プロジェクション形状改良による2024アルミニウム合金 スタッド/5052アルミニウム合金薄板 高速固相接合材の接合強度の向上

熊井 真次*・林田 慶祐**

Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 62, No. 9 (2012), 331-337
© 2012 The Japan Institute of Light Metals

Projection shape modification for improvement in joining strength of high-speed solid-state joined 2024 aluminum alloy stud and 5052 aluminum alloy thin plate

Shinji KUMAI* and Keisuke HAYASHIDA**

A 2024-T3 aluminum alloy stud with the circular ridge projection at the bottom was welded to a 1.5 mm-thick 5052-H34 aluminum alloy thin plate by the advanced high-speed solid-state joining method. The projection crushed and spread along the plate surface. Joining was achieved within a few milliseconds with a negligible temperature increase of the joint. Asymmetrical deformation occurred on both the inner side and the outer side of the projection. It was found that enlargement of the joining area outside of the projection was effective to increase the joint strength by the present authors' previous study. Based on this guide, in the present study, trial was made to increase the joint strength by determining the optimum projection shape at a bottom of the stud. Three types of projection shape were prepared and they were provided for joining tests at various discharge voltage conditions, and joint interface morphology, joining area and joint strength were compared. When we used the stud with which the projection tip shifted to the inner side, the outer side of the projection spread much wider along the plate surface than the inner side. This worked effectively to increase the joint area of the outside and the resultant joining strength. It is confirmed that the modified projection shape is useful for the stud welding for the thin plate.

(Received December 22, 2011 Accepted May 23, 2012)

Keywords: stud welding, solid-state joining, deformation behavior, current path, discharge voltage

1. 緒 言

高速固相接合法とは、接合材の温度上昇や変形、溶接痕の発生を起こすことなく、数ミリ秒の接合時間で、スタッドと薄板を強固に接合する方法である¹⁾。著者らは既報において、本接合法を用いて底部に環状で断面が逆二等辺三角形のプロジェクションを有する2024-T3合金製スタッドを、厚さ1.5 mmの5052-H34合金薄板に接合し、プロジェクションの変形挙動、接合部のミクロ組織、接合強度について調査した結果を報告した^{2)~4)}。そこでは、板厚が薄い場合には、プロジェクションの内側と外側では変形挙動が異なり、その結果、接合界面近傍のミクロ組織（結晶粒組織）も大きく異なることを明らかにした。また、硬さ分布、組成分布ならびに引張試験後の破面についても、プロジェクションの内側と外側で明らかな差異が見られることを示した。このような差が生じるのは、アースの役割をする銅製電極外管の位置に起

因し、放電大電流がプロジェクション先端から板表面を通過して優先的に外管へと流れるため、プロジェクション内側に比べ外側で、温度上昇や塑性変形がより顕著に起こるためであると考えられるが、これに加えて、被接合材が薄板であることが大きく影響していると思われる。

このようなことから、前報では、板の厚さを1~4 mmの範囲で変化させて接合実験を行い、板厚の影響について検討を行った⁵⁾。その結果、板厚が厚い場合（2~4 mm）には、プロジェクションの変形挙動が内側、外側でおおむね均等になること、また、これにより接合面積が広がるため接合強度も増加することを明らかにした。

さて、板厚が厚い場合には、投入エネルギー（放電電圧）を増加させると、プロジェクションの塑性変形がより大きくなって接合面積が広がる。よって、接合強度を増加させるには放電電圧を大きくすることが有効である。しかし、放電電圧を大きくすると発熱も大きくなるため、板の変形や板の裏

* 東京工業大学大学院総合理工学研究科材料物理科学専攻（〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259 G3-20）。Department of Materials Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology (G3-20, 4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 226-8502). E-mail: kumai.s.aa@m.titech.ac.jp

** 東京工業大学大学院生（横浜市）。Graduate student, Tokyo Institute of Technology (Yokohama-shi, Kanagawa).

Fig. 1 A close-up of the cross section of the circular ridge projection of the aluminum alloy stud; (a) Type I: Symmetrical, The projection tip is located at the center, (b) Type II: The projection tip shifts to the inside, (c) Type III: The projection tip shifts to the outside.

