

位相コントラスト X 線イメージング法による食品の凍結・解凍過程の 内部構造の可視化

Visualization of Internal Structural Changes in Foods During Freezing and Thawing Using Phase-Contrast X-ray Imaging

安田みどり^{1,*}, 米山明男^{2,3}, 竹谷敏⁴, 平野馨一³, 兵藤一行³

¹西九州大学, 〒842-8585 佐賀県神埼市神埼町尾崎 4490-9

²九州シンクロトロン光研究センター, 〒841-0005 佐賀県鳥栖市弥生ヶ丘 8-7

³高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所, 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

⁴産業技術総合研究所, 〒305-8565 茨城県つくば市小野川 16-1 つくば西

Midori YASUDA^{1,*}, Akio YONEYAMA^{2,3}, Satoshi TAKEYA⁴, Keiichi HIRANO³ and Kazuyuki HYODO³

¹Nishikyushu University, 4490-9 Ozaki, Kanzaki, Saga 842-8585, Japan

²SAGA Light Source, 8-7 Yayoigaoka, Tosu, Saga 841-0005, Japan

³Photon Factory, Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

⁴National Metrology Institute of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 16-1, Tukuba West, Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8565, Japan

1 はじめに

冷凍は、食品の品質を保持し長期保存を可能にする代表的な保存技術であり、青果物や加工食品など幅広い食品に利用されている。しかし、凍結および解凍過程では、氷結晶の生成・成長や凍結濃縮が生じ、細胞組織の損傷、ドリップの発生、保水性やテクスチャーの低下などの品質劣化を引き起こすことが知られている[1,2]。これらの品質変化は食品内部で進行するため、そのメカニズムを明らかにするには非破壊で内部構造を観察できる手法が求められている。

これまで食品の内部構造解析には光学顕微鏡や電子顕微鏡、X 線 CT などが用いられてきたが、凍結中の試料内部に形成される微細な構造変化や氷結晶の分布を高感度に観察することは容易ではない。一方、位相コントラスト X 線イメージング法は、X 線の吸収だけでなく位相変化を利用して画像化するため、密度差の小さい軟組織や含水食品の内部構造を高いコントラストで可視化できる特徴を有する[3]。

本研究では、位相コントラスト X 線イメージング法を用いて、イチゴおよびブドウの凍結・解凍過程における内部構造の変化を非破壊で可視化し、凍結条件の違いが食品内部構造および品質に及ぼす影響について検討した。

2 実験

本研究で用いた位相コントラスト X 線イメージングシステムは、BL-14C にてエネルギー : 35

keV、単色器 : Si (220)、検出器 : Zyla、蛍光体 : CsI 1000 μm 、ファイバーカップリング (1:1)、画素数 : 2560 $\times$ 2180、画素サイズ : 6.5 μm 、露光時間 : 0.5 秒/枚、走査数 : 15、投影数 : 500 枚/360 度、背景 : 2 枚、計測モード : ステップ DEI スキャンにて行った。また、試料は、酢酸メチルを入れたチャンバーにて温度制御を行った。試料には、イチゴ (いちごさん、佐賀県産)、ブドウ (デラウェア、島根県産) を用い、緩慢冷凍 (チャンバー内の温度を 4 $\sim$ -20 $^{\circ}\text{C}$ に冷却) および急速冷凍 (液体窒素により急速凍結後、-20 $^{\circ}\text{C}$ で保持した状態で測定) を行った。緩慢冷凍試料は 4 $^{\circ}\text{C}$ で解凍し、解凍後の内部構造についても測定した。

3 結果および考察

イチゴを 4、0、-5 および -20 $^{\circ}\text{C}$ で冷却した結果を図 1 に示す。4 $^{\circ}\text{C}$ から -5 $^{\circ}\text{C}$ までは果実内部に大きな構造変化は認められず、内部は比較的均一な状態を維持していた。一方、-20 $^{\circ}\text{C}$ では果実内部に黒色の点状構造が多数観察され、凍結の進行に伴う内部構造の変化が明瞭となった。これらの点状構造は、氷結晶の形成や成長に伴う密度変化、あるいは細胞組織の損傷や細胞間隙の拡大を反映している可能性が考えられる。イチゴは水分含量が高く、凍結過程で氷結晶が形成されやすい食品であることから、-20 $^{\circ}\text{C}$ で観察された構造変化は、凍結による組織変化を可視化したものと考えられる。

