

含気容器詰の加熱殺菌における制御圧力曲線の検討

稲葉 正一^{1,2}、羽倉 義雄²

Explanation of Method of Pressure Control of Retort Equipment used for Heating of Plastic Food Containers

Shoichi Inaba^{1,2} and Yoshio Hagura²

To prevent the deformation of pressurized food containers during temperature changes, retort pressure control methods are used to maintain an appropriate pressure within the container gas headspace. The simplest of these, known as the Taguchi method, involves manual control of the retort pressure based on the measured temperature within the container. There is, however, a lack of understanding concerning the applicability of various types of containers and retort methods, and selection of the location of temperature measurement and respective offset values proposed by Taguchi. This study resolved these issues and provides an explanation of them.

Three types of plastic cups with different thicknesses of gelatinized starch were used. Temperature within the cups was measured in the central vertical direction during a thermal process in which the cups were heated to 120° C for 30 minutes using a hot-water shower-type retort. The pressure calculated based on the temperature of the air within the cups during the heating process showed better consistency with the measured pressure than that measured at other locations. During the cooling process, the pressure calculated from the temperature within the retort chamber was strongly consistent with the measured pressure. The reason why the chamber temperatures and offset values are used in the Taguchi pressure calculation is attributed to the good heat conductivity of the contained air.

1. はじめに

含気状態のプラスチックカップ詰食品の加熱殺菌では、殺菌庫内温度（雰囲気温度）の上昇に伴い内容物温度が上昇する。内容物温度の上昇に伴いカップ詰内の圧力も増加する。一方、包材の素材であるプラスチックは高温になるほど剛性が低下し、熱溶着部の強度も低下する。そのため加熱殺菌中の商品価値を逸する変形や密封不良の発生を防ぐ目的で、加熱装置内の圧力を容器内圧と均衡するよう空気加圧によって装置内の圧力を調整する等圧制御が求められる。等圧制御方法は種々あるが（東洋製罐株式会社 2007；清水ら 2022；田口 1994；漆原ら 2001；山野 1979）、測定した温度から圧力に変換した値で調整する方法であれば、装置に求められる機能は手動による圧力制御機能のみであり、装置コストの面でメリットがある。先行技術としては、田口が作成した温度と圧力の関係図²⁾（田口法・田口 1994）が広く知られている。この田口法の詳細を確認したところ、下記の 2 点についての説明が不足していた。

1-1. 適用範囲

田口法は、論文作成当時に実用化が求められていた飲料用の細長いカップ容器を対象に、静置から種々の回転数の

回転殺菌を熱水満水式で実施し、内容物であるでんぷん液については濃度を変えることで粘度を変えて幅広く検討した結果が報告されている。ただし、形状の異なる容器や熱水満水式以外の加熱殺菌方法などへの適用性については説明不足であった。

1-2. 計算の基準値となる温度測定位置とオフセット値

本報告の付録に田口法による容器内圧計算方法を示したが、内圧は加熱過程では含気部温度、冷却過程においては雰囲気温度から計算される。また冷却過程においては、計算値に対し 0 ~ 20 kPa のオフセット値： α を加えている。温度測定位置が変更される理由とオフセット値：0 ~ 20 kPa を加えている理由についても説明が不足していた。

そこで本研究では田口（1994）とは全く異なる条件で容器内圧と等圧となる圧力を制御圧力として取得して、田口法の容器形状および加熱殺菌方式に対する汎用性と制御圧力を計算する時に使用する温度測定位置を選択した理由について検証することとした。容器としては高さの低いカップを使用し、加熱殺菌は熱水シャワー静置方式とした。また、田口法は加熱殺菌中の容器形状を目視で観察しながら等圧になる制御圧力曲線を取得した結果であるが、本研究では自動制御方式を採用した。

¹ 公益財団法人 東洋食品研究所 (Toyo Institute of Food Technology)

² 広島大学大学院 統合生命科学研究科 (Graduate School of Integrated Sciences for Life, Hiroshima University)

2. 実験方法

2-1. 測定サンプルの作成

使用したカップ容器の断面図を Fig. 1 に示す。ポリプロピレン (PP) 製で外径 61 mm、内側高さ 30 mm とし、側壁および底部の肉厚を同一厚さに指定して旋盤加工により製作した。各容器の肉厚: t は 0.5、1.0、2.0 mm であった。

