

一般論文

# レトルト食品の加熱殺菌における レトルト温度プロフィールと品質の変化

寺島好己\* 野中保雄\*\*

## Retort Temperature Profile and Quality Changes during Thermal Processing of Conduction Heating Foods in Retortable Pouches

Yoshimi TERAJIMA\*, Yasuo NONAKA\*\*

Thermal processing is a most commonly used method for extending the shelf life of processed food. The heat sterilization of foods in cans or retortable pouches has been conducted conventionally by heating the food container in a pressurized steam or hot-water retort at predetermined temperature and time. Although this process will certainly make microorganism and spores inactive, it may cause destruction of essential nutrients that leads to deterioration of product quality.

Under these circumstances, the significant point is to find out the condition for the maximum nutrient or quality retention as well as the sufficient bacterial reduction required for stable and safe products.

For this purpose, it is vitally important to find out the optimum temperature profile and its effect on product quality.

With a view to predict the effect of various temperature profiles with an equal sterilizing value on quality retention, a model was constructed to simulate the thermal processing of foods packed in retortable pouches. Five types of retort temperature profiles were selected that are conventionally used in thermal processing of food industry.

This paper presents an optimum retort temperature profile obtained by computer simulation. It was found that a trapezoid-type temperature profile is the best one among these five types of profiles.

Keywords : Thermal processing, Sterilization, Optimization, Retort, Retort temperature, Retort temperature profile, Retortable pouch

食品のシェルフライフをのばす最も一般的な方法の一つとして加熱殺菌がある。缶詰食品やレトルト食品などの加熱殺菌は、一般には水蒸気あるいは熱水レトルトの中で加熱することによって行われているが、食品の温度を比較的短時間に所定の温度以上に上げ、微生物や酵素などを不活性化させることによって、シェルフライフをのばしているのである。

実際の加熱殺菌においては、微生物や酵素などは不活性化させているが、栄養素や色やテクスチャなどの品質面での劣化をまねくことがないとはいえない。したがって、缶詰食品やレトルト食品などの加熱殺菌においては、所定の殺菌効果を達成しながら、品質面での劣化をできるだけさけるようにすることが理想的である。これを実現するために、ここではレトルト温度プロフィールを取り上げどのような温度プロフィールがよいかについて検討した。本報では、1次元熱伝導をあてはめることができるレトルトパウチ詰食品のような偏平な被加熱体を対象とし、直接的な方法として、5種類のレトルト温度プロフィールを取り上げ、各温度プロフィールごとに最適な諸条件を数値計算により検討した。

その結果、評価関数として、C-value (Cook-value) の体積平均を対象にした場合も、表面のC-valueを対象にした場合も、5種類の温度プロフィールのなかでは台形型が最もよいことがわかった。

キーワード：加熱殺菌、殺菌、最適化、レトルト、レトルト温度、レトルトパウチ

\* 東洋製罐（株）技術本部（〒230 神奈川県横浜市鶴見区下野谷町1-8）：TOYO SEIKAN KAISHA, LTD., Technical Headquarters, Plastic Container Technical Department, 1-8, Shitanoya-cho, Tsurumi-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 230 \*\* 東京理科大学工学部経営工学科（〒162 東京都新宿区神楽坂1-3）：Department of Management Science, Faculty of Technology, Science University of Tokyo, 1-3, Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo, 162

## 1. 緒言

食品のシェルフライフをのばす最も一般的な方法の一つとして加熱殺菌がある。食品の温度を比較的短時間に所定の温度以上に上げ微生物や酵素などを不活性化させることによって、シェルフライフをのばしているのである。しかし、実際の加熱殺菌においては、微生物や酵素などは不活性化させているが、栄養素や色やテクスチャなどの品質面での劣化をまねくことがないとはいえない。

したがって、缶詰食品やレトルト食品などの加熱殺菌においては、所定の殺菌効果を達成しながら、品質面での劣化をできるだけさけるようにすることが理想的であり、缶詰食品やレトルトパウチ詰食品などを対象に、近年、種々の研究が行われている。

加熱殺菌の最適化の研究を最初に行ったのは Teixeira ら<sup>1)</sup> であり、Teixeira らは缶に詰められた伝導食品を一定のレトルト温度で殺菌したときの最適温度は、栄養素などの品質面の物性値である  $z$  値 (反応速度を10倍にするのに必要な温度変化) の影響を受けるが、一般に 120~140℃ の範囲にあることをコンピュータを用いて計算している。

Thijssen ら<sup>2)</sup> は、缶詰食品が一定のレトルト温度で加熱された場合、栄養素や品質が最もよく保存されるのは、加熱時間が Fourier 数に換算して 0.45~0.55 の範囲にあるときであることを広範囲な計算から求めている。

一方、レトルトパウチ詰食品については、Yamaguchi, Kishimoto<sup>3)</sup> は 12~15mm の厚みの伝導食品について、種々のレトルト温度で殺菌を行い、栄養素やテクスチャは 135℃ のときに最もよく保存されたと報告してい

る。

Ohlsson<sup>4)</sup> は C-value (Cook-value) を導入し、レトルトパウチ詰食品に1次元熱伝導をあてはめ、体積平均 (Volume average)、表面および厚みの中心に関する C-value ( $C_v$  値) を計算しこれらの  $C_v$  値が最小になるレトルト温度を求めている。

以上の研究は、一定のレトルト温度で缶詰食品やレトルトパウチ詰食品を殺菌した場合の最適温度に関する研究であるが、レトルト温度プロフィールはどのようなプロフィールが最適かについての報告は、現在までのところそう多くはない。

