

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：32658

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K08023

研究課題名(和文) 青果物の脱水凍結および解凍への減圧過熱水蒸気の適用

研究課題名(英文) Application of superheated steam under reduced pressure for dehydrofreezing and thawing of vegetables

研究代表者

村松 良樹 (MURAMATSU, Yoshiki)

東京農業大学・地域環境科学部・教授

研究者番号：60328549

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)： ブランチングしたニンジンに脱水凍結(DF)を施した。減圧過熱水蒸気(SSRP)による解凍時間は空気解凍よりも短かった。DFにより試料のテクスチャーは改善された。また、DFにより復水後の試料表面の色が維持された。さらにSSRPによって解凍された脱水試料の硬度は、空気解凍されたよりも、生サンプルに近かった。その他、幾つかの野菜について、DFの影響を検討した。ニンジンのブランチング方法を比較した結果、SSRP加熱によるブランチングはニンジンのブランチングに適用できることが示唆された。また、幾つかの方法で冷凍鶏肉の解凍特性を調べた結果、SSRP加熱解凍が効果的な解凍方法の1つであることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

減圧過熱水蒸気は、通常100℃以下となるため、常圧の過熱水蒸気の利点も持ちつつ、熱感受性の強い食品の品質劣化を抑制できる可能性がある。減圧過熱水蒸気を用いた食品の乾燥に関する研究はいくつかある。しかし、乾燥以外の加工方法に減圧過熱水蒸気を適用した例はみあたらない。本研究では、減圧過熱水蒸気加熱法をブランチングや解凍処理に適用し、他の加熱方法・解凍方法とも比較して減圧過熱水蒸気加熱の優位性を検証した。また、減圧過熱水蒸気加熱法を組み合わせた青果物の脱水凍結に関する研究も行って、加工処理方法、条件と品質特性との関係を検証した。ここに本研究の学術的意義や特徴がある。

研究成果の概要(英文)： Superheated steam under reduced pressure (SSRP) was applied for the blanching and thawing. The blanched carrots were dehydrated, frozen, and thawed in several methods. The thawing time by the SSRP heating was shorter than that of air thawing. The dehydro-freezing (DF) treatment for the blanched vegetables improved the texture of the carrot. The DF treatment maintained the color of the sample's surface after the rehydration. The dehydrated sample thawed by the SSRP had closer hardness to the hardness of the raw sample than the hardness of the sample thawed by air. The effect of DF treatment on some vegetables was also examined. Three kinds of blanching methods were used in the experiments of the blanching of carrot. The results suggested that the blanching by the SSRP could be applied for the blanching of the carrot. Thawing of frozen chicken in several methods was examined. The results suggested that the SSRP thawing was one of the effective thawing methods for meat.

研究分野：ポスハーベスト工学

キーワード：減圧過熱水蒸気 ブランチング 脱水凍結 解凍 青果物

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

凍結貯蔵は長期間の貯蔵を可能にする方法の一つとして様々な場所で広く利用されている。乾燥も長期貯蔵を可能にし、貯蔵に要するコストが低いことが利点であるが、乾燥された農産物を本来の状態に戻すことは困難である。これに対し凍結は、貯蔵中にもエネルギーを必要とするが、最適な凍結や貯蔵、解凍が施されれば、食品本来の品質を維持することができる利点を持つ。

