

軟鋼板と Al-Mg 合金板の超音波接合*

渡辺 健彦**, 作山 英雄***, 柳沢 敦**

Ultrasonic Welding between Mild Steel Sheet and Al-Mg Alloy Sheet*

by WATANABE Takehiko**, SAKUYAMA Hideko*** and YANAGISAWA Atushi**

Ultrasonic welding between SS400 mild steel sheet and aluminum alloy sheet containing magnesium (A5052) was conducted. In this study, authors investigated the influence of ultrasonic welding condition on the mechanical properties and the interface microstructure of a joint, and examined the effect of an insert metal to improve the joint strength. The main results obtained in this study are as follows.

It was possible to ultrasonically weld SS400 mild steel sheet and A5052 sheet. When the clamping force was varied keeping the welding time constant for 1s, the joint strength showed the maximum at the clamping force of 588N and it decreased with the clamping force because the frictional action at the interface decreased with it. When the clamping force was kept constant at 588N and the welding time was varied, the joint strength reached the maximum at the welding time of 2.5s, and the strength of the joint welded for 3s decreased due to the formation of Fe_2Al_3 intermetallic compound at the interface. Using an insert metal of commercially pure aluminum successfully improved the joint strength and the strength of the joint welded at the welding time of 3s was about three times that of the joint without an insert metal.

Key Words: Ultrasonic welding, Mild steel sheet, Al-Mg alloy sheet, Joint strength, Microstructure of interface, Insert metal, Improvement of joint strength

1. 緒 言

車両等の軽量化を図るために、鉄鋼材料とアルミニウム合金を組み合わせた構造体は有効であることから、鉄鋼とアルミニウム合金を溶接・接合するいろいろな試みがなされている。特に、接合界面における金属間化合物の生成防止や低減を目的に、これまでに多くの固相接合法が研究されており、摩擦圧接法¹⁾、圧延接合法²⁾や回転プローブを利用して鉄鋼接合面を活性化し、塑性流動状のアルミニウムを凝着させて接合する方法等³⁻⁹⁾が報告されている。また、その他の接合法として、抵抗スポット溶接¹⁰⁾等の研究も行われている。

固相接合法の一つに超音波接合法があるが、鉄鋼材料とアルミニウム合金との接合に適用した研究は非常に少なく^{11, 12)}、多くの知見は得られていない。

本研究では、軟鋼板と適度の強度を有し、耐食性や成形加工性にすぐれ用途の広い Al-Mg 合金板について超音波接合を行い、継手の機械的性質と界面組織に及ぼす超音波接合条件の影響を調査し、さらに、高強度の継手を得るためのインサート材の効果について調査した。

2. 供試材および実験方法

供試材は次のようである。鋼板は板厚 0.8 mm の市販の SS400 軟鋼板であり、Al 板は市販の板厚 1.2 mm の Al-Mg 合金板 A5052-H24 (Al-2.84at%Mg, 以後、A5052 と表記) を、また、接合面へのインサート材挿入の効果を調べる場合には、インサート材として板厚 1.2 mm の工業用純 Al 板 A1050-H24 (以後、A1050 と表記) を入手のまま用いた。SS400, A5052 および A1050 の引張強さはそれぞれ約 375 MPa, 250 MPa および 106 MPa であった (実測値)。

超音波接合用試験片の形状は、SS400 および A5052 については、幅 10 mm × 長さ 100 mm の短冊状であり、A1050 インサート材については、幅 10 mm × 長さ 25 mm の矩形状である。

接合面の表面処理は、入手状態の表面に電解研磨を施して、表面粗さを一定にした。用いた電解研磨溶液は、過塩素酸とエタノールの混合液であり、電解研磨後の表面粗さは、SS400 が $Ra = 0.58 \mu m$, A5052 および A1050 の $Ra = 0.34 \mu m$ であった。

接合に用いた超音波接合機の発振周波数は 15 kHz で無荷重時のホーン先端での振幅は約 $53 \mu m$ (peak to peak) である。ホーン先端及びアンビルには 10 mm × 10 mm の溶接チップが取り付けられており、接合面積は約 10 mm × 10 mm である。溶接チップには 0.8 mm ピッチのローレット加工が施されており、試験片と溶接チップ間でのすべりを生じにくくしている。

