

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 30 日現在

機関番号：58001

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560865

研究課題名(和文) 難燃性マグネシウム合金と亜鉛めっき鋼板の摩擦攪拌点接合における界面制御と最適化

研究課題名(英文) Interfacial Control and Optimization for Friction Stir Spot Welding between Non-combustible Magnesium Alloy Sheet and Zinc-coated Steel Sheet

研究代表者

津村 卓也 (TSUMURA, Takuya)

沖縄工業高等専門学校・機械システム工学科・准教授

研究者番号：00283812

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：摩擦攪拌点接合により、接合条件を同一として、組織観察用と強度試験用の継手を作成した。接合部断面を観察し、引張せん断および十字引張強度を評価した後に鋼板側破面の観察も行った。

引張せん断強度は、難燃性マグネシウム合金と溶融亜鉛めっき鋼板SGCC(GI)との組合せが最も高く、破断は接合部周辺からアルミニウムと鉄の化合物に沿って進むことが分かった。接合は、接合時の入熱でマグネシウム、アルミニウム、亜鉛が三元共晶融解を起こして接合界面外へ排出され、その後アルミニウムと鉄の化合物が生成することで達成すること、接合ツールや固定治具の形状変更により強度が改善する可能性があることが分かった。

研究成果の概要(英文)：Joints for metallographic observation and strength test were obtained by Friction Stir Spot Welding on certain conditions. Cross sections of the joint were observed, tensile shear test and cross tension test of the joint were evaluated, and fractured surface on the steel sheets were observed after the strength test.

Tensile shear strength of the non-combustible magnesium alloy and hot dip galvanizing steel sheet joint was higher than any other joints. Fracture was start at periphery of the joining area, and was progressed along with aluminum-iron intermetallic compound layer. Ternary eutectic of magnesium, aluminum and zinc was produced by the frictional heat, and the eutectic melt was discharged out of the joint interface, aluminum-iron intermetallic compound layer was formed. This compound layer help the tight-jointed.

It is made clear that change of tool shape and fixing plate produce an increased potential for improvement of tensile shear and cross tensile strength.

研究分野：溶接・接合工学

キーワード：母材添加元素 三元共晶融解 金属間化合物

1. 研究開始当初の背景

(1) 地球温暖化ガスである CO₂ の排出量削減のため、輸送機器の軽量化が望まれている。このためには、軽合金薄板と構造強度部材の薄鋼板とを組合せた複合構造化が有効である。輸送機器用の薄板接合には、これまで抵抗スポット溶接が用いられてきたが、摩擦攪拌点接合 (FSSW) 法はこれと比較して省エネルギーでかつ低環境負荷であり、主にアルミニウム (Al) 合金薄板同士の接合や Al 合金薄板と薄鋼板との異材接合などへの実用化が進んでいる。

(2) 実用軽合金の中で最も密度が低いマグネシウム (Mg) 合金は、軽量化部材として輸送機器への適用が期待され、高強度 Mg 合金^① や難燃性 Mg 合金^② の開発とその摩擦攪拌接合^③ や、実用 Mg 合金の FSSW に関する研究^④ が進められている。特に難燃性 Mg 合金は、鉄道車両や自動車などへの適用を目的として薄鋼板との異材接合技術の開発が求められている。

2. 研究の目的

(1) 輸送機器の軽量化部材として注目されている難燃性 Mg 合金と、亜鉛めっき鋼板との FSSW による異材重ね接合 (図 1) において、めっき皮膜作成法とめっき厚さが異なる亜鉛めっき鋼板を用い、めっき皮膜状態が接合部形成組織と機械的性質に及ぼす影響を検討し、最適な接合界面構造を明らかにする。

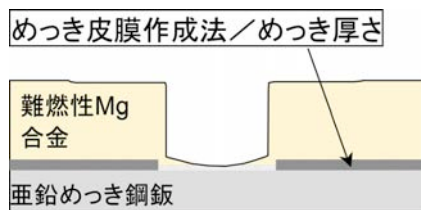


図 1 FSSW による異材重ね継手断面と本研究における検討事項

(2) FSSW の接合パラメータ (図 2) について接合中の動的変化を計測・解析し、接合界面制御のための接合パラメータの抽出とその最適化を行い、その接合機構を明らかにするとともに接合界面構造を最適にする亜鉛めっき特性を明らかにする。

