

## 自動車用アルミニウム合金の接合技術\*

福田 敏彦\*\*

## Welding and Joining Technologies on Aluminum for Vehicles\*

Toshihiko Fukuda\*\*

**Keywords:** aluminum, steel, inter metallic compounds, heat input, welding, joining

## 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重要になっている。中でも自動車の軽量化には軽量材料への置換が効果的であり、ボディおよび部品の鋼からアルミニウムへの転換、さらに樹脂やCFRPへの置換も検討されている。これらの軽量化は単一で使われるケースもあるが、多くは複数の素材を適材適所で用いるマルチマテリアル化が進む中、アルミニウム合金の特長を十分に活かした利用と、他素材との接合が大きな課題となっている。アルミニウム合金の接合に関する新しい技術として、Fig. 1の摩擦攪拌接合(FSW: friction stir welding)<sup>1)</sup>などの固相接合

やFDS (flow drill screw) に代表される機械的接合などがあるが、アルミニウムと鋼、アルミニウムと樹脂の異材接合技術も多種多様である。また、自動車の駆動システムも進化し、ハイブリッドなども含めた電動化が拡大するにつれて、高電圧の配線や制御機器、それらのヒートマネージメントが重要となってきた。この分野においても軽量で導電性に優れたアルミニウム合金が鋼からの置換で大きな需要となり、今後は鋼との接合が重要な課題となる。

## 2. アルミニウム合金の溶接性

代表的な接合法として溶接がある。

アルミニウムの溶接法に触れる前に、溶接性に関するアルミニウムの特徴について簡単に述べる。

## 2.1 アルミニウムの物性と溶接性

アルミニウムは鋼に比べ、比重は約1/3と小さく、輸送機器などの分野で有望な軽量材料の1つである。

一方、溶接に関する物性として、融点は絶対温度で1/2と低く、熱伝導度は約3倍高く、また、線膨張係数は約2倍大きい。従って、溶接に際して鋼材とは異なる作業上の諸注意が要求される。アルミニウム表面の硬く緻密な酸化被膜は融点が高く、健全な溶接を阻害するので、前処理やアルゴンアークの清浄作用によって除去する必要がある。また非常に酸化されやすいため、溶接の際には溶融部を不活性ガス雰囲気にするなど環境に留意する必要がある。

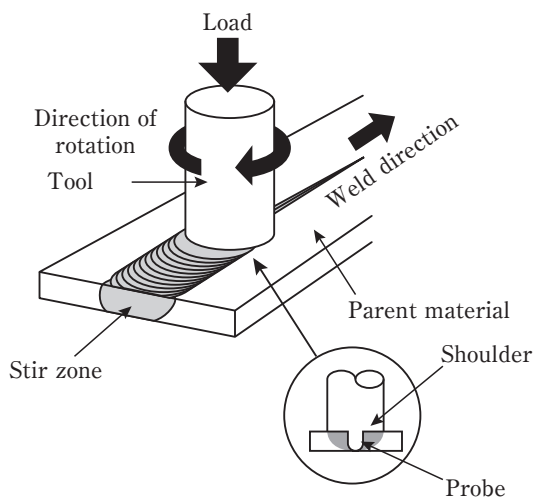


Fig. 1 Friction stir welding method.

\* 本稿は、溶接学会誌, 84 (2015), 519-527. に掲載されたものを改訂  
Revision of Journal of The Japan Welding Society, 84 (2015), 519-527.

\*\* (株)UACJ 技術開発研究所 第六研究部  
No. 6 Research Department, Research & Development Division, UACJ Corporation

## 2.2 アルミニウム合金の分類

アルミニウム合金の分類を Fig. 2<sup>2)</sup> に示す。

アルミニウム合金は加工法の観点から展伸材と鋳物材とに大別される。また、強化機構の観点から、2000系、6000系、7000系に代表される熱処理合金と1000系、3000系、5000系に代表される非熱処理合金に分類される。

## 2.3 熱影響による組織変化

溶接でのアークによる入熱は直下の熔融池を沸点近くまで加熱し、母材側では、熔融直前であるボンド部から室温近くまで温度分布が生じる。これが母材の受ける熱影響である。

溶接入熱によって、溶接金属・熱影響部・原質部で複雑な組織変化とそれに伴う機械的性質の変化が生じる。組織変化の例として Fig. 3<sup>3)</sup> に示す。

熱処理合金の熱影響部では、過時効域で強さが最低となる。溶接後、全体を再加熱処理(焼き入れおよび焼き戻し処理)できる時は元の性質に回復できるが、圧延加工と熱処理の組合せで得られた特別な材質の場合は再加熱処理でも完全な回復は難しい。

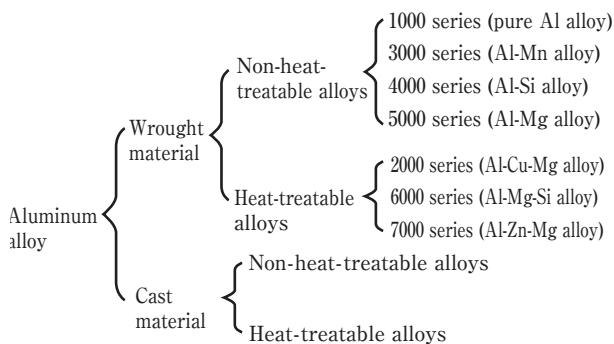


Fig. 2 Series of aluminum alloys.

