

# 香りの科学と食感性工学

## —香りの分析・評価に基づくトータルエンジニアリングの展開—



東京大学 大学院農学生命科学研究科  
農学国際専攻  
**相良泰行**  
Yasuyuki Sagara

### 1. 食感性研究のニーズと現状

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。我々の「感性」は生活のアメニティーと密接不可分の関係にあり、これに関する研究・開発は近い将来、学問的にも産業的にも急速に発展することが予測される。食生活のアメニティーを表す最大の指標は食物に対する「おいしさ」の程度である。また、これを判断する尺度の一つとして「食嗜好」が挙げられる。

食品の「おいしさ」やこれを判断する食嗜好の尺度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、食品産業界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を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「香り」成分などの物質的属性と「食」にまつわる人の心理的要因を抽出して、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」を定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

の心理的反応を各種の「官能評価」手法を適用して把握する努力がなされてきた。しかし、アンケートによる主観的データの解析に依存する官能評価には再現性や信頼性に疑問が残る場合が多く、評価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。

本稿では食感性工学を視点とした「香り」の計測と評価技術、五感コミュニケーションモデリングによる新商品開発と製造プロセスの最適化、さらにこれらの技術開発の基盤となる嗅覚における脳内機序の解明などについて、主に「香り」と関連する最近の研究開発の動向を紹介する。

### 2. 関連科学技術の進展

食品の「おいしさ」や「食嗜好」の計測・評価に要望される理想的条件は、「非破壊・遠隔・高速度の3条件」である。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」<sup>1)</sup>やCCDカラーカメラと画像処理技術を組み合わせた「カラーグレーダー」<sup>2)</sup>などが実用化され、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、生物が保有している「スーパーセンサー」などのメカニズムの解明が精力的に進められている。また、これらのメカニズムを模倣する形で、バイオセンサー、特に各種の脂質膜や酸化半導体などを利用した味覚<sup>3), 4)</sup> や匂いセンサー<sup>5)</sup> が実用化されつつある。大脳生理学の分野では人の五感によって得られた情報の伝達と脳の働きを解明する研究が展開され<sup>6)</sup>、ここでは脳磁場の多点計測により味覚・臭覚のメカニズムを解明するための研究が注目される。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イ理論、学習機能を持つニューラルネットワークモデルおよび遺伝的アルゴリズムが考案され、その利用は「感性評価モデル」として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。

### 3. 感性の定義とあいまいさの利点

このような現状を踏まえると、個々の計測技術と官能評価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「食感性工学」として提唱している。食感性工学のイメージは「食情報に関わる感性のモデリングとこれを利用したプロダクトマネージメント」であり、研究領域には食情報のセンシング、生体生理反応機序の解明、センシング情報の感性情報への変換、「おいしさ」にまつわる評価・判断および嗜好形成のモデリング、さらに、応用分野ではこれらのモデルを利用した新製品の開発・設計、加工プロセスの最適化および販売戦略の立案などが含まれる。

「食感性工学」なる新しい研究領域を提唱するにあたり、筆者が苦悩した問題点の一つは「感性」をいかに定義するかという課題である。西欧の諸言語には日本語の「感性」と正確に等しい概念と言葉が見当たらず、また現時点でこれを正確に定義する事は困難であり、「感性」に関する研究の成果を取り入れながら曖昧さの部分を解消してゆく方法を探らざるを得ないと考えられる。このことは「感性」の研究が現時点では未熟の状態にあり、新しい研究分野として自由度の高い多様で広大な領域が残されてい

ることを意味している。

今後は「脳」研究の隆盛に観られるように、いわゆる「知性」をベースにして培われた研究分野の境界領域から感性研究への萌芽が発生・伸長し、これらの萌芽が新領域を創造しながらお互いに刺激し、場合によっては結合しあいながら網状に感性研究の領域を拡大してゆくものと予測される。

以上述べた事由により、筆者は感性の概念を「①外界の刺激に応じて感覚・知覚を生ずる感覚器官の感受能力、②感覚によってよび起こされる感情の動態、③理性・意志によって制御さるべき感覚的欲望」と大まかに定義し、また、「感性」に対応する英語として日本語の「kansei」を採用することを提案している。欧米で定義された4つの基本味に日本が世界に向けて発信した「うまみ (umami)」が5番目の基本味として認知されたように、「kansei」も世界的に認知され始め、ドイツ語圏では「カンザイ」と発音されている。

### 4. 消費者起点産業へのパラダイムシフト

近年における「食」を取り巻く諸問題を解決するためには、従来の大量効率生産・販売方式に変わる新しい方式への変換、すなわち川上から川下への生産・サプライシステムから消費者を起点とする逆方向システムへの変換が必要と考えられる。特に、前世紀末から多発した食品危害により醸成されてきた消費者の食に対する「安全と安心」への不信感を払拭して、信頼性を回復するためには、ここに述べた新しいアイデアに基づく食品産業構造の改革とこれを支援する科学技術と社会システムの構築が必要と考えられる。これらの認識は欧米諸国でも定着しつつあり、いわゆる「消費者科学」の充実と発展に多大の研究開発費が投入され、また、EUでは機能性・健康・高齢者に関する多国籍ボーダーレスプロジェクトが進展し始めている。

ここに提唱した食感性工学の目的は「消費者起点工学および生産 (Consumer-oriented Engineering and Production)」を食品分野において具体的に実現する基礎科学とこれを生産に反映させる技術を含むした、横断的新科学技術分野と新食品産業・市場・社会システムの創生にある。これらの研究開発により得られる成果は、単に食品産業のみならず他産業における消費者起点工学の発展と生産方式・販売戦略に具体的方法論を提供する事になる。これにより、現在、多くの産業が構造的に抱える諸問題の解



の知覚センサーと脳内情報処理モデルを組み合わせた「インテリジェント人工マウス」などの開発にも基礎的情報を提供することになり、おいしさと食嗜好に関するマルチセンシング・評価および嗜好形成モデリングなどの実用技術開発にも肝要な情報を提供することが期待されている。さらに、心理物理学の進展は官能評価によるマーケティングの手法に新しいツールを提供する。

