総 説

食嗜好評価に基づく冷凍米飯の最適保蔵温度条件
—高齢者の食嗜好と粘弾性特性の相関関係分析法—相 良 泰 行[§]

(社)食感性コミュニケーションズ (FKC)

Optimum Condition of Preservation Temperature for Frozen Cooked Rice
Based on Sensory Evaluation of Food Preference
—Correlation Analysis Method Between Food Preference of the Aged
and Viscoelastic properties—Yasuyuki Sagara[§]

Food Kansei Communications, Corp. (FKC)

1. はじめに

食感性工学のパラダイム¹⁾を実現する基盤モデルとして、ヒトが感じる「おいしさ」を定量的に評価する機能を有する「食感性モデル」を提唱し²⁾、このモデルの有用性を実証するために、消費者の感性を考慮した緑茶飲料の香味設計法およびペットボトルの視覚情報が香味評価に及ぼす影響などについて紹介した。また、味と香りの感性計測システム³⁾では、味覚・嗅覚センサーやGC/Oによるコーヒアロマを保持するための最適凍結乾燥温度条件の探索法を紹介し、食感性モデルは食品製造プロセスのコントロールにも利用可能であることを示した。しかし、テクスチャーの感性計測法⁴⁾については既存の機器計測法により得られる測定結果と官能評価による官能値とが必ずしも一致しない現状にあることを述べた。

本稿では食感性工学の理念を念頭におきながら、研究開発の計画や到達目標を設定するランドデザインの考え方と、凍結保存した米飯の解凍後における粘弾性特性と官能評価スコアに関するデータセットから、最適な冷凍保存温度条件を探索した研究事例について紹介する。ここに紹介する方法は消費者の嗜好特性を考慮した、すなわち消費者を起点とした新食品の開発や加工条件の最適化に有用であると考えられる。

具体的には、「食感性モデル」の食品属性として定義した「物理化学的特性」として、冷凍米飯の粘弾性特性などを計

測し、また、ヒトの「感情(おいしさ)」を評価する方法として、一般成人および高齢者を対象とした官能評価を実施した。これらの計測・評価結果に、機器計測値と官能値との相互関係を探索する典型的解析手法として、ニューラルネットワーク(Artificial Neural Network: ANN)モデル^{5)~7)}を採用することとし、以下に示すような研究目的を設定した。

- 1) 凍結・保存温度条件の異なる米飯を対象とする官能評価スコアより一般成人および高齢者の米飯に対する食嗜好特性の相違を明らかにする。
- 2) 米飯の保存温度・時間、粘弾性特性計測データおよび官能評価により得られた評価スコアから最適な保存温度条件を探索する方法を開発する。
- 3) 前項と同様なデータおよび探索法から得られる最適保存温度条件の汎用性、例えば品種依存性を検討する。
- 4) 粘弾性パラメータから一般成人および高齢者が感じる「おいしさ」をそれぞれ予測し、ANN分析法が米飯の機器測定データから両者が感じる「おいしさ」を予測するのに有用であることを示す。
- 5) 凍結保存による品質劣化の要因を探るための基礎資料を得るために、異なる温度で凍結保存した米飯の1粒子内に形成される氷結晶の性状を3次元的に可視化する方法の開発を試みる。

これらの多様な目的を達成するためには、研究の意義と重要性、ニーズと社会貢献、技術レベルの現状などの検討結果に基づく総合的研究計画、すなわち「ランドデザイン」の策定が重要である。次節以降には、研究の初期段階

で実施した情報探索結果について要約し、研究従事者がこれらの情報を共有して全体計画の中の自分の役割を認識しながら研究意欲を高めるのに役立てた事例を紹介する。

2. 冷凍米飯の生産・消費・研究の現状

日本統計協会によると、総人口に占める高齢者人口の割合は約 18% となっている（表 1）⁸⁾。このような高齢化に加え、食の安全性への消費者意識の高まりに伴って、「おいしく簡単に食べられる健康で安全な食」の提供が急務となっている。とりわけ我々の主食である米飯に関しては、その簡便さと安全性確保から冷凍米飯が広く利用されており（表 2）、平成 14 年には全加工米飯生産量の 59% を占めるまでに至っている（図 1）。

表 1 総人口に占める高齢者（65 歳以上）の割合

	総人口 [万人]	65 歳以上人口 [万人]	総人口に占める割合 [%]
昭和 45 年	10 467	739	7.1
昭和 50 年	11 194	887	7.9
昭和 55 年	11 706	1 065	9.1
昭和 60 年	12 105	1 247	10.3
平成 2 年	12 361	1 489	12.0
平成 7 年	12 557	1 826	14.5

