

調理モヤシの凍結条件と力学物性について

常門加奈* 宮脇長人* 李潤珠**† 鈴木徹**

* 東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科食機能保全科学専攻 (108-8477 東京都港区港南4-5-7)

** 東京海洋大学先端科学技術研究センターサラダサイエンス寄附講座 (108-8477 東京都港区港南4-5-7)

要約

食品中の水分が凍結するとその氷結晶の大きさによるダメージが発生する。既往研究において、凍結過程で偶発的に顕著な過冷却が生じる場合、微細かつ均質な構造を持った特徴的な氷結晶が生成したとの報告がある。本研究では試料のリュクトウモヤシをブランチング後の緩慢凍結で意図的に過冷却凍結させ、解凍後の復元性、氷結晶の大きさが及ぼす影響を調べた。その結果、ブランチング後雰囲気温度 -10°C での凍結は過冷却が起こりやすく、テクスチャーは未凍結と類似の傾向が得られた。

キーワード: 過冷却, 氷結晶, 凍結保存, 過冷却解消温度, テクスチャー, モヤシ

1. 緒言

野菜や果物などの青果物は凍結すると本来持つシャキシャキとした食感が失われてしまう。その原因は凍結時の氷結晶や濃縮による細胞膜組織の破壊とされている^{1)~7)}。産業の現場では高品質な冷凍食品を生産するため、急速凍結法がよく利用されている。しかし、未加熱の生鮮青果物などでは効果が見られないため、さらに微細な氷結晶を生成しダメージを抑制する凍結法が求められている。

過冷却状態にある水が凍結を開始すると、通常の凍結に比べて極めて急速に氷結晶が生成されることであり、この現象を食品に用いた研究が報告されている^{8)~13)}。先行研究により、冷却時に過冷却現象が伴う場合は、その冷却が緩慢であっても高品質な状態を作り出す可能性がある。しかし、青果物の細胞膜損傷由来の組織軟化は不可避であり、過冷却凍結後の品質の復元は難しいことが報告されている。植物組織の場合、過冷却凍結によっても細胞膜の損傷は免れないため、テクスチャーの軟化が生じると考えられる。さらに過冷却凍結では組織内の異なる場所で一斉に氷核が発生するが、この際の凍結濃縮理論による水分移動が組織毎に異なるダメージ

を与えている可能性がある。

よって、凍結条件によって氷結晶の微細化、発生場所が異なると、水分の移動を束縛する大きな構造体である表皮、あるいは維管束などへのダメージが異なる可能性がある。

本研究では、上記推察のもと、野菜の中では比較的強固な膜を持つモヤシに着目し、凍結条件がテクスチャーに与える影響を調べることにした。レタスなどの葉物野菜は茎や葉の部分によって組織構造や形状に大きく差があるが、モヤシは均一な組織構造を持ち個体差が小さいため、測定が容易でもある。日本では緑豆やブラックマッペ、大豆を種子とするモヤシが主に生産されている中でリュクトウモヤシは国内生産全体の約9割を占めているため本研究ではリュクトウモヤシを用いた。

2. 実験方法

2.1 実験試料およびブランチング条件

試料は量販店より購入したリュクトウモヤシを用いた。リュクトウモヤシ 50 g を直径 30 cm の蒸し器を用いて 120 秒ブランチング (100°C) し、キムタオル上で表面の水分を乾かした後実験に用いた。

2.2 凍結処理

未処理の生鮮モヤシを雰囲気温度 -10°C のディープフリーザー (Twinbird 社製 SC-DF25) に入れ過冷却凍結 (r-SC), ブランチング処理後のモヤシを, 雰囲気温度 -10°C のディープフリーザー (Twinbird 社製 SC-DF25) に入れ過冷却凍結 (b-SC), ブランチング処理後のモヤシを, -20°C に設定したディープフリーザー (Twinbird 社製 SC-DF25) に入れ緩慢凍結させた (b-S). また, ブランチング処理後のモヤシを -60°C ストッカー (TMsystem 製 Thermo Magic) で急速凍結も行った (b-Q).

