

審査の結果の要旨

氏名 河野 晋治

本論文は、凍結食品内に形成される氷結晶の新規計測法に基づく凍結保存条件の最適化に関する研究であり、全6章で構成されている。第1章は凍結食品内に形成される氷結晶の可視化及び計測技術に関する総説であり、また、本研究の目的および全体構想についてまとめている。食品の凍結保存操作に伴う氷結晶性状の変動と品質の関係を定量的に解明することは、食品凍結技術における核心的課題の一つとされている。また、氷結晶性状の変化をモデル化し、数値シミュレーションにより最適な凍結保存操作条件を探索することは、凍結食品の温度管理を設計・運用する上で重要である。一方、凍結食品内に形成される氷結晶を可視化するためには、材料の前処理、機器の選定、組織画像の処理方法など、対象材料に特化した多様な計測技術が必要とされてきた。しかし、従来の計測法には氷結晶の形態変化速度に対応不可能と考えられる長時間の前処理および観察、高精度で高価な測定機器、さらに熟練を要する画像処理技術などを必要とするものも少なくないため、従来の計測法を短時間に簡便・安価で汎用性などに優れ、実用上も汎用性の高い計測法へと改善することが技術的課題とされてきた。

第2章ではまず、従来法の凍結置換法における標本作製に時間を要するという欠点を補うため、医学病理学分野において利用されている低温粘着フィルムを応用することにより、迅速かつ簡易な氷結晶計測標本作製法を提唱し、この方法により試料作製時間が20~30分に短縮した。具体的には、低温粘着フィルムにより標本作製の手順を入れ替えることが可能となり、組織固定・置換液浸漬時間が大幅に短縮され、結果的に凍結置換法の欠点を補うことになった。さらに、提唱した計測法を評価するため、本手法と凍結置換法により得られた氷結晶性状に関するデータを比較したところ、顕著な相違は観察されず、ほぼ同等の氷結晶計測用標本作製可能であることを確認した。

第3章では、第2章で提唱した氷結晶の新規計測法に基づき凍結食品の外観を評価するための応用事例として、外観色を定量化可能な **Computer Vision System** を用い、凍結速度に依存する氷結晶サイズが食品の外観色に及ぼす影響を定量的に明らかにした。具体的には、凍結サーモンフィレの凍結速度と外観色の相互関連性を検討した結果、表層面の凍結速度に依存して外観色の L^* 値が増加することが明らかとなった。また、急速凍結したフィレの表層近傍においては、微細な氷結晶が形成されるが、そのサイズは深さ方向に伴って大きくなることが観察された。色彩変化については、表面から深さ方向 0.3 mm までの領域において、 L^* 値が極端に低下し、反対に a^* 、 b^* 値も同じ領域において大きく増加していたが、これより深い領域ではほとんど変化しなかった。さらに、顕微鏡画像における試料表面近傍の氷結晶面積率と表面色の関係をみると、氷結晶サイズおよび氷結晶面積率が小さく

なるにつれて L^* 値が増加し、 a^* 、 b^* 値は減少したことから、急速凍結時にフィレ表面が白く変化する現象は氷結晶の微細構造とその分布に起因することが分かった。

第 4 章では、食品中の氷結晶が食品の品質に及ぼす影響について詳細に調べるために、主食である炊飯米を典型的な研究対象として、異なる凍結操作条件により形成される氷結晶が官能評価に及ぼす影響を総合的に評価した。具体的には、凍結条件が異なる米飯試料内に形成される氷結晶サイズの計測、解凍後の粘弾性計測および官能評価を行なった。粘弾性計測データおよび官能評価スコアに対する主成分分析の結果から、室温解凍サンプルの保存温度が高くなると、硬さが増加し、また保存期間に依存して付着感・粘着感が低下することが明らかとなった。次に、Artificial Neural Network (ANN) を用いて凍結保存操作条件と美味しさスコアの関係性をモデル化し、美味しさスコアを維持するための凍結保存条件を解凍方法に応じて探索可能となった。また、氷結晶サイズと官能評価から得られた食感および美味しさスコアとの間に負の相関関係が認められ、さらに解凍方法により官能評価スコアに与える影響が異なることを明らかにした。

第 5 章では、最適な凍結プロセスや保存条件を探索する手法を確立するため、氷結晶サイズおよびフラクタル次元に基づいたモデルを構築した。具体的には、凍結・保存条件の変化に起因して冷凍米飯中に形成される氷結晶サイズを計測し、その結果に基づいた ANN モデルを構築した。氷結晶サイズと官能評価スコアの関係から導出した値を、この ANN モデルと組み合わせることによって、目的とする品質を維持することができる凍結温度と保存温度の領域を描くことができる。この領域をデザインスペースと呼び、目的とする品質を維持する操作条件の組み合わせを示している。また、この領域は保存日数が長くなるにつれて狭くなることが示された。また、凍結・保存条件に起因して変化する氷結晶について、フラクタル次元の解析を用いて形状変化を定量化した結果、冷凍米飯中の氷結晶粒の輪郭は自己相似性を有する形状であることが明らかとなった。さらに、フラクタル次元の計測結果に基づき再結晶化の進行予測モデルを構築することにより、氷結晶の再結晶化を抑制する上限温度条件を予測することが可能となった。

第 6 章では結論と今後の展望がまとめられている。具体的には、食品内に形成される氷結晶形状を精度良く短時間に測定可能な手法を提唱し（第 2 章）、また、凍結保存条件が異なる凍結サーモンフィレ（第 3 章）および冷凍米飯（第 4 章）の氷結晶の形態計測法を基盤とするデータ解析法・品質評価法を確立し、氷結晶が食品品質に及ぼす影響について明らかにした。さらに、氷結晶性状を入力データとする ANN モデルによる数値シミュレーションを用いて効率的かつ効果的な実用操作条件を探索する方法を提唱した（第 5 章）。

これらの研究成果は、凍結食品における設計・運用に反映され、効率的かつ効果的な食品製造プロセス実現のための条件探索手法として有用であるだけでなく、今後さまざまな食品の凍結・保存・解凍における詳細な品質劣化のメカニズムの解明、さらには食品毎に適したより詳細な操作条件のデータベース化に寄与するものと考えられ、学術上応用上寄与するところが少なくない。よって、審査委員一同は本論文が博士（農学）の学位論文として価値あるものと認めた。