

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

食品の冷凍による品質変化の把握およびその制御手法の検討

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2022-06-27 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 篠崎, 純子 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/2464

博士学位論文

食品の冷凍による品質変化の把握

およびその制御手法の検討

2020年度

(2021年3月)

東京海洋大学大学院

海洋科学技術研究科

応用生命科学専攻

篠崎 純子

博士学位論文

食品の冷凍による品質変化の把握

およびその制御手法の検討

2020年度

(2021年3月)

東京海洋大学大学院

海洋科学技術研究科

応用生命科学専攻

篠崎 純子

目次

1.序論.....	1
1.1. 社会的背景....	1
1.2. 技術的背景...	1
1.3. 研究対象について.....	1
1.3.1 冷凍パスタと品質劣化.....	2
1.3.2 冷凍ニンジンと品質劣化.....	2
1.4. 本研究の目的.....	3
1.5. 本論文の構成.....	3
1.6. 参考文献.....	3
2. 放射光 X 線 CT による冷凍パスタの観察.....	11
2.1. はじめに.....	4
2.2. 実験方法.....	5
2.2.1. 冷凍パスタの作製....	5
2.2.2. 温度変化のある保管条件で保管した冷凍パスタの作製....	6
2.2.3. 実験装置.....	7
2.2.4. 測定条件・解析.....	7
2.2.5. 冷凍パスタの水分量測定....	8
2.2.6. 統計解析.....	8
2.2.7. パスタ画像の撮影.....	8
2.3. 実験結果と考察.....	8
2.3.1. 冷凍パスタの観察.....	16
2.3.2. 人為的に温度変化をつけた恒温槽での保管.....	10
2.3.3. 冷凍パスタ水分量の測定.....	12
2.4. まとめ.....	12
2.5. 参考文献.....	13
3. 冷凍やけの抑制手法の開発.....	38
3.1. はじめに.....	15

3.2. 実験方法.....	15
3.2.1. 保水性素材を添加したパスタの作製.....	15
3.2.2. 素材を表面に付着させたパスタの作製.....	16
3.2.3. パスタの保管と目視観察.....	16
3.2.4. 放射光 X 線 CT 観察.....	17
3.3. 結果と考察.....	17
3.3.1. 保水性素材を添加した冷凍パスタの目視観察.....	17
3.3.2. 素材を表面に付着させたパスタの目視観察...	18
3.3.3. 放射光 X 線 CT 観察.....	19
3.4. まとめ.....	21
3.5. 参考文献.....	
4. 簡易的な冷凍やけ評価手法の開発.....	21
4.1. はじめに.....	21
4.2. 実験方法.....	21
4.2.1. 実験サンプルの作製.....	21
4.2.2. 保管とサンプリング	21
4.2.3. 重量測定.....	21
4.3. 結果と考察.....	22
4.4. まとめ.....	
4.5. 参考文献.....	
5. 凍結方法（凍結速度）による品質劣化抑制の検討.....	21
5.1. はじめに.....	
5.2. 実験方法.....	
5.2.1. 実験サンプル調製方法物性測定.....	
5.2.2. 物性測定.....	
5.2.3. サンプル調製方法.....	
5.2.4. サンプルサンプル凍結・解凍速度測定.....	
5.2.5. 物性測定	

5.2.6. ドリップ量測定

5.2.7. 食味評価

5.3. 実験結果と考察.....

5.3.1. 根菜類の凍結速度と品質の関係把握

5.3.2. ニンジンの凍結速度と品質の関係把握

5.4. 参考文献.....

6. 品質劣化抑制方法の検討

7. 総括

1. 序論

1.1. 社会的背景

日本では1920年に冷凍事業が始まり、1931年に冷凍食品が発売されて以来、冷凍食品は家庭用、業務用ともに今日の私たちの食生活に欠かせないものとなっている（一般社団法人日本冷凍食品協会）。近年は世帯人数の減少や女性の社会進出などにもとない、個食化や調理の簡便化のニーズが高まり、冷凍食品の市場は拡大している。

また、長期間の保存が可能で、品質の変化も少ないことが冷凍食品の特徴であり、家庭用ではお弁当やおやつ、朝昼晩の食事にも重宝され、業務用では加工原料の一つとして大きな需要がある。2023年の市場は17年比7.3%増の1兆7298億円が予測されている（(株)富士経済『2019年食品マーケティング便覧 総市場分析篇』）。

1.2. 技術的背景

冷凍は食品を長期保存するための有用な技術であるが、保存状態によっては品質の変化が起こる。冷凍保管～流通～店舗陳列～家庭での保管・喫食の工程で温度管理不備により冷凍食品が-15℃以上にさらされた場合、その温度と時間の積算により品質は変化する（冷凍空調便覧2013）。中でも配送時の積み込み、荷下ろしの際の温度上昇、店舗で陳列されている時の温度管理不備、家庭用冷凍庫内の温度変動の影響は大きいと考えられているが、ハード面の抜本的な改善は難しい状況のため、冷凍食品メーカーはソフト面からの対策を講じなければならない。

また、現在市場には様々な冷凍食品が販売されているが、冷凍・解凍を経ると凍結前の品質から変化してしまう素材がある。一般的に畜肉類、魚介類は品質が変化しにくく、果物や野菜（果菜類、根菜類など）の一部は品質が変化しやすい（冷凍空調便覧2013、Ando 2020、Yamada 1988）。凍結・解凍による品質変化が著しい果物や野菜の品質変化抑制（品質向上）を目的に凍結技術（Liang ら 2015、Chassagne ら 2010）、冷凍耐性付与技術（Velickova ら 2013、Phoon ら 2008、Ramallo ら 2010、Sharma ら 2007、Onishi ら 2003、Nakagawa ら 1998）、解凍技術（Hishimoto 1992）などが盛んに研究されている。

1.3. 研究対象について

冷凍食品の中で冷凍保管中に品質が変化（冷凍やけ）する「パスタ」と凍結・解凍により品質が変化する「ニンジン」について焦点をあてた。

1.3.1. 冷凍パスタの品質変化

冷凍食品の一つの商品カテゴリーを形成している冷凍パスタは、麺とソースが混合されたタイプと、麺のみのタイプがある。前者は主に家庭用で、後者は主に業務用で販売されている。特にソースが混合されたタイプの製品は電子レンジなどで温めるだけですぐに食べられる (Daniela ら 2008, 2011、 Xie ら 2020)。日本の市販用の冷凍パスタは発売開始から 20 年以上が経過した現在も生産数は伸長し続けており、2014～2019 年度の 5 年間における年間生産数は約 5,800 万食から約 1 億食に増えている (<https://reitoumen.gr.jp/aboutrmk/market/>)。混合されるソースとしては、トマト系、クリーム系、オイル系、和風系などがあり、麺は乾パスタもしくは生パスタを茹でたものが製品化されている。冷凍パスタの一般的な製造工程は小麦粉と水を混合して作製した麺を茹で、水で冷却して凍結後に包装する。水で冷却する効果は茹でたあとの麺が水を吸って変化することを防止して、茹でた直後の麺の食感を保つことと、麺の温度を下げることによる冷凍するときの冷凍時間の短縮である (Ozawa ら 1995)。

冷凍パスタを含む冷凍めん類の好ましくない品質変化は主に冷凍やけと呼ばれ、乾燥、外観が白色化し、食感が硬くなる (Tabuchi 2003、Shimada, 2014) ことをさす。冷凍パスタの冷凍やけは、製品出荷後の冷凍保存過程で発生するケースがほとんどである。しかしながら消費者の立場からすれば冷凍やけは食品メーカー側の責任と考えられる傾向にあり、クレームに繋がるケースもあるため、冷凍やけの低減は取り組まなければならない重要な品質課題の一つである。

冷凍めんの冷凍焼けについては、幾つかの研究が行われているが、外観や顕微鏡での観察 (Masuda ら 2004、Adi ら 2019) や、冷凍やけ防止方法の開発 (Irie 2010、Irie ら 2019) に焦点が当てられている。冷凍やけの発生中に冷凍パスタの内部で起こる変化を詳細に調査した研究はほとんどない。氷結晶の状態は冷凍パスタの品質に影響すると考えられるため、冷凍パスタの保管中の品質変化を把握するために氷結晶の状態を観察することが必要である。

1.3.2. 冷凍ニンジンの品質変化

冷凍野菜類の国内製造量上位はニンジン、コーン、カボチャ、ポテト、ホウレンソウの 5 種類 (令和元年(1～12 月)冷凍食品の生産・消費について(速報)) でニンジンは前年比 109.9%で増加傾向である。また、フライ類以外の調理食品は平成 24 年～29 年の 5 年間で 928,011 トンから 1,030,389 トンと (対比 111%) に生産量 (平成 24 年(1～12 月)冷凍食品の生産・消費につ

いて(速報)、平成 29 年 1~12 月) 冷凍食品の生産・消費について(速報)) が増えており、野菜単体としての需要のみならず、調理食品の原料の一つとしても需要が増えていると考えられる。ニンジンには前記 4 種類の野菜に比べ凍結解凍後の品質変化が生じやすい。一般的に植物組織は動物組織と異なる点がある。高水分含量、細胞壁の存在、細胞間隔における気体の存在、細胞内の成分である(冷凍空調便覧 2013)。ニンジンは凍結・解凍により、組織の軟化、すじ感の増加、ドリップの発生が起こり、特に固形として大きい状態で喫食する場合、その傾向が顕著であり、品質変化の抑制は重要な課題である(Paciulli ら 2016、Yamada ら 1988)。

1.4. 本研究の目的

冷凍パスタについては、外観・内部観察による品質変化(冷凍やけ)を把握し、品質変化(冷凍やけ)を抑制する手法を検討する。冷凍ニンジンについては、官能評価、物性測定、ドリップ量測定により品質の変化を把握し、凍結方法と前処理の検討を行い、品質変化の抑制を図る。いずれも、最終的な目的は得られた研究データを活用して、冷凍パスタと冷凍ニンジンの品質を向上させることである。

1.5. 本論文の構成

第 2 章では冷凍パスタを作製し、特定の保管状態で保管したサンプルを目視及び SPring-8 (Super Photon ring-8 GeV) の放射光 X 線 CT 装置を用いて組織観察を実施した結果、そして温度変化が冷凍やけの原因の一つと考え、人為的に温度変化を起こした保管庫で冷凍パスタを保管し、前述と同様の方法で組織を観察、水分量の測定を行った結果を述べた。第 3 章では冷凍やけを抑制する手法として、冷凍パスタから水分が飛散しないように工夫したサンプルを作製し、第 2 章と同様の方法で組織の観察を行った結果を述べた。第 4 章では冷凍やけの抑制法をより簡便に評価するための評価系の構築について述べた。

第 5、6 章はニンジンの品質変化抑制手法について、凍結機器による凍結速度の検討と凍結前のニンジンの前処理方法の検討について述べた。

今後、本研究で開発した品質変化抑制手法を製品に適用することで冷凍食品の品質向上に貢献したい。

1.6. 参考文献

- Adi Riyanto, R., Nishizu, T., 2019. The effect of frozen storage on textural quality of cooked pasta. Proceedings of International Symposium on a New Era in Food Science and Technology, P12.
- Ando Y., 2020., Technological approach and research trend of quality improvement of frozen vegetables. JATAFF Journal. 56, p.19-31.
- Chassagne B. S., Fonseca F., Citeau M., Marin M. 2010. Freezing protocol effect on quality properties of fruit tissue according to the fruit, the variety and the stage of maturity. Food Science and Technology. 43, p.1441-1449.
- Daniela F.Olivera,Viviana O.Salvadori.. 2008. Effect of freezing rate in textural and rheological characteristics of frozen cooked organic pasta. J. Food Eng. 90, 271.
- Daniela F.Olivera,Viviana O.Salvadori., 2011. Instrumental and sensory evaluation of cooked pasta during frozen storage. Int. J. Food Sci. Technol. 46, 1445.
- Furuhasi, T., Shimada, H., 2014. Quality advantage and challenges of frozen udon. The refrigeration 89 p. 20-27.
- Hishimoto M., 1992. Frozen Foods, Vegetables and Fruits. Reitou. 67, p.208-214
- Irie, K., 2010. Frozen noodles, method of producing the same, and a coating liquid for the preservation of freezer burn. United States Patent US 2010/01 8984.6 A1.
- Irie, K., Suga, Y., Koizumi, N., Watanabe, T., Miya, Y., Yoshida, T., 2019. Production method for frozen noodles and composition for preventing freezer burn. United States Patent US 10, 258, 067 B2.
- Liang D., Lin F., Yang G., Yue X., Zhang Q., Zhang Z., Chen H.2015. Advantages of immersion freezing for quality preservation of litchi fruit during frozen storage. Food Science and Technology. 60, p.948-956.
- Michiyuki Tabuchi., 2003. Frozen Noodles:Technological Developments and Work to done. The refrigeration 78 p. 36-44.
- Nakagawa R., Nagashima K., 1998. Development of vegetable freezing technology. New Food Industry. 40, p.63-68.
- Onishi S., Fujii T., Miyawaki N., 2003. Prevention of Freezing Injury of Agricultural Products by Osmotic Dehydration. Teion Seibutsu Kougaku Gakkaishi. 49, P.165-169.
- Paciulli M., Ganino T., Carini E., Pellegrini N., Pugliese A., Chiavaro E.2016. Effect of different cooking

- methods on structure and quality of industrially frozen carrots. *Journal of Food Science & Technology*. 53, p. 2443-2451.
- Phoon P. Y., Galindo F. G., Vicente A. Dejmek P., 2008. Pulsed electric field in combination with vacuum impregnation with trehalose improves the freezing tolerance of spinach leaves. *Journal of Food Engineering*. 88, p.144-148.
- Ramallo L.a., Mascheroni R.h., 2010. Dehydrofreezing of pineapple. *Journal of Food Engineering*. 99, p.269-275.
- Sharma N, Cram D., Huebert T., Zhou N., 2007. Exploiting the wild crucifer *Thlaspi arvense* to identify conserved and novel genes expressed during a plant's response to cold stress. *Plant Molecular Biology*. 63, p.171-184.
- Velickova E., Tylewicz U., Dalla R. M., Winkelhausen E., Kuzmanova S., Gomez Galindo F., 2013. Effect of vacuum infused cryoprotectants on the freezing tolerance of strawberry tissues. *Food Science and Technology*. 52 p.146-150.
- Xie, L., Nishijima, Noriaki Oda Yoshifumi Handa Akihiro. Majumder Kaustav. Xu Changmou . Zhang Yue., 2020. Utilization of egg white solids to improve the texture and cooking quality of cooked and frozen pasta. *Food Science and Technology*. 122,.
- Yamada. K., 1988. Agricultural and meat products. *Vegetables and fruits. Reitou*. 63, p.2-9.
- 冷凍食品の生産・消費について(速報) 一般社団法人日本冷凍食品協会
<https://www.reishokukyo.or.jp/frozen-foods/>
(株)富士経済『2019年食品マーケティング便覧 総市場分析篇』
新版 第6版 冷凍空調便覧 第IV巻 食品・生物編 公益社団法人日本冷凍空調学会 2013. P.161-162.
- Ryutaro Ozawa, Soichi Kobayashi, 日清製粉株式会社 冷凍パスタ類の製造法第 2709098 号 1997

2. 放射光 X 線 CT によるパスタの観察

2.1. はじめに

冷凍パスタの保管中の品質変化を捉えるには氷結晶を観察する必要があると考える。氷結晶の観察手法は各種報告 (Ueno 2016) されているが、本研究では X 線 CT 技術に注目する。

