

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：13301
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2020～2022
課題番号：20K04305
研究課題名(和文) 高周波超音波と交番磁場を利用した過冷却制御による食品の高品質凍結・解凍技術の開発

研究課題名(英文) Development of high-quality freezing-thawing technique of food by utilizing high-frequency ultrasonic wave and alternating magnetic field

研究代表者
多田 幸生 (Tada, Yukio)
金沢大学・機械工学系・教授

研究者番号：20179708
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：高周波超音波と交番磁場を利用した過冷却の促進とそれを利用した食品の高品質冷凍技術の開発を目的に、超音波振動と交番磁場が水および組織体の凍結・解凍に及ぼす影響を実験的に追究した。その結果、音波吸収に伴う発熱作用を利用した組織体内の温度制御により、組織体全域を過冷却状態から急速凍結できることが実証された。また、音波吸収に伴う内部発熱効果を利用することで流水解凍を上回る均質・急速解凍が実現された。交番磁場の効果については過冷却度のばらつきが大きくなる傾向はみられたが明確な過冷却促進効果を確認するには至らなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

食品を安全かつ美味しく凍結保存する技術の確立が求められている。しかし、凍結・解凍の過程で細胞レベルのミクロ現象が生じ、これが各種の損傷を発生させ、解凍後、ドリップ(液汁)の発生や食感の低下などの品質劣化を招く。この問題に対処する有効な技術として、本研究課題では、高周波超音波を利用して組織体内部の温度を制御する方法を提案し、組織全域を過冷却状態から急速凍結できることを操作条件と関連づけて明らかにした。また、高周波超音波を利用した急速解凍が可能であることが示された。これらの研究成果は食品の品質を劣化させない効果的な凍結技術の開発につながると考えられる。

研究成果の概要(英文)：A method to actively controlling crystallization is one of promising technique for cryopreservation of food. The object of this project is to study the effects of ultrasonic vibration and alternating magnetic field on supercooling of water and biological tissue. Firstly, we focus on the thermal effect of ultrasonic wave due to its absorption as changing temperature distribution in tissue during cooling process. It was found that ultrasound at frequency of 1 MHz is effective to enhance supercooling degree in the tissue. The degree of supercooling was clarified in relation to ultrasonic power and cooling condition. Secondly, ultrasonic thawing experiments were performed on frozen tissue. As the results, the thawing rate in the range between -5°C and 0°C increased with increasing ultrasonic power due to attenuation of acoustic energy. Finally, the effect of alternating magnetic field on supercooling of physiological saline solution was not found clearly in the experiments.

研究分野：熱工学，伝熱工学

キーワード：凍結 解凍 高周波超音波 交番磁場 過冷却 食品

1. 研究開始当初の背景

コールドチェーンの発達に伴って食品を安全かつ美味しく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生化学反応の抑制を図るものであるが、凍結の過程で細胞レベルのマイクロ現象が生じ、これが各種の機械的損傷や膠質的損傷に繋がる。特に細胞内外の氷晶の成長は組織の形態変化や破壊をもたらし、また、細胞の脱水は含有成分の濃縮に伴うタンパク質の変性に繋がる。その結果、解凍後、ドリップ（液汁）の発生や食感の低下などの品質劣化を招く問題がある。

この問題に対処するため、従来は急速凍結が用いられてきた。たとえば、代表的な凍結法であるエアブラスト法では、冷風を食品に吹き付けて凍結させるため、食品内部では冷却速度が低下し、氷晶の肥大化により食品の細胞が破壊されやすくなる。このため、適用寸法に制限がある。したがって、従来の方法とは原理の異なる新しい凍結技術の開発が必要であり、食品の品質（風味、テクスチャー）を劣化させない効果的な凍結技術の開発が課題となる。

