

〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-1

3D プリンタで 3次元フレキシブル配線を作製

本研究のポイント

- ・導電性を有するフレキシブルな3次元造形物を3Dプリンタで作製
- ・作製した造形物は3次元フレキシブル配線として活用可能
- ・IoTに用いる次世代型フレキシブルデバイスへの応用が期待できる

【研究概要】

横浜国立大学の向井理特任助教、丸尾昭二教授の研究グループは、導電性を有するフレキシブルな3次元造形物を3Dプリンタで作製することに成功しました。本研究では、独自に開発した光硬化性樹脂を用いて、3Dプリンタの一つである光造形法で任意の3次元(3D)構造体を作製し、その後に構造体に後処理を行うことで 16 Scm^{-1} の導電性を有する3D構造体を形成できることが確認されました。この3D構造体は柔軟性を有し、表面処理を施したポリイミドフィルム上に微細パターンを光造形することで、フレキシブルな微細電気配線を実現しました。本研究成果は、2022年11月16日付で国際科学雑誌「Polymers」に掲載されました。

【研究成果】

導電性高分子は、白川英樹博士らによってプラスチックが高い導電性を発現することを発見し、この功績によりノーベル賞を受賞しています。導電性高分子の中でもポリ(3,4-エチレンジオキシチオフェン)(PEDOT)は安定性が優れていることなどから、産業的に最も成功している導電性高分子の一つとして知られています。現在、PEDOTの導電性を活かしたデバイスを開発するために、さまざまな加工法が提案されておりますが、その多くは3次元的な造形が困難な手法でした。一方、最近では3次元的な造形が可能な3Dプリンタの活用が試みられており、材料押出(MEX)法を用いたPEDOTの造形手法が実証されています。しかしながら、MEX法は造形精度が材料を押し出すノズル径に制限されるため造形精度に限界があります。本研究では、最も高精細な3Dプリント技術である光造形を用いて導電性を有する3D構造体を作製可能なPEDOTを基礎とする光硬化性樹脂および造形プロセスを開発し、導電性が 16 Scm^{-1} の3D構造体やフレキシブル配線の作製に成功しました。

【実験手法】

光造形法は、光照射によって硬化する光硬化性樹脂を用いて3D構造体を作製する手法として知られています。しかしながら、PEDOT単独では青黒い固体であるため、光造形の際にPEDOTが光を減衰させてしまい直接硬化させることは困難であるという問題がありました。この問題を解決するために、Kurselisらの先行研究では、PEDOTの前駆体である

無色透明な 3,4-エチレンジオキシチオフェン(EDOT)と光硬化樹脂を混ぜ合わせ、光造形にて任意の形状を作製したのち、造形物内部の EDOT を PEDOT へ後処理で変換することで導電性を有する 3D 構造体の作製に成功しています。さらに、彼らは光硬化性樹脂の選択によってフレキシブルな造形物を作製できる可能性を示唆しています。しかしながら、彼らの研究では導電性は最大でも 0.04 Scm^{-1} と配線材料に用いるには低く、また導電性を上げるために EDOT の量を増やそうとすると造形物の構造が崩れてしまうといった欠点がありました。本研究では、彼らが十分な導電性が得られなかった理由として後処理の過程に注目しました。彼らは、塩化鉄を用いて EDOT を PEDOT へ変換するとともに、塩化鉄で PEDOT のドーピング処理を行なっています。ドーピング処理は白川英樹博士らのノーベル賞のキーポイントにもなった処理でもあり、ドーピング処理により導電性が大きく変化することが知られています。そこで本研究では、Kurselis らが 1 段階で行なっている酸化重合とドーピング反応を、EDOT を PEDOT へ変換する酸化重合反応と、ドーピング処理の 2 段階に分けました(図 1 a)。EDOT を PEDOT へ変換する過程は彼らと同様に塩化鉄を用い、ドーピング処理は *p*-トルエンスルホン酸 (PTSA) を用いました。その結果、EDOT の含有量を Kurselis らの半分以下に減らしたにもかかわらず、 16 Scm^{-1} と 100 倍以上の導電性の向上させることに成功しました(図 1b)。また、光硬化性樹脂の成分として柔軟な造形物が得られるポリエチレングリコール(600)ジメタクリレートを用いたことにより、後処理後にピンセットで屈曲可能なフレキシビリティを有することが確認されました(図 1b)。

