

■9 群 (電子材料・デバイス) - 8 編 (センサ・弾性波・機構デバイス)

---

## 5 章 MEMS

### 【本章の構成】

本章では以下について解説する.

- 5-1 デバイスの基本構造と動作原理
- 5-2 具体的な各種 MEMS デバイス

## ■9 群-8 編-5 章

### 5-1 デバイスの基本構造と動作原理

(執筆著者：原 基揚・桑野博喜) [2012年7月 受領]

#### 5-1-1 はじめに

半導体微細加工技術の発展は、回路とともに、構造体や機構部品を基板上に集積することを可能にし、電子デバイスを格段に高性能化・高機能化することができる。これらの技術は MEMS (Micro Electro Mechanical System) と呼ばれ、1980 年代からの実用化の進展とともに、工学分野において強い関心を集めている。

MEMS は前述のように半導体技術に由来し、その製作工程はバッチ生産方式を基礎とする。そのため、量産化が容易であり、高性能化・高機能化と同時に、コストの面でも優位性を発揮する。また、MEMS は半導体技術とは異なる独自の発展も遂げており、ガラスや圧電体、磁性体などの多種多様な材料を使用し、近年、様々な加工技術及びデバイスが確立・提案されている<sup>1),2)</sup>。

MEMS の応用分野は自動車産業、情報通信産業、医療応用、航空宇宙産業と極めて広範にわたり、すべてを網羅的に議論するのは容易ではない。本項では、エネルギー変換素子としての MEMS に主眼を置き、各物理量を電気量に変換するセンサと、機械量に変換するアクチュエータとについて概説を試みる。

表 1・1 センサ及びアクチュエータの動作原理

		センサ	アクチュエータ
出力		電気量	機械量
入力	電気		圧電効果 静電力
	機械	圧電効果 ピエゾ抵抗効果	
	熱	焦電効果 ゼーベック抵抗効果	熱膨張 (SMA, ハイメタル)
	磁気	ホール効果 磁気抵抗効果	磁歪効果 磁力
	光 (マイクロ波)	光電効果	光圧 (光マニピュレーション)
	化学	ボルタ効果	分子モータ

表 1・1 は、各物理量の電気・機械量への変換原理をまとめたものである。表 1・1 より、光-機械変換のように、強勢に出力が得られず、実用化が容易でない変換も存在することが分かる。このような物理変換に対し、図 1・1 に示す間接的な変換手法が有用である。具体的には、光量

を熱量に変換し、熱量より機械量に変換する手法 (図 1・1(a)) や、機械量である共振周波数を化学物質の吸着によって変化させる手法 (図 1・1(b)) などである。

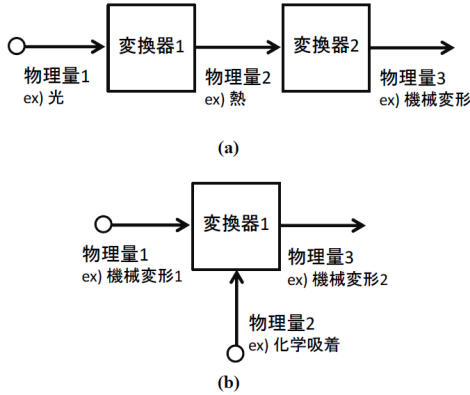


図 1・1 間接的な物理量変換

以下では、MEMS において利用価値の高い電気-機械の相互変換、及び熱-機械の相互変換について、その動作原理を解説する。

### 5-1-2 MEMS における電気-機械変換

#### (1) 静電力の利用

##### (a) 平行平板アクチュエータ

図 1・2 に示す平行平板アクチュエータは、最も単純な電気-機械変換素子である。ここでは、電極面に対して直行方向に変位する構成を縦変位型、平行方向に変位する構成を横変位型と呼ぶこととする。縦変位型、横変位型では、電圧の印加によって平板間に生じる力を式(1・1)、式(1・2)を用いて、計算することができる。

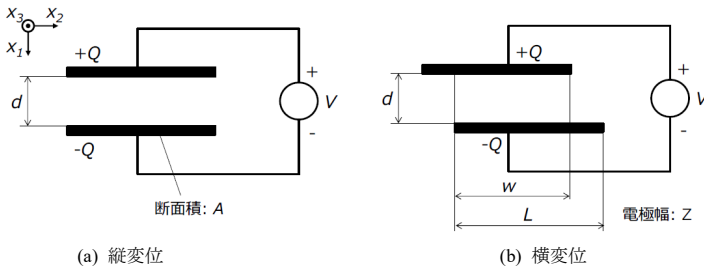


図 1・2 平行平板アクチュエータの概念図

$$F_1 = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 A}{x_1^2} V^2 \tag{1・1}$$

$$F_2 = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 Z}{d} V^2 \quad (1 \cdot 2)$$

式(1・2)より、横変位型では、発生力が変位方向  $x_2$  に依存しないことが分かり、線形な出力を得られることが分かる。そのため、横変位型のアクチュエータは大きく連続的な変位量を必要とするモータやスライドテーブルなどに利用される。

また、 $A = lZ$ 、 $x_1 = d$  とすると、以下の関係式を得る。

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l}{d} \quad (1 \cdot 3)$$

$d$  が 1 に対して十分に小さいとすると、横変位型に対して、縦変位型の発生力が極めて大きいことが式(1・3)より理解される。ただし、縦変位型では上下の電極が張り付いてしまう問題(ブリイン現象)があり、実用的には、ストップなどを用いて変位量を初期ギャップの 1/3 程度となるように設計される。

