

食品凍結中に磁場が及ぼす効果の実験的検証

Experimental Investigation of Effectiveness of Magnetic Field on Food Freezing Process

鈴木 徹*	竹内 友里*	益田 和徳*
Toru SUZUKI	Yuri TAKEUCHI	Kazunori MASUDA
渡辺 学*	白樫 了**	福田 裕 ³
Manabu WATANABE	Ryo SHIRAKASHI	Yutaka FUKUDA
鶴田 隆治 ⁴	山本 和貴 ⁵	古賀 信光 ⁶
Takaharu TSURUTA	Kazutaka YAMAMOTO	Nobumitsu KOGA
比留間 直也 ⁶	一岡 順 ⁷	高井 皓 ^{8†}
Naoya HIRUMA	Jun ICHIOKA	Kiyoshi TAKAI

- * 東京海洋大学海洋科学部食品生産科学科 (108-8477 東京都港区港南 4-5-7)
Dept. Food Sci.&Tech., Tokyo University of Marine Science and Technology (4-5-7 Konan, Minato-ku, 108-8477)
- ** 東京大学生産技術研究所 (153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo (4-6-1 Komaba, Meguro-ku, 153-8505)
- *3 水産大学校食品科学科 (759-6595 山口県下関市永田本町 2-7-1)
Dept. Food Sci.&Tech., National Fisheries University (2-7-1, Nagata-Honmachi, Shimonoseki, 759-6595)
- *4 九州工業大学工学研究院機械知能工学研究系 (804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1)
Dept. Mech. Eng., Kyusyu Institute of Technology (1-1 Sensui, Tobata-ku, Kitakyusyu, 804-8550)
- *5 食品総合研究所 (305-8642 茨城県つくば市観音台 2-1-12)
National Food Research Institute (2-1-12 Kannondai, Tsukuba, 305-8642)
- *6 前川製作所技術研究所 (302-0118 茨城県守谷市立沢 2000)
Research and Development Center, Mayekawa MFG. Co., Ltd. (2000 Tatsuzawa, Moriya-shi, 302-0118)
- *7 東洋製作所研究開発部 (242-0001 神奈川県大和市下鶴間 1634)
Research & Development Dept., Toyo Engineering Works, Ltd. (1634 Shimotsuruma, Yamato-shi, 242-0001)
- *8 日本冷凍空調学会 (160-0008 東京都新宿区三栄町 8)
Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers (8 San-ei-cho, Shinjuku-ku, 160-0008)

Summary

Recently, several food refrigeration equipments that utilize magnetic field have attracted much attention from food production companies, consumers and mass media. However, the effectiveness of the freezers is not scientifically examined. Therefore, the effectiveness should be clarified by experiments or theoretical considerations. In this study, the effect of weak magnetic field (about 0.0005 T) on freezing process of several kinds of foods was investigated by using a specially designed freezer facilitated with magnetic field generator. The investigation included the comparison of freezing curves, drip amount, physicochemical evaluations on color and texture, observation of microstructure, and sensory evaluation. From the results of the control experiments, it can be concluded that weak magnetic field around 0.0005 T provided no significant difference on temperature history during freezing and on the qualities of frozen foods, within our experimental conditions.

Key words : Magnetic field, Freezing, Food quality, Freezing curve, Freezer

1. 緒言

食品の冷凍保存は、殺菌操作を行う必要がないため、栄養成分、呈味成分、香気成分等の損失を抑制できる優れた保存法であるが、氷結晶が生成、成長することによって食品の微細組織を物理的に破壊してしまうという原理的な欠点を持つ。これを克服するためには、急速凍結によって凍結過程での氷結晶の成長を抑制するという方法が最も一般的であり、これまで数十年の長きに渡り多大な努力が成されてきた。しかし昨今、食品の凍結過程に磁場を印加することで、食品中の水の過冷却状態が維持されて氷結晶生成に影響を及ぼすとする説が現れ議論を呼んでいる。これが事実であれば食品冷凍技術に革新的な進歩をもたらす可能性があるが、これまでこの説に対する科学的検証はなされておらず、物理化学的体系に則った妥当性の検討、また再現、追試可能な実験研究結果は発表されていない。

磁場が食品中の水に及ぼす影響を考える場合、磁場が食品中の水に直接及ぼす影響と、水と相互作用している食品の成分に磁場が影響を及ぼし、それが間接的に水に影響を与える効果、のそれぞれを考える必要がある。そこでまずは、これらに関する文献調査を行った。また、実際に食品や生体を実験試料に用いて、磁場を印加して凍結を行った報告についても調査した。

ここで、混乱を避けるために磁場の強度について明確にしておく必要がある。Fig. 1 に磁場強度範囲とその利用領域を示す。一般に磁場は、発生源から距離が離れるほど強度が低下するため、たとえ発生源近傍での磁場強度が大きくても、実際に試料が置かれる位置での磁場強度は小さい可能性があることに留意する必要がある。ちなみに Fig. 1 に示した磁場強度は、試料の置かれている場における値である。一部の食品凍結装置では 0.03 T といった磁場を利用している例もあるが、一般的にみられる商業用磁場印加食品凍結装置では、Fig. 1 に示すように 0.00001 ~ 0.0005 T といった弱静磁場、あるいは弱交番磁場を利用していると推察される。ちなみにこれは地磁気の数倍程度の磁場強度であり、生体計測、医療などで人体への影響は小さ

いとして利用されている NMR, MRI の磁場強度 1.0 T 前後と比較しても 4 桁ほど小さい。

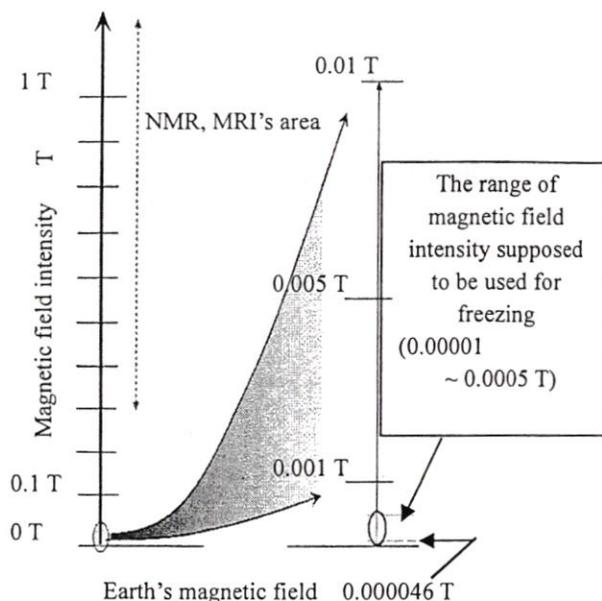


Fig. 1 The range of magnetic field intensity in practical use

1.1 水に対する磁場の影響

食品中の水は身近な物質でありながら、特別に大きな比熱、融解潜熱を示すなど特殊な物性をもつ。その理由は、水分子が極性を持つことから、液体中の水分子同士が水素結合によって何らかの構造を形成しているためと考えられている。しかし、純水においてさえも、それがいかなる構造であるかは解明されていない。クラスター構造という説明がよく聞かれるが、これも幾つか提案されているモデルの一つに過ぎない^{1), 2)}。2005年 Science 誌で特集された、今世紀に人類がもっとよく知らなければならない科学的トピックス 125 の中にも水の構造の解明が選ばれているほどである³⁾。ましてや、水に磁場がどのように作用するかについては科学的にほとんど未知である。近年 London South Bank University の Prof. M. Chaplin は、水に関する電磁場の効果について総説を発表している⁴⁾。Chaplin は、数 T といった非常に強い静磁場の印加が液体水の分子内構造あるいは分子集合構造、ひいては巨視的物性に影響を与えることは、信頼性のある理論、実験両面から支持できると結論している。ただしその影響もあまり大きなものではなく、例えば、水に 6 T といった強静

磁場を印加して融点が 5.6 mK 上昇したという報告がある⁵⁾。

一方で、弱磁場 (0.1 T 以下程度と考えられる) の水に対する影響について報告されている研究は、信憑性に欠ける報告が多く病的科学の様相を呈しているとまとめている。従って現在のところ、食品の凍結に關与するいわゆる自由水に関しては、かなり強い磁場でない限り、その物性に対する影響は今日の分析機器をもってしても検出限界以下にあると考えられる。

1.2 水との相互作用を含む生体系物質に対する磁場の影響

Wang ら⁶⁾ は、6 T といった強磁場の下では水を含むメチルセルロースのゾルゲル転移温度が低下すると報告しており、その理由は水分子のファンデルワールス結合力が磁場によって弱まるためであると推論している。また宮越⁸⁾ は、10 T といった非常に強い磁場下では細胞の配向現象などが観察されること、また弱磁場の場合でも、他の外因 (化学物質や放射線) が生物に与える影響を増幅するといった事例を報告している。弱磁場の生体活動への影響については、熱運動のような大きなエネルギーを介しての影響は考え難いが、生体膜や溶解する物質と水との界面における分子配向などの非熱的な影響がある可能性は否定できない⁴⁾。

