

マイクロ・ナノメカニクス研究

研究代表者 岩瀬 英治
(基幹理工学部 機械科学・航空学科 教授)

1. 研究課題

本研究は、マイクロサイズやナノサイズで特異的に作用する物理現象を積極的に活用することにより、新規な機能を有するデバイスを実現することを大きな目標としている。具体的な研究ターゲットとしては、折り紙や切り紙の特性を機械工学的に捉えなおした独自のアプローチにより、曲面に貼付可能な電子デバイスおよび伸縮可能なフレキシブル電子デバイスの設計論の体系化から実際のデバイス実証まで行うことを目的としている。折り紙や切り紙では、素材自体には伸縮性を有していない紙を用いて伸縮変形を実現している。この特性を、“局所的な曲げ変形によるデバイス全体の伸縮変形”と捉えたり、マクロな構造・形状により本来単一の素材では持ちえない機械物性（ヤング率や曲げ剛性の異方性、負のポアソン比など）を有することができるという点から“機械的メタマテリアル”と捉えたりすることができる。これらの基礎学理から、実際に曲面に貼付可能な電子デバイスや伸縮可能なフレキシブルデバイスへの応用までを一貫して行う。

2. 主な研究成果

本年度は、球面などの曲面への貼付時には伸縮変形が必要なものの、その後変形は必要としない用途を想定し、曲面に貼付が可能なデバイス構造の検討・製作と形状記憶ポリマ（Shape memory polymer: SMP）を用いた形状固定に関する研究を行った。

2. 1 貼付対象面に平行な面を備えた折り紙構造の製作

曲面への貼り付けが可能なフレキシブル電子デバイスは、生体情報のモニタリング等、さまざまな分野で用いられている。このようなデバイスを構築するには、電子基板と配線が柔軟であることが必要である。先行研究では、導電性エラストマ等のフレキシブル材料を柔軟な電子基板や配線として用いる方法が一般的であるが、金属や半導体と比べると導電性が低い事が特徴として挙げられる。近年、折り紙や切り紙といった構造的な工夫を適用することにより、これらの無機材料に柔軟性を持たせる方法が報告されている。しかし、これまでの研究で用いられている一般的な切り紙や折り紙構造は、初期状態から収縮/伸長状態への変形中に、一部の平面が平面から飛び出すため、曲面貼付可能なフレキシブル電子デバイスへの応用に適さない特徴を有する。

そこで、我々は、取り付け対象の表面に平行な面を持つ折り紙構造を、曲面貼付可能なフレキシブル電子デバイスに応用する事を考えた。具体的には、折り紙テセレーションの一つである Extruded miura-ori を使用した。Extruded miura-ori は、ミウラ折をベースに一部の面が押し出された状態となっており、折られる過程のどの状態においても平行な2平面を有する。そのため、1つの面を貼付

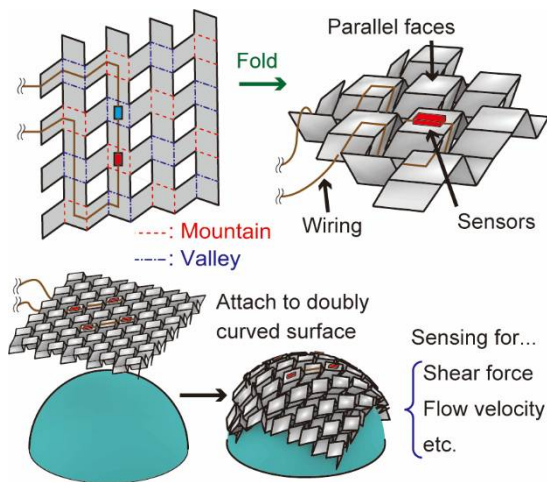


Fig.1 Our proposed flexible substrates with Origami structure including parallel faces in its folded state. Electronic elements, such as sensors or LEDs, can be mounted on the parallel faces. The folded devices can be attached to a doubly curved surface using their parallel faces.