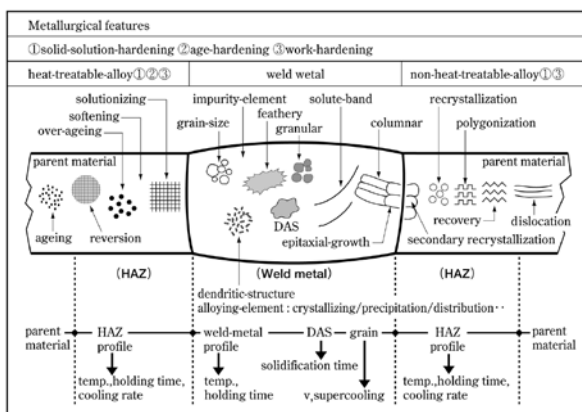


Fig. 3 Cause and effect diagram on arc welding joints.

非熱処理合金では、O材では熱影響を受け難いが、加工硬化したH材では熱影響部の軟化が進み、特に、約300℃以上に加熱された部分は著しく軟化する。高加工度材の方が再結晶温度は下がり、軟化部の幅が広くなり、また、相対的に軟化が著しくなる。

## 2.4 不完全部の発生原因と対策

### 2.4.1 溶接割れ

溶接における割れは、本質的には鋳物と同様、合金の組成が大きく影響する。

溶融部は鋳物と同様に凝固組織となっており、粒界や亜粒界は共晶組織や偏析のためマトリックスより融点が低く、凝固時に最後まで液相が残存する。Fig. 4<sup>4)</sup> に示すごとく、この共晶融解部分に、溶接部の熱膨張とその後の収縮に伴う熱応力、あるいは外部からの拘束力が負荷されるとCavityを生じ、微小割れになる。

この過程を図式的に示すと Fig. 5<sup>4)</sup> のごとくである。

割れ発生場所は溶接金属中と熱影響部に分かれる。割れの形態は、凝固割れと融解割れに分かれる。アル

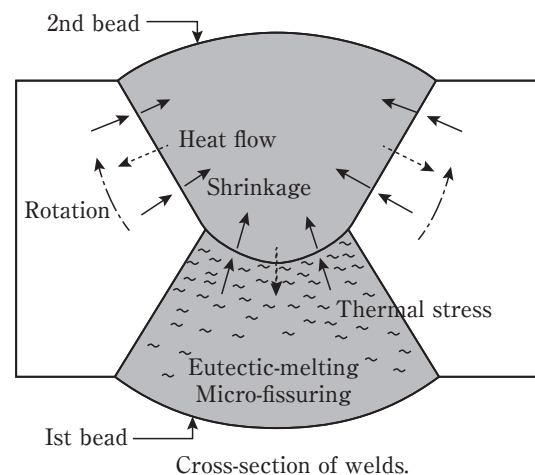


Fig. 4 Schematic models in formation of eutectic-melting and micro-fissuring in 2-pass welds of aluminum alloys.

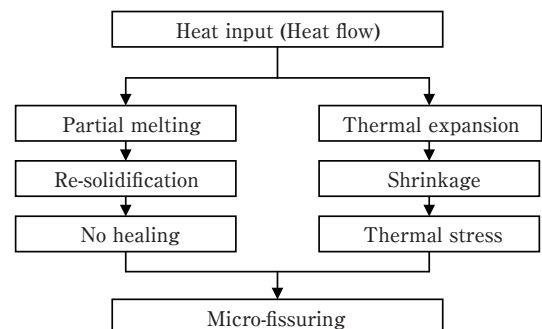


Fig. 5 Process of micro-fissuring.

ミニウム合金継手の割れ抑制策は Table 1<sup>5)</sup> のようにまとめられる。

2.4.2 気泡 (ポロシティ)

気泡 (ポロシティ) 発生の要因については、多くの研究がなされ、その結果報告も多い。また、防止策としても Fig. 6<sup>6)</sup> に示す特性要因図が提唱されている。

しかし、合金元素の影響については系統的にまとめたものは少ない。Table 2<sup>7)</sup> に示すように、純アルミニウムとアルミニウム合金を比較するとポロシティは純アルミニウムの方が発生しやすい。これは Fig. 7<sup>7)</sup> に示すように、アルミニウム合金になるとポロシティ発生の主な原因となる水素の固溶度が大きくなるからと考えられている。

3. 接合方法の特徴の比較

Table 3 に、自動車の車体製造に用いられる代表的な接合方法の特徴を示す<sup>8)</sup>。各接合方法に対する適用

Table 1 Type of cracking and countermeasures for weld's cracks.

Place of occurrence	Type of cracking	Elements of parent material	Impurities of parent material	Elements of filler metal
Weld metal	Solidification cracking	Effective	Effective	Effective
	Liquation cracking	Effective	Effective	Effective
HAZ	Liquation cracking	Effective	Effective	Not effective

可能な厚み、設計自由度に影響する継手形状、隙間やギャップに対する接合部の精度、タクトタイムに影響

Table 2 Gas volume of aluminum alloys.

