

# 航空機グレードの力学特性を達成する 連続炭素繊維強化プラスチックの ハイパフォーマンス 3D プリンティング

日本大学 理工学部 機械工学科

市原 稔紀

## 1. はじめに

デジタルデータから直接部品を成形できる 3D プリントは、複雑な形状でもすばやく簡単に成形できるため、試作品の成形に活用されてきた。3D プリントに利用できる材料は、プラスチックだけでなく、鋼材などの高い力学特性を有する材料へ拡大している。このような材料の 3D プリントは、試作用途だけではなく、実際に使用可能な構造部品の成形に利用ができる。複雑な形状が成形可能という 3D プリントの利点を最大限に活かすために、3D プリンタとトポロジー最適化等の数値解析技術と組み合わせることで、より軽量で高性能な構造部品を実現している。しかしながら、鋼材はプラスチックに比べて比重が大きく軽量化への効果は限定的である。そこでプラスチック程度の比重でありながら鋼材と同等の力学特性を発揮できる炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の 3D プリンティングが提案された。CFRP の 3D プリントには、連続炭素繊維と母材のプラスチックとを別々に供給し、3D プリント中に複合化する「その場合侵法」と呼ばれる手法と、あらかじめプリプレグ化した CFRP を加熱溶融しながら積層する「予備含浸法」とがある。この中で予備含浸法は、あらかじめ安定した体積比率でプリプレグを準備できるため成形品の品質も安定している。しかしながら、3D プリントされた CFRP は、CFRP 内部に多くの欠陥を含んでおり航空機等で使用される CFRP に比べて大きく力学特性が劣る [1]。力学特性を定義される主要な欠陥として、ボイド、層間接着の弱さ、繊維蛇行などが挙げられる。これまでの研究で、ボイドや層間接着の弱さを克服するための手法が提案されてきた [2]。しかしながら、これらの手法では繊維蛇行を低減することはできない。繊維蛇行は特に CFRP の繊維方向の圧縮強度を著しく低下させることが知られている。従ってこの圧縮強度が設計強度となるが、構造部材として利用するためには十分ではない。我々の先行研究では、3D プリント中にフィラメントへ作用する力（すなわちプリント力）を適切に制御することで繊維蛇行を低減できることが示された [1]。これによって曲げ特性を向上させることができるが、作用している力が、CFRP 内部の欠陥に与える影響は不明である。

本研究では、3D プリント中にプリント力を測定できる 3D プリンタを新規開発し、プリント力が CFRP 内部の欠陥に与える影響を調査した。様々なプリント力で成形した CFRP を、X 線 CT 解析を用いて観察した。また構造テンソル解析を利用して CT 画像から繊維の揺らぎを定量的に計測した [3]。さらに、軸方向圧縮試験を実施し、プリント力を制御することで航空機グレードの圧縮強度が達成できることを実証した。

