

14. 食感性モデルによる品質評価と設計法 (その3) ～ニューラルネットワークモデルによる解析法～

橋本 理帆* Riho HASHIMOTO 相良 泰行* Yasuyuki SAGARA

1. はじめに

前回の本講座では、冷凍米飯の物理化学的特性の計測法および一般成人と高齢者を対象とした官能評価法について解説した。物理化学的特性としては、温度・保存期間の異なる条件下で冷蔵・凍結保存した炊飯米を供試材料として、含水率、粘弾性特性、デンプン α 化度および食味計による食味値などを計測した。また、これらの計測は保存後、品温を室温まで戻した「常温処理」と電子レンジで70℃まで加熱後再び室温下で放冷した「加熱処理」試料についてそれぞれ実施した。また、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、-5℃と-30℃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た。

本稿では、これらの機器計測結果の中から、官能評価項目と最も深い関連性を有すると考えられた粘弾性特性パラメータを選択し、このデータと官能評価スコアの両者に、「感性変換モデル」として、ニューラルネットワーク(ANN)モデルを適用して解析した結果について述べる。このANN解析の結果から得られた主な知見を以下に列挙する。

(1) 官能評価スコアより一般成人および高齢者の米飯

に対する嗜好特性の相違を明らかにした。

(2) 米飯の保存温度、時間のデータと官能評価により得られた「おいしさ」のスコアから最適な保存温度条件を明らかにした。

(3) 前項と同様なデータから最適な保存温度条件は米の品種により異なることを明らかにした。

(4) 粘弾性計測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モデル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した。

また、前回述べた「研究のグランドデザイン」において、新規開発の到達目標レベルを設定したマイクロスライサ画像処理システムによる「氷結晶計測」の結果を紹介する。

2. 粘弾性パラメータの経時変化

図1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」と付記して示した。

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わかった。常温(25℃)で50 hr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

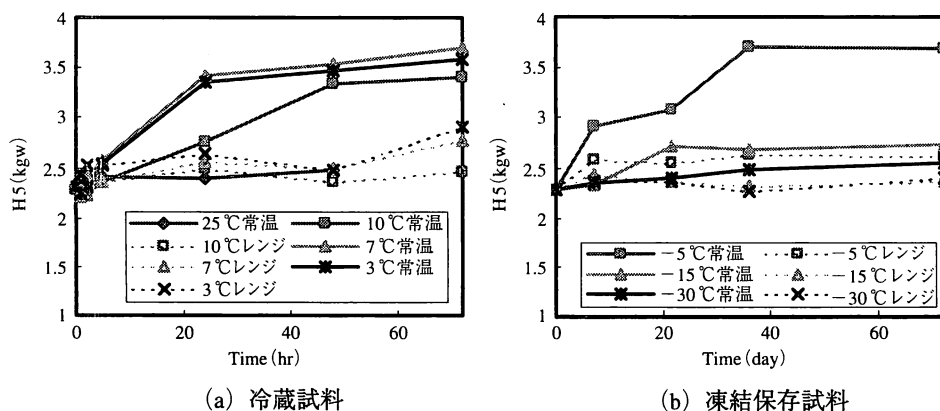


図1 コシヒカリにおける「硬さ(H5)」の経時変化

* 東京大学大学院 農学生命科学研究科
農学国際専攻
Dept. of Global Agricultural Sciences,
Graduate School of Life and Agricultural
Sciences, The University of Tokyo
原稿受理 2004年3月4日

