

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 30 日現在

機関番号：16301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010 ～ 2011

課題番号：22658076

研究課題名（和文） 瞬間冷凍による青果物の冷凍及び長期貯蔵法の開発

研究課題名（英文） Development of a quick freezing technique for long storage
of fruit and vegetables

研究代表者 森本 哲夫（MORIMOTO TETSUO）

愛媛大学・農学部・教授

研究者番号：50127916

研究成果の概要（和文）：冷凍による青果物の細胞破壊を抑制するため、①アルミ材を活用した急速冷凍、②40～50℃の熱ストレス処理、③トレハロース処理による超急速冷凍法を開発研究した。アルミ容器にトマトを収納しアルミ粒で埋没させると約20分で冷凍でき、液体窒素噴霧による急速冷凍と比べても差はなかった。45℃の熱ストレスをトマトに24時間与えると、冷凍による細胞破壊をある程度抑制できた。さらにトマトの果柄をトレハロース溶液に漬けると、冷凍によるクラックをかなり抑制できた。

研究成果の概要（英文）： The preservation of fruit and vegetables by freezing is one of the most effective ways for retaining high quality and freshness in agricultural products during long-term storage. However, conventional freezing methods typically destroy plant cells and tissues due to the formation of ice crystals. Quick freezing techniques that made use of aluminum materials, heat treatment and trehalose addition were now used for reducing the freezing injury of plant cells. Contacting a sliced tomato with two thick aluminum plates on both sides provided a significant quick freezing. The use of an aluminum vessel and particles also provided a quicker freezing method for whole tomatoes. Heat treatment at 45°C for 24h reduced the freezing injury of whole tomatoes. The absorption of trehalose from a 10% trehalose solution also reduced the freezing injury. These results suggest that the combinatorial uses of a quick freezing technique with aluminum plates and particles, heat treatment and trehalose addition is an effective way to reduce the freezing injury of fruit and vegetables during the freezing process.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,600,000	0	2,600,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	150,000	3,250,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業環境工学

キーワード：瞬間冷凍、青果物

1. 研究開始当初の背景

青果物の長期貯蔵を考えると、通常の低温（ $-1\sim-10^{\circ}\text{C}$ ）で貯蔵するより、 -20°C 以下の冷凍貯蔵の方が有効である。なぜなら、 -20°C 以下の冷凍状態では、青果物の代謝がほとんど停止し、細菌の活動も無くなるので、鮮度及び品質の低下がほとんどなく、6~12ヶ月の長期貯蔵が可能になるからである。

また、現在、植物工場が注目されているが、愛媛大学の太陽光利用型植物工場では主にトマトの安定した大量生産を考えているので、今後のトマト需要を考えると、すべて生鮮野菜として供給（販売）するのではなく、何らかの加工処理を施して付加価値を高めることも重要と思われる。この1つに冷凍処理が考えられる。たとえば、トマトやイチゴをシャーベット状にして、このとき味などが低下しないようにし、今までとは別の感覚で味わえる食品ができれば、新しい商品の開発として意義がある。

2. 研究の目的

上述したように、青果物は、冷凍処理により、長期貯蔵が可能になるとともに、別な食感を持つ新食品の開発も可能となる。

しかし、青果物の冷凍は、細胞が脂質でできた柔軟性のある細胞膜とその外側にセルロースやペクチン等の多糖類でできた硬い細胞壁で出来ているので、冷凍により細胞内の水が凍って体積が増えると、細胞膜・壁が破壊されるという問題がある。

さて、本研究では、冷凍による細胞破壊の抑制法として、①アルミニウム材を有効利用した急速冷凍法、②熱ストレス処理、③トレハロース処理の3つの方法を試みた。①については、安価で加工しやすいアルミニウム材が優れた熱伝導性をもつことから、それをもっと有効利用した急速冷凍法が実現できないかと考えている。②については、我々の今までの研究より、 $40\sim 50^{\circ}\text{C}$ の熱ストレス処理が青果物の水損失を抑制し、腐敗も抑制する

効果を見出している。この原因は、熱ストレス処理により細胞内に熱ショックタンパク（HSP）が生成され、その働きにより温度耐性ができて細胞からの蒸発散を抑制し、また細胞膜や壁を丈夫にして細菌の侵入を抑制したためと考えている。③については、トレハロースがショ糖と同類な2糖類であり、氷点以下の低温環境や乾燥した砂漠地域で生息できるクマムシやネムリユスリカなどの細胞内に多く含まれていることから、その働きを利用した冷凍法が考えられる。これら3つの方法は、いずれも安価であり、市販のもので十分対応できて使いやすい。

