

氷菓に適した県産イチゴの冷凍技術の開発

金井 悠輔* 太田 英佑* 齊藤 龍樹** 伴 雅之** 菅沼 公一***

Development of Strawberry Freezing Technology Suitable for Frozen Desserts
Yusuke KANAI, Eisuke OTA, Tatsuki SAITO, Masayuki BAN and Koichi SUGANUMA

急速凍結及び凍結前に浸透圧脱水処理を適用した緩慢凍結（デハイドロフリージング）の2通りのアプローチにより、冷凍状態でも容易に咀嚼できる、一粒まるごと凍結させた氷菓用冷凍イチゴの製造技術を検討した。イチゴを急速凍結させることで、緩慢凍結品と比較して圧縮試験における最大荷重が有意に低下した。特にブライン凍結において、イチゴを脱気包装せずブライン液に直接浸漬する手法により最大荷重が著しく低下した。一方、デハイドロフリージングにおいても、高濃度糖液に浸漬することでイチゴ内部の水分の脱水が進行し、圧縮試験において最大荷重が低下する傾向が見られたが、著しい低下は見られなかった。これらの冷凍イチゴの硬さについて官能評価を行ったところ、急速凍結品は緩慢凍結品と比べて有意に柔らかい評価となり、有望な新規凍結法であると考えられた。

Key words: いちご, テクスチャー, 冷凍, 急速凍結, デハイドロフリージング

1 はじめに

県内の氷菓メーカーにおいては、本県ならではの魅力ある商品を創出するため、県産イチゴを活用した新たな商品開発に取り組んでいる。従来、氷菓にはピューレ状やダイスカットされたイチゴ果肉が用いられてきたが、より商品の魅力を高めるため一粒まるごと冷凍したイチゴ果肉に対する要望がある。しかし、通常の凍結法では果肉が硬くなってしまい、凍結状態では咀嚼が困難であるとともに果肉感が得られないことが課題となっている。

そこで、本研究では、県産イチゴを活用した新たな氷菓製品の開発に資するため、急速凍結及び凍結前に浸透圧脱水処理を適用した緩慢凍結（デハイドロフリージング）の2通りのアプローチにより、従来よりも柔らかく、冷凍状態でも容易に咀嚼できる冷凍イチゴの製造技術の開発を行った。

2 研究の方法

2.1 イチゴ原料

原料は栃木県産イチゴ（一粒あたり約11g）を使用した。なお、収穫期の都合上、急速凍結試験及び官能評価においては「とちおとめ」、デハイドロフリージング試験においては「なつおとめ」を使用した。

2.2 凍結試験

冷凍イチゴの硬さの原因の一つとして、凍結時にイチゴ果肉内部に生成する氷結晶の成長が影響するものと予想した。そこで、氷結晶の大きさや物性の関係を調査するため、緩慢凍結方式及び各種急速凍結方式によるイチゴの凍結試験を行った。緩慢凍結は低温インキュベーター（福島工業㈱ FMU-133I 庫内温度：-15℃）、急速凍結はエアブラスト凍結装置（古賀産業㈱ KQF-8A-300B 庫内温度：-30℃）、ブライン凍結装置（サラヤ㈱ SF-10 ブライン液：同社製ラピノール CL 槽内温度：-30℃）を用いた。液体窒素凍結については、実機を稼働させるには大量の液体窒素を使用する必要があるため、金属カゴに入れたイチゴを液体窒素の浴槽に一定間隔で瞬間的に浸漬させる方法により凍結させた。また、ブライン凍結においては、食材を脱気包装してブライン液と食材が直接接触しない状態で凍結するのが一般的な方法だが、イチゴを強く脱気包装すると果肉が潰れ、逆に弱く脱気包装すると含気量が増えて凍結速度の低下につながる。このため、脱気包装する方法と、脱気包装せずにイチゴを直接ブライン液に浸漬する方法の2通りの手法を用いた。

凍結試験時に、イチゴ中心に熱電対（石川産業㈱ T/T-T-30）を挿入し、芯温をデータロガー（日置電機㈱ LR8432）により測定した。品温は各試験区で3点測定し、得られた凍結曲線から、最大氷結晶生成温度帯（-1℃～-5℃）の通過時間の平均を求めた。