2.3 温度測定

モヤシの両端をカッターで 4~5 cmの大きさに切断し, 中央部を使用した. その中央部の下から中心に熱電対を差し込み, データロガー (MCR-4TC, T&D Co., Ltd., Japan) を用いて凍結温度測定を行った (N=6).

2.4 テクスチャー測定 (曲げせん断試験)

テクスチャーアナライザー (Stable Micro Systems 製, TA.XTPlus) に Fig.1 の自作アタッチメントを取り付け使用した. 木片の間にフィルター (FT5-30) を敷き, モヤシをつぶさないように固定し中央にフックを引っ掛けて切断できるようにになっている. 試料は (r), (b), (b-SC), (b-S), (b-Q) の 5 条件で 24 時間凍結し 3 時間常温解凍後, 引張試験を各条件 10 本ずつ 3 回測定した. 引張速度は 2.0 mm/s である. 生

鮮状態のテクスチャー保持率をあらわす CI は下の式で求められる.

$$\text{Crispiness Index (CI, \%)} = (\text{多段階破壊曲線の本数} / \text{測定した本数}) \times 100$$

多段階破壊曲線とは, グラフに見られる 3 回以上段階的なピークを示す曲線であり, この曲線を持つ試料の本数が, 全試料本数に占める割合を CI とした. この CI を用いてモヤシのテクスチャーを評価した.

2.5 組織観察

ブランチング処理後のモヤシを, 雰囲気温度 -10°C のディープフリーザー (Twinbird 社製 SC-DF25) に一晩入れ過冷却凍結した試料 (b-SC) と, 対照としてブランチング処理後のモヤシを -60°C ストッカー (TMsystem 製 Thermo Magic) に一晩入れ急速凍結した試料 (b-Q) を, 凍結乾燥機 (共和真空技術株式会社製 RLE-52) を用いて -20°C ~ $+40^{\circ}\text{C}$ まで 3 日間かけてフリーズドライさせた. 乾燥させた試料を 5mm の大きさに, モヤシの軸に対して垂直方向に切断し, その後 X線CT (Bruker 社 Sky scan 1172) を用いてスキャンした. 垂直縦方向の断面を撮影し, CCD カメラは $4.9\mu\text{m}$ のピクセルサイズを用いて撮影した. スキャン後, 合成ソフトウェア (NRecon Skyscan) を用いて再合成し観察した¹³⁾¹⁵⁾.

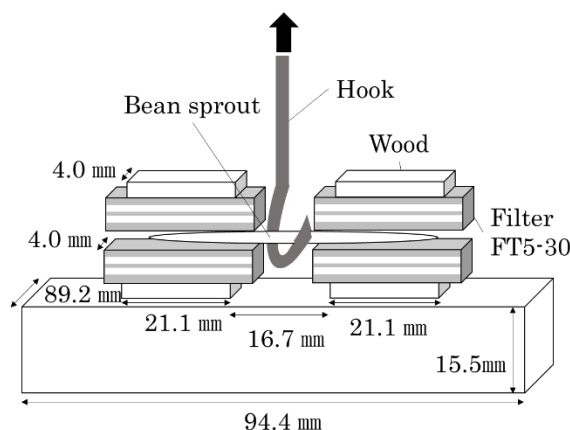


Fig. 1 Attachment for bending shear test of mung bean sprouts.

3. 実験結果

3.1 凍結温度履歴

凍結温度測定結果を Fig.2 に示す. 代表的な凍結曲線のみを示す. r-SC では測定した 6 本の平均解除温度は -2°C と深い過冷却は起きず, b-SC では平均解除温度 -7.7°C と深く過冷却した. r-SC と b-SC の比較より, ブランチングを行うことで過冷却が発生しやすくなり, より低い温度で過冷却解除が起きることが確認できた. これはブランチングを行うことによって, モヤシの構造体が軟化し, 膜の透過性が上がり, 氷核の多発生を促したからだと考えられる¹¹⁶⁾. b-SC は -8.3°C まで深く過冷却した後解除が起き, 他の条件と比べてより低い温度で過冷却解除が起きていることから, より微細な氷結晶ができていると考えられる. b-Q から, 急速凍結では過冷却はわずかに起こるものの高い温度ですぐに解除が起きることが確認された.

