーザー照射による熱伝達速度差を利用した未接合部検知方法が品質保証のために用いられている。

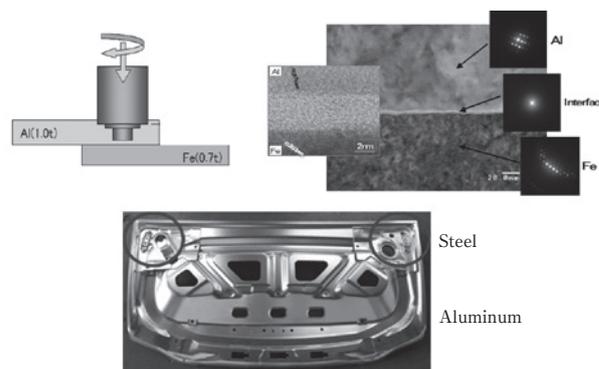


Fig. 13 FSSW between aluminum and steel sheets.

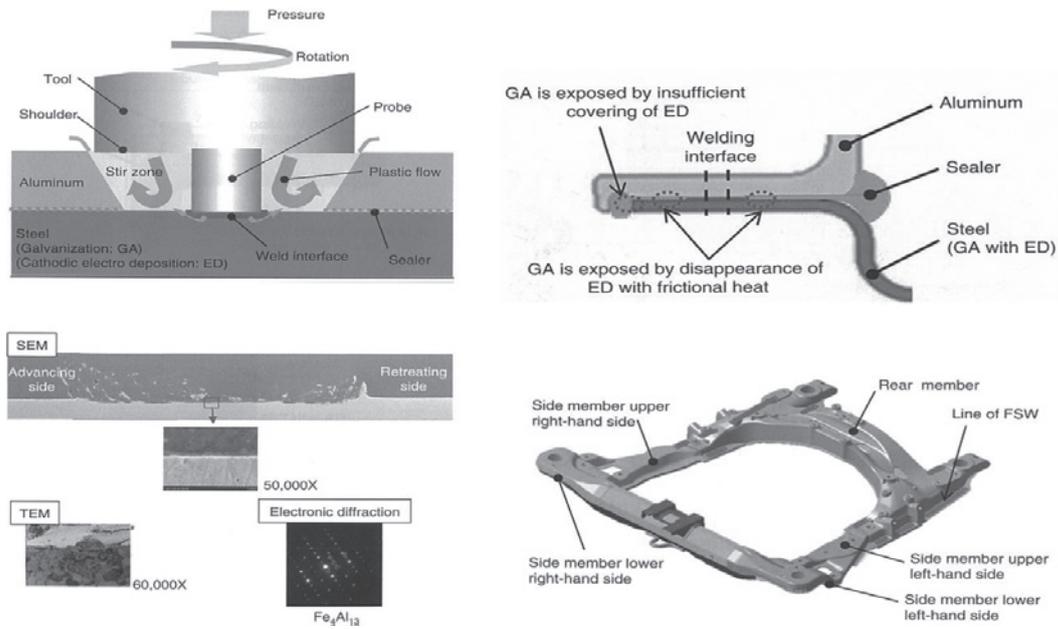


Fig. 14 Hybrid subframe by FSW between aluminum and steel¹³⁾

融接では困難と考えられていたアルミニウムと鋼の接合であるが、Fig. 15に示すように薄板であれば入熱の制御により金属間化合物の生成を抑制でき、重ね隅肉ミグ溶接が可能である¹⁴⁾。汎用溶接設備でアルミニ

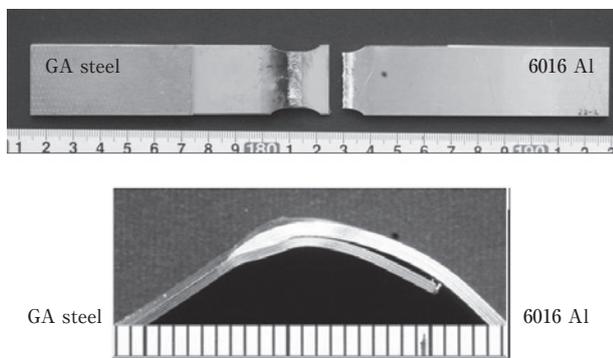


Fig. 15 MIG welding between aluminum alloy and galvanized steel sheets.



Fig. 16 Dissimilar material bodies of CFRP center cabin with aluminum parts of McLaren MP4-12C.