Teixeira ら<sup>5)</sup> は、缶に詰められた伝導食品に関して、缶詰内のある個数の芽胞をある一定の個数以下にするという殺菌条件下でチアミンの残存量を最大にするという観点から、一定温度型、三角型、多段型および sin 型の各プロフィールについて最適な条件を計算している。その結果、三角型と多段型が他のプロフィールよりわずかに良いという結果が得られている。Teixeira らの研究は、あらかじめ数種の温度プロフィールを与えて、各プロフィールごとに最適な条件を検討しているが、最適なプロフィールを直接探索した研究としては、Saguy ら<sup>6)</sup>、Nadkarni ら<sup>7)</sup> および Banga ら<sup>8)</sup> の研究がある。

これらの研究は、Teixeira らの研究結果と比較するという意味で、缶型、内容食品の温度伝導率、殺菌条件を Teixeira らの条件と同一とし、チアミンの残存量を最大にするプロフィールを検討している。

Saguy らは変分法の拡張であるポントリャギンの原理を応用して計算し、ほぼ三角型のプロフィールが良いと報告している。

Nadkarniらは同じくポントリャギンの原理を応用して、レトルト温度の上昇速度と下降速度を最適制御するという計算を行ない、ほぼ台形型のプロフィールを求めている。

Bangaらは、確率論的最適制御アルゴリズムを用いて最適プロフィールを検討しほぼ三角型のプロフィールが良いと報告している。

レトルト温度プロフィールの最適化の方法としては、種々のプロフィールを与えて最適なプロフィールに接近する方法と多変数関数の最小化法や変分法や動的計画法 (Dynamic programming) などを応用して最適なプロフィールを探索する方法が考えられる。

本報では、1次元熱伝導をあてはめることができるレトルトパウチ詰食品のような偏平な被加熱体を対象とし、5種類のプロフィールを取り上げ各プロフィールごとに最適な条件を検討した。被加熱体の厚み方向の中心におけるF値を一定にするという条件で、Browning reactionを対象にし、 $C_v$ 値の体積平均を最小にするという見方から、各プロフィールごとに最適な条件を求めた。

## 2. 微生物および栄養素などの破壊速度

微生物の死滅速度や栄養素などの劣化速度は一般に式(1)のように表される。

$$\frac{dx}{dt} = -(2.303/D)x \quad (1)$$

$$D = D_0 \exp\left(\frac{\theta_s - \theta}{z/2.303}\right) \quad (2)$$

ただし、

- x : 時間tでの微生物や栄養素などの濃度
- D : 濃度を1/10にするのに要する時間
- $D_0$  : 基準温度 $\theta_s$ において濃度を1/10にするのに要する時間

$\theta$  : 被加熱体の温度

z : Dを1/10にするのに要する温度差

添字1は微生物を、添字2は栄養素などを表わすとし、濃度の初期値を $x_{10}$ 、 $x_{20}$ 基準温度を $\theta_{1s}$ 、 $\theta_{2s}$ 、 $D_0$ を $D_{10}$ 、 $D_{20}$ で表わすことにして、式(1)を解くと、式(3)、(4)が得られる。

$$x_1 = x_{10} \exp\left\{-\frac{2.303}{D_{10}} \int_0^T \exp\left(\frac{\theta - \theta_{1s}}{z_1/2.303}\right) dt\right\} \quad (3)$$

$$x_2 = x_{20} \exp\left\{-\frac{2.303}{D_{20}} \int_0^T \exp\left(\frac{\theta - \theta_{2s}}{z_2/2.303}\right) dt\right\} \quad (4)$$

問題は、時間Tが0から冷却終了時間 $t_f$ まで経過したとき、ある一定量の微生物を破壊し栄養素などをできるだけ多く残存させるためにはどうしたらよいかということになる。

したがって、式(3)、(4)より、

$$F = \int_0^{t_f} \exp\left(\frac{\theta - \theta_{1s}}{z_1/2.303}\right) dt \quad (5)$$

を一定値とし、評価関数

$$J = \int_0^{t_f} \exp\left(\frac{\theta - \theta_{2s}}{z_2/2.303}\right) dt \quad (6)$$

を最小にする問題を解けばよいことになる。

$\theta$ もFも時間と場所の関数であるが、Fとしては、被加熱体のなかでの式(5)の最小値を対象にするとすれば、1次元熱伝導のときは式(5)の $\theta$ は中心温度にとればよいことになる。

評価関数Jが被加熱体の体積平均を対象にする場合、1次元熱伝導のときは、式(6)を式(7)のように拡張する。

$$J = \int_0^{t_f} \left\{ \frac{1}{2a} \int_{-a}^a \exp\left(\frac{\theta - \theta_{2s}}{z_2/2.303}\right) dx \right\} dt \quad (7)$$

ただし、a : 被加熱体の厚みの1/2

また、評価関数Jが被加熱体の表面を対象

にする場合は、式 (6) の  $\theta$  を表面温度にとればよい。なお、殺菌関係の分野では、 $F$  は  $F$  値と呼ばれており、評価関数  $J$  は  $C$ -value<sup>4)</sup> ( $C_v$  値) と呼ばれている。

### 3. 温度プロフィールと被加熱体の温度

#### 3.1 レトルト温度プロフィール

本報では、Fig. 1 に示した5種類のレトルト温度プロフィール、すなわち、1) 標準型

(プロフィール1)、2) 上昇傾斜型 (プロフィール2)、3) 下降傾斜型 (プロフィール3)、4) 三角型 (プロフィール4)、5) 台形型 (プロフィール5) について、各プロフィールごとに最適な諸条件を検討した。

