

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02028

研究課題名（和文）軽量マルチマテリアル構造体実現のための高強度・高耐損傷性革新的異材接合技術の開発

研究課題名（英文）Development of innovative dissimilar material joining technology with high strength and high damage resistance to realize a lightweight multi-material structure

研究代表者

菅田 淳（SUGETA, ATSUSHI）

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・教授

研究者番号：60162913

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：軽量マルチマテリアル接合材として、Al/CFRP、Al展伸材/Alダイカスト材については摩擦攪拌継手ならびに接着剤併用継手、鉄系接合体は接着接合継手を用いて疲労試験を実施し、その損傷機構解明を行った。いずれの材料も母材の接触部の界面先端からの疲労き裂発生が破壊の主要因子であることが明らかとなり、接着併用継手ではその弱部を強化できるため強度向上を実現できた。接着接合体においては、水劣化の影響を調査し、強度低下の一時因子は界面に生成される錆による界面強度低下であることが明らかとなった。2次的因子は接着剤本体の水劣化現象で、3週間程度の水浸漬でき裂進展速度が大幅に加速することが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

軽量マルチマテリアル車体の実現のための異材接合継手の強度評価ならびに損傷機構の解明を行った。特に微視的連続観察により、接合体母材界面の先端部が弱部となりそれを起点としてき裂が発生し、その他の損傷と連成する損傷機構メカニズムが解明できた。また、接着剤については水劣化の影響を調べ、界面強度の低下と接着剤自信の劣化を分離して強度評価を行った結果は、これまでなく学術的意義は大きい。各種接合材についての損傷メカニズムが解明できたことにより、それらの発現を極力抑制する接合技術開発への指針を提案できたことは社会的意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：As lightweight multi-material joint, fatigue tests were conducted using friction stirring joints and weld-bond combined joints for Al / CFRP and Al wrought materials / Al die-cast materials, and adhesive joints for iron-based joints, and their damage mechanisms were evaluated. In all materials, it was clarified that the occurrence of fatigue cracks from the interface tip of the contact part of the base material was the main factor of fracture, and the weak part could be strengthened in the weld-bond combined joint, so the strength could be improved. In the adhesive joint, the effect of water deterioration was investigated, and it was clarified that the main factor of the decrease in strength was the decrease in interface strength due to the rust generated at the interface. The secondary factor was the water deterioration phenomenon of the adhesive, and it was clarified that the crack growth rate was significantly accelerated by being immersed in water for about 3 weeks.

研究分野：材料強度学

キーワード：疲労損傷機構 異材接合材 微視的観察 き裂発生 疲労寿命評価 疲労き裂進展 微視的内部観察

1. 研究開始当初の背景

原子力発電所の事故を契機としたエネルギー問題ならびに環境対策としてのCO2削減がクローズアップされる現代において、航空機や自動車等の輸送機器の軽量化は益々重要性を増して、2030年に車体重量半減の目標も立てられている。これらの目標は従来用いられている高強度鋼や高強度アルミニウム合金といった金属系素材のみでは達成できないことが、経産省の委託を受けた Arthur D. Little 社の「重要技術分野に関する技術動向等調査」において報告されており、構造材料として繊維強化複合材料の利用が不可欠の状態となっている。しかしながら、強度特性や衝撃特性の観点から主要構造材は高強度鋼や高強度アルミニウム合金の使用が避けられず、軽量構造物として製品化するためには金属系/非金属系異種材料の接合技術の革新が必要である。我が国の自動車産業分野では金属系/非金属系異種材料の接合技術は十分に確立されていないのが現状であり、欧州に比べて非常に遅れていることが懸念されている。金属系/非金属系異種接合体を実現する各種の接合法が提案されているが、接合強度や接合時間の観点から車体全体に適用する技術は少ない。その中で注目されている技術が摩擦攪拌接合技術であり、NEDOの「革新的新構造材料等研究開発」事業においても主要な接合技術研究テーマとして上がっている。FSWはこれまで金属同士の接合に用いられてきた技術であるが、摩擦攪拌時に生じる熱を利用してCFRPと金属を接合しようとする試みがなされてきている。しかしながら、従来の研究は静的引張強度等のバルクな特性の把握に限定されており、実機において重要となる異材接合材の疲労強度に関する研究は少なく、かつ現状の強度は車体構造に適用するには不十分なレベルである。耐疲労強度特性の改善は、接合条件を網羅的に変えてバルク特性を調査するだけでは困難であり、局所的疲労損傷のメカニズム解明を基礎として、それらの発現を抑制する接合技術開発を行う必要がある。

