

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

---

### 1章 センサ

#### 【本章の構成】

本章では以下について解説する.

- 1-1 センサの分類
- 1-2 物理センサ
- 1-3 化学・生物センサ

## ■9 群-8 編-1 章

---

### 1-1 センサの分類

## ■9 群-8 編-1 章

### 1-2 物理センサ

#### 1-2-1 磁気センサ

(執筆者：高村 司, Adarsh SANDHU) [2012年9月 受領]

磁気センサとは、外界における磁界の強さや変化を感じ取り、主に電気信号に変換し出力する素子である。私たちは生活するうえで磁気センサによる恩恵を様々な形で受けている。例えば、電気自動車や洗濯機などで使われるモータの回転数を計測したりコンピュータには欠かせないハードディスクなどの磁気記録媒体からの信号を検出したり、冷蔵庫のドアの開閉を非接触で検出して照明のスイッチングを行ったりなど、その使用方法は多岐にわたっている。

磁気センサの種類として、ホール効果磁気センサ（ホールセンサ）、MR (Magnetoresistive effect) センサ、GMR (Giant Magnetoresistive) センサ、SQUID (Superconducting Quantum Interference Device)、MI (Magnetoimpedance element) センサなど、検出原理・材料の異なった様々な磁気センサがある。また、磁界に対する感度や分解能、温度特性、作製及び運用コストなどが異なるため、使用目的に対して最適なセンサを用いることが重要である。ここではまず代表的なホールセンサと MR センサについて述べる。

##### (1) ホール効果磁気センサ

ホールセンサとは、ホール効果と呼ばれる現象を利用し磁場の大きさやその向きを電圧として出力することのできる四端子の磁気センサである。この現象を支えているのが物質中に移動する電荷に働くローレンツ力と呼ばれる力であるので、まずその力について説明する。

##### (a) ローレンツ力とは<sup>1)</sup>

電荷は一樣電界中では加速度運動を行う。その運動方向は正電荷の場合は電界方向であり、負電荷の場合は反対方向に加速されるわけであるが、そのときに磁場を印加されると電荷は磁場から力を受ける。その向きは正電荷の場合は電荷の速度ベクトルの向きから磁場方向へ右ねじの進む方向であり、電荷に働く力は下記のような式で表すことができる。

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2 \cdot 1)$$

式(2・1)の第一項目は電界による力で、二項目がローレンツ力である。 $q$ は電荷の電気量、 $\mathbf{E}$ は印加された電界、 $\mathbf{v}$ は電荷の移動速度、 $\mathbf{B}$ は電荷に加えられた磁場の磁束密度である。

##### (b) ホール効果とは<sup>2)</sup>

上で述べたような力が金属や半導体中のキャリア（電荷）にも作用し、結果的に先に述べたホール効果という現象を引き起こすことになる。具体的に正電荷がキャリアとして考えられる p 型半導体に電流を流し磁場を印加したときのキャリアの様子を考えてみる。

まず、図 2・1 のような  $y$  方向に長さ  $l$ 、 $x$  方向に幅  $w$ 、 $z$  方向に厚さ  $d$  の直方体の p 型半導体を考え、長さ方向に電圧を印加し素子中に電流  $I$  が流れたと仮定する。磁場印加直後、キャリアである正電荷のホールは先に述べたローレンツ力によって電流  $I$  に対して直角の方向に力を受けて図の斜線部へ集まることになるが、その集まることでその向かい側の端面と電位差を生じ  $x$  軸方向に電界を発生させることになる。ついには発生した電界と磁場からのローレンツ力

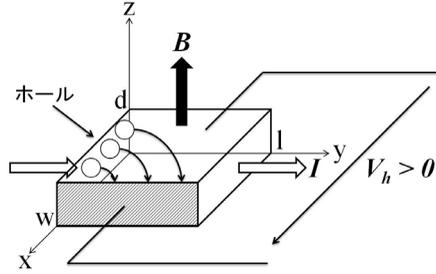


図 2・1 磁場を印加したときのホールセンサ

とが釣り合い、キャリアは再び  $y$  軸方向にのみ移動をする。このように磁場を印加することで電流方向と垂直の面の間に電位差を発生させる現象のことをホール効果と呼び、このときキャリアによって生み出された電位差をホール電圧  $V_H$  と呼ぶ。以下で先の現象を式を用いて定量的に考え、ホール電圧を導出する。

ホール電圧によって生み出された電界  $E_H$  (ホール電界とも呼ぶ) は

$$E_H = \frac{V_H}{w} \quad (2 \cdot 2)$$

である。この電界からキャリアが受ける力とローレンツ力が釣り合うことから

$$qE_H = qvB \quad (2 \cdot 3)$$

という関係になる。一方、電流  $I$  は素子中のキャリア密度を  $p$  とすると

$$I = qpvdw \quad (2 \cdot 4)$$

とおけるので式(2・2)から式(2・4)を整理することにより

$$V_H = \frac{IB}{qp d} \quad (2 \cdot 5)$$

を得る。一般的にはホール係数  $R_H$  というのを導入して

$$V_H = \frac{R_H IB}{d} \quad (2 \cdot 6)$$

ただし、

$$R_H = \frac{1}{qp} \quad (2 \cdot 7)$$

というような表現が一般的である。もしもキャリアが電子である場合はホール電界の方向が逆になることに注意して素子中の電子密度を  $n$  とすると

$$R_H = -\frac{1}{qn} \quad (2 \cdot 8)$$

となり、半導体においては  $R_H$  の正負、すなわち  $V_H$  の正負から伝導型を特定することが可能である。

式(2・6)から分かるように、このセンサは磁場の大きさに比例してホール電圧を出力できること、またその電圧の正負から磁場の方向までも検出できることが特徴である。また、素子の厚さ  $d$  を薄くすればするほど高いホール電圧の出力を得ることができるので、素子の薄膜化が重要である。また、キャリア濃度が小さいほど良いが、あまりに小さくすると真性伝導となり温度依存性が非常に高くなることに気をつけなくてはならない。使用環境・目的に合わせた材料やドーピング濃度を適切に選択する必要がある。

現在の実用ホールセンサは高移動度の  $\text{InSb}$  や  $\text{InAs}$  をマイカやアルミナなどの絶縁基板上に真空蒸着法によって薄膜を堆積させたり、分子線エピタキシー (MBE) 法を用いて、膜厚を精度良く調整し、高移動度なホールセンサを実現している。高移動度材料であれば定電圧でホールセンサを駆動させたときのホール電圧の増大が見込める。また、許容温度上昇に制限がある場合に駆動時に発生するジュール熱による駆動電流の制限が発生するため、できるだけ入力電力に対して効率的にホール電圧の出力を取り出すことが必要になってくる。入力電力に対する出力の電力特性は移動度の 2 乗に比例するため、ここでも高い移動度を持つ材料が好ましいことがうかがえる。

## (2) MR センサ

MR センサとは、磁気抵抗効果と呼ばれる磁場を垂直に印加したときに素子の抵抗が増加する現象を利用して磁場を検出する 2 端子のセンサである。センサの出力は印加磁場に対してどちらの向きに対しても増加するため磁場の方向を検出できないが、抵抗値の変化なのでセンサを直列に接続することで抵抗値を積算でき高感度にするのが可能である。また、低磁場より高磁場中での変化をより高感度に検出することが可能であるといった特徴もある。

半導体の磁気抵抗効果においては、キャリアの散乱に伴う電流パス増加の結果として抵抗値が増加して見える物理的磁気抵抗効果もあるが、端子付近のホール効果緩和による形状の磁気抵抗効果が主要因として挙げられる。ともにキャリアの移動度が高ければより大きい変化を引き起こすが、特に同一の材料であってもその加工によって形状が変わってしまうと抵抗値の変化量が著しく変化する形状の磁気抵抗効果について説明する。

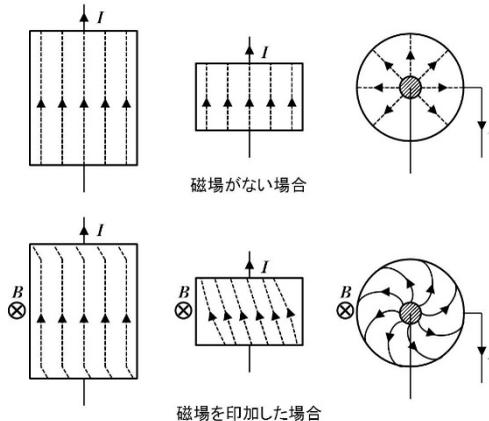


図 2・2 MR センサの形状磁気抵抗効果

磁気抵抗素子の概略図を図 2・2 に示す。磁場がない場合は、電流は素子内を直進する。次に、素子に垂直に磁場を印加すると先に述べたとおり素子中に流れるキャリアに磁場からローレンツ力が働き、その後溜まったキャリア自身が生み出したホール電界からの力と釣り合うことでキャリアは磁場がないときと同じようにまっすぐと進行し出す。しかし、実際は図 2・2 に示したように端子付近で大きく曲がることになる。なぜなら、電流を流す端子によってホール電圧は短絡されることになり素子中で一定ではなく端子付近でローレンツ力が支配的となり、結果として電流パスが長くなり抵抗値は増加する<sup>3)</sup>。特に電流の長さ方向に対して幅が大きくなればなるほど長さ方向に対して直線的にキャリアが移動する部分が小さくなり、抵抗変化量は大きくなる。最大はコルビノ素子と呼ばれる円形の素子で、中心から縁に電流を放射状に流すことで実質的にホール効果の影響をなくすることができる。

なお、形状的磁気抵抗効果の理論式は下記のように表すことができる。

$$\frac{R}{R_0} = \frac{\rho}{\rho_0} (1 + g\mu^2 B^2) \quad (2 \cdot 9)$$

ただし、 $R_0$  と  $R$ 、 $\rho_0$  と  $\rho$  はそれぞれ磁場印加前と後の素子の抵抗値と抵抗率を示す。また、 $g$  は素子の形状因子である。

形状効果を最大限引き出すために幅に対して長さ方向を短くすることが重要であると述べたが、そうすると抵抗値そのものが小さくなってしまうため計測において実用的ではない。そこで、実際には図 2・3 のように帯状に電極を多数付けることで、一個一個の素子を直列に接続するような構造をとることで十分な抵抗値とより高感度なセンサを実現している。

