

応力解析を用いたインフィル効率化による軽量・高剛性 3D プリント手法

A Novel 3D Printing Technique for Fabricating Lightweight and High-Stiffness Structures through Optimized Infill Distribution Based on Stress Analysis

谷口 朝洋¹, 矢田 美涼¹, 田中 浩也²

Tomohiro TANIGUCHI¹, Misuzu YADA¹, Hiroya TANAKA²

¹慶應義塾大学大学院, ²慶應義塾大学

¹Keio University Graduate School, ²Keio University

【要約】

MEX 方式 3D プリンタでは、スライスソフトが 3D モデルを外周壁と内部の格子構造(インフィル)からなる造形データに変換する。しかし、従来のインフィルは基本的に密度が均一であるため、材料や造形時間の観点から非効率という課題があった。

そこで本研究では、構造解析による応力分布に基づきインフィル密度を部位ごとに最適化する手法を提案し、それを実現するソフトウェア『Strecs3D』を開発した。

本ソフトウェアは、応力が高い領域には密なインフィルを、低い領域には疎なインフィルを配置する造形データを生成する。本手法を用いて製作した造形物の評価を通じて、材料使用量と造形時間を削減しつつ、剛性を大幅に向上できることを確認した。

キーワード: 3D プリンタ, インフィル, ソフトウェア, 応力解析, FEA

【Abstract】

In Material Extrusion (MEX) 3D printing, slicing software converts a 3D model into fabrication data, which consists of outer shells and an internal lattice structure known as infill. However, conventional infill typically has a uniform density, posing a challenge of inefficiency in terms of material consumption and fabrication time. This study proposes a method for locally optimizing infill density based on stress distribution derived from structural analysis. To implement this method, we have developed a software tool named "Strecs3D." This software generates fabrication data by assigning a dense infill to high-stress regions and a sparse infill to low-stress regions. Evaluation of fabricated parts demonstrates that the proposed method can significantly improve stiffness while simultaneously reducing both material usage and fabrication time.

Keywords: 3D Printer, Infill, Software, Stress Analysis, FEA

1. はじめに

1.1 背景

積層造形(Additive Manufacturing, AM), 特に熱溶解積層(Fused Deposition Modeling, FDM)方式の 3D プリンティング技術は、試作品製作から最終製品の製造に至るまで、その応用範囲を急速に拡大させている。FDM 方式において、造形物の内部を充填する構造は「インフィル」と呼ばれ、その密度やパターンは、完成品の機械的強度、重量、そして造形時間を決定づける極めて重要な設計パラメータである[1]。

従来、多くのスライサーソフトウェアで採用されている標準的なアプローチは、インフィルの密度やパターンをモデル全体にわたって均一に適用するものであったが、構造力学的な観点からは課題を内包している。

実際の工学製品が荷重を受ける際、その内部に生じる応力は決して均一に分布しない。応力は特定の箇所に集中する一方、他の多くの領域ではごくわずかな応力しか発生しないのが一般的である。しかし、均一なインフィルを適用する従来の手法は、このような不均一な応力分布を考慮していない。その結果、応力がほとんど

かからない不要な部分にも過剰な材料が配置される一方で、強度が最も要求される応力集中部では材料が不足するという、構造的な非効率が生じる。

このような非効率な材料配置は、材料の無駄や、重量および造形時間の増加につながる。また、大きな力がかかる部分では強度が不足し、意図しない破損を招く可能性もある。したがって、軽量で信頼性の高い部品を造るためには、実際の負荷に応じて材料を効率的に配置する、新たなインフィル最適化技術が求められる。

1.2 関連研究

3D プリンティングにおけるインフィル最適化のアプローチは、その原理と実装の複雑さから、スライサーに統合された幾何学的ヒューリスティクスと、物理シミュレーションに基づく先進的な計算設計フレームワークに大別される。

前者は、Prusa Slicer の「アダプティブキュービックインフィル」機能[2]に代表されるように、モデルの外壁からの距離といった幾何学的特徴に基づいて経験則的に密度を変化させる手法である[3]。これらは計算コストも低く一般的なスライスソフトへ統合されておりユーザビリ

ティが高いものの、実際の荷重条件を考慮しないため最適化の精度には限界がある。

後者は、構造解析や計算設計フレームワークを駆使する、より専門的で理論的なアプローチである。その中核をなすのが、与えられた設計領域、荷重、境界条件の下で剛性などの性能を最大化するように材料の最適配置を算出する計算手法であるトポロジー最適化(TO)だ。これをインフィルに応用する研究として、例えば Jun Wu らは、部品の外殻を維持しつつ、内部の均一なインフィルを TO によって生成された耐荷重性に優れたラティス構造に置き換える手法を提案した[4]。また、Li Yi らは TO の解析結果をフィラメントの吐出量を局所的に制御する手法に埋め込み、最適化された密度分布を物理的に再現するアプローチを提示している[5]。他にも Yamin Li, Samuel Rilling らをはじめ、TO の結果からインフィル密度を局所的に変化させる試みは数多く存在する[6,7]。

