

令和3年度 未来研究ラボシステム 研究成果報告書

研究種目： 研究期間：令和3年10月～令和4年10月

研究課題名：自己修復ポリマーの三次元造形による柔軟な電子回路

ラボ長

所属：大阪大学大学院基礎工学研究科 機能創成専攻 生体工学領域

氏名：石塚 裕己

研究目的

近年、身体の動きを阻害しないことや安全性の高さからポリイミドやシリコンゴムといった柔軟性や伸縮性に優れた材料を用いてフレキシブルなウェアラブルデバイスを作る研究が行われており、今後益々ウェアラブルデバイスのフレキシブル化が進んでいくと考えられる。加えて、使用者毎に体格や用途が異なっていることから、使用者に合わせてウェアラブルデバイスをパーソナライズ化できることも将来的には必要になってくるとも考えられる。

そこで、本研究では柔軟性に優れたポリマー材料のステレオリソグラフィ造形を活用し、内部に予め流路構造を形成しておき、その流路を導電性液体で満たすことで造形物内部に電子回路を作製する手法を提案する。ステレオリソグラフィは簡易かつ短時間で造形できるという特徴を有しており、本手法を実現することでフレキシブルデバイスなデバイスを高い自由度で設計・作製できるようになる。本研究では、提案手法の確立に向け、まず造形技術を確立・評価するとともに、それを用いて抵抗・コンデンサ・コイルといった電子回路の基本的な素子を形成できることを確認する。その後、それらを纏めて成形し、柔軟な構造物内部に回路を形成できることを確認するとともに、所望の回路機能を有していることを確認する。また、本ポリマー材料の有するもう一つの特徴である自己修復性にも着目し、回路の切断及び再構築による機能変化についても調査する。

令和3年度の研究成果

最初に、本研究の準備として、市販の光造形式の3Dプリンタを用いて自己修復ポリマーの造形を試みた。造形自体は可能であることは確認できたものの、光造形によって作製可能な最小の流路の直径が5mmであったことから、電子回路として用いるには大きすぎるという結果が得られた。そこで、平坦な形状にしか加工できないものの、高い造形精度を有しているソフトリソグラフィを用いることによって自己修復材料を成形することとした。

まず、自己修復ポリマーをソフトリソグラフィによって加工して、コンデンサを作製した。その作製方法を図1に示す。まず、自己修復ポリマーを作製した型に流し込み硬化させた(図1(a), (b))。硬化後、凹型の自己修復ポリマーを型から剥がし、表面を水で洗浄、室温で乾燥させた(図1(c))。同様の手順で、シート形状の自己修復ポリマーも作製した(図1(d), (e), (f))。自己修復ポリマーは凹型を二個とシート型を一個作製した(図1(g))。次に、シート型の自己修復ポリマーを挟んで、凹型の自己修復ポリマーを窪みが向かい合うように貼り合わせた(図1(h))。自己修復ポリマーは、貼り合わせた箇所が完全に融合(自己修復)するまで、24時間以上静置した。これによって、液体金属の流路を作製した。その後、作製した流路の空気を抜きながら、注

射器で液体金属を注入することで、電極を作製した(図 1 (i), (j)). 液体金属は EGaIn を使用した. EGaIn は質量比でガリウムの含有率が 75.0%, インジウムの含有率が 25.0%であり, 融点は 15.5°C である. 最後に, 液体金属の電極を計測装置に接続するために, 電極に直径 0.25 mm の導線を挿入した(図 1 (k)). 作製したコンデンサの写真は図 2 に示す.

実験では, 作製した平行平板型コンデンサの静電容量を計測し, 計測値と理論値とを評価した. 自己修復材料の有する修復能力を確認するために, 計測後にコンデンサをナイフを使用して切断し, $1/3$ と $2/3$ の電極面積に分割した. この時, 常温でコンデンサを切断すると, 液体金属が漏れ出し静電容量に影響を与えてしまうため, コンデンサを冷凍し液体金属を -18°C に凍らせた状態で切断することで液体金属の漏れ出しを防止した. その後, 分割した各コンデンサの静電容量を計測した. 最後に, コンデンサの結合が可能であることを確認するために, 分割したコンデンサ同士を再結合した. この時, 切断前の状態に近づけるためにシート形状の自己修復ポリマーを結合面に可能な限り近い所で切断し, 再結合させた. 各条件において 静電容量を 5 回計測した.

