

OVERVIEWS (3)

物 理 セ ン サ

高 橋 清

東京工業大学工学部電子物理工学科 〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1

(1984年4月5日 受理)

Physical Sensors

Kiyoshi TAKAHASHI

Department of Physical Electronics, Tokyo Institute of Technology
2-12-1, Ohokayama, Meguro-ku, Tokyo 152

(Received April 5, 1984)

Physical sensors are reviewed. What is the physical sensor? How does the physical sensor differ from the chemical sensor? What kinds of physical effects can be applied to the physical sensors? These questions are answered in this paper. The present status and the future of physical sensors, optical, magnetic, temperature, and, pressure sensors, are described.

1. はじめに

最近“化学センサ”という言葉は、よく耳にする。本誌の化学センサ(1)の執筆者である清山哲郎先生の編まれた“化学センサ”(講談社, 1982年)という立派な単行本も出版されており*, 同じく清山先生によって組織された“化学センサ国際会議”も昨年9月我が国で開催された。それに対して“物理センサ”という言葉は, あまり耳にしない。それは今までセンサと云えば, 物理センサを指す場合が多かったので, あえて物理センサと呼ばなかったためであろう。

本稿では, 先ず物理センサとは何かについて考えてみたい。それから物理センサの現状と将来像について表面科学の立場からながめてみる。

2. 物理センサと化学センサ

物理センサとは, 物理量を電気信号に変換するもので, 化学センサは, 化学量を電気信号に変換するものと云えるであろう。たとえば, 光, 温度, 磁気を検出して電気信号に変換するものが物理センサであり, 特定の化学物質の種類や濃度を電気信号に変換するものが, 化学センサであろう。

われわれ生体の五感をみでみると, Table 1 に示すように, 視覚, 聴覚, 触覚は物理センサで, 嗅覚, 味覚は化学センサである。

物理センサは, 以前からある程度確立されたものが多く, 光や音, 磁気などの物理量を取り扱うこと自体, 比

Table 1 Human and artificial sensors

人間の感覚	センサ	効 果	現 象
視覚 (目)	光センサ	光導電効果 光起電力効果 光電子放出効果 フォトン・ドラッグ効果	物理現象
聴覚 (耳)	圧力センサ	圧電効果 歪抵抗効果	物理現象
	磁気センサ	磁歪効果 磁電効果 ジョセフソン効果	
触覚 (皮膚)	圧力センサ	圧電効果 歪抵抗効果	物理現象
	温度センサ	熱抵抗効果 熱電効果 光電効果	物理現象
嗅覚 (鼻)	ガスセンサ 湿度センサ	吸着効果	化学現象
味覚 (舌)	味センサ	未開発(?)	化学現象

* 最近同じシリーズで, 鈴木周一編: バイオセンサ (1984) が出版された。

Table 2 Physical sensors and chemical sensors

	物理センサ	化学センサ
主 役	電 子	イ オ ン
機 構	単 純	複 雑
センシング法	ディジタル	アナログ
選択性	容 易	困 難
絶対量検出	容 易	困 難
開発の難易	易	難
今後の発展	中	きわめて大

較的容易であり、かつ物理量を電気信号に変換すること、あまり問題はない。それは電気量自体が物理量であることから明らかである。したがって物理センサは研究開発が比較的行なわれやすい面をもっている。

化学物質の種類や濃度といった化学量に対しては、人間は嗅覚、味覚で感知しているが、それに対応するセンサはあまり開発されていない。それは化学物質のどのような物理量、あるいは化学量を利用するか、またいかにしてそれらの量を電気信号に変えるか、必ずしも簡単ではないからである。

Table 2 は物理センサと化学センサを対比しながらそれらの性質を示したものである。物理センサの主役は電子（含む正孔）であるが、化学センサの主役はイオンである。この電子によるか、イオンによるかが、物理センサと化学センサの性質を本質的に決めており、それに全てが集約されているように思われる。

電子はその種類が1つしかない。これに対してイオンはいろいろな種類のものがある。その結果、物理センサはきわめて単純明快であるが、化学センサは複雑に変化に富んでいる。

