

感性センシングシステム（その2）
～ 味・匂い・テクスチャの
感性センシングシステム～

東京大学

相 良 泰 行

冷凍 2003年11月号 別刷

社団法人 日 本 冷 凍 空 調 学 会

8. 感性センシングシステム (その2) ～味・匂い・テクスチャの感性センシングシステム～

相良 泰行* Yasuyuki SAGARA

1. 感性計測・評価システムとは

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」、「匂いセンサ」などとネーミングされて商品化されている。これらのセンサはシステムの中に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、たとえば、青果物の糖度と酸度を同時に計測する「光糖酸度センサ」や「携帯型ガスクロマトグラフィー」は測定対象物質の含有成分を分析し、その濃度を数値として表示する機能を有している。しかし、これらの計測機器には、人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、ヒトは表示された数値から味や匂いの「強度」や「好き嫌い」などを評価・判断しなければならない。すなわち、表示された数値はヒトの評価・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」は近赤外分光法による呈味成分濃度値とヒトの官能検査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、システムの中にヒトが感じる「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、たと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」または「感性計測システム」などと従来の技術用語に「感性」を加えて区別している。

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ともに、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」および「匂いセンサ」を取り上げ、その計測原理・特徴・適用例について概説する。また、近い将来、感性計測システムとして実用化が期待されている「テクスチャ感性計測」の現状についても解説する。

2. 嗅覚のメカニズム

生物スーパーセンサの一例として^{1,2)}、最近の生理学的研究から判明した人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を受容、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³⁻⁶⁾。

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

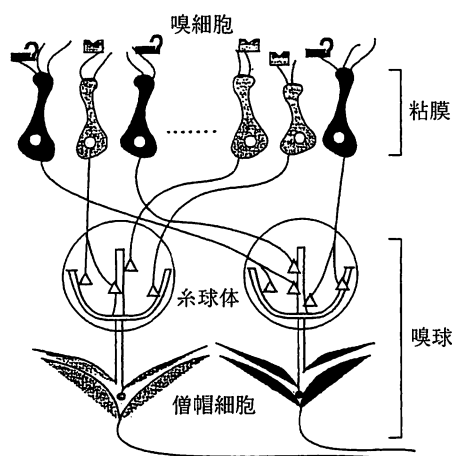


図1 嗅細胞から嗅球への神経ネットワーク¹⁰⁾

* 東京大学 大学院農学生命科学研究科 農学国際専攻
The University of Tokyo, Graduate School of Life and Agr. Sciences Dept. of
Global Agr. Sciences
原稿受理 2003年9月17日

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ことが次第にわかってきた。ウサギは片半球に約2000個の糸球体を持っており、1つの糸球体には約26000個の嗅細胞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選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²⁾、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。

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。しかし、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わかっている。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^{4,6)}。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ことは明らかである。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、1つの感覚のメカニズムを解明することは、ほか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」の典型例であり、感性工学が対象とするセンサはこのような「インテリジェントセンサ」とも呼ばれるものにほかならない。

3. 米の食味計

近赤外分光法を応用した味覚センシングの例として、「米の食味計」を取りあげ、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。このシステムでは近赤外分光分析により食味呈味成分の含有量を推定し、次に、食味成分含有量のデータから官能検査結果を予測し、「食味評価指数」を表示する機能を有している。呈味成分量から評価指数を推定する

ために多様な方法が採られているが、ここでは非線形多変量解析を高速度で実現したニューラルネットワークによる推算方式について解説する。この方式では、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タンパク質および⑥検出器温度、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ニューラルネットワークが考えられ、教師信号には官能検査データが入力された。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検査から得られる食味スコアを、計測された米の食味成分から良好に推定することが可能になった。

このシステムの革新的な点は、粒状または粉状の材料のまま成分分析を行い、炊飯した後の食味を予測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、まず、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、次に標準化された官能検査の手法とその信頼性の高い結果に対する評価法が確立されていた

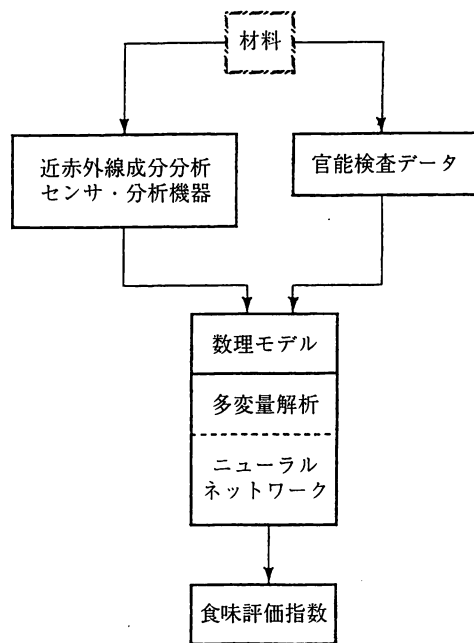


図2 米の食味計測システム概念図

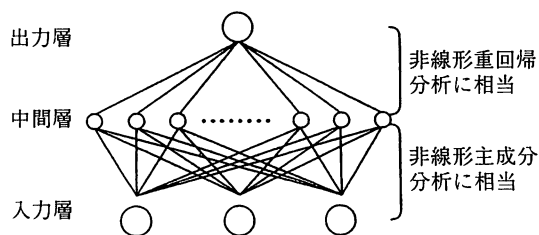


図3 ニューラルネットワークと非線形多変量解析

ことである。このことが成分分析結果と官能検査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の普遍的信頼性が官能検査結果から得られた意義は大きいと考えられ、人の嗜好に関する数量化手法の重要性が浮き彫りにされている。このことは、現在、このシステム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関する官能検査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た研究例が報告されている。

