

非回転二重円筒法による液状食品の粘性 および粘弾性の簡易測定

鈴木 寛 一*

A Novel Method for Evaluating Viscosity and Viscoelasticity of Liquid Foods by a Non-Rotational Concentric Cylinder Setup

Kanichi Suzuki*

* Department of Food Science, Faculty of Applied Biological Science, Hiroshima
University, 1-4-4 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima 739-8528

A concentric cylinder system without plunger rotation was applied in this study. The theory and method were based on analyzing shear stress acting on the surface of plunger when the plunger moved upward or downward a very small distance at a constant speed. Sample used were sucrose solutions, French dressing, tomato catsup, mayonnaise, etc. The viscosity of these samples could be evaluated from the force measured just after the starting time of the plunger moving (theoretically, $t = 0$). The viscoelasticity was also evaluated by analyzing the change in force during the plunger movement for a quite small distance.

(Received, Mar. 30, 1999 ; Accepted Jul. 13, 1999)

食品のレオロジー特性は、製造、輸送、保存などの工程と品質の制御と管理において重要な物性の一つである¹⁾²⁾。食品はその存在状態から、通常、液状食品、半固体状食品、固体状食品に分類されることが多い。半固体および固体状食品のレオロジー特性は、主に弾性と粘弾性が論議され、それらの測定も定型性を保つことから静的な方法と動的な方法のいずれも用いることができる。これに対して液状食品の場合は、測定の容易さから粘度（または見かけ粘度）と流動特性が論議されることが多い。これら食品の弾性、粘弾性および粘性の測定方法には各種の理論と装置があり、多くの成書に詳述されている^{1)~6)}。しかし、一般に液状食品として扱われている食品群の中には、糖液のように溶質が均一に溶解した溶液状のものから、エマルジョンやサスペンションのように液滴や固体粒子が懸濁しているもの、各種デンプンや多糖類の糊液のようなもの、ジャムやビューレのような附着性の高いペースト状またはスラリー状のものなど多種多様な性状のものがある。それらのレオロジー挙動は濃度や温度によって大きく変化し、粘度（または見かけ粘

度）も水のような低粘度のものから、ほとんど流動しないような高粘度のものまで極めて範囲が広い。従って、粘度の測定だけをとっていても、多様な性状に対応した適切な測定装置と測定条件が必要になる。既存の装置はいずれも流動性のよい低粘性試料に対しては粘度を精度よく測定できる。しかし、液状食品の多くは、流動特性が測定条件によって影響を受ける非ニュートン流体であるため、測定結果に差の出やすい高粘性試料では、測定条件や方法の異なる装置での粘度（または見かけ粘度）の測定結果が一致しないこともある。特に、表面または器壁などで離水を起こしやすい濃厚懸濁液状の食品では、測定中のすべりや部分的な固-液分離などにより、粘度が低く測定されることはよく経験するところである。加えて、液体のずり流動や振動を測定原理とする大部分の既存の測定装置では、測定値が安定するまでに加えられたずり変形や振動によって材料内部の構造が変化し、測定値にも影響を受けることも経験する。従って、このような広い範囲の性状の液状食品に対しては、できれば同一の測定原理で、しかも可能な限り材料変形が少なく

* 広島大学生物生産学部 (〒739-8528 広島県東広島市鏡山 1-4-4)

短時間で測定が行える汎用的な粘度測定法が望まれる。

一方、液状食品の多くは、粘性に加えて粘弾性を有しており、その粘弾性挙動が液状食品の品質制御因子として重要であることが認識されてきている⁶⁾。しかし、液状食品は容易に変形して定型性を持たないため、その粘弾性測定には、試料に正弦振動波または正弦振動回転を加える動的粘弾性測定法が専ら用いられてきた。液状材料の動的粘弾性測定装置としては、国内および国外の幾つかのメーカーが製造・販売しているが、いずれも測定条件の制御機構の複雑さから高価であるため、主に研究用に使用されているのが現状であり、食品製造の現場サイドでの品質管理にはあまり用いられていない。従って、粘性に加えて液状食品の粘弾性に関しても、簡便・汎用性のある測定法が望まれる。