青果物をはじめとする多くの食品素材は多量の水分を含み、その水分は凍結することにより氷結晶になる。その際に体積が約 9%増加し、凍結中に組織内に生成した氷結晶は、細胞組織荷損傷を与える。そして、解凍時に壊れた細胞膜から水分とともに様々な栄養分がドリップとして流出し、食感や外観の悪化など様々な食品の品質劣化が生じてしまう。そのため、凍結貯蔵技術が発達した現在においても、農産物の冷凍は水産物や畜産物に比べて困難であることが多く、現在凍結状態で流通している農産物の種類や品質も充分とは言い難い。農産物の品質を維持する凍結貯蔵を行うには、凍結時に発生する細胞膜の損傷を最小限にすることが重要であり、そのためには組織内水分の凍結率を下げ、組織内に生成する氷結晶を少なくする必要がある。そこで、凍結前に脱水処理を行い、組織内の自由水含量を減少させた後で凍結することにより、氷結晶の生成を抑制でき、凍結時あるいは解凍時における細胞の損傷を防ぐことができると考えられる。この方法は脱水凍結(デハイドロフリージング)とよばれ、従来の冷凍技術と比較しても品質保持やコスト面において有効であると報告されている。しかし、脱水凍結の各過程(脱水、凍結、解凍)の方法や条件は様々で、技術として未確立の部分が多く、広く実用化がなされていない。これは最適脱水法が検証されていないことも要因である。そのため、各過程で最適化を図り、脱水凍結の優位性を示すことができれば、低コストで品質を保持できる新たな貯蔵技術が確立される。

ブランチングとは農産物を加熱することにより農産物内の諸酵素の働きを抑制することなどにより加工中や加工後の製品の品質劣化を防ぐことを目的に行われる処理である。凍結により酵素の働きは抑制できるが、凍結前処理としてブランチングを施せば、貯蔵安定性が一層向上することが期待できる。従来、ブランチング処理方法として熱湯浸漬処理が広く用いられている。この方法は簡便であるが、水溶性成分の逸脱が問題となる。特に熱感受性の強い成分を多く含んだ農産物のブランチングにおいて、低温かつ短時間で処理することができれば、有用成分の損失が抑えられる。そのため、最適なブランチング方法も検証することが必要となる。

過熱水蒸気は水の沸点よりも高温に加熱した水蒸気である。大気圧下では水を沸騰させると 100℃ の飽和水蒸気を得られるが、この飽和水蒸気をさらに二次加熱することで得られる 100℃ 以上の気体が過熱水蒸気である。過熱水蒸気による加熱処理は、低酸素状態で加工が可能であるので酸化されにくいという利点を持つ。また、輻射伝熱と対流伝熱により過熱水蒸気から食品に熱が伝えられるが、沸点以下の温度の食品原料を過熱水蒸気中に投入すると水蒸気は食品表面で凝縮して凝縮潜熱が食品に伝えられる。このように過熱水蒸気で加熱された食品は、はじめに凝縮水で覆われるが、表面が水で覆われている間は、大気圧下では過熱水蒸気の温度に関わらず食品表面温度は約 100℃ となる。水蒸気により加熱されて食品の温度が上昇してくると凝縮は止まり、食品から水分が蒸発するようになる。このような利点と特徴のある過熱水蒸気加熱は農業・食品産業を含む幅広い産業分野で利用されている。

前述のように過熱水蒸気は沸点より高温の水蒸気であるが、水の沸点は圧力に応じて変化する。通常の過熱水蒸気加熱では 100℃ 以上の水蒸気を利用されるが、圧力を下げれば 100℃ 以下の過熱水蒸気を得られる。このような過熱水蒸気を低温過熱水蒸気または減圧過熱水蒸気とよぶことがある。減圧過熱水蒸気は、通常 100℃ 以下となるため、常圧の過熱水蒸気の利点も持ちつつ、熱感受性の強い食品の品質劣化を抑制できる可能性がある。しかし、減圧過熱水蒸気加熱を食品加工に適用した例はほとんどない。

低コスト・低エネルギーで、本来の品質を保持できる新たな貯蔵技術が確立されれば、農産物の有効利用や将来への備蓄が可能となる。そのためには、凍結前処理や凍結解凍時における青果物の物理的特性や成分組成の変化を定性的かつ定量的に把握するとともに凍結前処理法、凍結・解凍方法と品質特性との関係を詳細に検討する必要があることから本研究を着想するに至った。