ウム合金と鋼の接合を行う場合に期待される。

アルミニウム合金と樹脂の接合では、Range Rover Evoqueのようにアルミニウム合金のルーフと鋼のサイドメンバーの全長を接着接合している例もある。一部にセルフピアシングリベットを用いているが、殆どを構造接着剤の強度で持たせている。ただし、熱歪み抑制と防食のため、接着材の量や性状の選定に多大な解析作業を要することは容易に推測される。Fig. 16に示すように、McLarenはCFRP製のキャビンにアルミニウム合金製のフレームをボルト締結した車体を開発している¹⁵⁾。今後、CFRPの破壊挙動と長期信頼性を十分理解することにより、軽量高剛性の樹脂の部位は増やせそうであるが、このような複雑な車体骨格では、今のところ接合部に金属が介在するものが主である。

アルミニウム合金と樹脂の直接接合技術の開発として、アルミニウム合金側への前処理により接合強度を上げる試みがなされている。Fig. 17の左は5052アルミニウム合金板表面に施された特殊陽極酸化処理(KO処理)¹⁶⁾である。アルミニウム合金の表面に微細な凹凸のある層を設けることにより、樹脂との熱圧着が強固に行え、信頼性のある異種材料継手が得られる。特殊陽極酸化処理したアルミニウム合金板に熱圧着や射出成形などで樹脂を加熱しながら加圧すると、ナノオーダーの微小孔に樹脂が入り込み杭打ち効果により強固な接合ができると考えられている。Fig. 17の右は接合部の断面EPMA結果であり、樹脂成分のCがKO処理層の隙間に入り込んでいる様子がわかる。

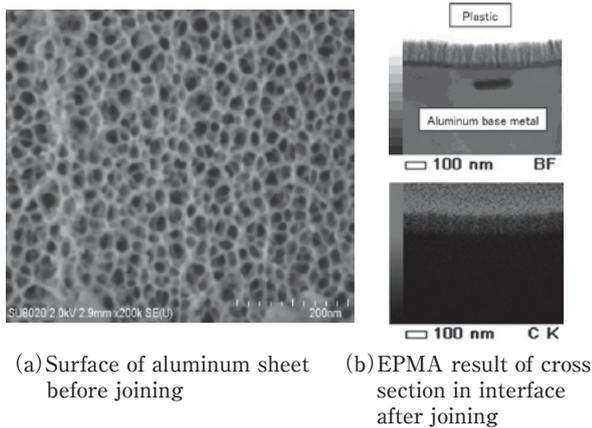


Fig. 17 KO treatment for joining between aluminum and plastics.

2.4 機能部品へのアルミニウム合金の適用

アルミニウム合金のろう付は、自動車用熱交換器の組み立てで数多くの実績がある (Fig. 18)。ラジエータ、コンデンサー、ヒーターコアなどの自動車用熱交換器用のアルミニウム合金のろう付は、一般的にノコロックフラックスを用いた窒素ガス中での連続炉中ろう付 (ノコロックろう付) であるが、一部で真空ろう付も実用化されている。真空ろう付によるものは、フラックスが製品に残留しない利点がある反面、クリアランスが大きくなると接合が困難になる。今後は生産性の良い連続炉による、フラックスを使わないろう付工法の実用化が求められるであろう。

次世代自動車の普及とともにインバータ冷却器や電池冷却器などの熱交換器のニーズが高まっている。Fig. 19 にパワーコントロールユニットのインバータ冷却器の例を示す。デバイスの高性能化が進むにつれて発熱量が増し、冷却能の高い冷却器が求められ、現在のところ水冷またはLLCでの冷却が主である。トヨタPriusのインバータ冷却器は、コルゲートフィン内蔵し両側から蓋をしたものに、冷却水が流れる容器の片面にセラミック絶縁基盤が接合される構造で、フィン、容器および基盤の接合には真空ろう付が採用されている¹⁷⁾。一方、半導体素子が基板上に半田付される。トヨタLexus LS600hのインバータ冷却器では、パワーデバイスの両面をアルミニウム合金板のフィンで挟み、フィンの両端に水路となるアルミニウム管をノコロックろ

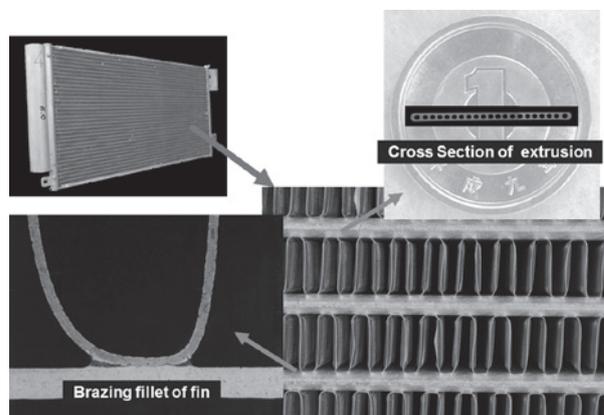


Fig. 18 Representative automotive heat exchanger.

