

成形・機械的接合を同時に行うマルチマテリアル部材の レーザー援用 3D プリンティング

旭川工業高等専門学校 システム制御情報工学科
准教授 中川 佑貴

(2022 年度 一般研究開発助成 AF-2022205-B2)

キーワード：3D プリンティング，レーザー，マルチマテリアル

1. 研究の目的と背景

輸送機器の燃費向上のためには軽量化が有効である。近年自動車の電動化が進んでいるがバッテリーが非常に重いことから、航続距離を延ばすためにその他の部分でさらなる軽量化が望まれている。車体の軽量化のために金属と樹脂、とりわけ繊維強化樹脂 (FRP) を組み合わせたマルチマテリアル部材の適用が拡大している。一種類の金属のみで構成された部材を、設計の最適化によって部材の一部分を樹脂に置き換え、強度を損なわずに軽量化している。マルチマテリアル部材は金属部品と FRP 部品を接合して作るのが一般的であるが、接着剤は熱応力に弱く、ボルトナットによる締結は重量の増加を招くなど問題がある。

FRP は強化繊維が伸びないことから成形性が低く、成形品の形状自由度が低い。この問題の解決のために 3D プリンターを用いた FRP 部品の製造に関する研究が活発に行われている。申請者は 3D プリンターとレーザー加熱を複合したプロセスで CFRP 部品を製造した¹⁾。電動キックボードなど小型モビリティや、パーソナライズされた製品が今後ますます求められることから、3D プリンターのようにフレキシブルな生産体制の構築は重要である。以上の背景を踏まえて、申請者は金属部品に対して樹脂部品を 3D プリンティングしながらカシメを形成する成形・機械的接合同時 3D プリンティングを提案した²⁾。

本研究では、種々の樹脂および金属素材に対して成形・機械的接合同時 3D プリンティングを試み、その適用範囲を明らかにすることを目的とした。また FRP 部品の成形を試みた。

2. 成形・機械的接合同時 3D プリンティング

2.1 樹脂と金属

樹脂と金属部材の成形接合同時レーザー援用 3D プリンティング方法を図 1 に示す。突起付き下部品を印刷した上に、穴の開いた金属部品を配置し、その上に上部品を印刷しながらカシメを形成する。上部品を印刷する際にはレーザーにより突起を溶かし、突起を押しつぶしながら印刷する。CFRP 部品を作成する場合は、金属部品配置時に炭素繊維束を同時に配置し、上部品を印刷する。

