

【公開版】

平成29年度  
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

「接合方向誘導機構を有する同軸スピンドル式小型F S W装置の開発」

研究開発成果等報告書

平成30年3月

担当局 近畿経済産業局  
補助事業者 国立大学法人大阪大学接合科学研究所

目 次

第1章	研究開発の概要	4
1 - 1	研究開発の背景・研究目的及び目標	4
1 - 1 - 1	研究開発の背景	4
1 - 1 - 2	研究目的及び目標	4
1 - 1 - 3	実施内容	6
1 - 2	研究体制	6
1 - 2 - 1	研究組織及び管理体制	6
1 - 2 - 2	研究者氏名	8
1 - 2 - 3	協力者	8
1 - 3	成果概要	9
1 - 4	当該研究開発の連絡窓口	12
1 - 4 - 1	事業管理機関	12
1 - 4 - 2	研究実施機関	12
第2章	本論	13
2 - 1	予熱機構技術への対応	13
2 - 1 - 1	予熱機構及び温度測定方法の基本決定	13
2 - 2	回転力相殺機構技術と予熱機構技術への対応	15
2 - 2 - 1	予熱機構を有する対向スピンドル式F S W装置の開発	15
2 - 2 - 2	接合条件の最適化	18
2 - 3	装置の小型化技術への対応	21
2 - 3 - 1	予熱機構を有する同軸スピンドル式小型F S W装置の開発	21
2 - 4	接合開始・終了タイミングの制御技術	23

## 【公開版】

2 - 4 - 1	同軸スピンドル式小型F S W装置の接合条件の最適化.....	23
2 - 4 - 2	接合方向誘導機構の有効性の実証 .....	27
2 - 5	プロジェクトの運営・管理.....	30
第3章	全体総括.....	31

## 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

#### 1-1-1 研究開発の背景

部材同士を接合する技術において、アーク溶接を代表とする溶融溶接が一般的に用いられてきたが接合時に高温となるため接合部材の品質が劣化するという問題があった。

近年、接合部材に押し当てたツールの回転による摩擦熱によって接合部を軟化させ、固相状態にある部材内部に挿入させたプローブの回転により部材同士を攪拌して接合する摩擦攪拌接合が用いられてきている。この摩擦攪拌接合技術は品質の劣化が極めて少ない付加価値の高い技術であり、鉄道車両・航空・自動車で活用されており、主に鉄道車両の車体用アルミニウム合金押出材の接合方法として導入が進んでいる。

しかしながら、この技術の使用には2015年1月まで英国接合研究所とのライセンス契約が必要であったことから、それらの使用の殆どは大企業に制限され、中小企業の間ではまだまだ広まりを見せていない。今後、中小企業を含めた多くの企業や産業でFSWの技術を普及するにあたり以下の様な課題を解決する仕様の装置が求められる。

- ・小規模工場や、作業現場でも容易に設置できる小型装置
- ・接合部材への負荷（回転力や推進力）が少なく簡易な固定機構で対応できる装置
- ・接合タイミングが自動化され、小ロット生産に適した装置
- ・プログラミングの必要なく、自在に手動送りでの接合が可能となる装置

以上の課題を解決する装置の開発にあたり、国立大学法人大阪大学接合科学研究所が開発してきた、ツール前方の接合部材をレーザー等にて予備加熱する機構（以後、「予熱機構」という。）にて初期軟化させツールへの負荷を減少させる技術や、ツールの回転と逆回転する裏当て構造によりツールの回転力を相殺する特許技術（特許5252415）を採用した。

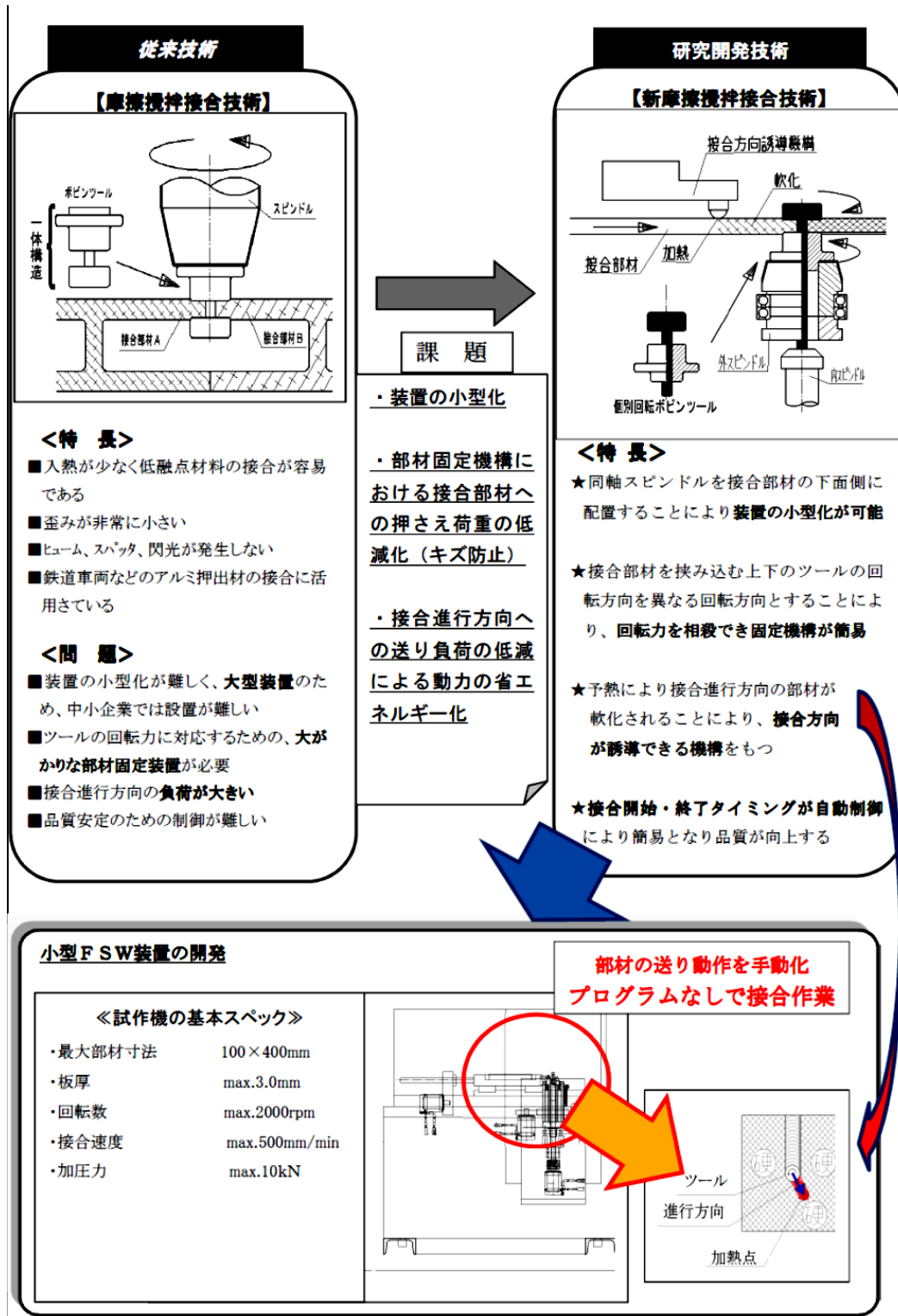
#### 1-1-2 研究目的及び目標

本研究開発は「予熱機構」や「回転力相殺機構」により、接合進行方向への送り負荷を減少させ、固定機構による接合部材への押さえ力を低減することにより、小型化FSW装置技術を製作するための要素技術を開発し、中小企業等の小規模現場に設置が容易な「小型FSW装置」の事業化につなげることにある。現状ではこのような小型FSW装置は実用化されておらず新規性のある事業であり、さらに中小企業においても最新の摩擦攪拌接合技術を活用する事ができるため、国内の技術水準を向上させるという社会性も有している

「予熱機構」および「接合方向誘導機構」は摩擦攪拌接合が可能な温度に接合部材を昇温させることで、初期軟化による接合進行方向への負荷を減少し、接合の進行方向を誘導するという新発想によるものである。さらに予熱機構に抵抗加熱を採用し小型化とコストダウンを両立できる独創性・革新性の高い技術である。また、「回転力相殺機構」は、中空のスピンドル（以下、「外スピンドル」という。）に内包され、同軸上に配置したスピンドル（以

下、「内スピンドル」という。) が互いに異なる回転方向となることにより、ツールの回転力が相殺できる独創性・革新性の高い技術である。

本研究開発はこれらを取りまとめて事業化に耐えうる「小型F SW装置」を開発することであり、上記のような独創性・革新性の高い「接合方向誘導機構」や「予熱機構」および「回転力相殺機構」により課題を解決すべく研究開発を行うものである。



1-1-3 実施内容

平成27年度には「予熱機構技術への対応」の予熱機構及び温度測定方法の基本決定として一般建材として広く使用されているアルミニウム合金（A1100）厚さ3mmの部材における初期軟化状態を達成する予熱機構の開発と温度測定法の開発を行った。また、「回転力相殺機構技術と予熱機構技術への対応」の予熱機構を有する対向スピンドル式FSW装置の開発として装置の設計及び製作を行った。

