

食品急速冷凍装置の開発

四国ポリテクカレッジ 電子技術科 望月 隆生
(四国職業能力開発大学校)

1. はじめに

四国ポリテクカレッジでは地域高度技能活用推進事業（平成12～13年度）のなかで、異業種企業団体であるTIC研究会と高品位の凍結を実現する「食品急速冷凍装置」の共同開発を行った。

この共同開発において、参加企業はそれぞれ業種に応じて制御装置、断熱処理、外装等の設計・製作を担当しており、四国ポリテクカレッジでは、実験と解析を担当し、最適な液体冷凍装置の設計指針の構築を行った。

具体的には主として次の2つから成り立っている。
①最適な凍結条件を決定する際のツールとして、凍結プロセスに対する高精度な解析モデルを構築すること、②実機による魚の凍結実験の実施ならびに凍結プロセスのモデル実験を実施すること。また、実際に凍結した魚は、味や食感などに関する官能検査と、鮮度測定による定量的な品質評価を行い、凍結条件による品質の違いも調査を実施した。

このような研究によって、最適な凍結条件を決定するルールと、これを実現する冷凍装置の開発を行った。

2. 魚の凍結

2.1 凍結速度と品質

魚を凍結するとき、内部の温度変化は図1に示すような凍結曲線を描く。内部温度は時間の経過とと

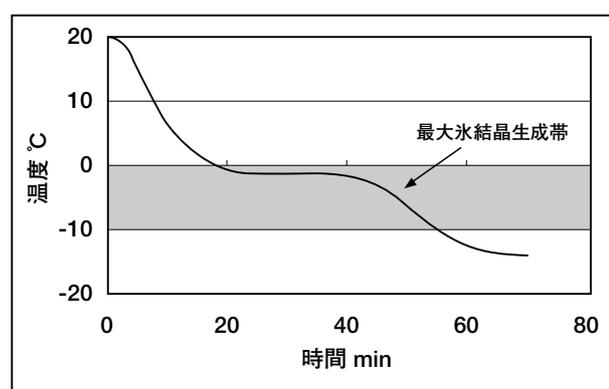


図1 魚の凍結曲線

もに降下するが、氷点付近で温度の下がらない状態が発生する。これは魚に含まれる水分を凍結させるために潜熱を除去している状態である。

0℃から-5℃の温度領域は最大氷結晶生成帯と称され、氷結晶が大きく成長する温度領域である。この領域に長時間留まると、氷結晶による細胞破壊や濃縮が発生し、冷凍品質を大きく低下させる。したがって、高品質な冷凍を行うには、急速凍結によって最大氷結晶生成帯を短時間で通過させることが肝要である^{1)～3)}。

凍結の速さは、凍結曲線における最大氷結晶生成帯の通過時間によって判断することができるが、通過時間は凍結対象の形状や大きさ等の条件に左右されるため扱いにくい指標とされている。そこで、より現実的な指標として、国際冷凍協会では、食品の中心から表面までの距離を、表面が氷点になったときから中心の温度が氷点より10℃下がるまでの経過時間で割った数値 [cm/h] を凍結速度として用いて

いる²⁾。なお、凍結速度はその大きさにより経験的に次のように区分されている。

- 緩慢凍結 : 0.1 cm/h
- 急速凍結 : 3 cm/h
- 超急速凍結 : 10~100 cm/h

2.2 凍結速度を決める因子

凍結速度を大きくするためには、凍結対象の表面からの熱除去を高くする必要がある。これに関与する伝熱工学的因子には、冷媒温度と冷媒の熱伝達係数とがあり、大きな熱除去を実現するには、

- ・冷媒の温度を下げる
- ・冷媒の熱伝達係数を高める

の2つの方法がある。

3. 冷媒温度を条件とする凍結実験

3.1 実験条件

冷媒温度の違いによる冷凍品質への影響を明らかにするための実験を行った。実験に用いた液体冷凍装置はエタノールをブラインとして使用し、ブライン温度は-25℃まで設定可能である。

実験におけるブライン温度は-15℃と-25℃とし、氷水による予冷の有無において、それぞれ実施した。また、きわめて大きな熱除去を実現する方法として液体窒素を冷媒として用い、極端に冷媒温度を下げた場合も調べた。

凍結対象とした魚種はヒラメとし、状態はラウンドとした。ただし、液体窒素凍結とその比較用の液体凍結には、フィレーを真空パックしたものを用いた。中心温度の測定部位は魚体の体高が最大となる部分の脊椎付近とし、シース型熱電対（外径 1.0mm）を用いて測定した。

