

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業
「摩擦攪拌接合による鉄系高融点材料の
接合システムの開発」

研究開発成果等報告書

平成23年3月

委託者 近畿経済産業局

委託先 財団法人大阪科学技術センター

平成 22 年度戦略的基盤技術高度化支援事業
「摩擦攪拌接合による鉄系高融点材料の接合システムの開発」報告書
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	1
1-2	研究体制	1
1-3	成果概要	6
1-4	当該プロジェクトの連絡窓口	6
第 2 章	ツール材料の開発	
2-1	Ni 基超々合金開発の経緯	7
2-2	FSW ツール用 Ni 基超々合金の諸特性	8
第 3 章	ツール形状の決定及びツール加工方法の開発	
3-1	ツール形状の決定	13
3-2	ツール加工方法の開発	13
第 4 章	最適接合条件の探索	
4-1	接合試験条件	17
4-2	接合実験結果	19
第 5 章	接合システムの開発	25
第 6 章	全体総括	
6-1	ツール材料の開発	27
6-2	ツール形状の決定及びツール加工方法の開発	
6-3	最適接合条件の探索	
6-4	接合システムの開発	

第1章 研究開発の概要

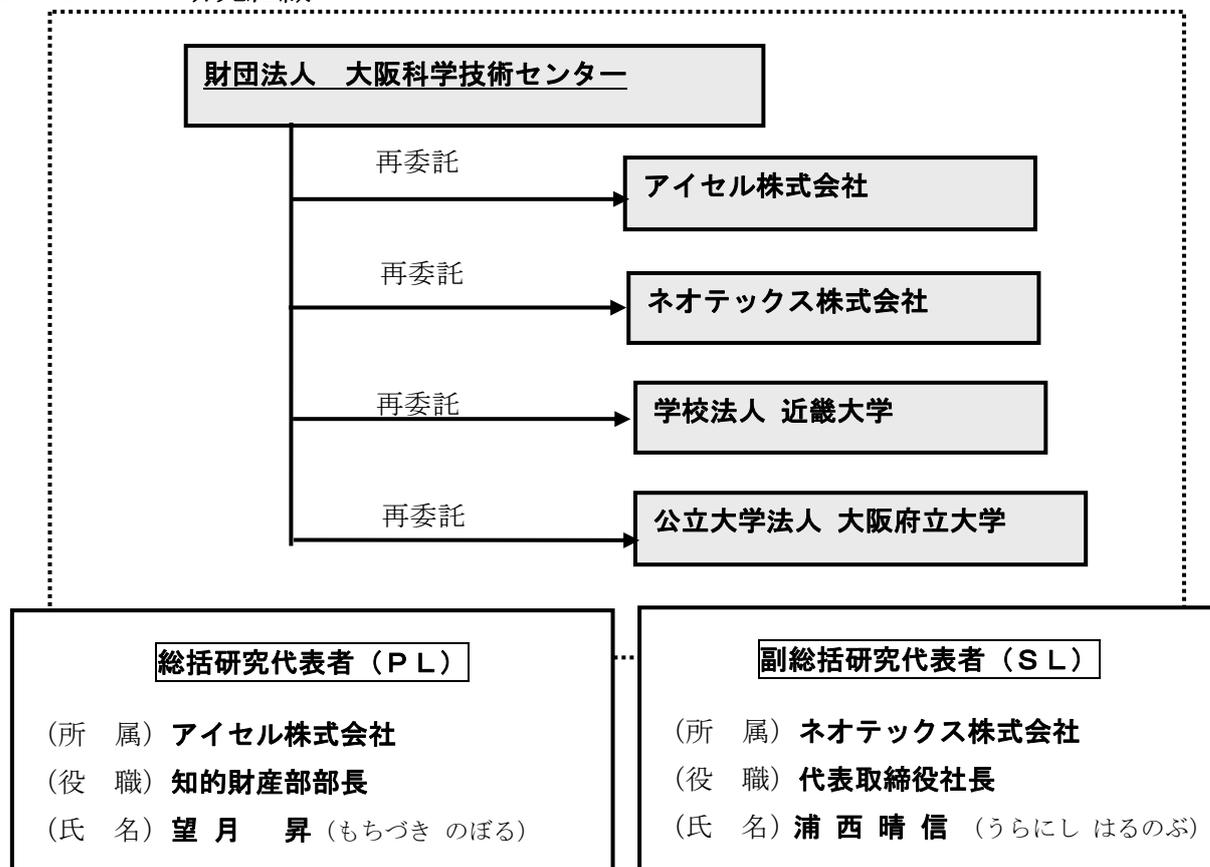
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

自動車産業では、CO₂排出量削減という社会的な要請を満たすために使用する金属板の薄肉化が求められているが、薄肉化に伴って二次加工性に優れた接合システムが求められている。この問題を解決するため、本研究開発では摩擦攪拌接合(FSW)に着目した。しかし、FSWは従来の溶融溶接と比べて高品質に接合できるが、ツールの耐熱性・耐摩耗性・価格の問題により実用化はアルミニウム等の低融点金属に留まっている。

そこで、本研究開発では自動車部品の中でも、ステンレス製であって二次加工後の安全性・信頼性が強く要求される触媒コンバーターケース製造ラインへの導入をターゲットとして、耐熱性・耐摩耗性に優れ、かつ安価な材料による接合ツールを開発し、当該ツールを使用したFSW接合システムを開発することを目的とした。具体的には、①1.0mm以下の薄板の接合を実現、②接合システムのコストを3分の2に削減する、の2点を3年間の最終目標として実施した。

1-2 研究体制

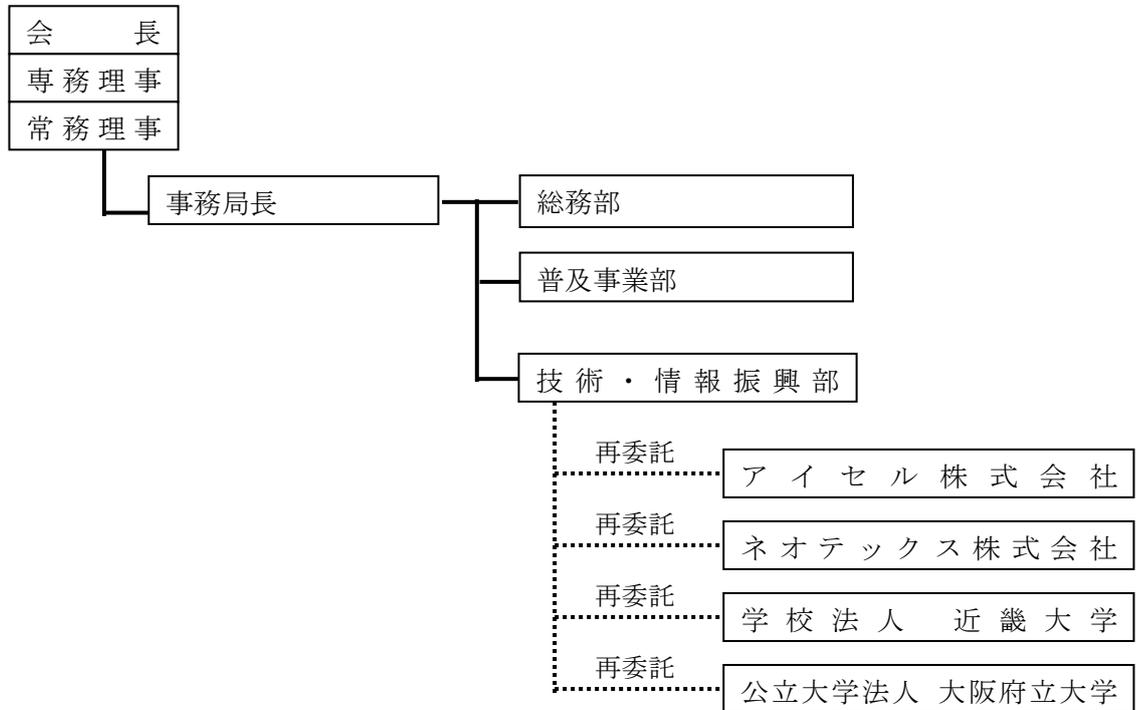
1-2-1 研究組織



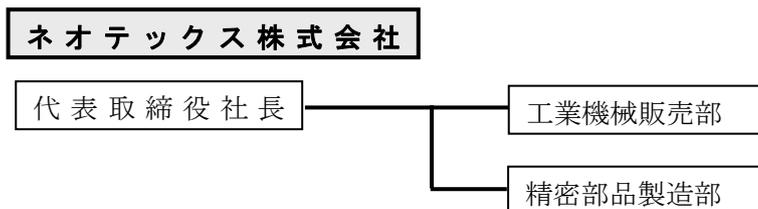
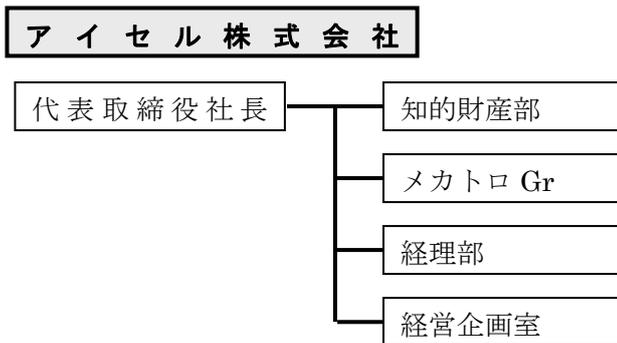
1-2-2 管理体制