X 線 CT (Computed Tomography) は物質内部の形態を非破壊で観察可能であるため、冷凍食品中の組織や氷結晶の状態を観察できる有用な分析技術である。これまでに X 線 CT 装置で食品中の氷結晶を観察した研究としてタンパク質のペーストと生地 (Mousavi ら 2005)、肉、魚、鶏肉、ジャガイモ、チーズ、ニンジン (Mousavi ら 2007)、マグロ (Kobayashi ら 2015)、ジャガイモ (Zhao ら 2017) がある。これらは実験室系の管球光源を使用した白色 X 線を用いて観察されている。X 線 CT は物質の密度に依存する X 線の透過率差によって組織形態を識別する。氷結晶と食品の密度差は小さいため、X 線透過率の差も小さく、実験室系の X 線 CT 装置では両者を識別し難いという難点がある。それゆえに、実験室 X 線 CT 装置で凍結した食品を観察する場合は、前処理として凍結乾燥により氷結晶部分を取り除いてから観察する方法がとられてきた。凍結乾燥は処理により組織が変化すると示唆されており (Faydi et al., 2001)、さらに処理前から存在する空隙と処理後の氷結晶を区別することは困難である。一方、放射光を利用した放射光光源の場合、高輝度な単色 X 線を得ることができ、実験室 X 線 CT 装置と比較して高コントラストな X 線透過画像を得られる。放射光 X 線 CT 装置を利用して凍結マグロ、凍結豆腐を観察し、氷結晶と食品成分を識別した結果 (Sato ら 2016) が紹介されていることから、放射光 X 線 CT 装置にて氷結晶とパスタ成分を識別した観察ができる可能性がある。また、Sato ら 2016 の観察方法では、液体窒素を吹き付けることにより、試料は凍結状態で X 線 CT にて測定が可能で、凍結乾燥による前処理は必要がなく、凍結中の組織の状態を直接的にかつ非破壊で観察できる非常に優れた観察手法である。

2.2. 実験方法

2.2.1. 冷凍パスタの作製

デュラム小麦粉 100 % に対して 30 % 加水し混合した後に押し出したパスタを最高温度 90 °C で乾燥して 1.7 mm 径の乾燥スパゲティを調製した。調製したパスタを 8 分 40 秒茹でて 1 分 30 秒水冷し、-40 °C ~ -30 °C で凍結後 -20 °C にて 1 週間保管 (条件 A) したものをサンプル (a)、-20 °C で 1 年保管 (条件 B) したものをサンプル (b)、徐霜機能が作動するため -25 °C ~ -13 °C

の温度変化のある冷凍庫に1ヶ月保管(条件C)したサンプルを(c)とした。各保管庫の雰囲気温度の履歴を Fig. 2-1.に示した。

2.2.2. 温度変化のある保管条件で保管した冷凍パスタの作製

2.2.1.と同じ方法で調製したパスタを8分40秒茹でて1分30秒水冷し、1本ずつ並べて -40°C の庫内で凍結したパスタを2条件(条件D: $-21^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 1時間 $\Leftrightarrow -5.5^{\circ}\text{C}\sim -5.0^{\circ}\text{C}$ 10分の繰り返し、条件E: $-21^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 5時間 $\Leftrightarrow -5.5^{\circ}\text{C}\sim -5.0^{\circ}\text{C}$ 10分の繰り返しのある人為的に温度変化をつけた恒温槽)で保管した(Fig.2-2. (d), (e))。恒温槽の雰囲気温度の履歴を Fig.2-1, 2-2に示した。

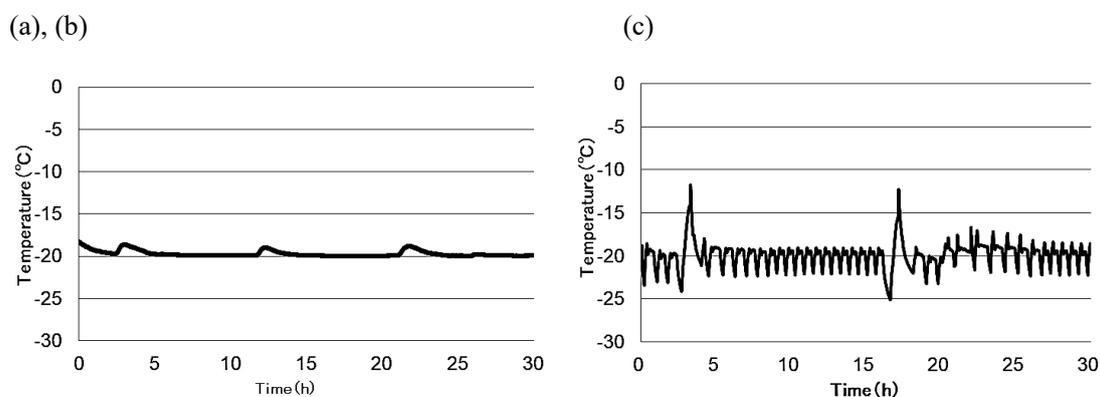


Fig. 2-1. Freezer temperature history for conditions (A) and (B) (-20°C) (left) and (C) (kept between -25°C and -13°C) (right). After 30 hours, the temperature history was almost the same during the test period, and no seasonal variation was observed.

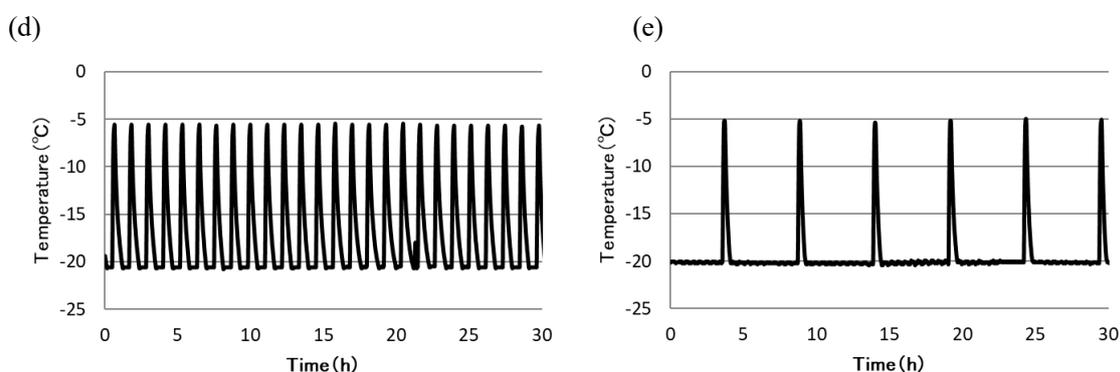


Fig. 2-2. Freezer temperature history for conditions (D) and (E). After 30 hours, the temperature history was almost the same during the test period, and no seasonal variation was observed.

2.2.3. 実験装置

実験は SPring-8 産業利用Iビームライン BL19B2 と BL14B2 の X 線 CT 装置を用いて行った。装置の模式図を Fig.2-3.に示した。偏光電磁石光源で発生した放射光は Si 単結晶を用いた 2 結晶型モノクロメーターで分光し、その後 2 枚の X 線ミラーで全反射させて高次光成分の X 線を除去することにより単色化される。X 線の光路上に設置した回転ステージで測定サンプルを回転させながら測定サンプル下流に設置した X 線カメラで透過画像を測定した。上部から液体窒素を吹き付ける方式でサンプルの凍結状態を保ちつつサンプルホルダーに凍結したパスタサンプルを 1 本ずつセット固定して測定した。

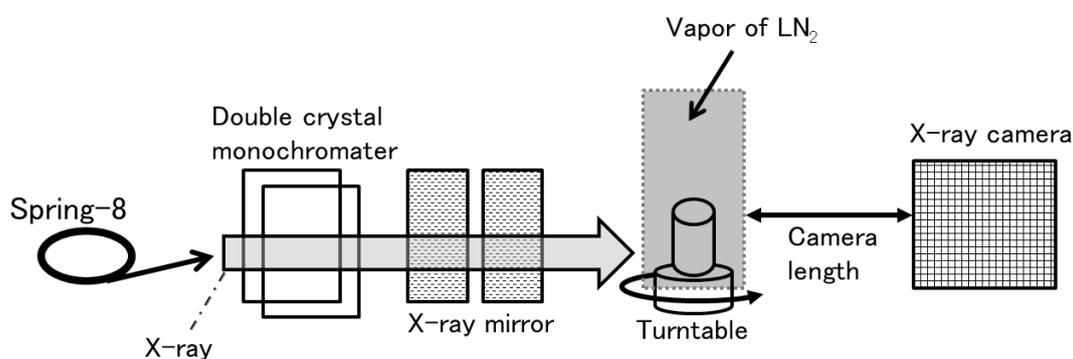


Fig.2-3. Experimental layout of the X-ray CT measurement at BL19B2&14B2 of Spring-8

2.2.4. 測定条件・解析

ビームライン BL19B2 およびビームライン BL14B2 の実験ハッチ内に設置された回転ステージにサンプルを設置し、液体窒素蒸気を吹き付けて冷却した。熱電対(クロメル-アルメル)を用いて測定したサンプル周りの雰囲気温度は約 -30°C であった。X 線のエネルギーは 12.4 keV に設定し、高調波除去のため X 線ミラーをミラー角 4 mrad に設定した。凍結試料を回転させながらサンプルステージ下流側に設置した X 線 CCD カメラで透過 X 線画像を測定した。サンプルから CCD カメラまでのカメラ長は 30 mm、サンプルを 180° 回転する間に 0.5° ステップで 361 枚もしくは 382 枚の透過 X 線画像を測定した。透過 X 線画像データの 1 画素のサイズは $2.9\ \mu\text{m}$ 、1 枚当たりの測定時の露光時間は 250 ms であった。得られた透過 X 線画像データを用いて Filtered Back Projection 法に基づく画像再構成を行い、回転軸に直交した断面における X 線線吸収係数の 2 次元分布を得た。

2.2.5. 冷凍パスタの水分量測定

常圧加熱乾燥法にて試料の水分を測定した。あらかじめ恒量を測定した秤量缶に裁断した試料を 1 g 秤取、乾燥機 (ISUZU SSR-114S) にて 135 ± 1 °C で 2 時間乾燥した。乾燥後すぐ、秤量缶にふたをしてデシケーターに移し 1 時間放冷、天秤 (METTLER TOLEDO XPE204) で精秤、以下の式で水分量を算出した。

$$\text{水分(\% WB)} = (W_1 - W_2) / (W_1 - W_0) \times 100$$

W_0 : 秤量缶重量

W_1 : 試料入り秤量缶重量 (乾燥前)

W_2 : 試料入り秤量缶重量 (乾燥後)

2.2.6. 統計解析

水分含量データは、平均 \pm SD として表し、t 検定または分散の一方向分析、続いて JMP 11.2.0 ソフトウェア (SAS Institute, Cary, NC, USA) を用いた有意差についてのダンネット多重比較検定によって分析した。P 値 <0.05 を有意とみなした。

2.2.7. パスタ画像の撮影

2.2.1. で作成したパスタと同ロットの画像をキーエンス社製のデジタルマイクロスコープ VH-Z00R を用い 20 倍率にて撮影した。

2.3. 実験結果と考察

2.3.1. 冷凍パスタの観察

デジタルマイクロスコープの画像を Fig.2-4. に示した。サンプル(a)(-20°C で 1 週間保管) とサンプル(b) (-20°C で 1 年間保管) はほぼ同じ外観を示し、表面に変色は認められなかった。しかしながら、サンプル(c)は、白っぽい外観を有し、冷凍やけを起こした冷凍めんて観察される特徴の 1 つである氷結晶の昇華を示す点で、(a)および(b)とは全く異なっていた。

凍結パスタサンプル(a)、(b)および(c)の断面二次元 X 線 CT 画像を Fig.2-5 に示した。画像の濃淡はサンプルの X 線吸収係数分布を示し、色が濃いほど X 線係数が大きく、密度が高い (Sato ら 2016、Murase ら 2018、Kobayashi ら 2019、Vicent ら 2019)。サンプル(c)では、画像の左から中央に広がる白色部分が顕著であったが、サンプル(a)および(b)では見られなかった。これは、

サンプル(c)において、より低い密度部分が存在することを示している。Fig.2-4. のサンプル(c)の写真は氷結晶の昇華を示しており、Fig.2-5. サンプル(c)に見られる白い領域が氷結晶の昇華によって生じた空隙に対応していることが示唆された。また、試料(b)の保管期間はサンプル(c)よりも長かったが、試料(b)には低密度の領域は確認できなかった。この結果は、冷凍パスタ中の氷結晶の昇華に温度変化が関係していることを示唆している。

試料(a)および(b)は、全体的により暗い色を有していた。試料(c)は、上記の白色領域を除いて同様の灰色を有していた。Sato ら(2016)は、本研究で使用したのと同じ放射線 X 線 CT によって、マグロと豆腐の凍結組織を観察しており、画像が明るい灰色領域および暗い灰色領域からなること、両領域は明瞭な境界を有し、互いに容易に区別することができていた。これらの領域は、未凍結サンプルでは観察されなかったもので、明るい灰色および暗い灰色が、それぞれ氷晶相および凍結濃縮相に対応すると結論づけている。Sato ら 2016 の研究で見出されたこれらの2つの氷晶相および凍結濃縮相領域は、サンプル(a)、(b)、および(c)では観察されなかった。サンプル(a)、(b)、および(c)における氷結晶粒径が、Sato ら 2016 による研究で使用されたサンプルのものよりもはるかに小さいからと考えられる。

放射線 X 線 CT は氷結晶の昇華によって引き起こされるパスタ内部の構造を可視化できることがわかった。

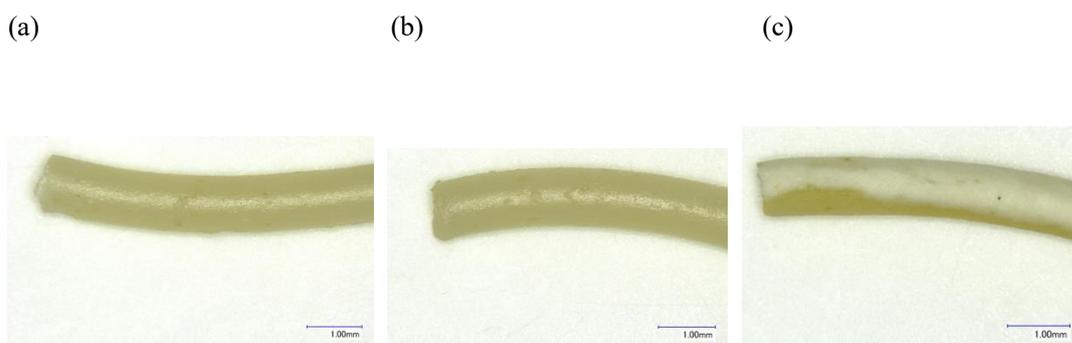


Fig. 2-4. Picture by a digital microscope.-20°C 1week(a), -20°C 1year(b), -13 to -25°C 1month(c)

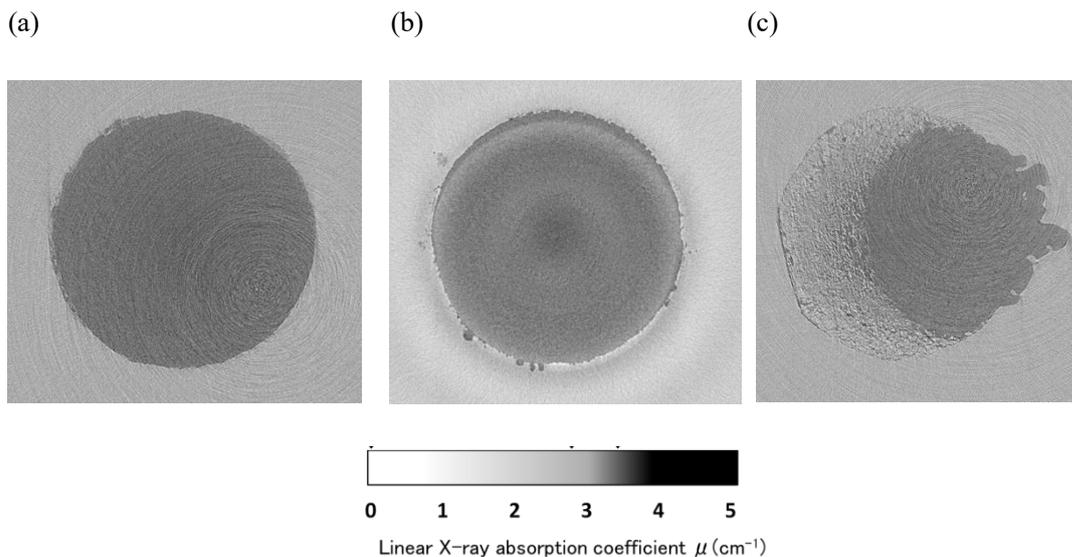


Fig. 2-5. Two-dimensional X-ray CT images of cross sections of frozen pasta. -20°C 1 week(a), -20°C 1 year(b), -13 to -25°C 1 month(c)

