

巻頭論文

# 安全・安心・快適な社会を支えるセンシング技術



井上満夫\*



大路 浩\*\*



吉田幸久\*\*\*

*Sensing Technologies for Supporting Safe, Secure and Comfortable Society*

*Mitsuo Inoue, Hiroshi Oji, Yukihisa Yoshida*

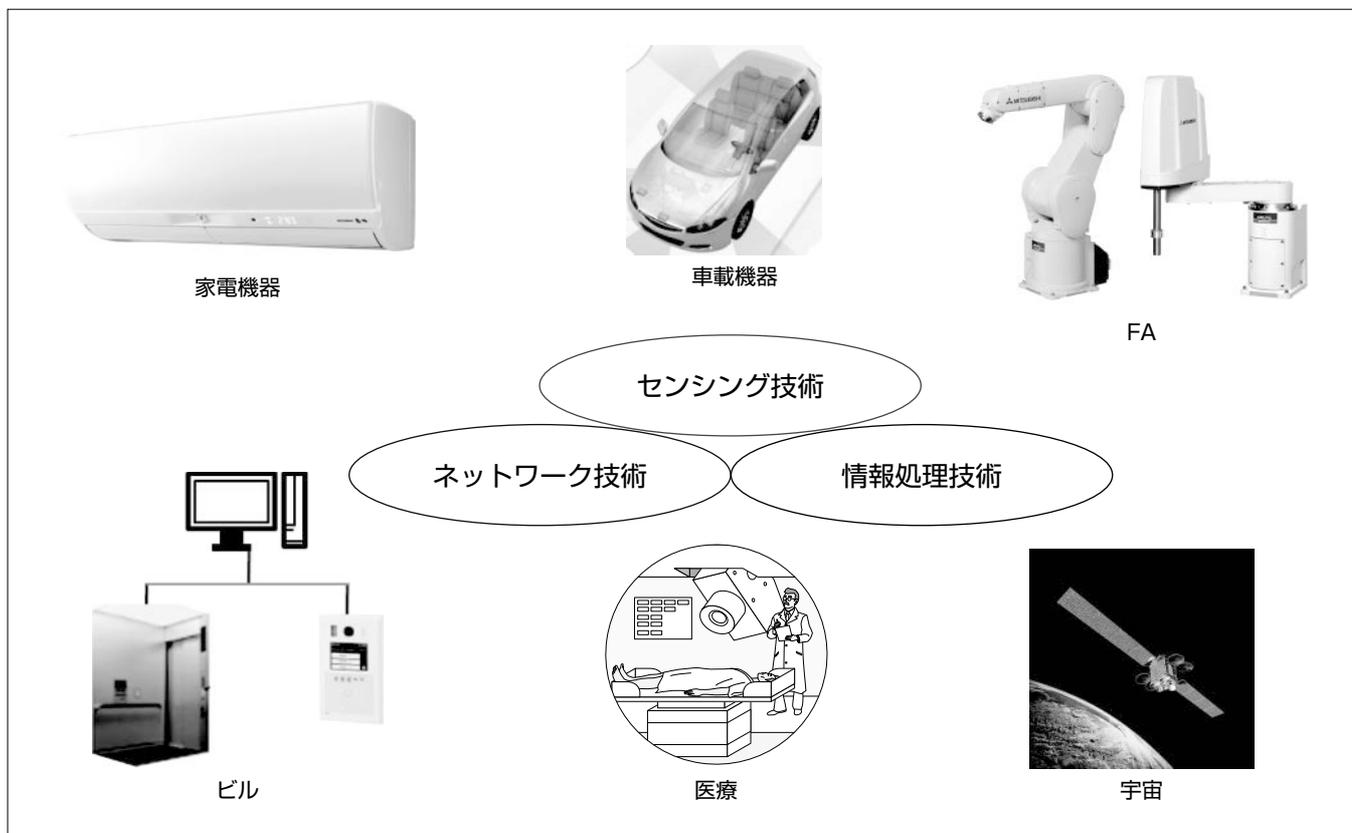
要 旨

人は古くから、世の中の現象をセンシング(計測)して情報を取得し、それを生活に役立ててきた。例えば、古代エジプトでは天体の動きから洪水の時期を予測したり、作物の植付けの時期を決めたりしていた。しかしながら、目測によるセンシングでは、経験と勘に基づくところが大きく、定量性には限りがあった。その後、多種多様なセンサ(道具)を生み出すことで、より精度良く計測することが可能となり、我々の豊かな社会を支える一助となっている。また、学術の進歩はセンシング技術の進歩と表裏一体の関係があると言われている。特に物理学の世界では、理論によって予測された現象をセンシングによって実証することを繰り返すことで、進歩・発展してきた。

