

レーザ溶接した Ti 合金積層造形体の 機械的特性改善のためのレーザ熱処理*

園田 哲也**、黒須 信吾**、佐々木 龍徳***

金属積層造形により作製したチタン合金 (Ti-6Al-4V) のレーザ溶接と溶接部の延性改善を目的としたレーザ熱処理について検討を行った。レーザ溶接については、溶接条件の最適化により、母材強度以上の接合強度が得られた一方、曲げ試験においては溶接部の延性低下による破断を確認した。対策として溶接部に対し局所的なレーザ熱処理を行った結果、極めて短時間の熱処理で接合部の延性が改善することを明らかにした。

キーワード：レーザ溶接、レーザ熱処理、金属積層造形、チタン合金

Laser Heat Treatment to Improve Mechanical Properties of Laser Welded Titanium Alloy Produced by Additive Manufacturing

SONODA Tetsuya, KUROSU Shingo, SASAKI Tatsunori

Key words: laser welding, laser heat treatment, additive manufacturing, titanium alloy

1 緒言

Ti 合金は、高比強度、耐熱性、耐食性に優れ、航空機産業を始めとする高付加価値工業製品に多く使用されているが、原材料が高く難削材であることや、活性金属であり酸素との反応性が極めて高いというデメリットがある。一方で、これらのデメリットは金属積層造形 (以下、AM) のメリットである、ニアネットシェイプや造形時の雰囲気制御の容易さという点で相性がよく、この合金の AM に関する研究が盛んに行われている。AM の造形サイズは、造形方式により制限があり、例えば AM の代表的な造形方式のひとつであるパウダーベッド方式は、粉末を敷き詰めたテーブルの範囲内で造形を行うため、造形サイズに限界がある。このような中で大型部材への適応を考えた場合、AM 造形品の接合が必要である。このことにより AM 材同士以外にも、汎用部材との組み合わせや、マルチマテリアル化への対応等についての検討も重要な課題である。このような背景から本研究では金属積層造形により作製したチタン合金 (Ti-6Al-4V) のレーザ溶接について検討を行うと共に、溶接部の機械的特性の改善を目的としたレーザによる溶接後熱処理の検討を行った。

2 実験方法

2-1 レーザ溶接及びレーザ熱処理

供試材は、電子ビーム積層造形装置で作製した板厚 2 mm の Ti-6Al-4V を用い、開先面を研削加工し、突合せ溶接にて接合体を作製した。レーザ溶接は、最大出力 6 kW

の半導体レーザ (Laserline 社) 発信器を用い、出力 2.5 kW、溶接速度 2.0 m/min、溶接長約 90 mm で行った。一般にチタン材料は 400°C~500°C の比較的低温域でも容易に酸化し、機械的特性の低下に繋がるため、溶接中に大気から溶接部を完全にシールドすることが重要となる²⁾³⁾。本研究では、レーザ同軸方向からシールドガスを供給するための独自の円錐ノズルを作製し使用した。シールドガスは Ar を使用し、流量は同軸方向 30 L/min、アフターシールド 50 L/min、バックシールド 50 L/min とした。溶接の後、溶接部の機械的特性の改善を目的に、溶接後熱処理としてレーザ熱処理を行った。最大出力 3 kW の半導体レーザ (Laserline 社) 発信器を用い、ビームホモジナイザーにより 28 mm×7 mm の矩形均一強度ビームを作製し、Ar ガスシールド BOX 内に設置した試験材の溶接ビードに対しガラス越しに処理を行った。熱処理温度は、2 色式パイロメータによりレーザ同軸上の材料表面温度を測定すると同時に、所定の温度となるよう出力フィードバックを行った。レーザ熱処理の概略図を図 1 に示す。熱処理前後の接合部の評価は、組織観察、引張試験、曲げ試験、EBSD、マイクロビッカース硬さ測定により行った。

2-2 電気炉による熱処理

短時間の溶接後熱処理による金属組織及び硬さの変化を調べることを目的に、電気炉による熱処理を行った。熱処理用の試験材は、板厚 3 mm の Ti-6Al-4V 電子ビーム積層造形材にビードオン溶接を行い、図 2 に示すよう

