固液混合缶詰内の液体の流れと温度分布

王 奇志*・酒井 昇*・三堀友雄*

Heat-induced Flow and Temperature Distribution in Canned Foods Containing Liquid and Particles

Qi-Zhi WANG*, Noboru SAKAI* and Tomoo MIHORI*

* *Department of Food Science and Technology, Tokyo University of Fisheries,
4-5-7, Kohnan, Minato-ku, Tokyo 108-8477*

Natural convection heat transfer was experimentally investigated in a cylindrical can packed with liquid and particles. White ceramic particles were used as a model tracer to observe the flow of the content easily. Flow visualization of the tracer and temperature measurement for this system were carried out to make clear the natural convection mechanism. According to the observation of natural convection, axisymmetric flow could be assumed; three-dimensional problem could be reduced to two dimensions. Darcy's number, which was calculated from the size of the can and the permeability of the porous medium, indicated that Darcy's law could be applicable to the flow analysis in this system. A mathematical model was developed for predicting flow patterns and temperature profiles during heating of canned foods containing liquid and particles. The calculated temperature profile agreed closely with the experimental one. (Received Sep. 13, 1999; Accepted Jan. 4, 2000)

近年、缶詰製造技術の発達に伴い、多種多様な固液混合物が充填された缶詰が製造されている。これらの缶詰類の加熱殺菌において、食品の栄養損失及び色調、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。

一般に缶詰を加熱殺菌する時、缶内冷点(The slowest heating point)位置の温度変化によって、加熱殺菌時間を決めている。従来殺菌時間を求めるために、大量の加熱実験を行い、冷点温度の経時変化を求めている。近年計算機の発達にともない、コンピューターシミュレーションによって、理論的に冷点温度の経時変化が求められるようになった¹⁾²⁾。また、固体を充填した缶詰殺菌の冷点位置は、充填容器の幾何的中心であり³⁾、液体缶詰の冷点位置は充填容器の幾何的中心よりやや下のほうに収斂している⁴⁾⁵⁾ことが説明されている。しかし、固液混合缶詰は固体や液体を単一に充填した缶詰よりも缶内の熱の伝わり方は複雑となる。

加熱時の系内に生じた自然対流を考慮して熱移動解析を行い、固液内容物は一つの懸濁液として取り扱えることを示した。

一方、粒子が缶詰容器に多く充填されている場合は、粒子は充填層あるいは多孔質層を形成し、液体は粒子間を流れる。この流れが熱伝達に大きく影響すると考えられる。しかし、缶詰内の粒子の間で起こる自然対流の様子や熱移動挙動に関してはほとんど研究されていないのが現状である。

そこで本研究では、最初に粒子を充填した固液混合缶詰の加熱殺菌の際に生じる自然対流の可視化及び温度分布の測定を行い、この系で生じた自然対流の機構について検討した。次いで、多孔質層内自然対流の理論解析モデルを確立し、加熱の際に生じる多孔質層内温度分布について検討した。

実験装置、試料及び方法

著者ら⁶⁾は、小粒子が入った固液混合缶詰について、

Fig. 1 に加熱実験装置の概略を示す。加熱装置として

* 東京水産大学食品生産学科 (〒108-8477 東京都港区港南 4-5-7)

Fig. 1 Experimental apparatus

は市販の恒温水槽（ヤマト科学(株)製 T205 型）を使用した。恒温温度精度は $\pm 0.2^\circ\text{C}$ である。

使用した缶詰容器は $D \times H = 8.4 \text{ cm} \times 8.0 \text{ cm}$ のガラス容器と $D \times H = 8.4 \text{ cm} \times 10.5 \text{ cm}$ のすずメッキ処理のブリキ缶である。缶内に粒子を充填した後、水を注入して密封したものを缶詰モデルとした。また、上部は断熱材で外部と断熱させた。缶内温度測定点に径 0.1 mm の熱電対をセットした。リード線は缶の側壁から外に引き出し、接着剤で密封した。温度を測定したポイントを Fig. 2 に示した。自然対流を阻害しないように、水平方向に 9 点を一回の実験で測定し、鉛直方向には四回の実験を行い、合計 36 点の測定を行った。