Fig. 1 において、 $u_R$ 、 $u_{R0}$ 、 $u_{RC}$  はレトルト温度、 $u_c$  は冷却水温度、 $m_1$ 、 $m_2$  はレトルト温度勾配、 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$  は時間を表わす。

このとき、被加熱体の表面温度は、周囲の温度すなわちレトルト温度と同一とする。

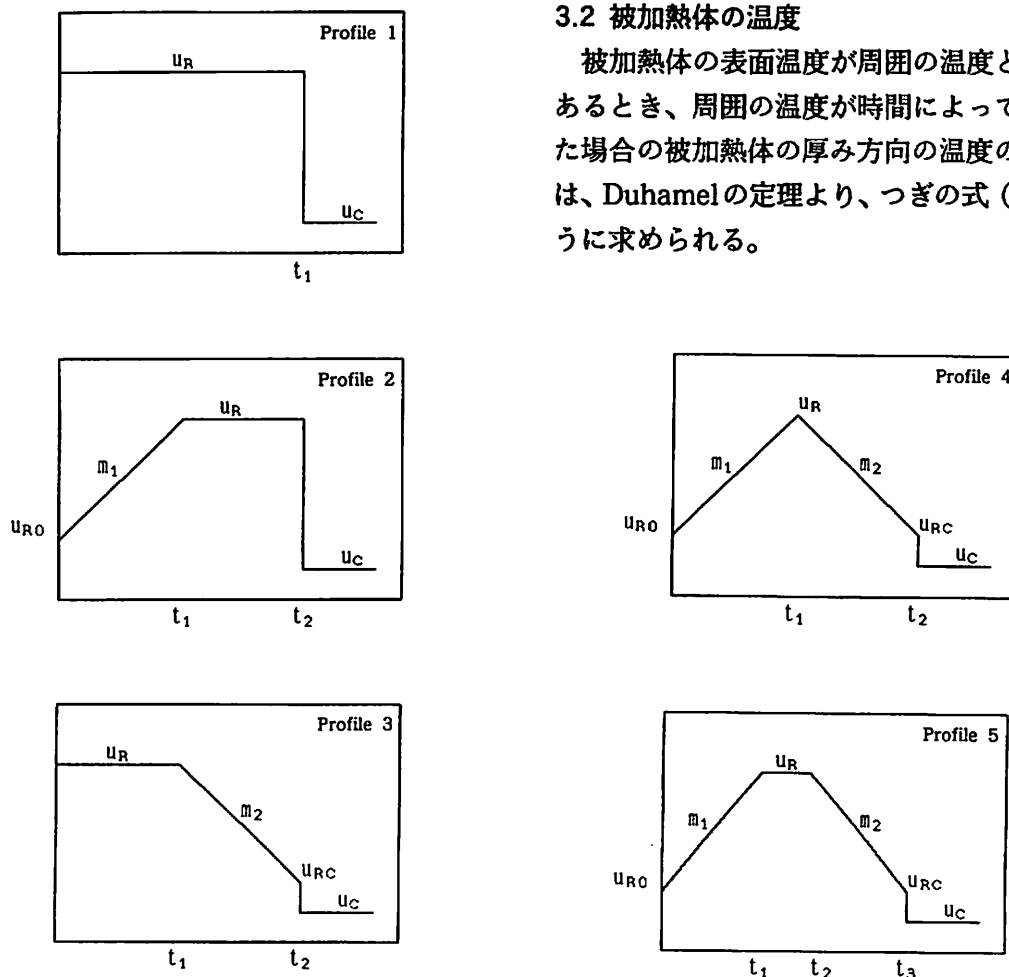


Fig. 1 Five types of retort temperature profiles

#### 3.2 被加熱体の温度

被加熱体の表面温度が周囲の温度と同一であるとき、周囲の温度が時間によって変化した場合の被加熱体の厚み方向の温度の理論解は、Duhamelの定理より、つぎの式 (8) のように求められる。

$$\theta(x, t) = \theta_0 \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n t) C_n + \int_0^t u(\tau) \sum_{n=1}^{\infty} A_n B_n \exp[-B_n(t-\tau)] C_n d\tau \quad (8)$$

ただし、 $\theta_0$  : 初期温度  
 $u(t)$  : 周囲温度  
 $A_n, B_n, C_n$  は Table 1 参照

Fig. 1 の各レトルト温度プロフィールに対して式 (8) を用いて被加熱体の厚み方向の温度を計算した。その結果を Table 1 に示す。

#### 4. 計算結果および考察

##### 4.1 諸係数

ここでは、1次元熱伝導をあてはめることができるレトルトパウチ詰食品のような偏平な被加熱体を対象とし、被加熱体の表面温度はレトルト温度とし、温度計算には Table 1 の理論解を用いた。

被加熱体の厚み  $2a$  は 10 (mm)、温度伝導率  $\alpha$  は  $9.6 \text{ (mm}^2/\text{min)}$ <sup>4)</sup>、初期温度  $\theta_0$  は 20 (°C) とし、冷却時のレトルト温度  $u_c$  は 20 (°C) とした。また、その他の各係数は次の通りである。 $F_c = 5 \text{ (min)}$ 、 $\theta_{1s} = 121.1 \text{ (}^\circ\text{C)}$ 、 $\theta_{2s} = 100 \text{ (}^\circ\text{C)}$ <sup>4)</sup>、 $z_1 = 10 \text{ (}^\circ\text{C)}$ 、 $z_2 = 25 \text{ (}^\circ\text{C)}$ <sup>4)</sup>。