## 5.2 実用技術の開発

基礎科学の領域研究で得られた知見に基づき、以下に列挙するような実用領域における研究課題を推進する必要があると考えられる。

- 1) 知覚センサー、特に、遠隔検知機能を有する視聴覚と嗅覚および摂食後の味覚・テクスチャ・音・温度などを司る知覚器官のメカニズムを模倣したセンシングシステムの開発
- 2) 物理化学的機器分析や知覚センサーなどの出力とマーケティング情報を融合させる「双方向感性変換システム」の開発
- 3) マーケティングサイエンスの構築。特に、ITを活用した消費者の官能評価システムおよびマーケティング戦略にも役立つ分析・評価ツールの開発

これらの研究成果により、「センシングシステム」の開発分野では、ヒトを対象にしたセンサーの開発のみならず、食素材を対象とした機能性や安全性に関するデータバンクの構築が可能となる。このデータバンクをウェブサイトに掲載する事により、食素材の生産者、民間企業および行政機関などに提供することも可能となる。また、ここに示した研究課題の成果を統合することにより、前項で述べた「インテリジェント人工マウス」の開発が進展し、口腔内におけるおいしさと安全に寄与する知見や食嗜好形成のメカニズムなどの工学的な解明が期待される。「双方向感性変換システム」は特定の食品に対する消費者の嗜好特性を探るツールとしてマーケティング戦略に有用であるが、さらに特定の嗜好特性を有する消費者グループをターゲットとした新製品開発、例えば高齢者用機能性食品に用いられる各種素材の最適配合問題を解決するツールとして有用となる。マーケティングサイエンスの分野では、従来の官能検査手法が一般大衆の食嗜好を多変量解析手法などにより探求してきたのに対し、特定の食嗜好を有する消費者グループから選定された被検者個人を対象とする脳機能・生体反応計測システムとの併用

により、そのグループの食生活・社会活動に関するバックグラウンドを把握する事が可能となる。このことは、従来の官能評価手法に消費者個人を起点とする方法論を導入する事が可能となる事を意味しており、学校給食センターなどを介した「食育」計画や高齢者個人を対象とした「介護食」などの設計ツールとして多大な貢献をなすものと考えられる。

## 6. 五感コミュニケーションモデル

食感性工学のパラダイムと手法の構築に当たっては、「食」にまつわるヒト個人の五感コミュニケーション、さらには消費者間のコミュニケーションを起点とした顧客満足型の新食品開発や加工プロセスの最適化などに役立つ手法の開発が肝要であると考えられる。そこで、その中核モデルとして「五感コミュニケーションモデル」(図2)を考案した。その目的は、「個人」が「食行動の短期間」に「感情変化(おいしさ)」を生起するプロセスを「定量的に評価」して「製品設計および製造方法の最適化に役立てる」ことにある。ここに述べたような前提条件の下で、食感性に関わる因子を想定した。すなわち図2に示すように、食品は「物理化学的属性」と「情報」、他方、ヒトは「知覚」と「嗜好」、「認知」と「記憶」、そして「感情(おいしさ)」を有するものとした。

「物理化学的属性」は、味覚や嗅覚によりセンシングされ、食嗜好とのコミュニケーションを通じて、おいしさに影響する食品の成分や構造などを指し、対照的に「情報」は、認知的要因としておいしさに影響する食品の付加情報を指すものとする。例えば、GC-MSにより計測される飲料の揮発性成分に関する質的データは「物理化学的属性」であり、包装材料に記載される商品名、メーカー、原材料などのデータは「情報」として扱うものとする。

「知覚」は、外界の知覚的要因が感覚器官、すなわち五感に与える刺激作用を通して、ヒトの脳内に生じる有意味な事象を指し、5つの基本味を含む多次元の属性により構成されると考えられる。また「嗜好」は、知覚された対象ないし属性から生じるおいしさの評価パターンを指し、要求的要因としておいしさに影響する因子と考えられる。

「認知」は、外界の認知的要因が視聴覚を主とする感覚器官を通して、ヒトの脳内に生じるイメージを指し、「記憶・知識」は、このイメージと関連する経験・体験などによって獲得されるものとし、広義

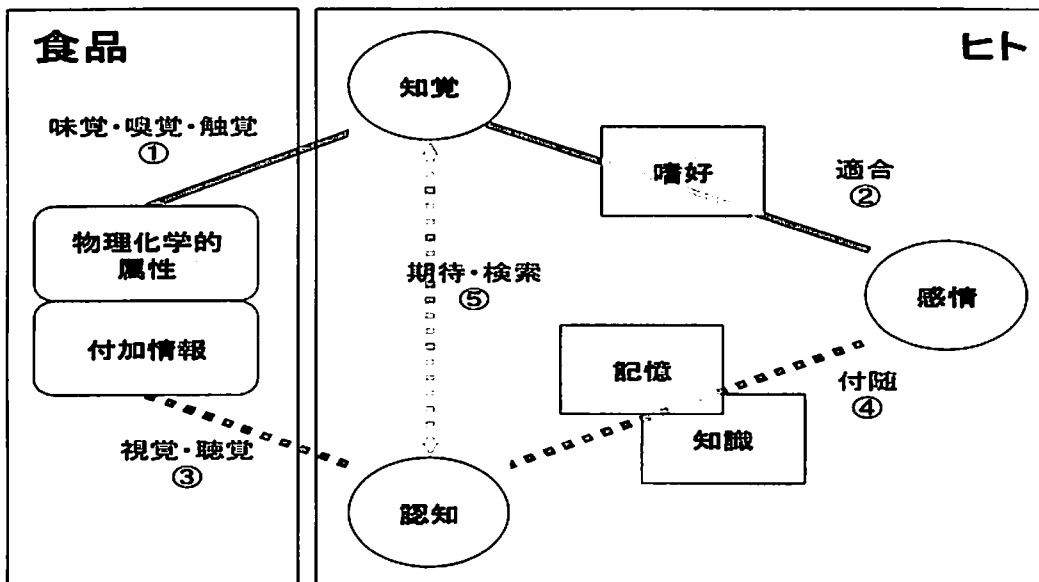


図2 「おいしさ」の食感性モデル

の要求的要因としておいしさに影響する。また最後の「感情」は、おいしさにほぼ等しいが、仕事上がりのビールに感じる爽快なおいしさ、高級料理店のフォアグラのポワレに感じる滋味のあるおいしさなど、食品ごとに多様性が認められる。以下に、これらの因子を介しておいしさが生じる過程を説明する。