接合は、Fig. 1 のように A5052 板を上部に配置して、ホ

*受付日 平成18年12月4日 受理日 平成19年3月19日 平成17年度秋季全国大会で発表

**正会員 新潟大学大学院自然科学研究科 Member, Niigata University, Graduate School of Science and Technology

***学生員 新潟大学大学院自然科学研究科 Student member, Niigata University, Graduate School of Science and Technology

ーンに所定の荷重（以後、加圧力）をかけて試験片の長手方向と直角の方向に振動を加えた。加圧力および超音波発振時間（以後、接合時間）を変化させて接合体を作製後、Fig. 2 に示すように、両端を曲げてU字型試験片を作製して引張試験を行い接合強さを測定した。引張破断荷重を接合部の接合強さとした。また、光学顕微鏡やSEMやEDSによって接合部の組織や破断面を観察、分析した。

接合部の温度測定を行うために、アンビル側のSS400試験片の接合箇所のほぼ中央の端部（Fig. 1の円内拡大図参照）に直径0.1mmのK熱電対を溶接した。熱電対接点部とホーン側のA5052試験片との接触による熱電対の脱落を避けるために、A5052試験片のほぼ中央の端部を図に示すように削除した。

3. 実験結果および考察

3.1 接合強さに及ぼす加圧力の影響

3.1.1 継手の接合強さ

最初に、接合時間を1.0sと一定にし、加圧力を343Nから1764Nまで変化させて継手の接合強さへの影響を調べた。その結果を、Fig. 3に示す。加圧力が343Nでは摩擦力不足で接合強さは低く、加圧力588Nで極大となり、平均接合強さ約412Nを示した。このような傾向はAl合金の超音波接合に関する研究報告にもみられ¹³⁻¹⁶⁾、過大な加圧力を加えた場合、接合界面での摩擦力が大きくなって相対運動が起こりにくくなる結果、接合強さが低下すると考えられており、SS400とA5052の場合も同様に考えられる。

加圧力が882N以上では、A5052がホーン側の溶接チップに付着したり、接合中にA5052自体が破断する現象もみ

られた。加圧力が588Nと1176Nの場合について、A5052のホーン側表面の写真をFig. 4に示す。溶接チップのローレット凸部でできた圧痕が見られるが、加圧力1176N時の圧痕の大きさは588N時のそれよりも大きく、振動方向およびそれと垂直方向に拡げられた形状になっており、さらに、A5052の中央付近が破壊されていることから、チップと試験片との間ですべりが生じて、接合が十分に達成されなかったと考えられる。振動方向に対して垂直方向の圧痕の幅を測定すると、加圧力1176N時では平均540μmで加圧力588N時のそれは平均460μmであった。なお、接合界面での相対運動の大きさを推定するための指標として、圧痕の大きさが有効であることが既に示されている¹⁴⁾。

3.1.2 接合中の試験片の温度変化

接合中のSS400試験片の温度変化を測定した結果をFig. 5に示す。加圧力を変化させたときの接合時間1.0sまでの温度変化である。加圧力343Nでは摩擦力不足で試験片温度は低く100℃以下であり、接合強さが大きい588Nと882Nの場合には試験片温度は約400℃まで上昇している。

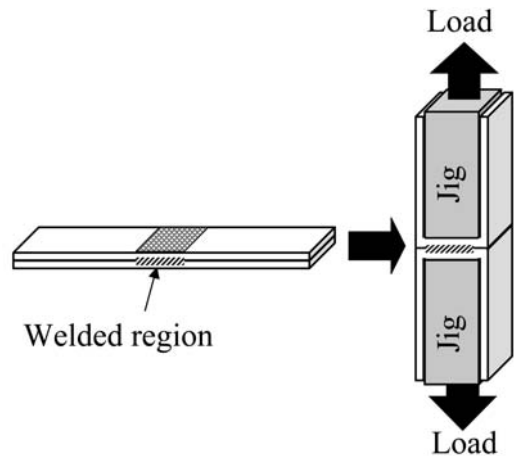


Fig. 2 Schematic illustration for the tensile test of a joint.

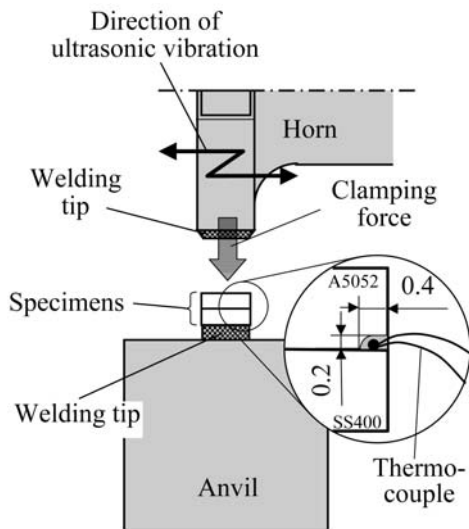


Fig. 1 Schematic illustration of the apparatus for ultrasonic welding. Enlarged part of the specimens shows the location of a thermocouple to measure the interface temperature.