表 1 に切断前後における静電容量計測結果を示す. 切断後 A, 切断後 B の理論値は電極面積の比から算出した静電容量である. 切断前の静電容量と切断後 A 及び切断後 B の静電容量を足した値を比較すると, 切断前よりも 2.4 pF 静電容量が増加した. これは, ナイフによる切断時にコンデンサが押しつぶされることで, 電極間の自己修復ポリマーも押しつぶされ, 電極間の距離が近づいたことが原因として考えられる. また, 切断後 A 及び切断後 B の静電容量を足した値と, 再結合後の静電容量を比較すると, 1.5 pF , 再結合後に静電容量が減少した. これは, 切断と再結合時に液体金属がわずかに除去されてしまったことが原因として考えられる. 以上の結果から, 自己修復ポリマーを用いてコンデンサを作製し, 修復性を有していることが確認できた.

表 1 静電容量の計測結果

	1 回目 (pF)	2 回目 (pF)	3 回目 (pF)	4 回目 (pF)	5 回目 (pF)	平均値 (pF)	標準偏差 (pF)	理論値 (pF)
切断前	26.4	26.4	26.4	26.4	26.4	26.4	5.04×10^{-3}	29.4
切断後 A	11.6	11.6	11.6	11.6	11.6	11.6	1.94×10^{-2}	10.5
切断後 B	17.1	17.1	17.2	17.2	17.2	17.2	1.84×10^{-2}	18.9
再結合後	27.6	27.3	27.3	27.2	27.2	27.3	1.50×10^{-1}	29.4

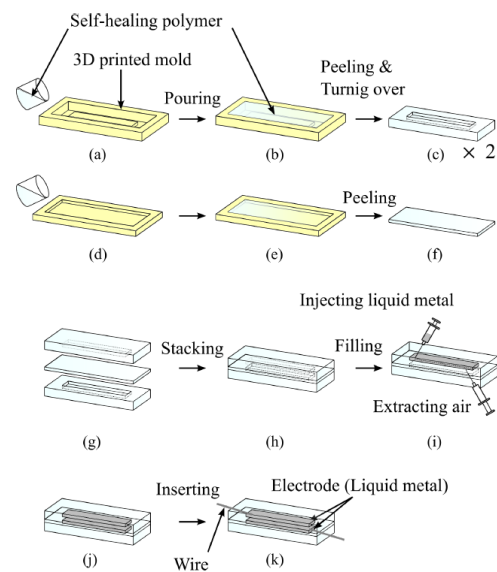


図 1 作製工程

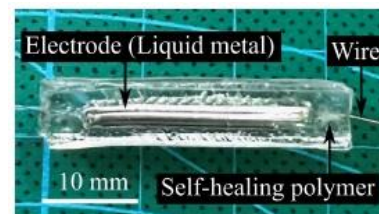


図 2 作製したコンデンサ

研究経費（R3年度）の内訳

備品費	消耗品費	旅費	謝金	その他	合計
0円	139,592円	0円	0円	0円	139,592円

共同研究者等

(1) 共同研究者（氏名・所属）

Parinya Punpongsanon・大阪大学基礎工学研究科システム創成専攻

平木剛史・筑波大学 図書館情報メディア系

(2) 研究協力者（氏名・所属・学年（学生の場合））

花島彩斗・大阪大学基礎工学部システム科学科生物工学コース

発表論文等（令和4年3月31日現在）

〔雑誌論文〕

現在，Advanced Intelligent Systems への論文投稿準備中

〔学会発表〕

石塚裕己，花島彩斗，平木剛史，川原圭博，池田聖，大城理：自己修復ポリマーを用いた再構築可能なフレキシブル電子回路，UWW 2021，1 page（2021）.

外部資金獲得状況・申請状況

本研究に関連した自己修復ポリマーを用いたソフトロボットの開発に関する内容が科研費基盤研究(B)に採択された。

参考となるHP等

<https://sites.google.com/view/ishizukahp/%E3%83%9B%E3%83%BC%E3%83%A0>