

1-6 センサ技術の発展

Development of Sensor Technology

奥山雅則

Abstract

センサは外界の種々の情報を捉える素子で、温度、磁気、光、圧力、加速度等の物理量、そしてガス、イオン、バイオ物質等の化学量を電気や光等の伝達・処理しやすい信号に変換する。センサは、新物質の発見、MEMS 三次元構造の作製技術の進歩、集積回路素子との一体化技術の改良、信号処理技術の進化とともに小形化、高機能化、多様化、多次元化、低価格化が図られ、発展してきた。これらの技術的發展と現状について、代表的なセンサを分類して紹介する。

キーワード：センサ、MEMS、三次元構造、半導体

1. はじめに

センサは外界の種々の情報を捉え電気や光信号等に変換する素子であり、この信号を伝達・処理し人間や機械に分かりやすい量や画像の形で役立てている。その研究開発はセンサのハードウェアと情報処理のハード・ソフトウェアの最先端の科学技術を駆使して進められているが、更にこれらを一体化したシステムとしてのセンシング技術の発展も著しい。最近では、無線端末とセンサを一体化したデバイスを多数散在させ、対象領域の環境や状態量を検知して総合的な状況把握をするセンサネットワークへの展開も盛んになってきている。本稿では、これらの研究開発を振り返って発展過程、現状そして動向を知り、エレクトロニクスでの重要性を理解しようとするものである。

センサの研究開発は、ここ数十年の間に高感度化、高速化、小形化に向けて急速に進んだ。これらの研究開発には、新物質、新現象の発見の寄与が大きく、それらの発見後すぐにセンサ応用に取り入れられ大きく発展してきた。また、検知対象も物理・化学量からバイオ物質へ

と大きく広がっている。更に、センサの構造や作製において、シリコン MEMS (Micro Electro Mechanical Systems, 微小電気機械システム) 技術の貢献が大きく、力学量・熱・光・磁気センサが次々と小形化され、更に半導体動素子との一体化や微細構造による化学・バイオセンサの作製も容易になって、高機能化・多様化が大きく進展した。

小形化、高機能化、多様化されたセンサを用いて取得された大量のデータは最終的な出力として質の高い情報とされることが求められるため、大容量の情報処理が必要とされる。光によるイメージングはその代表的なもので、人間は目で外部情報の 80 パーセント以上を捕らえていることからその重要性が明らかである。イメージングに使われる撮像素子は集積化が急速に進み、2 億を超える画素の光センサ信号を高速に処理し、デジタルカメラにより手軽に利用されるようになった。更に、面情報から周囲の三次元環境情報を取得する立体センシング技術への展開も進められている。これらの進展は文献数の推移からもよく分かる。図 1 は文献検索サイトの Scopus⁽¹⁾で論文タイトル、抄録、キーワードで sensor や device が入った年間発表文献数の対数並びに比の年次推移を示している。センサとデバイス関連文献数は年度に対し指数的に増加し、エレクトロニクス関連の飛躍的發展を示している。とりわけ、センサのデバイスに対する文献数比もほぼ線形で増えており、デバイスの中で

奥山雅則 大阪大学ナノサイエンスデザイン教育研究センター
E-mail okuyama@insd.osaka-u.ac.jp
Masanori OKUYAMA, Nonmember (Institute for NanoScience Design, Osaka University, Toyonaka-shi, 560-8531 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.100 No.9 pp.913-918 2017 年 9 月
©電子情報通信学会 2017

