

TED Plaza

熱駆動 MEMS アクチュエータの作り方



橋本 将明

慶應義塾大学 助教
 理工学部システムデザイン工学科
 hashimoto@sd.keio.ac.jp

1. はじめに

インクジェットプリンタからマイクロオプティクスに至るまで、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) アクチュエータは様々な分野に広く応用されている。MEMS アクチュエータの原理として静電式、圧電式、電磁式、熱駆動式があげられるが、アクチュエータ開発の際にはそれぞれの長所と短所を考慮した上で特性を活かす設計が重要となる。他の駆動原理と比較して、熱駆動式は、数 100 μm 程度の長ストロークを得られるという長所がある。筆者らは、これまで Si-MEMS 微細加工や 4D プリンティングを用いた熱駆動 MEMS アクチュエータの開発に取り組んできた。本稿では筆者らの研究を中心に熱駆動 MEMS アクチュエータの設計・作製方法について紹介させて頂く。

熱駆動 MEMS アクチュエータの駆動原理を図 1 に示す。熱駆動アクチュエータは、熱バイモルフと呼ばれる熱膨張率の異なる 2 層構造を可動部として全体が構成される。熱バイモルフにはジュール加熱用のヒータが統合されていることが多く、ジュール加熱時の材料間の熱ひずみ差による湾曲によって変位を得る。高熱膨張材料 1 と低熱膨張物質 2 で構成される片持ち梁構造の熱バイモルフの温度が Δt 上昇した時、曲率 k は熱膨張率 (α_1, α_2)、ヤング率 (E_1, E_2)、材質厚み (t_1, t_2) の関数として (1) 式で表される。(1) 式からも分かるように、設計の際にはまず熱膨張率とヤング率を基準として材料の組み合わせを考える。また (1) 式では一様な温度分布を仮定しているが、実際には熱リーク等で不均一な温度分布となる。そのため、熱伝導率や熱抵抗を考慮して熱バイモルフ内の温度分布がアクチュエータ動作にどう影響するかも考慮する必要がある。熱バイモルフ材料の探索からデバイス全体の熱機械設計を行って初めて熱駆動 MEMS アクチュエータは性能を発揮する。

$$k = \frac{6E_1E_2t_1t_2(t_1+t_2)(\alpha_1-\alpha_2)\Delta t}{(E_1t_1^2)^2 + (E_2t_2^2)^2 + 2E_1E_2t_1t_2(2t_1^2 + 3t_1t_2 + 2t_2^2)} \quad (1)$$

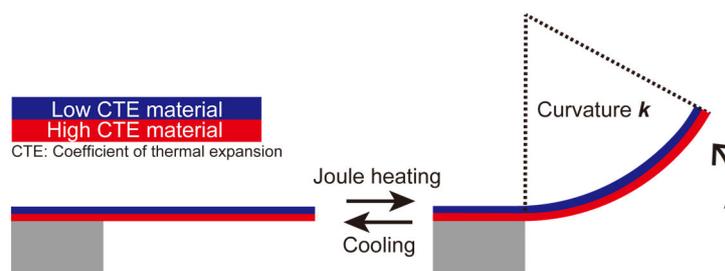


Fig. 1 Actuation principle of thermal bimorph.

2. 半導体微細加工で作る熱駆動 Si-MEMS アクチュエータ

MEMS アクチュエータの1つの応用先として内視鏡分野が挙げられる。光バイオプシーと呼ばれる内視鏡下の光学診断を実現するために、長ストロークで低消費電力なレンズ・ミラーMEMS アクチュエータの開発が期待されている。熱駆動式は他の駆動方式と比較して、長ストロークを得られることから、これまでに様々な熱駆動MEMS アクチュエータが提案されている (Zhou, et al., 2019) (Wang, et al., 2019)。(1)式からも分かるように長ストロークを得るためには熱膨張率差が大きい材料を組み合わせることが重要である。例として (Liu, et al., 2012) らは、高熱膨張率材のアルミニウム薄膜と低熱膨張率材タングステン薄膜を組み合わせた熱バイモルフを用いて MEMS ミラーを開発し、消費電力 275 mW で 227 μm のストロークが得られている。また (Wu, et al., 2010) らは、高熱膨張率材料のアルミニウム薄膜と低熱膨張率材料の酸化シリコン薄膜を組み合わせた熱バイモルフを用いて MEMS アクチュエータを開発し、880 μm もの長ストロークを印加電力 495 mW で達成している。どの熱駆動 MEMS アクチュエータも独自の構造設計となっており、応答速度や長期安定性などにそれぞれメリットを有する。しかし、長ストロークと低消費電力を両立させるためには熱バイモルフ材料の組み合わせや構造設計以外にも、MEMS アクチュエータ全体の熱設計を考える必要がある。ストロークに寄与しない熱容量の大きいバルクサポート構造への熱リークによって消費電力が増大するため、低消費電力駆動を達成するにはそれらの熱リークをいかに抑えるかが熱設計の1つのポイントとなる。