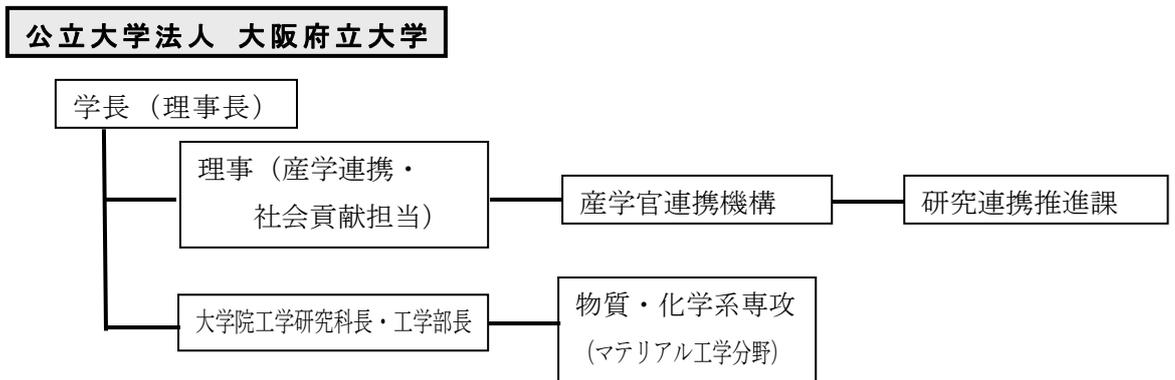
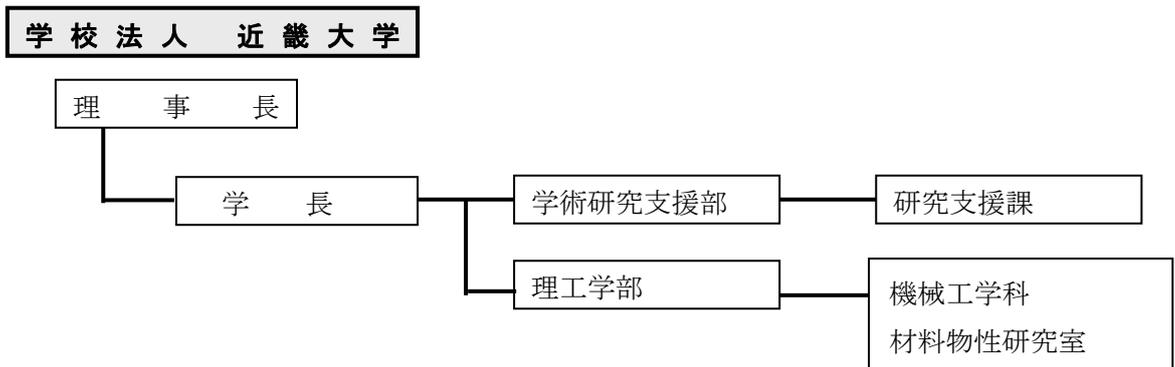
1-2-2-1 事業管理者

[財団法人大阪科学技術センター]



1-2-2-2 再委託先





1-2-3 管理員及び研究員

1-2-3-1 【事業管理者】財団法人大阪科学技術センター

管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
福田 隆	技術・情報振興部 主席調査役	【3】
脇坂 啓司	技術・情報振興部 課長	【3】

(注) 【3】 プロジェクトの管理運営など

研究員 なし

1-2-3-2 【再委託先】

アイセル株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
望月 貴司	代表取締役社長	【1】、【2】
◎望月 昇	知的財産部部長	【1】、【2】
内田 隆憲	パンチングGr 次長	【2】
福永 隆一	メカトロGr 主任	【1】②
大久保勝也	メカトロGr 員	【1】②
笥 貴一	知的財産部部員	【1】、【2】

ネオテックス株式会社

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
○浦西晴信	代表取締役社長	【1】②
吾妻浩司	専務取締役	【1】②

学校法人近畿大学

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
沖幸男	理工学部機械工学科材料物性研究室・大学院総合理工学研究科東大阪モノづくり専攻／大学院総合理工学研究科メカニクス系工学専攻・教授	【1】③

公立大学法人大阪府立大学

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
高杉隆幸	大学院工学研究科物質・化学系専攻 マテリアル工学分野・教授	【1】①
金野泰幸	大学院工学研究科物質・化学系専攻 マテリアル工学分野・准教授	【1】①

(注) ◎ プロジェクト リーダー

○ プロジェクト サブリーダー

【1】 ツール開発及び最適接合条件の探索

① ツール材料の開発

② ツール形状の決定及びツール加工方法の開発

③ 最適接合条件の探索

【2】 接合システムの開発

1-2-3-3 研究開発推進委員会 委員・オブザーバー名簿

委員長： 望月 昇 アイセル株式会社 知的財産部 部長
副委員長： 浦西 晴信 ネオテックス株式会社 代表取締役社長
委員： 望月 貴司 アイセル株式会社 代表取締役社長
吾妻 浩司 ネオテックス株式会社 専務取締役
高杉 隆幸 大阪府立大学大学院 工学研究科 マテリアル工学分野
教授
金野 泰幸 大阪府立大学大学院 工学研究科 マテリアル工学分野
准教授
沖 幸男 近畿大学 理工学部 機械工学科 教授
浅岡 武之 財団法人大阪産業振興機構 ものづくり支援部
(大阪TLO) コーディネータ
角谷 哲生 財団法人大阪産業振興機構 ものづくり支援部
(大阪TLO) コーディネータ (弁理士)
平田 智丈 大阪府立産業技術総合研究所 機械金属部 金属材料系
北崎 浩 フタバ産業株式会社 商品企画室 主担当員

オブザーバー：

永田 慶治 近畿経済産業局 産業部 製造産業課 調査官
山中 政明 大阪府商工労働部 商工振興室ものづくり支援課 課長
金谷 匠泰 大阪府商工労働部 商工振興室 ものづくり支援課
課長補佐
林 雅彦 大阪府商工労働部 商工振興室 ものづくり支援課
総括主査
植木友紀子 大阪府商工労働部 商工振興室 ものづくり支援課
主査
橘堂 忠 大阪府立産業技術総合研究所 機械金属部長
木下 俊行 大阪府立産業技術総合研究所 業務推進部研究調整課
西村 幸司 アイセル株式会社 名古屋営業所 機械営業本部次長

事業管理者：

八木 嘉博 財団法人大阪科学技術センター 理事 技術・情報振興部長
福田 隆 財団法人大阪科学技術センター技術・情報振興部主席調査役
脇坂 啓司 財団法人大阪科学技術センター技術・情報振興部 課長
米田 祥子 財団法人大阪科学技術センター技術・情報振興部

1-3 成果概要

1-3-1 ツール開発及び最適接合条件の探索

1-3-1-1 ツール材料の開発

#1 から#11 まで計 11 個の Ni 基超々合金製 FSW ツール用のインゴット (合金組成としては 8 種類) 作製し、高温硬さが優れた 5Ta+3Re 添加 Ni 基超々合金 (#10) について、ツール加工後に時効処理を行って高温硬さを向上させた後に接合実験を行い、良好な性能を確認している。この材料は、開発目標である、室温で 700HV 以上、900℃で 500HV 以上の硬さを十分達成している。なお、Re を添加しない#7 合金についても接合実験を行い良好な性能を確認した。

1-3-1-2 ツール形状の決定及びツール加工方法の開発

時効処理前の #10 材の常温硬さは、従来最も硬かった #9 を上回るが、加工法の工夫でツール加工に成功している。

ネック加工試験の結果、未接合部なしに板厚全体を接合することが必要であることが判明した。SUS430 1mm 薄板に対し、ツール寿命を考慮してプローブ部高さを 0.8mm にし、プローブが板厚を貫通せずに板厚全体の接合が出来る条件を確立している。