充填粒子として平均粒径 $d_p = 4.11 \text{ mm}$ 、と $d_p = 2.15 \text{ mm}$ のセラミックス球を用いた。想定した実際の缶詰は、グリーンピース（直径約 5.5 mm）、小豆（直径約 5 mm）などである。本実験では上記 2 種類の直径の粒子を用いた。また、流れの可視化実験を行う際に、トレーサー染料と識別しやすいように白色のセラミックス球を使用した。

実験方法としては、缶内を一定温度にした缶詰サンプルを恒温水槽（ $95 \pm 0.2^\circ\text{C}$ ）中に浸し、時間の経過に対して缶内温度分布を測定した。

また、容器内の自然対流の観察実験は以下のように行った。壁の薄いガラス容器に前述のセラミックス粒子と液体を投入し、トレーサーとして赤インクを注射針で容器底部に注入する。容器上部にわずかに Head space を残して断熱し、蓋で密封した。この容器を静かに恒温槽に浸し、自然対流により生じたトレーサーの流れをデジタルカメラで一定時間毎に撮影した。

各実験条件を Table 1 に示す。

Fig. 2 Temperature measured points in the can model

Table 1 Experimental Conditions

Case	Can	Inner diameter D [cm]	Inner height H [cm]	Particle diameter d_p [mm]
1	Glass vessel	8.40	8.00	4.11
2	Glass vessel	8.40	8.00	2.15
3	Tin can	8.40	10.50	4.11
4	Tin can	8.40	10.50	2.15

数 学 モ デ ル

缶内の粒子を多孔質層と考えると、中の空隙はその形や連結状態がさまざまな部分空隙から成り立っている。そのため、いろいろなモデルが考えられ、代表的なモデルとしては、Darcy の法則⁽⁷⁾⁽⁸⁾ に適用するモデルと、Brinkman の式⁽⁹⁾ に適用するモデルがある。ここでは以下のように Darcy の法則に従うとしてモデル化を行った。

1. 連続の式

多孔質層の微小要素中の流体に、物質保存則を適用すると、連続の式は次のように導かれる。

$$(\nabla \cdot \bar{v}) = 0 \quad (1)$$

ここで、 $\bar{v}$ は流体のみかけ速度である。

2. 運動方程式

固体部分が流体部分に及ぼす力を考慮すると、運動方程式は Brinkman の式⁽⁹⁾ によれば次式で与えられる。

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\rho}{\varepsilon^2} (\bar{v} \cdot \nabla) \bar{v} = -\nabla p + \rho g + \frac{\mu}{k} \bar{v} + \frac{\mu}{\varepsilon} \nabla^2 \bar{v} \quad (2)$$

上式の右辺の第3項は固体部分が流体部分に及ぼす力、即ち、流体が受けた固体があることによる抵抗力である。第4項は流体が隣接領域に流れを誘起する粘性剪断力を示す。流体の速度勾配が大きい場合は、この粘性剪断力の作用は無視できない。一方、流体の速度勾配が小さい場合は Darcy の法則 (2') に従う。

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\rho}{\varepsilon^2} (\bar{v} \cdot \nabla) \bar{v} = -\nabla p + \rho g + \frac{\mu}{k} \bar{v} \quad (2')$$

3. エネルギー式

エネルギー保存の法則は、

$$(\rho C_p)_m \frac{\partial t}{\partial t} + (\rho C_p)_l (\bar{v} \cdot \nabla) t = \lambda_m \nabla^2 t \quad (3)$$

ここで添字 m は固液混合物の値、添字 l は流体の値を示す。

式 (3) に関する固液混合のみかけ物性値は次式により求めた。

$$\text{みかけ比熱: } C_{pm} = \frac{(1-\varepsilon)C_{ps}\rho_s + \varepsilon C_{pl}\rho_l}{\rho_m} \quad (4)$$

$$\text{みかけ密度: } \rho_m = (1-\varepsilon)\rho_s + \varepsilon\rho_l \quad (5)$$

$$\text{有効熱伝導率: } \frac{\lambda_m}{\lambda_l} = \varepsilon + (1-\varepsilon)/[\phi + (2/3)(\lambda_l/\lambda_s)] \quad (6)$$

ここで、 ϕ は充填粒子の接触点近傍の流体薄膜を通したの伝熱を表す項であり、 λ_s/λ_l の関数として定まる値

で、次式により求められる⁽¹⁰⁾。

$$\begin{aligned} \phi &= \phi_2 + (\phi_1 - \phi_2)[(\varepsilon - 0.260)/0.216] \\ &\quad 0.260 \leq \varepsilon \leq 0.476 \\ \phi &= \phi_1 & \varepsilon \geq 0.476 \\ \phi &= \phi_2 & \varepsilon \leq 0.260 \end{aligned} \quad (7)$$

