摩擦攪拌作用を用いた Al 合金/Zn めっき鋼板の重ね点接合*

宮川 堅**, 椿 正己***, 安井 利明***, 福本 昌宏***

Spot Welding between Aluminum Alloy and Zn Coated Steel by Friction Stirring*

by MIYAGAWA Katashi**, TSUBAKI Masami***, YASUI Toshiaki*** and FUKUMOTO Masahiro***

Application of aluminum alloy which is a typical lightweight material has been expected to achieve energy saving and prevention of pollution in many kinds of transportation vehicles. While the structure made of whole aluminum alloy, however, is lightweight, it still has problems, such as low mechanical strength and high cost. Hence, hybrid or joining structure made of aluminum alloy and steel seems to be reasonable because of its lightweight and higher strength.

To make a hybrid structure for transportation vehicles, we examined welding by friction stirring between aluminum alloy and low carbon steel, which was welding without melted weld materials. As a result, welding between aluminum alloy and low carbon steel that had thin intermetallic compound at weld interface was obtained.

In recent automobile manufacturing, zinc coated steel has been used as structural parts in general. On the welding between zinc coated steel and other materials such as aluminum alloy, existence of Zn layer between aluminum and steel have to be taken into account, to get high quality joint between the materials.

In this study, the spot joining between aluminum alloy and several kind of zinc coated steels by friction stirring was carried out, and the effect of coated layer both on the weld strength and weld interface microstructure was investigated. As a results, joint between aluminum alloy and zinc coated steel was stronger than that between aluminum alloy and non coated steel, when coated layer was removed at weld interface by plastic flow of aluminum alloy.

Key Words: Friction stirring, Aluminum alloy, Zn coated steel, Dissimilar metals, Spot welding

1. 緒 言

近年、省エネルギー化の観点から、燃費の向上を目的とした軽量化が自動車、航空機、鉄道車両、船舶等の輸送機器に求められており、これらの機器への軽量部材の適用が検討されている。特に自動車においてはアルミニウム合金と鉄鋼材料を併用した高強度且つ軽量の構造体への移行が期待されている¹⁻³⁾。さらに昨今、現在輸送機器の製造等に利用されている鉄鋼材料の多くは、防食のために表面にめっきが施されているものが数多く見受けられる。よって、接合対象としてめっき鋼板を視野に入れる必要がある^{4, 5)}。

筆者らはこれまでに、アルミニウム合金同士の接合法として普及しつつある摩擦攪拌接合法 (Friction Stir Welding, 以下 FSW) を応用し、摩擦攪拌作用を活用した鉄鋼材料とアルミニウム合金の重ね点接合の可能性を追究してきた。その結果、アルミニウム合金側のみを攪拌することにより異材間の接合が可能であることを明らかにするとともに、さらに接合条件と接合体特性および接合部界面状態との関

係性の解明を通し、異材界面の接合メカニズムについて考察してきた⁶⁾。

溶融溶接においては、同種材、異種材の接合に関わらずめっき層の役割は重要である。摩擦攪拌作用を用いた異種材料間の接合を適用する場合においても、鉄鋼材料に施されためっき層が接合中にいかなる挙動を示し、また、それが接合強度にいかなる影響を与えるのかについて、詳細な検討が必要である。さらに、めっきの材質やその製膜プロセスによっても、めっき層の機械的特性、化学的特性は大きく異なるため、接合に有効なめっき層の特定や有効な接合プロセスの確立が重要と考えられる。

本研究では、Al 合金と組成や製膜プロセスの異なる種々の Zn めっき鋼板との摩擦攪拌点接合を行い、接合中のめっき層の変形、ならびにめっき層が接合強度に及ぼす影響を調査した。

2. 供試材料および実験方法

接合実験には、既設マシニングセンター (エンシュウ (株), S400) を用いて行い、回転ツールはφ10 mm の超硬合金製で、先端にプローブのない形状のものをを用いた⁶⁾。また、予備実験において、ツール表面に供試材が凝着する現象が認められたため、これを防止するために、ツール表面にダイヤモンドコーティング処理を施したものをを用いた。本実験に用いた供試材保持用の治具の外観及び模式図を Fig. 1

*受付日	平成19年12月28日	受理日	平成20年4月16日	平成19年度春季全国大会で発表
**学生員	豊橋技術科学大学 (院)	Student Member,		Toyohashi Univ. of Technology
***正 員	豊橋技術科学大学	Member,	Toyohashi Univ. of	Technology

Fig. 1 Spot welding by Friction Stirring, (a)Overview, (b)Cross section view.