* 令和 5 年度技術シーズ創生・発展研究事業 (発展研究)

** 素形材プロセス技術部

*** 素形材プロセス技術部 (現: DX 推進特命部)

に、溶接部を中心に 5 mm×18 mm のサイズに切り出し作製した。熱処理条件を表 1 に示す。昇温速度は 20°C/min とし、真空雰囲気下で所定の保持時間に到達後、炉冷し、組織観察、マイクロビッカース硬さ測定を行った。

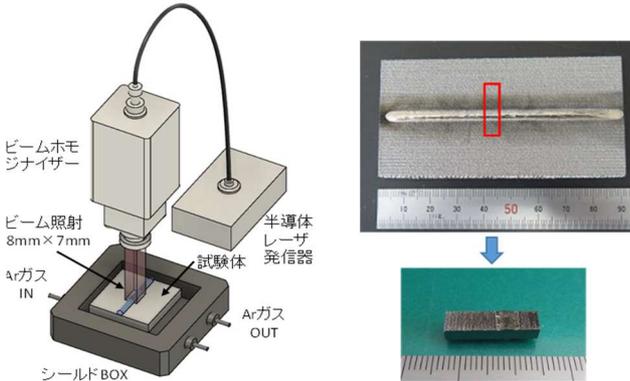


図1 レーザ熱処理概略図 図2 電気炉熱処理試験片

表 1 電気炉熱処理条件

熱処理温度	保持時間(min)			
	1	5	10	30
600°C	1	5	10	30
700°C	1	5	10	30
800°C	1	5	10	30

3 結果及び考察

3-1 レーザ溶接接合部の組織と機械的特性

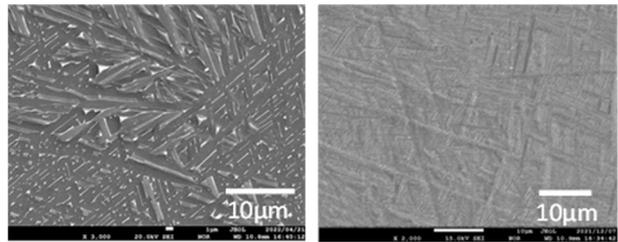
表 2 に、AM 母材及び、AM レーザ溶接材の引張試験及び曲げ試験結果を示す。JIS 規格値、引張強さ 895 MPa 以上、伸び 10% 以上に対し、AM 母材においては両規格値ともに満足し、曲げ試験も良好な結果であったのに対し、レーザ溶接材については、伸びが 4.5% と規格値を大きく下回り、曲げ試験では破断する結果となり、溶接部の著しい延性低下を確認した。

表 2 引張試験及び曲げ試験結果

試験片	積層造形体(母材)	積層造形体レーザ溶接材
引張強度(MPa)	1071	1147(母材破断)
伸び(%)	13	4.5
曲げ試験結果		

図 3 に AM 母材及び、AM レーザ溶接部の断面組織観察結果を示す。母材の組織には、針状の α 相とその粒界に明コントラストの部位が点在していることがわかる。EPMA 分析の結果、この部位は β 安定化元素であるバナジウムの濃化部であることを確認したことから、 α 相と β

相が混在した組織となっている。一方で、溶接部の組織にはバナジウムの濃化部は確認できず、針状の α 相と微細な α' マルテンサイト相で形成された組織である。このことからレーザ溶接部の延性低下は、 β 相の消失と、 α' マルテンサイト相の形成が要因であることが示唆された。



(a) AM 母材 (b) AM レーザ溶接部

図 3 AM 母材と AM レーザ溶接部の断面組織

3-2 電気炉での短時間溶接後熱処理による変化

熱処理した溶接金属断面の組織写真を図 4 に、マイクロビッカース硬さ測定結果を図 5 にそれぞれ示す。

Ti-6Al-4V の金属積層造形材の熱処理について、 β トランザス以下の温度での有効性が示されていることから⁴⁾、熱処理温度を 600°C、700°C、800°C とした。熱処理温度 600°C における、1 分、5 分、10 分の保持時間の違いによる目立った組織変化は認められず、熱処理前の組織とほぼ同様の組織であるが、保持時間 30 分の組織写真では、母材組織と同様のバナジウム濃化部が認められる。一方、熱処理温度 700°C、800°C の組織を見ると、1 分の処理時間でバナジウム濃化部位 (β 相) が生成されており、極めて短時間の熱処理で、母材と類似した組織に変化することが示された。

