

その七「かん」と「びん」とにおける熱伝達速度 の比較

COMPARATIVE HEAT PENETRATION TESTS ON CANS AND JARS

In this experiment, it was found that the experimental data nearly correspond to the calculation results by the formula introduced by Merrill.

第 1 節 緒 言

いままでの記載は主として罐詰の熱伝達速度の測定結果と、熱流に対する内容物の内部抵抗の相違による熱伝達の種々相についてなされた考察に関するものであったが、ここで著者は熱流に対する外部抵抗が、いかに罐詰（ただし、ここでは広義の罐詰を意味し、びん詰を包含する）の熱伝達に影響するものであるかについて述べたい。

ちなみに、ここに記載の骨子をなすものは、著者が 1939 年 8 月に罐詰とびん詰とについて熱伝達速度の比較測定をしたさいに得られた結果に関するものであって、同年 11 月発行の罐詰時報⑤に発表されている。この種の実験で発表されているものには、古くは Bigelow ら (1920年) ① のものがあり、近くは、Merrill (1948年) ③のものがある。

第 2 節 測 定 方 法

1. 実験に利用したブリキ罐とガラスびん

比較実験のためにとくに同型の容器を作って行ったのではなくて、比較的径および内容量の相似た販売容器として測定当時存在した以下のごとき「罐」と「びん」とを撰定し、実験資料にした。

a. ブリキ罐（標準罐型規格表による）

2号罐径	101.5mm	高さ	121mm	容積	876cc
5号罐径	77mm	高さ	82mm	容積	327ccb.

b. ガラスびん（標準びん型表による）

アンカー果実大瓶

口径（外径）	90mm	高さ	160mm	容積	920cc
--------	------	----	-------	----	-------

アンカー湯呑型瓶

口径（外径）	77mm	高さ	97mm	容積	270cc
--------	------	----	------	----	-------

2. 実験に利用した内容物

水と「のこくずでん粉のり」とを内容物として利用した。水は対流作用によって熱伝達の行われるさいの測定に利用され、「のこくずでん粉のり」は熱伝達が主として伝導作用によって支配され

るような場合の状態を観察するために利用したもので次のごとき組成のものである。

水 500cc
 米でん粉 30gms
 のこくず 100gms

3 ミリメータのふるいを通して粒を揃えたのこくずを以上の割合に水および、でん粉と混和し、始終かくはんしながら加熱してのこくずをほぼ均等に包含する「のり」に作って使用した。

3. 測 温 方 法

容器内にそう入の水銀温度計の感温部が容器の中心点に位置するように固定し、沸騰する水浴内に沈めて荒目の金網底の上に直立させ一定の時間間隔をもって容器内の中心温度を測定した。

第 3 節 測 定 結 果

測定の結果は表 1 ならびに、表 2 に所載のとおりである。

表 1 : 水を内容物とした場合の結果 その一 ブリキかんの場合

加 熱 時 間	5 号 かん (三かん平均)		加 熱 時 間	2 号 かん (二かん平均)	
	充てん量	初温 (I T)		充てん量	初温 (I T)
	270c.c.	28.7°C		820c.c.	29.5°C
		100°C		100°C	
	測定かん数	3 かん		測定かん数	2 かん
分	CT	RT - CT	分	CT	RT - CT
0	28.7	71.3	0	29.5	70.5
1	68.8	31.2	2	73.0	27.0
2	86.3	13.7	4	90.5	9.5
3	94.8	5.2	6	96.7	3.3
4	97.9	2.1	8	98.9	1.1

表 1 : 水を内容物とした場合の結果 その二 ガラスびんの場合

加 熱 時 間	77m. m. 湯呑型びん (3びん平均)		加 熱 時 間	90m. m. 果実大びん (3びん平均)	
	充てん量	初温 (I T)		充てん量	初温 (I T)
	250c.c.	29.0°C		850c.c.	29.0°C
		100°C		100°C	
	測定本数	3		測定本数	3
分	CT	RT - CT	分	CT	RT - CT
0	29.0	71.0	0	29.0	71.0
3	60.0	40.0	3	55.7	44.3
6	80.2	19.8	6	72.7	27.3
9	90.5	9.5	9	83.5	16.5
12	95.2	4.8	12	90.4	9.6
15	97.6	2.4	15	94.2	5.8
18	98.8	1.2	18	96.5	3.5
			21	98.0	2.0
			24	98.6	1.4