さらに、Kam-Ming Mark Tam は密度ではなく、応力解析に基づきフィラメントの経路自体を主応力方向に沿わせることで最適化を目指すなど、多様な研究が進められている[8]。

1. 3 研究目的

前節で示した、大多数のユーザーが利用する簡易な手法と、一部の専門家のみが利用可能な高度な手法との間には、応用上の断絶、いわゆる「アカデミック・プラクティショナー・ギャップ」[9]が存在する。本研究で開発した Strecs3D(Fig. 1)は、このギャップを埋めることを目的とする。基本的な有限要素解析(FEA)の結果に基づき、工学的に妥当な応力分布に従ってインフィル密度を最適化する。これにより、TO ほどの複雑性を伴わずに物理ベースの最適化を可能とし、専門家でないエンジニアや設計者にもアクセス可能な実用的ソリューションを提供するものである。

Table1. Comparison with conventional methods

手法	基本原理	主な入力	主な出力	計算コスト	主な利点	主な限界
Adaptive Cubic[2]	幾何学的ヒューリスティクス	スライサー設定	G コード	低	周辺部の強度向上	荷重を考慮しない
Modifier(手動修飾子)	ユーザーの直感	Modifier メッシュ	G コード	低	局所的な制御	非科学的、非スケーラブル
グラデーションスクリプト ³	幾何学的ヒューリスティクス	G コード+スクリプト	変更された G コード	低(後処理)	滑らかな勾配	外部ツールが必要
Strecs3D	FEA 応力マッピング	STL + VTU (荷重/拘束)	密度領域を持つ 3MF	中(前処理)	アクセス可能な物理ベース最適化	等方性を仮定、非反復的
トポロジー最適化[4, 5, 6, 7]	数学的最適化	設計空間+荷重	最適化された STL/STEP	高	新しい形状の生成	計算コストが高い
応力整合ツールパス ⁸	異方性プロセス最適化	FEA 応力場	曲線 G コード	非常に高い	異方性強度を最大化	研究レベルの複雑性

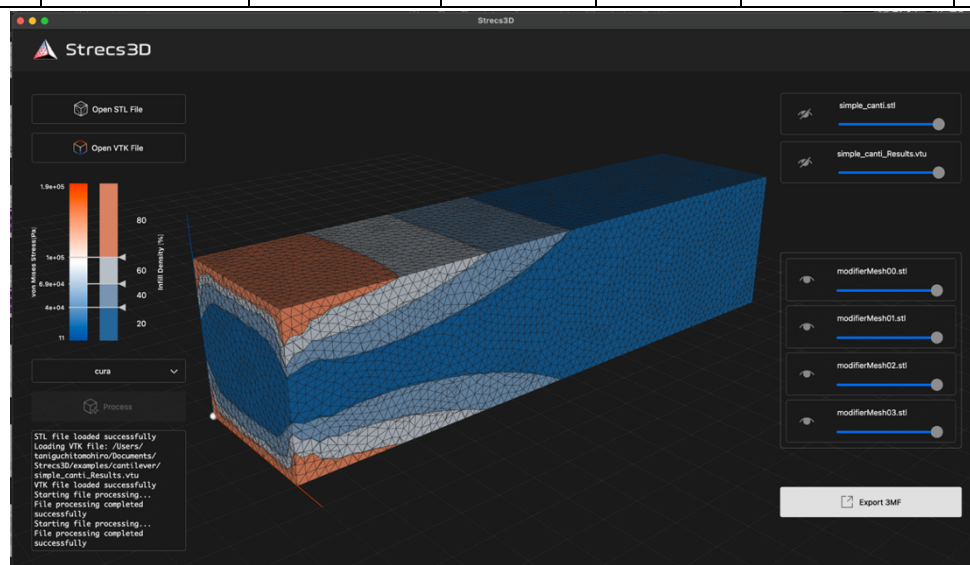


Fig.1. Screenshot of Strecs3D

2. 提案手法

本研究では、3D プリント部品の内部構造を力学的な要求に応じて最適化するため、汎用ツールと独自開発のソフトウェアを連携させる新たなワークフロー「Strecs3D メソッドロジー」を提案する。本手法は、(1)汎用 CAE ソフトによる応力解析、(2)提案ソフトウェア Strecs3D による最適化意図の具体化、(3)主要スライサーによる最終的な G-code 生成という 3 つのステップで構成され、専門的な知識がなくとも応力に基づいたインフィル設計を可能にする。

