

ATS (Ambient Temperature Slide) 法のパラメータ決定に関する研究

稲葉 正一, 藪川 啓司

A Method of Determining the Parameters for the ATS Method (Ambient Temperature Slide)

Shoichi Inaba and Keiji Yabukawa

This article describes a suggested improvement for the ATS method (Ambient Temperature Slide) invented by Mukai in 2006. This method has great potential to be used for modeling in the field of heat-sterilized foods, because it can calculate the temperature of the cold spot and lethality from any retort temperature pattern, once the ATS parameters have been obtained from a single heat sterilization experiment. The delay-time parameter, δ , is usually determined manually, so we propose obtaining it automatically using the properties of the relationship between the value of δ and the deviation ratios calculated from the difference between the measured and calculated temperatures. Determining these properties has led to a strategy to calculate δ automatically.

Key words: ATS method, heat sterilization, lethality, numerical calculation, parameter, delay time

1. はじめに

容器詰食品の加熱殺菌において、必要な殺菌値を確保しながらも加熱変性を抑え、さらに全体の工程時間に配慮して殺菌時間を最適化する必要がある。そのためには少なくとも容器詰食品の内部で最も殺菌しにくい場所である最小加熱点^(※1)の温度を把握し、加熱殺菌条件を変更して最適化を行うことが必要となる。加熱殺菌条件の温度および時間の組み合わせである最適な雰囲気温度パターンを決定するための条件出しに数値計算を導入することは作業効率向上の一助になる。

加熱殺菌に関する数値計算手法としては、百年近く前に Ball により提案された Formula Method¹⁾ が既に存在する。加熱殺菌された容器詰食品を米国に輸出する工場には FDA に認められた殺菌主任技術者がいることが必須であり、殺菌主任技術者試験には Ball 法に関する出題があるため、Ball 法を理解習得することが求められている。

Ball 法も Simpson²⁾ 等により改良されているが、基本は変わっていない。それに対し、日本では向井が 2006 年に Ball 法とは計算方法の概念が異なる ATS (Ambient Temperature Slide) 法を提唱した³⁾。

ATS 法は時分割方式であり、デジタルデータ処理との親和性が高い。データは Microsoft Excel[®] (Excel) 上で入出力および表示され、Visual Basic Application[®] (VBA) で計算される。

ATS 法のプログラムは ATS 法研究会から公開されているが、雰囲気温度パターンから最小加熱点温度を再現する精度が高いという実績と技術者がなじんでいる Excel で

処理できるところに発展性と汎用性がある。食品会社が開発現場で使用する場合には更に使いやすさを向上させる必要があると考えられたため、プログラム⁴⁾を改良することにした。

改良すべき最優先事項として、手動で試行錯誤して決定していた ATS 法のパラメータ決定を自動化することとした。本報では、自動化のために取得した基礎データを報告し、自動化の手順を明らかにする。

2. ATS 法の計算法とパラメータの決定

ATS 法では、遅れ時間 δ と伝熱係数 τ を容器詰食品ごとに加熱側及び冷却側で求めて、雰囲気温度から最小加熱点温度が式 1 で計算される³⁾。加熱側とは雰囲気温度において冷却開始時点までの期間を指し、冷却側とは冷却開始から全工程終了までの期間を指す。一般に加熱側と冷却側は伝熱機構が異なるため、ATS 法のパラメータも別々に求める必要がある。加熱側の遅れ時間を δ_h 、冷却側の遅れ時間を δ_c と表す。更に伝熱係数もそれぞれ二つのパラメータ τ_h と τ_c で表す。

※1 容器詰食品の加熱殺菌において計測すべき位置とその温度についてはいくつかの用語がある。位置を示すのは、冷点、最遅速加熱点で、位置と温度を示すのは中心温度、温度のみは品温である。これらの用語は、温度について注目されているが、筆者は最も計測する必要があるのは殺菌値が最小の位置と考えているので、本報ではその位置を最小加熱点と呼ぶことにした。最小加熱点の温度は最小加熱点温度になる。英語では Cold Spot を使用することにする。