一方で、生物物理学的見地からの理論的研究によれば⁷⁾、たとえ強磁場であっても磁場の与えるエネルギーは、化学反応を伴う代謝系に必要とされるエネルギーレベルに比べ無視できる大きさであることから、磁場は代謝系に影響を及ぼさないと結論している。さらに生物活動の中でエネルギーレベルの低い神経伝達系に関しても、影響が及ぶ可能性は非常に小さいことが示されている。さらに、携帯電話など電子機器から発生する微弱な電磁波が人体に及ぼす影響についての関心から、WHO は国際的に膨大な研究機関のデータをもとに、0.0005 T (5 G) 以下の磁場では有害な生物学的影響は認められないといった報告を発表している⁹⁻¹¹⁾。

食品は種々の物質の複合物であり、肉や魚等は細胞から構成される。その細胞を構成する膜やタンパク質酵素等は全て水分子との微妙な相

相互作用のバランスの上で複雑な機能を発現している。しかし、常温での弱磁場の数時間暴露における影響については、人体の場合と同様、顕著な影響は無いと結論して良いと思われる。

ただし、以上の見解はあくまでも常温域における議論であり、凍結過程のような低温下で熱的揺らぎが抑えられた状況下における、食品構成成分の水和物に対する磁場の影響に関する研究例は非常に少なく、理論的な推論も困難な状況にある。

1.3 食品への磁場の影響

実際の食品を用いた研究例として、岩手大学三浦¹²⁾ らが科学技術振興機構・岩手県地域結集型共同研究事業として行った、磁場利用による食品加工・貯蔵法の開発の研究報告がある。この一連の研究では、0.1 ~ 5.0 T の強磁場環境下において様々な食品の凍結に及ぼす影響が調べられ、脂質の結晶化にはある程度の影響があるものの他の食品素材については際立った影響が見られないといった最終結論が報告されている¹³⁻¹⁷⁾。

また、トリ胸肉の凍結の際に 1.5 ~ 2.0 mT の範囲で 20, 30, 40 Hz の磁場を印加させた場合と無印加で凍結した場合を比較した結果が報告されている¹⁸⁾。この報告によれば、凍結曲線に過冷却は見られず、テクスチャー、ドリップ量に関しても凍結一週間後、及び 6 ヶ月後の試料ともに、従来の急速凍結品との有意差は見られなかったものの、組織観察では 6 ヶ月の保存後、30 Hz で磁場印加凍結した試料のみが未凍結品に近い状態であったと述べている。しかし、組織観察において差が生じた理由が不明であり、他の品質評価との対応が付いていない点にも疑問が残る。組織観察用切片作成過程には通常、観察部位切り出し、解凍条件、樹脂包埋、切削等多くの工程でアーティファクトが入り込むため、この結果から、磁場が食品に影響を及ぼしたと結論するのは早計であると思われる。

1.4 生体への磁場の影響

磁場が生体組織、細胞に何らかの影響を及ぼす、という報告は数多く存在するが、その凍結過程で磁場を印加したという研究例は少ない。

梶田らは、ブタ精子の凍結中に 24 ~ 745 mT の静磁場を印加することで、融解後の精子生存指数が高められたと報告している¹⁹⁾。しかし、精子の損傷度合いの指標となる GOT 漏出量は対照区と比較して有意な差はなかったとしており、磁場がどのように影響したかについて、明確な説明は成されていない。

また Kaku *et al.* は、磁場印加機能を備えたプログラムフリーザを用いて歯根細胞の凍結保存実験を行い、磁場発生装置に流す電流を 5, 75, 150 mA と変えたところ、150 mA の場合のみ有意に生存率が低下したと報告している²⁰⁾。しかし、示されているのは電流値のみで、サンプルに印加された磁場の強度と周波数は明らかにされていない。しかも、凍結時の伝熱特性に関わる諸条件も不明であるため、磁場が本当に凍結過程に影響を及ぼしているのかどうか、この論文から判断することは難しい。

さらに 2008 年受精着床学会学術大会では、サル卵巣²¹⁾ やブタ卵巣²²⁾ の凍結保存に、磁場印加凍結が有効であるという研究結果が発表されているが、前者は磁場無しとの比較実験を行っておらず、後者は磁場の有無に関わらず凍結曲線の形は同じで、過冷却解消にも相違が無かったことが口頭で発表された。

このように、医学、生物分野においては、凍結時に磁場を印加することが有効である、という報告はあるものの、それが本当に磁場の効果によるものなのか、その場合磁場がどのように作用しているのか、という点に関しては詳細な検討が行なわれていない。よって、これらの報告をもって、磁場が生体の凍結に真に有効であると証明されたとは言えないと考えられる。

1.5 本研究の目的

以上より、食品の凍結過程において微弱磁場を印加した場合、水分子の運動に何かしらの影響を及ぼすとする仮説は科学的根拠に乏しいと判断される。また、精子や卵巣の凍結保存に磁場が有効であるとの報告がある一方で、弱磁場が生体活動に影響を及ぼさないとする WHO の調査結果もあり、現時点では統一の見解を見出すことが難しい。すなわち、既存の文献からは、食品の凍結過程に磁場を印加することが有効で

あるか否かを判断することはできない。

そこで本研究では、凍結時に微弱な磁場を印加した場合に、実際の食品に対して、明らかな違いが表れるか否かを検証するために、凍結条件を精密にコントロールできる実験用のエアブラストフリーザを用いて、磁場の有無だけを変化させた対照実験を行うこととした。調査項目としては、まず凍結曲線への影響、すなわち過冷却度、また平衡凍結点温度への影響を調べた。さらに両条件で凍結した試料の氷結晶および細胞組織観察による比較を行った。また解凍後の食品素材の物理化学的な品質への影響、官能的評価に対する影響についても検討を行った。

2. 実験方法

本実験の目的は、磁場の印加による影響を確実に検出することである。そのためには、磁場の有無以外の条件を完全に一致させることが必要である。しかし通常の食品凍結実験では、様々な因子のため凍結曲線に再現性が乏しい。すなわち一般的な食品の凍結試験では、試料の形状を厳密に決めることが難しく、温度センサの位置の正確な設定も困難であることなど、凍結速度、凍結曲線に影響を与える因子が多いため、たとえ同じ試料を用いても精度の高い再現性のある凍結曲線を得ることは困難であった。そのためこれまでの手法では、異なる試料間、測定間の微妙な相違を検出することは難しく、大雑把な違いの議論をすることしかできなかった。

しかし本試験研究では、食品の凍結に微弱磁場が及ぼす影響を可能な限り高精度で検出するため、Table 2 のように食品の凍結に影響を及ぼす伝熱工学的要因を洗い出し、それらを厳密に一定とする条件を設定し、磁場印加の有無だけを変化させて凍結する比較試験を行った。以下、実験方法の詳細について説明する。

2.1 凍結装置

凍結装置には、Fig. 2 に示すような、磁場発生コイルを内蔵した実験用のエアブラストフリーザを用いた。Fig. 2(b)に示すように、塩化ビニール製試料台の上下にそれぞれ 80 mm の間隔で磁場発生コイルが設置されており、サンプルの設置

位置で垂直方向の平行磁場が形成されるようになっている。凍結チャンバーは垂直のダクト状になっており、冷気が上から下へ流れている中にサンプルを置いて凍結させる構造となっている。一般的な業務用フリーザでは、被凍結物周りの冷気の流れが一方向ではないため、たとえ同じ場所に置いたとしても、気流とサンプルの間の熱伝達率は同じにはなり難いが、今回用いた凍結装置ならば、再現性の高い凍結試験が可能である。また冷気の温度を一定にコントロールするためにヒータが取り付けられており、設定温度からの誤差は $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内である。さらに凍結条件を厳密に一定とするため、凍結装置運転中の試料台近傍の風速分布、温度分布、磁場強度分布を予め測定し、Fig. 3 に示す約 $100\text{ mm}\times 140\text{ mm}$ のエリアでは、風速、温度、磁場強度が均一であることが確認できたため、実験サンプルは必ずこのエリアに設置することとした。

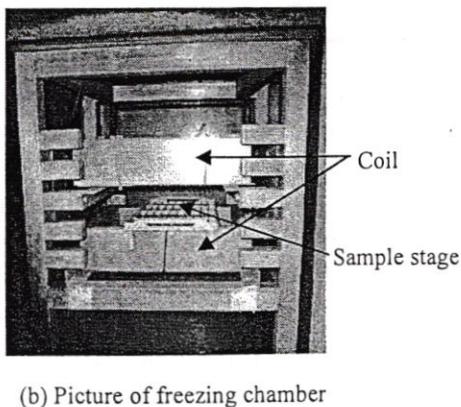
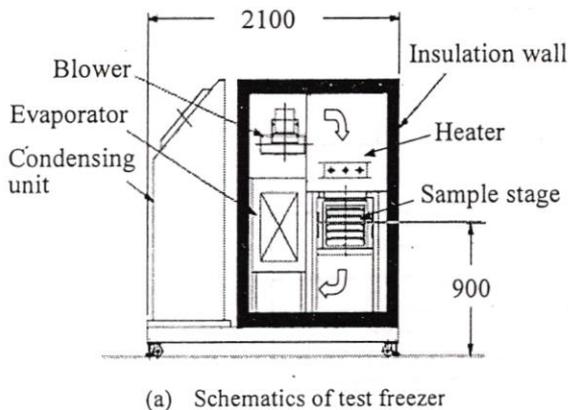


