

# 食品用試作ブライン凍結装置の実験的評価に関する考察

村田政隆, 小林孝紀, 青木央, 高橋志郎, 田谷嘉浩,  
 上加淳悦\*, 広川正記\*, 井川幸一\*

## Consideration on experimental evaluation of the prototype brine freezing equipment for the food

Masataka Murata, Takanori Kobayashi, Hiroshi Aoki, Shiro Takahashi,  
 Yoshihiro Taya, Junetsu Joka\*, Masaki Hirokawa\*, and Koichi Igawa\*

### 要 旨

近年、急速凍結技術の進歩により冷凍食品業界では、高品質の冷凍食品・食材を流通できるようになった。函館市の上加冷機工業（株）では、ブライン液を用いたオリジナルブランドの小ロット向け食品凍結装置について研究開発を行っているが、食材を用いた簡易的な評価方法を必要としていた。

そこで、本研究では実際の食材を用いて、上加冷機工業（株）が試作した凍結装置による急速凍結と、空冷凍結による緩慢凍結との比較検証を実験的に行い、今回の手法について考察した。

近年、冷凍食品業界では、凍結技術の進歩等により、冷凍食品の品質やその製造技術は目覚しく発展している。（一社）日本冷凍食品協会の20160420統計資料を元に、この10年間における冷凍食品業界の動向をまとめた結果を図1に示す。

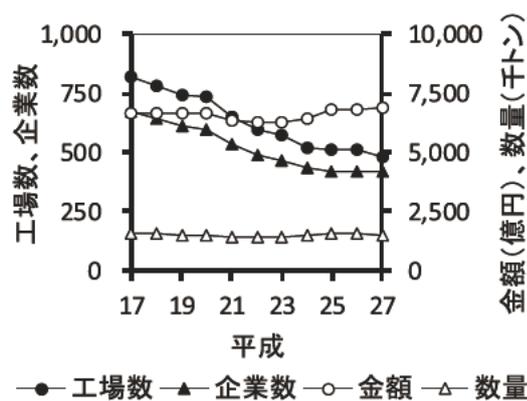


図1 冷凍食品業界の動向

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が進展したことが一因にあると考える。

急速凍結は、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2に示す。

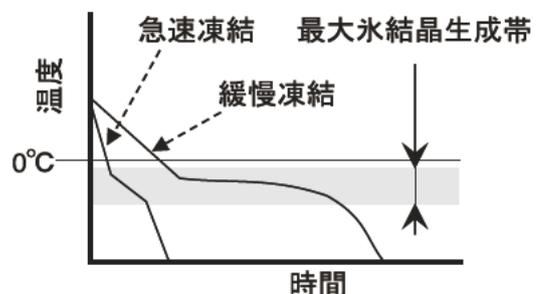


図2 急速凍結と緩慢凍結

\* 上加冷機工業株式会社

責任著者連絡先 (Masataka Murata) : murata@techakodate.or.jp

最大氷結晶生成帯の温度域と通過時間には様々な定義があるが、温度域は-1℃から-5℃、通過時間は25分から30分程度が一般的のようである。

冷凍食品業界の凍結機は三種類に大別できる。まず、大手食品製造会社が導入する大量生産向けの大型食品用急速凍結機では、トンネル凍結機やボックスフリーザー（液体窒素、液化炭酸ガスタイプ）がある。急速凍結可能な仕様であるが、装置内部温度-60℃から-100℃を維持しなければならず、24時間稼働が要求され、コストが高いなどの欠点がある。小ロット向けの凍結機では、空冷凍結機と液体凍結機の二種類に分類できる。このうち、空冷凍結機は、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、上加冷機工業（株）では、エネルギー効率、装置規模が最適なブライン液を用いた液体凍結機が最も中小企業の小ロット生産ニーズに適合した装置であると考え、ブライン液容量が400Lit以下で、-30℃仕様の図3に示す凍結装置を試作した。