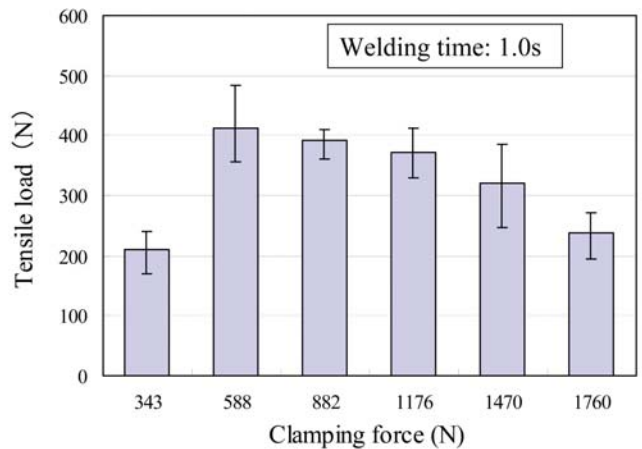


Fig. 3 Relation between tensile load of a joint and clamping force.

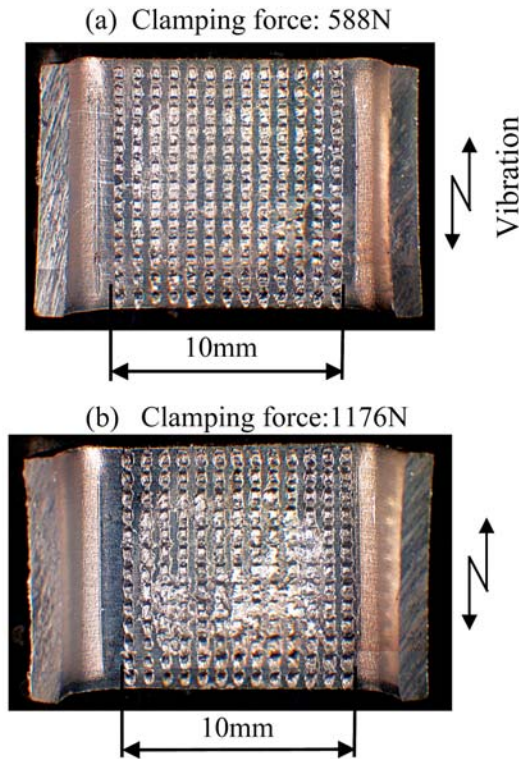


Fig. 4 The appearances of scratches on A5052 surface formed by a welding tip with pyramidal projections. (a): Clamping force of 588N, (b): Clamping force of 1176N

しかし、最高試験片温度は加圧力の増大と共に低下しており、接合界面での相対運動が起こりにくくなっていることを示しており、前項で述べた事象と符合する。

3.1.3 SS400 側破面の観察

加圧力 588N、接合時間 1.0s で接合した継手を引張破断させた後の SS400 側破面の SEM 写真を Fig. 6 に示す。写真 (a) の破面には、白く見える領域と黒く見える領域が混在している。なお、試験片の振動方向は紙面の上下方向である。(b) の白く見える領域と (c) の黒く見える領域を拡大した写真を (b) と (c) に示す。(b) の破面には、W で示すディンプル部と擦過痕が見られる S で示す箇所が存在する。また、(c) の破面には、W で示すディンプル部と EP で示す平坦な箇所が見られる。W、S と EP の記号で示した箇所は、著者らのアルミニウム合金の超音波接合の研究で既に報告している^{13, 14)}ように、W (Weld) は接合された箇所を S (Scrape) はホーン側の A5052 試験片接合面で振動方向に擦られて生じたと考えられる擦過痕が見られる箇所を示す。また、EP (Electrolytic Polish) は電解研磨のままの箇所を示している。

加圧力を変化させた時の SS400 側破面における W、S、EP 部の占める面積率を Fig. 7 に示す。面積率は、破断面の試験片長手方向の中央に一本の線を仮想し、これに沿って 0.5mm ピッチで撮影した20箇所の写真上でリニアアナリシス法¹⁷⁾によって算出した。なお、撮影倍率は1000倍とした。