しかし、冷凍米飯の品質や食味に関する研究は、精白米に関する研究と比較して数少なく、例えば米の品種・炊飯法・凍結法・貯蔵温度・解凍法などが米飯の物理的特性に及ぼす影響に関する報告^{9)~15)}がなされているが、冷凍米飯の加工・保存条件が物理化学的特性や「おいしさ」に与える影響については系統的に解明されていない現状にある。このために、例えば高齢者を対象にした介護食弁当の主食として、健康・生活習慣病予防機能を有する冷凍米飯を開発しても、その食味がまずければ継続摂食を拒否され、さらには消費が伸び悩む事態を招くことになりかねない。このように、冷凍米飯の「おいしさ」を定量的に把握して消費者の嗜好に合致した製品を設計・製造することや、食味を保持するための最適な冷凍・保存温度条件を明らかにすることは重要な研究課題であることが分かった。

3. 米飯の食味評価法^{16)~18)}

米飯の食味評価には、炊飯米をサンプルとした官能評価および食味に関連の深い物理化学的特性を機器計測・分析により評価する方法が行われている。物理化学的特性に基づく評価法の例としては、アミロースやタンパク質の測定、炊飯特性試験、糊化特性試験、米飯物性測定などが挙げられる。これらの特性の中でも、米飯の食味には、その「硬さ」や「粘り」のような粘弾性特性が強く影響することが

表 2 加工米飯の種類別生産量

(単位 t)

	平成 6 年	平成 7 年	平成 8 年	平成 9 年	平成 10 年	平成 11 年	平成 12 年	平成 13 年	平成 14 年
冷凍米飯	109 594	128 753	137 809	141 520	146 155	177 813	153 240	161 288	146 075
無菌包装米飯	11 035	17 945	18 781	27 214	34 787	53 259	55 615	58 246	66 316
レトルト米飯	21 507	25 341	21 976	21 190	21 783	23 795	22 892	22 834	21 840
チルド米飯	3 177	3 591	5 827	5 217	5 486	5 573	7 046	9 794	6 686
乾燥米飯	3 444	4 232	4 326	4 554	3 743	4 073	3 512	4 587	4 907
缶詰米飯	1 874	2 907	1 752	1 586	1 926	2 099	1 906	1 973	1 923
合計	150 631	182 769	190 471	201 281	213 880	266 612	244 211	258 723	247 747

図 1 加工米飯生産量に占める冷凍米飯の割合

指摘されており、その測定機器として、テクスチュロメータ、レオメータ、万能圧縮引張試験機およびテンシプレッサなどが広く使われている^{19)~24)}。しかし、これらの測定結果と官能値、特に米飯の総合的な「おいしさ」との関係は不明である。例えばテクスチュロメータ²⁴⁾はその測定結果の波形からヒトが感じる「かたさ」「粘り」「割れやすさ」などを表示する機能を有しているが、これらのテクスチャーに関するパラメータの計測結果と官能値とは必ずしも一致しないことが知られている。すなわち機器計測の結果から官能値を正確に予測することは不可能な現状にある。

他方、米飯の成分および水分分布に関する研究例²⁵⁾として、米粒粒子内におけるデンプン、タンパク質および脂質などの分布を計測した結果や、米飯粒子内の水分分布を NMR ミクロイメージング^{26)~29)}を用いて 3 次元的に可視化した研究が報告されている。NMR は液体または溶液状態で存在する化合物に含まれるプロトンを検出し、水、油、糖、アミノ酸、芳香族化合物の分布と性質をマッピングする機能を有しており、特に水をマッピングすることによって、試料の組織の内部構造を非破壊的に計測できる特徴を有している。しかし、米飯の食味に関する研究報告は、精白米を対象とした膨大な研究例と比較して数少なく、口腔内で知覚されるテクスチャーについても、その定量的知見は得られていない現状にある。また成分、デンプンの糊化度および水分分布など、米飯の物理化学的な定量的データを測定・報告した研究例も数少ない現状にある。