### 2. 研究の目的

本研究では、数種類の青果物を試料として用いて、脱水凍結処理を行った。脱水前のブランチングや解凍時に減圧過熱水蒸気加熱法を適用した。また、減圧過熱水蒸気加熱法を冷凍鶏肉の解凍にも適用した。本研究の主目的は 1)脱水凍結の優位性を示すこと、2)加熱処理に減圧過熱水蒸気を適用することの優位性や特徴を示すことである。

### 3. 研究の方法

#### (1)実験装置

試作した減圧過熱水蒸気加熱装置の概略を図 1 に示す。この装置は、蒸気発生部(石英炉心管、電気管状炉とその温度を制御するための温度コントローラー、供給水量を調節するための流量計と微小流量調節バルブ、および蒸留水)、加熱部(デシケーター、リボンヒーター、断熱材、デシケーター内部温度を制御するための温度コントローラー、供給蒸気量を調節するための微小流量調節バルブ)、減圧部(真空ポンプ、コールドトラップ、デシケーター内の圧力を調節するための圧力計と圧力調節バルブ)の 3 つの部分から成る。

減圧過熱水蒸気加熱の場合、真空ポンプの吸引力により電氣管状炉の内側に設置した石英炉心管（外径 50 mm、内径 46 mm、長さ 500mm）内に蒸留水を取り込み、蒸留水を電氣管状炉で加熱することで過熱水蒸気を作る。これを真空ポンプにより減圧状態にしたデシケーター（全高 239 mm、内径 145 mm、容積約 3 リットルのガラス製デシケーター、または外径 230 mm、高さ 280 mm のステンレス製円筒容器）内に取り込み、デシケーター周囲に貼付したリボンヒーターでデシケーター内の温度を制御する。デシケーター内に試料を置き、圧力と温度を制御した状態で過熱水蒸気により加熱する。この装置は常圧下での過熱水蒸気加熱も可能で、常圧の場合、真空ポンプは用いず、石英炉心管上部から蒸留水を管状炉内に取り込み、過熱水蒸気を作る。これを、送風ポンプを利用してデシケーター内に送り込む。

減圧過熱水蒸気加熱の場合、まず電氣管状炉とデシケーター内部の温度が設定温度になるように加熱する。設定温度に達したら試料をデシケーター内部に静置する。次に真空ポンプを稼働して圧力調節バルブによりデシケーター内部の圧力を設定圧力に調節する。デシケーター内の温度と圧力が設定値に達したら、流量調節バルブを開いて蒸留水を石英炉心管に取り込んで過熱水蒸気を作る。その過熱水蒸気をデシケーター内に供給し、温度と圧力を制御した状態で過熱水蒸気により試料を加熱する。