4. 味覚センサ⁸⁾

4.1 原理と構造

都甲らはバイオセンサのアイデアに基づく味覚センサを開発した。バイオセンサは生物由来の機能性膜で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。その原理を説明するために、人工脂質膜を味溶液中に浸した場合に発現する膜近傍の電位プロフィールを図4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電位を検出する。したがって、この種の化学センサ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認する必要がある。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つの脂質を選び、これをポリ塩化ビニル (PVC) に混入して人工脂質膜を形成し、これらの膜の味溶液に対する応答感度が計測された。

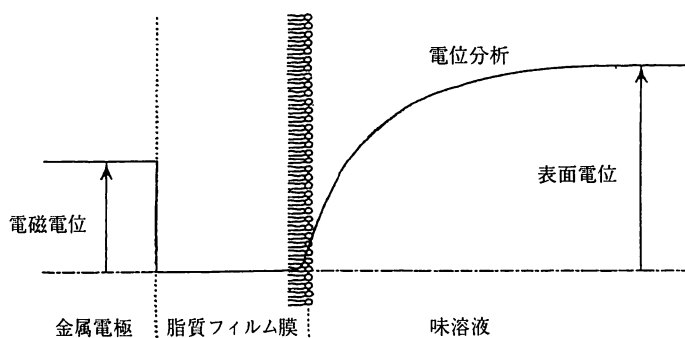


図4 水溶液中における脂質膜近傍の電位プロフィール⁸⁾

このようにして製品化された脂質膜電極の構造を図5に示す⁷⁾。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る。通常、脂質の異なる8つの人工脂質膜電極または高分子脂質膜電極が準備され、マルチチャンネルによる同時計測を可能としている。

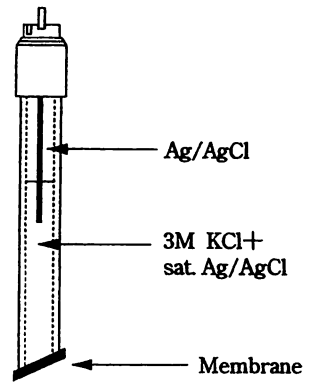


図5 脂質膜電極⁷⁾

4.2 出力パターンと測定例⁷⁾

マルチチャンネル味覚センサの基本味呈味成分に対する電位の応答パターンを図6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。図7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(まろやか) - (刺激的)のスケールを表わし、また、(さわやか)および(濃厚)の程度を表わ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K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A社の製品が(A-SUPER DRY)のように表示してある。

この図に示すように、味覚センサは同一カテゴリ内の商品の味を識別することが可能であり、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て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る。また、従来のセンサの大部分は高度の選択性を追求する方向で開発が進められてきたが、味覚センサ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。

