

次世代センサに関連して振動アクチュエータの基礎を復習する



東北大学
大学院工学研究科
田中 秀治

1. はじめに

次世代センサ協議会の創立 20 周年記念事業の一環として、2008 年、「次世代センサハンドブック」(培風館)が刊行されたが、私は主査として 10 章「アクチュエータ」を担当する任を仰せつかった。そこでは、無数にあるアクチュエータを圧電アクチュエータ、静電アクチュエータ、電磁・電歪アクチュエータ、熱アクチュエータ、流体アクチュエータ、ソフトアクチュエータ、およびバイオアクチュエータに分類し、第一線で活躍する若手～中堅研究者に充実した内容を執筆頂いた。

アクチュエータは、1986 年刊行の「センサハンドブック」(培風館)には取り上げられていなかったが、その後の MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術の急速の発展によってセンサとは切り離せないものになり、1994 年刊行の「アドバンストセンサハンドブック」(培風館)では、8 章「センサとエフェクタ」の中で部分的に取り上げられ、さらに、「次世代センサハンドブック」では、1 章、56 ページを割いて系統的に解説されている。機械量を測るセンサ、たとえば、圧力センサ、変位センサ、加速度センサは、機械量を電気信号に変換する機械-電気トランスデューサであり、逆に電気信号を入力すれば、機械運動が出力されるものが多い。同じことが、電気-機械トランスデューサ、すなわちアクチュエータでも成り立ち、機械運動を入力すれば、電気信号が出力されるものが多い。このように、そもそもセンサとアクチュエータは表裏一体である。

上述のように、アクチュエータには様々なものがあるが、センサとの関連性からは、静電アクチュエータ、圧電アクチュエータ、および電磁アクチュエータが特に重要である。というのも、これらのアク

チュエータは、発生させた機械運動(振動)に対する応答を見るという原理のセンサに用いられ、センサの構成要素そのものであるからである。具体的には、振動ジャイロ(次世代センサハンドブック、I 編 3.3.3 節)、コリオリ力流量計(同 I 編 4.3.14 節)、QCM (Quartz Crystal Microbalance) に代表される共振式質量センサ(同 I 編 7.4.3 節、II 編 3.6.1 節)、超音波センサ(同 I 編 8 章)、各種 SAW センサ(同 I 編 7.4.3 節)などがこれにあたる。アクチュエータは、これらのセンサの中で機械振動、多くは共振を起こすために用いられる。本稿では、アクチュエータによる機械共振の基礎を復習し、脱線しつつも皆様と一緒に次世代センサ開発の基礎の 1 つを、今一度、確認してみたい。

2. 共振

アクチュエータにその共振周波数と等しい電気信号を入力すると、共振が起こる。ちなみにマクロな機械は、共振が起こらないように設計し、アクチュエータも共振点より十分に低い周波数で利用するのが普通であるが、MEMS ではしばしば共振を利用する。これは、MEMS の材料として用いられる Si 結晶が、金属や樹脂と比べて機械的疲労に強いことから可能である。しかし、振動する MEMS の材料として初めから Si 結晶が用いられていたわけではない。

1965 年に Westinghouse から発表された”Resonant Gate Transistor” [1]は、MOS トランジスタのチャンネル構造の上に、静電駆動される Au めっきの片持ち梁が形成されたデバイスであるが、表面マイクロマシニングによる最初の MEMS (当時は MEMS という単語はなかった)としてよく知られている。片持ち梁の共振周波数の半分の周波数の成分を含んだ信

号を入力すると、片持ち梁が共振して MOS トランジスタがその共振数で駆動されるため、高い Q 値のフィルタ兼増幅器として働く。これは、現在の携帯電話用フィルタにも通じる革新的なアイデアであったが、主に金属疲労による寿命の問題から、当時は注目されなかった。その後、1980 年代に UC Berkeley などで多結晶 Si の表面マイクロマシニング[2]が開発され、これを用いた共振デバイスは十分な信頼性を示し、振動ジャイロなどに応用された。現在、携帯電話やスマートフォンで成功している STMicroelectronics と Bosch の振動ジャイロも、多結晶 Si で作られている。ただし、その多結晶 Si は「エピ・ポリシリコン」と呼ばれるもので、20 μm 以上と厚く積んでも応力で反らないことを特長としている[3]。

