



多層インフレータブル構造の造形に向けた 選択的溶着層形成手法の基礎検討

佐久間亮太¹⁾, 堺雄亮²⁾, 川原圭博¹⁾, 平木剛史^{3,4)}

- 1) 東京大学 大学院工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, {sakuma, kawahara}@akg.t.u-tokyo.ac.jp)
- 2) ソニーコンピュータサイエンス研究所 - 京都 (〒 600-8086 京都市下京区本燈籠町 13-1, Yusuke.C.Sakai@sony.com)
- 3) 筑波大学 図書館情報メディア系 (〒 305-8550 茨城県つくば市春日 1-2, hiraki@slis.tsukuba.ac.jp)
- 4) クラスター メタバース研究所 (〒 141-0031 東京都品川区西五反田 8-9-5)

概要: インフレータブル構造とは、内部に空気を注入することで形状を保持する膜構造である。これを多層にした多層インフレータブル構造は、上下非対称な構造や膨張後の形状切り替えなどより高い自由度での形状制御が可能となるため、注目されている。しかし、多層インフレータブル構造の作製においては、従来の溶着手法を用いると、溶着過程で重ねられた全ての層が同時に溶着されてしまうことから、その製作には煩雑な工程を要していた。本稿では、インクと長波長レーザーを用いることで、溶着層を選択的に制御可能な新たな溶着手法を提案する。さらに、インクの塗布位置を調整することで、多層インフレータブル構造において任意の厚みで溶着層を制御できることを実験的に示した。

キーワード: インフレータブル構造、デジタルファブリケーション

1. はじめに

インフレータブル構造とは、内部に空気を注入することで形状を保持する膜構造であり、大規模な構造であってもコンパクトに折りたたむという可搬性の利点に加え、空気圧による応力提示が可能であることから、力覚ディスプレイ [1]、ソフトロボット [2]、建築 [3] など幅広い分野への応用が期待されている。特に、インフレータブル構造を多層に重ねて溶着することにより、単層では実現困難な上下非対称形状 [4] の構築や、単一構造における膨張後形状の切り替え [5] が可能となる。したがって、多層インフレータブル構造は日常的な大型かつ重量物の形状や機能を再現しつつ、可搬性を両立できる技術として期待されている。

しかし、多層インフレータブル構造の製作工程は煩雑であり、安定した製作が困難である。この主要因は溶着時の熱制御の困難さにあり、安定した多層溶着のためには各層を個別に取り出して反復的に溶着する必要がある。例えば、従来の電熱ごてによる圧着溶着手法 [6] では、3 層以上の同時溶着において熱と摩擦によるシート破損が生じ、安定した溶着が困難となる。この問題に対し、摩擦を発生させないレーザーカッターを用いた溶着手法 [7, 8] が提案されているが、多層に重ねた全ての層が同時に溶着されるため、選択的溶着の実現は依然として困難である。

そこで本研究では、着色時のレーザー光エネルギー吸収量の差異を活用し、単一工程で各層に独立したパターンを溶着する多層インフレータブル構造の製造手法を提案する。具体的には、黒色染料の油性インクを塗布することにより

シート層間のインク層による溶着阻害効果を利用する。これによって溶着を阻害したい層にインクを塗布し、長波長レーザーである CO₂ レーザーで加熱することで、溶着層数を制御可能とする。本稿では、レーザー出力とインク塗布による溶着特性の変化を検証し、提案手法により多層インフレータブル構造が作製可能であることを実証した。

2. 提案手法

提案する溶着手法の概要を図 1 に示す。まず、溶着を避けたい層の透明なポリエチレンシートへ、溶着を避けたいレーザーパターンに沿って黒色染料のインクを事前に塗布する。たとえば、すべての層の溶着パターンを独立に制御する場合、その層以外の溶着パターンがすべて重なったパターンの黒色インクが塗布される。その後、インク塗布されたポリエチレンシートを全て重ね、各層が物理的に離れないよう、溶着点周囲を抑え込みながら長波長レーザーである CO₂ レーザーを照射し熱を加える。この時、インクを塗布した層ではフィルム同士でなくインクとフィルムが結着することでフィルム同士は溶着されない。これにより、単一のレーザー照射工程で多層に重なったシートへ異なったパターンを溶着することができる。

図 2 に示すレーザーが照射時の断面の様子のように、ポリフィルム間に存在する黒色染料インク層によって、フィルム同士でなくインクとフィルムが結着し溶着を防ぐことができる。通常の溶着の場合、CO₂ レーザーによってどのポリフィルムに対しても一程度吸光され、熱エネルギーへ