そこで本研究では、簡易・安価な青果物の急速冷凍法の開発を目指して、熱伝導性の優れたアルミニウム材を有効利用した超急速冷凍法の開発および熱ストレス処理やトレハロース処理を利用した植物細胞の破壊の抑制法を検討した。

3. 研究の方法

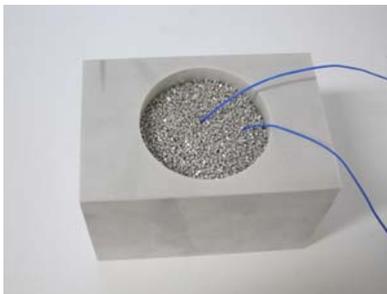
冷凍に用いた青果物はトマト（ハウス桃太郎）とジャガイモ（男爵イモ）である。両者とも丸ごと（そのまま）と冷凍しやすいように厚さ2cmにスライスしたものをを用いた。冷凍に用いた冷凍庫は -60°C 設定の低温ストッカー（DF-140D, DAIREI）である。解凍は室温で24時間自然解凍させた。温度はクロメル-アルメル熱電対（ $0.3\text{mm}\phi$ ）を用いて、青果物の表層部、中間部、中心部を1分毎に計測した。

図1は、本研究で使用したアルミニウム板（厚さ3、10mm）、アルミ容器（L150×W100×H100mm、穴部 $80\text{mm}\phi$ ×H80mm）、アルミニウム粒（ $1\times 1\text{mm}\phi$ ）を有効利用した冷凍法である。(a)はスライスしたトマトの場合であり、両側からアルミニウム板を接触させて冷凍させる。(b)は丸ごと（そのまま、球体）のトマトの場合であり、球体では板（平面）への接触面積が少ないので、アルミニウム容器にトマトを入れ、それにアルミニウム粒を入れ

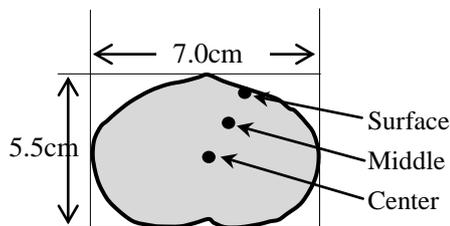
て埋没させ、すなわちアルミニウム粒・容器との接触面積を増大させて -60°C 設定の低温ストッカーで冷凍させる。これらのアルミニウム材はあらかじめ低温(-60°C)にした状態で使用した。(c)は丸ごとトマトの内部温度の3つの計測位置(中心部、中間部、表層部)である。



(a) アルミ板(両側接触)によるスライストマトの冷凍



(b) アルミ容器・粒による丸ごとトマトの冷凍法



(c) 温度の計測位置

図1 アルミニウム材を有効利用した急速冷凍法

4. 研究成果

まず、青果物の基本的な冷凍曲線を示す。図2は、丸ごとのトマトを -60°C に設定した冷凍ストッカーに入れて、その中心部、中間部、表層部の冷凍曲線を示したものである。何も処理しない空気冷却の場合で、これをコントロールとした。トマトの温度変化は、冷凍開始後から時間とともに低下するが、約50分後からは -1°C 付近の温度を維持して一定

になり、その後(約135分後から)再度急速に低下した。この -1°C 付近の一定温度を示す区間は、体内の水分がすべて氷晶化する段階とみられる。氷晶化が完了すれば、トマト温度は設定温度の -60°C 付近まで低下した。中心部の温度変化から、このトマトの冷凍時間は約90分とみられる。部位による温度の低下パターンは、大きな違いはないが、表層部と内部で時間的なズレがあり、やはり表面に近いほど速いことが分かる。このバラツキによっても、氷の成長が部位によって乱れ、細胞を傷つける割合が多くなると考えられる。

