



MEMS—微小電気機械システム

東北大学大学院工学研究科
ロボティクス専攻
教授 田中 秀 治

1. MEMSとは何か

MEMSはMicro Electro Mechanical Systemsの略記であり、日本語で表せば、微小電気機械システムになる。その外見は、典型的には何の趣もない数mm角の黒い樹脂封止の電子部品である。スマートフォンなどの中に入っているプリント基板を見たことがあるだろうか。「スマホ プリント基板」とインターネット検索すれば、きっと多くの画像が出てくるが、それらのプリント基板の上に載っている黒い部品のいくつかはMEMSのはずである。普段からスマートフォンを使っていれば、知らぬまにMEMSを使っていることになる。黒い樹脂封止を加熱して発煙硝酸で溶かし、さらにシリコンやガラスのキャップを剥がせば、シリコン製の微小メカニズム（たとえば、図1）がようやく見える^{1,2)}。

スマートフォンでMEMSが提供する機能は様々である。まず、マイクロフォンは須くMEMSである³⁾。しかも、マイクロフォンは1つではない。多くの機種で4つくらい使われており、ノイズキャンセリング機能が提供されている。重力を感知して画面を正しい方向に向けたり、「シェイク」を感知したり、歩数を数えたりしているのは、MEMS加速度センサーである⁴⁾。加速度センサーは、MEMSジャイロセンサーと協調してカメラの手ぶれ防止、ナビゲーション、ゲーム（たとえば、「Pokémon GO」）などにも使われている。MEMS気圧センサーによって階段の昇り降りの一段一段だってわかる。高層ビルをエレベーターで上ると耳が痛くなるのと同じ原理だ。一部の指紋センサーもMEMSである⁵⁾。

そもそもスマートフォンの無線通信システムにもMEMSが使われている。無線通信に使える周波数は厳格に割り当てられており、その周波数帯をバンドと呼ぶ。現在、50を下らないバンドが使われているが、スマートフォンの中でバンドを選ぶ弾性波フィルターの1方式には、MEMS技術が用いられている^{6,7)}。もちろん、MEMSが使われているのはスマートフォンだけではない。流行りのTWS（True Wireless Stereo）イヤホン、スマートウォッチ、AI（Artificial Intelligence）スピーカー、自動車、家電機器、ドローン、ロボットなど枚挙にいとまがない⁸⁾。

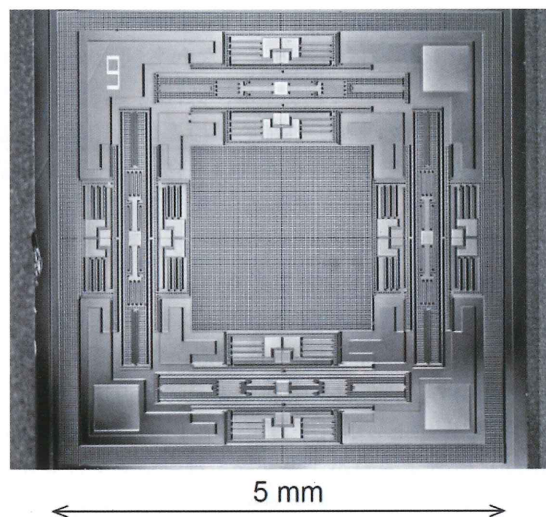


図1 MEMSジャイロセンサーの構造

これは製品のパッケージを取り除いて撮影したのではなく、当研究室で開発したもの。

2. 当研究室の役割

私達の研究対象はMEMS産業である。その中心となる活動は、次世代のMEMSや関連技術の先行研究である。基盤技術はもちろんだが、数年後に企業が開発を始めたいと思うだろう技術を先んじて研究することを大切にしている。特に、私達の研究がなければ、企業はどこも気付かなかったはずの技術を生み出したいと常々思っている。もちろん、顧客企業の課題を解決することも大きな喜びである。大学の強みは、一連の技術を長く研究し、原理原則と技術の系譜を知悉しているので、誤ると金銭的・時間的損害の大きい研究開発の入口や岐路でお客様を正しく導ける可能性が高いことである。アイデアの実証過程で学生さんが多くの失敗をしてくれていることも大きい。また、その中立的な立場を活かし、業界、サプライチェーン、および市場動向を広く深く理解し、ビジネスへの出口を踏まえて研究開発を方向づけできることも強みだと思っている。私達のお客様はデバイスメーカーだけではない。材料メーカー、装置メーカー、ファウンドリなどともお付き合いさせて頂いている。

MEMSにはいろいろなものがある。上で紹介したものは代表的なMEMSであって、少量生産のMEMSや実用化したばかりのMEMSはたくさんある（図2）。大抵、これらは

