

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：53203

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05704

研究課題名(和文) 摩擦攪拌による異種金属接合体の疲労破壊過程の解明と強度向上に関する基礎的検討

研究課題名(英文) Basic investigation for improvement of fatigue properties and fracture mechanisms of the dissimilar joints by friction stir welding

研究代表者

岡根 正樹 (OKANE, MASAKI)

富山高等専門学校・機械システム工学科・教授

研究者番号：90262500

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、摩擦攪拌接合(FSW)により、複数の組合せの鉄鋼材料とアルミニウム合金からなる接合体を創製し、材料の組合せに応じた最適な接合条件を求めた。次に、得られた接合体を用いて疲労試験を行い、それらの基本的な疲労強度特性や疲労破壊のメカニズムについて検討した。また、接合体に後熱処理(時効処理)を施し、硬度が回復した接合体の疲労強度特性や、未熱処理材との疲労破壊形態の差違についても、検討を加えた。

研究成果の概要(英文)：In this study, several kinds of the dissimilar joints of steel and Al alloy by means of friction stir welding (FSW) were prepared for investigating the best welding condition for each combination of the specimen. The fatigue tests were carried out for clarifying basic fatigue strength properties and for investigating the fatigue fracture mechanisms of the joints. Further, heat treatment (aging) was applied for some joint specimens for recovering of hardness in the welding region, and effect of heat treatment (aging) on fatigue strength properties of the dissimilar joints was also investigated.

研究分野：材料強度学

キーワード：摩擦攪拌 摩擦攪拌接合 異種金属接合体 疲労強度 疲労破壊

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化防止、地球環境保全等、環境問題への世界的な取り組みの中で、各種機械構造物の軽量化への必要性が、以前にも増して高まっている。機械構造物の軽量化には、アルミニウム (Al) に代表される軽金属の多用が期待されているが、強度保証の観点から、すべての部品を軽金属に置き換えることは困難である。そこで、強度と機能性をバランス良く組み合わせるため、複数の材料を適材適所で使用するマルチマテリアル構造が注目されている。マルチマテリアル構造体の実現には、鉄鋼材料とAl合金の接合技術が必要不可欠であるが、鉄鋼材料とAl合金の溶接では脆弱な金属間化合物が生成し、実用強度を得ることが困難である。

摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding, FSW)、摩擦攪拌点接合 (Friction Stir Spot Welding, FSSW) は、高速回転する接合ツールを用いて、被接合材どうしを固体のまま練り混ぜて接合する固相接合の一種であり、接合時の温度が融点以下であるため、化合物層の生成を大幅に抑制でき、異種金属材料の接合への適用が期待されている。

これらの異種金属接合体を、機械構造物に適用するためには、あらかじめ、強度特性、とりわけ疲労強度特性を明らかにすることが必要不可欠である。しかしながら、FSWによる鉄鋼材料とAl合金の異種金属接合体については、接合方法そのものが研究段階にある上、接合条件が材料の組合せや環境に依存して繊細に変化することから、強度特性におよぼす接合条件の影響など、不明な点が多く、疲労強度特性に関する検討は、国内外を問わず、これまでのところ皆無に等しいのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、摩擦攪拌接合により、複数の組合せの鉄鋼材料とAl合金からなる、異種金属接合体を創製し、それらの基本的な疲労強度特性を明らかにするとともに、微視的な疲労破壊機構を明らかにし、最適な接合条件の検討への寄与や、マルチマテリアル構造の推進に対して貢献することを目的とする。

3. 研究の方法

まずは、摩擦攪拌作用による、Al-Mg-Si系合金A6063 (展伸材) と、機械構造用炭素鋼S45Cの異種金属接合体の接合加工実験を行う。その際、これまでの経験や実績を元に、考えられるいくつかの接合条件で試行し、最適な条件を模索する。得られた接合体における接合領域の特性を把握するため、硬さ測定や組織観察を行う。その後、接合体から強度試験用の試験片を機械加工し、引張試験や疲労試験を実施し、基本的な疲労強度特性を把握し、試験後の破面観察等を通じ、疲労破壊過程の解明を行う。その際、同接合体の疲労強度特性におよぼす後熱処理の影響を把握するため、適切な時効処理を施した接合試験片を用いた疲労試験を実施し、基本的な疲労特性を