1-3-1-3 最適接合条件の探索

接合状況が良好で、ツール摩耗の少ない接合条件を探索した。上記 #10 製ツールでの 20m 接合後の摩耗量から、開発目標の推定ツール寿命 290m を十分達成出来る見通しを得た。

1-3-2 接合システムの開発

接合システムの開発において接合品質を決定する重要な要素である接合開始のタイミングを自動化した自動接合システムを開発した。これにより、SUS430 1mm 薄板の良好な接合を可能にした。

1-4 当該プロジェクトの連絡窓口

〒550-0004 大阪市西区靱本町1丁目8番4号

(財)大阪科学技術センター

技術振興部 TEL : 06-6443-5322、FAX : 06-6443-5319

福田 隆 (Eメールアドレス : fukuda@ostec.or.jp)

脇坂 啓司 (Eメールアドレス : wakisaka@ostec.or.jp)

第2章 ツール材料の開発

2-1 Ni 基超々合金開発の経緯

Ni 基超々合金は大阪府立大学で開発された複相金属間化合物合金で、Ni、Al、V を基本成分とする比較的単純な成分からなる合金であるにもかかわらず、現用の Ni 基超合金を上回る高温強度特性を示す新規耐熱金属材料である。

Ni 基超々合金は図 2-1 に示す次世代型超合金組織とも言えるべき特異な微細組織を有しており、最密充填構造型金属間化合物である Ni_3Al (L_{12}) 相と Ni_3V (D_{022}) 相が 2 重に階層化され、微細精緻に組織化されている。すなわち、ミクロスケールの上層複相組織では立方体形状の微細な初析 Ni_3Al 相とその間隙である channel 部からなり、さらに下部複相組織においては channel 部に存在する Ni_3Al 相と Ni_3V 相がナノスケールオーダーで超微細に配置されている。2 重複相組織はその微細性および高い結晶整合性によって延性を維持しつつ高い組織安定性をも実現し、特に、高温で優れた強度特性を発揮する。

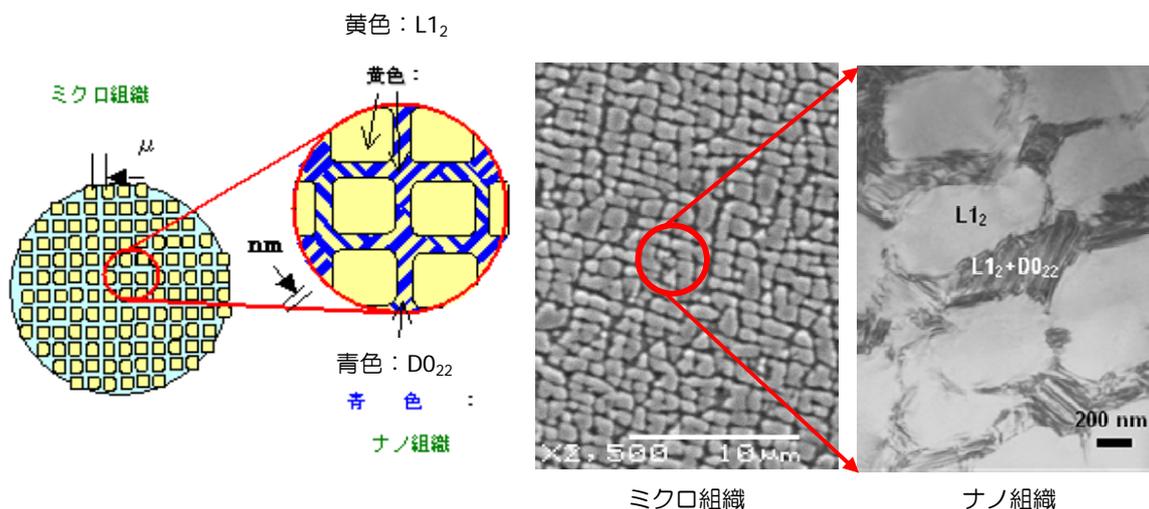


図 2-1 Ni 基超々合金の 2 重複相組織の模式図（左図）と電子顕微鏡写真（右図）。

Ni 基超々合金は高温強度特性が優れるために、航空機ジェットエンジンや自動車エンジンの部材等での使用が期待され、研究開発が行われてきている。一方、その後の研究で本合金は硬さ特性にも優れることがわかり、特に、高温硬さが通常の合金のみならず粉末焼結系の高硬度材料と比べても優れていることから、鉄系など高融点金属材料の摩擦攪拌接合（FSW）のツール素材として注目され、本事業実施に至っている。

2-2 FSW ツール用 Ni 基超々合金の諸特性

化学組成

前述のように、Ni 基超々合金の 2 重複相組織を生み出す基本構成元素は Ni、Al、V である。Ni 量は 75at.% が基本であり、したがって、(Al+V) 量は 25at.% となる。Ni 量が

定のもと、Al 量が増えると 2 重複相組織中の初析 Ni_3Al (L_{12}) の体積割合が増える。逆に、V 量が増えると channel 部の体積割合が増える。既存の $(\gamma + \gamma')$ 2 相組織 (γ : fcc 構造の Ni 固溶体相, γ' : L_{12} 構造の Ni_3Al 相) をもつ Ni 基超合金の場合とは逆で、Ni 基超合金では初析 L_{12} 相が軟質相で、channel 部が硬質相となる。このため、Al 量を増やすと耐酸化性や軽量性は向上するが、硬さや強度特性は低下する。逆に、V 量を増やすと耐酸化性は低下し、延性も減少するが、硬さや強度特性は向上する。したがって、使用目的に応じた Al、V 量の選択が必要となる。

一方、通常の合金の場合と同様、Ni 基超合金に対しても合金元素の添加は種々の材料特性を改善・向上させる有効な手法である。これまでの研究で、Nb、Ti は強度向上に、Cr、Co は耐酸化性向上に有効な元素であることが判明している。また、B は常温延性に、C は主として高温延性改善に有効であることも明らかにされている。

本事業では、基本組成の Ni 基超合金から出発して、高融点金属用摩擦攪拌接合ツールとして必要な特性を具現化する合金開発を行った。事業開始当時の Ni 基超合金は高温強度特性には優れていたが、耐摩耗性、すなわち、硬さ特性は必ずしも十分ではなかった。そこで、2 重複相組織を維持しつつ硬さ特性を向上させる元素ならびにその添加方法の探索を行った。その結果、Ta、W が Ni 基超合金の硬さ向上に有効であることを見出した。特に、Ta は Ni 基超合金に対する固溶限が大きく、顕著な固溶硬化をもたらすことが判明した。

Ni 基超合金製 FSW ツール用のインゴットは本事業実施の 3 年間で #1 から #11 まで計 11 個 (合金組成としては 8 種類) 作製したが、プロトタイプ of #1 合金から接合性能が格段に向上したのは Ta を固溶限まで添加した #7 合金であった。その後もさらに改良を進め、最終的には Ta に加え、Re も添加した #10 合金を完成させた。#10 合金の室温硬さは 765HV で、工具鋼にほぼ匹敵する硬さである。なお、接合時に問題なる高温硬さについても、本合金は後述の通り、秀逸である。

微細組織

図 2-2 に本事業の主力ツール素材である #7 合金と、最新鋭ツール素材の #10 合金の溶体化処理 (1280°C-3h) 後の SEM 写真を示す。FSW ツール用素材の合金開発に当たっては、2 重複相組織以外の粗大な金属間化合物相の出現は延性、靱性の低下をもたらす可能性があるため注意を要する。したがって、合金元素の種類および添加量と、その添加方法を適正化することが重要となる。詳細な組織観察の結果、#7 合金では L_{12} 相、 D_{022} 相以外の粗大な第二相は観察されず、微細な 2 重複相組織が形成されている (図 2-2a)。#10 合金も溶体化処理後は粗大な第二相は観察されず、2 重複相組織が形成されているが (図 2-2b)、その後、時効熱処理を行うと、channel 部に微細な析出物が出現している (図 2-2c)。TEM-EDS ならびに X 線回折の結果、この微細析出物は Re-rich 組成であり、#10 合金では Ta の固溶硬化に加え、Re-rich 相による析出硬化により、特段に優れた硬さ特性を示す。