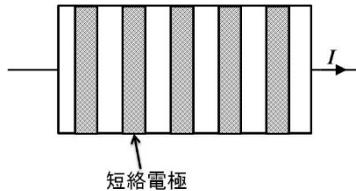


図 2・3 直列に接続した MR センサ

### (3) 最新の動向

最近の動向として、より高感度に検出するために半導体と金属のハイブリッド構造をした EMR (Extraordinary Magnetoresistance) 効果という現象が報告されている<sup>4)</sup>。また、ただ磁界を検出するだけでなく更なる付加価値を付けていく流れがある。例えば、今まで以上の高温下での磁場測定をするためにバンドギャップの大きな GaN という材料を用いて磁気センサを作製・計測する試みが行われている<sup>5)</sup>。また図 2・4 のように、生体物質には磁気を含まないため磁気センサと磁性マーカーを用いて SN 比の非常に高いバイオ物質機構の開発が盛んである<sup>6)7)</sup>。

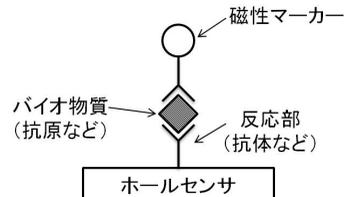


図 2・4 磁性マーカーを用いたバイオ物質検出の概略図

## ■参考文献

- 1) 稲荷隆彦：“基礎センサ工学,” pp.53-56, コロナ社, 2001.
- 2) 森泉豊栄, 中本高道：“センサ工学,” pp.38-40, 昭晃堂, 1997.
- 3) 電気学会：“センサ材料—基礎と応用—,” pp.14-17, コロナ社, 1999.
- S. A. Solin, Tineke Thio, D. R. Hines, and J. J. Heremans：“Enhanced Room-Temperature Geometric Magnetoresistance in Inhomogeneous Narrow-Gap Semiconductors,” *Science*, vol.289, no.5484, pp.1530-1532, 2000.
- 4) S. Koide, H. Takahashi, A. Abderrahmane, I. Shibasaki and A. Sandhu：“High Temperature Hall sensors using AlGaIn/GaN HEMT Structures,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol.352, 012009, 2012
- 5) A. Sandhu, Y. Kumagai, A. Lapicki, S. Sakamoto, M. Abe, and H. Handa：“High efficiency Hall effect micro-biosensor platform for detection of magnetically labeled biomolecule,” *Biosens. Bioelectron.*, vol.22, pp.2115-2120, 2007.
- 6) Y. Morimoto, T. Takamura, R. Ishikawa, P.J. Ko, and A. Sandhu：“Amplification of direct current magnetic responses of magnetic nanobeads due to induced self-assembly of magnetic microbeads,” *J. Appl. Phys.*, vol.109, 07E516, 2011.

## 1-2-2 光・赤外線・熱センサ

(執筆者：木村光照) [2012年6月受領]

光センサは、広義には紫外線や赤外線も含み、可視光（波長：0.38～0.78  $\mu\text{m}$ ）付近の電磁波の検出器であり、光電変換を利用する量子型と、光を吸収して熱に換えて温度センサと組み合わせることで温度検出する熱型センサ（熱センサ）に大別される。可視光付近や近赤外線領域では、受光する光子のエネルギーが大きいため、高感度で高速応答性の量子型の光センサが用いられる。中赤外線以上の波長の赤外線センサは、室温では量子型が冷却を必要とするので、簡便な赤外線センサとして波長依存性が小さい熱型センサが用いられる。

量子型センサでは、光エネルギー  $E$  [eV] と波長  $\lambda$  [ $\mu\text{m}$ ] との次の関係式を用いるとよい。

$$E \text{ [eV]} = 1.2398 / \lambda \text{ [\mu m]} \quad (2 \cdot 10)$$

### (1) 光センサ

可視光域付近の光センサには、光電効果を利用した受光部の光電陰極からの二次電子を電界加速して、ダイノードを通して1個の光電子が1000万倍以上にも増倍される高感度の光電子増倍管 (Photomultiplier Tube) や、半導体の価電子帯や不純物準位から伝導帯に電子を励起し、そのとき発生した電子や正孔の流れ（光電流）を利用する半導体光センサがある。

半導体光センサには、光導電セル、半導体接合を用いたフォトダイオードやフォトトランジスタがあり、フォトダイオードには、特に雪崩増倍機能を持たせて、高感度で高速動作できるようにしたアバランシェフォトダイオード (APD) がある。ここでは、広く用いられている量子型の光センサである半導体光センサの原理を示す。

#### (a) 光導電セル

半導体のバンドギャップ ( $E_g$ ) 以上の光子エネルギーの光を吸収して、価電子帯に電子の抜け殻である自由正孔を残し、そのとき伝導帯に電子が励起されて自由電子となる、いわゆる、対生成して導電率が大きくなる現象を光導電効果 (Photoconductive Effect) という (図 2・5 参照)。光導電セルは、この光導電効果を利用した量子型の受光素子である。分光感度特性が、人間の視感度特性に近いことから、CdS や CdTe などの半導体材料が主に用いられ、照度計やカメラの露出計に使用されている。

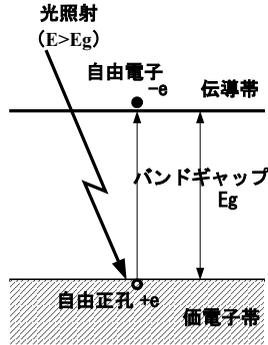


図 2・5 光子吸収による電子・正孔対生成

### (b) フォトダイオード

バンドギャップ ( $E_g$ ) 以上の光子エネルギーの照射光の吸収により発生した電子・正孔対は、pn 接合付近では拡散により動き回り、pn 接合部に入る。そこでは電界によりポテンシャル (電位) に傾斜 (坂) があり、電子は n 型に、正孔は p 型に寄せ集められる。したがって、太陽電池の発電原理と同じく pn 接合の順方向電圧が発生する光起電力効果で、n 型は負の電位、p 型は正の電位になり、この電圧差から光を計測することができる。しかし、光起電力効果は、電源も不要でノイズも小さいが、応答速度が遅く出力が小さいので、一般には、図 2・6 に示すように負荷抵抗  $R_L$  を介してフォトダイオードの pn 接合に逆方向電圧を印加して、極めて小さな暗電流の状態での光計測の方法を採用する。そこでは、光照射により発生した自由電子・正孔対を逆バイアス pn 接合による急峻な電位の坂を高速に走行させて流れる光電流を負荷抵抗  $R_L$  での電圧降下として電圧出力とする。電子の移動度が正孔のそれよりも一般に大きいので、光

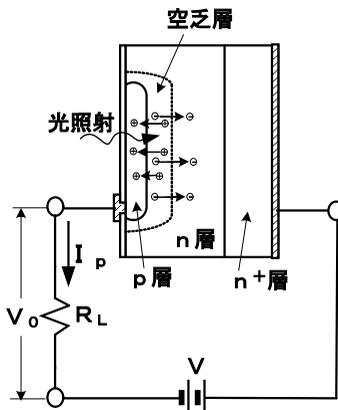


図 2・6 フォトダイオードでの光検出

を p 型半導体側で多くを吸収させるようにし、そこで発生した少数キャリアの電子が pn 接合の電位の坂に到達しやすくなる。真性半導体層 (i 層) を挿入した pin フォトダイオードでは、電位の坂になる i 層で光吸収がしやすくなることや接合容量が小さくできるから高感度で高周波まで応答できる光センサとなる。光ファイバを用いた光通信などに多用されている。

### (c) フォトトランジスタ

フォトトランジスタは、エミッタ (E)-ベース (B)-コレクタ (C) の三層構造であるが、B から電極を取り出さずに、電位的に浮かした構造にしてある。nnp 型では、光吸収で発生した電子・正孔対のうち、正孔が電位の坂を移動して p 型の B に溜まる。このとき B は正の電位になり、E-B 間の電位障壁の高さが小さくなるので、E から沢山の多数キャリアである電子がこの障壁を越え、狭い B 領域をほとんど再結合せずに通って、逆バイアスのために急峻になった B-C 間の電位坂を電子が駆け下り、この光電流がコレクタ電流となり負荷抵抗  $R_L$  を通して電圧出力となる。フォトダイオードに比べ応答が遅いが高感度で、フォトカプラなどの光スイッチに用いられる。

### (2) 赤外線センサ

近赤外線領域 (波長  $0.7\sim 2.5\ \mu\text{m}$ ) では、光子のエネルギーが室温 (300 K) のエネルギー (約 25.9 meV) より充分大きいので、比較的大きなバンドギャップ  $E_g$  や活性化エネルギー  $E_a$  を持つ半導体を用いることができ、赤外線を照射しないときの電流である暗電流が小さく、上記した量子型光センサが用いられる。冷却することにより暗電流を減らすことができるので、中赤外線以上の波長域の赤外線でも高感度、高速応答が得られる量子型赤外線センサとして使用することができる。しかし、冷却装置が必要で大型化し、高価になるので、簡便な熱型赤外線センサを使用することが多い。

熱型赤外線センサは、赤外線を受光部で吸収させ熱に変換し、受光部に搭載した温度センサでその温度変化分を計測して赤外線の受光量を求めるものである。特に、遠赤外線の波長域 ( $4\sim 1000\ \mu\text{m}$ ) の赤外線の検出には、この熱型赤外線センサが非冷却型として、単独の受光部や二次元配列のピクセル (画素) としてのイメージセンサが多用されている。

熱変換なので、感度が赤外線の波長依存性がほとんどなく、光の全エネルギー測定には有用である。一般に受光部を基板から支持されるが熱分離するために宙に浮かした赤外線吸収膜を持つ薄膜構造にしている。

