

精密な温度制御可能なレーザーろう付機の開発

東京ブレイズ株式会社 松 康太郎、石 康道
鹿児島県工業技術センター 瀬知 啓久

1. はじめに

ろう付法は、接合する部材(母材)よりも融点の低い合金(ろう)を溶かして接合材として用いることにより、母材を溶融することなく、複数の部材を接合させる方法である。この手法は、他の方法では接合困難な材料や形状に適し、機械的締結よりも高精度な接合が可能である特徴を持つ¹⁾。そのため、一般消費財、自動車、電子部品、化学工業から航空宇宙機器にいたるまで、いたるところで金属同士または金属と非金属の接合に用いられる極めて重要な接合技術である。

そのろう付法の特徴として、ろう付作業は必ず加熱を伴うことがあげられ、その加熱には様々な手法と装置が用いられる。ろう付の加熱方法を大別すると、トーチや高周波誘導加熱などフラックスを用いて行う大気ろう付と、真空や各種雰囲気ガス中で加熱する炉中ろう付に分けることが出来る。大気ろう付は部材を部分的に加熱する場合に有効であり、一方の炉中ろう付は部材全体を加熱することで、一度に多数箇所の接合を行うのに適している。

一方、どちらの加熱方法にしても加熱された部材への熱影響は不可避であり、その熱影響で接合部の機械的性質が著しく損なわれてしまうことがしばしばある。そのため、ろう付においては加熱時間や温度を制御することは非常に重要な要素であるが、これまでのろう付法で十分に制御が行われてきたわけではない。特に短時間の加熱を制御し、適切なろう付を行うことは至難の業である。その問題を解決できる加熱方法の一つとして、最近ではレーザー加熱が注目されている。

2. レーザーろう付

レーザーの種類にはYAGレーザーに代表される固体レーザー、CO₂レーザーに代表される気体(ガス)レーザーの他、液体レーザーや半導体レーザー、ファイバーレーザーなどがあり、それらの特徴により様々な用途で使用されている。そして、レーザー発振器はその用途の広がりに伴い次第に価格が低下傾向にあるため、更にその応用の拡大が期待されている。

ろう付においても、レーザーを加熱源として用いるレーザーろう付が自動車業界ではすでに実用化されており、レーザー特有の特性から局所的な短時間加熱により接合部への入熱を最低限にコントロールすることで、歪の少ない異種金属同士の接合に成功している。しかし、レーザーろう付の適用事例は、自動車業界の他はほぼないのが現状であり、更にレーザーろう付における加熱時間や温度の制御は、レーザー出力とロボットによる加熱部分の移動速度で調整しているのみである。レーザーろう付の特徴を更に生かし、精密接合や熱影響に問題のあ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できるようにする必要がある。

そこで、著者らは被加熱体(母材)の測定温度値からレーザー加熱をフィードバック制

御することで、精密な温度制御が可能なレーザろう付機を開発し、実際にろう付を行った。

3. 温度制御可能なレーザろう付機の開発

開発したレーザろう付機の外観を写真 1 に示す。また、レーザろう付機の装置概要を図 1 に示す。今回開発したレーザろう付機は、非接触の温度計である放射温度計を備えており、任意の位置における被加熱物の温度測定データは本体制御コントロールユニットに入力され、制御 PC を経由して、ファンクションジェネレータ(パルス発生器)でレーザ照射のパルス出力制御を行うことでろう付温度の制御を実現している。このシステムにおいて安定した温度制御を可能にするためには、放射温度計の応答速度、レーザ発振器の応答速度及び本体コントロールユニットのシーケンサ演算速度が十分に速いものとする必要がある。本システムでは、これらすべての速度が数 msec 以内での動作が可能な仕様となっている。

ろう付を行う際の雰囲気は真空中、真空+Ar ガス及び Ar ガス中の条件で行えるよう、真空チャンバーが付属している。真空チャンバーの外観を写真 2 に示す。真空チャンバーは加熱中のその場観察及び動画記録を可能とする観察窓が備えられており、更に光学フィルターも設置可能となっている。レーザは試料の直上から照射される構造になっており、ガルバノスキャナによる任意図形の照射が可能となっている。

