

新しい振動式粘度計 SV-10、SV-100 を用いた粘度測定と 食品物性および食品開発への応用

株式会社 エ - ・アンド・デイ
販売促進部

はじめに

食品のもつ機能には、栄養機能 生体調節機能、そして おいしく楽しく食べるという感覚刺激機能があると言われている。私たちと食物との関わりは、うぶ声をあげた新生児の時から生命の終焉を迎えるまでの長い間、つねに連続的で不可欠なものである。それゆえに、毎日をおいしく楽しく食することの重要性は高い。また、わが国は世界にも誇る長寿国であるが、このことは同時に高齢化社会に向かっていることを意味する。高齢者における自歯保有率や臼歯の FU(上下の組)、筋力などの減少にともなう咀嚼機能の低下や誤嚥、嚥下困難症に代表されるような嚥下機能の低下は、口腔内の感覚が大きく変化するばかりでなく、食品においても安全に食べることができる物性をもったものに制約される。このようなことから食品の開発において、より嗜好性の高い食品の開発と同時に咀嚼機能や嚥下機能が未熟もしくは低下した乳幼児や高齢者に向けて、いかに高い安全性をもった食品を開発するかということが重要な課題となってくると考えられる。

食品のテクスチャーと粘度測定

食品の研究開発にはテクスチャーの研究が欠かせないが、その手法には パネルによる官能試験 機器による食品物性の測定、また近年ではその中間的な手法として生体にセンサを装着し口腔内圧や筋電位などを生体計測する 生理学的手法がある。官能試験は優れた評価法であるがパネルの身体的、精神的な状態の影響を受けることと、離乳食や高齢者用食品においてはその対象者と食感が異なるために適用することができない。機器による物性測定は必ずしもその数値と感覚とが比例しないが、食品の有する普遍的な物理量を定量する意義は大きく、大切なことはその物性値と生理学的な生体計測で得られた結果とを分析し、いかに機能的な食品を開発するかという点である。食品物性を表す最も基礎的な物理量として粘度があるが、従来の粘度計では例えば試料の温度変化にตอบสนองした粘度計測が難しく、テクスチャーを示すことが難しかった。当社では新しい粘度の測定法を研究開発し、従来法では測定できなかった温度と粘度との相関関係を、試料の組織を破壊することなくリアルタイムにかつ、連続的に測定することができる振動式粘度計 SV-10、SV-100(以下、SV シリーズ)を開発したので本報で紹介し、いくつかの食品でその粘度の測定例を示すことにする。

粘度計 SV シリーズの測定理論

粘度計 SV シリーズは試料中に置かれた振動子を正弦振動させることにより測定する、音叉型振動式粘度計 *Sine-wave Vibro Viscometer* で、写真1のように粘度計測部と表示部およびパソコンへのデータ通信ソフトウェアで構成されている。粘度検出部は図1に示すように、先端に感応板(振動子)を取りつけた一対の板ばねを電磁駆動部により一定の振動数および振幅でそれぞれ逆位相に共振振動させ、感応板と試料との間に生じる粘性抵抗の相違を加振力である駆動電流の変化として検出し、その駆動電流と粘性抵抗との比例関係を利用して試料の粘度を求めるものである。また中央部にある温度センサにより、粘度と温度との同時



写真1. 振動式粘度計 SV-10、SV-100

測定ができる特長がある。

自由振動系では抵抗によるエネルギーの損失のためにその振動振幅が減衰するが、外部より加振力を与え続ければ一定の振幅をもった振動を継続する。一般に加振力 $F = F_0 \sin t$ の作用下にある一自由度の粘性減衰振動系では(1)式のような運動方程式で表すことができる。

$$F = m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + Kx \quad (1)$$

ここで右辺の第1項は慣性力、第2項は粘性減衰力、第3項はばねの復元力で、共振振動系のために慣性力と復元力とは互いに等しく打ち消し合い、強制振動を与える限り(2)式のように粘性抵抗に応じた振幅値で振動する。

$$x = \frac{F}{c \cdot n} \quad (2)$$

(F は加振力、 x は振幅値、 n は検出系の固有振動数、 c は粘性減衰係数)

