食品の品質管理と物理計測

林 弘通, 堀 友繁

雪印乳業研究本部技術研究所

食品は一般に、水分、炭水化物、蛋白質、脂肪、ミネラルなどの多成分よりなり、これらが不均質な系を形成している。特に食品原料は品種、気候、季節などにより、その品質が微妙に変化する。また、食品の製造工程では加熱、殺菌、冷却などの熱処理工程が多く、食品の不均質で多様な性質とあいまって、色々な併発反応を生じ易い。近年、食品工業の著しい発展により、この変化し易い食品原料の物理化学的性質を改良し、新しい機能性をもち、品質の優れた加工食品が造り出されてきている。これらの加工食品の研究開発には微生物学や化学の手法が主として用いられてきたが、最近これらの手法のほかに物理学の手法が次第に用いられるようになってきた。原料食品から製品に至る加工処理の過程で、食品の力学的性質（主として粘性率、弾性率、緩和時間、降伏値、破壊強度）や熱物性、電気物性などを知ることがきわめて大切である。たとえば、食品の混合、加熱、搬送などの各単位操作の最適化には、熱物性や力学物性に関する情報が不可欠である。また食品のかたさ、ねばり、歯ごたえなどは主に指や口腔内の感触によって決定されるもので、消費者の嗜好に影響を与える物理的性状である。これらの性質はテクスチャーと称し、食品の味、香りを除いた物理的な品質を表わしていて、次第に定量的な評価が進み、客観的な知見が得られてきている。

このように、食品加工工程の最適化や食品品質の評価に物理的手法が重要視されてきている。ここでは、関連する一般事項の解説に加えて、雪印乳業技術研究所で開発されたバター水分計とチーズ乳凝固計について述べ、ご批判を仰ぐこととする。

食品の品質と物性制御

食品工業では、一定品質の製品を大量生産するため

に、通常の製造業と同じように流量、液面、圧力、温度、速度などの計測制御を行なっている。たとえば液体流量、液体および粉粒体タンクのレベル、気体圧力、加熱工程温度、コンベアーの速度などである。このような制御の他に、水分、粘度、味、色、フレーバー、糖濃度などのように食品の品質と密接に関係する物性の制御がある。前者のプロセス制御は、現在、満足すべき技術が得られているが、後者は計測が難しく、オンライン計測に適した物性をどのように把えるかにかかっている。また、プロセスの制御対象が液体→スラリー→固体というように相の状態変化があり、測定システムとしてまとめにくい。したがって、地道な基礎実験により得られた物性をオンラインセンサーとしていかに工程に組み込むかが大切である。たとえば、食品の水分を連続的にオンラインで測定するには、①マイクロ波法、②電気抵抗法、③誘電率などがあげられる。これらの方法のうちどの方法が最も精度よく測定できるかを、対象とする食品の物性との関連において判断しなければならない。また、測定中に食品を破壊または変質するような方法では、たとえ精度の良い方法であってもオンラインセンサーとして用いるわけにはいかない。

次に、具体例としてバター製造過程における水分測定について考えてみる。現在、バターは、連続式バター製造機により5~7 ton/hrの能力で造られていて、その水分調節はクリームのエージング条件、製造機の操作条件により変えられる（図1）。これらの要因は定量的なものでなく、季節などにより変化する。そこで、バターの水分含量を一定にするために、筆者ら⁽¹⁾は安立電気(株)と共同で、自動的に水分を調節する装置を開発した。

バターは水中油滴型(o/w)のクリームから油中水滴型(w/o)エマルジョンに相転換したものであるため、

図1 バター水分の変化要因
 →増加, →減少, -→増加が可能

数百 MΩ の高抵抗をもち、電気抵抗法による水分測定は使用できない。そこで絶縁体の静電容量を測定する誘電率方式を用いた。まず、バターの誘電特性（周波数分散、温度分散）を調べた結果⁽²⁾、誘電率 ϵ' は測定周波数が高くなるほど小さくなることがわかった（図2）。一方、誘電損率 ϵ'' （抵抗分を表わす）は周波数 10 kHz ~ 1 MHz において小となり（図3）、水分量、バター温度、水分、塩分含量に影響されにくい測定周波数として

