

生鮮野菜に対する浸透圧脱水凍結法の効果の検討

安藤 寛子*¹・渡辺 学*²・大下 誠一*¹・鈴木 徹*²§

* 1 東京大学大学院農学生命科学研究科

* 2 東京海洋大学海洋科学部食品生産学科

Effect on Osmotic Dehydrofreezing on Fresh Vegetable Tissue

ANDO Hiroko*¹, WATANABE Manabu*², OSHITA Seiichi*¹ and SUZUKI Toru*²§

* 1 Graduate of Agriculture and Life Science, The University of Tokyo,
1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657

* 2 Department of Food Science and Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology,
4-5-7, Kounan, Minato-ku, Tokyo 108-8477

Osmotic dehydrofreezing has been proposed as an excellent freezing technique for fresh vegetables because the texture after freezing-thawing can be kept in better condition. However, this mechanism has not yet been clearly understood. Thus we investigated in detail the osmotic dehydrofreezing mechanism through comparative measurements of water permeability using PFG-NMR (Pulsed field gradient Nuclear magnetic resonance) spectroscopy and of texture using texture analyzer for carrot and onion tissues before and after freezing. In particular, texture was evaluated using two parameters, namely fracture stress and instantaneous elasticity, related to the strengths of the cell wall and cell membrane in the tissues, respectively. The results suggested that although the strength of the cell wall of cells in the carrot and onion tissues was maintained by osmotic dehydrofreezing, the elasticity in texture and the water permeability due to the damage of the cell membrane markedly changed. Moreover, from this study it was found that some damage was inflicted on the cell membrane by only osmotic dehydration without freezing. In conclusion, it can be said that the osmotic dehydrofreezing technique is suitable for protecting the cell "wall", but cannot maintain the texture of the tissue the same as that of fresh tissue owing the damage to cell membrane.

(Received Feb. 20, 2008 ; Accepted Jun. 9, 2008)

Key words : *osmotic dehydrofreezing, water permeability, texture, NMR, vegetable*

浸透圧脱水凍結, 水透過係数, テクスチャー, NMR, 野菜

生鮮野菜組織は凍結によってダメージを受け、品質が低下してしまう。特に、凍結・解凍後の組織軟化は著しく、独特の“シャキッ”とした食感が大きく変化する。このような野菜組織の凍結・解凍後の軟化は、顕微鏡観察^{1),2)}、テクスチャーの測定^{3)~5)}・ドリップ量測定^{6),7)}など行われてきたが、その原因は未だ明確に示されていない。しかし、近年、生鮮植物のプロトプラストを使った研究により、生鮮組織の細胞膜は水透過性が低く^{8)~10)}、凍結・解凍後に細胞膜の水透過性が変化してしまうことが明らかにされた¹¹⁾。また、粘弾性の測定によって、凍結・解凍後の細胞膜の水透過性の変化と組織テクスチャーの変化に関連性があることが示唆されている¹²⁾。これら既

往の研究結果を踏まえ、これまで私たちは、生鮮野菜組織の凍結・解凍後の軟化メカニズムの解明を目的に、細胞膜の水透過性の変化を非破壊で測定する方法を模索してきた。その結果、PFG-NMR (Plus Filed Gradient Nuclear Magnetic Resonance) による組織内の水の拡散係数の測定と光学顕微鏡による組織構造の観察を合わせて行うことで、凍結・解凍後の細胞膜の水透過性の変化を組織状態で定量的に評価する方法を見いだした^{13),14)}。

生鮮野菜は、動物性の食品よりも多く水分を含むため、凍結による氷結晶生成に伴い、組織が著しいダメージを受ける。特に、激しい細胞膜の損傷によって生鮮野菜組織独特のテクスチャーは失われてしまう。そのため、予

