

修士論文 2025 年度

応力解析に基づく 3D プリントの内部構造の
設計手法とプリプロセッサの研究

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科

谷口 朝洋

修士論文 2025 年度

応力解析に基づく 3D プリントの内部構造の設計手法と プリプロセッサの研究

論文要旨

本研究は、材料押出 (MEX) 方式の 3D プリントにおける造形物の軽量化と機械的強度の最適化を目的とし、応力解析に基づくインフィル生成手法およびそのためのプリプロセッサの開発を行ったものである。

近年の 3D プリント技術の普及に伴い、実用的な強度を持つパーツの製作が求められている。しかし、既存のスライサーの多くはモデル内部に一様な密度のインフィルを充填する手法が一般的であり、構造的な負荷に対して材料配置が最適化されていないという課題があった。これに対し本研究では、有限要素法 (FEM) の応力解析結果をインフィル構造へ反映する手法を提案した。

具体的には、応力が集中する部位には高密度なインフィルを配置し、負荷の少ない部位では密度を抑えることで、材料消費を最小限にしつつ必要な強度を確保するアルゴリズムを構築した。また、この最適化計算から造形データの生成までを円滑に行うためのプリプロセッサを実装し、設計から製造までのワークフローの効率化を図った。評価として実機による強度試験およびユーザテストを行い、機械的特性の向上とワークフローへの適合性を確認した。

本研究の成果は、力学的根拠に基づいた効率的な材料配置を可能にし、デジタルファブ리케이션における設計自由度と構造信頼性の向上に大きく寄与するものである。

キーワード

1. 3D プリンティング
2. インフィル
3. 構造最適化
4. 応力解析
5. デジタルファブ리케이션

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科
谷口 朝洋

Abstract of Master's Thesis Academic Year 2025

Research on a Design Method and Preprocessor for 3D Printed Internal Structures Based on Stress Analysis

Summary

This study aims to optimize the weight reduction and mechanical strength of Material Extrusion (MEX) 3D printed parts. To achieve this, an infill generation method based on stress analysis and a dedicated preprocessor were developed.

With the recent proliferation of 3D printing technology, there is an increasing demand for the production of parts with practical mechanical strength. However, most existing slicers typically fill the interior of a model with a uniform density, which often results in material distributions that are not necessarily optimized for specific structural loads. To address this issue, this research proposes a method that directly integrates stress analysis results, such as those from the Finite Element Method (FEM), into the generation of infill structures.

Specifically, an algorithm was constructed to ensure the required structural integrity while minimizing material consumption by allocating high-density infill to areas of stress concentration and reducing density in low-load regions. Furthermore, a preprocessor was implemented to facilitate a seamless workflow from optimization calculations to the generation of fabrication data, thereby streamlining the process from design to manufacturing. Mechanical testing of printed specimens and user studies were conducted to confirm the improvement in mechanical properties and the system's compatibility with standard workflows.

The results of this study enable efficient material placement based on mechanical principles, significantly contributing to the enhancement of design flexibility and structural reliability in the field of digital fabrication.

Keywords

1. 3DPrinting 2.Infill Structure 3.Structure Optimization 4.Stress Analysis 5.Digital Fabrication

Keio University

Graduate School of Media and Governance

Tomohiro TANIGUCHI

目次

用語集	2
1 序論	4
1.1 研究背景	4
1.1.1 デジタルファブリケーションの変遷：試作から実用部品へ	4
1.1.2 研究対象としての「ロボットコンテスト」の定義と重要性	5
1.1.3 ロボコンにおけるデジタルファブリケーションの浸透と部品製造の現 状	6
1.1.4 3D プリント部品における造形パラメータと機械強度	8
1.1.5 インフィル構造の均一性と最適化の必要性	10
1.2 先行研究と実用化のための壁	11
1.2.1 インフィル最適化研究の現状	11
1.2.2 製造プロセスの分断：解析領域と現場の乖離	12
1.2.3 計算リソースと実装プロセス上の課題	12
1.2.4 技術的障壁：要求スキルの高度化	13
1.3 研究目的	13
1.4 提案手法のコンセプト：プリプロセッサによる介入	14
2 関連研究	16
2.1 ヒューリスティクスに基づく幾何学的密度制御	16
2.1.1 スライサー標準の幾何学的アルゴリズム	16
2.1.2 ユーザーの設計意図による局所補強	17
2.1.3 梁理論による断面剛性の最大化	18
2.2 構造解析に基づくインフィル最適化	19
2.2.1 空間変形およびマッピング手法	19
2.2.2 物理量に連動したセルパラメータ制御	20
2.2.3 周波数変調による密度遷移	21
2.2.4 Gコード直接拡張による流量操作	21
2.2.5 トポロジー最適化による内部構造生成	22
2.2.6 領域分割と離散的密度レベルの割り当て	23
2.3 関連研究のまとめと本研究の立ち位置	24
3 提案手法：Strecs3Dによる最適化ワークフロー	27
3.1 システムの設計思想と全体概要	27
3.1.1 開発の背景とシステムの位置づけ	27
3.1.2 設計ポリシー	27
3.1.3 システムの全体構成とデータフロー	28

3.2	ソフトウェアの使用方法	30
3.2.1	インストールとセットアップ	30
3.2.2	3D モデルの設計と読み込み	30
3.2.3	境界条件の設定と構造解析	32
3.2.4	領域分割とインフィル最適化	35
3.2.5	スライサー連携と 3MF ファイルの出力	36
3.3	ソフトウェアアーキテクチャ	38
3.3.1	設計方針	38
3.3.2	レイヤー構造	39
3.3.3	デザインパターンの適用	40
3.3.4	状態管理	41
3.3.5	技術スタックの選定	41
3.3.6	拡張性への配慮	42
3.4	FEM 解析パイプラインの自動化	43
3.4.1	解析プロセスの全体フローと抽象化	43
3.4.2	外部ツールとの連携手法とハイブリッド制御	44
3.4.3	STEP to INP 変換 (Pre-processing)	45
3.4.4	FRD to VTU 変換 (Post-processing)	46
3.5	領域分割とインフィル密度の計算	48
3.5.1	応力場の定義	48
3.5.2	領域分割	48
3.5.3	実装手法	48
3.6	インフィル密度計算方法	51
3.6.1	Gibson-Ashby モデルによる理論的アプローチ	51
3.6.2	定数の決定と具体的な関係式	52
3.6.3	領域ごとのインフィル密度の算出	53
3.6.4	密度の制約 (クリッピング処理)	53
3.6.5	閾値調整による動的更新	54
3.6.6	パラメータの一般化と今後の展開	55
3.7	マルチスライサー対応 3MF エクスポート機能	55
3.7.1	3MF 形式の採用と製造プロセスへの適合	55
3.7.2	応力分布に基づくメッシュ構築と密度情報の統合	56
3.7.3	主要スライサーごとのメタデータ最適化 (相互運用性の確保)	57
3.7.4	実装の結果とエンジニアリングワークフローへの効果	58
4	実装評価と検証実験	59
4.1	試験片の作成および機械的性質の評価	59
4.1.1	本章の目的	59

4.1.2	試験片の設計	59
4.1.3	使用材料	60
4.1.4	試験片の作成手順	60
4.1.5	実験装置	62
4.1.6	測定手順	63
4.2	実験結果	64
4.2.1	曲げ試験の荷重-たわみ曲線と近似直線	64
4.2.2	等価曲げ剛性の算出と評価	65
4.2.3	最大荷重の比較	65
4.3	考察	67
4.3.1	内部構造の幾何学的特徴と荷重伝達メカニズム	67
4.3.2	接触点における局所補強と最大荷重の向上	67
4.3.3	インフィル最適化が造形時間に与える影響	68
5	ユーザ評価	69
5.1	評価の目的	69
5.2	評価手法	69
5.2.1	被験者	69
5.2.2	評価タスクの設定	71
5.2.3	評価対象とする手法	71
5.2.4	評価タスクの内容	72
5.2.5	計測指標	72
5.2.6	スコアの算出方法	73
5.3	定量的評価結果	73
5.4	定性的評価結果	77
5.4.1	提案手法に対する肯定的評価	77
5.4.2	抽出された改善課題	77
5.5	ユーザビリティ評価に関する考察	78
5.5.1	システムの統合化による認知負荷の低減	78
5.5.2	実用化に向けた障壁の解消と受容性	78
5.5.3	インターフェースにおける今後の課題	79
5.5.4	総括	79
6	適用事例	80
6.1	Cantilever	81
6.2	Bearing Holder	82
6.3	Drone Frame	83
6.4	Frame Connector	84
6.5	Handle	85

6.6	Hook	86
6.7	Smartphone Stand	87
6.8	Motor Mount	88
6.9	Rod Connector	89
6.10	Tablet Stand	90
6.11	Bracket	91
7	今後の展望	92
7.1	本研究の立ち位置と残された課題	92
7.2	最適分割のための反復計算の導入	92
7.3	パス生成における連続性の保証	93
7.4	3D プリントにおける材料異方性の考慮	96
8	結論	97
8.1	本研究のまとめ	97
8.2	研究の成果と知見	97
8.3	結び	97
	Bibliography	99
	謝辞	103

目次

Figure 1	ULTEM 9085 樹脂を用いて製造された 3D プリント製ブラケット (Source: https://www.tctmagazine.com/stratasys-direct-manufacturing-to-3d-print-parts-for-airbus/)	4
Figure 2	南京航空航天大学のロボットチームのボール押し出し機構 (Source: https://www.esun3d.com/news/9900/)	6
Figure 3	モナシュ大学のロボットおよびそのカスタムホイール (Source: https://www.esun3d.com/news/9900/)	7
Figure 4	カリフォルニア大学バークレー校のロボット「Berkeley Humanoid Lite」 (Source: https://engineering.berkeley.edu/news/2025/06/berkeley-engineers-develop-customizable-3d-printed-robot-for-tech-newbies/)	8
Figure 5	Cura スライスソフトのスクリーンショット	9
Figure 6	Cura スライスソフトのインフィルパターン (Source: https://all3dp.com/2/cura-infill-patterns-all-you-need-to-know/) ..	9
Figure 7	インフィル密度によるトレードオフ	10
Figure 8	片持ち梁部品の応力分布の有限要素解析結果	11
Figure 9	従来の製造フロー	15
Figure 10	Strecs3D を用いたワークフロー	15
Figure 11	Adaptive Cubic のインフィルパターン	16
Figure 12	Support Cubic インフィルパターン	17
Figure 13	Modifier による局所的な補強	18
Figure 14	吐出量調整によるインフィル密度の変化 (Source: https://www.cnckitchen.com/blog/gradient-infill-for-3d-prints) ..	19
Figure 15	Li による逆マッピングを用いた Gradient Infill のステップ (Source: Li et al., 2025 より引用)	20
Figure 16	Wang らによる荷重パスに基づく Gyroid インフィル (Wang et al., 2025 より引用)	21
Figure 17	Wegner らによる局所的な密度変化のある Gyroid 構造 (Source: Wegner et al., 2025 より引用)	21
Figure 18	Yi らによる吐出量によるインフィル最適化の概要 (Source: Yi et al., 2023 より引用)	22
Figure 19	Yi らによる吐出量によるインフィル最適化の詳細 (Source: Yi et al., 2023 より引用)	22
Figure 20	Wu らによるトポロジー最適化による多孔質の内部構造 (左: 従来のトポロジー最適化構造、右: Wu らによる提案手法) (Source: JunWu et al., 2018 より引用)	23

Figure 21	Rilling らによる領域分割処理によるインフィル最適化 (Source: Rilling et al., 2023 より引用)	24
Figure 22	Strecs 3D の内部処理のフロー	28
Figure 23	システムアーキテクチャ図	29
Figure 24	データフロー図	29
Figure 25	Strecs3D v2.0.0-beta の起動時の初期画面	30
Figure 26	ベアリングを保持するパーツの CAD モデル	31
Figure 27	STEP ファイルの読み込み手順	31
Figure 28	モデルの固定面の面番号を確認する手順	32
Figure 29	固定条件の設定手順	32
Figure 30	荷重対象となる面番号を確認する手順	33
Figure 31	荷重条件の設定手順	33
Figure 32	構造解析完了の通知ダイアログ	34
Figure 33	有限要素解析結果の可視化	34
Figure 34	自動領域分割結果のプレビュー表示	35
Figure 35	インフィル密度の調整手順	35
Figure 36	スライサーの選択手順	36
Figure 37	エクスポートされた 3mf ファイルを Bambu Studio へインポートする様 子	37
Figure 38	スライス結果のプレビュー表示	37
Figure 39	最終的な造形結果	38
Figure 40	Strecs3D のレイヤーアーキテクチャ図	40
Figure 41	Simulation Config の Json ファイルの例	44
Figure 42	$S(x) < \tau_1$ でクリップされたメッシュ	49
Figure 43	$\tau_2 < S(x) < \tau_1$ でクリップされたメッシュ	50
Figure 44	応力閾値に基づく分割されたメッシュファイル	51
Figure 45	インフィル密度と応力の関係	53
Figure 46	インフィルスライダーによる密度更新の様子	55
Figure 47	出力された 3MF ファイルの概念図	57
Figure 48	Bambu Studio における 20% インフィルモディファイアーメッシュ	57
Figure 49	試験片の形状と寸法	60
Figure 50	BambuLab P1S (Source: https://bambulab.com/en/p1)	61
Figure 51	三点曲げ試験装置の構成	63
Figure 52	三点曲げ試験における荷重-たわみ曲線	64
Figure 53	均一インフィル試験片の最大荷重と圧壊挙動	66
Figure 54	提案手法 (Strecs3D) のピーク荷重と破壊挙動	66

Figure 55	GARDENs で開発されている超小型人工衛星 (Source: https://www.perc.it-chiba.ac.jp/projects/cubesat/)	70
Figure 56	ユーザテストの様子	70
Figure 57	Strecs3D を用いた実験ワークフロー	71
Figure 58	Strecs3D を用いない比較手法のワークフロー	72
Figure 59	Strecs3D と従来手法の SUS スコア比較	75
Figure 60	SUS スコア評価基準 (Source: https://medium.com/thinking-design/the-system-usability-scale-how-its-used-in-ux-b823045270b7)	75
Figure 61	各項目ごとの Strecs3D と従来手法のユーザビリティ比較	77
Figure 62	片持ち梁の造形結果とその処理の様子	81
Figure 63	ベアリング固定パーツの造形結果とその処理の様子	82
Figure 64	ドローンフレームの造形結果とその処理の様子	83
Figure 65	アルミフレーム接合パーツの造形結果とその処理の様子	84
Figure 66	ハンドルパーツの造形結果とその処理の様子	85
Figure 67	フックパーツの造形結果とその処理の様子	86
Figure 68	スマートフォンスタンド造形結果とその処理の様子	87
Figure 69	モーターマウント造形結果とその処理の様子	88
Figure 70	ロッド接続パーツの造形結果とその処理の様子	89
Figure 71	タブレットスタンドの造形結果とその処理の様子	90
Figure 72	壁掛けブラケットの造形結果とその処理の様子	91
Figure 73	Strecs3D における反復計算の流れ	93
Figure 74	均質なジャイロイド構造	94
Figure 75	密度変化する傾斜ジャイロイド構造	95
Figure 76	現在の Strecs3D のアプローチと将来的なアプローチの比較	95

表目次

Table 1 関連研究比較表	26
Table 2 試験片の質量と造形時間の比較	62
Table 3 三点曲げ試験における荷重-たわみ曲線の勾配	65
Table 4 SUS アンケートの評価項目	73
Table 5 SUS スコアの統計情報比較	74
Table 6 SUS アンケートの結果比較	76

用語集

用語	定義・解説
3D プリンティング / AM	アディティブ・マニュファクチャリング。デジタルデータから材料を積層して立体物を造形する技術。
材料押出 (MEX) 方式	熱で溶かしたフィラメント状の材料をノズルから押し出して積層する、最も一般的な3Dプリント手法。
インフィル (Infill)	3D プリント造形物の内部を充填する格子状の構造。
インフィル密度	インフィルの充填率。強度と重量・造形時間のトレードオフを決定する重要なパラメータ。
構造最適化	材料消費を最小限にしつつ、必要な機械的強度を最大限に確保するための設計手法。
応力解析	外部荷重によって部品内部に生じる力の分布(応力)を計算・分析すること。
有限要素法 (FEM)	複雑な形状を小さな要素に分割して、構造全体の応力や変形を近似的に計算する数値解析手法。
トポロジー最適化	与えられた荷重・拘束条件の下で、剛性を最大化するような最適な材料配置を数学的に導き出す技術。
3MF (3D Manufacturing Format)	形状データだけでなく、領域ごとの密度指定などの製造メタデータを保持できるオープンな3Dデータ形式。
フォン・ミーゼス応力	材料の破壊や降伏を評価するために、多軸の応力状態を単一のスカラー値に換算した指標。

用語	定義・解説
Gibson-Ashby モデル	多孔質材料（インフィル等）において、相対密度と力学的強度の関係をべき乗則で記述する理論モデル。
G-code	3D プリンタの動きや吐出量を制御するための命令群。
スライサー	3D CAD データをプリンタが解釈可能な G-code に変換するソフトウェア。

1 序論

1.1 研究背景

1.1.1 デジタルファブリケーションの変遷：試作から実用部品へ

近年、3D プリンティング技術（アディティブ・マニュファクチャリング：AM）の普及は目覚ましく、製造業における設計・生産プロセスにパラダイムシフトをもたらしている。かつてこの技術は、設計の初期段階で形状を確認するための「プロトタイプ」の製作、いわゆるラピッドプロトタイピングとしての活用が主であった。

しかし、造形精度の向上や材料の多様化に伴い、その活用範囲は大きく広がりつつある。現在では、単なる外観確認にとどまらず、航空宇宙、自動車、医療機器、あるいはロボティクスといった多岐にわたる分野において、実際に荷重や負荷がかかる環境で使用される「実用部品（エンドユースパーツ）」の製造へと移行している。Figure 1 に示す Airbus 社の例がその代表的な事例である [1], [2]。

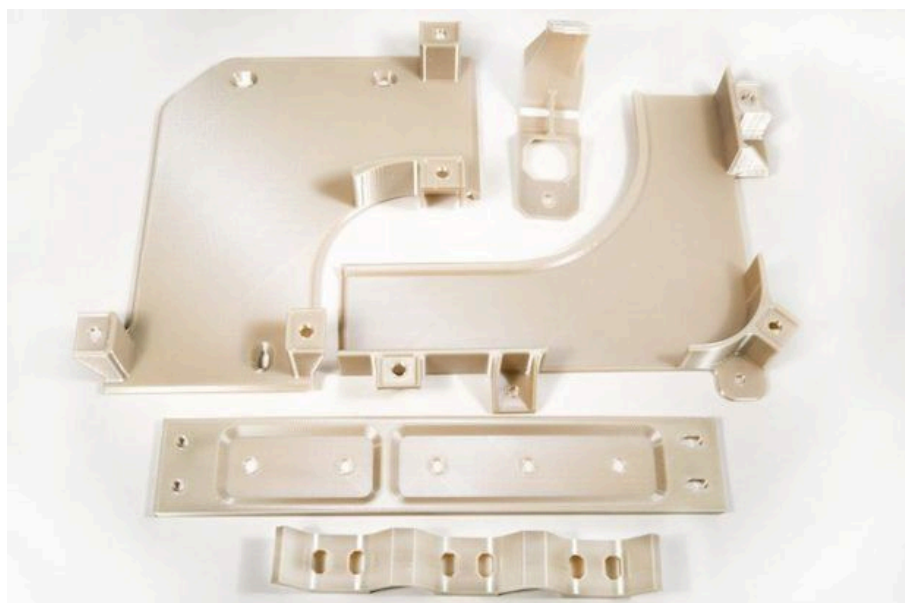


Figure 1: ULTEM 9085 樹脂を用いて製造された 3D プリント製ブラケット
(Source: <https://www.tctmagazine.com/stratasys-direct-manufacturing-to-3d-print-parts-for-airbus/>)

一方で、樹脂を用いた 3D プリント部品を実用部品として社会実装し、従来の製造手法を代替していくにあたっては、解決すべき工学的な課題が依然として存在する。

第一に、剛性、強度の不足が挙げられる。樹脂材料は、アルミニウムや鋼鉄などの金属材料と比較してヤング率が低いため、同一形状であっても構造体としての剛性を確保することが困難である。実用部品として高負荷が予想される環境に適用する場合、部材

のたわみや変形がシステム全体の精度や安全性に悪影響を及ぼす懸念があり、限られた材料特性の中でいかに剛性を最大化するかが重要な課題となっている。

第二に、個々の部品の造形に要する時間の増大という生産効率上の課題がある。3D プリンティングは金型を必要としないダイレス製造を可能にする一方で、微細なノズルを用いて一層ずつ積層する原理上、造形時間は造形物の体積や積層ピッチに強く依存する。

したがって、実用的な3D プリント部品の普及には、要求される力学的性能を満たしつつ、可能な限り材料使用量と造形時間を削減できる効率的な設計・最適化手法の確立が不可欠である。

1.1.2 研究対象としての「ロボットコンテスト」の定義と重要性

本研究では、構造設計における諸要素のトレードオフが最も顕著に現れる実証フィールドとして、「ロボットコンテスト（以下、ロボコン）」に着目する。ロボコンは単なる競技会に留まらず、限られたリソースの中で最適解を導き出す「エンジニアリングの縮図」としての側面を持つ。

• エンジニアリングの縮図としてのロボコン

ロボコンにおける機体開発は、一般的な工業製品の開発サイクルを極端に短縮し、かつ過酷な制約条件を課した環境下で行われる。設計者は、機体の「性能」を最大化するために、常に以下の3つの相反する要素（トレードオフ）の境界線上で意思決定を迫られる。

1. 厳格な機体重量制限（軽量化の強制）

多くの競技会では、参加チームが守るべき絶対的な制約として「総重量制限」が設けられている。機体の機動性を高め、かつルールを遵守するためには、1g単位での徹底した軽量化が不可欠となる。

2. 激しい接触や駆動負荷（高強度の要求）

軽量化を追求する一方で、ロボットは対戦相手との接触、高速移動時の慣性、あるいは重量物の持ち上げといった大きな動的負荷に耐えうる「構造的信頼性」を維持しなければならない。強度の欠如は大会本番での致命的な故障に直結するため、過剰設計に陥りやすい傾向がある。

3. 短い開発期間（製造時間の短縮）

大会当日までの数ヶ月という限られた期間内で、設計・試作・評価・改善のサイクルを回す必要がある。特に近年の複雑な機構を持つロボットにおいて、部品の製造時間は開発のボトルネックとなりやすく、迅速な部品製造手法が強く求められる。

• 最適化手法の実証フィールドとしての妥当性

これらの要因から、ロボコンは「高強度・軽量・短納期」という、3D プリンティング技術および構造最適化手法が解決すべき課題が先鋭化して現れる環境であると言える。

従来のシミュレーション主体の研究では見落とされがちな、実運用における「扱いやすさ」や「現場での即時性」を評価する上で、ロボコンは極めて有用な社会実装のテストベッドとしての価値を有している。本研究で提案する手法が、この過酷な条件下で設計者の意思決定を支援できることを示すことは、そのまま一般的なエンジニアリング領域への展開可能性を証明することに繋がる。

1.1.3 ロボコンにおけるデジタルファブリケーションの浸透と部品製造の現状

ロボットコンテストの製造現場では、長らく旋盤やフライス盤を用いた切削加工が主流であったが、2010年代以降、材料押出（MEX）方式を中心とする3Dプリンティング技術の普及により、その部品製造方法は大きな転換を迎えている。特に、設備リソースや熟練工数に制約のある学生チームにとって、3Dプリンタは単なる試作ツールを超え、競技パフォーマンスを左右する基幹的な製造インフラへと進化している。

第一に、3Dプリンタは形状自由度の向上をもたらし、従来の加工法では不可能であった複雑機構の具現化を可能にした。例えば、南京航空航天大学のロボットチームの製造した Figure 2 の部品に見られるように、上部シェルはモーターを保護し、底部は六角形のダイヤルとして安定的にボールを押し出す機構になっている。このように、複数の機能を持つ部品を少ない部品点数で製造することが可能になっている [3]。



Figure 2: 南京航空航天大学のロボットチームのボール押し出し機構
(Source: <https://www.esun3d.com/news/9900/>)

第二に、高性能材料の戦略的活用と軽量化が挙げられる。モナシュ大学の事例では、TPU-95A の高性能フィラメントを用い、激しい衝突に耐えうる柔軟性と軽量化を両立した Figure 3 に示すようなカスタムホイールを製作している [3]。

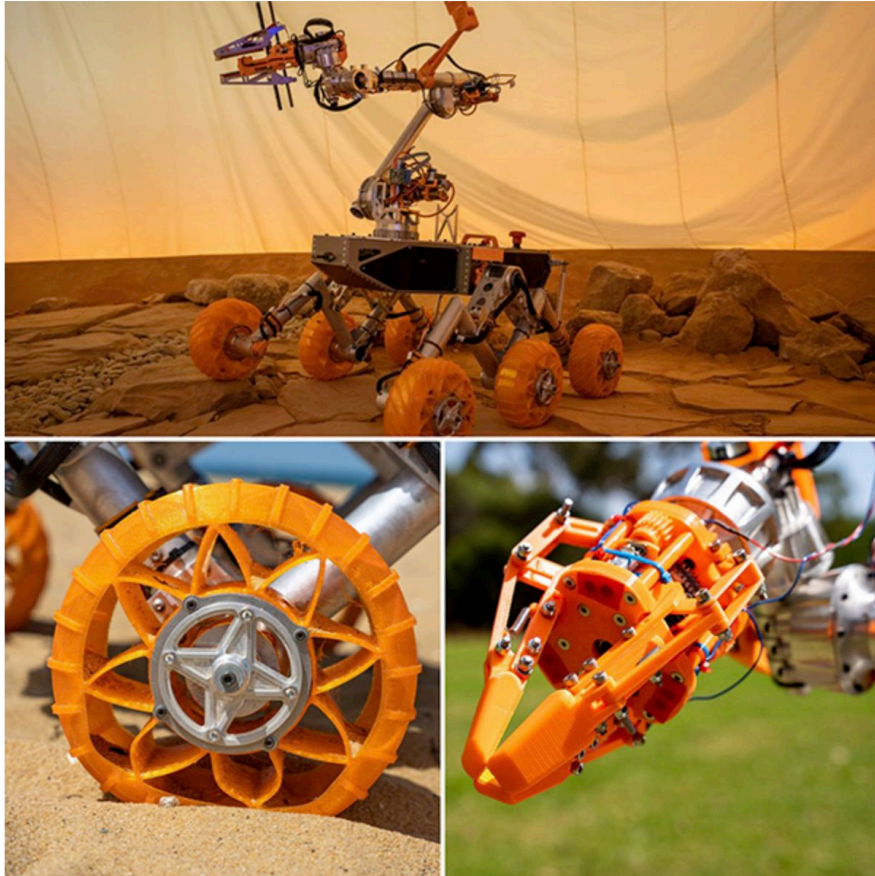


Figure 3: モナシュ大学のロボットおよびそのカスタムホイール
(Source: <https://www.esun3d.com/news/9900/>)

第三に、リソース効率の最大化という側面である。MEX方式の3Dプリンタは無人稼働が可能であるため、日中に設計を行い夜間に造形することが可能となり、学生の限られた時間を制御プログラムの開発や動作テストといった高付加価値な活動へ再投資することを可能にした。また、カリフォルニア大学バークレー校による「Berkeley Humanoid Lite」の事例[4]や、FTC(First Tech Challenge)ロボコンにおける事例[5]が示すように、ロボットの時間的、経済的コストを低減できる。こうしたハードルの低さが大胆なトライ・アンド・エラーを促進し、最終的な機構の洗練度を高める要因となっている。



Figure 4: カリフォルニア大学バークレー校のロボット「Berkeley Humanoid Lite」
(Source: <https://engineering.berkeley.edu/news/2025/06/berkeley-engineers-develop-customizable-3d-printed-robot-for-tech-newbies/>)

以上の通り、3D プリンタは専門的な工作技術の障壁を打ち破り、設計者の意図をダイレクトに物理世界へ反映させるツールとして、ロボコンにおける部品製造の不可欠な地位を確立している。

1.1.4 3D プリント部品における造形パラメータと機械強度

積層造形において、造形時の「製造条件」が、最終的な強度に決定的な影響を与えるという点が、従来の除去加工や等方的な成形加工とは大きく異なる特徴である。

ここで具体的な製造フローを整理する。3D プリンタで部品製造を行う際、設計された 3D CAD データは、スライスソフト（スライサー）と呼ばれる CAM ソフトウェア (Figure 5) によって、プリンタの制御命令である G-code に変換される。このスライスソフト上では、積層ピッチ、充填率（インフィル密度）、充填パターン[6] (Figure 6)、外壁の厚さ（シェル数）、ノズル温度など、多岐にわたるパラメータ設定が行われる。

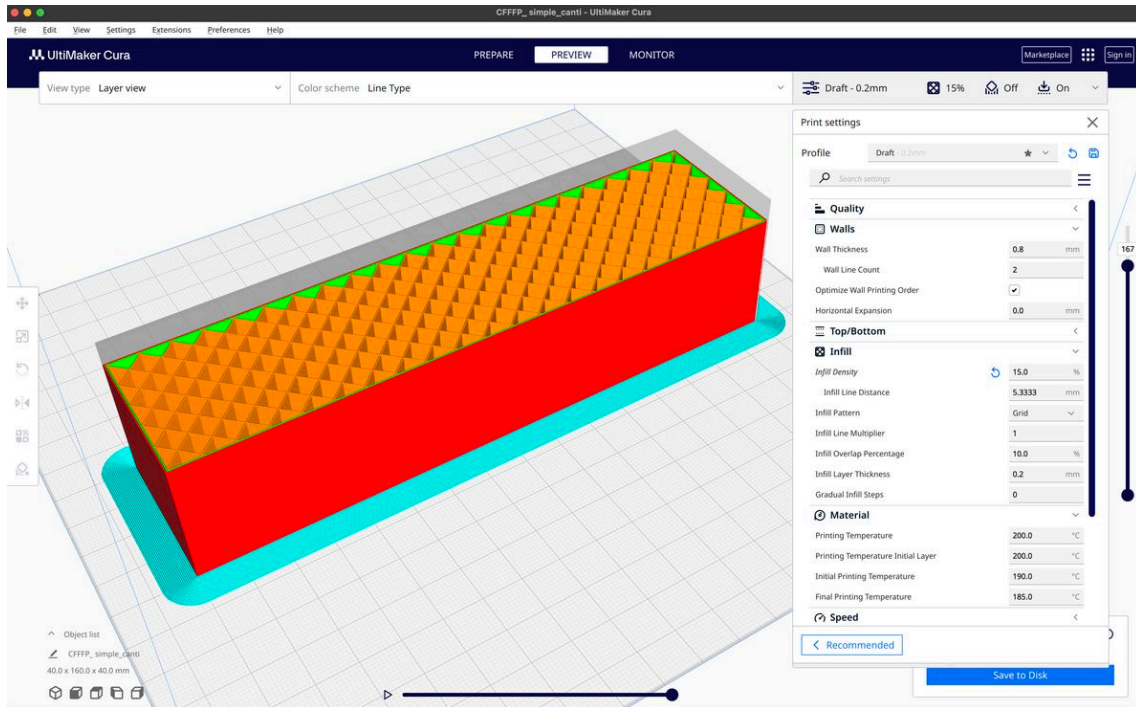


Figure 5: Cura スライスソフトのスクリーンショット

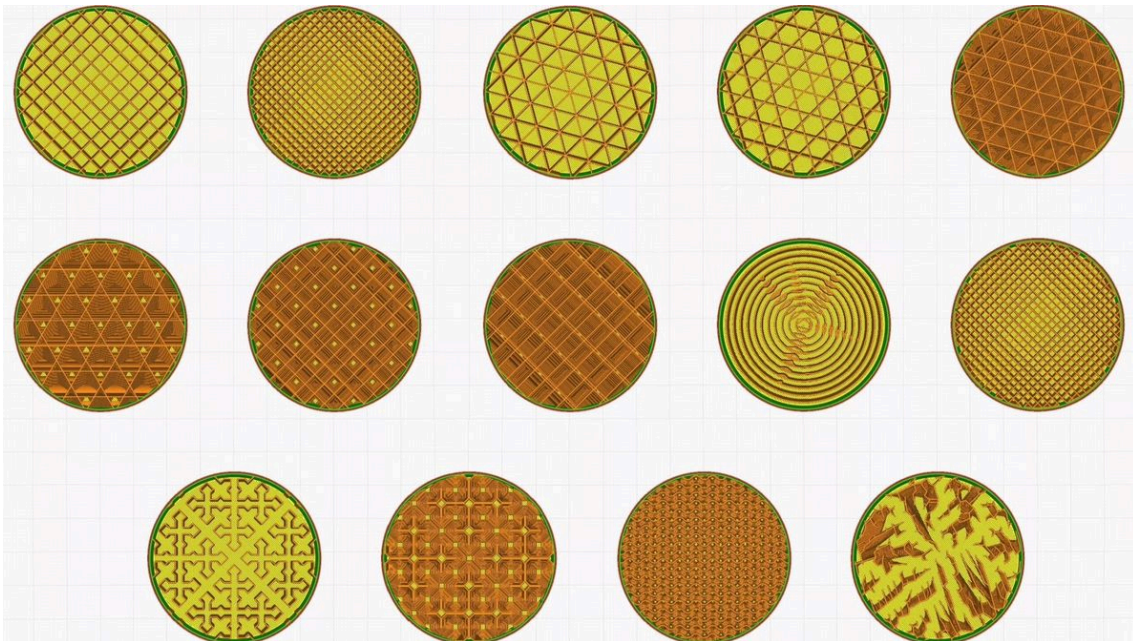


Figure 6: Cura スライスソフトのインフィルパターン

(Source: <https://all3dp.com/2/cura-infill-patterns-all-you-need-to-know/>)

既往の研究においても、これらのパラメータ設定の違いによって、同一の材料、同一の形状であっても、造形物の引張強度や曲げ強度が大きく変化することが報告されている [7]。したがって、ロボット部品のように高い信頼性が求められる部品を製造するた

めには、その部品にかかる負荷や応力状態に応じた、適切な製造条件の選定が不可欠となる。

それにもかかわらず、現状の3Dプリンティングのワークフローには重大な工学的課題が存在する。それは、造形物の強度を左右するスライスソフト上のパラメータ設定が、依然としてユーザーの「直感」や「経験則」に依存しているという点である。構造解析に基づいた客観的な指標ではなく、試行錯誤的なアプローチに頼らざるを得ない現状は、高強度部品の製造における歩留まりの低下や、設計者が意図した強度が確保できないという信頼性の欠如を招いている。