水溶性攪拌しながら 70°C まで加熱して自然冷却した 6% 糊化でんぷん液約 60 g をカップに充填し、東洋製罐製フィルム蓋材 (外面から 12 μm ポリエチレンテレフタレート (PET) / 7 μm アルミニウム / 15 μm ポリアミド / 70 μm PP) を 175°C -1.7 秒間 -1 kN / カップの設定で、シンワ機械製単発カップシール機を使用し、熱溶着して密封した。充填された糊化でんぷん液は高さ 22.5 mm で残りの上部 7.5 mm の含気部分はガス置換をせずに空気とした。

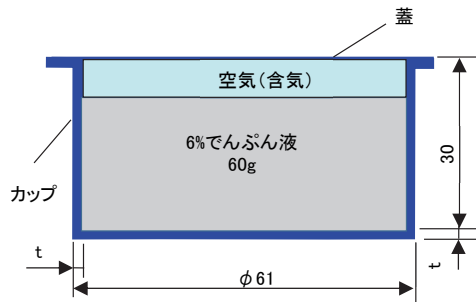


Fig. 1 でんぷん液カップ詰の断面図

2-2. 加熱・冷却試験

加熱・冷却試験は東洋製罐製 SIMULATOR RETORT H130 (C110) で近接センサーを使用した等圧熱水シャワー方式で実施した。殺菌庫内の雰囲気およびカップ内の温度、制御圧力の測定は Ellab 社製計測システムを使用した。温度は T 型熱電対式温度センサー SSA-12100 (ϕ 1.2 mm) を、制御圧力は圧力センサー DIGITAL PRS SENSOR を、それぞれデータ記録計 E-Val Flex に接続して測定した。高さ方向の温度分布は容器底部外面を $h=0$ として、中心軸上の $h=5$ 、10、15、20、22.5、25 mm の位置の 6 点を測定した。22.5 mm は糊化でんぷん液と含気の界面付近、25 mm は含気部である (Fig. 2)。

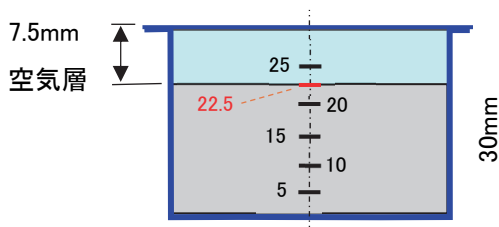


Fig. 2 でんぷん液カップ詰温度測定位置

中心軸上のカップ底外面からの高さ 5 mm ずつ配置した温度センサーで測定。ただし 22.5 mm は界面近くとして特別に配置。

含気容器詰の加熱殺菌における雰囲気温度パターンには制約がある。昇温中に内容物が十分加熱されて水蒸気が供給されることで内圧が発生することから、急激に雰囲気温度を上げると内圧不足により容器潰れが発生する。そのため昇温時間をパウチ詰食品等の殺菌条件より長く設定したパターンとした (Fig. 3)。冷却過程の終了は $h=15$ mm の温度が 40°C を下回った時点とした。そして加熱殺菌の開始から殺菌温度である 120°C の保持が終了するまでを加熱過程、その後の全工程が終了するまでを冷却過程とした。

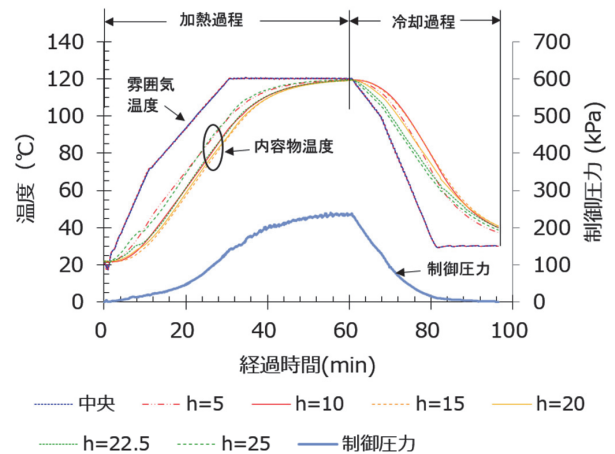


Fig. 3 加熱殺菌時の雰囲気温度と糊化でんぷん液各位置の温度および制御圧力の時間推移

$t=1.0$ mm 糊化でんぷん液カップ詰 (含気)