ただし、 ϕ_1 、 ϕ_2 は文献⁽¹⁰⁾ 中のグラフに与えられている値である。また、 ε は充填多孔質層の空隙率を示す。

式 (1)~(3) に示した連続の式、運動方程式及びエネルギー式は、結果のところで後述するように、二次元として取り扱うことが可能である。その場合の初期条件及び境界条件は次式で表される。

Initial condition

$$\theta = 0, u = v = 0, t = t_0 \quad \text{at } 0 \leq r \leq r_w : 0 \leq z \leq H \quad (8)$$

Boundary conditions

$$\begin{aligned} \theta &> 0 \\ u &= \frac{\partial v}{\partial r} = \frac{\partial t}{\partial r} = 0 \quad \text{at } r = 0, 0 \leq z \leq H \\ t &= t_h & \text{at } r = r_w, 0 \leq z \leq H \\ t &= t_w & \text{at } 0 \leq r \leq r_w, z = 0 \\ v &= \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial t}{\partial z} = 0 \quad \text{at } 0 \leq r \leq r_w, z = H \end{aligned} \quad (9)$$

結果及び考察

1. 流れの観察実験

Photo 1 は、ガラス製円筒型容器内の自然対流の様子を側面から撮った写真である。容器内には平均直径 $d_p = 4.11$ mm のセラミックス球と水が充填されている。また、赤い部分はトレーサーインクである。写真から、加熱初期において缶壁付近に沿って、底部から頂部への上昇流れがあることがわかる。また、上昇中のインクの幅はほぼ一定であり、軸方向の速度はあるが、円周方向の速度は見られなかった。Photo 2 は Photo 1 とほぼ同じ時間に、容器の上面から流れの様子を撮った写真である。Photo 2 の観察から、トレーサーの流れは頂部に廻ってきた際、扇状に中心軸に集中していることがわかる。またこの過程で、半径方向の速度以外に、円周方向の速度はほとんどないことが認められる。

Photo 1 の g, h は、底部側面に注入したトレーサーが、容器内を一周した後、再び缶壁に沿って上昇するときの写真である。トレーサーの幅は広がっており、中心軸付近を通過した後、底面中心より半径方向へ扇状に広がって流れたと考えられる。以上の観察結果から、粒子間の液体の流れは円筒型容器の軸に対して対称であり、大量の粒子が存在するにもかかわらず、流体の円周方向への攪拌効果は極めて少ないことがわかった。

Photo 3 は、平均直径 $d_p = 2.15$ mm のセラミックス球

Photo. 1 Flow visualization of the tracer in the cylindrical glass vessel with a porous medium (case 1).

Photo. 2 Flow visualization of the tracer in the cylindrical glass vessel at top surface with a porous medium (case 1).

Photo. 3 Flow visualization of the tracer in the cylindrical glass vessel with a porous medium (case 2).

の場合について同様に撮影した写真である。Photo 1 に示したのと同様にトレーサーの移動が観察され、2 mm 程度の粒子直径でも自然対流が起こることがわかる。しかし、トレーサーが一回循環するのに 400 秒かかっており、平均直径 $d_p = 4.11$ mm の場合の循環時間約 140 秒と比較すると、3 倍近くかかっていることになる。粒子の存在により多孔質層内の流体の流れる速度は自由空間を流れる速度より遅くなるが、粒子の平均直径が小さいほど、その効果は大きいと考えられる。

2. 流動特性

一般に、多孔質層内の流動特性はいくつかの流動特性

Table 2 Parameters of void fraction and permeability, and Darcy number

Case	Void fraction ε [—]	Permeability $k \times 10^{-4}$ [cm ²]	Darcy number $Da \times 10^{-4}$ [—]
1	0.393	4.514	0.256
2	0.400	2.548	0.144
3	0.374	3.658	0.207
4	0.377	1.979	0.112

値によって評価するのが便利である。これらの流動特性値はいずれも現象を記述するモデルによって定義される。多孔質層内の流れの代表的な特性値は、透過係数と Darcy 数である。