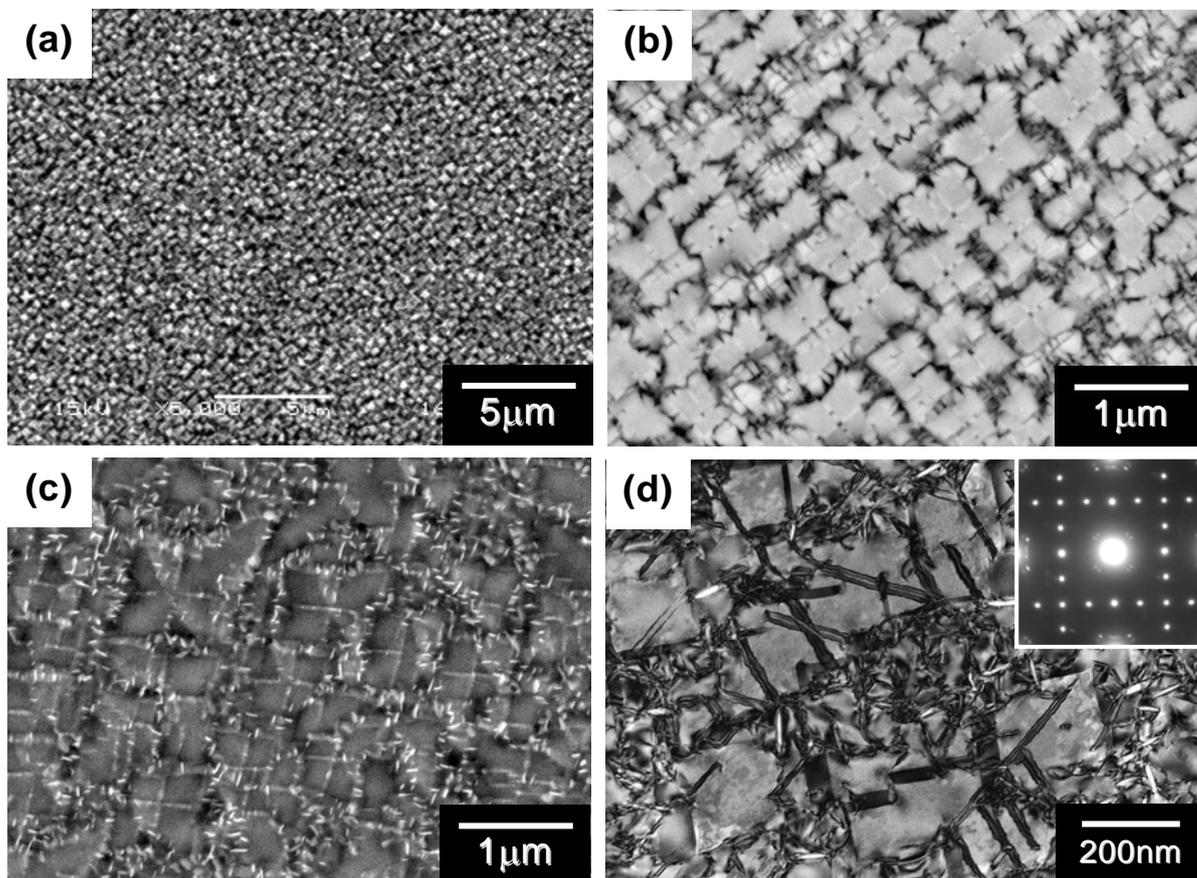


図 2-2 FSW ツール用超々合金インゴットの微細組織写真。(a) #7 合金、1280°C-3h 溶体化処理後 (SEM-SEI)、(b) #10 合金、1280°C-5h 溶体化処理後 (SEM-BEI)、(c) #10 合金、950°C-2h 時効処理後 (SEM-BEI)、(d) #10 合金、950°C-2h 時効処理後 (TEM-BF, SADP)。

引張強度特性

Ni 基超々合金の引張強度特性の一例として、図 2-3 に #1~#4 合金の試験温度の上昇に伴う引張強度変化を示す。同図には比較のために、市販の高強度型ニッケル超合金展伸材である Udimet 520®, Waspaloy®, Inconel 718® の結果も示されている。Ni 基超々合金は casting material でありながら、高強度タイプの市販ニッケル超合金展伸材と比べて、低温から中温域ではほぼ同等の、600°C 以上の高温域では凌駕する優れた強度特性を有している。特に、900°C における引張強度は Udimet 520® の約 1.3 倍で、Waspaloy® や Inconel 718® と比べると実に 2~3 倍もの高強度を示している。なお、Ni 基超々合金の中で比較すると、#2~#4 合金は #1 合金に比べて概ね全温度域で高い引張強度を示すが、800°C 以上ではその差はほとんど無くなっており、高温域では 2 重複相組織そのものが高温高強度に有効であることを示唆しているものと考えられる。

硬さ特性

図 2-4 に本事業で開発した Ni 基超々合金インゴットの室温におけるビッカース硬さ測定結果を示す。#1 合金は強度・延性、耐酸化性等にはバランスのよい特性を示すが、Ta, W を含まないため、#2 以降の合金比べると硬さは低い。

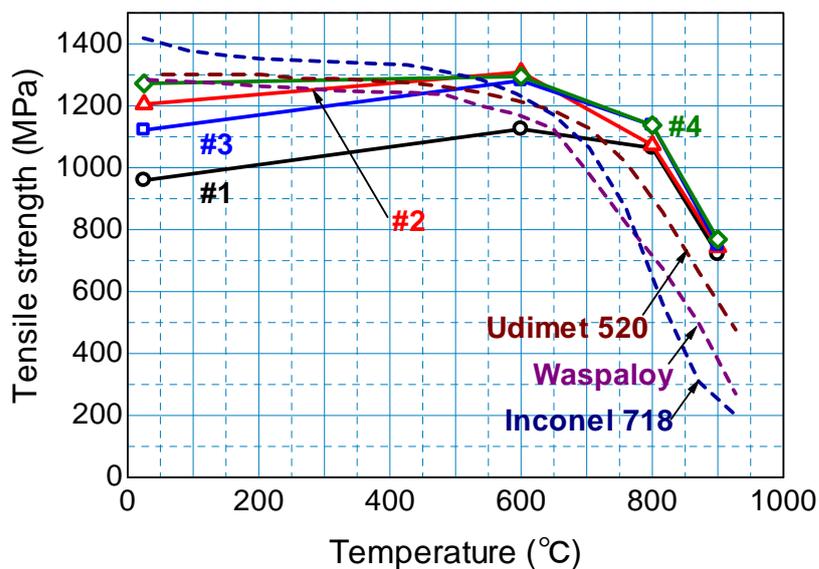


図 2-3 Ni 基超々合金の高温引張強度特性. 比較合金の Udimet 520®, Waspaloy®, Inconel 718®の引張データは Special Metals 社のホームページ (<http://www.specialmetals.com/index.php>) 掲載の技術データから引用.

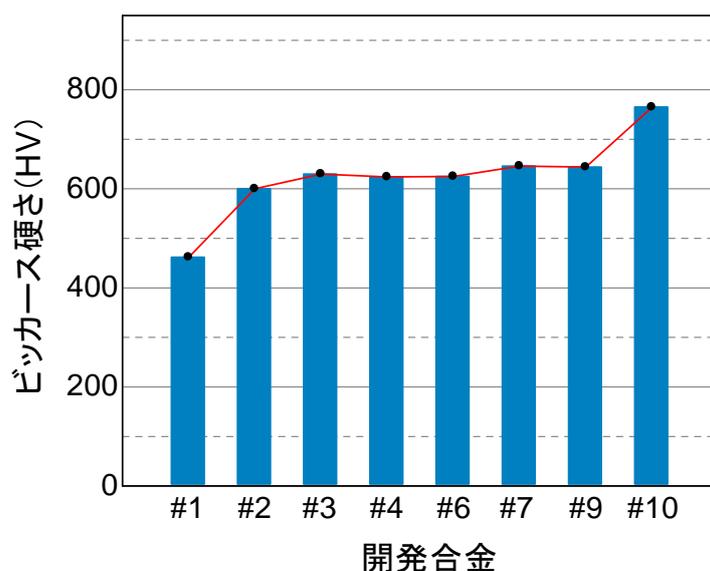


図 2-4 FSW ツール用 Ni 基超々合金の室温ビッカース硬さ特性.

