化学センサ

キーワード:

センサ, 電気化学電極, バイオセンサ

正員 森 泉 豊 栄

東京工業大学 工学部 電気電子工学科

1. はじめに

電気工学は物理学から派生したから、その技術も物理的である。従って電気学会E部門は、物理センサしか扱わない……と結論するのはまちがいである。物理センサに比べて少数であるが、化学センサは徐々に我々の生活に浸透し始めた。エアコンの湿度センサ、台所のガスもれを感知するガスセンサ、等が挙げられる。又、各種工業、環境計測分野においては気体中のガス成分、液体中のイオン、ガス分子、有機物を検出するために沢山の化学センサが使われている。加えて医用・生物学用にも化学センサが不可欠である。

この様な背景から、日本でも最近化学センサの研究開発が増えてきたが、欧米に比べると遅れているのは否めない事実である。例えば今年スウェーデンで開催された固体センサ国際会議(Transducer 95)では、研究発表の25%(563件中139件)が化学センサに関するものであった。これに比べて、本年6月の電気学会主催センサシンポジウムにおいては、16%(67件中11件)の発表が化学センサ関係であった。欧米(特にヨーロッパ)と日本で学会事情の違うこともあるが、この背景には何か大きな理由がありそうである。

日常生活において我々が扱う情報の大部分は、視覚情報及び聴覚情報である。したがってそれらの情報を電気信号に変えるセンサは、必然的に光センサや音のセンサになる。又、自動車や家庭電化製品の中には、温度、圧力、磁界、

光センサ、等の物理センサが沢山使われている。要するに日本が得意とする大量生産品には物理センサが多数使われており、日本の技術者(特に電気・電子工学技術者)は物理センサの技術開発に高い関心を持っている。これが日本において物理センサの研究者人工が多い主要原因である。それではヨーロッパで化学センサの研究者が多い理由は何であろうか。

次節で述べるように、一般に化学センサは学問的に難しい。したがって、その研究には長期間の基礎科学的な興味が必要である。このような地味なお金にならない基礎科学分野において、ヨーロッパの研究者はこつこつと取り組

むが、日本の研究者はそれから逃れようとする傾向がある。この傾向は進歩の緩やかな分野に見られるばかりではない。バイオ関係、医学、薬学、化学において基礎科学色の強い分野では、日本は研究者数も少なく世界的にも遅れている。この状態が、日本において化学センサの研究が少ない理由にもなっている。電気学会の化学センサの研究者数を増やすことは、日本の基礎科学の研究者数を増やす事にも通じるのではなかろうか。この点を意識して、本論文では化学センサの種々の問題点を述べ、今後の発展課題、将来の夢を語る事にする。

2. 化学センサの問題点

研究者人口の違いを反映して、化学センサの発達は物理センサに比べて遅れている。種々の原因が考えられるが、以下に述べる点が主要なものであろう。

2-1) 界面、表面現象

化学センサは検出原理として、界面、表面現象を使っており、物理センサは一般にバルク現象を使っている(図1)。化学センサにおいて検出対象となるイオンやガスは気体や液体中から供給され、センサの表面で電気化学反応や吸着反応を起し、電気信号に変換される。電気を伝える

a) 化学センサは界面、表面現象を使う
例えば、溶液中のイオン

b) 物理センサはバルク現象を使う
例えば

図1: 化学センサと物理センサの違い

Chemical sensors

By Toyosaka Moriizumi, Member(Tokyo Institute of Technology)

部分、すなわち電極金属や半導体部分の固体層は、反応を起こす界面において気相や液相と接している。このように相をしっかりと分離する結果、電気伝導に有害なイオンやガスが金属や半導体内部に進入しなくてすむ(言い換えると、そのような界面を作らないとセンサ特性が安定しない)。

一方、物理センサにおいては検出すべき光、磁界、温度等の情報は波動や粒子となってセンサ内部(現在では半導体が大部分)に進入する。その結果キャリアの発生、キャリア濃度の変化が起こり電気信号に変換される。すなわち物理センサはバルク現象を使っており、工学的に扱いやすい。