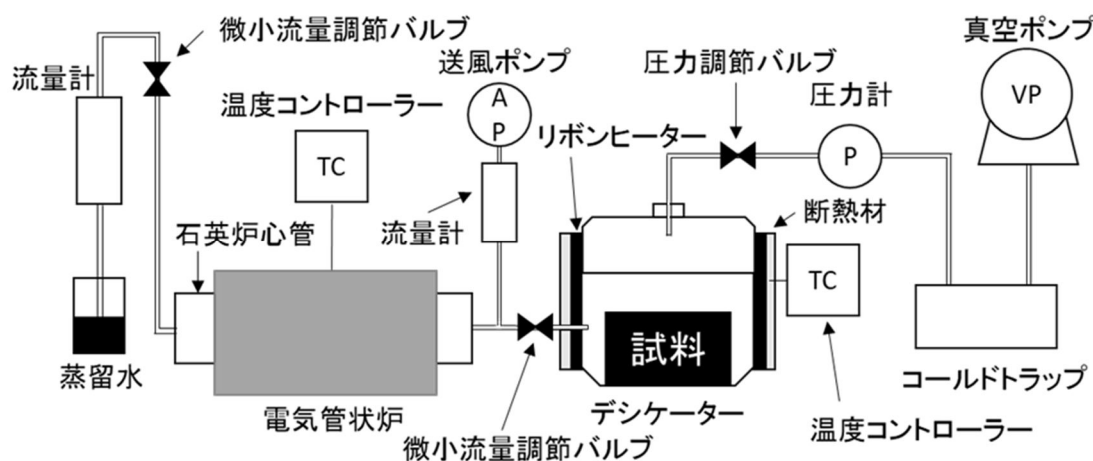


図1 減圧過熱水蒸気加熱装置の概略図

## (2)脱水凍結

ニンジンの脱水凍結に関しては、一辺 25 mm の立方体に成形したニンジンを試料として用いた。試料を熱湯浸漬により 2 分間ブランチングした。熱風乾燥により脱水を行った。生試料の水分に対し水分を 0, 10, 15 %減らし 3 段階の脱水を行った。これを密封包装し、5 のインキュベーターで 24 時間置き、水分を拡散させた。これを - 40 のエタノールに浸漬し、試料中心温度が - 20 に達するまで冷却した。実験には - 20 のフリーザーで 1 週間保管したニンジンを試料とした。解凍は空気解凍法 (20 )、減圧過熱水蒸気加熱解凍法 (60 , 10 kPa) の 2 方法で行った。いずれの解凍法も中心温度が 10 に達したときを解凍終了とした。これを 20 に温度コントロールしたウォーターバスの中で 300 分間復水した。試料はブランチングあり-脱水 (0, 10, 15 %) とブランチングなし-脱水 (0, 10, 15 %) を用意した。解凍過程における試料の温度変化を測定した。また脱水、復水中の質量を 30 分間隔で測定した。各処理前後に質量、色彩、カリウム、収縮率、テクスチャーおよび水分の測定を行った。その他、ズッキーニ、ダイコン、カットキャベツにも脱水凍結を試みた。

## (3)ブランチング

一辺 25 mm の立方体に成形したニンジンを試料として用いた。熱湯浸漬 (約 96 )、蒸し加熱 (約 100 ) および減圧過熱水蒸気加熱 (10, 30, 50, 70 kPa-90 ) により試料にブランチングを施した。ブランチング過程における試料の温度変化とペルオキシターゼ (POD) 活性の経時変化を測定した。また、ブランチング前後の試料の質量、色彩、硬度の変化および水溶性成分 (カリウムおよび L-アスコルビン酸) の含有量を測定した。

## (4)冷凍鶏肉の解凍

国産鶏ムネ肉を幅 50 mm × 長さ 50 mm × 厚み 20 ~ 30 mm に成形して包装した。これを - 40 のエタノールに浸漬し、試料中心温度が - 20 に達するまで冷却した。実験には - 20 のフリーザーで 1 週間保管した冷凍肉を試料とした。包装から取り出した試料を、空気解凍法 (20 , 湿度 50 %) と減圧過熱水蒸気加熱解凍法 (10 kPa, 60 ) により解凍した。いずれの解凍法も試料中心温度が 10 に達したとき解凍終了とした。解凍後、再び試料を密封包装し、75 の水の中に浸漬して加熱調理した。試料中心温度が 70 に達したとき調理終了とした。試料は、解凍のみ行うものと、解凍と調理を連続的に行うものを用意した。解凍、調理過程における試料の温度変化を測定した。また、各処理前後 (凍結、解凍、調理) に質量、色彩、保水性 (遠心分

