

特集：ろう付

ろう付の適用事例

東京ブレイズ株式会社
瀬 知 啓 久

1. はじめに

ろう付の最大の特徴は「母材をあえて溶かすことがない」点にある。このため、母材に与える熱的な影響が比較的小さく、特殊な材料や異種材料の接合も可能となっている。

ろう付の特徴について、以下に列挙する¹⁾。

- (1) 母材をほとんど溶融しない
- (2) 薄板接合、精密接合に有利
- (3) 多点同時接合が可能
- (4) 広い面の接合が可能
- (5) 異種金属や非金属の接合も可能
- (6) ろう付部再加熱により、接合部の切り離しが可能
- (7) 気密封止・水密封止を実現可能
- (8) 有機接着剤では達成できない導電性を付与可能
- (9) 溶接と比べると習熟が容易で、短時間に技能習得が可能
- (10) 作業の自動化が比較的容易
- (11) 継手形状によっては、母材に匹敵する接合強度を実現可能

ろう付には、表1に示すように多数の手法が用いられている²⁾。本稿では炉中ろう付やレーザーろう付を中心に、各種材料の組み合わせによる具体的なろう付事例について解説する。

表 1 各種ろう付方法²⁾

ろう付方法	概要
トーチろう付 (炎ろう付)	ガスバーナーを用いて部材を加熱し、ろう材を溶かす方法。 プリフォームろう材やペーストろう材を用いた自動ろう付機も使用される。
炉中ろう付	電気炉、ガス炉内で部材を加熱し、ろう材を溶かす方法。 使用雰囲気としては、水素、各種還元ガス、アルゴン、真空等がある。均一加熱と大量ろう付に適する。自動機による連続ろう付に多く使用される。
高周波ろう付	高周波による加熱で部材を加熱し、ろう材を溶かす方法。 急速加熱と局所加熱に適する。
抵抗ろう付	ジュール熱によって部材を加熱し、ろう材を溶かす方法。 スポット溶接と同じ原理によるもので、パイプろう付や電子素子、部品の接合など電子関係に多く使用されている。
アークろう付	アーク熱を利用して部材を加熱し、ろう材を溶かす方法。 炭素またはタングステン電極を用いる非消耗電極式と、ろう材自体が電極となって熔融する消耗電極式がある。
電子ビーム ろう付	電子ビームによる加熱で部材を加熱し、ろう材を溶かす方法。 短時間加熱、局所加熱が可能であるが、高真空中で行う必要がある。
赤外線（光） ろう付	赤外線ランプやハロゲンランプを用いてろう付する方法。 反射鏡で集光して使用する。
レーザろう付	YAG レーザ、半導体レーザ等を用いてろう付する方法。 電子部品、素子等のはんだ付、ろう付に使用される。
超音波ろう付	超音波振動により母材表面の酸化物を物理的に破壊してろう付しやすくする方法で、アルミニウムの接合などに使用されている。
拡散ろう付	ろう材中の元素（ホウ素など）を母材に拡散させてろう付する方法。 ろう材の融点が上昇する特徴を持ち、耐熱合金のろう付に利用される。
ディップ ろう付	熔融したろう材または化学薬品の浴槽中で行う方法。 後者にはブレイジングシートで組み立てた母材を熔融塩中に浸漬してろう付する方法などがある。

2. 各種ろう付方法

表 1 に示すろう付方法の中から、主要なものについて以下に詳説する³⁾。

2.1 トーチろう付

トーチろう付はガスバーナーを用いて部材を加熱し、ろう材を溶かす方法である。図 1 に実際の様子を示す。銀ろう付、りん銅ろう付、黄銅ろう付、アルミニウムろう付などに幅広く利用されている。加熱には、青色の内炎先端部の還元炎を用いる。アセチレン-酸素ガスをを用いる場合、アセチレン：酸素の比は 2:1～1.2 : 1 の間が好ましい。工程上で高速化や均一な加熱が必要な場合は、複数トーチによる加熱が推奨される。加熱の際は、材料が過熱されないようにトーチを動かすようにする。