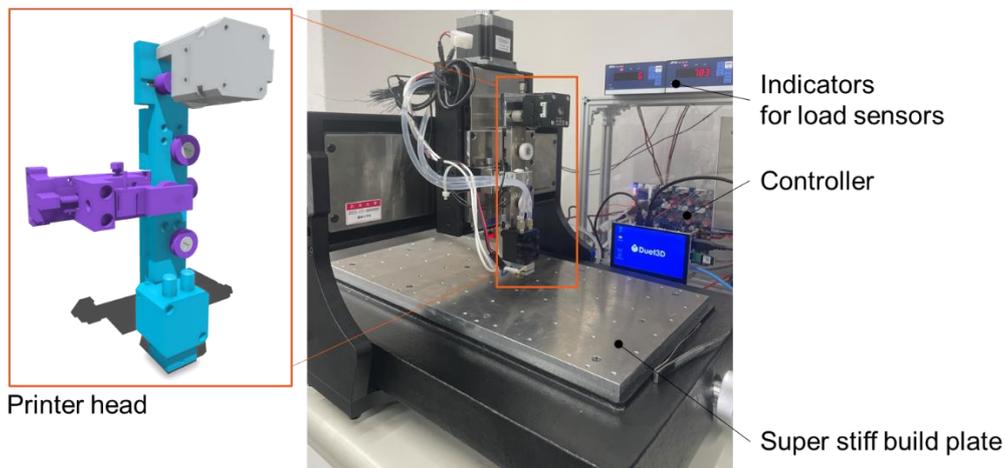


図 1 3D プリンタの外観

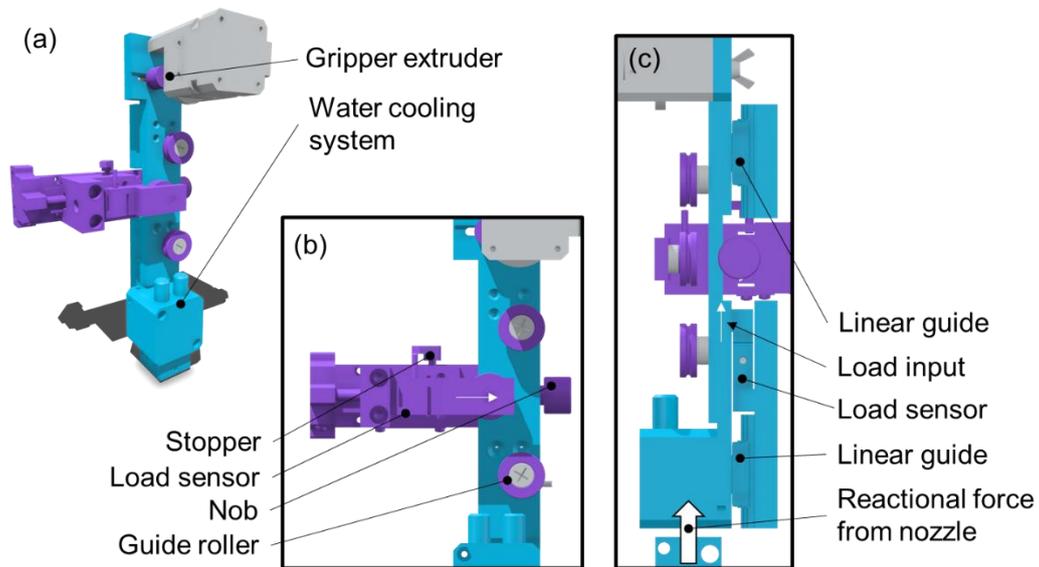


図 2 3D プリントヘッド各部の詳細 (a) 全体図 (b) 張力計測部 (c) コンパクション力測定部

## 2. プリント力が計測可能な 3D プリンタの開発

図 1 に開発した 3D プリンタの外観を示す。汎用の卓上門型 CNC 装置 (Kitmill RZ420, Originalmind) のツール部に CFRP 用 3D プリンタヘッドを取り付けた。ベースマシンである CNC 装置は、鋳鉄製のビルドプレートで摺動部分は複数のリニアガイドで構成された堅牢な構造であり、プリント力を効率よく成形中の CFRP へ伝えることができる。CFRP 成形中のプリント力は大きく 2 つに分けられる。一つはノズルを介してフィラメントへ鉛直に作用するコンパクション力であり、もう一つはフィラメントの繊維方向へ作用する張力である。本研究で開発した 3D プリンタは、これらの力を成形中に計測可能である。

