

# 7. 食品用ブライン凍結試作装置の実験的評価

ものづくり技術支援グループ      ○村田政隆  
 応用技術支援グループ              小林孝紀、高橋志郎、田谷嘉浩  
 食産業技術支援グループ           青木央  
 上加冷機工業（株）                  ○広川正記、井川幸一、上加淳悦

## 1. はじめに

近年、小ロット向け食品凍結装置の需要が高まっている。本発表では、地域企業が開発した小ロット向けブライン液浸漬型凍結装置により凍結した食品を、空冷凍結品と比較することにより評価した結果について報告する。

最近の冷凍食品業界は、冷凍食品の事業者が減少しているにもかかわらず、生産量・市場規模が安定していることから、冷凍食品技術の生産効率性は高まっているといえる。この背景には、鮮度維持など良品質な冷凍食品・食材の流通を可能とした急速凍結技術の産業利用化の進展が一因だと考える。急速凍結技術とは、その凍結過程において、水が膨張して氷結晶を生成する「最大氷結晶生成帯」を短時間で通過する冷凍技術である。これに対し、時間をかけて最大氷結晶生成帯を通過する凍結方法を緩慢凍結と呼ぶ。これらの凍結時間に対する凍結温度の変化をモデル化した事例を図1に示す。

大量生産向け凍結機には、トンネル凍結機やボックスフリーザー等の急速凍結機が存在するが、導入・維持・管理条件の制約があり、コストも高い。小ロット向けの凍結機では、安価な冷凍庫タイプの凍結機の導入が進んでいるが、装置に付随する冷凍機は大型化しやすく、温度や風速などの庫内環境は不均一となりやすいなどの欠点がある。

そこで、本研究では上加冷機工業が開発したブライン液浸漬型凍結装置を用いた液体凍結品と空冷凍結品の凍結過程等を比較し、小ロット向け装置としての凍結技術評価を行った。

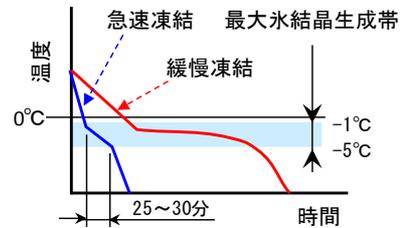


図1 急速凍結と緩慢凍結のモデル例

$$t = \frac{L_f \cdot \rho}{T_F - T_R} \left( \frac{d}{2h} + \frac{d^2}{8k} \right)$$

$t$ : 凍結時間 [s]
$L_f$ : 凍結潜熱 [J/kg]
$\rho$ : 未凍結層密度 [kg/m <sup>3</sup> ]
$T_F$ : 凍結温度 [K]
$T_R$ : 冷媒温度 [K]
$d$ : サンプル厚さ [m]
$h$ : 表面熱伝達率 [W/m <sup>2</sup> K]
$k$ : 凍結層熱伝導率 [W/mK]

図2 Plank の式

## 2. 理論的指標に基づく実験的評価

食品凍結時間の予測式として用いられる、無限平板における Plank の式を図2に示す。この式は食品凍結時間の予測式ではあるが、表面熱伝達率  $h$  が既知でなければならない。今回、食品凍結時間  $t$  を測定することで、液体凍結（ブライン凍結）と空冷凍結における  $h$  の差が評価基準の指標になると考え、 $h$  を実験的に推定することとした。

本実験では、無限平板条件を擬似的に作り出すため、熱伝導率が 0.034 W/mK の断熱材を用いて、実験用容器を試作し、水分が 98% のこんにやくを三本設置した、図3に示す 60×140×80mm の実験サンプルを試作した。実験サンプルは1軸方向からのみ凍結が進行する仕様であり、こんにやくの中心温度と長手方向分布を測定用の熱伝対を固定した。本実験は、サンプルを 0°C一定にした後、周囲温度が-30°Cのブライン凍結と空冷凍結の凍結温度をサンプリングタイム 1秒のデータロガーで測定した。その結果例を図4に示す。

本実験の結果、中心温度が約-30°Cに低下するまでの所要時間は、ブライン凍結では約 132分、空冷凍結では約 704分となり 5倍程度の差を生じた。熱伝達率  $h$  の推定では、物性値等を、 $L_f = 336 \text{ kJ/kg}$ 、 $\rho = 999.9 \text{ kg/m}^3$ 、 $T_F = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $d = 0.08 \text{ m}$ 、 $\kappa = 22 \text{ W/mK}$  として算出した結果、ブライン凍結では約 115.7W/m<sup>2</sup>K、空冷凍結では約 22.0W/m<sup>2</sup>K となり、5倍程度の差を生じた。この Plank の式は、簡易式である

