

味と香りの感性計測システム

誌名	日本食品科学工学会誌 : Nippon shokuhin kagaku kogaku kaishi = Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology
ISSN	1341027X
著者名	相良, 泰行
発行元	日本食品科学工学会
巻/号	56巻8号
掲載ページ	p. 429-443
発行年月	2009年8月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



味と香りの感性計測システム

相 良 泰 行[§]

(社)食感性コミュニケーションズ (FKC)

Kansei Measurement Systems for Taste and Flavor

Yasuyuki Sagara[§]

Food Kansei Communications, Corp. (FKC)

1. はじめに

近年、ヒトの感覚器官を人工的に模倣したセンシングシステムが「味覚センサー」、「匂いセンサー」などとネーミングされて商品化されている。これらのセンサーは計測システムの中の構成要素、すなわちコンポーネントとして、ヒトの感性を計測・評価する機能を含んでいる。従来のセンサー、例えば、青果物の糖度と酸度を同時に計測する「光糖酸度センサー」や匂い成分の分析に用いられている「ガスクロマトグラフィー」は測定対象の含有成分を分析し、その濃度を数値やグラフとして出力する機能を有している。しかし、これらの計測機器には、ヒトの感性を評価するコンポーネントが含まれていないために、ヒトは出力された数値やグラフから味や匂いの「強度」や「おいしさ」などを評価・判断しなければならない。すなわち、計測機器の出力はヒトの評価・判断を助ける情報としての役割を果たしていることになる。

他方、「米の食味計」は近赤外分光分析法により測定された呈味成分の濃度値とヒトの官能評価スコアとの関係から「おいしさ」の程度を数値として表示する機能を有している。すなわち、計測システムの中にヒトを感じる「おいしさ」を評価するコンポーネントが含まれている。このように、計測・評価系に人の感性、例えば「おいしさ」や「食嗜好」を評価する機能や尺度が組み込まれている機器およびシステムなどを「感性バイオセンサー」または「感性計測システム」などと従来の技術用語に「感性」を付記して区別している。

本稿では、生物の嗅覚を題材として知覚器官の機能や特徴を述べると共に、ヒトの味覚と嗅覚を人工的に模倣した「感性センシングシステム」の典型例として、「米の食味

計」、「味覚センサー」、「匂いセンサー」を、また、ガスクロマトグラフィーにより分離された匂い成分の強度と特徴をヒトの嗅覚により評価する「Gas Chromatography/Olfactometry」、すなわち、通称「GC/O」を利用して、インスタントコーヒー原液のアロマを保持するための最適凍結乾燥温度条件を探索した事例を取り上げ、これらの計測原理・特徴・適用例について概説する。さらに、脳波・脳磁場・fMRIなどの測定法を用いた嗅覚の脳内機序の解明に関する研究の進展状況を、感性計測システムを構築する立場から解説する。ここでは、筆者らが行ったアリナミン静脈注射による嗅覚刺激法を採用して、脳磁場計測システムやfMRIで脳機能の動態を考究した研究例を紹介する。

2. 生物のスーパーセンサー

生物は環境情報を検出し、また、仲間とコミュニケーションするためのセンサーを保有している。そのセンサーの特色は(1)高感度、(2)高集積化、(3)知能化、(4)生体に適したシステム構成にある¹⁾²⁾。例えば、コウモリは暗闇の中で餌となる小動物を追いかけて、障害物を避けながら自由に飛び回り、また、子供と通信するための超音波センサーを持っている。また、空港の税関検査やレスキュー隊で活躍する犬はヒトより優れた嗅覚を持ち、長い耳を持つウサギやシマウマは優れた聴覚で猛獣のわずかな動きを察している。これらの事実は、生物が高感度のセンサーを保有し、ある種の動物はヒトよりも優れたセンサーを備えていることを示している。また、蛾は一对の触角上に数千本分布する長さ数十ないし数百マイクロンの感覚毛からなる、高度に集積化された嗅覚センサーを備えている。雄の蛾はこのセンサーにより、数キロメートル離れたところにいる雌の性ホルモンを検知して興奮するが、仲間の種以外の性ホルモンに対しては興奮しないことが知られている。このことは風に流されて浮遊してくる数分子の性ホルモンを高感度で

〒101-0061 東京都千代田区三崎町 2-8-7 大庄ビル 3 階

[§] 連絡先 (Corresponding author), sagara@foodkansei.or.jp

感知し、同種の性ホルモンのみを識別する能力も兼ね備えていることを意味している。このようなセンサーは他種の生物との交雑を防ぎ、種の保存のために配偶行動を規制するために発達してきたものと考えられる。

一般に多くの生物は群をなして生活している。これは種の保存を効率的に行うためであり、そこでは群の秩序を保つために雌雄間、親子間および構成員間でのコミュニケーションが行われている。また、生物センサーはそれぞれの生物の生存を確実にするために、環境条件と生活様式に順応して発達してきたものと考えられる。単細胞生物では情報の受容から行動の発現に至るまでの一連の情報処理プロセスが、細胞内に存在するいくつかのタンパク質の構造と物理化学的変化により遂行される^{3)~7)}。他方、多細胞生物の情報処理は、細胞の分化と発達により特殊な機能を持った細胞と組織により行われる。例えば、脊椎動物の摂食行動はレセプターと称される受容器、感覚神経・中枢神経・運動神経などの細胞および効果器からなる情報処理と制御システムにより行われる。このシステムへの情報入力を担う受容器が「センサー」であるが、その働きは受容器に絡み合って接続している感覚神経系、中枢神経系および脳の情報処理によりインテリジェント化されている。このように情報の検出から処理までを含む機能を持ったセンサーを「インテリジェントセンサー」または「スーパーセンサー」と称している。

3. 嗅覚のメカニズム

生物スーパーセンサーの一例として、最近の生理学的研究から判明したヒトの嗅覚器の機能と役割について概説する。ヒトの鼻腔奥の天井部には鼻上皮という粘膜があり、そこに匂いを受容する嗅細胞が数十万から数百万個存在する。図1に示すように、嗅細胞は脳の神経細胞が進化し、特殊化したものである。これらの嗅細胞先端の突起部分は、嗅小胞といわれて、粘液層に突き出ている。嗅小胞からはシリアと呼ばれる嗅繊毛が数本生えており、これらは全体的に粘液層に覆われている。鼻腔から導入された匂い分子は、粘液中に溶解して移動し、嗅繊毛の膜表面に吸着すると考えられている。そこでは、受容された匂い成分の化学エネルギーが嗅細胞で電気的エネルギーに変換され、次に嗅細胞根部で電気的インパルス列信号となり、この信号が神経軸索を通じて嗅球部の糸球体に伝播する。このように嗅細胞は匂いの受容、A/D変換、デジタル信号処理および増幅機構を有していることになる。

嗅細胞から伸長している神経繊維はネットワーク状となって嗅球にある糸球体内へ延びている。嗅球は第一次嗅覚中枢といわれ、脳の前頭部底部に球状に突き出ている嗅球内の糸球体は、匂いの識別に重要な役割を担っている事が次第に分かってきた。ウサギは片半球に約2000個の糸球体を持っており、一つの糸球体には約26000個の嗅細胞

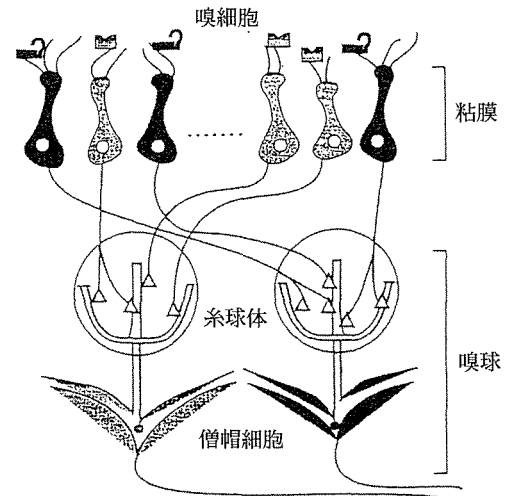


図1 嗅細胞から嗅球への神経ネットワーク

からの神経繊維が結合している、同じ種類の匂い情報は同じ糸球体に集められるので、ウサギは約2000のチャンネルで匂いを識別しているものと考えられている。ウサギの僧帽細胞について、その匂い応答特性を調べた研究によれば、特定の僧帽細胞は類似した立体化学構造を有する匂い分子に対して選択的な興奮を示す。このことは個々の僧帽ニューロンが、特定の匂い受容タンパク質と特異的に反応するごく少数の匂い分子群に対するチューニング特性を有していることを示している⁸⁾。

嗅細胞における電流発生分子論的メカニズムについては完全に解明されていないが、現象論的には、負の電位に固定した状態で嗅細胞に匂いの刺激を与えると、細胞内部方向への電流が流れることが分かっている。この内向きの電流がトランスダクション電流と呼ばれ、その発現機構モデルとして「匂いの吸着説」と「匂い受容タンパク説」の2つの仮説が提唱されている。現在、これらの仮説モデルの実証に向けて遺伝子工学やクローニングなどの先端技術を駆使した研究が急速に進展しているため、近い将来、その全貌が解き明かされるものと期待されている。

