Study of food cooling and refrigerating process

○正 西田哲也(水産大) 正 一瀬純弥(水産大) 正 中岡 勉(水産大)

Tetsuya NISHIDA, Junya ICHINOSE, Tsutomu NAKAOKA,

National Fisheries University,

2-7-1, Nagatahonmachi, Shimonoseki-city, Yamaguchi, 759-6595

Key words: foods, cooling, refrigerating, heat transfer, characteristic

1. 緒言

食品(水産物)を消費者の元まで運ぶ流通・輸送システムとして、冷凍輸送は最もよく用いられる。これは、食品(水産物)の鮮度保持のために重要なシステムである。現在、食品(水産物)の鮮度を保つための冷凍については、魚種や品物に対して経験的に行われ、適切な冷凍方法や時間については、あまり検討されていない。

そこで、本報は、食品(水産物)の冷凍における伝熱特性について、凍結がある場合の各部分の温度変化を予測するための計算を行った。また、実験は、食品(水産物)の物性値が一定の場合の冷却について行い、計算値との比較を行った。

2. 冷凍システムのモデル

本報は、食品(水産物)の冷凍システムを構築して、冷凍能力に対して食品(水産物)の冷却・凍結過程における各部の温度変化について計算を行った。

このシステムは、冷凍機の蒸発器、冷凍室内と冷却される食品(水産物)から成り立つ。

図1は、冷凍システムのモデルを示す。冷凍システムは、大きく3つの要素にわけられる。第1要素は、冷媒の蒸発により熱を奪われる。第2要素は、食品(水産物)と冷凍室内の温度差による熱伝達と冷凍室内の壁を通して流入する熱である。第3要素は、食品(水産物)は、熱伝導が悪く、熱容量も大きいので、食品(水産物)を分割して、それぞれ温度の異なる多層と考えた。

計算は、第1要素、第2要素と第3要素(食品(水産物内))の熱の流れと温度変化を求めた。また、食品(水産物)の中は、凍結がない場合とある場合について行った。

3. 基礎式と計算方法

各要素のヒートバランスを示す。

3.1 第1要素(蒸発器)

Fig.1 Model of refrigerating system

冷凍能力は、蒸発器が空気から奪う熱量と蒸発器自身の温度を変える熱量(蒸発器の熱容量×温度変化)を加えたものに等しくなる。次式になる。

$$R(\theta_e) = K_e \times A_e \times (\theta_a(i) - \theta_e(i)) + H_{ce} \times (\theta_e(i) - \theta_e(i+1)) / \Delta t \quad \dots \dots (1)$$

3.2 第2要素(空気および冷凍室内構築物)

第2要素は、蒸発器が空気から奪う熱量から水産物から奪う熱量と冷凍室の外から奪う熱量をひいたものが、冷凍室内の温度を変える熱量(冷凍室内の熱容量×温度変化)に等しくなる。次式になる。

$$K_e \times A_e \times (\theta_a(i) - \theta_e(i)) - \alpha_f \times A_f \times (\theta_{fs}(i) - \theta_a(i)) - K_f \times A_f \times (\theta_{out} - \theta_a(i)) = H_{cf} \times (\theta_a(i) - \theta_a(i+1)) / \Delta t \quad \dots \dots (2)$$

3.3 第3要素(食品(水産物))(凍結がある場合)

食品(水産物)は、計算が簡単のように両側から冷却される多層板と考えた。また、各状態における食品(水産物)の冷却については、(A)凍結なしの状態、(B)凍結開始～凍結点通過の状態、(C)凍結点通過後の状態の三段階に分けて考えた。

(A) 凍結なしの状態

第1層から流出する熱量は、先に計算した第2要素への流入熱量である。第1層へ流入する熱量は、第2層との温度差による熱伝導である。次式になる。

第一層

$$\alpha_f \times (\theta_{fs}(i) - \theta_a(i)) - (\lambda_1 \times (\theta_f(i, 2) - \theta_f(i, 1))) / \Delta x = (\Delta x \times \rho_f \times C_f \times (\theta_f(i, 1) - \theta_f(i+1, 1))) / \Delta t \quad \dots \dots (3)$$

第二層以降

$$\lambda_1 \times \{ \theta_f(i, j) - \theta_f(i, j-1) - (\theta_f(i, j+1) - \theta_f(i, j)) \} / \Delta x = (\Delta x \times \rho_f \times C_f \times (\theta_f(i, j) - \theta_f(i+1, j))) / \Delta t \quad \dots \dots (4)$$