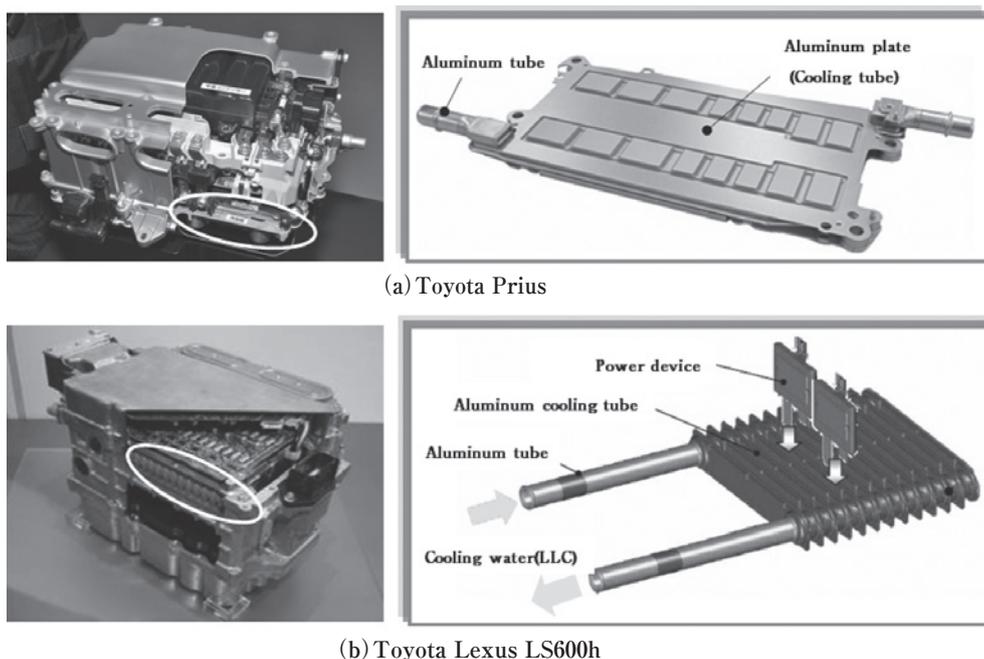


Fig. 19 Inverter cooling systems for power control unit.

う付した構造である¹⁸⁾。この分野では、発熱量の多い高性能素子を限られたスペースで冷却しなければならないため、通水抵抗が少なく熱効率の良い内部構造や素子搭載および使用時の熱応力の緩和に配慮が必要である。また、長期的に漏れの生じない信頼性の高い接合を行うことが必要で、高レベルの接合生産技術が求められる。

ハイブリッド車や電気自動車では、電池の性能と信頼性が重要である。集電体となるアルミニウム箔の接合には超音波接合が、ケースの蓋と胴体の接合にはレーザー溶接が用いられている。端子の接合には各種接合法が工夫されて用いられているが、最近では配線であるバスバーの銅からアルミニウムへの代替が進むにつれ、アルミニウムと銅の異種金属接合が重要になってきた。一つの方法として、Fig. 20に示す突合せFSW線接合が注目されている。アルミニウムと銅は低融点の脆い共晶を生じやすく、融接では温度制御が難しいが、溶融しないFSWであれば過剰な共晶を生じることなく接合が可能であるため、実用化が期待できる。この異種金属継手は配線のトランジションピースとしての機能も有するため、銅とアルミニウムの接合部位に挟んで同種の金属同士の接合としたい場合に有効である。

3. 鉄道車両

Fig. 21に鉄道車両の最高速度と単位長さ当たりの車両質量の関係を示す¹⁹⁾。高速車両の新幹線には主にアルミニウム合金が使われている。Fig. 22に新幹線の主要構造を示す。最近の新幹線で多いのが中空のダブルスキン押出型材を幅方向に不活性ガスアーク溶接する

構造であり、複数のトーチを並走させて複数の押出型材を溶接して構体の製作を行うこともある。ろう付ハニカムパネル (brazed honeycomb panel) 構造はそれより更に軽量高剛性であり500系新幹線に採用された。超高速のリニアモーターカーには、航空機構造に似たスキン板とフレームからなる構造が採用されているが、航空機で用いられるリベット接合ではなく、ストリングが一体となった押出型材がFSWで組み立てられているものがある。鉄道車両は長手方向への直線接合が多く、歪みの少ないFSW広幅材を用いることにより空力抵抗の少ない流麗な構体の組み立てが可能である。

