

細線加熱法による動粘度測定と制御 —チーズ製造プロセスへの利用—

Kinematic Viscosity Measurement and Control by a Hot Wire Method
—Use for a Cheese Manufacturing Process—

種谷真一

Shin'ichi Taneya

要 旨 : 今まで動粘度は、応力とずり速度との関係として、力学的方法で測定されてきた。この方法は、必ず流動物質へ応力を作用するので、とくにゲルのような高粘性物質では、構造破壊が生じる。流動物質へホットワイヤーを挿入するとき生じる熱対流現象に基づいて、これまでにない新しい非破壊動粘度測定法が開発された。この新しい理論とチーズ製造における牛乳のカード(豆腐状)最適凝乳物生成の経時的動粘度測定についても述べる。

Abstract : Kinematic viscosity has been measured by dynamic method, as relating between stress and rate of shear. This method is surely occurred a structural destruction by applying stress to fluid materials, especially a high viscous material such as a gel. According to a thermal convection phenomenon by penetrating a hot wire into fluid material a completely new non-destructive viscosity measuring method has developed. The new theory and application to measuring and controlling the kinematic viscosity in curdling process of milk with cheese manufacturing will be described.

キーワード : 動粘度、ホットワイヤー法、熱対流、非破壊粘度

keywords : kinematic viscosity , hot wire method , thermal convection, non-destructive viscosity

著者 種谷真一 種谷技術士事務所 190-0031 立川市砂川町7丁目33-35 s-taneya@blu.m-net.ne.jp

2010.10.22 受付, 2011.5.10 受理

社会技術革新学会第4回学術総会(2010.9.30)にて発表

1. まえがき

従来、高粘度物質の連続的粘度測定法は動的方法により、振動の振幅の減衰を計測していた。この方法は物質中に振動による外力を加えるために、物質構造を破壊し、振動の振幅の与え方によって大きく振幅の減衰傾向が変わる¹⁾。

ここで紹介する新しい方法は物質中にホットワイヤーを挿入して、熱の伝導および対流による現象を利用する非破壊的方法であり、簡単な設備で連続測定が可能で、かつゾルーゲル変化のような広範囲な粘度管理も可能である。

ここでは、ナチュラルチーズ製造において最も重要な工程である、タンパク質の酵素反応による凝固過程にこの新しい方法を適応し、チーズ製造の連続化と制御法を述べる。

2. 細線加熱法の原理と動粘度測定

その原理は図1のように、液状試料にホットワイヤー（以下「細線」という。）を挿入して、この細線に瞬間的に一定電流を流すと、細線の温度がジュール熱のため上昇する。その細線の温度上昇は細線表面の液体の自由対流が起こるまでの時間、液体への熱伝導によって起こる。いま、細線を加熱したときの、細線表面温度を θ_s とし、液体自体の温度を θ とすると、その温度差 $\Delta\theta$ は $\ln t$ （時間： t ）に比例し、図1のように直線的に変化して、細線の太さを無視すると仮定すると、近似的に次の式が成立する。

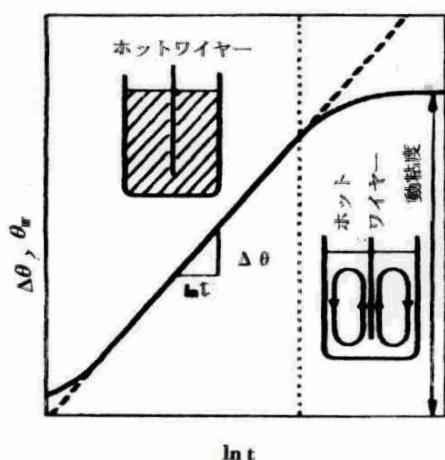


図1 細線加熱法（ホットワイヤー）の原理

$$\lambda = \frac{\left(\frac{Q}{4\pi}\right)}{\left(\frac{d\Delta\theta}{d\ln t}\right)} \quad (1)$$

ここで、 λ は熱伝導率、 Q は発熱量である。この現象について、細線の加熱熱量の液体への移動について最初の直線部は伝導伝熱であるが、それを経過すると直線部からはずれて、 $\Delta\theta$ は一定値に近づく。この領域は液体の自由対流による熱伝達に基づくものである。