以上のような観点から、本研究では、広範囲の性状を持つ液状食品の粘性および粘弾性を簡便、迅速、しかも安価な装置で測定できる新しい方法を開発することを一義的な目的とした。この簡易測定法を考えるに当たり、解析理論が明解であり、しかも装置構造が単純であることを前提とした。本研究に至る背景として、著者は環状路流動理論を応用して各種のパイプ径の輸送ラインに対応できる2種類の簡便なインライン粘度計を試作した⁷⁾が、測定部の液体流動部分が短いにも拘らず測定精度が高いことから、この環状路流動理論を二重円筒型ジオメトリーでの非回転定速流動に展開すれば、その有用性は高いと考えたことにある。同様の考えに基づく粘度測定法としては、古くはBICKERMAN⁸⁾による高粘度流体に対するPenetroviscometerが、また、比較的最近ではMORGANら⁹⁾によるBack-extrusion法が研究され、非ニュートン流体への適用性¹⁰⁾も検討されている。また、レオロジー特性の熱走査試験の一方法として、温度制御下でBack-extrusion法を用いた装置も開発されている¹¹⁾。これらはいずれも、プランジャーを試料中に下向きに挿入することによって試料を上方向に流動させ、その際に生じる応力変化を流動時間に対して測定し、粘度または見かけ粘度を求めるものである。しかし、これらの測定法では、液状試料が粘弾性を有している場合でも、測定応力に含まれる粘性寄与分と弾性寄与分を分離できないことから、測定される応力はすべて粘性応力として計算され、粘弾性の評価はできない。

これらの諸点を鑑み、本研究では、液状食品の粘性と粘弾性を簡便・迅速に測定するための一方法として、共軸二重円筒の外筒(シリンダー又はカップ)内の試料に内筒(プランジャー又はポップ)を定速で進入させる場合

に、プランジャーが試料から受ける総合的な応力に含まれる粘性応力と弾性応力とを明確に分離して測定する理論と解析法を提案することとした。本法による測定結果の信頼性と有用性は、既存の液体用動的粘弾性測定装置(Reologica Instrument AB社製, StressTech)の測定結果と比較することにより検討した。

測定理論

測定理論の説明図をFig. 1 (A), (B)に示す。内半径 R_i の外筒(試料容器シリンダー)と外半径 R_o の内筒(プランジャー)とからなる共軸二重円筒の外筒に試料を入れ、この試料にプランジャーを予め任意の距離(深さ) L だけ浸らせる。この状態からプランジャーを一定速度 V_p で下方に微小距離 ΔL 移動させて、環状路に試料の上方向流動を起こさせる場合を考える。実際には、外筒を一定速度 V_p で押し上げるが、理論的にはプランジャーを一定速度 V_p で下方に移動させる場合と同じ現象であり、 ΔL は任意の微小距離とする。

1. 試料が粘性流体の場合

この場合、プランジャーに作用する力は、試料流体の流動によってプランジャー壁面に作用するずり応力 F_s と、その流動の結果液深 L (= L_0 +増加分)に生じる圧力差 ΔP によりプランジャーの底面に作用する力 F_p の合力 F_v となる(但し、液体が作用する浮力は、試料密度と液深で補正されているものとする)。この場合、プラン

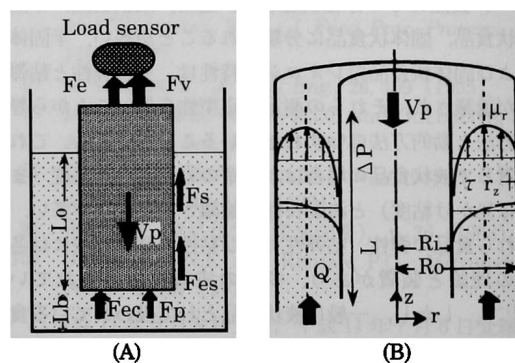


Fig. 1 Schematic illustration of the setup (A) and the model (B) for evaluating viscosity and viscoelasticity of liquid foods by a non-rotational concentric cylinder system in which inner cylinder (plunger) moves upward or downward a very short distance perpendicularly at a constant speed