お客様の製品にとってキーデバイスとなる。さらに、MEMSとはただちに呼べないものの、MEMS的な技術を取り入れた製品もある。多様性はMEMSの魅力の1つであるとともに、難しさでもある。ちらばった知識や技術を集めてきてものを創り上げることはsynthesis（総合、analysis＝分析の対義語）と呼ばれるが、体系化しにくいからこそ楽しくも難しくもあるわけだ。学生さんにはそこを学んで欲しい。そして、多様性があれば、大学の役割も多い。ここでは毛色の異なる研究開発の例を3つ紹介しよう。

3. 高性能化するMEMSジャイロセンサー

ジャイロセンサーは角速度、すなわち回転を測るセンサーである。ジャイロセンサーは、低性能で安価ものから高性能で高価なものまで、性能も値段も何桁にもわたるようなデバイスである。図3に示すように、ローエンド品はMEMSジャイロセンサーである。主たる用途はスマートフォン、自動車のナビゲーションシステム、VR（Virtual Reality）ヘッドセットなどである。お値段は1つ100円といったところである。一方のハイエンド品の代表はHRG（Hemispherical Resonator Gyroscope）である。主たる用途は兵器であり、性能はMEMSのその1万倍くらいと飛び切り良いが、1セット数千万円以上すると言われている。その中間に位置するのが、光ファイバージャイロやリングレーザージャイロと呼ばれる光学式のものである。

話題の自動運転車には、光学式ジャイロセンサーが用いられている。いかなる状況でも、たとえば、長いトンネルや摩天楼の谷間でも自動車を正確に導くためには、光学式ジャイロセンサーの性能が必要となる。しかし、そのお値段が問題である。ジャイロセンサーだけで普通の自動車を買ってしまう価格である。光学式ジャイロセンサーを画期的に安くすることは難しそうであり、そこにMEMSジャイロセンサーを高性能化する動機がある。それができれば、

たとえば、VRにも役立つだろう。普及しているVRヘッドセットは座って、あるいは立ち止まって使うことが想定されている。顔の動きはMEMSジャイロセンサーで認識できるが、部屋の中を動き回られてもユーザーの位置トラッキングはできない。MEMSジャイロセンサーの性能が悪いからである。高性能MEMSジャイロセンサーがVRのユーザー体験を一変させるかもしれない。

MEMSジャイロセンサーは2軸直交振動系に働くコリオリ力を用いる振動型である。インターネット検索すればすぐわかるので、その原理はここでは説明しない。図1に示したように、MEMSジャイロセンサーの機構はとても小さいので、機械的にも電氣的にもマクロ世界では気にならないようなノイズが問題になる。それでも2軸直交振動系が完璧であれば、理論的には超高性能を実現できる。ただ、完璧なものは作れない。いかに素晴らしいツールを用いても、加工誤差や材料の不均一性は必然だからだ。そして、良くできたMEMSの加工誤差は、電子顕微鏡で見てもわかるようなものではない。したがって、MEMSジャイロセンサーの高性能化は、各種ノイズと見えない加工誤差による不完全性との闘いである。それをどうするか、そこが腕の見せ所である。

ところで、フーコー振子をご存知だろうか。1851年、フランスの物理学者レオン・フーコーはパリのパンテオンの天井から長さ67mもの振り子を吊るし、地球の自転を実証してみせた。これがフーコー振子である。フーコー振子はゆっくりとした地球の自転を長時間に渡って測定できる優れたジャイロセンサーと言える。私の同僚の塚本貴城准教授はフーコー振子をMEMS上で実現する新しい方式を考案し、極めて温度特性に優れるジャイロセンサーを実現してみせた⁹⁾。上述のMEMSの不完全性を補正または補償する技術と組み合わせて、この新しいMEMSジャイロセンサーが自動運転車などに使われることを期待している。