1.1.5 インフィル構造の均一性と最適化の必要性

スライスソフトにおいて設定可能なパラメータは、積層ピッチ、ノズル温度、造形速度など多岐にわたるが、構造的な観点から見た場合、FDM方式による造形データは大きく二つの領域に大別される。すなわち、製品の輪郭を形成する「外壁（シェル）」と、その内部空間を充填する「インフィル」と呼ばれる格子状の内部構造である（Figure 5におけるオレンジの領域）。

このインフィルに対してユーザーが設定する主要なパラメータとして「充填率（インフィル密度）」が挙げられる。この密度の設定は、造形物の品質とコストのトレードオフを決定づける重要な要素である。Figure 7に示すように一般的には、インフィル密度を高く設定すれば、内部の実体積が増え、造形物の機械的強度は向上する。しかし、これは同時に、使用材料の増加によるパーツ重量の増大と、ノズルの総移動距離の延長による造形時間の長時間化を招くことになる。逆に、密度を低く設定すれば、軽量化および造形時間の短縮は達成されるものの、構造的な強度は低下し、脆くなることが知られている [8]。

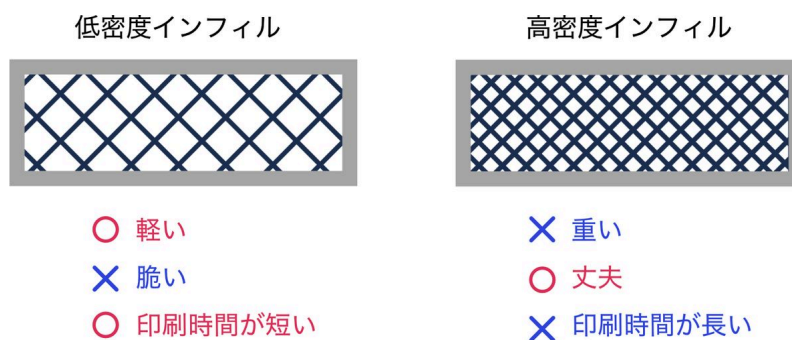


Figure 7: インフィル密度によるトレードオフ

既存の一般的なスライスソフトにおける課題は、このインフィル密度が、一度設定されると「パーツ全体に対して均一」に適用されるという点にある。

Figure 8に示すように、機械部品が使用される際、外部負荷によって内部に生じる応力（力の分布）は決して均一ではない。形状や荷重条件により、局所的に大きな力が集

中する部位が存在する一方で、ほとんど負荷のかからない部位も存在する。それにもかかわらず、従来の手法では、応力集中部も低負荷部も、全て同じ密度のインフィルが生成されてしまう。これは、強度が不要な部分に過剰な材料を使用している（重量と時間の無駄）か、あるいは強度が本来必要な部分の密度が不足している（破損のリスク）という、非効率な状態を意味する。

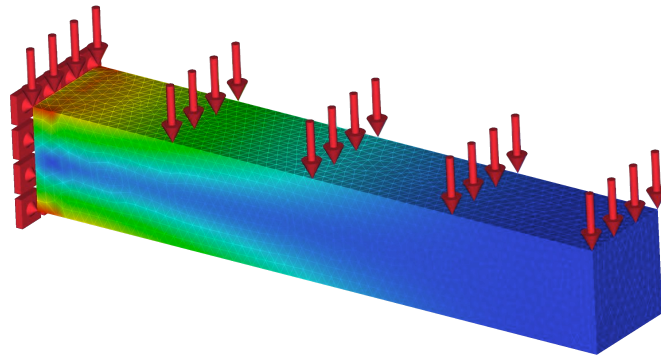


Figure 8: 片持ち梁部品の応力分布の有限要素解析結果

したがって、全体を一律の密度で充填するのではなく、部品内部の応力状態（力の分布）を解析し、その結果に基づいて局所的にインフィル密度を変化させる技術が求められる。力がかかる部分のみを高密度化し、そうでない部分は密度を下げるという最適化を行うことができれば、FDM造形において「軽量化」と「高強度化」という相反する要求を同時に満たす部品製造が可能となる。

1.2 先行研究と実用化のための壁

1.2.1 インフィル最適化研究の現状

熱溶解積層 (FDM) 方式を中心とした3Dプリンタにおいて、内部構造であるインフィルの最適化は、工学的・幾何学的観点からさまざま研究されてきた。特にトポロジー最適化の理論を応用し、応力分布に応じてインフィルの密度や形状を動的に変化させる手法は、材料消費の削減と力学的強度の向上を両立する有効な手段として注目されている。Wuらによる骨構造を模した生成手法 [9] や、Liらによるマッピングを用いたパターン生成 [10] はその代表例である。また、これらの関連研究については、第二章にて詳述する。

しかし、こうした高度な最適化手法が学術的に提案されているにもかかわらず、実用化の現場、特に「軽量性」「強度」「製作時間」が勝敗に直結するロボットコンテストの最前線において、これらの技術が導入されていない。多くの学生やエンジニアは、依然としてスライサ上で提供される「均一なインフィル」を選択している。本節では、研究

レベルの知見がなぜ実務の設計・製造フローに浸透しないのか、その要因を「プロセスの壁」「リソースの壁」「要求スキルの壁」という3つの視点から分析する。

1.2.2 製造プロセスの分断：解析領域と現場の乖離

第一の障壁は、構造解析から製造に至るワークフローの「プロセスの分断」である。

- 既存手法における「Gコード直接生成」の限界

従来のインフィル最適化研究の一部では、最適化された計算結果を造形するために、スライサを介さず独自のアルゴリズムでGコードを直接出力する手法を採用してきた。このアプローチは理論上の構造性能を追求する上では有利だが、実用面では「汎用性の欠如」という問題を抱えている。近年の3Dプリンタは、ハードウェアの性能を最大限に引き出すため、独自のGコード拡張(G-code Flavor) [11] や、振動抑制(インプットシェイピング)、動的な流量制御といった高度なファームウェア制御を実装している。Cura [12] やPrusaSlicer [13]、Bambu Studio [14] といった標準的スライサは、これらのハードウェア特性に緻密に適合している。一方で、研究用アルゴリズムが市販される多種多様なプリンタの特性すべてに追従することは不可能である。

- ユーザーワークフローとの不整合

ロボコンの現場では、CADで設計し、使い慣れたスライサで微調整を行い、即座に出力するという高速なサイクルが求められる。独自のGコード生成ツールを導入することは、この確立されたワークフローを破壊することを意味する。インフィル最適化を普及させるためには、既存のスライサが持つ高度なパス生成機能を活用しつつ、その入力段階で最適化情報を付加する、既存エコシステムに統合可能なフレームワークが必要である。

1.2.3 計算リソースと実装プロセス上の課題

第二の障壁は、計算コストとデータ処理の複雑性である。

- 軽量性の欠如とトライ&エラーの阻害

ロボコンにおける部品製作は、一度の造形で完了することは少なく、短期間に何度も設計製造を繰り返す。しかし、先行研究ではアルゴリズムの精緻化に主眼を置いており、最適化計算に数十分から数時間を要するものもある。意思決定論における「Satisficing」 [15] の概念が示す通り、極めて限定された開発期間においては、膨大な計算時間を要する「厳密解」よりも、即座に試作・テストへと移行できる「実用解」を得ることの方が、システム全体の完成度を高める上で工学的に合理的である。現場で求められているのは、数時間を要する「100点の厳密解」ではなく、数分で得られる「80点の実用解」である。

- データ肥大化による処理の限界

また、先行研究では最適化された複雑な構造を詳細なメッシュデータ (STL 等) として出力する手法も存在する。しかし、複雑な内部構造をすべてポリゴンで定義すると、データ容量は数百 MB~数 GB に達し、スライサでの計算負荷が PC の限界を超えてしまうことが想定される。スライス工程へのシームレスな統合を考慮するならば、メッシュ生成を経由しない、データ表現レベルでの軽量化が求められる。

1.2.4 技術的障壁：要求スキルの高度化

第三の障壁は、ユーザーに求められる専門性の高さである。

- 領域横断的な知識の要求

先行研究の手法を実践するには、有限要素法 (FEM) などの構造解析知識と、それを実装するプログラミング能力、さらには G コードレベルの製造知識という、多岐にわたる専門性が要求される。しかし、ロボコン参加者の本来の目的は「勝てるロボットを作ること」であり、最適化計算そのものの研究ではない。

- カプセル化と抽象化の不在

現在のインフィル最適化技術は、複雑な数理モデルがツールとしてカプセル化されていない。ユーザーは、本来手段であるはずの計算プロセスそのものに多大なりソースを割かざるを得ない「ホワイトボックス」な状態にある。

本研究が目指すのは、これらの複雑な低レイヤーの処理を隠蔽し、ユーザーが「どこにどのような力が加わるか」という設計の本質的な問いに集中できる環境の構築である。構造解析の専門知識を持たないエンジニアであっても、直感的に最適化インフィルの恩恵を享受できる「抽象化レイヤー」の提供こそが、社会実装への鍵となる。

1.3 研究目的

本研究の目的は、重量・強度・製作時間の三要素が極めて重要な制約となるロボット開発現場を舞台として、実用的な「インフィル構造の最適化」を実現する手法を確立することである。

とりわけロボコン等の競技現場では、機体の軽量化は運動性能の向上に直結し、強度の確保は故障による敗退を防ぐ死活問題となる。しかし、これまでの高度な最適化研究は、前述の三つの障壁により、こうした現場のエンジニアが享受できていなかった。本研究は、これらを同時に解消することを目指す。

- 「プロセスの壁」の打破：既存環境への完全適合

既存の CAD からスライサに至る確立された設計・製造フローを破壊することなく、そのフローの中に自然に組み込める最適化手法を構築する。ユーザーが特定のプリンタや特殊なツールに縛られることなく、現在使用している純正スライサの性能を維持したまま、パーツ強度の向上を可能にする。

- 「リソースの壁」の打破：迅速な試作サイクルの維持

3D プリンタの最大の価値である「製造サイクルの速さ」を損なわない。数時間を要する厳密な最適化計算ではなく、数分以内で「実用的な強度」を導き出し、かつデータ容量を軽量に保つことで、競技直前の急な設計変更にも対応できる軽快なシステムを実現する。

- 「スキルの壁」の打破：最適化技術の民主化

構造解析(FEM)やアルゴリズム実装の専門知識を持たないエンジニアであっても、ソフトウェアが複雑な計算工程を代行することで、直感的な操作のみでインフィル密度を最適に配置できる環境を提供する。

本研究を通じて、研究者のみが扱っていた技術であったインフィル最適化を、現場のエンジニアが勝利のために日常的に振るえる実用的な道具へと昇華させる。

1.4 提案手法のコンセプト：プリプロセッサによる介入

本研究で開発した「Strecs3D」は、既存のスライスソフトを代替するものではなく、CAD（設計）とスライスソフト（製造）の間に「スライシング・プリプロセッサ」という新たな層を介在させる、独自のワークフローを提案するものである。

従来のデジタル製造における解析の活用フローを、Figure 9 に示す。今までも、構造解析を用いた設計手法は広く普及しており、応力分布に基づいた肉抜き加工や、トポロジー最適化による荷重条件への最適形状探索などが一般的であった。しかし、これらはいくまで形状そのものを決定するための「形状設計」を行うものである。

設計された形状データは、その後スライスソフトへと送られ、積層造形のための実行データ (G-code) へと変換される。スライスソフト上には、インフィル密度、インフィル形状、壁厚、積層ピッチといった、造形物の内部構造や製造プロセスを規定する多数のパラメータが存在する。最終的な造形物の力学的パフォーマンスを決定づけるのは、これら製造パラメータの設定に他ならない。

しかし、現状のワークフローにおいて、これらのパラメータ決定は、ユーザの主観的な経験や勘に依存している。例えば、「強度が求められる部品であるため、経験的にインフィル密度を 60% に設定する」といった、定量的な根拠に欠ける調整が行われているのが実情である。

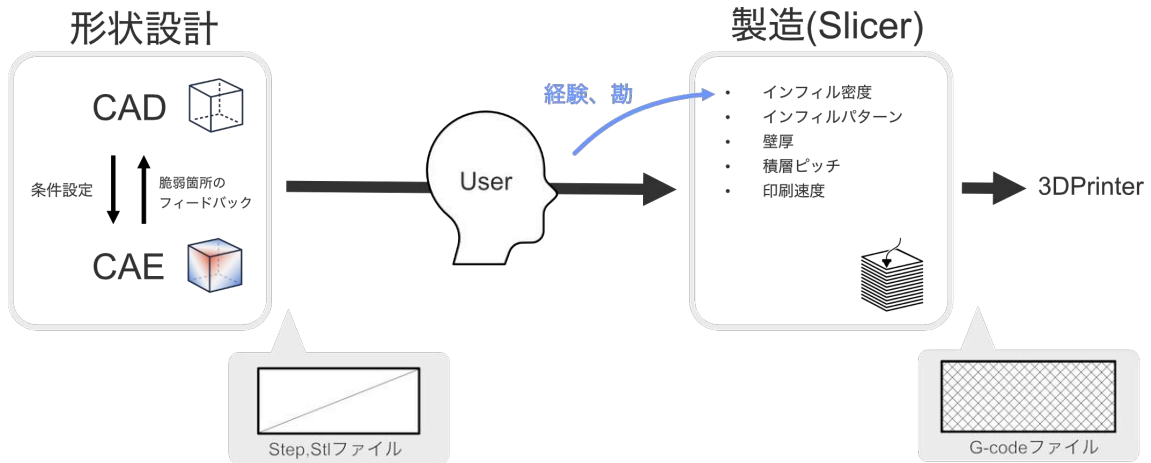


Figure 9: 従来の製造フロー

Strecs3Dが提案するプリプロセッサ・アプローチは、これまで経験的に決定されてきた製造パラメータに対し、力学的解析に基づく定量的根拠を与えるものである。

本手法では、3MF (3D Manufacturing Format) ファイルフォーマットが、幾何形状情報に加えて製造に関するメタデータを包含できる点に着目している。具体的には、CADモデルから得られる解析結果を、スライサが解釈可能な製造メタデータへと「翻訳」する処理を行う。

これにより、インフィル密度をはじめとする製造パラメータを、荷重条件や応力分布に最適化された値として自動的に割り当てることが可能となる。すなわち、Strecs3Dは形状設計 (CAD) とスライシング (製造) を力学的なデータで橋渡しし、積層造形における「製造の最適化」を実現するためのソフトウェア・レイヤーとして定義される。

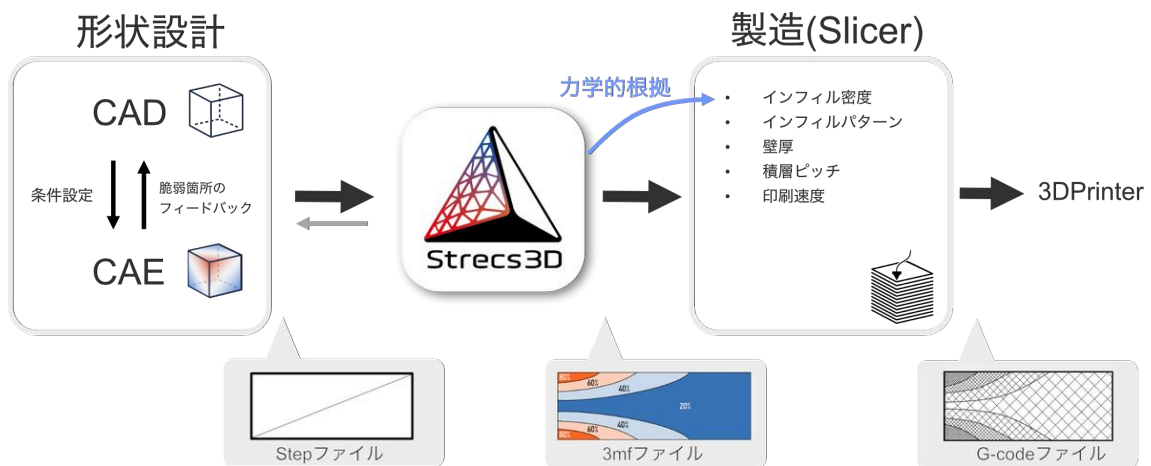


Figure 10: Strecs3D を用いたワークフロー

2 関連研究

2.1 ヒューリスティクスに基づく幾何学的密度制御

溶融積層造形法 (FDM) において、造形物の内部を充填する「インフィル」は、形状の自己支持および構造的強度を担保する上で不可欠な要素である。しかし、既存の多くのスライスソフトウェアは、入力された3Dモデル全体を均質なブロックとして扱い、造形領域全域に対して単一かつ固定された充填率 (インフィル密度) を適用する手法を標準としている。

こうした課題に対し、近年ではモデル内部の領域ごとに密度を局所的に変化させる「可変インフィル」へのパラダイムシフトが進展している。可変インフィルのアプローチには、有限要素法 (FEM) 等を用いた厳密な構造計算に基づくものも存在するが、計算コストや実装の複雑さが課題となる場合がある。これに対し、高度な物理シミュレーションを必要とせず、幾何学的特徴や経験則 (ヒューリスティクス) に基づいて効率的にインフィル密度を最適化する手法も数多く提案されている。

2.1.1 スライサー標準の幾何学的アルゴリズム

物理シミュレーション等の複雑な解析を行わず、モデルの幾何学的特徴 (空間の広さや天井までの距離など) に基づいて、スライサーが自動的にインフィル密度を可変させる手法について述べる。これらの手法は計算コストが低く、既存の主要なスライスソフトウェアにも実装されている。

- 空間分割による最適化 (Adaptive Cubic)

この手法は、オクトツリー (八分木) 構造に基づき、3次元空間を再帰的に分割することで密度を制御するアプローチである [16]。アルゴリズムはモデルの外壁 (ペリメーター) からの距離を計算し、壁面に近い領域を検出すると、そのセルの分割レベルを上げて細かく配置し、外殻を強固に支持する構造をとる (Figure 11)。

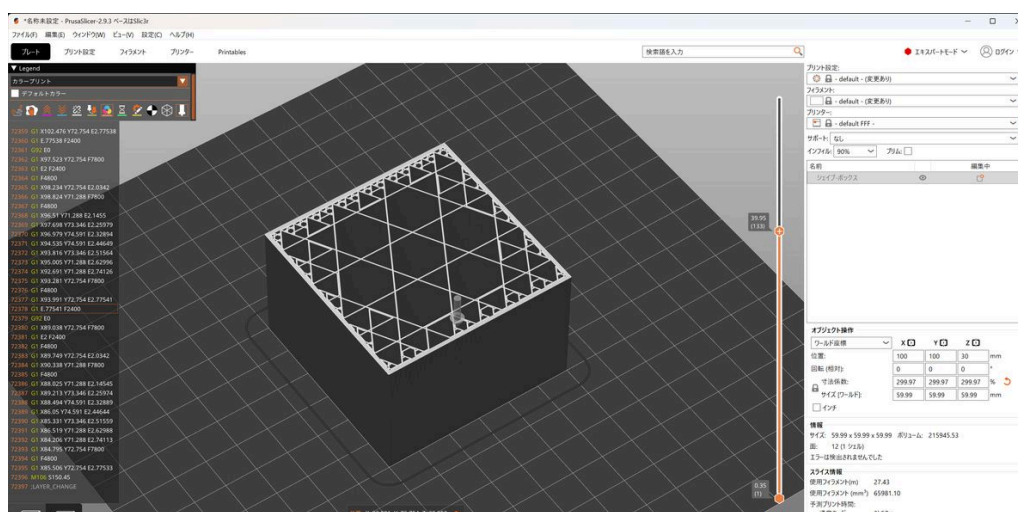


Figure 11: Adaptive Cubic のインフィルパターン

一方で、モデルの中心領域や中立軸付近においてはセル同士を結合し、大きな空洞を設けることで軽量化を図る。この構造は、生体における骨の構造に類似しており、 $X \cdot Y \cdot Z$ の3方向に対してバランスの取れた等方的な特性を持つとされる。均一なインフィルと比較してフィラメント消費量を約25%削減できるケースがある一方、肉厚の薄いパーツでは再帰的な分割が十分に機能しないという課題もある。

- Z軸方向による最適化 (Support Cubic)

壁面からの距離に着目する Adaptive Cubic に対し、この手法は「天井 (トップレイヤー) からの距離」に基づいて密度を変化させる [16]。主な目的は造形上面の品質確保にあり、造形の低層部では密度を極めて低く設定し、天井面に近づくにつれて密度を急上昇させることで、トップレイヤーを閉じる際のブリッジ品質を確保する (Figure 12)。外観品質を保ちつつ材料を節約できるが、水平方向の力に対しては脆弱である。

内部オーバーハングの最小支持より極端な軽量化を目指した手法として、モデル内部の天井やオーバーハングを支えるための「最小限の経路」を逆算して生成する。樹木のような分岐構造を持ち、支持が不要な領域は完全な空洞となるため、材料を最大で90%節約できる。ただし、内部がほぼ空洞であるため、機能部品に求められる構造的強度は低い。

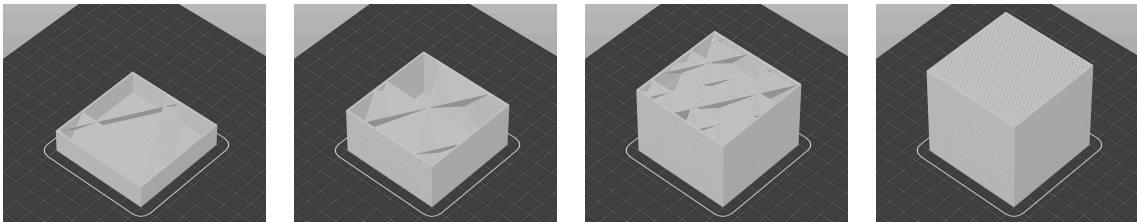


Figure 12: Support Cubic インフィルパターン

2.1.2 ユーザーの設計意図による局所補強

数値計算や幾何学的ルールに依存せず、設計者自身の直感や経験則を造形設定に直接反映させるアプローチについて述べる。

- モディファイアメッシュの活用

スライサーは通常、部品の用途や外力の作用点を認識できない。そのため、ユーザーが「モディファイアメッシュ」と呼ばれる仮想的なジオメトリを配置し、その重複領域に対してのみ異なるインフィル密度やパターンを上書きする手法が一般的である。

- 代表的な適用シナリオ

ボルト締結部の強化: 締結時に発生する強い圧縮応力による陥没を防ぐため、穴の周辺を局所的にソリッド（密度 100%）化する。

ヒンジ・可動部の強化: 複雑な負荷がかかる可動軸周辺の密度を高め、積層方向の剥離を防ぐ。

重心位置の調整: モデル下部の密度を高め、上部を低くすることで、自立安定性を向上させる。

- 課題と限界

設計者の経験則に基づいた柔軟な補強が可能である一方、手動でのメッシュ配置には多大な工数を要するため、自動化には不向きである。

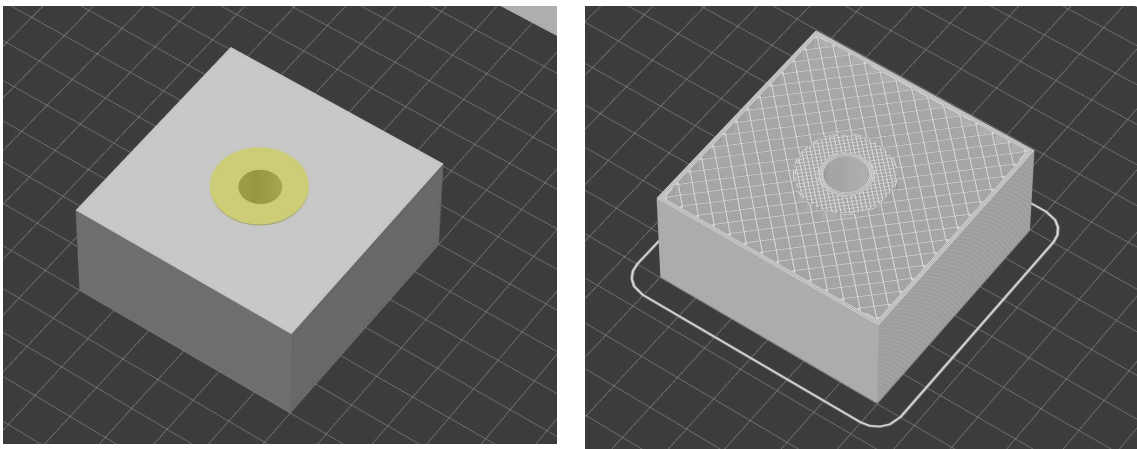


Figure 13: Modifier による局所的な補強

2.1.3 梁理論による断面剛性の最大化

材料力学における梁理論のヒューリスティクスを応用し、構造内部に連続的な密度勾配を生成する CNC Kitchen によって考案された手法 [17] について述べる。

- 手法の概要とアルゴリズム 本手法は、スライサーの標準機能ではなく、生成された G コードに対して後加工を行う点に特徴がある。インフィルラインの間隔を変えるのではなく、ノズルからの樹脂吐出量を操作し、ラインの「押し出し幅」を連続的に変化させることでシームレスな勾配を実現する (Figure 14)。

具体的には、壁に近いセグメントほどフローレートを増大させて線を太くし、中心部に向かうほど細く成形する。これは、部材の質量を外殻側（中立軸から遠い位置）に集中させることで断面二次モーメントを最大化し、軽量化と曲げ剛性の向上を両立させるアプローチである。

- 効果と制約

この手法により、均一なインフィルと比較して同一重量で約 60% 高い剛性を実現したとの報告がある。ジャイロイドのような連続曲線を持つパターンとも親和性が高い。一方で、フローレートを頻繁に変動させることはエクストルーダーの内圧管理

を困難にし、フィラメントの供給不良やノズル詰まりといった造形トラブルを誘発するリスクがあり、加えてスライサーから出力された G-code を直接編集する必要がある。

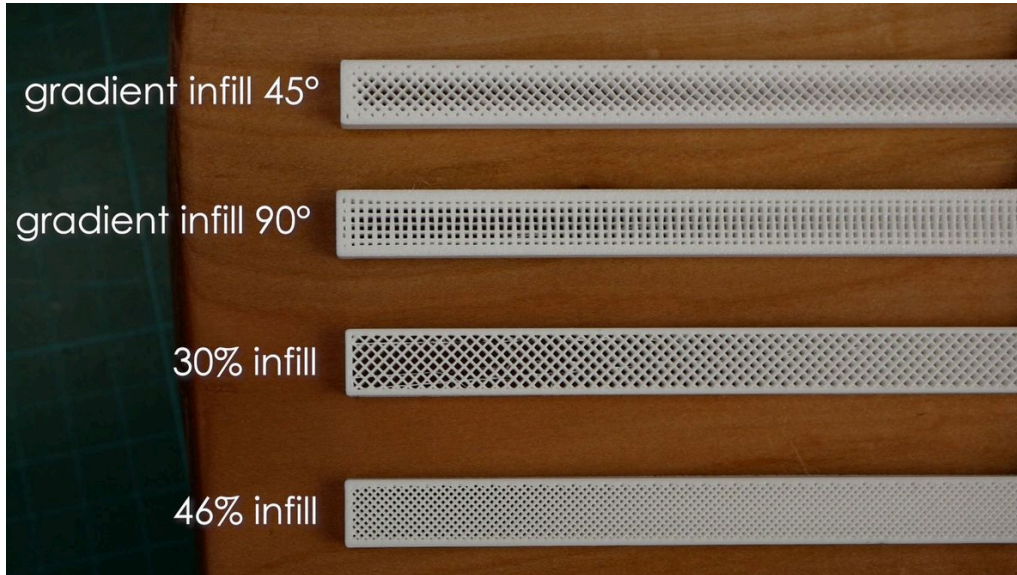


Figure 14: 吐出量調整によるインフィル密度の変化
(Source: <https://www.cnckitchen.com/blog/gradient-infill-for-3d-prints>)

2.2 構造解析に基づくインフィル最適化

前章では、幾何学的なパターンや充填率を経験則的に決定する、ヒューリスティクスに基づいたインフィル生成手法について概観した。これらの手法は計算コストが低く実現が容易である反面、個別の造形物が受ける具体的な荷重条件に対して力学的な妥当性を十分に担保しているとは言い難い。そこで本章では、こうした経験的な手法から一歩踏み込み、有限要素法 (FEM) による応力解析やトポロジー最適化といった、明確な力学的根拠に基づくインフィル最適化手法について詳述する。これにより、材料配置の合理性を定量的に評価し、構造剛性の最大化と軽量化を両立するための設計論について考察する。

2.2.1 空間変形およびマッピング手法

空間変形・マッピング手法は、設計空間そのものを幾何学的に歪ませたり、異なる空間へ射影したりすることで、均一なパターンを不均一な分布へと変換するアプローチである。

Liら (2025) は、密度場に基づいて設計領域を拡張し、その拡張空間に対して一様な充填パターンを生成した後、元の領域へ「逆マッピング」を行う手法を提案している [10]。このプロセスにより、高密度が必要な領域では格子が圧縮され、低密度領域では拡張さ

れるような構造が生成される。この手法の大きな特徴は生成されたインフィルが極めて高い連続性を持つことである。また、Groen と Sigmund (2018) は、均質化法に基づくトポロジー最適化の結果を、粗いメッシュから細かいメッシュへと射影することで、製造可能な高解像度の微細構造へと変換する手法を示した [18]。

これらの手法は、大域的な空間操作を行うため、構造的な連続性と結合性を保ちつつ、滑らかな密度変化を実現できる点が大きな利点である。一方で、空間の変形に伴う形状の歪みが生じやすく、意図した密度場と実際の幾何形状との間に誤差が生じる課題がある。

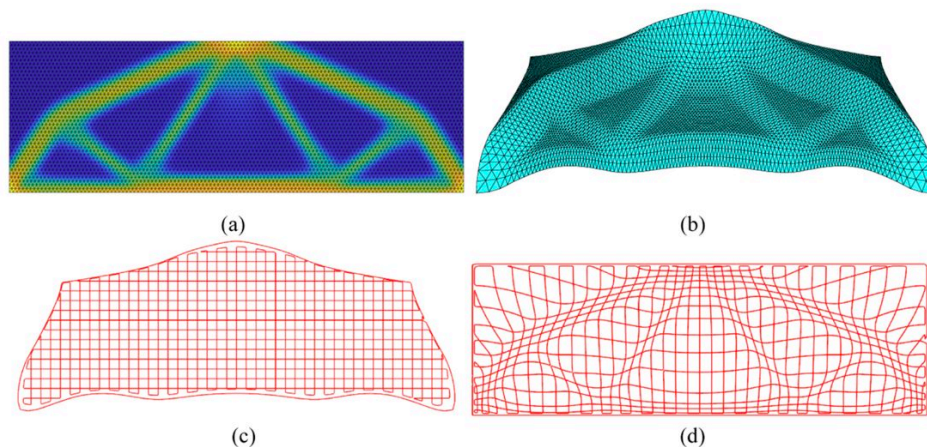


Figure 15: Li による逆マッピングを用いた Gradient Infill のステップ
(Source: Li et al., 2025 より引用)

2.2.2 物理量に連動したセルパラメータ制御

ユニットセルの特定の幾何学的パラメータ（壁厚、スケーリング、配向など）を、解析により得られた荷重パスや応力値に直接リンクさせて局所的に変化させる手法も広く研究されている。

Wang ら (2025) は、構造内の荷重パスに着目し、その容量に基づいて Gyroid セルの空隙率を決定するパラメータをマッピングする手法を提案した [19]。さらに、荷重の伝達方向に応じてセルの配向を適応的に変化させることで、力学的特性の向上を図っている。また、Biroisz と Andó (2023) は、有限要素法 (FEM) による応力解析結果に基づき、円形パターンの半径を局所的にスケーリングすることで、応力集中部の密度を高める手法を検証している [20]。

これらの手法の利点は、局所的な力学的要件を直接的に構造へ反映でき、応力集中部を的確に補強できる点にある。しかし、熱溶解積層法方式 (FDM 方式) のプロセスにおいては、インフィル構造まで含めた膨大なポリゴンメッシュを処理する必要があり、スラ

イスにおけるデータ容量、処理時間が極めて重くなってしまう。そのため、FDMの製造プロセスそのものにフォーカスした最適化にはなっていない。

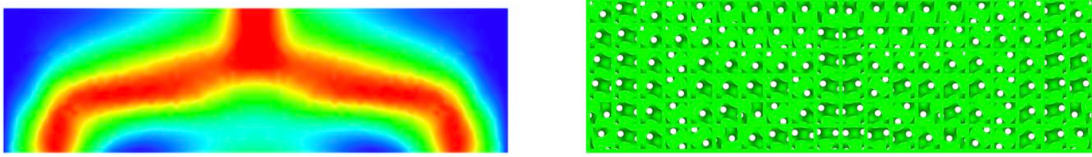


Figure 16: Wang らによる荷重パスに基づく Gyroid インフィル
(Wang et al., 2025 より引用)

2.2.3 周波数変調による密度遷移

陰関数で表現された周期構造（TPMS：三周期極小曲面など）において、壁厚を固定したままパターン「の周期」を操作することで密度を制御するアプローチである。

Wegner らは、Gyroid 構造の壁厚を一定に保持しつつ、周波数変調を用いて局所的な密度を変化させる手法を提案している [21]。

この手法の最大の特徴は、一定の線幅を維持したまま密度を制御できる点にある。MEX（材料押出）方式のようなプロセスにおいては、吐出量を一定に保てるため製造性が極めて高く、造形速度の安定化にも寄与する。課題としては、構造が近傍密度の影響を受けるため、最適化時の密度仮定と実際の局所密度に乖離が生じ、急激な密度変化への追従性も制限される点が挙げられる。



Figure 17: Wegner らによる局所的な密度変化のある Gyroid 構造
(Source: Wegner et al., 2025 より引用)

2.2.4 G コード直接拡張による流量操作

標準的なスライサーが生成した均一なインフィルパスに対し、構造解析結果に基づき各パスセグメントの押出量（E 値）を動的に書き換えるアプローチである [22]。本手法は、先行して述べた 2.1.3 節の「G-code への後加工」の考え方を拡張したものである。Yi ら (2023) は、直線的なインフィルパスを微小セグメントに分割し、トポロジー最適化から得られた密度行列に応じて各セグメントの流量を増減させるアルゴリズムを提案し

た。これにより、応力集中部では線を太く、低応力部では細くすることで、材料消費を抑えつつ剛性を高めることが可能となる。

最大の利点は、複雑な CAD モデリングやパス計画の再計算を介さず、既存のスライス処理フローにプラグインする形で密度勾配を実装できる点にある。そのため、計算コストが比較的低い。

一方で、ノズルからの吐出量には物理的な限界（最小・最大流量）があるため、実現可能な密度範囲が制限される。また、パスの間隔自体は一定であるため、線幅を極端に太くした際の隣接パスとの過剰な重なりや、逆に細くした際の隙間の発生といった、パス間隔と線幅のミスマッチによる不整合が生じやすい点が課題である。

