

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 25 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360052

研究課題名(和文)プラスチック/金属異材レーザースポットマイクロ接合法の開発

研究課題名(英文)Development of laser spot micro joining method between plastic and metallic materials

研究代表者

宮下 幸雄 (Miyashita, Yukio)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号：00303181

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円、(間接経費) 4,380,000円

研究成果の概要(和文)：微小部品をターゲットとした、プラスチックと金属の異材レーザースポットマイクロ接合法について検討した。本質的な接合強度向上のため、金属側の溶込部形状、界面近傍のプラスチック側に生成される気泡、接合部への加圧力および加振力の影響を明らかにした。接合強度向上のための適切な溶込部形状および気泡の生成状態を明らかにし、さらに、気泡生成挙動の制御方法を開発し、力学的およびプロセス的に最適化した、新しい異材接合法を提案した。

研究成果の概要(英文)：Laser spot micro joining method between plastic and metallic materials applying for welding of micro parts was studied. In order to improve intrinsic joining strength, effects of molten pool shape formed in a metallic material side, bubbles formed inside a plastic material nearby the interface and applying static and cyclic contact force were investigated. Appropriate condition of the molten pool shape and state of the bubbles formation were shown. Moreover, controlling method of formation behavior of the bubbles was developed. A new dissimilar materials joining method by optimizing in mechanics and process was proposed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：異材接合 レーザー プラスチック 金属 界面 接合強度

1. 研究開始当初の背景

たとえば、携帯用電子機器に見られるように、機器・構造物の小型化・軽量化が急速に進み、接合部への要求も厳しくなっている。そのため、機械締結やろう接などとは異なる、接合のための部品や材料を用いない直接接合が求められている。そこで、研究代表者は、微小部品をターゲットとした金属と金属、さらに、近年では、プラスチックと金属の異材接合について検討してきた。研究代表者らが取り組んでいる微小部品をターゲットとしたスポット接合の場合、寸法上の制約が厳しく、単純に接合面積を大きくすることで、継手破断荷重を増加させるには限界がある。そこで、本質的に接合強度を向上させることが技術的な課題となる。

2. 研究の目的

本研究では、微小部品をターゲットとした、プラスチックと金属の異材レーザースポット接合法を開発する。接合部寸法の制約から要求される、本質的な接合強度向上のため、主に、(1)溶込部形状の影響、(2)プラスチック側界面近傍の気泡の生成挙動の接合体強度特性への影響と制御手法、(3)接合部への振動付与の影響、について検討し、力学的およびプロセス的に最適化した、新しい異材接合法を提案することを目的とする。

3. 研究の方法

上記(1)溶込部形状の影響については、レーザー接合実験により、金属側に形成される溶込部の形状が異なる接合体を作製し、異なる負荷条件下で強度試験を行い、溶込部形状と強度との関係を調べた。また、接合体をモデル化し、有限要素解析により、溶込部形状の影響を調べた。以上の結果より、溶込部形状と強度特性の関係、さらに、高強度接合体を得るための手法について明らかにした。

上記(2)気泡生成挙動の接合強度への影響と制御手法、および(3)振動付与の影響、については、接合下部に静的な押付力および繰返し押付力を付与した状態でレーザー接合実験を行い、接合部の観察および強度試験より、接合体強度特性に及ぼす気泡の影響について調べた。また、気泡の生成状態を調べ、それをもとにした力学的モデルにより、気泡の生成状態の接合体強度特性への影響を検討するとともに、強度信頼性の高い接合体を得るための手法について提案した。

4. 研究成果

(1) 溶込部形状の影響

供試材には、プラスチック材料の PET と金属材料の A5052 を用いた。接合実験には、パルス YAG レーザ (波長 1064nm) を用いた。レーザを透明な PET 側から照射し A5052 と重ね接合を行った。

得られた接合体の接合部 (界面) を透明な PC 側から観察した例を図 1 に、接合部の断

面観察例を図 2 に、それぞれ示す。図 1 より、PET が溶融もしくは軟化し、A5052 表面に付着している領域が認められる。本研究では、この領域を接合領域と定義した。接合領域の大きさは、接合時の入熱量の増加にともない増加していた。また、接合中央部には、PET の熱分解により生じたと考えられる気泡の生成が認められた。図 2 より、A5052 側に溶込部の形成が認められ、接合時の入熱量の増加にともない溶込部の幅や深さが増加する傾向が認められた。

