

レトルト殺菌における容器詰伝導食品の F_0 値の最小点

寺島 好己

Computer Determination of Positions Showing Minimum F_0 -value in Containers of Heat Conductive Food during Heat Sterilization

Yoshimi Terajima

A method for finding the minimum of a function of several variables was used to determine the positions showing minimum F_0 -value in cylindrical and rectangular containers of heat conductive food during heat sterilization. This minimization problem was solved numerically, using the conjugate gradient method.

The positions are presented for various container sizes. In cylindrical containers, they are along the center line or the concentric circles on the mid-plane, depending on the ratio of height to diameter. In rectangular containers having square bottoms, they are along the center line or the diagonal lines on the mid-plane, depending on the ratio of height to square's side length.

Key words : F_0 -value, minimization, heat sterilization, heat conductive food, canned food.

1. 緒 論

熱が伝導で伝わる食品（伝導食品）が詰められた缶詰のレトルト殺菌においては、一般に缶詰の中心の F_0 値を問題にすることが多い。中心における F_0 値が一番小さいと考えられているからである。レトルト殺菌を加熱と冷却に分けて考えると、加熱終了時には缶詰の中心における F_0 値が一番小さいことは理論的にも異論はない。しかしながら、冷却終了時においても缶詰の中心における F_0 値が一番小さいとは限らない。なぜなら、冷却は缶詰の外側から中心に向かって進行するので、缶詰の形状によっては中心における F_0 値が一番小さいとは一概には結論できない。

この問題に関連した従来の研究としては、缶詰食品についての Teixeira ら¹⁾の研究がある。伝導食品が詰められた1号缶（直径：153.4mm，高さ：176.8mm）を200分割し、レトルト殺菌終了時における各領域の微生物の生残数をコンピューターを用いて計算を行い、生残数が一番大きい領域を求めている。その結果、缶詰の中心から半径方向に沿って半径の約1/4だけ離れた領域の生残数が最も大きかったと報告している。

ここでは、多変数関数の最小化の方法を応用して、円筒容器詰伝導食品（缶詰食品）と角型容器詰伝導食品についてレトルト殺菌終了時における F_0 値が最小になる位置のコンピューターによる探索を試みた。

2. 理 論

2.1 微生物の死滅速度

微生物の死滅速度は一般に式(1)のように表される²⁾。

注 本論文は缶詰時報, Vol.81, No.6, 553~560 (2002) 掲載論文を転載したものである。

$$dN/dt = -(\ln 10/D)N \quad (1)$$

$$D = D_r \exp \{(\theta_r - \theta)/(z_r/\ln 10)\} \quad (2)$$

初期条件を $t=0$ で $N=N_0$ として式 (1) を解くと $t=T$ のとき

$$N = N_0 \exp \left[(-\ln 10/D_r) \int_0^T \exp \{(\theta - \theta_r)/(z_r/\ln 10)\} dt \right] \quad (3)$$

となるが、 F_0 値はつぎの式 (4) のように定義されている。

$$F_0 = \int_0^t \exp \{(\theta - \theta_r)/(z_r/\ln 10)\} dt \quad (4)$$

ただし、 $\theta_r = 121.1$ ($^{\circ}\text{C}$)、 $z_r = 10$ ($^{\circ}\text{C}$) である。

2.2 多変数関数の最小化

容器内の位置により温度 θ は異なるので、式 (4) で定義された F_0 値は位置により分布を生じる。そこで、 F_0 値が最小値を取るのは容器内のどの位置かという問題について考えることにする。

この問題の解を求めるにはいろいろな方法が考えられるが、ここでは、つぎのような多変数関数の最小化の考え方³⁾を応用して解を求めることにする。

いま、 n 個の変数 $x_1, x_2, \dots, x_n$ の評価関数 J をつぎのように表す。

$$J = f(\mathbf{x}) \quad (5)$$

ただし、 $\mathbf{x}$ はベクトルであり、 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ である。ここで、 T はベクトルの転置を表す。

