TOPICS

UACJ における FSW の技術開発と適用の変遷 *

増田 章太 **

Development and Application of Friction Stir Welding at UACJ*

Shota Masuda **

1．はじめに

The Welding Institute (TWI) において，1991年に摩擦かくはん接合 (Friction Stir Welding：FSW) が開発された。画期的な接合技術であったために，精力的に研究・開発が進められた。

FSWが他の接合方法と比較して優れる点は，融点よりも低い温度で接合可能な点である。アルミニウム合金における溶融溶接の問題点である，溶接ひずみ，熱処理合金の強度低下が軽減される。更に，低温であることから，金属間化合物の生成が抑制されるため，異材接合への適用も可能である。

これらの利点のため，FSWは当社においても，精力的に研究開発を進めた接合法であった。本稿では，既報を基に，当社におけるFSWの研究開発を振り返る。取り組みの範囲は広く，少々取留のない内容となることをご容赦いただきたい。

2．2000年前後の取り組み

FSWが開発されて間もない2000年前後の取り組みは，アルミニウム合金，特に6005Cの広幅押出形材をFSWにより接合し，剛性の高い幅広のパネル材を作製する手法として適用していた[1)]。

事例の一つは，700系新幹線用床材 (**Fig. 1**) である。日本初のFSWが実用化された工業製品である。6005Cの押出形材を4枚接合し，ひずみの少ない床材が作製出来た。継手周辺の板厚を大きくし，接合による強度低下 (熱影響による軟化・接合による板厚減) を吸収する工夫がなされている。

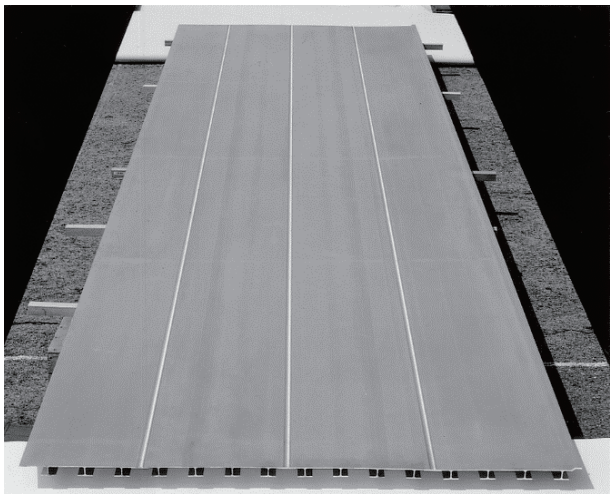

Fig. 1 Floor panel for the super-express 700 Series Shinkansen [1)].

土木建築関係でも事例がある。アルミニウム合金は軽量かつ耐食性に優れるため，メンテナンスにかかる手間が少ないことから，インフラへの適用が検討された。新加古川大橋 (兵庫県加古川市) の拡幅工事では，**Fig. 2**に示す歩道橋の床材をFSWで作製した[1)]。パネルに使用したアルミニウム合金は60 tと，かなり大規模な工事であった。**Fig. 3**に示すのは，西唐津駅自由通路 (跨線橋) である[1)]。軽いアルミニウム合金の特徴を生かし，FSWによる広幅の床材を現地でMIG溶接し組み立て，クレーンで釣り上げ設置することで，一晩で橋を架けることが出来る。そのため，工期が短く路線を止める必要が無かった。

これらの事例は，まさに適材適所と言えるだろう。廉価に複雑な断面形状を押し出すことが可能であるアルミニウム合金の利点と，低ひずみ接合ができるFSW

* 主要部を軽金属溶接 **61** (2023)，368-373 に掲載。
The main part of this paper has been published in Journal of Light Metal Welding **61** (2023), 368-373.

** (株) UACJ マーケティング・技術本部 R&D センター 板・鋳鍛製品開発部 自動車材料開発室
Automotive Material Development Section, Flat Rolled Foundry and Forged Products Development Department, Research & Development Center, Marketing & Technology Division, UACJ Corporation.

