

最近の食嗜好センシング技術の動向

東京大学助教授

相 良 泰 行

さが ら やす ゆき

はじめに

近年、食品に限らず、楽器・自動車などの設計・生産に、人の「感性」を考慮する試みが始められ、いろいろな分野の学会などで「感性」をキーワードとする研究が発表されるようになってきた。このように「感性」は生活のアメニティーと密接不可分の関係にあり、近い将来に学問的にも産業的にも急速な発展が予測される。

食生活のアメニティーを表わす一つの尺度は、食物に対する人の「嗜好」の程度であり、これと逆方向の尺度は「嫌悪」で表現されよう。食品に対する人の味覚や嗜好を、何らかの理工学的手法で計測し、再現性や客観性の高い数量化された情報を得るシステムが確立されることになれば、食品産業分野における新食品の開発やプロダクトマネジメント、さらにはマーケティングの戦略に革新的な改善がもたらされるものと期待される。このようなシステムを構築するためには、食品が保有している物質的属性と食生活に関する人の心理学的要因を抽出して、これら相互の関連性を明らかにし、最終的には「人の食に対する感性」を数量化しなければならないと考えられる。

従来、このための技術を開発することは極めて困難とみなされ、一般的には食品に対する人の反応を各種の「官能検査」手法を適用して把握する努力がなされてきた。しかし、官能検査にも再現性や信頼性に疑問が残る場合が多く、検査結果の

利用に当たっては再度、人の主観的判断を要するなど、この方法にもさらなる研究が必要とされている現状にある。

一方、近年に至り、生体や食品を対象とした電磁波による非破壊成分分析や、品質の定量的評価技術が実用化されてきた。「人の食嗜好」の評価・判断に、特に要望される理想的条件は「非破壊・遠隔・高速度の3条件」であり、しかも同時にこれらを満足する計測や情報処理の手法であろう。今のところ、このような条件を満足する情報伝達媒体としては電磁波が最も適しており、いわゆる光センシング技術として、多方面でその研究・開発が進められて実用化が進展してきている。

例えば、食品や農産物を対象とした光センシングの分野では、近赤外分光法を測定原理とする「米の食味計」や、CCD カラーカメラと画像処理技術を組み合わせた「カラージェーダー」等が実用化され、世界的な工業技術レベルからみても、画期的な技術として高く評価されている。

バイオエレクトロニクス分野においては、生体が保有しているセンシング・通信・判断システム等のメカニズムの解明が精力的に進められている。これらのメカニズムを模倣する形で、バイオセンサ、特に各種の脂質膜を利用した味覚や匂いのセンサが実用化されつつある。

さらに知識工学の分野では、人の情報処理法を模したファジィ理論や学習機能を持つニューラルネットワーク・モデルが考案され、その利用は生活のアメニティー化をもたらす電化製品にまで浸

透している。

このような現状を踏まえると、個々の工学的な計測技術と官能検査や、マーケティング分野で発達してきた数量化手法を統合してシステム化することにより、従来不可能と考えられてきた食品に対する消費者の味覚や嗜好を定量的に評価し、この結果に基づく商品開発や、販売戦略の検討にも役立つ技術的・学問的領域の構築が可能と考えられる。筆者はこの領域をカバーする新しい学術研究の分野を「食品感性工学」として提唱している。

ここでは、農産物や食品を対象とした光センシングの具体的な成功例として、「青果物選別システム」、「果実の糖度・酸度・熟度センサ」および「米の食味計」の技術レベルを紹介し、さらに「匂いセンサ」の開発状況を概説すると共に、その成功に寄与した要因について考察する。

1 青果物選別システムの概要

青果物を選別する意義は、所定の基準により対象品目の等階級を揃え、その基準に基づく等階級レベルの品質を保証する事にある。

したがって、選別システムの基本的な機能は「人為的に定めた基準に従って、非破壊で全数を検査し、その基準を超える青果物と基準以下のものに仕分ける」ことにある。その選別方法を大別すると、規格の大小基準に相当する重さや大きさに基づいて選別する「階級選別」と、品質基準に相当する外観、損傷、味等に基づいて選別する「等級選別」に分けられる。

