魚體の凍結に關する物理的研究

第二報 魚體の塩水凍結に要する時間の算定

(昭和 24 年 1 月 19 日受理)

田 中 和 夫

(第一水産講習所)

Physical Studies on the Freezing of Fish-body

II. Determination of the Time required for the Brine-freezing

of Fish-body

K. TANAKA

SYNOPSIS

Taking the effect of the fat-layer in freezing of fish-body into consideration and according to the same method of Plank and regarding a fish as a conical body, the author have taken a formula determining the time required for the brine-freezing of fish-body.

1. 実験——前報に述べたる如き鰯にて塩水凍結の実験を行ふ爲に矢張り大・中・小三種類の魚体を選んだ。其の諸元は第1表の通りである。之と別に亜鉛引鉄板製の凍結パン中に食塩水 (NaCl Be/ 15° at 15°C) を作り、空氣凍結室に於て略 -10°C 迄予冷し、此の食塩ブライン中に先の鰯を全身悉く浸漬した物を再び空氣凍結室中に靜置して行つた。此所で凍結パンは同形同大の物2個を使用し、其の中1個には大なる魚体を1匹入れ、他の1個には中、小なる魚体を1匹づつ2匹入れて各部の溫度を測定した。つまり実験は靜止塩水凍結の形となり、その結果は第2表に示す如くである。

Dimension Material	Length cm	Height cm	Width cm	Weight G _{kg}
I 大	0.533	0.148	0.112	4.2
II 中	0.423	0.113	0.087	1.9
III 小	0.320	0.084	0.062	0.75

Table 1. Dimension of Fish-body for used of Brine-freezing.

2. 空氣凍結の場合と同様な考慮の下に立てた魚体の塩水凍結に要する時間を算定する式
魚体周囲の二次冷媒が空氣・塩水何れにしても流体であるから、空氣凍結に於て熱伝流の理論から誘導した凍結時間を求める各式は、中の常數が適當に変われば塩水凍結にも適用出来る筈である。著者の円錐形の式は、

		Temperature of Fish body I					Temperature of Fish body II				Temperature of Fish body III			
Temp. Number	Time hr	Air Temp. °C	Brine θ _e °C	Surface °C	Inter- mediate °C	Center °C	Brine θ _e °C	Surface °C	Inter- mediate °C	Center °C	Brine θ _e °C	Surface °C	Inter- mediate °C	Center °C
1	7.30	-5.0	-4.0	9.0	2.5	1.5	-5.0	10.5	3.2	1.5	-5.0	13.0	5.0	3.0
2	8.30	-0.5	-6.0	-2.0	-0.5	0.7	-6.0	-3.0	-0.2	0.0	-6.0	-2.2	-0.2	-0.3
3	9.30	-6.0	-6.0	-2.1	-1.0	-1.0	-7.0	-3.7	-1.0	-1.5	-7.0	-3.5	-2.0	-1.0
4	10.30	-11.5	-8.5	-2.8	-1.0	-1.0	-7.5	-4.0	-1.5	-1.5	-7.5	-3.5	-3.0	-2.0
5	11.30	-12.0	-7.5	-3.0	-1.1	-0.9	-8.0	-6.1	-2.0	-1.8	-8.0	-6.2	-2.3	-1.4
6	12.30	-12.5	-8.0	-3.8	-1.5	-1.0	-9.0	-6.5	-2.5	-1.8	-9.0	-6.5	-2.7	-2.5
7	13.30	-13.2	-8.5	-4.0	-1.5	-1.0	-9.0	-8.0	-3.0	-1.8	-9.0	-8.0	-5.0	-4.5
8	14.30	-13.2	-9.0	-5.0	-1.5	-1.0	-9.5	-8.0	-3.3	-2.0	-9.5	-8.0	-6.0	-5.0
9	15.30	-14.0	-9.5	-4.8	-2.0	-1.0	-9.5	-8.0	-4.0	-3.0	-9.5	-9.0	-6.5	-6.0
10	16.30	-15.0	-9.5	-6.5	-2.0	-1.0	-10.0	-9.0	-5.0	-4.0	-10.0	-9.5	-7.5	-7.0
11	17.30	-16.0	-9.5	-7.5	-2.1	-1.0	-10.0	-9.5	-6.0	-5.0	-10.0	-9.0	-8.0	-7.5
12	18.30	-16.1	-10.0	-8.1	-3.0	-1.2	-11.0	-9.0	-7.0	-6.0	-11.0	-9.0	-8.5	-8.0
13	19.30	-18.5	-10.0	-9.0	-4.0	-2.0	-10.5	-9.5	-7.5	-6.8	-10.5	-10.0	-9.0	-8.2
14	20.30	-18.0	-10.0	-9.5	-5.0	-3.0	-10.5	-10.0	-7.5	-7.2	-10.5	-10.5	-10.0	-9.0
15	21.30	-17.5	-11.0	-10.5	-7.0	-5.0	-11.0	-11.0	-8.2	-8.0	-11.0	-11.0	-11.0	-9.5
16	22.30	-19.0	-11.0	-11.0	-8.0	-6.0	-12.0	-11.0	-9.0	-8.5	-12.0	-11.5	-11.0	-10.0