2-2) 選択性

第二の問題点は、特定な分子やイオンを検出するための選択性がなかなか得られないことである。イオンにしる分子にしる、その種類は非常に多い。従ってそれらの多数の種類に対し、高い選択性を発揮することは最初から難しい。この点、物理センサでは波動や粒子に対しては周波数、エネルギー、時間、等の基本変数が存在し、十分な解析理論が存在する。この事が物理センサの理論的背景となり、開発を容易にしている。

化学センサにおいても分析化学的な手法により分子、イオンを同定しながらセンシングする場合もある。しかし一般に化学分析には長時間を要し、リアルタイムを原則とするセンサの要求とは根本的に相容れない。そこで近年、ケモメトリックス的な手法が有望視されており、次説でそれを述べる。

2-3) 生体現象の複雑さ

ヒューマンインタフェース技術、医用技術においては、人間感覚や人間生理を正確に計測するためのセンサが必要である。これらのセンサの開発にあたっては、生体が化学機械であることが重要な意味をもっている。

我々は食べ物を食べ、化学的にエネルギーを取り出し、電気的かつ化学的コンピュータ(すなわち脳)で考え、その命令の下に化学エネルギーを使い筋肉(アクチュエータ、すなわち効果器)を動かし仕事をする。その反応過程を制御するために、化学情報を高感度、かつ高い選択性(特異性)のもとに検知するセンサ(受容器)が体内に存在する。医用センサ(特に臨床化学センサ)についても、体内の化学情報を検知するセンサが必要である。中でも生体内化学プロセスを利用した酵素センサ、微生物センサ、等のバイオセンサが注目を集めている。又味覚、嗅覚の機能を真似たセンサとして味センサ、匂センサがある。しかし、バイオセンサにしる、匂センサにしる、単離抽出できる酵素等の分子種も少く、生体機能自体の解明も不十分であることが、開発の障害になっている。

2-4) センシングの場

どんなセンサについても、“センシング場”は重要である。化学センサの場合は、気相、液相などの流体場である。特に気相は見えないため、化学情報の捕え方が重要である。

「ガス臭いののにガス警報器がならない」ことがよくある。原因は感度が悪いだけでなく、後述するようにガスや匂いが気流で運ばれる点を無視しているからである。

3. 化学センサの今後の発展

前節で述べた種々の困難を解決するために、以下の課題について検討してみる。

3-1) 界面の制御とナノケミストリー

化学センサではセンサと媒質の界面、表面部分から情報を取り出す。通常、化学的情報は気体や液体のバルク(体積とも言える)中のイオンや分子である。従って体積と表面の比が、検出すべき情報と検出できる情報の比に密接に関連する。この比は空間のサイズが小さくなると増大する。従ってバルク中の情報を効率良く検知しようと思えば、サイズを小さくしていくことが必要である。

生物はこの観点から反応場及び反応を検知する化学センサのサイズを小さくしている。反応の単位として細胞を考えれば、通常サイズは μm であり、細胞内小器官、タンパク質分子、DNAレベルを考えればまさに分子のサイズであり、 nm オーダーである。このような微小空間の化学は生物の独壇場であり、まだ人口的な化学及び化学センサがタッチ出来ない世界である。しかし最近ナノケミストリーと言う分野が現れ、ターゲットとする分子を捕束したり、反応空間をナノオーダーで製作、制御し、生産物を得ようとするようになった。

ナノケミストリー的手法を化学センサにも適用することが出来る。従来、電気化学電極や半導体ガスセンサでは、このような観点から界面表面を制御し、センサの効率や選択性を向上させる試みはない。将来の大きな発展の方向と考えられる。なお現在のマイクロマシニングの技術は、 10 nm オーダーの加工技術がせいぜいであり、 1 nm オーダーに到達していない。 1 nm オーダーとは既に大きな分子のサイズであるから、通常のマイクロマシニングの手法でこのオーダーを加工することは困難である。マイクロマシニング技術をナノケミストリーに応用することは、極限技術を究める点でも大きな意味がある。

