

## 凍結魚の解凍に関する基礎的研究—I

真空解凍における解凍速度

御木 英昌\*・西元 諄一\*

### Fundamental Studies on the Thawing of Frozen Fish—I

Thawing Rate of Vacuum Thawing

Hidemasa MIKI\* and Jun-ichi NISHIMOTO\*

#### Abstract

An experimental study of vacuum thawing of frozen skipjack muscle in model of a infinite slab (thermal center; 5 cm from surface) has been made with respect to the thawing time and the distribution of temperatures (mass-average temperature) after thawing at temperatures between 10 and 25°C.

At 15°C, water thawing (spraying 20~40 ml/cm<sup>2</sup>min) and air thawing (1 m/sec) was tested to be compared with vacuum thawing in all systems.

Thawing time in this investigation was defined as the time for the thermal center of the thawed samples to reach -2 from -24°C.

Consequently, the following results were obtained.

1) In the vacuum thawing, increasing thawing temperature decreased thawing time and increased the mass-average temperature of samples after thawing. But the lowest values of this mass-average temperature were obtained at 15°C of vapor temperature.

2) In the thawing at 15°C, the thawing-rate of vacuum is faster than those of water and air, also the mass-average temperature of samples thawed in vacuum thawing was lower than those in water and air thawing.

3) The heat transfer coefficient of vacuum thawing, which calculated from thawing times with Gensho's formula of thawing, was so high as to be regarded as "infinite" nearly.

#### 1. 緒 論

凍結魚の解凍は鮮度保持上、凍結同様に重要な操作であるが、従来自然放置や静水浸漬等による簡単な方法で容易にできるところからあまり重視されなかった。近年凍結魚の利用にはほとんど解凍操作を伴い、大量の凍結魚を経済的に、しかも良品質で計画的に解凍できる装置が必要になり、各種解凍装置の研究が内外各国で幾つか試みられてきた<sup>1)2)3)4)</sup>。

\* 鹿児島大学水産学部食糧保蔵学研究室 (Laboratory of Food Preservation Technology, Faculty of Fisheries Kagoshima University)

しかし、凍結魚の品質変化あるいは鮮度保持に最も重要な因子と考えられる解凍温度、解凍速度（時間）、解凍終了時の温度分布等の伝熱に関する基礎的研究が少ないように思われる。

そこで、本実験では大気圧以下の低温蒸気（10～25°C）を媒体とした新しい解凍法である真空解凍<sup>\*)6)</sup>を採り上げ、被解凍物にカツオ肉の無限平板モデルを用いて真空解凍実験を行ない解凍速度および温度分布等について検討した。

同様に、15°Cの水解凍および空気解凍を行ない同温度の真空解凍結果と比較した。

## 2. 試料と方法

### 2.1 解凍試料

被解凍物のカツオ肉は、市販凍結カツオ（約4kg/尾）を用い、魚体中心温度を-5°C位まで半解凍後、解凍装置（Fig. 1, Fig. 2）の都合上肉厚7.0cm、加熱表面5×5cmの皮付肉片の大きさに整形し、皮側の加熱表面を残して硬質ウレタンフォーム（商品名；カネライト）で断熱した無限平板モデル（Fig. 3）として用いた。このモデルの熱中心は表面から5.0cmである。

断熱材と試料肉との接触部の隙間にはパテを詰め、凝縮水や水蒸気が入らないようにした。解凍試料の測定点は表面から1, 2, 3および5cmとし、各点に熱電対（c.-c., 3mm $\phi$ ）を差込んで-24°Cまで再凍結し、試料内部の温度分布が均一になった時点で、解凍実験に供試した。

### 2.2 真空解凍

水は大気圧（760mmHg）のもとでは100°Cで沸騰蒸発するが、周囲の圧力が大気圧以下になると100°C以下で沸騰蒸発することは良く知られている。真空解凍では、これらの減圧下で発生した低温蒸気を解凍媒体としており、この低温蒸気が被解凍物の低温表面へ移動して凝縮する。この相変化に伴い、Table 1に示す如く非常に大きな凝縮潜熱を発生する。こ

Table 1. Thermal properties of vapor<sup>7)</sup>.