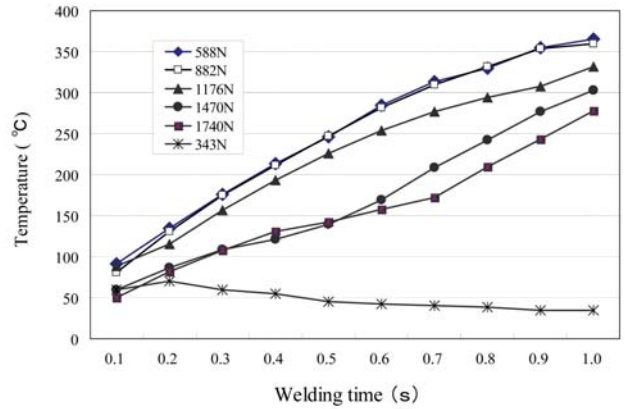


Fig. 5 Temperatures of a specimen welded at various clamping force.

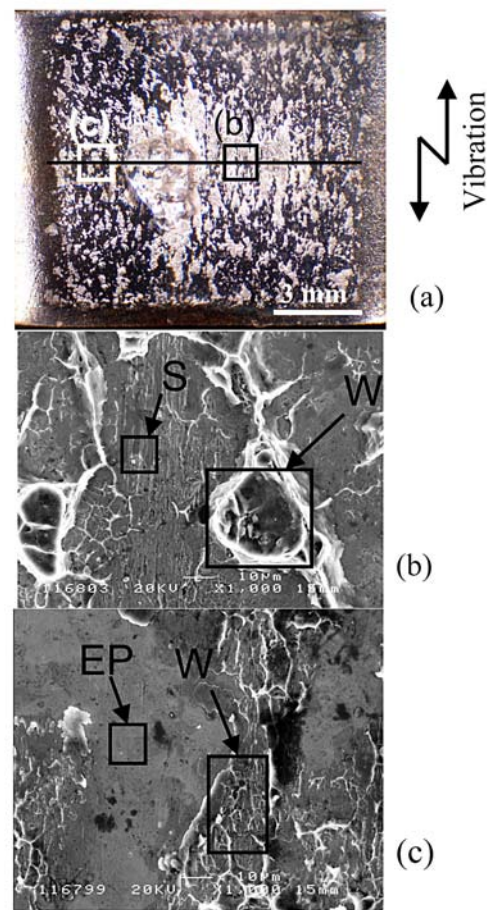


Fig. 6 Fracture surface of SS400 (a). Photographs (b) and (c) are SEM micrographs of white part (b) and dark part (c) in the photograph of (a), respectively.

Fig. 7 から分かるように、加圧力 588N で W 部の面積は極大値を示し、W 部の面積の変化と Fig. 3 に示した継手の引張強さの変化とが良く対応している。

3.2 接合強さに及ぼす接合時間の影響

次に、接合面に電解研磨を施した試験片を用いて、加圧力を 588N と一定にして接合時間を 0.5s から 3.0s まで変化

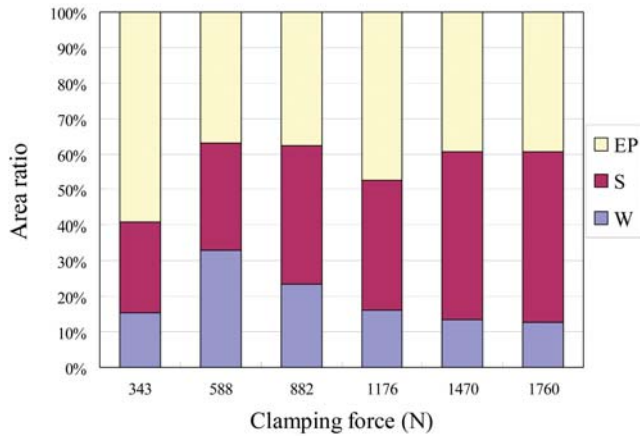


Fig. 7 Area ratio of EP, S and W region in fracture surface of SS400 vs. clamping force.

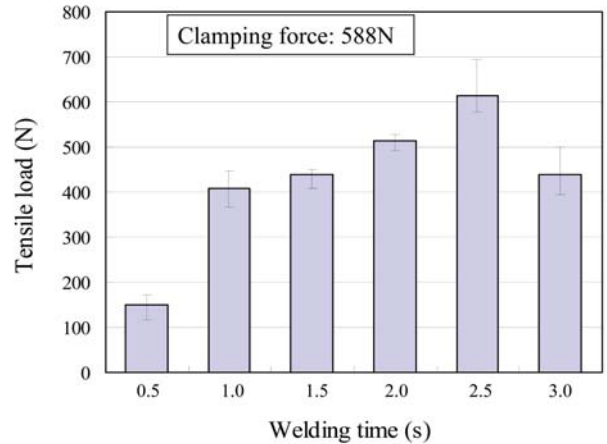


Fig. 8 Relation between tensile load of a joint and welding time.