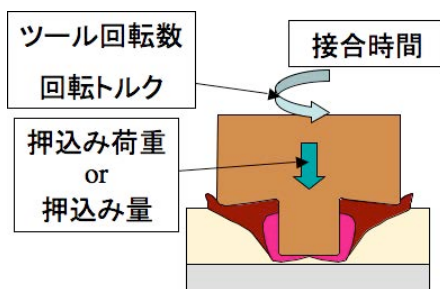


図 2 FSSW の接合パラメータ

3. 研究の方法

(1) 難燃性 Mg 合金と亜鉛めっき鋼板との異材 FSSW

① 供試材として、Mg に Al を 6% 含む AM60 合金に難燃性を付与するカルシウム (Ca) を 2% 添加した AMX602 (板厚 2 mm) 板と、表 1 に示しためっき方法が異なる熔融純亜鉛めっき鋼板 SGCC(GI)、電気純亜鉛めっき鋼板 SECC、合金化熔融亜鉛めっき鋼板 SGCC(GA)、および自動車用裸鋼板 SPCC (全て板厚 0.8 mm) を使用した。

表 1 使用した市販鋼板の種類と特徴 (融点は参考文献^⑤より)

名称	略称	融点 [°C]	目つけ量 [g/m ²]	組成
熔融純亜鉛めっき鋼板	SGCC(GI)	415*	60	純Zn
電気純亜鉛めっき鋼板	SECC	420	3	純Zn
合金化熔融亜鉛めっき鋼板	SGCC(GA)	720	60	Zn-Fe
自動車用裸鋼板	SPCC	-	-	-

AMX602 板は、成分調整を行ったインゴットから厚さ 2 mm になるように押出後、押出方向と長手方向が垂直となるように幅 30 mm、長さ 100 mm に切断したものを入手した。また 3 種類の亜鉛めっき鋼板および自動車裸鋼板は、市中流通のものを幅 30 mm、長さ 100 mm に切断したものを入手した。

② 図 3 に示す専用装置による FSSW を想定し、3. (3) で後述するようにして研究の目的 2. (2) を達成する動的システム構築を行った。その後、ショルダ径 10 mm、プローブ長さ 1.9 mm、プローブ径 3 mm (逆ネジ付き) の SKD61 工具鋼製ツールを AMX602 側から挿入し、ツール回転数、押込み荷重と接合時間をパラメータとした接合を実施して重ね継手が得られる接合条件範囲の調査を行った。



図 3 荷重一定制御型定置式 FSSW 装置 (川崎重工業製; 大阪大学接合科学研究所既設)

③研究代表者の所属研究機関変更に伴い、図4に示す汎用の立フライス盤で FSSW を行うこととした。前出3. (1)②と同等な重ね継手形成条件の選定を行なうため、同一形状の SKD61 工具鋼製ツールを用い、新たにツール回転数、押し込み速度、押し込み深さ、保持時間を接合パラメータとして接合試験を実施した。得られた重ね継手の引張せん断強度評価の結果から、以前と同等な重ね継手が得られる接合パラメータを選定した。



図4 数値制御立フライス盤（牧野フライス製 KE-55；沖縄工業高等専門学校既設）

(2) 異材 FSSW 接合部の形成組織調査と接合継手の強度評価

3. (1)の③により得られた重ね継手の接合部断面観察を行い、接合部形成組織の調査を行った。また、得られた重ね継手の引張せん断試験と十字引張試験を実施して強度評価を行うとともに、引張せん断試験後の破面観察により、接合部の破断面組織を調査し、これらから、接合部形成組織と機械的特性との関係を調査した。

(3) FSSW 中の接合因子の動的計測システム構築

①研究の目的2. (2)を達成するための動的システムの構築を行った。図3で示した FSSW 専用装置のツール回転数、回転軸モータ電流値（回転トルクに相当）、押し込み荷重、押し込み量の4つの電圧出力を接合パラメータ、また温度センサ固定治具により R 熱電対テレメータをツール回転軸に固定して、これを通じて得たツール中心に挿入した R 熱電対の起電力をツール先端部温度、試料の接合界面近傍に挿入した K 熱電対の起電力を接合部近傍温度として、高速電圧／温度ロガーに接続して 10kHz で測定可能なシステムを構築した。また、パーソナルコンピュータを用い、この計測データを統合化し解析を行うソフトウェアを自作した。