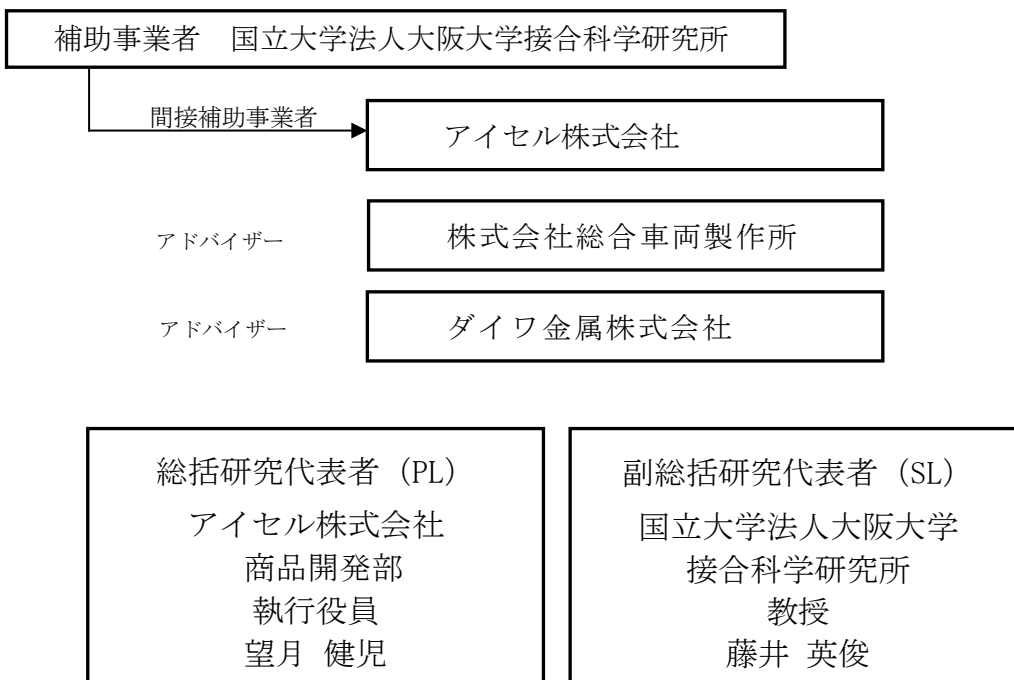
平成28年度には平成27年度に作製した予熱機構を有する対向スピンドル式FSW装置を使用し、「回転力相殺機構技術と予熱機構技術への対応」の接合条件の最適化として装置にて接合を行い、回転力相殺の効果や予熱機構の効果を確認するとともに、接合の最適条件の探索を行った。また、対向スピンドル式FSW装置で計測した数値を基に「装置の小型化技術への対応」の予熱機構を有する同軸スピンドル式小型FSW装置の開発として予熱機構を有する同軸スピンドル式小型FSW装置の設計・開発及び製作を行った。

平成29年度には平成28年度に作製した装置を使用し、「接合開始・終了タイミングの制御技術」の予熱機構を有する下面配置同軸スピンドル式小型FSW装置の接合条件の最適化として接合試験を行い、最適条件での接合開始・終了タイミングの制御が連続して安定的に行える様、条件の探索を行った。また、接合方向誘導機構の有効性の実証として装置に改良を実施し手動機構を搭載し、部材固定装置を手動にてコントロールすることにより、部材の接合を達成した。

1-2 研究体制

1-2-1 研究組織及び管理体制

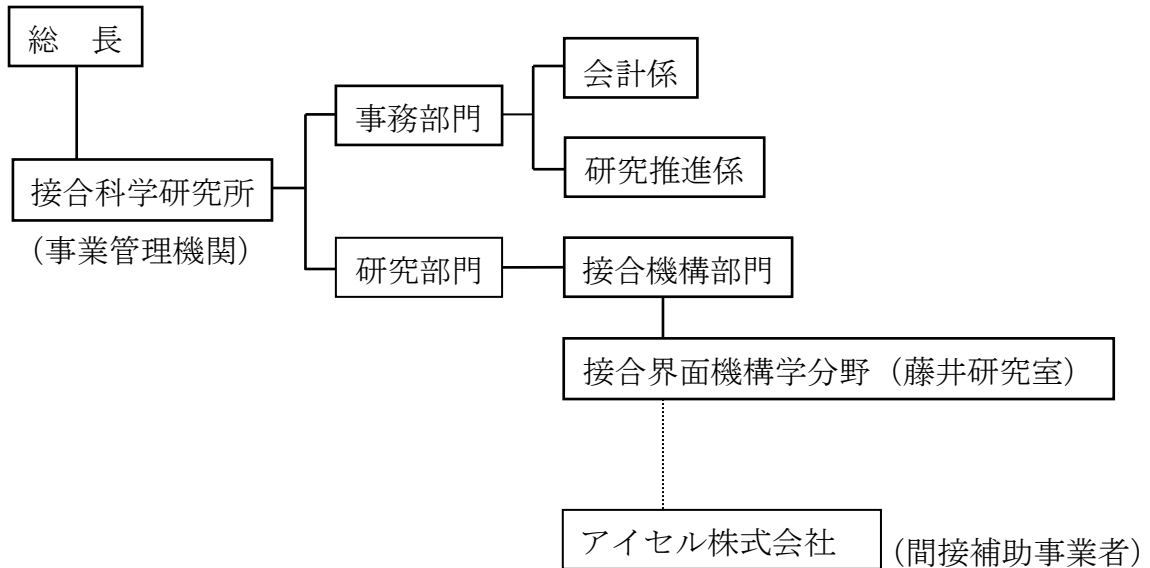
(1) 研究組織



(2) 管理体制

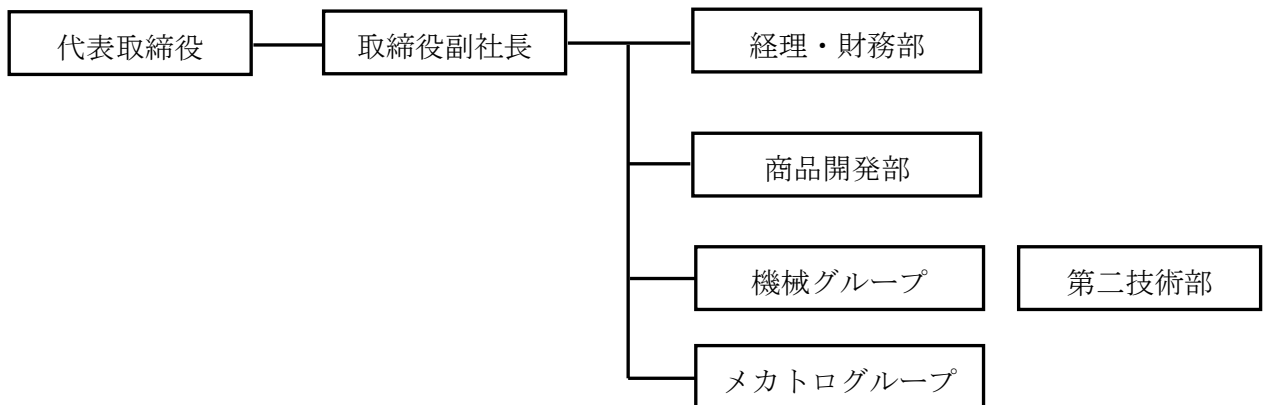
① 事業管理機関

国立大学法人大阪大学接合科学研究所



② 間接補助事業者

アイセル株式会社



1-2-2 研究者氏名

【補助事業者】 国立大学法人大阪大学接合科学研究所  
 研究員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
藤井 英俊	接合機構部門 接合界面機構学分野 教授	【1. 予熱機構技術への対応】 機器選定及び調整 【2. 回転力を相殺する機構技術と予熱機構技術への対応】 検査・測定機器選定及び調整 【4. 接合開始・終了タイミングの制御技術】 検査・測定機器選定及び調整

【間接補助事業者】 アイセル株式会社  
 研究員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
望月 健児	開発部・執行役員	【1. 予熱機構技術への対応】 予熱機構の設計・製造
東 武志	メカトロG・主任	【2. 回転力を相殺する機構技術と予熱機構技術への対応】 予熱機構を有する対向スピンドル式FSW装置の設計・製造、接合試験
久保 渉	第2機械G・主任	【3. 装置の小型化技術への対応】 予熱機構を有する下面配置同軸スピンドル式小型FSW装置の設計・製造 【4. 接合開始・終了タイミングの制御技術】 接合試験・試験片の一部調査 手動送りを可能とする改造

1-2-3 協力者

【アドバイザー】 株式会社総合車両製作所  
 代表者 生産本部 技術部（接合技術センター）  
 主査、博士（工学） 河田 直樹  
 具体的な協力内容  
 実用化に向けたアドバイス

【アドバイザー】 ダイワ金属株式会社  
 代表者 代表取締役 平田 俊勝  
 具体的な協力内容  
 本研究開発において接合製品の評価・装置の評価



1-3 成果概要

平成27年度

【1.予熱機構技術への対応】

【1-1】予熱機構及び温度測定方法の基本決定

1. 予熱機構を用いた時に接合部材の温度測定により軟化状態の良、不良を判断。その温度が接合母材の軟化温度である目標値205℃に達していること。

【2.回転力相殺機構技術と予熱機構技術への対応】

【2-1】予熱機構を有する対向スピンドル式FSW装置の開発

1. 送り装置の送り軸に作用する負荷を測定することにより接合進行負荷とし、1N単位での測定が行える。

2. 部材固定機構に配置したロードセル等に作用する負荷を測定することにより回転力とし、1N単位での測定が行える。

3. 部材を固定するボルト軸力を測定することにより押さえ荷重とし10N単位での測定が行える。

それぞれの課題に対し実験・検証を行った結果は次のとおりである。

【1-1】 1. 大阪大学の予備試験を基に、本事業において試験装置に搭載するための性能を調査するため試験装置を作製し試験を行った。熱源としては比較的安価で入手性の良い窒化アルミ製ヒーターを採用した。接合材となるアルミ合金に関してはアドバイザーであるダイワ金属㈱のアドバイスにより、マーケットにおいて流通性の高い材料A1100を選定した。

予熱機構試験においてはヒーターの押付け時間、押付け圧力、送り速度を変化させながら貼り付け型温度センサにて各カ所の温度を測定、サーモグラフィにて温度分布の計測を行った結果、アルミ合金材の軟化温度である目標温度205℃にツール直前部分の温度が到達する条件を把握する事が出来た。

【2-1】 1. 送り装置の送り軸に作用する負荷を測定するにあたり水平駆動の軸受部に荷重計を搭載した。計測精度の確認方法としてフォースゲージにて10Nの荷重を送り軸に負荷し、その値を表示計にて表示した荷重計の値と比較した。結果、1N単位での差異が無いことが確認できた。

【2-1】 2. 部材固定機構に配置した荷重計に関しても1.と同様に試験を行い1N単位での差異が無いことが確認できた。大阪大学の予備試験より負荷荷重が1kN以上となる事が解っているので、測定精度としては0.1%程度と十分に高精度であるといえる。