そこで筆者らは、図 2a に示すように、従来のアクチュエータ構造とは大きく異なる切り紙型の熱駆動 MEMS アクチュエータを開発した (Hashimoto, et al., 2020)。この切り紙型は、熱容量の大きなバルクサポート構造を排除して低消費電力化を図った上で、切り紙自立薄膜の立体的な機械変形によって長ストロークを得る。この熱駆動切り紙 MEMS アクチュエータは、高熱膨張率材料のニクロム (NiCr) 薄膜と低熱膨張率材料の窒化シリコン (SiN) 薄膜を組み合わせた熱バイモルフを用いている。図 2b にアクチュエータの構成を示す。微細加工で切り込みをいれた低熱膨張材の SiN 自立薄膜 (厚み 1.0 μm) に、低熱膨張材の NiCr (厚み 0.5 μm) が選択的にパターンされている。またすべての NiCr パターンはタングステン (W) パターンで電氣的に接続されており、この NiCr・W パターンがジュール加熱用電気回路としても機能する。Si-MEMS 微細加工で作製される熱駆動 MEMS アクチュエータは、スパッタ法・プラズマ化学気相成長法・ウェットエッチング・ドライエッチングといった表面微細加工と Si 深堀りエッチングといったバルク微細加工を組み合わせる。ナノ薄膜で構成される熱バイモルフを作製するためには、特に薄膜の残留応力制御が重要となる。高残留応力状態の薄膜で熱バイモルフを構成すると、微細加工中にデバイスが破損したり、アクチュエータの初期変位が大きくなる。作製プロセスの具体例として、熱駆動切り紙 MEMS アクチュエータの微細加工プロセスを図 2c に示す。最初に Si 基板にプラズマ化学気相成長法を用いて圧縮応力 30 MPa の SiO₂ 膜 (厚み 0.2 μm) と圧縮応力 25 MPa の SiN 膜 (厚み 1.0 μm) を成膜する。次に、リフトオフプロセスで W ヒータをパターン (厚み 0.2 μm) した後、引張応力 180 MPa の NiCr (厚み 0.5 μm) 薄膜をスパッタ法とウェットエッチングを用いてパターンする。NiCr パターンの残留応力に関しては、スパッタ圧力を調整することで 180 MPa の引張応力値まで低減している。フォトレジストでマスクした後、SiN 膜を反応性イオンでエッチングすることで切り紙薄膜を作製する。そして、Si 基板を反応性イオンで深堀りエッチングした後に、SiO₂ 膜を気相フッ化水素酸エッチングすることで熱バイモルフ構造を有する切り紙自立薄膜構造を形成する。図 2d に作製した熱駆動切り紙 MEMS アクチュエータの走査型電子顕微鏡画像を示す。残留応力制御によって、垂直方向の初期変位は 20 μm 、初期傾きは、約 0.6 度に抑制されていた。また NiCr・W パターンで構成されるジュール加熱用電気回路は、SiN 切り紙自立薄膜上に断線なくパターンされており、電気抵抗値は室温で 4.6 k Ω であった。駆動評価テストにて、図 2e に示すように、消費電力 130 mW で垂直方向変位 200 μm が得られた。また応答性に関しては、図 2f に示すように、カットオフ周波数が約 20 Hz であった。これらの結果より、熱駆動切り紙 MEMS アクチュエータの作製に初めて成功し、長ストローク 0.2 mm を達成することができた。