選別の機械化は、まず球形果実を対象として、機械的な篩いを用いて果実のサイズにより選別する「形状選別機」に始まり、次に果実の重量を機械的秤で計って選別する「重量選別機」が開発された。次の段階では、重量選別機の計測部にロードセルやフォースコイルを用いる「電子秤重量選別機」が開発され、現在では国内におけるこの方式の普及率は、60%以上と推定されるほど技術的にも信頼性が高く、安定・定着した装置となっている。

一方、形状選別にはカーテンビームを用いて光学的に果実のサイズを計測する方式が導入され、次に、モノクロムカメラで撮影した撮像を画像処

理して果実の形状を抽出する「画像処理式形状選別機」が開発された。これにより、複雑な形状を有するキュウリ等の長物青果物の選別も可能となった。この装置ではキュウリの「長さ」「太さ」「曲がり」「鼻曲がり」「体積」等が画像処理により計測され、ここに至って等級選別要因の一部が機械的に判別可能となり、等階級同時選別への道が開かれた。

さらに撮像センサをカラーカメラに変えることにより、果実表面色の着色度・傷等に関する詳細な外観の等級判別情報と階級判別要因とを、総合的に解析・判定して選別する機能を持つ「カラーグレーダー」が開発され、主に落葉果実の選別ラインに導入されてきた。

等級選別要因のなかでも、青果物内部の品質を判別する自動計測技術の出現は、選別機の開発当初からの長年の夢であったが、現在では「内部構造」に関してスイカの打音・密度計測による判別が可能となり、また、電磁波、特に近赤外線反射スペクトル分析による「糖度・酸度・熟度センサ」が開発され、選別ラインへ実装されるに至っている。

これら内部品質の測定システムについては、一部に性能に関する客観的評価に疑問は残るものの、選別システム全体としては世界的なレベルからみても、画期的な技術として注目を集めている。現在では、対象青果物の「重量」「形状」「外観」「内部品質」等の判別要因を、品目の特性と重要度に応じて選択し、それらの判別要因を自由に組み合わせる自動的かつ総合的に判断する選別システム、すなわち「インテリジェント選別システム」の利用が可能となっている。

2 カラーグレーダー

近年、R.G.B. カラーカメラを光センサとして用い、青果物の形状に関する情報に表面色の情報を加味して画像処理を行い、等階級同時判別を行う「カラーグレーダー」が開発され、リンゴ、モモ、トマト等の共選施設に導入されてきた。その計測処理部の概念図を図1に示す。計測処理部はカメラ、照明装置と反射ミラー、中央処理装置、制御処理装置、モニタTVで構成される。

