

回転ピンによる鉄鋼とアルミニウム合金の固相接合*

—回転ピンによる異種材料の固相接合 (第1報)—

渡辺 健彦**, 柳沢 敦**, 高山 博史***

Solid State Welding Aluminum Alloy to Steel Using a Rotating Pin*

—Solid State Welding of Dissimilar Metals Using a Rotating pin (Report 1)—

by WATANABE Takehiko**, YANAGISAWA Atsushi** and TAKAYAMA Hirofumi***

Authors tried to butt-weld a mild steel plate to an aluminum alloy plate by the solid state welding using a rotating pin.

This study investigated the effects of a pin rotation speed, the position for the pin axis to be inserted and the pin diameter on the tensile strength and the microstructure of the joint. The main results obtained are as follows:

Butt-welding of a steel plate to an aluminum alloy plate was easily and successfully achieved. The maximum tensile strength of the joint was about 86% of that of the aluminum alloy base metal. Many fragments of the steel were scattered in the aluminum alloy matrix, and fracture tended to occur along the interface between the fragment and the aluminum matrix. A small amount of intermetallic compounds was formed at the upper part of the steel/aluminum interface, while no intermetallic compounds were observed in the middle and bottom parts of the interface. A little intermetallic compound was also often formed at the interface between the steel fragments and the aluminum matrix. The regions where the intermetallic compounds formed seem to be fracture paths in a joint.

Key Words: Joining of dissimilar metals, Steel, Aluminum alloy, Rotating pin, Tensile strength of joint, FSW

1. 緒 言

地球環境の保全や省エネルギーは早急に取り組みなければならない重要な課題であり、その対応策の一つとして車両等の軽量化が進められている。車両としての強さを維持しつつ、軽量化するためには鉄鋼材料とアルミニウム合金を組み合わせた構造は有効であり、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。しかし、鉄とアルミニウムを熔融溶接すると、溶接部には硬くてもろい金属間化合物が生成するために、熔融溶接による健全な継手は作製されていない。

現在のところ、鉄鋼とアルミニウムの継手の作製には、金属間化合物が生成しにくい接合法である爆発圧接法によって作製した移行継手を介して鉄鋼同士およびアルミニウム同士を溶接する方法¹⁾、摩擦圧接法²⁾、超音波接合法³⁾や圧延接合法⁴⁾等のいわゆる固相接合法が主に適用されている。しかし、移行継手を用いる方法では、移行継手の製造が容易ではなく高コスト、工程数の増加や継手形状が制限される等の欠点がある。また、摩擦圧接法では、少なくとも一方の部

材の断面形状が円形であることが必要であり、継手形状が制限される。さらに、超音波接合法や圧延接合法では、薄板にしか適用できない等の欠点がある。最近では、レーザを鉄鋼側に照射して加熱し、鉄鋼側からの熱伝導でアルミニウムの接合面だけを熔融させて接合する方法⁵⁾が試みられているが、入熱制御と溶融量制御が難しいことやレーザ装置が高価等の難点がある。

そこで、異種金属を容易に接合することを目的に、「回転ピンによる固相接合法」⁶⁾によって、鉄鋼とアルミニウム合金の接合を試みた。

2. 本研究における回転ピンによる固相接合法について

回転ピンによる固相接合法について Fig. 1 を用いて説明する。(a)は鳥瞰模式図で、(b)は接合線と直角に切断した模式図である。図に示すように、回転ピンの大部分をアルミニウム側に挿入する。つづいて、(b)のように鉄鋼側の接合面に回転ピンを押しつけて回転側面で擦ることによって酸化皮膜を除去して新生面を露出させて活性化させる。回転子のショルダーとの摩擦熱で塑性流動状態となったアルミニウムをこの活性面へ凝着させて接合を完了する。回転ピンの大部分を軟らかいアルミニウム側に挿入することからピンの摩滅もほとんど生じない。

本研究の方法で、鉄鋼とアルミニウムの突き合わせ接合線のほぼ真上の位置に回転ピンを挿入すると、回転ピンは容易に摩滅してしまうこと、そして、両金属はうまく混合せず、

*原稿受付 平成15年2月27日 平成14年度秋季全国大会で発表、平成15年1月界面接合研究委員会で発表

**正 員 新潟大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Niigata University

*** 新潟大学大学院 Student Member, Graduate School, Niigata University

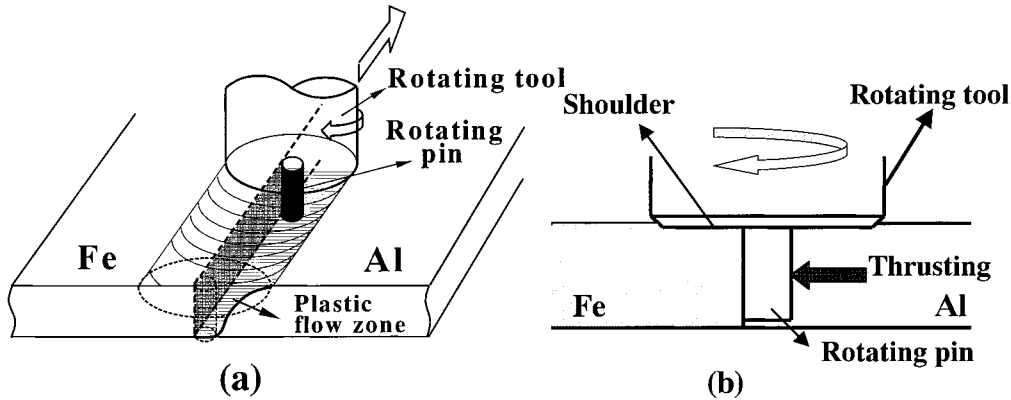


Fig. 1 Schematic illustration of solid state welding using a rotating pin : (a) Bird's eye schematic view of the method and (b) schematic view of the cross section perpendicular to weld line.

