

令和 5 年 10 月 30 日現在

機関番号：31308

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04913

研究課題名（和文）低直流電圧で駆動するMEMSアクチュエータに関する研究

研究課題名（英文）A Study of MEMS Actuator Driven by Low DC Voltage

研究代表者

水野 純（Mizuno, Jun）

石巻専修大学・理工学部・教授

研究者番号：50644499

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、現在の集積回路やマイコン等の3.3～5.0Vの低直流動作電圧を用いて、5μm以上という比較的大変位量が得られるMEMSアクチュエータの実現を目指す。その目的に対して、デバイスの設計・試作・評価を行った。設計段階で理論モデルを構築し、それに対する方程式を導出し、それに基づいて設計、試作、評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、MEMSにおいて心臓部であるマイクロアクチュエータ部は大きな問題を残している。MEMS分野において、集積回路やマイコン等の3.3～5.0Vの直流電圧で駆動しようとしてもサブミクロンオーダー程度の僅かな変位量しか得られない問題が未だに解決されていない。そこで、本研究はその問題に着目し、櫛歯型静電MEMSアクチュエータを基にプルイン現象と複数のバネ・質量系によって低電圧駆動で大変位量を実現できることを実証することにより、これまでDC駆動で大変位量が不可能とされた静電マイクロアクチュエータの概念を覆し、学術的な意義が十分ある研究を遂行することにした。

研究成果の概要（英文）：This research aims to realize a MEMS actuator that can obtain a relatively large displacement of 5 μm or more by using a low DC operating voltage of 3.3 to 5.0 V for current integrated circuits and microcomputers. For that purpose, we designed, fabricated, and characterized the device. At the design stage, we consider a theoretical mode, and based on it we designed, fabricated, and characterized the device.

研究分野：MEMS

キーワード：MEMS actuator comb-drive low voltage pull-in phenomenon

## 1. 研究開始当初の背景

近年、MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems: マイクロ・エレクトロメカニカル・システムズ) と LSI (Large-Scale Integrated Circuit: 高密度集積回路) の融合、つまりヘテロ集積化に向けての研究開発が盛んになっている<sup>1)</sup>。MEMS と LSI を一体化することにより、MEMS デバイスの制御が容易になると同時に小型化・高機能化が期待できる。これに伴い、IoT (Internet of Things: モノのインターネット)、AI (Artificial Intelligence: 人工知能)、ロボット、自動運転等といった分野において、MEMS の需要が更に高まると予想される<sup>2)</sup>。これらの分野の発展は、加速度センサ、角速度センサ、圧力センサ、マイクロミラー、マイクロカンチレバー、RF スイッチ、 $\mu$ TAS 等のデバイス研究<sup>3)</sup>が行われてきたことによって実現可能となってきた。しかし、心臓部であるマイクロアクチュエータ部は大きな問題を残している。MEMS 分野において、集積回路やマイコン等の 3.3 ~ 5.0 V の直流電圧で駆動しようとしてもサブマイクロオーダー程度の僅かな変位置しか得られない問題が未だに解決されていない。このようなアクチュエータを有するデバイスを真空封止して空気抵抗を減らし、デバイスの共振周波数点で交流駆動 (AC 駆動) を行うことにより変位が増幅するため電圧を劇的に下げることができると報告されている<sup>4)</sup>。しかし、共振点で駆動するものはごく一部に限り、直流電圧駆動 (DC 駆動) 必要とするもの (RF スイッチ、2次元光スキャナ、光スイッチ、各種センサ等) の方が多いが、DC 駆動の場合は真空中での動作にも関わらず変位は増幅されない。そこで、本研究はその問題に着目し、櫛歯型静電 MEMS アクチュエータを基にプルイン現象と複数のバネ・質量系によって低電圧駆動で大変位置を実現できることを実証することにより、これまで DC 駆動で大変位置が不可能とされた静電マイクロアクチュエータの概念を覆し、学術的な意義が十分ある研究を遂行することにした。

