

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02443

研究課題名（和文）摩擦プロセスと熱処理を併用した高強度異材接合とその強度発現機構の解明

研究課題名（英文）High-Strength dissimilar material joining using combined friction process and heat treatment and the elucidation of the mechanism of strength development

研究代表者

小椋 智（OGURA, TOMO）

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90505984

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では摩擦プロセスと熱処理を併用した高強度異材界面形成とその強度発現メカニズムを解明し、そのモデルを構築することを目的とした。プロセスを最適化することで同材接合ならびにA7N01合金/SUS304異材接合では母材破断を呈する接合が達成された。力学数値解析から超高強度アルミニウム合金/SUS304継手は、界面外周部において継手に対する公称応力以上の局所応力が作用し界面破断に至ることが明らかとなった。そのため、母材破断を呈する異材接合のモデルの構築には材料間の降伏応力および加工硬化によって生じる界面の応力分布の差を考慮する必要があることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は界面反応制御と母材強化を並立させている。そのため、研究の展開として、例えばチタン合金など他実用合金においても界面反応による金属間化合物を形成する系において適用が可能であり、それらの異材界面強度の理解が深めることができると考えられる。また、理論解析による異材接合の局所変形モデルの構築を行っている。その解析モデルは今後のシミュレーション予測を始め、わが国が推進しているマテリアルDXなどのAI、ビッグデータ、インフォマティクスなどのデータ駆動研究にも適用ができるものと考えている。そのため本研究は工業的展開が可能な学術研究として役に立つものと思われる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to elucidate the mechanism of high-strength dissimilar-material interface formation and its strength development using a combination of friction process and heat treatment, and to develop a model for the mechanism. By optimizing the process, joining of the same material and A7N01 alloy/SUS304 dissimilar material was achieved with base metal fracture. Numerical analysis of the mechanics revealed that the ultra-high-strength aluminum alloy/SUS304 joints exhibit interface rupture due to local stresses above the nominal stress on the joint at the periphery of the interface. Therefore, it is necessary to take into account the yield stress between the materials and the difference in stress distribution at the interface caused by work hardening in order to construct a model of dissimilar material joints that exhibit base metal fracture.

研究分野：溶接・接合

キーワード：異材接合 アルミニウム合金 組織制御 摩擦プロセス 界面反応

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

最終製品を生産する過程では個々の部品を溶接・接合して製造される。特に近年、種々の産業分野で構造物の高機能化、省コスト化のために、複数の異なる材料を適材適所に使用するマルチマテリアル化が指向されており、それを実現するためには異種材料の接合技術開発が必須となる。特に輸送機器産業においては車体の軽量化かつ衝突安全性の向上が求められ、鉄鋼材料と軽量のアルミニウム合金やマグネシウム合金とを接合する、鉄鋼材料/軽金属材料のハイブリッド異種金属接合技術の研究開発が促進されている。現在、難接合材であるアルミニウム合金/鉄鋼材料の異材界面強度はアルミニウム合金母材強度(300MPa)以上であることまでわかっているが界面強度そのものは明らかになっていない。そのため、異材接合の更なる高強度化には異材界面強度を示し、その強度発現機構を解明することが必要となる。

2. 研究の目的

本研究では、母材に超高強度アルミニウム合金を適用することで、摩擦プロセスと熱処理を併用した高強度異材界面形成とその強度発現メカニズムを解明し、そのモデルを構築することを目的とする。また、超高強度アルミニウム合金の同材接合性も明らかとなっていないため、同材接合においても評価する。