物理センサの場合には、極端な表現を許していただけるならば、そこに電子が“あるか否か”の2つの場合しかないで、極めてディジタル的である。これに対して、化学センサは、“どのようなイオンがあるか”ということになり、性質が連続的に変化するもので、いわゆるアナログ的である。その結果として、たとえばガスセンサ（化学センサ）にみられるように、アナログセンサで選択性をもたせようとする、かなり困難である。それに対してディジタルセンサである物理センサでガスを検出する場合、後に述べるように、たとえばスペクトル応用計測技術、あるいはレーザレーダなどの手法を用いて、ガス分子による光吸収波長の特徴性を利用すると、選択性をかなりはっきりもたすことができる。すなわち、ディジタル（物理）センサでは、アナログ（化学）センサよりも容易に選択性をもたせることができる。

Table 3 Classification of the field laws

	力 学	熱	静電	電磁	光	波動	化学
力学	アルキメデスの原理 ニュートンの運動法則 エートヴエッシュ効果 ストークスの法則 万有引力の法則 コリオリの力	ボイル・シャルルの法則 クラペロン・イ・クラウスの式	静電容量 パシンの法則		回折現象 光波干涉	ドップラー効果 管の共鳴	ヘンリーの法則
熱					プランクの法則 ステファン・ボルツマンの法則		
静電	クーロンの法則 電気毛管現象 界面動電現象						
電磁	ピンチ効果 アンペールの法則		ファラデーの法則	ビオ・サバールの法則	制動放射	磁気分散	ファラデーの電気分解の法則
光	放射圧				スネルの法則 クリスチャンセンの法則 全反射		
化学	ラウールの法則	氷点降下					

3. 物理センサと物理効果

物理センサには、各種の物理効果が使われている。ここではそれら物理効果を逐一説明することはさけて、体系的に分類してみたい。

センサ側からみた場合、物理効果（法則）の分類法には、いくつかあるがここではその内の2つの分類法すなわち

1) 物理学サイドからの分類法

2) エレクトロニクスサイドからの分類法

について触れてみたい。

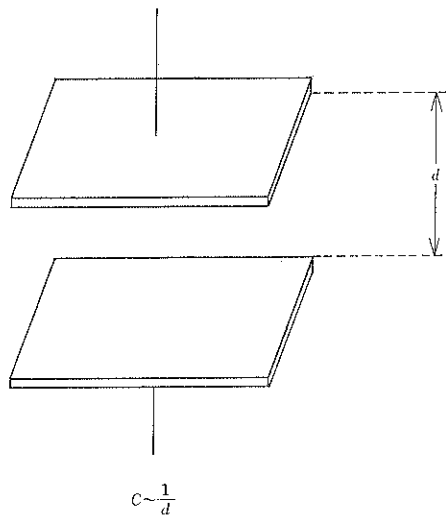


Fig. 1 Electrical capacitance of parallel flat plates.

3.1 物理学サイド（物理法則）からの分類法

森村，山崎両氏は，

a. 場の法則

b. 物質法則

に大別している*。

Table 3 は前者の“場の法則”を分類したものである**。これは，物質の空間分布配置には依存するが，物質固有の性質には依存しない。たとえば **Table 3** の力学—静電の項にある静電容量を例にとると，**Fig. 1** に示すように平行平板間の静電容量は，平行平板間の距離に反比例する。この効果を利用して機械的変位を電気信号に変換することのできる物理センサを作ることができる。このように場の法則を用いたセンサは，物質の性質に依存しないので，外乱の影響を受けにくい，互換性の高いセンサを作ることができる。

