

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：14303
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2020～2022
課題番号：20K05153
研究課題名(和文) アルミニウム合金/鋼レーザ突合せTWBの微視組織と強度，成形性，耐食性の関係

研究課題名(英文) Relationship during Micro Texture, Strength and Formability of Aluminum Alloy/Steel Laser Butt Tailored Welded Blanks

研究代表者
飯塚 高志 (Takashi, Iizuka)
京都工芸繊維大学・機械工学系・教授

研究者番号：60335312
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：軽量化材料として期待されるアルミニウム合金/鋼異種金属テーラードブランクをレーザ接合によって作製し，接合強度の向上，成形性の評価および電界腐食性の解明に取り組んだ。では，接合条件とオフセット位置に関する一次強度マップ，複数の接合条件に関する二次接合マップの作成を行った。また，接合条件-接合強度-組織の相関マップの構築を行った。については，張出しおよび穴広げ試験を行い，接合強度と成形性の関係などを明らかにした。については，レーザ接合材に加えて摩擦圧接材および摩擦攪拌材を作製し，複合サイクル試験を行った。結果から耐腐食性を評価でき，接合法による強度低下挙動の違いなどを明らかにできた。

研究成果の学術的意義や社会的意義
異種金属テーラードブランクは将来的な軽量化材料として期待されているが，アルミニウム合金/鋼の系についてレーザ接合を用いた研究はほとんど行われていない。本研究で得られた成果は強度向上，成形性および耐電界腐食性に関するものであるが，まず接合法自体が新しいため得られた成果は全て学術的に試金石的なものとなると考えられる。特に成形性や耐腐食性に関しては，他の接合法も含めて新しいものであり，今後の二酸化炭素排出削減のための異種金属接合材の開発と利用の促進のために重要であり，社会的な意義も大きいと考えている。現状では課題が浮き彫りになった状況であるが，課題克服のヒントも得ることができたことは重要である。

研究成果の概要(英文)：Aluminum alloy/steel tailor welded blanks(TWBs) is expected as future light-weighting materials. In this study, aluminum alloy/steel TWBs were fabricated using laser butt welding in order (1) to improve joint strength, (2) to evaluate sheet formability of them, and (3) to clarify resistance to galvanic corrosion. As for the aim (1), strength maps related to welding conditions and joint strength were created. In addition, correlation maps during welding conditions, joint strength and texture were also created. As for the aim (2), punch stretching tests and hole expansion test were conducted to TWBs, and relationships between joint strength and sheet formability were clarified. As for the aim (3), the combined cycle corrosion tests were conducted to TWBs. From the results, resistance to galvanic corrosion for each TWBs could be evaluated and some differences in degradation behavior of joint strength by welding methods were clarified.

研究分野：機械工学

キーワード：塑性加工 板材成形 テーラードブランク 異種金属接合 レーザ接合 成形性 耐電界腐食性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

燃費向上や二酸化炭素排出量削減のために自動車の軽量化が求められており、今後の電気自動車や燃料電池車への展開を考えても、これは益々重要な課題であると言える。軽量化の方法は種々考えられるが、板材のマルチマテリアル利用に関しては、テーラードブランク (Tailored Welded Blank: TWB) 成形が効果的である。ここで、TWB とは、設計に沿って強度や板厚の異なる素材を適材適所に配置し、溶接した成形用板材で、この溶接板をプレス成形することによって、「加工工程の削減」、「形状・寸法精度の向上」、「コスト削減」等の利点が得られる。TWB については、主に鋼板で実用化されており、軽金属板と鋼板の異種金属 TWB は実用化されていない。