ジャーの進行方向を正にとり、試料の粘度を μ 、中心軸から r の距離の環状路での流速を u_r 、ずり応力を τ_{rz} とすれば (Fig. 1 (B))、環状路流動での基礎式は次式で表される¹²⁾。

$$d(\tau_{rz})/dr=r\Delta P/L \tag{1}$$

この基礎式を、境界条件

$$\text{B.C. } u_r=0 \quad \text{at } r=R_o \tag{2}$$

$$u_r=V_p \quad \text{at } r=R_i$$

とニュートンの流動方程式

$$-(du_r/dr)=\tau_{rz}/\mu \tag{3}$$

を用いて解けば次式を得る。

$$\tau_{rz}=\{r\Delta P/(2L)-[\mu V_p + \{R_o^2 \Delta P (\kappa^2-1)/4L\}]/(r \ln \kappa)\} \tag{4}$$

$$u_r=\{V_p \ln (r/R_o)/\ln \kappa + \{R_o^2 \Delta P \kappa/(4\mu L)\}\} \tag{5}$$

ただし、 $K=1-(r/R_o)^2+(\kappa^2-1)\ln (r/R_o)/\ln \kappa$ (6)

$$\kappa=R_i/R_o \tag{7}$$

よって、プランジャー側壁面 ($r=R_i=\kappa R_o$) でのずり応力 τ_i は次式となる。

$$\tau_i=\{\kappa R_o \Delta P/(2L)-[\mu V_p + \{R_o^2 \Delta P (\kappa^2-1)/4L\}]/(\kappa R_o \ln \kappa)\} \tag{8}$$

また、環状路での試料の上方向の平均流速 u_{av} は

$$u_{av}=[1/\{\pi R^2 (1-\kappa^2)\}]\int_{R_i}^{R_o} 2\pi r u_r dr \tag{9}$$

一方、プランジャー速度 V_p と環状路での流量との収支から、平均流速は次式となる。

$$u_{av}=V_p \kappa^2/(\kappa^2-1) \tag{10}$$

(5)式~(9)式より、 V_p と ΔP との関係は次式のように求めることができる。

$$\Delta P=4\mu L V_p/[R_o^2 \{(1+\kappa^2) \ln \kappa + (1-\kappa^2)\}] \tag{11}$$

これらの諸式から、プランジャーに作用する力 F_s と F_p の合力 F_v は、

$$F_v=F_s+F_p=2\pi\kappa R_o L \tau_i - \pi(\kappa R_o)^2 L \Delta P = -2\pi\mu L V_p \alpha \tag{12}$$

ここで、

$$\alpha=(1+\kappa^2)/\{(1+\kappa^2) \ln \kappa + (1-\kappa^2)\} \tag{13}$$

(13)式の α の値は、 R_i と R_o の比 κ ($\kappa < 1$) だけで決まる装置定数である。従って、(12)式で得られる F_v の値は、試料容器シリンダー (外筒) とプランジャー (内筒) のサイズそのものには依存せず、その比だけに依存することになるが、この解析結果は実用上においても興味があり、その有用性に関しては結果と考察の項で論述する。

プランジャーが試料液に浸っている深さ L は、プランジャーの移動時間を t ($=\Delta L/V_p$) とすれば

$$L=L_o + \{V_p t/(1-\kappa^2)\} \tag{14}$$

の関係があるから、(12)式は次式のように書き換えられる。

$$F_v=-2\pi\mu V_p \alpha [L_o + \{V_p t/(1-\kappa^2)\}] \tag{15}$$

この(15)式が、プランジャーを一定速度 V_p で粘性流体に侵入させた場合に、プランジャーが流体から受ける力 (測定荷重値) の時間変化を表している。従って、 F_v は時間 t に対して、Fig. 2 (A) で表されるような変化を示す。ここで、もしプランジャーを移動させる瞬間 ($t=0$) の作用力が測定できれば、その値は次式のように粘度に比例する値となる。

