摩擦攪拌点接合で得られたアルミニウム合金継手における
塑性流動に関する検討*

藤本 光生**, 古賀 信次**, 阿部 奈津美****, 佐藤 裕***, 粉川 博之***

Analysis of Plastic Flow of the Al Alloy Joint Produced by Friction Stir Spot Welding*

by FUJIMOTO Mitsuo**, KOGA Shinji**, ABE Natsumi****, SATO S. Yutaka*** and KOKAWA Hiroyuki***

This study examined development of the stir zone and plastic flow of the material during friction stir spot joining of aluminum alloys. The development of the stir zone was discussed through the observation of macrosections of the joints produced at various process times. The friction stir spot joining trial with insert of Au foil to lap surface and the dissimilar lap friction stir spot joining showed that the movement of the lap surface was attributed to the downward plastic flow from the upper plate to the lower plate around the probe. Additionally, it was clarified that the direction of the plastic flow was roughly the same as the direction of the tool rotation. The dissimilar butt friction stir spot joining suggested that the plastic flow occurred not only within the stir zone but also in larger area below the tool shoulder. The present study revealed that the threads on the probe surface were important for producing the plastic flow of thickness direction during friction stir spot joining.

Key Words: Friction Stir Spot Welding, Aluminum Alloy, Stir Zone, Plastic Flow, Insert material, Thread

1. 緒 言

自動車や鉄道車両を軽量化する目的として、ドアやフード等の蓋物、上部の構体に従来の鋼に代わってアルミニウム合金を用いることが多くなってきた¹⁻⁵⁾。これらの継手には点接合が多く用いられており、鋼の場合には抵抗スポット溶接が主に採用されているが、アルミニウム合金は熔融溶接が困難であるため、抵抗スポット溶接に代わり、摩擦攪拌現象を利用した摩擦攪拌点接合 (Friction Spot Joining; FSJ) が実用化されている^{6, 7)}。

これまで、アルミニウム合金 FSJ 部の機械的特性に関する検討が行われてきた^{8, 9)}。しかし、その接合部の信頼性向上および高品質化には材料組織学的検討が不可欠であるが、それらに関する知見はあまり得られていない。そこで、著者らは、FSJ 部の攪拌領域における材料組織学的特徴をEBSP (Electron backscattered diffraction pattern) 自動解析や透過電子顕微鏡法などを用いて調べ、前報¹⁰⁾において報告した。しかし、攪拌領域の形成に影響すると考えられる接合中の塑性流動現象ならびにその駆動源については未だ明らかにされていない。

そこで、本研究では、板厚 1 mm の6000系アルミニウム合金重ね継手に対して、適正な接合時間に至るまでの各接合時間で施工を強制的に終了させ、攪拌領域の形成プロセ

スならびに攪拌領域形成に影響する因子の解明を試みるとともに、5000系／6000系アルミニウム合金異種合金継手や板厚の異なる試験体を駆使して材料中の塑性流動に関する系統的な知見を得ることを目的とした。

2. 実験方法

2.1 供試材料および板組

試験に用いた材料は、長さ 100 mm、幅 30 mm、板厚 1 mm および 2 mm の6000系アルミニウム合金 A6061-T6 材である。また、攪拌領域内部の塑性流動現象を観察するために、同じ大きさ、板厚の5000系アルミニウム合金 A5052-H34 材を用いた。供試材料の化学成分ならびに機械的特性を Table 1 に示す。これら供試材を Table 2 に示すように組合せて試験体を作製した。重ね継手の場合には、重ね代を 30 mm として 2 枚の供試材を上下に重ね、その中心に FSJ を行った。一方、突合せ継手の場合には、2 枚の供試体を

Table 1 Properties and chemical compositions of the base material used

Material	Thickness (mm)	Mechanical properties		Chemical compositions									
		Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	
A6061	1.0	316	11.5	0.66	0.28	0.25	0.09	1.10	0.19	0.06	0.02	Re	
	2.0	317	12.7	0.67	0.27	0.33	0.07	1.00	0.19	0.01	0.01	Re	
A5052	1.0	256	8.8	0.10	0.30	0.00	0.00	2.60	0.20	0.00	0.00	Re	
	2.0	253	6.0	0.08	0.26	0.01	0.01	2.58	0.17	0.01	0.00	Re	

Table 2 Material combination and configuration of FSJ test employed in this study

