

(解説)

最近のアルミニウム接合技術の動向と当社の取組み

Latest Trend of Joining Technologies on Aluminum Alloys and Kobe Steel's R&D



笹部誠二*
Seiji SASABE

Innovative joining processes such as friction stir welding, laser welding and hybrid laser welding have been developed in the field of aluminum joining and are gaining industrial interest in regards to high weld quality and high productivity. These processes have begun to be applied to several real structures. This paper surveys these various joining technologies and introduces Kobe steel's R&D, including our original technologies.

まえがき = アルミニウム (以下、アルミという) の接合技術に関する最近の動向と当社の取組みを紹介する。対象とした接合技術は、機械的接合や接着接合などは除き、主として冶金的な接合技術に関するものとした。まずは、最近の各種接合方法を概観比較し、高速度低コスト化、高性能化を目指したレーザー溶接技術、施工時の裕度 (誤差許容度) を考慮したレーザーとミグとのハイブリッド溶接ならびにタンデムミグ溶接、さらには溶接ワイヤの送給安定化と低コストを目指したサーボ式ブルトーチ搭載のロボットシステムを紹介する。また、材料の適材適所化を可能とする、とくに自動車分野でのハイブリッド材料化を目指した鋼との異種金属接合技術についても取組中であり、合せて触れてみることにした。最後に、自動車に多用される重ねすみ肉継手に着目して、材料面からとらえた継手性能について触れた。

1. 各種接合方法の比較検討

アーク溶接機は、1983年のインバータ制御溶接電源の実用化を契機とし、そのインバータ制御をベースに高速演算素子や高速スイッチング素子の出現によって電源がデジタル化され、さらに溶接アーク現象を直接制御できる電源システムの市販に伴って目覚ましい進展を遂げている。また、アーク溶接よりもさらに高エネルギー密度溶接であるレーザー溶接や、アーク溶接とレーザー溶接を併用したハイブリッド溶接などの新しい溶接方法も開発され、既に実用化されている。また、とくにアルミの接合分野では、FSW (Friction Stir Welding) という固相での摩擦攪拌接合が TWI (The Welding Institute: 英国溶接協会) によって開発され、既に鉄道車両や船舶分野などで実用化されている。

これら最近の種々の接合方法を、接合に必要なエネルギーならびに母材に与える熱影響などの観点から比較検討

した結果¹⁾を以下に紹介する。まずは、板厚2mmの突合せ接合を例にして、1mの接合に必要な1次側電源入力と使用するシールドガス製造エネルギーを合算すると、図1のような試算結果となる。レーザー溶接は、高エネルギー密度ゆえに高速溶接が可能になるものの、レーザーの発振効率が低く、かつアルミ材へのレーザー吸収率が低いために、レーザー溶接よりも溶接速度が遅いティグ (TIG) 溶接やミグ (MIG) 溶接よりもエネルギー効率が低いという結果となった。鋼の場合は、材料へのレーザー吸収率がアルミの場合よりも高いため、そのエネルギー効率は、炭酸ガス溶接やマグ (MAG) 溶接より高くなる点で異なるようである²⁾。また、MIG溶接とYAGレーザー溶接とのハイブリッド溶接は、そのエネルギー効率の大幅な改善に直結するものではないこともわかるが、これはレーザー溶接のエネルギー効率の低さに支配されているからと思われる。このレーザー溶接のエネルギー効率を上げるために、励起方法の改善による発振効率の向上や発振媒体の開発、種々の波長のミキシングによるアルミ

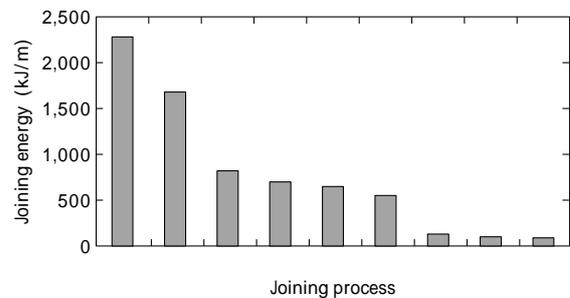


図1 2mm t 突合せ溶接時の各種接合方法における必要エネルギー量の比較

Fig. 1 Comparison of joining energy on various joining processes in case of 2mm t butt welding (lamp-pumped YAG laser hybrid welding of lamp-pumped YAG laser with MIG CO₂ laser LD-pumped YAG laser Laser Diode TIG MIG FSW Tandem MIG)

*アルミ・銅カンパニー 技術部 (藤沢)