Table 2. Results of Experiment of Brine freezing of *Katsuo*.

$$t_0 = \frac{f\rho xy \cos\beta}{24K\Delta\theta} D_0 \left(\cos\beta D_0 + \frac{4K}{a} + \frac{12K}{a_0} \right)$$

此所に t_0 は魚体の凍結開始温度より凍結終了温度迄に経過する時間で、単位は h である。

f は清水の凍結の潜熱にして $=80\text{kcal/kg}$

ρ は清水の密度にして $=1000\text{kg/m}^3$

x は魚体の含水率にして $=0.75$

y は魚体水分中凍結する水分の割合にして、魚体の中心温度が -3.9°C になつた時略75%の水分が凍結を完了したと見做して $=0.75$

β は魚体を円錐形と見做した時に其の頂角の $1/2$ にして $\cos\beta = \cos 71/2^\circ = 1.00$

$\Delta\theta$ は魚体の凍結温度 θ_c と塩水温度 θ_e との温度差にして $=\theta_c - \theta_e^\circ\text{C}$

D_0 は魚体を円錐形とした場合の底面の直径 m

K は魚体の凍結層の熱傳導率にして $=1.25\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$

a は魚体と周囲の塩水冷媒との間の熱傳達率にして静止液体の値を取り $=240\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$

a_0 は魚体内部に於ける未凍結水溶液と凍結層との間の熱傳達率にして $=\infty\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$

とすると、塩水凍結に要する時間を算定する式として、魚体を円錐形と見做した場合には次式を得る。

$$t_0 = \frac{1500}{\Delta\theta} D_0 (D_0 + 0.020)$$

Plank の両端面防熱されたる円筒形の式は

$$t_0 = \frac{f\rho xy}{16K\Delta\theta} D_0 \left(D_0 + \frac{4K}{a} + \frac{8K}{a_0} \right)$$

此所に他の常数は上と同様なるも唯

K は純粋の水の値を採用し $=2.0\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$

a は静止液体として $=235\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$

と取ると、塩水凍結に要する時間を算定する式として、魚体を円筒形と見做した場合には次式を得る。

$$t_0 = \frac{1406}{\Delta\theta} D_0 (D_0 + 0.034)$$

以上両式に実験の結果を代入して計算した値と、実験に依る値とを比較すると第3表の如くなる。

此の表を見ると、塩水凍結の場合には円錐形の式も円筒形の式も著しく過少な凍結時間を與へ、實際の凍結時間の $1/2 \sim 1/3$ しか計算されていない。之では到底、上二式は實用に供し得ない。

此の結果を考察するのに、空氣凍結の場合には影響僅少にして看過し得たが、塩水凍結の場合は相当大きく働く或熱抵抗を考へざるを得ない。すると直ぐ氣付く事は魚体成分中脂肪の熱傳導率は非常に小

Material	Time Diameter $D_0 = \frac{b+c}{2} m$	Freezing Temp. $\theta_c^\circ\text{C}$	Brine Temp. $\theta_e^\circ\text{C}$	Temp. Difference $\Delta\theta = \theta_c - \theta_e^\circ\text{C}$	Conical $t_b \text{ con. cal.}$ h	Cylindrical $t_b \text{ cyl. cal.}$ h	Ex- perimen- tal $t_b \text{ exp.}$ h
I	0.130	-2.0	-9.50	7.50	3.90	3.99	8.5~9.5
II	0.100	-2.0	-9.16	7.16	2.51	2.63	4.0~5.0
III	0.073	-2.0	-8.37	6.37	1.59	1.72	2.5~3.5

Table 3. Comparison of Calculation and Experiment
(Take into Nonconsideration of Fat-layer)