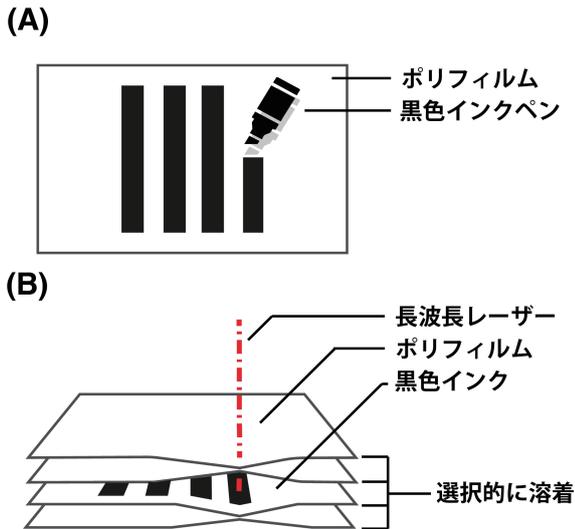


図 1: インク着色と長波長レーザーによる選択的溶着手法。
(a) ペン等を用いて事前に溶着を避けたい地点に黒色インクを塗布する。(b) それらのシートを多層に重ね、CO₂ レーザーを照射すると、黒色インクの塗布された層以外の層が溶着される。

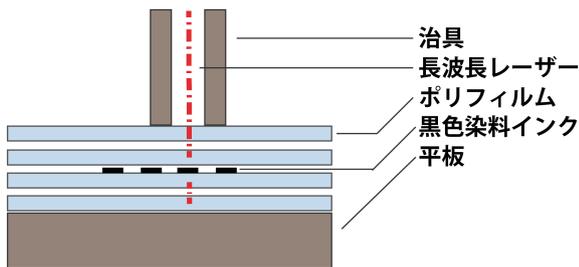


図 2: 溶着時の断面図

と変換される。これによって表面が溶解し、それが再度硬化することでフィルム同士が溶着される。しかし、本手法ではその溶解面をインクによって覆うことにより溶着を防ぐことができる。

3. 実験 1: インク塗布による溶着結果の比較

3.1 実験条件

インク塗布によって溶着がどのように変化するか検証するために、実験を行った。実験環境を図 3 に示す。CO₂ レーザーが搭載されたレーザーカッター (Trotec Speedy 400, Trotec) を長波長レーザー源とし、固定された 4 層のポリエチレンフィルム (岩谷マテリアル) へ向けてレーザーを照射した。また溶着の安定のため、ポリエチレンフィルムの下へアクリル板を敷き、ポリフィルムを押さえつけるための治具をレーザー口へ設置した。この治具は木板とスポンジによって構成され、高さは 21 mm である。

4 層のポリフィルムは、どの層にもインクが塗布しないものと 3 層目の表面に染料の油性黒インクペン (マッキー, ZEBRA) によって着色を施したものの 2 組を用意し、そ

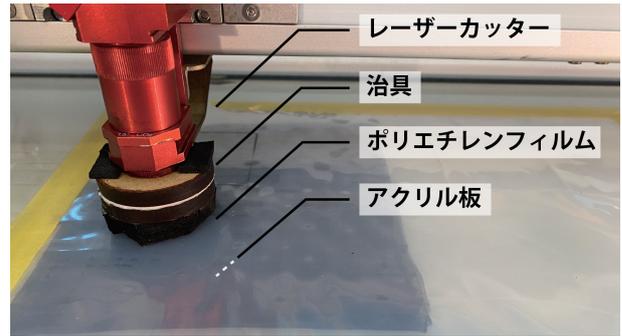


図 3: 溶着装置のセットアップ

表 1: 着色なしの場合のレーザー出力と溶着結果の関係

	1 層目-2 層目	2 層目-3 層目	3 層目-4 層目
8 W	×	×	×
16 W	×	×	×
24 W	○	○	○
32 W	○	○	○

表 2: 3 層目表面に黒色インクを塗布した場合のレーザー出力と溶着結果の関係

	1 層目-2 層目	2 層目-3 層目	3 層目-4 層目
8 W	×	×	×
16 W	○	×	×
24 W	○	×	○
32 W	○	○	○

れぞれ 8 W (10%)、16 W (20%)、24 W (30%)、32 W (40%) の出力にてレーザーを照射した場合の溶着を比較した。このとき、2 条件ともレーザーの波長は 10.6 μm、移動速度 0.86 mm/s、照射頻度は 1000 PPI であった。また、溶着するパターンは全て一辺 50 mm の正方形とし、正方形の線分の太さは 0.5 mm とした。試行回数は 1 回とした。