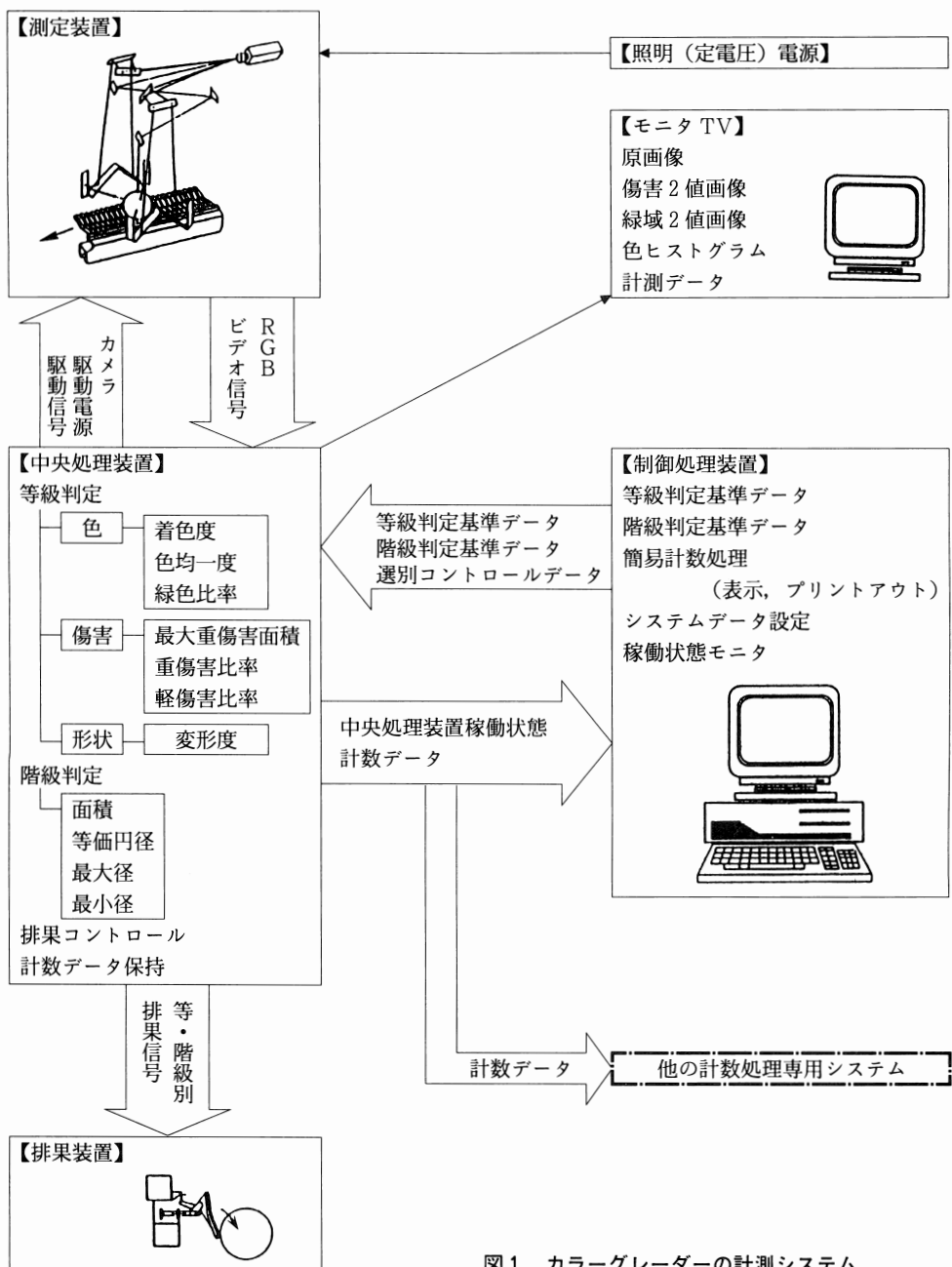


図1 カラーグレーダーの計測システム

整列供給装置によって、計測部に供給された果実の表面をハロゲンランプで均一に照明し、数枚の反射ミラーと1台の新しく開発された「高分解能R.G.B. リニアイメージセンサカラーカメラ」を組み合わせることにより、果実表面のカラー画像を検出する。この装置の開発の段階では、果実表面の全表面情報を画像として検出するために、

複数のカメラを多方向に設置したり、果実を回転させて機械的スキャンを行うなど、いろいろ工夫が試みられた。

実用的には図2の例に示されるように、カメラの直接撮像による果実上面画像と2枚のミラーによる2つの側面画像の合計3画像を画像処理に供する簡略化された方式が採用されている。

カメラの R. G. B. 出力信号は中央演算装置に送られ、等級の判定要因として表面色（着色度、均一性、緑色比率）、傷害（最大重傷害面積、重傷害比率、軽傷害比率）、形状（変形度）に関する情報に加工される。これらの等級判定要因のパラメータは、全ての撮像画について1画素毎に色値を求め、色値とその画素数から作成したヒストグラムに基づいて計算される。

その一例として、図3に128階調で求めた色値ヒストグラムに基づく色・傷害・形状に関するアルゴリズムを図示し、その内容を表1に示す。ま

た、階級の判定要因として表面積、等価円径、最大および最小径などが計算される。これらの情報は制御処理装置から送られる等階級判定基準データと比較され、最終的に等階級が判定される。判定結果は等階級別排果信号として排果装置に送られ、その排出ソレノイドを駆動する。中央処理装置の計数データは、制御処理装置や他の計数処理専用システムに送られ、精算事務処理等に利用される。

