

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への応用までを一貫して行う。

2. 主な研究成果

本年度は、本アイデアの原理検証と **self-folding** を中心としたデバイス製作手法の確立を行った。具体的には、折り紙構造を「どのように折り上げるか」という課題に対し、熱収縮ポリマを用いた **self-folding** の実証を行った。特に、伸縮可能なフレキシブル電子デバイスの開発に資する、電気配線を有する基板の **self-folding** を実証した。

折り紙構造で微細な電子デバイスを伸縮可能とするには、外部から直接折り上げる必要のない **self-folding** 技術が必要である。先行研究では、熱収縮ポリマ等、外部からの刺激で自発的に変形する材料を用いて、以下のような **self-folding** が提案されている。刺激変形性の材料を変形しない材料（受動材料）で挟んで3層構造とし、ヒンジとなる部分の片側の受動材料を取り除く。収縮または膨張すると、厚み方向の抗力の差に起因する曲げモーメントが生じ、構造の **self-folding** が可能となる。この方法を用いることで、蛇腹折りやミウラ折りに必要な、山折りや谷折りを含む両方向の折り畳みが実現される。しかし、従来方法では、ヒンジ部の受動材料を完全に取り除いており、電氣的接続を維持した状態で両方向折りを実現した研究は報告されていない。本研究では、切り紙構造を設けることで、電氣的接続が維持された状態での **self-folding** を実証した。

図1に本研究で提案した切り紙構造ヒンジを用いた電子基板の **self-folding** を示す。図1(a)のように、熱収縮ポリマを電気配線層で挟んだ3層構造を形成し、電気配線層上の谷折りする個所の片面に切り込みを設けることで切り紙構造ヒンジとした。このヒンジは、折り畳みの方向に平行な梁（平行梁）と折り畳みの方向に垂直な梁（垂直梁）を有する。切り紙構造ヒンジ部の伸び剛性は、切り紙構造ヒンジを持たない配線層よりも低い。このため、3層構造内の熱収縮ポリマが収縮する時、収縮力に対する厚さ方向の抗力の差でモーメントが生じ、図1(b)のような **self-folding** が可能となる。

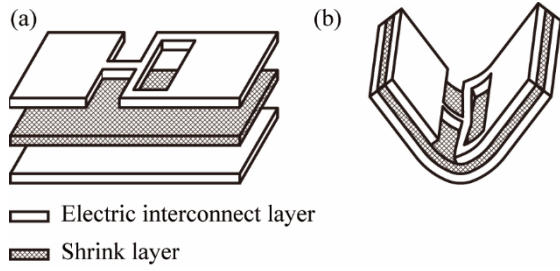


Fig.1 Self-folding method of electronic substrate using hinges with Kirigami structure. (a) Assembled layers. (b) A substrate after self-folding.

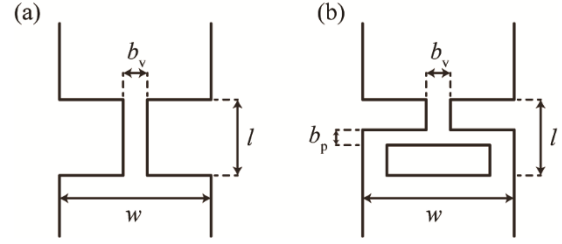


Fig. 2 Definition of hinge structure and parameters. (a) Hinges with simple beam structure. (b) Hinges with Kirigami structure.

と期待される。本研究では、単純梁構造ヒンジと切り紙構造ヒンジという 2 種類のヒンジ構造に関し、電気抵抗値を固定した時の、曲率の大きさの比較を行った。図 2 は、この 2 種類のヒンジ構造とそのパラメータの定義を示す。ヒンジ構造についてパラメータを、ヒンジ長さ $l = 2.00 \text{ mm}$ 、ヒンジ幅 $w = 10.00 \text{ mm}$ 、平行梁幅 $b_p [\text{mm}]$ 、垂直梁幅 $b_v [\text{mm}]$ と定め、単純梁構造ヒンジと切り紙構造ヒンジそれぞれについて、電気抵抗の理論値 $R_{\text{calcd}} [\Omega]$ に関する式(1)と式(2)を求めた。

$$R_{\text{calcd}} = \frac{l \rho_e}{b_v t_e} \quad (1)$$

$$R_{\text{calcd}} = \left(\frac{w - b_v}{4b_p} + \frac{3l}{4b_v} \right) \frac{\rho_e}{t_e} \quad (2)$$

ただし、配線層の導電材料の電気抵抗率 $\rho_e [\Omega\text{m}]$ 、電気配線層の導電材料の厚さ $t_e [\text{m}]$ とした。