面の溶接痕が発生しやすくなる。これは薄板への接合においては明らかなデメリットであり、溶接痕や板材の変形を抑えながら薄板に対するスタッド接合が可能であるという本接合手法の特徴を根本的に損なうものである。よって、特に薄板への接合において、より強固なスタッド接合材を得るには、放電電圧の増加とは別の方策を講じる必要がある。

そこで本研究では、薄板へ接合する場合、プロジェクション内側に比べ外側で温度上昇や塑性変形がより顕著に起こることに注目し、プロジェクション形状を工夫することによってプロジェクション外側の接合面積を拡大し、強度増加が可能かどうか検討を行った。

2. 実験方法

2.1 供試材

スタッドには、既報^{3),4)}と同じ2024アルミニウム合金T3処理材の押出棒材から加工したものを使用した。スタッドの外観、寸法等の詳細については既報ならびに前報⁵⁾を参照されたい。本研究では、形状、寸法は同じで、プロジェクション形状のみが異なる3種類のスタッドを作製した。これらは、(I) これまで使用してきた、プロジェクション断面が逆二等辺三角形のもの (Fig. 1(a), 以後、「対称材」と表記), (II) 頂点が内側に寄った逆三角形のもの (Fig. 1(b), 以後、「内寄り材」と表記), (III) 頂点が外側に寄った逆三角形のもの (Fig. 1(c), 以後、「外寄り材」と表記) である。これらは、プロジェクション部分の総体積は同じであるが、内寄り材では、プロジェクション外側の体積が、外寄り材ではプロジェクション内側の体積が相対的に大きくなることを意図したものである。

被接合材である薄板には、比較のため既報^{3),4)}と同じ、厚さ1.5mmの5052アルミニウム合金H34材を使用し、これを長さ150mm、幅50mmに切断して実験に供した。なお、接合直前にスタッドのプロジェクション先端が接する部分の板

表面を、ボール盤に取付けたワイヤブラシで研磨した。

2.2 接合

接合は曙機械株式会社が開発したスタッド接合機を使用し、充電電圧 (放電電圧に対応) を415, 445, 475Vの3通りに変化させて行った。加圧力は一定の0.45MPaで行った。1枚の板に3個のスタッドを連続して接合する操作を3回繰返し、同じ条件で9個の接合材を作製した。その内1個を外観観察, 3個を接合断面観察, 5個を引張試験に供した。なお、接合原理や接合手順については既報^{3),4)}を参照されたい。

2.3 ミクロ組織観察

接合界面に対して垂直に切出した接合部断面を鏡面研磨後、室温のケラー氏液 (HF: 1.0, HCl: 1.5, HNO₃: 2.5, H₂O: 95 (vol%)) で腐食し、2024合金の結晶粒組織を現出させて光学顕微鏡で観察した。走査型電子顕微鏡 (SEM) による反射電子像 (BEI) 観察も併せて行った。

2.4 引張試験ならびに破面観察

接合材の引張試験は、前報^{3)~5)}と同様、スタッドと板材の接合界面に対し垂直方向に負荷を与えて実施した。試験は、室温、クロスヘッド速度0.5mm/sの条件で行い、破壊までの荷重-クロスヘッド変位曲線を記録して、破断荷重を求めた。同一条件で作製した試料の試験数 (*N*数) は5とした。

破断後の試料を接合界面観察の場合と同様、接合界面に対して垂直に切出し、研磨、腐食して、破断面に垂直な方向から光学顕微鏡により観察し、破断箇所を調べた。併せて走査型電子顕微鏡 (SEM) (加速電圧20kV) による破面観察を行い、破壊の特徴を明らかにするとともに、両観察結果をもとに接合面積を求めた。引張試験で得られた破断荷重と接合面積の測定結果から、破断応力を推定した。本研究における接合面積の定義ならびに測定方法に関する詳細については3.5節で述べる。

