

平成 29 年度採択  
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業  
戦略的基盤技術高度化支援事業

「ロボット摩擦重ね接合法（FLJ）による金属/CFRPの  
直接異材接合の製品化に向けた最適制御を伴う  
高機能ロボットFLJシステムの研究開発」

研究開発成果等報告書

令和 2 年 3 月

担当局 中部経済産業局  
補助事業者 公益財団法人 名古屋産業振興公社

## 目 次

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第1章 研究開発の概要                   |    |
| 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標          | 3  |
| (1) 研究開発の背景                   |    |
| (2) 研究目標                      |    |
| 1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者） | 4  |
| 1-3 成果概要                      | 5  |
| 1-4 当該研究開発の連絡窓口               | 6  |
| 第2章 本論                        |    |
| 2-1 装置の設計製作                   | 6  |
| 2-2 制御技術の開発                   | 8  |
| 2-3 試験片での接合確認                 | 9  |
| 2-4 模擬製品での接合確認                | 10 |
| 第3章 全体総括                      |    |
| 3-1 研究開発成果                    | 11 |
| 3-2 研究開発後の課題                  | 11 |
| 3-3 事業展開                      | 11 |

## 第1章 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### (1) 研究開発の背景

近年、自動車業界においては、各社とも車体の軽量化への技術革新が進んでいる。車体の軽量化において急速に材料置換が進みつつある。材料置換の主流は非鉄及び樹脂であるが、非鉄としてはアルミ、樹脂としては炭素繊維強化樹脂(CFRP)が主流と考えられる。今後さらにアルミやCFRPが増大する傾向である。このため、適材適所に使用する材料を変えたマルチマテリアル化が進むと考えられている。特に、従来使用される金属と軽量で比強度に優れるCFRPの組合せは期待が大きい。

異材種接合には様々な方式があるが、ほとんどの方式は接合の為にボルトや接着剤等の副資材を必要とする。そのため新技術として、レーザー直接接合法及びFLJ(摩擦重ね接合法)への期待が高い。

レーザー直接接合法では、人体に有害なレーザー光を用いるため、安全対策が重要である。そのため、製品及び装置を専用の部屋で囲い人間と隔離する必要がある。対して、後で述べるようにFLJでは光や音など人体に有害なものの発生が無く、作業環境に優れている。

また、自動車業界において、生産ラインでは産業用ロボットが多く採用されており、従来の鉄の接合方法の主流である溶融溶接(アーク溶接等)や抵抗溶接(スポット溶接)において、ほぼロボット化が行われている。そのため、異材種接合においても、現状あるロボットの生産ラインにそのまま対応できる点が求められる。その点においても、先に述べたレーザー光を遮るための安全対策が必要なレーザー直接接合よりもFLJが優れている。

接合の適用形状についても自動車の部品には三次元曲面形状が多用されているため、三次元曲面での接合の可能性は重要な点である。三次元曲面の動きへの対応はロボットの得意分野である。

ロボット摩擦重ね接合法(FLJ)は、従来の加工機タイプに比較し、「装置自体がコンパクト」「自由な設置レイアウトが可能」「従来のスポット溶接等の自動化ラインへの組込みが容易」といった特徴がある。ロボット摩擦重ね接合法(FLJ)では、ロボットが潜在的に抱えている外力がアーム先端に係った際のロボットアーム部のたわみを解決するため、加圧の制御を備えている。高速回転する接合ツールの金属表面への押し付けを加圧力制御し、ロボットアームのたわみによる加圧力の変化を検知し、たわみ分の補正を加えるフィードバック制御を有している装置である。

## (2) 研究目標

### 【1. 加圧制御の開発】

加圧力制御機能を開発することでバリの発生を抑制し、母材強度以上の接合強度を確保する。  
また、接合界面の解析を行い、接合品質及び接合界面状態の検証を行う。

### 【2. 曲面形状での加工ツール軌跡制御の開発】

加工ツール軌跡制御の開発により、加工ツール先端位置をフィードバックしたロボット動作制御により緻密な加工動作を実現し、川下企業からの要求値である R50、R100 での凸 R、凹 R の直線接合時において、バリ発生を抑制する。