熱型赤外線センサには、焦電型、抵抗ポロメータ型、熱電型センサやダイオード型などがある<sup>1)</sup>。焦電型は、単結晶 ( $\text{LiTaO}_3$ ) やセラミックス ( $\text{PbTiO}_3$ ) など焦電材料である強誘電体の自発極  $P_s$  を利用し、赤外線入射により受光部に温度変化  $\Delta T$  を与えると、焦電係数に比例した電荷が受光素子表面に現れ、間もなく中和されるが、そのときの瞬間的な発生電圧を検出する。抵抗ポロメータ型は、金属や半導体の抵抗温度係数 (TCR : Temperature Coefficient of Resistance)  $\alpha$  を利用して赤外線の吸収と放射とのバランスによる  $\Delta T$  を抵抗変化で検出する。熱電型センサは、熱電対やサーモパイルを赤外線受光部に形成して  $\Delta T$  をゼーベック効果 (Seebeck Effect) による熱起電力で検出する (図 2・7 参照)。ダイオード型は、pn 接合ダイオードの温度変化による順電圧または順電流変化から  $\Delta T$  を検出する<sup>2)</sup>。

絶対温度  $T$  の黒体から放射される電磁波エネルギー  $I$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] は、ステファン・ボルツマン定数  $\sigma$  ( $\sim 5.67 \times 10^{-8}\ \text{W}/\text{m}^2\text{T}^4$ ) として、ステファン・ボルツマンの法則、

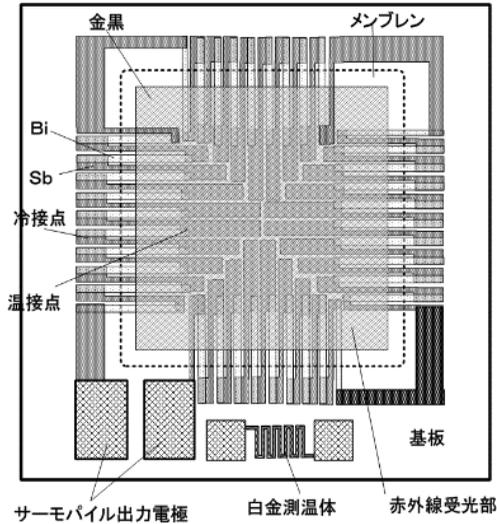


図 2・7 熱電型サーモパイル赤外線センサ

$$I = \sigma T^4 \quad (2 \cdot 11)$$

で与えられる。この式(2・11)を利用し、放射率  $\varepsilon (\leq 1)$  を考慮して  $I$  を計測して、放射温度計として非接触で物体の温度  $T$  を計測することができる。

### (3) 熱センサ

熱センサは、被計測物理量である赤外線、流量や気圧などを熱の授受に基づく温度変化  $\Delta T$  に変換して計測するセンサであり、次の熱方程式に従い、微小の入力パワー  $W$  で大きな温度変化  $\Delta T$  が得られることが望ましい。集中定数的に考えたセンシング部に熱パワー  $W$  が発生したとき、 $\Delta T$  だけ温度上昇したとすると、熱方程式は、

$$(d\Delta T)/dt + G\Delta T = W \quad (2 \cdot 12)$$

で表される。ここで、 $C$  は発熱部の熱容量、 $G$  は熱が発熱部から外部に逃げるときの熱コンダクタンスである<sup>3)</sup>。定常状態では、 $\Delta T = W/G$  となり、熱時定数  $\tau$  は、 $\tau = C/G$  で表される。 $W$  は、ヒータのジュール熱のように内部に発生する熱でも、マイクロ波や赤外線吸収のように外部からのパワー供給によるものでも良い。 $W$  を負とすれば冷却である。

熱センサで重要なことは、高速応答と高感度化のために、 $\tau$  と  $G$  とを共に小さくして、被測定物理量とに関わる表面積を大きくすることで、宙に浮く薄膜形状が最適となる。

熱センサでは、一般に MEMS (Micro Electro Mechanical System) 技術を利用して製作し、照射された赤外線を基板から熱分離した受光部で熱に換えて  $\Delta T$  を検出する上述の熱型赤外線センサ、熱分離のために宙に浮かした薄膜にヒータ<sup>4)</sup>と温度センサを搭載して、ヒータでのジュール熱を熱伝導型センサとして放熱に基づく  $\Delta T$  を温度センサで検出するフローセンサや気圧センサなどがある。図 2・8 に、熱センサの一例として、ガスフローセンサの構造と原理を示

す<sup>5)</sup>。中央の Pt ヒータでメンブレンを加熱しておき、気流がないときには、両側の Pt 薄膜温度センサは同一の温度であるが、気流があると風上側の温度が低下し、風下側の温度が低下するので、これらの温度差から校正により流速などに換算するものである。

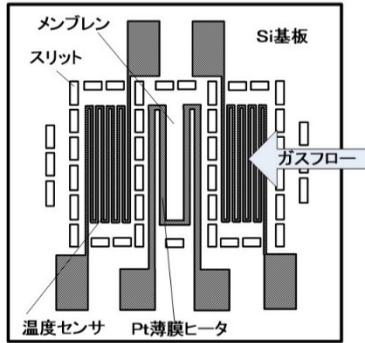


図 2・8 ガスフローセンサの構造例

#### ■参考文献

- 1) 室 英夫, 藍 光郎, 石垣武夫, 石森義雄, 岡山 努: “マイクロセンサ工学,” pp.69-72, 技術評論社, 2009.
- 2) M. Kimura and K. Toshima: “Thermistor-like pn junction temperature-Sensor with variable sensitivity and its combination with a micro-air-bridge heater,” Sensors and Actuators, A108, pp.239-243, 2003.
- 3) E.L. Dereniak and D.G. Crowe: “Optical radiation detectors,” p.136, John Wiley & Son, 1984.
- 4) M. Kimura: “Microheater and microbolometer using microbridge of SiO<sub>2</sub> film on silicon,” Electronics Letters, vol.17, no.2, pp.80-82, 1981.
- 5) 長田光彦, 上運天昭司, 黒澤 敬, 山本友繁: “流速センサ,” 公開特許公報, 特開平 4-5572, 1992.

### 1-2-3 加速度・カセンサ

(執筆者: 前中一介) [2012年7月 受領]

加速度センサ, 角速度センサなどの慣性力センサは, 1990年代以降, エアバッグ作動のための衝突センサ, カメラ・ビデオの手ぶれ補正, 車両制御, 携帯端末やゲーム機の入力デバイスとして急激に民生品への導入が進んできた. 特に, MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術の進展とともに超小型化, 高機能・高性能化, 低消費電力化などが進み, 最も普及した物理センサの一つに成長している<sup>1)~4)</sup>. 慣性力は, 加速度(や角速度)によって質量に発生する力を, その質量を支えるバネの歪みや変位によって検出することができる. ここでは加速度センサ及び力センサに関して述べる.

力を検出するためには, その力による変形や変位を計測できればよい. 例えば, 図 2・9 のような片持ち梁のバネに吊られた質量  $m$  を考える. 質量に力  $F$  を与えると, バネはそのバネ定数を  $k$  とすると,  $x=F/k$  の変位を発生する. このとき, 梁上にはこの変位による表面応力  $\sigma$  が発生している. 加速度  $\alpha$  を与えた場合は慣性力として  $F=-m\alpha$  が与えられることになる. 変位や応力を計測すれば与えられた力, または加速度を得ることができる. 以下, これらの具体的な計測手段について述べる.

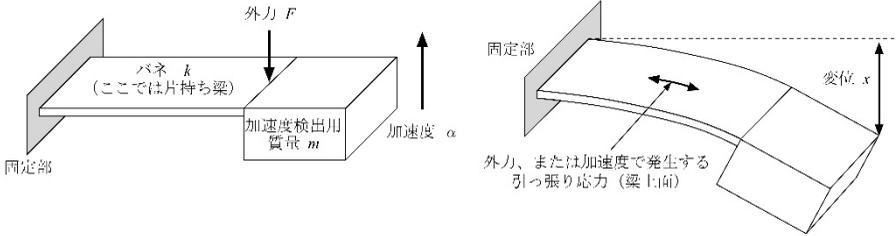


図 2・9 力及び加速度の検出

### (1) 変位を計測する方法

変位計測手法としては、固定電極を形成し、例えば質量部分に固定電極と対向する形で可動電極を設け、この間の距離の変化  $x$  によって、電極間の静電容量

$$C = \varepsilon A / (d_0 + x)$$

ただし、 $\varepsilon$ : ギャップ間の誘電率、 $A$ : 対向する電極の総面積、 $d_0$ : 電極間の初期ギャップ長。を計測する方法がある。最近の MEMS 加速度センサ及び角速度センサのほとんどはこの手法を計測手段としている。その他、差動トランスを用いたものや光を用いた手法などもある。

### (2) 応力を計測する方法

応力を計測する方法としては、応力による材料の歪みを検出原理とするもので、歪みゲージ、ピエゾ抵抗素子、圧電素子を用いたものなどがある。

歪みゲージは、厚さ  $t$ 、幅  $W$ 、長さ  $L$ 、抵抗率  $\rho_0$  の材料を長手方向 ( $L$  方向) に力を加え、これによる材料の変形を長手方向の抵抗値変化として得るもので、初期抵抗値

$$R_0 = \rho_0 L / (Wt)$$

が、変形によって

$$R = \rho(L + \Delta L) / ((W - \Delta W)(t - \Delta t))$$

となることを利用する。ここで、 $\rho$  は歪みが与えられたときの材料の抵抗率で、一般の金属の場合は  $\rho_0$  とほぼ同一である。

$\Delta L$  は力印加によって発生した長手方向 ( $L$  方向) の伸びで、長手方向の歪み  $\varepsilon$  と応力  $\sigma$  との関連は

$$\varepsilon = \sigma / Y = F / (Wt) / Y = \Delta L / L$$

ただし、 $Y$  は材料のヤング率であり、 $\Delta W$ 、 $\Delta t$  は材料の伸びに基づく伸び方向に垂直な断面の縮みで、等方性の材料の場合

$$\Delta W / W = \Delta t / t = \nu \varepsilon$$

ただし、 $\nu$  はポアソン比 (通常の金属の場合 0.3 近辺) となる。

歪み  $\varepsilon$  で規格化した構造変形前後の抵抗変化率 (ゲージファクタ)  $G = (R - R_0) / R_0 / \varepsilon$  は、近似計算によると

$$(1 + 2\nu)\varepsilon + (\rho - \rho_0) / \rho_0$$

となる。

歪みを計測する薄膜ゲージとして用いられる銅ニッケル合金やニクロム系合金膜では既に述べたように歪みによる  $\rho$  の変化は少なく、ゲージファクタ  $G$  は概略 2 程度の値にとどまる。

