

渦溝ツールにより作製した A6061/AZ31 異種金属 摩擦攪拌スポット接合継手の疲労挙動

植松 美彦^{*1}, 柿内 利文^{*1}, 戸崎 康成^{*2}, 麻地 剛史^{*3}

Fatigue behavior in dissimilar A6061/AZ31 friction stir spot welds fabricated by a scroll grooved tool without probe

Yoshihiko UEMATSU^{*1}, Toshifumi KAKIUCHI, Yasunari TOZAKI and Takeshi ASAJI

^{*1} Gifu Univ. Dept. of Mechanical Engineering
Yanagido 1-1, Gifu, 501-1193 Japan

Dissimilar friction stir spot welds between aluminum and magnesium alloys were fabricated using a tool without probe. The tool had a scroll groove on its shoulder surface to induce material flow in the nugget. The tensile strengths of dissimilar welds were comparable to those of the magnesium similar welds made by the same tool. Thin intermetallic compound layer of $Al_{12}Mg_{17}$ was formed along the interface between aluminum and magnesium sheets. EDX analysis revealed that the thickness of intermetallic compound layer was dependent on the distance from the center of nugget, where the thickness increased near the edge of the tool due to the upward material flow in the nugget. The intermetallic compound layer resulted in the bonding between the dissimilar alloys. Subsequently, fatigue tests were conducted, and the fatigue strengths were nearly the same between dissimilar and magnesium similar welds. Fatigue fracture modes were dependent on the load levels, where fatigue crack propagated along the interface at the higher load levels than 1000N. However, fatigue crack initiated in the lower magnesium sheets and propagated through thickness at the low load level of 750N. Fractographic and EDX analyses revealed that the fatigue crack mainly propagated through the thin intermetallic compound layer at the higher load levels.

Key Words : Friction Stir Spot Weld, Dissimilar Weld, Fatigue, Fracture Mechanism, Aluminum, Magnesium

1. 緒 言

近年、輸送機器分野では低燃費化や高効率化のために、構造の軽量化が強く求められており、アルミニウム (Al) 合金やマグネシウム (Mg) 合金等の軽金属が多用されるようになった。そのため、Al 合金と Mg 合金の接合が、特に自動車産業界等において重要な課題となっている。しかし、抵抗スポット溶接などに代表される従来の熔融接合手法では、接合界面に脆い金属間化合物が多量に形成されるため、信頼性のある継手を得る事が難しいとされている。一方、摩擦攪拌スポット接合 (Friction Stir Spot Welding : FSSW) は、固相接合であるために異種金属接合に適すと考えられているが、Al と Mg 合金の異種接合についてはほとんど実績がない。また、異種金属継手の疲労挙動に関する報告例も少ない。さらに、FSSW ではプローブを有する回転ツールが広く使用されているが、接合部にプローブ穴が残ることが欠点として挙げられる。

そこで本研究では、プローブが無くショルダー面に渦溝を施した円柱状ツール (渦溝ツール) を用いて、Al と Mg 合金薄板の異種金属 FSSW 継手を作製し、その疲労挙動について検討した。

^{*1} 岐阜大学 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

^{*2} 岐阜県工業技術研究所 (〒501-3265 岐阜県関市小瀬 1288)

^{*3} 豊和工業㈱ (〒452-8601 愛知県清須市須ヶ口 1900 番地 1)

E-mail: yuematsu@gifu-u.ac.jp

2. 材料および実験方法

2・1 試験片および実験方法

材料は A6061 および AZ31 である。それぞれ厚さ 2mm の板材から幅 40mm、長さ 150mm の短冊を切り出して接合に用いた。接合では、上板を A6061、下板を AZ31 として重ね部 40mm×40mm の中心に FSSW を施した。疲労試験には容量 49kN の電気油圧式サーボ疲労試験機を用い、室温大気中で実験を行った。試験条件は繰返し速度 $f=10\text{Hz}$ 、応力比 $R=0.1$ とした。接合断面と試験後の破面解析には、エネルギー分散型 X 線回折装置 (EDX) を搭載した走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた。

2・2 ツールおよび接合条件

図 1 に本研究で使用したツール先端の形状を示す。ツールにはプローブが無く、ショルダー底面に深さ 0.5mm の渦溝を施している。接合条件は、事前に行った引張り試験結果に基づき、回転数 1000rpm、保持時間 5.0s、侵入深さ 1.0mm とした。

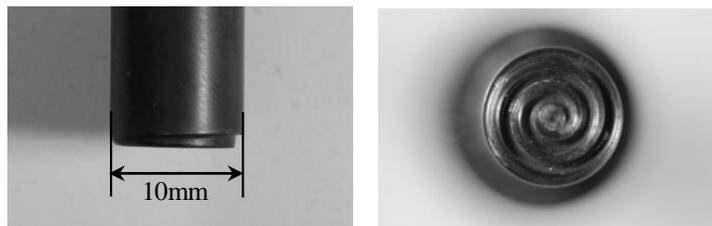


Fig.1 Configuration of scroll-grooved FSSW tool without probe.