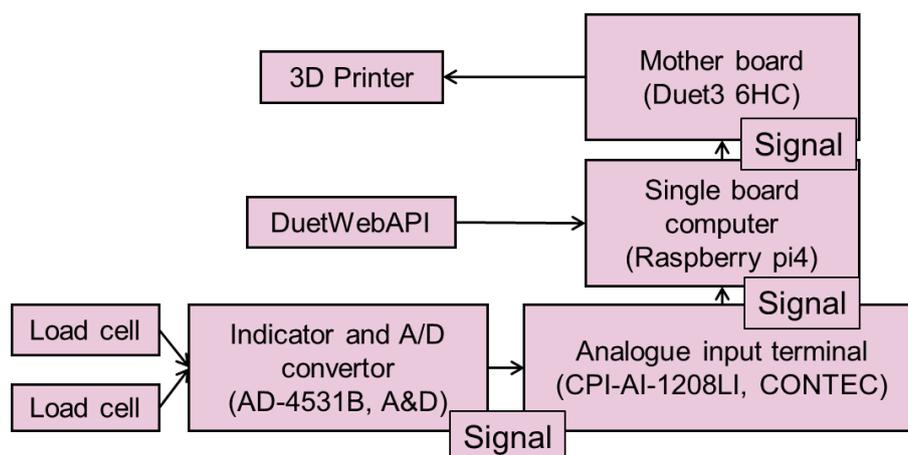


図3 開発 3D プリンタの制御方法

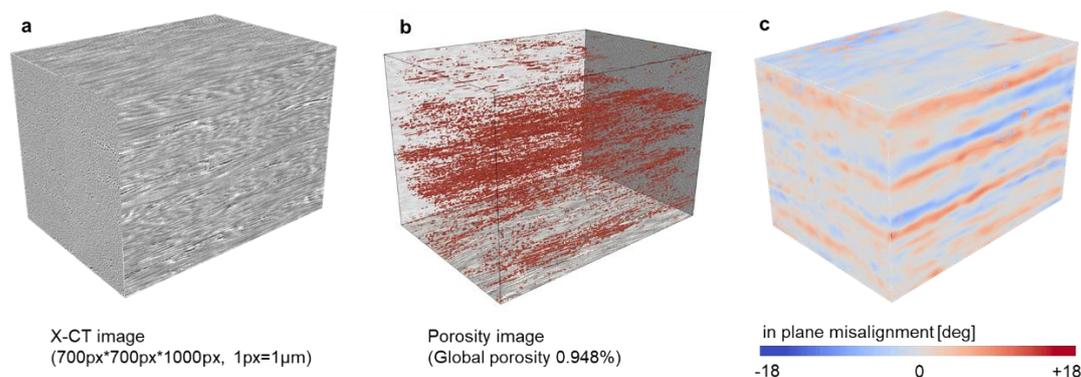


図4 X線 CT 観察によるマイクロストラクチャ (a) CT 画像 (b) ボイド (c) 構造テンソルによる繊維蛇行の可視化

コンパクション力は、図 2 (c) に示すような 2 枚対の板の中間部に接続されたロードセル (URM, Unipulse) によって計測された。これらの板はリニアガイドで接続されており、鉛直方向以外の力を除外することができる。張力は、図 2 (b) に示すような加熱前のフィラメント部分に取り付けられた 3 つのローラーで構成されたテンションゲージで計測された。テンションゲージはコンパクション力測定用のロードセルと同様のロードセルが搭載されている。これらのロードセルで計測されたプリント力は、ひずみゲージ用のインジケータを介してアナログ信号に変換された。

3D プリンタの各軸におけるモータや温度は図 3 に示すように、3D プリンタ用の汎用ボード (Duet 3 6HC, Duet3D) によって制御された。汎用ボードはシングルボードコンピュータ (Raspberry Pi4) およびアナログ入力ターミナル (CPI-AI-1208LI, Contec) と接続した。ロードセルの信号はアナログ入力ターミナルを介して Duet 3 6HC, Duet3D の制御へ利用した。3D プリンタは Duet 3 の DuetWebAPI と呼ばれる Python インターフェースと contec 社が提供する API-AIO の Python インターフェースを組み合わせることで制御した。

3D プリントに使用した材料は、ポリエーテルケトンケトン (PEEK) 樹脂を母材とした炭素繊維が 58vol%含有する CF-PEKK プリプレグフィラメントである。フィラメントは直径 0.5mm の円形断面であり、成形可能温度は約 350°Cである。

### 3. X線 CT 観察によるマイクロストラクチャの観察

プリント力が 3D プリント CFRP のマイクロストラクチャに与える影響を評価するために、X線 CT 装置 (TDM1601-II, ヤマト化学) を用いて内部構造を観察した。図 4 に CT 観察の結果を示す。CT 画像における黒い個所はボイドを表しており、最も明るい領域が炭素繊維を表している。また、グレーの領域は母材樹脂を表している。張力が作用していない場合、繊維の蛇行や繊維間のボイドが確認された。張力は繊維を軸方向へ揃え、繊維間のボイドを低減した。

繊維蛇行の低減を定量的に評価するために、CT 画像の構造テンソル解析を実施した。構造テンソル解析では、次式のように二つのガウスフィルタを用いて構造テンソル  $S$  を計算する。

$$S = K_{\sigma} * \{\nabla V_{\sigma}(\nabla V_{\sigma})^T\} \quad (1)$$

ここで、 $\sigma$ はガウスフィルタの標準偏差を表す。 $K_{\sigma}$ は積分フィルタ、 $\nabla V_{\sigma}$ は微分フィルタを表す。構造テンソル $S$ の最小固有ベクトル $\mathbf{v}$ は各ピクセルにおける繊維方向を表す。最小固有ベクトル $\mathbf{v}$ を用いて、層内 $\varphi_{in}$ および面外の繊維蛇行はそれぞれ

$$\varphi_{in} = \tan^{-1} \frac{v_1}{v_3}, \quad (2)$$

$$\varphi_{out} = \tan^{-1} \frac{v_2}{v_3}. \quad (3)$$

と計算した。

構造テンソルによって解析した繊維蛇行の分布を図 4 (c) に示す。張力によって繊維蛇行の標準偏差が 1°程度まで低減されることが分かった。一般的に航空機などの構造部材として使用される CFRP の繊維蛇行も 1°程度であることから、適切なプリント力は 3D プリント CFRP の繊維蛇行を他の成形法の CFRP に匹敵するレベルまで低減できる。ただし過剰な張力は繊維破断を引き起こし、なおかつ繊維蛇行の低減につながらないことから、張力は適切な値に制御する必要がある。