式 (5) の関数 $f(\mathbf{x})$ を変数 x_i で偏微分することにより、連立方程式 (6) を作成する。

$$\partial f / \partial x_i = 0 \quad (6)$$

ただし、 $i=1, 2, \dots, n$ である。

式 (6) で表される連立方程式を解いて、 $x_1, x_2, \dots, x_n$ を求め、これらの値を式 (5) に代入すれば、評価関数 J の最小値が求まる。評価関数 J が最小値をとる位置は $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ であることはいうまでもない。

しかしながら、式 (6) のような連立方程式が解析的に解けるのは、ごく限られた場合であって、一般には解析解が求まらない場合が多い。このような場合には数値計算によって連立方程式の解を探索して行くことになる。

数値計算による解の探索の基本となるのは、探索の方向を定めることと定められた方向にどれだけ進めばよいかというステップの長さを決めることである。

現在の位置を $\mathbf{x}_0$ 、探索の方向を $\mathbf{d}$ とし、踏み出すステップの長さを s とする。このとき、 $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + s\mathbf{d}$ という直線上で、関数 $f(\mathbf{x})$ が最小になるステップの長さ s を求める必要がある。

ここで、関数 $g(s)$ を式 (7) のように定義する。

$$g(s) = f(\mathbf{x}) \quad (7)$$

ただし、 $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + s\mathbf{d}$ であり、 $\mathbf{d} = (d_1, d_2, \dots, d_n)^T$ である。

すると、問題は式 (7) の一変数関数 $g(s)$ の最小値を求めることになるが、式 (7) を s で微分すると

$$g'(s) = \sum_{i=1}^n (\partial f / \partial x_i) (\partial x_i / \partial s) \quad (8)$$

となり、さらに $s=0$ とおくと

$$\mathbf{g}'(0) = \mathbf{f}_x(\mathbf{x}_0) \mathbf{d} \quad (9)$$

となる。ただし、 $\mathbf{f}_x = \partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{x} = [\partial f / \partial x_1, \partial f / \partial x_2, \dots, \partial f / \partial x_n]$ である。

探索方向 $\mathbf{d}$ は現在の位置から $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ が減少する方向に選ぶ必要があるので、式 (7) から $\mathbf{g}'(0) < 0$ が成り立っていないといけない。これを満足させるためには、式 (9) から $\mathbf{d}$ はつぎの式 (10) のようにとればよい。

$$\mathbf{d} = -\mathbf{f}_x^T(\mathbf{x}_0) \quad (10)$$

このようにして、 $\mathbf{d}$ が決まると式 (7) から $\mathbf{g}(s)$ を最小にする s が計算でき、 $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + s\mathbf{d}$ から $\mathbf{x}$ が決まる。つぎに $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}$ とおいてくりかえし計算を行ない $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ が最小値に収束したときの $\mathbf{x}$ を求めればよいわけである。評価関数 J が最小値をとる位置がこの $\mathbf{x}$ である。

F_0 値が最小となる位置を求めるときは、評価関数 J は F_0 値となり、 $\mathbf{x}$ は 3 次元空間の位置を表す。

3. 関数 F_0 の勾配と計算アルゴリズム

3.1 円筒容器詰伝導食品（缶詰食品）の場合の関数 F_0 の勾配

連立方程式 (式 (6)) の数値解を求めるためには関数 F_0 の勾配が必要である。

円筒容器の中心を原点とし、無次元座標 $R=r/a$, $Z=z/L$ を導入すれば円筒容器詰伝導食品の場合の $\partial F_0 / \partial R$, $\partial F_0 / \partial Z$ は式 (4) からつぎのように計算される。

$$\partial F_0 / \partial R = \int_0^{t_f} \exp \{ (\theta - \theta_r) / (z_r / \ln 10) \} \{ 1 / (z_r / \ln 10) \} (\partial \theta / \partial R) dt \quad (11)$$

$$\partial F_0 / \partial Z = \int_0^{t_f} \exp \{ (\theta - \theta_r) / (z_r / \ln 10) \} \{ 1 / (z_r / \ln 10) \} (\partial \theta / \partial Z) dt \quad (12)$$