3. 研究の方法

供試材料として7000系アルミニウム合金はA7N01, A7075, および開発材料のAl-11%Zn-3%Mg系超高強度アルミニウム合金を用い、鉄鋼材料はSUS304を用いた。接合はブレーキ式縦型摩擦圧接機(FE-002Ⅲ, 日東制機製)を用いた。異材接合では、アルミニウム合金を回転側、鋼を固定側として摩擦圧接を行った。実験では摩擦寄り制御で接合を行い、摩擦時間は実測した。引張試験はオートグラフ(AG-X, 島津製作所製)を用いて行った。試験数は各条件n=3とし、引張速度は1mm/minとした。組織観察は、光学顕微鏡および電界放出型走査電子顕微鏡(FE-SEM: Field Emission-Scanning Electron Microscope, S-4800, 日立ハイテクノロジーズ製)を用いて行い、接合部断面試料を観察した。

4. 研究成果

(1) 同材接合成果

Al-11%Zn-3%Mg(mass%)超高強度アルミニウム合金の同材摩擦圧接を行った。継手に対しマイクロスコープによる接合界面の外観観察を行った結果をFig.1に示す。なお、摩擦圧接条件は摩擦時間1s, 摩擦圧力100MPa, 回転数4200rpm, アップセット圧力160MPaであり、Fig.1(a)は接合まま材、(b)はその後、T6熱処理を行った結果である。接合まま材の攪拌部に黒色を呈する層が認められ、T6処理によってその領域が白色を呈していることがわかった。それらの領域にてEBSDによる結晶粒観察を行った結果をFig.2に示す。黒色の層は攪拌により形成された微細化した結晶粒の層、白色の層は微細化された粒が熱処理により異常粒成長をしたものであることがわかった。TEMによる析出物の観察および元素分析を行った結果、母材、接合まま材、T6処理材の全てにおいてAl-Mn-Cu系の棒状化合物が認められた。T6処理材には微細な析出物 η' が認められた。このことから、圧接継手においても接合後T6処理を施すことで、母材同様に微細な再析出が起きることがわかった。

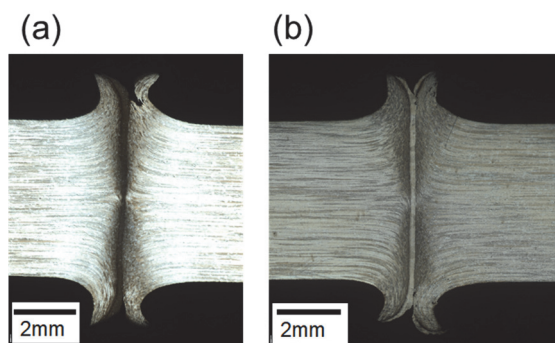


Fig. 1 Macrostructure of the interface of the friction welded joints. (a) As-welded and (b) T6 heat treatment.

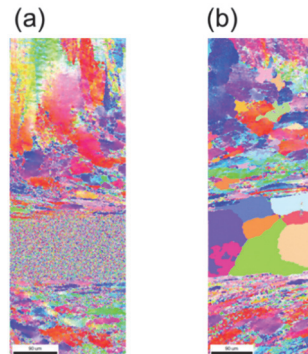


Fig.2 IPF map of the interface of the friction welded joints. (a) As-welded and (b) T6 heat treatment.

超高強度アルミニウム合金の接合界面軸心部から硬さ試験を行った結果、接合まま材には4~5mm程度の軟化域が認められた。T6処理材では軟化域が認められず、母材同等の硬さに改善された。微細硬さ試験を行った結果、接合界面の微細粒や粗大粒は近傍の硬さと同等であり、粒徑

は硬さに影響がないことがわかった. 超高強度アルミニウム合金について引張試験を行った結果を Fig. 3 に示す, 継手効率が接合まま材では 72 %から T6 処理材では 89 %に改善された. また溶体化処理なしの時効材でも強度は増加したが, T6 材の方が回復することがわかった. 破断縦断面の観察をした結果を Fig. 4 に示す. 破断は熱処理の有無に関わらず接合界面層の近傍で発生していた. 破断箇所では, 結晶粒の長軸方向が引張方向に対して垂直であることがわかった. 微小引張試験の結果, 引張方向に対して結晶粒が垂直方向に結晶粒が伸びていると強度が低下することがわかった. このことから, 継手の破断要因は界面近傍の垂直方向に伸びる結晶粒であると考えられた.

