

食品の冷却・凍結に関する研究

中岡 勉^{*1}, 西田 哲也^{*2}
一瀬 純弥^{*2}, 池上 康之^{*3}

Study of food cooling and refrigerating process

Tsutomu NAKAOKA^{*1}, Tetsuya NISHIDA^{*2},
Junya ICHINOSE^{*2} and Yasuyuki IKEGAMI^{*3}

^{*1}National Fisheries University

2-7-1 Nagatahon-machi Simonoseki-City, Yamaguchi 759-65, Japan

This paper described of simulation of food cooling and refrigerating process by personal computer. The experiments are carried out in the case of with and without freezing of food using yellow-fin tuna and brass. The value of simulation is compared with experimental results. The simulation prediction agrees with experimental results.

Key Words : food, 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、水産物の鮮度保持のために重要なシステムである。また、食品の凍結過程における温度や凍結の状態等を正確に把握する事は、食品の品質に関連して、最適な冷凍システムを決定する上で重要である。

凍結は、細胞や組織などの生体に対して破壊効果と保存効果を持っている。保存は、医療、農林、畜産、食品などの広い分野で凍結保存に利用される。

冷却あるいは凍結させる場合の冷却過程についての研究は、食品のみを対象に行われている^{1, 2)}。

越智³⁾は、食品から冷凍機まで、冷凍システム全体をパソコンを用いてシミュレーションし、食品の冷却・凍結過程について研究を行っている。

しかし、現在、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

われている。また、適切な冷凍方法や時間については、あまり詳細に検討されていない。

そこで、本研究は、水産物の冷凍における伝熱特性を考慮して、水産物の凍結がなし、ありの場合について、冷凍能力に対する各部分の温度変化を予測する計算を行った。また、冷凍システムの伝熱特性を見るための実験を行い、実験値と計算値の比較を行った。

2. 記号

- A : 伝熱面積 (m²)
- c_p : 定圧比熱 (kJ/(kg·K))
- d : 直径 (mm)
- g : 重力の加速度 (m/s²)
- Gr : グラスホフ数 (-)
- H : 熱容量 (kJ/K)
- K : 半凍結の諸物性値 (-)
- l : 長さ (mm)
- L : 潜熱 (kJ/kg)
- Nu : ヌッセルト数 (-)
- Pr : プラントル数 (-)
- q : 熱流束 (W/m²)
- Q : 熱流量 (kW)
- R : 冷凍能力 (W)

^{*1} 水産大学校 水産学研究所 (769-6595 下関市永田本町 2-7-1)

^{*2} 水産大学校 海洋機械工学科 (769-6595 下関市永田本町 2-7-1)

^{*3} 佐賀大学 海洋エネルギー研究センター (840-8502 佐賀市本庄町 1)

Ra	: レーレー数 (-)
Re	: レイノルズ数 (-)
t	: 時間 (s)
U	: 熱通過係数 (W/(m ² ·K))
v	: 流速 (m/s)
Δx	: 食品の厚さ (m)
α	: 熱伝達係数 (W/m ² ·K)
β	: 体膨脹係数 (K ⁻¹)
θ	: 温度 (K)
λ	: 熱伝導率 (W/(m·K))
μ	: 粘性係数 (Pa·s)
ν	: 動粘性係数 (m ² /s)
ρ	: 密度 (kg/m ³)

添字

1	: 凍結前
2	: 凍結後
A	: 大気圧
a	: 空気
e	: 蒸発
f	: 冷凍庫
fr	: 凍結点
fs	: 食品の表面
x	: 位置 x での値
∞	: 無限

3. 冷凍システム

3.1 冷凍システムの要素

図 1 は、冷凍システムのモデルを示す。冷凍システムは、大きく三つの要素に分けられ、

- (1) 第一要素は蒸発器、
- (2) 第二要素は冷凍室の空気及び室内構築物、
- (3) 第三要素は冷却される食品(水産物)

である。

第一、第二要素の冷却は、それぞれの要素の中では温度差がなく、それぞれ、一様伝熱面温

度の物体として扱う。しかし、第三の食品は、熱伝導が悪く熱容量も大きいので、それぞれ温度の異なる層の集まりと考えた。

図 2 は、第三要素の食品の分割モデルを示す。熱の流れ方向は、食品の中心層から外側へ流れる。図 2 より、食品を熱の流れ方向に微小厚さ Δx の層に分割し、層の最左側から流出する熱量を q_0 、第二層から第一層へ流れる熱量を q_1 、第 $j+1$ 層から第 j 層へ流れる熱量を q_j とする。また、その層内では温度が均一と考える。

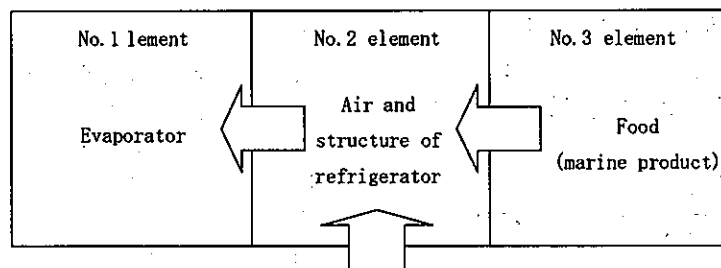
隣り合った第 j 層から第 $j-1$ 層へ流出する熱量は、温度差と食品の熱伝導率に比例し、層の厚さ Δx に反比例する。第 $j+1$ 層から第 j 層へ流入する熱量より流出する熱量が大きければ、その層内の食品温度が下がったり凍結し、逆の場合は上昇する。また、この食品の最左側より流出する熱量 q_0 は、冷凍庫内の空気へ伝わる熱量である。

3.2 各要素間の熱の伝達

ここでは、第一、第二要素内の熱の流れについて説明する。第一要素は、冷媒の蒸発により熱を奪う。その値は、冷凍機の圧縮機の性能によってきまる。また、第一要素への熱の流入は、冷凍庫内空気からの熱伝達によって決まる。この冷凍庫内空気から蒸発器へ流入する熱量より、冷媒により奪われる熱量の方が多い場合、蒸発器及び蒸発温度は時間と共に低下する。その逆の場合は上昇する。

第二要素からの熱の流出は、上述したように第一要素への熱の流出に等しい。そして、第二要素への熱の流入は二つある。一つは食品との温度差による熱伝達、もう一つは、冷凍室の壁を通して流入する熱である。

この場合、第一要素への熱の流出、すなわち、蒸発器に奪われる熱量の方が食品や外壁から流



Heat transfer from wall

Fig. 1 Refrigerating system

Table 1 Relation between refrigerating capacity and evaporating temperature (R502, 2.2kW)

Evaporating temperature	(°C)	-45	-40	-35	-30	-25	-20	-15
Refrigerating capacity	(W)	930	1396	1861	2442	3140	3954	4885