②FSSW 装置の変更により、装置からのツール回転数、回転軸モータ電流値の電圧出力が無く、またツール押し込みの制御方式が変わっ

たため、押し込み荷重、押し込み量の電圧出力を合わせた4つの接合パラメータが測定不能となった。また温度センサ固定治具形状にも互換性が無くなり、R 熱電対テレメータを通じたツール先端部温度の測定も行えなくなった。さらにこれら計測データに対応した自作ソフトウェアについても使用できなくなった。一方、フライス盤の加工力測定用に変更後の所属機関に設置されていた3成分切削動力計(KISTLER 9257B)により、接合中の押し込み力測定が可能である事が明らかとなり、これを測定して評価することとした。

4. 研究成果

(1) 汎用数値制御立フライス盤での適正接合条件の選定を行うため、接合パラメータを変化させて接合試験を実施した。得られた結果を接合条件とともに表2に示す。ツール回転数 3000 rpm, 押し込み速度 3~5 mm/min, 押し込み深さ 2.3~2.4 mm, 保持時間 5~8 s の条件範囲で接合することができた。この結果より以前と同等な重ね継手が得られる接合パラメータとして、ツール回転数 3000 rpm, 押し込み速度 5 mm/min, 押し込み深さ 2.4 mm, 保持時間 8 s を適正条件と選定した。

表2 接合条件と接合試験結果
(結果の×は接合後にはがれたもの)

	ツール回転数 [rpm]	押し込み速度 [mm/min]	押し込み深さ [mm]	保持時間[s]	結果
SPCC	2500	3	2.2	8	×
	3000	3	2.3	8	○
	3000	5	2.4	5	○
SECC	3000	3	2.3	8	○
	3000	3	2.4	8	○
	3000	5	2.4	5	○
SGCC(GI)	3000	3	2.3	5	○
	3000	5	2.4	5	○
SGCC(GA)	3000	5	2.4	5	○

(2)①AMX602 と表1に示した4種類の鋼板を、ツール回転数 3000 rpm, 押し込み速度 5 mm/min, 押し込み深さ 2.4 mm, 保持時間 8 s の接合条件でそれぞれ3本接合し、引張せん断試験を行った。得られた破断荷重を図5にまとめて示す。

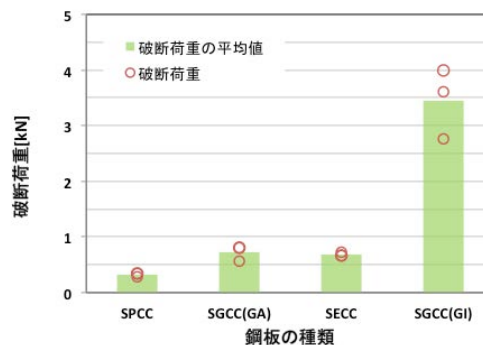


図5 めっき種類が破断荷重に及ぼす影響
(ツール回転数 3000 rpm, 押し込み速度 5 mm/min, 押し込み深さ 2.4 mm, 保持時間 8 s)

同一接合条件での平均破断荷重は、AMX602とSGCC(GI)の組合せが3.46 kNと最も高い値を示し、AMX602とSECCの0.690 kNおよびAMX602とSGCC(GA)の0.729 kNのおよそ5倍、AMX602とSPCCの0.321 kNの11倍程度となった。接合方法とツール径は異なるが、AMX602同士を接合した場合、破断荷重は5.47 kN[®]であり、AMX602とSGCC(GI)の組合せで63%の継手効率を持つ引張せん断継手が得られたことになる。

めっき種類が破断荷重に及ぼす影響は、Al板とめっき鋼板のFSSW継手[®]の場合と同様の傾向となっていた。馮らは破断後破面観察から求めた接合面積と平均破断荷重に良い相関が見られる[®]と述べている。このことを確認するため、引張せん断試験後の鋼板側破面を光学顕微鏡で観察し、プローブ先端で完全に接合している領域1と一部固着していると思われる領域2の直径を測定し、破断荷重との関連性を調査した。図6にその結果を示す。