Alloy series	Alloy (evaluated sample)	Total gas amount cc/100 g
1000 (pure Al)	1070 (slab)	0.16~0.20
2000 (Al-Cu alloy)	2017 (extrusion)	0.18~0.30
3000 (Al-Mn alloy)	3003 (can)	0.18~0.25
4000 (Al-Si alloy)	4043 (plate)	0.25~0.35
5000 (Al-Mg alloy)	5052, 5083 (plate)	0.20~0.30
6000 (Al-Mg-Si alloy)	6361 (billet)	0.16~0.38
7000 (Al-Zn-Mg alloy)	7N01 (shapes)	0.15~0.40

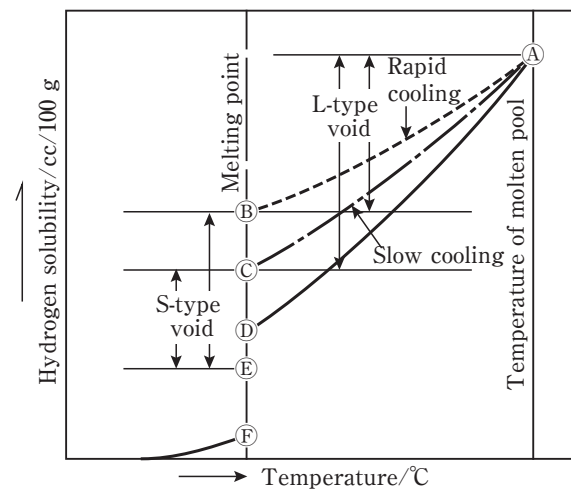


Fig. 7 Schematic diagram of hydrogen solubility curve.

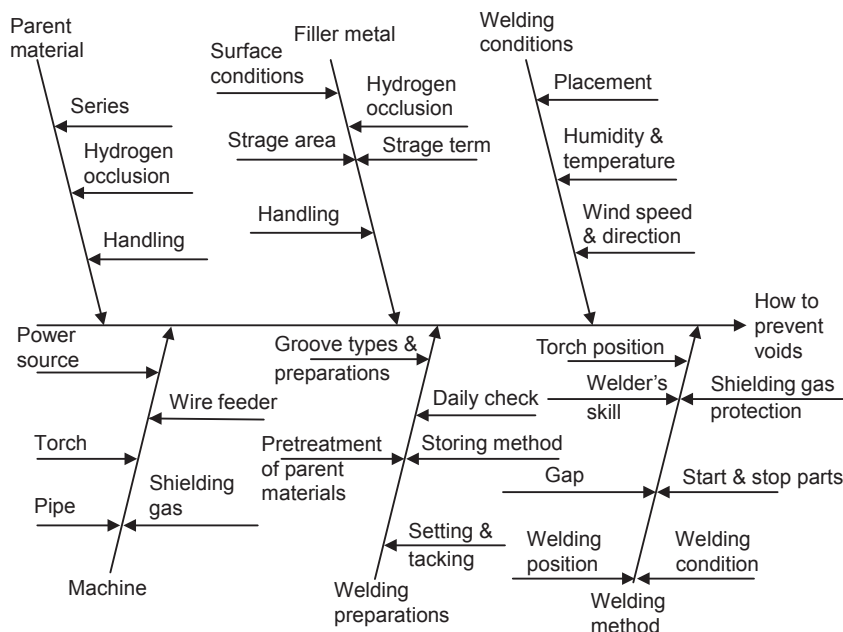


Fig. 6 Cause and effect diagram to prevent voids.

**Table 3** Comparison with welding and joining technologies for vehicles.

Technology		Thickness (mm)	Joint type			Joint precision	Welding speed (m/min)	Degree of difficulty on automation	Cost		HAZ area	Controlling Inner imperfection	Work environment	Degree of difficulty on dissimilar joint
			Bat	Fillet	Lap				Initial	Running				
Arc welding	MIG	1.0~	OK	OK	OK	OK	~1.0	OK	Mid	Mid	Large	Care	Care	Care
	TIG	~3.0	OK	OK	OK	OK	~0.5	Care	Small	Mid	Large	OK	Care	Care
Resistance spot welding		Total 10	NG	NG	OK	OK	~1.8	OK	Mid	Large	Small	OK	Care	Care
Adhesion		Total 10	NG	NG	OK	OK	-	Care	Small	Mid	Small	OK	Care	OK
Friction stir welding		~50	OK	Care	Care	NG	~6.0	OK	Mid	Small	Mid	OK	OK	OK
Friction stir spot welding		Total 6.0	NG	NG	OK	OK	~1.8	OK	Mid	Small	Small	OK	OK	Care
Self piercing rivet		Total 6.0	NG	NG	OK	OK	~1.8	OK	Mid	Large	Small	OK	OK	OK
Laser welding		~10	OK	OK	OK	NG	~10	OK	Large	Large	Small	Care	Care	Care
Hybrid laser welding		~10	OK	OK	OK	Care	~5.0	OK	Large	Large	Small	OK	Care	Care

する接合速度，ロボット化やライン化などの自動化への対応，コスト，ひずみや変形の要因である熱影響，内部欠陥および異種金属接合の可能性について比較した。

また，**Table 4**には，自動車のアルミニウム構成材料の組合せ（適用部位）と採用されている接合方法を整理した<sup>8)</sup>。適用部位を構成する素材に応じた最適な接合方法を選定し，軽量化とコストのバランスを保つことが重要である。また，ボディ構造毎に具体的な接合技術を整理すると**Table 5**となる<sup>9)</sup>。

### 3.1 モノコック構造のアルミニウム車体と接合技術

モノコック構造の代表的なオールアルミニウム車としては1990年発売のホンダNSX (**Fig. 8**)がある<sup>8)</sup>。構成する材料としては，車体成形時には軟らかく，焼付け塗装時の加熱で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を採用しており，プレス成形した板材のアセンブリは鋼板と同じ抵抗スポット溶接が多用された。