ここで、式 (11), (12) の $\partial \theta / \partial R$, $\partial \theta / \partial Z$ を計算するためには、容器の中の食品の温度が必要である。円筒容器詰伝導食品（缶詰食品）の場合、レトルト殺菌 ($CUT=0$, $CDT=0$, ビオ定数 = (熱伝達率・距離) / 熱伝導率 = ∞ の場合) の加熱時の食品の温度は式 (13) で表され、冷却時の食品の温度は式 (14) で表される⁴⁾。ここで、ビオ定数 = ∞ というのは、容器内の食品の表面温度は加熱中はレトルト温度に、冷却中は冷却温度になるという意味である。

$$\theta = \theta_R - (\theta_R - \theta_0) \left[\sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n t) C_n \right] \left[\sum_{m=1}^{\infty} A_m \exp(-B_m t) C_m \right] \quad (0 \leq t \leq t_h) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \theta = & \theta_C - (\theta_C - \theta_R) \left[\sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp \{ -B_n (t - t_h) \} C_n \right] \left[\sum_{m=1}^{\infty} A_m \exp \{ -B_m (t - t_h) \} C_m \right] \\ & - (\theta_R - \theta_0) \left[\sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n t) C_n \right] \left[\sum_{m=1}^{\infty} A_m \exp(-B_m t) C_m \right] \quad (t_h \leq t \leq t_f) \end{aligned} \quad (14)$$

すると、式 (13), (14) を偏微分して $\partial \theta / \partial R$, $\partial \theta / \partial Z$ はつぎのように求めることができる。

$$\partial \theta / \partial R = (\theta_R - \theta_0) \left[\sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n t) J_1(R_n R) R_n \right] \left[\sum_{m=1}^{\infty} A_m \exp(-B_m t) C_m \right] \quad (0 \leq t \leq t_h) \quad (15)$$

$$\partial \theta / \partial Z = (\theta_R - \theta_0) \left[\sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n t) C_n \right] \left[\sum_{m=1}^{\infty} A_m \exp(-B_m t) \sin(\lambda_m Z) \lambda_m \right] \quad (0 \leq t \leq t_h) \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \partial\theta/\partial R = & (\theta_C - \theta_R) \left[\sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp \{ -B_n(t-t_h) \} J_1(R_n R) R_n \right] \left[\sum_{m=1}^{\infty} A_m \exp \{ -B_m(t-t_h) \} C_m \right] \\ & + (\theta_R - \theta_0) \left[\sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n t) J_1(R_n R) R_n \right] \left[\sum_{m=1}^{\infty} A_m \exp(-B_m t) C_m \right] \quad (t_h \leq t \leq t_f) \quad (17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \partial\theta/\partial Z = & (\theta_C - \theta_R) \left[\sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp \{ -B_n(t-t_h) \} C_n \right] \left[\sum_{m=1}^{\infty} A_m \exp \{ -B_m(t-t_h) \} \sin(\lambda_m Z) \lambda_m \right] \\ & + (\theta_R - \theta_0) \left[\sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n t) C_n \right] \left[\sum_{m=1}^{\infty} A_m \exp(-B_m t) \sin(\lambda_m Z) \lambda_m \right] \quad (t_h \leq t \leq t_f) \quad (18) \end{aligned}$$

求めた $\partial\theta/\partial R$, $\partial\theta/\partial Z$ を, 式 (11), (12) に代入すれば関数 F_0 の勾配を計算することができる。

3.2 角型容器詰伝導食品の場合の関数 F_0 の勾配

角型容器の中心を原点とし, 無次元座標を $X=x/b$, $Y=y/c$, $Z=z/L$ とすれば角型容器詰伝導食品の場合の $\partial F_0/\partial X$, $\partial F_0/\partial Y$, $\partial F_0/\partial Z$ はつぎのように計算される。

$$\partial F_0/\partial X = \int_0^{t_f} \exp \{ (\theta - \theta_r)/(z_r/\ln 10) \} \{ 1/(z_r/\ln 10) \} (\partial\theta/\partial X) dt \quad (19)$$

$$\partial F_0/\partial Y = \int_0^{t_f} \exp \{ (\theta - \theta_r)/(z_r/\ln 10) \} \{ 1/(z_r/\ln 10) \} (\partial\theta/\partial Y) dt \quad (20)$$

$$\partial F_0/\partial Z = \int_0^{t_f} \exp \{ (\theta - \theta_r)/(z_r/\ln 10) \} \{ 1/(z_r/\ln 10) \} (\partial\theta/\partial Z) dt \quad (21)$$