### 6.1 物理化学的屬性から感情に至る過程

おいしさの生じる過程のうち、本モデルの扱う最も基本的な経路は、まず食品の物理化学的屬性が味覚・嗅覚・触覚により甘味や酸味として知覚され（経路①）、知覚と嗜好が合致するときに（経路②）、感情変化、すなわちおいしさが生じるとする経路である。例えば、グレープフルーツジュースにおいしさを感じる時、その過程としては、まずグレープフルーツに含まれる糖、有機酸およびリモニンなどの成分が、それぞれ甘味、酸味および苦味などの知覚を生じ、甘酸っぱさとほのかな苦みを好む消費者の嗜好に合えば、おいしさが感じられるものと解釈する。

### 6.2 情報から感情に至る過程

前項で説明した経路に並行する経路として、食品の情報が視聴覚により認知され（経路③）、認知に関連する記憶ないし知識が想起され、それらに付随する感情が生じるとする経路（経路④）が考えられる。再びグレープフルーツジュースを例にとると、「フロリダ産」、「低農薬栽培」などの付加情報が認知されると、現地で搾り立てのジュースを飲んだ旅行の記憶や、低農薬で健康に安心であるという知識が

呼び起こされ、それらに付随する感情が生じるということは大いに起こり得ると考えられる。

### 6.3 知覚と認知の対応経路

上述した2つの経路はそれぞれ独立ではなく、相互に影響し合い、補完する関係にあると考えられる（経路⑤）。例えば、摂取前には何のジュースか分からない飲料を飲むことにより、甘味と酸味と僅かな苦味が知覚されると、推測により原料がグレープフルーツであることが認知される、という場合も考えられる。対称的に、飲用前にグレープフルーツジュースであることが認知されれば、甘味と酸味と僅かな苦味が期待されることも考えられる。

### 6.4 食感性関数と解析ツール

これまで述べた各過程を数理モデルとして扱うためには、各因子を変数または係数と定め、これらの変数・係数間の関係を関数として記述する必要がある。そこで、これらの変数間の相互関係を示す関数を「感性関数」と定義した。官能評価用語の客観的抽出法には、類似度・使用頻度・認知度などの解析にKJ法や多変量解析などの手法が用いられる。また、五感コミュニケーションモデルに含まれる全ての因子間の相互依存関係、例えば食品の「物理化学的特性」と「価格情報」が消費者の感情変化、例えば「おいしさ」に及ぼす影響の定量的評価手法としては「共分散構造分析」が有用であり、この分析プロセスは「構造方程式モデリング」と称されている。しかし、この方法は因子間の関係を線形関係と仮定しているため、大まかな相互関係を把握するのに有用ではあるが、より正確な非線形関係の解析に

はニューラルネットワーク (Artificial Neural Network: ANN) や「マルチスプライン補間」などによる応答曲面法が用いられている。その例として、図3に飲料に含まれる多様な成分の機器分析データと官能評価スコアの主成分分析から得られた知覚因子、たとえば「すっきり感」などの非線形関係を解析するためのANN構造を示す。この分析により、例えば消費者が最も重視する知覚の第1因子である「すっきり感」に影響を及ぼす成分の特定とそれらの寄与度が明らかになり、最適配合割合の設計にも有用な情報が得られる。ここに紹介した解析ソフトはいずれも市販されているが、要因間の分析にどのような解析ツールを選択すべきかはモデル適用上のノウハウとなっている。

筆者はこのモデルを、消費者の感性を考慮した緑茶飲料製品の香味設計に適用して、ヒット商品の開発に貢献した事例を本誌No.228 (2005年) に紹介しているので参照されたい<sup>17)</sup>。

## 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匂い識別システムが実用化されている。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4に酸化半導体アレ

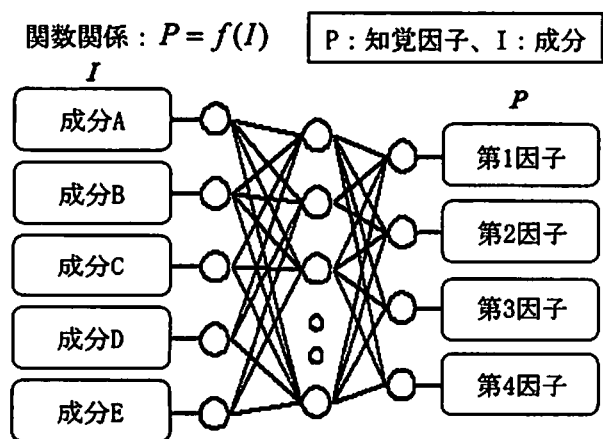


図3 ANNモデルの構造

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、前項で述べた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体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数に比べ、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のセンシング、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

筆者らは凍結乾燥したインスタントコーヒーの操作温度条件が香気成分に与える影響を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、この手法は五感コミュニケーション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5) を用いた。また、図6に示すような