図2 バター水分と誘電率(ϵ')の関係

図3 バター水分と誘電損率(ϵ'')の関係

300 kHz を選定した。通常、油脂およびバターの誘電率はそれぞれ2~3および4~5である。一方、水の誘電率は80と大きいため水分の増加に対応して誘電率が大きくなり、狭い範囲内で直線関係が得られる。このような物性測定結果よりバター水分自動制御装置を開発した^(3,4)。この装置を用いると、バターの誘電率と水分含量との関係から

自動的に水分を検出、PID（比例制御）式により、水分15~17.5%の目標設定に対し $\pm 0.1\%$ の精度で制御できる（図4）。検出部は図5に示すように平面状の特殊な電極で、バター出口ノズル底部に取り付けられる。水分検出回路はトランス結合の静電容量ブリッジになってお

図4 バター水分計の制御機構

図5 連続式バター製造機に自動水分計を取り付けた図

り、バター水分の変化に対応する静電容量の変化を増幅して取り出す仕組みになっている。

食品の粘度管理

食品は、加工過程における処理温度や処理時間の変化による物性変化が著しい。たとえば、図6に示すように食品を構成する蛋白質の種類、原料品質、処理法によってその粘度は著しく異なる。したがって、これらの食品を加工する際には、このような物性をよく把握し、プロセスを設定しなければ円滑な連続生産ラインの確立と優れた品質や歩留などの管理ができないことになる。たとえば液体食品の濃縮、搬送の場合、その物性としての粘度制御は非常に重要である。プロセスラインに液体を送る場合、しばしば粘度が律速条件となり、そのために固形分濃度はある一定値以下に押えられることがある。また、液体が高粘度のためにパイプライン内の摩擦抵抗が増加し、搬送ポンプの吐出圧が増加して、遂に搬送できなくなることがある。一方、液体自身は、高度の剪断応力をかけられて、構造破壊を起こし、品質低下につながることもある。

粉乳製造の場合、牛乳をできる限り濃縮して、噴霧乾燥機で乾燥を行ない製品とする。これは、濃縮過程における水分蒸発に要する熱エネルギーが乾燥のそれに比べ1/20～1/30であるためである。この濃縮工程では、その固形分率が45%を超えると急激に粘度が上昇し、蒸発罐内での焦付きや伝熱速度の低下を生ずる。したがって、粘度が制約条件となり、濃縮固形分率が決定される。この粘度は、牛乳の熱処理条件（温度、滞留時間、組成）によってかなり変化する。たとえば、熱処理条件の違う多重効用罐で牛乳を濃縮すると、同じ牛乳であっても積算熱量の多いほうでは約2倍の粘度になる。このように高

図6 各種蛋白質と粘度との関係

粘度になると、蒸発罐内の伝熱係数の低下による濃縮能力の低下ばかりでなく、粉乳の溶解性などの製品品質の低下をも生じ、与える影響は大きい。

一般に、粘度測定法として次の5方法が実験室で主として用いられてきた。

①細管法、②落体法、③回転法、④平板法、⑤振動法。

このうち①または③の方法に基づくオンライン連続粘度計が実用化されているが、その計測可能粘度範囲は比較的狭く（50～500 mPa·s）^⑤、また細管の閉塞防止などのために計測に先立ち原則としてフィルターを通過させなければならないなど、利用する際の制限が少なくなかった。また、センサーの価格が1個数十万～100万円以上と比較的高価なことも、多点計測を必要とする一般の工程管理への導入を阻害している。次に、筆者らの会社において基礎実験よりスタートして実用機として使用しているチーズ乳の凝固計（粘度計）について述べる。本測定機は非破壊的連続式オンラインセンサーとして優れた機能を発揮しているものである。

チーズ乳の凝固計の開発

1. 凝固計開発の背景

ゴーダ、チェダーなどに代表されるナチュラルチーズの製造は、仔牛の第4胃より抽出されたレンネット（酵素剤、レンニンを主成分とし、少量のペプシン、トリプシン、ペプチダーゼを含む）を牛乳に添加し、凝固させることより始まる。牛乳に乳酸菌スタータ（①レンネット凝固の促進、②ホエー排出の促進、③汚染菌生育の抑制、④チーズ風味の賦与などの役割をもつ）とレンネットを添加し、30～32℃で20～60分間静置すると牛乳は凝固する。凝固機構は複雑で完全には解明されていないが、凝固過程には次の2つの相があると考えられている^⑥。