#2 合金以降は Ta あるいは W 添加により、#1 合金に比べて、150HV 以上の硬さ向上がなされている。さらに、Re を添加した#10 合金では記述の通り、750HV を超える Ni 系の合金としては非常に高い硬さを実現した。

図 2-5 は#1、#2、#3、#7 合金の高温硬さを測定した結果である。図中には比較のために、WC 系超硬合金とステンレス鋼中で最高硬さを誇る SUS440C の測定結果も示してある。中高温度域の硬さは、超硬合金はもとより SUS440C の硬さよりも下回るが、高温域では逆に SUS440C は勿論のこと、超硬合金を上回る硬さを示す。ステンレス接合時の FSW ツール

温度は 900℃以上と推定されているので、超硬合金ツールに比べて Ni 基超々合金ツールの方が FSW ツールとして優位であるものと考えられる。

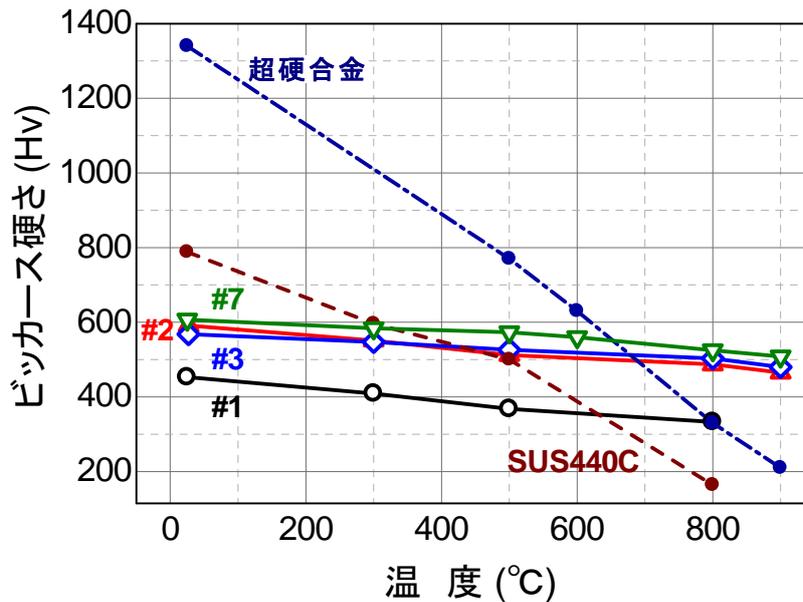


図 2-5 FSW ツール用 Ni 基超々合金の高温ビッカース硬さ。

その他の特性

(i) 浸炭・窒化特性

鋼の表面硬化法として浸炭、窒化がよく知られているが、Ni 基超々合金もプラズマあるいは真空浸炭・窒化による表面硬化が可能である。合金成分・組成によっても異なるが、プラズマ浸炭の場合、表面硬さが約 800HV にまで増加し、数十ミクロン程度内部まで硬化層が浸透する。プラズマ窒化の場合、硬化層は表面から十数ミクロンと極表面だけであるが、1000HV を超える非常に硬い表面が得られる。

FSW ツールとしての使用はツール素材にとって非常に過酷な条件であるので、一定深さ以上の硬化層が必要となるが、化学的摩耗や摩擦係数の低減が必要な場合には、本合金においても浸炭・窒化は有効な表面硬化（改質）法となるものと考えられる。なお、#10 合金は浸炭材とほぼ同等のバルク硬さが得られている。

(ii) 铸造性

Ni 基超々合金は新規な合金組成で溶解铸造の実績・経験が少なく、また、硬質材料であるが故に铸造欠陥のない健全铸塊作製には一定レベルの技術を必要とするが、基本的には铸造性は良好で、汎用的な真空溶解法が適用できる。本合金は単結晶作製が可能であり、また、本事業においてもロストワックス法による精密铸造法によってツール作製を行った。精密铸造法によるニアネットシェイプ铸造は、加工の手間やコストを省略するため、量産化の際には有望なツール製造法になるものと考えられる。

第3章 ツール形状の決定及びツール加工方法の開発

3-1 ツール形状の決定

ツールには耐久性及びコスト面での優位性が求められる。耐久性はツールに使用する材料自体に負うところが大きく、コストは材料の加工性及びツール形状により決まる。製造コスト最小を実現すべく以下のツール形状を標準形状とし、ショルダー径、プローブ高さ、プローブ径を変更したツールを製作した。

図 3-1-1 に標準ツールの形状を、図 3-1-2 に標準ツールの外観写真を、表 3-1-1 に製作したツールの内容について示した。

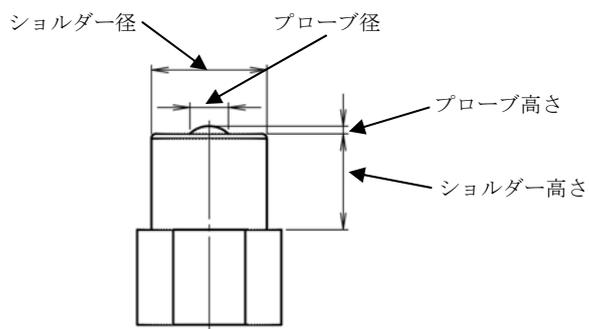


図 3-1-1 標準ツール形状



図 3-1-2 標準ツール外観写真

表 3-1-1 ツール諸元

ショルダー径	8~14 mm
プローブ高さ	0~0.9 mm
プローブ径	3~4 mm

ショルダー径の違いにより摩擦攪拌接合の際のツールによる発熱量が変わり接合品質に影響を与えるので、ショルダー径を 8~14mm の範囲で変更して、接合品質に与える影響を調べた。

プローブ高さは供試材の厚さ及び接合装置の制御方法との関係で重要であり、ショルダー径と同様に接合品質に影響を与える。通常は供試材の厚さより 0.1mm 程度小さいものとされるところ、本事業では SUS430 の 1.0mm 厚さの板を標準の供試材として取り扱うのでプローブ高さ 0.9mm を最長とし、それより短いものについても製作して接合品質に与える影響を調査した。さらに、ツール加工のコストダウンを考慮して、プローブなしのツールについても製作した。

3-2 ツール加工方法の開発

ツール加工は、最初に Ni 基超々合金のインゴットを円柱形状にワイヤ放電加工機により粗加工し、粗加工品をマシニングセンターによりツール形状に加工した。

3-2-1 はじめに

第2章で説明した、#10 Ni 基超々合金の 16.6φ 鋳造材について旋盤加工を行い、以下について検証した。

- 1：素材硬さアップによる加工可否、加工条件の探索
- 2：鋳物巣の影響による歩留まりの悪さ
- 3：寸法公差の精度維持

3-2-2 硬さアップによる加工可否、加工条件の探索

#10の素材硬さについて、下記の情報を事前に得ている。

- ・ 鋳造まま硬さ 平均 662HV (597~700HV)
- ・ ビッカース硬さ 660HV はロックウエル C スケールの約 58HRC 程度。

この平均硬さは、S55Cの高周波焼入れのMAX硬さ程度であるが、加工結果としては、従来の大径インゴットから7個取りした素材よりも加工性が良好という結果となった。

図3-2-1は、刃物が1回転（360度）切削した時の機械のロードメーターを表したグラフである。今回の素材（1本物無垢材）の方が円周方向の負荷のバラつきが少なく安定している。平均硬さが、上がったにもかかわらず加工が可能となり、且つ加工性が良くなった原因と思われる。

ロードメーター

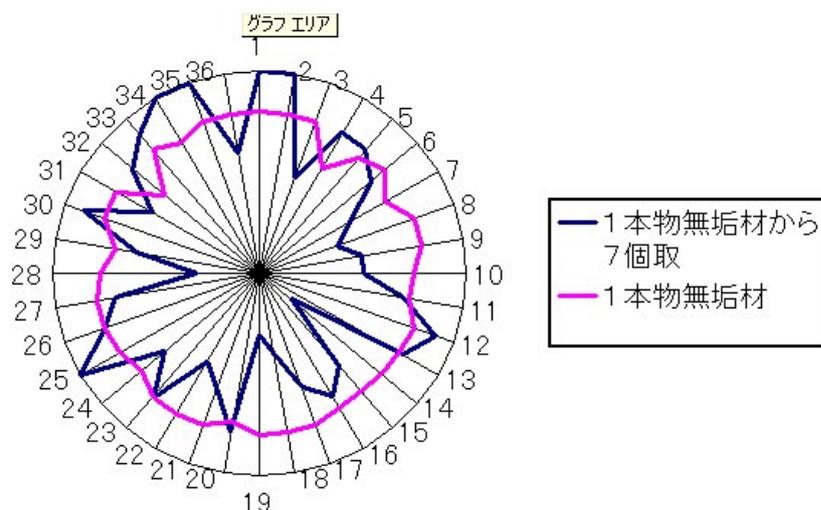


図3-2-1 切削時のロードメーターの比較

3-2-3 鋳物巣の影響による歩留まりの悪さ

切削条件は下記の通りである。

使用切削工具：超硬チップ（チタン-アルミナ系コーティング）

ホルダー：CNMG タイプ

【基本切削条件】

切削条件：周速 14 m/min 前後（可変） 送り 0.05~0.08/rev Ad（X
径方向） 0.4mm

切削油：水溶性切削油

中心付近の切削過負荷に対する加工法は昨年度見出して、今回も対処しているので、図3-2-2のようなツール破損が生じたのは、B1-4 素材にあった鋳物巣の影響と思われる。巣のない正常なものであれば、図3-3-3のように破損は生じないで摩耗となる。

