

レーザによる局所温度制御を応用した 異種材料の半凝固微細接合技術「SPLASH」の開発

芝浦工業大学 機械制御システム工学科

助教 酒井 康德

(2018 年度 奨励研究助成 (若手研究者) AF-2018239-C2)

キーワード：レーザ加工、接合加工、攪拌プロセス

1. 研究の目的と背景

微細接合技術は、センサや MEMS デバイス、電子機器を製造する上で不可欠な技術であり¹⁾、レーザ溶接が広く用いられる。レーザを用いれば、局所的な急加熱ができるため、電子デバイスの微細配線の接合や、自動車部品の精密接合に用いられることが多い。また、近年では、摩擦攪拌接合 (FSW) が、材料を溶融させずに接合可能な方法として実用されている。FSW は、航空機や鉄道車両に使用される高い信頼性が不可欠な部品や、熱影響を抑制しなければならない部品の接合でよく用いられる。

レーザ溶接では、レンズで小さく絞った光を照射し、局所的な加熱・溶融・凝固過程を経て、加工が行われる。そのため、熱影響に伴う結晶組織の粗大化が生じ、接合部の機械的強度を低下させてしまう問題がある²⁾。また、別の問題として、接合に伴う熱影響層で空隙やクラック、表面膨張などの発生が挙げられ、これらも接合部の機械的強度や信頼性を低下させる要因となっている³⁾。

一方、摩擦攪拌接合は、材料を溶融させず、固相状態で接合するため、レーザ溶接と比べて熱影響が抑制できる。そのため、結晶粒の粗大化による機械的強度の低下も小さい⁴⁾。回転させた工具を材料に押しつけ、そのときに生じる摩擦熱によって材料が軟化される。摩擦熱を利用しているため、高融点材料へそのまま摩擦攪拌接合を適用することは困難である。また、材料軟化に必要な摩擦熱を発生させるために、工具を高速回転させながら材料に強く押しつけなければならない、高剛性な FSW 加工機が求められるほか、強固に材料を固定するための工夫が不可欠となる。

このように、既存の接合技術には、解決すべき課題が存在しており、高融点材料や熱伝導性が高い材料などの高品位な接合を困難としている要因の 1 つとなっている。そこで、より高強度かつ高信頼な接合を実現するために、レーザ溶融と攪拌プロセスとを複合したレーザ加熱攪拌技術 (Laser Melting Stir Process; LMSP) を開発している。LMSP では、レーザにより急加熱・溶融させた材料を空冷するのではなく、攪拌しながら凝固させていく。このようにすることで、半凝固状態を経て、材料が凝固する。半凝固で溶融させると、材料内の空隙や結晶粒の粗大化を抑制できることが報告されている⁵⁾。LMSP は、溶融させた材料を攪拌することで、半凝固状態を創り出すことで、機械的特性の向上を目指すものである。

本研究では、提案手法であるレーザ加熱攪拌プロセス LMSP の実現可能性を実験的に検証するとともに、接合部材の機械的性質やそのばらつきを、レーザ溶接による接合部材と比較しながら明らかにする。

2. 実験方法

図 1(a) に、LMSP の加工原理を示す。接合したい 2 枚の重ね合わせ、接合箇所をレーザを照射すると、溶融池が形成される。この池に攪拌工具を挿入して、攪拌をする。この状態で、加熱・攪拌位置をずらしていくことで、溶融・攪拌・徐冷・凝固という過程で接合プロセスが進展する。

LMSP では、レーザを加熱源としており、レーザ出力やスポット径、送り速度を変えることで、任意に加熱量を制御可能である。また、FSW では、工具径を大きくして十分