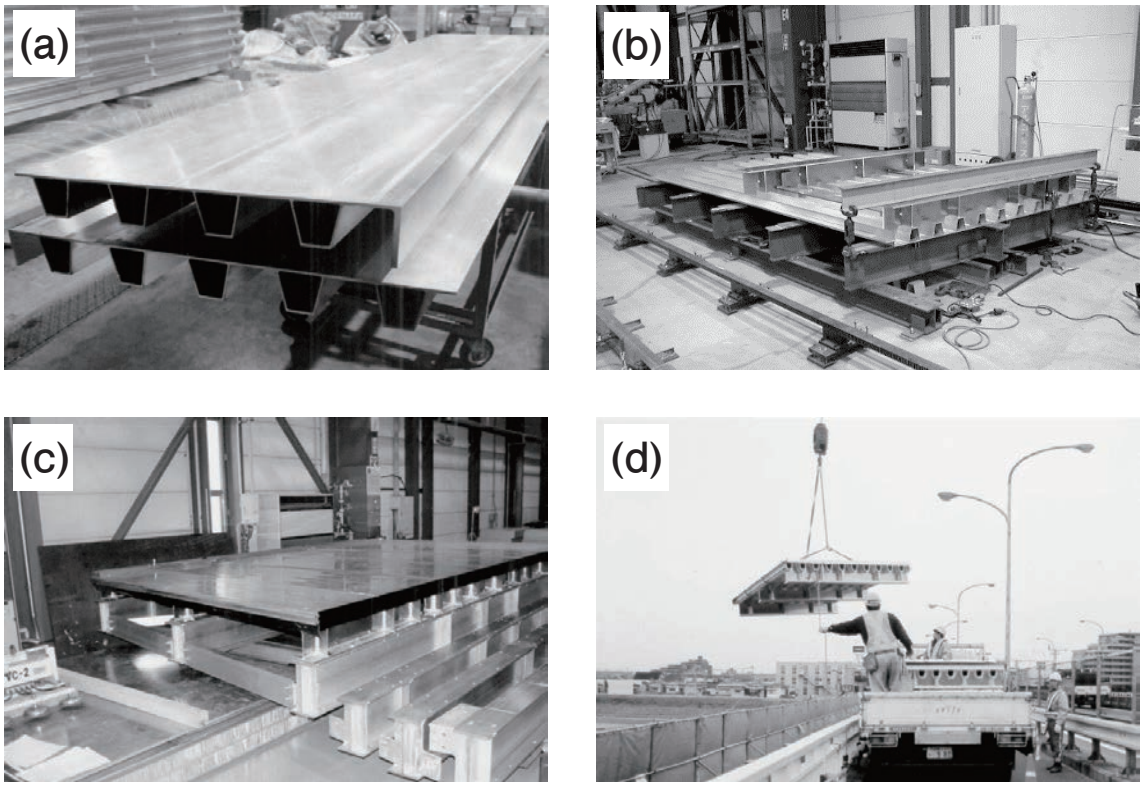

Fig. 2　The Shin-Kakogawa Bridge [1].

Fig. 3　Nishikaratsu Station over-bridge of JR Kyushu [1].

の利点がマッチしている。また，FSWの施工も直線・平面・突合せ継手であるため，最も適用しやすいことから，真っ先に実用が進んだと考えられた。

3．適用拡大への基礎研究

FSWの難易度は合金によって異なり，高温強度の高い合金ほど適正な接合条件の範囲は狭くなる[2]。2000系合金，5000系合金，7000系合金は高温強度が高いため条件範囲が狭いことから難易度が高い接合であった。2章で紹介した2000年前後の取り組みは，高温強度の低い6000系合金での取り組みであることから，接合の難易度が低いため，真っ先に適用が進んだと捉えることも出来る。2000年以降，当社では，FSWの用途拡大へ貢献するために，航空宇宙用途や船舶用途にFSWを適用するための基礎試験を行っていた。

Table 1　Process variations for the friction stir weld of alloy 7050 [4].