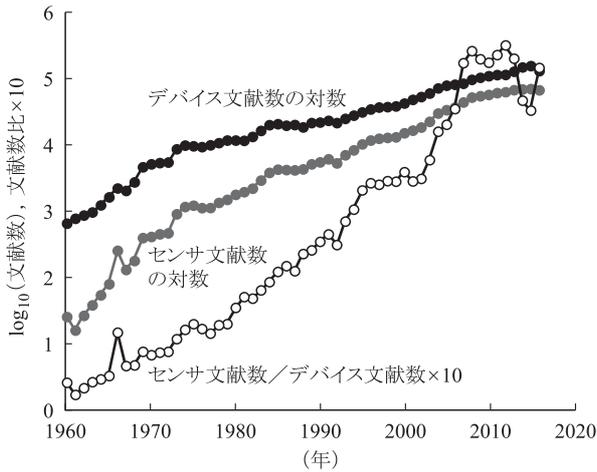


図1 センサ、デバイスの文献数及びその比の年次推移

もセンサの研究開発の伸びが大きくなってきていることが分かる。

本稿では、センサ用機能性材料、デバイス作製技術、種々のセンサの技術的發展について紹介したい。

2. センサ用材料と作製技術

2.1 機能性材料と薄膜

電気・磁氣的性質の違いによって特徴付けられる金属、半導体、誘電体、磁性体、超伝導体など多くの物質群が見いだされ、光、温度、圧力、磁気、ガス、イオンなどの物理量、化学量に対し、電圧や電流が変化するセンサ用機能性材料として利用されてきた。最近では、形状記憶合金、導電性高分子、アモルファスシリコン、高温超伝導体、カーボンナノチューブ、グラフェン、マルチフェロイック物質等これまでにない優れた物性を示す新物質が発見・合成され、すぐにセンサに応用されてきた。

これらの機能性材料を結晶、セラミック、高分子、非晶質等のバルクとして用いセンサを作製するほか、結晶・非晶質基板、シリコン IC 基板等の上に薄膜化してセンサの小形化、高機能化、多様化、低価格化が図られてきている。一般に結晶性が高いほどセンサに利用できる物性が良くなることから、結晶軸、格子定数と膨張係数を基板と薄膜の間で近くなるように、材料組成を調整した組合せでエピタキシャル成長が行われる。1 軸配向性の薄膜も単結晶に近い良好な物性を持つ場合もあり、基板と薄膜の組合せ、成長温度、成長後の冷却速度調整等の工夫により実現されている。これらエピタキシャルや 1 軸配向性薄膜では格子定数と熱膨張係数の僅かな違いにより膜中に応力を発生させ、その物性を単結晶に近いかあるいは越えるように制御できるものもある。

2.2 センサ作製基礎技術

ここ数十年でセンサは、機械的に組み立てて作り上げるような計測装置から、半導体を中心とした電子材料を加工成形して素子とする方向へと進んだ。この中で半導体製造技術は有力な手段となり、センサの作製に大きな変革をもたらした。このようなセンサも当初材料に電極形成と配線をする簡便な単体構造であったが、優れた集積回路技術によって微細化、アレー化、そして信号処理用の集積回路との一体化が図られ、信号の増幅やデジタル化までを一挙に行うことができるようになった。これにより種々の物理量・化学量の面分布、立体画像等の情報の高度化が図られるようになった。

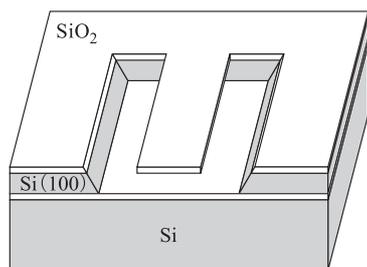
この集積回路技術を発展させ、センサの飛躍的發展を支える優れた加工技術としてマイクロマシニングがある。これは、微小な立体形状や可動部を有する MEMS 構造を作製する微細加工技術である⁽²⁾。具体的な例としては、半導体基板をフォトリソグラフィーでパターン化し、エッチング、薄膜堆積、接合技術を駆使して微小立体構造を形成できる。以下にセンサ作製に独特な基礎技術の代表的な手法を紹介する。

2.2.1 エッチング

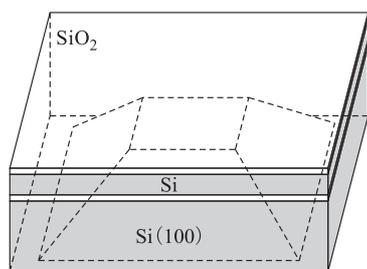
半導体シリコンの水酸化カリウム、水酸化ナトリウム、ヒドラジン等のアルカリ溶液に対するエッチング速度は、結晶面により異なり (111) が最も小さい。異方性エッチングによりウェーハの結晶面に関係した独特な形状が得られる。図 2(a) のように (100) SOI (Silicon on Insulator) 基板上の酸化膜にコの字形の窓を開け、異方性エッチングを行うと、(111) と酸化膜面が残りに、シリコン酸化膜のカンチレバーを形成できる。(b) のように裏面からの異方性エッチングでダイアフラムも形成できる。このような立体構造は微小可動部の作製、熱容量・熱伝導低減や曲げ性向上ができ、小形センサ実現に有用である。更に、エッチングと側壁保護層堆積を繰り返し行うことにより深い溝や孔を掘る深堀反応性エッチングも広く使われている。

