

<平成 28 年度助成>

流体技術を駆使した省エネルギー食品加熱殺菌プロセスの開発

増田 勇人

(静岡県立大学 食品栄養科学部)

諸言

食品製造において、人体に与える影響を考えれば、プロセスの開発や運転は失敗が許されない。それ故にこれまでに蓄積された技術者の勘と経験が何よりも優先され、革新的な装置の開発などが起こりにくいのが現状である。特に衛生面に直接関係する加熱殺菌プロセスではその傾向が顕著にみられ、殺菌に使う装置の種類は二重管式熱交換器やプレート式熱交換器などの数種類に集約され、新しい装置の報告・導入例は極めて少ない。しかし、最近の地球環境やエネルギー問題の観点から、食品産業においても省エネルギー・省資源の必要性が訴えられており、既存プロセスからの脱却が求められ始めている。特に、液状食品を扱う際の水資源の利用を抑えることが重要視されているが、これは食品の高濃度化を意味しており、今後は液状食品といえども濃厚系でハンドリングする必要が増すであろう。濃厚化に伴い生じる主な課題は、i) 液体の高粘度化、ii) 物性の複雑化である。ii) に関して、液状食品の多くは希薄状態でも非ニュートン性（せん断速度によって粘度が変化する性質）を有しているが、濃厚系になれば粘弾性などさらに複雑レオロジー特性が発現する。上述したような従来型の殺菌器は高粘性かつ非ニュートン性を有する食品の加熱殺菌には最適化されておらず、未来型の省エネルギー加熱殺菌装置の開発が囑望されている。

ここで、いくつかの液状食品の粘度特性を Fig.1 に示す。Fig.1 より、液状食品の多くはせん断速度の増加に伴い、粘度が減少する“shear-thinning 性”を有していることが分かる。特筆すべき点は、たと

え低せん断速度では粘度が高くても、高せん断速度域では低粘度化するということである。流体の運動状態（流動状態）を表す無次元数はレイノルズ数 (Re) であり、例えば、円管内流れでは Re は液密度×流速×管径/液粘度で定義される。プロセス設計の際には Re をそろえて流動状態を統一することが多いが、粘度が 2 倍になれば流速を 2 倍にしなければならない。そして、ポンプにかかる動力は運動エネルギー、つまり速度の二乗で効いてくるため、4 倍となる。水とハチミツで比較をすると、ハチミツの粘度は水の約 1000 倍なので、所要動力はおよそ 100 万倍となる。そのため、高粘性液状食品は輸送するだけでも膨大なエネルギーがいる。しかし、多くの液状食品は shear-thinning 性を有することを考えれば、高せん断速度域で操作することで粘度減少した状態での輸送および加熱が可能となる。そこで本研究では、せん断を印加した状態で輸送および加熱ができる装置として、共軸二重円筒間流れを提案した。

回転式内円筒と固定式外円筒の共軸二重円筒間流れでは、内円筒の回転によりせん断力が発生し、shear-thinning 性を有する流体に対して粘度減少効果が見込める。さらに、内円筒の回転速度がある臨