把握するとともに、疲労破壊過程の検討を行う。

次に、これまで用いた展伸材と大きく特性が異なるダイカスト用Al-Si-Cu系合金ADC12と、S45Cからなる異種金属接合体を、FSWにより作製し、基本的な疲労特性等の評価を行う。

4. 研究成果

(1) A6063/S45Cの基本的な疲労強度特性と時効処理の影響

本研究におけるFSWでは、接合ツールに、超硬合金製のM5左ねじプローブを用い、プローブの側面を0.05mmだけS45C側に食い込ませ (オフセット量)、回転速度2000rpm、接合速度500mm/min、ツールの送り方向と回転方向が一致する側 (Advancing Side: AS) がS45Cとなるようにして、接合加工を行った。得られた接合体から、図1に示す形状寸法の疲労試験片を機械加工した。また、一部の接合体試験片には、A6063に対するT6処理の時効工程に準じ、175°Cの大気炉内で8時間保持後に空冷の熱処理を施した。

本研究におけるFSWでは、接合加工時にプローブがS45Cを僅かに削るため、S45Cの小片がA6063内の攪拌部に分散する特徴を持つ。ただし、これまでの検討結果から、これらの小片は、

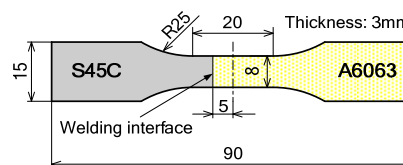
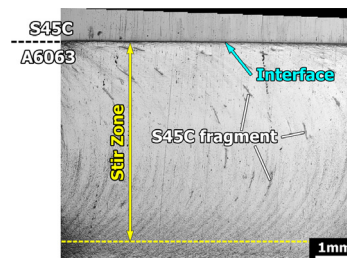
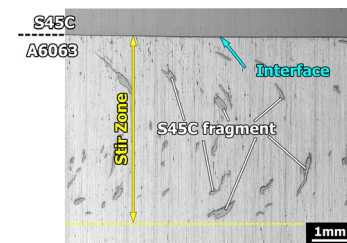


図1 疲労試験片の形状寸法



(a) SP1



(b) SP2

図2 接合部 (攪拌部) の観察例

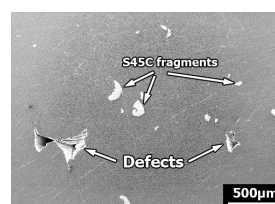


図3 SP2で観察された欠陥 (空隙)

強度特性にほとんど影響をおよぼさないことが明らかとなっている。図2に、試験片表面、攪拌部のSEMによる観察結果を示す。同図(a)と(b)は、同じ条件で接合した別々の接合体から機械加工したものであり、それぞれ便宜上SP1, SP2としている。図から、SP1と比べSP2におけるS45C小片の量が、明らかに多くなっていることがわかる。また、詳細な観察の結果、SP2では、図3のような欠陥(空隙)が観察されたが、SP1の場合は、このような欠陥は観察されなかった。