【2-1】 3. 押さえ荷重の測定は水晶圧電式力センサを使用した。

力センサ2個を軟鋼の間に挟み込み、M6のキャップボルトで10N・mでトルクレンチを使用し締結し、2個のセンサの値の差によって計測精度を確認した。

## 【公開版】

試験の結果から2つのセンサは0.01kN単位まで同じ値を示した。これにより計測精度としては技術目標の10N単位の計測は十分に可能だということが実証できた。

計測値の妥当性は計算値4762Nと実測値4660Nを比較して検証した。これはトルクレンチの精度が±3%のため±143Nの誤差が出ることから、実測値は誤差の範囲内にあるといえる。

平成28年度

### 【2.回転力相殺機構技術と予熱機構技術への対応】

#### 【2-2】接合条件の最適化

回転力相殺の効果や予熱機構の効果を確認すると共に、接合の最適条件を探索し以下の目標を達成する。

1. 接合時の部材固定機構にかかる負荷を測定し接合条件を最適化して、回転力の相殺により部材固定機構に作用する負荷を**50%低減**する。
2. 接合時の進行方向負荷を測定し接合条件を最適化して、予熱機構により接合進行方向の負荷を**30%低減**する。
3. 接合条件を最適化し、部材を固定するボルトによる押さえ荷重が、**50%低減**する。

### 【3.装置の小型化技術への対応】

#### 【3-1】予熱機構を有する同軸スピンドル式小型FSW装置の開発

外スピンドルと内スピンドルを同軸に配置し、小型化の最適化設計を行う事により、中小企業等の小規模工場内での移動や設置を容易とする小型FSW装置を開発する。

1. 装置の設置面積**1.1m×1.1m**以内とし、重量**980kg**以下とする

課題に対し実験・検証を行った結果は次のとおりである。

【2-2】 1. 上下のスピンドルを同方向に回転させた場合と逆方向に回転させた場合で部材固定機構に設置した荷重計の実測値を比較した結果、同方向に回転させた場合には平均1.74kNであったのに対し逆方向に回転させた場合には平均0.87kNと負荷**50%の低減を達成**した。

【2-2】 2. 予熱機構の有無時の進行方向負荷を送り軸に設置した荷重計により計測し比較した。

当初は負荷の低減は10%という結果であったが、ワーク内部の温度が205℃に達しておらず軟化が不十分である事が原因と考えヒーターの設定温度を上げ、再度試験を行った。その結果、目標である**30%低減を達成**するに至った。

【2-2】 3. 上下のスピンドルの回転数と押付け距離を変化させた時の部材を固定するボルトによる押さえ荷重を計測して最適な条件を探索する事により、荷重の低減を図った。結果は、最大4.1kNであった押さえ荷重を1.9kNまで減少させ、**50%低減を達成**した。

## 【公開版】

【3-1】 1. 【2-2】の結果を設計に反映し、同軸スピンドル式小型F S W装置の設計・製作を行った。その結果、設置面積**1.0m×1.0m**、重量約**500kg**と小型化を達成した。

平成29年度

### 【4.接合開始・終了タイミングの制御技術】

【4-1】 予熱機構を有する下面配置同軸スピンドル式小型F S W装置の接合条件の最適化

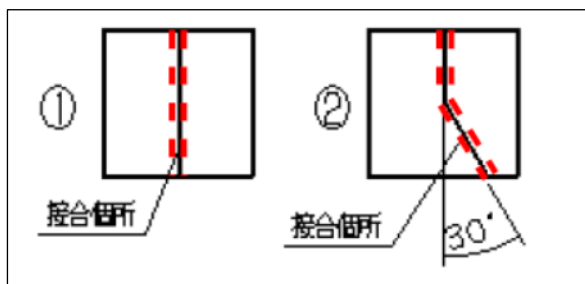
予熱機構を有する同軸スピンドル式小型F S W装置を使用して接合条件の最適化をおこなう。

1. 接合強度が母材の**95%以上**である。
2. 接合進行方向の負荷を**30%低減**する。
3. 部材固定機構にかかる負荷を**50%低減**する。
4. 部材を固定するボルトによる押さえ荷重を**50%低減**する。

### 【4-2】 接合方向誘導機構の有効性の実証

予熱機構を接合方向誘導機構として活用し、手動送りによる摩擦攪拌接合を行う。

1. 下図に示す①または②の形状の部材を接合する。



それぞれの課題に対し実験・検証を行った結果は次のとおりである。

【4-1】 1. 接合材の強度をマイクロビッカース計にて計測した結果、平均で**35.9 HV**となった。母材の硬度の平均が**44.4 HV**であった為、母材の**81%**の結果となった。これは接合条件を変更させて計測しても大きな変化は見られなかったため、**A1100**という素材にF S Wを行った場合には接合強度が母材の**80%**程度となるというデータを得るに至った。

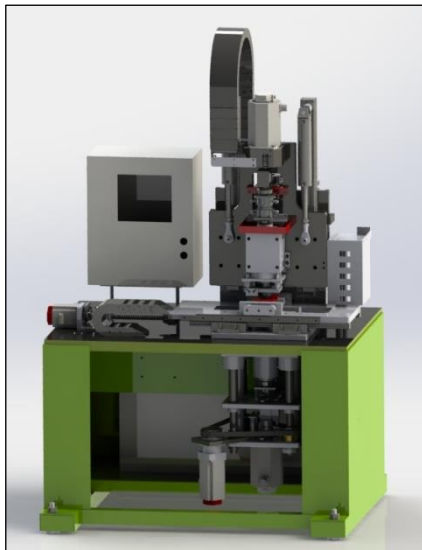
【4-1】 2. 3. 4. 予熱機構と加工条件によって接合材の軟化を促進させ目標を達成する事を目指したが、軟化が促進する事によりツールに接合材が溶着しツールの焼付きが発生するという問題が発生した。一般建材として広く普及している**A1100**であるが、F S Wが普及していないのは母材が軟らかくツールへの溶着の問題が発生することと、条件だしが大変困難であることであると再認識させられた。解決策として軟化を抑える条件にすることで、溶着の度合いが減少し接合が可能となった。

## 【公開版】

【4-2】 1. 予熱機構を有する対向スピンドル式F S W装置に手動機構の増設を行い、【4-1】の実験で求めた条件にて接合を行った。部材固定機構の関係から①の接合形状を採用した。

結果は5回連続で成功し目標を達成した。

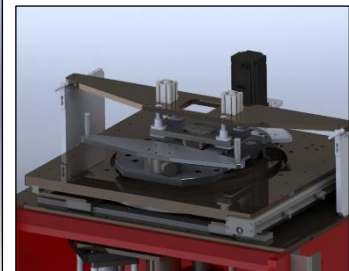
以下に予熱機構を有する同軸スピンドル式小型F S W装置、予熱機構を有する同軸スピンドル式小型F S W装置、手動機構のイメージ図を示す。



予熱機構を有する対向  
スピンドル式小型F S W装置



予熱機構を有する同軸  
スピンドル式小型F S W装置



手動機構イメージ

1-4 当該研究開発の連絡窓口

1-4-1 事業管理機関

【国立大学法人大阪大学接合科学研究所】

担当者：教授 藤井 英俊

電話番号：06 - 6879 - 8678 FAX 番号：06 - 6879 - 8689

メールアドレス：fujii@jwri.osaka-u.ac.jp

1-4-2 研究実施機関

【アイセル株式会社】

担当者：取締役 望月 健児 / 執行役員

電話番号：072 - 449 - 7500 FAX 番号：072 - 449 - 7501

メールアドレス：k.mochizuki@isel.jp

## 第2章 本論

## 2-1 予熱機構技術への対応

## 2-1-1 予熱機構及び温度測定方法の基本決定

担当：アイセル株式会社・国立大学法人大阪大学接合科学研究所

〈 当初の実施目標 〉

予熱機構の仕様について検討する為、予熱機構試験機を作製し接合部材の表面温度測定により軟化状態の良、不良を判断。その温度が軟化温度である目標値205℃に達するシステムを開発する。

平成27年度は予熱機構試験機を設計・製作し、予熱機構試験機を用いて、接合母材の表面温度がツール位置において205℃以上である様に条件の調整を行う。表面温度を貼付け型温度センサで、温度分布をサーモグラフィで計測し、押付け圧力を加圧用エアシリンダに設置した引張圧縮型ロードセルにより計測を行う。

(使用機械装置)

平成27年度製作 予熱機構試験機

平成27年度購入 サーモグラフィ

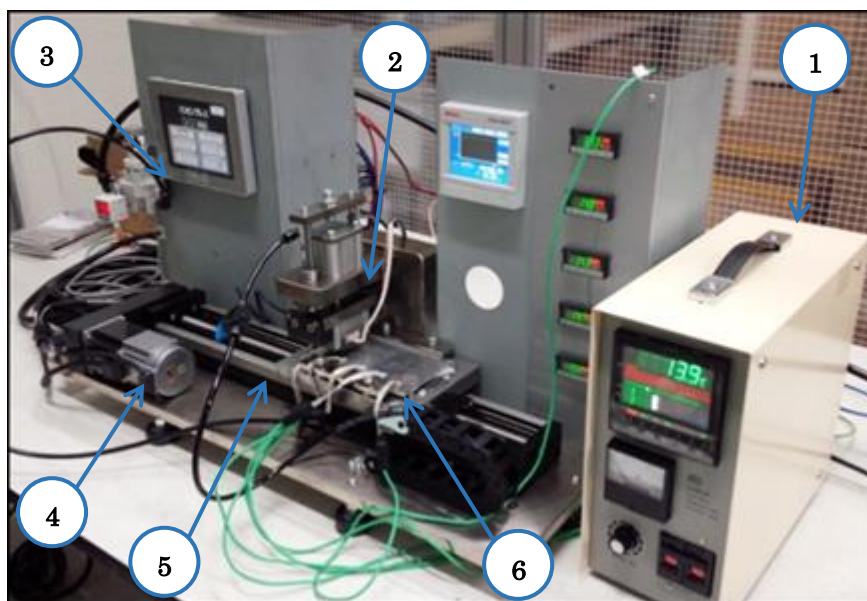


図1-1 予熱機構試験機

- ①温度コントロールボックス
- ②ヒーター部
- ③タッチパネル
- ④サーボモータ
- ⑤アクチュエータ



図1 - 2 予熱機構試験機 ヒーター部分

- ①引張圧縮型ロードセル
- ②ヒーター
- ③ヒーターホルダ
- ④エアシリンダ

#### 〈 取組内容と結果 〉

本課題では予熱機構の仕様決定の為、接合母材の表面温度が軟化温度である205℃に達していることが目標であり、それを実現する為に平成27年度に作製した予熱機構試験機にてヒーター設定温度・送り速度・ヒーター押付け力・ヒーターとツールの間隔を変更させた場合の接合母材の表面温度の計測を行った。ヒーターの設定温度については解析ソフトにより行った伝熱解析の結果を基に250℃と設定した。温度の計測には貼り付け型温度センサを一定間隔に設置し使用した。温度分布はサーモグラフィを使用し、温度の校正の為に接触式の温度センサの値とサーモグラフィの値を比較する方法を採用した。