ここに示したように、嗅覚のメカニズムは完全に解明されたわけではないが、各種のタンパク質とイオンが関与する複雑なメカニズムによる電位発生と、これに続くパルス信号への変換、匂い信号の選択と識別など、一連の情報処理プロセスから成り立っている^{9)~11)}。これらのプロセスに含まれる各種のメカニズムは、味覚などとの相似性を有しているものと考えられている。したがって、一つの感覚のメカニズムを解明することは、他の感覚のそれを解明するのにも役立つことを意味している。いずれにせよ、嗅覚におけるセンシングは「生物スーパーセンサー」の典型例であり、感性工学が研究対象とするセンサーはこのような「インテリジェントセンサー」とも呼ばれるものに他ならない。

4. 感性工学のセンシング

近年、「感性計測」という言葉が学術雑誌などで散見されるようになったが、その意味するところはだまかに2つに分類される。その一つはヒトの「こころ」そのものを対象にし、心理学的数量化手法や官能評価の手法などを用いてその情動を計測するという意味であり、ここではヒトの「感性」そのものが測定対象となっている。他の一つは「ヒトの感覚」に相当する情報の検出から処理までをシステム化したセンサー、すなわち、我々の「感性を数量化するモデルを内蔵したセンサーによる計測」、すなわち、インテリジェントセンシングを意味している。いずれにせよ、「感性工学」の発展には「感性計測」の研究が必須であることは言を待たない。

ヒトの感覚はレセプターから脳に至る複雑な情報処理プロセスにより成り立っており、そのセンシング機構は、上に述べたようにインテリジェントセンサーまたはスーパーセンサーに相当する。逆に言うと、感覚のセンシング機序を模倣した人工的センサーを作るためには、単にレセプターのみを意味する狭義の「センサー」のメカニズムを実現するだけでは不十分である。また、食べ物を対象にしたセンシングデバイスには高感度特性よりもインテリジェント化されたマルチセンシング特性が重要視される。すなわち、食情報を対象とするセンサーには高感度スーパーセンサーよりも「インテリジェントセンサー」が求められよう。この意味で都甲らが開発し¹²⁾¹³⁾、すでに市販されている「味覚センサー」は、ここに述べた「マルチ・インテリジェント・センシング」を実現したセンサーの典型例として注目される。

5. 米の食味計

現在実用化されている食味や食嗜好に関連する実用システムの具体例として「米の食味計」をとりあげ、その技術レベルを紹介する。図2に米の食味計の計測・評価システムの概念図を示す。このシステムの開発に当たっては、先ず、走査型近赤外線吸収スペクトルアナライザにより全国各地で収穫された米の近赤外線吸収特性曲線が測定された。次に、このスペクトルの中から食味と関連する、いわゆる呈味成分の吸収波長と化学分析結果の関係を表す検量線が作成され、近赤外分光分析により呈味成分含有量の推定が可能となった。最終的に、呈味成分含有量のデータから食味の官能評価結果、すなわち食味評価指数を100点満点で予測する試みが行われた。

このシステムの開発当初、呈味成分含有量と食味評価指数の相関を求めるために、両者間には線形関係が存在するものと仮定され、線形主成分重回帰分析が行われた。しかし、その結果は「食味」と「成分量」の関係に非線形性が含まれることを示した。すなわち、この方法は本来変量が

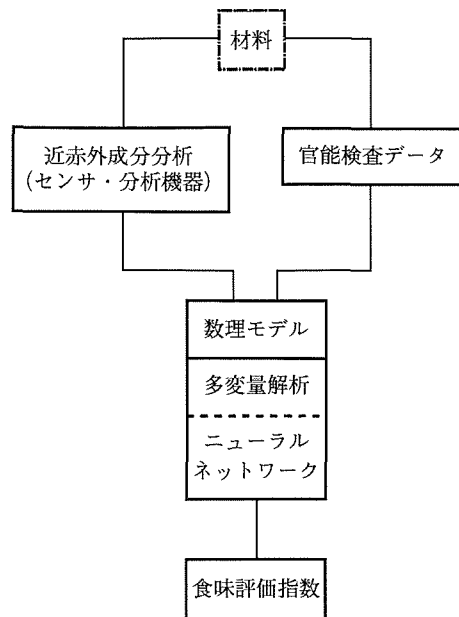


図2 米の食味計測・評価システム

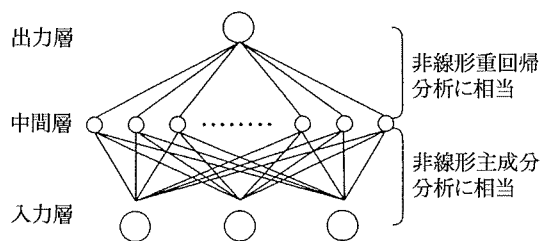


図3 ニューラルネットワークと非線形多変量解析の関係

線形な変化をする場合に有効な方法であり、食味の推定には非線形多変量解析が必要と考えられた。しかし、この方法は計算に長時間を要するため、実用システムにこのプログラムを搭載するのは不可能と判断された。そこで、これに代わり短時間処理を可能とする方法としてニューラルネットワークモデルが導入された。すなわち、図3に示すように入力層のユニット数を ①白度、②水分、③アミロース、④脂肪酸度、⑤タンパク質、⑥検出器温度および⑦米の温度の7ユニット、中間層20ユニット、出力を食味の総合評価指数の1ユニットで構成されるモデルが考案された。また、教師信号には官能評価スコアが入力された。このニューラルネットワークと多変量解析手法との対応関係は、入力層—中間層間が非線形主成分分析に、中間層—出力層間が非線形重回帰分析に相当する。このような手法を導入したことにより、官能評価から得られる食味評価指数を、近赤外分光分析法により計測された米の呈味成分から良好に推定する事が可能になった。また、ニューラルネットワークをハード化することにより、計算時間の大幅な短縮が実現された。

ここに紹介したシステムは、現在国内で「米の食味計」

を製造・販売している二十数社が採用している各種の食味評価指数算定方式の中の典型例である。しかし、食味を判定するための要因の選択、演算方式などは製造会社により異なり、これらに基づく食味評価指数の算定結果にも若干の差異が生じている現状にある。本来、このシステムは農協のライスセンターに生産者から搬入される米の品質検査を使用目的として開発されたものである。しかし、その用途はすでに米の流通、商取引、さらに小売商店におけるブレンド評価にまで広がっている。そこで同一サンプルに対して製造会社の異なる食味計が用いられると商取引上のトラブルが発生することになる。この問題を解決するために、食糧庁では「同一サンプルの食味評価指数の一致」を目指して製造会社間の調整を試み、「滋賀県琵琶湖畔産の日本晴れを75点とする」という、いわゆる「定点」などが確定されたが、測定方式には製造会社独特のノウハウが含まれるため、これを統一化するまでには至らなかった。

このような問題点は残されているものの、このシステムの核心的な点は粒状または粉状の精白米サンプルを投入して成分分析を行い、炊飯した後の食味、すなわちヒトの官能評価スコアと同等の評価指数を表示していることにある。このようなシステムの開発が成功した要因は、先ず、主食である嗜好性の低い米を測定対象に選んだことであり、次に、米については標準化された官能検査の手法が確立されていたことである。このことが成分分析結果と官能評価データを相関させるための数理モデルに信頼性をもたらしたものと考えられる。特に、ニューラルネットワークの学習プロセスに用いる教師信号、すなわち、官能評価結果の数量化手法とその普遍性の重要性が浮き彫りにされている。このことは、現在、この方法をコーヒー豆や牛肉に適用する研究が進められているにもかかわらず、このような嗜好性の高い材料に対しては官能評価手法や得られたデータの解釈に疑問が残り、結果的には成分量と食味評価指数との間の高い相関が得られていない現状にも示されている。これらの問題点を解決するためにさらに複雑な構造と計算のアルゴリズムを必要とする「ファジーニューラルネットワーク (FNN)」や「遺伝的アルゴリズム」などを用いてコーヒーや吟醸酒の品質評価を試みる研究例が報告されている¹⁴⁾¹⁵⁾。

6. 味覚センサー

6.1 原理と構造

このセンサーの原理は基本的に図4に示すバイオセンサーのアイデアに基づいている。バイオセンサーは測定対象を識別して電気信号に変換する機能を持ったデバイスの総称であり、その機能は分子識別部と信号変換部を組み合わせることにより実現されている。分子識別部には主に生物由来の機能性膜が使用されている。生物機能性膜で特定物質の分子が識別されると、膜自体に物理・化学的変化が

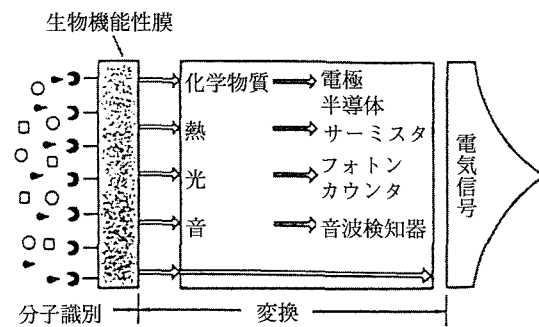


図4 バイオセンサーの原理

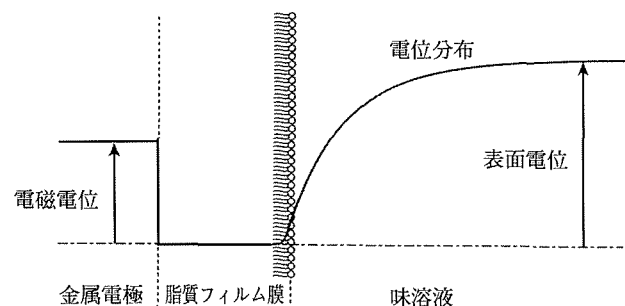
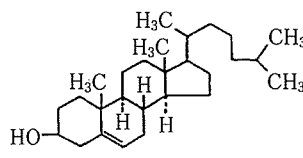