4. 研究の達成目標

本総説シリーズでは、上述したような研究の現状にブレイクスルーをもたらす方法として、「食感性モデリング」²⁾を提唱した。本研究例も「食感性モデリング」のアイデアを具体的に展開し、その有用性を実証した事例に相当する。その達成目標は、米飯の粘弾性測定および官能評価に基づき、冷凍米飯の品質保持に最適な冷凍・保存温度条件を明らかにすること、さらには一般成人および高齢者の嗜好特性の相違を把握し、解凍後における米飯の物性値から一般成人および高齢者が感じる「おいしさ」をそれぞれ予測することにより、これら社会属性の異なる消費者の嗜好を満足させる米飯を提供するための最適冷凍・保存温度条件を明らかにすることにある。これらの条件は米飯製造工程の設備機器の制御やプロダクトマネジメントに有用な情報を提供するものと考えられる。さらにこれらの個別技術を総合化して、例えば「少子高齢化社会に対応した冷凍宅配弁当フォードシステム」³⁰⁾を構築し、地域社会システムのモデルとして提案することも可能になると考えられた。

5. 研究のグランドデザイン

5.1 デザインの留意点

食感性モデルを有効に活用するためには、総合的な研究

計画、すなわち「グランドデザイン」が必要である。さらに、立案されたグランドデザインに従って、あらかじめ測定項目と採用すべき計測機器類および計測・評価のための手法を検討しておく必要がある。本研究の目標を達成するためには、食感性モデルの構成要素である食品属性の中の「物理化学的特性」からヒトの「おいしさ」に至る知覚の経路²⁾に着目し、少なくとも前者に関する機器計測データと後者に関する評価スコアの取得法をそれぞれ確定しなければならない。しかし、この段階では官能評価により得られる「知覚強度」および「おいしさ」に関するスコアと関連を有する米飯の「物理化学的特性」の測定項目は明らかでない。そのために、理想的には食品の物理化学的特性の計測には現存する全ての計測法を採用すべきである。

ヒトが感じる「かたさ」に寄与する要因は単に粘弾性パラメータのみでなく糖度・酸度、含水率などの含有化学成分量に影響される⁴⁾。すなわち、従来の研究で行われてきたように、テクスチャーを計測するために開発された工学的計測機器を用いて、力学的パラメータのみを計測しても、得られたデータからヒトが感じる「かたさ」を正確に予測することは不可能であることに留意すべきである。「食感性モデル」の利点の一つはモデルに含まれる要因間の関連性の強さを定量的に判定できる点にある。例えば食品の香りを抽出またはサンプリングする多様な方法の中から、官能評価スコアとの関連性が高い抽出法を選択する事が可能となる点である。このように、食感性モデルは物理化学的特性の計測法の中から、ヒトが知覚している食品の成分や理工学的特性を計測する方法を探索するツールとして利用することも可能であるといえる。

5.2 研究手法のデザイン

グランドデザインの第 1 ステップとして、本研究の目的を達成するための全体的なスキームを図 2 に示した。図中には計測項目を最下段に、計測により得られたデータ群に ANN を適用して明らかにする課題を中段に示し、最上段には計画した研究の最終目的を示している。最下段に示した計測項目の中で、「氷結晶計測」は、研究を開始する時点

図 2 研究のスキーム

で、その計測手法が確立されておらず、本研究を遂行する過程で、新規に開発することを計画した計測項目である。具体的には筆者らが開発した「マイクロスライサ画像処理システム」を利用して、米飯 1 粒子内に形成される 3 次元氷結晶構造を計測する新たな手法を開発することとした。この開発が達成されると、冷凍米飯の凍結速度-氷結晶構造-解凍後の品質の関連性を定量的に評価することが可能となる事が予測されるが、本研究のスキームの中での達成レベルとして、少なくとも凍結温度と保存期間により変化すると予測されている氷結晶構造の 3 次元可視化画像を計測可能とするレベルを目標とした。

5.3 測定項目・設定条件と手順

前項のグランドデザインに引き続き、第 2 ステップとして策定した、より詳細な研究手順を図 3 に示す。この手順に従って検討した実験条件や方法の検討結果を次項以降に述べる。

1) 供試材料

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、米の食味計³⁾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。

図 3 測定項目・設定条件と研究の手順

2) 炊飯・放冷法

これらの方法については、現在、健康・介護食を生産している民間企業の品質管理手法を参考にして決定した。具体的には、精白米 500 g をアルミニウム製ボウルに入れ、水道水 800 ml を加えて直ちに水を切り、10 回研いだ後、水道水 800 ml を加えて水を切る操作を 2 回、水道水 1 200 ml を用いて約 10 秒間攪拌しながらすぐ操作を 4 回繰り返した。続いて米重量の 1.36 倍の水道水を加え、家庭用炊飯器を用いて普通炊きのコースで炊飯した。