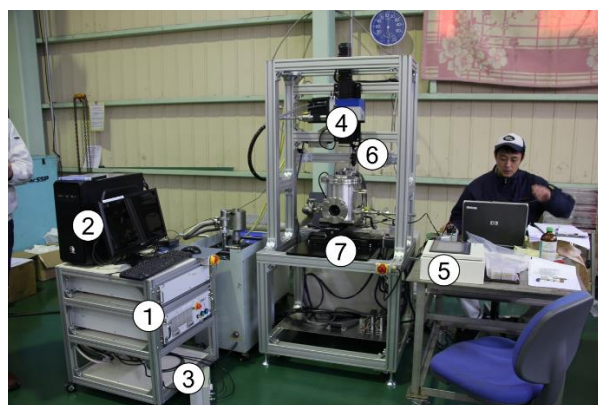


写真 1 開発したレーザろう付機の外観

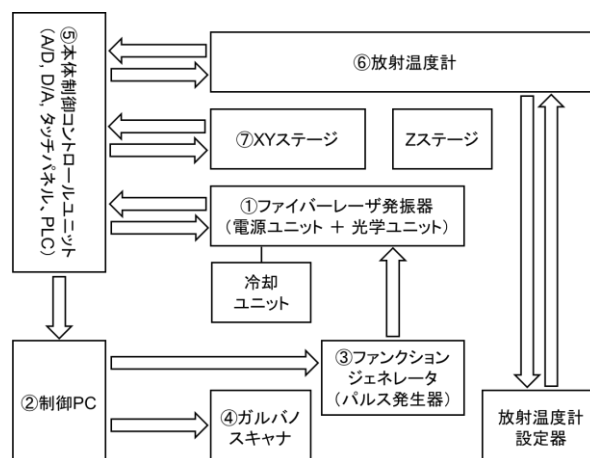


図 1 レーザろう付機装置概要

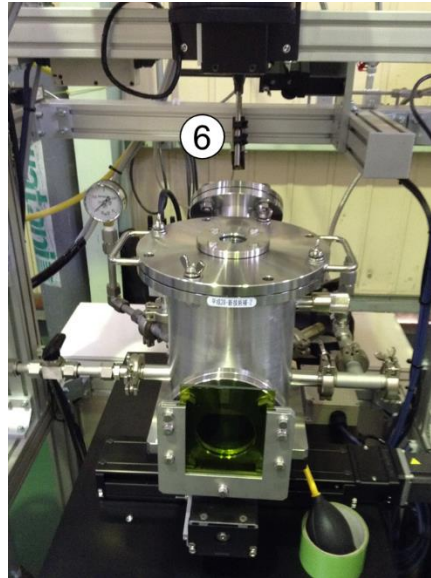


写真 2 真空チャンバーの外観

4. レーザろう付機によるろう付と接合部評価

開発したレーザろう付機を使用して実際にろう付を行い、ろう付性を評価した。供試材料としては、超硬合金 (ISO 使用分類 K10 相当材) と PCD (多結晶ダイヤモンド) を選択した。この組合せは高性能切削工具に適用されており、実際の製品は真空中や Ar ガス中において Ag ろう中に Ti を含有する活性金属ろうで製造されている。しかし、ダイヤモンドはろう付時の加熱条件によっては炭化するため、接合部に影響が出るばかりか切削工具としてダイヤモンド本来の性能を出せなくなってしまう問題がある。そこで、この精密な温度制御可能なレーザろう付機を評価するに当たり、超硬合金と PCD のろう付を行い、加熱時間を変化させることで接合状態の変化を調査した。

図 2 に試験片形状を示す。試験片は実際の製品を利用したため、切削工具のニアネットシェイプとなっている。PCD チップは、超硬合金が裏打ちされている一般的なものである。試験片作製においては、ろう付面が PCD となるようにした。これらの供試材はろう付前にアセトンで脱脂洗浄を行った。写真 3 にろう付した試験片を示す。

