

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「難接合材の固相拡散溶接による高機能部品製造技術・部品の開発」

## 研究開発成果等報告書

平成23年9月

委託者 関東経済産業局

委託先 財団法人長野県テクノ財団

# 目 次

	頁
<b>第1章 研究開発概要</b>	
1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1～
2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者名簿、協力者）	
3 成果概要	
4 当該プロジェクト連絡窓口	
<b>第2章 研究開発の内容</b>	
<本開発テーマの「固相拡散接合」とは>	6～
<b>1 チタンと鋼材の固相拡散接合技術開発</b>	
<現状のチタン合金製自動車用エンジン吸排気バルブ>	10～
1-1 接合試験に用いた材料の特性	10～
1-2 接合実験	11～
1-3 接合実験結果	13～
(1) 接合強度	
(2) 接合部の断面調査	
1-4 接合品の疲労強度試験	15～
1-5 まとめ	16～
<b>2 アルミニウム合金同士の固相拡散溶接技術開発</b>	
2-1 接合試験に用いた材料の特性	18～
2-2 接合実験	18～
2-3 接合実験結果	19～
(1) 接合強度	
(2) 接合部の断面調査	
2-4 まとめ	22～
<b>第3章 全体総括</b>	
1 成果概要と今後の展望	23～

# 第1章 研究開発概要

## 1 研究開発の背景・研究目的及び目標

### (1) 研究の必要性、社会的背景

自動車メーカー各社は、環境対策のために車両の低燃費化とエンジンの高効率化を目指し徹底した部品軽量化と国際競争力を維持するため、継続的な部品のコストダウンを要求している。これ等の実現のための手段として、異種材料接合の部品（チタン合金と鉄等）やアルミニウム合金同士の接合部品のニーズも非常に強いものがある。

しかしながら、これらのニーズを満たす接合法は、チタン合金と鋼の場合を例にとると、現在良く用いられている接合法は電子ビーム溶接（EBW）、摩擦圧接等である。前者は生産設備費が高く、結果として製品も高コストになっている、後者は、生産設備費は安価であるが、生産率が低く、後加工の費用が高いことなどのため、製品は高コストになっている。

自動車エンジンの吸排気バルブを軽量化するニーズは非常に高く、製品の中空化なども検討されているほどであるが、高々20～30%であり、鋼製品からチタン合金と鋼の接合品に置き換えることによって得られる約42%の軽量化という効果は得られない。（密度で比較すると、耐熱鋼SUH3の比重7.65、6-4チタンの比重4.45であり、約42%の軽量化になる。）低燃費・高性能化へのニーズが非常に大きいにもかかわらず、安価で高品質の性能を満たす接合法が見つかっていないため、採用例はレース用車両など一部の車両への採用にとどまっているのが現状である。

この問題を解決する手段として、(株)テーケー、(株)オーハシテクニカが新規開発し、特許を保有する「固相拡散接合技術」（圧入プロジェクション接合）を異種材料接合の部品（チタン合金と鉄等）やアルミニウム合金同士の接合に、適用し、新たに技術開発をすることを提案した。

### (2) 研究の目的

本研究開発では、自動車業界の緊急課題である低燃費・環境問題の解決のために、今後ニーズが急激に拡大すると思われるチタン合金やアルミニウム合金製の自動車用機械要素部品の接合技術の開発を行う。これらの材料は部品の高強度、軽量化等のために必要不可欠な材料であるにもかかわらず、難接合材であるため、信頼性及び生産性の高い接合技術は開発されていない。

本研究開発は、これらの材料に関する低コストで信頼性の高い量産接合技術を確立する事である。このため、(株)テーケー、(株)オーハシテクニカが開発した「固相拡散接合技術」（圧入プロジェクション接合）によって得られた鋼材の接合技術を基に新たに技術開発を行って、固相拡散溶接技術をさらに深化発展させることにより、低コストで高信頼性を確保した難接合材の高機能部品製造技術及び部品を開発し、自動車産業会の発展に寄与する。

### (3) 研究の目標

研究の目標として、チタン合金材と熱処理高炭素鋼およびアルミニウム合金同士の量産接合技術を確立するものとする。

チタン合金材と耐熱鋼の接合については、高精度圧入制御が可能な新固相拡散接合機－1を開発・製作すると共に、品質目標としては接合部について母材の特性と同等の特性を確保し、コスト目標としては電子ビーム溶接に対して加工サイクルタイム、ランニングコストを1/5以下とする。

またアルミニウム合金同士の接合については研究期間が短いこともあり、テストピースによる接合評価結果をベースにアルミニウム合金同士の接合が可能なコンデンサー電源タイプの新固相拡散接合機－2の開発・製作を行う。

### (4) 研究の概要

軽量化のために要望の強いチタン合金やアルミニウム合金などの難接合材について、(株)テーケー、(株)オーハシテクニカが特許を持つ「固相拡散接合技術」の高度化により、信頼性の高い高機能部品製造技術及び部品を開発する。

このため、これらの新しい固相拡散接合の特許技術をさらに深化発展させ、チタン合金／鉄(鋼)およびアルミニウム合金等の難接合材の接合ができる接合機と溶接技術を、接合評価ができる大学、公設試と連携しながら新規開発する。

### (5) 実施内容

#### 【1】チタン合金と鋼材の固相拡散接合技術

チタン／鋼等の難接合材の高信頼性・高効率な接合が可能な溶接機と溶接技術の新規開発を行う。

#### 【1-1】テストピース金型による基礎接合実験

(実施：株式会社テーケー、国立大学法人信州大学、長野県工業技術総合センター)

- ① テストピースによる接合実験
- ② 接合部の基礎評価

#### 【1-2】固相拡散接合機－1の開発(実施：株式会社テーケー)

- ① 圧入速度のコントロール、溶接電流制御技術及び設備等の検討
- ② 製品用金型の検討

#### 【1-3】固相拡散接合機－1による接合試験(実施：株式会社テーケー)

- ① 実寸テストピースによる接合実験と条件把握
- ② 製品による接合実験

#### 【1-4】接合面の評価

(実施：株式会社テーケー、国立大学法人信州大学、長野県工業技術総合センター)

- ① 接合部の外観、簡易な接合強度、硬さの評価を実施
- ② 電子顕微鏡による接合部の観察・組成分析
- ③ 接合部の疲労強度、接合強度素見の実施

#### 【2】アルミニウム合金同士の固相拡散溶接技術開発

アルミニウム合金は、電気抵抗が低く表面に絶縁被膜が形成されているので通常の抵抗溶接法では接合が困難である。このため、アルミニウム合金接合用のコンデンサータイプの溶接機をベースに固相拡散接合機—2を開発し、アルミニウム合金同士の固相拡散溶接技術を開発する。

#### 【2-1】溶接機メーカー設備による基礎接合実験（実施：株式会社テーケー）

- ① 実験用金型の製作
- ② テストピースによる接合試験

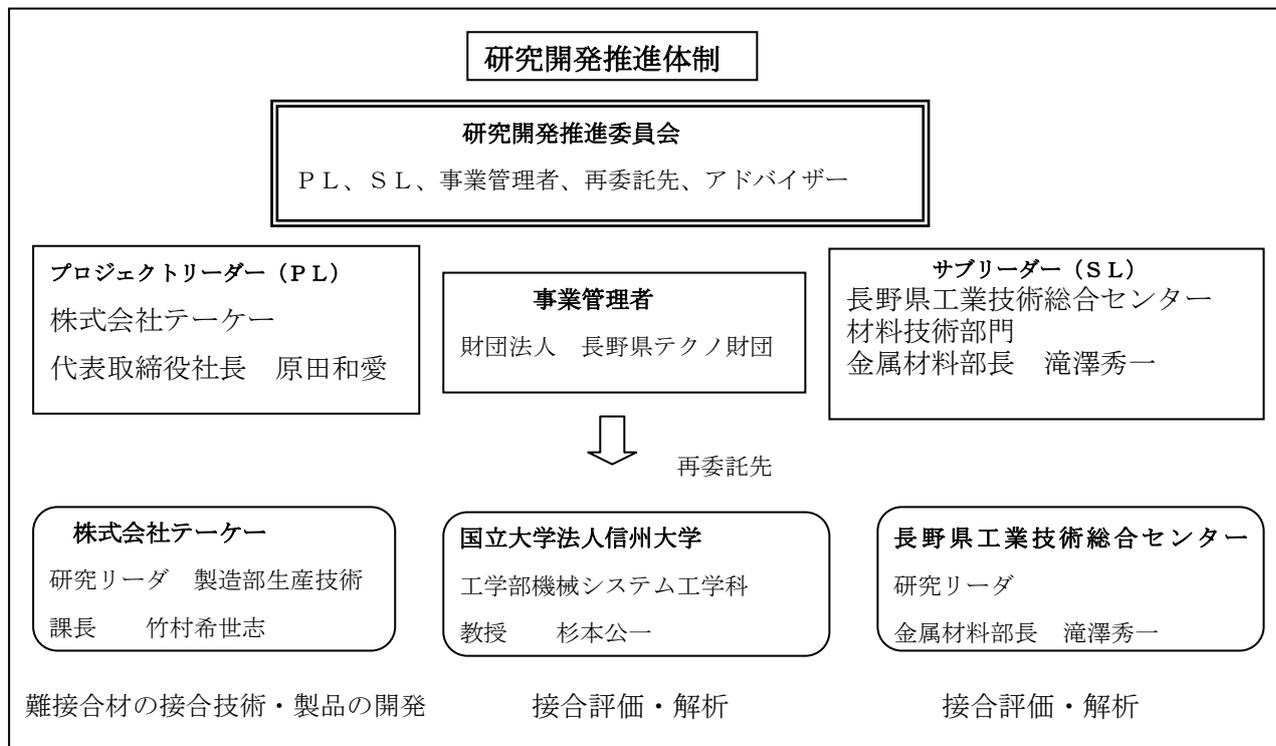
#### 【2-2】固相拡散接合機—2の開発と製作

(実施：株式会社テーケー、国立大学法人信州大学、長野県工業技術総合センター)

