OP-26

インフィルのツールパスを考慮した造形物の機械特性と変形の数値解析

Numerical analysis of fabricated objects considering infill toolpaths

竹之内 崇
Takashi TAKENOUCHI

三菱ケミカル株式会社
Mitsubishi Chemical Corporation

【要約】

本研究はインフィル構造とそのツールパスを考慮した 3D プリンタを用いた積層構造物の変形及び機械特性を評価する数値計算手法に関するものである。積層造形におけるエネルギー消費量と造形時間、それに対する造形物の変形及び機械特性について、シミュレーションを用いて予測を行い、実験と比較を行った。その結果、これらの指標をバランス良く満たすインフィル構造とツールパスの評価手法を見出した。本手法を種々の造形物に展開することで、積層造形の環境負荷低減が期待される。

キーワード:3D, **シミュレーション**, **モデリング**, **構造解析**, **インフィル**, SDGs

【Abstract】

This study concerns a numerical analysis to evaluate the deformation and mechanical properties of fabricated objects by FDM type 3D printer considering the infill structure and its toolpath. The energy consumption and time required for fabricated objects and corresponding deformation and mechanical properties were predicted by numerical analysis and compared with experimental results. As a result, an evaluation method for infill structures and toolpaths that satisfies these indices with good parity was found. The application of this method to various types of fabricated objects is expected to reduce the environmental impact of additive manufacturing.

Keywords:3D, simulation, modeling, structural analysis, infill, SDGs

1. 序論

従年、3D プリンタを用いた積層造形の環境負荷をより小さくするため、エネルギー消費量と造形時間を共に最小化するという取組みが必要とされている。これらの同時最小化のためには、インフィル構造とそのツールパスの設計が重要と考えられている。一般に積層造形が行われる際、ユーザーは任意のインフィルパタンを選択する。それにより、造形時間、装置加減速によるエネルギー使用量、熱による応力や変形による部品精度が影響を受ける。しかしながらユーザーがこれらの影響を事前に知ることは困難である。従って数値計算を用いたこれらに関する予測手法の提供は、積層造形の環境負荷低減において必要な要素技術である。

本研究では、プラスチックの曲げ試験規格 JIS K7171 に準拠した試験片寸法 80×10×h4 mm の試験片を異なるインフィル構造で造形し、それらの造形に必要なエネルギー消費量と造形時間、及びそれぞれの曲げ弾性率と反り量の、実験結果と解析結果の比較検証を行った。さらにこの検証を通して、数値解析を用いたこれらの指標をバランス良く満たすインフィル構造とツールパスの評価手法を提案する。

2. 実験

2-1. 実験装置

本実験では、Prusa Research 社製の FDM 式 3D プリンタ Original Prusa i3 MK3S+を使用した。また造形データ作成にはスライスソフトウェアの Prusa Slicer バージョン 2.4.2 を使用した。

2-2. 曲げ弾性率の評価

はじめに、インフィル構造による試験片の曲げ弾性率の違いを評価した。またこの時の造形に要するエネルギー消費量と造形時間を併せて評価した。各試験片のパラメーターを表 1 に、インフィル形状を含む試験片形状を図 1 に示す。図 1 に示すように、試験片はトップ層とボトム層のソリッドレイヤーを除く形で造形されている。これは、インフィル構造の違いによる曲げ弾性率の評価において、ソリッドレイヤーの影響を取り除くためである。これらの試験片は三菱ケミカル社製 DURABIO™ フィラメントを用いて造形された。

プラスチックの曲げ試験規格 JIS K7171 に準拠して各試験片に対して 3 点曲げ試験を行った結果を解析結果と併せて後述する。

表1. 曲げ弾性率評価のための試験片パラメータ

試験片No.	Infill pattern	Density [%]	Angle [deg]	試験片No.	Infill pattern	Density [%]	Angle [deg]
1	rectilinear	5	0	7	honeycomb	10	0
2	rectilinear	5	45	8	honeycomb	10	45
3	rectilinear	20	0	9	honeycomb	20	0
4	rectilinear	20	45	10	honeycomb	20	45
5	rectilinear	40	0	11	honeycomb	40	0
6	rectilinear	40	45	12	honeycomb	40	45