2. 研究の目的

自動車等に代表される輸送機器の省エネルギー化は、重量の大半を占める耐強度構造体の軽量化により最も有効に達成できる。軽量化のポイントはアルミニウム合金に代表される軽金属と繊維強化樹脂(FRP)の積極的活用である。しかしながらこのように異材を接合するためには、従来用いられてきたスポット溶接やレーザー溶接の手法は用いることができず、新たな接合技術の開発が必要である。そのような技術として着目されるのが、摩擦攪拌接合技術と接着技術である。本研究ではアルミニウム合金とCFRPの異材接合体をこれらの技術を用いて作成し、その疲労試験を実施し、損傷メカニズムを明らかにすることを目的としている。

3. 研究の方法

各種接合技術により作成された接合体の疲労試験を実施し、強度評価を行うとともに、逐次切断法を用いて疲労き裂の3D計測を行い、損傷メカニズムを明らかにする。また、接着接合体に関しては、環境の影響が顕著となることが示唆されているので、水浸漬を行った接合体の強度評価を行うことで、水劣化のメカニズムを明らかにする。

4. 研究成果

(a) Al/CFRP

供試材には、板厚1.2mmの交流電解処理を施工したAl合金(A5052相当)と板厚3.0mmのCF40wt%強化PPの射出成形品を用いた。各材を重ね合わせ摩擦攪拌点接合によりラップシエア型試験体を作製した。疲労試験は電気油圧式サーボパルサを用い、一定試験力振幅下および二段変動疲労試験を行った。まず、変動荷重試験に先立ち、一定試験力振幅条件下に対するAl/CFRP異材接合継手の疲労試験を行った。結果をFig.(a)-1に示す。同図は、一定試験力振幅における疲労寿命予測式を算出する過程で、両対数紙上にプロットしており、直線

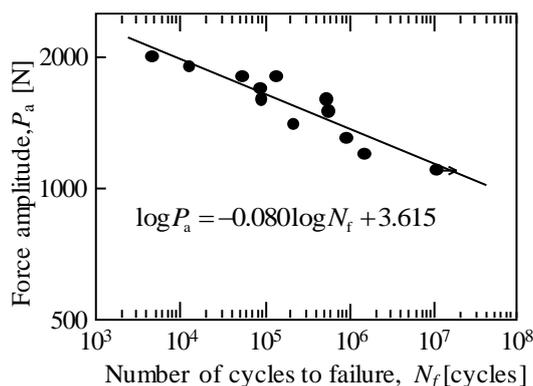


Fig.(a)-1 P-N curve.

回帰した疲労寿命予測式は図中の式にて表される。試験結果として、継手の疲労限度は未破断時の試験力振幅と破断時の最小試験力振幅の平均値から 1.15kN であることが確認された。

次に、変動荷重下での疲労損傷評価に対し本研究では、継手に作用する負荷試験力に基づく線形累積損傷則を用いた。すなわち、疲労限度以上の試験力振幅による損傷のみを考慮するマイナー則による累積損傷値  $D_M$ 、および疲労限度以下の試験力振幅による損傷も考慮する修正マイナー則による累積損傷地  $D_{MM}$  の両者による継手の疲労損傷評価を行った。その結果、全ての  $D_M$ 、 $D_{MM}$  において 1 を下回る傾向が確認された。これより、Al/CFRP 異材接合継手に対して疲労限度以下の試験力振幅を負荷した際にも疲労損傷が発生していることが確認され、疲労限度以上の試験力振幅を負荷することによって継手の疲労限度が消失することが明らかになった。そのため、変動荷重下での疲労特性を評価する際には、疲労限度以下の試験力振幅による疲労損傷を考慮する必要性が認められた。

## (b) ウェルドボンド Al/CFRP

本項目では、Al 合金と CFRP を接着剤と FSSW を併用したウェルドボンドによって接合した継手に対し、疲労試験を実施し継手の強度評価を行うとともに、損傷メカニズムを明らかにした。