### 【3. 接合状態の観察】

フェーズドレイ探触子を使用した超音波探傷法による非破壊での接合状態の観察、光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて接合界面の観察を行う。

## 1-2 研究体制

事業管理機関 公益財団法人 名古屋産業振興公社

トライエンジニアリング株式会社  
名古屋市工業研究所  
国立研究開発法人 産業技術総合研究所

## 研究等実施機関

|      |                    |                                   |       |
|------|--------------------|-----------------------------------|-------|
| (PL) | トライエンジニアリング(株)     | 取締役 営業部 部長 兼 開発部部长                | 岡 丈晴  |
|      | トライエンジニアリング(株)     | 製造部 設計技術課 課長 兼 開発課 担当課長           | 東 和也  |
| (SL) | 名古屋市工業研究所          | システム技術部 製品技術研究室長                  | 夏目 勝之 |
|      | 名古屋市工業研究所          | システム技術部 製品技術研究室 研究員               | 深谷 聡  |
|      | 名古屋市工業研究所          | システム技術部 金属表面技術研究室 研究員             | 浅野 成宏 |
|      | 名古屋市工業研究所          | システム技術部 製品技術研究室 研究員               | 浅尾 洋貴 |
|      | 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 | 企画本部・産業技術企画調査員 (構造材料研究部門・研究グループ付) | 千野 靖正 |
|      | 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 | 構造材料研究部門・上級主任研究員                  | 斎藤 尚文 |
|      | 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 | 構造材料研究部門・主任研究員                    | 黄新ショウ |

アドバイザー

|              |                                    |       |
|--------------|------------------------------------|-------|
| 大阪大学 接合科学研究所 | 名誉教授                               | 中田 一博 |
| 三菱自動車工業株式会社  | 生産技術本部 溶接組立生産技術部<br>マネージャー(先行技術担当) | 曲田 吉史 |
| 東レ株式会社       | オートモーティブセンター 主席部員                  | 土谷 敦岐 |

1-3 成果概要

|   | 研究開発実施内容                                      | 実施結果   |
|---|---|--|
| ① | 装置の設計   | 25 k g 可搬用、225 k g 可搬用、<br>600 k g 可搬用の設備の設計を完了                                |
| ② | 装置の製作   | 25 k g 可搬用、225 k g 可搬用、<br>600 k g 可搬用 の設備の製作を完了                               |
| ③ | 加圧力補正機能の開発                                    | 完了   |
| ④ | 加工ツール軌跡制御の開発                                  | 完了   |
| ⑤ | 加圧力補正機能の確認                                    | 一定の効果がある事を確認した   |
| ⑥ | 加工ツール軌跡制御の確認                                  | 効果はあるが課題もある事が確認できた   |
| ⑦ | 接合試験片での接合                                     | 25 k g 可搬用、225 k g 可搬用、600 k g 可<br>搬用<br>それぞれでの接合試験片の製作を完了                    |
| ⑧ | 接合試験片の接合部バリの高さ計<br>測                          | 25 k g 可搬での接合=バリ高さ許容値内<br>225 k g 可搬での接合=バリ高さ許容値内<br>600 k g 可搬での接合=バリ高さ一部許容値外 |
| ⑨ | 接合試験片の引張り試験機での強<br>度確認                        | 一部条件では母材破断するほどの<br>接合強度が確認できた。   |
| ⑩ | 接合試験片のフェーズドアレイ探<br>触子を使用した超音波探傷法<br>による接合部の観察 | 非破壊での CFRP 側の溶量を測定する事ができ<br>た  |
| ⑪ | 接合試験片の光学顕微鏡と<br>走査型電子顕微鏡(SEM)での<br>接合界面の観察    | 界面剥離やポアを確認する事ができた  |
| ⑫ | 模擬製品固定治具、<br>検査治具の設計、製作                       | 当初仕様通りに設計、製作完了   |
| ⑬ | アルミ模擬製品、CFRP 模擬製品<br>の製作                      | 当初仕様通りに設計、製作完了   |
| ⑭ | 模擬製品での接合                                      | 25 k g 可搬用、225 k g 可搬用、600 k g 可<br>搬用<br>それぞれでの接合試験片の製作を完了                    |
| ⑮ | 模擬製品検査治具での検査                                  |  |
| ⑯ | 模擬製品の引張り試験機での強度<br>確認                         | 製品形状により困難だった   |
| ⑰ | 模擬製品のフェーズドアレイ探触<br>子を使用した超音波探傷法<br>による接合部の観察  | 製品形状や不感帯内によって<br>試験片と同等の結果は得られず  |

|                                     |                   |
|-------------------------------------|-------------------|
| ⑬ 模擬製品の光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡(SEM)での接合界面の観察 | 界面剥離やポアを確認する事ができた |
|-------------------------------------|-------------------|