今回素材の鋳物巣は従来に比べて微少であるが、上記のように有害な存在である（2項のロードメーターの谷間は鋳物巣の影響の可能性が高い）。鋳物巣の発生による工具破損は予測がつかず、生産管理が難しく、依然解決できていない。



図3-2-2



図3-2-3

3-2-4. 寸法公差の精度維持の検証

今回素材は 16.6φと小さく、ツール保持部を従来の六角形に出来ないため、下図のように円筒部の一部をカットした保持方式に変更している。この方式では、円筒部とDカット部の保持部とツール軸部の嵌め合い（仕上げ公差）が問題となる。

保持部の外径とDカット部の寸法公差は下図に示す通りである。特に円筒部は公差記号 g 6 となっており、レンジで言うと 0.01mm以内で、切削では極めて厳しい寸法である。

この対策として、切削加工条件を若干遅くすることで、1つの加工チップでツール4個まで公差維持が出来ている。更に遅くすれば寿命が延びるのかは、加工数が少な

かったので検証出来なかった。

今回たまたま B-1-4 素材に鋳物巣があったが、先端部であったため、影響はなかった。

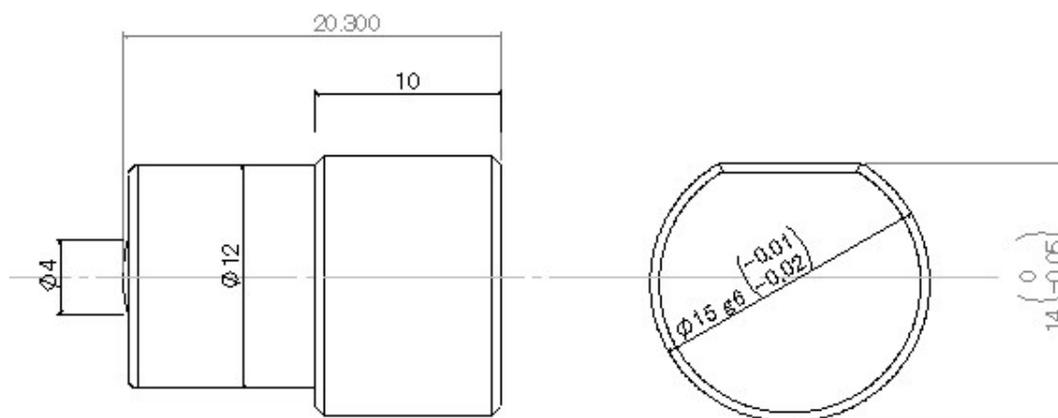


図 3-2-4 加工寸法と嵌め合い公差

3-2-5. まとめ

以上の結果をまとめると、以下のようになる。

- #10 Ni 基超々合金の 16.6 ϕ 新規溶製材は、素材平均硬さが#7 より高いが、ツール加工は問題なく可能である。
- その理由としては、硬さ変動が小さいことと、鋳物巣が微少なため、切削荷重の変動が小さいためと思われる。
- 鋳物巣は微少となっているが、やはり存在しており、ツール寿命、生産管理に大きく影響している。今後、この減少対策が必要となる。
- 今回鋳造素材が 16.6 ϕ と小さくなったため、ツール保持方法が変更された。この方式では嵌め合い（寸法公差）が問題となるが、加工方法の工夫で対処出来ている。

第4章 最適接合条件の探索

4-1 接合実験条件

(1) ツール

#1～#11の11個(8種類)のNi基超々合金についてインゴットを鑄造し、機械加工により第3章に示したツールを製作して接合実験に供した。

平成20年度は、2種類の標準条件を定めて各ツールの特性を把握するために最適接合条件探索のための実験を行った。平成21年度は、平成20年度のツールの中で最も高い耐久性を示した#7製ツールを主に使用して、より長期に渡って安定した接合状態を実現するために最適なツール形状及び最適接合条件を探索した。また、コストダウンの検討のためにニアネットシェイブ鑄造により#7インゴットと同じ組成を有するツールを製作し、インゴットから機械加工により製作したツールとの特性の違いの有無について実験により確認した。平成22年度は、高温硬さが他のNi基超々合金より優れた5Ta+3Re添加の#10及び#11製ツールを主に使用して実験を行った。

ツール形状については、第3章に記載の通りである。

表 3-1-1 ツール諸元

ショルダー径	8～14 mm
プローブ高さ	0～0.9 mm
プローブ径	3～4 mm

(2) 供試材

SUS430の平板を供試材としてツールの寿命試験を行った。表4-1に実験に使用した供試材について示した。

表 4-1 供試材

材質	SUS430
熱処理	冷間圧延後 780～850℃焼鈍処理
サイズ	300mm×150mm×1.0mm(厚さ)
0.2%耐力	323 N/mm ²
引張強さ	510 N/mm ²
伸び	31 %
硬さ	161 HV

(3) 接合条件

接合実験のパラメータは、ツール回転数、接合速度、加圧力とした。前進角はすべての実験を通じて安定した操作が可能な3度とした。表4-2に接合実験条件について示した。接合操作中のツール温度を放射温度計CHINO製IR-AHS2により測定し、予め定めた目標の温度になるようにツール回転数、接合速度、加圧力を調整した。

表 4-2 接合実験条件

前進角	3°
ツール回転数	500~1800 rpm
接合速度	500~1400 mm/min
加圧力	0.7~1.8 ton

(4) 制御方法

ツールの寿命については接合中のツール温度が決定的に重要な因子であり、低温であるほどツールの硬さ低下は小さく摩耗も少なくなってツール寿命が長くなる。特に、Ni基超々合金は900℃を境に硬さの減少する割合が大きくなるという特性を有するため、接合中のツール温度を900℃以下に維持することにより900℃以上の場合と比較してツール寿命を長くすることが可能になる。接合中のツール温度を安定させるためにはツールと供試材の接触状態を安定させることが重要であるため、ツールから供試材への加圧力を制御する加圧制御により実験を行った。

(5) 接合操作

供試材を支持テーブルの上にセットして、回転するツールを降下させ供試材の接合線上に接触させた後にツールと供試材をそのままの位置で保持し、ツールが発光したのを確認してから走行させた。1回のRunでの接合距離は250mmとした。

実験の各Run毎に供試材の接合線を目視観察し、適宜ツールの重量・形状測定及び写真撮影を行った。さらに、実験後の供試材については引張強度試験、組織観察等による分析を行った。

4-2 接合実験結果

(1) 5Ta+3Re 添加 Ni 基超々合金 #10 製時効処理ツールを使用した実験

5Ta+3Re 添加 Ni 基超々合金 #10 製ツールにつき時効処理してさらに硬化させたツールを使用して、SUS430 1.0t 平板の加圧制御による接合実験を行った。#10 製ツールは時効処理によりビッカース硬さ 700 を超える硬さを有している。実験の結果、施工長 20,000mm でもほぼ良好な接合状態を実現するという驚くべき結果が得られた。ツールのサイズ・重量変化等について図 4-1 に、供試材の接合面及びツールの外観の一部を図 4-2 及び図 4-3 に示した。

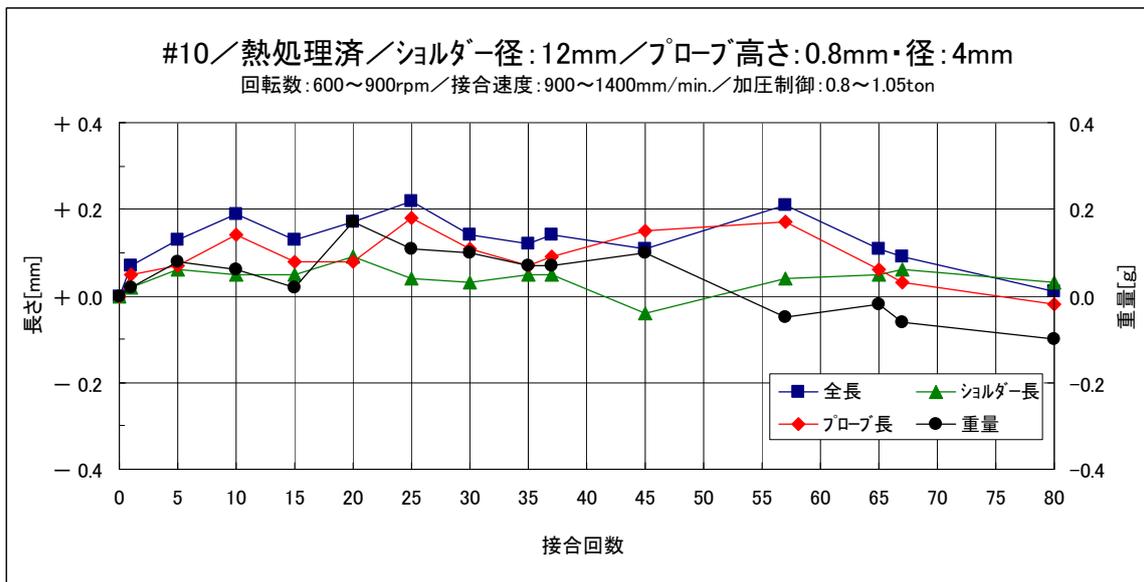


図 4-1 #10 Ni 基超々合金ツールによる SUS430 1.0t 平板の接合実験結果

実験では、ツール温度 850℃を目標にツール回転数・接合速度・加圧力を決定しているが、実験初期は 900rpm で 1150~1400mm/min. で実施しており、その後調整して 630~700rpm で当初の接合速度目標の 900mm/min. で実験を継続した。