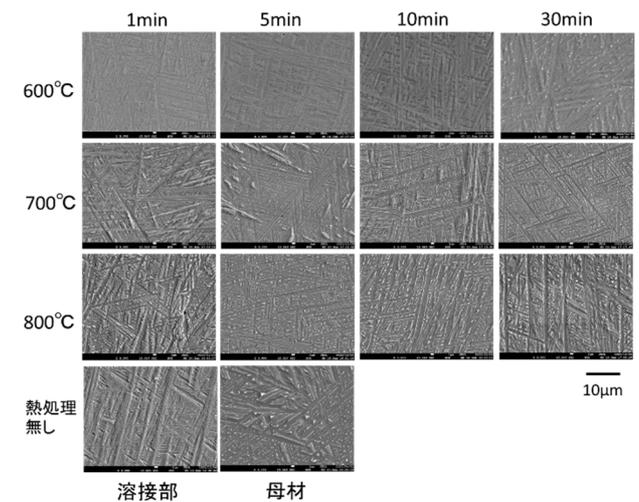


図 4 各熱処理条件における溶接部断面組織

次に、熱処理による硬さの変化に着目すると、熱処理温度 600°C では、保持時間の増加に伴う硬さの変化はほとんど見られないが、700°C、800°C の処理温度では、1 分の保持時間で硬さが低下し、保持時間の増加に伴いそれぞれ硬さが低下する傾向が見られた。Ti-6Al-4V 材の短時間の時効処理において、比較的高温になると析出した針状・相の粗大化により、硬さが低下するという報告がある⁹⁾。本研究でも同様の理由により硬さが低下したものと考えられる。

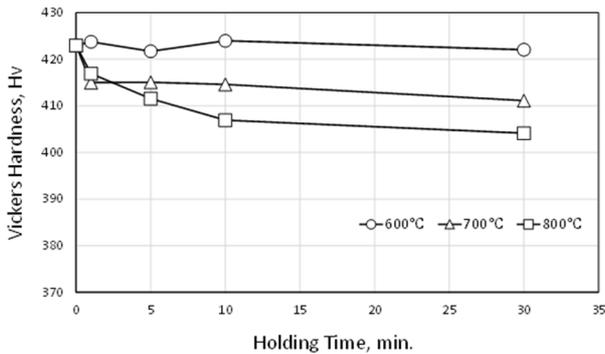


図5 各熱処理条件とマイクロビッカース硬さ

3-3 レーザ熱処理による機械的特性の改善

レーザ熱処理は、レーザ照射部だけに局所的な熱処理が可能であること、昇温・冷却速度が極めて速いことが大きな特徴である。図6に熱処理温度 800°C、照射時間 1 分の設定における、試験片表面温度測定データを示す。放射温度計による測定のため 550°C 以上の温度からの測定値となっているが、レーザ照射開始直後瞬時に所定の温度に到達していることがわかる。

AM 溶接材のレーザ照射時間に対する伸びと硬さの変化を図7に示す。伸びと硬さどちらの結果においても照射時間 1 分で値が大きく変化し、その後緩やかな変化に変わり、伸びは回復し、硬さは低下傾向を示している。伸びに着目すると、溶接したままの状態では、5%台であった数値が、僅か 1 分間の熱処理で 10%を超える値にまで大幅に回復している。処理温度については、700°C に比べ 800°C の方が、伸び、硬さ共に変化量が大きく、後

