

金属細線供給型 3次元積層技術を用いた 精密造形加工システムの開発

金沢工業大学 機械工学科

教授 森本 喜隆

(平成 29 年度 一般研究開発助成 AF-2017227)

キーワード：3D プリンタ，ファイバーレーザー，金属細線供給

1. 研究の目的と背景

従来の金属部品の製作は、鋳造や鍛造などの型を利用する変形加工や、切削加工や研削加工などの除去加工によって行われている。これに対し、近年、型を使わず必要な部分のみを付加して製品を製造する付加加工が注目を集めている。3D プリンタでの積層は付加加工の一種であり、変形加工や除去加工では不可能な中空構造や一体成型の製作を可能とする。現在の 3D プリンタの金属積層造形には、主に粉末焼結方式とデポジション方式が用いられている⁽¹⁾。粉末焼結方式はステージ上に敷き詰めた金属粉末にレーザー照射することで造形する手法で、デポジション方式はレーザー照射と金属粉末の供給を同時に行うことで造形する手法である。しかし、各積層方式では積層材料として金属粉末を使用しているため、粉体爆発や作業者の金属粉末の吸い込みといった問題が懸念される。また、金属粉末を交換する際には、使用していた金属粉末を完全に除去する必要があるため、メンテナンス性が悪いといった欠点もある。

これに対して本研究では、保守性の高い積層法として、レーザーを用いた金属細線の溶融・積層法に着目する。本手法は、小径の金属細線を使用し、レーザー照射と金属細線の

供給を同時に行うことで、所望の形状の積層を行う。本研究では、積層装置の設計・製作と最適な溶融・積層条件の検討を行い、レーザーを用いた金属細線の溶融・積層法の確立を目的とする。

2. レーザを用いた金属細線の溶融・積層法

2.1 溶融・積層装置

図 1 に本研究で開発した溶融・積層装置を示す。溶融・積層装置は大きく分けて、ベースプレート、金属細線を溶融させるレーザー装置、金属細線を供給するワイヤ送り装置、ベースプレートを移動させる X-Y テーブルの三つの要素からなっている。ワイヤ送り装置、X-Y テーブルの駆動には OMRON 社製の 50W サーボモータ R88M-K05030H-S2 を使用する。また、コントローラには NJ501-1500 を使用しており、これらを制御するプログラミングソフトとして OMRON 製のオートメーションソフトウェア Sysmac Studio を使用する。表 1 にレーザーユニットの仕様を示す。

2.2 溶融・積層法

本研究で提案する溶融・積層法では、テーブル上のベースプレートにレーザーを照射し、形成した溶融池に金属細線を供給させ、テーブルを移動させることで金属細線の溶融・積層を行う。また、テーブルの動作方法として、溶接分野で活用されているウィービング動作を用いる。これにより、ベースプレート表面に熱を溜めることができ、安定した溶融池の形成が行えると考える。

2.3 実験方法および実験条件

金属細線の溶融実験では、使用材料として $\phi 0.2\text{mm}$ のスズ細線を使用した。使用材料としてスズを選定した理由としては、融点が低く、レーザー出力や送り速度などの実験パラメータを大きく振れることや、酸化の影響を受けにくいこと、安価で入手しやすいことが挙げられる。

本実験では、前節で述べた溶融・積層装置を用いて金属細線の溶融可否を確認した。表 2 に金属細線の溶融実験の実験条件を示す。

2.4 実験結果

図 2(a)に光ファイバ伝搬方式の実験結果、図 2(b)に直接照射方式の実験結果を示す。両図より、光ファイバ伝搬方

表 1 レーザ発振器の仕様

Laser type	Yb:Fiber (CW)
Spot diameter	$\phi 10 \mu\text{m}$
Wavelength	1060 nm
Peak power	25 W

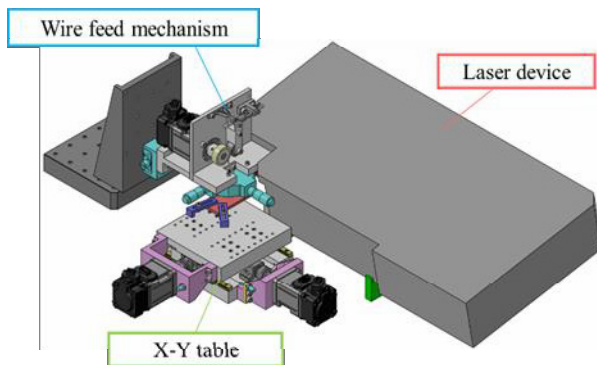


図 1 溶融・積層装置の概要

式では金属細線の溶融は確認できないが、直接照射方式では金属細線の溶融は確認できる。また、直接照射方式では金属細線の切断が確認できた。レーザ熱加工は、発熱した熱源の強度、照射時間などによって、材料は段階的に熱伝導現象の段階、溶融現象の段階、蒸発現象の段階などを経て蒸発に至る。このことから、直接照射方式では溶融現象の段階に留まらず、蒸発現象の段階まで進んでしまい、金属細線が切断されたと考える。

