

動的計画法によるレトルト食品の 加熱殺菌温度プロフィールの最適化

寺島好己* 野中保雄**

Optimization of Retort Temperature Profile
during Thermal Processing of Conduction Heating Foods
in Retortable Pouches using Dynamic Programming

Yoshimi TERAJIMA*, Yasuo NONAKA**

A dynamic programming algorithm was developed to determine the optimum retort temperature profile for optimizing quality retention for a given sterilizing value during sterilization of conduction heating foods packed in retortable pouches.

To describe the changes in sensory and nutritional properties, the C-value (Ohlsson, 1980) was employed as well as in the previous papers. The objective function for volume average or surface C-value was minimized, provided a final F-value in the center was constrained.

The optimal retort temperature profiles determined by this procedure for both volume average and surface C-value were considerably similar to those presented in the previous papers. This method may be applicable to the heat treatment of canned foods for optimizing quality retention during heat sterilization.

Keywords : Thermal processing, Sterilization, Optimization, Dynamic programming, Optimal control, Retort, Retort temperature, Retort temperature profile, Retortable pouch

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が、そのためにはレトルト温度のプロフィールをどのようにすればよいかということは重要な問題である。本報では前報までと同様に一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、動的計画法を応用して最適なレトルト温度プロフィールの探索をこころみた。その結果、Cv値の体積平均を対象にした場合も、表面のCv値を対象にした場合も前報までに報告した最適プロフィールとほぼ似たプロフィールが得られた。動的計画法を応用したこの探索法は、缶詰食品の殺菌における品質保持を考える場合にも適用可能である。

キーワード : 加熱殺菌、殺菌、最適化、動的計画法、最適制御、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

前報では一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扁平な被加熱体を対象とし、変分法による最適制御の方法を応用して、多段型レトルト温度の最適化をこころみだが、Cv値¹⁾の体積平均を対象にした場合も、表面のCv値を対象にした場合も、結果は前報までに得られたプロフィールとよく似たプロフィールが得られた。

最適化の方法としては、種々のレトルト温度プロフィールを与えて最適プロフィールに近づく方法²⁾、多変数関数の最小化の方法³⁾、前報で用いた変分法による最適制御の方法⁴⁾および動的計画法などを応用して最適なプロフィールを探索する方法があるが、レトルト温度の最適化に動的計画法が応用された例は見あたらない。食品の乾燥に適用された例としては、Brookら⁵⁾の研究があり多段型の乾燥機の最適な大きさと稼働条件とを求めている。評価関数はエネルギーコストであり最終的な水分含有量と品質面での許容値を拘束条件としている。

本報では、前報と同様に一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扁平な被加熱体について、厚み方向の中心でのF値を一定にするという条件で、Browning reactionを対象にし、Cv値の体積平均または表面におけるCv値を最小にするという見方から、動的計画法を応用して最適なレトルト温度プロフィールの探索をこころみた。

2. 理 論

2.1 微生物や栄養素などの破壊速度

時間tが0から冷却終了時間T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であるが、それには、前報までに述べたように殺菌学でF値、Cv値として知られている量に関し、F値を一定としCv値を最小にするという問題を解けばよいことになる。ここでは一次元的な熱伝導を想定し、F値は中心を対象にすることにし、Cv値の体積平均をC_Mとすると、FとC_Mはつぎのように表わされる。

$$F = \int_0^T \exp\left(\frac{\theta_1 - \theta_{1s}}{z_1/2.303}\right) dt \quad (1)$$

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

ただし、

- z_1, z_2 : 微生物や栄養素などのD値¹⁾をもとの値の1/10にするのに必要な温度変化
- θ_{1s}, θ_{2s} : 標準温度¹⁾
- θ : 被加熱体の温度
- θ_1 : 被加熱体の中心温度
- a : 被加熱体の厚みの1/2
- T : 冷却終了時間