3. 実験結果

3・1 接合部断面 EDX 分析

Al/Mg 継手におけるナゲット断面の巨視的形状を図 2 に示すが、接合界面が明瞭に認められる。また、上板が Al 合金であり、界面より上側の Al のみが主に攪拌されていることがわかる。図 3 にナゲット中央部における接合界面の拡大図と、EDX による界面に垂直方向の線分析結果を示す。図 3(a)に示すように、界面部には厚さ数 μm の白色部が認められた。図 3(b)の線分析結果から、白色部には Al と Mg の双方が存在しており、接合界面に金属間化合物 (Intermetallic Compound: IMC) $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ が形成されていることが明らかになった。そこで、図 3(b)で Al と Mg の双方が検出される領域の幅を IMC 層厚さと定義した。IMC 層の厚さの分布を図 4 に示す。IMC 層は接合部中心からほぼツール外周 (5mm) の位置まで存在している事がわかる。また、ナゲット中心から約 4mm の位置で局所的に IMC 層が厚くなっている。EDX による面分析の結果、ツール外周付近で生じるナゲット内での強い上板側へ塑性流動により、界面で生成した IMC が破壊されて上板内へ移動しているのが確認された。すなわち、上板型に破砕された IMC が分布することによって、Al と Mg の双方が検出される見かけの IMC 層厚さが急増したものである。したがって実際の IMC 層厚さは、ツールの下部全体で約 $5\mu\text{m}$ 程度と考えられる。



Fig.2 Macroscopic appearance in cross section of Al/Mg FSSW joint.

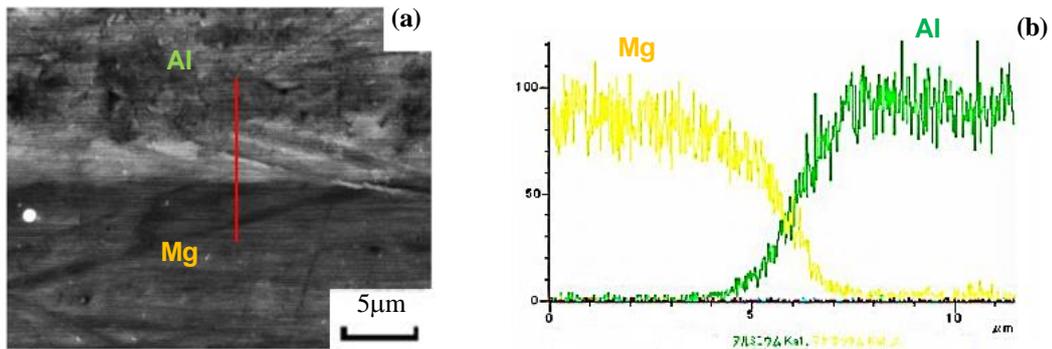


Fig.3 EDX line analysis near interface: (a) SEM image, (b) Line analysis of Al and Mg.

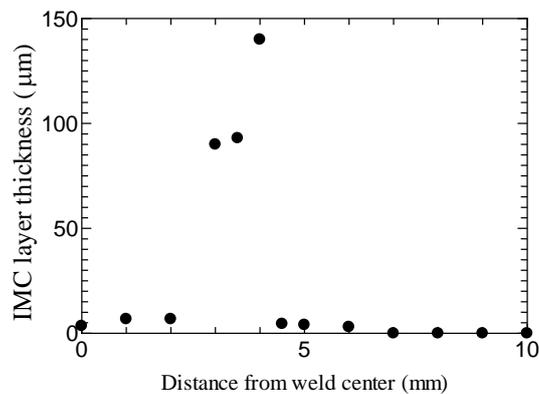


Fig.4 IMC layer thickness as a function of distance form weld center.

3・2 引張り試験

Al/Mg 継手の破断荷重は平均 2.3kN であり、破壊は Al/Mg の界面に沿って生じた。図 5 に渦溝ツールで作製した Al/Al および Mg/Mg 同種金属継手、Al/Steel および Mg/Steel 異種金属継手の引張り強さを示す¹⁾。また Al/Al の組合せについては、通常のプローブツールで作製した継手の強度も示している¹⁾。一般に Al/Mg 継手では、界面に厚い金属間化合物が形成されてしまい、Mg/Mg の同種金属継手よりも強度が劣ることが報告されている²⁾。しかし渦溝ツールで作製した Al/Mg 継手は、Mg/Mg および Mg/Steel 継手、また一般的なプローブツールで作製した Al/Al 継手と同程度の強度を有しており、渦溝ツールが Al と Mg の組合せでの接合に有効である事を示している。