また、凍結後は氷水による解凍を行い、官能検査を実施した。

3.2 結果と考察

(1) 凍結曲線と凍結速度

液体冷凍装置による凍結曲線を図2に示す。ブライン温度を下げると凍結時間が短くなることがわか

る。また、形状についても、ラウンドと比較して寸法が小さく、冷却表面から中心までの距離の小さいフィレーが短時間で凍結が行われている。

しかし、予冷の効果については、明確な所見を得ることができなかった。

液体窒素凍結による凍結曲線を図3に示す。きわめて急速な凍結が行われていることがわかる。

それぞれの凍結条件ごとの凍結速度の平均値を表1に示す。ブライン温度を-15℃から-25℃に引き下げることで凍結速度が約1.4倍向上していることがわかる。しかし、ブライン温度を-25℃としても、凍結速度は急速凍結の範疇となる3 cm/hに届いておらず、十分な凍結速度が得られていないことが明らかとなった。

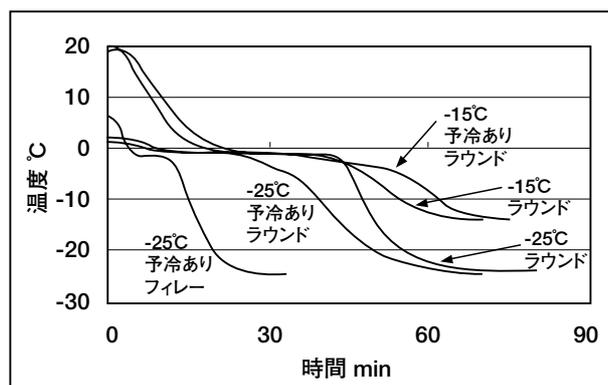


図2 ブライン温度による凍結曲線の違い

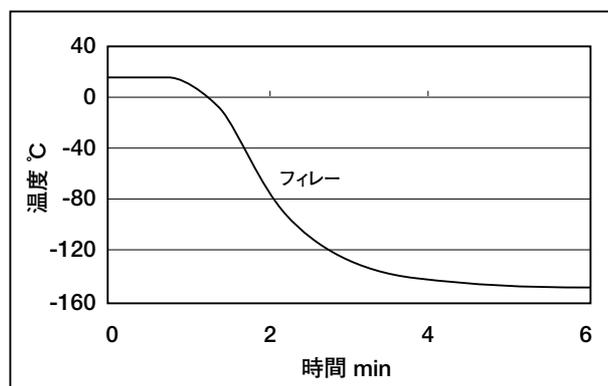


図3 液体窒素による凍結曲線

表1 冷媒温度と凍結速度

条件	凍結速度 [cm/h]
液体凍結 -15℃	1.8
液体凍結 -25℃	2.5
液体窒素凍結	32.0

液体窒素凍結はきわめて高い凍結速度を示し、ブライン温度 -25°C の約13倍も大きく、超急速凍結であるといえる。

(2) 官能的所見

-15°C 凍結では、食感の低下や肉色がわずかに白濁する傾向が認められた。 -25°C 凍結の場合、 -15°C 凍結と比較して食感の向上が認められるものの、肉色については特に改善は認められなかった。しかし、鮮魚との差は依然として存在し、加工用としては十分な品質であると思われるが、刺身用としては十分とはいえない品質である。

液体窒素凍結の場合、魚肉は凍結時の身割れによる損傷が大きいですが、これまでの液体凍結と比べて、食感や魚肉の色に関して特に差異は認められなかった。

4. 熱伝達係数を向上させた凍結実験

4.1 実験条件

冷媒の熱伝達係数の違いによる冷凍品質への影響を明らかにするための実験を行った。一般に乱流域にある強制対流熱伝達における熱伝達係数は流速の0.8乗に比例する。実験ではバブリングと水中ポンプによる攪拌をそれぞれ行うことで、熱伝達の向上を試みた。

バブリングはコンプレッサーを用いて、槽底部から 64 l/min のエアを吹出して実施した。なお、エアの吹出し部分は 6 mm^2 の吹出し口23個を配して構成した。

水中ポンプによる攪拌は、流量 12 l/min の水中ポンプ2台を槽内に固定し、噴流が対象魚に当たる状態で行った。

ブライン温度は -25°C とし、対象魚種および温度測定は3.1に示した実験条件と同じである。

4.2 結果と考察

(1) 凍結曲線と凍結速度

凍結曲線を図4に示す。図2に示したこれまでの凍結と比較して大幅な凍結時間の短縮が認められた。また、表2に示したように、凍結速度も大きく向上し、これまで 3 cm/h 以下であった凍結速度が4

