

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：50104

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14621

研究課題名（和文）高い形状自由度を持つCFRP部材の成形・接合同時3Dプリンティング

研究課題名（英文）Simultaneous process of 3D printing and joining for CFRP parts with high shape flexibility

研究代表者

中川 佑貴（Nakagawa, Yuki）

旭川工業高等専門学校・システム制御情報工学科・准教授

研究者番号：50837739

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：高い形状自由度を持つ炭素繊維強化プラスチック部材の製造のために、レーザーを援用した成形・接合同時3Dプリンティング方法を開発した。溶融積層造形方式の3Dプリンティングにおいて印刷中の樹脂層間に炭素繊維を挟みながらレーザーを照射することで、樹脂と繊維が接合し高強度化がなされた。また印刷中にカシメを形成しながら接合する成形・機械的接合同時3Dプリンティングによって、マルチマテリアル部材の印刷を可能とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

輸送機器の燃費向上は温室効果ガス排出量の抑制に寄与する。輸送機器の軽量化は燃費を向上させることから、高比強度材料として炭素繊維強化プラスチック部品(CFRP)の適用が拡大している。CFRPは優れた機械的特性を持つが、炭素繊維が変形しないため、部品の形状に大きな制限がある。本研究は3Dプリンティングという高い形状自由度を持つ部品を製造できるプロセスを利用して、CFRP部品を簡単に製造することが出来る。このことにより部品形状の制限を緩和し、CFRPの適用を拡大させ、ひいては環境問題の解決に寄与できる。

研究成果の概要（英文）：Laser-assisted 3D printing of carbon fibre reinforced plastic parts has been developed for the production of the parts with a various shape. In 3D printing using the fused filament fabrication, bundled carbon fibers are inserted between layers of plastic during printing, and the plastic layers and fibers are bonded by laser irradiation, resulting in high strength. In addition, combined Process of 3D printing and joining with different materials was developed, in which bonding is performed while forming caulking during printing, made it possible to print multi-material components.

研究分野：生産加工学

キーワード：3Dプリンティング CFRP レーザー マルチマテリアル

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

輸送機器のマルチマテリアル化の進行により、車体や内装メーカーにおいて、従来の鋼板から炭素繊維強化プラスチック(CFRP)部材への転換が図られている。3D プリンティングによる CFRP 部材の製造に関する研究は年々活発になっている一方、実製品への適用例がないことから、大型部材をターゲットとするより、本体と組み合わせて使用する小型部材への適用が実用的と考えた。炭素繊維挟込みによる CFRP 部材の製造方法についてはすでに論文で発表しているが、レーザーによる接合方法については検討の余地がある。

溶融積層造形法による樹脂部品の成形についての研究は、成形パラメーターについて多く取り組まれている。Sood ら^[1]は引張強さおよび衝撃強さに及ぼす積層厚さ、方向および幅など成形パラメーターの影響を調査した。炭素繊維強化樹脂部材の 3D プリンティングについては、溶融し押し出される樹脂内に炭素繊維を混入させる研究が多くある。Goh ら^[2]は連続炭素繊維を混入させた試験片の引張における破壊挙動を調査した。また Matsuzaki ら^[3]は連続炭素繊維を含んだ ABS 樹脂を用いて、3D プリンティングにおける円形状精度に及ぼす炭素繊維混入量および半径の影響を調査した。しかしこれらの方法では、炭素繊維の加熱および送りのコントロールが必要であり制御が難しく、また断面内に炭素繊維が分布し混入量が安定しない。また繊維の方向が樹脂線と同じ方向になるため、樹脂線の界面の強度が低下する問題がある。一方本研究による方法では、炭素繊維は任意の量および方向に配置でき、所望の強度を得ることが容易である点が他の研究と比較して優位である。