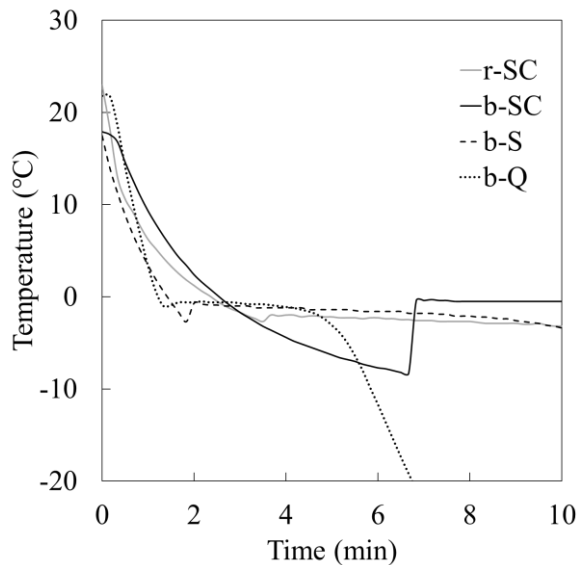


Fig. 2 Temperature profiles of mung bean sprouts by various treatments (r-SC: Supercooled freezing of raw mung bean sprout; b-SC: Supercooled freezing of blanched mung bean sprout; b-S: slow freezing of blanched mung bean sprout; b-Q: Quick freezing of blanched mung bean sprout).

3.2 テクスチャー測定 (曲げせん断試験) 結果

テクスチャー測定結果のグラフを Fig.3 に示す. 代表的な測定結果(10 回分)を示す. この図は上断面積一定として算出し, 引っ張った距離 (断面移動面積) = 引張速度 \times 時間を示した. そのため弾性率は傾きで表される. グラフの立ち上がりから, 初期弾性率が生鮮試料では大きく, 凍結解凍試料では小さいことがわかり, また, 生鮮試料では上に凸, 凍結解凍試料では下に凸の曲線を示すことがわかった. 生鮮試料では初期弾性率は大きく, 徐々に小さくなっていくのに対し, 凍結解凍試料では, 初期弾性率は小さく, 徐々に大きくなっていく. また, 破断に至るまでの曲げせん断歪と曲げせん断応力は凍結解凍試料が生鮮試料よりも高い値を示す傾向が見られた. さらに, 破断時に生鮮試料で多く見られる多段階破壊曲線は, 生鮮モヤシの新鮮なテクスチャーに関係あるものと思われ, モヤシの硬さを示す指標として, CI を用いた. 生鮮 (r), ブランチングのみ (b), ブランチング後過冷却凍結 (b-SC), -20°C 緩慢凍結 (b-S), -60°C 急速凍結 (b-Q) の平均の CI を求め Fig. 4 に示す. 凍結条件の中で, 試料 (b-SC) が 70% と明確に高い値を示しており, ブランチングのみ (b) 試料の 76% に近い値を示しており, テクスチャーが保持されていると考えられる.