- ① 溶接機メーカーへ製作依頼
- ② 固相拡散接合機—2で使用するテストピース金型の製作
- ③ 接合面の評価

## 2 研究体制

### (1) 研究組織及び管理体制



### (2) 管理員及び研究員

【事業管理者】 財団法人長野県テクノ財団 伊那テクノバレー地域センター

氏名	所属・役職	管理主担当
林 正樹	事務局長	全般
北澤 修治	テクノコーディネータ	技術担当
藤田 恵子	事務職員	経理担当
宮坂 彰	コーディネータ	技術、事務処理担当

### (3) 研究者氏名・研究主担当 (○印)

#### ① 株式会社テーカー

氏名	所属・役職	主研究実施項目
原田和愛	代表取締役	【1-1】 【1-2】 【1-3】 【1-4】 【2-1】 【2-2】
竹村希世志 ○	製造部生産技術課長	【1-1】 【1-2】 【1-3】 【1-4】 【2-1】 【2-2】
原田浩二	取締役工場長	【1-1】 【1-2】 【1-3】 【2-1】 【2-2】
山本忠幸	技術部工作課班長	【1-1】 【1-2】 【1-3】 【2-1】 【2-2】
萩原道彦	品質管理部品質管理課主任	【1-1】 【1-4】 【2-2】

② 国立大学法人 信州大学

氏名	所属・役職	主研究実施項目
杉本公一	信州大学工学部 機械システム工学科 教授	【1-1】【1-4】【2-1】【2-2】

③ 長野県工業技術総合センター

氏名	所属・役職	主研究実施項目
滝澤秀一	材料技術部門金属材料部長	【1-1】【1-4】【2-1】【2-2】
古畑 肇	材料技術部門金属材料部研究員	【1-1】【1-4】【2-1】【2-2】
小池 透	材料技術部門金属材料部研究員	【1-1】【1-4】【2-1】【2-2】

(4) 他からの指導・協力者名及び指導協力事項

氏名	所属・役職	指導項目
金原 理	金原技術士事務所 所長	【1-1】【1-2】【1-3】【2-1】
野末 明	株式会社オーハシテクニカ S B開発グループ長	【1-1】【1-2】【1-3】【2-1】

### 3 成果概要

電気抵抗発熱としごき加工を複合的に利用した固相拡散接合法（圧入プロジェクション接合法）を用いた開発研究において今回得られた成果は、自動車用部品の接合法として有効であることを確認できた。

(1) チタン合金と耐熱鋼 SUH の異種材の固相拡散接合が可能であることを確認できた。

（従来の方法は、電子ビーム接合法と摩擦圧接法だけであった。）

(2) この固相拡散接合法は接合強度においても理論値以上の強度を示し、チタン合金と耐熱鋼の接合品は優れた疲労強度を有することを確認できた。

(3) チタン合金と耐熱鋼を固相拡散接合した自動車部品として、エンジンバルブを試作することができた。

(4) 低電気抵抗材であるアルミ合金同士の固相拡散接合が可能であることを確認できた。

### 4 当該プロジェクト連絡窓口

管理団体 : 財団法人長野県テクノ財団伊那テクノバレー地域センター

担 当 : 林 正樹 (事務局長)

北澤 修治 (テクノコーディネータ)

藤田 恵子 (職員)

宮坂 彰 (コーディネータ)

住 所 : 〒399-4501 伊那市西箕輪2415-6

電 話 : TEL 0265-76-5668

FAX 0265-73-9023

E-Mail : [ina-tec@valley.ne.jp](mailto:ina-tec@valley.ne.jp)

## 第2章 研究開発の内容

### < 本開発テーマの「固相拡散接合」とは >

本研究開発は、(株) テーケーと (株) オーハシテクニカが開発した「固相拡散接合」の基本的技術<sup>1)</sup>を応用したものであり、「圧入プロジェクション接合」という名前で技術開発を進めているものである。この技術は、従来から知られていた「固相拡散接合」とは全く異なった新技術であるため、まず今回の開発で取り上げた「固相拡散接合」(すなわち「圧入プロジェクション接合」)について技術的解説をする。

一般的に固相拡散接合を行うためには以下のような条件を設定することが必要である。

- ・接合部には酸化被膜などの無い極めて清浄な接合面が必要
- ・接合にはある一定の加圧力が必要
- ・接合面に固相拡散を生じさせるためには拡散エネルギーが必要

このような条件は容易に設定することができず、一般的には真空環境が必須である。このため安価で安定的に大量に供給することは困難であり、ごく限られた分野で用いられる技術であった。

しかしながら、(株) テーケーと (株) オーハシテクニカが開発した「固相拡散接合」(すなわち「圧入プロジェクション接合」)はこれらの必要条件を解決するため、新たな発想のもとに、従来の技術要素を複合させ、新しい固相拡散接合技術として完成したものである。

具体的には、上記の必要条件を成り立たせるために、

- ・接合面に必要な大きな拡散エネルギーを短時間にかつ集中的に与えるため、「電気抵抗加熱」を採用し、
- ・清浄な接合面を生成するために「しごき加工」<sup>2)</sup>を採用する。
- ・接合に必要な加圧力として、ストロークの進行に追従でき、変化しない加圧力を与えるために本開発では「空気圧加圧」を採用する

という様々な技術の複合化によって成り立っている技術である。実際の固相拡散接合のプロセスを図1に示す。これらの一連の接合プロセスは極めて短時間(接合プロセスは1秒以下)で行われるので非常に量産性に優れている。

(第一段階) 固相拡散接合機の電極に部材をセットし、加圧通電を行う

固相拡散接合機は、電気抵抗溶接機に固相拡散接合に必要な機構を追加設計したものである。圧入部材と被圧入部材を電極にセットし、加圧を行う。この場合、図に示すように、圧入部材を上側電極に、被圧入部材を下側電極にセットする通例である。

接合部の圧入部材の外径と被圧入部材の内径は0.1～0.7mmの圧入代を設定する。

(第二段階) 加圧・通電し、発生した抵抗発熱により、部材の軟化と圧入が開始する

圧入部材と被圧入部材を加圧セットした段階で通電をすると、最も電気抵抗が高くなる接触部で大きな電気抵抗発熱をする。発熱により圧入部材と被圧入部材は加熱され、瞬時に軟化する。部材が軟化したとき、この両部材には加圧力が付加されているため、圧入を開始する。