3. 実験結果および考察

3.1 スタッドならびに板の変形挙動に及ぼすプロジェクション形状の影響

すべての接合材において、スタッドの環状プロジェクションの先端が板表面に押付けられることにより潰れ、板表面に広がって接合がなされていた。このようなマクロ的な形態変化は、プロジェクション形状が異なっても基本的に同じであった。しかし、以下に述べるように、プロジェクション内側と外側での塑性変形挙動ならびに接合界面のミクロ組織は、プロジェクション形状によって大きく異なっていた。

Fig. 2~Fig. 4に放電電圧475Vの条件で接合した対称材、内寄り材、外寄り材、おのおのの接合界面を示す。2024合金製スタッドの結晶粒組織は、ケラー氏液で腐食することによって明瞭に観察することができる。縦方向に配列した柱状の結晶粒組織は、押出棒材から加工されたスタッドが元々有する組織である。よって、これを基にプロジェクションの変形挙動を知ることができる。

Fig. 2は既報において報告した対称材の接合界面である^{3),4)}。板材に押込まれたプロジェクションの先端部分は元の巨視的形状を維持しており、結晶粒組織も接合前と比べ変化していない。一方、プロジェクションの内側と外側では、2024合金の結晶粒が押し潰され、扁平となり結晶粒組織は大きく変化していた。また、プロジェクション外側で板表面

Fig. 2 Microstructure of the joint interface of 2024 aluminum alloy stud (Type I) to the 1.5 mm-thick 5052 aluminum alloy plate^{3), 4)}. (Reprinted from Fig. 7)

Fig. 3 Microstructure of the joint interface of 2024 aluminum alloy stud (Type II) to the 1.5 mm-thick 5052 aluminum alloy plate.

Fig. 4 Microstructure of the joint interface of 2024 aluminum alloy stud (Type III) to the 1.5 mm thick 5052 aluminum alloy plate.

の盛り上がりが大きくなっていた。さらに矢印で示すように、プロジェクション外側には激しく腐食されたこぶ状の領域が認められ、そこではデンドライト組織が明瞭に観察された。これはプロジェクション外側では、一部溶融が起こったことを示している。

このように薄板の接合時には、プロジェクション内側と外側の温度上昇がアンバランスとなり、外側ではプロジェク

ションの一部が溶融するほど高温になるが、反対にプロジェクションの内側では、塑性変形や拡散を促進するための十分な温度上昇が得られない場合がある。これは、緒言でも述べたように、アースの役割をする銅製電極外管の位置に起因するものである。すなわち、放電大電流がプロジェクション先端から板表面を通して優先的に外管へと流れるため、プロジェクション内側に比べ外側で、温度上昇や塑性変形がより

Fig. 5 SEM-BEI (Composition image) pictures of the interface between the inserted 2024 aluminum alloy projection tip and the 5052 aluminum alloy plate. (a) Type II, (b) Type III.

Fig. 6 Interfacial microstructure of the welded 2024 aluminum alloy stud (Type II) to the 5052 aluminum alloy plate. Close up of the area "A" in Fig. 3. (a) Optical micrograph, (b) SEM-BEI (Composition image).

顕著に起こる。

Fig. 3は内寄り材の接合界面である。プロジェクションの先端部分は、やや内側へ傾いているものの、対称材と同様、元の巨視的形狀のまま板中に埋込まれていた。ここで特徴的なことは、外側へ向かってプロジェクションが大きく変形して張出し、対称材の場合と比べ、プロジェクション外側における張出部と板との接触面積が拡大していることである。なお、Fig. 2の対称材の場合と同様、外側の張出部先端にはこぶ状の熔融領域が観察された。

Fig. 4は、外寄り材の接合界面である。5052合金板表面が大きく変形し、そのため、板中に埋込まれたプロジェクション先端も外側へ向かって移動していた。さて、この場合は、プロジェクションは内側に向かって大きく張出していた。しかし、2024合金の結晶粒組織はそれほど変化していない。一方で、プロジェクション外側において強く腐食されている領域が拡大していた。これはプロジェクション外側において熔融部分が増加したことを示している。このように外寄り材では対称材の場合と比べ、内側への張出量は増加していたが、外側でのプロジェクション張出部と板との接触面積は減少していた。