2.3.2. 人為的に温度変化をつけた恒温槽での保管

3.1. の結果より温度変化が冷凍やけを引き起こす一つの要因であることが示唆されたため、Fig. 2-2.(d)および(e)に示した温度変化のある保管庫に保管した冷凍パスタ(サンプルdおよびサンプル(e)の内部構造を観察したところ、両者に違いが見られた。条件(D)に保管したサンプルのX線2次元画像を Fig. 2-6.の(a)~(f)に示した。保管3週間後に氷結晶の昇華によって形成されたと考えられる空隙を表す白色部分がパスタ表面に観察された。保管5週間後には白色部分は表面からパスタの中心に向かって広がった。条件(E)のX線2次元画像を Fig. 2-7.の(a)~(f)に示した。保管4週間で白色部分が観察され、白色部分の面積は5週間後に増加したが、5週間後のサンプル(d)の白色化した面積よりも小さかった。これらの結果は、同温度帯で温度変化がある場合、温度変化の頻度が多いほど氷結晶の昇華がはやく起こることを示している。

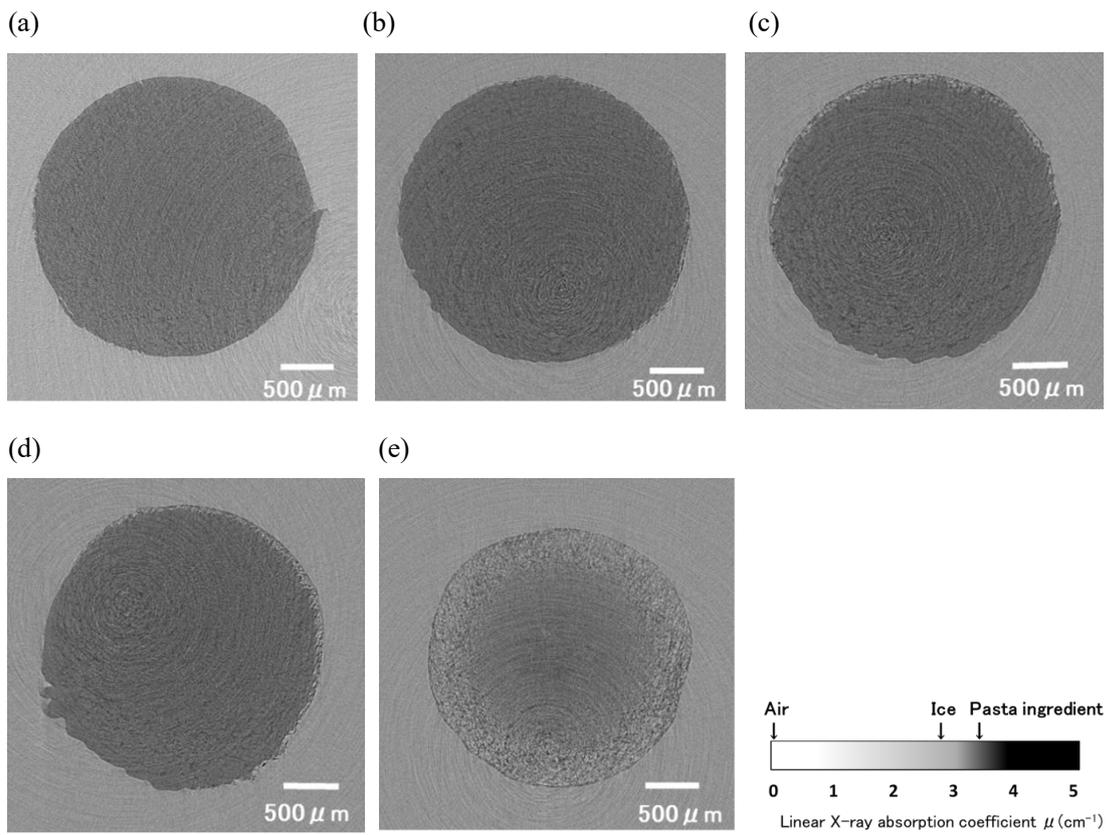
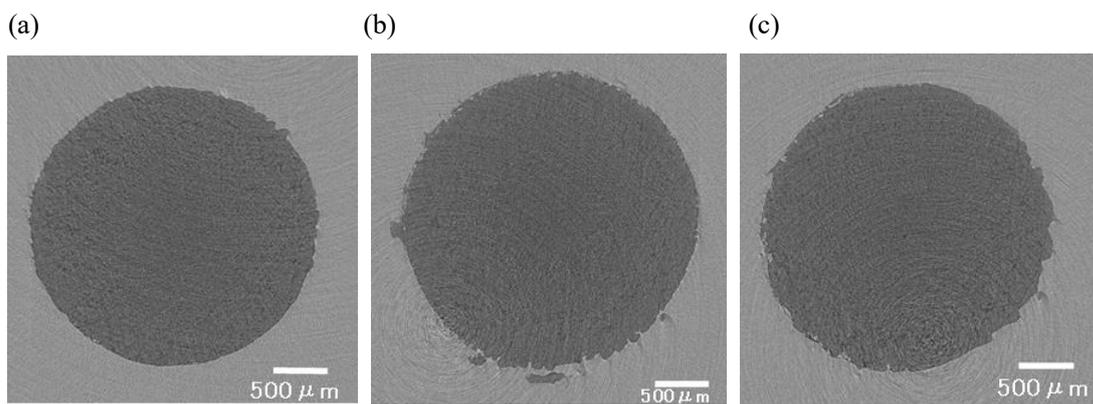


Fig. 2-6. Two-dimensional X-ray CT images of cross sections of frozen pasta. Condition D.

(a)1week, (b)2weeks, (c)3weeks, (d)4weeks, (e)5weeks



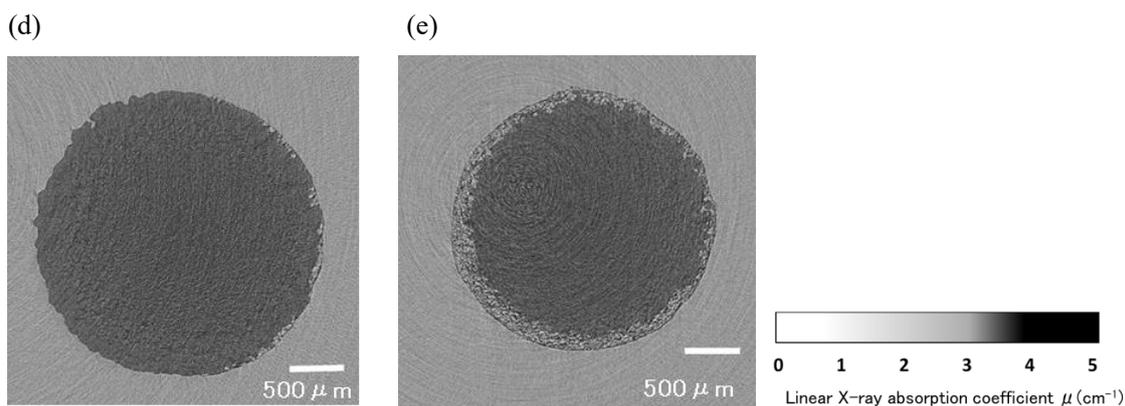


Fig. 2-7. Two-dimensional X-ray CT images of cross sections of frozen pasta. Condition E.

(a)1week, (b)2weeks, (c)3weeks, (d)4weeks, (e)5weeks.

2.3.3. 冷凍パスタ水分量の測定

サンプル(b)、(d)、(e)の水分量の測定結果を Fig. 2-8 に示した。サンプル b と比較してサンプル(d)と(e)の水分量は保管期間が長くなるのにもなって減少した。4 週間保管後、(d)の含水量は、試料(e)の含水量よりも減少した。水分量の減少度 (D>E>B) の順序は、Fig. 2-1 と Fig. 2-2 で示した温度変化の頻度 (D>E>B) と同じであった。

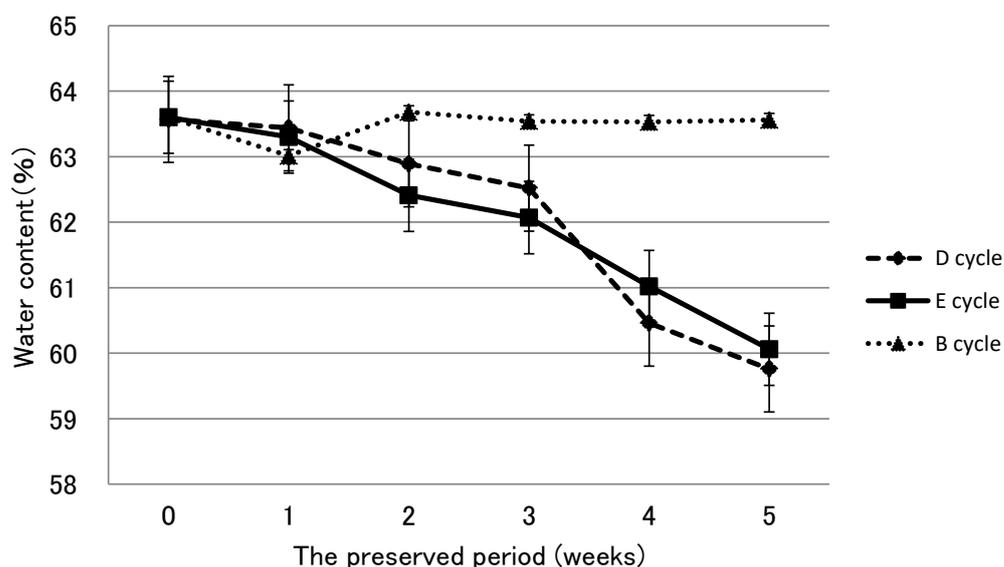


Fig. 2-8. Changes in water content of frozen pasta over time during storage. Data are presented as mean \pm SD (n=3). *p < 0.05.

2.4. まとめ

冷凍やけは保管中に温度が上昇して容器内の飽和水蒸気圧が上がると食品表面の氷が昇華して容器内に水蒸気として放出される。温度が低下すると容器内の飽和水蒸気圧が下がり、容器内の水蒸気圧が結露して冷やされ氷になるが、水として食品に戻ることはできずに容器内で霜として残る。この現象が繰り返されることで食品表面の乾燥が進み、白色化が起きるとされている (JSRAE 2009b)。今回の実験において、Furuhashi ら 2014 が提唱した温度変化の上下によって食品から放出された水分が再び食品に戻ることができないことを水分含量の経時的な減少により冷凍パスタでも確認できた。また、X 線 CT 画像から、温度変化頻度が高い保管環境において、表層部分の組織が粗になる面積が大きいことから、温度変化が冷凍やけを引き起こす原因であることが検証できた。

冷凍パスタの品質向上を図るためには、冷凍パスタの環境温度変化の抑制、乾燥しにくい商品設計が必要であると考え。また、今回用いた凍結状態での放射光による X 線 CT 観察は、非破壊、短時間で試料を測定できるとともに、実験室 X 線 CT 測定で行う凍結乾燥前処理が不要なため、さらなる測定時間の短縮、および凍結乾燥により試料が変化する懸念もなく、非破壊観察手法として非常に優れていると考える。放射光による X 線 CT 観察は、パスタのみならず、様々な冷凍食品での組織観察への応用が期待できる。

2.3.5. 参考文献

- Faydi, E., Andrieu, J., Laurent, P., 2001. Experimental study and modelling of the ice crystal morphology of model standard ice cream. Part I: Direct characterization method and experimental data. *J. Food Eng.* 48, 283. [http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00168-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00168-0)
- Furuhashi, T., Shimada, H., 2014. Quality advantage and challenges of frozen udon. *The Refrigeration* 89, 20.
- Icicle Seafoods, Inc. 1979. Vacuum/shrink packaging system protects frozen salmon quality. *Quick Frozen Foods* 41, 40.
- Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2009a. New edition food freezing technology. pp. 39.
- Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2009b. New edition food freezing technology. pp. 155.

- Kida, N., Shimada, H., Furuhashi, T., Natsumi, M., 2016. Technological development for quality evaluation and problem solution of frozen udon. *Jpn. J. Food Eng.* 17, A.11.
- Kobayashi, R., Kimizuka, N., Watanabe, M., Suzuki, T., 2015. The effect of supercooling on ice structure in tuna meat observed by using X-ray computed tomography. *Int. J. Refrig.* 60, 270.
- Kobayashi, R., Suzuki, T., 2019 Effect of supercooling accompanying the freezing process on ice crystals and the quality of frozen strawberry tissue. *Int. J. Refrig.* 99, 94
- Masuda, T., Mabe, K., Sato, N., Kato, T., Yamazaki, N., 2004. Method for preparing frozen food. United States Patent Application Publication, US 2004/0058037 A1.
- Meat-O-Mat Corp., 1979. Frozen patty processor continues growth through efficiency and modernization. *Quick Frozen Foods* 42, 91.
- Mousavi, R., Miri, T., Cox, P.W., Fryer, P.J., 2005. A novel technique for ice crystal visualization in frozen solids using X-ray micro-computed tomography. *J. Food Sci.* 70, e437.
- Mousavi, R., Miri, T., Cox, P.W., Fryer, P.J., 2007. Imaging food freezing using X-ray microtomography. *Int. J. Food Sci. Technol.* 42, 714.
- Murakami, N., Shimada, H., Method for suppressing freeze-burning of frozen foods. Japanese patent, JP6043097B2, 2016.
- Murase, N., Uetake, Y., Sato, Y., Irie, K., Ueno, Y., Hirauchi, T., Kawahara, T., Hirai M., 2018. Frozen State of Sephadex[®] Gels of Different Crosslink Density Analyzed by X-ray Computed Tomography and X-ray Diffraction. *Gels*, 4, 44, p. 115.
- Sato, M., Kajiwara, K., Sano, N., 2016. Non-destructive three-dimensional observation of structure of ice grains in frozen food by X-ray computed tomography using synchrotron radiation. *Jpn. J. Food Eng.* 17, 83.
- Shimada, H., 2014. Quality deterioration phenomenon of frozen UDON noodles. *Jpn. J. Food Eng.* 15, 115.
- Tabuchi, M., 2003. Frozen noodles: technological developments and work to done. *The Refrigeration* 78, 36.
- Zhao, Y., Takhar, P.S., 2017. Micro X-ray computed tomography and image analysis of frozen potatoes subjected to freeze-thaw cycles. *LWT–Food Sci. Technol.* 79, 278.