図 4-1 に示すように 80 回合計 20,000mm の接合操作にもかかわらず、ショルダー長は±0.1mm の変化に留まっており、重量は 0.1g 減少しただけであってツールの摩耗量が小さいことが分かる。本ツールにおいて、重量 0.1g の減少はショルダー長 0.1mm の摩耗に相当する。図 4-2 の接合開始時の貫通孔（左側）は接合開始時のタイミングの遅れによるものであり、これを改善するための自動スタート機構については第 5 章に示した。なお、若干ではあるが全長やプローブ長が長くなり重量が増加しているのは、図 4-3 から分かるように、供試材の SUS430 がツールの特にプローブ部に付着したためである。特に Run-20～65 で



Run-15 接合面（#10 熱処理ツール、900rpm - 1,200mm/min.、3,500～3,750mm 走行部分）



Run-50 接合面（#10 熱処理ツール、640rpm - 900mm/min.、12,250～12,500mm 走行部分）



Run-80 接合面（#10 熱処理ツール、700rpm - 900mm/min.、19,750～20,000mm 走行部分）

図 4-2 #10 Ni 基超々合金ツールによる SUS430 1.0t 平板の接合面

プローブ部への付着物が顕著である。接合回数の増加によりショルダー表面が粗くなり供試材がプローブ周辺に付着しやすくなると考えられるが、接合終了時のタイミングにより Run-80 のように付着物が少なくなる場合もある。

以上のように、接合回数を重ねるごとにショルダー及びプローブ表面が摩耗し、また供試材のツールへの付着によって接合面が粗くなるが、これらの現象はショルダー及びプローブ表面を研磨して未使用の状態に再生することで解消できる。

以上を考慮して実際の操作について検討すると、#10 製ツールを使用して接合距離 20,000mm 毎にツールを研磨して未使用の状態に再生するとの条件の下に、1 回の再生操作で接合開始前より 0.2mm づつツールが短くなると仮定すれば、14 回の再生で接合距離 300m が可能である。14 回の再生でもツールは $0.2 \times 14 = 2.8\text{mm}$ 短くなるだけであり、実験に使用したツールのショルダー部長さ 10mm は十分に余裕がある。以上により、結論として #10 Ni 基超々合金熱処理ツールでは本事業の目標である 290m のツール寿命をクリアできる見通しが得られた。



Run-1 後 Run-10 後 Run-20 後 Run-30 後 Run-45 後 Run-65 後 Run-80 後

図 4-3 #10 ツール外観の変化

本実験で接合した供試材についての引張強度試験の結果を表 4-3 に、引張試験後の試験片を図 4-4 示した。Run 76 の試験片を除いてすべて母材で破断しており、唯一接合部で破断した Run 76 の試験片も母材並みの引張強度を示している。これらは、摩擦攪拌接合の特徴である金属組織が微細化されて強固に接合されていることを示している。

表 4-3 #10 製ツール接合実験引張試験結果

Run No.	引張強度 [MPa]
43	545
66	550
76	528
80	572



図 4-4 引張試験後の試験片

なお、ツール表面への付着物についての参考として、図 4-5 に実験終了後の#4 製ツール断面写真を示した。#4 は、#10 及び#7 より高温での耐久性に劣るため接合長 5000mm でプローブ周辺部が凹状に摩耗している。白く見えるのが供試材が付着したものであって、主にプローブ及びショルダー部周辺に見られる。



図 4-5 接合ツール断面図
(#4 製ツール、5500mm 走行)

(2) #7Ni 基超々合金製ツールを使用した実験

ツールのコストダウンの観点から、Re を添加していない#7 Ni 基超々合金についても溶製して機械加工によりツールを製作し、#10 製ツールと同様の接合実験を行った。その結果を図 4-6 に示した。

#10 製ツールについての実験と同様に、#7 製ツールについてもツール温度 850°C を目標に回転数・接合速度・加圧力を決定しているが、本実験では回転数は 900rpm で固定し接合速度及び加圧力を調整した。

45 回合計 11,250mm の接合操作にもかかわらず、ショルダー長は 0.07mm の減少に留まっており、また、重量は 0.08g 減少しただけであってツールの摩耗量が小さいことが分かる。なお、45 回目のプローブ長及び全長がその前の 42 回目と比較して急激に減少しているのは、図 4-3 に見られたようなプローブ部の付着物が剥離したためであり、42 回目以降で急激にツールの摩耗が進んだものではない。

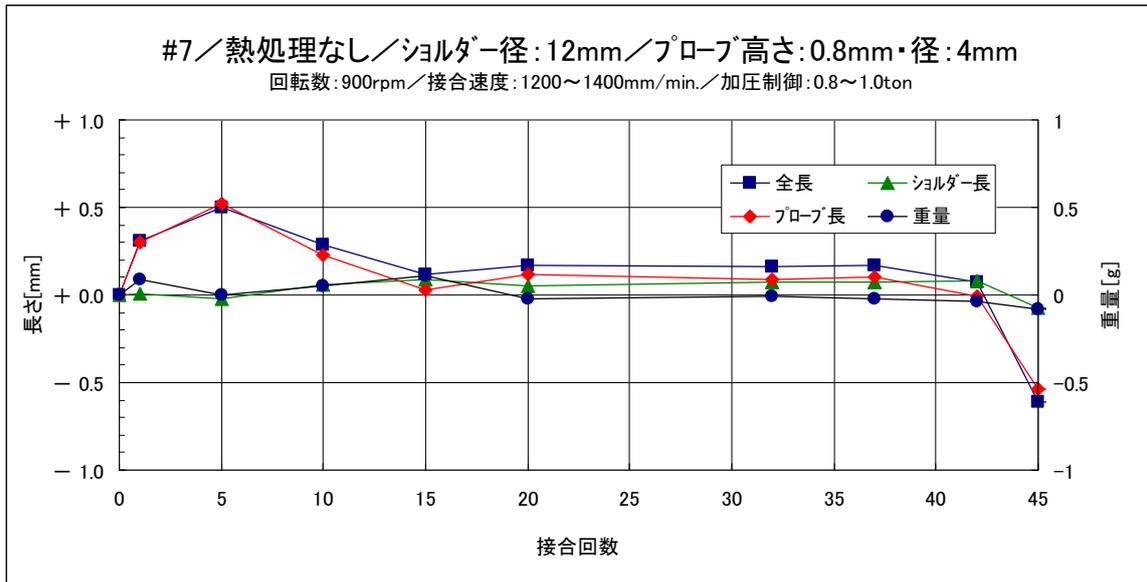


図 4-6 #7 Ni 基超々合金ツールによる SUS430 1.0t 平板の接合実験結果

#7 製ツールについて接合距離 10,000mm 毎にツールを再生するとして、1 回の再生操作で接合開始前より 0.2mm づつツールが短くなると仮定しても 29 回の再生で 300m 接合可能であって、29 回の再生でツールは 5.8mm 短くなるだけである。以上により、結論として #7 製熱処理ツールについても本事業の目標である 290m のツール寿命をクリアできる見通が得られた。

なお、#7 製ツールについてはニアネットシェイプ鋳造法によってもツールを製作したが、接合品質はインゴットから機械加工により製作したものと明確な差異は見られなかったが、5000mm 接合後のツールの摩耗量はニアネットシェイプ鋳造法によるツールが若干大きかった。

(3) プロブ長及びショルダー径

プローブ長を 0.3~0.9mm の範囲で変更したが、ツール温度が 850°C 目標での実験の場合には、プローブ長が 0.3mm では供試材裏面に接合線が残り引張強度も小さく、引張試験では接合部で破断した。温度が低くてプローブが短いことにより、供試材の攪拌が不十分であることが推測される。ツール温度が 850°C 目標でもプローブ長さを 0.8mm にすると、供試材裏面の接合線は消滅し引張り強度は母材並みの値を示した。ただし、接合速度を大きくするにつれて供試材裏面の接合線が残りやすい傾向を示した。