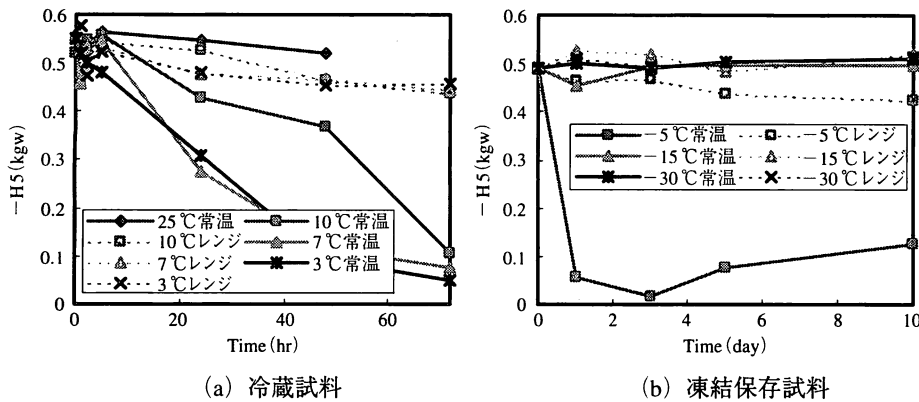


図2 コシヒカリにおける「付着力 (-H5)」の経時変化

除いては、レンジ加熱により解消できるが、特に、 -30°C 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わかった。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わかった。

図2には「付着力 (-H5)」の経時変化を示した。付着力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、説明できることがわかった。すなわち「硬さ」の増大に伴って「付着力」は減少することが確認された。ほか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わかった。

これらの結果より、コシヒカリを7, 3, -5°C で冷蔵後、常温処理した試料については、ほぼすべ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°C 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わかった。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わかった。ただし、 -5°C で保存した試料の解消の程度はほか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°C 以上、 -15°C 以下であることがわかった。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。

3. 一般成人および高齢者の嗜好特性

一般成人・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8に示すような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、すなわち前回の講座で示した官能評価シートに記載されている評価項目すべてのスコアと「おいしさ」との関係性を明らかにした。

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」、「付着感」、「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すべ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、中間層の素子数は一般成人では12、高齢者では10とした。

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。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 ($R^2 = 0.89$, $\text{RMSE} = 0.56$)、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 ($R^2 = 0.90$, $\text{RMSE} = 0.54$)。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 $R^2 = 0.82$, $\text{RMSE} = 0.72$; 検証時 $R^2 = 0.64$, $\text{RMSE} = 1.04$)。

図3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

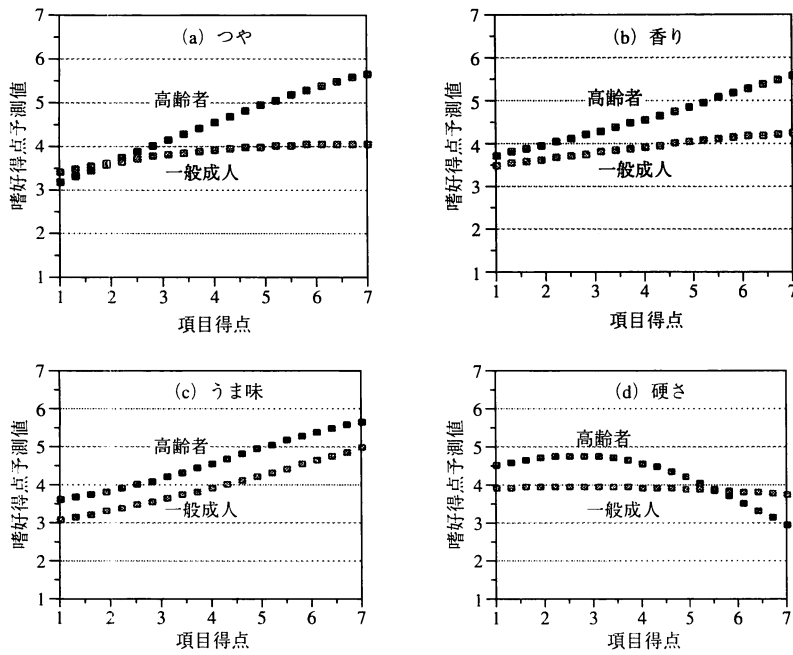


図3 項目得点と嗜好得点「おいしさ」(一般成人と高齢者の比較)