炊飯終了直後に蓋を開け、工業用吸水シートの表面に炊飯器内の釜を転倒し、ライスケーキ状試料を取り出した。次に、炊飯器付属のしゃもじを用いて釜面に接していた部分の米飯を 300 g 削り取り、軽く攪拌した後、厚さ 20 mm に広げて室温 25℃ まで放冷後、シートに包んで 15 分間なじませた。なお、試料の炊飯および放冷時における試料中心温度の径時変化を熱電対によりモニターした。

3) 保存温度と保存期間

前項で述べた方法により室温まで放冷した後の試料 200 g をポリエチレン製容器に入れ、塩化ビニル樹脂製食品包装用ラップフィルムで二重に包装した後、設定温度に対して±0.2℃の精度で制御が可能な小型低温恒温器内に冷蔵または凍結保存した。表 3 に示すように、試料は 25℃ で 2 日間、10℃・7℃・3℃ で 3 日間、-5℃・-15℃・-30℃ 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℃-24 h 灼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℃ まで加熱した後、再度室温まで放冷して「加熱処理試料」とした。

4) 計測・評価・ANN 分析の手順

これらの試料について、レオメータを用いたクリープ試験およびテンシプレッサを用いた低・中・高圧縮 6 バイト試験による粘弾性特性、デンプンの糊化度をそれぞれ測定し、さらに炊飯米用食味計を用いた食味評価および官能評

表 3 試料の保存温度条件および物性測定・官能評価時間の設定

温度 (℃)	時間 (hr)							時間 (day)	
25	0*	—	2	5	24	48	—	—	—
10	0	1	2	5	24	48	72		
7	0	1	2	5	24*	48	72	—	—
3	0	1	2	5	24	48	72	—	—
-5	0	—	—	—	1	—	3	5	10
-15	0	—	—	—	1*	—	3	5	10
-30	0	—	—	—	1	—	3	5	10

備考：■ は一般成人を、* は一般成人と高齢者を対象とした官能評価実施箇所を示す。

図 4 テンシプレッサの概略図

価を実施した. このようにして得られた計測・評価結果データに ANN モデルを適用して解析し, 保存温度・期間・粘弾性パラメータおよび官能評価により得られる「項目得点」と「おいしさ」の関係をそれぞれ明らかにした.

6. 粘弾性計測装置と方法

6.1 テンシプレッサ

前節で述べたように, 米飯の保存後における粘弾性特性データを取得するために, レオメータによる炊飯米 1 粒子の破断およびクリープ試験と, テンシプレッサによるバルク状試料の粘弾性特性計測を実施した. しかしながらレオメータによる計測データから判別可能な傾向を把握することは困難であった. これの原因は装置の試料台に供試した米飯 1 粒子の姿勢を常時一定に保つ事が困難であったためであり, これに起因して取得データの測定誤差が増大したものと考えられた. したがってその後の ANN 解析にはテンシプレッサにより得られたデータを採用した.

図 4 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おり, 本体はパーソナルコンピュータから操作することが可能である. 本体の試料台は一定速度で垂直方向に昇降して試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(図 5) 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.

6.2 計測方法

表 3 に示した温度・時間条件下で保存した常温処理試料

図 5 6 バイト試験計測曲線

および加熱処理試料それぞれについて, 6 バイト試験による粘弾性特性を測定した. 試料 10.0 g を内径 40 mm 高さ 16 mm の円筒状試料容器入れ, 専用プランジャで試料厚さ 10 mm になるよう 5 秒間荷重を加えたのち除重し, 3 分間放置した. このバルク状米飯を試料として 6 バイト試験を実施した. 測定は各試験区の試料についてそれぞれ 5 回を行い, 得られた粘弾性パラメータ値の平均値を採用した.

試料の測定は, 直径 18 mm の円筒形プランジャを用いて, 圧縮速度 2.0 mm/s, 引張り速度 1.0 mm/s の条件下で行い, 図 5 に示すような 6 バイト計測曲線を得た. 図中にはそれぞれの圧縮に要した力を H, 仕事量を A, 逆に引離しに要した力を -H, 仕事量を -A として表示している. さらに, これらのパラメータから食糧庁で用いられている米飯の品質評価指標である硬さ・こし・付着性・粘りの 4 指標が算出される. すなわち試料を圧縮したときの最大圧縮力の値を「硬さ (H5)」, また, 試料を 92% および 23% 圧縮するのに要する仕事量の比を「こし (A5/A1)」, さらに圧縮したのち引離すのに要する力と仕事量の最大値をそ