2.2.2 微細三次元構造物の堆積

薄膜の堆積によく用いられる気相成長法 (CVD) において、光や電子ビームの照射部だけに堆積させることができ、基板の位置移動により微小立体構造の堆積を可能にしている。光 CVD によりほう素の微細らせん構造が形成された。また、基板に金属微粒子を置き、これを触媒として合金を成長させ、その先端から結晶成長させて針状結晶やワイヤを形成する VLS (Vapor-Liquid-Solid) 成長も微小立体構造の堆積に有効である。



(a) マイクロカンチレバー



(b) ダイアフラム

図2 SiO₂/Si/SiO₂/Si/基板を異方性エッチングにより作製されたマイクロカンチレバーとダイアフラム

2.2.3 ウェーハ直接接合

2枚のシリコンウェーハを接着剤なしで直接接合することができる。鏡面に磨かれクリーンにされた平坦なウェーハに化学処理を施し、僅かな極薄酸化膜形成後重ね合わせると接合される。これに高温熱処理をすると二つのウェーハは強固に接合する。ウェーハを重ね接着したときは、親水性表面同士が水素結合を行い、熱処理により水素・酸素が除去され強固なSiの接合となる。更に、シリコンとガラスを重ね合わせて高電圧を加えて接合する方法も開発されている。これらの技術は複雑な三次元構造やパッケージ作製に有効である。

3. 種々のセンサ

物理量、化学量やバイオ物質を計測する多種多様なセンサが提案され、開発されている⁽³⁾。ここでは従来のセンサからMEMS技術を駆使して開発された代表的な小形センサについて検出量別に紹介する。

3.1 物理センサ

代表的検知物理量として温度、磁気、光、力学量を取り上げる。

3.1.1 温度センサ

物体の点や面の温度を検知するのに、電気抵抗、熱電効果、半導体の接合電流の温度変化を利用してそれぞれサーミスタ、熱電対、pn接合温度センサとして実用化されている。特にシリコン基板上のpn接合により得ら

