

【論文】

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—

Development of a Millimeter-Stroke Electrothermal Kirigami MEMS Actuator with Low Driving Power -Static and Dynamic Thermomechanical Characteristic of Film Bimorph-

橋本将明* 田口良広**
Masaaki Hashimoto, Yoshihiro Taguchi

本論文では、ミリ長ストロークを低電力で達成する熱駆動切り紙 MEMS アクチュエータを提案する。紙を切って折るだけで立体構造を造形する切り紙のコンセプトは、様々な工学デバイスに応用されている。著者らは、ジュール加熱によって面外方向ステップ状に変形する切り紙式熱バイモルフ薄膜アクチュエータを設計した。薄膜直径 2 mm のシングルステップ型および直径 4 mm のマルチステップ型の 2 種類のアクチュエータを MEMS プロセスを用いて作製した。シングル型は供給電力 131 mW でストローク 0.2 mm, マルチ型はわずか 128 mW でミリ長ストローク 1.1 mm を達成した。本稿では、提案した切り紙 MEMS アクチュエータの熱・機械特性を明らかにした。

This paper presents a millimeter-stroke electrothermal kirigami MEMS actuator with low driving power for endoscopic applications. Kirigami, a traditional Japanese art of paper cutting and folding, is a promising approach for engineering out-of-plane film structures. Based on the concept of a thermal bimorph kirigami film being folded by the thermal expansion difference, the proposed MEMS actuator is electrothermally transformed into an out-of-plane step structure. Two types of kirigami actuators, multistep and single-step actuator, were successfully fabricated by MEMS processes. The single step actuator with 2 mm film diameter provided a 0.2 mm vertical displacement at 131 mW, and the multistep actuator with 4 mm film diameter achieved a larger 1.1 mm actuation at only 128 mW.

[**Keywords:** Coefficient of thermal expansion, Electrothermal MEMS actuator, Film bimorph, Kirigami]

1. はじめに

近年、共焦点顕微鏡、光干渉断層計、多光子顕微鏡などの病変部位の非侵襲 in vivo 診断を可能にする光測定装置の開発が進んでいる。それらベンチトップ装置のバルク光機械素子を MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技

術を用いて内視鏡にパッケージング可能なサイズへと小型化することは、内視鏡型測定デバイスへの応用に大きく寄与する。これまでに著者らは、測定対象位置が生体運動によってミリスケールで時間変位する内視鏡下の測定系を想定し、対象に対するフォーカストラッキングによって血流光ドップラー信号や組織自家蛍光寿命の高感度測定が可能になることを示した [1-2]。これらフォーカストラッキングをベースにした測定手法を内視鏡デバイスへと実装するためには、対象をトラッキング可能なミリ長ストローク・内視鏡プローブにアセンブリ可能な低電力・小型サイズといった仕様を同時に満たすレンズ駆動用 MEMS アクチュエータが不可欠である。

熱駆動 MEMS アクチュエータは、熱膨張係数の異なる 2 層ナノ薄膜で構成される熱バイモルフ部をジュール加熱することで変位を得る。静電式、圧電式、電磁式といった他の MEMS アクチュエータ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ることができ

* 慶應義塾大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻,
〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1.

School of Integrated Design Engineering, Keio University,
3-14-1 Hiyoshi, Yokohama 223-8522.

FAX: 045-566-1720. E-mail: hashimoto@naga.sd.keio.ac.jp

* 日本学術振興会特別研究員,

〒102-0083 東京都千代田区麹町 5-3-1.

Research Fellow of Japan Society for the Promotion of Science
5-3-1 Kojimachi, Tokyo, 102-0083.

** 慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科,

〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1.

Department of System Design Engineering, Keio University,
3-14-1 Hiyoshi, Yokohama 223-8522.

FAX: 045-566-1720 E-mail: tag@sd.keio.ac.jp

る。熱駆動 MEMS アクチュエータは、ナノ薄膜の熱物性値（熱膨張率・熱伝導率・比熱など）を仔細に考慮したバイマテリアルデバイスであり、様々なデザインの熱駆動アクチュエータが提案されている [3-7]。例えば、Liu ら [3] は Al/W バイモルフを用いたマイクロミラーを提案し、275 mW で 227 μm ストロークを達成している。Wu ら [4] は Al/SiO₂ バイモルフをヒンジとして用いた Si フレームベースのアクチュエータを開発し、報告されているデバイスの中で最長となる 880 μm のストロークを印加電力 495 mW で達成している。しかし、これら従来の熱駆動アクチュエータはそれぞれ応答特性にメリットを有するものの、バイモルフ部からバルクサポート構造体への熱リークによって駆動電力が増大してしまうという問題点があった。これらジュール熱の制御の難しさから、1 mm 以上のミリ長ストロークを 100 mW 程度の低電力で達成した熱駆動 MEMS アクチュエータは未だ報告されていない。