離前後の質量比), pH, テクスチャーおよび水分の測定, 微細構造の観察を行った。

#### 4. 研究成果

(1) ニンジンの脱水凍結: 水蒸気解凍の解凍時間は空気解凍の約 1/10 に短縮された。脱水量が増えると解凍時間がより短縮された。脱水・復水を施すことでカリウム残存率が低下した。脱水量によって残存率は変わらなかった。また解凍法によって残存率にほとんど差はないが、ブランチングあり-0%では空気解凍に比べ水蒸気解凍の残存率が低くなっていた。これは水蒸気解凍の解凍ロスが多いことからモドリップとして成分が流出したと考えられる。ブランチングありの脱水 15%と 10%の復水後の水分は、水蒸気解凍ではそれぞれ 86.8%と 87.6%, 空気解凍では 85.5%, 86.9%であった。脱水 15%において、空気解凍より水蒸気解凍の方が復水速度が大きかった。復水速度が大きく復水後の水分が高いことから水蒸気解凍の方が空気解凍より復水性が優れていることがわかった。図 2 にブランチング後および復水後のテクスチャーを示す。図 2 より凍結・解凍することで最大荷重, 第二弾性率が低下した。脱水することにより水蒸気解凍では最大荷重の低下を抑制することができた。しかし, 空気解凍では脱水量の違いによる最大荷重に差は認められなかった。水蒸気解凍が空気解凍より最大荷重が小さいのは, 解凍中に試料が加熱処理されたためである。ブランチング-脱水 0%に比べ, 脱水を施した試料は第二弾性率の低下を抑制した。ブランチングなしの脱水 15%ではいずれの解凍法でも最大荷重と第二弾性率の低下を抑制できた。

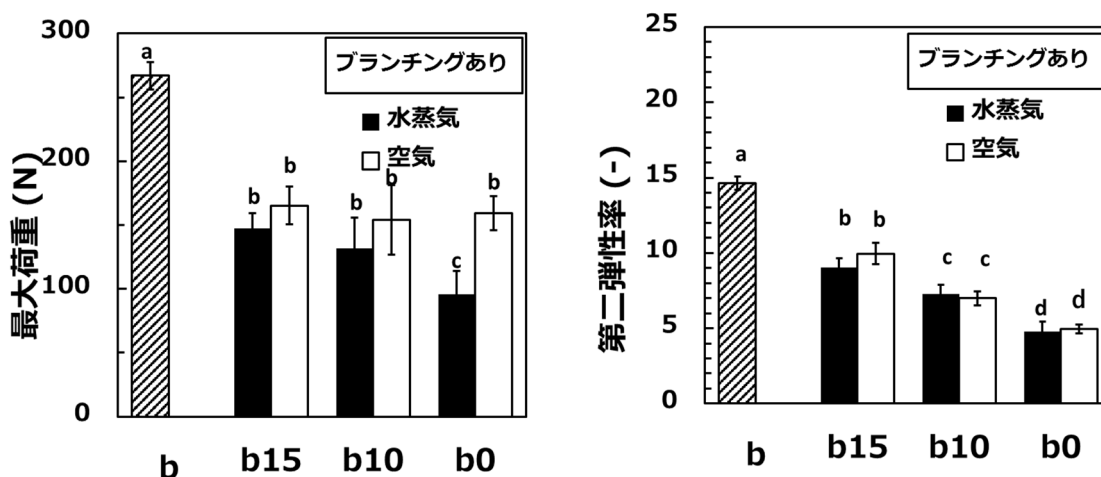


図 2 ブランチングした試料の復水後のテクスチャー

#### (2) ニンジンのブランチング:

減圧過熱水蒸気加熱より熱湯浸漬, 蒸し加熱の方が POD 残存率の減少が速かった。ブランチング終了時間は, 熱湯浸漬: 120 s, 蒸し加熱: 240 s 過熱水蒸気 (50 kPa, 90 ): 900 s であった。熱湯浸漬の質量損失率は他のブランチング法に比べ低かった。生試料に対する各処理後の水溶性成分の残存率を図 3 に示す。熱湯浸漬の場合は水に浸漬したため水溶性成分が溶出した。蒸し加熱および減圧過熱水蒸気加熱処理した試料の残存率は熱湯浸漬に比べ大きく, 水溶性成分の保持に有効であることがわかった。