## 2. 研究の目的

本研究は、現在の集積回路やマイコン等の 3.3 ~ 5.0 V の低直流動作電圧を用いて、5  $\mu$ m 以上という比較的大変位置が得られる MEMS アクチュエータの実現を目指す。

## 3. 研究の方法

次の点について研究を遂行する: 詳細設計の確立、デバイス製造のプロセスの確立とその試作、駆動電圧 3.3 ~ 5.0 V で動作検証 (デバイスの特性評価)。これらの点を実行することにより、新アクチュエータが低直流電圧で大変位置が得られることを明らかにする。

デバイスの具体的な構造設計、製作、評価を次のような方法で実施する。アクチュエータ構造検討: アクチュエータは櫛歯型静電タイプであり、大きく分けて可動部と固定部からなり、静電引力を発生するための電極、可動部の支持及びそれを可動するためのバネ構造で構成されている。また、CAE を用いて各種パラメータ (静電引力、バネ定数、構造体質量、構造強度、固有振動周波数等) による構造解析を行う。また、理論モデルに基づき、電圧の関数としての変位、プルイン電圧及びプルイン変位の理論方程式を導出する。製造工程設計: 詳細構造を設計した後に、デバイスを駆動するための電極レイアウト及び製造工程設計を行う必要がある。材料は SOI (Silicon On Insulator) ウエハーという 3 層構造のウエハーを採用する。このウエハーは、活性層 (Si)、絶縁層 (SiO<sub>2</sub>) 及び支持層 (Si) で構成されている。デバイスは活性層に造り、可動部をリリースする必要があるため、デバイスの下に残った絶縁層は、スティッキングは起こりにくい気相フッ酸で除去する。デバイスの製造を成功するためには、製造工程のキーとなる Deep-RIE 加工について、Low Frequency 電源によるノッチング (絶縁層付近で起きる Si の異常浸食エッチング) 対策と低スキャロップ (波打った壁面形状) の製造法を用いることが必要である。特に、構造体を支持しながら常に変形するバネの部分については低スキャロップ加工が不可欠である。フォトマスク設計: 基本製造工程が確立した時点で、フォトマスクの設計を行う。フォトマスクの数は製造工程によって決定されるが、検討中の工程については、最低 2 枚は必要になる。フォトマスク及びデバイス試作: とを終えた段階で、必要枚数のフォトマスクの製造を行い、これらを用いての製造工程設計に基づきデバイスを試作する。試作は東北大学マイクロシステム融合研究開発センター試作コインランドリ制度を利用する予定である。完成したデバイスは、形状や寸法等の評価及び駆動実験による駆動電圧の実測値と計算値の検証を行い、結果によって設計や製造条件等の見直しを行う可能性もある。

## 4. 研究成果

### (1) 理論モデル

図 1 に本研究に採用した櫛歯型静電タイプのアクチュエータ部の概念図を示す。固定櫛電極には電圧  $V$  を印加し、可動櫛電極は接地する。そのときに、固定櫛歯に囲まれた可動櫛歯の接線 ( $y$  方向) と法線 ( $x$  方向) 方向に、接線と法線成分に容量が生じ、それぞれの方向に力が発生する。

可動櫛歯は  $x$  方向に沿って対称的に配置されているため、接線方向における力は釣り合い、合成力はゼロとなる。従って、可動櫛歯には法線方向のみの力が働くことになる。可動部は同じバネ定数を持つ 2 本のバネで支えられている。変位  $x$  に対して、静電力とバネによる復元力が釣り合うことにより合成力はゼロとなる。この条件より、電圧  $V$  と変位  $x$  の関係は次式となる。

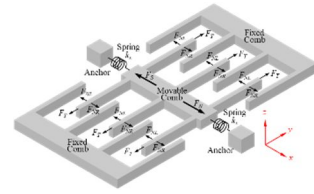


図 1. アクチュエータ部の概念図

$$V = 2(g_R - x)(g_L + x) \sqrt{\frac{k_x x}{\epsilon_r \epsilon_0 (l - g_T) h [n_R (g_L + x)^2 - n_L (g_R - x)^2]}}, \quad (\text{式 1})$$