* 1 〒113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1

* 2 〒108-8477 東京都港区港南 4-5-7

§ 連絡先 (Corresponding author) E-mail : toru@kaiyodai.ac.jp

め凍結可能な水分を減らす脱水凍結^{15),16)}は、組織への凍結ダメージを軽減させ、解凍後の農産物の品質を向上させる有効な方法であると考えられてきた^{17),18)}。脱水の方法にはエアードライのような乾燥法^{19)~21)}が使用されてきたが、急激な水分移動により細胞膜が損傷を受けるとされ、近年では浸透圧を利用した浸透圧脱水凍結法の研究が盛んに行われている^{15),22)}。この浸透圧脱水凍結法は、すでに、リンゴ²¹⁾、キュウイ¹⁵⁾、パパイヤ⁷⁾、ニンジン⁴⁾、ブロッコリー⁴⁾など多くの生鮮農産物で検討され、レオメータ測定により凍結・解凍後のテクスチャーの保持効果¹⁵⁾が観測されている。しかし、必ずしもすべての農産物に効果があるわけではなく⁴⁾、物理的な測定ではテクスチャー保持の効果が観測された農産物においても、官能検査^{3),15)}ではその効果が認められないなど、浸透圧脱水凍結法の効果やそのメカニズムはまだ不明な点が多い。

そこで、本研究では浸透圧脱水凍結法のテクスチャー保持効果を明らかにするために、PFG-NMRを用いた細胞膜の水透過性の測定とレオメータを用いたテクスチャーの測定より、詳細に検討することを目的とした。特に、テクスチャーは、これまでよく評価されてきた破断強度と共に初期弾性値を検討することで、細胞壁と細胞膜の2つの側面から検討された。試料には、冷凍保存に関する実験でよく使用されるニンジン組織と、生物学的な実験でよく使用されるタマネギ組織を用いることとした。

試料と実験方法

1. 試料の調製

北海道産ニンジン (*Daucus carota* L.) と、北海道産タマネギ (*Allium cepa* L.) を購入後、ニンジンは、中心部と外皮を切除し、約1cm角に、タマネギは0.5cm幅のスライスに切り出し、生鮮試料とした。切り出した生鮮試料を、下記の様に処理し、凍結・解凍後試料、浸透圧脱水凍結後試料を調製した。

(1) 凍結・解凍処理 -18℃雰囲気温度の冷凍庫に1週間入れ、凍結後、室温で解凍した。

(2) 浸透圧脱水凍結処理⁹⁾ 切り出した生鮮組織を50% (W/W) スクロース水溶液に5時間浸漬・脱水した。これを、-18℃雰囲気温度の冷凍庫に1週間静置した。その後、各試料を室温 (25℃) で1時間解凍し、0.9% (W/W) NaCl水溶液に5時間浸漬し、復水した。ただし、脱水および復水は約10℃で攪拌・振動させながら行った。

2. 実験方法

(1) PFG-NMRを用いた水透過係数の測定 NMR装置はパルス磁場勾配アクセサリを装着したBrukerAM200WB (4.7Tesla) を使用した。パルスシーケンスは、3つの90°RFパルスを組み合わせたStimulated echo法を用いた。1回目の90°パルスの直後と3回目の90°パルスの直後にそれぞれ磁場勾配強度 g

[Gauss/cm]、パルス幅 δ [ms] の磁場勾配パルスを挿入した。2つの磁場勾配パルスの間隔 Δ [ms] が、拡散観測時間である。 δ と Δ を一定に保ちながら磁場勾配強度 (g) を変化させエコーシグナルを観察すると、シグナル強度 E は式 (1) に従って減衰する。

$$E = \exp \left[-D (\gamma \delta g)^2 \left(\Delta - \frac{\delta}{3} \right) \right] \dots \dots \dots (1)$$

ここで γ は水素原子¹Hの磁気回転比で4258Hz/Gaussである。 $(\gamma \delta g)^2 (\Delta - \delta/3)$ に対して $\ln(E)$ をプロットして得られる直線の傾きから拡散観測時間 Δ における見かけの拡散係数 D [cm²/s] を求めた。本研究では、拡散観測時間 (Δ) を19.5~1,210msの範囲とし、磁場勾配強度 g を3.0~37.8Gauss/cm、測定温度は約20℃で測定を行った。PFG-NMR測定より得られた拡散係数を基に、細胞膜水透過係数 P [m/s] の算出を行った^{13),14)}。詳しい計算方法に関しては参考文献13)と14)を参照されたい。