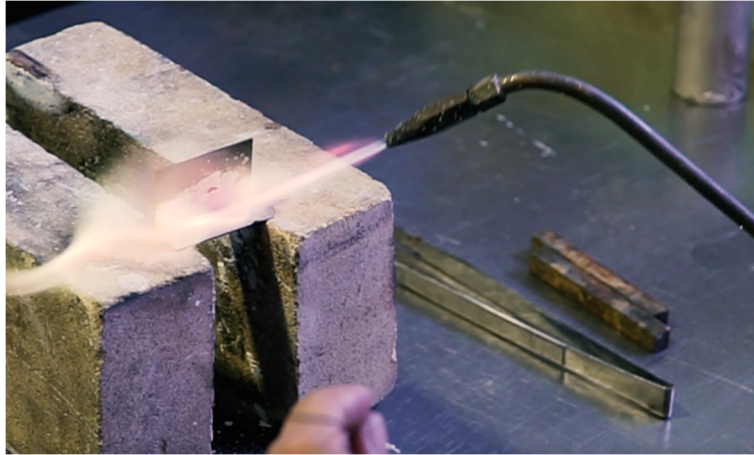


図1 トーチろう付の例

アセチレンガスは火力が強いため、使用に際しては過熱しないように特に注意が必要となる。MPSガス（メチルアセチレン-プロパジエン混合ガス）はアセチレンよりも加熱が穏やかとなるため、加熱制御が容易となる。この場合、通常の火炎よりも酸素ガスを約2倍消費する点に注意が必要である³⁾。

長所としては以下の点が挙げられる¹⁾。

- ・加熱設備が単純安価で手軽に利用可能
- ・持ち運びが容易、現場作業に好適
- ・鉄系／非鉄系のほとんどの金属材料に利用可能
- ・部分加熱可能
- ・差しろう付や置きろう付など、様々なろう材供給方法を選択可能
- ・自動化にも対応可能

一方で、以下のような短所がある。

- ・対象物によっては熟練が必要
- ・温度管理が難しく、条件選定には勘と経験が必要
- ・大気中でのろう付となるため、フラックスが必須
- ・熱影響や熱ひずみ、母材の表面酸化が発生
- ・高温作業で火災の危険があり、作業環境に劣る

温度が適正值よりも低いとろうがぬれず、過熱してしまうと母材の酸化進行によりろうがぬれなくなる。また、ろうは高温部に流れる傾向があるため、接合部以外への流出が発生し、外観不良やろう付け不良につながるため、注意が必要である。

トーチろう付のポイントは、ろう付部の温度が均一となるように双方の母材を予備加熱し、フラックスによる接合部の清浄化を経て適正温度に到達した段階でろう付を行い、毛細管現象により接合部全体にろうを完全に充填させることにある。フラックスには、スラリー状やガスに気化したフラックスを添加するガスフラックスなどがある。大量生産では、条件確立によりろう付の自動化を図ることが出来る。図2に回転テーブル式の自動トーチろう付装置の外観写真を示す。複数のバーナーを使用し、回転テーブル上に備えられた複数のステージで加熱を行い、効率的なろう付を実現する。



図2 回転テーブル式自動トーチろう付機

2.2 高周波ろう付

高周波ろう付は、高周波による誘導電流で部材を加熱してろう材を溶かす方法で、超硬合金の切削工具において最も一般的に利用されるろう付方法である。図3に、高周波ろう付装置の外観を示す。誘導加熱電源より送られる交流電流がコイルに流れると、コイル内に配置された被加熱物の周りに磁界を発生し、この磁場が被加熱物内に渦電流を誘導することによりコイルと被加熱物との物理的な接触なしに精密で局所的な熱を生成する。通常使用される周波数は1kHz～10MHz程度であるが、金属に対する加熱深度(電流の浸透深さ)は周波数の平方根に反比例する。即ち周波数が高いほど加熱深度は浅くなるため、表面層のみ加熱しやすい結果となる¹⁾。



図3 高周波ろう付装置

良好なろう付を得るためには、適切な形状とサイズの加熱コイルと周波数を選択することが最も重要である。コイルのサイズや形状(らせん状、丸型、角型等)、巻数は被加熱物の特性や形状、加熱する範囲等により異なり表2のように関連する³⁾。