Atmospheric temperature 32°C, 60Hz

入する熱量より大きければ、時間と共に庫内温度は低下する。そして、その低下率は、壁、床を含む庫内構築物の熱容量に反比例する。

4. 基礎式

4.1 第一要素

第一要素から熱を奪う冷凍機の冷凍能力は、圧縮機の性能、冷媒の特性により変化する。大きく関与するのは蒸発温度で、冷凍機の機種がきまれば蒸発温度の関数と考えられる。つまり θ_e (°C)を蒸発温度とする冷凍能力、 $R(\theta_e)$ (W)は、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 x 温度変化)を加えたものに等しくなる。

冷凍室に食品を入れたときから、時間ごとの諸物理量の変化を時間を微小量 Δt (h)で刻み、 $t_0(=0)$, t_1 , $t_2 \dots t_i(= \Delta t \times i) \dots$ とすると、次式となる。

$$R(\theta_e) = U_e \times A_e \times (\theta_a(i) - \theta_e(i)) + \{H_e(\theta_e(i) - \theta_e(i+1))\} / \Delta t \quad (1)$$

ここで、 $R(\theta)$ は、冷凍機の性能曲線として与えられる。実際計算する場合は、蒸発器温度の二次曲線として表す。冷凍機の冷凍能力は、蒸

発温度によって大きく変化する。

表 1 は、冷凍機の蒸発温度と冷凍能力(R502, 2.2kW)の 1 例を示す。圧縮機の動力は 2.2kW, 作動流体は R502 の場合の冷凍機の蒸発温度と冷凍能力の関係を次式に示す。

$$R(\theta_e) = 2.0 \times \theta_e^2 + 230 \times \theta_e + 7200 \quad (2)$$

冷凍室に食品を入れた時($i = 0$), 空気の温度 $\theta_a(0)$, 蒸発温度 $\theta_e(0)$ は、初期条件として与える。そして、食品を入れてから Δt 時間後の蒸発温度 $\theta_e(1)$ は、式(1)を変形すると、次式になる。

$$\theta_e(1) = \theta_e(0) - \{R(\theta_e) - U_e \times A_e \times [\theta_a(0) - \theta_e(0)]\} \times \Delta t / H_e \quad (3)$$

同様に、式(3)で求めた $\theta_e(1)$ より、 $\theta_e(2) \dots \theta_e(i)$ は、次式より求まる。

$$\theta_e(i+1) = \theta_e(i) - \{R(\theta_e) - U_e \times A_e \times [\theta_a(i) - \theta_e(i)]\} \times \Delta t / H_e \quad (4)$$

式(4)中の未知数は、 $\theta_a(i)$ ($i = 1, 2 \dots$)のみで

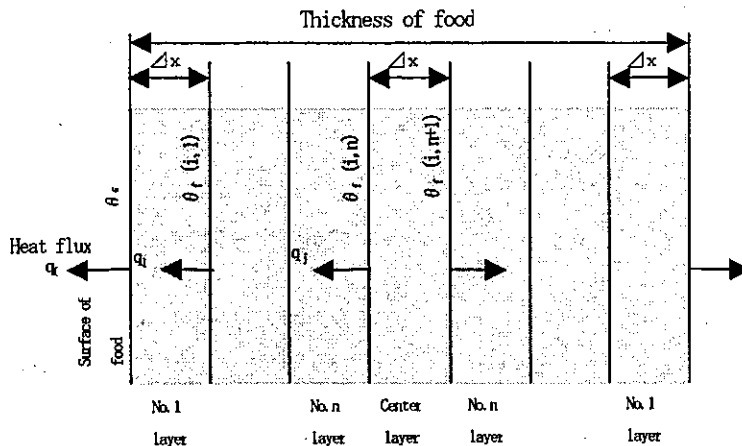


Fig. 2 Calculation model of food

ある。また、ある各時刻における空気温度 $\theta_a(i)$ は、次に述べる第二要素の熱収支から、第一要素の場合と同様に求められる。

4.2 第二要素

第二要素は、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 \times 温度変化）に等しくなり、次式となる。

$$U_o \times A_o \times (\theta_a(i) - \theta_o(i)) - \alpha_{fs} \times A_f \times \{\theta_{fs}(i) - \theta_a(i)\} - U_r \times A_r \times (\theta_A - \theta_a(i)) = (H_{ras}(\theta_a(i) - \theta_a(i+1))) / \Delta t \quad (5)$$

式(5)より第二要素の温度 $\theta_a(i)$ は、次式になる。

$$\theta_a(i+1) = \theta_a(i) - \{U_o \times A_o \times [\theta_a(i) - \theta_o(i)] - \alpha_{fs} \times A_f \times [\theta_{fs}(i) - \theta_a(i)] - U_r \times A_r \times [\theta_A - \theta_a(i)]\} \times \Delta t / H_{ras} \quad (6)$$

式(6)において、 U_o , A_o , A_r , U_r , θ_A , H_{ras} は定数である。

式(6)の平均熱伝達係数 α_{fs} は、自然対流熱伝達で層流⁹⁾と考えると、次式より求まる。

$$Nu_x = C_1 (\nu_\infty / \nu_w)^{0.21} Ra_x^{1/4} \quad (\text{局所}) \quad (7)$$

$$10^4 \leq Ra_x \leq 4 \times 10^9 \sim 3 \times 10^{10}$$

ただし、空気の場合は $(\nu_\infty / \nu_w) = 1$ とする。

ここで、

$$C_1 = 3/4 \times \{Pr / (2.4 + 4.9\sqrt{Pr} + 5\sqrt{Pr})\}^{1/4} \quad (8)$$

ここで、

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (9)$$

$$Gr = g \beta (\theta_{fs} - \theta_a) l^3 / \nu^2 \quad (10)$$

$$Pr = c_p \mu / \lambda \quad (11)$$

$$Nu_l = 4/3 (Nu_x)_{x=l} \quad (\text{平均}) \quad (12)$$

$\theta_o(0)$, $\theta_a(0)$, θ_{fs} を初期条件として与えると、

Δt 時間後の空気温度 θ_a は、蒸発温度の場合と同様に計算することができる。

式(6)中の未知数である $\theta_{fs}(i)$ ($i = 1, 2, \dots$) は、次に述べる第三要素の熱収支から求めることができる。

4.3 第三要素

ここでは、食品の計算は、両側から冷却する一次元の熱伝達と考える。

ここでは、食品の分割は、 $2n+1$ 個（奇数）と考えた。また、各層の厚さは Δx (m) で同一とする。したがって、冷却は、板の両側から同じように進行し内層に及ぶ。したがって、計算は、左の片側の中心層（左から $n+1$ 個目の層）で行った。

食品の表面温度は、式(5)の $\theta_{fs}(i)$ である。また、各層の $i \times \Delta t$ 時間後の温度を第一層目から $\theta_f(i, 1) \cdots \theta_f(i, j) \cdots \theta_f(i, n)$ とする。すなわち、中心層のすぐ左隣の層の温度が $\theta_f(i, n)$ である。そして、中心層の温度が $\theta_f(i, n+1)$ である。