* 栃木県産業技術センター 食品技術部

** フタバ食品株式会社

*** 株式会社健食

2. 3 デハイドロフリージング

一般的に、水分含量の高い青果物を凍結すると、氷結晶の生成や凍結濃縮等の影響により解凍後の品質が低下することが知られている。青果物の凍結解凍耐性を向上させる手段として、凍結前に脱水処理を施し、予め組織内の水分を減少させてから凍結させるデハイドロフリージングと呼ばれる技術が存在する。本研究ではこれに着目し、凍結前に浸透圧脱水を行うことで氷結晶生成量を低減する手法を試みた。浸透圧脱水に用いる液の溶質は、単糖類からフルクトース及びグルコース並びに二糖類からスクロース及びトレハロースの計4種類を選定した。フルクトース及びスクロースは20%・40%・60%、グルコース及びトレハロースは10%・20%・40%(w/w)の3段階の溶液濃度に調整し、イチゴを等量の糖溶液に浸漬させた。浸漬時間は1h・2h・4h・6hの計4条件とした。浸漬前後でイチゴ重量を計測し、重量変化率を求めた。

2. 4 冷凍イチゴの硬さの評価

冷凍イチゴの硬さを評価するため、テクスチャーアナライザー (Stable Micro Systems TA.XT plus) による圧縮試験を行った。圧縮プローブはステンレス製のφ4mm円柱プローブを用い、圧縮速度1mm/s、圧縮距離15mmとした。なお、冷凍状態を保つため、サーマルキャビネット (同社製 TC/LN2) を用いて試験環境を-18℃に維持して試験を実施した。

2. 5 氷結晶サイズの観察

冷凍イチゴ内部の氷結晶の直接観察は技術的に困難であったため、冷凍イチゴを真空凍結乾燥し、氷が昇華することで組織内部に生成される空洞を氷結晶の痕跡と捉え、X線CTで空洞の大きさを測定した。

まず、冷凍イチゴを凍結状態のまま、バンドソーで厚さ5mmにスライスした。スライスした冷凍イチゴを表1の条件で真空凍結乾燥を行い、乾燥品をX線CT (㈱ニコン MCT225) による三次元計測により痕跡の大きさごとの分布を調査した。

表1 真空凍結乾燥条件

順序	棚温度	昇温速度	時間
1	-50℃	-	48h
2	40℃	5℃/h	-
3	40℃	-	1h

2. 6 色彩の評価

冷凍イチゴの外観も商品価値を左右する重要な要素であるため、凍結前のイチゴ及び冷凍イチゴの表面色を分光測色計 (コニカミノルタジャパン㈱ CM-5) により測定した。各試験区あたり3粒、1粒あたり2か所測定し、それらの平均値をL*a*b*表色系により比較した。

2. 7 官能評価

試作した各種凍結イチゴを用いて官能評価を行い、実際に人が咀嚼した際の食感改質効果を検証した。緩慢凍結品の硬さを基準とし、評価対象試料の硬さを-3~+3の7段階評点法により評価を行った。評価結果については、1標本のt検定により評価対象試料の硬さ評点と定数0との差を解析した。パネルは、産業技術センター食品技術部、(株)健食及びフタバ食品(株)の職員計21名とした。

3 結果及び考察

3. 1 急速凍結による冷凍イチゴの品質検討

3. 1. 1 各種凍結方式によるイチゴの凍結試験

緩慢凍結及び各種急速凍結における最大氷結晶生成温度帯通過時間を表2に示す。急速凍結ではいずれも20分以内で最大氷結晶生成温度帯を通過した。冷媒が気体であるエアブラスト凍結と比較すると、ブライン凍結や液体窒素凍結を行うことでさらに急速に凍結した。また、脱気包装せずブライン液に直接浸漬させた場合は、脱気包装した場合と比べて半分以下の時間で通過した。包装資材や包装内の空気による断熱効果が失われたことで、急激にイチゴの熱が奪われたものと考えられた。

表2 最大氷結晶生成温度帯通過時間

凍結方式		最大氷結晶生成温度帯通過時間
緩慢凍結		160分
急速凍結	エアブラスト凍結	17分
	ブライン凍結 (包装あり)	11分
	ブライン凍結 (包装なし)	5分
	液体窒素凍結	5分未満