自動圧力制御は近接センサー方式を用いた。蓋の膨らみの検出は初期位置を基準にして、初期位置を保つ膨らみ設定: 0 mm とした。更に蓋の膨らみ設定の影響を調べるために、膨らみ設定: 1 mm で追加試験を行った。膨らみ設定 1 mm では、蓋が初期位置から 1 mm を超えて膨らむと殺菌庫内を空気加圧し、1 mm を下回ると排気する。従って内容物温度が低く蓋が膨張しない場合には、排気状態が継続する。

3. 結果と考察

3-1. 温度、殺菌値、制御圧力の経時変化

糊化でんぷん液カップ詰 ($t=1.0$ mm) を加熱・冷却した時の殺菌庫内の温度・制御圧力および容器内の各部の温度を Fig. 3 に示す。近接センサーを使用した自動制御であるために制御圧力のカーブは全体として滑らかであった。ただし、デジタルデータを見ると制御圧力は水蒸気供給時に上昇し、供給されていないときは若干下がるという振動がみられた。内容物温度は雰囲気温度に対して遅れて変化した。他の 2 種類のカップ詰も含め、薄いフィルム蓋を介して隣接する $h=25$ mm の含気部の温度が最も早く変化していたことと他の内容物にはない、不規則な軌跡が

存在した (5 から 15 分) が、黄色線、赤実線で示す中心部 ($h=10、15、20\text{ mm}$) の温度測定値が他の位置の温度より遅く変化している傾向がみられることから容器内の温度分布の測定結果は概ね妥当であったと考えられる。

3-2. 制御圧力を計算するための温度測定位置の検討

内容物の温度は内容物の熱拡散率により異なることから、多様な内容物のカップ詰に対応し、普遍的な関係性を得ようとする場合には内容物の温度を適用することはできないと考えられる。従って、内容物以外の温度測定部位である含気部および雰囲気温度について結果を示すことにした。肉厚 1.0 mm のカップ詰で得られた含気部および雰囲気温度と制御圧力の関係を Fig. 4 に示す。

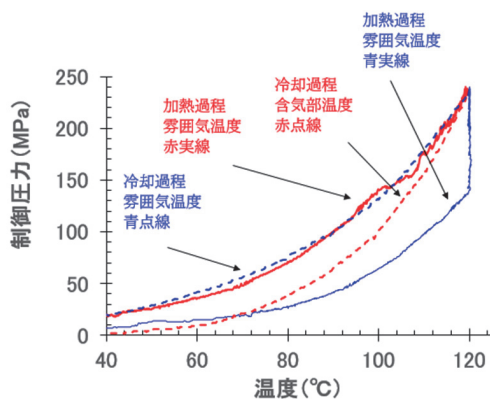


Fig. 4 含気部および雰囲気温度と制御圧力の関係
t=1.0 mm 糊化でんぷん液カップ詰

田口法においては、測定温度に対して圧力値が1つだけ決まることが必要条件である。含気部の加熱過程 (赤実線)、含気部の冷却過程 (赤点線)、雰囲気気の冷却過程 (青点線) においては、温度が決まれば圧力値が1つ決まるので必要条件を満たした。一方、雰囲気気の加熱過程 (青実線) においては、温度 120°C に対して制御圧力値が幅をもって存在する領域が存在するため必要条件を満たしていなかった。以上より、田口法で計算する際の温度測定位置は加熱過程で1つ、冷却過程で2つが必要条件を満たしていることが確認された。他の肉厚のカップ詰でも同様の傾向を示した。

3-3. 取得した制御圧力と計算圧力の比較

Fig. 5 に取得した制御圧力と計算圧力の時間推移を示す。肉厚:0.5 mm の A、肉厚:1.0 mm の B、肉厚:2.0 mm の C は、膨らみ設定:0 mm である。肉厚:1.0 mm の B-1 は膨らみ設定:1 mm である。青実線の実測値と赤実線の田口法で計算値の比較、および赤点線の冷却過程でも含気温度から田口法と同様に計算した計算値も実測値と比較した。赤実線の田口法における冷却過程に必要なオフセット値: α は試行錯誤で計算値が最も実測値に近づく値: 13 kPa を選んだ。