Table 1 Welding conditions

Tool rotation N (rpm)	3000
Tool plunge speed v (mm/min)	50
Tool plunge depth d (mm)	0.4
Hold time of tool t (s)	5

に示す。治具本体 (Holder A) に配した溝部に供試材を配置し、それを上部治具 (Holder B) によって上から押さえることで固定した。供試材は、Al 合金が上になるように配置し、そこに指定回転数で回転させた回転ツールを任意の押し込み深さまで挿入し数秒間の保持を与えて接合を完了する。供試材には Al 合金 A5052, および冷間圧延鋼板に Zn めっき処理を施したものをを用いた。Zn めっきの種類は、電気 Zn めっき, 電気 Zn-Ni 合金 めっき, 熔融 Zn めっきの 3 種類とした。

接合条件を Table 1 に示す。この条件は著者らのこれまでの Al 合金/軟鋼板接合実験において、十字引張強度, 引張せん断強度ともに高かった条件である⁶⁾。継手強度の評価は十字引張試験および引張せん断試験によった。強度試験後の接合部破断面, および継手の接合部断面に対し SEM による観察および EDX による元素分析を行った。また、接合中のめっき層の状態を推察するため、接合部界面に熱電対を配置し、接合中の温度測定を行った。熱電対の位置は Fig. 1 (b) に示すとおり、継手中心とした。

3. 実験結果および考察

3.1 継手作製予備試験結果

予備実験として、超硬合金製ツールで接合実験を行ったところ、いずれのめっき鋼板においても接合終了後、Fig. 2

Fig. 2 Effect of A5052 adhesion (a)Tool end (b)(c)Cross section of weld interface.

Fig. 3 Zinc diffusion in A5052 at $t=0$ (a)Cross section of weld interface (b)Zinc inflow.

に示すように、回転ツール先端に Al の凝着が生じ、その結果、継手中央部に Al が欠損したくぼみが生じた。この状態では、健全な継手作製が困難であり、また、ツールへの凝着により、連続した接合プロセスが不可能と判断された。ツールへの Al 凝着の原因を調査するため、保持時間 t を 0 s として凝着が生じない条件で継手を作製し、接合部断面の観察を行った。観察結果を Fig. 3 に示す。その結果、接合部外周部近傍において、界面から A5052 側に向けて筋状の模様が観察された。EDX 分析の結果、その筋は Zn で構成されていることが分かる。つまり、Zn めっき層は接合中に A5052 側へ流入することが裏付けられる。すなわち、このような Zn の流入により、Al 合金内に面状の異層が形成される。また、回転ツールに対し A5052 の親和性が高いことから、A5052 と回転ツールの間には強固な接合が形成される。その結果、Al 合金内の異層の低強度に起因し、上述のカップコーン形状のくぼみが形成されたものと考えられる。このような破断を防止するためには A5052 の回転ツールへの凝着抑制が効果的であると考えられる。

そこで、A5052 の凝着を抑制するために、先端のピンおよびショルダ部、そして先端から 20 mm の側面部にダイヤモンドコーティング（以下：ダイヤモンドコート）を施したツールを新たに準備した。ダイヤモンドコートは、その親和性の低さ、熱伝導性の高さから、Al 等の軟質材料の切削における構成刃先の抑制に効果的であり、本実験における A5052 の凝着抑制にも効果的であると期待される。ダイヤモンドコートを施したツールを用いた場合の、接合後ツール先端部、および接合部断面および表面の観察結果を Fig. 4 に示す。ツール端部には薄い凝着が認められるものの、ダイヤモンド無しツールのツールで起こった接合部の Al の剥離欠陥は起こらなかった。これは、ダイヤモンドの親和性の低さに起因するものと考えられるが、詳細は不明であるため、今後さらに調査が必要である。しかし、本実験でダイヤモンドが凝着抑制に有効であることは明らかであった。そこで、以下においては、

Fig. 4 Effect of diamond coat on tool surface (a) Tool end with diamond coat (b) Weld interface (c) weld surface.

Fig. 5 Cross tensile strength of joints (N=3).

端面にダイヤモンドを施したツールを用いることとした。

3.2 継手強度測定結果

ダイヤモンドツールを用いて作製した継手の十字引張試験結果および引張せん断試験結果を Fig. 5 および Fig. 6 にそれぞれ示す。継手強度については、十字引張強度、引張せん断強度ともに、製膜プロセスに関わらず、Zn 単体のめっきを施した鋼板の方が裸鋼板よりも高い継手強度を示した。これに対し、Zn-Ni 合金めっきを施した鋼板は、裸鋼板よりも低い継手強度となった。これより、めっき材質によって継手強度が大きく変化することがわかった。しかし、全ての接合体において、界面を起点とした破断形態を呈していた。

以上の結果より、めっき鋼板の種類によって継手強度は大きく異なるが、その破壊はいずれも継手界面にて生じていることが分かった。そのため、継手強度の相違はその破断の起点となっている箇所の組成と界面の状態に起因するものと考えられる。そこで引張せん断試験後の継手の破断

Fig. 6 Tensile shear strength of joints (N=3).