光ファイバ伝搬方式において金属細線の溶融が確認できなかった要因として、加工点におけるパワー密度の不足が考えられる。各方式のパワー密度の理論値は、光ファイバ伝搬方式は $8.0 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 、直接照射方式は $3.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ であり、光ファイバ伝搬方式は直接照射方式の $1/375$ 倍である。また、光ファイバ端面にはレーザによる損傷が見られた。これより、光ファイバ伝搬においてレーザ損失が生じていると分かる。このことから、加工点におけるパワー密度が理論値より低下し、金属細線の溶融に至らなかったと考える。

以上のことから、本研究では金属細線の溶融方式として、直接照射方式が適切であると考えられる。

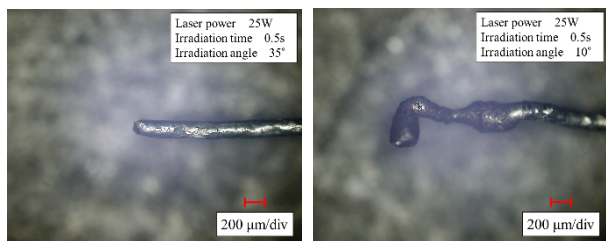
3. 金属板の溶融条件の検討

3.1 実験方法および実験条件

本研究では、金属細線を積層するにあたりベースとなるベースプレートの溶融に焦点を置き、金属板の溶融実験を行った。金属板の溶融実験では、焦点外し量による溶融状態の比較実験と、ウィービング動作による溶融状態の比較実験を行い、金属板（スズ板）の溶融状態を観察した。使用材料としてスズを選定した理由としては、融点が低く、レーザ出力や送り速度などの実験パラメータを大きく振れることや、酸化の影響を受けにくいこと、安価で入手しやすいことが挙げられる。

表2 溶融実験条件

Laser power	25 W
Spot diameter	$\phi 10 \mu\text{m}$ (Direct irradiation) $\phi 200 \mu\text{m}$ (Optical fiber irradiation)
Metal wire material	Sn
Metal wire diameter	$\phi 0.2 \text{ mm}$



(a) Optical fiber irradiation (b) Direct irradiation

図2 金属細線の溶融状態

焦点外し量による溶融状態の比較実験では、図3に示すように金属板の上面を基準に上方向に+0.5mm、下方向に-0.5mmを上限とし、0.1mmずつ焦点を外して溶融実験を行った。表3に焦点外し量による溶融状態の比較実験の実験条件を示す。

ウィービング動作による溶融状態の比較実験では、ウィービング速度およびウィービングの変位を変化させて溶融実験を行った。表4にウィービング動作による溶融状態の比較実験の実験条件、図4に実験の模式図を示す。図5に示すテーブル送り方向はウィービング動作中におけるテーブルの送り方向であり、ウィービング動作中における単位時間当たりのテーブル送り方向の変位をテーブル速度とする。

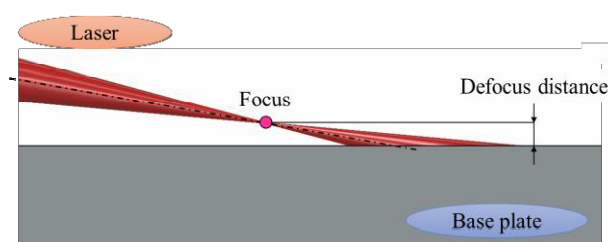


図3 焦点外し距離の定義

表3 レーザ照射条件と焦点外し距離

Laser type	Yb:Fiber (CW)
Spot diameter	$\phi 10 \mu\text{m}$
Wavelength	1060 nm
Laser power	12.5 W
Defocus distance	-0.5 ~ +0.5 mm
Table feed speed	300 mm/min