尚、温度分布を計測するにあたり接合材表面には黒体テープの貼付けを行った。

図1 - 3に試験状況を示す。

送り速度はタッチパネルを使用して設定を行いサーボモータとアクチュエータにより動作させた。ヒーター押付け力はエアシリンダの加圧用レギュレータにより設定を行った。また、1個目の貼付温度センサをツールと仮定しヒーターとの距離を変更させた。

試験結果は当初のヒーター設定温度ではヒーター直近の温度は目標値に達していたが、ツール位置の温度は損失が解析より多く目標に達しなかった。その為、当初の設定値より、ヒーター設定温度を上昇させ、ヒーターとツールの間隔の短縮を行い、温度測定を繰り返し行った結果、目標値である205℃を達成する条件の確立に至った。



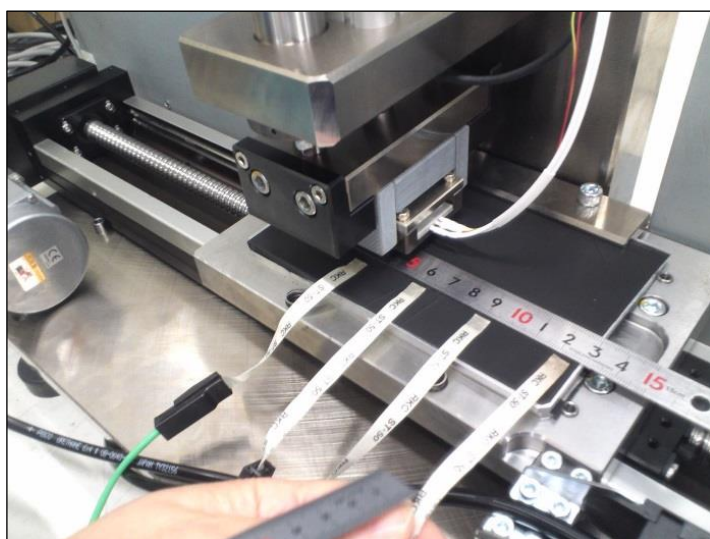


図 1 - 3 黒体テープ貼付状況

## 2-2 回転力相殺機構技術と予熱機構技術への対応

### 2-2-1 予熱機構を有する対向スピンドル式FSW装置の開発

担当：アイセル株式会社・国立大学法人大阪大学接合科学研究所

〈 当初の実施目標 〉

予熱機構を有しツールを上下に持ち、ツールの回転を独立して行う事が可能な対向スピンドル式FSW装置の開発を行う。

平成27年度に製作する当装置は負荷の計測が可能な様に各位置に計測器を設置する。それらの計測器が以下の精度で計測出来る事を目標とした。

1. 送り装置の送り軸に作用する負荷を測定することにより接合進行方向負荷とし、1N単位での測定が行える。

2. ロードセル等を部材固定機構に配置し、作用する負荷を測定することにより部材固定機構に掛かる回転負荷とし、1N単位での測定が行える。

3. 部材を固定するボルト軸力を測定することにより押さえ荷重とし10N単位での測定が行える。

(使用機械装置)

平成27年度製作 予熱機構を有する対向スピンドル式FSW装置

平成27年度購入 水晶圧電式力センサ

平成27年度購入 バランシングマシン

### 〈 取組内容と結果 〉

本課題では最終目標である同軸スピンドル式小型F S W装置を製作するにあたり、F S W加工時の各カ所の負荷を計測し必要な強度を調査する事が可能な、対向スピンドル式F S W装置の作製を行った。装置の概要は図2 - 1に示す通り、上部スピンドル部、下部スピンドル部、テーブル送り部からなり、上下のスピンドルによりツールを別々に動作させることが可能な機構となっている。

対向するスピンドルの同心度が過大でスピンドルに振れが発生すると、スピンドルに不規則な負荷が発生し、ツールの破損の原因となり加工に悪影響をおよぼすため対向スピンドル間の同心度は $0.01\text{ mm}$ 以下と設定した。ツールやスピンドル等の回転体はバランス等級G 2.5とし、バラシングマシンを使用し各パーツでアンバランスの調査を行い、G 2.5以下になる様にバランスの調整を行った。組立後に組立によるアンバランスが発生するため、フィールドバランスにて再度、G 2.5以内にバランス調整を行った。

作製した装置を用いて平成28年度に加工負荷の計測が行える様、各箇所荷重計やトルク計等の計測器を取付けた。負荷の計測が十分に行える精度を有するか確認する為に、接合進行方向負荷・部材固定機構に掛かる回転負荷・部材固定機構の押え荷重の測定を行った。

接合進行方向負荷を測定するにあたり、テーブル送り部水平駆動軸の軸受押えと軸受の間に荷重計を搭載した。(図2 - 2)計測精度の確認方法としてフォースゲージにて $10\text{ N} \cdot 20\text{ N}$ の荷重を送り軸に掛け、その値を表示計にて表示した荷重計の値と比較した。結果、 $1\text{ N}$ 単位以上の差異が無いことを確認した。

テーブル送り部の部材固定機構に掛かる回転負荷として左右の接合材固定部に荷重計を設置した(図2 - 3)ニードルガイドを用いて固定部の負荷を伝達し荷重計にて計測する為、接合材の膨張方向が負の値、収縮方向が正の値となる。

部材固定機構に関しても1.と同様に試験を行い $1\text{ N}$ 単位での差異が無いことが確認できた。大阪大学の予備試験より、F S W加工時の固定負荷荷重が $1\text{ kN}$ 以上となる事が解っているので、負荷に対する測定精度としては $0.1\%$ 程度と十分に高精度であるといえる。

部材固定機構の押え荷重の測定は水晶圧電式力センサを使用した。力センサ2個を軟鋼の間に挟み込み、M6のキャップボルトで $10\text{ N} \cdot \text{m}$ でトルクレンチを使用し締結し、2個のセンサの値の差によって計測精度の確認を行った。

結果は2つのセンサは $0.01\text{ kN}$ 単位まで同じ値を示した。これにより計測精度としては技術目標の $10\text{ N}$ 単位の計測は十分に可能だということが実証できた。