### (b) 櫛歯アクチュエータ

MEMS は半導体微細加工技術を用いて基板上に作製される。そのため、生産性の観点から、構造体は 2 次元的なパターンを有することが好ましく、図 1・3 に示すような櫛歯アクチュエータ(コムアクチュエータ)が広く用いられている。この櫛歯アクチュエータの出力は式(1・4)を用いて計算することができる。

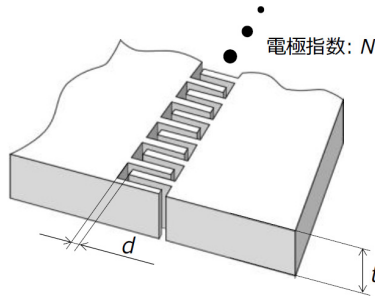


図 1・3 櫛歯アクチュエータの構造図

$$F = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 t N}{d} V^2 \quad (1 \cdot 4)$$

式(1・4)より、十分な発生力を得るには、櫛歯の数の増大と、電極間の間隔の縮小とが有効であることが理解され、これらは半導体製造技術により、大幅に改善することが可能である。

## (2) ピエゾ抵抗効果の利用

ピエゾ抵抗効果とは、印加された歪みによって、材料の抵抗値が変化する現象を指す。歪みのセンシングはセンサにおいて最も基本的な要素であり、間接的には変位や、加速度などのセンシングにも応用できる。シリコンやゲルマニウムなどの半導体材料では、金属材料と比較して、高いピエゾ抵抗効果が発現することが知られており、MEMS を用いた歪みセンシングには上記効果が広く用いられている<sup>3)~5)</sup>。

ピエゾ抵抗効果の大きさはゲージファクタを用いて評価される。ゲージファクタの定義式を

式(1・5)に示す。

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = 1 + 2\nu + \frac{\Delta\rho/\rho}{\varepsilon} \quad (1 \cdot 5)$$

ここで、 $R$  は抵抗、 $\rho$  は抵抗率、 $\varepsilon$  は歪み、 $\nu$  はポアソン比である。

金属材料を用いた場合、 $GF=1\sim 5$ 、半導体では  $GF=80\sim 150$  となる。また、 $p^+$  型シリコンを用いると、 $GF$  は 200 まで増加させることができる。

ピエゾ抵抗効果の欠点は、温度依存性が高いことである。そのため、温度補償技術は実用上必須であり、リファレンスセンサを利用したホイットストーンブリッジ (Wheatstone Bridge) 回路が広く採用されている (図 1・4 参照)。図 1・4 の回路において、ピエゾ抵抗素子に歪みが作用していない場合、ブリッジは平衡状態となり、出力電圧  $e$  はゼロとなる。ここで、素子に歪みが作用し、抵抗値が  $\Delta R$  だけ増大したとすると、出力電圧は式(1・6)にて計算される。

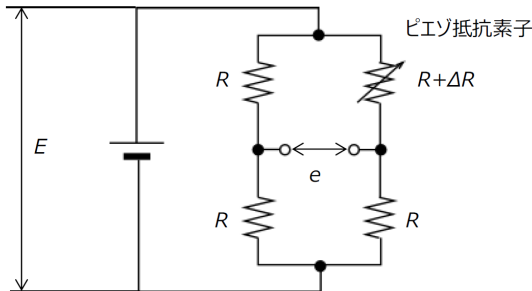


図 1・4 ピエゾ抵抗素子を用いたホイットストーンブリッジの構成例

$$e = \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} E \quad (1 \cdot 6)$$

いま、 $R$  に対して、 $\Delta R$  が十分に小さいとすると、式(1・6)は式(1・7)に近似され、出力電圧と歪みによる抵抗変化との間に比例関係を得る。

$$e = \frac{\Delta R}{4R} E \quad (1 \cdot 7)$$

ピエゾ抵抗素子への多結晶シリコンの採用も温度補償に有効である。多結晶シリコンは結晶粒界とその界面とで構成され、結晶粒界では従来の単結晶シリコン同様、温度と抵抗率とに正の相関が存在する。一方、界面では、多数の欠陥が存在し、それらがキャリアの再結合中心として機能する。そのため、温度上昇によって、再結合を上回るキャリアが界面に流入すると、温度と抵抗率とは負に相関することとなる。この結晶粒界と界面との温度依存性の違いを利用すると、ブリッジ回路なしに素子単体にて温度補償を行うことができる。

### (3) 圧電効果の利用

圧電体は材料の結晶性に由来し、機械的な歪みに対して分極を生成する(圧電効果)材料である。圧電効果は可逆的であり、電圧を印加すると、材料には歪みが生成される(逆圧電効果)。

MEMS では、基板として、主にシリコンが使用されるが、シリコンは圧電性を示し得ないのて、圧電効果を利用したデバイスを作製するには、圧電材料を基板に堆積する必要が生じる。

表 1・2～表 1・3 に MEMS にて使用される主な圧電材料をまとめる<sup>6)~9)</sup>。

表 1・2 ドライブプロセスで成膜可能な圧電体

	圧電ひずみ定数 [pC/N]			電気機械結合係数		
	$d_{15}$	$d_{31}$	$d_{33}$	$k_{15}$	$k_{31}$	$k_{33}$
ZnO	-11.34	-5.43	11.67	0.26	0.18	0.42
AlN	-4.08	-2.65	5.53	0.15	0.14	0.31

表 1・3 湿式プロセスで成膜可能な圧電体

	タイプ	圧電ひずみ定数 [pC/N]		電気機械結合係数	
		$d_{31}$	$d_{33}$	$k_{31}$	$k_{33}$
PZT	セラミック	43-93	110-223	0.17-0.31	0.44-0.67
BaTiO <sub>3</sub>		-79	191	0.208	0.493
PVDF	高分子	23	-35	0.16	0.2