なお、溶着評価は溶着パターンの全周が途切れることなく溶着した場合を成功 (○) とし、少しでも未溶着な部分が残る場合は失敗 (×) として扱った。

3.2 結果

どの層にもインクを塗布しない場合の結果を表 1、3 層目に黒色インクを塗布した場合の結果を図 4 (a)、および表 2 に示す。インクを塗布しない場合はどの層間も完全に溶着されなかった場合と全ての層が溶着された場合の 2 種類の結果となった。16 W 出力では、1-2 層間が一部のみ溶着されているという不完全な溶着結果となった。

一方でインクを塗布した場合は、レーザーの出力によって、全て溶着されない場合、1-2 層目間のみ溶着された場合、2-3 層目のみ溶着されなかった場合、全ての層が溶着された場合の 4 種類確認された。特に 16 W 出力では、1-2 層間の

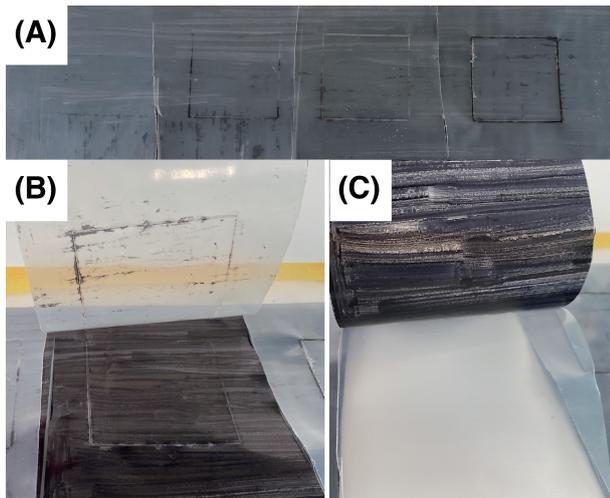


図 4: 黒色マーカーによりインクを塗布した際の溶着結果 : (a) 左から順に、8 W、16 W、24 W、32 W のレーザー出力によって溶着されたもの (b) 24 W 出力のレーザーを照射した際の 2 層目-3 層目、(c) および 3 層目-4 層目間の溶着の様子

表 3: 3 層目表面に青色インクを塗布した場合のレーザー出力と溶着結果の関係

	1 層目-2 層目	2 層目-3 層目	3 層目-4 層目
16 W	×	×	×
24 W	○	×	○

み完全に溶着される結果となった。また 24 W 出力の結果に注目すると、図 4 (b), (c) に示すように 2-3 層目のみ溶着されず 1-2 層および 3-4 層は溶着される結果となった。

4. 実験 2: 塗布するインク色による比較

4.1 実験条件

次に、異なるインク色を塗布した場合の溶着結果を検証するため以下の実験を行った。実験 1 と同様に、レーザーカッターを長波長レーザー源とし固定された 4 層のポリエチレンフィルムへ向けてレーザーを照射した。ポリエチレンフィルムは 4 層とし、3 層目の表面に染料の油性青インクペン (マッキー, ZEBRA) によって着色を施し、実験 1 において変化が見られた 16 W (20%)、24 W (30%) の出力にてレーザーを照射した場合の溶着を比較した。この時、実験 1 と同様にレーザーの波長は 10.6 μm 、移動速度 0.86 mm/s、照射頻度は 1000 PPI とした。また、溶着するパターンは一辺 50 mm の正方形とし、正方形の線分の太さは 0.5 mm とした。試行回数は 1 回とした。

なお、実験 1 と同様に溶着評価は溶着パターンの全周が途切れることなく溶着した場合を成功 (○) とし、少しでも未溶着な部分が残る場合は失敗 (×) として扱った。

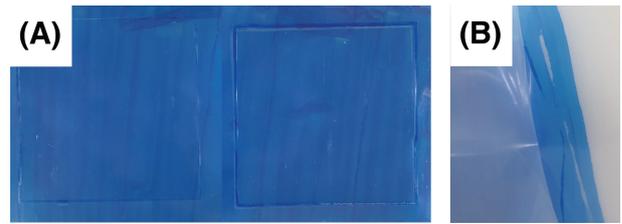


図 5: 青色マーカーによりインクを塗布した際の溶着結果 : (a) 左から順に、16 W、24 W のレーザー出力によって溶着されたもの (b) 16 W 出力のレーザーを照射した際の 1 層目-2 層目間の様子