被加熱体の表面のCv値を対象にする場合には式(2)は表面温度を対象にすればよい。

2.2 動的計画法による最適制御問題⁶⁾

加熱殺菌において、所定の殺菌効果を達成しながら、栄養素や、テクスチャなどの品質面での劣化をできるだけさけるようにするという問題は、動的計画法による最適制御問題にあてはめることができる。しかし、この種の問題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ので、ここでは数値解について

考えてみることにする。

最適制御系は、状態方程式と評価関数とで特徴づけられる多段決定過程と考えられる。

いま、状態方程式が、つぎのように表わされる制御系を考える。

$$\frac{dx}{dt} = G(x, u) \quad (3)$$

$$x(0) = C \quad (4)$$

ただし、 x は状態変数、 u は制御変数を表わす。 C は定数である。

つぎの評価関数が最小になるように制御変数 u を決めるという問題である。

$$J = \int_0^T L(x, u) dt \quad (5)$$

従来、つぎのような解法がよく知られている。この問題を解くために、まず、 $0 \leq t \leq T$ の時間間隔を N 個の等しい間隔 $\Delta T = T/N$ に分ける。つぎに微分方程式 (3) を差分方程式に近似しなければならない。最も簡単な近似は

$$\begin{aligned} x((k+1)\Delta T) \\ = x(k\Delta T) + G(x(k\Delta T), u(k\Delta T))\Delta T \end{aligned} \quad (6)$$

である。同時に式 (5) で与えられる評価関数を

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} L(x(k\Delta T), u(k\Delta T))\Delta T \quad (7)$$

と近似する。そうすると、この問題はつぎのように変換される。式 (6) で定義される離散系が与えられたとき、制御変数列 $u(0), u(\Delta T), \dots, u((N-1)\Delta T)$ を式 (7) で与えられる評価関数が最小になるように決定する問題である。

$f_n(x)$ = 状態 x からはじめ、 $t = T = N\Delta T$ で終わる n 段階の過程に対する評価関数の

最小値、と定義するとつぎの式が成り立つ。

$$\begin{aligned} f_n(x) &= \min \left[\sum_{k=n}^{N-1} L(x(k\Delta T), u(k\Delta T))\Delta T \right] \\ &= \min \left\{ L[x((N-n)\Delta T), u((N-n)\Delta T)]\Delta T \right. \\ &\quad \left. + \min \left[\sum_{k=n+1}^{N-1} L[x(k\Delta T), u(k\Delta T)]\Delta T \right] \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

式 (6) より制御変数 u は状態 x を状態 $x + G(x, u)\Delta T$ に変換するので、つぎの関数再帰方程式を得る。

$$f_n(x) = \min [L(x, u)\Delta T + f_{n-1}(x + G(x, u)\Delta T)] \quad (9)$$

ただし、 $n = 1, 2, \dots, N$

$$f_1(x) = \min [L(x, u)\Delta T] \quad (10)$$

関数再帰方程式は、 $t = T$ の N 段階から出発し時間的には逆向きに計算して行く。

しかしながら、本報の問題では一次元熱伝導における温度分布を状態変数とし、レトルト温度を制御変数と定義するが、 n 段階過程が始まるときの温度分布の群を実際に与え、レトルト温度を適当に選んで、 $n-1$ 段階過程の温度分布の群と接続することは困難である。

なぜなら、一次元熱伝導における温度分布は、時間 $t = 0$ から n 段階過程が始まるまでのレトルト温度によって左右されるので、 n 段階過程が始まるときの温度分布の群をレトルト温度の経過を考えずに人為的に与えることはほとんど不可能であるからである。以上より、従来の方は本報の問題にはそのまま適用できないことになる。

