

食感性工学による食育サポート技術の構築

相良 泰行

Sagara Yasuyuki

東京大学大学院農学生命科学研究科農学国際専攻

月刊フードケミカル2006年12月号 別刷

食感性工学による食育サポート技術の構築

相良 泰行

Sagara Yasuyuki

東京大学大学院農学生命科学研究科農学国際専攻

1. はじめに

前世紀において大部分の産業が「大量効率生産方式」により利潤を追求してきた結果、原材料の確保に関する南北問題、エネルギーおよび環境などの諸問題が蓄積されてきた。これらの問題は前世紀末に至り、人の健康・生命ひいては生存を脅かす存在として国民に認知され、さらに近年の構造的不況の長期化と相まって深刻な社会不安を招く事態となっている。このため、これらの問題は、政策面でも、科学技術の面でも、緊急に解決すべき課題としてクローズアップされてきた。

農業・食品産業の分野でも、各種メディアに「狂牛病」、「O157」、「企業倫理」および「高齢化」などのキーワードが氾濫する状況になり、「食の安全と安心をとどける科学技術と産業」の創生が必要となってきた。特に、「食の高齢化社会対応」の課題は、団塊の世代が65歳を迎える前までに解決しなければならない緊急性を有していると言える。すなわち、現在の福利・厚生・医療に関する諸制度は、高齢化社会の進行に伴って破綻するとの社会不安が広がっている。

高齢者の健康・介護・医療の諸問題に対処する最良の方策は、「食育」による若年層と一般成人の健全な食生活への回帰による疾病の予防と、後述する「高齢者用健康・介護食サプライ社会システム」の構築にあると考えられる。しかし、消費者、特に若年層と高齢者が感じる「おいしさ」と「食嗜好」さらには「安心」を与える情報を取得し、これを評価して生産・サプライプロセスに反映させるための科学技術の分野は未発達の現状にある。他方、食品産業では新製品の市場定着率の向上が

死活問題となっており、市場に投入された新製品の年間定着率は10%以下と推測されている。このために、新商品の開発競争が熾烈となっており、裾野産業に支えられたわが国の食糧供給体制の破綻を招きかねない現状にある。さらに、機能性食品の効用発現には比較的長期間の継続摂取が必要とされており、市場における継続消費のモチベーションを維持するためには、「機能性」と「おいしさ」の調和を図るための技術が要望されている。

これまでに述べた「食」を取り巻く緊急な課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、生産者、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指向型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、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および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。

「食感性工学」は高齢化社会に対応したフードサプライシステムを創生するのに有効なパラダイムと方法論を提供するものと考えられるので、本稿では「食感性工学」に基づき、「高齢者に安全と安心をとどけ、食生活の健全化を図る食育社会システム」を創生するための方法論を1つの「モデル」として提唱する。また、米飯に対する高齢者

の嗜好を探り、最適な保存条件を探索した事例を紹介する。

2. 食感性工学のパラダイムと展開^{5,7,8)}

食感性工学は「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ための基礎科学とその成果を生産・販売戦略に反映させる応用技術を含む横断的学問体系を有しており、新しい食品産業・市場・社会システムを創生するのに有用であると考えられる。われわれ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、近い将来、高齢者の感性を把握した市場創出が急速に発展すると予測されている。食生活のアメニティーを表す尺度は食べ物に関する「おいしさ」の程度であり、これを計測・評価して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、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戦略に革新的な改善がもたらされるものと期待される。高齢者を対象にして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高齢者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「高齢者の食に対する感性」を数量化しなければならないと考えられる。

他方、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、「生物スーパーセンサ」などのメカニズムを模倣した知覚センサが実用化されつつある。また、五感

によるコミュニケーション機能や脳機能を模したニューラルネットワークモデルなどが考案され、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。このような計測・評価技術と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、食に対する高齢者の感性を定量的に把握し、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。

「食感性工学」はこれらの領域をカバーする新しい学術研究の分野として提唱されている。その主な研究課題は、①五感コミュニケーションに関するメカニズムの解明、②知覚センシングシステムの開発、③食品の機器分析結果とマーケティング情報との「双方向感性変換システム」による新商品の機能・品質設計およびプロダクトマネジメント手法の開発、④食嗜好・購買行動などを考究する「マーケティングサイエンス」の構築などである。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ことになる。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決にもブレークスルーをもたらすものと期待されている。

3. 安全と安心をとどける健康・介護食サプライ社会システム

3.1 健康・介護食宅配社会システムの提案

食感性工学の消費者起点工学としての有用性を示すために、高齢化社会に対応した「安全と安心

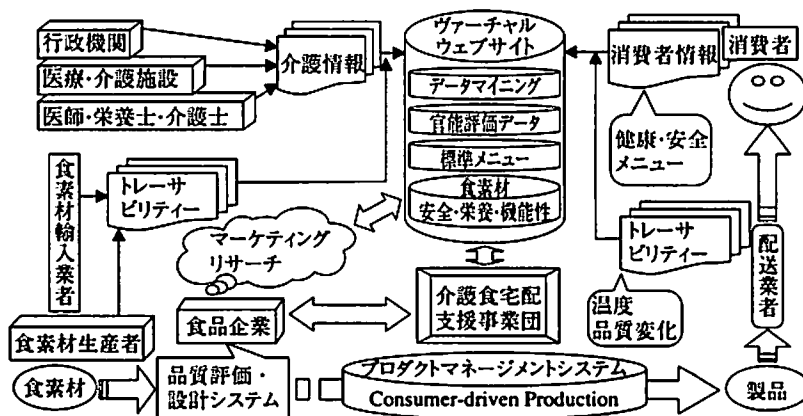


図1 高齢化社会における健康・介護食宅配システム

をとどける健康・介護食宅配システム」の構築例を提案して図1に示した。このシステムには、上述した研究課題の成果、安全・安心をとどけるトレーサビリティと消費者への情報サービスおよびこの社会システムの構築に参画する関係諸団体が含まれる。このシステムの情報網はヴァーチャルウェブサイトを中心としたユビキタスネットワークで構築される。このサイトには高齢者を対象とした官能評価データの収録・利用、同時多サイトで実施される官能評価・消費動向調査を支援するためのデータおよびテキストマイニングなどの機能が含まれる。さらに、食育に関連する標準メニューなどの情報や食素材の安全・機能性・栄養などに関するデータバンクを搭載することが望ましい。また、食育メニューに含まれる食品素材は国内の生産者団体から計画的に提供されることが望ましく、これにより、国内の農林水産業の発展に寄与する効果が期待できる。

消費者団体および高齢者個人に関する食育・介護情報は行政、医療・介護施設、給食センターなどからウェブサイトへ送信され、食素材の生産・輸入業関係者からは食品原料に関するトレーサビリティに関する情報が提供されてウェブサイトのデータバンクに蓄積される。また、高齢者個人および団体の嗜好評価と健康状態に関する情報は、健康・介護食を宅配した業者の代行により、携帯

