

平成31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

「異種金属の通電拡散接合による自動車用エンジンバルブの  
量産技術の確立」

研究開発成果等報告書

令和2年3月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 公益財団法人栃木県産業振興センター

## 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

国内自動車メーカー各社は、新たな市場の開拓とさらなる経営効率の向上を目指し、製造工程や部品／ユニット等の継続的な改善に取り組んでいる。

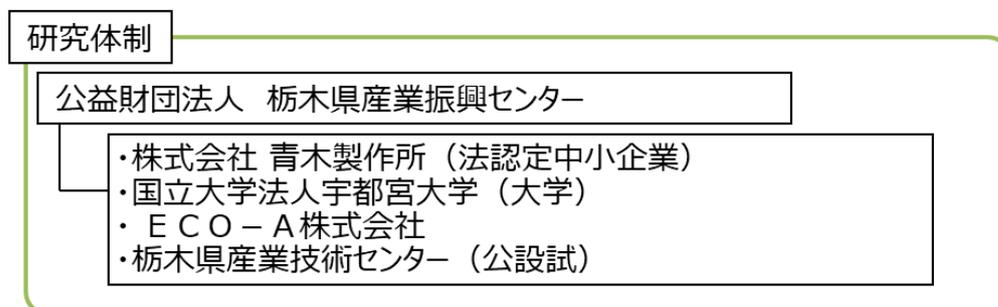
このような状況の中、レシプロエンジン吸排気バルブの製造に関しては、摩擦圧接接合法を用いて2種の耐熱鋼（オーステナイト系のSUH35及びマルテンサイト系SUH3）を接合し、部品を製造している。しかし、現行の方法では、接合箇所のバリ取りや余剰部分の切り落としなどの後工程が必要である。これにより、作業工数の増加や高価な耐熱鋼の材料損失が課題となり、高品質でコストを低減する製造方法が求められている。

摩擦圧接接合における課題解決に向けて、新たな接合方法である「通電拡散接合」技術の構築について、青木製作所とECO-Aは連携して共同研究に取り組み、異種金属接合の試作機の開発に取り組んできた。

この通電拡散接合技術は、真空中で金属同士を加圧／通電することにより接合するものであり、接合前後の材料の形状変化が少なくバリ等が発生しないため、工程全体の効率化が可能となることで生産コスト低減が図れ、一方で、耐熱鋼など高価な材料の廃棄量削減などと資源保護にも有用な技術である。

そこで、バリ取り等の後処理工程が不要な通電拡散接合をエンジンバルブ等の接合に適用し、タクトタイムを短縮できる製造プロセスを構築することで、従来の40%となる120秒まで短縮し、製造コストの8%以上の低減を目標とした。

#### 1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）



##### 総括研究代表者（プロジェクトリーダー）

株式会社 青木製作所	メディカル事業部	部長	伊藤 俊之
		技術顧問	梅山 規男

##### 副総括研究代表者（サブプロジェクトリーダー）

国立大学法人宇都宮大学	工学部	教授	高山善匡
-------------	-----	----	------

##### 研究者

ECO-A株式会社	研究開発部		伊藤 誠
栃木県産業技術センター	機械電子技術部	主任	江面 篤志
		主任研究員	柳田 治美
		主任	小池 宏侑
		技師	荒井 辰也

## アドバイザー

本田技研工業株式会社 栃木製作所 生産業務部事業企画課

技師

馬場 忠男

国立研究開発法人 理化学研究所 大森素形材工学研究室

主任研究員

大森 整

### 1-3 成果概要

研究開発計画に基づく実施項目一覧を表1に示す。

表1 申請計画に基づく実施項目一覧

項目番号	主な実施内容（実施年度）
実施項目1	高精度治具等の設計／試作
実施項目1.1	治具の同軸度の確保（平成29年度～平成30年度）
実施項目1.2	冷却システム等の検討（平成29年度～平成31年度）
実施項目2	中空構造に対応した通電拡散接合技術の開発
実施項目2.1	加圧／通電条件の最適化（平成29年度～平成31年度）
実施項目2.2	接合面の評価（平成29年度～平成31年度）
実施項目3	IoTを駆使した量産技術の開発
実施項目3.1	量産における耐久性の確保（平成31年度）
実施項目3.2	ロボット／IoTの活用（平成31年度）

#### 実施項目1 高精度治具等の設計／試作

##### 実施項目1.1

治具の同軸度の確保（青木製作所、ECO-A）

達成目標：同軸度 0.1 mm 以下（達成率 100%）

材料の押さえ方など治具の設計見直しを実施し、材料をセットする際の平行度を高精度に保つことが可能な構造とし、縦軸と横軸の抑えバランス、接合面の密着性を微調整することで、同軸度 30  $\mu$ m 以下を達成した。

##### 実施項目1.2

冷却システム等の検討（青木製作所、栃木県産業技術センター）

達成目標：接合時間 20 秒以下（達成率 100%）

当初、治具が過熱された際に接合不良が生じる現象が散見されたことから、治具を一定温度に降下させる必要があるとの仮説を立て、冷却時間の短縮を目的として、治具に水冷配管経路を配置する試みを実施した。その方法は、熱電対を用いて、接合通電時における既存治具の温度プロファイルの計測を行い、そのデータから伝熱解析シミュレーションを実施し、最適な冷却水配管のレイアウトを設定した。

このデータから金属三次元積層造形装置を用いて治具を試作し、冷却性能の比較試験を行った。本結果として、最適解の冷却水配管レイアウトにおいて冷却効率の向上がみられた。

一方、ろう付け作業のタクトタイムを想定した加熱作業時間の目標値は 20 秒以下に設定したが、実機の接合時間は約 10 秒で完了している。

## 実施項目2 中空構造に対応した通電拡散接合技術の開発

### 実施項目2. 1

加圧／通電条件の最適化（宇都宮大学、青木製作所）

達成目標：接合強度 250 MPa 以上（達成率 100%）

横型接合装置を用いた量産化試験は青木製作所が担当した。本実験では、無垢材に比べて接合面積が狭く接合強度が低い中空形状の材料における加圧／通電条件の最適化を目指した。具体的には治具とワークの接点部分の改良、接合通電制御を定電圧から定電流制御へ改善を行うことで、適切な加圧／通電条件を設定することが可能となり、目標の接合強度である 250MPa 以上の強度を得ることができた。

縦型接合装置を用いた基礎的実験は宇都宮大学が担当した。本実験では、接合界面周辺の温度上昇の様子をサーモグラフィーで観察し、接合面の加工方法と接合強度の関係を調べた。接合面をサンドブラスト加工したワークでは、メディア粒子の研削による微細な凹凸が接合面に存在する。一方、旋盤加工したワークでは、切削バイトによる微細な旋状の凹凸が存在する。これにより、旋盤加工では、微細な凹凸が噛み合うように接することで電気的特性が有効に作用し、サンドブラスト加工より温度上昇が少なく、目標接合強度である 250MPa を満足する結果が得られた。これは、加工コストの面でも有用となる情報であると考えられる。

### 実施項目2. 2

接合面の評価（栃木県産業技術センター）

達成目標：接合強度 250 MPa 以上（達成率 100%）

電子線マイクロアナライザ（EPMA）を用いて接合状態の異なる試験片の接合面の断面方向について元素分析を行った。強い接合がなされた試験片では US304/SUH3 接合界面からの距離に応じ、SUH3 側で鉄の濃度の減少が見られた。弱い接合となった試験片では、同様の傾向はなく、接合面近傍において炭素の局在が見られた。鉄の濃度変化については、鉄又は他の元素が、電流の流れに応じ移動している可能性がある。炭素の局在については弱い接合との因果関係や原因が明確ではないため、今後の課題とした。

本実験では、250MPa 以上の高い結合強度が得られる際には、鉄元素の移動が生じること、炭素等の局在が発生した際には強度不足が起こることが判明した。

## 実施項目3 IoTを駆使した量産技術の開発

### 実施項目3. 1

量産における耐久性の確保（青木製作所、宇都宮大学）

達成目標：10,000 個の接合を行った際の治具の破損が1 個以下（達成率 50%）

本実験では、耐久試験を含む接合試験を1セットの治具で約 1,000 回以上実施し、治具の破損や接合不良は発生しなかった。また、電極部に対する表面観察と機器分析を実施し、耐久性の推定を行ったが、不具合の原因となる異常の発見には至らなかった。