接合体のピール強度および引張りせん断強度を接合時の入熱量で整理した結果を図 3 および図 4 にそれぞれ示す。なお、両図の強度は、各強度試験により得られた接合体の破断荷重を接合面積で除することにより求めた見かけの値である。図 3 より、ばらつきは大きいものの、接合時の入熱量が小さい条件で得られた接合体は、ほぼ一定のピール強度を示し、他方、接合時の入熱量が大きい条件で得られた接合体では、入熱量の増加にともないピール強度がやや低下する傾向が認め

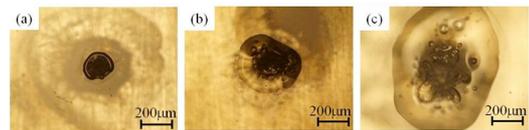


図 1 PET/A5052 接合体の接合部観察例。



図 2 PET/A5052 接合体の接合部断面観察例。

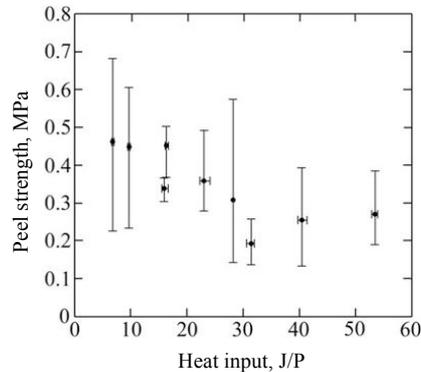


図 3 PET/A5052 接合体のピール強度。

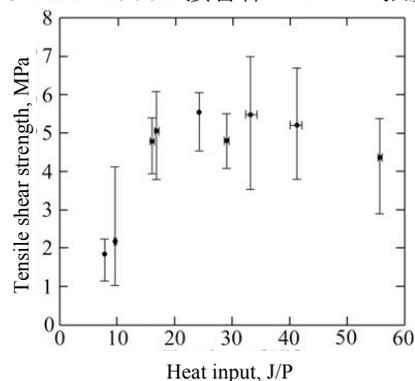


図 4 PET/A5052 接合体の引張りせん断強度。

られた。図4より、接合時の入熱量が小さい条件で得られた接合体は、入熱量の増加とともに、引張りせん断強度が増加する傾向が認められ、他方、接合時の入熱量が大きい条件で得られた接合体は、接合時の入熱量の増加にともない、引張りせん断強度がやや低下する傾向が認められた。

図2の断面観察より、接合時の入熱量が小さい場合には、A5052側溶込部に軟化・熔融したPETが入込んでいる様子が認められるが、接合時の入熱量が大きい場合には、界面近傍のPET内で著しい気泡の生成が認められ、また、場合によっては、A5052側溶込部に軟化・熔融したPETが認められず、空洞となっている場合があった。上述のように、ピール強度および引張りせん断強度のいずれも、接合時の入熱量が大きい条件で得られた接合体では、入熱量の増加にともない、強度が低下していた。また、強度試験後の破面観察より、PETとA5052の界面および気泡を連結するようにPET内で破壊が生じた様子が認められた。接合時の入熱量が大きい条件で得られた接合体では、気泡および接合中央部に形成された空洞の影響により強度低下が生じたと考えられる。

他方、接合時の入熱量が小さい条件で得られた接合体では、主に、PETとA5052の界面で破壊が生じていた。図3より、接合時の入熱量が小さい条件で得られた接合体のピール強度がほぼ一定であったことから、接合部の界面の強度は入熱量によらず一定と推察される。しかし、引張りせん断強度は、接合時の入熱量の増加にともない増加していた。接合部の界面にばねを導入したモデルを作成し、引張りせん断荷重を加え、接合端部のばねの引きはがし方向(モードI)の変位により生じるばね力によりはく離のしやすさを評価することを試みた。溶込部の幅および深さを变化させたモデルを準備し、接合体の強度特性に及ぼす溶込部形状の影響について有限要素法解析により調べた。なお、ここでは、接合時の入熱量が小さい条件で得られた接合体、すなわち、A5052側の溶込部にPETが完全に入り込んでいる状態をモデル化している。例として、溶込部の幅が一定の場合のはく離力(F_{mp})に及ぼす溶込部深さ(D_{mp})の影響を図5に示す。同図の縦軸は、溶込部深さが0.1mmのときのはく離力($F_{0.1}$)で整理している。図5より、溶込部深さが増加すると、はく離力(すなわち、はく離を生じさせる力)が低下している。これは、実験で、接合時の入熱量が小さい条件で得られた接合体では、入熱量の増加にともない溶込深さが増加し、さらに、引張りせん断強度が増加した傾向と一致している。なお、本稿では省略するが、引張りせん断強度に及ぼす溶込部幅の影響は小さかった。