れぞれ「付着性（－H5）」および「粘り（－A5）」と定義している。

7. 官能評価法

供試材料のコシヒカリおよび日本晴について、表3に示した試験区の常温および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 サンプルあたりのパネル数

は約 40 名であり、パネルの延べ人数は 2292 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。図 6 に示すような官能評価用シートを作成して、「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」を 7 段階尺度法により評価した。評価には一回ごとに 1 サンプルを供試し、サンプルの撰

米飯試食テスト																	
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> サンプル を召し上がって、以下の質問にお答えください。 </div>																	
Q1. サンプルを召し上がって、以下の項目について、それぞれあてはまると思うものを1つずつ選んで、番号を○で囲んでください。																	
(1)	透明感がある	← 7	非常に	← 6	かなり	← 5	やや	← 4	どちらとも いえない	← 3	やや	← 2	かなり	← 1	非常に	透明感がない	→
(2)	つやがある	← 7	非常に	← 6	かなり	← 5	やや	← 4	どちらとも いえない	← 3	やや	← 2	かなり	← 1	非常に	つやがない	→
(3)	白い	← 7	非常に	← 6	かなり	← 5	やや	← 4	どちらとも いえない	← 3	やや	← 2	かなり	← 1	非常に	白くない	→
(4)	米本来の香りがある	← 7	非常に	← 6	かなり	← 5	やや	← 4	どちらとも いえない	← 3	やや	← 2	かなり	← 1	非常に	香りがない	→
(5)	あま味がある	← 7	非常に	← 6	かなり	← 5	やや	← 4	どちらとも いえない	← 3	やや	← 2	かなり	← 1	非常に	あま味がない	→
(6)	米のうま味がある	← 7	非常に	← 6	かなり	← 5	やや	← 4	どちらとも いえない	← 3	やや	← 2	かなり	← 1	非常に	うま味がない	→
(7)	硬い	← 7	非常に	← 6	かなり	← 5	やや	← 4	どちらとも いえない	← 3	やや	← 2	かなり	← 1	非常に	硬くない	→
(8)	こしがある	← 7	非常に	← 6	かなり	← 5	やや	← 4	どちらとも いえない	← 3	やや	← 2	かなり	← 1	非常に	こしがない	→
(9)	付着感がある	← 7	非常に	← 6	かなり	← 5	やや	← 4	どちらとも いえない	← 3	やや	← 2	かなり	← 1	非常に	付着感がない	→
(10)	粘りがある	← 7	非常に	← 6	かなり	← 5	やや	← 4	どちらとも いえない	← 3	やや	← 2	かなり	← 1	非常に	粘りがない	→
(11)	舌触りが滑らか	← 7	非常に	← 6	かなり	← 5	やや	← 4	どちらとも いえない	← 3	やや	← 2	かなり	← 1	非常に	滑らかでない	→
(12)	総合評価 おいしい	← 7	非常に	← 6	かなり	← 5	やや	← 4	どちらとも いえない	← 3	やや	← 2	かなり	← 1	非常に	おいしくない	→
氏名() 年齢() (男・女)																	

図 6 米飯の官能評価用シート

食間には、水で口直しをしながら評価することとした。また、評価の前に評価用語について次のような説明を行なった。

- ・硬さ:「ご飯を噛むときの力とする」
- ・こし:「ご飯の噛み応えとし、割れたり切れたりしないもの程こしがあるとする」
- ・付着:「ご飯が歯にひっつく具合とし、付着のないものの例として豆腐やプリンを挙げた。」
- ・粘り:「ご飯の粘りとし、もちを例として伸びれば伸びるほど粘りがあるとした。」

8. ANN モデルの適用

8.1 モデルの概要

図7に示すように、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

図 7 3 層 ANN モデル

重初期値に $-1 \sim 1$ 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 $1 \sim 15$ 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。なお、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。

8.2 解析項目と手順

本研究で行なった解析項目と手順の概要を図8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従って、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①)。

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②と③)。

3) テンシプレッサにより得られた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 $A \cdot H \cdot -A \cdot -H$ 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④)。

これらの解析により、例えば図9に示すように、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。

図 8 ANN モデルによる解析項目 (①～④)

図 9 食感性モデルによる製品設計の流れ

9. 粘弾性パラメータの経時変化

図 10 に冷蔵および凍結保存したコシヒカリの硬さ、すなわちテンシプレッサの計測パラメータ H5 の経時変化を示した。また、「常温処理」および「加熱処理」した試料の計測結果を区別するために、それぞれ保存温度条件に「常温」、「レンジ」と附記して示した。