供試材料として、Al 合金は板厚 3mm の A5083 相当材、CFRP は板厚 3.0mm の炭素繊維強化ポリアミドの射出成形品(CFRP)を使用した。CFRP 板表面に 1 液熱硬化型エポキシ接着剤を塗布し Al 合金板を重ね、Al 合金側からツールを挿入し FSSW を施工した後、電気炉にて 130°C で 45 分加熱することでウェルドボンド(WB)継手を作製した。また比較のため、WB 継手と同一の接合条件で作製した FSSW 継手、後述するウェルドボンド継手の接着厚さをテフロンテープで統一した接着継手も別途準備した。

Fig. (b)-1 に各種接合継手の疲労試験結果を示す。図中に示す黒色の実線は、各種接合継手の疲労寿命を最小二乗法により直線回帰にて導出した疲労寿命予測式である。同図より、FSSW と接着剤を併用した WB 継手と接着継手の疲労強度は同程度であった。また、WB 継手の有限寿命域における疲労強度は FSSW 継手のそれと比べ高く、FSSW と接着剤の併用による疲労強度の向上が確認できた。一方、各種接合継手の疲労限度はいずれも 1.5kN 程度であった。

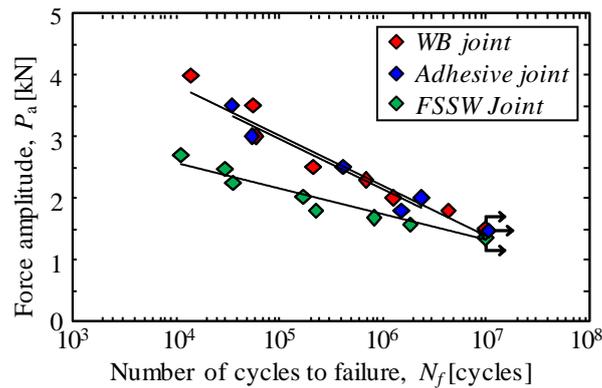
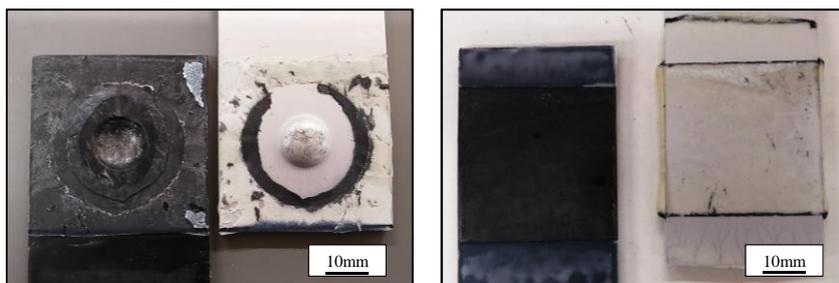


Fig.(b)-1 P-N curve.

次に、Fig. (b)-2 に WB 継手および接着継手の疲労破面を示す。同図(a)の WB 継手において、接着領域の大部分が CFRP と接着剤の界面破壊を呈し、一部に接着剤の凝集破壊が確認できた。WB 継手の FSSW 接合部においては、Al 合金板に円環状に CFRP が凝着しており、その内部は Al 合金表面が露出している様相が確認できた。一方、接着継手は接着面全体を通じて CFRP と接着剤の界面破壊を呈しており、本研究で使用した CFRP と接着剤の界面強度が低く、CFRP と化学的結合力が弱いことが考えられる。



(a) WB joint

(b) Adhesive joint

Fig.(b)-2 Fatigue fracture surface of each joint.

## (c) Al 圧延材/Al ダイカスト材

本研究では、Al 圧延材と Al ダイカスト材の異種材料を母材とする摩擦攪拌点接合 (FSSW) 継手の疲労破壊機構に関する知見の取得を目的としている。そこで、プローブ形状の異なる

ツールにて作製した FSSW 継手に対して疲労試験を行い、ツール形状の違いが疲労き裂進展挙動に影響を及ぼすかどうか検討を行った。

本研究では、Al 圧延材 A6016-T4(板厚 2.0mm)と Al ダイカスト材 Al-9.5Si-Mg 系-T7(板厚 2.4mm)を使用した。なお、予め接合面を#240 エメリー紙で粗研磨した。これ以降、圧延材を P、ダイカスト材を DC と表記する。

Table(c)-1 に本研究で用いたツール形状を示す。ショルダー径 10mm、プローブ径 5mm、プローブ長 2.8mm で、塑性流動による接合界面の形態を変化させるため、プローブに左ネジを設けた標準ツール (Standard)、左ネジの無いネジ無しツール (No-Thread)、プローブをテーパネジとしたテーパツール (Taper-Thread)の 3 種類のプローブ形状にて比較検討した。