3. 1. 2 急速凍結イチゴの物性評価

急速凍結による凍結イチゴの硬さ低減効果を検証するため、作製した各種凍結イチゴについて冷却チャンパー付きテクスチャー測定装置により圧縮試験を行った。平均化した応力歪み曲線を図1、最大荷重平均値を図2に示す。緩慢凍結品では圧縮初期に約25kgfの荷重がかかり、破壊後に一気に低下するのに対し、急速凍結品ではより小さい荷重で破壊され、破壊後も荷重が一定のまま圧縮される傾向となった。最大荷重平均は、緩慢凍結品と比べて急速凍結品において有意に低下し、特にブライン凍結(包装なし)では、緩慢凍結品と比較して約75%減、ブライン凍結(包装あり)と比較して約50%減という大幅な低下が認められた。これは、最も凍結速度の速い液体窒素凍結品よりも低い荷重であることから、急速

凍結による氷結晶の微細化以外の効果も作用しているものと考えられた。他の急速凍結品では、圧縮開始後 12～15kgf の荷重がかかり破壊されるのに対し、ブライン凍結品（包装なし）では、わずか 3kgf 程度の荷重で破壊が進み、中心部に近づくると徐々に荷重が上昇していることから、特に外周部が軟化しているものと考えられる。ブライン液にイチゴを直接浸漬した際、ブライン液中のエタノールがイチゴ表面から果肉内部に若干染み込むことが予想される。これにより果肉の凍結点が低下し外周部を中心に未凍結状態となり、圧縮初期の荷重が極端に低下したものと考えられる。

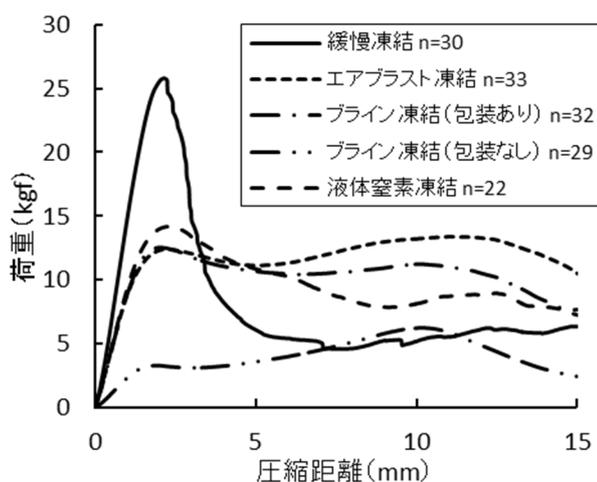


図1 応力歪み曲線

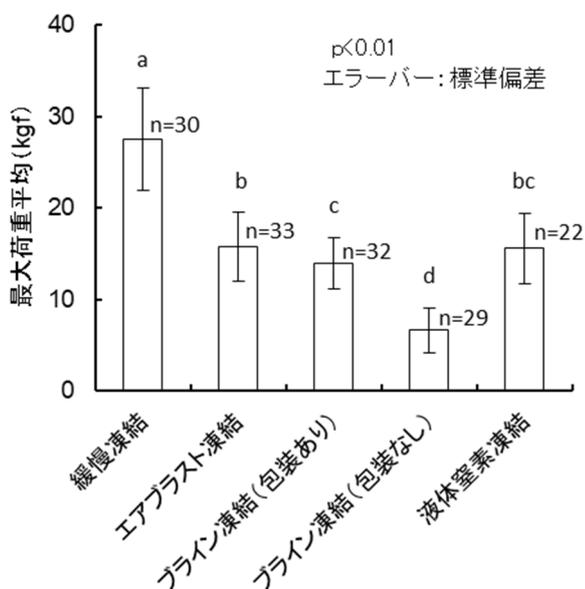


図2 最大荷重平均

異なるアルファベットは統計的に有意な差があることを示す。

3. 1. 3 氷結晶サイズの観察

急速凍結によりイチゴ内部に生成される氷結晶が微細化されていることを確認するため、真空凍結乾燥させた各種凍結イチゴを X 線 CT で撮影し、氷結晶の痕跡サイズの分布を比較した。結果を図 3 に示す。すべての急

速凍結品において約 0.01mm³以下の空洞が緩慢凍結品よりも多く、それよりも大きな空洞は少ない分布となることが確認された。このことから、急速凍結により氷結晶が実際に微細化したものと考えられた。急速凍結品の中では、脱気包装したブライン凍結及び液体窒素凍結において小さな氷結晶痕跡の分布が最も多く、次にエアブラスト凍結が続いた。一方、凍結速度が 2 番目に速かったブライン凍結（包装なし）は、急速凍結品の中では小さな氷結晶痕跡が最も少ない分布を示した。詳細な原因は不明だが、前述したブライン液中のエタノールが果肉内部に染み込むことが影響しているものと推察した。

