

複数材料から構成される空気圧駆動円筒形状膜の成型

○三森友貴（立命館大学） 王忠奎（立命館大学）
松野孝博（立命館大学） 平井慎一（立命館大学）

1. 緒言

エラストマ材料で構成された流体駆動機構は、人や環境との安全な接触などを目的としたロボット機構への応用が図られている。流体駆動機構の膨張後の形状を変える方法として、機構形状を変える方法（外形状や膜の厚み）と機構内の材料分布を変える方法の二つが挙げられる。中でも材料分布を変更する設計手法は、機構の外形状を変えることなく膨張形状を変えられる。また、センサ用の機能性材料を機構内部に組み込む設計と関係している。三次元プリンタを用いて流体駆動機構を成型する方法は、複雑な形状を一体成型できるため、複数の材料で構成された流体駆動機構の製作に利用されている [1]。しかし、三次元プリンタで一体成型された流体駆動機構は型取りで製造された機構に比べて強度が低いことが報告されている [2, 3]。

本稿では、複数材料膜を型取りで製作する手法を提案する。特に空気圧人工筋を活用した配管検査ロボット [4] に見られる、円筒側面の膜が膨張するアクチュエータに焦点を当て、円筒形状膜を製作の対象とする。複数材料で構成された膜を製作する上で、異なる材料を接合する方法を考える必要がある。この解決方法として、型の中で順番にエラストマを硬化させる方法を提案する。また、膜のような薄い構造では気泡が破裂の原因となりうるため、気泡の残りにくい型取り方法を考える必要がある。よって、射出成型に基づいた気泡の残りにくい型取り方法を提案する。

2. 複数材料膜の型取り

2.1 材料の接着方法

エラストマ材料で構成された流体駆動機構を型取りで製造する場合には、エラストマ材料同士の接着が必要になる。エラストマ材料同士の接着には、エラストマ材料を糊として利用する方法 [3] や、接着剤で接着する方法が挙げられる。前者は、硬化済みのエラストマ材料の接着面に未硬化のエラストマ材料を塗布することで、硬化後に接着が実現される。この方法では硬化の工程とは別に接着の工程に時間がかかる。また、エラストマ材料を塗布した箇所の膜の厚みを一定に成型することは難しい。後者は、瞬間接着剤などの膜材料と異なる材料を利用する。一般に接着剤は膜材料と異なる硬さに硬化する。瞬間接着剤の場合は特に、塗布した部分が局所的に硬くなる恐れがある。

本研究では、膜を構成する材料を種類ごとに順番に硬化させることで、硬化と同時に異種材料間の接着を実現する。図 1 は材料の接着方法を表している。一つ目の材料（図 1 中 A 材料）が硬化した後にあふれた材料を除去し平らな接着面を成型する。その後、型を上部に追加して二つ目の材料（図 1 中 B 材料）を流し込

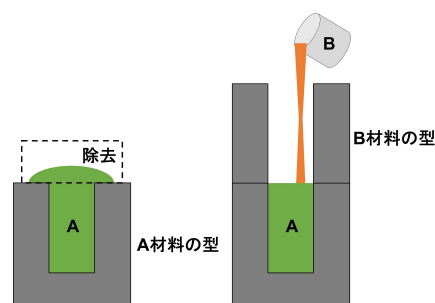


図 1: 材料の接着方法

み硬化させることで、A, B 材料の接着を行う。したがって、二種類目以降の材料の硬化と同時にエラストマどうしの接着を行うことができる。

2.2 エラストマ製機構の型取り

ソフトロボットでよく用いられるエラストマ材料は、二種類の液体を混合することで硬化が開始する。また、三次元プリンタなどで製作した型に硬化前のエラストマ材料を流し込むことで型取りを行う。硬化前の材料は一般に粘度が高く、複雑な型の場合は型内部に充填するまでに時間がかかる。

円筒膜の型に上方から材料を流し込んだ場合、型に気泡が残りやすい。膜の型が狭く深い流路であり、粘度の高い材料を流し込むのに時間がかかるためである。型への材料の充填に時間がかかると、気泡の除去（脱泡）が完了するより前に材料の硬化が始まってしまい、気泡の残った成型物が生成されてしまう。すなわち、材料の硬化開始に伴う粘度の上昇と、材料充填時間および脱泡時間が気泡の残留に関係していると考えられる。