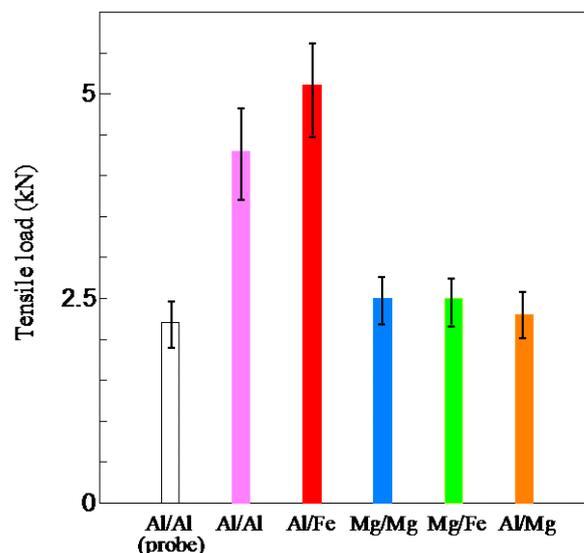


Fig.5 Tensile-shear strengths of similar and dissimilar welds.

3・3 疲労挙動

図 6 に最大荷重 P_{max} と破壊繰返し数 N_f との関係を示す。同図には渦溝ツールで作製した Mg/Mg 同種金属、Al/Steel および Mg/Steel 異種金属継手の疲労強度も併示しているが、Al/Mg 継手は Mg/Mg および Mg/Steel 継手と同程度の疲労強度を有しており、疲労強度の面でも、渦溝ツールによる FSSW が異種金属接合に有効な手法であることを示している。

図 7 にいくつかの荷重レベルにおける Al/Mg 継手の巨視的破壊様相を示す。 $P_{max}=1250N$ での破壊形態は、静的引張と同様にナゲット部でのせん断破壊である。一方、 $P_{max}=1000N$ でもナゲット部でのせん断破壊が最終破壊をもたらしているが、ナゲット円周に沿った大きなき裂が下板側で生じており、母材破壊の兆候も確認された。この荷重が破壊形態の遷移域であると考えられる。 $P_{max} \leq 750N$ の低荷重では、下板である Mg 板でき裂が発生してそのまま母材破壊が生じている。図 8 に、 $P_{max}=1000N$ で破断した Al/Mg 継手の両側の破面の SEM 観察結果を示す。(a), (b)中の c~g に示す部分において EDX による成分分析を行った。その結果、Al 側の破面ではいずれの位置でも Al と Mg の双方が強く検出され、破面に Al が露出しているのではなく、ほぼ全域が $Al_{12}Mg_{17}$ の IMC で覆われていることが判明した。一方、Mg 側の破面でも Al と Mg の双方が検出された。しかし、図 8 の低倍率破面中の矢印で示すように、暗部として観察される平坦な破面部では、Mg のみが検出された。すなわち、疲労き裂は主として境界部に存在する IMC 層の内部を進展するが、ナゲット外周近くの一部で、Mg と IMC 層の界面を進展していることを示唆している。しかし、破面中の暗部（ごく平坦な破面部）は前破面の一部であり、IMC 層が主たる疲労き裂進展経路となっていた。

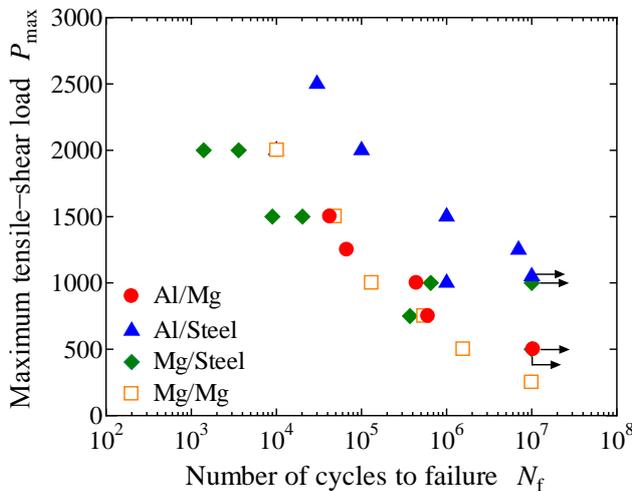


Fig.6 Relationship between maximum load, P_{max} , and number of cycles to failure, N_f .