本論文では、ミリ長ストロークかつ低電力を満たす切り紙型熱駆動 MEMS アクチュエータを提案する。切り紙は、紙に切れ込みをいれて折るだけで平面構造から立体構造を作り出すことができる。これまでに、切り紙をコンセプトとしたマクロ・マイクロスケールの様々なデバイスが開発されている [8-10]。著者らは、切れ込みを入れた低熱膨張材自立薄膜に高熱膨張材薄膜を部分的にパターンニングすることで、ジュール加熱によって自立薄膜を折ることが可能であることに着目し、切り紙型熱駆動 MEMS アクチュエータを開発した。自立薄膜直径が異なる 2 種類の切り紙アクチュエータの設計・作製・評価を行い、提案する切り紙アクチュエータの妥当性を検証した。

2. 熱駆動切り紙 MEMS アクチュエータの設計

2.1 熱駆動バイモルフ

Fig. 1 に熱駆動アクチュエータの原理図を示す。熱駆動 MEMS アクチュエータは、熱膨張率（coefficient of thermal expansion: CTE）が異なる 2 層ナノ薄膜で構成される熱バイモルフを通电加熱した時の曲げを利用する。熱バイモルフの温度変化 Δt に対する角度変化 θ_t は次式 (1) で表される [11]。

$$\theta_t = \beta \cdot (l_b/t_b) \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

l_b はバイモルフ長さ、 t_b はバイモルフ厚み、 $\Delta\alpha$ はバイモルフ材料の熱膨張率差、 β は 2 層バイモルフ材料の厚みとヤング率の比に関する係数である。MEMS デバイスで一般的に用いられる材料を Table 1 に示す。バイモルフは温度変化に対して大きな角度変化が得られかつ剛性が必要であることから、高熱膨張率差・高ヤング率・高降伏応力を満たす材料組み合わせが好ましい。提案アクチュエータにおいては、高熱膨張率材料には NiCr、低熱膨張率材料には SiN を選択した。特に、両者とも降伏応力が高く、信頼性の高い長ストローク駆動が可能である。

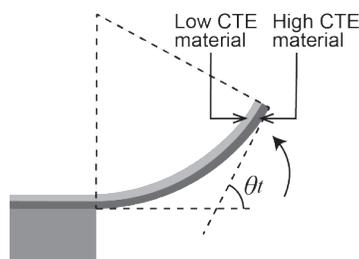


Fig. 1 Actuation principle of thermal bimorph.

Table 1 Properties of popular MEMS materials [12-17].

	Coefficient of thermal expansion [ppm/K]	Young's modulus [GPa]	Yield stress [MPa]
Al	23.6	70	0.2
Cu	16.9	120	0.3
NiCr	13.6	220	2.2
Cr	5.0	140	0.2
W	4.5	410	0.6
SiN	3.3	310	5.8
Si	2.5	179	1.1
SiO ₂	0.4	70	0.8

2.2 切り紙デザイン

Fig. 2, Fig. 3 に熱駆動切り紙 MEMS アクチュエータのデザインを示す。マルチ、シングルステップ型の 2 種類のアクチュエータを設計した。両者とも Si バルクフレーム、切り紙 SiN 薄膜、NiCr・W 薄膜パターンから構成される。低熱膨張率の SiN 薄膜（厚み 1.0 μm ）はマイクロスケールの切れ込みがパターン化されており、Si バルクフレームによって支持されている。また SiN 薄膜裏面には高熱膨張率の NiCr 薄膜パターン（0.5 μm ）が成膜されており、NiCr/SiN バイモルフ領域が形成されている。またすべての NiCr パターンは W（タングステン）パターンで電気的に接続されている。Fig. 2 (b), Fig. 3 (b) にアクチュエータ裏面を示す。マルチステップ型は 4 ステップの