計測値の妥当性は計算値と比較して検証の結果、問題が無いと確認できた。

上記の計測以外にも各ツールにかかる負荷の計測に、モータとスピンドル間にトルク計をそれぞれ設置している。



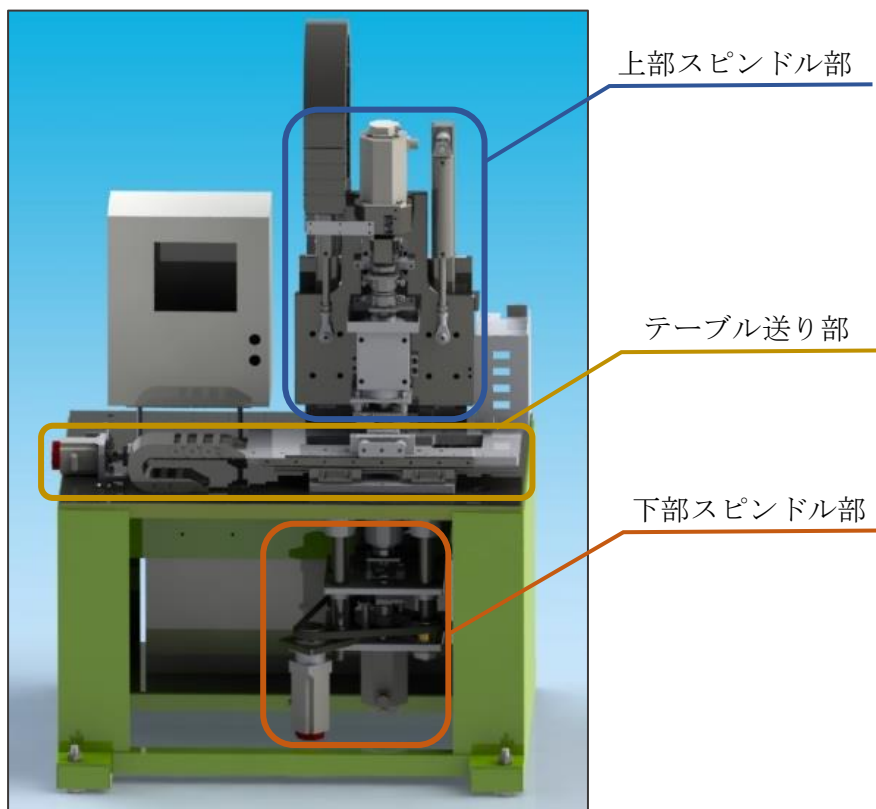


図 2 - 1 対向スピンドル式小型F S W装置

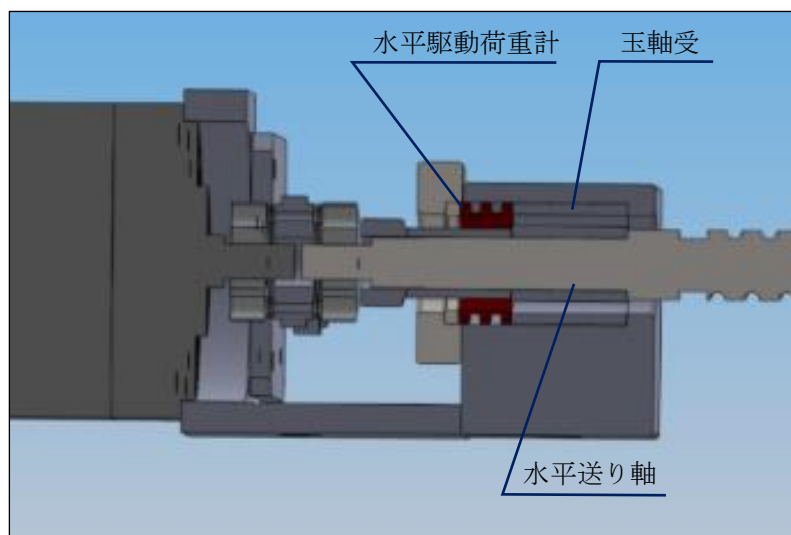


図 2 - 2 水平駆動荷重計イメージ

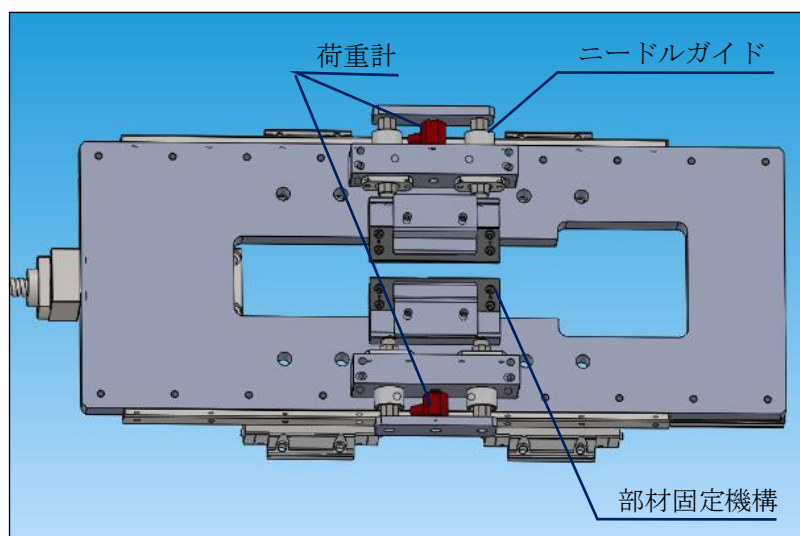


図 2 - 3 部材固定機構荷重計イメージ

## 2-2-2 接合条件の最適化

担当：アイセル株式会社・国立大学法人大阪大学接合科学研究所

〈 当初の実施目標 〉

平成 28 年度には、平成 27 年度に作製した予熱機構を有する対向スピンドル式 F SW 装置を用いて、F SW 加工時の各負荷を計測し、回転力相殺の効果や予熱機構の効果を確認すると共に、接合の最適条件を探索し以下の目標を達成する。

1. 接合時の部材固定機構にかかる負荷を測定し接合条件を最適化して、回転力の相殺により部材固定機構に作用する負荷を **50%低減** する。
2. 接合時の進行方向負荷を測定し接合条件を最適化して、予熱機構により接合進行方向の負荷を **30%低減** する。
3. 接合条件を最適化し、部材を固定するボルトによる押さえ荷重が、**50%低減** する。

(使用機械装置)

平成 27 年度製作	予熱機構を有する対向スピンドル式 F SW 装置
平成 27 年度購入	データロガー
平成 27 年度購入	水晶圧電式力センサ
平成 27 年度購入	ハイスピードカメラ
平成 28 年度購入	高速動画像温度解析用ソフト
平成 27 年度購入	マイクロビッカース

## 〈 取組内容と結果 〉

本課題では最終目標である同軸スピンドル式小型F S W装置を製作するにあたり、設計に必要な各負荷の値を把握するため、平成27年度に作製した装置を用いて、実際にF S W加工を行った場合の各負荷を計測し回転速度や押付位置、送り速度、予熱時間等、最適な条件を調査した。また、接合が問題なく行われているかをハイスピードカメラで監視すると共に、高速動画画像温度解析用ソフトで分析を行った。接合材に関しては、マイクロビッカースを使用して強度低下がどの程度で発生しているか調査した。

回転力の相殺の効果を調査する為、接合時の部材固定機構にかかる負荷として部材固定機構に搭載した荷重計を使用し、上下のツールを同方向に回転させた場合と、逆方向に回転させた場合の数値を計測した。予熱機構の影響を無くす為、予熱機構は使用せずに試験を行った。ツール回転速度を1000rpm、送り速度を90mm/minの条件とした。計測結果はツールを同方向回転させた場合が平均1.74kNに対してツールを逆方向回転させた場合が平均0.87kNで50%の低減を達成した。表2-1、2-2のグラフより（緑線・青線）、ツール同方向回転の場合には片側に負荷が偏り、加工開始時に大きな負荷が掛かっておりその後は緩やかに収縮方向の負荷が掛かっているのが見てとれる。それに対し、ツール逆方向回転の場合には両側の固定機構の差が減少し、加工開始時の負荷が低減していることが見てとれる。このことから回転力の相殺による効果が有効であると考察される。

接合時の進行方向負荷について予熱機構の有無において水平駆動荷重計の値を比較した。回転速度は回転力の相殺の試験条件から接合の状態が良好になる様に再検討し、回転速度1400rpm、送り速度50mm/minとした。計測結果は当初、予熱機構無の時が平均230.4Nであったのに対し、予熱機構有の時が平均208.1Nと目標値である30%低減に至らなかった。

そこで、予熱機構のヒーター温度の設定とヒーター形状の改良を行い、再度試験を行った。計測結果は160.1Nと目標である30%の低減を達成した。表2-3、2-4のグラフ（赤線・Y軸 第2軸）より予熱機構の接合材軟化によって接合開始時と接合終了時の負荷が予熱機構無の時と比較して減少していることが見てとれる。また、波形の山の数が減少していることから、接合中の前後のうねりも減少している事が見てとれ、より良好な接合状況となっていることが考察される。以上の事から予熱機構の効果が有効であると考えられる。

部材を固定するボルトによる押さえ荷重に関してはツールの回転速度を変化させた場合に、ツールの熱による接合材の軟化を促進させ、尚且つ、接合状況が良好な最適条件を調査し、各回転速度時に部材を固定するボルトに掛かる負荷を測定した。その結果、荷重はツールの回転速度が600rpm時に最大の4.0kNとなり、1200～1400rpm時に最小の1.9kNになったため、目標である押さえ荷重50%の減少を達成した。

表 2 - 1 ツール同方向回転時の部材固定機構にかかる負荷

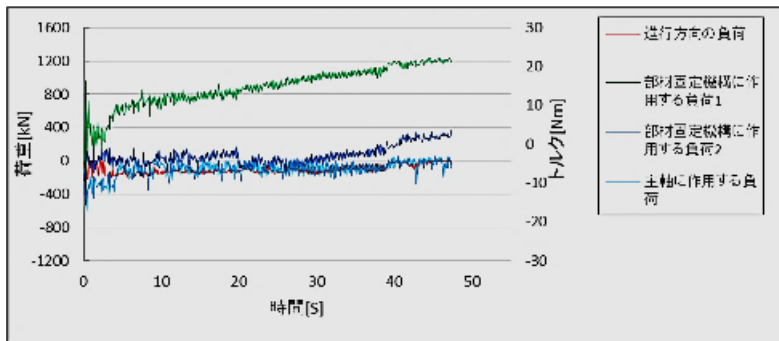


表 2 - 2 ツール逆方向回転時の部材固定機構にかかる負荷

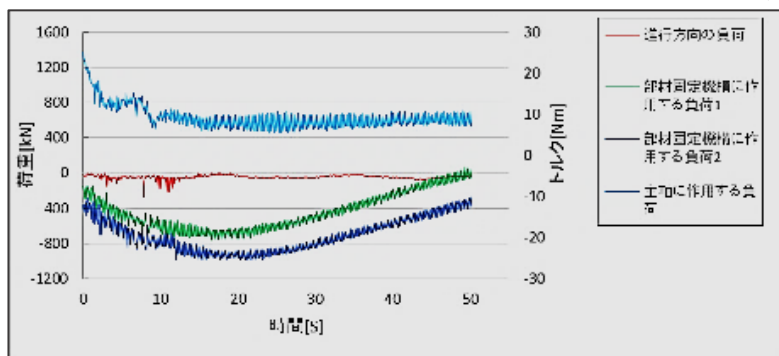


表 2 - 3 予熱機構無時の進行方向負荷

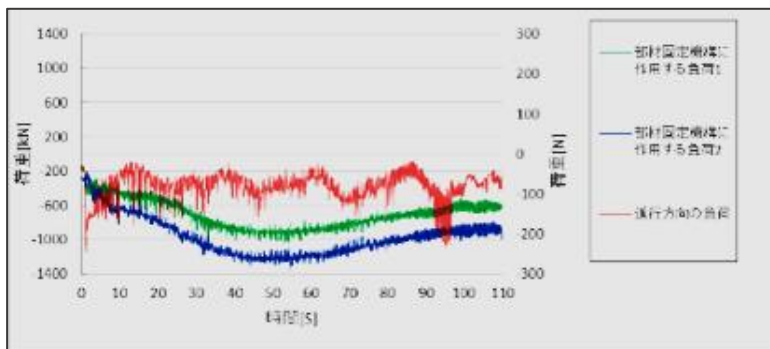
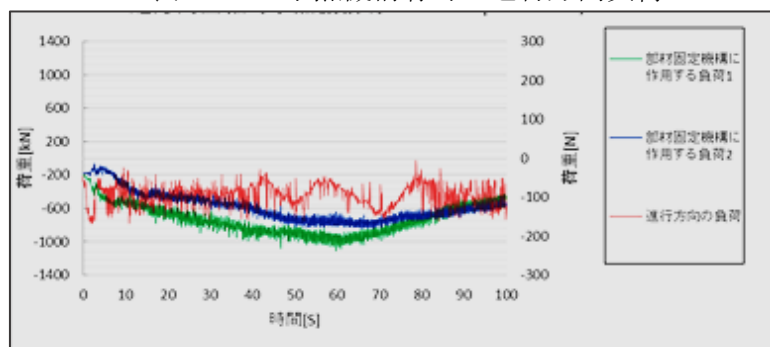