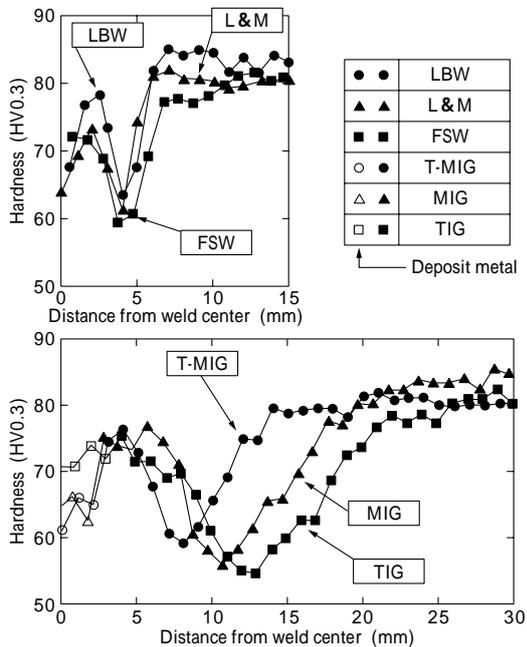


図2 各種接合方法による溶接部の硬さ分布の比較

Fig. 2 Comparison of distribution of hardness (Hv) in welded joints on various joining methods (LBW: YAG laser welding, L&M: YAG laser + MIG hybrid welding, FSW: Friction stir welding, T-MIG: Tandem MIG, MIG: Metal inert gas arc welding, TIG: Tungsten inert gas arc welding)

材のレーザ吸収率の向上に向けて日進月歩の開発が行われている。

つぎに、これらの熱源が母材に与える熱影響の大きさを比較するため Al-Mg-Si 系 SP540-T5 材料による厚さ 2mm の突合せ継手を例にして、その硬さ分布を調べた (図 2)。その結果、熱影響の大きさは、LBW(YAG) L&M(YAG + MIG) < FSW < Tandem MIG < MIG < TIG の順で大きくなった。従来の MIG 溶接や TIG 溶接に比較して、YAG レーザ溶接 (YAG) は熱影響が著しく小さく、FSW がこれに続く。また YAG + MIG のハイブリッド溶接は YAG と同程度、タンデムミグ溶接 (Tandem MIG) は MIG 溶接よりも若干改善されるものの非熔融溶接の FSW にはほど遠いという傾向であり、そのまま継手強度 (硬さ) にも反映されている。

2. レーザ溶接ならびにハイブリッド溶接への取組み

2.1 リサイクル材の溶接性

アルミは、スクラップリサイクル時の溶解再生エネルギーが新地金製造時の 3.3% (CO₂ 排出量で約 2.2%) で済むことから、リサイクル材の活用が CO₂ 排出量低減にとくに有効である。自動車のアルミ化においては、たとえばオールアルミ車からの鋳物をも含む再生塊を 6063 あるいは 5182 といった展伸材へ再生する場合、Si 量などが JIS 上限値よりも高く許容されるとすると、再生塊の投入利用率をさらに増加させることが可能となる。ここでは、溶接の観点から熱影響部に発生しやすい割れ前兆となる共晶融解に着目し、その発生傾向を YAG レーザ溶接ならびにミグ溶接で比較した結果を表 1 に示す⁴⁾。JIS 成分範囲を超えた Si, Cu の場合、MIG 溶接では共晶融解が発生しやすくなるが、YAG レーザ溶接では発生

表 1 各材料における溶接マイクロ割れに対する溶接方法の影響

Table 1 Effect of joining process on micro-crackings in various aluminum alloys

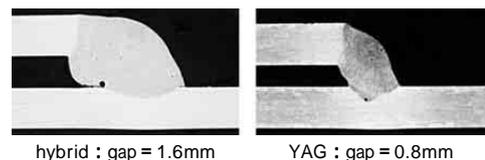
welding method	welding rate (m/min)	6063				5182			
		JIS base	Si	Cu	JIS base	Si	Cu		
MIG	1		0.7	1.0	0.15	0.3			
	2								
YAG	3								
	7								

eutectic or melting phase in bond area: rare recognition <a little < more

表 2 2mm 材突合せ継手における溶接条件の比較

Table 2 Comparison of welding schedules on 2mm thickness butt joints

	MIG	YAG	Hybrid	Hybrid/YAG
Welding speed (m/min)	0.95	3	5	1.67 (productivity)
Laser power (kW)	-	4	2	0.5 (reduced photon cost)



