その五　ミカンかん詰についての測定結果

RESULTS OF THE MEASUREMENT OF THE RATE OF HEAT PENETRATION IN PROCESSING CANNED MANDARIN ORANGE SEGMENTS

Heat penetration into canned Mandarin orange segments in syrup was measured by using No. 5 can (Japanese can name). The heat penetration curves obtained could not be represented by a single straight line, but a irregular curve with two broken points, on the semi-log paper, showing occurrence of change in the heat transfer mechanism from the one mainly by convection to the one mainly by conduction. One of the cause of this change of the heat transfer mechanism seemed to be ascribed to the phenomenon that fruit segments gather together upward tightly each other, getting buoyancy as temperature rises.

It was suggested that the formula introduced by Schultz and Olson, and modified by Kaneko should be modified as shown in formula-9 in order to make the formula adaptable to the change of j-value with vertical position of the measurement of temperature in a can.

第 1 節　緒　　言

これまでは、熱伝導の支配的な熱流のみられる内容物の罐詰の熱伝達速度の測定結果にもとづいて、それら罐詰に共通した加熱線曲の性質や温度伝導度等について検討してきたが、本章ならびに次の記載ではその内容物の物理的な状態からみて、対流による熱流が支配的であると考えられるミカン罐詰ならびにモモ罐詰の熱伝達速度の測定およびその結果について取り扱った。しかし、それら罐詰内にあっても対流にもとづく熱流の支配的なのは、加熱の初期にかぎられ、少なくとも「罐」の幾何学的中心点およびそれから上に位置する部分にあっては、やがて加熱効果による果肉の浮上現象が現われるにつれて、対流型の熱流から伝導型の熱流に転移することがみられた。以下それらの点について記載する。ちなみに、この測定は 1934 年 2 月に著者によって行われたもので、その結果は同年 10 月 28 日第 6 回全国罐詰業者大会（静岡県清水市庵原中学校において 27 日および 28 日の両日にわたって開催）にて、ミカン罐詰の白濁原因体についてとともに発表し、罐詰時報③に掲載されたものであるが、それに未発表のものを付加して本文に記載した。

第 2 節　測 定 方 法

第 1 回目の測定実験に供せられたミカンは「ウンシユウ」ミカン（Citrus Aurantium L. var, Unshiu）である。はく皮ミカン 255 グラムが 5 号罐に詰められ、そのうえに Brix 42 度の糖液 80cc (95gms) が注加され、ふた付して、一夜放置後の翌朝に熱伝達速度の測定が行われた。温度

計は、罐蓋の中心にあけられた孔を通じて罐詰内にそう入され、ふたの孔と連通させて、ふたに半田付された取付金具によって、水銀溜が「罐」の中心点に位置するように固定された。かように温度計の装置された罐詰が沸騰水中に入れられ、2分間隔おきに罐詰の中心温度が読み取られた。