食品の温度変化は、凍結がある場合と凍結がない場合に分けて考えた。その計算方法を以下に示す。

4.3.1 食品の凍結がない場合

第一層から流出する熱量は、第二要素への流熱量 $\alpha_{fs} \cdot A_{fs} \cdot (\theta_{fs}(i) - \theta_a(i))$ である。また、第一層へ流入する熱量は、第二層との温度差による熱伝導である。この第一層からの流出熱量が流入の熱量より大きければ、第一層の温度は低下する。

Δt 時間後の第一層の温度を $\theta_f(i+1, 1)$ とすると、次式となる。

$$\alpha_{fs} \times (\theta_{fs}(i) - \theta_a(i)) - \{\lambda_1 \times (\theta_f(i, 2) - \theta_f(i, 1))\} / \Delta x = \{\Delta x \times \rho_1 \times c_{p1} \times (\theta_f(i, 1) - \theta_f(i+1, 1))\} / \Delta t \quad (13)$$

式(13)より温度 $\theta_f(i+1, 1)$ は、次式になる。

$$\theta_f(i+1, 1) = \theta_f(i, 1) - \{\alpha_{fs} \times [\theta_{fs}(i) - \theta_a(i)] - \lambda_1 \times [(\theta_f(i, 2) - \theta_f(i, 1))] / \Delta x\} \times \Delta t / (\Delta x \times \rho_1 \times c_{p1}) \quad (14)$$

式(13)中の $\theta_{fs}(i)$ が未知数である。

図3は、食品の表面温度 θ_{fs} の算出方法を示

す。この表面温度 $\theta_{fs}(i)$ は、第一層の温度 $\theta_{fs}(i, 1)$ と第二層の温度 $\theta_{fs}(i, 2)$ の直線的延長上にあると考えた。

付録1に、詳細な計算に方法について示す。

4.3.2 食品の凍結がある場合

食品の凍結がある場合は、次のように考えた。

- 1) 食品の温度と凍結率の関係を見積る。
- 2) 凍結後の物性値は、熱伝導率、比熱、密度が変化する。
- 3) 凍結を開始する点は、各層毎に計算し、移行前後で前を正しく見積もる。

食品の温度と凍結率の関係は、次式を使用した²⁾。

凍結点通過後の食品(半凍結状態)の物性値の熱伝導率、比熱、密度は、凍結した割合の加重平均により、次式より求めた。

$$K = K_1 \times [1 - r(i, j)] + K_2 \times r(i, j) \quad (15)$$

ここで、

- K : 半凍結の諸物性値
- K_1 : 凍結前の諸物性値
- K_2 : 凍結後の諸物性値

ここで、温度 $\theta_f(i, j)$ における凍結率 $r(i, j)$ は、次式より求める。

$$r(i, j) = 1 - \theta_{fr} / \theta_f(i, j) \quad (16)$$

ここで、 θ_{fr} は凍結開始温度である。

図4(a)(b)(c)は、凍結ありの場合の食品の表面温度の修正方法を示す。図4(a)は、食品表面温度 $\theta_f(i, 1)$, $\theta_f(i, 2)$ は、凍結点よりも低い場合、図4(b)は、食品表面温度 $\theta_f(i, 1)$ が凍結点 θ_{fr} よりも低く、 $\theta_f(i, 2)$ が θ_{fr} よりも高い場合である。図4(c)は、食品表面温度 $\theta_f(i, 1)$, $\theta_f(i, 2)$ は、凍結点 θ_{fr} よりも高く、また、食品の修正表面温度 $\theta_{fs}(1)$ が θ_{fr} より低い場合である。

付録2に、詳細な計算方法について示す。

5. 計算方法及び条件

図5は、計算のフローチャートを示す。

a) 凍結なしの場合

計算は、まず、食品の物性値を与える。次に、初期条件、すなわち、時刻 $t=0$ における各部温度を与えれば、 Δt 時間後の蒸発温度、空気温度、食品の表面温度、食品の各層の温度、食品の中心温度を求める。

b) 凍結ありの場合

計算は、まず、時間 $t=0$ における初期値を与える。次に、 Δt 時間後の蒸発温度を求める。そして、 Δt 時間後の空気温度(冷凍室内温度)を求める。次に、 Δt 時間後の表面、各層、中心温度を求める。凍結なし、ありの判断をして、凍結ありの場合は、凍結点を通過したかどうか判定し、凍結の状態を計算する。次に、凍結点を通過後は、 Δt 時間後の計算をやり直す。

以上の計算を Δt 時間進め規定時間まで繰り返して計算する。

表2は、凍結なしの場合の計算条件を示す。凍結なしの場合、テストピースは、円柱棒(黄銅製)である。主な条件は、熱伝導率 λ が $117 \text{ (W/(m}\cdot\text{K))}$ 、密度 ρ が $8400 \text{ (kg/m}^3)$ 、 $0.376 \text{ (kJ/(kg}\cdot\text{K))}$ である。

表3は、凍結ありの場合の計算条件を示す。凍結ありの実験は、水産物の代表的な“まぐろ”を使用した。主な条件は、熱伝導率 λ が $0.619 \text{ (W/(m}\cdot\text{K))}$ 、密度 ρ が $1048 \text{ (kg/m}^3)$ 、定圧比熱 c_{pl} が $3.395 \text{ (kJ/(kg}\cdot\text{K))}$ 、潜熱 L が 0.634 (kJ/kg) である。