ここで, 式 (19), (20), (21) の $\partial F_0/\partial X$, $\partial F_0/\partial Y$, $\partial F_0/\partial Z$ を計算するためには, 容器の中の食品の温度が必要である。角型容器詰伝導食品の場合, レトルト殺菌 ($CUT=0$, $CDT=0$, ビオ定数 $=\infty$ の場合) の加熱時の食品の温度は式 (22) で表され, 冷却時の食品の温度は式 (23) で表される⁴⁾。

$$\begin{aligned} \theta = & \theta_R - (\theta_R - \theta_0) \left[\sum_{i=1}^{\infty} A_i \exp(-B_i t) C_i \right] \left[\sum_{j=1}^{\infty} A_j \exp(-B_j t) C_j \right] \left[\sum_{k=1}^{\infty} A_k \exp(-B_k t) C_k \right] \\ & (0 \leq t \leq t_h) \quad (22) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta = & \theta_C \\ & - (\theta_C - \theta_R) \left[\sum_{i=1}^{\infty} A_i \exp \{ -B_i(t-t_h) \} C_i \right] \left[\sum_{j=1}^{\infty} A_j \exp \{ -B_j(t-t_h) \} C_j \right] \left[\sum_{k=1}^{\infty} A_k \exp \{ -B_k(t-t_h) \} C_k \right] \\ & - (\theta_R - \theta_0) \left[\sum_{i=1}^{\infty} A_i \exp(-B_i t) C_i \right] \left[\sum_{j=1}^{\infty} A_j \exp(-B_j t) C_j \right] \left[\sum_{k=1}^{\infty} A_k \exp(-B_k t) C_k \right] \quad (t_h \leq t \leq t_f) \quad (23) \end{aligned}$$

すると, 式 (22), (23) より $\partial\theta/\partial X$ はつぎのように求めることができる。

$$\begin{aligned} \partial\theta/\partial X = & (\theta_R - \theta_0) \left[\sum_{i=1}^{\infty} A_i \exp(-B_i t) \sin(\lambda_i Z) \lambda_i \right] \left[\sum_{j=1}^{\infty} A_j \exp(-B_j t) C_j \right] \left[\sum_{k=1}^{\infty} A_k \exp(-B_k t) C_k \right] \\ & (0 \leq t \leq t_h) \quad (24) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \partial\theta/\partial X = & (\theta_C - \theta_R) \left[\sum_{i=1}^{\infty} A_i \exp \{ -B_i(t-t_h) \} \sin(\lambda_i X) \lambda_i \right] \left[\sum_{j=1}^{\infty} A_j \exp \{ -B_j(t-t_h) \} C_j \right] \left[\sum_{k=1}^{\infty} A_k \exp \{ -B_k(t-t_h) \} C_k \right] \\ & + (\theta_R - \theta_0) \left[\sum_{i=1}^{\infty} A_i \exp(-B_i t) \sin(\lambda_i X) \lambda_i \right] \left[\sum_{j=1}^{\infty} A_j \exp(-B_j t) C_j \right] \left[\sum_{k=1}^{\infty} A_k \exp(-B_k t) C_k \right] \\ & (t_h \leq t \leq t_f) \quad (25) \end{aligned}$$

以上のように、 $\partial\theta/\partial X$ が求まるので、これらの値を式(19)に代入すれば、関数 F_0 の勾配 $\partial F_0/\partial X$ を計算することができる。

$\partial\theta/\partial Y$ と $\partial\theta/\partial Z$ も式(24)、(25)と同様に計算できるので、これらの値を式(20)、(21)に代入すれば、関数 F_0 のY方向の勾配 $\partial F_0/\partial Y$ とZ方向の勾配 $\partial F_0/\partial Z$ を計算することができる。

