カムアップを伴う加熱殺菌の逆問題手法による最適制御

謝 来發*・渡辺尚彦*・三堀友雄*

An Inverse Method for Achieving Correct Heat Sterilization of Conduction-heated Food with Come-up Heating

Laifa XIE*, Hisahiko WATANABE* and Tomoo MIHORI*

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

A procedure was developed for an on-line control system to achieve the correct heat sterilization for conduction-heated food considering the come-up delay in heating the retort. The procedure collects a series of time/temperature data via a sensing probe during the early stage of the heating sterilization process, and analyzes the collected data for parameters of conduction heating. Using these parameters it predicts the temperature history for the remainder of heating phase and during cooling, integrates the lethal rate, and determines an appropriate time to start cooling to achieve a designed lethality. The experiment using acrylic resin as the model food, achieved the designed lethality within 5.7% for an infinite slab and 6.8% for an infinite cylinder. This validated that the inversion method of this study was applicable to the cases where the report temperature has a come-up delay.

(Received Oct. 7, 1996 ; Accepted Mar. 30, 1997)

レトルトパウチ、缶詰などの食品の加熱殺菌において、加熱しすぎると食品の品質が低下する 경우가少なくない。そこで、過不足のない加熱殺菌を行うためには食品の温度変化を知る方法が必要になる。現在でも、食品の物性値及び熱伝達率などが既知であれば、食品内部における温度/時間の関係を計算して、最適な冷却開始時刻を予測することができる。しかし、食品は天然素材であり、その物性値は品種、産地、鮮度により異なる。従って、食品の正確な熱物性や熱伝達率などを事前に知ることとは困難である¹⁾。このような背景の下で、逆問題手法による加熱殺菌最適制御の原理が提案された²⁾。逆問題手法による加熱殺菌最適制御法とは、加熱殺菌工程の初期段階での温度変化データから、伝熱パラメータを逆問題として推定し、得た伝熱パラメータを用いて、加熱工程の後期段階及び冷却段階の温度変化を予測し、適正な冷却開始時刻を予報するものである。本研究は逆問題手法による加熱殺菌最適制御を加熱開始時にレトルトの加熱媒体温度が設定値に達するまでに遅れを伴う（カム

アップと言う）場合に適用する問題を取り扱う。

缶詰食品のような有限円柱状の物体内の温度は、無限平板の解と無限円柱の解との積で表せるから、本研究では問題の所在の把握を簡単にするため、対象とする食品の形状を無限平板と無限円柱に限定した。

はじめに、カムアップを伴う加熱殺菌工程における食品中の温度変化の解析解を順問題の伝熱問題として扱い、食品中の任意の場所の温度が時刻 t と 2 つの伝熱パラメータ τ と Bi の関数になることを示す。次いで、加熱工程初期における食品中の温度/時間データから、最大傾斜法で伝熱パラメータ τ と Bi を推定する。つぎに、推定したパラメータ τ と Bi を用いて、加熱殺菌全工程（冷却工程を含む）における食品の温度変化を予測し、食品中心における殺菌条件を満足する冷却開始時刻を決定する方法を示す。最後に、この方法の妥当性を数値実験及びアクリル樹脂試料を用いた実験によって検証する。

逆問題による熱物性測定に関する既往の研究は①境界条件が既知の場合に物体内部の温度履歴から熱物性値

* 東京水産大学食品生産学科（〒108 東京都港区港南 4-5-7）

を分析するもの³⁾。② 既知の熱物性値を用いて物体内部の温度履歴から境界条件を評価するもの⁴⁾に大別できる。本研究では、対象物の熱物性を測定しようとするものではなく、対象の示す熱的挙動を特徴を付ける伝熱パラメータを同定しようとするものである。従って、熱物性測定に関する既往の逆問題とは問題の性質が異なっている。

加熱工程における食品中の温度を推定する順問題

1. カムアップの遅れを無視できる場合

カムアップの遅れを無視できる場合、即ち、レトルト(熱媒体)の温度が T_{c0} から T_h にステップ状に変化する加熱工程においては、食品の無次元温度 $u(t, x) = (T_h - T)/(T_h - T_0)$ は次のように表される。

