

パルス超音波を利用した凝固制御による生体・食品の低損傷・凍結保存技術の開発

著者	多田 幸生
著者別表示	Tada Yukio
雑誌名	平成17(2005)年度 科学研究費補助金 基盤研究(C) 研究成果報告書
巻	2004-2005
ページ	6p.
発行年	2006-03
URL	http://doi.org/10.24517/00049453



パルス超音波を利用した凝固制御による
生体・食品の低損傷・凍結保存技術の開発

(研究課題番号 16560178)

平成16年度～平成17年度科学研究費補助金
(基盤研究(C)(2)) 研究成果報告書

平成18年3月

研究代表者 多田 幸生

(金沢大学大学院自然科学研究科 助教授)

金沢大学附属図書館



0800-04187-9



1. はしがき

コールドチェーンの発達に伴って水産物や畜産物などの食品を凍結保存する技術の確立が求められている。凍結保存は、原理的には、低温化と活性水分の低減により、微生物、酵素あるいは化学的な反応に基づく食品の腐敗を阻止し、元の品質を長期維持することが目的である。しかし、凍結操作により、細胞（食肉では筋繊維が単位）レベルでの複雑なマイクロ挙動が生じ、これが品質低下に直接つながる細胞膜等の組織の破壊、タンパク質の変性・不溶化、ATPaseの失活などをもたらす。したがって、食品の品質（風味、テクスチャー）を損なわない効果的な冷却技術の開発が必須となる。

代表的な食品凍結法であるエアブラスト方式では、冷風を食品に吹き付けて凍結させるため、食品内部では局所冷却速度が低下し、氷晶の粗大化と細胞の脱水によりタンパク質の変性やドリップ（液汁の流出）を起こしやすくなる。改善の方策として、従来、圧力シフト法が提案されているが、装置の構造が複雑であり、かつ高圧場が食品に与えるダメージなどの問題がある。また、添加剤を用いる方法では、食味の変化や組織体内部への浸透が困難であるなどの問題がある。

以上の観点から、本研究課題では超音波を照射することにより凍結過程における結晶成長の能動的制御を追究した。すなわち、超音波照射により、超音波キャビテーションによる衝撃波を発生させ、それにより(1)細胞内過冷却の能動的解除と、(2)細胞内氷結晶の微細化を図り、凍結損傷の軽減を図るものである。具体的には、模擬食品（寒天）および食品組織体を供試した凍結実験を行い、氷晶径を超音波の特性ならびに冷却操作と関連づけて実験的に追究し、食品の味・風味を損なわない冷凍技術としての可能性について検討した。本報告書は、研究計画に基づいて実施された凍結食品中の3次元氷結晶構造の観察装置の製作、生体・食品凍結におけるマイクロ挙動と損傷の連関、寒天および馬鈴薯を供試した超音波音響場における凍結実験に関する2年間の成果をまとめたものであり、次のような章構成からなる。

- 第1章 超音波を利用した食品の低損傷・凍結保存技術
- 第2章 凍結食品中の氷結晶構造の3次元マイクロ観察
- 第3章 生体・食品凍結におけるマイクロ挙動と損傷
- 第4章 超音波照射下における氷晶成長
- 第5章 超音波照射による氷晶形成の制御
- 第6章 超音波照射下における食品の凍結実験

2. 研究組織

- 研究代表者： 多田 幸生（金沢大学大学院自然科学研究科助教授）
- 研究分担者： 瀧本 昭（金沢大学大学院自然科学研究科教授）
- 研究分担者： 大西 元（金沢大学大学院自然科学研究科助手）
- 研究分担者： 義岡 秀晃（富山商船高等専門学校助教授）

3. 交付決定額（配分額）

	直接経費	間接経費	合計
平成16年度	2,200,000円	0円	2,200,000円
平成17年度	1,500,000円	0円	1,500,000円
総計	3,700,000円	0円	3,700,000円