##### 4.2 加熱時間と計算打ち切り温度

実際の計算は、式 (5)、(6)、(7) の積分計算を行うが、積分の終端時間  $t_f$  と加熱時間  $t_h$  について検討した。

標準型のプロフィール (Fig. 1 のプロフィール1) でレトルト温度  $u_R = 120 \text{ (}^\circ\text{C)}$ 、厚み  $2a = 10 \text{ (mm)}$ 、初期温度  $\theta_0 = 20 \text{ (}^\circ\text{C)}$  の場合の F 値および体積平均と表面に関する評

価関数 J の値を、冷却領域をも含めて計算した。ただし、温度は Table 1 の理論解を用い、積分計算は台形則を適用すると、F 値が 5 ( $F_c = 5$ ) のときの加熱時間  $t_h$  は 624 (sec) となる。なお、時間きざみは 1.0 (sec) とした。その結果の一部を Table 2 に示す。Table 2 は冷却開始時からの中心温度と F 値および体積平均と表面に関する評価関数との関係を表しているが、中心温度  $\theta_c$  が 69.35 (°C) と 25.41 (°C) の時は F 値とそれぞれの評価関数の値はほとんど変化していないので、中心温度が 70 (°C) 以下になったときに計算を打ち切ることにした。

計算打ち切りの温度が決まると、レトルト温度プロフィールと F 値が与えられたときの加熱時間が式 (5) から計算できる。積分計算に台形則を適用し時間のきざみは 0.1 (sec) とした。 $F_c$  が与えられたときレトルト温度  $u_c = 20 \text{ (}^\circ\text{C)}$  の冷却領域で中心温度が 70 (°C) 以下になるまでの F 値を計算し、F 値が -0.01

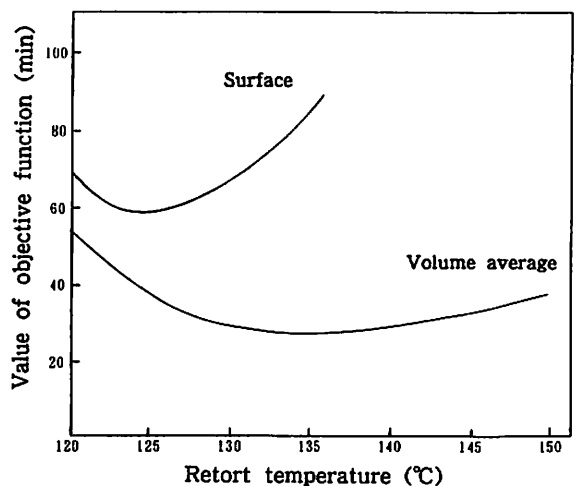


Fig. 2 Effect of retort temperature on volume average value and surface value of objective function in standard process (profile)

$\leq F - F_c \leq 0.01$ の範囲に入ったときに計算を終了しそのときの加熱時間を採用した。

加熱時間と計算打ち切りの時間が決まると体積平均に関する評価関数の値が式(7)から表面に関する値が式(6)から計算できるが、

この場合も積分計算には台形則を用い、時間きざみは0.1(sec)とした。

### 4.3 各プロフィールの最適条件

#### 4.3.1 プロフィール1(標準型)の最適条件

標準型(プロフィール1)について、体積平均および表面に関する評価関数の値をレトルト温度を変えて計算した。その結果をFig. 2に示す。体積平均に関する評価関数の値は約135(°C)で最小となっており、表面に関する評価関数の値は約124(°C)で最小になっていることがわかる。 $z_2 = 25$ (°C)はBrowning reactionを対象にしたときの係数<sup>4)</sup>であ

るがFig. 2の結果はYamaguchi, Kishimoto<sup>3)</sup>の研究結果およびOhlsson<sup>4)</sup>の計算結果とよく一致している。Fig. 2より、レトルト温度が高すぎると表面劣化が著しくなり、レトルト温度が低すぎると全体が劣化する傾向がみられるのでレトルト温度を含めて最適なレトルト温度プロフィールが存在すると考えられる。