一般に熱が物体の表面を通じて出入りする割合を表わす無次元量ヌッセル数 N_U は液体の温度差によって生じる浮力の影響を示す無次元量グラスホフ数 G_R と液体の熱輸送に関するプラントル数 P_R との2つの無次元量のみ関数として次のように表わされる¹⁾。

$$N_U = f(G_R P_R) \quad G_R = d^3 g \beta \Delta\theta / \nu^2 \quad (2)$$

$$P_R = \nu / a$$

ここで、 α : 熱伝達率 d : 細線の直径 λ : 熱伝導率 g : 重力の加速度 β : 液体の体積膨張率 $\Delta\theta$: 細線表面温度と液温との差 ν : 動粘度（粘性率を密度で割った値） a : 温度伝導率である^{1,3)}。

この細線加熱では N_U の値として次のような関係式が導かれている。

$$N_U = C_0 G_R^{C_1} P_R^{C_2} (\theta_s / \theta)^{C_3} (d/l)^{C_4} \quad (3)$$

l は細線の長さ、 $C_0 \sim C_4$ は定数である。この式に各無次元量を代入すると、液体の動粘度 ν は次のようになる。

$$\nu = f(\lambda, \beta, \alpha, \theta_s, \theta, a) \quad (4)$$

ここで、液体の熱体積膨張率 β があまり変化しない条件で測定すれば、その他の物理量は細線で求められるから、動粘度は求められることになる。

ここで、細線の表面温度 θ_s を求めるとき、工業的に細線法を利用とすれば、どうしても、太い金属線を用いことになるので、次の工夫が必要になる。

3. 測定方法

3.1 ホットワイヤー

図1のように試験用としてホットワイヤー自体を試料に挿入するとき、普通ホットワイヤーとして白金線を使用する。その白金線は発熱にある程度時間を要する電気抵抗の低いものを選び、直径 0.1mm、長さ 106mm である。これを容量 5000 l チーズバット内に投入した牛乳中に、このホットワイヤーを設置し 1.0A の定電流を流し、凝乳酵素による凝固継続過程の動粘度測定を行う。また容量 10000 l 縦型タンクによる実用試験では、タンク内低部の側面に写真1のようなホットワイヤーをステンレス管に内蔵したセンサーを設置した。

これはU字タイプの形状で、直径 1mm のホットワイヤーをステンレス管で覆って中心線を形成し、さらにU字管底部に直径 1.5mm のホットワイヤーをステンレス覆った管を形成している。なお、ホットワイヤーの抵抗は 1.364892Ω で抵抗の温度係数は $3.8166 \times 10^{-3} K^{-1}$ である。タンク上部から調整乳を投入し凝固開始からの測定は中心線で θ を U 字管で θ_w を求める。通電は試験用と同じで、温度測定精度は 100 分の $1^\circ C$ である。測定器の構成は電流供給ユニットとデータ処理ユニットから成り、最大出力電流は 1.0A で定電流装置が組み込まれている。測定は電流または電圧である。

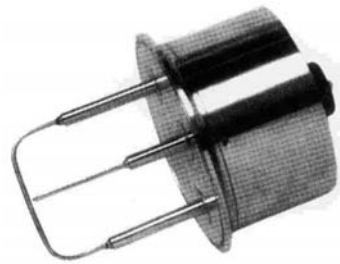


写真1 タンクに設置するホットワイヤー内蔵センサーの概観

4. 結果

4.1 牛乳の凝乳酵素による凝固試験

図3に全脂牛乳(全乳)への凝乳酵素(レンネット)を添加し、その凝固過程での試験用ホットワイヤーによる動粘度の測定を行った結果である。凝固継続時間 Δt に対する凝固状態を相対動粘度の変化とし