最近では，アルミニウム合金の板プレス品の接合には，**Fig. 9**に示す低入熱の摩擦攪拌点接合（FSSW：friction stir spot welding）<sup>10),11)</sup>が用いられており，マツダ，トヨタで多用されている。さらにマツダでは，

**Table 4** Examples of ways to select welding methods.

	Forge	Cast	Extrusion	Plate
Plate	Wheel	Frames, wheel, chassis parts	Frames	Panel
	AW	AW, LW	AW, LW	AW, SW, AD, FSW, R, LW
Extrusion	Frames	Frames, chassis parts	Frames, bumper	
	AW	AW, FSW, R, LW	AW, SW, FSW, LW	
Cast	Frames, chassis parts	Frames		
	AW, FSW, LW	AW, FSW, LW		
Forge	-			

Method

AW: Arc welding

LW: Laser welding

SW: Spot welding

AD: Adhesion

FSW: Friction stir welding

R: Riveting

**Fig. 8** Monocoque structure vehicle (NSX/HONDA).**Table 5** Examples of vehicles made of aluminum.

Structure	Car / maker		Aluminum type ratio/ %			Welding and joining methods						
			Plate	Extrusion	Cast	Arc	Spot	SPR	Clinch	Laser	Adhesion	
Monocoque	Nsx / honda	1990~	88	12	0	○	○					
	XJ / Jaguar	2003~	85	10	5			○				○
Space frame	A8 / Audi	1194~	55	23	22	○	○	○	○			
	Insight / honda	1999~	57	18	25	○	○					
	A2/Audi	1999~	57	30	13	○		○			○	
	360Modena/Ferrari	1999~	18	48	38	○	○	○				
	New A8/Audi	2002~	67	21	12	○		○			○	



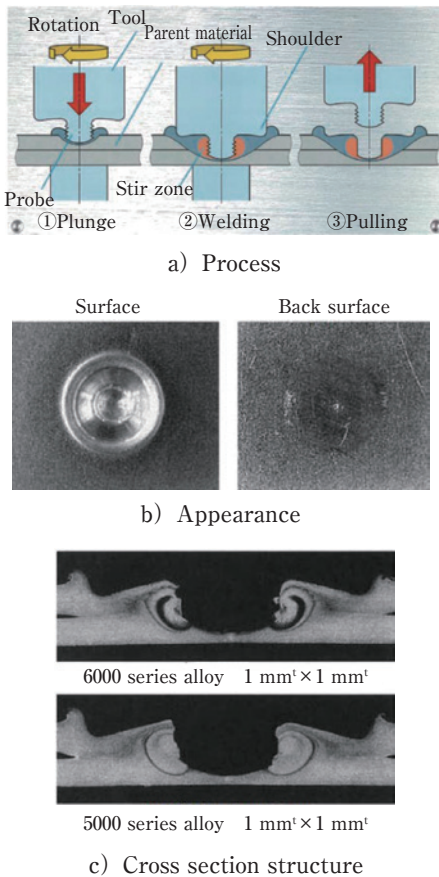


Fig. 9 Friction stir spot welding.

アルミニウム合金製のトランクリッドと鋼板のヒンジの異種金属接合を摩擦攪拌点接合で行っている<sup>12)</sup>。

欧州では、先穴が不要で鋼板との接合も可能な継手強度の高いセルフピアシングリベット (SPR: self piercing ribbet) がAudiやBMWで多用され、継手強度は弱い副資材が不要なクリンチングと接着の組合せもジャガー-XJなどで用いられている。一方、継手強度の高いSPRと接着剤の併用で強度および剛性向上を図った事例として、FordのF-150が注目されている。抵抗スポット溶接で7000点必要なところ、4000点で同等の接合強度が得られるとの報告もある<sup>13)</sup>。最近では、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締結するFDS (flow drill screw, Fig. 10) が、Audi TT/R8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<sup>14)</sup>。また、直近の事例としては、Fig. 11に示す釘打ちタイプの機械的接合も一部で適用されている<sup>15)</sup>。

鋼板では、車体構造の各所でレーザー溶接が用いられているが、アルミニウム合金では、Audi A2でピラー部にYAGレーザー溶接が、A6ではドアインナーの分割部に半導体レーザー溶接が用いられた。従来のYAGレーザーではアルミニウムへの吸収率が低いため、高パワー

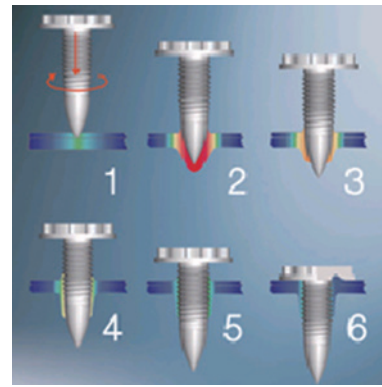


Fig. 10 Flow drill screw; FDS<sup>\*1)</sup> (EJOT).