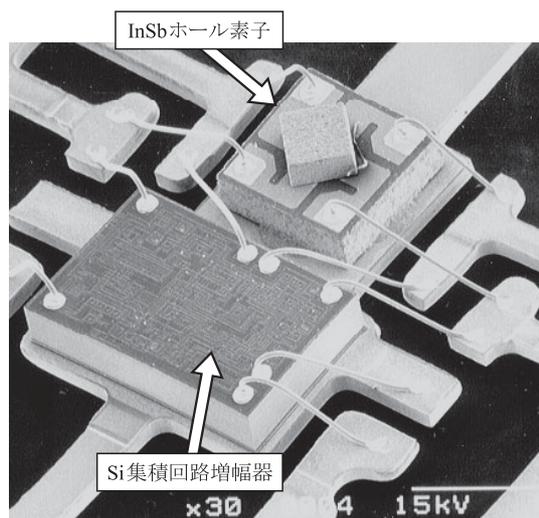


図3 ハイブリッドホールIC フェライトチップ磁気増幅構造のInSb 薄膜ホール素子と増幅・デジタル化のSi集積回路を結線し、磁界をデジタルで検出できる。

れた信号を増幅し、信号補正をしてデジタル信号として同じ基板上の集積回路に出力したり、別の検知量の温度補正をする高機能センサもあり、広く利用されている。

3.1.2 磁気センサ

磁気検知には、電磁誘導、ホール効果、磁気抵抗効果、磁気光学効果、磁気共鳴、超電導量子干渉など様々な現象が利用されてきている。電磁誘導では、コイルが非常に簡単な構造で、堅ろうであるためよく用いられてきたが、磁界の変化を検知するため磁界の絶対値や緩慢な変化は計測できない。他の現象の中では、ホール効果や磁気抵抗効果は、金属や半導体中のキャリアがローレンツ力によって軌跡が曲げられることによって生ずるもので、小形化に適している。特にキャリア移動度の高いインジウムアンチモン (InSb) 薄膜によるホールセンサでは、高感度が得られる。図3に示すホールIC素子は低雑音のブラシレスモータの実現と情報機器への広い応用を可能にした⁽⁴⁾。

また、磁気ハードディスクでは媒体に書込み・読出しを行うヘッドに高性能磁気抵抗素子が利用されている。最近では、巨大磁気抵抗効果 (GMR)、トンネル磁気抵抗効果 (TMR) を用いた高感度・高空間分解能が達成され、記録密度の増大の重要な鍵技術となっている。

3.1.3 光センサ

光電効果により光生成されるキャリアを利用する量子形と、光吸収により生ずる温度変化を検出する熱形に分けられる。

(1) 量子形

金属や半導体の外部光電効果による真空管形センサは高感度・高速検出が可能で、水中のニュートリノを捕らえる素粒子物理研究等の科学計測用として現在も用いられている。また、半導体で光励起キャリアを外部回路への電流変化として捕える光導電素子及びpnやショットキー接合の内部電界を利用した光起電力素子があり、小形化、高機能化され、広く利用されている。

画像を捉える実用的な撮像素子は、まず真空管のアイコノスコープで実現された。真空管中に感光膜を塗った平板上に画像を結像させて電荷分布を形成し、その上から電子線を走査し、その電流を読み取れば画像に対応した信号が読み取れる。1930年代に開発され初期の放送に使われた。その後、次々と改良された撮像管がテレビの撮像に大きく貢献した。しかし、撮像管は動作立ち上げ時間が長く、動作電圧が高く、大形であったため、半導体撮像素子の開発が進められた⁽⁵⁾。

まず、半導体に発生した光キャリアを電荷としてためこみ、この電荷を転送し、電流として取り出す電荷結合素子 (CCD) が実用化され、カメラに広く利用された。もう一つの撮像素子は画素の電荷を MOSFET (絶縁ゲート電界効果トランジスタ) により順にスイッチングして電流として読み出す。当初、スイッチングのための電圧パルスが大きな雑音を生じ問題となったが、種々の工夫により改善され、現在はこの MOS 形へと変わってきている。MOS 形は各画素での信号処理を加えることによる高機能化も可能である。図4に MOS 撮像素子 (イメージセンサ) の一例を示す⁽⁶⁾。

(2) 熱形

中・遠赤外線検知に感度の高い、バンドギャップの狭い半導体を用いたセンサでは、熱キャリアによる雑音抑制のため冷却が必須で使いづらい。熱形はこのような赤外線検知に有効である。シリコン基板上に MEMS 技術で作製されて浮上した膜構造では、熱容量や熱伝導が抑えられ、赤外線照射による温度上昇を非常に大きくでき

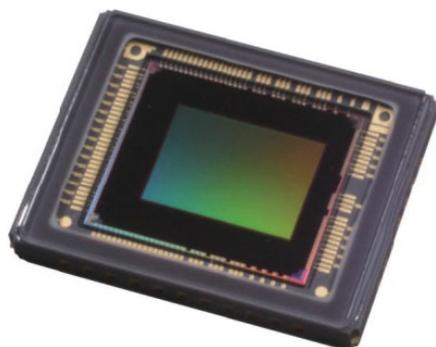


図4 低消費電力、高速読出し、信号処理回路内臓による高機能化等の特徴を有する CMOS イメージセンサの一例

る。この構造上に金属、誘電体、焦電体、半導体薄膜を堆積した温度センサにより赤外線イメージセンサが実現されている。この薄膜温度センサを基板から浮いた膜アレー上に形成した撮像素子では熱画像が捕らえられ、温度分布解析、人検知等に広く用いられている。