表 1・2 は化学気相成長法や反応性スパッタリングなどの乾式にて成膜される無機圧電膜をまとめたものである。表 1・3 は湿式、すなわち、溶液の塗布膜を焼結し、分極処理することで得られる圧電セラミック及び圧電高分子をまとめたものである。

圧電材料は歪みに応じて、分極を誘起する材料であり、直流電圧の生成が容易である。しかし、連続的に電荷を供給することはできず、直流電流を出力することは容易ではない。そのため、センサとして出力を読み出すには、高入力インピーダンスの増幅器が必要となる。

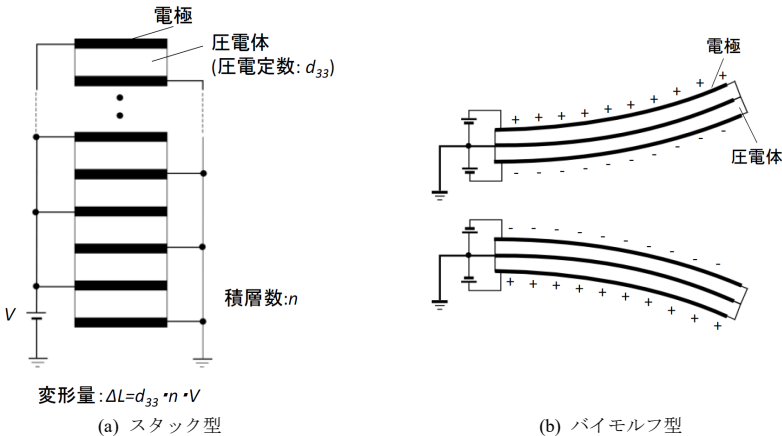


図 1・5 圧電アクチュエータにおける変位増大機構の一例

また、一般的な手法として、圧電体を共振動作させ、その共振周波数の変化にて応答を読み取る手法も広く採用されている。共振周波数の変化を利用したセンシングでは、増幅器からの電圧出力を直接に利用しないため、耐ノイズ性に優れるといった特徴をセンサに付与することができる。

アクチュエータとしての圧電体は発生力が大きく、変位が小さいため、微小変位の制御に好適であり、走査型プローブ顕微鏡 (Scanning Probe Microscopy : SPM) 用の精密位置決め機構などに採用されている<sup>10),11)</sup>。また、変位を必要とする応用では図 1・5 に示すような、種々の変位増大機構が採用される。

### 5-1-3 MEMS における熱-機械変換

熱からの電気・機械変換も MEMS において広く利用されている。表 1・1 に示したように、熱から電気に直接変換する手法として、焦電効果やゼーベック効果が挙げられるが、これらの効果は、センサとしての応用とともに、発電デバイスとしても注目を集めている。

熱を利用したアクチュエータも多数報告されており、ここでは、バイモルフ型の熱アクチュエータと形状記憶合金 (Shape Memory Alloy : SMA) アクチュエータとについて触れる。

#### (1) バイモルフ型熱アクチュエータ

熱による機械変形として、熱膨張が挙げられる。一般に、単一材料の熱膨張による変形量は微小であるが、バイモルフ構造を利用することで、大きな曲げ変形を得ることが可能となる (図 1・6)。MEMS では、構造体の小型化が容易であり、熱容量を極めて小さくできる。そのため、熱駆動でも十分な応答速度を得ることができる<sup>12)</sup>。

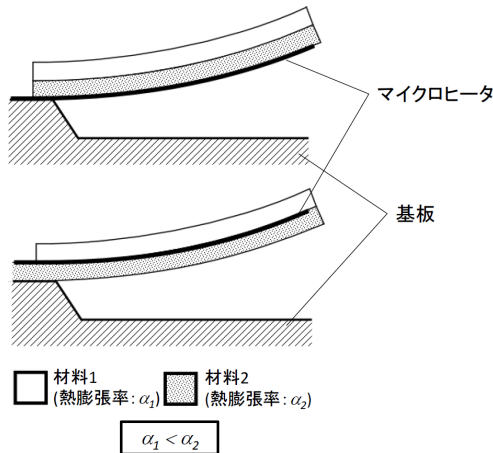


図 1・6 バイモルフ型熱アクチュエータの一例

しかし、静的に変形を保持するためには、熱を供給し続ける必要があり、消費電力に課題を有する。そのため、熱アクチュエータの開発では、ラッチ機構の集積化が重要となる<sup>13)~15)</sup>。

## (2) 形状記憶合金

SMA は熱によって大きな形状変化を得ることのできる材料である<sup>13)~15)</sup>。形状変化は材料の相変化に由来し、熱印加によってマルテンサイト構造から結晶対称性の高いオーステナイト構造に変位させることで大変形を得る。

SMA 特性を有する代表的な合金として、Au・Cr、In・Ti 及び Ni・Ti などが挙げられる。

### 5-1-4 相互比較

前項までに、様々なセンサ及びアクチュエータの動作原理について概説してきた。ここでは、それらの動作原理に関して相互比較を試みる。

図 1・7 に MEMS における各アクチュエータの変位と応答周波数の関係を示す。図より、変位と応答速度にはトレードオフの関係が存在し、圧電駆動、静電駆動、熱駆動の順に応答性が優れることが分かる。また、前項にて述べた、バイモルフのような変位増大機構は総じて、応答性を劣化させることが分かる。これは、デバイスサイズの増大による質量と熱容量との増大に起因する。