これに対して，物質法則を用いたものは，物質の性質に強く依存する。むしろこの物質の性質の依存性を積極的に利用してセンサを作ろうとするものである。

Table 4 に物質法則の分類を示す**。例えば同表の光—電磁の項の光導電効果をみると，光導電の生じる限界波長 $\lambda(\text{\AA})$ は

$$\lambda = \frac{12394}{E_g(\text{eV})} [\text{\AA}]$$

で表わされるように，その物質の禁制帯幅 E_g で決まる。

Table 4 Classification of the matter laws

	力学	熱	静電	電磁	光	波動
力学	フックの法則	ジュール・トムソンの法則	摩擦電気圧電効果 熱弾性効果	ピエゾ抵抗効果 電気効果 ピラリ効果 ヴェルトハイム効果	光弾性	
熱	熱膨張	デュロン・プティの法則 ニュートンの冷却法則 リーギール・デュック効果	焦電効果 ヴィーデマン・ランツの法則 熱電子効果	ゼーベック効果 キュリー・ヴァイスの法則		
静電	逆圧電効果	ペネディク効果	残留電圧効果	コルビノ効果	ポッケルス効果 カー効果 エレクトロルミネセンス グッデンポール効果 デシエース効果 シュタルク効果	
電磁	ジュール効果 ヴィーデマン効果	トムソン効果 エッチングスハウゼン効果 ジュール熱 ベルチエ効果	ネルンスト効果 ホール効果 ウィーガト効果	オームの法則 磁気抵抗効果 核磁気共鳴	ファラデー効果 コットン・ムートン効果 カー効果 ゼーマン効果	ドハーヌーヴァン・エレン効果
光			光起電力効果 デンバー効果 光電磁効果 ベクレル効果	光電子放出 光導電効果	ラマン効果 ブリュアン効果	
波動					偏光面回転	

* 両氏はもう少しきめこまかく分類している（森村，山崎：センサ工学，朝倉書店，1982）。

** センサの原理と使い方（1），コロナ社，1983。

Table 5 Physical effects for sensors

エネルギー制御形	エネルギー変換形
抵抗 インダクタンス 容量 歪抵抗効果 磁気抵抗効果 熱抵抗効果 光導電効果 磁歪効果 ホール効果 イオン化効果 ジョセフソン効果	幾何学的制御 圧電効果 磁歪効果 熱電効果 光起電力効果 光電子放出効果 ピロ電気効果 フォトン・ドラッグ効果 熱磁気効果 熱電磁気効果

現在開発されている物理センサの多くは、この物質法則を利用したものが多い。物質法則を利用したセンサは、物質の性質に強く依存するために、場の法則を利用したセンサに比べて、信頼性、互換性に若干問題がないわけでもない。しかし現在ではこれらの点はほとんど克服されており、むしろ物質の性質の依存性を利用して、後述のように物質（材料）設計の思想が進みつつある。

3.2 エレクトロニクスサイドからの分類

ここでは物理センサに用いられている物理効果を、エレクトロニクスサイドから分類してみよう。

Table 5 はセンサに用いられる代表的物理効果を、

- a. エネルギー制御形（能動センサ）
- b. エネルギー変換形（受動センサ）

から分類したものである。

エネルギー制御形は、エネルギーを外部から供給してやる必要がある。例えば磁気抵抗効果や、歪抵抗効果は、抵抗値が磁界や圧力によって変化するが、磁界や圧力が電子系にエネルギーを与えるわけではない。エネルギーはもっぱらセンサに接続された電源から供給されるのみであって、まさに信号の形態のみが変化している。

後者のエネルギー変換形は、いわゆるエネルギーの変換素子で、光起電力効果を利用した p-n 接合などはその例で、外部から電源を加えてやらなくても、光信号を直接電気信号に変換することができる。

以上センサに用いられている諸効果を、物理学サイド、ならびにエレクトロニクスサイドからながめて分類してみた。この内のどの効果をセンサとして選ぶかは、その対象量と計測システムにどれが一番マッチするかで選ばなければならない。その選択、あるいは組合せによってセンサシステム全体の精度が決定される。たとえば変位を電気量に変換する場合、コンデンサを用いて直接変換するか、あるいは変位を一度光または磁界の変位に

