◇◇◇ 総 説 ◇◇◇

連続流動殺菌における工学的課題

戸 塚 英 夫

(社) 日本缶詰協会 研究所

Engineering Topics on Thermal Processing Using Continuous Flow System

Hideo TOZUKA

*Research Laboratory of Japan Cannery Association
2-4-5 Fukuura, Kanazawa-ku, Yokohama 236-0004, Japan*

High temperature short time processing (sterilization and pasteurization) by continuous flow system, which consists of heat exchangers and a holding tube, offers shelf stable foods of high quality. Since the lethal effect for food is calculated based on the temperature histories, the engineering knowledge such as flow behavior and heat transfer is indispensable. To ensure microbial safety, thermal schedule to sterilize all parts of the food under the worst condition must be established. The continuous flowing sterilization of liquid food such as beverage has already been widely used as useful producing method. However, the lethal effect might be underestimated because the understanding of their flowing characteristics is insufficient. There are many difficulties with sterilization of the food containing particles. The evaluation of flow velocity distribution of the particles and the boundary heat transfer coefficients between the particle and fluid are especially important to calculate the lethal effect.

Key words: thermal processing, flow behavior, heat transfer

1. は じ め に

連続流動殺菌システムは熱交換器とホールディングチューブで構成され、高温短時間殺菌により高品質な常温流通食品を製造できる。食品の受ける殺菌効果は、流動時の温度変化に基づいて算定されるので、システム内での伝熱、流動などの工学的知識が不可欠である。また、最悪の状況でも食品すべての部分を殺菌できるように殺菌条件を設定する必要がある。

飲料などの液状食品の連続流動殺菌は通常の生産方法としてすでに普及している。しかし、流動状態の評価が不十分なので殺菌効果を低く算定している可能性がある。固形物を含む食品の殺菌では克服すべき問題点が多い。その殺菌効果を算定するときは固形物の速度分布や境界伝熱係数の評価が重要である。

2. 連続流動殺菌システム

連続流動殺菌システムは、食品の温度を急速に加熱する加熱用熱交換器、加熱後に必要な時間だけ食品を通過させるホールディングチューブ、食品を急速に冷却する冷却用熱交換器で構成される (Fig. 1)。食品の殺菌に使用される熱交換器にはプレート式、チューブ式、表面かき取り式などがあり、食品の性質によって異なる熱交換器が使用される [1]。本稿では熱交換器として、高粘性食品および小固形物を含む食品の加熱殺菌が可能な表面かき取り式熱交換器を中心に解説する。この熱交換器では食品が流動する中央部でブレード付きの回転軸が回転しており、伝熱壁での焦げ付きを防いでいる。その外側のジャケット部分に熱媒体として蒸気 (加熱) あるいは水 (冷却) が導入される。

Fig. 1 Schematic diagram of continuous flow sterilizing system.

ホールディングチューブは一定直径のステンレス製の円形直管であり、チューブの長さを調整して食品の受ける殺菌効果を変更する。

殺菌条件を設定するには、各構成装置（熱交換器およびホールディングチューブ）において食品がどのように流動し温度が変化するか、実験あるいは数式から求める必要がある。固形物を含む食品では固形物の挙動が液状食品よりも複雑になる。

3. 液状食品の殺菌

液状食品の連続流動殺菌の研究は古く、熱交換器が誕生したころに始まっている。しかし、殺菌効果に関係する事項が工学的に解明されていても、実生産において活用されていないことがある。

3.1 熱交換器内の流動

熱交換器内での液状食品の流動は複雑である。とくに、表面かき取り式熱交換器では、食品の流動は回転軸の高速回転に伴い、回転軸の周囲にテイラー渦と呼ばれる多数の渦を形成する[2]。そして、ポンプの推進力によって、回転軸周囲に螺旋を描きながら流動する（Fig. 2）。その速度分布は数式化されていないので、実験的に求めるしかない。2%コーンスターチ糊化液の場合、もっとも速く流動する部分の流速は平均流速の2.5倍という結果が得られた[3]。しかし、2.5倍という値を一般的に適用できるとは限らないので注意が必要である。