図4に、SP1およびSP2における、未熱処理材、

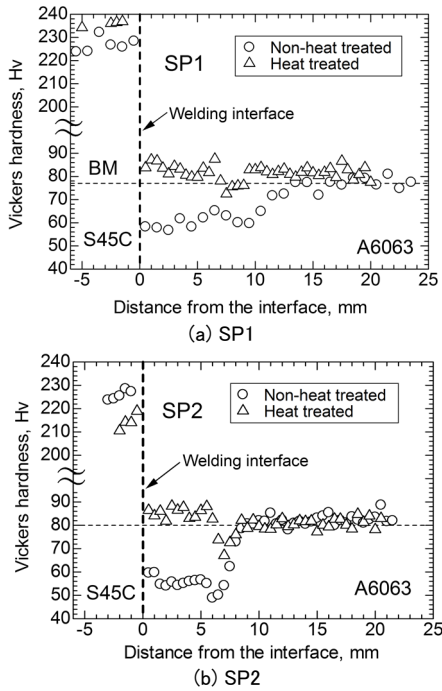


図4 A6063/S45C接合体の接合領域硬さ測定結果

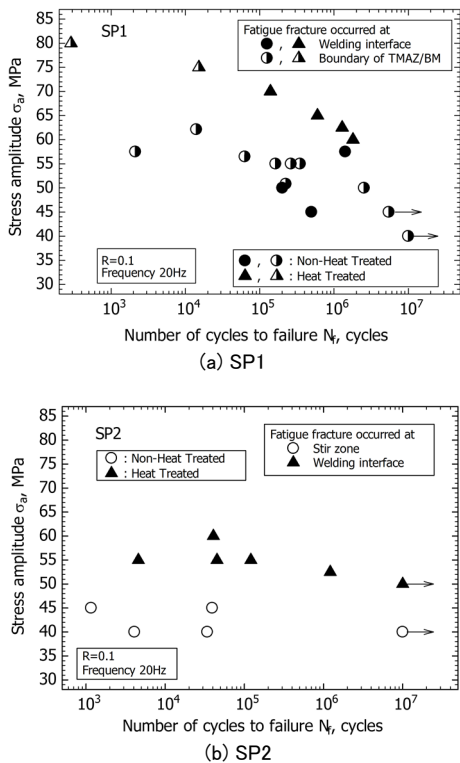


図5 A6063/S45C接合体の疲労寿命線図

熱処理材の硬さ分布測定結果を示す。図から、未熱処理材の場合、SP1, SP2いずれも、接合部近傍のA6063部が軟化していることがわかる。また、軟化領域の大きさはSP2の場合がやや小さく、かつ、軟化部から母材部への立ち上がり、急激になっている。一方、熱処理材の場合は、SP1, SP2いずれも、軟化領域の硬さが、母材と同程度まで回復しているが、未処理材における軟化部と母材部の境界近傍に、やや軟化している領域が残っていることがわかる。

図5に、疲労試験結果から得られた疲労寿命線図を示す。疲労試験には、電気油圧サーボ疲労試験機を用い、大気中室温の実験室雰囲気、正弦波荷重制御、試験周波数20Hz、応力比R=0.1の条件で実施した。同図(a)はSP1, (b)はSP2の場合である。(a)SP1の場合、未熱処理材における疲労破壊は、ほとんどの場合A6063内の軟化部と母材部の境界近傍で発生し、一部、接合

