

フードサイエンス 平成 26 年 11 月号 投稿原稿

特集 高齢者向け食品の開発

主題『粘度による食品材料の評価技術』

副題『摂食・嚥下評価に関わる、増粘剤や粉体食品の物性測定について』

テーマ 『粘度による食品材料の評価技術について』

副題 (摂食・嚥下評価に関わる、増粘剤や粉体食品の物性測定について)

キーワード：とろみ、ゲル化、音叉振動式粘度計、静粘度、粉体の粘性

## 1)はじめに

粘度という言葉は日常使われないが、液体の特徴を表現するサラサラ、ネバネバなどの表現はよく聞かれる。これら液体の特性を表わす『粘度』を測定した歴史は古く、産業革命時にさかのぼる。蒸気機関を動力源として、力を回転運動などに変換する時に、軸受の摩擦低減にオイルが利用され、その時にオイルの粘性を評価する必要が発生した、との記述がみられる。<sup>\*1</sup> しかし、その利用が一般的になったのは、産業革命の集大成として自動車が大量生産され、内燃機関に必要不可欠となった、エンジンオイルが一般化し、オイルの管理が必要不可欠となった事が大きかったと推測される。

当初の粘度は、液体がジョウゴ状の細い口を通過する時間と、その粘性が比例した事を利用して測定された。この方式は今でも細管式粘度計として利用され、ある液体が一定のオリフィスを通過する時間が『粘度÷密度』に比例する事を利用して、粘性を測定する方法として提案された。液体の粘性を表す標準物質としては、普遍性のある水が粘度の基準となり、水と細管式粘度計が、粘性を規定する物質と測定方法として最初に確立された。

その後、粘度測定は、液体中にローターを浸漬させ、それを回転させるのに必要となるトルクが、粘度に比例することを利用した回転式や、液体中を落下する金属球の落下時間が、粘性に比例することを利用した、落球式などが確立された。これらの方式には一長一短があるが、総じて機器が大掛かりとなり使用する液体の量が多い、一つの測定装置で測定できる粘度範囲が狭く、かつ粘度の基準となる水など、低粘度の測定が不安定で、測定されたデータのデジタル化し難いという問題があった。

近年、半導体を利用した電子部品が開発された事により、計測制御技術が飛躍的に発達した。その結果、上記3方式とは異なる粘性測定方法として、約50年前に提案された振動式粘度計が、最近になって製品化された。<sup>\*2</sup> 振動式粘度計が販売された初期段階では、長年変化のなかった粘度測定の現場において、方式の異なる新しい提案は受け入れられない、との拒絶反応もあった。しかし最近では、振動式の特徴が評価された結果、2011年に行われ

た『粘度の JIS 規格改定』\*3 により、振動式も正式に規格への仲間入りを果たした。また、それに先立ち、粘度の JCSS 対象機器\*4 にも指定されるに至った。

最近の粘度測定は、旧来のオイルや石油などの工業分野だけでなく、新素材となるナノコロイドやインク、接着材や食品など多くの分野に拡大している。特に高齢化社会の到来により、誤飲・誤嚥の重要な指標となる『とろみ』や『ゲル化温度』の測定など、人体に関わる粘度測定への新しい場面を迎えており、これらの分野でも音叉振動式粘度計が利用され始めた。\*5 音叉振動式が選ばれる理由としては、人の感じる各液体の微妙な物性差（感覚差）を、手軽に、かつ明確に、再現性良く測定できる高感度な粘度測定機器が、過去には無かったこと。また関係する測定機器が、大変高価であったことがあげられる。

本報告は、振動式の中で、30Hz の低周波駆動となる音叉振動式粘度計、及び音叉振動式レオメータを利用し、増粘剤、食品、及びその他、特徴ある液体・粉体の粘性を測定した結果について、まとめたものとなる。この方式による粘度測定により、液体や粉体の材料破壊を起こさず、今まで容易に測定できなかった、素材そのものが持つ本来の粘性評価が可能となった。

## 2) 音叉振動式レオメータの測定原理

音叉振動式粘度計と音叉振動式レオメータとの違いは、センサ部となる振動子の振幅が一定値に固定されるか、または振幅を変えられるか、の違いとなる。ここでは、センシング方式の基本となる、音叉振動式粘度計の原理について説明する。