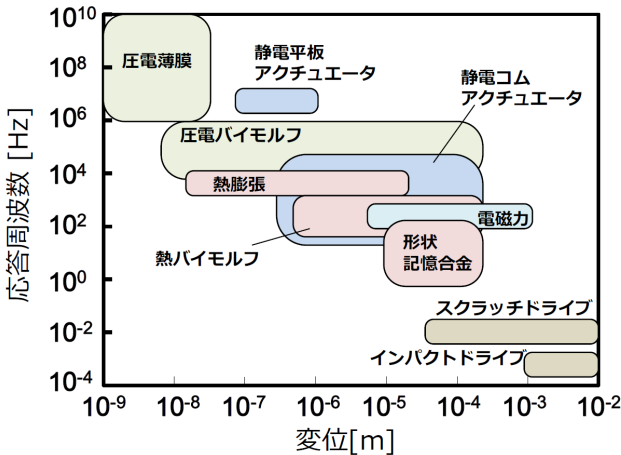


図 1・7 各アクチュエータにおける変位と応答性との関係

図 1・8 に MEMS における各アクチュエータの変位と発生力の関係を示す。本図より、変位と発生力との間にもトレードオフの関係が存在し、また、変位増大機構は発生力を低下させることが確認される。

ここで、熱バイモルフと圧電バイモルフとを比較した場合、圧電バイモルフでは発生力の劣化が著しいことが理解される。これは、圧電体に分極方向が存在するためである。MEMS で用いられる圧電薄膜は一般に厚み方向に分極されるが、表 1・2 及び表 1・3 に示したように、分極軸と直行する方向の圧電定数は分極軸方向のそれと比較して低い値を示す。そのため、電界方向と直行する方向の変形を利用するバイモルフ構造では、十分な発生力を得るのは難しい。



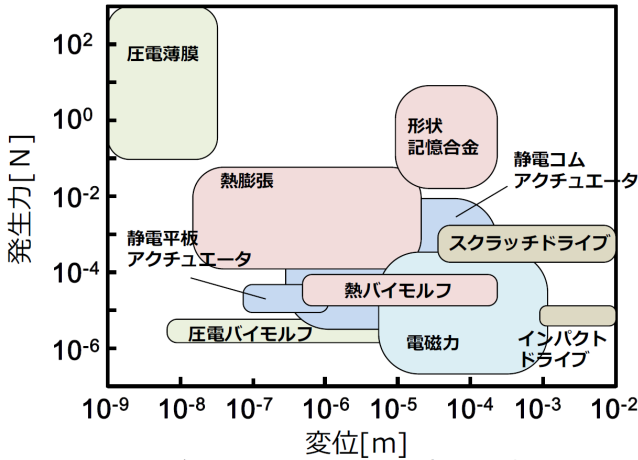


図 1・8 各アクチュエータにおける変位と発生力との関係

#### ■参考文献

- 1) M.J. Madou : "Fundamentals of microfabrication and nanotechnology," CRC press, 2012.
- 2) Y.B. Gianchandani, O. Tabata, and H. Zeppe : "Comprehensive Microsystems," Elsevier Science, 2007.
- 3) C.S. Smith : "Piezoresistance effect in germanium and silicon," Physical Review, vol.94, no.1, pp.42-49, 1954.
- 4) Y. Kanda : "A graphical representation of the piezoresistance coefficient in strain," IEEE Trans. Electron Devices, ED-29, no.1, pp.64-70, 1982.
- 5) K. Yamada, M. Nishihara, S. Shimada, M. Tanabe, M. Shimazoe, and Y. Matsuoka : "Nonlinearity of the piezoresistance effect of p-type silicon diffused layers," IEEE Trans. Electron Devices, ED-29, no.1, pp.71-77, 1982.
- 6) 田中哲郎, 岡崎 清, 一ノ瀬昇 : "圧電セラミックス材料," pp37-65, 学献社, 1973
- 7) M. J. Madou : "Fundamentals of microfabrication and nanotechnology vol III," CRC press, pp.387-474, 2012.
- 8) K. Tsubouchi and N. Mikoshiba : "Zero temperature coefficient SAW delay line on AlN epitaxial films," in Proc. Int. Ultrason. Symp., Philadelphia, pp.299-310, 1983.
- 9) 中鉢憲賢 : "ZnO 圧電膜とその応用," 応用物理, vol.46, no.7, pp.663-676, 1977.
- 10) W.P. Robbins, D.L. Polla, T. Tamagawa, D.E. Grumac, and J.W. Judy : "Linear motion microactuators using piezoelectric thin films," in Proc. Transducers '91, the international conference on solid-state sensors and actuators, San Francisco, pp.55-58, 1991.
- 11) S. Akamine, T.R. Albrecht, M.J. Zdeblick, and F. Quate : "A planar process for microfabrication of a scanning tunneling microscope," Sensors and Actuators A Physical, vol.23, pp.964-970, 1990.
- 12) W. Riethmuller and W. Benecke : "Thermally excited silicon microactuators," IEEE Trans. Electron Devices, vol.35, no.6, pp.758-763, 1988.
- 13) J.W. Suh, S.F. Glander, R.B. Darling, C.W. Stormont, and G.T.A. Kovacs : "Organic thermal and electrostatic ciliary microactuator array for object manipulation," Sensors and Actuators A Physical, vol.58, no.1, pp.51-60, 1997.
- 14) M. Hoffmann, P. Kopka, T. Gro?, and E. Vogas : "Optical fibre switches based on full wafer silicon micromachining," J. Micromech. Microeng., vol.9, no.2, pp.151-155, 1999
- 15) K.J. Gabriel, W.S.N. Trimmer, and J.A. Walker : "A micro rotary actuator using shape memory alloys," Sensors and Actuators, vol.15, no.1, pp.95-102, 1988.
- 16) J.A. Walker, K.J. Gabriel, and M. Mehregany : "Thin-film processing of TiNi shape memory alloy," Sensors and Actuators A Physical, vol.21, pp.243-246, 1990.