Fig. 7 Steel side fracture morphologies of A5052/Zn electroplating steel after tensile shear strength (a)(b) Appearance, (c) SEM images, and (d) XRD diffractograms.

面, および接合部の断面の観察および分析を行い, 接合後のめっき層の状態を調査した。

3.3 継手破断面の組織観察結果

引張せん断試験後の電気 Zn めっき鋼板を用いた継手, および Zn-Ni 合金めっき鋼板を用いた継手の鋼板側破断面観察, EDX 分析結果および XRD 分析結果をそれぞれ Fig. 7 および Fig. 8 に示す。破断面の表面観察結果から, 電気 Zn めっき鋼板を用いた継手では, 接合部破断面における Al の付着はほとんど確認できないのに対して, Zn-Ni めっき鋼板を用いた継手では, 接合部破断面のほぼ全体にかけて Al の付着が確認された。また, EDX 分析結果から, 電気 Zn めっき鋼板では接合部破断面が Al と Fe によって構成されているのに対して, Zn-Ni 合金めっき鋼板では, 主に Al と Ni によって構成されていた。さらに, XRD 分析の結果から, 電気 Zn めっき鋼板を用いた継手では Fe および Fe_2Al_5 のピークが確認されたのに対し, Zn-Ni 合金めっき鋼板を用い

Fig. 8 Fracture point of A5052/Zn-Ni electroplating steel, steel side (a)(b) Appearance, (c) SEM images, and (d) XRD diffractograms.

Fig. 9 Cross section microstructure of A5052/Zn electroplating weld interface (a) weld center (b) 4mm from center, and (c) non weld region.

た継手では Fe, Ni および Al_3Ni のピークが認められた。これより, 両者においては, 接合部界面近傍を構成する元素, あるいは界面に生成した金属間化合物相が異なり, このことが継手強度の差をもたらしたのではないかと考えられる。

3.4 継手断面の組織観察結果

そこで, 継手の縦断面について, より詳細な観察を行った。電気 Zn めっき鋼板を用いた継手および Zn-Ni 合金めっき鋼板を用いた継手の断面観察および EDX 分析結果をそれぞれ Fig. 9 および Fig. 10 に示す。その結果, 電気 Zn めっき鋼板接合体では Fig. 9 (a), (b) に示すように, 接合部界面においてめっき材である Zn の存在がほとんど確認できないことから, めっき層は A5052 の流動に伴って母材である鋼板表面から剥離し, 接合部界面から排除されたものと考えられる。排除されためっき層は Fig. 3 で確認された, A5052 内への流入とともに, Fig. 9 (c) に示すように接合部外周の Al とめっき鋼板の未接合部間隙に堆積する傾向が確認された。本来, 界面に存在する Zn は接合のために必要な Al と鋼の接触を阻害するため, この継手で見られたように界面から Zn が排除されることは, 強固な継手を得るのに有利である⁷⁾。また, 同継手では, 接合部界面に Fe と Al と異なる薄い層が確認された。界面の EDX 分析の結果, この層は Fe と Al によって構成されていることが確認された。

これに対して, Zn-Ni 合金めっき鋼板接合体では, Fig. 10 (a), (b) に示すように, 界面には 2 つの異なる層が存在することが分かった。EDX 分析の結果から, これら 2 層はそれぞれ, 鋼板側の層が Zn, A5052 側の層が Al と Ni で構成されていることが分かった。したがって, 同継手においては, 接合部界面に残留した Zn が Al と鋼との接合を阻害する⁷⁾と共に, 硬くて脆い Al/Ni 金属間化合物⁸⁾相の生成により接合強度の低下を招いたものと考えられる。

以上のように, 鋼板めっき層組成の違いに応じ, 接合時めっき層の流動状態の相違は, めっき層組成と接合時界面温度の相関関係に依存すると考えられることから, 界面温度の測定を行った。

Fig. 10 Cross section microstructure of A5052/Zn-Ni electroplating weld interface (a) weld center (b) 4mm from center, and (c) non weld region.

Fig. 11 Temperature change at weld interface.