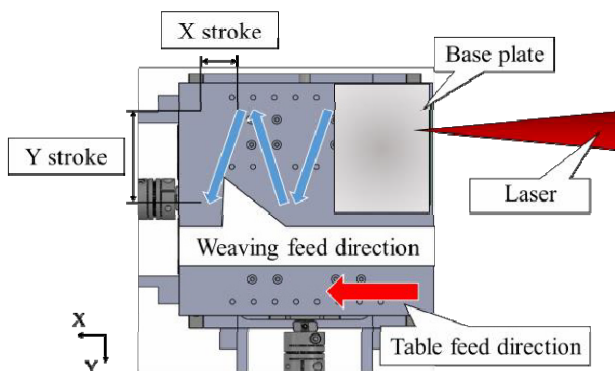
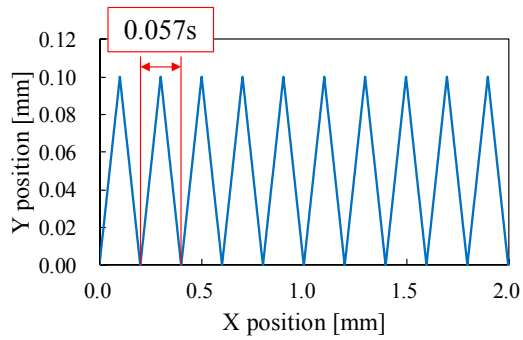


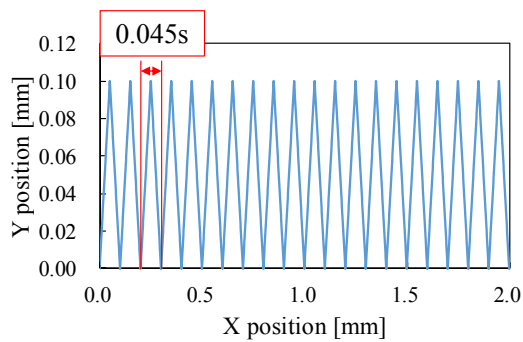
図4 2軸移動テーブルを用いたウィービング動作

表4 レーザ照射条件とウィービング動作条件

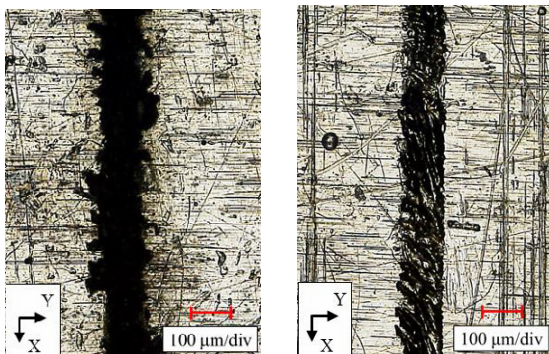
Laser type	Yb:Fiber (CW)
Spot diameter	$\phi 10 \mu\text{m}$
Wavelength	1060 nm
Laser power	1~25 W
Defocus distance	+0.15 mm
Weaving speed	300 mm/min, 350 mm/min
Weaving stroke	X +0.05 mm, +0.1 mm Y $\pm 0.1 \text{ mm}$, $\pm 0.15 \text{ mm}$



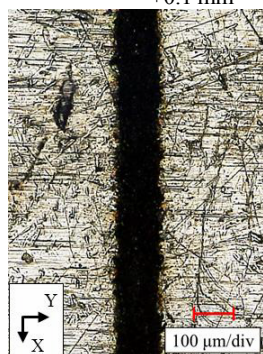
(a) 相対移動距離 $X+0.1\text{mm}$, $Y\pm 0.1\text{mm}$