電話・ファックス・パソコンなどによりウェブサイトへ送信され、行政・介護施設などの利用に供される。さらに、宅配業者は製品のデリバリー過程における温度や品質変化に関するトレーサビリティ情報の送信も担当する。他方、食品企業は日々更新されるウェブサイトからの情報を入手し、マーケティングリサーチに役立てると共に食育、健康・介護食などのメニューに従った製品の機能・品質の設計を行う。

これらの作業は食品工場内に設置される「プロダクトマネジメントシステム」内にコンポーネントとして含まれる「感性品質評価・設計システム」の機能を利用して行う。食品原料から最終製品に至る生産ラインは各種知覚センサを利用してモニターし、また、機械設備の制御も同時に行う。すなわち生産の形態はウェブサイトへ収録された消費者情報に基づくConsumer-driven Production方式となる。他方、この社会システムの円滑な運営を司り、公的資金の有効利用を図る機関として、関係諸団体の出資により運営される、例えば「介護食宅配支援事業団」を設立する。

3.2 IT利用官能評価ビジネスモデル

消費者起点科学技術の一翼を担う食感性工学を社会システムに展開するための「起点」となるIT利用官能評価システムのビジネスモデルを図2に示す。この図は前項の図1に示したウェブサイト

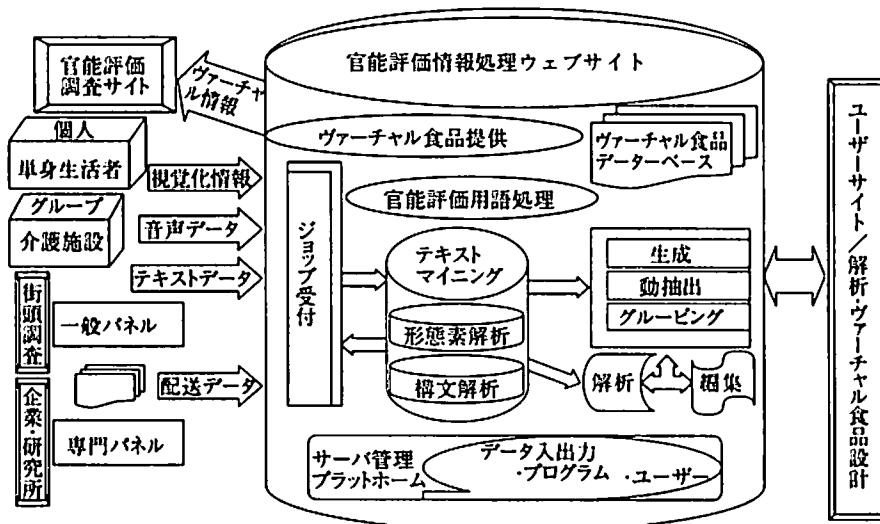


図2 IT-テキストマイニング利用官能評価モデル

内のデータマイニングセクションの機能を詳細に示したもので、このシステム単独でも新しいビジネスモデルとしての価値を有するものと考えられる。ここに示した「官能評価情報処理ウェブサイト」の主な機能は、データ・テキストマイニングによる官能評価用語の創成と前述した官能評価用バーチャル食品の提供にある。官能評価の対象者には高齢で単身生活を余儀なくされている健康・介護食の消費者、消費者グループの中には介護施設・病院・学校と給食センターなどが含まれる。また、食品企業では一般パネルを対象とした街頭調査や社内で育成した専門パネルを対象とした官能評価が実施されている。現在、これらの多様な状況下に置かれたパネルの同時多サイトにおける官能評価結果は、アンケート用紙によるテキストデータとして集められ、食品企業または委託された調査会社により分析されている。ここに提唱したシステムでは、ウェブサイトに搭載されたデータ・テキストマイニングの機能により、テキストデータの他に音声や視覚化された情報の利用が可能となる。また、同時多サイトにおいて日常的に収録される官能評価情報から官能評価用語を創成する機能を有している。

他方、現在、官能評価サイトではパネルに対して試作サンプルや製品などの実物が提供されているが、本システムではパソコンなどを介してこれらの実物に代わるバーチャル食品の視聴覚情報が提供される。バーチャル食品は主にこのシステムを利用するユーザーサイトにおいて設計されるが、設計を支援する情報はウェブサイトに搭載されたデータベースから取得することが可能である。このようにして得られた消費者の感性に関する情報は、随時ユーザーサイトにおける解析と評価に利用され、その結果はユーザーの所属する食品企業内のプロダクトマネジメントシステムに転送される。

3.3 感性品質評価・設計システム

食品企業内に設置されるプロダクトマネジメントシステムの中には、そのコンポーネントとして「感性品質評価・設計システム」が含まれる。ここでは後述する「氷結晶3次元構造計測システム」を中核とし、これに冷凍・解凍・保管装置と前述のウェブサイトを利用した官能評価機能を組み合わせた「健康・介護冷凍食品の感性品質評

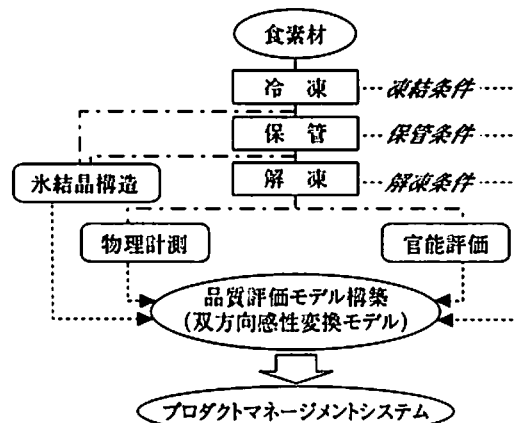


図3 健康・介護冷凍食品の感性品質評価・設計システム

価・設計システム」の概念図を図3に示す。このシステムには食感性工学のアイデアにより開発された視覚センサと双方向感性変換モデルが含まれており、対象材料の機器計測結果と官能評価スコアの双方向情報処理機能により、消費者の感性に基づく最適な商品機能と品質を設計する機能を有している。現在、筆者らは双方向感性変換モデルとして、機器計測結果から官能評価スコアを予測するモデルとしてニューラルネットワークモデル(ANN)を、また、逆に消費者の官能評価結果に基づく商品機能・品質の設計条件から最適な原料配合割合と加工・保管の操作条件を設定するためのモデルとしてマルチスプライン補間法を利用している。これらの結果を利用することにより、生産ラインに配置された機械設備、たとえば凍結、解凍、保管などの設備を操作するための条件を設定することが可能となり、生産ラインは消費者の嗜好を満足させる製品を製造する機能を有することになり、いわゆるConsumer-oriented Productionが達成される。