Cr (厚さ 10 nm) と Au (厚さ 500 nm) が蒸着されたポリイミドフィルム粘着テープの電気配線層で、収縮層として用いたポリオレフィンフィルムを挟むことで、3 層構造を製作し、レーザ加工機を用いて切り紙構造ヒンジを製作した。ポリオレフィンフィルムの厚さ t_{PO} は $20 \text{ }\mu\text{m}$ である。ポリオレフィンの樹脂の流れ方向の収縮率 α は 110°C で 0.51 であり、本研究ではヒンジ長さと樹脂の流れ方向を一致させ、 110°C で self-folding を行うこととした。一方、ポリイミド基板のヤング率 $E_{\text{PI}} = 3.5 \text{ GPa}$ 、厚さ $t_{\text{PI}} = 25 \text{ }\mu\text{m}$ であり、粘着テープの厚さ $t_{\text{adhesive}} = 25 \text{ }\mu\text{m}$ である。Cr と Au のヤング率はそれぞれ $E_{\text{Cr}} = 279 \text{ GPa}$ と $E_{\text{Au}} = 78 \text{ GPa}$ である。Au の厚さ ($t_{\text{Au}} = 500 \text{ nm}$) は、Cr ($t_{\text{Cr}} = 10 \text{ nm}$) に比べて大きいので、計算には Au 層の厚さをを用いた。同様に、Au の電気抵抗率 $\rho_{\text{Au}} = 2.44 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ を全体の電気抵抗率として設定した。電気抵抗の理論値 $R_{\text{calcd}} = 0.15 \text{ }\Omega$ に固定した時、式(1)から単純梁構造ヒンジの垂直梁幅 $b_v = 0.66 \text{ mm}$ となる。

切り紙構造ヒンジについて、モデル解析から曲率が最大となる平行梁幅 b_p と垂直梁幅 b_v を求めた。自然長が異なる薄膜の両端をそろえて貼り合せた多層膜の曲げ変形を考えた場合、厚さ方向での力のつり合いおよびモーメントのつり合いから式(3)が得られ、曲率を計算で求められる。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \int_{R+\sum_{j=1}^{i-1} t_j}^{R+\sum_{j=1}^i t_j} E_i w \frac{r}{R} \frac{L - l_i}{l_i} dr = 0 \\ \sum_{i=1}^n \int_{R+\sum_{j=1}^{i-1} t_j}^{R+\sum_{j=1}^i t_j} E_i w \frac{r}{R} \frac{L - l_i}{l_i} r dr = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\kappa = \frac{L}{l} \frac{1}{R}$$

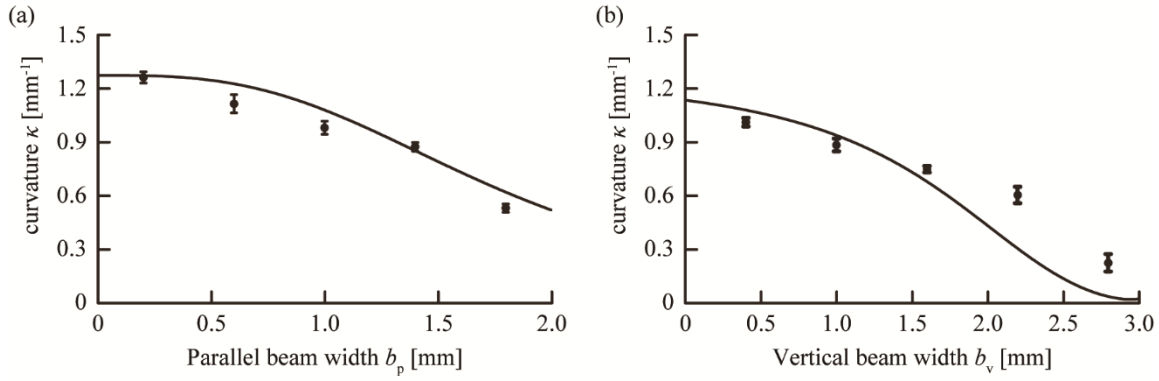


Fig. 3 Relationship between hinge structure parameters and curvature. (a) Relationship between parallel beam width and curvature. (b) Relationship between vertical beam width and curvature.

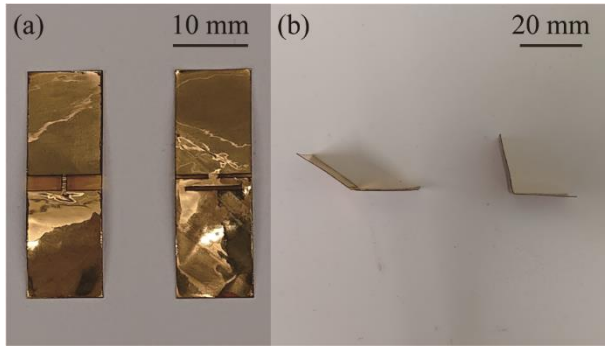


Fig. 4 Test pieces (left: vertical beam structure hinge, right: Kirigami structure hinge) before self-folding (a), and after self-folding (b).