表 2 高周波加熱に使用される加熱コイルの要素と被加熱物の関連³⁾

被加熱物	加熱コイル
材料の特性	直径
サイズと形状	形状
コイルの中での位置	巻数

高周波ろう付の工程は以下のとおりである。

- (1) 接合部材の加熱部分にフラックスを塗布する。
- (2) 接合部にろう材をセットする。
- (3) ろう材の上にさらにフラックスを塗布する。
- (4) 接合部材を加熱コイルに挿入する。
- (5) 加熱コイルに電流を印加し、所定の温度まで接合部材を誘導加熱し、ろう付を行う。必要に応じ、放射温度計等を用いて接合部材の温度測定を実施する。
- (6) ろう付温度以上に 5～10 秒程度加熱し、ろう材が溶融し流れた後に、加熱を停止し、冷却する。
- (7) 加熱コイルから接合部材を抜き取る。

2.3 炉中ろう付

炉中ろう付は、電気炉、ガス炉、真空炉内で部材を加熱し、ろう材を溶かす方法である。還元雰囲気、不活性ガス雰囲気などが使用される。炉中ろう付は特に大量生産品に適しており、ベルトタイプの連続炉や密閉タイプの真空炉が多用される。

ろう材をセットした接合部材を、炉内にてろう材溶融温度よりも 50～100℃程度高い温度まで加熱し、確実にぬれ拡がる条件にてろう付を行う⁴⁾。接合部材によって最適な加熱プロファイルが異なるため、試作による条件出しが特に重要となる。

図 4 に連続式水素炉の模式図を示す。接合部材は搬送用ベルトによって左側の入口から炉内に入り、加熱ゾーンで所定の温度まで昇温される。その後、冷却ゾーンで室温付近まで冷却され、出口にて取り出される。模式図の炉はハンプバック式(鞍型)と呼ばれる形状であり、雰囲気ガスはガス導入口から炉の入口／出口方向に流れる構造となっている。加熱ゾーンにて雰囲気ガスが膨張することで大気との比重差が発生して上方に留まろうとするため、雰囲気ガスの消費量抑制につながる。比重の軽い水素ガスを使用する際は特に有効である。昇温速度や保持時間・冷却速度については、炉内の設定温度やガス流量とともにベルトスピードの設定が主な制御要素となる。連続炉である特徴を生かし、大量生産に用いられる。

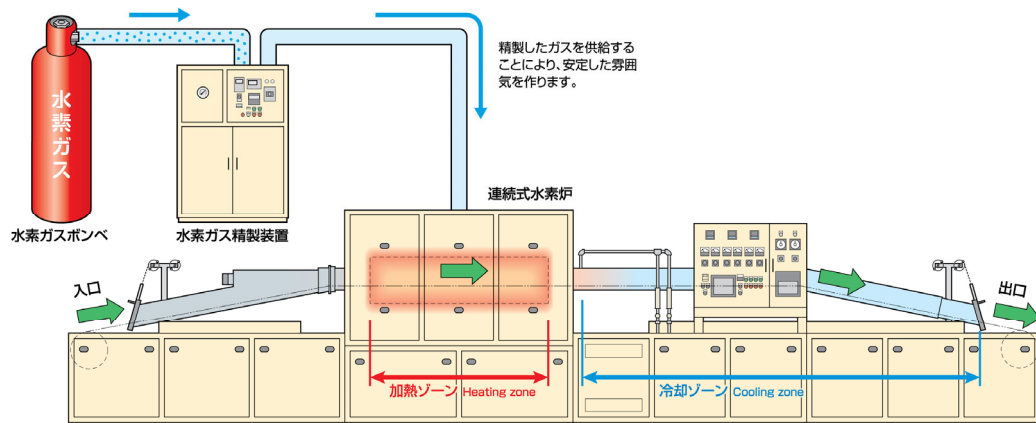


図 4 連続式水素炉の模式図

図 5 にバッチ式真空炉の外観写真を示す。加熱と冷却を同一のチャンバーで行い、ワーク挿入・取り出しは、チャンバーの前扉を開放して行う。構造がシンプルかつワークセットや取り出しが容易で、振動が加わることなく加熱冷却が可能となる。