表 2 - 4 予熱機構有時の進行方向負荷



### 2-3 装置の小型化技術への対応 2-3-1 予熱機構を有する同軸スピンドル式小型FSW装置の開発

担当：アイセル株式会社

#### 〈 当初の実施目標 〉

平成28年度に行った接合条件の最適化に於いて取得した各負荷の数値を基に、予熱機構を有する同軸スピンドル式小型FSW装置の設計を行ない、中小企業等の小規模工場内での移動や設置を容易とする小型FSW装置を開発する。

小型化するにあたり同軸スピンドル機構を接合部材の下面に配置する構造とした。小規模工場の通路はパレットの移動を考慮した幅であるため、パレットの大きさ(1.1m×1.1m)及び搬送装置の可搬能力(1トン)より、装置の設置面積1.1m×1.1m以内とし、重量が980kg以下とすることを目標とする。

#### (使用機械装置)

平成28年度購入 水晶圧電式3成分力センサ

#### 〈 取組内容と結果 〉

本課題では予熱機構を有する同軸スピンドル式小型FSW装置の設計・開発・製作を行った。図3-1に装置概要を示す。装置はテーブル部と同軸スピンドル部からなり、テーブルはX軸方向・Y軸方向・θ方向に動作する事が可能である。

目標値を達成する為、同軸スピンドル式とすることで小型化を目指したが同軸スピンドル機構が外スピンドルの中に内スピンドルが設けられる構造のため、両スピンドル回転時に振れが発生すると対向スピンドル式の場合より、接触や焼付きにより重大な破損が生じる為、装置の加工・組立にはより高い精度を必要とした。また、振れの原因となるアンバランスの調整もバランス等級G1以内で行う事により安定したツールの回転を実現し、同軸スピンドル機構を可能とした。

その他にも、小型化する為に架台の内部のスペースを活用し制御盤の殆どを内蔵する形状とした他、自社のカップリングの技術を使用し、モータとプーリ間に設けたトルク計の取付け寸法を通常取付け方法の寸法から40%短縮する等の設計を行った。加工テーブルに関してもX軸・Y軸を2段に重ねることにより装置の幅・奥行の小型化を実現した。結果として作製した装置は設置面積1.0m×1.0m、重量約500kgと小型化の目標値を達成した。

加工テーブル部分にはX軸方向・Y軸方向・Z軸方向の荷重を計測できる様、3成分力計を設置できる機構とした。その様子を図3-2に示す。

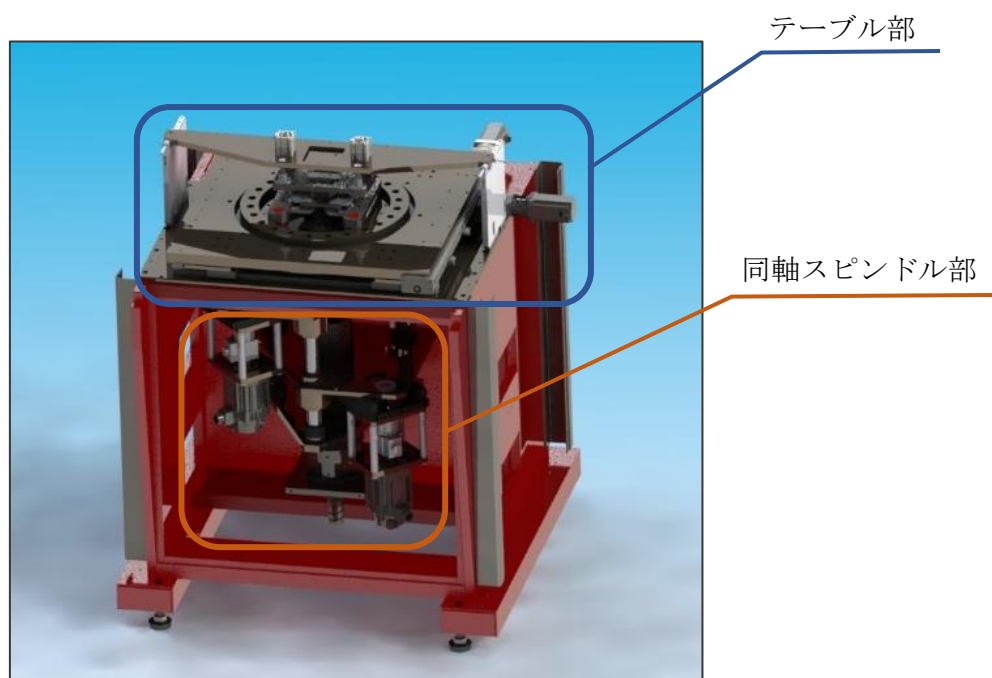


図3 - 1 同軸スピンドル式小型F S W装置

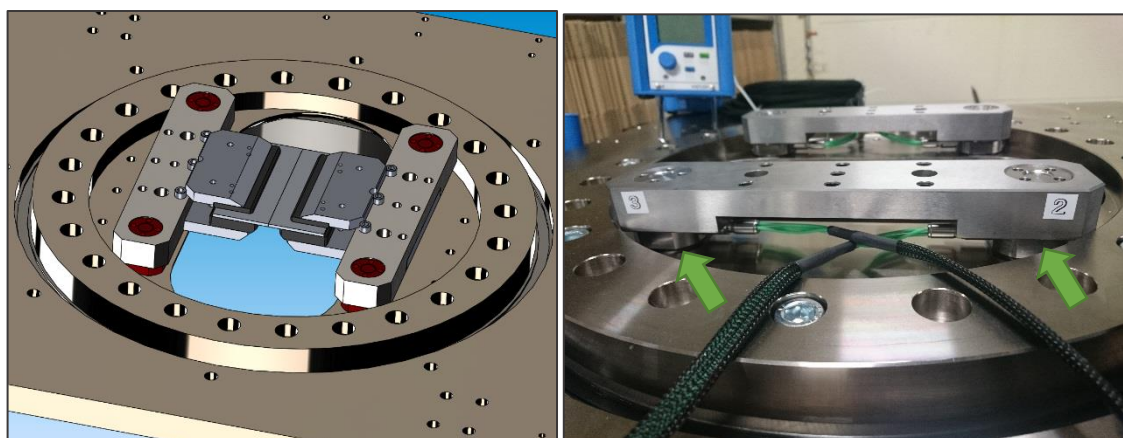


図3 - 2 3成分力計取付け状況

## 2-4 接合開始・終了タイミングの制御技術 2-4-1 同軸スピンドル式小型FSW装置の接合条件の最適化

担当：アイセル株式会社・国立大学法人大阪大学接合科学研究所

### 〈 当初の実施目標 〉

平成29年度は、平成28年度に開発した予熱機構を有する同軸スピンドル式小型FSW装置を用いて、技術的目標値を達成する接合条件の最適化を行うとともに、測定により取得したデータを活用し接合の開始や終了を判断する制御機能により、最適化条件が再現できる制御技術を開発する。それにより接合開始から接合終了を自動的に制御できる技術の開発を目標とする。接合の最適条件時の目標負荷を以下に示す。

1. 接合強度が素材の**95%以上**である。
2. 接合時の進行方向負荷を測定し接合条件を最適化して、予熱機構により接合進行方向の負荷を**30%低減**する。
3. 接合時の部材固定機構にかかる負荷を測定し接合条件を最適化して、回転力の相殺により部材固定機構に作用する負荷を**50%低減**する。
4. 接合条件を最適化し、部材を固定するボルトによる押さえ荷重が、**50%低減**する。

### (使用機械装置)

平成28年度製作 予熱機構を有する同軸スピンドル式FSW装置  
平成27年度購入 データロガー  
平成27年度購入 水晶圧電式力センサ  
平成28年度購入 水晶圧電式3成分力センサ  
平成27年度購入 マイクロビッカース

### 〈 取組内容と結果 〉

本課題では同軸スピンドル式小型FSW装置を用いて実際に接合加工を行い、ツール回転速度・ヒーター温度設定・送り速度・ツール負荷圧力等の接合条件を変化させ、最適な条件を水晶圧電式力センサと水晶圧電式3成分力センサ、データロガーを用いて負荷を計測する事で探索を行った。

これまで、加工時に接合材の軟化を促進させる条件を探索する事で装置に掛かる負荷を低減させてきたが、外側ツールの中に内側ツールを設ける構造(図4-1参照)の同軸スピンドル式においてはツール間に軟化した素材が付着し焼付きが発生するという状況(図4-2参照)により、対向スピンドル式と同様の条件では加工が不可能であるという結果となった。

対策として、負荷の低減は諦め、接合材の軟化を抑えることでツール間への素材の付着を減少させる様な条件を探索する事とし、以下の方法を実行した。

- ①ツールの回転速度を減速させることにより、接合材に伝達する熱量を減少させた。
- ②内側ツールと接合材の接触面積が外側ツールとの場合より多い為、内側ツールと外側ツールの回転速度に差を設け、熱量の差を減少させた。



## 【公開版】

③軟化した接合材がツール間に入りにくい様、内側ツールに螺旋溝を入れた。

対策を行った結果、接合進行方向の負荷及び部材固定機構に作用する負荷は20%程度の低減、部材を固定するボルトによる押さえ荷重負荷は30%程度の低減に抑制されたが焼付きは解消され接合加工が可能となったため再度、安定して接合が可能な加工条件の探索を行った。

その条件を使用して接合開始から接合終了を自動的に制御できる技術の開発をするべく、接合加工試験と装置の制御の改良を繰り返し、部材を装置にセット後は数値制御によるプログラムとツールに掛かる負荷の圧力制御により、予熱開始・待機時間・接合開始・送り速度の変化・接合終了の流れを自動運転にて行う事が可能となり、負荷低減はならなかったが最終的な目標である、接合開始から接合終了を自動的に制御できる技術の開発は達成した。自動運転画面を図4-3に示す。