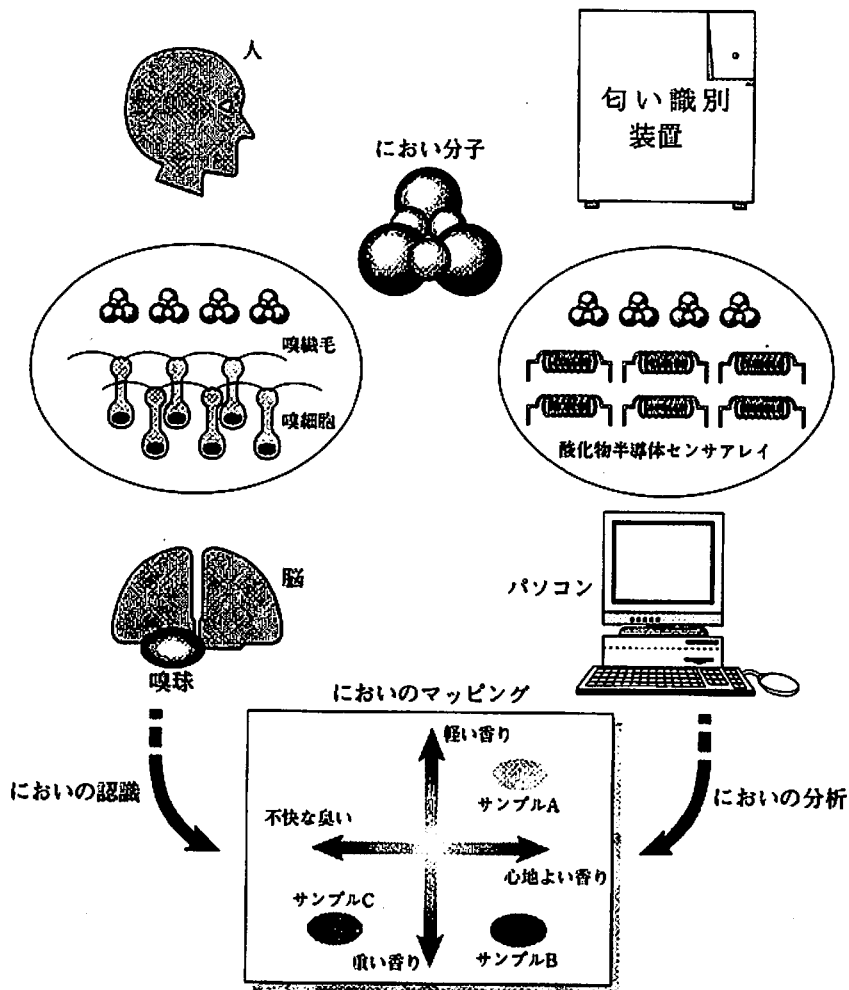
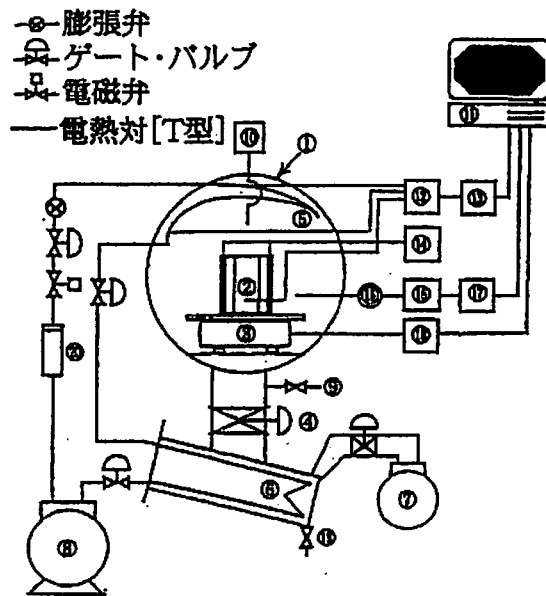


図4 匂い識別装置の構成と機能 (島津製作所提供)



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[コンデンシング・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ドライヤ

図5 実験用凍結乾燥特性計測システム

液状・顆粒状材料用のサンプルホルダを用い、濃度40%に凍結濃縮して原液試料とした試料底面の凍結温度を $-40 \sim -120^{\circ}\text{C}$ 、また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、商業規模の凍結乾燥操作では凍結温度 $-40^{\circ}\text{C}$ 、乾燥温度 $80^{\circ}\text{C}$ が採用されていると予測されている。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及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<sup>16)</sup>。図7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スニファァーの鼻先に供給される。次に、スニファ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、感じなくなったところでマウスを放す。そのとき感じた香りの特徴を、予めPCに内蔵されている表現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8に示した。両者のピークを比較すると、双方で検出可能な成分が異なり、また、前者に示さ

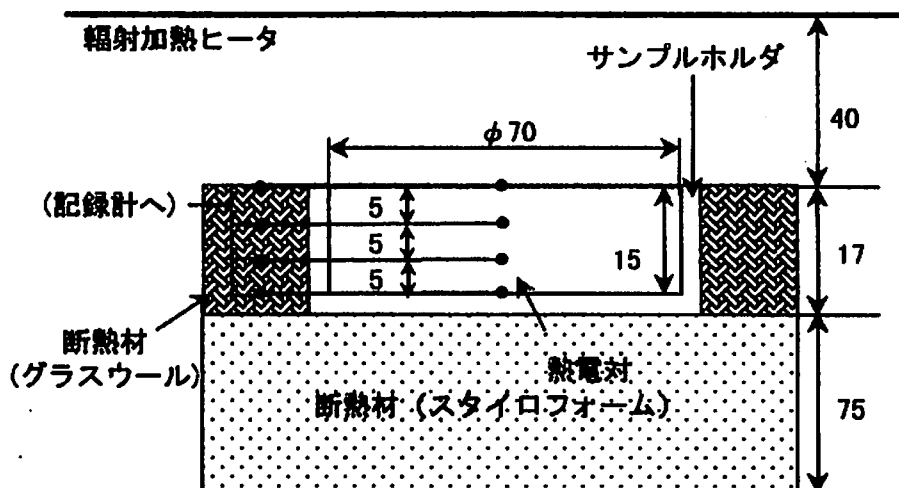


図6 液状・顆粒状材料のサンプルホルダー

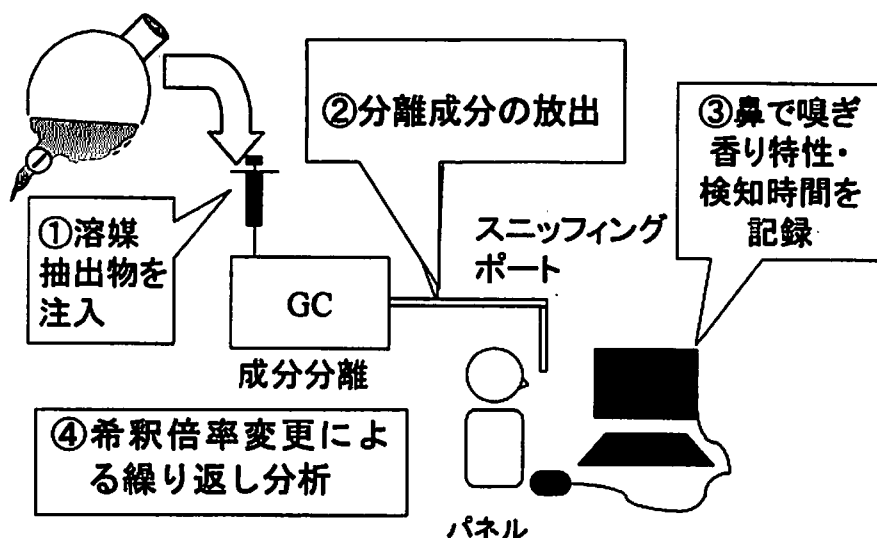


図7 GC/Oによるチャーム分析の手順



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)、カaramelの甘い香り (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9と10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9に示すように、凍結温度条件を変えて80°Cで乾燥した試料では、fruity-juicy, green-black, current-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