透過係数 k は Blake-Kozeny の半理論式¹¹⁾ で求められる。

$$k = \frac{d_p}{150} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \quad (10)$$

ここで、 ε は空隙率、 d_p は充填粒子直径である。空隙率は多孔質層内の空隙体積の全体積に対する比と定義される。この場合空隙率は、同じ粒子でも多孔質層を構成するごとに多少値が異なる。本実験では充填層の空隙率を、粒子の総重量及び粒子の密度を実測することにより求めた。

Darcy 数は次式により求められる。

$$Da = k/s^2 \quad (11)$$

ここで、 s は多孔質層の厚さである。

Table 1 に示した実験条件と式 (10) 及び式 (11) により求めた透過係数と Darcy 数の値を Table 2 示す。Table 2 によると、Case 1 と Case 2 は同じ容器であるが、充填粒子の違いによって、多孔質層の空隙率には僅かの差が

Fig. 3 Temperature distribution measured for case 3 at different heating times

(a) 30 sec, (b) 120 sec, (c) 180 sec and (d) 300 sec ($\diamond$: $z = 2.0$ cm, $\triangle$: $z = 4.0$ cm, $\circ$: $z = 6.0$ cm, $\square$: $z = 8.0$ cm)

ある。また、充填粒子径が大きい Case 1 の方が、透過係数及び Darcy 数は大きくなっている。透過係数が大きいと、写真観測のように流体の流れる速度は大きくなる。

多孔質層内の流れに対して空隙率が小さくなると、粘性剪断力による流れの影響は小さくなり、ついには粘性剪断力の作用は無視できる。この粘性剪断力が無視できるかどうかは Darcy 数 D_a の大きさにより判断できる。 $D_a < 10^{-4}$ であれば、多孔質層内の粘性剪断力は無視でき、数学モデルに Darcy の法則が適用される。 $D_a > 10^{-3}$ であれば、粘性剪断力の作用は無視できなくなり、数学

モデルとしては Brinkman 式がより適切な近似を与え、 $10^{-4} < D_a < 10^{-3}$ の範囲であれば、どちらの解析モデルを用いても良いとされている¹²⁾。

本実験の範囲内では Darcy 数は全て 10^{-4} より小さい値であり、流れは Darcy の法則が適用できる。

3. 温度分布及び流れ分布

Fig. 3 は金属缶の多孔質層内における温度分布の測定結果を示す。(a), (b), (c), (d) は各々高さ $H=2.0, 4.0, 6.0, 8.0$ cm における加熱時間 30 s, 120 s, 180 s, 300 s 後の半径方向温度分布である。図より、温度分布もすべて軸対称であり、軸方向と半径方向の 2 次元で解析できることわかる。

次に、Darcy の法則を用いて、有限差分法より缶内の温度分布及び流れ分布を理論的に解析した。解析条件は Case 3, 4 の実験条件と同様にした。解析に必要なみかけの物性値は式 (4)~(7) から求めたが、その値を Table 3 に示した。なお、缶詰容器上部には Head space が存在する。この空間は極めて薄い扁平空間であるので、この空間内で自然対流は起こりにくく、そのため上面からの伝熱は非常に遅いと考えられる。そこで、この部分を断熱面と仮定している。

Table 3 Apparent physical properties of sample

	Case 3	Case 4
Density ρ_m [g/cm ³]	2.670	2.750
Heat capacity C_{pm} [J/g °C]	0.833	0.781
Thermal conductivity λ_m [J/cms °C]	0.020	0.0186

Fig. 4 Comparison of calculated temperature distribution with experimental ones and calculated streamlines for the case 3 at heating time of 30 sec

Fig. 5 Comparison of temperature distribution at heating time of 300 sec

- (a) Calculated result with experimental one for the case 3.
- (b) Calculated result with experimental one for the case 4.
- (c) Calculated result of conduction heating.