輸送機器への適用を考えると、金属と CFRP の接合は必須である。金属と CFRP の接合の研究は、接着剤および機械的締結なしの方法では、Okada らによって摩擦重ね接合法が開発されている^[4]。この方法は金属と樹脂を重ねて、金属側に回転する棒状工具を押付け、摩擦発熱させ熱伝導によって樹脂を溶融させ接合する方法である。極性官能基を持つ樹脂は水素結合により、持たない樹脂は金属表面にアルマイト皮膜処理を施すことで接合が可能となる。本研究も皮膜の種類は異なるが、同様の効果が期待される。

2. 研究の目的

本研究では、自由な形状を持つ CFRP 部材の製造と金属部材との接合を目的として、CFRP 部材の成形・接合同時 3D プリンティング法を開発する。あらかじめ成形された金属部材上に、樹脂を積層し、積層された樹脂間に炭素繊維を挟込み、レーザーによって接合し強度を向上させる。通常、成形と接合は別工程であるが、部材に直接 3D プリンティングすることで、1つのプロセスで完了できる。プロセス開発を通して、炭素繊維と樹脂、樹脂と金属の強度予測法を構築する。

3. 研究の方法

3.1. レーザー援用 3D プリンティング方法

CFRP 部材の 3D プリンティングは、申請者が開発した、図 1 に示すような炭素繊維を 3D プリンティング中の樹脂層間に挟込む方法を適用した^[5, 6]。樹脂層間に挟まれた炭素繊維をレーザーによって加熱し、周囲の樹脂と接合することで強度を向上させる。加熱に大きな影響を及ぼす樹脂の透過率は、厚さ、色などに影響される。また樹脂の低い熱伝導のため熱が集中し十分に溶融しないことが考えられ、レーザーの焦点距離、走査させるパスおよび速度も重要なパラメーターとなる。

これらの影響を評価するために、繊維なしで成形した試験片の間に繊維を挟み、その後青色半導体レーザー加熱接着し剥離強度を測定した。その後、インプロセスで印刷された引張試験片および自動車のバンパーモデルの強度試験を行った。

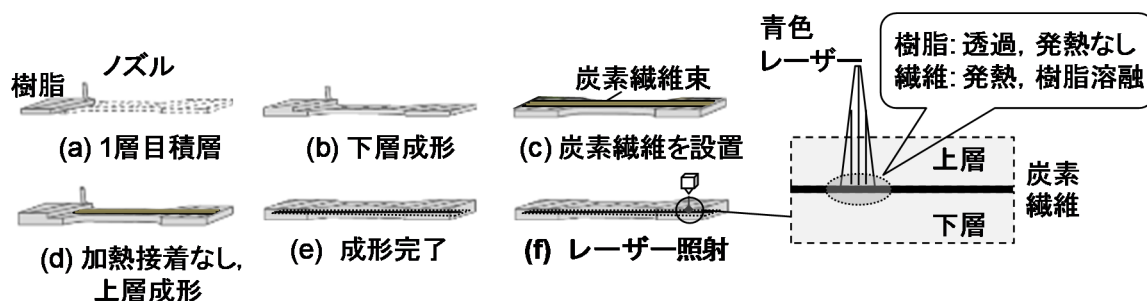


図 1 3D プリンティングによって成形された炭素繊維強化樹脂部材における青色半導体レーザーによる樹脂と繊維の加熱接着

3.2. 成形・機械的接合同時 3D プリンティング方法

金属部品に対する樹脂部品の成形・機械的接合同時 3D プリンティング方法を図 2 に示す。まず接合用の突起を持った樹脂部品を 3D プリンティングし、その上に穴の開いた金属部品を設置する。その後金属部品上に直接 3D プリンティングすることで、カシメを形成して機械的に接合する。この方法は表面処理が不要で、工程数と重量が増加しない点がメリットである。またノズルを二つ持つ 3D プリンターを使用すれば、異種樹脂をこの方法で接合しながら印刷することもできる。図 2(a)における樹脂板の突起の高さをパラメーターとして、印刷された試験片の強度を十字引張試験によって評価した。