(2) テクスチャーの測定 レオメータ (RE-3305, Yamaden Co., LTD., Tokyo, Japan) を用い、試料に一定の変形を与えたときの応力の時間的変化を記録計 (DR 1100, Yamaden Co., LTD., Tokyo, Japan) のチャート紙に記録して応力を求めた。本研究では、クサビ形プランジャー (Fig.1) を用い、感受電圧は50mV~2,000mV、変形量を最大50%までとし、プランジャー押し込み速度は1mm/secとした。また、測定は室温にて行った。測定より得られた応力-ひずみ曲線を用いて、破断強度と初期弾性値を求めた。本研究では、プランジャーを試料の厚さの50%まで押し込む途中に、組織が破断を起こすことを確認しており、生じるピークの試料面積あたりの応力を破断強度 [N/m²] とした。また、応力-ひずみ曲線より得られたひずみが限りなくゼロに近いときの傾きを初期弾性値 [N/m²] とした。

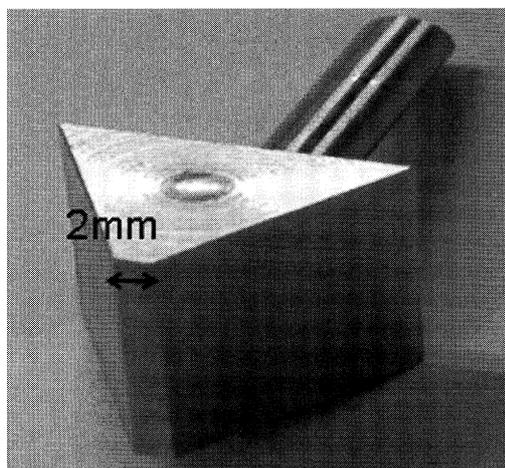


Fig.1 Wedge-shaped plunger for measuring vegetable texture

結果と考察

1. 組織体における細胞膜水透過性の評価

PFG-NMRによる拡散係数の測定の結果をFig. 2に示した。既往の研究において、PFG-NMRによる拡散係数の測定では、細胞などの閉鎖的系で、拡散観測時間の増加に伴って見かけの拡散係数が減少する制限拡散現象が観察されている²³⁾。本研究においても、生鮮ニンジン・タマネギ両組織 (■) に典型的な制限拡散現象が観測された。一方、凍結・解凍後の組織 (□) では、拡散観測時間が増加しても見かけの拡散係数の変化は小さく、制限拡散現象が弱まることが確認された。さらに、浸透圧脱水凍結後の組織 (△) においても、凍結・解凍後の組織と同程度、制限拡散現象が弱まること示された。これまでにも私たちは、凍結・解凍後の生鮮野菜組織の変化を制限拡散現象の観察より検討してきた。その結果、本研究同様、凍結・解凍後の組織では制限拡散現象が観測されにくくなることを確認している。また、この制限拡散程度の変化は、組織内の細胞膜の変化に関係していることを明らかにしている¹³⁾。これらの結果を考慮すると、凍結・解凍後の細胞膜の変化を防ぐと考えられてきた浸透圧脱水凍結法においても、細胞膜の変化を防ぐことができないと考えられる。

PFG-NMR測定によって得られた拡散係数と光学顕微鏡観察より得られる細胞サイズを用いることで細胞膜の水透過係数の算出が可能であり¹⁴⁾、本研究においても、この手法を用いて水透過係数の算出を行った。その結果をFig. 3に示した。生鮮状態の細胞膜の水透過係数は、ニンジン組織で 1.1×10^{-5} m/s、タマネギ組織で 0.6×10^{-5} m/sであった。既往の研究によって植物の細胞膜の水透過係数は約 $1 \times 10^{-5} \sim 10^{-6}$ m/s^{24), 25)}であることが示されており、本測定で得られた水透過係数もこの範囲にあった。一方、無処理で凍結・解凍を行った組織の細胞膜の水透過係数は、ニンジン組織で 10.6×10^{-5} m/s、タマネギ組織で 2.8×10^{-5} m/sであり、生鮮組織と比較して、水透過性が著しく増大することがわかった。そして、浸透圧脱水凍結後の水透過係数は、ニンジン・タマネギ組織共に 6.2×10^{-5} m/sであった。浸透圧脱水凍結法の効果を組織別にみても、ニンジン組織では、水透過性の増大を若干抑えるものの、タマネギ組織では、浸透圧脱水凍結においても水透過性は著しく増大しており、水透過係数から検討しても浸透圧脱水凍結法の効果はみられなかった。従来、浸透圧脱水凍結法は、細胞膜に対する凍結ダメージを和らげると考えられてきた。実際、誘電率測定において、細胞膜が存在することで観測されるCole-Coleの円は、凍結・解凍処理によって消失するが、浸透圧脱水凍結法を施すことで凍結・解凍後も小さいながら観察されることが報告されている⁴⁾。本研究はNMRを用いた測定であり、組織内の細胞膜の平均的な水透過性を評価しているといえる。そのため、誘電率測定のよ