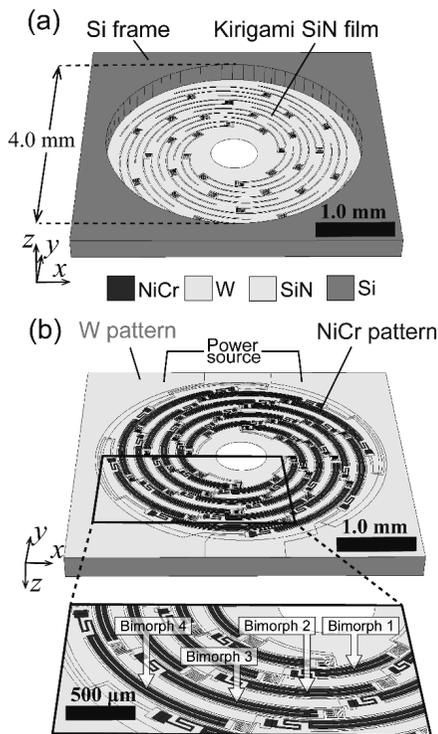


Fig. 2 Design of multistep kirigami MEMS actuator: (a) frontside view, (b) backside view.

NiCr/SiN バイモルフ 1-4 を有しており、サーペンタイン型のばねによって各ステップのバイモルフは電気・機械的に接続されている。さらに、Fig. 3(b) に示すように NiCr ガードヒーターがバイモルフ領域外への熱リークを防ぐためにバイモルフの付け根部分に配置されている。ガードヒーター部の発熱量はバイモルフ部での 3 分の 1 程度であり、バイモルフ部での発熱が支配的である。NiCr および W パターンで構成される電気回路に電力を供給すると、ジュール加熱によって NiCr / SiN バイモルフ領域が温度上昇し、バイモルフが垂直方向に変形する。SiN 自立薄膜領域にはバルクサポート構造体が一切存在しないため、バイモルフからバルク構造体への熱リークは Si フレームのみに限定される。マルチステップ構造は、シングルステップ構造と比較して、シリコンフレームへの熱伝導パスが長いことから熱抵抗が高い構造になっている。熱機械連成解析を用いたバイモルフ部分のアクチュエーションの検証結果を Fig. 4 に示す。この時解析に用いた、熱物性パラメータを Table 2 に示す。特に SiN 薄膜はバルク体と比較して熱伝導率が低下するため、薄膜値を使用した [18]。Fig. 4 よりレンズアセンブリ用のプラットフォームが垂直方向に変位していることが分かる。

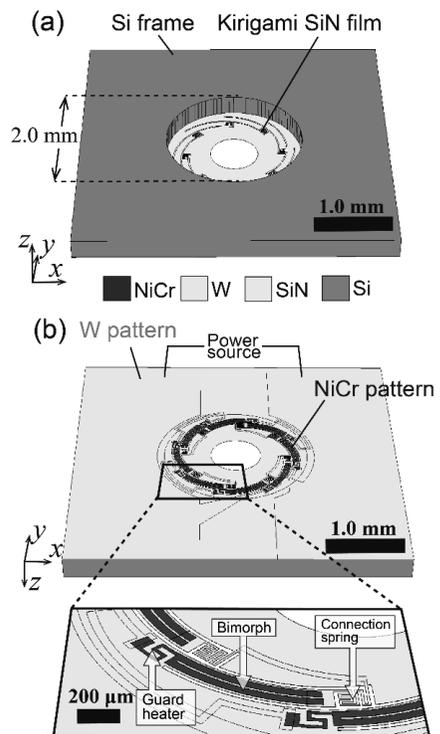


Fig. 3 Design of single step kirigami MEMS actuator: (a) frontside view, (b) backside view.

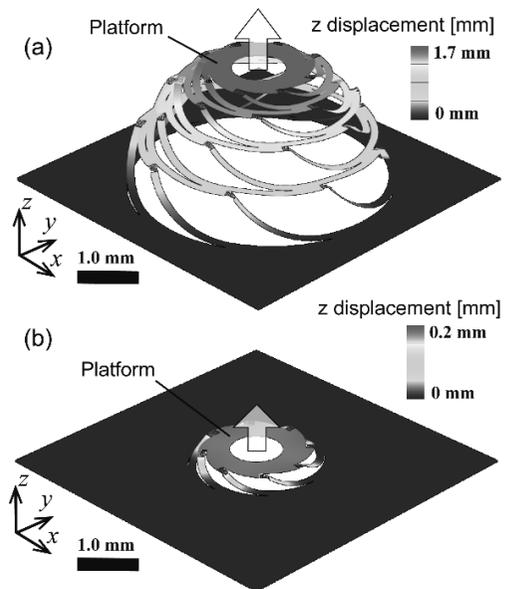


Fig. 4 FEM simulation of kirigami out-of-plane actuation: (a) multistep structure, (b) single step structure.

