

研究終了報告書

「低消費電力な超長ストローク熱駆動 MEMS アクチュエーターの開発」

研究期間：2021 年 10 月～2024 年 3 月

研究者：橋本 将明

1. 研究のねらい

膨大な熱エネルギーを消費して機械エネルギーを得てきた今までの社会が、カーボンニュートラルな社会へシフトしていく上で、熱－機械エネルギー高効率変換が可能なマイクロマシンの設計・製造基盤技術の確立は喫緊の課題である。本研究のねらいは、低消費電力な超長ストローク熱駆動 MEMS アクチュエーターの開発に挑戦し、マイクロマシンの熱－機械エネルギー高効率変換設計・製造基盤技術を創出することである。本研究では、超長ストロークを低消費電力で達成するために、新奇熱応答アクチュエーター材である金属絶縁体相変化ナノ薄膜を用いた切り紙型熱駆動 MEMS アクチュエーターを開発した。一般的なナノ薄膜は温度上昇に伴い体積膨張するが、金属絶縁体相変化ナノ薄膜は相転移温度にてピコ秒スケールで巨大物性値変化を伴い不連続的に体積収縮した後、相転移温度以上では高熱膨張材料として体積膨張する。本研究では、体積収縮と膨張を示す金属絶縁体相変化ナノ薄膜から構成される切り紙バイモルフ薄膜の熱輸送形態をナノ・マイクロ熱工学の観点で設計することによって、熱エネルギー（消費電力）を高効率に機械エネルギー(変位 or 仕事)に変換可能な MEMS アクチュエーターを開発している。低消費電力で超長ストロークな熱駆動アクチュエーターの開発で得られた本研究の知見を、熱駆動型マイクロマシンの熱－機械エネルギーの高効率変換設計・製造基盤技術へと一般体系化することで、研究成果を広く社会に波及させることが可能である。

2. 研究成果

(1)概要

本研究期間においてはまず当初の研究計画通りに、金属絶縁体相変化ナノ薄膜で構成される切り紙型熱駆動 MEMS アクチュエーターを設計・作製・評価し、低消費電力で長ストロークな MEMS アクチュエーターを開発した。従来 MEMS アクチュエーターと本研究で開発した MEMS アクチュエーターを消費電力とストロークの観点で比較した結果を図1に示す。図1に示すように、従来 MEMS アクチュエーターがカバーできていなかった低消費電力で長ストロークな領域をカバーする MEMS アクチュエーターの開発に成功している。本研究で開発した MEMS アクチュエーターはレンズやミラーをアセンブリ可能であり、例えば低消費電力と長ストロークの両立が必要とされる内視鏡下光 MEMS 分野への応用が期待できる。一方で、作製した MEMS アクチュエーターは従来 MEMS アクチュエーターが持ち得ない独自の性能を有しているものの、有限要素解析値との乖離が見られる。この実験値と解析値の乖離は、一部の微細加工が不完全であることに起因している。微細加工プロセスを一部改良することで実験値と解析値の乖離が解消され、数ミリ長の超長ストロークを数十ミリワットで達成する MEMS アクチュエーターが作製できると考えられる。

また研究開始の当初の想定とは異なる有用な結果も複数得られている。当初の計画では、

垂直方向駆動する長ストローク切り紙型熱駆動 MEMS アクチュエーターの開発を想定していたが、アクチュエーターに埋設された複数のジュール加熱回路に選択的に電圧を印加することで、垂直方向にピッチ・ロール軸方向も加えた多自由度駆動が可能であることが解析かつ実験的に示されている。さらには、開発したアクチュエーターにレンズを集積する上で、マイクロスケール空間分解能で 3 次元光造形構造物の熱膨張率を制御可能であることが明らかになり、熱駆動ソフトマイクロアクチュエータの開発にも派生的に成功している。

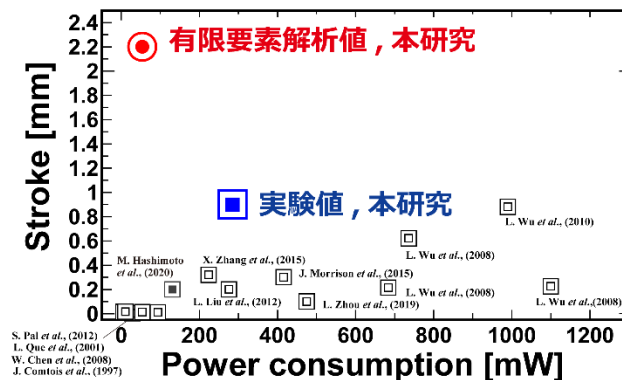


図1 従来 MEMS アクチュエーターと開発した MEMS アクチュエーターの比較

(2) 詳細

本研究期間において、下記の項目に示すように金属絶縁体相変化ナノ薄膜で構成される切り紙型熱駆動 MEMS アクチュエーターを設計・作製し、マイクロマシンの熱-機械エネルギー高効率変換設計の体系化に向けて開発したアクチュエーターを評価・解析した。