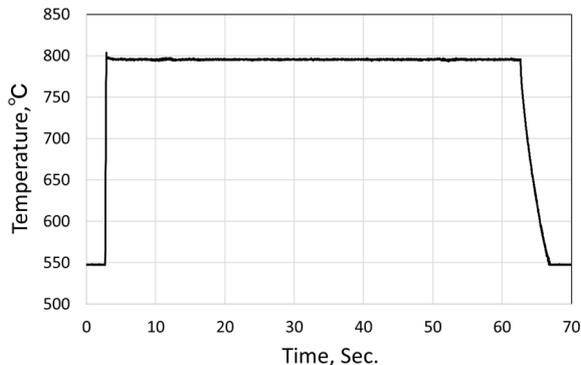


図6 レーザ熱処理による試験材表面温度測定

熱処理の効果が大きいことがわかった。これらの試験材に対し曲げ試験を実施した結果を図8に示す。レーザ熱処理を行った試験材は全て破断せず曲がり、溶接したままの試験材のみ破断する結果となった。これは熱処理による伸びの回復結果とよい一致を示しており、短時間のレーザ熱処理により、曲げ特性が改善されることを確認した。

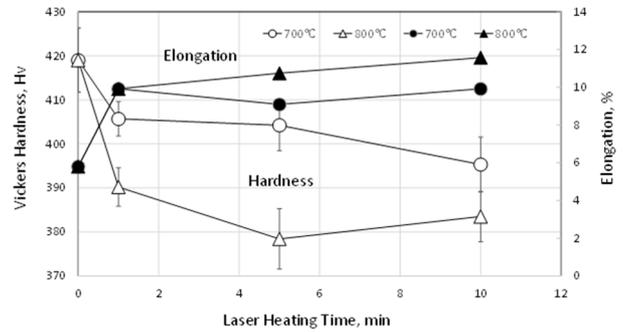


図7 レーザ熱処理品の伸び及び硬さ測定結果



700°C ①1分, ②5分, ③10分
800°C ④1分, ⑤5分, ⑥10分
熱処理無し⑦

図8 レーザ熱処理品の曲げ試験結果

3-4 レーザ熱処理による機械的特性の改善

図9に各試験材断面の反射電子線像と、バナジウムの特異 X 線像を示す。図4に示した通り電気炉での熱処理では、800°C 保持時間 1 分で、バナジウム濃化相の形成が確認されたが、レーザ熱処理の場合は、1 分の保持時間では、熱処理無しの組織とほとんど差異が見られず、保持時間 5 分で一部濃化相、10 分の保持時間で、組織全体に濃化相が形成されている。電気炉加熱は、レーザ加熱と比較すると昇温速度が非常に遅い。瞬間的に表面温度が 800°C に到達するレーザ加熱に比べ、今回は 20°C/min の昇温速度で加熱を行っているため、700°C から 800°C への昇温に 5 分程要し、その分多く入熱が材料に投入されるため、このような差異が生じたと考えられる。