Fig. 23は鉄道車両へのFSWの利用例であるが、車両構体だけでなく、大型の熱交換器や側カバーにも継手

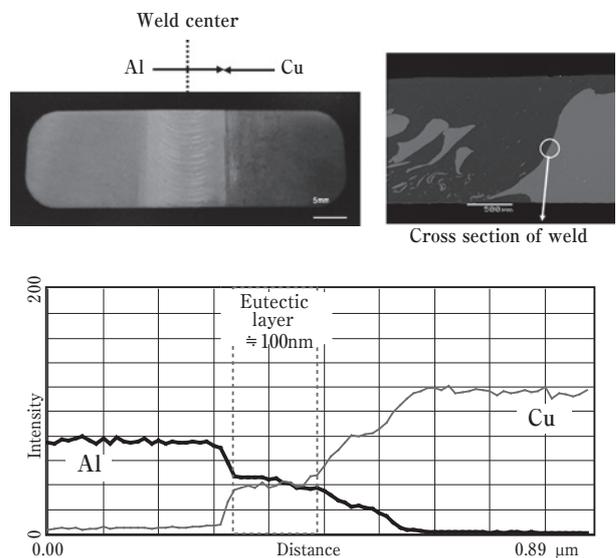


Fig. 20 FSW transition piece of Al and Cu for an electric terminal.

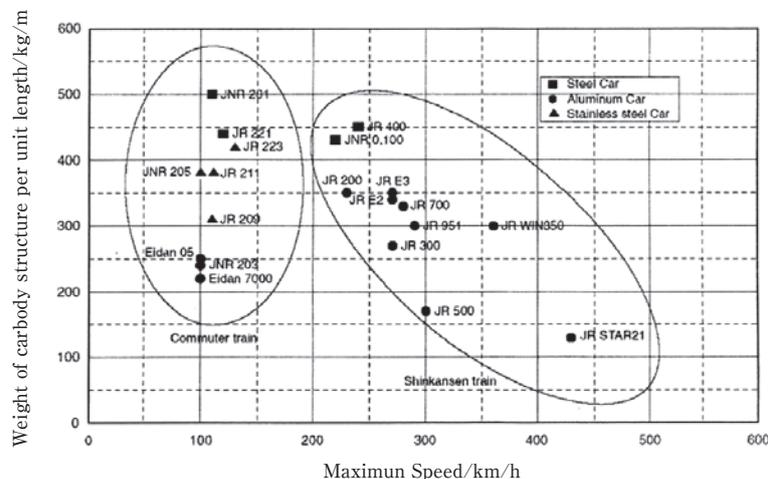


Fig. 21 Relation between maximum speed and weight of railway car bobbies.

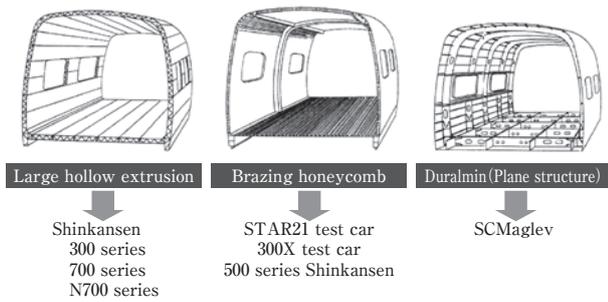


Fig. 22 Car body structures of high speed railway vehicles.

品質の安定したFSWが用いられている。同図 (b) の制御機器用ヒートシンクは、ハイトングでピッチの狭い楕円形押出型材を幅方向にFSWして製造されている²⁰⁾。同図 (c) に示す側塞ぎ板は遮音性能を上げるため、規則的な穴加工が施してある²¹⁾。

ろう付ハニカムパネルは、六角形のアルミニウム合金製コアの両面にアルミニウム合金製面板を、真空ろう付して作製されるサンドイッチ構造のパネルで、軽量で剛性が高いので輸送機器の軽量化に好適である (Fig. 24)²²⁾。このろう付ハニカムパネルは、Al-Siろう付をクラッドした面板を用いて真空ろう付され、ハニカムコアと面板は脚長を持った強固な接合となる。剛性を一定にした質量の比較ではアルミニウム合金板の約1/6の軽さである。また、ろう付ハニカムパネルはオールアルミニウム製であり、アルミニウム合金の特性をそのまま

引き継ぎ、溶接や曲げ加工も可能であり、リサイクルも容易である。軽量かつ高剛性であるため、500系新幹線の構体やN700系新幹線のガイシオオイに用いられている。

更なる軽量・高剛性を求めて、Fig. 25に示すように、アルミニウム合金板を最も剛性倍率が高い形状にした高剛性パネルをコアに用い、両面に平板を接着またはろう付したスマートコアパネルが開発されている²³⁾。ハニカムパネルに比べて薄くて剛性を要求される床や内装に適すると考えられている。

4. 航空機

Fig. 26に一般的な航空機の一次構造を示す。主に強度の高い7000系および2000系合金のスキン板とストリंगाおよびフレームがリベット接合されている。最近では、FSW線接合で組み立てたビジネスジェットが空を飛んでいる²⁴⁾ 亀裂が伝搬しにくい点接合の方が疲労強度面で有利との考えから、Fig. 27に示す穴やバリの残らないFSSWの適用も有力視されている^{25), 26)}。ツールのショルダーとプローブが別駆動することにより、塑性流動した金属を埋め戻す。「2. 自動車」で紹介したFSW点接合では、上板厚が厚くなると引張応力が加わった際に重ね界面の未接合部から残留した穴に向かって亀裂が進行し、継手強度が母材相当に上がらない場合がある。穴を埋めることにより、未接合部から薄い