本装置は、水槽内のブライン液を直接銅管コイルで冷却する方法と、チタン製コイルを用いた二重管方式により冷却したブライン液を水槽内で循環させる方法を選択できる機能を有している。また、コンデンサを含む冷凍機ユニットを凍結装置内に収納する構造と、屋外に設置可能な構造を選択できるようになっている。ブライン液とは、熱媒体の一種で、食塩水などを主成分とする液体のことである。

本装置の主要寸法は、銅管コイルの冷凍機収納仕様において、約1,700W×700D×800Hである。

本実験では、まず水分が98%程度で切断加工



図3 試作凍結装置外観

のしやすさから、サンプルにはこんにやくを用いることとし、ブライン液による凍結（以下、ブライン凍結）と空冷凍結の違いについて実験的に確認した。ここで、食品の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<sup>1), 2)</sup>について示す。

この基本式では、ほとんどが水の物性値を用い

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

|                                      |
|--------------------------------------|
| $t$ : 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]                 |

るが、凍結時間  $t$  の予測には表面熱伝達率  $h$  を求めておく必要がある。表面熱伝達率  $h$  は、二つの物質における熱エネルギーの伝え易さを示すことから、この式を表面熱伝達率  $h$  を求める式に変換すれば、凍結時間  $t$  を測定することにより、簡易的に熱交換の傾向を数値化できると考えた。

また、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、図4に示す容器を試作し、サンプルのこんにやくを三本設置した。本実験では、三本のこんにやくの中心温度についてK型熱電対をデータロガに接続し、サンプリングタイムを1秒で測定すると共に、中央のこんにやくについては、中心から10mmごとに測定点を設けて分布測定を行った。凍結試験は、周囲温度（冷媒温度）-30℃の条件で、ブライン凍結と空冷凍結にて実験を行った。ブライン凍結における中心温度の測定結果例を図5に示す。

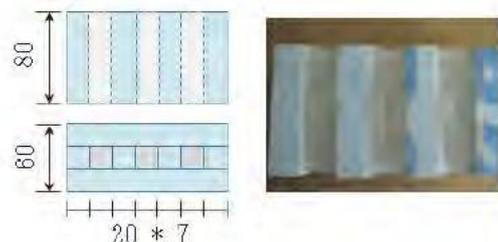


図4 実験サンプル

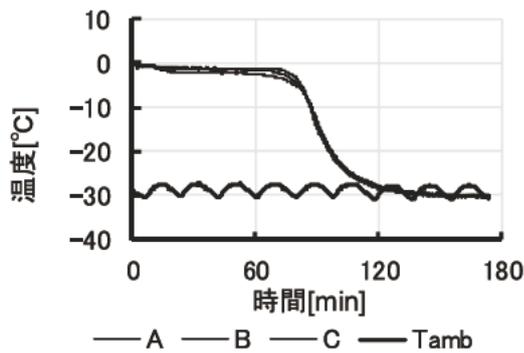


図5 三本のこんにゃくの中心温度変化

三本の中心温度変化は、ほぼ一致しており断熱材の効果が認められていると思われる。そこで、この三点について平均値と測定値の差について検証した。各測定値のデータ数  $N$  は10,423個/本、平均値に対する最大偏差は $\pm 1.07^\circ\text{C}$ 、標準偏差  $\sigma$  は0.395であった。偏差が正規分布であると仮定すると、 $\pm 2\sigma$  は $0.790$ であり、測定値の95%は平均値の $\pm 1^\circ\text{C}$ の範囲内であると推測された。実際に確認したところ、測定値の99.4%が平均値の $\pm 1^\circ\text{C}$ に収まっており、本実験方法は中心温度変化の測定結果には、バラツキが少ない方法といえる。