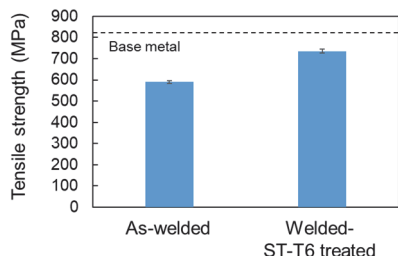


Fig.3 Tensile strength of the friction welded ultra-high strength aluminum alloy

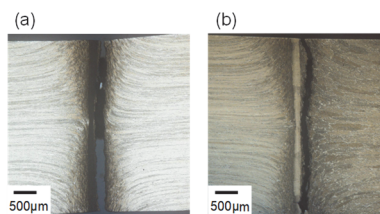


Fig.4 Macrostructure of the fractured interface of the friction welded joints after tensile test. (a) As-welded and (b) T6 heat treatment

(2) 異材接合成果

① 引張特性評価

Fig. 5.1 に摩擦圧力 50 MPa, 回転数 3000 rpm 条件で接合した A7N01/SUS304 継手の引張試験結果を示す. 3 本の引張試験片が全て母材破断に至り, 引張強度は 320 MPa であった. Fig. 5.2 に破断後の画像を示す. いずれの試験片も, 引張試験前の状態で界面から約 2 mm の位置を中心にくびれが生じ, カップアンドコーン型の破断が起こった.

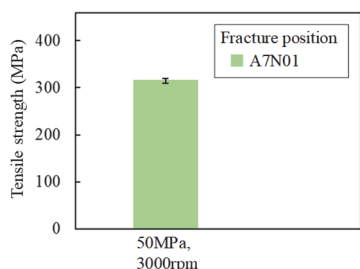


Fig. 5.1 Tensile test results of A7N01/SUS304 joints.



Fig. 5.2 A7N01/SUS304 joint after fracture.

Fig. 6.1 には摩擦圧力, 回転数と各条件での引張強度の関係を示す. ここからわかるように, 摩擦圧力と回転数の両方を小さくすると引張強度が向上し, 50 MPa, 1500 rpm 条件で引張強度が 380 MPa で最大となったがいずれも界面破断であった. ここからさらに摩擦圧力と回転数を低下させた, 40 MPa, 1200 rpm 条件では 3 本の継手のうち 2 本が界面から 5-6 mm の位置で母材破断に至ったが, 引張強度としては条件 S10 の 380 MPa 以下となった. 母材破断後の画像を Fig. 6.2 に示す.

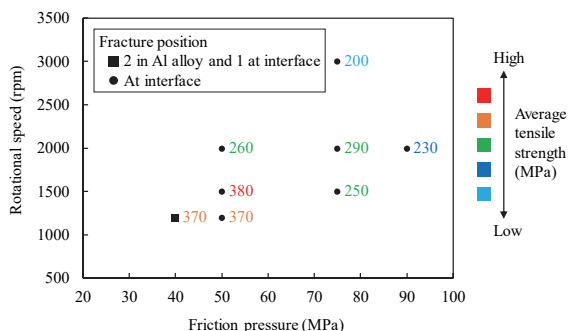


Fig. 6.1 Relationship among friction pressure, rotational speed and average tensile strength.



Fig. 6.2 Ultra high strength Al alloy (ST) /SUS304 joint after fracture.