一方、シリコンに代表される半導体材料では、歪みによりバンド構造に変化が生じ（この効果をピエゾ抵抗効果と呼ぶ）、歪み印加前後で $\rho$ の変化が極めて大きくなる場合がある。これは半導体の種類、 $p$ 型・ $n$ 型の別、不純物濃度、結晶方位に大きく依存するが、典型的にはゲージファクタ 100~150 程度が得られる。結晶方位に注意すれば、このゲージは標準集積回路の抵抗として容易に作製でき、MEMS 型デバイスで応力を計測する際にはこのピエゾ抵抗型の検出機構がよく用いられる。

応力を検出する機構として最後に圧電型について述べる。PZT（チタン酸ジルコン酸鉛）や AlN（窒化アルミニウム）、有機系の PVDF（ポリフッ化ビニリデン）などの圧電材料は、歪みを加えると電荷を発生し、逆に電界を与えると歪みが発生する。これを利用し、例えば薄膜を梁上に形成して生じた歪みから電気信号を取り出す、あるいは材料に直接力を印加する（例えば、マスを材料上に直接貼り付けて加速度に対する発生力を材料に与える）ことによって与えられた力・応力を電気信号として取り出すことができる。ただし、発生するのは応力に比例した「電荷」であり、一般的には出力信号はリーク電流によって時間的に消滅していくため、静応力を検出するには適切ではない。

圧電材料では材料定数として  $d$  定数、 $g$  定数などが定義されている。応力印加による発生電圧を直接記述する定数は  $g$  定数であり、圧電体の分極方向（添え字 3 で示される）に応力  $\sigma$  を印加したときにその方向に発生する電界  $E$  は  $E = g_{33}\sigma$  となる。なお、図 2・9 のような梁上に薄膜状の圧電体（分極は厚み方向）を形成し、その膜の上下（裏表）方向に電極を形成したときには電極面に平行に歪み  $\sigma T$  が与えられることになり、この場合に発生する電界は  $g_{31}\sigma T$  と記述できる。 $g_{33}$ 、 $g_{31}$  の値の例として、PZT では  $g_{33}$  は  $20 \times 10^{-3} \text{ Vm/N}$  程度、 $g_{31}$  は  $-10 \times 10^{-3} \text{ Vm/N}$  程度、AlN の場合はそれぞれ  $40 \times 10^{-3} \text{ Vm/N}$ 、 $-50 \times 10^{-3} \text{ Vm/N}$  程度の値である<sup>5)6)</sup>。

以下、具体的な力センサ及び加速度センサについて例示する。

### (3) カセンサの例

棒状、板状の構造体に与えられた力、シャフトに発生するトルクなどを検出する場合、歪みゲージを対象物に貼り付けることによって構造体の歪みを検知し、外力を検出することができる。図 2・10 にその例を示す。薄膜状の歪みゲージが市販されており、これを構造体に強固に貼り付ける。構造体に対してゲージが十分薄い場合、構造体に発生する歪みを直接検知し、構造体のヤング率、断面積によって与えられた力が計算できる。また、シャフトに与えられたトルクはシャフト外周に斜めに貼り付けたゲージでシャフトのねじれを歪みとして受け取り、トルクを算出することができる。

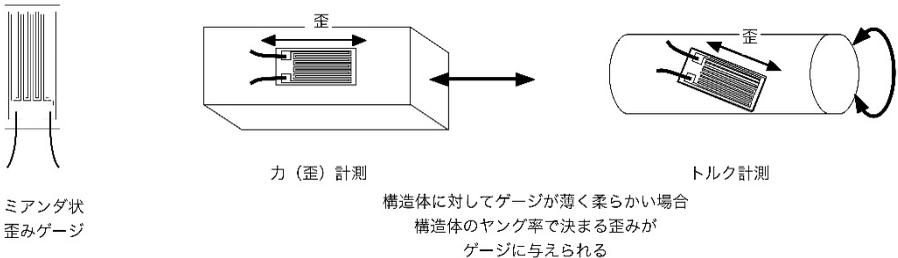


図 2・10 歪みゲージを用いた力/トルク検出

なお、図 2・9 のような構造の梁上にゲージを貼り合わせる場合、梁の曲がりに対するゲージ位置での歪みを検出することになり、梁の表にゲージを貼る場合と裏に貼る場合には正負逆の出力が発生することになる。また、梁幅が等しい場合には梁の位置によって発生する歪みが異なるため、材料力学に沿って歪み分布を計算し<sup>7)</sup>、その積算値としてゲージ出力を取り扱わなければならない。

#### (4) 加速度センサの例

次に加速度センサについて述べる。本節冒頭に述べたように、特に MEMS 加速度センサは近年の民生品に多数導入されている。MEMS 加速度センサの場合、検出機構は半導体ピエゾ抵抗で質量を支えるバネ部の応力を検出する形式、及び質量の変位を電極間の静電容量で検出する形式が一般的である。

近年は、

- ① ピエゾ抵抗は強い温度特性を持ち、高精度の検出が難しいこと
- ② ピエゾ抵抗式では一般的には大きな歪みを発生させるために大きな質量を形成するためバルク加工（ウエハ全体を貫通エッチングするなど）がもたら使われ、スペース効率及びプロセスコストが必ずしも良好ではないこと
- ③ 逆に微小な静電容量変化を高精度に計測する回路の熟成とその同一パッケージ内での集積化技術の向上によって静電容量式のメリット、すなわち検出原理そのものに温度依存性がなく、またチップの表面加工のみによって構造形成が可能な点などが活かせるようになってきたことから、主流は静電容量型になっている。

ここでは、静電容量式 3 軸加速度センサについて例示する。ここでは、シリコン表面に数～数十  $\mu\text{m}$  の厚さの薄膜を形成し、その薄膜を一部を残してシリコン基板から浮かせることによって可動構造体を形成したデバイスについて示す。

図 2・11 に概念図を示す。図(a)は基板表面に平行な  $x, y$  軸方向の加速度を検出するデバイス、図(b)は基板と垂直な  $z$  方向の加速度を検出するデバイスである。いずれも一部（図(a)では中央 1 箇所、図(b)ではねじりバネの先端 2 箇所）で基板に固定されており、それ以外の部分は基板から浮いている。また、両者とも、基板固定された対向電極を設けてある。

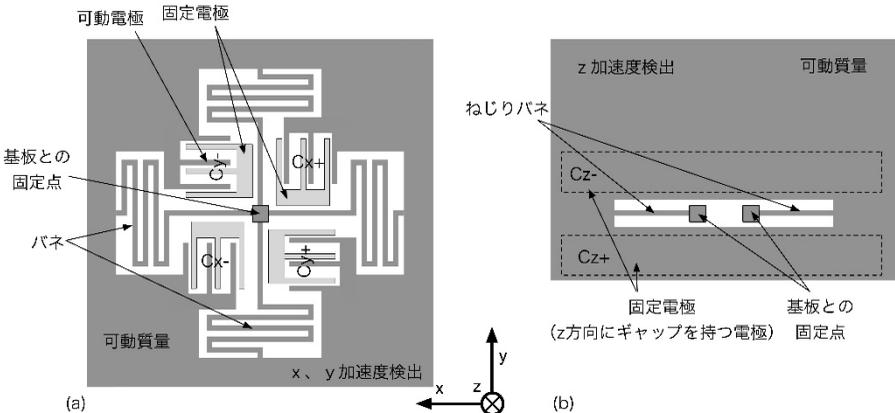


図 2・11 MEMS 技術による 3 軸加速度センサの構造例

図(a)では、中央の固定部から上下左右の4本のバネを介して周辺の可動質量を支えている。デバイスの中程には、可動質量に接続された櫛歯状の電極と対向するように固定電極が設置されており、両者間で4組の静電容量を形成している。いま、 $x$ 方向に加速度が加わると可動質量は右に動き、 $C_{x+}$ と示される電極では静電容量として主となる電極間が狭まる方向、 $C_{x-}$ では広がる方向に変位し、結果として静電容量  $C_{x+}$  は増加、 $C_{x-}$  は減少する。 $y$ 方向についても同様である。この差動的な静電容量変化を周辺回路で精度良く検出することによって与えられた加速度を得る。ここでは櫛歯は1つに静電容量に対して3本しか描かれていないが、実際には多数の櫛歯を形成して静電容量の変化の絶対値を大きくする工夫がなされる。

また、図(b)のデバイスでは可動質量の中心からオフセットされた位置にねじりバネが形成されており、 $z$ 方向の加速度印加によってねじりバネの上部は手前、下部は奥へ変位するトルクを受ける。可動構造体と対向して  $C_{z+}$ 、 $C_{z-}$  の位置に固定電極を形成しておけば、加速度によってこれらの電極と可動質量間の静電容量がやはり差動で変化する。

以上で3軸の加速度センサが形成できる。なお、バネを工夫して1つの構造体で3自由度を持たせ3軸を同時に検出することも可能であるが、各軸の検出独立性及び $z$ 軸方向の感度設計の容易なことからここで挙げた例のように $z$ 軸を個別デバイスとすることも有利である。

また、MEMS デバイスではチップサイズが必然的に小さくなることから、得られる静電容量は極めて小さく ( $fF = 10 \times 10^{-15} F$  オーダ) これを精度良く安定に検出する回路と、そのアセンブリ、更にはパッケージング手法も極めて重要な問題であるが、現在これらの問題も解決され、様々なタイプの MEMS 加速度センサがデリバリされている。例えば 2012 年現在、パッケージサイズが 2 mm 角の超小型 3 軸デジタル加速度センサや消費電流がわずか  $2 \mu A$  以下の超低消費電力センサなども開発されている。

#### ■参考文献

- 1) 藍 光郎(監修)：“次世代センサハンドブック,” 培風館, 2009.
- 2) 桑野博喜(監修)：“MEMS/NEMS 工学全集,” テクノシステム, 2009.
- 3) 木股, 他：“自動車用センサの最新動向,” シーエムシー出版, 2009.
- 4) 藤田(編)：“センサ・マイクロマシン工学,” EE Text, 電気学会・オーム社共同企画, 2005.
- 5) 江刺(監修)：“MEMS マテリアルの最新技術,” シーエムシー出版, 2007.
- 6) 中村(監修)：“圧電材料の高性能化と先端応用技術,” サイエンス&テクノロジー, 2007.
- 7) 例えば, 竹内洋一郎：“わかる材料力学,” 日新出版, 1969.