3.4 プロダクトマネジメントシステム

図4にHACCP対応健康・介護食宅配弁当製造ラインを一元的に統括管理する「プロダクトマネジメントシステム」を示す。このラインは前述したウェブサイトの機能を利用した個人またはグループ消費者の官能評価結果、学校給食センターの栄養士により提供された食育標準メニュー、データベースに収録されている多様な消費者データを利用したマーケティングリサーチの結果、さらには前

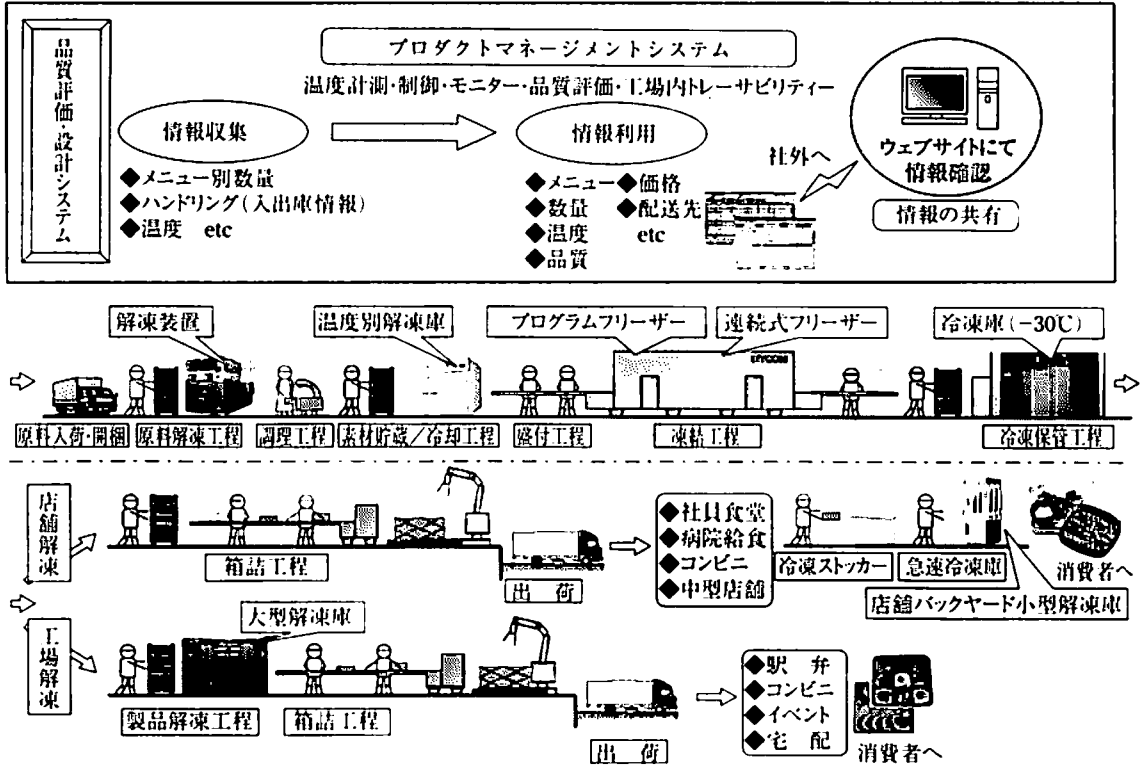


図4 冷凍食品製造ラインの製品マネジメントシステム

項で述べた品質設計システムなどから得られる全ての情報に基づき決定された最適操作条件により駆動される。また、ライン内に組み込まれた視聴覚・匂い・温度などの遠隔センサは、HACCPと工場内トレーサビリティのモニタリングに利用され、さらにはこれらのモニタリングデータと感性変換モデルにより、出荷品の流過程における品質変化や賞味期限の予測が可能となる。健康・介護食の広領域宅配には凍結製品が、また、近距離宅配製品のデリバリには低温流通が用いられるものと予測される。もちろん、精算関連の情報も一括して管理され、一部の公開可能な情報は前述したウェブサイトへ送信され、関係団体もしくは在宅消費者に共有される。

これまで述べた社会システムの構築には、食感性工学のアイデアにサポートされた科学技術の発展が不可欠であり、また、消費者に起点を置いた新生産方式と産業創出の重要性、すなわち、逆転の発想を柔軟に受け入れる社会・経済的素地の育成が必要である。

4. 食嗜好を満足させる冷凍米飯開発の目的

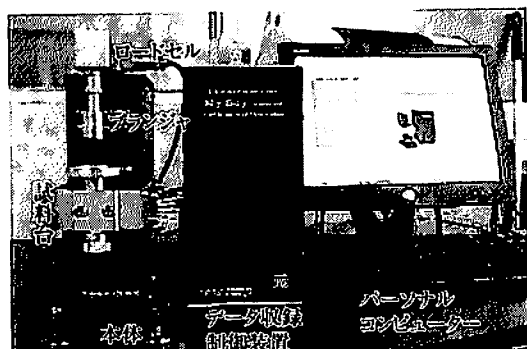
日本冷凍協会の統計によれば、1999年の冷凍米飯類の生産量は14万8,500トンで、調理済み冷凍食品全体の12%の構成比を占めており、その市場は10年前の約3倍にまで拡大成長を続けている³⁾。このような冷凍米飯市場の拡大に伴って、米飯の保存期間および輸送中の品質劣化は食品企業間で深刻な問題となっており、通常の米飯と遜色ない食味を維持する技術の開発が望まれている。特に、高齢者の食嗜好を満足させる冷凍米飯の最適な品質や保存条件を明らかにする方法の開発が望まれている。

次節以下には、異なる冷凍条件下で保存した炊飯米を供試材料とし、消費者を対象とした官能評価、冷凍米飯の粘弾性特性および凍結試料断面の水結晶の経時変化を測定し、これらの測定結果にニューラルネットワークモデルを適用して最適な品質特性と冷凍保存条件を探索した研究事例を紹介する。

5. 実験装置および方法

5.1 テンシプレッサ

図5に米飯の粘弾性計測に用いたテンシプレッサの概略図を示した。この図に示すように、テンシプレッサは本体、データ収録制御装置および解析用パーソナルコンピュータから構成されている。本体の試料台は一定速度で垂直方向に昇降して試



テンシプレッサ
(TAKETOMO製)