ここで、 $\epsilon_0 (= 8.7754 \times 10^{-12} \text{ F/m})$ 、 $\epsilon_r (= 1)$  はそれぞれ真空の誘電率、媒質の比誘電率、 $h$  は櫛歯の深さ、 $w$ 、 $l$ 、 $h$  は櫛歯の幅、長さおよび厚さ、 $g_T$  は固定櫛歯先端と可動櫛歯先端との間の初期隙間、 $g_R$  および  $g_L$  はそれぞれ固定櫛歯と可動櫛歯の側壁との間の初期隙間、 $k_x$  はバネ定数である。

プルイン条件下でのアクチュエータの動作を理解するには、システムの安定性をさらに検討する必要がある。異なる様々駆動電圧に対する静電力とバネの復元力を考える。変位が比較的小さい場合、これらの二つの力は必ず 2 点で交差する。しかし、変位を大きくなるにつれて、一点でのみの交点となり、この時点で、平衡状態は安定性のしきい値に達する。それ以上の変位では、交点が存在しないため、静電力は復元力より常に大きくなり、可動部は必ず固定部に向かって接触し、これをプルイン現象といい、このときの電圧をプルイン電圧と呼ぶ。また、プルイン現象が開始される変位をプルイン距離と呼ぶ。従って、システムは、プルイン電圧よりも大きな電圧に対して不安定な状態になる。プルイン距離及びプルイン電圧は次式となる。

$$x_{pull-in} = \frac{(g_R - x_{pull-in})(g_L + x_{pull-in}) [n_R (g_L + x_{pull-in})^2 - n_L (g_R - x_{pull-in})^2]}{2 [n_R (g_L + x_{pull-in})^3 + n_L (g_R - x_{pull-in})^3]}, \quad (\text{式 2})$$

$$V_{pull-in} = \sqrt{\frac{2k_x (g_R - x_{pull-in})^3 (g_L + x_{pull-in})^3}{\epsilon_r \epsilon_0 (l - g_T) h [n_R (g_L + x_{pull-in})^3 + n_L (g_R - x_{pull-in})^3]}}, \quad (\text{式 3})$$

ただし、式 2 は反復法を使用して解く必要がある。

式 2 と式 3 より、 $x_{pull-in}$  と  $V_{pull-in}$  のプルイン値を求め、および式 1 に基づき、駆動電圧の関数としての変位を図 2 に示す。アクチュエータが移動するにつれて、安定平衡状態、遷移状態、不安定状態の 3 つの状態の順で移行していくことが分かる。

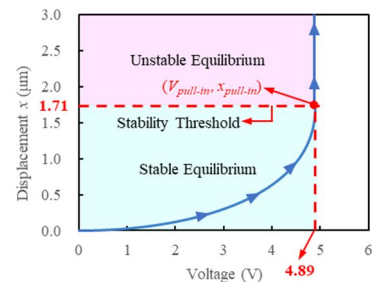


図 2. 電圧に対する変位の関係

## (2) 駆動原理

3 つの質量体 (図 3(a) に示す質量体 1 ~ 質量体 3) はバネで連結されており、質量体 1 と質量体 3 の左端と右端に連結されているバネはそれぞれの固定端に接続されている。この構造の独創性と革新性は次の 3 点にあります。1 点目：対向する櫛歯に電位差を与えると、櫛歯側壁に垂直にクーロン力 (静電気力  $F_N$ ) が発生し、平板電極のように互いに引き寄せられる。そこで、静電アクチュエータでは本来起こらないプルイン現象を意図的に起こすことで電圧を下げるができる。プルイン現象は、櫛歯の間隔 (隣り合う櫛歯間の距離) とバネ定数を調整することにより、駆動電圧を下げる有効な手段であると考えられる。また、櫛歯の数を増やし、垂直方向の櫛歯の厚みを増やすことにより、プルイン電圧をさらに下げることができる。2 点目：上記のように電極同士が接触すると電氣的に短絡が発生し、アクチュエータが破損する原因となる。これを回避するには、電源側に高抵抗 (例えば 10 ~ 100 kΩ 程度の汎用抵抗) を接続して電流を制限する必要がある。また、接触面積を小さくすることで永久固着を防止することができる。具体的には、櫛歯の長手方向に 2 μm 程度の突起が形成されている。3 点目：従来構造では可動電極を支持する構造の両側にバネ構造を設けるのが一般的であったが、このような構造では低電圧駆動ができない。提案構造では、複数のバネ・質量系を備えた複数段にわたってプルイン現象が数回発生する。従って、必要な最大変位量は、プルインギャップに設定される単一のばね・質量系変位量とプルイン現象の発生回数を乗じることによって得られる。