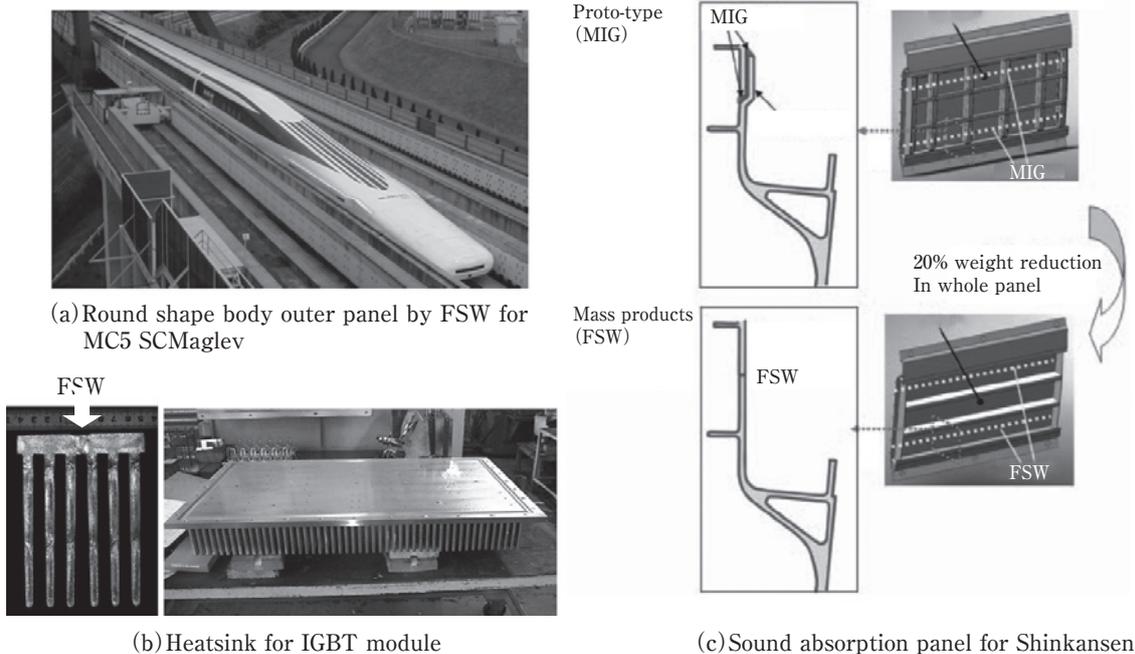


Fig. 23 Railway vehicle parts manufactured by FSW.

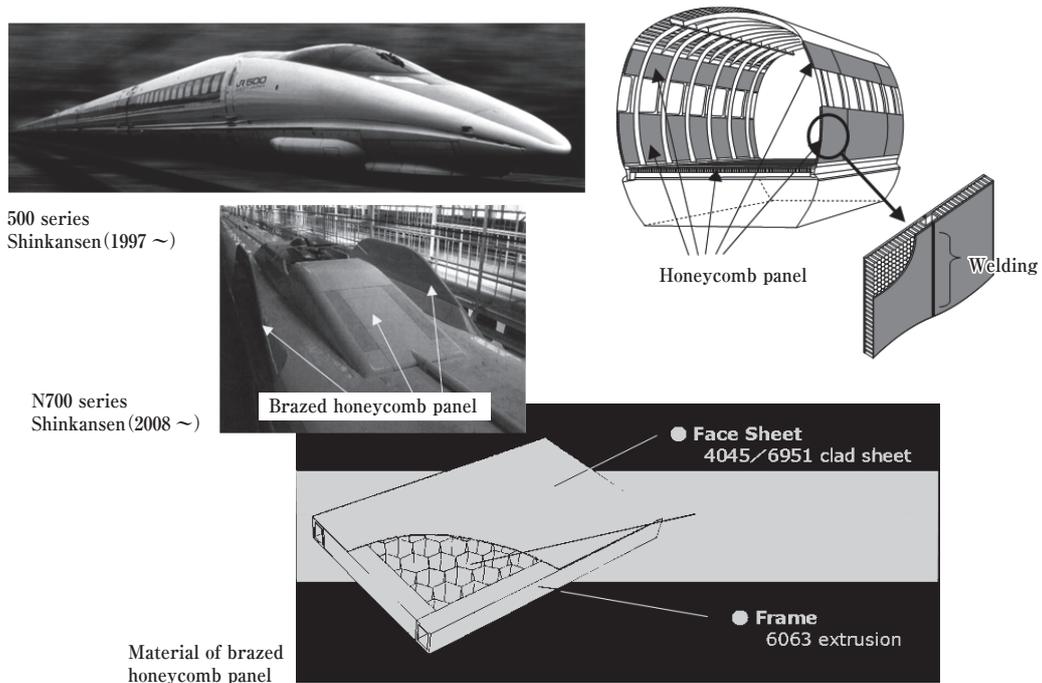


Fig. 24 Brazen honey-comb panels for rolling stocks.