### ○音叉振動式の理論展開

音叉振動式粘度計では、音叉同様に、2つの振動子を面と並行方向に共振させ、振動子の振幅を一定に保つのに必要となる振動エネルギーを、電磁力により補償している。つまり、液体の粘性抵抗に相当する駆動力を与え、その駆動力が粘性抵抗に比例することから、粘度を求めている。振動式粘度計では原理的に粘性抵抗として『粘度×密度』が求まる。この粘度×密度を『静粘度』\*6と呼んで、細管式で得られる動粘度、回転式で得られる粘度と区別している。

音叉振動式では、振動子を共振させるのに必要となる駆動力と慣性項、粘性項、弾性項に関する運動方程式を計算することで、振動子を駆動する力が粘度×密度に比例することが理解される。

振動式粘度計の理論モデル詳細については、別の報告\*2を参照していただく事とし、結論のみ説明する。Fig. 1 の機構において、振動子が周波数  $f$  で

振動する場合、液体から振動子が受ける機械的インピーダンス  $R_z$  は

$$R_z = A\sqrt{\pi f\eta\rho}$$

となり、右式を構成する各内容は、 $f$ ：振動周波数 (Hz)、 $A$ ：振動片の両面の面積、 $\eta$ ：液体の粘度、 $\rho$ ：液体の密度となる。ここで、電磁駆動部が振動子に一定の振動速度  $Ve^{i\omega t}$  を与えている力を  $F$  とすると

$$R_z = \frac{F}{Ve^{i\omega t}} = A\sqrt{\pi f\eta\rho}$$

と表すことができる。上式から電磁駆動部が与える力は静粘度（粘度  $\eta$  と密度  $\rho$  の積）に比例していることが理解される。実際の測定では、試料となる液体に対して、振動子が常に一定の振幅を維持するよう電磁駆動部に発生するトルクを制御し、その制御に必要となる電流が『粘度×密度』すなわち静粘度に比例することを利用し、粘性を測定している。