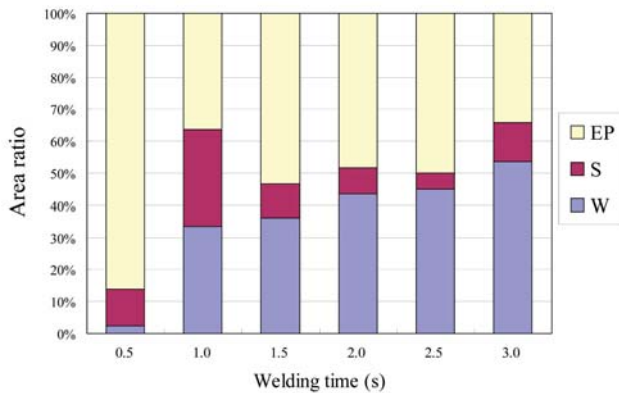


Fig. 9 Area ratio of EP, S and W region in fracture surface of SS400 vs. welding time.

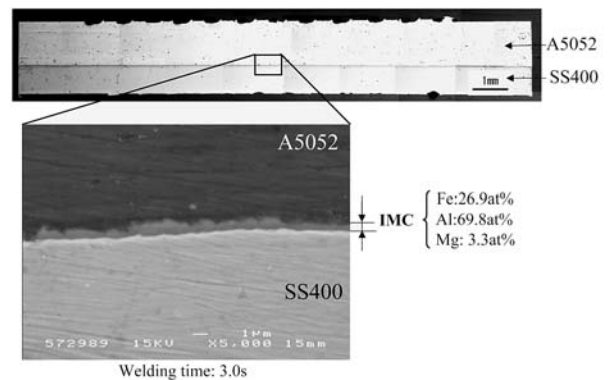


Fig. 10 Macrostructure and SEM micrograph of the interface of a joint welded under the conditions of 3s welding time and 588N clamping force. SEM micrograph shows the intermetallic compound formed at the interface.

させて接合し、継手の接合強さを調べた。その結果を、Fig. 8 に示す。接合時間とともに接合強さは向上して 2.5 s で最高値を示したが、3.0 s では低下した。継手を引張試験した後の SS400 破断面について、Fig. 7 と同様に接合領域調査をした結果を Fig. 9 に示す。W で示す接合部の面積は 3.0 s まで接合時間とともに増加しているにもかかわらず、接合時間 3.0 s では継手強さが低下した。

次に、その低下の理由について調べた。Fig. 10 に、加圧力 588 N で接合時間 3.0 s で接合した継手の断面マクロ写真と中央部を拡大した SEM 写真を示す。

写真の中央の接合界面には、約 1 μm 幅の帯状相が見られるが、EDS によってこの相を定量分析すると、26.9at%Fe-69.8at%Al-3.3at%Mg の組成であることから、Fe-Al 二元平衡状態図¹³⁾から判断して、この帯状相は Fe₂Al₃ が主体の金属間化合物相と考えられる。一方、最高接合強さが得られた接合時間 2.5 s の場合の接合界面に金属間化合物相はほとんど観察されなかったことから、接合時間が 3.0 s になると、硬くてもろい金属間化合物相が接合界面に顕著に生成するために継手の接合強さが低下したと考えられる。しかし、接合時間と金属間化合物相の生成や成長に関する詳細は明

らかではなく、今後検討する。

3.3 接合強さに及ぼす A1050 インサート材の効果

Mg を含有する A5052 や A5086 等の 5000 系 Al 合金を超音波接合すると、接合中に接合界面に Mg が偏析して接合強さを低下させることが知られている¹³⁾。Fig. 11 は、加圧力 588 N、接合時間 2.5 s で接合した継手の破断後の SS400 側の破面である。EDS 分析の結果、丸印で示したディンプル底部には MgO 介在物が存在しており、本研究においても、接合中に Mg が接合界面に偏析して接合強さの低下を引き起こしていることが十分に考えられる。そこで、Mg の接合面への偏析が接合強さを低下させることを確かめるために次のような実験を行った。A5052 試験片接合面を電解研磨した後に、大気中で 100℃ に 3.6 ks 間熱処理を施して Mg を表面に偏析させた後に接合に供した。この熱処理によって、Mg が表面に偏析して表面層が MgO に覆われていることは既に確かめられている¹³⁾。なお、この熱処理によって、母材接合面の硬さはほとんど変わらず、熱処理前の硬さは HV 79.0 で熱処理後の硬さは HV 80.7 であった。

