

令和 6 年 5 月 21 日現在

機関番号：32665

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20415

研究課題名（和文）3DプリントCFRPのミクロ構造に基づく最適プリントパスの解析・実験的実証

研究課題名（英文）Experimental and simulational demonstration of the optimal print path for 3D printed CFRP based on the microstructure

研究代表者

市原 稔紀 (ICHIHARA, Naruki)

日本大学・理工学部・助手

研究者番号：30961552

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,500,000円

研究成果の概要（和文）：航空機など、軽量でなおかつ丈夫さが求められる構造で活用されている炭素繊維強化プラスチック（CFRP）を成形できる3Dプリンターを活用して、外形形状のみならず、構造の内部における3Dプリントパスを最適化設計した。これにより、CFRPの特性を最大限に活かした構造設計を可能とし、より軽量でなおかつ高性能なCFRP構造の創出を可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義：本研究は、熱や電気をはじめとする様々な物理現象を数値的に予測することができる有限要素法によるトポロジー最適化に基づいている。従ってトポロジー最適化によって得られた様々な物理現象における最適構造をCFRP等の複合材料で3Dプリント可能にする点で汎用性が高く、今後の最適設計の研究を発展させる可能性がある。

社会的意義：本研究で設計可能なCFRP構造は、従来CFRP構造よりも軽量かつ高性能であり、輸送機等の軽量化に直接貢献ができる。

研究成果の概要（英文）：Utilizing a 3D printer that can build carbon fiber reinforced plastic (CFRP), which is used in aerospace applications, we have optimized the 3D printing path for the external shape and the interior of the structure. This process enables optimal design that takes full advantage of CFRP's characteristics, making it possible to create a lighter and more efficient CFRP structure.

研究分野：複合材料の力学

キーワード：3Dプリント 構造最適化 CFRP トポロジー最適化 異方性

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

3D プリントを利用して炭素繊維強化プラスチック (CFRP) などの複合材料が成形可能となった。CFRP は航空機等によく使用されている材料であり、樹脂程度の比重でありながら金属を超える力学特性を有することから、3D プリントできる高性能材料として注目されている。ただし CFRP は炭素繊維の配向する方向にのみ著しく高い力学特性を有しており、そのほかの方向には樹脂程度の特性しか発揮できない「異方性材料」である。金属等の等方性材料に比べて材料の配向を考慮して構造設計をする必要があることから、設計が困難な材料である。

CFRP を 3D プリントする場合、あらかじめ繊維に熱可塑性樹脂を含浸したフィラメント状の材料をノズルで熔融しながら積層する。ノズルは 3 次元ロボットに取り付けられており、プリントパスを積層していくことで構造を成形する。炭素繊維はノズルの通った軌跡であるプリントパス方向に配向することから、プリントパス方向に高い力学特性を有する。従って 3D プリント CFRP では、このプリントパス設計が構造の性能を決める[1]。

材料の最適な配置を計算的に求めるトポロジー最適化という手法がある[2]。トポロジー最適化では、設計変数として材料密度を取り、構造の剛性や強度を限られた材料使用量の中で最大化する。設計変数として、材料密度に加えて材料の各位置の配向を表す新しい設計変数を導入し、材料密度と同時に最適化することで、材料異方性を考慮したトポロジー最適化、すなわち「異方性トポロジー最適化」が提案されている[3]。異方性トポロジー最適化では、構造の最適形状と、各位置でどの方向に材料を配向すべきかを表すベクトル場が得られる。ただし、得られた最適化結果からどのようにして 3D プリントパスを計画するかに課題がある。ベクトル場に沿うように人の手でプリントパスを計画する手法は再現性が無く、また構造が複雑になると困難である。従って自動で、なおかつ最適化結果をよく反映したプリントパス計画手法の確立が必要である。研究代表者は、ベクトル場に沿ったプリントパスを計画する手法を提案した[1]。この文献では、外形形状や材料密度は一定とし最適な配向のみを反映したプリントパスを計画する手法を提案している。本研究では、これをさらに発展させ、外形形状や材料内部の密度も可変とした最適構造のプリントパス計画手法の開発と実証を目指す。