変えてから、光电または磁電効果を用いて電気量に変換するかの優劣を検討する必要がある。

これらの効果に基づくセンサ用材料としては、金属をはじめ、半導体、絶縁体、磁性体、強誘電体、超電導体など、種々のものがあるが、特に半導体材料は多く用いられている。

4. 物理センサの現状

Table 1 にしたがって物理センサの現状について、生体の五感と比較しながら一瞥してみたい。

4.1 視覚と光センサ

人間の目は、1億個の感光素子で像を検出し、その出力は網膜の視神経回路によって、空間的、時間的な処理を施された後、100万本にも及ぶ視神経を介して脳へと送られる。その結果我々人間は波長 370~780 nm の光（可視光）であれば、それが何色であるか、また立体像を瞬時（ $\sim 10^{-1}$ 秒）に検出することができる。

それに対して光センサは、例えば標準テレビの解像度が 500×400 程度であることを考えると、人間の目は桁違いによいことがわかる。

一方ワンポイント光センサをみると、光センサでは波長の短い方は X 線、γ 線（波長 数 nm）から、長い方では mm の遠赤外まで検出できる。また応答速度は、 10^{-9} 秒程度と極めて速く、人間の目の応答速度（ $\sim 10^{-1}$ 秒）とは比較にならない。

光の検出感度をみると、人間の目で感じるのに必要な最小の光子数は、波長にもよるが 10 数個程度といわれている。光センサの検出限界も数個の光子で充分である。また超高感度の光電子増倍管を用いた光センサでは、文字通り 1 個 1 個の光子を検出しているといっても過言ではない。

このようにワンポイントセンサに関する限り、人間の視覚よりも光センサの方が勝っていると云える。

空間分布検出としての光センサをみると、人間の視覚には及ばない。人間の目は単一の光センサではなくて、機能化と集積化が究極の状態にまで発達した三次元光センサである。“光の二次元像をとらえる”人間の目の二次元解像度の良さは、人それぞれが自覚するところである。二次元光センサの代表例は、先にあげたテレビカメラである。最近では全固体化二次元撮像デバイスの開発が進んできている。このデバイスは、基本的には単体の光センサを画素と同じ数だけ並べている。これらは CCD あるいは MOS 形固体カメラと呼ばれ、486×512、つまり約 25 万個の光センサを $1.4 \times 1.8 \text{ cm}^2$ の Si 上に集積化されている。しかしこれでも人間の 1 億個の集積度には及ばない。

人間の視覚は、瞬間にして三次元像（立体像）をとらえると同時に、計測したい物体像までの距離も測定できる。光センサでも距離の測定も行なわれはじめており、自動焦点カメラに用いられている。

最近赤外領域での二次元センサに対するニーズが高まっている。特に工業、農林、公害、防災、防犯、医用、海洋開発、宇宙開発などの分野では、赤外線センサは必要不可欠である。自然界に存在するすべてのものは、その温度に応じて赤外光を放出している。対象物の空間的温度分布を赤外光のイメージとしてとらえたものをサーマルマップと呼んでいる。

このように赤外線センサの利用が高まっているのは、とりもなおさず、人間の視覚では、赤外線は暗黒の領域で全く手がでないために、その暗黒部分を工学的センサで補おうとするためである。この赤外領域に関しては工学的センサの方が、はるかに人間の視覚に勝っている。

4.2 視覚と、圧力、磁気センサ

人間の耳では、16 Hz～15 kHz の音を聞きとることができる。聴覚の発達した犬では、800 Hz と 805 Hz の音を聞きわけることができる。

聴覚に対するセンサには、圧力、歪み、超音波、振動センサ、およびあえてあげるならば磁気センサがある。これらのセンサの性能を、生物のそれと直接比較するには無理があるが、生物の聴覚が、レーダや超音波探知機のシステムの設計者に価値あるインスピレーションを与えたであろうことは十分考えられる。

われわれ人間は磁気を感じることはいできない。しかしある種の渡り鳥の中には地球磁場の方向を感じとっているものがあるとも云われている。一方われわれが手にすることができる磁気センサは、基本的にはローレンツ力を利用したホール効果や磁気抵抗効果を利用したものが多い。最近新しい原理に基づく画期的なセンサが実用化されている。第1は核磁気共鳴吸収を利用した磁気センサで、第2は SQUID と呼ばれるジョセフソン効果を用