軽量化のための Al/Fe 異種金属 TWB の利用が進まない理由の一つには費用対効果の問題があるが、技術的には、難溶接性、難成形性および電界腐食の三つの課題が解決できていないためである。「難溶接性」に関しては、Fe と Al の二相合金系で脆弱な金属間化合物を生成しやすいことに主な原因がある。これを解決する方法としては、摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding: FSW) のような固相接合法を用いることが挙げられる。一方、本研究室では、局部的に入熱可能であるレーザを用いてアルミニウム合金と鋼板の突合せ接合法を開発し、引張応力で 150MPa 超の接合強度を有する接合を可能にしている。「難成形性」に関しては、特にレーザ接合板に関しては、成形性自体に関する情報がほとんどないため、接合強度や微視組織と成形性の関係の調査をまず行う必要がある。「電界腐食」はアルミニウム合金 / 鋼の接合板の利用を阻む最大の障壁と考えられているが、複合サイクル試験のような実用的な耐食性の評価はほとんど報告されていない。軽量化材料の新しい可能性を切り開くためにも、異種金属 TWB のこれらの課題の克服が必要であり、本研究ではそのための基礎となる実験を実行した。

2. 研究の目的

本研究課題では、燃費向上や二酸化炭素排出量削減のための自動車の軽量化の方法として有効であるアルミニウム合金 / 鋼の異種金属 TWB を開発するために、加圧突合せレーザ接合を行い、異種金属接合板材における課題である強度、成形性、耐食性と接合界面近傍の微視組織の関係について調査を行う。実際には主として以下の三つの目的を持って実施する。

レーザを用いたアルミニウム合金 / 鋼突合せ接合における接合条件と強度および微細組織の関係の解明

レーザを用いたアルミニウム合金 / 鋼突合せ接合板の成形性と接合部の変形能の評価

レーザを用いたアルミニウム合金 / 鋼突合せ接合板の金属間化合物層と電界腐食性の関係の解明

3. 研究の方法

(1) 接合条件と強度および微細組織の関係の解明

加圧突合せレーザ接合法を用いて、アルミニウム合金板と鋼板のレーザ接合を行う。この方法では図 1 に示すように、アルミニウム合金板と鋼板を突合せ、加圧した状態で炭酸ガスレーザを接触界面から鋼側にオフセットした位置に照射して、熱伝達を利用して接合する方法である。これによって、アルミニウム合金の溶融を極力抑えることができる。

本研究では、これまでにほとんど調査されていない 6061P-T6 材を対象にして、オフセット位置と接合条件に関する一次接合強度マップを作成することが第一の目的となる。主な接合条件を表 1 に示す。オフセット位置は表の範囲内において 0.02mm 間隔で変化させる。今回は、レーザ出力、加圧力および焦点位置が相互に接合強度に及ぼす影響について主に検討した。表の括弧外の値は標準として設定した値で、括弧内の条件の範囲で変化させる。なお、焦点位置に関しては、0mm ~ 2.1mm まで変化させているが、標準の 1.5mm における想定スポット面積の 0, 0.25, 0.5, 1, 1.5 および 2 倍となるような焦点位置を対象とした。最終的に、一次マップから得られた最大強度に関して、各条件間の二次マップを作成し、最適条件を整理する。

さらに図 2 に示すように、1050P-O 材を対象に接合強度と接合界面構造の関係を SEM 観察および EDS 分析によって調査した。金属間化合物として

表1 主な接合条件

オフセット位置 / mm	0~0.60
レーザ出力 / W	300~700
焦点位置 / mm	1.5 (0~2.1)
加圧力 / MPa	31.3 (21~374)
焦点位置 / mm	1.5 (0~2.1)

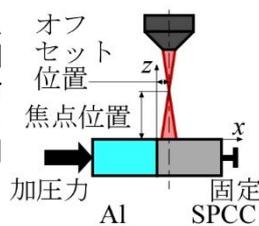
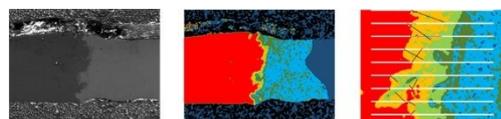