第2回目の測定

第1回目の測定に試製された罐詰は生のまま2日間放置され、第1回目の測定と同様にして熱伝達試験が行われた。

第3回目の測定

第1回目の測定のさい罐詰に試製され、100°C 10分間加熱して3日間放置されたものについて、熱伝達の速さについての試験が行われた。

第3節　測定結果

測定の結果は以下の表1，表2および表3に記載のとおりである。

表 1 ： ミカンかん詰の熱伝達速度測定結果（第一回測定結果）

試験かん番号	1	2	3	4	5	6	7	8	平均	
果実粒数	43	63	47	48	62	33	29	42	46	
加熱時間(分)	CT °C	CT °C	CT °C	CT °C	CT °C	CT °C	CT °C	CT °C	CT °C	RT—CT °C
0	15.0	15.0	15.0	16.0	15.0	15.5	15.5	15.0	15.3	64.7
2	72.5	61.5	71.0	70.0	71.0	81.0	56.7	68.6	69.0	31.0
4	85.5	81.6	85.0	84.6	87.2	90.2	74.7	84.6	84.2	15.8
6	91.4	89.5	90.0	89.8	92.6	93.4	84.3	91.0	90.3	9.7
8	94.0	92.8	93.0	91.7	94.7	94.3	90.0	93.8	93.0	7.0
10	93.7	94.1	94.4	93.2	95.3	95.0	93.0	94.5	94.2	5.8
12	94.6	94.9	94.9	93.8	95.2	95.2	94.6	94.8	94.8	5.2
14	95.2	95.4	95.2	94.6	95.4	95.3	94.8	95.2	95.2	4.8
冷					却					CT—WT
16	58.4	61.0	57.5	61.0	59.0	48.4	64.0	60.0	58.7	53.7
18	41.0	41.3	38.6	41.4	—	31.7	44.3	41.0	39.9	34.9
20	31.5	30.0	29.5	30.3	30.0	24.0	34.0	31.5	30.1	25.1

ただし　RT＝殺菌温度＝100°C

CT＝かん中心温度

WT＝冷却水の温度＝5°C

測定の時＝1934年2月10日

表 2 ： ミカンかん詰の熱伝達速度測定結果（第二回測定結果）

試験かん番号	1	2	平　均	
果実粒数	40	41	40.5	
加熱時間　（分）	CT　°C	CT　°C	CT　°C	CT—WT　°C
0	10.3	11.6	11.0	89.0
2	76.0	78.0	77.0	23.0
4	88.5	89.5	89.0	11.0
6	93.2	94.0	93.6	6.4
8	95.7	96.2	96.0	4.0
10	96.8	97.4	97.1	2.9
12	97.2	97.7	97.5	2.5
14	97.5	98.0	97.8	2.2
冷		却		C T — W T
16	55.5	56.0	55.8	49.8
18	38.8	38.8	38.8	32.8
20	30.2	30.0	30.1	24.1

WT＝6°C　　　測定時＝1934年2月12日

表 3 ： ミカンかん詰の熱伝達速度測定結果（第三回目測定結果）

試験かん番号	1	
果実粒数	42	
加熱時間　（分）	CT　°C	RT—CT　°C
0	13.2	86.8
2	72.3	27.7
4	89.5	10.5
6	94.8	5.2
8	97.2	2.8
10	98.0	2.0
12	98.6	1.4
14	99.0	1.0
冷	却	C T — W T
16	42.5	36.1
18	26.0	19.6
19	22.0	15.6