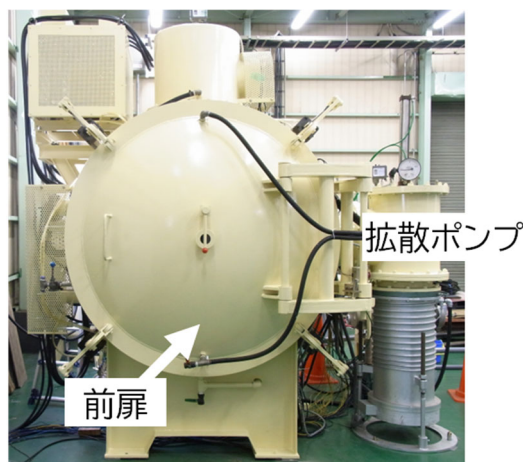


図 5 バッチ式真空炉外観

図 6 に多室式真空炉 (3 室式) の模式図を示す。真空加熱室の前後に予備排気室と冷却取出部が設けられており、メンテナンス時以外は真空加熱室が大気に曝されることがないため、残留酸素の少ない高品質な真空加熱が実現できる。ワークは入口から予備排気室に挿入され、所定の真空排気の後、真空加熱室に挿入される。加熱終了後、ワークは冷却室に移動し、一定温度まで冷却した後、炉外に取り出される。

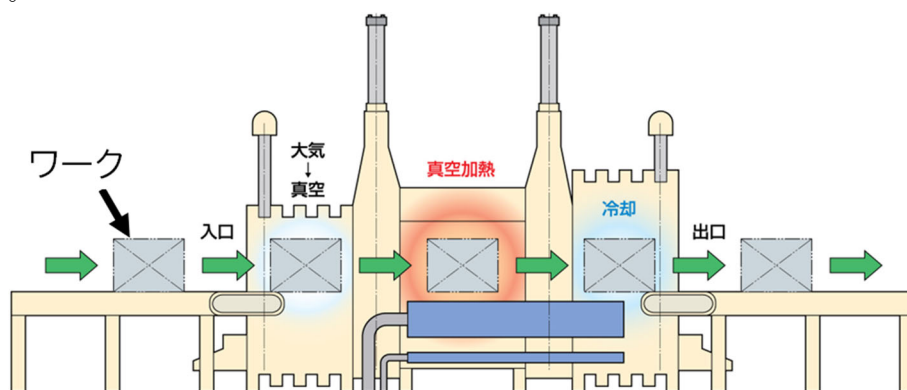


図 6 多室式真空炉 (3 室式) の模式図

多室式の場合は操業効率は高いものの、加熱開始から取り出しまでの温度履歴の記録が難しい。バッチ式の真空炉の場合、ワークセットや取り出し時に炉内が大気開放されるため真空排気に時間を要する一方、昇温～加熱～冷却までの温度履歴を各バッチごとに管理可能となる。そのため、必要に応じて真空炉の使い分けを図ることが重要である。

2.4 電子ビームろう付

電子ビームろう付は、真空中で高エネルギー密度の電子ビームを接合部材に照射し局所加熱することでろう材を熔融させる手法で、短時間加熱が可能である。そのため、ダイヤモンドや超硬合金をはじめとする長時間の加熱で劣化する母材に対する適用が可能となる特徴を持つ。加えて冷却速度を速くすることが可能なため、鉄鋼材料の組織変化を最低限に抑制することができる⁵⁾。

電子ビームは電磁コイルを用いて容易に集束したり平面方向に偏向したりすることが可能なため、加熱領域の微細制御が容易となる特徴を持つ。一方で真空中での加熱が必須であり、接合部材を収容する真空チャンバーや真空排気機器が必要となるなど、非常に高価なろう付法となる。実用的には、タービンブレードや航空宇宙部品などの特殊で付加価値の高い用途において使用されている⁵⁾。