$$F_{v0}=-2\pi\mu L_o V_p \alpha \tag{16}$$

後述するように、(16)式を用いることが、本法で流体の粘弾性を測定する場合に、流体の作用力に含まれる粘性寄与分と弾性寄与分を分離するための基本的な条件となる。

2. 試料が弾性体の場合

プランジャーが浸っている試料が、非圧縮性の完全弾性体 (ヤング率を E 、ずり弾性率を G 、 $E=3G$) であると仮定する。この試料に、深さ L_o だけ浸っているプランジャーを一定速度 V_p で下方に微小距離 ΔL 移動させる場合を考える。弾性試料の変形に関する基礎式 ($\tau_{rz}=G\gamma=G(dZ/dr)$) を適用して、プランジャー側壁面に作用する力 F_{es} は

$$F_{es}=2\pi r L_o \tau_{rz}=2\pi r L_o G(dZ/dr) \tag{17}$$

ここで、 γ はずり歪み、 Z はプランジャーと試料との相対移動距離である。(17)式を r について $R_i \sim R_o$ 、 Z について $0 \sim Z$ の範囲で積分して次式を得る。

$$F_{es}=-2\pi L_o GZ/\ln \kappa \tag{18}$$

プランジャー壁面で試料とのスリップは無いものとする。プランジャーと試料との相対速度 V は、 $V=V_p/(1-\kappa^2)$ となるから、プランジャーが微小距離移動する場合の Z の値は、 $Z=Vt=V_p t/(1-\kappa^2)$ となる。ここから

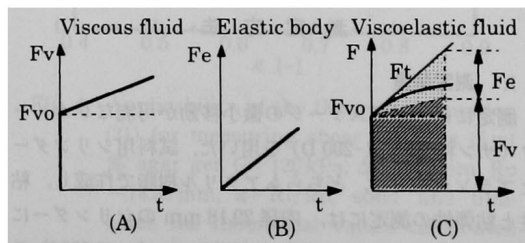


Fig. 2 Force-time curves for a viscous fluid (A), elastic body (B) and viscoelastic fluid (C) estimated from the theoretical equations proposed in this study

次式が求められる。

$$F_{es} = -2\pi L_0 V_p t G / \{(1-\kappa^2) \ln \kappa\} \quad (19)$$

また、プランジャー底面で試料を圧縮する際の圧縮応力 F_{ec} は、 $E=3G$ を仮定して次式となる。

$$F_{ec} = 3\pi(\kappa R_0)^2 V_p t G / L_b \quad (20)$$

ここで、 L_b はプランジャー底面と試料容器底面との距離である。従って、プランジャーが弾性試料から受ける力の合力 $F_e = F_{es} + F_{ec}$ は

$$F_e = \{3\pi(\kappa R_0)^2 V_p t G / L_b\} - [2\pi L_0 V_p t G / \{(1-\kappa^2) \ln \kappa\}] \quad (21)$$

となり、時間 t に対して Fig. 2 (B) で表されるような直線的な変化を示す。

3. 試料が粘弾性流体の場合

試料の粘性と弾性がそれぞれ独立してプランジャーに作用する場合には、その合力は (19) 式と (21) 式の値を単純に加えたものになるが、粘弾性試料の場合には、測定される応力は粘性緩和を受け、Fig. 2 (C) に示すように時間に対して曲線的な変化を示す。しかし、(19) 式と (21) 式の合力 $F = F_v + F_e$ の時間微分値 (dF/dt)、即ち曲線 F の任意の時間での接線の勾配は、時間を含まない値となり、粘性緩和の発現しない $t=0$ (プランジャーを移動させる瞬間) での値は、粘弾性流体の弾性を適正に含む値であるものと考えられる。そこで、(19) 式と (21) 式から新たに $F = F_v + F_e$ の $t=0$ での接線 F_t を次式のように求め、任意の時間における F_t の値から粘性寄与分 F_v を差し引けば、残りは弾性寄与分 F_e となるから、(21) 式を適用して弾性率 G を算出できるものと考えられる。

$$F_t = F_{v0} - 2\pi\mu V_p \alpha t / (1-\kappa^2) + \{3\pi(\kappa R_0)^2 V_p t G / L_b\} - [2\pi L_0 V_p t G / \{(1-\kappa^2) \ln \kappa\}] \quad (22)$$