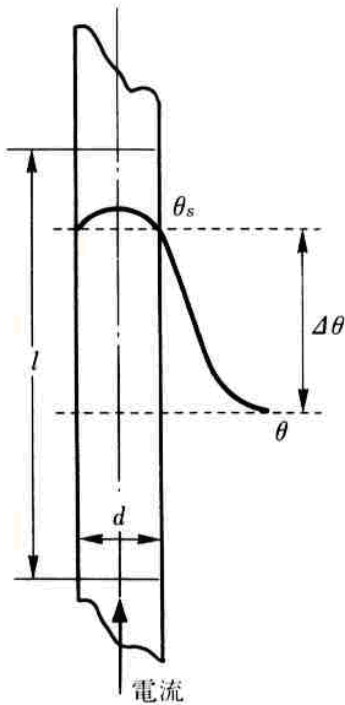


図2 太いホットワイヤーの内部と近傍の温度分布

図2に太い金属線の内部とその近傍の温度分布を示した。この状態での熱伝達率 α は次の式で与えられる。

$$\alpha = W / \pi d l (\theta_s - \theta) \quad (5)$$

W は単位体積・単位時間当たりの発熱量で太い金属線の電気抵抗 R 、電流 i とすると

$$W = 4 R i^2 / \pi d^2 l \quad (6)$$

となる。

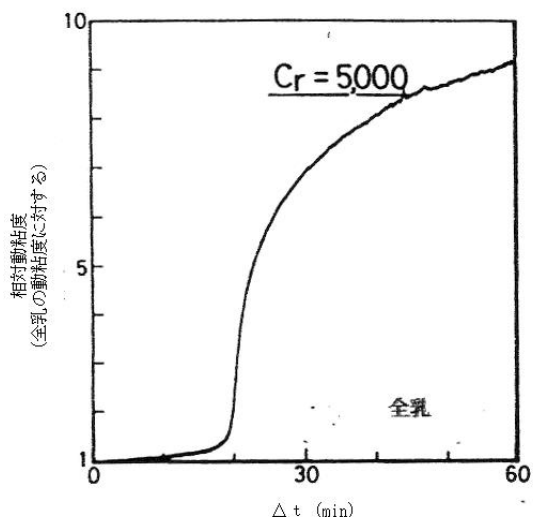
ここで、太い金属線自体の平均温度 θ_w が得られ、金属線の熱伝率 λ_s が分かっている材料の使用によって、表面温度 θ_s が理論的に次の式で与えられる²⁾。

$$\theta_s = \theta_w - W d^2 / 32 \lambda_s \quad (7)$$

帰るところ、式(4)の動粘度に係わる因子全部が与えられることになる。

したがって、動粘度は次のように表わされる。

$$\nu = f(\theta_s) \text{ 又は } \nu = f(\theta_w) \quad (8)$$



Δt (min) : 凝固継続時間
Cr : 牛乳kg当たりの凝乳酵素 (レンネット) 添加単位
図3 牛乳の凝乳酵素による凝固継続時間と相対動粘度との関係

て表わしている。凝固継続時間に対して、相対動粘度は見事な変曲点を示す曲線を描き、凝固継続時間が長くなると、飽和相対動粘度に達する。したがって、充分細線加熱法で凝固状態の連続測定が可能であることが分かった。

4.2 ナチュラルチーズ製造における凝固試験

牛乳は脂肪率約3.0%に調節され、78°C、15分間殺菌し、その後30°Cまで冷却される。それをタンク上部から投入され、そこに、スター（乳酸菌）を0.5~1.5%、塩化カルシウム0.01~0.02%、凝乳酵素0.002~0.004%（粉末、力価（凝固力） C_r : 70000）を自動添加して、タンク内攪拌機でよく攪拌した後、約30°Cにて静置し、凝乳酵素による凝乳の硬度をタンク内に設置されているセンサーで検知して最適凝乳物（これを「カード」という。）に達した時点で、タンク内ナイフ（5~10mm幅）で自動的に「さいの目」に切断される。この静置中チーズ乳の酸度は0.02%増加し、切断直後のホエー（凝乳中の液体部）酸度は0.08~0.10%である。その後攪拌しながら、切断物は収縮して、カード粒になり、最初全ホエーの1/3~1/2程度をタンク底部から排除し、その後タンク内をシャワー式で熱水（75~85°C）を攪拌しながら散布し、加温と同時にホエーの希釈を行う。加温温度は制御によりは35~38°Cまで、2分間に1°Cの速度で行う。ホエー酸度が切断時より0.03%程度上昇し、収縮したカード粒は網を通過し弾力性のある状態になって、ホエーと一緒に排出し、自動的にカード粒は約30分圧搾されて、カード粒は密着して、カードマットと