雰囲気温度パターンから最小加熱点温度を計算する際には、時分割 n 番目の時点の経過時間を t とし、そのときの雰囲気温度: T_w から最小加熱点温度: T_{pn} を計算すると、時分割 $n-1$ 番目の最小加熱点温度 T_{pn-1} と δ , τ を用いて (式 1) で計算される³⁾。

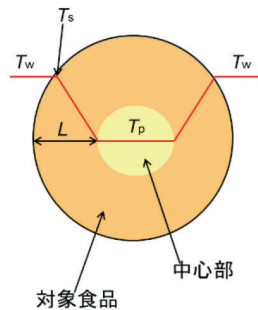


図1 ATS法の記号の説明図

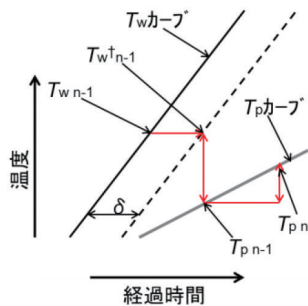


図2 ATS法の計算イメージの説明図(*3)

$$T_{pn} = T_{pn-1} + \tau \cdot (T_w(t - \delta) - T_{pn-1}) \cdots (式 1)$$

ATS法を容器詰食品の加熱殺菌工程の検討に用いる場合、当該容器詰食品の想定される充填形態で実際に加熱試験を実施し、雰囲気温度と最小加熱点温度の関係からATS法のパラメータを求める必要がある。

ATS法のパラメータの決定方法を説明する。まずATS法のプログラムに δ を与えると、式1で計算した計算値と実測値で得られた殺菌値が最も小さくなるように τ が決定される。これを、「収束計算」と呼ぶ。様々な δ で収束計算を行い、(式2)でズレ比率⁵⁾を計算し、Pが最も小さくなった δ と τ をパラメータとして採用する。

$$\text{ズレ比率} = \sum_{\text{開始}}^{\text{終了}} \sqrt{\frac{(\text{計算温度} - \text{実測温度})^2}{\text{実測温度}^2}} \cdots (式 2)$$

ズレ比率が小さいほど雰囲気温度パターンから最小加熱点温度の再現性が高い。図3にズレ比率が異なる場合に実測値と計算値の位置関係を示す。ズレ比率が小さい場合、重なって見えるが、遅れ時間が大きい場合には計算値が実測値の下側に、遅れ時間が小さい場合には計算値が実測値の上側に位置する。また計算値と実測値の離れ具合でズレ比率を直感的に判断できる。