6. 実験

ここでは、食品の凍結がなし、ありの場合の計算

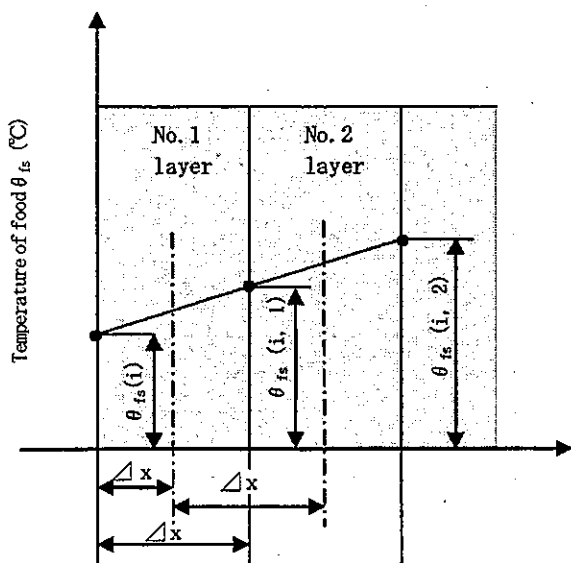


Fig.3 Calculation of the surface temperature of food

を実証するために実験を行った。

実際、冷凍時間に影響する要因は、大別すると、風速、ブライン流量、食品の質量・種類・形状、ブライン温度がある。食品の種類の違いは、熱伝導率、凍結潜熱が異なる。

以上のことより、実験は、凍結なしの場合は、

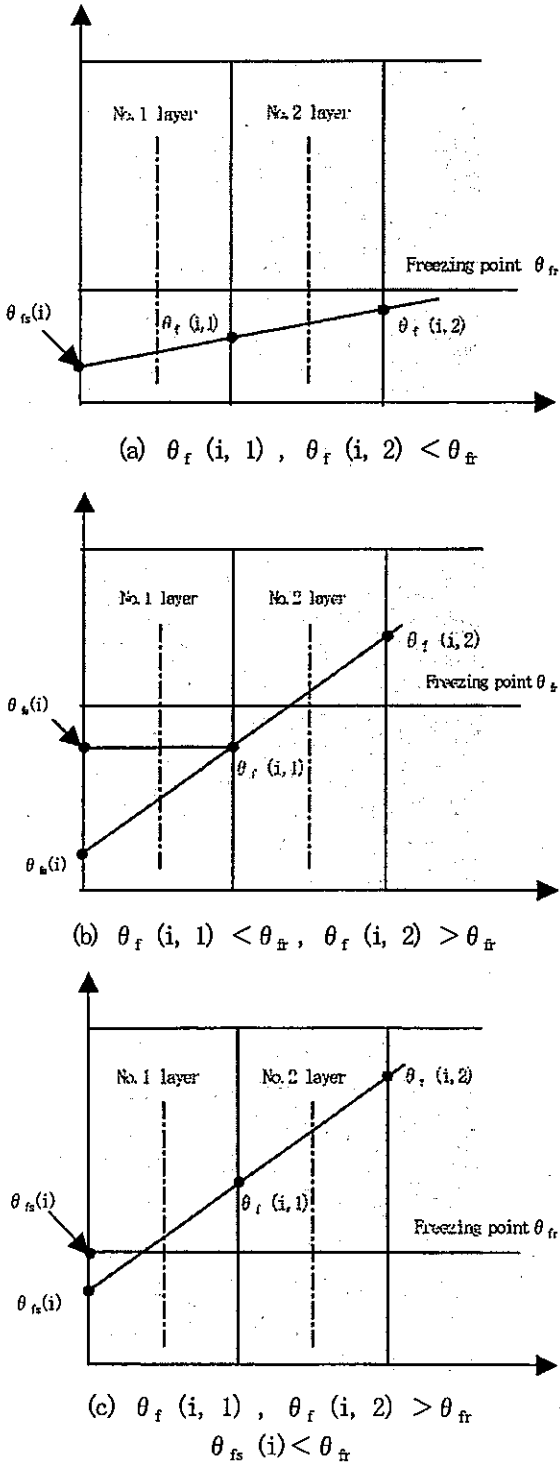


Fig. 4 Modified of surface temperature in case of with freezing of food

円柱棒(黄銅製)に対して行い、凍結ありの場合は、水産物の代表的なものとして、“まぐろ”を使用して行った。

6.1 実験装置

図 6 は、冷凍システムの実験装置を示す。実験装置は、家庭用冷蔵庫を改造し使用した。また、フィンチューブ式蒸発器の伝熱面積は、管とフィン部分である。冷蔵庫内は、面積を測定するため、また、熱通過係数の見積りのため断熱性の高い発砲スチロールで平滑面に形成した。この冷凍システムの冷媒はR134aである。また、自然対流熱伝達の実験を行うため、冷凍庫内の送風機取り外して実験を行った。

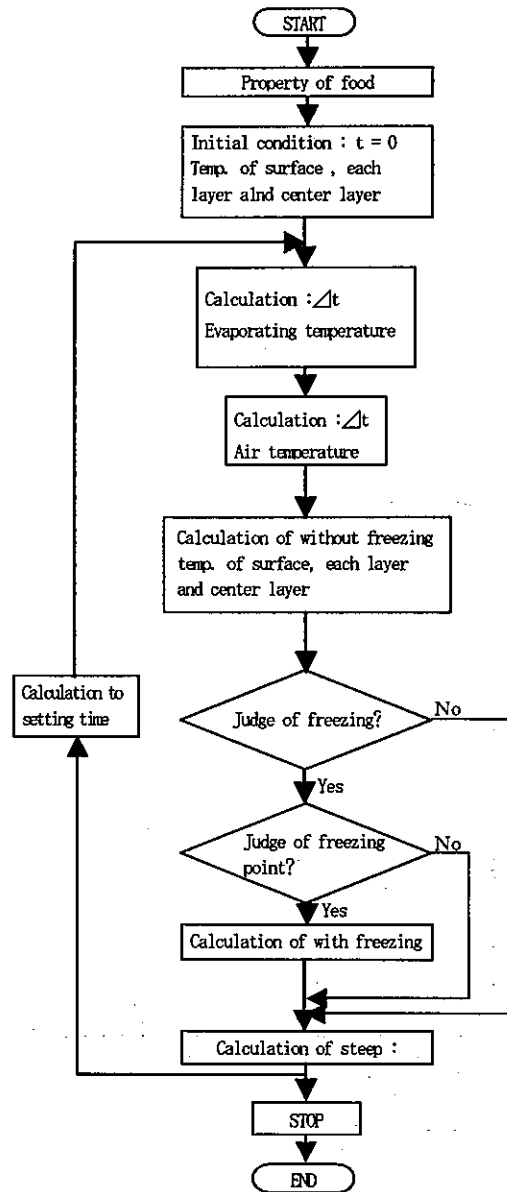


Fig. 5 Flowchart of calculation

Table 2 Calculated conditions (Brass)

Overall heat transfer coefficient of the evaporator U_e	$[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$	30.0
Heat transfer area of the evaporator A_e	$[\text{m}^2]$	0.25
Evaporating temperature θ_e	$[\text{°C}]$	11.4
Air temperature of freezer θ_a	$[\text{°C}]$	11.4
Heat capacity of the evaporator H_e	$[\text{kJ}/\text{K}]$	1.7
Heat transfer coefficient of the food surface α_{fs}	$[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$	9.4
Overall heat transfer coefficient of wall of the refrigerator U_r	$[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$	0.09
Heat transfer area of the refrigerator A_r	$[\text{m}^2]$	0.00196
Surface area of the freezer A_f	$[\text{m}^2]$	0.581
Surface temperature of the food θ_{fs}	$[\text{°C}]$	11.4
Atmospheric temperature θ_A	$[\text{°C}]$	11.4
Heat capacity of the air and structure of refrigerator H_{ras}	$[\text{kJ}/\text{K}]$	4.006
Heat conductivity of the food before freezing λ_1	$[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	117
Density of the food before freezing ρ_1	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	8400
Specific heat of the food before freezing c_{p1}	$[\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}]$	0.376
Density of the evaporator ρ_e	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	7740
Specific heat of the evaporator c_{pe}	$[\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}]$	0.442
Volume of the evaporator V_e	$[\text{m}^3]$	0.505×10^{-3}
Heat conductivity of the evaporator λ_e	$[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	26900
Thickness of wall of the evaporator δ_e	$[\text{mm}]$	2.0
Density of air ρ_a	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	1.2
Specific heat of air c_{pa}	$[\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}]$	1.0
Volume of the evaporator V_a	$[\text{m}^3]$	0.027
Density of the structure of refrigerator ρ_{rs}	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	7740
Specific heat of the structure of refrigerator c_{prs}	$[\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}]$	0.442
Volume of the structure of refrigerator V_{rs}	$[\text{m}^3]$	1.161×10^{-3}
Thickness of the structure of refrigerator δ_{rs}	$[\text{mm}]$	2.0