図5 脂質膜近傍の電位プロフィール¹²⁾

生ずる。これらの変化は信号変換部で電気信号に変換される。そのためデバイスとして、図中に示した各種のトランスデューサーが用いられている。従って、バイオセンサーの種類は生体物質とトランスデューサーの組み合わせにより多様となっている。

都甲らは生物機能性膜として人工脂質膜を用いた味覚センサーを開発した¹³⁾。その原理を説明するために、脂質膜を味溶液中に浸した場合に発現する脂質膜近傍の電位プロフィールを図5に示す。このプロフィールは脂質膜と味溶液の種類により変化する。そこで、両者の「組み合わせ」を識別する電気信号として、脂質膜裏面に接着した白金などの金属電極の電位を検出する。したがって、この種の化学センサーを開発するためには、測定対象物質に敏感に反応して高い電位を発生する脂質を選択し、これを用いた人工脂質膜の形成方法を確立する必要がある。そこで、5つの基本味の代表的呈味成分に敏感に反応する8つの脂質(表1)を選び、これをポリ塩化ビニル(PVC)に混入して人工脂質膜が形成された。実験装置の段階では、図6に示すようにこれらの膜に銀電極を接着して8チャンネルとし、これを味溶液の中に浸して、銀電極と参照電極との電位差を計測した(図7)。図8には製品化された脂質膜電極の構造を示す。この電極はポリ塩化ビニルの中空棒にKCl溶液と銀・塩化銀線を導入し、その断面に人工脂質膜を張り付けたものであり、必要に応じて脂質の異なる膜または高分子膜電極を増やし、マルチチャンネルの計測を可能としている。

表 1 PVC に混入させて作成した人工脂質膜¹²⁾

チャンネル番号	脂 質
1	$\text{HO}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{P}}-\text{O}(\text{CH}_2)_7\text{CH}_3$ $\text{O}(\text{CH}_2)_7\text{CH}_3$ ジオクチルフォスフェート
2	 コレステロール
3	$\text{HO}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{CH}_2(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{CH}_3$ オレイン酸
4	$\text{HO}-(\text{CH}_2)_9\text{CH}_3$ デシルアルコール
5	Cl^- $\begin{matrix} & (\text{CH}_2)_7\text{CH}_3 \\ & \\ \text{N}^+ & \\ & \\ \text{CH}_3 & (\text{CH}_2)_7\text{CH}_3 \end{matrix}$ トリオクチルメチルアンモニウム クロライド(TOMA)
6	$\begin{matrix} \text{H} \\ \\ \text{N}-\text{CH}_2(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{CH}_3 \\ \\ \text{H} \end{matrix}$ オレイルアミン
7	CH_3 Br^- $\begin{matrix} & (\text{CH}_2)_{17}\text{CH}_3 \\ & \\ \text{N}^+ & \\ & \\ \text{CH}_3 & (\text{CH}_2)_{17}\text{CH}_3 \end{matrix}$ ジオクタデシルジメチルアンモニウム ブロマイド
8	CH_3 Cl^- $\begin{matrix} & \text{CH}_3 \\ & \\ \text{N}^+ & \\ & \\ \text{CH}_3 & (\text{CH}_2)_{17}\text{CH}_3 \end{matrix}$ トリメチルステアリルアンモニウム クロライド

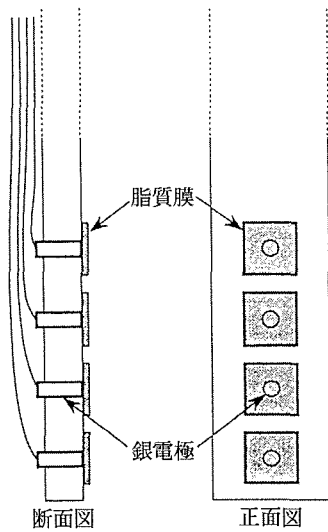


図 6 マルチチャンネル味覚センサーの構造¹²⁾

6.2 出力パターンと測定例

マルチチャンネル味覚センサーの基本味呈味成分に対する電位の応答パターンを図9に示す。これらは概して5つの基本味に対しては異なるパターンを示し、同じ基本味の呈味成分に対しては類似のパターンを示す。これらのパターンは目的に応じた味の識別に利用されるが、「甘み」と

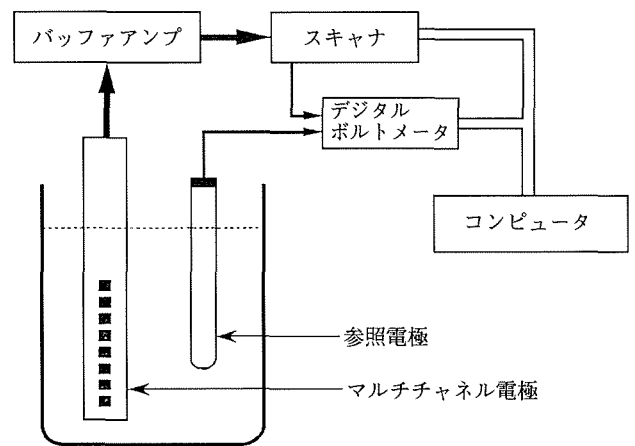


図 7 味の計測基本システム¹²⁾

「うま味」の応答電位は他の基本味に比べ小さい値を示し、また、「甘み」呈味成分である果糖のパターンはブドウ糖やショ糖のパターンとは逆の極性を示す。したがって、これら2つの基本味成分に対し、高精度の識別能力が必要な場合には注意を要するものと考えられる。

図10は各種のビールを測定し、その出力結果に主成分分析を施してテイストマップを作成した例を示す。図中のPC1軸はビールの味を表現する代表的な語彙である(まる

やか)-(刺激的)のスケールを表し、また、(さわやか)および(濃厚さ)を表すスケールの方向も示されている。

商品名は戦前からシェアのトップを占めていた麒麟ビール社のラガーが(K-LAGER)、これの強力なライバル

商品として、最近シェア競争を有利に展開しているアサヒビール社のスーパードライが(A-SUPER DRY)のように表示してある。

このマップからアサヒスーパードライのシェアが伸びている原因には、その味が麒麟ラガーに比べてより「さわやかで刺激的」であり、「ドライ」というネーミングも商品の特質をうまく表現しており、さらに、これらが消費者の嗜好にもマッチしていることなどが考えられる。このマップが作成された当時、サントリーモルツ(SU-MALTS)はスーパードライとは対極にある商品であり、スーパードライの愛飲家には好まれないものと予想された。このように、味覚センサーは同一カテゴリ内の商品の味を識別することも可能であり、既に販売されている商品の特徴を明らかにしたうえで新商品開発の方向を探るなど、プロダクトマネージメントのツールとして有効利用されている。特に、従来の官能評価法に比べ計測による客観的な数量データに基づく感性情報の検討を可能としている点は高く評価され