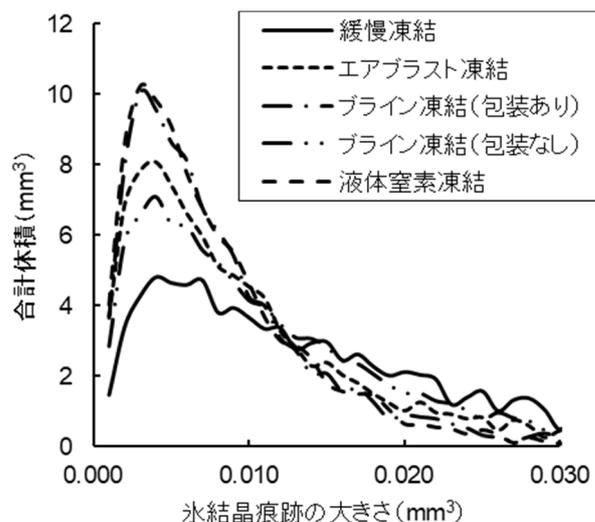


図3 氷結晶痕跡の大きさの分布

3. 1. 4 色彩の評価

凍結方式の違いによるイチゴの色彩への影響を把握するため、凍結前イチゴ及び各種凍結イチゴの表面色を分光測色計で測定した（図 4）。その結果、いずれの凍結品においても凍結前と比較して明度、色度ともに低下したが、急速凍結品では、緩慢凍結品と比較して凍結前に近い色度を示す傾向が見られた。ブライン凍結（包装なし）においては、凍結品の中では最も凍結前に近い色度であったが、明度は最も低く、やや暗いが鮮やかな色を維持することが明らかとなった。

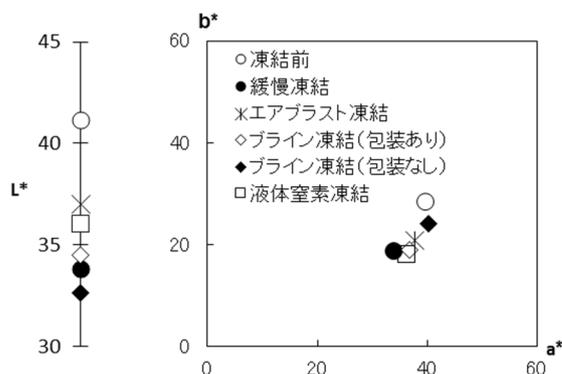


図4 急速冷凍イチゴの色彩測定結果

3. 2 緩慢凍結による冷凍イチゴの品質検討

3. 2. 1 浸透圧脱水処理の検討

イチゴ内部の自由水の一部を浸透圧脱水することで、凍結時の氷結晶生成量を減少させる手法を検討した。脱水によるイチゴの重量変化率を図5に示す。いずれの糖においても高濃度かつ長時間の浸漬を行うことで重量が減少し、脱水が進行する傾向が確認された。また、当初は分子量の小さい単糖類の方が二糖類よりもモル濃度が高くなるため、効率的に脱水が進むものと予想していたが、今回の結果では単糖類、二糖類の違いによる脱水効率への影響は確認されず、飽和溶解度が高いフルクトース及びスクロースの高濃度溶液を用いることで効率的に脱水が進行する傾向が見られた。脱水処理後のイチゴは、緩慢凍結により凍結させた。