したがって、検出系の固有振動数と等しい振動数で感应板を振動させ、さらに一定の振幅値で共振振動させた場合、加振力と粘性係数は比例関係にある。本粘度計の検出系振動特性は一自由度の粘性減衰振動系として高い再現性があり、上述のように粘性減衰係数の相違を感应板の駆動電流の差として表すことができる。

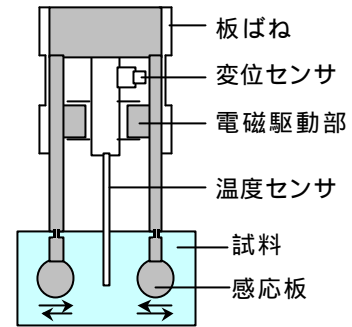


図1. 粘度検出部の機構

SV シリーズの特長と仕様

粘度計は従来より優れた測定法として毛細管方式や回転方式、回転振動方式などがあるが、SVシリーズにはこれらの従来法に加えて以下のような特長がある。試料の粘度や温度変化にリアルタイムに应答し温度と粘度との相関関係が測定できる。さらに試料容器の周囲にオプションのウォータージャケットを用いて試料の温度制御ができる。測定範囲は沸騰水の粘度である $0.3\text{mPa}\cdot\text{s}$ 付近の低粘度領域から高粘度領域の $100\text{Pa}\cdot\text{s}$ まで広い。さらにSV-10、SV-100それぞれの持つ広い測定範囲において、センサである感应板を交換することなく連続的に測定することができる。測定値の再現性は1%で非常に高い再現性を有する。付属のパソコン通信ソフトを用いることで測定中の温度と粘度の変化過程をリアルタイムに確認することができ、測定結果をデータファイルとして収録することができる。さらにこのソフトは最大で10000ポイントのデータを収録することができるので、仮に10秒毎にサンプリング設定すると1日以上 of 長期間測定ができる。また本体の測定時間には制限がないことと、サンプリング時間を長く設定することで数日間といった放置時の長期経時変化を測定することができる。感应板の振動振幅は 0.4mm 以下と微小でまた、振動数も 30Hz と低振動数であることから、試料の組織を变形したり破壊することなく測定できる。このことは攪拌中や流動状態の試料を測定すること可能にし、食品生産ラインにおける連続測定を可能にした。

ここまで述べたように、SVシリーズには従来の粘度計にはない多くの有用な特長があり、表1にその概略的な仕様を示した。

表1. 粘度計 SV シリーズの概略仕様

	SV-10	SV-100
測定方式	SV型(音叉型振動方式)、固有振動数 30Hz	
粘度測定範囲	$0.3 \sim 10,000\text{mPa}\cdot\text{s}$	$1,000 \sim 100,000\text{mPa}\cdot\text{s}$
粘度測定再現性	1%	
試料量	10ml ~ 45ml	
温度測定範囲	0 ~ 100 (分解能 0.1)	
外形寸法	$332\text{W} \times 314\text{D} \times 536\text{H}$ (mm), 約 5kg (計測部)	
標準価格(税抜)	¥298,000	

食品における粘度測定と応用

SV シリーズを用いていくつかの食品の粘度測定例を示すとともに、ほかの食品への応用について述べてみたい。

図2は純水を25℃の室温から60℃まで加温し、その後室温に放置したときの粘度の変化を示しており、パソコン通信ソフト WinCT-Viscosity を用いてリアルタイムに温度と粘度の変化を画面に表示させた結果である。水の粘度は、常温よりも高い温度において $1\text{mPa}\cdot\text{s}$ 以下の低い粘度を呈し、また温度と粘度とは逆相関することがすでに詳しく調べられている。SV シリーズを用いた結果、定性的にも、数値的にもかなり正確に合理的な結果が得られたことがわかる。また、測定開始から180分経過し再び25℃の室温に戻った時点でも測定開始時の粘度を再現よく測定している。