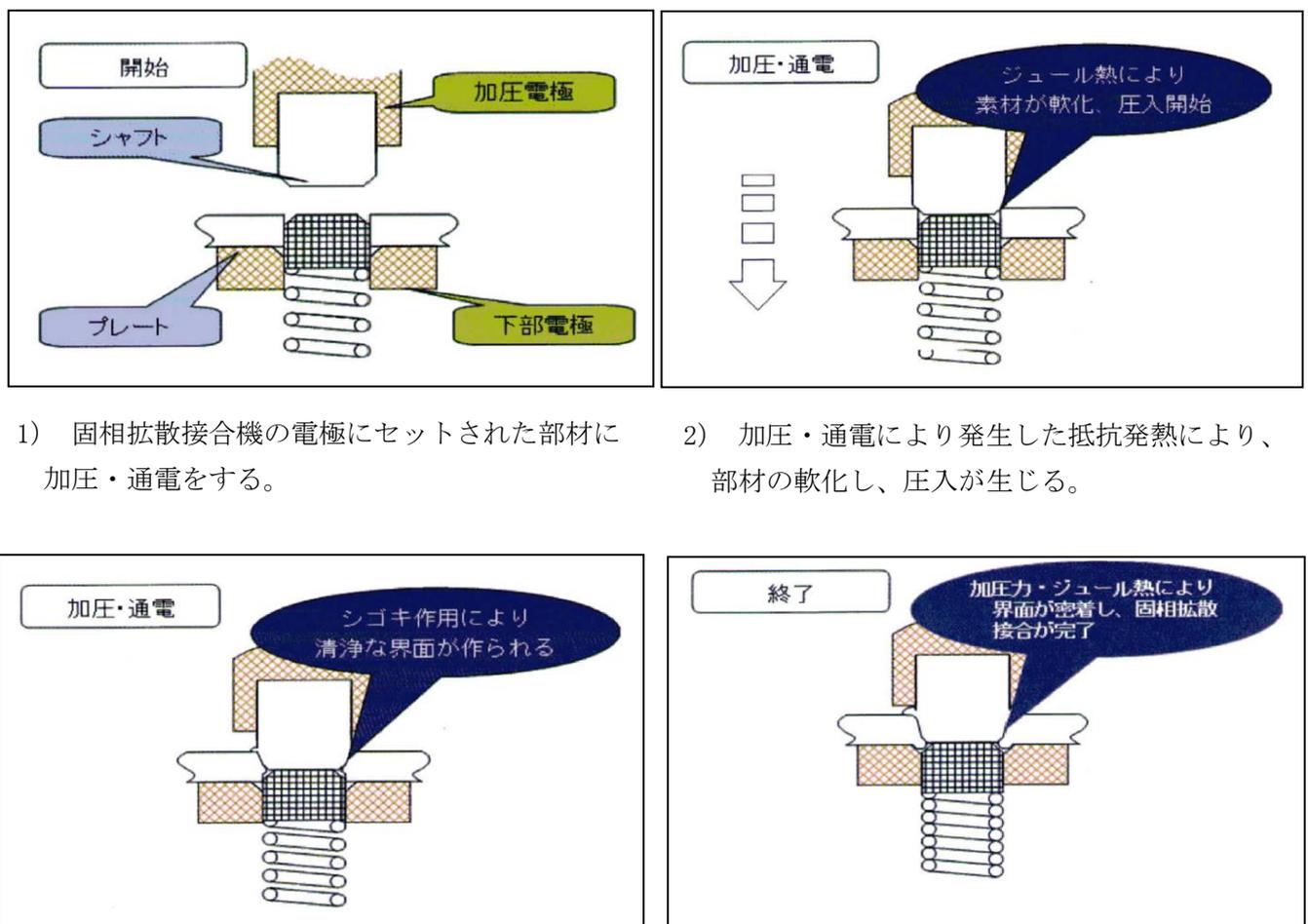
(第三段階) 圧入時のしごき作用により、接合面の酸化皮膜層などを除去排除

圧入が開始される時、両部材の間には内外径差があるため、加圧力によってこの内外径差分がしごかれ、両者の接合表面が外に排除されるとともに、清浄な新生面が生成し、接合する。

(第四段階) 接合面の固相拡散接合が完成

接合部は活性で、清浄な接合面の生成、熱の発生、接合面の摺動という条件が生まれることによって、真空状態での加熱という特殊な条件より、はるかに簡易な条件で固相拡散接合が完成される。

一般的な電気抵抗溶接は、接合部の溶融によって成立する溶接であるが、本法では小さな圧入代（加圧によって機械的に圧入されるような嵌め合い代と比べればはるかに大きい圧入代）という特殊な条件を与えることによって、接合部が溶融しないで圧入されるような接合条件を付与している。すなわち、溶融するような高温に加熱された材料が軟化し、軟化と同時に圧入が開始されるためであり、溶融する前にこれらの現象が生じ、この接合法においては接合界面が溶融することはない。このことが電気抵抗溶接との大きな違いである。圧入が開始されると、接触部の面積は圧入深さに比例して増加するため、接触部の電気抵抗は低下し、接合部近傍の材料に熱が伝播する。これらの現象のため、接合部は急速に冷却され、接合部の軟化も急激に減少し、加圧力と接合部の変形抵抗が等しくなり、圧入は停止し、固相拡散接合が終了する。



1) 固相拡散接合機の電極にセットされた部材に加圧・通電をする。

2) 加圧・通電により発生した抵抗発熱により、部材の軟化し、圧入が生じる。

3) 圧入時のしごき作用により、接合面の酸化皮膜層などを除去排除する。

4) 清浄面の生成、加圧力、電気抵抗加熱により、接合面の固相拡散接合が完成する。

図1 固相拡散接合の接合プロセス

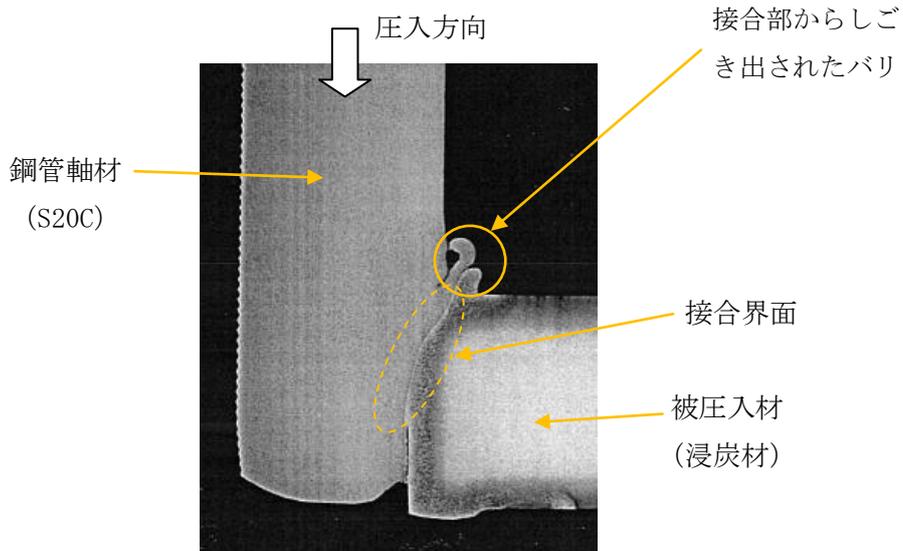


写真1 固相拡散接合部材の断面写真 (プレートに鋼管を圧入)

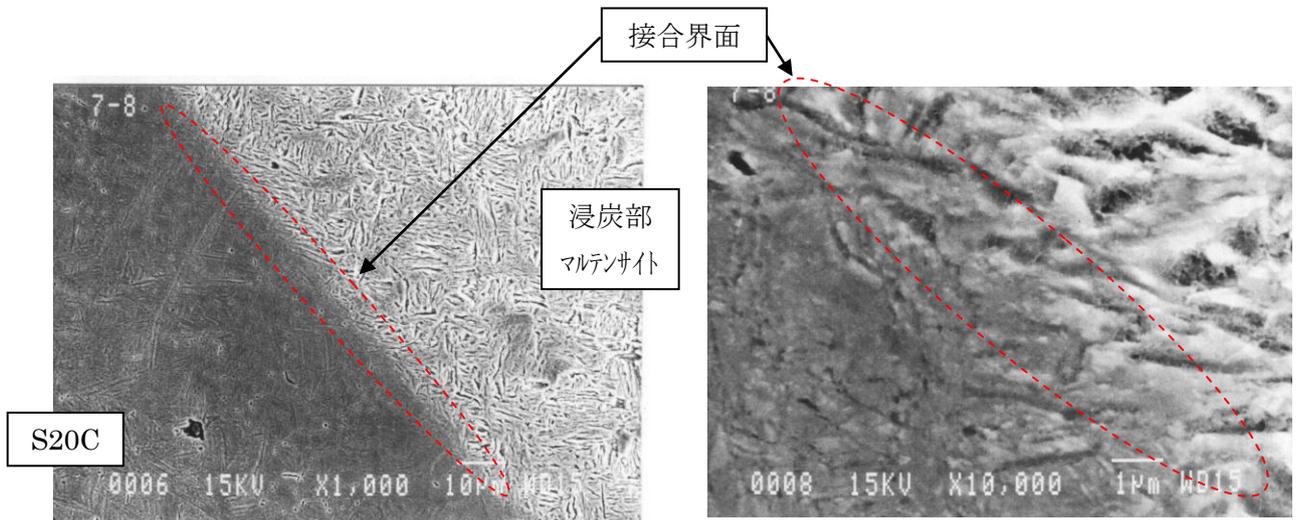
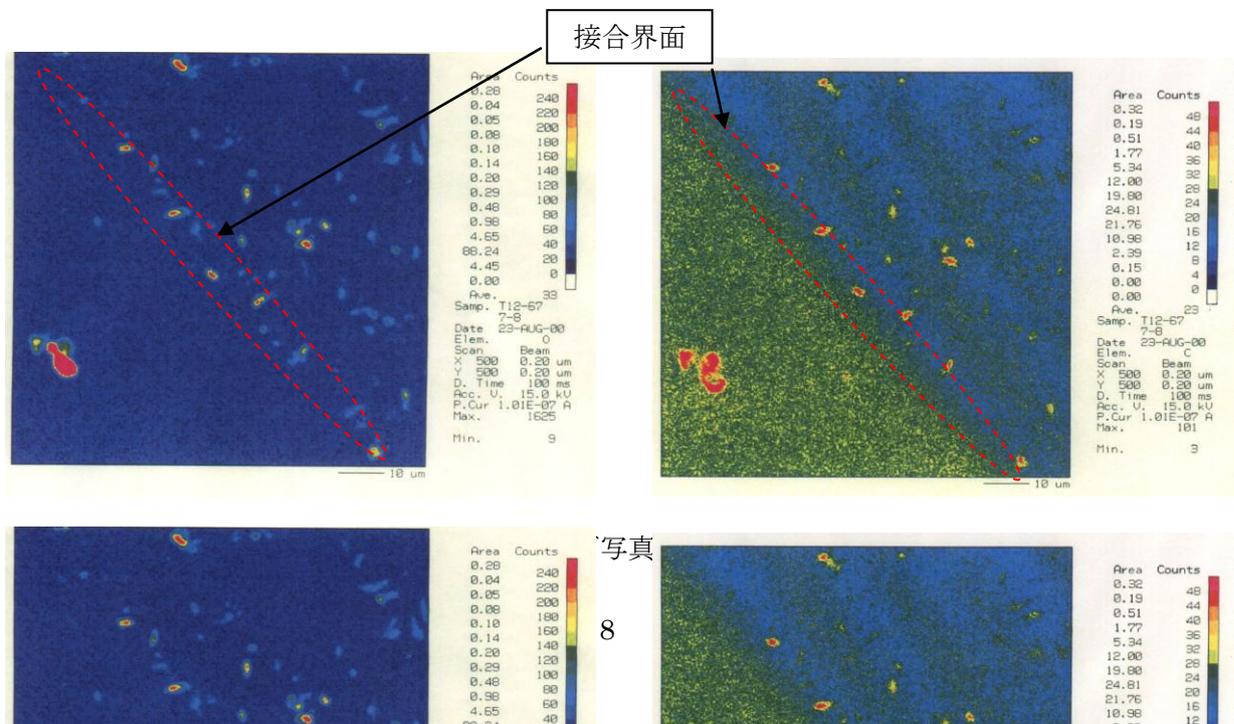