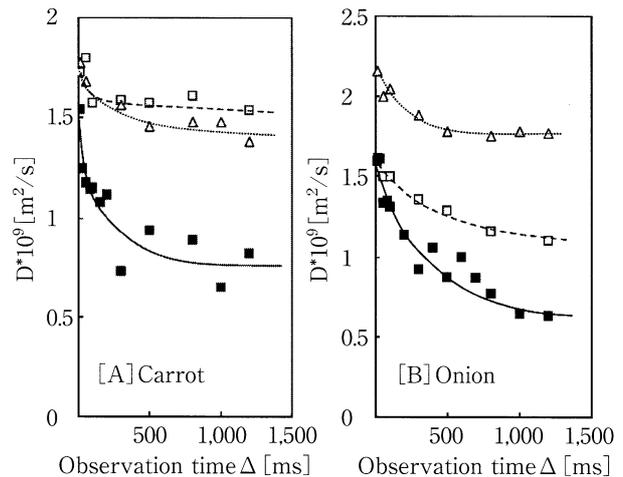


Fig. 2 Comparison of restricted diffusion phenomenon between [A] carrot and [B] onion tissues before and after freezing-thawing by PFG-NMR spectroscopy

■ : Control (fresh tissue) □ : Frozen
△ : osmotic dehydrated

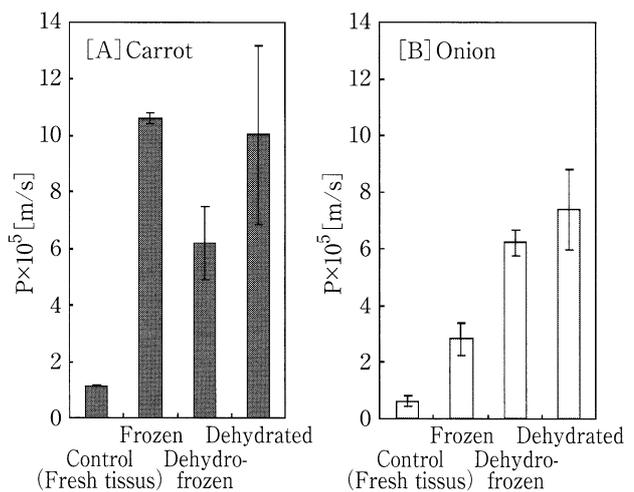


Fig. 3 Water permeabilities of [A] carrot and [B] onion tissues before and after freezing-thawing

うに微量の健全な水透過性をもつ細胞膜を識別することができなかったと考えられる。しかし、本研究の結果は浸透圧脱水凍結法において、組織内のほとんどの細胞膜の水透過性が増大してしまったことを示していると考えられ、浸透圧脱水凍結法には細胞膜に対する凍結ダメージを和らげる効果がほとんどないことが推察された。

ニンジン組織とタマネギ組織を比較した場合、浸透圧脱水凍結法の効果に差がみられた。ニンジン組織では細胞膜水透過性の変化を若干防いでいるものの、タマネギ組織では無処理で凍結した組織よりも水透過性を増大させてしまった。このように、浸透圧脱水凍結法の効果には差があり、凍結によるダメージとは別に浸透圧脱水による細胞膜へのダメージも検討する必要があると考えられた。しかし、既往の研究では、浸透圧脱水そのものの細胞膜に対するダメージの評価はほとんどされていない。