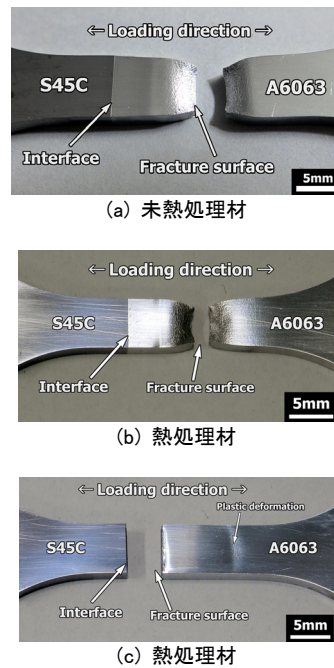


図6 SP1材における疲労破壊形態

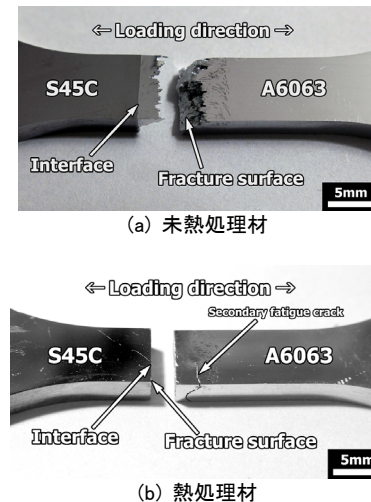


図7 SP2材における疲労破壊形態

界面で破断する場合は発生した。一方、熱処理材の場合は、高応力レベルでは、熱処理前の軟化部と母材部の境界付近に存在している、やや軟化している領域で破断し、中～低応力レベルにおいては、接合界面での破断となった。一方、(b)SP2の場合、未熱処理材は、すべて図3に示した攪拌部内の欠陥を起点とした破断であり、熱処理材は、すべて接合界面での破断となった。SP1、SP2それぞれの疲労強度は、熱処理により、いずれも約25%程度ずつ向上していることがわかるが、全般的に、SP2がSP1に比べて低強度・低寿命となっている。

図6に、SP1における、破断後の試験片の観察例を示す。同図(a)は未熱処理材で軟化領域端部破断の場合、(b)は熱処理材で、熱処理前の軟化部と母材部の境界付近に存在している軟化領域での破断、(c)は界面破断した熱処理材である。(a)では、破面付近が大きく塑性変形していることがわかる。また、(b)も、ほぼ(a)と同様の破壊形態となっている。(c)では、(b)の破断箇所とほぼ同一の箇所において、顕著な塑性変形が認められる。これは、界面での破断と境界部での破断が同時進行していた結果によるものと思われる。

図7に、SP2における、破断後の試験片の観察例を示す。(a)は、未熱処理材における攪拌部内での破断であり、図3に示した欠陥を起点とした破断である。一方、(b)は、熱処理材における界面破断であり、未熱処理材における破断箇所には、二次き裂が確認できる。この場合も、界面での破断と、欠陥からの破断が同時進行した結果と推察される。

本研究で用いた6000系に代表される析出強化型Al合金どうしのFSWの場合、攪拌部周辺で過時効が起こって軟化し、また、粗大析出物が存在する領域(軟化部端部付近)が、最も低硬度となることが知られており、さらに時効処理により、軟化部の硬度が回復することが報告されている。本研究における、A6063内の硬度分布も、ほぼ、同様の結果となっており、析出強化型のAl合金を用いた異種金属接合体においても、適度な熱処理により、硬度が回復することが明らかとなった。図5に示したように、攪拌部に欠陥のないSP1の場合、攪拌部に欠陥が存在するSP2いずれの場合

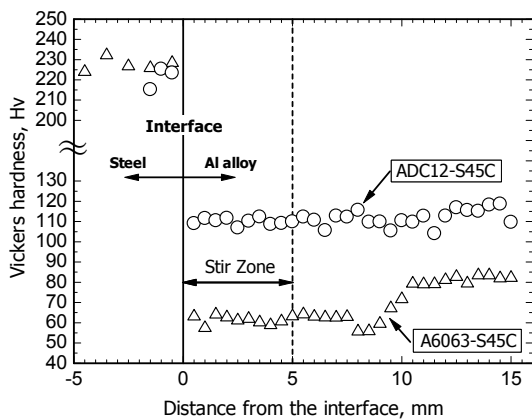


図8 ADC12/S45Cにおける接合部の硬さ分布

も、熱処理により、疲労強度・寿命ともに向上しており、これは、未処理材において破断が発生する領域の硬さが、熱処理により回復した結果によると思われる。すなわち、最弱リンク的な考えに従えば、熱処理材においては、未熱処理材における破断箇所の強度が、熱処理により向上した結果、相対的に弱くなった接合界面で破断が起こったものと推察される。また、SP1熱処理材の高応力レベルにおいて、熱処理前の軟化部と母材部の境界付近に存在している軟化領域で破断する結果となったが、これも、応力レベルによって、界面の強度と軟化領域での強度の相対関係に依存した結果と推察される。これらに加え、SP1とSP2とで、接合界面の強度に違いがあるか否か、熱処理により、純粋な界面強度が変化するかについても、未だ不明な点が多く、今後の検討課題の一つと考えられる。