4. 研究発表

(1) 学会誌

- (1) 多田幸生, 中谷博行, 瀧本昭, 林勇二郎, 食品凍結における3次元マイクロ構造と損傷機序, 第41回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 2004年5月.
- (2) Y.Tada, A.Takimoto and Y.Hayashi, Microscale Heat and Mass Transfer during Freezing of Food, Proceedings of The First International Forum on Heat Transfer, 2004年11月.
- (3) 多田幸生, 瀧本昭, 三上浩子, 藤田平, 超音波を付与した鉛直冷却円筒面における水溶液の凍結と離脱, 日本機械学会環境工学総合シンポジウム2004講演論文集, 2004年7月.
- (4) 多田幸生, 村山栄治, 林勇二郎, 生体細胞の凍結におけるマイクロ挙動と生存状態の連関, 日本機械学会論文集, 71巻702号, 2005年3月.
- (5) 多田幸生, 瀧本晃, 宮本智彰, 林勇二郎, 超音波振動と濃度制御を併用した氷スラリーの連続生成, 日本冷凍空調学会論文集, 22巻1号, 2005年3月.
- (6) 多田幸生, 瀧本昭, 坂井宏郷, 林勇二郎, 超音波を利用した氷晶形成の制御, 第42回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 2005年6月.
- (7) 藤田平, 多田幸生, 瀧本昭, 林勇二郎, パルス超音波を利用した氷スラリーの連続生成, 第42回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 2005年6月.
- (8) 多田幸生, 瀧本昭, 藤田平, 谷口直久, 超音波を付与した流動水溶液による管内連続製氷, 日本機械学会環境工学総合シンポジウム2005講演論文集, 2005年7月.
- (9) 多田幸生, 瀧本昭, 坂井宏郷, 林勇二郎, 超音波照射下における氷晶形成に関する研究, 日本機械学会熱工学コンファレンス2005講演論文集, 2005年11月.
- (10) Y.Tada, A.Takimoto and Y.Hayashi, Active Control of Ice Formation by Utilizing Ultrasonic Irradiation, Proceedings of 13th International Heat Transfer Conference, 2006年8月(掲載予定).

(2) 口頭発表

- (1) 多田幸生, 中谷博行, 瀧本昭, 林勇二郎, 食品凍結における3次元マイクロ構造と損傷機序, 第41回日本伝熱シンポジウム, 2004年5月.
- (2) Y.Tada, A.Takimoto and Y.Hayashi, Microscale Heat and Mass Transfer during Freezing of Food, Proceedings of The First International Forum on Heat Transfer, 2004年11月.
- (3) 多田幸生, 瀧本昭, 三上浩子, 藤田平, 超音波を付与した鉛直冷却円筒面における水溶液の凍結と離脱, 日本機械学会環境工学総合シンポジウム2004, 2004年7月.
- (4) 多田幸生, 瀧本昭, 坂井宏郷, 林勇二郎, 超音波を利用した氷晶形成の制御, 第42回日本伝熱シンポジウム, 2005年6月.
- (5) 藤田平, 多田幸生, 瀧本昭, 林勇二郎, パルス超音波を利用した氷スラリーの連続生成, 第42回日本伝熱シンポジウム, 2005年6月.
- (6) 多田幸生, 瀧本昭, 藤田平, 谷口直久, 超音波を付与した流動水溶液による管内連続製氷, 日本機械学会環境工学総合シンポジウム2005, 2005年7月.
- (7) 多田幸生, 瀧本昭, 紺谷翼, 林勇二郎, 超音波照射下における氷晶形成に関する研究, 日本機械学会熱工学コンファレンス2005, 2005年11月.
- (8) Y.Tada, A.Takimoto and Y.Hayashi, Active Control of Ice Formation by Utilizing Ultrasonic Irradiation, 13th International Heat Transfer Conference, 2006年8月(発表予定).