### 1-2-4 触覚センサ

(執筆：篠田裕之) [2018年10月 受領]

人間の皮膚のように柔らかくどこにでも実装でき、人間の皮膚感覚あるいはそれ以上の情報を取得できる万能人工皮膚を作ることは、ロボット工学の黎明期からの課題である。近年このようなデバイスを実現するための基盤技術は大幅に進展しているが、想定される用途をすべてカバーできる万能センサは存在していないのが現状である。これまでに開発された触覚デバイスを、その主目的で分類すると、主に次の3つのカテゴリ、すなわち、触感定量化用、物体把持用、ロボット被覆用にまとめられ、それぞれ異なった優先事項を意識して開発が進められている<sup>1)</sup>。以下ではそれらの現状をまとめる。

## (1) 触感定量化センサ

第一のカテゴリは触感を数値化・データ化できるセンサである。このセンサの目的は、ヒトの指先が取得しているのと同様な触覚情報を知覚するセンサを実現することであり、当面の目標としてそれがただちにロボットの表面全体を被覆できるものである必要はない。触感の定量化においては、触覚の能動性・多面性と個人差という2つの問題に留意しておく必要がある。

### (a) 触覚の能動性・多面性

皮膚センサの出力が単独に存在するだけでは不十分であり、手指がどのように対象物体に触れるか、その運動の軌道とセンサ出力が対となることで初めて触感を表現するデータとなる。触感には対象物体をつかむ、押す、撫でる、曲げるなど、対象に動きを与えたときの反応によって生じるものであり、皮膚表面の力の分布が同一であったとしても、指の運動が異なっていれば触感も異なったものとなる。

### (b) 個人差

触感是指と対象物との相互作用で生じた皮膚の変形や振動を知覚するものであるから、指の表面の特性が変化すると、触感も変化する。また、個人差や加齢による変化も大きい。例えば、硬い皮膚を持った人の指の特性を模倣して開発した指先センサで、ある物体に触れ、その計測信号をもとに柔らかい皮膚を持ったほかの人の指を刺激することを考えてみよう。このとき後者が感じる触感、その人が実物に触れたときの触感とはいくらか異なったものになっているはずである。皮膚の硬さが異なれば、対象物体の変形の仕方も異なるし、皮膚表面の凹凸や摩擦特性が異なれば、接触に伴って生じる振動も異なる。

### (c) 触感定量化センサの実例

触感を厳密に定義しようとすると、前述のように厄介な問題が出てくるが、厳密さは後回しにしたうえで実用的な取り組みは既に進んでいる。布地の風合いを定量化する KES と呼ばれる手法では、引っ張り、曲げ、せん断特性や表面の摩擦係数などの測定値のセットによって布地の触感を定量化している。また、一定の押し当て力と移動速度のもと、センサプローブで物体表面をこすったときの振動波形は、人間が触感の差として見分けている表面性状の差異をよく反映している<sup>2)</sup>。MEMSによって人間の指紋形状を模倣し、羽毛の表面など柔らかい表面の触感を定量化する試みも行われている<sup>3)</sup>。

このような触感定量化センサは、工業製品の表面の触感を定量化し、品質を管理するために有効な技術である。その他、美容・健康のための肌状態の計測や、医師の触診すなわち腫瘍、腫瘍、リンパ節などの検査の自動化、オンラインショッピングでの商品の触感伝送などへの応用も期待されている。触覚ディスプレイと同時に使用し、テレグジスタンスロボットの指先の感覚をリアルタイム伝送する応用も、重要な研究テーマになっている。

## (2) 物体把持用触覚センサ

第二のカテゴリは、自動作業するハンドの指先のためのセンサである。この応用において、触感検出の能力が必ずしも人間のそれと同じ特性を持つ必要はない。指の表面における力分布がベクトルとして正確に計測できることが重要であり、その精度、時間応答はむしろ人間の能力を超えたものになることが望ましい。

物体の把持に必要な情報は、各指が物体に及ぼしている力ベクトル・トルクと、物体と指の間の滑りである。柔軟性を保ちつつ指表面の力ベクトルの分布を計測するため、光学的手法が古くから検討されていたが<sup>4)</sup>、特に高精細撮像素子とコンピュータの小型化を背景として、リ

アルタイムでの力ベクトル分布計測をはじめて実証した指先型センサは文献 5) のセンサである。弾性体表面付近の微小マーカーの移動を指内部に埋め込まれたカメラで撮影し、マーカーの変位分布から表面の応力分布を推定する。

文献 6) のセンサは、接触力重心位置とそこに加わる力の総和を 4 本の信号線によって直接計測する。力の分布を計測するセンサの場合には、指が物体に与える合力とトルクは分布データから計算によって求める必要があるが、このセンサの場合には分布データを経ることなく、初めから接触分布重心の座標と力の総和が得られる。センサの面内には配線の必要がなく、物理配線と計算量の両方を節約する合理的な構成になっている。このようなセンサを用いて接触位置と力を 1 ms で検出することによって、高速ペン回しや片手ひも結びなどの動作が可能であることが示されている<sup>7)</sup>。現在は、基礎研究だけでなく実用化も進展しており、SynTouch 社 BioTac など、物体把持に利用でき、同時に指先の微小振動も計測できる商用センサが入手可能になってきている。

物体把持用触覚センサに求められるもう一つの役割は、滑り、特に把持していた物体が滑り出す直前の状態を検出することである。初期滑り、すなわち全体の滑りが発生する直前に部分的な滑りが生じている状態を検出する方法としては、滑り出す直前に顕著な振動が発生するように表面性状を工夫し、指先に埋め込んだセンサで振動を検出する方法<sup>8)</sup>、せん断変形の変化を捉える方法<sup>9),10)</sup> などがあったが、滑りとは直接関係のない振動と、滑りの予兆となる振動を明確に区別することは難しかった。それに対し文献 11) の研究では、初期滑りのみを安定に検出する手法が示されている。ある種の感圧導電性ゴムにおいては、初期滑り時に高い周波数で抵抗が変動する現象が見られる。それらの高周波成分は、垂直方向に物体が衝突したときや、系全体が振動したときの信号にはほとんど含まれていないことから、初期滑り信号であることを確実に特定できる。

### (3) ロボット被覆用触覚センサ

第三のカテゴリはロボットの全身を覆うことを目的とした触覚デバイスである。ロボットが人間に接触した瞬間を検知して安全性を確保すること、皮膚を通したロボットと人間とのコミュニケーションを可能にすること、などが実用面から見た直近の目的である。このカテゴリにおける最優先事項は、実用的な丈夫さを持ち、柔らかく自由曲面を覆うことができることであり、センシングの解像度や多様さは、後から除々に高めていけばよいというのが基本姿勢となる。

触覚センサの分布計測法として最も古くから利用されている代表的手法は縦横電極の走査を用いる方式<sup>12)</sup>である。配線のトポロジーとしてはこれと同様のものを用い、自由曲面に多数のセンサ素子を実装することができる網目状デバイス<sup>13)</sup>が開発されている。網目の節に近接覚センサが接続されており、網目の繊維に相当する部分を導線とする。導線が伸縮できない材質であったとしても面としての伸縮性を確保することができ、自由曲面に実装することができる。これとは異なる考え方として、文献 14) の研究では、センサユニットが通信機能を備え、センサユニットをシリアル結合で拡張できるようにした方式が採用されている。この手法によって、人間型ロボットの表面にセンサを大規模実装できることを実証した。

更に完全に配線を排除する方法は、センサ素子を実線化することである。センサ素子と外部コイルとの誘導結合を利用する方法<sup>15)</sup>や、柔軟体皮膚の内部を伝播するマイクロ波によってセンサ情報を読み取る方式<sup>16)</sup>が提案されている。研究は原理検証段階であるが、高機能な

MEMS センサを大規模に実装するために有力な方法であると考えられる。

その他、EIT (Electrical Impedance Tomography) を用いた手法がある。荷重により抵抗が変化する導電体シートの外周に多数の電極を配置し、導電体内部の抵抗値分布を、逆問題手法を用いて計測する<sup>17)</sup>。人体の断層像を得る X 線 CT スキャン (Computer Tomography Scanning) 法に比べると逆問題としての困難度は高いが、電気配線を排除することができ、柔軟な皮膚を構成できる。

近年は、有機トランジスタを用いたセンサシート<sup>18)</sup>も実用段階に入りつつある。薄く伸縮可能なシート上にセンサと回路を一括で形成することができ、将来的な発展が期待できる。