第一に、FreeCAD などの汎用 CAE ソフトを用いて、対象モデルに想定される荷重・拘束条件に基づいた有限要素解析 (FEA) を実行し、内部の応力分布データ (VTU ファイル) を取得する (Fig. 2)。

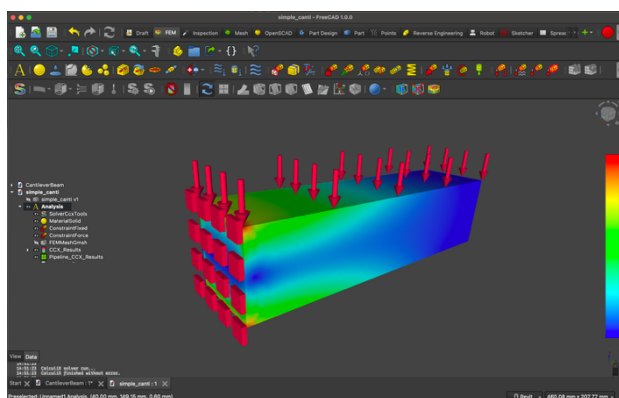


Fig.2. An example of an FEA simulation in FreeCAD

第二に、本研究で開発したソフトウェア「Strecs3D」に、モデル形状 (STL) と先の応力分布データ (VTU) を読み込む。ユーザーは、ソフトウェア上で可視化された応力分布を確認しながら、応力とインフィル密度の対応関係を設定する。Strecs3D は、このルールに基づき、高応力領域や低応力領域を自動で抽出し、その空間を囲むモディファイア・メッシュを生成する。これにより、力学的な要求に応じた局所的な材料配分の「意図」が、具体的な 3D データとして具現化される。

最終ステップとして、モデル本体と自動生成された複数のモディファイア・メッシュを、オブジェクトの相対位置関係と各々の役割情報 (モデルかモディファイアか) を保持できる。3mf 形式の単一ファイルとして出力する。

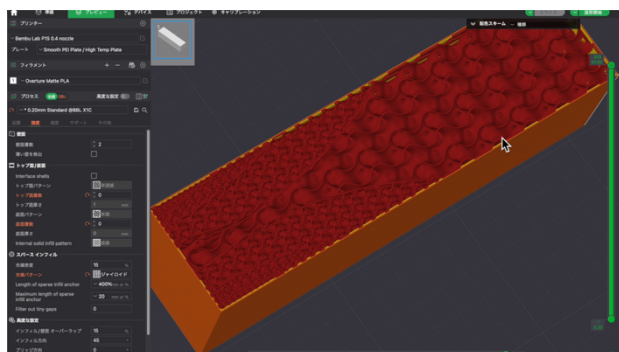


Fig.3. Slicing the data output from Strecs3D

サーで開くと、最適化の意図が正確に伝達され、ユーザーは各モディファイア領域に任意のインフィル設定を割り当てることができる (Fig.3). それを実際に造形したものを Fig. 4 に示す。



Fig.4. An actual 3D-printed cantilever beam

本手法の技術的特徴は、ツールパス自体を直接生成するのではなく、最適化の抽象的な「意図」を標準化された形式で既存のスライサーに伝達する点にある。複雑な G-code 生成は各スライサーが持つ高度に最適化されたアルゴリズムに委ねることで、特定の実装に依存しない高い堅牢性と将来性を確保した。これは、アカデミックな理論と実践的なものづくりとの間に存在するギャップを埋める、現実的かつ持続可能なソリューションである。

3. 実験

3.1 試験片の作成

Strecs3D の有効性を検証するため、本実験では 2 種類の試験片を作製し、その機械的特性を比較した。両試験片は共通の条件として、寸法を 50mm × 90mm × 7.5mm、材料を PLA (Polylactic Acid) とし、Bambu Lab P1S を用いて造形した。

試験片 A は、応力解析ソフトウェア「Strecs3D」を用いて作製した。本ソフトウェアによる応力解析結果に基づき、以下のマッピングに従って局所的なインフィル密度を最適化した。作製した試験片 A の質量は 8.3 g、造形時間は 16 分 42 秒であった。

応力下限値 [Pa]	応力上限値 [Pa]	インフィル密度 [%]
1.2×10^4	9.2×10^4	5
9.2×10^4	3.2×10^5	15
3.2×10^5	5.6×10^5	25
5.6×10^5	7.5×10^5	40

比較対象として、インフィル密度を均一にした試験片 B を作製した。試験片 B のインフィル密度は、試験片 A と質量を等しくするため、全体で 16% に設定した。その際の造形時間は 16 分 40 秒であった。