3. 冷凍やけの抑制手法の開発

3.1. はじめに

第2章において、水分飛散（乾燥）が冷凍パスタにて冷凍やけが起こる原因の一つとわかったため、本章ではパスタからの水分飛散を防止するために、パスタ作製時に保水性を持つ素材を添加する方法、パスタ表面を素材で覆う方法を検討した。

3.2. 実験方法

3.2.1. 保水性素材を添加したパスタの作製

実験に使用した保水性素材（澱粉とセルロース）とパスタへの添加量を Table 3-1. に示した。パスタはデュラム小麦粉 100 に対して 30%加水したものをコントロール（比較対照）とし、素材を添加したサンプルの加水はコントロールと同様の 30%とした。不二精機社製 MAC40 に 1.7 mm の円形ダイスを装着、麺線押し出し製法にて調製した。調製したパスタを 8 分 40 秒茹でて 1 分 30 秒水冷し、-40℃フリーザー（ホシザキ社製 LL-50）に入れて 30 分以上凍結した。

Table 3-1. Water retention material and amount added

Sample name	Blending amount w/w (%)	General name	Handling company
Starch 1	20	Hydroxypropyl etherated tapioca	Matsutani Chemical Co.,
Starch 2	20	Etherified tapioca	Ltd.
Starch 3	20	Etherified phosphate cross-linked tapioca	
Starch 4	20	Acetylated Tapioca	
Starch 5	20	Hydroxypropyl ether phosphate- crosslinked tapioca	
Cellulose 1	2.0	Cellulose(Fermented products of microorganisms)	San-Ei Gen F.F.I. Co., Ltd.
Cellulose 2	2.0	Carboxymethyl cellulose (Ingredients: wood)	Nippon Paper Industries Co., Ltd.
Cellulose 3	2.0	Cellulose nanofibers(Ingredients: wheat)	Laboratory prototype

3.2.2. 素材を表面に付着させたパスタの作製

デュラム小麦粉 100 に対して 30 %加水し混合した後に押し出したパスタを最高温度 90°Cで乾燥して 1.7 mm 径の乾燥スパゲティを調製した。調製したパスタを 8 分 40 秒茹でて 1 分 30 秒水冷し、Table 3-2. に示した素材をパスタに対して 10 %混合することでパスタ表面に付着させた後、1 本ずつ並べて-40 °Cのフリーザー（ホシザキ社製 LL-50）で 30 分以上凍結した。コントロール（比較対照）は素材を付着させていないサンプルとした。

<素材の調製方法>

- ・ 油と水の混合液：大豆油（J-オイルミルズ）33.2 g にタマリンドシードガム（三菱ケミカルフーズ社製）0.0083 g、キサンタンガム（三菱ケミカルフーズ社製）0.166 g を加えて攪拌後にイオン交換水を加え合計 100 g とし、更によく攪拌した。（特許 WO2013/172118 参照）
- ・ トレハロース溶液：トレハロース（林原：トレハ）10 g にイオン交換水 100 g 加えて混合、攪拌した。
- ・ マルトトリオース：群栄化学工業の「ピュアトース」を使用した。
- ・ イヌリン：イヌリン（フジ日本精糖：フジ FF）10 g にイオン交換水 100 g 加えて混合・攪拌した。

Table 3-2. Water retention material

Sample name	Details
Oil	Soybean oil, tamarind seed gum, xanthan gum, water
Trehalose	Disaccharide
Maltotriose	Trisaccharide
Inulin	Polysaccharide

3.2.3. パスタの保管と目視観察

調製したパスタは第 2 章で使用した条件 D（-21 °C~20 °C 1 時間 ⇔ -5.5 °C~-5.0 °C 10 分の繰り返し）に設定した恒温槽（エスペック社製 LU-114）で 5 週間保管した後に取り出し、デジタルカメラ（Panasonic LUMIX DMC-FH7）で撮影、目視で白色化の有無を確認した。

3.2.4 放射光 X 線 CT 観察

目視観察でコントロール（保水素材無添加、覆う素材なし）と比較して白色化が抑えられているサンプルを 2.2.3.および 2.2.4.の方法と同様の方法を用いて SPrin-8 の放射光 X 線 CT 装置で撮影、観察した。

3.2.5. 冷凍パスタの水分量測定と水分変化の把握

放射光 X 線 CT を観察したサンプルは常圧加熱乾燥法にて試料の水分を測定した。あらかじめ恒量を測定した秤量缶に裁断した試料を 1g 秤取、乾燥機（ISUZU SSR-114S）にて 135±1℃で 2 時間乾燥した。乾燥後すぐ、秤量缶にふたをしてデシケーターに移し 1 時間放冷、天秤（METTLER TOLEDO XPE204）で精秤、以下の式で水分量を算出した。

$$\text{水分(\% WB)} = (W_1 - W_2) / (W_1 - W_0) \times 100$$

W₀ : 秤量缶重量

W₁ : 試料入り秤量缶重量（乾燥前）

W₂ : 試料入り秤量缶重量（乾燥後）

$$\text{水分変化} = \text{初発の水分 (\%)} - \text{保管時の水分 (\%)}$$

3.3. 結果

3.3.1. 保水性素材を添加した冷凍パスタの目視観察

保水素材を添加して作製したパスタの目視観察結果を Table 3-3.と Fig. 3-1.に示した。目視観察では、セルロース 1 はコントロールと比較して白色化が抑えられていた。

Table 3-3. Results after storage for 5 weeks (visual observation)

Sample name		Visual observation results
Starch 1	×	There is as much whitening as the control
Starch 2	×	There is as much whitening as the control
Starch 3	×	There is a whitening part similar to the control
Starch 4	×	There are more whitening parts than controls
Starch 5	×	There are more whitening parts than controls
Cellulose 1	○	Partially whitened, but less than control
Cellulose 2	×	There is a whitening part similar to the control



Fig. 3-1. Results after storage for 3 weeks (digital camera photo)

3.3.2. 素材を表面に付着させたパスタの目視観察

保水素材を付着させて作製したパスタの目視観察結果を Table 3-4.と Fig. 3-2.に示した。目視観察では、油と水の混合液を付着させたパスタはコントロールと比較して白色化が抑えられていた。

Table 3-4. Results after storage for 5 weeks (visual observation)

Sample name		Results
Oil and water mixture	○	Partially whitened, but less than control
Trehalose	×	There is a whitening part similar to the control
Maltotriose	×	There are more whitening parts than controls
Inulin	×	There are more whitening parts than controls

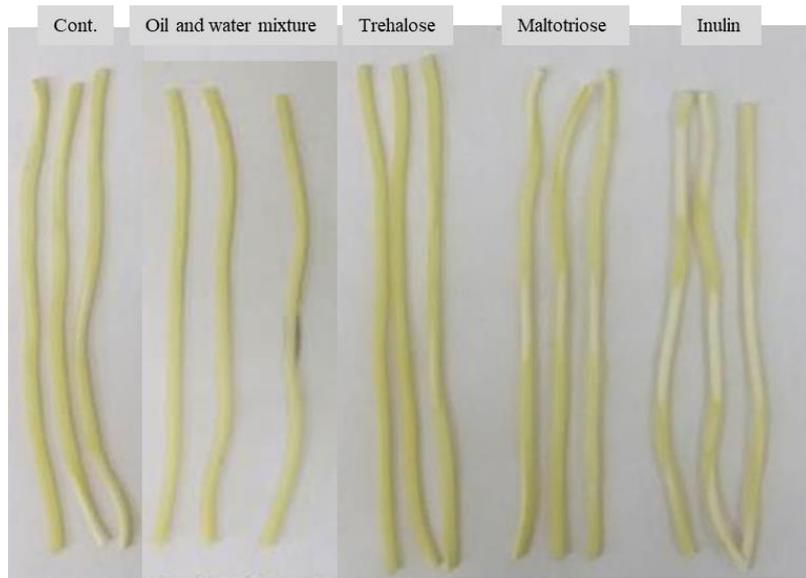


Fig. 3-2. Results after storage for 5 weeks (digital camera photo)

3.3.3. 放射光 X 線 CT 観察

コントロールと比較して白色化が抑えられていたサンプル 4 種類：澱粉 3（エーテル化リン酸架橋タピオカ澱粉）を 20% 添加したパスタ、セルロース 1 を 2.0% 添加して作製したパスタ、パスタ表面に油と水の混合液を付着させたサンプル、パスタをトレハロース溶液と混合したサンプルを凍結直後、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ で 3 週間、条件 D ($-21\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 1 時間 $\leftrightarrow -5.5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim -5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 10 分の繰り返し) で温度変化のある保管庫でそれぞれ 3 週間保管した際の二次元画像を Fig. 3-3, 4 に示した。

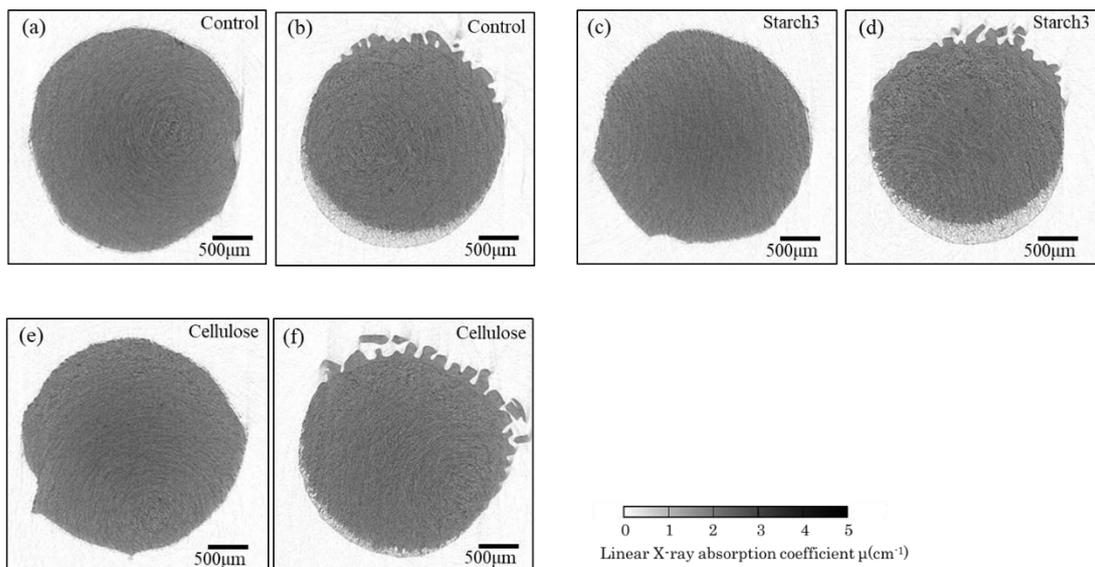


Fig. 3-3. Two-dimensional X-ray CT images of cross sections of frozen pasta. (a), (c) and (e) : Immediately after freezing (no storage), (b), (d) and (f) :-21 °C to 20 °C for 5 hr ⇔ -5.5 °C to -5.0 °C for 10 min. 3 weeks storage

Fig. 3-3.において澱粉を添加したパスタ(d)は、コントロールのパスタ(b)と同程度の空隙（氷結晶の昇華により水分飛散部分）が形成されており、発酵セルロース入りのパスタ(f)の空隙はコントロールの空隙よりも面積として小さいことが確認できた。この結果は目視で白色化している程度と一致していた。また、コントロール(b)に対して添加物を配合したパスタ(d)、(f)の組織内の大きな変化は確認できなかった。

Fig. 3-4.において-20 °C一定で3週間保管したパスタは、油と水の混合液(a)、トレハロース付着(c)は表層に空隙は見られず、(a)はパスタ表層見える膜状の部分は付着した油と考えられる。温度変化のある保管庫で3週間保管したパスタ(b)は空隙が見られたものの、油が付着していると考えられる部分には空隙は見られなかった。(e)はパスタ表層に空隙が確認できた。

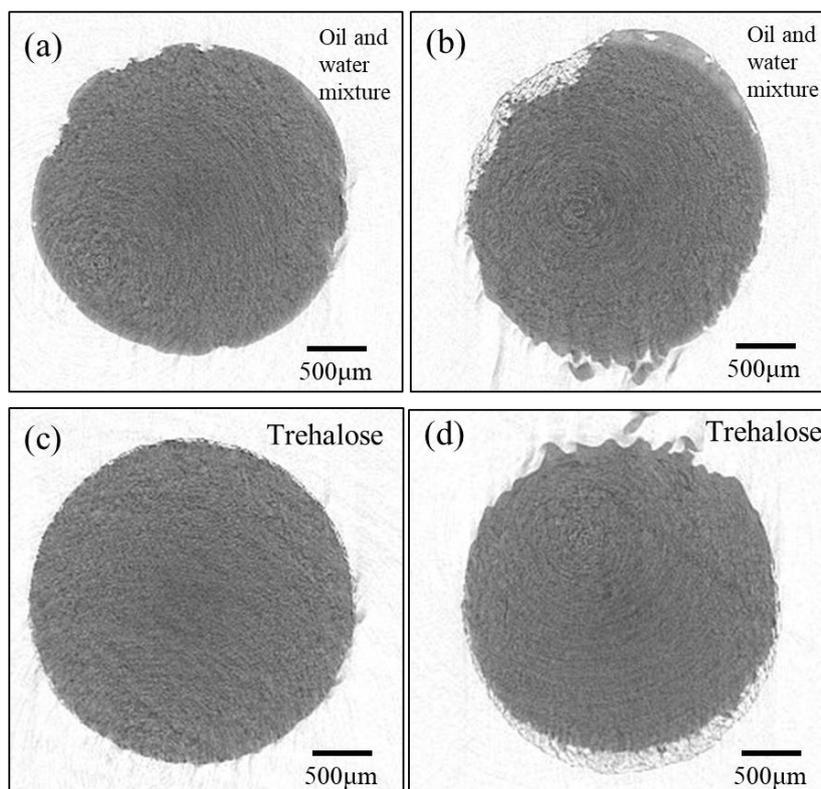


Fig. 3-4. Two-dimensional X-ray CT images of cross sections of frozen pasta. (a) and (c) :-20 °C constant 3 weeks storage, (b) and (d) :-21 °C to 20 °C for 5 hr ⇔ -5.5 °C to -5.0 °C for 10 min. 3 weeks storage.

3.3.4. 水分量の測定

X線CTにて観察したサンプルと同じ条件で作製したパスタを、温度変化のある環境（条件D）にて1、2、3週間保管したサンプルの水分減少量を Fig. 3-5. に示した。本試験のコントロールは 3.2.2. で作製したパスタ（素材を付着させていないもの）である。条件Dの温度変化のある保管庫に3週間保管したサンプルの水分減少率を比較すると、油と水の混合液を付着させたパスタにの水分減少率は少ない傾向が見られた。

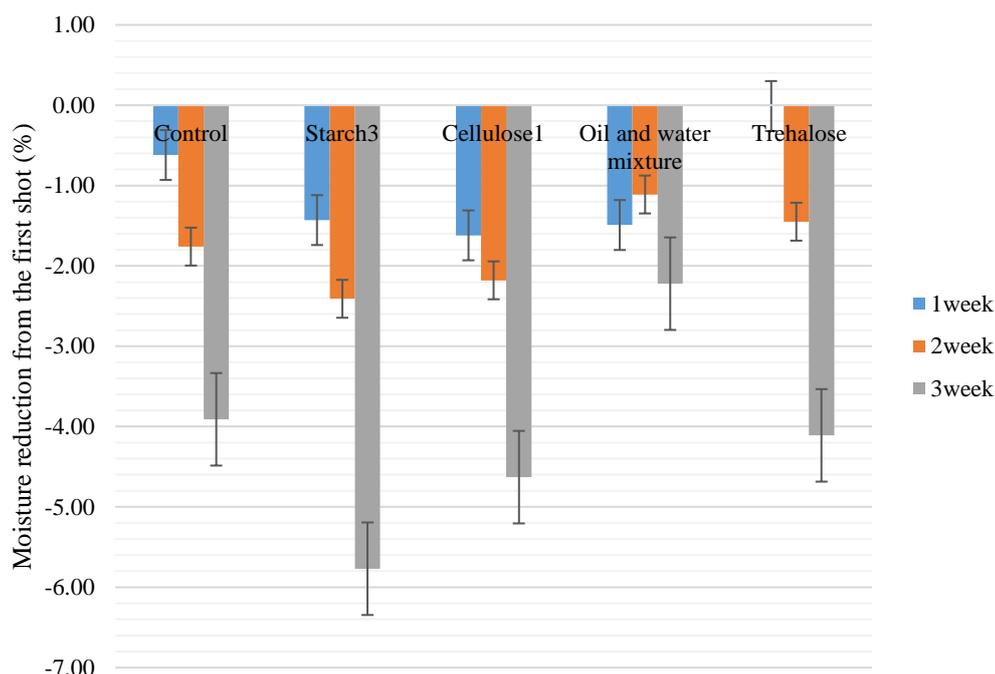


Fig. 3-5. Moisture reduction rate of various samples stored under condition D (-21 °C to 20 °C for 5 hr ⇔ -5.5 °C to -5.0 °C for 10 min. d).