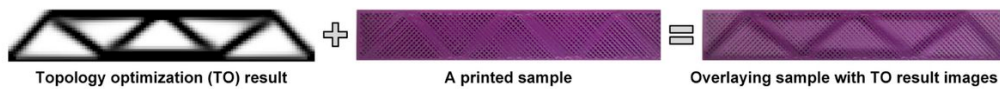


Figure 18: Yi らによる吐出量によるインフィル最適化の概要

(Source: Yi et al., 2023 より引用)

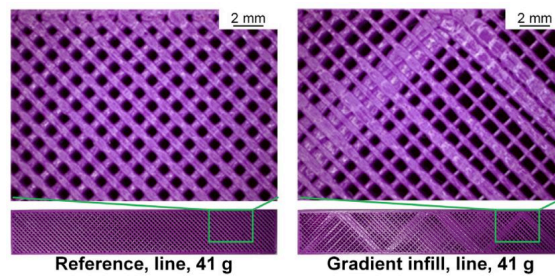


Figure 19: Yi らによる吐出量によるインフィル最適化の詳細

(Source: Yi et al., 2023 より引用)

2.2.5 トポロジー最適化による内部構造生成

従来のトポロジー最適化を拡張し、内部に微細な多孔質構造を自然発生させる手法が提案されている。Wu らは、積層造形向けのインフィル最適化において、骨のような多孔質構造を生成する計算手法を確立した [9]。

通常のトポロジー最適化では、剛性最大化を目的とすると材料が一箇所に凝集し、巨大な中実の塊を形成する傾向がある。これに対し彼らは、各ボクセルの近傍領域における材料体積に上限を設ける局所体積制約を導入した。この制約により、材料の過度な凝集が抑制され、結果として Figure 20 のような微細なトラス状や壁状の構造が空間内に分散して形成される。

この手法の特長は、均質化法などの中間的なプロセスを介さず、高解像度のトポロジー最適化によって直接的に微細構造を導出できる点にある。応力分布やコンプライアンス最小化といった力学的要請に忠実であるため、重量あたりの強度が極めて高い有機

的な構造を得ることが可能である。しかし一方で、高解像度計算に伴う膨大な計算負荷が大規模モデルへの適用を困難にしているほか、生成された複雑な形状がFDM方式等の製造プロセスにおいて印刷不能なオーバーハングや微細すぎる空隙を含むリスクがある点に課題が残る。

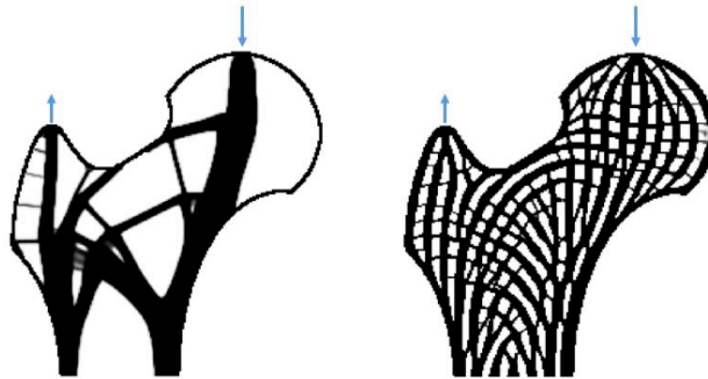


Figure 20: Wu らによるトポロジー最適化による多孔質の内部構造
(左：従来のトポロジー最適化構造、右：Wu らによる提案手法)

(Source: JunWu et al., 2018 より引用)

2.2.6 領域分割と離散的密度レベルの割り当て

連続的な密度勾配を生成する代わりに、設計領域を複数のサブドメインに分割し、離散的な密度レベルを割り当てる実用的なアプローチも研究されている。

Rilling らは、離散トポロジー最適化を用いた手法を提案した。これは、異なる目標質量で最適化された複数の形状を重ね合わせ、領域ごとに最適な密度分率を持つ構造を選択的に配置するものである。この手法は、既存のスライサーが持つインフィル密度設定を活用しやすいため実装の障壁が低く、質量の増加を伴わずに荷重負担能力を大幅に向上させることが実証されている [23]。

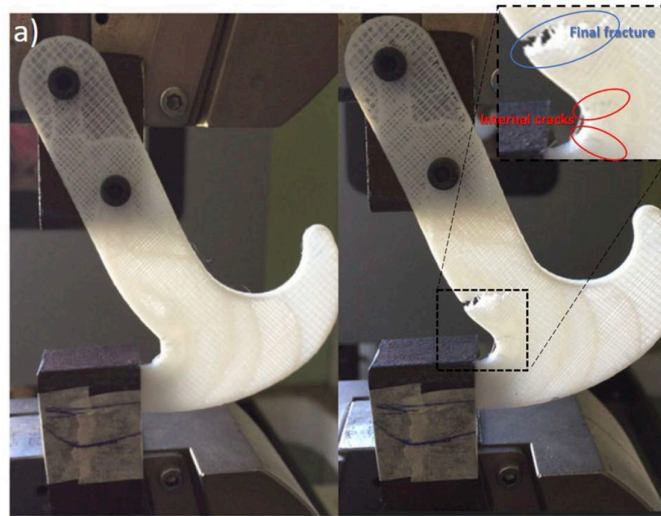


Figure 21: Rilling らによる領域分割処理によるインフィル最適化
(Source: Rilling et al., 2023 より引用)

また、Tanveer らは、引張試験片の外層とインフィルの領域に分割して、それぞれに異なる密度を組み合わせる実験的アプローチを行い、外層を密、内層を疎にする構造配置が引張強度の向上に寄与することを示した [24]。

これらの手法は、最終的な G-code 生成においてスライサを使用しやすく、最適化計算の成果を既存の製造パイプラインに統合しやすいという利点を持つ。しかし、密度が急激に変化する境界部においては、剛性の不連続性に起因する応力集中や、積層界面の剥離が生じるリスクがある。そのため、単なる領域分割に留まらず、境界部における力学的な整合性を考慮した設計指針が不可欠である。また、特定のソフトウェアへの依存や目標質量別の反復計算、手動の重ね合わせ工程が多大な工数を要する点にも課題が残る。

2.3 関連研究のまとめと本研究の立ち位置

これまで述べてきた関連研究は、そのアプローチから大きく分けて「ヒューリスティクスに基づく手法」と「構造解析に基づく手法」の2つに分類できる。これらの手法の特性を、実運用における課題や精度の観点から比較した結果を Table 1 に示す。

Table 1 の各項目は、本研究における評価軸を定義したものである。第1列は「解析・理論の有無」を示し、第2列から第4列は、序論で述べた実用化への障壁（製造プロセスとの整合性、リソースの軽量性、要求スキル）に関する評価である。また、第5列では、造形物の強度に直結するインフィルの連続性について整理した。

Table 1 の傾向を概観すると、既存手法には明確なトレードオフが存在することがわかる。まず、ヒューリスティクスに基づく手法は、スライサーの標準機能やユーザーの経験則に依存するため、解析的な根拠は薄い（表中の1,2段目の青色部分）。しかし、計

算コストが低く、既存のワークフローへの導入が容易であるという実運用面での高い優位性（表中の1,2段目の赤色部分）を持っている。

一方で、構造解析に基づく手法は、材料力学やトポロジー最適化 (TO) などの確固たる力学的根拠に基づいている（表中の4~8段目の赤色部分）。しかし、これらは高度な専門知識や膨大な計算リソースを必要とするケースが多く、既存のスライサーとの親和性も低いため、実運用の面では依然として大きな課題を残している（表中の4~8段目の青色部分）。

すなわち、従来の研究は「簡便ですぐに使えるが、力学的根拠に乏しいもの」か、「理論的根拠は強固だが、実運用上の壁があるもの」の二極に分かれていたと言える。

本研究では、この両者の中間領域を研究のスコープとして定める。応力解析に基づく力学的根拠を持ちながらも、計算負荷を抑え、既存の製造プロセスにスムーズに統合できる手法を提案することが、本研究の主眼である。

具体的には、製造プロセスとの整合性を最優先事項として設計を行い、Rillingらの研究 [23] を参考に、領域分割および離散的なレベル割り当ての手法を導入した。ここに、既存のスライサーにおいて使用可能な「モディファイアー (Figure 13)」を用いた領域指定の枠組みを統合した。すなわち、Rillingらの手法が持つ領域分割の利点と、モディファイアーによる実用性を掛け合わせることで、解析結果を直ちに製造データへと変換可能な、独自のインフィル最適化プロセスを構築した。

これは、Table 1 において緑色で示した「提案手法」の立ち位置であり、解析精度と実用性を両立させることで、3D プリントにおける構造最適化技術の社会実装を目指すものである。

手法分類	解析・理論の有無	製造プロセスとの整合性	計算・データリソースの軽量性	要求スキル(現場での利用)	インファイルの連続性
ヒューリスティックスに基づく手法	△× (壁面からの距離に基づく)	◎ (標準実装)	◎ (計算コストが低い)	◎ (自動生成)	○ (オクトツリー構造)
提案手法	× (ユーザーの経験則)	◎ (標準機能)	◎ (計算不要だが手工作大)	○ (設計者の経験が必要)	× (手動配置による)
	○ (FEMによる応力解析)	◎ (スライスの前処理)	◎ (メタデータを作るので計算コストが低い)	○ (FEM、内部処理を自動化)	× (境界部での剥離リスク)
	○ (材料力学・TO)	△× (Gコード直接編集・供給不良)	○ (計算コストは比較的低い)	△ (G-code 製造知識が必要)	◎ (シームレスな勾配)
	○ (密度場)	× (独自の G-code 生成が必要)	× (大規模モデルで負荷)	× (専門的な数理知識)	◎ (極めて高い連続性)
構造解析に基づく手法	○ (荷重パス・応力)	○ (一定線幅の継走が可能)	△ × (高解像度処理が必要)	× (専門的な数理知識)	○ (滑らかな変化)
	◎ (トポロジー最適化)	× (設計段階でのインファイル同定)	× (計算・容量共に大)	× (専門知識が必要)	◎ (有機的な連続構造)
	○ (離散TO等)	○ (既存スライスを活用可能)	△ (反復計算や手動統合)	△× (特定ソフトウェアへの依存、アルゴリズム開発)	× (境界部での断絶リスク)

Table 1: 関連研究比較表

3 提案手法：Strecs3D による最適化ワークフロー

3.1 システムの設計思想と全体概要

3.1.1 開発の背景とシステムの位置づけ

従来の3Dプリンティングにおけるワークフローは、CADによる形状設計、CAEによる構造解析、そしてスライサーによる造形データ（G-code）生成という各プロセスが独立しており、データ形式の変換に伴う情報の欠落や、工程間の乖離が課題となっていた。特に、構造解析の結果を造形パラメーターに動的に反映させるには、高度な専門知識と複雑な手動操作が必要であった。

本研究で提案するシステムは、これらの分断されたワークフローを統合し、シームレスな最適化を実現するためのプリプロセッシング・ソフトウェア(前処理ソフトウェア)である。本システムは、応力解析の結果に基づき、造形物内で大きな負荷がかかる部位には密なインフィルを、負荷の少ない部位には疎なインフィルを自動で割り当てる。これにより、部品の軽量化と高強度化を両立する「インフィル最適化」を実現する。

本システムの最大の特徴は、特定のG-codeを直接生成するのではなく、スライス工程の前処理として「どの領域に何%のインフィルを配置するか」という製造メタデータを含んだ3MF（3D Manufacturing Format）[25] ファイルを出力する点にある。これにより、ユーザーは既存のスライスソフトや使い慣れた3Dプリンタの環境を維持したまま、高度な構造最適化の恩恵を享受することが可能となる。

3.1.2 設計ポリシー

本システムの開発にあたっては、研究室内での実験に留まらず、将来的な製造現場での実用性を考慮し、以下の4つの設計目標を掲げた。

- 汎用性の確保

特定の3Dプリンタやスライサーの独自仕様に依存しないよう、オープンな標準規格である3MF形式を採用する。3MFは、XMLベースのメタデータを保持できるため、Cura、Bambu Studio、PrusaSlicerといった主要なスライサーとの互換性を確保できる。これにより、既存の加工データ生成プロセスを阻害することなく最適化を導入できる。

- データ処理の軽量化と実用性

インフィル構造をすべてポリゴンとして表現すると、データ量が膨大になり、PCの計算リソースやスライス処理に多大な負荷をかける。本システムでは、形状データと最適化パラメーターを分離して管理し、3MFの製造メタデータを活用することで、軽量化データハンドリングと高速なアルゴリズムを実現する。

- 解析プロセスの自動化

有限要素法（FEM）や構造解析の専門知識を持たないユーザーでも利用できるよう、計算メッシュの生成から解析の実行、結果のインフィル密度への変換プロセスを抽象化・カプセル化する。ユーザーは「形状データ」「拘束条件」「荷重条件」の3点を与えるだけで、最適な内部構造を得ることができる。

- モジュール構造による拡張性

将来的な機能拡張を見据え、システムをモジュール化して設計する。これにより、新しい解析ソルバーの導入や、将来登場する新しいスライスエンジンへの対応、あるいはトポロジー最適化アルゴリズムの追加などを容易に行える構造とする。

3.1.3 システムの全体構成とデータフロー

本システムの処理フローを以下に示す。ユーザーからの入力データが、内部的な解析を経て、製造情報を含む3MFデータとして出力されるまでの流れは Figure 22 の通りである。

入力データ：ユーザーは、対象物の3D形状データ（STEP形式）に加え、本システム上で、固定箇所（拘束）と力をかける箇所（荷重）を指定する。

内部処理：入力された形状に基づいて自動的にメッシュ分割が行われ、静解析が実行される。得られた応力分布に基づき、領域の分割とインフィルの設定が付与される。

出力データ：最終的に、形状データと「領域ごとの密度指定」をパッケージ化した3MF形式のファイルを出力する。

この3MFデータを既存のスライサーに読み込ませることで、解析結果に基づいた可変インフィル構造を持つ造形パスが生成される仕組みとなっている。

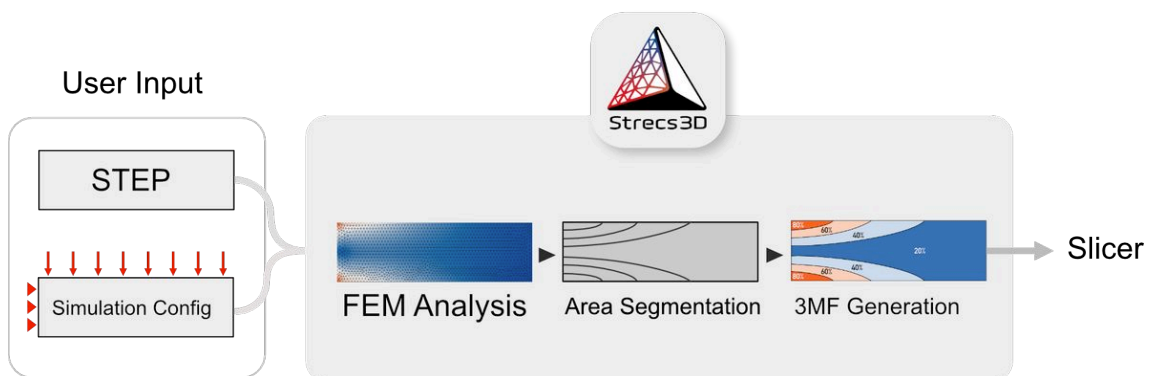


Figure 22: Strecs 3D の内部処理のフロー

3.2 ソフトウェアの使用法

本節では、提案手法を具現化するためのソフトウェア「Strecs3D」を用い、インフィル最適化を行う具体的なプロセスについて述べる。本稿執筆時点（2025年12月）での最新バージョンである ver.2.0.0-beta を対象とし、導入からスライスデータの出力までの手順を解説する。

3.2.1 インストールとセットアップ

Strecs3D は、GitHub の公式リポジトリ (<https://github.com/tomohiron907/Strecs3D/releases/tag/v2.0.0-beta>) より入手可能である。利用者は、自身の OS 環境 (macOS または Windows) に適したインストーラーを選択する。

macOS 環境では、ダウンロードした dmg ファイルを展開し、アプリケーションディレクトリに「Strecs3D.app」をコピーすることで導入が完了する。Windows 環境では、提供されるセットアップウィザードの指示に従いインストールを行う。インストール後、ソフトウェアを起動し、Figure 25 に示す初期画面が表示されることを確認する。

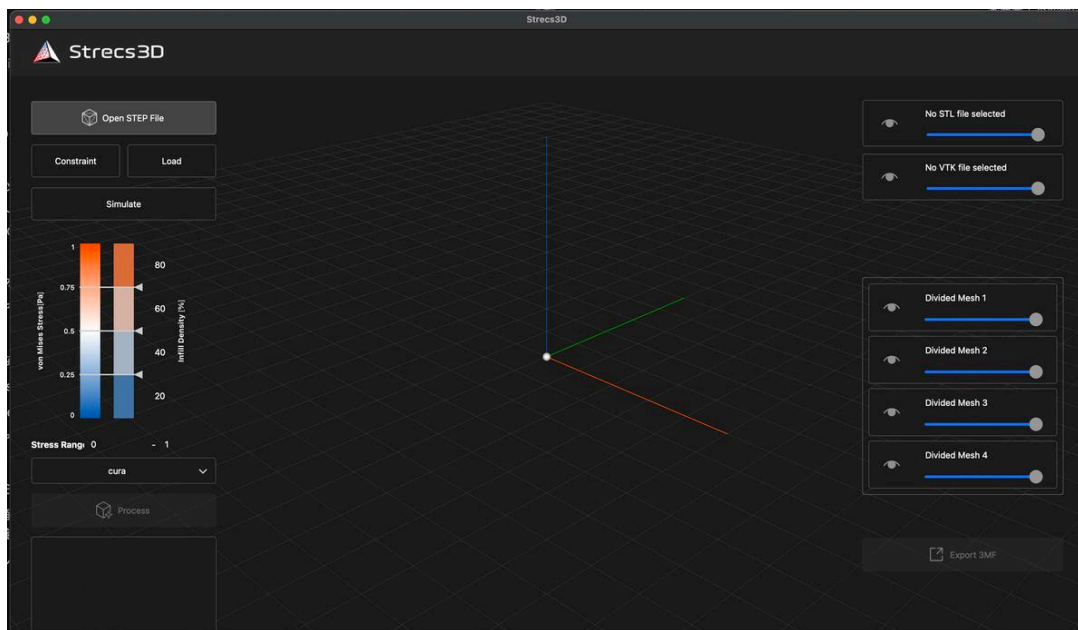


Figure 25: Strecs3D v2.0.0-beta の起動時の初期画面

3.2.2 3D モデルの設計と読み込み

まず、任意の CAD ソフトウェアを用いて 3D モデルを設計する。本稿では一例として、ベアリングを保持するパーツ (Figure 26) を対象とする。設計した形状は、汎用的な CAD フォーマットである STEP ファイルとしてエクスポートする。

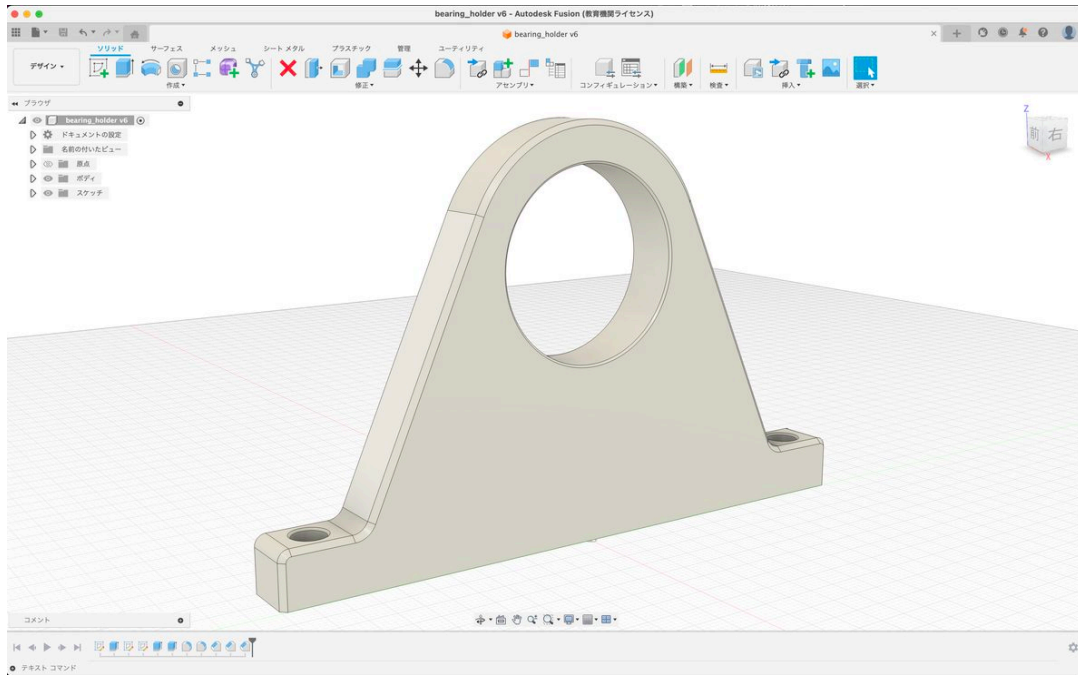


Figure 26: ベアリングを保持するパーツの CAD モデル

なお、v2.0.0-beta では、読み込み可能なファイル名は英数字のみに限定されている点に留意が必要である（※次期アップデートにてマルチバイト文字に対応予定）。Strecs3D 上の「Open STEP file」ボタンをクリックし、出力した STEP ファイルを選択して読み込む（Figure 27）。

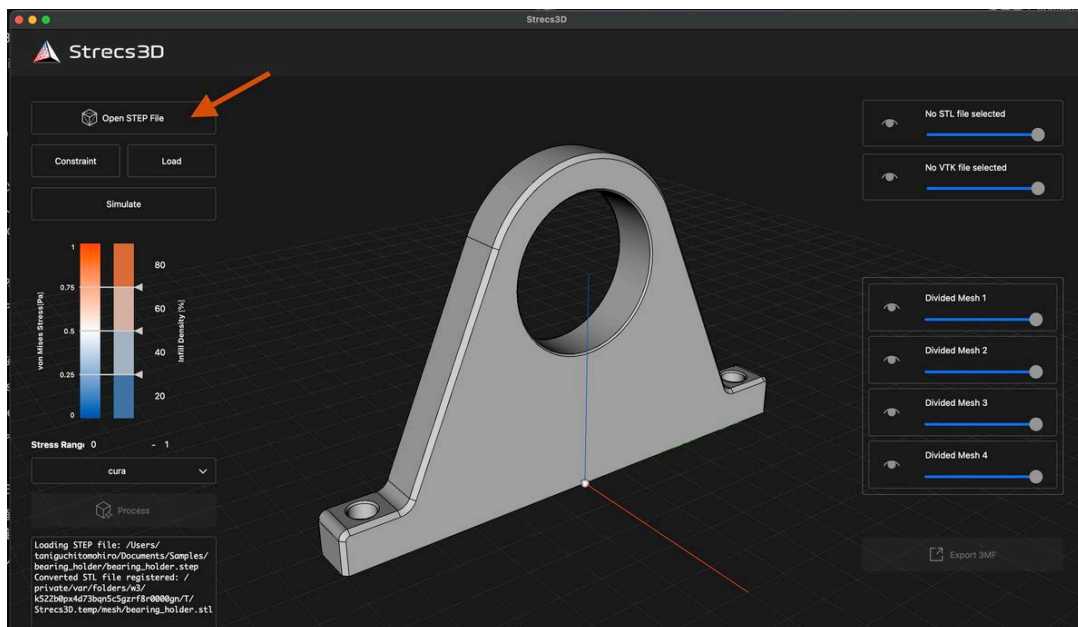


Figure 27: STEP ファイルの読み込み手順

3.2.3 境界条件の設定と構造解析

モデルの読み込み後、解析のための境界条件を設定する。本例では、パーツの底面を固定し、中央の円筒部に対して下方へ 50N の荷重を印加する条件を想定する。

モデル上にカーソルを合わせることで、各面の面番号を確認できる (Figure 28)。本モデルでは面番号 31 が底面に該当するため、「Constraint」ボタンをクリックし、表示されたポップアップに面番号「31」を入力して固定条件を付与する (Figure 29)。

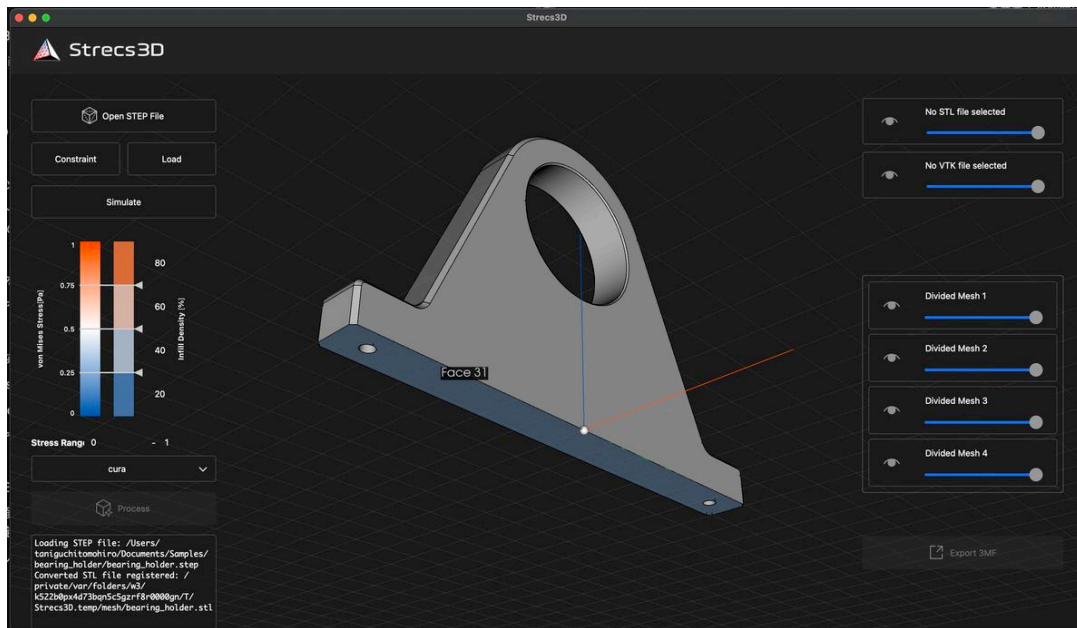


Figure 28: モデルの固定面の面番号を確認する手順

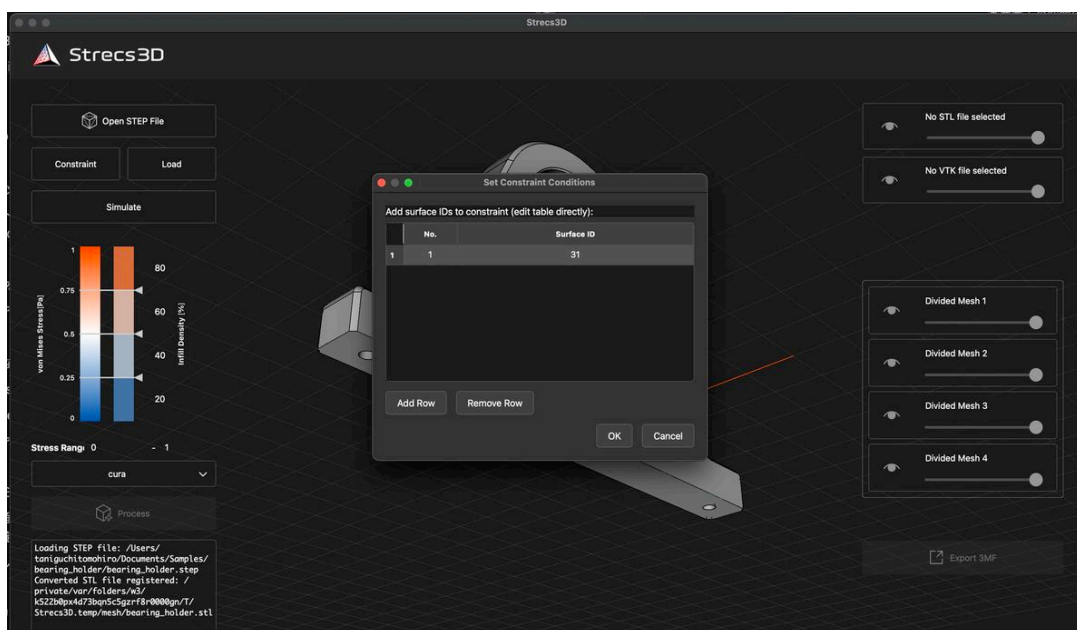


Figure 29: 固定条件の設定手順

次に、荷重条件を設定する。今回の部品は中央の円筒部分の面に 50N の力が下向きにかかるという想定である。その荷重対象となる中央円筒部の面番号は 8 である (Figure 30)。「Load」ボタンをクリックし、ポップアップに以下のパラメータを入力する (Figure 31)。

Load parameters:

SurfaceID: 8

Magnitude: 50

Vector: 0, 0, -1

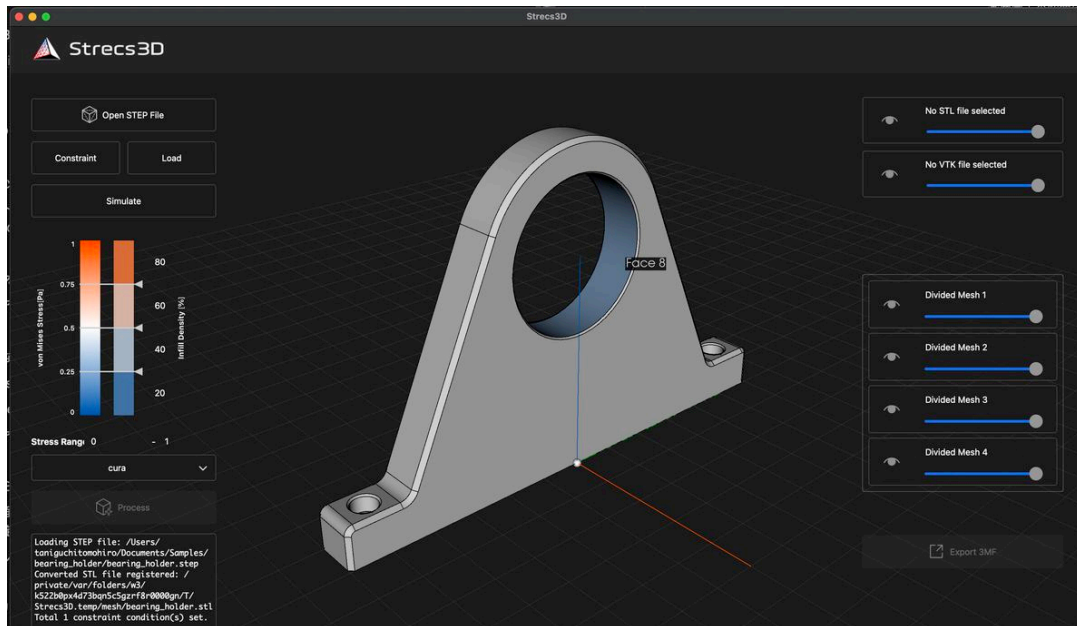


Figure 30: 荷重対象となる面番号を確認する手順

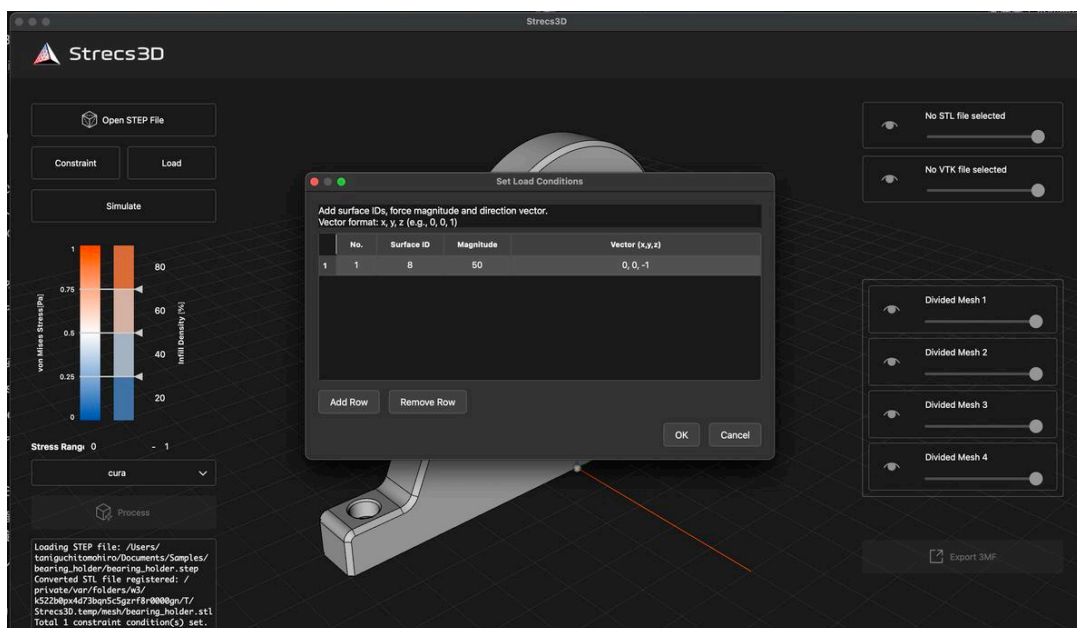


Figure 31: 荷重条件の設定手順

設定完了後、「Simulate」ボタンを押下することで内部で構造解析が実行される。数秒後に解析完了のダイアログが表示され (Figure 32)、OK を選択すると計算された応力分布等の解析結果が画面上に可視化される (Figure 33)。