接合ができないことを確かめている。この点については 4.3 項で言及する。

3. 接合材および実験方法

接合材は、板厚 2 mm の SS400 軟鋼板 (以後、Fe と表記) と A5083-H24 (4.5 mass% Mg, 0.5 mass% Mn, 残部 Al, 引張強さは 275 MPa) アルミニウム合金板 (以後、Al と表記) であり、入手状態のまま用いた。接合試片の形状・寸法は長さ 140 mm, 幅 40 mm の矩形板である。その長手方向が圧延方向と直角になるように母板から切り出した。Fe および Al 試片の長さ 140 mm の接合面を #400 のエメリー紙で研磨後、突き合わせてジグに固定した。接合は、フライス盤を用いて行った。

回転子は工具鋼で作製した。ピンの長さは 1.9 mm とし、直径は 1 mm, 2 mm, 3 mm および 4 mm と変化させたが、実験には、主に直径 2 mm のピンを用いた。ショルダーの直径は 15 mm である。なお、ピンにはネジは施されていない。

Fig. 1 に示すように、ピンの回転方向は時計回りで、溶接方向に向かって左側に Fe 試片を右側に Al 試片を配置した。接合速度は 25 mm/min で一定とし、ピン回転速度を 1.67, 4.17, 8.33 および 20.83 s^{-1} の 4 段階で変化させた。また、Fe 接合面への回転ピンの押し込み量を Fig. 2 に示すように定義して変化させた。つまり、Fe 接合面とピン側面が一致するところを基準点零とし、Fe 側への押し込み量をプラスとした。ピンを回転させながら Al 側に挿入後、ピンを移動させて所定の押し込み量になるように調整した。ピンは試験片に垂直に挿入し、回転子のショルダー部は接合材表面から約 0.1 mm 侵入させた。

各接合条件下で作製された継手について、接合部の表面観察、断面組織の観察や元素分析等を行った。また、継手の引張強さを求めるための引張試片は、接合部が試片のほぼ中央に位置するように接合線と直角になるように放電ワイヤカット機で切り出し、#400 のエメリー紙研磨によって表面お

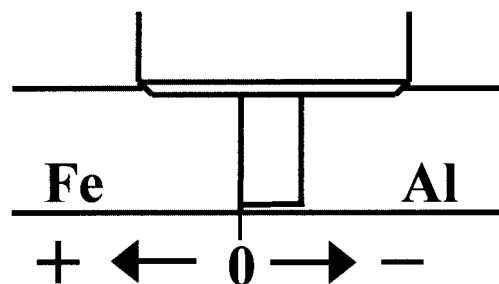


Fig. 2 Schematic illustration to explain the relation between the pin position and the coordinate.

よび裏面を平坦にした後、引張試験に供した。引張試片の平行部幅は 6.25 mm で平行部長さは 37.5 mm である。

4. 実験結果および考察

4.1 ピン回転速度と接合状態と継手の引張強さ

ピンの押し込み量を 0.2 mm (つまり、ピン回転側面を接合面から Fe 側へ 0.2 mm 移動) とし、ピン回転速度を変化させて接合部の表面状態や断面の様相を調べた。その結果を Fig.3 に示す。また、Fig.4 にはピン回転速度と継手の引張強さの関係を示す。図中に、入手のままの Al 母材の引張強さも示した。

回転速度が 1.67 s^{-1} の場合は、回転子が低速回転のために発熱量が少なく Al の変形抵抗が大きくなり、ピンの摩滅が異常に早く生じた。その結果、全接合線の約 4 分の 1 しか接合されず、残部はショルダーに擦られた表面部だけが接合していた。したがって、破断は未接合の接合界面に沿っており、引張強さは低かった (破断経路は破線で示す。以後同じ)。回転速度が 4.17 s^{-1} になると、接合は健全に行われて破断は Al 内に散在する Fe 片 (矢印で示す。EDS 分析で Fe と同定) の近傍で生じる傾向にあるが、引張強さは最大となり、Al 母材強さの約 86 % となった。回転速度が 8.33 s^{-1} では、接