① κ -カゼインの不安定なペプチド結合はレンニンによって加水分解され、グリコペプチドとパラ κ -カゼインが生成される（酵素反応）。

② パラ κ -カゼインはカルシウムイオン存在下で他のカゼイン画分とともに沈殿する（非酵素的変化）。

この凝固乳の切断時期が早すぎても遅すぎてもチーズの歩留、品質に好ましくない影響を与える。この判断は、現在まで長い間（約8,000年といわれる）、チーズ製造技術家の手指を使って、凝乳の硬さ、割れ具合、組織を観察しながら主観的、経験的に行なわれてきた。凝固

時間は主に牛乳の pH(酸度), 静置温度, レンネット量に左右され, 凝固時間が速ければ速いほどカードは硬くなる. 切断時期を客観的手法, つまり精緻な測定器により数値化できれば, 効率, 歩留, 品質の上でより優れたチーズ製造工程が確立されると考えられる. このような観点から現在まで数多くの試みがなされてきたが, 凝固乳を非破壊的に, オンラインで精度良く測定できた計測法は確立されていない

2. 細線加熱式チーズ乳凝固計

チーズ乳の入ったパットの底部に図7に示すような白金線 (0.1 mmφ×106 mm) を浸漬する^(7,8). 0.7 A の電流を通電し, 5秒おきに自動的に温度を測定し, 制御装置 (ヒューレットパッカード (HP) 社製モデル 3497 A) とデスクコンピュータ (HP 製モデル 86) を直接連結してデータを集積する. 加熱された細線の温度は 0.044% の精度で次式により表わされる.

$$\theta_w = (R/R_0 - 1)/\alpha_w \quad (1)$$

ここで, θ_w : 細線の温度 (°C), R : 細線の電気抵抗 (Ω), R_0 : 0°C における電気抵抗 (Ω), α_w : 温度変化に対する電気抵抗係数 (1/K)

実験に用いた白金線の R_0 と α_w の値はそれぞれ 1.36489 Ω と 3.817×10^{-3} 1/K である. θ_w はチーズ乳にレンネットを添加後, しばらくの間一定 (酵素反応) であるが, 凝固が始まると急上昇する (非酵素的变化). また, θ_w は平衡に達するまで $d\theta_w/dt$ が減少する. これをモデル的に示すと図8のようになる. 次に, この方法の測定原理を述べる.

図7 細線加熱法によるチーズ乳凝固計のセンサー部分

レンネット添加後の時間

図8 チーズ乳にレンネット添加後の熱線の温度と時間との関係の模式図

まず, 温度 θ_∞ の静止流体中に, 垂直に固定された直径 d の金属細線 (両端の影響を無視するために長さ $l > \sim 1,000 d$) を通電加熱した場合の, 該細線の表面における熱伝達に考えてみると, フーリエ (Fourier) の熱伝導方程式は次式で示される.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left(\nabla^2 \theta + \frac{1}{\lambda} W \right) \quad (2)$$

ここで, θ =温度 (K), t =時間 (秒), a =温度伝導率 ($\text{m}^2/\text{秒}$), ∇^2 =ラプラス演算子, λ =熱伝導率 ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$), W : 単位体積の細線中で発生した熱量 (J/m^3) であり, 円柱座標系においては,

$$\nabla^2 = \frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \quad (3)$$

となる.

ここで r =半径方向における熱線中心からの距離 (m) 定常解は境界条件,

$$-\lambda \left(\frac{d\theta}{dr} \right)_{r=d/\alpha} = \alpha (\theta_s - \theta_\infty) \quad (4)$$

$$\left(\frac{d\theta}{dr} \right)_{r=0} = 0 \quad (5)$$

のもとで, 直ちに解けて, 細線の表面における熱伝達 α は次式で与えられる.

$$\alpha = \frac{Wd}{4(\theta_s - \theta_\infty)} \quad (6)$$

ここで, θ_s は細線の表面温度を示す.

一方, 垂直加熱細線の周囲における自由対流熱伝達は, プラントル数の変化がそれほど大きくない場合 ($Pr \approx 3 \sim 10$),

$$Nu = c_1 Gr^{c_2} \quad (7)$$

で, 近似的に記述できる (図9)⁽⁷⁾.