3.3 計算アルゴリズム

3.1、3.2で求めた $\partial F_0/\partial R$ 、 $\partial F_0/\partial X$ などは、関数 F_0 の現在位置での最も勾配の急な方向であり、この方向をとる探索法が最急降下法とよばれている方法である。しかし、実用アルゴリズムとしてはかならずしも有効でない場合もあるということから、この方法をベースにした種々の方法が考案されている。各種の探索方法のうち、ここでは最も一般的な共役勾配法(Fletcher-Reeves法)を用いることにする。また、探索方向に踏み出すステップの長さは直線探索法の一方法である放物線近似法を用いた。

いま、関数 F_0 は複数個の変数 $\mathbf{x}$ の関数 $f(\mathbf{x})$ とすると共役勾配法のアルゴリズム³⁾はつぎのようになる。

$J=F_0=f(\mathbf{x})$: 評価関数

$\mathbf{x}$: ベクトル変数

- ① 変数 $\mathbf{x}$ の初期点 $\mathbf{x}_0$ をあたえる。 $k=0$ とおく。
- ② 探索方向 $\mathbf{d}_0 = -\mathbf{f}'_x(\mathbf{x}_0)$ を計算する。 $\mathbf{f}_x = \partial f / \partial \mathbf{x}$
- ③ $f(\mathbf{x}_k + s\mathbf{d}_k)$ を最小にする s を計算し、 $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + s\mathbf{d}_k$ を計算する。
- ④ $f(\mathbf{x}_k)$ と $f(\mathbf{x}_{k+1})$ とで収束判定し、収束していれば終了する。
- ⑤ $\beta_k = \{ \int_0^{t_f} \mathbf{f}_x(\mathbf{x}_{k+1}) \mathbf{f}_x^T(\mathbf{x}_{k+1}) dt \} / \{ \int_0^{t_f} \mathbf{f}_x(\mathbf{x}_k) \mathbf{f}_x^T(\mathbf{x}_k) dt \}$ を計算する。
ただし、 $\mathbf{f}_x(\mathbf{x}_k)$: 行ベクトル、 $\mathbf{f}_x(\mathbf{x}_k) \mathbf{f}_x^T(\mathbf{x}_k)$: ベクトルの内積
- ⑥ $\mathbf{d}_{k+1} = \mathbf{f}'_x(\mathbf{x}_{k+1}) + \beta_k \mathbf{d}_k$ $k=k+1$ において③にもどる。

4. 結果および考察

4.1 計算の諸条件

実際の計算は、円筒容器詰伝導食品(缶詰食品)と角型容器詰伝導食品について行なった。円筒容器の直径は $2a$ とし、 $2a=100$ [mm] とした。全高を $2L$ として、 L/a (=高さ/直径)を0.25か2.0まで変化させた。

角型容器の底辺は正方形とし、二辺の長さは $2b$ 、 $2c(=2b)$ として、 $2b=2c=100$ [mm] とした。全高を $2L$ として $L/b=L/c$ (=高さ/底の正方形の辺の長さ)を0.25から2.0まで変化させた。また、レトルト殺菌の加熱および冷却条件はつぎの通りである。ただし、容器の中心の F_0 値は、 $F_0=6$ [min] と設定した。

レトルト温度	: $\theta_R=121.1$ [°C] (=250 [°F])
冷却温度	: $\theta_C=25.0$ [°C]
食品の初期温度	: $\theta_0=71.1$ [°C] (=160 [°F])
食品の温度伝導率	: $\alpha=9.6$ [mm ² /min] ⁵⁾
z_r の値(z 値)	: $z_r=10$ [°C] (=18 [°F])
基準温度	: $\theta_r=121.1$ [°C] (=250 [°F])
容器の中心の F_0 値	: $F_0=6$ [min]

4.2 円筒容器詰伝導食品（缶詰食品）の F_0 値の最小点

円筒容器詰伝導食品（缶詰食品）の場合の計算結果を Table 1 に示す。Table 1 より、 L/a が 1 の場合の F_0 値の最小点は容器の中心（ $R=r/a=0$, $Z=z/L=0$ ）ではなく容器の中心面（ $Z=z/L=0$ ）の同心円の円周上にあることがわかる。また、 L/a が 1 より小さくなると容器は扁平になるが、 F_0 値の最小点は中心線（ $R=r/a=0$ ）上に移り、 L/a が 0.75 より小さくなってさらに扁平になると F_0 値の最小点は中心方向に移動するということがわかる。 $L/a=0.75$ のときは $Z=z/L \approx 0.297$ の点（Fig. 1）で $F_0 \approx 5.71$ であり、中心での F_0 値（ $F_0=6.0$ ）との差が一番大きくなる。