3-2) ケモメトリックスと多次元センサ

既にガスセンサ、匂センサ^[1]、及び味センサ^[2]の分野で、選択性が少しずつ異なる多数センサの多次元ベクトル情報から、ガス、匂、味、等の識別が行われている。化学の分野において化学情報量を数量的に分析し、情報の最適抽出、反応の最適化、等を追及する分野をケモメトリックスと呼んでいる^[3]。これと関連して、数量的手法で化学情報を忠実に効率良く取り出すセンサをケモメトリックセンサと呼ぶことが出来る。味、匂を検出する多次元センサもケモメトリックセンサである。

前述の様に、化学センサの選択性を高く保ち、自由に制御することは難しい。多次元センサの手法を使うと、センサだけに高い選択性を付与する必要がない。原理的には少しずつ選択性が異なるセンサを用意し、前もって多数の予

備実験を行えば、目的とする化学物質に対して高い選択性をうることが出来る。しかし一般的には種々のノイズ、揺らぎ、干渉物質、等が存在するため、センサの選択性を目的に合せて設計する必要が生じる。今のところ充分な設計論がなく、今後の大きな課題である。

又、多次元センサと情報処理のアルゴリズムを用いたとしても、得られた出力が本当に所定の化学物質に関する情報なのか、疑問が常に残る。例えば、校正や学習を行わなかった対象がセンサ表面に来た場合はどうするか。センサの性能を常にある時間間隔で校正し、ある閾値のもとにセンシングシステムに警報や解答不能を出力させる、と言う常識的方法しか現在のところ解決法はない。

3-3) バイオセンサと自己修復

高齢化社会の到来と共に、家庭生活における使いやすい化学センサの必要性が高まっている。特に尿や排泄物、血液中に存在する化学物質を検知するバイオセンサが重要である。バイオセンサには現在大きな二つの制約がある。一つは人工的に大量に抽出出来る酵素の種類数が限られている。又、酵素反応によって発生する情報を電気信号に変換できるトランスジューサの種類が少ない。将来的には生体で行われているように、複数の酵素を使った反応系をセンサ表面作り込むことが考えられる。2 種程度の酵素を使った試みが既に行われている^[4]。

バイオセンサのもう一つの制約は、生体機能のほんの一部を使っているのみで、生体機能の本質とは大きな差があることである。生体中では分子や細胞を自己再生し、自己修復することが出来る。このような再生・修復を人工的に実現することは現在のところ出来ない。将来は化学センサに微小かつ信頼性の高い物質輸送機構を作り込み、適当な頻度でセンサ表面を清浄化し再生出来る技術が開発されるかもしれない。巨大な規模では、既に化学プラントにおいて反応装置の中の触媒をある頻度で再生させ、使うこと

が行われている。これに似たものを現実的なレベルで微小化し、センサ表面に作り込むわけである。

3-4) バイオミメティックセンサ

生物の化学情報受容の仕組みの巧妙さは、分子や細胞レベルに隠されているだけではない。味覚や嗅覚等の化学情報の受容の行動、感覚行動等にもその巧妙さが存在する。ここで、嗅覚における匂い、情報の流れ及びその受容行動を詳しく考えてみる。図 2 は人、犬等の匂い受容行動を分析したものである。我々は食物や飲料物を口に入れ、舌や喉の動きによりそれらを口から食道に動かす。その過程で飲食物は動き、加温され、匂いは蒸発し、呼吸の流れにより嗅細胞表面へ届く。一方これら飲食物を容器に入れ、鼻で嗅ぐ行動も重要である。呼吸を整え、注意深く匂い物質を嗅細胞に送る、いわゆる匂いを味わう行動である。

犬の嗅覚能力が優れていることはよく知られている。人の 100 万倍以上の能力を持つといわれているが、その秘密はあまり明らかにされていない。嗅細胞の数が多く、能力が優れている事は事実である。しかし、犬の受容行動自体も人間に比べてはるかに真剣である。匂いを嗅ぎ回り必死に動く。匂いの痕跡をたどっているわけである。痕跡が見つければ鼻を近づけ必死にクンクンと嗅ぎ回る。これにより匂いを着実に嗅細胞上へ導く。又、鼻を空気中に上げ匂いが運ばれる気流の鞘（それをプルーム、plume と言う）を確認め、さらにそれを辿る行動も見られる。これらのセンサや感覚器官を動かしセンシングする方法を、能動センシングと呼ぶ。