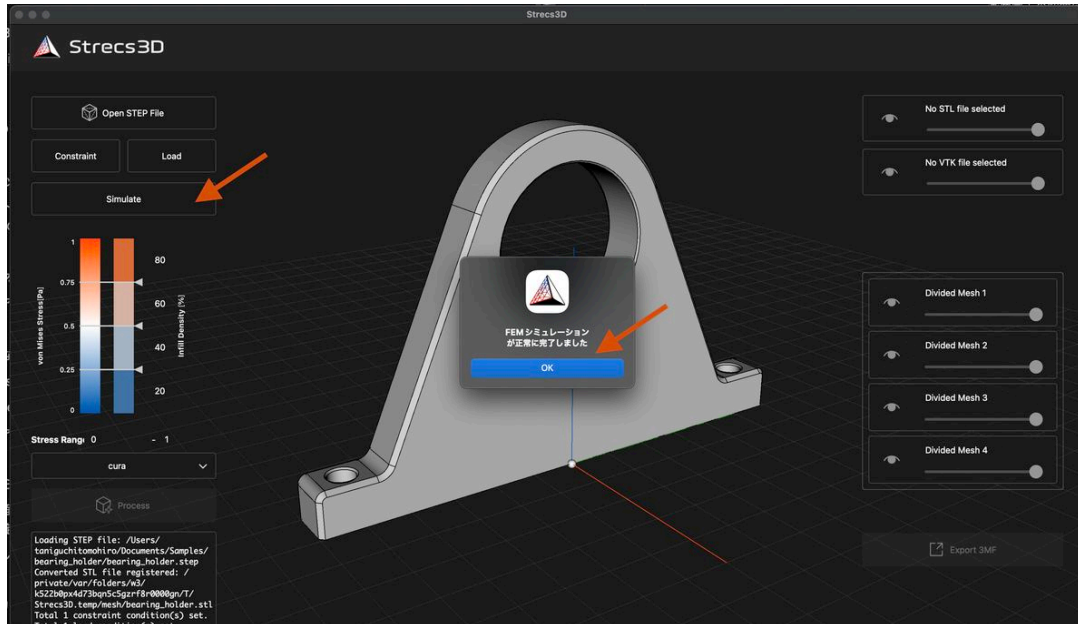


Figure 32: 構造解析完了の通知ダイアログ

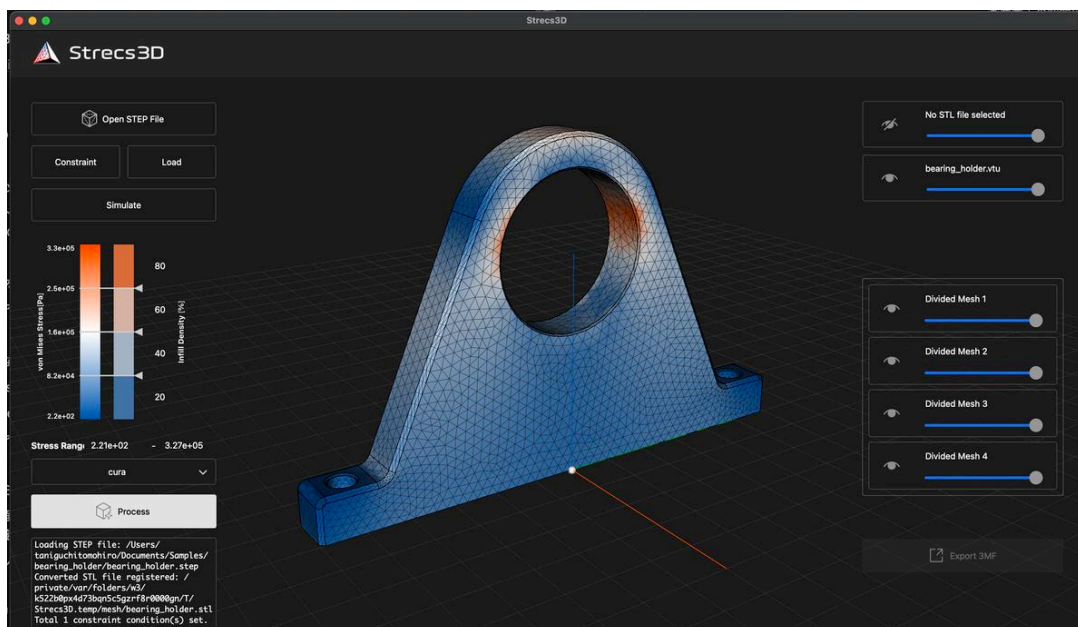


Figure 33: 有限要素解析結果の可視化

3.2.4 領域分割とインフィル最適化

解析が正常に終了すると、「Process」ボタンが有効化される。このボタンを押下することで、応力分布に基づいた領域分割処理が実行される。

本手法では、対象領域を応力の高い順から低い順へ4段階に分割し、プレビューを表示する (Figure 34)。各領域は、高密度領域から低密度領域にかけて、暖色 (オレンジ) から寒色 (青) のグラデーションで色分けされる。領域を分割する閾値は、ユーザーがスライダー操作によって任意に調整可能であるほか、オプションとして各領域のインフィル密度をマニュアルで指定することもできる (Figure 35)。

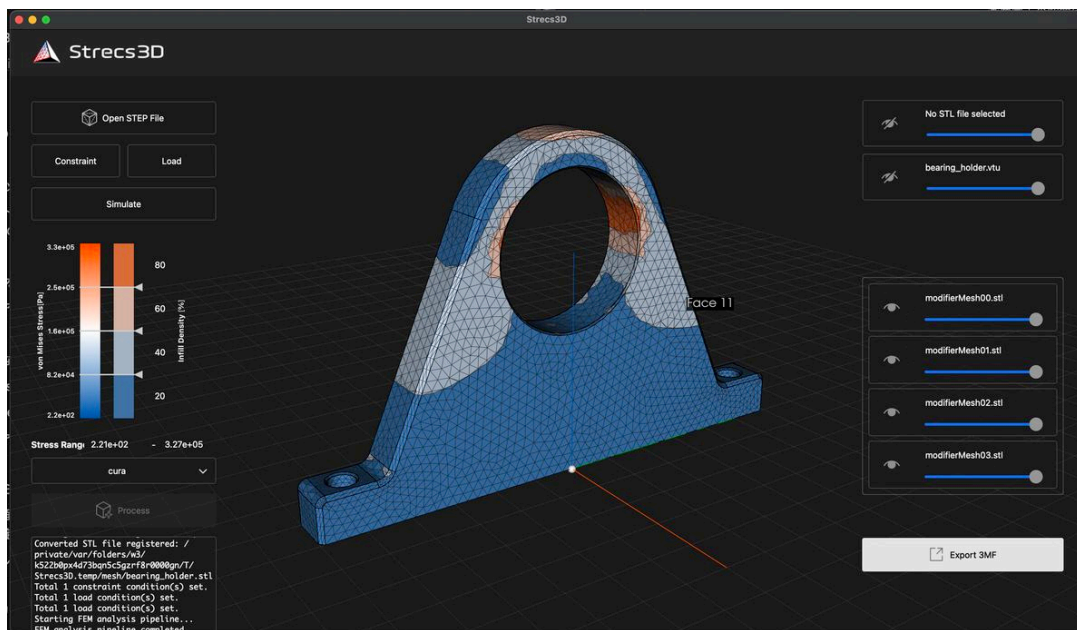


Figure 34: 自動領域分割結果のプレビュー表示

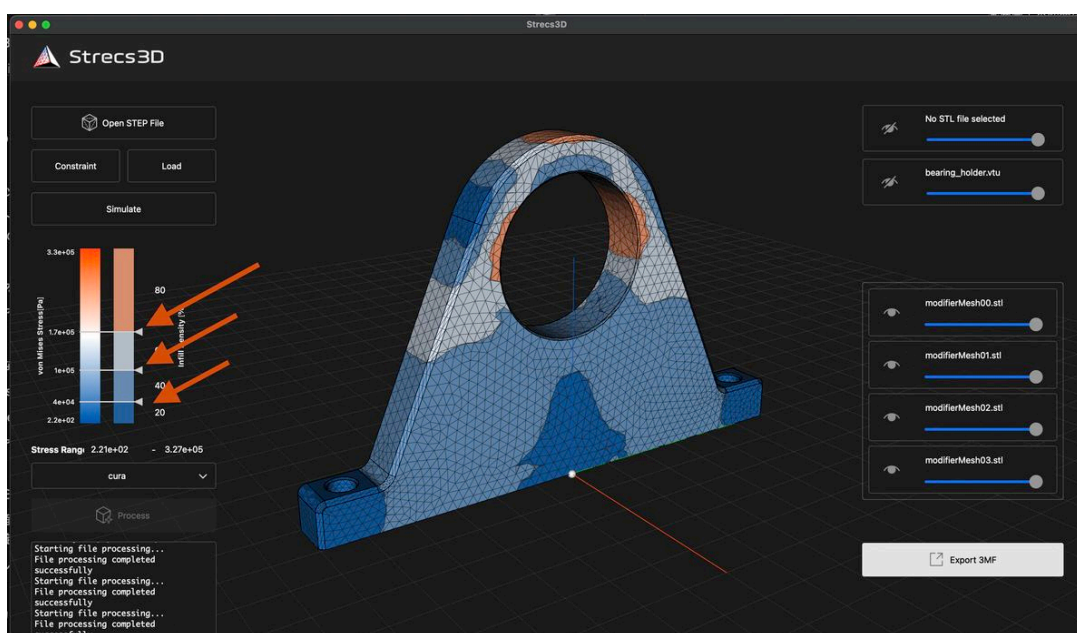


Figure 35: インフィル密度の調整手順

3.2.5 スライサー連携と 3MF ファイルの出力

最適化された結果を実際の造形に反映させるため、出力先の指定を行う。Strecs3Dは、コンボボックスから対象のスライサー（Cura, Bambu Studio, PrusaSlicer）を選択できる仕様となっている（Figure 36）。スライサーの選択や各種設定を変更した場合は、再度「Process」ボタンを押下して情報を更新する必要がある。

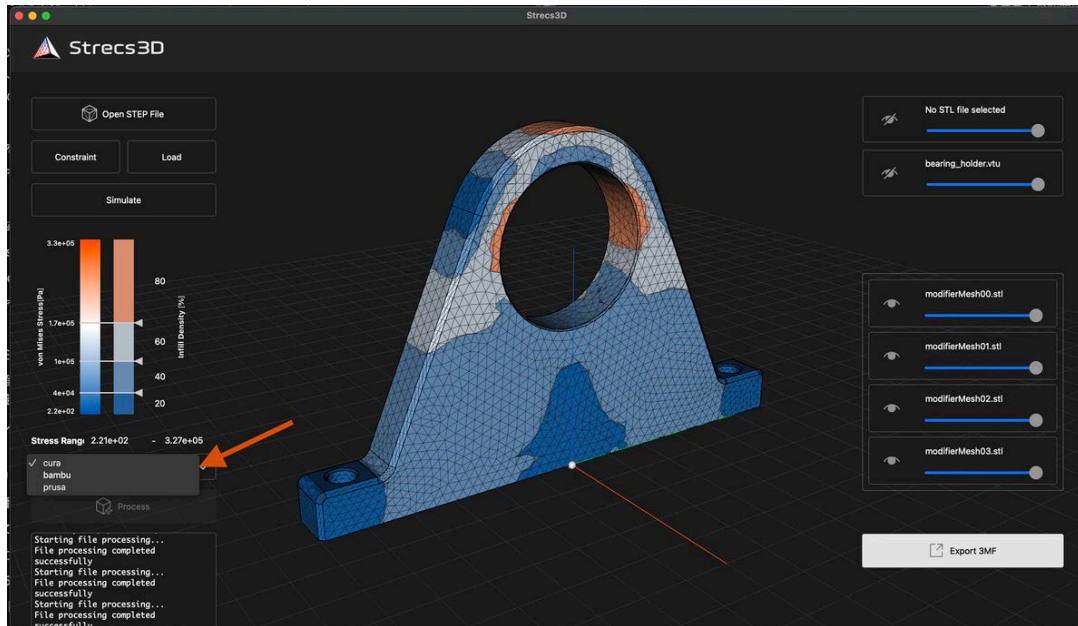


Figure 36: スライサーの選択手順

設定確認後、画面右下の「Export 3MF」ボタンをクリックし、最適化情報が含まれた.3mf ファイルを保存する。保存したファイルを指定のスライサー（本例では Bambu Studio）で開き（Figure 37）スライスを行うと、Figure 38 に示すように、内部のインフィルが領域ごとに疎密を持って生成されていることが確認できる。

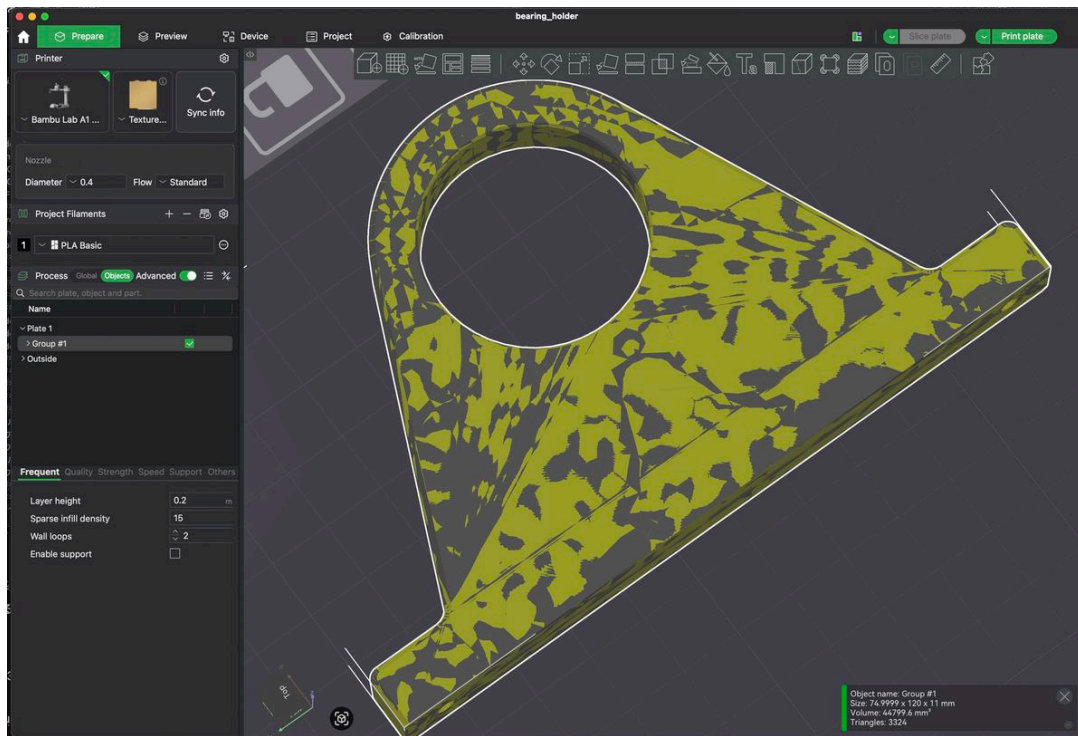


Figure 37: エクスポートされた 3mf ファイルを Bambu Studio へインポートする様子

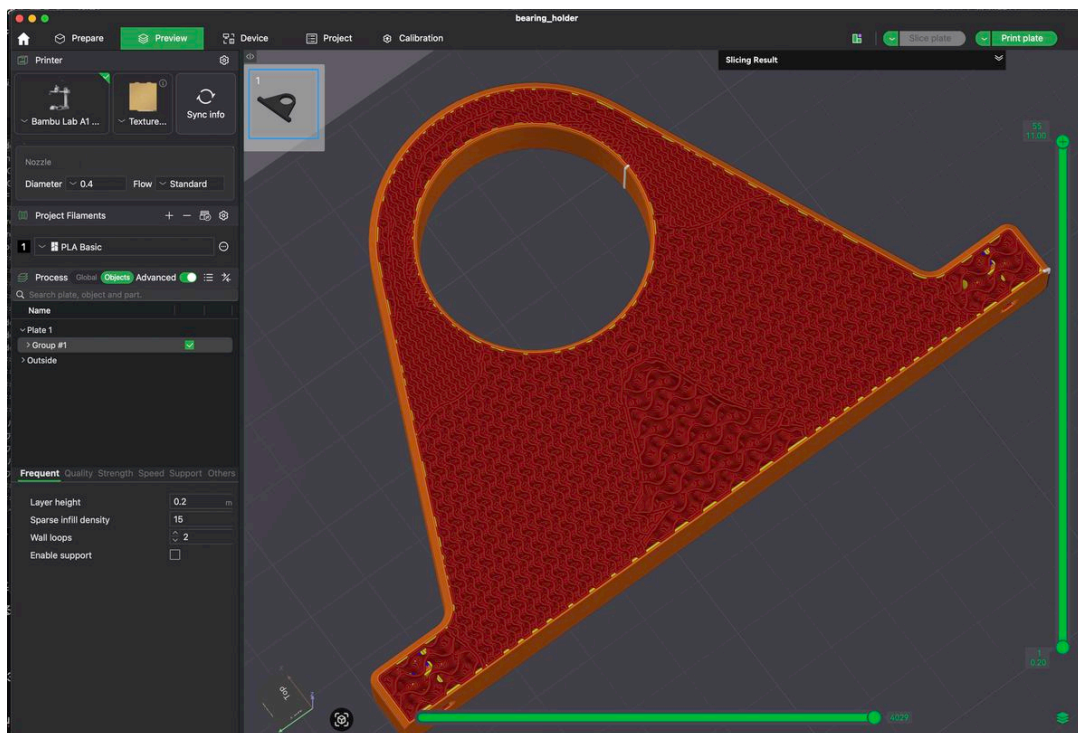


Figure 38: スライス結果のプレビュー表示

このように、Strecs3D を介して出力されたデータを 3D プリンタで造形することにより、力のかかる部位には密なインフィルを、負荷の少ない部位には疎なインフィルを配置した、構造的合理性を持つパーツの製作が可能となる (Figure 39)。

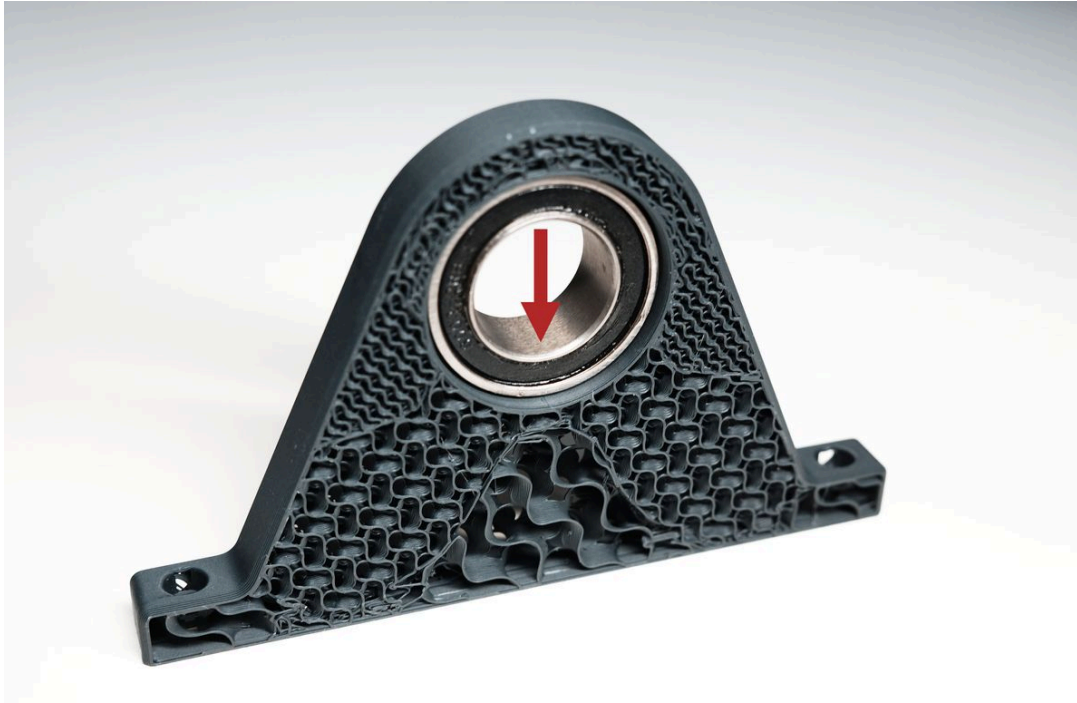


Figure 39: 最終的な造形結果

3.3 ソフトウェアアーキテクチャ

3.3.1 設計方針

本研究では、構造解析結果に基づく 3D プリント前処理という複雑な処理を、保守性と拡張性を両立させながら実装するため、ソフトウェア工学の知見を積極的に取り入れた設計を行った。

設計における主要な方針として、以下の 3 点を掲げた。第一に、GUI 操作とビジネスロジックの分離により、ユーザーインターフェースの変更が内部処理に影響を与えない構造とすること。第二に、複数のスライサーソフトウェアへの対応を見据え、出力形式の差異を吸収できる拡張可能な設計とすること。第三に、大規模な 3D メッシュデータを扱うため、処理性能を犠牲にしない実装とすること。

これらの方針を実現するため、レイヤードアーキテクチャを基盤とし、適切なデザインパターンを組み合わせた設計を採用した。

3.3.2 レイヤー構造

本ソフトウェアは、責務に応じて4つのレイヤーに分割した階層構造を採用している。各レイヤー間の依存関係は上位から下位への一方向に制限することで、変更の影響範囲を局所化している。

UIレイヤーは、ユーザーとの対話を担当する最上位のレイヤーである。Qt 6フレームワークを用いたウィジェット群と、VTKを用いた3D可視化コンポーネントから構成される。ユーザーの操作イベントを受け取り、下位レイヤーへの処理要求を発行する役割を担う。また、処理結果の表示やエラーメッセージの提示もこのレイヤーが担当する。

アプリケーションレイヤーは、ユーザー操作に対応するアプリケーション全体の制御フローを管理する。ApplicationControllerクラスがファイルの読み込みから処理実行、エクスポートまでの一連のワークフローを統括する。UIレイヤーとの通信にはIUserInterfaceインターフェースを介することで、具体的なUI実装への依存を排除している。

処理パイプラインレイヤーは、本研究の中核となるメッシュ処理と3MFファイル生成を担当する。ProcessPipelineクラスが処理全体の流れを制御し、VtkProcessorクラスが構造解析データの読み込みと応力値に基づくメッシュ分割を実行する。スライサーごとに異なる3MFファイル形式への対応は、BaseLib3mfProcessorを基底とした継承階層により実現している。

ユーティリティレイヤーは、ファイル操作やパス管理など、他のレイヤーから共通して利用される補助機能を提供する。一時ファイルの管理やZIP圧縮・解凍処理など、プラットフォーム固有の処理をこのレイヤーに集約することで、上位レイヤーの可搬性を確保している。

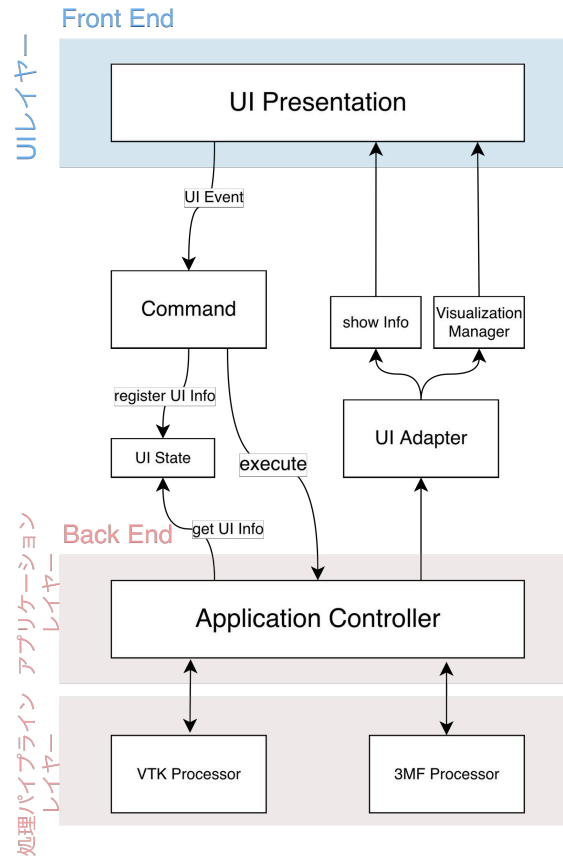


Figure 40: Strecs3D のレイヤーアーキテクチャ図

3.3.3 デザインパターンの適用

本ソフトウェアでは、設計方針を実現するために複数のデザインパターンを適用した。

Command パターンは、ユーザーの全ての操作をコマンドオブジェクトとしてカプセル化するために採用した。ファイルを開く操作は `OpenStlFileCommand` および `OpenVtkFileCommand` として、処理実行は `ProcessFilesCommand` として、それぞれ独立したクラスとして実装されている。このパターンにより、UI 層のイベントハンドラは対応するコマンドオブジェクトを生成して実行するだけの単純な処理となり、ビジネスロジックとの疎結合が実現される。

Adapter パターンは、UI の実装詳細をアプリケーション層から隠蔽するために採用した。 `MainWindowUIAdapter` クラスが `IUserInterface` インターフェースを実装し、具体的な Qt ウィジェットへの操作を抽象化されたメソッド呼び出しに変換する。 `ApplicationController` は `IUserInterface` インターフェースのみに依存するため、UI の実装を変更する場合でもアプリケーション層のコードを修正する必要がない。この設計は、単体テストにおいてモックオブジェクトを注入する際にも有効に機能する。

Strategy パターンは、複数のスライサーソフトウェアへの対応を実現するために採用した。3MF ファイルの生成処理において、BaseLib3mfProcessor を抽象基底クラスとし、Cura 用の CuraLib3mfProcessor、Bambu Studio 用の BambuLib3mfProcessor、PrusaSlicer 用の PrusaLib3mfProcessor がそれぞれの出力形式に応じた実装を提供する。ProcessPipeline クラスは基底クラスのインターフェースを通じて処理を呼び出すため、新たなスライサーへの対応は新しいサブクラスを追加するだけで実現できる。

3.3.4 状態管理

GUI アプリケーションにおいて、複数の UI コンポーネント間で状態を一貫して管理することは重要な課題である。本ソフトウェアでは、UIState クラスを導入し、アプリケーション全体の UI 状態を一元管理する設計を採用した。

UIState クラスは、読み込まれたファイルのパス、応力値の表示範囲、各オブジェクトの表示設定、選択されている処理モードなど、UI に関連する全ての状態を保持する。状態の変更はセッターメソッドを通じてのみ行われ、変更時には Qt の Signal 機構を用いて関連するコンポーネントに通知される。この設計により、Single Source of Truth の原則が守られ、状態の不整合が発生しにくい構造となっている。

また、応力値と密度の対応関係を表す StressDensityMapping 構造体を導入し、DensitySlider ウィジェットで設定された値を UIState を介して処理パイプラインに伝達する仕組みを構築した。これにより、UI での設定変更が即座に処理パラメータに反映される。

3.3.5 技術スタックの選定

本ソフトウェアの実装にあたり、以下の技術スタックを選定した。選定にあたっては、処理性能、クロスプラットフォーム対応、既存ライブラリとの親和性を主な評価基準とした。

プログラミング言語には C++17 を採用した。大規模な 3D メッシュデータの処理において十分な性能を確保できること、VTK [26] をはじめとする科学技術計算ライブラリの多くが C++ で実装されていること、C++17 で追加された標準ライブラリ機能によりファイル操作が簡潔に記述できることが選定理由である。

GUI フレームワークには Qt 6 [27] を採用した。Windows と MacOS の両プラットフォームに対応できること、Signal/Slot 機構によりイベント駆動プログラミングが自然に記述できること、VTK との統合を容易にする QVTKOpenGLNativeWidget が提供されていることが選定理由である。

3D 可視化ライブラリには VTK (Visualization Toolkit) [26] を採用した。構造解析ソフトウェアの出力形式である VTU ファイルの読み込みに標準で対応していること、等

値面抽出やクリッピングなど本研究で必要なメッシュ処理機能が充実していること、科学技術可視化の分野で広く利用されており信頼性が高いことが選定理由である。

3MF ファイルの生成には lib3mf ライブラリ [28] を採用した。3MF Consortium が公式に提供するライブラリであり仕様への準拠が保証されていること、メタデータの操作が柔軟に行えることが選定理由である。

依存ライブラリの管理には vcpkg [29] を採用した。上記のライブラリ群を統一的な方法で導入できること、Windows と macOS の両環境で同一の設定ファイルを使用できることが選定理由である。

3.3.6 拡張性への配慮

本ソフトウェアは、将来的な機能追加を見据えた拡張可能な設計としている。

スライサーソフトウェアへの対応については、前述の Strategy パターンにより、既存コードを変更することなく新たなスライサーへの対応を追加できる。BaseLib3mfProcessor クラスで定義された純粋仮想関数を実装するサブクラスを作成し、ProcessPipeline クラスのファクトリメソッドに登録するだけで対応が完了する。

表示対象オブジェクトの追加については、SceneDataController クラスにオブジェクト情報を登録し、対応する ObjectDisplayOptionsWidget を配置することで実現できる。表示設定の管理は DisplaySettings 構造体により統一されているため、新たなオブジェクト種別を追加する際も既存の枠組みを再利用できる。

処理パイプラインの変更については、ProcessPipeline クラスの各処理ステップが独立したメソッドとして実装されているため、特定のステップのみを修正または差し替えることが可能である。

3.4 FEM 解析パイプラインの自動化

3.4.1 解析プロセスの全体フローと抽象化

本システムでは、有限要素法 (FEM) による構造解析を自動化し、専門的な知識を持たないユーザーでも容易に解析を実行可能なパイプラインを構築した。この自動化の核となるのが、解析プロセスの統合管理 (オーケストレーション) を担う `runFEMAnalysis` 関数である。

3.4.1.1 処理の自動化とシーケンシャルな実行フロー

本システムは、ユーザーが作成した解析条件 (JSON 形式の `SimulationConfig`) を入力として受け取り、以下の4つのステップをシーケンシャルに自動実行するフローを実装している。

- 環境準備：実行時の干渉を避けるため、解析専用の一時ディレクトリ (`temp/FEM`) を動的に生成し、一連の中間ファイルを管理するためのワークスペースを確保する。
- 前処理 (Pre-processing)：入力された STEP 形式の 3次元 CAD データと、JSON ファイルに定義された境界条件を読み込む。これらを基に、解析ソルバーが解釈可能な入力ファイル (INP 形式) へと変換を行う。この過程で、形状データのメッシュ化や各ノードへの物理量の割り当てが自動的に行われる。
- ソルバー実行 (Solving)：外部のオープンソース解析ソルバーである CalculiX [30] をシステム内部から呼び出す。OS ごとの実行パスの差異や環境変数の影響をプログラム側で吸収し、安定した解析実行環境を提供する。
- 後処理 (Post-processing)：ソルバーから出力された独自形式の解析結果 (FRD 形式) を、汎用的な可視化用データフォーマットである VTU 形式へと変換する。これにより、解析終了後即座に結果を可視化することが可能となる。

3.4.1.2 複雑性の隠蔽と抽象化

本パイプラインの最大の特徴は、解析に伴う専門的な複雑性をシステム内部に完全に隠蔽 (カプセル化) した点にある。

従来の FEM 解析では、メッシュの生成、ノードやエレメントに対する適切な荷重・拘束条件の定義、フォーマットの異なる複数のソフトウェア間でのファイル変換など、高度な専門知識と煩雑な手動操作が必要であった。これに対し本システムでは、ユーザーは「STEP ファイル」と、それに対する「境界条件 (固定面や荷重の大きさ・方向)」を定義した JSON ファイル (Figure 41) を用意するだけでよい。

```

1  {
2  "constraints": {
3    "fixed_faces": [
4      {
5        "name": "Constraint_1",
6        "surface_id": 4
7      }
8    ]
9  },
10 "loads": {
11   "applied_loads": [
12     {
13       "direction": {
14         "x": 0.0,
15         "y": 0.0,
16         "z": -1.0
17       },
18       "magnitude": 100.0,
19       "name": "Load_1",
20       "surface_id": 1
21     }
22   ]
23 },
24 "mesh": {
25   "max_element_size": 2.0,
26   "min_element_size": 1.0
27 },
28 "step_file": ""
29 }

```

Figure 41: Simulation Config の Json ファイルの例

メッシュの細分化、要素への荷重配分、ソルバーのコマンドライン引数の設定といった専門的手順はすべてパイプライン内部で抽象化されている。この設計により、ユーザーは解析の技術的な詳細に翻弄されることなく、設計案の評価という本来の目的へ注力することが可能となっている。

3.4.2 外部ツールとの連携手法とハイブリッド制御

本システムにおける FEM 解析パイプラインは、単一のソフトウェアですべてを完結させるのではなく、既存の専門的な解析ツールを戦略的に組み合わせることで構築されている。具体的には、ライブラリリンクによる API 呼び出しと、外部プロセスの実行を組み合わせた「ハイブリッドな連携手法」を採用している。

3.4.2.1 Gmsh によるメッシュ生成と API 連携

前処理段階におけるメッシュ生成には、オープンソースのメッシュジェネレータである Gmsh [31] を採用している。本システムでは、Gmsh を単なる外部コマンドとして利用するのではなく、step2inp.cpp および MeshGenerator.cpp において C++ API (gmsh::initialize、gmsh::model::mesh::generate など) を介して直接制御している。

この API 連携を採用した最大の利点は、生成されたメッシュデータへのプログラマ的な直接アクセスが可能になることである。API を通じてメッシュのノード情報や Surface ID をメモリ上で直接取得できるため、ユーザーが指定した境界条件（固定面や荷重面）と、それに対応するメッシュノードの正確なマッピングを自動で行うことができる。これにより、手動操作を介さずに、信頼性の高い解析用入力ファイル（INP）の自動生成を実現している。

3.4.2.2 CalculiX による解析実行とクロスプラットフォーム制御

解析ソルバーには CalculiX (ccx) [30] を採用しており、`fem_pipeline.cpp` において `std::system` 関数を用いた外部プロセス実行により制御を行っている。計算負荷の高いソルバー部分を独立したプロセスとして実行することで、メインアプリケーションの安定性を確保している。

また、本システムは多様な OS 環境での動作を想定し、プリプロセッサ (`#if defined`) を用いた OS 依存性の解決を図っている。

- 実行パスの自動解決:

Windows 環境では `bin/ccx.exe`、MacOS 環境では `bin/ccx` と、OS ごとに異なるバイナリ名称や実行ファイルの格納パスをプログラム内で自動的に判別し、適切に呼び出す仕組みを構築している。

- 実行環境の動的制御:

実行時にプロセスの現在ディレクトリを解析用のワークスペース (`temp/FEM`) へ一時的に変更し、解析後に元のディレクトリへ復帰させるといったディレクトリ管理もコード上で制御されている。

このように、密な連携が必要なメッシュ生成には API を使い、独立性の高い計算処理には外部プロセス実行を用いるという適材適所のハイブリッド制御を行うことで、高度な解析プロセスの自動化と高い汎用性を両立させている。

3.4.2.3 データ変換プロセスと独自フォーマット処理

本システムが異なる解析ツールを統合し、シームレスな自動パイプラインを実現する上で、中核となるのが独自に実装したデータ変換ロジックである。これらは既存のツールチェーン間を繋ぐ役割を果たし、形状データ、境界条件、解析結果の整合性を確保している。

3.4.3 STEP to INP 変換 (Pre-processing)

本研究では、CAD から出力された形状データ (STEP 形式) を有限要素解析 (FEA) プログラムである CalculiX [30] や Abaqus [32] で実行可能な入力ファイル (INP 形式) へと変換するプロセスを、自作した `Step2Inp` クラスにより自動化する。このプロセスは単なるファイル形式の変換にとどまらず、形状データとユーザー定義の解析条件 (JSON 形式の境界条件等) をシームレスに統合する役割を担う。