Fig. 5 の A ~ C において田口法で計算した全3種類のカップ詰において計算値は実測値と良好に一致した。ただし、冷却開始直後の値は実測値を 10 kPa 程度大きくなった。これは加熱過程から冷却過程への移行における α の影響と考える。冷却過程の 70 分過ぎでは、計算値と実測値

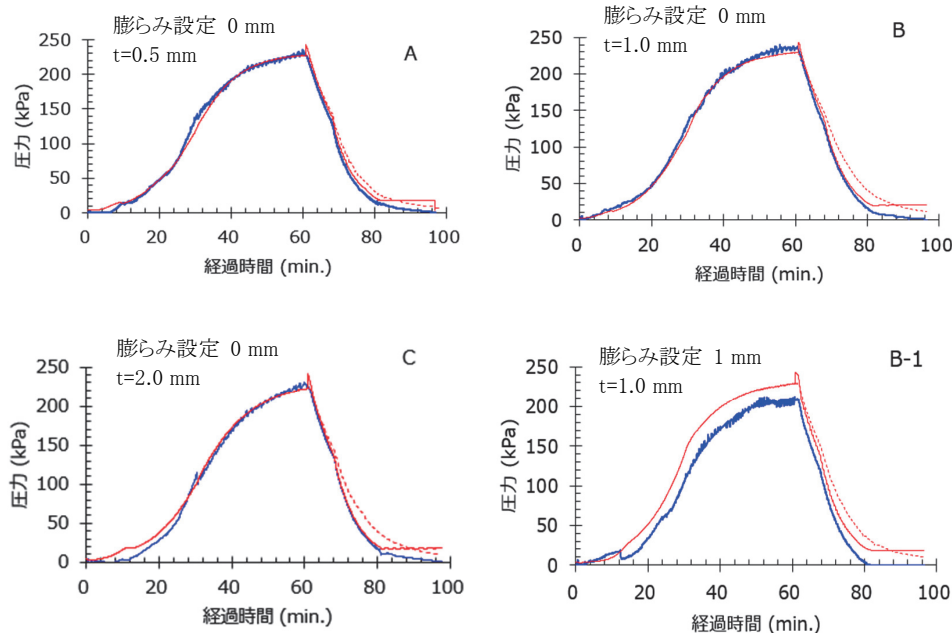


Fig. 5 糊化でんぷん液カップ詰を近接センサー使用の等圧制御方式で加熱殺菌した時の経過時間と実測した圧力値および田口法計算値の関係

青実線: 実測制御圧力、赤実線: 田口法計算圧力 (冷却過程は雰囲気温度から計算) (参考) 赤破線: 計算圧力 (冷却過程は含気部温度から計算)

の乖離が大きくなるが、冷却温度が一定値になると制御圧力が 30 kPa の一致値を加える様にプログラミングされている理由による。実用面を考えると加熱過程から冷却過程において不連続な操作を行わないことが求められる。また、冷却が十分進んだのちにはプラスチック材料も十分な強度になり、加圧も容器強度と比べて大きくないことから容器変形への影響はほとんどないと推測される。

一方、冷却過程において含気温度から計算される制御圧力は実測値よりも若干大きな値を示し、田口法より計算値との差異が大きかった。Fig. 5 の B-1 においては、実測された制御圧力は計算値より 15 ~ 20 kPa ほど小さい値となった。

制御圧力曲線を求める目的は、加熱殺菌においてカップ詰に変形品を発生させないことである。殺菌終了後に変形品が発生するのは、容器の変形限界を超えて殺菌庫内の圧力が高い場合と低い場合である。圧力が容器内圧力より高くなると、最初に蓋が凹状になって、その後にカップの弱い部分に変形する。圧力が容器内圧力より低くなると、最初に蓋が凸状になり、その後カップの弱い部分に変形する(東洋製罐株式会社 2007)。即ち、蓋が凹から凸の間に容器変形が発生しない殺菌庫内の圧力範囲が存在する (Fig. 6)。