3.2 接合界面近傍のミクロ組織変化に及ぼすプロジェクション形状の影響

Fig. 5(a), (b)は、内寄り材、外寄り材について、おのこの板材に埋込まれたプロジェクション先端部分のSEM-

BEI写真である。プロジェクション形状にかかわらず、板材に埋込まれたプロジェクション先端部分では、2024合金と5052合金の間に隙間が見られ、この部分では接合されていないことが確認できた。各合金中の第2相粒子の寸法や形状、分布も変化しておらず、この領域においては、塑性変形や温度上昇がほとんど起こっていないものと考えられる。

Fig. 6(a), (b)は、内寄り材の接合界面 (Fig. 3) のコラムA中の領域を撮影した、同じ倍率の光学顕微鏡写真とSEM-BEI (組成像) である。Fig. 6(a)中、2024合金内の筋状もしくは点状に強腐食されている部分は、Fig. 6(b)内の筋状もしくは点状の最も明るいコントラストを呈する部分に対応し、これらは2024合金中の第2相粒子である。5052合金中の明るい点状のコントラストの部分も同じく第2相粒子である。

光学顕微鏡写真において強腐食されている接合界面近傍は、SEM-BEIの組成像から判断して、暗いコントラストを呈する5052合金と明るいコントラストを呈する2024合金とが髭状に混じった部分に対応する。これより界面近傍の20~30μmの範囲では、MgとCu成分の拡散が進んでいることがわかる。またこの領域には2024合金中の第2相が観察されない。この原因としては、第2相粒子の再固溶や溶解が想定され、このことは接合界面近傍の極限られた範囲で、急激な温度上昇が起こったことを示唆している。よって、極短時間の間に接合界面において両合金成分の拡散が起こり、これ

Fig. 7 Interfacial microstructure of the welded 2024 aluminum alloy stud (Type III) to the 5052 aluminum alloy plate. Close up of the area “B” in Fig. 4.

により強固な固相接合が達成されたものと考えられる。なお、接合界面近傍の組成変化ならびに硬さ変化については既報にて検討を行っているので、そちらを参照されたい^{3),4)}。

このような接合界面組織は既報でも述べたように、対称材のプロジェクション外側においても観察されるものであるが、内寄り材の場合、このような組織が接合界面に沿ってより広範囲に認められた。

一方、Fig. 7(a), (b)は、外寄り材の接合界面 (Fig. 4) のコラムB中の領域を、光学顕微鏡ならびにSEM-BEI (組成像) により観察した結果である。Fig. 7(a) に示すように、接合界面は平坦で、内寄り材で見られたような、結晶粒が微細化された領域は認められなかった。また、Fig. 7(b) に示すように、2024合金と5052合金の界面には明瞭なコントラスト差が観察される。界面近傍の第2相粒子の形状や寸法にも変化は見られなかった。これらは、既報で述べたように、プロジェクション内側の接合界面の特徴である。

3.3 接合強度に及ぼすプロジェクション形状の影響

Fig. 8に各放電電圧で作製した接合材のプロジェクション形状と破断荷重の関係を示す。図中の各プロットは5回の試験結果の平均値、エラーバーの上端、下端はそれぞれ最大値、最小値を表している。いずれのプロジェクション形状においても、放電電圧の増加とともに破断荷重は増加した。また、破断荷重は内寄り材が最大で、415Vの条件で約2kN、475Vの条件で約3.5kNであった。これらは対称材や外寄り材に比べ、約2倍である。

さて、本接合法では、スタッド底部のプロジェクションが変形して板面に拡がることによって接合がなされる。このため接合面積はプロジェクションの変形挙動に依存して変化する。よって、例えば摩擦圧接材や摩擦攪拌接合材のような突合せ固相接合の場合のように、引張試験で得られた荷重をあらかじめ定めた接合面積で除した値、いわゆる公称応力 (σ/Pa) で接合強度を表すことは困難である。

当然のことながら、本接合法では、プロジェクションの寸法や形状が異なるスタッドを用いると、それに応じて接合面積も変化する。このようなことから著者らは、既報^{3),4)}、前報⁵⁾、本報を通じて、同じ形状、同じ寸法の2024-T3合金製スタッド、同じ5052-H34合金板を使用し、前報では板厚のみを、本報ではプロジェクションの体積は変えずに、その形状のみを変化させて実験を行ってきた。これは各接合材の接

Fig. 8 Effects of the projection shape and discharge voltage on fracture load of the joint.