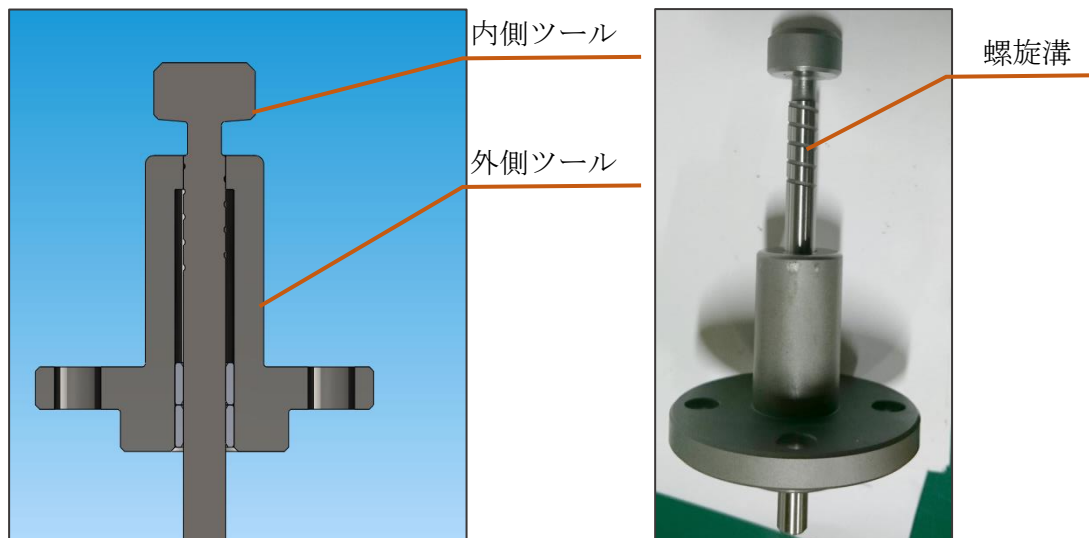


図4-1 同軸スピンドル式小型F S W装置 ツール

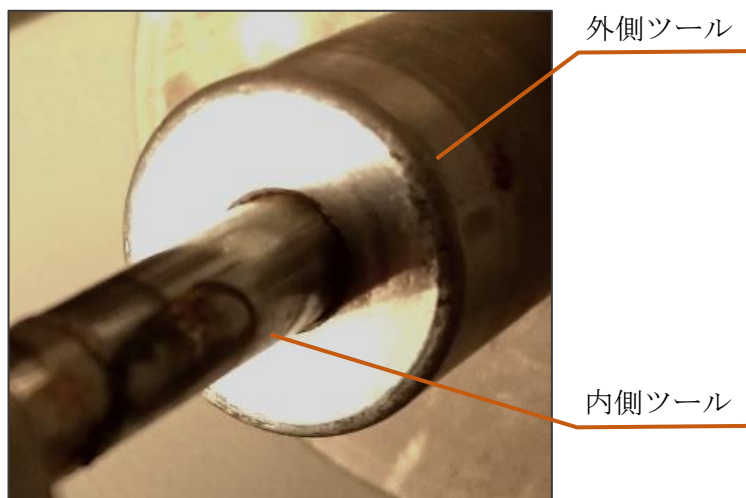


図4-2 ツール 接合材付着状況





図 4 - 3 自動運転設定画面

接合加工を施したワークの硬度試験を行い、接合部分の強度低下がどの様になっているのかマイクロビッカースにより調査した。ワークを図 4 - 4 の様に分断し試験を行う面に研磨処理を行った。試験条件は図 4 - 6 に示す。

試験結果は母材硬度の平均値が 4 3.7 HV~4 5.4 HVであったのに対し接合部分の硬度平均は 3 4.7 HV~3 6.9 HVと約 2 0 %の硬度低下が発生したという結果になった。硬度の分布を図 4 - 7 に示す。ツール径がφ 1 4 mm である事から、接合部幅の 2 mm 程度外側から硬度低下が発生していることが見てとれる。

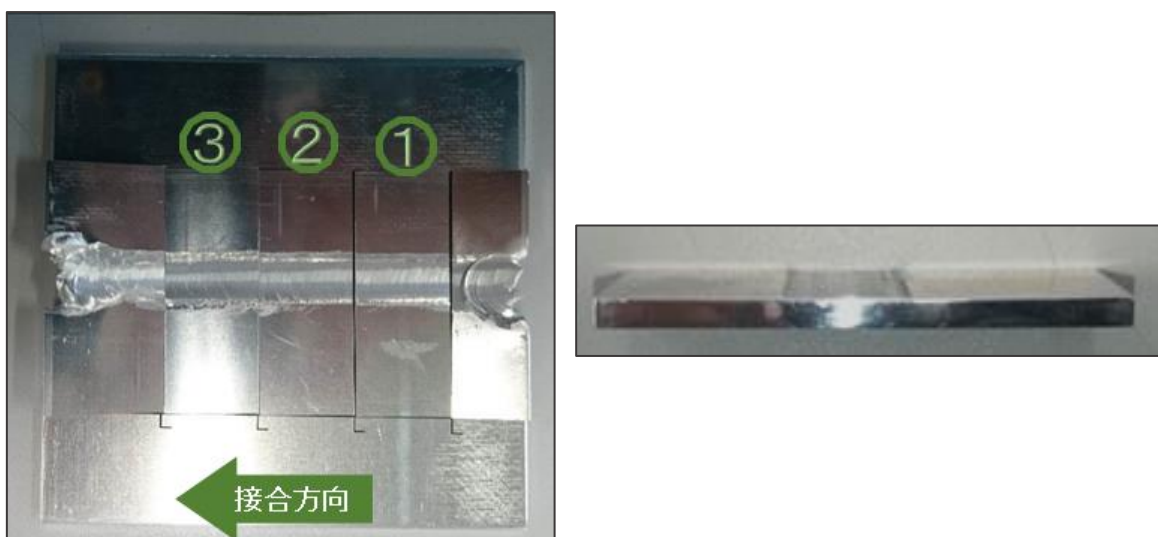


図4 - 4 ワーク切断状況



図4 - 5 マイクロビッカース



試験力：HV0.03      試験点数：40点  
 Xピッチ：0.8mm      Yピッチ：0.4mm

図4 - 6 硬度試験条件

横軸：距離 [mm]    縦軸：硬度 [HV]

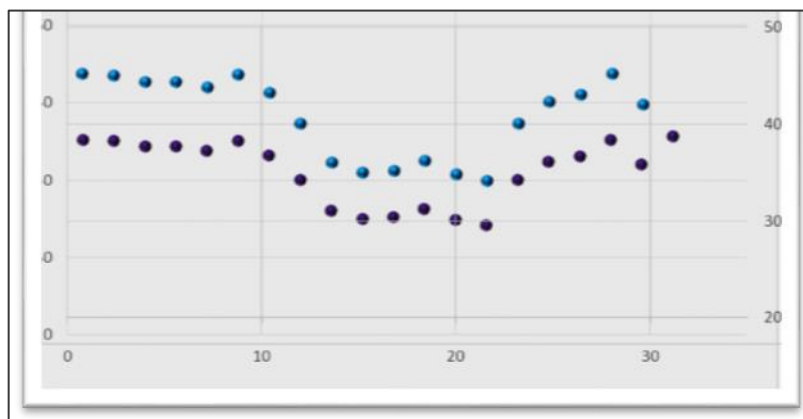


図4 - 7 硬度試験結果

## 2-4-2 接合方向誘導機構の有効性の実証

担当：アイセル株式会社・国立大学法人大阪大学接合科学研究所

〈 当初の実施目標 〉

平成28年度に開発した予熱機構を有する同軸スピンドル式小型F S W装置に手動送りによる加工を可能とする、手動用部材固定機構を増設する。(図4 - 8 参照)

手動用部材固定機構を使用し、手動により接合材を任意の動作でツールに送り込み接合を行う事を目標とする。これは中小企業等で小ロット多品種の加工を行う場合にプログラムの作成を省略する事で生産のタクトタイムを上げることを目的としている。

(使用機械装置)

平成28年度製作 予熱機構を有する同軸スピンドル式F S W装置

平成29年度増設 同軸スピンドル式F S W装置の手動用部材固定機構

平成29年度購入 レーザードップラ計

〈 取組内容と結果 〉

本課題では同軸スピンドル式小型F S W装置に手動用部材固定機構を増設を行った。

手動用部材固定機構には手動ハンドルの下部に6軸センサを設置し(図4 - 8 参照) X軸方向・Y軸方向の負荷とZ軸方向の回転トルクを計測し、その値をフィードバックする事で加工時に、もし過大な負荷が掛かったとしても、サーボモータによりキャンセルする事が出来る制御を備え付けた。

操作用のタッチパネルに手動運転用の画面を作製。ツール位置・送り速度・各ツール回転速度のモニタが可能な内容とした。手動運転画面を図4 - 9に示す。

装置を使用し手動による接合加工を行った。加工のプロセスは以下の通りである。

- ①予熱機構によるワークの加熱(設定待機時間)
- ②内側ツール・外側ツールの回転(設定回転速度)
- ③内側ツールの下降
- ④接合開始 Y軸前進(手動操作)
- ⑤接合終了 回転停止

接合の様子を図4 - 10に示す。接合は5回行い、目視では問題は見受けられなかった。

その後、接合を行ったワークを非破壊にて接合の合否を判定した。内部にボイド等の接合不良が生じた場合、振動が正常なものと変化する事を利用し、レーザードップラ計を用いて振動を取得し周波数応答関数にてモニタリングを行い、素材の振動と接合ワークを比較し判定を行った。加振にはインパルスハンマによるハンマリングを採用した。3回のハンマリングを行い平均の波形を取得した。データが正常に取得できているかは入力と出力信号の相関度を表すコヒーレンス関数を使用した。結果としては、素材と比較して接合ワークが同様の振動波形となった為、接合は問題なく行われていると判断した。