Table 2 Thermal properties used in FEM simulation.

	Coefficient of thermal expansion [ppm/K]	Thermal conductivity [W/(m · K)]	Specific heat [J/(kg · K)]
SiN	3.3	1.7	170
NiCr	13.6	11.3	460
W	4.5	174	132
Si	2.5	148	712

3. 熱駆動切り紙アクチュエータの作製

Fig. 5 にアクチュエータの微細加工プロセスフローとプロセス中の顕微鏡画像を示す。(a) 最初に片面研磨 Si ウェーハ (厚み: 300 μm) に、プラズマ化学気相成長法を用いて SiO_2 薄膜 (0.2 μm) と SiN (1.0 μm) 薄膜を成膜する。ボックス層である SiO_2 膜の除去後に SiN 膜が収縮するのを防ぐため、30 MPa の低圧縮応力 SiO_2 膜を成膜した。そして、 SiN 膜は SiO_2 膜応力にほぼ等しい 25 MPa の圧縮応力に調整した。次に、リフトオフプロセスにより W をパターン (0.2 μm) した後、NiCr (0.5 μm) をスパッタ成膜とウェットエッチングでパターンした。NiCr パターンの残留応力によって自立薄膜が破壊されるのを防ぐため、スパッタリングガス圧を調整することで NiCr 薄膜の残留応力を 180 MPa の引張応力まで抑制した。プロセス画像より、 SiN 薄膜上にパターンが成膜されていることが分かる。(b) マスク用のフォトレジストをパターンした後、 SiN 膜を反応性イオンでエッチングする。プロセス画像の黒く見える部分がエッチングされた箇所であり、 SiN 薄膜にマイクロスケールの切れ込みが入っていることが分かる。(c) Cr をパターンニングした後、Si 基板を反応性イオンで深掘りエッチングすることで SiO_2 / SiN 膜を形成する。最後に、 SiO_2 膜を気相フッ化水素酸エッチングによって除去し、NiCr, W パターンが成膜された切り紙自立薄膜が形成される。プロセス画像の透明に見える部分が SiN 自立薄膜であり、黒く見える部分が NiCr, W パターンである。

Fig. 6 に作製した熱駆動アクチュエータを示す。NiCr と W で構成される金属パターンは、 SiN 自立薄膜上に電気・機械的に断線なく成膜されている。シングル、マルチステップ型の電気抵抗値は、室温にてそれぞれ 4.6 k Ω , 18 k Ω であった。シングル型バイモルフ領域とマルチステップ型バイモルフ 1 領域の走査型電子顕微鏡画像を Fig. 6 (c), Fig. 6 (d) に示す。ガードヒーターとバネを含め薄膜バイモルフが作製できていることが分かる。

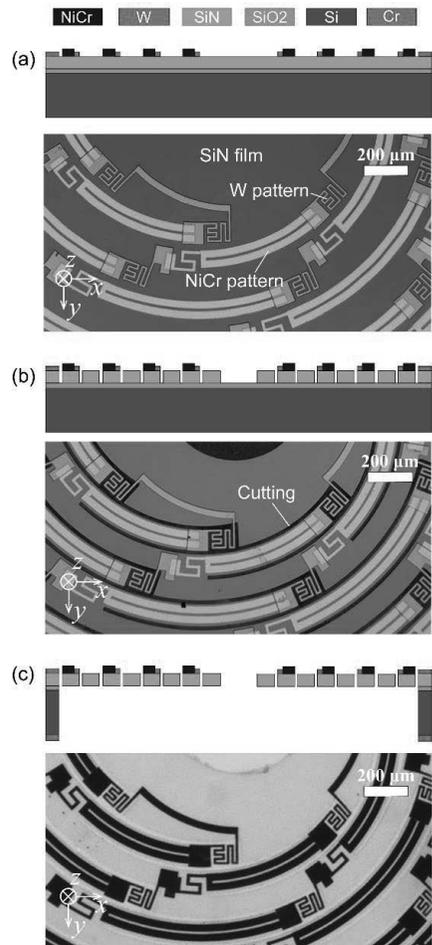


Fig. 5 Fabrication process flow of kirigami MEMS actuator.