冷蔵温度 3～7℃ の条件下で保存した試料の硬さは保存期間の経過に伴って、増大する傾向を示した。しかし、48 hr 以内であればレンジ加熱によりこの硬化が解消されることが分かった。室温で保存した試料の硬さは冷蔵保存後再加熱した試料と同程度に維持された。

凍結保存した試料の硬化は、-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。

図 11 には「付着感（-H5）」の経時変化を示した。付着感は保存期間の増大に伴って減少するが、その傾向は上述した「硬さ」の「増大」を「減少」と読み替えることにより、説明出来ることが分かった。すなわち「硬さ」の増大に伴って「付着感」は減少することが確認された。他の粘弾性パラメータの経時変も、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。

これらの結果より、コシヒカ리를 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

(a) 冷蔵試料

(b) 凍結保存試料

図 10 コシヒカリにおける「硬さ(H5)」の経時変化

(a) 冷蔵試料

(b) 凍結保存試料

図 11 コシヒカリにおける「付着(-H5)」の経時変化

メータにおいて大きな変化が認められ、10℃ 保存試料では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、「ヒトが感じるテクスチャーやおいしさ」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る。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。後で述べるように、本稿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。

10. 一般成人および高齢者の嗜好特性

一般成人と高齢者それぞれについて、官能評価によって得られた 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図 7 に示したような 3 層構造を有する ANN モデルにより近似し、それぞれの項目得点、すなわち官能評価シートに記載されている評価項目全てのスコアと「おいしさ」との関係を明らかにした。

ANN の入力値としては官能評価により得られた「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」の 11 項目のスコアデータを用いた。出力値は、同じく官能評価により得られた「おいしさ」の得点とした。一般成人および高齢者の米飯に対する嗜好特性を明らかにするため、解析には、コシヒカリ・日本晴の常温処理および加熱処理試料を対象とした全ての官能評価結果のデータセットを用いた。すなわち、一般成人については、欠損値のあるデータを除いた全データ数 2292 のうち、ランダムに選択した 1604 を学習データ、688 を検証データとして用いた。高齢者については、全データ数 272 のうち、190 を学習データ、82 を検証データとした。また、試行の結果、中間層の最適素子数を一般成人では 12、高齢者では 10 とした。

近似精度は、先に述べた決定係数 (R^2) および平方平均二乗誤差 (RMSE) を用いて評価した。近似の結果、一般

成人については、学習時において高い精度の近似が可能であり ($R^2=0.89$, RMSE=0.56)、また検証時でも同様に高い精度の近似が行われていることを確認した ($R^2=0.90$, RMSE=0.54)。また、高齢者についても比較的高い精度での近似が可能であった (学習時 $R^2=0.82$, RMSE=0.72, 検証時 $R^2=0.64$, RMSE=1.04)。

図 12 に一般成人および高齢者の嗜好特性の相違が認められた項目得点と「おいしさ」との関係の典型的な例として、「つや」・「香り」・「うま味」・「硬さ」と「おいしさ」のスコアとの関係をそれぞれ示した。これらの図に示すように、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、「つや」および「香り」については、高齢者の曲線の傾きが一般成人と比較して大きいことから、「つや」と「香り」が「おいしさ」に与える影響を大きく感じる事が分かった。また、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 13 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。なお、これらの作図に当たっては、上記 2 項目以外の項目スコアデータについて、その平均値を採用して、これらを固定した。その結果、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。

11. 最適保存条件の探索

11.1 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。高齢者の被験者および供試サンプル数は一般成人と比較して少なく、解析に十分なデータ数が得られなかったため、本節では一般成人についての結果のみを報告する。

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

図 12 項目得点と嗜好得点「おいしさ」(一般成人と高齢者の比較)

図 13 「こし」と「付着感」が「おいしさ」に及ぼす影響

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 14 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」および「付着感」の官能評価得点をそれぞれ示した等高線図である。近似の精度は、「硬さ」では学習時 ($R^2=0.52$, $RMSE=0.29$), 検証時 ($R^2=0.60$, $RMSE=0.38$), 「付着感」では学習時 ($R^2=0.91$, $RMSE=0.45$), 検証時 ($R^2=0.43$, $RMSE=0.15$) であった。ここで、「硬さ」は保存期間中に評価得点が上昇す

る評価項目であり、他方、「付着感」は他の全ての評価項目と同様に低下する評価項目である。これらの両評価項目は保存期間中の経時変化の特性を典型的に示す項目として、その解析結果を採用することとした。