3.2 ホールディングチューブ内の流動

チューブ内の液状食品の流動状態は、次式で計算されるレイノルズ数 Re で判定できる[4]。

$$Re = \frac{\rho D^n V_{ave}^{2-n}}{K} \times \left[\frac{n}{1+3n} \right]^n \times 2^{3-n} \quad (1)$$

ここで、 n と K は食品の粘性に関する定数である。ほとんどの食品の粘性は次式で表される。

$$\mu_a = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2)$$

水や牛乳などのニュートン流体では $n = 1$ である。それ以外の流体は擬塑性流体であり、 $0 < n < 1$ である。

Fig. 2 Flow pattern of liquid food in the scraped surface heat exchanger [2].

$Re \leq 2100$ では流動は層流となり、チューブ中央で流速が最大になる釣鐘型の速度分布を生じる。最大流速 V_{max} と平均流速 V_{ave} の比は次式で計算できる。

$$\frac{V_{max}}{V_{ave}} = \frac{3n+1}{n+1} \quad (3)$$

$Re \geq 4000$ では、流動は乱流になる。チューブ壁近傍で摩擦により流速が遅くなるために、複雑な速度分布を生じる。 $4000 \leq Re \leq 10^6$ では V_{max} と V_{ave} の比は次の近似式で計算できる[5]。

$$\frac{V_{max}}{V_{ave}} = \frac{1}{0.0336 \log(Re) - 0.130n + 0.792} \quad (4)$$

食品の流動で V_{max}/V_{ave} が最大になるのは、ニュートン流体が層流になる場合で $V_{max}/V_{ave} = 2$ である。実際には、ほとんどの液状食品は擬塑性流体であり、乱流になる場合もある。すなわち、 $V_{max}/V_{ave} < 2$ になることが多いにもかかわらず、これらの殺菌条件は $V_{max}/V_{ave} = 2$ として設定されている[4]。すなわち、実際の流動を無視して、ニュートン流体が層流で流動すると仮定している。この仮定では、食品の受ける殺菌効果を少なく評価することになる。

このように、普遍的な法則が無視されているのは、食品では流動状態の計算に必要な粘性が不明確なことが原因の一つと考えられる。とくに連続流動殺菌で使用される 100°C 以上の高温域での食品の粘性は不明である。 n は温度にかかわらず一定とされているが、すべての食品にも適用できる一般的なことがわかっていない。また、乱流という現象が理論的に完全に解明されたわけではないので、 V_{max} を求める一般式が確立されていないためと考えられる。

3.3 熱交換器内の温度変化

加熱用熱交換器における食品温度 $T(t)$ は、ジャケット内の蒸気温度 T_s が一定なので、時間 t から次式で計算できる。 $T(t)$ は蒸気温度 T_s に対して指数的に上昇する[6]。

$$\log \frac{T_s - T(t)}{T_s - T_0} = - \frac{2.303UA}{C_p W} t \quad (5)$$

冷却用熱交換器では冷却水は食品に対し逆方向に流れるので、食品温度 $T(t)$ は次式で表される。 H は定数なので、 $T(t)$ は直線的に低下する。

$$\frac{T_0 - T(t)}{T_0 - T_w} = Ht \quad (6)$$

$$\text{ここで、} H = \frac{1 - \exp \left[-(1+1/r) \left(\frac{UA}{C_p W} \right) \right]}{1 + 1/r}, \quad r = \frac{C_{pw} W_w}{C_p W}$$

総括伝熱係数 U は熱伝達係数（熱媒体 h_o 、伝熱壁 k 、食品 h_i ）から次式により計算できる。

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_o} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_i} \quad (7)$$

h_o は熱媒体である蒸気あるいは冷却水の性質、 k は伝熱壁の材質等から決定される。 h_i は食品の性質で異なる。

り、とくに粘度の影響を受ける。

Blaisdell らの実験によると、表面かき取り式熱交換器においても式(5)、(6)が成立した[7]。しかし、彼らの熱交換器は食品が流れる隙間が 1 cm と狭かった。筆者の研究所にある表面かき取り式熱交換器は隙間が 5 cm あり、回転軸からの距離（流動に対して垂直方向）によって温度差を生じないか疑問を生じた。そこで、温度を実測した結果、垂直方向の温度差はないことがわかった[8]。