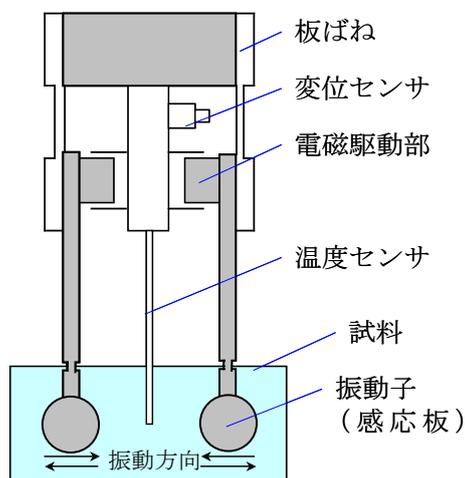


Fig. 1 センサ部構造



Fig. 2 全体写真

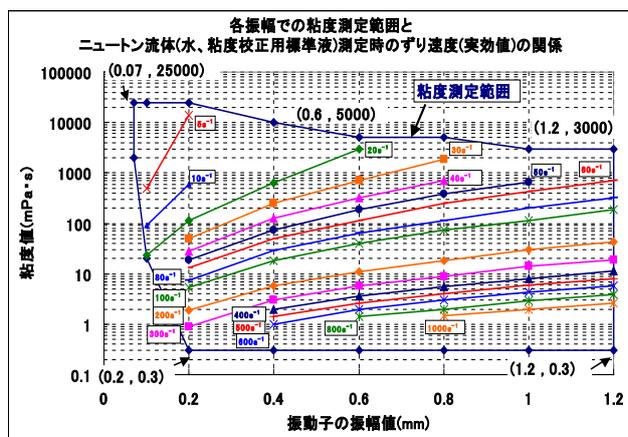


Fig. 3 粘度の測定範囲

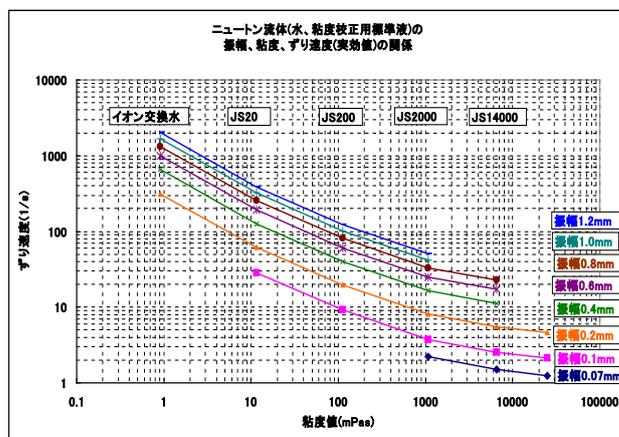


Fig. 4 粘度標準液とずり速度分布

## ○音叉振動式の特徴

Fig.1 に音叉振動式粘度計のセンサ部の構造を示す。この図にある変位センサと、その出力(変位)を一定値とする加振力を電磁力で制御・補償する方式は、分析天びんに利用される電磁平衡式の質量検出部と同じ要素構成となっている。また固有振動数を規定する板ばねも、電磁駆動式天びんと共通する要素となる。これらの背景から、音叉振動式粘度計では、最小感度  $0.01\text{mPa}\cdot\text{s}$  を最大測定粘度  $10000\text{mPa}\cdot\text{s}$  をで割った分解能が、天びん相当の 100 万分の 1 という高感度になっている。

Fig.2 が音叉振動式レオメータの全体の構成写真となる。左側から、粘度検出部、制御部、コントローラ部となる。

Fig.3、4 は、音叉振動式レオメータで得られる、せん断速度(ずり速度)分布をグラフ化したものとなる。振動式の場合、液体中を移動するのは振動子のみであり、せん断速度を仮定できる相手面が無い。また本来、せん断速度の到達範囲は同じ測定条件下でも、各液体の粘性(粘度値)により異なっている。従って、同一の加振条件下でも、また同一の回転運動下でも、液体の粘度値によりせん断速度の到達範囲は異なる。これらの理由から、音叉振動式粘度計では、粘度値が既知となる標準液の粘度値と、その標準液を駆動するに必要となるトルク(力)を振動子の総接液面積で割った、せん断応力値から、計算によりせん断速度を求めている。ちなみに粘度の定義は、『せん断応力』 = 『粘度』 × 『せん断速度』 となり、粘度はせん断応力をせん断速度で割った係数となる。<sup>\*7</sup>

音叉振動式におけるせん断速度については、振動子が往復運動を行うため時間に対して一定値にはならない。そこで、せん断速度の実効値により、せん断速度を定義している。

以上が、音叉振動式粘度計の技術的内容となるが、共振周波数が 30Hz と低く、かつ振動子の基準振幅が 0.4mm と大変小さい事も、被測定物の構造変化を最小限とした、高精度な粘性測定が可能となった理由になっている。

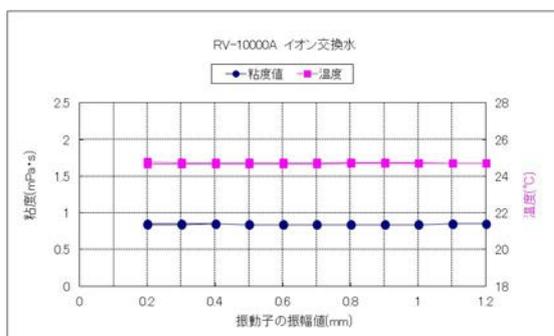
### 3) 音叉振動式レオメータによる測定例

音叉振動式レオメータ及び粘度計を利用し、色々な液体の粘性を測定した結果について説明する。なお、以下のグラフは縦軸を静粘度：『粘度×密度』で表記すべきところを、被測定液体の密度(比重)を 1 と仮定して粘度として表現している。

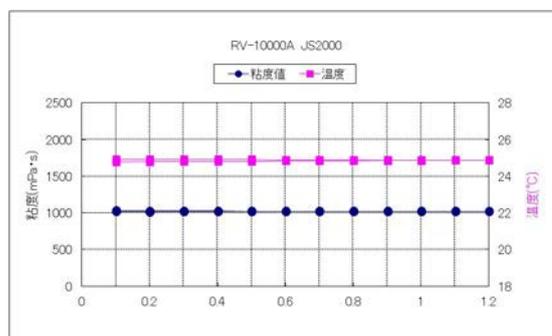
#### 3-1) ニュートン流体の測定

代表的なニュートン流体となる水、及び粘度の標準液となる JS2000 につ

いて、振動子の振幅を変化させた時の測定結果を Fig.5/Fig.6 にまとめた。水、JS2000 ともに振幅変化に対して、粘度値は変わらずニュートン性を示すことが理解される。



