静置殺菌法と回転殺菌法とによる殺菌値の比較—I

ある程度粘度をもった食品が缶を満たす場合について

池　上　義　昭

Comparison of F Value for Stationary and Rotated Processes- I

Canned Viscous, Uniform Food

Yoshiaki Ikegami

It is well known that the thermal processing time of canned foods at a given temperature is significantly shortened by agitation processes. However, routine methods for evaluating the convection-(agitation) heating processes, in which the processing time is calculated on the basis of F value similar to the conduction-(stationary) heating processes, may cause wrong estimation.

In the present paper, F value for conduction- and convection-heating products of equal probability of survival were calculated, by means of theoretical examinations on the distribution of the probability of survival in containers.

For example, when an adequate process is accomplished and F value at the center of the conduction-heating products is 10, the probability of survival is $10^{-8.12}$, while F value required for the equivalent probability of survival on the convection-heating products is calculated to be 12.60.

The results indicate that the necessary F value of convection-heating products should be arger than that of the conduction-heating products.

1. 緒　　言

わが国でも近年回転殺菌機を使用して缶詰を殺菌されるようになってきた．回転殺菌が従来の静置殺菌に比べて殺菌時間の短縮および製品の品質において優れていることが知られている．しかし殺菌時間の比較を検討する場合，同じ殺菌値（F値）で殺菌すると変敗率が異なることが想像される．それで私は同じ変敗率になるようにして，回転殺菌法と静置殺菌法とのF値の比較を理論的に検討した．この場合，回転殺菌は缶詰の内容物が完全に攪拌され，缶内の温度分布が均一であるものとし，静置殺菌では熱の伝達が伝導によるものとした．

＊ 日本缶詰協会第19回技術大会発表論文

2. 理 論 的 考 察

1. 缶詰の温度分布

外囲温度 T_1 で加熱された缶詰の中心点における温度Tと加熱時間 t との関係式として次が知られている．

$$t = fh \ \log\frac{T_1 - T_0}{T_1 - T} J = fh \ \log\frac{JI}{g} \cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

fh は $T_1 - T$ がその 1/10 に減ずるに要する時間，J は加熱速度が対数的になる以前の速度の遅滞を示す常数．

図 1 に示すごとく半径 a，高さ b の缶詰を想定し，この缶詰の表面における相対熱伝達率を考慮に入れないで缶詰内部の各部分における J 値を決定する式として次の関係式が得られる．

$$J = 2.04 J_0\left(R_1 \frac{r}{a}\right)\cos\frac{\pi}{b} l \quad \cdots\cdots\cdots(2)$$

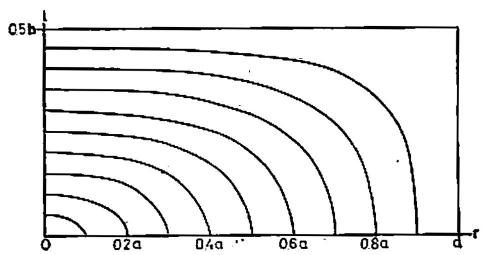

Fig. 1 Curves for coordinates of isothermal surfaces.

R_1 はベッセル函数 $J_0(x) = 0$ の第一番目の正根である．この関係式から中心点の理論的J値は2.04であることがわかる．

一定の J 値に対して無数の r，l の組が対応して，ここに等J値曲面が得られる．この等J値曲面は(1)式によりJとgは比例するので等g値曲面であり又等温曲面でもある．

2. 等温曲面内の容積

(2)式で$\dfrac{J}{2.04} = \lambda$ とすると次のようになる．

$$\lambda = J_0\left(R_1 \frac{r}{a}\right)\cos\frac{\pi}{b} l \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

等温曲面に囲まれた容積を求めると次のようになる．

$$V\lambda = 2\int_0^{lr=0} \pi r^2 dl \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

(3)式より

$$l = \frac{b}{\pi}\cos^{-1}\frac{\lambda}{J_0\left(R_1 \frac{r}{a}\right)} \text{ であるから}$$

$$\frac{dl}{dr} = \frac{b}{\pi}\left[\cos^{-1}\frac{\lambda}{J_0\left(R_1 \frac{r}{a}\right)}\right]' dr \cdots\cdots\cdots\cdots(4)'$$

ここに〔 〕′ は微分を略記したものである．

(4)(4)′ より

$$V\lambda = 2\int_{rl=0}^{0} \pi r^2 \frac{b}{\pi}\left[\cos^{-1}\frac{\lambda}{J_0\left(R_1 \frac{r}{a}\right)}\right]' dr \cdots\cdots\cdots\cdots(4)''$$