(b) 相対移動距離 $X+0.05\text{mm}$, $Y\pm 0.1\text{mm}$
図5 ウィービング動作の軌跡



(a) Defocus distance 0 mm (b) Defocus distance +0.1 mm

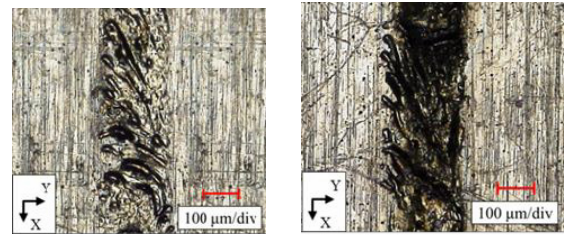


(c) Defocus distance -0.1 mm

図6 表面溶融状態の観察結果

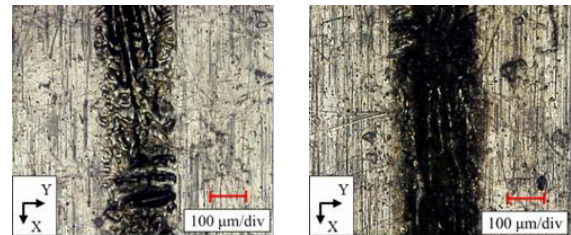
3・2 焦点外し量による溶融状態の比較

図6(a)に焦点外し量 0mm の実験結果, 図6(b)に焦点



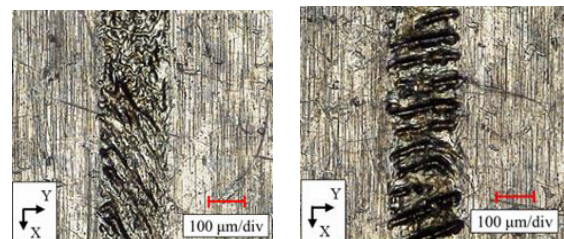
(a) Laser power 15 W (b) Laser power 20W
Weaving speed 300 mm/min,
Weaving stroke $X+0.1\text{mm}$, $Y\pm 0.1\text{mm}$

図7 表面溶融状態の観察結果



(a) Laser power 15 W (b) Laser power 20W
Weaving speed 300 mm/min,
Weaving stroke $X+0.05\text{mm}$, $Y\pm 0.1\text{mm}$

図8 表面溶融状態の観察結果



(a) Laser power 15 W (b) Laser power 20W
Weaving speed 350 mm/min,
Weaving stroke $X+0.1\text{mm}$, $Y\pm 0.1\text{mm}$

図9 表面溶融状態の観察結果

外し量+0.1mm の実験結果, 図6(c)に焦点外し量-0.1mm の実験結果を示す。図6より, 焦点外し量 0mm および焦点外し量-0.1mm の条件では, 金属板が蒸発していることが確認でき, 焦点外し量+0.1mm の条件では, 金属板が溶融していることが確認できる。金属板の溶融・蒸発は焦点外し量 $\pm 0.2\text{mm}$ までは確認できたが, 焦点外し量 $\pm 0.3\text{mm}$ 以降は確認できなかった。また, 焦点外し量 0mm では激しい加工音と共に金属板の蒸発が見られたが, 焦点を外すにつれて加工音は小さくなり, 蒸発現象の段階から溶融現象の段階へと変化していった。

レーザ加工では, 焦点を外すにつれて加工点でのビーム径は大きくなり, パワー密度は低くなる。そのため, 焦点を外すにつれて蒸発現象の段階から溶融現象の段階へと変化していったと考えられる。また, 蒸発現象の段階から溶融現象の段階へと変化するにつれ, 加工音は小さくなると考えられる。以上のことから, 本研究で使用するレーザ装置は, 焦点におけるパワー密度が高く, 金属板を蒸発させることが容易であることが確認できた。これより, 金属細線の溶融に適した溶融池の形成には, ある一定量の焦点

外しが必要であると考える。

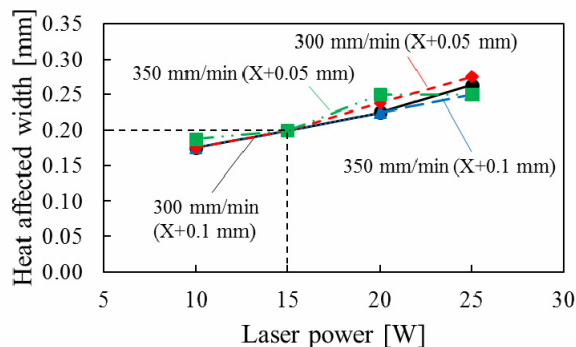
3・3 ウィービング動作による溶融状態の比較

図7にウィービング速度 300mm/min, ウィービング変位 X+0.1mm, Y±0.1mmの実験結果(条件①), 図8にウィービング速度 300mm/min, ウィービング変位 X+0.05mm, Y±0.1mmの実験結果(条件②), 図9にウィービング速度 350mm/min, ウィービング変位 X+0.1mm, Y±0.1mmの実験結果(条件③)を示す。