測定時＝1934年2月13日　　WT＝6.4°C

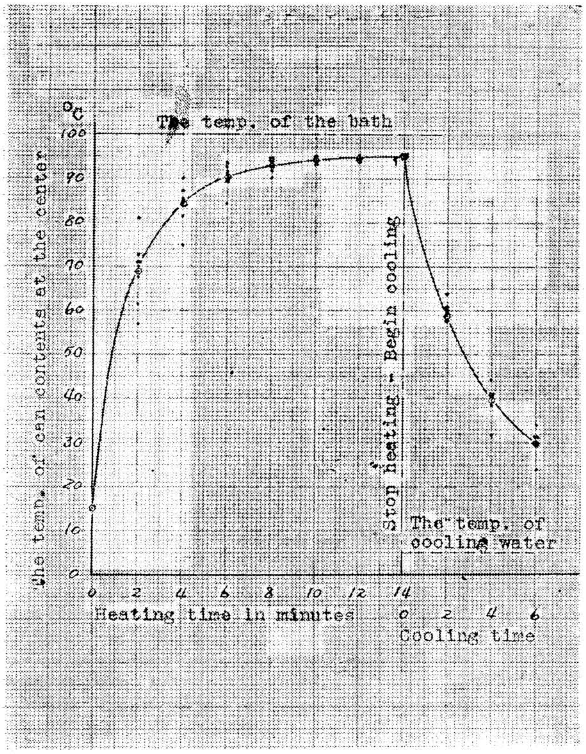

図 1 ： ミカンかん詰における加熱曲線および冷却曲線

（第一回目の測定結果）

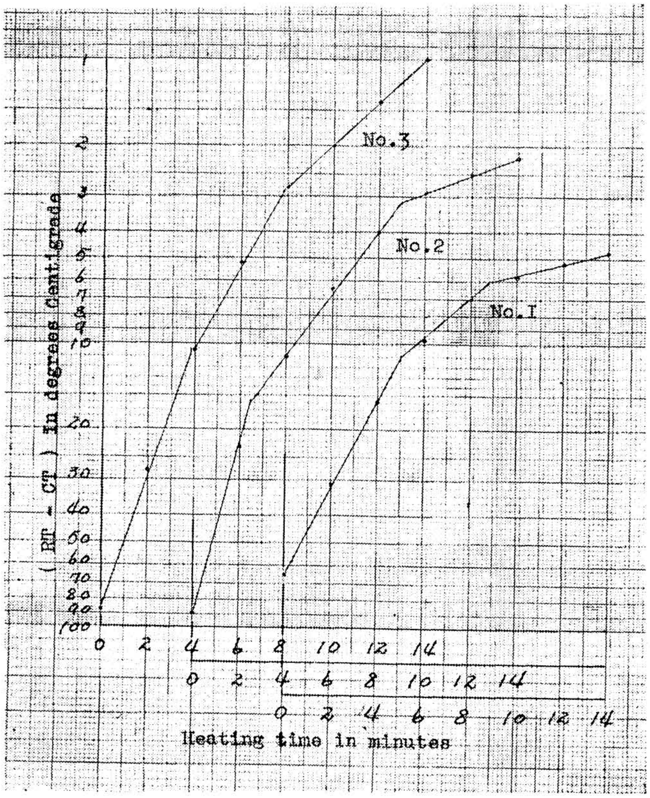

図 2 ： ミカンかん詰における加熱曲線

No. 1 曲線 ： 第一回目の測定結果

No. 2 曲線 ： 第二回目の測定結果

No. 3 曲線 ： 第三回目の測定結果

第 4 節　　測定結果についての考察

水または1％の bentonite clay の懸濁液のごとき、あるいは糖液のごとき流体のみを詰め、対流を妨害する固体を含まない罐詰を縦に静置して加熱するさいに「罐」の外囲より「罐」の内部へ流入する熱の伝達は自然対流によるのであって、その対流による熱の移動の状態は谷（1939）⑤や Jackson and Olson（1939）① によって描きだされている。それによると罐胴壁に沿って高温薄層の管状上昇流を生じ上昇流が上りきると罐詰の上表面に流込む、罐底に接する液体は加熱されて、罐胴壁に沿って上昇する管状上昇流に合流するから、薄壁の管状上昇流に囲まれた円柱状の液体は静かに下降する、このことは罐内の温度分布が水平面において罐胴壁に接する高温部を除くとほぼ均等である事実と、縦の温度分布においては上部においてもっとも高く、下底に近くもっとも低く、中心点では中位の温度を有することによって示される。

対流による熱の伝達を理想的に解析的に取り扱おうとすると、はなはだしい困難があるので、従来から近似的な方法が2～3の学者によって提唱された。Schultz & Olson（1938）④は罐詰の加熱に要する熱量は、「罐」の体積と内容物の温度とに比例し、単位時間当り罐詰に供給される熱量は、「罐」の表面積と、温度差とに比例するものと仮定した。一方金子（1941年）②は、この考えに、さらに次のことを補足した。すなわち、供給熱量は表面積に比例するばかりでなく、熱の伝達に要する距離、罐詰ならば表面と中心との平均距離に逆比例すると考えた。その結果を要約すると、罐詰内部への熱の伝達は次の式によって近似的に表わせる。

$$CT = RT - (RT\text{-}IT)\,e^{-\frac{BS}{AV}\frac{1}{r}t} \qquad 〔1〕$$

ただし　CT：時間 t における罐詰内容物の温度、ただし t＝加熱時間

RT：加熱温度

IT：t＝Oにおける罐詰内容物の温度

S：「罐」の表面積

B：比例常数

A：内容物に特有な常数

V：「罐」の容積

r：金子の改良において付加されたもので、「罐」の表面と中心との平均距離で、円鋳形の罐では

$$r = \frac{3}{2}\cdot\frac{ah}{a+h}$$

ただし　a＝「罐」の半径　　h＝「罐」の高さ　　式〔1〕を変形すると

$$u = \frac{RT\text{-}CT}{RT\text{-}IT} = e^{-\frac{BS}{AV}\cdot\frac{1}{r}\cdot t} \qquad 〔2〕$$