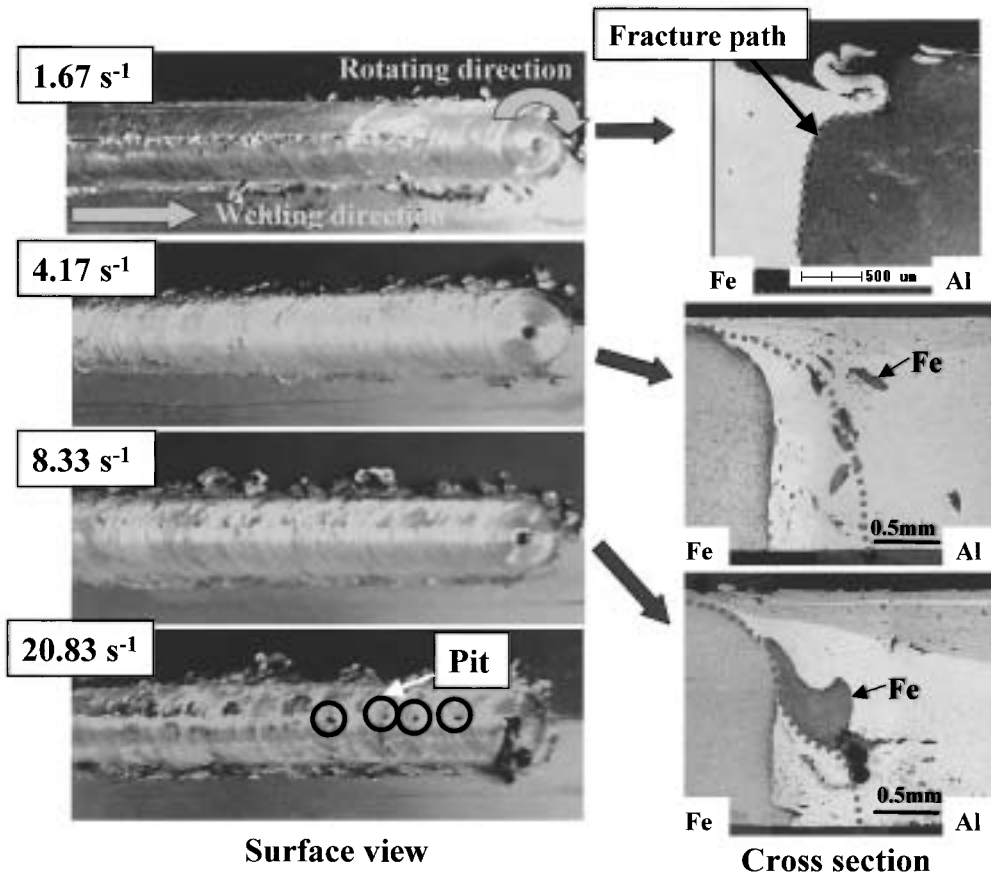


Fig. 3 Effects of a pin rotation speed on the surface view, cross sectional structure and fracture path of welds.

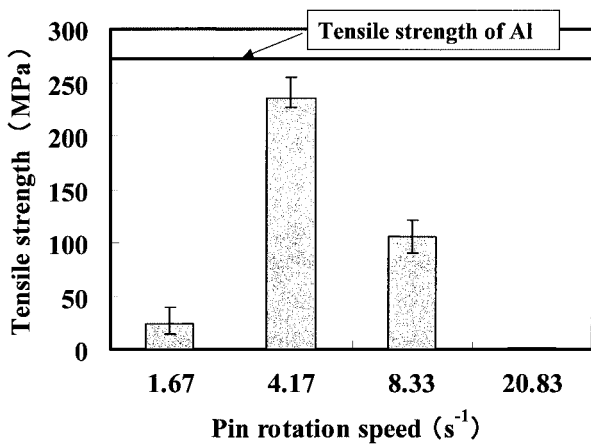


Fig. 4 Relation between a pin rotation speed and the tensile strength of joints.

合部の表面性状は 4.17 s⁻¹ の場合と大差はないが、断面中央部より下の部位に欠陥が発生する傾向にあった。Al 内には大きな Fe 片が存在し、破断は大きな Fe 片の近傍と欠陥を通じて生じた。引張強さは 4.17 s⁻¹ 時のそれより大きく低下した。

回転速度が 20.83 s⁻¹ になると、回転子が高速回転するために接合部が高温になり過ぎ、発煙が見られ、Al 合金中の Mg に起因すると考えられる燃焼が生じてほとんど接合され

なかった。接合部表面には Mg に起因する燃焼が原因と思われる小さな穴が出現する欠陥継手となり、断面観察のための切断作業時に接合界面から破断した。破面は焼けたように変色していた。なお、発煙が Mg に起因していることを示す直接的な証拠は得られていない。

以上の結果から、ピン回転速度 4.17 s⁻¹ の場合に比較的良好な結果が得られたことから、以後、ピン回転速度を 4.17 s⁻¹ として実験を進めた。

4.2 ピンの押し込み量と継手の引張強さ

接合速度を 25 mm/min、ピン回転速度を 4.17 s⁻¹ とし、Fe 側へのピン押し込み量を変化させて接合した継手の引張強さを調べた。その結果を Fig. 5 に示す。

ピン押し込み量が零あるいは負の場合（つまり、ピン側面が Fe 接合面に接する時あるいは Al 内に位置する時に相当）は、継手の引張強さはあまり大きくない。押し込み量が 0.2 mm で引張強さは最大となり、これ以上では、ピン側面が Fe 側に押し込まれていくほど引張強さは低下した。

4.3 ピン押し込み量と接合部断面組織と破断経路

Fig. 6 にピン押し込み量を変化させたときの接合部断面組織と引張試験後の破断経路を破線で示す。ピン押し込み量が負や零の時はピン側面による Fe 接合面の酸化皮膜の除去が

