

レーザーによる局所温度制御を応用した微細攪拌接合技術「SPLASH」の開発

東京工業大学 ○市川渉, 東京電機大学 酒井康德, 東京工業大学 ©田中智久

要旨

電子デバイス等の工業製品の小型化・高度化に伴い、信頼性が高い異種材料の微細接合に対する要求が高まっている。しかし、レーザーやFSWによる接合技術では、接合強度の低下や適用可能材料の制限等が問題となっている。そこで本研究では、レーザーによる局所温度制御と工具による機械的な攪拌を複合することで、傾斜組成を有する高強度かつ高信頼な接合技術を開発する。試作機により加工原理を検証したところ、良好な接合部が得られた。

1. 緒言

IoT技術の普及に伴い、様々な工業製品に電子デバイスが組み込まれるようになった。超スマート社会実現に向け、電子デバイスにはさらなる小型・軽量化、省エネルギー化、高い信頼性が要求されており、半導体やセンサの高集積化、高密度実装が不可欠となっている。これに伴い、超薄板異種材料の微細接合技術の確立が強く求められている^①。

従来の接合技術として、レーザー溶接や摩擦攪拌接合(FSW)等がある。しかし、加工による結晶粒の粗大化や金属間化合物の生成に伴う結合強度の低下、加工可能な材料に制限がある。また、熱影響層の幅が大きく、微細化が困難な場合がある。

そこで、本研究では、熱影響層や金属間化合物の生成を抑制した、新たな異種材料の微細接合技術の確立を目指す。そのために、レーザーによる局所温度制御しながら材料を攪拌凝固させる新たな加工法を提案する。本報では、試作した加工装置を用いて提案手法の加工原理の検証を行い、既存の接合技術に対する有用性を示す。

2. 提案する接合技術「SPLASH」について

本研究で開発する新たな加工法を、「**Stir Process by Laser Heating: SPLASH**」と名付けた。SPLASHの加工原理を図1に示す。レーザー加熱により材料を溶融させ、その直後にレーザー照射部を工具で攪拌しながら冷却・凝固させる加工法である。攪拌凝固させることで、半凝固状態^②を経るため、結晶粒が細かく、空隙などの材料欠陥を抑制した高強度接合が期待できる。また、機械的に攪拌するため、接合界面をなくし、接合部の材料組成を傾斜させられると考えられる。

上記の特徴を有するため、既存のレーザー加工やFSWと比べて以下のような優位性がある。

- 1) 溶接欠陥や結晶粒の粗大化を防ぐ。
- 2) 接合界面を消失させ、傾斜機能を付与することができる。
- 3) 摩擦力が低減できるため、小さな攪拌力で加工可能
- 4) 加工反力が小さいため、強固なワーク保持が不要

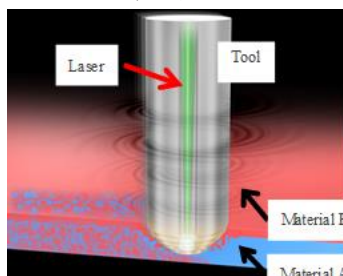


Fig.1 Stir process by laser heating (SPLASH)

3. 加工装置の試作

SPLASHの加工原理を検証するため、図2に示す加工機を設計・試作した。図示したように、ワークは1軸自動ステージ(Y軸)上面にジグを用いて固定してある。レーザーユニットとスピンドルは2軸自動ステージ(X・Z軸)上に固定されており、ZX平面上を移動できる。レーザーユニットとスピンドルは一つのテーブル上に固定されており、その相対位置は変化しない。

レーザー径と工具とレーザー照射点の距離を精密に調整するため、レーザーユニットは手動2軸ステージ(X・Z軸)を介して固定してある。また、工具との干渉を避け、材料で反射した光によってレーザーユニットの破壊を防ぐため、加工対象物に対して45°傾けて固定した。

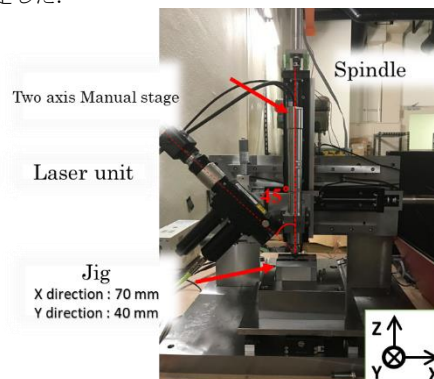


Fig.2 Experimental setup for SPLASH

4. 実験方法及び結果

4.1 実験方法

図2に示した装置を用いて実加工実験を行った。実験条件を表1、レーザー照射条件を表2に示す。

Table 1 Experimental conditions

Tool type	Carbide end mill
Tool diameter(mm)	1
Rotational speed(rpm)	2000
Direction of rotation	Counterclockwise rotation
Laser type	YAG
Wavelength(nm)	1064
Oscillation mode	Pulse

Tab.2 Laser parameter

No.	1	2	3	4	5
Peak power (W)	800	800	800	700	900
Pulse duration (ms)	1	1.3	1.6	1.2	0.9
Pulse frequency (1/s)	30	25	20	30	30
Feed rate (mm/s)	7.2	6	4.8	7.2	7.2

レーザの照射条件は、オーバーラップ率（レーザスポットの重なり率）が 99.8%，平均出力が 25 W となるように、表 2 に示す 5 通りに設定した。

4.2 実験結果および考察

まず、SUS304（厚さ 0.8 mm）の材料表面を①レーザ、②エンドミルによる切削、③SPLASH により加工し、その加工部表面に生じる差異を検討する。図 3 に、非接触粗さ測定器による表面形状の観察結果を示す。