② 界面の局所応力状態の力学数値解析

Fig. 7に溶体化まま超高強度アルミニウム合金/SUS304 継手 (S10) の解析結果を示す. まず, Fig. 7(a) について述べる. Lv. Aに達すると, 溶体化まま超高強度アルミニウム合金より降伏応力の低い SUS304 が先に塑性変形を開始し, 外負荷応力の増大に対する SUS304 の変位量が溶体化まま超高強度アルミニウム合金よりも大きくなる. その結果, Lv. Bでは SUS304 の方が溶体化まま超高強度アルミニウム合金よりも大きく変形した状態になった. 溶体化まま超高強度アルミニウム合金も降伏点に達する Lv. B以降は, 溶体化まま超高強度アルミニウム合金の方が SUS304 より加工硬化が小さいため, 外負荷応力の増大に対する変位量は溶体化まま超高強度アルミニウム合金の方が SUS304 より大きくなると考えられる. しかし, Lv. A-B間で SUS304 と溶体化まま超高強度アルミニウム合金の間に生じた変形量の差は, Lv. B-C間という短い区間では縮まらず, Lv. Cでも SUS304 の方が溶体化まま超高強度アルミニウム合金よりも大きく変形した状態となった. このように, 負荷の増大に伴って変位量の差が遷移した結果, Fig. 7(b) に示すように, 界面での応力は Lv. Aから局在化を開始して, Lv. B近傍でそのピークに達し, その後局在化が緩和されていったものの, Lv. Cでも局在化が生じていたと考えられる. Fig. 7(c) に示すように, Lv. AとBの間で局所応力のピーク位置は外周部であることがわかる. 継手引張強度と対応させて考察すると, 実験で界面破断に至った 380 MPa は Lv. A と B の間に相当し, 界面の外周部には 380 MPa 以上の局所応力が作用していたと考えられる. こうした界面の応力分布の差は, 材料間の降伏応力および加工硬化能の差に由来するものであり, 母材で破断する良好な継手を得るには, 界面強度の向上に加えて, 材料間の機械的特性の関係に対する考慮も必要であることが明らかとなった.

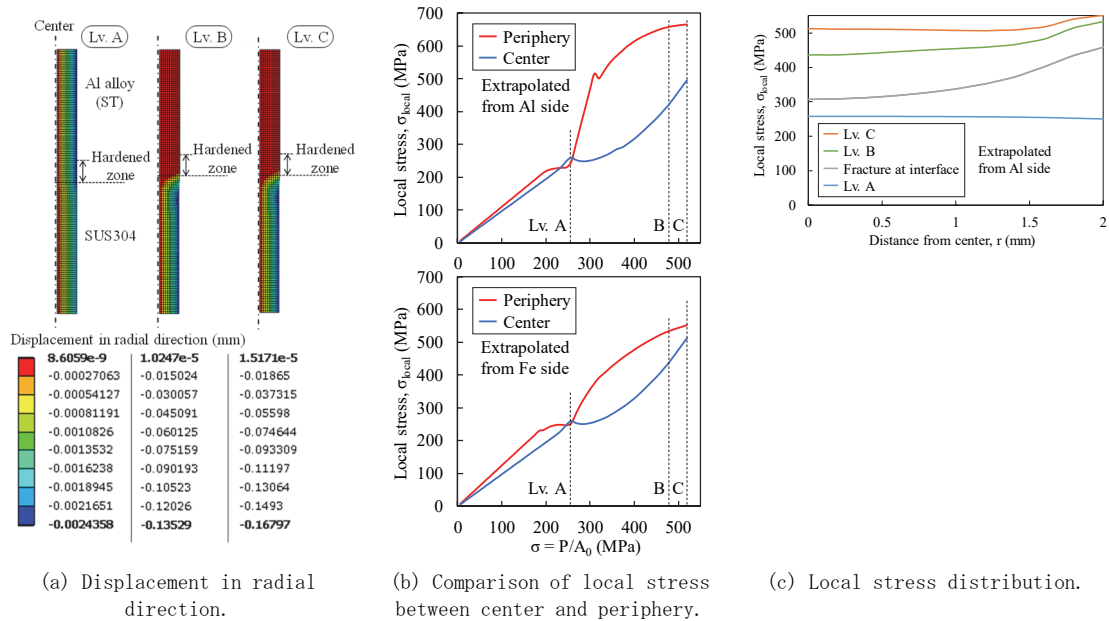


Fig. 7 Simulation results of ultra high strength Al alloy (ST) /SUS304.