Fig. 2 Details of test freezer

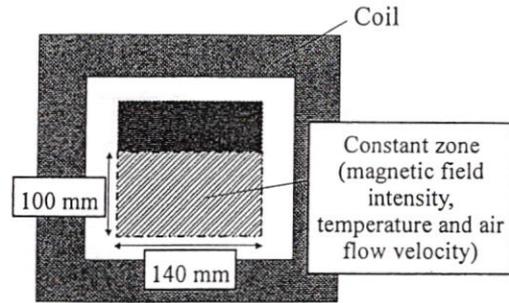


Fig. 3 Constant zone where samples are placed

2.2 凍結試料

試験に用いた試料を Table 1 に示す。野菜類としては入手が容易で、形状の切り出し易さ、組織の均一性等、実験上扱いやすいダイコンとサツマイモを、また色調、テクスチャーなど効果が確認しやすいと考えられるハウレンソウを用いた。また動物性食品としては凍結条件によって差異が出やすく、かつ実験上扱いやすい試料であるマグロ(メバチマグロ)とブリを用いた。さらに、組織の均一な標準的試料として寒天ゲルを用いた。

測定に際しては、Table 1 に示した各試料を Table 2 に示したサイズに切り出し、Fig. 4 のように断熱材(発泡スチロール)に埋め込むことで次元凍結とした。サンプル中心温度の測定には極細のT型熱電対を用い、これをサンプルの伝熱方向の中心点に正確に取り付けた。サンプル表面は極薄のテープで覆って乾燥を防止するとともに、テープとサンプルの間に極細熱電対を挟むことで表面温度の測定を行った。

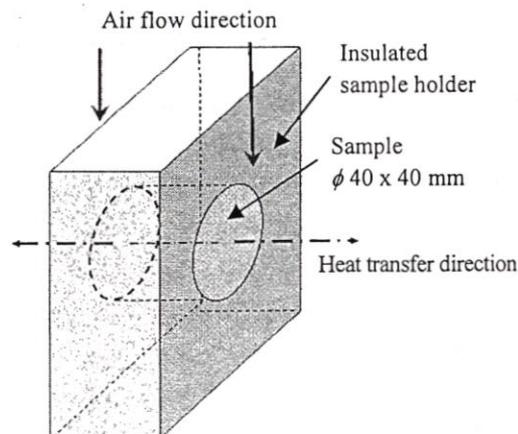


Fig. 4 Special setting for realizing 1-dimensional freezing

Table 1 List of samples and their terms of evaluation

		交番磁場						共鳴	
		急速凍結			緩慢凍結			急速凍結	
		凍結曲線	品質評価	解凍後組織観察	凍結組織観察	官能評価	凍結曲線	品質評価	凍結曲線
野菜	ダイコン	○	○	○					
	サツマイモ	○	○	○					
	ホウレンソウ		○						
魚肉	ブリ	○	○	○		○			
	マグロ	○	○	○	○	○	○	○	○
その他	寒天ゲル	○		○	○				○

Table 2 Important terms to be considered to realize constant heat transfer condition

要因	設定要件	具体的要件	
食品内部の熱伝導	形状	単純化形状で伝熱方向を限定、かつ同一形状試料間比較	円筒 ($\phi 40\text{mm} \times 40\text{mm}$)
	組成	試料採取：同一個の同一部位から切り出し試料とする 試料保管：比較する試料の組成の変化が起きない時間	ブリ：背肉中央、血合い無し マグロ：赤身、背肉 ダイコン：中央部 サツマイモ：中央部
	組織	組織構造異方性がある場合、伝熱方向をそろえる	繊維方向に平行
	初期温度	試料の初期温度を一定、均一な内部温度分布状態とする	5~7℃、毎回測定
	測定点	中心、表面位置の正確な固定	位置精度 ($\pm 1\text{mm}$ 以内)
	温度センサ	被測定物に熱的な影響を与えない (太さを極細に)	$\phi 0.076\text{mm}$ T型熱電対 $\phi 0.25\text{mm}$ シース熱電対
表面熱伝達	気流	試料伝熱面に対して同じ方向、常に一定の気流を当てる	食品伝熱面に平行な気流、風速 3.4 m/s
	空気温度	冷却 (空気) 温度の時間変動、場所による差異の解消	-35 \pm 2℃、常に測定監視

またマグロについては、通常の急速凍結に加えて、魚体中心部を想定した緩慢凍結を行うため、サンプル表面を断熱材で覆った実験も行った。なおサンプルの切り出しに当っては、Table 2 に示すように組成や組織にも留意した。

ただし、ホウレンソウは形状が不定であるため温度測定は行わず品質評価のみとした。またブリは、温度測定と品質評価は上述の一次元凍結サンプルを用いたが、官能試験用にはある程度の分量が必要であったため、一次元凍結ではなく、厚さ 30 mm、質量 100 g 程度の肉塊を縦

において凍結させた。

2.3 磁場の印加方法

本実験では、2種類の磁場印加方法を試みた。一つ目は、Fig. 5 のように垂直方向の交番磁場を印加するもので、これを一方向交番磁場と呼ぶ。磁場強度は 5 G (1 T = 10000 G) で、参考実験の一部では 1 G とした。磁場強度の測定にはハンディ Gaussメータ (東陽テクニカ、410 型、計測精度 $\pm 5\%$ R.S.) を用い、上記磁場強度が試料セット位置で得られるように、コイル

に流す電流を調節した。ガウスメータのプロープには断熱を施し、凍結実験時毎に磁場強度を確認した。交番磁場の周波数は、商用周波数の50 Hzとしたが、これに先立ち幾つかの試料について、周波数を50 Hzから10 kHz程度まで2~3段階に変化させた凍結試験を行い、凍結-解凍後の品質に対して、交番磁場の周波数の違いによる顕著な影響がみられないことを確認している。この条件では、Table 2に示す全ての試料について試験を行った。

もう一つは、Fig. 6のように水平方向の静磁場と垂直方向の高周波変動磁場を組み合わせる方法で、これは共鳴方式(NMR)と呼ぶ。水プロトンの核磁気共鳴条件に近づけるため、静磁場は200 G、交番磁場は周波数1 MHz、磁場強度は実効1.2 Gとした。この共鳴方式についてはマグロ試料(急速凍結条件)と寒天ゲルのみについて試験を行った。

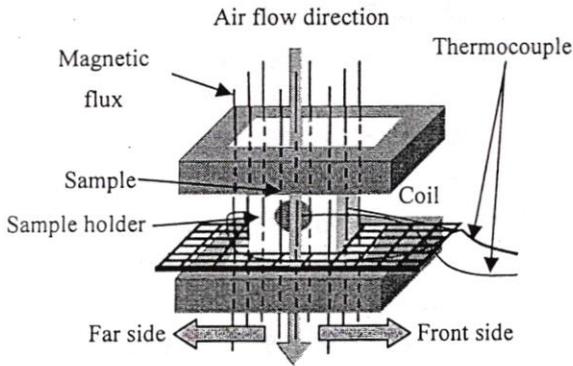


Fig. 5 Schematics of experimental setting for the freezing test with simple magnetic fields

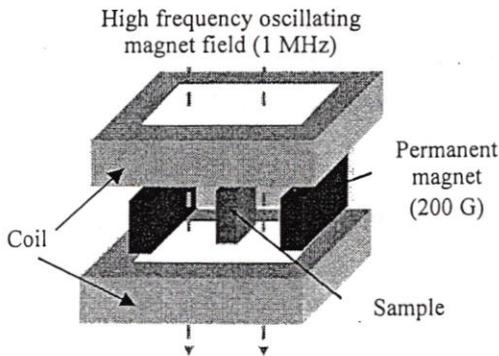


Fig. 6 Schematics of experimental setting for the freezing test in magnetic resonance condition

2.4 凍結試験

凍結装置の運転を開始し、十分に予冷を行っ

た。その間に、試料の初期温度を一定にするため、予め1~2時間程度、別の低温恒温庫にて冷却した。中心、表面ともおよそ7℃となったら、試料を凍結装置に素早くセットし冷却を開始した。表面温度、及び中心温度は予め試料に埋め込んだ熱電対センサによって凍結装置セット直後からモニターするとともにデータロガーに記録した。中心温度が-40℃に到達した時点で凍結を完了したとみなした。上記の操作を、各種サンプルに対して、磁場印加と磁場無しで3回ずつ行った。