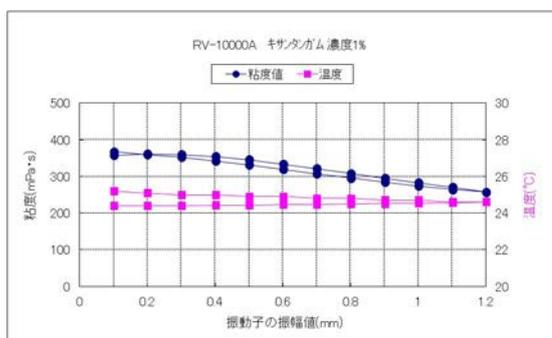
**Fig.5** イオン交換水



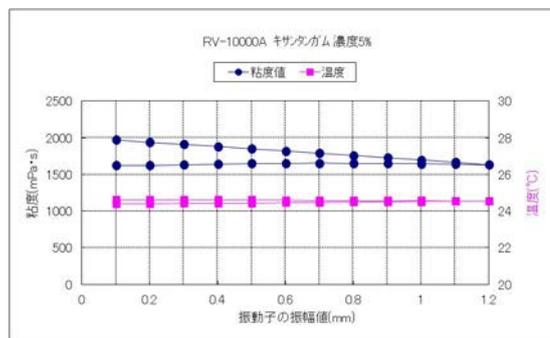
**Fig.6** JS2000

### 3-2) 増粘剤の測定

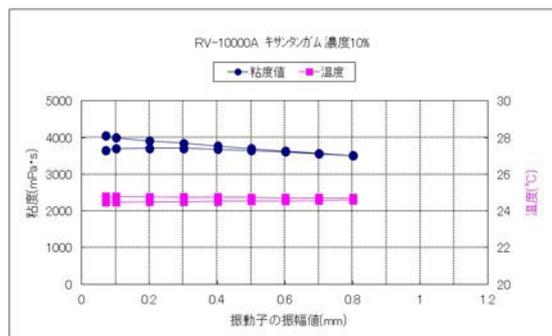
とろみ剤(増粘剤)の代表的となる、キサンタンガムの濃度を変えて測定した結果が Fig.7、8、9 となる。濃度による粘度の非線形性が強く、振幅に対する非ニュートン性も確認されるデータが得られた。



**Fig.7** キサンタンガム 1%



**Fig.8** キサンタンガム 5%



**Fig.9** キサンタンガム 10%

### 3-3) 粉体の測定

粉体に発生する粘性抵抗を、粘度と呼ぶべきか判断できないが、音叉振動式を利用することで、今まで定量化のできなかつた粉体の粘性抵抗が再現性良く測定できた。Fig.10~14 には、小麦粉(薄力粉、強力粉)、かたくり粉の粉単体、及び薄力粉を水で溶いた状態での測定結果を示す。

粉体の粘性抵抗には、その粉体の『かさ密度』が影響する。そこで、固定した測定用容器に、粉を自由落下させ、すり切りいっぱいとし、質量測定を行った。その後、振動による一定圧力をかけて、一定の容量になるまで粉を圧縮し、この時のかさ密度を求めて測定を開始した。

粉体の静粘度は、せん断速度が大きくなると急激に小さくなり、せん断速度に対する履歴については、行きと帰りがほぼ一致した。ただし、かたくり粉だけは、ヒステリシスが大きかった。また、薄力粉に混合する水の割合を増やしていくと、急激な静粘度の低下と同時に、せん断速度に対するヒステリシスが確認された。また、中間付近のせん断速度において、静粘度の低下する現象が見られた。

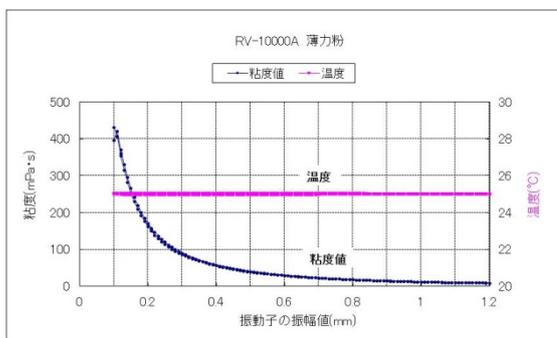


Fig.10 薄力粉

(かさ密度  $0.49 \text{ g/cm}^3$ )