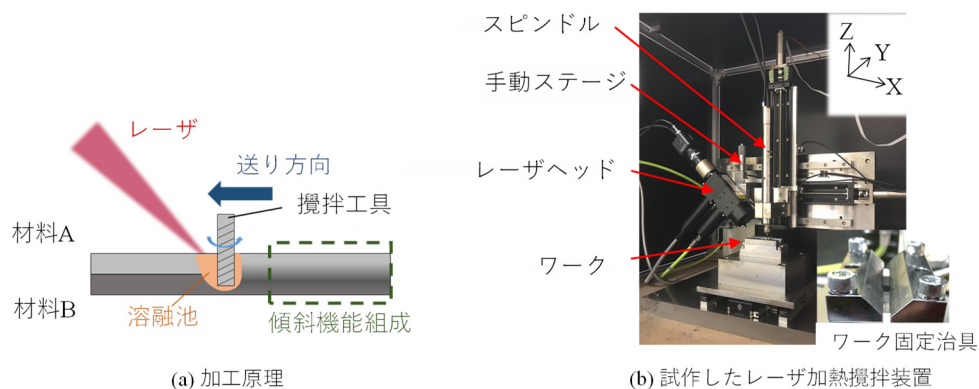


図 1 レーザ加熱攪拌プロセスの原理と試作した実験装置

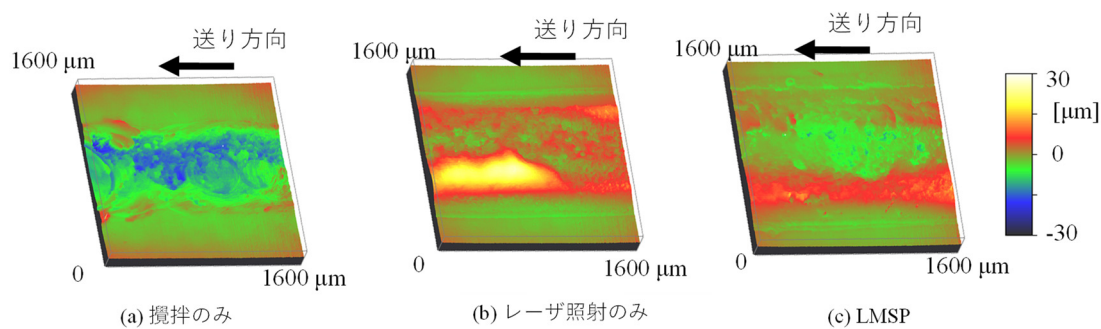


図2 異なる方法で加工した表面の観察結果（攪拌時の工具挿入深さ：30 μm ，レーザーのピーク出力：800 W，パルス照射時間：1.0 ms，パルス照射周波数：30 Hz，送り速度：7.2 mm/s.）

な摩擦熱を発生させる必要があるため、微細化が困難な場合がある。一方、LMSP の場合は、FSW のような工具径の制約がないのが特徴である。

図 1 (b) に、LMSP の実現可能性を検討するために試作した実験装置を示す。レーザー光源としてパルス YAG レーザ（ML-2150A；アマダウエルドテック社（旧アマダミヤチ社），神奈川県，日本）を使用した。レーザー波長は 1064 nm，平均出力は 25 W である。ガウス分布の強度を有する。また、レーザーヘッドと攪拌工具用スピンドルは、X-Z 方向の 2 軸自動ステージのテーブルと一緒に取り付けてあり、照射位置と攪拌位置が変わらないように工夫してある。

さらに、レーザーヘッドは、2 軸の手動精密ステージを解して、自動ステージに固定してある。加工物法線方向に対して 45° 傾斜した方向から、材料へレーザーを照射する。手動ステージの位置を調節することで、スピット径と照射位置を任意に変更できる。本報では、スポット径が 2 mm，攪拌工具と照射中心位置とが 0.5 mm となるように位置を調整した。

攪拌工具には、右刃右ねじれの超硬エンドミル（直径 1.0 mm，刃長：4 mm，刃数：4，ねじれ角：30°）を使用した。右刃右ねじれのエンドミルを CW 方向へ回転させると、切りくず（材料）は上方向へ排出される。本実験では、工具を CCW 方向へ回転させることで、熔融した材料が攪拌中に熔融池から排出させるのを抑制した。

FSW では、工具回転数と送り速度の組み合わせによって、接合部の機械的特性が大きく変化する⁶⁾。そのため、今 LMSP でも送り速度と工具回転数は加工特性を支配する重要なパラメータであると予想できる。本報告では、LMSP の実現可能性を検討するため、工具回転数は 2000 rpm に設定した。

接合する加工材料として、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 の薄板（厚さ：100 μm ）を使用した。薄板は、浮き上がりを防止するための固定ジグを用いて、X 軸方向へ駆動可能な自動ステージ上に固定した。