表 2 : 「のこくずでん粉のり」を内容物とした場合

加熱時間	5 号 か ん		加熱時間	77 m. m. 湯呑型びん	
	CT	RT - CT		CT	RT - CT
	充てん量..... 310gms.			充てん量..... 250gms.	
	初温 (IT) 25.5°C			初温 (IT) 25.0°C	
	加熱温度 (RT) 100°C			加熱温度 (RT) 100°C	
	測定個数..... 1			測定個数..... 1	
分	CT	RT - CT	分	CT	RT - CT
0	25.5	74.5	0	25.0	75.0
5	26.4	73.4	5	26.0	74.0
10	32.5	67.5	10	33.0	67.0
15	45.0	55.0	15	46.0	54.0
20	58.0	42.0	20	59.3	40.7
25	69.5	30.5	25	71.0	29.0
30	78.3	21.7	30	79.0	21.0
35	84.5	15.5	35	85.2	14.8
40	89.0	11.0	40	90.0	10.0
45	92.5	7.5	45	93.2	6.8
50	94.8	5.2	50	95.3	4.7
55	96.3	3.7	55	96.7	3.3
60	97.3	2.7	60	97.7	2.3
65	98.2	1.8	65	98.4	1.6
70	98.8	1.2	70	99.0	1.0