#### ■参考文献

- 1) 下条 誠, 前野隆司, 篠田裕之, 佐野明人(編): “触覚認識メカニズムと応用技術—触覚センサ・触覚ディスプレイ,” サイエンス&テクノロジー, 2010.
- 2) 田中真美, 長南征二, 江鐘 偉, 中島英貴: “触覚感性の計測: 人間の触感と PVDF センサの出力の対比,” 日本機械学会論文集 C 編, 65 巻 631 号, p.970-976, 1999.
- 3) K. Watatani, R. Kozai, K. Terao, F. Shimokawa, and H. Takao: “A “micro-macro” integrated planar MEMS tactile sensor for precise modeling and measurement of fingertip sensation,” Proc. MEMS 2017, pp.223-226, 2017.
- 4) 前川 仁, 谷江和雄, 金子 真, 鈴木夏夫, 他: “半球面光導波路を用いた指先搭載型触覚センサの開発,” 計測自動制御学会論文集, vol.30, no.5, pp.499-508, 1994.
- 5) K. Kamiyama, K. Vlack, H. Kajimoto, N. Kawakami, and S. Tachi: “Vision-Based Sensor for Real-Time Measuring of Surface Traction Fields,” IEEE Computer Graphics & Applications Magazine, Jan-Feb, pp.68-75, 2005.
- 6) 石川正俊, 下条 誠: “感圧導電性ゴムを用いた 2 次元分布荷重の中心位置の測定方法, 計測自動制御学会論文集, vol.18, no.7, pp.730-735, 1982.
- 7) 山川雄司, 並木明夫, 石川正俊, 下条 誠: “高速多指ハンドと高速視触覚フィードバックを用いた柔軟紐の結び操作,” 日本ロボット学会誌, vol.27, no.9, pp.1016-1024, 2009.
- 8) M.R. Tremblay and M.R. Cutkosky: “Estimating Friction Using Incipient Slip Sensing during a Manipulation Task,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.429-434, 1993.
- 9) H. Shinoda and S. Ando: “A Tactile Sensor with 5-D Deformation Sensing Element,” Proc. 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol.1, pp.7-12, 1996.
- 10) 前野隆司, 広光慎一, 河合隆志: “曲面状弾性フィンガの固着・滑り分布推定に基づく把持力の制御,” 日本ロボット学会誌, vol.19, no.1, pp.91-99, 2001.
- 11) S. Teshigawara, K. Tadakuma, A. Ming, M. Ishikawa, and M. Shimojo: “High Sensitivity Initial Slip Sensor for Dexterous Grasp,” 2010 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.4867-4872, 2010.
- 12) 石川正俊, 下条 誠: “ビデオ信号出力を持つ圧力分布センサと触覚パターン処理,” 計測自動制御学会論文集, vol.24, no.7, pp.662-669, 1988.
- 13) M. Shimojo, T. Araki, A. Ming, M. Ishikawa: “A High-Speed Mesh of Tactile Sensors Fitting Arbitrary Surfaces,” IEEE Sensors Journal, vol.10, no.4, pp.822-830, 2010.
- 14) Y. Ohmura, Y. Kuniyoshi, and A. Nagakubo: “Conformable and Scalable Tactile Sensor Skin for Curved Surfaces,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1348-1353, 2006.
- 15) M. Hakozaki, H. Oasa, and H. Shinoda: “Telemetric Robot Skin,” Proc. 1999 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.957-961, 1999.
- 16) H. Shinoda, H. Chigusa, and Y. Makino: “Flexible Tactile Sensor Skin Using Wireless Sensor Elements Coupled with 2D Microwaves,” Journal of Robotics and Mechatronics, vol.22, no.6, pp.784-789, Dec. 2010.
- 17) 長久保晶彦, アリレザーイーハサン, 國吉康夫: “逆問題解析に基づく触覚分布センサ,” 日本ロボット学会誌, vol.25, no.6, pp.162-171, 2007.
- 18) H. Kawaguchi, T. Someya, T. Sekitani, and T. Sakurai: “Cut-and-Paste Customization of Organic FET Integrated Circuit and Its Application to Electronic Artificial Skin,” IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol.40, no.1, pp.177-185, 2005.

## 1-2-5 光ファイバセンサ・ジャイロ

(執筆著：堀口常雄) [2012年6月 受領]

光ファイバセンサは、物理的及び化学的の量を、何らかの方法により光学的な量の変化に変換して測定し、その光信号の伝達や変換機構（トランスデューサ）に光ファイバを使用するものである。トランスデューサには光ファイバ以外のものを使用し、信号伝送の役割のみを光ファイバに担わせたものも光ファイバセンサとして分類している。

光ファイバセンサの最も重要な利点は、光ファイバ（特にガラス製光ファイバ）が電氣的に安定（無誘導性、高耐圧性、高絶縁性など）、かつ化学的に安定（耐腐食性、耐水性、耐熱性など）なため、厳しい環境下においても使用可能なことである。また、光ファイバは細径で柔軟性に富むので、狭く複雑な形状の空間の奥にある対象物にも光信号を伝送して測定することが可能という利点もある。更に、光ファイバの低損失性を生かした光信号の伝送により、遠隔点や、空間的に広がった測定対象にも適したものになっている。

測定対象となる物理的の量には、電界、磁界、歪み、温度、角速度、流速、振動、圧力、屈折率、光スペクトルなどがある。また、それらの物理的の量の変化を知るために測定する、光学的な量の種類には、光強度、周波数（波長）、位相、偏光などがある。

このように、光ファイバセンサは種々の情報量を測定可能であるが、ここでは、(1) 光ファイバ内に屈折率格子を形成した FBG (Fiber Bragg Grating) の反射率あるいは透過率の変化を応用したポイントあるいは多点型センサ、(2) 同一種類の光ファイバが光信号の伝送とトランスデューサの役割を同時に果たすことにより、光ファイバの長さ方向に連続して分布した情報量を測定可能な分布型センサ、及び、(3) 光ファイバの低損失性や、軽量、柔軟さに基づく収納性などを活かし高感度化を図った光ファイバジャイロについて説明する。

### (1) FBG センサ

光ファイバ内に周期  $\Lambda$  の屈折率分布を持つ FBG は、ブラッグ波長  $\lambda_B = 2 n_g \Lambda$  において高い反射率を有する光フィルタとして利用される。FBG に応力が加わると、周期  $\Lambda$  の伸縮及び実

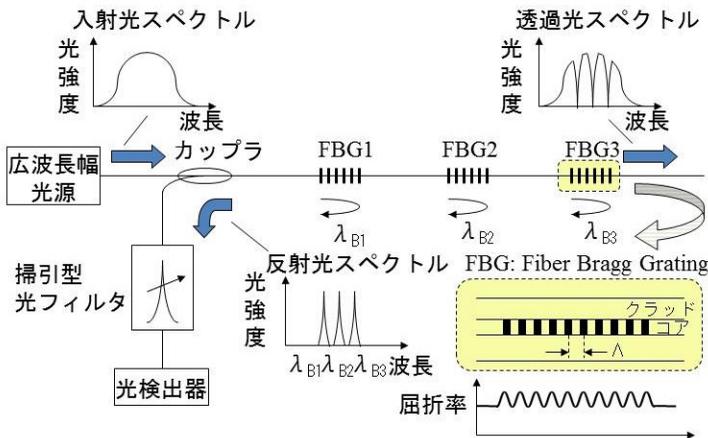


図 2・12 FBG 多点型センサ

効的な屈折率  $n_g$  の増減により,  $\lambda_B$  も変化する ( $\Delta\lambda_B/\lambda_B = 7.69 \times 10^{-7}/1 \mu$  歪み). また, 温度変化に対しても同様な理由により  $\lambda_B$  は変化する ( $\Delta\lambda_B/\lambda_B = 7.64 \times 10^{-6}/1$  度). そのため, FBG は歪みや温度センサとして動作する.  $\lambda_B$  の変化の検出方法には種々のものがあるが, 主要な方法は, 発光ダイオードなど波長幅の広い光源と, 波長掃引型の光フィルタを使用して, FBG からの反射光のスペクトルを測定するものである.  $\lambda_B$  が互いに十分離れた複数の FBG を使用することにより, 多点型センサを構成することも可能である (図 2・12). その数は, 発光ダイオードの波長幅と歪みまたは温度の測定レンジによって制限され, 通常 5~6 個/ファイバである.

## (2) 分布型光ファイバセンサ

光ファイバ自身がセンサとして機能する分布型光ファイバセンサは, 光ファイバに沿った任意の位置の情報量を測定可能である. その多くの測定系は OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) を基本とし, 光ファイバに入射した短パルス光によって発生した後方散乱光が, 入射点へ戻ってくるまでの遅延時間から位置測定を行う. また, 利用する後方散乱光は, レイリー散乱, ブリュアン散乱, ラマン散乱などである.

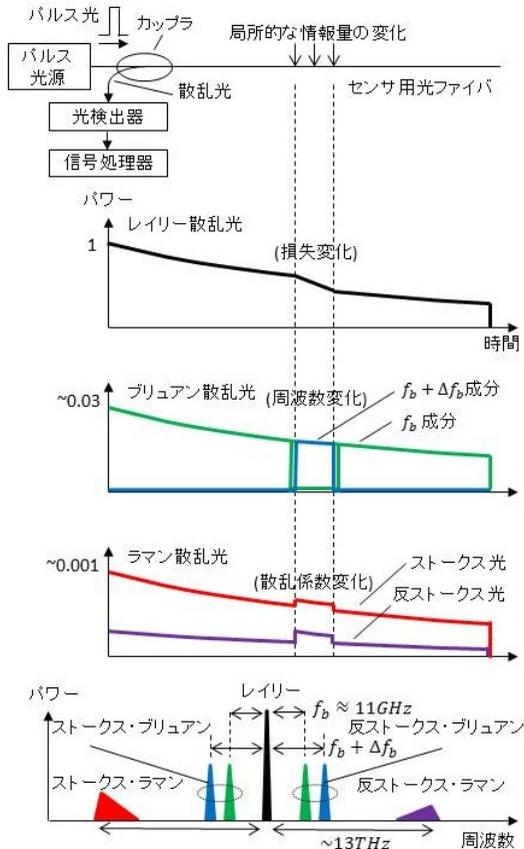


図 2・13 分布型光ファイバセンサ

レイリー散乱を利用する場合、感度を高めるために、測定したい情報量を光ファイバの損失に変化させるトランスデューサを設けることが多い。その種のものとして、クラッド部にテフロンを被覆し、そこに浸透した油によって光ファイバのコアを伝搬する光が外部に放射することを利用した油漏れセンサなどがある。一方、コヒーレントな短パルス光を入射することによって発生した後方レイリー散乱の干渉信号波形が、光ファイバの歪みや温度によって変化する現象を利用した、歪み・温度の相対変化センサも開発されている。後者のタイプのセンサは、伝送特性や経済性に優れた通信用光ファイバを、特殊な加工を施すことなく使用可能という特長を有する。

ブリュアン散乱光を利用した歪み・温度センサは、後方散乱光の周波数シフトが、光ファイバの歪みや温度によって変化することを利用している。ブリュアン散乱は、音波（移動する屈折率格子）によって散乱される現象であるので、ドップラ効果によって散乱光の周波数は変化する。入射光に対するこの周波数変化量 $f_b$ をブリュアン周波数シフトという。通信用の石英ガラス光ファイバの場合、引っ張り/圧縮歪みが生じると、そのヤング率が増加/減少することが知られている。ヤング率が増加すると集団的に変位したガラス分子がより速く振動の平衡位置方向に戻るようになるので、分子の振動数、すなわち音波の振動数は上昇する（これは、弦の張力を増すと弦の振れがより速く戻り、その振動数が上昇する現象と同様である）。その結果、 $f_b$ も増加する（約 50 kHz/1  $\mu$ 歪み）。温度が変化する場合も同様の理由により $f_b$ が変化する（約 1 MHz/1度）。OTDRと同様の測定系によって得た後方ブリュアン散乱光の信号波形の光周波数依存性を解析し、 $f_b$ の分布を求めることにより、歪み/温度分布を得ることができる。