2.2 樹脂素材同士

樹脂素材同士の成形・機械的接合同時 3D プリンティング方法を図 2 に示す。部品の内部にカシメを設けて異種素材同士を機械的接合により接合する。

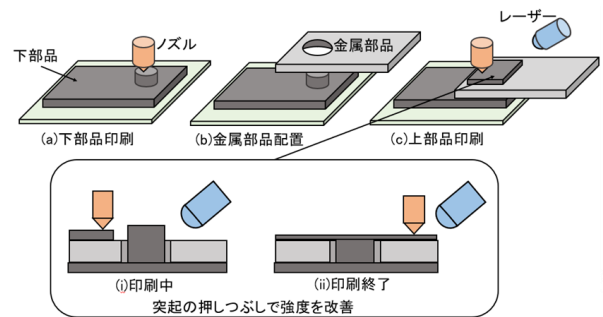


図 1 樹脂と金属部材の成形接合同時レーザー援用 3D プリンティング方法

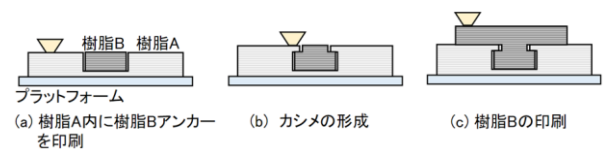


図 2 異種樹脂素材の成形接合同時 3D プリンティング

3. 実験方法

3.1 レーザー援用 3D プリンター

レーザー援用 3D プリンティングに用いた 3D プリンターを図 3 に示す。使用する 3D プリンターは Creality 社製の Ender-3 S1 Pro である。樹脂は PolyLite PLA Black であり、レーザーを吸収し発熱する。ノズルの温度は 210℃、プラットフォームの温度は 50℃である。レイヤー高さは 0.3mm で、内部密度は 50%のグリッドパターンで印刷速度は 60mm/s とした。ただし上板は十分にレーザー照射する時間が必要なため、1 層目および 2 層目の印刷速度のみ 15mm/s とした。レーザーは青色半導体レーザー (マイクロエッジプロセス株式会社製、型番 MPR450-660AP) を用い、



図 3 レーザー援用 3D プリンティングに用いた 3D プリンター

治具によって照射角度が約 30° となるように、3D プリンターのヘッドに固定した。波長は 450nm であり、ノズル近傍において約 15mm のデフォーカスがなされている。これは樹脂板の熱の集中を防ぐためである。

3.2 樹脂素材

本実験で使用した樹脂素材の特性を表 1 に示す。印刷温度およびステージ温度は素材の推奨の温度を示している。印刷時の温度が高く線膨張係数が大きいものほど、印刷後の熱収縮が大きいことからカシメの形成に影響があるものと考えられる。

表 1 本実験で使用した樹脂素材³⁾

	TPU	PLA	Nylon	PC
印刷温度 [°C]	225	210	245	260
ステージ 温度[°C]	70	60	70	110
線膨張係数 [$\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$]	100	41	80	65

3.3 金属部材

試験片として用いる金属板試験片の特性を表 2 に示す。試験片には C3710, A5052P, SUS304 の 3 種類を用いる。SUS304 製金属板試験片を図 4 に示す。幅 20mm、長さ 50mm、厚さ 6mm のプレートを用い、長さ方向に 20mm、厚さ方向に 3mm 切削し、段差を設けた。段差の中央には直径 6mm の貫通穴を設けた。樹脂と接する面はショットブラストにより $2.0 \sim 3.0 \mu\text{Ra}$ に調整した。

表 2 金属板試験片の特性

	C3710	A5052P	SUS304
密度 [g/cm^3]	8.4	2.7	7.93
熱伝導率 [$\text{W}/\text{m K}$]	117	204	16.7
線膨張係数 [$\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$]	20.8	23.9	17.3

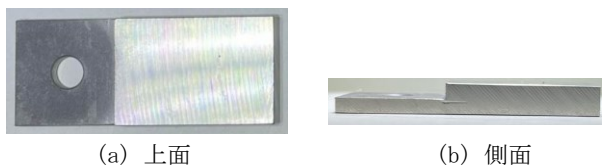


図 4 SUS304 製金属板試験片

3.4 せん断引張試験条件

マルチマテリアル部材のせん断引張試験方法を図 5 に示す。試験片の両端を治具で把持し、引張速度 10 mm/min でせん断引張する。引張試験には万能試験機(今田製作所製、型番 SVZ-200NB)を用いた。

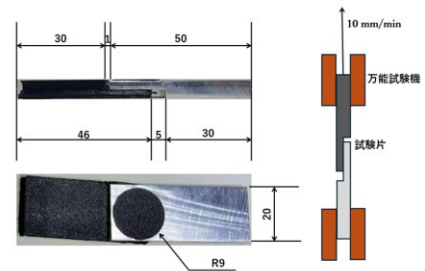


図 5 引張試験片寸法および試験条件

3.5 十字引張試験条件

樹脂素材同士の接合強度の評価は十字引張試験によって行った。印刷された十字引張試験片を図 6 に、カシメ部の寸法を図 7 に示す。十字引張試験を行うために引張試験機に取り付ける治具は鋳鉄を使用し、主に NC フライス盤を用いて製作した。カシメ部の直径は 10mm でレイヤー厚さ 1 層分である 0.25mm の突き出し量とした。突起を持つ板を凸板、穴を持つ板を凹板と定義した。