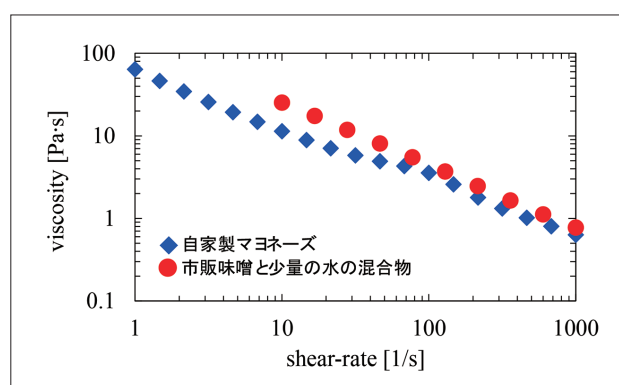


Fig.1 液状食品のレオロジー特性

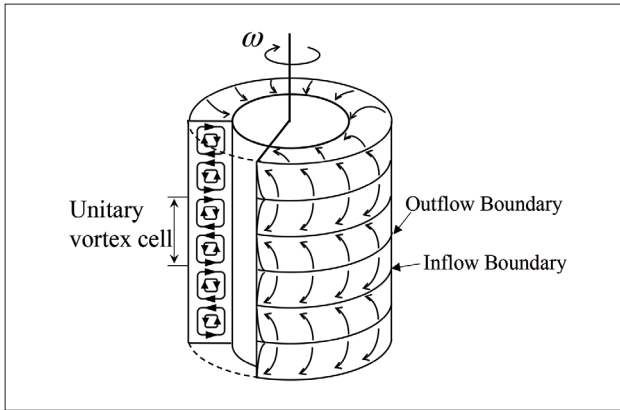


Fig.2 テイラー渦流

界値を超えると、ドーナツリング状の渦セルが軸方向に連なったテイラー渦流が形成される (Fig.2)。このテイラー渦流における渦流動により、混合や伝熱が促進される。また、軸流を与えると各渦セルが崩壊することなく押し出されることから、連続操作も可能である。実際にテイラー渦流は様々な化学・バイオ・食品プロセスに適用されており、すでにいくつかの分野では実用化もされている。本研究では外円筒表面から加熱することで、テイラー渦流を利用した連続型加熱殺菌装置を提案した。しかしながら、テイラー渦流の伝熱特性は古くから研究されているが、ニュートン流体（水や空気など）に限られており、食品のような非ニュートン流体に関してはほとんど知見がない。そのため、本研究では数値解析を用いて非ニュートン流体系での伝熱特性を調査し、その後、ボツリヌス菌の殺菌を例として、数値解析によりテイラー渦流型加熱殺菌装置の性能を調査した。なお、本報告書では紙面の都合上、加熱殺菌特性についてのみ記載する。

数値流体力学

(Computational Fluid Dynamics : CFD)

装置内の流動・伝熱現象を把握するために、本研究では数値流体力学 (CFD) に基づく解析を行った。解析対象を Fig.3 に示す。解析対象であるテイラー・クエット流装置は長さ (L) 0.3 m で、外半径 (R_i) 0.0125 m の内円筒、内半径 (R_o) 0.0175 m の外円筒からなる。ギャップ幅 (d) は 0.005 m である。

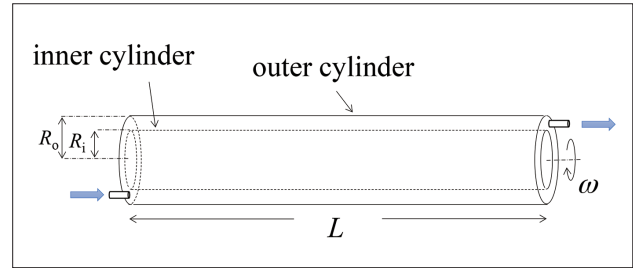


Fig.3 解析対象

流体は円筒間に満たされており、内円筒を回転させることでテイラー渦流が発生する。本研究で扱う支配方程式は、(1) 連続の式、(2) Navier-Stokes 式、(3) Carreau モデル式、(4) エネルギー方程式である。なお、粘度の温度依存性についてはアレニウス型で式 (3) 中に加えている。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (2\eta \mathbf{D}) + \rho \mathbf{g} \alpha (T - T_{ref}) \tag{2}$$

$$\eta = \eta_0 \exp \left\{ E \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right\} \left[1 + (\beta \cdot \dot{\gamma})^2 \right]^{(n-1)/2} \tag{3}$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (T \mathbf{u}) \right) = \kappa \nabla^2 T \tag{4}$$

ここで、 \mathbf{u} は速度ベクトル、 t は時間、 p は圧力、 ρ は密度、 η は見掛け粘度、 \mathbf{D} は変形速度テンソル、 \mathbf{g} は重力加速度、 α は熱膨張係数、 T は温度、 T_{ref} は参照温度、 η_0 はゼロせん断速度粘度、 E は温度依存係数、 β は特性時間、 n は粘度減少傾き、 C_p は比熱、 κ は熱伝導度を表す。本研究では n を 0.5、1 と変化させた。なお、 $n = 0.5$ のときは shear-thinning 流体、 $n = 1$ のときはニュートン流体となる。その他の各物性値は $\rho = 1003 \text{ kg/m}^3$ 、 $\eta_0 = 4.2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、 $E = 3145$ 、 $\beta = 1.2 \text{ s}$ 、 $C_p = 2390 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ 、 $\alpha = 5.0 \times 10^{-4} \text{ 1/K}$ 、 $\kappa = 0.285 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ とした。これらの物性値は 1.0wt% ヒドロキシエチルセルロース水溶液を高粘性液状食品のモデル流体として設定した。