この標準型について、被加熱体の厚み、初期温度およびF値と評価関数の値(体積平均、

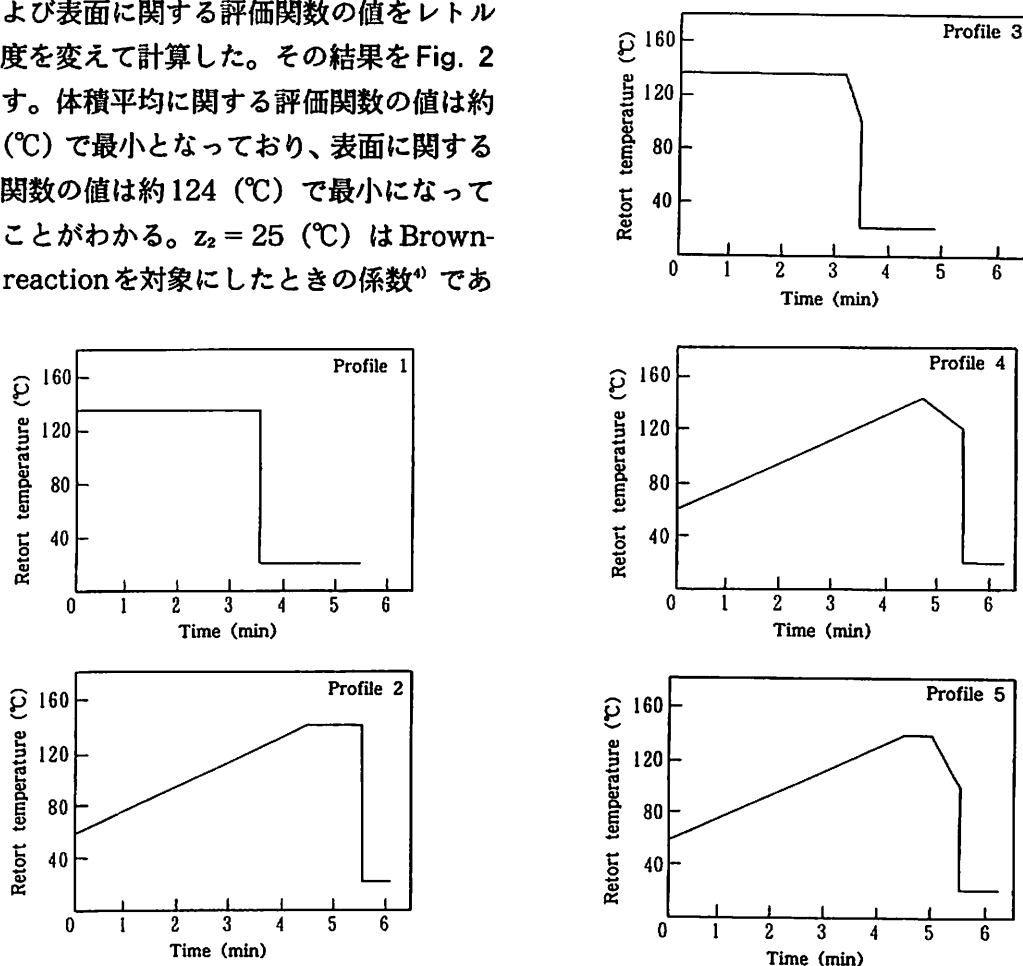


Fig. 3 Description of five types of retort temperature profiles showing minimum volume average value of objective function

Table 1 Formulas for transient temperature distributions for five types of retort temperature profiles

Profile	t	$\theta(x, t)$
Profile 1	$0 \leq t \leq t_1$	$\theta = u_R - (u_R - \theta_0) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n t) C_n$
	$t_1 \leq t$	$\theta = u_c - (u_c - u_R) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n(t - t_1)) C_n$ $- (u_R - \theta_0) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n t) C_n$
Profile 2	$0 \leq t \leq t_1$	$\theta = u_{R0} - (u_{R0} - \theta_0) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n t) C_n$ $+ m_1 t - m_1 \sum_{n=1}^{\infty} (A_n/B_n) (1 - \exp(-B_n t)) C_n$
	$t_1 \leq t \leq t_2$	$\theta = u_R - (u_{R0} - \theta_0) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n t) C_n$ $- m_1 \sum_{n=1}^{\infty} (A_n/B_n) (\exp(-B_n(t - t_1)) - \exp(-B_n t)) C_n$
	$t_2 \leq t$	$\theta = u_c - (u_c - u_R) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n(t - t_2)) C_n$ $- (u_{R0} - \theta_0) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n t) C_n$ $- m_1 \sum_{n=1}^{\infty} (A_n/B_n) (\exp(-B_n(t - t_1)) - \exp(-B_n t)) C_n$ where, $m_1 = (u_R - u_{R0}) / t_1$
Profile 3	$0 \leq t \leq t_1$	$\theta = u_R - (u_R - \theta_0) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n t) C_n$
	$t_1 \leq t \leq t_2$	$\theta = u_R - (u_R - \theta_0) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n t) C_n + m_2(t - t_1)$ $- m_2 \sum_{n=1}^{\infty} (A_n/B_n) (1 - \exp(-B_n(t - t_1))) C_n$
	$t_2 \leq t$	$\theta = u_c - (u_c - u_{RC}) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n(t - t_2)) C_n$ $- (u_R - \theta_0) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n t) C_n$ $- m_2 \sum_{n=1}^{\infty} (A_n/B_n) (\exp(-B_n(t - t_2)) - \exp(-B_n(t - t_1))) C_n$ where, $m_2 = (u_{RC} - u_R) / (t_2 - t_1)$
Profile 4	$0 \leq t \leq t_1$	$\theta = u_{R0} - (u_{R0} - \theta_0) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n t) C_n$ $+ m_1 t - m_1 \sum_{n=1}^{\infty} (A_n/B_n) (1 - \exp(-B_n t)) C_n$
	$t_1 \leq t \leq t_2$	$\theta = u_R - (u_{R0} - \theta_0) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n t) C_n$ $- m_1 \sum_{n=1}^{\infty} (A_n/B_n) (\exp(-B_n(t - t_1)) - \exp(-B_n t)) C_n$ $+ m_2(t - t_1) - m_2 \sum_{n=1}^{\infty} (A_n/B_n) (1 - \exp(-B_n(t - t_1))) C_n$