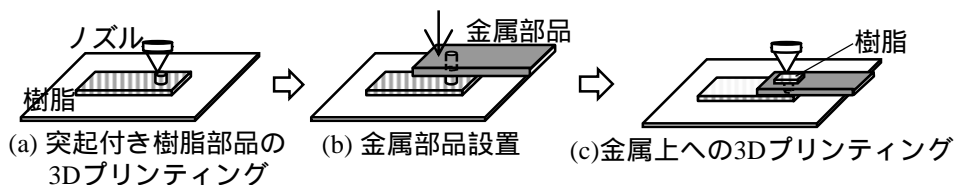


図 2 金属部品への樹脂部品の成形・機械的接合同時 3D プリンティング方法

4. 研究成果

4.1. レーザー援用 3D プリンティングによる CFRP 部品の印刷結果

レーザーの波長に対する樹脂の発熱温度を測定した。レーザーを 60s 照射した繊維なしの樹脂板の表面温度を図 3 に示す。板厚は 0.5mm である。透明および青はレーザーを吸収せず発熱が小さかったが、灰および黒はレーザーによって加熱され、樹脂表面が溶融し変形した。なお黒においては溶融した箇所にてかりが生じており、放射率が低下し温度が低く見積もられている可能性がある。

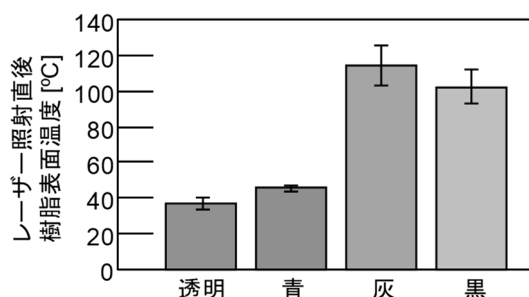


図 3 レーザーを 60 s 照射した繊維なしの樹脂板の表面温度

板厚 0.2mm の板間に繊維を挟込みレーザー接合した。レーザー 60 s 照射における樹脂板の接合直後表面温度を図 4 に示す。いずれの樹脂色においても接合は可能であったが灰および黒では樹脂の表面から加熱され、表面に穴が生じた。繊維なしではほとんど発熱しなかった透明および青においても、内部の繊維が発熱したことで樹脂の表面温度はかなり高くなった。

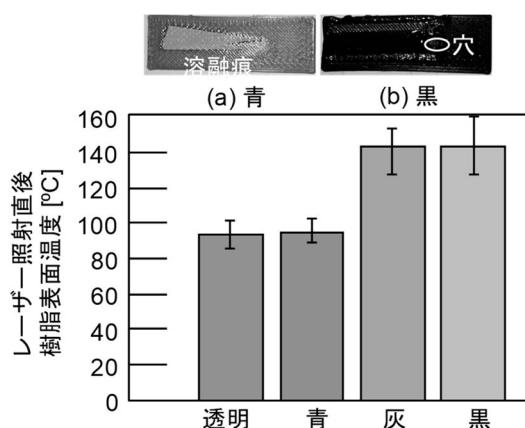


図 4 レーザーを 60s 照射した繊維が挟み込まれた樹脂板の接合直後表面温度

3D プリンティングされた CFRP 部材の引張荷重 - ストローク線図を図 5 に示す。繊維なしと比較してレーザーあり 2 層では最大荷重が約 2 倍となった。また 1 層と比較しても最大荷重は 10% 程度向上しており、炭素繊維を複数の層間に挟込むことで強度を向上させた。