- 17) A.D. Johnson : "Vacuum-deposited TiNi shape memory film: characterization and applications in microdevices," J. Micromech. Microeng, vol.1, pp.34-41, 1991.

## ■9 群-8 編-5 章

### 5-2 具体的な各種 MEMS デバイス

#### 5-2-1 MEMS アクチュエータ

(執筆者：原 基揚) [2012 年 7 月 受領]

##### (1) 静電マイクロモータ

静電アクチュエータを用いた代表的な MEMS デバイスとして静電モータが挙げられる<sup>1)~5)</sup>。静電モータは、ポリシリコン製のロータの周囲に、複数の電極を等角度に配置した構成を有する。図 2・1・1 は静電モータの駆動原理を示したものである。隣り合う電極が、それぞれ逆位相となるように、交流電圧を印加すると、ロータは静電誘導とクーロン力によって回転運動する。

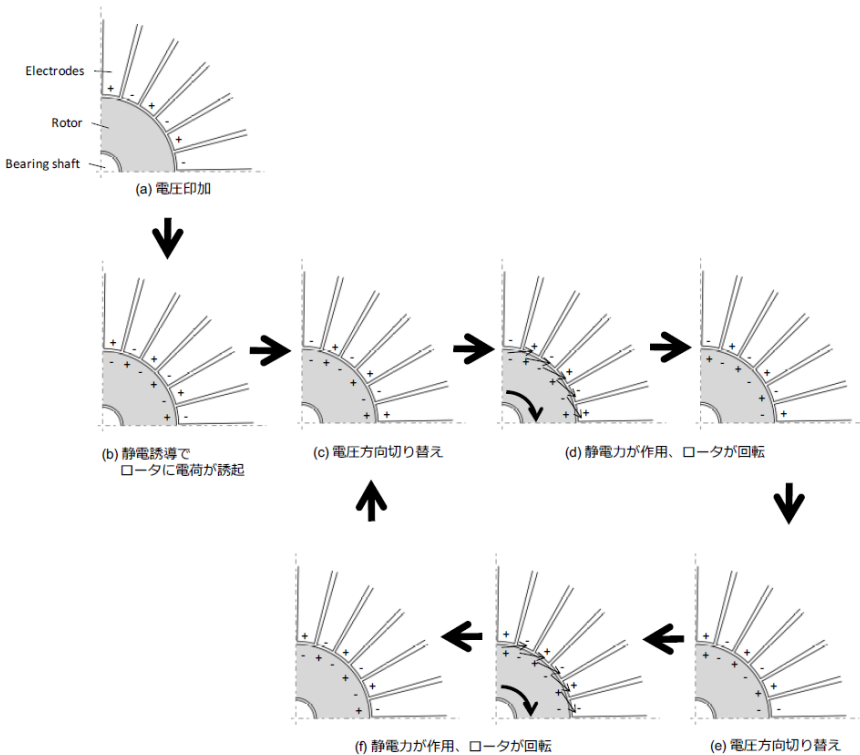


図 2・1・1 静電モータの動作原理

Mehregany らの報告では、直径  $100\ \mu\text{m}$ 、厚さ  $2\ \mu\text{m}$  のポリシリコンロータにて、回転数 10000 rpm 以上、連続駆動時間 1 週間以上の結果を得ている<sup>3),4)</sup>。

静電モータは MEMS として極めて印象的なデバイスであるが、トルクを取り出すことが容易ではなく、実用例は乏しい。しかし、静電モータの開発において得られたマイクロドライバ

ロジの知見は、MEMS 開発において、多くの示唆を与える<sup>6)</sup>。また、静電モータは機構部品としての応用は容易でないものの、光学用のスイッチングデバイスとしての展開が期待されている<sup>7)</sup>。

## (2) 機械共振子

静電アクチュエータの代表的な構成例を図 2・1・2 に示す。これらのアクチュエータは図 2・1・3 に示すようなバネ-マス系を用いてモデル化でき、図 2・1・3(b)に示すような共振特性を示す。

構造体として、シリコンを用いた場合、極めて  $Q$  値の高い共振が得られることが知られており、共振子として応用することができる<sup>8)~10)</sup>。