Profile	t	$\theta(x, t)$
Profile 4	$t_2 \leq t$	$\theta = u_c - (u_c - u_{RC}) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n(t-t_2)) C_n$ $- (u_{RO} - \theta_0) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n t) C_n$ $- m_1 \sum_{n=1}^{\infty} (A_n/B_n) (\exp(-B_n(t-t_1)) - \exp(-B_n t)) C_n$ $- m_2 \sum_{n=1}^{\infty} (A_n/B_n) (\exp(-B_n(t-t_2)) - \exp(-B_n(t-t_1))) C_n$ <p>where, <math>m_1 = (u_R - u_{RO}) / t_1</math>  <math>m_2 = (u_{RC} - u_R) / (t_2 - t_1)</math></p>
Profile 5	$0 \leq t \leq t_1$	$\theta = u_{RO} - (u_{RO} - \theta_0) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n t) C_n$ $+ m_1 t - m_1 \sum_{n=1}^{\infty} (A_n/B_n) (1 - \exp(-B_n t)) C_n$
	$t_1 \leq t \leq t_2$	$\theta = u_R - (u_{RO} - \theta_0) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n t) C_n$ $- m_1 \sum_{n=1}^{\infty} (A_n/B_n) (\exp(-B_n(t-t_1)) - \exp(-B_n t)) C_n$
	$t_2 \leq t \leq t_3$	$\theta = u_R - (u_{RO} - \theta_0) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n t) C_n$ $- m_1 \sum_{n=1}^{\infty} (A_n/B_n) (\exp(-B_n(t-t_1)) - \exp(-B_n t)) C_n$ $+ m_2 (t - t_2) - m_2 \sum_{n=1}^{\infty} (A_n/B_n) (1 - \exp(-B_n(t-t_2))) C_n$
	$t_3 \leq t$	$\theta = u_c - (u_c - u_{RC}) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n(t-t_3)) C_n$ $- (u_{RO} - \theta_0) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n t) C_n$ $- m_1 \sum_{n=1}^{\infty} (A_n/B_n) (\exp(-B_n(t-t_1)) - \exp(-B_n t)) C_n$ $- m_2 \sum_{n=1}^{\infty} (A_n/B_n) (\exp(-B_n(t-t_3)) - \exp(-B_n(t-t_2))) C_n$ <p>where, <math>m_1 = (u_R - u_{RO}) / t_1</math>  <math>m_2 = (u_{RC} - u_R) / (t_3 - t_2)</math></p>

$$1) A_n = \frac{2 \sin \left\{ \frac{(2n-1)}{2} \pi \right\}}{\left\{ \frac{(2n-1)}{2} \pi \right\}}$$

$$2) B_n = \alpha \cdot \left\{ \frac{(2n-1)}{2} \pi \frac{1}{a} \right\}^2$$

$$3) C_n = \cos \left\{ \frac{(2n-1)}{2} \pi \frac{x}{a} \right\}$$

where, a : Half of thickness

$\alpha$  : Thermal diffusivity

x : Distance measured from the center of a slab

t,  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  : Times



Table 2 F-value, volume average value and surface value of objective function during cooling period following processing time

Time	$\theta_1$	F-value	Volume average <sup>1)</sup>	Surface <sup>2)</sup>
0.0	119.99	0.4827765E + 01	0.4961442E + 02	0.6561951E + 02
10.0	118.96	0.4950383E + 01	0.5017037E + 02	0.6561959E + 02
20.0	110.37	0.4996327E + 01	0.5038932E + 02	0.6561967E + 02
30.0	98.68	0.5000616E + 01	0.5046468E + 02	0.6561974E + 02
40.0	87.55	0.5000910E + 01	0.5049174E + 02	0.6561982E + 02
50.0	77.77	0.5000936E + 01	0.5050281E + 02	0.6561990E + 02
60.0	69.35	0.5000938E + 01	0.5050800E + 02	0.6561997E + 02
70.0	62.15	0.5000938E + 01	0.5051075E + 02	0.6562005E + 02
80.0	55.99	0.5000938E + 01	0.5051237E + 02	0.6562012E + 02
90.0	50.74	0.5000938E + 01	0.5051340E + 02	0.6562020E + 02
100.0	46.25	0.5000938E + 01	0.5051412E + 02	0.6562028E + 02
110.0	42.41	0.5000938E + 01	0.5051465E + 02	0.6562035E + 02
120.0	39.14	0.5000938E + 01	0.5051506E + 02	0.6562043E + 02
130.0	36.34	0.5000938E + 01	0.5051539E + 02	0.6562051E + 02
140.0	33.96	0.5000938E + 01	0.5051566E + 02	0.6562058E + 02
150.0	31.92	0.5000938E + 01	0.5051590E + 02	0.6562066E + 02
160.0	30.18	0.5000938E + 01	0.5051611E + 02	0.6562074E + 02
170.0	28.69	0.5000938E + 01	0.5051630E + 02	0.6562081E + 02
180.0	27.42	0.5000938E + 01	0.5051647E + 02	0.6562089E + 02
190.0	26.34	0.5000938E + 01	0.5051662E + 02	0.6562096E + 02
200.0	25.41	0.5000938E + 01	0.5051677E + 02	0.6562104E + 02

Units : Time (sec), F-value (min)

1)  $\theta_1$  : Temperature in the center (°C)

2) Volume average : Volume average value of objective function (min)

3) Surface : Surface value of objective function (min)

表面) を最小にするレトルト温度との関係を品質に関する係数  $z_2$  の値をパラメータとして示したのが Table 3、4、5 である。

Table 3 より、厚みが増すと、体積平均を対象にした場合も表面を対象にした場合も最適なレトルト温度は下がる傾向にある。また、評価関数の最小値も厚みが増すと増加する傾向がある。これは厚みが厚くなると中心で所定の F 値を得る間に表面の近くは高温にさらされるからであろう。

初期温度や F 値が増すと、最適なレトルト

温度はわずかに上がる傾向にあることが Table 4、5 よりわかる。また、全般的に品質に関する係数  $z_2$  の値が増加すると最適温度は高温側に移動しているが、これは  $z_2$  の値が大きい方が、高温殺菌の効果が大きいことを示していると考えられる。