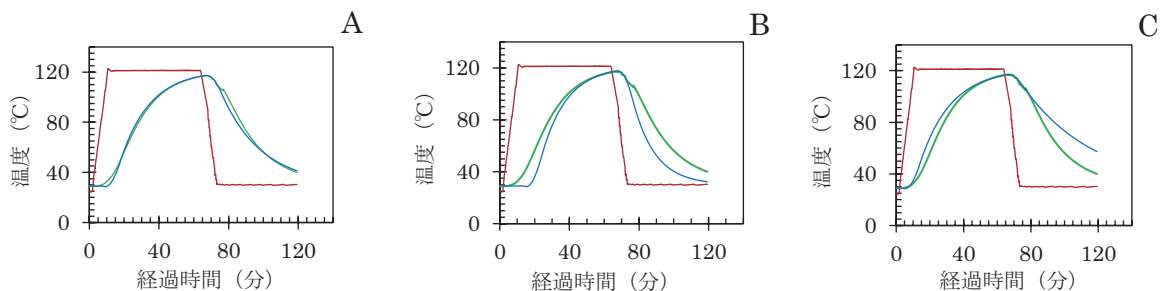


図3 遅れ時間 δ を変更して収束計算を行った場合の実測値と計算値の位置関係の例

赤線は雰囲気温度、青線は最小加熱点温度の実測値、緑線は最小加熱点温度の計算値。A (最適 δ での収束計算の結果) $\delta_h = 348$, $\delta_c = 156$, $\tau_h = 1.0 \times 10^{-3}$, $\tau_c = 0.72 \times 10^{-3}$, B (δ が最適 δ より大きい場合) $\delta_h = 800$, $\delta_c = 200$, $\tau_h = 1.2 \times 10^{-3}$, $\tau_c = 1.3 \times 10^{-3}$, C (δ が最適 δ より小さい場合) $\delta_h = 200$, $\delta_c = 100$, $\tau_h = 0.90 \times 10^{-3}$, $\tau_c = 0.40 \times 10^{-3}$ (δ の単位は秒)

3. ATS 法のプロプログラム

3.1. ATS 法のオリジナルプログラムの構成

ATS 法のオリジナルプログラムは 2 種類あり、一つは、「カーブフィッティングプログラム」で、もう一つは「受け取り型プログラム」と呼ぶ。

カーブフィッティングプログラムは、入力データとして時分割された経過時間、雰囲気温度、最小加热点温度の数列を入力後、任意の δ_h 、 δ_c の組み合わせで収束計算を実施する。前述の様に収束計算により τ が決まるため、ATS 法の利用者は最適な δ を自身で決める必要があった。その際に、計算で得られた最小加热点温度の曲線が実測温度の上方にある場合には δ を大きくし、下方の場合には δ を小さくして収束計算を繰り返すのがノウハウであった^(*)3)。収束計算で得られたズレ比率の値が 1% を下回れば実験値の再現性は十分と考えられていた。1% 以上であれば、何回か試行し、加熱側及び冷却側でズレ比率が最小となる δ の組み合わせを選択する必要があった。

未知の雰囲気温度パターンについて予測計算を行う場合には、別途雰囲気温度パターンを作成し、時分割した経過時間と雰囲気温度パターンの数列として入力し、ATS 法のパラメータ値を受け取り型プログラムに手動で入力した後に、式 1 に基づいたプログラムで自動計算する。結果として経過時間に対し、最小加热点温度と殺菌値の時系列の数列が得られ、それらが図として表示される。

3.2. ATS 法プログラムの改良

当初のプログラムでは手動で δ を決定していたため、ズレ比率が小さい値が求められれば良いが、ズレ比率が小さくならない場合など、何度も試行錯誤を繰り返す必要があった。今後、 δ を自動設定できれば時間短縮が可能である。 δ を自動決定するためのアルゴリズムを見つけるために、 δ を変化させた場合のズレ比率の変化特性を把握することとした。

4. 実験方法

4.1. 加熱殺菌データの取得

4.1.1. 内容物

熱伝導性である 6wt% デンプン液は、デンプン(ワキシーコーンスターチ) 90 g に水 1410 g を加え、かき混ぜながら 70℃ まで加熱して調整し、充填は徐冷中に行った。加熱殺菌試験は室温まで自然冷却してから開始した。

4.1.2. 各容器の充填・密封条件

缶詰は、呼び内径 74.1 mm 天地巻締 缶高 81.3 mm 内容積 322 ml の 5 号缶にデンプン液 285 g を充填して 301 蓋を東洋製罐製 M-2 セミオートマチックバキュームシーマーで、チャンバーバキュームゲージ圧設定 -15kPa で密封した。

パウチ詰は、層構成が外側から 12 μ m PET / 15 μ m ナイ

ロン / 7 μ m アルミ / 50 μ m PP 目安容量 300 g のスタンディングパウチ 幅 140 mm × 高さ 180 mm × 厚さ 38 mm にデンプン液を 200 g 充填し、富士インパルスシーラー F1-450-10W でエアーが残らないよう注意して密封した。