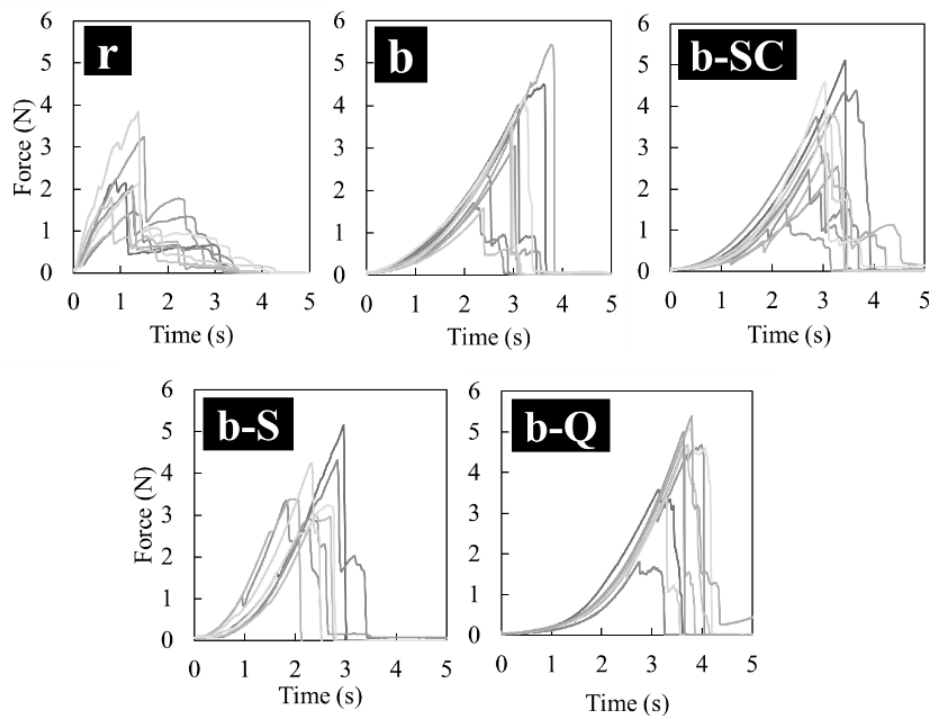


Fig. 3 Bending shear test of mung bean sprouts by various treatments (r: Raw mung bean sprouts; b: Blanched mung bean sprouts without freezing; b-SC: Supercooled freezing of blanched mung bean sprouts; b-S: Slow freezing of blanched mung bean sprouts; b-Q: Quick freezing of blanched mung bean sprouts).

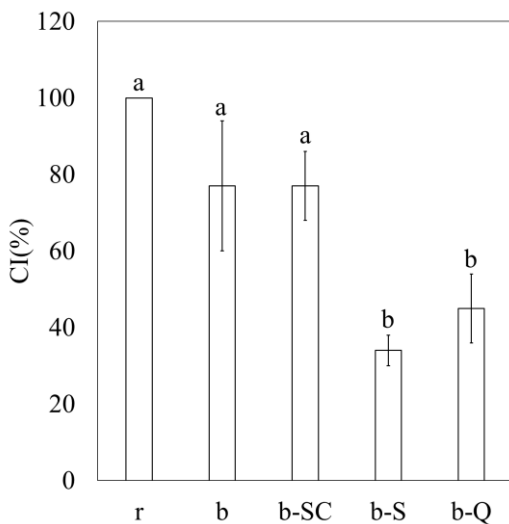


Fig. 4 Crispiness index for mung bean sprouts by various treatments (r: Raw mung bean sprouts; b: Blanched mung bean sprouts without freezing; b-SC: Supercooled freezing of blanched mung bean sprouts; b-S: Slow freezing of blanched mung bean sprouts; b-Q: Quick freezing of blanched mung bean sprouts).

3.3 組織観察結果

過冷却凍結したモヤシ (b-SC) のCT画像を Fig.5Aに、急速凍結したモヤシ (b-Q) のCT画像を Fig.5Bに示す。Fig.5Aでは小さい氷結晶跡がみられ、Fig.5Bでは大きな氷結晶跡がみられた。みえる白線は細胞壁を含む構造体であると考えられ、表皮部分において緻密な構造がみえる。過冷却モヤシ表面側の細かい細胞壁がテクスチャー測定の際力がかかったときの歪が小さくなるため、モヤシが変形して伸びることなく裂けて多段階に切れると考えられる。一方、急速凍結したモヤシの表面の大きい組織構造が観察され、テクスチャー測定では、歪が大きくなるため、モヤシが伸びて最終的に破断に至ると考えられる。この破断が、凍結解凍後のモヤシの咀嚼時の噛み切りにくく、繊維が口の中に残ってしまい不味いと感じる原因であると考えられる。

