

3D プリンティングとレーザー加熱を複合した 炭素繊維強化プラスチック部材の製造

東京工業大学 工学院機械系
助教 中川 佑貴

(2019 年度 奨励研究助成(若手研究者枠) AF-2019230-C2)

キーワード：3D プリンティング，レーザー加熱，炭素繊維強化プラスチック

1. 研究の目的と背景

熔融積層造形法の 3D プリンターは、ステレオリソグラフィやセレクトィブレーザーシタリング方式の 3D プリンターと比較してかなり低価格であることから、広く普及している。熔融積層造形法の 3D プリンターでは、素材となるプラスチックフィラメントをヒーターで溶かしながら押し出し、加熱されたプラットフォーム上に積層していくことで、複雑な形状を金型なしで製造することが出来る。最近では民生用の 3D プリンターにおいてもエンジニアリングプラスチックの製造が可能となっており、より高強度な部品が手軽に製造できるようになる。しかしながら積層体であるため、内部の空隙や層間の強度の低さから、射出成型品と比べると強度は低くなる¹⁾。3D プリンティングの条件が強度に及ぼす影響は引用²⁾³⁾が調査している。

高比強度なプラスチック部材として自動車や航空機などに炭素繊維強化プラスチック(CFRP)が多く使われている。より強度の高い熱硬化性プラスチックを用いた CFRP は主に航空機に、生産性の高い熱可塑性プラスチックを用いた CFRP は自動車に用いられることが多い。炭素繊維強化熱可塑性プラスチック(CFRTP)のプレス成形では、繊維の織物とプラスチックのシートを交互に重ねるか、あらかじめプラスチックが含浸した繊維のシートを重ねて、それらを予加熱した後、加熱された金型によって成形を行い、金型内に冷却水を流して金型内でプラスチックを硬化させる。ただし炭素繊維がほとんど伸びないことから形状自由度が低くなるのが問題である。

CFRTP で複雑な形状を製造できる 3D プリンターが市販されている。溶けたプラスチックと共に炭素繊維フィラメントを押し出す方式、あるいは溶けたプラスチックと別なノズルから繊維フィラメントを押し出す方式が一般的である。プレス成形品と比較すると強度は低いが、高強度かつ複雑形状部材が製造できる一方、装置の制御が複雑でありプラスチックのみの部材の造形のための工業用 3D プリンターと比較して装置コストは 5~6 倍程度高くなる。また繊維が配置される位置や方向は押し出されるプラスチックの方向と一致するため、所望の補強効果を得ることが難しい⁴⁾。

本研究ではプラスチックの 3D プリンティングとレーザー加熱を複合した CFRP 部材の製造方法を開発し、手軽かつテーラード部材を製造することを目的とした。

2. CFRP のレーザー援用 3D プリンティング方法

図 1 に開発した CFRP のレーザー援用 3D プリンティング方法を示す。積層されたプラスチックの上に炭素繊維を置きその上にプラスチックを積層する。そこにレーザーを照射することで、プラスチックを透過したレーザーが内部の繊維を加熱し周囲のプラスチックと接合する。

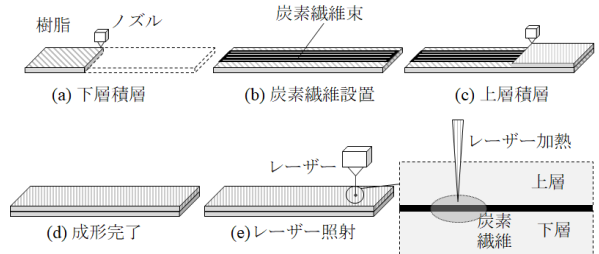


図 1 開発した CFRP のレーザー援用 3D プリンティング方法

既存の 3D プリンターと本開発手法の比較を図 2 に示す。炭素繊維の配向、量および位置が自由に設定できることが最大のメリットである。本研究では手作業によって繊維を配置したが工業化においてはロボットハンドを用いることが考えられる。