No.	Process
A	7050-T451 → aging → FSW
B	7050-T451 → FSW → aging
C	7050-T451 → FSW (air cooling) → aging
D	7050-T451 → FSW → SHT* → aging
E	7050-T451 → FSW 2% tensile → aging

* SHT: Solution heat treatment

熊谷[3]，田中ら[4]は航空宇宙分野へFSWを適用するため，7050合金について接合後熱処理を含めた継手の機械的性質を明らかにし，析出状態の変化から結果を整理した。**Table 1**に示す，5つのプロセスを検討しており，プロセスAをT451調質から人工時効した後にFSWしたプロセス，プロセスB～EはT451調質からFSW後に熱処理するプロセスであり，プロセスBをFSW後に人工時効したプロセス，プロセスCをFSW後空冷し人工時効したプロセス，プロセスDをFSW後に溶体化処理および人工時効したプロセスとし，プロセスEはFSW後に2％の引張矯正および人工時効したプロセスである。**Fig. 4**に示すように，溶体化処理および人工時効処理をFSW後に実施する場合（プロセスD）が最も強度が高くなったが，ひずみが大きくなった。

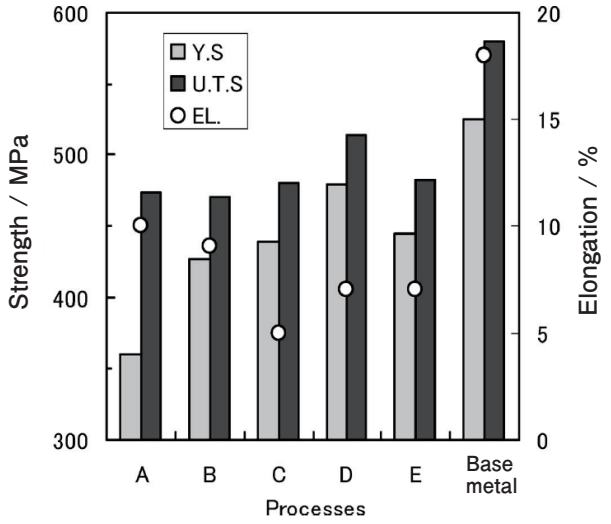

Fig. 4　Effect of process on tensile strength in the friction stir weld of alloy 7050 [4].

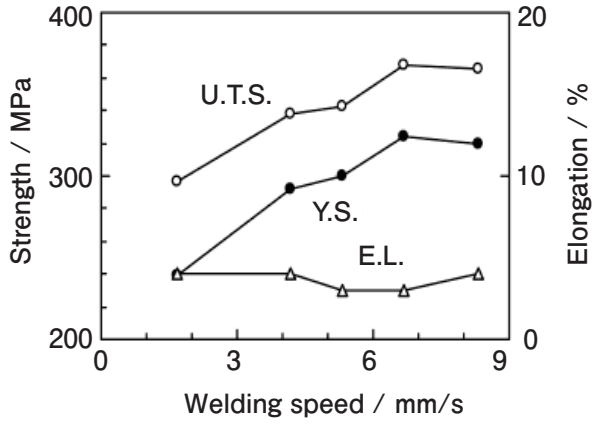

Fig. 5　Effect of welding speed on tensile properties in the friction stir weld of alloy 2013 [6].

プロセスC，Eでは大幅な改善が認められなかったことから，プロセスA，Bが機械的性質から最適なプロセスであると考えられた。耐応力腐食割れ(耐SCC)性においては，プロセスBの方が優れており，プロセスAでは熱影響部が再固溶状態になっていることが耐SCC性を低下させたと考えられた。

田中ら[5, 6]は，当社が開発した高強度Al-Mg-Si-Cu合金について，FSW継手の機械的性質を調査した。接合の熱影響を接合パラメータ（ツール回転速度・接合速度）で整理している。この検討では，前述の7050でのプロセスBに相当する工程で検討している。ツール回転速度750 ～ 1500 rpmでは撹拌部では硬さが異なったものの最軟化部の硬さが同等であり，継手効率は同等となった。**Fig. 5**に示すように接合速度は高いほど継手強度が向上する傾向にあった。これは加熱・冷却速度が接合速度に応じて早くなり，過時効となる温度域での保持時間が変化したためであると考えられた。