図 6 印刷された十字引張試験片

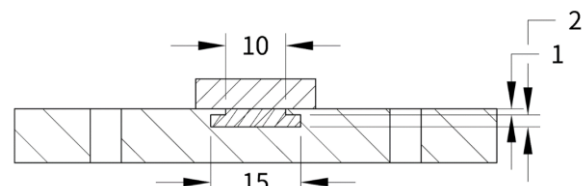


図 7 試験片のカシメ部の断面寸法

4. 実験結果

4.1 金属部材のレーザー加熱特性

初めに金属板のレーザー加熱特性を調査した。金属板のレーザー加熱試験におけるレーザー照射条件を表 3 に示す。出力は最大の 6W で他の条件は実際のレーザー援用 3D プリンティングと同様になるように設定した。また室温において熱電対とサーモカメラによって金属板の温度を測定し、放射率を表 4 のように設定した。

表 3 金属板のレーザー加熱試験におけるレーザー照射条件

出力	6W
デフォーカス	約 15mm
照射角度	約 30°

表 4 サーマカメラによる測定における放射率

材質	放射率
C3710	0.7
A5052P	0.3
SUS304	0.55

レーザー照射後の金属板の温度増加とレーザー照射時間との関係を図 8 に示す。温度は熱電対によって測定した。レーザー照射時間の増加と共に温度増加も大きくなった。温度増加は SUS、真鍮、アルミの順に大きかった。

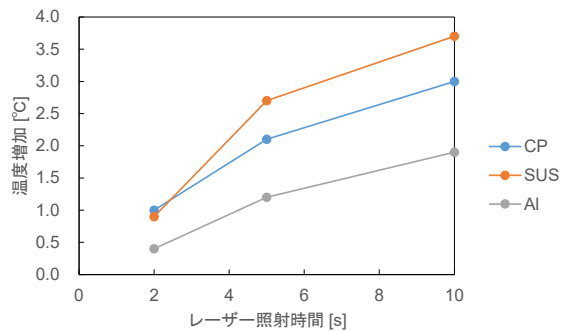


図 8 レーザー加熱試験結果
(出力 6W, 照射角度約 30°, デフォーカス 15mm)

4.2 樹脂と金属の接合結果

マルチマテリアル引張試験片の 3D プリンティング結果を図 9 に示す。図 8 よりレーザーによる温度増加が大きかった SUS および C3710 に対して試験を行った。レーザー照射ありなしともにカシメが形成されることによって金属板と樹脂板が接合された。レーザー照射された試験片は条件によって金属板と上板の界面に大きな隙間が見られた。

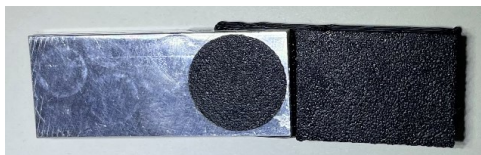


図 9 マルチマテリアル試験片の下面

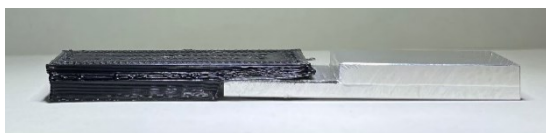


図 10 側面

引張試験から得られた荷重—ストローク線図を図 11 および図 12 に示す。いずれの金属においてもレーザー照射による荷重の変化は見られなかった。

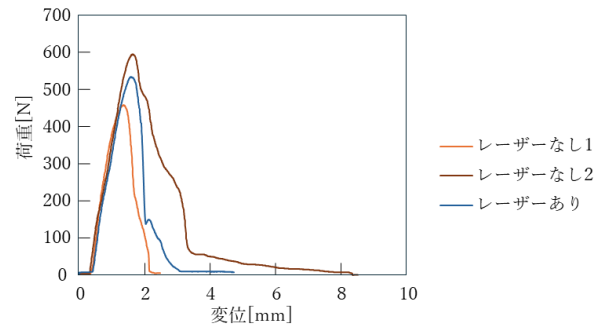


図 11 引張試験から得られた荷重—ストローク線図 (C3710)