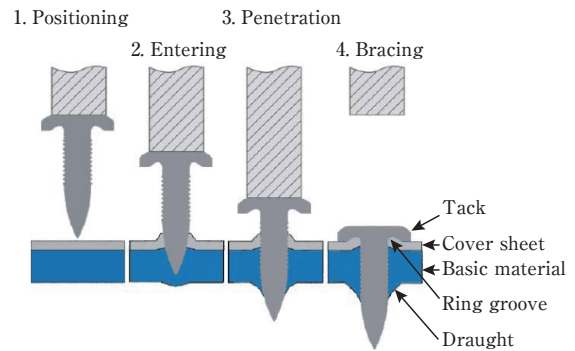


Fig. 11 Rivtac<sup>\*2)</sup> (Boellhoff).

のレーザー溶接機を要したが、半導体レーザーはアルミニウムの吸収率が高い波長光を発信源にするため、エネルギー効率の良い溶接が可能である。また、複数の車種でトランクリッドのナンバーフレームの上下を6000系合金の別プレス品として成形し、それらをへり継手のフィルター入り半導体レーザー溶接で、外観では判らないほど流麗な接合を行っている。

### 3.2 異材接合技術に関する課題

溶接によるアルミニウムと鋼との異種金属接合においては次のような技術的課題がある。

アルミニウムとの接合で一方の母材が変わると、アルミニウム同士の溶接、溶融亜鉛めっき鋼、裸鋼、合金化亜鉛めっき鋼の順に溶接の難度は高くなる。特に、合金化亜鉛めっき鋼は、低入熱過ぎれば、アルミニウムと鋼の母材を架橋できない。

一方、高入熱過ぎるとFig. 12<sup>16)</sup>に示すように接合界面に厚く金属間化合物層が形成し、割れおよび剥離が発生してしまう。

\* 1) EJOT社の商標

\* 2) Boellhoff社の商標

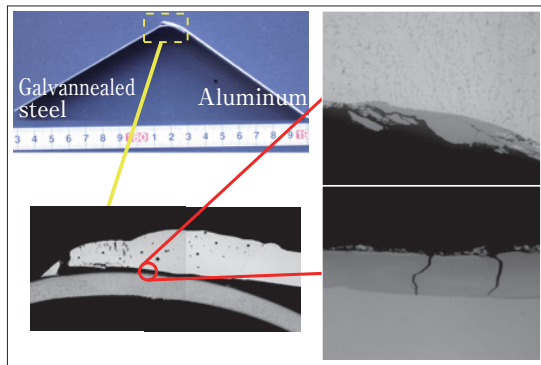


Fig. 12 Formation situation of inter metallic compound layers (heat input : too high).

形成する金属間化合物層は、Fig. 13<sup>17)</sup>に示す状態図から5種類前後と推定される。また、各相の機械的性質に関してはFig. 14に示す報告例がある。

アルミニウムと鋼とを金属結合させる場合、架橋のための加熱と金属間化合物層成長抑制のための入熱制御とのバランスを図るため、精密な入熱制御が必要である。

金属間化合物層の厚さを制御することで良好な継手の性質が得られるとの報告例 (Fig. 15<sup>18)</sup>)もある。直接接合のための入熱制御の基本的な考え方は、レーザーレーズングなどに代表される他の熱源であっても、種類に依らず共通である。

近年、車体のマルチマテリアル化が進み、車体の前

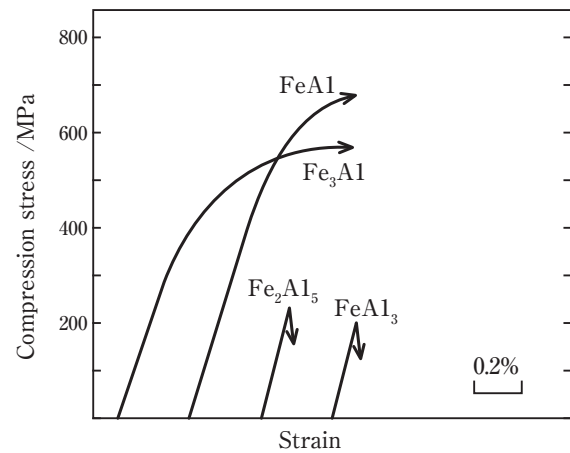


Fig. 14 Compression stress - strain curves of Al-Fe series inter metallic compounds.

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動きがある。2003年発売の先代BMW5シリーズでは、フロントメンバーのアルミニウムと後部の鋼板との接合に鋸を介して締結するSPRと爆着などで結合させたバイメタルを用いたトランジションピースを介した異種金属接合が行われた。なお、アルミニウムと鋼のクラッド材を介して、アルミニウム同士はミグ溶接、鋼同士はプロジェクション溶接で接合した。