以上の測定結果を $\log (RT-CT)$ と加熱時間との関係曲線で示すと図 1 および図 2 のごとくである。

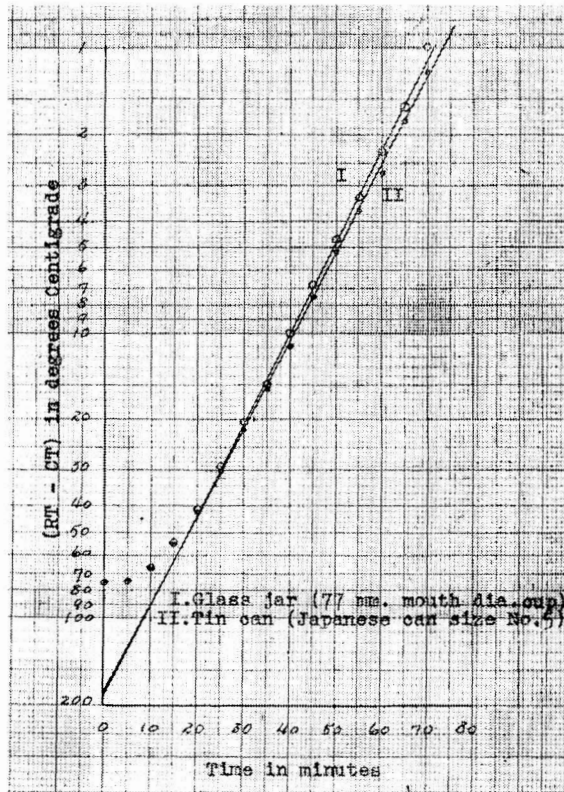


図 1 : 水を内容物とした「かん」と「びん」との加熱曲線

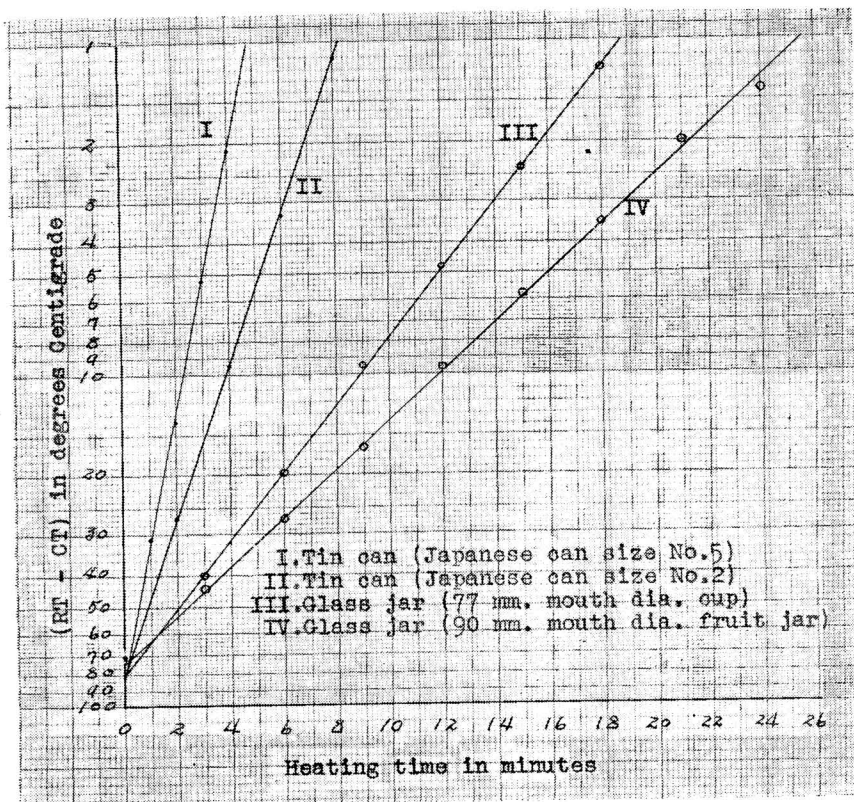


図 2 : 「のこくずでん粉のり」を内容物とした「かん」と「びん」との加熱曲線

第 4 節 測定結果についての考察

1. 加熱曲線の性質

図 1 および図 2 に図示のごとく加熱曲線はいずれも Semilogarithmic coordinate にプロットすると直線状をなす。

「その五」の第 4 節において、Jackson and Olson (1939) ②および谷 (1939) ⑥らによって描きだされた加熱中における容器内の対流作用による液の流動模様について記載したが、著者もびん詰用ガラス容器 (円壺状 920cc 容) 内に蒸留水を入れ、界面活性剤を添加した水で均質にこねた粉アルミニウムをその中に数滴落して振り、いちように粉末アルミニウムを水中にサスペンドさせて末のちにびん詰をガラス容器内の沸騰水中に入れ、側方よりは顕微鏡写真撮影用の光源装置 (日本光定工業株式会社製品) をもって一定の光束を当て、加熱中のびん内の液の流動状況を観察したところでは、びん詰の内壁面に接して薄層の急な上昇流が見られたが、それ以外のものは、ごく下底にちかく起るかく乱流を除いて、きわめてゆるやかに、一本の液注のごとく全体として下降するのが見られた。

各加熱曲線に対する fh および j の値を示した次の表 3 によると、伝導作用による熱伝達が支配的である「のこくずでん粉のり」を内容とした場合に比較して、対流作用による熱伝達の支配的である水詰の場合には fh の値は小さく、とくにブリキ罐においていちじるしく小さいことが注目される。また j の値も小さくて、ほぼ 1 に近いことが注目されることである。

水詰の場合において、罐とびんとの相違によって、 j の値は影響されていないが、 fh の値はびんにおいて格段に大きくなっている。しかしその fh の値も伝導作用が支配的である「のこくずでん粉のり」を詰めたものにおいては、両者間の差違が消えてともに大きな値を示している。この場合 j の値も、やはり両者間において有意差が認められず、ともに大きな値を示しているのが見られる。

表 3 : 加熱曲線の fh および j の値

容 器 の 種 類	内 容 物	fh (分)	j
5 号 か ん	水	2.5	1.15
2 号 か ん	水	4.3	1.12
77m.m. 湯呑型びん	水	9.9	1.12
果 実 大 び ん	水	13.6	1.05
5 号 か ん	のこくずでん粉のり	32.6	2.41
77m.m. 湯呑型びん	同 上	31.4	2.47

上表の数値は平均法によって求めたものであるが、罐詰時報所載の数値⑤は定規法によったものであるので、 fh の値は小数点以下において両者間に多少の相違がある。

2. 罐とびんとの熱伝達速度の相違について

対流作用による熱伝達が支配的である水詰の場合には、罐とびんとの間では両者の fh の値に大きな差違の生ずることが、〔本文所載の実験において、使用の罐とびんとは、完全な同形同大ではないが〕明確に認められるところであると同時に、伝導作用による熱伝達が支配的である「のこくずでんぷんのり」を詰めた場合には fh がともに大きくなって両者間の差違がほとんど認められなくなるものであるということも表 3 に所載の数値から主張できる。そしてかような現象はガラスびんとブリキ罐との器壁の熱流に対する抵抗の差違に原因の主体のあることが容易に考えられるところのものである。