2.5 品質評価

本実験では、磁場印加の有無以外全く同じ条件で凍結させているため、凍結曲線が同じであれば氷結晶の生成過程は同様で、ひいては品質も同様であると考えられる。そこで、まずは凍結曲線の比較を行った。その上で確認のために、以下の品質評価試験を行った。このとき、凍結が完了した各試料は直ちにポリエチレン包装袋に密閉した上で-60℃のストックに保存し、1週間以内に品質評価試験を行うようにした。そのため保存中の品質変化は無いと考えられる。

2.5.1 物理化学的評価

凍結後包装された各試料を20℃流水中で中心温度4℃まで解凍した後、色差計による色調(L*, b*, a*値)、遠心ドリップ流出量、およびテクスチャー値として押し込み最大荷重を測定した。各項目の試験条件はTable 3に示した。

2.5.2 組織観察

主に3種類の方法を用いて微細組織観察を行った。1つ目は解凍後の組織観察である。凍結包装状態の試料を、20℃の流水中で中心温度4℃まで解凍して小片に切り出し、凍結置換法に準じて組織固定を行い、これから顕微鏡観察切片を作成して光学顕微鏡で観察を行った。この観察は、ホウレンソウ以外の全ての急速凍結試料について行った。2つ目は凍結状態の氷結晶組織観察である。凍結試料を-20℃以下の雰囲気下において切り出した後、凍結置換法²³⁾を用いて顕微鏡観察切片を作成し、光学顕微鏡で氷結晶組織を観察した。この観察は、急速凍結のマグロ試料についてのみ

Table 3 Details of physicochemical quality evaluation

色調	色彩色差計 (MINOLTA CR-100)	L* a* b* 値
ドリップ量	遠心ドリップ	<ul style="list-style-type: none"> ●サンプル重量：約 1.5 g ●野菜：2330 g, 15 min 雰囲気温度 20 °C ●魚：524 g, 15 min 雰囲気温度 0 °C
テクスチャー	押し込み試験最大荷重	<ul style="list-style-type: none"> ●サンプル重量：約 3 g ●プランジャー形状： 野菜：直径 3 mm 円柱 魚：長さ 20 mm 楔形 ●押し込み割合： 野菜：30% 魚：80% 押し込み時の最大荷重 ●速度：1 mm/sec

行った。3 つ目はマイクロスライサ顕微鏡²⁴⁾を用いて凍結したままの氷結晶組織状態の 3 次元微細組織構造観察を行うもので、これは寒天ゲルについてのみ行った。

2.5.3 官能試験

ブリとマグロ(急速凍結)については、解凍後、官能試験による比較を行った。ブリの官能試験は、日本水産(株)中央研究所の 20 代から 50 代の男女混合ブリ専門パネル 16 名によって、色調、透明感などの外観、臭い、味、硬さ、歯切れ等の項目(Table 5 参照)について、評点法(絶対評価)および一対比較法(相対評価)を用いて行った。マグロの官能試験は、東京海洋大学において、20 代から 40 代までの研究室構成員の 15 名を被験者とし、ブリの官能試験と同様の方法で行った。被験者には予めブリの試験方法を開示し、ブリの試験項目に準じた 1 回の訓練を与えてからマグロの官能試験を実施した。得られた結果について、有意差の判定には分散分析と t 検定を用いた。

3. 結果

3.1 一方向交番磁場印加による試験結果

3.1.1 凍結曲線

Figs. 7-12 に各試料の凍結曲線の比較を示す。各図の上段が対照区(Control)である磁場無しのデータ、下段が磁場印加のデータであり、それぞれ 3~4 回の試験結果を重ねて示した。

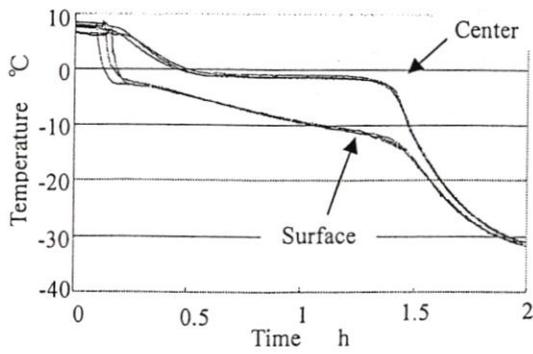
全ての図において、表面温度と中心温度の各曲線群はほとんど重複一致を示しており、これは実験条件の再現性が極めて高いことを裏付けている。植物系の素材は少々ばらつきが大きいものの、ブリとマグロでは、表面、中心とも凍結曲線全体を通して大きくても 2 °C 程度の誤差に収まっている。一般に、たとえ同一の食品サンプルと凍結装置を用いたとしても、再現性のある凍結曲線はなかなか得られないものと考えられてきたが、本実験の結果より、試料の形状や風速風向等、厳密に伝熱条件を設定することで、ほぼ完全に同一な凍結曲線が得られることがわかった。

そこで、磁場無し、磁場印加の凍結曲線を比較してみると、両者はやはり良く一致していることがわかる。各試料の中心温度曲線の平坦部によって示される平衡凍結点温度は、磁場印加の有無によらずほぼ同一であり、氷結晶生成域を示す平坦部の持続時間も測定誤差以内で全く差異が認められなかった。また表面温度曲線に見られる、過冷却解消による小さなステップ上の温度上昇は、磁場無しの場合に一部明確にとらえられるデータがあったが、これも誤差の範囲内であり磁場印加と磁場無しに間に差異は無いと判断できる。

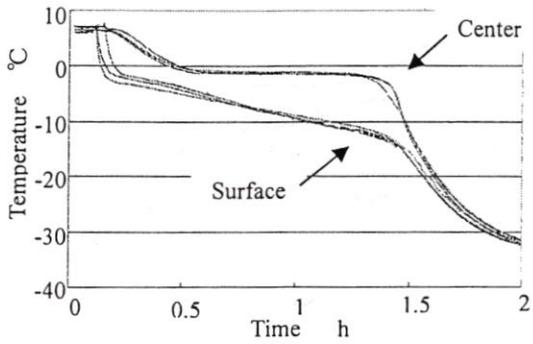
結局、磁場を印加することで過冷却が深くなる、食品の平衡凍結点温度が低下する、等の現象は全く見られず、凍結速度に対する影響も認められなかった。凍結中の温度変化における微細な違いを検出するために極めて再現性の高い実験系を構築したにも関わらず、磁場の有無に起因する違いが現れなかったという事実からは、食品の凍結中に磁場を印加しても氷結晶生成過程に対してはほとんど影響を及ぼしていないと判断される。

3.1.2 物理化学的品質評価

急速凍結を行った各試料に関する、色差測定、遠心ドリップ量測定、最大押し込み荷重の測定結果を Figs. 13-17 に示す。色調については、色の明暗を示す明度を L* 値で、色の鮮やかさを示す彩度(saturation)を b* および a* の値を用いて $(b^{*2} + a^{*2})^{1/2}$ の式から求めた値で示した。またドリップ量は、ドリップ流出前のサンプルに対する質量割合 [%] として求めた。いずれの試

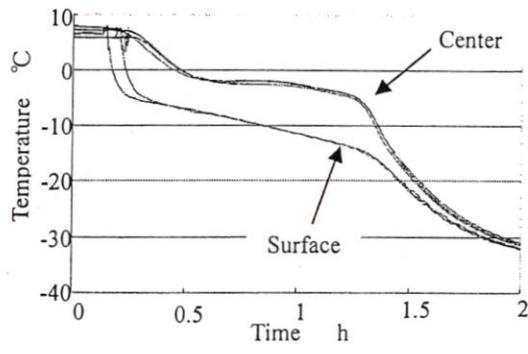


(a) Control

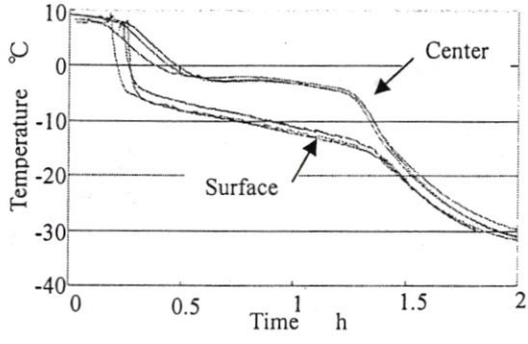


(b) Magnetic field

Fig. 7 Freezing curves for radish. (n=3)