不十分であると思われる、破断は Fe/Al 接合界面を通過していた。ピンの押し込み量が負から正になると、継手の引張強さは上昇し、破断経路が接合界面から Al 母材内へと移行した。押し込み量が 0.2 mm で引張強さは最大になり、押し込み量が 0.4 mm になると矢印で示すようなボイド欠陥が発生しやすくなって、引張強さは押し込み量 0.2 mm の場合よりも低下する傾向にあった。

ピン押し込み量が 0.6 mm や 1.0 mm になると、Al 内には Fe が塊状に存在し、さらに、大きな欠陥も発生しており、継手の引張強さは大きく低下している。なお、ピン押し込み量が 1.0 mm の場合の継手では、図に示すように破断は複数の箇所で見られ、また、Fe との摩擦が大きいためピン先端が容易に摩滅した。ピン押し込み量 1.0 mm の場合、直径 2

mm の回転ピンが接合線のほぼ真上に挿入されることによって FSW の場合に相当する。しかし、この場合には健全な接合はできなかった。押し込み量が 2.0 mm になると、Fe との摩擦が大きいためピン先端が容易に摩滅して、断面写真に見られるように Fe 上部にピンが少し食い込むのみで、十分な接合はなされず破断は Fe/Al 界面で起こり、引張強さも低かった。

5. 接合部の断面組織の分析と破面観察

5.1 接合線に垂直な断面組織

接合速度 25 mm/min の場合、ピン回転速度 4.17 s^{-1} ピン押し込み量 0.2 mm で最大引張強さの継手が得られたが、この継手の接合線に垂直な断面組織を SEM 観察し、Fe と Al の接合界面での金属間化合物の生成の有無等を調べた。

Fig. 7 に、左側の SEM 写真中の断面上部(a)、中央部(b)と下部(c)の拡大 SEM 像と EDS による Fe と Al の線分析結果を示す。倍率 5,000 倍の SEM 観察と EDS 分析結果からではあるが、断面中央部および下部の Fe と Al の接合界面には金属間化合物は観察されなかった。一方、断面上部には(a)に見られるように層状組織が観察され、Fe と Al の線分析線にステップが見られることから金属間化合物が生成していることがわかる。そこで、Fig. 8 に示す(1)点と(2)点を EDS によって定量分析した。その結果、(1)点は 40.85 % Fe-48.26 % Al-5.73 % Mg-5.16 % O で(2)点は 19.61 % Fe-70.26 % Al-5.27 %

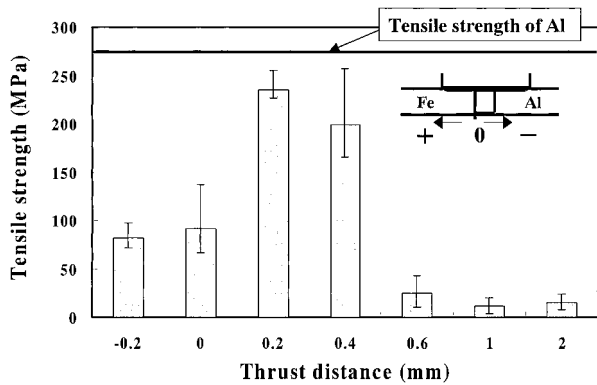


Fig. 5 Relation between the thrust distance of a pin and the tensile strength of joints.

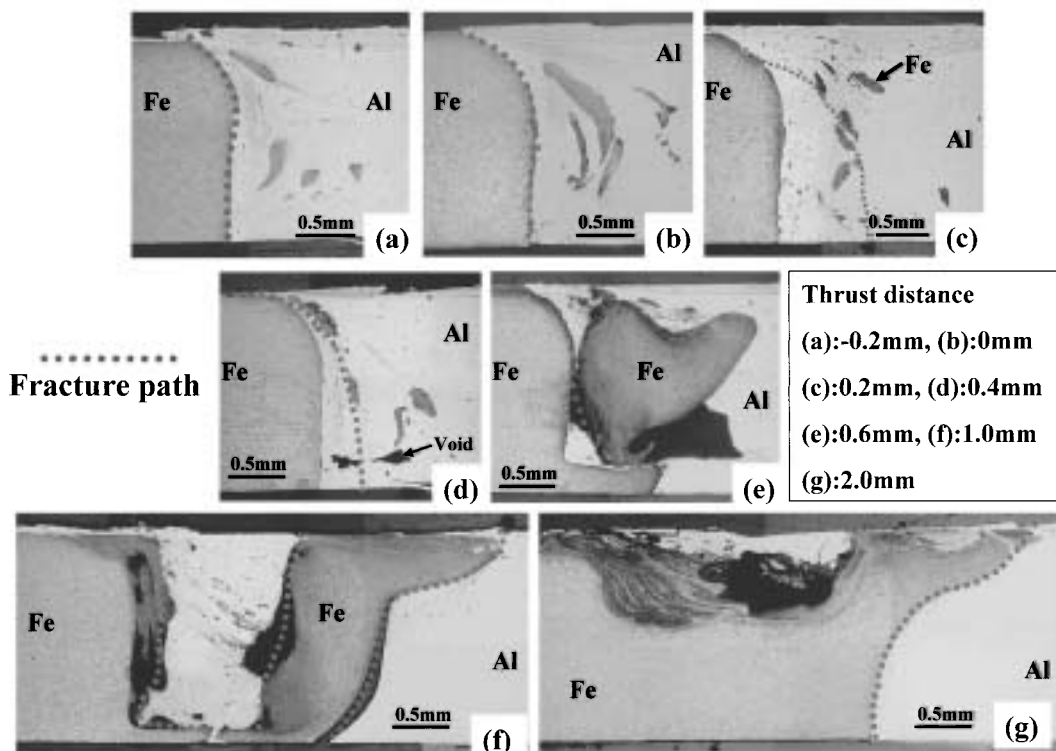


Fig. 6 Effects of the thrust distance of a pin on the microstructure and fracture path of welds.