図1 接合方法



(a) SEM画像 (b) EDS分析 (c) 厚さ評価

図2 金属間化合物層厚さの評価方法

表2 金属間化合物の分類

Al濃度/%	0~10	10~20	20~40
化合物	Fe ■	Fe+Al 固溶 ■	Fe ₃ Al ■
Al濃度/%	40~70	70~90	90~100
化合物	FeAl ■	Fe ₂ Al ₅ + FeAl ₃ ■	Al ■

代表的なものに対応する AI 濃度を表 2 に示す。分析結果から色分けして分布図を作成し、厚さの評価を行った。これらの結果から、最終的に接合条件、強度および組織の相関図を作成した。

(2) 接合板の成形性と接合部の変形能の評価

接合板の成形性に関しては、1050P-O/SPCC 接合材のエリクセン試験、平頭パンチ張出し試験および穴広げ試験を行って評価を行った。特に接合条件を変えて異なる接合強度を持った接合板を作製し、調査した結果と成形性も対応付けた。また、接合板の破断形態を観察し、変形能について考察した。

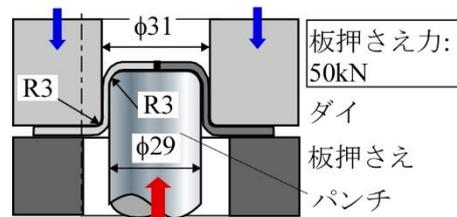


表3 複合サイクル試験サイクル試験条件

1 サイ クル	塩水噴射試験(2時間,35±1°C,5%NaCl)
	乾燥試験(4時間,60±1°C,20~30%rh)
	湿潤試験(2時間,50±1°C,95%rh以上)

(3) 金属間化合物層と電界腐食性の関係の解明

接合材の複合サイクル試験を実施し、サイクル数に伴う接合強度の変化および界面近傍の元素分布の変化を調査し、腐食形態を明らかにした。複合サイクル試験は表 3 に示す条件で実施した。この条件では、3 サイクルがおよそ 1 年に相当する促進型の腐食試験となる。対象は 6061P-T6/SPCC とした。レーザー接合材には、界面近傍に凹部が形成されるため、凹部を取り除いた試験片についても試験を実施した。摩擦圧接材および摩擦攪拌接合材についても同様の試験を実施し、結果を比較した。摩擦攪拌接合材については、接合後に再人工時効処理を行ったものも同様に試験した。レーザー接合材については、1050P-O/SPCC 接合材の試験も一部実施した。

4. 研究成果

(1) 接合条件と強度および微細組織の関係の解明

突合せ圧力およびレーザースポット面積の影響

これまでに調査されていない A6061P-T6/SPCC のレーザー接合に関して、突合せ圧力およびレーザースポット面積の影響について調査を行った。突合せ圧力に関しては、降伏応力以下の低圧域 (21MPa ~ 166MPa) と塑性変形が生じて断面積が増加する高圧域 (249MPa ~ 374MPa) について、接合強度への影響を調べている。図 4(a)および(b)にそれぞれ低圧域および高圧域の一次接合強度マップ(オフセット位置による変化)を示している。

図より、低圧域ではおよそ 62MPa までに接合強度が 120MPa を超える適切な接合条件が存在することが確認できる。突合せ圧力の増加に伴い適切なオフセット位置は界面から離れる方向に移動すると共に最大接合強度の低下の傾向が見て取れる。原因としては、突合せ圧力の増加に伴い熱拡散が容易になるため熱過多になることが考えられる。

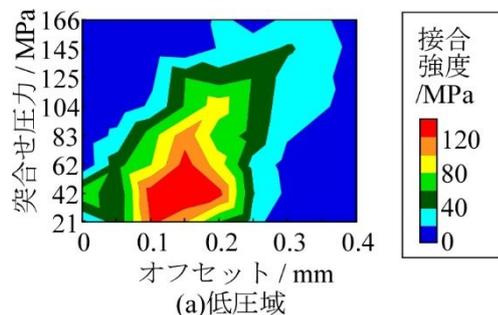
一方、高圧域では適切な接合が困難であることがわかる。接合界面の面積増加は見かけの接合強度(荷重)の上昇につながると考えられ、面積増加による熱不足もしくは表面性状の変化による入熱量の低下が生じているのではないかと考えられる。