5. 匂いセンサ

5.1 匂いセンサ開発の現状

食品の匂いは多成分で構成され、ヒトはその匂いを総体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

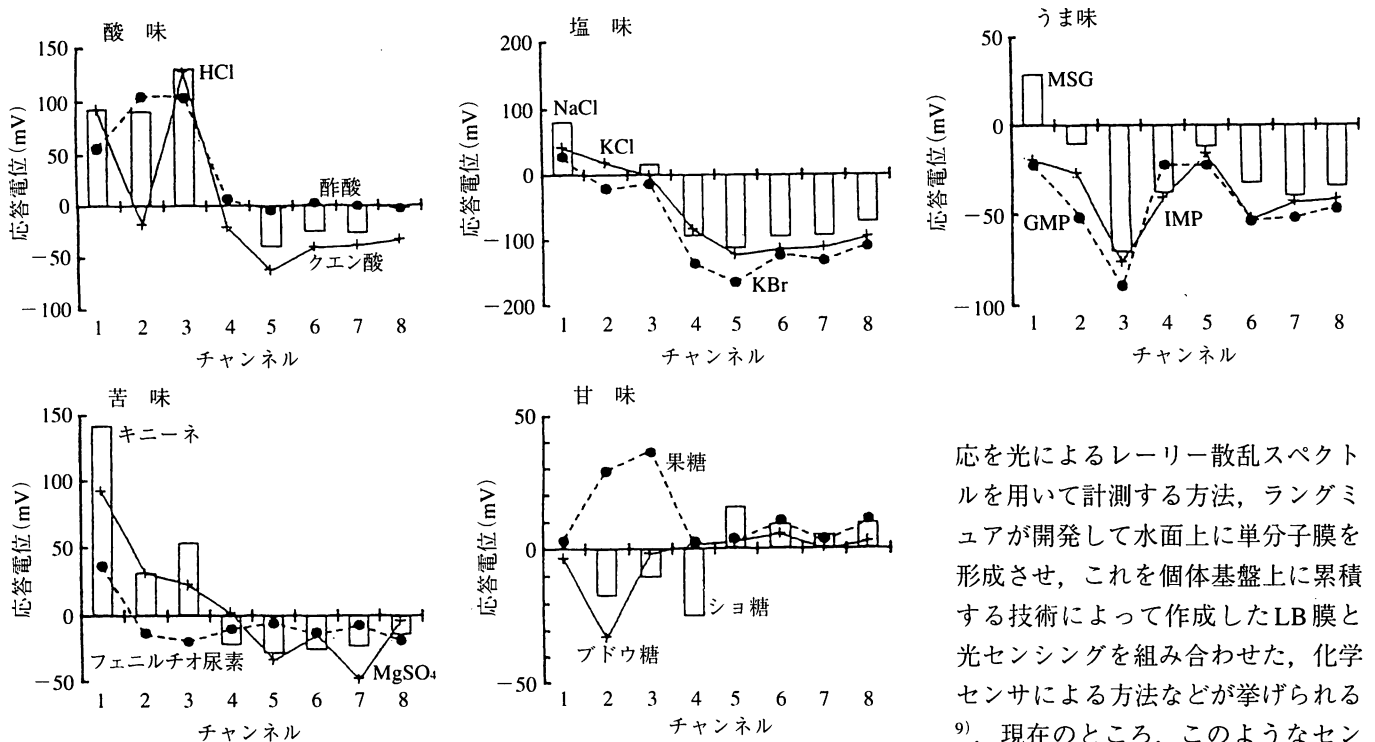


図6 マルチチャンネル味覚センサの基本味応答パターン⁸⁾

応を光によるレーリ-散乱スペクトルを用いて計測する方法, ラングミュアが開発して水面上に単分子膜を形成させ, これを個体基盤上に累積する技術によって作成したLB膜と光センシングを組み合わせた, 化学センサによる方法などが挙げられる⁹⁾. 現在のところ, このようなセンサの中で, もっとも実用性の高いものとして「水晶振動子式匂いセンサ」

と「膜電気抵抗式匂いセンサ」が挙げられる. 以下にこれらの測定原理と計測結果を紹介する.

5.2 水晶振動子式匂いセンサ¹¹⁾

このセンサの構造と測定原理を図8に示す. このセンサは厚み滑り振動モードでカットされた水晶振動子の表面に, 合成脂質フィルムを多層化した人工脂質膜を塗布した構造をしている. 水晶振動子は超高精度のマイクロバランスであり, 表面に塗布した脂質膜に吸着する匂い成分の重量変化を周波数の変化として検出する. すなわち, 空気中に存在する匂い分子は膜との親和性によって, ある一定の割合で膜に吸着し, その質量を増加させる. この質量付加効果により, 振動子の共振周波数が低下する. この共振周波数の

低下量 Δf は吸着した匂い分子の質量に正比例することが知られている. さらに, 匂いの種類を識別するために, 各種のPVCブレンド脂質膜を塗布した水晶振動子が用いられ, マルチセンシングを可能としている.

センサ出力と各種の臭気濃度との関係を図9に示す. この図のプロットからわかるように, このセンサは各種の匂いを識別することが可能であり, その出力はアルミアセテート濃度とリニアな関係にあることがわかる. 食品を対象とした測定例は数少ないが, 密閉した袋の中に