3.2 実験結果

圧縮試験の結果、剛性の指標となるピーク荷重は、試験片 A が 365N であったのに対し、試験片 B は 220N を記録した (Fig.5). この結果は、Strecs3D を適用することにより、同一重量・同一造形時間でありながらピーク荷

重が145N高く、剛性が約66%と大幅に向上していることを示す。



Fig.5. Compression test setup: (a) Streccs3D-applied infill,
(b) uniform infill

4. 考察と今後の展望

本研究では、応力解析結果に基づき、スライサーのモディファイア・メッシュ機能を活用してインフィルを適応的に最適化する前処理ワークフロー「Streccs3D」を提案した。本手法は、.3mf フォーマットを介して既存のツールエコシステムにシームレスに統合され、高度な最適化を一般ユーザーに解放するものである。

本研究の貢献は、新たな最適化アルゴリズムの発明ではなく、既存技術を革新的に統合することで新しいワークフローを創出し、それによる技術の民主化を実現した点にある。これは、専門家と一般ユーザーの間に存在する「アカデミック・プラクティショナー・ギャップ」を埋める実用的なソリューションとして位置づけられる。

一方で、本ワークフローはアクセシビリティを最大化するために、シミュレーションの物理的忠実度においていくつかの実用的な妥協を含んでいる。第一に、異方性の未考慮である。FDM方式の3Dプリント品は積層方向に起因する顕著な異方性を持つ。そのため、シミュレーション上の応力分布と実際の物理モデルにおける応力分布には乖離が生じる。第二に、非反復的な最適化プロセスである点である。インフィル構造を変更すると全体の剛性が変化し、応力分布も再計算されるべきだが、本手法は初期の FEA 結果のみに基づく一方の「オープンループ」プロセスを採用している。

これらの限界は認識しつつも、均一なインフィル設定と比較して強度重量比を大幅に改善できる実用的な価値は大きいと考えられる。今後の展望としては、異方性を考慮した材料モデルの導入や、簡易的な反復計算ループを実装することを検討するなどの高忠実度化が挙げられる。さらに、機能拡張として、応力の種類(引張、圧縮、せん断など)に応じて最適なインフィル「パターン」や「配向」を選択・制御する機能への拡張も目指す。

謝辞

本研究はIPA(情報処理推進機構)の未踏IT人材発掘・育成事業の支援を受けている。加えて、JST 共創の場形成支援プログラム JPMJPF2111 の支援を受けたもの

である。ここに感謝の意を表します。

参考文献

1. Raise3D. "Infill 3D Printing: Patterns, Density and Issues." Raise3D Blog. Accessed September 7, 2025. <https://www.raise3d.com/blog/infill-3d-printing/>.
2. Prusa3D. "Infill patterns." Prusa Knowledge Base. Accessed September 7, 2025. https://help.prusa3d.com/article/infill-patterns_177130.
3. Herman, Stefan. "Gradient Infill for 3D Prints." CNC Kitchen. Accessed September 7, 2025. <https://www.cnckitchen.com/blog/gradient-infill-for-3d-prints>.
4. Wu, Jun, Niels Aage, Rüdiger Westermann, and Ole Sigmund. "Infill Optimization for Additive Manufacturing – Approaching Bone-like Porous Structures." IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 24, no. 2 (2018): 1127-40. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2017.2655523>.
5. Li, Yi, Jan Mertes, Matthias Klar, Shradha Ghansiyal, Chengkai Fei, Moritz Glatt, and Jan C. Aurich. "A New Gradient Infill Design Method for Material Extrusion Using Density-Based Topology Optimization and G-Code Extension." Manufacturing Letters 37 (2023): 21-25. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2023.06.003>.
6. Li, Yamin, Chenyang Shi, Xiangyu Wang, Shangqin Yuan, Jihong Zhu, and Weihong Zhang. "A Mapping-Based Graded Infill Structure Design Method and Continuous Printing Path Planning." Additive Manufacturing 98 (2025): 104639. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2025.104639>.
7. Rilling, Samuel, Ignacio Ríos, Álvaro Gómez, Marian Valenzuela, Angelo Oñate, and Victor Tuninetti. "Optimized Infill Density Through Topological Optimization Increases Strength of Additively Manufactured Porous Polylactic Acid." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 129 (2023): 3739-50. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12554-z>.
8. Tam, Kam-Ming Mark, and Caitlin T. Mueller. "Additive Manufacturing Along Principal Stress Lines." 3D Printing and Additive Manufacturing 4, no. 2 (June 2017): 63-81. <http://dx.doi.org/10.1089/3DP.2017.0001>.
9. Kaufman, Bruce E. "The Academic-Practitioner Gap: Past Time to Bring in the Practitioner Perspective." Human Resource Management Review 32, no. 2 (June 2022): 100895. <https://doi.org/10.1016/j.hrmr.2022.100895>.