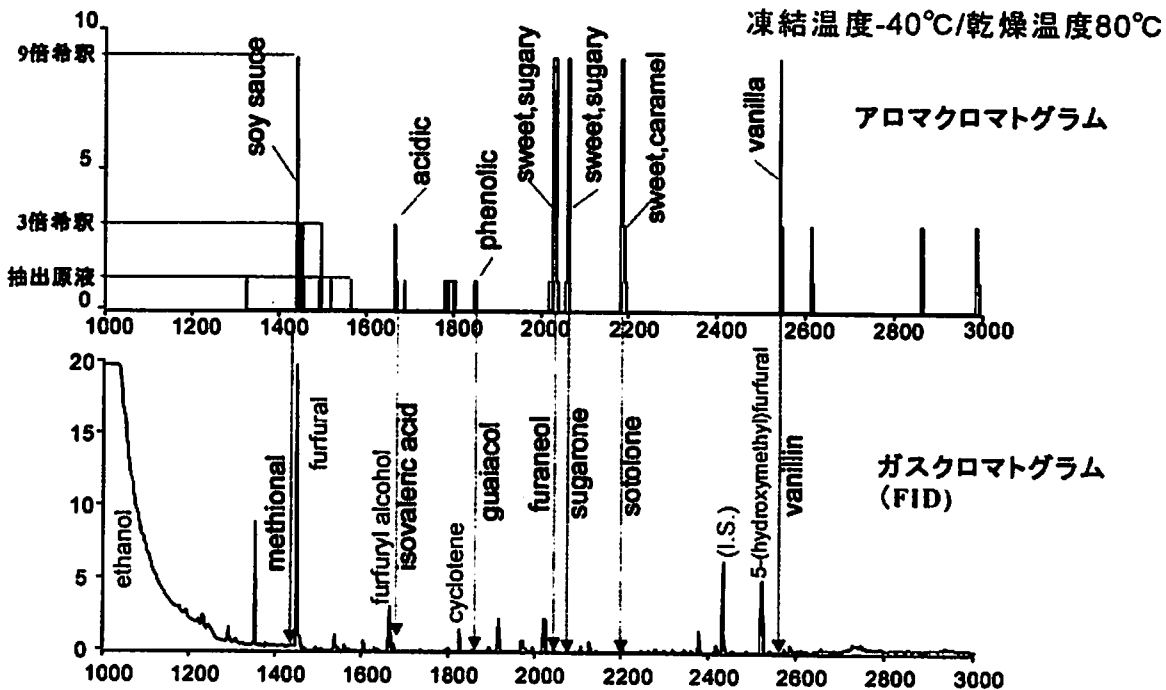


図8 アロマおよびガスクロマトグラムの比較

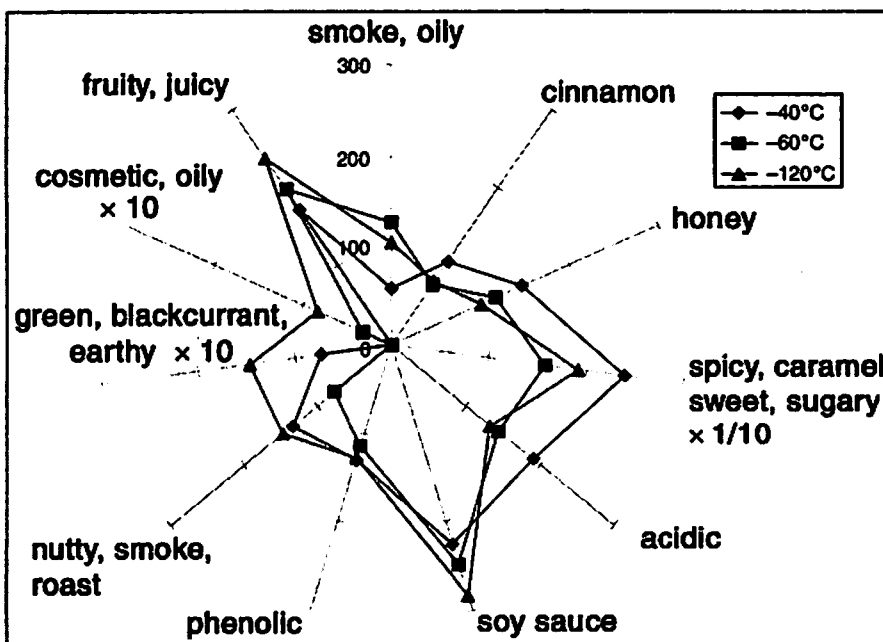


図9 アロマの凍結温度条件依存性 (乾燥温度: 80°C)

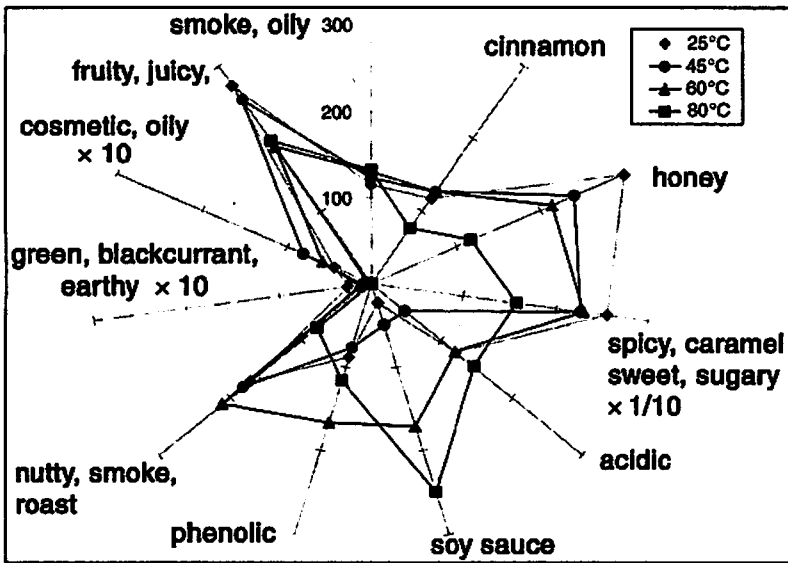


図 10 アロマの乾燥温度依存性 (凍結温度:  $-60^{\circ}\text{C}$ )