また、2011年発売の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

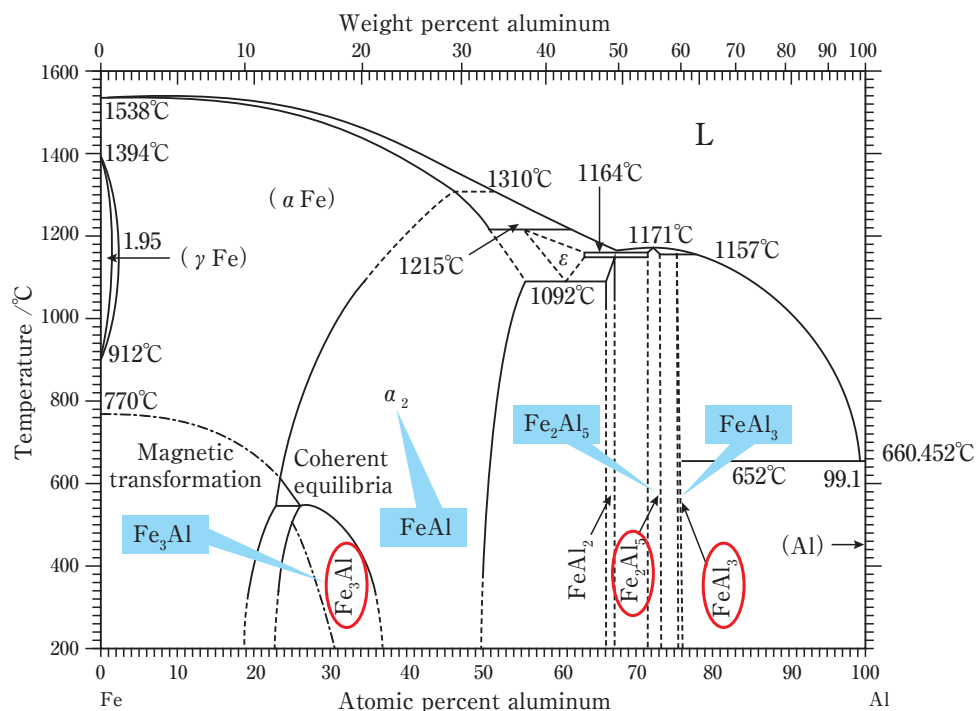


Fig. 13 Al-Fe phase diagram and inter metallic compounds.

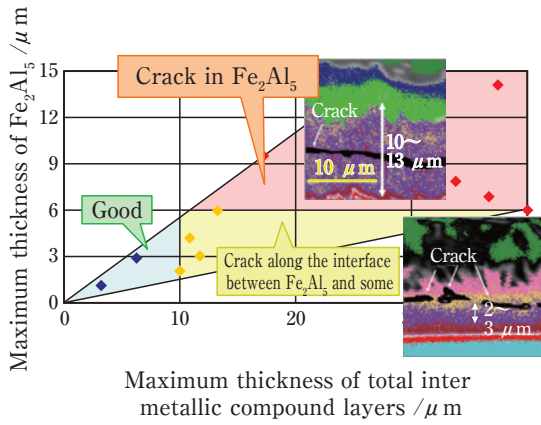


Fig. 15 Relationship between inter metallic compounds and interface properties of aluminum and steel.

長を接着接合している例がある。一部にSPRを併用しているが、殆どを構造用接着剤の強度で持たせている。ただし、アルミニウム材と鋼材の線膨張係数の違いにより生じる熱歪みの抑制と電気化学的性質の違いにより生じる電食の防止のため、接着材の量や性状の選定に多大な解析作業を要している。

3.3 スペースフレーム構造のアルミニウム車体と接合技術

スペースフレーム構造の代表的なオールアルミニウム車としては、1994年発売のAudi A8 (Fig. 16<sup>8)</sup>)があり、アルミニウム押出材材が多用されている (Table 4)。初期は、高品質鋳物の継手を介してミグ溶接で組立てていたが、最近では材同士を直接ミグ溶接している。押出材には押出性の良い6000系合金が多用されている。継手の品質については、曲げた材同士のギャップが大きく、溶け落ちやオーバーラップなどの課題がある。

アルミニウム合金の薄板に適する溶接法として、フルデジタル制御をベースとしたFronius社のCMT (cold metal transfer, Fig. 17<sup>19)</sup>) や交流パルスミグ溶接法が開発されている。CMT法は、溶接ワイヤの先端をプッシュ・プル動作により溶融池へ溶滴を短絡移行させる低入熱溶接法である。交流パルスミグ溶接は、溶け



Fig. 16 Space frame structure vehicle (A8/Audi)<sup>8)</sup>.

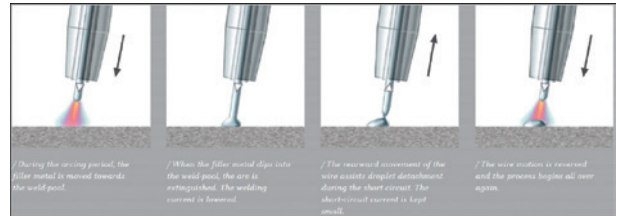


Fig. 17 Cold Metal Transfer (CMT).

落ちが少なく、ギャップ余裕度に優れているため、自動車の骨格に板を溶接するなどの薄板の接合に適している。また、低周波パルスミグ溶接は、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することが可能で、溶け込みの制御が容易である。比較的大きな重ね隅肉溶接のギャップに対しても溶け落ちなく溶接ができ、複雑な形状の部材を自動溶接する際、部材の組み付け時にある程度の隙間があっても許容できる。さらに、低周波のサイクルで溶融池が攪、揺動させられることで気泡の排出が促進され、溶接割れ感受性も改善される。

4. 構造部品のアルミニウム化

ミグ溶接は、BMWやBenzの自動車足周り部品であるサブフレームの溶接に多く用いられており、分解調査の結果、健全な溶接状態であることが確認されている。また、Benz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。ホンダの燃料電池車のサブフレームは、6000系合金を嵌合しやすい継手形状にして組合せ、ロボットを用いたFSWによりラダー状に組み立てている。最近では、塗装した鋼板プレス品とアルミニウムダイカスト品を重ねてFSWしたACCORDサブフレー

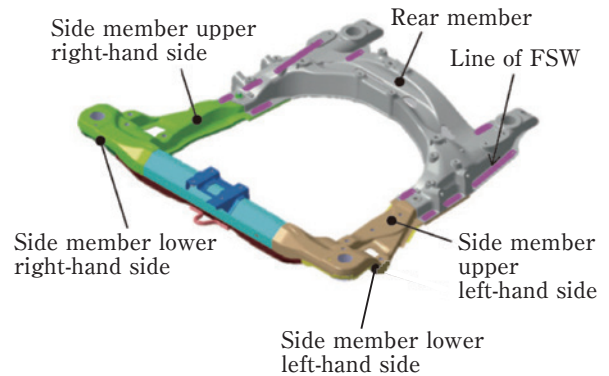


Fig. 18 Subframe hybrid structure made of aluminum and steel.