テンシプレッサ独自の指標
H5 → 硬さ, -H5 → 付着など

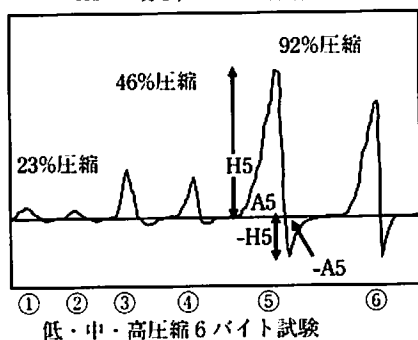


図5 テンシプレッサと6バイト試験による典型的計測曲線

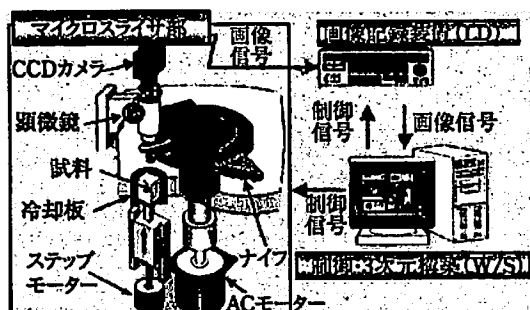


図6 マイクロスライサ画像処理システム

料を連続的に圧縮すると同時に、ロードセルにより圧縮・引張りに要する力・仕事量と変形距離を検出する機能を有している。この装置の特徴は、試料を23～92%の範囲で設定した3段階の低・中・高圧縮を各段階について連続的に2回繰り返す方法、すなわち6バイト試験における力-時間曲線を測定し、得られた曲線の波形から「硬さ」、「こし」、「付着性」および「粘り」などのパラメータ値を表示する機能を有している点にある。

5.2 マイクロスライサ画像処理システム

図6に米飯1粒子断面の水結晶観察に用いたマイクロスライサ画像処理システムの概略図を示す。このシステムはスライサ部、画像記録装置および制御・画像処理用パーソナルコンピュータから構成されている。スライサ部では、試料をステップモータで駆動する一軸ステージで間欠的に押し上げ、その上端をマイクローム用ナイフの回転により連続的に切削する。このときの切削速度は毎分90回、最小切削厚さは $1.0\mu\text{m}$ である。試料の露出断面像はCCDカメラとこれに接続したレンズを組み合わせて撮像する。撮像した画像は追記型レーザービデオディスクレコーダに一時記録し、ワークステーションで3次元像を再構築する。これにより、外観および任意断面の形状や色彩分布が計測可能である。

5.3 実験方法

供試材料にはおいしさの程度が異なる2つの品種の冷凍米飯製造に対する適性を判定することを目的とし、食味計で90点以上の最高評価点と約75点を示すことが知られている2つの品種、すなわち新潟県魚沼産の「コシヒカリ」と滋賀県産「日本晴」のいずれも新米を供試材料として選択した。試料は 25°C で2日間、 10°C ・ 7°C ・ 3°C で3日間、 -5°C ・ -15°C ・ -30°C で10日間保存して、その後の計測および官能評価に供した。また、保存期間中の試料について一定時間ごとに含水率を 105°C -24h炉間法により測定した。保存後の試料は含水率測定後に2分し、一方は自然放置して試料温度を室温まで上昇させて「常温処理試料」、他方は家庭用電子レンジを用いて 70°C で加熱した後、再度室温まで放冷して「加熱処理試料」とした。さらに、濃度1wt%のRhodamine蛍光試薬を添加して炊飯した試料を -5 ～ -30°C で凍結した後、マイクロスライサ画像処理システムを用いて厚さ $5\mu\text{m}$

mで切削し、試料断面の氷結晶性状を観察した。

5.4 官能評価法

官能評価は品種として選んだコシヒカリおよび日本晴を供試材料とし、保存後に常温まで戻した試料およびマイクロ波加熱処理試料それぞれをパネルに供試した。一般成人（平均年齢30.4±8.9歳）に対しては、品種・加熱処理の有無・保存試験区数の組み合わせにより総量58サンプルを供試した。1サンプル当たりのパネル数は約40名であり、パネルの延べ人数は2,292名となった。高齢者（平均年齢81.1±8.4歳）に対しては10サンプルを供試し、1サンプルあたりのパネル数約27名、延べ272名を対象とした。

評価項目は「透明感」・「つや」・「白さ」・「香り」・「あま味」・「うま味」・「硬さ」・「こし」・「付着」・「粘り」・「舌触り」などの知覚強度に関する11項目および総合的な嗜好度の尺度である「おいしさ」とし、これらを7段階尺度法により評価した。

6. ANNモデルの適用

6.1 モデルの概要

本研究ではC言語を用いて作成した入力層－中間層－出力層の3層ANNモデルを使用した。このモデルは素子の出力演算にシグモイド関数を利用し、逆誤差伝播法・逐次更新学習法により荷重修正を行った。荷重初期値に-1～1の範囲の乱数を用い、20回の試行の上、交差妥当化により評価される学習程度が最も高い結果を最適な荷重として採用した。なお中間層素子数は1～15の範囲で検証を行い、学習精度の向上が認められなくなる最小の素子数を採用した。また、近似精度は、決定係数 (R^2) および平方平均二乗誤差 (Root Mean Square Error: RMSE) を用いて評価した。

6.2 解析対象項目と手順

解析の対象項目と手順の概要を図7に示した。図中の実線は一般成人、点線は高齢者を対象にし

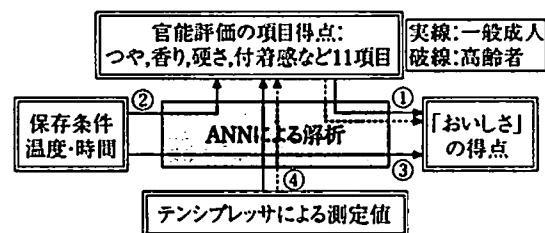


図7 ANNモデルによる解析

た解析をそれぞれ示している。以下に図中に示した番号順にしたがって、解析の課題や内容について述べる。

- 1) 一般成人および高齢者について官能評価で得られた「硬さ」や「付着感」など11の項目得点と「おいしさ」の関係を探る（経路 (a)）。
- 2) 保存温度・時間条件が一般成人の項目、得点および「おいしさ」の評価スコアに与える影響を評価する（経路 (b) と (c)）。
- 3) テンシプレスサにより得られた12種類の粘弾性パラメータ、すなわち低・中・高圧縮時それぞれにおけるA・H・-A・-Hの値から一般成人および高齢者の項目得点スコアを予測する（経路 (d)）。

これらの解析により、冷凍米飯に対する高齢者の嗜好を把握すると共に、例えば、ある製品の物性値から高齢者の感じる「硬さ」、さらには「おいしさ」を予測することが可能となる。さらに、これらの情報を逆に製品設計にフィードバックすることにより、高齢者の嗜好を重視した品質設計が可能となる。