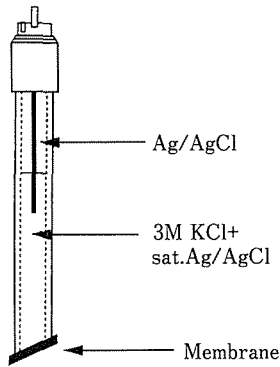


図 8 製品化された脂質膜電極¹³⁾

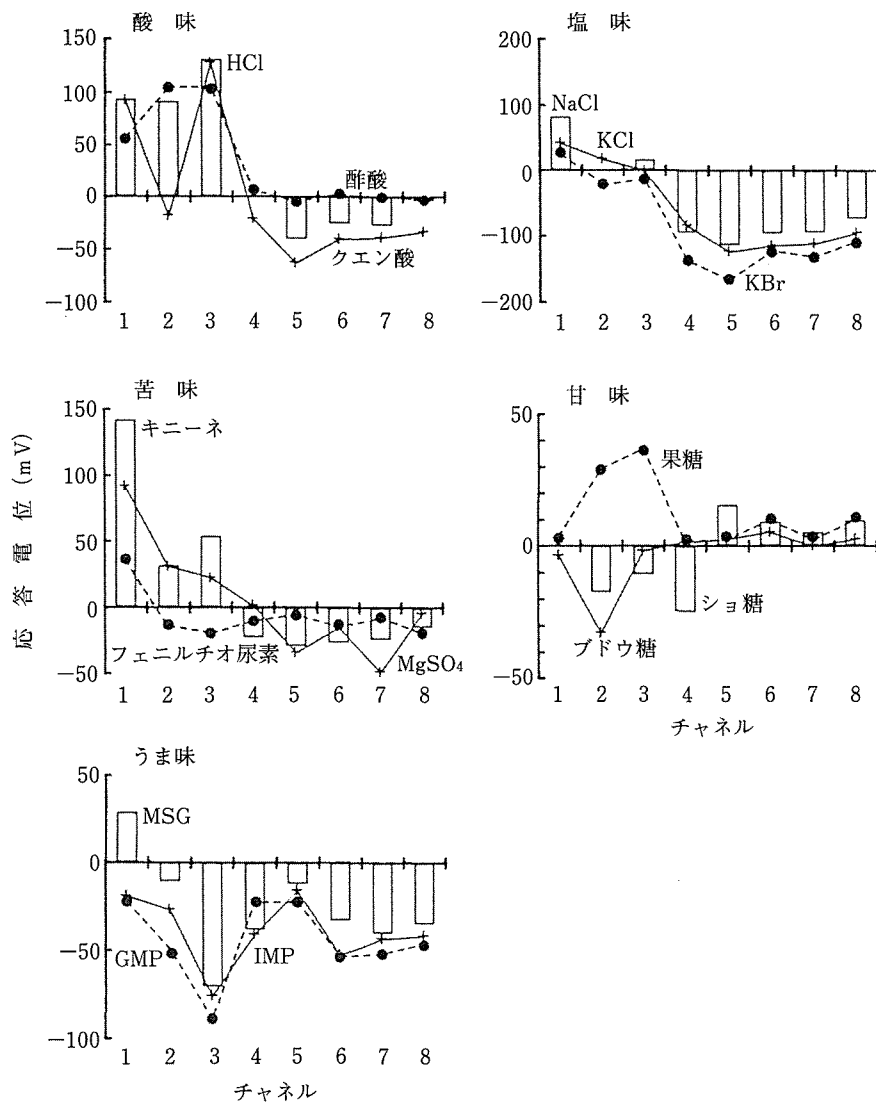


図 9 味覚センサーの基本味応答パターン¹²⁾

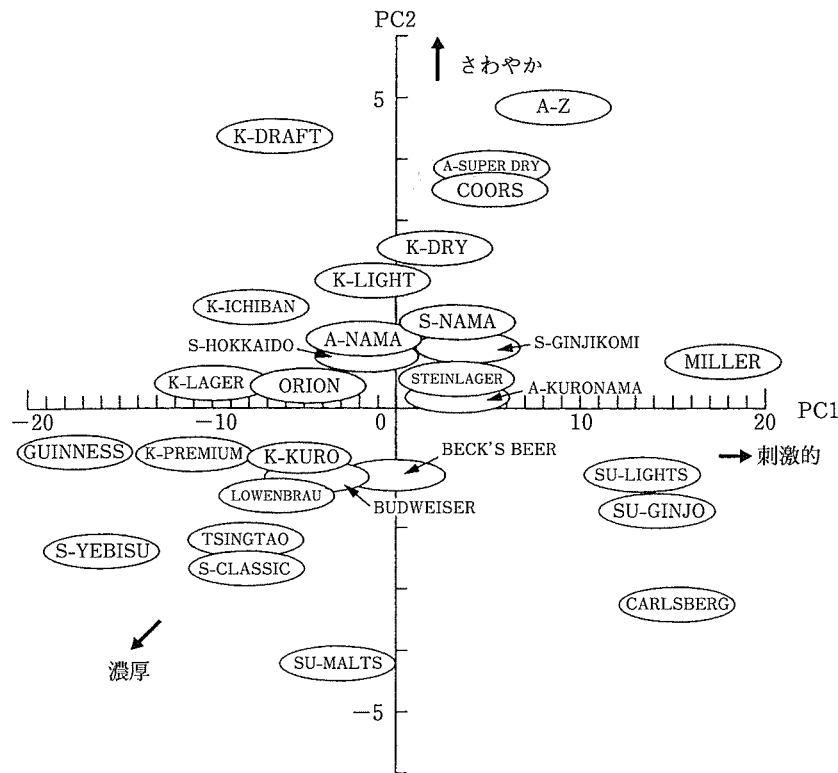


図 10 ビールのテイストマップ¹³⁾

る。また、一般的にセンサー類の大部分は高度の選択性と測定精度を追求する方向で開発が進められてきたが、味覚センサーはマルチチャンネル化により広域選択性をも併せ持つことになった。このことは我々が味覚で識別している「味」そのものを計測可能としていることを意味しており、いわゆる感性計測を実現しているといえる。

7. 匂いセンサーの開発

食品の匂いは多成分で構成され、ヒトはその匂いを総合的かつ迅速にセンシングして、匂いの発生源である食品の種類や状態を識別している。近年、このようなヒトのセンシング方式を模倣した匂い識別システムが実用化されている^{16)~19)}。現在、実用化されているシステムは、匂い成分を吸着するセンサーとして複数の金属半導体、高分子膜および生体膜のモデルである化学センサーを用いており、これに識別機能を加えたトータルシステムは「電子鼻 (Electronic Nose)」と総称されている。これらのシステムはいずれもヒトの匂い識別プロセスを模倣したものである。その典型例として、図 11 に酸化物半導体アレイをセンサーとする匂い識別装置を示す。この装置は、ヒトの嗅細胞から嗅球を経て脳に至る「匂い情報」の伝達・処理プロセスを (センサー)-(パソコン)-(解析ソフト) のフローにより代行させ、最終的には利用者により有用な情報を、例えば「匂いのマッピング」として表示する機能を有している。このようなシステムの開発には、電気抵抗、周波数などのセン

サー出力と特定の匂いを対象とした官能評価スコアとの相互関連性を分析・表示する方法が必須であり、本総説シリーズの第 2 報で紹介した「食感性モデル」の感性関数や解析ツールの適用が有用である。

これらの電子鼻はヒトが感じる匂いの「識別」装置として、環境関連分野や食品の品質評価分野などで利用されているが、同様のセンシング方式を採用している「味覚センサー」に比べて実用現場での利用度は低い状況にある。これは食品の摂食行動中に感知される総合的な味に寄与する味として定義されている 5 つの「基本味」とこれらの代表的な呈味成分に比べ、匂いの「基本臭」は不明であり、呈臭成分も膨大である。さらに、成分のブレンドや相互作用により生成される香りも複雑である。このため、10 数個のセンサーでこれらの成分をセンシングし、さらに、ヒトの能力と同程度の識別性能を達成することは困難である。このため、ヒトと電子鼻間に存在する識別能力のギャップ解消が汎用システム開発の課題としてクローズアップされている。従って、現段階における匂いセンサーの開発目標は、特定の匂いの識別に特化したシステムの開発にあると言える。この点に関し、次項で述べる GC/O は汎用的な成分分析法とヒトの嗅覚を融合した安定的で実用度の高い計測法として有用である。

8. GC/O による最適凍結乾燥条件の探索

筆者らは凍結乾燥時の操作温度条件が香気成分に与える

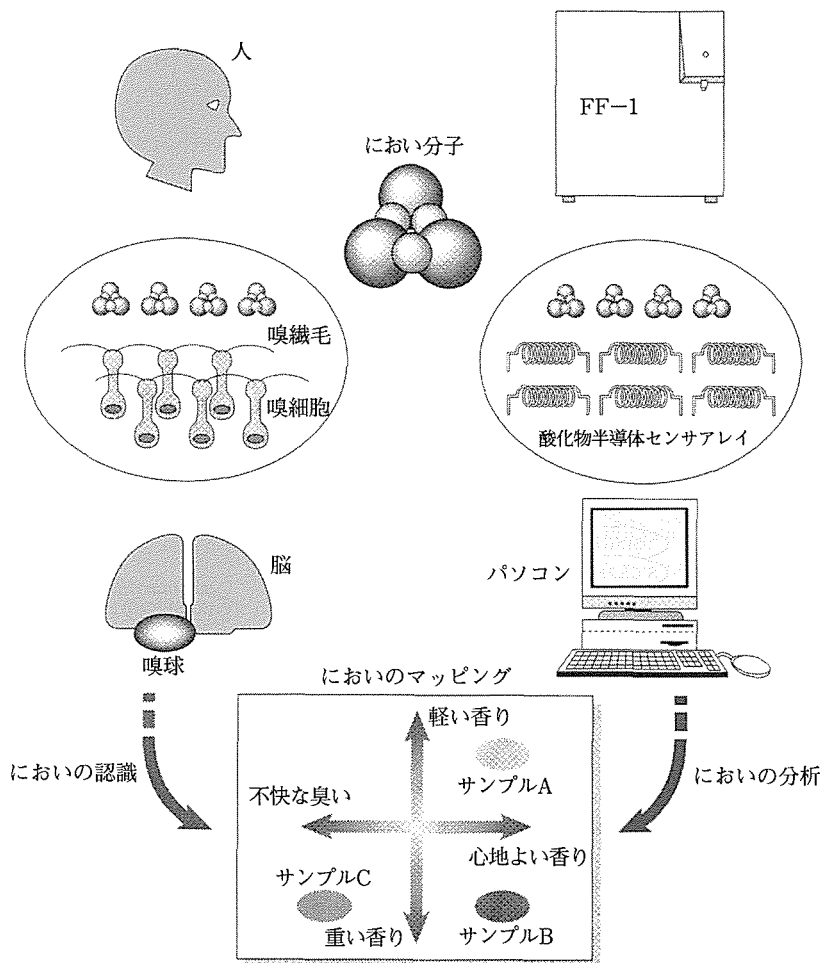


図 11 匂い識別装置の構成と機能 (島津製作所提供)