(4)″ を部分積分して

$$V\lambda=2b\left[r^2\cos^{-1}\frac{\lambda}{J_0\left(R_1\frac{r}{a}\right)}\right]_{rl=0}^{0}-4b\int_{rl=0}^{0}r\cos^{-1}\frac{\lambda}{J_0\left(R_1\frac{r}{a}\right)}dr=4b\int_{0}^{rl=0}r\cos^{-1}\frac{\lambda}{J_0\left(R_1\frac{r}{a}\right)}dr \cdots (5)$$

缶の容積 V は $a^2b\pi$ であるから $V\lambda$ と V の比を δ[5] とすると

$$\delta=\frac{V\lambda}{V}=\frac{4}{a^2\pi}\int_{0}^{rl=0}r\cos^{-1}\frac{\lambda}{J_0\left(R_1\frac{r}{a}\right)}dr \cdots\cdots (6)$$

缶詰の半径方向（r 軸）を10等分し，各点を通る等温曲面内の容積比を求める場合，普通の方法では解くことができないので区分求積法で近似的に求めた．まず r 軸上の $0.1a$ を通る等温曲面内の容積比は次式

$$f(r)=r\cos^{-1}\frac{\lambda_{r=0.1a}}{J_0\left(R_1\frac{r}{a}\right)} \cdots\cdots (6)'$$

を 0 から $0.1a$ まで積分した値と $4/a^2\pi$ の積であるから，区分求積法により 0 から $0.1a$ の間隔を10等分して，等分点に対する $f(r)$ の値を y_1，y_2，y_3……とすると容積比は次式により近似的に求められる．

$$\delta \fallingdotseq \frac{4}{a^2\pi}\left[y_1+(y_1+y_2)+(y_2+y_3)\cdots\cdots\right]\frac{0.01}{2}a=\frac{0.04}{a\pi}(y_1+y_2+y_3+\cdots\cdots) \cdots\cdots (6)''$$

缶詰の r 軸上の $0.2a$ を通る等温曲面内の容積比も同様に 0 から $0.2a$ の間隔を20等分して区分求積法で求めた．このようにしてそれぞれの等温曲面内の容積比は表 1 に示すような値が得られた．又 $0\sim0.1a$，$0.1a\sim0.2a$…… の容積比を百分率で求めた結果も示した．

Table. 1 Percentages of volumes enclosed between each two isothermal surfaces.

r	λ	Vλ/V	volume, %
0	1	0	
			0.071
0.1 a	0.9856	0.00071	
			0.503
0.2 a	0.9430	0.00574	
			1.384
0.3 a	0.8740	0.01958	
			2.732
0.4 a	0.7817	0.04690	
			4.594
0.5 a	0.6699	0.09284	
			7.045
0.6 a	0.5434	0.16329	
			10.234
0.7 a	0.4075	0.26563	
			14.473
0.8 a	0.2679	0.41036	
			21.082
0.9 a	0.1302	0.62118	
			37.882
a	0	1	

3．等温曲面上の F 値

1号缶（3 kg）に胞子（$D_{250}=1$，$Z=18$）がグラム当り10個存在し，この胞子を缶詰の中心点においてグラム当り 10^{-9} 個まで減少せしめる殺菌を行なうものとする．この場合殺菌温度を 250°F，缶詰の初期温度を70°F，$fh=100$，$J=2.04$ とする．

缶詰内の各部分の胞子数をあるレベルまで減少せしめるに要する殺菌値（U 値）は次式によって得られる．

$$U=D\ (\log a-\log b) \cdots\cdots (7)$$

$$F=\frac{U}{Fi} \cdots\cdots (8)$$

$$Fi=\log^{-1}\frac{250-T_1}{Z} \cdots\cdots (9)$$

D は胞子数が 1/10 に減ずるに要する時間

a は最初の胞子数

b は殺菌後の残存胞子数

(8), (9)より $T_1=250$ の場合は $U=F$ であるから中心部分の F 値は10個の胞子を 10^{-9} まで減少せしめるのであるから(7)式より

$F=\log 10-\log 10^{-9}=10$ である．

Ball[1] の $fh/U:g$ の関係表より $F=10$の場合の g 値を求めると9.04である．10等分した各等分した各等分した各等温曲面上の g 値も中心点の g 値と各等温曲面上の J 値が求められているから比例により計算し表2に示すような値が得られた．これらの g 値に対してさらに $fh/U:g$ の関係表より F 値も得られる．

それでは缶詰内の F 需要分布はどのようになっているか，Stumbo[3]は中心点から缶壁に近くなるに従い大きくとり，胞子残存確率の最大の個所は中心点でなく中心からかなり離れた場所であると述べているが，中心部分の1g 中の胞子も他のどの部分の1g 中の胞子もその熱抵抗は同じであるから缶詰内の必要な F 値はどの部分も同じであるとみてよいだろう．