3.4. まとめ

保水素材として、澱粉とセルロースを選択した。澱粉は加熱されることで膨潤して水をとることができる（二國ら、1991）、セルロースは水と混合攪拌することで膨潤して水分を保水できると考えた。特に試験に供した加工澱粉は澱粉に化学的処理を行うことで構造や物性を改良、改善し機能が付与されており、中でもリン酸化澱粉、ヒドロキシプロピル澱粉は冷凍耐性に優れている（大隈、2011）との報告がある。今回の試験で各種加工澱粉が冷凍パスタの水分飛散（乾燥）抑制に効果が低かった原因として、パスタが冷凍された際に茹でて糊化したパスタのデンプンが老化して水分を排出したため、保水効果が得られなかったと考えられる。セルロ

ースにも保水効果はうたわれており、近年ではセルロースの繊維を細かくしたものなどが発売されている (文献引用)。セルロースは澱粉と比較して構造が安定していて、茹でや冷凍などの加工工程で物性に変化がでにくく適度に水分を保持できたと考えられる。今回試験に供したセルロースのうち、微生物の発酵により生産されたセルロースに保水効果が確認できたが、他二種のセルロースとの違いについては確認できていない。X線 CT を用いての構造観察では、油と水の混合液を付着させたパスタはパスタの表層に膜のような部分が観察でき、膜が無い部分とその他のサンプルは空隙が見られた。

以上の結果より、温度変化がある環境下において、冷凍やけ (水分飛散による乾燥、白色化) はパスタ表面を油で覆うことで、パスタ表面からの水分飛散を抑え、冷凍焼けの発生を抑制できると考える。しかしながら、油で覆われていない部分は冷凍やけを起こしていたことから、パスタ表面全体に油を付着させ、剥離しない技術が必要と考える。

3.5. 参考文献

4. 簡易的な冷凍やけ評価手法の開発

4.1. はじめに

第2、3章では実際の食品(冷凍パスタ)を実験に供してきたが、作製の煩雑さ、一部結果のばらつきが発生、大量のサンプルを一度に試験するときに場所を要するなど、課題もある。そこで本章では、冷凍やけを抑制する技術を評価するための簡易的な評価手法の開発に取り組んだ。

4.2. 実験方法

4.2.1. 実験サンプルの作製

デュラム小麦粉 70 g とイオン交換水 30 g を基本配合とし、Table 4-1.に示した素材を添加して攪拌して調製した。素材を添加した分イオン交換水の量を減らした。白きくらげ多糖と発酵セルロースは 7000 rpm 10 分、それ以外の素材は 7000 rpm 3 分にミキサー(PLYTRON PT2500E)を設定して攪拌混合した。混合液はプラスチックチューブ(450mm×90mm φ SARSTEAD)に充填し、水道水を入れて 70 °Cに加熱した温浴槽(アズワン社製 THERMAL ROBO TR-2A)で 10 分加熱し、固化させた。チューブを温浴槽から取りだして室温で 3 分放冷し、-40 °Cのフリーザー(ホシザキ社製 LL-50)で 30 分保管した。

4.2.2. 保管とサンプリング

4.1.1.で調製した各サンプルは-20 °C一定の保管庫(エスペック社製 LU-114)と「-20 °C 1 hr → 20 °Cから-5 °Cまで 3 hr →-5 °C 1 hr →-5 °Cから-20 °Cまで 3 hr」の繰り返し条件に設定した保管庫(エスペック社製 LU-114)に 4 週間保管し、1 週間ごとに取り出して重量を測定した。

4.2.3. 重量測定

各サンプルを恒温槽から取りだし、-20 °Cの冷凍庫(ホシザキ社製 XX)の中に天秤(METTLER TOLEDO XPE204)を静置して精秤した。

Table 4-1. Material information and blending amount.

Materials	Maker	Amount added (g)	Durum flour (g)	Ion-exchanged water (g)
-----------	-------	---------------------	--------------------	----------------------------

Durum flour	Nisshin Flour Milling	0	15	35
White kurage polysaccharide	UNITEC FOODS Co., Ltd.	0.5	14.5	35
Trehalose		0.5	14.5	35
Trehalose	Hayashibara Co., Ltd.	2.5	12.5	35
Trehalose		5	10	35
Etherified phosphate cross- linked tapioca	Hayashibara Co., Ltd	10	5	35
Fermented cellulose	San-Ei Gen F.F.I. Co., Ltd.	1	14	35

4.3 結果

-20 一定の保管庫に保管したサンプルの重量測定結果を Fig. 4-1.に、温度変化のある保管庫に保管したサンプルの重量測定結果を Fig. 4-2.に示した。-20 °C~-5 °Cまで温度変化のある保管庫に保管したサンプルの方が-20°C一定の保管庫に入れたサンプルよりも重量が減少した。これは第2章においてパスタで実施した実験結果と一致していた。

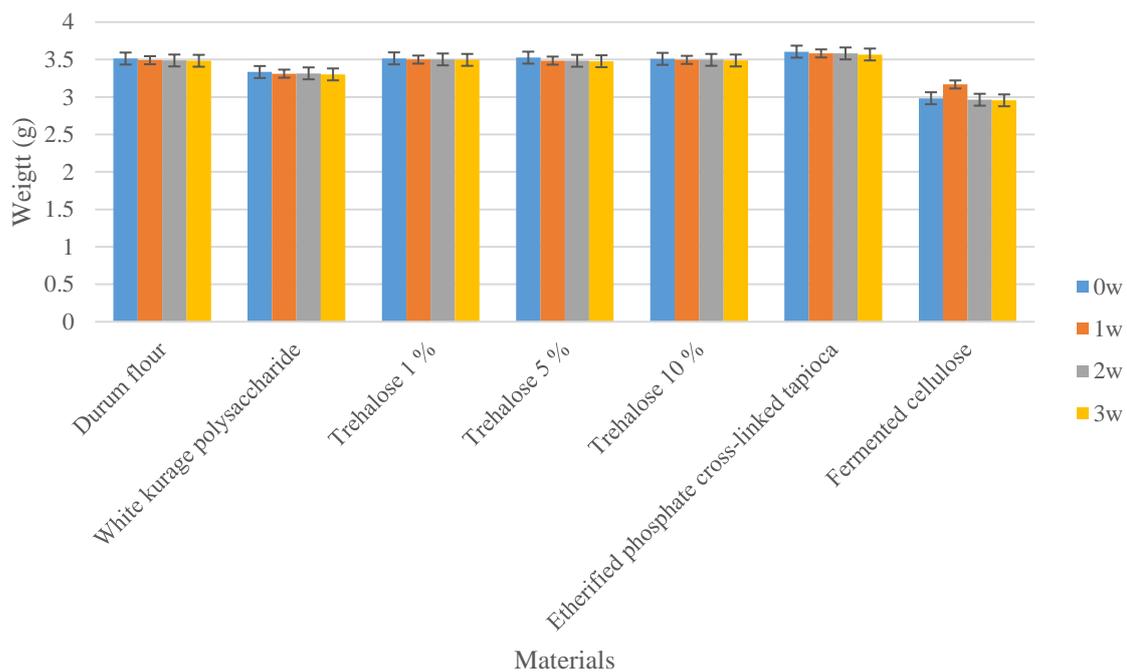


Fig 4-1. Weight measurement results of samples placed in a constant storage at -20 °C

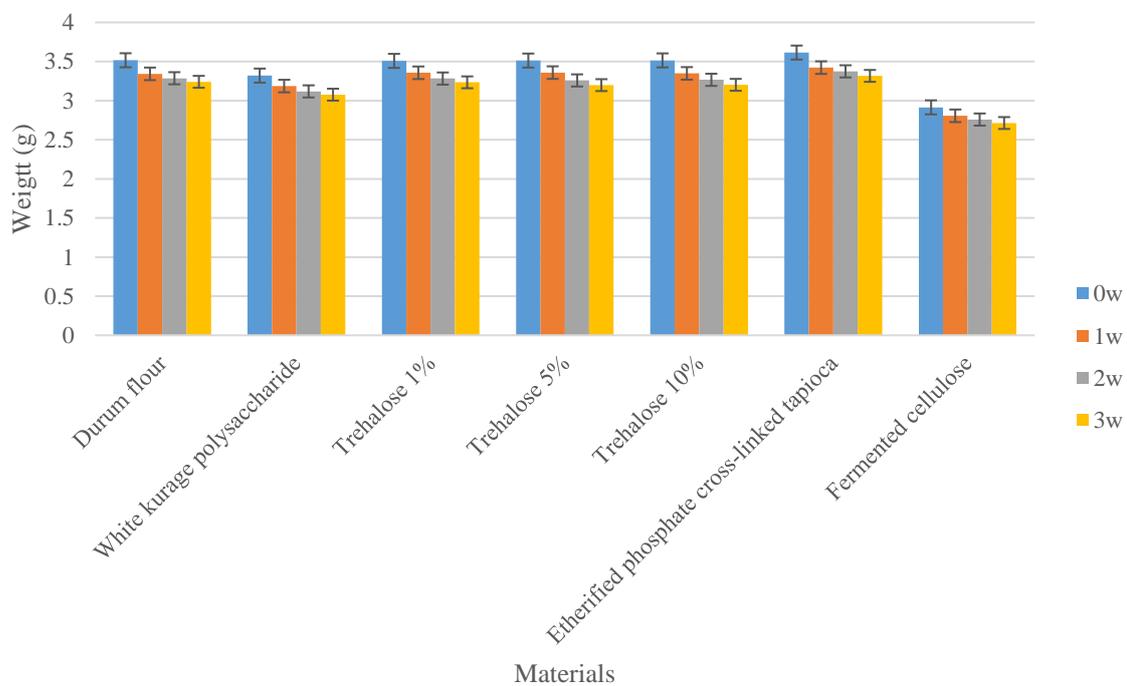


Fig 4-2. -20 °C ⇔ -5 °C Weight measurement result of the sample placed in the storage with temperature change

現在も本試験は継続中である。

- ・追加データ取得
- ・再現性確認

を行い、第4章に追加、考察した上で、冷凍やけの簡易評価試験系を構築する。

4.4. まとめ

4.5. 参考文献

5. 凍結方法（凍結速度）による品質劣化抑制の検討

5.1 はじめに

1.3.2にて「ニンジン」の凍結・解凍後の品質劣化は大きいと述べたが、本章でははじめに冷凍食品に使用される代表的な根菜類(ニンジン、ゴボウ、ダイコン)の凍結温度による品質差を把握した。その後、ニンジンに焦点をあて、凍結方法(凍結速度)による品質差を確認した。

5.2 実験方法

根菜類の凍結速度と品質の関係把握

5.2.1. 実験サンプル調製方法

スーパーカスミで購入した生鮮のニンジン・ダイコン・ゴボウの皮を剥き輪切り（厚さ 15 mm、10 mm）にカットしてニンジンとダイコンは直径 30mm の丸型で型抜き、ゴボウは 20 mm にカットした。喫食可能な状態まで茹でてパウチに入れ、脱気包装した（脱気率 92%）。パウチごと -10、-20、-30 °C に設定したブライン凍結機（テクニカン 凍眠）の中に浸漬することで凍結した。比較対照のコントロールは茹でた後の未凍結品(チルドと表記)とした。

5.2.2. 物性測定

冷凍庫からサンプルを取り出し、10 °C で 1~2 時間解凍したサンプルをクリープメータ（株式会社山電 RE2-33005C）楔形プランジャーで 1mm/sec の速度でせん断した。

<測定条件>

ロードセル：0.1

アンプ倍率：1

格納ピッチ[sec]：0.02

測定歪率[%]：100

測定速度[mm/sec]：1

接触面直径[mm]：15

ニンジンの凍結速度と品質の関係把握

凍結速度を速めると、氷結晶生成帯(0～10°Cの温度帯)を速く過ぎることができるため組織内の氷結晶が成長することを抑制できると言われている。どの程度の速度で凍結すれば冷凍ニンジンとして許容できる品質を維持できるのか確認するため、試験を実施した。

5.2.3. サンプル調製方法

ニンジンを輪切り（厚さ 10mm）にカットし、喫食可能な状態まで茹でた。比較対照として茹でた後に未凍結品も用意した。

5.2.3. サンプル凍結方法

●ブライン凍結

- ・-10～-30°C：温度を調整したブライン凍結機に脱気包装したサンプルを浸漬することで凍結した。
- ・-40～-70°C：特級エタノールにドライアイスを入れ、温度を調整し、脱気包装したサンプルを浸漬することで凍結した。

●液体窒素凍結

液体窒素に未包装のサンプルを浸漬することで凍結した。

5.2.4. サンプル凍結・解凍速度測定

ニンジン茹でた（3分、7分）後、サンプルにおんどとり(T&D社製)をさした。おんどとりをさしたまま凍結し、保管後 10°Cで解凍する工程を行い、温度の変化を測定した。0°C～-10°Cに達するまでの時間を調査した。

5.2.5. 物性測定

クリープメータで円柱型プランジャー(L50 P-3)を用いて破断強度解析を行い、平均を求めた（n=5）。測定条件は 5.2.1.と同様にした。

5.2.6. ドリップ量測定

解凍後のサンプルをクリープメータで歪率 100%まで加重し、加重前後のサンプルの重さ

を比較したものをドリップ量として測定し、平均を求めた (n=5)。

$$\text{ドリップ量} = \text{加重前のサンプルの重量} - \text{加重後のサンプルの重量}$$
$$\text{ドリップ率} = \text{ドリップ量} / \text{加重前のサンプルの重量}$$

5.2.7.食味評価

食味の課題ごとに品質を以下の5段階で評価を行った。

- 5: チルド品と同等の食感
- 4: チルド品に近いが食感に違和感がある
- 3: チルド品からは遠いが許容できる範囲
- 2: チルド品から遠く食感が悪い
- 1: チルド品からは程遠く食品として許容できない

5.3 実験結果と考察

5.3.1. 根菜類の凍結速度と品質の関係把握

厚さ 15mm のニンジンについては、凍結方法による物性の差はあまり大きくはみられなかった (Fig. 5-1.)。食味評価では、エアブラストはブライン-30℃と比較するとやわらかく、食感に少し差が感じられた。厚さ 10mm になると、歪率が 0~40% ではブライン-30℃ > ブライン-20℃ > エアブラスト > ブライン-10℃ の順に荷重が大きく、この順は凍結速度が速い順と同じであるため、凍結速度と物性はある関係があると判ったが、物性の差はあまり大きくはなかった (Table 5-1.)。

ゴボウはエアブラストと比較してブライン-30℃は 10mm、15mm とともに歪率が 0~40% で少し高い荷重を示した (Fig. 5-2.)。食味評価では、ブライン-30℃はエアブラストと比較すると、少し硬く感じられ、繊維の食感があつたが、エアブラストは比較的やわらかかった。ダイコンは、部位による差があるためか、サンプルごとのばらつきが大きく、傾向があまりみられなかった (Fig. 5-3.)。ドリップ量に関しては、どの食材についても、凍結方法による差はみられなかった。

冷凍耐性の低い根菜類においては、エアブラスト凍結とブライン凍結の間で食味の差はほぼなく、凍結後の品質は未凍結品と比較して劣化した。凍結ダメージが少ないとされるブライン凍結においても食味の改善はほぼみられなかった。凍結後もより良い品質を維持するた

めには、-30℃のブライン凍結よりもさらに速い凍結速度で凍結を行う必要があると考える。

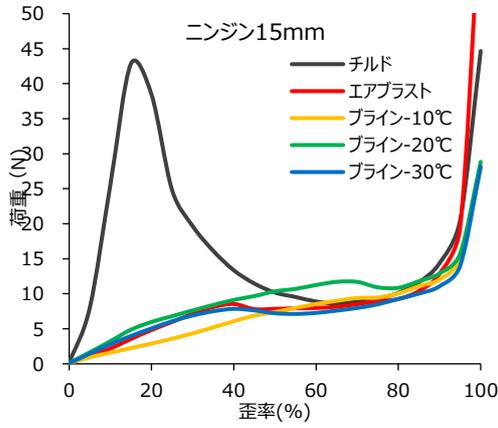


Fig. 5-1. ニンジンの凍結方法における荷重曲線

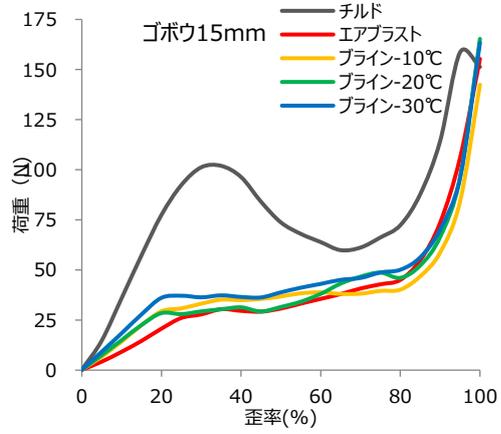


Fig. 5-2. ゴボウの凍結方法における荷重曲線

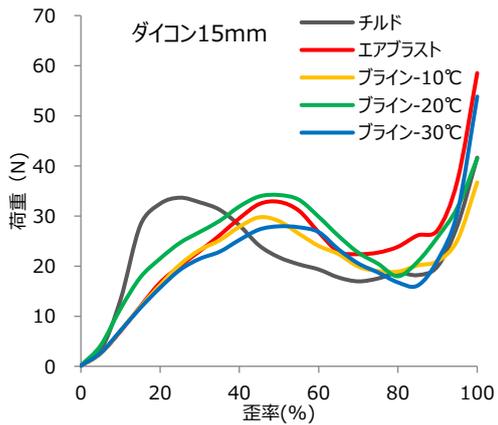


Fig. 5-3. ダイコンの凍結方法における荷重曲線

Table 5-1. ニンジンの凍結方法による物性比較

凍結方法	平均破断強度		ドリップ割合 (平均)	凍結速度 ※
	20	60		
エアブラスト	1.7	2.8	1.01 %	17分
ブライン-10℃	1.8	2.5	0.71 %	25分
ブライン-20℃	1.3	2.3	2.58 %	13分
ブライン-30℃	1.2	2.2	0.99 %	3分