3.4 ホールディングチューブ内の温度

ホールディングチューブでは発熱や高温体との接触がないので、食品温度が上昇することはない。多くの場合、等温とみなしている。しかし、チューブが長い場合にはチューブ外部への放熱が無視できなくなるほど大きくなるので、実験あるいはエネルギー収支式を解いて温度低下を求める必要がある。

3.5 殺菌条件

連続流動システムで液状食品が受ける殺菌効果は、温度 $T(t)$ から F 値を計算して評価される。

$$F = \int_0^{t_{\text{end}}} 10^{\frac{T(t)-T_i}{Z}} dt \quad (8)$$

原則的には F 値は工程全体の殺菌効果を積算して求められる。しかし、液状食品の殺菌では熱交換器での殺菌効果を無視して、ホールディングチューブでの殺菌効果だけを積算することが多い。それは熱交換器における流動が複雑なために、得られる殺菌効果が不確実であるためである。その仮定に従うと、式(8)は次のように簡単になる。

$$F = 10^{\frac{ST-T_i}{Z}} \times t_{\text{min}} \quad (10)$$

ここで、 ST はホールディングチューブ内の温度であり、ここでは一定と仮定している。放熱がある場合は、 ST としてホールディングチューブ出口温度を採用すれば式(9)を使用できる。 t_{min} は最小滞留時間で、ホールディングチューブの長さが L では $t_{\text{min}} = L/V_{\text{max}}$ となる。

前述したように $V_{\text{max}}/V_{\text{ave}}$ を過大に仮定してしまうと、 t_{min} は小さくなり、結果として F 値が小さくなる。レイノルズ数から明らかに乱流と考えられる場合でも $V_{\text{max}}/V_{\text{ave}} = 2$ として殺菌条件が設定されているので、実際の速度分布に基づいて計算すべきであると考えられる。

4. 固形物を含む食品の殺菌

固形物を含む食品の連続流動殺菌では、もっとも速く流動する固形物中心の殺菌効果が最小になると考えられる。固形物の流動や温度はその周囲の液状部の影響を受ける。固形物以外の液状部の流動や伝熱については前章での考察を参照できると考えられる。

4.1 熱交換器内の流動

熱交換器内における固形物流動の研究はあまり多くない。固形物流動の基礎的知見は透明の実験システムにより得られるものの、透明の熱交換器を製作するのは困難である。また、熱交換器内では液状部自体も複雑な流動を示す。Taeymans らによると、熱交換器内で固形物は液状部より遅く流動することはあっても、速く流動することはなかったと報告している[9]。そこで、液状部の流動に基づき、固形物の最大流速は平均流速の 2.5 倍と仮定する。

4.2 ホールディングチューブ内の流動

ホールディングチューブにおける固形物流速は各種の実験で求められている[10]。多くの場合、ホールディングチューブを模した透明の流動システムを製作し、固形物を混合した透明液体を流動させ、流動システムの透明部を通過する固形物を視覚あるいは録画を再生して流速を求めている[11]。不透明な液状部における固形物の流速を超音波、MRI、電磁誘導を応用して測定している研究もある。

流動実験における固形物の投入方法には 2 種類ある。1 つは、固形物をシステムに 1 個だけ導入する方法である。固形物に働く力を解析しやすいので、運動方程式を構築する基礎となる。筆者らの実験では、Fig. 3 に示すように固形物流速に固形物と液状部の比重差が大きく影響した[12]。これは、固形物の流動経路に比重差が影響し、固形物に働く力が変わるためと考えられる。固形物と液状部の比重が同じ場合、固形物はチューブの底から浮上した。ほとんどの固形物はチューブ壁に沿って流動したが、一部の固形物はチューブ中央を流動した。固

Fig. 3 Relationship between flow velocity ratio and density difference in the holding tube [12].