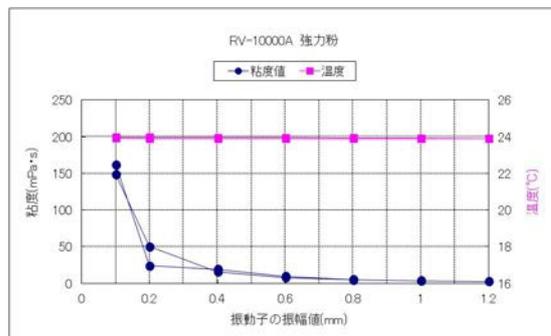


Fig.11 強力粉

(かさ密度  $0.56 \text{ g/cm}^3$ )

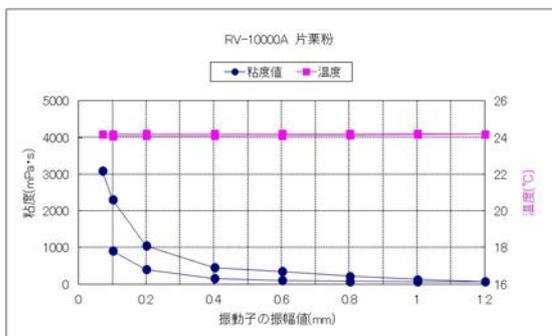
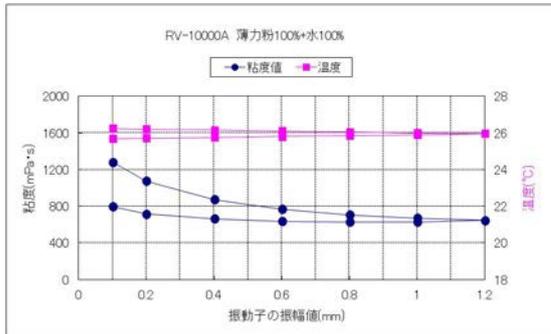
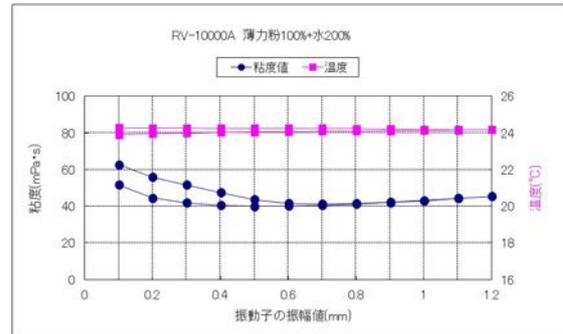


Fig.12 かたくり粉

(かさ密度  $0.70 \text{ g/cm}^3$ )



**Fig.13 薄力粉 100%+水 100%**



**Fig.14 薄力粉 100%+水 200%**

### 3-4) その他の粘度測定

増粘剤や粉体の他、特徴ある食材などの測定結果について以下にまとめた。

#### ○ゲル化点測定

Fig.15 にゼラチンの温度変化に対する粘度値変化をグラフ化した。縦軸は対数目盛となっており、濃度によるゲル化点の違いが確認された。

#### ○卵白の硬化過程測定

Fig.16 は卵白の硬化過程となる。卵白を構成する たんぱく質が複数あり、それぞれ 60℃と 70℃から、温度による変質が起こることが、粘度値の変化から確認された。

#### ○非イオン系界面活性剤の曇点測定

Fig.17 は曇点を測定した結果となる。ミセルの構造変化により発生する曇点は、白濁を光学式に検出し、その時の温度として測定されている。音叉振動式粘度計では、この曇点を粘性変化として捉えることができる。この測定サンプルでは、上記 JIS 法により 35.9℃の曇点が規格化され、粘度変化からは 35.4℃の曇点を確認された。

#### ○オイルの測定例

代表的な例として、ガソリンエンジン用オイルの温度-粘度カーブを Fig.18 に載せた。エンジンオイルは 3 mPa·s 以下の粘度になるとピストン&シリンダー間に焼き付きが起こると言われている。グラフからは温度 110℃が、このオイルの使用可能上限と推測される。