3.1.4 力学量センサ

加速度、応力、圧力、超音波、触覚等の力学量を計測するセンサは、古くは機械部品を組み立てる装置でサイズが大きかったが、MEMS 技術により小形、高性能、低消費電力化され広く用いられている。

(1) 加速度・角速度センサ

シリコン基板におもりをはりて支えた微細立体構造に加速度が加わると、はりが変形し埋め込まれた抵抗の値の変化から加速度が得られる。図5はその一例で、4本のはりて支えられた中央部の周りに四つのおもりを形成した構造をしており、加速度が加わるとはりの周辺部との付け根付近に設けた抵抗部分が引張、圧縮、ねじれなどが生じ、その相対的变化から xyz の三軸方向の加速度が求められる⁽⁷⁾。同様のおもりを集積回路と一体化した集積化加速度センサもできている。

回転座標系上で移動した際に働くコリオリ力によるジャイロセンサがある。MEMS によりシリコン基板上に形成されたおもりを振動させることにより、回転した場合のコリオリ力を測定して角速度を求めるセンサができています。

(2) 圧力センサ

シリコン基板のダイアフラムに圧力を加えると、ダイアフラムは低圧側に反る。ダイアフラムの4辺の中央部の周辺基板近くの部分は大きなひずみを受けるが、この部分に抵抗を設けブリッジ回路を構成して出力の微小な圧力変化を測定するセンサが作製され実用化されている。また、ダイアフラム内に、小さなH形のビームを真空空洞に入れ、機械的共振の振動をさせておき、ダイ

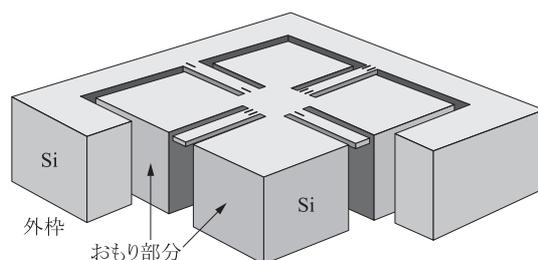


図5 三軸加速度センサの一例 四つのおもりをはりて支える構造で、加速度が加わるとはりがたわみ、その上の検出部の抵抗変化から三軸方向の加速度が検出される。手前の外枠の一部が切り取られ構造を分かりやすくしている。

アフラムに圧力を加えたときの共振周波数変化から圧力を計測するセンサもできている。

(3) 超音波センサ

超音波によりシリコン基板上のメンブレンの振動を発生させ、静電容量や圧電体膜で検知するセンサが代表的である。後者については、図6にあるようにシリコン基板上のダイアフラム上に電極膜、圧電体 PZT ($\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ 、チタン酸ジルコン酸鉛) 薄膜を形成した多層構造に超音波を照射するとダイアフラムは上下に振動し、圧電体薄膜もたわみ、応力が発生し圧電出力が電極で捕らえられる⁸⁾。この超音波センサエレメントをアレー状に並べ、エレメント間の到達時間差だけ各エレメント信号を遅延加算することにより指向性を電子的に制御することができる。物体に超音波を照射し、超音波アレーセンサで検知し遅延加算処理をして角度スキャンすることにより、立体画像を得ることができる。

(4) 触覚センサ

図7に示すように、シリコン基板上に絶縁層シリコン窒化 (SiN_x) 膜、応力制御層クロム (Cr) 金属膜、ひずみゲージニッケルクロム (NiCr) 合金膜の多層膜から成るカンチレバーは熱膨張係数の違いから基板面に対し反る形状となる。このカンチレバーを三つ対抗して並べた構造を、エラストマー (弾性高分子) の PDMS