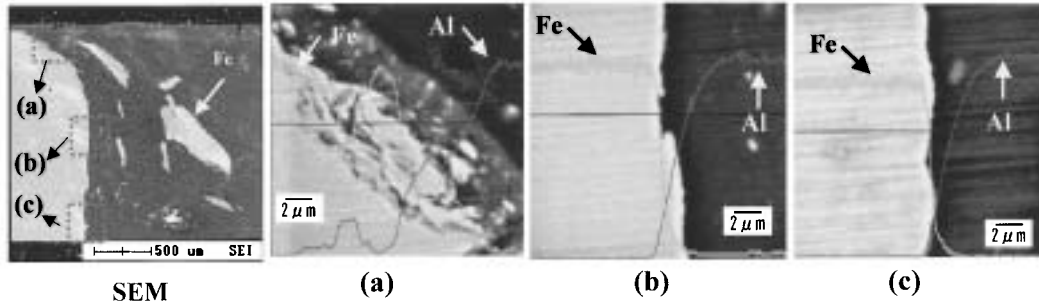


Fig. 7 SEM images and line analyses of Fe and Al around the interface between steel and aluminum alloy : (a) Upper position and (b) middle position and (c) bottom position.

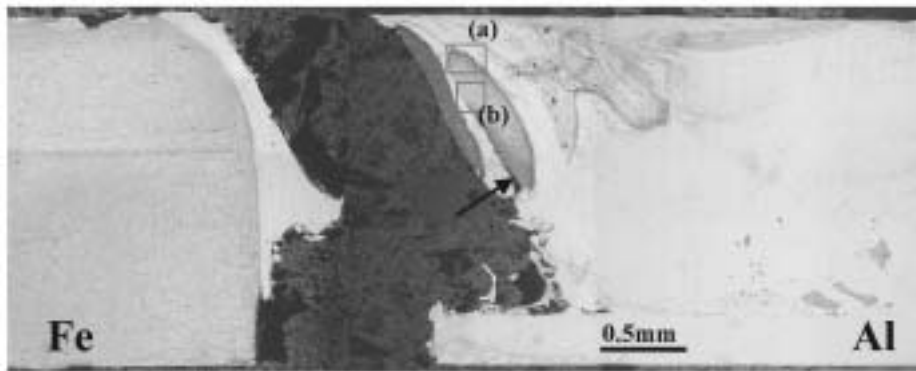


Fig. 9 Cross sectional view of the broken part of the joint after tension test. It is seen that fracture occurred along the interface between steel fragment and aluminum matrix.

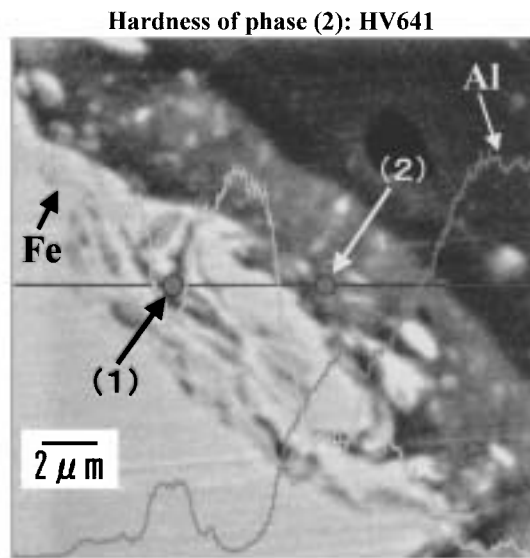


Fig. 8 Quantitative analyses of the phases at the positions indicated by (1) and (2).

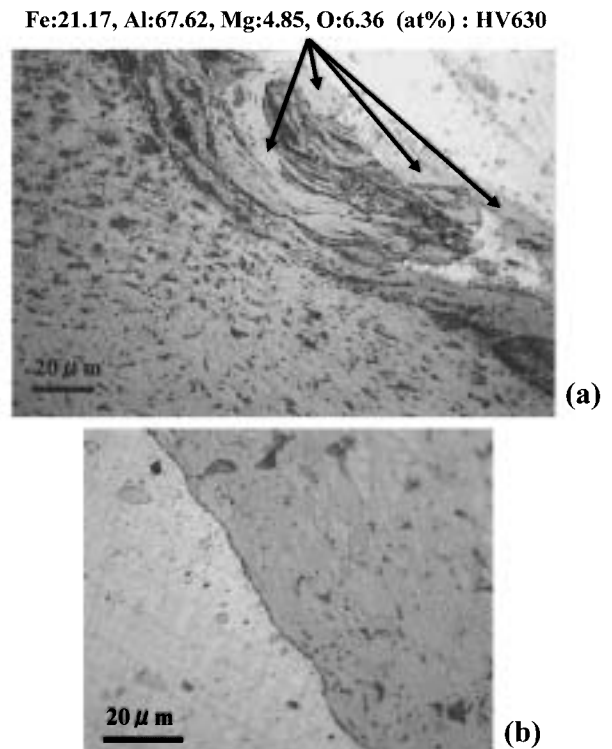


Fig. 10 Enlarged optical micrographs of parts (a) and (b) in Fig. 9. Intermetallic compounds appeared at the part (a) of the interface between steel fragment and aluminum matrix. No intermetallic compounds appeared at the part (b).