Flow velocity ratio = Particle velocity / Fluid average velocity
 Density difference = Particle density – Fluid density
 Fluid: 2% Carboxymethylcellulose solution (Laminar flow)
 Particle: Plastic ball

Fig. 4 Forces acting on particle flowing holding tube.

形物が液状部よりも重い場合には、チューブの底を転がりながら流動した。固形物が相対的に重くなるほど固形物流速は遅くなった。また、固形物サイズによって流速は異なり、固形物が小さいほど比重差の影響を大きく受けた。

もう1つは多数の固形物を同時に導入する方法である。現実的な流動を示すけれども、固形物相互の影響などのために複雑な流動を示す。ランダムな要因が増えるので、統計力学を利用した解釈も必要になると考えられる。しかも、食品固形物は気体分子のような微粒子ではないので、巨視的に観察しても不均一な流動になる。

多くの研究の結果、固形物の最大流速は平均流速の2倍以下であることが判明している[10]。これはニュートン流体の層流における流体の最大流速よりも速く流動する固形物はないことを示している。しかし、式(3)で流体の実際の粘性から計算される最大流速よりも速く流動する固形物が存在した。そこで、ホールディングチューブにおける固形物の最大流速は平均流速の2倍と仮定する。

これらの実験的研究のほかに、固形物に働く力から運動方程式を構築し、それを解いて流速を算出する研究も行われている[13]。単独の固形物でも、Fig. 4に示すように浮力、揚力、抗力、摩擦、重力、回転力、推進力などが働き、運動方程式は複雑である。さらに複数の固形物を流動させた場合には衝突、集団化、飛び越しなど数式で表現するのが難解な運動が観察された。

4.3 固形物周囲の液状部温度

周囲の液状部との温度差により固形物は加熱あるいは冷却される。したがって、固形物温度を求めるには固形物周囲の液状部温度が必要になる。

熱交換器では外部の熱媒体が十分存在するので、液状部の温度は固形物がない場合と差がないと考えられる。ホールディングチューブでは、液状部温度はチューブ外への放熱および固形物に熱を与えて低下する。エネルギー収支式を解くか実験によりこの温度低下を求める。

4.4 固形物の温度

連続流動殺菌システムを流動する固形物の温度を、その運動を邪魔せずに実測するのは困難である。そこで、既知のデータおよび計算により固形物の伝熱特性値を求

め、最終的に固形物の中心温度を求める必要がある。

液状部から固形物中心への熱伝達は、境界熱伝係数 h_p (液状部から固形物表面への熱伝達) と固形物の熱拡散率 α (固形物表面から固形物中心への熱伝達) で表現される。

初期の研究では h_p を無視して固形物表面温度は液状部温度と同じと仮定されていた[4]。しかし、現実には固形物表面温度は液状部温度より低いので、この仮定では殺菌効果を過大評価することになる。

h_p は液状部の流動状態、液状部と固形物の相対速度、固形物形状の影響を受ける。熱交換器内とチューブ内では液状部の流動状態が異なり h_p は異なる。一般的に適用できる h_p に関する数式は確立されていないので、実験的に求める必要がある。しかし、 h_p を求めるために動いている固形物の表面温度を測定することは困難である。

そこで、一定温度に保持した液状部の中に固形物を入れて固定した状態で加熱し h_p が求められている。このように液状部と固形物の相対速度が0の実験では実際よりも h_p を小さく(抵抗を大きく)評価してしまい、固形物中心の殺菌効果を過小評価する可能性がある。しかし、連続流動殺菌システム内では固形物と液状部の相対速度は小さいので、相対速度が0の状態でも求めた h_p を使用しても誤差は比較的小さいと考えられる。

固形物の熱拡散率 α は固形物の熱伝導率、比熱、密度により決定され、固形物の物理的性質だけで求められる。

最終的には、周囲の液状部温度、液状部から固形物中心への熱伝達、固形物の最大流速のデータから、厳密解、差分法、有限要素法、有限体積法など各種の数学的方法を用いて固形物中心温度を求める[14]。これらの方法では、高度な数学的知識と強力な計算能力が必要になる。また、厳密解の適用は単純な形状の固形物に限られる。