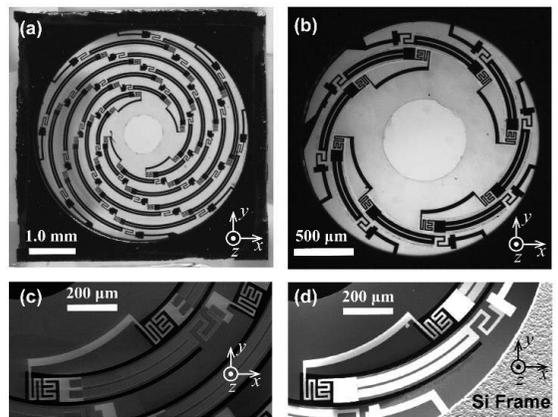


Fig. 6 Fabricated kirigami MEMS actuator: Microscopic images of multistep (a) and single step actuator (b), SEM images of bimorph 1 of multistep actuator (c) and bimorph of single step actuator (d).

4. 実験結果と考察

4.1 熱応答特性評価

シングルならびにマルチステップ型切り紙アクチュエータのバイモルフ熱応答特性を実験的に評価した。赤外線サーモグラフィ (TVS-8500, 日本アビオニクス, frame rate: 120 fps) を用いてバイモルフ梁の中心位置の温度を測定した。シングル, マルチステップ型バイモルフの DC 温度応答特性の実験結果を Fig. 7 に示す。印加電力に対して線形的な温度上昇が得られていることが分かった。

次に各バイモルフの AC 熱応答特性を検証した。ここでバイモルフのピオ数が 0.1 以下であることから, バイモルフを RC 熱等価回路に置き換えると, 各ステップ層におけるバイモルフ i の 3 dB カットオフ周波数 f_{ci} は次式 (2) で表される。

$$f_{ci} = 1/(2\pi R_{bi}C_{bi}) \quad (2)$$

R_{bi} は各 i ステップ層バイモルフの熱抵抗, C_{bi} は各 i ステップ層バイモルフの熱容量である。熱放射を無視した場合, バイモルフで発生したジュール熱は空気中への熱伝達とバイモルフ領域外への熱伝導によって輸送される。よって, バイモルフ i の熱コンダクタンスは次式 (3) で表される。

$$1/R_{bi} = h_a \cdot S_{bi} + \sigma_{bi} \quad (3)$$

h_a は空気への熱伝達係数, S_{bi} はバイモルフ表面積, σ_{bi} はバイモルフ領域外への熱伝導コンダクタンスを表している。各層においてバイモルフ横幅は同一であり, バイモ

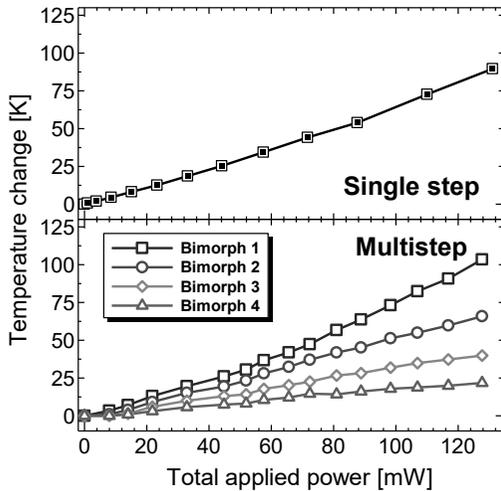


Fig. 7 DC temperature response of bimorphs at each step.

ルフ長さに対して表面積・熱容量は比例関係にあるので, 表面積 S_{bi} と熱容量 C_{bi} はそれぞれ次式 (4), (5) で表される。

$$S_{bi} = (l_{bi}/l_{b1}) \cdot S_{b1} \quad (4)$$

$$C_{bi} = (l_{bi}/l_{b1}) \cdot C_{b1} \quad (5)$$

(2) 式に (3) ~ (5) 式を代入すると, カットオフ周波数 f_{ci} は次式 (6) で表される。

$$f_{ci} = \frac{(l_{bi}/l_{b1}) \cdot h_a \cdot S_{b1} + \sigma_{bi}}{2\pi \cdot (l_{bi}/l_{b1}) \cdot C_{b1}} \quad (6)$$

シングル型のバイモルフ, マルチステップ型のバイモルフ 1 の長さは等しいので, 表面積・熱容量は同一である。そのためシングル型バイモルフ, マルチステップ型バイモルフ 1 におけるカットオフ周波数 $f_{c, \text{single}}$, $f_{c1, \text{multi}}$ は, 次式 (7), (8) で表される。

$$f_{c, \text{single}} = \frac{h_a \cdot S_{b1} + \sigma_{b, \text{single}}}{2\pi \cdot C_{b1}} \quad (7)$$

$$f_{c1, \text{multi}} = \frac{h_a \cdot S_{b1} + \sigma_{b1, \text{multi}}}{2\pi \cdot C_{b1}} \quad (8)$$