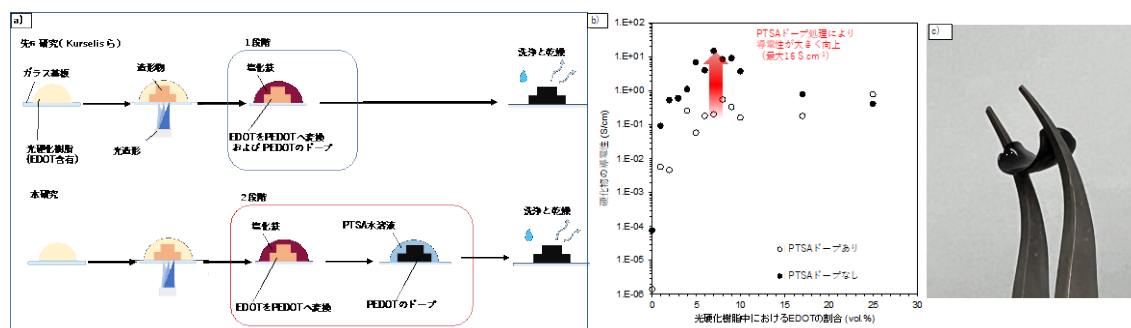


図 1 (a) 先行研究と本研究の後処理の違い (b) PTSA を用いたドーピング処理による導電性向上 (c) 光造形と後処理を行なった導電性構造体の柔軟性の実証

次に、フレキシブル配線の基板として実績のあるポリイミドフィルム上への造形を行うために、ポリイミドフィルム上にアクリレート基を付与する表面処理を行い、フィルムの屈曲に対しても造形物が剥離しない密着性を実現しました。そして、ポリイミドフィルム上に作製し、フィルムを屈曲させた場合でも青色発光ダイオードが発光することを確認しました(図 2 a)。これは、作製した造形物がフレキシブルな配線として機能していることを示します。さらに、光造形を用いているため、2 次元的な導電性パターンのみならず、導電性を有する 3 次元的な造形物を作製できることも確認できています(図 2b,c)。今後、フレキシブルな 3D 配線やセンサーの作製に応用できると考えています。

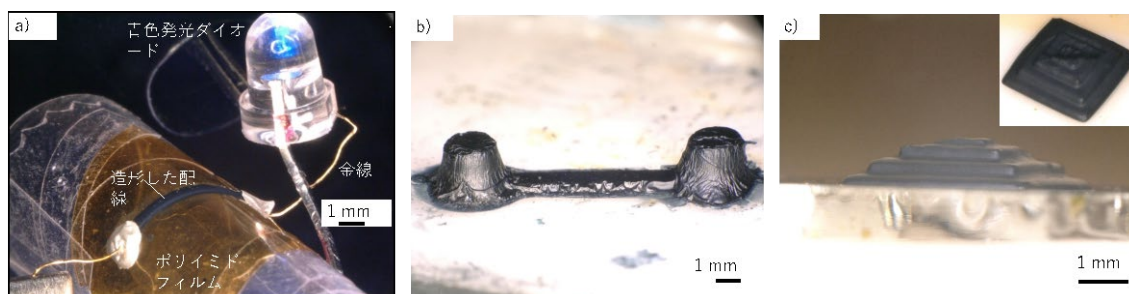


図 2 (a) 表面処理を行なったポリイミド上に造形したフレキシブル配線と青色発光ダイオードを発光させた例 (b) 3D 構造体の例 1 : ピラーと配線 (c) 3D 構造体の例 2 : 階段状ピラミッドの例 (挿入図は上面図を示す)

【社会的な背景】

現在、物のインターネット (IoT) の進展に伴い、ウェアラブルデバイスなど曲面に追従するようなフレキシブルデバイスが求められております。ウェアラブルデバイスを作製するうえで、配線を 3 次元化することができれば、2 次元的な配線に比べ素子の高密度化が実現できるため、デバイスの飛躍的な高機能化が期待されます。しかしながら、現在の主要な加工技術は 2 次元的な配線の作製に制限されており、多くの研究では 2 次元的なフレキシブルデバイスの開発にとどまっています。そこで、本研究では、3D 構造体の造形が可能な光造形法に着目し、柔軟性を有する高分子材料をマトリックスとして導電性高分子である PEDOT がナノレベルで分散した 3D 構造体を形成できる光造形用樹脂および処理法を開発しました。その結果、柔軟性と導電性を併せ持つ 3D 構造体やフレキシブル配線を実証しました。

【今後の展開】

本研究では、高機能なフレキシブルデバイスの社会実装に向けて、光造形に適用可能な光硬化性樹脂と、高い導電性を付与するための処理方法を開発しました。今後、さらなる導電性の向上や有機デバイスなどの電子素子と組み合わせることで、さまざまなウェアラブルセンサーや医療デバイスの実現が期待されます。

(DOI: 10.3390/polym14224949)

【本研究への支援】

本研究は JST 戦略的創造研究推進事業 CREST (課題番号 JPMJCR1905)、JSPS 科研費 (課題番号 JP21K04691) による支援を受けて行われました。

本件に関するお問い合わせ先

横浜国立大学 大学院工学研究院 丸尾 昭二 Tel : 045-339-3880

e-mail : maruo-shoji-rk@ynu.ac.jp