そこで、本研究では浸透圧脱水のみを行った組織の水透過係数についても測定を行った。その結果 (Fig. 3), 脱水ダメージが比較的少ないと考えられていた浸透圧脱水によっても、細胞膜の水透過性は増大してしまうことが確認された (脱水後、復水しており、水分含量は同程度である)。特に、タマネギ組織の水透過性は、浸透圧脱水をただけで、凍結・解凍後よりも増大してしまった。このタマネギ組織の水透過性が著しく増大してしまった原因は、生鮮時の細胞膜の水透過性の差にあると考えられる。そもそも植物細胞膜よりも水透過性のよい細胞膜をもつ動物組織は、冷凍保存後も生鮮時の品質を保つことが可能とされている。既往の研究において、動物性食品であるマグロ組織は、凍結前後の水透過性変化をPFG-NMR測定によって検討されている¹⁴⁾。その結果、凍結前の細胞膜水透過係数は、約 $30 \times 10^{-5} \text{m/s}$ であるとされ、さらに、このマグロの細胞膜水透過性は、凍結・解凍を行っても変わらないことが報告されている¹⁴⁾。これらの結果と本研究結果を併せて考えると、凍結前の細胞膜水透過性の差は、解凍後のダメージ程度の差を生む大きな要因であると考えられる。マグロ組織ほど顕著にみられないものの、タマネギ組織の水透過係数はニンジン組織の約半分であるため、ニンジン組織と同条件の浸透圧脱水では水ストレスが大きく、無処理で凍結したときよりも水透過性が増大してしまったと考えられる。

以上の結果より、浸透圧脱水凍結法は、凍結による細胞膜の水透過性の変化を防ぐ効果はほとんどないことが示唆された。そればかりか、浸透圧脱水処理自体が、凍結前の組織の水透過性を増加させてしまい、特に、生鮮状態の細胞膜の水透過性が低い組織には適した凍結前処理でないと考えられた。

2. 細胞壁、細胞膜のテクスチャー

レオメータを用いたテクスチャー測定の結果をFig. 4に示した。浸透圧脱水凍結後のテクスチャーは、多くの場合、破断強度のみから評価されてきた。しかし、従来、植物組織のテクスチャーは、破断強度は細胞壁、初期弾性値は細胞膜に由来した変化と考えられており、本研究では両パラメータを測定することで、より詳細にテクスチャーの変化を観測できると考えた。

生鮮組織の破断強度をみてみると、ニンジン組織・タマネギ組織共に $9.5 \times 10^6 \text{N/m}^2$ であった。そして、無処理で凍結した組織の破断強度は、生鮮組織と比較して、ニンジン組織で約40%、タマネギ組織で約90%減少した。生鮮時のテクスチャーは個体によって差があるものの、凍結・解凍後のニンジン組織のテクスチャーは、生鮮組織と比較して約50%減少することが示されており^{5), 24), 26)}、本研究で測定された破断強度の変化は妥当であると考えられた。一方、浸透圧脱水凍結後の組織の破断強度は、無処理で凍結・解凍を行った組織よりも、生鮮組織と近い値であった。特に、ニンジン組織の破断強度は生鮮組織に等しく、テクスチャーの保持効果が認められた。ま

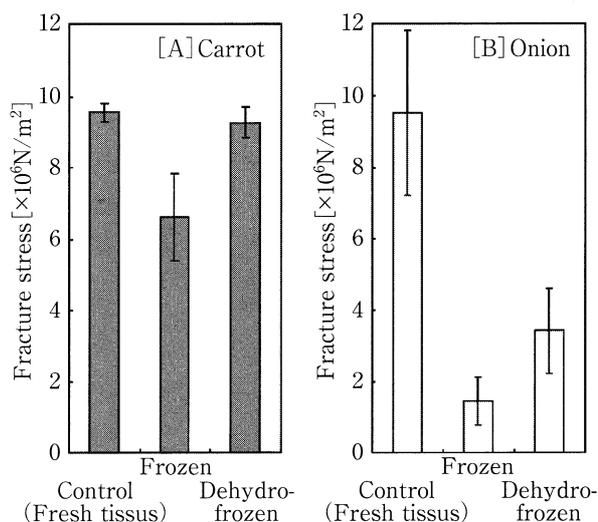


Fig. 4 Fracture stresses of [A] carrot and [B] onion tissues before and after freezing-thawing