そこで、ここでは、つぎのように考えることにする。一次元熱伝導において、被加熱体の表面温度をレトルト温度に等しいとした場合、厚み方向の温度分布を状態変数とし、レ

トルト温度を制御変数として、有限要素法の表現を使うと、制御系の状態方程式はつぎのように表わされる。

$$[K] \{\theta(t + \Delta t)\} = \{\theta(t)\} \quad (11)$$

$$\{\theta(0)\} = C \quad (12)$$

ただし、 $\{\theta(t)\}$: 時間 t での温度分布
 $[K]$: 変換マトリックス

このように変換すると、この問題は式 (11) の条件で式 (5) の評価関数が最小になるように制御変数 u を求める問題になる。

前にも述べたように、まず、 $0 \leq t \leq T$ の時間間隔を N 個の等しい間隔 $\Delta T = T/N$ に分け、 $t = T$ から $t = 0$ に向けて、1 段階、2 段階、……、 N 段階とする。ここで、 $x(t) = \{\theta(t)\}$ とおけば、式 (11) は、つぎのように表わされる。

$$[K] x((k+1)\Delta T) = x(k\Delta T) \quad (13)$$

評価関数は式 (7) がそのまま使えるので、問題はつぎのように整理できる。

式 (13) で定義された離散系が与えられたとき、式 (7) で与えられる評価関数が最小になるように、 $u(0), u(\Delta T), \dots, u((N-1)\Delta T)$ を決定するという問題に帰着する。

$f_n(x)$ = 状態 x から出発し、 $t = 0$ で終わる n 段階の過程に対する評価関数の最小値、と定義すると、式 (13) より制御変数 u は状態 x を時間と逆向きに状態 $[K]x$ に変換するのでつぎの関数再帰方程式が得られる。この場合、式 (10) はそのまま使える。

$$f_n(x) = \min [L(x, u)\Delta T + f_{n-1}([K]x)] \quad (14)$$

残り n 段と残り $n-1$ 段との温度分布の接続はつぎのように考える。

いまかりに n 段 ($(n-1)\Delta T \leq t \leq n\Delta T$) の $t = n\Delta T$ の時点である温度分布が与えられたと仮定すると、式 (13) よりレトルト温度を適当に選べば、 $t = (n-1)\Delta T$ における温度分布が求まる。この温度分布と同じ温度分布を $n-1$ 段の $t = (n-1)\Delta T$ ですでに離散化されている温度分布の群の中からさがして両者を接続させればよい。

しかしながら、 $t = n\Delta T$ で温度分布を与えることは、前に述べた理由により無理であるので以下のように考える。レトルト温度を適当に選べば、 $n-1$ 段の $t = (n-1)\Delta T$ でのある温度分布と n 段の $t = n\Delta T$ でのある中心温度 θ_1 とを結びつけることができる。すなわち、 n 段の $t = n\Delta T$ で θ_1 を含む温度分布が求まるが、この温度分布と先のレトルト温度を組み合わせて、式 (13) より $n-1$ 段の $t = (n-1)\Delta T$ での温度分布を求めたと考えればよいことになる。

このようにして、各段で離散化された θ_1 を含む温度分布の群を接続することができる。式 (14) と式 (10) の x と u とはつぎのように解釈する。

N	$x = x(0) = C$	$u = u(0)$	$n=1$
$N-1$	$x = x(\Delta T)$	$u = u(\Delta T)$	$n=2$
$N-2$	$x = x(2\Delta T)$	$u = u(2\Delta T)$	$n=3$
⋮	⋮	⋮	⋮
1	$x = x((N-1)\Delta T)$	$u = u((N-1)\Delta T)$	$n=N$

ここで、 $f_0 = 0$ であることはいうまでもない。

式 (14) より、現在の状態が x で残りの段数が n のとき、評価関数の最小値は現在の $L(x, u)\Delta T$ (時間間隔 ΔT での評価関数の値) と $f_{n-1}([K]x)$ [つぎの状態から出発する残りの $(n-1)$ 段階に対する評価関数の最小

