

通信用光ファイバーを用いた石英ガラスのデジタルファブリケーションにおけるブリッジ性の評価

西本寛[†] 内田直樹[†] 川原圭博[†]

東京大学大学院情報理工学系研究科電子情報学専攻[†]

1 はじめに

熱溶解積層方式の3Dプリンタは複雑な形状の造形物を容易に作成できる利便性から急速に普及している。しかし、熱溶解積層方式の3Dプリンタで一般に用いられる樹脂素材の欠点として耐久性や強度が劣ることが知られている。本研究では樹脂素材に代わる化学的・機械的耐久性の高い素材として、石英ガラスを用いた立体構造物を造形するデジタルファブリケーションを目指す。

ガラス材料を用いたデジタルファブリケーションの実現を目指す関連研究は数多くある。J. Kleinらはソーダライムガラスを炉で溶融し、溶融ガラスを押し出して積層する熱溶解積層方式のガラス3Dプリンタを提案した[1]。また、J. Luoらは1mmのソーダライムガラスの棒材をフィラメントとして使い、レーザー照射によりガラスを溶融し積層する方式を提案した[2]。F. Kotzらは石英ガラスのナノコンボジットを溶媒に溶かして3Dプリントした後、炉で焼成する方式を提案した[3]。

本稿では、入手が容易な通信用光ファイバーを材料として使い、溶融した石英ガラスをDCファンで冷却することで、ガラス造形物において既存手法では困難であったブリッジ構造の形成を実現した。

2 手法

本研究では通信用光ファイバーを炭酸レーザーにより溶融することで石英ガラスの立体構造物の造形する方式を用いる[4]。

石英ガラスを材料としてブリッジを形成するため、溶融したガラスを造形中に冷却する仕組みを考案し実装した。冷却は50mmのDCファンにより発生した風を上方斜め45度から当てることで実現した。使用したDCファンは厚さ15mm、最大風量12.9CFM、回転数4900rpmのものを用いた。加熱した溶融ガラスを空冷することでガラスの形状が固まり、隙間の上での造形が可能となる。なお、DCファンは溶融ガラスの冷却と同時に一次被覆除去の消炎の機能も兼ねている。また、DCファンの向きはレーザーの軸を中心に回転することができ、風向きの調整ができる(図1)。

本稿ではフィラメントとして古河電工のシングルモード光ファイバーを用いた。シングルモード光ファイバーは石英ガラスのコア・クラッドとアクリル樹脂の一次被覆から構成される。本稿で用いた古河電工のシングルモ

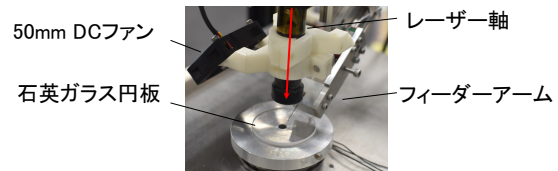


図1: レーザー軸とDCファンの位置関係

ード光ファイバーはクラッド径が125 μm 、一次被覆径が250 μm である。一次被覆の除去と石英ガラスの溶融を同時に実現するため、ハーフミラーとフルミラーを組み合わせたレーザー光のスプリッターを用いている。スプリッターにより、レーザー出力のうち、1/4は一次被覆除去に使用、1/4は石英ガラスの溶融に使用、残る1/2をアッテネータで終端している。また、3Dプリンタのベッドには、厚さ2mm、直径50mmの石英円板を使用した。石英ガラスは熱膨張率が低く温度差による亀裂が生じにくいいため、石英円板上に直接造形でき、ヒートベッドが不要となる利点がある。

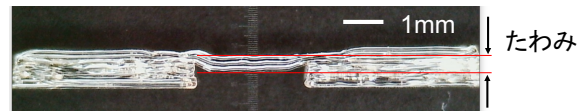


図2: 石英ガラスで造形したブリッジ構造

3 評価

樹脂を材料とする3Dプリンタの多くでは、造形面の下側に隙間があいている場合でも隙間が小さければ造形が可能であり、ブリッジ構造を形成できる。詳細に見ると、下に支えのない造形部分では溶融した材料が固まるまでに垂れてしまい、最終的にたわみとして残る。

本稿では、ブリッジ性の良否をブリッジ部分のたわみ量と定義し、ブリッジ構造の中で最も下がった部分のたわみ量を計測することで評価を行った。DCファンを追加したことでブリッジの造形が可能となったが、よりたわみ量の少ない造形を実現するため、ブリッジ性に寄与する要因の洗い出しを行った。具体的には、DCファン回転数、造形速度、レーザー出力をパラメータとして変化させ、ブリッジのたわみ量を計測した(表1)。評価用に作成したブリッジは、長さ4.5mm、幅0.125mm、高さ1mmの2本の脚の間に3mmの隙間を作り、その上に幅0.125mm、長さ12mmの層を3層積層して作成した(図2)。積層厚みは0.092mmである。

分散分析により、3つの要因の中でどのパラメータがブリッジのたわみ量に影響を与えている主要因であるか、またパラメータ間の交互作用についても分析した。交互作用も分析するため、測定は1の各要因と設定値の組み合わせ27通りをそれぞれ2回、合計54回行った。

Bridging performance evaluation of digital fabrication of fused silica glass using optical fiber

Hiroshi Nishimoto[†], Naoki Uchida[†] and Yoshihiro Kawahara[†]

[†] Kawahara Laboratory, Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

表1: 各種パラメータとその設定値

要因	設定値	単位
DC ファン回転数	5100, 4500, 3800	rpm
レーザー出力	27, 29, 31	Watt
造形速度	100, 125, 150	mm/min

統計分析フリーソフト R を用いて有意水準を 5% と設定し, ANOVA により分析を行った. 繰り返しのある三元配置の分散分析の結果, 3つの要因間における交互作用はなく, 造形速度が主要因であった. 表1の条件の中では, 造形速度は低速の時にたわみ量が少なく, また, DC ファン回転数が低い時にたわみ量が少ない結果が得られた. レーザー出力については, 設定値によるたわみ量の差は小さいものの, $29W > 30W > 27W$ の順に良好な結果が得られた.