この場合、接線中に含まれる粘性率 μ は、(16) 式を用いて $t=0$ での荷重測定値 F_{v0} から求められることが条件となる。試料が粘弾性を示さない場合 ($G=0$) には、(22) 式の接線は (19) 式と一致する。

測定方法

1. 測定装置

測定には、試料ステージの微小移動が可能なレオメータ (サン科学, CR-200 D) を用いた。試料用シリンダーとプランジャーは、どちらもアクリル樹脂で作成し、粘性と粘弾性の測定には、内径 29.18 mm のシリンダーに外径 23.95 mm ($\kappa=0.8208$) と 26.95 mm ($\kappa=0.9236$) の 2 種類のプランジャーを試料粘度に対応して用いた。また、弾性率の測定理論の適用性の確認には、上記以外のシリンダーとプランジャーの組み合わせも用いた。プラ

ンジャーに対し、共軸となるようにシリンダーをステージに固定し、本研究ではステージの上昇速度を 0.50 mm/s ~ 1.33 mm/s の範囲、ステージ (プランジャー) の移動距離を 0.1 mm ~ 0.5 mm として測定を行った。他の測定法との比較のために、本法でのプランジャー壁面でのずり速度を (3), (5), (8) 式より次式を得て求めた。

$$(d\gamma/dt)_{R_1} = -(1-\kappa^2) V_p \alpha / (1+\kappa^2) \quad (23)$$

ここで、円筒内流動では $d\gamma/dt = -(du_r/dr)$ の関係がある¹²⁾。(23) 式から、外径 26.95 mm のプランジャーを用いた場合のずり速度は $3.24 \text{ s}^{-1} \sim 8.62 \text{ s}^{-1}$ の範囲であった。試料へのプランジャーの初期侵入深さ L_0 、およびプランジャー底面とシリンダー底面との距離 L_b が測定結果に及ぼす影響を検討するために L_0 と L_b を変化させた測定も行ったが、ここではすべて $L_0=50 \text{ mm}$ と $L_b=20 \text{ mm}$ とした場合の結果を示す。従って、一回の測定に必要な試料量は、約 25 cm^3 または 19 cm^3 である。本研究での粘弾性測定理論と方法の有用性を検討するために、市販の液体用動的粘弾性測定装置 (Reologica Instrument AB 社製, StressTech) を用いて、ほぼ同様のずり速度範囲での測定を行った。使用したジオメトリーは、ステンレス製のポップ・カップ (共軸二重円筒) 型で、シリンダー内径 27.0 mm、プランジャー外径 25.0 mm ($\kappa=0.9259$) である。測定はすべて 25°C で行った。

2. 試料

測定には、粘度、弾性率および粘弾性の各測定理論の有用性を検討するために、それぞれの測定目的に応じた試料を用いた。粘度測定用の試料として、グリセリン水溶液とショ糖水溶液を用いた。蒸留水を混合して調製した各試料濃度での粘度は、それぞれの濃度に対応する粘度の文献値¹³⁾¹⁴⁾ から求め、試料濃度は密度測定 (京都電子工業, DA-110) によって確認した。弾性率測定の確認には、寒天ゲルおよびゼラチンゲルを用い、加熱溶解してシリンダーの注入した所定濃度の各試料にプランジャーを浸したまま冷却してゲル化させた。試料の弾性率は、別に高さ 10 mm ~ 20 mm の試料を用いて平板間圧縮法により測定して求めた。粘弾性の測定に用いた試料は、アラビアゴムなどガム類の水溶液およびケチャップ、ドレッシング、マヨネーズなど市販の液状食品である。ガム類はナカライテスク (株)、液状食品は市中のマーケットより購入した。

3. 測定方法

恒温水槽中で 25°C に調温した試料の所定量をシリンダーに入れ、プランジャーを所定の深さまでゆっくりと試料に侵入させて停止させた。この際にプランジャーに

作用する浮力は、測定装置のゼロ点校正で消去した。その後、プランジャーを0.50 mm/s~1.33 mm/sの速度で0.1 mm~0.5 mm 移動させる場合の荷重の変化を測定した。この条件でのプランジャー移動時間は、最長で1秒間である。得られた荷重-時間曲線と測定理論から、粘性率と弾性率を求めた。