先に述べたように、熱バイモルフをジュール加熱した際、熱容量の大きな構造への熱リークが消費電力を増大させる。しかし、熱リークを抑制しつつミリ長ストロークを得ることは熱機械設計的に難しく、これまで 1.0 mm 以上のミリ長ストロークを 100 mW 程度の低消費電力で達成する熱駆動 MEMS アクチュエータは、筆者の知る限り開発されていなかった。そこで筆者らは、光

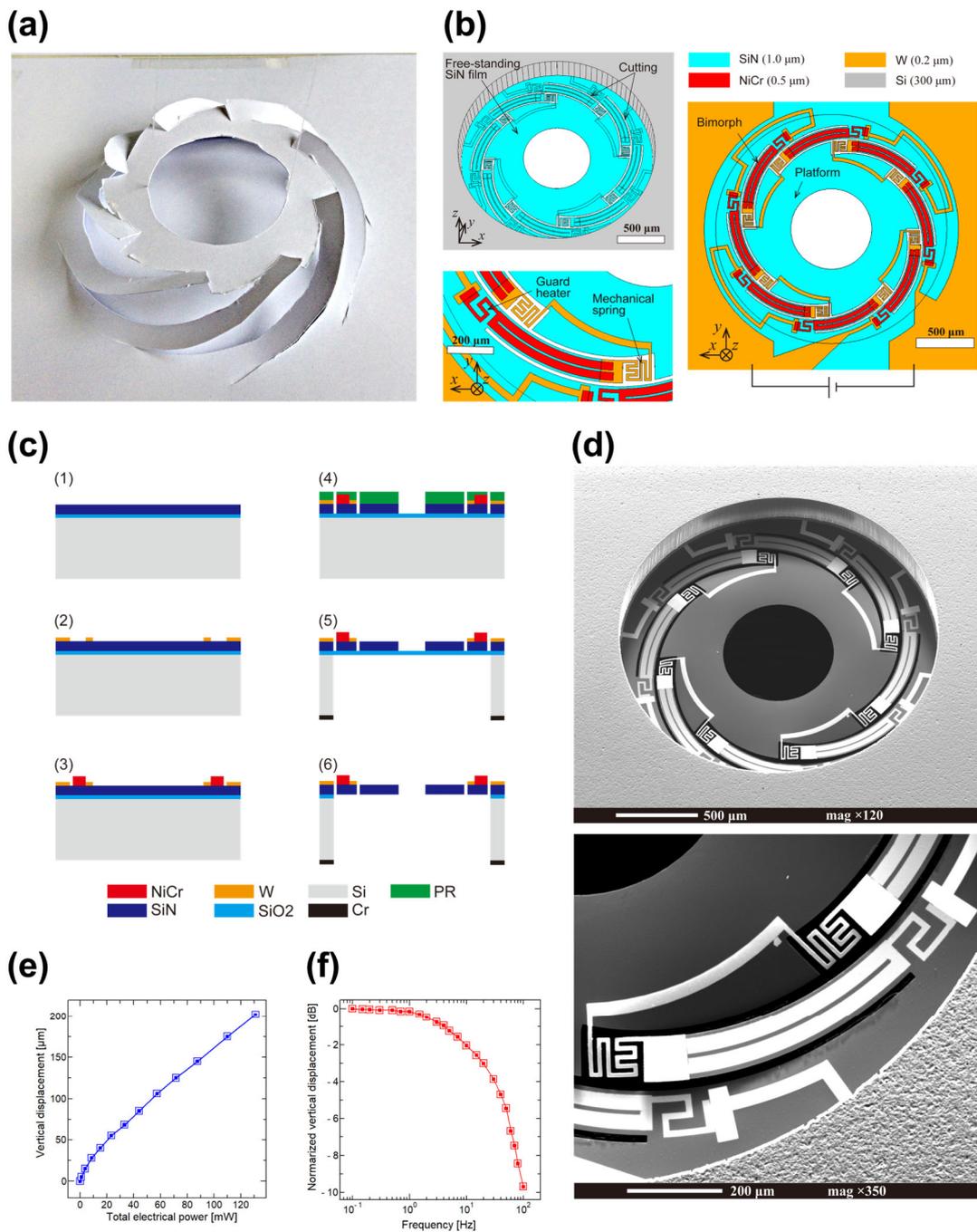


Fig. 2 Electrothermal Si-MEMS actuator fabricated by surface and bulk micromachining: (a) Paper model of kirigami actuator, (b) Design of kirigami actuator, (c) Fabrication flow, (d) SEM images of kirigami actuator, (e) Static response, (f) Frequency response. (Hashimoto, et al., 2020)