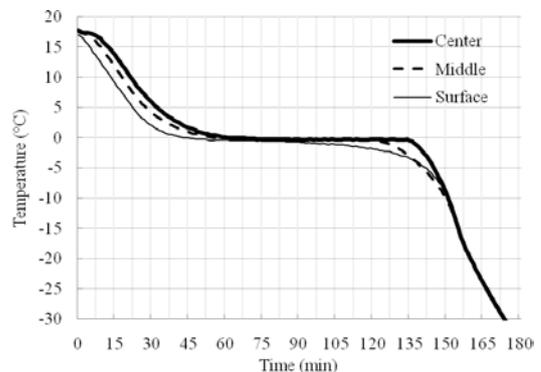


図2 丸ごとトマトの基本的な冷凍曲線

次に、アルミニウム板を接触させて、板厚の違いによる冷凍性能を調べた。図3は、板厚2、3、10mmのアルミニウム板にスライスしたジャガイモ(2cm厚)を載せて(片側のみに接触させて)冷凍した場合の冷凍曲線である。なお、コントロールはアルミニウム材を使用せずに単に空気中に置いて冷却させた場合である。冷凍速度はアルミニウム板に接触させることでコントロールと比べ大幅に短縮し、板厚の厚いほどジャガイモの凍結時間が短いのが分かる。日常生活では厚さ1mm程度の薄いアルミニウムトレイしか使用されていないが、板厚の厚い方が冷凍時間が短く、冷凍に有利と分かる。したがって本研究では、板厚3mm以上のアルミニウム板を使用した。

図4は、スライスしたトマト(2cm厚)を、アルミニウム板に載せて(片側接触)と上下から挟んで(両側接触)冷凍した場合の冷凍曲線である。なお、図中のコントロールはアルミニウム材を使用せずに空気冷却で冷凍させた場合である。凍結時間は、コントロール

が約 43 分であるのに対し、片側のみの接触が約 7 分、両側からの接触が約 3 分となり、アルミニウム板を両側から接触させることで、冷凍時間はかなり短縮できた。

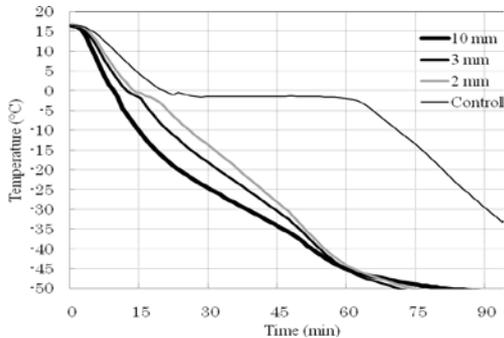


図3 アルミニウム板の厚の違いによる冷凍性能（スライスしたジャガイモ使用）

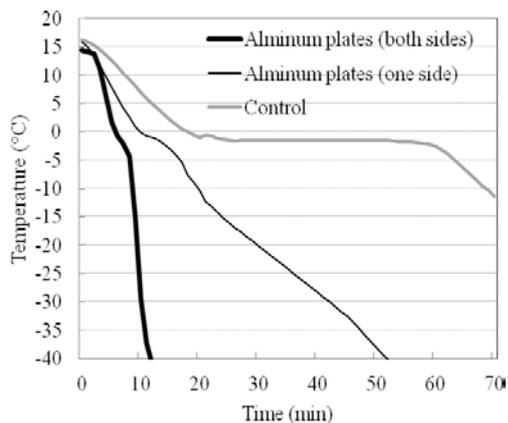


図4 スライストマトをアルミニウム板の片側、両側で接触させて冷凍した場合の冷凍性能（コントロール：アルミ材未使用）

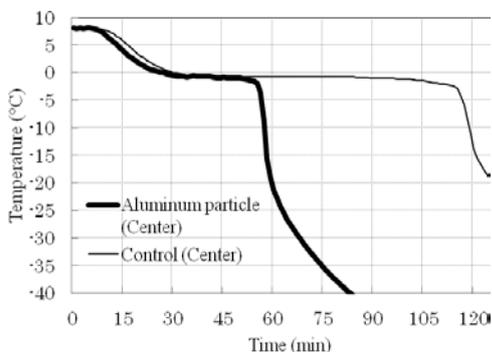


図5 丸ごとトマトをアルミ容器に入れ、アルミ粒で埋没させて冷凍した冷凍性能

図5は、丸ごとのトマトをアルミニウム容器に入れアルミニウム粒で埋没させて冷凍した場合のトマト中心部の冷凍曲線である。冷凍温度は -60°C である。冷凍時間はトマト丸ごとなので長くなり約 18 分となるが、アルミニウム粒に埋没させたトマトの方が、空气中に置いたコントロールの場合より約 1/3 短縮できているのがわかる。