一方、ツール温度を 900°C 以上にした実験の場合には、プローブ長が 0.3mm でも供試材裏面の接合線は消滅し引張強度も母材並みの強度を示し、引張試験では母材で破断した。温度が高いためプローブが短くても攪拌が十分であったものと考えられる。

SUS430、1.0mm 厚さの供試材について、ショルダー径を 8~14mm の範囲で変更して

接合実験を実施したが、ショルダー径が大きいほど接合部は安定する傾向を示したもののそれほど明確な接合品質の差異は見られなかった。1.0mm 厚さ程度であれば、ショルダー径の影響は受けにくいものと考えられる。

(4) 金属組織

接合実験後の供試材の接合部分の金属組織を撮影した結果を、図 4-7 及び図 4-8 に示した。図 4-7 の実験の接合面は良好であったが、図 4-8 の実験の走行面はほぼ良好で欠陥は存在しないもののバリが散見された。金属組織を比較すると、図 4-8 には接合部内部に空隙が存在しており、図 4-7 には見られない。これらにより、走行面からは欠陥が存在しないように見えても内部に欠陥が存在する場合があることが明らかになった。



図 4-7 金属組織
(#4 製ツール、125mm 走行部分)



図 4-8 金属組織
(#3 製ツール、875mm 走行部分)

第5章 接合システムの開発

(1) 背景

当初の実験では接合開始のタイミングをオペレーターが判断していたが、急激に発熱するため適切なタイミングで接合を開始することが難しく、ツールの走行開始が早過ぎると接合部初期に接合不良が発生し、逆に遅過ぎる場合には板厚が薄いために図 4-2 の左端に見られるような貫通孔が発生してしまう。そこで、自動スタート機構を組み込んで R 軸トルクをパラメーターとした自動接合開始実験を行った。

(2) 自動接合開始実験概要

自動接合開始実験は、R 軸トルクを接合開始のタイミングのパラメーターとして実施した。表 5-1 に自動接合開始実験の条件についてまとめた。供試材については、表 4-1 に示したのと同じ SUS430 の厚さ 1mm の平板を使用した。

表 5-1 自動接合開始実験条件

ツール材質	#10Ni 基超々合金
ショルダー	12mm
プローブ	高さ : 0.3mm / 径 : 4mm
前進角	3°
ツール回転数	900 rpm
接合速度	1300 mm/min
加圧力	1.2 ton

(3) 実験結果

図 5-1 に R 軸トルクによる自動接合開始運転の実験による供試材の接合部写真を、図 5-2 に接合実験におけるトルクの時系列データを示した。縦軸はモータトルク値、横軸は時間である。横軸が 0 [sec.] の時にツールが移動を開始している。図 5-2 において、時系列データは上の図から下の図へいくに従い時間軸の間隔が短くなっている。

写真からも分かるように、自動接合開始運転により接合開始部に貫通孔はなく良好に接合することができた。



図 5-1 R 軸トルク自動スタート運転による接合面

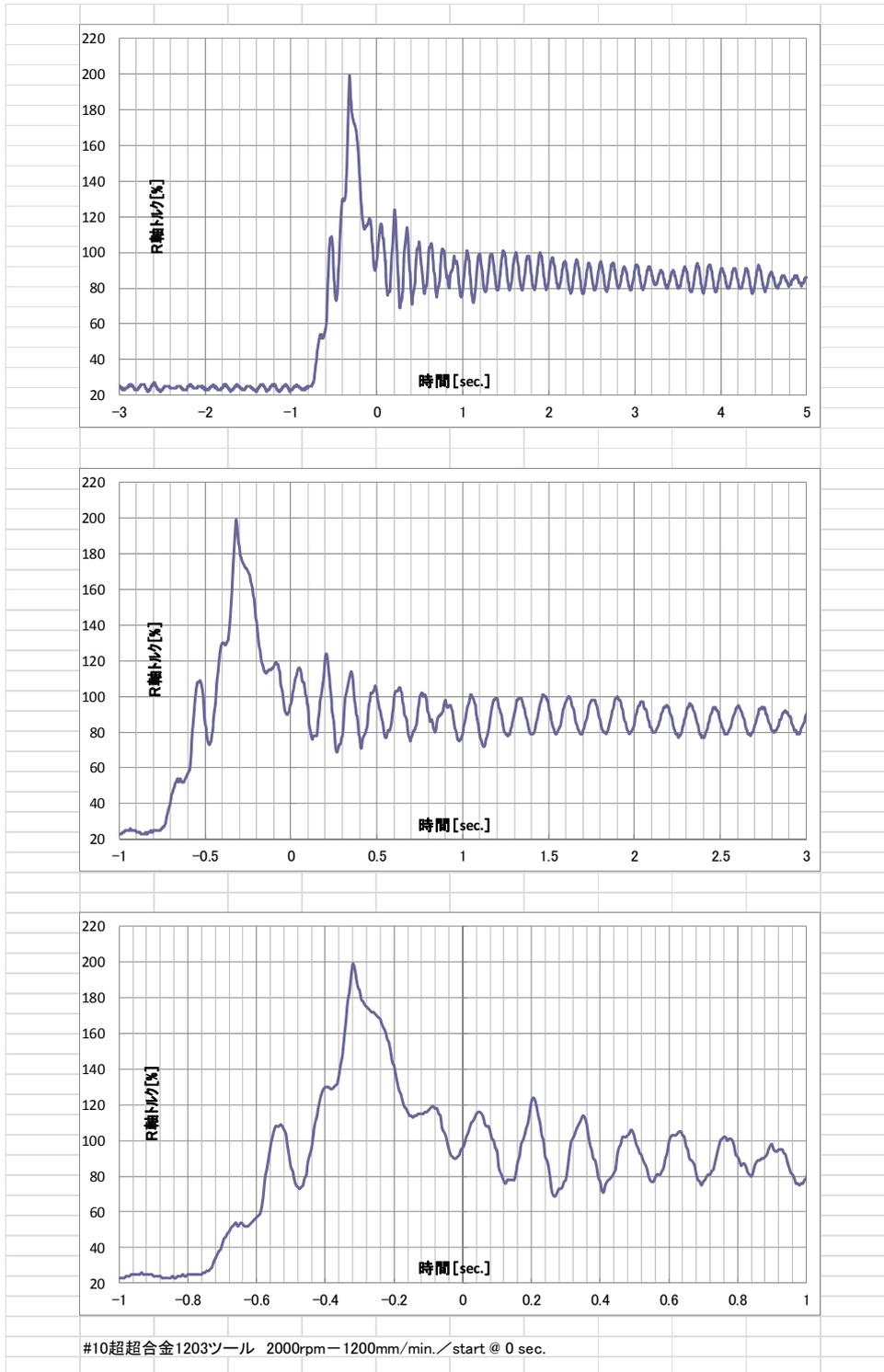


図 5-2 R 軸トルク自動スタート運転における R 軸トルクの経時変化

第6章 全体総括

6-1 ツール材料の開発

#1 から#11 まで計 11 個の Ni 基超々合金製 FSW ツール用のインゴット（合金組成としては 8 種類）作製し、高温硬度が優れた 5Ta+3Re 添加 Ni 基超々合金（#10）について、ツール加工後に時効処理を行って高温硬度を向上させた後に接合実験を行い、良好な性能を確認している。この材料は、開発目標である、室温で 700H_v 以上、900℃で 500HV 以上の硬度を十分達成している。なお、Re を添加しない#7 合金についても接合実験を行い良好な性能を確認した。

6-2 ツール形状の決定及びツール加工方法の開発

時効処理前の #10 材の常温硬度は、従来最も硬かった #9 を上回るが、加工法の工夫でツール加工に成功している。

ネック加工試験の結果、未接合部なしに板厚全体を接合することが必要であることが判明した。SUS430 1mm 薄板に対し、ツール寿命を考慮してプローブ部高さを 0.8mm にし、プローブが板厚を貫通せずに板厚全体の接合が出来る条件を確立している。

6-3 最適接合条件の探索

接合状況が良好で、ツール摩耗の少ない接合条件を探索した。上記 #10 製ツールでの 20m 接合後の摩耗量から、開発目標の推定ツール寿命 290m を十分達成出来る見通しを得た。

6-4 接合システムの開発

接合システムの開発において接合品質を決定する重要な要素である接合開始のタイミングを自動化した自動接合システムを開発した。これにより、SUS430 1mm 薄板の良好な接合を可能にした。