接合体の強度特性には、他にも、熱によるプラスチック材料の機械的性質の劣化が考えられる。そのような観点では、接合時の入

熱量が小さい方が、高い接合強度が期待される。しかし、実際には、入熱量が変化すると、溶込部形状、気泡の生成状態、プラスチックの熱劣化などが同時に生じるため、これら複数の因子の影響を同時に考慮して接合条件を導き出す必要がある。他方、本研究で示したように、接合部の大きさが制限されるような微小部品の場合、荷重負荷形式によっては、溶込部形状により、接合強度を制御する手法は有効と考えられる。

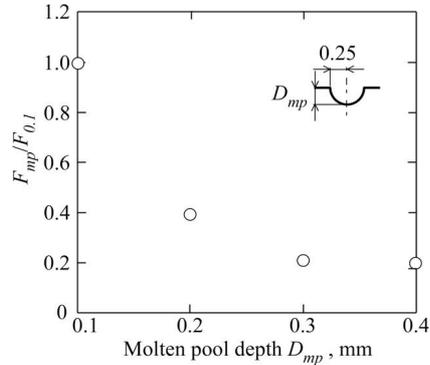


図5 PET/A5052接合体のはく離力(F_{mp})に及ぼす溶込部深さ(D_{mp})の影響。

(2) 気泡の生成挙動の影響

金属材料としてステンレス鋼(SUS304)、プラスチック材料としてポリエチレンテレフタレート(PET)を用いて実験を行った。接合実験には波長1070nmのファイバーレーザーを用いた。

実験の概略図を図6に示す。SUS304の上にPETを重ね合せ、スポット接合を行った。プラスチック側界面近傍の気泡生成状態を变化させるため、接合面下部から静的な押付力および加振力を付与することを試みた。加振力を付与した接合実験では、接合中に接合下部から圧電素子により、正弦波、荷重振幅50N、最大押付力100N、周波数0.1、1および10kHzの負荷条件で繰り返し押付力を加えた。なお、レーザーの出力はプラスチック界面近傍に気泡の生成が確認される5.6J/Pとした。

図7に各接合条件で得られた接合体の破断荷重および接合面積を示す。同図より、0~200Nの押付力では、押付力の増加にともない破断荷重および接合面積のいずれも増加した。他方、300~500Nの押付力では、押付力の増加にともない、破断荷重および接合面積が減少した。加振力を負荷した場合、静

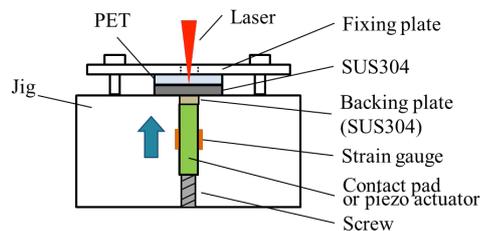


図6 接合部に押付力および加振力を負荷したPET/SUS304接合実験の模式図。

的な押付力 100N を負荷した場合の結果と比較して、破断荷重および接合面積は低い値を示し、また、周波数の増加にともない、それらが減少する傾向を示した。なお、いずれの接合体も、界面近傍の PET 側に気泡が生成していた。各接合条件で得られた接合体の引張せん断試験後の破面観察から、PET 側に気泡が生成した領域では、SUS304 側の破面に PET が付着していた。すなわち、気泡の間を、気泡同士が連結するようにき裂が進展し、破壊に至ったと考えられる。