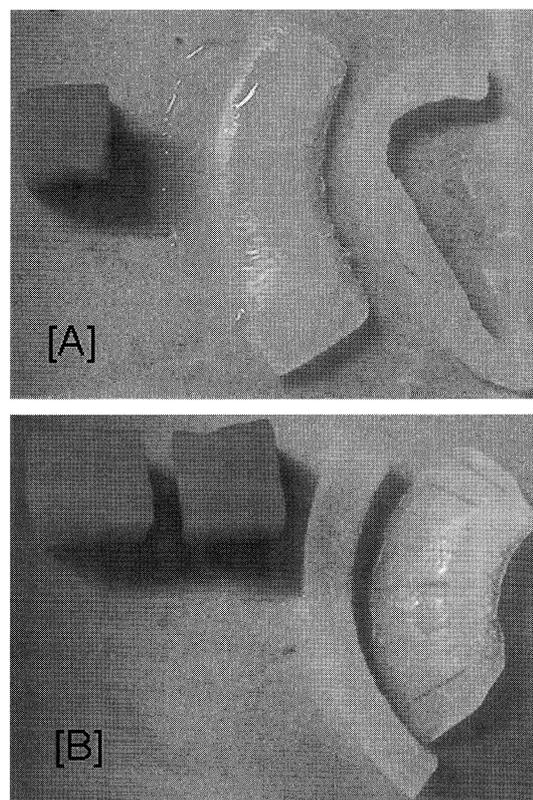


Fig. 5 Photographs of carrot and onion tissues after [A] freezing and [B] osmotic dehydrofreezing

た、Fig. 5より、浸透圧脱水凍結後のタマネギ組織は生鮮組織と遜色ない外観を保っていることが示された。ニンジン組織では若干の変色はみられたものの、無処理で凍結した組織よりも生鮮組織の外観と近く、浸透圧脱水凍結法に凍結による外観の劣化を抑制する効果があることが示された。一方、細胞膜のテクスチャーを示す初期弾性値においては、浸透圧脱水凍結法の明確な効果は観察されなかった (Fig. 6)。これらの結果と先に述べた細

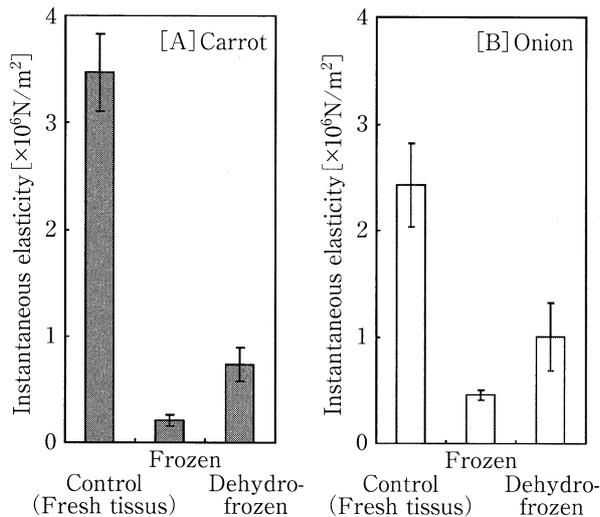


Fig. 6 Instantaneous elasticities of [A] carrot and [B] onion tissues before and after freezing-thawing

胞膜の水透過性の結果を踏まえると、浸透圧脱水凍結法は凍結・解凍による破断強度、すなわち、細胞壁に関するテクスチャーの変化を防ぐ効果は高いが、細胞膜に対するダメージを防ぐ効果は少ないと考えられた。

ニンジン組織の破断強度で非常に高いテクスチャー保持効果がみられた理由は、組織に占める細胞壁の割合が高いためと考えられる。既往の研究においてZDUNEK and UMEDA²⁷⁾は、細胞サイズの大きさと組織の硬さの関係を検討した。その結果、細胞サイズが小さい組織、すなわち、細胞壁の割合のより多い組織は、より硬いことを明らかにした。本研究でも光学顕微鏡観察の結果、タマネギの細胞サイズは約 $150\mu\text{m}$ であり、ニンジン組織の細胞サイズは約 $100\mu\text{m}$ と小さかった。そのため、ニンジン組織はテクスチャーに対する細胞壁の影響が大きき、浸透圧脱水凍結法の効果が十分に発揮されたと考えられる。