バイオプシーと呼ばれる内視鏡下光診断を応用先として、従来 MEMS アクチュエータでは未踏のミリ長ストロークを低消費電力で達成するレンズ MEMS アクチュエータを開発した (Hashimoto, et al., 2020) . 図 3 に開発したミリ長ストローク・低消費電力熱駆動切り紙 MEMS アクチュエータの概要を示す。ミリ長ストロークを低消費電力で達成するため、直径 4 mm の切り紙 SiN 自立薄膜に NiCr 薄膜パターンを高密度に集積したデバイスを設計・作製した (図 3a, 図 3b, 図 3c) . まずデバイス熱応答について、図 3d に示すようにアクチュエータの熱応答をサーモグラフィで可視化した。熱駆動切り紙 MEMS アクチュエータの集中定数モデルを構築し、サーモグラフィで観察したこれらの動的熱応答を解析することで熱伝導による熱バイモルフ領域外への熱リーク量は

小さく、空気中への熱輸送が支配的であることを実験的に明らかにした (橋本ほか, 2020) . 次にデバイス機械応答について, 図 3e に示すように作製したアクチュエータは 4 層ピラミッド状に機械変形することが確認された. 作製したアクチュエータにマイクロレンズをアセンブリした時の消費電力と変位の関係を図 3f に示す. 図 3f より, ミリ長ストローク 1.1 mm を低電力 128 mW で達成する熱駆動切り紙 MEMS レンズスキャナの開発に成功した.