熱処理後の A5052 と SS400 を加圧力 588 N、接合時間

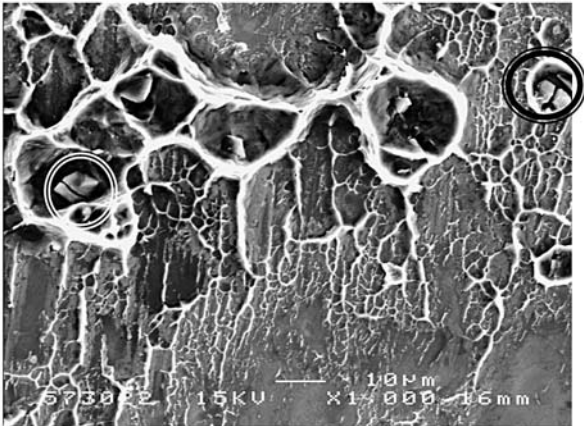


Fig. 11 Fracture surface of SS400 in the joint made under the conditions of 2.5s welding time and 588N clamping force.

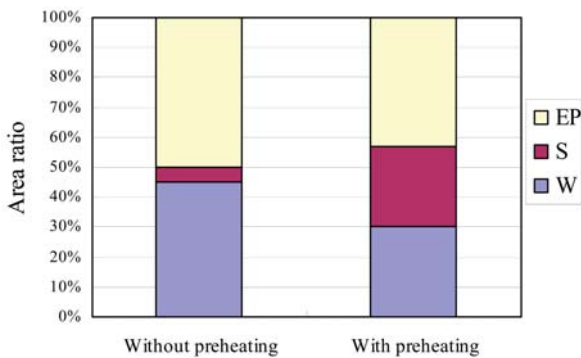


Fig. 13 The influence of preheating A5052 on the area ratio in the fracture surface of SS400.

2.5s で接合した継手の接合強さおよび SS400 側破面における W, S, EP 部の面積測定結果を Fig. 12 と Fig. 13 にそれぞれ示す。図には、熱処理を施していない A5052 の結果も示した。明らかに、Mg の表面偏析処理を施した場合に接合強さが低下して、W 部の面積も減少していることから、接合中に Mg が接合界面に偏析して接合強さの低下を引き起こしていることが十分に推察される。

以上のことから、Mg をほとんど含有しない工業用純アルミニウム A1050 を A5052 と SS400 と間にインサート材として挿入して接合すれば接合強さの向上が期待できる。そこで、A1050 インサート材を用いて実験を行った。用いた A1050 インサート材は厚さ 1.2 mm、長さ 25 mm、幅 10 mm である。両面を電解研磨して接合に供した。加圧力 588 N で接合時間を 0.5 s から 3.0 s まで変化させた。継手の接合強さおよび破断後の SS400 側破面での W, S, EP 部の面積測定結果をそれぞれ Fig. 14 と Fig. 15 に示す。インサート材を用いない Fig. 9 の結果と比較すると、接合時間が 1.0 s より長くなると、いずれの場合も接合強さは向上している。特に、接合時間 3.0 s の場合には約 300% も接合強さが向上して約 1800 N にも達した。また、SS400 側破面での W 部の面積も約 80% にも達した。これは、軟らかい A1050 インサート材を用いたためと考えられる。

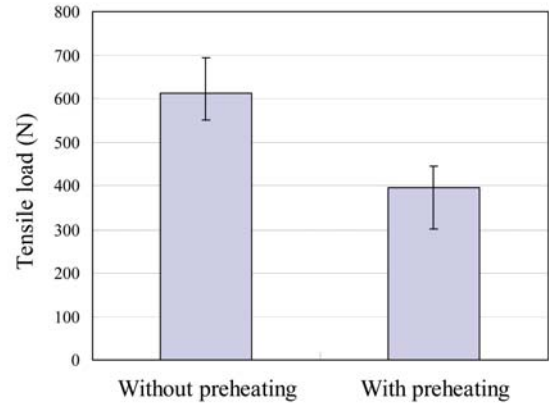


Fig. 12 The influence of preheating A5052 on the tensile load of a joint.