無限平板状食品 (厚さ $2l$)

$$u(t, x) = \sum_{m=1}^{\infty} A_m \exp\left(-\lambda_m^2 \frac{t}{\tau}\right) \cos\left(\lambda_m \frac{x}{l}\right) \quad (1)$$

ここに、時定数 τ は熱拡散率 ($a = k/\rho C_p$) を用いて $\tau \equiv l^2/a$ と定義する。また、 A_m は(2)式の m 番目の正根 λ_m を用いて(3)式で表される。

$$\lambda_m \tan(\lambda_m) = Bi \quad (2)$$

$$A_m = \frac{2 \sin(\lambda_m)}{\lambda_m + \sin(\lambda_m) \cos(\lambda_m)} \quad (3)$$

Bi は物体の内外の熱抵抗の比で、平板の場合は $Bi \equiv hl/k$ と定義される。

無限円柱状食品 (半径 R)

$$u(t, r) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp\left(-P_n^2 \frac{t}{\tau}\right) J_0\left(P_n \frac{r}{R}\right) \quad (4)$$

ここに、時定数は円柱においては $\tau \equiv R^2/a$ となる。また、 A_n は(5)式の n 番目の正根 P_n を用いて式(6)で表せる。

$$\frac{P_n J_0(P_n)}{J_1(P_n)} = Bi \quad (5)$$

$$A_n = \frac{2 J_0(P_n)}{P_n [J_0^2(P_n) + J_1^2(P_n)]} \quad (6)$$

$J_0(P_n)$, $J_1(P_n)$ はそれぞれ 0 次, 1 次ベッセル関数で、 Bi は円柱においては $Bi \equiv hR/k$ と定義する。

2. カムアップを伴う場合

カムアップ期間におけるレトルト(熱媒体)の温度履歴 $\phi(t)$ が既知であれば、レトルトの温度変化を微小なステップの和とみなし、DUHAMEL の定理を用いると食品中の温度は次式で表せる⁵⁾。

$$T = \sum_{i=1}^w (T_i - T_0) \Delta u_{w-i+1} + T_0 \quad (7)$$

ただし、時刻 t を w の微小時間 Δt に分割し、レトルト温度は時間 $\Delta t (= t_{i+1} - t_i)$ の間には一定値 $T_i = \{\phi(t_i) + \phi(t_{i+1})\} / 2$ に保たれているとする。 $u(t)$ はレトルト温度が一定とする場合の無次元温度であり、(1)式あるいは(4)式を用いて計算する。また、 $\Delta u_{w-i-1} = u[(w-i)\Delta t] - u[(w-i+1)\Delta t]$ である。(7)式を用いるとカムアップを伴う場合には加熱工程中の食品内の位置 x または r における温度を次式より記述できる。

無限平板の場合

$$T = T_0 + \sum_{i=1}^w \left\{ \left(\frac{[\phi(t_i) + \phi(t_{i+1})]}{2} - T_0 \right) \times \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos\left(\lambda_m \frac{x}{l}\right) \left[\exp\left(-\lambda_m^2 \frac{(w-i)\Delta t}{\tau}\right) - \exp\left(-\lambda_m^2 \frac{(w-i+1)\Delta t}{\tau}\right) \right] \right\} \quad (8)$$

無限円柱の場合

$$T = T_0 + \sum_{i=1}^w \left\{ \left(\frac{[\phi(t_i) + \phi(t_{i+1})]}{2} - T_0 \right) \times \sum_{n=1}^{\infty} A_n J_0\left(P_n \frac{r}{R}\right) \left[\exp\left(-P_n^2 \frac{(w-i)\Delta t}{\tau}\right) - \exp\left(-P_n^2 \frac{(w-i+1)\Delta t}{\tau}\right) \right] \right\} \quad (9)$$