Boiling point	Pressure	Latent heat
0°C	4.581 mmHg	597.1 Kcal/Kg
5	6.539	594.3
10	9.204	591.5
15	12.782	588.7
20	17.528	585.9
25	23.752	583.1
30	31.821	580.2
35	42.175	577.4
40	55.329	574.5
50	92.540	568.8
100	760.000	538.8

\* イギリスの Torry 研究所と APV Clark Built Ltd. が共同開発している。

これらの凝縮による伝熱により被解凍物の表面熱伝達率が大きくなり解凍速度が促進される。

しかし、真空解凍の解凍速度を左右する表面熱伝達率は試料表面の非凝縮ガスの存在や水蒸気の流動方向に対する試料表面の方向性、さらに試料表面と低温蒸気との温度差によって大きく影響を受けるものと考えられている<sup>6)</sup>。なお、他の水や空気を媒体とした水解凍や空気解凍は相変化を伴わない感熱\*による伝熱方法であり、被解凍物の表面を流動させて、境界層の厚さを小さくして表面熱伝達率を改善している点で真空解凍と異なっている。

実験装置の概略図を Fig. 1 に、解凍容器の詳細図を Fig. 2 に示す。

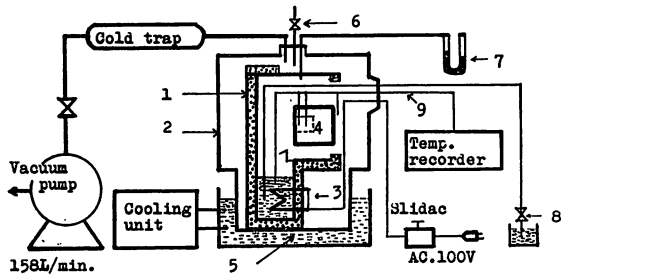


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

- |                                    |                       |
|------------------------------------|-----------------------|
| 1. Thawing vessel                  | 6. Leak valve         |
| 2. Desiccator (30cm <sup>φ</sup> ) | 7. Manometer (Hg)     |
| 3. Sheathed heater (500 watt)      | 8. Supply water valve |
| 4. Sample                          | 9. Thermocouples      |
| 5. Chilled water                   |                       |

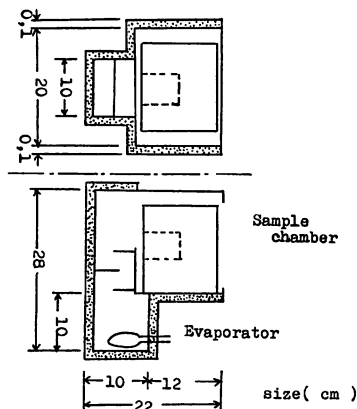


Fig. 2. Detail of thawing vessel.

本装置は主に、減圧装置（日立 5VP-C<sub>2</sub> 型油回転真空ポンプ）、解凍容器を内蔵する真空容器（30cm 径×45cm 高デシケータ）と計測器から構成され、その他に圧力と温度の調整や余剰水蒸気の除去機能を有している。

Fig. 2 に示す解凍容器は垂鉛引鉄板（0.2mm<sup>t</sup>）で作製し、外部からの輻射熱を防ぐため

\* 湿り空気の場合、空気中の水分が多少凝縮するが僅少と考える。

厚さ 10mm<sup>4</sup> の硬質ウレタンフォームで断熱した。解凍容器の上部を被解凍物を入れる解凍室とし、下部を蒸気発生器とした。これには約 0.8l の水を満たし、底部に 500watt のシーズヒータを付け蒸発潜熱を与えるようにした。蒸発の際、突沸による解凍室への飛沫を防止するための邪魔板を付けた。

一方、発生した水蒸気は試料の解凍に一部消費されるが解凍試料が小さいため凝縮される水蒸気が非常に少なく、大部分の水蒸気が真空容器内に充満し、蒸気圧が上がり蒸気温度が上昇する。その結果、水蒸気温度が制御できなくなるため、デシケータ（真空容器）の下部を冷水で冷却して、余分の水蒸気を凝縮除去し、一様に蒸気が発生するようにした。この冷水は、デシケータの外側に底から 10cm の高さまで水を入れ、砕氷またはユニットクーラ (RK-250 型オリオン機械K.K) で約 2°C 位に冷却した。