3 光糖度・酸度・熟度センサ

落葉果実を対象とする共選施設では、1990年頃からカラーグレーダーの計測部に「光糖度センサ」を設置し、果実の糖度を検出して、等級判別要因に加えるシステムが導入され始めた。この原理は、果実の近赤外吸収スペクトルもしくはこれの2次微分スペクトルの中から、果実の糖度と最も相関の高い波長を選び、その波長の吸光度と糖度の検量線を利用して果実の糖度を予測する方法、すなわち「近赤外分光法」に基づいている。

図4にその計測原理を説明するためのブロックダイアグラムを示す。まず、コンベア上の果実に光を照射して、果実表面からの反射光をレンズで

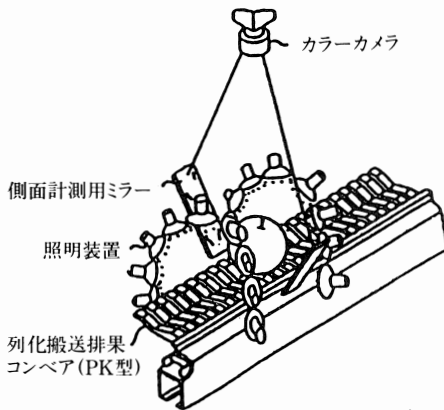
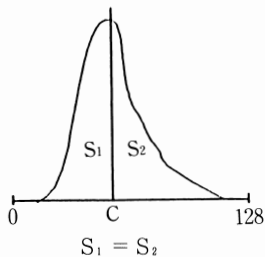
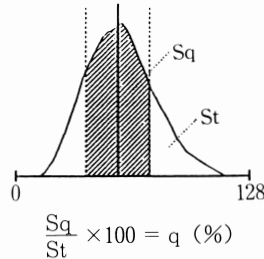


図2 実用カラーグレーダーの計測部

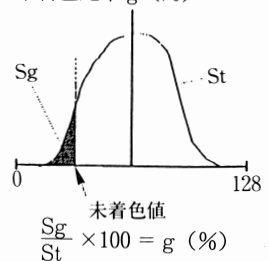
(1)着色度 C



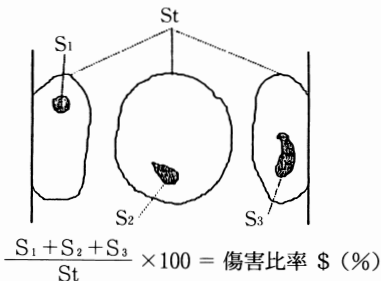
(2)色均一性 q (%)



(3)未着色比率 g (%)



(4)傷害比率 \$ (%)



(5)最大傷害面積 S (mm²)

$$S_3 = \text{最大傷害面積 } S \text{ (mm}^2\text{)}$$

(6)変形度 d/D (%)

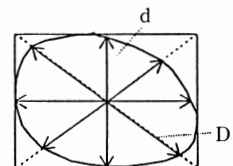


図3 カラーグレーダーの選別アルゴリズム

集光し、これを分光器にかけて所望する波長の近赤外線のみを取り出す。次に、受光素子で電気信号に変換し、それぞれの波長の反射強度を求め、最後に別途実験から求めた数理モデルを用いて、果実の糖度を算出する。この方式では、果実の反射光を分光するので「後分光」方式と呼ばれ、あらかじめ分光した波長帯の光を照射する「前分光」方式と区別されている。光の反射強度から糖度を算出するための検量線は、対象とする果実の種類・熟度のバラツキ程度、さらに等級の設定等によって異なる。

現在のところ、各選果場で異なる検量線が用いられ、これが販売戦略のデータとなって公表されていないために、このセンサの実用的精度を客観

的に評価するのは困難である。しかし、すでに導入した施設では、生産農家との格付けに関するトラブルの解消に役立ち、また、「糖度センサ」が商品差別化の手段として、市場で認知されることを期待しているようである。