(8) 式の λ_m , (9) 式の P_n は Bi によって決定できるので、結局、食品中の任意の位置における温度は 2 つの伝熱パラメータ τ と Bi によって支配される。即ち、

$$T = T(\tau, Bi, t) \quad (10)$$

τ と Bi を決定できれば、温度履歴全体を予測できる。次節ではカムアップ期間のレトルト温度履歴 $\phi(t)$ 及び伝熱パラメータ τ と Bi を逆問題手法により推定する。

初期温度履歴からパラメータを推定する逆問題

1. カムアップ期間のレトルト温度履歴 $\phi(t)$ の推定

商用レトルトによる加熱殺菌工程においてはカムアップ期間が約 5~10 分程度と短い場合が多い⁶⁾。この場合加熱工程の開始と同時にレトルト温度 $\phi(t)$ を測定し、カムアップ期間の終了後に実測した $\phi(t)$ を用いて次節で述べる方法で伝熱パラメータ τ と Bi を推定し、冷却開始時刻推定の計算を始めればよい。他方、カムアップ期間が相対的に長い場合、カムアップの途中から冷却開始時刻推定の計算を始めねばならぬ場合は $\phi(t)$ の推定が必要となる。幸い、商用レトルトのカムアップ期間におけるレトルト温度履歴 $\phi(t)$ は次の経験式に従うことが知られている⁷⁾。

$$\phi(t) = [T_h - T_{cu0}] \left(\frac{t}{t_u}\right)^c + T_{cu0} \quad 0 \leq t \leq t_u$$

$$\phi(t) = T_h \quad t > t_u \quad (11)$$

ここに c はカムアップ曲線の指数, T_{cu0} はレトルトの初期温度, t_u はカムアップ終了時間である。従って, レトルト温度履歴が (11) 式に従うと仮定し, (11) 式中の定数 c と t_u を推定できれば, $\phi(t)$ を既知とする次節以降の方法が適用可能となる。

即ち, 加熱工程の開始と同時にレトルト温度 $\phi(t)$ の測定を開始し, 適当な期間 $t_1, t_2, \dots, t_n$ にわたって n 個の $\phi(t)$ を測定する。(11) 式を変形して両辺の対数をとれば

$$\log \frac{\phi(t) - T_{cu0}}{T_h - T_{cu0}} = c \log t - c \log t_u \quad (12)$$

であるから, $y = \log \frac{\phi(t) - T_{cu0}}{T_h - T_{cu0}}, x_i = \log t_i$ とおけば, 線形最小二乗法により c と t_u を決定できる。

$$c = \left(n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i \right) / \left(n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \right) \quad (13)$$

$$\log t_u = \left(\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i \right) / \left(n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i \right) \quad (14)$$

2. 食品の伝熱パラメータの推定

レトルト内に置かれた食品中の既知の場所に温度センサーを設置し, レトルトの加熱開始と同時に温度/時間データの収集を始める。 k 個の温度 Y_j 及び時間 t_j のデータセット

$$(Y_1, t_1), (Y_2, t_2), (Y_3, t_3), \dots, (Y_k, t_k) \quad (15)$$

が得られたとする。このデータセットを用いて, 非線形最小二乗法により, 2つの伝熱パラメータ τ と Bi を推定する。まず何らかの方法により伝熱パラメータ τ と Bi についての概略値が得られたとし, これを初期値 τ_0, Bi_0 として, (10) 式に代入すると, 食品中のある場所における時刻 t の温度の近似値が得られる。

$$T_0 = T(\tau_0, Bi_0, t) \quad (16)$$

この近似値は, パラメータ τ と Bi に増分 δBi と $\delta \tau$ をそれぞれ加えることによって改善されるとしよう。テイラー展開を1次まで打ち切って得られた値 T' を改善値とする。

$$T' = T(\tau_0, Bi_0, t) + \frac{\delta T}{\delta \tau} \delta \tau + \frac{\delta T}{\delta Bi} \delta Bi \quad (17)$$

この改善された値 T' と温度センサーによる測定値 T_j との差の2乗和を最小にするような増分 δBi と $\delta \tau$ を最大傾斜法で求める。この手順を繰り返して τ と Bi の真