日立パワーソリューションズ製の位置制御型摩擦攪拌点接合を用い、Fig.(c)-1 に示す引張せん断型試験片を作製した。接合条件を Table(c)-2 に示す。

Table(c)-1 Tool shapes of friction stir spot welding

	Standard	No-Thread	Taper-Thread
Shoulder diameter [mm]	10		
Shoulder angle [degree]	14		
Probe diameter [mm]	5		
Probe length [mm]	2.8		
Probe angle [degree]	4		
Thread	With	Without	With

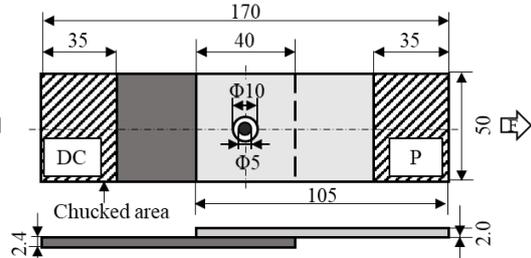


Fig.(c)-1 Shape and dimensions of FSSW joint.

Table(c)-2 Welding conditions and probe shapes

	Standard	No-Thread	Taper-Thread
Tool insertion amount [mm]	3.11	3.80	3.03
Rotational speed [rpm]	3000		
Tool plunge speed [mm/min]	30		

各ツールで作製した継手の疲労試験結果を Fig.(c)-2 に示す。同図より、標準ツールに対し、ネジ無しツールでは疲労強度が低下しており、継手の疲労強度に対してプローブに左ねじを設けることの有効性が確認された。また、標準ツールとテーパツールの疲労強度は大きな差異が認められなかった。標準ツールを用いた場合の疲労破壊の形態については、高試験力域では接合部内で破壊するボタン破壊 (*Button fracture*)、低試験力域では下板に発生したき裂が板幅方向に進展したのち最終破断に至る母材破壊 (*Base metal fracture*)、高試験力域と低試験力域の中間的な試験力振幅においてはボタン破壊と母材破壊の両方の特徴がみられる混合破壊 (*Mixed fracture*) に大別できる。これらの破壊形態については、ネジ無しツールやテーパツールで作製した継手においても同様の破壊形態を示しており、破壊形態の遷移は板組、特に上板と下板の板厚比に依存するものと考えられる。

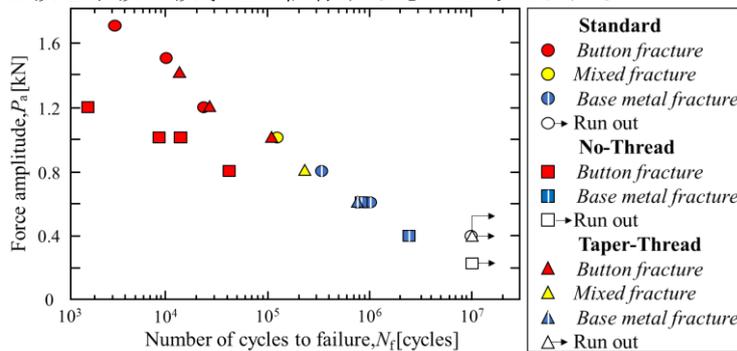


Fig.(c)-2 P-N curve.

#### (d) 接着接合材

本項は、自動車用冷間圧延鋼板 SPCC を被着材とした接着接合継手の疲労特性に及ぼすレーザパターニング前処理の影響について、実験的検討を行うことを目的とした。また異なるレーザパターニング条件で前処理することにより、被着材表面に異なるパターニングを形成し、接着接合継手の疲労特性に及ぼすパターニングの影響について実験的検討を行った。

レーザパターニング処理は、レーザマーカ (YS-P30, サンインスツルメント (株) 製) を用い、Table(d)-1 に示す複数のパターニングを形成した。接合に用いた接着剤は 1 液熱硬化型エポキシ樹脂 (サンスター技研 (株) 製 SW-601) であり、接着層厚さは  $150 \pm 20 \mu\text{m}$  に統一した。

Table (d)-1 Laser patterning condition.