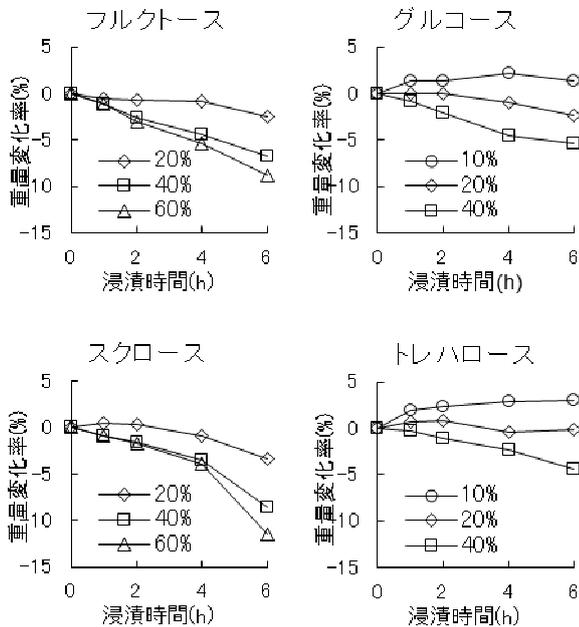


図5 浸漬時間と重量変化率の関係

3. 2. 2 脱水処理後の緩慢凍結イチゴの物性評価

浸透圧脱水処理による凍結イチゴの硬さ低減効果を検証するため、各条件で脱水処理後に緩慢凍結した冷凍イチゴについて圧縮試験を行った。応力歪み曲線は、未処理の緩慢凍結品と同様に圧縮初期に大きな力加わり、破壊後に急激に低下する波形を示した。脱水処理における重量変化率と圧縮試験の最大荷重平均値の相関を図6に示す。トレハロース以外の処理区においては、より脱水されたものほど最大荷重が低下する傾向が認められ、近似曲線の傾きはフルクトース、グルコース、スクロースの順に大きい値を示した。一方、トレハロース処理区では低濃度かつ短時間の浸漬処理においても破断強度が低下したものの、重量変化率と最大荷重の間に相関が認められなかった。

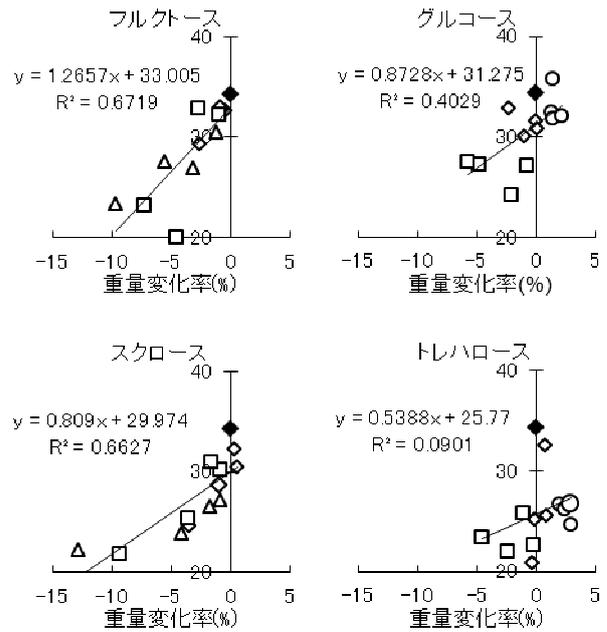


図6 重量変化率と最大荷重の相関

縦軸は圧縮試験における最大荷重平均 (kgf)

◆: 緩慢凍結 (未処理), ○: 10%, ◇: 20%, □: 40%, △: 60%

ここで、今回脱水処理に用いた糖のガラス転移温度 (Tg) を表3に示す。食品を構成する物質のガラス転移温度は、食品全体の物性に大きく影響することが知られており、低 Tg 成分の配合による食感の軟化や、逆に高 Tg 成分を配合することで系全体の Tg を引き上げ、食感を硬くする手法が報告されている¹⁾。トレハロース溶液による脱水処理区において重量変化率と最大荷重の間に相関が見られなかったのは、脱水による軟化効果が果肉に浸透または付着したトレハロースの Tg 特性の影響によって相殺された結果であると推察した。

表3 各糖類のガラス転移温度

糖の種類	ガラス転移温度 (Tg)
フルクトース	5℃
グルコース	31℃
スクロース	62℃
トレハロース	114℃

3. 2. 3 色彩の評価

脱水処理が冷凍イチゴの色に及ぼす影響を把握するため、凍結前イチゴ及び脱水処理後の緩慢凍結イチゴの表面色を測定した。結果を図7に示す。浸透圧脱水処理した凍結イチゴの場合、いずれも凍結前と比較して明度が低下し、色度は b* が低下する傾向が見られた。一方で、その傾向は単糖類での処理区において顕著に表れた。そのため、二糖類を用いた糖溶液で脱水処理を行うことで、凍結前の鮮やかな色彩を比較的維持するものと考えられた。