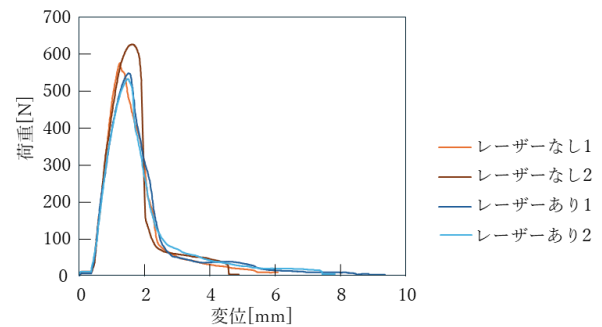


図 12 引張試験から得られた荷重—ストローク線図 (SUS304)

破断した引張試験片を図 13 に示す。破断は突起の上部にあたる上板の内部から生じていることから、母材破断となっており接合は良好になされていることが分かる。また金属板の上板と接している面において樹脂の残存はほぼ見られなかったことから、この条件においては金属板と樹脂板はほぼ接合されていなかった。3D プリンティングの速度を低下させ、十分な加熱を行いながら印刷することで接合できる可能性はあるが、実用的な速度を得るためには荷重を与えながらの印刷が必要である。

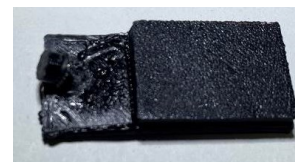


図 13 破断した樹脂板

下板の内部の状態を確認するために下板の断面を観察した。切断した下板の内部構造を図 14 に示す。この断面では突起のあった中心部分に近づくにつれて内部の空間が大きくなっており、その部分から破断している。レーザーによってこの欠陥を消すことが出来れば強度の向上も期待できる。

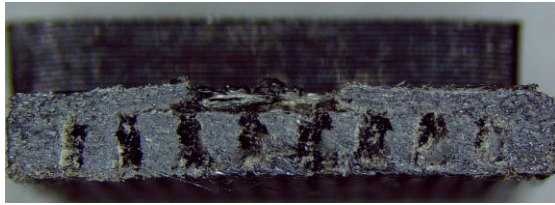


図 14 切断した下板の内部構造

4.3 樹脂素材同士の接合結果

実際に印刷した試験片を試料切断機にてカシメ部分を観察できるように切断した。切断した断面は電子顕微鏡にて観察し、設計した寸法との誤差を測定した。測定結果を表 5 に示す。ほぼ全ての試験片が設計した寸法より大きくなっていた。凸板 TPU 凹板 PLA および Nylon 試験片の断面を図 15 に示す。巨視的には欠陥なくカシメによって接合されている。表 5 の組み合わせにおいては全ての場合で接合が可能であった。

表 5 カシメ根元部分の実寸法と誤差

カシメ根元部分		実寸法	誤差
凸板	凹板	[mm]	[mm]
TPU	PLA	10.248	+0.248
TPU	Nylon	10.340	+0.340
TPU	PC	10.120	+0.120
PLA	TPU	9.934	-0.066
Nylon	TPU	10.716	+0.716
PC	TPU	10.159	+0.159

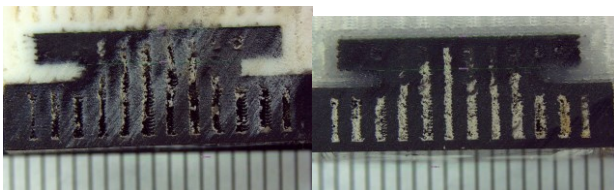


図 15 凸板 TPU (左) 凹板 PLA (右) Nylon 試験片の断面

凸板 TPU 凹板 PLA および Nylon 試験片の十字引張試験から得られた最大荷重と最大応力を表 6 および表 7 に示す。凹板 PLA の場合はややばらつきが大きく、Nylon の場合はばらつきが小さかった。PLA と比較して Nylon はヤング率が TPU に近いので、応力集中が緩和され、最大荷重のばらつきが小さくなったと考えられる。

