小粒子入り液体缶詰の加熱殺菌時間の推算

王 奇志*・半澤 保*・酒井 昇*

Estimating Heating Time for Sterilizing Process in a Canned Liquid Foods with Particles

Qi-Zhi WANG*, Tamotu HANZAWA* and Noboru SAKAI*

* Department of Food Science and Technology, Tokyo University of Fisheries,
4-5-7, Kohnan, Minato-ku, Tokyo 108-0075

The slowest heating point and the time required up to setting temperature for sterilizing process in a canned liquid foods with particles, which were a important guide for sterilizing operation of canned foods, were calculated numerically by fundamental equations under the assumption of imaginary fluid with the physical properties of the semblance. To check these calculated results, the temperature distributions in the can and the time required for sterilization were measured experimentally under the same operating conditions as those of theoretical analysis. The calculated results agreed closely with the experimental ones. The position characteristics of the slowest heating point and the required time were showed by the present numerical analysis. Furthermore, the correlative equations were obtained with various operating conditions.

(Received May 29, 1998 ; Accepted Aug. 4, 1998)

近年、缶詰製造技術の発達に伴い、多種多様な固液混合充填物のものが製造されている。これら缶詰類の加熱殺菌において、食品の栄養損失、および色調、味覚、香り等の感覚的要素の損失への配慮から迅速な加熱、冷却の操作が望まれている。しかしこれら特殊な缶詰の加熱殺菌における殺菌時間に対する研究は少なく、特に系内充填物に対する基礎式の数値解析による検討はあまりなされていないようである。

固形物入りの液体缶詰で、混合粒子の大きさが比較的小さい場合には、加熱時系内に生じる自然対流により熱移動が行われ、固体缶詰より遙に複雑である。そこで本研究では、この種の缶詰内の固液混合物を一つの仮想流体と考え、固液混合物の見かけ物性値を用いて、基礎式の数値解析を行い、系内冷点における加熱殺菌設定温度への経過時間の検討を種々の操作条件のもとで行った。また、本数値解析の妥当性の検証のため、実験的な検討も行った。

基礎式および数値計算法

Fig. 1 に示すような円筒型密閉系内において、缶詰内のヘッドスペースを想定して、上面のみ断熱面であるような、二次元密閉系内の非定常自然対流熱伝達現象を考える。浮力項以外に物性定数の温度依存性を無視すると、基礎式および境界条件として次式を得る^{1)~3)}。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (ru)}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial \theta} + u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial p}{\partial r} \\ = v_e \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru) \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial \theta} + u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial p}{\partial z} \\ = v_e \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + g\beta (t - t_c) \end{aligned} \quad (3)$$

* 東京水産大学食品生産学科 (〒108-0075 東京都港区港南 4-5-7)

Fig. 1 Coordinate system for a canned food

$$\frac{\partial t}{\partial \theta} + u \frac{\partial t}{\partial r} + v \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\lambda_e}{\rho_e C_{pe}} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right] \quad (4)$$

初期条件

$$\theta = 0, \begin{cases} 0 \leq r \leq r_w \\ 0 \leq z \leq H_d \end{cases}; u = v = 0, t = t_0 \quad (5)$$

境界条件

$$\theta > 0, \begin{cases} r = 0, 0 \leq z \leq H_d; u = \frac{\partial v}{\partial r} = \frac{\partial t}{\partial r} = 0 \\ r = r_w, 0 \leq z \leq H_d; u = v = 0, t = t_H \\ 0 \leq r \leq r_w, z = 0; u = v = 0, t = t_H \\ 0 \leq r \leq r_w, z = H_d; \frac{\partial u}{\partial z} = v = 0, \frac{\partial t}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

ここで、Eqs. (1)~(4) 中の物性値は固液混合物の見かけの物性値で、密度 ρ_e と粘度 μ_e は実測により、そして比熱 C_{pe} と熱伝導度 λ_e は Eqs. (7)⁽⁴⁾ (8)⁽⁵⁾ によりそれぞれ求めた。

$$C_{pe} = \frac{m_s}{m} C_{ps} + \frac{m_l}{m} C_{pl} \quad (7)$$

$$\lambda_e = \lambda_l [1 - N^2 (1 - \lambda_s / \lambda_l)] \quad (8)$$

ここで、 m は質量、 N は固形物の体積占有率である。

Eqs. (1)~(6) は無次元化を行い、流れ関数 (Stream function) ϕ 、渦度 (Vorticity) ξ を導入して整理した後差分法して、逐次近似代入法により各時間における数値計算を行った。計算条件は $r_w/H_d = 0.25 \sim 1.12$, $P_r = 2.89 \sim 5.6$, $G_r = 0.0 \sim 6.0 \times 10^8$, $t = 25.0^\circ\text{C} \sim 115.0^\circ\text{C}$ である。