図6は丸ごとのトマトをアルミニウム容器&アルミ粒に埋没させて冷凍した場合の冷凍直後と解凍後の外観である。コントロール（アルミ材未使用）と比較している。アルミニウム粒に埋没させて急速冷凍したトマトは冷凍後にひび割れ（クラック）が生じたが、コントロールでは生じなかった。しかし、解凍後では、コントロールのトマトは組織が壊れ、ほとんどつぶれた状態になった。これに対して、アルミニウム粒に埋没させて急速冷凍したトマトは組織の破壊が少なく、もともとの形状を維持していた。図7は、この場合のドリップ量を比較したものである。なお、図中のバーは標準偏差を表す。ドリップ量は、アルミニウム容器と粒を活用して急速冷凍したトマトの方がコントロールの場合と比べ、約 1/8 に減少した。

このように、アルミニウム容器とアルミニウム粒を有効利用して急速冷凍したトマトは、表面にある程度のクラックが生じたが、解凍後では、組織は比較的しっかりしており、ドリップ量も少なかった。

それで次に、熱ストレスとトレハロース処理を利用して、クラックやドリップの抑制を試みた。熱ストレス処理は、まず 45°C の高温下に 24 時間置き、その後あらかじめ冷却しておいたアルミニウム容器（粒で埋没）に入れて急速冷凍した。図8は、熱ストレス処理した場合としない場合の冷凍直後におけるクラックの発生割合である。熱ストレス処理するとトマトのクラックの発生が少なくなった。

図9は熱ストレス処理後のトマトの外観の写真である。(a)は冷凍直後、(b)は解凍後（冷凍後2時間）の状態である。トマトは急速冷凍によりクラックが発生したが、熱ストレス処理すると、顕著なクラックはほとんど見られなかった。

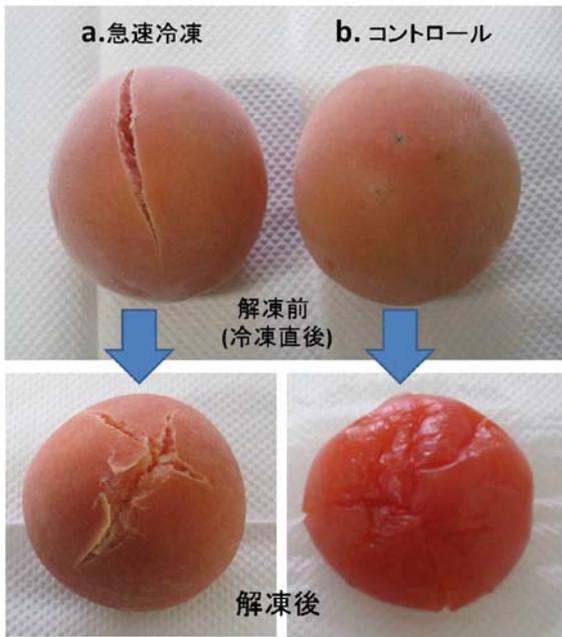


図6 丸ごとトマトをアルミニウム容器&粒に埋没させて冷凍した場合の冷凍直後と解凍後の外観(コントロール:アルミ材未使用)

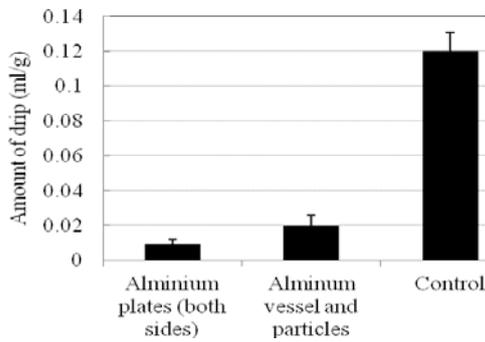


図7 ドリップ量の比較

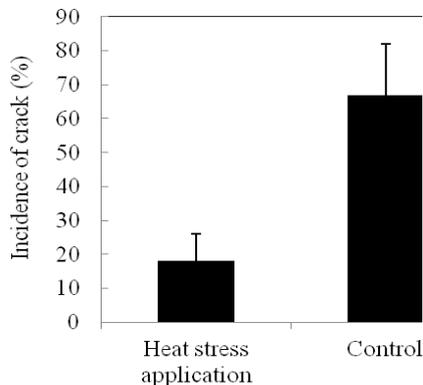


図8 熱ストレス処理と無処理の場合の冷凍直後におけるクラックの発生割合



(a) 冷凍直後



(b) 解凍後(冷凍後2時間)