影響を GC/MS および GC/O で分析し、原液の香りを保持する最適温度条件を探索する方法を開発した。一般的に、この手法は「食感性モデル」の知覚の経路を利用して、消費者の感性評価に基づく製造工程の最適温度操作条件を探索する方法に該当すると言える。次項以降にその手順を概説する。

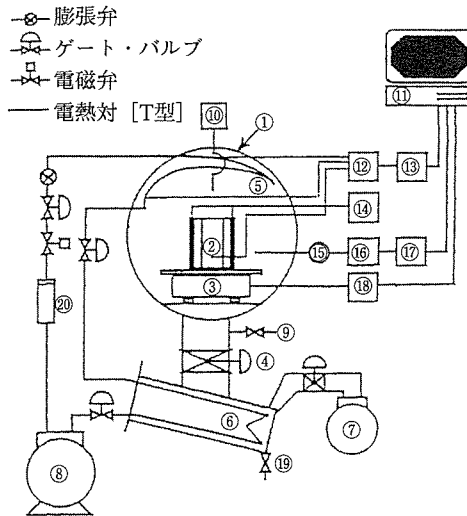
8.1 凍結・乾燥温度の設定法

この研究には乾燥操作条件とサンプルの乾燥特性をオンライン計測するために開発した実験用凍結乾燥装置 (図 12) を用いた。また、図 13 に示すような液状・顆粒状材料用のサンプルホルダを用い、抽出した固形分濃度約 10% の原液を濃度 40% に凍結濃縮して原液試料とした。また、試料底面の凍結温度を $-40 \sim -120^{\circ}\text{C}$ 、乾燥プロセスにおける試料表面温度を $25 \sim 80^{\circ}\text{C}$ の範囲で一定値に制御して、凍結乾燥プロセスにおける試料重量、乾燥速度、試料内温度分布の経時変化および乾燥試料の含水率などを計測した。ちなみに、筆者は商業規模の顆粒状凍結コーヒーの凍結乾燥操作では凍結温度 -40°C 、乾燥温度 80°C が採用されていると推算している。このような方法により得られた乾燥試料水溶液のアロマを GC/MS および GC/O で測定

し、両者のデータを比較することにより、凍結および乾燥温度条件が乾燥試料のアロマ成分におよぼす影響を明らかにした。

8.2 GC/O のチャーム分析法

GC/O 分析法にはコーネル大学の Acree 教授が開発した“Charm Analysis”と称される手法を用いた²⁰⁾。図 14 に示すように、この分析手法では、溶液試料を GC に注入し、GC によって分離された香り成分は、空気の流れとともに評価パネリスト、すなわちスニファーの鼻先に供給される。スニファーは香りを感じ始めると同時に、パソコンのマウスを押し始め、匂いを感じなくなった時点でマウスを放す。そのとき感じた香りの特徴を、予め PC に内蔵されている「特徴記述用語」の中から選択することにより、検知時間と香りの特徴が記録される。さらに、同試料を 3 倍ずつ 3 段階に希釈し、同様の分析を繰り返す。このようにして得られたアロマクロマトグラムのピーク面積よりアロマ成分の強度を表す Charm Value (CV) が計算される。チャーム分析によって得られるアロマクロマトグラムと GC 分析によって得られる成分ピークを比較して図 15 に示した。両者のピークを比較すると、双方で検出可能な



①真空チャンバ ②試料およびサンプルホルダ ③電子天秤 ④主弁 ⑤内部コンデンサ ⑥外部コンデンサ ⑦油回転真空ポンプ ⑧冷凍機[コンデンスング・ユニット] ⑨リーク・バルブ ⑩ピラニー真空計 ⑪パソコン ⑫電子式冷接点 ⑬A/Dコンバータ ⑭温度コントロール ⑮金属隔膜型圧力計 ⑯圧力表示計 ⑰BCDコンバータ ⑱重力表示計 ⑲ドレーン・バルブ ⑳ドライバ

図 12 実験用凍結乾燥特性計測システム

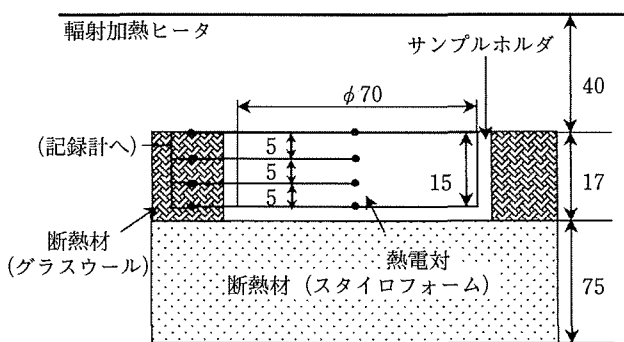


図 13 液状・顆粒状材料のサンプルホルダ

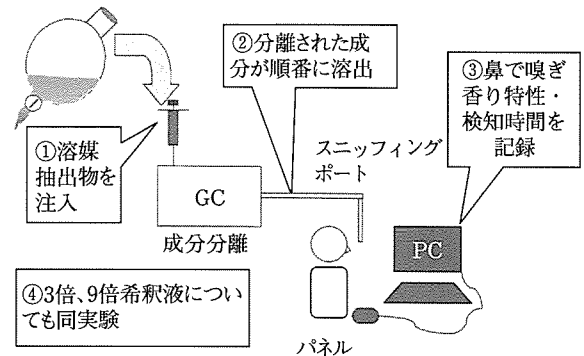


図 14 GC/Oによるチャーム分析の手順

成分が異なり、また、前者に示されるヒトが検知可能な成分が、必ずしもGCによって検出されないことも分かる。

他方、GC/MSでは42成分について同定することが可能であったが、これらの同定成分の中で、チャーム分析により検知された成分は6成分であった。それらの特徴は、酢酸の香り (acetic acid)、汗の酸の香り (isovaleric acid)、キャラメル甘い香り (cyclotene, maltol, vanillin)、シナモンの香り (acetovanillone) であった。

8.3 香り成分強度の温度依存性

図16と17にチャーム分析により得られた香り成分強度 (CV) の凍結および乾燥温度条件依存性をそれぞれレーダーチャートとして図示した。図16に示すように、凍結温度条件を変えて80℃で乾燥した試料では、(fruity, juicy), (green, blackcurrant, earthy) に代表される果実様の甘い香りは凍結温度の低下に伴い保存性が向上することがわかった。同様に、醤油香 (soy sauce) が凍結温度の低下に

伴い生成されることが分かった。また、図17に示すように、-60℃で凍結し、乾燥温度条件を変化させて得られた試料では、醤油香が高温で乾燥するほど強くなり、高温条件下で生成されることが分かった。他方、honey, (fruity, juicy), (spicy, caramel, sweet, sugary) などの香りの保存性は低温乾燥条件下で保たれることが明らかになった。これらの結果より、原液のアロマに微量成分として含まれている醤油香は、凍結温度の低下と乾燥温度の上昇により生成するため、両操作温度のバランスを採ることが重要であることが分かった。

8.4 最適温度条件の探索法

上述したデータを利用して、凍結乾燥による香気成分への影響が最も小さくなるような操作温度条件をシミュレーションにより求めた。このシミュレーションには、本誌シリーズの第2報の「食感性モデル」で述べた「マルチスプライン補間法」に基づく応答曲面法を用いた。先ず、図18

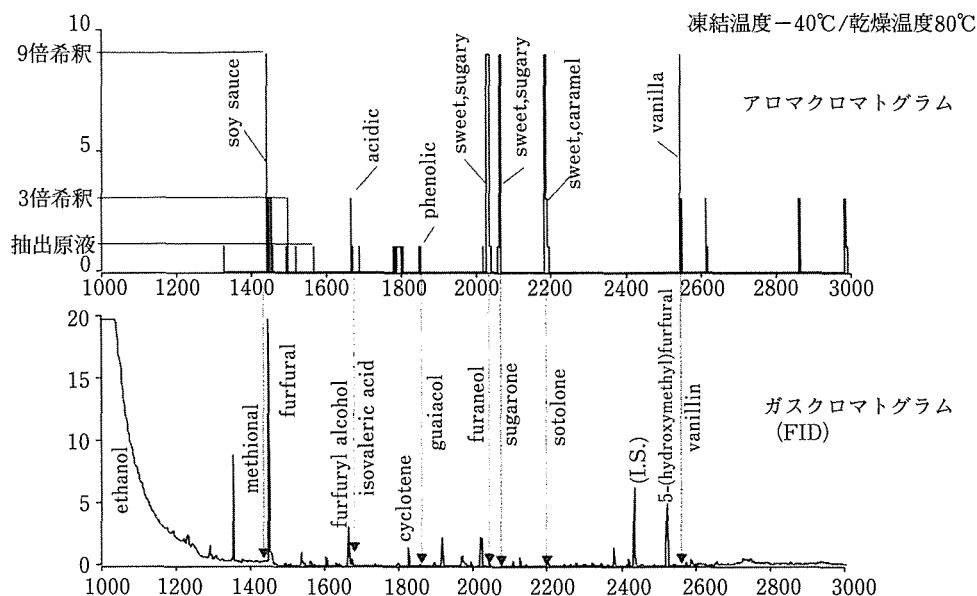


図 15 アロマおよびガスクロマトグラムの比較

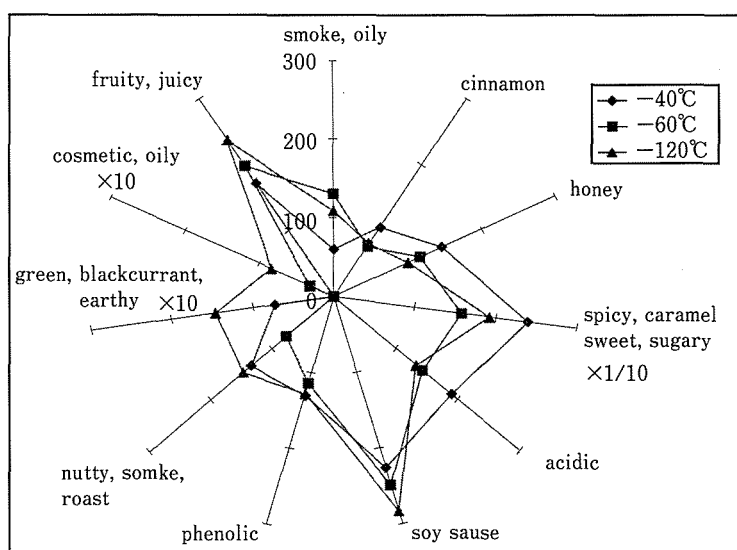


図 16 アロマの凍結温度条件依存性 (乾燥温度: 80°C)