	Frequency	Average power	Speed	Number of loop	Interval of line
	[kHz]	[%]	[mm/s]	[cycles]	[mm]
Cleaning joint	30	0.5	225	1	0.03
Anchor joint	30	15	225	5	0.03
Hybrid joint	Procedure 1	30	15	5	0.03
	Procedure 2	30	0.1	225	1
Cleaning anchor joint	Procedure 1	30	0.5	1	0.03
	Procedure 2	30	15	5	0.13

各種処理条件にて作製した接着継手の疲労試験結果を Fig.(d)-1(a)に示す. 同図より, レーザパターニング処理を施した全ての試験片の疲労強度が, 研磨継手のそれより向上していることがわかる. これは, レーザパターニング処理により, 接着面の弱境界層が除去され界面接着強度が向上したことが要因と考えられる. また, 各継手の疲労試験後の破面より凝集破壊した領域から凝集破壊率 (Cohesive failure rate: CFR) を算出した結果 (Fig.(d)-1(b)), レーザパターニング処理を行うことにより, CFR が上昇することが明らかとなった. 特に, アンカー継手およびハイブリッド継手の CFR が著しく高いことから, 比較的深い溝を設けたことによるアンカー効果が認められた. これらの結果より, レーザパターニング処理によって生じた酸化層を除去したことによる界面強度の向上と, 比較的深い溝を設けたことによるアンカー効果が重畳したハイブリッド継手が, 接着接合継手の疲労強度を向上させるための最適な処理であると推察される.

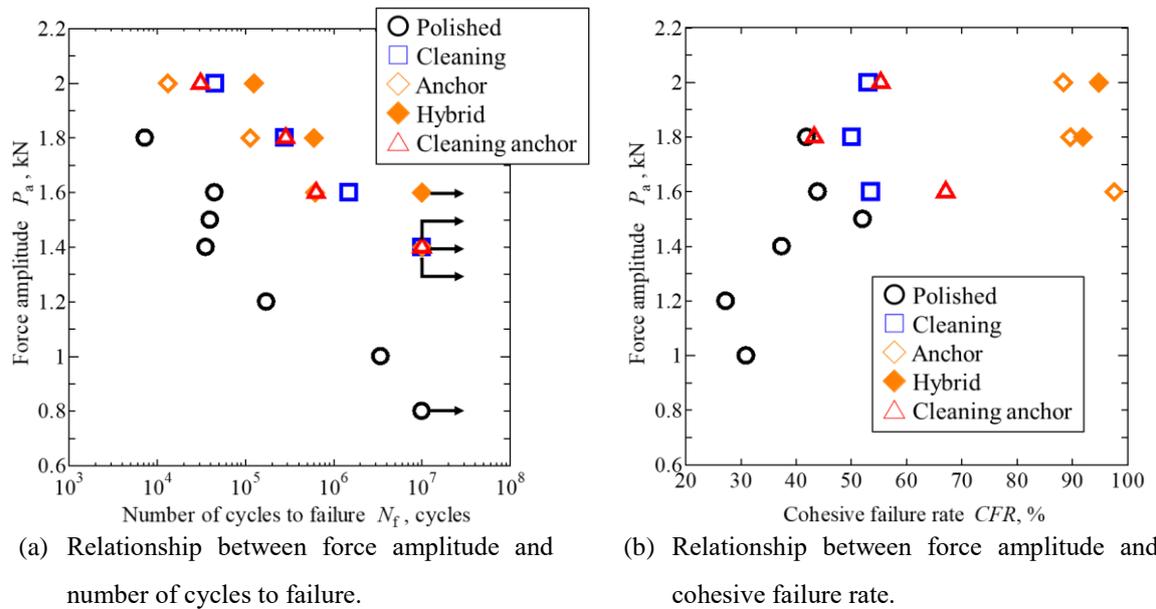


Fig.(d)-1 Results of fatigue test.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Yuki Ogawa, Ichiro Ohara, Jinta Arakawa, Hiroyuki Akebono and Atsushi Sugeta	4. 巻 66
2. 論文標題 Effects of Welding Defects on the Fatigue Properties of Spot Welded Automobile Steel Sheets and the Establishment of a Fatigue Life Evaluation Method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Welding in the World	6. 最初と最後の頁 745/752
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s40194-021-01238-5	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 -

1. 著者名 Ogawa Yuki, Nakahara Fumiya, Akebono Hiroyuki, Tanaka Kojiro, Sugeta Atsushi	4. 巻 43
2. 論文標題 Effect of jig constraint state during welding process on fatigue properties of Al/CFRP dissimilar welds and fatigue life evaluation based on singular stress	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures	6. 最初と最後の頁 2259 ~ 2269
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/ffe.13254	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 -