※0～-10℃に到達するまでの時間

5.3.2. ニンジンの凍結速度と品質の関係把握

凍結速度が速いほど食味評価は良くなると判った。(Table 5-2., Fig.5-4.) ドリップ量についても凍結速度が速くなるほど減少するが、液体窒素凍結でも、未凍結品のドリップ量には到達しなかった (Table 5-3, Fig.5-5)。未凍結品に近い食感 (食味評価 4 点以上) を実現するためには、少なくとも 0~-10°C に達するまでの時間を 30 秒以下にする必要がある。液体窒素凍結以外でその速度を実現できる凍結機器は存在しない。品質改善のためにはランニングコストも考慮すると、現在の凍結機器では達成することが難しい圧倒的な速度での凍結が必要であると判った。

Table 5-2. 凍結速度ごとの食味評価

凍結方法	凍結速度 (0~-10°Cに到達するまでの時間)		食味評価 (総評)	
	3分茹で	7分茹で	3分茹で	7分茹で
未凍結	0分	0分	4	5
エアブラスト -40°C	10分	10分	1	1
ブライン -10°C	19分	15分	1	1
-20°C	5分	4分	2	1
-30°C	4分	3分	2	2
-40°C	4分	3分	2	2
-50°C	2分	2分	2	3
-60°C	30秒	30秒	3	3
-70°C	15秒	20秒	4	4
液体窒素 -196°C	数秒	数秒	4	4

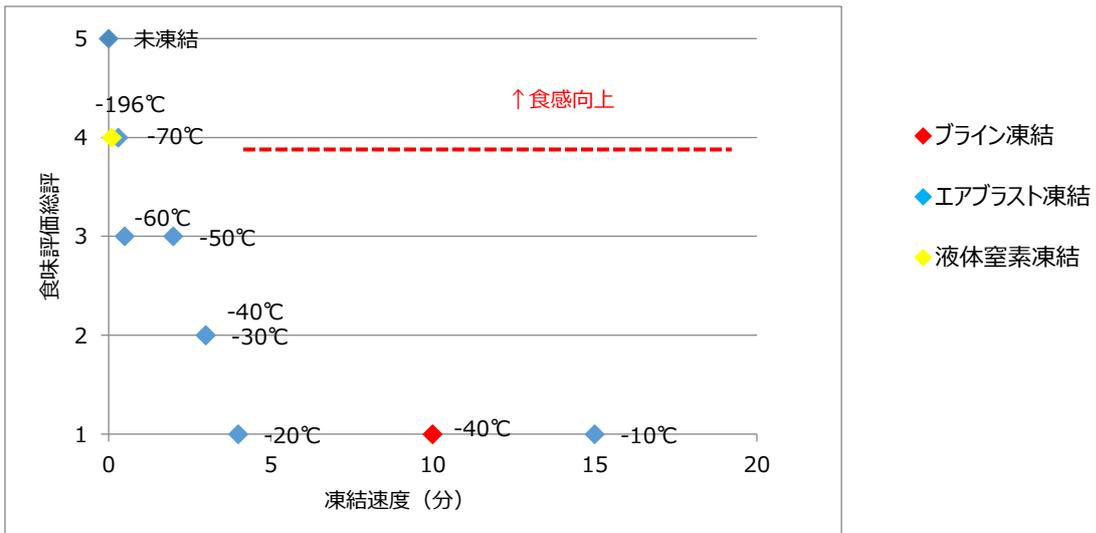


Fig.5-4. 凍結速度と食味評価の関係

Table 5-3. 凍結速度ごとのドリップ率

	凍結速度 (分)	ドリップ率 (%)
未凍結	0	1.3
エアブラスト -40°C	10	14.8
ブライン -20°C	5	18.7
-40°C	4	15.9
-50°C	2	13.0
-60°C	0.5	13.1
-70°C	0.25	12.3
液体窒素 -196°C	0.1	7.9

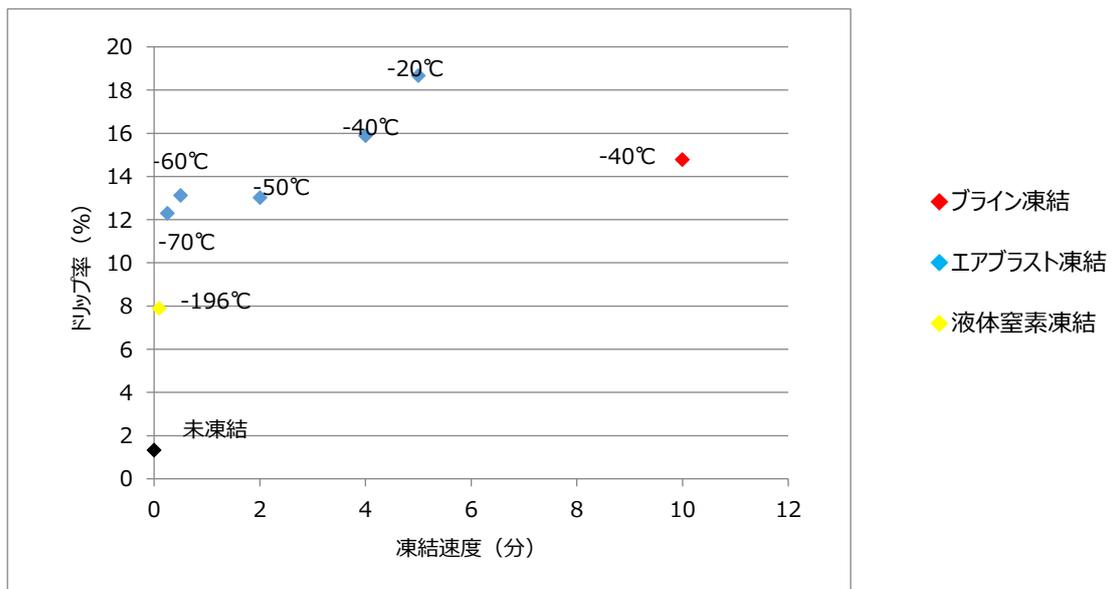


Fig.5-5. 凍結速度とドリップ率の関係

5.4. 参考文献

6. 品質劣化抑制方法の検討

品質劣化抑制のため、以下 8 種類の検討を実施。

1. 加熱時間の検討
2. 部位による検討
3. Ca 浸漬・予加熱処理の検討
4. Ca 処理+予加熱
5. pH 調整の検討
6. 糖浸漬の検討
7. 増粘剤浸漬の検討
8. 乾燥処理の検討

以下、博士論文のための体裁が整っておりませんが、冷凍ニンジンの品質劣化抑制のために実施した実験を記載させていただきます。お見苦しくて大変申し訳ございませんが、参考にしていただければ幸いです。

冷凍食品の市場品について試食を行うことで冷凍ニンジンの課題を抽出し、課題ごとに 5 段階で品質の良し悪しを評価する食味評価体系を確立した。

7 分間沸騰水中で茹でたニンジンをもとに 5 点満点とし、目標品質とした。

表 6. 官能評価項目

食感の課題	定義
かたさ	歯が入ってからかみ切るまでの歯ごたえ
	1. やわらかい～5. 良い～7. かたい
ドリップ	噛んだ時に組織から出る違和感のある水分
	1. ドリップがある～5. ドリップがない
スポンジ感	歯切れの良さ
	1. 歯切れが悪い～5. 歯切れが良い

すじ感	繊維質の有無
	1. 繊維質を感じる～5. 繊維質を感じない
総評	食感のバランスの良さ
	1. 悪い～5. 良い

冷凍ニンジンの品質の悪さには5点課題（かたさ、ドリップ、スポンジ感、すじ感）があると確認した（表6）。それらの原因は共通して凍結過程において、組織内の水分が氷結晶になり成長することで細胞を破壊し、組織の保水力が下がるため、解凍後に張りのある食感を維持できなくなるからであると考えた。それらの改善策として、氷結晶が成長するのを防ぐため凍結速度を速めること、氷結晶が形成しても組織が壊れないように組織を強化すること、氷結晶となる水を前もって減らしておくことを考えた（図17）。

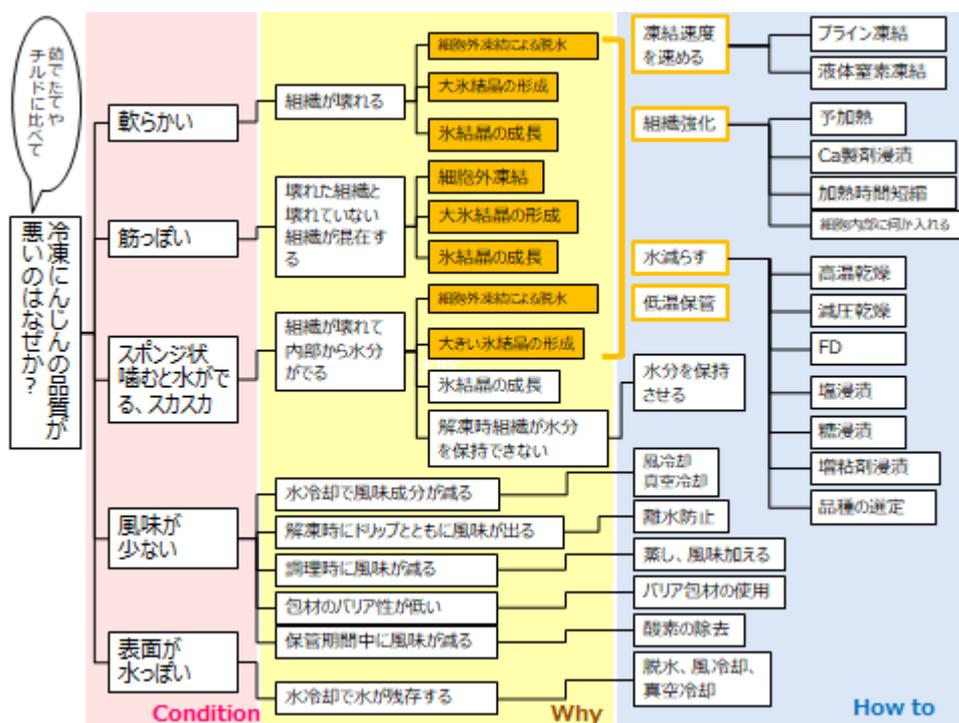


図17. 冷凍ニンジンにおける課題と検討内容

これらの結果から、ニンジンモデル食材とし、以下の凍結前処理による冷凍耐性付与方

法を検討した。

1. 加熱時間の検討
2. 部位による検討
3. Ca 浸漬・予加熱処理の検討
4. Ca 処理+予加熱
5. pH 調整の検討
6. 糖浸漬の検討
7. 増粘剤浸漬の検討
8. 乾燥処理の検討

2-3-1. ニンジンの品質向上技術の探索

【方法】

図 18 の実験フローにあるように、ニンジンは一様な大きさにするため厚さ 10mm に輪切りにした後、直径 30mm の丸型で型抜きをした。カットしたニンジン茹で加熱し、エアブラスト凍結機（ホシザキ HBC-12B3-AW）にて凍結・解凍を行い、凍結・解凍した後の、物性測定、ドリップ量、食味評価を行った。

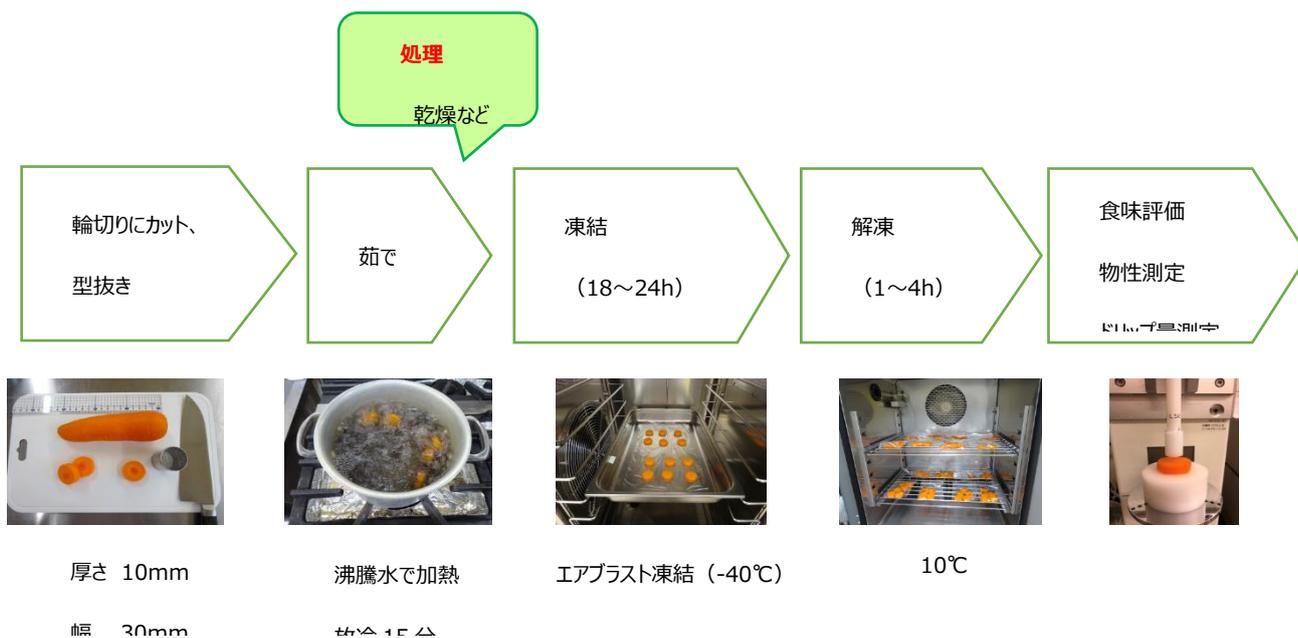


図 18. 実験フロー

- 物性測定

クリープメータで円柱形プランジャー(L50 P-3)を用いて破断強度解析を行った (n=5)。

- ドロップ量測定

クリープメータの台座にろ紙をひき、その上にサンプルをのせた。

歪率 50%まで加重した後、加重前後のろ紙の重さを測定し、以下の計算式にてドロップ量を求めた (n=3)。

ドロップ量=加重後のろ紙の重量-加重前のろ紙の重量

- 食味評価

目標品質と比較して食感の課題ごとに 5 段階で評価した。

<1.加熱時間の検討>

野菜の細胞壁は多量のペクチン質を含んでおり、細胞の接着剤の役割を果たしているために、野菜は硬く一定の形を保っている。沸騰水中での加熱時間が長くなるほど、ペクチンが溶解することによって野菜の軟化が進行することが知られている。そのため冷凍野菜は加熱による軟化と凍結による軟化が起こることとなる。加熱時に喫食に適した食感よりも硬い状態になるよう加熱時間を短縮することで、凍結後の軟化を抑制することを目的に検討を行った。

【方法】

生のニンジンとを 3 分および 7 分沸騰水で煮た後、エアブラストで凍結した。

【結果】

目標品質である7分茹でのニンジンを凍結解凍すると、求める品質よりもやわらかくなった（図19）。そのため、予め茹で時間を短縮して3分にすると、目標品質に近い硬さを実現できた。