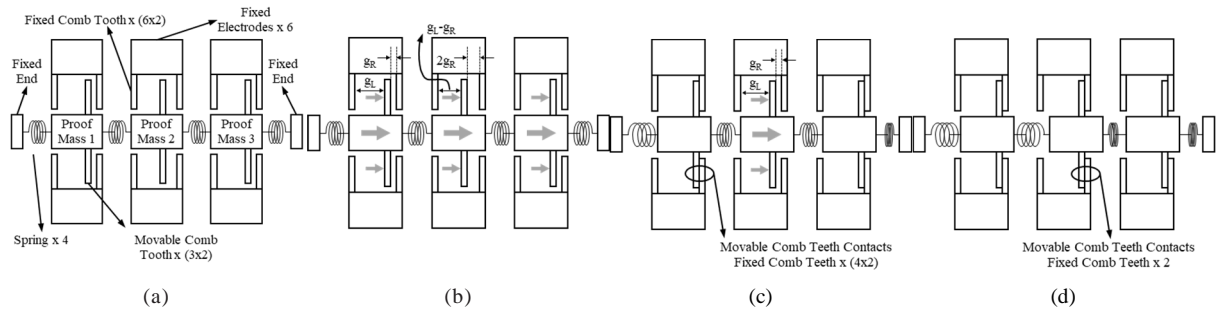


図 3. 駆動原理：(a) パーツの名前、(b) 移動方向、(c) 最初のプルイン、(d) 2 番目のプルイン

### (3) 構造体設計

図 4(a) に示すように、構造設計は前述に述べたように概念図に基づいた設計となる。以下、質量 1 および 3 を外部質量と呼び、質量 2 を中心質量と呼ぶ。20 mm 角の SOI ウェハ上に設計されています（デバイス層：20  $\mu\text{m}$ 、ボックス層：2  $\mu\text{m}$ 、ハンドル層：約 525  $\mu\text{m}$ ）。図 4(b) に詳細の設計パラメータを示す。主要な設計値は次のとおりである。幅  $w_S = 2.5 \mu\text{m}$  の蛇行形状のパネによってリンクされた 3 つの質量で構成されている。外部質量は、幅  $w_{PMTH} = 10 \mu\text{m}$ 、長さ  $l_{PMTH} = 200 \mu\text{m}$  の寸法を持つ 5 本の櫛歯で構成されている。一方、中央質量は、11 本の櫛歯で構成されている。固定電極からは幅  $w_{FIXELCTRDTH} = 20 \mu\text{m}$ 、長さ  $l_{FIXELCTRDTH} = 200 \mu\text{m}$  の櫛歯が設置され、可動質量の櫛歯と互いに噛み合っている。櫛歯の間隔は外側と中央質量でそれぞれ  $g_{EXT} = 5 \mu\text{m}$ 、 $g_{CTR} = 8 \mu\text{m}$  となっており、長手方向に  $w_P = 2 \mu\text{m}$  の永久固着防止用の突起が形成されている。従って、駆動電圧が電極に印加されると、可動質量はギャップ値からマイナス 2  $\mu\text{m}$  移動し、外部に対して  $\Delta g_{EXT} = 3 \mu\text{m}$  および  $\Delta g_{CTR} = 6 \mu\text{m}$  の実効変位となる。変位中に櫛歯が互いに離れる反対側のギャップは、外側と中央質量でそれぞれ  $g_{EXTL\_OPP} = 10 \mu\text{m}$  と  $g_{CTR\_OPP} = 8 \mu\text{m}$  となる。