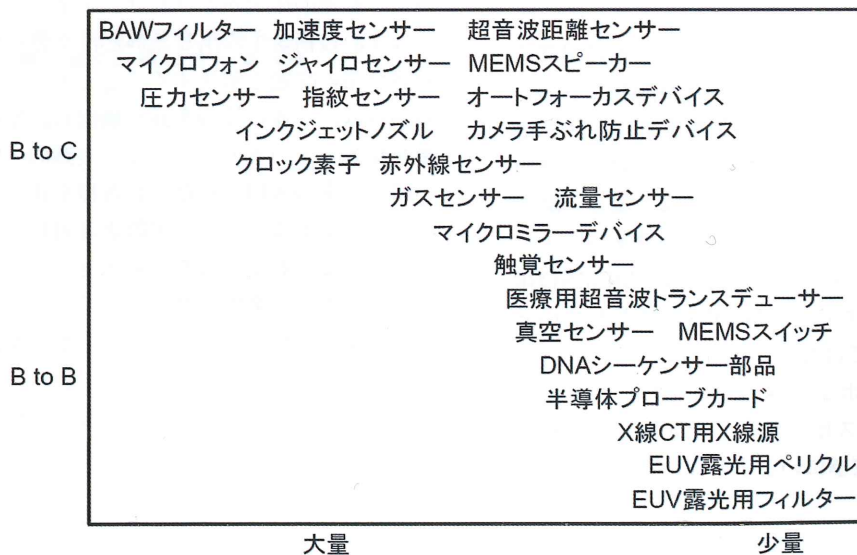


図2 様々なMEMS製品
これらのほとんどのMEMSが当研究室の営業品目である。お問合せ頂きたい。

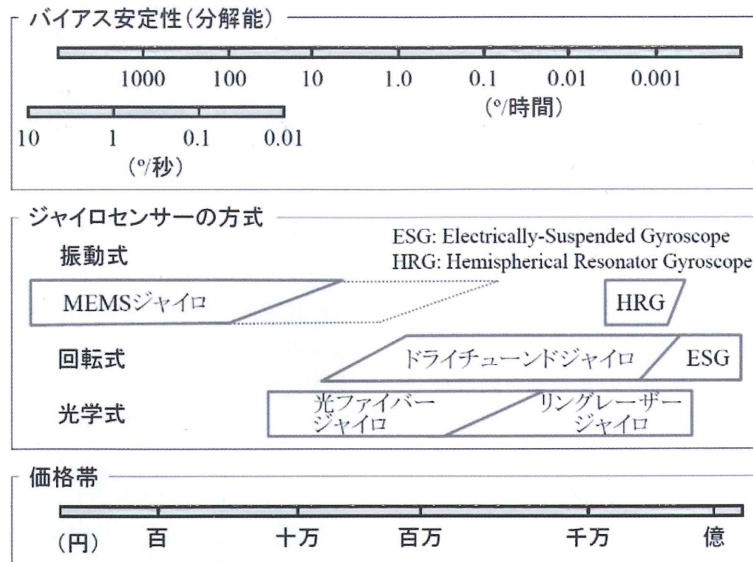


図3 様々なジャイロセンサー

バイアス安定性は性能指標の1つで分解能(どのくらいゆっくりとした回転を検出できるか)に相当する。

4. 新しいSAWフィルター

スマートフォンに用いられている弾性波フィルターのうち、BAW (Bulk Acoustic Wave) フィルターは、今や最大のMEMS製品である¹⁰⁾。なお、BAWデバイスの2つの形態のうちの1つ、FBAR (Film Bulk Acoustic Resonator) は、1980年に3つのグループから独立に発表されたが、その1つは本学の中村信良先生らの研究室であった。最近、MEMSのディフェンディングチャンピオンであるBAWフィルターに挑んでいるのが、ここに紹介する新しいSAW (Surface Acoustic Wave) デバイス、「HAL SAWデバイス」である¹¹⁾。なお、HALはHetero Acoustic Layerの略記である。

HAL SAWデバイスは、図4(b)に示すように、波長程度以下に薄い、具体的には厚さ1 μ m程度以下のLiTaO₃単結晶またはLiNbO₃単結晶を別の基板で支持した構造を有する。ここで、LiTaO₃ (タンタル酸リチウム) とLiNbO₃ (ニオブ酸リチウム) は圧電材料である。この構造によって、従来構造(図4(a))では基板に漏れる弾性波(地震波のようなもの)を表面の圧電単結晶に閉じ込められる。漏れが少ないということは、振動エネルギーの損失が小さい、つまりQ値(周波数領域での蓄積エネルギー集中度)が高いということである。弾性波フィルターは、すごく簡単に言えば、共振子が信号を共振時に通し、反共振時に通さない性質を使っている。図4で共振子は表面の櫛歯電極によって形成されているが、Q値はその共振の鋭さであり、結局、フィルターのカットオフの鋭さに繋がる。Q値の高いHAL SAWデバイスは、5G時代以降により複雑となるバンド制御に好適である。

暑い日や寒い日にスマートフォンが使えなくなったり、通信速度が下がったりするのは困るし、そもそも大パワーで通信すれば、フィルターはひどく加熱される。デバイスの温度安定性はいつも重要である。HAL SAWデバイスで