#### 4.3.2 各プロフィールの最適条件

つぎに、諸係数を 4.1 のようにとり、Fig. 1 の各ケースについて計算した結果を Table 6、7 に示す。Table 6 は体積平均を対象とした場合であり、Table 7 は表面を対象とした場

Table 3 Effect of thickness on optimum retort temperature

2a (mm)	$z_2 = 25 (^{\circ}\text{C})$		$z_2 = 33 (^{\circ}\text{C})$		$z_2 = 50 (^{\circ}\text{C})$	
	V.A. <sup>1)</sup>	Surface	V.A.	Surface	V.A.	Surface
10	135	124	140	127	150	132
15	131	121	136	123	147	129
20	129	<120	134	121	145	126
25	126	<120	132	<120	143	124
30	125	<120	130	<120	141	123
35	124	<120	129	<120	140	121
40	123	<120	128	<120	140	<120

Units : Optimum retort temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )

1) V.A. denotes volume average.

2)  $\theta_0 = 20 (^{\circ}\text{C})$ ,  $F = 5$  (min)

Table 4 Effect of initial temperature on optimum retort temperature

$\theta_0$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$z_2 = 25 (^{\circ}\text{C})$		$z_2 = 33 (^{\circ}\text{C})$		$z_2 = 50 (^{\circ}\text{C})$	
	V.A. <sup>1)</sup>	Surface	V.A.	Surface	V.A.	Surface
20	135	124	140	127	150	132
40	135	124	141	127	152	133
60	135	125	142	128	153	134
80	136	126	143	129	153	135
100	137	127	144	130	154	136

Units : Optimum retort temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )

1) V.A. denotes volume average.

2)  $2a = 10$  (mm),  $F = 5$  (min)

Table 5 Effect of F-value on optimum retort temperature

F (min)	$z_2 = 25 (^{\circ}\text{C})$		$z_2 = 33 (^{\circ}\text{C})$		$z_2 = 50 (^{\circ}\text{C})$	
	V.A. <sup>1)</sup>	Surface	V.A.	Surface	V.A.	Surface
5	135	124	140	127	150	132
10	138	127	143	130	>150	135
15	139	129	145	132	>150	136
20	140	130	146	133	>150	138

Units : Optimum retort temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )

1) V.A. denotes volume average.

2)  $2a = 10$  (mm),  $\theta_0 = 20 (^{\circ}\text{C})$

合である。Fig. 3 に体積平均を対象としたときの標準型、上昇傾斜型、下降傾斜型、三角型、台形型のそれぞれの場合の最適プロフィールを示す。

上昇傾斜型 (プロフィール2) は標準型の初期のレトルト温度に勾配をもたせた場合であるが、加熱開始時間  $t = 0$  のときのレトルト温度  $u_{RO}$ 、レトルト温度  $u_R$  およびレトルト温度の上昇勾配  $m_1$  を種々変えて計算し、評価関数が最小になる条件を探った。その結果、体積平均と表面に関する評価関数の値は標準型の場合よりも小さく、標準型よりも良いプロフィールであると考えられる。

下降傾斜型 (プロフィール3) は上昇傾斜型とは逆に、標準型の後半のレトルト温度に勾配をもたせた場合であるが、レトルト温度  $u_R$  加熱終了時のレトルト温度  $u_{RC}$  およびレトルト温度の下降勾配  $m_2$  を逐次変えて計算した。

体積平均と表面に関する評価関数の値は標準型の場合よりもわずかに小さく、上昇傾斜型の場合よりは大きいので、下降勾配型は標準型よりわずかに良いが、上昇傾斜型より劣るプロフィールであると考えることができる。

上昇傾斜型と下降傾斜型が両者とも標準型よりも良いプロフィールであるということがわかったので、両者を接続したプロフィールである三角型 (プロフィール4) をつぎに取り上げた。 $u_{RO}$ 、 $m_1$  および  $u_{RC}$  を種々変えて計算し最適な上昇勾配  $m_1$  を求めた。下降勾配  $m_2$  は  $u_{RO}$ 、 $u_R$ 、 $m_1$ 、 $u_{RC}$  および  $t_R$  が決まれば計算できる値である。体積平均と表面に関する評価関数の値は、標準型、上昇傾斜型、下降傾斜型、三角型のなかでは、三角型の場合が最も小さく、これらのプロフィールのなかでは

Table 6 Five types of retort temperature profiles showing minimum volume average value of objective function

Profile	O.T. <sup>1)</sup>	H.T. <sup>2)</sup>	V.J. <sup>3)</sup>	$m_1^{*4)}$	$m_2^{*4)}$	Remarks
Profile 1	135	3.4	28.7			
Profile 2	139	5.4	26.4	0.30		$u_{RO}^{*5)} = 60$
Profile 3	135	3.5	28.3		-1.75	$u_{RC}^{*5)} = 100$
Profile 4	145	5.5	25.9	0.30	-0.54	$U_{RO}^* = 60$ $u_{RC}^* = 120$
Profile 5	140	5.5	25.7	0.30	-1.48	$u_{RO}^* = 60$ $u_{RC}^* = 100$

- 1) O.T. : Optimum retort temperature (°C)
- 2) H.T. : Heating time (min)
- 3) V.J. : Volume average value of objective function (min)
- 4)  $m_1^*, m_2^*$  : Optimum ascending and descending slopes (°C/sec)
- 5)  $u_{RO}^*, u_{RC}^*$  : Optimum initial and final retort temperatures (°C)