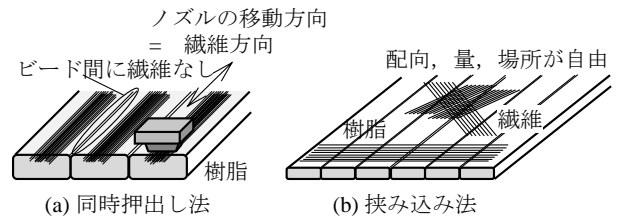


図 2 既存の 3D プリンターと本開発手法の比較

3. 実験条件と 3D プリンティングされたプラスチックの光学特性

3.1 3D プリンティング条件

本実験で用いた試験片の 3D プリンティング条件を図 3 に示す。直径 1.75mm の PLA フィラメントを直径 0.4mm の加熱されたノズルから押し出し、一層あたりの厚さ $t=0.2\sim 0.4\text{mm}$ で積層した。色は透明、青、灰、黒の 4 色であり、それぞれ図 4 に示す 445nm に対する透過率を持つ。また炭素繊維の束は厚みが 0.1mm 以下であり、透過率はほぼ 0 であった。

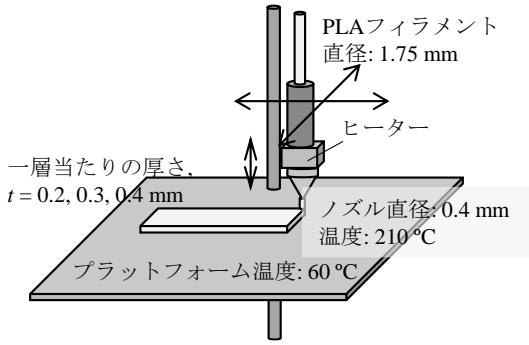


図3 試験片の3Dプリンティング条件

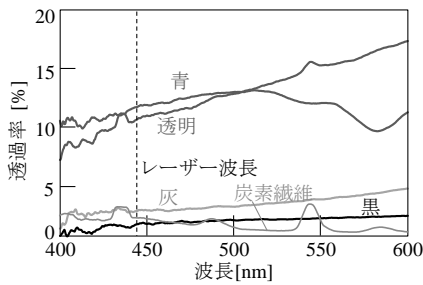


図4 レーザー波長周囲におけるプラスチックの透過率

3.2 レーザー加熱実験条件

初めに接合の可否を判断するため、2枚の薄いプラスチック板を3Dプリンティングし、炭素繊維を挟んで上からレーザーを照射した。挟みこまれた炭素繊維のレーザー加熱試験条件を図5に示す。レーザーは出力3.6Wの青色半導体レーザーを用いた。レーザーも3Dプリンター同様に低価格化が進んでいる。図5(b)の経路を速度 $v=2\sim 30\text{mm/s}$ で走査させた。また熱の集中を防ぐためにフォーカス位置から15mmデフォーカスした。温度は赤外線サーモカメラで測定した。各色のプラスチックの輻射率を表1に示す。

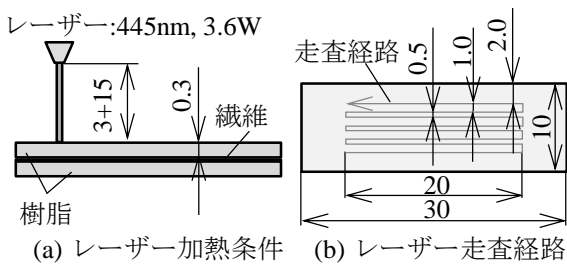


図5 挟みこまれた炭素繊維のレーザー加熱試験条件

表1 3Dプリンティングされたプラスチックの輻射率

プラスチック色	輻射率
透明	0.30
青	0.80
灰	0.50
黒	0.85

4. レーザー加熱結果

4.1 プラスチックの色およびレーザー走査速度の影響

炭素繊維を挟み込んだプラスチック板の加熱結果を図6に示す。プラスチックと繊維が接合されたものを○、接合されたが穴などの欠陥が現れたものを△、接合されなかったものを×で示した。透明および青のように透過率の高いものは欠陥なく接合できる条件があったが、灰および黒は接合できるものの図7に示すように表面に穴やくぼみが生じた。また走査速度が大きすぎると加熱が不十分であり接合できなかった。