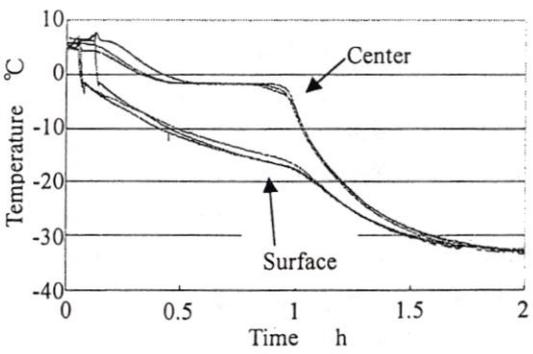


(a) Control

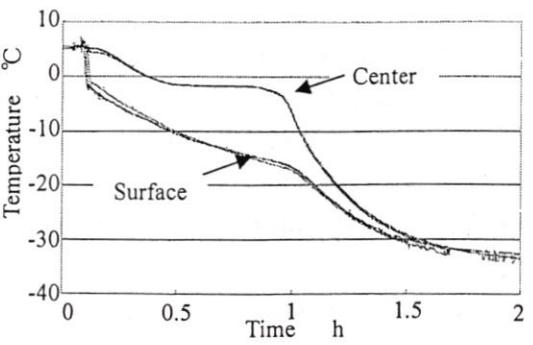


(b) Magnetic field

Fig. 8 Freezing curves for Sweet potato (n=3)

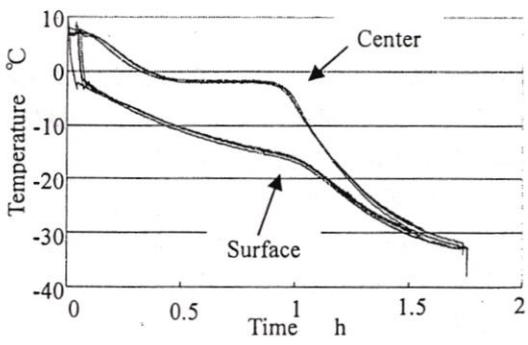


(a) Control

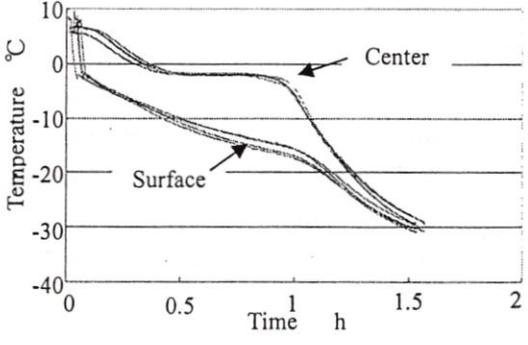


(b) Magnetic field

Fig. 9 Freezing curves for Yellow tail (n=3)

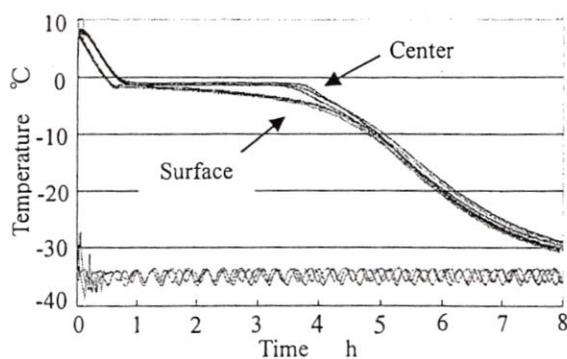


(a) Control

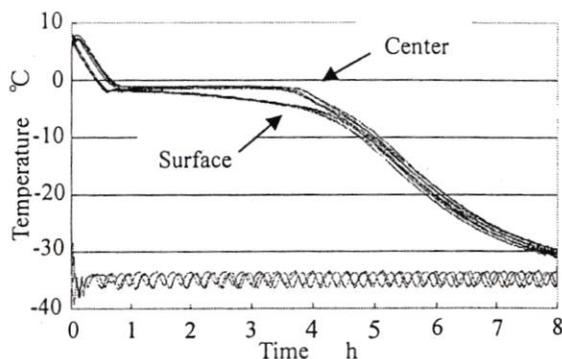


(b) Magnetic field

Fig. 10 Freezing curves for Tuna (n=4)



(a) Control



(b) Magnetic field

Fig. 11 Freezing curves for tuna (slowly frozen) (n=3)

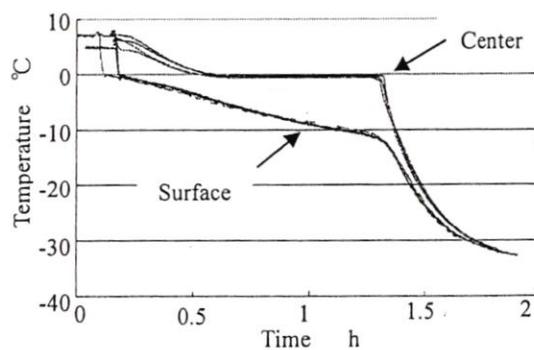
料においても色差, ドリップ量, テクスチャーの平均値には大小が見られるが, 測定誤差の範囲内であり, 全ての評価項目において, 磁場印加と磁場無しの試料の間で有意な差は認められなかった. マグロに関しては, 急速凍結に加えて, 緩慢凍結時における磁場印加の影響を調べたが, Fig. 19 に示す通り, 磁場印加と磁場無しとの間に有意な差は認められなかった.

3.1.3 組織観察結果

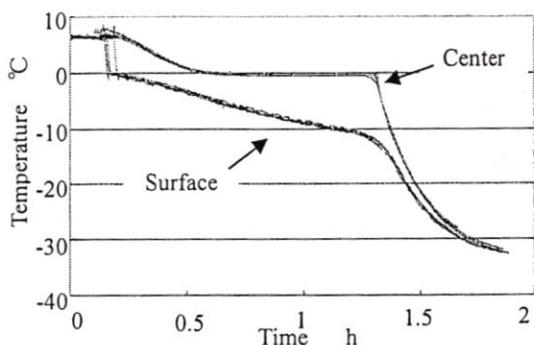
Figs. 13-17 には, 各試料の解凍後における組織写真が示されている. Fig. 18 は急速凍結したマグロの氷結晶組織写真, Fig. 20 は緩慢凍結したマグロの氷結晶組織写真, Fig. 21 は凍結状態の寒天ゲルの3次元組織画像である. いずれにおいても, 磁場印加と磁場無しの試料間に顕著な差異は認められなかった.

3.1.4 官能試験結果

マグロ (急速凍結) およびブリの, 解凍後の



(a) Control



(b) Magnetic field

Fig. 12 Freezing curves for Agar gel (n=4)

官能評価結果を Table 4, 5 に示す. 官能評価の場合においても, 統計的手法に基づく検定の結果, 磁場印加と磁場無しの間には, いずれの項目においても有意差は見られなかった.

以上より, 凍結曲線, 物理化学的品質評価, 組織観察, 官能試験において, 本試験で用いた磁場強度の一方交番磁場を印加して凍結された食品の品質は, 磁場無しで凍結された食品の品質と区別し得る差異は見出せなかった.

3.2 共鳴方式磁場印加試験の結果

共鳴方式磁場印加試験では, マグロの急速凍結条件下における凍結曲線の比較および物理化学的品質評価による比較を行った結果を, また寒天ゲルについては凍結曲線の比較のみを行った結果を述べる.

Fig. 22 にはマグロの磁場印加, 磁場無しにおける凍結曲線の比較を示す. 両凍結曲線はほとんど一致したため, 氷結晶生成過程に対して磁場印加は影響を及ぼさないと考えられる. また,