現結果に基づく統計的な評価は実施していないが、物理的および化学的変化の状況から目標値を満足することが確実であると推測する。

### 実施項目3. 2

ロボット・IoTの活用（青木製作所、宇都宮大学、栃木県産業技術センター）

達成目標：タクトタイム 120 秒以下（達成率 70%）

拡散接合装置用ワーク移載装置を導入し、ワークの自動搬送を実現させた。

実機での加熱時間は約 10 秒であるが、接合直後の治具とワークは 200℃前後を有し、保護具など着用が必要であった。さらに、酸化防止を実現するための真空維持や窒素パージ、100Kg 以上の横方向加重などの条件を満足させるため複雑なレイアウトを呈していることから、治具の設置などの操作性やタクトタイムにも大きな影響を与えていた。

そこで、耐熱を考慮した自動搬送ロボットの導入により、タクトタイムの改善と共に、繰返し作業の安定性、オペレータの火傷防止にも貢献できた。

また、実機では、放射温度計、電圧／電流制御、治具やワークへの圧力制御に加えロボットの導入を行い、素材／形状を自動的にセンシングし、適切な接合条件を自動的に設定することも可能となり、IoT 機能の有効活用を検討しているが、実用に至らず目標達成率は 70%とした。

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社青木製作所 東京 R&D センター  
センター長 緒形 博  
Email : ogata@aokisym.tech  
Tel: 0285-81-6802 Fax: 0285-82-1053

## 第2章 本論

### 実施項目1 高精度治具等の設計／試作

#### 実施項目1.1

#### 治具の同軸度の確保（青木製作所、ECO-A）

同軸度の精度を確保するため治具の改良を行った。具体的には電極の位置や材料の押さえ方等を改良し、接合面の密着性を微調整できる構造とした。



図1 通電拡散接合装置



図2 チャンバー内部



図3 接合後の材料

治具改良後の実際の接合後の様子をマイクロスコープで観察した（図4）。また詳細をワイドフィールド共焦点顕微鏡（Smartproof5 Sp5-SS）で観察し（図5）、良品では30 $\mu\text{m}$ 以内の差異で接合が可能になった。

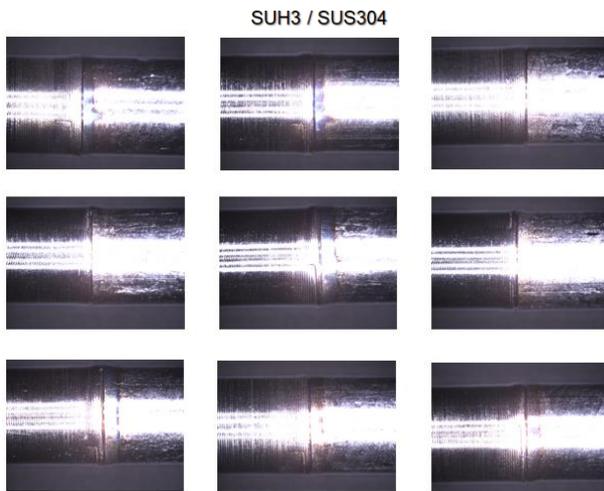


図4 接合部のマイクロスコープ観察像

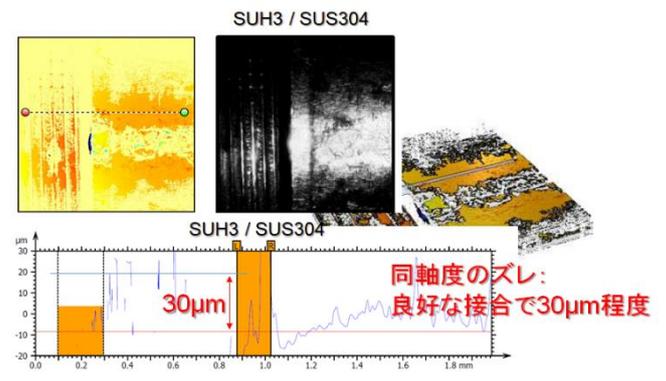


図5 接合部のワイドフィールド共焦点顕微鏡の観察像および表面プロファイル計測結果

## 実施項目 1. 2

### 冷却システム等の検討（青木製作所、栃木県産業技術センター）

通電拡散接合を自動車用エンジンバルブの接合に適用する場合、摩擦攪拌接合と比較してタクトタイムの優位性が求められる。特に、接合時の熱が接合体を保持する治具に伝播し、接合強度に影響を及ぼす傾向がみられたことから、冷却に要する時間が、タクトタイムに対し不利な状況を与える。そこで、治具を効率的に冷却するため、治具内部に冷却水管を設けることで対策を講じることとした。

冷却水管の設置に当たっては、その配置の最適解を求めることにより、効果的な冷却プロセスの実現を目指した。具体的には、伝熱解析を行う際、最適化計算を同時に実施することにより求めた冷却水管の最適解モデルを金属三次元積層造形装置により作製した造形モデルを用いた冷却水管の有効性を評価した。

冷却水管の配置最適化には、基本となる伝熱解析を高精度に行う必要がある。このため既存治具から周辺への熱伝導率を求めるため、熱電対を用いて実際の接合プロセスにおける温度変化を測定した。温度測定時における治具と熱電対と接合試験片の配置を図6に、接合プロセスにおける治具の温度の測定結果を図7に示す。800°C設定での通電拡散接合を2回実施しているがほぼ再現している。温度履歴から求められる熱伝導係数をシミュレーションに活用する

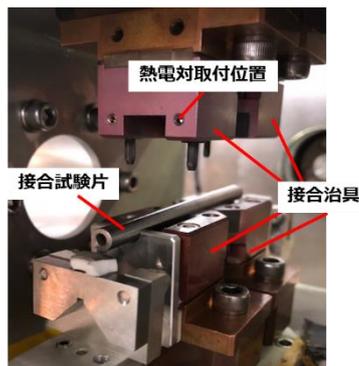


図6 接合装置の治具周りの外観

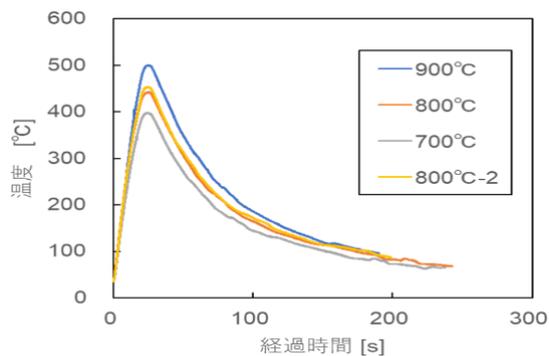


図7 接合プロセスにおける治具の温度測定結果

放熱設計シミュレーションシステム（COMSOL Multiphysics）を使用して、冷却水管配置最適解の算出を実施した。図8に冷却水管配置最適化フローを示す。また、図9に解析に用いた冷却水管を具備した治具モデルを示す。

図8に示す、冷却水管配置最適化を行うため、まず、有限要素法による伝熱解析を実施し、モデルの温度分布及び冷却時間を求める。なお、モデル内の最高温度が100°Cまで冷却されるまでに要する時間を冷却時間と定義した。その後、冷却水管のいずれかの配置をわずかに移動させ（図8中②）再び有限要素法を用いた伝熱解析を実施し（図8中③）冷却時間が短縮し冷却性向上が認められれば、図8②で変更した冷却水管位置は有効であると判定され（図8中④）その位置は保存される（図8中⑤a）。一方、冷却時間が増大、もしくは変化がない場合には、図8②で実施した冷却水管の位置の変更は有効でないと判定され、水管の位置は元の場所に戻される（図8中⑤b）。このようにして、冷却水管位置の変更が保存もしくは無効化されたモデルの冷却水管の位置の変更を再度実施し（図8中⑥）、その有効性について、前述した手順で判定を行い、冷却時間が最短となる冷却水管位置を求める。なお、算出された最適解の妥当性について検討するため、放熱設計シミュレーションシステムに搭載されている複数のアルゴリズムを用いて最適解の算出を行った。