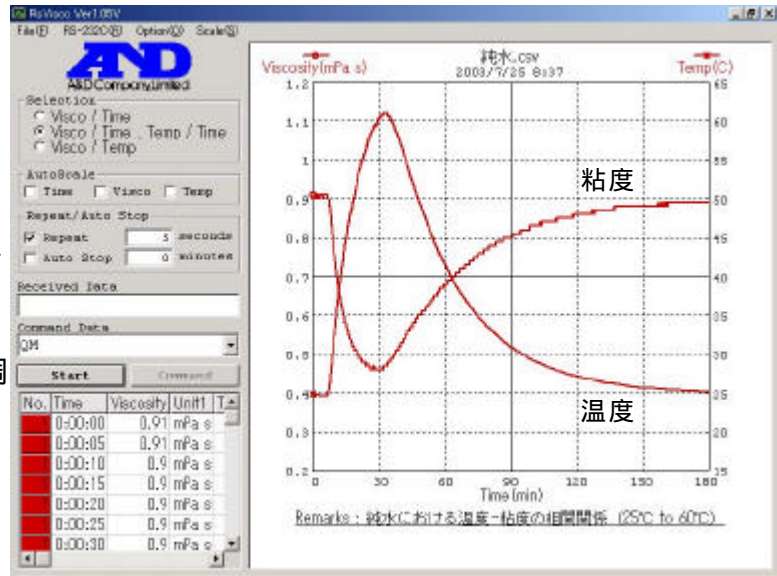


図2. 水の温度変化と粘度の変化過程

さらに、微小な粘度値の差を検証するために25℃のエチルアルコール（粘度 $1.084\text{mPa}\cdot\text{s}$ 、理科年表）を測定したところ、25℃の水の粘度 $0.890\text{mPa}\cdot\text{s}$ よりも約20%程度高値のほぼ理想値に近い粘度値を示し、両者の粘度差を有意な差をもって検出できることを確認した。

このように、粘度の非常に低い領域で安定してかつ再現性よく粘度測定ができることは、ミネラルウォーターをはじめ清涼飲料水や乳飲料物、ビール、洋酒、日本酒、スープなど、さまざまな飲料の飲み心地を数値的に評価、管理する一つの手法として極めて有用である。

図3は市販されているレトルトパックの粥を沸騰水で5分加熱後、開封して樹脂製の試料容器に移し、その周囲を氷水で冷却放置しながら粘度測定した結果である。摂食に最も適する温度の目安は体温と20℃の差であると言われているが、通常の炊飯ジャーの保温温度が70℃程度であることから、米飯の摂食温度は70℃から口腔内温度の38℃程度までと考えられる。この温度範囲において粥の粘度は比較的安定した数値を示していた。この粘度変化は粥の重湯成分（ゾル）を主に反映していると考えられるが、その中にゲル様の米粒が存在しても粘度センサである感応板の振動振幅が微小なためにその影響を受けにくく安定した粘度測定ができる。

糊化した粥の粘度が測定できることは、高齢者や嚥下障害患者向けに増粘剤を添加した食品や離乳食、さらにクリームのようなペースト状の食品などの粘度測定にも応用できるものと考えられる。

図4は冷蔵保存した鶏卵卵白を試料容器に採り、容器全体を約80℃付近まで加温しながら粘度を測定した結果である。温度上昇とともに通常の液体のように粘度は減少するが、58.4℃より粘度は増加に転じ、さらに70.4℃から粘度勾配が急に大きくなっている。WinCT-Viscosityのグラフ機能には図のように粘度軸（縦軸）を対数で表現する機能があり、試料が低粘度から高粘度までダイナミックに変化する過程を的確に表現することができる。文献から鶏卵卵白の物性を精査したところ、卵白の凝固過程は「56℃付近から粘度増加が始まり、58℃でたんぱく質が凝固を始め白濁、70℃までは流動性を保ちながら凝固を続け、70℃でほぼ凝固、その後は硬化をしながら80℃で硬く完全に固まる。」とある。SVシリーズで測定した本結果は多くの諸先生方が研究された通りの結果を正確に再現していることがよくわかる。

このように、凝固した食品の粘度が測定できることは、ヨーグルトやプリン、ゼリー、ジャムといった食品への応用が可能であり、また低粘度領域から凝固過程、硬化過程といった高粘度領域まで連続