No.	Upper plate		Lower plate		Joint type
	Material	Thickness	Material	Thickness	
1	A6061	1.0 mm	A6061	1.0 mm	Lap
2	A6061	1.0 mm	A5052	1.0 mm	Lap
3	A6061	2.0 mm	A5052	2.0 mm	Butt

*受付日 平成19年11月27日 受理日 平成20年 1 月31日
**正 員 川崎重工業(株) Member, Kawasaki Heavy Industries LTD.
***正 員 東北大学 Member, Tohoku University
**** 東北大学 Tohoku University

突合せ、その合わせ面上に FSJ を行った。

2.2 実験装置および接合条件

本試験で用いたツールの形状は、プローブ径 3.0 mm、プローブ高さ 1.5 mm、ショルダ径 10 mm である。プローブ表面には、一般的な FSW ツールと同様、左ねじが付与されている (M 3.0, ピッチ 0.5)。また、ツールの加圧力を受ける裏当ては、表面が平滑な径約 15 mm の円柱状の S45C 材である。接合では、所定時間、ツールの加圧力および回転速度を一定とする制御方式を採用した。

基本となる供試材組合せ No. 1 において、接合時間を 4.0 s、ツール加圧力を 3920 N、ツール回転速度を 2000 rpm のとき、材料内部に十分な攪拌領域が形成されていることが確認されたため、本条件を標準施工条件と定め、必要に応じて接合時間を変化させた¹⁰⁾。

3. 接合試験および評価方法

3.1 攪拌領域の形成とその成長に関する検討

攪拌領域の成長を確認するために、供試材組合せ No. 1 において、標準施工条件下で接合時間を 1.5 s から 4.0 s まで 0.5 s ピッチで変化させた継手を製作した。

各時間接合した試験体の外観を観察するとともにツールの圧入深さを計測した。圧入深さの定義は Fig. 1 に示すとおりである。また、内部の攪拌領域の成長を観察するために断面マクロ観察も併せて行った。断面マクロ観察用試験片は、接合部の断面を研磨後、NaOH 水溶液にてエッチングを行うことにより仕上げた。また、光学顕微鏡用試験片は、バーカー氏液にて電解エッチングすることにより仕上げた。さらに、各接合時間施工した試験体の結晶粒径ならびにすべり面のトレースの向きを調べるため、EBSP 自動解析を行った。EBSP 自動解析は 2 μ m ピッチで実施し、母材、攪拌領域内外およびプローブ近傍の領域から結晶方位データを得た。

3.2 塑性流動現象に関する検討

3.2.1 板間界面の挙動

供試材組合せ No. 1 の上下の供試材の間に厚さ 10 μ m の

Fig. 1 Definition of plunge depth

金箔を挟み、標準施工条件を用いて FSJ を行った。また、接合時間 2.0 s の FSJ も実施し。施工後の試験体は、上述した処理を経て仕上げた後、断面マクロ観察および SEM/EDX 面分析を行った。

3.2.2 板厚方向の塑性流動

供試材組合せ No. 2 に対して、標準施工条件を用いて FSJ を行った。また、接合時間 2.0 s の FSJ を実施した。施工後、試験体の断面マクロ観察を行った。

3.2.3 ツール回転方向の塑性流動

供試材組合せ No. 3 に対して、標準施工条件を用いて FSJ を行った。また、接合時間 2.0 s の FSJ を実施した。施工後、試験体の外観観察を行うとともに、突合せ面に対してツール軸を中心に 45 度傾けて切断し、断面マクロ観察を行った。

3.2.4 試験体表面における塑性流動

供試材組合せ No. 1 の上板表面に厚さ 5 μ m の Ni メッキを施して FSJ を行った。プローブ先端による Ni の圧入を防ぐためにプローブが圧入される径 4 mm の範囲には Ni が蒸着しないようマスクを施した。施工条件は標準施工条件であり、施工後、試験体の断面マクロ観察および SEM/EDX 面分析を行った。

3.3 塑性流動の駆動源に関する検討

ねじ加工していないツールを用いて、供試材組合せ No. 1 および No. 3 の FSJ を行った。施工条件は標準施工条件である。また接合時間 2.0 s の FSJ も実施した。施工後、試験体の外観観察を行うとともに、重ね継手の場合には施工位置中心で、突合せ継手の場合にはツール軸を中心に突合せ面から 45 度傾けて切断し、得られた断面マクロを観察した。