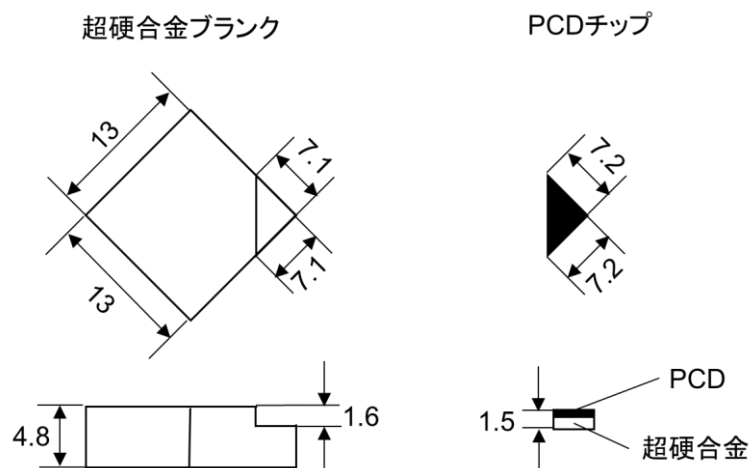


図 2 試験片形状

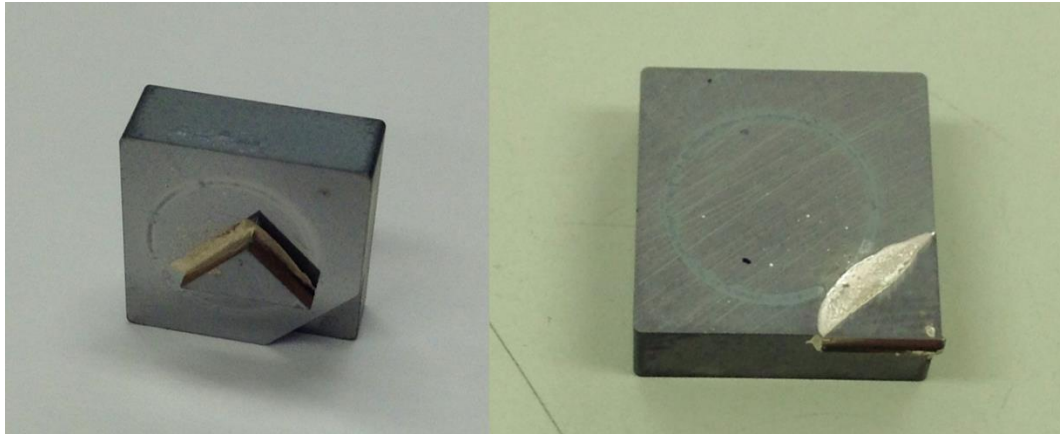


写真 3 ろう付試験片外観(左:強度試験・組織観察用、右:製品形状)

ろう材にはペースト状の TB-629T を使用した。TB-629T の化学成分と溶融温度範囲を表 1 に示す。チップ側接合部全面に一定量のろう材を塗布後、超硬合金にセットし、約 150℃でバインダーの乾燥を十分に施してからろう付を行った。

表 1 TB-629T の化学成分と溶融温度範囲

ろう材種	化学成分 (mass%)				溶融温度範囲 (°C)
	Ag	Cu	In	Ti	
TB-629T	60	24	14	2	620 ~ 720

ろう付試料の作製手順を以下に記す。チャンバー内を 1.5Pa まで真空排気した後、排気を継続した状態で高純度の Ar キャリアガスを導入し、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レーザ照射を開始した。ろう付温度は 780℃で一定とし、保持時間を 5sec、30sec、60sec と変化させた。ろう付温度付近での温度制御の精度は $\pm 10^\circ\text{C}$ 以内である。写真 4 にガイドレーザによるレーザ照射位置及び放射温度計の測定位置を示す。レーザ照射位置はガルバノスキャナで円形に描画し、500mm/sec の速度で移動させた。