7. 結果の概要

7.1 粘弾性特性の経時変化

図8に冷蔵および凍結保存したコシヒカリの付着感 (-H5) の経時変化を示した。また、マイクロ波過熱した試料については、それぞれ保存温度条件に「レンジ」と附記して区別した。冷蔵温度3～7℃の条件下で保存した試料の付着感は保存期間の経過に伴って、減少する傾向を示した。しかし、48hr以内であればレンジ加熱によりこの軟化が解消されることが分かった。室温で保存した試料の不着感は冷蔵保存後再加熱した試料と同程度に維持された。図には示していないが、凍結保存した試料の「硬さ」は、-5℃で保存した試料を除いては、レンジ加熱により解消できるが、特に、-30℃で保存した試料の硬さはレンジ加熱により、ほぼ炊飯直後の硬さに回復することが認められた。すなわち、凍結米飯の硬化は凍結保存温度に依存し、その温度が低いほど炊飯直後の硬さに維持されることが分かった。他の粘弾性パラメータの経時変化も、増大・減少の差はあるものの、保存温度・時間・レンジ加熱の有無に関して、上述した結果と同様の傾向を示すことが分かった。また、

コシヒカリを7・3・-5℃で冷蔵後、常温処理した試料については、ほぼ全ての粘弾性パラメータにおいて大きな変化が認められ、10℃保存試料では比較的小さな変化が認められた。また、これらの変化は炊飯後室温で保存した試料よりも大きくなることが分かった。また、凍結保存試料の粘弾性の変化は保存温度が低いほど小さくなる傾向を示すが、この変化は常温処理またはレンジ加熱処理によりほぼ解消されることが分かった。ただし、-5℃で保存した試料の解消の程度は他の試料に比べて小さい傾向を示すことが認められた。

これらの結果より、米飯の粘弾性を維持するための保存温度条件の範囲は約10℃以上、-15℃以下であることが分かった。この結果は、従来指摘されてきた保存温度条件を裏付けるものとなっているが、これらの結果はあくまでも「機器測定による粘弾性特性」の変化から予測された温度条件であり、「人が感じるテクスチャやおいしさ」の変化から予測された条件ではない。したがって、この段階で得られた条件下で保存した米飯に対して、消費者が「おいしい」と評価するか否かは不明である。この問題を解決するためには、粘弾性パラメータと官能評価スコアとの関連性を明らかにする必要があり、さらには、粘弾性特性データから官能評価スコアを予測するモデルの出現が必要であると考えられた。次節以降ではこれらの関係を明らかにし、また予測モデルの構築ツールとしてANNモデルの適用を試みた結果を紹介する。

7.2 米飯に対する高齢者の嗜好

一般成人と高齢者それぞれについて、官能評価にて得られた11の項目得点を説明変数、嗜好度すなわち総合的な「おいしさ」のスコアを目的変数とする関数をANNモデルにより近似し、それぞれの項目スコアと「おいしさ」との関係性を明らかにした。その結果、一般成人・高齢者ともに、「つや」・「香り」・「うま味」の増加に伴って「おいしさ」を強く感じる事が明らかとなった。しかし、高齢者は一般成人と比較して「つや」と「香り」が「おいしさ」に与える影響を大きく感じ、また、図9に示すように、一般成人では「硬さ」が「おいしさ」に与える影響は認められなかったのに対して、高齢者では「硬さ」の項目スコア3点近傍で「おいしさ」の極大値を示し、これ以上の項目スコアの範囲では、「硬さ」の増加に伴って「おいしさ」が減少することが分かった。これらの結果、高齢者は「おいしさ」に関して、一般成人よりも「つや」と「香り」を重視し、極端な「硬さ」には拒否感を示すことが分かった。図10は一般成人および高齢者が感じる「こし」と「付着感」から予測される、「おいしさ」の官能評価スコアを示した等高線図である。一般成人では、「こし」と「付着感」の増加に伴い「おいしさ」も増加する傾向がみられたのに対して、高齢者では、「こし」が小さく「付着感」の高い米飯に「おいしさ」のピークが観られるなど、両者の嗜好特性の相違が明らかとなった。これらの結果に示されるように、本節では官能評価データのみを利用してANN解析

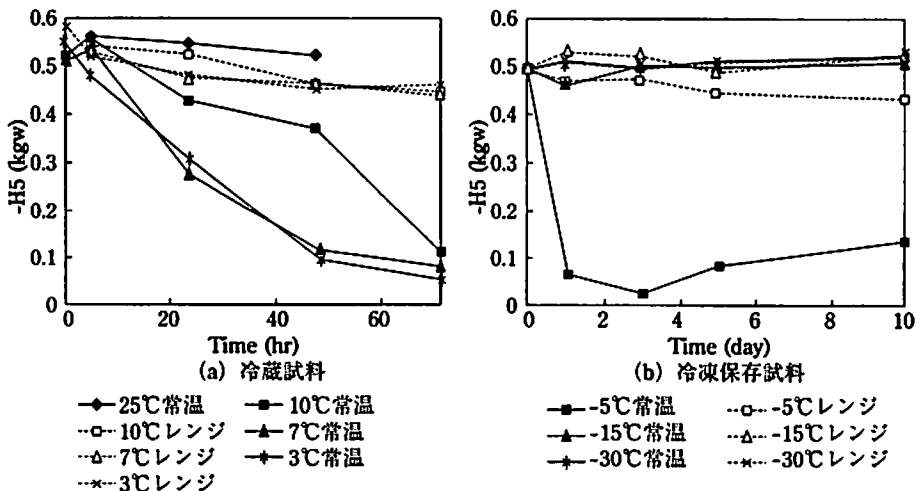


図8 テンシプレッサによる不着感 (-H5) の計測結果

を行うことにより、従来の解析手法では得られなかった有用な情報が得られることを示した。

7.3 保存条件が品質特性に及ぼす影響

一般成人を対象として、保存温度および保存時間がそれぞれの官能評価項目得点に及ぼす影響について、ANN解析を行った結果について述べる。ANNの入力値としては官能評価で供試したサンプル

の保存時間・温度を用い、出力値としては、コシヒカリの常温処理および加熱処理試料それぞれについて、官能評価により得られた11項目それぞれについて得られたスコアの平均値を用いた。