最近、温州ミカン等に照射した光の透過光強度を測定して、果実の酸度を計測する「酸度センサ」が開発されて注目を集めている。果実の酸度は、近赤外領域の2次微分スペクトルを採ることにより、計測可能と考えられてきたが、現在、実用装置の導入が検討されている段階にあり、計測方法の詳細は不明である。

現在、糖度センサと同様に「熟度センサ」が一部の施設で導入され始めている。しかし、果実の熟度を定義する要因はメーカーによって異なり、それが公表されていないために、このセンサの実態は必ずしも明らかにされていない。ここでは、果実の熟度を表わす物理的指標として、表皮のクロロフィル含量と果実の硬度を電磁波の吸収度と相関させて検出し、これらを組み合わせて1つの熟度指標としている方式について述べる。

図5は西洋ナシ（品種：ル・レクチェ）の貯蔵中における電磁波の反射特性の経日変化を示す。波長帯400～700nmの範囲からは果実表面色の情報が得られ、特に680nm付近はクロロフィルの吸収波長であり、果実表面の着色度を表わす情報として利用される。果実硬度の変化は、800nm近傍の波長を採用することにより検出可能と考え

表1 カラーグレーダーによる等階級判定のアルゴリズム

選別パラメータ	記号	アルゴリズムの説明
1) 着色度	C	128階調で求めた色値ヒストグラムの中心値
2) 色均一性	q	色値(C)を中心にして指定した色幅内にある画素数の総画素数に対する割合
3) 未着色比率	g	指定した色値より緑側にある画素数の総画素数に対する割合
4) 傷害比率	\$	抽出した傷害画素数の総画素数に対する割合
5) 最大傷害面積	S	連続した傷で構成される最大集合画素の面積
6) 変形度	d/D	最大径Dに対する最小径dの比率(柑橘を除く)