シングル, マルチステップ型バイモルフの AC 温度応答特性の実験結果を Fig. 8 に示す。シングル型バイモルフのカットオフ周波数 $f_{c, \text{single}}$ が 15 Hz 付近であるのに対してマルチ型バイモルフ 1 のカットオフ周波数 $f_{c1, \text{multi}}$ は 5~7 Hz であった。これより, 式 (7), (8) より, シン

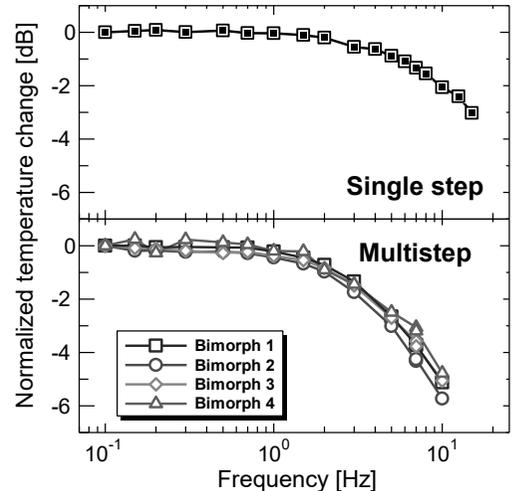


Fig. 8 AC temperature response of bimorphs at each step.

グル, マルチステップ型のバイモルフ領域外への熱コンダクタンス $\sigma_{b, \text{single}}$, $\sigma_{b, \text{multi}}$ の関係は次式 (9) で表される.

$$\sigma_{b, \text{multi}} < \sigma_{b, \text{single}} \quad (9)$$

これは, Fig. 6 に示すようにシングル型のバイモルフの根本付近にバルク Si フレームが存在するため, Si フレームへの熱リークが生じたためと考えられる. マルチステップ型のバイモルフ 4 は Si フレームに接しているが, シングルステップ型のバイモルフと比較して熱容量が大きいためカットオフ周波数は低くなっている. また, バイモルフ領域外への熱伝導が空気への熱伝送に対して十分に小さい場合, (6) 式よりカットオフ周波数 f_{ci} は次式 (10) で表される.

$$f_{ci} = 1/(2\pi R_{bi} C_{bi}) \approx \frac{h_a \cdot S_{b1}}{2\pi C_{b1}} \quad (10)$$

(10) 式より, バイモルフ領域外への熱伝導が空気への熱伝送に対して十分に小さい場合, 各層バイモルフのカットオフ周波数 f_{ci} は一致する. マルチステップ型アクチュエータのバイモルフ 1~4 のカットオフ周波数は 5 Hz 付近であり, 各層のバイモルフによって顕著な違いは見られなかった. また, 式 (10) より見積もられるカットオフ周波数は 3 Hz 程度であり, 実験値とオーダーで一致する. これより, マルチステップアクチュエータは, 熱伝導によるバイモルフ領域外への熱リーク量は小さく, 空気中への熱伝送が支配的であると言える.

4.2 機械応答評価

まず, バルク Si フレームを外部ヒーターで加熱することで, マルチステップ型切り紙薄膜の機械駆動を検証した. Fig. 9 にヒータ温度とプラットフォームの垂直方向変位量の関係を示す. 加熱前後でバイモルフに破損はみられず, 直径 4.0 mm の切り紙薄膜は 2.3 mm のミリ長アクチュエーションが機械的に可能であることが示された. Fig. 10 にマルチステップ型をバイモルフ領域のパターンに通電加熱して駆動した様子, Fig. 11 にシングル, マルチステップ型アクチュエータのプラットフォームの DC 機械応答を示す. プラットフォーム垂直方向変位は, 高倍率顕微鏡を垂直方向にフォーカシングすることで測定した. シングル型は 131 mW で 0.2 mm (消費電力に対する変位量: 1.5 $\mu\text{m}/\text{mW}$), マルチステップ型は 128 mW で 1.1

mm (8.6 $\mu\text{m}/\text{mW}$) の変位を達成した. マルチステップ型の応答性が 30 mW 付近でスイッチしているが, これはバイモルフの湾曲方向が温度上昇によって z 軸負方向から正方向に遷移したためと思われる. シングル型のバイモルフはバルク Si サポートへの熱リークが大きく, マルチ型のバイモルフは空気中への熱伝送が支配的なため, 消費電力に対する変位量はマルチ型にすることで, 5.7 倍向上した.