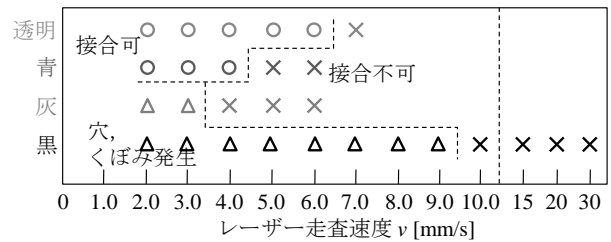


図6 炭素繊維を挟み込んだプラスチック板の加熱結果

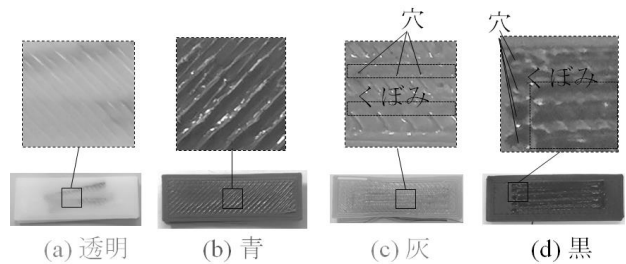


図7 レーザー加熱後のプラスチック表面

$t=0.3\text{mm}$ におけるレーザー加熱終了直後のプラスチック表面温度とレーザー走査速度との関係を図8に示す。図6より、表面温度が 100°C を超えた際に接合できている。また黒は他の色よりも温度が高いが、灰は欠陥なく接合できた透明および青と同程度の温度だった。

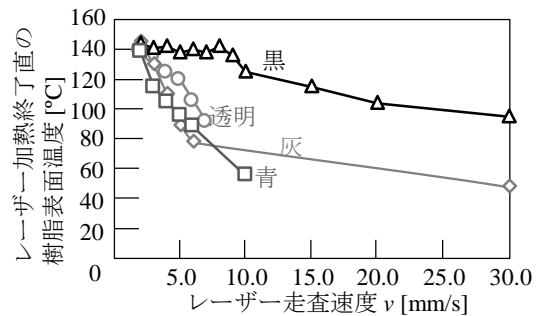


図8 $t=0.3\text{mm}$ におけるレーザー加熱終了直後のプラスチック表面温度とレーザー走査速度との関係

挟みこまれた繊維がレーザー加熱に及ぼす影響を調査するために、繊維を挟みこんでいないプラスチック板を加熱した。レーザー加熱終了直後のプラスチック表面温度に及ぼす繊維有無の影響を図9に示す。透明と青は繊維がな