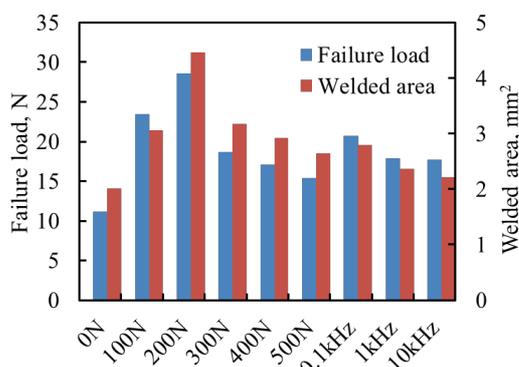


図 7 PET/SUS304 接合体の破断荷重および接合領域面積。

気泡生成領域の気泡の大きさの分布を図 8 に示す。同図より、押付力 0N では大きい寸法の気泡が、静的な押付力を加えた場合および加振力を負荷した場合には、小さい寸法の気泡が多く観察された。引張せん断試験より得られた破断荷重を、破面観察より得られた接合面積で除することにより求めた見かけの引張せん断強度と、各接合条件での気泡密度の関係を図 9 に示す。なお、ここで、気泡密度は、単位長さ (mm) あたりの気泡の個数と定義した。静的な押付力を加えた場合と比較して、加振力を負荷した場合には、気泡密度は低い値を示し、また、周波数の増加にともない気泡密度は低下した。他方、静的な押付力を加えた場合は、押付力の増加にともない気泡密度は増加する傾向を示した。引張せん断強度は、押付力 0N で得られた接合体が、気泡密度が低いにもかかわらず最も低い値を示した。その他の条件で得られた接合体では、気泡密度の増加にともない引張せん断強度が低下する傾向が認められた。押付力 0N では、生成した気泡が容易に膨張できるため、

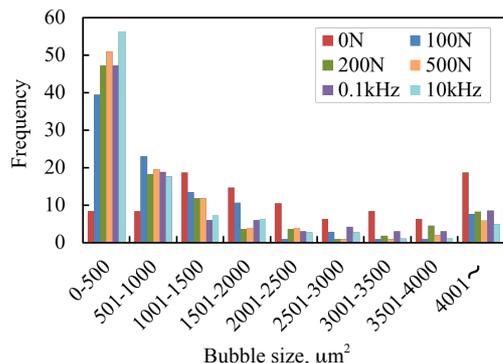


図 8 PET/SUS304 接合体の気泡寸法分布。

気泡の寸法が大きくなり、その気泡が欠陥として働くことで低い接合強度を示したと考えられる。他方、押付力を加えた場合には、気泡の膨張が抑制され、気泡の寸法が小さくなる。また、押付力 200N 以下では、軟化・溶融した PET が広がることで接合面積も増加したと考えられる。しかし、押付力 300N 以上では、接合界面での密着性が向上したことより、軟化・溶融した PET の流動が制限され、接合面積の増加が抑えられたと推察される。また、静的な押付力 100N を加えた場合よりも最大押付力 100N の加振力を負荷した場合の方が比較的小さい接合面積を示したことは、平均押付力では加振力の方が小さいことや粘弾性挙動に起因した効果などに起因すると考えられる。

図 9 に示すように、静的な押付力を加えた場合および加振力を負荷した場合、気泡密度の増加にともない、接合強度が低下していた。そこで、PET 側界面近傍に生成した気泡を 2 次元の直線上の周期き裂群と仮定し、気泡密度の違いによる応力拡大係数の変化を検討した。応力拡大係数の算出式を式(1)および(2)に示す。図 7 より、押付力を加えた場合および加振力を負荷した場合には、面積 500 μm² 以下の気泡が最も多く存在していたため、ここではき裂長さ 2a を 25 μm 一定と仮定し、き裂の間隔 d を各押付力での気泡密度から算出した。