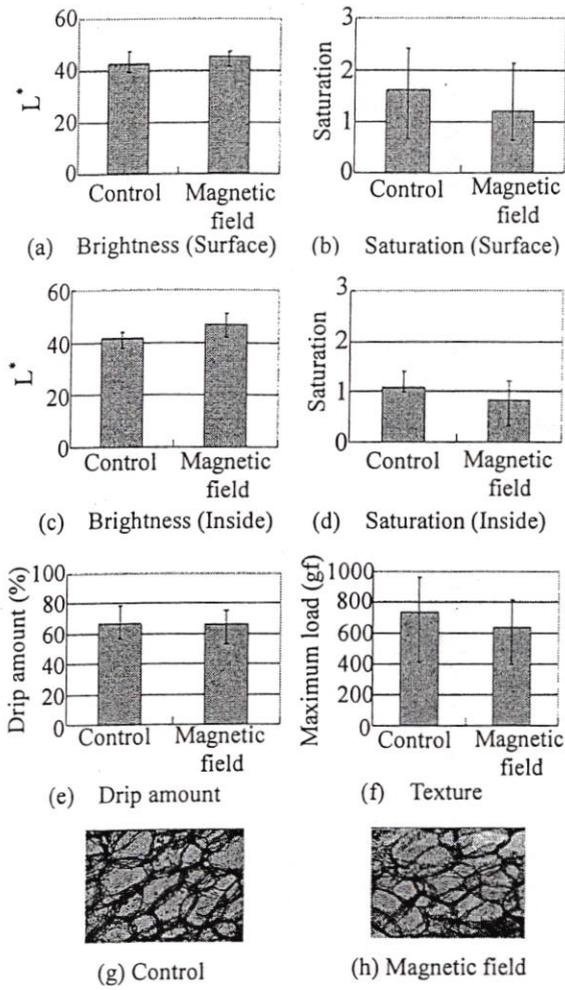


Fig. 13 Quality evaluation results and images of micro structure for radish

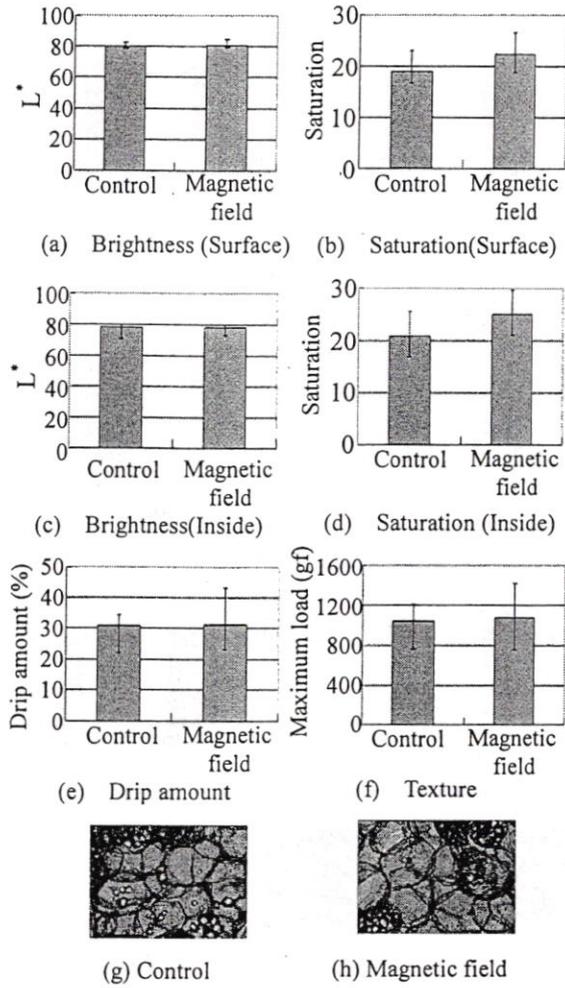


Fig. 14 Quality evaluation results and images of micro structure for sweet potato

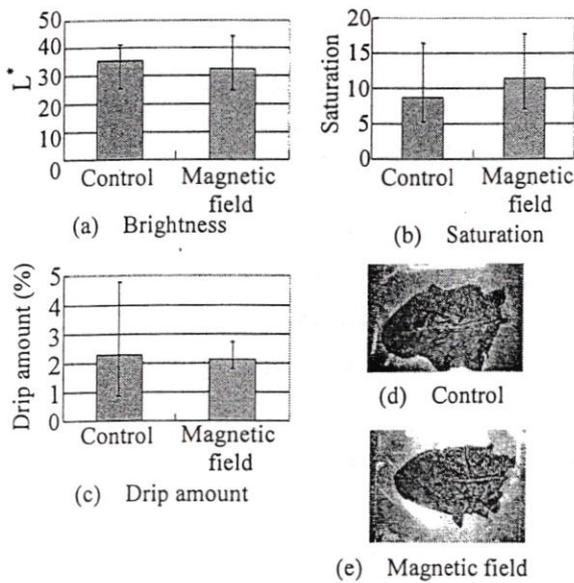


Fig. 15 Quality evaluation results and images for spinach

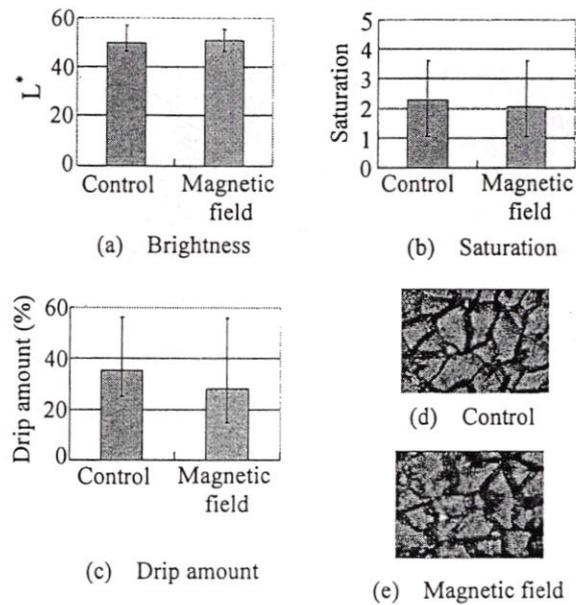


Fig. 16 Quality evaluation results and images of micro structure for yellow tail

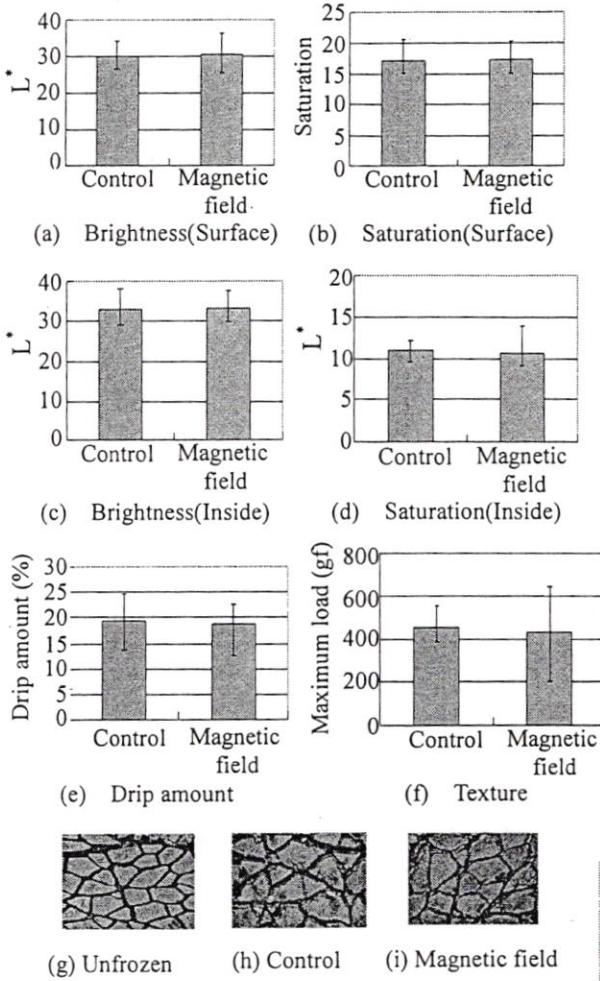


Fig. 17 Quality evaluation results and images of micro structure for tuna

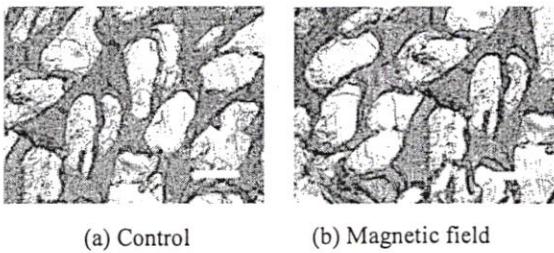


Fig. 18 Images of ice crystals in tuna tissue (Scale bar : 100 μm)

Table 4 Results of sensory evaluation for tuna

Evaluation item			MF freezing	Control	Differences
Side A	Redness	Relative evaluation	-0.30 ± 0.35	0.30 ± 0.35	Negative
	Brightness	Relative evaluation	-0.30 ± 0.63	0.30 ± 0.63	
	Color tone	Relative evaluation	-0.20 ± 0.54	0.20 ± 0.54	
	Wateriness	Relative evaluation	0.10 ± 0.39	-0.10 ± 0.39	
Side B	Redness	Relative evaluation	0.52 ± 0.52	-0.52 ± 0.52	
	Brightness	Relative evaluation	0.66 ± 0.66	-0.66 ± 0.66	
	Color tone	Relative evaluation	0.54 ± 0.54	-0.54 ± 0.54	
	Wateriness	Relative evaluation	0.49 ± 0.49	-0.49 ± 0.49	
Smelling	Smell	Relative evaluation	-0.10 ± 0.47	0.10 ± 0.47	
Hardness	Hardness	Relative evaluation	0.07 ± 0.50	-0.07 ± 0.50	
Tasting	Wateriness tasting	Absolute evaluation	1.07 ± 1.10	1.13 ± 1.13	