ラマン散乱光を利用した温度センサは、散乱係数の温度依存性を利用している。ラマン散乱では、入射光と振動する分子一つひとつがエネルギーを授受するので、散乱光の周波数はシフトする（石英ガラスの場合、約 13 THz）。低いエネルギー準位にある分子にエネルギー $\Delta E$ を与え、低周波側にシフトした光をストークス光と呼ぶ。逆に、 $\Delta E$ だけ高いエネルギー準位にある分子からエネルギーを受け取り、高周波側にシフトした光を反ストークス光と呼ぶ。その散乱係数は各エネルギー準位にある分子数に比例し、またその分子数は統計力学によりボルツマン分布に従う。よって、反ストークス光とストークス光の散乱強度の比は、 $\exp(-\Delta E/k_B T)$ に比例する（ $k_B$ :ボルツマン定数、 $T$ :絶対温度）。そこで、この強度比の分布をOTDRと同様の測定系によって得ることにより、温度分布の測定を可能としている。このとき、光ファイバの損失による光強度変化は補償される。実際には、ストークス光と反ストークス光の波長の違いによる損失差や遅延時間差も事前校正し、測定精度を高めている。

### (3) 光ファイバジャイロ

回転するループ状の光路を右回りと左回りで伝搬する光の位相に差が生じる現象をサニャック(Sagnac)効果と呼ぶ。この位相差 $\theta$ が回転角速度 $\Omega$ に比例することを利用し、回転角速度あるいは回転量を検出するセンサを光ジャイロという。位相差 $\theta$ はループが囲む総合の面積に比例するので、このループを多層巻の光ファイバコイルにし、高感度化、小型化、高信頼度化を図ったものが光ファイバジャイロである。位相差 $\theta$ の測定方法にはいくつかの方式があるが、両光を干渉させ、その強度変化から回転角速度を測定する、干渉型光ファイバジャイロ(I-FOG: Interferometric Fiber-optic Gyroscope)が最初に実用化され、広く使用されている。雑音を極力抑えるためには、無回転時の両光の光路長は周囲環境に変化があったときも等しく保つ必要がある(相反性の確保)。そこで、カップラの分岐比の温度変動による雑音などが生じないよ

う、光ファイバコイルに接続したカップラ（図 2・14 では Y 分岐）と、コイルから戻ってきた光を光検出器に導くカップラを別に設けている。更に、光ファイバコイル伝搬時の偏光状態の変化による雑音も生じないように、偏光子を挿入し、不用偏光成分は除去している。いま、二光波の位相差を  $\theta$  とすると、その干渉信号強度は  $\cos^2(\theta/2)$  に比例する。よって、このままでは低い回転角速度は検出しにくいので、 $\pi/2$  だけ位相バイアスした検出信号とすることが望ましい。そこでコイルの片端に位相変調器を挿入し、両光の間に、光ファイバの伝搬による遅延時間差  $\tau$  をつけた位相変調をかける（位相変調法）。このとき干渉信号に含まれる変調周波数成分の振幅は  $\sin \theta$  に比例するため、低い回転角速度に対して感度を得られ、また回転方向も分かるようになる。しかしこの場合においても、入力回転角速度に対する出力は線形ではなく、また大きな回転角速度は測定できないという問題が残る。そこで、回転速度測定量を帰還させた零位法も採用することにより、高ダイナミックレンジ化が図られている。帰還は、上述の位相変調法のとおり同様にして、右回り光と左回り光の間に、光ファイバの伝搬による遅延時間差  $\tau$  をつけた、鋸歯状波による位相変調によって行っている。このとき鋸歯状波のスロープと  $\tau$  の積で決まる帰還信号が得られる。

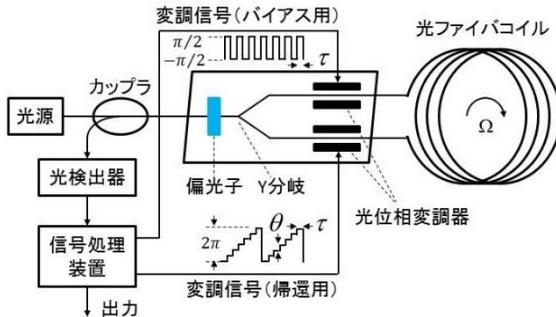


図 2・14 干渉型光ファイバジャイロの構成例

以上の 2 種類の位相変調方法として、アナログ方式に加え、デジタル方式も開発されている（図 2・14 の変調信号を参照）。デジタル信号処理技術の発展と相俟って、高精度、高安定な光ファイバジャイロが実現されている。また、I-FOG に加え、サニャック効果による、リング共振器の共振周波数の変化を捕える共振器型光ファイバジャイロ（R-FOG : Resonant-FOG）や、ブリュアン光ファイバレーザの発振周波数差の変化を捕えるブリュアン光ファイバジャイロ（B-FOG : Brillouin-FOG）、更に、光ファイバコイル部での雑音低下を狙い、空気コア・フォトリソニック結晶ファイバを使用した R-FOG など、次世代の光ファイバジャイロの研究開発が進展している。

## ■9 群-8 編-1 章

### 1-3 化学・生物センサ

#### 1-3-1 嗅覚センサ

S2 群 7 編 バイオナノテクノロジー 3 章 3-1-9 項参照.

#### 1-3-2 味覚センサ

S2 群 7 編 バイオナノテクノロジー 3 章 3-1-10 項参照.

#### 1-3-3 イオンセンサ

(執筆者：宮原裕二) [2018年6月 受領]

イオンセンサはイオン選択性電極ともいわれ、その主要部は図 3・3・1 に示すように、イオン感応膜、内部電極、内部溶液から構成されている。

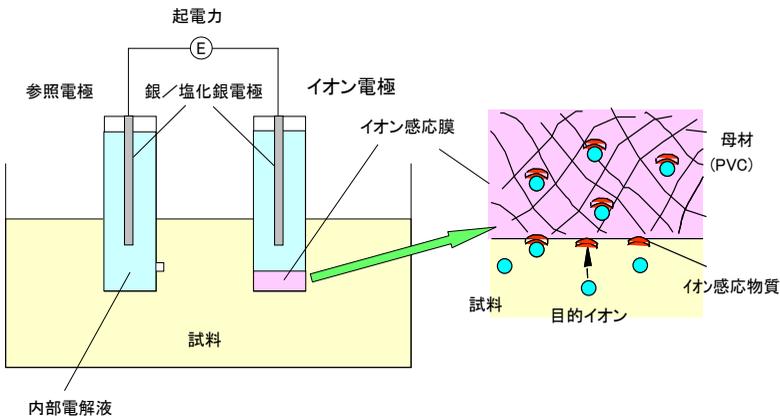


図 3・3・1 イオン電極の構成

試料中の目的イオン濃度に応じてイオン感応膜で発生する起電力  $E$  を、比較電極を基準として測定する。イオン感応膜が特定のイオン  $i$  のみに選択的に応答し、膜中を電流が流れないという理想的な場合、イオン感応膜で発生する起電力  $E$  は式 (3・3・1) で表される。

$$E = E_i^0 + (RT/z_i F) \ln(a_i) \quad (3 \cdot 3 \cdot 1)$$

ここで、 $E_i^0$ ：標準電位、 $R$ ：気体定数、 $T$ ：絶対温度、 $z_i$ ：イオンの価数、 $F$ ：ファラデー定数、 $a_i$ ：試料中のイオン  $i$  の活量を表す。 $(RT/z_i F)$  はネルンストの傾きといいイオンセンサの応答を評価する指標となり、式 (3・3・1) を常用対数で書き換えて次のように表される。

$$2.303 RT/z_i F = 59.16 \text{ mV}/z_i \quad (25^\circ\text{C}) \quad (3 \cdot 3 \cdot 2)$$

これより、1 価のイオンについて、試料中の濃度が 1 桁変化したときの起電力変化は  $25^\circ\text{C}$  で

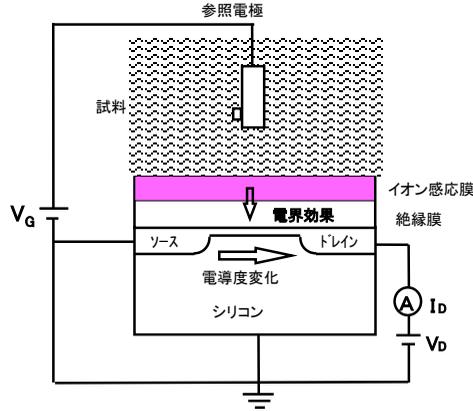


図 3・3・2 イオン感応性電界効果トランジスタの構造

59.16 mV となる。

図 3・3・1 に示したイオン感応膜を図 3・3・2 に示すように絶縁ゲート電界効果トランジスタのゲート絶縁膜上に直接形成した構造のイオンセンサをイオン感応性電界効果トランジスタ (Ion Sensitive Field Effect Transistor : ISFET) という<sup>1)</sup>。ゲート電位は同じ試料溶液中に浸せきした参照電極により制御される。試料溶液中のイオン濃度が変化すると、イオン感応膜で起電力が変化する。この起電力変化が電界効果トランジスタのゲート電圧変化と同様に作用して、電界効果によりシリコン表面のチャネルの導電率を変化させ、ドレイン電流の変化として測定される。あらかじめ検量線を作成しておけば、ドレイン電流変化からイオン濃度を求めることができる。ISFET は半導体技術により製作されるため、下記の特徴がある。

- (1) FET はインピーダンス変換機能を有するため、絶縁性の材料でもイオン感応膜として用いることができる。
- (2) 微細加工技術により小型のイオンセンサチップを製作することができる。
- (3) 複数のイオンセンサや信号処理回路をワンチップに集積化することができる。