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

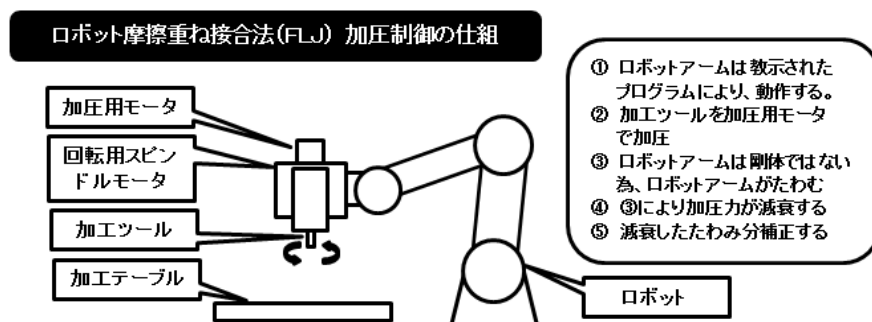
|        |                   |
|--------|-------------------|
| 企業・団体名 | トライエンジニアリング株式会社   |
| 所在地    | 名古屋市守山区花咲台2丁目601番 |
| 氏名     | 岡 丈晴              |
| 所属     | 営業部 兼 開発部         |
| 役職     | 取締役 部長            |
| 電話番号   | 052-725-8111      |
| FAX 番号 | 052-739-3581      |
| E-mail | info@trieg.co.jp  |

## 第2章 本論

### 2-1 装置の設計製作

#### 【従来技術】

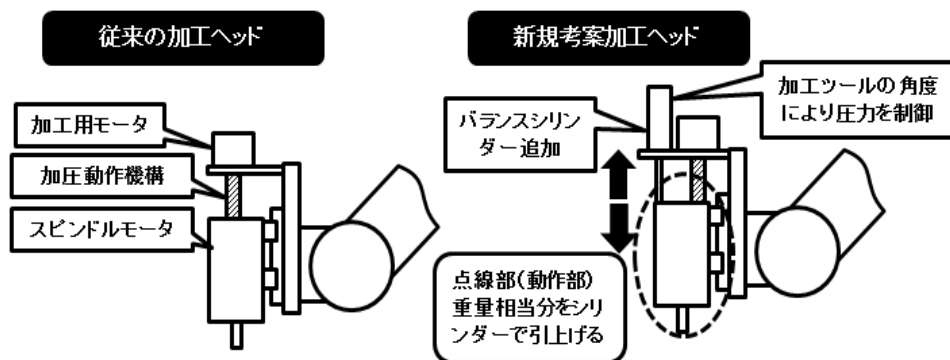
ロボット摩擦重ね接合法（FLJ）ではロボットが潜在的に抱えている外力がアーム先端に係った際のロボットアーム部のたわみを解決する為、加圧の制御を備えている。高速回転する接合ツールの金属表面への押し付けを加圧制御とし、ロボットアームのたわみによる加圧力の変化を検知し、たわみ分の補正を加えるフィードバック制御を有している装置である。