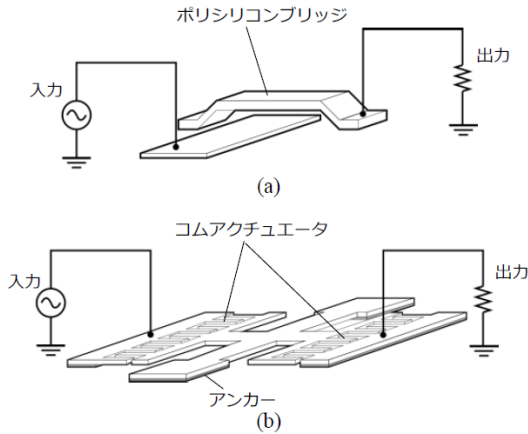


図 2・1・2 静電アクチュエータの代表的構成例

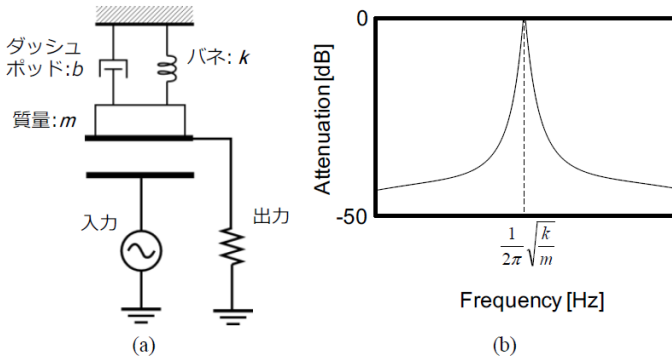


図 2・1・3 静電アクチュエータの周波数応答

発振器の周波数リファレンスとして、この共振子を利用すると、位相雑音の少ない発信器を実現することが可能となる<sup>10),11)</sup>。

また、複数のシリコン共振子を図 2・1・4(a)に示すように連結すると、図 2・1・4(b)のようなフィルタ特性を得ることもできる。これは、表面弾性波フィルタやセラミックフィルタで利用されている振動モードの多重化と同様の原理に基づく<sup>12)~14)</sup>。

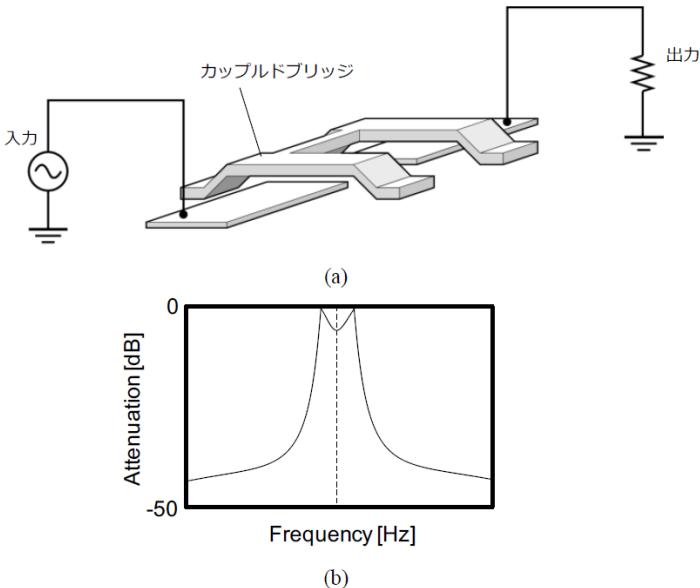


図 2・1・4 機械共振子を用いた多重モードフィルタ

#### ■参考文献

- 1) L.S. Fan, Y.C. Tai, and R.S. Muller : "IC-processed electrostatic micromotors," Sensors and Actuators, vol.20, pp.41-47, 1989.
- 2) Y.C. Tai, and R.S. Muller : "IC-processed electrostatic synchronous micromotors," Sensors and Actuators, vol.20, pp.49-55, 1989.
- 3) M. Mehregany, S.F. Bart, L.S. Tavrow, J.H. Lang, S.D. Senturia, and M.F. Schleht : "A study of three microfabricated variable-capacitance micromotors," Sensors and Actuators A Physical, vol.21, pp.173-179, 1990.
- 4) M. Mehregany, P. Nagarkar, S.D. Senturia, and J.H. Lang : "Operation of a microfabricated harmonic and ordinary side drive motors," in Proc. IEEE workshop on micro electro mechanical systems, Napa Valley, pp.1-8, 1990.
- 5) M. Mehregany, S.M. Phillips, E.T. Hsu, and J.H. Lang : "Operation of harmonic side-drive micromotors studied through gear ratio measurement," in Proc. Transducers '91, the international conference on solid-state sensors and actuators, San Francisco, pp.59-62, 1991.
- 6) 江刺正喜, 藤田博之, 五十嵐伊勢美, 杉山 進 : "マイクロマシーニングとマイクロメカトロニクス," 培風館, pp.134-136, 1992.
- 7) A.A. Yassen, S.W. Smith, M. Mehregany, and F.L. Merat : "Diffraction Grating Scanners using polysilicon micromotors," in Proc.MEMS '95, IEEE micro electro mechanical systems conference, Amsterdam, pp.175-180, 1995.
- 8) C.T.C. Nguyen, and R.T. Howe : "Quality factor control for micromechanical resonators," in Tech. Dig. IEEE Int. electron devices meeting, San Francisco, pp.505-508, 1992.
- 9) A.N. Cleland and M.L. Roukes : "Fabrication of high frequency nanometer scale mechanical resonators from bulk

silicon crystals,” Appl. Phys. Lett., vol.69, no.18, pp.2653-2655, 1996.

- 10) C.T.C. Nguyen and R.T. Howe : “CMOS micromechanical resonator oscillator,” in Tech. Dig. IEEE Int. electron devices meeting, Washington. DC. pp.199-202, 1993.
- 11) R.N. Candler, M.A. Hopcroft, B.S. Kim, W.T. Park, R. Melamud, M. Agarwal, G. Yama, A. Partridge, M. Lutz, and T.W. Kenny : “Long-term and accelerated life testing of a novel single-wafer vacuum encapsulation for MEMS resonators,” IEEE J. Microelectromechanical Systems, vol.15, no.6, pp.1446-1456, 2006.
- 12) Y. Nakazawa : “High frequency crystal electromechanical filters,” in Proc. 16th freq. control symp., pp.373-390, 1962.
- 13) 山田 晃, 清水 洋 : “表面波共振子の弾性結合による二重モードフィルタ,” 電子通信学会超音波研究会技術研究報告, US77-33, pp.29-34, 1977.
- 14) K.M. Lakin : “Equivalent circuit modeling of stacked crystal filters,” in Proc. 35th annual freq. control symp., pp.257-262, 1981.