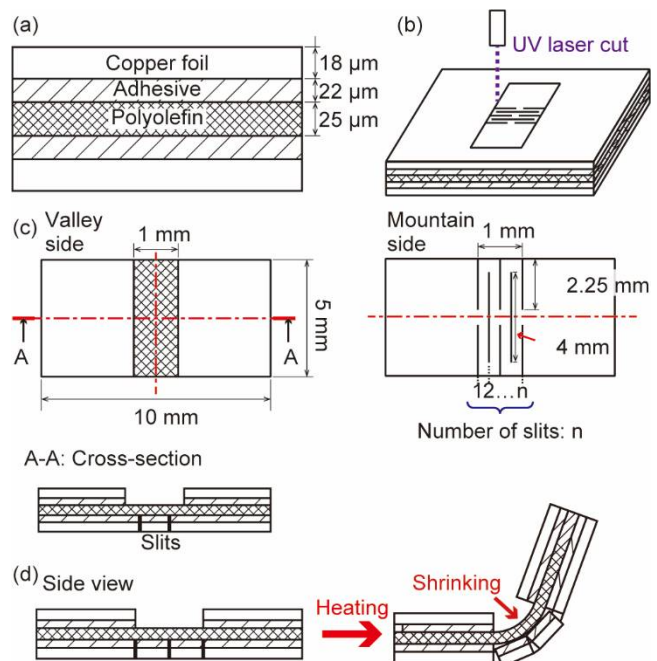


Fig.2 Schematic drawings of fabrication and design for self-folding. (a) Five-layered film in which polyolefin (heat shrink polymer) is sandwiched by copper foil with adhesive. (b) Fabrication by UV laser cutting plotter. (c) Dimensions of test strips. (d) Mechanism of self-folding by heat-shrinking of polyolefin.

対象の面に取り付け、もう 1 つの面にセンサやデバイスを配置することが可能である。また、折り畳みを容易にするため、基板は一部を切り取られた形状で設計されている。

本研究では、熱収縮ポリマを用いた Self-folding によって Extruded miura-ori の折り構造を持つ基板の作製を行った。図 2 は、Self-folding 機構の設計と製作を示す。熱収縮ポリマとして、ポリオレフィンを使用し、アクリル系の粘着相を持つ銅箔で挟んだ。図 3 (b)に示すように、フィルムの加工は、UV レーザー加工機を用いて行った。図 3 (c)は、単一の折り目を含む試験片の設計を示す。図 3 (d)に Self-folding 機構を模式的に示す。フィルムの谷側の層に銅箔がないため、ポリオレフィンの熱収縮により回転方向に力が発生し、試験片の Self-folding が行われる。このフィルムは、上下の金属層が絶縁されているため、図 3 (a)に示すように、導電性ペーストを埋め込む事で導通を取った。図 3 (b)に、上記の Self-folding 機構と上下面導通を利用し製作した、Extruded miura-ori の構造を持つ電子基板の設計を示す。

提案された基板のフレキシブル電子基板としての有用性を示すため、LED が取り付けられた状態で伸縮・曲面貼付を試験した。最初に、基板の初期の折りたたみ状態からの収縮と伸長を行った。図 6 (a)、(b)に示すように、LED を発光させたまま、基板が伸縮可能であることを確認した。続いて、直径 30 mm のガラス球の表面に基板を取り付けた。図 6 (c)のように、LED が発光している状態を維持したまま、ガラス球の表面に基板を取り付けることが可能であることを確認した。これらの結果から、Extruded miura-ori の平行な 2 平面が、貼付対象の表面に直接接触し、電子素子を取り付けるのに利用できる事が確認された。

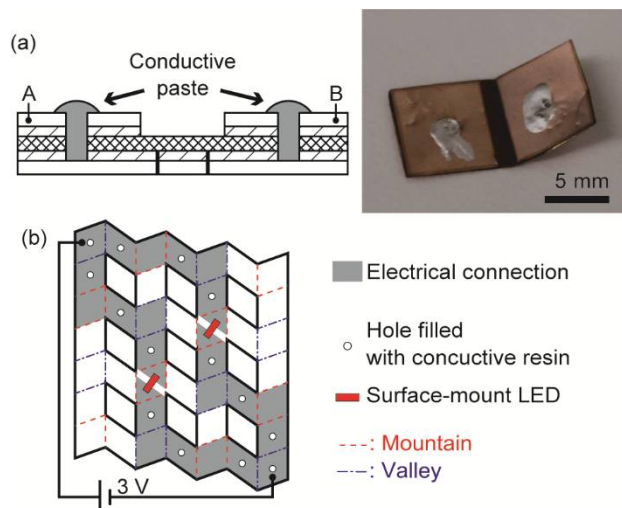


Fig. 3 A design of electronic substrates with extruded Miura-Ori. (a) Electrical connection of a substrate over silver conductive pastes filled in holes. (b) Design of structured electronic substrates with Surface-mount LED.