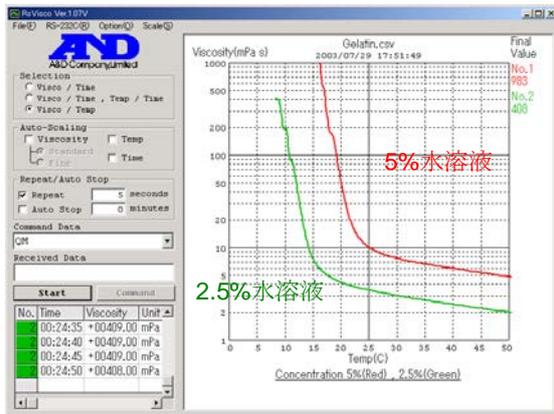


Fig.15 ゼラチン

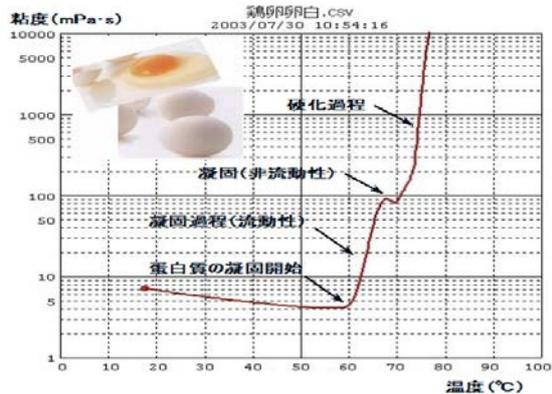


Fig.16 卵白

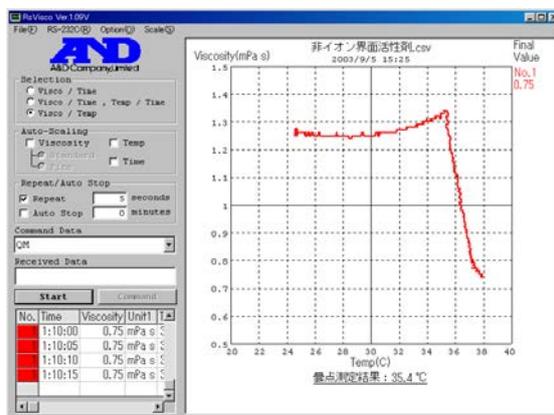


Fig.17 非イオン界面活性剤

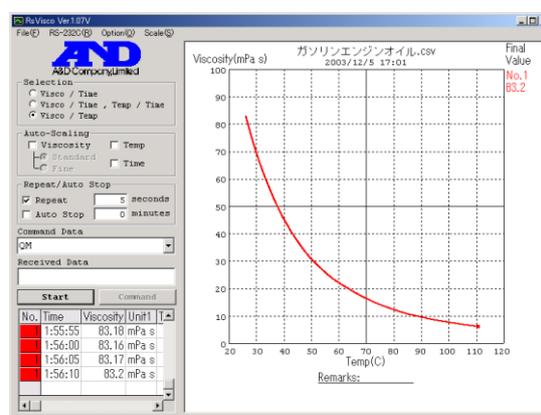


Fig.18 ガソリンエンジンオイル

#### 4) まとめ及び考察

##### ○とろみ剤の評価結果

最近の『とろみ剤』では、わずかな添加量で強いとろみの発生することが要求されている。これは経済面からは正しい展開と思われるが、実際にとろみの量が変わった時に、変わる粘度値は1桁以上/Δ9%に達する事が、確認された。このことは、看護の現場で食品に添加される『とろみ剤』の分量管理が、大変重要となっていることを示している。また、増粘剤では、せん断速度変化に対する粘度変化は小さく、飲み込むスピード変化に対する粘度値変化は小さいことが理解された。この増粘剤の特徴は、介護の現場では重要な性能と考えられる。それは、せん断速度変化に対する粘性抵抗変化が直線的になる性能は、人の持つ感性に合っていると判断されること。従って、誤飲・誤嚥を防ぐ『とろみ剤』には、粘度を上げるだけではなく、その非ニュートン性の小さい特性が、必要不可欠である事が推察される。

## ○粉体となる食材の粘性評価結果

粉体状となる食品では、その粉体の特徴となる粘性の評価方法が、確立されたとは言えない状況下にある。それは既存の粉体物性評価が、確立されたSI単位系で表現されていないこと。また、ある粉体の試験機から得られたデータが、その機器固有の単位で表されている事などから明らかと言える。

今回行った、音叉振動式レオメータ：RV10000A を利用した測定では、食品となる各種粉体の粘性抵抗が求まった。装置は、測定前に粘度の標準となる、ニュートン流体の粘度値で校正されており、その意味で今回行った測定は、粉体の粘性をSI単位で測定・評価した初めての結果ではないかと思われる。