そこで、簡便かつ任意形状の固形物でも適用できる計算方法が望まれる。缶詰の加熱殺菌では Hayakawa によってレトルト温度変化にしたがって缶詰中心温度がどのように変化するか比較的小易に算出する方法が開発されている[15]。筆者はその方法を使って連続流動殺菌における固形物の温度変化を計算した。対象食品の液状部を恒温槽で一定温度に保持し、その中に固形物を投入し、静置状態で加熱した固形物中心温度の実測値から缶詰の熱伝達評価に使用されている fh , j を求めた。そして固形物流速から想定される液状部の温度変化から Duhamel の法則により、連続流動殺菌システムにおける固形物の中心温度を計算した。計算例を Fig. 5 に示す[16]。

この方法でも概ね良好な結果が得られた。しかし、 fh , j を一定と仮定しており、 h_p を一定としていることになる。固形物サイズが小さい場合には、 h_p の変化が中心温度に及ぼす影響も大きい。すなわち、 h_p を一定と仮

Fig. 5 Example of temperature histories of fluid and a particle center [16].

Schematic diagram of the continuous flowing system: refer to Fig 1

Fluid temperature: Experimental data corrected using equations 5, 6

Particle center temperature: Computed by using Duhamel's theorem

Heat penetration parameter of particle: $fh = 2.0$ min, $j = 0.95$

定すると厳密には正確な結果を得られない[15]。筆者の計算は液状部から固形物表面への熱伝達が最悪条件での固形物温度を示していると考えられる。

4.5 殺菌条件

固形物を含む食品の受ける殺菌効果は液状食品と同様に F 値で評価するので、基本的には式(8)で計算できる。固形物を含む食品では $T(t)$ は最も速く流動する固形物の中心温度になる。

固形物中心の受ける殺菌効果は熱交換器よりもホールディングチューブ内で大きくなった。加熱用熱交換器において受ける殺菌効果は F 値の算定に含めてよいと考えられる。しかし、冷却用熱交換器では固形物が割れて小さくなった場合に、急速に温度が低下するので確実な殺菌効果として期待できない。冷却時の殺菌効果は殺菌条件設定では F 値の積算に含めないのが安全と考えられる。

5. 結 論

昭和 56 年より社団法人日本缶詰協会では産官学共同の研究事業として、無菌充填法による新しい食品の開発に取り組んだ。この研究でも様々な結果が得られ、現在では無菌充填食品は当然のものとして消費者に受け入れ

られている。最近では、連続流動殺菌された製品としてペットボトル詰飲料なども成長している。

しかし、固形物を含んだ無菌充填食品は品質がよいものが製造できることが実験的にも理論的にも確認されているにもかかわらず、ほとんど普及していない。

これは、固形物の均一流動や充填技術が不十分、固形物自体の熱伝達に時間が必要なので液状部が過剰加熱を受ける、ポンプで流動できる食品しか適用できない等の限界があるのが理由と考えられる。複数の種類の固形物を混合した食品ではさらに大きな困難が予想される。

しかし、これらの困難は製造装置をはじめ各分野での技術革新により克服されると考えられる。そのために食品工学の果たす役割はますます重要になる。食品メーカーもこれらの領域の研究開発に積極的に取り組み、安全で高品質な食品を製造していかなければならない。