いた磁気センサであり、性能的にはほぼ極限状態にまで開発が進んでいる。Fig. 2 に示すように地球磁場の強さは 10^{-4} テスラ程度であるが、核磁気共鳴吸収形磁気センサでは地球磁場の1千万分の1、SQUID では1千億分の1という極微弱な磁束まで測定できる。

4.3 触覚と、圧力、温度センサ

圧覚、温度といった面では、生体の感覚器官が工学的センサに重要なインパクトを与えることはないと思われる。工学の扱う圧力や温度範囲が極めて広いのに対して、生体では極めて狭い範囲における制御しかないからである。

工学的にみると、温度センサは極めて重要であり、種類も非常に多い。温度の計測法は2つに大別できる。すなわち

- a. 接触形センサ
- b. 非接触形センサ

接触形温度センサの代表が、ゼーベック効果を利用した熱電対と、サーミスタを用いた抵抗温度計である。一方トランジスタやダイオードの特性が周囲温度によって変化するので逆に利用した温度センサが最近開発されつつある。このトランジスタの温度センサは、IC 化に適しており、IC 化温度センサとして開発されている。

非接触温度センサは、物体の放射する全エネルギーが物体の絶対温度の4乗に比例するので（ステファン・ボルツマンの法則）、放射光の強度を測定すれば、物体の温度をセンシングすることができる。

温度センサは、センシングできる温度範囲と精度が話題になっている。温度センサでは、下は絶対温度で 10^{-6} K から、上は核融合プラズマの何億度という温度までセンシングできる。暗黒の宇宙空間でも絶対零度ではないので、超高精度温度センサを用いれば、宇宙空間の温度測定も夢ではない。極低温センサは、前に述べたジョセフソン効果形熱雑音センサの登場によって初めて可能となった。また核四重極共鳴吸収という量子効果を利用した NQR (Nuclear Quadrupole Resonance) 温度センサでは¹⁾、 $-263^{\circ}\text{C} \sim 180^{\circ}\text{C}$ の範囲で分解能 0.001 度が得られる。NQR 温度センサはすでに市販されている。

5. 物理センサの最近の動向

物理センサの最近の動向として次の諸点をあげることができる。

1. 物理センサの量子化
2. 物理センサの質的変換
3. 物理センサのスマート化

5.1 物理センサの量子化

物理センサの量子化とは、ある意味では物理センサの

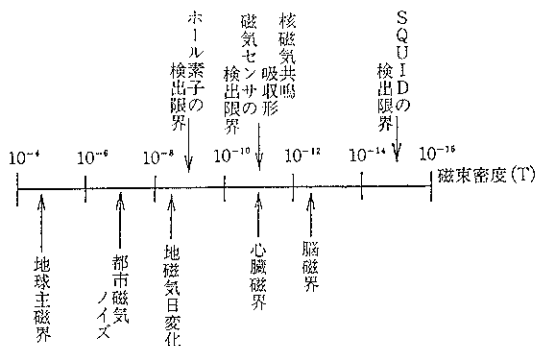


Fig. 2 Detective limits for magnetic sensors.

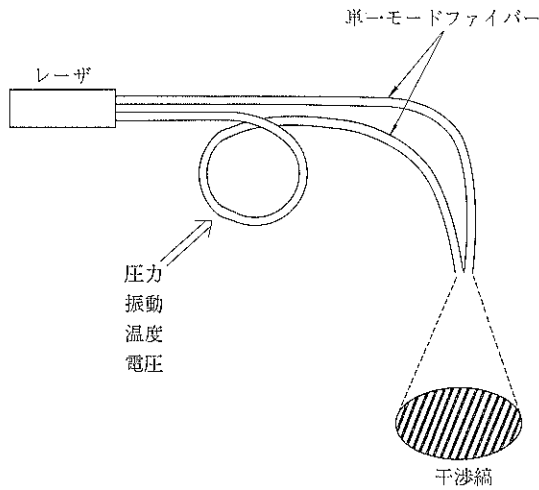


Fig. 3 Optical fiber sensor.