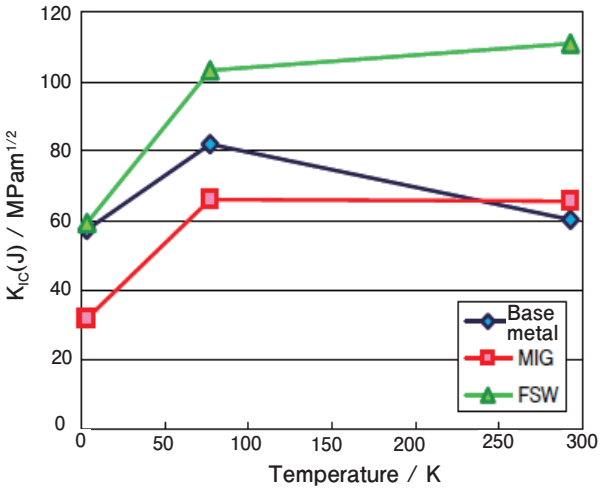

Fig. 6　Fracture toughness at Cryogenic Temperature of alloy 5083 [7].

林[7]は船舶用途でのFSW適用の基礎研究として，極低温環境での5083のMIG溶接継手，FSW継手の破壊靭性を明らかにした。MIG溶接継手では凝固時のMg偏析および粒界に存在する金属間化合物の影響により，極低温での破壊靭性は低下したが，FSW継手は融点以下での接合であることから上記のような破壊靭性の低下は無く，母材並であった（**Fig. 6**）。

以上から，各分野への適用を目指し，材料メーカとして基礎的なデータを提供した。

4．異材接合

ここ20年間では，世界的な環境対応，特に地球温暖化防止において，二酸化炭素排出規制が進んでいる。自動車分野では，二酸化炭素排出規制に基づいた燃費規制に対応するため，車体を軽量化するニーズが強い。この軽量化目的においてアルミニウム合金の適用が進んでいる。また，適用が進んでいるのはアルミニウム合金のみならず，高強度鋼板，樹脂といった様々な材料である。これら軽量化材料を組み合わせた，車体のマルチマテリアル化には異材接合技術が欠かせない。当社においても，自動車分野への利用拡大を目指し，異材接合技術への基礎検討を実施していた。

田中ら[8]は摩擦かくはん点接合（Friction Stir Spot Welding：FSSW）を6000系アルミニウム合金と鋼板（SPCC）に対して行い，適正な接合条件であればAl同士の抵抗スポット溶接よりも高い強度を有した接合が可能であることを明らかにした。FSSWではアルミニウム合金および鋼の酸化皮膜を組成流動で排出し接合されていた。接合界面には，TEMによる電子回折パターンから，数nm厚さのアモルファス層が生成されて

いることが確認された（**Fig. 7**）。脆い金属間化合物の生成が認められないことから，比較的高い強度での接合が達成されていたと推測される。

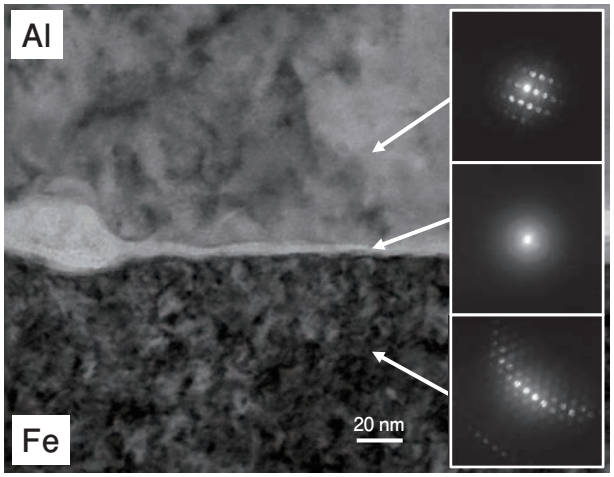

Fig. 7　TEM micrographs of weld interface of the FSSW dissimilar joint and selected area diffraction pattern [8].