カップ詰は、口径 73 mm 高さ 32 mm 呼び内容積 105 ml のオキシガードカップ LRX84-105W にデンプン液 70 g を充填し、ユタカ産業製 SMX-2S 形を用いて炭酸ガス 5 l/min、窒素ガス 5 l/min の混合ガスでガス置換しながら、シンワ機械製 単発カップシール機 SN-2S 型を用いて、層構成外側から 12 μ m PET / 7 μ m アルミ / 15 μ m ナイロン / 50 μ m PP の蓋材を熱溶着で密封した。

4.1.3. 加熱殺菌装置と温度測定機器

レトルト装置は東洋製罐製シミュレーターレトルト(H130-C110)を使用し、加熱殺菌方式は各種容器詰食品に共通して適用できるシャワー方式を選択した。温度測定は、エラブ社有線式温度計測システム(E-Val Flex)と ϕ 1.2 でプローブ長さ 100 mm の温度センサー SSA12100E-ID を用いた。

最小加热点温度は、それぞれの容器詰食品において、容器の幾何学的中心にセンサーを配置して、3 個の容器詰食品で品温を測定し、最も殺菌値の小さかった温度データを最小加热点温度とした。雰囲気温度はスパーサーを用いて殺菌棚の底面から約 2 mm 浮かせてセンサーを取り付けた。

4.1.4. 加熱殺菌条件

缶詰の場合、18℃ から 121.1℃ まで 10 分間で昇温し、殺菌温度 121.1℃ で 53 分間保持した後、4 分間で 100℃ まで、その後の 4 分間で 30℃ まで冷却し、最小加热点温度 40℃ まで 30℃ を保持した。最終的に殺菌値は $F_0 = 6.4$ 分であった。パウチ詰の場合、18℃ から 10 分間で 120℃ まで昇温、殺菌温度 120℃ で 23 分保持した後、4 分間で 90℃ までその後の 4 分間で 30℃ まで冷却し、最小加热点温度 40℃ まで 30℃ を保持した。最終的に殺菌値は $F_0 = 12.8$ 分であった。カップ詰の場合、18℃ から 80℃ まで 10 分間で昇温、その後 15 分間で 120℃ まで昇温し、殺菌温度 121.1℃ で 17 分間保持した後、7 分間で 100℃ までその後 13 分間で 30℃ まで冷却し、最小加热点温度 40℃ まで 30℃ を保持した。最終的に殺菌値 $F_0 = 6.8$ 分であった。

ATS 法のパラメータ取得に当たり重要なことは、加熱殺菌試験における容器詰食品の熱特性が他の条件に適用しても差異が無視できる程度に小さいことである。これらの殺菌試験においては、最小加热点温度も殺菌温度近くまで上がっており、ATS 法のパラメータを取得するならば、殺菌値が全く一致する必要がないと判断した。

4.2. 加熱殺菌データの ATS 法による解析

δ とズレ比率の関係を把握した手順を記す。最初に δ_c を一定値に固定し、 δ_h を一定間隔で変えながら ATS 法の収束計算を実施した。次いで、 δ_h を加熱側のズレ比率が最

小となった値に固定し、 δ_c を一定間隔で変えながらATS法の収束計算を実施した。最後に δ_c を冷却側ズレ比率が最小値になった δ_c に固定し、再び δ_h を一定値で変えながらATS法の収束計算を実施し、加熱側のズレ比率を求めた。 δ を変える際には温度測定の間隔である3秒間を最小値とした。

5. 結果と考察

5.1. 加熱殺菌試験結果

雰囲気温度は3点測定したが、殺菌棚の真ん中付近に配置した雰囲気温度2のセンサーの温度データを雰囲気温度とした。他の2点では雰囲気温度2の測定値と2℃以上の差がないことを確認した。