さいと云ふ事である。故に空気凍結の場合には大して影響を及ぼさなかつた魚体の脂肪層の影響が、塩水凍結の場合には見逃し得ぬ熱抵抗となつて表れて来るので、塩水凍結の場合には此の脂肪層の影響をも考慮に入れた魚体の凍結時間を求める式を別途に誘導する必要がある。

3. 魚体の塩水凍結に要する時間を算定する式の誘導

獸肉・魚肉等に於て、比較多脂性の物は割合に厚い皮下脂肪層を持ち、かゝる表面下の層にて包まれてゐる食品の凍結時間の算定は、円筒形の場合に付き Plank¹⁾ が既に解いて居る。彼は熱傳導率の異なる内外二種の物質より成れる円筒管の、内部の流体より外部を流れる流体に熱が貫流する時の理論を元にして、之迄と同じ様な思考の下に、脂肪層の影響をも考慮に入れた円筒形食品の凍結時間を算定する式を求めた。著者は、魚体の如きは円筒形と見做すよりは、円錐形と見る方がむしろ妥当であると考へ、Plank と同一の思考の下に、脂肪層の影響を考慮に入れた円錐形食品の凍結時間を算定する式を誘導した。

Figure 1.

第1図に示す如く魚体を頂角 2β なる円錐形と考へ、全円錐形及び脂肪層を引き去つた円錐形並びに凍結層を引き去つた未凍結円錐形の側長高さ・底面の半径を夫々 l_0, h_0, r_0, l, h, r とする。而して此の円錐形の底面は、防熱されて居るか又は $Y-Y'$ の方向に無限と考へ、脂肪層の底面に平行なる厚みは何所も一樣にして d_m とするならば、

$$d = r_0 - r_0' \quad 2d = D_0 - D_0'$$

となり、此の熱傳導率を K' とする。 r を未凍結部の半径とし、脂肪中の水分の量は僅かに 6~10% であるから、その水分が凍結する爲に奪はれる熱量を無視し、他は空気凍結の場合と同様な符号と仮定を設けると、凍結の進行と熱の貫流の両方より次の二式が得られる。

$$dQ = f_{pxy} \pi \frac{\cos \beta}{\sin \beta} r^2 dr$$

$$dQ = \frac{\pi \Delta \theta dl}{\sin \beta \left\{ \frac{1}{a_0 r^2} + \frac{\cos \beta}{K} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0'} \right) + \frac{\cos \beta}{K'} \left(\frac{1}{r_0'} - \frac{1}{r_0} \right) + \frac{1}{a r_0^2} \right\}}$$

両式の右辺同志を相等しいと置いて

$$dt = \frac{f \rho x y \cos \beta}{d \theta} \left\{ \frac{1}{a_0} + \frac{\cos \beta}{K} \left(r - \frac{r^2}{r_0'} \right) + \frac{\cos \beta}{K'} \left(\frac{r^2}{r_0'} - \frac{r^2}{r_0'^2} \right) + \frac{r^2}{a r_0'^3} \right\} dr$$

此の式の左辺を 0 から t_0 迄, 右辺を r_0' から 0 迄積分して

$$t_0 = \frac{f \rho x y \cos \beta}{6 d \theta} r_0' \left\{ \frac{6}{a_0} + \frac{\cos \beta}{K} r_0' + \frac{2 \cos \beta}{K'} r_0' \left(1 - \frac{r_0'}{r_0} \right) + \frac{2 r_0'^2}{a r_0'^3} \right\}$$

r_0' の代りに直径 D_0' , r_0 の代りに全直径 D_0 を用ひる爲に $r_0 = \frac{D_0'}{2}$, $r_0 = \frac{D_0}{2}$ を代入して,

脂肪層の影響を考慮に入れた円錐形食品の凍結時間を求める次式を得る。

$$t_0 = \frac{f \rho x y \cos \beta}{24 d \theta} D_0' \left\{ \frac{12}{a_0} + \frac{\cos \beta}{K} D_0' + \frac{2 \cos \beta}{K'} D_0' \left(1 - \frac{D_0'}{D_0} \right) + \frac{4 D_0'^2}{a D_0^3} \right\}$$

Plank が求めた脂肪層の影響を考慮に入れた円筒形食品の凍結時間を求める式は次の如くである。

$$t_0 = \frac{f \rho x y}{16 d \theta} D_0' \left(\frac{8}{a_0} + \frac{1}{K} D_0' + \frac{2}{K'} D_0' \ln \frac{D_0}{D_0'} + \frac{4 D_0'}{a D_0} \right)$$