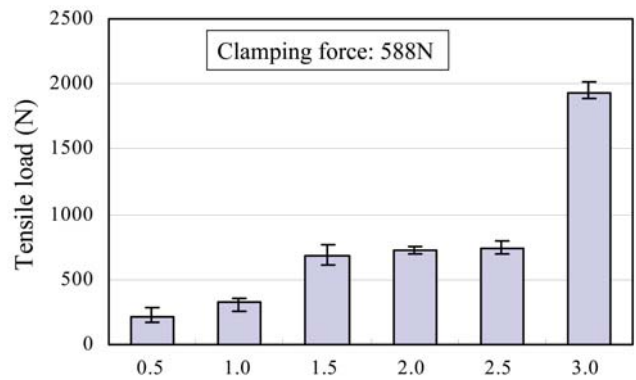


Fig. 14 Relation between tensile load of a joint welded using an insert metal and clamping force.

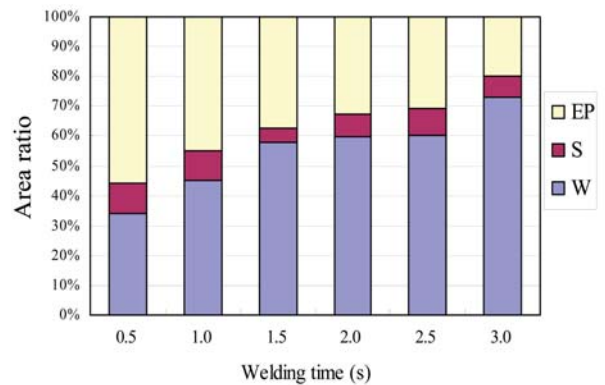


Fig. 15 Area ratio of EP, S and W region in fracture surface of SS400 in a joint welded using an insert metal.

Fig. 16 に、加圧力 588 N、接合時間 3.0 s で接合した接合界面組織を示す。(a) は A1050 と SS400 との接合界面で (b) は A1050 と A5052 との接合界面である。(a) に示すように、A1050 インサート材を用いると接合時間が 3.0 s でも、Fig. 10 に見られたような金属間化合物の形成は倍率 5000 倍の SEM 観察では観察されなかった。これは、Al 中に Mg が含有されると、Al 中への Fe の拡散量が多くなって Fe₂Al₃ 金属間化合物が厚く成長することが知られている¹⁰⁾ことから、Mg を含有しない A1050 インサート材を用いることによ

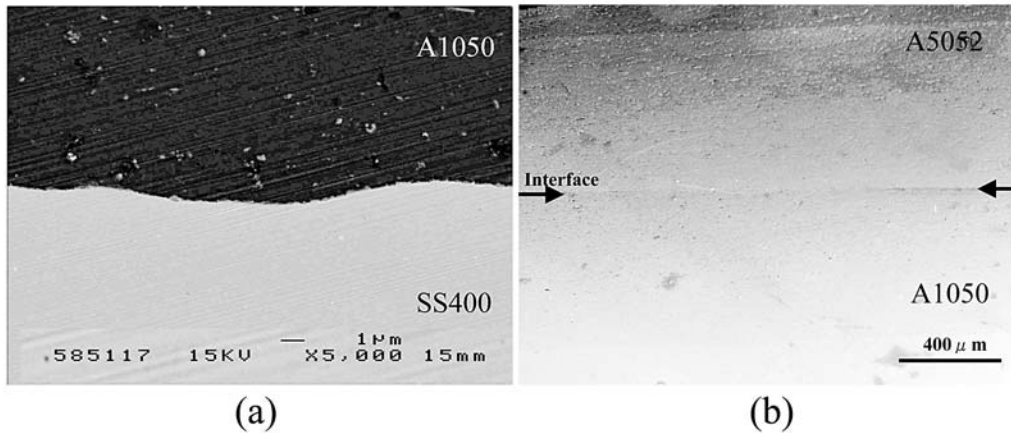


Fig. 16 SEM micrographs of the joint interface welded using an insert metal at the welding time of 3s.
(a): Interface of SS400/A1050, (b): Interface of A1050/A5052

て Fe_2Al_5 金属間化合物の生成が阻止されたためと考えられる。なお、Fig. 16(b)に示すように、A1050インサート材とA5052との界面は良く接合されているように見える。

4. 結 言

本研究では、SS400軟鋼板とA5052アルミニウム合金板について超音波接合を行い、継手の機械的性質と界面組織に及ぼす超音波接合条件の影響を調査し、さらに、高強度の継手を得るためのインサート材の効果についても調査した。得られた結果は要次のようである。

