味と匂いセンサの研究・開発動向

正 員 勝 部 昭 明 (埼玉大学)

Developments and Technologies of Taste Sensor and Odor Sensor

Teruaki Katsube, Member (Saitama University)

This paper reports recent research activities and developments of odor sensor and taste sensor. The application fields and market places of these sensors are expanding by the remarkable progress both in sensing devices and signal processing engines. These sensor developments are first reviewed by comparing the differences between odor and taste detection technologies. Then, the quantitative analysis method of taste sensor is discussed and finally mentioned about a flavor sensor consisting of taste sensor and odor sensor.

キーワード: 匂いセンサ、味覚センサ、センサ信号処理、パターン認識、風味センサ

Keywords: odor sensor, taste sensor, sensor signal processing, pattern recognition, flavor sensor

1. はじめに

人の五感に対応したセンサのうち、嗅覚と味覚のセンサは、その開発が遅れていることが指摘されてきた。ところが最近情報化システムからの需要の高まりやセンサの基本技術の発達等が契機となり匂いセンサ⁽¹⁾、味覚センサ⁽²⁾とも研究開発が盛んになっている。

匂いセンサや味覚センサは物質を測るセンサであり、測定対象となる物質は通常非常に多い。例えばコーヒーの匂いには 400 種類以上の揮発性有機化合物が含まれている。これらの成分をすべて測定することは GC/MS (ガスクロマトグラフィー/質量分析) などを使えば原理的には可能だが、大掛かりな分析プロセスとなる。またこれらの成分がすべて同定できたとしても匂いや味がわかるわけではない。現在匂いセンサといわれているものは、選択性は高くないが、いろいろな成分に少しずつ感度の異なるガスセンサを用い、これらの応答パターンから匂いを認識しようとするパターン認識型センサである⁽³⁾。この種のセンサは、1982 年英国 Warwick 大の Parsaud らによって最初に提案されたものである⁽⁴⁾が、その後ヨーロッパを中心に盛んに研究開発が行われ、現在では市販品も二桁のオーダーを数えるようになっている⁽¹⁾。

味覚センサの研究は匂いセンサに比べると遅れているが、都甲らにより脂質膜型センサが開発されたことを契機にして研究が活発になってきている⁽⁶⁾。食物の味は舌の表面にある味細胞で受容されるが、味細胞の表面は脂質膜とたんぱく質から構成されている。脂質膜センサはこのような味細胞の構造を模したものである。このように開発の過程は異なるが、味覚センサも匂いセンサ同様パターン認識型センサであることには変わりがない。即ち脂質膜により

非特異的に多くの呈味物質の情報を読み取り、これを信号処理して味を推定している。本稿では匂いセンサと味覚センサの研究の現状を紹介する。

2. 匂いと味を測るセンサ

<2.1> 匂いセンサ

今日匂いセンサと称されるものには大きく分けて 2 つの考え方があある。一つは、悪臭や特定の食品の匂い等を選択的に検出しようとするもので、我が国で活発に研究開発がおこなわれてきたものである。例えば H_2S のセンサ、口臭チェッカ、肉や魚の鮮度の測定センサ等がある⁽⁷⁾。これに対し複数のセンサを組み合わせる単独のセンサでは不可能な高機能センサを作製し、これを匂いセンサに応用しようとする研究がヨーロッパを中心に研究され、電子鼻 (electrical nose) と称されるようになっていく⁽³⁾。現在のガスセンサは特定のガスを検出するために開発されたものであるが、その選択性は必ずしも高くなく、他のガスにも多少の応答があるのが普通である。このことはまた、ガスセンサの応答には多様な情報が含まれていることを意味するものである。電子鼻はこの多様な情報の中からこれまでに得られなかった新しい機能を引き出そうとするものである。

匂いセンサに使用可能なガスセンサとしては多くの可能性があるが、実用化レベルで今日主に使われているセンサは、金属酸化物半導体、導電性ポリマ、感応膜を塗布した水晶振動子を用いたものである^(1,8)。この他匂いセンサに適合した材料設計や、新たな材料を開発しようとする研究も盛んである。たとえば感応膜の物性パラメータを系統的に調べ、機能的なセンサ設計を行おうとする研究⁽⁹⁾、溶解パラメータを用いたセンサ材料の設計⁽¹⁾、分子インプリ

図1 匂いセンサ、味覚センサの応答、信号処理、感性認識の概念図(a) 及びそれに対応した信号変換プロセス(b)
Fig.1 Sensor response, signal processing and kansei recognition of odor sensor and taste sensor (a)
and correspondent signal conversion process(b)