Mg-4.86% O (いずれも at%) であり、Fe-Al 平衡状態図⁷⁾ から判断して、(1)点および(2)点の相はそれぞれ FeAl および FeAl₃ 金属間化合物と推定される。(2)点の金属間化合物のビッカース硬さは HV641 で非常に硬かった。

回転子のショルダー部と接する断面上部は高温になることが知られており⁸⁾、高温になる Fe と Al の接合界面部には少量の金属間化合物が生成することが明らかとなった。

Fig. 9 は、破断後の断面の一例を示す。前述のように、破断が Al 内に散在した Fe 片と Al マトリックスとの界面を通して生じていることが分かる。矢印で示す箇所には Fe 片と Al マトリックスとの界面が開口しており、この界面に亀裂が発生しやすいことを示唆している。そこで、この写真中の (a) と (b) の枠部を拡大して界面を観察した。拡大写真を Fig. 10 の (a) と (b) に示す。(a) 部には矢印で示すような相が出現していた。この相を EDS によって定量分析すると、その組成は 21.17% Fe-67.62% Al-4.85% Mg-6.36% O (at%) で、ビッカース硬さは HV630 であり、FeAl₃ 金属間化合物と推定され

る。一方、(b) に示すように、金属間化合物の観察されない界面も多く存在した。

以上のように、Fe/Al 接合界面の上部および Fe 片と Al マトリックスとの界面にも少量の金属間化合物が生成しており、破断はそこを通過して起こりやすいことが明らかになった。

5.2 接合線に平行な断面組織

次に、前項で述べた継手について、接合線に平行な縦断面組織の SEM 写真を Fig. 11 に示す。Fe と Al の界面から Al 側へ約 700 μm 入った位置 (写真中の破線位置) で Al 内に散在する Fe 片部を通る縦断面を観察した。SEM 像から、Al 中の Fe 片は接合方向に点在していることがわかる。

Fig. 12 には、この継手の破断面の SEM 写真を示す。(a) は破断面のマクロ写真である。(b) は Al 側の拡大写真であるが、Fe 片に沿って破壊が進行したような凹凸が見られる。これは、前述のように Fe 片と Al との界面で破断が生じやすいことから、Fig. 11 の縦断面の Fe 片の存在形態に良く対応して

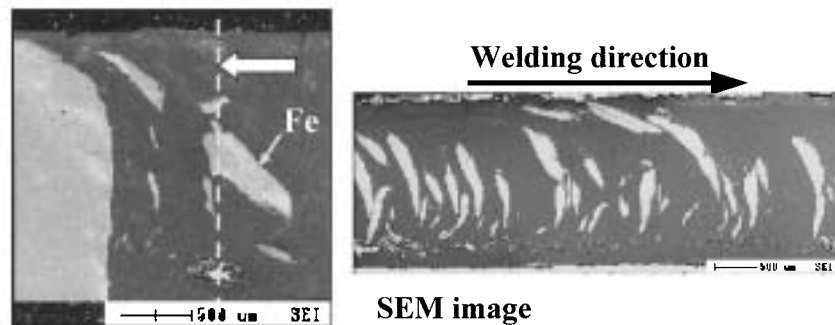


Fig. 11 Cross sectional SEM image longitudinal to welding direction. Many steel fragments are observed in aluminum matrix.

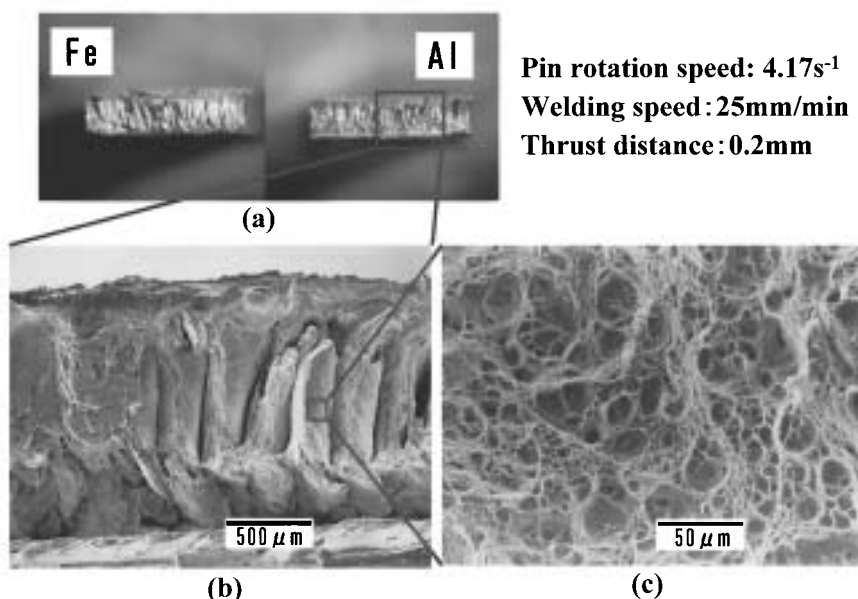


Fig. 12 Fracture surface of the weld under the optimal welding conditions : (a) Macro-photo of fracture surface, (b) SEM image of fracture surface and (c) enlarged SEM image of (b). Fracture seems to occur along the interface between steel fragments and aluminum matrix, and dimple pattern is observed in the fracture surface.