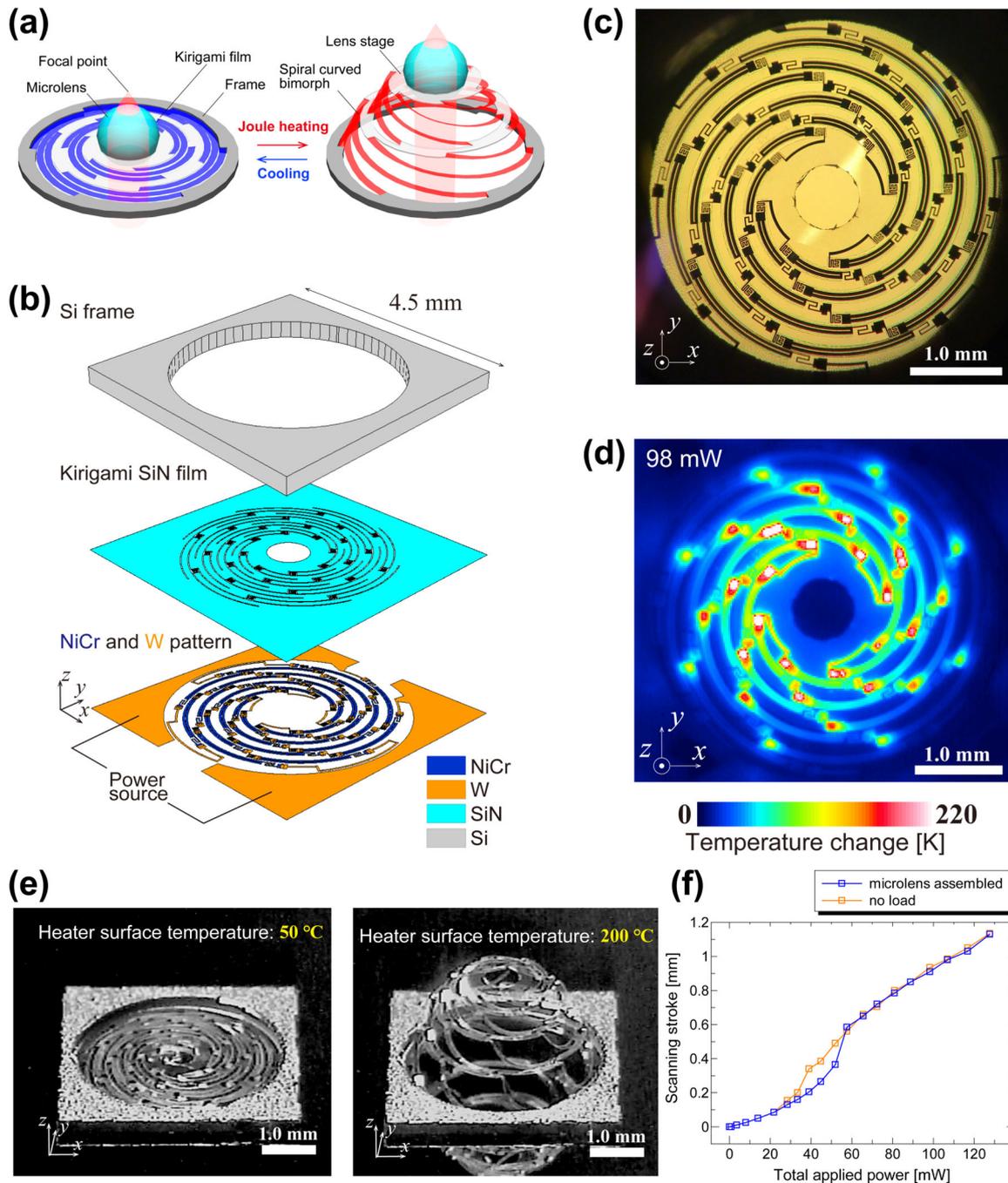


Fig. 3 Circular pyramidal kirigami MEMS actuator with millimeter-range low-power lens drive: (a) Design concept, (b) Design of kirigami actuator, (c) Microscopic image of fabricated actuator, (d) DC temperature response, (e) Demonstration of circular pyramidal out-of-plane actuation, (f) Static mechanical response. (Hashimoto, et al., 2020)

3. 4D プリンティングで作る熱駆動 Polymer-MEMS アクチュエータ

材料間の熱膨張率差によって変位する熱駆動 MEMS アクチュエータは、一般的に図 2c に示すような Si-MEMS 微細加工技術を用いてこれまで開発されてきた。ここでいう Si-MEMS 微細加工技術とは、フォトリソグラフィや薄膜成膜を用いる表面・バルク微細加工のことを指す。これら表面・バルク微細加工で作製される熱駆動 Si-MEMS アクチュエータは基本的に 2 次元形状となる。そのため、図 3e に示すように「いかに平面構造からアクチュエートして立体構造をうみだすか」という設計思想でアクチュエータは設計される。マイクロロボティクス等の多自由度運動を必要とする分野へ熱駆動 MEMS アクチュエータを今後応用していくためには、アクチュエータの設計形状自由度を 2 次元から 3 次元へと拡張させる必要がある。近年、印刷構造物が外部刺激によって時間的に機械変形するという意味で、4D (3D 構造+時間) プリンティングという新しいモノづくり概念が提唱された。実際に光や湿度といった外部刺激によって機械変形する様々な 4D プリンティングデバイスが開発されている (Gastaldi, et al., 2023)。

そこで筆者らは、図 4 に示すように 3 次元熱駆動 MEMS アクチュエータの新しい作製方法として、4D プリンティングをベースにしたアディティブ加工を提案した (Hashimoto, et al., 2023)。