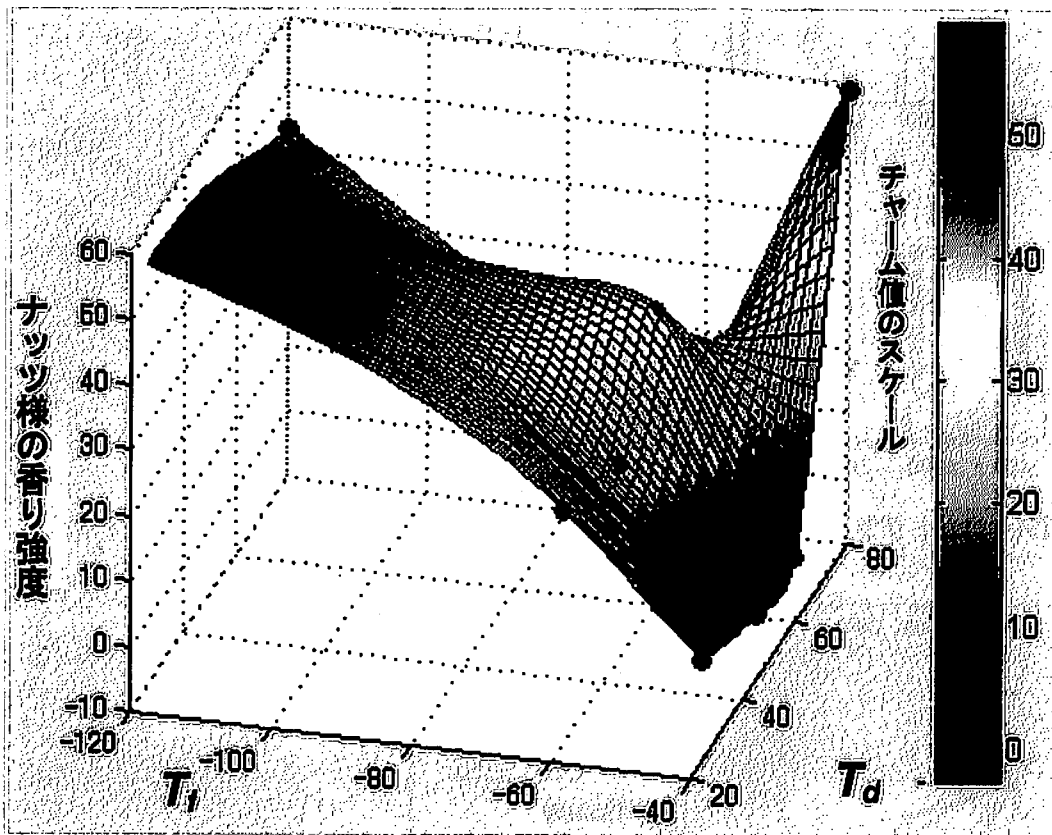


図 11 スプライン補間法によって得られた香り強度の応答曲面  
( $T_f$ : 凍結温度、 $T_d$ : 乾燥温度、 $^{\circ}\text{C}$ )

い生成されることが分かった。また、図 10 に示すように、 $-60^{\circ}\text{C}$  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。

#### 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マルチスプライン補間に基く応答曲面法を用いた。まず、図 11 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操作温度条件として、凍結温度  $-40^{\circ}\text{C}$  と乾燥温度  $32^{\circ}\text{C}$  が推算された。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12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、ここで新しく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ると考えられる。

## 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、「ヒトが食品との関わりの中で、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。そこでは五感における情報処理のメカニズムが解明される必要があり、このためには食品に対するヒトの生体反応を非侵襲 (non-invasive) に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、「被験者の事前の了承」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。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

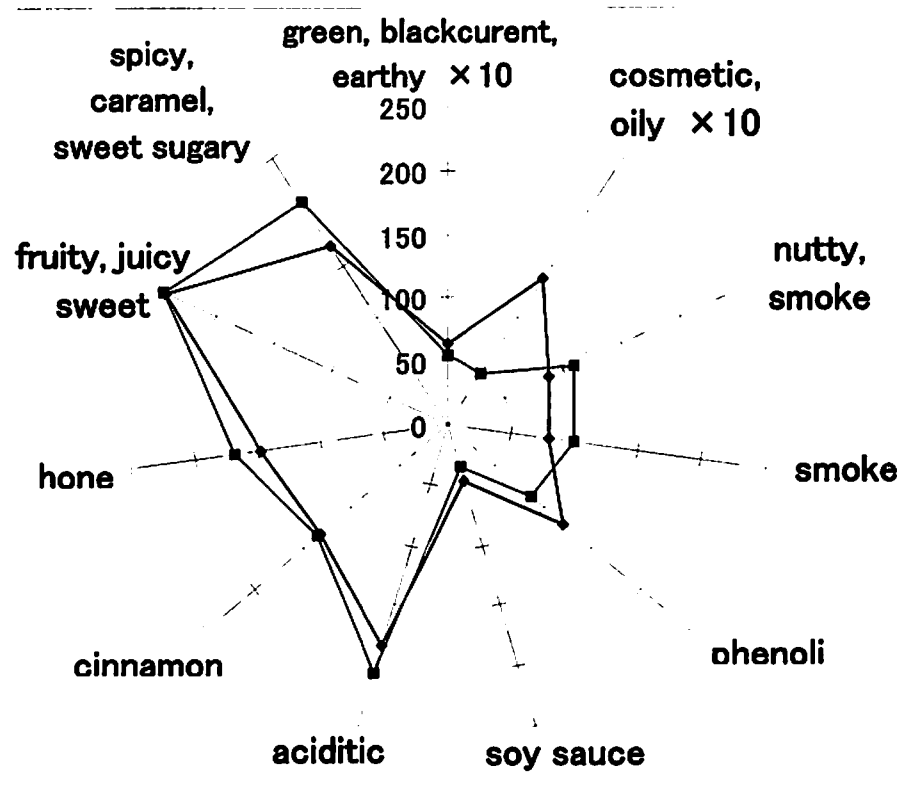


図12 原液のアロマと最適温度条件により予測されるアロマの比較

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 (MRI) 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むことが指摘され、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13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。図14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テ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。ここではま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