このように、センサ及びセンシング技術は様々な分野で活用され、我々に多大な恩恵を与えているにも関わらず、縁の下の役割を担っている場合が多く、その技術があまり知られていない。

三菱電機では、家電機器、車載機器、FAやビル、医療から宇宙などの広い分野にわたって、センシング技術を活用した製品群の開発を進めている。

この特集号では、具体的な事例を通してセンシング技術がどのような形で我々の身の回りの生活を安全・安心・快適なものに導いているか、また環境保全に貢献しているかを述べていく。



センシング技術を用いた製品群

センサで計測されたデータは、情報処理回路によって意味のある情報に加工され、判定又は機器の制御情報として用いられる。最近ではネットワーク技術の進展によって、様々なセンサが有機的に統合され、いわゆるスマート社会の形成に活用されている。今後も、当社はこれら技術の開発を推進し、安全・安心社会の実現、環境に配慮した循環型社会の構築を先導していく。

## 1. ま え が き

センサが計測の対象とするものは、温度・湿度などの環境状況、位置・傾き、速度・加速度、衝撃・圧力等の物理量、光、電気・磁気、化学に関する情報等、極めて広い範囲に及ぶ。自動車に搭載されるセンサを例に挙げると、センサの役割は速度やエンジンの回転数、冷却水温度などの機器の状態を計測する基本的なものから、エンジンの燃焼状態、ブレーキングの安定性、車体の姿勢等の制御に用いるための情報取得手段へと進展し、自動車の更なる電動化に伴い、ますます車載センサの重要性は増してきている。一方、GPS(Global Positioning System)を使って位置を計測することによって、カーナビゲーションシステムは地図や道路標識で自分の位置を知るといった煩わしさから運転者を解放し、快適かつ安全に目的地まで誘導してくれる。さらに、高度化するセンシング技術は運転者の状態の監視から、最近では自動車に搭載したセンサによって、段差や機械的強度などの路面状態を非接触で検知し、道路や橋梁(きょうりょう)などの状況を把握して、これらインフラのメンテナンスに役立てようとする試みも提唱されている。

本稿では、自動車用のセンサを中心に、センシング技術の開発動向と当社の取組みについて述べる。

## 2. センシング技術の開発動向

従来、センサは機械的、電氣的、磁氣的な部品を組み合わせた構成となっており、センサを利用する側からの小型化や高精度化に対する要求に十分応えることができていなかった。しかしながら、1980年代に入り、図1に示すように加速度センサなどの一部のセンサには半導体技術をベースとしたMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技術が適用されるようになり<sup>(1)</sup>、半導体ウェーハ上へのセンサの一括大量生産が可能になった。これによって、小型化や高精度化に加えて、低コスト化も一気に進み、後述する自動車やスマートフォンなど、身近な機器に数多くのセンサが搭載されるに至っている。

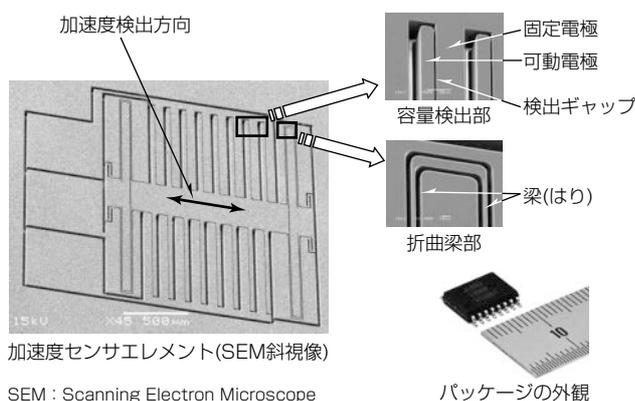


図1. MEMS加速度センサ

また、半導体デバイス・プロセス技術の適用に伴い、従来センシングできなかったものを新たな現象を用いてセンシングすることが可能になりつつある。例えば、赤外線センサは赤外線を熱として検知して、その温度変化をセンシングするものであるが、燃焼するガスからは、ガス種によって特定波長の赤外線が放出されており、赤外線の波長を知ることで燃焼ガスの同定が可能となる。これまでは、センサに分光器を設置しなければ、吸収された赤外線の波長を知ることはできないため、大掛かりなシステムが必要であった。しかしながら、プラズモンという現象を利用することによって、赤外線吸収面に微細な構造を作りこむことで、センサそのものに赤外線分光の機能を持たせることができる<sup>(2)</sup>。