実験装置および試料

基礎式による数値計算結果の妥当性検証のために、計算と同様の系における実験を行った。Fig. 2 に実験装置の概略を示す。使用した缶詰容器は、内径 5.0 cm ϕ 、内部高さ 9.0 cm (200 グラム缶) の亜鉛メッキ処理の鉄製缶である。缶内に試料を挿入し、缶内温度測定点の各所に

Fig. 2 Experimental apparatus

Table 1 Physical properties

	Water with 20% fibre	Water with 20% particle
Viscosity ($\times 10^3 \text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s})$)	35.1	8.63
Density (g/cm^3)	0.991	0.998
Heat capacity ($\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})$)		4.145
Thermal conductivity ($\times 10^3 \text{J}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{K})$)		6.507

熱電対の先端をセットした。リード線は缶の側壁から外に引出し、接着剤で密封して、68 cm Hg の真空中で巻締めた。

試料は市販の人参を包丁で細かく切った粒子、および人参をすり下ろした繊維を水と混合したものを使用した。試料の見かけの物性値の測定結果と計算結果を Table 1 に示す。

実験方法としては、室温中に長時間放置して缶内を一定温度にした缶詰モデルを、恒温水槽 ($95^\circ\text{C} \sim 115^\circ\text{C}$) 中に浸し、時間の経過に対する缶内温度を求め、非定常での系内温度分布を測定した。

計算結果および実験結果との比較

1. 流線分布と温度分布

得られた結果の一部を以下に示す。

Figs. 3~4 は一例として $r_w/H_d = 0.294$ ($H_d = 8.5 \text{ cm}$) の系において、人参粒子 ($d = 2.5 \text{ mm}$) 20% を混合した溶液で、 95°C 加熱温度における、操作開始後 30 秒経過した時点での、系内流線分布と温度分布の計算結果を示す。図の横軸は系の半径方向無次元距離 R を、縦軸に垂直方向無次元距離 Z を示す。

Fig. 3 より、30 秒の経過時間における系内流体は、外壁上を上昇し、系中央部を下降する流れと、系中央を上

Fig. 3 Streamline and temperature distribution in the case of $\theta=30$ s for 20% carrot particle ($r_w=2.5$ cm, $H_d=8.5$ cm)

Fig. 4 Streamline and temperature distribution in the case of $\theta=500$ s for 20% carrot particle ($r_w=2.5$ cm, $H_d=8.5$ cm)

昇する別の弱い循環流があることがわかる。温度分布も流れに沿った方向に伸びていることが分かる。

Fig. 4 は Fig. 3 と同じ系、同じ操作条件のもとで、加熱開始後 500 秒の流線分布と温度分布を示す。図よりこの時点では系内には 1 つの循環流がゆっくり動いており、系内温度も大略同一になってきていることが分かる。また、この時期冷点位置は系中央下部に存在することがはっきり分かる。

Fig. 5 は前図と同じ系、同じ操作条件において、系内 3 点の位置における温度の経時変化の計算値と実験値の比較である。図は横軸に加熱時間を縦軸に温度をとり、実線が計算結果を、プロットが実験値を示す。図から、計算値と実験値との比較は大略良好な一致を示すと思われる。このような計算値と実験値の一致は人参繊維の試料についても大略同様に見られた。

同様の解析から、粒子の場合は、粒子径 5.0 mm 以下で、混合濃度 20% まで、また、人参繊維の場合は、混合

Fig. 5 Comparison of calculated temperature distributions with experimental ones at the three points with elapsed time for 20% carrot particle ($d=2.5$ mm, $r_w=2.5$ cm, $H_d=8.5$ cm)