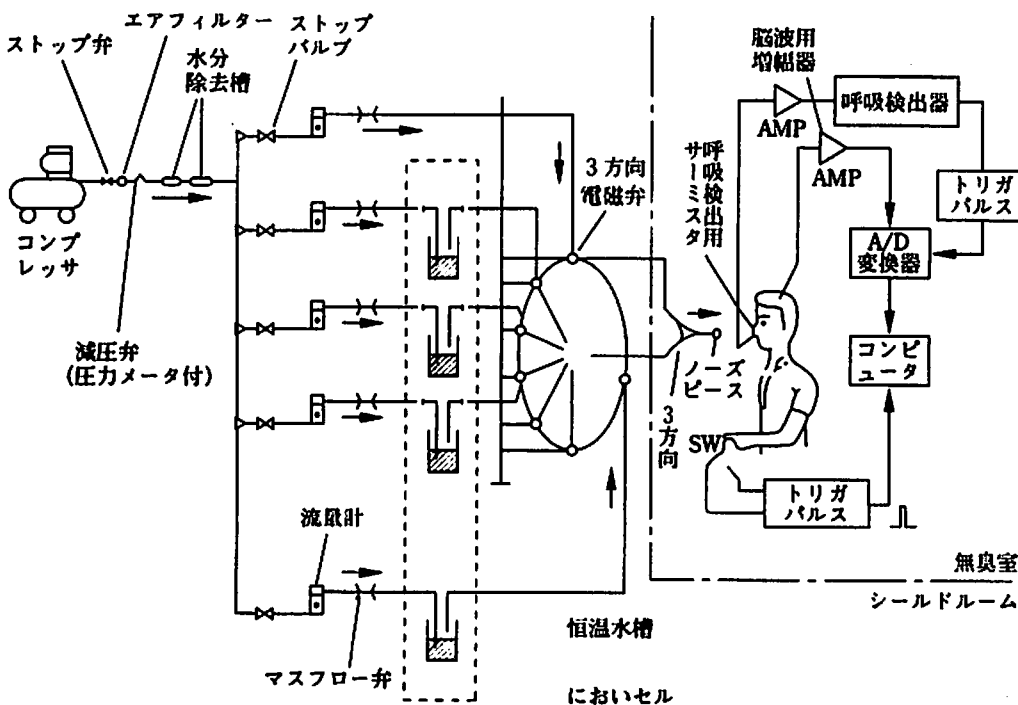


図13 呼吸同期式嗅覚刺激装置

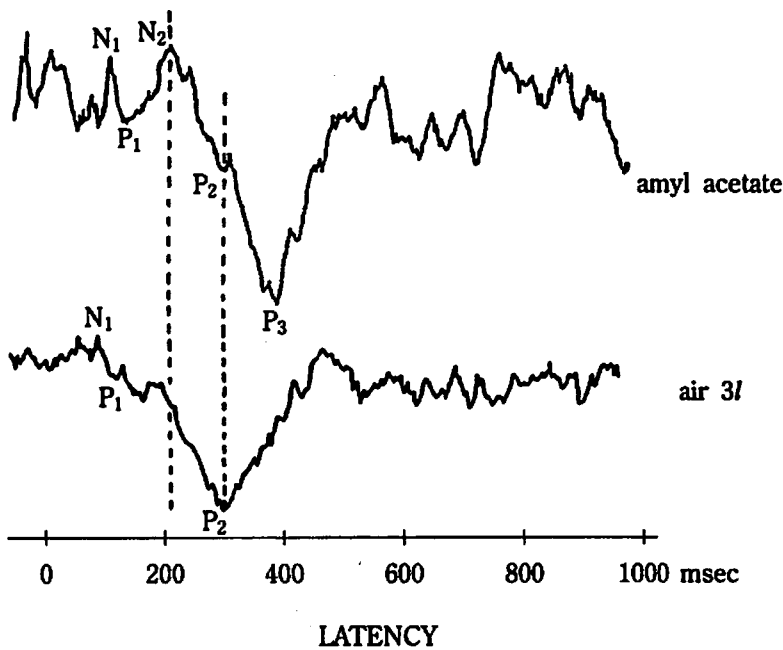


図 14 無臭空気刺激と匂い刺激の脳波応答波形の比較

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15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、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MRI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

従来、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ตอบสนองする脳波や脳磁場の計測結果には、嗅覚以外の刺激にตอบสนองした神経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およびBlast法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B<sub>1</sub>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(武田薬品株)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

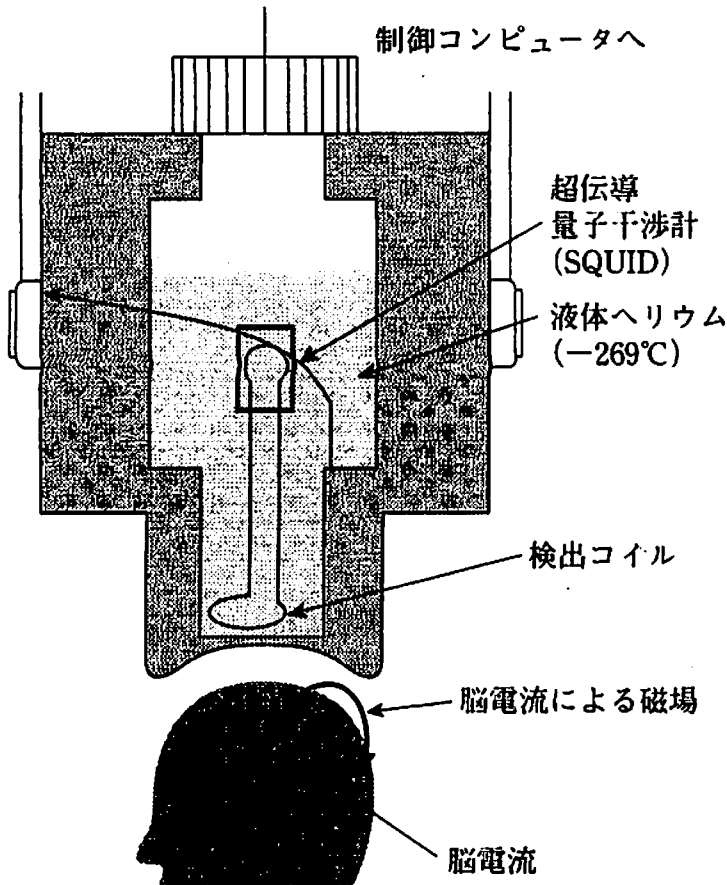


図 15 脳磁場計測装置の構造

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。健常者では、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。

