

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

内田 直樹[†] 川原 圭博[†] 浅見 徹[†]
 東京大学 大学院情報理工系研究科[†]

1 はじめに

現在 3D プリンターに用いられる材料は多岐にわたっているが、その多くは耐久性に劣ることが問題となっている。一方石英ガラスは高純度の二酸化ケイ素 (SiO_2) からなる無色透明なガラスであり、非常に高い化学/機械的耐久性および透明度をもつことから科学、産業用途に広く利用されてきたが、その高い安定性から加工には非常に高温での作業が必要になるため自由な造形をすることが困難であった。そこで我々は比較的安価で安定に入手できる通信用光ファイバーを材料とし、それらを炭酸レーザーを用いて溶着、積層していくことで石英ガラスの立体構造物を造形するデジタルファブリケーション手法を提案する。本稿では簡素な光学系素子を利用することで光ファイバーの一次被覆と石英コアクラッドを選択的かつ連続的に除去、溶着積層する手法を提案し、それを用いて作成した構造物を評価した。これらの成果は生体アート作品やマイクロ流路デバイスへの応用に繋がるほか、中古光ファイバーの新しいリサイクル方法としても利用できる。

1.1 関連研究

石英ガラスのデジタルファブリケーションの実現を目指した関連研究は数多く存在する。近年では Kotz らが SiO_2 のナノ粒子を UV 重合樹脂の中に高濃度に分散させ、型に流してから硬化させて取り出し、最後に電気炉にて焼成することで高密度、透明な石英ガラスを得ている [1]。また、Luo らは石英ガラス棒を炭酸レーザーにて基板に溶着、積層していくことで石英ガラスの立体構造物を作成している [2]。その他の主な関連手法も含めて各特徴を表 1 に整理した。

1.2 本研究のねらい

石英ガラスは高い審美性(透明性)、生体親和性、自然界における耐久性など際立った特長を持ち合わせているが、現状ではこのような素材のうち 3D プリントが可能なのは知られていない。石英ガラスのデジタルファブリケーションが実現することで、ニーズは存在していたものの今までの手法では実現が困難または高価であったガラスの造形が出来るようになり、石英ガラスの潜在的なユーザーに新たな活動の幅をもたらすことができることを期待している。

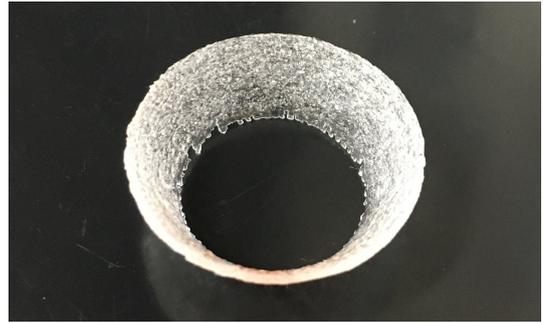


図 1: 本手法にて積層造形した石英ガラス。最大部直径 25mm, 高さ 10mm, 厚み 0.7mm, 積層厚み 0.03mm, 造形にかかった時間は約 4h。

2 提案手法と評価

本稿ではシングルモード光ファイバー (古河電工, クラッド径: $125\mu\text{m}$, ウレタンアクリレート被覆径: $250\mu\text{m}$) のコアクラッドに使用されている石英ガラスを材料として用いて、ZnSe レンズ (焦点距離: 38mm) で集光した炭酸レーザー (波長: $10.6\mu\text{m}$, 定格: 120W) によって光ファイバー同士を溶着、積層していくことによる立体造形を試みた。無垢の石英ファイバーは表面のキズや曲げに対して極めて弱いが、光ファイバーはアクリル樹脂の 1 次被覆によって保護されているため運搬、保管等の取り扱いが全般的に容易であり、また世界中で大量に生産されているため入手性や価格の面でも優れている。また通信用途で使用されるため透明度などの品質が極めて高く材料として最適と考えられる。以下では光ファイバーの各種積層手法について、室温の石英基板上に 1 列の壁状構造物 ($5\text{mm} \times 5\text{mm}$) を造形し評価を行った。

まず、最も単純な積層方法として考えられるのはアクリル被覆とコアクラッドを同時にレーザー焦点に送り、被覆の除去と石英ガラスの溶着積層を同時に行う手法であるが、この手法では造形物内に被覆の燃焼によって生じたと考えられる無数の気泡や未燃焼被覆の残滓がのこり、透明度や機械強度に問題が残った。図 3(a) に造形物の様子を示す。

次に検討したのは、まず一定長の光ファイバーをレーザー焦点に送り被覆だけを燃焼させてから巻き戻し、あらためて露出したコアクラッドを溶着積層していく手法である。これにより、被覆をあらかじめ除去してから積層することが可能になり造形物の透明度、緻密さに改善が見られた。図 3(b) に造形物の様子を示す。図 3(a) に比べ気泡や残滓が大幅に

| 著者 | 材料 | 概要 | 長所 | 短所 |
|-------------------------|------------------|----------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| Kotz <i>et al.</i> [1] | ヒュームドシリカと紫外線硬化樹脂 | キャストイングと紫外線による造形, 光硬化の後に焼成 | 高い透明度と密度/比較的短時間で完成する | 溶液の粘性の問題から光造形プリンターへの転用が難しい/溶液の脱泡が必要 |
| Luo <i>et al.</i> [2] | 石英無垢棒 | 炭酸レーザーにて溶着積層 | 必要な装置が小規模 | 材料が特殊/複雑な構造は積層できない/形状の再現性が低い |
| Ikeda <i>et al.</i> [3] | ヒュームドシリカとPVA | キャストイングと乾燥による造形, 硬化の後に焼成 | 高い透明度と密度 | 自由な造形は困難/乾燥に時間がかかる/溶液の脱泡が必要 |
| Klein <i>et al.</i> [4] | 溶融ソーダライムガラス | 溶融ガラスをノズルから射出して積層 | 高い透明度/大きな造形サイズ | 射出の制御が困難/装置設備が大規模/造形解像度が低い |