実験では、まず LMSP の加工原理の検証を行った。1 枚の薄板を実験装置に取り付け、①レーザー照射のみ（攪拌な

し）、②攪拌のみ（レーザー照射なし）③LMSP（レーザー照射と攪拌）の 3 通りで材料表面を加工した。なお、攪拌時は、いずれも工具を約 30 μm 挿入した。

次に、レーザー照射条件が加工に及ぼす影響を検討するため、入熱量に大きな影響を及ぼすピーク出力とパルス周波数をそれぞれ 3 通りに変えて、LMSP による加工実験をした。加熱位置での入熱量は、レーザー照射条件のほかにも送り速度の影響も受ける。そこで、加工条件を整理するために、オーバーラップ率⁷⁾を定義した。オーバーラップ率は、送り速度、ピーク出力、パルス周波数の関数となる。これが一定となるように、実験条件を変化させた。

最後に、LMSP による接合を行い、レーザー溶接と比較しながら、接合強度を評価した。2 枚の SUS304 薄板を重ね合わせて接合を行い、万能試験機（MCT-1150；A&D 社，東京，日本）を用いて、接合部のせん断強度を測定した。

なお、本実験は全て大気中で実施しており、シールドガスは使用していない。また、レーザーの出力変動や強度分布が、加工特性に影響を及ぼすと考えられる。これらは、実験や粒子法（SPH 法）を用いた数値解析によって、今後検討する予定である。

3. 実験結果と考察

図 2 に、レーザー照射のみ、攪拌のみ、LMSP の 3 通りで加工したときの表面を観察した結果を示す。観察には、非接触粗さ測定器（ μsurf ；Nano focus 社，Oberhausen, Germany）を用いた。図中の色スケールは、表面凹凸の高さを表している。

図 2 (a) に示す攪拌だけを行った場合を見ると、材料表面が工具で削られ、凹みが生じていることがわかる。また、工具を CCW 方向へ回転させているため、切削はされず、工具による攪拌が生じている様子が確認できる。一方、図 2 (b) に示したレーザー照射のみを行った場合を見ると、大きく不均一な隆起が加工部に生じていることがわかる。これは、急激な加熱にともなって、金属蒸気が発生し、その影響によって熔融した材料が隆起・凝固したものと考えられる。