図 4 (b) に CT 画像からボイドを可視化した結果を示す。張力が作用すると繊維間のボイドが低減された。張力が作用していない場合ボイド率は 2.5~3.0vol%程度であったが、張力によってボイド率は 0.5~1.0%程度まで低減した。

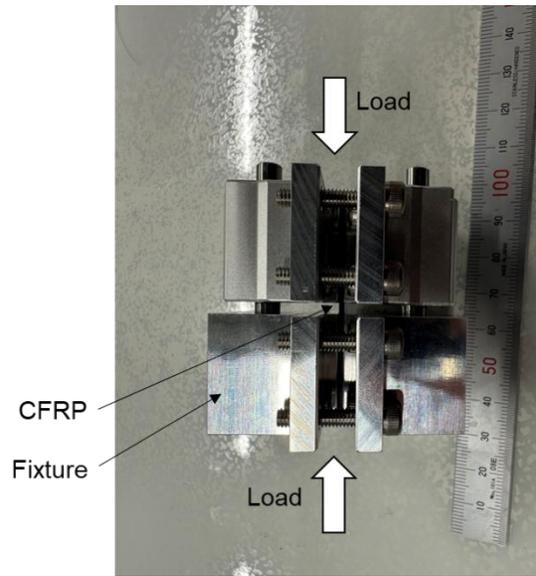


図 5 圧縮試験治具

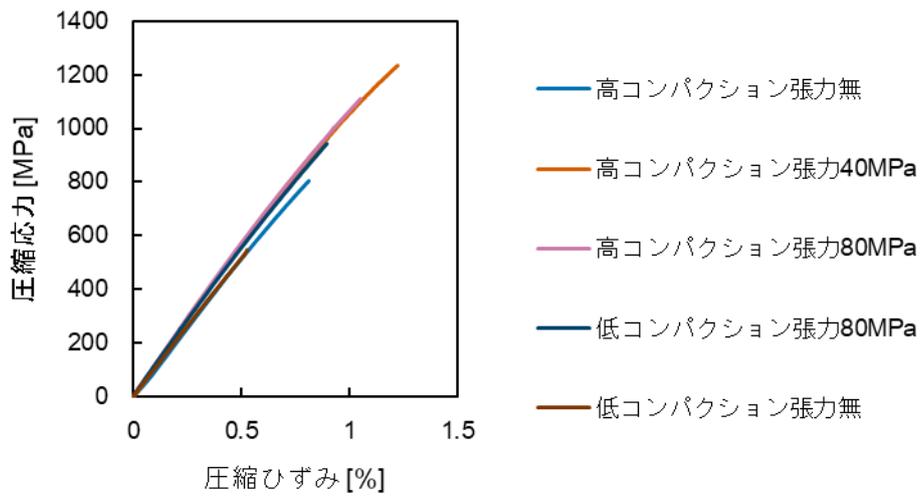


図 6 圧縮応力ひずみ線図

#### 4. シングルライン圧縮試験

プリント力によって改善したマイクロストラクチャが、力学特性に与える影響を調査するために繊維方向圧縮試験を実施した。ここでは、1方向に1ラインだけCFRPを成形したシングルライン圧縮試験片を作成した。このような1ラインのCFRPはラティス構造やアイソグリッド構造などに見られ、軸方向の圧縮荷重を受けることがある。圧縮試験治具は複合負荷圧縮 (Combined Loading Compression) 方式を採用した。自作した試験治具を図5に示す。試験片は