Fig. 6 Position of the slowest heating point in different size of can

濃度 30% 以下で、系内充填物の温度分布の経時変化は、本数値解析により大略予測が可能であることがわかった。

2. 冷点位置

缶詰内の温度分布は加熱初期の数分間大きく変化し、それに伴い冷点の位置が移動し、やがて系の中心軸の適当な場所に落ち着く。こうして主に系の形状によって中心軸上に最終の冷点位置が定まる。Fig. 6 にその結果を示す。図の横軸は缶の縦横比 r_w/H_d を、縦軸は缶の軸方向無次元冷点位置 C_c を示す、また、プロットが種々操作条件を変えて行った計算から得られた値を示し、実線は最小二乗法から求めた回帰直線を示す。なお、 C_c は缶の幾何学的中心位置から離れ、 r_w/H_d の 0.616 乗に比例することが分かる。本計算の操作条件の範囲においては次式を得た。

$$C_c = 0.384 (r_w/H_d)^{0.616} \quad (11)$$

ここで、Eq. 11 の適用範囲は $H_d = 4.8 \sim 15.9$, $r_w/H_d = 0.13 \sim 1.5$, $t_h = 90 \sim 100^\circ\text{C}$ である。

設定温度への所要時間の推算

Fig. 7 は前項と同様の系に置いて、人参繊維の混合流体の系内冷点および幾何学中心点における、加熱段階の殺菌値の計算結果を示す。殺菌値を計算する際の参照温度は設定温度 t_H (ここでは 95°C) とし、 Z 値は 10 とした。温度 t が $t_H \times 0.1$ に到達する時間を設定温度到達時間と考える。図より、幾何学的中心点が設定温度に到達する時間まで、冷点位置の総合殺菌値 (曲線に囲まれた面積) は、幾何学的中心点の総合殺菌値より約 35% も不足することが分かる。以上のことから、缶詰の加熱殺菌における設定温度への到達所要時間に対して、食品の安全面から冷点における所要時間で整理を行った。

Fig. 7 Comparison for a heating time of sterilisatrice value of the slowest heating point and geometrical central point for 10% carrot fibre can ($r_w = 2.5$ cm, $H_d = 8.5$ cm)

この所要時間に影響を及ぼす因子として、混合流体の見かけ物性値、缶の形と大きさ、加熱温度などが考えられる。見かけ物性値としては、温度への依存性を考慮して混合流体の物性の比、 (μ_e/μ_i) , (α_e/α_i) をとり、また、缶の形状と大きさとしては缶の縦横比 (r_w/H_d) と缶容積 V をとった。さらに加熱温度 t_H を含めた各項について、所要時間 θ_r に対する全計算値をまとめた。

Fig. 8 は缶容積 V をパラメータとして、 θ_r と (r_w/H_d) との関係を示すが、各直線の傾斜の平均をとることにより $\theta_r \propto (r_w/H_d)^{-0.19}$ を得た。また、 θ_r と (μ_e/μ_i) , θ_r と (α_e/α_i) との関係について示したのが Fig. 9 と Fig. 10 であり、各々直線の傾斜をとることにより $\theta_r \propto (\mu_e/\mu_i)^{0.31}$, $\theta_r \propto (\alpha_e/\alpha_i)^{-0.49}$ を得た。さらに、 θ_r と V との関係、および θ_r と t_H との関係も同様に求めて求めた結果、 $\theta_r \propto V^{0.25}$ および $\theta_r \propto t_H^{0.37}$ を得た。

以上の結果に基づいて、全計算値について $\theta_r t_H^{-0.37} (r_w/H_d)^{0.19} (\mu_e/\mu_i)^{-0.31} (\alpha_e/\alpha_i)^{0.49}$ と容積 V との関係プロットしたのが Fig. 11 である。結局この図によって、

Fig. 8 Correlation for a heating time of the slowest heating points to sterilizing temperature with can size (r_w/H_d)

Fig. 9 Correlation for a heating time of the slowest heating points to sterilizing temperature with the ratio of effective viscosity and liquid ones (μ_e/μ_l)

Fig. 10 Correlation for a heating time of the slowest heating points to sterilizing temperature with the ratio of effective thermal diffusivity and liquid ones (μ_e/μ_l)

缶詰の殺菌設定温度への到達所要時間の推算に関して、次のような関係式を得た。

$$\theta_r = 17.7 V^{0.25} t_H^{0.37} (r_w/H_d)^{-0.19} (\mu_e/\mu_l)^{0.31} (\alpha_e/\alpha_l)^{-0.49} \quad (12)$$

また、Fig. 12 は Eq. (12) と実測値との比較を示す。図中、実線が Eq. (12) を、そして各プロットが種々操作条件における実測値を示すが、図より、両者の一致は良好と思われる。