検出感度への挑戦と云うことができよう。先に述べたように、ジョセフソン効果を用いた SQUID による磁気センサは、量子効果を利用した代表的な物理センサである。その検出感度は従来のセンサの検出感度では遠く及ばない桁違いに優れたものである。また核磁気共鳴吸収形磁気センサ、ジョセフソン効果形熱雑音温度センサなど、超高感度をもったセンサは、いずれも量子効果形センサである。

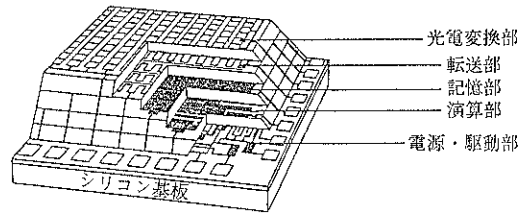
5.2 物理センサの質的変換

物理センサの開発動向をみると、“量から質へ”の転換がみられる。光センサを例にとると、従来の光センサは、街路灯の点滅用光センサをあげるまでもなく、光の強弱をセンシングしている場合が多かった。これは光の“量”をセンシングするものである。ところが最近の光ファイバー自身をセンサに用いた光ファイバーセンサは²⁾、光(コヒーレント光)の位相差、あるいは光の振動数をセンシングの媒体として用いている。これは光の量ではなくて、光の“質”をセンシングの対象媒体に用いている。

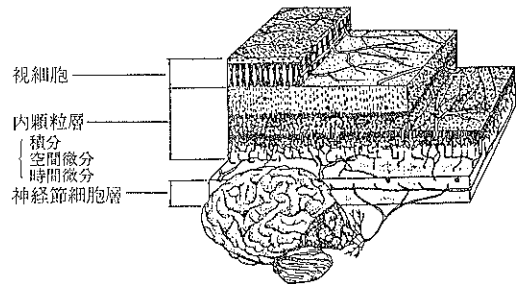
Fig. 3 は光ファイバーセンサの一例で、2本の単一モード光ファイバーの内の一方の光ファイバーに外力、たとえば圧力、温度、振動、音響、電圧などが加わると、伝搬光の位相が変化して、他の光ファイバーからの出力光との間に干渉縞が生じる。この干渉縞の変化によってセンシング対象量が求められる。

5.3 物理センサのスマート化

センサの将来動向として、よく“センサの集積化、多機能化”ということがいわれている。集積化とはハードウェア的な指向、多機能化とはソフトウェア的な指向を指す。これらはいずれも“センサの複合化(電子回路も



(a)



(b)

Fig. 4 (a) Artificial cell (One chip sensing device). (b) Illustration of the retina.

含めて)”である。センサの複合化は、たとえば1つの素子(デバイス?)で、感温+感湿、感磁+感圧、あるいは増幅器などの電子回路を含んだものといえよう。これは広義には“センサのスマート化”と表現できる。

スマートには“気の利いだ”，あるいは“利口な”などの意味があるように、センサに知能をもたせて、“判断能力”をもたせようとするものである。人間でいえば“五感のみではなく、五感と頭脳のドッキング”，すなわち，“センサ+コンピュータ=スマートセンサ”ということになる。このコンピュータとのドッキングによって、“対象の物理量をセンシングし、電気信号に変換して、そのデータを記憶し、蓄積し、さらに解析、統計処理して、必要とするデータの形に変換して情報を抽出する”ことができる。

現在も、もちろんこのスマートセンサは開発されている。しかし現在のスマートセンサは、センサとコンピュータとのそれぞれの組合せによるハイブリッド形である。これからのスマートセンサは、Fig. 4(a)に示すように、1つのチップ上に、センサとコンピュータをモノリシックに集積化したものである。これは Fig. 4(b)に示した人間の網膜の構造とよい一致をみることができる。したがって Fig. 4(a)のような一体化されたスマートセンサは、正に人工細胞であろう。わが国では現在この人工細胞に向けて国家的プロジェクトで研究開発が進められている。