5. 記 号

A	: 伝熱面積, m^2
C_p	: 食品の比熱, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
C_{pw}	: 冷却水の比熱, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
D	: ホールディングチューブ内径, m
F	: 殺菌値, 基準温度 $T_r(^{\circ}C)$ で相当する加熱時間, min
fh, j	: 熱伝達値 (本稿では固形物の熱伝達値)
h_o	: 熱媒体側の境界伝熱係数, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
h_i	: 食品側の境界伝熱係数, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
h_p	: 液状部と固形物の境界伝熱係数, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
K	: 粘性定数, $mPa \cdot s$
k	: 伝熱壁の熱伝導度, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
L	: ホールディングチューブ長さ, m
n	: 粘性指数
Re	: レイノルズ数
$T(t)$	: t における食品温度, $^{\circ}C$
T_o	: 熱交換器入口における食品温度, $^{\circ}C$
T_s	: 蒸気温度, $^{\circ}C$
T_w	: 冷却水温度, $^{\circ}C$
ST	: ホールディングチューブ内の液状部温度, $^{\circ}C$
t	: 時間, min, 流速から想定される時間
t_{end}	: F 値の積算を終了する時間, min
t_{min}	: 最小滞留時間, min
V_{max}	: 最大流速, $m \cdot s^{-1}$
V_{ave}	: 流体の平均流速, $m \cdot s^{-1}$
U	: 総括熱伝達係数, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
W	: 面積 A に接する食品重量, kg
W_w	: 面積 A に接する冷却水重量, kg
x	: 伝熱壁の厚さ, m
z	: 微生物死滅速度が 10 倍になる温度差, $^{\circ}C$
α	: 固形物の熱拡散率, $m^2 \cdot s^{-1}$

γ : ずり速度, s^{-1}
 μ_a : 流体のみかけ粘度, $mPa \cdot s$
 ρ : 流体の密度, $kg \cdot m^{-3}$

7. 引用文献

- 1) 戸塚英夫; 熱交換器式殺菌装置と HTST・UHT 殺菌装置. 食品と容器, **34**, 373-380 (1993).
- 2) A. M. Trommelen, W. J. Beek; Flow phenomena in a scraped surface heat exchanger. Chem. Eng. Sci., **26**, 1933-1942 (1971).
- 3) 藤原 忠, 戸塚英夫, 森 光國; 表面かき取り式熱交換器における流体の滞留時間分布. 缶詰時報, **78**, 459-468 (1999).
- 4) J. E. Manson, J. F. Cullen; Thermal process simulation for aseptic processing of foods containing discrete particulate matter. J. Food Sci., **39**, 1084-1089 (1974).
- 5) J. A. Palmerg, V. A. Jones; Prediction of holding times for continuous thermal processing of power-law fluids. J. Food Sci., **41**, 1233-1234 (1976).
- 6) J. P. Adams, J. Simunovic, K. L. Smith; Temperature histories in a UHT indirect heat exchanger. J. Food Sci., **49**, 273-277 (1984).
- 7) J. L. Blaisdell, J. W. Zahadnik; Longitudinal temperature distribution in a scraped-surface heat exchanger. Food Technol., **11**, 659-662 (1959).
- 8) 藤原 忠, 戸塚英夫, 森 光國; 表面かき取り式熱交換器における流体の温度変化. 缶詰時報, **78**, 534-543 (1999).
- 9) D. Taeymans, E. Roelans, J. Lenges; Residence time distribution in a horizontal SSHE used for UHT processing of liquids containing solids. 4th Int. Cong. Eng. Food, 247-258 (1985).
- 10) N. G. Stoforos; An overview of aseptic processing of particulate foods. Food Science and Human Nutrition, 665-677 (1992).
- 11) D. I. Chandarana, A. Gavin; Establishing thermal processes for heterogeneous foods to be processed aseptically: A theoretical comparison of process development method. J. Food Sci., **54**, 198 (1989).
- 12) H. Tozuka, T. Fujiwara, M. Mori; Flow velocities of particles in holding tube. Developments in food engineering Part 2, 751-753 (1993).
- 13) B. Dutta, S. K. Sastry; Velocity distributions of food particle suspensions in holding tube flow: Experimental and Modeling studies on average particle velocities. J. Food Sci., **55**, 1448-1453 (1990).
- 14) C. Skjoldebrand, T. Ohlsson; A computer simulation program for evaluation of the continuous heat treatment of particulate food products. part 1: Design. J. Food Eng., **20**, 149-165 (1993).
- 15) K. Hayakawa; Selective Review of Research Results related to thermal process lethality estimation I. Lethality estimation and heat transfer. 日本食品工学会誌, **2**, 1-10 (2001).
- 16) 戸塚英夫; 固形物を含む無菌充填食品の殺菌条件算定. 日本食品工学会第 1 回年次大会講演要旨集, p123 (2000).