一方、 L/a が 1 を越えると容器は縦長になるが、 F_0 値の最小点は容器の中心面の同心円の円周上に移り、 L/a が 1.25 を越えてさらに縦長になると F_0 値の最小点は容器の中心方向に移動するということも Table 1 よりわかる。 $L/a=1.25$ の場合は、 $R=r/a \approx 0.189$ の点（Fig. 2）で $F_0 \approx 5.94$ （中心では $F_0=6.0$ ）である。

また、 F_0 値の最小点が中心線上から中心面の同心円の円周上に移るときの L/a の値はほぼ 0.94 であった。

4.3 角型容器詰伝導食品の F_0 値の最小点

角型容器詰伝導食品の場合の計算結果を Table 2 に示す。 $L/b (=L/c)$ が 1 の場合は正六面体

Table 1 Computer Estimation of positions showing minimum F_0 -value in cylindrical containers.

L/a	R	Z	F_0
0.25	0.1008560E-03	0.8144200E-01	0.5998779E+01
0.50	0.2228742E-04	0.2287025E+00	0.5870204E+01
0.75	0.3428814E-04	0.2971678E+00	0.5710826E+01
0.80	0.7818689E-04	0.2963707E+00	0.5767163E+01
0.90	0.1506373E-03	0.2383402E+00	0.5961987E+01
1.00	0.1651730E+00	0.8714237E-04	0.5978035E+01
1.25	0.1893494E+00	0.8541445E-04	0.5942745E+01
1.50	0.1604915E+00	0.4033705E-04	0.5967764E+01
1.75	0.1283772E+00	0.4914315E-04	0.5986468E+01
2.00	0.9939279E-01	0.8618769E-04	0.5995144E+01

L/a : 高さとの比

0.1008560E-03 = 0.1008560×10^{-3}

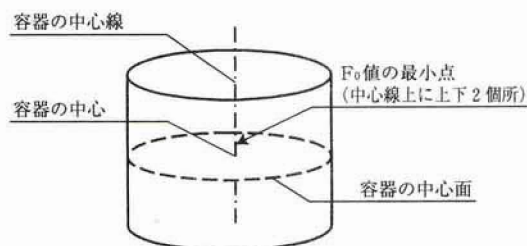


Fig. 1 Positions showing minimum F_0 -value in a cylindrical container ($L/a=0.75$) of heat conductive foods.

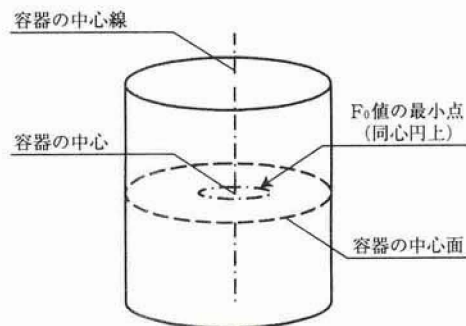


Fig. 2 Positions showing minimum F_0 -value in a cylindrical container ($L/a=1.25$) of heat conductive foods.

であるが、このとき、 F_0 値は正六面体の中心で最小値をとることが Table 2 よりわかる。また、 $L/b (=L/c)$ が1より小さくなると容器は扁平になるが、 F_0 値の最小点は中心線 ($X (=x/b) = 0$, $Y (=y/c) = 0$) 上に移り、 $L/b (=L/c)$ が0.75より小さくなってさらに扁平になると F_0 値の最小点は容器の中心方向に移動するということが Table 2 からわかる。 $L/b (=L/c) = 0.75$ の場合は、 $Z = z/L \approx 0.288$ の点 (Fig. 3) で $F_0 \approx 5.69$ となり、中心での F_0 値 ($F_0 = 6.0$) との差が一番大きい。