真空ポンプと真空容器の間にコールドトラップ (-70°C) を設け、真空ポンプへの水蒸気の侵入を防止した。

実験方法としては、先ず真空容器内を真空ポンプで所定圧力まで減圧 (9~25mmHg) してからシーズヒータでの加熱を行ない、設定した蒸気温度 (10~25°C) の蒸気が発生してから解凍を始めた。

蒸気温度と圧力の関係は Table 1 に示す如く、相対関係にあり、蒸気発生量が凝縮量より過剰になると蒸気圧が上がり、蒸気温度の上昇が起こる。また逆の場合は蒸気圧が下がり蒸気温度が下がる。従って、解凍媒体温度の調整は主にシーズヒータの入力をスライダックで加減して行なった。

解凍中における蒸気発生器への給水は 1mm<sup>φ</sup> ビニールパイプに接続した給水弁を通して行なった。

温度測定は 6 打点自動記録温度計 (ET-1, 200 型干野製作所 K.K) を用い、熱電対 (c-c. 0.3mm<sup>φ</sup>) で測温した。測定点は、蒸発水温 (1 点)、水蒸気温度 (1 点)、試料温度 (4 点) とした。真空度は水銀マノメータで測定した。なお、真空解凍の媒体の蒸気温度は 10, 15, 20 および 25°C の 4 段階について行なった。

### 2.3 水解凍および空気解凍

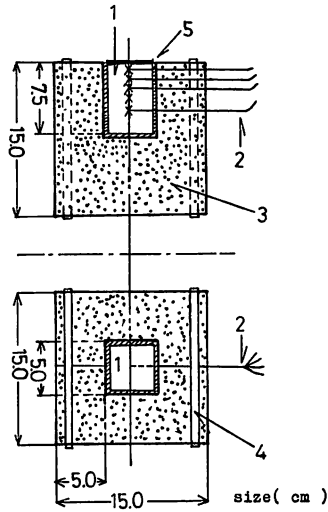
水解凍は恒温水槽の水温を 15°C±1 に制御して外部からの熱を遮断した散水塔の中で散水解凍を行なった。散水条件は孔サイズ 1mm<sup>φ</sup>×孔数74個の 6.5cm 径のシャワーで散水し、水量は 20~40ml/cm<sup>2</sup> min で行なった。この散水解凍の解凍速度は水解凍の中で最高に近い。なお、散水はシャワー下方 16cm のところに試料 (Fig. 3) の加熱表面が散水方向と垂直となるように上向きに置いた。

また、空気解凍は電気低温恒温器 (NK 式-130w) の庫内温度 15°C±1 に設定した状態の中で試料表面と平行に 1m/sec の流速の空気を環気ファン (5m<sup>3</sup>/min) で送り流動空気解凍を行なった。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 解凍速度

解凍時間の定義は確立されていないが、一般には凍結状態の初期温度から全部が融解状態

Fig. 3. Thawing model<sup>8)</sup> of frozen fish(skipjack)

1. Fish muscle with the skin
2. Thermocouple junctions (c.-c.)
3. Insulated rectangular cell for model of a infinite slab
4. Rubber band
5. Putty

になる凍結点に達するまでの所要時間と云っている。しかし、実際の解凍作業においては凍結魚の中心が完全に解凍しない凍結点以下の半解凍状態で解凍作業を打切ることが多く、これは、凍結魚を生鮮解凍する場合に重要な条件とされている<sup>1)11)</sup>。

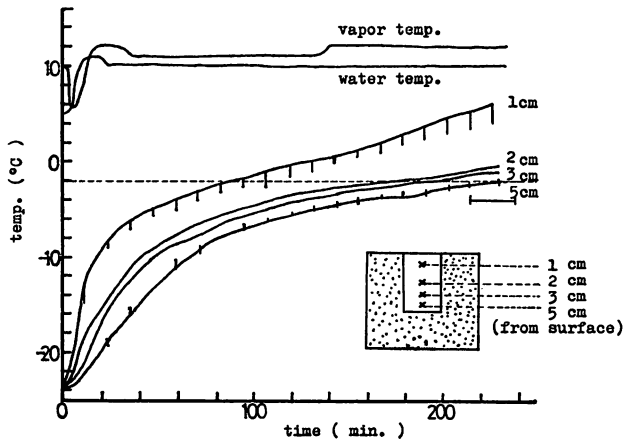


Fig. 4. Curves of temperature in vacuum thawing (10°C).