4. 実験結果

4.1 接合部の外観観察

時間を種々変化させて施工した継手の外観を Fig. 2 に示す。いずれの場合もプローブ穴やショルダ部の傾き等、圧入されたツールの形状が転写されている。接合時間が短い場合には、プローブの圧入により排出された材料がショルダの凹面部に移動するため、施工前の板表面よりも中心部が盛り上がっているように見える。一方、接合時間が長い場合にも、短い場合と同様、施工位置中心部は盛り上がる

Process time	Appearance		Process time	Appearance	
1.5s			3.0s		
2.0s			3.5s		
2.5s			4.0s		

Fig. 2 Appearances of the FSJed Al alloys

て見えるが、圧入量が増加するため、中心部は施工前の板表面よりも低くなっている。施工部周辺にはツールの圧入で排出された材料により余盛が形成されており、接合時間が長くなるに従って大きくなっている。Fig. 3に接合時間ごとのツールの圧入深さを示す。接合時間が長くなるに従ってツール圧入深さは増加するが、その増加量は一定ではなく、接合時間が2.0s以上で、増加量が小さくなっている。これは、本試験ではツール加圧力一定で施工する制御方式を用いているため、接触面積の増大に伴い、単位面積あたりの加圧力が減少することに起因していると考えられる。また、接合時間が同じ場合の圧入深さのばらつきは、いずれの条件においても $\pm 0.2\text{mm}$ 以下となっており、安定した施工が行われていると言える。

4.2 接合時間の変化による攪拌領域の成長

攪拌領域の形成に関する知見を得るために接合時間を変化させた継手の断面観察を行った。その結果をFig. 4に示す。下板プローブ穴左右に生じた楕円状の攪拌領域は接合時間が短い場合には狭く、接合時間の増加に伴って成長していることが判る。攪拌領域が見られるのは、接合時間2.0s以上からであった。一方、板間界面については、接合時間1.5sにおいてもプローブ周辺で不連続となっており、接合時間の増加とともに不連続領域が広範囲に及んでいる。同時に、プローブ穴近傍で板間界面の隆起が認められ、隆起の程度は接合時間2.0sから3.0sにおいて大きくなっている。更なる接合時間の増加は、板間界面の隆起を軽減するが、接合時間4.0sにおけるプローブ穴近傍の板間界面は接合前の界面位置よりも上板側に移動していることが見てとれる。

Fig. 3 Relationship between process time and plunge depth

Fig. 4 Macro sections of the FSJed Al alloys at various process times

Fig. 5に接合時間を2.0sとして施工した場合の結晶粒界マップを示す。マップの左上側がプローブ穴近傍の攪拌領域に対応している。なお、マップ中の黒線は方位差が15度以上の大角度粒界、赤線は方位差が3度から15度までの小角度粒界を示している。母材の結晶粒径は約 $14.5\mu\text{m}$ であったが、図中の2本の白い点線で挟まれた攪拌領域外縁部では結晶粒の著しい微細化が確認された。

4.3 攪拌領域における結晶方位

前報¹⁰⁾において、接合時間4.0sの接合部における集合組織分布を詳細に調べた結果、攪拌領域だけでなくショルダ直下の広範囲で母材と異なるせん断集合組織を有していることが示された。接合時間を2.0sとした場合の逆極点図マップをFig. 6に示す。逆極点図マップの基準方向はFig. 5に示した板法線方向NDとプローブ表面に垂直な方向TD2とした。接合時間4.0sの接合部と同様、プローブ周辺から母材に向かって結晶方位が変化しているものの、攪拌領域外縁における明瞭な結晶方位の不連続性は認められなかつ

Fig. 5 Grain boundary map in the joint

Fig. 6 Inverse pole Figure maps in the joint

Fig. 7 [111] pole figures of various regions shown in Fig. 6

た。また、Fig. 6 に示す領域 A から F までの $\{111\}$ 極点図を Fig. 7 に示す。プローブ穴近傍部から攪拌部外縁に遠ざかるに従って、結晶方位成分が変化している様子が伺える。全ての領域において、2つの方位成分から成る集合組織が形成されている。2つの方位成分は、1つの共通する $\{111\}$ 極を有しているが、プローブ近傍の領域から遠ざかるに従い、極点図が TD1 方向を軸に時計回りに回転している様子が観察される。1つの共通する $\{111\}$ 極を有する2つの方位成分から成る集合組織は、Al 合金攪拌部内で見られる単純せん断変形集合組織と一致しており¹⁰⁾、共通の $\{111\}$ 極に垂直な $\{111\}$ 面がせん断面、その $\{111\}$ 面上の $\langle 110 \rangle$ 方向がせん断方向に対応する。領域 A から F におけるせん断応力面のトレースは Fig. 6 のそれぞれの域内に示した線のとおりであり、いずれの領域においても、せん断方向は TD1 に近い方向に揃っている。せん断面トレースならびにせん断方向の向きは、接合時間 4.0s の場合と同様の傾向を示しており、接合時間 2.0s においても、材料は広範囲において回転ツールの回転方向に沿ったせん断力を受けて塑性流動していることが示唆された。