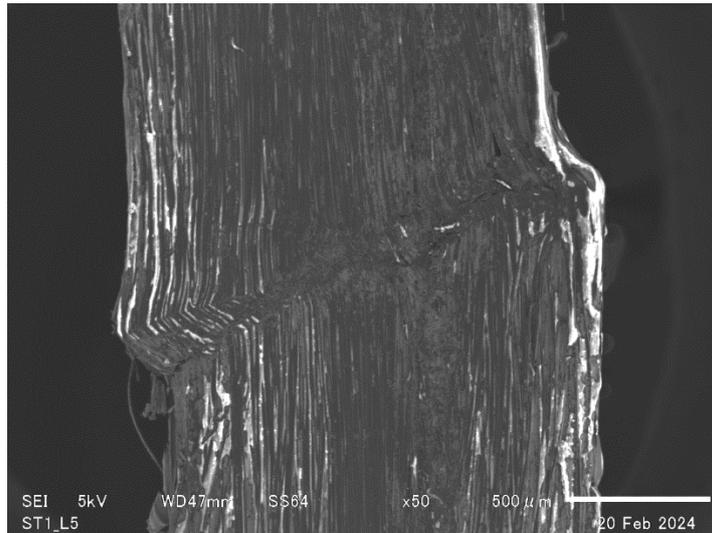


図 7 圧縮破壊時におけるキンクバンド

長さ 55 mm に切り出し、両端から 25 mm は端部破壊を防ぐためにタブ付けをした。負荷中のひずみは試験片評点部の両面に添付したひずみゲージで計測した。試験速度は 0.5 mm/min とした。

圧縮試験によって得られた応力ひずみ線図を図 6 に示す。また圧縮破壊後のキンクバンドを図 7 に示す。キンクバンドはすべての試験片で面内方向に生じた。すべての試験片で線形的に応力が上昇し、脆性的に破壊した。小さなコンパクション力でなおかつ張力無しで成形した試験片は、580MPa 程度の圧縮強度であった。オートクレーブ等で成形した熱可塑性樹脂を母材とした CFRP の圧縮強度は 1000~1300 MPa 程度であるため、これに比べて半分程度の特長しか発現していない。これは繊維蛇行の影響に加えて、層間の接着が十分でないことに起因している。コンパクション力が小さい場合でも、張力を作用させることで圧縮強度が 800 MPa 程度まで上昇した。これは張力によって繊維が配向したことに加えて、繊維の凝集によって熔融したフィラメントの粘度が見かけ上高くなり、結果としてコンパクション力が向上したためである。しかしながら、いずれの場合も繊維蛇行を考慮した理論モデルの予測値 [4] よりも大幅に下回る圧縮強度であった。コンパクション力を大きくし張力を付与していない場合、圧縮強度は 800 MPa 程度であり、これは理論モデルに十分近い圧縮強度であった。さらに張力を 40 MPa 程度付与した場合、圧縮強度は 1100 MPa 程度まで向上した。これは繊維の分散が 1°程度の時の理論圧縮強度に十分近い値である。ただし張力を 80 MPa 程度付与した場合は、圧縮強度の若干の低下が見られた。これは過剰な張力によって繊維破断が生じたためである。

コンパクション力と張力を付与しながら成形することで最大圧縮強度は 1100 MPa を超える結果となった。これは航空機等で使用されるオートクレーブで成形した熱可塑性樹脂を母材とする CFRP の圧縮強度に匹敵し、チタニウム合金 Ti-6Al-4V を超える圧縮強度である。3D プリントによる CFRP では、このような航空機グレードの圧縮強度を達成した例はない。

## 5. まとめ

本研究では、航空機グレードの力学特性を発揮する 3D プリント CFRP の実現を目的として、プリント力を制御しながら成形が可能な 3D プリンタを開発した。様々なプリント力で CFRP を成形し、そのマイクロストラクチャを X 線 CT 装置で観察した。また定量的に繊維配向の分布を取得した。シングルライン圧縮試験を実施し、航空機グレードの CFRP が 3D プリントで実現可能であることを実証した。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、天野工業技術研究所より多大なご支援を頂きました。

## 参考文献

- [1] Ichihara N, Ueda M, Kajiwara K, Le Duigou A, Castro M. 3D printing with tension and compaction: prevention of fiber waviness in 3D-printed continuous carbon fiber-reinforced thermoplastics. *Advanced Composite Materials* 2024;33:377–87.  
<https://doi.org/10.1080/09243046.2023.2260233>.
- [2] Luo M, Tian X, Shang J, Zhu W, Li D, Qin Y. Impregnation and interlayer bonding behaviours of 3D-printed continuous carbon-fiber-reinforced poly-ether-ether-ketone composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2019;121:130–8.  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.03.020>.
- [3] Jeppesen N, Mikkelsen LP, Dahl AB, Christensen AN, Dahl VA. Quantifying effects of manufacturing methods on fiber orientation in unidirectional composites using structure tensor analysis. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2021;149:106541.  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106541>.
- [4] Ueda M, Suzuki Y, Pinho ST. Estimation of axial compressive strength of unidirectional carbon fiber-reinforced plastic considering the variability of fiber misalignment. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2023;175:107821.  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107821>.