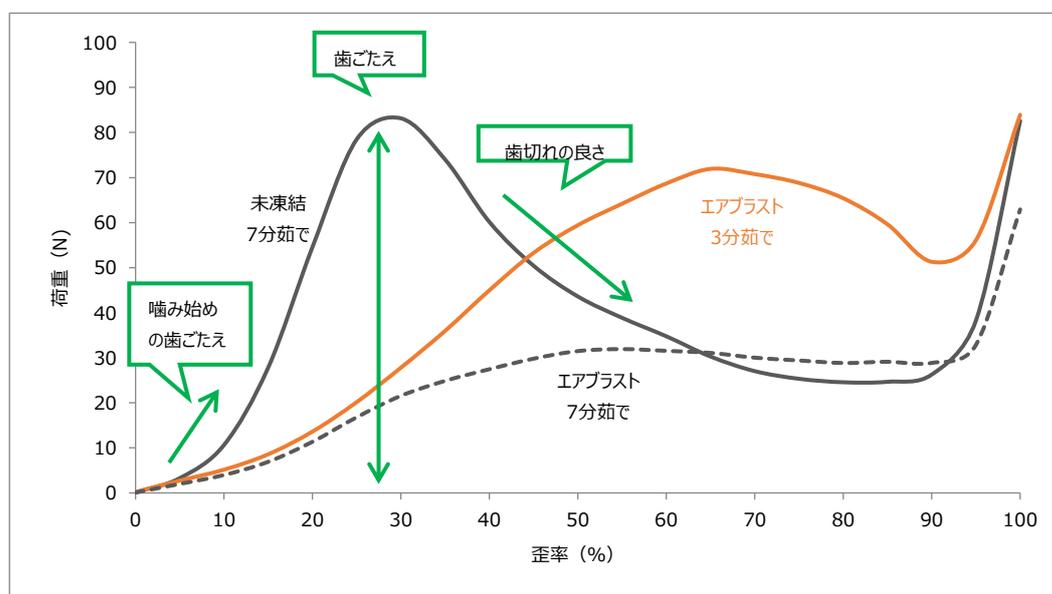


図 19. 加熱時間ごとの荷重曲線

このときクリープメータで測定した荷重曲線の結果から、食感の課題について表すことができると考えた。はじめのグラフの立ち上がりの角度、頂点の高さが歯ごたえとし、角度が急かつ、頂点が高い程、硬いことを表しているとした。また、グラフが頂点から下る角度を歯切れの良さとし、急であるほどスポンジ感が少ないとした。頂点の位置が右にずれるほど、すじ感が強いとした（図16）。

<2.部位による検討>

ニンジン上部と下部によって細胞の大きさ、古さが異なる。ニンジンの部位ごとに食感の違いがあるのか検討を行った。

【方法】

ニンジン上部と下部に2分し、茹でた（3分、5分、7分）後、エアブラストで凍結した（図20）。

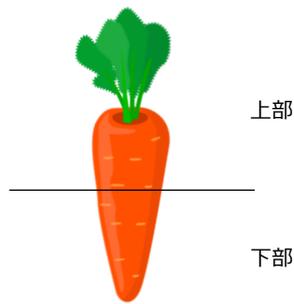


図 20. ニンジンの部位

【結果】

ニンジンの上部と下部では、茹で時間が短い（3分）と差が感じられなかったが、茹で時間が長く（7分）なれば下部の方が硬く感じられた（表7）。

表 7. ニンジンの上部と下部の食感の差

茹で時間	食味評価
3分	硬い。上部と下部で差がない。
5分	少しやわらかい。上部より下部の方が硬い。
7分	やわらかい。上部より下部の方が硬い。

ニンジンは上部より下部の方が細胞が若く、細かく密集しているため、組織がより強固と考えられ凍結後も硬さを保持できる可能性がある。

<3.Ca 浸漬・予加熱処理の検討>

細胞が死ぬと透過を調整する原形質膜の機能がなくなり、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} などが原形質から細胞壁に移行してペクチンと結合し、より強固なゲルを形成するため硬化することが知られている。そのため、ニンジンを Ca 溶液に浸漬することで、細胞壁の硬化を促進させ、凍結ダメージを受けても耐えうるよう組織を強化することを目的に検討を行った。

また、50°C以上になると細胞壁酵素であるペクチンメチルエステラーゼ (PME) が活性化し、ペクチンのメチルエステルがけん化され、カルボキシル基が増加するので、細胞内から透過して出た Mg^{2+} や Ca^{2+} の作用でペクチン質のゲル化が強固になることが知られている。そのため、予加熱として 60°C の水に浸漬させることで、細胞壁の硬化を促進させることを目的に検討を行った。

【方法】

生のニンジン各条件で処理した後、3 分間茹で、エアブラストで凍結した。

- ・ 2%酢酸 Ca 浸漬 常温 15 分
- ・ 2%酢酸 Ca 減圧含浸 (ESPEC EVC-220) 20°C 5 分×1 回
- ・ 0.5%酢酸 Ca 減圧含浸 20°C 5 分×1 回
- ・ 60°C 温浴 (東京硝子器械 FTB-01N) 15 分

凍結・解凍後の食味評価、物性測定、ドリップ量測定を行った。

【結果】

酢酸 Ca 溶液への浸漬を行うと、解凍後のニンジンに硬さが付与された (表 8, 図 21)。

浸漬と減圧含浸では、減圧含浸の方がより硬い食感となったが、同時にすじ感も高まり、全体として食感のバランスが悪くなった。

酢酸 Ca の濃度による食感の差は大きくは見られなかった。

予加熱においても酢酸 Ca 浸漬と同じような傾向がみられ、硬さが付与された。

表 8. Ca 浸漬、予加熱における処理方法ごとの食味評価

処理方法	食味評価				
	かたさ	ドリッ プ	スポン ジ	すじ	総評
目標品	5	5	5	5	5
未処理	3	2	3	2	2

2%酢酸 Ca 浸漬	3	1	1	1	1
2%酢酸 Ca 含浸	4	2	1	3	3
0.5%酢酸含浸	3	2	3	2	2.5
予加熱	4	2	3	3	3

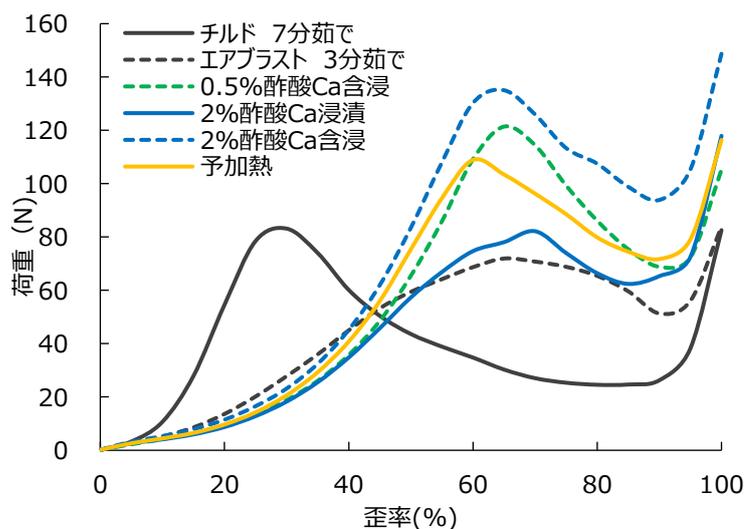


図 21. Ca 浸漬、予加熱における処理方法ごとの荷重曲線

酢酸 Ca 浸漬、予加熱は解凍後の硬さの付与に効果がみられることが判った。浸漬よりも減圧含浸の方が硬化に効果があることから、ニンジンの組織内部まで溶液をしみこませることが重要であると考えられる。また、硬さの付与はできたものの、すじ感の改善がみられなかったため、細胞壁を硬化しても細胞壁以外の部分が軟化してしまっていると、食感の差が大きくなり品質として悪く感じると考えられる。

<4.Ca 処理+予加熱>

【方法】

生のニンジン、各条件で処理した後茹で、エアブラストで凍結した。

- ・ 0.5%酢酸 Ca 浸漬+予加熱 60℃ 15 分
- ・ 0.5%酢酸 Ca 減圧含浸+予加熱 60℃ 4 分×3 回

- ・2%酢酸 Ca 浸漬+予加熱 60°C 15分
- ・2%酢酸 Ca 減圧含浸+予加熱 60°C 4分×3回

【結果】

Ca 浸漬と予加熱を組み合わせることで、より硬さを付与できたが、加熱時間を短縮すると目標品質を越える硬さになった（表9）。

3分茹で、7分茹でともに酢酸 Ca の濃度は2%より0.5%の方がより硬くなった（図22, 23）。

浸漬方法では、減圧含浸の方が浸漬よりもより硬くなったが、同時にすじ感が高まり、ゴリゴリとした食感となった。

表9. Ca 浸漬+予加熱方法ごとの食味評価

茹で時間	処理方法	食感の課題				
		かたさ	ドリッ プ	スポン ジ	すじ	総評
7分	未凍結	5	5	5	5	5
3分	エアブラスト	6	2	2	2	2
	0.5%酢酸 Ca 浸漬+予加熱	7	2	2	1	1
	0.5%酢酸 Ca 含浸+予加熱	9	1	1	1	1
	2%酢酸 Ca 浸漬+予加熱	7	1	1	1	1
	2%酢酸含浸+予加熱	9	1	1	1	1
7分	エアブラスト	1	2	2	4	2
	0.5%酢酸 Ca 浸漬+予加熱	4	2	2	2	2
	0.5%酢酸 Ca 含浸+予加熱	6	2	2	1	1

2%酢酸Ca 浸漬+予加熱	5	2	2	2	2
2%酢酸Ca 含浸+予加熱	6	2	2	1	1

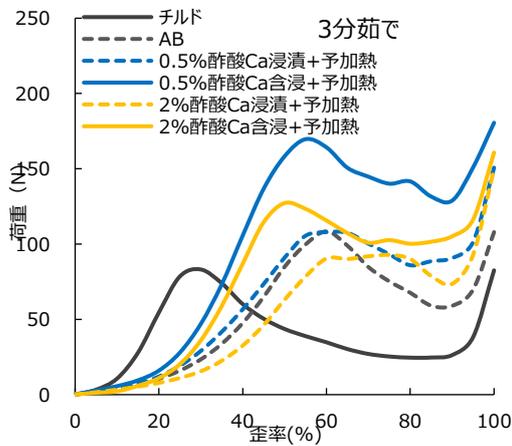


図 22. Ca 浸漬+予加熱方法ごとの荷重曲線

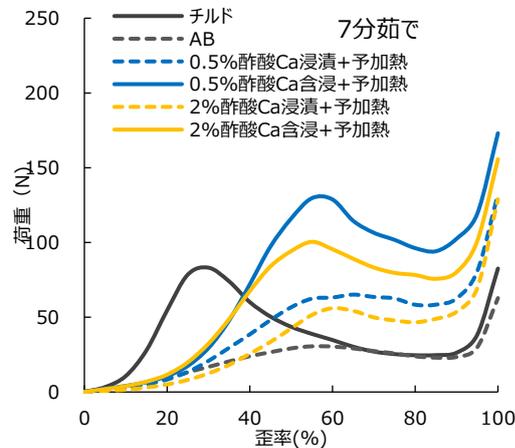


図 23. Ca 浸漬+予加熱方法ごとの荷重曲線

Ca 浸漬と予加熱を組み合わせることで、硬さについては効果がみられたが、それ以外の課題については改善が見られなかったため、さらなる技術の組み合わせの検討が必要である。

<5.pH 調整の検討>

ペクチンは中性・アルカリ性で加熱により分解する。メチル基によってエステル化されているペクチン質は、中性またはアルカリ性の水溶液中で加熱すると、加水分解と異なり、トランスエリミネーション (β -脱離) が起こり、ペクチンが分解されるため食材が軟化する。pH4 と pH5 ではエステル化度に関係なく、 β -脱離を起こさないことが知られている。そのため、pH4 に調整した溶液で加熱をすることで、凍結前の食感の軟化を抑制することを目的に検討を行った。

【方法】

生のニンジン各条件で処理した後、その pH に調整した水溶液にて 3 分間茹で、エアブラストで凍結を行った。

- ・クエン酸にて pH4 に調整→浸漬
- ・クエン酸にて pH4 に調整→減圧含浸

- ・重曹にて pH8 に調整→浸漬
- ・重曹にて pH8 に調整→減圧含浸

凍結・解凍後の食味評価、物性測定、ドリップ量測定を行った。

【結果】

pH4 に調整した溶液で茹でると、解凍後のニンジンに硬さが付与された
(表 10, 図 24)。

処理方法は浸漬、減圧含浸のどちらにおいても食感の差はほぼみられなかった。

pH8 における食味評価では、未処理品と比べてよりやわらかくなり、
食感が悪化した。

表 10. pH 調整における処理方法ごとの食味評価

処理方法	食味評価				
	かたさ	ドリッ プ	スポン ジ	すじ	総評
チルド 7 分 茹で	5	5	5	5	5
エアブラ スト	3	2	3	2	2
pH4 浸漬	3.5	3	4	2	2.5
pH4 含浸	4	3	4	2	3
pH8 浸漬	2	3	2	2	2
pH8 含浸	1	2	3	2	1

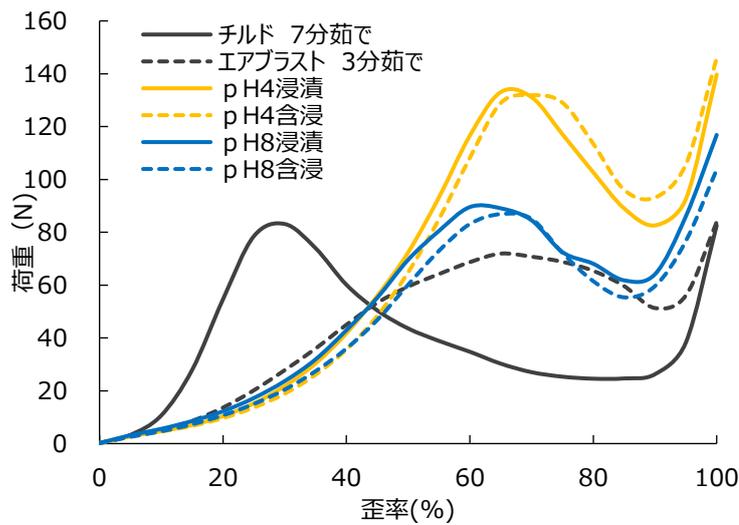


図 24. pH 調整における処理方法ごとの荷重曲線

pH8 では水 (pH7) 中で加熱した未処理品よりやわらかい食感となり、pH4 で硬さを付与できたことから、pH を調整した溶液中で加熱をすることは食感の向上に有効であると確認した。すじ感の改善には至らなかったが、ペクチンの流出を抑制したためか、すじ感がより際立つということはない。

<6.糖浸漬の検討>

糖液に浸漬することで、組織内の自由水が減り、結合水となることで凍結する水分を減少させること、また浸透圧脱水が行われ、組織内の水分を減少させることを目的に検討を行った。

糖の中でもトレハロースは組織中で小さく丸い形の氷の結晶を作り、かつ成長を抑制する性質があり、組織の損傷や離水が抑えられるため、冷凍による劣化を起こしにくいことが知られている。

【方法】

ニンジン各条件にて処理し (茹で時間 3 分)、エアブラストで凍結を行った。

- ・ 茹で水に 10%糖を添加
- ・ 茹で後、常温で 10%糖液に減圧含浸 5 分×3 回

・茹で後、常温で10%糖液に1時間浸漬
凍結・解凍後の食味評価を行った。

- ・トレハロース：トレハ（林原）
- ・マルトース：サンマルト（林原）
- ・マルトシルトレハロース：ハローデックス（林原）

【結果】

3種類の糖、3条件の処理方法のどれにおいても、解凍後のニンジンの食感は未処理品と大きな差はなく、食感の向上はみられなかった（表11）。

表 11. 糖浸漬における処理方法ごとの食味評価

処 理 方 法	添加物	食味評価				
		かたさ	ドリッ プ	スポン ジ	すじ	総評
	なし（目標品質）	5	5	5	5	5
茹で水	なし	4	2	2	2	3
	トレハロース	4.5	2	2	1	3
	マルトース	3	1	2	3	2
	マルトシルトレ ハロース	3	1	2	3	2
	全部（1：1：1）	3	2	2	2	3
減 圧 含 浸	なし	5	1	2	1	3
	トレハロース	4	1	2	2	3
	マルトース	3	2	2	2	2
	マルトシルトレ ハロース	3	1	2	2	2
	全部（1：1：1）	3	2	2	2	3
浸 漬 1	トレハロース	3	1	2	2	2

h	マルトース	3	1	2	2	2
	マルトシルトレ	3	1	2	2	2
	ハロース					
	全部 (1 : 1 : 1)	3	1	2	2	2

ニンジンの内部まで糖液が浸透していない可能性がある。来期にむけて、今一度試験方法を検討しなおす必要がある。

<7.増粘剤浸漬の検討>

氷結晶の成長によって組織が損傷したとしても食感を維持できるよう、組織内に物質を浸透させ組織強化をすること、また浸透圧脱水によって水分を減少させることを目的に検討を行った。