Table 7 Five types of retort temperature profiles showing minimum surface value of objective function

Profile	O.T. <sup>1)</sup>	H.T. <sup>2)</sup>	S.J. <sup>3)</sup>	$m_1^{*4)}$	$m_2^{*4)}$	Remarks
Profile 1	124	6.5	59.3			
Profile 2	128	9.8	44.8	0.15		$u_{RO}^{*5)} = 60$
Profile 3	125	6.7	57.5		-0.75	$u_{RC}^{*5)} = 70$
Profile 4	135	10.0	42.4	0.15	-0.36	$U_{RO}^* = 60$ $u_{RC}^* = 100$
Profile 5	130	10.2	42.0	0.15	-0.65	$u_{RO}^* = 60$ $u_{RC}^* = 80$

- 1) O.T. : Optimum retort temperature (°C)
- 2) H.T. : Heating time (min)
- 3) S.J. : Surface value of objective function (min)
- 4)  $m_1^*, m_2^*$  : Optimum ascending and descending slopes (°C/sec)
- 5)  $u_{RO}^*, u_{RC}^*$  : Optimum initial and final retort temperatures (°C)

三角型がよいことがわかった。

そこで、つぎに三角型(プロフィール4)の頂点を平にした形状、すなわち、台形型(プロフィール5)について検討した。三角型の計算で、 $u_{RO}$ と $u_{RC}$ を組み合わせて、最適な上昇勾配 $m_1$ を求めたときの各条件で、そのときの $m_1$ を固定して、台形の上辺の長さ $t_{TR}$ (時間)を変えて計算を行い最適な時間を求めた。

$t_{TR}$ の最適値は体積平均を対象にした場合は約40sec、表面の場合は約70secであった。Table 6、7より、体積平均を対象にした場合も表面の場合も、評価関数の値は三角型の場合よりも小さく、以上の5種類のプロフィールの中では台形型が最もよいことがわかった。また、Table 6、7より、どのプロフィールでも最適温度は体積平均を対象にした場合の方が、表面の場合よりも高く、加熱時間は

表面の方が長い。

最適温度は、体積平均を対象にした場合、標準型、上昇傾斜型、下降傾斜型、三角型、台形型の順に、135℃、139℃、135℃、145℃、140℃であり、表面の場合は、124℃、128℃、125℃、135℃、130℃であった。

加熱開始時 ( $t = 0$ ) におけるレトルト温度  $u_{ro}$  の最適値  $u_{ro}^*$  は、上昇傾斜型、三角型、台形型とも、体積平均を対象にした場合も表面の場合も約60 (°C) であった。

上昇勾配  $m_1$  は、上昇傾斜型、三角型、台形型とも、体積平均を対象にした場合は約0.3 (°C/sec)、表面の場合は約0.15 (°C/sec) が最適となり、 $u_{ro}^*$  とともに興味深い結果が得られている。

下降勾配の最適値  $m_2^*$  は、下降傾斜型、三角型、台形型とも、体積平均を対象にした場合も表面の場合も顕著な傾向はみられなかった。

また、加熱終了時 ( $t = t_h$ ) のレトルト温度の最適値  $u_{rc}^*$  は、下降傾斜型、三角型、台形型とも、体積平均を対象にした場合も表面の場合も、 $u_{ro}^*$  より高い値を示している。

## 5. 結 論

レトルトパウチ詰食品のような偏平な被加熱体に、1次元熱伝導をあてはめ、5種類のレトルト温度プロフィールを取り上げて、各プロフィールごとに最適な条件を検討した。

被加熱体の体積平均に関する評価関数を対象とした場合は、5種類の温度パターンのなかでは、標準型、下降傾斜型、上昇傾斜型、三角型、台形型の順に、評価関数の値は減少しており台形型が最もよい。

上昇傾斜型、三角型、台形型では最適な上昇勾配と最適な最高温度が存在する。

被加熱体の表面に関する評価関数を対象とした場合も体積平均を対象とした場合と同様なことがいえる。表面を対象とした場合、最高温度は体積平均を対象とした場合より低い方がよく加熱時間は長い方がよい。

以上の結果は、多変数関数の最小化法や変分法や動的計画法などを応用して最適なレトルト温度プロフィールを探索する場合に参考になると考えられる。

## <引用文献>

- 1) Teixeira, A. A., Dixon, J. R., Zahradnik, J. W. and Zinsmeister, G. E., Food Technol., 23 (6), 137 (1969)
- 2) Thijssen, H. A. C., Kerkhof, P. J. A. M. and Liefkens, A. A. A., J. Food Sci., 43, 1096 (1978)
- 3) Yamaguchi, K. and Kishimoto, A., Presented at Internationale Konferenz über den Schutz verderblicher Güter durch Verpackung. München, Germany (1976)
- 4) Ohlsson, T., J. Food Sci., 45, 848 (1980)
- 5) Teixeira, A. A., Zinsmeister, G. E. and Zahradnik, J. W., J. Food Sci., 40, 656 (1975)
- 6) Saguy, I. and Karel, M., J. Food Sci., 44, 1485 (1979)
- 7) Nadkarni, M. and Hatton, T., J. Food Sci., 50, 1312 (1985)
- 8) Banga, J. R., Perez-Martin, R. I., Gallardo, J. M. and Casares, J. J., J. Food Eng., 14 (1), 25 (1991)

(原稿受付 1993年 10月 25日)  
(審査受理 1994年 6月 9日)