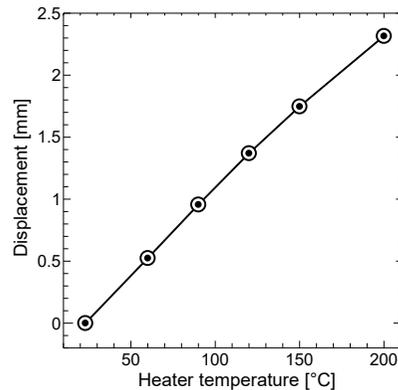


Fig. 9 Demonstrated multistep kirigami actuation stimulated by external heating with different temperatures.

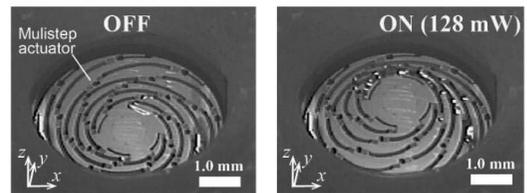


Fig. 10 Electrothermal multistep actuation captured by a CCD camera when the power is off and at 128 mW.

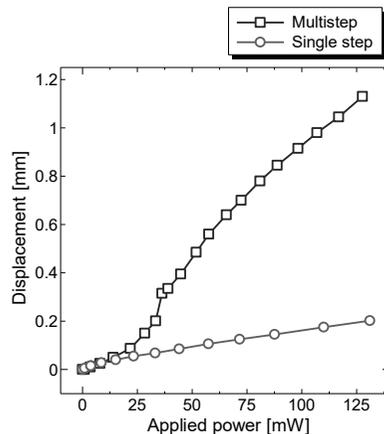


Fig. 11 DC mechanical response of single step and multistep actuator.

Fig. 12 にプラットフォームの周波数応答を示す。この時、プラットフォーム表面で反射されたビームのスポット位置変化を用いて周波数応答を測定した。シングル、マルチ型のカットオフ周波数はそれぞれ約 20Hz, 約 5~7Hz であった。熱カットオフ周波数と比較的良好な一致を示すことから、低周波帯域の応答性は主に熱的応答特性によって決定されることが分かった。

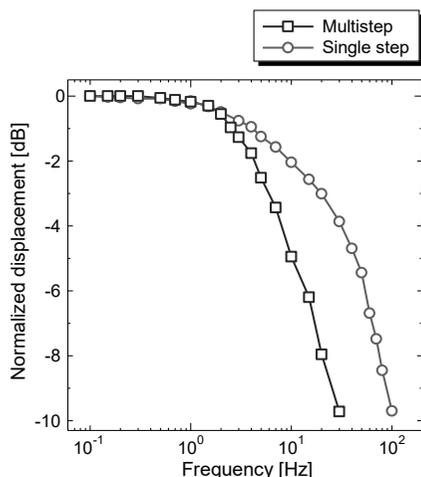


Fig. 12 AC mechanical response of single step and multistep actuator.

5. 結論

本論文では、ミリ長ストロークを低電力で達成する熱駆動切り紙 MEMS アクチュエータを提案し、熱物性値を用いたデバイス設計、MEMS プロセスを用いた作製、熱・機械応答評価を行った。以下に結論を示す。

1. 自立薄膜に熱バイモルフをパターンすることで、ジュール加熱によって自立薄膜が面外方向ステップ状に変形する熱駆動切り紙 MEMS アクチュエータを設計した。
2. 薄膜直径が異なるシングル、マルチステップ型の 2 種類のアクチュエータを MEMS プロセスを用いて作製した。
3. 熱・機械応答評価にて、マルチステップ型はわずか 128 mW の供給電力で 1.1 mm の長ストロークを達成した。本アクチュエータの機械応答特性は熱的応答特性に依存し、今回のマルチステップ型デザインでは、空気への熱輸送が支配的であることを明らかにした。

【謝辞】

本研究の一部は、日本学術振興会特別研究員奨励費 (No. JP18J20513) 並びに潮田記念基金慶應義塾博士課程学生研究支援プログラムによるものであることを記し、謝意を表す。ま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。