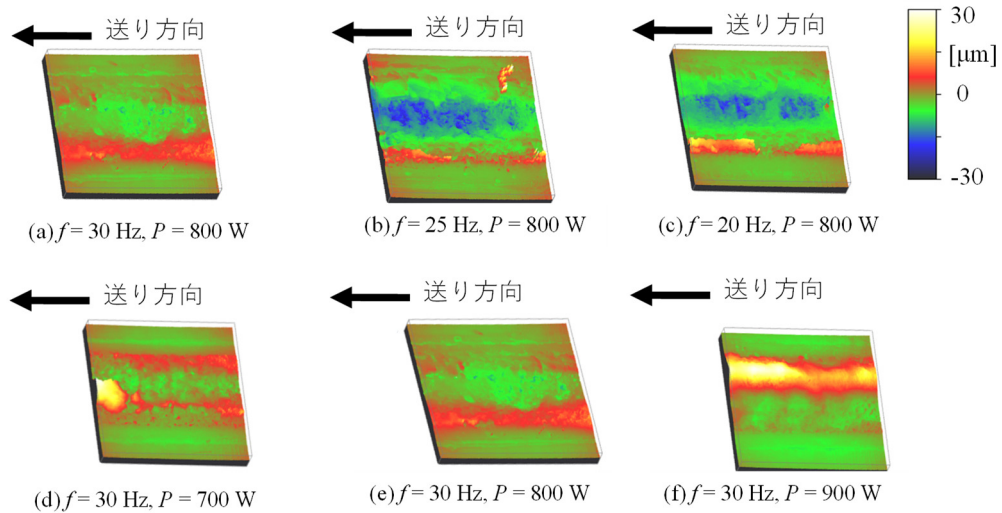


図3 パルス照射周波数 f とピーク出力 P が加工表面に及ぼす影響

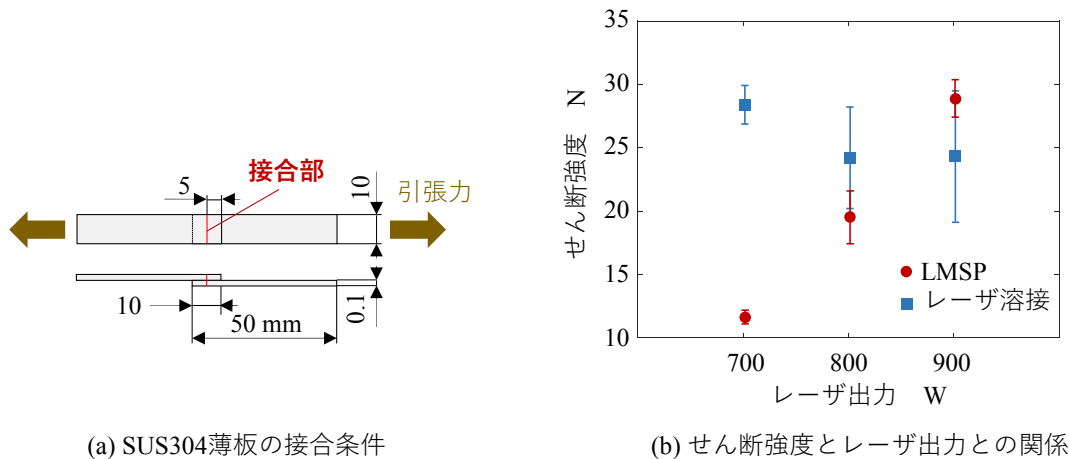


図4 パルス照射周波数 f とピーク出力 P が加工表面に及ぼす影響

一方、LMSP で加工した場合、攪拌工具により削られた凹みや、不均一で大きな隆起も発生せず、攪拌のみやレーザー照射のみの場合と比較して、良好な接合面が得られている。加工部外縁に、わずかに隆起した部分が均一に生じている。FSW でも同様な現象が生じることが知られており⁸⁾、攪拌による材料の塑性流動に起因している。以上の結果より、レーザー加熱によって生じた熔融池を攪拌することで、攪拌加工ができることが分かった。

そこで、次に、レーザー照射条件が加工面性状に及ぼす影響を検討した。

図3 (a) ~ (c) に、加工部の表面凹凸を測定した結果を示す。レーザーのピークパワーは一定とし、パルス周波数を20~30 Hz で変化させてある。図から分かるように、良好な攪拌ができていているのは、パルス周波数が30 Hz のときのみで、それ以外の条件では材料が工具によって削られ、凹んでいる。これは、パルス周波数が小さすぎると、十分な加熱ができず、攪拌工具が通過する前に材料が凝固して

しまっているものと考えられる。

図3 (d) ~ (f) には、パルス周波数は30 Hz とし、ピーク出力を700~900 W の間で変化させたときの表面凹凸の状態を示す。ピーク出力が800, 900 W の場合、攪拌加工がされている様子が分かるが、900 W の場合の方が加工部外縁の隆起量が多い。また、700 W の場合は、他の場合と比べて不均一な隆起が生じていた。これらの結果から、レーザーパワーは低すぎても、高すぎても、加工面の凹凸が不均一になったり、大きくなったりすることが予想できる。

次に、LMSP によって重ね合わせ接合を行った結果について述べる。図4(a)に示すようにSUS304 薄板を重ね合わせ、LMSP によって接合した。接合した板材を引張り、接合部が破断したときの力を接合部のせん断強度とした。レーザー出力を変えた場合のせん断強度を、図4(b)に示す。比較のため、LMSP と同じ条件でレーザー溶接も行い、そのせん断強度の違いを比較した。測定は、1つの条件に対して、3回行っており、図には最大値、最小値、平均値を示して

ある。

図から分かるように、LMSP では、レーザ出力が高いほど、せん断強度が高くなる。一方、レーザ溶接の場合は、今回実験した範囲では、レーザ出力によるせん断強度の変化は小さかった。レーザ出力が 900 W の場合、LMSP の方がレーザ溶接よりもせん断強度が高くなる傾向がある。接合強度のばらつきを見てみると、レーザ溶接では、同じ条件で加工しても、せん断強度に大きなばらつきがあることが分かる。一方、LMSP では、せん断強度のばらつきが、どのレーザ出力の場合でも低い。

以上のことから、LMSP では、レーザ照射条件によっては、レーザ溶接と同程度以上のせん断強度が得られることを示した。また、強度のばらつきが小さく、信頼性が高い接合ができる可能性が高いことが示唆された。