$$\log u = -\frac{BS}{AV} \cdot \frac{I}{r} \cdot t \qquad 〔3〕$$

したがって log (RT-CT) / (RT-IT) または log (RT-CT) と加熱時間 t との関係曲線は直線をなすはずである。事実、谷⑤は水にて、Jackson & Olson ①は1%の bentonite clay の suspension で実験の結果、いずれも、ほぼ線直をなすことを示している。そしてかような直線に対して $u = je^{-2.303t/fh}$ なる式が適用できる。この式と式〔2〕とを比較して

$$j = 1 \qquad 〔4〕$$

また

$$2.303 \cdot \frac{t}{fh} = \frac{BS}{AV} \cdot \frac{I}{r} \cdot t \qquad 〔5〕$$

$$fh = 2.303\ \frac{A}{B} \cdot \frac{V}{S} \cdot r = \frac{I}{c} \cdot \frac{V}{S} \cdot r \qquad 〔6〕$$

となるが Schultz & Olson および金子の理論では中心温度の上昇の遅れについては、なんら考察がなされていないので、j の値については別に実験的に定めなければならない。

以上述べた理論に照してミカン罐詰について得られた加熱曲線を検討してみると、図2に所載のごとくに log (RT-CT) と加熱時間との関係曲線は単純な1本の直線をなさないで、むしろ双曲線として取り扱ってもよいように、彎曲している。もし直線をもって示すとすれば図のごとく、2個の折点を仮定し3本の直線をもってしなければならない。これは理論上考えられる加熱曲線の性質や、あるいは単純な水、または1%の bentonite clay の懸濁液について実験的に得られる加熱曲線の性質とはいちじるしく相違する点である。理由は果実粒が温度の上昇につれて浮上し、より上層部にたがいに寄りかたまり合って対流作用による熱伝達を妨げると考えられる。表5に所載の k の値が加熱曲線の折れるごとに低下して、最後には水の温度伝導度にほぼ等しくあるいはそれに近い数値を示し、対流による熱伝達が完全に停止して、熱伝導 (condubtion) に転移していることを示している。以上と同様な観察結果がその後 Townsend (1951) ⑥によって述べられている。第1回目の測定結果より第2回目の測定結果において、第2回目の測定結果より第3回目の測定結果において、いっそう迅速な温度上昇の見られることは、糖液につけ込の長さが加熱のさいにおける果実粒の浮上（つけ込み効果によって果肉の内外の液汁の可溶固形物量の平衡化が進み、浮上し難くなる）に影響を与えることが主なる原因であると考える。

熱伝達の均等迅速化を企図するためには、かような果実の浮上密集を阻止するのに有効な動揺かくはん作用を罐詰内部に与えることが必要である。

fh と k

図2に図示のごとく加熱曲線をそれぞれ3本の直線をもって示し fh を図上にて求めると表4のごとくである。

表 4　ミカンかん詰の fh（分）かん型＝5号かん　　　R T＝100°C

実　験　番　号	fh_1	fh_2	fh_3
1　（8かん平均）	6.4	14.3	4.8
2　（2かん平均）	3.2	9.2	33.5
3　（1　か　ん）	4.4	7.2	13.4

自然対流によって熱伝達の行われる鑵詰の鑵型と fh との理論的な関係については Schultz and Olson (1938) ④ および金子 (1941年) ② が論じているが、ここに記載のミカン鑵詰の加熱曲線のように複雑なものではかような理論は適用できないので、鑵型が変ればその鑵型について実地に測定するよりほかはない。