加熱殺菌試験の結果を図4に示す。

缶詰の殺菌値は、ばらつきが1分以下であり、高い精度で温度測定できた。パウチ詰では、計測された温度カーブは一本に見えるほどに一致していたため、やはり温度は高い精度で測定できたが、缶詰やカップ詰の2倍の殺菌値にしたためバラツキは1分程度と大きくなった。カップ詰では各温度測定値は缶詰やパウチ詰よりバラツキが大きかったが、いずれの容器詰食品も最も殺菌されにくい事例を取り扱うという食品業界の常識に従い、殺菌値が最も小さい測定値をATS法の解析対象とした。カップ詰は温度センサーの固定方法によりバラツキが大きいことが知られている。

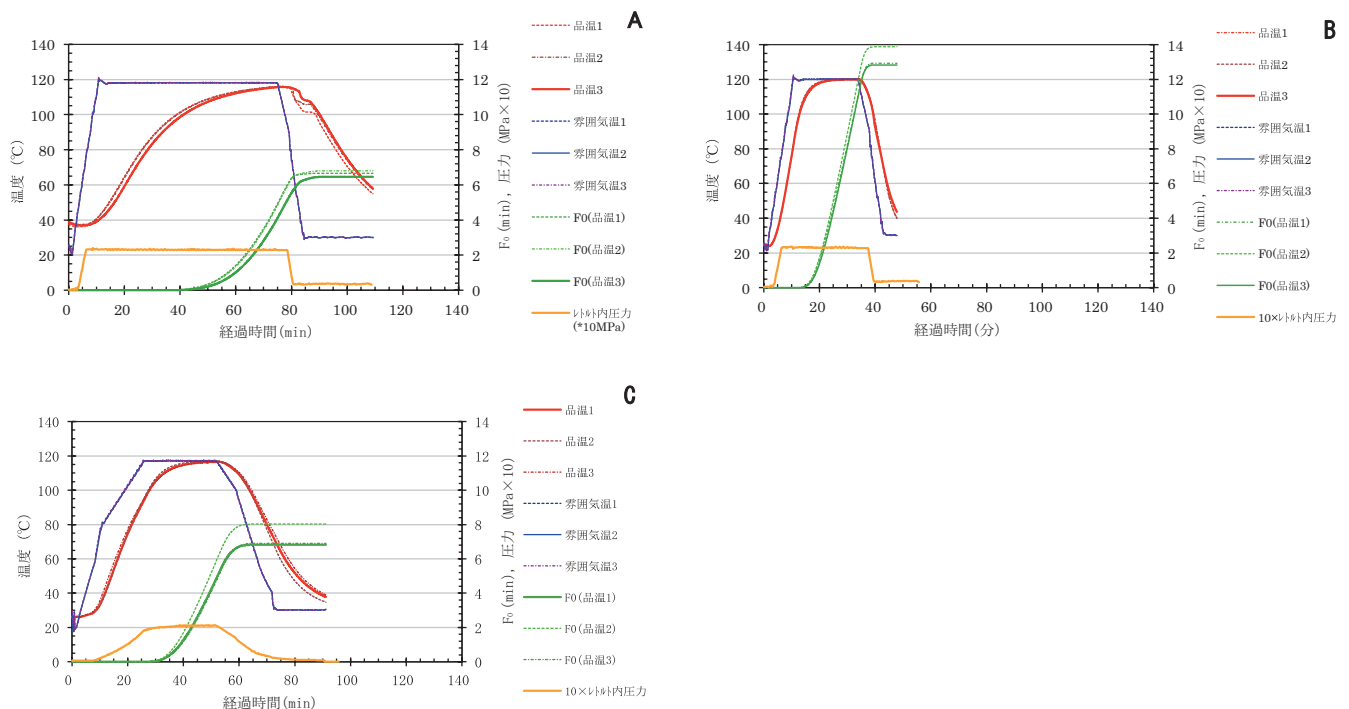


図4 各容器詰の加熱殺菌試験結果

加熱殺菌の経過時間と雰囲気温度、最小加熱点温度（品温と表示）、最小加熱点温度から計算された F_0 値を示す