岡田ら[9, 10]は，**Fig. 8**に示すFSWの摩擦熱を熱源として用いる摩擦重ね接合法（Friction Lap Joining: FLJ）によるアルミニウム合金と樹脂の直接接合について検討した。金属／樹脂材料の接合メカニズムは，アンカー効果，ファンデルワールス力，水素結合力および化学的接合力が提案されている。このうち，水素結合力は強固な接合を達成するために必要とされる。

Mg添加量の異なる1050，3004，5052，5083および官能基を有するPA6とのFLJの検討[9]において，**Fig. 9**に示すようにMg添加量が多い合金ほど継手強度が大きくなった。破壊形態は界面剥離かPA6側の母材破断であったが，Mg添加量が増えるほどPA6側の母材破断が生じることが多かった。これは接合熱による還元作用で界面でのMgO量が増大することで水素結合力が大きくなり，より強固な接合が達成されたと考えられた。

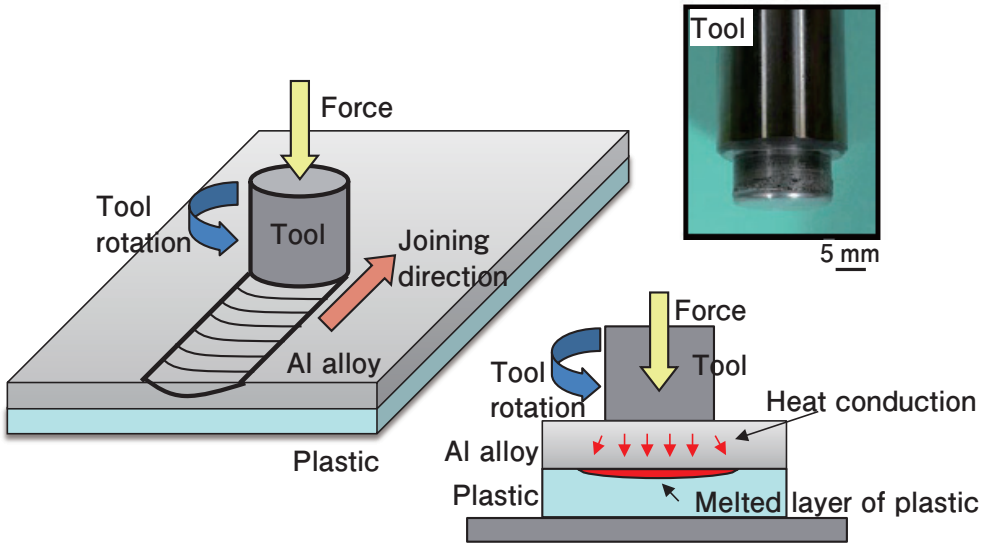

Fig. 8　Schematic illustration of the joining process FLJ [9].

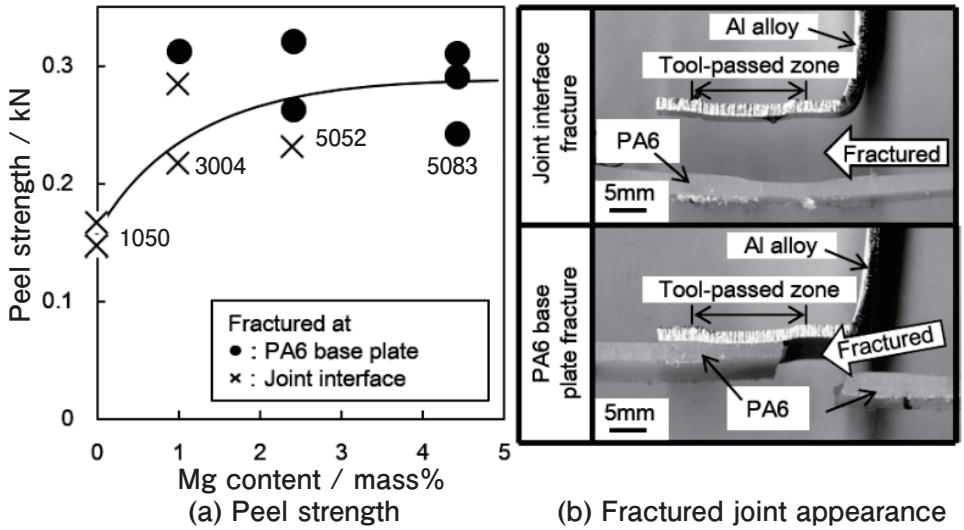

Fig. 9　Effect of Mg content on the peel strength of FLJ joint [9].