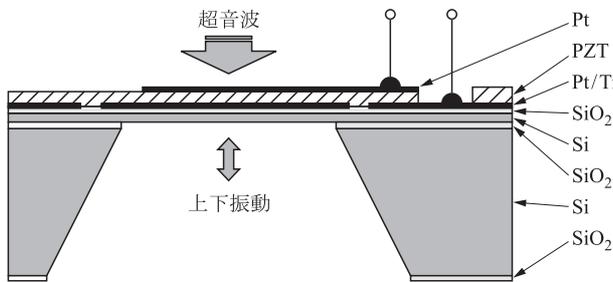


図6 超音波センサ MEMSにより作製されたダイアフラム構造上にPZT圧電体薄膜と電極を形成し、超音波によるたわみ振動に対する圧電出力で検知する。

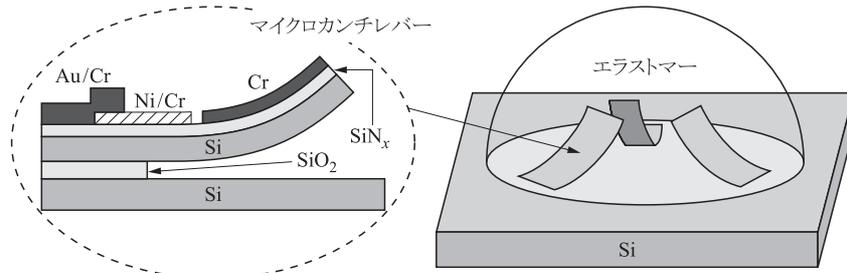


図7 触覚センサ ピエゾ抵抗薄膜を形成し上向きに反ったマイクロカンチレバーを三つシリコン基板上に配列し、エラストマーで覆った構造で、押付の応力とせん断力を検出する。

(ポリジメチルシロキサン) で半球状に覆ったものが触覚センサとして作製されている⁹⁾。上下の圧力とせん断力はゲージ出力から線形計算で得られる。この触覚センサを用いて物体や製品の質感検査、ロボットハンドの触覚検知などに応用できる。

3.2 化学・バイオセンサ

検定量としてガス、湿度、イオンそしてバイオ物質を取り上げる。

3.2.1 ガス・湿度センサ

空気中のガスを計測する主なセンサは、半導体、固体電解質、熱線を用いた素子があり、ほかに空気中の水分を計測する湿度センサがあり以下に紹介する。

(1) ガスセンサ

粒子が凝集した酸化物半導体には粒子間の結合部に電位障壁がある。ここに酸化性や還元性ガスが吸着すると電位障壁が増減し、電気抵抗の変化としてガスが検知される。パラジウム (Pd) 等の金属触媒電極を用いたMOSFETのドレイン電流変化からも検出できる。

固体電解質は特定のイオンだけを透過させ、その流れから生じる電流や起電力によりガスを検出できる。安定化ジルコニアは酸素イオンを透過させ酸素を検知でき、ボイラやエンジンの燃焼制御に応用されている。

白金 (Pt) コイルの周りに金属酸化物をビーズ状に形成し焼結した素子構造で、白金線に電流を流し素子を加熱しておき、可燃性ガスがセンサに触れると燃焼して、金属酸化物の温度を上げる。この温度上昇に伴う電気抵抗変化から可燃性ガス濃度を検出できる。

(2) 湿度センサ

セラミックスが水蒸気を吸着すると、電気伝導度や誘電率が変化することから、これに電極を形成しその電気抵抗や静電容量から湿度を計測するセンサがある。有機高分子では電気伝導度や静電容量、吸着による重量変化から計測するものもある。