次に、ブライン凍結において、温度分布についてまとめた結果を図6に示す。

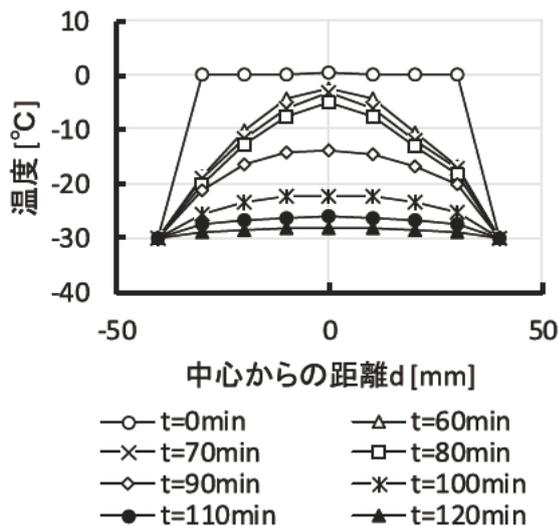


図6 温度分布測定例

この結果から、こんにゃくは両端から均一に凍結されていることがわかり、本実験が無限平板モデルを実現できると判断できる。次に、空冷凍結とブライン凍結による中心温度変化を比較した結果を図7に示す。

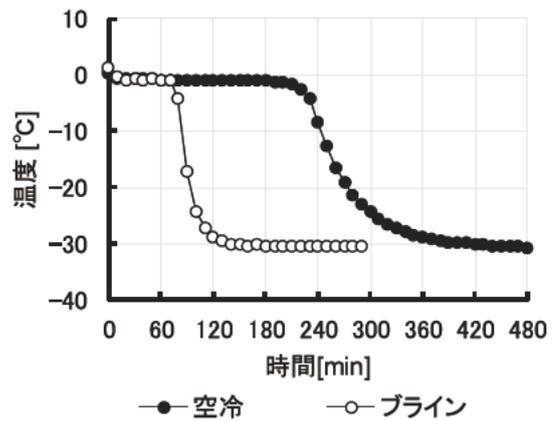


図7 空冷凍結とブライン凍結の中心温度比較

この結果から、ブライン凍結のほうが空冷凍結よりも、中心温度が早く低下することがわかる。ゆえに、同じ食材で同じ形状ならば、ブライン凍結では急速凍結になる場合であっても空冷凍結では緩慢凍結になる場合が高い確率で存在するといえる。

次に、こんにゃくと冷媒間の熱伝達率  $h$  について検討した。物性値は、 $L_f=336 \text{ kJ/kg}$ 、 $\rho=999.9 \text{ kg/m}^3$ 、 $T_F=0^\circ\text{C}$ 、 $d=0.08 \text{ m}$ 、 $\kappa=22 \text{ W/mK}$  とし、中心温度が初期値の $0^\circ\text{C}$ から約 $-30^\circ\text{C}$ に到達するまでの測定時間  $t \text{ sec}$  を用いて、Plank の式から熱伝達率  $h$  を算出した結果を表1に示す。

表1 熱伝達率 (参考値)

|      | 冷媒温度<br>$T_R [^\circ\text{C}]$ | 所要時間<br>$t [\text{sec}]$ | 熱伝達率<br>$h [\text{W/m}^2\text{K}]$ |
|------|--------------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| ブライン | -30                            | 7,943                    | 115.7                              |
| 空冷   | -30                            | 42,245                   | 22.0                               |

今回用いた Plank の式は簡易式であるため、熱伝達率の値には誤差が含まれるが、簡易式であっても熱伝達率には約5倍程度の差を認めた。

そして、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8、図9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。

| 凍結法    | ブライン凍結  | 空冷凍結  |
|--------|---|---|
| 寸法     | 約260×210×35mm   | 約240×150×35mm   |
| 重量     | 662g  | 476g  |
| 凍結後の外観 |  |  |
|        | 全体的に白っぽい  | 赤みが強い   |

図8 凍結実験結果 (サーモン)