ントによる新しい材料の開発⁽⁹⁾などが試みられている。このような材料面からのセンサ開発の他に、測定技術を工夫しようとするアプローチもある。たとえば、過渡応答や周波数応答などの動特性の活用⁽¹⁰⁾、温度変化によるセンサの感度の違いを利用して少数のセンサから多くの信号を得ようとする試み⁽¹¹⁾、捕集管を用いたガスの濃縮・分離機能の活用⁽¹²⁾などがあり、また昆虫そのものの触覚を用いたセンサも報告されている⁽¹³⁾。センサ材料の詳細については優れた解説があるのでそれらを参照していただきたい⁽¹⁾。

<2.2> 味覚センサ

味覚センサとしては、現在脂質膜イオンセンサにより多くの成果が報告されているが、その他半導体集積化センサ⁽¹⁴⁾、イオン電極を用いたセンサ^(15,16)、酸化・還元電流を測定するセンサ⁽¹⁷⁾、磁気半導体を用いたセンサ⁽¹⁸⁾、超音波伝導を用いるもの⁽¹⁹⁾等が研究されており、これらが味覚センサに適用可能であることが示されている。

このような中でも脂質膜センサは今日の味覚センサ研究の端緒となったものである。ここではその概要を述べる。くわしいことは文献^{(2),(5)}などを参照していただきたい。

脂質膜型センサは、種類の異なる複数の人工脂質膜を有機膜中に固定化し、味物質が吸着した時に発生する膜電位を測定する。このセンサの構造および特徴は次のようである。①センサに用いられている脂質膜は、生体膜の脂質の

官能基を網羅するように選ばれ、また親水性・疎水性、正・負荷電状態等がバランスをとって装着されている。このため呈味物質の多様な属性が測定できる。②受容膜の最外層は脂質の親水基が液側に向いて並び、生体膜の外液側の単分子膜とよく似ている。またアルコールなどで表面の脂質を脱着しても内部の脂質が表面に表れるので元の状態にもどる。③測定誤差は1%以下であり、1年以上にわたって使用できる。

このように味覚センサとして優れた性能を有しており、また生体膜との類似性もある。このため人の感じる味覚の特徴を良く再現でき、現在種々の飲料や米、果物、酒類、牛乳、醤油など多くの味の測定が可能になっており、品質管理の為の実用化も進んでいる⁽²⁾。

3. 匂いセンサ、味覚センサの応答特性とその設計

図1(a)に匂いセンサ、味覚センサによる計測・認識プロセスを示す。入力である匂い・味物質の刺激($x_1, x_2, \dots, x_n$)に対しセンサはその種類に応じて固有の応答を示す。センサ応答($S_1, S_2, \dots, S_n$)は信号処理され特徴抽出や分類が行われる。特徴抽出が行われた信号($Y_1, Y_2, \dots, Y_n$)は最終的には感性認識手法が適用され感性表現が行われる。

前項で示したように現在匂いや味を測るセンサとしては様々な手法が試みられており、その応答特性にもいくつ

かの特徴がある。これらの中には図1のセンサ応答の欄にも示したように、線形応答(i)、指数関数的応答(ii)、シグモイド関数的応答(iii)等がある。

図1(b)に信号処理結果を表示する座標空間の概念図を示す。匂い・味物質を表す空間(①)はセンサ応答特性の空間(②)に投影される。応答が指数関数特性を示す場合、 n 個のセンサより得られる i 番目のサンプルの出力を S_i とすると、

$$S_i = a_{i0} + a_{i1}X_1^{k_i} + a_{i2}X_2^{k_i} + \dots + a_{in}X_n^{k_i} \quad \dots\dots (1)$$

のように表される。ここで x_i はサンプルの濃度である。センサが線形応答を示すときは、 k_i は1であるが、金属酸化物半導体では一般に0.5-0.9程度となる。材料が異なると応答は異なる。例えば有機材料では、ラングミュア型吸着の特性などを考慮する必要がある。

複数のサンプルについて線形応答の場合を考え、それらの応答をベクトル表示で表すと、

$$S = AX + A_0 \quad \dots\dots (2)$$

となる。 A は感度を表すマトリックスであり、 A_0 はベース値に対応したベクトルである。仮に今、すべてのセンサ応答が直交しており、お互いに相関がないとすると感度マトリックス A の対角要素はすべて1であり、非対角要素は0となる。この時は、入力 X は応答 S にそのまま投影される。しかし一般にはセンサ間には相関があるので、図(1)b-②のように応答 S の限定された空間に投影される。投影される空間の体積 V_n がセンサ性能の指標となる。また V_n 中における測定点間の識別はセンサの雑音によって制限をうける。即ち V_n と雑音の比からセンサの性能評価ができる。最近このような立場からセンサの設計を行おうとする試みが提案されている⁽²⁰⁾。また V_n と雑音の大きさを数値化してセンサ標準を定めようとする提案もある⁽²¹⁾。匂いセンサや味覚センサには多種の材料が使われていてその特性には互換性がない。センサの材料にかかわらず共通の設計指標が与えられ、かつ特性の標準化が行われると匂いセンサ、味覚センサの研究に大きな発展をもたらすことが期待できる。