値に近づくことができる。用いた方法は MIHORI ら²⁾ と同様であるので省略する。

最適制御システムの設計

1. 冷却工程における食品の温度

加熱工程を終え, 冷却工程に移行しても, 食品の中心部の温度はしばらくの間は高温に保たれる。従って, 冷却工程における食品内部の温度を正確に予測する必要がある。

加熱工程終了後, ただちに冷却工程に入り, 媒体温度は T_h から T_c にステップ状に変化するものとする。従って, 加熱工程終了時刻 t_q は冷却開始時刻と等しい。また, 加熱, 冷却両工程とも熱媒体が水であるので, 加熱工程での Bi と冷却工程での Bi とを同一と見なす。そうすると, 冷却工程における食品中の温度は, 加熱工程での温度計算の継続で (18) 式または (19) 式により与えられる。

無限平板の場合

$$T = T_0 + \sum_{i=1}^w \{ (\phi(t) - T_0) \times \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos\left(\lambda_m \frac{x}{l}\right) \left[\exp\left(-\lambda_m^2 \frac{(w-i)Dt}{\tau}\right) - \exp\left(-\lambda_m^2 \frac{(w-i+1)Dt}{\tau}\right) \right] \} \quad (18)$$

無限円柱の場合

$$T = T_0 + \sum_{i=1}^w \{ (\phi(t) - T_0) \times \sum_{m=1}^{\infty} A_m J_0\left(P_m \frac{r}{R}\right) \left[\exp\left(-P_m^2 \frac{(w-i)Dt}{\tau}\right) - \exp\left(-P_m^2 \frac{(w-i+1)Dt}{\tau}\right) \right] \} \quad (19)$$

ただし, 冷却開始時刻 t_q から媒体温度 $\phi(t)$ には冷却温度 T_c を入れ替えて計算する。

2. 殺菌値の評価及び冷却開始時刻の決定

加熱殺菌処理を評価するため, 殺菌値 F_p を用いた。殺菌値は次式のような積分式によって表される。

$$F_p = \int_0^{t_u} 10^{(T-\tau_0)/z} dt + \int_{t_u}^{t_q} 10^{(T-\tau_0)/z} dt + \int_{t_q}^{t_c} 10^{(T-\tau_0)/z} dt \quad (20)$$

ここに T_r は殺菌参照温度である。熱湯を用いた商業的な殺菌では参照温度を 121.1°C とし, 熱湯の温度はこれより 3.9°C 高い 125°C にするのが一般的である。本研究では加熱実験において約 99.9°C の熱湯を用い, それにより, 125°C の熱湯による殺菌シミュレートするため, 熱湯温度より 3.9°C 低い 95.7°C を参照温度とした。 z は殺菌値曲線の傾斜指数であるが, *C. botulinus* 菌を想定し

$z=10$ を採用した。

過不足のない殺菌を行うための適正な冷却開始時刻 t_q は挟み撃ち法で (20) 式の右辺の各段階の温度履歴を計算し、積分値 F_p が目標殺菌値に十分近づくように t_q を決定した。

3. 数値実験

上述のカムアップを伴う加熱殺菌最適制御システムの計算機プログラム (Basic 言語) を作成した。プログラムが正常に作動することを確認するため、既知の τ と Bi 値 (後述する実験に用いた食品モデルの場合に似せて $\tau=184$, $Bi=8$) を使って順問題によって温度/時間を計算し、それを疑似実験値として用いて逆問題により τ と Bi を推定する数値実験を行った。数値実験では、2つの伝熱パラメータ τ と Bi に対する初期値を与える必要があるが、 τ と Bi の初期値 τ_0 と Bi_0 が真値と大きく離れると計算は収束しない。本研究では初期値 τ_0 と Bi_0 が真値から約 38% 以上ずれると収束しなかった。数値実験の結果の典型例を表 1 に示した。予報された冷却開始時刻に熱媒体温度をステップ状に変えて冷却を開始したと仮定して得られた殺菌値は目標の殺菌値 (240 s) にほぼ等しく、計算機プログラムが正常に作動したことを示している。