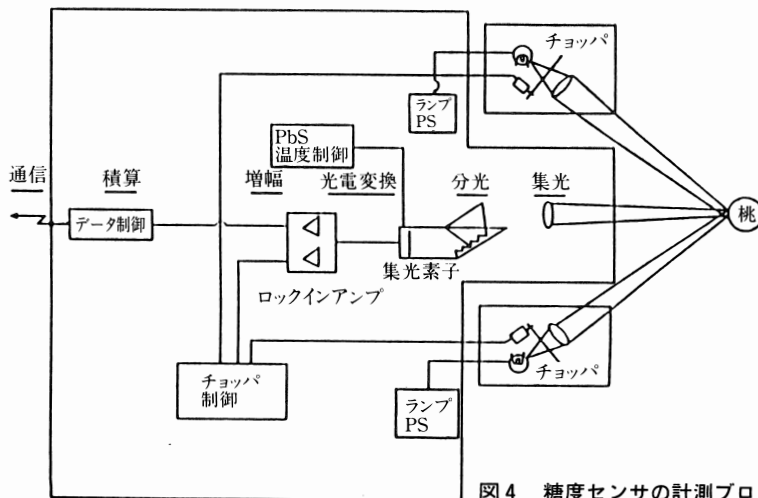


図4 糖度センサの計測ブロックダイアグラム

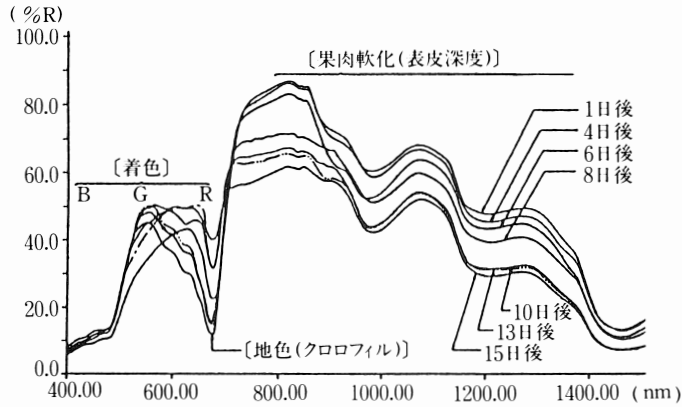


図5 西洋ナシ(ル・レクチュ)の熟度変化と光反射スペクトル

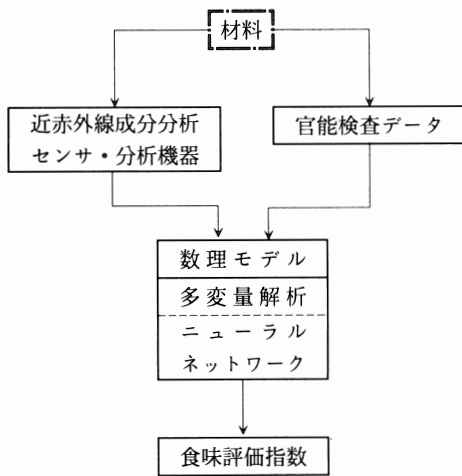


図6 米の食味計測システム概念図

られる。

電磁波の反射特性は果実の種類・品種により変化するので、実際にはそれぞれの果実・品種を対象として、ここに示したような反射特性を計測し、検出しようとする熟度パラメータの検出が、可能な波長を選択してパラメータを数量化し、これを演算処理することにより熟度指標を算出する方法が採られている。計測システムは、図4に示した糖度センサの場合と基本的に同様と考えられる。

4 米の食味計

現在、実用化されている食味や嗜好に関連する計測・評価システムの具体例として「米の食味計」を取りあげ、その技術レベルを紹介する。図6に

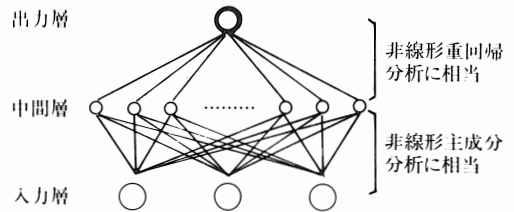


図7 食味値推算のためのニューラルネットワーク

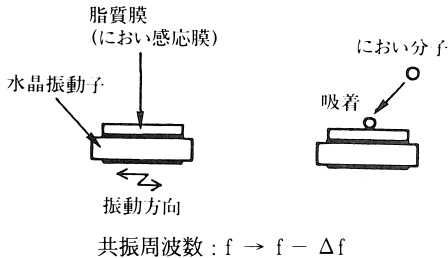
米の食味計の計測・評価システムの概念図を示す。このシステムの開発に当たっては、まず走査型近赤外線吸収スペクトルアナライザにより、材料の赤外線吸収特性曲線を測定し、これらのスペクトルの中から食味成分の吸収波長帯が特定されると共に、その含有量が推定された。次に、機器分析によって得られた食味成分含有量のデータから官能検査結果を予測し、両者を結合する試みが行われた。

初め、両者の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。そこで、図7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タンパク質の5ユニット、中間層20ユニット、出力層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を、計測された米の食味成分から良好に推定する事が可能になった。