- (1) 形状データと解析条件の統合

`Step2Inp::convert` メソッドは、入力された STEP ファイルを Gmsh を用いてメッシュ化し、ユーザーが指定した境界条件を動的に統合する。具体的には、Gmsh の物理グループ (Physical Groups) の概念を利用し、ユーザーが GUI 上で指定した面番号 (Surface ID) に対応する節点および要素を特定する。

変換フローは以下の通りである。

- **メッシュ生成:** Gmsh をバックエンドとして利用し、STEP ファイルから 3次元四面体二次要素 (C3D10) を生成する。
- **境界条件の特定:** 解析条件設定に基づき、特定の面番号に対して固定境界条件 (*BOUNDARY) および荷重条件 (*CLOAD) を生成する。
- **INP ファイルの構築:** 材料特性 (ヤング率、ポアソン比)、節点座標、要素構成、および特定した境界条件コマンドを順次 .inp ファイルに書き出す。

(2) 寄与面積に基づく節点荷重の分配アルゴリズム

荷重条件の適用において、本手法は指定された面に一様な圧力が作用すると仮定し、各節点に対してその「寄与面積」に応じた集中荷重を分配するロジックを採用している。この処理は `LoadConditionSetter::writeForceBoundaryCondition` において実装されており、以下の手順で数学的に定義される。

まず、指定された面に属する各 2次元要素 (三角形または四角形) の面積 A_e を計算する。要素の節点座標を \mathbf{r}_i とすると、三角形要素の面積は以下の式で求められる。

$$A_e = \frac{1}{2} |(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0) \times (\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_0)| \quad (1)$$

各要素の面積 A_e を、その要素を構成する節点数 N_{node}^e で等分し、各節点 j の累積寄与面積 S_j を求める。

$$S_j = \sum_{e \in E_j} \frac{A_e}{N_{\text{node}}^e} \quad (2)$$

ここで、 E_j は節点 j を共有する全要素の集合である。

面全体の総荷重を F_{total} 、面全体の総面積を $S_{\text{total}} = \sum A_e$ とすると、単位面積あたりの荷重 (等価圧力) P は以下となる。

$$P = \frac{F_{\text{total}}}{S_{\text{total}}} \quad (3)$$

最終的に、節点 j に与えられる集中荷重ベクトル \mathbf{f}_j は、指定された荷重の方向ベクトル \mathbf{n} (ただし $|\mathbf{n}| = 1$) を用いて次のように決定される。

$$\mathbf{f}_j = P \cdot S_j \cdot \mathbf{n} \quad (4)$$

このアルゴリズムにより、メッシュの密度に偏りがある場合でも、面全体に対して物理的に整合性の取れた荷重分布を再現することが可能となる。算出された \mathbf{f}_j の各成分は、INP ファイルの *CLOAD セクションに節点番号および自由度 (1=x, 2=y, 3=z) と共に出力される。

3.4.4 FRD to VTU 変換 (Post-processing)

本研究では、有限要素解析ソルバー (CalculiX) によって出力された解析結果を可視化するために、独自のポストプロセス変換ツールを実装している。CalculiX の標準出力形式である FRD (File Read) 形式は独自のテキストフォーマットであり、一般的な可

視化ソフトウェアでの直接的な取り扱いが困難であるため、これを VTK (Visualization Toolkit) ベースの VTU (VTK Unstructured Grid) 形式に変換する。

3.4.4.1 独自パーサーによる FRD ファイルの解析

frd2vtu.cpp において、FRD 形式のテキストデータを効率的に解析するためのパーサーを実装している。FRD ファイルは、節点座標定義、要素構成、および各ステップの解析結果 (変位や応力) がブロックごとに記述されている。本パーサーは、各ブロックのヘッダーコード (例: 節点データは 2C、結果データは 100CL 等) を識別し、以下のデータを動的にメモリ上にロードする。

- **幾何情報:** 節点番号とその 3次元座標、および要素タイプ (四面体、六面体等) と節点接続関係。
- **物理量データ:** 各節点における変位ベクトル (DISP) および応力テンソル成分 (STRESS)。

3.4.4.2 VTK ライブラリを用いたデータ構造の構築

ロードされたデータは、VTK ライブラリの vtkUnstructuredGrid クラスを用いて、解析用の非構造格子データとして再構築される。

- **格子生成:** 読み込んだ節点座標を vtkPoints に格納し、要素接続情報を vtkCellArray に変換して格子を定義する。
- **属性データの付加:** 変位データは vtkDoubleArray として節点データに登録され、後述する計算プロセスを経て算出された応力データも同様に付加される。
- **ファイル出力:** 構築されたデータ構造は vtkXMLUnstructuredGridWriter を介して、圧縮可能なバイナリ形式を含む汎用的な VTU 形式として出力される。

3.4.4.3 フォン・ミーゼス応力の算出アルゴリズム

本変換プロセスでは、ソルバーから出力された応力成分の生データから、材料の破壊や降伏の評価に不可欠なフォン・ミーゼス応力 (von Mises Stress) σ_{VM} を計算し、可視化データに付加している。

CalculiX の FRD ファイルから得られる応力成分を、 $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ とする。これらは frd2vtu.cpp 内で各節点ごとに抽出される。フォン・ミーゼス応力は、偏差応力不変量に基づき、以下の数式を用いて各節点で算出される。

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]} \quad (5)$$

変換アルゴリズムの具体的なフローは以下の通りである。

- **成分抽出:** 応力ブロックから、各節点 j における 6つの独立な応力成分を配列として取得する。
- **等価応力計算:** 上式に従い、各節点におけるスカラー値としての σ_{vM} を計算する。

- **データ登録:** 計算された σ_{vM} の値を `vtkDoubleArray` (名称: “vonMises”) に格納し、VTU の Point Data として紐付ける。

この実装により、ユーザーは外部の複雑な計算を行うことなく、変換後の VTU ファイルを読み込むだけで、構造全体の力学的負荷分布を直感的に把握することが可能となる。

3.5 領域分割とインフィル密度の計算

3.5.1 応力場の定義

解析対象となる 3次元形状の定義域を $\Omega \subset \mathbb{R}^3$ とし、有限要素法 (FEM) によって得られた各点 $x \in \Omega$ における評価指標 (von Mises 応力) をスカラー場 $S(x)$ と定義する。

$$S: \Omega \rightarrow [S_{\min}, S_{\max}] \quad (6)$$

ここで、 S_{\min} および S_{\max} はそれぞれ解析領域内における応力の最小値および最大値である。

3.5.2 領域分割

連続的な応力場 $S(x)$ を、3D プリンタで造形可能な離散的な部分領域に変換するため、応力範囲 $[S_{\min}, S_{\max}]$ を N 個の区間に分割する。そのためのしきい値集合 $T = \{\tau_0, \dots, \tau_N\}$ を以下のように定義する。

初期設定では閾値は応力範囲を等間隔に分割する値として設定される。第 k 番目のしきい値 τ_k は次式で表される。

$$\tau_k = S_{\min} + \frac{k}{N}(S_{\max} - S_{\min}) \quad (k = 0, \dots, N) \quad (7)$$

このしきい値を用いて、定義域 Ω を互いに素な N 個の部分領域 (サブドメイン) Ω_k に分割する。第 k 番目の部分領域 Ω_k は、応力値が区間 $[\tau_{k-1}, \tau_k)$ に含まれる点の集合として定義される。

$$\Omega_k = \{x \in \Omega \mid \tau_{k-1} \leq S(x) < \tau_k\} \quad (8)$$

これにより、元の 3次元モデル Ω は、応力レベルごとに分割された部分領域の和集合として近似的に再構成される。

$$\Omega \approx \bigcup_{k=1}^N \Omega_k \quad (9)$$

3.5.3 実装手法

前節で定義した数理モデルを、実際のソフトウェアシステム上でどのように実装したかを記述する。本システムのコア処理モジュールである `VtkProcessor` クラスにおける処理フローを中心に解説する。

3.5.3.1 等値面によるクリッピング処理

領域分割における部分領域 Ω_k の幾何学的抽出には、Visualization Toolkit (VTK) が提供する `vtkClipDataSet` フィルタを採用した。具体的には、各分割ステップ k ($1 \leq k \leq N$) において、対象となるスカラー場に対し以下の2段階のクリッピング処理を順次適用することで、目的の領域のみを抽出している。

下限クリッピング スカラー値が区間の下限 τ_{k-1} より小さい領域 ($S(x) < \tau_{k-1}$) をデータセットから除去する(Figure 42)。

上限クリッピング 残存した領域に対し、スカラー値が区間の上限 τ_k より大きい領域 ($S(x) > \tau_k$) を除去する(Figure 43)。

この論理的な操作により、複雑な3次元応力分布の中から、特定の応力帯に対応する形状を厳密に切り出すことができる。

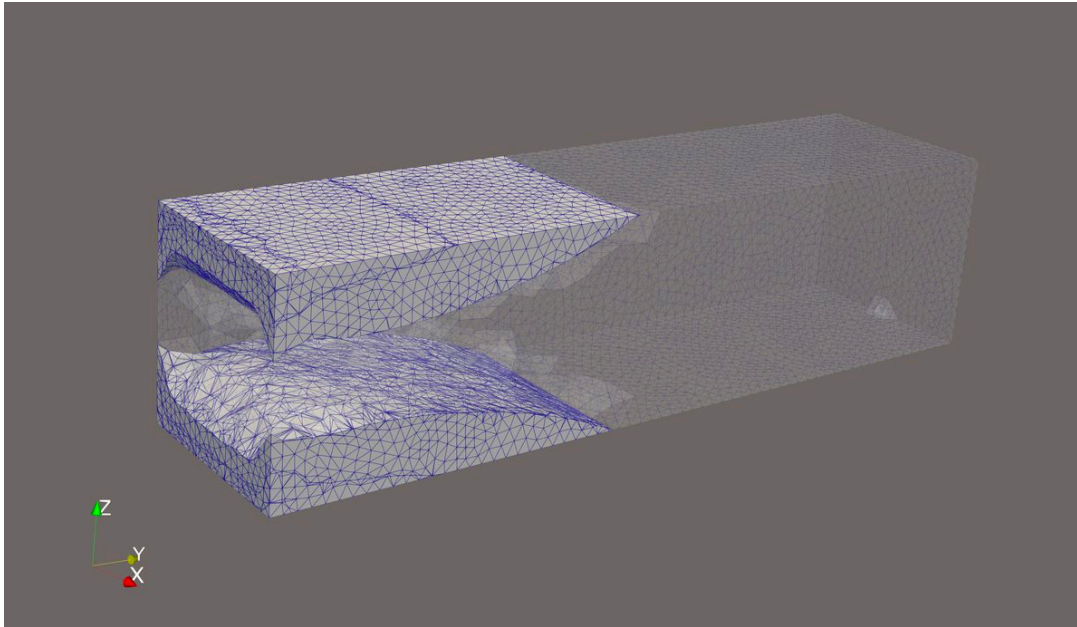
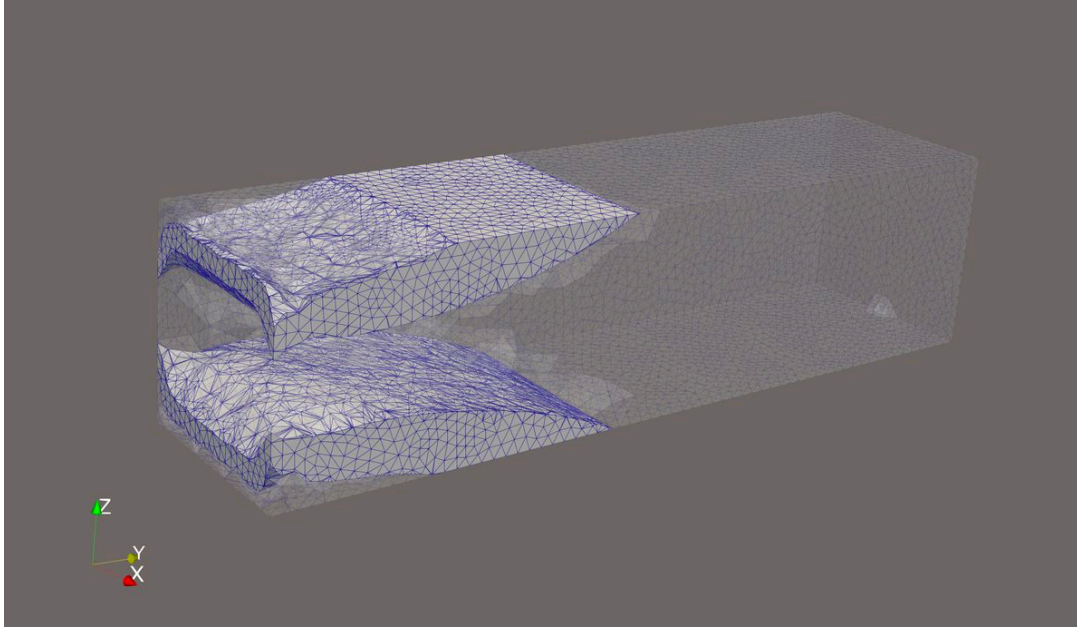


Figure 42: $S(x) < \tau_1$ でクリップされたメッシュ

Figure 43: $\tau_2 < S(x) < \tau_1$ でクリップされたメッシュ

3.5.3.2 表面メッシュへの変換と出力

vtkClipDataSet によって抽出されたデータは、非構造格子 (Unstructured Grid) 形式である。これスライサーが解釈可能な形式に変換するため、vtkGeometryFilter を用いて表面メッシュ (PolyData) への変換を行う。

最終的に、分割された各部分領域 Ω_k は、それぞれ独立した STL ファイル (例: modifierMesh01.stl) として保存される。また同時に、次節にて詳述する、各メッシュに対応するインフィル密度情報 (D_k) を含むメタデータ (MeshInfo 構造体) が生成され、システム内で保持される。

この分割されたメッシュと密度情報をセットで出力することで、スライサーソフトウェア上において、「パーツごとに異なるインフィル設定を適用する」ための準備が完了する。

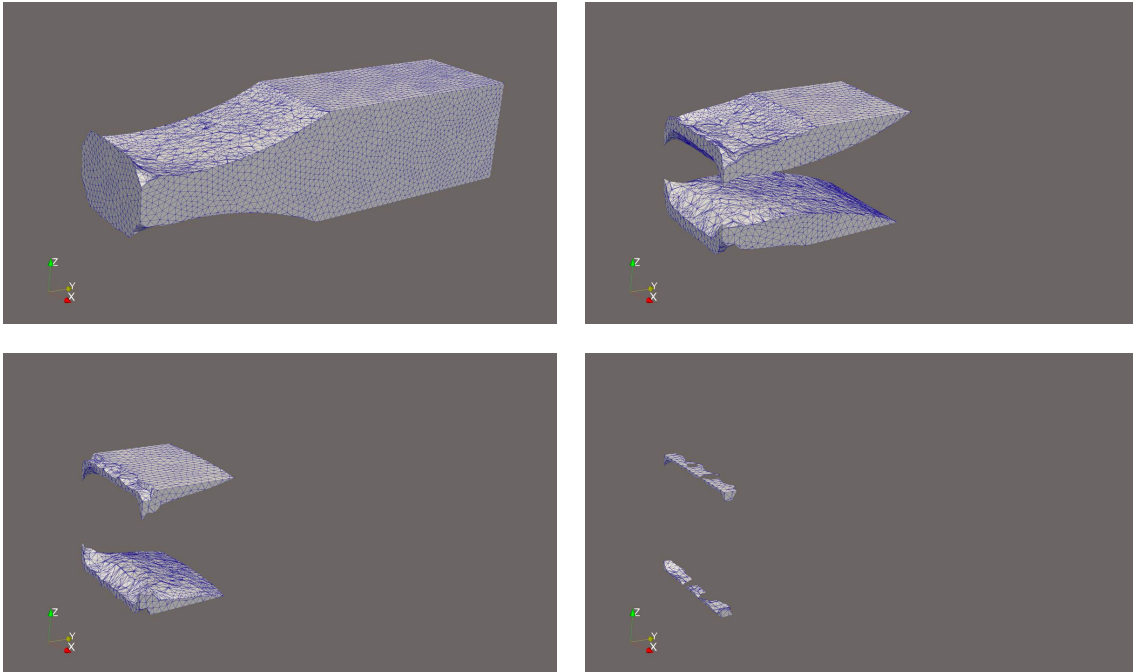


Figure 44: 応力閾値に基づく分割されたメッシュファイル

3.6 インフィル密度計算方法

前節の手法により、解析対象のモデルから応力値が $[\tau_{k-1}, \tau_k]$ の範囲にある領域が抽出された。本節では、抽出された各領域に対して適切なインフィル密度を割り当てるための計算手法について述べる。

なお、本節で提案する計算アルゴリズムは、Strecs3D の次期メジャーアップデートである ver.2.0.0 の公式版からの搭載である。具体的には、Section 3.6.5 に示すように解析結果に応じて、インフィル密度の初期サジェストがスライダーに表示される。この機能は ver.2.0.0-beta には含まれていないことを付記しておく。

3.6.1 Gibson-Ashby モデルによる理論的アプローチ

本研究では、インフィル構造を多孔質材料として捉え、その力学的特性を近似するために Gibson-Ashby モデル [33] を採用した。

本モデルを採用した主な理由は、3D プリンティングにおけるインフィル構造の強度評価において、本モデルが標準的な手法として採用されているためである。例えば、Maconachie ら (2020) の研究 [34] では、FDM 方式によるジャイロイド構造の機械的特性を調査し、実測値が Gibson-Ashby モデルと良好に合致することを示されている。

なお、Maconachie らの研究は主に ABS 樹脂を用いた検討であるが、本研究で対象とする PLA 樹脂においても、同モデルの適用性は十分に高いと考えられる。一般に PLA は ABS と比較して層間接着強度が強く、機械的特性において優れた均質性を示すことが

知られている [35], [36]。層間剥離や結合不良の影響を受けやすい ABS においてモデルの妥当性が確認されている以上、より均質な材料挙動を示す PLA においては、Gibson-Ashby モデルの適合性は同等、あるいはそれ以上に高いと判断できる。したがって、本研究では PLA 製のジャイロイドインフィルに対し、本モデルを適用してインフィル密度の計算を行うこととした。

Gibson と Ashby の研究によれば、多孔質材料の相対密度 ρ^* / ρ_s （本研究におけるインフィル率に相当）と、その構造体の許容応力（強度）の間には、以下のべき乗則が成り立つとされている。

$$\frac{\sigma^*}{\sigma_s} = C \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^n \quad (10)$$

ここで、各変数は以下の通り定義される。

- σ^* : インフィル構造体の許容応力
- σ_s : 使用するフィラメント（母材）自体の降伏強度
- $\frac{\rho^*}{\rho_s}$: 相対密度（インフィル率）
- C, n : セル構造（ジャイロイド等）の幾何学的形状に依存する定数

本研究の目的は、領域にかかる応力 σ_{applied} に対して必要なインフィル率 ρ_{rel} (0.0 ~ 1.0) を求めることにある。安全率 SF (Safe Factor) を考慮し、構造体の許容応力 σ^* を $\sigma_{\text{applied}} \cdot \text{SF}$ と置き換えて上記の式を $\frac{\rho^*}{\rho_s}$ について解くと、以下の式が得られる。

$$\rho_{\text{rel}} = \frac{\rho^*}{\rho_s} = \left(\frac{\sigma_{\text{applied}} \cdot \text{SF}}{\sigma_s \cdot C} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (11)$$

3.6.2 定数の決定と具体的な関係式

Strecs3D での実装にあたり、各定数を先行研究に基づき以下のように設定した。これらは現状、PLA 材料およびジャイロイドインフィルを用いた造形を想定した数値となっている。

- 安全率 (SF): 構造的な信頼性を確保するため、本研究では $\text{SF} = 3$ を採用した。
- 母材強度 (σ_s): 一般的な PLA フィラメントの降伏強度として、Damir Hodžić らの研究に基づき 30 MPa と設定した [37]。
- 形状依存定数 (C): Maconachie らの研究に基づき、ジャイロイド格子の圧縮挙動に関する研究に基づき $C = 0.23$ とした [34]。
- 指数 (n): Gibson と Ashby が示した値 $n = 1.5$ [38] を採用した。

これらの値を式に代入すると、インフィル率 ρ_{rel} と作用応力 σ_{applied} の関係は以下の簡略式で表される。

$$\rho_{\text{rel}} = \left(\frac{\sigma_{\text{applied}} \cdot 3}{30 \cdot 0.23} \right)^{\frac{1}{1.5}} = \left(\frac{\sigma_{\text{applied}} [\text{MPa}]}{2.3} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (12)$$

この式を用いることで、有限要素法 (FEM) によって得られた各領域の応力値から、インフィル密度を決定することが可能となる。作用する応力と算出されるインフィル密度の関係をグラフ化したものを Figure 45 に示す。

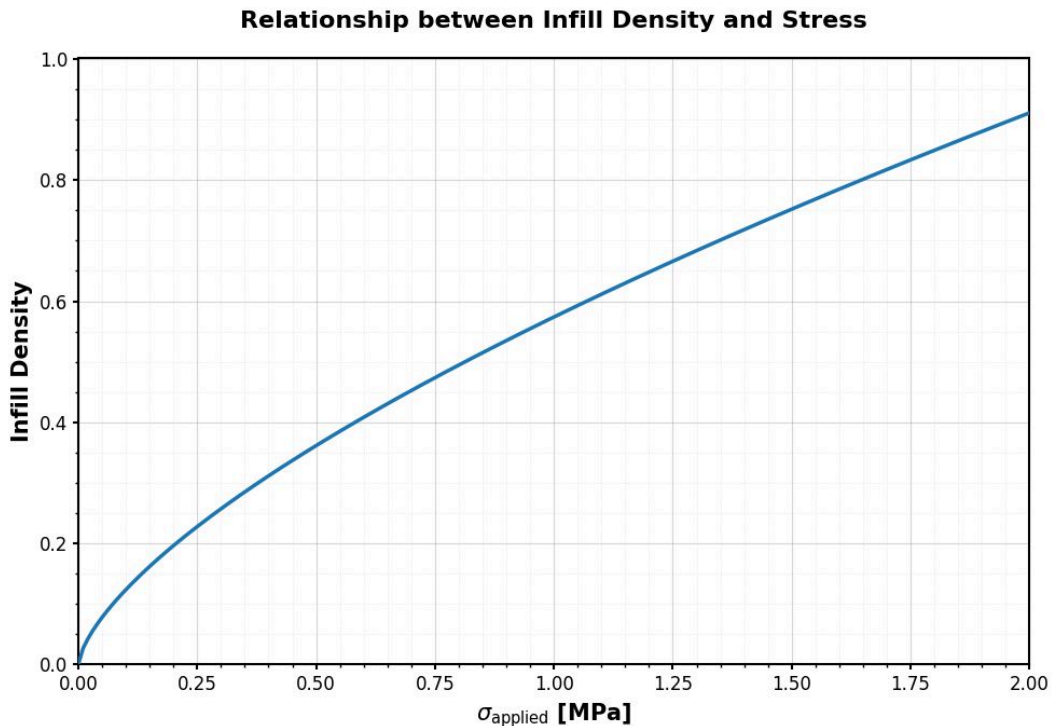


Figure 45: インフィル密度と応力の関係

3.6.3 領域ごとのインフィル密度の算出

前節で導出した Gibson-Ashby モデルに基づく計算式を用い、応力値によって分割された各領域に対して具体的なインフィル密度の割り当てを行う。

本システムにおいて、各領域は応力の閾値によって $[\tau_{k-1}, \tau_k]$ の区間で定義されている。当該領域のインフィル密度を決定する際には、その区間で発生しうる最大の応力に耐えうる必要があるため、区間の上限値である τ_k を、前述の式の作用応力 σ_{applied} として採用する。

この計算により、その領域内で最も高い応力がかかる部分を基準とした、安全側のインフィル密度が決定される。

3.6.4 密度の制約 (クリッピング処理)

算出されたインフィル密度をそのまま適用する場合、極端に低い値や高い値が算出される可能性がある。FDM 方式の 3D プリンタにおける造形の安定性を確保するため、本実装ではインフィル密度に対し 5% から 90% の範囲制限を設けた。

計算結果が 5% 未満の場合：インフィル密度を 5% とする

計算結果が 90% 超過 の場合：インフィル密度を 90% とする

これにより、理論計算値を尊重しつつも、現実的に造形可能な G-code 生成を保証している。

さらに、この下限値の設定は、不確定な荷重に対する堅牢性を担保する役割も担っている。特定の荷重条件に特化して材料配置を最適化する場合、その特定の力には非常に強くなる一方で、想定外の方向から力が加わった際に構造的な脆弱性が露呈するというトレードオフが含まれてしまう。

本システムは、ロボットコンテストにおける機体のパーツなど荷重と拘束条件が明確な機械部品の使用を主なターゲットとしているが、実環境においては予期せぬ衝突や振動などの不確定な荷重が発生しうる。そのため、この密度の下限値をユーザーが用途に応じて指定できる機能が ver2.0.0 で搭載される。

例えば、荷重条件が極めて明確で軽量化を最優先する場合は下限を低く設定して [5%–90%] の範囲で分布させ、不確定な力がかかりうる日常使いの部品などの場合は下限を引き上げて [20%–90%] の範囲で分布させるといった調整である。これにより、最適化による材料配置の恩恵を受けつつ、部品全体の最低限の剛性を底上げすることが可能となる。

3.6.5 閾値調整による動的更新

本ソフトウェア (Strecs3D) の GUI 実装において、これらの計算はユーザー操作とリアルタイムに連動している。ユーザーが応力分布のヒストグラム上に配置されたスライダーを操作し、領域分割の閾値 τ_k を変更すると、システムは即座に新しい τ_k を上記式に代入し、その領域に割り当てられるインフィル密度を再計算する。

Figure 46 に示すように値を高い応力値へ移動させれば、その領域に要求されるインフィル密度も高く計算され、逆に閾値を下げれば密度は低く計算される。このインタラクティブな仕様により、ユーザーは応力分布と算出されるインフィル率のバランスを確認しながら、最適な分割位置を調整することが可能となっている。なお、このインフィル密度の値は初期設定のサジェストであり、ユーザの入力により細かな調整も可能である。

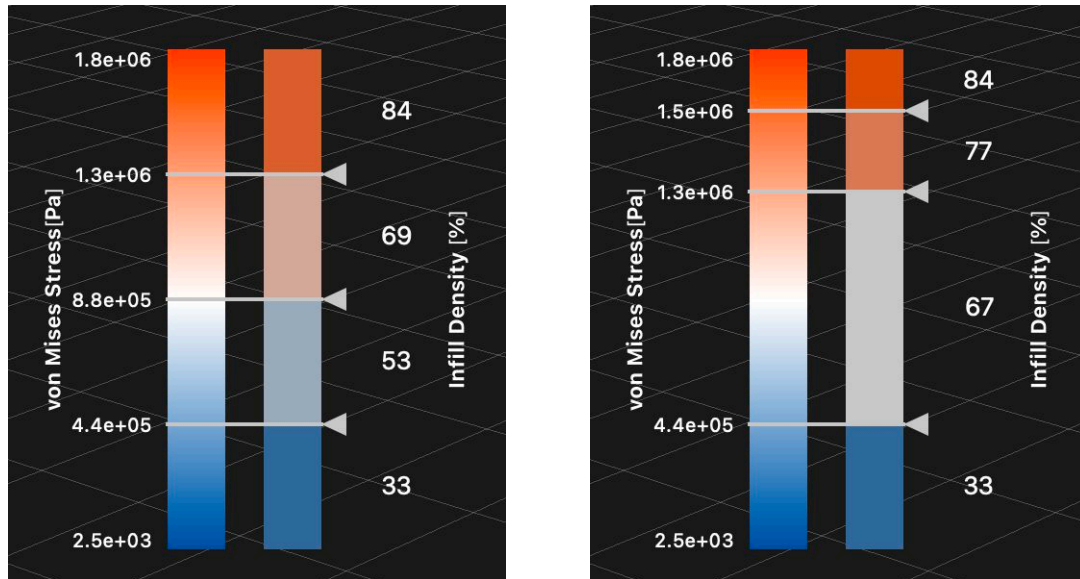


Figure 46: インフィルスライダーによる密度更新の様子

3.6.6 パラメータの一般化と今後の展開

本研究で提案した計算式における各パラメータ (σ_s, C, n) は、材料の物性やインフィル形状の幾何学的特性に依存しており、一般的なユーザーがこれらを独自に算出・定義することは容易ではない。この課題を解決するため、今後の Strecs3D のアップデートでは、開発側での実験に基づくパラメータ・プリセット機能の実装を計画している。

具体的には、先行研究の手法に準じた試験を体系的に実施する。これにより、PLA、PETG、ABS といった主要な造形材料と、ジャイロイド、格子状、ハニカム状などの多様なインフィル構造の組み合わせごとに、最適な物理定数を算出する。

これらの実験結果をデータベース化してソフトウェアへ統合することで、ユーザーは材料と形状を選択するだけで、高度な計算プロセスを意識することなく、適切な物理定数を採用して計算された最適なインフィル密度の割り当てが可能となる。本研究で提示した手法は、特定の条件に依存しない汎用的な枠組みであり、実験データの蓄積によってあらゆる製造条件へ適応可能な発展性を有している。

3.7 マルチスライサー対応 3MF エクスポート機能

本節では、FEM 解析によって導出された最適化情報を、物理的な造形工程へ正確かつ効率的に伝達するためのエクスポート機能について述べる。

3.7.1 3MF 形式の採用と製造プロセスへの適合

本研究において、造形データの出力形式として従来の STL (Standard Triangulation Language) ではなく、3MF (3D Manufacturing Format) を採用したことは、製造プロセス上の明確な必然性が存在する。

まず、STL 形式の限界について述べる。STL は表面形状（メッシュ）の幾何情報のみを保持する形式であり、内部の製造パラメータ（インフィル密度、積層ピッチ、材料種別など）を含めることができない。本研究が提案する「応力分布に応じた可変密度造形」を STL のみで実現しようとした場合、ユーザーは以下の手順を手動で行う必要がある。

1. 応力レベルごとに分割された多数の STL ファイルをスライサーソフトに読み込む。
2. それぞれの STL ファイルの位置合わせ（センタリングや相対座標の調整）を行う。
3. 各パーツに対して個別にインフィル密度やパターン設定を入力する。

このような手動操作は煩雑であるだけでなく、設定ミスや位置ズレといったヒューマンエラーの温床となり、再現性を著しく低下させる。

対して、3MF 形式は単一のアーカイブ内に「形状データ」と「製造メタデータ」を統合可能な規格である。3MF を採用することで、分割されたメッシュ（高応力部、低応力部など）の相対的な位置関係を維持したままカプセル化することが可能となる。さらに、解析結果に基づく製造パラメータをファイル自体に埋め込むことで、ユーザーがスライサーにファイルを読み込むだけで、即座にプリント可能な状態を提供できる。これは、設計から製造への自動化を推進する上で不可欠な要素である。

3.7.2 応力分布に基づくメッシュ構築と密度情報の統合

本項では、システム内部で生成された解析データが、どのようにして 3MF ファイルとして統合されるか、その基本ロジックについて述べる。この処理は主に `BaseLib3mfProcessor` クラスによって管理される。

処理の流れは以下の通りである。まず、FEM 解析結果に基づき、応力レベルごとに領域分割された一時的な STL ファイル群（例：`modifierMesh0.stl`）が生成される。プログラムはこれらのファイルを自動的に収集し、ファイル名に含まれるインデックス情報に基づいてソートを行う。

次に、各分割メッシュに対する密度マッピング処理が行われる。各分割メッシュは、解析時に算出された応力範囲（`minStress`, `maxStress`）の属性を有している。システムは、Section 3.6 のアルゴリズムに従い計算された応力-密度マッピングと各メッシュの応力値を照合する。このアルゴリズムにより、例えば高応力が作用するメッシュには 80%、低応力部には 20% といった具体的なインフィル密度が決定され、3MF モデルオブジェクト内のメタデータとして割り当てられる。

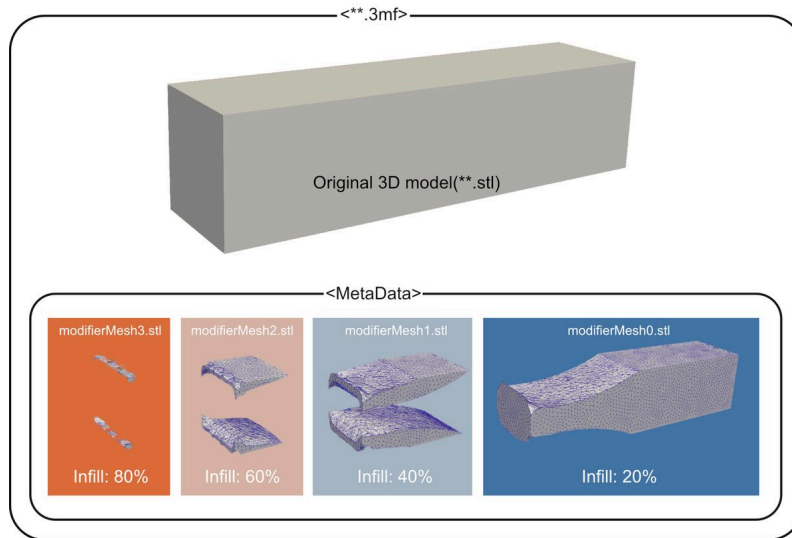


Figure 47: 出力された 3MF ファイルの概念図

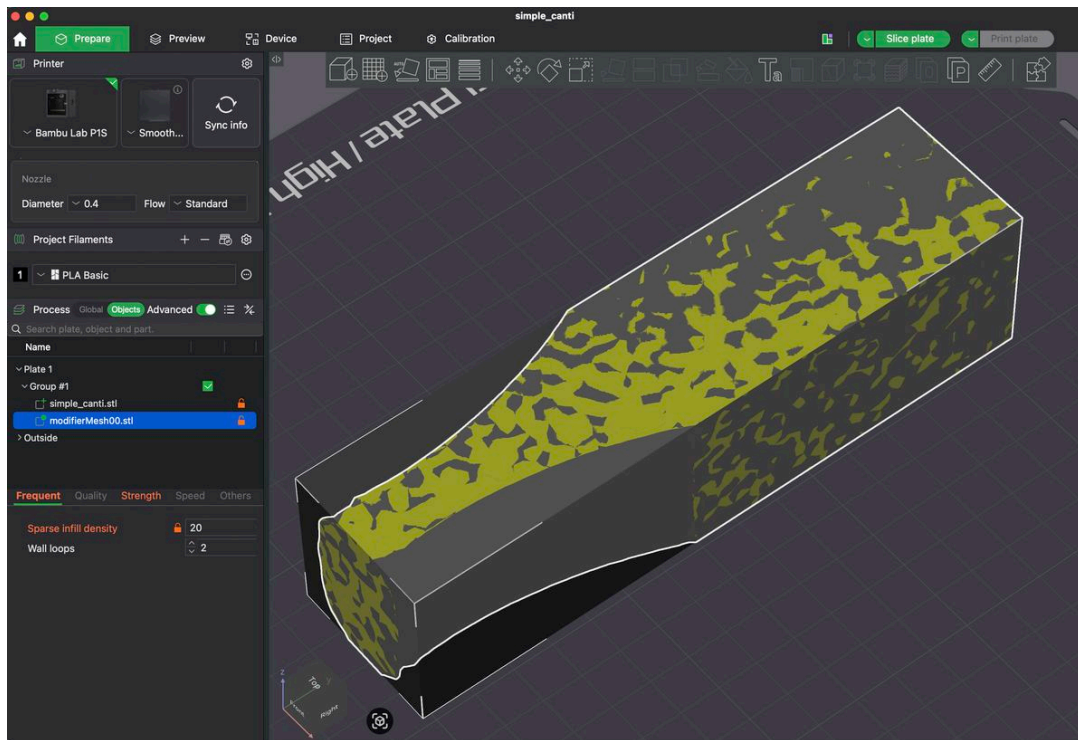


Figure 48: Bambu Studio における 20% インフィルモディファイアーメッシュ

3.7.3 主要スライサーごとのメタデータ最適化（相互運用性の確保）

3MFは標準規格であるが、実際のスライサーソフトウェアの実装においては、特に「部分的な設定変更（Modifier）」の解釈や記述方法に差異が存在する。本システムでは、ポリモーフィズムを用いた Strategy パターンを採用することで、ユーザーが使用するスラ