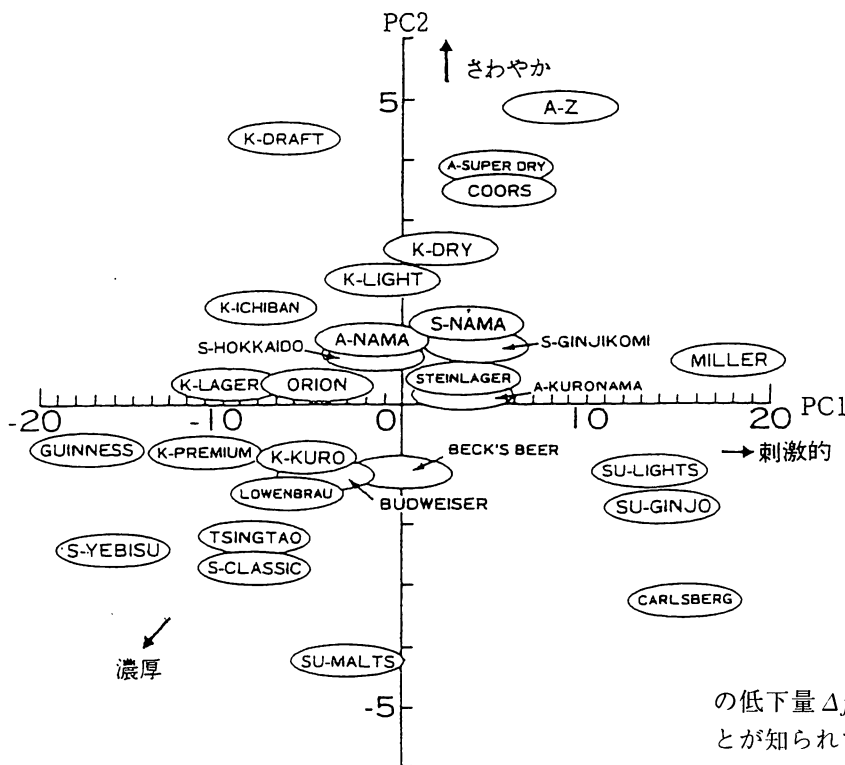


図7 ビールのテイストマップ⁷⁾

のセンシング方式を模倣したセンサが開発途上にあり, その一部が実用化されている. それらの中には, いくつかの金属半導体や高分子膜を用いる「電子鼻 (Electronic Nose)」¹⁰⁾, 生体膜のモデルであるリポゾームの凝集反

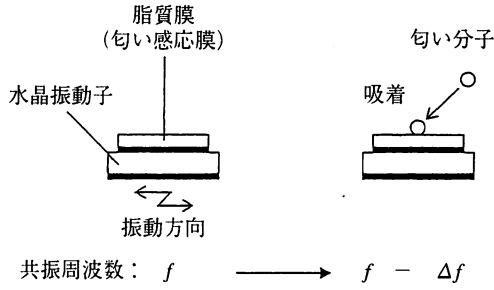


図8 水晶振動子式匂いセンサの構造と原理⁽¹⁾

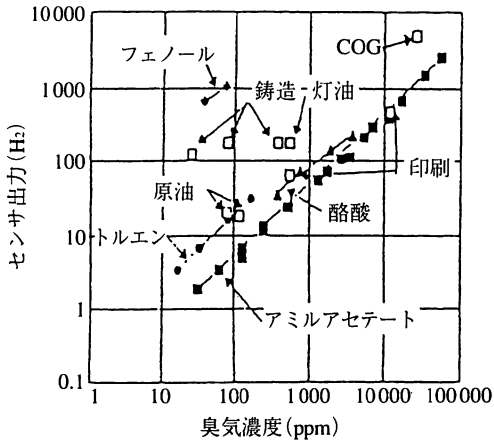


図9 臭気濃度との相関⁽¹⁾

放置したバナナの香りに対しては数100 Hzの応答が得られており、今後、食品、青果物および花卉への応用が有望視されている。

5.3 膜電気抵抗式匂いセンサ

多チャンネル膜電気抵抗式匂いセンサは多数の帯状高分子膜の電気抵抗を同時測定し、その経時変化のパターンをクラスター分析して匂いを判別する方式となっている。匂い感応膜には改質ピロール、アニリン、チオフェンの誘導体の共または重合によって製造される半導体ポリマーを使用している。センサ部分には15 mm角のセラミック基盤上に32種類の膜が配列されている。このセンサ上に匂い成分を含み調湿された空気が導入されると、感応膜は選択的に匂い成分を吸着し、その結果、膜の電気抵抗が変化する。匂いの識別法にはクラスター分析が用いられ、その出力例を図10に示す。具体的には、1つの匂いについて32のデータが出力されて32次元空間にプロットされる。この空間の複数のプロットを、プロット間の距離を保ったまま次元圧縮により2次元または3次元空間にプロットすることにより視覚的な表示を可能としている⁽²⁾。すなわち、このセンサでは「匂いの違いの程度」が判別可能である。

このセンサを用いてカマンベールチーズの熟成過程における匂いの変化をモニターした例を図11に示す。前にも述べたように、図のXY座標は香りの違いの程度を

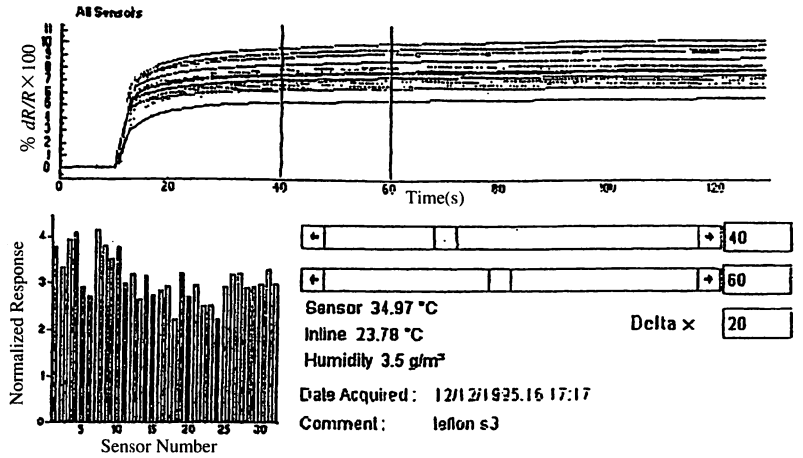


図10 膜電気抵抗式匂いセンサの出力 (アロマスキャン社提供)