今此の両式で他の常数は前述通りとして脂肪層の熱傳導率を

前式には $K' = 0.10 \text{ kcal/m h } ^\circ\text{C}$

後式には $K' = 0.15 \text{ kcal/m h } ^\circ\text{C}$

と取る。又脂肪層がかなり厚くない時は計算を簡便にする爲に $\frac{D_0'}{D_0} \approx 1.0$ と見做して

$$D_0' \left(1 - \frac{D_0'}{D_0} \right) = \frac{D_0'}{D_0} (D_0 - D_0') \approx 2r_0 - 2r_0' = 2d$$

$$D_0' \ln \frac{D_0}{D_0'} \approx 2d$$

と置ける事に注意し, 両式を使用に便利な形に書き変へると,

$$\text{円錐形の式 } t_0 = \frac{1875}{d \theta} D_0' (0.8 D_0' + 40d + 0.016)$$

$$\text{円筒形の式 } t_0 = \frac{2812.5}{d \theta} D_0' (0.5 D_0' + 26d + 0.017)$$

となる。

4. 脂肪層の厚み d の計算

上の兩式を用ひるのに前述の式と大いに異なるのは d の項 である。各魚体につき d を測定するのは煩瑣に堪へず, 又其の爲には凍結材料を輪切にせねばならぬので, 此所では実験に用ひざる他の鰹の d を測り, それより下の如き計算の結果を利用して凍結魚体の d を推定した。実際の凍結操作に當つても勿論かかる取扱ひを爲す可きである。

今円錐形の相似なる2匹の魚体があるとし, 一方を接尾字 1, 他方を接尾字 2 をつけて表はすと

$$\text{全体積 } V \text{ は } V_1 = \frac{1}{3} \pi \cot \beta r_1^3 \quad V_2 = \frac{1}{3} \pi \cot \beta r_2^3$$

脂肪層の厚み d を除いた体積 V' は

$$V_1' = \frac{1}{3} \pi \cot \beta r_1'^3 \quad V_2' = \frac{1}{3} \pi \cot \beta r_2'^3$$

故に皮下脂肪層は全部一樣な組成 (例へば脂肪なら脂肪から成るものとして) の体積 V_f は

$$V_{f1} = V_1 - V_1' = \frac{1}{3} \pi \cot \beta (r_1 - r_1') (r_1^2 + r_1 r_1' + r_1'^2)$$

$$V_{f2} = V_2 - V_2' = \frac{1}{3} \pi \cot \beta (r_2 - r_2') (r_2^2 + r_2 r_2' + r_2'^2)$$

今両円錐形魚体の代表的長さを l とし、比例常数を k とすると

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\frac{1}{3} \pi \cot \beta r_2^3}{\frac{1}{3} \pi \cot \beta r_1^3} = \frac{r_2^3}{r_1^3} = \frac{l_2^3}{l_1^3}$$

$$\frac{V_{f2}}{V_{f1}} = \frac{\frac{1}{3} \pi \cot \beta (r_2 - r_2') (r_2^2 + r_2 r_2' + r_2'^2)}{\frac{1}{3} \pi \cot \beta (r_1 - r_1') (r_1^2 + r_1 r_1' + r_1'^2)} = \frac{k_2 l_2^2 d_2}{k_1 l_1^2 d_1}$$

所が両魚体に於て脂肪含有率は相等しいと見做せるから、

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_{f2}}{V_{f1}} \quad \therefore \quad \frac{d_2}{d_1} = \frac{k_1}{k_2} \frac{l_2}{l_1} = k \frac{l_2}{l_1} \quad \therefore \quad d \propto l$$

同様に円筒形の相似なる二匹の魚体に対しても

$$V_1 = \pi r_1^2 h_1 \quad V_2 = \pi r_2^2 h_2 \quad V_1' = \pi r_1'^2 h_1 \quad V_2' = \pi r_2'^2 h_2$$

$$V_{f1} = V_1 - V_1' = \pi h_1 (r_1^2 - r_1'^2) \quad V_{f2} = V_2 - V_2' = \pi h_2 (r_2^2 - r_2'^2)$$

今両円筒形魚体の代表的長さを l として比例常数を k とすると

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\pi r_2^2 h_2}{\pi r_1^2 h_1} = \frac{r_2^2 h_2}{r_1^2 h_1} = \frac{l_2^3}{l_1^3}$$

$$\frac{V_{f2}}{V_{f1}} = \frac{\pi h_2 (r_2 - r_2') (r_2 + r_2')}{\pi h_1 (r_1 - r_1') (r_1 + r_1')} = \frac{k_2 l_2^2 d_2}{k_1 l_1^2 d_1}$$