速度境界条件は内円筒壁面速度を ωR_i で与え、その他の壁面は固体壁とした。ここで、 ω [rad/s] は内円筒回転速度である。軸流 (u_{ax}) を 0.00124 m/s で与えた。このとき、流入する流体の温度は 25 °C、外円筒表面温度を 85 °C、内円筒表面およびその他の壁面は断熱条件とした。両解析ともに、メッシュ

は径方向分割数 = 32、周方向分割数 = 64、軸方向分割数 = 640 とした。計算には熱流体解析ソフト“RFLOW”を用いた。離散化の方法は対流項、粘性項ともに2次精度中心差分を適用した。速度と圧力のカップリングにはSIMPLE法を用いた。

結果と考察

本流れ系の加熱殺菌器としての性能を調査するために、軸流 ($u_{ax} = 0.00124$ m/s) を与えた解析を行った。Fig.4 に内円筒回転速度を変化させた際の軸方向温度分布を示す。このとき、 $\omega = 50$ rad/s では渦形成が見られず、80 rad/s では装置全体で渦形成が見られた。また、65 rad/s においては、入り口付近では渦形成が起こらなかったが、温度上昇に伴い粘度が低下することで局所的 Re が上昇し、 $Re = 82.2$ を超えたあたりから渦が形成された。Fig.4 より、テイラー渦流が形成される条件では外円筒表面からの伝熱が迅速に行われ、入口に近い地点で加熱温度 (85 °C) に到達したことが分かる。一方、渦形成が起こらない条件では、装置中央部 ($z/L = 0.5$) を超えたあたりで、ようやく加熱温度に達する。このことは殺菌効率に大きな影響を与えたと考えられる。そこで、殺菌効率を検証するために孢子の熱失活モデルを用いる。一般に孢子の失活は次式のような一次式で与えられる。

$$-\frac{dN}{dt} = kN \quad (5)$$

ここで、

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_d}{RT}\right) \quad (6)$$

と表せる。 N は孢子数、 k は失活速度定数、 k_0 は頻度因子、 E_d は活性化エネルギー、 R は気体定数である。本解析では孢子の代表例として、ボツリヌス菌を取り上げるが、ボツリヌス菌に対する各パラメータは $k_0 = 2.0 \times 10^{40}$ 1/s、 $E_d = 310.1$ kJ/mol である。また、ここでは殺菌効率の指標として F_0 を用いた。 F_0 は次式のように定義され、算出過程は Kelder *et al.* の方法を用いた¹⁾。

$$F_0(z) = \sum \Delta F_0 = \sum \Delta z \frac{dF_0}{dz} \Big|_{\min} = \sum \Delta z \frac{\exp\left\{E/R\left(1/T_{ref} - 1/T(z)\right)\right\}}{u_{ax}} \Big|_{\min} \quad (7)$$

Fig.5 に F_0 値の軸方向分布を示す。温度分布同様、テイラー渦流が形成される条件 ($\omega = 80, 95$ rad/s) では F_0 値が飛躍的に向上することが分かった。これは半径方向に流れを起こすことで装置外部からの伝熱を促進する重要性を定量的に示している。例えば、典型的な熱交換器である二重管式熱交換器では、流れが軸方向のみなので、本流れ系における $\omega = 0$ rad/s に相当していると考えられる。Fig.5 中に $\omega = 0$ rad/s での結果は記載していないが、50 rad/s での F_0 値よりも低く、テイラー渦流形成条件下での結果との差異は明白である。今後は、ビタミンなどの栄養素変性モデルを組み込むことで、より精練されたシミュレーションを通してテイラー渦流型加熱殺菌器のプロセス開発を行っていく。