4.4 板間界面の挙動

上下の供試材の間に金箔を挟んで FSJ することにより得られた試験体断面の SEM/EDX 面分析結果を Fig. 8 に示す。接合時間 2.0s の場合には、SEM 写真からプローブ穴近傍の板間界面が上板側に隆起し不連続となっており、プローブ穴から更に遠い領域でも不連続となっている。プローブ穴直近は SEM 写真では金の分布が不明瞭であるが、EDX 結果によるとプローブ穴直下にも分布している様子が判る。これは、プローブの圧入による板間界面の下板方向への移動を示唆している。一方、この圧入でプローブ穴周辺の下板材料が上板側に移動することにより板間界面の隆起を引き起こしているものと推察される。

さらに、接合時間が 4.0s の場合には、SEM 写真から板間界面が不連続となる領域も拡大し、ショルダ外縁近傍にまで至っている。また、接合時間が長くなりプローブの圧入量が増加しているにも関わらず板間界面は 2.0s の場合に比べてさらに上板側に隆起し、その範囲も拡大している。金

Fig. 8 Macro sectional SEM images and EDX maps of the Au foil inserted joint

の分布については、板間界面は明瞭に検出されており、それ以外ではやや不明瞭となっているが、プローブ穴近傍に加え、攪拌領域の外周部と思われる領域においても検出されている。

4.5 板厚方向の塑性流動

上下に異なる供試材を配置して FSJ することにより得られた試験体の断面マクロ写真を Fig. 9 に示す。エッチングにおける腐食度の違いにより異なったコントラストが得られており、A6061 は白く、A5052 は黒く写し出されている。同一接合時間でのツールの圧入深さは A6061 同士の場合とはやや異なるものの、プローブ穴周辺に似たような攪拌領域が形成されている。攪拌領域は、主に上板の材料により形成されており、また、攪拌領域より外側の部分では板間界面の上板側への移動が確認された。

4.6 ツール回転方向の塑性流動

Fig. 10 は板厚 2mm 同士の A5052 と A6061 を突合せて施工した試験体の外観写真および断面マクロ写真を示している。外観写真の左側が A5052、右側が A6061 に対応する。外観図上に示す直線に沿って試験体を切断し、矢印の方向から断面を観察した。マクロ写真に示すように、接合時間 2.0s の場合には、外観写真左上の部分は試験体切断時に破断したが、もう一方の右下部分は破断することはなかったため、断面マクロ観察に供することができた。断面マクロ観察の結果、前節同様、エッチングにおける腐食度の違いにより A6061 は白く、A5052 は黒く映し出されている。接

Fig. 9 Macro sections of the dissimilar lap joint

Fig. 10 Appearances and macro sections of the dissimilar butt joint

合時間 2.0 s の場合、ショルダ直径に相当する領域のうちツールが接触する試験体表面側は A6061 と A5052 が攪拌され層を形成しているが、試験体裏面に近づくに従って攪拌領域は狭くなっており底面では攪拌されておらず、A5052 の母材と塑性流動域の間で未接合部が存在している。また、プローブ穴周辺の攪拌領域は小さく不明瞭である。一方、接合時間 4.0 s の場合、2.0 s の場合と比べて攪拌領域が鮮明であり、試験体裏面に近づくに従って狭くなっている。さらに、プローブ直下の領域でも試験体裏面まで攪拌されている様子が確認された。

接合時間 2.0 s で得られた接合部のうち、切断時に破断した部分の外観ならびに破断面の写真を Fig. 11 に示す。図 (A) において、右側は A6061、左側は A5052 に対応している。図 (B) は突合せ面を A6061 材斜め下側から観察した A5052 側の破断面である。図の左側半分は切断面であり、プローブ穴も確認できる。施工前の突合せ面と切断面で囲まれる領域が部分的に突出していることが判る。一方、図 (C) は切断時に破断した A6061 材であり、先端がプローブ直下、上下方向の縁が突合せ面、斜め右45度の縁が切断面に対応しており、A5052 側から突出した領域との界面で破