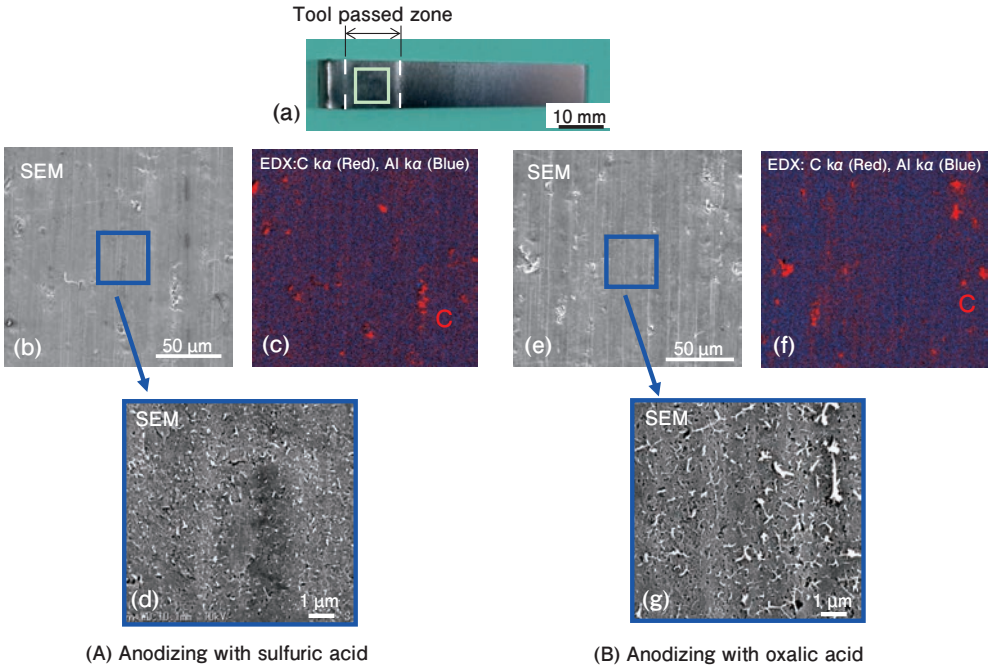

Fig. 10　Appearance of the fractured surface (a), SEM image (b, e), C mapping with EDX (c, f) and higher magnification SEM image (d. g) for the anodizing 2017/PE joints [10].

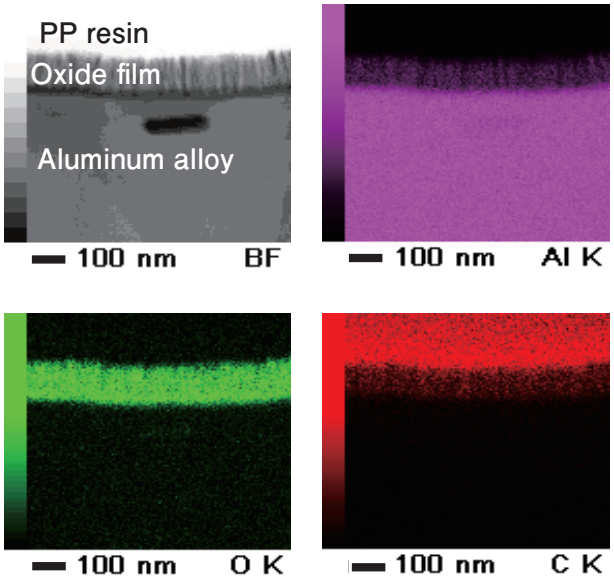

Fig. 11　TEM-EDS images for the cross section of the interface junction between the KO treated sheet and resin formed by the hot press at 210 ℃ [11].