材料を型に注ぐことの可能な時間の長さをポットタイムという。ポットタイムを過ぎると材料の流動性が下がり、機構内部に存在している気泡が抜けにくくなる。材料充填時間は、材料を型に流し込み、内部に充填させるまでの時間である。粘度の高い材料を用いる場合は、狭い流路の壁に粘着しやすく材料の充填に時間がかかる。材料充填の途中でポットタイムを過ぎると、気泡が残ったり、機構に欠けが生じる可能性が高くなる。最後に脱泡時間は、脱泡装置にいて材料内部の気泡を取り除く時間である。脱泡装置内が減圧されることで材料の流動性が上がり気泡を取り除きやすくなる。しかし、脱泡中にポットタイムを過ぎてしまうと、大きな気泡が材料内部に残ったまま硬化してしまう可能性が高くなる。すなわち、製作物に気泡を残さないためには、ポットタイム中に材料充填と脱泡を終わらせる必要がある。流路が狭く型の深い円筒膜の製造では材料充填に時間がかかるため、素早く材料充填を行わなければならない。

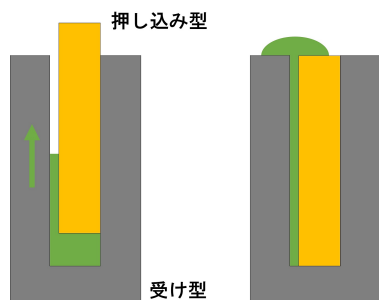


図 2: 狭い流路への材料の充填方法

そこで本研究では、射出成型を参考にして、圧力をかけて型に材料を速く充填する方法を用いた。図 2 は圧力をかけて狭い流路の型に材料を充填する方法を表している。最初に図中灰色部分（受け型）に材料を流し込む。その後、図中黄色部分（押し込み型）を押し込むことで、押し込み型と受け型の間の狭い流路に圧力をかけて材料を流し込む。本稿ではこの型取り方法を押し込み成型と呼称する。

3. 円筒形状膜

円筒形状膜を成型するために、材料の接着のための順次的な材料硬化と気泡の抑制のための速い材料充填を両立する型が必要となる。図 3 は提案する型構造である。型の主要な特徴は以下の二点である。

- (1) 型を材料の種類ごとに分割し、順次的に型を加えながら材料を型取りする。
- (2) 材料を溜めた受け型に対して押し込み型を押し込むことで、細い流路に圧力を加えながら材料を充填する。

型の組み立て手順を、図 3(a) に示す。成型時は図 3(b) のように材料を溜めた受け型に押し込み型を押し込む。押し込み型と内型の間には膜を成型するための隙間が空いており、圧力をかけて材料を隙間に流し込む。この時材料が図 3(c) に示す空気流路に侵入することを防ぐために、流路の入口を水溶性の円筒で蓋をする。水溶性の蓋は水溶性フィラメントを用いて三次元プリンタで成型した。また、図 3(d) の赤い領域が材料の侵入する空間である。膜を型に固定するために、薄型離型フリーシエルグリップ [5] の構造を参考に、膜を内型に固定するための穴（固定穴）を開けている。固定穴内の材料と膜が一体となって硬化することで、接着剤無しで膜を内型に固定できる。

二つ目の特徴である材料の接着は、外型を順次的に組み立てながら押し込み成型を行うことで実現する。図 4 は、複数の材料を順次的に押し込み成型し、複数材料で構成された円筒形状膜を製作する手順である。材料が硬化した後に、あふれた材料を型に沿って切断することで平らな接着面を形成する。その後、型を追加し、押し込み成型を行う。最後の材料の型取りが終わるまで、あふれた材料の除去、型の追加、押し込み成型を繰り返すことで材料同士を接着する。最後に、硬化後の成型物を水に浸けることで、空気流路に挿入した水溶性の蓋を除去する。

4. 製作・駆動結果

二種類の材料からなる複数材料円筒膜を製作した。形状は、膜厚 1mm で内径 48mm、高さ 30mm の円筒形とした。製作した円筒膜を図 5a に示す。機構の左部の半透明な材料は Dragon Skin 20、右部のピンク色の材料は Smooth-Sil 940 である（それぞれ Smooth-On Inc. の材料）。硬化後の膜に残った気泡は少量であった。

図 5b は動作結果である。印加圧力約 10kPa で破裂せずに駆動できた。また、非一様な膨張により、図 5b の機構の向きにおいて左右非対称な膨張形状が得られることを確認した。

5. 考察と展望

膜を破裂せずに駆動できたことから、破裂につながらない程度まで気泡を抑制できたと考えられる。また、比較的薄い 1mm の厚みの膜で複数材料を接合できた。強度的には多くのエラストマ製の流体駆動ロボットの複数材料機構に応用できる可能性がある。一方で、本稿では限られた材料の分割パターンしか検証していない。様々な材料の組み合わせや複雑な分割形状を検証する必要がある。