値] との和を最小にすることにより求められる。

関数再帰方程式は、 $t=0$ のN段階から出発し、時間的には前向きに計算を進めて行く。これは、従来の方法とは全く逆の順序になる。

2.3 評価関数⁶⁾

問題は、2.1で述べたように、F値を一定にして C_M の値を最小にするということであるので、つぎのような評価関数を考える。

$$\int_0^T \exp\left(\frac{\theta_1 - \theta_{1s}}{z_1/2.303}\right) dt = Fc \text{ (一定)} \quad (15)$$

$$J = \int_0^T \frac{1}{2a} \int_{-a}^a \exp\left(\frac{\theta - \theta_{2s}}{z_2/2.303}\right) dx dt + \lambda \int_0^T \exp\left(\frac{\theta_1 - \theta_{1s}}{z_1/2.303}\right) dt \quad (16)$$

ただし、 λ : ラグランジュの未定乗数

被加熱体の表面の C_v 値を対象にする場合には、式(16)の右辺第1項は表面温度のみを対象にすればよい。

3. 結果および考察

3.1 数値計算の手順

①計算は最後のN段階から出発する。まず、 $n=1$ 段 ($0 \leq t \leq \Delta T$, N段階) を計算する。初期温度 θ_0 を与え、 $t = \Delta T$ における中心温度 θ_1 を離散化する。

θ_0 と離散化された θ_1 とから、各々の組み合わせに対して、レトルト温度 u が計算でき、 $f_1(x)$ が決定できる。このとき、 $n=1$ 段の終了時点で離散化された θ_1 を含めた温度分布の群が決まっていることになる。

②いま、レトルト温度を適当に選べば、①で求めた $n=1$ 段の終了時点での温度分布の群と $n=2$ 段の終了時点で離散化された θ_1 とを結びつけることができる。

すなわち、 $n=2$ 段の終了時点で離散化された θ_1 を含む温度分布の群が求まるが、この温度分布の群とレトルト温度を組み合わせて、式(13)より、 $n=1$ 段の終了時点で離散化された θ_1 を含む温度分布の群を求めたと考えれば、各段で離散化された θ_1 を含む温度分布の群を接続することができる。こうして $f_2(x)$ がきまる。

このようにして、 $n=N$ 段 ($(N-1) \Delta T \leq t \leq N \Delta T$, 1段階) まで進めればよいのである。

計算には、被加熱体の厚み方向の温度 θ が必要であるが、一次元熱伝導の場合、周囲の温度が時間によって変化するときの、被加熱体の厚み方向の温度 θ の理論解は、Duhamelの定理を使うと、つぎの式(17)のように求められる。

$$\theta(x, t) = \theta_0 \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n t) C_n + \int_0^t u(\tau) \sum_{n=1}^{\infty} A_n B_n \exp(-B_n(t-\tau)) C_n d\tau \quad (17)$$

ただし、

θ_0 : 初期温度

$u(t)$: 周囲温度

α : 温度伝導率

a : 厚みの1/2

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

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

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

x : 厚みの中心からの距離

$$\begin{aligned}
 \theta = & u_i - (u_i - u_{i-1}) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp[-B_n \{t - (i-1) \Delta T\}] C_n \\
 & - (u_{i-1} - u_{i-2}) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp[-B_n \{t - (i-2) \Delta T\}] C_n \\
 & \vdots \\
 & - (u_2 - u_1) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp[-B_n \{t - 1 \cdot \Delta T\}] C_n \\
 & - (u_1 - \theta_0) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp[-B_n \{t - 0 \cdot \Delta T\}] C_n
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

ただし、 $(i-1) \Delta T < t \leq i \Delta T$ 、 $i = 1, 2, \dots, N+1$
 $i = N+1$ は冷却領域である。