2. 研究の目的

本研究では、CFRP を造形できる 3D プリントを活用して、外形形状のみならず繊維配向やハッチ間隔などのプリントパスまで最適化された高性能 CFRP を成形し、構造のさらなる軽量化、高機能化を目的とする。

3. 研究の方法

図 1 に示すような、プリントパスを各層で互い違いに交差させたラティス構造を想定した。このラティス構造は、隣り合うプリントパス間の間隔 (ハッチ間隔) を調整することで密度が可変である。プリントパスの幅とハッチ間隔とが等しければ密度は 100% となる。また、曲線的なプリントパスを用いれば各位置において、ラティス構造を任意に配向することができる。異方性トポロジー最適化において用いる、ラティス構造の力学特性と密度との関係を調べるために、本研究では漸近均質化法を用いた。図 1 に示すようなユニットセルを仮定し、周期境界条件を設定する各方向に変形を与えたときの反力から、密度とラティス構造の力学特性との関係を数値的に求めた。またラティス構造の配向は回転変換行列を掛けることで表した。以上により、ラティス構造の密度と向きに対する力学特性が数値的に計算可能となった。

漸近均質化法を用いて求めたラティス構造の力学特性を用いて、異方性トポロジー最適化を実施した。次式で示す弾性体のコンプライアンス最小化問題を考える。

$$\min_{\mathbf{d}} F = \int_D \boldsymbol{\varepsilon} : \tilde{\mathbf{C}} : \boldsymbol{\varepsilon} dV \quad (1)$$

$$G(\mathbf{d}) = \int_D \rho d\Omega - \bar{M} \leq 0 \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \tilde{\mathbf{C}} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \quad (4)$$

$$\begin{cases} -\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0 & \text{in } D \\ \mathbf{u} = 0 & \text{on } \Gamma_D \\ \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{t} & \text{on } \Gamma_N \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 F はコンプライアンス、 d は設計変数、 ϵ および σ はひずみと応力、 \tilde{C} は漸近均質化法を用いて求めたラティス構造の剛性マトリクス、 ρ と \bar{M} は密度と上限質量、 u と t は変位と力を表す。また D は設計領域を表し、 Γ_D と Γ_N はディレクレ境界条件とノイマン境界条件とを表す。この最適化問題を、図2に示すような境界条件のもと解くことで、図3に示すような最適な密度分布と配向ベクトルとを得た。ただし、最適な配向ベクトルと密度分布は初期配向ベクトルの影響を強く受けるため、本研究では、「異方性ペナルティ法」と呼称した、初期配向ベクトルに依存しない最適化手法を新たに提案した。

最適化結果は有限要素に離散化されており、このままでは3Dプリントすることができない。ここでは、Swift-Hohenberg方程式を利用したベクトル場に沿った縞模様の生成プロセスを応用してプリントパスを生成した。このプリントパスを基に成形した最適化構造を図3に示す。また最適化構造の力学特性を実験的に実証するために、最適化の境界条件と同等の材料試験を実施した(図3)。その結果、最適化で予測されたような力学特性の向上を確認できた。

4. 研究成果

漸近均質化法を用いたラティス構造の力学特性を基に、異方性トポロジー最適化を用いて剛性を最大化する材料密度分布と配向ベクトルを得た。この結果を基に、プリントパスを自動で計画する方法を提案し、実際に3Dプリントを実施した。3Dプリントした構造に対し材料試験を実施することで、最適化で予測される剛性の向上が実験的にも発現するか検証した。結果として実験的に力学特性の向上が確認された。本成果によって、最適化結果から実際の構造を成形する過程のギャップを埋めることができた。また、本研究成果は異方性トポロジー最適化に基づくため、剛性最大化以外の物理現象にも応用可能であり、様々な観点で最適化設計された構造の創出が見込まれる。