図 5 にはレーザースポット面積比とレーザー出力を変化させて得られた一次接合強度マップからそれぞれの条件における最大接合強度を抜き出してプロットした二次接合強度マップである。接合速度を 600mm/min および 800mm/min として比較している。

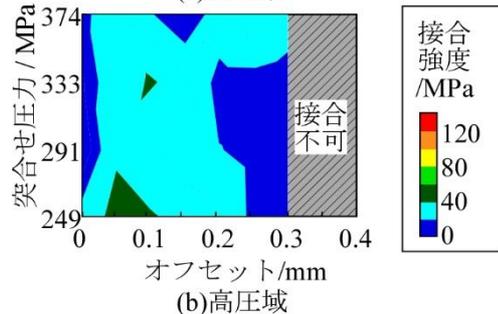
図より、レーザースポット面積の影響はそれほど大きくないことがわかる。ただし、出力が増加すると適切なレーザースポット面積もしくはレーザー焦点位置が現れることも同時に確認できる。この適切なレーザースポット面積は速度の増加とともに変化することがわかる。速度の増加は単位長さ当たりの入熱量を減少させるので、適切な接合強度が得られるオフセット位置は界面側に移動していると考えられることも併せてメカニズムを検討したい。

接合強度と界面構造の関係

A1050P-O/SPCC の系を対象に接合強度と接合界

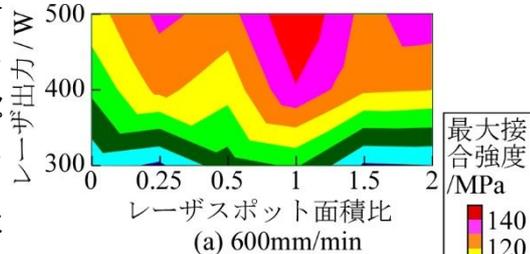


(a)低圧域

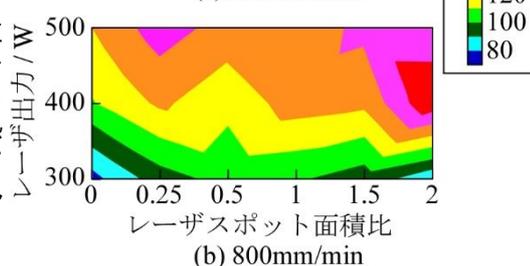


(b)高圧域

図4 突合せ圧力と接合強度の関係



(a) 600mm/min



(b) 800mm/min

図5 レーザ出力とレーザースポット面積の相関

面構造の関係を調査した 接合強度として 30MPa , 50MPa , 70MPa を持つことを狙ってそれぞれの相当材を作製して EDS 分析から界面近傍の金属間化合物層の厚さを評価した .30MPa 級については,界面側と鋼側で得られるので,それぞれ(界面)および(Fe)として区別している .

EDS 分析と測定から得られた界面近傍の金属間化合物層の厚さ分布を図 6 に示す .図では縦軸に表面からの距離をとり,横軸に層の厚さを取っている .横軸は Al リッチと Fe リッチな金属間化合物で区別し, Al リッチな化合物の厚さは負側に, Fe リッチな化合物の厚さは正側に積算して表示している .実際の分布も界面を境に, Fe 側では徐々に Al 濃度が減少するため,およその濃度分布を表している .

図 6(a)および(b)より,適切なレーザー照射位置より界面側の照射では,鋼側の広い範囲で Fe リッチな金属間化合物が生成していることが確認できる .強度の増加に伴い, FeAl から Fe₃Al に変化していく様子が伺えるが,金属間化合物層の厚さに大きな変化はない . Al 側には局部的に厚い Fe₂Al₅ 層が形成されており,これが低強度の原因であると考えられる .図 6(c)のように,接合強度が最大となる辺りでは,鋼側の金属間化合物層は消え, Fe に Al が固溶した状態となっていると考えられる .鋼側でも Al 側でも金属間化合物層は薄く均一に形成されているように見える .図 6(d)では,照射が界面から十分離れ,熱不足になると鋼側への Al の拡散がなくなり,表面以外では金属間化合物層が形成されていない様子わかる .同様な強度であっても適切な照射位置より界面側と Fe 側では接合界面の構造が大きく異なることが確認できた .