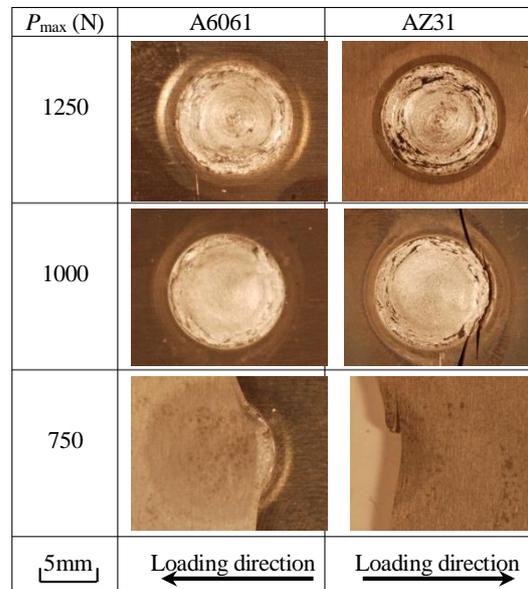


Fig.7 Macroscopic appearances of fatigue fractured Al/Mg welds at 1250N, 1000N and 750N.

4. 考 察

Al/Mg 継手では EDX 分析の結果、界面に IMC 層の形成が確認された。静的な破断は界面に沿って生じ、破面の EDX 分析では Al 側および Mg 側双方の破面上に Al と Mg が検出され、静的な破断も IMC 層内で生じていた。すなわち、界面にて IMC 層が形成されることで上下板が接合していたと考えられる。Al と Mg の接合では、IMC 層が厚い場合に十分な継手強度が得られない事が報告されており²⁾、本研究のように数 μm 程度の薄い IMC 層が、高強度の達成に有効と考えられる。また、疲労破壊形態には荷重依存性が確認され、高荷重においてせん断破壊が生じた。疲労き裂も静的破壊と同様に、母材よりぜい性的な IMC 層内を進展する。一方低荷重においては、Mg 側の母材部で板厚および板幅方向にき裂が進展して破断に至った。IMC 層によって Al と Mg 間の接合強度が

十分に得られているため、低荷重域ではナゲット部の応力集中によって下側の Mg 板にき裂が発生し、母材破壊が生じたと考えられる。

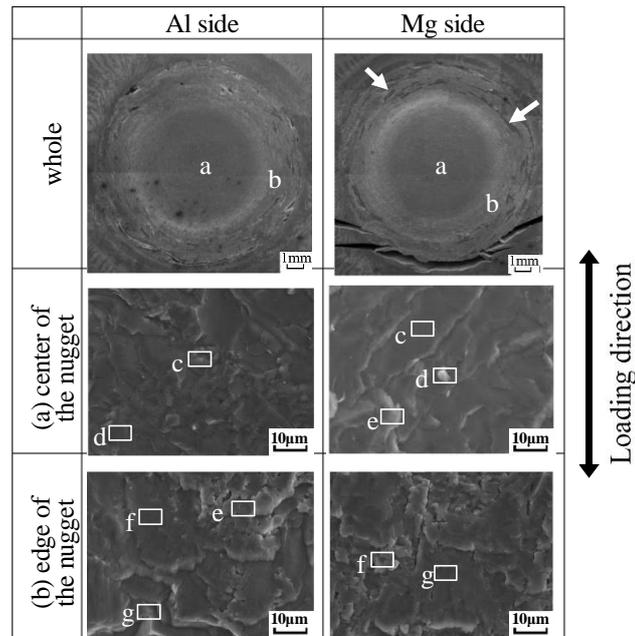


Fig.8 SEM macroscopic of fatigue fracture surface.

($P_{\max}=1000\text{N}$, $N_f=4.4\times 10^5$).

5. 結 言

本研究では、プローブの無い渦溝ツールで作製した Al/Mg 異種金属摩擦攪拌スポット接合 (FSSW) 継手の疲労試験を行い、その疲労挙動について検討した。その結果、渦溝ツールにより Al と Mg の FSSW に成功した。Al/Mg 継手では接合界面に脆い金属間化合物 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ を形成したが、その実際の厚さは $5\mu\text{m}$ 程度であった。せん断引張強度、疲労強度はともに渦溝ツールで作製した Mg/Mg 同種金属、Mg/Steel 異種金属継手とほぼ同程度であり、渦溝ツールが Al/Mg 異種金属の FSSW に有効であることを示した。

なお本研究は、公益財団法人 JKA の RING! RING!プロジェクトによる補助を受けた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) Uematsu, Y., Kakiuchi, T., Tozaki, Y., and Kojin, H., “Comparative study of fatigue behavior in dissimilar Al alloy/steel and Mg alloy/steel friction stir spot welds fabricated by a scroll grooved tool without probe”, *Sci. Technol. Weld. Joining*, Vol. 17, No. 5 (2012), pp. 348–356.
- (2) Chowdhury, S.H., Chen, D.L., Bhole, S.D., Cao, X., and Wanjara, P., “Lap shear strength and fatigue life of friction stir spot welded AZ31 magnesium and 5754 aluminum alloys”, *Mater. Sci. Engng A*, Vol. 556 (2012), pp. 500–509.