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わかった。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」の項目スコアは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」が減少することがわかった。

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わかった。

図4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」

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」のピークがみられるなど、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。

4. 最適保存条件の探索

4.1 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に対して、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5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

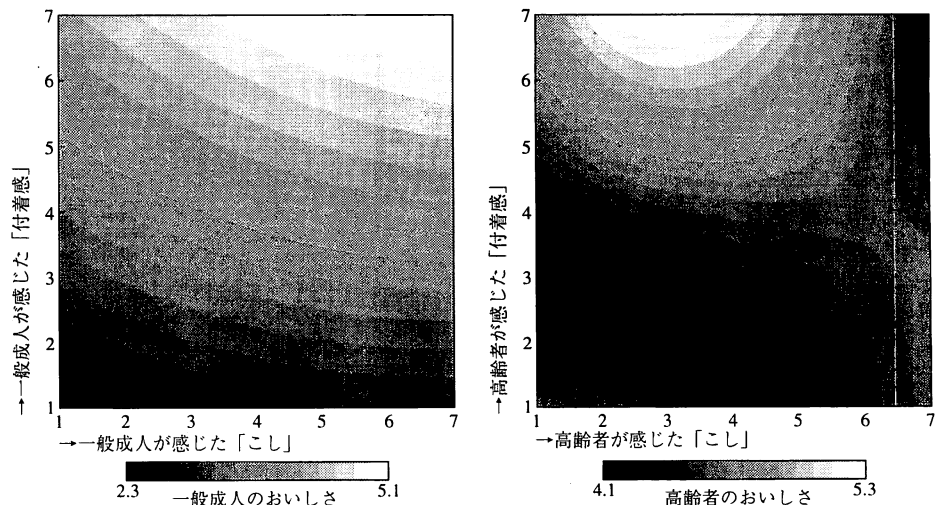


図4 「こし」と「付着感」が「おいしさ」に及ぼす影響

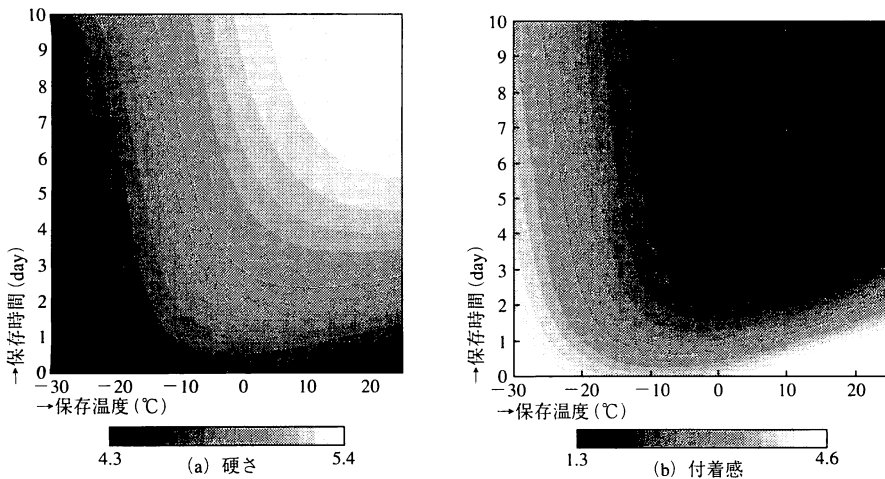


図5 コシヒカリの保存条件と「硬さ」・「付着感」の関係（一般成人）

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」はほかのすべ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」の変化、すなわち硬化を1日間防止するための保存温度条件としては15℃以上、長期間防止するためには-20℃以下が適当であることがわかった。同様に「付着感」を1日間保持するための保存温度条件としては10℃以上、長期保存では-25℃以下が適当であることがわかった。

4.2 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6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℃以上、長期保存では-25℃以下が適当であることがわかった。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。