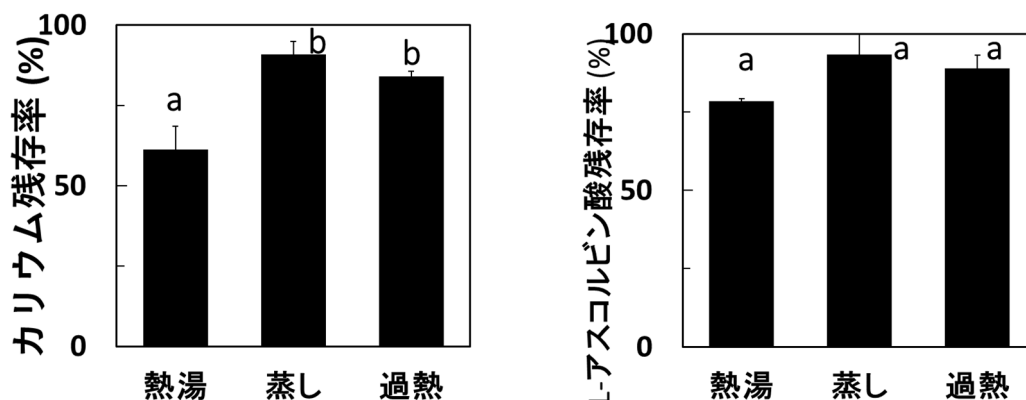


図 3 水溶性成分残存率

#### (3) 冷凍鶏肉の解凍

解凍時間は, 空気解凍では約 90 min, 減圧過熱水蒸気解凍では約 21 min であり, 減圧過熱水蒸気加熱解凍の解凍時間は空気解凍の約 1/4 に短縮された。減圧過熱水蒸気加熱解凍の解凍終

了時の試料表面温度は水の沸点（10 kPa, 45℃）付近まで上昇した。生試料と解凍後の試料表面の  $L^*$  と色差  $E$  は、空気解凍ではそれぞれ 0.18 と 2.4、減圧過熱水蒸気加熱解凍では -4.37 と 4.9 となった。減圧過熱水蒸気加熱解凍の  $L^*$  の値からタンパク質変性の可能性が示唆された。しかし、減圧過熱水蒸気加熱解凍の  $E$  の値は色の許容差の事例（日本電色工業株式会社）に従うと「等色とされる色の許容範囲（色差  $E$  : 3.2-6.5）」レベルであり、試料表面の変色はわずかであった。試料表面と中心の pH は、凍結前の生試料ではいずれも 6.1、空気解凍後ではいずれも 6.1、減圧過熱水蒸気加熱解凍後ではいずれも 5.9 であった。減圧過熱水蒸気加熱解凍後の pH の値は生試料と比べ低下していた。凍結、解凍中の pH の低下は、試料中のミネラルとプロテインが溶出することにより引き起こされたためと考えられる。調理後の表面と中心の保水性は空気解凍ではそれぞれ 73.58% と 76.89%、減圧過熱水蒸気加熱解凍では 74.68% と 76.34% であった。畜産物の調理後の保水性はジューシーさを表す指標として用いられており空気解凍と減圧過熱水蒸気加熱解凍は同等のジューシーさであることが示唆された。解凍後の最大荷重に解凍法による有意差は認められなかった。水蒸気解凍の X/Y 値（第二荷重/破断荷重）は空気解凍に比べ大きかった（表 1）。これは初期荷重と第二荷重の差が小さくなっており、空気解凍と比べ試料表面の組織構造が変化していることを示している。空気解凍と未処理に比べ、水蒸気解凍の調理後の最大荷重は大きくなった。しかし調理後の試料を食すと解凍法の違いによる硬さに差を感じなかった。解凍後および調理後の試料断面構造を、それぞれ図 4、5 に示す。

表 1 各処理後の最大荷重と X/Y 値

	解凍後		調理後	
	最大荷重 (N)	X/Y (%)	最大荷重 (N)	X/Y (%)
空気解凍	5.244±0.40 <sup>a</sup>	57.96±4.57 <sup>a</sup>	2.81±0.21 <sup>a</sup>	107.37±11.11 <sup>a</sup>
水蒸気解凍	5.241±0.32 <sup>a</sup>	72.36±3.67 <sup>b</sup>	4.32±0.52 <sup>b</sup>	94.74±7.97 <sup>a</sup>
未処理	—	—	3.01±0.15 <sup>a</sup>	106.58±5.95 <sup>a</sup>