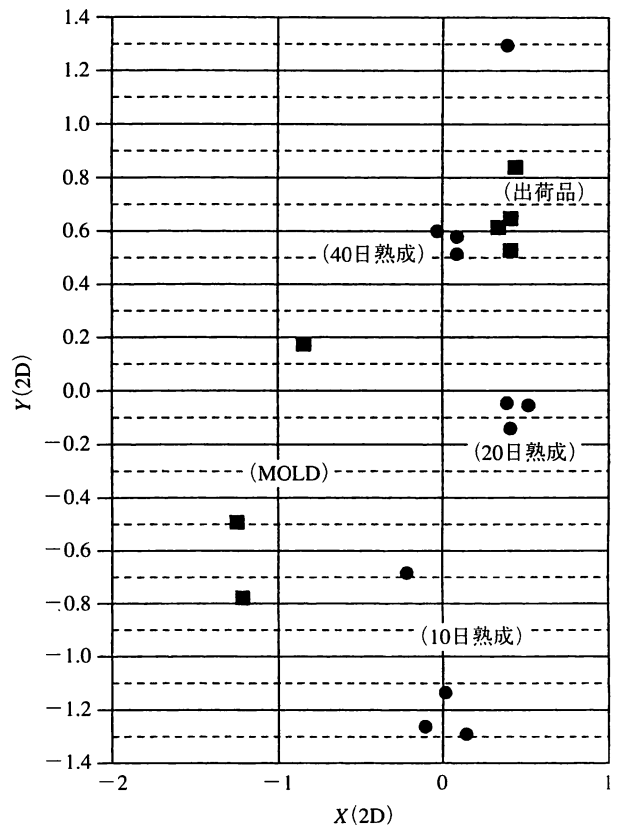


図11 カマンベールチーズの熟成過程における匂い変化 (アロマスキャン社提供)

平面座標上に示すためのもので、物理化学的な意味のある量を示すものではない。この無次元座標にヒトの感覚量を盛り込むためには、これらのデータに主成分分析などの官能評価における数量化手法を適用する必要がある。カマンベールの熟成過程はY軸方向の匂い変化として現われ、熟成過程でのカビの発生が検知可能であることがわかる。現在、このセンサの多方面における適用可能性を探る研究が進められている状況にある⁽²⁾。

6. テクスチャのセンシング

6.1 テクスチャセンシングの現状

触覚のメカニズムに関する研究は他の感覚に比べ、大幅に遅れている。食品の口腔内における噛み心地である「テクスチャ」についても、その感性計測・評価システムの実用化はほとんど不可能な状況にある。元来、テクスチャは食品中における主要成分の量的な比率や存在状態により支配される特性である。そこで、多様な食品素材や製品の属性として、その力学的特性を独自の方法で計測し、何らかの方法でテクスチャの官能検査結果と相関を採る方法が試みられてきた。たとえば、「裂きチーズ」、「グミ菓子」、「腰の強い麺類」および「蟹足カマボコ」や「人造イクラ」などのコピー食品の開発に用いられた計測法がその典型例である。

他方、小麦粉を主要な原料とするパン生地類の粘弾性はブラベンダー社が製造している「アミログラフ」や「ファリノグラフ」などの多様な計測器によって計測され、これらの計測装置を用いた方法が世界的な標準法として認知されている¹³⁾。これはパン生地の粘弾性特性が計測に用いる機器と方法により異なるために、その品質を客観的に評価するための特殊な計測機器と測定法を開発して標準化した例である。この標準化は世界的な小麦粉の取引を客観的なデータに基づき行うために必要とされているが、このような例は希である。また、焼成後のパンのテクスチャを推測する標準法として用いられている訳ではない。

現在のところ、食品のテクスチャに関連する力学的特性は、工業材料の試験法である「一軸圧縮・引張試験」と「クリープ試験」、もしくはこれらを組み合わせた方法により測定されている現状にある。しかし、これらの方法では各種の形状をした金属製プランジャを用いて、その往復運動や口腔内の咀嚼をまねた運動で食品に力を加え、または破壊して得られる力・応力と歪みの関係を示す曲線から、テクスチャとの関連を類推している。このために、同じ食品を対象としながらその測定法はまちまちであり、得られた結果も当然異なる。このような現状を脱却するためには、今後、食品を構成する成分の三次元的構造と強度を分子レベルでモデリングし、このモデルによりテクスチャとの関連を定量化する手法の開発が望ましいと考えられる。

ここでは、主に、筆者らが食パンクラムの粘弾性特性を計測するために行った圧縮試験およびクリープ試験の測定例を示しながら、標準化に必要な条件につき解説する。

6.2 圧縮・破壊試験

ここでは一般にレオメーターと称される圧縮・引張り試験器で、食パンクラムのスライスおよびブロック状サンプルを圧縮して得られる圧縮力-変形率曲線の例を示す。試料の採取方法とそれぞれの試料の圧縮法を図12に示した。図13は直径55 mmの円形プランジャを用いて、圧縮速度5 mm/sでクラムブロックを圧縮して得られる典型的圧縮力-変形率曲線を示す。この曲線の初期部分（I）は載荷直後の不安定な状態を示し、サンプルとプランジャの両表面間の接触状態により影響を受け