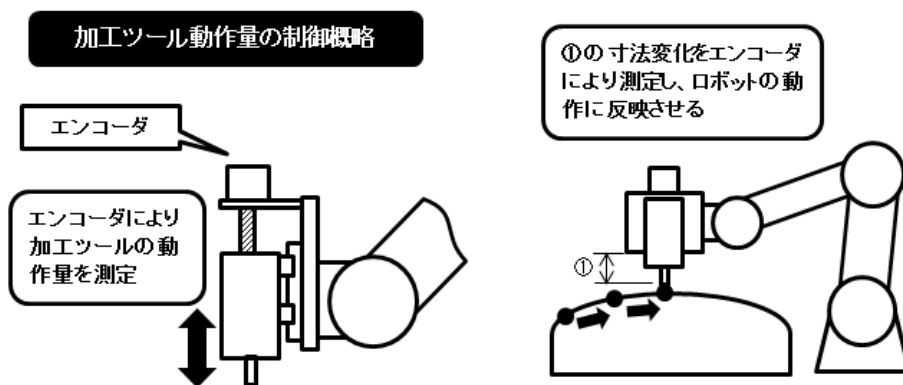
但し、現状の装置では、加圧制御が未熟である点、曲面接合時のツール先端の曲面形状に沿った動きが未成熟な点があり、接合表面にバリの発生や材料厚の減少といった不具合が発生している。

【本研究開発】

従来技術の課題を解決する手法として、下記内容の開発、実証実験をし、製品化を目指す。



加工ツール先端の動作量を測定し、加工ツール先端位置をフィードバックしたロボット動作制御を開発し、緻密な加工動作を実現する。



自動車車体には、0.5mm～1mm 程度の薄厚プレス材及び

1mm～3mm 程度の普通プレス材アルミダイカスト材、アルミ押出材、

3mm～5mm 程度のアルミダイカスト材、アルミ押出材が存在する。

それぞれ、必要な加圧力が異なり、それに伴い主軸モータやロボットサイズも異なる為、金属側の板厚によって異なるサイズのロボットシステムが必要となる。

そこで本研究開発では、金属、樹脂のそれぞれの材料(材質)及び板厚に対し、必要な接合条件を確認するとともに、適合する3台のロボットサイズで検証を行う。



25kg 可搬

225kg 可搬

600kg 可搬

## 2-2 制御技術の開発

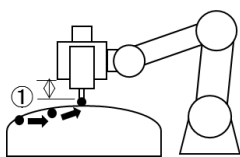
### 【加圧力補正機能】

- ・加圧方向をロボット側で計算させ加圧力に補正をかける。

当初はバランスシリンダーのエア圧を変更することで横方向の加圧制御補正をしていたが、水平方向での加圧では摺動抵抗などが垂直加圧に比べて大きくなる為、加圧誤差が大きかった、新しく加圧方向をロボット側で計算し加圧モータへの指令値に補正をかける制御を開発し加圧誤差を小さくする事が可能になった。

### 【加工ツール軌跡制御】

現状の問題点…加圧制御の為、ツール先端の位置が常に変化し加工品質が安定しない



ロボットアームは曲面に沿った動きをするが、加圧制御により①の寸法が変化する為、ツール先端の位置が変わるその為、曲面に沿った動きができない

補正機能の開発：加圧時に加圧軸が出過ぎないようにオフセット補正をかける



## 2-3 試験片での接合確認

### 【接合試験片の製作】

接合後バリの高さを測定し品質確認を行った。

| パネルNo. | バリ高さ(mm) |    |      | 破断荷重(N) |       | 写真      | コメント |
|--------|----------|----|------|---------|-------|---------|------|
|        | 条件(1)    | 結果 | 超過量  | 中央値との差  | 差分(%) |         |      |
| 11     | ①-0.12   | x  | 0.02 | 3272    | +19   | 0.6 %   |      |
|        | ②-0.12   | x  | 0.02 |         |       |         |      |
| 12     | ①-0.05   | o  |      | 3271    | +18   | 0.6 %   |      |
|        | ②-0.06   | o  |      |         |       |         |      |
| 13     | ①-0.09   | o  |      | 3289    | +36   | 1.1 %   |      |
|        | ②-0.09   | o  |      |         |       |         |      |
| 14     | ①-0.15   | x  | 0.05 | 3248    | -5    | -0.2 %  |      |
|        | ②-0.07   | o  |      |         |       |         |      |
| 15     | ①-0.12   | x  | 0.02 | 3253    | 0     | 0 %     |      |
|        | ②-0.09   | o  |      |         |       |         |      |
| 16     | ①-0.04   | o  |      | 3365    | +112  | 3.4 %   |      |
|        | ②-0.07   | o  |      |         |       |         |      |
| 17     | ①-0.08   | o  |      | 2487    | -766  | -23.5 % | 母材破断 |
|        | ②-0.06   | o  |      |         |       |         |      |
| 18     | ①-0.08   | o  |      | 2585    | -668  | -20.5 % | 母材破断 |
|        | ②-0.09   | o  |      |         |       |         |      |
| 19     | ①-0.12   | x  | 0.02 | 2984    | -269  | -8.3 %  |      |
|        | ②-0.16   | x  | 0.06 |         |       |         |      |
| 20     | ①-0.01   | o  |      | 2844    | -409  | -12.6 % |      |
|        | ②-0.05   | o  |      |         |       |         |      |