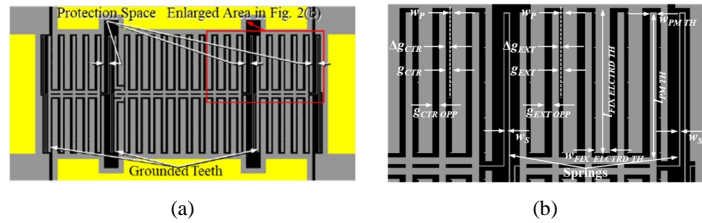


図 4. アクチュエータ設計：(a) アクチュエータ部、(b) 拡張図

### (4) 製造工程

図 5(a) から (e) までの製造工程を示す。図のキャプションにそれぞれの工程の説明を記載している。最後にアクチュエータチップが実装されたパッケージをガラスリッドで封止する。

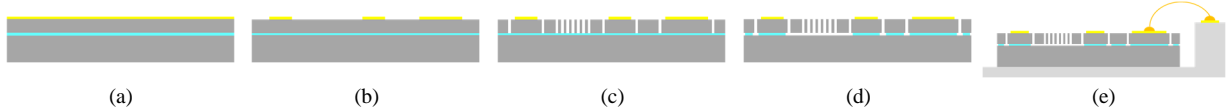


図 5. 製造工程：(a) Al-1 wt% Si スパッタ、(b) 金属パターニング、(c) deep-RIE、(d) 気相フッ酸エッチングとリリース、(e) ダイボンディングとワイヤボンディング

### (5) 結果と考察

図 6(a) と (b) は、上記の構造体設計に基づいて試作したアクチュエータの SEM 写真であり、図 6(c) はアクチュエータチップをパッケージに実装したときの写真を示す。

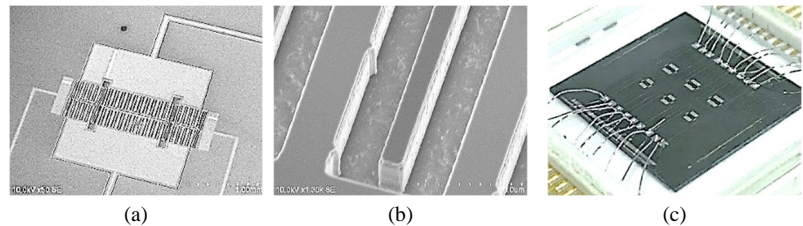


図 6. 試作したアクチュエータ写真：(a) アクチュエータ全体の SEM 写真、(b) 櫛歯部の SEM 写真、(c) パッケージ後の写真

図 7 は評価装置を示す。評価装置は 3 つの主要な評価装置で構成されている。(1) 高解像度デジタルカメラ (WRAYCAM-NOA200、Wraymer) と接続された金属顕微鏡 (BM-3400TTRL、Wraymer) で、デバイスの動作を明確に視覚化し、高解像度の動画を撮影することを可能とする。5、10、20、40、100 倍の倍率の対物レンズ (GLF-PLACH#XLM、# は倍率 / 例: GLF-PLACH100XLM は 100 倍の倍率のレンズ、Wraymer) を装備している) により、デバイスの全体構造から細部の部品までを確認することができる。(2) デバイスに駆動電圧を出力する多機能信号発生器 (WF1948、NF) である。(3) アクチュエータに印加される駆動電圧をモニタリングするためのデジタルオシロスコープ (TDS2004C、Tektronix) を使用する。

図 7 は評価装置を示す。評価装置は 3 つの主要な評価装置で構成されている。(1) 高解像度デジタルカメラ (WRAYCAM-NOA200、Wraymer) と接続された金属顕微鏡 (BM-3400TTRL、Wraymer) で、デバイスの動作を明確に視覚化し、高解像度の動画を撮影することを可能とする。5、10、20、40、100 倍の倍率の対物レンズ (GLF-PLACH#XLM、# は倍率 / 例: GLF-PLACH100XLM は 100 倍の倍率のレンズ、Wraymer) を装備している) により、デバイスの全体構造から細部の部品までを確認することができる。(2) デバイスに駆動電圧を出力する多機能信号発生器 (WF1948、NF) である。(3) アクチュエータに印加される駆動電圧をモニタリングするためのデジタルオシロスコープ (TDS2004C、Tektronix) を使用する。