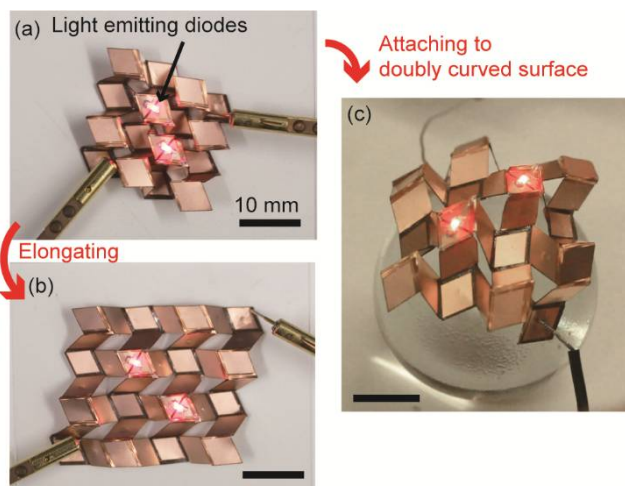


Fig. 4 Demonstration of flexibility and attachment of a substrate with extruded Miura-Ori with light emission of LEDs. (a) A contracted substrate. (b) A elongated substrate. (c) A substrate attached to a doubly-curved surface of a glass-sphere with 30-mm diameter.

2. 2 形状記憶ポリマを用いたフレキシブル電子デバイスの形状固定

従来のフレキシブル電子デバイスでは、それらを曲面等へ貼り付ける場合、外力を付加して変形させ対象面に貼付させても、その外力を除荷すると、復元力で貼付を維持できないため、粘着剤等による指示が必要である。そこで、我々は、電子デバイスの基板材料に形状記憶ポリマ(SMP)を用いることで、任意の形状への変形能と変形後の形状固定能を有するデバイスを実現し、3次元形状を有した貼付対象への支持なしに電子デバイスを3次元形状で利用可能とすることを目指した。

一般的に、ポリマはガラス転移温度(T_g)よりも高温ではゴム状態となり弾性率が低く伸縮可能である一方で、低温時はガラス状態となり弾性率が高く、かつ形状固定性を示す材料であるが、SMPとは T_g 以上に加熱されると記憶された形状に戻る性質を有するポリマの総称である。図5にフレキシブル配線層をSMPで封止して製作される電子基板の形状固定のコンセプトを示す。初めに、デバイス全体を加熱しSMPをゴム状態に変化させる。ここで、外力を加えることによって、デバイス全体を変形させる。外力を維持したまま、デバイス全体を T_g 以下に冷却しガラス状態にすることによって、形状保持が可能になる。その後、デバイスを再度加熱すれば、ゴム状態へと変化させることによって元の形状に戻すことが可能である。

本研究では、基板材料と同様に電気配線層も変形可能である必要があるため、銅ポリイミドシート(厚さ: Cu 25 μm , Polyimide 8 μm) に七夕飾り状の切り紙構造を設けた配線層を用意した。この配線層の作製は、UVレーザー加工機を用いて行った。この配線層のSMPによる封止は以下のように行った。SMPには、ポリウレタンベースの T_g が 55°C であるものを採用した。主剤約 5 g と硬化剤約 7.8 g を 60°C で 1 分加熱し、攪拌脱泡機を用いて 2000 rpm・15 秒で攪拌した。続いて、ポリイミドテープを用いて配線層を底から一定の隙間が空くよう固定し、硬化前のSMPを注ぎ入れた。この状態で、SMPを室温硬化させた。最後に、配線層を含むSMP (10 mm × 30 mm) を切り出し、デバイスとした。同じ寸法でSMP単体を切り出し、配線層を含まない試験片を準備した。

製作したデバイスを用いて形状変形性および形状固定性についての評価を行った。実験は下記の通りで行った。まず、引張試験機に製作した試験片を固定し、試験片を覆うように取り付けられた水槽に 80°C の温水を注ぎ、1 分間浸漬させ試験片を T_g 以上に加熱した。その後、ひずみが 1.0 となるまで試験片を

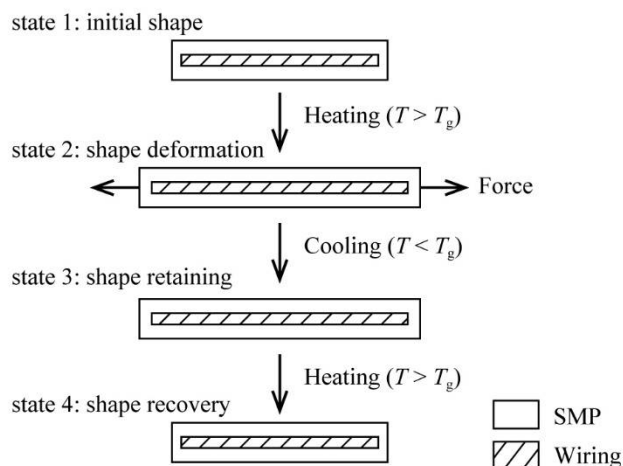


Fig. 5 A schematic drawing of an electronic substrate that can be deformed and fix its deformed shape using a shape memory polymer.