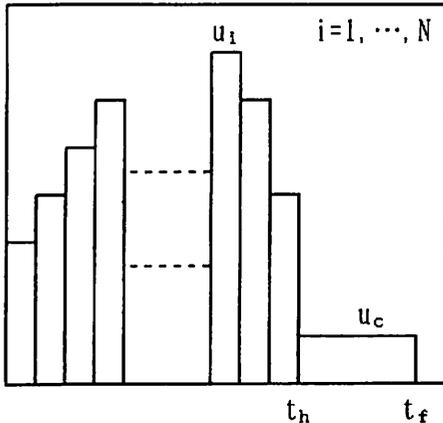


Fig. 1 Sequence of multiple steps

式 (17) を使って、レトルト温度が Fig. 1 のように表わされる場合の被加熱体の温度を求めるとつぎの式 (18) が得られる。

3.2 最適レトルト温度プロフィール

3.2.1 諸係数

数値計算は、一次元熱伝導を対象にし、被加熱体の表面温度はレトルト温度とし、温度計算には理論解を用いた。

被加熱体の厚みは 10 (mm)、温度伝導率は $9.6 \text{ (mm}^2/\text{min)}^{\text{7)}$ 、初期温度は $20 \text{ (}^\circ\text{C)}$ とし冷却温度は $20 \text{ (}^\circ\text{C)}$ とした。また、その他の各係数は次の通りである。 $F_c = 5.0 \text{ (min)}$ 、

$z_1 = 10 \text{ (}^\circ\text{C)}$ 、 $z_2 = 25 \text{ (}^\circ\text{C)}^{\text{7)}$ 、 $\theta_{1s} = 121.1 \text{ (}^\circ\text{C)} = 250 \text{ (}^\circ\text{F)}$ 、 $\theta_{2s} = 100 \text{ (}^\circ\text{C)}$

z_2 は栄養素や色やテクスチャなどうちのどれを対象にするかによってことなるが、ここでは、Browning reaction⁷⁾ を対象にした。

3.2.2 標準型プロフィール (1 段型)

Fig. 2 のような標準型プロフィールに関し、 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ から $150 \text{ }^\circ\text{C}$ のレトルト温度範囲で、式 (16) の評価関数のラグレンジの未定乗数 λ を種々変えて、レトルト温度と加熱時間の最適化の計算を行なった。加熱時間 t_h を任意に与えると、初期温度 θ_0 とレトルト温度の上限と下限から、 $t = t_h$ における中心温度 θ_1 の範囲が求まるが、その範囲で $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ きざみに中心温度 θ_1 を離散化した。

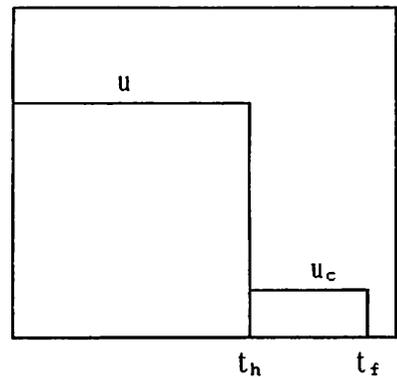


Fig. 2 Standard process

F や C_M の値は約 1sec きざみで計算したが、前報と同様に冷却領域では中心温度が $70 \text{ }^\circ\text{C}$ より低くなった時点で計算を打ち切った。 C_M の値は厚みを 10 分割して C_v 値を計算しその平均をとった。計算が終了したとき、 $-0.025 \leq F - F_c \leq 0.025$ を満たす計算結果から式 (16) の評価関数 J が最小になる解を選んだ。

Table 1 Standard process

u	t _h	F	C _M
135.35	202.0	4.987933	28.12481
134.95	205.0	4.983062	28.11906
134.56	208.0	4.979074	28.12764

Units : u (°C), t_h (sec), F (min), C_M (min)

以下の諸計算も同様である。

計算結果をTable 1に示すが、C_Mが最小になるのはレトルト温度が約135°C、加熱時間は約205secのときであることがわかる。ラグランジュ未定乗数は、λ = 1, 2, ~10, 50, 100, 150, 200, 250と変化させたが、同じ結果が得られた。この結果は加熱時間t_h、C_Mをも含めて前報までの計算結果とほとんど一致している。

3.2.3 2段型プロフィール

Fig. 3のような2段型の場合、前報で述べたように、レトルト温度u₁とu₂を変化させて逐次計算で最適値を求めると、u₁、u₂の最適値はそれぞれ約115°C、約136.5°Cであり、加熱時間t_hは約235secであった。