主な構成は、冷凍機、冷凍庫、計測装置からなる。冷凍庫の大きさは、縦 255mm x 横 305mm x 奥行き 215mm である。

冷凍庫内の温度測定は、サーミスターを使用し、4 箇所で行った。また、蒸発温度の測定は、伝熱管の表面にサーミスターを貼り付けて行った。

6.2 テストピース

a) 凍結なしの場合(円柱棒(黄銅製))

図 7(a) (b) は、実験に用いたテストピースを示す。図 7(a) は、凍結なしの場合に使用した円柱棒(黄銅製)の形状を示す。この実験は、物性値がわかっているものを使用した。そのために、円柱棒の材質は、ネパール黄銅 ($\lambda = 117 \text{W}/\text{mk}$) である。円柱棒は、直径 d が 50mm、長さ l が 150mm である。

温度測定は、テストピースの中心と端から長さ 37.5mm の 2 箇所に円柱の中心までサーミスターを挿入し行った。

b) 凍結ありの場合(水産物“まぐろ”)

図 7(b) は、凍結ありの場合は、水産物の代表的な“まぐろ”の形状を示す。“まぐろ”は、市販されているものを使用した。形状は長さ 169mm、巾は 60mm、厚さは 20mm である。

温度測定は、水産物の中心に 1 箇所サーミスターを挿入し行った。

6.3 実験方法

実験方法は、大気圧、大気温度から蒸発温度が -48°C になるまで冷却した。各部の測定は、サーミスターで、2 秒ごとに A/D 変換器を通して食品(水産物)、冷凍庫内、蒸発温度をパーソナルコンピューターに取り込んで行った。

実験値と計算の結果と比較するためには、計算の場合の冷蔵庫の冷凍能力を近似する必要がある。各要素の温度変化は、食品や空気が熱を蓄積する事により起こる。非定

Table 3 Calculated conditions (Yellow-fin tuna)

Overall heat transfer coefficient of the evaporator U_e	[W/(m ² ·K)]	30.0
Heat transfer area of the evaporator A_e	[m ²]	0.253
Evaporating temperature θ_e	[°C]	11.4
Air temperature of freezer θ_a	[°C]	11.4
Heat capacity of the evaporator H_e	[kJ/K]	1.7
Heat transfer coefficient of the food surface α_{fs}	[W/(m ² ·K)]	9.4
Overall heat transfer coefficient of wall of the refrigerator U_r	[W/(m ² ·K)]	0.09
Heat transfer area of the refrigerator A_r	[m ²]	0.00196
Surface area of the freezer A_f	[m ²]	0.581
Surface temperature of the food θ_{fs}	[°C]	11.4
Atmospheric temperature θ_A	[°C]	11.4
Heat capacity of the air and structure of refrigerator H_{ras}	[kJ/K]	4.006
Heat conductivity of the food before freezing λ_1	[W/(m·K)]	0.619
Density of the food before freezing ρ_1	[kg/m ³]	1048.0
Specific heat of the food before freezing c_{p1}	[kJ/kg·K]	3.395
Latent heat of the food L	[kJ/kg]	0.634
Heat conductivity of the food after freezing λ_2	[W/(m·K)]	0.9176
Density of the food after freezing ρ_2	[kg/m ³]	993.9
Specific heat of the food after freezing c_{p2}	[kJ/kg·K]	1.968
Density of the evaporator ρ_e	[kg/m ³]	7740
Specific heat of the evaporator c_{pe}	[kJ/kg·K]	0.442
Volume of the evaporator V_e	[m ³]	0.505×10^{-3}
Heat conductivity of the evaporator λ_e	[W/(m·K)]	26900
Thickness of wall of the evaporator δ_e	[mm]	2.0
Density of air ρ_a	[kg/m ³]	1.2
Specific heat of air c_{pa}	[kJ/kg·K]	1.0
Volume of the evaporator V_a	[m ³]	0.027
Density of the structure of refrigerator ρ_{rs}	[kg/m ³]	7740
Specific heat of the structure of refrigerator c_{prs}	[kJ/kg·K]	0.442
Volume of the structure of refrigerator V_{rs}	[m ³]	1.161×10^{-3}
Thickness of the structure of refrigerator δ_{rs}	[mm]	2.0

常熱伝達の場合、実験によって各要素の温度を測定すれば、実験装置全体を一つの系とし冷凍能力を見積れることができる。そ

のために、この冷蔵庫の冷凍能力を測定した。

付録 3 に、冷凍能力の実験結果を示す。

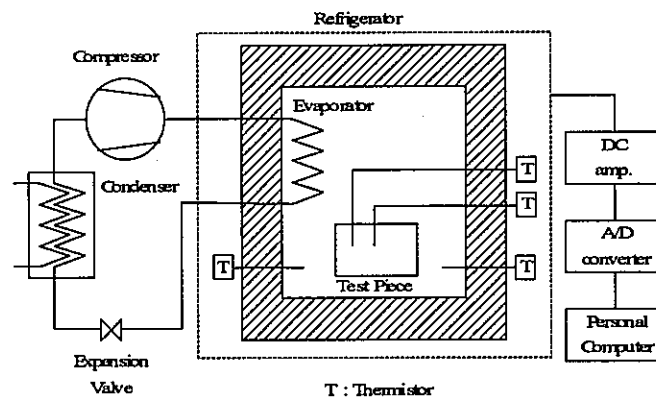


Fig. 6 experimental apparatus

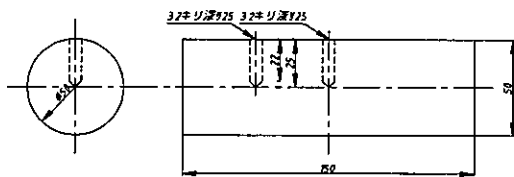
7. 実験値と計算値の比較

7.1 食品の凍結なしの場合

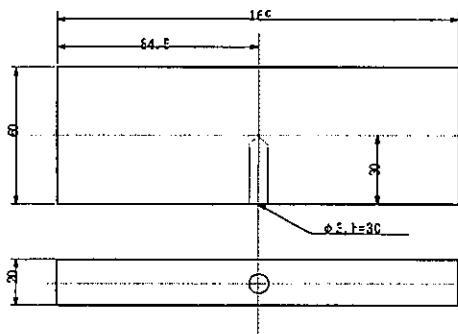
食品の凍結なしの場合は、第1, 2, 3要素について比較を行った。

図8(a)は、図1の、第1要素の蒸発温度と図3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、実験値と比較すると経過時間0~5分までは一定で、5~10分までは-35°C付近まで急激に温度降下がある。10分を経過すると温度降下は10~50分まで実験値が低くなっている。35分以降から計算値の温度が高くなる。これは、これ以降の冷凍能力が低いと考えられる。