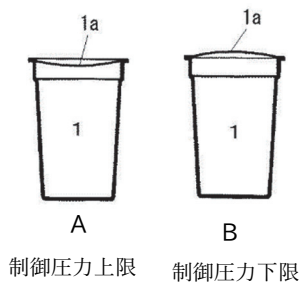


Fig. 6 カップ詰を加熱殺菌した時、カップ部の変形が生じない蓋部形状

A: 制御圧力上限時の蓋形状 B: 制御圧力下限時の蓋形状 (東洋製罐株式会社 2007 から引用)

加熱殺菌前には蓋形状は特に大きく膨らむことはない。その位置を初期位置に保つ膨らみ設定: 0 mm と同等の曲線を示す田口法の制御圧力は等圧制御において上限側である。膨らみ設定: 1 mm でも容器変形は起こらなかったため、制御圧力が下限側に一定範囲の等圧条件があることを示唆した。

以上より田口法は田口の示したハイト (容器の高さ) が高く細長い容器だけでなくハイトの低い容器についても適用可能であることから、様々な容器形状に対応できる可能があり、熱水シャワー式にも対応可能な方法であることが示唆された。更に加熱過程において含気部の温度を、冷却過程において雰囲気温度を指標とすることも適正であることが示唆された。以上より形状の異なる容器や熱水滴水式

以外の加熱殺菌方法などへの適用性についての説明不足が解決した。

次に制御圧力の計算に用いる温度測定位置について考察する。加熱過程において、田口法で示す含気部の膨張・収縮圧力と水蒸気圧の和で表されることについては理解が容易である。冷却過程において一定値: α を設定することによって 3 種類のカップ詰で計算値と実測値は極めて一致度が高かった。その理由として、含気部の気体が含気部より低温な蓋材内面に接触して水蒸気が凝縮し、伝熱が良好になり、含気部の蓋近傍は雰囲気温度が反映やすくなっていることが挙げられる。内容物の直近にある温度センサーで指示される温度より低い、雰囲気温度よりは高い。その調整のために一定値: α で高い圧力に補正していると推測される。 α の値の設定については試行錯誤が必要であるが 10 kPa 付近に設定しておくことで多様な容器や殺菌方式に対応可能となる。

最後に含気部分の温度測定の難しさに言及する。含気部の温度を測定するためには、熱溶着部の数 mm 下に温度センサーを挿し込む必要があるが、その部分はスタックラインと呼ばれる段差に近いこともある。また熱溶着するフランジが温度センサー挿入用治具と干渉する可能性がある。今回の試験では当該治具とフランジが干渉しない様に密封に影響を与えない範囲でフランジを切断した。含気部温度の測定には温度センサー挿入用治具の形状を変えるなど必要に応じて工夫が必要になることが予想される。また、カップ材料は加熱殺菌時に強度が低下するために長いシース付温度センサーを水平に保持するためには、温度センサー挿入用治具に加えてもう 1 点外部で支持する機構を追加することにより温度測定の確実性が向上すると考えられる (Fig. 7)。以上により、温度測定位置が変更される理由とオフセット値: 0 ~ 20 kPa を加えている理由についても説明不足が解消し、含気部温度測定の確実性向上についての具体案を提案した。

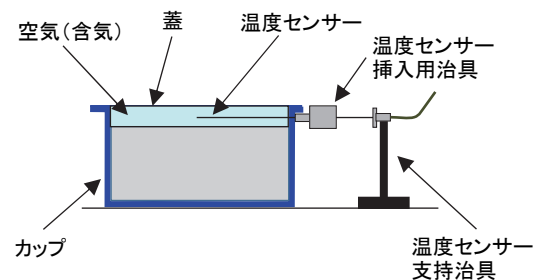


Fig. 7 カップ詰の含気部への温度センサー配置時の断面図
カップ側面からシース付温度センサー挿入を想定した場合

最後に計算圧力と実際の圧力に差が生じる要因を列挙する。

- ① (a) 置換ガスとして炭酸ガスを使用すると炭酸ガス

が吸収される (b) 酸化など含気部の気体と食品が反応する (c) 容器材料の素材と含気部気体の組み合わせにおいて、加熱殺菌中の気体透過が大きい、等の含気部の気体体積が減少するときには制御圧力は小さくなる。