| パネルNo. | バリ高さ(mm) |    |      | 破断荷重(N) |       | 写真      | コメント |
|--------|----------|----|------|---------|-------|---------|------|
|        | 条件(1)    | 結果 | 超過量  | 中央値との差  | 差分(%) |         |      |
| 11     | ①-0.05   | o  |      | 1933    | -104  | -5.1 %  |      |
|        | ②+0.09   | o  |      |         |       |         |      |
| 12     | ①-0.04   | o  |      | 1382    | -655  | -32.2 % |      |
|        | ②+0.08   | o  |      |         |       |         |      |
| 13     | ①+0.01   | o  |      | 2271    | +234  | 11.5 %  |      |
|        | ②+0.09   | o  |      |         |       |         |      |
| 14     | ①-0.03   | o  |      | 1280    | -757  | -37.2 % |      |
|        | ②+0.08   | o  |      |         |       |         |      |
| 15     | ①-0.04   | o  |      | 2037    | 0     | 0 %     |      |
|        | ②+0.08   | o  |      |         |       |         |      |
| 16     | ①-0.03   | o  |      | 1791    | -246  | -12.1 % |      |
|        | ②+0.09   | o  |      |         |       |         |      |
| 17     | ①-0.03   | o  |      | 2158    | +121  | 5.9 %   |      |
|        | ②+0.09   | o  |      |         |       |         |      |
| 18     | ①-0.03   | o  |      | 2055    | +18   | 0.9 %   |      |
|        | ②+0.06   | o  |      |         |       |         |      |
| 19     | ①-0.04   | o  |      | 2053    | +16   | 0.8 %   |      |
|        | ②+0.08   | o  |      |         |       |         |      |
| 20     | ①-0.02   | o  |      | 2275    | +238  | 11.7 %  |      |
|        | ②+0.11   | x  | 0.01 |         |       |         |      |

| パネルNo. | バリ高さ(mm) |    |      | 破断荷重(N) |       | 写真      | コメント |
|--------|----------|----|------|---------|-------|---------|------|
|        | 条件(1)    | 結果 | 超過量  | 中央値との差  | 差分(%) |         |      |
| 6      | ①-0.04   | o  |      | 3355    | +242  | 7.8 %   |      |
|        | ②+0.55   | x  | 0.45 |         |       |         |      |
| 7      | ①-0.03   | o  |      | 2352    | -761  | -24.4 % |      |
|        | ②+0.06   | o  |      |         |       |         |      |
| 8      | ①-0.04   | o  |      | 3113    | 0     | 0 %     |      |
|        | ②+0.36   | x  | 0.26 |         |       |         |      |
| 9      | ①-0.04   | o  |      | 3255    | +142  | 4.6 %   |      |
|        | ②+0.35   | x  | 0.25 |         |       |         |      |
| 10     | ①-0.03   | o  |      | 2988    | -125  | -4 %    |      |
|        | ②+0.03   | o  |      |         |       |         |      |