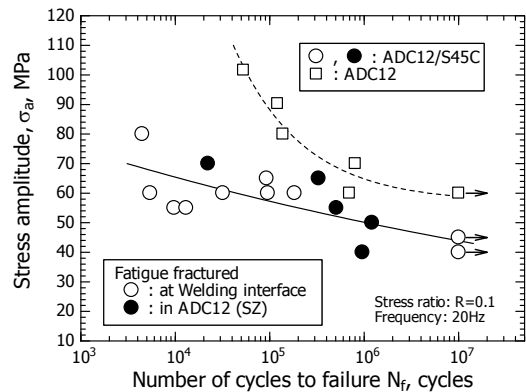
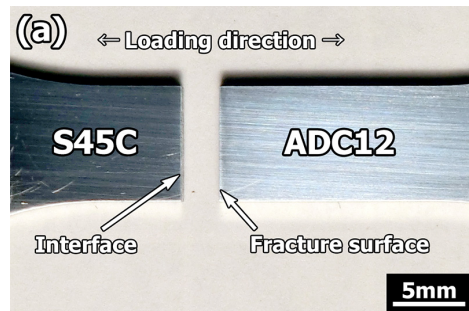
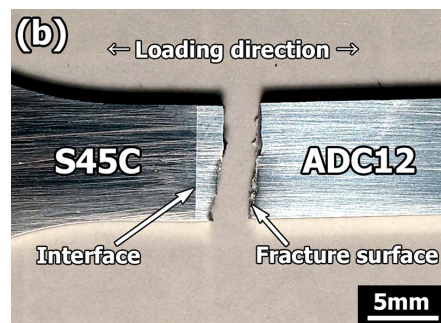


図9 ADC12/S45C 接合材の疲労寿命線図

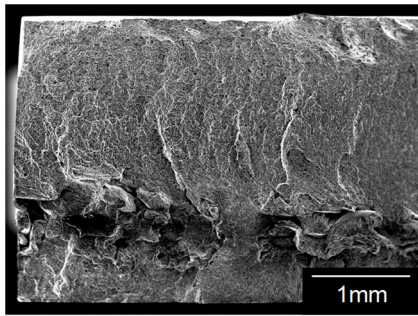


(a) 接合界面での破断

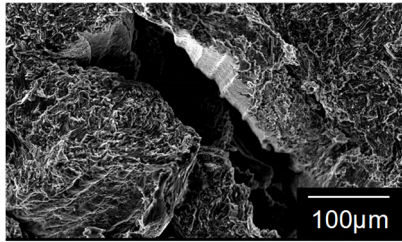


(b) 攪拌部内での破断

図10 ADC12/S45C 接合体の疲労破壊形態

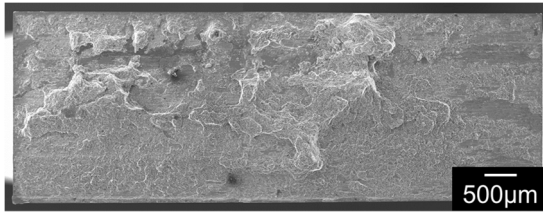


(a) 巨視的観察例

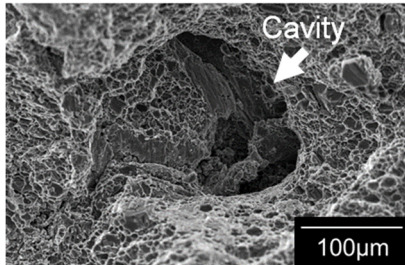


(b) 接合欠陥

図11 ADC12/S45Cの破面観察例(攪拌部内破断)



(a) 破面全体観察例



(b) 接合欠陥

図12 ADC12/S45Cの破面観察例(接合界面破断)