図 7 にはレーザー出力を変えて得られた強度が高い接合材の界面の金属間化合物層の様子を示している .出力の減少によって Al の拡散領域が減ることが確認できるが,界面近傍の金属間化合物層については大きな差はなく薄く均一である様子わかる .このことから,接合強度と界面の組織については出力の違いの影響はほとんどなく,薄く均一な化合物層を得ることが重要であると言える .

図 8 にレーザー出力とオフセット位置の接合強度マップを例にして,接合条件-強度-組織の相関マップのイメージ図を示す .まだ,大雑把な図となっているが,相関を見る上で効果的である .

(2) 接合板の成形性と接合部の変形能の評価

加圧突合せレーザー接合によって, 1050P-O/SPCC 接合材のエリクセン試験,平頭パンチ張出し試験および穴広げ試験を実施した .実験では,接合強度がおよそ 40MPa, 60MPa, 65MPa および 55MPa となる接合板を作製した .ただし, 60MPa 級と 55MPa 級については適切なレーザー照射位置から界面側および Fe 側のサンプルとして同程度の強度を有する条件として抽出したものである .

試験後の接合材の破断の様子を図 9 に示す .エリクセン試験では全ての条件において,パンチ中央部で接合界面に沿った破断が生じた .平頭パンチ張出しではパンチ肩部で破断が生じ,低強度のものではそれが接合界面に沿った割れに進展している .穴広