一方、最近ではセンサに対しても低消費電力化が強く求められている。すなわち、環境発電と呼ばれる小さな自立発電型分散電源によって、外部から給電することなくセンシングするとともに、複数のセンサを無線でつなぎ、多角的な情報を瞬時に把握する大規模センサネットワークが注目されている。この背景には、センシングによって収集したビッグデータをリアルタイムで処理することができる組み込みソフトウェアの性能向上がある。このようにセンシングは、情報の収集と同時に、得られた情報を的確に分析し、判断・処理することによって初めてその効果が発揮される。今後、この分野での組み込みソフトウェアの役割は、ますます増大していくことが予測される。

ここまで述べてきたように、センサの開発動向としては、従来のセンサを小型化、低コスト化、低消費電力化することによって、その利用の範囲を拡大していくとともに、新たな物理現象を活用することによって、従来、センシングすることができなかった現象をセンシングする方向に向かっている。もちろん、これらの発展を支える技術として、収集した情報を使うためのCPUの高速化と組み込みソフトウェアの進歩も必要である。

3章では、具体的な事例として、当社の自動車用センサの開発と将来展望について述べる。

## 3. 自動車用センサ

### 3.1 発展の背景

自動車は、機械、材料、エレクトロニクスなど様々な分野の先端技術を融合した複合体であり、その進化は“安全・安心・快適”を追求しつつ、今もその歩みを止めることはない。自動車を下支える先端技術の一つであるカーエレクトロニクスは、半導体技術の発展に呼応して1980年代から急速に進展してきた。また、それらの背景には外的要因とも言える排出ガス規制やエアバッグの搭載義務化といった環境問題・安全への社会的意識の高まりがあった。カーエレクトロニクスはECU(Engine Control Unit)とセ

ンサに大別できる。人に例えると前者は膨大な信号処理・判断をつかさどる脳であり、後者は多様な信号を正しく検知する五感である。現在の自動車には100個近くに及ぶセンサが搭載されている。その用途は、エンジン、ステアリング、トランスミッション、ブレーキ、サスペンション等を制御する駆動系に関するもの、エアバッグシステム、横滑り防止システム、ナビゲーションなどの安全性・利便性に関するものなど多岐にわたっている。図2に自動車に搭載されている代表的なセンサを示す。

自動車技術の高度化に伴うセンサへの要件について考えてみる。近年、自動車用エンジンに対する高動力性能・低公害・低燃費への要求は、地球環境保護など持続的社会的の実現に向けた意識の向上を背景に、一段と加速している。これらの相反する要求を成立させるには、多様な物理量を検知する各種センサの更なる性能向上が必須である。また、人の快適性・安全性を希求する観点からは、車内での居住性向上に伴うエンジンルームの縮小、及び安全機能の充実に向けた装着品の増加によって、センサを搭載できる空間はますます小さくなってきている。すなわち、自動車用センサには性能向上に加え、小型化・軽量化が求められている。

### 3.2 MEMS技術を利用したセンサ

#### 3.2.1 センサの種類と製造方法

自動車用センサの小型化には、半導体技術と親和性の高いMEMS技術の発展が大きく寄与している。MEMSを用いた自動車用センサは、エンジン制御用の空気量センサ、圧力センサ、エアバッグシステム用の加速度センサ、横滑り防止システムのジャイロセンサなどがある。自動車用途以外でも、携帯機器やスマートフォン、ゲーム機器、デジタルカメラなどに、MEMSを用いた加速度センサ、ジャイロセンサ、マイクロフォンが搭載されている。また、プ