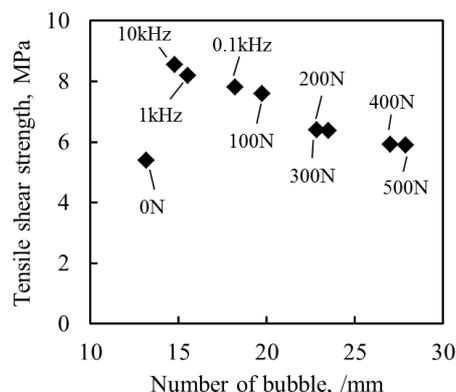


図 9 PET/SUS304 接合体の引張せん断強度と気泡密度の関係。

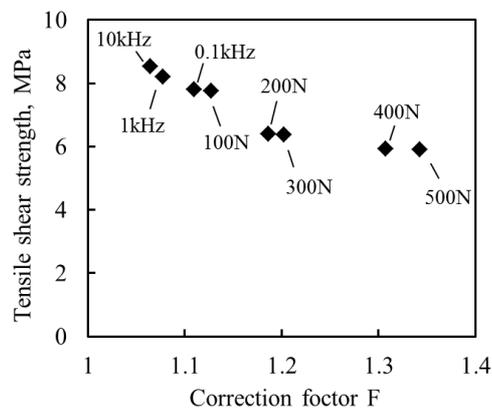


図 10 PET/SUS304 接合体の引張せん断強度と応力拡大係数の補正係数 F の関係。

$$K_1 = F_1 \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

$$F = \sqrt{\frac{d}{\pi a} \tan(\pi a/d)} \quad (2)$$

各接合条件で得られた接合体に対して、応力拡大係数の補正係数(式(1)の F) を求め、引張りせん断強度との関係をプロットした結果を図 10 に示す。同図より、引張りせん断強度は補正係数(すなわち応力拡大係数)により良く整理されている。押付力を加えない場合に比べて、押付力を加えた場合には、気泡の寸法は小さくなるが、押付力が過大な条件では、接合面積の増加があまり生じないために気泡密度としては高くなる。加振力を負荷した場合、熔融・軟化した PET の流動が生じ、それにともない気泡も移動し、結果として気泡密度が低くなった可能性が考えられる。気泡密度が高い場合には、図 10 の結果から、気泡同士が連結しやすくなることで、接合体の引張せん断強度が低下すると考えられる。すなわち、本実験で認められた押付力負荷条件の違いによる接合体の引張りせん断強度の変化は、主として、押付力の違いにより生じる気泡密度の変化に起因すると考えられる。また、加振力を負荷することにより、気泡密度を低下させることができたことから、同手法は、気泡の生成状態の制御および接合体の強度向上に有効であるといえる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Y. KURAKAKE, Y. FARAZILA, Y. MIYASHITA, Y. OTSUKA and Y. MUTOH, Effect of Molten Pool Shape on Strength of Dissimilar Materials Laser Spot Joint between Plastic and Metal, Journal of Laser Micro/Nanoengineering, 査読有, 8-2 (2013) pp. 161-164.

[学会発表] (計 15 件)

- ① 宮下幸雄, プラスチック/金属異材直接接合のプロセスとその接合体強度, 日本機械学会 2014 年度年次大会, 2014 年 9 月 10 日, 東京電気大学.
- ② 宮下幸雄, プラスチックと金属の異材直接接合, 第 260 回材料試験技術シンポジウム, 2014 年 7 月 25 日, 燕三条地場産業振興センター.
- ③ Akira FUJII, Yukio MIYASHITA and Yuichi OTSUKA, Strength and fracture morphology of a laser lap dissimilar materials joint between SUS304 and PC, The 3rd International GIGAKU Conference in Nagaoka (IGCN2014), 2014 年 6 月 21 日, 長岡技術科学大学.
- ④ Yukio Miyashita, Tepei Watanabe,

Yuichi Otsuka, Formation Behavior of Bubbles and its effect on Joining Strength in Dissimilar Materials Laser Spot Joining between PET and SUS304, ICM&P2014; The 5th JSME/ASME International Conference on Materials and Processing 2014 (ICM&P2014), 2014 年 6 月 11 日, Cobo center (デトロイト, 米国).