2.5 レーザろう付

レーザーろう付は、YAG（イットリウム・アルミニウム・ガーネット）レーザーや半導体レーザーを光源に用い、接合部材にレーザー光を照射することでろう材を熔融させる手法である⁶⁾。レーザー光はレンズやミラー等の光学系を用いた反射、屈折、集光等が可能であり、局所的な短時間加熱が可能であるため、長時間の加熱での酸化が懸念される母材への適用が可能となる特徴を持つ。加えて冷却速度を速くすることが可能なため、鉄鋼材料の組織変化を最低限に抑制できる。このように、レーザーろう付は電子ビームろう付と共通する特徴を持ちつつ、加えて炉内での加熱を必要としないため大気中での使用も可能なことから、電子ビームろう付よりも広範囲に利用されている⁶⁾。レーザー光源の波長と被加熱材料の吸収率により加熱効率が異なるため、使用される材料に適したレーザー光源を選択することが重要となる。

また、光ファイバーを用いた伝送が可能なYAGレーザーや半導体レーザーを光源として使用する場合、レーザーヘッド部または照射部分を載せたステージを用いることでレーザーの照射位置を容易に制御できることから、1バッチで複数箇所の接合を行うことも可能である。加えて、高速動作するガルバノミラーを使用⁷⁾することで離れた位置から同時複数箇所のろう付を行うことも可能となる。

初期のレーザーろう付では鉄鋼材料に対する吸収率の低いCO₂レーザーが用いられていたため、kW級の光源が必要であったものの、最近ではYAGレーザーや半導体レーザーなどの吸収率の高いレーザーが実用化され、より低出力（数百W）でのろう付が可能となったことや、これら光源の低価格化が進んだことにより、普及が急速に進みつつある。

一般的なレーザーろう付における加熱時間や温度の制御は、レーザー出力と照射領域の移動速度で調整している。レーザーろう付の特徴を更に生かし、精密接合や熱影響で劣化が進行する母材のろう付を適切に行うためには、レーザー加熱をより正確に制御する必要がある。

この問題を解決するため、精密な温度制御が可能なレーザーろう付機の開発が進められている⁷⁾。図7に同装置の外観写真を示す。放射温度計により測定した母材温度を参照しレーザー照射をOn/Offするフィードバック制御により、ろう付温度付近における温度制御精度±10℃以内を実現している。

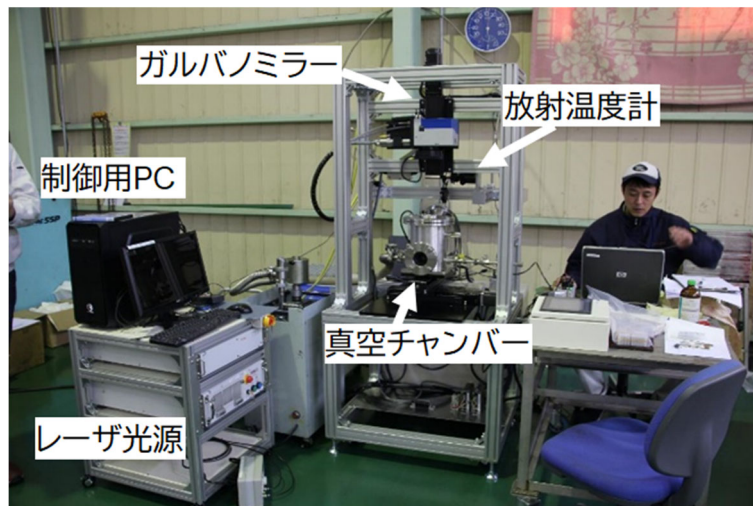


図7 精密な温度制御が可能なレーザーろう付装置（試作機）⁷⁾

3. 具体的な接合事例

3.1 トーチろう付

図8に、手動での純アルミニウム同士のトーチろう付を示す。Al-Si系ろう材ならびに塩化物系フラックスを使用している。アルミニウムのろう付の場合、ろう材と母材の融点の温度差が小さいため、過剰な入熱によって母材が溶融する可能性がある。そのため、温度管理には注意が必要である。また、ろうがぬれ拡がるには接合部材が均一に加熱されることが重要となる。そのためにはろう材を直接加熱せず、接合部材からの伝熱でろう材が溶融するように留意する。