A：デンブン液缶詰 B：デンブン液パウチ詰 C：デンブン液カップ詰

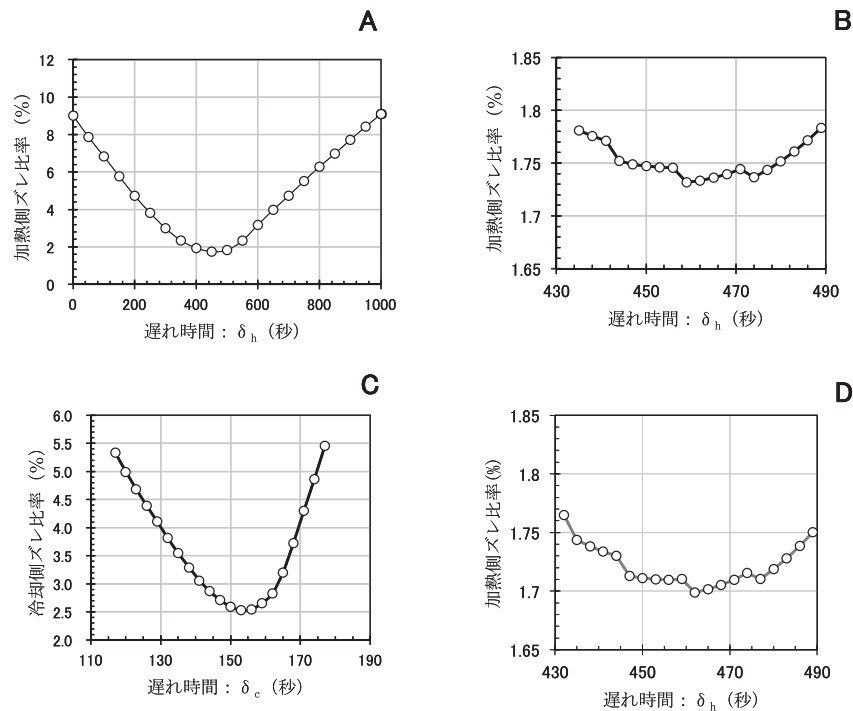
5.2. ATS法の収束計算の結果

4.2の手順で δ とズレ比率の関係を求めた結果を缶詰については図5に、パウチ詰については図6に、カップ詰については図7に示す。

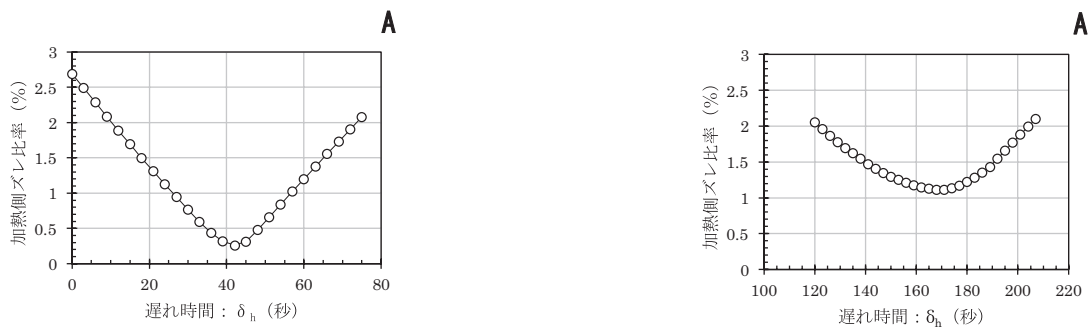
加熱側のズレ比率は遅れ時間に対して、下に凸の曲線であり、 $\delta_h = 459$ 秒で最小となった。また、冷却側のズレ比率は $\delta_c = 153$ 秒で最小になった。更に $\delta_c = 153$ 秒とした時の加熱側のズレ比率は $\delta_h = 462$ 秒で最小となった。ズレ比率が最小となる δ_h はわずかに3秒異なっていたが、 $\delta_c =$