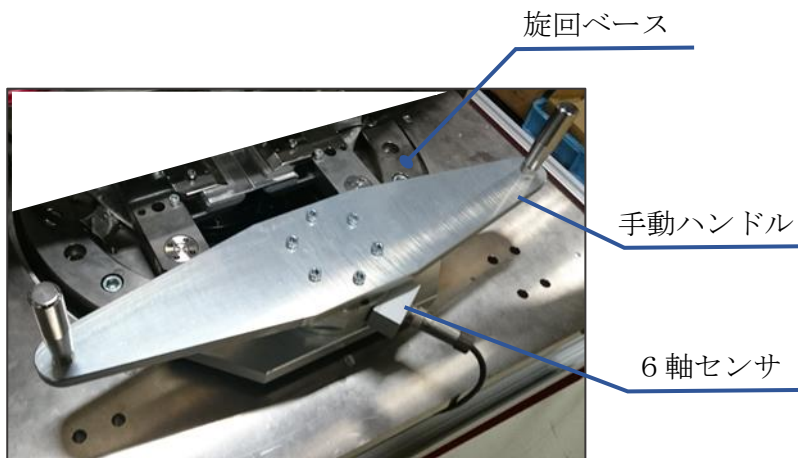


図4 - 8 手動用部材固定機構



図4 - 9 手動運転画面

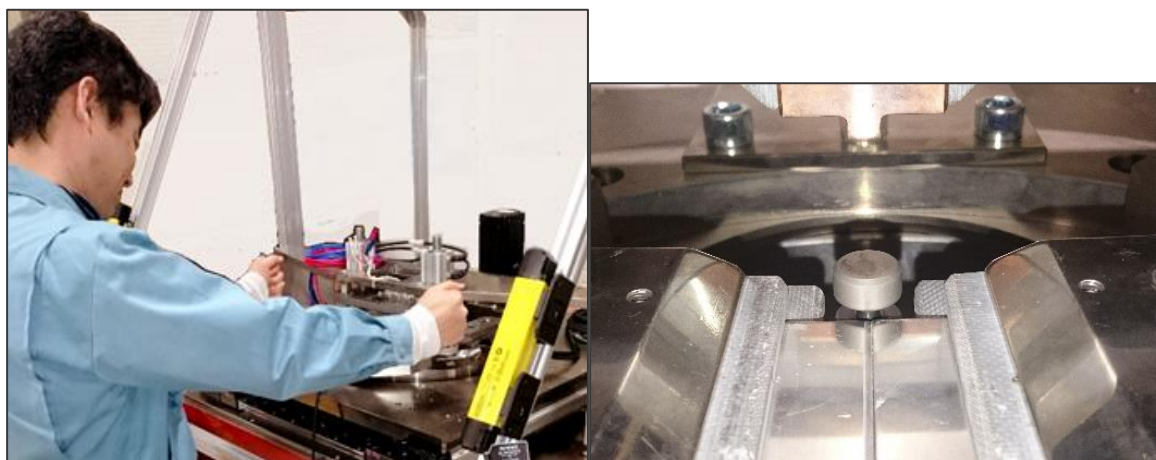


図4 - 10 手動運転による接合の様子



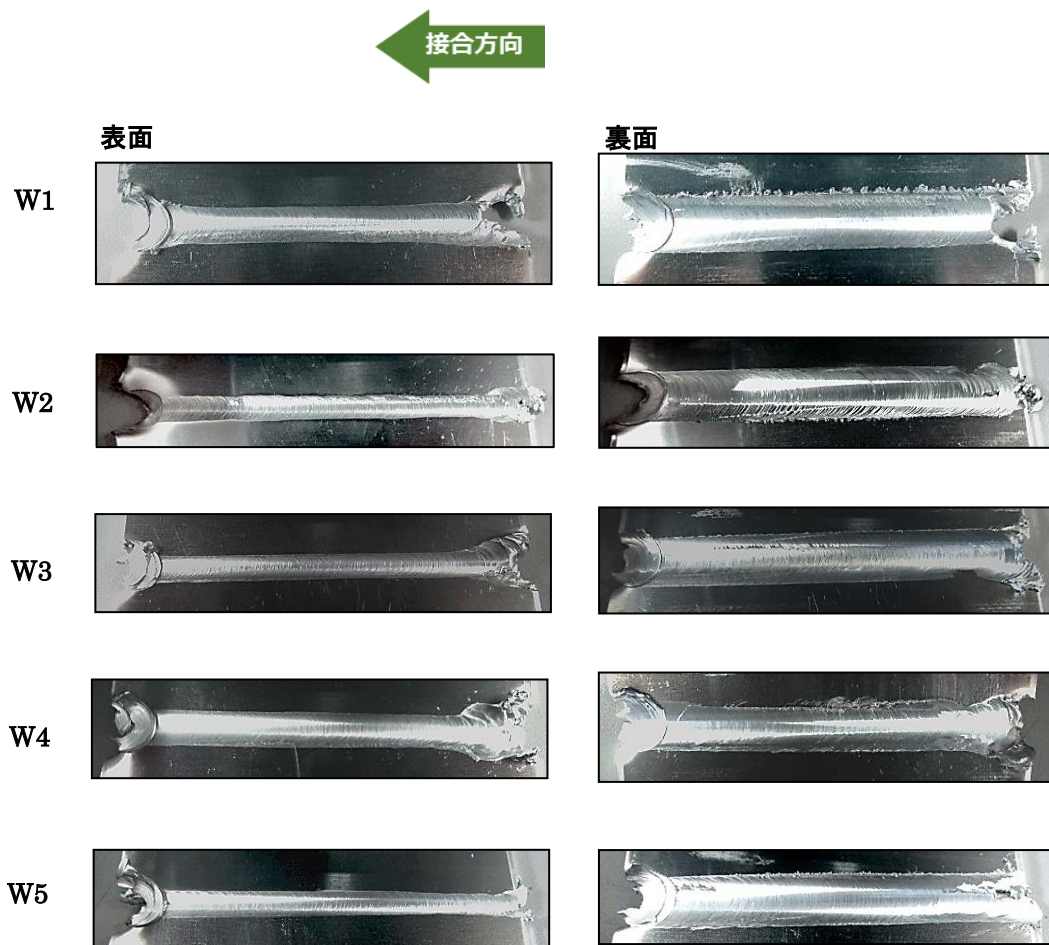


図 4 - 1 1 接合状況

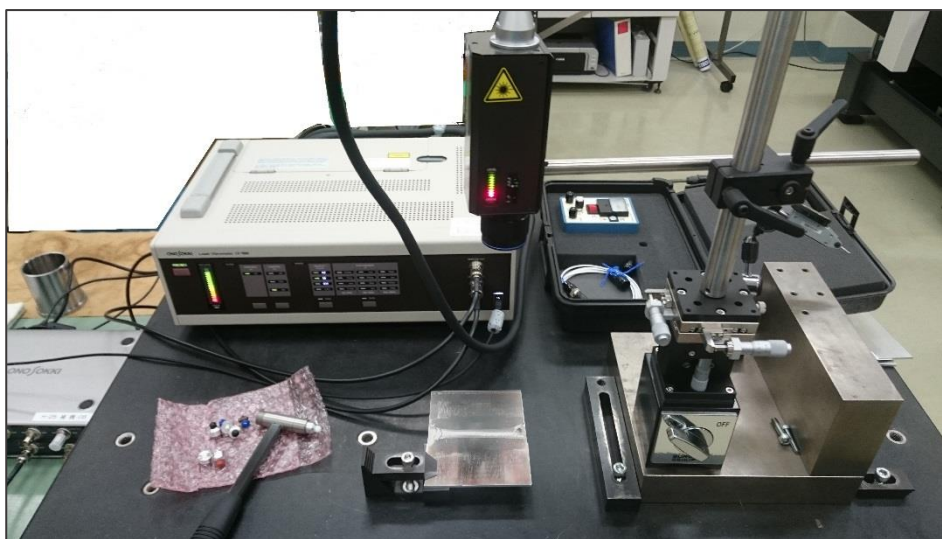


図 4 - 1 2 レーザードップラ計設置状況

左側が応答周波数グラフ、右側がコヒーレンス関数グラフ  
 上段が母材のまま、下段がF S W接合を施工したもの



図 4 - 1 3 振動計測波形

## 2-5 プロジェクトの運営・管理

担当：国立大学法人大阪大学接合科学研究所

研究開発にあたり委員会を開催するなど研究体の構成員相互の調整を図るほか、プロジェクトの進捗管理、報告書の取りまとめなど、プロジェクトの運営・管理を行った。

上記委員会の開催や定期的な進捗状況の報告の他に、研究の進捗に合わせて随時、問題点のとりまとめを行い、プロジェクトメンバーと打ち合わせやアドバイスをを行った。アドバイスに関しては、特に計測機器による測定方法やF S W接合の加工技術、特許に関して知見を活用し研究開発が円滑に行なわれる様に努めた。

その他、研究スケジュールの進捗状況及び補助事業費の執行状況について確認するとともに、スケジュール管理及び経費の適切な執行についてアドバイスをを行った。

## 第3章 全体総括

平成27年度から始まった本研究において、小規模工場への設置を容易とする小型の摩擦攪拌接合機の開発、一般建材に広く用いられているアルミニウム合金であるA1100の摩擦攪拌接合の条件の探索、小ロット生産の対応を可能にするためプログラミングの必要が無く接合作業が可能な汎用性の高い摩擦攪拌接合機の開発を目的としてきたが、同軸スピンドル式小型FSW装置の開発によりこれらの課題を達成し、この成果により今後の事業化に向けて大きく前進がみられた。

事業化へ向けての今後の課題としては、接合加工においてツールの耐久性及びメンテナンス性の向上、接合加工の成功率の向上である。今回の事業において、同軸スピンドル式に関してはツール間に接合材が侵入し焼付く現象がみられた。解決策としてツールの改良を行い対応したが、加工を繰り返す中でツールの改良部分にも接合材が付着し機能を果たさなくなることが判明している。接合材の除去方法の確立、または更なるツール形状の改良を検討して行く必要が試験により認識された。また、接合加工の成功率については、川下企業である小規模工場において不良の数量減少の要求が高く、条件だし時でも多数回の試作が難しい状況である。その為、より成功率の高い加工条件の探索が求められる。理想としては5回程度の試作により条件調整を行い、その後90%以上の成功率を持続する事である。

それらの課題をふまえ、次年度以降の予定を以下の通りとした。

- ・開発したFSW装置を展示会等へ参考出品し、川下ユーザーの意見や仕様・価格帯等の情報を収集する。
- ・耐久性向上の為、ツールの形状・材質等の改良の検証
- ・アルミ材A1100においてFSW加工の成功率の向上のため、再度、条件を検証。
- ・川下企業からの要求によっては、支給して貰った接合材を試験的にFSW加工し、客先の求める形状作製が可能か調査する。

以上をアドバイザー及び川下企業の意見を取入れながら実証を行い、よりニーズに即した小型FSW装置を目指して、最終的には一般建材の分野にFSW加工が普及する様、推進していく予定である。