本実験では、試料の熱中心の初期温度を  $-24^{\circ}\text{C}$  に設定し、凍結点の  $-2^{\circ}\text{C}$  まで昇温する時間を解凍時間とした。

なお、試料カツオの凍結点および融解点は凍結解凍の予備実験の結果、 $-2^{\circ}\text{C}$  付近であったので  $-2^{\circ}\text{C}$  を解凍終温としたものである。

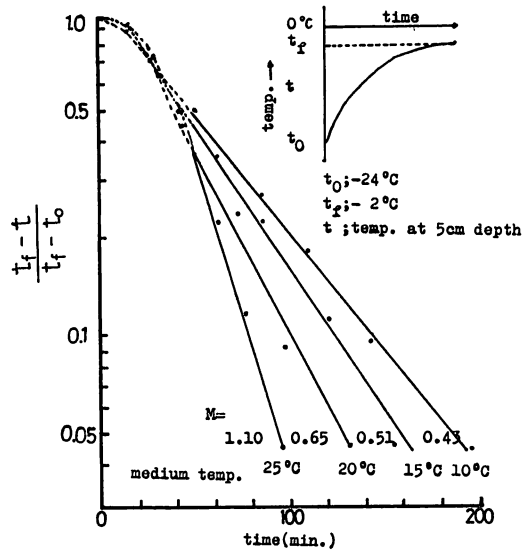


Fig. 5. Rate of vacuum thawing.

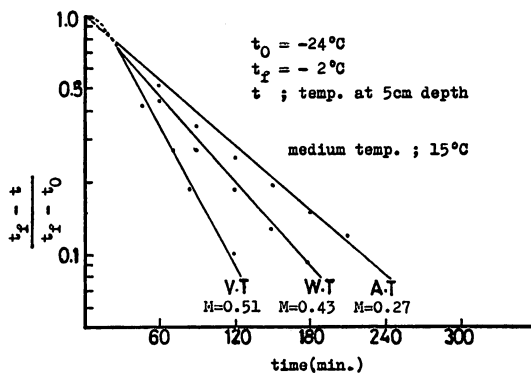


Fig. 6. Comparison of thawing-rate on three methods.

V. T: Vacuum thawing

W. T: Water thawing (spraying  $20\sim 40\text{ ml/cm}^2\text{min}$ )

A. T: Air thawing (1 m/sec)

解凍実験の一例として、解凍媒体温度 10°C の真空解凍曲線を Fig. 4 に示す。この図では、上から蒸気温度と加熱水温を表わしているが、加熱水温は真空容器の全圧に相当する飽和蒸気温度に一致している。しかし、それより発生した水蒸気は加熱水温より全般に 1~2°C 過熱していた。従って、本実験では水蒸気温度を指標に調整した。

真空解凍の各解凍（蒸気）温度毎の解凍時間を Table 2 に、他のデータと共に示した。また同様に各解凍法における解凍媒体温度 15°C における解凍時間を Table 3 に示した。

解凍速度をさらに検討するため、試料の熱中心が解凍終了点に到達する過程を温度比  $[\log(t_f - t)/(t_f - t_0)]$  と解凍時間  $[Z]$  との関係を片対数にプロットして、その勾配  $[M]$  によって解凍速度を表わしたのが Fig. 5, Fig. 6 である。これらの図で、 $M$  が大きい程解凍速度が速いことを意味している。

従って、Fig. 5 から真空解凍は媒体の水蒸気温度が高くなると解凍速度も速くなる。Fig. 6 は真空解凍と他の水や空気解凍と比較した結果であるが、解凍速度は真空解凍 (V. T) が最も速く、次いで水解除凍 (W. T), 空気解凍 (A. T) であると云える。

### 3.2 表面熱伝達率

解凍時間を予測する理論式や半理論式が凍結時間を解析する過程で、NEUMANN<sup>9),10)</sup> PLANK<sup>9),10)</sup>, 長岡<sup>9),10),12)</sup>, 源生<sup>11)</sup>, BAKAL and HAYAKAWA<sup>10)</sup> 等によって導びかれている。