図11は常温処理のコシヒカリについて保存温度と時間から予測される、一般成人の「硬さ」の官能評価得点をそれぞれ示した等高線図である。近

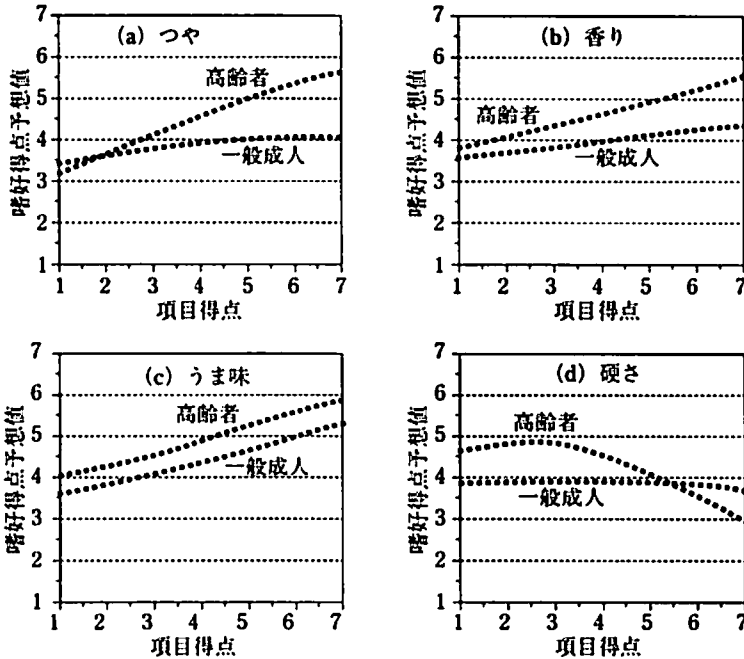


図9 項目得点とおいしさ（一般成人と高齢者の比較）

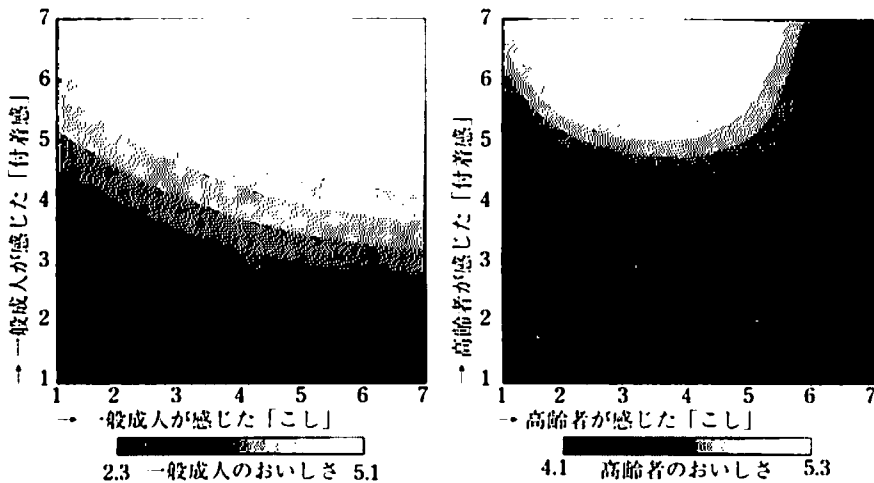


図10 「こし」と付着感が「おいしさ」に及ぼす影響の比較

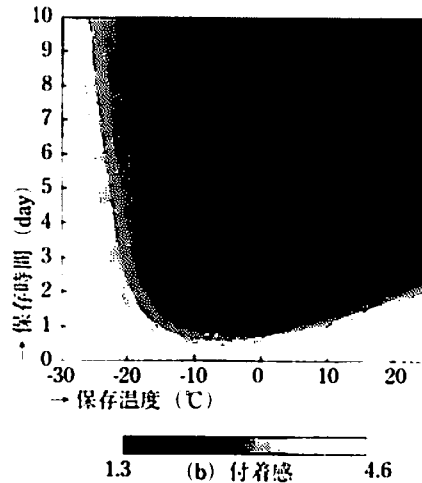
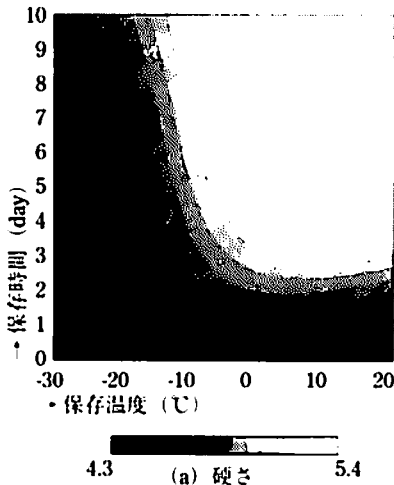


図11 コシヒカリの保存条件と「硬さ」・「不着感」の関係（一般成人）

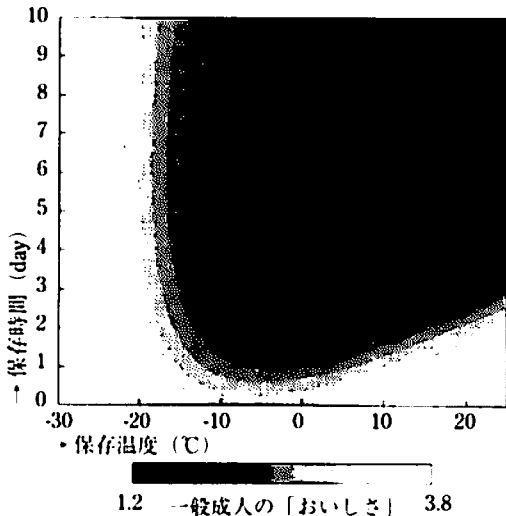


図12 コシヒカリの保存条件と「おいしさ」の関係

似の精度は、「硬さ」では学習時 ($R^2=0.52$, $RMSE=0.29$), 検証時 ($R^2=0.60$, $RMSE=0.38$) であった。

これらの結果、一般成人が感じる「硬さ」を1日間保持するための保存温度条件としては15℃以上、長期保存では-20℃以下が適当であることが分かった。同様に「付着感」を1日間保持するための保存温度条件は10℃以上、長期保存では-25℃以下が適当であることが分かった。

7.4 保存条件が「おいしさ」に与える影響

一般成人を対象として、コシヒカリの保存温度・時間が「おいしさ」スコアにおよぼす影響につ

いて、ANN解析した。ANNの入力値としては官能評価で供試したサンプルの保存温度・時間、出力値には常温および加熱処理試料それぞれについて、官能評価による「おいしさ」スコアの平均値を用いた。図12はコシヒカリの常温および加熱処理試料について、保存温度と時間から予測される「おいしさ」の官能評価スコアを示した等高線図である。近似の精度は、コシヒカリの常温処理試料では学習時 ($R^2=0.89$, $RMSE=0.46$), 検証時 ($R^2=0.83$, $RMSE=0.81$), 加熱処理試料では学習時 ($R^2=0.35$, $RMSE=0.39$), 検証時 ($R^2=0.59$, $RMSE=0.21$) であった。

この図に示されるように、常温および冷凍米飯の「おいしさ」を1日間保持するための保存温度条件は15℃以上、長期保存では-25℃以下が適当であることが分かった。このように、消費者が感じるおいしさを満足させる冷凍米飯の食味保持に最適な保存条件が明らかとなり、この結果はテンプレッサによる粘弾性計測結果とは異なることが明らかになった。すなわち、冷凍米飯の最適保存条件として、機器測定値のみに基づき検討した条件を採用すると、その米飯は消費者に受け入れられない結果を招きかねないと考えられる。