前述の式〔6〕から

$$fh \cdot c = \frac{V}{S} \cdot r = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{ah}{a+h}\right) \cdot \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{ah}{a+h}\right)$$

$$= \frac{3}{4}\left(\frac{ah}{a+h}\right)^2 \qquad 〔7〕$$

5号鑵では $a=3.73$；$h=7.6$ であるから

$$fh \cdot c = \frac{3}{4}\left(\frac{ah}{a+h}\right)^2 = \frac{3}{4}\left(\frac{3.73 \times 7.6}{3.73+7.6}\right)^2 = 4.6951$$

$$c = 4.6951/fh$$

Conduction の場合の k にならって c を温度伝達度と仮称することとし、表 5 の fh の数値からそれぞれの c の数値計算をやると表5のごとき数値が得られる。

表 5 ：ミカンかん詰におけるC ($cm^2/min.$)
かん型＝5号かん、R T＝100°C

実験番号	C＝4.6951 / fh		
1	$C_1=4.6951/6.4$ $=0.734$	$C_2=4.6951/14.3$ $=0.328$	$C_3=4.6951/48$ $=0.098$
2	$C_1=4.6951/3.2$ $=1.467$	$C_2=4.6951/9.2$ $=0.510$	$C_3=4.6951/33.5$ $=0.140$
3	$C_1=4.6951/44$ $=1.067$	$C_2=4.6951/7.2$ $=0.652$	$C_3=4.6951/13.4$ $=0.350$

c_3 の値はかなり低い値を示し、対流 (convection) による熱の移動が熱伝導 (conduction) による熱の移動に変化していることが認められる。

いま couduction の場合におけると同様にして k の値を計算してみると表6のごとき結果が得られる。

表 6 ： ミカンかん詰における k (cm²/min.)

実験番号	$k = d^2 \cdot fn / fh = 3.9259/fh$		
1	$k_1 = 3.9259/6.4 = 0.613$	$k_2 = 3.9259/14.3 = 0.275$	$k_3 = 3.9259/48 = 0.082$
2	$k_1 = 3.9259/3.2 = 1.227$	$k_2 = 3.9259/9.2 = 0.427$	$k_3 = 3.9259/33.5 = 0.117$
3	$k_1 = 3.9259/4.4 = 0.892$	$k_2 = 3.9259/7.2 = 0.545$	$k_3 = 3.9259/13.4 = 0.293$

No. 1 の k_3 の値のごときは水のそれにほぼ等しくきわめて小さいということができる。

Lag factor j について

図2に描かれた加熱曲線のうち、対流作用による最初の部分の j の値は式〔4〕に示されているようにいずれも1とみることができる。

Jackson and Olson (1939) ① が No. 10 Can (603×700. 日本の罐型1号罐に相当) に1%の bentonite clay の懸濁液を詰め、測定した結果では、罐詰の上部近くでjがほぼ 0.5 を示し、下底に行くにしたがってその数値を増し、罐底からやく1インチの点で1に近づいたと述べ、理想的な条件下においては、j の数値の1を越える点が罐底に近く見出されるはずであると述べている。

谷の実験では「罐」の位置によらず j>1 のように思われる。

本節冒頭に記載の静置円筒状罐内における対流作用による熱流の模式ならびに、以上の所説を考慮して著者は、以下の提案をしたい。

h=「罐」の高さ　　z =円壔垂直座標とし

$$j = \frac{h-z}{h} \qquad 〔8〕$$

とおき、この関係を Scnultz & Olson および金子にもとづく式〔2〕に入れて

$$u = \left(\frac{h-z}{h}\right) e^{-\frac{BS}{AV}\frac{1}{r}t} \qquad 〔9〕$$

とすることによって、測温点の垂直位置の変化による j の値の変化が与えられることになる (ただし平面上の位置の変化による j の値の変化はないものとみなす)。すなわち上端部では j≒0.5, 中心では j = 1 , 中心をすぎて下方にくだると j の値は1より大きくなることになる。

第 5 節　摘　　要

1. 1943年2月に著者が5号かんを使用してミカン罐詰の熱伝達速度の測定を行って得た結果について記載した。ミカン罐詰は小粒の果肉を糖液につけ込んだ罐詰であって、その内容の構成からみて、対流作用による熱流が一見この種罐詰の熱伝達の主流をなすもののように考えられるが、液体のみからなるスウプやジュース或は飲料の罐詰とは相違して、果実粒を含むので実地には、加熱中の果肉の浮上密集現象に原因して、少なくとも「罐」の幾何学的中心点における温度変化の測定結果からして、それは加熱前期に限られるものであることを知った。