写真2 接合界面のSEM写真 (左: ×1000、右: ×10,000)



本開発の固相拡散接合を採用した部材の接合部の断面写真を写真1に示す。これは浸炭処理をしたSPHC (C:0.06%程度の熱延軟鋼材)の板材にφ20の孔をあけ、片側0.3mmの圧入代をもったφ20.6のS20C軸材を固相拡散接合したものである。板材浸炭部は固相拡散接合時の熱で、再焼入れされた状態になり、このため接合部はマルテンサイト化している。軸材の接合部近傍は塑性変形を生じている。また、接合のしごき加工によって削られた余肉はバリとなって、接合部外に排出されている。この時鋼材表面の酸化被膜などはバリとなって排出され、極めて清浄な接合面が生成される。

写真2は接合界面の状態のSEM写真である。接合界面からは酸化被膜などの不純物が取り除かれているため、明確な境界線が存在せず、接合界面に固相拡散が生じている。この接合界面には固相拡散接合を生じるための、極めて清浄な表面、温度、塑性流動の3つ要因が生じ、固相拡散が生じる。固相拡散が生じることによって、明確な接合線は形成されない。これらの接合は融点以下で生じているため、当然のことながら、溶融した痕跡は全くない。

写真3は接合界面のOとCのEPMA写真であり、Oの分析結果によって接合界面に酸化物などの異物が無く、Cの分析結果により接合界面に油分などの不純物も存在せず、極めて健全な接合界面が形成されていることを示している。

なお、赤の点線で囲った部分が接合界面である。

- 1) 特許第3270758号 「軸体と板体との圧入接合構造」  
特許第3822853号 「圧入接合方法」
- 2) この場合は、圧入部材と被圧入部材にある圧入代を設けて、接合時に両者の酸化被膜を除去しながら圧入部材を圧入する加工を意味する。

## 1 チタン合金と鋼材の固相拡散接合技術開発

< 現状のチタン合金製自動車用エンジン吸排気バルブ >

本開発が目的とするチタン合金製の自動車用吸排気バルブを写真 1.1 に示す。バルブは全体がチタン合金でできているわけではなく、本体がチタン合金 (Ti-6Al-4V)、軸端部が耐熱鋼 SUH 材で構成され、両者は一般的には摩擦圧接法で接合されている。この接合状態を図 1.1 に示す。

摩擦圧接法は固相拡散接合法に分類され、本開発法と同じ接合法であるが、加工に時間がかかり生産性が悪く、さらに写真 1.2 に示すように接合部にバリが生じ、これを後加工で除去する必要がある。また接合工程も本法のような短時間ではなく、量産性も悪い。これらの問題などのため、チタン製エンジンバルブは製造コストが高くなる。このため自動車の省エネに有効な手段であるにもかかわらず、量産車種には採用されていないのが実態である。



写真 1.1 チタン合金製エンジンバルブ

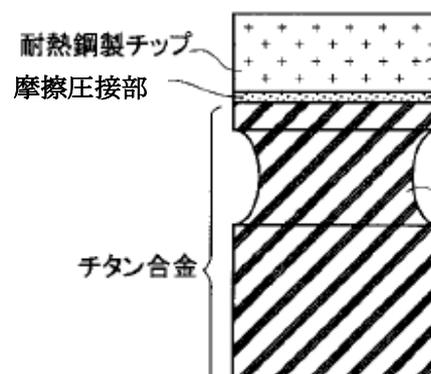


図 1.1 軸端部の接合状態

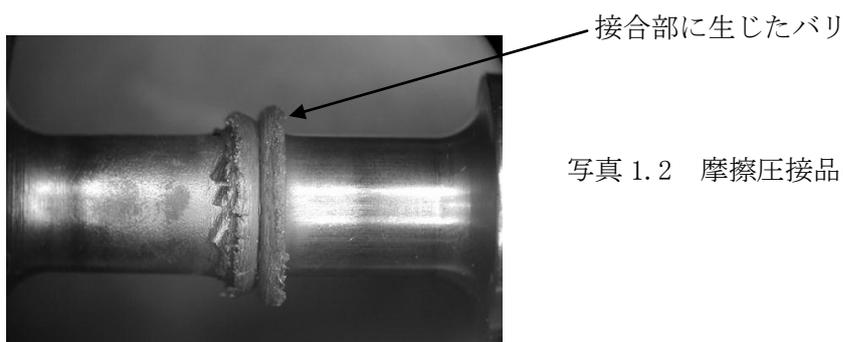


写真 1.2 摩擦圧接品の例

### 1-1 接合試験に用いた材料の特性

チタンと鋼材の接合は、鋼材同士の接合とは異なり、材料の成分のみならず、物理的性質、機械的性質も大きく異なっているため、(株) テーケーと (株) オーハシテクニカが開発した「固相拡散接合」の基本的技術をそのまますることはできない。

本開発で使用したチタン材は Ti-6Al-4V を耐熱鋼は SUH3 を採用した。本開発で使用した Ti-6Al-4V と耐熱鋼 SUH3 の化学成分と物理的性質、機械的性質を表 1.1 に示す。両者の機械的性質はほぼ同じであるが、電気抵抗、線膨張係数、熱伝導率などの物理的性質の違いはかなり大きい。また融点も Ti-6Al-4V の方が約 100℃高い。

これらをまとめると、

Ti-6Al-4V …… 発熱し易いが、融点が少し高い

SUH3 …… 発熱し難く、融点が低い

表 1.1 6-4Ti と耐熱鋼 SuH3 の特性値

(化学成分)

(%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	V
SUH3	0.35～ 0.45	1.80～ 2.50	0.60 以下	0.30 以下	0.30 以下	0.60 以下	10.00～ 12.00	0.70～ 1.30		
Ti-6Al-4V									5.50～6.75	3.50～4.50

(物理的性質、機械的性質)

	線膨張係数 ( $\times 106/^\circ\text{C}$ )	熱伝導率 ( $\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$ )	電気抵抗 ( $\mu \Omega \cdot \text{cm}$ )	融点 ( $^\circ\text{C}$ )	密度 ( $\text{g}/\text{mm}^2$ )	引張強さ ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )	伸び (%)
SUH3	12.2	22.7	84	1470	7.6	100	20
Ti-6Al-4V	8.8	7.5	171	1540～1650	4.5	96	10

## 1-2 接合実験

本実験に用いた接合実験機は、低加圧力と低電流通電用の仕様に合わせ新規に設計製作をした(写真 1.3)。また、本実験に用いた接合試験片を写真 1.4 に示す。試験片の直径は実際の乗用車エンジンバルブの寸法と同じものとした。

電流は 60 サイクルの交流を使用した。

接合は、銅電極で軸体の上部を固定、設置し(写真 1.5)、キャップを下部電極に設置し、軸をキャップに圧入する接合形態とした。

接合実験は上部銅電極で軸を固定し、軸心とキャップ軸心の位置合わせを行った後、加圧し、加圧を継続した状態で通電を行い、接合終了後に除荷する。このときの接合プロセスの変化を図 1.2 に示した。