2. 研究の目的

本研究課題では、高周波超音波ならびに交番磁場を利用した凍結過程における氷晶形成の能動的制御の追究した。すなわち、高周波超音波の付与によるマイクロな振動および交番磁場による静電的作用を利用して、細胞内外の水の過冷却の促進を図り、それによる高品質な凍結を実現する冷却技術の開発を目標とした。このような凍結技術の開発を行うため、本研究課題では、(1) 組織体凍結に及ぼす高周波超音波の効果、(2) 組織体解凍に及ぼす高周波超音波の効果、(3) 水溶液の過冷却に及ぼす交番磁場の効果について検討することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 組織体凍結に及ぼす高周波超音波の効果

組織体凍結における過冷却に及ぼす高周波超音波の影響を調べるため、定在音場中で試料を一定の冷却速度で冷却し、凍結させる装置を製作した。装置の概要を図1に示す。装置は、試料を凍結する試験部、冷却液循環系、熱電対を用いた温度測定系で構成される。試験部はアクリル製の円筒容器内に超音波照射のための圧電素子（共振周波数1MHz）を設置したものである。プログラム式低温恒温槽を用いて、一定速度(0.2K/min)で温度降下させた50wt%エチレングリコール水溶液を循環させることで、試料を一定速度で冷却した。試験容器は音波の伝播を妨げないようにするため、PMMA製の半透明2重円筒の底面にOHPシートを貼り付けた構造とした。

供試試料には寒天ゲル(2wt%アガロース, 8wt%スクロース)を用い、試験容器に挿入して直径7mm、長さ18mmの円筒試料とした。試料内の温度分布は側面から装着した5本のT型熱電対により測定した。実験は照射する超音波出力(振動子の駆動電力)を0~15W、循環させるエチレングリコール水溶液の温度を-15°C~-20°Cの範囲で変化させて行い、試料内温度の経時変化の測定と凍結様相のビデオ観察を行った。

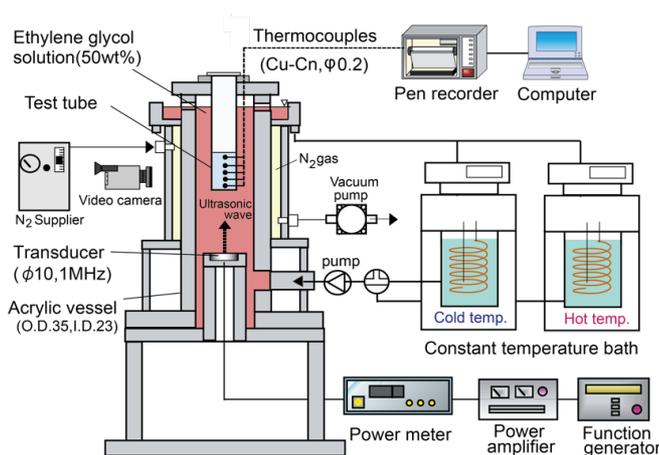


図1 実験装置

(2) 水溶液の過冷却に及ぼす交番磁場の効果

装置は、変動磁場を印加するためのソレノイドコイルを設置したプログラム式フリーザー、試料液を封入する試験容器、試料液の温度を測定する温度測定系で構成される。フリーザーを用いて一定速度(0.2K/min)で温度降下させたときの試料液の温度を試験容器に挿入したT型熱電対(素線径0.2mm)で測定した。試料液(0.9w/v%の生理食塩水)2mlを試験容器に入れ、上層をシリコンオイルで封入したものを試料とした。磁場の印加は、(1)磁場周波数一定(1Hz)で1~8mT、(2)磁場強度一定(4mT)で1~100Hzの条件で行い、過冷却解消温度の測定と核生成の様相の観察を行った。

4. 研究成果

(1) 高周波超音波を利用した組織体の凍結制御

模擬食品としての寒天ゲルを対象に超音波照射下での一方向凍結実験を行った。その結果、高周波超音波の吸収に伴って発熱作用が現れることを確認した。そこで、この効果を利用した組織体凍結の制御について検討を進めた。一般に、組織体を冷却すると表層部に過冷却域が形成される。過冷却域では、過冷却を原資とした急速凍結となるため、微細な氷結晶が生成され、各種の凍結損傷が軽減されると考えられる。しかし、通常の冷却方法では、過冷却域は組織体表層部に限定される。そこで超音波を照射しながら冷却することで、試料内に局所的に内部発熱の領域を形成する。これにより温度勾配を緩やかにした状態で試料全体の温度を低下させることが可能となり、その結果、過冷却域を拡大できると予想される。