4. 匂いセンサと味覚センサの信号処理

センサ応答(S)に投影された匂いや味の属性は信号処理により特徴抽出や分類が行われる。匂いや味の情報処理では、まず分類が大切であり、そのための研究がこれまで主に行われてきた。例えば、おいしい水の選別を行うのに味覚センサは極めて有能である。人の舌では、軟水と硬水の区別は出来るが、軟水に属する異なった水を区別することは大変むづかしい。しかし脂質膜型センサや、イオン電極型センサでは、軟水の種類も区別することは可能である。味覚センサとしてはしかし分類が出来ただけでは不十分である。味の感性表現が課題となる。このため味や匂いの感性指標で目盛りをつけようとする研究が精力的に行わ

れている⁽²⁾。

<4.1> 匂い・味の分類と特徴抽出

多チャンネルのセンサにより得られたデータから匂いや味の違いを分類し、視覚的に表示する手法として現在最も多く使われている方法は主成分分析である。この方法は、センサの個数の次元で表されているセンサ応答を、データの特徴が最も大きくなるような方向を見出してその方向を座標軸として表示するものである。結果として、多次元のセンサ信号が低次元の情報に圧縮されることになる。

一方、主成分分析はデータの差を強調する手法であるから、同一に分類されるべきデータの中に信号強度のバラツキがあるとこのバラツキもまた強調される。このことは分類だけに注目すると欠点であるが、品質の管理という立場からは重要な手法となる。特徴抽出を行う手法としてはこの他因子分析やクラスタ分析なども使用可能である⁽²²⁾。

一方、もっと確実な分類が必要な場合は判別分析やニューラルネットなどの手法を用いることが考えられる。判別分析法は、集団同士がなるべくよく区別されるように合成変数を作る。そのため、主成分分析と違って集団間の特徴をはっきりさせることが出来る。

<4.2> 味の感性表現

以上述べてきたように、味覚センサは「味」の識別のための研究が進んでおり、主成分分析を行って味の違いを図で表示することが有力な手段となっている。しかしこのように図表で表示することが出来たとしても、そのままではその図の横軸、縦軸がどのような味に関係しているか不明である。このためこの軸に味の目盛りをつけること、即ち味の感性表現の研究が行われている。味の感性表現には異なった2つの立場がある。一つは官能検査で目盛りをつける手法であり、もう一つは味の軸をまず決定し、それに食品の応答パターンを投影する手法である。

官能検査による前者の手法はこれまで主に研究されてきた方法である。例えばビールの測定の場合、多種類のビールの測定パターンを主成分分析して多次元座標で表示する。次に特徴的なビールをいくつか選び、その位置する方向から「さわやかさ」や「こく」といった味の軸をきめる。この方法により、ミネラルウォーターやお茶、日本酒、果物などの味の感性表現結果が報告されている²⁾。

これに対し後者の方法では、食品の味を特徴づける物質に着目し、そのセンサ応答で味の軸を決定する。この手法は一度スケールを決定するとそれ以後は官能検査を用いる必要がないので実用的価値の高いものである。しかしこの場合食品の味を特徴づける物質がみつかるかどうかという問題がある。辛い味には5基本味という味覚を特徴づける物質がある。我々は基本味の目盛りのついた座標軸を重回帰分析で求め、その座標軸上にお茶味の表示を行い良好な結果を得ている⁽²³⁾。また都甲らは医薬品の苦味の軸を次のような方法で決定している⁽²⁾。まず基準となる試料(医薬品)を用い、これに種々濃度の異なるキニーネを添

加して苦味の異なるサンプルを用意する。これらを味覚センサで測定し、測定結果を主成分分析する。このときサンプル間の主要な違いは苦味であるから、第1主成分軸は苦味の大きさに対応している。一方味覚の評価では、 τ 尺度なる人の味覚感度と味溶液の強さを表す関係式がある。従って測定結果の第1主成分軸と τ 尺度の関係を求めると味覚センサの測定結果から味強度(τ 尺度)を算出できる。