本研究では伝熱パラメータ τ と Bi の初期値が真値と 38% 以上ずれると繰り返し計算が収束せず、逆問題が解けなかった。カムアップを伴わない加熱工程の場合は約 50% が収束限度であった²⁾ ので、初期値に対する要求がより厳しくなることがわかった。

他方、本システムで入力として用いる加熱工程の初期段階での温度測定値には通常、測定誤差が含まれるが、これも伝熱パラメータを推定する繰返し計算を不安定にする要因となる。そこで、模擬実験値にランダム誤差が加わった場合の計算の安定性を調べた。即ち、既知の伝

熱パラメータ ($\tau=184$ と $Bi=8$) の値を使って順問題によって計算した温度の時系列値にランダムに誤差 ($\pm 0.1 \sim \pm 0.4^\circ\text{C}$) を加えたものを模擬実験値としてシステムに与え、逆問題を解かせて伝熱パラメータを推定した。その結果、ランダム誤差が ± 0.1 , ± 0.2 , $\pm 0.3^\circ\text{C}$ と大きくなるにつれて、 τ の推定値は 2%, 4%, 8%, Bi の推定は 3%, 6%, 15% と、それぞれ小さい値になり、ランダム誤差が $\pm 0.4^\circ\text{C}$ に達すると収束せず、 τ と Bi の推定はできなかった。

このように繰り返し計算による未知パラメータの決定は必ず収束するとは限らない。温度の測定誤差やパラメータの初期値などにより総合的に影響され、計算が不安定になり、残差が十分に小さくなくてもパラメータが真値に接近しないこともある。

次に、温度/時間データの採取期間及びサンプリング数の影響について調べた。逆問題により数学モデルの伝熱パラメータを推定する問題はデータの採取期間に影響される。採取期間が短かすぎると、逆計算が不可能になる。その理由は、伝熱パラメータが異なっている、過渡応答の初期温度変化は類似するため、パラメータの補正量 $\delta\tau$, δBi に対する解が 1 つと限らなくなるからである。採取期間が長ければ長いほど計算の安定性や精度が高くなると考えられるが、実際にはコンピュータの処理時間や冷却開始時刻などに制限され限界がある。本研究においては、データ採取時間を加熱工程の半分程度まで延長しても、加熱殺菌の on-line 制御が可能であることがわかった。サンプリング数については、10 秒毎に採取すれば、計算の安定性や精度に影響がないようである。

実 験

1. 実験装置及び方法

実験装置は食品モデル、加熱容器 ($\phi 40 \text{ cm} \times 42 \text{ cm}$)、冷却容器 ($\phi 40 \text{ cm} \times 42 \text{ cm}$)、データロガー (CADAC 60) 及びコンピュータ (NEC PC-9821, Xn) により構成した。

アクリル樹脂を食品モデルとして用いた。アクリル樹脂は加熱操作実験において固体状食品の代用品としてよく使われる。その理由は以下の通りである。

(1) 熱拡散率が食品と類似している。(2) 温度センサーを目的の場所に正確に設置しやすい。(3) 物体の内部で対流が起こらず、伝導伝熱のみに支配される。(4) 繰返し使用でき、実験の再現性を確認するのに都合がよい。

また、無限平板、無限円柱の条件を満たすために平板は $180 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ 、厚さ 10 mm 、円柱は直径 25

表 1 数値実験結果

無 限 平 板			
	τ [s]	Bi [-]	F_p [s]
真の値	184	8	[目標値] 240
推定値	183.5	8.1	[実現値] 239.2
無 限 円 柱			
	τ [s]	Bi [-]	F_p [s]
真の値	1149	32.6	[目標値] 240
推定値	1148.1	32.2	[実現値] 239.5

mm, 長さ 180 mm のものを用いた。それぞれの中心に銅-コンスタンタンで作られた熱電対 (直径 0.08 mm) を設置した。

実験は以下の手順で行った。

- (1) 加熱容器に水を入れガスの直火で加熱し、温度センサーにより熱湯の温度データを記録する。
- (2) 温度センサーをつけた食品モデルを加熱容器内に吊りし、加熱殺菌を開始する。
- (3) コンピュータは 1 秒間隔で温度データを記録する。一定時間の温度データを収集したら、コンピュータはデータ処理を始める。
- (4) コンピュータが最適な冷却開始時刻 t_q をディスプレイに表示する。
- (5) t_q 時刻に到達したら、直ちに食品モデルを加熱容器から引き上げ、冷却容器へ沈める。
- (6) 食品モデルの中心の温度が一定の温度まで下がったら加熱殺菌全工程を終了する。