に示すように、チャーム分析により得られた 13 種類の香り強度 (CV) の応答曲面を凍結温度 (T_f) と乾燥温度 (T_d) の平面上に示した。次に、この応答曲面を利用して得られた香り種 (i) の強度 (CV_i) と原液の香り強度 ($CV_{i,original}$) との差の総和が最小となるような凍結・温度条件を求めた。その結果、原液の総体的な香りを保持するための最適温度条件として、凍結温度 -40°C と乾燥温度 32°C がそれぞれ推算された。これらのシミュレーション結果から予測されるアロマ強度と計測された原液のそれを比較して図 19 に示した。この図に示されるように、シミュレーション結果は原液の実測結果と良好に一致し、この研究で予測した結果の妥当性が立証されたものと考えられた。特に、最適温度条件の採用により、凍結・乾燥プロセスにおいて生

成する醤油臭の抑制が可能であることが分かった。また、ここで開発した手法は消費者の嗜好に合致した香味を探索する手法としても有用であり、高級インスタント「コーヒー」、「紅茶」および「緑茶」などの最適温度条件探索法として採用されている。

9. 脳波・脳磁波による香りの感性計測

9.1 生体反応と計測法の概要

これまでに述べたように、食感性工学の主要な目的の一つは、「ヒトが食との関わりの中で、それをどのように受容し、また、評価・判断しているかを客観的に計測し、そのプロセスを解明すること」である。そこでは五感コミュニケーションにおける情報処理のメカニズムが解明される必

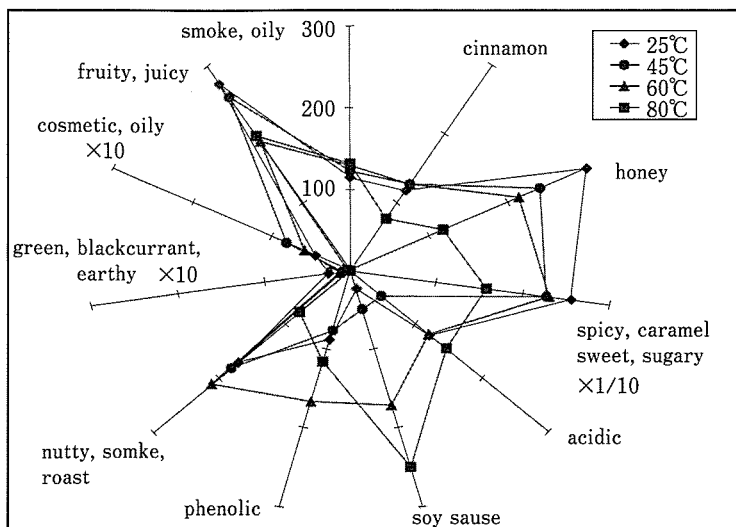


図 17 アロマの乾燥温度依存性 (凍結温度: -60°C)

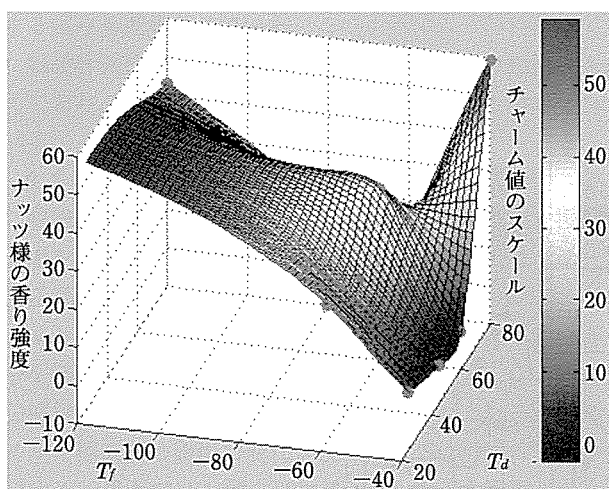


図 18 スプライン補間法によって得られた香り強度の応答曲面 T_f , 凍結温度; T_d , 乾燥温度. °C

要があり、このためには食に対するヒトの生体反応を非侵襲 (non-invasive) で計測しなければならない。このようにヒトを直接対象とする計測には医療分野で言われている「インフォームド・コンセント」、すなわち、「被験者の事前了承」を得ることが前提となることは言うまでもない。

ヒトの生体反応を計測する技術は主に医療分野で発達し、計測対象により多種類存在する。これらの中にヒトの感性と関連する計測技術も含まれ、例えば、我々が健康診断で経験する血圧、心拍、瞳孔反応、心電図などの計測技術などは馴染み深い。この他にも、「うそ発見器」などがあり、周知のように犯罪捜査の客観的評価法として重要視されている。これは精神的な緊張や情動興奮による手足の発汗現象を利用したもので、この精神性発汗量を皮膚の電気抵抗や電位の変化、すなわち皮膚電気反射 (GSR) として観察する技術である。これらの生理現象は自律神経系によ

り制御され、その特長はこれらの制御が我々の無意識下で行われることにある。

これに対し、中枢神経系は脳内に存在し、数十億個の脳神経細胞から構成されている。脳の組織の中でも大脳皮質部は大脳表面近傍の薄い層として存在し、外部情報に基づき高次の精神活動を司る。また、そこでは特定の機能を担う神経集団が局在していることが知られている。従って、大脳皮質部はヒトの感性に深く関わっているといえる。

現在、ヒトの脳を対象にした非侵襲計測法には 1) 脳波 (EEG), 2) 脳磁場 (MEG), 3) 陽電子放射撮像法 (PET), 4) 核磁気共鳴撮像法 (fMRI) などがある。脳波や脳磁場の計測技術はこの大脳皮質部を含め、脳内情報処理プロセスの機序を解明する有力な手段として脚光を浴びている。ここでは、主に嗅覚関連の計測法に関する研究の動向について紹介する。

9.2 脳波による匂いの感性計測

これまで、匂いの刺激に関する脳の活動状況は「嗅覚誘発脳波」により計測されてきた。この方法は基本的に短時間のパルス状の匂いで鼻孔を刺激し、その応答電位を頭皮上に接触配置した 20 個程度の電極で記録する方法である。しかし、この方法で得られる応答は嗅覚神経性の応答ばかりでなく、嗅ぐという動作に伴う三叉神経系の応答も含まれることが指摘され、嗅覚誘発脳波を選択的に計測することは困難とされてきた。この問題を解決するために、図 20 に示すような「呼吸同期式匂いパルス刺激装置」と刺激に用いる流体を一定圧力に制御する Flow Method や Blast Method が考案され、嗅覚神経応答波形から三叉神経の応答成分をほぼ分離する事に成功した¹⁷⁾。

図 21 に Blast Method により計測されたバナナの香りを持つアミルアセートの応答波形を示す。P₁, N₁, P₂ のピークは無臭空気刺激においてもほぼ同様に計測されるの