アルミニウム合金は，陽極酸化皮膜処理により凹凸を有するアルマイト皮膜が形成できる。これとFLJの加圧・加熱を活用し，アンカー効果による樹脂との直接接合を検討した[10]。官能基を持たないPEでは，金属との直接接合は難しく，通常はシランカップリング材などを用いて接合する必要がある。無処理材では接合できなかった一方で，アルマイト皮膜がある場合には強固な接合が達成された。これは**Fig. 10**に示すように凹凸に樹脂が入り込みアンカー効果が増大した結果と考えられた。余談ではあるが，当社の有する表面処理技術に陽極酸化皮膜処理に類似のKO処理技術がある。アルマイト皮膜よりも耐久性の高いポーラス状の皮膜を形成する技術であり，熱圧着により樹脂と金属の直接接合が達成されている[11]。**Fig. 11**に示すようにポーラスの中に樹脂が流入したと考えられる元素分析結果が認められており，FLJを熱源に摩擦熱を用いる熱圧着であると考えると，アルマイト皮膜でも同様の流入が生じていると推測された。

以上のように，当社ではFSWによる異材継手の検討を行っていた。FSWでは融点以下での接合が可能である利点を活用し，金属間化合物の生成を抑制でき，高強度な接合が可能であった。また，摩擦熱が発生し，かつ高圧を加えることができることから，樹脂－アルミニウム間の熱圧着への応用に可能性を示した。

5．複動式FSSWの開発

自動車分野は軽量化のニーズが高く，アルミニウム合金の適用が進んでいる。鋼板に対して抵抗スポット溶接（Resistance Spot Welding: RSW）が外板，骨格を問わずに活用されている。一方で，RSWはアルミニウム合金に適用した場合，鉄鋼に比べて電気および熱伝導率が高く，大電流を短時間で流す必要がある。また，銅合金製電極との共晶融解による電極損耗から，電極寿命が短いという課題があった。そこで，RSWの代替となる点接合技術が求められており，FSSWはその候

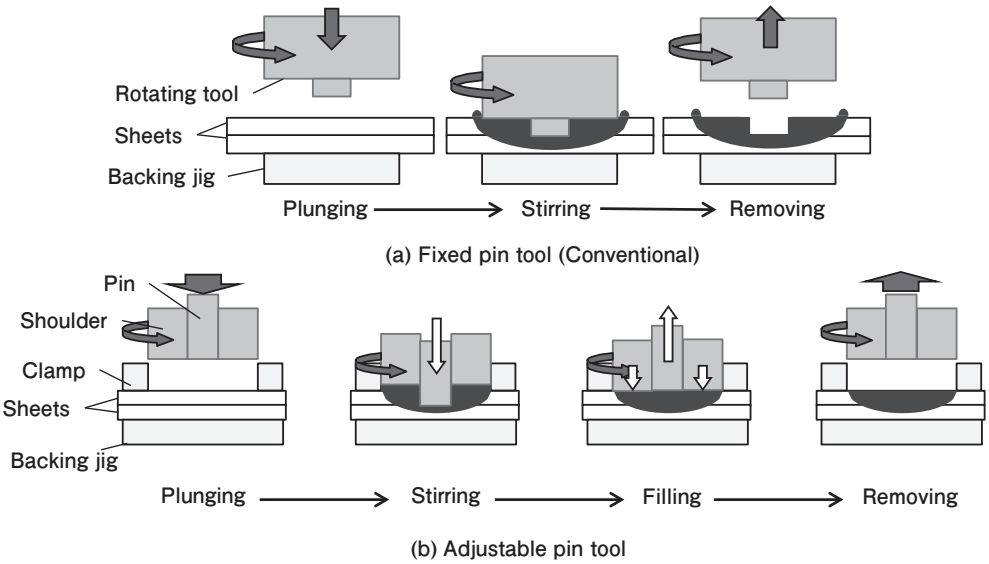

Fig. 12　Welding method illustration of conventional (a) and adjustable (b) FSSW [12].