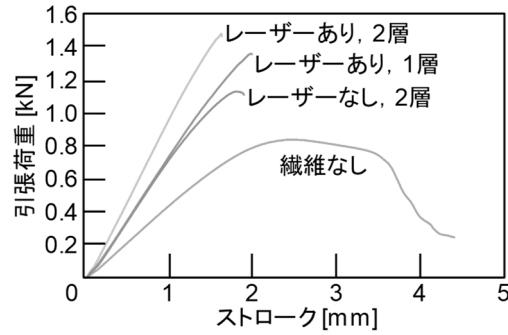


図5 3D プリンティングされた CFRP 部材の引張荷重 - ストローク線図

4.2. 閉断面を持つ CFRP 部材の曲げ試験

3D プリンティングによって閉断面を持つ部材を製造し、図 6 に示すように 3 点曲げ試験を行った。支点間距離は 50 mm で、試験速度は 10 mm/min とした。部材はプレス成形では製造が困難な閉断面形状かつ厚さが不均一な形状とした。炭素繊維は図 6(b) に示すように上面もしくは側壁に挟込み、レーザー接合した。製造時間はおよそ 4h であった。

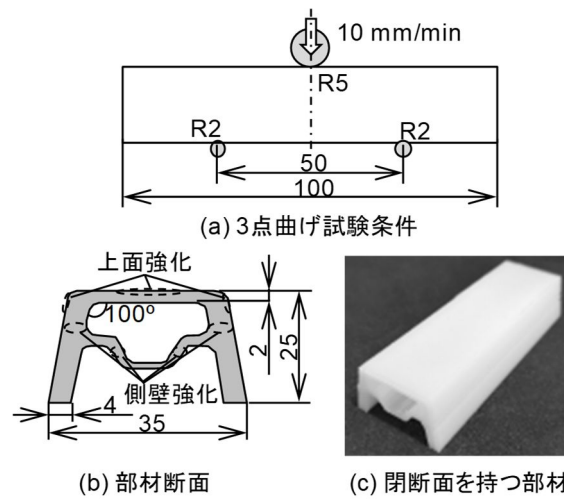


図 6 閉断面を持つ CFRP 部材と曲げ試験条件

閉断面を持つ CFRP 部材の 3 点曲げ荷重-ストローク線図を図 7 に示す。炭素繊維による上面強化によって、最大曲げ荷重は繊維なしと比較して 10% 程度向上した。

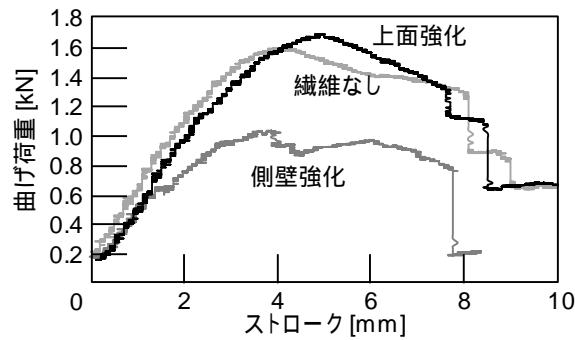


図 7 閉断面を持つ CFRP 部材の曲げ荷重-ストローク線図

4.3. 成形・機械的接合同时 3D プリンティングによって製造された金属と樹脂の接合部品の強度

成形・機械的接合同时 3D プリンティングによって製造された金属と樹脂の接合部品の強度に及ぼす突起高さの影響を図 8 に示す。突起高さ $h=0$ は突起の上面と金属板の表面が同じ高さである。見かけでは金属と樹脂は接合され一体部品となっている。せん断引張強度を測定したところ、強度にばらつきはあるものの、突起高さが高くなるにつれて強度が増加した。突起が押しつぶされることによって金属上に印刷される樹脂と突起の接合強度が増加したためと考えられる。