一方で、曲げ試験においては保持時間 1 分の試験材も破断せず良好な曲げ特性が得られたことから、組織変化

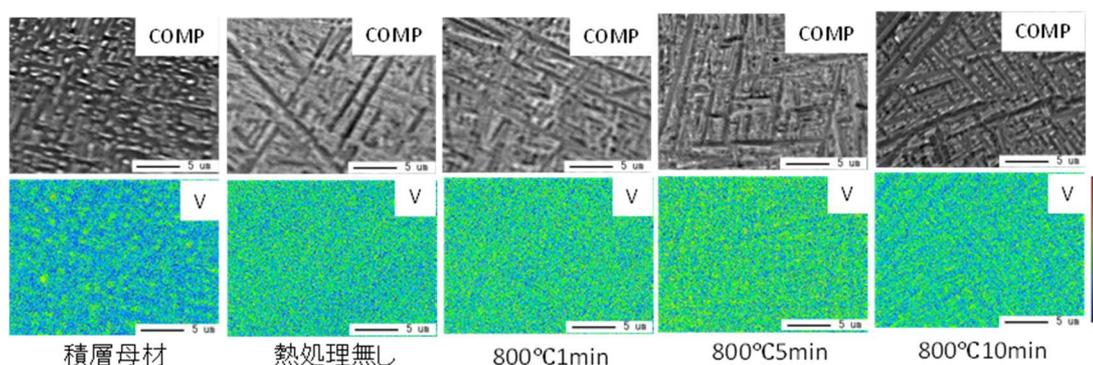


図9 レーザ熱処理品の反射電子線像及びバナジウム特性X線像

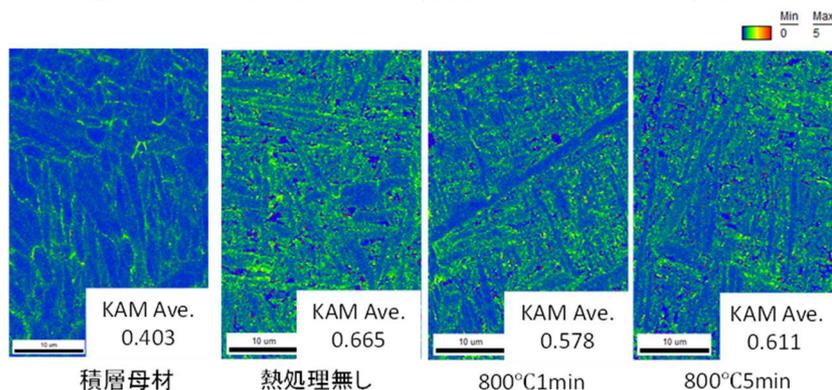


図10 レーザ熱処理品のEBSD測定によるKAMマップ

以外の要因により、曲げ特性が改善されたものと考えられる。この原因を明らかにするために、EBSDにより局部方位差（KAM: Kernel Average Misorientation）マップを測定した。各試験材のKAMマップと、KAM平均値を図10に示す。熱処理無しのKAMマップを積層母材のマップと比較すると、組織全体にひずみが分布し、特に結晶粒界付近にひずみが集中しているように見える。それに比べ保持時間1分及び5分のKAMマップは、全体的にひずみが緩和され、KAM平均値も減少傾向にあることがわかった。特に結晶粒内のひずみが除去されているように見える。この結果から、レーザ熱処理による曲げ特性の改善は、内部ひずみの除去に伴う延性の回復が要因と考えられる。

4 結言

金属積層造形装置で作製したチタン合金を使用し、突合せレーザ溶接及び、溶接部のレーザ熱処理を行い以下の結論を得た。

- (1) レーザ溶接継手の引張試験により、引張強度は積層材母材と同等以上であることがわかったが、曲げ試験では溶接部が破断した。この溶接部の延性低下は、レーザ溶接特有の急熱急冷プロセスにより、 α' マルテンサイト相が形成されたことが要因と考えられる。
- (2) 電気炉での熱処理試験により、700°C及び800°Cの熱処理温度において、保持時間1分から金属組織の変化と硬さの低下が確認され、適正な温度条件下であ

れば、短時間の熱処理で機械的特性に影響を与えることが示された。

- (3) 700°C及び800°Cの温度で、1分～10分の短時間レーザ熱処理を行ったサンプルは、全て良好な曲げ特性が得られ、レーザ熱処理により、昇温時間含め極めて短時間で溶接部の機械的特性を改善できることが確認された。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、秋田県産業技術センターのレーザ加工装置を借用するとともに、同センターから貴重な御助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

文献

- 1) 中野貴由, 石本卓也: チタンならびにチタン合金の Additive Manufacturing プロセス, までりあ, 58(4), p.181-187 (2019)
- 2) 社団法人日本チタン協会(編): チタンの加工技術, 日刊工業新聞社, (1992)
- 3) E.Akman, A.Demir, T.Cande and T.Sinmazcelik: Laser welding of Ti6Al4V titanium alloys, Journal of Materials Processing Technology, 209(8), p.3705-3713 (2009)
- 4) B.Vrancken, L.Thijs, J.Kruth and J.V.Humbeeck: Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting, Microstructure and Mechanical properties, Journal of Alloy

and Compounds, 541, p.177-185 (2012)

- 5) 森田辰郎, 信田康介, 川崎一博, 三阪佳孝 : Ti-6Al-4V 合金の疲労強度に及ぼす短時間 2 段階熱処理の影響, 材料, 56(4), p.345-351 (2007)