試作のアクチュエータは 7.8 V の DC 電圧で動作した。図 8(a) はアクチュエータ全体を示し、図 8(b), (c), (d) の 3 つの図のセットは拡大領域であり、それぞれ質量 PM1、PM2、PM3 に対応している。同様に、(e)、(f)、(g)の組、(h)、(i)、(j)の組、(k)、(l)、(m)の組、最後に、(n)、(o)、(p) の組も、これら 3 つの質量の拡大領域である。各図において、3 本の可動櫛歯のうち、初期状態を示すために、図の左側に位置する可動櫛歯の長さに沿って両端に赤い破線を描いてある。同様に、黄色の破線はプルイン状態、つまり全ての可動櫛歯が固定櫛歯に接触したときを表す。アクチュエータは次のように動作する。(b) ~ (d) : 電圧を印加していない初期状態、(e) ~ (g) : 7.8 V の駆動電圧を印加し、固定櫛歯に向かって移動する質量 PM1、PM2、PM3 の可動櫛歯の残像、(h) ~ (j) : 全ての櫛歯が完全に固定櫛歯に接触したとき、(k) ~ (m) : 駆動電圧が完全に除去され、初期位置に向かって移動する可動櫛歯の残像、(n) ~ (p) : 可動櫛歯が初期状態に戻ったとき。

新しいアクチュエータ概念に基づいて、理論的には、全ての質量を  $\Delta d = 6 \mu\text{m}$  の変位で移動させるために、LSI や MCU ボードの最大動作電圧よりも低い 4.89 V の電圧が得られた。しかし、試作したアクチュエータは、同じ距離  $\Delta d$  を移動させるために、実験的に 7.8 V の電圧が得られた。このような違いが生じた理由は、中心の質量 PM2 の櫛歯間の初期ギャップの設計値、つまり、 $g_{CTR}$  と  $g_{CTR\_OPP}$  が同値であったためである。それにも関わらず、理論値と実験値はいずれも 10 V 未満であり、表 1 に示すように、この 20 年間に著者が取り上げた、高変位に対して低い駆動電圧を主張する他の代表的な文献よりも低い値である。明らかに、駆動電圧が一桁にランクされたのはこの研究のみであり、最先端の静電マイクロアクチュエータを達成したことを意味する。LSI や MCU ボードによって制御される MEMS アクチュエータが高性能な制御と機能を必要とするアプリケーションにつながるため、本研究で得られた成果は MEMS 分野において学術的意義が大いにありと考える。