接合実験は加圧力、接合電流、通電時間を種々変化させ、接合強度によって接合状態を評価し、最適条件と適正接合条件を求めた。

また、解析のため、接合部の温度を光ファイバー温度計で測定した。

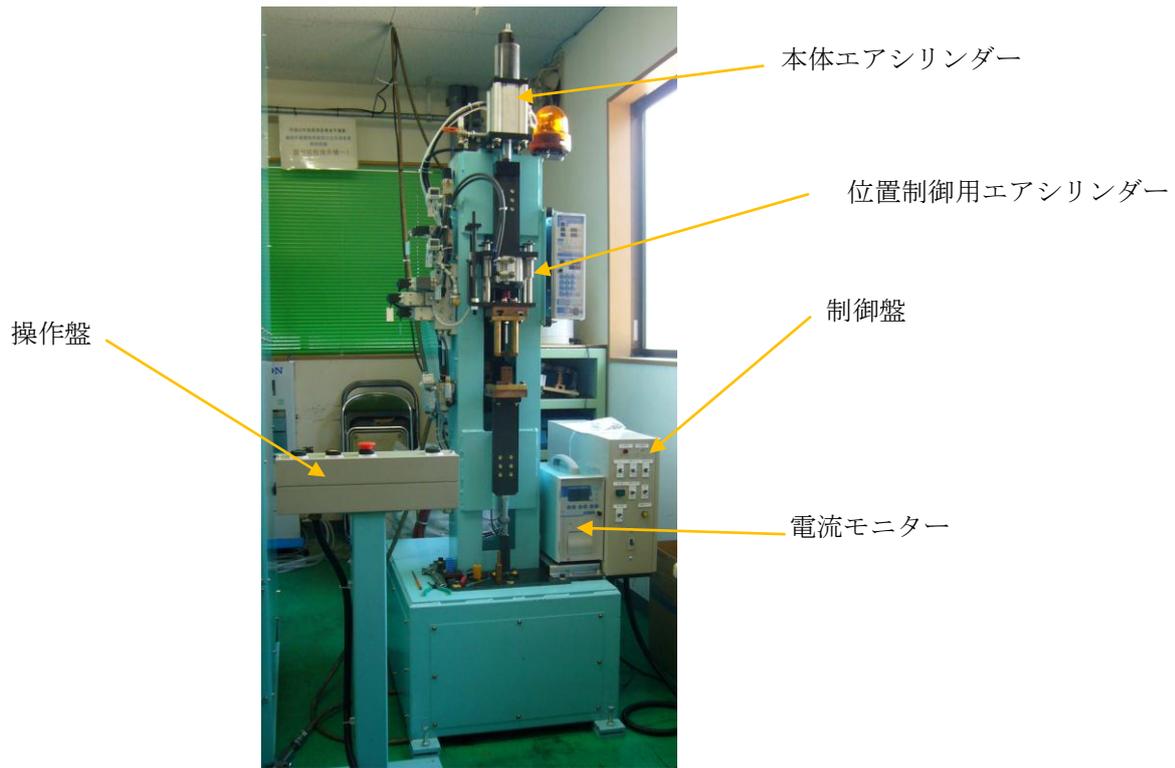


写真 1.3 固相拡散接合機- 1

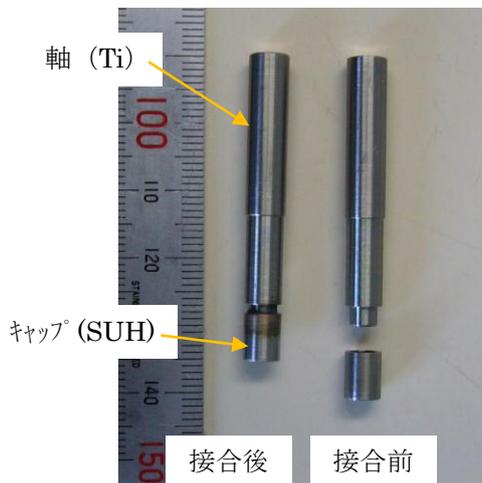


写真 1.4 接合試験片

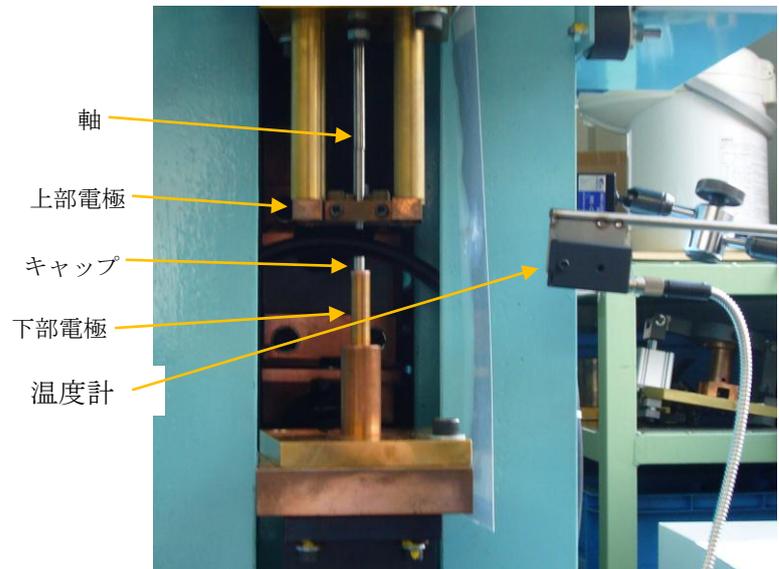


写真 1.5 接合試験装着状態

### 1-3 接合実験結果

接合試験結果のまとめを図 1.2 に示す。

接合強度は引張剥離試験で評価した。接合部の温度が高くなるとともに、接合強度は高くなるが、バラツキは大きい。しかし接合部の温度は接合電流ときれいに比例している。

図 1.2 によれば、接合温度 720°C 以上あれば、接合強度は 2.5 kN 以上であり、標準接合条件を、下記に設定して、接合界面の調査を行った。

加圧力：150 N、 電流：2.65 kA、 接合温度：800°C

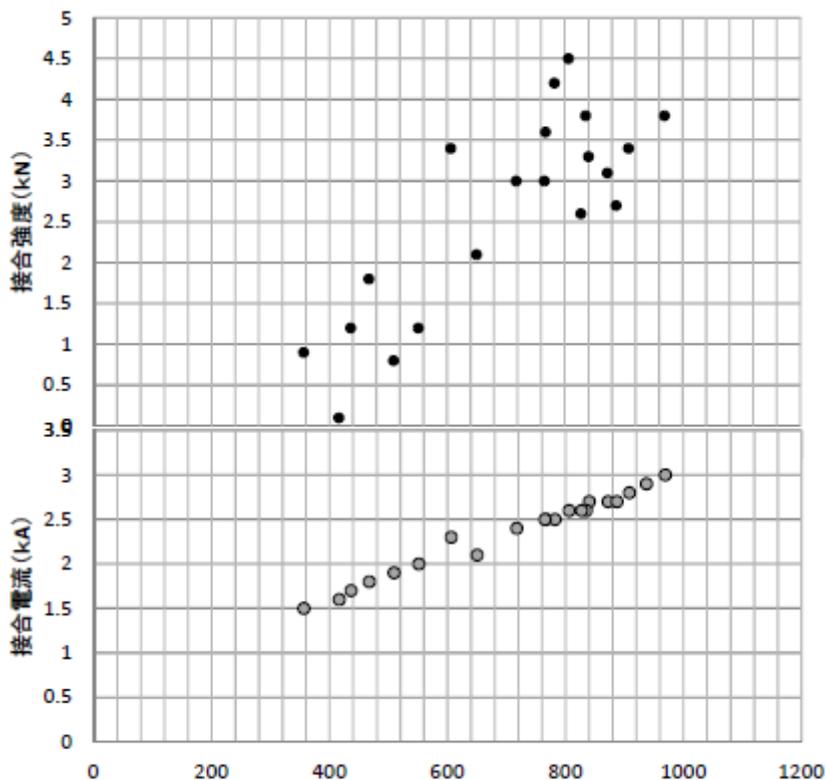


図 1.2 接合試験結果のまとめ

#### (1) 接合強度

接合強度を調べるために、圧入方向と反対方向に引張試験を行い、引張剥離強度を調べた。この結果は、図 1.2 に示されている。

接合強度の妥当性を調べるために、塑性加工で用いるプレスの打ち抜きせん断力を求める理論式で得られた値と比較した。

$$\begin{aligned}
 \text{接合強度} &= \text{プレスの打ち抜きせん断力} \\
 &= \text{接合面積} \times \text{せん断強度} \\
 &\quad (\text{接合面積} = \pi D \times \text{接合長さ、せん断強度} = \text{引張強度の } 80\%) \\
 &= 3.14 \times 4.1 \times 0.75 \times 980 \times 0.80 \quad (\text{接合長さは } 0.75\text{mm とした}) \\
 &= 7.6 \text{ kN} \quad (\text{チタン引張り強度： } 980 \text{ MPa})
 \end{aligned}$$

図 1.2 の実験結果と比べると、計算値の約半分の強度である。

## (2) 接合部の断面調査

接合部の断面の SEM 写真で調査した結果を写真 1.6 に、示す。接合部には中間層があり、この中間層の上部には空隙部、クラックが見受けられるが、下部は中間層も薄く、チタン軸と SUH キャップは強固に接合していることがわかる。引張剥離強度試験の結果から見ると、この中間層は接合強度にあまり悪影響を与えていないように思われる。