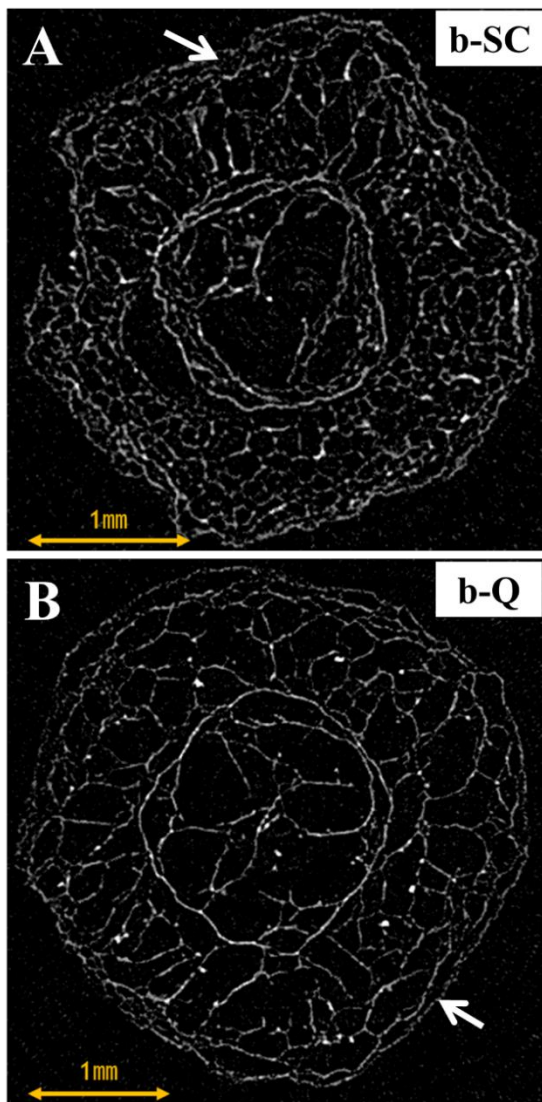


Fig. 5 X-ray computed tomography (CT) image of (A) supercooled freezing of blanched mung bean sprouts (b-SC) and (B) quick freezing of blanched mung bean sprout (b-Q) (The arrows exhibit the structure of the epidermal tissue).

4. 総括

本実験の結果より、ブランチング処理後雰囲気温度 -10°C に保つことで、過冷却を経て凍結し、解凍後もブランチング処理のみの試料と同等のテクスチャーが確かめられた。テクスチャー測定と組織観察の結果から、凍結前のブランチングによって、組織や表皮の柔軟性をもたらし、膜の透過性を上げ氷核発生を促進することによ

て、深い過冷却が発生したと考えられる。この操作によって解凍後のテクスチャー復元が可能になった。同じ植物素材のイチゴの過冷却凍結で¹⁴⁾、テクスチャーが復元できなかったのは、イチゴの表皮にはモヤシの表皮のような強固な構造体が存在せず、過冷却によって多発生した氷核の影響を組織が直接的に受けたためであると考えられる。

過冷却凍結を行うことで物的には高品質で凍結できることがわかったが、ビタミンなどの栄養成分の変化など明らかになっていない点が多々あり、今後もさらなる研究が望まれる。また、モヤシ以外の植物性素材にもこの凍結法が有効であるのか確かめる必要がある。