表 6 凸板 TPU 凹板 PLA における最大荷重と最大応力

	最大荷重[N]	最大応力[MPa]
試験片 1	475	6.0
試験片 2	327	4.1
試験片 3	308	3.9
平均	370	4.7

表 7 凸板 TPU 凹板 Nylon における各試験片の最大荷重と最大応力

	最大荷重[N]	最大応力[MPa]
試験片 1	572	7.2
試験片 2	554	7.0
試験片 3	583	7.4
平均	569.67	7.2

5. CFRP と金属部品の接合

図 12 および 13 より、下板の突起直下から破断が発生していることから、この部分に炭素繊維を挟み込むことによって接合部品の強度向上を図った。下板を 2.0mm 積層した時点で、3D プリンターを一時停止し、およそ 6000 本の炭素繊維を配置し、レーザーを照射しながら下板の印刷を完了させた。金属板は SUS304 を使用した。

せん断引張試験によって評価された、炭素繊維の有無が接合強度に及ぼす影響を図 16 に示す。PLA のロットおよびプリンターの z 軸補正が変化したため繊維なしの場合も改めて評価した。繊維なしと比較して繊維ありの場合は最大荷重が約 1.5 倍向上した。またヤング率も向上している。炭素繊維の混入によって応力集中が緩和され、最大荷重に達したのちの荷重低下も緩やかとなった。

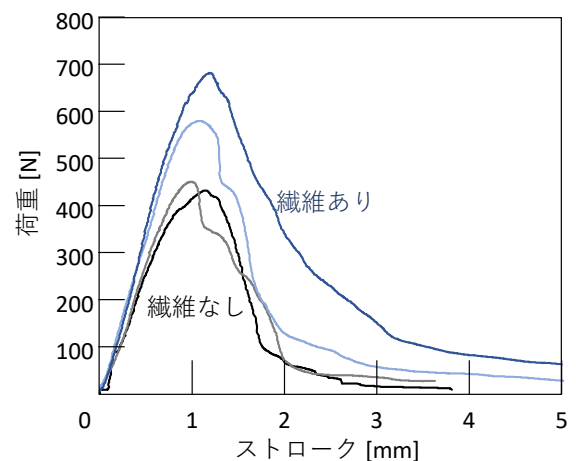


図 16 炭素繊維の有無が接合強度に及ぼす影響

6. まとめ

本研究ではマルチマテリアル部材の 3D プリンティングによる一体成型の可能性を調査するために、樹脂と金属および異種樹脂で構成される部材の成形・機械的接合同时レーザー援用 3D プリンティングを実施し、試験片の強度を評価した。以下に得られた結論を示す。

- 1) 金属の材質を問わず成形・機械的接合同时 3D プリンティングは適用可能だったが、レーザーによる金属と樹脂の面接合には至らなかった。
- 2) 炭素繊維を挟み込みながら印刷するレーザー援用 3D プリンティングを適用することで、繊維がない場合と比較して高強度のマルチマテリアル部品を印刷できた。
- 3) 異種樹脂で構成されるマルチマテリアル部品に対し

ても成形・機械的接合同时 3D プリンティングは適用可能であった。

参考文献

- 1) Yuki Nakagawa, Ken-ichiro Mori, Masahiko Yoshino, Laser-assisted 3D printing of carbon fibre reinforced plastic parts, Journal of Manufacturing Processes, 73 (2022) 375-384.
- 2) Yuki Nakagawa, Ayumu Abe, Masahiko Yoshino, Mechanical joining with aluminum part by 3D printing of polylactic acid and acrylonitrile-butadiene-styrene parts for fabrication of multi-material parts, International Journal of Automation Technology, 16 (5) (2022) 615-623.
- 3) Ultimaker Technical Data Sheet より