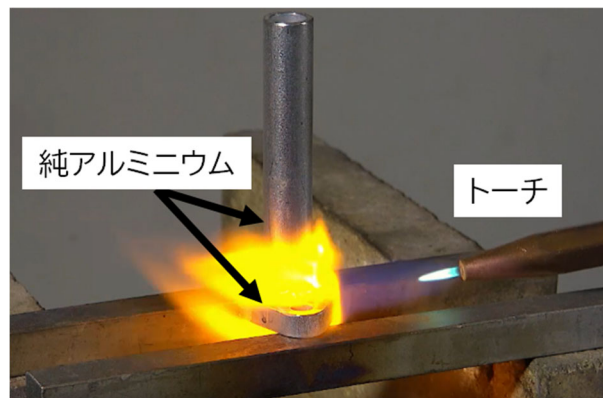


図8 アルミニウムのトーチろう付（手動）

3.2 高周波ろう付

図9に高周波ろう付中のドリルビットのろう付を示す⁸⁾。ドリルビットは鉄鋼材料のボディと超硬合金のビットで構成されており、ろう付部分を中心に接合部の上下が加熱されるように高周波コイルの位置を調整し、フラックスを使用してろう付を行う。コイル形状、電流値は、加熱部材ならびに形状に適したものを選定する。高周波コイル内部は中空となっており、水冷されている。このろう付では、加熱中のフラックスが気化し揺らめいている様子が確認できる。鉄鋼材料下部が赤熱していないことから、ろう付部周辺のみ局所加熱されていることがわかる。

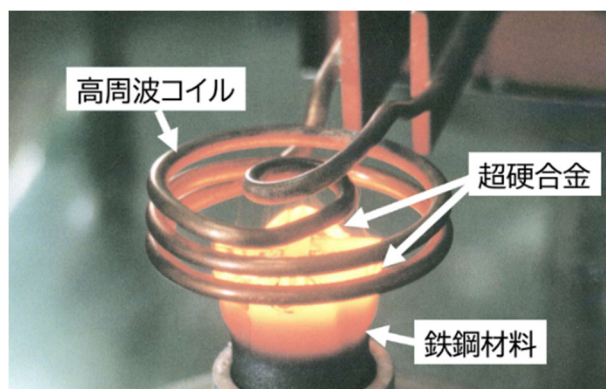


図9 ドリルビットの高周波ろう付⁸⁾

3.3 炉中ろう付

図10に、連続式水素炉を使用したタイヤチェーン用スパイクピン（スタッド）の事例を示す⁸⁾。円筒形状の超硬合金の中心部の空間に球状の銅ろう材をセットし、円柱形状の鉄鋼材料（鍛造品）端面との間にろう材をぬれ拡がらせて超硬合金とろう付している。連続式水素炉による還元雰囲気を用いるとともに、ろう材のぬれ性を改善するため超硬合金側にNiめっきを施した後にろう付している。還元性ガスである水素雰囲気にてろう付しているため、フラックスは使用していない。