7.5 品種による「おいしさ」の相違

常温処理米飯では、15℃以上の保存条件下において、コシヒカリと日本晴れの「おいしさ」に相違は認められなかったが、凍結保存した試料ではコシヒカリの「おいしさ」が-25℃以下で長期的に保持されるのに比べ、日本晴では全ての凍結保存温度

条件において低下することが分かった。

加熱処理したコシヒカリの「おいしさ」は、保存温度条件による食味変化の相違は認められず、全ての保存温度・期間において、ほぼ一定に維持された。これに対して、日本晴の「おいしさ」は保存4日以降に大きく低下した(図13)。このように、加熱による食味向上の程度は品種により異なることが確認され、加熱処理米飯の食味劣化については、保存温度条件と比較して品種の相違が大きく影響することが分かった。

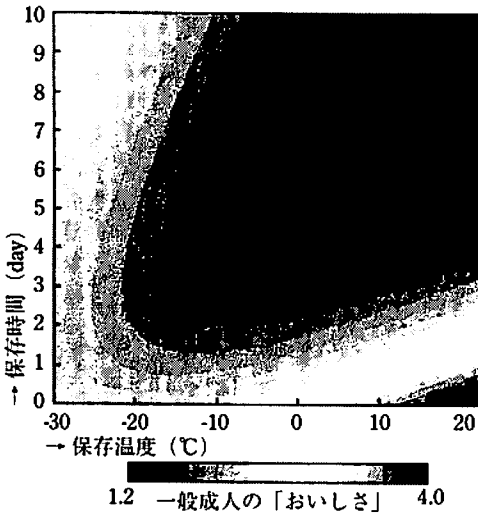


図13 日本晴の保存条件とおいしさの関係

7.6 粘弾性データを用いた官能評価スコアの子測

機器測定値から一般成人および高齢者が感じる官能評価項目スコアを予測することを目的として、テンシプレスサによる12の測定値を説明変数、一般成人および高齢者が感じる11項目それぞれの官能評価得点を目的変数とする関数をANNによりそれぞれ近似した。

ANNの入力値としては、コシヒカリと日本晴の常温処理および加熱処理試料それぞれについて、テンシプレスサにより測定された12の測定項目データを用いた。出力値としては、コシヒカリ・日本晴の常温処理および加熱処理試料それぞれについて、官能評価により得られた一般成人および高齢者が評価した項目スコアの平均値を用いた。平均値を採用したのは、機器測定値が一般成人および高齢者の感じるそれぞれの官能評価項目に与える影響を明らかにすることを目的とした解析であるため、同一の機器測定値を示すサンプル、すなわち同一保存条件下におけるサンプルの評価得点がパネルによってばらついた出力値を示すのを避けるためである。この解析による典型的な結果として、図14にテンシプレスサで計測された「付着感」の実測値に対する一般成人および高齢者が感じる「付着感」の予測値をプロットして示した。近似の精度は、一般成人では学習時 ($R^2=0.93$, RMSE=0.33), 検証時 ($R^2=0.71$, RMSE=0.64), 高齢者では学習時 ($R^2=0.98$, RMSE=0.07) および検

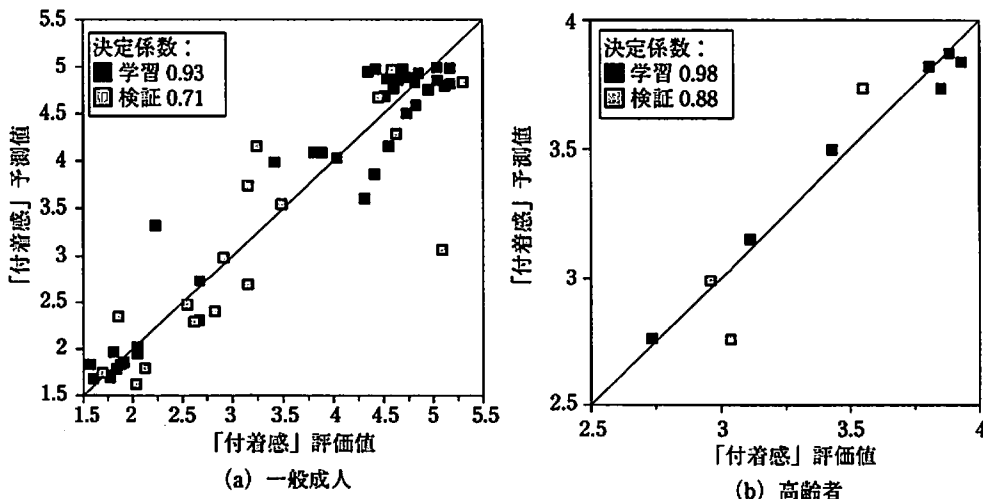


図14 テンシプレスサの計測データからANNにより「付着感」を予測した例

証時 ($R^2=0.88$, $RMSE=0.19$) と、比較的高い精度が得られた。また、一般成人および高齢者が感じる「付着感」の実測値と予測値の相関係数はそれぞれ0.94, 0.96であり、高い精度での予測が可能となった。このように、テンシプレッサによる粘弾性測定値から、一般成人・高齢者それぞれが感じる官能評価項目得点の予測が可能となった。さらに、ANNにより近似した項目得点と「おいしさ」得点との関係を示す関数に基づき、これらの項目得点から「おいしさ」の得点を予測することが可能となった。

8. 氷結晶計測技術の開発

8.1 凍結食品内氷結晶の挙動

急速凍結により食品内に生成した微細な氷結晶も、凍結保存中に次第に大きな氷結晶に成長する。これは再結晶化と呼ばれ、凍結食品内のように不均一で多数の氷結晶粒子からなる系では、自由エネルギー最小の原理に基づいて小さなサイズの氷結晶は消失し、大きなサイズの氷結晶はさらに成長することが知られている。凍結食品中の氷結晶サイズが増大すると細胞組織は圧迫・破壊されてその構造が崩れ、細胞全体の本来の調和が失われるために品質劣化が生ずる。すなわち、再結晶化は凍結保存中の食品における品質劣化要因の一つであり、食品内氷結晶を計測することは、食品の最適凍結操作法および保存法の確立に有用であると考えられる。

本研究でも -5°C で凍結保存した試料の粘弾性パラメータは著しく変化し、レンジ加熱してもテクスチャーの回復は他の試料に比べて若干困難であることを述べた。この原因は冷凍条件に依存する氷結晶サイズにあるものと想定された。そこで、本研究では氷結晶計測技術の開発レベルを冷凍米飯1粒子内の氷結晶観察を可能とするレベルに設定した。