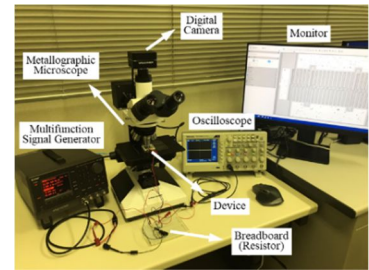


図 7. 評価装置

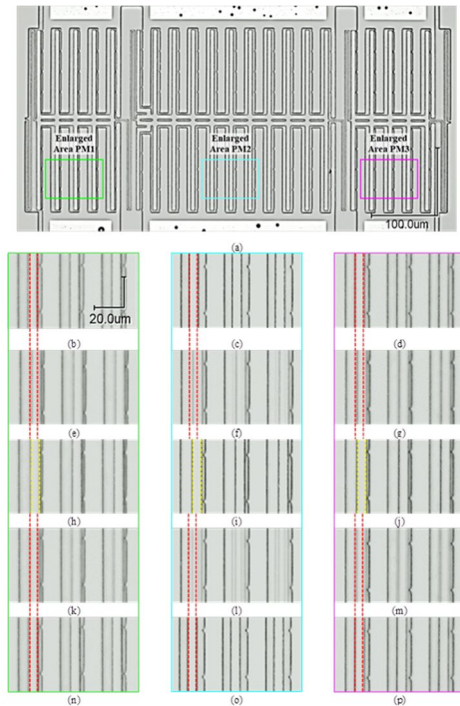


図 8. アクチュエータの動作実験

表 1. 低 DC 駆動電圧で大きな変位を得るアクチュエータの比較

Refs.	Year	Device type	Driving Voltage (V)	Disp. ( $\mu\text{m}$ )	Data type
This study	2023	Combination of parallel plate and comb drive actuator with proof mass suspended by springs	4.89	6	Theory
5	2023	Parallel plate with proof mass suspended by springs	35	6	Experiment
6	2023	Cantilever	17	3	Theory
7	2022	Parallel plate with proof mass suspended by springs	40	6	Experiment
8	2021	Parallel plate with proof mass suspended by springs	85	6	Experiment
9	2020	Diaphragm	12.5	5	Theory
10	2019	Combination of cantilever and comb drive actuator	12	6	Theory
11	2017	Parallel plate with proof mass suspended by springs	12	6	Theory
12	2012	Comb drive actuator with proof mass suspended by springs	30	6	Experiment
13	2006	Combination of parallel plate and comb drive actuator with proof mass suspended by springs	56	4	Theory
14	2003	Comb drive actuator with proof mass suspended by springs	36	6	Experiment

#### < 引用文献 >

- 1) 江刺正喜、小野崇人、“これからの MEM - LSI との融合 - ”、森北出版、2016.
- 2) 田中秀治研究室、“<http://www.mems.mech.tohoku.ac.jp/>”、2017 年 10 月.
- 3) M. Esashi, “Revolution of sensors in micro-electromechanical system”, Jpn. J. Appl. Phys., **51** (2021) 80001-1.
- 4) H. M. Chu et al., “Compact Low-Voltage Operation Micro-mirror Based on High Vacuum Seal Technology Using Metal Can”, J. Microelectromech. Syst., **19** (2010) 927.
- 5) M. Allameh, Y. Zhou, D. Chrusch, B. Park, and C. Shafai: J. Micromech. Microeng. **33** (2023) 034008.
- 6) X. Yang, P. Kästner, E. Käkel, M. Smolarczyk, S. Liu, Q. Li, and H. Hillmer: App. Sci. **13** (2023) 1118.
- 7) K. Kim, Y. Lee, I. L. Garro, and J. M. Kim: Sensors **22** (2022) 9490.
- 8) D. Admassu, T. Durowade, S. Velicu, S. Sivananthan, and W. Gao: Microsyst. Technol. **27** (2021) 2751.
- 9) A. C. Atik, M. D. Özkan, E. Özgür, H. Külâh, and E. Yıldırım: J. Micromech. Microeng. **30** (2020) 115001.
- 10) W. Bian, J. Zhao, and Z. You: J. Micromech. Microeng. **29** (2019) 065014.
- 11) C. Li, R. N. Dean, and G. T. Flowers: Microsyst. Technol. **23** (2017) 1125.
- 12) C. M. Chang, S. Y. Wang, R. Chen, J. A. Yeh, and M. T. Hou: Sensors **12** (2012) 10881.
- 13) S. Kamide and K. Suzuki: IEEJ Trans. SM. **126** (2006) 453.
- 14) J. D. Grade, H. Jerman, and T. W. Kenny: J. Microelectromech. Syst. **12** (2003) 335.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Mizuno Jun	4. 巻 35
2. 論文標題 A Novel MEMS Actuator Driven with a Low DC Voltage	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 2909 ~ 2909
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18494/SAM4411	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>【支援機関の利用に関する「利用報告書」（4件）】                  題名：Study on MEMS actuator driven with low DC voltage                  雑誌名：Bulletin of the Center for Integrated Nano Technology Support, Tohoku University                  発行年：2019, 2020, 2021, 2022.</p>
--

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------