ガはフェロモンにより雌雄の誘引行動をとる。フェロモンはプルームにより運ばれ、ガはプルームの中をジグザグに飛びながら風上に向かう。又、蚕ガのように飛べないガの場合、雄は羽ばたきの風とプルームの相互作用（すなわちフェロモンを自分の方に導いたり、押しやる）により、匂いの方向を判定している^[5]。

図 2. 嗅覚における匂いと受容行動（能動センシング）

以上のように生体における匂いの受容行動は複雑であるが、その要点は「匂いをたどる」ことである。このような生物の行動をケモタクシス (chemotaxis) という。匂いはプルームにより運ばる。匂いの分子拡散速度は1時間で数10cm程度であるため、熱拡散により広がらず、気流の中に鞘状に閉じ込められている。従って気流を追跡出来れば匂いの元に到達出来る訳である。著者等プルームをキャッチし辿るタイプの能動センシングを真似し (mimick)、自走型のガスセンシングシステムを研究中である。既にクリンルームの気流の中を移動しエタノール臭をたどる実験に成功した^[6]。

著者等はまた、口の中に飲み込んだ飲料水中の匂い物質が、口から鼻へ移動する過程を模したセンシングシステムを研究中である。これに味センサ系を将来は合体させたい。舌の動きのような動的受容行動をセンシングに取り入れることも計画中である。このような味センサはケモタクティック (chemotactic) センサと呼ぶことができよう。

4. おわりに

以上、種々の発展課題を論じてきた。これらはいずれも興味を引くが非常に難しい問題である。しかも化学センサの研究は明らかに境界領域である。電気工学は半導体技術、情報技術、マイクロマシン技術、等の強力な武器を持っているが、それだけでは不十分である。他分野との協力、特に化学分野との協力が不可欠である。現在、電気化学協会に化学センサ研究会が存在し、活発な研究が行われている。E部門はこの研究会と緊密に協力することを約束している。具体的には化学センサ研究会で扱われてない部分、特に多次元センサ、マイクロ化学センサの分野、等にE部門の努力を集中し、会員の交流、研究会の共催、調査活動などを行い、双方の発展を図る予定である。言い換えれば電気学会でなければできない分野で化学センサの学問、技術の発展に協力するわけである。これにより、本論文で指摘したような将来課題、研究方向に多数の方々が興味を持たれ、E部門の会員が数年内に急増(?)することを期待して本論文を終える。

(平成7年10月9日受付)

文献

- (1)森泉:「匂いセンシングシステム」DENKI KAGAKU,62(3): p.207-211(1994)
- (2)都甲:「味覚センサ」朝倉書店(1993)
- (3)B.M.Wise and B.R.Kowalski, "Process Chemometrics: The Case for Chemometrics in Chemical Engineering," Computing and Systems Tech. Div. Communications, AIChE's CAST, 16(2): p.5-10 (1993)
- (4)M.Ohnishi, C.Ishimoto and J.Seto, "Observation of the Adsorption of Cytochrome c and Glucose Oxidase onto an Amphiphilic Monolayer at an Air/Water Interface by the Reflection Spectroscopy of Visible Radiation" Bull.Chem.Soc. Jpn., 68: p.230-236 (1995)
- (5)石田, 林, 中本, 森泉, 神崎「カイコガの行動を模倣したにおい源探知システムの研究」電子情報通信学会技術研究報告, OME95-7: p.35-40 (1995)
- (6)H.Ishida, Y.Kagawa, T.Nakamoto and T.Moriizumi, "Odor-source Localization in Clean Room by Autonomous Mobile Sensing System", Technical Digest of Transducers'95 · Eurosensors IX: p.783-786(1995)

森泉豊栄 (正員)

昭和17年2月17日生れ。

39年東京工業大学工学部電子工学科卒業。44年同大学院博士過程終了。同年助手。48年助教授。60年東京工業大学理工学交流センター教授。63年東京工業大学工学部教授。この間化合物半導体、SAW、有機半導体、バイオエレクトロニクスセンサなどの研究に従事。電気学会、IEEEなど8つの学会の会員。