Fig. 3のような2段型プロフィールに関し

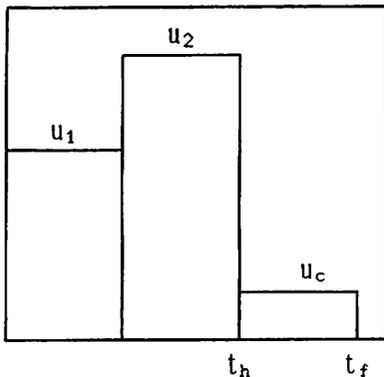


Fig. 3 Sequence of two steps

て、115°Cから150°Cのレトルト温度範囲で、式(16)の評価関数のラグランジュの未定乗数λを種々変えて、レトルト温度u₁、u₂と加熱時間の最適化の計算を行なった。その結果をTable 2に示す。ラグランジュ未定乗数は、λ = 1, 2, ~10, 50, 100, 150, 200, 250と変化させたが、同じ結果が得られた。Table 2の計算結果は逐次計算の結果とほぼ一致していることがわかる。

Table 2 Sequence of two steps

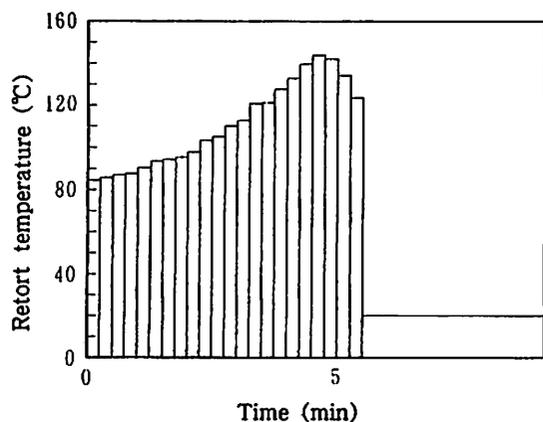
u ₁	u ₂	t _h	F	C _M
115.05	136.66	237.5	5.010102	26.73244
115.10	136.29	240.0	4.977171	26.67197
115.09	135.72	245.0	5.010105	26.78218

Units : u₁, u₂ (°C), t_h (sec), F (min), C_M (min)

3.2.4 多段型プロフィール

標準型と2段型の場合について、動的計画法による最適化の計算結果は、逐次計算による計算結果とほとんど一致した。そこでFig. 1のような多段型の場合について、式(16)の評価関数に関し、レトルト温度と加熱時間の最適化の計算を行なった。離散化する中心温度のきざみは標準型と2段型の計算の場合と同様に0.1°Cとし、各段の時間間隔ΔTは中心温度のきざみと実際の計算を考慮してΔT = 15secとした。前報までの結果からレトルト温度の最適プロフィールには一つのピークがあると考えられるので、まず最終段までの段数N_Fを与え、この段数を固定しピークの段N_Mを変えて計算しどの段がピークとして最適であるかを決定する。そして、つぎに段数N_Fを変えて、そのときのピークの最適段N_Mを決める。

このようにしてN_FとN_Mの組み合わせがで

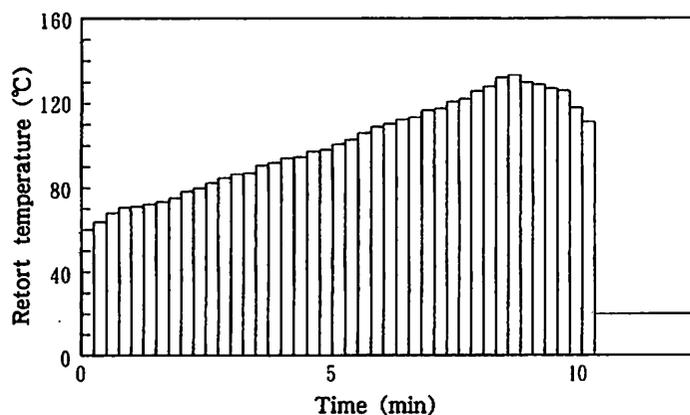


$t_h = 330.0$ (sec)
 $F = 5.004706$ (min)
 $C_M = 25.83147$ (min)