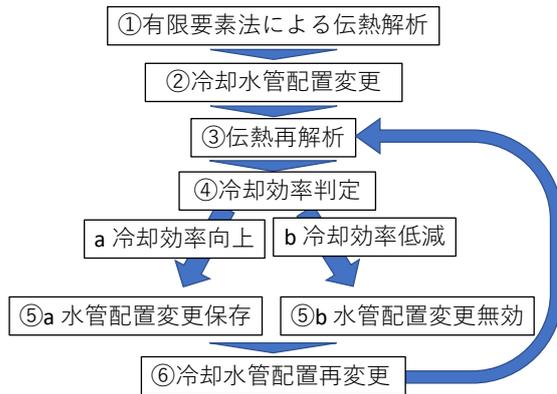


図8 冷却水管配置最適化フロー

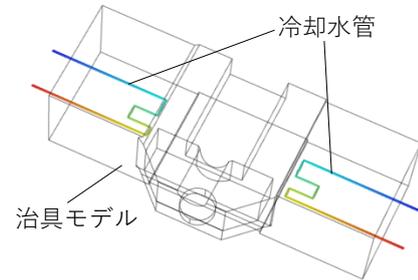


図9 解析モデルの概要（最適解無）

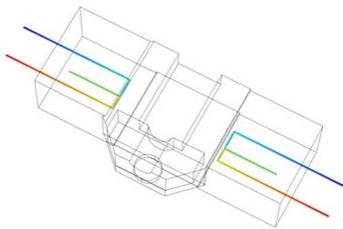


図10 最適解1の概略

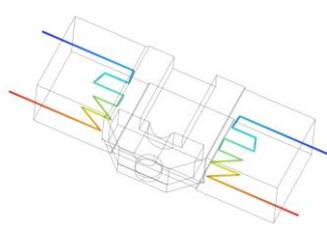


図11 最適解2の概略

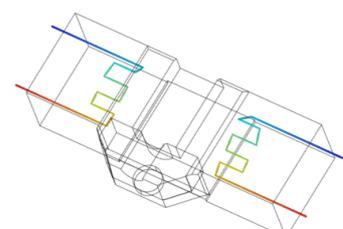


図12 最適解3の概略

図10から図12には、数値シミュレーションシステムを用いた最適化計算により、導き出された最適解の例を示す。最適化計算により、冷却水管位置が変化している。

次にこの結果を活かし、冷却水管の位置データを基に、金属三次元積層造形装置（OPM250L）を使用して造形物を図13のように作製し、図14のような冷却性能評価実験系で冷却効果の評価を行った。具体的には200℃に加熱したホットプレート上に断熱材を置き、その上に造形物を置き冷却水を循環させたのちプレート電源を切ったからの造形物の温度変化について熱電対を用いて測定した。

その結果を図15に示す。同図より、最適解無と比較して最適解3の方が、冷却速度が速いことがわかる。このことにより、最適化を行うことで冷却効率が向上することが示された。

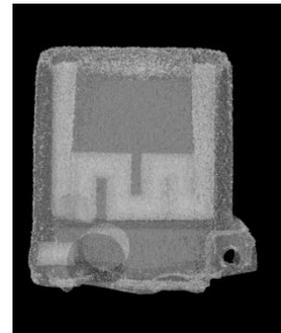
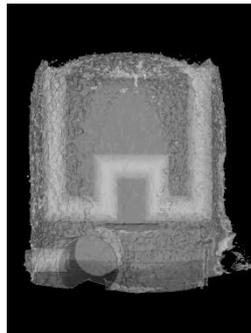


図13 金属3次元造形機による造形品外観およびX線CTスキャンによる配管内部構造観察結果（左：造形物外観、中：X線CT写真（最適解無）、右：X線CT写真（最適解3））

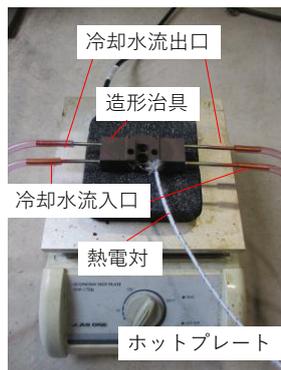


図 1 4 冷却性能評価実験系

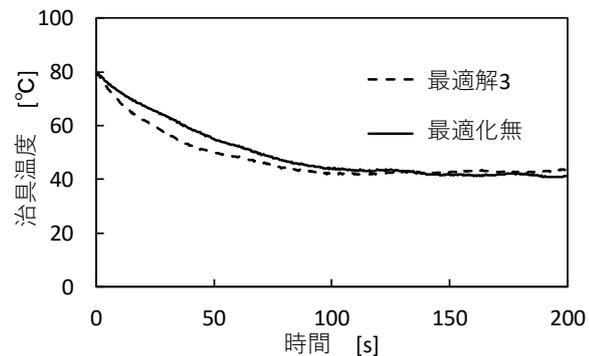


図 1 5 時間に対する治具温度の変化

今回の配管は実機には適用できていないが、このような配管を基に治具設計を行うことが重要であることが分かった。

ろう付け作業のタクトタイムを想定した加熱作業時間の目標値は 20 秒以下に設定したが、実機の作業時間は約 10 秒で完了している。またロボットでの自動搬送については、実施項目 3-2 で詳細を述べるが、ロボットを用いた自動搬送で接合を繰り返し返しても、接合不良は生じなかった。

## 実施項目 2 中空構造に対応した通電拡散接合技術の開発

### 実施項目 2. 1

#### 加圧・通電条件の最適化（宇都宮大学、青木製作所）

#### 横型接合装置による量産を想定した実験

量産を想定し、横型接合装置による実験通電拡散接合を行うため、図 1 6 に示す横型接合装置を用いて、主に青木製作所において実験を行った。本実験では、無垢材に比べて接合面積が狭く接合強度が低い中空形状の材料における加圧／通電条件の最適化を目指した。

具体的には、装置や治具や制御に関して、次の改良を行っている。

- ① 治具とワークの接点部分の改良
- ② 接合通電制御を定電圧から定電流制御へ変更
- ③ 放射温度計での温度計測場所をカーボン電極部からワークの接合部への変更（カーボン電極部等の位置については図 1 6 右上参照）

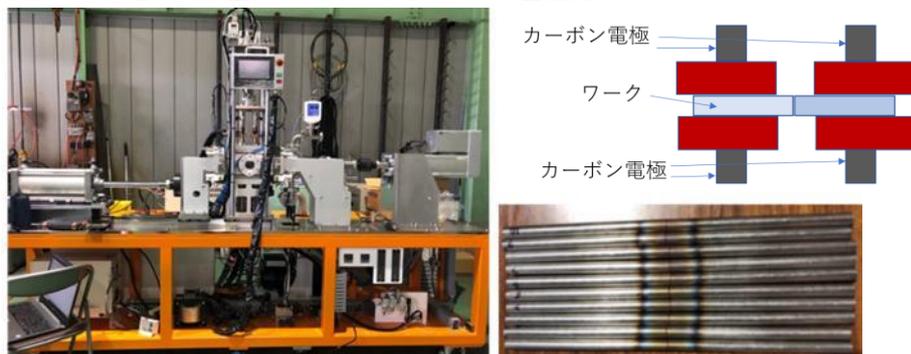


図 1 6 通電拡散接合装置（左）およびワーク（右）ワーク設置部分の模式図（右上）

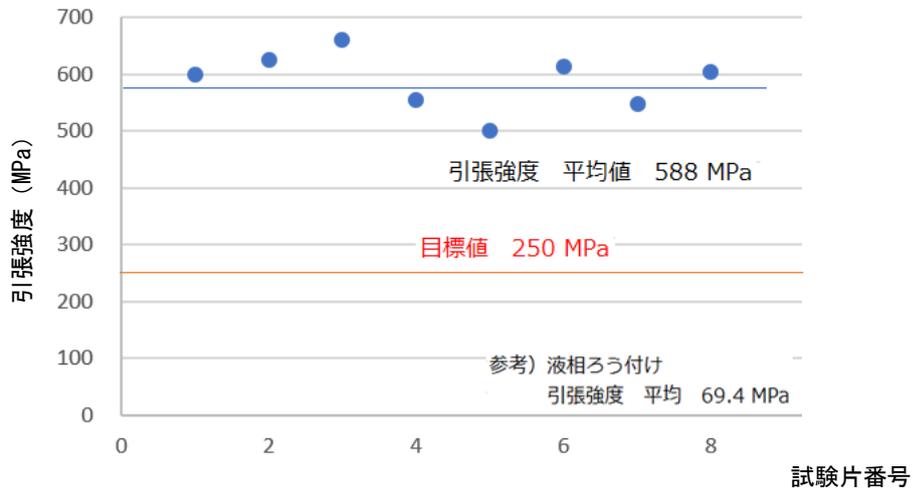


図 17 通電拡散接合後の引張強度試験の結果

このように温度・加圧を適切な条件にすると、図 17 に示すとおり、引張強度としては、目標値の 250MPa 以上を達成し、平均値は 588MPa であった。これは、材料の自体の強度が実現できていること考える。一方、液相ろう付け結合は、70MPa 程度の強度とされ、材料強度の 1/7 程度であり、その差が明確であることが分かる。実際には、温度・圧力・電圧・電流値等の水準を数多く設定し、適正条件を解析することができた。不具合事例としては、電圧上限値を 6 ボルト付近に設定すると、接合部において過剰電流と思われる閃光（火花）が生じ、材料の溶化を確認している。