以上のことから中心点が残存胞子数の最大のところであるといえる．表2に示すごとく中心点で $F=10$の殺菌を行なった場合缶壁部では約16倍の殺菌が行なわれたことになる．

Table. 2 F values and numbers of survival spores on respective isothermal surfaces.

r	J	g	F	b (/g)
0	2.04	9.04	10.00	$10^{-9.00}$
0.1 a	2.01	8.91	10.22	$10^{-9.22}$
0.2 a	1.92	8.51	10.96	$10^{-9.96}$
0.3 a	1.78	7.89	12.32	$10^{-11.32}$
0.4 a	1.59	7.13	14.00	$10^{-13.00}$
0.5 a	1.36	6.07	17.70	$10^{-16.70}$
0.6 a	1.11	4.92	22.99	$10^{-21.99}$
0.7 a	0.83	3.72	30.49	$10^{-29.49}$
0.8 a	0.55	2.44	43.10	$10^{-42.10}$
0.9 a	0.27	1.20	68.30	$10^{-67.30}$
a	0	0	160.87	$10^{-159.87}$

4. 残存胞子数と胞子残存確率

細菌胞子の死滅は繁殖能力の喪失をもって定義されており，熱による死滅現象を定量的に追究すると対数的になっていることが確認されているが，もちろんこれに従わない細菌もある．ここでは対数法則に従うものについて考えることにする．

胞子が加熱により対数的に減少してゆき，1個以下例えば 0.1 個とは単位量（1 ml）中に 0.1 個の残存胞子 10ml 中に1個，100ml 中に 10 個の胞子が生存していることを意味するが，この場合単位を1容器（1 ml）にとり各容器の胞子残存確率（殺菌不成功率）は 1/10 になるだろうか．

天羽氏[3]は残存胞子数と胞子残存確率は同じではなく，生物学的に細菌は1以下の単位は存在しないと述べている．胞子の熱抵抗性の個体差を考え残存胞子数0.01個にすれば完全に殺菌されたものとみている．しかし合葉氏[4]等の研究では胞子残存確率の実験値が残存胞子数よりもいく分大きい値になっている．

これらの事から残存胞子数と胞子残存確率の関係はむずかしい問題であるので今後の研究結果を待たなくてはならない．ここでは計算の便宜上同じものとみてこれからの計算を進めた．

5. 缶詰内の胞子残存分布

缶詰の中心点から r 軸上に10等分した等温曲面内の容積比は表1に示したが，これより1号缶（3 kg）についての重量を計算すると表3に示すごとき結果が得られる．中心部分の2.12g 中の残存胞子数はグラム当り 10^{-9} から $10^{-9.22}$ であるから 0.01g 当りにすると 10^{-11} から $10^{-11.22}$ までの変化がある．中心点の 0.01g の残存胞子数を 10^{-11} とし，その周囲の 0.01g を $10^{-11}\times 10^{-\frac{0.22}{212}}$ のように対数的に減少するとみて2.12g 中の残存胞子数（胞子残存確率）を計算すると次のようになる．

Table 3 Probability of survival spores in regions enclosed between each two isothermal surfaces.

r	wt (g)	b (/g)	p
0 ～0.1a	2.12	$10^{-9.00}\sim 10^{-9.22}$	$10^{-8.78}$
0.1a～0.2a	15.11	$10^{-9.22}\sim 10^{-9.96}$	$10^{-8.35}$
0.2a～0.3a	41.51	$10^{-9.96}\sim 10^{-11.32}$	$10^{-8.88}$
0.3a～0.4a	81.96	$10^{-11.32}\sim 10^{-13.20}$	$10^{-10.03}$
0.4a～0.5a	137.82	$10^{-13.02}\sim 10^{-16.70}$	$10^{-11.96}$
0.5a～0.6a	211.35	$10^{-16.70}\sim 10^{-21.99}$	
0.6a～0.7a	307.02	$10^{-21.99}\sim 10^{29.49}$	
0.7a～0.8a	434.19	$10^{29.49}\sim 10^{-42.10}$	
0.8a～0.9a	632.46	$10^{-42.10}\sim 10^{-67.30}$	
0.9a～ a	1136.46	$10^{-67.30}\sim 10^{-159.87}$	

$$1-(1-10^{-11})(1-10^{-11}\times 10^{-\frac{0.22}{212}})(1-10^{-11}\times 10^{-\frac{0.22}{212}\times 2})\cdots\cdots$$

$$=10^{-11}+10^{-11}\times 10^{-\frac{0.22}{212}}+10^{-11}\times 10^{-\frac{0.22}{212}\times 2}+\cdots\cdots$$

$$=10^{-11}\times\frac{1-10^{-0.22}}{1-10^{-\frac{0.22}{212}}}=10^{-11}\times\frac{0.3972}{0.0024}=10^{-8.79}$$