所が両魚体に於て脂肪含有率は相等しいと見做せるから、

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_{f2}}{V_{f1}} \quad \therefore \quad \frac{d_2}{d_1} = \frac{k_1}{k_2} \frac{l_2}{l_1} = k \frac{l_2}{l_1} \quad \therefore \quad d \propto l$$

つまり何れの場合にも魚体の脂肪層の厚み d は魚体の代表的長さ l に比例する事が分る。

5. 計算と実験の比較

以上の如くして脂肪層を考慮に入れたる魚体の塩水凍結時間を求める諸式が、どれだけ実験の結果と合ふか比較したのが第4表である。

Time Material	Total diameter $D_0 = \frac{b+c}{2}$ m	Thickness of fat layer d m	Diameter $D_0' = D_0 - 2d$ m	Tempera- ture difference $\Delta \theta = \theta_c - \theta_e$ °C	Conioal t_b con. cal. h	Cylind- rical t_b cyl. cal. h	Ex- perimental t_b exp. h
I	0.130	0.0035	0.123	7.50	7.81	7.84	8.5~9.5
II	0.103	0.0027	0.095	7.16	4.96	5.03	4.0~5.0
III	0.073	0.0020	0.069	6.37	3.06	3.16	2.5~3.5

Table 4. Comparison of Calculation and Experiment
(Take into Consideration of Fat-layer)

此の結果を見ると、円錐形の式も円筒形の式も脂肪層の熱傳導率 K' の値を適当に選んで使ふと、非常に良く實際と一致する凍結時間を與へる事が分る。問題なのは K' である。之に付ては Rubner の測定²⁾ では、

$$\begin{aligned} \text{牛脂にて} & \quad K' = 0.150 \text{ kcal/m h } ^\circ\text{C} \\ \text{豚脂にて} & \quad K' = 0.153 \text{ kcal/m h } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

又 Plank³⁾ が羊肉に就いて凍結実験を行つた時

羊脂として $K' = 0.15 \text{ kcal/m h } ^\circ\text{C}$

なる値を用いた。之等から見ると、本計算に用いた

魚脂として $K' = 0.10$ 又は $0.15 \text{ kcal/m h } ^\circ\text{C}$

は一方が少し小さい。併し魚体の場合は皮下脂肪層の熱傳導率として魚皮・魚鱗等も含めた総括熱傳導率である事を考へれば、單なる脂肪の熱傳導率たる先の値よりも此所に採用した値の方が妥当なのかも知れない。

次に空氣凍結の時にはさして表れなかつた脂肪層の影響が、何故に塩水凍結の場合には表れて來るか云ふ問題は簡單である。それは魚体の凍結層と周囲の流体冷媒との間の熱傳導率 α を見るのに、空氣凍結の場合は α が非常に小さいが、塩水凍結の場合は遙かに大きい。つまり二次冷媒が空氣の如き氣體では、熱の貫流を妨げる主なる抵抗は魚体表面の熱傳達の過程にあるが、二次冷媒が塩水の如き液体では熱傳達抵抗は僅少で、熱の貫流を妨げる主なる抵抗は魚体内部の熱傳導の過程にある。されば塩水凍結の場合には、脂肪層の持つ大きな熱傳導妨害が數字に表れて來たのである。又魚体が小さい程其の影響が著しい事も之で分る。此の点をも一つ押し進めて考へると、上記の式並びに其の誘導法は同様な考慮と実験とを、より精密に、正確に行ふならば、魚体の皮層・脂肪層・筋肉層等、それぞれ魚体各層の熱傳導率又は厚さ、尙進んでその成分の概略の値を求める手段としても役立つであらう。少くとも凍結操作に良く用ひられる包装の影響は、かゝる考への下に簡単に計算出来る。此の様な場合には、先に出した塩水凍結に要する時間を算定する半理論式は、

$$t_0 = \frac{1}{\alpha \theta} D_0' (B D_0' + c d + E)$$

の形の実験式と考へ、 A 、 B 、 C 、及び E なる常数は、実験の度毎に実験結果を満足する如く適當に定めて用ひる可きである。

参 考 文 献

- 1) Plank, R. : — Z. ges. Kälte-Ind., 24 (3), 1917, 18.
- 2) Rubner, M. — Archiv. f. Hygiene, 55, 1906.
- 3) 同 上 1)