

A13 3D プリンタによる応力対応型トラス構造

高野敦 (神奈川大学), ○堀内翔太 (神奈川大学・学), 佐藤浩彰 (神奈川大学・学)

Atsushi Takano, Shouta Horiuchi, Hiroaki Sato (Kanagawa University)

1. 目的および背景

近年, 複雑な構造物でも製作可能な 3D プリンタが普及しつつある. これにより, 従来は時間・製造性・コストの制約により実現困難であった複雑な構造物も成形することが可能となった. また 2014 年 11 月 NASA が国際宇宙ステーションでの 3D プリンタの運用実験を開始した事を受けて今後宇宙空間での 3D プリンタの有用性が期待されるようになった. 近い将来 3D プリンタを用いて太陽光パネルのフレームや宇宙ステーションの構造物を展開・組立等を必要とせず直接, 宇宙空間に造形する事も可能になるのではないかと考えられる. そこで, 本研究では構造を内力 (応力) に対応させることで軽量化するアルゴリズムの構築を試みた.

2. 3D プリンタについて

2.1 3D プリンタの性能

研究を始めるにあたって, まず神奈川大学で保有する 3D プリンタ(uPrint SE)⁽¹⁾の性能を確認した. 成形材料は ABS-Plus という ABS 樹脂の一種を使用する. ABS 樹脂は射出ヘッドで加熱され, 積層のための基板 (モデリングベース) 上にひも状に射出される. それぞれのスペックを表 1 および表 2 に示す.

表 1 uPrint SE のスペック

uPrint SE (3D プリンタ)	
ワークサイズ (mm)	203 (W) ×152 (D)×152 (H)
使用可能材料	ABS - Plus
加熱成形方式	熱溶解積層方式
成形サポート方式	ソリユブルサポート方式
機械寸法 (mm)	660 (W)×670 (D)×800 (H)
成形用ヘッド	ツインチップ方式
最小積層ピッチ (mm)	0.254 (鉛直方向)
射出幅(mm)	0.508 (水平方向)

表 2 使用した樹脂

ABS-Plus	
引張り強さ	37 MPa
引張り弾性率	2320 MPa
引張り伸び	3%
曲げ強さ	53MPa

2.2 単純トラスの試作・試験

素材の強度・剛性は表 2 にある通りだが, 3D プリンタによる加熱成形および積層により変化している可能性がある. 素材スペックと実際に成形した物の強度・剛性を比較するために, 単純トラスの試作を行った. 特に, 素材を積層しながら成形する方法は素材の種類 (金属, 樹脂), 加熱成形の方式 (熱溶解, 電子ビーム, レーザー) 問わず共通なので, ここで得られた知見は金属用 3D プリンタを適用する場合にも役立つと考えられる.

図 1 は実際に成形した二次元的な単純トラス構造をもつ単純両端支持梁の図である. 大きさは 10mm×10mm×200mm で, 全部で 10 個の均等なベイを持つ.

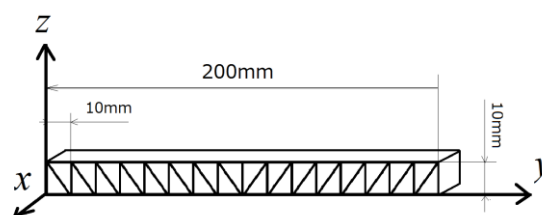


図 1 単純トラス

2.3 成形の精度

サンプルを制作していると uPrint SE で成形できる限界がある事がわかった. カタログスペックより最小積層ピッチはモデリングベースに対し鉛直方向 (積層方向) で 0.254mm, その水平方向で 0.508mm であるが, 輪郭を形成してから内部を埋めるという仕様上, 単純な棒状の形状でも往復してパスを描く使用になっている為実質的な射出幅は 1.016mm である, この事は同じ設計データであっても積層する方向によって, 形状が変わってしまう事を意味する. 寸法の設定には注意が必要である.

これらの点に注意しつつ積層後の材料特性を見るため, 厚さの違う 3 種類のトラス構造を持つ両端支持トラスを作成し, 3 点曲げによる破壊試験を行った.