アクチュエータの共振に話を戻そう。機械的に振動する系は、ばね (ばね定数 k)、マス m 、およびダッシュポット (減衰係数 c) でモデル化できる。 $c=0$ のときの共振点は、よく知られているように角振動数 $\omega_0 = (k/m)^{1/2}$ にある。 $c \neq 0$ のときには、変位振幅が最大となる角振動数は ω_0 からずれる。しかし、速度振幅が最大となるのは、 c によらず $\omega_0 = (k/m)^{1/2}$ のときである。したがって、変位振幅が最大ではなく、速度振幅が最大になる状態を共振と定義すると都合がよい。機械的振動系は LCR で構成される電氣的振動系と相似であるが、これらの間では速度と電流とが対応する。電流が最大、つまりインピーダンスが最小のときが共振である。機械振動系では、振幅の方が見たり測ったりしやすいのに加え、 c が小さいときには (ほとんどの MEMS は、これに当てはまる)、変位振幅最大点も速度振幅最大点もほとんど同じなので、曖昧になりがちなのかもしれない。

機械的振動系と電氣的振動系の相似性から、アクチュエータによる共振系を等価回路で表現すると、図 1 のようになる。左側が機械的な振動部で、インダクタ L_m が質量、キャパシタ C_m がばね (コンプライアンス)、抵抗 R_m がダッシュポットに対応する。変圧比 $1 : \Gamma$ のトランスはトランスデューサを表し、 Γ は電流と速度との間または電圧と力と間を変換する電気機械変換定数である。また、キャパシタ C_0 はトランスデューサ電極間の容量である。共振周波数 (直列共振周波数) は

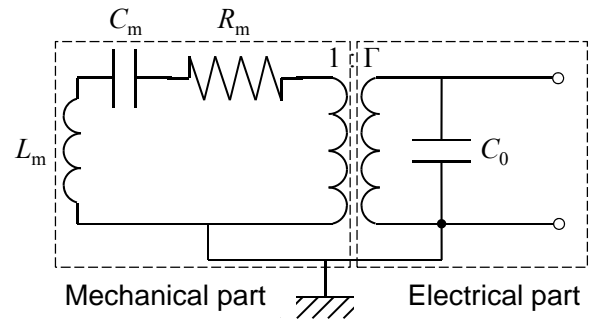


図 1 電気機械共振子の等価回路

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_m C_m}}, \quad (1)$$

C_0 が存在することで起こる反共振の周波数 (並列共振周波数) は

$$f_a = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_m C_m}} \sqrt{1 + \frac{C_m}{(C_0/\Gamma^2)}} \quad (2)$$

である。より厳密には、 C_0 が存在することによって、 f_r 、 f_a と電流がそれぞれ最大、最小になる周波数とは少し異なるが、実用上、その差は無視できる (後述する $k^2 Q$ が 1 より十分大きい場合)。より詳しくは文献[4]を参照して欲しい。

センサ応用、特に共振式質量センサへの応用では、共振の Q 値が重要である。共振の Q 値は

$$Q_r = \frac{2\pi f_r L_m}{R_m} = \frac{\sqrt{L_m/C_m}}{R_m} \quad (3)$$

で与えられる。Q 値の定義としては、半値幅 Δf_r を用いる定義

$$Q_r = \frac{f_r}{\Delta f_r} \quad (4)$$

やインピーダンスの位相 ϕ_z の回転速度から求める定義

$$Q_r = \frac{f_r}{2} \left| \frac{\partial \phi_z}{\partial f} \right| \quad (5)$$

もよく用いられるが、その他の定義もあり、共振点以外でも定義できる[5]。

3. 電気機械結合係数

振動アクチュエータにとって Q 値と並んで重要なのが電気機械結合係数 k^2 である。 k^2 は入力する電気

的エネルギーに対するアクチュエータに蓄えられる振動エネルギーの比である。また、図1の等価回路定数を用いると以下の式で与えられる。

$$k^2 = \frac{1}{1 + \{C_0 / (\Gamma^2 C_m)\}} \approx \frac{\Gamma^2 C_m}{C_0} \quad (6)$$