#### 縦型接合装置による基礎的実験

通電拡散接合の最適条件を解明するため、縦型接合装置（図 18）による基礎的実験を主に宇都宮大学において実施した。通電拡散接合における接合条件は、以下の通りである。

- ① 設定荷重 : 100、300、500[kgf]
- ② 最高温度 AL1 : 550-700[°C]
- ③ 制御開始温度 AL2 : 300-350[°C]
- ④ 電流 : 3.5-3.7[kA]
- ⑤ 接合時間 : 25-45[秒]

\* 上記の温度は、非接合材と圧縮治具間に設置したカーボンの温度

接合の最適条件を導き出すためには、各接合条件における被接合材の温度分布、微小変形量とそれに対応する接合強度を知ることが重要である。本実験では、主に下記に記す 2 点の実験を進めた。

耐熱鋼（SUH3/SUS304）による接合実験では、耐熱鋼試験片を用いた接合試験を実施し、寸法変化を測定し、接合時の 5 つのパラメータによる接合状態・接合強度を評価した。

- ① 設定荷重
- ② 最高温度（AL1）
- ③ 制御開始温度（AL2）
- ④ 電流
- ⑤ 接合時間の変化
- ⑥ 接合面表面粗さの変化による接合状態・接合強度

以上のパラメータに関する最適条件において接合強度が 250MPa 以上となることを目標とした。

接合過程の温度分布測定（温度分布測定精度の向上および条件との関係）では、通電拡散接合において、被接合材界面ならびに被接合材/圧縮治具界面にて加熱が開始され、接合中に温度分布が生じているものと推測される。真空チャンバー内で接合されるため、非接触で温度測定ができる 赤外線サーモグラフィカメラによる温度分布測定を行う（図 19 参照）。

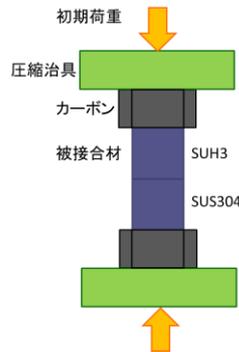


図 18 縦型の通電拡散接合装置の模式図

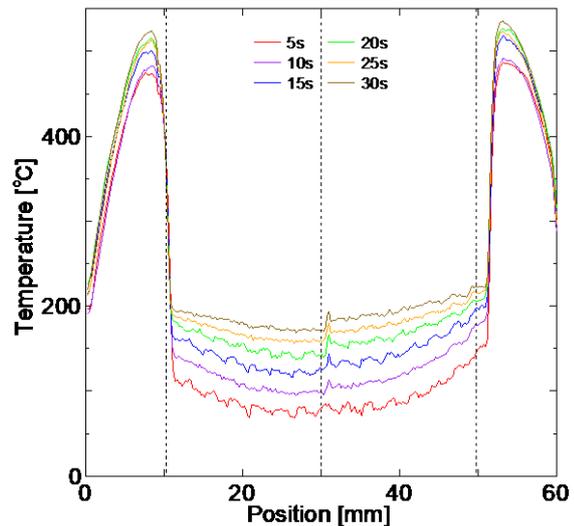
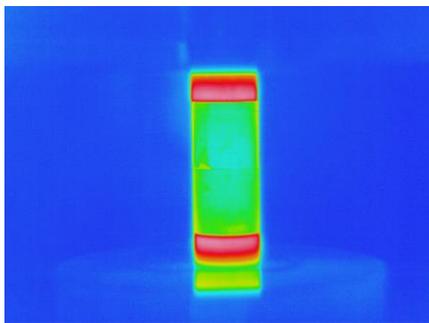


図 19 S45C/S45C の接合時の温度分布（左：サーモカメラ映像、右：位置による温度分布）

#### 実験方法

放射率を0.94にすることができる黒色スプレーを試験片，カーボン治具に塗布した後接合実験を行いサーモグラフィ解析を行った。

1. 解析方法はFig.1のように接合完了直前の試験片が最も高温であるときのデータを使用する。
2. 黒色部の高さ方向中心，黒色部境界線付近の放射率を0.94に設定し温度を確認する
3. 地肌部の高さ方向中心，黒色部境界線付近の温度が黒色部の温度と同等になるように放射率を変えていく
4. 黒色部の温度と地肌部の温度が一致した放射率を試験片の放射率と決定する。

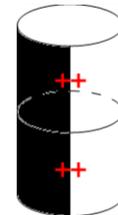


図 20 放射率測定実験の詳細

S45C 試験片を用いて、図 20 で示すような黒色スプレーにより放射率を高めた状態で、大気中において熱電対による温度校正実験を行った。S45C/S45C における放射率測定実験結果を図 21 に、SUH3/SUS304 における放射率測定実験結果を図 22 および図 23 に示す。