浸透圧脱水凍結後の組織テクスチャーの変化は、レオメータによる物理的な測定以外にも、官能検査によって検討されている^{3), 15)}。詳細を省いたが、本研究でも官能検査を実施しており、その結果、浸透圧脱水凍結後の組織は、硬さは残っているものの生鮮組織とは明らかに異なる食感に変化していることが確認された。この官能検査の結果を考慮すると、硬さとは異なる生鮮野菜組織の独特な食感は、細胞膜に由来するところが大ききと考えられ、凍結・解凍後の軟化を完全に防ぐためには、細胞膜の変化をも抑えることのできる凍結法を検討する必要があると考えられた。

以上のことより、浸透圧脱水凍結法は、細胞壁に関するテクスチャーの保持には有効であるが、細胞膜に関するテクスチャーや水透過性の変化を抑える効果はほとんどないという結論を得た。しかし、細胞壁の多い農産物の凍結・解凍によるテクスチャー変化を抑えることは事実であり、今後、野菜種別に適した脱水条件を模索する必要があると考えられる。

要 約

ニンジン・タマネギ組織に対する浸透圧脱水凍結法の効果を、NMRを用いた細胞膜の水透過性測定とレオメータを用いたテクスチャーの測定より検討した。

その結果、破断強度、すなわち、細胞壁に関するテクスチャーの変化が抑制されることが示された。しかし、細胞膜に関する初期弾性値や水透過性の変化は著しく、浸透圧脱水凍結法に細胞膜の変化を防ぐ効果はほとんどないと考えられた。さらに、従来行われている浸透圧脱水凍結条件では、浸透圧脱水のみによって、細胞膜の水透過性が増大してしまうことが観測された。これらの結果より、浸透圧脱水凍結法は、凍結・解凍後の軟化を完全に防ぐ方法ではないと考えられた。しかし、浸透圧脱水凍結法において、解凍後のテクスチャーの変化をある程度防止することは可能であるため、今後、さらに詳細な脱水条件を検討することで、凍結・解凍後の軟化を防ぐ凍結法が見いだされることが考えられた。

文 献

- 1) YAMADA, T., KURODA, K., JITUYAMA, Y., TAKEZAWA, D., ARAKAWA, K. and FUJIKAWA, S.: Role of the plasma membrane and the cell wall in the responses of plant cells to freezing, *Planta*, **215**, 770~778 (2002)
- 2) DEJMEK, P. and MIYAWAKI, O.: Relationship between the electrical and rheological properties of potato tissue after various forms of processing, *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **6**, 1218~1223 (2002)
- 3) REID, D. S.: Cryomicroscope studies of the freezing process in tissue and in model systems, *IIR*, **3**, 226~228 (1980)
- 4) BROWN, M. S.: Texture of frozen vegetables: effect of freezing rate on green beans, *J. Sci. Food Agric.*, **18**, 77~81 (1967)
- 5) OHNISHI, S. and MIYAWAKI, O.: Osmotic dehydrofreezing for projection of reological properties of agricultural products from freezing-injury, *Food Sci. Technol. Res.*, **11**, 52~58 (2005)
- 6) FUCHIGAMI, M., HYAKUMOTO, N. and MIYAZAKI, K.: Programmed freezing affects texture, pectin composition and electron microscopic structures of carrots, *J. Food Sci.*, **60**, 137~141 (1995)
- 7) FUSTER, G., PRESTAMO, G. and CANO, M. P.: Drip loss, peroxides and sensory changes in kiwi fruit slices during frozen storage, *J. Sci. Food Agric.*, **64**, 23~29 (1994)
- 8) MOYANO, P. C., VEGA, R. E., BUNGER, A., GARRETON, J. and OSORIO, F. A.: Effects of combined processes of osmotic dehydration and freezing on