③ 組織解析

Fig. 8に 50 MPa, 1500 rpm 条件の断面観察結果を示す. 界面の複数の領域で反応層が観察され, その最大厚さは $1.9 \mu\text{m}$ であった. 温度履歴において, 界面が約 500°C で 13 s ほど保持された条件, 約 420°C で 15 s ほど保持された条件, 約 420°C で 2 s ほど保持された条件の順に反応層の最大厚さが小さくなる結果となった. つまり界面が高い温度で長時間保持される条件ほど反応層成長が進んだといえる.

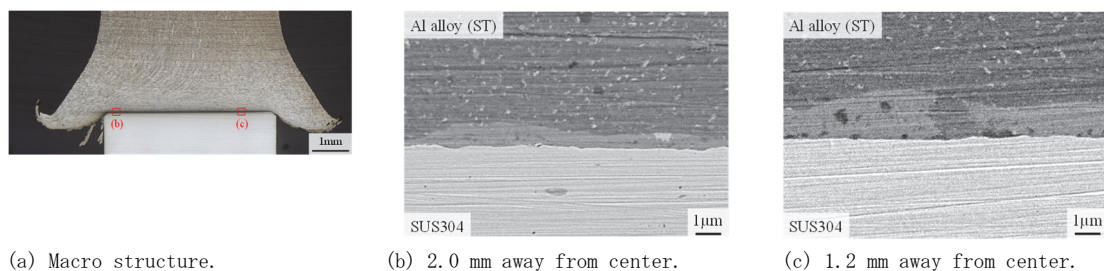


Fig. 8 Cross-sectional images of the interface of ultra high strength Al alloy (ST) /SUS304 joint joined in condition of 50 MPa and 1500 rpm.

400 MPa の強度を示した条件の継手の、界面の中心から端部方向へ 1 mm 離れた領域から Fig. 9 に示す 3 つの針状試料を作製した。右の試料では、界面に厚さ 120 nm ほどの IMC が存在したが、左右の試料は分析時に破壊されたため、分析結果は中央の試料のみで得られた。

界面に対して垂直な円筒領域での 3DAP 分析結果を示す。Fig. 10(a) に分析領域を、Fig. 10(b) に元素の濃度分布を示す。分析開始位置から 24 nm ほどの、Al と Fe のグラフが交差する位置近傍が SUS304 の表面に相当する。アルミニウム合金母材部では Fe 濃度は約 10% であるが、SUS304 表面からアルミニウム合金側へ約 10nm の範囲では Fe 濃度が 10-20% となっており、Al 中に Fe が拡散していることがわかる。Fig. 9 からは確認できなかったものの、この針状試料の界面にも厚さ数 nm の反応層が生成していたと考えられる。また、SUS304 中では Si 濃度は約 1% であるが、界面では 5% 以上となった。加えて、SUS304 中での Cr 濃度は約 20%、Ni 濃度は約 8% であるのに対し、アルミニウム合金中では Cr は約 0%、Ni は 1-2% であることから、Cr より Ni の方が Al 中へ拡散しやすいことがわかった。