Fig. 4 は加熱 30 s 後の系内の温度分布及び流線の計算結果を示す。図の横軸は半径方向の無次元距離を、縦軸は垂直方向の無次元距離を示す。温度分布の実線は数値解析の等温線を、プロットは温度の実測値である。計算値と実測値は大略良好に一致していることがわかる。また、流線は数値計算の結果を示すが、図から缶の表面で暖められた流体が自然対流により上昇し、中心部で沈み込む写真観測と一致した。

Fig. 5 に加熱 300 s 後の温度分布に関する結果を示す。(a), (b) はそれぞれ平均直径 $d_p = 4.11$ mm, $d_p = 2.15$ mm の場合の計算結果と実測値の比較である。図からこれらの缶詰の冷点は中心軸上の $H = 0.2$ 付近に存在することがわかる。また、この時間においても温度分布の実測値は計算値と良好に一致している。ただし、粒子直径の小さい缶のほうが温度上昇が遅くなっている。(c) は比較のために、対流は起こらない、即ち伝導のみが起こるとしたときの計算結果である。対流が起こるとした時よりも温度の上昇は遅く、温度分布も大きく異なった。これらの比較により、粒子が小さい場合でも温

度分布を予測するためには、自然対流を考慮した解析が必要であり、その解析には Darcy の法則が適用できることがわかる。

要 約

粒子を充填した固液混合缶詰を加熱したときに生じる缶内の自然対流及び温度分布について検討した。結果は以下の通りである。

1) セラミックス粒子を充填したガラス製容器に、加熱と同時にトレーサーを注入して中の流体の動きを観察した。トレーサーは壁面に沿って上昇した後、上面の中心軸周辺で沈み込み、自然体流が起こっていることが確認できた。この時の上昇流は軸方向に進み、円周方向への攪拌は少ないことがわかった。また、温度分布も測定したところ、軸対称性があることが確認できた。

2) 流動特性値として、透過係数と Darcy 数を求めた。粒子直径が大きいほうが透過係数は大きくなり、流れは速くなることを示すが、このことは観察結果と一致した。また、Darcy 数は $D_a < 10^{-1}$ の範囲にあり、Darcy

の法則が適用できることを確認した。

3) Darcy 流れを考慮した数学モデルを作成し、数値計算を行った。温度分布について計算結果と実測値と比較したところ良好に一致し、本数学モデルで粒子を充填した固液混合缶詰内の熱移動を解析できることがわかった。

記 号

D : Diameter of can	[m]
D_a : Darcy number	[—]
d_p : Diameter of sphere	[m]
g : Gravitational acceleration	[m/s ²]
H : Height of can	[m]
k : Permeability	[m ²]
p : Pressure	[Pa]
r : Radial distance	[m]
r_w : Inner radius of cylindrical enclosure	[m]
s : Thickness of space	[m]
t : Temperature	[°C]
u : Velocity in r-direction	[m/s]
v : Velocity in z-direction	[m/s]
z : Axial coordinate	[m]
θ : Time	[s]
λ : Thermal conductivity	[J/m · s · °C]
μ : Viscosity	[kg/m · s]
ρ : Density	[kg/m ³]
ϕ : Stream function	[—]
ε : Void fraction	[—]

Subscript

l : liquid
m : porous material
s : solid

文 献

- 1) NAVEH, D., PFLUG, I.J. and KOPELMAN, I.J.: *J. Food Sci.*, **49**, 461 (1984).
- 2) KUMAL, A., BHATTLACHRYA, M. and BLAYLOCK, J.: *J. Food Sci.*, **41**, 1403 (1990).
- 3) LEMOHARDT, G.F.: *J. Food Sci.*, **55**, 685 (1976).
- 4) DATTA, A.K. and TEIXEIRA, A.A.: *TRANSACTIONS of the ASAE*, **30**, 1542 (1987).
- 5) DATTA, A.K. and TEIXEIRA, A.A.: *J. Food Sci.*, **53**, 191 (1988).
- 6) 王 奇志・半澤 保・酒井 昇: 食科工, **45**, 676 (1998).
- 7) MUSKAT, M.: *Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media*, (McGraw-Hill) (1937).
- 8) CARMAN, P.C.: *Flow of Gases Through Porous Media* Butterworths (1956).
- 9) BRINKMAN, H.C.: *Appl. Sci. Res., Ser. A*, **1**, 27 (1927).
- 10) 化学工学協会: 化学工学便覧, (丸善), p. 289 (1978).
- 11) ECKERT, E.R.G. and DRAKE, R.M. *Heat and Mass Transfer*. (McGraw-Hill), p. 248 (1960).
- 12) 増岡隆士・河村 洋・岡本芳三: 日本機械学会論文集, **47**, 2157 (1981).

(平成 11 年 9 月 13 日受付, 平成 12 年 1 月 4 日受理)