実験結果および考察

1. 粘度測定

本法での粘弾性測定法では、(16)式が適用できること、即ち、プランジャーを移動させる瞬間の荷重値 F_{vo} から粘度を測定できることが必要である。Fig. 3に粘度既知のグリセリン水溶液とショ糖水溶液を試料として用いた場合の測定結果を示す。図中の実線は、測定値と文献値¹³⁾¹⁴⁾が一致している場合の関係であるが、両者は良い一致(相関係数:0.985)を示し、(16)式の適用が可能であることが明らかになった。従って、本測定法では、プランジャーを移動させる瞬間の荷重値から粘度を求めることが可能であることから、試料の構造を大きく変化させないで粘度が測定できることと極めて短時間で粘度測定ができる特徴がある。また、プランジャーの微小の移動距離および移動時間の制御に関するハード的な精度が増せば、測定精度も向上するものと考えられる。この方法では、荷重センサーの感度が高ければ、水のような低粘度の試料の粘度も精度良く測定できるのは勿論のこと、後述するように、極めて粘度の高い試料でも、シリンダー

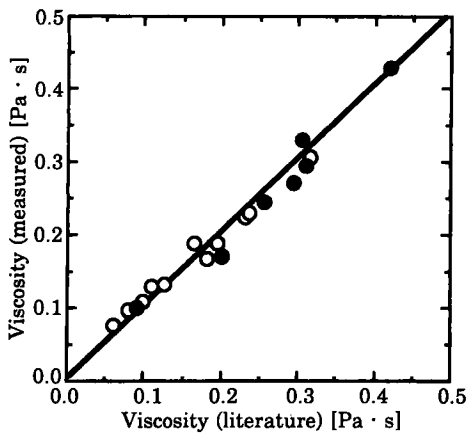


Fig. 3 Comparison of measured values of viscosity evaluated from eq. (16) with the literature values^{13) 14)}

●, glycerol solution ; ○, sucrose solution.

に試料を注入することができればその粘度(または見かけ粘度)を測定することができる。本論文では、試料中へのプランジャーの初期浸入深さ L_0 を5 cmとした場合の結果について述べているが、 L_0 を変化させた場合の測定結果も(16)式を満足した。また、(16)式から明らかのように、 F_{vo} の値は μ , L_0 および V_p の値に比例するが、更にシリンダーとプランジャーの実寸ではなく、それらの半径比 κ だけで決まる装置定数 α にも比例する。 α の値は κ を大きく(1に近づける)すると大きくなることから、シリンダーとプランジャーのサイズを適切に組み合わせて κ の値を変化させれば、測定される F_{vo} の値を変化させることができ、低粘度から高粘度までの試料の粘度を同一感度のセンサーで測定することも可能である。

2. 弾性率の測定

(22)式を用いて試料の粘弾性を測定するためのもう一つの条件として、弾性率の測定理論である(21)式の適用性を証明することが必要である。Fig. 4に5 wt% 寒天ゲルを試料として用いた場合の測定値と理論値(実線)との比較を示す。理論値は、別に測定したずり弾性率($G=120$ kPa)と実験条件を(21)式に代入して求めた。Fig. 4からも明らかなように、測定値は理論値と良い一致を示した。他の試料と条件でも、測定値は(21)式とよく一致

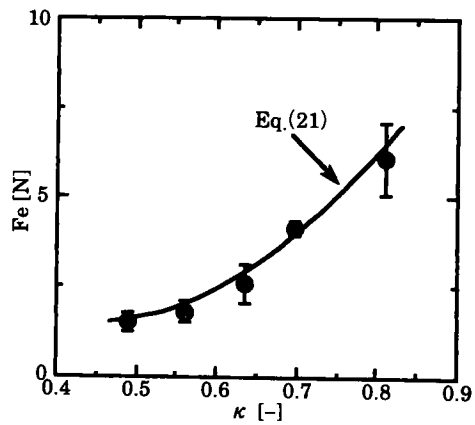


Fig. 4 Applicability of the theoretical equation (21) for measuring shear modulus (5 wt % agar gel, $G=120$ kPa, $\Delta L=0.1$ mm, $R_0=14.59$ mm, $\kappa=R_i/R_0$, solid line indicates the theoretical values calculated from eq. (21))

F_e , Force ; R_i , Radius of plunger ; R_0 , Radius of cylinder ; G , Shear modulus ; ΔL , Moved distance of plunger.