2. レトルトの温度 $\phi(t)$ の決定

本実験の場合、加熱はガスコンロで直火によって行った。カムアップ期間は比較的に長かったため、測定した初期段階の熱媒体の温度データを用いて、(13) 式により、 c を求めた。 c は 1.0 であり、加熱媒体温度は直線的に上

昇することがわかった。

3. 結果及び考察

実験の結果を図 1 (平板) 及び図 2 (円柱) に示した。図中の細い実線は、食品モデルの中心で測定した温度履歴及びこの温度履歴に基づいて計算した殺菌値 F_p である。図中の記号 $\times$ は中心における実測温度のうち、伝熱パラメータ τ と Bi を推定するために使われたデータの範囲を示したものである。破線はシステムが推定した食品モデル中心の温度履歴とそれに基づいて計算した殺菌値である。実測した温度 (実線) はシステムが予測した温度 (破線) とほぼ一致している。殺菌値は目標の 240 s に対し 10% 以内の値で達成している。図の下部に示された矢印はシステムが決定した最適冷却開始時刻 t_q を示す。この結果から逆問題による最適加熱殺菌処理手法はカムアップを伴う場合にも適用可能なことが示された。

無限平板実験 (図 1) の場合は 50 秒から 240 秒まで 10 秒間隔で採取した 20 個のデータを用い、4 回の繰り返し計算により伝熱パラメータを推定し、 $Bi=9.8$, $\tau=174.8$ s を得た。システムは最適冷却開始時刻を $t_q=929$ s と予報し、実験により達成した殺菌値の 252.5 s となり、目標の殺菌値の 240 s を 5.2% うわまわった。無限円柱実験

図 1 アクリル平板をモデル食品とした場合の測定値及び予測値

太い実線はレトルトの温度で、細い実線は食品モデルの中心温度及び殺菌値。破線は予測した食品モデルの温度及び殺菌値。 $\times$ はパラメータ τ と Bi を推定するのに用いた温度/時間データの範囲を示す。下部の矢印は最適冷却開始時刻 t_q を示す。用いた実験条件は次の通り：モデル食品の厚さ $l=10$ mm, モデル食品初期温度 $T_0=20.1^\circ\text{C}$, レトルト初期温度 $T_{\text{ret}}=77^\circ\text{C}$, レトルト温度設定値 $T_h=99.6^\circ\text{C}$, 目標の殺菌値 $F_p=240$ s。

図 2 アクリル円柱をモデル食品とした場合の測定値及び予測値

太い実線はレトルトの温度で、細い実線は食品モデルの中心温度及び殺菌値。破線は予測した食品モデルの温度及び殺菌値。×はパラメータ τ と Bi を推定するのに用いた温度/時間データの範囲を示す。下部の矢印は最適冷却開始時刻 t_q を示す。用いた実験条件は次の通り：モデル食品の半径 $R=10.5$ mm，モデル食品初期温度 $T_0=28.2^\circ\text{C}$ ，レトルト初期温度 $T_{cw}=86^\circ\text{C}$ ，レトルト温度設定値 $T_h=99.6^\circ\text{C}$ ，目標の殺菌値 $F_p=240$ s。

の場合は 100 秒から 390 秒まで 10 秒間隔で採取した 30 個のデータにより伝熱パラメータを推定し、 $Bi=30.6$ ， $\tau=1147.2$ s を得た。また、最適冷却開始時刻 $t_q=1232$ s を予報し、実験による殺菌値は 256.4 s となり、目標の殺菌値の 240 s を 6.8% うわまわった。これらの誤差は軽微なものであり、本システムの有効性を示すものであるが、本実験において伝熱パラメータを推定する計算が収束しない場合もしばしばみられた。これは加熱容器内の熱湯の対流に不安定を生じ、容器内の温度上昇が不均一になっていることに起因すると思われる。これは残された大きな問題の 1 つである。