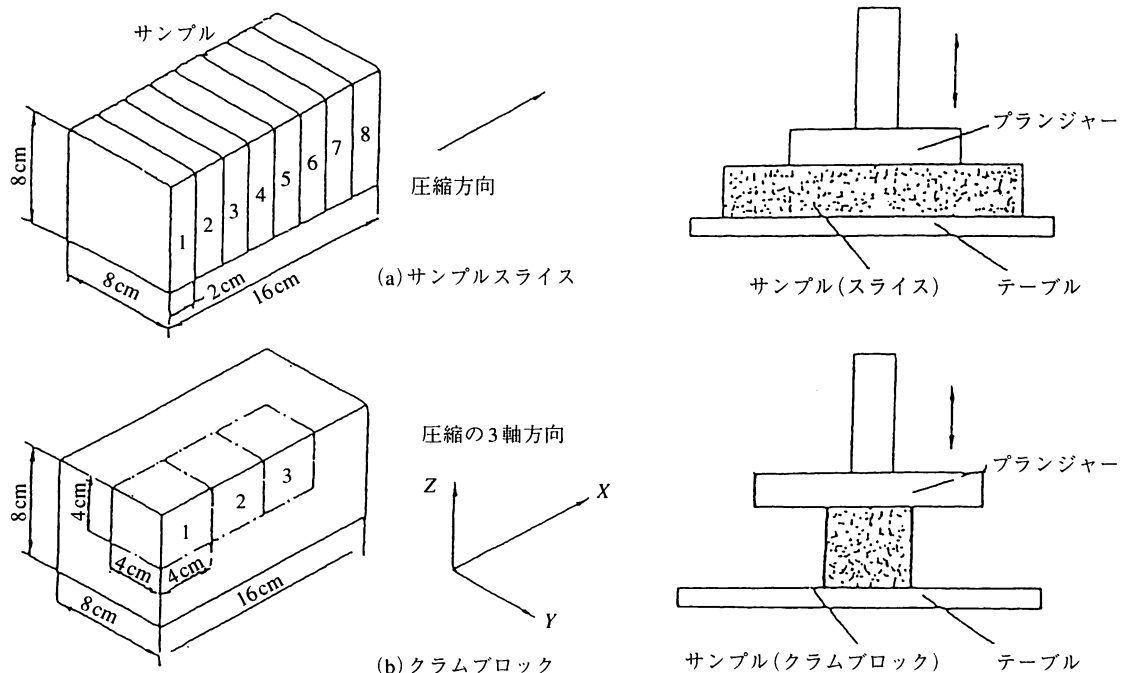


図12 サンプルと圧縮条件

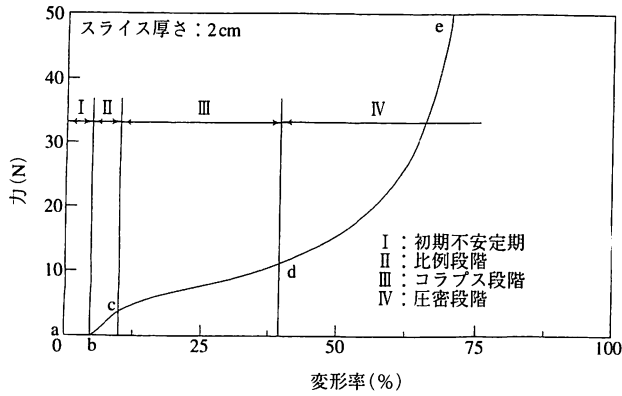


図13 食パンクラムの圧縮力-変形率曲線

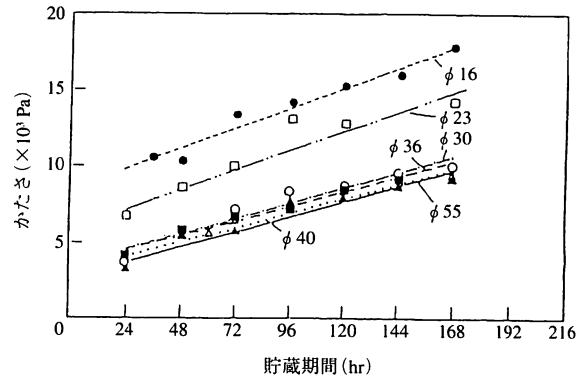


図14 かたさに及ぼすプランジャーサイズの影響

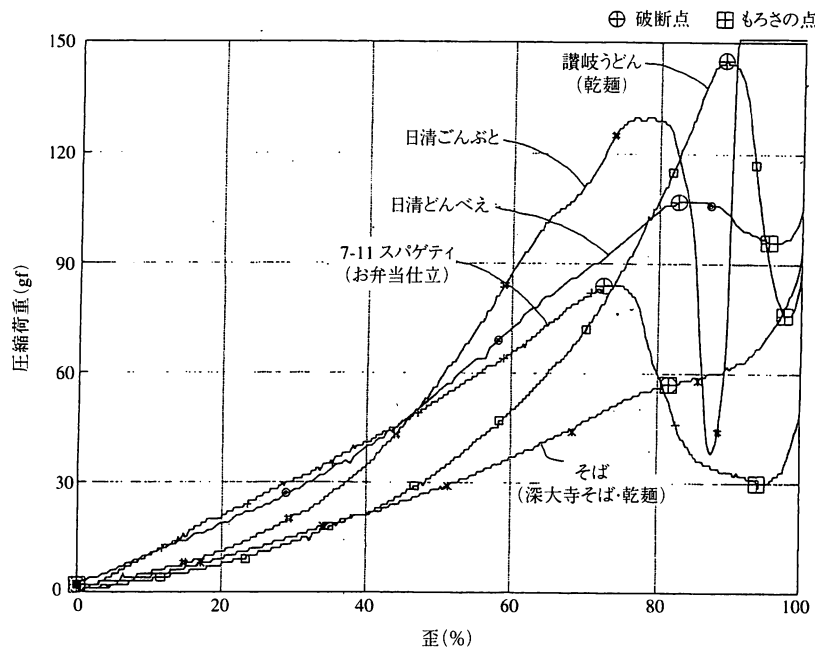


図15 麺類の破断曲線 (山電提供)

て次第に破壊されるため、この区間をコラプス段階と称することにして、変形率がさらに大きくなると圧密段階に至り、ここでは空隙が消滅して組織が高密度化され、これを圧密するために必要な圧縮力は急激に増大する。これらの挙動は口腔内でクラムを1回だけ噛んだときの応力-歪みの関係を表わしているものと考えられる。

ここに示した曲線は圧縮速度とプランジャの形状およびサイズにより影響を受ける。たとえば、プランジャ直径がかたさに影響を及ぼす状況を図14に示す。この図よりプランジャ直径が30 mmより大きくなると、ほぼ一定のかたさが測定可能となることがわかる。図15はくさび状のプランジャを用いて各種の麺類を破断して「こし」の強さを評価した例である。