図8(b)は、図1の第2要素の空気温度と図3の冷凍庫内温度の比較を示す。図よりわかるように、実験値と比較すると、実験値は0~5分までは一定であるが実験値は緩やかな温度降下となる。5分~30分までは共に急激に温度降下がある。しかし、10分を境に計算値の温度が実験値より高くなっている。35分以降は第1要素と同様な傾向があり、冷凍能力の影響により計算値の温度が高くなると考えられる。



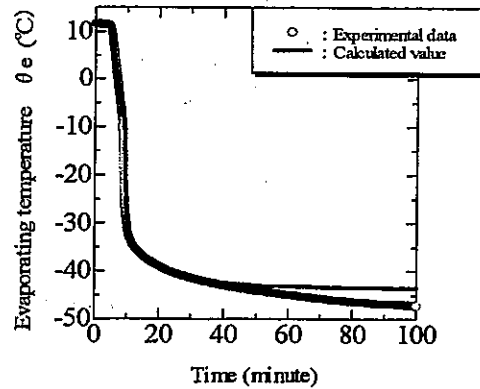
(a) In case of without freezing of food (Brass)



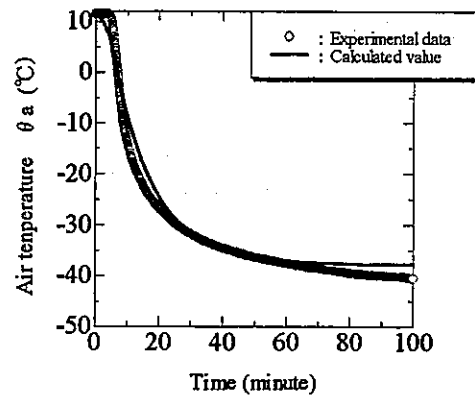
(b) In case of with freezing of food (Yellow-fin tuna)

Fig. 7 Test piece

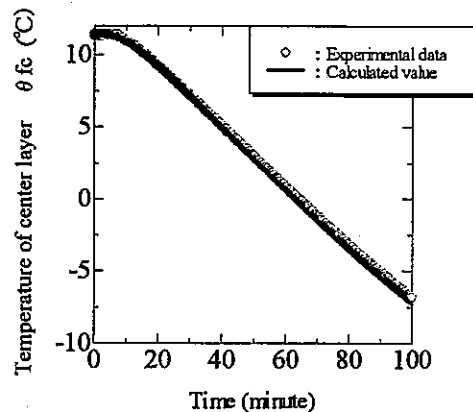
図8(c)は、図1の第3要素の水産物の温度と図3の水産物(テストピース)内の温度変化の比較を示す。図よりわかるように、実験値と比較すると、0~18分までは温度が一定で、その後は急激に温度降下する。40分を経過すると温度降下は少し計算値の温度が低くなる。



(a) No. 1 element



(b) No. 2 element



(c) No. 3 element

Fig. 8 Comparison of the experimental data with the calculated value (In case of without Freezing of food)

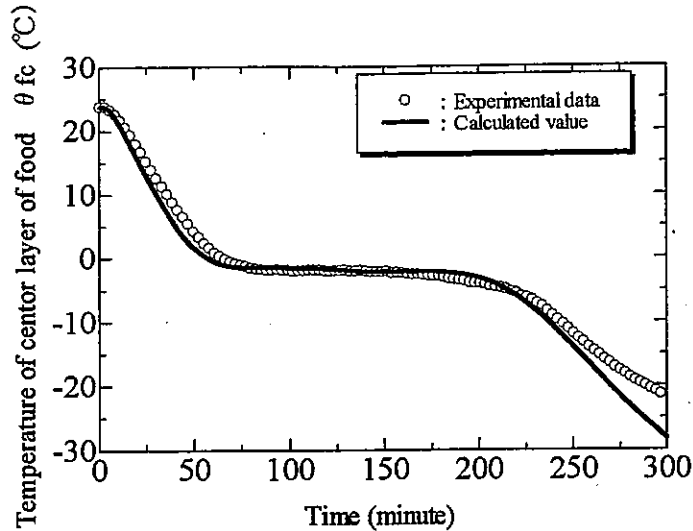


Fig.9 Comparison of the experimental data with the calculated value
(in case of with freezing of food)

7.2 食品の凍結ありの場合

図9は、食品の凍結がある場合、図1中の計算より得られた食品の中心温度と実験より得られた食品の中心温度との比較を示す。図中の実線は計算値、○印は実験値を示す。

図9よりわかるように、計算値と実験値を比較すると、冷凍を開始して凍結が始まるまでと凍結が終了するまでは、よく一致している。そして、時間が経過し、凍結点通過後は、計算値は実験値より低くなった。この原因は、凍結した水産物の物性値である密度、比熱等の見積りが悪いためと考えられる。

さらに、計算の精度を上げるためには熱容量、熱通過係数、熱伝達率の正確な見積りや強制対流熱伝達について考える必要がある。また、食品のモデルについては、一次元熱伝導を三次元と考える必要がある。

8. 結論

本研究は、水産物の冷凍における伝熱特性を考慮して、水産物の凍結がなし、ありの場合について、冷凍能力に対する各部分の温度変化を予測する計算を行った。また、冷凍システムの伝熱特性を見るための実験を行い、実験値と計算値の比較をした。以下、結果を示す。

- (1) 食品の凍結がない場合について、冷凍能力に対する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、0~35分までは計算値と実験

値は一致した。35分以降は実験値が低くなった。

- (3) 第2,3要素は、計算値と実験値はほぼ一致した。
- (4) 食品の凍結がある場合、計算値と実験値を比較すると、冷凍を開始して凍結が始まる時間と凍結が終了するまではよく一致する。しかし、凍結点通過後以後は、計算値は実験値より低くなった。

参考文献

- (1) 日本冷凍協会編, 冷凍空調便覧 応用編 新版第4版, 516-520, (1981)
- (2) 日本冷凍協会編, 冷凍空調便覧 応用編 新版第4版, 785, (1981)
- (3) 越智昌夫, 冷凍, 60(692), 35-46, (1985)
- (4) 日本機械学会編, 伝熱工学資料 改定第4版, 61-69, (1986)

付録 1 食品の表面温度 θ_{fs} の算出方法

図 3 は、食品の表面温度 θ_{fs} の算出方法を示す。

この表面温度 $\theta_{fs}(i)$ は、第一層の温度 $\theta_{fs}(i, 1)$ と第二層の温度 $\theta_{fs}(i, 2)$ の直線的延長上にあると考え、次式より求められる。

$$\theta_{fs}(i) = \theta_f(i, 1) - \{[\theta_f(i, 2) - \theta_f(i, 1)]\} / 2 = [3 \times \theta_f(i, 1) - \theta_f(i, 2)] / 2 \quad (1-1)$$