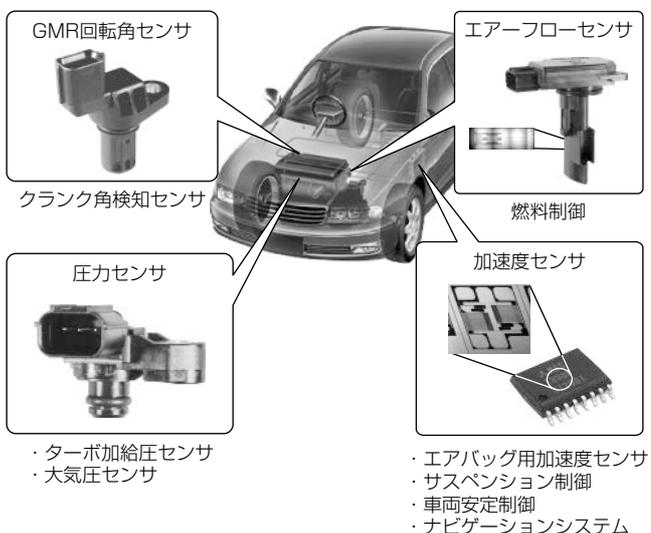


図2. 自動車へのセンサ適用事例

ロジェクタにはMEMSを用いたミラーデバイスが使われている。

MEMSセンサの製造方法は半導体技術を基盤にしている。つまり、直径が150mmないしは200mmのシリコンウェーハに電子デバイスで培われた半導体プロセスを適用し、1枚のウェーハから数千個の素子を一括して製造する。更に数10枚のウェーハを投入するバッチ処理が可能であり、ロット単位で数万個の素子が得られる。プロセス工程は半導体と同様に一定基準で管理されるため、多数の素子は均質な性能を持ち、品質を統計的見地から管理することができる。

#### 3.2.2 製造プロセス

MEMSセンサ素子は中空構造や可動構造を持っており、その点が従来の半導体デバイスと決定的に異なる。この相違点を述べるため、MEMSセンサ素子の製造プロセスの各工程を図3に示す。

工程(a)では所望のサイズのシリコンウェーハを用意する。これを基板として工程(b)と工程(c)では、成膜、写真製版、エッチングなどの処理を、設計した工程フローに基づいて行う。工程(c)の後半では、犠牲層除去と呼ばれる処理を行いMEMSに特徴的な可動構造体を形成する。工程(d)では、可動構造体を外部環境から保護するため、ガラス基板をウェーハレベルで接合する。最後に工程(e)でダイシングし

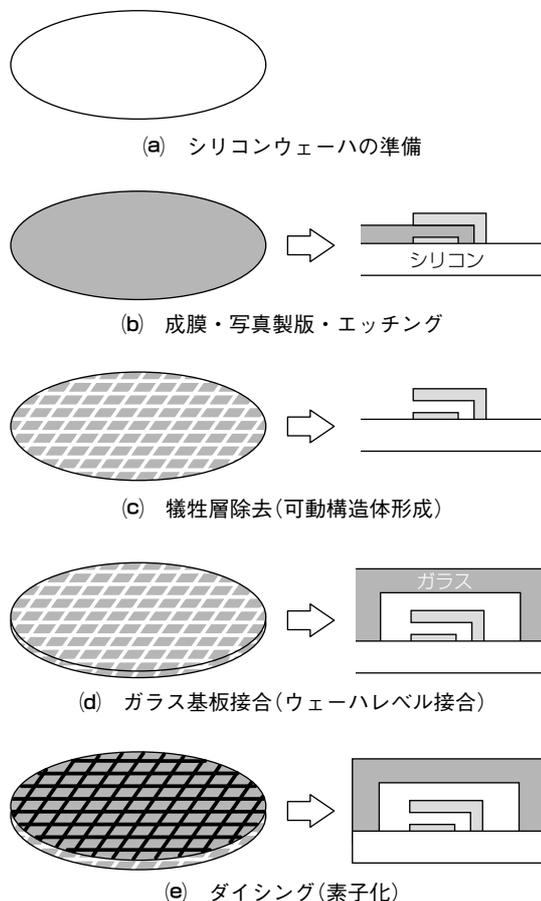


図3. MEMSセンサ素子の代表的な製造プロセス工程

素子化する。これらがMEMSセンサ素子製造の大まかな流れであるが、先に述べたように、このフローの中には従来の半導体プロセスにはないMEMS固有の特徴的なプロセスが使われている。その代表的なプロセスは、シリコンの深掘エッチング、犠牲層エッチング及びウェーハレベルでの陽極接合等であり、これらの詳細を次に述べる。