Fig. 4 Best sequence of multiple steps showing minimum volume average cook-value (C_M)

きるが、その中から式 (16) の評価関数が最小になる組み合わせを選んだ。式 (16) のラグランジュ未定乗数は、 $\lambda = 1, 2, \sim 10, 50, 100, 150, 200, 250$ と変化させたが、 $\lambda = 1 \sim 10$ のときに評価関数の最小値が得られた。

その計算結果を Fig. 4 に示すが、前報まで



$t_h = 615.0$ (sec)
 $F = 5.004169$ (min)
 $C_v = 42.90959$ (min)

Fig. 5 Best sequence of multiple steps showing minimum surface cook-value (C_v)

Table 3 Comparison of two methods for volume average cook-value (C_M)

Method	u_m	t_h	F	C_M
M-3	141.60	330.05	4.989803	25.76035
M-4	143.79	330.00	5.004708	25.83147

Units : u_m (°C), t_h (sec), F (min), C_M (min)

Note, M-3 : Optimization method used in the previous paper

M-4 : Optimization method used in this paper

Table 4 Comparison of two methods for surface cook-value (C_v)

Method	u_m	t_h	F	C_v
M-3	129.81	605.93	4.991373	41.88865
M-4	133.43	615.00	5.004169	42.90759

Units : u_m (°C), t_h (sec), F (min), C_M (min)

Note, M-3 : Optimization method used in the previous paper

M-4 : Optimization method used in this paper

の結果とほぼ似たプロフィールが得られた。最高温度 u_m 、加熱時間 t_h 、 C_M などの前報の結果との比較を Table 3 に示す。最高温度は本報の方がわずかに高いが、加熱時間、 C_M ともほぼ同じであることがわかる。しいていえば、 C_M の値がわずかに小さい前報の方がよいプロフィールであると考えられる。

また、Fig. 5 に表面の C_v 値を対象にした場合の計算結果を示すが、この場合も前報までの結果とほぼ似たプロフィールが得られた。

Table 4 より、表面の場合は最高温度 u_m 、加熱時間 t_h 、 C_v 値とも前報とはわずかに異なっていることがわ

かる。Cv値は前報の方が小さいので、前報の方がよいプロフィールであると考えられる。前報と本報の結果の違いは、中心温度を0.1℃おきに離散化したこと、厚みの分割数（前報では20分割、本報では10分割）および各段の時間間隔を15secにしたことなどが影響していると考えられる。

4. 結 論

動的計画法による最適制御問題に関して、従来の数値解法はそのまま本報の問題にはあてはめることができないので、従来の解法と時間的に全く逆の解法を考えてみた。

この解法を用いて、多段型レトルト温度プロフィールの最適化をこころみたが、Cv値の体積平均を対象とした場合も、表面のCv値を対象とした場合も、計算結果は前報までに得られたプロフィールとほぼ似たプロフィールが得られた。前報の結果と比較すると、最適

値の計算の面でいくぶん劣るようであるが、これは中心温度の離散化のきざみ、厚みの分割数、各段の時間間隔およびラグランジュの未定乗数の決め方などが影響していると考えられる。

<引用文献>

- 1) Ohlsson, T., J. Food Sci., 45, 836 (1980)
- 2) 寺島好己、野中保雄、日本包装学会誌、3 (3), 152 (1994)
- 3) 寺島好己、野中保雄、日本包装学会誌、3 (3), 164 (1994)
- 4) 寺島好己、野中保雄、日本包装学会誌、3 (4), 217 (1994)
- 5) Brook, R. C. and Bakker - Arkema, F. W., J. Food Proc. Eng., 2, 199 (1978)
- 6) 尾形克彦、“ダイナミック・プログラミング”、培風館、p.239 (1980)
- 7) Ohlsson, T., J. Food Sci., 45, 848 (1980)

(原稿受付 1994年1月18日)

(審査受理 1994年7月19日)