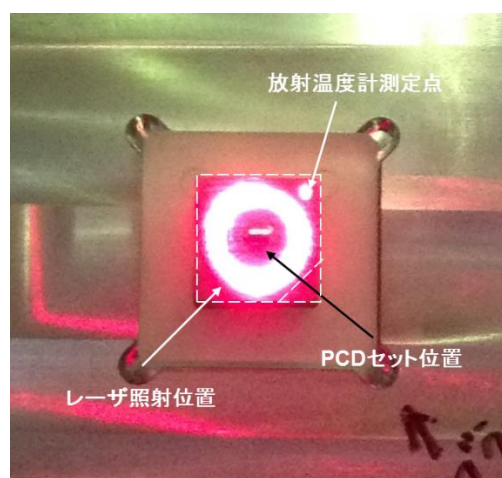


写真 4 ガイドレーザによるレーザ照射位置及び放射温度計の測定位置

レーザろう付による試験片作製の他、比較のため一般的に行われている真空炉による炉中ろう付試験片も作製した。ろう付条件を以下に記す。炉内を $1.0 \times 10^{-1} \text{Pa}$ まで真空排気後、排気を継続した状態で高純度の Ar キャリアガスを導入し、チャンバー内圧力を約 50Pa にコントロールした。ろう付温度はレーザろう付と同じ 780℃とし、保持時間を 600sec とした。ろう付温度付近における真空炉の温度制御精度は、 $\pm 10^\circ\text{C}$ 以内である。

試験片の作製において、全ての条件において著しい酸化や明らかなろう流れ不具合などの無い、きれいなフィレットを形成する良好なろう付を行うことが出来た。図3に各条件でろう付した試験片接合部の SEM 像を示す。ろう付後のろう材層厚さは、保持時間の経過に関わらず一定にはならなかった。供給したろう材量はある程度コントロールしたが、ろう付前の状態でのバラツキはあったと考えられる。また、レーザろう付・真空炉による炉中ろう付のいずれの場合においても、ろう材厚みのギャップコントロールは行っていない。これらの要因がろう材層厚さに影響したものと推測される。ろう材の凝固組織は、保持時間の増加に伴い粗大化していく傾向が見られた。

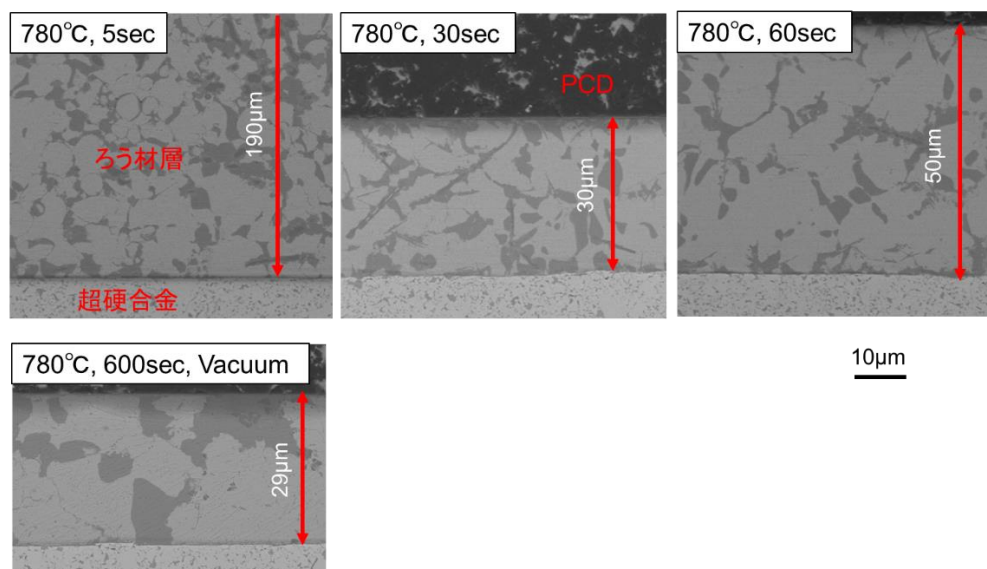


図3 各条件でろう付した試験片接合部の組織

ろう付保持時間と接合部のせん断強度の関係を図4に示す。レーザろう付で接合した場合、保持時間が 5sec の場合 184MPa と最高強度を示し、ろう付時間が長くなるに従い接合部の強度は低下した。更に真空ろう付でろう付時間が 600sec と長くなると、ろう付強度は 107MPa まで低下した。