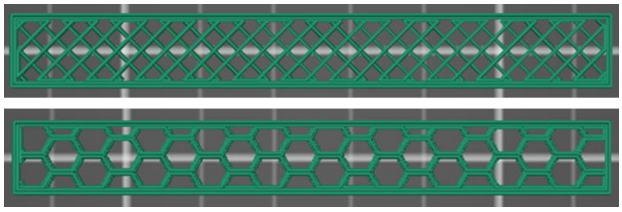

図1. 曲げ弾性率評価のための試験片形状
試験片 No.4（上）， 試験片 No.9（下）

2－3. 造形時の反り量の評価

次に、インフィル構造による試験片の反り量の違いを評価した。試験片の反りは、溶融した樹脂が積層造形時に急冷されることで起こる材料の収縮によるものである。実験では人為的に試験片に反りを発生させるため、図 2 に示すように試験片の長手方向に対して、半分だけプリンタテーブルに糊を塗ることで、試験片下面とプリンタテーブルの接着強さを操作した。その結果、プリンタテーブルに糊が塗られていない部分について、試験片とプリンタテーブル間で剥離が生じ、試験片の反りが観察された。このときの試験片端部とプリンタテーブル間の距離を反り量と評価した(図 3)。この評価で用いた試験片は 2-2.の曲げ弾性率の評価で用いた試験片と異なり、トップ層とボトム層にそれぞれ 0.2 mm のソリッドレイヤーを持つ(図 4)。これは、インフィル構造による試験片とプリンタテーブルの接着面積の違いを生じさせないための処理である。

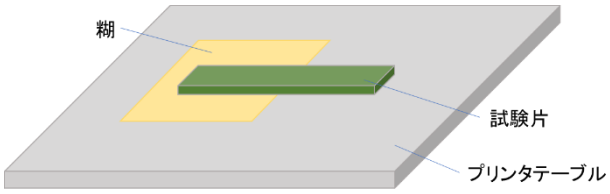

図 2. 試験片下面/プリンタテーブル間の接着強さの操作

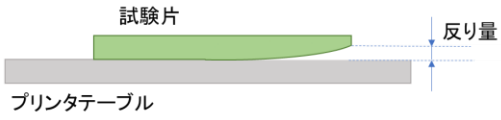

図 3. 試験片反り量

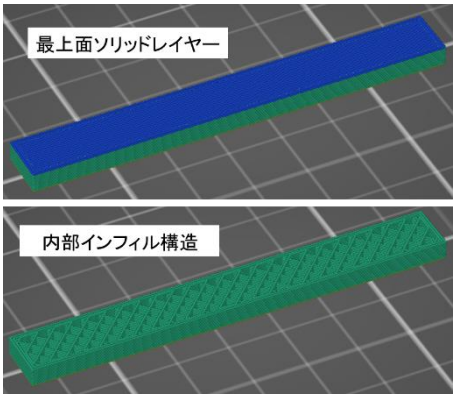

図 4. 反り量評価のための試験片

2－4. エネルギー消費量と造形時間

表 1 の各試験片の造形に際してシステムの消費電力量を造形に必要なエネルギーとして評価した。また各試験片の造形時間も併せて評価した。各試験片のエネルギー消費量と造形時間の関係を図 5 に示す。

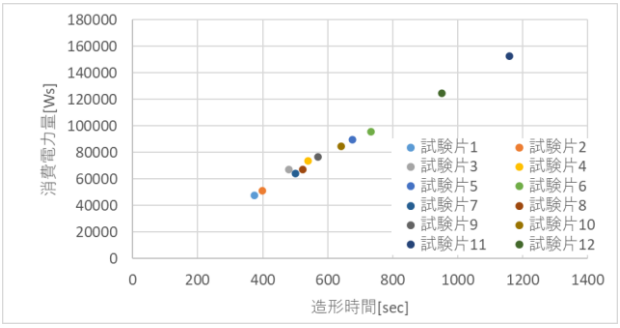

図 5. 造形に必要なエネルギーと造形時間の関係

3. 数値解析

3-1. 曲げ弾性率に関する解析

試験片の曲げ弾性率予測のため、有限要素法(FEM)を用いた構造解析を行った。解析には、汎用ソフトウェアである Ansys 19.0 と Multiscale.Sim 19.0 を適用した。解析フローは以下の通りである(図 6)。