4.3 品種による「おいしさ」の相違

図7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6のコ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℃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℃以下で長期的に保持されるのに比べ、日本晴ではすべての凍結保存温度条件において低下することがわかった。

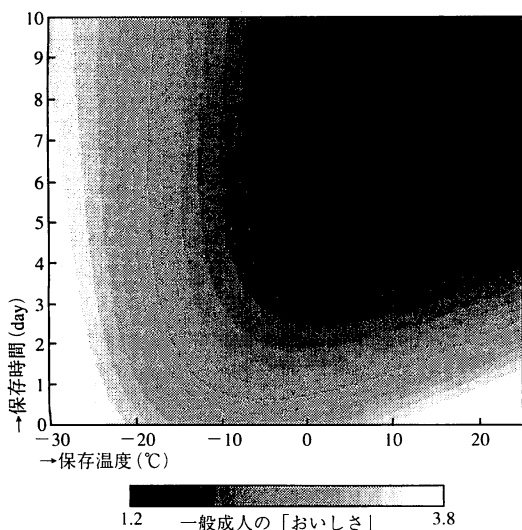


図6 コシヒカリの保存条件と「おいしさ」の関係

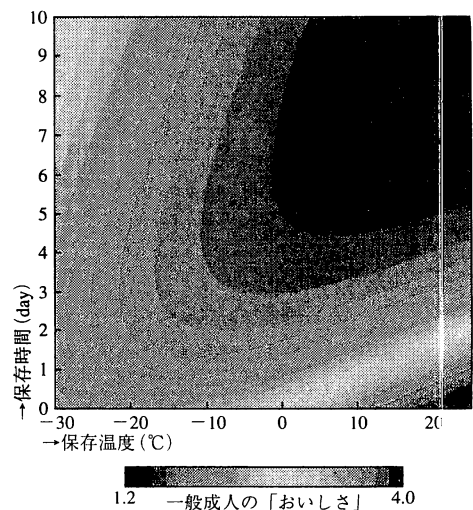


図7 日本晴の保存条件と「おいしさ」の関係

図には示さなかったが、加熱処理したコシヒカリの「おいしさ」に、保存温度条件による食味変化の相違は認められず、すべての保存温度・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による相違が大きく影響することがわかった。

5. 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、テンシプレッサによる12の測定項目を説明変数、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8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9にANNモデルで予測した「付着感」の評価値に対する、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」の評価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得点を予測することが可能となった。さらに、第3節で示したように、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を利用することにより、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。

6. 氷結晶計測技術の開発

6.1 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、細胞組織が圧迫・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の回