NOMENCLATURE

- C_{bi} : thermal capacity of bimorph i , $J \cdot K^{-1}$
- h_a : convective heat transfer coefficient of air, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
- f_{ci} : thermal cutoff frequency of bimorph i , Hz
- l_{bi} : length of bimorph i , m
- R_{bi} : thermal resistance of bimorph i , $K \cdot W^{-1}$
- S_{bi} : surface area of bimorph i , m^2
- ΔT : temperature change of bimorph, K
- t_b : bimorph thickness, m
- α : coefficient of thermal expansion, K^{-1}
- β : actuation coefficient related to thickness and biaxial Young's modulus ratios of two materials
- θ_t : arc angles change by temperature change, rad
- σ_{bi} : thermal conductance due to conductive heat transfer from bimorph i to ambience area, $W \cdot K^{-1}$

参考文献

- [1] M.Hashimoto, Y.Taguchi; "Motion Tracking System for Robust Non-Contact Blood Perfusion Sensor", *Sensors*, **18** (2018) 277.
- [2] S.Ito, M.Hashimoto, Y.Taguchi; "Development of a robust autofluorescence lifetime sensing method for use in an endoscopic application", *Sensors*, **20** (2020) 1874.
- [3] L.Liu, S.Pal, H.Xie; "MEMS mirrors based on a curved concentric electrothermal actuator", *Sens. Actuator A-Phys.*, **188** (2012) 349-358.
- [4] L.Wu, H.Xie; "A millimeter-tunable-range microlens for endoscopic biomedical imaging applications", *IEEE J. Quantum Electron.*, **46** (2010) 1237-1244.
- [5] A.Jain, H.Xie; "An electrothermal microlens scanner with low-voltage large-vertical-displacement actuation", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **17** (2005) 1971-1973.
- [6] L.Zhou, X.Zhang, H.Xie; "An Electrothermal Cu/W Bimorph Tip-Tilt-Piston MEMS Mirror with High Reliability", *Micromachines*, **10** (2019) 323.
- [7] P.Wang, Y.Liu, D.Wang, H.Liu, W.Liu, H.Xie; "Stability Study of an Electrothermally-Actuated MEMS Mirror with Al/SiO₂Bimorphs", *Micromachines*, **10** (2019) 693.
- [8] M.Blees, A.Barnard, P.Rose, S.Roberts, K.McGill, P.Huang, A.Ruyack, J.Kevek, B.Kobrin, D.Muller,

- P.McEuen; “Graphene kirigami”, *Nature*, **524** (2015) 204-207.
- [9] T.Han, F.Scarpa, N.Allan; “Super stretchable hexagonal boron nitride Kirigami”, *Thin Solid Films*, **632** (2017) 35-43.
- [10] A.Baldwin, E.Meng; “Kirigami Strain Sensors Microfabricated From Thin-Film Parylene C”, *J. Microelectromech. Syst.*, **27** (2018) 1082-1088.
- [11] G.Lammel, S.Schweizer, P.Renaud; “Optical Microscanners and Microspectrometers Using Thermal Bimorph Actuators”, (2002), Kluwer Academic, Dordrecht.
- [12] H.Javed, B.Merle, E.Preiss, R.Hivet, A.Benedetto, M.Goken; “Mechanical characterization of metallic thin films by bulge and scratch testing”, *Surf. Coat. Technol.*, **289** (2016) 69-74.
- [13] R.Edwards, G.Coles, W.Sharpe; “Comparison of Tensile and Bulge Tests for Thin-Film Silicon Nitride”, *Exp. Mech.*, **44** (2014) 49-54.
- [14] R.Vayrette, M.Galceran, M.Coulombier, S.Godet, J.Raskin, T.Pardoën; “Size dependent fracture strength and cracking mechanisms in freestanding polycrystalline silicon films with nanoscale thickness”, *Eng. Fract. Mech.*, **168** (2016) 190-203.
- [15] K.Davoudi; “Temperature dependence of the yield strength of aluminum thin films: Multiscale modeling approach”, *Scr. Mater.*, **131** (2017) 63-66.
- [16] V.Hatty, H.Kahn, A.Heuer; “Fracture Toughness, Fracture Strength, and Stress Corrosion Cracking of Silicon Dioxide Thin Films”, *J. Microelectromech. Syst.*, **17** (2008) 943-947.
- [17] S.Pal, L.Zhou, X.Zhang, H.Xie, “Optical MEMS, Nanophotonics, and Their Applications”, eds G.Zhou, C.Lee, (2017) 173–200, CRC Press, Boca Raton.
- [18] M.Bogner, A.Hofer, G .Benstetter, H.Gruber, R.Fu; “Differential 3ω method for measuring thermal conductivity of AlN and Si₃N₄ thin film”, *Thin Solid Films*, **591** (2015) 267-270.

[Received May 11, 2020, Accepted July 27, 2020]