それぞれの曲線に破断点ともろさに相当する点を示しており、讃岐うどんの曲線に示されるように、破断点に至る曲線の勾配が大きく、さらに破断後にも圧縮力が維持される麺ほどこしが強いものと判断される。このように、再現性のある結果を得るためには、試験の目的と対象物に合致した標準的試験法をあらかじめ決定しておくことが重要である。

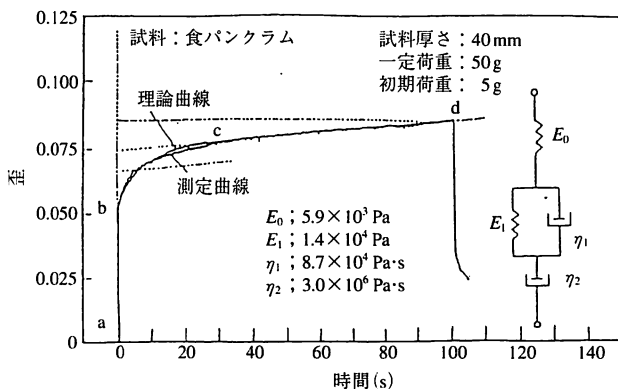


図16 クリープ曲線と4要素粘弾性モデル

る。この期間を過ぎて比例段階(II)に至ると(変形率4~12%)、試料は弾性的挙動を示す。変形率が約40%に至る次の区間(III)では、曲線の勾配が小さくなり、クラムの空隙を構成する固相の網状マトリクスが変形し

6.3 クリープ感性評価システム¹⁴⁾
食パンクラムのクリープ試験により得られた典型的曲線を図16に示す。また、図中には得られた曲線を4要素粘弾性モデルで近似した場合の各要素の係数値を示した。クリープ曲線は瞬間変形部(ab)、遅延変形部(bc)、および定常流動部(cd)で構成されることがわかった。試料は瞬間変形部(ab)でフックの法則に従う弾性的挙動を示し、定常流動部ではニュートン流体と同様に、時間に比例する歪みの増大を示し、残りの定常流動部では粘性と弾性の複合作用による挙動を示すことがわかる。この曲線を精度良く再現するためには、粘弾性モデルの