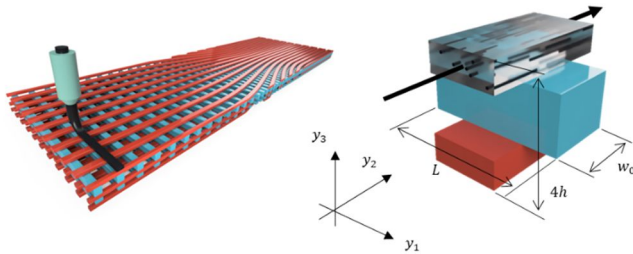


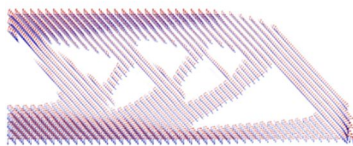
図1 曲線プリントパスで構成されたラティス構造とユニットセル



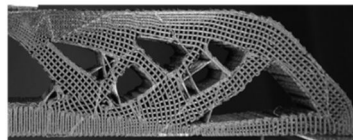
図2 境界条件



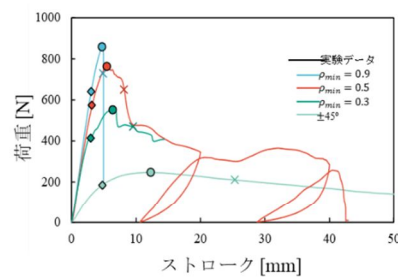
最適材料密度



最適配向角



3Dプリント構造



実験で得られた荷重一変位線図

図3 最適化結果と3Dプリント構造および実験から得られた荷重一変位線図

参 考 文 献

- [1] Ichihara N, Ueda M: 3D-print infill generation using the biological phase field of an optimized discrete material orientation vector field. *Composites Part B: Engineering*, **232**: 109626 (2022).
- [2] Sigmund O., Maute K: Topology optimization approaches. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **48**, 1031–1055 (2013).
- [3] Nomura T, Kawamoto A, Kondoh T, Dede E M, Dede E M, Song Y, Kikuchi N: Inverse design of structure and fiber orientation by means of topology optimization with tensor field variables, *Composites Part B: Engineering*, **176**, 107187 (2019).

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 Ichihara Naruki, Ueda Masahito	4. 巻 253
2. 論文標題 3D-printed high-toughness composite structures by anisotropic topology optimization	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Composites Part B: Engineering	6. 最初と最後の頁 110572 ~ 110572
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compositesb.2023.110572	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 Ichihara Naruki, Ueda Masahito, Todoroki Akira	4. 巻 2
2. 論文標題 Effects of a Perimeter on the Post-failure Behavior of Fiber-reinforced Polymer Composite Lattices	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers	6. 最初と最後の頁 100074 ~ 100074
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cjmeam.2023.100074	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 Ichihara Naruki, Ueda Masahito, Yokozeki Tomohiro	4. 巻 58
2. 論文標題 Penalized anisotropy: Controlling anisotropy growth in concurrent optimization of topology and fiber orientation for orthotropic composite materials	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Composite Materials	6. 最初と最後の頁 677 ~ 688
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/00219983241230379	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6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 市原稔紀, 上田政人
2. 発表標題 異方性トポロジー最適化に基づく3Dプリント複合材料の高靱性ラティス構造
3. 学会等名 日本複合材料学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naruki Ichihara, Masahito Ueda
2. 発表標題 3D print path generation based on the optimized material orientation
3. 学会等名 3rd International Conference on Additive Fabrication of Composites (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naruki Ichihara, Masahito Ueda
2. 発表標題 Topology and material orientation optimization for 3D printed fiber-reinforced polymers
3. 学会等名 International Conference on Materials and Processing 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naruki Ichihara
2. 発表標題 Conformed print path generation with optimized material orientation for 3D printed fiber reinforced polymers
3. 学会等名 CAMX2022 SAMPE University Research Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naruki Ichihara, Masahito Ueda
2. 発表標題 TAILORING OF CONTINUOUS CARBON FIBER REINFORCED POLYMER LATTICE STRUCTURES
3. 学会等名 23rd International Conference on Composite Materials (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 市原稔紀, 上田政人
2. 発表標題 材料配向とトポロジーの同時最適化における異方性発達の制御
3. 学会等名 M&M2023 材料力学カンファレンス / M&P2023 機械材料・材料加工技術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔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