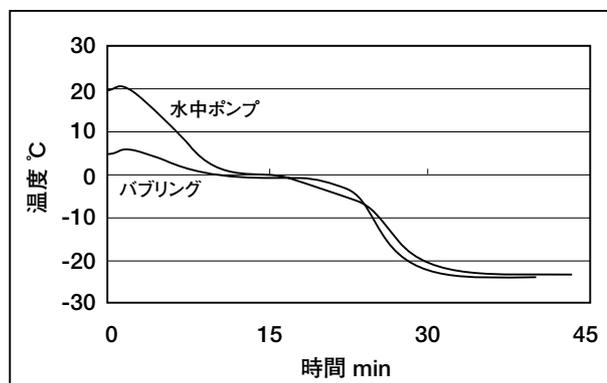


図4 ブラインの攪拌を伴う凍結曲線

表2 ブラインを攪拌した場合の凍結速度

条件	凍結速度 [cm/h]
液体凍結 -25°C バブリング	4.1
液体凍結 -25°C 水中ポンプ	4.2

cm/h を超える値まで向上し、十分に急速凍結の範疇に入る凍結速度が得られていることがわかる。

(2) 官能的所見

これまでの液体凍結と比較して食感の向上が認められた。また、攪拌を行わない状態ではブライン温度を下げることで向上させることのできなかった肉色に関して、向上を認めることができた。

5. 高品質な冷凍に必要な要件

5.1 凍結速度と品質

今回の実験で、凍結速度を高めることにより品質を向上できることが確認され、凍結速度と品質の対応関係が明らかになった。凍結速度と官能的所見の対応を表3に示す。

急速凍結の凍結速度は 3 cm/h が目安とされている

表3 凍結速度と官能的所見

凍結速度cm/h	ドリップ	食感	色	味
2以下	×	×	△	○
2.5~3	◎	△	△	○
4以上	◎	○	○	○
鮮魚	◎	◎	◎	◎

×:不可 △:可 ○:良 ◎:優良

が、凍結速度を4 cm/hとすることでさらなる品質の向上が得られた。

5.2 凍結速度を高める手段

凍結速度を高めるために冷却媒体の温度を下げることは有効な手段であるが、冷媒温度を下げすぎると、魚体との温度差から身割れなどの損傷が発生し、品質が低下するため、逆効果となる場合がある。

一方、熱伝達を向上させることも凍結速度を高める有効な手段である。熱伝達の促進は、冷媒温度の低温化とは異なり、損傷が発生しないため、凍結速度を高める優れた手段といえる。

6. 開発された食品急速冷凍装置

実験により凍結速度と品質の対応関係を明らかにすることで、食品急速冷凍装置に付与すべき性能の設定根拠を得るとともに、冷凍速度を高めるために必要な冷凍装置の設計要件を明らかにすることができた。

これらの成果に基づいて開発された食品急速冷凍装置が写真5である。冷凍実験におけるブライン温度よりさらに低い -35°C の設定が可能であり、熱伝達を促進するバブリング機能を併用することで高品位な凍結を実現する。



写真5 開発された食品急速冷凍装置

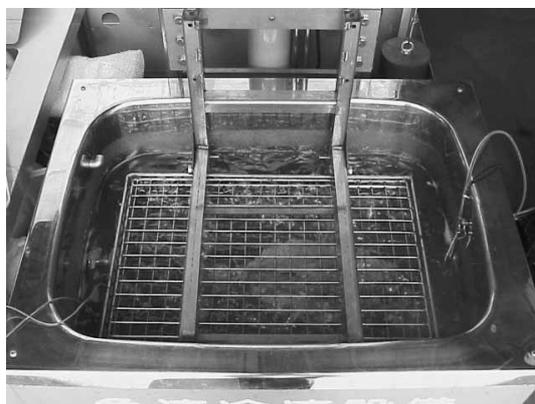


写真6 ブライン槽

7. おわりに

企業において、日頃の業務のなかでは手のまわらない実験とその解析や理論的な裏付け等がポリテクカレッジの参加によって実施できたことは、企業側の大きなメリットであると同時に、ポリテクカレッジにおいては地域企業への貢献の実施でもあり、双方にとって有意義な共同開発であったと考えている。

冷凍装置の開発は筆者の専門と異なる分野ではあるが、それ故に自己の専門性を広げる大変良い機会とすることができた。さらに、専門の異なる分野であっても工学的問題の解決という点では、手法的に共通するものが多いことも再確認でき、自己の技術的な幅と深さの双方を伸ばすことができた。

開発の場に技術者として参加し、企業の技術者と交流することは、開発の進め方や考え方などの理解を深める格好の機会であり、このような経験は日常の業務において企業の方々と接するだけでは得がたいものと思われる。

今回の共同開発によって得た貴重な経験は、今後の技術者育成と地域企業への技術支援にぜひ役だてていきたい。

<参考文献>

- 1) 渡邊悦生：『魚介類の鮮度と加工・貯蔵（改訂版）』，成山堂書店，P118-120，1998.
- 2) 野口敏：『冷凍食品を知る』，丸善，P60-69，1997.
- 3) 田中和夫，小嶋秩夫：『食品冷凍工学 改訂版』，恒星社厚生閣版，P156-158，1986.