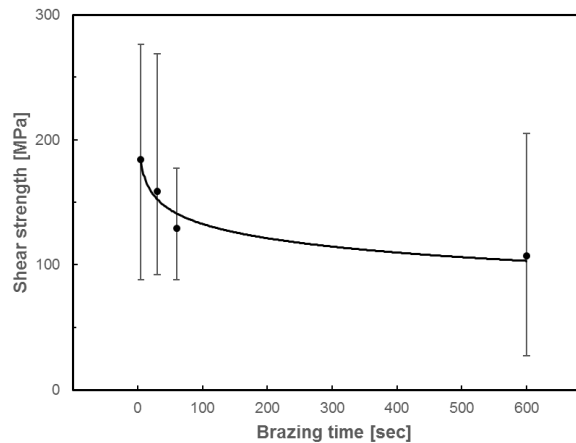


図 4 ろう付保持時間とせん断強度の関係

各ろう付条件における試験片のせん断試験後の代表的な破断面外観写真を、図 5 に示す。目視観察の結果、せん断試験後の破断位置は全て超硬合金側の界面で発生していた。破断面組織の外観観察から、レーザろう付においてろう付保持時間の増加に伴い、破断は灰色の層で発生していることが明瞭になっている。この灰色の層は TiC の化合物層であると推測され、ろう材中の Ti と超硬合金中の C が反応して形成される界面反応層であると考えられる。この破断面の組織に関しては、今後詳細な調査を行う。

一方で、真空炉でろう付した試験片の破断面は複雑な形状を呈しており、光沢のある金属面と TiC の化合物層である灰色の層が混在している。PCD チップ側の外観観察から、チップに亀裂が確認された。真空炉を用いた炉中ろう付はろう付保持時間がレーザろう付の場合と比較して著しく長いため、PCD の一部で炭化が進行し、接合強度が低下したものと推測される。

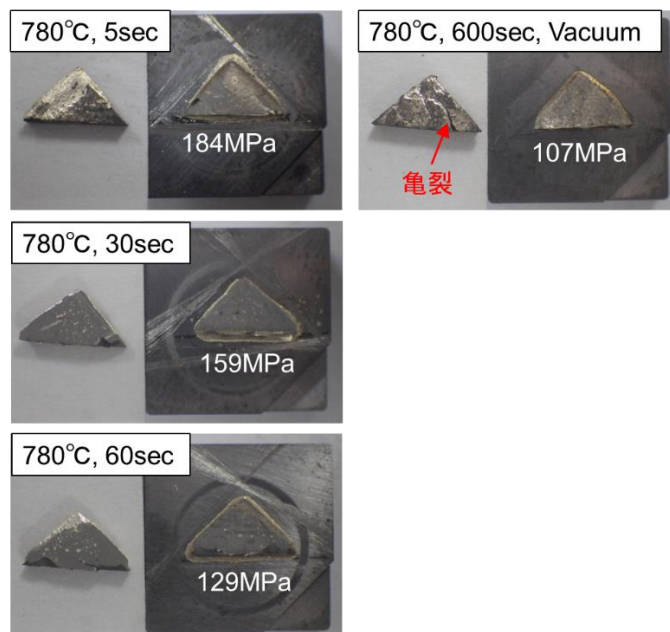


図 5 試験片のせん断試験後の代表的な破断面

PCD 側接合界面における Ti の挙動を詳細に調査するため、EPMA による断面元素分析を行った。図 6 に、各ろう付条件における接合界面の SEM 像と Ti および C の面分析結果を示す。ダイヤモンドと超硬合金を活性金属ろうでろう付すると、ろう材層界面には TiC の化合物層がサブミクロンサイズで層状に形成されることが報告されている²⁾。今回の結果では、ろう付保持時間 5sec における化合物層の厚さは非常に薄く、検出強度も低かったものの、保持時間が 30sec、60sec と増加するに従い徐々に Ti が明瞭に検出された。C の分布状況も踏まえると、いずれの保持時間の場合でも、接合界面での TiC の形成が推察される。せん断試験時の破断が、いずれのレーザろう付試料においても PCD 側の界面ではなく超硬合金側で発生していたことから、ろう材とダイヤモンドの界面で TiC の化合物層が形成する時間は非常に短く、極短時間で形成される TiC の化合物層は非常に強固であることが判明した。

一方、真空炉でろう付した場合の接合界面にも Ti が明瞭に検出されているものの、TiC の化合物層が著しく成長しているわけではない。これはもともとろう材中に含有していた Ti が十分に PCD 中の C と反応し、化合物層を形成後、TiC のろう材側に Cu-Ti 層を形成したためと考えられる²⁾。接合強度の低下については、これら化合物層の成長に加え、長時間の加熱による PCD への熱影響も関与したものと考えられる。