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°C 以上、長期保存では -20°C 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を 10°C 以上、長期保存では -25°C 以下が適当であることが分かった。

図 14 コシヒカリの保存条件と「硬さ」・「付着感」の関係（一般成人）

11.2 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」スコアに及ぼす影響について、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 15 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。

常温処理米飯の「おいしさ」を 1 日間保持するための保存温度条件は 15°C 以上、長期保存では -25°C 以下が適当であることが分かった。このように、冷凍米飯の食味保持に最適な保存条件が明らかとなり、この結果はテンシプレス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。

11.3 品種による「おいしさ」の相違

図 16 に日本晴の保存温度・時間と「おいしさ」の関係を示す。この図では米の品種間の比較を容易にするため、図 16 のシヒカリについて得られた結果と同一のスケールを用いている。常温処理米飯では、 15°C 以上の保存条件下において、コシヒカリとの「おいしさ」の相違は認められなかったが、凍結保存ではコシヒカリの「おいしさ」が -25°C 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

図 15 コシヒカリの保存条件と「おいしさ」の関係

図 16 日本晴の保存条件と「おいしさ」の関係

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」では、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。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。このために、コシヒカリ以外の品種に対応した最適保存温度条件は炊飯法も含めて別途求める必要があることが分かった。

12. 粘弾性データを用いた官能評価スコアの予測

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、テンシプレッサ

図 17 テンシプレッサのパラメータから官能評価スコアを予測する ANN モデル

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。

図 17 に示すように、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、テンシプレッ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 18 にテンシプレッサで計測された「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それぞれ示した。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。

以上のように、テンシプレッサによる測定値から、一般成人・高齢者それぞれが感じる官能評価項目スコアを予測することが可能となった。さらに、第 10 節で示したように、ANN により近似した項目スコアと「おいしさ」スコアとの関係を示す関数を利用することにより、項目スコアから「おいしさ」のスコアを予測することが可能となった。

図 18 ANN による「付着感」の予測

13. 氷結晶計測技術の開発

13.1 凍結食品内氷結晶の挙動

急速凍結により食品内に生成する微細な氷結晶も、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成る系では、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。

13.2 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、タンパク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。

13.3 氷結晶の観察結果

図 19 と 20 はそれぞれ -5°C および -30°C で 50 日間保存した試料の断面画像である。図 20 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。この図に示すように、米飯粒の周辺部は中心部と比較して、色が濃く、水分濃度が高いことが分かった。また、中心部の拡大図に示すように、この部分では長径 $150\mu\text{m}$ 、短径 $100\mu\text{m}$ ほどの団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 $50\sim 100\mu\text{m}$ ほどの細胞に、直径約 $5\mu\text{m}$ のデンプン粒が $10\sim 20$ 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。従って、図中の団粒状構造はコメの細胞組織が観察されたものであり、

(a) -5°C —50day 保存試料

(b) 試料中心部の断面拡大画像

図 19 凍結保存試料 (-5°C , 50 day) 内の氷結晶画像

(a) -30°C —50day 保存試料

(b) 試料中心部の断面拡大画像

図 20 凍結保存試料 (-30°C , 50 day) 内の氷結晶画像

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 15~30 μm の球状であることがわかった。

図 19 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。

14. 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研究は、「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、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、本研究で得られた方法を活用し、(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。

さらに、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も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深夜作業負荷の平準化および削減などに果たす役割は大きい。

他方、我が国をはじめ、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が、特に、我が国においては、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ている。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」を提供する社会システムの構築にも貢献するものと思われる。

文 献

1) 相良泰行, 食感性工学のパラダイムと展望, 食科工, **56**, 309-316 (2009).

2) 相良泰行, 食感性モデルによる「おいしさ」の評価法, 食科工, **56**, 317-325 (2009).

3) 相良泰行, 味と香りの感性計測システム, 食科工, **56**, 429-443 (2009).

4) 相良泰行, 食品の力学的物性とテクスチャーの感性計測法, 食科工, **56**, 501-512 (2009).

5) Bomio, M., Neural networks and the future of sensory

evaluation, *Food Technol.*, **52**, 62-63 (1998).

6) Ni, H. and Gunasekaran, S., Food quality prediction with neural networks, *Food Technol.*, **52**, 60-65 (1998).

7) Sitakalin, C. and Meullenet, J.F., Prediction of Cooked Rice Texture Using an Extrusion Test in Combination with Partial Least Squares Regression and Artificial Neural Networks, *Cereal Chem.*, **78**, 391-394 (2001).