いる。破面をさらに拡大すると(c)に示したようにディンプルパターンが見られ延性破壊したことが分かる。

6. 回転ピンの直径を変化させた場合

これまでは、回転ピンの直径を 2 mm として接合実験を行ってきた。次に、ピン押し込み量を 0.2 mm とし、ピンの直径を 1 mm, 3 mm と 4 mm に変えて接合した継手の引張強さを Fig. 13 に示す。回転ピンの回転速度は 4.17 s^{-1} で接合

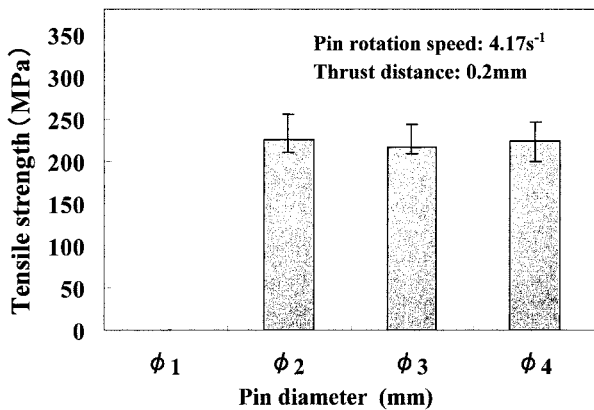


Fig. 13 Relation between the tensile strength of joints and pin diameter.

速度は 25 mm/min である。ピン径が 1 mm の場合は、ピンは直ぐに摩滅して接合は不可能であった。ピン径が 3 mm および 4 mm の継手の引張強さは 2 mm の場合とほとんど変わらないことが判明した。また、接合部の断面組織もピン径 2 mm のそれとほぼ同じであった。

7. 回転子を反時計回転にして接合した場合

次に、前節までとは異なり、回転子を反時計回転させた場合の影響を調べた。実際は接合方向を反対にすることによってその影響を調べた。ピン径は 2 mm, 回転子の回転数は 4.17 s^{-1} 接合速度を 25 mm/min として接合した。

接合部の表面写真を Fig. 14 の(a)に示す。表面状態だけを見ると一見接合しているように見えるが、接合箇所は表面部だけであり、亀裂も見られる。断面観察のために接合体を切断する時点で破断してしまい、内部は全く接合されなかった。(b)は破断後の Fe と Al の破面のマクロ写真であるが、ほとんど平坦になっており、接合された形跡が見られない。

次に、接合前に Fe 接合面に #400 エメリー紙で接合片の長手方向に対して約 45 度の角度に研磨痕を付け、接合前後の接合面の SEM 観察を行った。観察結果を Fig. 15 に示す。(a)は接合前の SEM 写真である。(b)はピン押し込み量 0.2 mm で

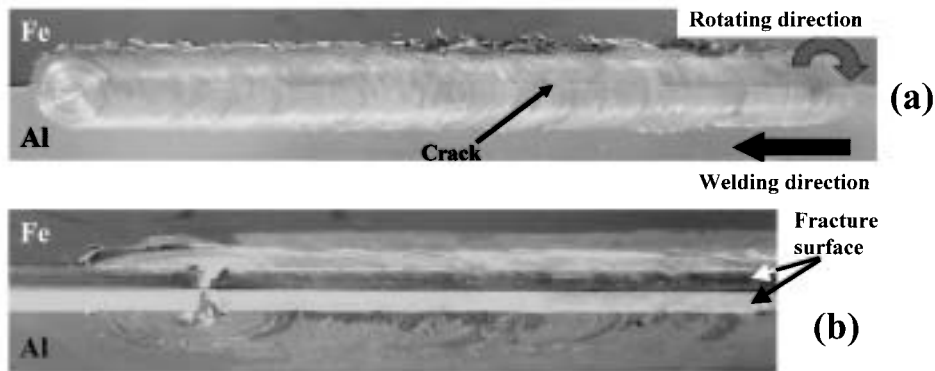


Fig. 14 Surface view and fracture surface of the weld when the welding direction was reversed, that is, the pin rotation direction was counterclockwise.

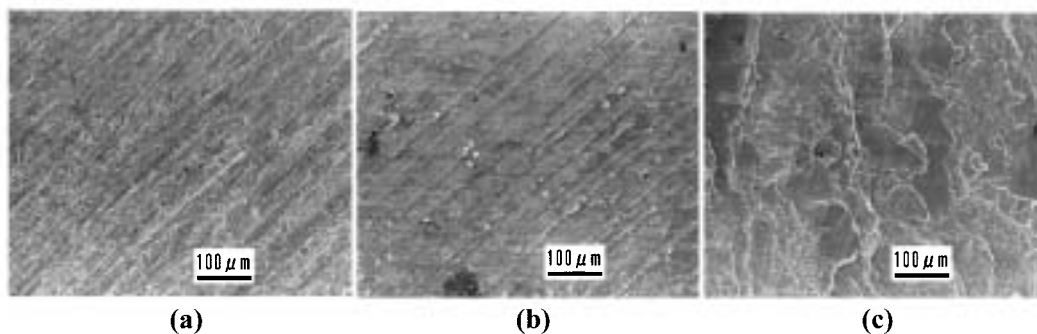


Fig. 15 SEM photographs showing steel faying surfaces before and after welding when the welding direction was reversed : (a) Before welding, (b) after welding with the thrust distance of 0.2mm and (c) after welding with the distance of 0.4 mm.