イサーに最適化された 3MF を出力するアーキテクチャを構築した。基本クラスで形状処理を共通化し、派生クラスでスライサー固有のメタデータ記述を切り替えている。

3.7.3.1 Ultimaker Cura への対応 (CuraLib3mfProcessor)

Cura 向けの実装では、Cura 固有の XML 名前空間 (<http://software.ultimaker.com/xml/cura/3mf/2015/10>) を利用した標準的な拡張機能を採用した。具体的には、メッシュオブジェクト自体に対し、`<metadata key="infill_mesh" value="True">` および `<metadata key="infill_sparse_density">` を直接付与している。これにより、Cura は読み込んだメッシュを単なる「形状の一部」ではなく、重複領域の設定を上書きする「設定変更用メッシュ」として正しく認識する。

3.7.3.2 Bambu Studio への対応 (BambuLib3mfProcessor)

Bambu Studio およびその派生スライサーへの対応には、より複雑な構成が必要となる。ここでは、3MF パッケージ内に `model_settings.config` という独自の XML 設定ファイルを生成・格納する実装を行った。また、オブジェクト構成において、外形を形成する形状用メッシュを `normal_part`、内部密度を調整するメッシュを `modifier_part` というサブタイプで厳密に区別し、アセンブリ情報として記述することで、意図通りの造形設定を反映させている。

3.7.3.3 Prusa Slicer への対応 (PrusaLib3mfProcessor)

Prusa Slicer への対応では、`Slic3r_PE_model.config` を生成し、Metadata ディレクトリに配置する手法を採用している。Prusa Slicer (および Slic3r ベースのソフト) はボリュームベースの管理を行っているため、オブジェクトを `ModelPart` と `ParameterModifier` に分類した上で、`<volume>` タグ内で `fill_density`などを指定する独自の構造に対応させた。

3.7.4 実装の結果とエンジニアリングワークフローへの効果

上述したマルチスライサー対応の実装により、本システムはスライサー非依存性を実現した。ユーザーは自身が所有する 3D プリンタや使い慣れたスライサーに合わせてエクスポート形式を選択するだけで、複雑な内部構造を持つ造形データを即座に準備することが可能となった。

これにより、従来の手動設定によるミスが排除され、FEM 解析から造形までのシームレスなデータ連携が確立された。これは、設計の手戻りを大幅に削減し、設計製造のサイクルを加速させるものであり、エンジニアリングワークフローの効率化に大きく寄与する。

4 実装評価と検証実験

4.1 試験片の作成および機械的性質の評価

4.1.1 本章の目的

本節では、提案システム「Strecs3D」によって生成された密度分布を持つ構造体が、従来の造形手法と比較してどの程度の優位性を有するかを、材料試験を通じて定量的に検証する。

本実験の主な目的は、「同一質量における機械的特性の向上」を実証することにある。具体的には、内部が均一な密度（インフィル）で充填された従来モデルを比較対象とし、以下の2項目に焦点を当てて評価を行う。

- 等価曲げ剛性の評価 三点曲げ試験等から得られる荷重-変位曲線の初期勾配に基づき、Strecs3Dによる最適化が構造体全体の剛性に与える影響を算出する。これにより、限られた材料でいかに「たわみ」を抑えられるかを検証する。
- 最大耐荷重（ピーク荷重）の特定 構造体が破断、または著しい塑性変形に至るまでの最大荷重を測定し、応力集中を考慮した本手法の設計が、破壊に対する耐性をどの程度向上させるかを明らかにする。

これらの比較実験を通じて、一様な内部充填では実現できない「軽さと強靱さの両立」に対する Strecs3D の有効性を実証する。

4.1.2 試験片の設計

本実験では、三点曲げ試験を用いて機械的特性を評価するため、以下の仕様に基づき試験片を設計した。

1. 試作体の形状および寸法 試験片の外形は、長さ 180 mm、幅 50 mm、厚さ 7.5mm の矩形平板とした。この外形寸法は、Strecs3D を用いた最適化モデル（提案手法）および比較対象となる均一インフィルモデルの双方で共通である。
2. 試験条件の再現性確保（位置決めガイド） 三点曲げ試験における測定データのばらつきを最小限に抑えるため、試験片の設置位置精度を構造的に担保する工夫を施した。具体的には、試験機の治具が接触する支点（Support points）および荷重点（Loading point）の計3箇所に、深さ 0.5 mm の微小な窪み（位置ガイド）を設けた。支点間距離（スパン長）は 110 mm とし、試験片長手方向の中心に荷重点が、その左右 55mm の位置に支点が正確に配置されるよう設計している。これにより、全ての試験片において同一の条件で荷重が負荷されることを保証した。

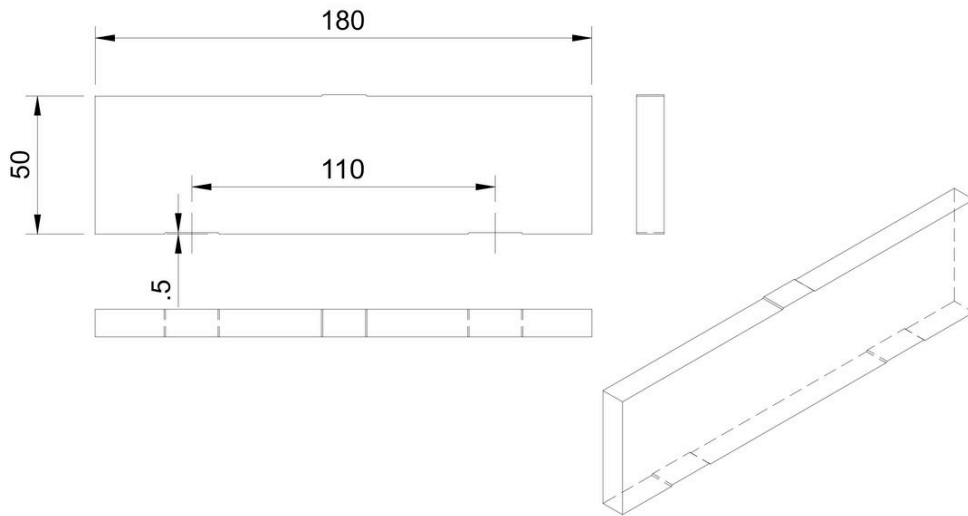


Figure 49: 試験片の形状と寸法

4.1.3 使用材料

本実験における試験片の造形には、熱可塑性樹脂として Overture 3D Technologies 社製 Matte PLA (Matte Polylactic Acid) [39] を使用した。

PLA (ポリ乳酸) は、FDM (熱溶解積層法) 方式の 3D プリンタにおいて最も標準的に用いられる材料であり、造形時の熱収縮が少なく、高い寸法精度が得られる特徴を有する。なお、材料ロットによる物性のばらつきを排除するため、全ての試験片は同一メーカー、同一色のフィラメントを用いて造形を行った。

主な仕様：

- 材料: PLA (Matte finish)
- メーカー: Overture 3D Technologies
- フィラメント径: 1.75 mm

4.1.4 試験片の作成手順

試験片の作製は、以下の手順で行った。

1. 設計および構造解析設定 試験片の 3 次元形状は Autodesk Fusion360 [40] を用いて設計し、STEP 形式にて出力した。続いて、自作の構造最適化ソフトウェア Streacs3D (ver.2.0.0-beta) に当該ファイルを読み込み、以下の条件下で解析およびインフィル密度の最適化を行った。

境界条件: 三点曲げ試験を模倣し、底面の支点位置に相当する 2 点を完全拘束し、上面中央 (荷重点) に 100 N の荷重を垂直方向に印加する条件を設定した。

比較対象の設定: 最適化を行わない基準モデル (コントロール群) として、試験片全体をインフィル密度 15 % で均一に設定したモデルを用意した。

密度分布の最適化: 提案手法 (Strecs3D) では、比較対象 (均一 15% モデル) と同一質量とするため、解析結果の応力分布を参照しつつ、各領域の密度配分および適用閾値の調整を行った。最終的に決定された設定値は以下の通りである。

1.8×10^5 Pa 未満の領域 → 5 %

1.8×10^5 Pa 以上 3.8×10^5 Pa 未満の領域 → 15 %

3.8×10^5 Pa 以上 5.9×10^5 Pa 未満の領域 → 30 %

5.9×10^5 Pa 以上の領域 → 60 %

解析およびパラメータ設定の完了後、Strecs3D より Bambu Studio 互換の 3MF 形式 (モディファイア情報を含む) にてデータを出力した。

2. 造形条件

出力された 3MF ファイルをスライスソフトウェア Bambu Studio に読み込み、FDM 方式 3D プリンタ Bambu Lab P1S (Figure 50) [41] を用いて造形を行った。本実験では、外殻 (シェル) による強度寄与を排除し、内部構造 (インフィル) そのものの機械的特性を評価するため、トップレイヤーおよびボトムレイヤーを 0 層に設定し、インフィルパターンが露出する状態で造形した。



Figure 50: BambuLab P1S

(Source: <https://bambulab.com/en/p1>)

その他の主な造形パラメータは以下の通りである。

- 造形姿勢: 試験片を横向きに配置
- インフィルパターン: ジャイロイド (Gyroid)
- 製造プロファイル: 「0.20mm Standard @BBL X1C」 (Bambu Lab 提供のシステムプリセットを流用)

この条件で試験片を造形した際のそれぞれの質量と、造形時間を以下の Table 2 に示す。

Specimen	Mass	Printing Time
	[g]	[min : sec]
Normal	15.8	32:30
Strechs3D	15.8	40:40

Table 2: 試験片の質量と造形時間の比較

4.1.5 実験装置

本実験では、試験片の機械的特性（荷重－変位関係）を取得するため、以下の機器類を用いて三点曲げ試験装置を構成した。

1. 荷重駆動部(フォースゲージスタンド) 荷重の印加には、手動式スクリュー計測スタンド(Mxmoonfree 製)を使用した。本スタンドは最大許容荷重 500 N の剛性を有し、ハンドル操作によりクロスヘッドを昇降させることで、試験片に対して垂直方向の圧縮荷重を加える。

主な仕様:

サイズ: 140×210×448 mm

ストローク: 296 mm

許容荷重: 500 N

2. 荷重測定部 (デジタルフォースゲージ) 荷重荷重の計測には、GOYOJO 製デジタルフォースゲージを使用した。これをスタンドのクロスヘッド部に下向きに固定し、押し込み治具を介して試験片に加わる荷重値を測定した。

主な仕様:

測定範囲: 0.1~500 N

測定精度: $\pm 0.5\%$

3. 変位測定部 (ダイヤルゲージ) 試験片のたわみ量 (変位) の測定には、ダイヤルゲージ(Mitutoyo 製)を使用した。試験片の下部変位を直接読み取るため、測定子が試験片の裏面中央に接触するように配置した。

主な仕様:

目量: 0.01mm

4. 試験装置の構成 (セットアップ) 上記機器を組み合わせ、Figure 51 に示す三点曲げ試験系を構築した。フォースゲージスタンドの台座上に、支点となる2つの金属片をスパン長 (支点間距離) 110 mm の間隔で平行に固定し、その上に試験片を架設した。試験片の上面中央 (スパン中央) に対してフォースゲージによる荷重を負荷し、

その直下（試験片下面）にダイヤルゲージを設置することで、荷重負荷点における試験片の最大たわみを計測可能な構成とした。



Figure 51: 三点曲げ試験装置の構成

4.1.6 測定手順

本実験では、以下の手順に従い試験片の設置からデータ取得、破壊試験までを実施した。

1. 試験片の設置 フォースゲージスタンドの支点上に試験片を設置し、位置決めガイド（窪み）を用いて試験機および支点との位置合わせを行った。続いて、試験片の下面中央にダイヤルゲージの測定子を接触させ、初期状態（荷重ゼロ）における変位のゼロ点調整を行った。
2. 荷重印加とデータ記録（初期段階） フォースゲージスタンドのハンドルを手動で操作し、試験片に対して準静的に荷重を印加した。データ取得は、荷重値がおよそ 10 N 増加するごとにハンドル操作を一時停止し、その時点での「フォースゲージの表示値（荷重 P ）」と「ダイヤルゲージの表示値（たわみ δ ）」を目視にて読み取り、対（ペア）のデータとして記録した。なお、手動操作による荷重制御であるため、正確に 10 N 刻みとはならないが、読み取った実数値をそのまま記録値として採用した。

3. ダイアルゲージの離脱 使用したダイアルゲージの測定可能範囲が最大 1.2 mm であるため、たわみ量が 1.2 mm に達した時点で変位の測定を終了し、機器の破損を防ぐためダイアルゲージを試験片から離脱させた。
4. 破壊試験（ピーク荷重の測定） ダイアルゲージ取り外し後、さらにハンドルの回転を継続して荷重を増大させた。試験片が破断、あるいは著しい座屈により荷重を維持できなくなるまで圧縮を行い、その過程で記録された最大荷重値（ピーク荷重）をフォースゲージのピークホールド機能を用いて取得した。

4.2 実験結果

4.2.1 曲げ試験の荷重-たわみ曲線と近似直線

通常の均一インフィル（Normal）および提案手法（Strecs3D）を適用した試験片に対し、三点曲げ試験を行った結果を Figure 52 に示す。グラフの横軸は試験片中央のたわみ量 δ [mm]、縦軸は荷重 P [N] を表している。

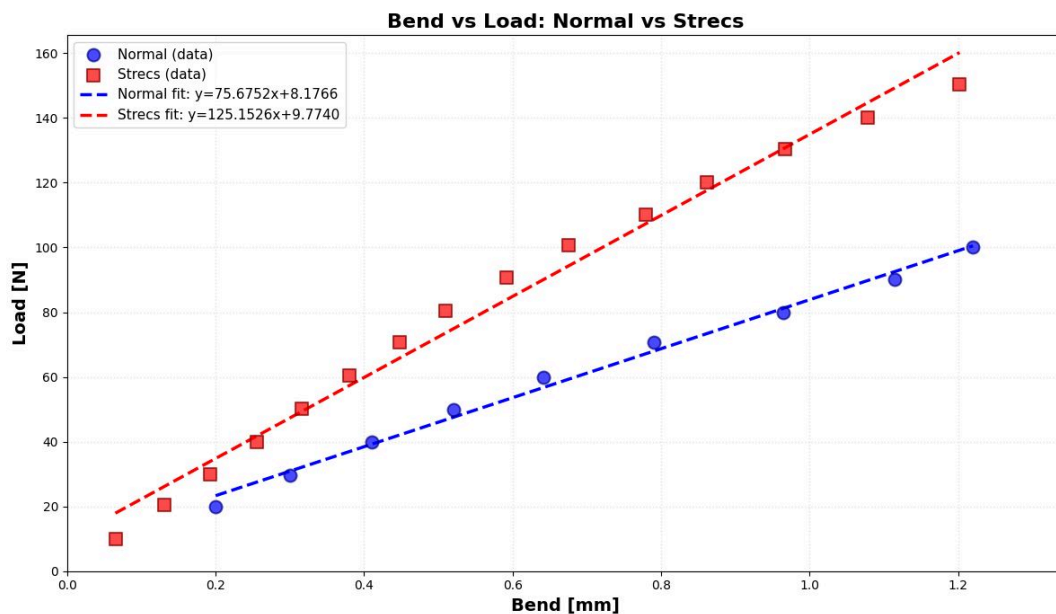


Figure 52: 三点曲げ試験における荷重-たわみ曲線

グラフより、Normal および Strecs3D の両条件において、荷重とたわみの間には線形関係が確認できる。そこで、得られたプロットデータに対して最小二乗法による線形回帰分析を行った。図中の破線は算出された近似直線を示している。各近似直線の決定係数 R^2 は、Normal で約 0.993、Strecs3D で約 0.985 となり、弾性変形領域における高い線形性が示された。

近似直線の傾き k ($k = \frac{P}{\delta}$) は、構造の見かけの剛性を表す指標となる。回帰分析の結果、それぞれの傾きは以下の通り算出された。

- Normal:75.7 [N/mm]
- Strecs3D: 125.2 [N/mm]

4.2.2 等価曲げ剛性の算出と評価

試験片の曲げ特性を定量的に評価するため、実験値より等価曲げ剛性を算出した。材料力学における梁の曲げ理論より、三点曲げ試験における中央のたわみは、荷重、支点間距離、等価曲げ剛性を用いて以下の式で表される。

$$\delta = \frac{PL^3}{48EI} \quad (13)$$

この式を変形し、前節で求めた荷重-たわみ曲線の傾き k ($k = \frac{P}{\delta}$) および本実験における支点間距離 $L = 110\text{mm}$ を代入することで、等価曲げ剛性 EI は次式より算出できる。

$$EI = \frac{kL^3}{48} \quad (14)$$

この関係式を用いて各試験片の等価曲げ剛性を算出した結果を Table 3 に示す。

均一インフィル (Normal) の等価曲げ剛性が約 2.10×10^6 [$N \cdot \text{mm}^2$] であったのに対し、提案手法 (Strecs3D) では約 3.47×10^6 [$N \cdot \text{mm}^2$] という値が得られた。両者を比較すると、Strecs3D の等価曲げ剛性は Normal に対して約 1.65 倍の値を示している。この結果より、提案手法によるインフィルの最適化が、構造の曲げ剛性の向上に大きく寄与していることが確認された。

Specimen	Slope k [$\frac{N}{\text{mm}}$]	R^2	Flexural Rigidity EI [$N \cdot \text{mm}^2$]	Ratio
Normal	75.7	0.993	2.10×10^6	1.00
Strecs	125.2	0.985	3.47×10^6	1.65

Table 3: 三点曲げ試験における荷重-たわみ曲線の勾配

4.2.3 最大荷重の比較

前節の剛性評価に続き、試験片が破壊に至るまでの最大荷重 (ピーク荷重) およびその破壊モードについて比較を行う。Figure 53 および Figure 54 に、最大荷重到達時における各試験片の様子を示す。

実験の結果、均一インフィル (Normal) の最大荷重が 121.5N であったのに対し、提案手法 (Strecs3D) では 239.5N を記録した。これは、Strecs3D が Normal に対して約 1.97 倍の強度を有していることを示している。



Figure 53: 均一インフィル試験片の最大荷重と圧壊挙動



Figure 54: 提案手法 (Strecs3D) のピーク荷重と破壊挙動

4.3 考察

4.3.1 内部構造の幾何学的特徴と荷重伝達メカニズム

本実験において、提案手法 (Strecs3D) は均一インフィル (Normal) に対し、等価曲げ剛性 EI において約 1.65 倍の値を示した。質量を同程度に調整している条件下において、この剛性の向上は、内部構造の最適化による構造効率の改善を明確に示唆している。

生成されたインフィル密度の分布形状に着目すると、Strecs3D による最適化は単に梁の長手方向の曲げモーメント分布に従ったものではないことが確認できる。具体的には、最も荷重がかかる中央の荷重点近傍と、梁を支える左右の支持点近傍が高密度化されており、さらに荷重点と支持点を最短距離で結ぶ経路上に、高密度領域が形成されている。

この特徴的な密度分布は、材料力学における「主応力線」あるいは「力の流線」の形状と高い整合性を示している。均一インフィル (Normal) では、内部の力の伝達が格子構造全体に分散してしまうのに対し、Strecs3D では、外部から作用する荷重を支持点へと逃がすための主要な経路が、高密度インフィルによって強化されていると解釈できる。

すなわち、長方形の試験片の内部において、荷重点と支持点を結ぶ「トラス構造」や「アーチ構造」に類似した高剛性な骨格が自動的に形成された結果、構造効率が飛躍的に向上したと考えられる。これが、同程度の質量でありながら、等価曲げ剛性において約 1.65 倍という高い改善効果が得られた主たる要因である。

4.3.2 接触点における局所補強と最大荷重の向上

最大荷重 (強度) が約 1.97 倍に向上した要因についても、前述の密度分布特性から説明が可能である。

三点曲げ試験においては、曲げモーメントによる圧縮応力に加え、治具と接触する荷重点および支持点において極めて高い局所的な接触応力 (集中荷重) が発生する。均一インフィルを用いた試験片の破壊挙動 (Figure 53) では、荷重点直下におけるセルの圧壊が確認されたが、これは接触点の局所的な圧力に耐えうるだけの密度が確保されていなかったことに起因する。

一方、Strecs3D の試験片 (Figure 54) では、前述の通り荷重点のみならず、支持点付近においても重点的な高密度化が行われている。この最適化により、以下の2つの効果が複合的に働いたと推察される。

- 荷重伝達経路の強化: 荷重点から支持点へ直接向かう圧縮の力に対して、高密度なインフィルが柱として機能し、構造全体の座屈を防いだ。
- 接触点の局所補強: 応力が集中する支持点および荷重点そのものの密度を高めることで、治具の食い込みや局所的な圧壊を抑制した。

結論として、Strecs3Dは単に曲げに対する剛性を高めただけでなく、荷重入力点と支持点という境界条件上の特異点を的確に補強し、構造内部に効率的な荷重伝達経路を構築したことで、剛性と強度の双方において顕著な性能向上を実現したと言える。

4.3.3 インフィル最適化が造形時間に与える影響

本研究では、試験片の重量を一定に保ちつつ、Strecs3Dを用いたインフィルの構造最適化を行った。当初の想定では、内部構造が効率化されることで造形時間も短縮されると考えていたが、実際の造形実験においてはその限りではなかった。重量を揃えた条件下では、造形時間はほとんど変わらないか、あるいは本実験の試験片のように、むしろ増加する場合があることが示された。

Table 2に示すように、最適化後の造形時間は32分30秒から40分40秒へと約25.6%増加した。フィラメント消費量が同等であるにもかかわらず造形時間が延伸した要因について、ツールパスの特性から以下の通り考察する。

1. 非造形移動（トラベル）とリトラクションの増加

最も顕著な要因は、移動時間の増大である。均一なインフィルでは41秒（全体の2.1%）であった移動時間が、最適化後には3分25秒（全体の8.4%）と約5倍に増加している。これは、均一なインフィル（ジャイロイド等）が連続的な一筆書きに近いパスを形成するのに対し、Strecs3Dによる最適化インフィルは応力分布に基づいて局所的な疎密や不連続な構造を生成するためである。その結果、ノズルが吐出を停止して別の領域へ移動する空走距離が伸び、それに伴うフィラメントの引き抜き（リトラクション）回数が頻発したことが、時間増の主要因と考えられる。

2. パス複雑化に伴う実効造形速度の低下

インフィル自体の造形時間も、約26%増加している。重量が同等であることから、総造形距離に極端な差はないと推測されるが、パスの形状が時間に影響を与えている。3Dプリンターの制御における加減速（Acceleration/Jerk）の観点から見ると、直線的あるいは緩やかな曲線で構成される均一パターンに比べ、最適化インフィルは曲率の変化や細かな線分が連続する。このような複雑なツールパスでは、ヘッドが設定された最高速度に達する前に減速・反転を繰り返すため、実効的な平均造形速度が低下し、結果として造形時間の延伸を招いたと分析される。

今後の課題として、構造的な剛性を維持しつつ、ツールパスの連続性を考慮した最適化アルゴリズムの改良、あるいはリトラクションを最小限に抑えるパスプランニングの導入により、製造効率を改善する余地がある。詳細は今後の展望にて詳述する。

5 ユーザ評価

5.1 評価の目的

本節では、提案手法 (Strecs3D) の有用性を検証するための評価目的を述べる。本評価では、既存のワークフロー (従来手法) と本ソフトウェアを用いた手法を比較し、以下の3つの観点からその優位性を明らかにすることを目的とする。

1. インフィル最適化における作業的障壁の解消

従来の3Dプリントにおいて、パーツの局所的な強度向上を図るには、CADでの複雑なモデル分割や、スライサ上での大量のモディファイアの手動配置が必要であった。本評価では、Strecs3Dの導入によって、これらの複雑な手動作業がどの程度簡略化され、ユーザの心理的負担 (「面倒だ」「難しい」と感じる障壁) が軽減されるかを検証する。

2. 既存ワークフローとの親和性と効率性の証明

ロボコンのような短期間の開発サイクルでは、新しいツールの導入が既存の作業 (CAD設計やスライサ設定) を妨げないことが極めて重要である。従来手法と比較して、本ソフトウェアが「使い慣れたスライサ環境を破壊せずに」いかにスムーズに最適化プロセスを組み込めるか、そのワークフローとしての実用性を評価する。

3. 定量的指標 (SUS) によるユーザビリティの客観的評価

主観的な感想に留まらず、標準的なユーザビリティ評価尺度である SUS (System Usability Scale) を用いる。比較手法 (手動設定) と比較した際の、本ソフトウェアの直感性、習得の容易さ、およびシステムとしての完成度を数値化し、ターゲットユーザであるロボコンエンジニアにとって真に実用的なツールであることを証明する。

5.2 評価手法

5.2.1 被験者

本研究では、提案手法の有効性を多角的に検証するため、設計環境や目的が異なる2つの被験者グループ合計7名を選定した。これにより、極限の制約下での「信頼性」と、多様なユーザにおける「汎用性」の両面を評価する。

- 高度な工学的制約を有する設計グループ

対面での詳細なユーザテストおよびヒアリングを行う対象として、千葉工業大学の超小型衛星開発プロジェクト「GARDENs」 [42] を選定した。選定理由は以下の通りである。

極限の設計制約: キューブサット開発特有の「1g単位の重量制限」と「宇宙空間での過酷な荷重条件」は、本研究のインフィル最適化が最も効果を発揮する領域である。

プロフェッショナルな設計フロー: JAXA への引き渡しを前提とした厳格な開発プロセスにおいて、本ツールが既存のワークフロー（解析・スライサ設定）に耐えうる実用性を持っているかを検証できる。

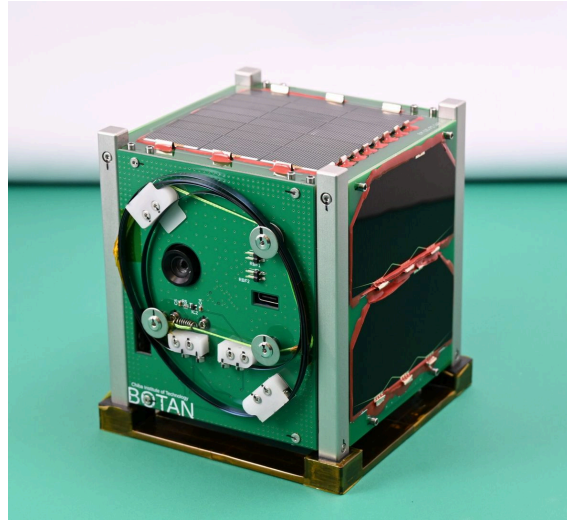


Figure 55: GARDENS で開発されている超小型人工衛星
(Source: <https://www.perc.it-chiba.ac.jp/projects/cubesat/>)



Figure 56: ユーザテストの様子

- 多様な開発環境を有するロボコンコミュニティ・3D プリントコミュニティ
ソフトウェアの汎用性と習得容易性を検証するため、様々なロボコンに参加する複数のチームや3D プリントユーザから被験者を募り、オンライン・対面でのユーザテストを実施した。

環境の多様性: 異なる 3D プリント機種、スライサ設定、および設計慣習を持つユーザが、自身の PC 環境で本ソフトウェアを問題なく動作・活用できるかを検証する。

ユーザビリティの一般化: 特定のプロジェクトに依存しない、幅広いスキルレベルのエンジニアを対象とすることで、SUS (システムユーザビリティ尺度) のスコアに客観性と一般性を持たせる。

5.2.2 評価タスクの設定

本研究の提案システムである「Strecs3D」の有用性と操作性を検証するため、従来の手動設定手法との比較実験を実施した。本節では、実験におけるタスクの内容、比較手法の定義、および計測項目について述べる。

実験は、導入レクチャー、提案システムによるタスク、従来手法によるタスクの順で構成した。公平な比較を行うため、各手法の実施前に同等のレクチャー時間を設け、同一の 3D モデル (ベアリングホルダー、L 字ブラケット等) を課題として使用した。

5.2.3 評価対象とする手法

本実験では、以下の 2 つの手法を比較対象とした。

- 提案手法：

Strecs3D を用いた自動最適化 解析データに基づき、最適な造形パラメータをシステムが自動で算出・反映する手法である。被験者は、提示された 3D モデルを読み込み、ソフトウェア上で解析および最適化処理を実行する。また、この実験は本稿執筆時点での最新版 Strecs3D ver.2.0.0-beta を用いて行った。

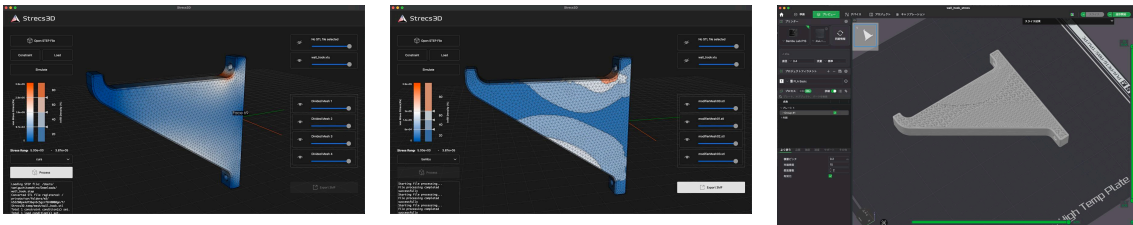


Figure 57: Strecs3D を用いた実験ワークフロー

- 比較手法：

手動設定 (従来手法) 解析結果を目視で確認し、スライサーソフト上で手動設定を行う、現在の一般的な最適化手法である。被験者は、解析画像を確認しながら、Bambu Studio 等のスライサー上で「モディファイアー」を適切な位置に配置し、局所的なインフィル密度の設定変更を行う。

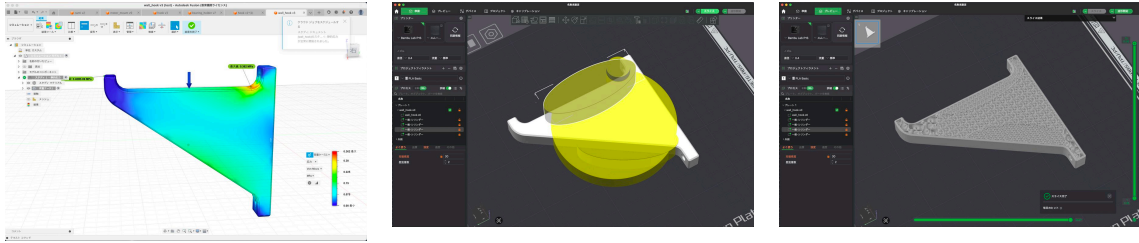


Figure 58: Strescs3D を用いない比較手法のワークフロー

5.2.4 評価タスクの内容

タスクには、構造的な強度が必要とされる実用的なパーツの3Dモデルを採用した。被験者には「特定の強度や機能を担保するために、適切なスライス設定を行うこと」を共通のゴールとして提示した。

5.2.5 計測指標

本研究では、提案システムのユーザビリティを定量的かつ客観的に評価するため、System Usability Scale (以下、SUS) を用いたアンケート調査を実施した。SUSは、John Brookeによって提唱されたシステム評価の標準的な指標であり、10項目の質問群から構成される [43]。これにより、システムの「学習の容易性」「複雑性」「直感性」といった観点から、既存手法と比較した提案システムの優位性を検証した。

各評価実験の終了後、被験者に対して Table 4 に示す 10 項目の質問を提示した。回答は「1: 全く同意しない」から「5: 非常に同意する」までの 5 段階のリッカート尺度による自己記入式とした。

項目番号	評価項目 (質問内容)
Q1	私は、このシステムを頻繁に利用したいと思う。
Q2	このシステムは、必要以上に複雑であると感じた。
Q3	このシステムは、シンプルで使いやすいと感じた。
Q4	このシステムを使いこなすには、専門家のサポートが必要だと感じた。
Q5	このシステムの諸機能は、適切に統合・連携されていると感じた。
Q6	このシステムには、一貫性がない部分 (不規則な点) が多いと感じた。
Q7	ほとんどの人が、このシステムを短期間で習得できると思う。
Q8	このシステムを利用する際、操作に手間取り (時間がかかり) 煩わしいと感じた。
Q9	私は、このシステムを自信を持って操作することができた。
Q10	このシステムを使い始める前に、習得すべき事項が多すぎると感じた。

Table 4: SUS アンケートの評価項目

5.2.6 スコアの算出方法

SUS の最終的なスコア S は 0 点から 100 点の範囲に正規化される。各回答の値を u_n ($n = 1, \dots, 10$) とすると、スコアは以下の式により算出される。

$$S = 2.5 \times \left(\sum_{n \in \text{奇数}} (u_n - 1) + \sum_{n \in \text{偶数}} (5 - u_n) \right) \quad (15)$$

奇数番号の質問 (肯定的質問) は「選択値 - 1」、偶数番号の質問 (否定的質問) は「5 - 選択値」として各項目の得点を算出し、その合計値に 2.5 を乗じる。本研究では、この算出値に基づき、システムの受容性を評価した。