第 1 章

超音波を利用した食品の低損傷・凍結保存技術

1. 超音波照射による生体・食品の凍結損傷軽減の原理

超音波照射による生体・食品の凍結損傷軽減の原理を図1に示す。一般に生体・食品組織の凍結は細胞外領域が優先するため浸透圧差に基づく細胞の脱水が生じ、膠質的損傷が発生する。また、細胞内外に形成される粗大氷晶は組織の機械的損傷に繋がる。そこで、本研究は、超音波照射による氷晶形成の制御を追究する。すなわち、細胞内外の領域で超音波キャビテーションを発生させ、それにより(1)細胞の過冷却の能動的解除、(2)細胞内外の氷結晶の破碎・微細化、(3)氷核生成数の増加を図る。これにより、早い段階で細胞内過冷却を能動的に解除して細胞の脱水による膠質的損傷を防ぎ、さらに細胞内外の氷晶を破碎・微細化することにより機械的損傷の軽減を意図したものである。本手法の特徴としては、(1)過冷却度の大きさを任意の値に設定でき、制御性に優れる、(2)試料の内部まで適用できるなどがあげられる。

2. 食品凍結における階層的取り扱いと超音波の効果

生体や食品に含まれる水は、物理化学的に拘束された自由水あるいは結合水の状態、代謝を基本とする生命活動の担い手として、また食品の官能性を発現する媒体として機能する。水をマトリックスとする生体や食品を一つの相と見なせば、生存の状態や官能性もまた一つの相である。凍結保存は、前者の相変態（水分子運動の凍結）による低温化と水分活性の低減により、後者の相の長期維持を図るものである。しかしながら、凍結の過程で、細胞内外での氷晶の偏在形成、細胞膜を通じた水分移動、さらには濃縮や変形等の細胞レベルでのマイクロ挙動が生じ、これらが種々の機械的・膠質的損傷をもたらす。

以上の食品の凍結の凍結保存における損傷機構の解明においては、図2に示される階層的な取り扱いが必要である。すなわち、(a)マクロスコピックには、固相、液相、固液共存相（マッシュ