ただし、近似が成り立つのは k^2 が小さいときである。 k^2 が大きくなると、 f_r と f_a との差が大きくなることもよく知られており、その関係は

$$k^2 = \frac{f_a^2 - f_r^2}{f_a^2} \quad (7)$$

によって与えられる。

静電アクチュエータの場合、 k^2 は小さく、

$$k^2 \approx \left(V_{\text{bias}} \frac{\partial C_0}{\partial z} \right)^2 \frac{C_m}{C_0} \quad (8)$$

と表される。ここに、 V_{bias} は静電アクチュエータの電極間にかかるバイアス電圧、 z は電極間距離である。静電アクチュエータでは、 k^2 を大きくするためには、 V_{bias} を大きくするか、 z を小さくする(z が小さければ、 $\partial C_0 / \partial z$ が大きい)必要がある。一方、圧電アクチュエータの場合、

$$k^2 = \frac{d^2}{s\varepsilon} \quad (9)$$

と表される。ここに、 d は駆動方向の圧電 d 定数、 s は振動方向の弾性コンプライアンス、 ε は誘電率である。

k^2 の定義から k^2 が大きいと振動エネルギーが大きく、つまり「強く」共振する。静電アクチュエータと圧電アクチュエータとを比較すると、一般的に k^2 は圧電アクチュエータの方が圧倒的に大きい。このことは、「次世代センサハンドブック」の10章の最初10.1節において ε との関係で説明されている。ここでは、 ε が大きいとアクチュエータの電極間に蓄えられる(静電)エネルギーが大きいと説明されているが、 ε が大きければ C_0 が大きくなり、 z が変化したときの C_0 の変化 $\partial C_0 / \partial z$ が大きくなり、式(8)から k^2 が大きくなる。このような原理を利用した内部変換型静電バルク共振子[6]が提案されている。これは、エアギャップの代わりに高誘電率の薄膜材料(HfO₂など)を電極間に挟み、これを静電的に変形させる共振子である(アクチュエータとしては、圧電材料を用いた方がよいと思う)。

圧電材料では、 ε と d の間におおよそ比例関係があることが知られている。図2は文献[7]に載っている圧電材料の一覧表から作成した $\varepsilon_{33} / \varepsilon_0$ (比誘電率)と d_{33} との関係である。したがって、圧電材料としてはこの傾向から外れるものが特別ということになり、当然、 ε が小さいのに d が大きいものが「偉い」ということになる。そのような材料として、最近、注目されているものにScAlNがある[8]。これは、FBAR(Film Bulk Acoustic Resonator)として携帯電話のフィルタに使われているAlNにScを入れた新しい圧電材料である。Scを40%程度入れると、その d_{33} はAlNのその5倍弱(~25 pC/N)になるが、比誘電率は2倍程度(~20)にしかならない。その点でScAlNはAlNより「偉い」ことになる。

4. 性能指数

既に述べたように、 k^2 が大きいと振動エネルギーが大きく、つまり「強く」共振する。共振点での(速度)振幅は、共振点から十分離れたところでの振幅(静的振幅)に対して Q 倍になるので、振幅は $k^2 \cdot Q$ に比例する。振幅が大きいかどうかは、振動アクチュエータの「沽券にかかわる」ことなので、 $k^2 \cdot Q$ を性能指数とするのがよさそうである。電氣的には、図1の等価回路の電極間インピーダンス、つまりアクチュエータのインピーダンスの振幅が $k^2 \cdot Q$ に比例する。より正確には、 Q 値は共振点と反共振点とで異なるので、共振点と反共振点とのインピーダンス比は $k^2 \cdot (Q_r + Q_a)$ に比例する(Q_a は反共振点の Q 値)。

振動アクチュエータの性能指数が $k^2 \cdot Q$ と表され、これに一定の制限があるとすると、 k^2 と Q とはトレードオフの関係にあることになる。実際、これは正