① 単位インフィル構造(ミクロモデル)の作成
② 均質化解析によるインフィル構造の等価物性値の算出
③ 試験片構造(マクロモデル)の作成
④ マクロ構造解析による 3 点曲げシミュレーションによる曲げ弾性率算出

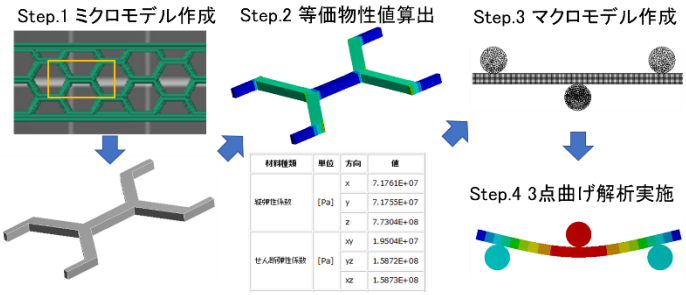

図 6. 曲げ弾性率算出の解析フロー

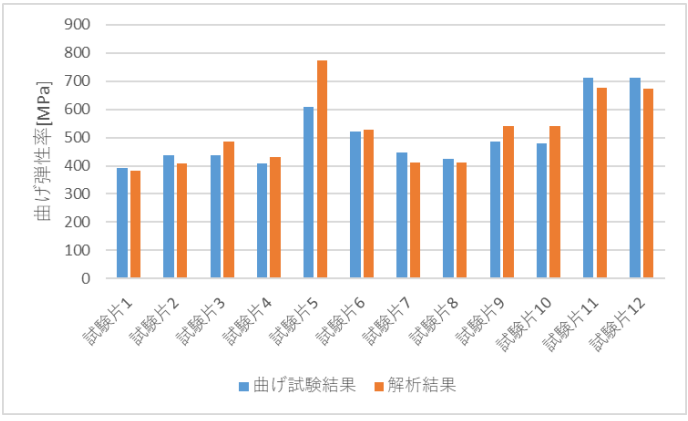

図 7. 3 点曲げ試験結果と解析値の比較

上記フローで算出した曲げ弾性率と 3 点曲げ試験結果を比較すると、両者は良く一致している(図 7)。

3-2. 造形時の反り量に関する解析

汎用ソフトウェア 3D TIMON-AMSolution を用いて試験片の造形時の反り量予測を行った。本解析は手法の確からしさの確認のために試験片 3, 4, 5 の解析モデルを用いて行われた。2-3.の実験結果との比較のため、造形中の試験片モデル下面の半分に拘束を加え、残りの半分をフリーとした(図 8)。実験では、試験片下面の半分は糊で強力に固定され、残りの半分は弱く固定されているため計算条件が異なるが、ここではインフィル構造における実験と解析の反り量が定性的に一致していることを確認した(図 9)。従って、本解析手法を用いた異なるインフィル構造における反り量の定性的な比較は可能であると判断した。

図 8. 造形時の反り解析

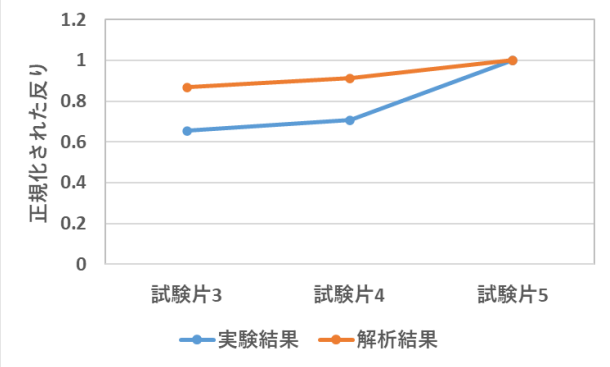

図 9. 造形時反り量の実験値と解析値の定性比較

3-3. 造形後の反り量予測に関する解析

3-2.と同様に汎用ソフトウェア 3D TIMON-AMSolution を用いて試験片の造形後の反り量予測を行った(図 10)。3-2.の解析とは異なり、造形中の試験片モデル下面は全面が拘束されており、造形終了後にその拘束が解かれた後、反り量の予測が行われる。これは通常の積層造形プロセスを想定しており、この時に予測される反り量が各インフィル構造の設計評価パラメータとなる。