同じように他の10等分した容積中の胞子残存確率を計算すると表3のような結果が得られた．それでは缶詰全体の胞子残存確率は同じような計算により

$$1-(1-10^{-8.78})(1-10^{-8.35})(1-10^{-8.87})\cdots\cdots$$

$$=10^{-8.78}+10^{-8.35}+10^{-8.87}+\cdots\cdots=10^{-8.12}$$

このように中心点における殺菌値 $F=10$ にした場合，缶詰の胞子残存確率（変敗率）は $10^{-8.12}$ となる．

6. 回転殺菌法での F 値

静置殺菌法で $F=10$ の殺菌を行なった場合，その胞子残存確率は $10^{-8.12}$ であり，これと同じ胞子残存確率にするためには回転殺菌法で行なった場合にいかになるか．この場合缶内の温度がどの部分も均一になっているものとみて計算し，缶詰（3 kg）の胞子残存確率が $10^{-8.12}$ であるから1 g 中の胞子残存確率 b は次式により求められる．

$$1-(1-b)^{3,000}=10^{-8.12}\quad \therefore \log b=-11.60$$

F 値はこの b 値を(7)式に代入して

$$F=\log 10+11.60=12.60$$

静置で $F=5$ の殺菌を行なったとすると，同じ胞子残存確率にするには表4に示すごとく $F=7.45$ にしなくてはならない．

しかしこの場合回転殺菌法で缶詰を殺菌する

Table 4 F value and probability of survival spores

F value		p
Statonary	Rotated	
5	7.45	$10^{-2.97}$
10	12.60	$10^{-8.12}$

に缶内の温度分布が均一であるとみて計算したので実際の場合とは異なる．そこで実際にはどのようになるかを検討した．まず1号缶に20%ベントナイトを詰め加熱温度 121°C，回転数 50rpm で殺菌した場合その中心点と缶壁部の加熱速度曲線は図2のようになり，これより中心部と缶壁部のF値を比較すると表5に示すごとく約1.2の差しかない．例えば実際の場合，中心部のF値が 12.0 のとき，缶壁部は 13.1 であるが，これが完全に攪拌され缶内の温度分布が均一であったとすると平均してそのF値は 12.6 くらいになる．このことから静置殺菌で$F=10$とした ときは回転殺菌では $F=12$くらいにしなければその変敗率は同しにならない．

いずれにせよ回転殺菌で缶詰を殺菌するにはその殺菌値（F値）を静置殺菌法より大きくしなければならない．

Table. 5 The comparison of F values of the center and the bottom in 603×700 can.
(End-over-end rotation at 50rpm)

F value	
Center	Bottom
10.0	11.2
10.5	11.7
11.0	12.2
11.5	12.7
12.0	13.1

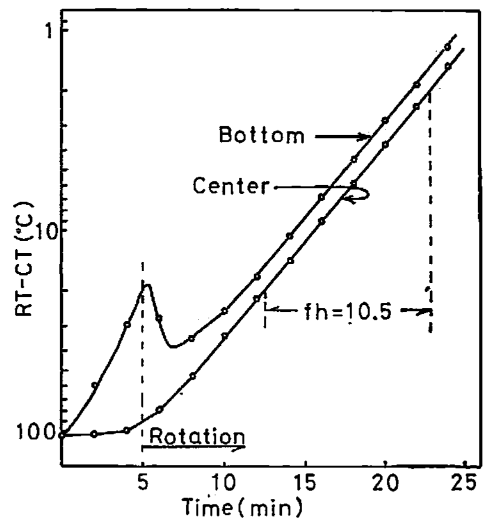

Fig. 2 Heating curves at the center and the bottom of 20% bentonite in a 603×700 can.
(End-over-end rotation at 50 rpm)

3. 要　　旨

缶詰の胞子残存確率とF値の関係を缶詰内を等分化して理論的に追究し，回転殺菌法と静置殺菌法との殺菌値の比較を行なった．

この結果回転殺菌法と静置殺菌値を同じにするとその胞子残存確率は異なってくる．同じ胞子残存確率にするには回転殺菌値を大きくとる必要がある．

文　　献

1） *BALL*, C. O : Sterilization in Food Technology, 1957.
2） STUMBO. C. R : Food Technology 2, (3), 228～240, 1948.
3） 天羽幹夫：缶詰時報，30，(2)，46～57，1951.
4） 合葉修一・戸田清：醗酵工学，43，(8)，527～533，1965.
5） 速川貫一：缶詰時報，37，(10)，107～127，1958.