表 1: 各種ガラスのデジタルファブリケーションに向けた各関連手法の比較

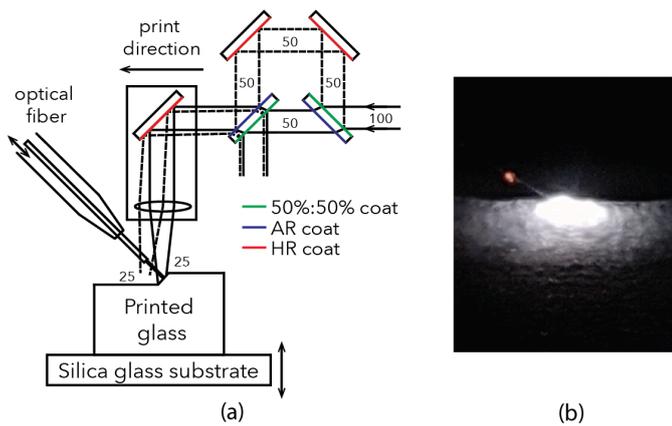


図 2: (a) レーザービームスプリットのための光学系と光ファイバー溶着積層実験の概要, (b) 積層の様子. 明るい加熱点が2つ確認できる.

減り透明度が向上した他, 層間接着が強化されているため機械強度も改善した. ただし, 被覆を除去した光ファイバーは折れやすく機械的に扱いにくいことから一度に積層できるサイズに制約が生じることが問題であった.

最後に上記の問題を解決するために検討されたのが, レーザービームのスプリットによって被覆の燃焼除去とコアクラッドの溶着積層を連続しておこなう手法である. 図 2(a) にその概要を示す. ハーフミラーとフルミラーの組み合わせによりレンズに対し斜めに入射するビームを作ることで, レンズのコマ収差によって本来の焦点より少しずれた位置にもう一つの焦点を作ることができる. また, ビームはエネルギー的に等しく分割されるが, スポットのずれの距離と光ファイバーの供給角度によって焦点からの距離を調整できるため, 被覆の燃焼と溶着積層のために光ファイバーに照射するレーザーのエネルギーを独立して調整することができる. これにより被覆の除去とコアクラッドの積層を連続かつ選択的に行うことが可能になった. 図 3(c) に造形物の様子を示す. 作成したサンプルの厚みは 0.6mm で積層厚みは 0.03mm, プリント速度は 90mm/min でプリント時のレーザー強度は 36W である. 図 3(b) と比較すると, 内部の気泡の量および層間接着は同程度であるが一部の表面に白い粉体が固着してしまい透明度を低下させていることが分かる. これはフッ酸 (HF) によるエッチングによって除去できるこ

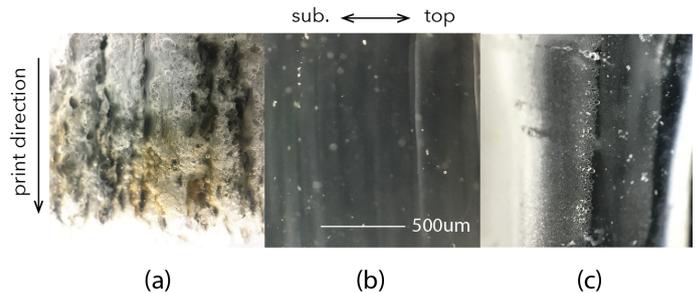


図 3: (a), (b), (c) 各積層手法によるサンプルの拡大像. 縮尺, 積層およびプリント方向は図中および周辺に示すものに全て統一.

とから SiO_2 の微粉末および燃焼した被覆の微粉末の混合物であると推定できる. 図 1 にこの手法を用いて立体積層した後ポストプロセス (10%HF 中で 20 分間の超音波洗浄) を経た造形物の様子を示す. 石英ガラスの持つ高い耐熱衝撃性のため室温下でも加熱部とその他の部位との温度差によるクラックは生じなかった.

3 まとめと今後の課題

本稿では通信用光ファイバーを材料とする石英ガラス造形物の効率的な積層造形手法を提案した. 現在さらに透明度や層間接着を高めるための最適な積層条件探索のほか, プリント時間の短縮, 造形可能な形状種類/サイズの拡大などの課題に取り組んでいる.

謝辞

本稿は, ERATO 川原万有情報網プロジェクトの研究成果を含む.

参考文献

[1] F. Kotz *et al.*, Adv. Mater. **28** 4646-4650 (2016).
 [2] J. Luo *et al.*, Proc. SPIE 9738 (2016).
 [3] H. Ikeda *et al.*, J. Ceram. Soc. Jpn. **119**, 65 (2011).
 [4] J. Klein *et al.*, 3D Printing and Additive Manufacturing **2**, 92 (2015).