1. 化合物半導体 (Eg: 不連続可変)
 - 3元合金 (Eg: 連続可変)
 - 多元合金 (Eg, L: 独立連続可変)
 2. 人工格子 (超格子)
 - 実空間設計 (絶縁体 → 導体, 高温超電導, ……)
 - 運動量空間設計 ($m^* \rightarrow \mu$: 設計)
- Eg: 禁制帯幅, m^* : 実効質量
L: 格子定数, μ : 移動度

Fig. 5 Classification of material design

6. センサ用機能材料の創出

最近センサ材料の創出が行われはじめています。本稿では、特に表面科学に関係の深いこの分野について、少し触れてみたい。

“センサ用材料, すなわち機能材料”といえるほど、機能材料はセンサに不可欠の材料である。機能材料には金属, 半導体, 誘電体, 磁性体, 生体など、ひじょうに広範囲にわたっており、現にいろいろな材料がセンサ用材料として使われている。

ところが今まで使用されているこれら機能材料をみると、“材料にこのような性質があるので、その性質を生かしてセンサを作ろう”という材料の性質優先の思想のもとづいている。ところが最近の機能材料は、全くその逆で、“このようなセンサを作りたい。ついてはどのような機能材料を設計したらよいか”という“機能材料設計”の思想がとり入れられはじめた。

最近分子生物学の分野では“遺伝子制御”すなわち“遺伝子組換え”の研究が行なわれて、新しい生物の誕生も伝えられている。同様のことが、機能材料の代表である半導体材料の分野でも活発に行なわれはじめています。すなわち遺伝子に相当する原子あるいは分子を、任意に組換えていまで天然にない新しい機能材料を創り出す試みである。

半導体の分野における遺伝子組換えは、Fig. 5に示すように2つの潮流に分けることができる。すなわち、

1. トランジスタの誕生間もない1950年代初期の、Welkerによる化合物半導体の合成。
2. 固体中のポテンシャルの周期構造を制御することによる新しいエネルギー帯構造をもった材料の創出。

1の遺伝子制御の思想は、“偶数価原子から成る固体は絶縁体(含む半導体)である”。という量子力学的結論のもとづき、また2は、“固体中のエネルギー帯構造は、周期ポテンシャルの構造によって決まる”，という思想のもとづいている。これら2つの思想は、いずれも“固体物理学における今世紀最大の理論”といわれている“固体の帯理論”に源流をおいている。

“偶数価原子から成る固体は絶縁体である”，との固体の量子論の基礎にたちかえって、Welkerは“Ⅲ価の金

属とⅤ価の金属を1対1に混合(?)すると、平均Ⅳ価の固体、すなわち絶縁体ができる”という思想から、GaAsなどのⅢ-Ⅴ族化合物半導体という、天然には存在しない半導体を作り上げた。これにより、光センサ等の性能を支配する禁制帯幅を不連続的に制御することが可能になった。この思想をさらに拡大して3元混晶半導体にすると、禁制帯幅を連続的に制御できる。しかしセンシングデバイス等が複雑になると、禁制帯幅のみではなく、格子定数も独立に制御できることが望まれる。3元以上の多元混晶にすると禁制帯幅と格子定数を独立に、連続的に制御することが可能で、現在広く光センサ用材料に用いられて実用化されている。

ところが最近の機能材料の創出設計法は、“固体の帯構造は、ポテンシャルの周期構造によって決まる”という量子力学的結論をもとにしている。すなわち新しい周期ポテンシャルを人工的に作り出すことによって、新しい機能材料を創り出す思想である。具体的には人工超格子構造、すなわち多層極薄膜構造によって、新しいエネルギー帯構造をもった新機能材料を設計し、所望のセンサを生み出そうとする思想である。この思想をもとにして、次のような機能材料を創出することができる。

- ① 新しいポテンシャルの周期構造による mini(or sub)-band を利用することにより、実効的禁制帯幅を連続的に、任意に変化させることができる。したがって、例えば任意の吸収端をもつ光センサを作ることができる。
- ② 運動量空間 (k 空間) を制御することによって、Fig. 6に示すように間接遷移半導体同志で、直接遷移半導体の創出が可能である。
- ③ 運動量空間 (k 空間) の曲率、すなわち d^2E/dk^2 の制御の可能性の結果として、キャリアの実効質量、換言するとキャリアの移動度の制御も可能性があり、新しいセンサ材料、例えば磁気センサ用材料として期待がもてる。