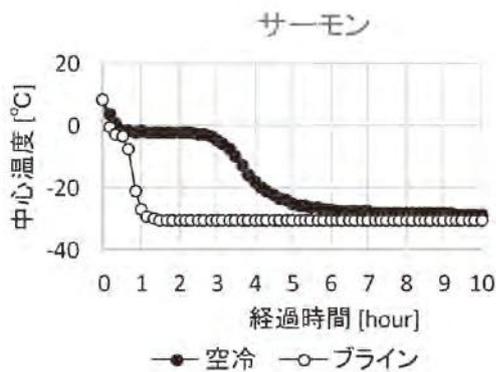


図9 サーモン凍結時の中心温度変化

実験の結果、サンプルサイズはブライン凍結のほうが空冷凍結よりも若干大きかったにもかかわらず、ブライン凍結では約70分後には、ほぼ-30℃で一定となったが、空冷凍結では温度が一定になるまで約360分を要しており、ブライン凍結と比較し凍結時間は、約5倍程度の時間を要していた。また、サーモンを一例に、熱分析を行った結果の概略を図10に示す。

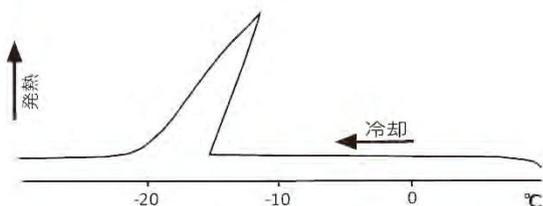


図10 サーモンの DSC 曲線 (サンプル側)

図7及び図9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℃/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℃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℃以下で最大氷結結晶生成帯の-1~-5℃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、マイクロトームによって観察用の切片 (-28℃) 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。三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。

試作凍結装置を実験的に評価した結果、断熱材で試作した容器に食材を固定または充填し温度測定することで、参考値ではあるものの熱伝達率から凍結状況を評価できると考える。また、凍結状況の違いによる食材の組織変異の違いも、顕微鏡観察できることを確認した。

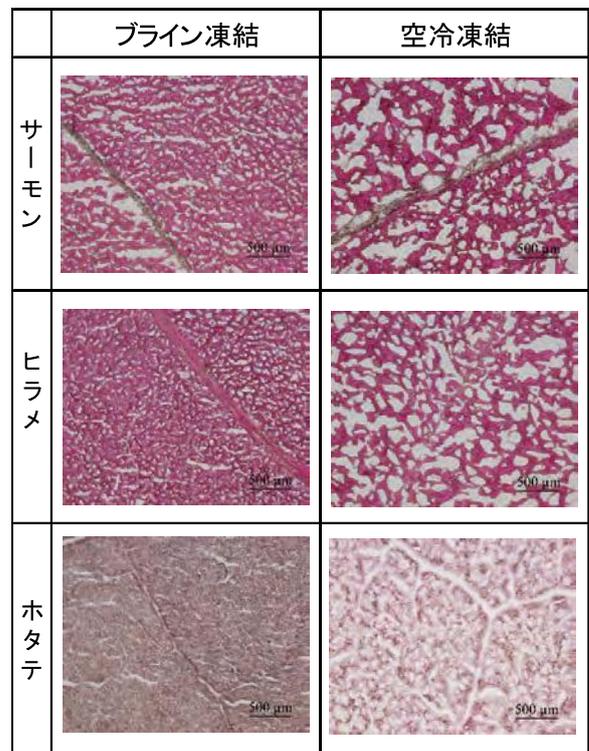


図11 凍結方法の違いによる組織

以上により、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・流通させる凍結方法は、ブライン凍結が優れている。そして、本試験にて実施した実験的な評価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

本研究の一部は、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」において実施した。記して感謝の意を表す。

### 参考文献

- 1) R.Paul Singh,Dennis R.Heldman:Introduction to Food Engineering (Fifth Edition:ACADEMIC PRESS)、(2014)、P536-542
- 2) Miguel Lopez-Levia,Bengt Hallstrom:Journal of Food Engineering,58(2003)、P267-275