hybrid : gap = 1.6mm

YAG : gap = 0.8mm

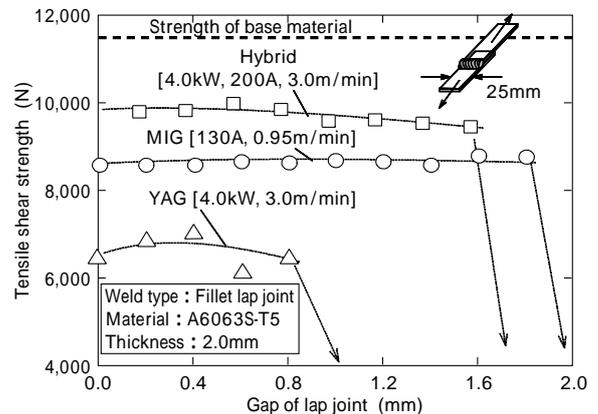


図 3 各種接合法におけるギャップ量と引張せん断強度との関係

Fig. 3 Relationship between gap and tensile shear strength on various joining methods

が抑制され、溶接速度を速くするとほぼ発生が抑止されることもわかった。熱影響の抑制が効果をもたらしていると推定され、レーザなど高エネルギー密度溶接がリサイクル材の活用には有効であると考えられる。

2.2 ハイブリッド溶接

本技術分野においては、基本的な研究が取組まれる⁵⁾と同時にその適用開発も活発であり、実用化は拡大しつつある。具体的には、開先部のギャップ裕度の緩和、ポロシティ (溶接金属中の空洞) やアンダフィル (溶着量不足) の低減といった溶接の安定化などとともに、溶込み深さの増加による溶接速度の高速度化を目指してレーザとアークとのハイブリッド溶接の開発や適用に向けた取組みが行われている。適用例としては、AUDI の新型 A8 のルーフや VW の Phaeton のドアなどが上げられる。

YAG-MIG の組合せ例⁶⁾として、A6063-T5、肉厚 2mm での突合せ継手では、表 2 に示すようにレーザ出力の半減化と溶接速度の 60% 増加が可能となり、前章のとおり熱影響は低減する。また、重ねすみ肉継手におけるギャップ裕度も図 3 のように、レーザ単独の 2 倍程度に改善

され MIG 溶接とほぼ同程度になる。国内での鉄道車両の中空型材同士への溶接に適用に際しては、MIG 溶接での開先が設計変更なしに適用可能であるとし、さらに狭開先にすることで、従来の MIG 溶接に比較して約 4 倍の高速度化が可能となり、熱影響低減による MIG 溶接同等以上の静的・疲労強度特性を有するという⁷⁾。

以上、レーザ溶接は高エネルギー密度ゆえに種々のメリットを有しており、組立施工時の溶接性改善のための MIG 溶接とのハイブリッド溶接も既に実用化され、大量生産向けの高効率溶接方法としてさらに発展していくものと思われる。

3. タンデム MIG 溶接

MIG 溶接では、高効率化のための安易な高速化は電流増大による溶湯の乱れを生じさせ、継手品質を損なう。このため、通常では溶接速度の上限は 1.5m/min 程度と考えられている。最近では、ワイヤ送給系や給電部の改善によりさらなる高速度化が図られつつあるが、さらに高速化を可能とする手段の一つとして、1 トーチに 2 本のワイヤを備えることによって高速度化と安定性を合せ持つタンデム MIG 溶接法が開発され、実用化が進みつつある。

A6N01S-T5, 3mmt の突合せ継手への適用を例にすると、溶接電流の先行/後行比を約 1.4 とすることにより、同比 1.0 の場合に対して貫通する同一溶込みで約 10% の入熱低減化が可能となり、継手強度の向上や図 4 に示したように耐溶接ミクロ割れ性が向上する⁸⁾。溶融池を中心とした温度分布の測定結果からは、溶接線方向に伸長した等温度分布となっており、溶接直角方向に熱が拡散するより溶接部の溶込み方向に有効に作用したものと推定される。その結果、熱影響部は高温にさらされる領域が狭いことからミクロ割れは抑制され、また 300 近傍の冷却速度は通常 MIG の場合の 1.5 倍前後と高く、安定相への時効進行が抑制されたものと思われる。図 5 に溶接金属部のデンドライト組織を示したが、デンドライトセルサイズが小さくなっており、明らかに入熱量の低減が図られていることがわかる。