振動式粘度計では、原理的に得られる粘性抵抗が『粘度×密度』と表される。仮に粉体の粘性抵抗が粉体の持つ粘度と密度(かさ密度)で表されるとすれば、今回の実験では、事前に粉体のかさ密度を求めており、最終的に粉体の持つ粘度が、精密に測定できたと判断される。

## ○せん断速度について

天然由来の液体は、ほとんどのものが『せん断速度』に対して、粘度値が一定となるニュートン流体になっている。それは『せん断速度』に比例した粘性抵抗の得られる事を意味している。しかし、人が合成した液体の約80%は、『せん断速度』に粘性抵抗が比例しない、非ニュートン流体であると言われている。これらの非ニュートン流体については、粘度の測定方法毎に液体に加わるせん断速度が変わるので、粘度測定方法による測定結果の差が、発生すると考えられている。

以下は私見となるが、このせん断速度については考慮すべき点が多いと考える。つまり、液体を充満した容器に相当する内壁と外壁を相対運動させた時に、内外壁に囲まれた液体には内外壁の回転差により生ずる、均一なせん断速度の加わる事が、上記論理の前提となっている。しかし、非ニュートン流体において、内壁・外壁、または上面・下面に設定された構造体の回転差が、その間に充填された液体に、均一のせん断速度を与えることは証明されていない。

つまり、非ニュートン流体に加わるせん断速度は、ニュートン流体に加わる均一なせん断速度を踏襲しており、仮に非ニュートン流体に均一なせん断速度が加わらない場合には、成立しないことになる。

既存の回転式粘度計や、レオメータにおいて決定される『ずり速度』は、以上のせん断速度均一の仮定と、ニュートン流体における回転体間の幾何

学形状と相対運動から決まるとされている。しかし、非ニュートン流体では、同じ条件下における『ずり速度』の伝搬範囲が、ニュートン流体とは異なる事が、結果として『ずり速度』変化に対する粘度値の非線形を招いていると考えると、現在のような一定回転を基本として、一定のずり測度を定めるような粘性評価方法については疑問を感じざるを得ない。

このことは、わずかなせん断速度差により、材料の粘度値が大きく変化する現象の妥当性についても、材料の物性変化としては証明されていない事からも、類推される。

本実験における、ずり速度変化による増粘剤の粘性変化が、比較的小さい事からは、分子鎖や架橋による結合力の変化は、かなりのせん断速度にならなければ発生しないと推察される。以上の考察から、非ニュートン流体の非線形性は、せん断速度を発生させる機器側の速度の違いが、せん断力の到達範囲を変え、せん断速度分布が変化した結果、見かけ上で粘度値を変化させている可能性が高いと考えられる。

これらの問題については、粘性の評価機器を供給する立場の人、つまり機器を開発・販売する側が、機器の使用者に対して、より多くの情報を公開すべき義務を負っていると考える。また、自社を含め機器を製造する企業は、それらの証明を果たす努力を行うべきと判断される。

#### 参考文献

- \* 1 『流量計測の歴史』(株)オーバル 小川胖 計測技術 2004.9.
- \* 2 『改定粘度』 計量管理協会編 川田裕郎著 1958
- \* 2 『振動粘度計の試作』 高分子学会誌 Vol.6[38] 深田栄一
- \* 2 『振動板粘度計の改良について』材料試験 第8巻第67号  
深田栄一 他2名
- \* 3 『液体の粘度測定方法』JIS Z8803:2011 2011.05.20 改正
- \* 4 粘度のJCSS : JCT20601 技術的要求事項適用指針(粘度)
- \* 5 『高齢者のコンプライアンス改善に寄与する経口除放性液剤の設計』  
北海道医療大学薬学部 伊藤邦彦 2010年度 一般用医薬品  
セルフメディケーション振興財団シンポジウム
- \* 5 『職種間におけるとろみ濃度設定の主観』  
みえ呼吸嚥下リハビリクリニック 鈴木典子、井上登太  
第20回日本摂食嚥下リハビリテーション学会学術大会 2014.9.6
- \* 6 『静粘度[sv]と振動式粘度計について』(株)エーアンドデイ出雲直人、  
小岩井敦志(社)計測自動制御学会主催 APMF2006 2006.10.2

- \*7 『静粘度測定に関する『ずり速度(シアレート)』の検討』  
(株)エアンドデイ 出雲直人、菅野将弘他 2名  
第 30 回センシングフォーラム  
(社)計測自動制御学会主催 2013.8 月

以上