(2)ADC12/S45Cの疲労強度特性

本項では、ADC12/S45C異種金属接合体について、基本的な疲労強度特性を検討する。接合に用いたFSWツールは、A6063/S45Cの場合と同じM5左ネジプローブであるが、ADC12は、A6063よりも攪拌性に劣るため、ショルダー部にスクロール溝加工が施されたツールを用いた。接合条件は、回転速度1500rpm、送り速度250mm/minである。疲労試験片の寸法形状は、図1と同様であり、図1におけるA6063部がADC12に置き換わったものである。

図8に、接合部近傍の硬さ分布を示す。ADC12/S45C接合体の場合、ADC12内では界面からの距離に関係なくほぼすべての領域で母材硬さと同じ110Hv程度となっており、A6063/S45C接合体のそれとは、大きく異なる分布となっている。一般的なAl合金の場合、FSWに

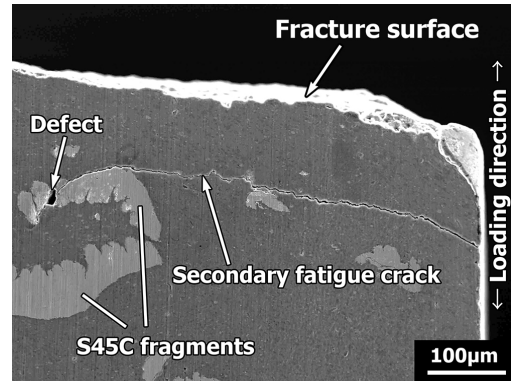


図13 破面近傍の観察例

よる同種材の接合部は、展伸材では軟化し鑄造材の場合は鑄造部あるいは溶体化処理材と同等の硬さとされており、本研究で用いた鉄鋼材料との異種金属接合体においても、同様な結果が得られたものと考えられる。

図9に、疲労試験によって得られた疲労寿命線図(S-N線図)を示す。図中、□はADC12材(未設合材)の結果、○と●はADC12/S45C接合材の結果であり、○は、図10(a)のような界面破断の場合、●は同図(b)に示したように、接合界面から2-4mm程度のADC12内で破断した場合を表している。図7からわかるように、ADC12材に比べて、ADC12/S45C接合材の疲労強度は、全般的に低下している。10⁷cycles時点での疲労強度は、ADC12材が60MPa程度、ADC12/S45C接合材が45MPa程度であり、ADC12材に対してADC12/S45C接合材のそれは75%程度にまで低下した。

図11に、ADC12/S45C接合材のうち、ADC12内で疲労破壊した試験片破面観察例を示す。同図(a)からわかるように、破面内の下から1/3程度の領域にある帯状の特徴的な領域から、複数のき裂が発生しているようすが観察される。同図(b)は、この領域の拡大観察例であるが、接合欠陥の推察される比較的大きな空隙が複数観察されている。

図12に、ADC12/S45C接合材のうち、界面で疲労破壊した試験片、S45C側破面のSEMによる観察例を示す。同図(a)からわかるように、S45C部が露呈した領域(筋状に見える領域)と、界面上に残存したADC12と思われる凹凸の大きな領域とが混在する破面となっている。同図(b)は、破面上における残存ADC12部の拡大観察例であるが、接合欠陥と思われる空隙が観察されている。

図13に、攪拌部内で判断した試験片の破面近傍の観察例を示す。図からわかるように、破面近傍に存在している欠陥を起点として、2次き裂が発生しているようすが観察されている。したがって、本研究で用いたADC12/S45C接合材の疲労破壊は、攪拌部内に存在している複数の欠陥から発生したき裂が進展し、いずれかが臨界に達した時点で、破断する過程を経るものと考えられる。

る。なお、本研究で実施したFSWでは、接合時にプローブが削ったS45C小片が、攪拌作用によってADC12内に分散する特徴を持つ。図13中の欠陥は、これらのS45C小片の近傍に存在しているが、欠陥が隣接しないS45C小片からの疲労き裂発生や、小片の分布状態と欠陥存在の相関等、現時点では不明な点が多く、この点も、今後の検討課題の一つと考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

①小倉裕貴, 岡根正樹, 他3名, 摩擦攪拌によるADC12/S45C接合体の疲労強度特性, 査読無, 日本機械学会北陸信越支部第55期総会・講演会論文集(CD-ROM), 2018.