5.3 定量的評価結果

提案手法 (Strecs3D) と従来手法における SUS スコアの算出結果を Table 5 および Figure 59 に示す。

指標	提案手法 (Streacs3D)	従来手法
平均スコア	69.29	30.00
中央値	67.50	27.50
標準偏差	9.76	9.13
最小値	55.00	15.00
最大値	82.50	45.00

Table 5: SUS スコアの統計情報比較

実験の結果、提案手法の平均スコアは69.29点であった。SUSの一般的な評価基準 [44] Figure 60 に照らし合わせると、提案手法は「良好」に近いスコアである。一方で、従来手法の平均スコアは30.00点と極めて低い数値を示した。

両手法の平均スコアを比較すると、提案手法は従来手法に対して39.3点の向上を実現しており、システム全体のユーザビリティが大幅に改善されたことが定量的に示された。

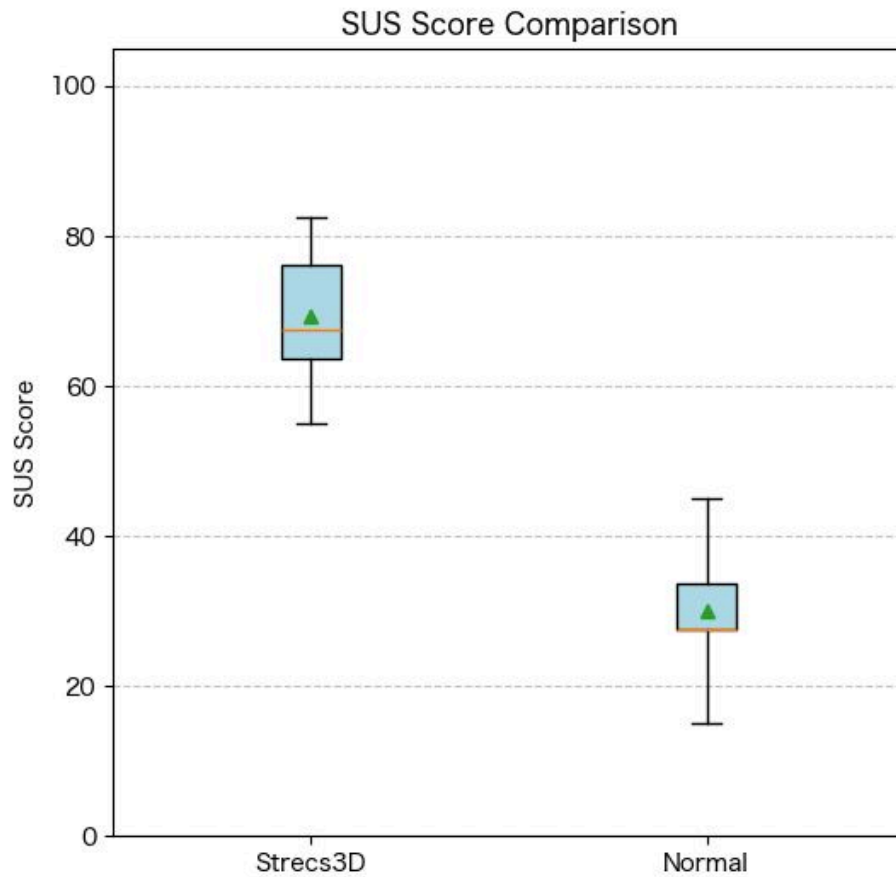


Figure 59: Strec3D と従来手法の SUS スコア比較

System Usability Score



Figure 60: SUS スコア評価基準

(Source: <https://medium.com/thinking-design/the-system-usability-scale-how-its-used-in-ux-b823045270b7>)

SUS は 10 個の質問項目から構成され、奇数番号がポジティブな問い（例：頻繁に利用したい）、偶数番号がネガティブな問い（例：複雑すぎる）となっている。本分析では、すべての質問項目を統一的な尺度（0～4 点、値が高いほどユーザビリティが高い）で評価するため、以下の正規化処理を行った。

- ポジティブな質問（奇数問）：回答値から 1 を引く
- ネガティブな質問（偶数問）：5 から回答値を引く

これにより、すべての項目において「4」が最も良好な評価であることを示す。各項目における Strecs3D と Normal の平均スコアを Table 6 および Figure 61 に示す。

質問項目	Strecs3D	Normal
1. 頻繁に利用したい	3.57	1.00
2. 複雑ではない	2.57	1.14
3. 使いやすい	3.57	1.86
4. サポートが不要	1.86	1.86
5. 機能が統合されている	3.43	0.86
6. 一貫性がある	2.29	0.71
7. 習得が早い	3.57	2.14
8. 時間がかからない	2.86	0.57
9. 自信を持って使える	2.29	0.86
10. 学習事項が少ない	1.71	1.00

Table 6: SUS アンケートの結果比較

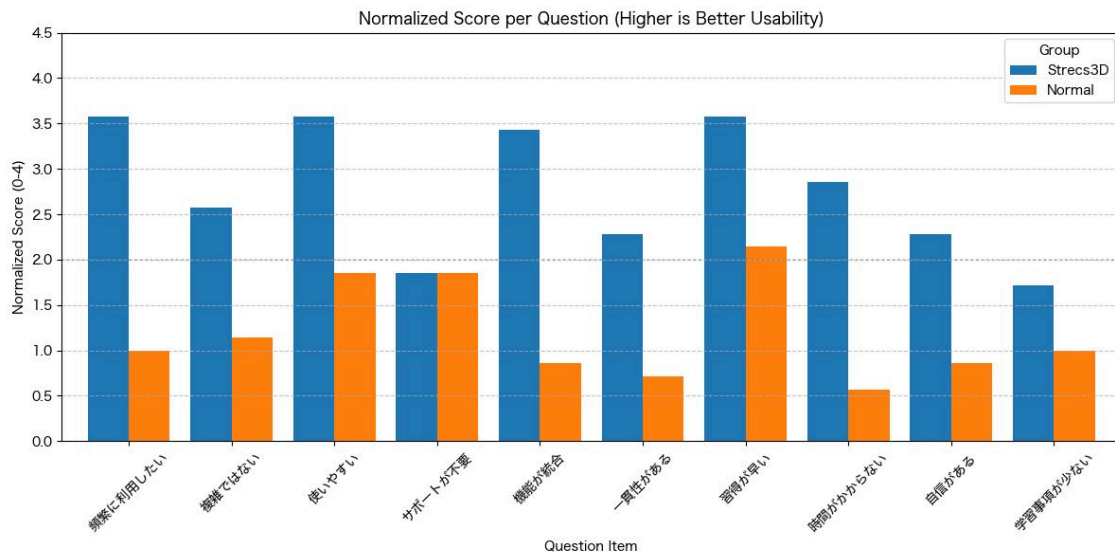


Figure 61: 各項目ごとの Strecs3D と従来手法のユーザビリティ比較

5.4 定性的評価結果

アンケートにおける自由記述および個別回答の結果を整理し、システムの具体的な評価点および課題を抽出した。

5.4.1 提案手法に対する肯定的評価

提案手法に関しては、特にワークフローの統合性と簡便性について多くの肯定的な意見が得られた。主なコメントを以下に示す。

「解析から出力までの一連の流れが1つのソフトで完結しており、迷いが無い。」

「面倒な解析処理を自動化した後に数値を適応するだけで出力されるため、手順が非常にスムーズである。」

「複雑な操作を覚える必要がなく、専門外のユーザでも解析が行えると感じた。」

これらの回答から、複数のツールを横断して行っていた従来の複雑な工程を単一のシステムに集約したことが、ユーザの負担軽減に大きく寄与していることが確認された。

5.4.2 抽出された改善課題

一方で、インターフェースの操作性に関する具体的な課題が複数指摘された。

入力方式の改善: 「接地箇所を選択において、面の番号を直接入力するのではなく、3Dモデル上を直接クリック（ピッキング）して選択したい」という要望が複数の被験者から寄せられた。

フィードバックの欠如: 「解析中に現在どの程度処理が進んでいるのか、進捗状況を%などで表示してほしい」という意見が見られた。

視覚的な確認機能: 「設定した荷重の方向や拘束条件が、3D 空間上で視覚的にわかるようなガイドを表示してほしい」といった、設定内容の可視化不足が指摘された。

これらの指摘は、バックエンドの解析・最適化機能自体の有用性は認めつつも、フロントエンドにおける対話的なインターフェースの洗練が不足していることを示唆している。

5.5 ユーザビリティ評価に関する考察

本章では、前章の評価実験結果に基づき、開発した Strecs3D の有用性と今後の課題について、システムの統合性、心理的障壁の解消、およびインターフェースの改善点の3つの観点から考察を行う。

5.5.1 システムの統合化による認知負荷の低減

SUS (System Usability Scale) の項目別比較において、Strecs3D は従来手法をほぼ全ての項目で上回る結果となった。特に「機能の統合性 (3.43 vs 0.86)」および「習得の迅速性 (2.86 vs 0.57)」において顕著な差が認められた。

この要因は、従来手法では構造解析ソフト、スライサー、製造条件設定といった複数の独立したツールを跨いで手動で行っていた一連のワークフローを、Strecs3D が単一のインターフェースへ統合したことにあると考えられる。定性評価における「一連の流れが1つのソフトで完結している」という回答は、この統合の有効性を裏付けている。専門的な解析・最適化処理の自動化と工程の集約は、ユーザのコンテキストスイッチを最小化し、認知負荷を劇的に低減させることに寄与したと推察される。

5.5.2 実用化に向けた障壁の解消と受容性

「頻繁な利用意欲 (3.57 vs 1.00)」および「煩雑さの欠如 (2.86 vs 0.57)」のスコア差は、従来プロセスが抱えていた操作上の冗長性を Strecs3D が解消したことを示している。本研究で定義した「実用化における3つの障壁」に照らし合わせると、以下の通り評価できる。

1. 従来プロセスとの整合性

機能の統合性と一貫性の項目で高い評価を得たことから、既存の分断されたフローを再構築し、一貫したパイプラインを提供することに成功したと言える。

2. 計算・データリソースの軽量性

「使いやすさ」と「処理時間の短縮」において高評価を得ており、ユーザがストレスを感じることなく計算リソースを扱える環境を実現した。

3. 要求されるスキルの低減

学習事項の少なさについては一定の評価を得たものの、後述するテクニカルサポートの必要性が示唆された点において、完全な解消には至っておらず、改善の余地を残す結果となった。

5.5.3 インターフェースにおける今後の課題

Strecs3D は多くの項目で優位性を示したが、「テクニカルサポートの不要さ (1.86)」および「学習事項の少なさ (1.71)」のスコアは相対的に低く留まった。特筆すべきは、「サポートの不要さ」において従来手法と同等のスコアを記録している点である。これは、バックエンドのアルゴリズム（解析・最適化）が高度に自動化されている一方で、それらを制御するフロントエンドのUIが、依然としてユーザのメンタルモデルと完全に一致していないことを示唆している。

定性的なアンケート結果から、具体的な課題として以下の3点が浮き彫りとなった。

- 入力インターフェースの直感性

現状、面番号の直接入力といったCUI的な操作が残存しており、これが「学習コストの増大」や操作に対する「自信の欠如」を招く要因となっている。3D空間上での直接的なインタラクションの導入が不可欠である。

- 可視化によるフィードバックの欠如

3D空間における荷重・拘束条件のガイド表示が不十分であるため、ユーザが入力情報の正誤を即座に判断できず、「自信(2.29)」という中程度の評価に繋がったと考えられる。

- システムの状態表示（リアクティビティ）の不足

進捗表示（プログレスバー）の不在は、ブラックボックス化された処理過程に対するユーザの不安を増長させる。計算負荷の高い処理を行うシステムにおいて、進捗状況の明示は心理的安全性を確保するために極めて重要である。

5.5.4 総括

以上の考察より、Strecs3Dは「解析から製造用メタデータ出力までの統合」という本研究の主要な目的を高い水準で達成しており、ユーザビリティの観点から極めて有効であることが実証された。しかし、より広範なユーザ層（特に非専門家）への普及を考慮すると、現在の「自動化された機能」を適切に制御し、確信を持って操作させるための「対話的インターフェース（3Dピッキングや視覚的フィードバック）」の洗練が、今後の課題であると結論付けられる。

6 適用事例

前章までにおいて、提案システム「Strecs3D」の設計思想、応力解析に基づくインフィル最適化アルゴリズム、および既存のスライス工程を阻害しないワークフローについて詳述した。また、第四章の検証実験では、同一質量において均一インフィルと比較して等価曲げ剛性が約 1.65 倍、最大荷重が約 1.97 倍向上することを定量的に証明し、第五章のユーザ評価を通じて、専門知識を持たない設計者であっても短時間で最適化の恩恵を享受できる高いユーザビリティを確認した。

本章では、これらの知見が実際の部品製造や製品設計においてどの程度有効に機能するかを示すため、具体的な適用事例を多数提示する。重量制限と強度の両立が至上命題となる「ロボットコンテスト」の競技部品を含め、産業用機械部品から日常生活におけるプロダクトデザインまで多岐にわたる。

本章で紹介する事例は、単純な片持ち梁から、ドローンフレーム、支持剛性が求められるベアリングホルダー、さらには人間の直感では過剰設計に陥りがちなフックやスタンド類まで、形状や用途の異なる 11 種類のモデルである。

これらの多様な作例を通じ、Strecs3D が単なる研究上のシミュレーションツールではなく、デジタルファブ리케이션における「実用的な設計・製造基盤」となり得ることを実証する。

6.1 Cantilever

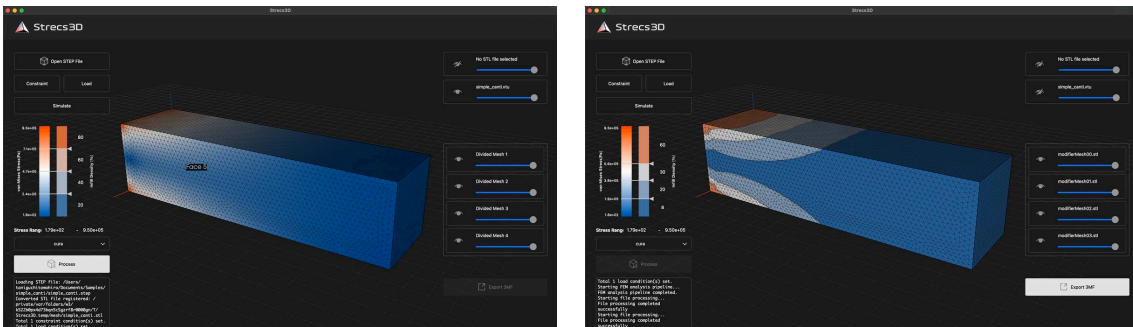
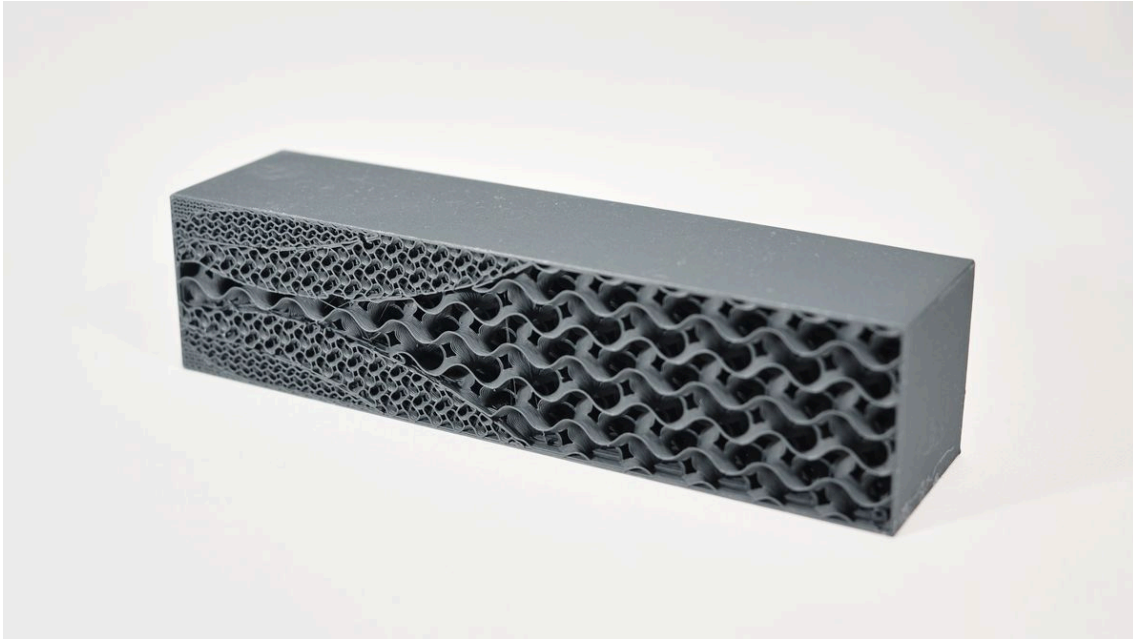


Figure 62: 片持ち梁の造形結果とその処理の様子

```

Model : Cantilever
Stress-Density mapping:
  - 1.9e05 [Pa] : 08[%]
  1.9e05 [Pa] - 3.8e05 [Pa] : 20[%]
  3.8e05 [Pa] - 5.6e05 [Pa] : 30[%]
  5.6e05 [Pa] - : 60[%]
Printing Time : 2h01m
Mass : 60[g]

```

シンプルな片持ち梁のモデル。左側の面で固定され上から一様な荷重がかかる想定。応力が集中する固定端付近や上下端のインフィル密度を高め、低応力部は疎になる様子が見られる。梁の曲げモーメントに応じた合理的な材料配置になっている。

6.2 Bearing Holder

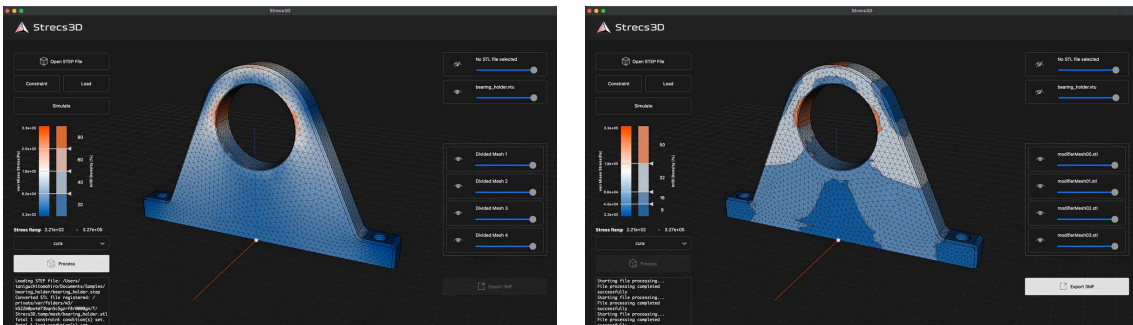
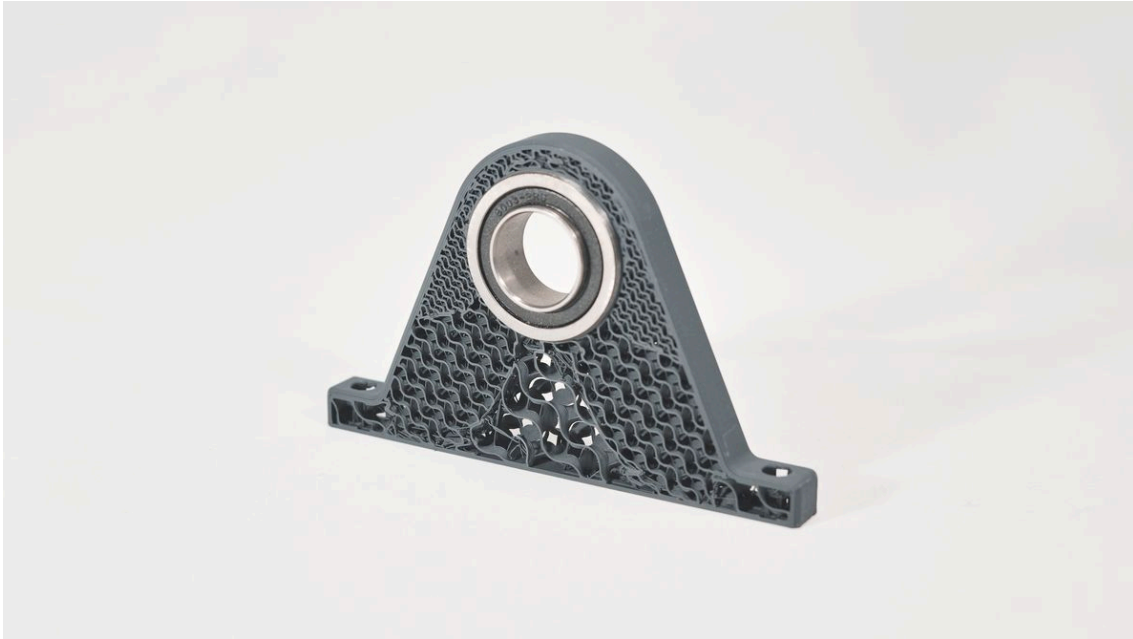


Figure 63: ベアリング固定パーツの造形結果とその処理の様子

```

Model : BearingHolder
Stress-Density mapping:
  - 4.4e04 [Pa] : 08 [%]
  4.4e04 [Pa] - 8.8e04 [Pa] : 16 [%]
  8.8e04 [Pa] - 1.9e05 [Pa] : 32 [%]
  1.9e05 [Pa] - : 50 [%]
Printing Time : 40m
Mass : 15 [g]

```

ベアリングの固定パーツ。ベアリングからの荷重を固定端へと経路に沿って、斜め方向の支持部が密に構成されている。応力が低い中央部を極端に疎にすることで、軽量化しつつも軸受けとしての支持剛性を保つことができる。

6.3 Drone Frame

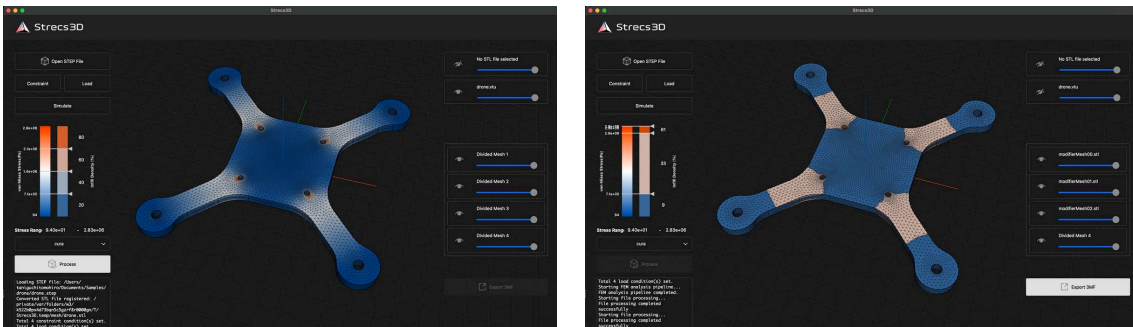


Figure 64: ドローンフレームの造形結果とその処理の様子

```

Model : DroneFrame
Stress-Density mapping:
  - 7.1e05 [Pa] : 09 [%]
  7.1e05 [Pa] - 2.6e06 [Pa] : 33 [%]
  2.6e06 [Pa] - : 61 [%]
Printing Time : 22m
Mass : 7.5 [g]

```

ドローンのフレームパーツ。フレーム中央の4つの穴を拘束条件とし、アーム先端に装着されるプロペラからの推進力を想定し、解析を行った。負荷が集中するアーム根元に高い密度のインフィルを配置し、中央の低応力部は疎なインフィルで軽量化されている。

6.4 Frame Connector

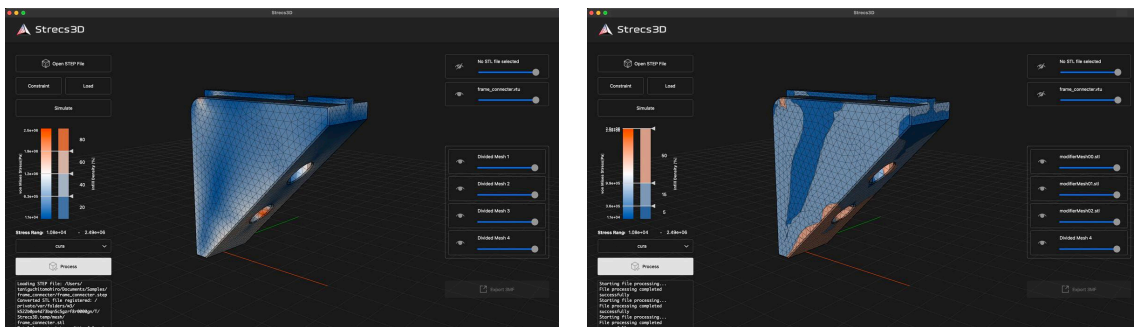


Figure 65: アルミフレーム接合パーツの造形結果とその処理の様子

```

Model : FrameConnector
Stress-Density mapping:
  - 3.6e05 [Pa] : 05 [%]
  3.6e05 [Pa] - 9.9e05 [Pa] : 15 [%]
  9.9e05 [Pa] - : 50 [%]
Printing Time : 37m
Mass : 11.7 [g]

```

アルミフレームを直角に保持するパーツ。ボルト固定部と、荷重を支える外側の斜辺（圧縮・引張材として機能する部分）に沿ってインフィルが密に配置されている。中央の低応力部を間引くことで直角保持の剛性と軽量化を同時に実現させている。

6.5 Handle

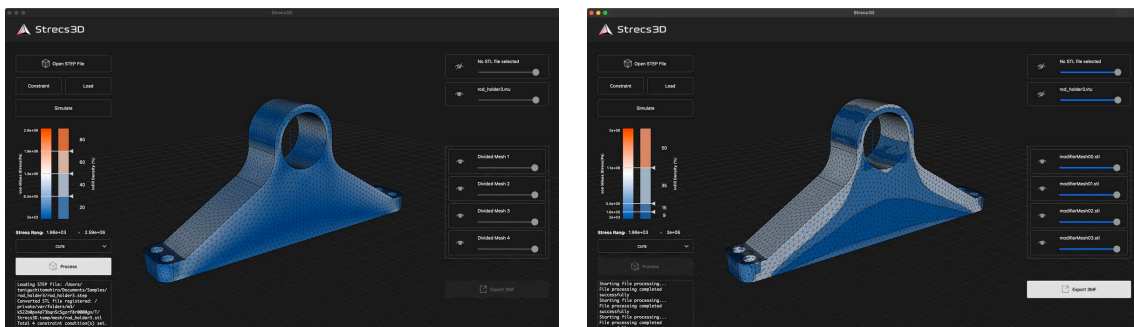


Figure 66: ハンドルパーツの造形結果とその処理の様子

```

Model : Handle
Stress-Density mapping:
  - 1.6e05 [Pa] : 09[%]
  1.6e05 [Pa] - 3.4e05 [Pa] : 15[%]
  3.4e05 [Pa] - 1.1e06 [Pa] : 35[%]
  1.1e06 [Pa] - : 50[%]
Printing Time : 1h17m
Mass : 28.3[g]

```

ロボットや機械部品を持ち上げるためのハンドルパーツ。両端のボルト部分で固定してパイプ部分にロボットの重量（約 20kg、片側 10kg）がかかる想定解析を行なった。画像では写り切っていないが、固定部分のボルト付近の応力が集中する箇所に赤い高密度の領域が生成されている。

6.6 Hook

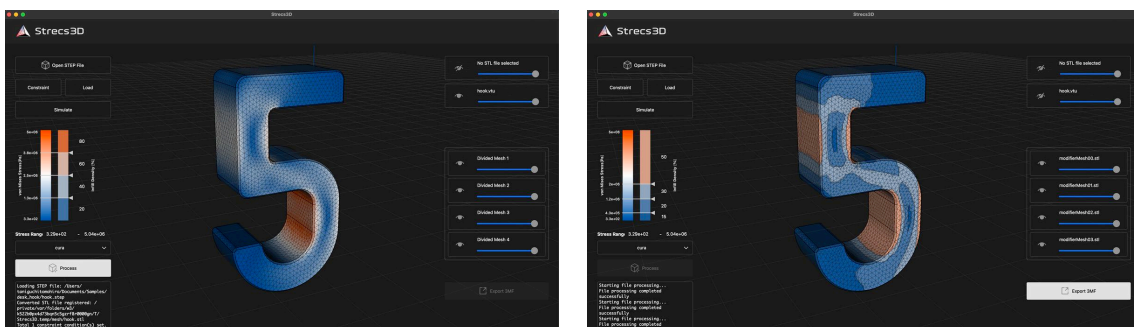
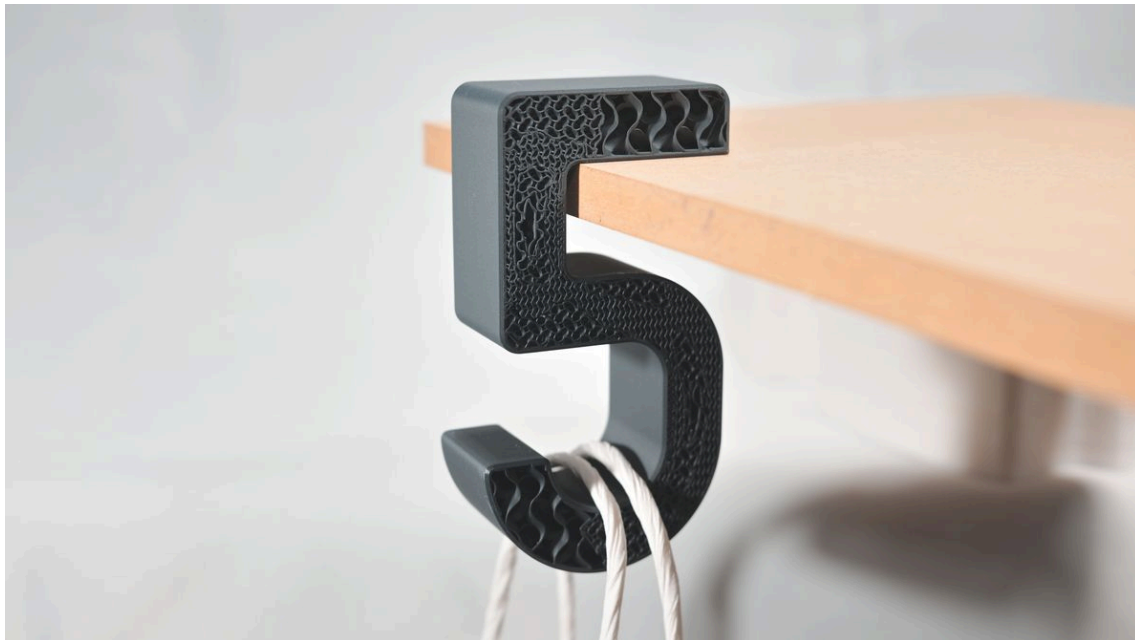


Figure 67: フックパーツの造形結果とその処理の様子

```

Model : Hook
Stress-Density mapping:
  - 4.3e05 [Pa] : 15 [%]
  4.3e05 [Pa] - 1.2e06 [Pa] : 20 [%]
  1.2e06 [Pa] - 2.0e06 [Pa] : 30 [%]
  2.0e06 [Pa] - : 50 [%]
Printing Time : 1h34m
Mass : 35 [g]

```

デスクに荷物をかけるフックのパーツ。フックの固定部において、当初はデスクとの接触面全体を密にする必要があると直感したが、解析の結果、応力は固定部の根元に集中し、先端の負荷は極めて低いことが判明した。実荷重試験においても根元の補強のみで十分な強度が得られ、解析の妥当性が裏付けられた。

6.7 Smartphone Stand

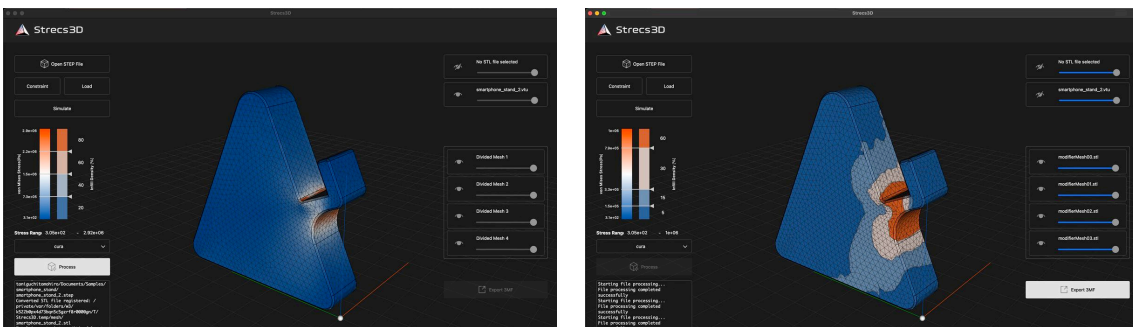


Figure 68: スマートフォンスタンド造形結果とその処理の様子

Model	: SmartphoneStand
Stress-Density mapping:	
	- 1.5e05 [Pa] : 5[%]
	1.5e05 [Pa] - 3.3e05 [Pa] : 15[%]
	3.6e05 [Pa] - 7.9e05 [Pa] : 30[%]
	7.9e05 [Pa] - : 60[%]
Printing Time	: 33m
Mass	: 11.9 [g]

スマートフォンを立てるためのスタンド。下面が固定、斜面と突起部分に力がかかる想定での解析を行なった。突起の根本は力がかかり、形状的にも破断しやすい部分であるが、重点的にインフィルによる補強がされているため、壊れにくいパーツとなっている。

6.8 Motor Mount

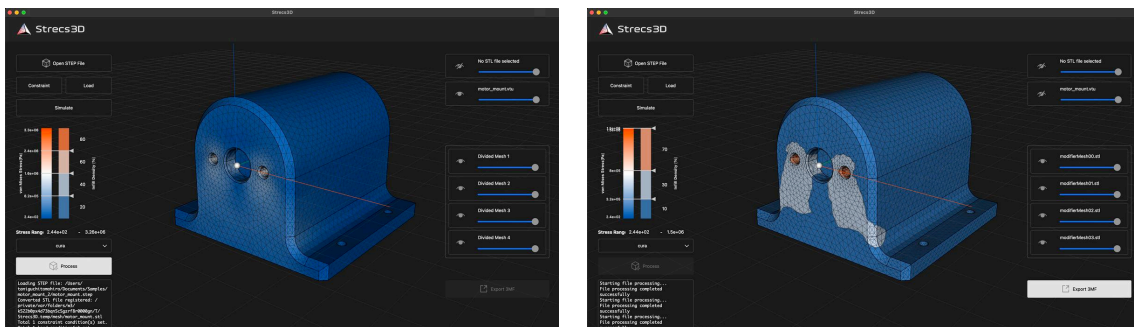


Figure 69: モーターマウント造形結果とその処理の様子

```

Model : MotorMount
Stress-Density mapping:
  - 3.2e05 [Pa] : 10[%]
  3.2e05 [Pa] - 8.0e05 [Pa] : 30[%]
  8.0e05 [Pa] - : 70[%]
Printing Time : 1h22m
Mass : 34[g]