LMSP では、熔融池を攪拌するため、空隙が生じにくく、また、攪拌による半凝固相が生じているため、高強度かつ安定した接合ができているものと考えられる。さらに、材料の熔融状態と組成流動状態が接合品質に大きく影響するため、レーザ照射条件と攪拌条件の適切な組み合わせを検討することが重要である。今後、表面品質や接合強度の観点から、加工条件を最適化する必要がある。

4. 結び

本研究では、新しい微細接合方法であるレーザ加熱攪拌プロセス (Laser Melting Stir Process; LMSP) の開発を目指して、その実現可能性を検討した^{9~10)}。その結果、レーザで加熱して形成された熔融池を攪拌しながら凝固させることで、攪拌プロセスが実現できることを示した。また、レーザの照射条件が、攪拌の可否や加工痕の表面性状に大きな影響を及ぼすことを明らかとした。

また、レーザ溶接と LMSP とを比較して、ステンレス鋼 SUS304 薄板の重ね合わせ接合時の接合強度を評価した結果、LMSP によってレーザ溶接と同程度の接合強度が得られることが確認できた。また、LMSP での接合強度のばらつきは、レーザ溶接よりも大幅に小さいことが確認できた。

本実験のように、パルス波レーザを用いると、入熱量の変動が大きくなるため、安定した加熱が必要となる。今後は、粒子法 (SPH 法) を用いた数値シミュレーションやより詳細な実験により、LMSP 加工時に生じる物理現象を解明するとともに、最適加工条件 (どのようなレーザ照射条件、攪拌条件が良いのか) について、決定指針を構築していく。また、レーザ溶接、FSW と比較しながら、材料組織の状態を詳細に明らかとする。

今後の展望として、LMSP による傾斜組成を有する傾斜機能微細構造物の造形へ応用することを考えている。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団による奨励研究助成

(若手研究者) (AF-2018239-C2) の助成を受けて実施された。ここに、深く謝意を表明する。

参考文献

- 1) Zhou Y, Hu A, Khan MI, Wu W, Tam B, Yavuz M. Recent progress in micro and nano-joining. J Phys Conf Ser 2009;165. doi:10.1088/1742-6596/165/1/012012.
- 2) Choudhury B, Chandrasekaran M. Investigation on welding characteristics of aerospace materials - A review. Mater Today Proc 2017;4:7519-26. doi:10.1016/j.matpr.2017.07.083.
- 3) Katayama S, Kawahito Y, Mizutani M. Latest progress in performance and understanding of laser welding. Phys Procedia 2012;39:8-16. doi:10.1016/j.phpro.2012.10.008.
- 4) Cetkin E, Çelik YH, Temiz S. Microstructure and mechanical properties of AA7075/AA5182 jointed by FSW. J Mater Process Technol 2019;268:107-16. doi:10.1016/j.jmatprotec.2019.01.005.
- 5) Xing B, Hao Y, Li YD, Ma Y, Chen TJ. Microstructure control of AZ31 alloy by self-inoculation method for semisolid rheocasting. Trans Nonferrous Met Soc China (English Ed 2013;23:567-75. doi:10.1016/S1003-6326(13)62501-7.
- 6) Ishikawa T, Fujii H, Genchi K, Iwaki S, Matsuoka S, Nogi K. High speed-high quality friction stir welding of austenitic stainless steel. ISIJ Int 2009;49:897-901. doi:10.2355/isijinternational.49.897.
- 7) Farnia A, Malek F, Sabbaghzadeh J. Effects of pulse duration and overlapping factor on melting ratio in preplaced pulsed Nd: YAG laser cladding. Opt Lasers Eng 2013;51:69-76. doi:10.1016/j.optlaseng.2012.07.015.
- 8) Węglowski MS. Friction stir processing - State of the art. Arch Civ Mech Eng 2018;18:114-129. doi:10.1016/j.acme.2017.06.002.
- 9) Y. Sakai, W. Ichikawa, T. Tanaka, Novel laser melting stir process for microwelding, Manufacturing Letters 2020;18:6-9. doi: 10.1016/j.mfglet.2020.05.004
- 10) W. Ichikawa, Y. Sakai, T. Tanaka, Development of new micro laser stir welding process with liquid-solid phase shift, Proceeding of International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology, 2019; 1-4.