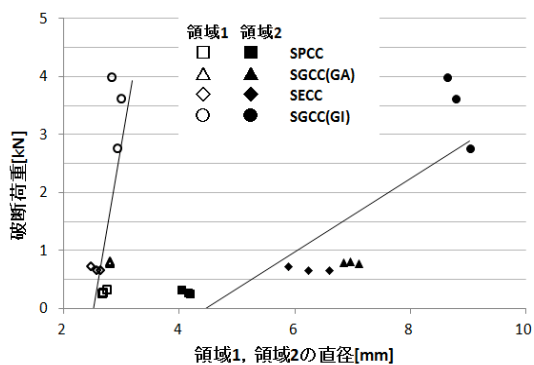


図6 鋼板側破面の特徴的な領域と破断荷重との関係

領域1, 2直径が大きいほど破断荷重が高く、両者は比例関係にある。この結果もまたAl板とめっき鋼板のFSSW継手[®]の場合と同様の傾向となっている。

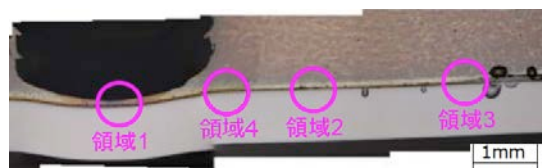
②接合試験時の固定治具形状を、接合ツール直下部分で圧力が抜けにくく、かつ治具側への抜熱がしにくい形状へと変更し、引張せん断試験片を作成したのと同じ接合条件で、十字引張試験用の接合継手を作成して十字引張強度の評価を行った。表3に結果をまとめて示す。

表3 十字引張試験の破断荷重

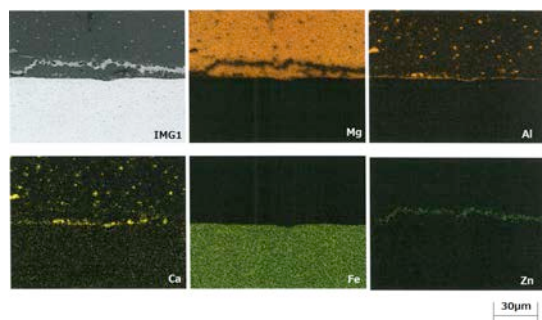
SGCC(GI)	SECC	SGCC(GA)	SPCC
×	7.70 kN	1.45 kN	測定不能
×	×	6.67 kN	測定不能
×	×	測定不能	測定不能

×は治具固定時に接合が外れて破断荷重が測定できなかったことを、測定不能は破断荷重が検知されなかったことを示す。AMX602とSECC, AMX602とSGCC(GA)の組合せで6 kNを越える高い破断荷重が得られる場合があることが分かった。

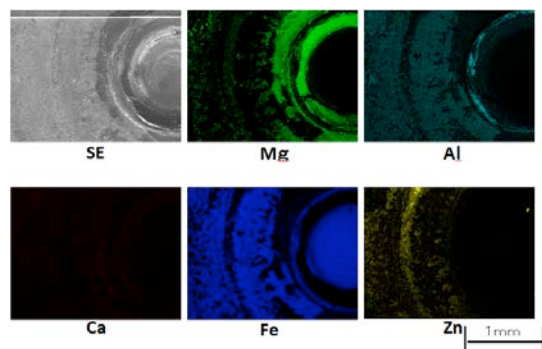
③図7にAMX602とSGCC(GI)の(a)接合部断面マクロ写真, (b)マクロ写真中の領域4のSEM-EDX面分析結果, (c)(d)引張せん断試験後の鋼板側破面を、図8にはAMX602とSGCC(GA)の断面および破面観察結果を示す。