4.2 結果

結果を表 3 および図 5 (a) に示す。16 W 出力で溶着を行った場合、図 5 (b) に示すように、インクを塗布した場合でも着色時と同様に、第 1 層から第 2 層のみが部分的に溶着され、それ以外の層は溶着されなかった。また、いずれの層においても完全な溶着は確認されなかった。一方、24 W 出力の場合には、黒色インクの結果と同様に、インクを塗布した第 2 層から第 3 層のみが溶着されず、それ以外の層は溶着された。

5. 考察

5.1 インクの塗布と溶着の阻害

実験結果より、インクの塗布によりフィルム層間の溶着が阻害されることがわかった。これはフィルム層の間にインク層が形成され、インク層とフィルム層が結着することが要因だと考えられる。図 4 (b) に示す黒色インク塗布の結果に注目すると、溶着箇所に沿ってインクが手前側のフィルム層に結着していることが観察できる。

5.2 インクの塗布とレーザー出力

黒色インクの塗布により、副次的な効果として通常よりも弱いレーザー出力でフィルムが溶着することを明らかにした。これは黒色インクによって長波長の光の吸光率が上昇しているためと考えられる。実際に、染料に用いられるニグロシンの 10 μm 付近の吸光率は 0.6 程度あり [9]、今回利用した 10.6 μm の波長を吸収する可能性がある。しかし、染料の構成要素が公開されていないため材料の特定と吸光率の調査が必要である。

6. おわりに

本研究では、多層インフレータブル構造の造形に向けて、インク着色と長波長レーザーを組み合わせた選択的溶着手法を提案した。実験により、黒色インクを表面に塗布することで、その層がレーザーによって溶着されにくくなる一方、弱い出力でも溶着可能になることが確認された。このことから、提案手法により溶着したい層を容易に選択できることが示された。今後は、材料の吸光特性を調査することで、本手法の作用原理の解明を進める予定である。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 JP25K00145, JP25KJ1061 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Gabriele Frediani and Federico Carpi. Tactile display of softness on fingertip. *Sci. Rep.*, Vol. 10, No. 1, pp. 1–10, November 2020.
- [2] Ryuma Niiyama, Xu Sun, Cynthia Sung, Byoungkwon An, Daniela Rus, and Sangbae Kim. Pouch motors: Printable soft actuators integrated with computational design. *Soft Robotics*, Vol. 2, No. 2, pp. 59–70, June 2015.
- [3] Emmanuel Siéfert, Etienne Reyssat, José Bico, and Benoît Roman. Programming stiff inflatable shells from planar patterned fabrics. *Soft Matter*, Vol. 16, No. 34, pp. 7898–7903, September 2020.
- [4] Ryota Sakuma, Yusuke Sakai, Yoshihiro Kawahara, and Takefumi Hiraki. Demonstration of multi-layered inflatables: Asymmetric-shaped inflatable structures by stacked planar sheets. In *SIGGRAPH 2025 Emerging Technologies*, Siggraph '25, pp. 1–2, 2025.
- [5] Qiuyu Lu, Jifei Ou, Lining Yao, and Hiroshi Ishii. MilleCrepe: Extending capabilities of fluid-driven interfaces with multilayer structures and diverse actuation media. In *Extended Abstracts of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–10, 2024.
- [6] Jifei Ou, Mélina Skouras, Nikolaos Vlavianos, Felix Heibeck, Chin-Yi Cheng, Jannik Peters, and Hiroshi Ishii. AeroMorph - heat-sealing inflatable shape-change materials for interaction design. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 121–132, October 2016.
- [7] Sora Oka, Kazuki Koyama, Tomoyuki Gondo, Yasushi Ikeda, Yoshihiro Kawahara, and Koya Narumi. Pneumatic laser origami: Rapid and large-scale fabrication of laser-welded pouch motors for shape-changing products. In *Proceedings of the Nineteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, pp. 1–12, March 2025.
- [8] 山本知生, 神村明哉. レーザ加工機を用いたソフトロボットの製作法提案と試作. *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集*, Vol. 2024, pp. 2A2-P01, 2024.
- [9] John Wiley & Sons, Inc. Nigrosin water soluble — atr-ir spectrum (spectrabase id: 3qnqrxspsj9). Accessed 2025-07-03.