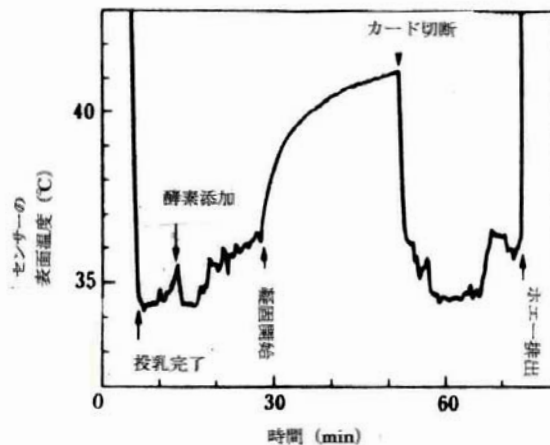


図4 タンク製造における凝固継続時間とセンサー表面温度との関係

なる。このカードマットを所定の大きさに自動的に切断して、0.5~1.0kg/cm²の圧力で20~30分圧縮されて、熟成室へ移動する。

この工程において、凝乳酵素の添加によるカードの生成過程は図4のように、凝固開始からカード切断に至る曲線は全く前述の牛乳の凝固特性と同様である。

図5はカード切断の設定方法で、 θ_w の変曲点から時間 t_1 で規制し、凝固終了温度 $\Delta\theta_w$ に入るように予測する。この $\Delta\theta_w$ 内に経過時間 t_1 が入るならば、その温度の時間で、切断が開始される。しかし、入らない場合は $\Delta\theta_w$ に入るまで時間延長してから、切断が行われようプログラムが組み込まれている。