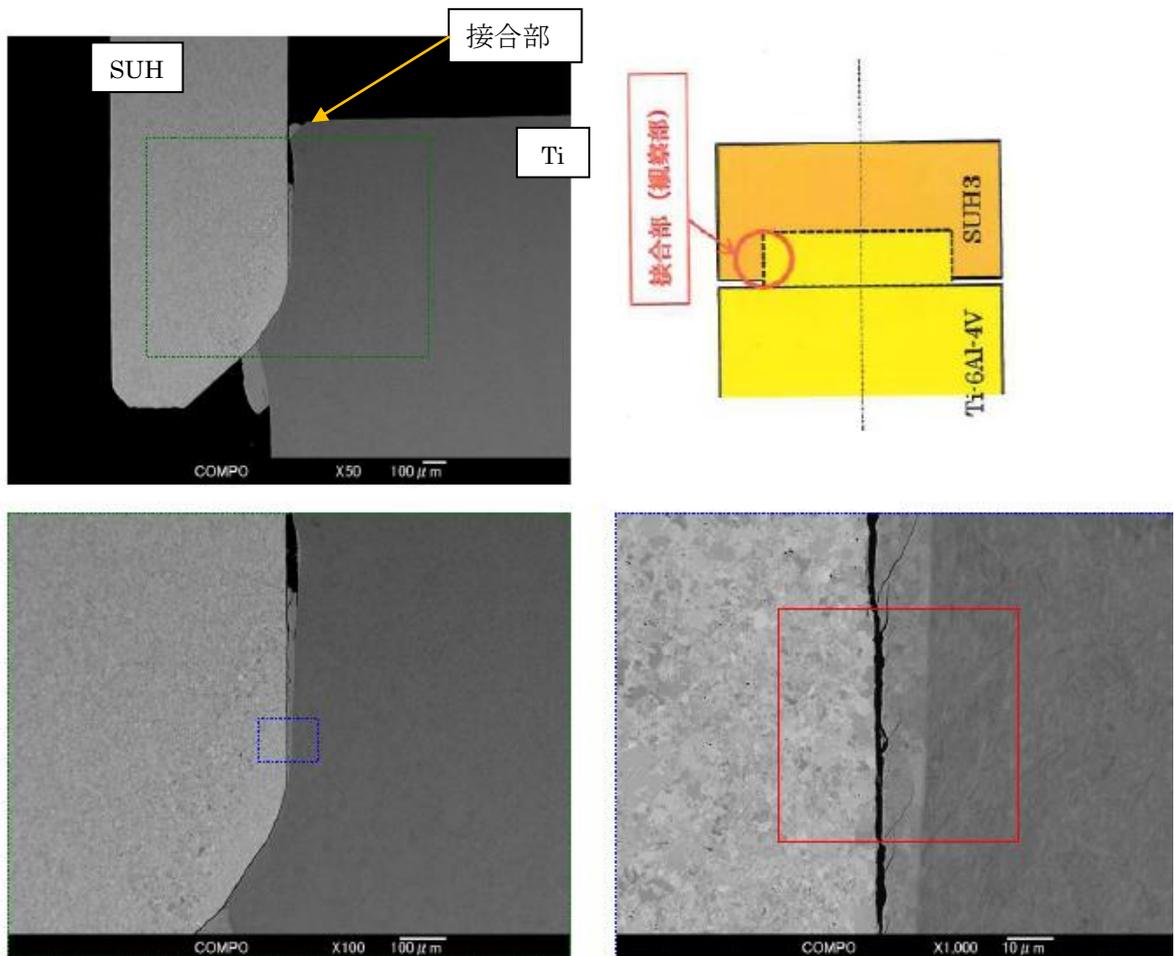


写真 1.6 接合界面の SEM 写真

接合界面の EPMA によるマッピングデータを写真 1.7 に、EBSP による測定結果を写真 1.8 に示す。中間層はこの結果から、チタンと SUH の合金であり、この結晶構造は SUH と同じ bcc 相であることを示している。(因みに Ti は hcp 相である。) この生成形態については今後の解析が必要である。

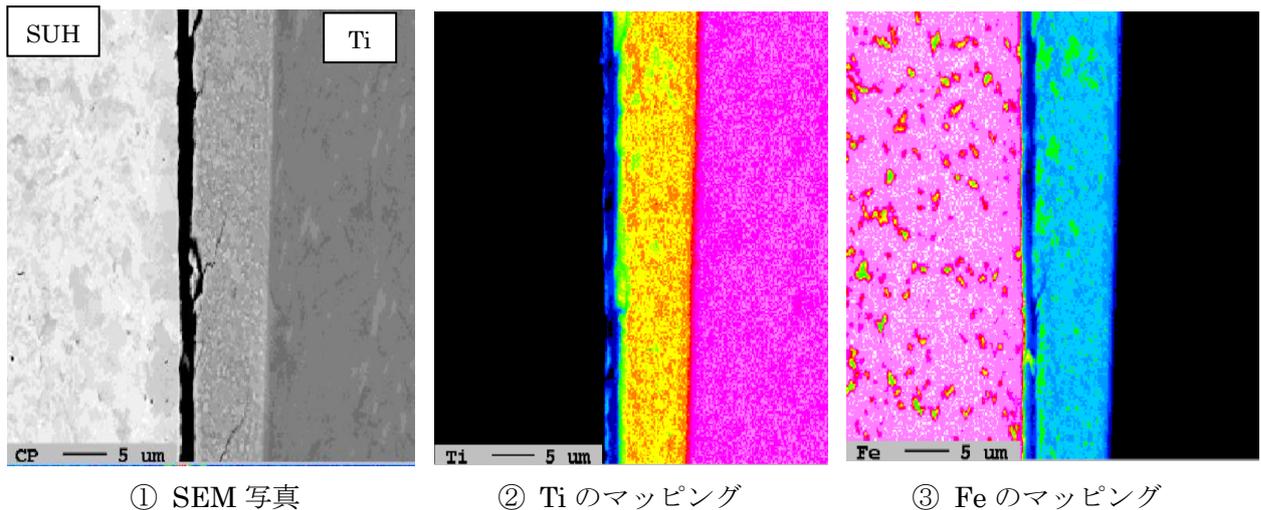


写真 1.7 接合界面の EPMA マッピング

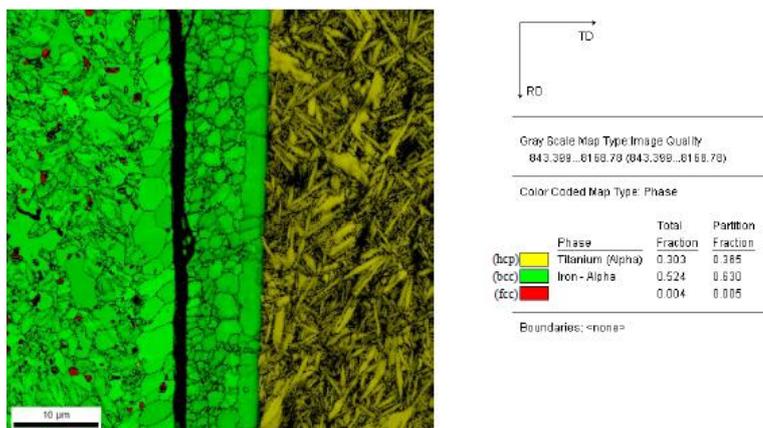


写真 1.8 EBSD 測定結果

#### 1-4 接合品の疲労強度試験

今回の接合試作品で疲労強度試験を行った。このときの条件を下記に示す。エンジンバルブに採用されることを想定しているため、この試験は圧縮荷重下の疲労試験を行った。

接合試験片    加圧力：150N    接合電流：2.65 kA    圧入深さ：0.7～0.9mm  
 試験条件    電動油圧サーボ疲労試験機 MTS S10 TEST STAR II (MTS 社製)  
 最大-最小の圧縮応力比：0.01    負荷状態：サイン波    40～50Hz

エンジンバルブという用途を想定していることから、圧縮-圧縮の疲労試験を行い、この結果を図 1.3 に示す。時間がないために十分な試験をすることはできなかったが、1.5 kN の圧縮荷重、1 千万回でも破壊なく、目標通りの疲労強度が得られた。

なお、この試験片の圧縮破壊強度は、7.06 kN であり、引張剥離強度 (2.5～4.5 kN) と比べてかなり高い値である。

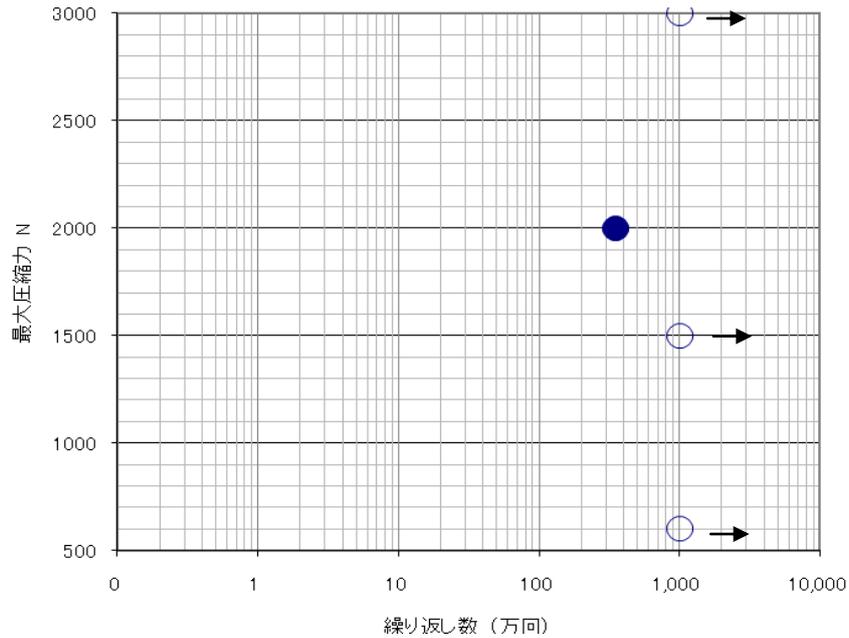


図 1.3 Ti-SUH 接合試験片の疲労試験結果

#### 1-5 まとめ

本開発テーマの固相拡散接合を自動車のエンジン吸排気用チタン合金製バルブに適用し、コストダウンと、量産性の向上のための研究開発を行い、ほぼ目的通りの成果を上げることができた。しかし、8カ月のみの開発期間という制約もあり、今後の研究課題も残った。

今回の開発研究で得られた成果は次の通りである。

① 現在のチタン合金製バルブと同じ条件の材料 (6Al-4V-Ti と SUH3) を使用し、引張接合強度 2.5 kN 以上のチタン合金製バルブを試作できた。(写真 1.9 参照)

② このバルブの接合部の圧縮疲労強度は 1.5 kN で 1,000 万回以上の疲労強度があった。

③ この接合法は摩擦圧接法と異なり、接合部のバリ除去が不要である。

④ 接合(通電)時間は、3 サイクル (3 / 60 秒) のみで接合が可能となり、部品の取付け、取外し時間を含めても加工サイクルタイムは、10 秒以内で加工でき、ランニングコストも、現在量産に使用している鋼同士の接合と同程度で可能なため、目標とした電子ビーム溶接の 1 / 5 以下で可能。