- papaya preservation, *Food Sci. Thch. Int.*, **8**, 296~302 (2002)
- 9) WANG, C. X., PRITCHARD, J. and THOMAS, C. R.: Investigation of the mechanics of single tomato fruit cells, *J. Texture Studies*, **37**, 597~606 (2006)
- 10) SOTOME, I., OSHITA, S., KAWAGOE, Y., TORII, T. and SEO, Y.: Measurement of membrane hydraulic conductivity by a newly development method, 2004 Transaction of the ASAE, **47**, 1208~1213 (2004)
- 11) 五月女格・大下誠一・瀬尾康久・川越義則・鳥居徹: マイクロチャンネル内の二相流を利用した細胞膜水透過係数測定法の開発, *農業機械学会誌*, **65**, 86~92 (2003)
- 12) ISHIKAWA, E., BAE, S. K., MIKAWAKI, O., NAKAMURA, K., SHINOKI, Y. and ITO, K.: Water permeability of plasma membranes of cultured rice, grape, and CH 27 cells measured dielectrically, *Journal of Fermentation and Bioengineering*, **83**, 222~232 (1997)
- 13) OHNISHI, S., FUJII, T. and MIYAWAKI, O.: Electrical and rheological analysis of freezing injury of agricultural products, *International journal of Food Properties*, **5**, 317~332 (2002)
- 14) 安藤寛子・福岡美香・宮脇長人・鈴木 徹: NMRを用いた生鮮植物組織の凍結・解凍における水透過性変化の評価, *低温生物工学会誌*, **52**, 1~5 (2006)
- 15) 安藤寛子・福岡美香・宮脇長人・鈴木 徹: 凍結・解凍による食品ダメージ程度のNMRによる評価日本冷凍空調学会論文集, **23**, 305~312 (2006)
- 16) ROBBERS, M., SINGH, R. P. and CUNHA, L. M.: Osmotic-convective dehydrofreezing process for drying kiwifruit, *J. Food Sci.*, **62**, 1039~1042 (1997)
- 17) SPIAZZI, E. A., RAGGIO, Z. I., BIGNONE, K. A. and MASCHERONI, R. H.: Experiments on dehydrofreezing of fruits and vegetables: mass transfer and quality factors. Advances in the refrigeration systems, *Food Technologies and Cold Chain, International Institute of Refrigeration Proceeding Series*, **6**, 01~408 (1998)
- 18) BISWAL, R. N., BOZORGMEHR, K., TOMPKINS, F. D. and LIU, X.: Osmotic concentration of green beans prior to freezing., *J. Food Sci.*, **56**, 1008~1011 (1991)
- 19) GARROTE, R. L. and BERTONE, R. A.: Effect of glucose, and sucrose solution on exudate loss during thawing, *Food Sci. Technol.*, **22**, 264~267 (1989)
- 20) HOWARD, L. B. and CAMPBELL, H.: Dehydrofreezing-a new way of preserving food, *Food Inds.*, **18**, 674~676 (1946)
- 21) LAZAR, M. E., CHAPIN, E. O. and SMITH, G. S.: Dehydration apples: recent developments in processing methods, *Food Technol.*, **14**, 32~36 (1961)
- 22) TALBURT, W. F. and LEGAULT, R. R.: Dehydrofrozen Peas, *Food Technol.*, **4**, 286~291 (1950)
- 23) GARROTE, R. L. and BERTONE, R. A.: Osmotic concentration at low temperature of frozen strawberry halves. Effect of glucose, and sucrose solution on exudate loss during thawing, *Food Sci. Technol.*, **22**, 264~267 (1989)
- 24) CLARK, C. A. and BIHAN, D. L.: Water diffusion compartmentation and anisotropy at high b values in the human brain, *Magnetic Resonance in Medicine*, **44**, 852~859 (2000)
- 25) ANISIMOV, A. V., SOROKINA, N. Y. and DAUTOVA, N. R.: Water diffusion in biological porous systems: a NMR approach, *Magn. Res. Imaging*, **16**, 565~568 (1998)
- 26) KAMIYA, N. and TAZAWA, M.: Studies on water permeability of a single plant cell by means of transcellular osmosis, *Protoplasma*, **46**, 394~422 (1956)
- 27) ROY, S. S., TAYLOR, T. A. and KRAMER, H. L.: Textural and ultrastructural changes in carrot tissue as affected by blanching and freezing, *J. Food Sci.*, **66**, 176~180 (2001)
- 28) ZDUNEK, A. and UMEDA, M.: Influence of cell size and cell wall volume fraction on failure properties of potato and carrot tissue, *J. Texture Studies*, **36**, 25~34 (2005)
- (平成20年2月20日受付, 平成20年6月9日受理)