2.4 3点曲げ試験

uPrint SE で成形したトラスに3点曲げ試験を行い、たわみと破壊荷重を測定した。また合わせて解析により破壊時の軸力および応力を求めた。実験の結果は表3と表4である。

表3 単純トラス試験ひずみサマリ

	たわみ[mm]		
	破壊荷重 [N]	解析 [N]	実験値 ※1
5ピッチ縦 (厚さ1.27mm)	67.7	4.43	5.05 114%
5ピッチ横 (厚さ1.27mm)	32.4	2.87	3.9 136%
2ピッチ縦 (厚さ0.508mm)	17.7	3.09	2.99 97%
4ピッチ横 (厚さ1.016mm)	49	4.15	4.93 119%

※1.破壊荷重の8割までの荷重一たわみ曲線に近似直線を引き、破壊荷重時のたわみを算出したもの

表4 単純トラス試験応力サマリ

	応力[MPa]		備考
	カタログ値	部材最大応力 (引張り)	
5ピッチ縦 (厚さ1.27mm)	37	21.2 57%	
5ピッチ横 (厚さ1.27mm)	37	10.2 27%	隙間 あり
2ピッチ縦 (厚さ0.508mm)	37	13.9 38%	
4ピッチ横 (厚さ1.016mm)	37	19.3 52%	

表3のサンプル名に“縦”とあるのは図1の z 方向がモデリングベース面の法線方向となるよう成形したものであり、“横”とあるのは図1の yz 平面がモデリングベース面と平行になる向きで成形したものである。破壊時の応力にばらつきが出てしまったが、当面の応力対応型のアルゴリズムにおいては最低値10.2[MPa]を採用する。“5ピッチ横”と“2ピッチ縦”の値がカタログ値を大幅に下回った原因にはいくつか考えられるが、“2ピッチ縦”に関しては、この条件下において、トラスのななめ部材は階段状に積層する事で表現されるが、実物を観察すると積層がうまく重ならず、ずれている部分があり。このずれにより層間の接着面積が十分に確保されず部材としての機能が低下したと考え、ズレの原因はuPrintSEのななめの表現の分解能の限界値を下回る造形命令となり、正確な造形がなされ

なかった為と思われる。また“5ピッチ横”に関して強度が低下している要因としては、uPrint SEでは最小積層値で表現できない寸法はその間に空間を入れる事でその寸法を表現するアルゴリズムとなっており、実際に成形した物を観察すると層と層との間が部分的に剥離している状態で、これが部材として正しく機能しなかったと推測される。このように、成形する部材の寸法が最小積層ピッチに近い場合は、成形上の制約が強度に大きな影響を与えるので注意が必要である。

3. トラスの最適化

3.1 応力対応型のトラスのアルゴリズム

以上の準備をもとに、トラスの最適化のアルゴリズムを検討した。最適化の出発点としての構造は図1に示した単純なトラス構造とし、最適化の対象は、強度に対する重量とした。最適化のアルゴリズムとしてはフラクタル⁽¹⁾⁽²⁾を用いた方法や、遺伝的アルゴリズムを用いた方法などがあるが、3次元プリンタの特性から、設計対象として扱えるパラメータが多い（部材厚さ、スパン、配置など）ため、ここではそのような探索的な手法を利用せず、トラスが力学的に明快な構造であることを利用して、各部材について逐次、力学的な検討を適用する以下に示すアルゴリズムを試みた。

- (1)梁理論を用いてトラスの水平部材の軸力を求め、スパン中央部についてはオイラー座屈と材料強度による破壊が同時に起こるようにし、それ以外では軸力とオイラー座屈荷重が等しくなるように水平方向のベイ間隔を決める。
- (2)水平のベイ間隔と同じ寸法を、垂直の間隔として用いる。
- (3)骨組み解析を用いて部材にかかる軸力を評価し、余裕がある部分を細くし軽量化を図る。

(1)は水平部材の軸力がオイラー座屈と等しくなるよう、スパンを変化させることがその部材に対して最も効率よくなるであろうという発想に基づく。(2)については垂直方向の部材間隔の明快な決定法が見当たらなかったため暫定的に設定した。ただし、(3)において余裕のある部材の厚さを細くするため、一定の軽量化は見込めるとの判断により採用した。その観点で(2)の手順は今後見直す余地がある。

3.2 応力対応型のトラスの設計

まず上記手順で作成したトラスの比較対象として、同じ高さ、長さ、強度を持ち、ベイ間隔および部材太

さが一定のトラスを採用し、これをオリジナルとする。次に手順 3.1 を通して、応力に余裕のある部材を細くし軽量化を図り、これを応力対応型トラスとする。なお手順 3.1(1)における部材厚さの決定には任意性があるが、3D プリンタの最小積層値の 0.254mm を採用するとベイ間隔が狭くなりすぎ、今回利用した解析ソフトの節点数制限を超えてしまうため、今回は 0.762mm を採用した。表 5 はそれぞれの比較である。また図 2 はオリジナルと応力対応型トラスの外形図である。それぞれ 3 点曲げで 191.6[N]に耐えられるように設計し重量を比較した。表 5 より応力対応型トラスはオリジナルに比べ 15.1%の重量を軽減する事に成功した。しかしたわみについてはオリジナルの方が小さかった。これは 3.1 項でのアルゴリズムが強度のみに着目しているため当然の結果ではあるが、今後は強度と同時に剛性も最適化することが課題となる。図 3 にそれぞれのトラスを実際に成形したものを示す。