的に測定できることから、ゼラチンやガラクトース、ペクチンなどの溶液の粘度測定やそれをゲル化剤として添加した食品の粘度測定にも応用できるものと考えられる。

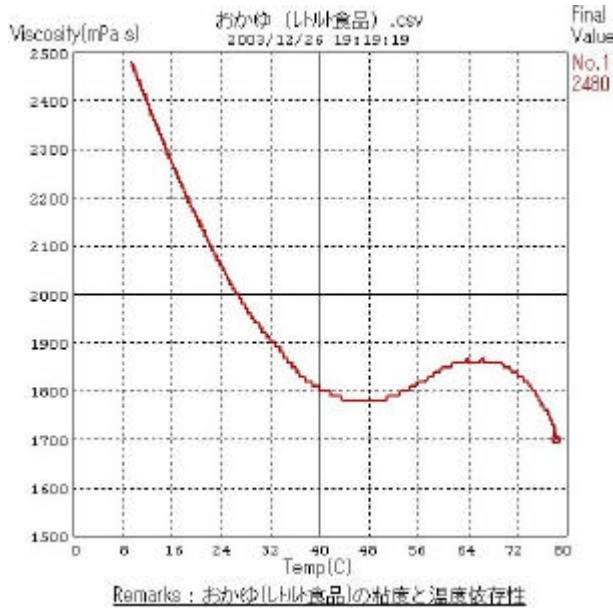


図3.粥(レトル)の温度変化と粘度の変化過程

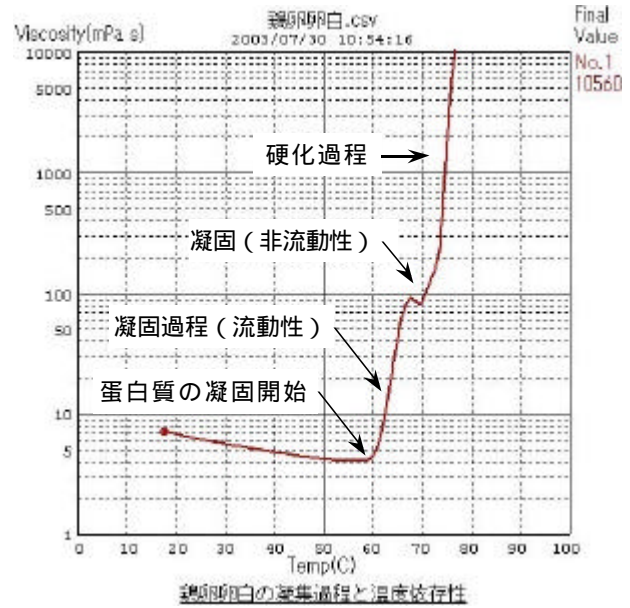


図4.鶏卵卵白の温度変化と粘度の変化過程

まとめ

食品におけるレオロジーやテクスチャーの研究、開発そして管理において、粘度はその物性値を表現する一つのパラメータとして重要である。今回開発した、新しい測定方式による振動式粘度計SVシリーズは、従来の粘度計では測定することが難しかった低粘度領域や、温度との相関関係、そして低粘度から高粘度領域までの広い領域を連続的にかつ精度(再現性)よく測定することを可能にし、また回転などによる試料組織の破壊がないため、本来の試料性状のまま粘度を測定することができる。食品に携わる多くの研究、開発、管理される方々にとって、本粘度計を使うことにより今まで評価、管理できなかった粘性の定量化に役立てば幸いである。今後は必要に応じて、食品分野などのアプリケーションを伺いながら、流動性などのレオロジー機能を付加した製品開発が必要であると考えている。

<参考文献>

- 1) 岡小天: レオロジー. 裳華房(1982)
- 2) 川端晶子: 食品物性学. 建帛社(2000)
- 3) 神山かおる: 高齢者の咀嚼解析と今後の食品開発. 食品と開発 Vol.38, No.11: 2-4(2003)
- 4) 石渡章介, 出雲直人: 新しい粘度計「SV-10」の技術と適用. J E T I Vol.51, No.7: 36-40(2003)
- 5) 石渡章介, 林充朗, 大島秀明, 鈴木脩: 音叉型振動による粘度測定法. 日本レオロジー学会誌 Vol.19, No.2: 83-88(1991)