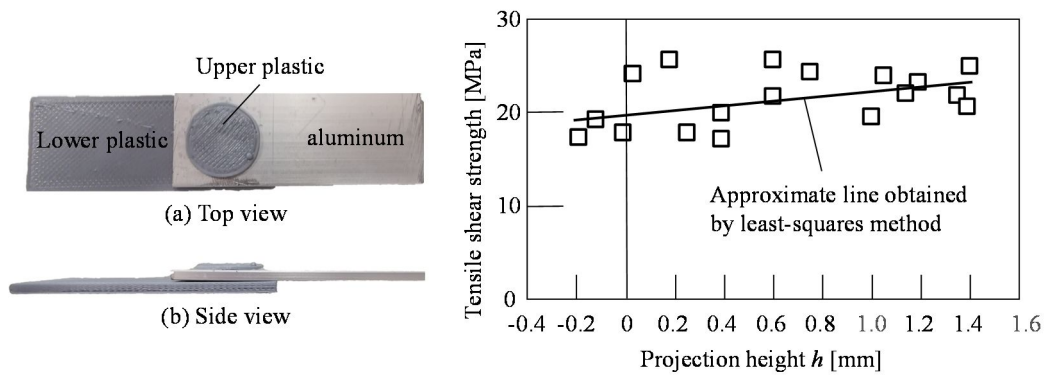


図 8 成形・機械的接合同時 3D プリンティングによって製造された金属と樹脂の接合部品の強度に及ぼす突起高さの影響

5. まとめ

自在な形状を持つ高比強度部材の 3D プリンティングによる製造に関する研究を実施した。レーザー援用 3D プリンティングにおいては、層間に挟み込まれた炭素繊維を加熱することで簡単に樹脂部材を高強度化することができた。また 3D プリンティング中にカシメを形成する成形・機械的接合同時 3D プリンティングによって、樹脂と金属が接合されたマルチマテリアル部品を印刷できた。この方法は金属と樹脂のみならず、異種樹脂の接合にも応用できる。またレーザー援用することで CFRP との組み合わせも容易であると考えられる。

参考文献

- [1] Sood et al., Materials and Design, 31-1 (2010) 287-295.
- [2] Goh et al., Materials and Design, 137-5 (2018) 79-89.
- [3] Matsuzaki et al., Additive Manufacturing, 24 (2018) 93-102.
- [4] Okada et al., Materials Science Forum 794-796 (2014) 395-400.
- [5] K. Mori, T. Maeno, Y. Nakagawa, Procedia Engineering, 81 (2014) 1595-1600.
- [6] Nakagawa et al., International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 91-5-8 (2017) 2811-2817.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yuki Nakagawa, Ayumu Abe, Masahiko Yoshino	4. 巻 16
2. 論文標題 Mechanical Joining with Aluminum Part by 3D Printing of Polylactic Acid and Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Parts for Fabrication of Multi-Material Parts	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 615-623
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/ijat.2022.p0615	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Nakagawa Yuki, Abe Ayumu, Yoshino Masahiko	4. 巻 1
2. 論文標題 Combined Process of 3D Printing and Joining with Metal by Fused Deposition Modelling of Plastic Parts	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 10th International Conference on Leading Edge Manufacturing Technologies in 21st Century, LEM	6. 最初と最後の頁 475-478
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakagawa Yuki, Mori Ken-ichiro, Yoshino Masahiko	4. 巻 73
2. 論文標題 Laser-assisted 3D printing of carbon fibre reinforced plastic parts	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Manufacturing Processes	6. 最初と最後の頁 375 ~ 384
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jmapro.2021.11.025	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yuki Nakagawa
2. 発表標題 Combined Process of 3D Printing and Joining with Metal by Fused Deposition Modelling of Plastic Parts
3. 学会等名 10th International Conference on Leading Edge Manufacturing Technologies in 21st Century（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中川佑貴
2. 発表標題 樹脂部品の成形・機械的接合同時3Dプリンティング
3. 学会等名 第72回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中川佑貴
2. 発表標題 炭素繊維強化樹脂部品のレーザー援用3Dプリンティングにおける樹脂と炭素繊維の接合に及ぼす樹脂色の影響
3. 学会等名 2021年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 中川佑貴ほか	4. 発行年 2020年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 469
3. 書名 3Dプリンタ用材料開発と造形物の高精度化 (第12章)	

1. 著者名 中川佑貴ほか	4. 発行年 2020年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 586
3. 書名 CFRP/CFRTPの 界面制御、成形加工技術と部材応用 (第8章)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------