(1) 深掘エッチング

シリコンの深掘エッチング技術は、ICP-RIE (Inductively Coupled Plasma-Reactive Ion Etching) とも呼ばれ、1990年代後半から市場に普及し始めたプロセスである。この技術によって、MEMSセンサ構造の設計自由度が飛躍的に向上し、多様なセンサ素子に適用されるようになった。ICP-RIEでは、側壁保護と底面エッチングのレシピを秒単位で交互に繰り返すことにより、シリコンを垂直に加工できる。エッチングの開口幅に対する深さの比(アスペクト比)は最大100程度までが可能であり、エッチングレートも20 $\mu\text{m}/\text{分}$ と速く製造のスループット向上に寄与している。図4に、厚み400 $\mu\text{m}$ のシリコンウェーハにICP-RIEを施した加工例を示す。この技術は、この特集号の論文で述べる加速度センサや圧力センサで適用しており、前者ではポリシリコン可動電極の形成に、また後者では受圧ダイヤフラムの形成に不可欠である(p7~10, p11~14)。

(2) 犠牲層エッチング

図3(b)と同図(c)に示した犠牲層エッチング技術で可動構造体又は中空構造体を作るには、まずその下地に犠牲層を形成し、その上に可動構造体となるポリシリコンなどを成膜する(“犠牲層”という言葉の由縁は“後に残らないが構造体形成上で必要な層”である)。犠牲層はフッ酸水溶液などでエッチングして除去する。この状態で空气中に曝(さら)すと、可動構造体同士は数 $\mu\text{m}$ の隙間しかないため液体が乾燥する際の表面張力によって固着(スティクション)してしまう。これを回避するためにエッチング直後に超臨界乾燥法を活用する。

(3) 陽極接合

ウェーハ上にでき上がったMEMS構造体を外部環境から保護するためには、これにキャッピングを施し、気密封

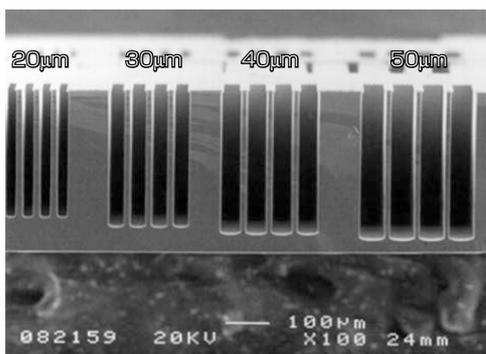


図4. ICP-RIEによるシリコン深掘エッチングの加工例

止を行う必要がある。その代表的な手法として、シリコンとガラスの陽極接合がある。450 $^{\circ}\text{C}$ 程度まで加熱し、両基板の間に1kV程度の電圧を印加することによって、界面が $\text{SiO}_2$ 化され強固な接合が得られる。これがウェーハレベルで可能であるため、図3(e)のダイシング工程における水圧からもMEMS構造体を保護することができる。陽極接合の用途はMEMS構造体の保護だけではない。例えば、圧力センサではダイヤフラム上に形成したピエゾ抵抗体で圧力を検知するが、ダイヤフラムが圧力を受けて変形するためにはダイヤフラムの裏面に真空基準室が必要である。この真空基準室を設けるために、ダイヤフラムが形成されたシリコンウェーハとガラスウェーハを真空中で陽極接合する。これもMEMS固有に開発されたプロセス技術である。

3.3 当社が取り組む自動車用センサの例

当社の自動車用センサへのMEMS応用は、1980年初頭のピエゾ抵抗型圧力センサの製品化から始まり、長い歴史を持つ。1990年代末から、櫛歯(くしば)構造による容量検出型の加速度センサを上市し、現在はエアバッグ用途のZ軸加速度センサを市場投入している。燃料制御用のエアフローセンサも白金抵抗体をMEMS化している。このセンサでは、ダイヤフラム上に形成した白金パターンが流量を検出するため、先に述べたようなMEMS構造体を保護する封止はせず過酷な環境下でも性能・信頼性を維持できるよう工夫を施している。これらのセンサについては、この特集号で個別に述べている。当社は、MEMSだけでなく磁性薄膜を用いた磁気センサの開発も推進している。図2に示したように、電気抵抗値が磁場によって変化する特性を用いたGMR (Giant Magneto-Resistance) 回転角センサをエンジンのクランク角検知に適用し、製品化した<sup>(3)</sup>。このセンサでは、信号処理回路のICと一体化したいわゆるモノリシック化を実現しており、高感度とともに耐高温環境、小型であることを特長としている。自動車用センサの開発は、その過酷な環境下における信頼性確保と低コスト化の両立が要求される点や製品化実績を問われる点で、他の民生用センサに比べて研究開発の障壁が高いと言える。当社では、これまで培ってきたMEMS技術、機能薄膜形成技術、回路集積化技術などを基盤に、今後も自動車用センサの開発・製品化を推進していく。