153秒の時の $\delta_h = 459$ 秒と $\delta_h = 462$ 秒の時のズレ比率の差は、わずかに0.01%であるため、実測値の再現性には問題がないと考える。そして、ズレ比率の最小値は、 δ_c の値を最適化したため $\delta_c = 90$ 秒の場合より小さくなった。

結局のところは $\delta_h = 462$ 秒で、 $\delta_c = 153$ 秒で収束計算を行って得た $\tau_h = 0.95 \times 10^{-3}$ 、 $\tau_c = 0.65 \times 10^{-3}$ が前記 δ_h 、 δ_c とともにデンブン液缶詰の最も最適なATSパラメータとなる。

図5 デンプン液缶詰の遅れ時間 δ とズレ比率の関係

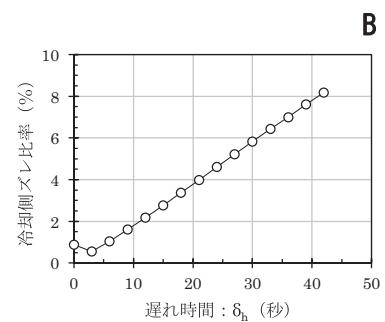
A: $\delta_c=90$ 秒に固定し, δ_h を 50 秒毎に増やした場合 B: $\delta_c=90$ 秒に固定し, δ_h を 3 秒毎に増やした場合 C: $\delta_h=459$ 秒に固定し, δ_c を 3 秒毎に増やした場合 D: $\delta_c=153$ 秒に固定し, δ_c を 3 秒毎に増やした場合

図6 デンプン液パウチ詰の遅れ時間 δ とズレ比率の関係

A: $\delta_c=9$ 秒に固定し, δ_h を 3 秒毎に増やした場合 B: $\delta_h=42$ 秒に固定し, δ_c を 3 秒毎に増やした場合

加熱側ズレ比率は $\delta_h=42$ 秒で, 冷却側のズレ比率は $\delta_c=9$ 秒で最小となり, この値で収束計算を行って得た $\tau_h=5.1 \times 10^{-3}$, $\tau_c=4.0 \times 10^{-3}$ が前記 δ_h , δ_c とともにデンプン液パウチ詰の ATS パラメータとなる.

加熱側のズレ比率は $\delta_h=171$ 秒で, 冷却側のズレ比率は $\delta_c=3$ 秒で最小となり, この値で収束計算を行って得た $\tau_h=2.7 \times 10^{-3}$, $\tau_c=1.5 \times 10^{-3}$ が前記 δ_h , δ_c とともにデンプン液カップ詰の ATS パラメータとなる.

図7 デンプン液カップ詰の遅れ時間 δ とズレ比率の関係

A: $\delta_c=3$ 秒に固定し, δ_h を 3 秒毎に増やした場合 B: $\delta_h=171$ 秒に固定し, δ_c を 3 秒毎に増やした場合