8.2 計測手法の検討

食品材料の凍結時において、材料内氷結晶は溶質または不純物を排除する形で形成されるため、食品の主要構成成分である糖質、たん白質および脂質などを染色し、非染色部分を氷とみなすことにより氷結晶性状の観察が可能になると考えられた。そこで、各種の染色剤を添加した水で炊飯・染色した後で凍結し、マイクロスライサ画像処理システムで氷結晶を計測する方法を試みた。その結果、Rhodamine蛍光試薬を炊飯水に0.1%添加することにより氷結晶を可視化することに成功した。

8.3 氷結晶の観察結果

写真1と2はそれぞれ -30°C および -5°C で50日間保存した試料の断面画像である。写真1に示した画像は炊飯直後に観察したものと同様であり、氷結晶サイズは冷凍条件と保存期間に依存しないことが確認された。この写真に示すように、試料中心部分では長径 $150\mu\text{m}$ 、短径 $100\mu\text{m}$ ほどの粒状構造が観察された。一般に、コメの可食部である胚乳部では、長径 $100\sim 200\mu\text{m}$ 、短径 $50\sim 100\mu\text{m}$

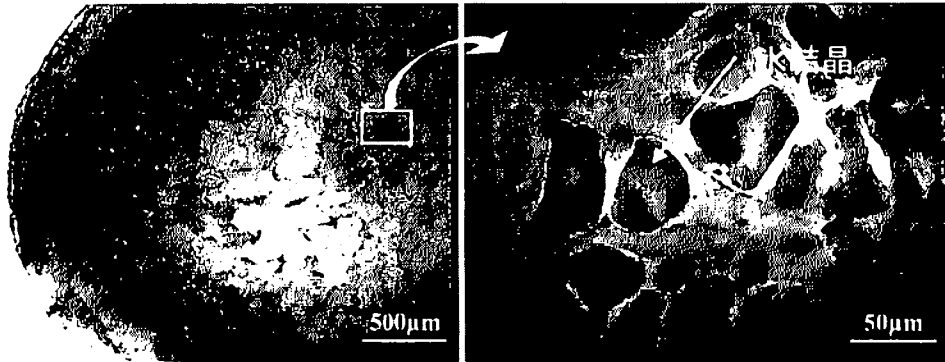


(a) -30°C , 50day 保存試料



(b) 試料中心部の断面拡大画像

写真1 凍結保存試料 (-50°C , 50day) 内の氷結晶



(a) -5°C, 50day 保存試料

(b) 試料中心部の断面拡大画像

写真2 凍結保存試料 (-15°C, 50day) 内の氷結晶

ほどの細胞に、直径約 $5\mu\text{m}$ の澱粉粒が10~20粒のグループをなして詰まっていることが知られている。したがって、写真中の粒状構造はコメの細胞構造が観察されたものであり、微細な氷結晶が細胞間隙に存在するものと、細胞質内に存在するものに分けられ、細胞粒内に形成される氷結晶は、サイズ $20\sim 30\mu\text{m}$ の球状であることがわかった。

他方、写真2に示すように、 -5°C の条件下で凍結保存した試料では氷結晶の成長が顕著であることが分かった。また、凍結保存米飯の米粒内氷結晶の成長が、先に示した物性値-H5などの粘弾性変化の一因であることが示唆された。以上の結果より、本研究で開発された冷凍米飯内氷結晶の計測法は、冷凍条件と氷結晶構造との関係を定量的に明らかにする手法として有用であることが確認された。

9. おわりに

本稿で紹介した冷凍米飯の最適保存条件を探索する手法は、「食感性工学」の手法を実用技術分野に展開する方法論と研究結果の有用性を示したものと考える。特に、本稿で紹介したANNモデルによる解析は、消費者起点工学を具体的に実現した典型例として評価され、今後の研究開発手法にもブレークスルーをもたらすものと期待されている。例えば本研究で得られた成果を活用し、(冷凍操作条件) - (計測機器による品質劣化要因のパラメーター) - (官能評価結果) の3者間に存在する関係を、多変量解析やニューラルネットワークモデルの導入により解明していくと共に、冷凍米飯の配送条件、すなわち、時間・距離・包装・温度

などの組み合わせによる各種条件下における最適な冷凍操作条件を提示するシステムの構築が可能になると考えられる。これらの研究成果は、国内のみならず米国や中国などにおける広域流通を対象としたマーケティング戦略の立案を可能とする基礎技術として有用となるものと考えられる。今後、冷凍食品が、レストラン、コンビニエンスストアおよび家庭などから廃棄されるごみの削減、食品供給の安定化、食品製造業における作業負荷の平準化および削減などに果たす役割は大きく、わが国をはじめ、米を主食とするアジア各国において、冷凍米飯の品質の向上と普及は重要な課題となっている。他方、わが国においては、今後、介護を要する高齢者のための施設の不足から、健康食および介護食の宅配による供給が必要となるものと考えられ、本研究で得られた成果が、消費者の嗜好に合った「おいしく簡単に食べられる健康で安全な食」を提供するシステムの構築に貢献することを願っている。

参考文献

- 1) A.K. Horigane et al., *J. Food Sci.*, 64(1), 1-5 (1999)
- 2) A.K. Horigane et al., *J. Food Sci.*, 65(3), 408-412 (2000)
- 3) 大坪研一編：米飯食品ビジネス事典，サイエンスフォーラム (2001)
- 4) 竹生新治郎：米の科学，石谷孝佑・大坪研一編，
- 5) 相良泰行：おいしさを分ける感性工学，東京大学公開講座73「分ける」，133-171 (2001)
- 6) Yukiharu Ogawa et al., *J. Agricultural and Food Chemistry*, 49 (2), 736-740 (2001)
- 7) 相良泰行編著：「食品感性工学」，朝倉書店，東京

(1999)

- 8) 相良泰行監修：「おいしさをさぐる食品感性工学」，
(社)農林水産技術情報協会編，化学工業日報社，東京（2004）



さがら・やすゆき

東京大学大学院農学生命科学研究科
農学国際専攻 教授

1972年東京大学大学院農学研究科農業
工学専攻博士課程在学中に東京大学農
学部助手採用。83年農学博士，85年東

京大学講師，88～90年インドネシア共和国ボゴール
農科大学大学院客員教授に派遣。97年東京大学助教
授。03年同教授，現在に至る。

○99年アジア・オセアニア乾燥会議メダル賞

○02年第13回国際乾燥シンポジウムにてクリオファル
マ凍結乾燥賞

○03年第2回北欧乾燥会議最優秀R&D賞

○趣味：モダンジャズプロデュース，精神分析，映
画・民族音楽集録ほか多趣味