- 3) 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計測は、周波数帯域別の特徴、反応部位(図16)、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。

### おわりに

これまでに述べた「食感性工学」は学術的にも技術的にも全く新しい分野であり、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「香り」などの物理化学的特性を計測して、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

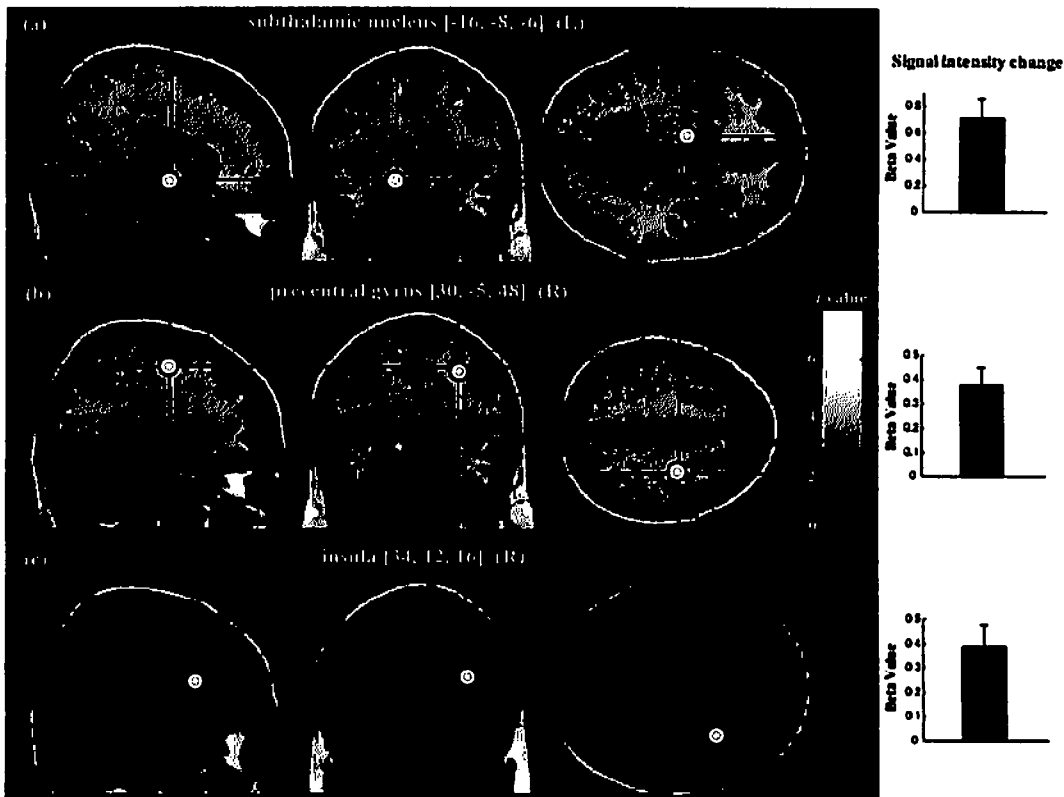


図 16 アリナミン嗅覚刺激法により fMRI で計測した脳内応答部位

ベルではとうてい解決不可能な課題であることも認識されている。

本稿では「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ロードマップを大胆に描いてみることに重点を置いた。ここでは、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、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」が現実に達成されることを祈念した。

「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、センサー等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ための基礎科学としての側面を有し、また、消費者の感情・購買意欲を対象とする応用科学の新分野も包含している点にあると言える。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「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ベーションを提供することになれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 相良泰行：食嗜好の計測・評価と先端技術，日本食品工業学会誌，41(6) 456 (1994)
- 2) 相良泰行：光センシングによる青果物選別システムの開発動向，日本食品工業学会誌，43(3) 215 (1996)
- 3) 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(3) 31 (1998)
- 4) 都甲 潔：味覚センサ，食と感性，光琳，155 (1999)
- 5) 外池光雄：匂いセンサ，テクノインテグレーション，8(7) 56 (1992)
- 6) 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(1) 5 (1999)
- 7) 相良泰行：食嗜好センシングから食品感性工学の展開にむけて, 食品工業, 6 (30) 16 (1997)
  - 8) 相良泰行：食品感性工学の提唱, 食品感性工学, 朝倉書店, (1999)
  - 9) 相良泰行：おいしさを探る感性工学, 日本味と匂学会誌, 8 (2) 153 (2001)
  - 10) 相良泰行：最新の食嗜好計測技術の動向, ジャパンフードサイエンス, 37 (3) 23 (1998)
  - 11) 相良泰行. おいしさを探る感性工学, 日本味と匂学会誌, 8 (2)153-159 (2001)
  - 12) A.W. Logue, 木村定訳：食の心理学, 青土社, 106 (1994)
  - 13) 相良泰行：形や色の識別技術, 食の先端科学, 朝倉書店, (1999)
  - 14) 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26 (1995)
  - 15) 佐藤邦夫・平沢徹也, 『感性マーケティング』, プレジデント社, (1996)
  - 16) Deibler, K.D.:Solid Phase Microextraction application in Gas chromatography-Olfactometry Dilution Analysis. J. Agric. Food Chem., 47 1616-1618 (1999).
  - 17) 相良泰行：おいしさの食感性モデルによる緑茶飲料の開発, 香料, (228) 81-88 (2005)
  - 18) Ai Miyanari: Neuromagnetic changes of brain rhythm evoked by intravenous olfactory stimulation in humans, Brain Topography, 18, 189-199 (2006)
-