容器内の内容物中心部へ、外部から熱の伝達される速さは、容器の大きさと形状、外部と内容物表面との間における熱流に対する抵抗、ならびに内容物内における熱流に対する抵抗等によって支配されるもので、内部抵抗は内容物の熱伝導度 (=K) または温度伝導度 (k) に関係する。

外部抵抗は、加熱媒質と容器との間に介在する皮膜、容器それ自体 (すなわちブリキ罐またはガラスびん) の器壁、および内容物と容器との間に介在する皮膜に原因する熱流に対する抵抗で、これらの全体を包含した外部抵抗を $1/E$ で表わすと、その逆数 E は外部の加熱媒質から容器壁を透過して熱が内容物に流入する、Merrill ③ のいわゆる External heat transfer coefficient (外面熱移動係数) にあたる。

$$E/K=0$$

外面熱移動係数 E が熱伝導度 K に比較してきわめて小さく、その極限において $E/K=0$ である条件下にあって、直径と高さとの比が N である有限円とう (壺) の f の数値の計算に Merrill ③ は Schultz & Olson ④ の式から次の式を導いた:

$$f_s = 2.303 \left(\frac{Na}{2N+1} \right) \frac{K}{k} \cdot \frac{1}{E} = 1.1515 \times \left(\frac{Nd}{2N+1} \right) \frac{v}{E} \quad (1)$$

ただし h =円とう (壺) の高; d =円とう (壺) の径

a =円とう (壺) の半径; $N=h/d$;

v =(比熱) × (比重)。

$$E/K=\infty$$

外面熱移動係数 E が熱伝導度 K に比較してきわめて大きい (たとえば表面温度が瞬時変化をなし、内部の熱流が熱伝導に支配されるような) 条件下においては、 f の計算に緒論の式 7 が適用される。

$$f_i = \frac{2.303 N^2 d^2}{23.136 N^2 + 9.87} \cdot \frac{1}{k} = 0.0995 \left(\frac{N^2 d^2}{N^2 + 0.427} \right) \frac{1}{k} \quad (2)$$

$$\infty > E/K > 0$$

E/K が中間にあるような条件、すなわち一般の多くの罐瓶詰においてみられるような条件下にあっては Merrill は式 (1) と式 (2) とを結合した次の式が f の数値計算に適用できるとし

た。

$$\begin{aligned} fh &= fs + fi \\ &= 1.1515 \left(\frac{Nd}{2N+1} \right) \frac{v}{E} + 0.0995 \left(\frac{N^2 d^2}{N^2 + 0.427} \right) \cdot \frac{1}{k} \end{aligned} \quad [3]$$

また

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{E'} + \frac{t}{K} \quad [4]$$

ただし

$1/E$: 器壁と、器壁の内外両面に接する皮膜の呈する「熱流に対する抵抗」

$1/E'$; 器壁の内外両面に接する皮膜の呈する熱流に対する抵抗

t : 器壁の厚み (cm)

K : 器壁の熱伝導度 (Cal/(sq. cm) (deg. C/cm)

Merrill の示した上掲の近似式は、罐びん詰の fh の計算に、容器の器壁（器壁の内外両面に介在する水の膜をも含めて）の呈する「熱の流入」に対する抵抗と、内容物のもつ熱流の内部抵抗とが考えられているので、この式を利用して、著者の得た実験結果に考察を加え、罐詰の熱伝達速度におよぼす容器構成材の影響について、理論的な概念をつかむようにつとめた。

実験の内容物は水と、水を多量に含有した「のこくず、でん粉のり」であるから式〔3〕において、 $v = (\text{比熱}) \times (\text{比重})$ を水と等しいとみて、 $v = 1$ とおくこととした。器壁の内外両面に存在する水の膜の呈する熱流に対する抵抗 $1/E'$ は、直接これを決定することができないので、水を詰めた2号罐ならびに5号罐について、実測の結果得られた数値を式〔3〕および式〔4〕に代入して、間接的に計算によって求めた。この計算に必要な温度伝導度 k の数値についてであるが、罐詰水のような、対流作用の支配する熱流の行われるものにおいて温度伝導度 k について言及することは正しいことではないが Merrill にしたがって eddy diffusivity の意味において k の数値として $40 \text{ sq. in./min} = 258 \text{ sq. cm./min}$ を用いた。次に「のこくず、でん粉のり」の k の数値は、それを内容物とした5号罐についての実測値から計算によって求めた。かようにしてブリキ罐についての実験結果から計算によって求められた $1/E'$ と $1/k$ との数値、およびガラスびんの器壁の厚さと、熱伝導度 K との数値を式〔3〕ならびに式〔4〕に代入して、びん詰の fh の計算を行い、その結果と実測値とが合致するかを d , e , および f 項の計算において調べてみた。以下それらの計算内容および、その結果について記載する。