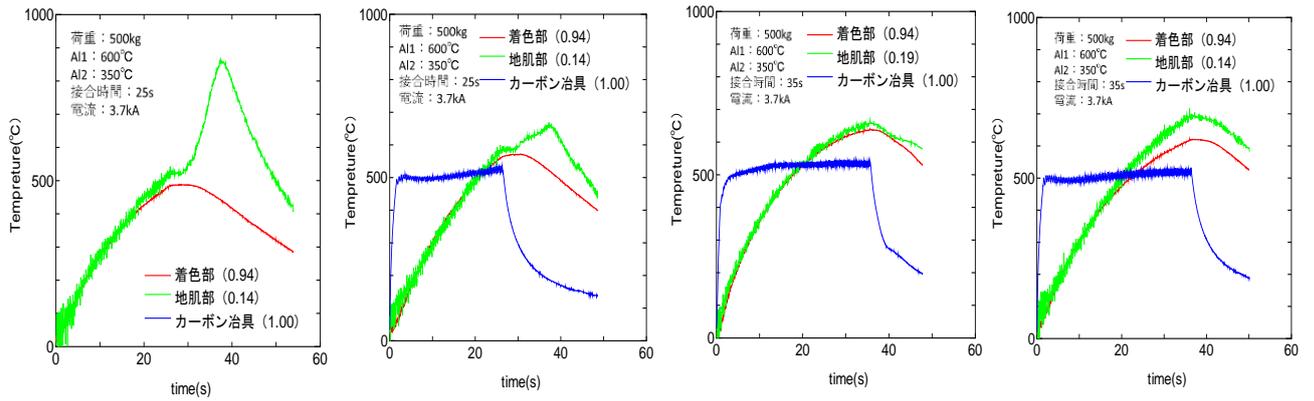


図 2.1 S45C/S45C の放射率測定実験結果

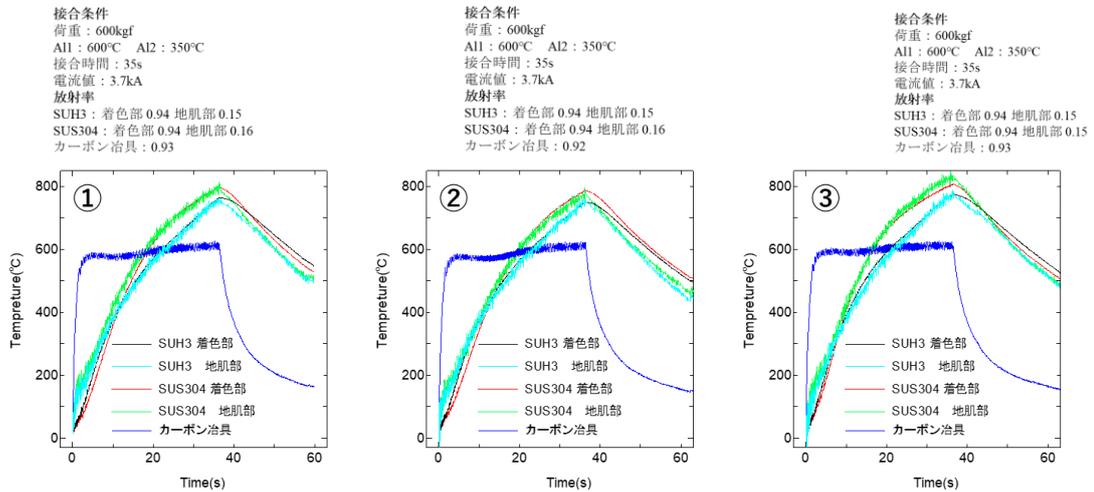


図 2.2 SUH3/SUS304 の放射率測定実験結果

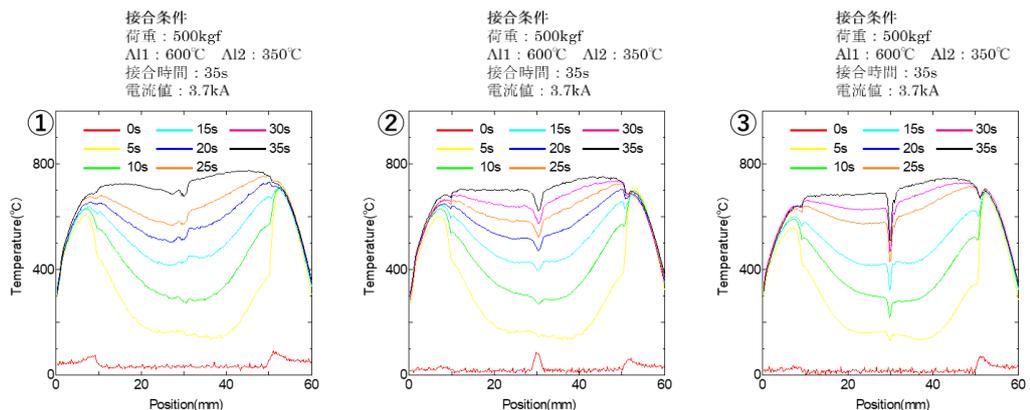


図 2.3 SUH3/SUS304 の放射率測定再実験結果

以上の実験から平均値を用いて放射率は下記の表 2 のように決定された。以降はこの値を用いて温度プロファイル等を示すこととする。また、より精度の高い温度測定を実現するために、真空チャンバー内に設置できる熱電対を使用した。この熱電対の概略図を図 2.4 に示す。

表 2 実験から求めた各試験片の放射率

	S45C	SUH3	SUS304
放射率	0.15	0.15	0.15

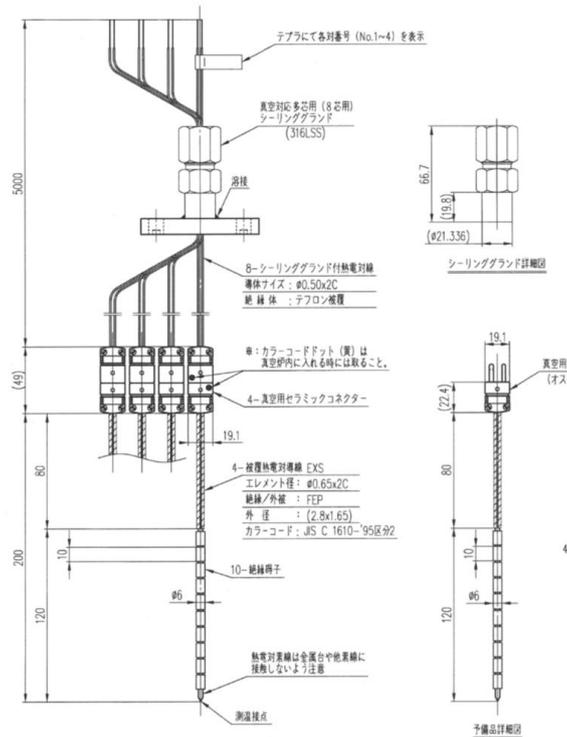


図 24 真空チャンバー内で使用した熱電対の概略図

また縦型接合装置を用いた実験における、接合前後の寸法変化（図 25）や表面粗さ等を変えた際の接合過程での接合体温度分布の変化（図 26、図 27）、接合過程における接合表面粗さと接合界面温度上昇分の関係（図 28）、接合面表面粗さと接合強度の関係（図 29）、破断後の接合界面の比較（図 30）を示す。接合面をサンドブラスト加工した材料では、メディア粒子の研削による微細な凹凸が接合面に存在する。一方、旋盤加工した材料では、切削バイトによる微細な旋状の凹凸が存在する。旋盤加工とサンドブラスト#80とサンドブラスト#120を比較すると、旋盤加工では平均温度と接合界面での温度上昇 $\Delta T$ は小さいが、旋盤加工による旋状の表面性状により凹凸が重なる部分が多く接合強度が高かった。旋盤加工では、微細な凹凸が噛み合うように接することで電気的特性が有効に作用し、サンドブラスト加工より温度上昇が少なく、目標接合強度である 250MPa を満足する結果が得られた。以上より導かれた寸法変化や表面性状と接合強度の関係一覧を表 3 に示す。

以上のように、縦型接合装置による基礎的実験の結果、通電拡散接合の接合状況には、接合界面温度と接合表面性状が極めて重要な影響を及ぼすことが明らかとなった。表面性状は接合温度を支配する要因でもあり、その最適化が製品製造条件の最適化に繋がると言える。これは加工費用面でも有益な情報である。

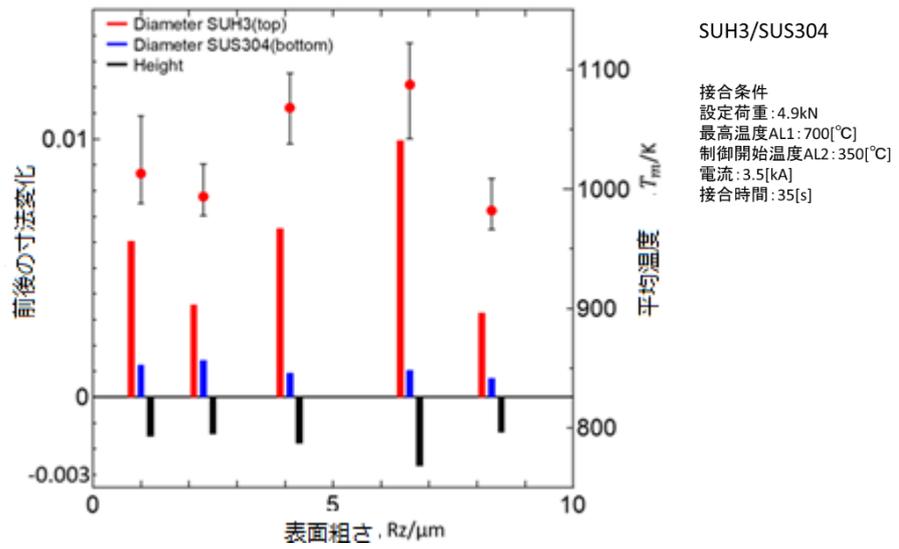


図 25 接合前後の寸法変化 (マクロメータによる)