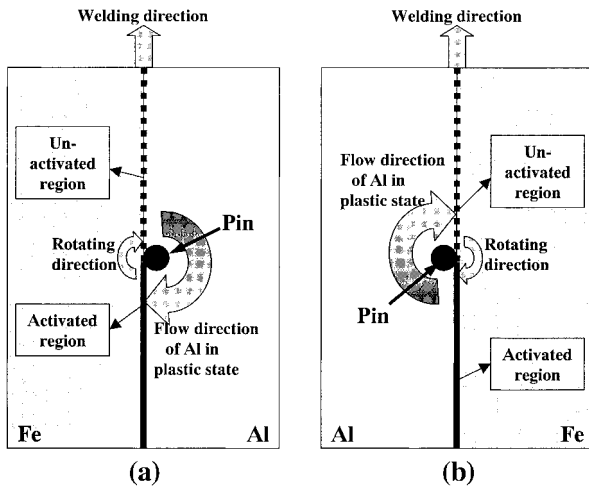


Fig. 16 Schematic illustration explaining the reason why the counterclockwise rotation of a pin cannot weld aluminum to steel: (a) Clockwise rotation of a pin and (b) counterclockwise rotation of a pin.

接合した後の Fe 接合面の SEM 写真である。接合前の研磨痕がピン側面で擦られた様相がみられるが、接合は全くなされていない。(c)はピンの押し込み量が 0.4 mm の場合の Fe 接合面である。ピンの側面でさらに擦られた様相がみられるが、接合は全くされていない。

ピン回転が反時計回転になる(接合方向を反対にする)と、接合しない理由を、Fig. 16 の模式図で説明する。(a)は接合方向に向かって左側に Fe を右側に Al を配置してピンを時計回転させて接合した場合で、(b)は接合方向を逆にした場合である。(a)のピン回転が時計回転の場合は、塑性流動状態の Al は矢印のような回転運動をして、回転ピン側面で擦られて活性化している Fe 接合面(太い実線で示す)に押しつけられて凝着し、接合が達成される。一方、(b)のように接合方向を反対にすると、矢印のように回転運動している塑性流動状態の Al は未だ活性化されていない Fe 接合面(破線で示す)に押しつけられることになり、接合されない。

8. 結 言

異種金属を容易に接合することを目的に、回転ピンを用いた固相接合法によって、鋼とマグネシウム含有アルミニウム合金の接合を試みた。継手の接合強さおよび接合部の組織に

及ぼすピンの回転速度と鋼側へのピンの押し込み量の影響を調べた。得られた結論は主要次のようである。

- 1) 本研究における回転ピンを用いた固相接合法を適用すると、これまで直接接合がほとんど不可能であった鋼とアルミニウム合金の接合が容易に可能となる。
- 2) 健全な継手を作製するためには適切なピンの回転速度が存在する。回転速度が小さいと、温度の上昇が不十分でピンの摩滅が顕著になる。また、回転速度が大きくなると、温度上昇が過度になりアルミニウム合金中のマグネシウムが燃焼して健全な接合体は得られない。
- 3) 鋼側へのピンの押し込み量が約 0.2 mm で継手の接合強さは最大になる。鋼破片がアルミニウム合金中に散在し、それらの界面に少量の金属間化合物が生成する場合は観察され、その界面が破断経路になる傾向がみられる。
- 4) 鋼とアルミニウム合金の接合界面には、金属間化合物の生成はほとんどみられないが、回転ショルダーとの摩擦で高温になる界面上部に少量の金属間化合物が生成される。
- 5) 接合進行方向に向かってアルミニウム合金を右側に配置して、回転子を反時計回転にすると、本研究における接合条件範囲内では接合は不可能である。

参 考 文 献

- 1) For example, Japan Welding Society : 溶接・接合便覧, Maruzen, 1990, 496. (in Japanese)
- 2) For example, M. Aritoshi and K. Okita : Friction welding of dissimilar metals, J. of Japan welding Society, Vol. 71, No. 6, 2002, 432-436. (in Japanese)
- 3) For example, T. Watanabe, A. Yoneda and A. Yanagisawa : Ultrasonic welding of dissimilar metals (1st report and 2nd report), Quarterly J. of Japan Welding Society, Vol. 17, No. 5, 1999, 223-242. (in Japanese)
- 4) 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, 2002, 427-431. (in Japanese)
- 5) S. Katayama : Dissimilar metal welding by laser, Welding Technology, Vol. 50, No. 2, 2002, 69-73. (in Japanese)
- 6) T. Watanabe et al : Joining of steel to aluminum alloy by interface activated adhesion welding, Preprints of The National Meeting of J.W.S, No. 71, Autumn, 2002, 446-447. (in Japanese)
- 7) T.B. Masalski et al edited : Binary Phase Diagrams, ASM, 1996, CD.
- 8) P. Ulysse : Three-dimensional modeling of the friction stir-welding process, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 42 (2002), 1549-1557.