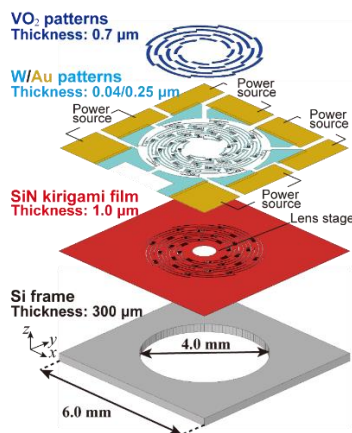
【研究項目①】:

「低消費電力で超長ストロークな熱駆動切り紙 MEMS アクチュエーターの設計・作製」

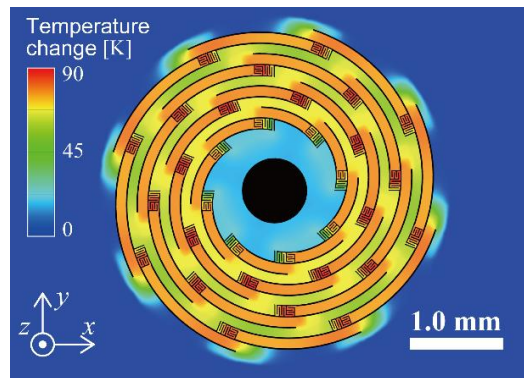
低消費電力で超長ストロークな熱駆動 MEMS アクチュエーターを設計し、プロトタイプ型を作製した。設計にあたっては図2に示すように、アクチュエーターの基本設計に切り紙デザインを採用し、有限要素解析を用いて窒化シリコン薄膜と二酸化バナジウム薄膜等で構成される切り紙型熱駆動 MEMS アクチュエーターを設計した。二酸化バナジウム薄膜を螺旋状に交互に切り紙薄膜上に配置することで、ピラミッド状に垂直変形する切り紙機械構造を設計した。また、アクチュエーター各構成要素の熱容量、熱抵抗等を集中定数モデリングした上で熱機械連成有限要素解析を行い、ジュール加熱用電気回路薄膜パターンの幾何形状を 2.5 次元的に最適設計している。これら最適化によって数分の1程度に消費電力を抑えることができ、低消費電力で超長ストロークな MEMS アクチュエーターの設計に成功した。(国際会議 Transducers 2023 口頭発表済、国内会議 3 件、解説記事 2 件)。

作製においてはまず、厚み・体積収縮率・残留応力といった二酸化バナジウムの膜質がアクチュエーター性能に大きく影響するため、二酸化バナジウムの成膜条件を探索した。スパッタ成膜プロセスとポストアニーリングプロセスにおける複数のパラメーターを最適化することで、厚膜かつ低残留応力な二酸化バナジウム薄膜の合成法を確立した。厚膜かつ低残留応力な二酸化バナジウムを成膜可能になったことから、次に表面・バルク微細加工を用いたアクチュ

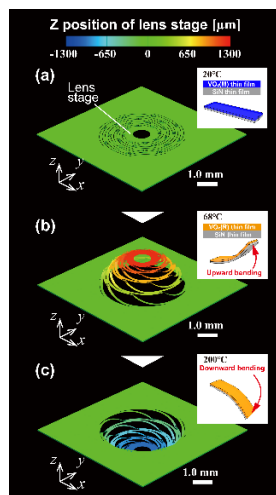
エーター本体を作製した。考案した微細加工プロセスフローに沿って各プロセスの条件出しを行い、プロトタイプ型アクチュエーターを作製した。プロトタイプ型アクチュエーターの駆動テストにおいて、垂直方向の駆動が確認された。この駆動テストにおける実験値を従来 MEMS アクチュエーターと比較した結果を図1に示す。図1に示すように、従来 MEMS アクチュエーターがカバーできていなかった低消費電力で長ストロークな領域をカバーする MEMS アクチュエーターの開発に成功した。作製したプロトタイプ型アクチュエーターは従来 MEMS アクチュエーターが持ち得ない独自の性能を有しているものの、有限要素解析値との乖離が見られる。この実験値と解析値の乖離は、一部の微細加工が不完全であることに起因しているため、微細加工プロセスを一部改良することで数ミリ長の超長ストロークを数十ミリワットで達成する MEMS アクチュエーターが作製できると考えられる。