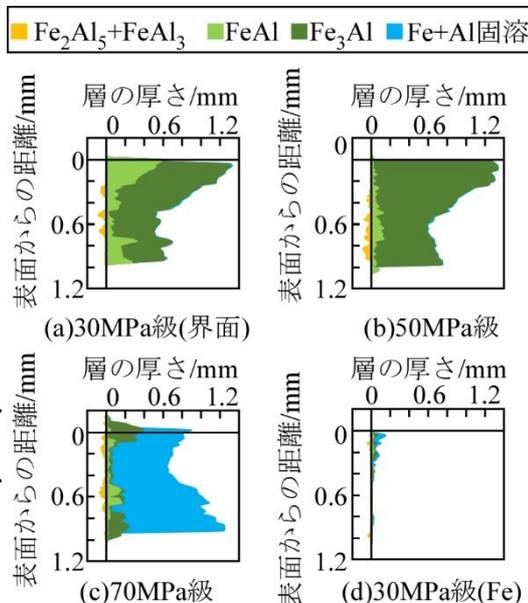


図6 接合材の強度と金属間化合物層の状態

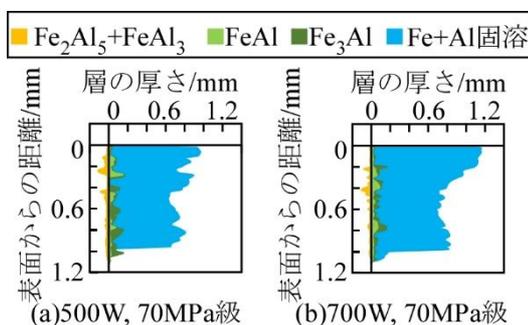


図7 レーザ出力と強度, 組織の相関

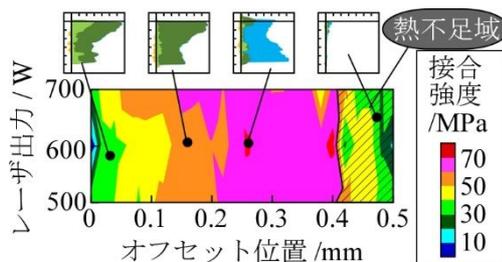


図8 接合条件-強度-組織の相関イメージ

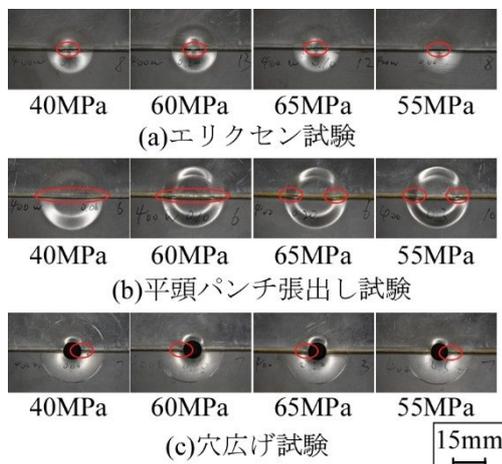
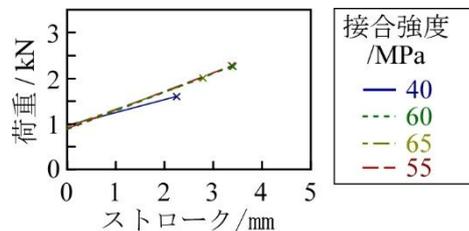


図9 成形性試験における破断の様子

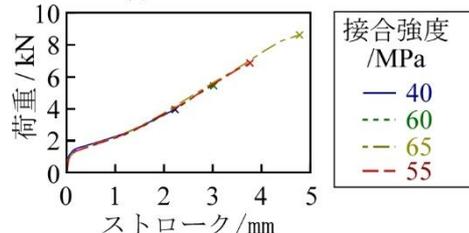
げ試験では接合界面で板厚方向に貫通する割れが生じた。なお、目視においては強度による破断形態の違いは確認できなかった。

図10にはエリクセン試験と平頭パンチ張出し試験における荷重 - ストローク線図を示す。図には、それぞれの接合材の強度級に対する結果と破断位置を×印で示している。基本的に強度級に依らず同じ曲線を描くが、接合強度が低いほど低い成形荷重で破断している様子が確認できる。

図11に接合強度と成形性の関係を示す。それぞれの試験について、エリクセン値、破断時の張出し高さ、穴広げ率を成形性の指標としている。図より、接合強度の上昇に伴う成形性の向上が確認できる。破断原因については、破断位置の組織などを確認する必要があるが、基本的に強度が低い接合材の変形能は低く、強度不足を主因とする界面に平行な破断が生じると考えられる。



(a) エリクセン試験



(b) 平頭パンチ張出し試験

図10 パンチストロークと荷重の関係

(3) 金属間化合物層と電界腐食性の関係の解明

レーザ接合材および参考として摩擦圧接材および摩擦攪拌接合材に対して複合サイクル試験を行い、サイクル数の増加に伴う接合強度の変化を調査した。結果を図12に示す。

図より切削の有無に関わらずほぼ同様な線形の強度低下が確認できる。実質的に40サイクル程度で強度が完全に失われることが確認できるが、これは10年程度に相当するものである。ただし、切削材は厚さが半分となっていることから、より長い寿命であると考えられる。その他の固相接合材では初期強度が高いものの、最終的に同様な寿命である。レーザ接合材では界面に金属間化合物が生成するため、継続的に強度減少が生じるが、急激な減少でない点をどう捉えるかは検討の余地がある。A1050材では初期強度が低いものの、試験開始後の強度低下が小さい点が評価できる。

図11にA6061/SPCCレーザ接合材の切削処理をした試料のサイクル数に伴う界面組織の変化を示している。結果から界面に存在するAlリッチな金属間化合物よりもAl側で腐食が進行する様子が伺える。基本的には界面に沿って直線的に腐食されるのではなく、三角形に腐食が進行している様子がわかる。したがって、単純な板厚の増加は接合界面の実質強度(荷重)を保持する点で意味があると考えられる。また、表面のAl被覆が腐食を遅らせることも確認できている。