超音波照射下で試料を冷却した場合の試料温度の経時変化を図2に示す。寒天ゲルの音波吸収に伴う発熱と試料端面からの冷却のバランスにより、試料は一定温度に維持され、かつ試料内の温度勾配は緩やかとなる。この状態で試料全域は大きな過冷却状態になっており、超音波照射を停止し、再び温度低下させると試料表面で核生成が起こり、試料全域が短時間で凍結した。以上の結果から、本手法で、組織体全域を比較的大きな過冷却状態になるように冷却することが可能となり、それを解除することが組織体全域を急速凍結できることが実証された。

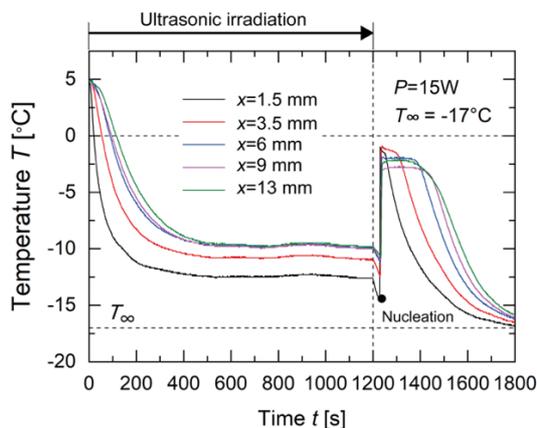


図2 冷却曲線（冷却液温度-17°C，振動子駆動電力 15W）

(2) 凍結パターンと操作条件

試料表面温度が到達する最終温度 T_s^* を操作条件から算出し、核生成温度 T_{nc} と比較することによって過冷却状態が維持される条件が求められる。算出された T_s^* を実験値と比較して図3に示す。ここで、核生成温度 T_{nc} は全実験データの平均値 (-14.2°C) を用いた。各冷却液温度に対して T_s^* が核生成温度 T_{nc} よりも高くなる条件において、過冷却が維持される Type II の凍結パターンになることが確認された。図中の実線は解析モデルから求めた試料表面温度であり、 $T_s^* = T_{nc}$ の条件で Type I から Type II の凍結パターンへの移行条件が推定できることが確認された。すなわち、本解析モデルを用いることで、任意の試料に対して Type II の凍結パターンを得るための操作条件を求めることが可能となり、本手法の実用化の点から有用な成果が得られた。凍結パターンを操作条件と関連づけて検討した結果、冷却液温度が比較的高く、冷却速度が小さい場合には Type II となり、超音波照射による凍結パターンの制御が可能であることが明らかとなった。