したことから、(21)式を用いて弾性率の測定も可能であると考えた。

3. 粘弾性の測定

以上の結果を踏まえて、(16)式と(22)式とを用いた液体試料の粘弾性の測定を試みた結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 (A) は、プランジャーを移動させた瞬間の荷重測定値 F_{v0} に(16)式を適用して求めた粘性率、Fig. 5 (B) は荷重変化曲線の $t=0$ での接線と(22)式とを用いて求めたずり弾性率の結果である。Fig. 5 (A) と (B) に示した点線は、同一試料を既存の動的粘弾性測定装置 (Stress Tech) で測定した粘性率と複素ずり弾性率である。Fig. 5 (A) より、本法で測定した粘性率は、既存の装置での測定結果と良く一致し、アラビアゴム水溶液のような低粘性からマヨネーズのような高粘性に至る広範囲の粘性率をプランジャーを移動させる瞬間の荷重値から測定できることが明らかとなった。また、ずり速度の増加に伴う粘性率の低下を示すずり流動性などの非ニュートン性も評価できる結果を得た。

一方、本法では試料が粘性流体の場合は Fig. 2 (A) のような測定曲線となり、弾性率は算出できない(22)式右辺の弾性寄与分はない)が、本研究で用いた液体試料はいずれも Fig. 2 (C) のような明確な粘弾性曲線を示し、(22)式を適用して求めたずり弾性率は Fig. 5 (B) に示すような値となった。これらの結果より、本法でも液体試料の粘弾性を簡便・迅速に測定することが可能であると考へた。しかし、動的測定法での複素弾性率の値(点線で示した)との比較では、フレンチドレッシングやトマトケチャップのように本法と動的測定法での値が概ね良い一致を示した場合と、マヨネーズやアラビアゴムのよ

うにオーダーはほぼ一致したものの、数値に 1.2~4 倍程度の差を示す場合があった。本法で測定される弾性率は、いわゆる静的弾性率に相当するものと考えられることから、本測定法と動的測定法の弾性率の結果をより正確に比較するためには、複素弾性率から弾性率(静的)を求める必要がある。そのためには使用した液体試料について、粘弾性要素の適切なモデル化を行うことが必要である。本研究では測定理論と測定法の技術的な面に関して取りまとめたが、液体試料の粘弾性のモデル化又は粘弾性の機構解析は今後の興味ある課題である。更に本測定法では、マヨネーズとトマトケチャップの弾性率がずり速度の増加に伴い若干低下する傾向を得たが、この点も液体試料の非ニュートン流動性の発現との関係に興味のある点である。

要 約

液状食品の粘性及び粘弾性を簡便・迅速に評価する新しい解析理論と測定法を提案した。共軸二重円筒の環状路に試料を入れ、内筒(プランジャー)を定速で上方又は下方に微小距離移動させる場合に内筒壁面に作用するずり応力を二重円筒の半径比、試料へのプランジャーの浸入距離、プランジャー移動速度等の条件で理論解析した。その理論から、ずり応力に含まれる粘性寄与分と弾性寄与分を分離して算出する方法を考案し、試料の粘度と粘弾性と求める理論式の有用性を検討した。用いた液体試料は、ショ糖水溶液等のニュートン流体とマヨネーズ、ケチャップ、ドレッシング、ガム類水溶液等の液状食品である。本研究で以下のことが明らかとなった。