2. 「罐」の幾何学的中心点における温度変化の状況からみて、加熱前期においては、対流作用にもとづく熱流が、この罐詰においての熱流の主体をなすが、やがて加熱効果による果肉の浮上密集現象が現われて対流作用が妨げられ、ついには阻止されて、熱流の模式が対流によるものから熱伝導による熱流に転移するものであることが認められた。すなわちこの罐詰の加熱曲線は3本の直線で表わされ、加熱前期の径時間的温度変化を代表する加熱曲線の最初の部分では j=1（対流作用による熱伝達の式から理論的に求めて得られる値に一致）で、曲線の勾配fhは 3.2～6.4分というように険しいのに反して、加熱終期を代表する加熱曲線の最後の部分では、fh が 13.4～48 分というふうに勾配がゆるやかになり、また、0.293～0.082cm^2/min というような温度伝導度を与え、しかもその最低値は水の温度伝導度にほぼ等しいことから、明らかに上述のような熱流の型に転移の起きたことを示している。

3. 上述の観察結果からみて、見掛上、対流作用による熱流が支配的であるように考えられる構造または組成の内容物であっては、加熱効果による内容固形物の浮上密集の現われるようなものにあっては、すくなくとも罐詰の中心および、それから上の上層部では、対流作用による熱流を許さないような内容固形体の密集集団が形成され、しぜんその密集団内に罐詰内での最低温部が出現することになる。他方罐詰の下層部では、以上とは逆に、それまでは液中にサスペンドしていた内容固形体群が浮上して、後には浮遊体を全然残さない液相だけからなる層部が形成されそこでは依然として、しかも妨げのない対流作用が「罐」の外部から内部への熱の流入に主役を演じ続けることが推定できる。

4. 上記のような対流圏と伝導圏との二層に罐詰内が加熱過程において分割される現象は、確実な Pasteurization の効果を得るうえにおいて、また熱傷害による品質の低下を抑制するうえにおいて、好ましいものではないので、「罐」を動揺させ、内容固形体の浮上密集作用を攪乱して、均等でしかも迅速な加熱が促進されるようにすることが肝要であると考えられた。
比較的低温での加熱で、目的の達せられる「ミカン」罐詰のようなものでは、ともかく、高温加熱を要する内容物では、以上の事は、とくに重要である。

5. 果肉の糖液つけ込み効果の進んだものほど、それだけ糖液濃度が低下し、それにともなって、より速かな対流作用が可能になり、また果肉の浮上密集傾向も減少するので、対流作用に対する果肉の妨害阻止の傾向も低下するため、「罐」の幾何学的中心点における温度上昇がより速かになることが認められた。

6. 対流による熱流に対して与えられた Schultz & Olson. および金子の式を改良して、測温点の

垂直位置の変化による j の値の変化に適応するよう以下のように改めることを提案した。

$$u = \left(\frac{h - z}{h} \right) e^{- \frac{BS}{AV} \frac{1}{r} t}$$

ただし$\left(\frac{h - z}{h} \right) = j$ に相当し、 h＝罐高、z＝円とう（壔）垂直座標。

かように改めることによって、罐詰内の上端では j≒0.5，中心では j＝1，中心をすぎると j は1より大きくなることになり、Jackson &Olson の観察結果をほぼ満たすこととなる。

文　　献

1) Jackson, J. M., and Olson, F. C. W. Food Res. 5 (4), 409-421, 1940

2) 金子伊喜雄：日本水産学会誌、9(6), 253-255, 1940.

3) 志賀岩雄：罐詰時報、13(12), 83-93, 1934.

4) Schultz, O. T., and Olson, F. C. W. Food Res 3(6), 647-651, 1938.

5) 谷正二：日本水産学会誌、8(2), 76-78, 1939.

6) Townsend, Ch. T. The Canner, 60-62 & 66, March 10, 1951.