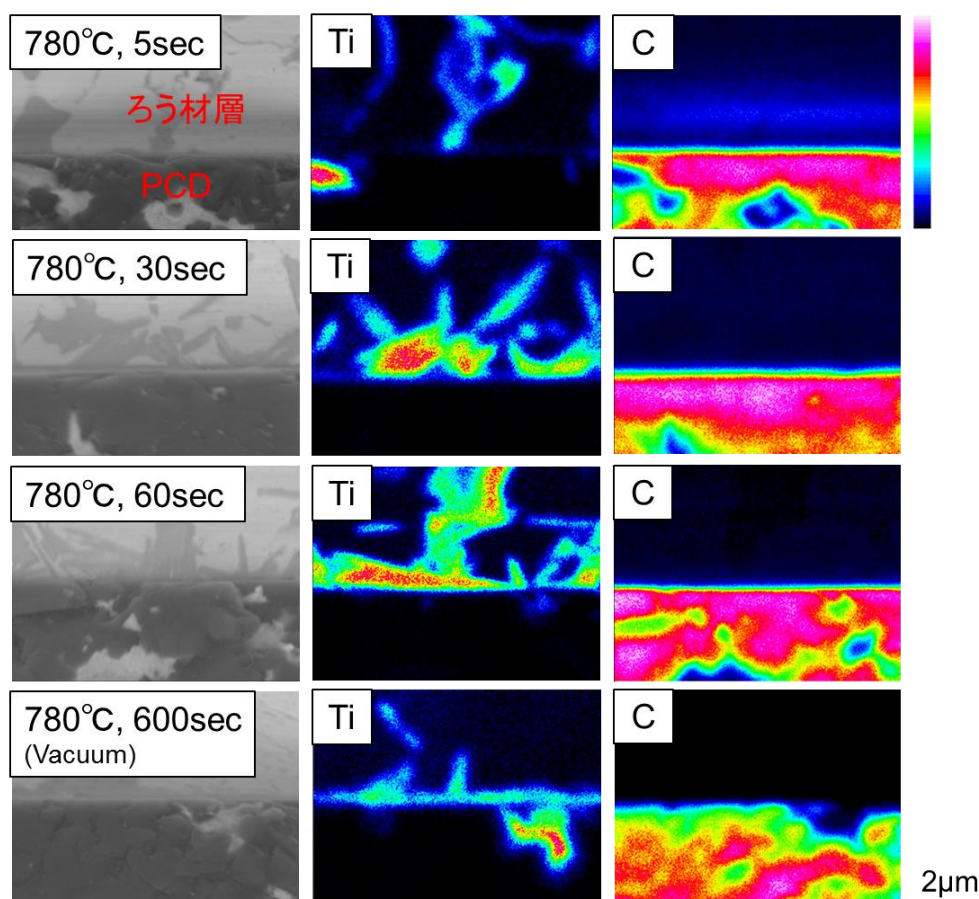


図 6 各ろう付条件における接合界面の断面元素分析結果

上述のように、開発したレーザろう付機によって精密な温度管理を行いつつ、極短時間のろう付保持時間で試験片を作製し、その強度に与える影響を観察することに成功した。ろう付保持時間が5secの場合でも十分に接合を実現できることが判明し、活性金属ろうの接合部界面の反応は、非常に速いことが確認された。

5. まとめと今後の展望

精密に温度制御可能なレーザろう付機を開発し、実際にろう付を行って接合部の評価を行ったところ、接合部の界面反応制御に優れたろう付を行えることが確認できた。更に従来のレーザ加熱とは異なり、温度の精密制御が可能なことから、熱影響の大きい部材に対しての入熱コントロール実現の可能性も示唆することが出来た。

今後は更にデータの蓄積と調査を進め、様々な母材の加熱と入熱制御を可能とすることで、これまで出来なかったろう付の挑戦を進めていく。

6. 謝辞

本研究は、「平成 28 年度埼玉県新技術・製品化開発費補助金(新エネルギー分野)」事業の一環として行われた。ここに謝意を表する。

1) 瀬知啓久, 永塚公彬, 中田一博, ぶれいず 第 50 巻 121 号、9-15

2) Y. Sechi and K. Nakata: Transactions of JWRI, Vol.39, No.2, (2010), pp340-342.