なお、Eq. (12) の適応範囲は $V=190\sim 2980 \text{ cm}^3$, $t_H=80\sim 125^\circ\text{C}$, $(r_w/H_d)=0.3\sim 1.0$, $(\mu_e/\mu_l)=3.0\sim 9.0$, $(\alpha_e/\alpha_l)=0.5\sim 2.15$ である。

Fig. 11 Correlation for product of $\theta_r t_H^{-0.37} (r_w/H_d)^{0.19} (\mu_e/\mu_l)^{-0.31} (\alpha_e/\alpha_l)^{0.49}$ with can volume

Fig. 12 Comparison of calculated transient temperature for the equ. of $\theta_r=17.7$
 $V^{0.25} t_H^{0.37} (r_w/H_d)^{-0.19} (\mu_e/\mu_i)^{0.31} (\alpha_e/\alpha_i)^{-0.49}$ and experimental

結 言

小粒子入り固液混合缶詰の加熱殺菌工程における系の冷点位置，加熱殺菌設定温度に至る所要時間について，理論および実験による検討を行い，以下の結果を得た。

(1) 系内自然対流流線分布および温度分布について，基礎式を誘導し，固液混合物の見かけの物性値を使用して，非定常での数値解析により，種々の形状及び操作条件における，系内流線分布，温度分布及び冷点位置を得た。

(2) 冷点位置に対する種々の形状及び操作条件の影響について求め，通常便宜的に使用する系の幾何学的中心を冷点とすることに対して注意を喚起し，冷点位置を求める推算式を示した。

(3) 冷点の殺菌設定温度までの所要時間に対して，種々の形状及び操作条件の影響について数値解析により求め，関係式を得た。

(4) 本研究での数値解析の妥当性検証のため，同じ操作条件などによる実験を行い，両者の間に良好な一致を得た。

使 用 記 号

C_c =position of slowest heating point ($=z/H_d$) [—]
 C_p =heat capacity of constant pressure [J/(g·K)]
 Gr =Grashof number ($=g\beta H_d^3 (t_H-t_c)/\nu^2$) [—]
 d =particle size [cm]

g =gravitational acceleration [cm/s²]
 H_d =height of cylindrical enclosure [cm]
 h =heat transfer coefficient [W/(cm²·K)]
 m =mass of material [g]
 N =occupancy rate of solid volume [—]
 Pr =Prandtl number ($=C_p \cdot \mu/\lambda$) [—]
 p =pressure of fluid [g/cm²]
 R =dimensionless radial coordinate ($=r/H_d$) [—]
 r =radial distance [cm]
 r_w =inner radius of cylindrical enclosure [cm]
 T =dimensionless temperature [—]
 t =temperature [K]
 u =velocity in r-direction [cm/s]
 v =velocity in z-direction [cm/s]
 Z =dimensionless longitudinal coordinate ($=z/H_d$) [—]
 z =longitudinal distance [cm]
 α =thermal diffusivity [1/cm²]
 β =volumetric coefficient of expansion [K⁻¹]
 ζ =dimensionless vorticity [—]
 θ =time [s]
 θ_r =time required up to setting temperature [s]
 λ =thermal conductivity of fluid [W/(cm·K)]
 μ =viscosity of fluid [Pa·s]
 ν =kinematic viscosity of fluid ($=\mu/\rho$) [cm²/s]
 ρ =density of fluid [g/cm³]
 ϕ =dimensionless stream function [—]

< Subscript >

C=cold

e=equivalent

H=heating

l=liquid

S=solid

o=initial

文 献

- 1) DATTA, A.K. : Numerical modeling of natural convection and conduction heat transfer in canned foods with application to online process control. Ph. D. Dissertation, University of Florida, Gainesville. (1985).
- 2) DATTA, A.K. and A.A. TEIXEIRA : *Transactions*

of the ASME, **30**, 1542-1551 (1987).

- 3) HIDDINK, J. : Natural Convection Heating of Liquids, with Reference to Sterilization of Canned Food. Agricultural Research Reports #43839. Center for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen, Netherlands (1975).
- 4) SATO, K. : Assumed Method for Physical Properties of Materials, 172-174, Maruzen Press, Tokyo, Japan (1963).
- 5) KOPELMAN, I.J. : Transient heat transfer and thermal properties in food systems. Ph. D. thesis, Michigan State Univ., East Lansing (1966).

(平成 10 年 5 月 29 日受付, 平成 10 年 8 月 4 日受理)