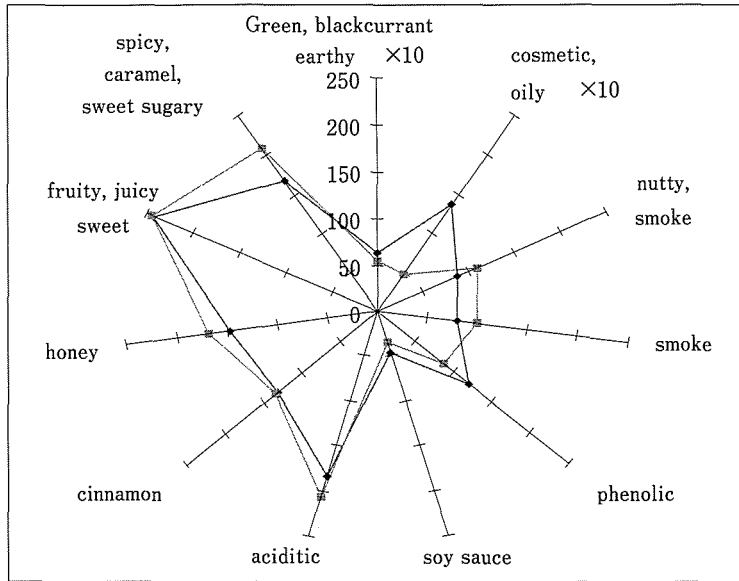


図 19 原液のアロマと最適温度条件により予測されるアロマの比較

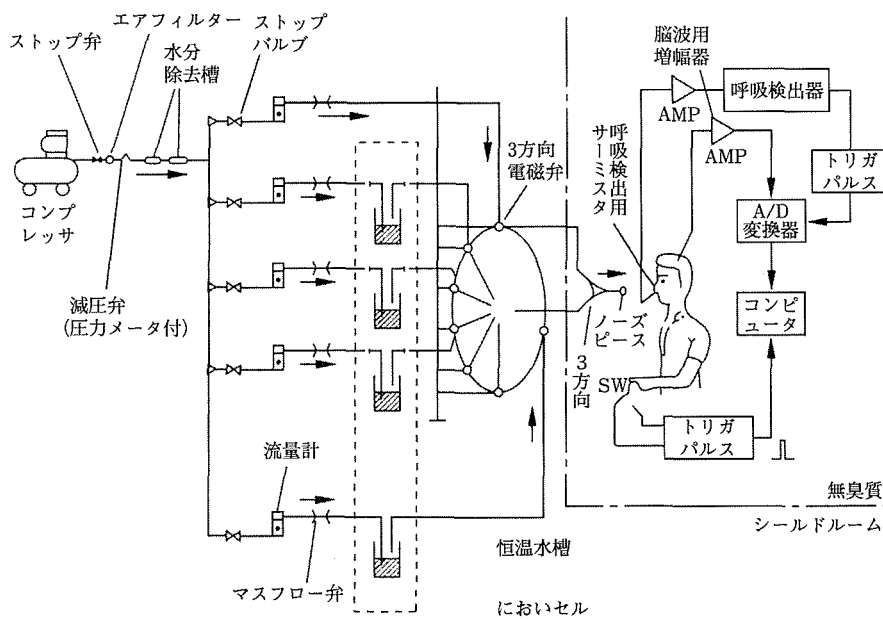


図 20 呼吸同期式嗅覚刺激装置

で、これらの応答ピークは三叉神経応答成分であると考えられる。これに対し、P₃およびN₂のピークは匂いの刺激に対してのみ検出されるので、これらの波形成分は嗅覚神経系の応答ピークであると推察される。このように脳波の計測で得られた誘発脳波の波形から感性情報を抽出する事が可能であるが、脳波の発生源を特定する事は困難である。このために、脳波研究の成果も脳波の特別なパターンで判断できる睡眠・覚醒の状態把握やてんかん、脳炎の診断などの利用に限られている。

脳波計測のこのような弱点を克服する方法として、双極子追跡法が開発されている。これは脳がある目的を持って

活動している状態にあるときには、数十から数百万のニューロンが集団として同時に活性化されていると考え、この同期ニューロン全体を一つの電流双極子、すなわち電流ダイポールと見なし、その位置と大きさを推定する方法である。そこでは先ず電流双極子の位置を適当に定め、この仮定の下で頭皮上の電位分布を境界要素法により計算し、次にこれと実測データとの差異が最小となるように、最初に仮定した電流双極子の位置を順次修正して行く方法が採られる。これに要する修正回数は50~200回で、最小値に収束する計算時間は最近の高性能パソコンで1.0秒以内となっている。現在では「感性スペクトラム分析法」な

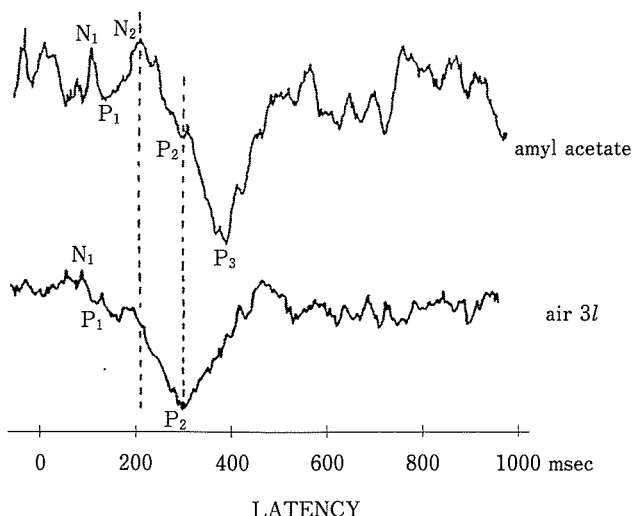


図 21 無臭空気刺激と匂い刺激の脳波応答波形の比較

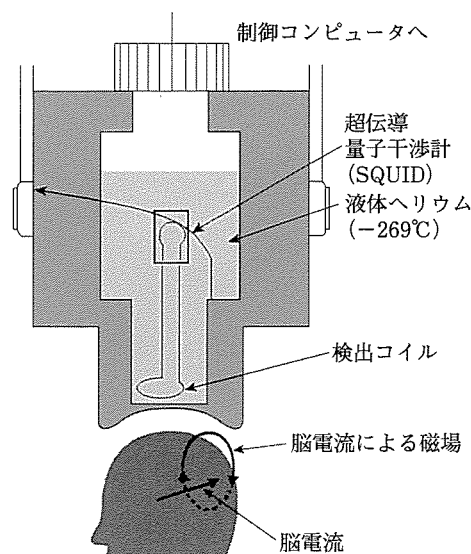


図 22 脳磁場計測装置の構造

どが提案され、脳波の解析から感情の変化を数値的に表現する試みも進められている。このように、一時停滞していた脳波計測技術は、これらの方法の開発により転換期を迎えており、その応用範囲は拡大してゆくものと考えられている。

9.3 脳磁場・核磁気共鳴計測

脳磁場計測法は前に述べた電流双極子が生み出す微弱な磁場を脳磁計により計測する方法である。そのセンサーは超伝導の研究成果を応用したもので、図 22 に示すように、ジョセフソン効果を応用した磁気検出装置である超伝導量子干渉計 (SQUID) を液体ヘリウムの中に浸し、これに超伝導材料で作られた検出コイルが接続されている。このコイルに極微弱の磁場の変化が加わると SQUID の電圧が変化する。最近では、頭全体に SQUID 素子を配置した全頭型脳磁計 (whole-head SQUID) が開発され、被験者に多チャンネル SQUID 素子を配置したヘルメットを被せて測定を行い、頭全体の脳磁図を得ることが可能となっている。しかし、生体から発生する電磁波は極めて微弱であり、その強さは地磁気の十億分の一というレベルである。従って、脳磁計による計測は磁気シールドルームの中で行われる。例えば 122 チャンネルの脳磁計では、バナナの香りの主成分として知られているアミルアセテートの誘発脳磁界が計測され、得られた脳磁図と被験者の fMRI 脳断層画像を重ね合わせ、電流双極子追跡法などにより脳内応答部位が推定されている。

9.4 アリナミン静脈注射による嗅覚刺激法²¹⁾²²⁾

これまで、ヒトを対象とした嗅覚に関する研究では、匂いを嗅ぐという臭素提示法が一般的に採用されてきた。しかし、この提示法では嗅ぐという運動が必要であり、また、鼻腔内の空気対流による三叉神経への刺激も生じ、純粋に嗅神経を刺激することが困難であった。このため、嗅覚刺激に応答する脳波や脳磁場の計測結果には、嗅覚以外の刺

激に応答した運動神経の活動に起因する外乱が含まれ、これを抑制するために、前述したような Flow Method および Blast Method などが開発されてきた。

近年、日本人の研究者により、刺激強度の異なるアリナミン静脈注射による純粋な嗅覚刺激法による脳活動の非侵襲計測が進展し、嗅覚を司る脳研究に新しく導入された手法として注目されている。ビタミン B₁ 欠乏症の予防薬、治療薬として日本の研究者により開発された「アリナミン」は製造販売会社の商品名であり、その一般名と化学名はそれぞれプロスルチアミン、Thiamine Propyl Disulfide (TPD) である。また、その後開発された「アリナミン F」はフルスルチアミン、Thiamine Tetrahydrofurfuryl Disulfide Monohydrochloride (TTFD) であり、薬理作用は同じであるが、ニオイ成分の側鎖を置換することにより、ニオイ強度を低下させた商品である。これらの静脈注射による臭素提示法は中枢性の嗅覚障害の診断法として、おもに日本の耳鼻科で「静脈性嗅覚検査」として用いられてきた。健康者では、これら薬液の注入開始から約 8 秒後にニンニク臭が感知されるが、その発現機序は解明されていない。

筆者らの研究グループはこの方法を MEG と fMRI に適用し、次に示す知見を得た。すなわち、MEG では

- 1) 周波数帯域別の特徴として、比較的高周波成分がニオイの処理に関与している。
- 2) 反応部位として、前頭葉を中心とした脳神経細胞のネットワークがニオイの情報処理に関与している。
- 3) ニオイ刺激強度の差異により応答する部位は大脳半球で異なる。