a. 水詰2号かん

$$fh = 4.326 \text{ 分 (実測値)}$$

$$h = 11.3 \text{ cm}$$

$$d = 9.9 \text{ cm}$$

$$N = h/d = 11.3/9.9 = 1.1414$$

$$k=258 \text{ sq. cm/min}$$

$$v = (\text{比重}) \times (\text{比熱}) = 1 \quad \text{水}$$

式〔2〕によって f_i を求める

$$f_i = 0.0995 \left(\frac{1.3028 \times 98.01}{1.3028 + 0.427} \right) \frac{1}{258} = 0.0285$$

式〔1〕によって f_s を求める

$$f_s = 1.1515 \left(\frac{1.1414 \times 9.9}{2.2828 + 1} \right) \frac{1}{E} = 3.9635 \frac{1}{E}$$

上の f_h と f_i と f_s との数値を式〔3〕に代入すると

$$4.326 = 3.9635 \frac{1}{E} + 0.029$$

$$1/E = 3.9635/4.297 = 0.9224$$

$$t = 0.0285 \text{ cm} \quad (= \text{ブリキ板の平均の厚さ})$$

$$K = 6.6 \text{ cal}/(\text{min}) (\text{sqcm}) (\text{deg. C}/\text{cm}) \textcircled{7}$$

ブリキ板の熱伝導度

$1/E \cdot t$, ならびに K の数値を式〔4〕に代入すると、

$$0.9224 = 1/E' + 0.0285/6.6$$

$$1/E' = 0.9224 - 0.0043 = 0.9181$$

b. 水詰 5号かん

$$f_h = 2.5115 \text{分} \quad \text{実測値}$$

$$h = 7.6 \text{ cm}$$

$$d = 7.46 \text{ cm}$$

$$N = h/d = 1.01877$$

式〔2〕によって f_i を求めると

$$f_i = 0.0995 \left(\frac{1.03789 \times 55.6516}{1.03789 + 0.427} \right) \frac{1}{258} = 0.015$$

式〔1〕によって f_s を求めると

$$f_s = 1.1515 \left(\frac{1.01877 \times 7.46}{2.03754 + 1} \right) \frac{1}{E} = 2.881 \frac{1}{E}$$

上の f_h と f_i と f_s との数値を式〔3〕に代入すると

$$2.512 = 0.015 + 2.881 \frac{1}{E}$$

$$1/E = 2.497/2.881 = 0.867$$

ここに求められた $1/E'$ と、a 頂に記載の t および K の数値を式〔4〕に代入すると、

$$0.867 = 1/E' + 0.0262/6.6$$

$$1/E' = 0.867 - 0.004 = 0.863$$

c. 『のこくずでん粉のり』詰5号かん

$$fh = 32.6396 \text{分} \quad \text{実測値}$$

式〔2〕から fi は次のようになる

$$fi = 0.0995 \left(\frac{1.03789 \times 55.6516}{1.03789 + 0.427} \right) \frac{1}{k} = 3.9233 \frac{1}{k}$$

b 項における計算結果から fs は次のとおりである。

$$fs = fh - fi = 2.5115 - 0.015 = 2.4965$$

上の fh と fi と fs との数値を式〔3〕に代入すると、

$$32.640 = 3.9233 \frac{1}{k} + 2.497$$

$$\frac{1}{k} = 30.143/3.923 = 7.684$$

以上ブリキかんから求められた $1/E'$ および $1/k$ の値を利用して以下 d,e および f の項でガラスびんの fh を計算し、実測値と比較してみることとする。

d. 水詰の口径 90mm 果実大グ

$$h = 15.13 \text{cm} \quad \text{平均内高}$$

$$d = 8.80 \text{cm} \quad \text{平均内径}$$

$$N = 15.13/8.80 = 1.7193$$

$$t = 0.40 \text{cm} \quad \text{びん壁の平均厚}$$

$$K = 0.168 \text{cal}/(\text{min}) (\text{sq. cm}) (\text{degC}/\text{cm}) \text{ ⑦ ガラスの熱伝導度}$$