ここで, c_1, c_2 : 定数

図 9 熱線表面の熱伝達を示す Nu 数と Gr 数との関係

$$Nu \text{ (ヌッセルト数)} = \alpha d / \lambda f \quad (8)$$

$$Gr \text{ (グラスホッフ数)} = d^3 g \beta_f (\theta_s - \theta_\infty) / \nu_f^3 \quad (9)$$

α : 熱伝達率 ($W/m^2 \cdot K$), λ : 熱伝導率 ($W/m \cdot K$), g : 重力加速度 (m/s^2), β : 体積膨張率 ($1/K$), ν : 動粘性率 (m^2/s)
また添字 f は膜温度, $\theta_s + (\theta_s - \theta_\infty)/2$ における物性値をとることを示す。

(6)式および(7)式から α を消去して変形すると,

$$\nu_f^2 = d^3 g \beta_f \left\{ \frac{3}{2} (\theta_w - \theta_\infty) \right\}^{1+(1/2)} \times \left\{ \frac{c_1 \pi l \lambda_f}{R_0 i^2 (1 + \alpha_w \theta_w)} \right\}^{1/2} \quad (10)$$

となる。ここで、 i は電流, θ_w は細線の直径方向の断面の平均温度を示し, θ_w との関係は次式で与えられる。

$$\theta_w = \frac{2}{3} (\theta_s - \theta_\infty) + \theta_\infty \quad (11)$$

また, d, g, l, R_0, α_w は一定と見なせるので, 流体の動粘性率 ν_f は結局,

$$\nu_f = f(\theta_w, \theta_\infty, i, \beta_f, \lambda_f) \quad (12)$$

で表わされることになる。また, β はある温度範囲での変化率なので, 実質的に一定と仮定できる場合が多い。したがって, 計測中に流体の組成や相の変化あるいは気泡や固体の混入がなく, λ が一定であれば (12) 式は,

$$\nu_f = f(\theta_w, \theta_\infty, i) \quad (13)$$

と簡略化される。すなわち, 流体中の細線を電流 i で通電加熱し, その時の流体の温度 θ_∞ および細線の温度 θ_w (ただし, i の値は θ_w が θ_∞ より“有意に”高くなるように設定する) を計測すれば, (13)式から直ちに流体の動粘性率 ν_f が観測できる。

食品加工では (13) 式を仮定できる場合が多い。たとえば冷却によってゲル化させる場合, 定電流を用い, $(\theta_w - \theta_\infty)$ を求めることによりゲル化過程を計測でき

図 10 チーズ乳のカード生成過程における熱線の温度と時間の実測例

①乳酸菌スタータ添加, ②レンネット添加, ③凝固開始, ④カードの細切時期

る。また, 乳凝固のように一定温度で凝固変化が起こる場合は, (13) 式はさらに簡略化されて, 単に θ_w 値のみによって凝固過程を直接的に計測できる (図 10)^(7,9)。

*

食品製造工程におけるオンラインセンサーとしては, ①非破壊計測 (連続計測), ②実時間計測 (自動制御), ③圧力非依存 (タンク内計測), ④センサー構成の単純さ (低コスト, 保守が容易) などが重要な開発の要点と考えられる。このような視点から, 実用機として筆者らの研究所で開発したバター水分計とチーズ乳凝固計について説明を試みた。これらの測定機は食品それぞれの物性に関する地道な基礎実験をもとに比較的長期間にわたり研究開発されたものである。このような手法が, 今後色々な食品の工程やさらに食品以外の工業にも利用されることを期待するとともに, 食品物性研究のますますの発展を願うものである。

文 献

- 1) S. Taneya & H. Hayashi: *Milchwissenschaft*, 34 (4), 192 (1979).
- 2) 半澤啓二, 種谷真一: 応用物理, 40 (12), 1321 (1971).
- 3) 半澤啓二他: 特許 822201.
- 4) H. Hayashi & S. Taneya: XIX th Intern. Dairy Congress, 137 (1974).
- 5) 川田裕郎: “粘度 (15 版)”, コロナ社, 1980.
- 6) 林 弘通: “乳業技術録典, 上巻”, 酪農技術普及学会, 1978.
- 7) T. Hori: *J. Food Sci.*, 50, 911 (1985).
- 8) T. Hori & H. Hayashi: Proc. of 4th Intern. Congr. Engineering and Food, Edmonton, Canada, July, 1985.