は、図4(b)の支持基板を水晶にしたり、LiTaO₃単結晶の下にSiO₂膜を付けたりとすることで、共振・反共振周波数の温度依存性(TCF)を小さくできる。LiTaO₃やLiNbO₃を含めておおよその物質は温度が上がると柔らかくなるので(日常感覚に合う)、負の温度係数を持っている。しかし、SiO₂やある結晶方向の水晶は温度が上がると硬くなる性質、すなわち正の温度係数を持っている。これらをお互いにキャンセルさせてTCFを小さくしようというわけだ。私達はLiTaO₃単結晶薄板と水晶基板を組み合わせたHAL SAWデバイスを考案し、その実用化を目指している。

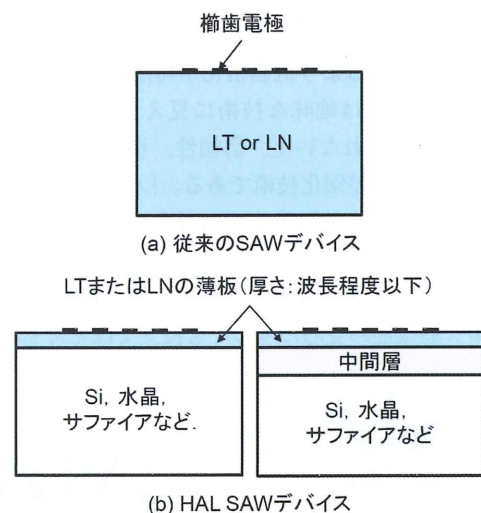


図4 (a) 従来のSAWデバイスと(b) 新しいHAL SAWデバイス

5. 深紫外LEDの小形パッケージング

新型コロナウイルス感染症が猖獗し、ウイルスの不活化技術にことさら注目が集まっている。核酸(DNA、RNA)は波長260nm周辺の深紫外光に最も高い吸収度を示し、し

たがって、この付近の波長で不活化の効率は最も高いだろうと期待できる。最近、それを支持する実験結果が出ている。研究パートナーのスタンレー電気様は自動車用ランプの大手であるが、265nmの深紫外LEDのトップメーカーでもある。この深紫外LEDの現在の主たる用途は水殺菌であるが、新型コロナウイルス等の不活化はそれよりずっとコンシューマー寄りの用途であり、普及には低価格化が鍵となる。

低価格化のためには、まず、デバイスの単価を下げる必要がある。また、実用的なウイルス不活化には多くの深紫外LEDが必要であるが、デバイスあたりの光強度を高められれば、使用数を減らせるので、低価格化できる。私達はこれらをパッケージングの刷新によって実現しようとしている。たががパッケージと侮るなかれ。MEMSのデバイスコストの半分以上がパッケージングによるとも言われているし、深紫外LEDでもパッケージングコストはバカにならない。現在のパッケージはAIN(窒化アルミニウム)セラミックス製である(図5(a))。深紫外LEDは発光効率がとても低いので大量の熱を発するが、熱くなると発光効率が急落してしまう。したがって、熱伝導率の高いAINセラミックスが用いられているが、これはどうしても高価である。

私達が開発しているパッケージは、シリコンウエハ上に作られる(図5(b))。MEMS技術を使えば、小さなパッケージを一度にたくさん作れるだけでなく、ウエハ状態で一括して蓋をすることもできる。パッケージの底を薄くして、さらに銅の貫通配線を高密度に作り込めば、熱伝導を高くできる。しかも、パッケージの凹みの側面がシリコンの結晶面でできた斜めの「鏡」であるため、横方向に放射された光を上方向に反射して有効利用できる。結果として、デバイスあたりの光強度を高められるわけだ。このようにパッケージングの刷新によって、深紫外LEDをより多くの用途に使うよう低価格化が可能になる。

パッケージングは地味な技術に見えるかもしれないが、どうしても避けられない上、信頼性、歩留り、性能、そして価格に直結する差別化技術である。「パッケージングを考えてから中身を考えろ」とまでは言わないが、そのくらい大事である。私達はMEMSのウエハレベルパッケージング技術^{1,2)}の研究にも力を入れてきたが、その経験が新型コロナウイルス感染症の克服に少しでも役立てばとても嬉しい。