写真 1.9 試作チタン合金バルブ

今後の開発研究課題は次の通りである。

- ① この結果を自動車メーカーに紹介し、実用化に向けた共同研究開発が必要である。
- ② このためにも、接合部に生じる合金層の構造、組成、機械的性質、物理的性質などの更なる解析が必須である。
- ③ またバルブ用として別の種類のチタン合金材が開発されているので、キャップ材を含めさらなる展開が必要である。
- ④ 当初予定していたチタン合金と熱処理鋼との接合は今後に残された開発課題となった。

## 2 アルミニウム合金同士の固相拡散溶接技術開発

### 2-1 接合試験に用いた材料の特性

今回の実験は自動車用素材として用いられることを想定して、超ジュラルミン (A2024) を選定した。供試材の化学成分規格、機械的性質、物理的性質を表 2.1 に示す。

表 2.1 超ジュラルミン (A2024) の規格、機械的性質、物理的性質

#### <化学成分>

成分名	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	その他
成分値	3.8~4.9	<0.50	<0.50	0.3~0.9	1.2~1.8	<0.25	<0.10	Ti+Zr<0.20

#### <機械的性質 (参考値) >

0 材			T4 処理材		
耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
95	185	20	325	470	17

#### <物理的性質>

比重	融点	ヤング率	0 材		T4 処理材	
			導電率	熱伝導度	導電率	熱伝導度
2.77	502~638℃	73.5	銅の 50%	0.19	銅の 30%	0.12

### 2-2 接合実験

実験装置を写真 2.1 に、接合試験片を写真 2.2 に、接合実験状態を写真 2.3 に示す。

接合実験は写真 2.3 に示すように、下部電極上にプレートを置き、プレートに設定した孔の軸心に合わせて軸を置き、加圧して通電する方法で行った。電流はチタンの接合実験と同様、交流 60 サイクルで行った。

実験は加圧力を固定し、通電時間、通電量を変更する方式で行った。



写真 2.1 固相拡散接合機－ 2

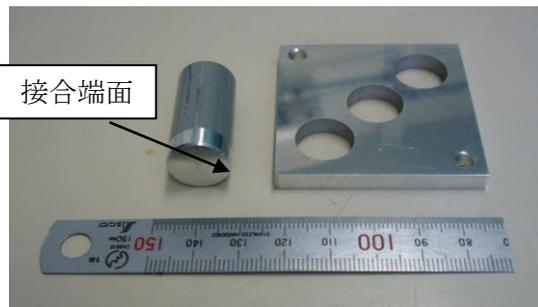


写真 2.2 実際の接合部材

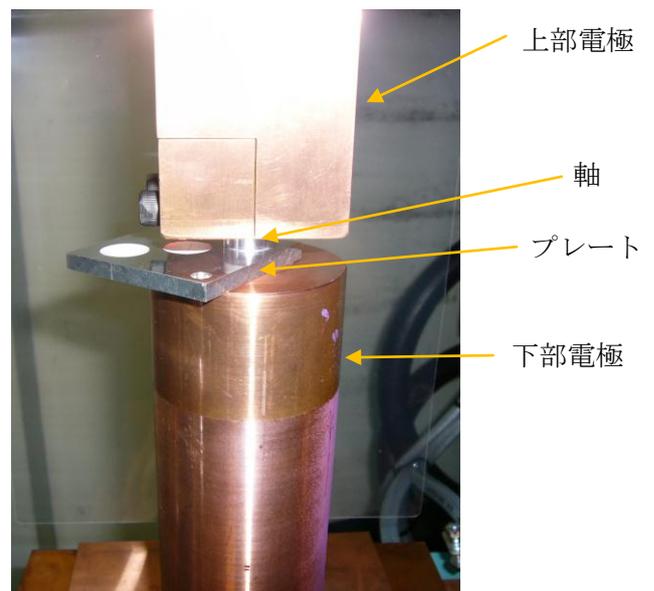


写真 2.3 Al の接合実験状態  
(加圧状態)

## 2-3 接合実験結果

### (1) 接合強度

接合強度はチタン材と同様に求めることができる。アルミ材の場合は、チタン材の場合と異なり、接合方法と反対方向に押し込み荷重を加え、接合部のせん断剥離強度を測定した。

チタン材と同様に接合強度を押し込みせん断剥離強度として求めると、次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 \text{接合強度} &= \text{押し込みせん断剥離強度} \\
 &= \text{接合面積} \times \text{せん断強度} \\
 &= (3.14 \times 14.1 \times 1.4) \times (185 \times 0.8) \quad (\text{接合部長さは } 1.4\text{mm}) \\
 &= 9.2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

この結果を図 2.1 と比べると、実験結果は 13.0 kN であり、計算値と比べかなり高い値を有している。

チタン合金の場合と同様電流を増加させると圧入深さも深くなっていく。しかし、この実験においてはバクヒの問題があり、今回の実験においては圧入深さに限界があった。

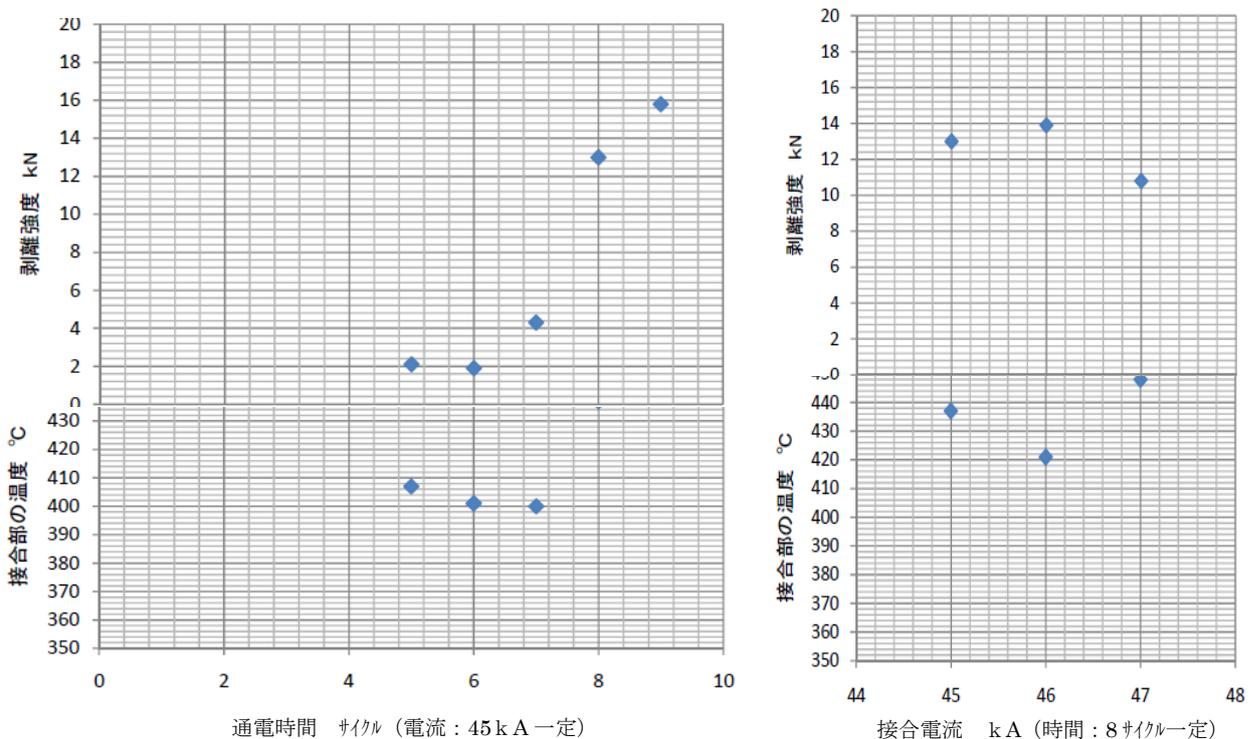


図 2.1 接合実験結果

## (2) 接合界面の断面調査

接合部の断面写真を写真 2.4 に示す。この結果に示すように、接合部はクラックの発生もなく良好である。しかしながら接合部近傍にクラックが発生している。これは形態から軸材の介在物 (Cu と Al の化合物) を起点として加圧力のせん断応力によって発生したものと推定される。また、このクラックは軸材端面にも発生している。

接合界面について SEM-EBSP 法を用いて、結晶方位の分布、イメージクオリティ (IQ) 分布を解析した結果を示す。

SEM 写真を写真 2.5 に、EBSP 解析結果を写真 2.6 に示す。この解析結果から、以下のことが判明した。

- 接合部は写真 2.4 より広範囲の写真 2.5 に示す黄色点線三角部分と推定される。
- 接合部は三角形部の右側（板材）、中央部（三角形部）、左側（軸材）に区分される。
- 右側の結晶粒は極めて微細であり（平均約  $5\mu\text{m}$ ）、この部分の転位密度は高く、粒間の傾き角は比較的大きい。中央部は結晶粒も粗大化し、熔融 $\rightarrow$ 再結晶の可能性があり。左側は軸材の組織がそのまま残っている。
- 接合形態が固相接合か熔融接合かの判断は、さらに詳細な解析が必要である。