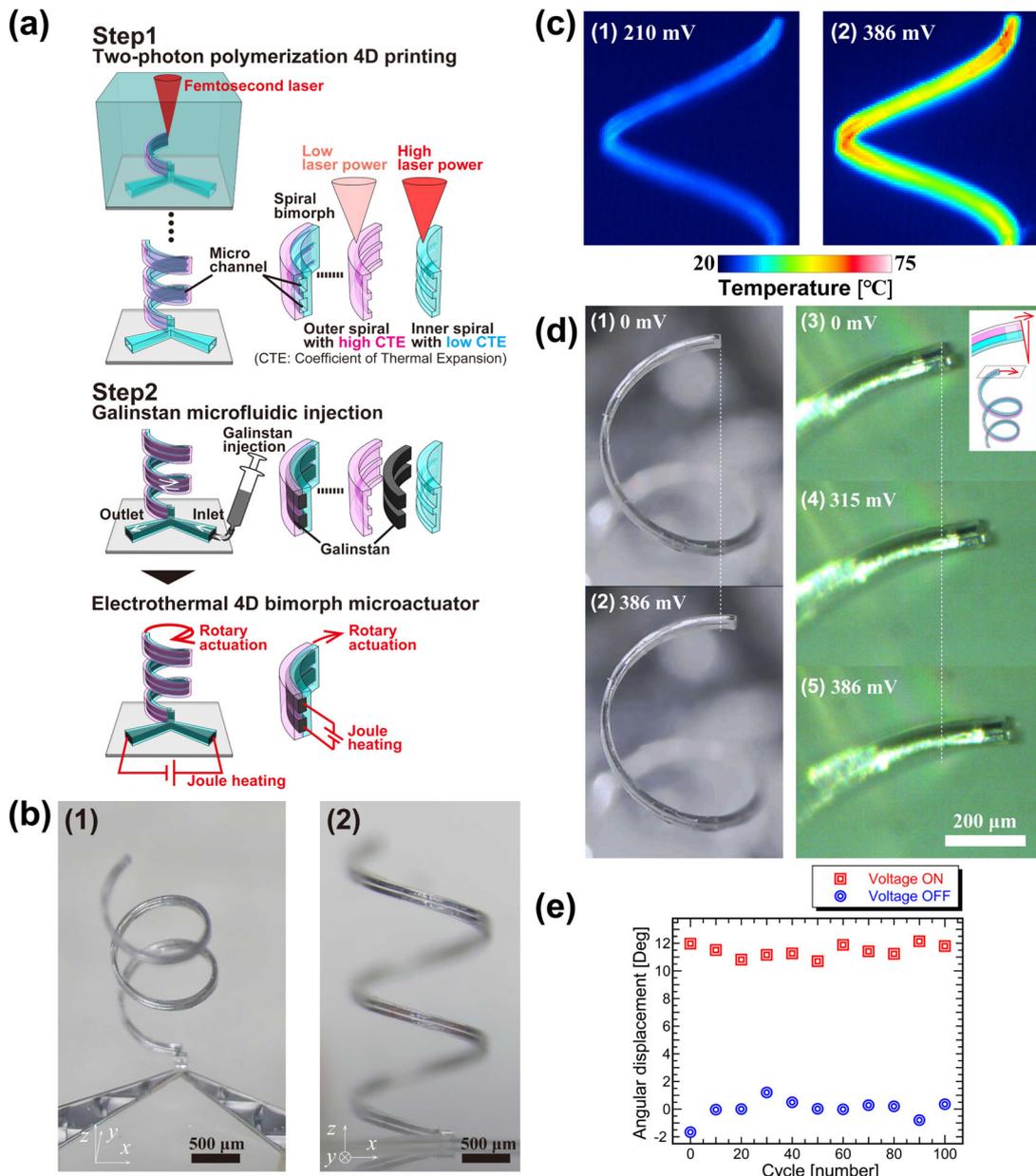


Fig. 4 Electrothermal polymer-MEMS actuator fabricated by 4D printing: (a) Conceptual illustration of the additive manufacturing method, (b) Fabrication results, (c) Temperature rise by Joule heating, (d) Electrothermal actuation, (e) Cycling test. (Hashimoto, et al., 2023)