なかでも、源生は平板や円柱状食品を対象に、それらの熱中心における温度変化を基礎として、表面熱伝達や解凍中の比熱変化をも考慮に入れた解凍所要時間  $[Z]$  を求める理論式を得ている。

そこで、本論では平板状食品に対する源生の解凍所要時間  $[Z]$  を求める(1)式<sup>11)</sup>を適用し、これに実験結果の解凍時間を代入し表面熱伝達率  $[\alpha]$  を算出した。その結果を Table 2 および Table 3 に示した。

$$Z = \frac{\gamma w}{10.7\lambda} a \left( a + \frac{5.3\lambda}{\alpha} \right) F(t_a, t_0) \quad \dots\dots(1)$$

ここで、

$$F(t_a, t_0) = C_2 \log \frac{t_a - t_0}{t_a - t_f} + \frac{t_f}{t_a} \times \left( C_1 - C_2 - \frac{L}{t_a} \right) \\ \times \log \frac{(t_a - t_0)t_f}{(t_a - t_f)t_0} + L \frac{t_f}{t_a} \left( \frac{1}{t_f} - \frac{1}{t_0} \right)$$

計算に当って、試料厚さ  $[a]$  は両面加熱の無限平板として  $a=2l=0.1\text{m}$  とした。

凍結カツオの物性は、既に発表されている凍結魚一般の値を参考にして、比重量  $[\gamma] = 1,000\text{kg/m}^3$ <sup>10),12)</sup>, 熱伝導率  $[\lambda]$ <sup>13)</sup> = 1.0kcal/mh°C として用いた。その他、水の比熱  $[C_1] = 1.0\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$ <sup>7)</sup>, 氷の比熱  $[C_2] = 0.487\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$ <sup>7)</sup>, 氷の潜熱  $[L] = 80\text{kcal/kg}$  とした。

表面熱伝達率は解凍速度が速くなる程大きくなるのは当然であるが、ある程度の大きさ (1,000~5,000kcal/m<sup>2</sup>h°C 以上) になると、解凍速度を速める効果が少なくなることが、式 (1) からの計算結果および解凍時間の関係 (Table 2~3) から解る。表面熱伝達率の計算結果から真空解凍における熱伝達率は非常に大きく、ほぼ無限大に近いとみなすことができ、COLIN BAILEY<sup>14)</sup> らが豚肉での実験で述べている値に近い。しかし、彼らは真空解凍と水解除凍

凍の解凍速度の差をあまり認めていないが、試料が大きい場合は表面熱伝達率の影響よりはむしろ内部熱伝導に依るものと考えられる。

Table 2. Results of vacuum thawing.

Medium temp. t (°C)	Thawing time Z (minutes)	Mass average temp. T <sub>m</sub> (°C)	Heat transfer <sup>a)</sup> coefficient α (Kcal/m <sup>2</sup> h°C)	Slope <sup>b)</sup> M (h <sup>-1</sup> )
10 (+2.0)	228±11.5	2.05	3373~∞	0.43
15 (±1.5)	192±10	1.57	1189~∞	0.51
20 (±1.5)	156±10.5	2.83	380~∞	0.65
25 (±1.5)	132±12	4.40	263~35277	1.10

a) Calculated from Gensho's formula of thawing.

b) The slope for  $\log(t_f - t)/(t_f - t_0)$  vs. thawing time (See Fig. 5.)

Table 3. Comparison of thawing method at a medium temperature of 15°C.

Method	Thawing time Z (minutes)	Mass average temp. T <sub>m</sub> (°C)	Heat transfer <sup>a)</sup> coefficient α (Kcal/m <sup>2</sup> h°C)	Slope <sup>b)</sup> M (h <sup>-1</sup> )
Vacuum (13±1 mmHg)	192 (±10)	1.57	1189~∞	0.51
Water-spraying (20~40 ml/cm <sup>2</sup> min)	240 (±10)	2.32	154~280	0.43
Air (1 m/sec)	492 (±12)	1.90	33~36	0.27

a) Calculated from Gensho's formula of thawing.

b) The slope for  $\log(t_f - t)/(t_f - t_0)$  vs. thawing time (Fig. 6.)