一方、 $L/b (=L/c)$ が1を越えると容器は縦長になるが、 F_0 値の最小点は容器の中心面の対角線 ($Y = \pm X$) 上に移り、 $L/b (=L/c)$ が1.25を越えてさらに縦長になると F_0 値の最小点は容器の中心方向に移動するということがわかった。 $L/b (=L/c) = 1.25$ の場合は $X = Y \approx \pm 0.131$ の点 (Fig. 4) で $F_0 \approx 5.95$ (中心では $F_0 = 6.0$) となる。

5. 結 論

- 1) 円筒容器詰伝導食品 (缶詰食品) と角型容器詰伝導食品の F_0 値の最小点を多変数関数の最小化の理論を応用して探索した。
- 2) 円筒容器詰伝導食品の F_0 値の最小点は、容器の高さと直径の比 (L/a) が約0.94を境にして、 $0.25 < L/a < 0.94$ の範囲では容器の中心から中心線上に、 $0.94 < L/a < 2.0$ の範囲では容器の

Table 2 Computer Estimation of positions showing minimum F_0 -value in rectangular containers having square bottoms.

L/b	X	Y	Z	F_0
0.25	0.9725668E-04	0.9725668E-04	0.6509621E-01	0.5999496E+01
0.50	0.6601123E-04	0.6601123E-04	0.2100368E+00	0.5904989E+01
0.75	0.7178708E-04	0.7178708E-04	0.2882587E+00	0.5687710E+01
0.80	0.1006647E-03	0.1006647E-03	0.2938071E+00	0.5701144E+01
0.90	0.1051788E-03	0.1051788E-03	0.2855470E+00	0.5825880E+01
1.00	0.9978128E-02	0.9978130E-02	0.9978135E-02	0.5999992E+01
1.25	0.1308432E+00	0.1308432E+00	0.9475415E-05	0.5952935E+01
1.50	0.1197464E+00	0.1197464E+00	0.8817589E-04	0.5962942E+01
1.75	0.9977617E-01	0.9977617E-01	0.1053240E-03	0.5981604E+01
2.00	0.7933247E-01	0.7933247E-01	0.1065786E-03	0.5992375E+01

$L/b (=L/c)$: 高さ と 底面の一辺との比

$0.9725668E-04 = 0.9725668 \times 10^{-4}$

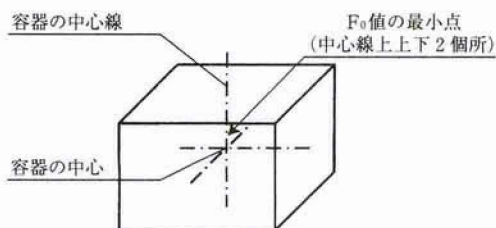


Fig. 3 Positions showing minimum F_0 -value in a rectangular container [$L/b (=L/c) = 0.75$] of heat conductive foods.

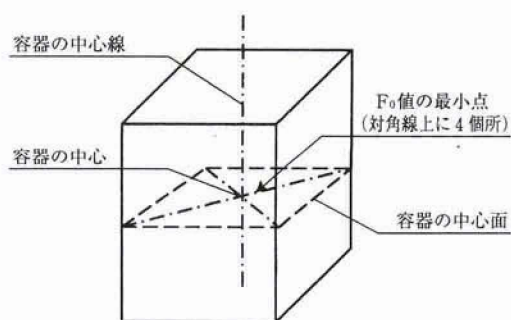


Fig. 4 Positions showing minimum F_0 -value in a rectangular container [$L/b (=L/c) = 1.25$] of heat conductive foods.