【方法】

ニンジン茹でた後、水 200g に増粘剤 2g を十分に混ぜた後、減圧含浸 (5 分×5 回 20°C) を行い、凍結・解凍後の食味評価を行った。

- ・ ウェランガム：ピストップ W (三栄源)
- ・ 発酵セルロース：サンアーティスト (三栄源)
- ・ ペクチン 1：ペクチン LM-5CSJ (三晶)
- ・ ペクチン 2：ペクチン LM-100AS-HP (三晶)
- ・ 特殊加工酵母：モイステックス (富士食品工業)
- ・ 寒天：伊那寒天 (伊那食品工業)

【結果】

ペクチンは冷解凍後のニンジンの食感の向上に効果がみられた (表 12)。それ以外の増粘剤には際立った効果はみられなかった。

表 12. 増粘剤ごとの食味評価

	水	ウェラン ガム	発酵セルロ ース	ペクチ ン1	ペクチ ン2	特殊加 工酵母	寒天
茹 で 3 分	△	○	×	○	○	△	△
茹 で 5 分	△	△	×	△	○	×	△

○：品質が良い △：品質がコントロールと同等 ×：品質が悪い

複数人で食味評価を行った結果、サンプルによる個体差が大きかったためか、評価にばらつきがみられた。また、減圧含浸の前後でニンジンの重量を計測していたが、処理後の重量がほぼ増加していなかったため、ニンジン内部まで浸透していなかったと考えられる。結果としてペクチンが食感の向上に効果がみられたが、必ずしもペクチンによる効果であるとは言い難いため、増粘剤が内部まで浸透するような処理方法の再検討が必要である。

<8.乾燥処理の検討>

氷結晶が組織を傷つけることを防ぐため、氷結晶の原因である水分を凍結前に減らしておくことで、解凍後の軟化を抑制することを目的に検討を行った。

恒温乾燥

【方法】

ニンジン を 3 分茹でた後、各条件の水分減少量となるまで 50、80°C+湿度 20% に設定した恒温機（ESPEC LHU-114）に保管し、エアブラストで凍結を行った。

凍結・解凍後の食味評価、物性測定、ドリップ量測定を行った。

【結果】

乾燥処理を行うと、ドリップが減少し、目標品質に近い品質を再現できた

(表 13, 図 25)。

15%程度水分を減少させてから凍結を行うと、ドロップ率が目標品質である未凍結品とほぼ同じ数値となった。食味においてもドロップ感は改善され、食感が向上した(図 26)。

表 13. 50°C恒温乾燥における水分減少量ごとの食味評価

水分減少量 (%)	食味評価					ドロップ率 (%)
	かたさ	ドロップ	スポンジ	すじ	総評	
0 (チルド)	5	5	5	5	5	1.3
0 (エアブラスト)	6	1	1	1	1	14.8
10	4	3	2	1	2	2.9
15	5	4	2	1	2	1.8
20	4	5	2	1	2	1.1

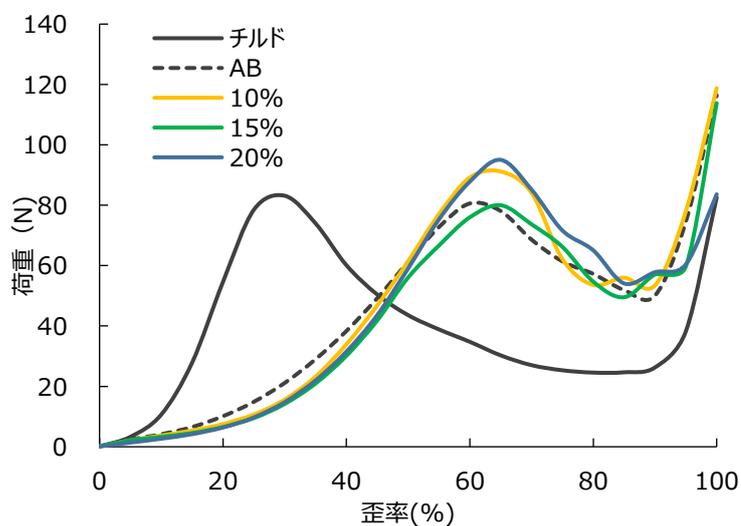


図 25. 50°C恒温乾燥における水分減少量ごとの荷重曲線

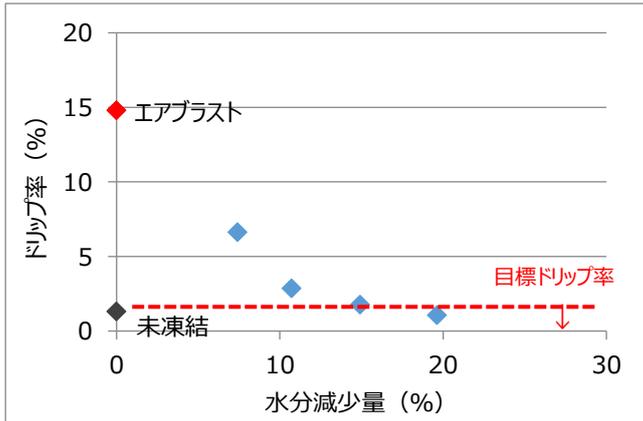


図 26. 50°C恒温乾燥における水分減少量ごとのドリップ率

80°Cの恒温機にて水分を15%程度減少させると、凍結解凍後も硬さの付与、ドリップ量の減少、スポンジ感の抑制ができた（表 14, 15）。

どの乾燥温度においても、水分減少量が15%のときもっとも食味が向上した。

乾燥温度による食感の違いは大きくは見られなかったが、温度が高いほどすじ感が抑制され、より食感のバランスが良くなった。

破断強度解析においても、15%程度水分を減少させると、未処理品よりもグラフの頂点が高く、硬いという結果であった（図 27, 28）。

表 14. 80°C恒温乾燥における水分減少量ごとの食味評価

茹で時間	水分減少量 (%)	食味評価				
		かたさ	ドリップ	スポンジ	すじ	総評
7分	0 (チルド)	5	5	5	5	5
3分	0 (エアブラスト)	3	3	3	2	2
	5	4	3	3	2	3
	10	4	4	4	2	3
	15	3	4	4	2	3

	20	3	4	2	1	2
7分	0 (エアブラスト)	1	3	2	4	1
	5	2	4	4	3	3
	10	3	4	4	3	3
	15	3	4	4	3	3
	20	3	3	3	2	2

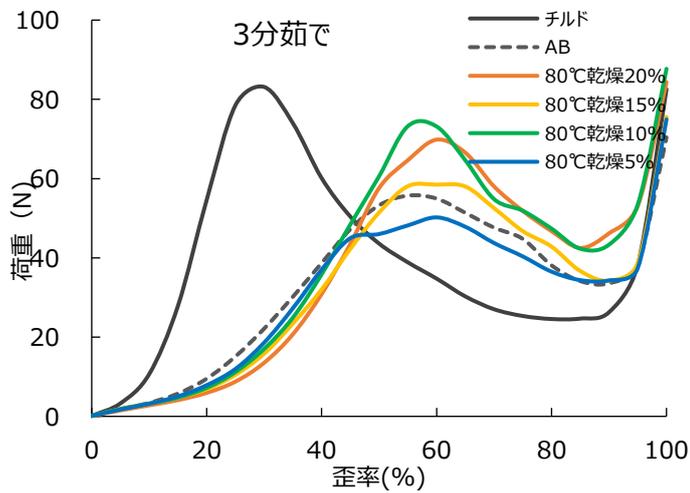


図 27. 80°C恒温乾燥における荷重曲線

表 15. 恒温乾燥における水分減少量ごとの食味評価と乾燥時間

	食味評価					乾燥時間 (分)
	かたさ	ドリッ プ	スポン ジ	すじ	総評	
チルド 7分茹 で	5	5	5	5	5	0
エアブラスト	4	1	2	2	2	0
10°C						

5%	4	2	2	1	2	57
10%	4	3	3	1	3	104
15%	4	4	4	1	3	190
20%	5	6	4	1	2	263
50°C						
5%	3	2	3	2	2	17
10%	3	3	3	2	3	27
15%	4	4	4	2	4	40
20%	5	6	4	1	2	68
80°C						
5%	3	2	3	2	2	11
10%	3	3	3	2	3	18
15%	3	4	4	2	4	29
20%	5	6	4	1	2	37

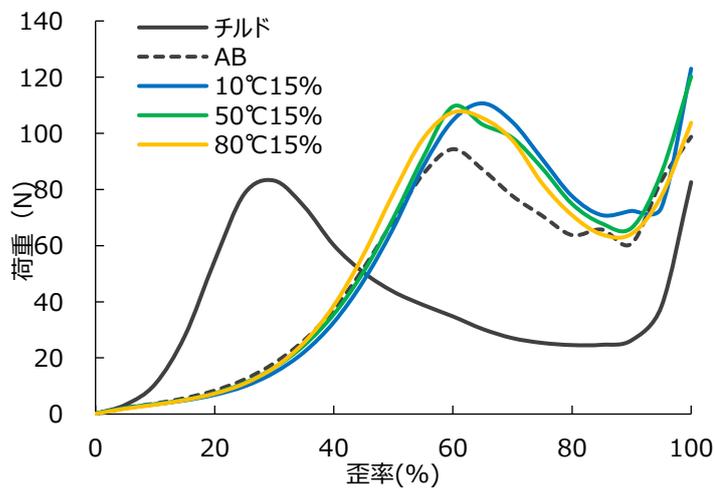


図 28. 恒温乾燥における乾燥温度ごとの荷重曲線

乾燥方法の検討

【方法】

ニンジン5分茹でた後、各乾燥方法を用いて15%水分を減少させ、エアブラストで凍結を行った。

- ・真空冷却機（ミウラ工業）にて乾燥
- ・スチームコンベクションオープン（フジマック）160℃、0%rhにて乾燥
- ・恒温機80℃（ESPEC）、20%rhにて乾燥
- ・電子レンジ（SHARP）200Wにて乾燥

【結果】

マイクロ波により水分を15%減少させることで、凍結解凍後も硬さの付与、ドリップ量の減少、スポンジ感の抑制ができた（表16）。

マイクロ波乾燥はすじ感についても未処理品と比較して多少改善が見られた。

クリープメータでは乾燥方法による物性の差が表せなかった（図29）。

乾燥をさせると見た目が悪化した（表17）。

	食味評価					乾燥時間（分）	
	かたさ	ドリップ	スポンジ	すじ	総評		
未凍結（目標品質）	5	5	5	5	5	0	
未処理	3	1	4	3	2	0	
乾燥方法	真空冷却	2	5	2	3	2	20
	オープン	4	5	3	1	2	3
	80℃恒温	4	5	4	2	3	23
	マイクロ波	4	5	4	3	4	1.4

表 16. 乾燥方法ごとの食味評価と乾燥時間

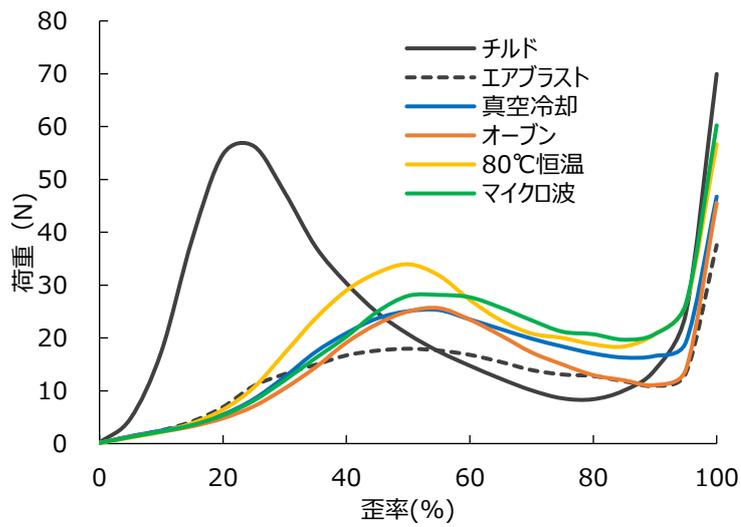


図 29. 乾燥方法ごとの荷重曲線

表 17. 見た目における課題

未処理	真空冷却	オープン
問題なし	表面が荒れてがさがさになっている	しなびてみえる
80°C恒温	マイクロ波	
表面から乾燥し、角が取れて丸みを帯びる	均一に乾燥し、中心がへこんでいる	

恒温乾燥では、表面から水分が蒸発し、中心部は水が多く含まれたままの不均一な乾燥であったが、マイクロ波乾燥は、全体的に均一に水分を減少させることが可能であり、食べた時の表面と内部の食感のばらつきが少なくなるため、品質が良いと感じられた。乾燥の均一さの差によってすじ感の改善への効果の差がうまれ、恒温乾燥よりもマイクロ波乾燥の方がよりよい食感になったと考えられる。

クリープメータで食感の差を表すためには、プランジャーやニンジンの形状の検討が必要である。

また、水分減少に伴って見た目におけるハリがなくなったため、見た目があまり気にならないような料理や形状を検討する必要がある。

【考察】

ニンジンの凍結前処理の効果について表 18 にまとめた。個々の技術では 5 つの課題すべてに改善がみられるものはなく、目標の品質に近づけることは難しいと判った。

その中でも、マイクロ波乾燥はすじ感以外の食感の課題に改善がみられ、目標品質に近い品質を実現できた。すじ感については、原因を究明するとともに、技術の組み合わせを検討してよりよい品質実現を目指していく。

表 18. 処理方法ごとの食感の改善度

	食感の課題			
	硬さ	ドリップ	スポンジ感	すじ感
凍結速度	(○)	(○)	(○)	(○)
加熱時間	○	×	×	○
Ca 処理	△	×	×	×
予加熱	○	×	×	×
pH 調整	○	×	×	×
糖浸漬	×	×	×	×

増粘剤浸漬	×	×	×	×
温風乾燥	○	○	○	×
マイクロ波乾燥	○	○	○	△

7. 総括

[冷凍パスタ]

本研究では、SPring-8(Super Photon ring-8 GeV)の放射光 X 線 CT 装置を用いて冷凍保存中の冷凍パスタの組織を観察した。その結果、冷凍パスタが置かれている環境下（非破壊・凍結状態）にて目的である冷凍パスタの組織の変化を捉えることができた。パスタの冷凍やけは表層で氷結晶が昇華することで組織が粗になることが原因であると推察する。頻度を高めて温度変化させて保管したサンプルは空隙の発生や水分消失などの品質変化の度合いが大きくなった。また、パスタの冷凍やけは、環境温度変化によって起こる表層の乾燥が大きく影響していることが確認できた。よって、冷凍パスタの品質向上を図るためには、冷凍パスタ保管中の環境温度変化の抑制や、パスタそのものが乾燥しにくい設計が必要であると考えられる。冷凍パスタの冷凍焼け抑制方法として、表面を物理的に覆うことで水分蒸発を抑制することが有効であると考えられたが、パスタ表面の覆った素材等を剥離させない技術開発が必要であることがわかった。今後は開発した簡易評価手法も活用しつつ、冷凍やけ抑制手法を検証し、冷凍パスタの品質向上に役立てていきたい。

[冷凍ニンジン]

冷凍野菜の中でも特に凍結・解凍時の品質劣化の大きいニンジンの品質劣化抑制について検討し、凍結方法(凍結速度)は液体窒素が最も品質が良いが、安全面やコスト面で製造上の課題があると考えられたので、前処理手法についても検討した。電子レンジ加熱で水分をとばし(乾燥させ)てから凍結すると、品質が良くなることがわかった。今後は、本手法を加工食品に適用し、品質の良い冷凍ニンジンを提供していきたい。