いと温度の上昇が限定的であるが、灰と黒は繊維なしでもプラスチックそのものが加熱されるため、表面が発熱し、図7に示すように欠陥が生じた。

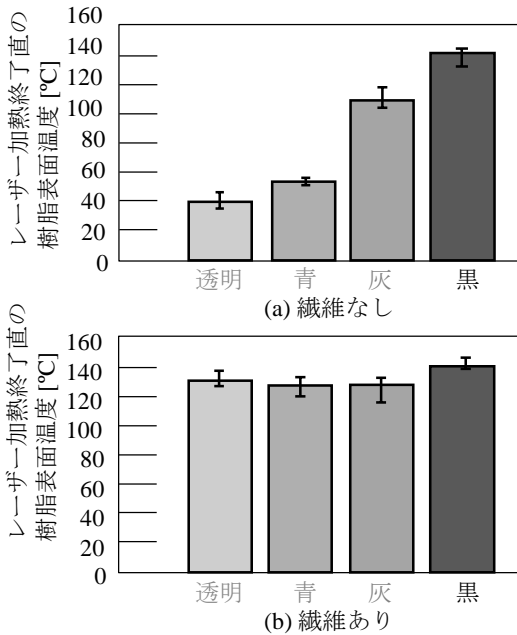


図9 レーザー加熱終了直後のプラスチック表面温度に及ぼす繊維有無の影響

4.2 厚さの影響

透明における接合の可否に及ぼす板厚の影響を図10に示す。接合のためには板厚が大きくなるほど走査速度を遅くする必要があった。

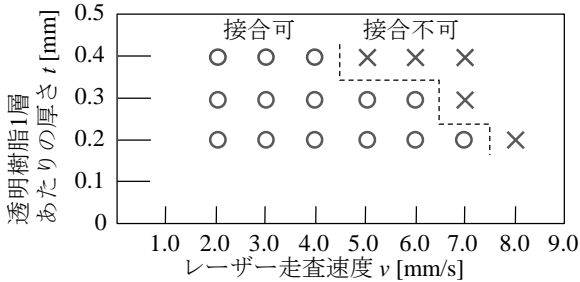


図10 透明における接合の可否に及ぼす板厚の影響

透明におけるレーザー加熱終了直後の表面温度を図11に示す。板厚が大きくなるほど温度は低くなっており、3.1節同様に、100°C以上の表面温度において接合されていた。

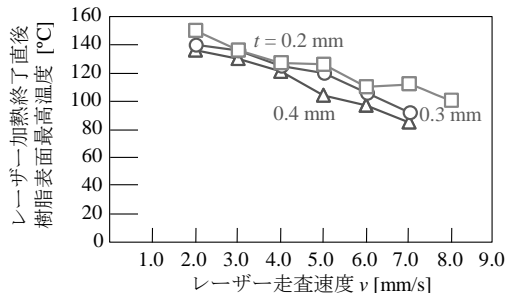


図11 透明におけるレーザー加熱終了直後の表面温度

5. レーザー加熱された CFRP 部品の強度

5.1 引張試験条件

引張試験片の製造条件を図12に示す。 $t=0.3$ mmの2層構造であり、間に約9000本の炭素繊維を挟み込んだ。レーザー走査速度は $v=2\sim6$ mm/sとした。引張速度10mm/minで試験片が破断に至るまで試験を行った。

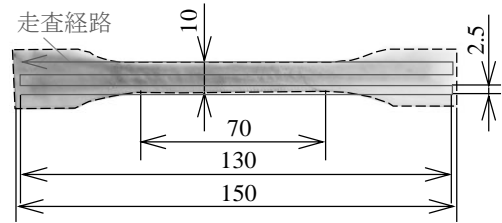
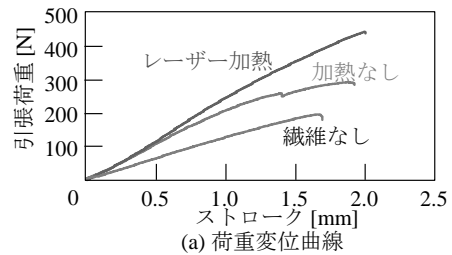


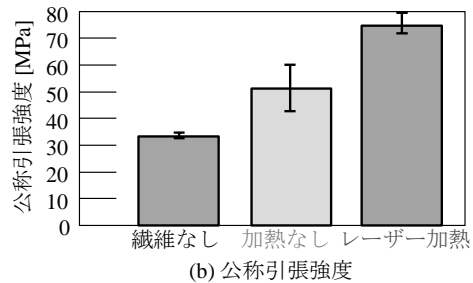
図12 引張試験片の製造条件

5.2 引張試験結果

引張試験より得られた荷重変位曲線および公称引張強度を図13に示す。試験は各3回行い、荷重変位曲線は代表的なものを記載している。繊維なしと比較して、レーザー加熱されたものは強度が2倍強くなった。また繊維を挟み込み、加熱しなかったものは1.5倍程度となった。