(B) 凍結開始～凍結点通過の状態

式(3)の右辺に食品が凍結するのに必要な潜熱量 $F \times \Delta x \times \rho_f \times r(i+1) / \Delta t$ が加わる。次式になる。

$$\alpha_f \times (\theta_{fs}(i) - \theta_a(i)) - (\lambda_1 \times (\theta_f(i, 2) - \theta_f(i, 1))) / \Delta x = (\Delta x \times \rho_f \times C_f \times (\theta_f(i, 1) - \theta_f(i+1, 1))) / \Delta t + F \times \Delta x \times \rho_f \times r(i+1, 1) / \Delta t \quad \dots \dots (5)$$

(C) 凍結点通過後の状態

この状態は、(B)で得られた式(5)中の各物性値Kのみが異なる。食品の各物性値は、凍結前、後の物性値を用

い、凍結した割合で計算した。

$$K = K_1 \times (1 - r(i, j)) + K_2 \times r(i, j) \dots (6)$$

計算方法は、まず、時間 $t=0$ における初期値を与える。次に、 Δt 時間後の式 (1) 中の蒸発温度を求める。そして、式 (2) から空気温度 (冷凍室内温度) を求める。次に、食品の表面、各層、中心温度を求める。

以上、計算を Δt 時間進め規定時間まで繰り返し計算した。

4. 食品の冷却実験

図 2 は、実験装置を示す。実験装置は、冷凍機、冷凍室、計測装置からなる。第一段階として、測定する食品 (テストピース) は、物性値がわかっているネパール黄銅 ($\lambda = 117 \text{ W/mK}$) の円柱 (長さ $l=150 \text{ mm}$, 直径 $d=50 \text{ mm}$) を用いた。

温度の測定は、テストピースの長さ 75 mm , 37.5 mm , 深さ 25 mm の 2 箇所に、サーミスタを挿入して行った。また、冷凍室内の測定は、サーミスタを使用し 4 箇所で行った。

実験は、大気温度から蒸発温度が -48°C になるまで行った。また、各部の測定は、2 秒ごとに A/D 変換器を通して蒸発温度、冷凍室内、テストピースの温度をパーソナルコンピュータに取り込み行った。

5. 実験値と計算値の比較

図 3 (a) は、図 1 の第 1 要素の蒸発温度と図 2 の冷凍機の蒸発温度の比較を示す。実験は、凍結がない場合である。○印は実験値、実線は計算値である。図よりわかるように、実験値は、経過時間 $0 \sim 5$ 分までは一定である。5~10 分までは -35°C 付近まで急激に温度降下する。その後、50 分までは、実験値と計算値は一致する。50 分を経過すると、実験値の方が低くなる。これは、計算値の冷凍能力が影響したものと考えられる。

図 3 (b) は、第 2 要素の空気温度と冷凍室内温度の比較を示す。図よりわかるように、実験値は、 $0 \sim 5$ 分までは一定である。実験値と計算値は、5~20 分までは急激に温度降下する。10 分~20 分の間では、実験値は、計算値より低くなる。20 分~60 分の間では一致した。その後、60 分を経過すると、実験値は低くなる。これは、第 1 要素と同様で、冷凍能力の影響によるものと考えられる。

図 3 (c) は、図 1 の第 3 要素の食品 (水産物) の温度と図 2 のテストピース内 (中心温度) の温度変化の比較を示す。図よりわかるように、計算値と実験値は、10 分までは温度が一定である。その後、温度は急激に降下する。実験値と計算値は一致する。

(a) Evaporating temperature

(b) Temperature of evaporator

(c) Temperature of interior in food

Fig.3 Comparison between experimental value and calculated value

6. 結論

- 1) 食品 (水産物) の凍結がある場合の各部分の温度変化を予測することができた。
- 2) 第 1 要素は、 $0 \sim 50$ 分までは計算値と実験値は一致した。その後、50 分以降は実験値が低くなった。
- 3) 第 3 要素は、計算値と実験値は一致した。しかし、さらに、精度を上げるためには、熱容量、熱通過係数、熱伝達係数の正確な見積もりが必要である。

参考文献

- (1) 越智昌夫 : 冷凍, 60(692), 35-46(1985).

Fig.2 Experimental apparatus