DOI:10.1299/jsmehs.2018.55.B041

②岡根正樹, 清水貴明, 安井利明, 福本昌宏, A5052/SPC270C摩擦攪拌点接合継手の疲労強度特性におよぼす力学的要因, 査読有, 軽金属溶接, Vol.56, No.2, pp.61-69, 2018.

DOI:10.11283/jlwa.56.61

③岡根正樹, 石田誠人, 他4名, 摩擦攪拌によるA6063/S45C突き合わせ接合体の疲労強度特性におよぼす時効処理の影響, 査読無, 日本機械学会2017年度年次大会講演論文集(CD-ROM), 2017.

DOI:10.1299/jsmemecj.2017.J0460203

④ M Okane, T Shitaka, 他4名, Fatigue Properties of Butt Welded Aluminum Alloy and Carbon Steel Joints by Friction Stirring, 査読有, Journal of Physics: Conf. Series 843 (open access), 2017.

DOI:10.1088/1742-6596/843/1/012040

⑤志鷹哲哉, 岡根正樹, 他4名, A6063/S45C摩擦攪拌接合体の疲労強度特性におよぼす熱処理の影響, 査読無, 日本機械学会北陸信越支部第54期総会・講演会論文集(CD-ROM), 2017.

DOI:10.1299/jsmehs.2017.54.L044

⑥ M Okane, T Shimizu, 他2名, Mechanical Factors Influencing Fatigue Behavior of A5052/SPC270C Joints by Friction Stir Spot Welding, 査読有, Proceedings of Asia-Pacific Conference on Fracture and Strength 2016(CD-ROM), 2016.

[学会発表] (計8件)

①小倉裕貴(岡根正樹), 摩擦攪拌によるADC12/S45C接合体の疲労強度特性, 日本機械学会北陸信越支部第55期総会・講演会, 2018.

②岡根正樹, 摩擦攪拌によるA6063/S45C異種金属接合体の疲労強度特性, 溶接学会, 第119回軽構造接合加工研究委員会, 2017.

③岡根正樹, 摩擦攪拌によるA6063/S45C突き合わせ接合体の疲労強度特性におよぼす時効処理の影響, 日本機械学会2017年度年次大会, 2017.

④ M Okane, Fatigue Properties of Butt Welded Aluminum Alloy and Carbon Steel Joints by Friction Stirring, 6th International Conference on Fracture Fatigue and Wear, 2017.

⑤石田誠人(岡根正樹), 熱処理を施したA6063/S45C摩擦攪拌接合体の強度特性, 日本機械学会北陸信越学生会第46回学生会員卒業研究発表講演会, 2017.

⑥志鷹哲哉(岡根正樹), A6063/S45C摩擦攪拌接合体の疲労強度特性におよぼす熱処理の影響, 日本機械学会北陸信越支部第54期総会・講演会, 2017.

⑦志鷹哲哉(岡根正樹), 摩擦攪拌によるA6063/S45C突き合わせ接合体の強度特性, 日本機械学会2016年度年次大会, 2016.

⑧ M Okane, Mechanical Factors Influencing Fatigue Behavior of A5052/SPC270C Joints by Friction Stir Spot Welding, Asia-Pacific Conference on Fracture and Strength 2016, 2016.

6. 研究組織

(1)研究代表者

岡根正樹(OKANE, Masaki)

富山高等専門学校 機械システム工学科・教授

研究者番号:90262500

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし

(4)研究協力者

石原外美(ISHIHARA, Sotomi)