6. 結言

本稿では、順次的な膜の硬化と押し出し成型を両立する型と型取り手順を提案した。また、提案手法で成型した膜が、約 10kPa の印加圧力で破裂せずに駆動できることを確認した。今後は、流路と型の分割パターンを考えることで、より複雑な材料分割パターンの膜の製造方法を検討する。

謝 辞 本研究は JSPS 科研費、新学術領域研究「ソフトロボット学」21H00333 の助成を受けた。

参 考 文 献

- [1] Li-Ke Ma, Yizhong Zhang, Yang Liu, Kun Zhou, and Xin Tong, “Computational design and fabrication of soft pneumatic objects with desired deformations,” *ACM Trans. Graph.*, Vol. 36, No. 6, article 239, pp.1–12, 2017.
- [2] Zhongkui Wang, Mingzhu Zhu, Sadao Kawamura and Shinichi Hirai, “Comparison of different soft grippers for lunch box packaging”, *Robotics and Biomimetics*, Vol. 4, No. 10, 2017.
- [3] Andrew D. Marchese, Robert K. Katzschmann, and Daniela Rus, “A Recipe for Soft Fluidic Elastomer Robot”, *Soft Robotics*, Vol. 2, No. 1, pp. 7–25, 2015.
- [4] Taro Nakamura, Takashi Kato, Tomohide Iwanaga, and Yoichi Muranaka, “Development of a Peristaltic Crawling Robot Based on Earthworm Locomotion,” *J. Robot. Mechatron.*, Vol. 18, No. 3, pp. 299–304, 2006.
- [5] 青山 大樹, 王 忠奎, 平井 慎一: “狭空間での把持を目的とした薄型離型フリーシエルグリップの提案”, 第 39 回 日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2021), オンライン, Sept. 8-11, 2021.



図 3: 複数材料の押し込み成型のための型

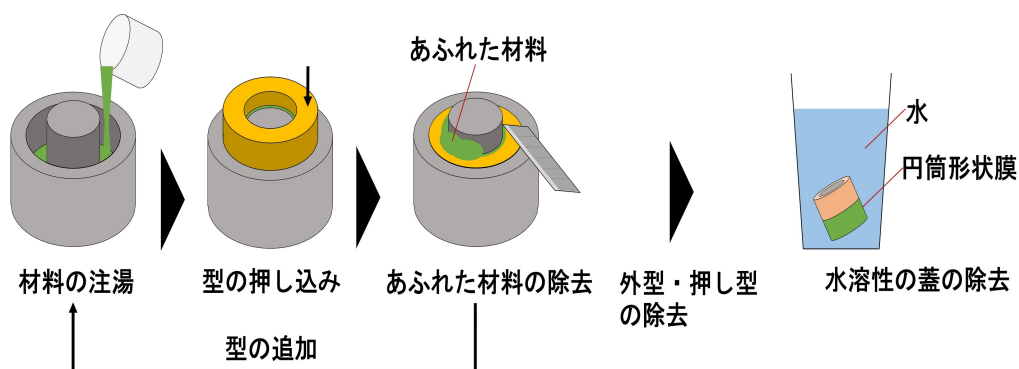


図 4: 複数材料の押し込み成型の手順

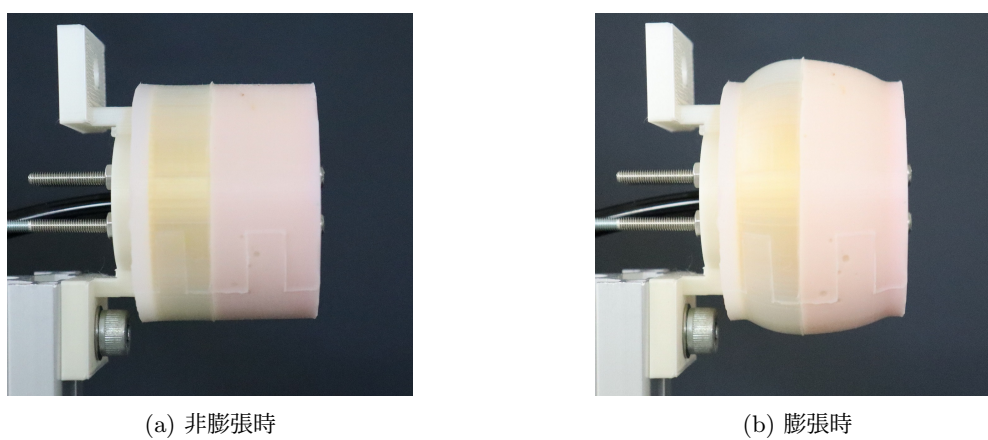


図 5: 製作した円筒形状膜