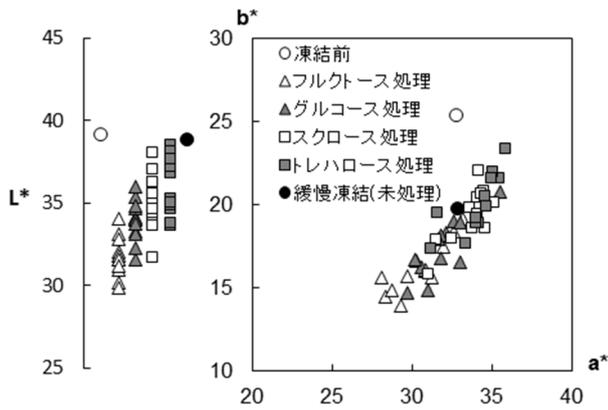


図7 浸透圧脱水冷凍イチゴの色彩測定結果

3.3 冷凍イチゴの官能評価

試作した各種凍結イチゴを用いて官能評価を行い、実際に人が咀嚼した際の食感改質効果を検証した。従来の緩慢凍結品を対照とし、エアブラスト凍結、ブライン凍結（包装なし）、浸透圧脱水（60%スクロース溶液で6h脱水処理）を評価対象とした。対照の硬さを0とした時の評価対象品の硬さを評点法で評価した。結果を図8に示す。エアブラスト凍結品は平均-1、ブライン凍結（包装なし）は平均-2.6であり、緩慢凍結品と比較してそれぞれ有意に低い評価が得られた。ブライン凍結（包装なし）に対する自由意見として「外観が鮮やか」「軟らかく食べやすい」との意見が多く上がり、当該手法が

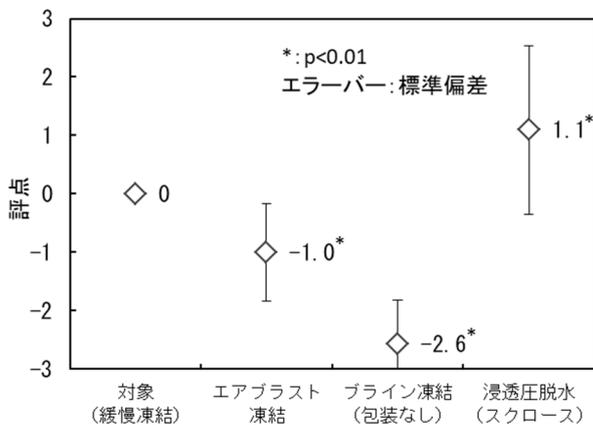


図8 官能評価結果

容易に咀嚼できる冷凍イチゴの製造法として有望であると考えられた。一方、浸透圧脱水処理を行った冷凍イチゴに対しては、未処理の緩慢凍結品と同等以上に硬いとの評価が多かった。圧縮試験での最大荷重は低下したものの、実際に人が食感改善効果を感じるためには脱水処理が不十分であったと考えられた。

4 おわりに

県産イチゴを活用した氷菓製品の高付加価値化のため、冷凍状態でも容易に咀嚼できる冷凍イチゴの製造技術開発に取り組んだ結果、以下の知見を得た。

- (1) イチゴを急速凍結することで果肉内の氷結晶が微細化し、圧縮試験による最大荷重が低下することを確認した。
- (2) イチゴを脱気包装せずブライン液に直接浸漬して凍結させることで、最大荷重の大幅な低減を実現するとともに、他の急速凍結方式よりも鮮やかなイチゴの色を維持することが分かった。
- (3) 凍結前に浸透圧脱水処理を行うことで、最大荷重が低下することを確認した。脱水処理により表面の色彩が暗くくすんだ色に変色するが、二糖類の溶液で脱水処理をすることで変色が軽減された。
- (4) 官能評価の結果、イチゴを脱気包装せずブライン液に直接浸漬して凍結したものが顕著に柔らかいと感じられ、本手法が新規凍結法として有望であるとの結論に至った。

謝辞

本研究実施にあたり協力・助言を頂いた東京海洋大学 鈴木徹教授、ブライン凍結装置による実験にご協力頂いたサラヤ株式会社及び東京サラヤ株式会社に感謝いたします。

参考文献

- 1) 川井清司：“日本食品工学会誌”，Vol.19 (No.1)，9-14，(2018)