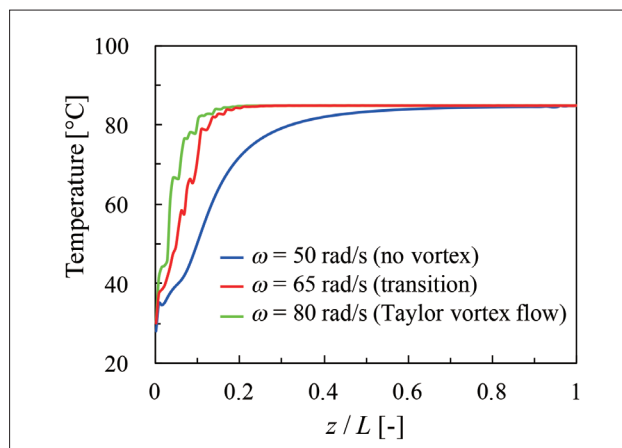


Fig.4 各条件での軸方向温度分布

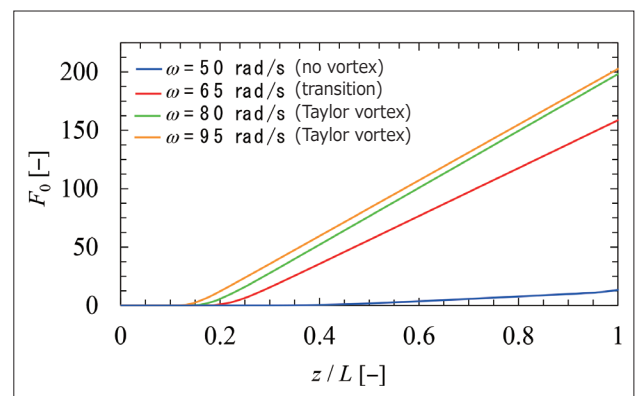


Fig.5 各条件での軸方向 F_0 値分布

結言

同心二重円筒間に生じるテイラー渦流を利用した、液状食品加熱殺菌プロセスの開発を行った。数値解析を用いて、流動場・温度分布を明らかにした上で、テイラー渦流がボツリヌス菌の殺菌効率に与える影響について、 F_0 値をベースに議論を行った。その結果、テイラー渦流の半径方向の流れによって外円筒壁面からの伝熱が促進され、殺菌効率が飛躍的に向上することが分かった。今後は栄養素の失活も加味したシミュレーションを行い、テイラー渦流を様々な液状食品の加熱殺菌プロセスに応用展開していく予定である。

謝 辞

本研究は、平成 28 年度公益財団法人 浦上食品・食文化振興財団の研究助成の支援を受けて行いました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) J. D. H. Kelder, K. J. Ptasinski, P. J. A. M. Kerkhof; "Power-law foods in continuous coiled sterilisers", *Chem. Eng. Sci.*, 57, 4605-4615(2002).

Development of an energy-saving sterilization process for foods using fluid dynamics technology

Hayato Masuda

School of Food and Nutritional Sciences, University of Shizuoka

This study attempts to undertake the development of a heat sterilization process for liquid foods, from the viewpoint of fluid engineering. Taylor vortex flow, which is flow between coaxial double cylinders with the inner cylinder rotating, is proposed as a method for heat sterilization. Above a critical circumferential rotational speed of the inner cylinder, pairs of counter-rotating toroidal vortices (Taylor vortices) appear, which are spaced regularly along the cylinder axis. This toroidal vortex motion enhances not only heat and mass transfer, but also mixing. In addition, all fluid elements leaving the annulus have the same residence time when a relatively small axial flow is added. Therefore, this flow system enables conversion of a batch operation into a continuous one. In order to evaluate its performance as a heat sterilizer, the destruction of spores was numerically simulated, including both fluid flow and heat transfer.

Process performance was evaluated based on the equivalent lethality, F_0 . After simulation of fluid flow and heat transfer, the F_0 value was calculated based on the flow and temperature field. The value of F_0 increased significantly when Taylor vortices were formed in the annular space. This is attributable to the fact that the velocity component in the radial direction due to Taylor vortices improved heat transfer from the surface of outer cylinder. As a result, sterilization was also intensified. Thus, a Taylor vortex flow system has the potential to implement further intensification of the sterilization process. In the future, a more complicated simulation, including degradation of nutritional components such as vitamin thiamine, will be conducted.