Table 5 Results of sensory evaluation for yellow tail

Evaluation item			MF freezing	Control	Significant difference
The color of red muscle (-: Brown, +: Red)	Relative evaluation	0.11 ± 0.24	-0.11 ± 0.24		Negative
Brightness (Without red muscle)	Relative evaluation	0.08 ± 0.29	-0.08 ± 0.29		
Color tone (Without red muscle) (-: Red +: White or yellow)	Relative evaluation	-0.11 ± 0.37	0.11 ± 0.37		
Clearness (Without red muscle)	Relative evaluation	0.08 ± 0.28	-0.08 ± 0.28		
Oiliness	Relative evaluation	0.02 ± 0.31	-0.02 ± 0.31		
Smell fishy	Absolute evaluation	1.00 ± 0.88	1.13 ± 0.91		
Smell	Curve evaluation	-0.05 ± 0.29	0.05 ± 0.29		
Fishy taste	Absolute evaluation	0.91 ± 0.86	1.03 ± 0.93		
Umami	Relative evaluation	0.13 ± 0.32	-0.13 ± 0.32		
Amount of the oil	Relative evaluation	-0.05 ± 0.42	0.05 ± 0.42		
Wateriness	Absolute evaluation	0.47 ± 0.62	0.63 ± 0.75		
Hardness	Relative evaluation	-0.09 ± 0.40	0.09 ± 0.40		
Articulate	Relative evaluation	0.00 ± 0.33	0.00 ± 0.33		
Resilience	Relative evaluation	-0.16 ± 0.39	0.16 ± 0.39		
Feeling on the tongue	Relative evaluation	0.08 ± 0.28	-0.08 ± 0.28		
Juiciness	Relative evaluation	0.05 ± 0.28	-0.05 ± 0.28		

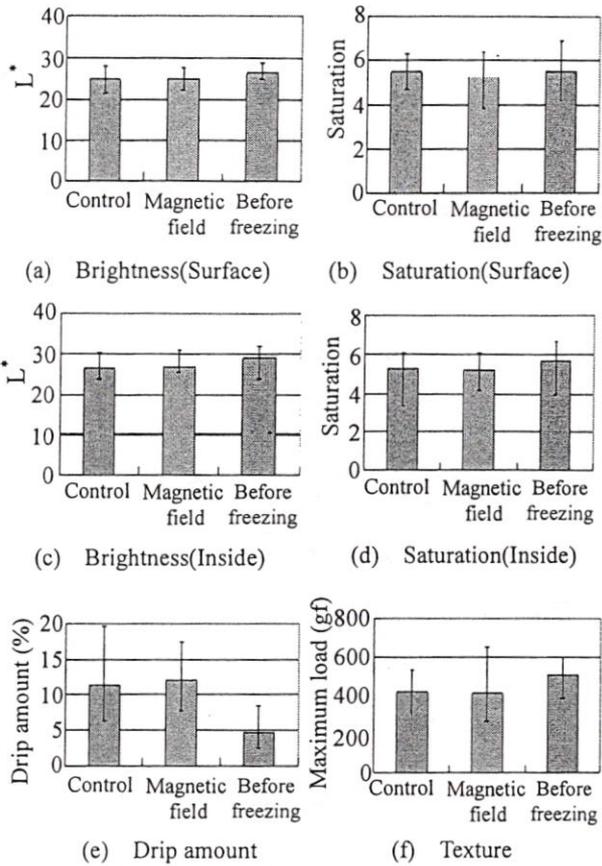


Fig. 19 Quality evaluation results for slowly frozen tuna

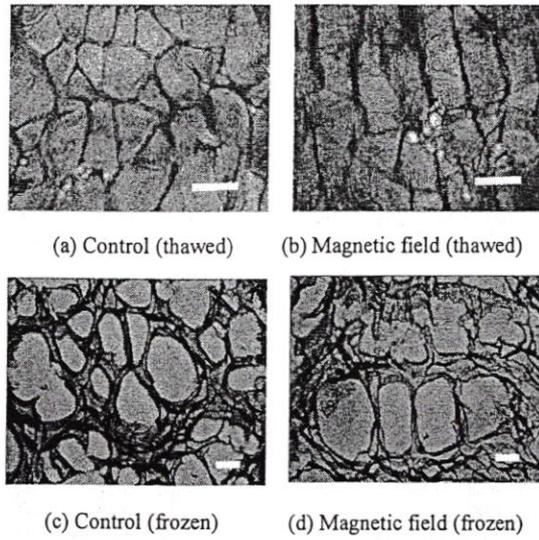


Fig. 20 Images of ice crystals in slowly frozen tuna tissue (Scale bar : 100 μm)

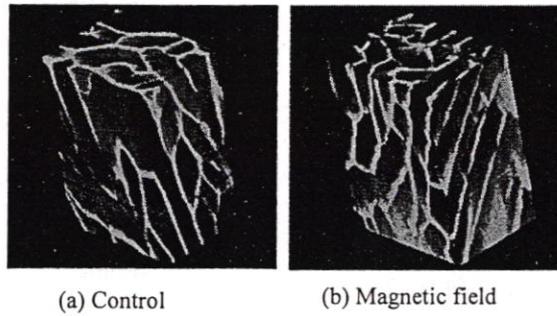


Fig. 21 3-D images of ice crystals in agar gel

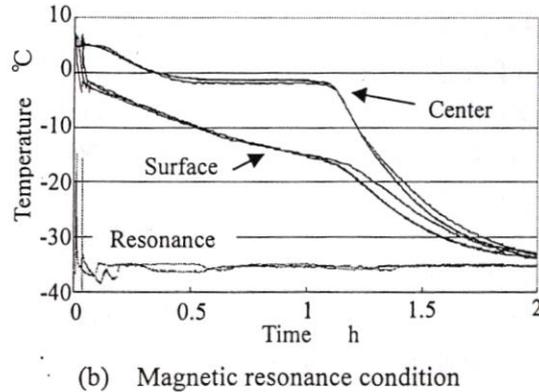
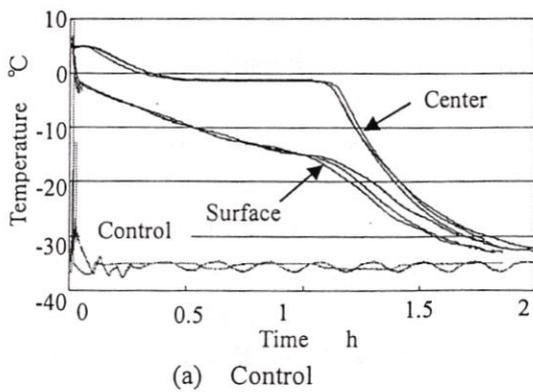


Fig. 22 Freezing curves of tuna under the magnetic resonance condition (n=3)

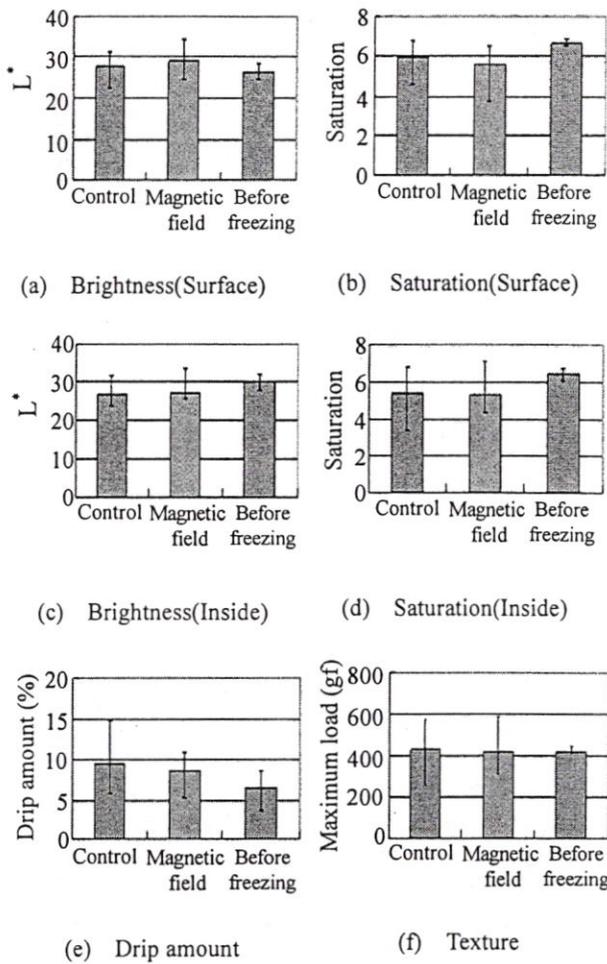


Fig. 23 Quality evaluation results for tuna frozen under the magnetic resonance condition

Fig. 23 に示すマグロの物理化学的品質評価結果において、いずれの項目についても磁場印加、磁場無しの試料の間の差異は誤差範囲内であり、有意な差は認められなかった。Fig. 24 には寒天ゲルの凍結曲線の比較を示すが、やはり磁場印加の影響は認められずほぼ一致する凍結曲線が得られた。

よって、共鳴方式にて磁場印加した場合においても、先に述べた一方向交番磁場印加と同様、本試験で用いた磁場強度では、食品の凍結時における氷結晶生成には影響を与えず、かつ品質にも影響を及ぼさないと判断できる。