```

モーターを固定するためのパーツ。下面で固定され、正面のボルト穴に上向にロボットの重量の反作用がかかるという想定での解析を行なった。モーターを保持するボルト穴から、その荷重を支えるベースのボルト固定部へ向かって、インフィルが密に配置されている。

6.9 Rod Connector

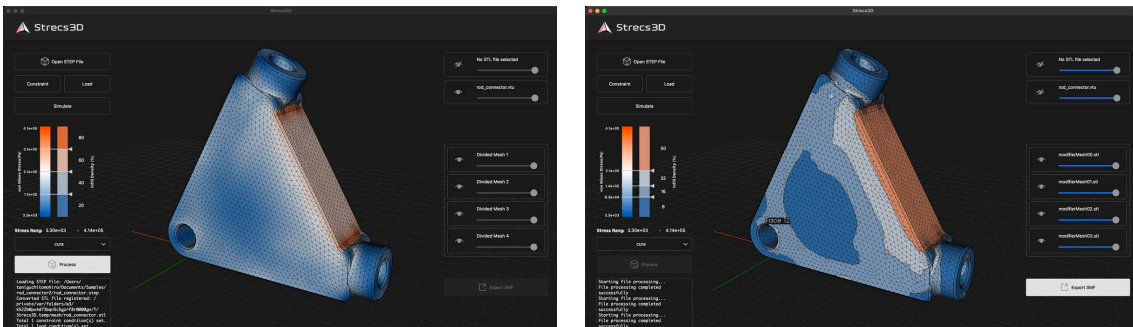


Figure 70: ロッド接続パーツの造形結果とその処理の様子

```

Model : RodConnector
Stress-Density mapping:
  - 9.3e04[Pa] : 8[%]
  9.3e04[Pa] - 1.4e05[Pa] : 16[%]
  1.4e05[Pa] - 2.1e05[Pa] : 32[%]
  2.1e05[Pa] - : 50[%]
Printing Time : 2h06m
Mass : 48[g]

```

トラス構造を作る際の接合パーツ。二つのロッドが互いに開くような力を受けている状態を想定し、解析を行なった。トラスは建築、橋梁、航空機からロボットまで、あらゆる構造体の基本単位である。そこに荷重条件に応じた内部構造の最適化を適用すれば、既存の広範な部品やプロダクトにおいて、軽量化と高剛性化の両立が可能になる。

6.10 Tablet Stand

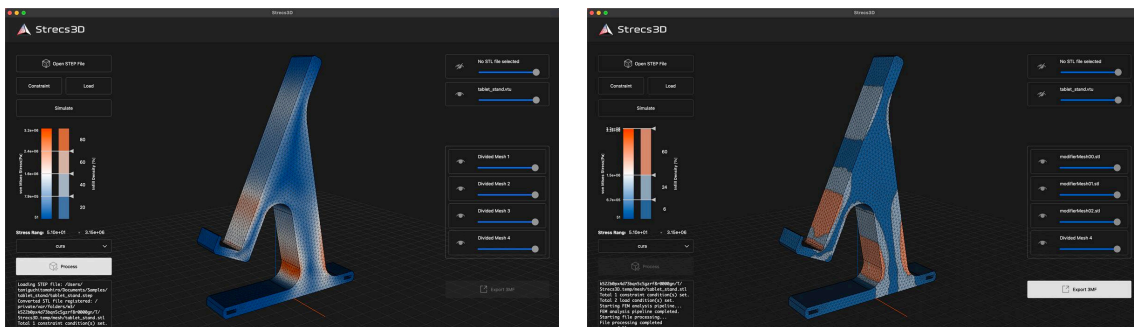


Figure 71: タブレットスタンドの造形結果とその処理の様子

```

Model : TabletStand
Stress-Density mapping:
  - 6.7e05 [Pa] : 6 [%]
  6.7e05 [Pa] - 1.5e06 [Pa] : 24 [%]
  1.5e06 [Pa] - : 60 [%]
Printing Time : 2h04m
Mass : 29.5 [g]

```

タブレットを保持するためのスタンド。タブレットを立てかけた時の重量を想定した。タブレットの荷重を支える支柱部分に、解析に基づいた密度分布を配置することで、最小限の材料で安定性を確保している。専門的な機械部品に留まらず、日常的なプロダクトデザインへも高い適応性を持つことが示唆される。

6.11 Bracket

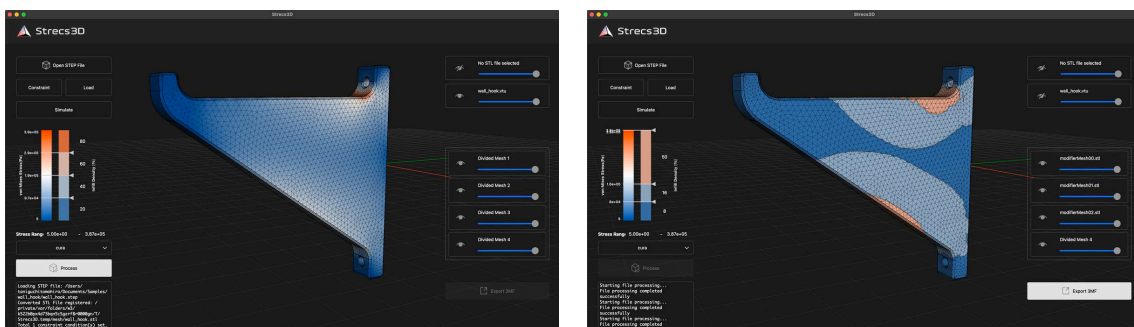


Figure 72: 壁掛けブラケットの造形結果とその処理の様子

```

Model : WallBracket
Stress-Density mapping:
  - 8.0e04[Pa] : 08[%]
  8.0e04[Pa] - 1.6e05[Pa] : 16[%]
  1.6e05[Pa] - : 50[%]
Printing Time : 55m
Mass : 25[g]

```

壁や柱から突き出して棚や板などを支えるブラケットパーツ。壁に設置される面を拘束、上の面に下向きに5kgの重量がかかるという想定で解析をした。荷重がかかる上部の根本には、非常に密度の高いインフィルが配置されている。一方で、応力があまりかからない中央部や先端付近は、インフィルを疎にすることで、強度と軽量化の両立が可能になる。

7 今後の展望

7.1 本研究の立ち位置と残された課題

本研究は、構造解析に基づくインフィル最適化という高度な計算手法を、ロボットコンテスト（ロボコン）参加者をはじめとする、必ずしも計算機科学や構造力学の高度な専門知識を持たないユーザに開放することを最優先の設計思想としてきた。

従来のインフィル最適化手法の多くは、計算の厳密性や材料効率の極大化に主眼が置かれており、ツールの操作性やワークフローの簡便さが犠牲にされる傾向があった。これに対し、本研究で開発したシステムは、専門的なパラメータ設定を抽象化し、試行錯誤のサイクルを短縮することで、実戦的なものづくりの現場における「実用的な最適化ツール」としての立ち位置を確立した。

しかしながら、本研究が提案した手法は、実用性を重視した簡略化に基づいているがゆえに、技術的な観点から解決すべき課題が依然として残されている。現時点で解決できていない主要な問題点は、大きく以下の3点に集約される。

7.2 最適分割のための反復計算の導入

現在、本システムで採用しているアルゴリズムは、一度の構造解析結果に基づいて領域分割とインフィル密度の割り当てを行う「ワンパス」の処理である。しかし、厳密な意味での構造最適化、すなわち特定の目的関数（剛性の最大化や質量の最小化など）を定義し、その極値を計算によって導き出すプロセスには至っていない。

本来、物体内部のインフィル密度を変化させることは、その領域の材料物性（等価ヤング率など）を変化させることを意味する。物性が変化すれば、荷重を加えた際の内部の応力伝達経路も変化するため、一度の解析結果のみに基づいて密度を決定する手法では、最終的な形状における応力分布を正確に反映できないという理論的限界がある。

真に最適な材料配置を実現するためには、Figure 73 に示すような反復計算の導入が不可欠である。

- 初期解析：現在の形状（または初期の均一密度）で構造解析を行う。
- 領域分割と密度変更：解析結果に基づき、各領域のインフィル密度を更新する。
- 再計算：更新された密度分布を反映した物性値を用いて、再度構造解析を行う。
- 収束判定：密度分布の変化が一定の閾値以下になる（収束する）まで、ステップ2と3を繰り返す。

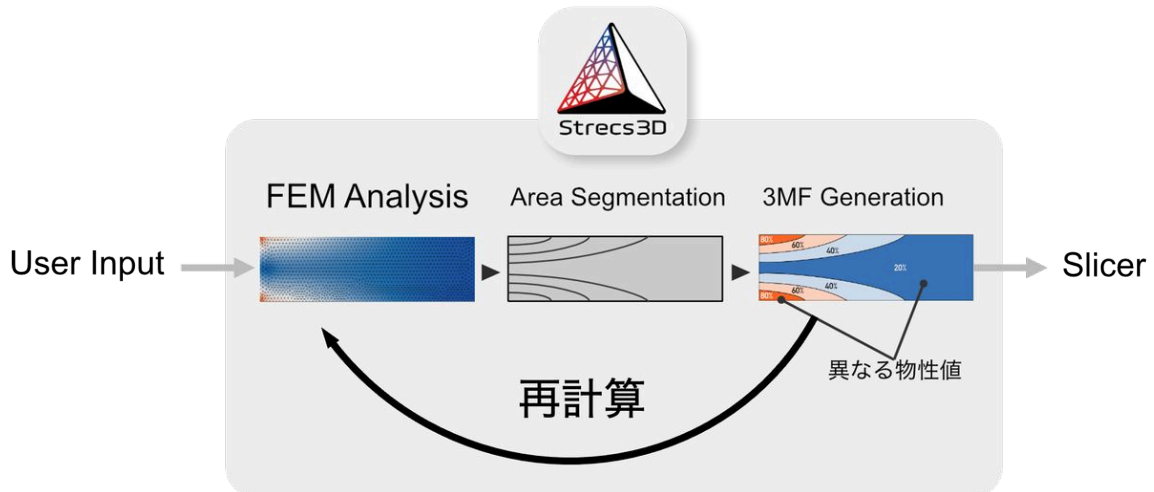


Figure 73: Strecs3Dにおける反復計算の流れ

この反復プロセスを確立するための有力な手がかりとして、「トポロジー最適化」の手法を本研究に統合することを検討している。トポロジー最適化は、与えられた荷重条件と拘束条件の下で、材料の最適なレイアウトを計算機によって自動的に導き出す技術である。

一般的なトポロジー最適化は、材料が存在するか否か（1か0か）を判定することで物体の「外形」を変化させることを目的とする。これに対し、本研究が目指すのは、外形は維持したまま内部の密度分布を最適化する手法への転用である。

トポロジー最適化の代表的な手法の一つである「均質化法(Homogenization Method)」では、設計領域内の各点において密度を0から1の間の連続値として扱う。この手法の計算過程で生成される「中間密度」の分布は、物理的には「空隙を含む材料」を意味する。

今後は、このトポロジー最適化によって導き出される0から1の最適密度分布を、本システムのインフィル密度分布と直接的に対応付けるアルゴリズムの開発を行う。これにより、経験則や簡易的なマッピングに頼ることなく、力学的根拠に基づいた真に剛性の高い内部構造の自動生成が可能になると考える。

7.3 パス生成における連続性の保証

本研究では、インフィルに粗密を設ける手法として、モデル内部を複数の領域（セル）に分割し、各領域に異なる密度を割り当てる手法を採用している。しかし、この「領域分割に基づく離散的な密度制御」は、密度が急激に変化する境界部分において理論的および実用的な課題を残している。

まず理論的な懸念として、インフィルの境界における不連続性に起因する応力集中が挙げられる。密度が段階的に変化する境界では、構造的な剛性が不連続となるため、荷重負荷時にその境界線上で予期せぬ破壊や剥離が生じるリスクがある。

また、不連続なインフィル生成は造形効率の低下を招いている。材料試験の試験片において、最適化を行った結果、造形時間がかえって増加するという現象が確認されたが、これは分割された境界ごとにインフィルのツールパスが途切れることで、ノズルヘッドの移動が増大したことが主な原因であると考えられる。実際に、実施したユーザテストにおけるフィードバックにおいても、インフィルの不連続性が造形品質や信頼性に与える影響を危惧する声が寄せられた。

これらの問題を解決するために、前節で述べたトポロジー最適化（均質化法）によって得られる連続的な密度分布を、数的にインフィル生成へと直結させる手法を検討している。具体的には、ジャイロイド (Gyroid) 構造に代表される三周期極小曲面 (TPMS) を定義する陰関数に対し、空間的な周期制御関数 $L(x,y,z)$ を導入する。

通常のジャイロイド構造は、以下の近似式によって定義される。

$$\sin(x) \cos(y) + \sin(y) \cos(z) + \sin(z) \cos(x) = 0 \quad (16)$$

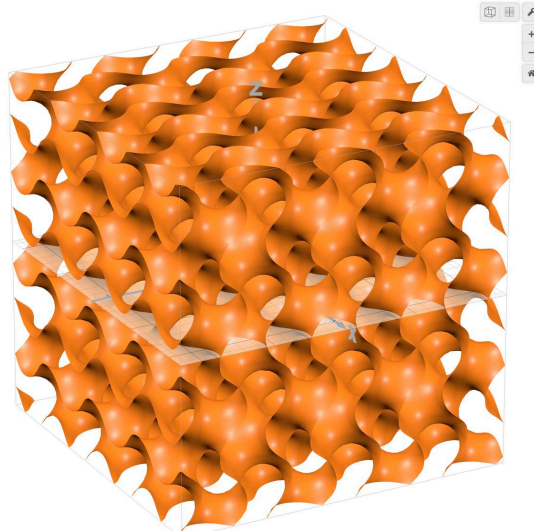


Figure 74: 均質なジャイロイド構造

ここに、トポロジー最適化から導出された密度分布関数を周期のパラメータとして注入することで、空間座標に応じて周期が連続的に変化する「Cell Graded Gyroid 構造」を実現できる。

$$\begin{aligned} & \sin(L(x, y, z) \cdot x) \cos(L(x, y, z) \cdot y) \\ & + \sin(L(x, y, z) \cdot y) \cos(L(x, y, z) \cdot z) \\ & + \sin(L(x, y, z) \cdot z) \cos(L(x, y, z) \cdot x) = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

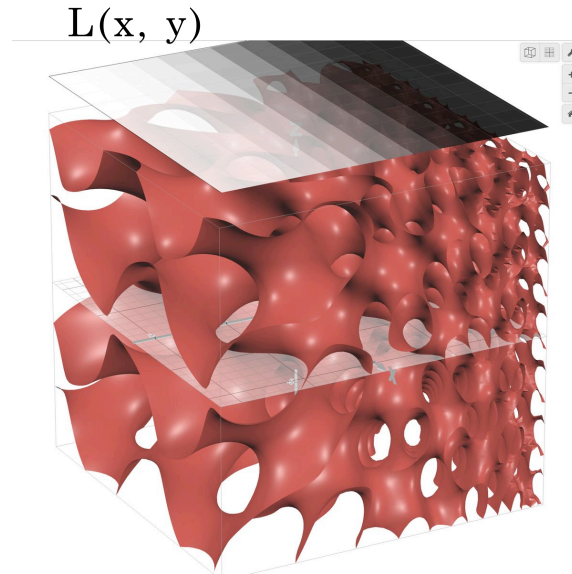


Figure 75: 密度変化する傾斜ジャイロイド構造

この手法の利点は、インフィルの密度（セルのサイズや壁の厚み）が急激な境界を持たず、空間全体で滑らかに変化する点にある。これにより、以下の改善が期待される。

- 構造的堅牢性の向上：剛性の不連続面を排除し、部材全体でのスムーズな応力伝達を可能にする。
- 造形効率の最適化：パスが分断されず、一筆書きに近い連続的なツールパスを生成できるため、造形時間の大幅な短縮と造形品質の安定化に寄与する。

このように、密度分布の計算とパスの生成を共通の数学的基盤（密度分布関数）で統合することが、将来的なパス生成アルゴリズム刷新の核心となる。

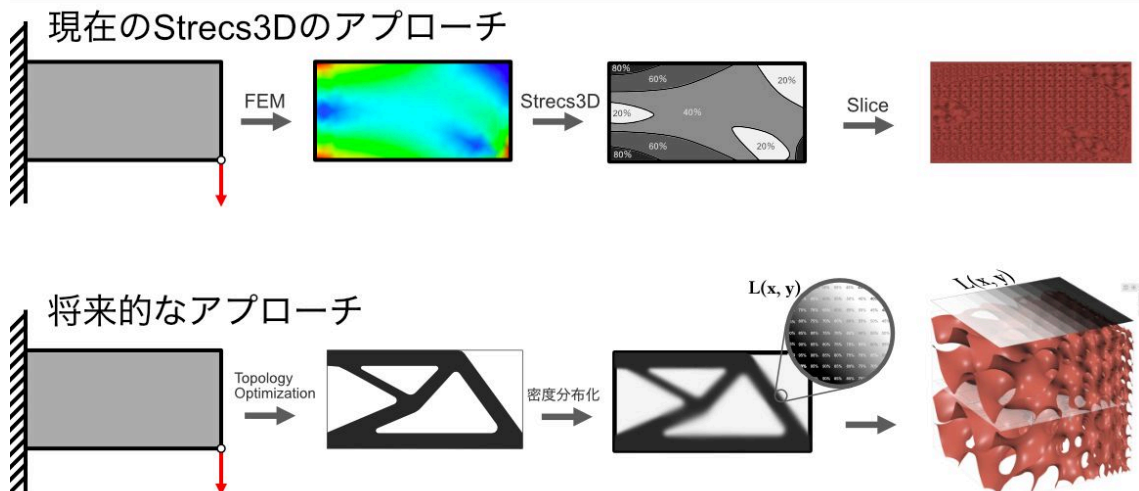


Figure 76: 現在の Strecs3D のアプローチと将来的なアプローチの比較

7.4 3D プリントにおける材料異方性の考慮

本研究の構造解析モデルでは、計算の簡略化のために造形物を「等方性材料」、すなわち全方向に対して均質な力学的性質を持つものとして扱っている。しかし、本システムが主に対象とする熱溶解積層法(FDM)方式の3D プリントにおいては、積層プロセスに起因する顕著な材料異方性が存在する。

FDM 方式の造形物は、ノズルから吐出された樹脂が層状に積み重なって形成されるため、層内の結合強度に比べ、層間（積層方向：Z 方向）の結合強度が著しく低い。そのため、積層を剥がすような方向に力が加わった場合、解析上の予測よりもはるかに低い負荷で破断に至る「層間剥離」が大きな課題となる。

この問題に対し、本研究を実用レベルへ引き上げるための対処として、以下の2つのアプローチを博士課程において検討している。

1. シミュレーション段階での異方性材料モデルの定義

第一のアプローチは、構造解析 (FEM) の計算モデルそのものを等方性から直交異方性へと拡張することである。シミュレーションの段階で、あらかじめ積層方向のヤング率やせん断剛性を低く設定した材料プロパティを定義する。これにより、層間剥離のリスクが高い部位を解析段階で正確に特定し、その領域に対して自動的にインフィルを強化する、より物理事象に即した最適化が可能となる。

2. 積層方向と応力ベクトルの相関に基づく安全率の導入

第二のアプローチは、本システムが「スライサーの前処理ソフト」という立ち位置であることを活かした、幾何学的な補正手法である。具体的には、造形時の積層方向と、解析によって算出された最大主応力の方向（力の加わる方向）の関係性を事前に定義する。

もし、特定の領域において積層面を垂直に引き剥がすような力が支配的であると判断された場合、システム側で自動的にその領域のインフィル密度に「余裕（バッファ）」を持たせる処理を行う。具体的には、通常最適化アルゴリズムで算出された密度に対し、積層方向とのなす角に応じた補正係数を乗じることで、スライスソフトへ出力する際の印刷条件をより堅牢な設定へと自動調整する。

これらのアプローチを統合することで、ユーザが積層方向による強度の違いを意識することなく、3D プリント特有の弱点を補完した、信頼性の高い最適化パーツを容易に得られる環境の構築を目指す。

8 結論

8.1 本研究のまとめ

本研究では、3D プリンティングにおける部品製造において、造形パラメータ設定がユーザーの経験則や直感に依存しているという課題に対し、構造解析に基づき局所的なインフィル密度を自動最適化する「スライシング・プリプロセッサ」という新しい概念を提唱し、そのシステムとして「Strecs3D」を開発した。

従来の高度な構造最適化研究が抱えていた「製造プロセスの分断(プロセスの壁)」「計算リソースの膨大化(リソースの壁)」「要求スキルの高度化(スキルの壁)」という3つの障壁を打破するため、既存のスライサーの機能を活用しつつ、3MF フォーマットのメタデータを介して最適化情報を伝達する非破壊的なワークフローを構築した。

8.2 研究の成果と知見

本研究を通じて得られた主要な成果は、以下の通りである。

- 力学的特性の向上: 三点曲げ試験による実証実験の結果、提案手法 (Strecs3D) によって生成された試験片は、同一質量の均一インフィルモデルと比較して、等価曲げ剛性で約 1.65 倍、最大荷重 (ピーク荷重) で約 1.97 倍の性能向上を記録した。これは、応力分布に基づき「力の流線」に沿った効率的な荷重伝達経路が内部構造に自動形成された結果である。
- ユーザビリティの改善: ロボットコンテストに参加するエンジニアを対象としたユーザ評価において、システムユーザビリティ尺度 (SUS) のスコアが、従来の手動設定手法 (30.00 点) と比較して、提案手法では 69.29 点へと大幅に向上した。解析から出力までを単一のソフトウェア内でカプセル化したことで、専門知識を持たないユーザーであっても短時間で構造最適化の恩恵を享受できることが実証された。
- 製造エコシステムへの適合性: Strategy パターンを用いた設計により、Cura、Bambu Studio、PrusaSlicer といった主要なスライサーに対応し、ユーザーが既存の製造環境を維持したまま高度な最適化を導入できる汎用性を実現した。

8.3 結び

本研究は、これまで研究者や専門家のみが扱っていたインフィル最適化技術を、ロボコン等の過酷な開発現場に立つエンジニアが勝利のために日常的に利用できる「実用的な道具」へと昇華させた。

今後の展望として述べた反復計算の導入や TPMS (三周期極小曲面) を用いた連続的なパス生成、材料異方性の考慮といった課題を解決することで、積層造形における設

計・製造プロセスのさらなる効率化と、3D プリント 部品の実用部品としての社会実装が加速することが期待される。

Bibliography

- [1] Stratasys, “Stratasys to Produce 3D Printed Flight Parts for its A350 XWB Aircraft.” Accessed: Dec. 08, 2025. [Online]. Available: <https://www.stratasys.com/en/resources/blog/airbus-3d-printing/>
- [2] Tctmagazine, “Stratasys Direct Manufacturing to 3D print parts for Airbus.” Accessed: Jan. 29, 2026. [Online]. Available: <https://www.tctmagazine.com/stratasys-direct-manufacturing-to-3d-print-parts-for-airbus/>
- [3] Esun3d, “3D Printing: Making Competitive Robots Lighter, Stronger, and Faster!.” Accessed: Dec. 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.esun3d.com/news/9900/>
- [4] UC Berkeley Engineering, “UC_Berkley_robot.” Accessed: Dec. 26, 2025. [Online]. Available: <https://engineering.berkeley.edu/news/2025/06/berkeley-engineers-develop-customizable-3d-printed-robot-for-tech-newbies/>
- [5] Stratasys, “High School Teams Use 3D Printing for Custom Robotics Parts.” Accessed: Jan. 29, 2026. [Online]. Available: <https://www.stratasys.com/en/resources/blog/3d-printing-robots-challenge/>
- [6] Benjamin Goldschmidt, Dominic Aubertage, “Cura Guide to the Best Infill Patterns.” Accessed: Jan. 29, 2026. [Online]. Available: <https://all3dp.com/2/cura-infill-patterns-all-you-need-to-know/>
- [7] S. Ekşi and C. Karakaya, “Effects of Process Parameters on Tensile Properties of 3D-Printed PLA Parts Fabricated with the FDM Method,” *Polymers*, vol. 17, no. 14, p. 1934, July 2025, doi: 10.3390/polym17141934.
- [8] M. T. Biroş, D. Ledenyák, and M. Andó, “Effect of FDM Infill Patterns on Mechanical Properties,” *Polymer Testing*, vol. 113, p. 107654, Sept. 2022, doi: 10.1016/j.polymertesting.2022.107654.
- [9] J. Wu, N. Aage, R. Westermann, and O. Sigmund, “Infill Optimization for Additive Manufacturing—Approaching Bone-Like Porous Structures,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 24, no. 2, pp. 1127–1140, Feb. 2018, doi: 10.1109/TVCG.2017.2655523.
- [10] Y. Li, C. Shi, X. Wang, S. Yuan, J. Zhu, and W. Zhang, “A Mapping-Based Graded Infill Structure Design Method and Continuous Printing Path Planning,” *Additive Manufacturing*, vol. 98, p. 104639, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.addma.2025.104639.
- [11] S.-C. Eva, A. Sover, and V. Ermolai, “The Impact of the G-code Flavour Selection in FFF,” in *Proceedings - 4th International Conference Business Meets Technology 2022*, Editorial Universitat Politècnica de València, July 2022. doi: 10.4995/BMT2022.2022.15547.

-
- [12] Ultimaker, “Ultimaker Cura.” Accessed: Dec. 31, 2025. [Online]. Available: <https://ultimaker.com/ja/software/ultimaker-cura/>
- [13] Prusa Research, “PrusaSlicer | Original Prusa 3D printers directly from Josef Prusa.” Accessed: Dec. 31, 2025. [Online]. Available: https://www.prusa3d.com/page/prusaslicer_424/
- [14] BambuLab, “BambuStudio.” Accessed: Dec. 31, 2025. [Online]. Available: <https://bambulab.com/en/download/studio>
- [15] H. A. Simon, “Rational Choice and the Structure of the Environment.,” *Psychological Review*, vol. 63, no. 2, pp. 129–138, 1956, doi: 10.1037/h0042769.
- [16] PrusaResearch, “Infill patterns | Prusa Knowledge Base.” Accessed: Dec. 16, 2025. [Online]. Available: https://help.prusa3d.com/article/infill-patterns_177130
- [17] CncKitchen, “Gradient Infill for 3D Prints — CNC Kitchen.” Accessed: Dec. 29, 2025. [Online]. Available: <https://www.cnckitchen.com/blog/gradient-infill-for-3d-prints>
- [18] J. P. Groen and O. Sigmund, “Homogenization-based Topology Optimization for High-resolution Manufacturable Microstructures,” *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 113, no. 8, pp. 1148–1163, Feb. 2018, doi: 10.1002/nme.5575.
- [19] Z. Wang, C. Wang, F. Wu, Z. Liu, L. Liu, and D. Wang, “Design Method of Gyroid Lattice Structure Based on the Load Paths Direction and Capacity,” *Additive Manufacturing*, vol. 97, p. 104586, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.addma.2024.104586.
- [20] M. T. Biroş and M. Andó, “Simplified Local Infill Size Optimization for FDM Printed PLA Parts,” *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, p. 5933, Apr. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-33181-4.
- [21] I. Wegner, A. Bischoff, M. I. Campbell, and D. J. Roach, “Variable Density Gyroid Lattice from Stiffness Optimized Structures.”
- [22] L. Yi *et al.*, “A New Gradient Infill Design Method for Material Extrusion Using Density-Based Topology Optimization and G-code Extension,” *Manufacturing Letters*, vol. 37, pp. 21–25, Sept. 2023, doi: 10.1016/j.mfglet.2023.06.003.
- [23] S. Rilling, I. Ríos, Á. Gómez, M. Valenzuela, A. Oñate, and V. Tuninetti, “Optimized Infill Density through Topological Optimization Increases Strength of Additively Manufactured Porous Polylactic Acid,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 129, no. 7–8, pp. 3739–3750, Dec. 2023, doi: 10.1007/s00170-023-12554-z.
- [24] M. Q. Tanveer, A. Haleem, and M. Suhaib, “Effect of Variable Infill Density on Mechanical Behaviour of 3-D Printed PLA Specimen: An Experimental Inves-

- igation,” *SN Applied Sciences*, vol. 1, no. 12, p. 1701, Dec. 2019, doi: 10.1007/s42452-019-1744-1.
- [25] 3mf Consortium, “3MF Consortium – The File Format for 3D Printing.” Accessed: Dec. 31, 2025. [Online]. Available: <https://3mf.io/>
- [26] Vtk, “VTK - The Visualization Toolkit.” Accessed: Dec. 31, 2025. [Online]. Available: <https://vtk.org/>
- [27] Qt, “Qt 6 - The latest version of Qt.” Accessed: Dec. 31, 2025. [Online]. Available: <https://www.qt.io/development/qt-framework/qt6>
- [28] 3MFConsortium, “GitHub - 3MFConsortium/lib3mf: lib3mf is an implementation of the 3D Manufacturing Format file standard.” Accessed: Dec. 31, 2025. [Online]. Available: <https://github.com/3MFConsortium/lib3mf>
- [29] Vcpkg, “vcpkg - Open source C/C++ dependency manager from Microsoft.” Accessed: Dec. 31, 2025. [Online]. Available: <https://vcpkg.io/en/>
- [30] CalculiX, “CALCULIX: A Three-Dimensional Structural Finite Element Program.” Accessed: Dec. 31, 2025. [Online]. Available: <https://www.calculix.de/>
- [31] Gmsh, “Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities.” Accessed: Dec. 31, 2025. [Online]. Available: <https://gmsh.info/>
- [32] Dassault Systemes, “Explore Abaqus by SIMULIA for Structural Simulation & Virtual Testing.” Accessed: Dec. 31, 2025. [Online]. Available: <https://discover.3ds.com/test-and-validate-your-product-faster-abaqus>
- [33] L. J. Gibson and M. F. Ashby, *Cellular Solids: Structure and Properties*, 2nd ed. in Cambridge Solid State Science Series. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. doi: 10.1017/CBO9781139878326.
- [34] T. Maconachie *et al.*, “The Compressive Behaviour of ABS Gyroid Lattice Structures Manufactured by Fused Deposition Modelling,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 107, no. 11–12, pp. 4449–4467, Apr. 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05239-4.
- [35] E. Ebel and L. RTejournal, “Fabrication of FDM 3D Objects with ABS and PLA and Determination of Their Mechanical Properties.”
- [36] A. Rodríguez-Panes, J. Claver, and A. M. Camacho, “The Influence of Manufacturing Parameters on the Mechanical Behaviour of PLA and ABS Pieces Manufactured by FDM: A Comparative Analysis,” *Materials*, vol. 11, no. 8, p. 1333, Aug. 2018, doi: 10.3390/ma11081333.

-
- [37] D. Hodžić, A. Pandžić, I. Hajro, and P. Tasić, “Strength Comparison of FDM 3D Printed PLA Made by Different Manufacturers,” *TEM Journal*, pp. 966–970, Aug. 2020, doi: 10.18421/TEM93-18.
- [38] L. J. Gibson and M. F. Ashby, “The Mechanics of Three-Dimensional Cellular Materials,” *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, vol. 382, no. 1782, pp. 43–59, 1982, Accessed: Jan. 28, 2026. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/2397268>
- [39] Overture3d, “Overture 3D Printer Filament – High Quality, Great Price.” Accessed: Dec. 31, 2025. [Online]. Available: <https://overture3d.com/>
- [40] Autodesk, “Fusion.” Accessed: Dec. 31, 2025. [Online]. Available: <https://www.autodesk.com/asean/products/fusion-360/overview>
- [41] Bambu Lab, “Bambu Lab P1S 3D Printer.” Accessed: Jan. 28, 2026. [Online]. Available: <https://bambulab.com/en/p1>
- [42] Perc, “高度技術者育成プログラム - 千葉工業大学 惑星探査研究センター (PERC).” Accessed: Dec. 31, 2025. [Online]. Available: <https://www.perc.it-chiba.ac.jp/projects/cubesat/>
- [43] J. Brooke, “SUS: A "quick and dirty" usability scale,” *Usability Evaluation in Industry*. Taylor & Francis, London, pp. 189–195, 1996.
- [44] Andrew Smyk, “The System Usability Scale & How it's Used in UX.” Accessed: Jan. 29, 2026. [Online]. Available: <https://medium.com/thinking-design/the-system-usability-scale-how-its-used-in-ux-b823045270b7>

謝辞

本論文の執筆にあたり、多くの方々から多大なるご支援とご指導を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

主査を務めていただいた慶應義塾大学環境情報学部の田中浩也教授には、デジタルファブリケーションの第一人者として、常に的確かつ示唆に富んだご指導をいただきました。アルゴリズムや実装の細部に終始しがちであった私に対し、ユーザからの視座や、研究の本質を捉え直すための多角的な視点を与えてくださいました。先生の指導がなければ、本研究をこれほどまでに進展させることは叶わなかったと思います。心より深く感謝申し上げます。

副査を賜りました名古屋大学大学院工学研究科の加藤準治教授には、構造最適化の専門的な知見から、シミュレーションや材料試験の実施において多岐にわたる貴重なご助言をいただきました。また、同じく副査の慶應義塾大学環境情報学部の巴山竜来准教授には、将来的な展望を見据えた本研究の意義について、幾度となく議論の機会をいただきました。研究をさらに推し進める上で克服すべき課題や重要な指針を示していただいたことに深く感謝するとともに、来年度以降もご指導を賜りますよう、よろしく願い申し上げます。

本研究で開発したソフトウェア「Strecs3D」の制作にあたっては、独立行政法人情報処理推進機構（IPA）の「未踏 IT 人材発掘・育成事業」より多大なご支援をいただきました。特にプロジェクトマネージャー（PM）の竹迫良範氏には、ソフトウェアの実装面において専門的な立場から多くの有益なアドバイスをいただきました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

また、ソフトウェアのユーザテストにご協力いただいた千葉工業大学「高度技術者育成プログラム」の皆様、およびオンラインでテストに参加して下さった皆様にも、心より感謝いたします。皆様から寄せられた貴重なフィードバックは、本研究の有用性を検証する上で欠かせないものでした。

田中浩也研究室の同期である矢田美涼さんと汪明靖さんには、研究の議論のみならず、日々の何気ない対話を通じて、この二年間を非常に楽しく充実したものにさせていただきました。二人の存在が、修士課程における大きな支えとなりました。本当にありがとうございました。

最後に、金銭面および生活面での惜しめないサポートを続け、研究に専念できる環境を支えてくれた家族に、心からの感謝をいたします。

2026年1月13日

谷口 朝洋