## 5-2-2 MEMS スイッチングデバイス

### 5-2-3 MEMS センサ

(執筆者：原 基揚) [2012年7月受領]

#### (1) 圧力センサ

圧力センサはタイヤ圧センサをはじめ、車載センサとして多数実用化されており、最も普及している MEMS センサと言える。

圧力センサは図 2・3・1 に示すように、ダイアフラムによって構成され、参照する圧力を変更することで、絶対圧、相対圧及び差圧が測定される。また、圧力センサを動的に使用し、音波を計測するシステムに転用すると、MEMS マイクロフォンとなる<sup>1)~3)</sup>。

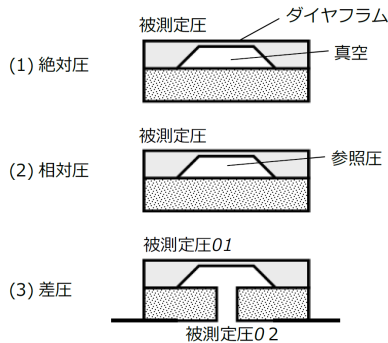


図 2・3・1 圧力センサの構成

ダイアフラムを構成する材料としては、一般にシリコンが用いられるが、使用環境に応じて、ステンレスやセラミックなど様々な材料が用いられる。

圧力センサはダイアフラムの変形量を計測することで圧力を検出するが<sup>4)5)</sup>、この検出方法によって、圧電型、ピエゾ抵抗型、及び静電容量型に分類することができる。表 2・3・1 は、これらの圧力センサに関し、その特徴を比較したものである。

また、上記以外の検出方法として、ダイアフラム上に振動する共振器を集積化し、ダイアフ

ラムの変形によって生じる共振周波数の変化から圧力を読み取る手法も提案されている。この手法では、出力が周波数として得られるため、ノイズに強いセンサを構成することができる<sup>6),7)</sup>。

表 2・3・1 検出原理の比較

	圧電型	ピエゾ抵抗型	容量型
高温への耐性	有	無	無
電気補正	不可	可	可
コスト	高	低	高
精度	±1%	±1%	±0.2%
好適な用途	苛酷環境	低価格	高精度

## (2) 加速度センサ

加速度センサは図 2・3・2 に示すように、フレームに固定されたばねと、ばねで支持された錘（試験質量）とで構成される。外部より加速度が印加されると、慣性力により試験質量が変位し、この変位を、圧力センサと同様に、圧電素子、ピエゾ抵抗素子、静電容量などで検出することで加速度を得る<sup>8)~10)</sup>。

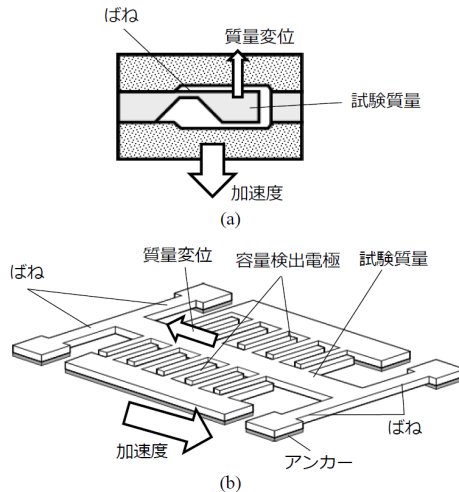


図 2・3・2 加速度センサの構成例

加速度センサでは、ばねの剛性を抑制し、質量を増大させることで高感度化が可能であるが、この手法では、センサの耐衝撃性が劣化してしまう。そこで、感度とともに耐衝撃性を担保する手法として、サーボ型加速度センサが提案されている。サーボ型加速度センサでは、試験質

量が変位しないようにフィードバック制御がなされており，加速度の印加によって生じる試験質量の変位は，それを抑制するフィードバック量として観測される<sup>11),12)</sup>。

### (3) 角速度センサ (ジャイロスコープ)

機械式の角速度センサには角運動量保存則を利用した回転式とコリオリ力を利用した振動型の 2 種類が存在する<sup>13)~16)</sup>。ここでは，小型化が容易な振動型の角速度センサについて解説する。

振動型角速度センサの検出原理を図 2・3・3 に示す。質量が一軸方向に振動するとき，回転が印加されると，質量には回転の角速度に比例する見掛けの外力（コリオリ力）が，振動方向と回転軸とに直行する方向に作用する。この外力によって生じる変位量を検知することで，角速度が検出される。

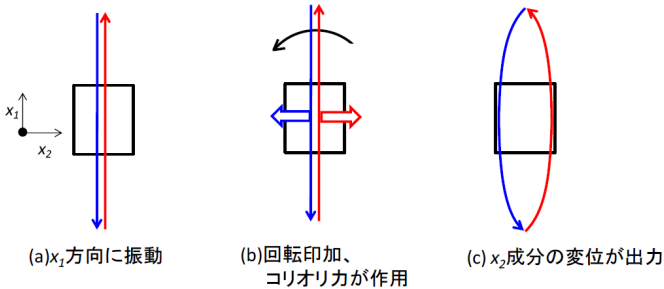


図 2・3・3 角速度センサの原理図

角速度センサは，圧力センサや加速度センサと異なり，センサ自身を機械的に駆動しなければならない。そのため，高い感度を得るには，パッケージへの固定方法にも留意する必要がある。図 2・3・4 は角速度センサに広く用いられている音叉型角速度センサの構成例である。音叉形状を用いることで，駆動振動と検出振動とに対称性を持たせることができ，機械的な不動点を形成することができる。この不動点をパッケージへの固定箇所として利用することで，感度を劣化させることなくセンサをパッケージへ搭載することができる<sup>17),18)</sup>。