(1) 本法では、プランジャーを移動させる瞬間の荷重

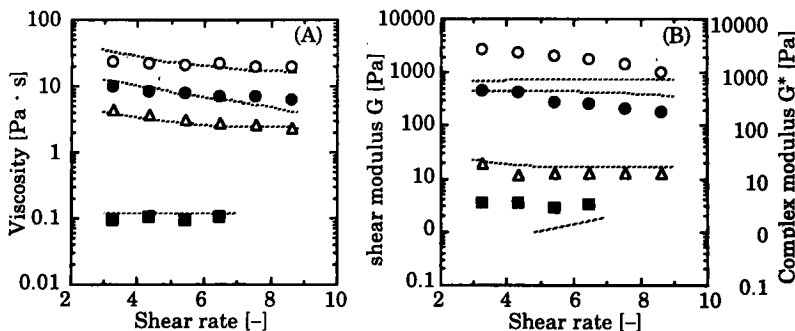


Fig. 5 Comparison of the viscosity (A) and shear modulus (B) measured by the proposed method and eqs. (15) & (22) in this study with the values measured by the established dynamic method (Stress Tech, dotted lines)

○, Mayonnaise; ●, Tomato catsup; △, French dressing; ■, Gum arabic (30 wt%).

値から各試料の粘度（又は見かけ粘度）を測定できた。

(2) 続くプランジャーの微小移動に伴う荷重値変化から $t=0$ での接線を求めることで粘弾性が評価できた。

(3) 以上の結果より、本研究で提案した粘性と粘弾性の測定理論と方法の有用性を認めた。

本研究で用いた測定装置の二重円筒部は、広島大学生物生産学部技官仲井 敏氏に作成して頂いた。また、理論の検証に用いた測定値は、本研究の遂行時に広島大学生物生産学部食品工学研究室に所属していた学生、池田昌浩氏及び沖野江美氏と協同の実験で得た。記して謝意を表します。

文 献

- 1) 磯 直道・水野治夫・小川廣男：食品のレオロジー（成山堂書店），p. 1, 2（1992）。
- 2) STEFFE, J.F. : Rheological Method in Food Process Engineering (Freeman Press, East Lansing) p. 1（1992）。
- 3) 後藤廉平・平井西夫・花井哲也：レオロジーとその応用（共立出版，東京），（1962）。
- 4) BOURNE, M.C. : Food Texture and Viscosity (Academic Press, London), (1982).
- 5) PRENTICE, J.H. : Measurements in the Rheology of Foodstuffs (Elsevier Applied Science Publishers, London), (1984).
- 6) RAO, M.A. and STEFFE, J.F. : Viscoelastic Properties of Foods (Elsevier Applied Science, London), (1992).
- 7) SUZUKI, K. : Theory and Application of a New Viscometer based on Annulus Liquid Flow. Developments in Food Engineering (Ed. by T. YANO, R. MATSUNO and K. NAKAMURA), Part. 2, (Blackie Academic & Professional) p. 921 (1994).
- 8) BICKERMAN, J.J. : *J. Colloid Sci.*, **3**, 75 (1948).
- 9) MORGAN, R.G., SUTER, D.A. and SWEAT, V.E. : Mathematical analysis of a simple back-extrusion rheometer. (American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI.), Paper No. 79-6001 (1979).
- 10) OSORIO, F.A. and STEFFE, J.F. : *J. Texture Studies*, **18**, 43 (1987).
- 11) HAMANN, D.D., PURKAYASTHA, S. and LANIER, T. C. : Applications of Thermal Scanning Rheology to the Study of Food Gels. In "Thermal Analysis of Foods" ed. by HARWALKER, V.R. and MA, C.-Y. (Elsevier Applied Science, London), p. 306 (1990).
- 12) BIRD, B.B., STEWART, W.E. and LIGHTFOOT, E.N. : Transport Phenomena (John Wiley & Sons, Inc., New York), p. 51 (1960).
- 13) LANGE, N.A. : Handbook of Chemistry, 10th ed. (McGraw-Hill, New York), p. 1183, p. 1681, p. 1154 (1967).
- 14) 日本化学会編：化学便覧，基礎編Ⅱ（丸善，東京），p. 584（1975）。

（平成 11 年 3 月 30 日受付，平成 11 年 7 月 13 日受理）