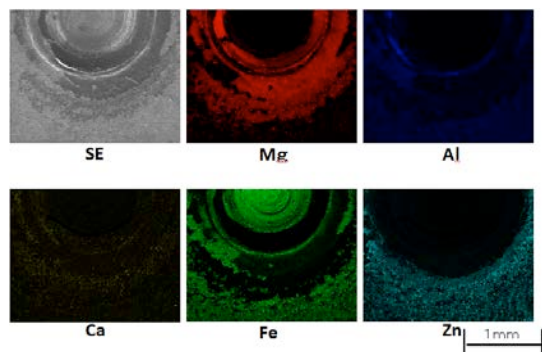
(a) 接合部断面マクロ写真



(b) 接合部断面の領域4のSEM-EDX面分析結果

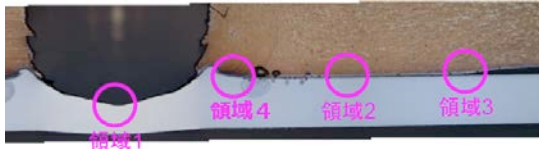


(c) 鋼板側破面の左領域 SEM-EDX面分析結果

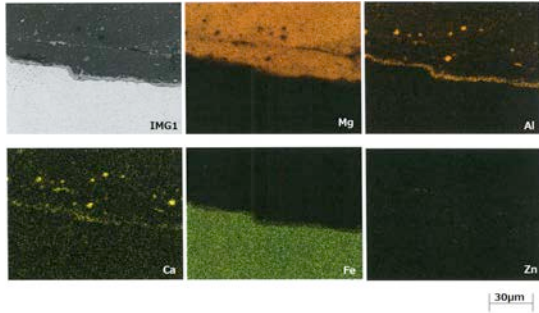


(d) 鋼板側破面の下領域 SEM-EDX面分析結果

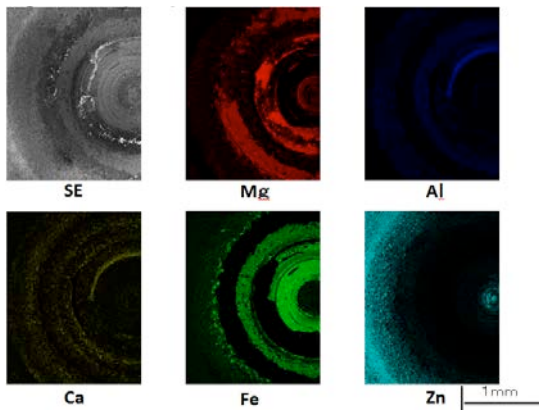
図7 AMX602-SGCC(GI)接合材の断面および破面観察結果



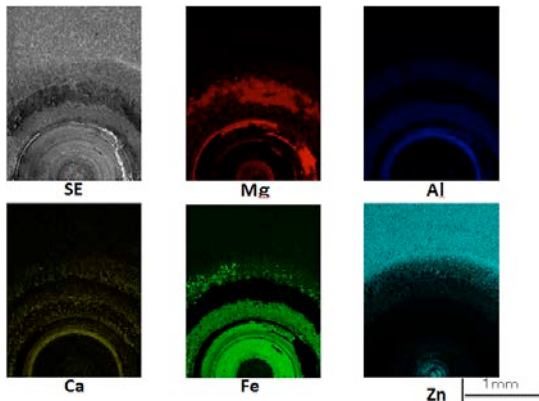
(a) 接合部断面マクロ写真



(b) 接合部断面の領域4のSEM-EDX面分析結果



(c) 鋼板側破面の左領域 SEM-EDX 面分析結果



(d) 鋼板側破面の下領域 SEM-EDX 面分析結果

図8 AMX602-SGCC(GA)接合材の断面および破面観察結果

断面および破面の観察結果を総合的に判断すると、破断は接合部周辺の界面から Mg 合金中に含まれる Al と鉄(Fe)の金属間化合物層に沿って中心部に向かって進み、中央のキーホールに向かい AMX602 内を進むことが分かった。図9には図8(a)の領域3でのSEM-EDX面分析結果を示す。図では分かりづらいが、接合周縁部の界面近傍で Al-Mg-亜鉛(Zn)の三元共晶、Mg-Zn 共晶と、Al と Fe の金属間化合物の存在などが確認された。

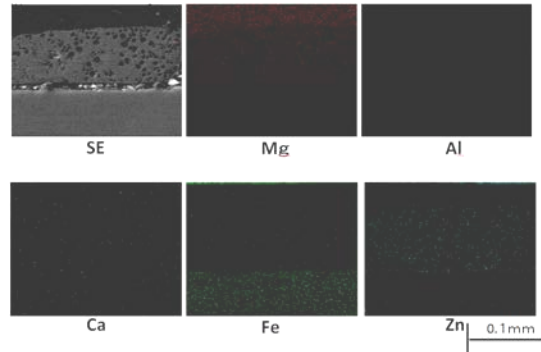
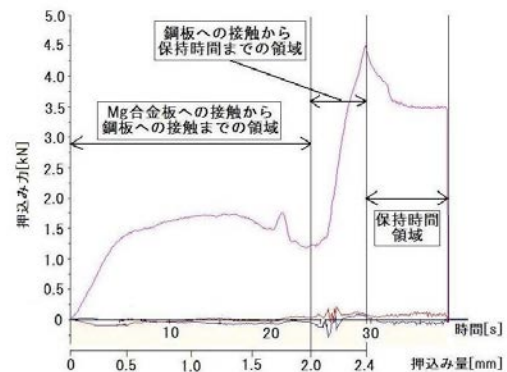