- 1) SS400軟鋼板とA5052アルミニウム合金板の超音波接合は可能であり、接合時間を一定(1.0s)にして加圧力を変化させると、約588Nで極大接合強さを示すが、加圧力が大きくなると接合界面での相対運動が起こりにくくなり、接合強さは低下する。
- 2) 加圧力を一定(588N)にして接合時間を変化させると、2.5sの接合時間で接合強さは極大値を示すが、3.0sと長くなると接合界面に Fe_2Al_5 金属間化合物相が生成して接合強さは低下する。
- 3) A1050インサート材をSS400とA5052界面に挿入して接合すると、インサート材が無い場合と比して接合強さは向上し、接合時間が3.0sになると接合強さは約300%向上する。

参 考 文 献

- 1) For example, M. Aritoshi and K. Okita: Friction welding of dissimilar metals, J. of Japan Welding Society, Vol.71, No.6, 2000, 432-436. (in Japanese)
- 2) For example, T. Kohno: Production of Al/SUS Clad material Using Vacuum Roll Bonding and its Characteristics, J. of Japan welding Society, Vol.71, No.6, 2000, 427-431.
- 3) T. Watanabe, A. Yanagisawa and H. Takayama: Bonding of steel and aluminum alloy by interfacial active adhesion bonding method, Preprints of the National meeting of Japan Welding Society, Vol.71, 2002, 446-447. (in Japanese)
- 4) T. Watanabe and H. Takayama: Joining of Steel to Aluminum Alloy by Interface-Activated Adhesion Welding, Materials Science Forum, Vols. 426-432, 2003, 4129-4134.
- 5) T. Watanabe, A. Yanagisawa and H. Takayama: Solid state welding aluminum alloy to steel using a rotating pin, Quarterly J. of Japan Welding Society, Vol.22, No.1, 2004, 141-148. (in Japanese)
- 6) M. Fukumoto, M. Tsubaki, Y. Shimoda and T. Yasui: Welding between ADC12 and SS400 by means of friction stirring, Quarterly J. of Japan Welding society, Vol.22, No.2, 2004, 309-314. (in Japanese)
- 7) T. Watanabe, et al: Friction stir welding of aluminum alloy to steel, Welding Journal, Vol.83, No.10, 2004, 277S-282S.
- 8) K. Kimapong and T. Watanabe: Lap Joint of A5083 Aluminum Alloy and SS400 Steel by Friction Stir Welding, Materials Transactions, Vol.46, No.4, 2005, 835-841.
- 9) K. Kimapong and T. Watanabe: Effect of Welding Process Parameters on Mechanical Properties of FSW Lap Joint between Aluminum Alloy and Steel, Materials Transactions, Vol.46, No.10, 2005, 2211-2217.
- 10) T. Watanabe, Y. Doi A. Yanagisawa and S. Konuma: Resistance spot welding of mild steel toAl-Mg alloy, Quarterly J. of Japan Welding Society, Vol.23, No.3, 2005, 491-495. (in Japanese)
- 11) T.Watanabe and A.Yoneda et al, A Study on Ultrasonic Welding of Dissimilar Metals, 1st report and 2nd report, Quarterly J. of Japan Welding Society, Vol.17, No.2, 1999, 223-233. (in Japanese)
- 12) T.Watanabe and A.Yoneda et al, A Study on Ultrasonic Welding of Dissimilar Metals, 2nd report, Quarterly J. of Japan Welding Society, Vol.17, No.2, 1999, 234-242. (in Japanese)
- 13) M. Hiraishi and T. Watanabe: Effect of magnesium on ultrasonic weldability of Al-Mg alloy, Quarterly J. of Japan Welding Society, Vol.20, No.4, 2002, 552-558. (in Japanese)
- 14) M. Hiraishi and T. Watanabe: Improvement of ultrasonic weld strength for Al-Mg alloy by adhesion of alcohol, Quarterly J. of Japan Welding Society, Vol.21, No.2, 2003, 795-801. (in Japanese)
- 15) Electric Industries Association of Japan: Ultrasonic Engineering, Corona Publishing Co., 1995, 162-168. (in Japanese)
- 16) N.E.Weare, J.N. Antonevich, R.E. Monrore: Fundamental studies of ultrasonic welding, Welding Journal, Vol.37, No. 8, 1960, 331s-341s.
- 17) T. Sato et al edited: Materials Inspection Methods, Japan Institute of Metals, 1959, 28. (in Japanese)
- 18) T. B. Masalski et al edited: Binary Phase Diagrams, ASM, 1996, CD.