5. 風味センサ

人の味覚は、味細胞が検出する狭義の味の他に匂いの影響も受ける。匂いを考慮したときの味を風味といっているが、最近味覚センサと匂いセンサを融合した風味センサの開発も行われている。具体的な研究例はまだ少ないが、現在までに次のようなことがわかっている⁽²⁴⁻²⁶⁾。①食物や飲料の味の違いに対し応答パターンは味覚センサ、匂いセンサでは大きな違いがある。即ち呈味物質の異なった属性が検出される。②味覚センサ、嗅覚センサ単独では似通った味の識別が困難なものがあるが、融合して用いると明瞭に識別できるようになる。これはまた官能検査の結果とも良い相関がある。③食物を口に入れる直前の匂いと咀嚼中の匂いでは味に与える効果が異なる。この性質を利用すると味覚センサの性能を向上させることが可能である。

風味センサの研究は始まったばかりであるが、センサ融合に関わる新しい信号処理の技法を開発する必要もある。

6. おわりに

匂いセンサ、味覚センサは信号検出デバイスおよび信号処理手法の研究が共に進み、食品産業における製造プロセスや品質管理を始めとして実用化が広がりつつある。センサデバイスの設計や信号処理の手法も多くの研究成果が報告されるようになった。これらの成果はまだ分散的であるが、すべてのセンサに共通な設計指標を導入しようとする試みや、センサ標準を定めようとする提案も行なわれている。

見逃してならない重要なことの一つは、これらのセンサから嗅覚や味覚の特性をある程度再現する結果が得られていることである。生理学的にも嗅覚や味覚のメカニズムはまだ十分に解明されておらず、センサにはそのメカニズムの解明に寄与するという役割もある。

(平成14年2月6日受付)

文 献

- (1) 南戸秀仁：感性バイオセンサ，都甲潔編（朝倉書店），186-225（2001）
- (2) 都甲潔：感性バイオセンサ，都甲潔編（朝倉書店），130-185（2001）
- (3) J.W.Gardner and P.N.Bartlett: Sens. Actuators B 18-19, 211-220（1994）
- (4) K.Persaud and G.H.Dodd: Nature, 299, 352-355（1982）
- (5) 谷口晃，池崎秀和：ぶんせき 8, 408-414（2001）
- (6) 島ノ江憲剛：ぶんせき 8, 663-668（1999）
- (7) 三浦，高橋，阿武，玉置，浅野，山添：電学論 E, 117, 306-313（1997）
- (8) 井手純一：電学論 E, 117, 298-301（1997）
- (9) H.S.Ji, S.McNiven, K-H.Lee, T.Saito, K.Ikebukuro and I.Karube: Biosensors & Bioelectronics 15, 403-409（2000）
- (10) C.Delpha, M.Siadat and M.Lumbreras: Sens. Actuators B77, 517-524（2001）
- (11) P.Mielle and F.Marquis: Sens. Actuators B76, 470-476（2001）
- (12) 喜多純一：エレクトロニクス, 1, 50-52（2001）
- (13) M.J.Schoning, S.Schutz, P.Schroth, B.Weisbecker, A.Steffen, P.Kordos, H.E.Hummel and H.Luth: Sens. Actuators B47, 235-238（1998）
- (14) Y.Sasaki, Y.Kanai, H.Uchida and T. Katsube: Sens. Actuators B 24-25, 819-822（1995）
- (15) 張，安彦，渡部，E. A. de Vasconcelos, 内田，勝部：電学論，118-E, 608-613（1998）
- (16) T.Yoshimura, A.Yoshida and Y.Aoyama: DENKI KAGAKU, 64, 1244-1253（1996）
- (17) S.Holmin, P.Spangaus, C.Krantz-Rulcker and F.Winquist: Sens. Actuators B76, 455-464（2001）
- (18) 長田，吉田，大豆生田，安穴，関，菊池：電学論 E, 117, 371-376（1997）
- (19) Y.Kojima and H.Kato: Sensors and Materials 13, 145-154（2001）
- (20) T.C.Pearce: Neurocomputing 32-33, 941-952（2000）
- (21) J.W.Gardner and P.N.Bartlett: Sens. Actuators B 33, 60-67（1996）
- (22) 相島鐵郎：ぶんせき，4，297-305（1999）
- (23) A.Yokoyama, H.Uchida and T.Katsube: Tech. Digest of the 17th Sensor Symposium, 283-286（2000）
- (24) 勝部昭明：食品機械装置 6，83-89（2001）
- (25) S.Baldacci, T.Matsuno, K.Toko, R.Stella and D.D.Rossi: Sensors and Materials 10, 185-200（1998）
- (26) F.Winquist, I.Lundstrom and P.Wide: Sens. Actuators B 58, 512-517（1999）

勝部昭明（正員） 1965 年名工大電気卒、1974 年東大博士課程了。工博。同年埼玉大・工・助教授。1980-1981 年米国ペンシルバニア大研究員。現在は埼玉大情報システム工学科教授。主な研究分野は半導体表面物性、電子情報デバイス、化学・バイオセンサ。