本溶接方法は、溶着金属がある程度必要な中肉厚用の高効率溶接方法として位置づけられ発展するものと推定される。

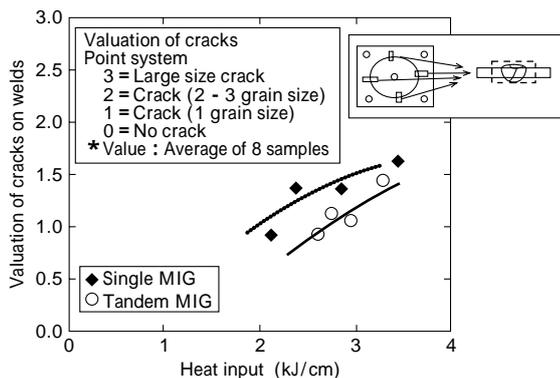


図 4 溶接ミクロ割れ性の比較

Fig. 4 Comparison of micro crackings in tandem MIG welds with single MIG

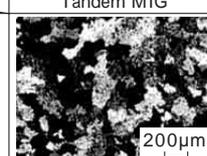
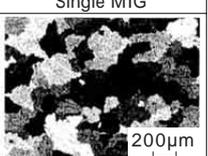
	Tandem MIG	Single MIG
Location of micrograph in weld metal 	 200μm	 200μm
Grain size [μm]	116.8	183.1
Dendrite arm spacing [μm]	11.8	12.5

図 5 溶接金属のデンドライト組織の比較

Fig. 5 Comparison of micro-structures in tandem MIG weld metal with single MIG

4. MIG 溶接ワイヤの送給性改善

MIG 溶接時のトラブルは、溶接ワイヤ送給にかかわるものが多く、鋼に比べて軟らかいアルミの溶接ワイヤを安定して確実に送給することがポイントである。その送給の安定化を可能とするサーボ式プルトーチの適用を考え、そのトーチ搭載のロボットシステムの開発に取り組んだ。その際、設備投資コストの低減を図るために、既設の鋼用溶接ロボットシステムの有効活用にも取り組み、サーボ式プルトーチを後付搭載することによってアルミ溶接のロボットシステムを完成させた⁹⁾。

欧州車のサブフレームなどでの構造体によく見られる 5454 板材のプレス曲げ部品の重ねすみ肉溶接を想定し、通常よく使われる硬質の Al-Mg 系ワイヤでは、溶接部のスマット（黒スス）付着が避けられないことから、あえて Al-Si 系の 4047 溶接ワイヤを用いて溶接した例を図 6⁹⁾ に示す。このワイヤは、Al-Mg 系ワイヤに比べて軟質であるにもかかわらず、プルトーチにより、非常に安定的な送給性を保つことができ、良好な継手品質が得られている。

なお、この後付型トーチはジェットトーチ（高丸工業(株)の商標）という名称で市販されており、鋼用ロボットシステムであっても後付することで、アルミの溶接に適用可能であるという付加価値を提案している。

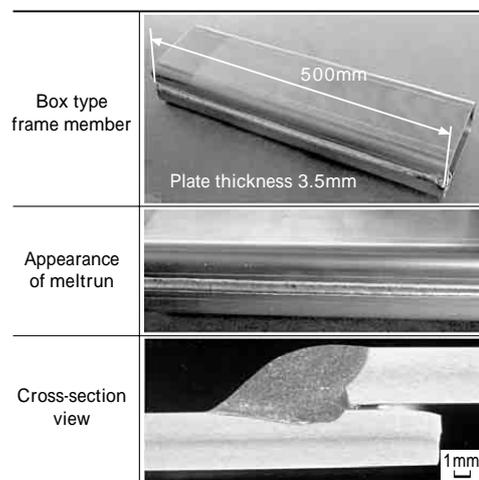


図 6 後付型サーボ式プルトーチにて得られた実用的溶接の品質例（母材：A5454P-H112，溶接電流：200A，溶接速度：120 cm/min⁹⁾）

Fig. 6 Example of application result in practical aluminum welding by added torch (Base metal: A5454P-H112, Welding current: 200A, Welding speed: 120cm/min⁹⁾)

5. 鋼との異種金属接合技術の開発

地球温暖化防止の観点から、CO₂ 排出量低減に直結する自動車の軽量化を図るための材料のハブリッド化に向けた取組みが活発化し、各種接合方法による異種金属接合に関する報告が多く発表されてきている。表3¹⁰⁾に示すように機械的接合などでは既に実用化されているが、新たな設備投資をすることなく既存の溶接装置を有効活用することや、その既存の溶接装置による冶金的接合も望まれている。