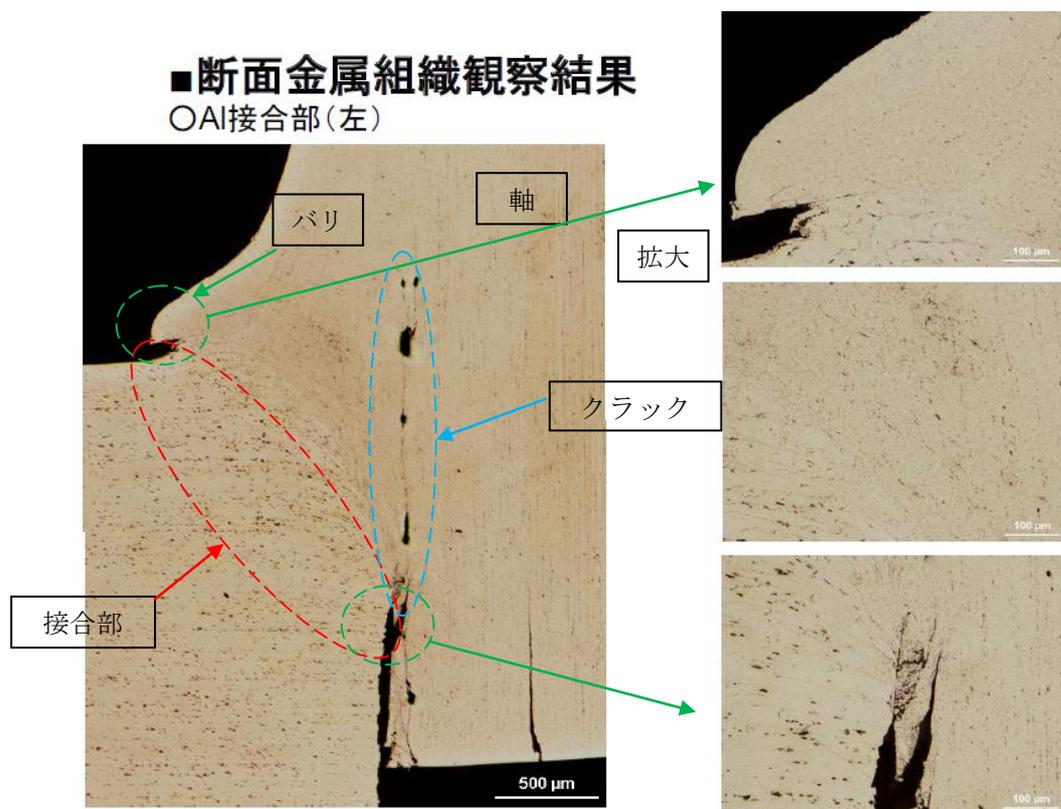


写真 2.4 超ジュラルミン材の接合部の断面写真

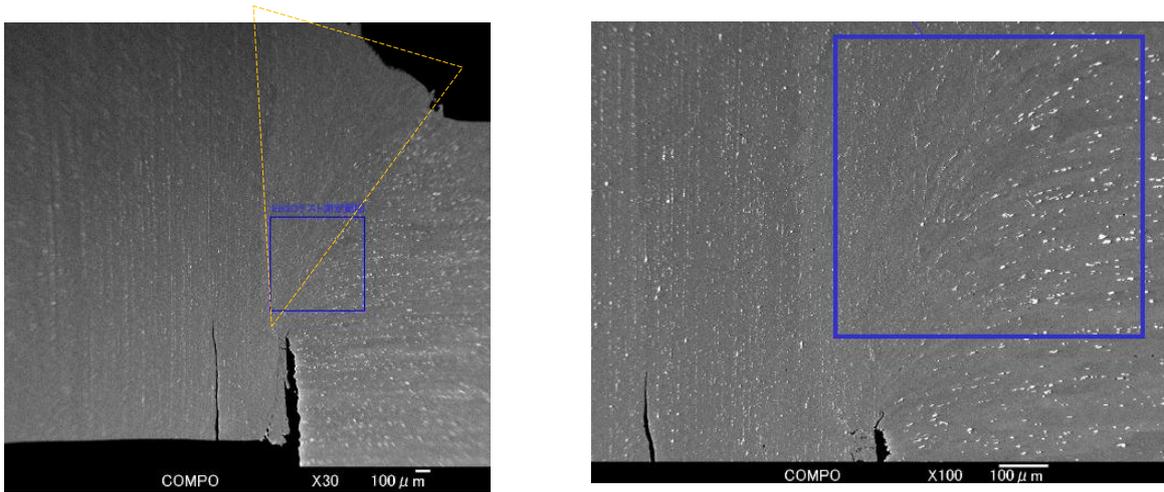


写真 2.5 解析部位の SEM 写真

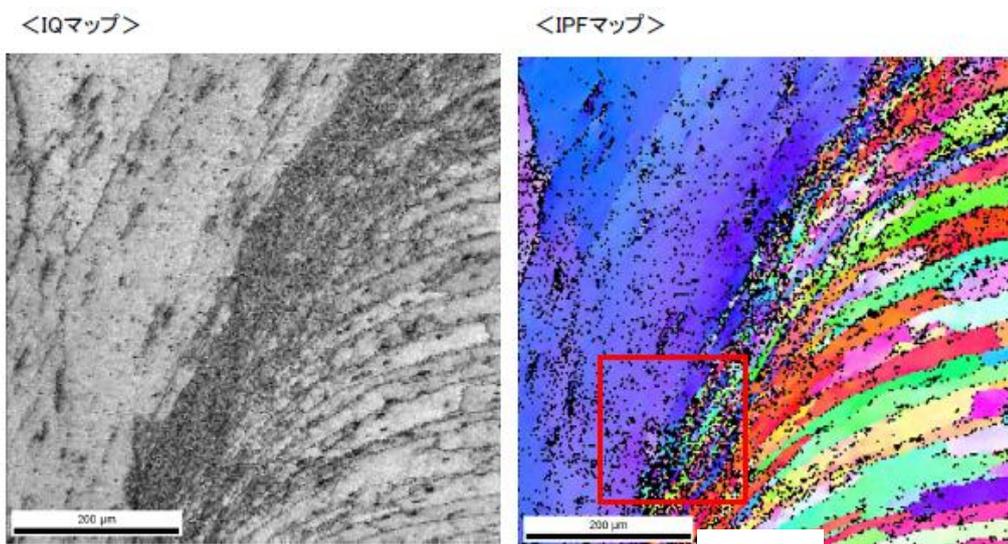


写真 2.6 EBSD による解析  
(解析部位の IQ マップと IPF マップ (低倍率))

#### 2-4 まとめ

電気抵抗加熱法を利用した「固相拡散接合法」には、電気抵抗の低いアルミニウム材の接合は非常に不利である。今回、東日本大震災の影響により半導体部品の入荷が遅れ、固相拡散接合機-2の導入時期が7月になり実験期間が短かったが、大電流を流す装置を開発し、アルミニウムのような低抵抗材においても、この方法による接合が可能であることを証明できた。

アルミニウム材の接合開発実験で得られた成果は次の通りである。

- ① 代表的アルミニウム素材として超ジュラルミン (A2024) を取り上げ、固相拡散接合が可能であることを証明できた。
- ② アルミニウムは低電気抵抗材であるため、通電のため、特別な治具の開発が必要であることを示した。

今後の研究課題として、以下の事項が挙げられる。

- ① 接合界面の解析が必要である。
- ② 自動車部品に採用されることを想定すると、接合部に発生するクラックの原因究明と防止対策が必須である。
- ③ 接合部の溶融の有無を明確にすることも今後の重要な研究課題である。
- ④ 超ジュラルミン（A2024）だけでなく、その他の自動車用アルミニウム合金についても、接合法を開発していく必要がある。
- ⑤ 通電終了時には、取出し治具が必要であるが、今後製作が必要である。

## 第3章 全体総括

### 1 成果概要と今後の展望

自動車部品の接合法として、新たに登場した「固相拡散接合法（圧入プロジェクション接合法）」は鉄鋼材料の世界では性能の良い新しい接合法として認識され始め、この特長を活かして自動車部品に採用されつつある。

これからの自動車考えた場合、環境にやさしい車として、低燃費・軽量化などが強く叫ばれ、これからは、軽量化材料であるアルミニウム、チタンなどが多量に採用される状況にある。ところがこれらの材料を信頼性が高く、量産性が高く、安価な方法で接合する技術はまだ確立されていない。

ここで本開発法がこのような目的に合致する手段として提案できたことは、この開発テーマの大きな成果である。

電気抵抗発熱としごき加工を複合的に利用した固相拡散接合法（圧入プロジェクション接合法）を用いた開発研究において今回得られた成果は、次の通りである。

- (1) チタン合金と耐熱鋼 SUH の異種材の固相拡散接合が可能であることを示した。
- (2) 低電気抵抗材であるアルミ合金同士の固相拡散接合が可能であることを示した。
- (3) この固相拡散接合法は接合強度においても理論値以上の強度を示し、チタン合金と耐熱鋼（SUH）の接合品は優れた疲労強度を有することを示した。

今後の実用プロセスへの採用に向けて、方向性を示すことができたが、また同時に、汎用的に採用されていくためには今後も解明すべき多くの課題、開発すべき多くの課題、実用化に向けて実施すべき多くの課題があることを示した。

このため、今後も国等の研究開発資金を活用して製品化に向けた取り組みを継続して行う所存である。

今回の研究開発に当たっては、固相拡散接合法の共同発明者である株式会社オーハシテクニカの野末 明アドバイザーより多大なご支援を頂いたことに感謝を申し上げます。

**リサイクル適性 (A)**

この印刷物は、印刷用の紙へ  
リサイクルできます。