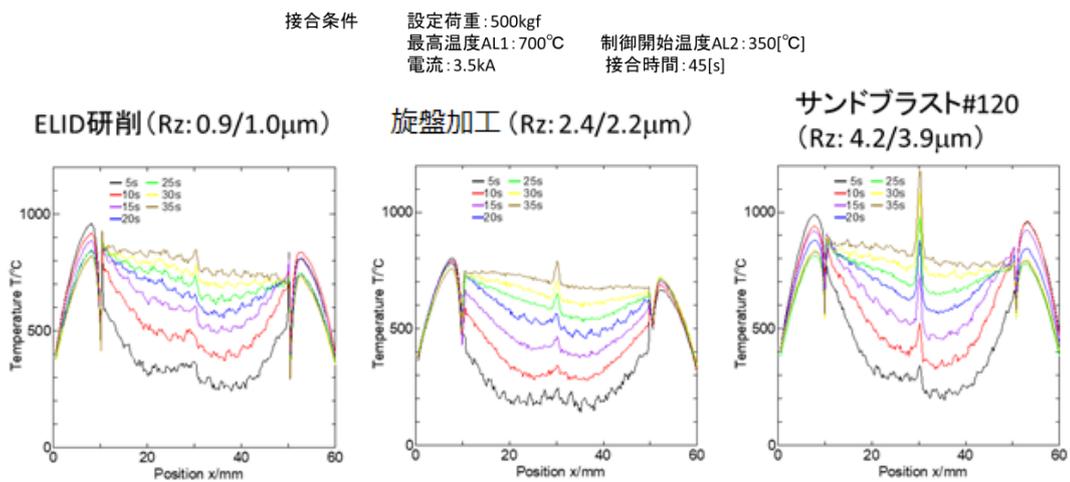


図 26 接合過程の接合体の温度分布の変化

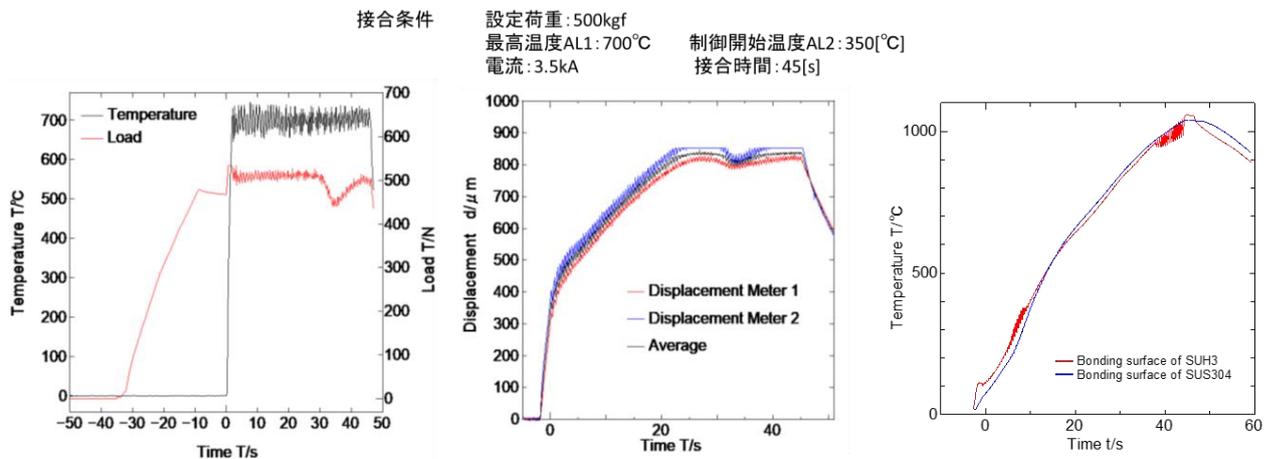


図 27 接合過程の接合体の温度分布の変化

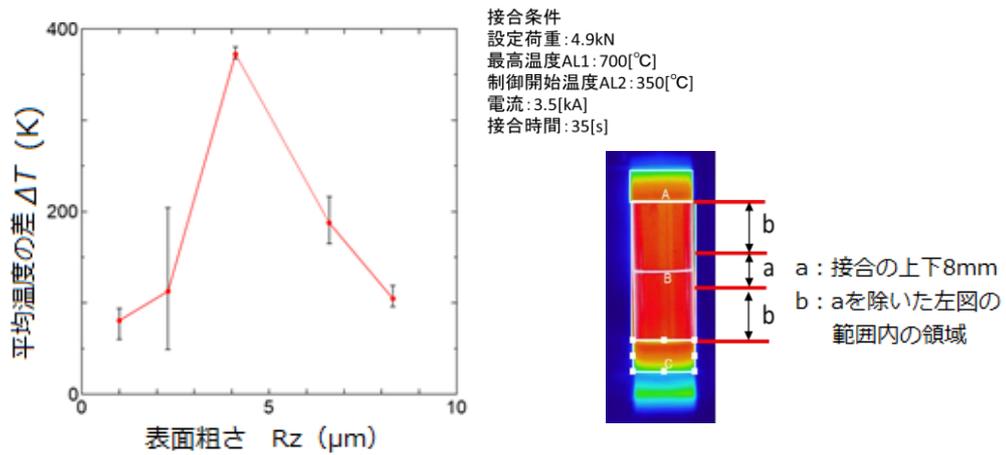


図 28 接合過程における接合表面粗さと接合界面温度上昇分の関係

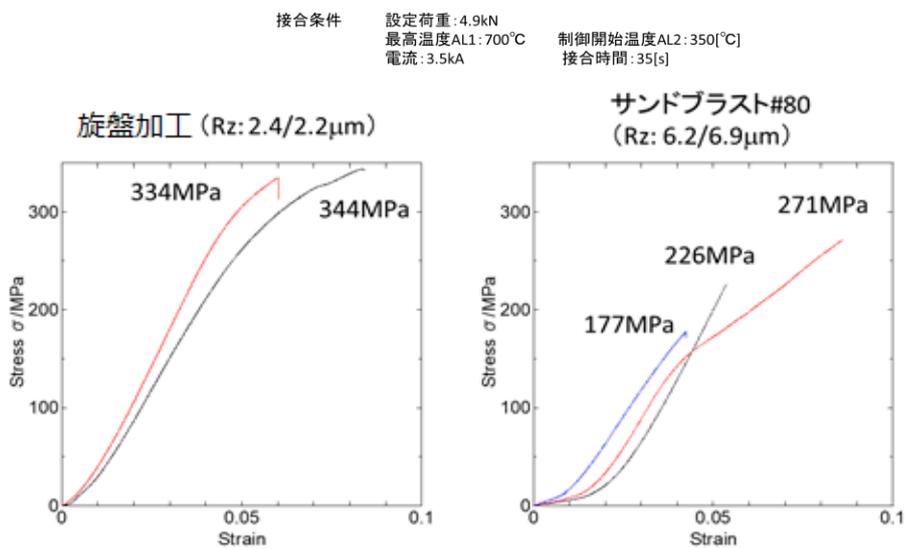


図 29 接合面表面粗さと接合強度の関係

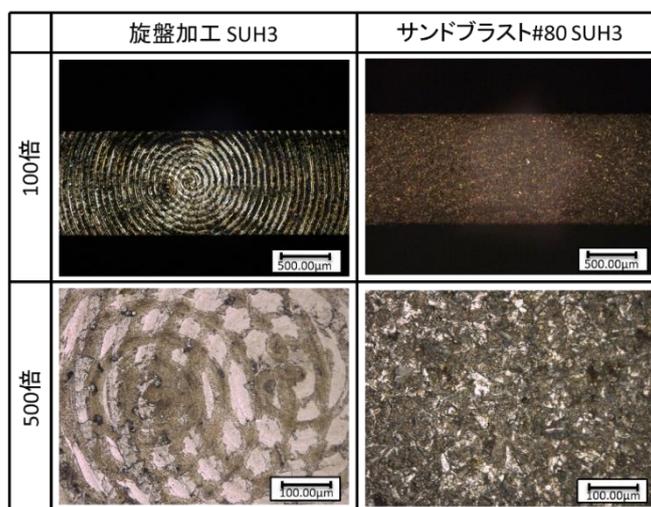


図 30 破断後の接合界面の比較

表3 寸法変化や表面性状と接合強度の関係一覧

	平均温度と寸法変化	接合界面最高温度と平均温度の差 $\Delta T$	表面性状	接合強度
旋盤加工	△	○	◎	◎
サンドブラスト#80	◎	○	△	○
サンドブラスト#120	○	◎	△	△

## 実施項目2. 2

### 接合面の評価（栃木県産業技術センター）

接合実験を行った接合後の材料の接合状況について検討するため、図31に示す接合面近傍の断面について走査型電子顕微鏡による観察と電子線マイクロアナライザ（EPMA）を用いた成分分析を行った（JXA-8100）。EPMAによる成分分析結果を図32に掲げる。分析には、強固な接合が得られた材料1検体と脆弱な接合となった材料2検体の合計3検体を用いた。同図より、強接合領域においてSUS304/SUH3接合界面からの距離に応じ、SUH3側で鉄が傾斜的に存在していることがわかる。

一方、弱接合領域では、同様の傾向は無く、接合面近傍および結晶粒界と考えられる箇所において炭素の局在が見られた。これは、結晶粒界にクロム炭化物が析出しているためであると考えられる。強接合領域のSUH3においては、クロムが網目状に存在しているものの、弱接合領域と比較して、その存在領域の輪郭はぼやけており、わずかに固溶しているものと考えられる。

このように、接合強度に差がある接合体の接合面における主要元素の存在領域は異なることがわかる。それぞれの違いが接合強度の程度に及ぼす影響を明らかにするためには追加試験が必要であるが、良好な接合が実現でき接合面近傍の元素分布の特徴については明らかにすることができた。鉄の濃度変化については、鉄又は他の元素が、電流の流れに応じ移動している可能性がある。炭素の局在については弱い接合との因果関係や原因が明確ではないため、今後の課題とした。