0.1mm 以内を目標値とし試験を実施したがアルミ側の板厚が厚くなるにつれ接合強度を確保しつつバ리를抑える事が困難だった。

原因は板厚が厚くなると入熱量を増やし CFRP 側へ熱を加える必要があるが入熱量が上がるとバリが出やすくなる為と考えられる。

### 【接合試験片の接合部の強度確認と観察】

接合部を短冊状に切断し条件の変化による強度の違いを引張り試験で確認した。

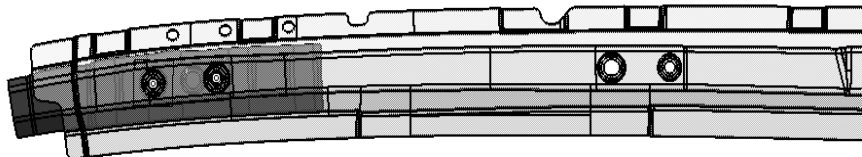


引張り試験

## 2-4 模擬製品での接合確認

### 【模擬製品での接合】

試験片での接合条件を参考に模擬製品での接合を実施した。



模擬製品形状

|   | 編1   | 編2   | 編3   | 編4   | 写真 | 編5   | 編6   | 編7   | 編8   | 写真 |
|---|------|------|------|------|----|------|------|------|------|----|
| 1 | 10.4 | 10.9 | 10.4 | 11.3 |    | 11.3 | 10.1 | 10.5 | 10.6 |    |
| 2 | 10.7 | 11.2 | 10.5 | 10.6 |    | 11   | 8.9  | 10.4 | 9.9  |    |
| 3 | 10.3 | 10.7 | 9.9  | 11.2 |    | 11.2 | 9.9  | 10.4 | 10.4 |    |
|   | 編1   | 編2   | 編3   | 編4   | 写真 | 編5   | 編6   | 編7   | 編8   | 写真 |
| 1 | 12.8 | 12   | 11   | 9.7  |    | 12.2 | 11.7 | 11.7 | 10.7 |    |
| 2 | 12.7 | 11.9 | 10.6 | 10.8 |    | 10.8 | 11.4 | 11.1 | 10.4 |    |
| 3 | 10.5 | 10.1 | 10.4 | 10.4 |    | 12.5 | 11.2 | 11.2 | 10.6 |    |
|   | 編1   | 編2   | 編3   | 編4   | 写真 | 編5   | 編6   | 編7   | 編8   | 写真 |
| 1 | 10.4 | 9.2  | 9.4  | 10.8 |    | 13.1 | 11   | 10.4 | 10.9 |    |
| 2 | 12.8 | 9.2  | 9.9  | 10.8 |    | 13.6 | 10.8 | 10.7 | 9.6  |    |
| 3 | 10.5 | 9.7  | 10.5 | 11   |    | 10.6 | 10.4 | 10.7 | 6.7  |    |

模擬製品での接合確認

### 【模擬製品の接合部の強度確認と観察】

曲率のある模擬製品だと試験片と同等の検査は困難になる。

曲率引張り試験機では接合部に垂直に力を加える事ができない事や

フェーズドアレイ探触子を使用した超音波探傷法でも曲率によりパネルとの密着度が低下し安定した観察は困難となった。

光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて接合界面を観察した。

接合界面の観察を重点的に実施し、アルミ厚さと界面剥離の関係を定性的に抽出することができた。また、アルミ合金側の結晶配向状態を調査し、入熱量の大小により残留歪みの蓄積が異なることを定性的に把握することができた。FLJ 接合における加工条件を最適化する上で直接利用できる情報であると考えている。

## 第3章 全体総括

### 3-1 研究開発成果

開発した制御技術により試験片だけでなく 3D 形状の模擬製品でもロボット摩擦重ね接合法で接合する事ができた。

### 3-2 研究開発後の課題

アルミ側の板厚が厚くなるにつれ接合強度を確保しつつバリを抑える事が困難だった。

板厚が厚くなると入熱量を増やし CFRP 側へ熱を加える必要があるが入熱量が上がるとバリが出やすくなる。表面の入熱を抑えつつ CFRP 側へより熱が伝わるツールが必要になると考えている。

模擬製品では破壊検査・非破壊検査共に計測が難しく、事業化で求められる破壊検査・非破壊検査方法についてエンドユーザー側の必要条件の調査も含め検討していく必要がある。

### 3-3 事業展開

自動車の軽量化での異材種接合への関心は依然として高い状況と判断される。

自動車メーカー及び Tier1 メーカー、材料メーカーからも本研究開発に対し多大な関心を示す情報を入手している。本研究開発終了後も引き続きユーザー様と接合試験実施し開発を続け設備販売に繋げていきたい。