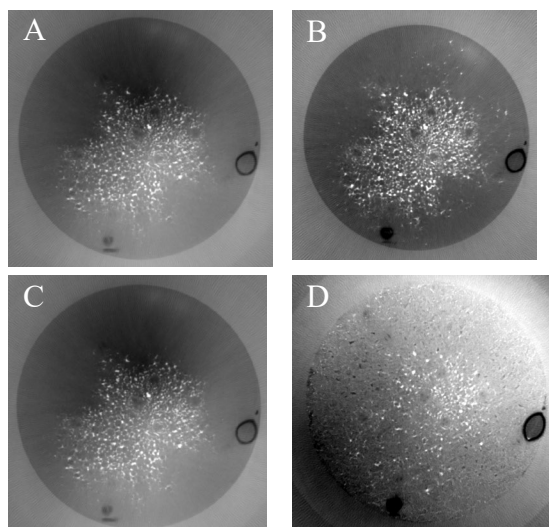


図1．緩慢冷凍過程でのいちごの位相コントラスト X 線画像

A : 4℃、B : 0℃、C : -5℃、D : -20℃

また、ブドウについて緩慢冷凍、緩慢冷凍後解凍および急速冷凍を行った結果を図2に示す。緩慢冷凍試料では、果実中心部から外側へ向かう放射状の構造が明瞭に観察され、大きな氷結晶が形成されたことが示唆された。一方、急速冷凍試料ではこのような構造はほとんど認められず、内部は比較的均一な像を示した。緩慢冷凍後に解凍した試料では、放射状構造は消失したものの、冷凍前とは異なる内部コントラストが認められた。

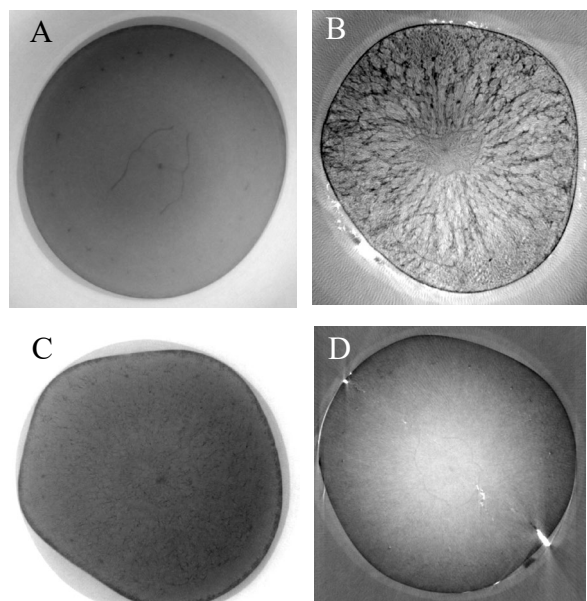


図2．ブドウの位相コントラスト X 線画像

A : 4℃、B : 緩慢冷凍 (A を -20℃ にゆっくり冷凍後測定))、C : 緩慢冷凍後解凍 (B をゆっくり解凍後 4℃ で測定) 、D : 急速冷凍 (液体窒素で冷凍固定後 -20℃ にて測定)

また、解凍後の試料ではドリップの発生が認められ、破断強度を測定した結果、冷凍前と比較して低下し、果肉の軟化が確認された。これらの結果は、緩慢冷凍により形成された大きな氷結晶が細胞組織を損傷し、解凍時の水分流出および組織の軟化を引き起こしたことを示唆している。

4 まとめ

本研究では、位相コントラスト X 線イメージング法を用いて、イチゴおよびブドウの凍結・解凍過程における内部構造の変化を非破壊で可視化した。イチゴでは、-20℃ で内部に点状構造が多数観察され、凍結に伴う組織変化を可視化することができた。一方、ブドウでは、緩慢冷凍により放射状の構造が観察されたのに対し、急速冷凍ではそのような構造は認められず、凍結条件による氷結晶形成の違いが明瞭に確認された。また、緩慢冷凍後に解凍した試料ではドリップの発生および破断強度の低下が認められ、内部構造の変化と品質低下との関連が示唆された。以上より、位相コントラスト X 線イメージング法は、食品の凍結・解凍過程における内部構造変化を評価し、冷凍食品の品質評価や最適な凍結条件の検討に有用な手法であることが示された。今後は、位相コントラスト X 線イメージングで得られた内部構造の変化と、破断強度や糖度などの品質評価指標との関連を解析し、凍結損傷の発生機構を明らかにするとともに、食品品質を維持できる冷凍・解凍条件の最適化を目指す。

参考文献

- [1] DW. Sun, Handbook of frozen food processing and packaging. 2nd ed. CRC Press (2012)
- [2] DS. Reid, Frozen foods. In: S. Damodaran *et al.*, eds. Fennema's food chemistry. 5th ed. CRC Press (2017)
- [3] H. Miki, A. Yoneyama and K. Hirano, *Journal of texture studies* 53, 366 (2022)

成果

1. 安田みどり、米山明男、竹谷敏、位相コントラスト X 線イメージング法による食品の凍結過程の可視化、日本食品科学工学会第72回大会 (2025 年)

* midori@nisikyu-u.ac.jp