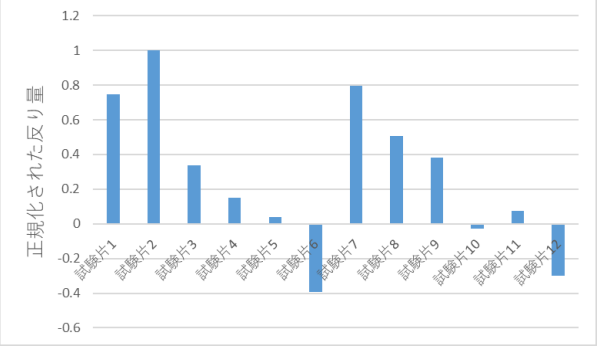

図 10. 造形後反り量予測

3-4. エネルギー消費量の予測

各試験片の造形に要するエネルギー消費量をプリンタシステムが予測する造形物体積を用いて簡易に予測可能か評価を行った(図 11)。

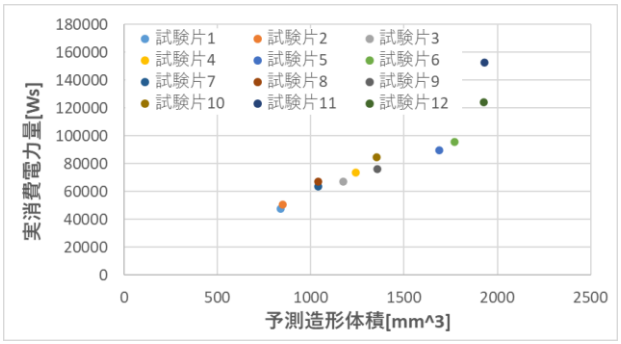

図 11. 造形に必要なエネルギーと造形体積の関係

4. 結論

図 7 の結果から、曲げ弾性率の実測値と解析値はよく一致している。従って、数値解析から異なるインフィル構造を持つ積層構造体の剛性を予測することができることが確認された。

図 9 の結果から、数値解析による定性的な反り量の予測が可能であることが確認された。また、図 10 の結果から、インフィル密度が高くなることで構造体の反り量が低減されるが、より密度が高くなると反対の方向に反りが発生することが確認された。

図 11 の結果から、プリンタシステムが予測する造形物体積の情報を用いて簡易的に造形に必要なエネルギーを予測できることが確認された。

これらの結果から、図 12 のように剛性・反り量・エネルギー消費の指標を用いた各試験片の性能評価が可能である。ここで、バブルの大きさは弾性率の大きさを示す。

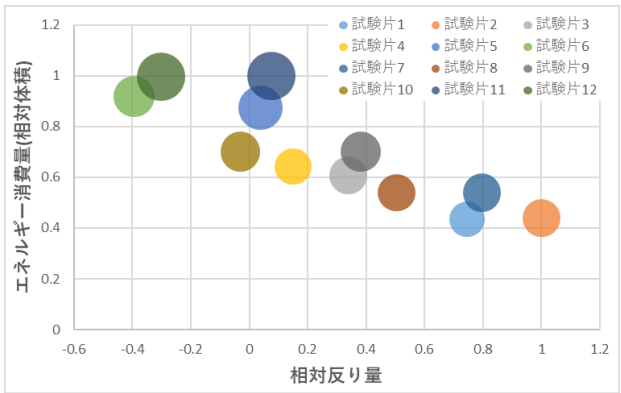

図 12. 剛性・反り量・エネルギー消費の指標を用いた各試験片の性能評価

参考文献

1. A. Papacharalampopoulos, H. Bikas, P. Stavropoulos, “Path planning for the infill of 3D printed parts utilizing Hilbert curves”, Procedia Manuf. 21, 757-764 (2018)