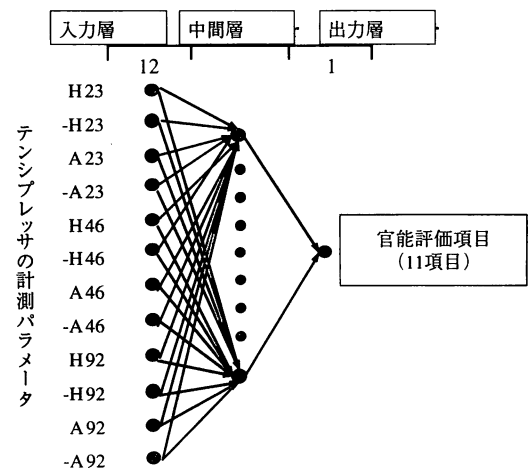


図8 テンシプレッサのパラメータから官能評価スコアを予測するANNモデル

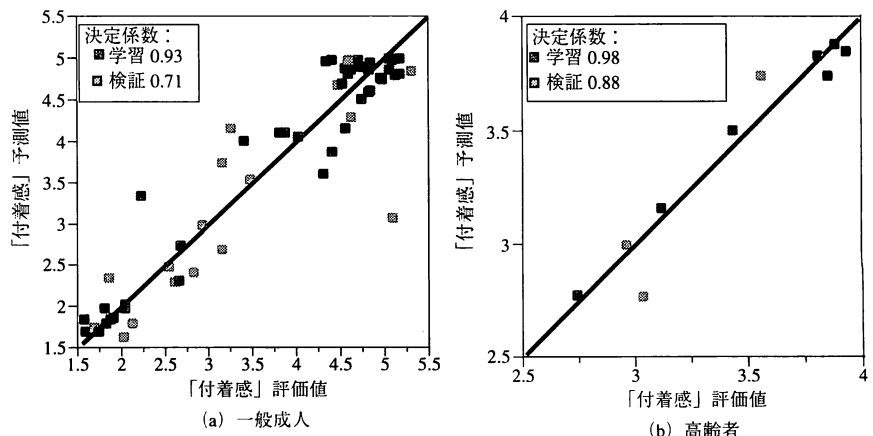


図9 ANNによる「付着感」の予測

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。

6.2 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。

6.3 氷結晶の観察結果

図10と11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11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、

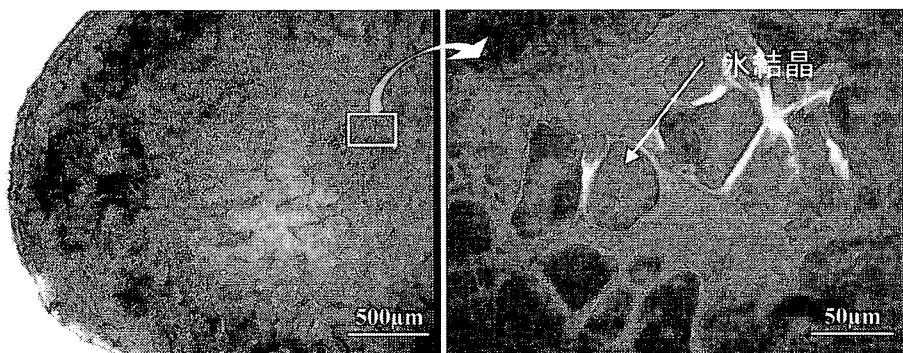
色が濃く、水分濃度が高いことがわかった。また、中心部の拡大図に示すように、この部分では長径 $150\mu\text{m}$ 、短径 $100\mu\text{m}$ ほどの粒状構造が観察された。一般に、コメの可食部である胚乳部では、長径 $100\sim 200\mu\text{m}$ 、短径 $50\sim 100\mu\text{m}$ ほどの細胞に、直径約 $5\mu\text{m}$ のデンプン粒が $10\sim 20$ 粒のグループをなして詰まっていることが知られている。したがって、図中の粒状構造はコメの細胞構造が観察されたものであり、微細な氷結晶が細胞間隙に存在するものと、細胞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。

図10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わかった。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。

7. おわりに

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) - (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ともに、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。

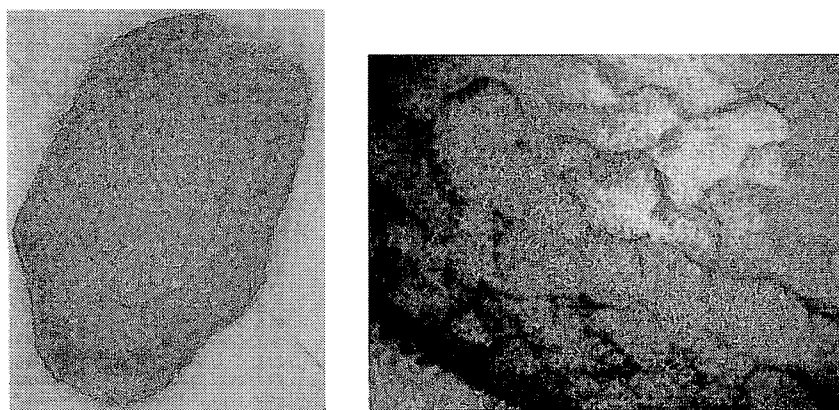
これらの研究成果は、国内のみならず米国や中国などにおける広域流通を対象としたマーケティング戦略の立案を可能とする基礎技術として有用となるものと考えられる。今後、冷凍食品が、レストラン、コンビニエンスストアおよび家庭などから廃棄されるごみの削減、食品供給の安定化、食品製造業における作業負荷の平準化および削減などに果たす役割は大きく、我が国をはじめ、米を主食とするアジア各国において、冷凍米飯の品質の向上と普及は重要な課題となっている。他方、我が国においては、今後、介護を要する高齢者のための施設の