References

- 1) Fennema, O.R., "Low-temperature Preservation of Food and Living Matter", 1973, Marcel Dekker, INC., New York, pp. 160-161.
- 2) Burke, M.J., Gusta, L.V., Quamme, H.A., Weiser, C.J. and Li, P.H., Freezing and Injury in Plants, *Annual Review Plant Physiology*, 1976, **27**, pp. 507-528.
- 3) Steponkus, P.L., Role of Plasma Membrane in Freezing Injury and Cold Acclimation, *Annual Review Plant Physiology*, 1984, **35**, pp. 534-584.
- 4) Ishikawa, E., Miyawaki, O. and Nakamura, K., Water permeability of Plasma Membranes of Cultured Rice, Grape, and CH27 cells Measured Dielectrically, *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 1997, **61**, pp. 1826-1830.
- 5) Ando, H., Fukuoka, M., Miyawaki, O., Watanabe, M. and Suzuki, T., PFG-NMR Study for Evaluation of Freezing Damage in Onion Tissue, *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2009, **73**, pp. 1257-1261.
- 6) Virgin, H., A New Method for the Determination of the Turgor of Plant Tissues, *Physiologia Plantarum*, 1955, **8**, pp. 954-962.
- 7) Fennema, O.R., Powrie, W.D. and Marth, E.H., "Low-Temperature Preservation of Foods and Living Matter" 1973, Marcel Dekker, INC., New York, pp. 352-385.
- 8) Chevalier, D., Le Bail, A. and Ghoul, M., Freezing and Ice Crystals Formed in a Cylindrical Food Model: part I. Freezing at atmospheric pressure, *Journal of Food Engineering*, 2000, **46**(4), pp. 277-285.
- 9) Miyawaki, O. and Yano, T., Effect of Water State on Freezing and Ice Crystal Formation in Food, *Japanese Journal of Freezing and Drying*, 1985, **31**, pp. 24-26. (in Japanese)
- 10) Miyawaki, O., Abe, T. and Yano, T., Freezing and Ice

- Structure Formed in Protein Gels, *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 1992, **56**, pp. 953-957.
- 11) Simoyamada, M., Tomatsu, K. and Watanabe, K., Effect of Precooling Step on Formation of Soymilk Freeze-Gel, *Food science and technology research*, 1999, **5**, pp. 284-288.
 - 12) Sanguansri, C. and Nutsuda, P., Undercooling Associated with Slow Freezing and Properties of Rice Starch Gels, *Journal of Food Engineering*, 2010, **100**(2), pp. 310-314.
 - 13) Kobayashi, R., Kimizuka, N., Watanabe, M. and Suzuki, T., The Effect of Supercooling on Ice Structure in Tuna Meat Observed by Using X-ray Computed Tomography, *International Journal of Refrigeration*, 2015, **60**, pp. 270-277.
 - 14) Kobayashi, R. and Suzuki, T., Effect of Supercooling Accompanying the Freezing Process on Ice Crystals and the Quality of Frozen Strawberry Tissue, *International Journal of Refrigeration*, 2019, **99**, pp. 94-100.
 - 15) Mousavi, R., Miri, T., Cox, P.W. and Fryer, P.J., A novel technique for ice crystal visualization in frozen solids using X-ray micro-computed tomography, *Journal of Food Science*, 2005, **70**, pp. e437-e442.
 - 16) Kobayashi, R., Kanesaka, N., Watanabe, M. and Suzuki, T., Effect of the Breaking Temperature of Supercooling on Ice Characteristics and Drip Loss of Foods in Supercooled Freezing Method, *Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers*, 2014, **31**(3), pp. 297-303. (in Japanese)

Effect of Freezing on Physical Properties of Blanched Mung Bean Sprout

Kana JODO*

Osato MIYAWAKI*

Younju LEE**†

Toru SUZUKI**

*Department of Food Science and Technology, Graduate School of Tokyo University of Marine Science and Technology
(4-5-7 Konan, Minato-ku, Tokyo, 108-8477)

**Salad Science (Endowed Laboratory), Research Center for Advanced Science and Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology
(4-5-7 Konan, Minato-ku, Tokyo, 108-8477)

Summary

When moisture in food freezes, the growth of ice crystals caused damage to food structure. It was reported that the fine and homogeneous ice crystals could be formed when accidental supercooling during freezing. In this study, a sample of mung bean sprout was intentionally supercooled and frozen by slow freezing after blanching. The effects of the freezing conditions on mung bean sprout after thawing and the size of ice crystals were investigated. As a result, the freezing in still air at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ after blanching was easy to occur supercooling of mung bean sprout, and the textural property of thawed mung bean sprout was similar to unfrozen sample.

Keywords: Supercooling, Ice crystal, Breaking temperature of supercooling, Texture, Bean sprout