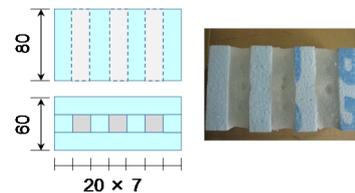


図3 こんにやく実験サンプル

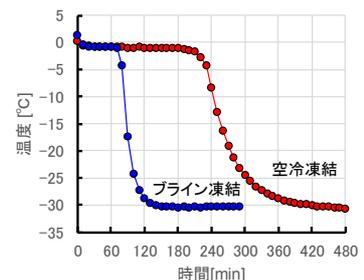


図4 こんにやく中心温度測定例

ため、誤差は含まれるが、空冷凍結よりもブライン凍結のほうが、こんにやくとの熱交換に優れ、急速凍結に適しているといえる。

### 3. 食材試験

実際に食材を使用してブライン凍結と空冷凍結を行い、凍結環境の違いによる細胞の凍結状況の違いについて観察した。本実験では、食材サンプルとして、サーモン、ヒラメ、ホタテを使用した。まず、外観目視確認と温度測定結果の一例として、サーモンを用いた実験の結果を図5、図6に示す。なお、サーモンとヒラメは同一固体を三枚に卸した時の、左右をサンプルとしているため、個体差は生じない。

実験の結果、サンプルサイズは液冷のほうが空冷よりも若干大きかったにもかかわらず、液冷では約70分後には、ほぼ $-30^{\circ}\text{C}$ で一定となったが、空冷では温度が一定になるまで約360分を要しており、液冷と比較して約5倍程度の時間を要した。また、サーモンを一例に、熱分析を行った結果の概略を図7に示す。図4及び図7からサーモンのブライン凍結時の冷却温度/時間を求めた結果、約 $-2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ で温度低下が見られた。そこで、同温度条件で示差走査熱量計(DSC)を用いて冷却時のサーモンのDSC分析を行った。その結果、サンプルサーモンの温度は $-16^{\circ}\text{C}$ 付近まで一定速度で低下し、その後、細胞の凍結に由来する発熱が過冷却状態で発現した。細胞凍結最大発熱時に温度上昇するものの、発熱ピークは $-10^{\circ}\text{C}$ 以下で最大氷結結晶生成帯の $-1\sim-5^{\circ}\text{C}$ まで温度上昇していないことが判明し、DSCの結果からも、ブライン凍結が急速凍結として優れた手法であることを確認した。

次に、凍結した食材の組織観察した事例を図11に示す。組織観察では、ブライン凍結サンプルと空冷凍結異サンプルで可食部から同一部位を抽出し、マイクロームによって観察用の切片( $-28^{\circ}\text{C}$ )をつくり、ホルマリン固定後、染色標本を作製し、光学顕微鏡で観察した。空冷凍結では緩慢凍結過程において細胞内の水分が膨張して粒成長した氷結晶が大きく、細胞組織を破壊している様子が観察できている。3種類の異なる試料に共通して、ブライン凍結のほうが、空冷凍結よりも、結晶が微細なことから、組織に与える損傷が少なく、品質保存により適していると判断できる。

### 4. まとめ

凍結方法の違いによる食品の凍結状況について実験的に評価した結果、空冷凍結よりもブライン凍結のほうが、急速冷凍に適しており、実験的に有意な差異のある評価を得られた。ゆえに、中小企業向け小ロット生産用として、食材・食品を高品質のまま保管・流通させる凍結装置は、ブライン凍結が優れている。また、本研究での実験的評価法も簡易的ではあるが一定の指標になりうると言える。

### 謝辞

本件の発表内容は、経済産業省「平成26年度補正ものづくり・商業・サービス革新補助金」の支援を受けて実施しました。また、北海道補助事業「参入促進支援事業(地域のものづくり技術力向上)」により、継続的に技術開発を進めています。関係者の皆様には大変感謝申し上げます。

凍結法	ブライン凍結	空冷凍結
寸法	約 $260 \times 210 \times 35\text{mm}$	約 $240 \times 150 \times 35\text{mm}$
重量	662g	476g
凍結後の外観	 全体的に白っぽい	 赤みが強い

図5 凍結実験結果(サーモン)

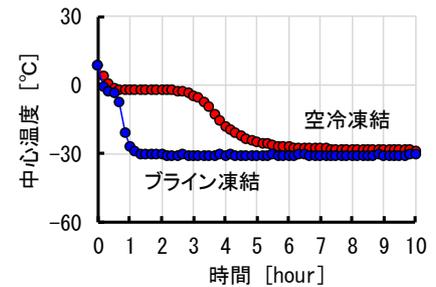


図6 サーモン凍結時の中心温度変化

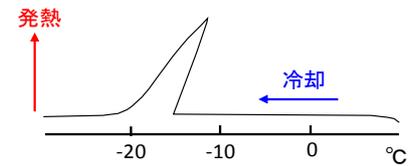


図7 サーモンのDSC曲線(サンプル側)

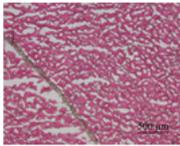
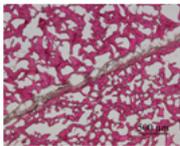
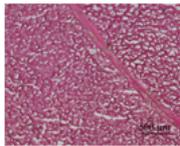
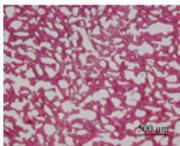
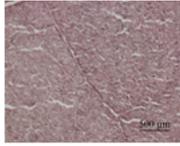
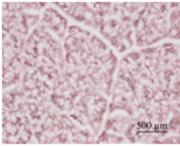
	ブライン凍結	空冷凍結
サーモン		
ヒラメ		
ホタテ		

図8 凍結方法の違いによる組織