中心から中心面の同心円の円周上に移動することがわかった。また、 $L/a < 0.25$, $2.0 < L/a$ の範囲では F_0 値の最小点は容器の中心であることもわかった。

- 3) 角型容器(底は正方形) 詰伝導食品の F_0 値の最小点は、容器の高さと正方形の辺の長さとの比(L/b)が1.0を境にして、 $0.25 < L/b < 1.0$ の範囲では容器の中心から中心線の上に、 $1.0 < L/b < 2.0$ の範囲では容器の中心から中心面の対角線の上に移動することがわかった。また、 $L/b < 0.25$, $2.0 < L/b$ の範囲では F_0 値の最小点は容器の中心であることもわかった。

記 号

- a = 円筒容器の半径
- $A_i = 2 \sin \lambda_i / \lambda_i$
- $A_j = 2 \sin \lambda_j / \lambda_j$
- $A_k = 2 \sin \lambda_k / \lambda_k$
- $A_m = 2 \sin \lambda_m / \lambda_m$
- $A_n = 2 / \{R_n J_1(R_n)\}$
- b = 角型容器の底のc長方形の一辺の長さの1/2
- $B_i = \alpha (\lambda_i / b)^2$
- $B_j = \alpha (\lambda_j / c)^2$
- $B_k = \alpha (\lambda_k / L)^2$
- $B_m = \alpha (\lambda_m / L)^2$
- $B_n = \alpha (R_n / a)^2$
- c = 角型容器の底の正方形の一辺の長さの1/2
- CUT = カムアップタイム
- CDT = カムダウンタイム
- $C_i = \cos(\lambda_i X)$
- $C_j = \cos(\lambda_j Y)$
- $C_k = \cos(\lambda_k Z)$
- $C_m = \cos(\lambda_m Z)$
- $C_n = J_0(R_n R)$
- d = 探索方向
- dk = k番目の探索方向
- D = D値
- D_r = 基準温度 θ_r におけるD値
- f = 関数
- F_0 = 殺菌値 (sterilizing value)
- g = 関数
- i = 1, 2, 3, ... などの数
- j = 1, 2, 3, ... などの数
- J = 評価関数
- $J_0(u)$ = 第1種零次のベッセル関数
- $J_1(u)$ = 第1種1次のベッセル関数
- k = 1, 2, 3, ... などの数
- L = 容器の高さの1/2

- N = 時間 t での微生物の生残数
 N_0 = 初期の微生物の数
 m = 1, 2, 3, ... などの数
 n = 1, 2, 3, ... などの数
 r = 半径方向の座標
 R = r/a
 R_n = 第 1 種零次のベッセル関数 $J_0(u) = 0$ の第 n 次正根
 s = 探索方向のステップの長さ
 t = 時間
 T = 任意の時間
 t_h = レトルト殺菌における加熱時間
 t_c = レトルト殺菌における冷却時間
 t_f = レトルト殺菌における冷却終了時間 ($t_f = t_h + t_c$)
 t_F = レトルト殺菌の場合は容器の中心の F_0 値が設定値になる時間 (= 加熱時間 + 冷却時間)
 冷却時間: 中心温度が $70 [^{\circ}\text{C}]$ 以下になるまでの冷却時間
 x = 角型容器の中心より x 軸方向の座標
 $\mathbf{x}$ = ベクトル変数
 $\mathbf{x}_0$ = ベクトル変数 $\mathbf{x}$ の初期値
 x_i = 変数
 y = 角型容器の中心より y 軸方向の座標
 z = 容器の中心より z 軸 (容器の中心線) 方向の座標
 z_r = z 値
 X = x/b
 Y = y/c
 Z = z/L
 α = 温度伝導率 = 熱伝導率 / (比熱 · 比重)
 β_k = 勾配の修正係数
 θ = 温度
 θ_0 = 初期温度
 θ_R = レトルト温度
 θ_C = 冷却温度
 θ_r = 基準温度
 λ_i = $(2i-1)\pi/2$
 λ_j = $(2j-1)\pi/2$
 λ_k = $(2k-1)\pi/2$
 λ_m = $(2m-1)\pi/2$

参 考 文 献

- 1) A. A. Teixeira, et al. : *Food Technol.*, **23**, 352 (1969).
- 2) A. A. Teixeira, et al. : *Food Technol.*, **23**, 845 (1969).
- 3) 加納秀明: システムの最適理論と最適化, コロナ社, 53 (1990).
- 4) 川下研介: 熱伝導論, 河出書房, **254**, 366 (1941).
- 5) T. Ohlsson : *J. Food Sci.*, **45**, 848 (1980).