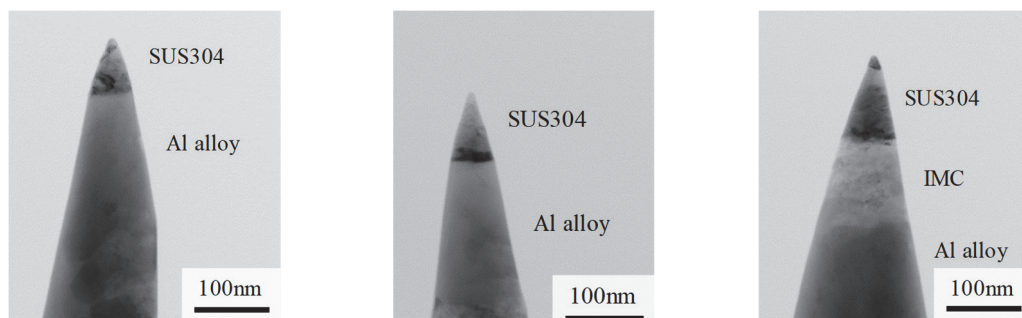
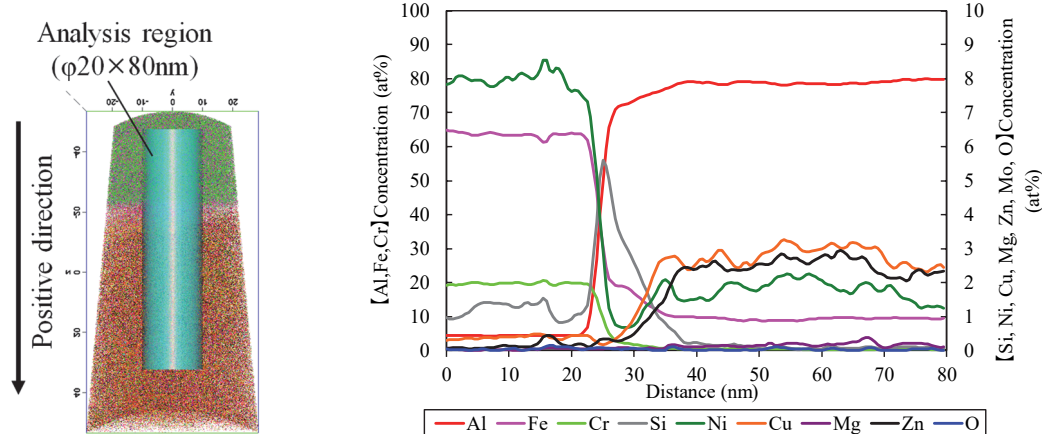


Fig.9 Scanning transmission electron microscope images of the samples.



(a) Analysis region.

(b) Concentration distribution of each elements.

Fig. 10 Analysis results.

④ 研究の概要および今後の展望や国内外での位置づけ

以上の成果より、本研究の概要は以下となる。摩擦プロセスと熱処理を併用した高強度異材界面形成とその強度発現メカニズムを解明し、そのモデルを構築することを目的とした。プロセスを最適化することで同材接合ならびに A7N01 合金/SUS304 異材接合では母材破断を呈する接合が達成された。力学数値解析から超高強度アルミニウム合金/SUS304 継手は、界面外周部において継手に対する公称応力以上の局所応力が作用し界面破断に至ることが明らかとなった。そのため、母材破断を呈する異材接合のモデルの構築には材料間の降伏応力および加工硬化によって生じる界面の応力分布の差を考慮する必要があることが明らかとなった。

また、研究の今後の展望や国内外での位置づけは以下となる。本研究は界面反応制御と母材強化を並立させている。そのため、研究の展開として、例えばチタン合金など他実用合金においても界面反応による金属間化合物を形成する系において適用が可能であり、それらの異材界面強度の理解が深められることができると考えられる。また、理論解析による異材接合の局所変形モデルの構築を行っている。その解析モデルは今後のシミュレーション予測を始め、わが国が推進しているマテリアル DX などの AI、ビッグデータ、インフォマティクスなどのデータ駆動研究にも適用ができるものと考えている。そのため本研究は工業的展開が可能な学術研究として役に立つものと思われる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 小椋 智, 三好 啓友, 山下 正太郎, 才田 一幸 |
| 2. 発表標題 摩擦圧接による超高強度7000系アルミニウム合金の継手特性 |
| 3. 学会等名 溶接学会2020年度春季全国大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小椋 智, 三好 啓友, 山下 正太郎, 才田 一幸 |
| 2. 発表標題 摩擦圧接による超高強度7000系アルミニウム合金の継手特性 |
| 3. 学会等名 溶接学会2020年度春季全国大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|--|--------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 才田 一幸 (Saida Kazuyoshi) (30178470) | 大阪大学・工学研究科・教授 (14401) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| | |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|