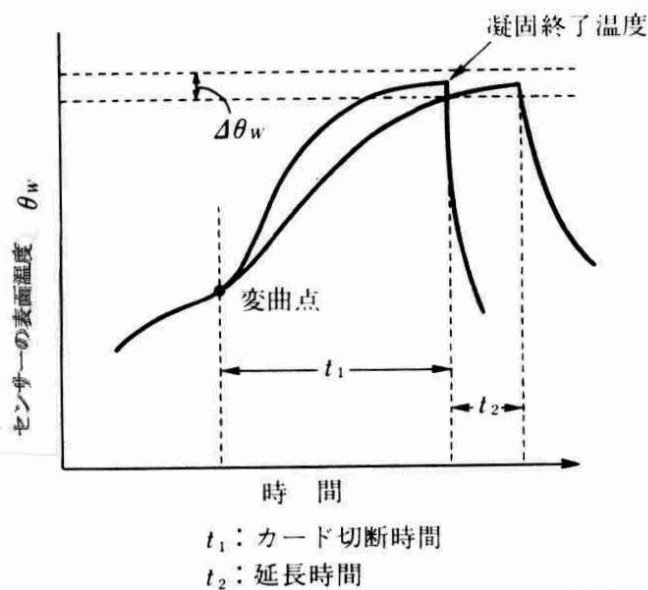


図5 チーズカードの切断点制御法

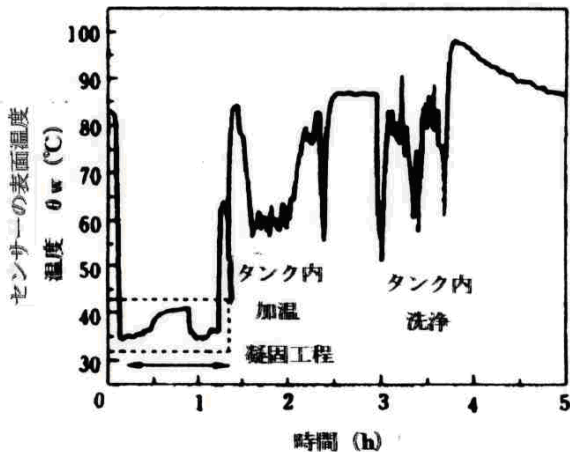


図6 ゴダーチーズ製造におけるタンク内工程のセンサーの表面温度変化

また、タンク使用状態のタンク内工程のセンサーの表面温度を示すと図6のようになる。タンク内のホエーの加温、排除、タンクの洗浄の工程などを確認できる。

4. 考察

ナチュラルチーズ製造において、最も重要な工程はチーズカードの切断時点を決定することである。従来、職人が感覚的に人指し指と中指をカード中に差し込んで、持ち上げる途中での、カードの割れ目を見て、「良し悪し」を判断していた。この感覚は他人には公表せず、職人の宝として自分だけが所有していた。

堀²³⁾は凝固継続時間の違いが製品の品質に及ぼす影響を官能試験で調べている。弾力性や香りは凝固継続時間が30分を超えると、弾力性も香りも失う傾向がある。総合的おいしさの判断としても、凝固継続時間が長いほど悪くなる傾向があつて、歩留りも悪くなる。この結果からも凝乳継続時間の詳細な管理が必要であり、充分感覚的判定に代わって、新しい細線加熱法を使用することにより自動化ができ、さらにタンク使用の工程管理も可能になったことは非常に大きい製造工程の改革である。

5. 結論

ナチュラルチーズ製造において、最も重要な工程は調製乳の凝乳酵素添加によるカードの生成で、そのカードの適正硬度時の切断は大きく品質に影響を与えため、従来は感覚的に判定していた。その判定に

代わって、凝乳の連続的カードの生成を巨視的構造破壊がない状態で連続的に凝固継続過程を新しい細線加熱法による動粘度測定にて、その変化を捉えた。切断適正動粘度を設定し、その動粘度に到達して自動切断が開始するプログラムを設定したら、またタンク内の工程管理による監視も可能であり、ナチュラルチーズ製造の自動化において最も困難とされていた問題を解決できた。

この技術を使った新設工場を2001年に建設した。そして当時ナチュラルチーズ用原料乳が全社で年間35万トンであった内の25万トンを新設工場でも処理することができた。これもこの技術が確立してのことで、原料乳の受け入れから製品に至るまで、一貫通貫で製造できる新鋭の設備になっている。現在では生乳で時間当たり45トン処理し、チーズ製造量は70トン/日である。受乳タンクは200トが6基あり、75°Cで殺菌された原乳はチーズタンク(22.5ト×8基)の中でスターター(乳酸菌)と凝乳酵素が加えられカードとなる。自動制御によりそれを切断し、脱ホエーと加塩して、20kg単位のブロックに成型し、この間は全て機械処理で、全く人の手に触れることがない。衛生的で製造効率が最大である世界的に類のない独自の設備になっている。

また、この工業所有権は日本電子工業に譲渡され、測定器として販売実績をもっている。この研究開発は、私がプロジェクトリーダーとして全体の指導を行い、そのもとで主に理論的部門で堀友繁博士が、工場設置部門では佐伯幸弘博士が担当して行ったものである。この発表に当たり資料の提供など協力を頂いた両博士に感謝する。

なお、この論文は物理的輸送現象⁴⁵⁾として、液体中に生じる速度勾配に打ち消す方向に運動量の輸送比例定数としての粘性率を動粘度に変換し、また液体中の温度勾配によって生じる熱量の輸送比例定数熱伝導率を温度伝導率に変換し、両者の輸送現象を初めて関係づけ、液体中の熱移動によって動粘度の計測を可能にした技術的成果の論文を集大成しさらに補足しものであり、社会的・経営的成果は、チーズの完全連続製造という面で多大な成果があり、この技術の社会的普及面の実績など具体的成果の発表は別稿に譲ることとする。

参考文献

- 1) 種谷真一; やさしいレオロジー工学, 216, 工業調査会 (1990)
- 2) 堀 友繁; 計装, 2月号, 4, 工業技術社 (1986)
- 3) T.Hori; Ins.of Food Tech, 50(4) 911 (1985)
- 4) 川端晶子編著, 食品とテクスチャー, 光琳 (2003)
- 5) 蒔田 薫; 粘度と熱伝導率, 培風館 (1975)