本実験の結果、250MPa以上の高い結合強度が得られる際には、鉄元素が傾斜的に存在すること、一方で炭素等の局在が発生した際には強度不足が起こることが分かった。

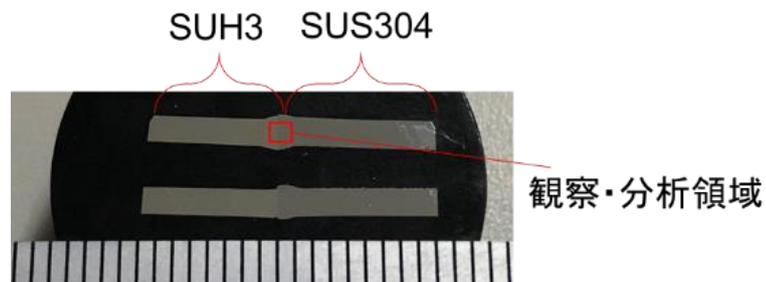


図31 観察分析領域

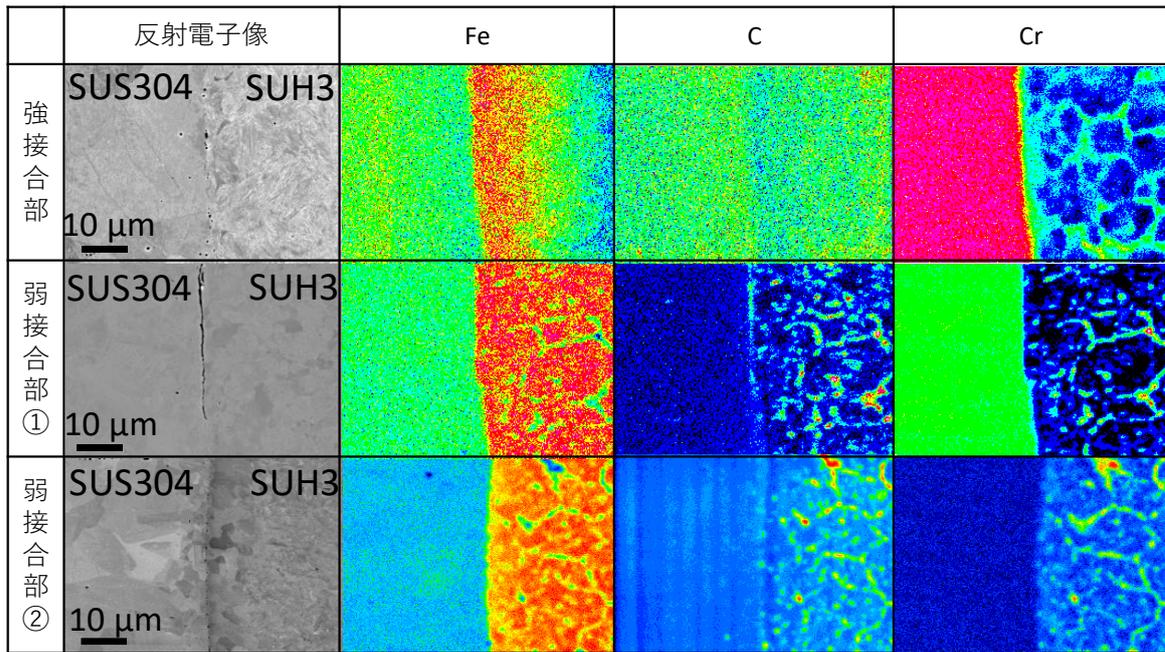


図32 接合面近傍の観察および成分分析結果

### 実施項目3 IoTを駆使した量産技術の開発

#### 実施項目3. 1

量産における耐久性の確保（青木製作所、宇都宮大学）

量産における耐久性については、目標として「1万回の接合を行った際の治具の破損が1回以下」という目標を掲げたが、実際に1万回の実験を行うことが困難なため、次のように耐久性に対する評価実験を検討した。

また、これまでの実験における状況は、下記のとおりである。

- ① 連続的な運用において、数十回以内に十分な接合が得られなくなる現象が生じていた。これは、電極や治具全体の熱が影響していると考えられる。
- ② 治具が一定の温度まで冷却されると、再度接合が可能となる。結果的に現在まで約1,000回以上の接合を繰り返してきたが、治具として接合性への課題は生じていない（図33）。

信頼性試験として、通常（1）環境試験、（2）寿命試験、（3）安全性試験、（4）非破壊試験、（5）故障解析が想定される。本治具において、特に電極部の耐久性を評価するにあたり、項目ごとに実施した内容について以下に記す。

#### （1）環境試験

高電流、高温、温度サイクル、物理／化学的特性などの使用環境から、タングステンやニッケルなどを素材として選定したが、いずれも劣化／破損が認められたため、最終的に電極にはモリブデン材を使用し治具を構成した。

実機により数百から1,000回以上の使用において、電極部の変化を目視等で観察した結果、形状変化や物理的損傷は生じなかった。

#### （2）寿命試験

あえて過酷な条件で試験を行い、短期間で製品の寿命を確認等し、潜在的な欠陥や弱い部分の発見を試みた。本実験では、電圧設定を通常より高い6ボルトに

設定することで、材料接合部が軟化し閃光が発生することが分かった。この高負荷条件を約 100 回以上繰り返したが、環境試験と同様に治具の損傷は生じなかった。

### (3) 安全性試験

開発試験機のため、安全確保のための理想的な仕組みには、改善の余地がある。しかし、繰り返しの接合実験（延べ 1,000 回以上）に対し、電気や物理的な危険性が無いことを確認できた。

### (4) 非破壊試験

製品の潜在的な欠陥や故障の予兆を間接的に検出する試験であり、試験方法は、放射線透過、超音波探傷、浸透探傷、磁粉探傷、赤外温度等がある。しかし、今回の治具は銅金属のインゴットを削り出して加工しており、その形状から治具内部の損傷は想定し難く、表面性状等の評価が適切であると判断し、未実施とした。

### (5) 故障解析

故障の状態を各種試験により把握し、機能、変形、変色、保全状態等を評価する。本実験では、変色や異物による影響を分析したが、外観上の変化が見られ、これについて下記に詳細を記述する。

本実験で通電拡散接合を繰り返した結果、変形・損傷等は見られず、電極表面に変色が生じるのみであった。その電極の外観写真と卓上電子顕微鏡に付帯するエネルギー分散型 X 線分析装置を用いた分析の結果を図 34 に示す。この変色の原因について、異物等の付着による元素等の変化は無かった。現在のタクトタイムで接合を実施する限り、治具の損傷や接合が行えなくなる等の課題が生じていない。分析結果からは、顕著な酸化や材料の転移（鉄、ニッケル、クロム等の付着）が起きている様子はない。500 回接合後の治具の分析等からの推定であるが、現在の条件で接合を実施する限り、治具の破損を引き起こす要因は確認できておらず、1 万回までの使用で破損が起きる可能性は極めて低いと推察される。

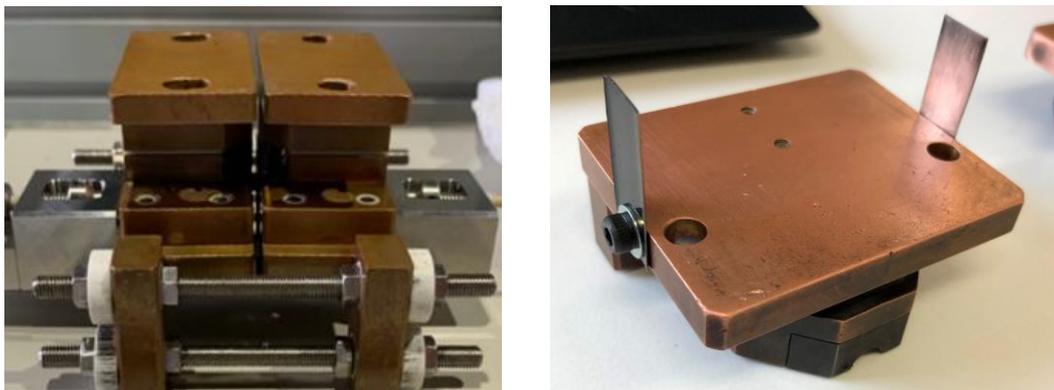
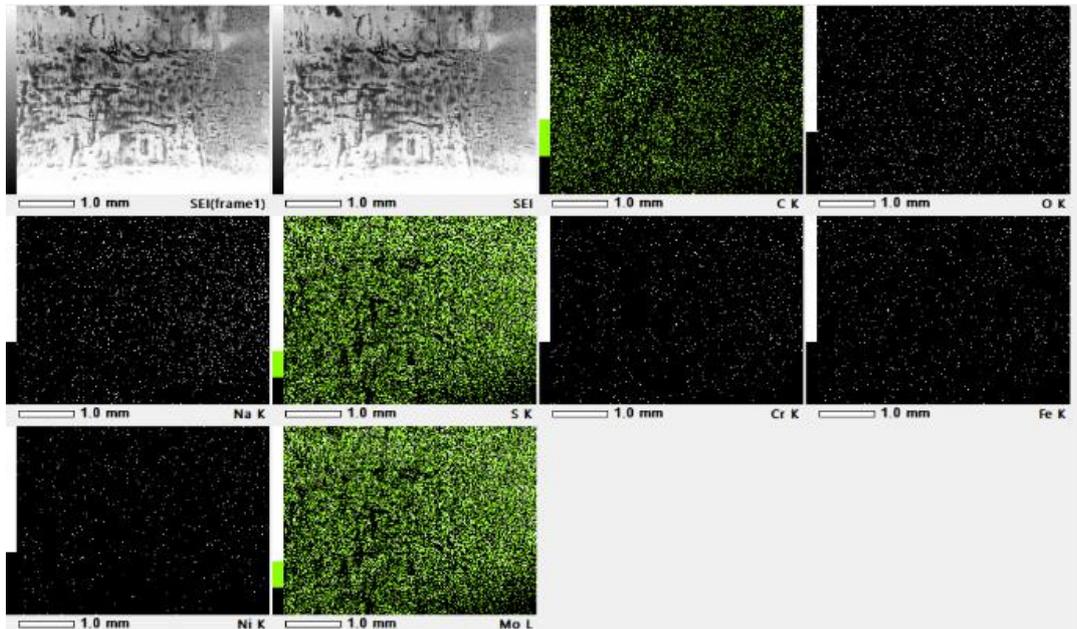