$$1/E' = 0.891 \quad \text{2号かんと5号かんとの結果の平均}$$

$$1/E = 0.891 + 0.40/0.168 = 3.29$$

$$fi = 0.0995 \left(\frac{2.9550 \times 77.44}{2.955 + 0.427} \right) \frac{1}{258} = 0.026$$

$$fs = 1.1515 \left(\frac{1.7193 \times 8.8}{3.4386 + 1} \right) \times 3.29 = 12.913$$

$$fh = fi + fs = 0.026 + 12.913 = 12.939$$

$$\text{実測値} = 13.6 \text{分} \quad \text{計算値} = 12.9 \text{分}$$

e. 水詰の口径 77mm 湯呑型びん

$$h = 8.95 \text{cm} \quad \text{平均内高}$$

$$d = 6.24 \text{cm} \quad \text{平均内径}$$

$$N = 8.95/6.24 = 1.434$$

$$t=0.363\text{cm}$$

びん壁の平均厚

$$K=0.168\text{cal}/(\text{min})(\text{sq. cm})(\text{deg. C}/\text{cm})$$

ガラスの熱伝導度

$$1/E'=0.891$$

$$1/E=0.891+0.363/0.168=3.052$$

$$f_i=0.0995 \left(\frac{2.0564 \times 38.9376}{2.0564 + 0.427} \right) \frac{1}{258} = 0.0124$$

$$f_s=1.1515 \left(\frac{1.434 \times 6.24}{2.868 + 1} \right) \times 3.052 = 8.130$$

$$f_h=0.0124+8.130=8.142$$

$$\text{実測値}=9.9\text{分} \quad \text{計算値}=8.1\text{分}$$

f. 「のこずでん粉のり」詰の口径 77mm湯呑型びん

$h, d, N, t, K, 1/E$ は (e) の場合と同じ条件とす。

$$1/k=7.684 \quad (\text{c}) \text{ の結果を利用。}$$

$$f_i=0.0995 \left(\frac{2.0564 \times 38.9376}{2.0564 + 0.427} \right) \times 7.684 = 24.651$$

$$f_s=8.130 \quad (\text{e}) \text{ における計算結果}$$

$$f_h=24.651+8.130=32.781$$

$$\text{実測値}=31.4\text{分} \quad \text{計算値}=32.8\text{分}$$

以上の計算結果から対流作用による熱伝達の支配的な場合と伝導作用による熱伝達の支配的な場合における「かん」と「びん」との f_h の値の間にみられる変化の根拠がほぼ明らかにされると考える。

摘 要

1. かん詰用容器の構成材の相違が、殺菌加熱中の容器内中心へ熱の伝達される速さに、いかに影響するものであるかについての知見を得るため、径および容積が販売容器のうちで一番よく似たかんとびんとを二種類選び、内容物として水および「のこずでん粉のり」を使用して熱の伝達速度について実験した。
2. 水を内容物とした対流作用による熱伝達が支配的である場合に熱伝達の速さにかなり相違のあったかんとびんにおいて、「のこずでん粉のり」を内容物とし、伝導作用による熱伝達が支配的であるようにした場合には両者間の熱伝達速度にはほとんど差違のないことがみられた。

3. 以上のように、ブリキかんとガラスびんとの「熱伝達の速さに対する作用」は、それを両者間において比較したさいに、内容物の熱流を支配する法則の相違によって、そのあらわれかたに変化を示すが、その理論的な根拠は、容器の器壁の呈する熱流に対する外部抵抗の相違に求められる。すなわち、かような外部抵抗の要素をいれたかん詰の熱流の計算に関してたてられた Merrill の式を利用することによって第2項所載の実験結果を数的に説明できる。

文 献

- 1) Bigelow, W. D., et al. Natl. Canners Assoc. Bull. 16-L, 1920.
- 2) Jackson, J. M., and Olson, F. C. W. Food Res. 5 (4), 409-421, 1940.
- 3) Merrill, D. G. Ind. and Eng. Chem. 40 (12), 2263-2269, 1948.
- 4) Schultz, O. T., & Olson, F. C. W. Food Res. 3 (6), 647-651, 1938.
- 5) 志賀岩雄、罐詰時報 18 (11), 30-36, Nov., 1939.
- 6) 谷正二、日本水産学会誌 8 (2), 76-78, 1939.
- 7) Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. Conduction of Heat In Solids, Appendix VI, Oxford, England, 1950.