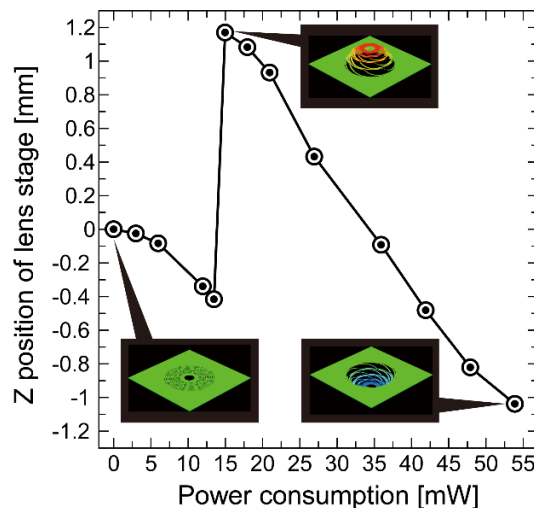
(a) 設計アクチュエーターの構成



(b) 温度分布の有限要素解析結果



(c) 駆動形態の解析結果



(d) 消費電力と変位の有限要素解析結果

図2 低消費電力で超長ストロークな熱駆動切り紙 MEMS アクチュエーターの設計概要

【研究項目②】

「熱－機械エネルギー高効率変換設計の体系化に向けたアクチュエーター評価・解析」

本研究では、金属絶縁体相変化ナノ薄膜から構成される切り紙バイモルフ薄膜の熱輸送形態をナノ・マイクロ熱工学の観点で設計することによって、熱エネルギー(消費電力)を高効率に機械エネルギー(変位 or 仕事)に変換可能な MEMS アクチュエーターを設計している。本設計の妥当性を評価するために、アクチュエーター各構成要素の熱容量、熱抵抗等を集中定数モデリングした上で、有限要素解析結果と実験結果を比較した。これらの比較によって、ジュール加熱用電気回路薄膜パターンの幾何形状を 2.5 次元的に最適設計することで数分の1程度に消費電力を抑えることの妥当性が示され、熱－機械エネルギー高効率変換のための設計指針を提案するに至った。

また開発したアクチュエーターを解析することによって、研究開始の当初の想定とは異なる有用な結果も得られている。当初の計画では、垂直方向駆動する長ストローク切り紙型熱駆動 MEMS アクチュエーターの開発を想定していたが、アクチュエーターに埋設された複数の電気回路に選択的に電圧を印加することで切り紙薄膜を選択的にジュール加熱可能であり、垂直方向駆動に加えてピッチ・ロール 2 軸方向駆動も可能であることが実験的に明らかになった。さらには、開発したアクチュエーターにレンズを集積する上で、熱駆動ソフトマイクロアクチュエータの作製にも成功している(成果論文 1、受賞1件)。これらの当初予定していた結果と想定外の結果を踏まえ、本研究の新展開として異種集積化技術を構想するに至った。

3. 今後の展開

サイバー空間との親和性が高い異種集積化技術によって、本研究で開発した MEMS アクチュエーターのアプリケーション応用を進める。近年の半導体デバイスの世界的な開発状況にもみられるように、ムーアの法則は破れつつあり、単に素子寸法の縮小に頼った微細化による MEMS 分野の発展は限界が見え始めてきた。異なる材料・構造・機能を有するデバイスを MEMS へ最適に集積化することは、MEMS の新たなアプリケーション先を開拓するための有効なアプローチだと考えられる。まず今後 1 年のタイムスパンで、マイクロオプティクスを MEMS アクチュエーターに集積させる。そして今後 10 年のタイムスパンで、サイバー空間によって MEMS のアプリケーション応用が加速する未来を、提案する異種集積化技術によって切り拓いていく。

4. 自己評価

熱－機械エネルギー高効率変換のためのデバイス設計指針を提案した上で、独自の微細加工を駆使して目的であった低消費電力で長ストロークな MEMS アクチュエーターを開発しており、解析値と実験値での乖離があるものの波及効果が大きい成果が得られている。また、当初想定していなかった有用な結果も踏まえ、新たな異種集積化技術の提案にも至っており、本研究の更なる新展開が期待される。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 1件

1. M. Hashimoto, T. Sato, Y. Taguchi, “Additive manufacturing method of electrothermal 4D bimorph microactuator”, Sensors and Actuators A-Physical, 356(16), 114348, (2023).

ACT-X 研究では、派生的にポリマー熱駆動 MEMS アクチュエーターの開発に成功した。MEMS アクチュエーターへ実装可能なポリマーデバイス例として、有用性を示す重要成果論文として記載した。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 0 件(特許公開前のものは件数にのみ含む)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

国際会議発表

- ① Design of bi-directional VO₂-kirigami electrothermal microactuator with millimeter large stroke, the proceeding of the 22nd International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers 2023), 2023.

受賞

- ② 日本熱物性学会奨励賞, 橋本将明, 日本熱物性学会, 2023 年 11 月
- ③ 若手優秀講演表彰, 橋本将明, 一般社団法人日本機械学会マイクロ・ナノ工学部門 2022 年 2 月

著作物(解説)

- ④ 橋本将明, めるていんぐぽいんと(24) 美学と熱工学—熱駆動マイクロアクチュエータのデザイン—, 熱物性, Vol. 36, No. 2, pp.83-84 (2022)
- ⑤ 橋本将明, 熱駆動 MEMS アクチュエータの作り方, 日本機械学会熱工学部門ニュースレター, 2023 年 9 月号, TED Plaza.