図 33 1,000 回以上の通電拡散実験を行った治具の外観

### 治具接点 A



### 治具接点 B

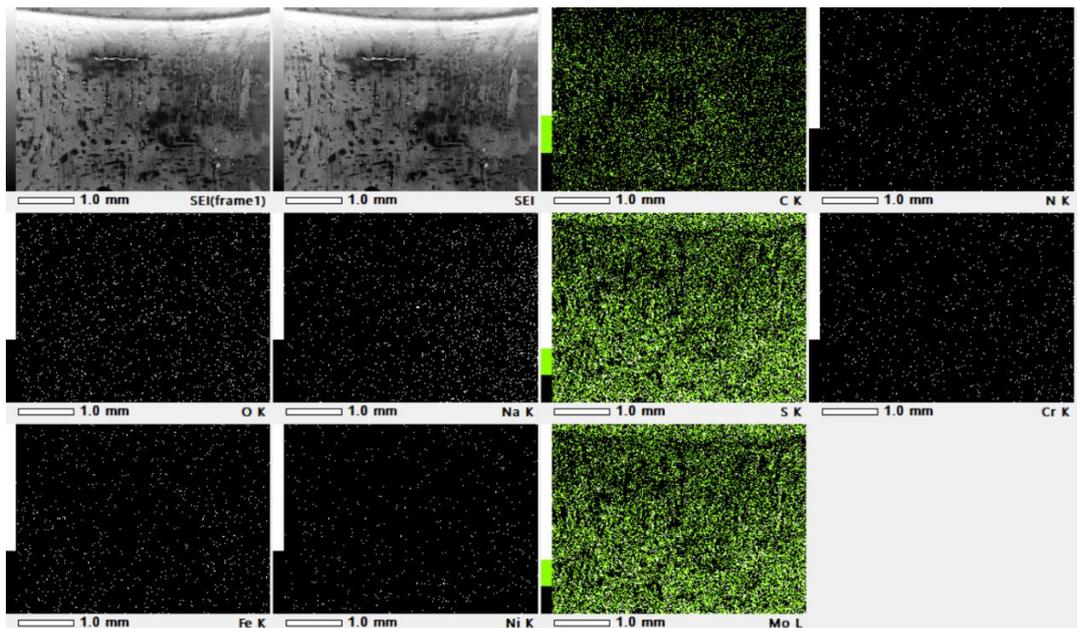


図34 通電拡散実験後の治具電極接点部 A 及び B の元素マッピング分析結果

### 実施項目 3-2

ロボット・IoTの活用（青木製作所、宇都宮大学、栃木県産業技術センター）

拡散接合装置用材料移載装置を検討し、自動搬送を試行実施した。

実機での加熱時間は約 10 秒であるが、接合直後の治具と材料は 200℃以上を有し、保護具など着用の必要であった。さらに、酸化防止を実現するための真空維持や窒素封入、100Kgf 以上の横方向加重などの条件を満足させるため複雑なレイアウト

呈していることから、治具の設置などの操作性や接合時間にも大きな影響を与えていた。

今回、通電拡散接合装置内の治具にアクセス可能なワーク移載装置を構築した。基本となる装置は、人協働ロボット COBOTTA(デンソーウェーブ社)を採用し構築した(図 35)。材料の移載には、既存チャンパー等のレイアウトに制限があるため、材料の保持方法、アクセス範囲、可動域等を工夫した。

実際の稼働の様子は図 36に示す。これにより、これまで人の手で治具内にセットしていたため、材料の位置決め誤差が大きかったが、通電拡散装置内の治具へのアクセス位置を一定にすることが可能になった。

また、ロボットを用いた自動搬送で接合を繰り返しても、接合不良は生じなかった。安全面では、自動搬送ロボットの材料捕捉部位の形状と材料を金属に変更したことで接合工程の時間短縮と、繰返し作業の安定性、作業者の火傷防止にも貢献した。

#### <自動化の追求>

仕様検討  
見積もり検討 数社実施



- ・チャンパー部改良
- ・搬送仕組み改良
- ・ワーク設置方法改良



次年度以降に取り組む想定



図 35 通電拡散接合装置に取り付けた材料移載装置の外観

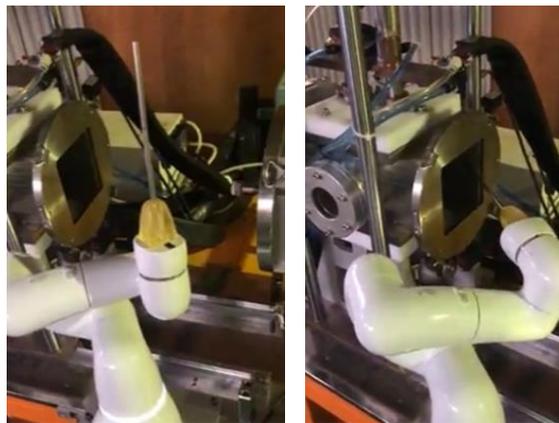


図 36 実際のワーク移載動作の概観

実機では、放射温度計、電圧／電流制御、治具やワークへの圧力制御に関するセンサーを実装しており、これらの情報をロボットと連携することにより、素材／形状を自動的にセンシングし、適切な接合条件を自動的に設定することも可能とするため、今後は量産対応を含め、プロセスを改善し構築を目指す。

## 最終章 全体総括

研究開発事業については、有用な成果を残すことができた。

今後、その成果を活かし、技術開発を継続することにより、生産性や精度が求められる輸送機器関連や精密機器分野における事業化展開が期待できる。

加えて、通電拡散接合は、異種金属の接合に適しており、また、接合界面の寸法変化が少ないため追加加工が不要となることから、より安全性が高い付加価値な接合に適用できると考える。具体的には、インプラント等の医療関連製品における接合に有効性があると推測する。

このように、本接合技術を、あらゆる業界の製品製造への適用を試み、エンジンバルブ製造以外への水平展開を模索していく。(図37)。

### 事業化の見通し

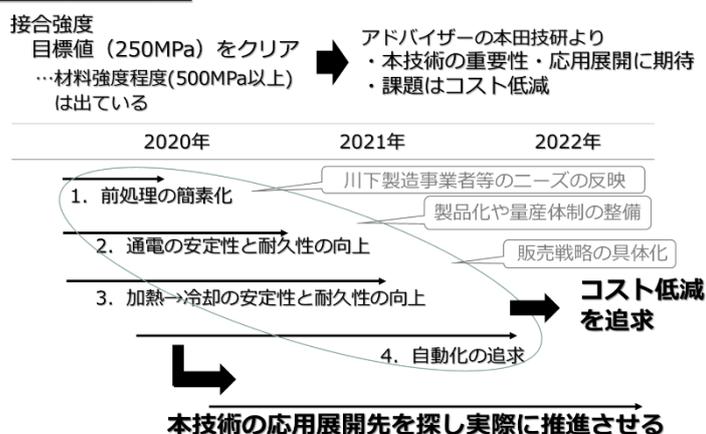


図37 事業化の見通し