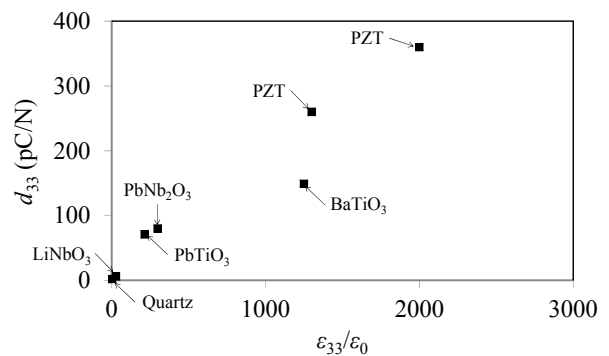


図2 比誘電率 $\varepsilon_{33} / \varepsilon_0$ と圧電定数 d_{33} との関係

しい。これは次のように説明することもできる。横軸が周波数、縦軸がインピーダンスのグラフにおいて、共振と反共振のピーク高さが一定であったとすると、共振点と反共振点の周波数が離れば、式(7)から k^2 は大きくなるが、ピークはなだらかになって式(4)から Q は小さくなる。論文で Q 値が高いと威張ってみても、それは単に k^2 が小さいからということが少なくない。

圧電トランスデューサや静電トランスデューサでは入力（電気）と出力（機械振動）とを逆にしてもよく、圧電・静電アクチュエータはセンサとしても働く（はやりのエネルギーハーベスタ／振動発電デバイスとしても働く。これについては、文献[9]を参照して欲しい）。センサは電圧出力であることが多いが、センサの電極間容量が小さい方が高い電圧が出力される。センサを拘束していないときの電圧出力は $g = d/\epsilon$ （圧電出力定数）に比例するので、これも1つの性能指数と言え。もちろん、アクチュエータを拘束せずに静的に変形させたときの変形量は d に比例するので、 d も性能指数の1つである。要するに、目的に応じた性能指数で評価する必要がある。

5. おわりに

「次世代センサハンドブック」の10章「アクチュエータ」の主査を務めたということで、アクチュエータに関する執筆依頼を受けたが、担当した章を要約してもつまらないと考え、何を書こうか悩んだ。もう一度、担当した章を読み直してみて、静的な変形や発生力については十分に説明されているものの、振動・共振という観点からは説明が足りなかったことに気が付いた。日頃、MEMSやセンサを研究開発している立場から、振動・共振は基本中の基本であると考え、自らの復習のためにも本稿をまとめた次第である。思いついたことをつらつらと綴ったためまとまりのない内容になったが、御容赦頂きたい。

参考文献

- [1] H. C. Nathanson, R. A. Wickstrom, A Resonant-Gate Silicon Surface Transistor with High-Q Bandpass Properties, Appl. Phys. Lett., 7 (1965) pp. 84–86
- [2] James M. Bustillo, Roger T. Howe, Richard S. Muller, Surface Micromachining for

Microelectromechanical Systems, Proc. IEEE, 86 (1998) pp. 1552–1574

- [3] M. Kirsten, B. Wenk, F. Ericson, J. Å. Schweitz, W. Riethmüller, P. Lange, Deposition of thick doped polysilicon films with low stress in an epitaxial reactor for surface micromachining applications, Thin Solid Film, 259 (1995) pp. 181–187
- [4] 清水洋, 振動モードと等価回路 (2.1 節), 弾性波素子技術ハンドブック, オーム社 (1991) pp. 66–82
- [5] Rich Ruby, Reed Parker, Dave Feld, Method of Extracting Unloaded Q Applied Across Different Resonator Technologies, 2008 IEEE International Ultrasonics Symposium, Beijing, China, November 2–5, 2008, pp. 1815–1818
- [6] Dana Weinstein, Sunil A. Bhave, Internal Dielectric Transduction in Bulk-Mode Resonators, J. Microelectromech. Syst., 18, 6 (2009) pp. 1401–1048
- [7] 圧電セラミックス テクニカル・ハンドブック, 富士セラミックス, p. 36
- [8] Morito Akiyama, Toshihiro Kamohara, Kazuhiko Kano, Akihiko Teshigahara, Yukihiko Takeuchi, Nobuaki Kawahara, Enhancement of Piezoelectric Response in Scandium Aluminum Nitride Alloy Thin Films Prepared by Dual Reactive Cosputtering, Adv. Mater., 21 (2009) pp. 593–596
- [9] 田中秀治, マイクロ振動発電機的设计論, 電気学会論文誌 C, 132, 3 (2012) pp. 359–363