8) 日本統計協会, 「高齢人口と高齢者のいる世帯」(総務庁統計局編) p. 21 (2000).

9) 貝沼やす子, 品種, 貯蔵期間, 炊飯条件が異なる冷凍保存米飯の解凍時の性状, 家政誌, **47**, 15-23 (1995).

10) 貝沼やす子, 米の種類, 炊飯条件が異なる冷凍保存米飯の解凍時の性状 (第 2 報), 家政誌, **47**, 49-57 (1996).

11) Takeuchi, S., Maeda, M., Gomi, Y., Fukuoka, M. and Watanabe, H., The Change of Moisture Distribution in a Rice Grain During Boiling as Observed by NMR Imaging, *J. Food Engineering*, **33**, 281-297 (1997).

12) 貝沼やす子, 温水浸漬が低温保存米飯のテクスチャ変化に及ぼす影響, **51**, 15-21 (2000).

13) 成宮正興, 米飯のアルファ凍結, 冷凍, **71**, 326-333 (1996).

14) 矢内和博, 三浦 靖, 中村良司, 西ノ宮武, 原田 努, 小林昭一, 冷凍米飯の品質に及ぼす凍結, 貯蔵および解凍条件の影響, 食科工, **48**, 777-789 (2001).

15) 成宮正興, 冷凍米飯の大量解凍法, 食品工学, **42**, 35-41 (1999).

16) 岡部元雄, 米飯の食味に関する研究, *New Food Industry*, **19**, 65-71 (1977).

17) 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, 東京) (2001).

18) 竹生新治郎, 「米の科学」, 石谷孝佑・大坪研一(編), (朝倉書店, 東京) (1995).

19) Okabe, M., Texture Measurement of Cooked Rice and its Relationship to the Eating Quality, *J. Texture Stud.*, **10**, 131-152 (1979).

20) 岡留博司, 豊島英親, 大坪研一, 単一装置による米飯物性の多面的評価, 食科工, **43**, 1004-1011 (1996).

21) 岡留博司, 豊島英親, 須藤 充, 安東郁男, 沼口憲治, 堀末登, 大坪研一, 米飯 1 粒の多面的物性測定に基づく米の食味評価, 食科工, **45**, 398-407 (1998).

22) Ramesh, M., Zakiuddin Ali, S. and Bhattacharya, K.R., Structure of rice starch and its relation to cooked-rice texture, *Carbohydrate Polymers*, **38**, 337-347 (1999).

23) Bhattacharya, K.R. and Sowbhagya, C.M., Pasting Behavior of Rice, A New Method of Viscography, *J. Food Science*, **44**, 797-804 (1979).

24) Ohtsubo, K., Julie J.H. Siscar, Bienvenido O. Juliano, Iwasaki, T. and Yokoo, M., Comparative Study of Texturometer and Instron Texture Measurements on Cooked Japanese Milled Rices, *Rep. Natl. food Res. Inst.*, **54**, 1-9 (1990).

25) Ogawa, Y., Sugiyama, J., Kuensting, H., Ohtani, T., Hagiwara, S., Liu, X.Q., Kokubo, M., Yamamoto, A., Kudoh, K. and Higuchi, T., Advanced Technique for Three Dimensional Visualization of Compound Distributions in a Rice Kernel, *J. Agricultural and Food Chemistry*, **49**, 736-740 (2001).

26) Horigane, A.K., Toyoshima, H., Hemmi, H., Engelaar, W. M.H.G., Okubo, A. and Nagata, T., Internal Hollows in Cooked Rice Grains (*Oryza sativa* cv. Koshihikari) Observed by NMR Micro Imaging, *J. Food Science*, **64**, 1-5 (1999).

27) Horigane, A.K., Engelaar, W.M.H.G., Toyoshima, H., Ono, H., Sakai, M., Okubo, A. and Nagata, T., Differences in

- Hollow Volumes in Cooked Rice Grains with Various Amylose Contents as Determined by NMR Micro Imaging, *J. Food Science*, **65**, 408-412 (2000).
- 28) 渡辺尚彦, 核磁気共鳴 (NMR) イメージング法の食品科学への適用, *食工誌*, **41**, 448-455 (1994).
- 29) 石田信昭, 小泉美香, 小川秀一郎, 狩野広美: ミクロ MRI と食品科学, *食科工*, **47**, 407-423 (2000).
- 30) 相良泰行, 食感性工学による高齢者介護食サプライシステムへの展開, *冷凍*, **78**, 26-29 (2003).
- (平成 21 年 9 月 16 日受理)
-