3.4 自動車用センサの今後の展望

3.3節までは主にMEMS技術を用いたセンサについて述べたが、新しい自動車用センサやそれを使ったシステムはこれらに限らない。人は元来ミスを犯す生き物との前提に立ち、自動車運転における安全・安心システムの更なる高度化が進められている。最近よく知られるようになったプリクラッシュセーフティシステムがその一例である。居眠り・不注意運転による衝突事故の防止、AT車の誤発進防止を目的としている。このシステムに使われるセンサには、

ミリ波レーダ方式とカメラ方式がある。前者では、例えば周波数76.5GHzのミリ波を前方に照射し、自分の車に接近した他の走行車、障害物、人を早期に検知して、自動的にブレーキをかける衝突回避システムである。欧州では、AEB(Autonomous Emergency Braking)システムと呼ばれ、現在のエアバッグシステムのように将来の標準装備化が検討されている。ミリ波レーダを使った送受信機は元来、航空・宇宙用途で開発された電波技術であり、これが自動車分野に転用された例である。

人の倫理観に対してもリスクを見出し対処しようとするシステムが検討されている。飲酒運転による相次ぐ痛ましい事故の報道は、我々の記憶に新しい。飲酒運転撲滅に向け、法的措置がより厳罰化された。これは抑止力として効果を発揮しているが、更なる取組み強化が自動車業界でも促進されている。運送事業者の点呼時に、ドライバーのアルコール検知が2011年から義務化されたことは、その一例である。これに用いられるアルコールセンサは従来ある携帯型のものであるが、ドライバーが特別な動作をすることなく呼気からアルコールガスを高精度に検知する運転席搭載型のセンサも研究開発されている。

先に述べた地球環境保護など持続的社會への意識の高まりは、自動車業界でも新たな技術を後押ししている。ハイブリッド車(Hybrid Electric Vehicle: HEV)を始め、電気自動車(Electric Vehicle: EV)、プラグインハイブリッド車(Plug-in Hybrid Vehicle: PHEV)が目されるようになり、インバータ駆動モータやバッテリー充放電の状態をモニタする電流センサが活発に開発されている。これらに続く究極のエコカーとして、水素と酸素を化学反応させて動力源を作り出す燃料電池車(Fuel Cell Vehicle: FCV)がある。水素は取扱いに注意を要するガスであり、燃料電池の水素ガス検知センサはFCVの普及には不可欠なセンサと言える。

今後も、自動車用センサは、多角的な見地からクルマの安全・安心・快適さを下支えするハードウェアとして、システムと密接に係りあいながら、常に先端技術を取り込んで進化していくものと考えられる。

#### 4. む す び

我々の身の周りの製品を見渡すと、そこには必ずと言っていいほど安全・安心・快適の概念・設計指針が反映されている。文明の利器は単に利便性を追求するだけでなく、安全性が担保されていなければならない。それがモノの品質を形作り、消費者の信頼獲得につながる。歴史をたどればクルマは便利な交通手段を目的に発明されたわけだが、やがてそれが普及すると公害や交通事故といった社会問題を提起することになった。環境負荷低減に向けた取組みとして低燃費、排ガスのクリーン化が進められ、ドライバーや歩行者にとって安全な乗り物であるためにエアバッグシステムや衝突回避システムが誕生した。これらの実現には、多様な技術を基盤としたセンシング技術が使われていることを述べた。

安全・安心・快適なセンシングの基盤技術は、半導体技術、信号処理技術、組み込みソフトウェア、電波・無線技術、画像処理技術等の様々な分野にわたっている。そして、これらの基盤技術は、自動車だけではなく、一般の家電製品、社会インフラ、セキュリティ、リサイクル等の様々な分野で活躍している。この特集号では、当社の取り組む“安全・安心・快適”なセンシング技術について具体的な事例を通して述べる。

#### 参 考 文 献

- (1) 平田善明, ほか: MEMS高精度加速度センサ, 三菱電機技報, **78**, No.6, 389~392 (2004)
- (2) Ogawa, S., et al.: Wavelength selective uncooled infrared sensor by plasmonics, Applied Physics Letters 100, 021111 (2012)
- (3) 深見達也, ほか: 車載用集積化GMR回転センサ, 電気学会論文誌E, **120**, No.5, 219~224 (2000)