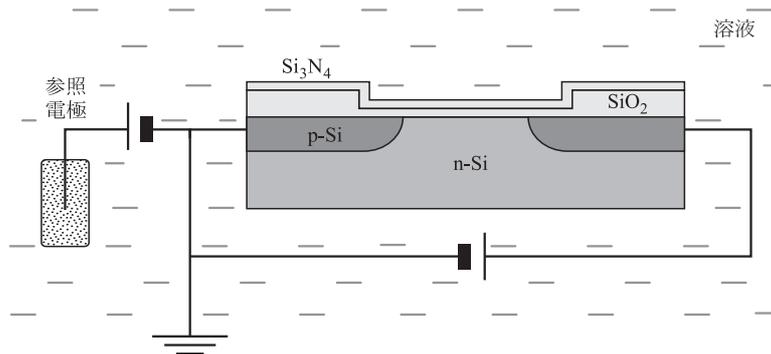


図8 ISFET イオンセンサ 絶縁ゲート FET のゲートを溶液に露出させ Si 表面電位の変化からイオン濃度をドレイン電流変化として検出する。

3.2.2 イオンセンサ

イオン感応膜の隔壁を持ち内部の異種溶液中に電極を持つ二つの構造体を、測定対象溶液に入れたときに生ずる電位によりイオン濃度が計測できる。しかし、電極構造は大形で使い難いことから、半導体素子によるイオン検出素子が開発された。図8に示すように絶縁ゲート FET のゲート電極を溶液に露出させた半導体イオンセンサ (ISFET: Ion-sensitive FET) は、溶液中のイオンがチャネル部の界面電位を変化させドレイン電流の変化として検出される⁽¹⁰⁾。本センサは FET を用いているため、出力が低インピーダンスとなり雑音に強く、また小形にできる。水溶液中の水素イオン指数 (pH) を測るセンサとして実用化され、更にこのアレーセンサにより DNA 解析装置や化学分析などにも応用されている。

3.2.3 バイオセンサ

酵素、抗体、微生物、生体組織などとバイオ物質と反応させ、生成物として出てくるイオン、酸素や水素ガスをイオンやガスセンサで検出したり、光学的に検出できる。よく知られたバイオセンサとしてぶどう糖 (グルコース) を検出するグルコースセンサがある。グルコースは酸素と酵素反応して、グルコースオキシターゼと過酸化水素水を生成するが、このとき変化する酸素をイオンセンサを用いて測定すればグルコースを検出できる。ほかには、尿素、尿酸、乳酸、コレステロール、エタノールなどの種々のバイオ関連物質を計測するセンサが開発されている。

4. おわりに

数十年前から現在までのセンサ技術の発展と現状について述べた。センサは時代時代で最新の現象、材料、性質が利用され、優れた科学技術を取り入れて作製されて

きた。今後、IoT や人工知能等の先端技術が進んでいく中、ますます重要性が増し、その発展が期待されている。

文 献

- (1) <https://www.scopus.com/>
- (2) 藤田博之(編著), センサ・マイクロマシン工学, オーム社, 東京, 2005.
- (3) 江刺正喜, “MEMS によるセンサの革新,” 応用物理, vol. 80, no. 3, pp. 181-188, 2011.
- (4) 柴崎一郎, “非接触センサによる電子制御モータ時代を拓いた高感度 InSb ホール素子と磁性材料,” セラミックス, vol. 48, no. 7, pp. 354-361, 2013.
- (5) “画像入力とカメラ,” 寺西信一(編), 信学知識ベース, 「知識の森」8 群 4 編.
- (6) <http://news.panasonic.com/jp/press/data/jn110512-3/jn110512-3.html>
- (7) <http://www.kumikomi.net/archives/2003/09/26matsu.php>
- (8) K. Yamashita, L. Chansomphou, H. Murakami, and M. Okuyama, “Ultrasonic micro array sensors using piezoelectric thin films and resonant frequency tuning,” Sens. Actuators A Phys., vol. 114, no. 2-3, pp. 147-153, 2004.
- (9) M. Sohgawa, D. Hirashima, Y. Moriguchi, T. Uematsu, W. Mito, T. Kanashima, M. Okuyama, and H. Noma, “Tactile sensor array using microcantilever with nickel-chromium alloy thin film of low temperature coefficient of resistance and its application to slippage detection,” Sens. Actuators, vol. 186, no. 10, pp. 32-37, 2012.
- (10) P. Bergveld, “Development of an ion-sensitive solid-state device for neurophysiological measurement,” IEEE Trans. Biomed. Eng., vol. BME-19, no. 1, pp. 70-71, 1970.

(平成 29 年 3 月 31 日受付 平成 29 年 4 月 23 日最終受付)



おくやま まさきのり
奥山 雅則

昭 43 阪大・基礎工・電気卒, 昭 48 同大学院博士課程了。同年日本学術振興会奨励研究員。昭 49 阪大・基礎工・助手, 以来誘電体・強誘電体薄膜の作製・評価と応用, 不揮発性メモリ, センサなどの研究に従事。平 3 阪大・教授, 平 21 同名誉教授, 現在同特任教授。工博。センシング技術応用研究会会長。