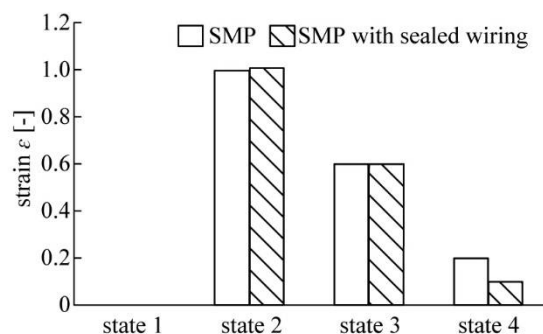


Fig. 6 Measured strain at each state. State 1 is the initial state, state 2 is the state of a sample with load in hot water, state 3 is the state of a sample without load in cool water, and state 4 is the state of a sample without load in hot water.

伸長した。その後、水槽中の水の温度を 35°C 以下とし、試験片を 1 分間冷却した。デバイスを引張試験機から取り外し評点間距離を計測した。最後に、デバイス全体を 80°C の温水に 3 min 浸漬させ、評点間距離を再度計測した。

実験結果を図 6 に示す。この図の通り、SMP 単体のデバイスでは、 T_g 以上でひずみを 0.0 から 1.0 に延伸させ T_g 以下に冷却すると、ひずみが 0.6 となり、再度 T_g 以上に加熱すると、ひずみが 0.2 となった。一方、配線を封止したデバイスでは、 T_g 以上でひずみを 1.0 に延伸させ T_g 以下に冷却すると、ひずみが 0.6 となり、再度 T_g 以上に加熱すると、ひずみが 0.1 となった。この結果から、配線を封止したデバイスを用いて、加熱・冷却処理後に SMP 単体と同程度で形状固定が可能であることが分かった。また、再加熱後の形状回復も、0.1 の非回復ひずみは見られたものの形状は回復した。配線を封止したデバイスの形状回復後のひずみが SMP 単体のデバイスより小さくなった原因として、SMP に封止した切り紙配線によって復元力が働いたことが考えられる。

3. 共同研究者

川本 広行（早稲田大学・理工学術院・教授）

4. 研究業績

4.1 学術論文

- Hiroki Taniyama, Eiji Iwase, “Design of Rigidity and Breaking Strain for a Kirigami Structure with Non-Uniform Deformed Regions,” *Micromachines*, vol. 10, no.6, 395, June 14, 2019.
- Kento Yamagishi, Akihiro Nojiri, Eiji Iwase, Michinao Hashimoto, Syringe-Injectable, “Self-Expandable and Ultra-Conformable Magnetic Ultrathin Films,” *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol 11, no. 44, pp. 41770-41779, October 8, 2019.

4.2 総説・著書

なし

4.3 招待講演

- ・ Eiji Iwase, “Flexible Electronic Devices using Rigid Materials,” Proceedings of the 32nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2019), 30D-4-1, Hiroshima, Japan, October 28-31, 2019.

4.4 受賞・表彰

なし

4.5 学会および社会的活動

- ・ 文部科学省 研究振興局 学術調査官
- ・ 日本機械学会, 若手の会, 委員
- ・ 日本機械学会 マイクロ・ナノ工学部門, 運営委員会, 委員
- ・ 電気学会 センサ・マイクロマシン部門, MSS 技術委員会, 委員

5. 研究活動の課題と展望

本年度は、球面などの曲面に貼付が可能なデバイス構造の検討・製作と形状記憶ポリマ（SMP）を用いた形状固定に関する研究を行った。来年度は、繰り返し伸縮変形に対する伸縮耐性の評価、折り畳み・切り込みを利用した伸縮変形可能なフレキシブル電子デバイスを用いた実証評価を行う。最終段階として、「繰り返しの伸縮変形可能なフレキシブル電子デバイス」、すなわち、ゴムやヒトの皮膚など変形や可動する場所で使用する用途について評価を行う。