イオン感応膜としては従来のイオン電極に用いられている材料を ISFET に適用することが可能である。それに加えて(1)の特徴を利用して、半導体プロセスとの整合性が良い  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$  が ISFET に使用される pH 感応膜材料として開発されている。これらの材料は  $\text{Si}_3\text{N}_4 < \text{Al}_2\text{O}_3 < \text{Ta}_2\text{O}_5$  の順にネルンストの傾きや安定性が良いとの報告があるが<sup>2)</sup>、膜形成方法や条件により pH 応答特性が変わることが知られている。 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$  は通常半導体デバイスでは絶縁膜として用いられているが、溶液中に浸漬して水素イオン (pH) 感応膜として機能し、溶液/絶縁膜界面において起電力が発生する。 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$  などの酸化物は水溶液中に浸漬すると、その表面が水和化してヒドロキシル基が生成され、水素イオンの結合、解離サイトとなる。一方、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  は酸化物ではないが、水溶液中に浸漬すると表面に酸素原子が現れることがオージェ電子分析の結果明らかになっており、やはりその表面が水和化してヒドロキシル基が生成されると考えられている。

ISFET のゲート絶縁膜表面に機能性膜を形成することにより、検知対象や選択性を変えるこ

とができる。FET と高分子イオン感応膜、固定化酵素、抗体、あるいは DNA とを組み合わせると、 $\text{Na}^+$  や  $\text{K}^+$  などのイオン、グルコースや尿素などの生化学成分、抗原-抗体反応、あるいは DNA を検出する FET を製作することができる。半導体集積回路技術を用いて高密度に集積化した ISFET アレイと DNA の伸長反応を組み合わせて、DNA シーケンサが開発され、実用化されている<sup>3)</sup>。

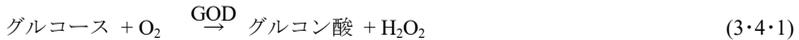
#### ■参考文献

- 1) P. Bergveld : IEEE Trans. on Biomed. Eng., BME-17, 70, 1970.
- 2) H. Abe, et al. : IEEE Trans. Electron Device, ED-26, 1939, 1979.
- 3) J.M. Rothberg, et al. : Nature, vol.475, 21 July, pp.348-352, 2011.

### 1-3-4 酵素センサ

(執筆者：六車仁志) [2012年5月受領]

酵素センサは、酵素の基質特異性を利用し、酵素反応によって生じる電極活物質の増減を電極で電気化学的に検出する。このとき、検出は電流値を測定することになるのでアンペロメトリックセンサとも呼ばれる。代表的な酵素センサの一種、グルコースバイオセンサの測定原理は次のとおりである(図 3・4・1)。すなわち、酵素グルコースオキシダーゼ (GOD) によりグルコースは酸化され、反応により、式(3・4・1)のように過酸化水素が生成される。



生成した過酸化水素は、電極を+0.7V程度に設定することにより式(3・4・2)のような反応が起こり、電流値が増加する。この電流値の増加を測定することでグルコースの濃度が測定できる。



または、式(3・4・1)に示すように、この反応は酸素を消費するので、酸素電極を用いてもグルコース濃度を測定できる。

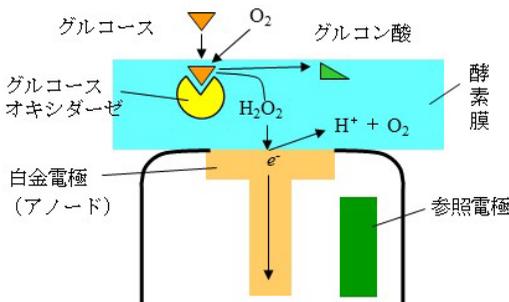


図 3・4・1 過酸化水素電極を用いるグルコースバイオセンサの動作原理

この電極型のバイオセンサは、図 3・4・2 に示すようなフロー式と呼ばれる形態で利用される。

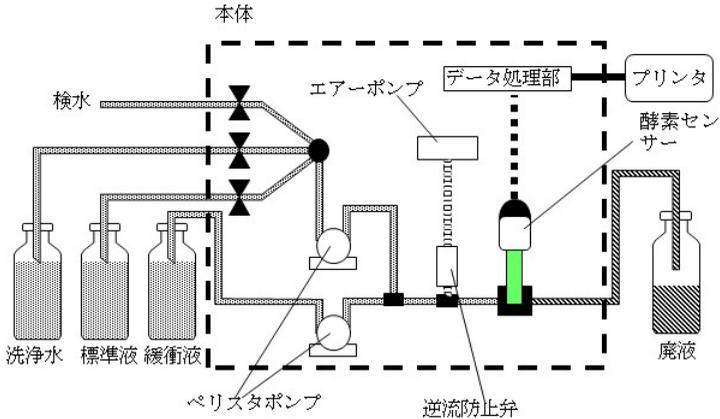


図 3・4・2 フロー型測定システム

フロー型では、フロー系を作るのにペリスタポンプ、チューブ、試料注入口、フロー液などを用意し、フロー液の流速、組成、測定アルゴリズムなどを最適化する必要がある。これにより、多くの試料を短時間で測定できる。また、測定試料の注入を自動化すれば連続測定も可能である。医療検体検査、細胞培養、発酵プロセス、食品分析などが用途である。したがって、測定試料は、血液、発酵溶液、細胞培養用培地、生体試料、清涼飲料水、牛乳などで、ほとんど前処理なしで測定できる。測定は、全自動でプログラムにより、測定間隔、条件などを自由に制御できる。また、発酵プロセスでは、コンタミネーションをさけるために無菌状態で生物培養槽から直接サンプリングが可能であり、そのシステムの部品はすべて殺菌（オートクレーブ）できる。これらの酵素センサは、グルコースのほかにも、ラクテート、グルタミン、グルタミン酸、スクロース、エタノール、メタノールなども同時に測定できる。これらの物質は、酵素を代えることにより、同様の測定原理で測定することができる。

血液中のグルコースを測定したい場合、血液をセンシング部に付着させる。血液は、様々な病原菌が存在し、感染のおそれもあるため、取り扱いには注意が必要である。このため、一度血液を付着させたチップは、洗浄して再使用することはできず、使い捨てにすることが望ましい。使い捨てセンサの形態は、図 3・4・3 に示すように、センサチップに血液を付着させ、測定機器に挿入すると測定値が表示される。その後、チップは取り除き捨てることになる。再び測定するときには、新たな別のチップを使用する。このセンサの測定原理は、酵素を利用してい

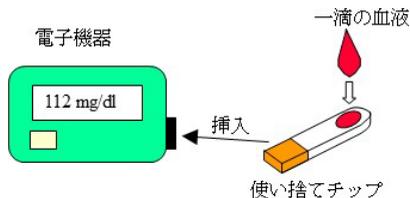


図 3・4・3 使い捨てセンサ

るが、更に大きな特徴は、メディエータを使用している点である。電極型のグルコースバイオセンサは、酵素反応によって増減する酸素または過酸化水素の量を電極で検出した。これに対し、メディエータ型のバイオセンサは、図 3・4・4 に示すように酵素反応によって生じる電子を直接電極で検出する。グルコースオキシダーゼの活性中心に FAD という補酵素が存在し、この FAD が酸化還元されることで電子の移動が起こる。しかし、FAD は巨大な分子の内部に埋もれているために FAD から直接電極に電子を受け渡すことができない。そのために、メディエータを利用することによって電極への電子伝達が可能になった。

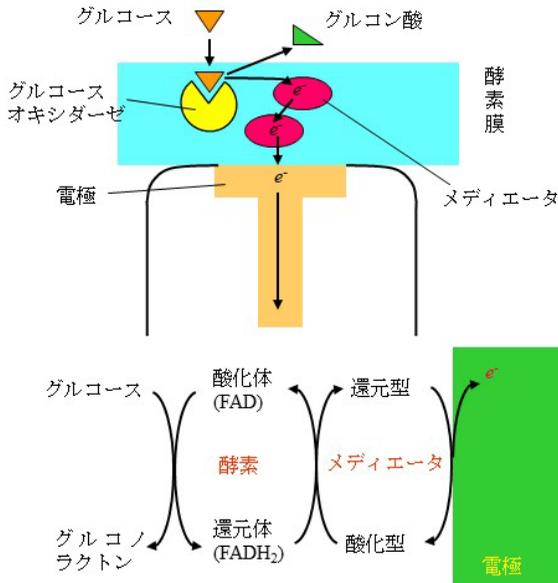


図 3・4・4 メディエータの役割

メディエータを使用する利点は、酵素反応に酸素が必要でない。高濃度のグルコースを測定するには、酵素反応に必要な酸素量が不足すると電流値が飽和して正確なグルコース濃度を測定できない。このほかには、血液中には、電極反応する成分が存在する。アスコルビン酸、尿酸、アセトアミノフェンがそうである。この電極活性物質の存在によっても電流値が増加するので正確なグルコース濃度を測定することはできない。この対策としては、妨害物質を除去する膜を電極上に使用されているが、メディエータを使用することで更に妨害物質の影響を抑えることができる。先に述べた過酸化水素電極型のグルコースバイオセンサでは、過酸化水素を検出するためにアノードを +0.6 V に設定する。これに対し、多くのメディエータを使用した場合にはアノードを +0.3~0.4 V でよい。より低い電位で検出に十分な電流値を得ることができる。アノード電位が低いと電極活性物質と電極反応によって生じる電流を少なくすることができるので正確な血糖値を測定することができる。このセンサは、一型糖尿病患者の血糖値管理には欠かせないが、健康な人や糖尿病予備軍の人にとっても、普段の健康管理に利用して、予防医

学に貢献できる。

最近の動向は、ナノテクノロジーの進歩により、ナノ構造を持つ物質の作製評価が進み、それらのバイオセンサの利用が顕著である。ナノ材料のナノ構造のサイズレベルは、生体分子のサイズとほぼ同等になり、生体分子と信号変換素子を組み合わせる際に、その界面構造の構成制御がより精密容易になり、高機能なバイオセンサの報告が増えている。ナノ材料の中でも、カーボンナノチューブが特に多く利用されている。カーボンナノチューブについては、S2 群 2 編 3 章に記載されている。

### 1-3-5 生物センサ