### 3.3 温度分布

解凍において、凍結試料の各部位の解凍速度の違いは、食品の品質を考える場合に重要な因子であると指摘されている<sup>3)</sup>が COLIN BAILEY らの実験ではこの点にふれていない。

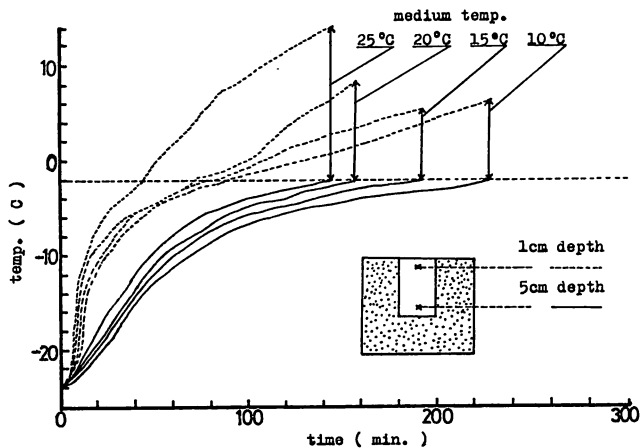


Fig. 7. Difference of temperature between surface layer (1cm) and thermal center (5cm) in vacuum thawing.



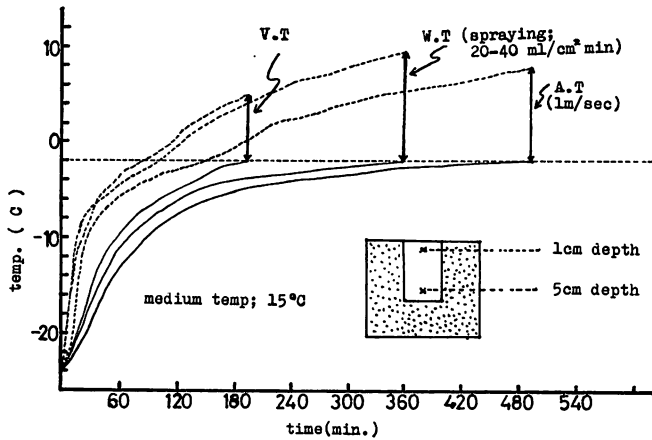


Fig. 8. Difference of temperature between surface layer (1 cm) and thermal center (5 cm) in three methods of thawing.

そこで、試料の表層部（表面より 1cm 点）と試料中心部（5cm 点）の温度曲線を描き、温度差の関係を見るため Fig. 7, Fig. 8 に示した。

しかし、表層部と中心部の 2 点だけでは十分に解凍試料断面の温度分布を表わしていると云えないので、解凍終了時の試料内部の各点の温度から質量平均温度を求め Table 2 および 3 に示した。この場合の試料表面温度は解凍媒体温度としている。なお、質量平均温度  $[T_m]$  は次式で定義されている。<sup>9)</sup>

$$T_m = \int_0^{V_T} \frac{T dv}{V_T} \quad \dots\dots(2)$$

本実験では被解凍物を無限平板モデルとして取扱っているので、単位面積当たり  $dv = dx$   $V_T = l$  と表わせる。従って、

$$T_m = \int_0^l \frac{T dx}{l} \quad \dots\dots(3)$$

で表わされる。(3)式の  $\int_0^l T dx$  の値は、縦軸に解凍終了時の温度分布をプロットして得られた曲線と縦軸、横軸に囲まれた面積を求める図式積分で求められる。結局、 $T_m$  は  $\int_0^l T dx$  の値を表面から熱中心までの距離  $[l] = 0.05m$  で除した値である。解凍後の温度分布において表層部と中心部の温度差が小さく、さらに質量平均温度が低い事がより均一に解凍されていることになり、良い解凍と云える。

真空解凍の場合、この条件を満足する蒸気温度は  $15^\circ C$  付近であることが Fig. 7, Table 2 から知ることができる。従って、解凍媒体温度  $15^\circ C$  において他の解凍法と比較した場合に、真空解凍が解凍速度および温度分布において最もすぐれていることが Fig. 8 と Table 3 から解る。しかし、COLIN BAILEY<sup>14)</sup>らの結果から、品質を衛生的面から考えると、 $15^\circ C$  解凍が適当か否かは更に検討を要する。