(a) -5°C , 50 day 保存試料

(b) 試料中心部の断面拡大画像

図10 凍結保存試料 (-5°C , 50 day) 内の氷結晶画像



(a) -30°C , 50 day 保存試料

(b) 試料中心部の断面拡大画像

図11 凍結保存試料 (-30°C , 50 day) 内の氷結晶画像

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。

前回に引き続いて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、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。

文 献

- 1) 池田岳郎, 相良泰行: 冷凍, 78 (914), 23 (2003).
- 2) 池田岳郎, 相良泰行: 冷凍, 79 (915), 59 (2004).
- 3) 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), 21, (2000).
- 4) 貝沼やす子: 家政誌, 47 (6), 15 (1995).
- 5) 貝沼やす子: 家政誌, 47 (11), 49 (1996).
- 6) Takeuchi S. et al.: J. Food Engineering, 33, 281 (1997).
- 7) 貝沼やす子: 家政誌, 51, 15 (2000).
- 8) 成宮正興: 冷凍, 71 (822), 326 (1996).
- 9) 矢内和博, 三浦靖, 中村良司, 西ノ宮武, 原田努, 小林昭一: 日食科工誌, 48 (10), 777 (2001).
- 10) 成宮正興: 食品工学, 42 (22), 35 (1999).
- 11) 相良泰行: ジャパンフードサイエンス, 37 (3), 23 (1998).
- 12) 相良泰行: 「食品感性工学」, 朝倉書店, (1999).
- 13) 相良泰行: 味と匂い学会誌, 8 (2), 153 (2001).
- 14) 岡部元雄: New Food Industry, 19 (4), 65 (1977).
- 15) Okabe M.: J. Texture Stud., 10, 131 (1979).
- 16) Bhattacharya K.R. et al.: J. Food Sci., 44, 797 (1979).
- 17) K.Ohtsubo et al.: Rep.Natl. food Res. Inst., 54, 1 (1990).
- 18) 岡留博司, 豊島英親, 大坪研一: 日食科工誌, 43 (9), 1004 (1996).
- 19) 岡留博司, 豊島英親, 須藤充, 安東郁男, 沼田憲治, 堀末登, 大坪研一: 日食科工誌, 45 (7), 398 (1998).
- 20) M.Ramesh, et al.: Carbohydrate Polymers, 38, 337 (1999).
- 21) 全国食糧検査協会: 「米の食味評価最前線」, (1997).
- 22) 大坪研一: 「米飯食品ビジネス事典」, サイエンスフォーラム, 東京.
- 23) 竹生新治郎: 「米の科学」(石谷孝佑・大坪研一編), 朝倉書店 (1995).
- 24) Y. Ogawa, et al.: J. Agr. Food Chem., 49 (2), 736 (2001).
- 25) A. K. Horigane: J. Food Sci., 64 (1), 1 (1999).
- 26) A. K. Horigane, et al.: J. Food Sci., 65 (3), 408 (2000).
- 27) 渡辺尚彦: 日食工誌, 41 (6), 448 (1994).
- 28) 石田信昭, 小泉美香, 小川秀一郎, 狩野広美: 日食科工誌, 47 (6), 407 (2000).
- 29) 相良泰行: 冷凍, 78 (914), 30 (2003).