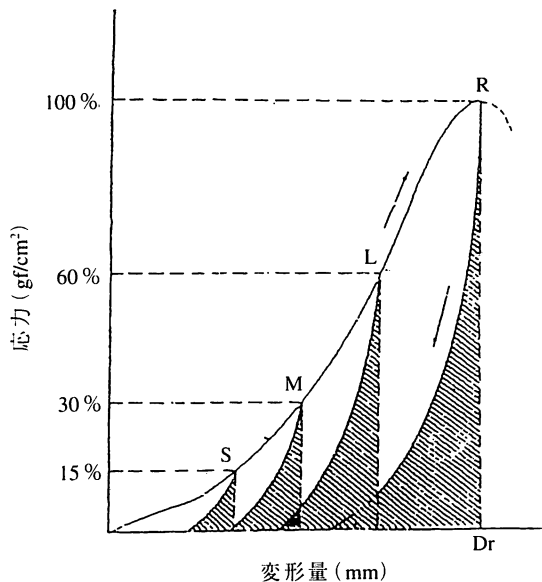


図17 破断および破断にいたる途中の変形段階についての圧縮・回復試験からの荷重・変形曲線¹⁴⁾
R：破断，L：大変形，M：中変形，S：小変形

要素数を限りなく増やすことによって可能であるが、逆に食品の品質設計などを要素の値から考察するためには、要素数はできるだけ少なくする必要があります。

クリープ試験に基づく感性評価システムの構築例として、破壊点に至るまで数回に渡り载荷を中断して、テクスチャを計測する方法を図17に、また、この方法に基づき得られた各種食品の3次元テクスチャマップを図18に示す¹⁴⁾。このマップの作成方法は力学的特性値の測定、知覚量の因子分析および3次元グラフ表示の手順から成り立っている。図18に採用された3軸は主成分分析により採用されたものである。それぞれのテクスチャは「かたさ」と「くずれにくさ」および弾性を基準にして区別され、テクスチャの違いがマップの位置として表現されている。このようなマップを作成することにより、消費者の好むテクスチャの動向を把握し、その動向に添った食品の開発を行うことが可能となる。すなわち、官能評価に必要な時間と労力を大幅に削減し、定量的データに基づくプロダクトマネジメントが可能となる。この

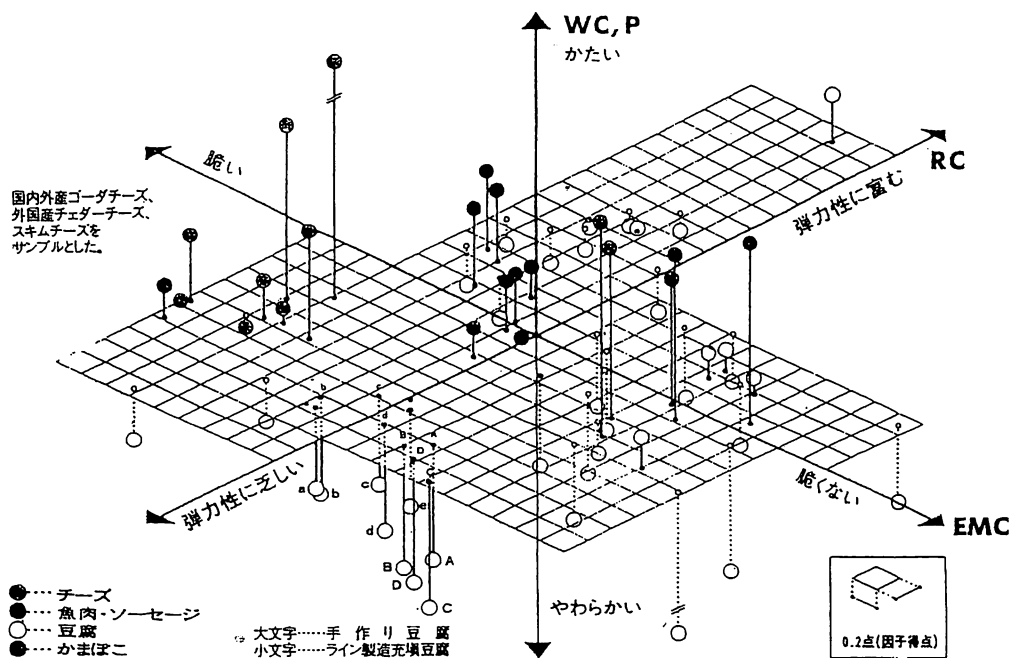


図18 テクスチャーマップ¹⁴⁾

ように、機器測定と因子分析の組み合わせは、今後とも感性情報処理の手段として有望視される。

文 献

- 1) 鈴木良次：「生物情報システム論」, p.25, 朝倉書店, 東京 (1991).
- 2) 津田基之他：「生物のスーパーセンサー」(津田基之編), p.3, 共立出版, 東京 (1997).
- 3) 外池光男：Clinical Engineering, 6 (8), 566 (1995).
- 4) 倉橋隆, 渋谷達明：「匂いの化学」(高木貞敬, 渋谷達明編), p.67, 朝倉書店, 東京 (1989).
- 5) 栗原堅三：科学, 54 (11), 669 (1984).
- 6) 森憲作：「匂いの応用光学」(栗岡豊, 外池光男編), p.14, 朝倉書店, 東京 (1994).
- 7) 都甲潔：ジャパニフードサイエンス, 37 (3), 31 (1998).
- 8) 都甲潔：「味覚センサ」, 朝倉書店, 東京 (1993).
- 9) Hatfield, J. V. et. al：Sensors and Actuators B, 18 (19), 221 (1994).
- 10) 外池光雄：テクノインテグレーション, 8 (7), 56 (1992).
- 11) 松野玄：「平成7年度農業施設学会秋期シンポジウム講演要旨集」, p.26 (1995).
- 12) 大下誠一他：「第58回農業機械学会年次大会講演要旨」, p.325 (1999).
- 13) 長尾精一：「小麦とその加工」, p.189, 建昴社, 東京 (1984).
- 14) 森友彦他：食品と開発, 31 (2), 8 (1996).