4 考察

今回行った評価したパラメータの設定値の範囲において, ブリッジのたわみの主要因は造形速度であり, 造形速度が低速であるほどたわみの少ない結果が得られた. レーザー出力は一定であることから, 造形速度が低速であるほどガラスの溶融部位に与えるエネルギーは増加する.

この結果は, 溶融部位にエネルギーを多く与え, ガラスの粘性を高めれば, 溶融ガラスが垂れてたわみが生じるという予想に反するものである. このような結果となった原因として, 溶融ガラスの表面張力による変形が考えられる. 表面張力が働くと, 表面積が最も小さい安定な状態に変形する. 溶融ガラス界面の表面張力は水の 5~6 倍程度あり, 表面張力が強いことで知られている. また表面張力は直径が小さいほど強くなるが, 本研究で用いたガラス素材は直径が $125\mu\text{m}$ であり, 1mm 径のガラスを用いた先行文献 [2] に比べ 1 桁小さい. 文献 [2] の熱モデルでは, 照射したレーザー光とヒーターにより発生した熱は, 基材, フィラメント, 放射, 対流の 4つの要素によって放出される. 本稿でのモデルを図3に示す.

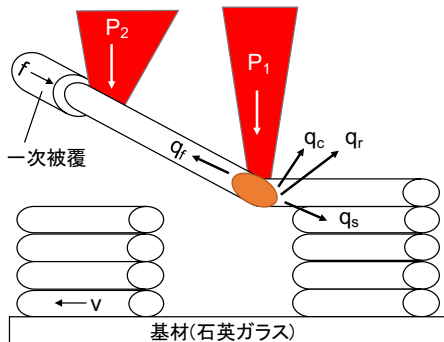


図3: 熱モデル

ブリッジ構造の造形時には隙間の上を造形するため, 基材に放出される熱量が小さく, 放射や空冷による溶融ガラスの冷却が支配的になる. したがって, DC ファンの回転数の減少は溶融ガラスの冷却を助け, 溶融ガラスの表面張力による変形が起こりやすくなる.

また, ガラスが溶融している部位では, 基材に平行な

面から約 30 度の角度でガラスが曲がっている. この溶融部位が基材や造形済みのガラス上にある場合には溶融部位が基材と接触しているため, 角度を維持したまま造形が継続できる. しかし, ブリッジ形状の造形中は溶融部位が基材から離れる. この際, 円柱が折れ曲がっている状態よりも表面積が小さく安定的な曲がっていない円柱状, さらに球形に変形しようとする力が発生し, 重力に打ち勝って溶融ガラスが斜め上方に引っ張られる状態が発生すると考えられる.

したがって, 石英ガラス素材を用いてブリッジ構造を実現するために必要な条件として, 溶融ガラスの表面張力による変形を考慮し, 溶融・冷却を適切に制御することが重要であると考えられる.

3章で得られた, 最もたわみの少ない条件のパラメータを用いて, 作成した造形物が図4である.

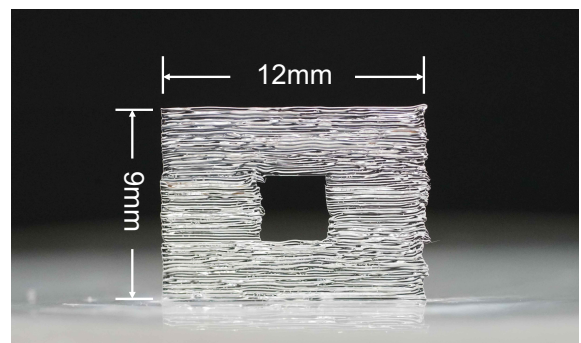


図4: 石英ガラスで造形したブリッジ構造をもつ造形物

5 おわりに

本稿では, 通信用光ファイバーを用いた石英ガラスのデジタルファブリケーションにおいて, 溶融した石英ガラスを空中で空冷することにより, ブリッジを造形する手法を提案し, ブリッジ性の評価を行った. DC ファン回転数, レーザー出力, 造形速度をパラメータとして評価を行い, 各パラメータがブリッジ性に与える影響を分析した.

今後の課題として, プリント時間の短縮, より複雑な形状の造形, 造形の安定化などの課題に取り組んでいる.

謝辞

本研究は JST ERATO 川原万有情報網プロジェクト (JPMJER1501) の一環として実施されました.

参考文献

- [1] J. Klein et al., "Additive Manufacturing of Optically Transparent Glass," 3D Print. Addit. Manuf., vol. 2, no. 3, pp. 92-105, 2015.
- [2] J. Luo et al., "Additive Manufacturing of Transparent Soda-Lime Glass Using a Filament-Fed Process," J. Manuf. Sci. Eng., vol. 139, no. 6, p. 61006, 2017.
- [3] F. Kotz et al., "Three-dimensional printing of transparent fused silica glass," Nature, vol. 544, no. 7650, pp. 337-339, 2017.
- [4] 内田直樹 et al., "通信用光ファイバーを用いた石英ガラスのデジタルファブリケーション", 情報処理学会全国大会 2017, 4S-06