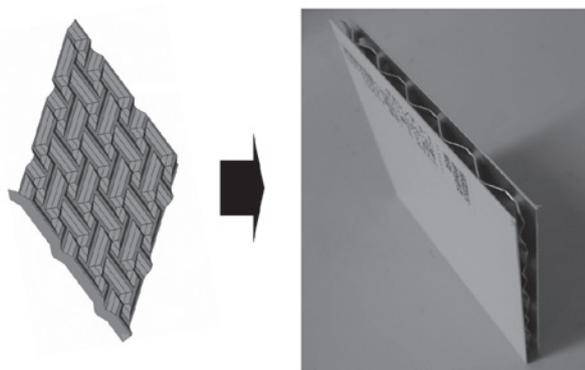


Fig. 25 Reinforced and textured adhesive sandwich panel.

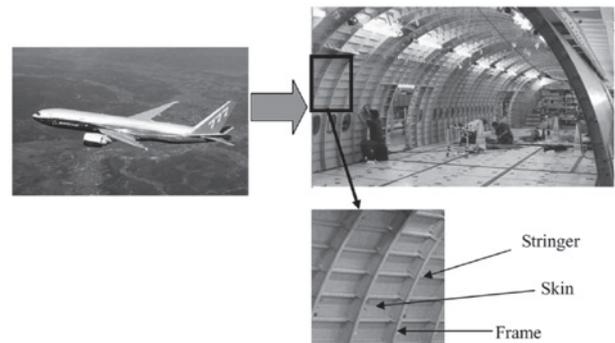


Fig. 26 Representative skin/stringer structure for a plane.

方の板表面に亀裂が進行するため栓抜け破断となり、所定の継手強度が得られる。

航空宇宙分野では、高強度の中空構造の製品が多く、中空の接合を効率よく行うため、ポピン型のツールを用いたセルフリアクティングFSWが開発されている。これは、複動式のツールを用い、プローブの先端に表面側と似た形状のショルダーを取り付け、表裏両方のショルダーで母材を挟んで加圧し、表裏ほぼ均一に摩擦攪拌することで、裏当て治具無しで中空構造の接合を可能にしている。片側からツールを差し込む従来のFSWに比べ垂直方向の荷重が少なくて済む²⁷⁾。Fig. 28にH II-Bロケットの燃料タンクを示す²⁸⁾。2219合金板を用いた筒状中空円周部の接合がこの工法で行われており、このロケットは複数回の打ち上げに成功している。

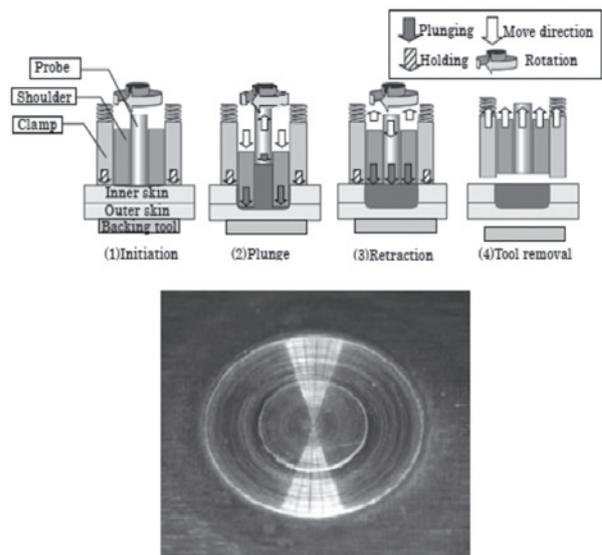


Fig. 27 Process and surface appearance of refill friction stir spot welding.

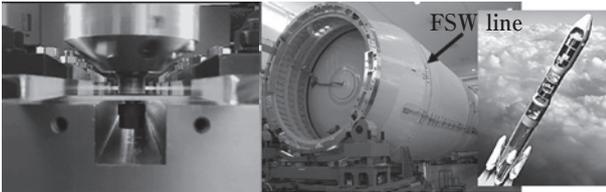


Fig. 28 Hollow construction by the self-reacting FSW technology for a H-IIB rocket fuel tank.