(a) 荷重変位曲線



(b) 公称引張強度

図13 引張試験より得られた(a)荷重変位曲線および(b)公称引張強度

引張試験によって破断した引張試験片を図14に示す。加熱なしではプラスチックと繊維の接合が不十分でありほとんどの繊維が層間からすり抜けたが、加熱によって接合され強度向上に寄与した。

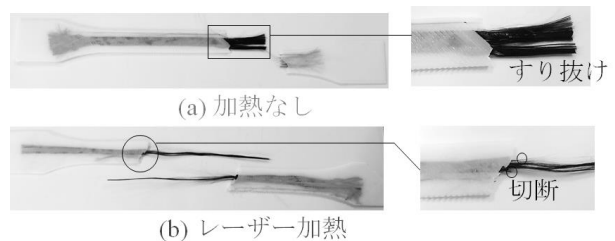


図14 引張試験によって破断した引張試験片

引張強度に及ぼすレーザー走査速度の影響を図 15 に示す。4 章における接合試験では $v=5\text{mm/s}$ 以上でも接合は出来ていたが、一部不十分であり強度向上は限定的であった。

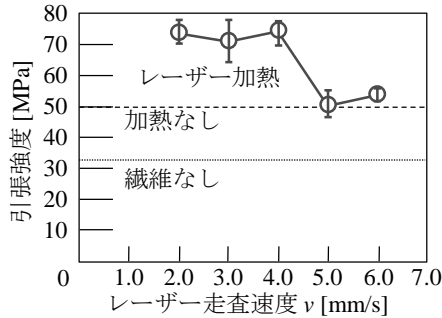


図 15 引張強度に及ぼすレーザー走査速度の影響

6. 炭素繊維によって部分強化されたテーラード部品の 3D プリンティング

図 16 に示す閉断面を持つ複雑形状テーラード CFRP 部品の 3D プリンティングを行いその強度を評価した。この形状は自動車のバンパービームを模した形状であり、通常プレス製品を溶接して作られることから、板厚分布を持たせることが難しい。3D プリンティングであればこのような形状も容易に製造することができる。約 9000 本の炭素繊維を図 16 に示す位置に部分的に挟み込んだ。配向も自由に設定できることから、長手方向および直交方向にそれぞれ挟み込み、 $v=3\text{mm/s}$ でレーザー加熱した。

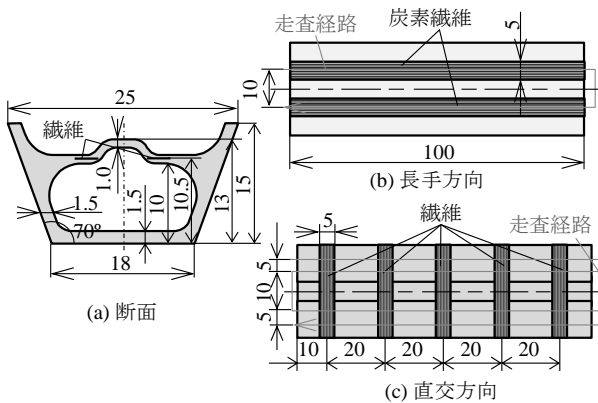


図 16 閉断面を持つ複雑形状テーラード CFRP 部品

テーラード部品の曲げ試験方法を図 17 に示す。閉断面の突起が下向きになるように設置し、 10mm/min で部品が分離するまで試験を行った。

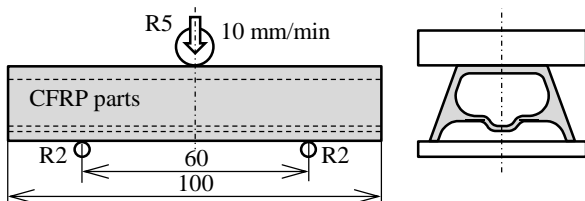


図 17 テーラード部品の曲げ試験方法

曲げ荷重ストローク線図を図 18 に示す。いずれの試験

片も初めの荷重低下でクラックが発生し、2 度目の荷重低下で部品が分離した。長手方向に繊維を配置した部品は大きな荷重低下が早く発生した。一方直交方向に配置した部品は最大荷重が 1.2 倍程度高かった。