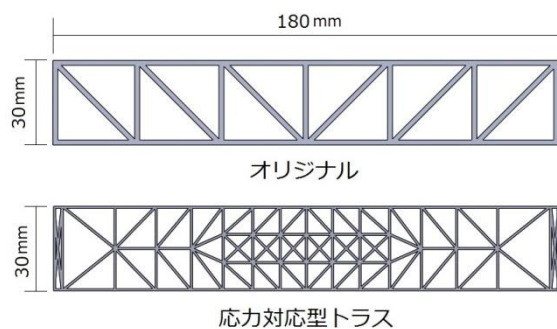


図 2 各トラスの外形図

表 5 応力対応トラスの比較

サンプル名	部材厚さ [mm]	質量 [g]	たわみ [mm]
オリジナル	1.78mm	48.48	0.708
応力対応型トラス	応力に対し最適化	41.13 (-15.1%)	1.074

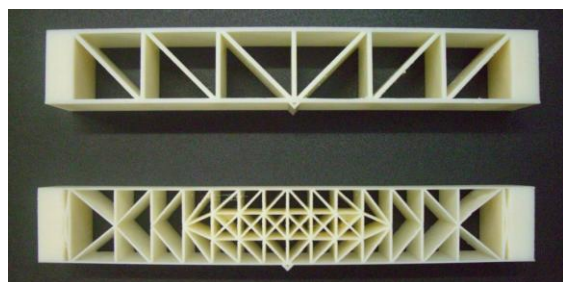


図 3 成形されたトラス

4. 試験結果

4.1 破壊試験結果

表 6 破壊試験結果

		オリジナル	応力対応型トラス
部材厚さ [mm]	設計値	1.778	0.752
	実測値	1.73 (97.3%)	0.75 (99.7%)
破壊荷重 [N]	設計値	191.6	191.6
	実験値	190.2 (99.6%)	171.6 (89.8%)
断面積 [mm ³]	設計値	53.34	22.56
	実測値	51.9 (97.3%)	22.5 (99.7%)

表 6 は実際に uPrint SE で造形したトラスに三転曲げでの破壊試験の結果および、実験値と設計値の比率である。応力対応型トラスの破壊荷重の項目において、実験値と設計値の比率が 89.8%と少し落ち込んでいる。これはオイラー座屈と材料破壊が同時に起こるようにしたため部材の塑性変形による座屈応力の低下が原因であると考えられる、この点を除けばおおむね設計通りの強度であると考ええる。

4.2 造形したトラスの質量的評価

表 7 質量比較

	オリジナル	応力対応型トラス	
設計質量 [g]	48.48	41.13	53.23 (部材厚さの実測を反映)
実測質量 [g]	48.50	55.10	
実測/設計	100%	134%	104%

表 7 は実際に造形したトラスの質量を測定したものである。設計質量のみに着目すると応力対応型トラスは軽量化に成功している。しかし実測の質量は全体的に重い結果になった。特に応力対応型トラスはオリジナルの設計質量を上回った。原因として部材が設計より厚くなっていると推測した。そこで、実際に全部材の厚さを測定し、その実測値を元に質量を再計算した値が表 7 右側部の“部材厚さの実測を反映”である。実測質量との比は 104%で、このことから質量増加は部材が意図した厚さとして造形されなかった事が原因といえる。厚さが設計より大きくなる原因は特に縦部材の厚さが射出幅の 1.016mm を下回る設計値になっている場合が多く、実際に造形された縦部材厚さ 1.016mm と設計値の差ができたためと考える、この問題は 3D プ

リントの精度の問題であり。射出幅が小さいプリンタを利用する事で解決され则认为。

5. 考察

本研究において、アルゴリズムを使用した応力対応型トラスは、設計上では軽量化に成功したが、実際に造形したトラスの質量は部材の厚さが意図した寸法とは違った為、それより重くなってしまった。設計寸法と実寸法にズレがあるのは、3D プリンタの精度の問題であり。今後は使用する 3D プリンタや材料の選定等も課題になる。

今後はトポロジー最適化や遺伝アルゴリズム等を用いる事でより最適化を進められる可能性がある。その際に本研究で得た知見が、今後他のアルゴリズムを構築する際や結果の妥当性評価にも有用であるとする。

参考文献

- 1) uPrint SE スペック，丸紅情報システムズ株式会社，ホームページより
http://www.marubeni-sys.com/de/3d_modeling/lineup/uprint_se_plus.html
- 2) 朝山秀一，フラクタル幾何学的形状をしたトラス構造物の自動形状生成，計算工学講演会論文集， pp.671-674, 1998.
- 3) Daniel Rayneau-Kirkhope, Yong Mao, and Robert Farr, Ultralight Fractal Structures from Hollow Tubes, Phys. Rev. Lett. Vol. 109, No. 204301, November 2012.