このシステムの核心的な点は、粒状または粉状



共振周波数： $f \rightarrow f - \Delta f$
 図8 水晶振動子式匂いセンサの構造と原理

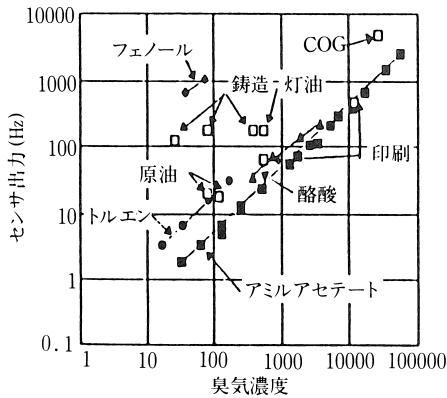


図9 臭気濃度との相関

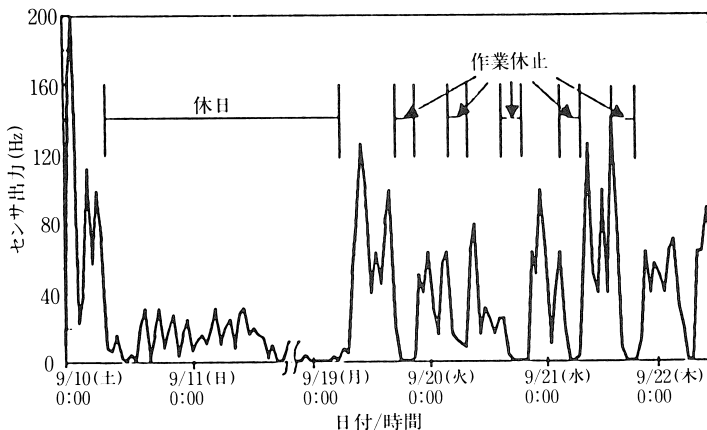


図10 鑄造工場におけるフィールド臭気の測定例

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、結果的には分量と食味評価指数との間で、高い相関が得られていない現状にも示されている。

5 匂いのセンシング

匂いの化学成分を分析し、その濃度を計測する機器の代表格は「ガスクロマトグラフ」であり、食品関連の研究分野で不可欠な分析機器として、多方面で利用されている。

しかし通常、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、このようなヒトのセンシング方式を模倣したセンサが開発され、実用段階に入っている。現在のところ、このようなセンサの中で、最も実用性の高いものとして「水晶振動子式匂いセンサ」と「多チャンネル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。

図8に水晶振動子式匂いセン

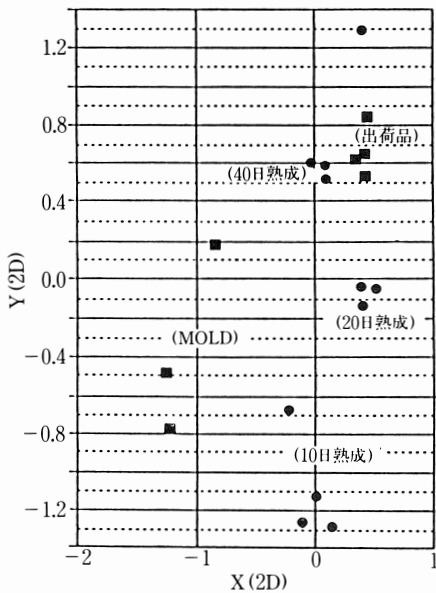


図 11 カマンベールチーズの熟成過程における匂い変化

サの構造と測定原理を示す。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、匂い感応膜を張り付けた構造をしている。空气中に存在する匂い分子は感応膜との親和性によって、ある一定の割合で感応膜に吸着し、膜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。したがって、センサ出力 Δf は、匂いの濃度に対して正比例する。さらに、匂いの種類を識別するために、各種のPVCブレンド脂質膜が用いられる。

図 9 に、センサ出力と各種の臭気濃度との関係を示す。この図から分かるように、両者はほぼリニアな関係にあることが分かる。また、応用例として、図 10 に鍛造工場の臭気測定例を示す。食品を対象とした測定例は報告されていないが、密

閉した袋の中に放置したバナナでは数百 Hz の応答が得られ、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。

多チャンネル膜電気抵抗式匂いセンサは、30以上の帯状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が、膜の種類は公表されていない。このセンサを用いて得られた、カマンベール熟成過程における匂い変化の測定例を図 11 に示す。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れ、熟成過程でのカビの発生もモニター可能であることが分かる。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。

おわりに

食嗜好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嗜好関連要因を計測して、その特徴を抽出し、美味しさに客観的なスケールを与えるだけでは、嗜好の計測が完成したことにならない。また、技術面では、人の食品に対する感情の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、本稿で紹介したように、対象物の属性を多方面から計測するだけではなく、その計測結果にヒトの感性による判断結果を加味して評価する、いわゆる「感性計測」の分野が急速に発達してきている。これらのセンシング技術が官能検査に取って代わるほどの信頼性を有しているとは考えられないが、官能検査に客観的スケールを持ち込む補助的方法として有効利用され始めている。今後、センシング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「食品感性工学」の発展が期待される。