(4) 国内外の位置づけとインパクト、今後の展望

アルミニウム合金/鋼の突合せレーザ接合に関する研究はほとんどなく、成形性や耐腐食性に関するものも当然ない。摩擦攪拌等の固相接合材についても複合サイクル試験の結果の報告はなく、本研究成果は学術的な試金石となると言える。

接合条件と接合強度、組織の関係は、本接合法が拡散接合的なものであることを明らかにしたが、接合界面近傍の状態によって成形性試験の破断メカニズムや腐食のメカニズムがどのように変化するかは今後明らかにする必要がある。接合速度やデュエティー比など接合条件の最適化は今後も進める必要がある。

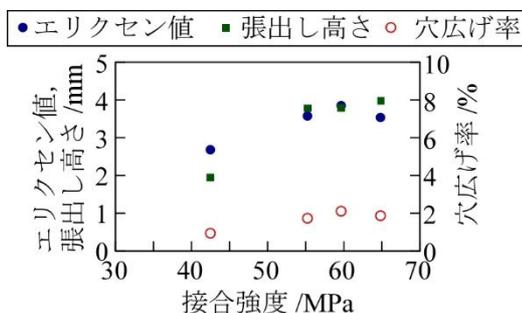


図11 接合強度と成形性の関係

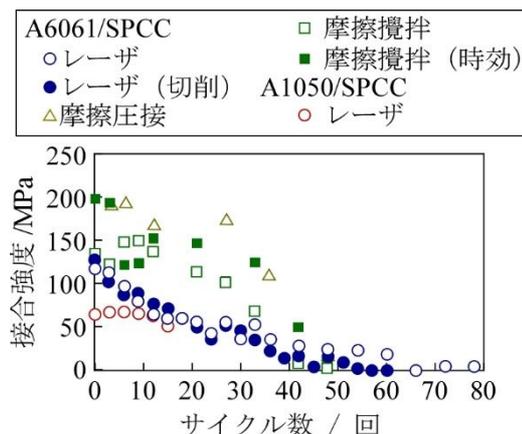


図12 複合サイクル試験による接合強度変化

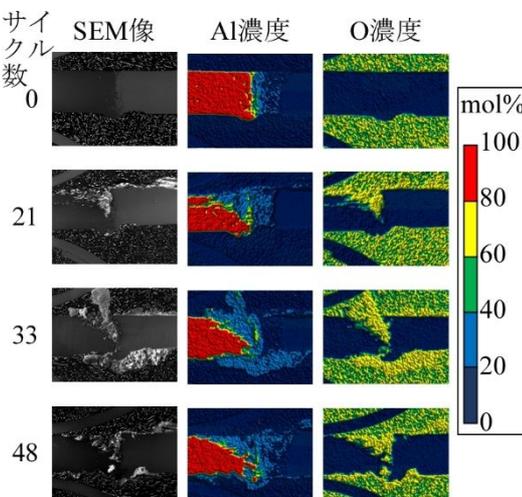


図13 複合サイクル試験による界面状態変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Jin Jianchen, Iizuka Takashi	4. 巻 web
2. 論文標題 Combined-cycle corrosion testing of steel/6000 series aluminum alloys joined by friction welding	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ESAFORM 2021	6. 最初と最後の頁 web
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.25518/esaform21.3665	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Jianchen Jin
2. 発表標題 Combined-Cycle Corrosion Testing of Steel/6000 Series Aluminum Alloys Joined by Friction Welding
3. 学会等名 24th International Conference on Material Forming (ESAFORM 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金建晨, 飯塚高志
2. 発表標題 アルミニウム/鋼突合わせレーザー接合材の接合強度と金属間化合物層の状態
3. 学会等名 2022年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金建晨, Doniddorj Bayarjargal, 阪本大夢, 飯塚 高志
2. 発表標題 アルミニウム/鋼突合せレーザー接合材の強度, 組織とレーザー出力の関係
3. 学会等名 第73回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2022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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------