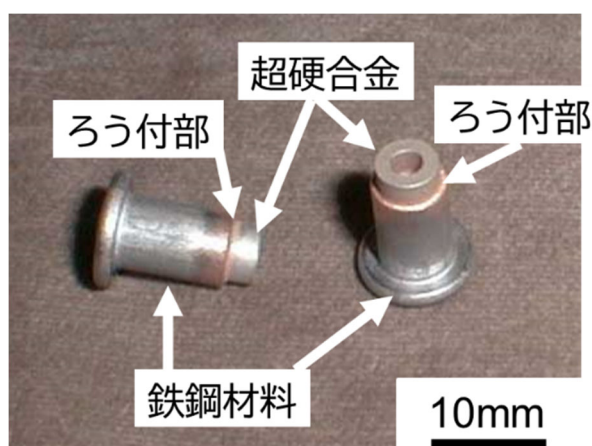


図10 タイヤチェーン用スパイクピンの事例⁸⁾

図11に、バッチ式真空炉を使用した地面掘削用ドリルの事例を示す⁸⁾。円筒形状の鉄鋼材料（鋳造品）端面に超硬合金がろう付されている。ろう材にはBAg-21とCu板のサンドイッチろうを用い、ろう材中のCu層の存在により、ドリル使用時に生じる衝撃をろう付部で吸収する構造となっている。ろう材のぬれ性を改善するため、超硬合金側にNiめっきを施した後にバッチ型真空炉にて真空ろう付している。真空ろう付のため、フラックスは使用していない。

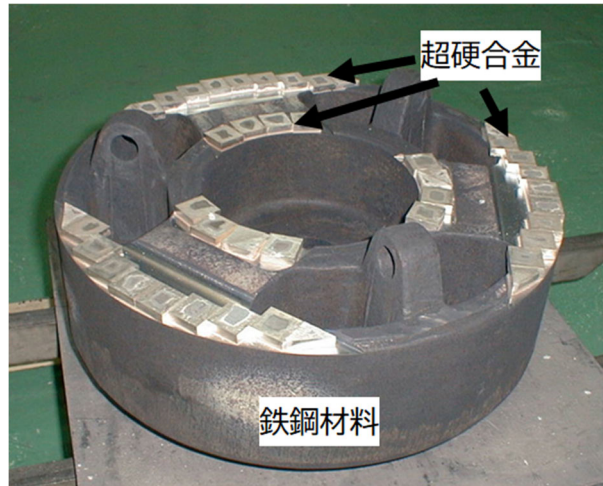


図 11 地面掘削用ドリルの事例⁸⁾

図 12 に、連続式 Ar 炉を使用したセラミックス (c-BN) と金属 (超硬合金) の接合事例を示す。ろう材には Ti を含有する活性銀ろう材 (Ag-Cu-Ti) を使用しており、不活性ガス雰囲気にてろう付している。ろう材に含まれる Ti が加熱時にセラミックスと反応し、TiN の界面反応層を形成することでセラミックスの表面改質がろう付と同時に行われる¹⁾。そのため、セラミックスとろう材がぬれるようになり、良好なろう付を実現している。

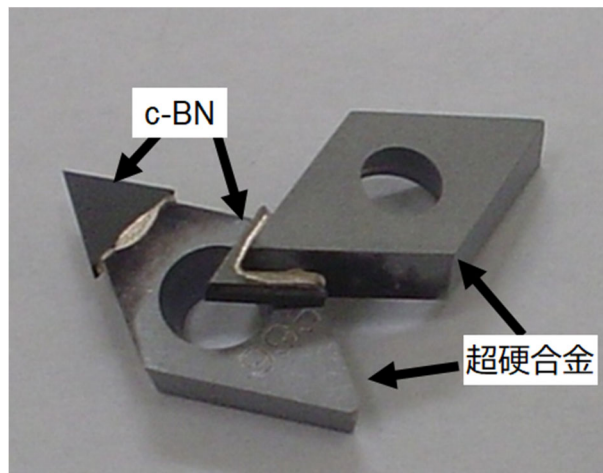


図 12 セラミックスと金属の接合事例 (c-BN / 超硬合金、連続式 Ar 炉使用)

Ti を含有する活性ろう材を使用する場合、水素ガス雰囲気は使用を避ける。これは Ti と水素の反応による水素化 Ti の生成や、Ti への水素吸収により、Ti が活性成分として作用しなくなるためである。窒素雰囲気の場合には、Ti と窒素が反応して TiN を形成し、同様に活性成分としての効果が低減してしまう。活性ろうを使用する場合、Ar 雰囲気もしくは真空中でのろう付が一般的である。

3.4 レーザろう付

図 13 に多結晶ダイヤモンドと超硬合金のレーザろう付装置を使用した接合事例を示す⁷⁾。ろう材にはペースト状の活性ろう材 (Ag-Cu-In-Ti) を使用し、バインダーの乾燥を十分に施してからろう付を行っている。チャンバー内を 1.5 Pa まで真空排気した後、Ar キャリアガスを導入することで残留