合強度を、破断荷重を用いて直接比較できるようにするためであり、このようなことから、本報では、あえてこの「破断荷重」 (F/N) をもって「接合強度」を表すことにする。

3.4 破壊形態に及ぼすプロジェクション形状の影響

Fig. 9に内寄り材の破断面のSEM像を示す。写真は環状プロジェクション側の破断面の一部を示しているが、このような破面が環状プロジェクションに沿って360°観察されている。写真左側の灰色のコントラストの帯は、板中に押込まれていたプロジェクション先端部に対応する。このように内寄り材では、プロジェクション外側に幅広い帯状のディンプル破壊領域が観察された。一方、プロジェクション内側は平坦で、5052合金の付着等は観察されず、板表面に押付けられたものの、この部分は接合されていなかったと考えられる。Fig. 10は、引張試験後の内寄り材断面の光学顕微鏡写真である。変形したプロジェクション外側の底部に付着しているコントラストの明るい領域が、接合された5052合金板材であり、この部分の底面がFig. 9のディンプル破面に対応する。以上の結果より、スタッドと板材は、プロジェクション先端部外側で、およそ200μmの幅で、環状に接合されていたことが明らかとなった。

Fig. 11は、外寄り材の破断面のSEM像である。外寄り材の場合にはプロジェクション先端は変形しているため、破面上では不明瞭である。外寄り材の破面は全体に平坦であっ

Fig. 9 A part of the fracture surface of the stud with Type II projection.

(a)

(b)

Fig. 10 Cross section of the broken stud with Type II projection. (a) Macroscopic view, (b) Close-up of the area "C" in (a). Bright contrast area is 5052 aluminum alloy.

た。プロジェクション外側にごく薄い帯状のディンプル領域が観察されたものの、プロジェクション内側ではごく少量のディンプル破面しか観察されなかった。引張試験後の外寄り材断面の光学顕微鏡写真をFig. 12に示す。プロジェクション内側と外側に一部付着した5052合金が観察されたが、観察されない断面もあり、断面組織はFig. 11の破面様相とよく対応している。

3.5 接合面積に及ぼすプロジェクション形状の影響

光学顕微鏡ならびにSEM観察によって得られた破面様相に関する情報を基に、各接合材の接合領域について解析した結果を模式的に示したのがFig. 13である。このように本接合材の接合領域は、基本的に円弧状プロジェクションを反映した環状を呈している。Fig. 13(a)の対称材では、板表面部に埋込まれるだけで接合に寄与しないプロジェクション先端部分を中央に挟む二重環構造になっており、外側はディンプル破壊を、内側はごく少量のディンプル破面を含む平坦破壊をしている。一方、Fig. 13(b)の内寄り材では、内側に比べ外側の環状接合領域の面積が非常に広く、かつディンプル破壊をしていた。外寄り材 (Fig. 13(c)) では、外側に比べ内側の環状接合領域の幅は広いが、その直径は小さい。また、

Fig. 11 A part of the fracture surface of the stud with Type III projection.

(a)

(b)

(c)

Fig. 12 Cross section of the broken stud with Type III projection. (a) Macroscopic view, (b) Close-up of the area "D" in (a), (c) Close-up of the area "E" in (a).

そこでは平坦破壊が支配的であり、ディンプル破面はごく一部にしか観察されなかった。対称材は両者の特徴を併せ持っており、プロジェクション外側でディンプル破面が、内側で平坦な破面が観察されるが、内寄り材、外寄り材に比べて接合面積は小さかった。これは、プロジェクションの断面形状が対称で崩れにくいためであると考えられる。

本接合材において実際に接合されていた面積を正確に求めることは困難である。そこで、破断後のスタッド側の破面の低倍率 (100倍) SEM像を撮影し、これを基に環状接合領域の境界をトレースした画像を作製、その平均幅と直径を測定することにより接合面積を求めた。測定結果をFig. 14に示す。なお図中には、各プロジェクション形状について支配的な破面様相を併せて示した*¹。Fig. 14に示すように、いずれの場合も放電電圧の増加とともに接合面積は増加し、415Vと475Vとを比較すると接合面積はほぼ2倍になっていた。ただし、Fig. 8ならびにFig. 13で示したように、プロジェクション形状により破断荷重や破壊様式は異なっている。