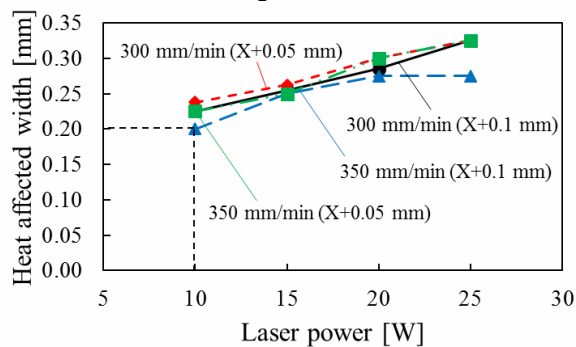
溶融実験より, 条件①, ③では10W, 条件②では9Wから金属板の溶融が始まった。また, 条件①, ③では17W, 条件②では15Wを超えると加工音が生じ, 徐々に金属板の蒸発が見られた。また, 図5~7を比較すると, 同一出力において条件②, 条件①, 条件③の順で溶融・蒸発現象が確認できる。各条件におけるテーブル速度は, 条件①は3.5mm/s, 条件②は2.2mm/s, 条件③は4.1mm/sであり, テーブル速度が遅いほど, ある領域におけるレーザー照射時間が長くなる。前述したように, 同一出力において条件②, 条件①, 条件③の順で溶融・蒸発現象が確認できる。これより, レーザ照射時間が長いほど溶融・蒸発現象が見られると考える。また, レーザ照射時間によって溶融・蒸発現象の過程は異なると考える。

3・4 ウィービング動作による熱影響幅の比較

図10(a)にウィービング変位 Y±0.1mmでの各条件におけるレーザー出力と熱影響幅の関係, 図10(b)にウィービング変位 Y±0.15mmでの各条件におけるレーザー出力と熱影響幅の関係を示す。



(a) Weaving stroke Y±0.1 mm



(b) Weaving stroke Y±0.15 mm

図10 レーザ出力と熱影響幅との関係

図10より, 全ての条件においてレーザー出力の増加に伴い, 熱影響幅は増加していることが分かる。また, 熱影響幅の増加値は, レーザ出力 10~25Wにおいて0.06~0.1mmであった。これは, レーザ出力の増加に伴い, 材料に作用する熱エネルギーが増加したためだと考えられる。本研究では, φ0.2mmの金属細線(スズ細線)を使用し, 溶融池の熱により溶融を行う。そのため, 溶融池の幅は金属細線の直径以上が好ましいと考える。しかし, 溶融池の幅が大きすぎると溶融・積層済みの金属細線に熱影響が及び, 形状精度が低下する。これより, ウィービング動作のY方向の変位は±0.1mmが適切であると考える。

4. 結言

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- (1) 本研究で使用するレーザー装置は, 焦点外し量-0.2~+0.2mmで金属板の溶融が可能である。
- (2) レーザ照射時間によって溶融・蒸発現象の過程は異なり, テーブル速度 2.2mm/sでは9W, テーブル速度 3.5mm/s, 4.1mm/sでは10Wから金属板の溶融は始まる。
- (3) レーザ出力の増加に伴い, 材料に作用する熱エネルギーは増加し, 熱影響幅は増加する。
- (4) 得られた知見ならびに特許第 6583771号を基に, CNC複合加工機に, この機能を実装し, 金属ワイヤを供給しながら3次元造形が可能な工作機械の実用化を目指す。

謝辞

本研究は, 一部, 公益財団法人天田財団平成29年度一般研究開発助成助成番号: AF-2017227の支援を受けました。記して謝意を表します。

本研究に関する研究業績

- 1) 吉田悠哉, 森本喜隆, 林晃生, 「金属ワイヤ供給型3Dプリンタの開発」, 電気加工学会全国大会 2019。
- 2) 吉田悠哉, 森本喜隆, 林晃生, 「金属ワイヤ供給型3Dプリンタの開発」, 日本機械学会北陸信越支部第57期総会・講演会, 2020
- 3) 特許第 6583771号, 立体造形装置, 2019

参考文献

- 1) 京極秀樹, 池庄司敏孝, 「図解金属3D積層造形の基礎」, 日刊工業新聞社, (2017), p.22。
- 2) 日本塑性加工学会: 粉末成形—粉末加工による機能と形状のつくり込み—, コロナ社, (2018), p.83。
- 3) 清水透: 金属3Dプリンティングにできること—世界に一つだけのものづくり—, 産報出版株式会社, (2016), pp.58-59。
- 4) 田中建: 金属ワイヤ供給型3Dプリンタの開発, 平成28年度金沢工業大学修士学位論文, (2016), pp.1-44。