かん詰の熱伝達速度の測定結果

志　賀　岩　雄

THE RATE OF HEAT PENETRATION IN PROCESSING SOME CANNED FOODS

Iwao Shi a

緒　　　論

罐詰法は食品の気密々封と、加熱殺菌とから成立している。罐詰の殺菌については、近時、ionizing radiation のような熱を使用しない方法が研究者の手によって試みられているが、その実際化は未だ成功するまでにゆかず、依然として加熱方法によって罐詰の殺菌が行われているし、また研究の現状から考えて、従来の加熱方法が、安全で確実、単純で経済的な方法として今後もなお永く利用し続けられるであろうと思われる (2-b)。各種の実験動物が不妊、弱視力、肥大心臓及び内出血等の兆候をあらわしたため U.S.Army における atomic radiation による食品貯蔵の計画が中止されるという (5)。

罐詰の殺菌は、加熱に伴う内容物の品質傷害を可能な最少限度に抑え、しかも一般公衆衛生の見地から安全で、確実な殺菌効果をもたらす程度に行われなければならない。それ故、個々の内容物品質の熱傷害、加熱不十分の際に変敗に関与する細菌の熱抵抗、ならびに加熱媒質から罐詰内部へ流入する熱流等に関する知見が罐詰の殺菌加熱を合理的に取扱ううえにおいて本質的に重要なものである。

加熱媒質から、罐詰内部への熱流については、内容物の物理的な状態の相違によって、a. 主として対流 (convection) に支配される場合、b. 主として伝導 (Conduction) に支配される場合、ならびに、c. 対流と伝導との両者によって支配される場合等が考えられる。

罐の形体には、罐筒形、楕円形及び角形等があるが、量的に主体をなすものは、円筒形の「かん」である。本文での記載は、円筒形の罐に関するものである。

一定の温度 RT で加熱された罐詰の幾何学的中心点における品温 CT と加熱時間 t との関係曲線が加熱曲線と呼ばれ、多くの場合、次のような実験式であらわされる。

$$\log (RT - CT) = \log jI - t/fh \quad \cdots\cdots 1$$

即ち方眼紙上において log (RT-CT) と t とは $^1/fh$ の勾配をもち、y 軸とは log jI において交わる直線をなす。

I = RT − IT, IT = 罐詰の初温度を意味する。fh は半対数方眼紙上において、加熱曲線が1対数周期をよぎるに要する時間（分）数である。

罐詰内の熱流が主として、熱伝導によって支配される場合、加熱時間の十分に経過した後におい

て、熱の伝導理論から得られた次の式が近似的に適用される③。

$$U = A_{110}J_0\,(R_1\,r/a)\,\sin\frac{\pi}{2b}\,(z+b)\,e^{-\left(\frac{R_1^2}{a^2}+\frac{\pi^2}{4b^2}\right)kt} \qquad \cdots\cdots 2$$

ただし
$$U = (RT - CT)/(RT - IT) \qquad \cdots\cdots 3$$

式3から、式2は次のように書きかえられる。

$$\log(RT - CT) = \log\left[(RT - IT)\,A_{110}J_0\,(R_1\,r/a)\,\sin\frac{\pi}{2b}\,(z+b)\right]$$
$$- k\left(\frac{R_1^2}{a^2}+\frac{\pi^2}{4b^2}\right)(\log e)t \qquad \cdots\cdots 4$$

式1と式4とを比較すると、両式は同形であることから次のような関係式が得られる。

$$jI = (RT - IT)\,A_{110}J_0\,(R_1\,r/a)\sin\frac{\pi}{2b}\,(z+b)$$

即ち
$$j = A_{110}J_0\,(R_1 r/a)\,\sin\frac{\pi}{2b}\,(z+b) \qquad \cdots\cdots 5$$

罐詰の初温度が均等に分布している場合には、

$A_{110} = 2.04$, $J_0\,(R_1\,r/a)$ は Bessel 函数、$2a = d =$ 罐の直径、$2b = h =$ 罐の高さ、r 及び z は直円筒坐標、従って初温度の分布が均等な罐詰の幾何学的中心点においては、

$$j = 2.04 \qquad \cdots\cdots 6$$

これは熱伝導の支配的な熱流における lag factor j の理論値であるが、しかし実験値は理論値とは必ずしも一致しないばかりでなく、可なり偏った数値を与える場合がある。この実験値の理論値からの偏い（倚）に関係する要因としては、測温点のずれ⑦、初温分布の不均等、j の実験値は加熱曲線の漸近線によってではなく、接線によって決定されるので、（罐高）/（罐径）による影響をうける⑧、罐詰の外周の温度は瞬時に一定の殺菌温度になるのではなく、レトルトの温度上昇に時間を要し、その要した上昇時間を殺菌温度で加熱したと値の等し時間数に換算するのに用いられる換算率は温度上昇状態によって著しく影響をうける①(2-a)、及び上部空隙の熱抵抗の影響④等があげられる。

次に式1と式4とから、更に次のような関係式が得られる。

$$1/fh = k\left(\frac{R_1^2}{a^2}+\frac{\pi^2}{4b^2}\right)(\log e)$$

すなわち

$$fh = 2.303\,\frac{4a^2b^2}{4b^2R_1^2+a^2\pi^2}\,\frac{1}{k}$$

ただし　k = 温度伝導度、R_1 は $J_0\,(x) = O$ の第一番目の正根で、2.404826 なる数値をもつ。$h/d = N$ とし、R_1 及び π にそれぞれの数値を与えると上式は、

$$fh = \frac{2.303\ N^2 d^2}{23.136\,N^2 + 9.87}\ \frac{1}{k} \qquad \cdots\cdots 7$$

$$fn = \frac{2.303\ N^2}{23.136\,N^2 + 9.87} \qquad \cdots\cdots 8$$

とおくと、fn は h/d によってきまる、すなわち

$$fh = fn\ d^2/k$$

従って同じ内容物を詰めた異種の罐型間には、次の関係式が成立する。

$$fh'' = fh' . \ (d_2^2 \cdot fn'') \ / (d_1^2 \cdot fn') \qquad \cdots\cdots 9$$