*¹ 対称材については、既報のFig. 17(a) においてディンプル破面を呈した部分の面積の測定結果を示している。本報のFig. 14の対称材の接合面積は、これに平坦破壊部分の面積を加えたものである。

Fig. 13 Schematic views of the fracture surface of the stud side corresponding to the joining area. (a) Type I, (b) Type II, (c) Type III.

Fig. 14 Effects of projection shape and discharge voltage on the joining area and fracture type.

先に述べたように、本接合法における接合面積はプロジェクションの変形挙動に依存して変化するため、引張試験で得られた荷重をあらかじめ定めた接合面積で除した値、いわゆる

公称応力 (σ/Pa) で接合強度を表すことは困難であるが、あえて破断荷重を接合面積で除して破断応力を求めると、対称材で200 MPa、内寄り材で330 MPa、外寄り材で170 MPaとなる。

2000系アルミニウム合金と5000系アルミニウム合金の固相接合に関しては、5052合金と2017-T4合金丸棒材の摩擦圧接において、接合界面における機械的混合層の幅を200 μm 以下になるように圧接条件を設定すれば、2017合金母材の約85%の引張強さを有する高い継手強度が得られるとの報告がある⁶⁾。また、厚さ6 mmの2219-T87合金と5083-H321合金の突合せ摩擦攪拌接合材で、最大で5083合金のUTSのおよそ90%の引張強さが得られたとの報告がある⁷⁾。

先に求めた本接合材の破断応力は、5052-H34材のUTS (260 MPa)⁸⁾ の65~125%に相当する。よって、本接合材は、他の固相接合材と同等の接合強度を有していると考えられる。以上示したように、本固相接合法により薄板に対しても、接合材の温度上昇や変形、溶接痕の発生を起こすことなく強固なスタッド接合を行うことができた。さらにプロジェクション外側の体積が相対的に大きくなるよう、プロジェクション形状を工夫することにより、ディンプル破壊が主体となるような強固な接合領域の面積を拡大し、接合強度を向上させることができた。

4. 結 言

接合界面の温度上昇や被接合体(板や形材)への入熱量を最低限に抑え、板の変形や板の裏面の溶接痕発生を防止するという本接合法の利点を活かすために、投入エネルギー(放電電圧)を抑えた状態で接合面積をより大きくするための方策として、プロジェクションの形状を変化させ、その効果について検討を行った。その結果、プロジェクション先端の位置を内側にずらすことで、プロジェクション外側(アース側)の体積を増加させ、より強固に接合されるプロジェクション外側での接合面積を拡大することによって、2024合金スタッドの5052合金薄板への接合強度を大きく向上させることができた。

謝 辞

曙機械株式会社 北山健二氏、斎藤恒成博士、久保寺美憲氏には接合実験の援助ならびに有益な議論をしていただきました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 久保寺美憲: プレス技術, **40** (2002), 44-48.
- 2) S. Kumai, K. Hayashida and M. Watanabe: Proc. of the 12th Int. Conf. on Aluminium Alloys, Yokohama, (2010), 940-944.
- 3) S. Kumai, K. Hayashida and M. Watanabe: Mater. Trans., **52** (2011), 992-998.
- 4) 熊井真次, 林田慶祐, 渡邊満洋: 軽金属, **61** (2011), 206-212. (3) の和訳)
- 5) 熊井真次, 高谷謙斗: 軽金属, **62** (2012), 293-299.
- 6) 不破野裕崇, 加藤数良, 時末 光: 軽金属, **50** (2000), 157-161.
- 7) M. Koilraj, V. Sundareswaran, S. Vijayan and S. R. Koteswara Rao: Materials & Design, (2012), doi: 10.1016/j.matdes.2012.02.016.
- 8) Aluminium Handbook: Japan Aluminium Association, (2001), 3.