ムの適用例もある (Fig. 18)<sup>20)</sup>。なお、電食防止のため、アルミニウムと鋼の間にシール材を置いた状態でFSWを行っており、回転工具はアルミニウム側から差し込み、鋼の表面をプローブの先端が擦る程度まで挿入する。

テーラードブランクは厚さまたは材質の異なる板を接合してからプレス成形する方法で、材料の歩留りが良く、別部品として金型を起しプレス成形して接合する手間が省けるため、鋼板ではレーザー溶接にて多用されている。アルミニウム合金では、レーザー溶接するとポロシティが発生し易い。また継手部の成形性を安定させるためには突合せ時の板隙精度を厳しく管理する必要がある。この点からも接合状態の安定したFSWが適する。

その他、FSWを適用した部品例としては、足周り部品であるアーム類にも適用されており<sup>21)</sup>、パイプの両側にヨークを嵌合し、ワークを回転させながら2か所同時にFSWしている。複雑な形状の接合を目的とした3次元のロボット接合機も開発されており<sup>22) 23)</sup>、FSWはこれまでの熔融溶接における種々の欠点を払拭する画期的な方法であり、今後盛んに活用されるであろう。

## 5. 最近のアルミニウム化技術動向 ECB<sup>24)</sup>

車格も異なり直接比較は乱暴かもしれないが、Fig. 19に示すように、アルミニウムの使用率で整理すると、概ね増加傾向にあることが判る。

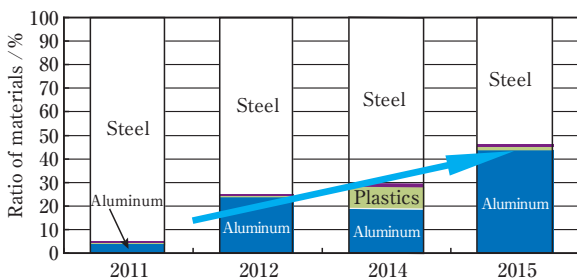


Fig. 19 Aluminum usage rate change (ECB).

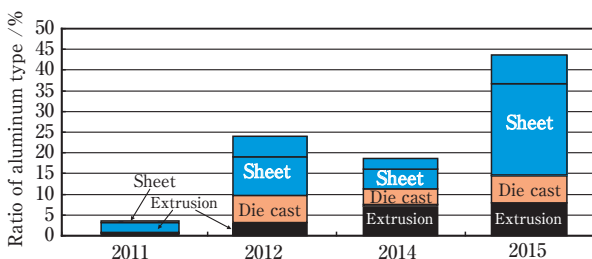


Fig. 20 Usage trends of aluminum types.

Fig. 20にアルミニウムの種類を使用量で整理したものを示す。ボデーシート材に代表される5000系や6000系板材の使用量は概ね増加傾向にある。また、6000系や7000系押出材や鋳物の事例も増えてきた。今後、接合可能な高強材のニーズはさらに高まるだろう。同時にアルミニウム同士の接合技術も更なる進化が求められる。

アルミニウムに対して適用されている接合技術全般で整理した結果をFig. 21に示す。

この図からアルミニウムの接合法では、① SPR, ② 抵抗スポット, ③ FDSの急増が目立つ。これらから継手形状は鋼同士の場合と同様に重ね点継手が主流と言える。

Fig. 22<sup>25)</sup>にChevrolet Corvetteに使用されている接合法を示す。抵抗スポット溶接とレーザー溶接、近年使用例が急増しているFDS、Mercedes-Benz C-Classに採用されているImpAcTが目目される技術だろう。

FDS, ImpAcTやSPRはアルミニウム同士以外に、鋼との異材接合技術としても使用されている。

一方、Table 6示すように、FORD F-150やAudi Q7に使用されている接合法を整理してみると、アーク溶接、抵抗スポット溶接やレーザー溶接はアルミニウム同士の接合に特化されている。

以上から、アルミニウム化はコストや製造面も課題

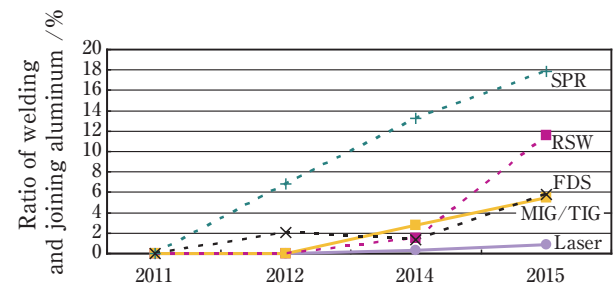


Fig. 21 Usage trends of welding and joining technologies.