熱伝導の支配的な熱流によって熱伝達の行われる「罐詰の fh は高い数値をもつことが特徴である。

例えば、後記のタラバカニ罐詰⑩、育児食罐詰、カンショ罐詰および脱水松茸罐詰等の測定結果において、何れも高い数値の fh を与えている。

fh は式7によって、あきらかなように、罐の寸法と $1/k$ とによって支配される。$1/k$ は熱流に対する罐詰の内部抵抗を意味し、k は内容物に特有な温度伝導度である。育児食罐詰及びカンション罐詰の k の平均値は、略々 0.095′ cm^2/min で、その最低値は 0.087〜0.090 cm^2/min である、糊状の内容物では、この数値と罐の寸法とから近似的な fh の数値を算出できるものと考えて間違いないであろう。

罐詰内に対流を妨害するような固体を含まず、罐内液体の自然対流によって、罐の外部から内部へ伝達される熱流に対しては、次の式が近似的に適用される。

$$CT = RT - (RT - IT)\left(\frac{h-z}{h}\right) e^{-\frac{BS}{AV} \cdot \frac{1}{r} \cdot t} \qquad \cdots\cdots 10$$

ただし、$_1/r$ は金子⑥、が Schultz & Olson の式⑨に付加したものであって、$r = 3/2 \cdot ah/(a+h)$, $(h-z)/h$ は志賀の付加したものである。

式10を変形して以下のように書きかえると、式1と同形の式になる。

$$\log(RT - CT) = \log(RT - IT)\left(\frac{h-z}{h}\right) - \frac{BS}{AV}\frac{1}{r}(\log e)\,t \qquad \cdots\cdots 11$$

相互に形を等しくする式1と式11との比較から次のような関係式が得られる。

$$jI = (RT - IT)\left(\frac{h-z}{h}\right)$$

即ち

$$j = \frac{h-z}{h} \qquad \cdots\cdots 12$$

註　V＝缶の容積，S＝缶の表面積，A＝内容物に特有な常数，

B＝比例常数，a＝缶の半径，h＝缶の高さ，z＝円壔垂直坐標

従って、かんの中心点においては、$j=1$、中心点より上方では $j<1$ となり、下方では $j>1$ となる。

更にどうようにして今一つ次の関係式が得られる。

$$1/fh = \frac{BS}{AV}\frac{1}{r}(\log e)$$

即ち

$$fh = 2.303\frac{AV}{BS}\cdot r$$

A及びBは何れも常数であるから $2.303\frac{A}{B}=\frac{1}{c}$ と置くと、

$$fh = \frac{1}{c}\frac{V}{S}r \quad \cdots\cdots 13$$

この場合も、fh は罐の寸法と、$1/c$ とによって支配される。$1/c$ は熱流に対する内部抵抗を意味し、罐詰内容物の対流に対する抵抗性の大きなものの $1/c$ の数値は大きく、c の数値は小さい。

対流の支配的な熱流によって熱伝達の行われる「罐詰の fh は、熱伝導の支配的な罐詰の fh に比較して、その数値の可なり小さいことが特徴となる。著者の行った測定から引例すると、罐型は同じ5号罐であっても、それに詰めた内容物が「のこくずでんぷんのり」と水とでは、fh の値は甚しく相違し、前者では 32.6 分であったのに対して後者では2.5分であった。

加熱に伴って生ずる内容物の存在状態や物理的状態の変化に原因して、罐詰内の中心点における加熱曲線は前述の式で表わせるような単純なものでなくなり、複雑で不規則な曲線を描く場合もできる。

罐詰を広義に解すれば、気密々封容器としてブリキ罐の外にびんを使用したものも包含される。この両種の容器に詰められた内容物の中心部へ熱の伝達される速さについて比較考究する場合には熱流に対する内容物の内部抵抗以外に加熱媒体と内容物との間に介在する壁体の外部抵抗を考えることによって両種容器間に生ずる差違を合理的には（把）握できる⑪。

著者が過去においてなした若干の測定結果を、既に或程度発表ずみのものもあるが、以下に取纒めて記載して置くことにした。

引 用 文 献

1) Alstrand, D. V. & Benjamin, H. A. Food Res., 14 (3), 253, 1949.
2) a. Ball. C. O. Bull. Nat. Res. Council, 7, pt. 1, No. 37, 1923.
b. Ball, C. O. Food Technol., 9 (11), 588, 1955.
3) Carslaw, H. W. Mathematical theory of the conduction of heat in solids. Macmillam, London, 1931.
4) Evans, H. L. Food Technol. 12 (6), 276, 1958.

5) Food Technol. in Aust., 12(1), 27, 1960.

6) 金子伊喜雄・日本水産学会誌、9(6), 253, 1940.

7) 岡田光世・罐詰の物理・厚生閣、1940.

8) Olson, F, C. W. & Jackson, J. M. Ind. Eng. Chem., 34, 874, 1942.

9) Schultz, O.T. & Olson, F.C.W. Food Res. 3(6), 647, 1938.

10) 志賀岩雄・罐詰時報、11(1), 70, 1932.
化学と工業、7(3), 168, 1932.

11) Merrill, D. G. Ind. & Eng. Chem. 40(12), 2263, 1948.