4. まとめ

食品の凍結過程に磁場を印加することで高品位な凍結が可能となる、という説が昨今巷間を

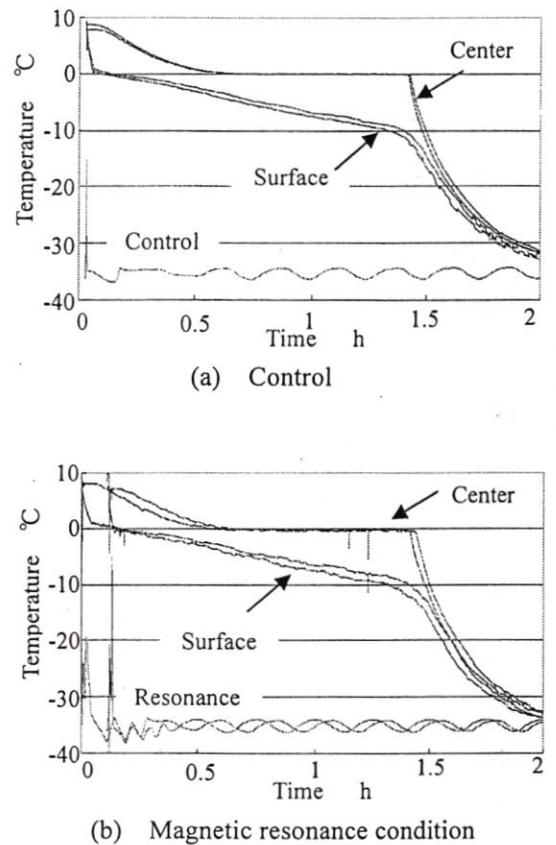


Fig. 24 Freezing curves of agar gel under the magnetic resonance condition (n=2)

にぎわしている。真実であれば食品冷凍技術に革新をもたらす可能性があるが、これを科学的に検証した例は全く見られず、むしろ既往の文献からは、この説が科学的根拠に乏しいという見解が多く得られた。

そこで本研究では、伝熱条件を厳密に同一にした実験系を構築して、磁場印加と磁場無しの条件下で実際に様々な食品素材の凍結試験を行い、磁場が凍結過程に及ぼす影響を検出するための実験を行った。しかし、調べた全ての食材の凍結曲線には、磁場の有無に起因する差異は認められなかった。特に、過冷却現象に対する影響が見られなかったことは、磁場印加が過冷却に影響を与えないとする報告^{18), 22)}とも一致する。温度変化だけでなく、凍結マグロの氷結晶組織観察においても磁場の有無による差異は無かった。また解凍後の食品としての品質評価

を行った結果、調べた全ての食材の理化学的評価、組織構造評価において、磁場印加の有無による差異は見出せなかった。さらにマグロ、ブリ試料について行った官能試験でも、磁場印加、磁場無しの試料の間に統計学的に有意な差は見出せなかった。特にマグロでは、大型魚の中心部の凍結を想定した緩慢凍結実験も行ったが、磁場印加による凍結曲線への影響は全く見られなかった。

以上より、本実験で検討した磁場条件（磁場強度約 5 G—周波数 50 Hz の一方向交番磁場、および 200 G の静磁場と 1.2 G—1 MHz の交番磁場を組み合わせた核磁気共鳴条件）の下で食品を凍結させた場合、磁場の印加は、食品中の氷結晶の生成挙動および解凍後の品質に、なんら影響を及ぼさないと結論できる。

ただし、本研究の結果はあくまで食品としての品質に限定しているものであり、報告例のある細胞の生死に関する議論とは一線を画するべきものである。しかし、生体組織や細胞に対する磁場の効果を論ずる場合であっても、やはり、凍結時の伝熱条件を厳密に制御した実験データに基づく比較検討が行われて然るべきである。その上で何かしらの効果が認められたならば、水や生体物質に対する磁場の効果が十分に実証されていない現状を良く勘案した上で、慎重な姿勢で効果機序の検証を行うべきである。

生体、食品を対象とした磁場凍結に関連する研究者には、専門である医学、生物学、家政学等だけでなく、伝熱工学的、物理化学的な視点を踏まえた上で、誤解を生まない科学的報告を期待したい。

参考論文

- 1) 荒田洋治：PNE モノグラフ，水の書共立出版，(1998)，74-89.
- 2) 荒川泓：水・水溶液の構造と物性，北海道大学図書刊行会，(1989)，120-149.
- 3) D. Kennedy and C. J. Norman: So much more to know in ..."125th Anniversary", Science, 309, 83 (2005).
- 4) M. Chaplin: Magnetic and electric effects on water in Water Structure and Science, <http://www.lsbu.ac.uk/water/magnetic.html>, 8 Aug. ver. (2007).
- 5) H. Inaba, T. Saitou, K. Tozaki, and H. Hayashi: Effect of the magnetic field on the melting transition of H₂O and D₂O measured by a high resolution and supersensitive differential scanning calorimeter, J. Appl. Phys., 96, 6127 (2004).
- 6) Q. Wang, L. Li, G. Chen and Y. Yang: Effects of magnetic field on the sol-gel transition of methylcellulose in water, Carbohydr. Polymers, 70, 345 (2007).
- 7) J.C.Weaver, T.E.Vaughan, and G.T. Martin: Biological effects due to Weak electric and magnetic fields: the temperature variation threshold, Biophysical J., 76, 3026 (1999).
- 8) 宮越順二：電磁場生体影響評価研究の現状ならびに電磁場生命科学の確立に向けて，放射線生物研究，40 (4), 385 (2005).
- 9) WHO: <http://www.who.int/peh-emf/> Fact Sheets No.205 (1998); 国立保健医療科学院 (生活環境部による日本語訳ホームページ) <http://www.niph.go.jp/soshiki/seikatsu/seiri/html/WHO/top.htm#top> ⑦ (2006).
- 10) 中部電力：関係機関・学会の見解；磁界に対する見解 <http://www.chuden.co.jp/manabu/magnet/agency/jikai.html> (2005).
- 11) 電磁界影響調査検討会資源エネルギー庁：電磁界影響に関する調査・検討報告書，(1993)，39.
- 12) 三浦靖，金哲：磁気利用による食品加工・貯蔵法の開発，岩手県地域結集型共同研究事業「生活・地域への磁気活用技術の開発」報告書 A-4a (2004).
- 13) M. Miura, A. Kusanagi, S. Kobayashi, S. Tokairin, and Z. Jin: Effect of Static Magnetic Field on Crystallization of Triacylglycerol, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 14(2), (2004).
- 14) 金哲，尹永浩，千田晋，三浦靖：凍結デンプンゲル解凍法の比較，日本食品科学工学会第 50 回大会 (東京，東京農業大；2003/9/13)。
- 15) 尹永浩，三浦靖，小林昭一，村上猛志，金哲：バレイショデンプンの凍結に及ぼすパ

- ス磁場の影響, 日本食品科学工学会第 50 回大会 (東京, 東京農業大; 2003/9/13) .
- 16) Z. Jin, Y. Yin and M. Miura : Cryoprotective Effects of Gluconates, Saccharides, and Magnetic Field on Sea Urchin During Frozen Storage ,12th World Congress of Food Science and Technology (CHICAGO; 2003/7/17).
- 17) 金哲, 三浦靖 : ハイドロゲルの凍結・解凍に及ぼす静磁場の影響, 日本食品工学会第 1 回 (2000 年次) 大会 (東京, 東京水産大; 2000/8/4) .
- 18) N.Yamamoto, S.Tamura, J.Matshita and K Ishimura : Fracture Properties and Micro-structure of Chicken Breasts Frozen by Electromagnetic Freezing, *J. Home Econ. Jpn.*, 56(3), 141 (2005).
- 19) 榊田博司, 良方めぐみ, 金哲 : 磁場印加がブタ精子の凍結に及ぼす影響, *日本養豚学会誌*, 39 (3), 175 (2002).
- 20) Kaku M., Kamada H., Kawata T., Tai M., Kohno S., Motokawa M., Tohma Y., Fujita T., Ohtani J., Tsuka N., Ohwada T., Tanne K. : Cryopreservation of PDL cells by use of program freezer with magnetic field for teeth banking: *Dentistry in Japan*, 43, 82 (2007).
- 21) 山海直ほか 7 名 : 磁場環境下における Whole Ovary の凍結, 第 26 回受精着床学会学術講演会 (福岡) 抄録集, (2008), 166.
- 22) 持丸佳之ほか 7 名 : 交流磁場発生装置を用いたブタ卵巣の超低温保存, 第 26 回受精着床学会学術講演会 (福岡) 抄録集, 260 (2008).
- 23) 鈴木徹 : 凍結食品内氷結晶観察のための凍結置換法 (特集 生体内や氷晶を観察する技術) , *冷凍*, 83 (965), 143 (2008).
- 24) 相良泰行, 荒木徹也 : マイクロスライサ画像処理システムによる氷結晶 3 次元計測法の開発 (特集 生体内や氷晶を観察する技術) , *冷凍*, 83 (965), 135 (2008).