第二層以降、第 n 層までの、次の Δt 時間後の温度は、左の層への流出熱量から右隣からの流入熱量を引いた残りの熱量が、その層の食品を冷却する。

$$\lambda_1 \times \{\theta_f(i, j) - \theta_f(i, j-1) - [\theta_f(i, j+1) - \theta_f(i, j)]\} / \Delta x = \Delta x \times \rho_1 \times c_{pl} \times (\theta_f(i, 1) - \theta_f(i+1, 1)) / \Delta t \quad (1-2)$$

式(1-2)より、次の時刻の温度は、次式になる。

$$\theta_f(i+1, j) = \theta_f(i, j) - \{\lambda_1 \times [2 \times \theta_f(i, j) - \theta_f(i, j-1) - \theta_f(i, j+1)] \times \Delta t\} / (\Delta x^2 \times \rho_1 \times c_{pl}) \quad (1-3)$$

中心層の熱は、左右両側から流出する。流出した熱量だけ自分自身が冷却される。中心層は、 $j = n+1, j-1 = j+1 = n$ とおくことができるので、式(1-3)より、 Δt 時間後の中心層の温度は、次式になる。

$$\theta_f(i+1, n+1) = \theta_f(i, n+1) - \{[\theta_f(i, n+1) - \theta_f(i, n)] \times 2 \times \lambda_1 \Delta t\} / (\Delta x^2 \times \rho_1 \times c_{pl}) \quad (1-4)$$

付録 2 食品の凍結ありの場合の表面温度の修正方法

ここでは、食品の凍結ありの場合の表面温度の修正方法について示す。

図 5(a) (b) (c) は、凍結ありの場合の食品の表面温度の修正方法を示す。

計算は、凍結点より上では、前節の凍結なしの場合と全く同様である。計算が進めば、計算値は、凍結点 θ_f 以下になる。計算値が凍結点以下になった時、計算をやり直す。すなわち、凍結点より温度が下がれば、その瞬間から凍結が始まる。そのために、凍結の潜熱を加えて熱収支を考えた。

まず、第 1 層の場合、凍結点を通過する時の凍結の潜熱を考えると、次式になる。

$$\alpha_{fs} \times [\theta_{fs}(i) - \theta_a(i)] - \lambda_1 \times [\theta_f(i, 2) - \theta_f(i, 1)] / \Delta x = \Delta x \times r_1 \times c_{pl} \times [\theta_f(i, 1) - \theta_{fr}] / \Delta t + L \times \Delta x \times r_1 \times r(i+1, 1) / \Delta t + \Delta x \times r_2 \times c_{p2} \times [\theta_{fr} - \theta_f(i+1, 1)] / \Delta t \quad (2-1)$$

ここで、右辺第 1 項は、食品を凍結点 θ_{fr} まで冷却するのに必要な熱量である。また、第 2 項は、食品が凍結率 $r(i+1, 1)$ だけ凍結するのに必要な潜熱量である。第 3 項は凍結点以下に温度が下がるために必要な熱量である。

凍結が始まる点では、食品の温度は下がらず凍結率が増加する。これは、冷却の熱量はほとんど凍結の潜熱に費やされ、凍結後の温度低下のための熱量にはならない。

凍結点通過直後では温度低下はなく、冷却の熱量は潜熱のみに費やされる。したがって、凍結が始まる点では、式(2-1)の右辺第 3 項は、他の項に比べて非常に小さく無視できる。式(16)を式(2-1)に代入すると、次式になる。

$$\theta_f(i+1, 1) = \theta_{fr} / \{1 + c_{pl} \times [\theta_f(i, 1) - \theta_{fr}] / L - [\alpha_{fs} \times (\theta_{fs}(i) - \theta_a(i)) - \lambda_1 \times \theta_f(i, 2) - \theta_f(i, 1)] / \Delta x\} \times \Delta t / (L \times \Delta x \times \rho_1) \quad (2-2)$$

図 5(a) に示すように、食品の表面温度 θ_{fs} は、前述の凍結なしの場合、第 1 層と第 2 層の温度の延長線上にある。

しかし、凍結のある場合は、同様に考えるこ

とができない。表面温度が一時的に凍結温度よりも低くなる。しかし、実際は、食品の表面温度は、凍結点まで温度が低下すると、一時凍結点で停滞する。そして、凍結率が相当に上がった所で徐々に温度低下すると考えられる。

そのために、凍結がある場合は、以下の修正が必要となる。

式(2-2)は、第1層の凍結開始温度を通過する時である。凍結点を通過した後は、次式になる。

$$\begin{aligned} & \{\alpha_{fs} \times [\theta_{fs}(i) - \theta_a(i)]\} - [\lambda_1 \times (1 - r(i, 1)) \\ & + \lambda_2 \times r(i, 1)] \times [\theta_f(i, 2) - \theta_f(i, 1)] / \Delta x \\ \Delta t = & \Delta x \times \{[1 - r(i, 1)] \times \rho_1 \times c_{p1} + r(i, 1) \\ & \times \rho_2 \times c_{p2}\} \times [\theta_f(i, 1) - \theta_f(i+1, 1)] + L \\ & \times [r(i+1, 1) - r(i, 1)] \times \Delta x \times \Delta \tau_1 \end{aligned} \quad (2-3)$$

ここで、 λ_2 は食品の凍結後の熱伝導率である。 λ_2 は、式(2-2)より、凍結率 $r(i+1, 1)$ は温度 $\theta_f(i+1, 1)$ の関数であるから、これを式(2-3)に代入すると、次式になる。

$$\begin{aligned} & M(i, 1) \times \theta_f(i+1, 1) + H(i, 1) - M(i, 1) \\ & \times \theta_f(i, 1) - L \times \theta_{fr} \times \rho_1 / \theta_f(i, 1) \\ & + L \times \theta_{fr} \times \rho_1 / \theta_f(i+1, 1) = 0 \end{aligned} \quad (2-4)$$

ここで、

$$r'(i, j) = 1 - r(i, j) = \theta_{fr} / \theta_f(i, 1) \quad (2-5)$$

$$M(i, j) = r'(i, j) \times \rho_1 \times c_{p1} + r(i, j) \times \rho_2 \times c_{p2} \quad (2-6)$$

$$\begin{aligned} H(i, j) = & \{\alpha_{fs} \times [\theta_{fs} - \theta_a(i)]\} / \Delta x \\ & - \{[\lambda_1 \times r'(i, 1) + \lambda_2 \times r(i, 1)] \\ & \times [\theta_f(i, 2) - \theta_f(i, 1)]\} \times \Delta t / \Delta x^2 \end{aligned} \quad (2-7)$$

式(2-4)の両辺に、 $\theta_f(i+1, 1)$ を乗ずると、次式の $\theta_f(i+1, 1)$ に関する2次式になる。

$$A_{qe} \times \theta_f(i+1, 1)^2 + B_{qe} \times \theta_f(i+1, 1) + c_{qe} = 0 \quad (2-8)$$