- ② 飲料で重曹等が使用される場合があるが、重曹が分解することで炭酸ガスが発生すると、容器内圧力が上昇するため、制御圧力は高くなる傾向がある。
- ③ 熱水満水式では、装置の上部と下部で水頭圧の差だけ圧力が異なるため、中央付近の容器詰について圧力制御を行うことで、上下位置による圧力の差異を吸収しやすくなる。
- ④ 殺菌庫内の温度分布が大きくなると各容器詰内部の圧力分布も大きくなるので変形品の発生確率が大きくなる。回避策としては雰囲気温度の時間変化率を小さくすることと、温水、冷却水を殺菌庫内に導入する際に、全体に広がる様にする機構が有効である。

4. まとめ

含気カップ詰を等圧方式で加熱殺菌する方法として田口法の検証を行った。その結果、これまで報告されていないハイトの小さい容器形状、熱水シャワー式加熱殺菌において田口法で求めた計算圧力が容器変形の発生しない適正な制御圧力範囲にあることが示唆された。容器種類と加熱殺菌方式の適用範囲についての説明不足を検証し、解決した。

計算に使用する温度測定位置は、田口法で使用する温度測定位置が最も実測値との差異が小さい組み合わせであった。冷却過程において雰囲気温度から内圧を求める理由については、含気部の水蒸気凝縮により蓋近傍の温度が雰囲気温度に強く影響を受け、オフセット値で温度のズレを補正していると推測された。計算に用いる温度測定位置の変更の理由とオフセット値の必要性に関する説明不足を検証し、解決した。

5. 引用文献

日本熱物性学会編, 1990, 熱物性ハンドブック, 第1版, 養賢堂, p.73. ISBN: 978-4842590068.
(原著) 清水 潮; 横山 理雄; (改訂) 武田 淳; 山口 敏季; 五味 雄一郎; 山崎 良行; 浅見 太一; 田辺 利裕, 2022, レトルト食品の基礎と応用, 改訂第2版, 幸書房, p.142-147.

田口 善文, 1994, プラスチック成形容器詰デンプン液の回転殺菌中の容器内圧力, 缶詰時報, 73(11), p.65-72. (巻末に参考資料として、温度と圧力についての図を掲載)

東洋製罐株式会社, 稲葉 正一; 兼田 正義; 黒崎 敏靖, 2007, 変位センサーを用いたレトルト圧力制御, 特開2007-014226, <https://www.j-platpat.inpit.go.jp/c1801/PU/JP-2005-196755/10/ja>.

漆原 哲雄; 葛原 武; 向井 勇, 2001, 含気形態の密封容器製品のレトルト処理方法, 特許3078545, <https://www.j-platpat.inpit.go.jp/c1801/PU/JP-H11-231380/10/ja>.

山野 聖二, 1979, 殺菌装置における圧力制御装置, 特開昭54-113480, <https://www.j-platpat.inpit.go.jp/c1801/PU/JP-S54-113480/11/ja>.

6. 付録

田口法により容器内圧力を求める方法を説明する。容器内圧力: P を求めるときは、ボイル・シャルルの法則から計算される圧力: $P_B(T_a)$ 、水蒸気圧: $P_W(T_s)$ 、一定定数: α として式 1 で計算される。便宜上、 T_a (K)、 T_s (°C) で計算する方法とした。

$$P = P_B(T_a) + P_W(T_s) + \alpha \cdots (\text{式 1})$$

ボイル・シャルルの法則より $P_B(T_a)$ 式 2 は、加熱殺菌開始時の初期値: P_1 と絶対温度に変換した温度: T_{a1} (K) が必要である。(絶対温度に 273.15 を加えると摂氏に変換される)

$$P_B(T_a) = \frac{P_1 \cdot T_{a1}}{T_a} \cdots (\text{式 2})$$

水蒸気圧: $P_W(T_s)$ は日本熱物性学会 (1990) から温度 T_s (°C) の多項式回帰曲線である式 3 を導いて計算する。

$$P_W(T_s) = 1.316 \times 10^{-9} \times T_s^4 - 1.21137 \times 10^{-7} \times T_s^3 + 1.1135517 \times 10^{-5} \times T_s^2 - 2.40777945 \times 10^{-4} \times T_s + 3.469983158 \times 10^{-3} \cdots (\text{式 3})$$

温度測定位置と α については、Table を参照のこと

Table 田口法における温度測定値と α

	温度測定位置	α
加熱過程	含気部	0
冷却過程	雰囲気	0 ~ 20 kPa