Fig. 11 Failed specimens of the dissimilar butt joint

Fig. 12 Macro sectional SEM image and EDX map of the Ni coated aluminum alloy

断していることが判る。図 (B) に示すように、突出した領域の最外層が母材の A5052 と連続していることから、材料の塑性流動はプローブ周辺の攪拌領域だけでなく、ツールが接触する領域においても生じていることが示された。

4.7 試験体表面における塑性流動

Ni メッキした試験体を施工位置中心で板厚方向に切断し、試験体の断面を観察した。Fig. 12 (A) に示すように母材の一部がツールに凝着し欠損しているが、攪拌領域が形成されていると思われる部分の SEM 写真を (B) に、また、EDX 面分析を (C) に示す。SEM 写真では攪拌領域の特定は困難であるが、最大 50 µm 程度の領域にコントラストの異なる相が存在する領域が認められる。EDX による面分析の結果、この領域に見られるコントラストの異なる相は、Ni であることが示された。この結果は、表面にメッキした Ni が材料と一緒に塑性流動することにより試験体表面から試験体内部に移動したことを示唆している。

4.8 塑性流動の駆動源

ねじなしツールを用いて供試材組合せ No. 1 にて得られた接合部の断面マクロ写真を Fig. 13 に示す。接合時間が長くなるに従ってツールの圧入深さは大きくなっており、その深さはねじ加工したツールとほぼ同様であったが、接合時間が十分長い場合でも攪拌領域がほとんど形成されておらず、板間界面の明瞭な隆起も認められなかった。しかし、プローブ穴の極近傍では板間界面が隆起しており、プローブの圧入による下板材料の上板側への移動を示唆している。また、プローブ穴から離れた領域における板間界面は、不連続になっているものの、ツールの圧入に従って施工前の

Fig. 13 Macro sections of the lap joint produced by non-threaded tool

Fig. 14 Macro sections of butt joint produced by non-threaded tool

位置に比べてやや下板側に移動しているだけである。これらの結果から、板厚方向の塑性流動に、プローブ表面のねじが大きく影響していることが示唆された。

Fig. 14 は、ねじ加工していないツールを用いて、板厚 2mm 同士の A5052 と A6061 を突合せて施工した試験体の外観写真および断面マクロ写真を示している。Fig. 10 同様、外観写真の左側が A5052、右側が A6061 に対応し、外観図上に示す直線に沿って試験体を切断し、矢印の方向から断面を観察した。ねじ加工したツールで施工した場合と同様、ツール直下には A5052 側から A6061 側への塑性流動が認められ、その領域には両材料によって形成された層状組織が観察される。しかし、ねじ加工したツールで施工した場合に観察されたような楕円形状を示す攪拌領域は、板厚方向に塑性流動していないため生じていなかった。

これらの結果より、ツールを軸とした回転方向の塑性流動にはツールの回転が、板厚方向の塑性流動には、プローブ表面のねじが主に影響していることが示唆された。

5. 考 察

5.1 攪拌領域の成長メカニズム

接合部の断面マクロ観察結果より、FSW と同様、プローブ周辺に攪拌領域が形成されており、その領域は、接合時間が長くなるに従って板幅、板厚方向に大きくなっていく。この攪拌領域の成長プロセスは、板間界面に金箔を挟んで施工した試験体の金の検出箇所が接合時間とともに外側に移動していることから、攪拌される領域が徐々に外側に拡大するのではなく、攪拌された材料が外側に移動しているものと推察される。

5.2 塑性流動の駆動源

Fig. 13 および Fig. 14 に示すように、ねじが無いツールで FSJ した場合には、ツール回転方向の塑性流動は認められるものの板厚方向の塑性流動は認められなかったことから、ツールの圧入により生じた微少な塑性流動を除く板厚方向の塑性流動はプローブ表面に加工したねじによるものと考えられる。

供試材組合せ No. 1 において標準施工条件を用いて FSJ した場合、腐食条件によっては攪拌領域に明瞭な縞模様が

(a) Macro section of the stripe in the stir zone (b) Schematic illustration of the stripe