ここで、

$$A_{qe} = M(i, 1) \quad (2-9)$$

$$B_{qe} = H(i, 1) - M(i, 1) \times \theta_f(i, 1) - L \times \rho_1 \times r'(i, 1) \quad (2-10)$$

$$c_{qe} = L \times \rho_1 \times \theta_{fr} \quad (2-11)$$

したがって、式(2-8)の解は、2根のうち1根を採用すると、次式になる。

$$\begin{aligned} \theta_f(i+1, 1) = & [-B_{qe} - (B_{qe}^2 - 4 \times A_{qe} \times c_{qe})^{1/2}] \\ & / (2 \times A_{qe}) \end{aligned} \quad (2-12)$$

以下、第二～n層において、凍結点を通過する場合は、次式となる。

$$\begin{aligned} & \lambda_1 \times [2 \times \theta_f(i, j) - \theta_f(i, j-1) - \\ & \theta_f(i, j+1)] \times \Delta t / \Delta x^2 = \rho_1 \times c_{p1} \times \\ & (\theta_f(i, j) - \theta_{fr}) + L \times \rho_1 \times \\ & r(i+1, j) + \rho_2 \times c_{p2} \times (\theta_{fr} - \\ & \theta_f(i+1, j)) \end{aligned} \quad (2 \leq j \leq n) \quad (2-13)$$

右辺第三項は、式(2-1)と同様に他の二項に比べて極めて小さいので無視すると、次式になる。

$$\begin{aligned} & \lambda_1 \times [2 \times \theta_f(i, j) - \theta_f(i, j-1) - \\ & \theta_f(i, j+1)] \times \Delta t / \Delta x^2 = \rho_1 \times c_{p1} \times \\ & (\theta_f(i, j) - \theta_{fr}) + L \times \rho_1 \times \\ & r(i+1, j) \end{aligned} \quad (2-14)$$

Δt 時間後の温度 $\theta_f(i+1, j)$ は、式(2-2)を求めるときと同様に凍結率 $r(i+1, j)$ との関係から、次式となる。

$$\begin{aligned} \theta_f(i+1, j) = & \theta_{fr} / (1 + c_{p1} \times [\theta_f(i, j) - \\ & \theta_{fr}] / L - \lambda_1 \times [2 \times \theta_f(i, j) - \\ & \theta_f(i, j-1) - \theta_f(i, j+1)] \times \Delta t / \\ & (\Delta x^2 \times L \times \rho_1)) \end{aligned} \quad (2-15)$$

次に、第二～n層の凍結開始点通過後の熱収支から、次式となる。

$$M(i, j) = \rho_1 \times c_{p1} \times r'(i, j) + \rho_2 \times c_{p2} \times r(i, j) \quad (2-16)$$

$$H(i, j) = \{[\lambda_1 \times r'(i, j) + \lambda_2 \times r(i, j)]$$

$$x [2 x \theta_f(i, j) - \theta_f(i, j+1) - \theta_f(i, j-1)] \\ \times \Delta t / \Delta x^2 \quad (2-17)$$

式(2-15)を整理すると、次式となる。

$$M(i, j) \times \theta_f(i+1, j) + H(i, j) - M(i, j) \\ \times \theta_f(i, 1) - L \times \rho_1 \times r'(i, 1) + L \times \rho_1 \\ \times \theta_{fr} / \theta_f(i+1, 1) = 0 \quad (2-18)$$

ここで、

$$r'(i, j) = 1 - r(i, j) = \theta_{fr} / \theta_f(i, j) \quad (2-19)$$

$$M(i, j) = r'(i, j) \times \rho_1 \times c_{p1} + \\ r(i, j) \times \rho_2 \times c_{p2} \quad (2-20)$$

$$H(i, 1) = \{[\lambda_1 \times r'(i, 1) + \lambda_2 \times \\ r(i, 1)] \times [\theta_f(i, 2) \\ - \theta_f(i, 1)]\} \times \Delta t / \Delta x^2 \quad (2-21)$$

式(2-18)の両辺に $\theta_f(i+1, j)$ を乗ずると、 $\theta_f(i+1, j)$ に関する2次式となる。

$$\theta_f(i+1, j) = [-B_{qe} - (B_{qe}^2 - 4 \times A_{qe} \times C_{qe})^{1/2}] \\ / 2 \times A_{qe} \quad (2-22)$$

ここで、

$$A_{qe} = M(i, j) \quad (2-23)$$

$$B_{qe} = H(i, j) - M(i, 1) \times \theta_f(i, 1) \\ - L \times \rho_1 \times r'(i, 1) \quad (2-24)$$

$$C_{qe} = L \times \rho_1 \times \theta_{fr} \quad (2-25)$$

食品の中心層(第 $n+1$ 層)の温度は、初めて凍結開始温度を通過する場合と凍結開始温度を通過した後について求める。

凍結がない場合、中心層の温度は、第2～ n 層の式(1-3)の変数を $j=n+1$, $j-1=j+1=n$ として、式(1-4)より求めた。

同様に、式(2-15), (2-18)より、式(2-26), (2-27)となる。

初めて凍結点を通過する場合は、次式となる。

$$\theta_f(i+1, n+1) = \theta_{fr} / \{1 + c_{p1} \times \\ [\theta_f(i, n+1) - \theta_{fr}] / L - 2 \times \lambda_1 \times \\ [\theta_f(i, n+1) - \theta_f(i, n)] \times \Delta t / \\ (\Delta x^2 \times L \times \rho_1)\} \quad (2-26)$$

凍結点通過後の場合：

$$M(i, n+1) \times \theta_f(i+1, n+1) + H(i, n+1) \\ - M(i, n+1) \times \theta_f(i, n+1) - L \times \rho_1 \times \\ r'(i, n+1) + L \times \rho_1 \times \theta_{fr} \\ / \theta_f(i+1, n+1) = 0 \quad (2-27)$$

ここで、

$$M(i, n+1) = r'(i, n+1) \times \rho_1 \times c_{p1} \\ + r(i, n+1) \times \rho_2 \times c_{p2} \quad (2-28)$$

$$H(i, n+1) = \{[\lambda_1 \times r'(i, n+1) \\ + \lambda_2 \times r(i, n+1)] \times \\ [\theta_f(i, n+1) - \theta_f(i, n)]\} \\ \times \Delta t / \Delta x^2 \quad (2-29)$$

式(2-27)の解は、 $\theta_f(i+1, j+1)$ の2次式となる。この解は、式(2-5)と同様に求められる。

付録3 冷凍機の冷凍能力の算出

ここでは、冷凍機の冷凍能力の算出について示す。

実験より、蒸発温度と冷凍能力の関係は、次式となる。

冷凍能力 (R134a)

1) (測定開始 ~ -9.0°C)

$$R(\theta_e) = 230 \quad (3-1)$$

2) (-9.0°C ~ -17.9°C)

$$R(\theta_e) = 1.71 \times \theta_e^2 - 33.93 \times \theta_e + 214.43 \quad (3-2)$$

3) (-17.9°C ~ -34.5°C)

$$R(\theta_e) = 1.49 \times \theta_e^2 + 143.26 \times \theta_e + 3458.56 \quad (3-3)$$

4) (-34.5°C ~ -51.0°C)

$$R(\theta_e) = 28.93 \times \theta_e^2 + 1303.2 \quad (3-4)$$