また、fMRI による計測より、以下に示す結果が得られた。

- 1) 第 1 次嗅覚野の活動開始時期は、能動的にニオイを嗅ぐという行為と、慣れの現象が生じる前の早い時

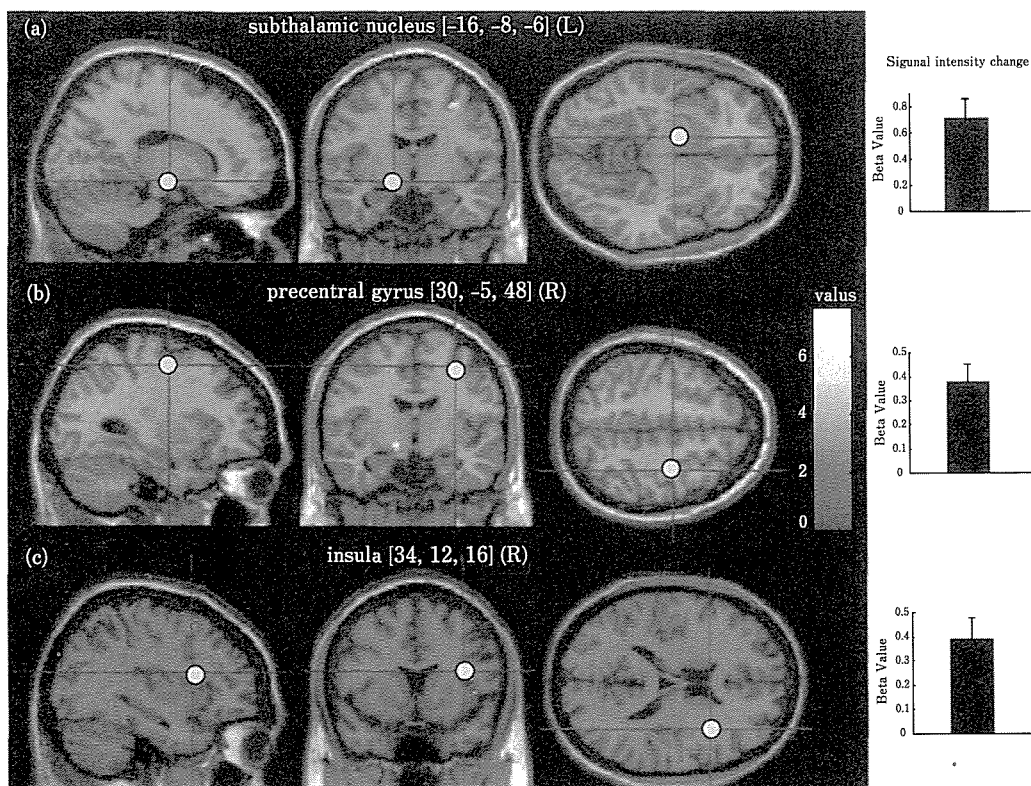


図 23 アリナミン嗅覚刺激法により fMRI で計測した脳内応答部位

間帯であり、第 2 次嗅覚野は、ニオイ強度に関係なく活動する。

- 2) 強いニオイ刺激と弱いニオイ刺激に対する脳内処理過程は異なる。

また、研究手法について、ニオイ強度の異なるアリナミン静脈注射による臭素提示法は、嗅覚関連脳神経細胞活動の機序を解明する手法として有用であること、さらに、MEG 計測および fMRI 計測では、周波数帯域別の特徴、反応部位 (図 23)、ニオイ強度による変化を可視化することが可能であり、嗅覚における脳機能解明に基礎的知見を提供する手法として有用であることなどを確認した。

10. おわりに

「食感性工学」は学術的にも技術的にも新しい分野であり、その研究領域も広く認知されているわけではない。食感性は人の感情に由来する度合いが大きく、このために単に食品の物理化学的屬性を計測して、その特徴を抽出し、「おいしさ」に客観的な評価スケールを与えるだけでは、食感性の計測が完成したことにならない。また、技術面では、人の感情変化を遠隔かつ高速で計測・評価する方法の開発が究極の課題となることも明らかである。しかし、現存する技術レベルではとうてい解決不可能であることも認識されている。

本稿では「味と香りの基礎科学」と「食感性工学」を融合して、ヒトの食生活にアメニティーをもたらすトータル

エンジニアリングの構築に向けた「感性計測法」の現状を紹介することに重点を置いた。そこでは、従来の官能評価法に代わり、消費者の生理現象の計測結果が実用技術に展開されるような方法論の発展を念頭に置いた。具体的なイメージとしては、味覚や嗅覚を対象とした脳機能の非侵襲計測法で得られた結果が、コーヒーを素材とした新商品の香味設計や製造工程の制御に利用されるような「夢」が達成されることを想定した。

「食感性工学」の特色はヒトを対象とした基礎科学の研究成果を導入しながら、センサーなどの計測技術からマーケティング手法の開発に至る流れをシステム化して取り扱うことにより、消費者の感情・購買意欲をも促進する戦略的コミュニケーション操作法の開発も包含している点にあると言える²³⁾。近い将来、先端計測技術と五感コミュニケーション数理モデルを併用し、また、逆に従来の官能評価手法を数理モデル構築のアイデアとして還元しながら、消費者の食感性を高度に定量化してゆくプロセスが進展するものと予測される。これに伴って、高度な客観性に裏付けされたマーケティング手法の開発も多方面で進展するものと考えられる。その結果、例えば、従来社長の「鶴の一声」で決まったと言われる新製品の開発戦略等に客観的な判断材料を提供する「食品消費予測・判断システム」が選挙開票結果の予測システムと同程度の信頼性を持って実用化されることが期待される。本稿が「味と香り」に関心を持っておられる全ての読者に、新しい視点と何らかのモチ

バージョンを提供することになれば幸いである。

文 献

- 1) 津田基之, 「生物のスーパーセンサー」, 津田基之(編), (共立出版, 東京), pp. 3-9 (1997).
- 2) 鈴木良次, 「生物情報システム論」, (朝倉書店, 東京) pp. 25-29 (1991).
- 3) 倉橋 隆, 「生物のスーパーセンサー」, 津田基之(編), (共立出版, 東京), pp. 44-53 (1997).
- 4) 倉橋 隆, 渋谷達明, 「匂いの科学」, 高木貞敬, 渋谷達明(編), (朝倉書店, 東京), pp. 67-75 (2002).
- 5) 倉橋 隆, Gold G.H., 匂い情報の細胞内変換機構, 生物物理, **34**, 9-14 (1994).
- 6) 外池光男, 匂いの受容メカニズム, *Clinical Engineering*, **6**, 566-571 (1995).
- 7) 栗原堅三, 味覚と嗅覚の分子機構～化学情報の電気信号への変換～, 科学, **54**, 669-678 (1984).
- 8) 森 憲作, 「匂いの応用光学」栗岡豊, 外池光男(編), (朝倉書店, 東京) pp. 14-23 (1994).
- 9) 渋谷達明, 神崎良平, 「匂いの科学」, 高木貞敬, 渋谷達明(編), (朝倉書店, 東京), pp. 98-138 (2002).
- 10) 山本 隆, おいしさの評価にかかわる脳機能, 日本官能評価学会誌, **3**, 5-9 (1999).
- 11) 外池光雄, 匂いセンサ, テクノインテグレーション, **8**, 56-60 (1992).
- 12) 都甲 潔, 味覚計測へのセンサ利用の現況, ジャパンフードサイエンス, **37**, 31 (1998).
- 13) 都甲 潔(編著), 「食と感性」, (光琳, 東京), p. 155 (1999).
- 14) 花井泰三, 知識情報処理を用いたコーヒーの品質モデル, 日食工誌, **44**, 560-568 (1997).
- 15) 各務彰洋, ニューラルネットワークと遺伝的アルゴリズムを用いた吟醸酒の品質モデリング, 生物工学, **73**, 387-395 (1995).
- 16) Hatfield, J.V., Towards an Integrated Electronic Nose Using Conducting Polymer sensors, *Sensors and Actuators B*, **18**, 221-228 (1994).
- 17) 外池光雄, 匂いセンサ, テクノインテグレーション, **8**, 56-60 (1992).
- 18) 松野 玄, 水晶振動子式脂質膜においセンサの開発動向, 平成7年度農業施設学会秋期シンポジウム講演要旨集, pp. 26-31 (1995).
- 19) 大下誠一, 匂いセンサによる果実の匂い識別に関する研究, 第58回農業機械学会年次大会講演要旨, pp. 325-326 (1999).
- 20) Deibler, K.D., Solid Phase Microextraction application in Gas Chromatography-Olfactometry Dilution Analysis. *J. Agric. Food Chem.*, **47**, 1616-1618 (1999).
- 21) Miyanari, A., Kaneoke, Y., Ihara, A., Watanabe, S., Osaki, Y., Kubo, T., Kato, A., Yoshimine, T., Sagara, Y. and Kakigi, R., Neuromagnetic changes of brain rhythm evoked by intravenous olfactory simulation in humans. *Brain Topography*, **18**, 189-199 (2006).
- 22) Miyanari, A., Kaneoke, Y., Sagara, Y., Honda, M., Sadato, N. and Kakigi, R., Human brain activation in response to olfactory simulation by intravenous administration of odorants. *Neuroscience Letters*, **423**, 6-11 (2007).
- 23) 相良泰行, おいしさを探る感性工学, 日本味と匂学会誌, **8**, 153-159 (2001).

(平成21年6月16日受理)