Fig. 15 Stripe pattern in the stir zone

Fig. 16 Schematic illustrations of the plastic flow during FSJ

観察できる場合がある。この縞模様は攪拌領域の成長に伴って外側へ拡大していることから、接合した試験体を表面から 1.5 mm の位置まで研磨にて減厚し、ツール圧入方向から攪拌領域の縞模様を観察した。Fig. 15 に観察結果を示す。縞は 1 本の渦巻状の線であり、外側から内側に向けてツールの回転方向と同様、右回転となっている。これは、本ツールのねじが左ねじであり、ツールが右回転であることを考慮すると、ねじによってらせん状に下向きに流動してきた材料が、ねじ下端で右回りに連続的に排出され、先に排出された材料を外側へ押し出すことにより攪拌領域を成長させているものと推察される。

5.3 塑性流動現象

材料の板厚方向ならびに回転方向の塑性流動は同時に生じていることから、ねじ加工されたツールを用いた場合、攪拌領域内部の材料は、らせん状に上板表面から下板底面方向に塑性流動しているものと推察される。これまでに得られた試験結果より、試験体内部の塑性流動は、Fig. 16 ならびに以下に示す通りであると考えられる。

(1) ショルダ面接触部

ショルダが接触した後は、ショルダの凹面に沿って中心部へとらせん状に塑性流動し、プローブ根元周辺まで移動する。

(2) プローブ側面

プローブ根元まで流動した材料は、ねじの回転による効果によりプローブ側面を旋回しながら下板側へ移動する。

(3) ねじ下端

プローブ先端まで流動した材料はねじ下端で右回りに連続的に排出される。

(4) 攪拌領域

連続的な塑性流動により材料が供給されることから、最初に形成された攪拌領域が外周へ押し出されることにより攪拌領域はツールの径方向外周側へ成長する。

6. 結 論

本研究では、アルミニウム合金 A6061 および A5052 に対して、FSJ による接合試験を行った。時間を種々変化させ

て施工した結果、接合時間が2.0sと短い場合においても攪拌領域は形成されており、接合時間が長くなるに従って攪拌領域が板厚方向ならびに板幅方向に成長した。接合部における塑性流動は、攪拌領域だけでなくツール接触面を底面とした逆円錐状の領域でツール回転方向に生じていることが示唆された。さらに、その内部に攪拌領域が存在し、ねじ加工されたツールを用いた場合には、攪拌領域ではツール回転方向に加え、板厚方向にも生じていることが示唆された。攪拌領域の形成にはツールの回転ならびにブロー表面のねじが大きく影響していることが確認された。

参 考 文 献

- 1) Hirose Akio: Aluminum Alloy Car Body -Application and Joining Technologies of Aluminum Alloys in Automobiles-, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 23-1 (2005), 163-168. (in Japanese)
- 2) Konishi Tokujirou: Welding and Joining of Car Body, Journal of The Japan Welding Society, 74-8 (2005), 512-515. (in Japanese)
- 3) Eizaburo Nakanishi: Weight Reduction of Automotive Vehicle Body and Joint Technologies, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 23-1 (2005), 151-156. (in Japanese)
- 4) Takeo Sakurai: Aluminum Alloy Sheet Trends for Automotive Body Panels, Vol.57 No.2 (2007), 45-50.
- 5) Shinji Koga, Masaru Seto, Mitsuo Fujimoto, Katsumi Ohkubo, Masayuki Inuzuka: Application of New Welding and Joining Technologies, Vol.164 (2007).
- 6) Kotoyoshi Murakami: Development of Environmentally Friendly Welding Technology, Journal of Society of Automotive Engineers of Japan, 57-6 (2003), 63-68.
- 7) Toshiyuki Hirashima, Tomonori Umebayashi, Makoto Taguchi, Naomasa Shimoyama, Mitsuhiro Kamioka, Takeo Marutani, Takayuki Murata, Hideki Hiramatsu: Car Body Shells with Beautiful Skin -Made by Laser Weld or Friction Spot Joining-, No.160 (2006).
- 8) Mitsuo Fujimoto, Masayuki Inuzuka, Shinji Koga and Yoshitaka Seta: Development of Friction Spot Joining, Welding in the World, Vol.49 (No 3/4-2005), 18-21.
- 9) Shinji Koga: Development of Friction Spot Joining, Journal of light metal welding & construction, 42-11 (2004), 523-529. (in Japanese)
- 10) Fujimoto Mitsuo, Koga Shinji, Abe Natsumi, Sato Yutaka and Kokawa Hiroyuki: Microstructural Analysis of the Stir Zone of Al Alloy Produced by Friction Stir Spot Welding, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 投稿中