このような要望にこたえるべく、当社は日新製鋼株式会社とともに、異種金属接合用アルミめっき鋼板を用いた接合技術の開発に取り組んだ¹¹⁾。

合金化溶融亜鉛めっき鋼板(GA 鋼板)あるいは裸鋼板(SPCC)とアルミ板との接合時には、接合界面全面にわたってFe-Al系金属間化合物層が形成されるが、開発したアルミめっき鋼板とアルミ板との組合せでは金属間化合物の形成しない領域が溶接金属部内の外縁部に安定的に存在する。つまり、この金属間化合物未形成域が強固な接合強度を発揮することで接合界面方向への亀裂伝播を防ぎ、アルミ同士の継手と同様な破断プロセスとして最後は溶接金属部あるいはアルミ母材部への亀裂伝播に導くことになる。このFe-Al系金属間化合物未形成域は、開発したアルミめっき鋼板材の鋼素地とめっき層界面に存在させた窒素(N)濃縮層が、アルミ溶融部と鋼板素材部との固液拡散の障壁として働くことによって生成する¹²⁾。

たとえば抵抗スポット接合の場合を例にとると、図7¹¹⁾のように本アルミめっき鋼板との組合せの場合には、とりわけ十字引張強度においてアルミ同士並の高い継手強度が得られることが特徴であり、その破断モードはアルミ材でのプラグ破断となる。また、鋼材のジュール発熱ならびに蓄熱効果もあり、鋼用容量のスポット溶接機がそのまま使えるというメリットもある。さらに、重ねすみ肉継手としてミグブレイジングやレーザブレイズ溶接などの線接合も可能であり、アルミ用の通常MIG溶接機やレーザ溶接機がそのまま使える。

一方、GA鋼板との接合にも取り組んでおり、フラックススコアードワイヤを用いて、レーザブレイズ溶接すれば良好な継手性能(図8)なども得られつつあり¹³⁾、現在

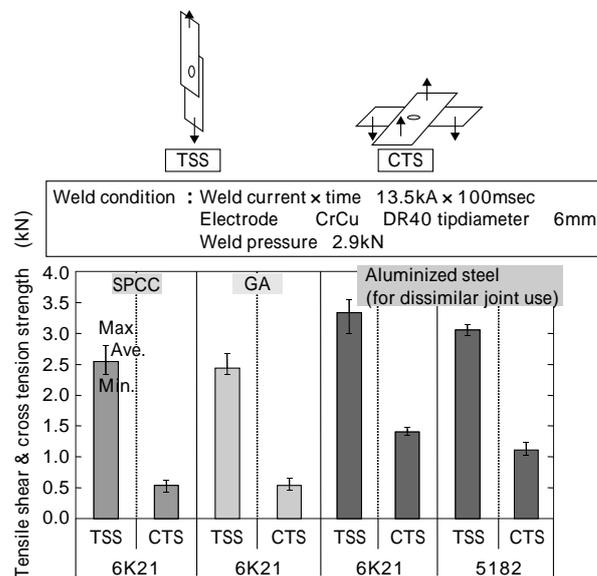


図7 抵抗スポット溶接継手の引張せん断強度(TSS)、十字引張強度(CTS)の各種鋼材における比較¹¹⁾

Fig. 7 Comparison of tensile-shear strength (TSS) and cross-tensile strength (CTS) in resistance spot welds between the combinations with various steels¹¹⁾

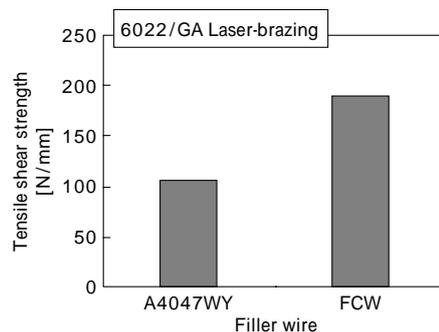


図8 GA鋼板とアルミとのレーザブレイズ溶接による重ねすみ肉継手における溶加材の継手強度に与える影響

Fig. 8 Effect of filler wire on tensile-shear strength in lapped fillet welds by laser-braze welds of combination GA steel and aluminum

もさらなる改善に向けて技術開発中である。

6. 各種溶接構造用材料の溶接性

自動車分野における構造用材料として適用可能な5154, 5083, 6061, 6N01, 7N01ならびに7000系開発合金の重ね隅肉継手(3t, 5356WY)性能に着目し、多分野で多用される突合せ継手と比較すると以下のとおりである¹⁴⁾。