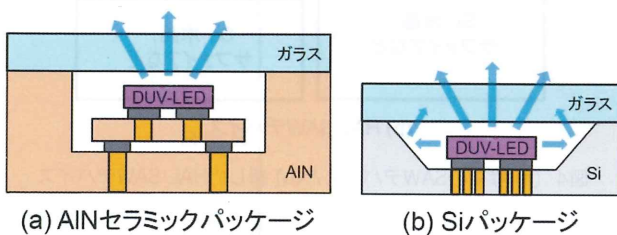


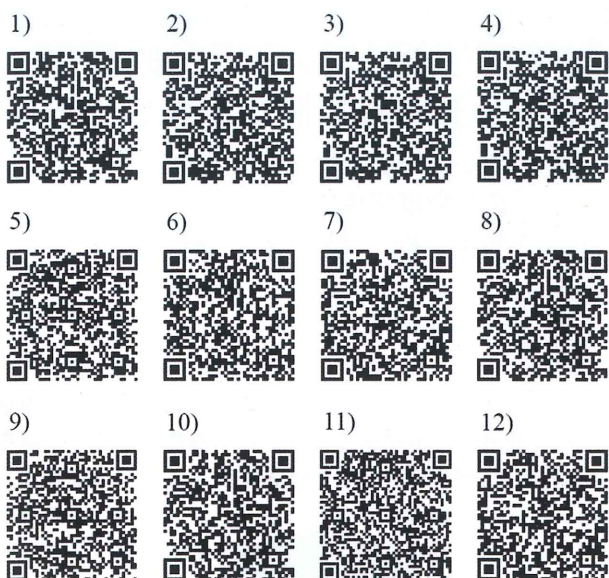
図5 深紫外LEDのパッケージ (a) 従来のAINセラミックパッケージ、(b) MEMS技術によるシリコンパッケージ

6. 50年の歴史を経て

本学のMEMS研究は、江刺正喜先生が学生の頃、それを始めてから、約50年の歴史を誇る。当初、MEMSという言葉すらなかった。それから長い間、あまり儲からないことはMEMSの宿命であった。しかし、最近10年、スマートフォンの爆発的な普及によってMEMS産業は急成長し、今も健全な成長を続けている。2014年に電気学会会員が江刺先生を囲んで行った座談会で、江刺先生は、ある技術の黎明期から発展期に関わるのと、産業として大きくなった後に関わるのとでは、やりにくさが違うという趣旨で、「『江刺先生は幸せ、田中先生は不幸』なんじゃないかなあ」とおっしゃって¹²⁾、自分の次の世代はやり方を変えて取り組むようにと檄を飛ばして下さった。これからのMEMSの産業規模に合う研究開発を行うには一層の努力が必要であるが、当研究室は基礎研究から事業化までお客様から頼りにされるMEMSと関連技術のプロ集団であり続けたい。それは不幸ではなく、とても楽しいことであるはずである。

参考文献

- 1) 田中秀治, MEMSの封止は、構造物の保護とコスト低減の両立がカギ MEMSのウエハレベルパッケージングの基礎 第1回, 日経xTECH, 2020/8/20
- 2) 田中秀治, 実装面積を小さくする、慣性センサー封止のあれこれ MEMSのウエハレベルパッケージングの基礎 第2回, 日経xTECH, 2020/8/21
- 3) 田中秀治, MEMSマイクに新原理、PZTでスピーカーやレンズも「Transducers 2019」の発表を読み解く, 日経xTECH, 2019/9/19
- 4) 田中秀治, 0.12平方mmのMEMS加速度センサー、チップ面積1/10で同等性能に, 日経xTECH, 2019/4/4
- 5) 田中秀治, ガラス下に置く指紋センサー、TDK子会社が超音波ビームで実現, 日経テクノロジーオンライン, 2017/10/05
- 6) 田中秀治, BroadcomをMEMS売上高トップにしたデバイスとは, 日経xTECH, 2018/07/09
- 7) 田中秀治, 中国スマホのアキレス腱、BAWフィルターの先端技術, 日経xTECH, 2019/5/15
- 8) 高市清治, スマホにも自動車にも不可欠なMEMSが日本製造業を救う, 日経xTECH, 2019/7/25
- 9) 田中秀治, チップ上にフーコー振子—高性能MEMSジャイロ 自動運転などに向けて開発が進む, 日経テクノロジーオンライン, 2015/07/17
- 10) 田中秀治, 2019年MEMS売上高ランキングTOP30、日本企業は9社に減少, 日経xTECH, 2020/9/1
- 11) 田中秀治, 「成熟したはず」の弾性表面波フィルターが、新技術開発ブームに沸くワケ, 日経xTECH, 2020/2/21
- 12) E部門編修委員会, 座談会 江刺先生を囲んで, 電気学会論文誌E, 134, 6 (2014) pp. NL6_3-NL6_8



著者略歴

たなか しゅうじ
田中 秀治

1999年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了

1999年 東北大学大学院工学研究科助手

2001年 同講師

2003年 同助教授

2013年 同教授