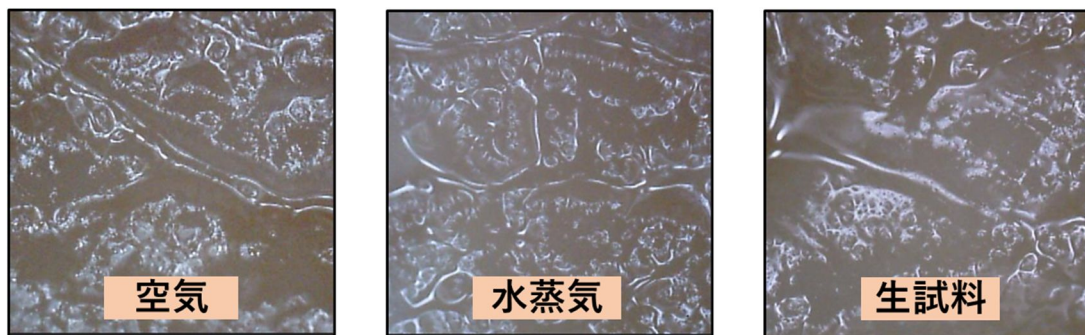


図 4 解凍後の試料断面

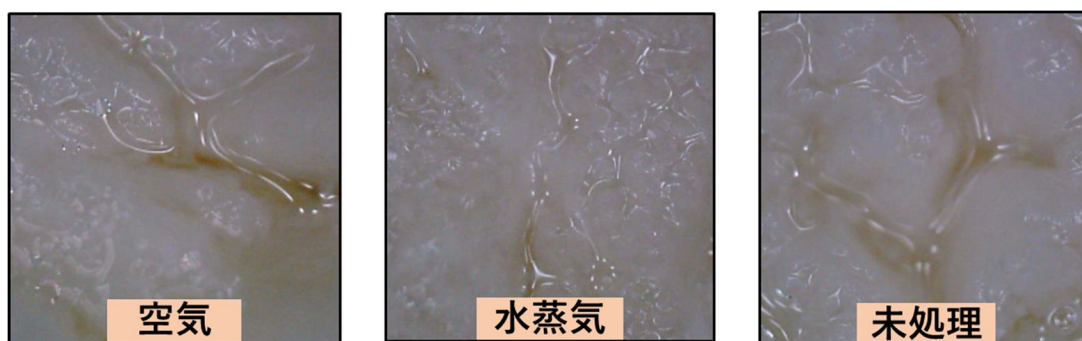


図 5 調理後の試料断面

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山本陽斗, 村松良樹, 坂口栄一郎, 川上昭太郎
2. 発表標題 減圧過熱水蒸気による鶏肉の解凍
3. 学会等名 美味技術学会第18回例会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本陽斗, 村松良樹, 坂口栄一郎, 川上昭太郎
2. 発表標題 脱水条件と解凍法が凍結野菜の品質に及ぼす影響
3. 学会等名 2019年農業施設学会 学生・若手研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本陽斗, 村松良樹, 一木綾乃, 坂口栄一郎, 川上昭太郎, 田川彰男
2. 発表標題 過熱水蒸気の食品加工への適用
3. 学会等名 第76回農業食料工学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 村松良樹
2. 発表標題 減圧過熱水蒸気の食品加工への適用
3. 学会等名 第22回テクノフェスタ（招待講演）
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 山本陽斗, 村松良樹, 坂口栄一郎, 川上昭太郎, 笹原由雅
2. 発表標題 鶏肉の解凍・調理特性に及ぼす解凍法の影響
3. 学会等名 日本食品科学工学会平成30年度関東支部大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 村松良樹, 山本陽斗, 橋口真宜, 坂口栄一郎, 川上昭太郎
2. 発表標題 減圧過熱水蒸気の食品加工への適用
3. 学会等名 第40回日本熱物性シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考