- ⑤ 宮下幸雄, レーザによる異種金属およびプラスチック/金属異材接合, 日本溶射学会中部支部第 12 期第 4 回溶射技術研究会, 2014 年 1 月 30 日, まちなかキャンパス長岡.
- ⑥ 渡辺哲平, 宮下幸雄, 大塚雄市, PET/SUS304 レーザスポット接合体の気泡生成挙動とその接合強度特性への影響, 日本機械学会北陸信越支部第 51 期講演会, 2014 年 3 月 8 日, 富山県立大学.
- ⑦ 渡辺哲平, 宮下幸雄, 大塚雄市, 金属とプラスチックの異材レーザスポット接合体の接合強度に及ぼす気泡の影響, 日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス, 2013 年 10 月 14 日, 岐阜大学.
- ⑧ Y. Miyashita, T. Watanabe, Y. Kurakake, Effect of Contact Force on Formation Behaviour of Bubbles in SUS304 / PET Dissimilar Materials Laser Spot Joining, LPM2013- The 14th International Symposium on Laser Precision Microfabrication, HPL2013- The 6th International Symposium on High Power Laser Processing, 2013 年 7 月 25 日, 朱鷺メッセ.
- ⑨ 宮下幸雄, 倉掛優, 大塚雄市, 武藤睦治, PET/A5052 レーザスポット接合体の強度特性に及ぼす負荷条件の影響, 日本材料学会第 62 期学術講演会, 2013 年 5 月 17 日~19 日, 東京工業大学.
- ⑩ 倉掛 優, 宮下幸雄, 大塚 雄市, 武藤睦治 YAG レーザによる PET/A5052 異材スポット接合体の強度特性に及ぼす金属表面粗さの影響, 日本機械学会 北陸信越支部 第 50 期総会・講演会, 2013 年 3 月 9 日, 福井大学工学部
- ⑪ 渡辺哲平, 倉掛 優, 宮下幸雄, 大塚雄市, 武藤睦治, ファイバーレーザによる PET/SUS304 の異材スポット接合体の強度特性に及ぼす気泡の影響, 日本機械学会北陸信越支部 第 50 期総会・講演会, 2013 年 3 月 9 日, 福井大学工学部
- ⑫ 前田卓磨, 倉掛 優, 渡辺哲平, 宮下幸雄, 大塚雄市, 武藤睦治, ファイバーレーザによるポリカーボネートと SUS304 の異材スポット接合, 日本機械学会 北陸信越支部 第 42 回学正員卒業研究発表講演会, 2013 年 3 月 9 日, 福井大学工学部
- ⑬ 宮下幸雄, レーザによる異材接合のプロセスとその接合体強度, 日本機械学会第 20 回機械材料・材料加工技術講演会

- (M&P2012) , 2012 年 11 月 30 日, 大阪工業大学 大宮キャンパス.
- ⑭ Y. KURAKAKE, Y. FARAZILA, Y. MIYASHITA, Y. OTSUKA and Y. MUTOH Effect of Molten Pool Shape on Strength of Dissimilar Materials Laser Spot Joint between Plastic and Metal, 13th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM2012), 2012 年 6 月 13 日, The Catholic University of America (Washington D. C., 米国) .
- ⑮ 倉掛優, Farazila Yusof, 宮下幸雄, 大塚雄市, 武藤睦治 プラスチックと金属の異材レーザースポット接合における溶込部形状の影響, 高温強度・破壊力学合同シンポジウム(第49回高温強度シンポジウム, 第15回破壊力学シンポジウム) 2011年11月25日, 石垣市民会館.

[図書] (計3件)

- ① 宮下幸雄 (共著), サイエンス&テクノロジー株式会社, 異種材料一体化のための最新技術(第4章第2節「金属とPETの異材レーザースポット接合」を担当) 2012.
- ② 宮下幸雄 (共著), 株式会社エヌ・ティー・エス, 破壊力学体系—壊れない製品設計へ向けて—(第1編, 第3章「溶接構造」, 3節「異材溶接」を担当) 2012.
- ③ Y. Miyashita (ed. by Seiji Katayama), Laser welding technologies (Ch.11:Twin beam laser welding technology)2013.

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
○取得状況 (計0件)

[その他]

- 解説記事 (計1件)
- ① 宮下幸雄, プラスチックと金属の異材直接接合, 材料試験技術, 59-3, (2014).
- 受賞 (計1件)
- ① 名称;平成23年度溶接学会奨学賞受賞受賞者;倉掛優(長岡技術科学大学大学院)
研究題目;プラスチックと金属のレーザースポット接合法の開発とその強度特性評価

6. 研究組織

(1)研究代表者

宮下幸雄 (MIYASHITA, YUKIO)
長岡技術科学大学・工学部・准教授
研究者番号: 00303181

(2)研究分担者

なし.

(3)連携研究者

古口日出男 (KOGUCHI HIDEO)
長岡技術科学大学・工学部・教授
研究者番号: 90143693

磯部浩已 (ISOBE HIROMI)
長岡技術科学大学・工学部・准教授
研究者番号: 60272861