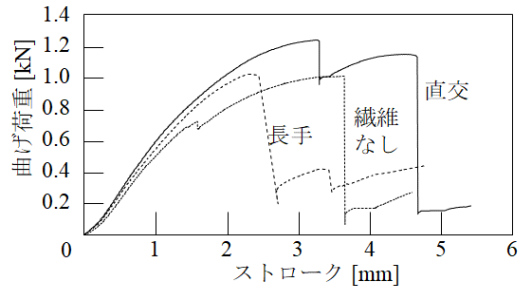


図 18 曲げ荷重ストローク線図

テーラード部品の破壊挙動を図 19 に示す。繊維なしは閉断面の突起にクラックが入り、その後側壁が破壊する。直交方向の繊維はこの突起のクラック発生を抑制したため強度が向上した。一方長手方向の繊維はむしろ欠陥となりクラックの発生を促進した。このように部品の機能に合わせた繊維配置は重要な技術である。

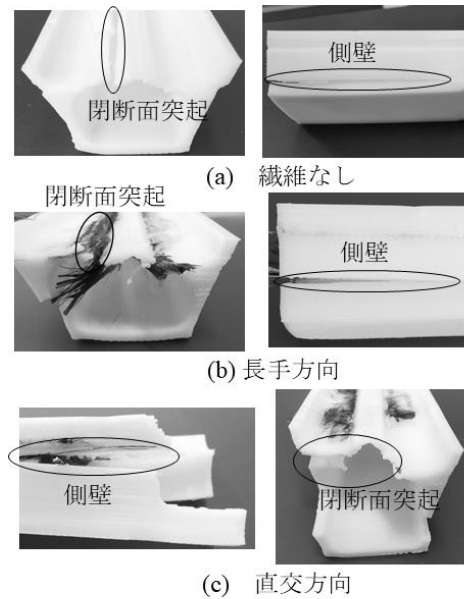


図 19 テーラード部品の破壊挙動

7. 結論

本研究では炭素繊維強化プラスチック部品の形状自由度向上およびテーラード特性の付与のために、3D プリンティングとレーザー加熱を複合したプロセスを開発した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 炭素繊維をプラスチック層間に挟み込み、レーザー加熱を行った。レーザーを透過するプラスチック色において表面に欠陥なく接合できた。
- 2) CFRP のレーザー加熱によって 3D プリンティングされたプラスチック試験片の引張強度は 2 倍程度向上した。
- 3) 複雑形状かつ炭素繊維を自由に配置したテーラード

CFRP 部品を製造し、繊維配向をコントロールすることで強度を向上させた。

以上本研究の成果は国際論文「Journal of Manufacturing Processes」誌に「Laser-assisted 3D printing of carbon fibre reinforced plastic parts」というタイトルで掲載された。

謝 辞

本研究の遂行に当たり、東京工業大学工学院吉野雅彦教授および豊橋技術科学大学森謙一郎名誉教授にご尽力頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) Kumar S, Kruth JP: Materials & Design 31-2 (2010), 850–856.
- 2) Sood AK, Ohdar AK, Mahapatra SS: Materials & Design 31 (2009), 287–295.
- 3) Dawoud M, Taha I, Ebeid SJ: Journal of Manufacturing Processes 21 (2016), 39–45.
- 4) Hou Z, Tian X, Zhang J, Li D: Composite Structures 184 (2018), 1005–1010.