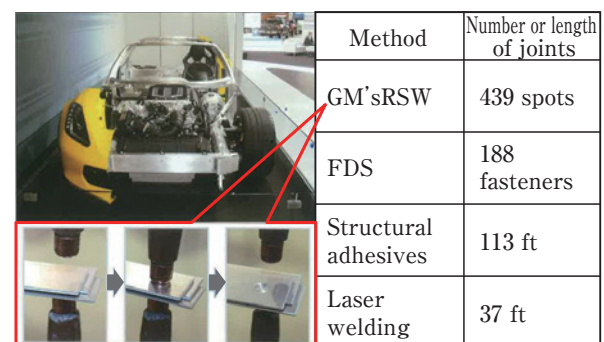


Fig. 22 Welding and joining technologies for fabricating CORVETTE.



**Table 6** Welding and joining methods to fabricate FORD F-150 and Audi Q7

Method	Al/Al	Al/Mid steel	Al/High strength steel
Laser	F150/Q7		
MIG	F150/Q7		
RSW	F150		
FEW			Q7:world-first
FDS	F150/Q7	Q7	
SPR	F150/Q7	Q7	Q7:world-first
Clinching	F150/Q7	Q7	

が多く、アルミニウム同士はもちろんのこと、安価で安定したアルミニウムと異種材料との接合技術が求められていることも推察できる。

## 6. おわりに

高速鉄道車両の構体は、そのほとんどがトラス断面のダブルスキン押出型材の溶接構造であり、最近では不活材の利用のされ方を理解することにより、課題解決の大きなヒントとなることを期待する。昨今の多様化するニーズに応えるために、本稿が一助となれば幸いである。

## 参考文献

- 1) C. J. Dawes: Welding and metal fabrication, **63** (1995), 13-16.
- 2) 日本アルミニウム協会編: アルミニウムハンドブック第7版, 日本アルミニウム協会, (2016), 2.
- 3) 難波圭三: 軽金属溶接, **45** (2007), 141-150.
- 4) 福井利安: 住友軽金属技報, **11** (1970), 139-150.
- 5) 福田敏彦: 溶接学会誌, **81** (2012), 178-183.
- 6) 軽金属溶接構造協会編: IV 溶接施工, アルミニウム合金構造物の溶接施工管理 (第4版), 軽金属溶接構造協会, 2009. 08. 20.
- 7) 軽金属溶接構造協会 気孔防止研究委員会編: アルミニウム及びアルミニウム合金溶接部の気孔発生メカニズム, 軽金属溶接構造協会, 1982. 5. 15.
- 8) 岡田俊哉: Furukawa-Sky Review, **4** (2008), 18-26.
- 9) 軽金属溶接構造協会編: I 材料, アルミニウム合金構造物の溶接施工管理 (第4版), 軽金属溶接構造協会, 2009. 08. 20.
- 10) 古賀信次: 軽金属溶接, **45** (2004), 523-529.
- 11) 川崎重工工業株式会社: フリクションスポット接合システムカタログより
- 12) 玄道俊行, 西口勝也, 麻川元康: 日本金属学会誌, **70** (2006), 870-873.
- 13) L. Brooke: AUTOMOTIVE ENGINEERING, **2** (2014), 19-23.
- 14) EJOT: FDS<sup>®</sup>, products, Home Page, www.ejot.lt/industry/, 2016. 03. 07.

- 15) BOLLHOFF: RIVTAC<sup>®</sup> The innovative high-speed joining process, RIVTAC<sup>®</sup> High-Speed joining, www.boellhoff.com/en/de/assembly\_systems/rivtac.php, Boellhoff, 2016. 03. 07.
- 16) 福田敏彦, 熊谷正樹, 難波圭三: 「フォーラム 自動車材料の最前線 - 次世代技術への取り組み - 『アルミと鋼の接合の最近の技術動向』」, 自動車技術会 2008年春季大会 in PACIFICO YOKOHAMA, (2008).
- 17) 泰山正則, 小川和博, 高 隆夫: 溶接学会論文集, **14** (1996), 314-320.
- 18) 福田敏彦, 中山英介, 西畑ひとみ: 溶接学会 平成24年度春季全国大会講演概要, (2012), 講演 No. 208.
- 19) Fronius International: The CMT weld process, COLD METAL TRANSFER. /The technology, http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-EEBD8E0B-816922C5/fronius\_espana/M\_06\_0001\_EN\_CMT\_leaflet\_Feb\_2014\_aw19\_low\_44211\_snapshot. pdf, Copyright© 2011 FroniusTM, p. 2, 2016. 03. 07.
- 20) T. Miyahara, M. sayama, T. Yahaba, S. Ohhama, T. Hata and T. Kobayashi: Honda R&D Technical Review, **25** (1) (2013), 71-77.
- 21) M. Enomoto: Mass production of Al suspension parts using friction stir welding for the automotive, Proceedings of The Third International Conference on Friction Stir Welding, TWI, Sept. 27-28 (2001), Port Island, Kobe, Japan.
- 22) R. Sakano, K. Murakami, K. Yamashita, T. Hyoe, M. Fujimoto, M. Inuzuka, Y. nagao, and H. Kashiki: Development of FSW Robot System for Automobile Body Members, Proceedings of The Third International Conference on Friction Stir Welding, TWI, Sept. 27-28 (2001), Port Island, Kobe, Japan.
- 23) 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.
- 24) EuroCarBpdy 資料抜粋.
- 25) LIGHT METAL AGE, JUNE (2014).



福田 敏彦 (Toshihiko Fukuda)  
(株)UACJ 技術開発研究所 第六研究部