5. 土木建築

ここまで紹介してきた輸送機器には、必ず道路や線路、エネルギー供給などのインフラが必要であることを忘れてはならない。橋梁は自動車や鉄道車両の移動には非常に重要なインフラのひとつである。

Fig. 29は、およそ50年前に主に6000系合金をミグ溶接して作られた裏六甲ドライブウェイの車道橋の外観である²⁹⁾。殆どメンテナンスすることなく、溶接部も含めて顕著な腐食は見られず健在である。Fig. 30にFSW広幅形材を歩道橋、跨線橋および車道の歩道の床版に用いた例を示す。歪みの少ないFSWで6N01合金形材を幅方向に接合したパネルを用いるため、平坦な床面が得られる³⁰⁾。海に近い場所でもFSW橋梁床版が用いられており、鋼床版に比べて腐食が進行しにくく、塗装などのメンテナンスに掛かる手間が少ない。現在では、軽量で耐食性に優れるアルミニウム合金がインフラ整備に欠かせない材料となってきている。

Fig. 31に近年開発された隅肉FSWの模式図を示す³¹⁾。回転せず母材表面を長手方向に滑っていくフィレット形状のショルダーを用い、T字に突合せた板にフィラ



Fig. 29 Bridge construction manufactured by MIG welding 50 years ago.

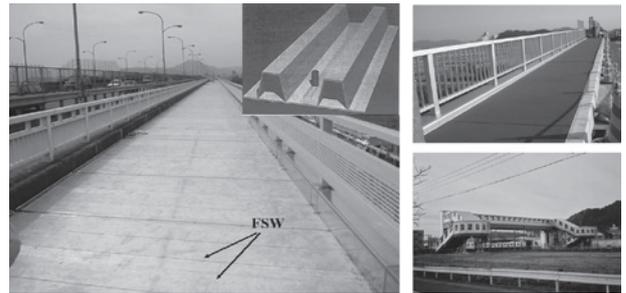


Fig. 30 Bridge floor panels manufactured by FSW.

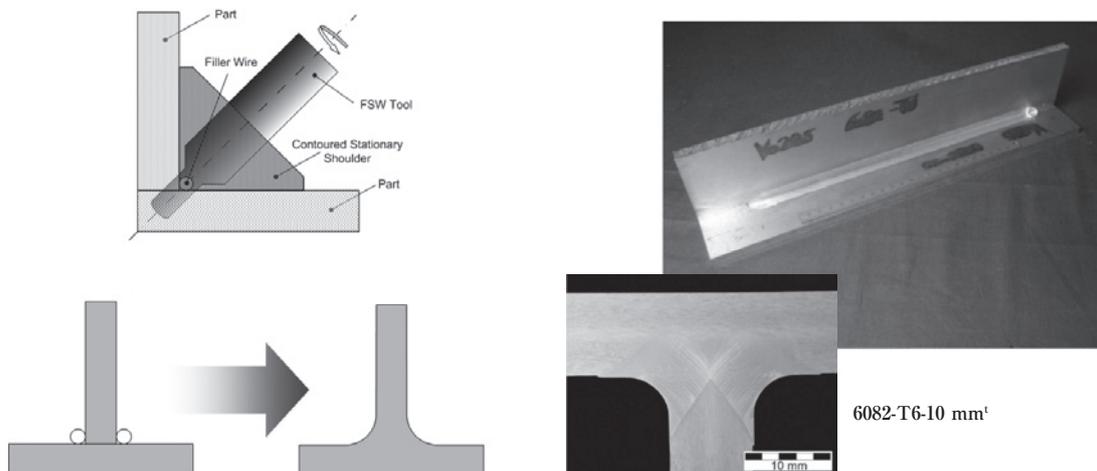


Fig. 31 Stationary shoulder fillet FSW with a filler metal.

ーメタルを置いて、ショルダーを押し付けながらショルダーの中から突き出したプローブにより脚長部を攪拌する方法である。FSWは基本的に溶加材を用いないが、本法の応用により隅肉部や隙間を充填しながら滑らかな形状の品質の安定した継手を得ることが可能となる。この工法は、隅肉溶接が多く用いられる大型溶接構造物への利用が期待される。

6. おわりに

ここに挙げた他にも、超音波半田付、電子ビーム溶接、回転摩擦圧接、電磁シーム圧接など、新しく開発された技術や従来技術をうまく応用した方法がアルミニウム合金の接合に実用化されている。これらの接合技術をうまく融合させることにより、アルミニウム合金製の車体および部品の生産コストが大幅に軽減され、輸送機器の軽量化と高性能化が大きく推進されるものと期待される。また自動車のマルチマテリアル化に伴い、材料や要件によって最適な接合方法を選定する技術力がますます重要となってくるであろう。ここに紹介した以外にも、船舶、IT、電機、食品などの分野で、アルミニウム合金の利用拡大が進んでいる。各分野で材料の特長を余すことなく機能させるには、接合技術はますます重要な役割を担うものであり、技術開発に注力していく必要がある。