表3 異種金属接合方法の分類と自動車分野における適用状況
 Table 3 Classification of dissimilar metal joinings and its applications in automobile field

		spot-joining	line-joining	face-joining
Mechanical joining	Rivetting	SPR	X	X
	Clinching	TOX, TOG-L-LOC		
	Screw	FDS		
Chemical joining		Mechanical-bonding Weldbonding		Adhesive Bonding
Metallurgical joining	solidus-solidus	FSW-spot Ultra sonic bonding	Friction welding Friction stir welding(FSW) Magnetic pulse joining Magnetic seam joining	
	solidus-liquidus	Resistance spot welding	MIG braze welding Laser braze welding	Brazing
	liquidus-liquidus			

Real application our R&D (by new developed aluminized steel)

突合せ継手では5000系で母材,6000,7000系で熱影響部で破断し,継手効率はそれぞれ100%,70%,80~90%で,破断位置である熱影響部の最小の硬さ値によって整理できる。

重ねの片側隅肉継手では,全て溶接金属部で破断し,継手強度は突合せよりも低く,継手効率は5000系では60~70%,6000,7000系では40~50%である。破断位置が溶接金属部であるが,その硬さでは整理できない。引張負荷時には重ねの上材,下材の界面と溶接金属との交点に応力が集中し,図9に示すような破断に至るため,熱影響部や母材の強度(硬さ)など溶接部の回転曲げに影響する因子でもうまく整理できず,溶接金属部の靱性,切欠抵抗などをも含めた検討が必要である。継手形状としては,両面すみ肉溶接やせぎり溶接など,負荷時に曲げ成分を極力排除することが高強度化の対策の一つとなる。

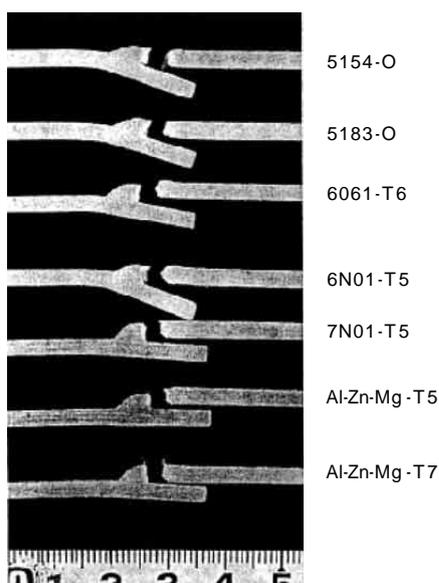


図9 各種アルミ合金材を用いた片面重ねすみ肉継手の引張試験破断後の変形状況

Fig. 9 Appearances of transformation in single-lap fillet welds by using various aluminum alloys after tensile testing

むすび=以上,最近のアルミに関する接合技術の動向と当社の取組みについて取りまとめた。高能率・高品質な溶接技術が開発される一方,今後は接合のエネルギー効率の面からの評価も重要視されるであろう。また,材料の適材適所化のための異種金属接合技術のさらなる進化も期待される。

参考文献

- 1) 笹部誠二: IIW International Conference (2004) p.53.
- 2) B. Pekkari: The ESAB Welding and Cutting Journal, Vol.59, No.1(2004) p.53.
- 3) 江間光弘ほか: 軽金属溶接, Vol.41, No.7(2003) p.308.
- 4) 笹部誠二ほか: 自動車技術会材料フォーラム(2002) No.20024366, p.39.
- 5) 内海 怜ほか: 第62回レーザ加工学会論文集, Vol.62(2004) p.10.
- 6) 江口法孝: 軽金属溶接, Vol.42, No.8(2004) p.373.
- 7) 米谷 弘: 軽金属溶接, Vol.46, No.2(2008) p.43.
- 8) 松本 剛ほか: 軽金属溶接, Vol.43, No.3(2005) p.128.
- 9) 米沢和男ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.54, No.2(2004) p.70.
- 10) 笹部誠二: 自動車技術, Vol.61, No.4(2007) p.24.
- 11) 岩瀬 哲ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.57, No.2(2007) p.56.
- 12) 服部保徳ほか: 日新製鋼技報, No.88(2007) p.1.
- 13) 松本 剛ほか: 溶接学会全国大会講演概要, Vol.79(2006-9) p.306.
- 14) 江間光弘: 軽金属溶接, Vol.45, No.8(2007) p.369.