3.5 接合時界面温度の測定結果

接合部界面の温度測定を行った結果を Fig. 11 に示した。温度測定の結果、各めっき鋼板によってわずかに違いが見られるものの、いずれもほぼ同じような温度履歴を示した。また、回転ツール挿入時に 400℃ 程度まで上昇するが、それ以後、ツール保持中は 400～300℃ の間でほぼ一定値を保つ傾向が認められた。ここで、各めっき層の融点と測定された温度を比較すると、Zn 単体のめっき層の融点は 420℃ と、測定された上限温度とはほぼ等しいのに対して、Zn-Ni 合金のめっき層の融点は 800℃ と測定温度よりもはるかに高い温度であることが分かる。このことから、電気 Zn めっき鋼板と溶融 Zn めっき鋼板の場合、接合中にめっき層はほぼ溶融状態にあるのに対し、Zn-Ni 合金めっき鋼板の場合、めっき層の一部は Al と反応し Al/Ni 金属間化合物層を形成するが、多くは固相状態として留まっている可能性が高い。これによって、両継手の界面の状態に相違が見られたと考えられる。

3.6 接合メカニズムの考察

摩擦攪拌作用を用いた A5052/Zn めっき鋼板の重ね点接合において、高い継手強度を得られる場合の接合メカニズムを Fig. 12 に示す。この接合において、接合部界面では以下のような工程で継手が形成される。

- ① 回転ツールの挿入により Al 合金が軟化、塑性流動を起こす。
- ② Al 合金の塑性流動に伴いめっき層が剥離、接合部から排除され、鉄鋼材料に Fe 新生面が形成される。
- ③ 塑性流動した Al 合金が回転ツールの押し込みによって Fe 新生面に押し付けられる。それにより、Al 合金と Fe 新生面が反応、薄い金属間化合物を生成し、接合を完了する。

Zn めっき鋼板を用いた場合、接合中に Zn めっき層を除去することによって、活性な Fe 新生面が形成される。これによって、裸鋼板を用いた場合に比べて Fe/Al 間の反応が促進されるため、高い継手強度が得られたと考えられる。

しかし、Zn-Ni 合金めっき鋼板では、めっき層が界面に残留し Al と Fe の間の反応を阻害するため、強固な接合継手が得られなかったと考えられる。

Fig. 12 Joining mechanism between A5052/Zn plating steel.

4. 結 言

本研究で明らかになった諸点を以下に示す。

- (1) 摩擦攪拌作用を用いた A5052/Zn めっき鋼板間の接合において、A5052 内へ流入した Zn 層の形成に基づき、ツールに A5052 が凝着したカップコーン型剥離現象が認められた。これに対し、ツール端面にダイヤコート処理を施すことで凝着現象を抑制し、良好な継手を得ることに成功した。
- (2) 強度試験の結果、Zn 単体めっき鋼板では裸鋼板よりも高い接合強度が得られたが、Zn-Ni 合金めっき鋼板では裸鋼板よりも低い強度しか得られなかった。
- (3) 本接合プロセスにおいて、Zn めっき鋼板ではめっき層は接合部から排除され、その結果、裸鋼板を用いた場合には得られない鋼材新生面と Al との強固な接合が得られる。これに対し、Zn-Ni 合金めっき鋼板では、めっき層の効果的な流動が得られず、高い継手強度が得られないことが分かった。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、回転ツールを提供して下さった

オーエスジー株式会社様，めっき鋼板を提供して下さいました
住友金属工業株式会社様に対し，厚く御礼申し上げます．

参 考 文 献

- 1) Koji TANAKA, Masaki KUMAGAI, Hideo YOSHIDA, Dissimilar joining of aluminum alloy and steel sheets, Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol.56, No.6 (2006), 317-332.
- 2) WATANABE Takehiko, DOI Yuhei, YANAGISAWA Atsushi, KONUMA Shizuyo, Resistance Spot Welding of Mild Steel to Al-Mg Alloy, Journal of Japan Welding Society, Vol.23, No.3 (2005), 491-495.
- 3) NISHIMOTO Koji, FUJI Hiro, KATAYAMA Seiji, Laser Pressure Welding of Aluminum Alloy and Low Carbon Steel, Journal of Japan Welding Society, Vol.22, No.4 (2004), 572-579.
- 4) WATANABE Takehiko, SAKUYAMA Hideko, YANAGISAWA Atsushi, Ultrasonic Welding between Mild Steel and Al-Mg Alloy Sheet, Journal of Japan Welding Society, Vol.25, No.2 (2007), 239-244.
- 5) Mikako Takeda, Wataru Urushihara, Katsushi Matsumoto, Jun Katoh, Joining of Aluminum Alloys and Steels Together with Resistance Spot Welding, KOBE STEEL ENGINEERING REPORT, vol.57, No.2 (2007), 69-73.
- 6) MIYAGAWA Katashi, TSUBAKI Masami, YASUI Toshiaki, FUKUMOTO Masahiro, Spot Welding between Aluminum Alloy and Low Carbon Steel by Friction Stirring, Journal of Japan Welding Society, vol.26, No.1 (2008), 42-47.
- 7) Toshiyuki Gendo, Katsuya Nishiguchi, Motoyasu Asakawa, Shinichi Tanioka, Spot Friction Welding of Aluminum to Steel, Journal of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.61, No.4 (2007), 83-86.
- 8) Thaddeus B. Massalski, BINARY ALLOY PHASE DIAGRAMS, American Society for Metals, 1986.