Table 1 Comparison of curvature between vertical beam structure hinge and kirigami structure hinge.

Hinge structure	Observed electric resistance R_{obs} [Ω]	Curvature κ [mm^{-1}]
Vertical beam structure $b_v = 0.66$ mm	0.413	0.261
Kirigami structure $b_p = 1.10$ mm $b_v = 1.39$ mm	0.408	0.720

ただし、せん断変形はなく、曲率中心を1つだけ持つことを仮定した。層数 n 、各層の厚さ t_i ($i = 1, 2, \dots, n$)、各層の長さ l_i 、各層のヤング率 E_i 、長さ l 面での曲率 κ とした。 r は曲率中心を原点とし、 R は曲率中心から最も近い層の表面までの距離、 L は曲率中心から最も近い層のつり合った後の長さである。予備実験の結果とこの式から、モデル解析に用いる加熱時のポリオレフィンフィルムのヤング率 E_{PO} を求めると、 $E_{PO} = 6.89$ MPa となった。ヒンジ構造パラメータと曲率の関係において、平行梁の曲げ変形を考慮すると、切り紙構造ヒンジのヒンジ長さ方向の見かけのヤング率 E' は式(4)となった。

$$E' = E \frac{l}{w} \left(\frac{3(l - b_p)}{4b_v} + \frac{(w - 3b_v)^3}{4b_p^3} \right)^{-1} \quad (4)$$

各層の厚さ、長さ、ヤング率を式(3)に代入して、self-folding の際の曲率の理論値を求めた。電気抵抗の理論値 $R_{calcd} = 0.15 \Omega$ の条件下では、平行梁幅 $b_p = 1.10$ mm、垂直梁幅 $b_v = 1.39$ mm で、曲率 κ は最大値 0.711 mm^{-1} となり、これらの値を用いて切り紙構造ヒンジを製作した。

製作した切り紙構造ヒンジを持つ試験片が self-folding した時の曲率を計測した。まず、各ヒンジ構造のパラメータを変化させて曲率との関係を調べ、理論の検証を行った。図 3(a)に垂直梁幅 $b_v = 0.40$ mm 固定条件下での平行梁幅 b_p と曲率 κ の関係を、図 3(b)に平行梁幅 $b_p = 1.00$ mm 固定条件下での平行梁幅 b_v と曲率 κ の関係を示した。平行梁幅および垂直梁幅の増加に伴い減少した実測値と理論値の曲率はよく一致している。この結果から、本研究で考察した理論をもとに、切り紙構造ヒンジの設計が可能であることが分かった。

次に、設計をもとに製作した、単純梁構造ヒンジと切り紙構造ヒンジの曲率を比較した。図 4(a) に self-folding 前の試験片を、図 4(b)に self-folding 後の試験片を示した。計測した電気抵抗および曲率を表 1 に示した。電気抵抗は、単純梁構造と切り紙構造ヒンジでそれぞれ、 $0.413\ \Omega$ と $0.408\ \Omega$ であった。電気抵抗の理論値 $R_{\text{calcd}} = 0.15\ \Omega$ と乖離した理由としては、有機材料に蒸着を行ったことにより金属が変性したことなどが考えられる。電気抵抗の実測値同士は 2 桁まで一致しているため、電気抵抗固定の条件は満たしていると言える。self-folding の際の曲率は、単純梁構造ヒンジで $0.261\ \text{mm}^{-1}$ 、切り紙構造ヒンジで $0.720\ \text{mm}^{-1}$ であった。以上より、電気抵抗固定条件下では、切り紙構造ヒンジは単純梁構造ヒンジより大きい曲率で self-folding することが実証された。

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

- ・ Kana Fukuie, Yoshitaka Iwata, Eiji Iwase, “Design of Substrate Stretchability using Origami-Like Folding Deformation for Flexible Thermoelectric Generator,” *Micromachines*, vol. 9, issue 3, 135 (8 pages), June 22, 2018.

4.2 総説・著書

なし

4.3 招待講演

なし

4.4 受賞・表彰

- ・ 谷山広樹, 次世代プリントエレクトロニクスコンソーシアム(JAPEC), アイデアコンテスト 2018, アイデア賞

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
- ・ 日本機械学会 情報・知能・精密工学部門, 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、折り紙構造を「どのように折り上げるか」という課題に焦点をあて研究を行い、熱収縮ポリマを用いた self-folding デバイスの製作方法を確立した。来年度は、本年度確立したデバイス製作技術を用い、曲面へ貼付可能な電子デバイスを製作し、その伸縮性の評価を行う予定である。