要 約

カムアップ加熱時間を考慮した食品の最適加熱殺菌を行う on-line 制御システム用の処理方法を開発した。

本方法では、加熱殺菌工程の初期段階での食品中の温度/時間データを収集し、それを解析することによって、伝熱パラメータを求めて、加熱工程の後期段階及び冷却段階での食品中の温度/時間を予測し、過不足なく加熱殺菌を行う最適な冷却開始時刻を予報する。食品モデルとしてアクリル樹脂を用いた実験により本方法を検証し

た。実験により得られた殺菌値は無限平板状モデルでは約 5.2%，無限円柱状モデルでは約 6.8% の誤差で、目標殺菌値に一致した。

記 号

A_m [—]	m 次 Fourier 係数 (平板, 加熱工程)
A_n [—]	n 次 Fourier 係数 (円柱, 加熱工程)
a [m^2/s]	熱拡散率 ($a=k/\rho c_p$)
Bi [—]	ビオ数 (平板: $Bi=hl/k$, 円柱: $Bi=hR/k$)
c [—]	カムアップ曲線の指数
C_m [—]	m 次 Fourier 係数 (平板, 冷却工程)
C_n [—]	n 次 Fourier 係数 (円柱, 冷却工程)
F_p [s]	細菌の殺菌値
l [m]	平板の半分の厚さ
h [$\text{W}/(\text{mK})$]	熱伝達率
$J_0(P_n), J_1(P_n)$ [—]	第 1 種 0, 1 次ベッセル関数

k [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$]	熱伝導率		温度降下
P_n [—]	(5) 式の n 番目の正根	λ_m [—]	(2) 式の m 番目の正根
R [m]	円柱半径	τ [—]	時定数 (平板: $\tau \equiv l^2/a$, 円柱: $\tau \equiv R^2/a$)
r [m]	円柱中心軸からの距離		
T [$^{\circ}\text{C}$]	温度	$\phi(t)$ [—]	カムアップ時のレトルト温度
T_c [$^{\circ}\text{C}$]	冷却温度		
T_{cu0} [$^{\circ}\text{C}$]	レトルト初期温度		文 献
T_h [$^{\circ}\text{C}$]	設定した熱媒体の温度		1) HAYAKAWA, K.: Heat Sterilization of Food, (Koseisha-Koseikaku, Tokyo), p. 109 (1983).
T_r [$^{\circ}\text{C}$]	殺菌参照温度		2) MIHORI, T., WATANABE, H. and KANEKO, S.: <i>J. Food Process. Preserv.</i> , 15 , 135 (1991).
T_0 [$^{\circ}\text{C}$]	モデル食品の初期温度		3) IIDA, Y.: <i>Proceedings of the International Heat Transfer Conference</i> , 4 , 527 (1982).
t [s]	時間		4) BECK, J.: <i>J. Heat Mass Transfer.</i> , 13 , 703 (1970).
t_q [s]	冷却開始時刻		5) HAYAKAWA, K.: <i>J. Food Sci.</i> , 36 , 378 (1971).
t_u [s]	カムアップ期間終了時刻		6) 日本缶詰協会: 缶詰製造講義, (1969. 9-1970. 3).
t_e [s]	冷却終了時刻		7) UNO, J. and HAYAKAWA, K.: <i>J. Food Sci.</i> , 45 , 1484 (1980).
u [s]	無次元温度 $= (T_h - T)/(T_h - T_0)$		(平成 8 年 10 月 7 日受付, 平成 9 年 3 月 30 日受理)
w [s]	時間の間隔数		
x [m]	平板中心からの距離		
Y_i [$^{\circ}\text{C}$]	レトルト温度		
z [$^{\circ}\text{C}$]	細菌の致死時間が 10 倍になる		