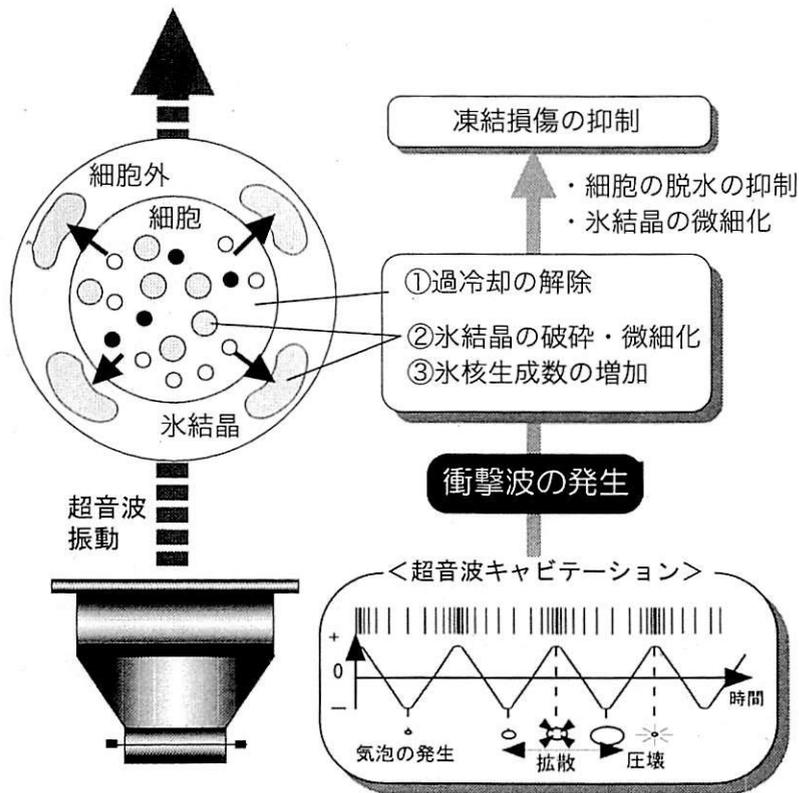


図1 超音波照射による生体・食品の低損傷・凍結保存の原理

域)の3領域からなる熱伝導問題となり、冷却操作により温度や凍結率が変化するマクロな移動現象として捉えられる。ミクロスコピックには、(b)細胞外の優先凍結、細胞膜を通じた水分移動、細胞の変形、過冷却状態からの細胞内氷晶の形成など細胞レベルのミクロ挙動が問題となる。このレベルでは、氷晶による細胞膜の機械的損傷によりドリップの発生や食感(テクスチャー)が問題となる。さらに、分子レベルでは、(c)細胞内溶液の濃縮に伴う塩析やcross-linkingなどに起因するタンパク質の変性が発生するため、最終的にはこのレベルでの取り扱いが究極となる。すなわち、味に関わる分子レベルの状態を、ミクロレベルの挙動や状態変化を媒介として制御するのは、潜熱を除去する熱操作であり、直接的には場の温度あるいはその勾配を規定するマクロスケールの伝熱である。このため、食品の品質変化を評価し得る物理量を直接的・間接的に熱伝導方程式に組み込まなければならない。

本研究課題では、まず、図2における食品の凍結過程における細胞内外での氷結晶の生成・分散状態の観察法の確立(第2章)、ミクロ挙動と品質の連関を記述するモデル(第3章)を提示した後、超音波が氷結晶の成長に与える影響(第4章)、および超音波が食品内部の氷晶形成に及ぼす影響(第5,6章)を追究する。

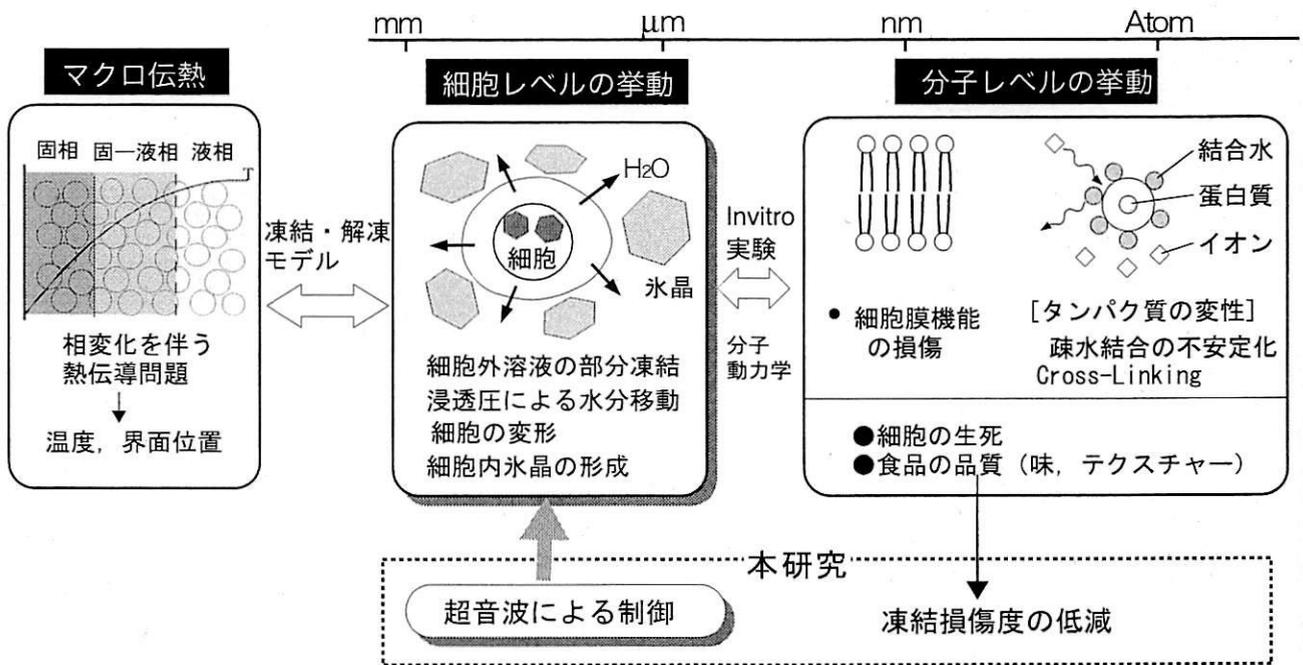


図2 食品凍結における階層的視点