#### 4. 要 約

凍結カツオの肉片を無限平板モデル（熱中心；表面から 5cm 点）として、10～25°C の解凍温度で真空解凍を行ない、解凍時間（熱中心が -24°C から -2°C に昇温する時間）と解凍後の温度分布（質量平均温度）について検討した。同様に、解凍温度 15°C において水解凍（散水解凍；20～40ml/cm<sup>2</sup> min）と空気解凍（1m/sec）を行ない真空解凍と比較した。その結果は次の通りである。

- 1) 真空解凍では、水蒸気温度が高くなると解凍時間は短くなり、解凍後の質量平均温度も増大した。しかし、この質量平均温度は水蒸気温度 15°C のとき最低であった。
- 2) 15°C 解凍の場合、真空解凍は水解凍より速く、解凍後の解凍試料の質量平均温度も真空解凍が水や空気解凍より低かった。
- 3) 本実験で得られた解凍時間から算出された表面熱伝達率は、真空解凍の場合に非常に高く、無限に近いとみなされた。

本研究を行うに当って、終始御指導を賜った本学部太田冬雄教授ならびに農学部石橋貞人教授に深謝する。あわせて実験遂行および資料整理に協力された杉尾勇、安藤周治、ならびに原田良一の各氏に謝意を表す。

#### 記 号

$a$	； 平板状試料の厚さ = $2l$ [m]
$C_1$	； 液体状の水の比熱 [kcal/kg°C]
$C_2$	； 氷の比熱 [kcal/kg°C]
$L$	； 氷の融解潜熱 [kcal/kg]
$l$	； 平板状試料の熱中心 = $\frac{1}{2}a$ [m]
$M$	； $\log (t_f - t) / (t_f - t_0)$ と $Z$ の勾配 [ $h^{-1}$ ]
$T$	； 解凍終了時の試料内部の任意の温度 [°C]
$T_m$	； 質量平均温度 [°C]
$t$	； 解凍中の試料の熱中心における任意の温度 [°C]
$t_a$	； 解凍媒体温度 [°C]
$t_f$	； 試料の凍結点 [°C]
$(t_f - t) / (t_f - t_0)$	； 温度比 [-]
$t_0$	； 解凍初期温度 [°C]
$V_T$	； 試料の総体積 [m <sup>3</sup> ]
$w$	； 含水比 [kg水/kg]
$x$	； 試料表面からの距離 [m]
$Z$	； 解凍所要時間 [h]
$\alpha$	； 表面熱伝達率 [kcal/m <sup>2</sup> °Ch]

- $\gamma$  ; 凍結試料の比重量 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 $\lambda$  ; 凍結試料の熱伝導率 [ $\text{kcal}/\text{m}^\circ\text{Ch}$ ]

## 参 考 文 献

- 1) 田中和夫 (1970) : 冷凍, 45 (508), 1-7.
- 2) 中出政司 (1970) : 同誌, 45 (508), 16-23.
- 3) 熊谷義光 (1970) : 同誌, 45 (508), 24-32.
- 4) 田中武夫 (1970) : 同誌, 45 (508), 33-42.
- 5) IFT (1972) : Food Technology, 26 (7), 70.
- 6) D. W. エヴァリントン (1972) : 食品機械装置 (APV [株] 訳).
- 7) 日本機械学会編 (1966) : 伝熱工学資料, 258, 260, 279.
- 8) K. Hayakawa and A. Bakal (1973) : *J. Food Sci.*, 38, 623.
- 9) スタンリ・E・チャーム (細川明 監訳) (1968) : 食品工学の基礎, 光琳書院, 211-224.
- 10) A. Bakal and K. Hayakawa (1973) : *Advances in Food Research* (20), Academic Press, 217-253.
- 11) 源生一太郎 (1970) : 冷凍, 45 (508), 8-15.
- 12) 長岡順吉・田中和夫 (1964) : 冷凍冷蔵学, 恒星社厚生閣, 210-215.
- 13) C. P. Lentz (1961) : *Food Technology*, 15, 243.
- 14) Colin Bailey, S. J. James, A. G. Kitchell and W. R. Hudson (1974) : *J. Sci. Fd & Agric.*, 25, 81-97.