作製プロセスを図 4a に示す。作製ステップ 1 として、フェムト秒レーザ強度を印刷中に変化させる光造形 4D マイクロプリンティングを用い、3 次元構造の樹脂性熱バイモルフを造形する。フェムト秒レーザ強度を低くした場合、光硬化樹脂の重合度が低くなるため、熱膨張率の高い構造が印刷される。逆にフェムト秒レーザ強度を高くした場合、光硬化樹脂の重合度が高くなるため、熱膨張率の低い構造が印刷される。2 光子吸収を利用することで数ミクロンスケールの高空間分解能で 3 次元樹脂性熱バイモルフ構造を印刷することができる。そして作製ステップ 2 として、熱バイモルフ内部に設けたマイクロ流路に液体金属ガリウムを圧送することでジュール加熱用の電気回路を形成する。提案手法の妥当性を示すため、図 4b に示すように、螺旋形状の熱駆動回転 MEMS アクチュエータを設計・作製した。電圧印加時のアクチュエータを赤外カメラで側面から観察したところ、図 4c に示すようにジュール加熱によってアクチュエータ温度が上昇していることが分かった。次に、ジュール加熱時のアクチュエータの機械変形を光学顕微鏡で上面から観察したところ、図 4d に示すように、ジュール加熱によってアクチュエータの回転運動が観察された。これらの光学顕微鏡画像から回転角度を算出し、繰り返し駆動を検証した結果を図 4e に示す。これらの結果から平面 2 次元構造となる熱駆動 Si-MEMS アクチュエータでは得られない大きな回転運動が得られることが分かり、熱駆動 MEMS アクチュエータの新規作製方法として、提案手法の妥当性が示された。これらの結果は、4D プリンティングによって熱駆動 MEMS アクチュエータの設計自由度を 3 次元へと拡張可能であることを示唆しており、ソフトロボティクス等への展開が期待される。

4. おわりに

本稿では、筆者らの研究を中心に熱駆動 MEMS アクチュエータの設計・作製について紹介させて頂いた。微細加工の発展に伴い、今まで作製困難であった複雑かつ機能的な熱駆動 MEMS アクチュエータの開発が可能になってきている。今後も新しい熱駆動 MEMS アクチュエータの設計・作製からそれらの実用化まで取り組んでいきたいと考えている。

謝 辞

本研究は日本学術振興会科学研究費特別研究員奨励費 (No. 18J20513) の助成を受けて実施された。また本研究の一部は、JST, ACT-X Grant Number JPMJAX21KF, Japan により支援された。デバイスの作製にあたっては、4 大学ナノ・マイクロファブ리케이션コンソーシアムおよび川崎市ナノ・マイクロ産学共同研究開発補助金の支援を受けた。

文献

- Gastaldi, M., Spiegel, C.A., Vazquez-Martel, C., Barolo, C., Roppolo, I., Blasco, E., 4D printing of light activated shape memory polymers with organic dyes, *Molecular Systems Design & Engineering*, Vol.8, No.3 (2023), pp.323–329.
- Hashimoto, M., Taguchi, Y., Design and fabrication of a kirigami-inspired electrothermal MEMS scanner with large displacement, *Micromachines*, Vol.11, No.4 (2020), 362.
- Hashimoto, M., Taguchi, Y., Circular pyramidal kirigami microscanner with millimeter-range low-power lens drive, *Optics Express*, Vol. 28, No.12 (2020), pp.17457-17467.
- 橋本将明, 田口良広, “ミリ長ストローク・低電力熱駆動切り紙 MEMS アクチュエータの開発—薄膜バイモルフの熱・機械応答特性—”, *熱物性*, Vol.34, No.4 (2020), pp.109-116.
- Hashimoto, M., Sato, T., Taguchi, Y., Additive manufacturing method of electrothermal 4D bimorph microactuator, *Sensors and Actuators: A. Physical*, Vol.356 (2023), 114348.
- Liu, L., Pal, S., Xie, H., MEMS mirrors based on a curved concentric electrothermal actuator, *Sensors and actuators: A. Physical*, Vol. 188 (2012), pp.349-358.
- Wang, P., Liu, Y., Wang, D., Liu, H., Liu, W., Xie, H., Stability study of an electrothermally-actuated MEMS mirror with Al/SiO₂ bimorphs”, *Micromachines*, Vol.10, No.10 (2019), 693.
- Wu, L., Xie, H., A millimeter-tunable-range microlens for endoscopic biomedical imaging applications, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 46, No.9 (2010), pp.1237-1244.
- Zhou, L., Zhang, X., Xie, H., An electrothermal Cu/W bimorph tip-tilt-piston mems mirror with high reliability, *Micromachines*, Vol.10, No.5 (2019), 323.