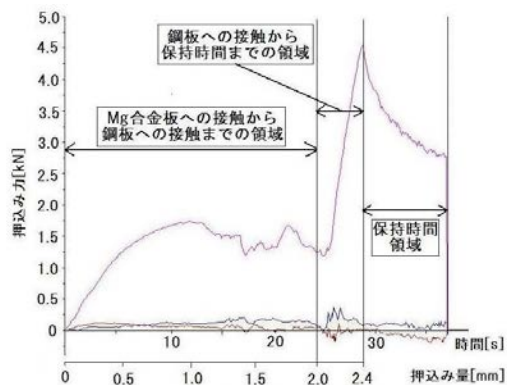
図9 AMX602-SGCC(GA)接合材の接合部断面の領域3のSEM-EDX面分析結果

また、十字引張試験の試験後破面観察を行った結果、破断は引張せん断試験片の場合と同様に進展すること、接合界面近傍で同様の共晶や金属間化合物の存在などが確認された。

(3) 図10に切削動力計を用いて接合試験中のツール押し込み荷重を計測した結果を示す。その結果、AMX602-SGCC(GI)の組合せとそれ以外の組合せとでは、ツール先端が鋼板へ接触をする少し前の押し込み量約 1~1.8mm の領域で、押し込み力の安定性に差があること。また保持時間領域でも押し込み力の変化に差があることなどが分かった。



(a) AMX602-SGCC(GI)



(b) AMX602-SGCC(GA)

図10 切削動力計による接合中のツール押し込み荷重の時間変化

(4) これら結果をまとめ、AMX602 と亜鉛めっき鋼板の FSSW の接合機構は、FSSW による入熱で Mg と Mg 母材の合金元素である Al およびめっき中の Zn が三元共晶融解を起こし、FSSW の圧力と塑性流動で亜鉛めっき層が接合界面外へ排出され、鋼板の新生面で Mg 母材の合金元素である Al と Fe の化合物が生成することで接合継手が得られる事が分かった。また、接合ツールおよび固定治具の形状を最適化することにより、接合強度が改善する可能性が示唆されるなどの結果が得られた。

<引用文献>

- ① 河村，長周期積層構造相を強化相にした高強度・高耐熱マグネシウム合金，*金属*，**80**，2010，581-588.
- ② 河村，沸騰が始まっても発火しない KUMADAI 不燃マグネシウム合金，*アルトピア*，**42-8**，9-13.
- ③ 五味，津村，河村，中田，Mg-Zn-RE 系高強度 Mg 合金の摩擦攪拌接合，*溶接学会全国大会講演概要*，**78**，2005，246-247.
- ④ K. Nakata, H. Ikegami, T. Tsumura, Effect of Probe Thread on Friction Spot Joint Strength of AZ31 Mg Alloy, *Materials Science Forum*，**580-582**，2008，351-354.
- ⑤ 馮，渡邊，熊井，6022 アルミニウム合金板／めっき鋼板摩擦攪拌スポット接合材のミクロ組織と接合強度，*軽金属*，**61-9**，2011，463-468.
- ⑥ 山本，廖，中田，難燃性 Mg 合金の摩擦攪拌点接合および抵抗スポット溶接，*日本金属学会誌*，**74-5**，2010，307-313.

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 1 件)

- ① 名城，新屋，津村，中田，めっき種類が難燃性マグネシウム合金と各種亜鉛めっき鋼板との異材摩擦攪拌点接合継手の引張せん断強度に及ぼす影響，*溶接学会平成 26 年度秋季全国大会*，2014 年 9 月 11 日，「宇奈月国際会館セレネ（富山県・黒部市）」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

津村 卓也 (TSUMURA, Takuya)
沖縄工業高等専門学校・機械システム工学
科・准教授
研究者番号：00283812

(2) 研究協力者

中田 一博 (NAKATA, Kazuhiro)
具志 孝 (GUSHI, Takashi)
新屋 誠栄 (SHINYA, Nobuhide)
名城 裕希 (NASHIRO, Yuki)