図8はズレ比率が最小となった場合の実測値と計算値の位置関係を示す図である。特にパウチ詰とカップ詰では、実測値と計算値は良く一致した。一方、缶詰の場合、

冷却カーブに急激な温度変化があるためにズレ比率が小さくならないことが示唆された。

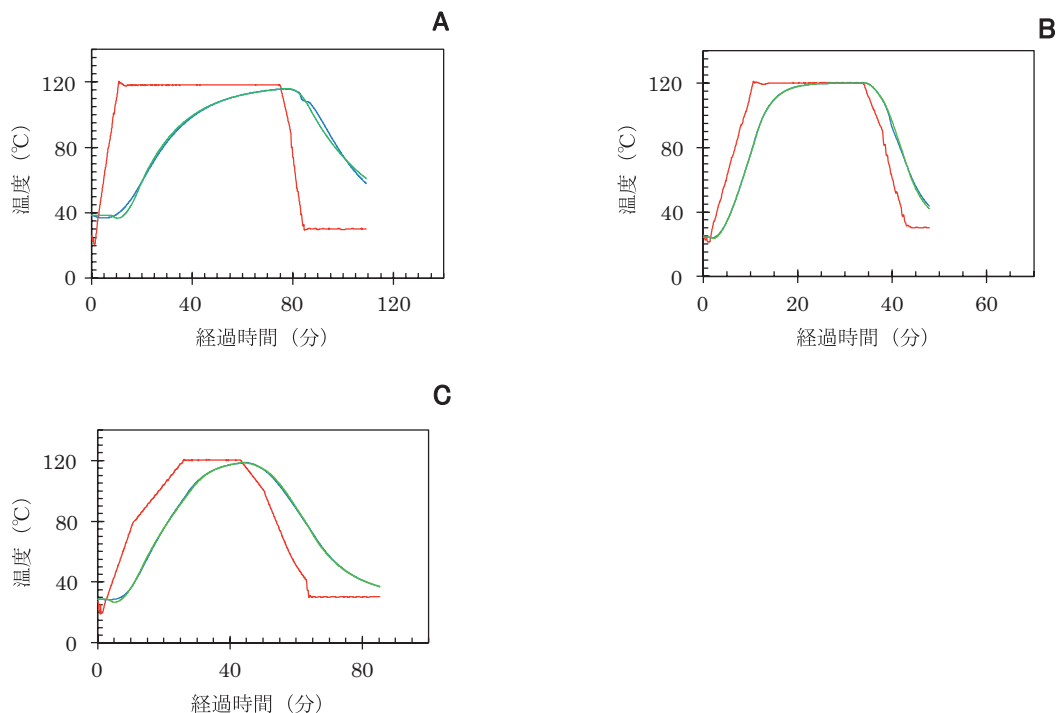


図8 求めた最適な遅れ時間 δ で収束計算を行った場合の実測値と計算値の位置関係

赤線は雰囲気温度、青線は実測した最小加热点温度 緑線は最小加热点温度の計算値 A (缶詰), B (パウチ詰), C (カップ詰)

6. 結論

デンプン液缶詰、パウチ詰、カップ詰の加熱殺菌試験で得られたデータに対し、ATS法の遅れ時間パラメータ δ を変えてATS法の収束計算を行ったところ、加熱側および冷却側のズレ比率が最小となる δ の値は各容器で大きく異なり、曲線の形も異なっていたが、 δ に対して下に凸の曲線でほぼ最小値を示すという基本的な性質は変わらなかった。また、冷却側の δ を変更してもズレ比率が最小となる加熱側の δ は同じ値であった。

加熱側と冷却側のズレ比率は、お互いに相互干渉し、加熱側および冷却側のズレ比率が最小となった δ で収束計算を行って得た場合がATS法のパラメータとなる。今回のように加熱側および冷却側でズレ比率が最小となる δ をそれぞれ求める手法が有効と考える

7. さいごに

本方法を用いて δ を求めるプログラムを制作し、東洋食品研究所のホームページに掲載する予定である。規定に沿ってダウンロードして利用ください。

参考文献

- 1) 容器詰食品の加熱殺菌 (理論および応用) 発行者 公益社団法人日本缶詰協会
- 2) R. Simpson Jpurnal of Food Science Vol.68, Nr.4 2003 1324-1333
- 3) 向井勇, レトルト殺菌における食品温度履歴の簡便な推定法, 日本食品工学会誌, vol.7, No.3, pp197-205, Sep.2006
- 4) 一般社団法人 ATS法研究会からの提供
- 5) 向井勇, 朱政治, 温度履歴曲線の相似関係によるATS法の理論的課題の解明, 日本食品工学会誌, Vol.16, No.3, pp209-207, Sep.2015

謝辞

一般社団法人 ATS研究会の向井氏にはプログラム提供から始まり様々なアドバイスを頂きました。この場を借りてお礼申し上げます。