図 3 から分かるように、エンドミル加工では、材料を 30 μm ほど削っていることが観測できた。レーザ加工では金属の盛り上がりや不均一な加工部となっている。一方、SPLASH ではエンドミルで切削することなく、攪拌により表面の盛り上がりを抑えられていることが分かる。このことから、熔融部分を攪拌できていたと判断した。

次に、レーザのピークパワーを一定（800 W）とした場合について、パルス周波数が表面形状へ及ぼす影響を検討する。図 4 に、パルス周波数を 3 通りに変えたときの表面形状を示す。図中の No. は、表 2 の実験番号と対応している。

パルス周波数が 25、20 s^{-1} の条件では材料を削ってしまった。パルス周波数が低くなると、レーザを照射していない時間が長くなるため、材料表面温度が再凝固温度よりも低くなり、凝固した表面を単に切削してしまったためだと考えられる。

さらに、周波数を一定（30 s^{-1} ）として、ピークパワーが表面形状へ及ぼす影響を検討した。図 5 にピークパワーを 3 通りに変えた場合の表面の観察結果を示す。ピークパワーを高くすることで、熔融部分を切削することなく攪拌できたことが分かる。

最後に、SUS304（厚さ 0.1 mm）同士の重ね合わせ接合を、レーザ加工と SPLASH でそれぞれ行った。レーザの照射条件は、表 2 に示す No. 5 とした。図 6 にそれぞれの加工部の外観と加工表面を光学顕微鏡で観察した結果を示す。図示したように、SPLASH ではレーザ加工とは異なる加工痕となっており、攪拌したような痕跡が見られた。しかし、レーザ加工に比べて加工部が不均一にみられる。これを改善するためには、攪拌条件や送り速度が SPLASH による接合加工に及ぼす影響を詳細に検討する必要がある。

5. 結論

本研究では、傾斜機能を有する高強度かつ高信頼性接合技術の開発のために、レーザによる局所温度制御と工具による攪拌を複合した新たな加工法の提案し、その加工原理を検証した。

SPLASH ではレーザ加工で生じる材料の盛り上がりを抑えることができる。一方、加工条件によっては材料を削ってしまうことが分かった。

SPLASH 加工による薄板の重ね合わせ接合を実現できた。

今後の課題としては、加工条件の最適化や同種材料や異種材料の接合における接合強度や金属間化合物層の評価などが必要となる。

本研究での登壇者の貢献

登壇者が主体となって遂行した事項を以下に示す。

- 接合技術に関する先行研究調査と研究計画決定
- 試作加工機の仕様、機械要素の選定、FEM を用いた部品設計、組み立て、MATLAB を用いた制御系の設計・実装
- 実験及び得られたデータに対する考察

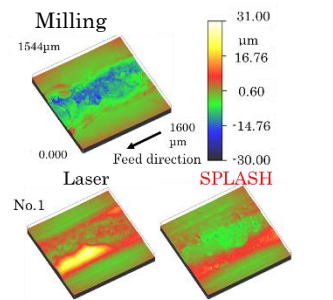


Fig.3 Comparison of surface processed by different process

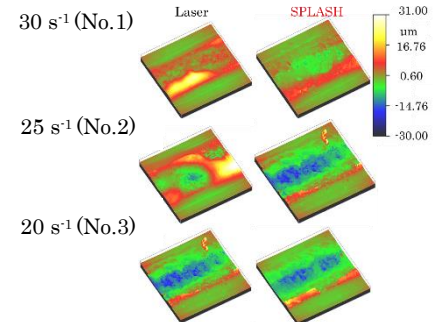


Fig.4 Influence of laser frequency on processed surface

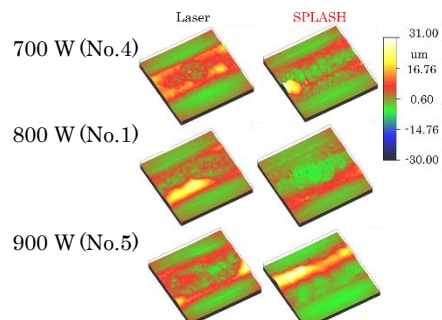


Fig.5 Influence of laser peak power on processed surface

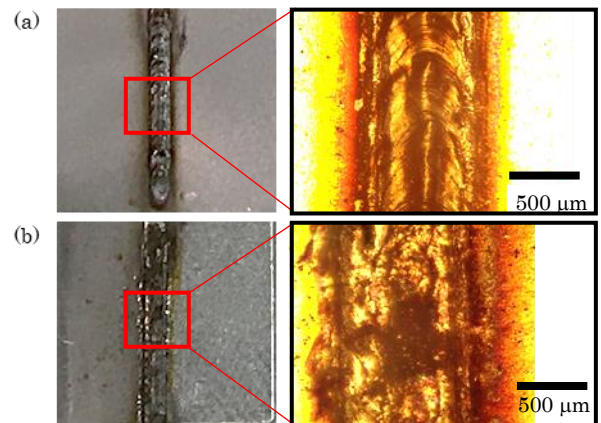


Fig.6 Processed surface : (a) Laser (b) SPLASH

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、(公財)天田財団より奨励研究助成 (AF-2018239-C2) をいただきました。ここに心より感謝の意を表します。

参考文献

- [1] マイクロ接合研究委員会, マイクロ接合アカデミックロードマップ, 溶接学会誌, 第 79 巻, 第 1 号(2010), pp.88-90.
- [2] Z. Fan, X. Fang et al., Microstructure and mechanical properties of rheo-diecast (RDC), Materials Science and Engineering Vol412 (2005), pp298-306.