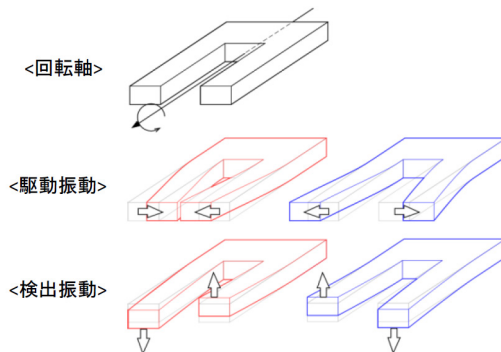


図 2・3・4 音叉型角速度センサの変位



## ■参考文献

- 1) P.R. Scheeper, A.G.H. van der Donk, W. Oltheus, and P. Bergvel : “Fabrication of silicon condenser microphones using single wafer technology,” IEEE J. Microelectromechanical Systems, vol.1, no.3, pp.147-154, 1992.
- 2) R. Schellin and G. Hess : “A silicon miniature microphone based on piezoresistive polysilicon strain gauges,” Sensors and Actuators A Physical, vol.32, pp.555-559, 1992.
- 3) M. Royer, J. Holmen, M. Wurm, O. Aadland, and M. Glenn : “ZnO on Si integrated acoustic sensor,” Sensors and Actuators, vol.4, no.3, pp.357-362, 1983.
- 4) H. Guckel : “Surface micromachined pressure transducers,” Sensors and Actuators A Physical, vol.28, no.2, pp.133-146, 1995.
- 5) K.H.L. Chau and K.D. Wise : “A batch-processed vacuum-sealed capacitive pressure sensor,” in Proc. Transducers '97, the international conference on solid-state sensors and actuators, Chicago, pp.593-596, 1997.
- 6) K.E. Petersen, F. Pourahmadi, J. Brown, P. Parsons, M. Skinner, and J. Tubor : “Resonant beam pressure sensor fabricated with silicon fusion bonding,” in Proc. Transducers '91, the international conference on solid-state sensors and actuators, San Francisco, pp.177-180, 1991.
- 7) K. Ikeda, H. Kuwayama, T. Kobayashi, T. watanabe, T. Nishikawa, T. Yoshida, and K.Harada : “Silicon pressure sensor integrates resonant strain gauges on diaphragm,” Sensors and Actuators A physical, vol.21, pp.146-150, 1990.
- 8) L.M. Roylance and J.B. Angell : “A batch-processed silicon accelerometer,” IEEE Trans. Electron Devices, ED-26, no.12, pp.1911-1917, 1979.
- 9) J.C. Cole : “A new sense element technology for accelerometer subsystems,” in Proc. Transducers '91, the international conference on solid-state sensors and actuators, San Francisco, pp.93-96, 1991.
- 10) P.L. Chen, R.S. Muller, R.D. Jolly, G.L. Halac, R.M. White, A.P. Andrews, T.C. Lim, and M.E. Motamedi : “Integrated silicon microbeam PI-FET accelerometer,” IEEE Trans. Electron Devices, ED-29, no.1, pp.27-33, 1982.
- 11) B.P. van Driehhuizen, N.I. Maluf, I.E. Opris, and G.T.A. Kovacs : “Force-balanced accelerometer with mG resolution, fabricated using silicon fusion bonding and deep reactive ion etching,” in Proc. Transducers '97, the international conference on solid-state sensors and actuators, Chicago, pp.1229-1230, 1997.
- 12) S. Suzuki, S. Tachikawa, K. Sato, S. Ueno, Y. Yokota, M. sato, and M Esashi : “Semiconductor capacitance-type accelerometer with PWM electrostatic servo technique,” Sensors and Actuators A physical, vol.21, pp.316-319, 1990.
- 13) T. Murakoshi, Y. Endo, K. Fukatsu, S. Nakamura, and M. Esashi : “Electrostatically levitation ring-shaped rotational gyro/accelerometer,” Jpn. J. Appl. Phys., vol.42, no.4B, pp.2468-2472, 2003.
- 14) P. Greiff, B. Boxenhorn, T. King, and L. Niles : “Silicon monolithic micromechanical gyroscope,” in Proc. Transducers '91, the international conference on solid-state sensors and actuators, San Francisco, pp.966-968, 1991.
- 15) F. Ayazi and K. Najafi : “Design and fabricaton of a high performance polysilicon vibrating gyroscope,” in Proc. MEMS '98, IEEE micro electro mechanical systems workshop, Heidelberg, pp.621-626, 1998.
- 16) T. Juneau, A.P. Pisano, and J.H. Smith : “Dual axis operation of a micromachined rate gyroscope,” in Proc. Transducers '97, the international conference on solid-state sensors and actuators, Chicago, pp.883-886, 1997.
- 17) 藤吉基弘, 野々村裕, 大村義輝, 塚田厚志, 大桑政幸, 森川建志, 杉谷伸芳, 佐藤誠也, 松重誠一, 倉田信夫 : “水晶振動式角速度センサのモード解析,” 第22回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム講演予稿集, G-1, pp.271-272, 2001.
- 18) H. Tanaka and N. Wakatsuki : “Improvement of the sensitivity of H-type LiTaO<sub>3</sub> piezoelectric gyroscope,” IEICE Trans. Electron, E82-C, no.1, pp.60-65, 1999.