図9 熱ストレス処理による冷凍及び解凍後のトマトの外観

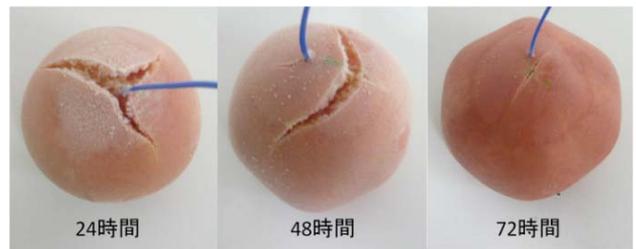


図10 トレハロース水に24、48、72時間浸漬させ、その後アルミニウム容器(粒で埋没)で急速冷凍した場合の冷凍直後のトマトの外観

我々の今までの研究より、低温貯蔵前のトマトに対して、気温 40~50℃、24 時間の熱ストレス処理が貯蔵青果物の水損失を抑制して鮮度をより長く維持できること、また病原菌の侵入を抑制して青果物の腐敗を抑制できることを報告されている。また、42~43℃の熱ショックを30~60分与えることで、植物の耐凍性及び耐圧性を高めた報告もある。これらの原因は、植物のストレス応答の働きで、細胞内に熱ショックタンパク質を産

生し、これらの働きで細胞膜を強固にすることによって、氷晶化による細胞膜・壁の破壊を抑制し、その結果、解凍後の組織の構造を維持し、ドロップを低減できたと考えられる。

図10は、45℃に設定した恒温恒湿器（風速0.4m/s）にトマトを収納し、そこではトマトの果柄をトレハロース溶液に24、48、72時間浸漬させてトレハロースを吸収させ、その後-60℃の超低温ストッカーでアルミニウム容器（粒で埋没）に入れて急速冷凍した場合の冷凍直後のトマトの外観である。浸漬時間が長いほど、クラックが抑制される傾向が見られた。トレハロースは、微生物から無脊椎動物、また高等植物まで広く存在し、とくに極寒や砂漠地域に生息する生物に多くみられるのが特徴であり、低温や乾燥ストレスに対する糖質源であり、ガラス化等の作用で氷晶化させずに凍結させる働きがあると考えられている。すなわち、低温ストレスを受けると細胞内にトレハロースを蓄積し、この働きで水を結晶化させずにガラス化状態で凍結させるので、体積があまり膨張せず、これにより凍結の傷害から細胞を保護できる。Uchidaらは、トレハロースが氷結晶の大きさを抑制することを確認している。このように、細胞内にトレハロースが多く存在すると、凍結を抑制したり、あるいは凍結しても氷の結晶の成長を抑制でき、植物細胞の破壊を抑制できる可能性がある。

以上より、熱伝導性の高いアルミニウム材を有効利用した急速冷凍法と熱ストレス処理、トレハロース処理を適切に組み合わせた冷凍法が、水分含量の多い青果物の冷凍に有効であり、安価かつ簡易な急速冷凍法を確立する上で重要と考えられる。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計2件）

- ①森本哲夫・Md. Parvez Islam. アルミニウム材の利用および熱ストレス、トレハロース処理による青果物の急速冷凍法。査読有り，植物環境工学会，印刷中。

- ②森本哲夫・Md. Parvez Islam. 熱ストレスを利用した青果物の冷凍に関する研究。査読有り，日本冷凍空調学会，第46回空気調和・冷凍連合講演会講演論文集，2012，pp.159-162。

〔学会発表〕（計1件）

- ① 森本哲夫・Md. Parvez Islam. 青果物の冷凍に関する研究。日本生物環境工学会，2011年9月8日，札幌，講演要旨，pp.182-183。

〔図書〕（計1件）

- ① 森本哲夫・羽藤堅治・野口伸（分担）：第5章 作物の知能的扱い，太陽光植物工場の新展開，養賢堂，2012，p380，pp.129-154。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森本 哲夫 (MORIMOTO TETSUO)

愛媛大学・農学部・教授

研究者番号：50127916