酸素の低減を図っている。チャンバー内の圧力を $1.5 \times 10^3 \text{ Pa}$ にコントロールした状態で超合金部分をレーザー照射し、780 °Cで5～60秒の保持を行い、ろう付を行っている。

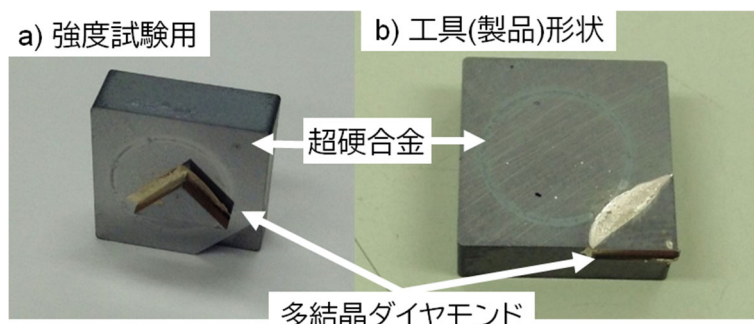


図 13 多結晶ダイヤモンドと超合金の接合事例（レーザーろう付装置使用）⁷⁾

通常の炉中ろう付と比べて短時間でのろう付を実現しており、また、ガルバノスキャナを利用することで任意の形状にレーザー照射可能となっている。著しい酸化や明らかなろう流れ不具合などの無い、良好なろう付が得られている。

4. おわりに

以上に示したように、ろう付は産業界の多種多様な分野で使用されており、ものづくりの根幹を支える重要な技術である。特に近年のマルチマテリアル化の進展に伴う異種材料接合のニーズに対し、ろう付はその特徴を活かし、部材の高機能化に寄与できる。これまで利用されてきた構造材料の接合だけでなく、セラミックス／金属の放熱基板をはじめとする自動車の電動化や鉄道・産業分野での需要も高まっている。従来の枠を超えた幅広いろう付の利用法も期待されている。

ろう付は「古くて新しい技術」と表現されることも多い。これまで培ってきたろう付技術の利活用が世の中に貢献するとともに、新たなろう付の技術開発が同分野の更なる発展につながることを期待したい。

参考文献

- 1) 恩澤忠男, 松 忠男: 「はじめてのろう付」, 産報出版 (2013)
- 2) 日本規格協会編: JISに基づく機械システム設計便覧, 日本規格協会 (1986)
- 3) AWS Technical Activities Committee: Brazing Handbook 5th Edition, American Welding Society (1991)
- 4) Handy & Harman: The Brazing Book, Wisconsin, Handy & Harman, (1998)
- 5) J. Felba, K. P. Friedel, P. Krull, I. L. Pobol, H. Wohlfahrt: Electron beam activated brazing of cubic boron nitride to tungsten carbide cutting tools, Vacuum, Vol.62, (2001) p.171-180.
- 6) C. E. Witherell, T. J. Ramos: Laser brazing, Welding Journal, Vol.59, No.10, (1980) p.267.S-277.S.
- 7) 松 康太郎, 石 康道, 瀬知啓久: 「精密な温度制御可能なレーザーろう付装置の開発」, ぶれいず, 第 51 巻, 122 号 (2017) p.15-19.
- 8) 瀬知啓久: 「超合金と鉄鋼材料のろう付」, 溶接技術, 2023 年 6 月号 (2023) p.55-62.

<略歴>

瀬 知 啓 久 (せち よしひさ)

1997年 大阪大学 大学院 工学研究科 材料物性工学専攻 博士前期課程修了
2001年-2022年 鹿児島県工業技術センター (素材開発部、企画支援部、生産技術部)
2005年-2021年 大阪大学接合科学研究所 共同研究員
2011年 大阪大学 大学院 工学研究科 博士後期課程 マテリアル生産科学専攻
にて博士(工学) 取得
2022年 東京ブレイズ株式会社 技術課 主席研究員
2023年 同 営業技術部 主席研究員
現在に至る