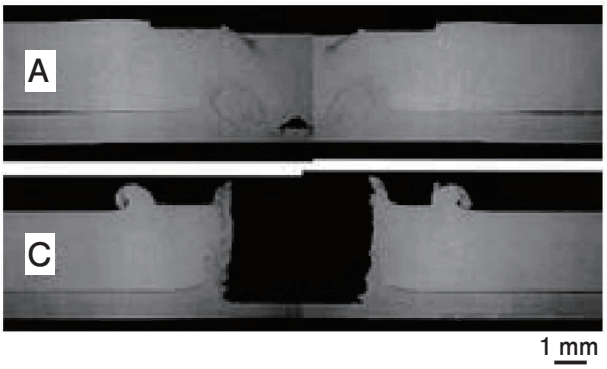

Fig. 13　Microstructure of adjustable (A) and conventional (C) FSSW joints in 3 mm/1 mm sheet thickness [12].

補の一つであった。

従来の単動式FSSWでは，接合後に穴やバリが残る課題や上板厚に応じたツール形状を使用しなければならない課題があった。**Fig. 12**に示す複動式FSSW[12]では可動プローブ，可動ショルダおよびクランプの動作を組み合わせることで，上記の課題を克服することが出来る。**Fig. 13**に示すように，複動式FSSWは接合後の穴・バリ無く接合されている。また，上板厚が3 mmの場合にも接合出来ており，1～3 mmの上板厚を同一のツールで接合が可能であった。

6．まとめと展望

本稿では当社における，FSWという接合技術に対しての，実構造物への適用から，基礎的なデータの蓄積までの幅広い取り組みを紹介した。FSWという技術が世に広まっていく中で，FSWの数多くあるメリットに応じて，様々な分野で適用が検討されてきた。紹介した取り組みは，材料メーカとしてユーザでの利用技術も合わせて提案するべき立場である当社が，FSWを含めた様々な接合方法に取り組んできた成果と言えるだろう。

さて，環境対応における現在のトレンドはライフサイクルアセスメント（LCA）に移りつつある。今後の展望として，接合技術においてもLCAへの対応が必要と考えられる。ここでは，環境負荷の低い接合技術というよりも，素材のリサイクル性を担保した接合技術が求められるだろう。依然として厳しい燃費規制やEV車への転換の対応として，軽量化のニーズから車体のマルチマテリアル化の要求は続くと予想される。様々な材料が混在したものをリサイクルすることは材料特性の悪化を招くことから，容易に異材同士を分離可能な接合技術が求められると考えられる。

FSWでは溶加材や鋲といった副資材を用いる必要が無く，素材同士を直接接合できることから，異材の混入を低減できるため，LCAのリサイクル性の要求にも有用な接合法となることが期待される。

接合方法は適材適所であるが，読者の方々もFSWを選択肢の一つに加えられてはいかがだろうか。当社での検討事例紹介として，少々取留めの無い内容となったが，少しでも楽しみや新しいアイデアのきっかけとなれば幸いである。

参考文献

1）Masaki Kumagai and Sunao Tanaka: Sumitomo Light Metal Technical Reports, **46** (2005), 141-146.
2）藤井英俊：溶接学会誌，**77**（2008），731-743.
3）熊谷正樹：住友軽金属技報，**44**（2003），142-146.
4）田中　直，熊谷正樹，八太秀周，吉田英雄：軽金属，**56**（2006），162-165.

5）田中　直，熊谷正樹，吉田英雄：住友軽金属技報，**45**（2004），36-40.
6）田中　直，熊谷正樹，吉田英雄：軽金属，**55**（2005），479-482.
7）林　稔：Furukawa-Sky Review，**8**（2012），22-28.
8）田中晃二，熊谷正樹，吉田英雄：住友軽金属技報，**48**（2007），21-26.
9）永塚公彬，斧田俊樹，岡田俊哉，中田一博：溶接学会論文集，**3**（2014），235-241.
10）岡田俊哉，内田壮平，中田一博：本誌 **3**（2016），41-51.
11）長谷川真一，三村達矢，本川幸翁，兒島洋一：Furukawa-Sky Review，**9**（2013），64-67.
12）熊谷正樹，青木健太：住友軽金属技報，**48**（2007），129-134.

増田 章太（Shota Masuda）
（株）UACJ　マーケティング・技術本部
R&D センター　板・鋳鍛製品開発部
自動車材料開発室