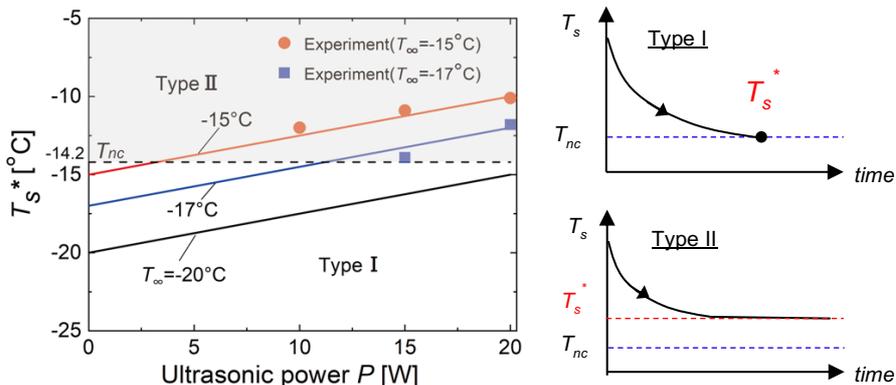


図3 試料表面が到達する最終温度と超音波出力の関係

(3) 高周波超音波を利用した組織体の解凍の促進

高周波超音波を照射しながら解凍することで、試料内部の解凍速度の向上を図り、それにより解凍過程で生ずる氷結晶の粗大化による損傷や膠質的損傷を軽減する方法について実験的に検討した。その結果、従来の気流解凍および流水解凍と比較して、試料内温度が 5°C を超えないように維持しながら、試料全域を急速解凍できることが見出された。高品質な食品凍結技術を確立する上で、凍結損傷と解凍損傷の両方を抑制する必要があり、高周波超音波を利用することで急速凍結と急速解凍が実現できた点は本研究の成果である。次に種々の超音波照射方式について試料の平均昇温速度 ($-5^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$) を調べた結果を図4に示す。本実験範囲では段階的に超音波出力を減少させる照射方式の有効性が見出された。音波吸収に伴う内部発熱を組み込んだ伝熱解析と、試料の特性、特に音波吸収係数、熱物性およびサイズを考慮した最適な超音波照射条件の追究が今後の課題である。

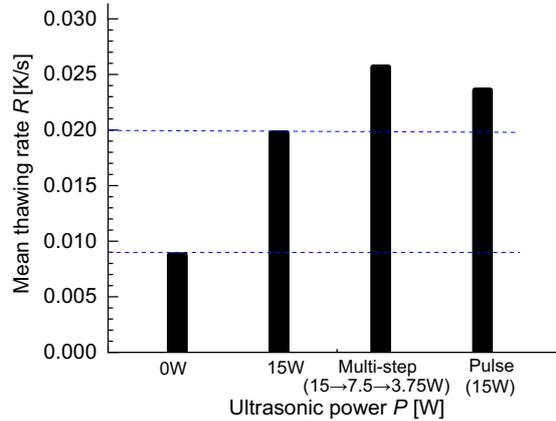


図4 各種超音波照射方式に対する平均昇温速度 ($-5^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$)

(4) 水溶液の過冷却に及ぼす交番磁場の効果

試料液を冷却すると凝固点温度を下回っても未凍結な状態、すなわち過冷却状態となる。さらに冷却を続けると試験容器内で核生成が起こり、凝固潜熱の放出に伴う温度上昇が現れる。試料液の凝固点温度と過冷却状態を維持したまま到達できた最低温度との差を過冷却度 ΔT と定義した。交番磁場の付与により過冷却度のばらつきが大きくなる傾向はみられたが、実験データの不足もあり、明確な過冷却促進効果を確認するには至らなかった。磁場周波数や磁場強度をより広範囲に変化させた検討が今後の課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 多田幸生, 青木和也, 大西元, 春木将司	4. 巻 -
2. 論文標題 高周波超音波を利用した凍結組織体の解凍（超音波出力の影響）	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本機械学会熱工学コンファレンス2020講演論文集	6. 最初と最後の頁 paper No.H123
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 西銀河, 多田幸生, 春木将司, 大西元	4. 巻 -
2. 論文標題 高周波超音波を利用した組織体における過冷却域の制御	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集	6. 最初と最後の頁 paper No.A324
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 犬飼啓登, 多田幸生, 春木将司, 義岡秀晃	4. 巻 -
2. 論文標題 高周波超音波を利用した凍結組織体の高品質解凍	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 2022年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集	6. 最初と最後の頁 paper No.D111
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 多田幸生, 青木和也, 大西元, 春木将司
2. 発表標題 高周波超音波を利用した凍結組織体の解凍（超音波出力の影響）
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西銀河, 多田幸生, 春木将司, 大西元
2. 発表標題 高周波超音波を利用した組織体における過冷却域の制御
3. 学会等名 2021年度日本冷凍空調学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 犬飼啓登, 多田幸生, 春木将司, 義岡秀晃
2. 発表標題 高周波超音波を利用した凍結組織体の高品質解凍
3. 学会等名 2022年度日本冷凍空調学会年次大会
4. 発表年 2022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
研究分担者	大西 元 (Onishi Hajime) (80334762)	金沢大学・機械工学系・助教 (13301)	
研究分担者	春木 将司 (Haruki Masashi) (90432682)	金沢大学・機械工学系・教授 (13301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------