1. 著者名 Katsuki SHIKIMOTO, Shogo ISHIDA, Wataru JINNOUCHI, Yuki OGAWA, Hiroyuki AKEBONO, Atsushi SUGETA	4. 巻 61
2. 論文標題 Effect of Laser Patterning Preprocessing on Fatigue Strength of Adhesive Bonded Joints Using Thin Steel Plate	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Transactions	6. 最初と最後の頁 469-474
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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14件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 野瀬悠生, 菅田 淳, 曙紘之
2. 発表標題 FSSWを用いたAl異材接合継手の疲労特性に及ぼすツール形状の影響
3. 学会等名 溶接学会中国支部第6回学生発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北川和也, 菅田 淳, 曙紘之
2. 発表標題 アルミニウム合金ダイカストと圧延材の摩擦攪拌点接合継手の動的強度特性
3. 学会等名 先進自動車製造技術における接合技術2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 橘知哉, 菅田 淳, 曙紘之
2. 発表標題 接着接合継手の疲労き裂進展速度におよぼす水劣化の影響とその定量的評価
3. 学会等名 第20回破壊力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 峯岡誠太郎, 菅田 淳, 曙紘之
2. 発表標題 Al/CFRP 異材点接合継手の二段変動荷重下における疲労特性評価
3. 学会等名 日本機械学会M&M2021材料力学カンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Selvaraj Thomasprabhua, Jinta Arakawa, Hiroyuki Akebono, Atsushi Sugeta, Yasuhiro Aoki and Hidetoshi Fujii
2. 発表標題 Fatigue Crack Behaviour on Thin Steel Sheets Welded by Friction Stir Spot Welding
3. 学会等名 Asian Pacific Conference on Fracture and Strength 2020(APCFS2020, On-line) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤田一輝, 菅田 淳, 曙紘之
2. 発表標題 自動車用鋼板を母材とする引張はく離型摩擦攪拌点接合継手の疲労特性に及ぼす接合部径の影響
3. 学会等名 溶接学会中国支部主催第5回学生発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 北川和也, 菅田 淳, 曙紘之
2. 発表標題 アルミ / ダイカストFSSWの動的強度特性の評価
3. 学会等名 溶接学会中国支部主催第5回学生発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中原文弥, 小川裕樹, 曙紘之, 田中耕二郎, 菅田淳
2. 発表標題 Al合金/CFRP 異材接合継手の変動荷重下における疲労強度評価
3. 学会等名 日本材料学会第68期学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村大祐, 三宮知大, 荒川仁太, 曙 紘之, 山本元道, 菅田淳
2. 発表標題 レーザースポット溶接による薄板鋼板接合継手の疲労特性評価
3. 学会等名 第16回機械・構造物の強度設計, 安全性評価に関するシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三宮知大, 中村大祐, 荒川仁太, 曙 紘之, 山本元道, 菅田 淳
2. 発表標題 レーザースポット溶接による薄板鋼板接合継手の疲労破壊メカニズムの解明
3. 学会等名 溶接構造シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 曾我拓哉, 曙紘之, 菅田淳, 平出隆志, 川邊直雄, 田川哲哉
2. 発表標題 抵抗スポット接合継手の疲労特性に及ぼす負荷形式の影響
3. 学会等名 溶接構造シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 橋 知哉, 菅田 淳
2. 発表標題 接着接合継手の水劣化による接合強度への影響
3. 学会等名 日本機械学会中国四国学生会第50回卒業発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林 圭亮, 曙紘之, 菅田淳
2. 発表標題 荷重伝達型すみ肉溶接のルート部における疲労破壊機構の解明
3. 学会等名 日本機械学会中国四国学生会第50回卒業発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takamasa Abe, Hiroyuki Akebono, Atsushi Sugeta
2. 発表標題 Analysis evaluation study on the fatigue crack propagation behavior of the structures with one-sided welding of the fillet welded joint for load carrying type
3. 学会等名 International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2019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	小山 敦弘  (KOYAMA ATSUHIRO)  (40324800)	長崎大学・工学研究科・准教授   (17301)	
研究分担者	曙 紘之  (AKEBONO HIROYUKI)  (50447215)	広島大学・先進理工系科学研究科(工)・教授   (15401)	

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