7. 謝辞

日本アルミニウム協会のホームページの各部屋を参考にさせていただきました。ここに御礼申し上げます。摩擦攪拌点接合の資料をご提供頂きましたマツダ株式会社殿および川崎重工業株式会社殿、FSWサブフレームの資料をご提供いただきました株式会社本田技術研究所殿、リニアモーターカーの写真をご提供頂きました東海旅客鉄道株式会社殿、ロケットの写真をご提供頂きました三菱重工業株式会社殿およびFSW橋梁床版の写真をご提供頂きました株式会社住軽日軽エンジニアリング殿に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) <http://www.aluminum.or.jp/>, 日本アルミニウム協会「自動車の部屋」
- 2) C. Dawes : *Welding & Metal Fabrication*, **1** (1995), 13-16.
- 3) J. E. Gould : *Welding Journal*, **91** (2012), 23-34-s.
- 4) 熊谷正樹, 佐野啓路, 永田公二, 難波圭三 : 住友軽金属技報, **35** (1994), 145-150.

- 5) 熊谷正樹, 田中晃二 : 軽金属学会第102回春期大会講演概要 (2002), 247-248.
- 6) R. Sakano, M. Fujimoto et.al. : 3rd Int. Sympo. on Friction Stir Welding, Kobe, Sep. (2001), CD-ROM.
- 7) M. Ruterling, A. Luft : *LTJ*, **3** (2012), 42-45.
- 8) 熊谷正樹, 箕田 正, 田中晃二, 浅野峰生 : 自動車技術会秋季学術講演会 (2005), 13-14.
- 9) 全 紅軍, 上山智之 : 軽金属溶接, **39** (2001), 328-334.
- 10) 山本英幸, 原田章二, 上山智之, 小川俊一 : 溶接学会論文集, **10-2** (1992), 25-30.
- 11) 小林努, 佐山満, 矢羽々隆憲, 加藤高士 : *Honda R&D Technical Review* **21** (2009), 46-54.
- 12) 田中晃二, 熊谷正樹, 吉田英雄 : 軽金属, **56** (2006), 317-322.
- 13) 宮原哲也, 佐山満, 矢羽々隆憲, 大浜彰介, 畑 恒久, 小林 努 : *Honda R&D Technical Review* **25** (2013), 71-77.
- 14) 福田敏彦, 熊谷正樹, 難波圭三 : 軽金属学会春期大会概要, **59** (2007), 112-113.
- 15) 伊藤清文, 熊谷正樹 : 住友軽金属技報, **52** (2011), 101-106.
- 16) 長谷川真一, 三村達矢, 本川幸翁, 兒島洋一 : 古河スカイレビュー, **9** (2013), 64-67.
- 17) 納 康弘, 田中克征 : 軽金属溶接, **50** (2012), 8-14.
- 18) 山中 章, 稲垣充晴, 山下尚希 : アルミニウム, Vol. **82**, No. 18 (2011), 1-3.
- 19) <http://www.aluminum.or.jp/>, 日本アルミニウム協会「鉄道車両の部屋」
- 20) 中嶋祐司, 松本史朗 : 軽金属溶接, **39** (2001), 321-327.
- 21) 古河スカイレビュー, **9** (2013), 48-50.
- 22) 伊藤泰永 : 住友軽金属技報, **53** (2012), 79-91.
- 23) 高橋昌也 : 住友軽金属技報, **52** (2011), 51-56.
- 24) 時末 光, 篠田 剛, 熊谷正樹 : FSWの基礎と応用, 日刊工業新聞社 (2005).
- 25) 熊谷正樹, 青木健太 : 軽金属溶接, **44** (2006), 560-564.
- 26) H. Okada, K. Kamimuki, and M. Fujimoto : *SAE Int. J. Aersp.* **6-1** (2013), 299-304.
- 27) 田中 直, 熊谷正樹, 渋谷和久, 吉田英雄 : 溶接学会秋季全国大会講演概要第75集 (2004), 226-227.
- 28) 後藤智彦, 坂口秀明, 佐藤広明, 山田 毅, 田中大助, 原 英総 : 三菱重工技報, **42** (2005), 234-237.
- 29) <http://www.aluminum.or.jp/>, 日本アルミニウム協会「アルミ建築・土木の部屋」
- 30) 大隅心平, 山口進吾, 熊谷正樹, 田中 直, 林 典史, 喜田 靖 : 住友軽金属技報, **44** (2003), 147-156.
- 31) J. P. Martin : *Proceedings of the 1st International Joint Symposium on Joining and Welding*, Osaka, Nov (2013), 477-482.



熊谷 正樹 (Masaki Kumagai)
(株)UACJ 技術開発研究所 名古屋センター
第五部