またその他に、例えば Fig. 7に示すような超格子構造により、電子と正孔のイオン化率の比を大きくすることができ、これを用いた低雑音超格子アバランシェ・フォトダイオードの光センサが開発されている³⁾。

さらに超格子構造を用いると、従来の超電導体よりも高い温度で超電導を示す BCS 理論にはしたがわない材

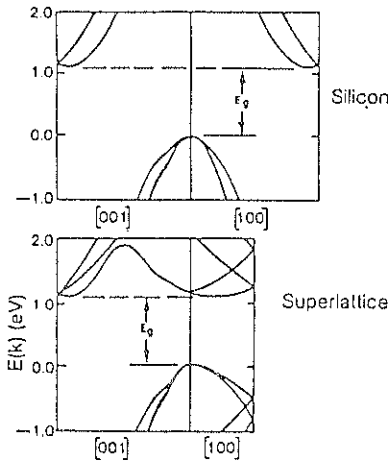


Fig. 6 Typical electronic structure in the longitudinal [100] and transverse [001] directions of the superlattice. Top panel, bulk Si bands. Bottom panel, folded bulk bands in the Si-Ge superlattice minizone.

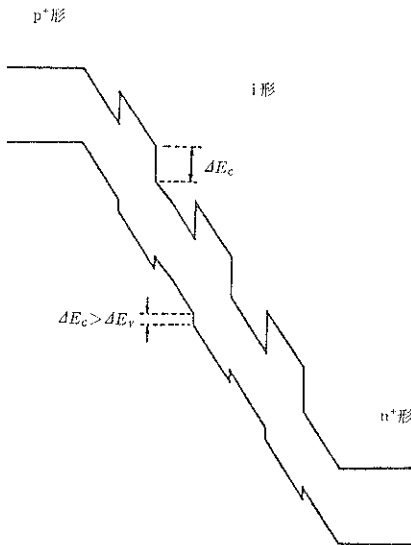


Fig. 7 Energy band structure of the superlattice avalanche photodiode.

料の出現の可能性も秘めている。そうすると、かなり高温で動作する SQUID 形センサも夢ではないかも知れない。

これからは、このように新しい機能材料を設計・創出して、新しい機能をもったセンサの展開が行われるものと思われる。

7. おわりに

センサの機能、材料もきわめてバラエティに富んでいる。物理センサのみならず、例えば吸着現象を利用したガスセンサをはじめとする化学センサ、あるいは、センサ用機能材料の創出の手法でもみたように、センサと表面科学とのかかわりあいは極めて強い。今後このかかわりあいは益々強くなるものと思われる。

これらのセンサの機能・構造をながめた場合、物理センサ、化学センサ、生物(バイオ)センサが一体となり、かつ Fig. 4 に示したように他の処理機能、蓄積機能等が一体になったものであろう。生体ではこれらが細胞に集約されている。この意味で、人間の細胞は完全に複合化されたスマートセンサと呼ぶことができる。人工細胞はこの生体細胞に複合化されたスマートセンサと呼ぶことができる。人工細胞はこの生体細胞にどれだけ近づくことができるのか。あまりにも距離がありすぎる。

しかし現代の科学技術は、それに敢然と挑戦し、ある分野では(磁気、超音波、赤外線センサなど)、それを超えようとしている。人工細胞の出現の一日も早からんことを期待して筆をおく。

文 献

- 1) A. Ohte, and H. Iwaoka: IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, **IM-25**, (1976) 357.
- 2) 松村宏善: 日経エレクトロニクス, 1981年7月6日, p. 154.
- 3) R. Chin, H. Holonyak, G. E. Stillman, J. Y. Tang and K. Hess: Electronics Letters, **38** (1980) 467.

総合的な文献として

- 森村, 山崎: センサ工学, 朝倉書店 (1982).
- 高橋, 小長井: センサエレクトロニクス, 昭晃堂 (1984).