超音波スピニングレオメトリによる混相流体のレオロジー試験*

Rheometric Test for Multiphase Fluids by Means of Ultrasonic Spinning Rheometry

芳 田 泰 基**
YOSHIDA Taiki田 坂 裕 司**
TASAKA Yuji大 家 広 平***
OHIE Kohei村 井 祐 一**
MURAI Yuichi

Abstract For playing a role of filling a hole in the applicable range of standard rheometer, ultrasonic spinning rheometry (USR) is presented; it is based on equation of motion to explain the fluid rheology and to quantify the rheological properties satisfying the considered equation of motion for complex fluids. Some examples of rheological evaluation for multi-phase fluids using USR were presented; clay dispersion with thixotropy, polymer solution with large-spherical particles, dessert paste with pectin gel including fruit pulps. The efficacy of USR was discussed through those practical tests for complex fluid.

Keywords: Rheometry, Ultrasound, Clay dispersion, Polymer, Food rheology

1. 緒 言

多種多様な性質を持つ流動体が工業生産される昨今、生産過程における流動は経験則により、制御・管理・予測されている。レオロジー物性を評価する計測機器（レオメータ）の信頼性が乏しいために経験則に頼らざるを得ない現状がある。

産業・学理の多分野に最も広く利用される市販レオメータの原型は、二百年以上前に完成されており、ラボレベルの分析に用いられるトルク式の市販レオメータは、十二分に計測精度を有している。一方、計測確度の保証にはいくつかの仮定が満たされる必要があるが、多くの非ニュートン性流体ではそれが満たされないことが多い。測定対象物質と回転子壁面との間での滑り[1]や、局所剪断層[2,3]の発現、弾性的不安定性[4]など、「流動」現象に由来する課題が数多く報告されている。市販レオメータのユーザーの多くには認知されておらず、レオメータにおける幾何設計固有のトルク応答が評価されるため、計測結果の物理的な解釈が難しくなる。

レオメータの表面性状[5]の改良や、クエット逆問題に対する数学的な解法[6]等、既存のレオメー

タの計測確度を改善する方法が数多く提案されている中で、我々は流体挙動を直接計測し、物性値の導出を試みる新たな手段に注目している。本稿で紹介する超音波スピニングレオメトリ（USR）[7-13]は、流動に仮定を与えず、流動を計測することに基づいた手法である。先行研究として、速度分布計測を用いるレオメトリ[14]があり、計測をベースとする点で同一であるが、複雑流体のダイナミクスに対し、運動方程式を満たすようなレオロジー物性を逆算・定量化する点で異なる。本稿ではUSRの概念とレオロジー物性を評価する過程を解説する。さらに、USRに基づいた混相流体へのレオロジー評価例をいくつか紹介し、評価結果に対して、流体工学的に基づいた考察を与え、議論する。

2. USR の計測概念

2.1 計測上の定義と基礎理論

Fig. 1(a)が示すような半径 $R = 72.5 \text{ mm}$ のアクリル製円筒容器内に試験対象の流体を満たし、振幅 Θ 、周波数 f_0 の正弦波振動を与える。この時、円筒内部に伝播される運動量には、試験流体のレ

* 2020.4.10 受付

** 北海道大学 工学研究院 〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目
TEL: (011)706-6373 E-mail: yoshida@ring-me.eng.hokudai.ac.jp

*** 北海道大学大学院 工学院 〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目

オロジー物性が反映される。超音波送受信器 (TDX) を介して受信されるドップラー信号 (周波数変調) から、超音波流速分布計測法 (UVP) により、計測線上の瞬時流速分布を取得する。周方向流速が卓越している場合、計測方向流速成分 u_ξ は、 $u = u_\xi r / \Delta y$ から周方向流速 u として計算できる。ここで、 Δy は超音波計測線を円筒中心軸からずらした距離である。

計測線上を伝播するディスク形状の超音波パルスは、Fig. 1(b)で図示されるような計測体積 V を持つ。計測体積内の周方向流速 u 、せん断応力 τ を

$$\langle u \rangle = \frac{1}{V} \int u dV, \langle \tau \rangle = \frac{1}{V} \int \tau dV \quad (1)$$

とそれぞれ定義できる。ここで、周方向一方向流れ、かつ理想的な軸対称性が近似できる場合、角運動量保存則から、支配方程式は、

$$\frac{\partial(\rho \langle u \rangle r)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial(r^2 \langle \tau \rangle)}{\partial r}, \text{ s.t. } \tau = f(\dot{\gamma}, A, B, C, \dots) \quad (2)$$

と考えられる。ここで、関数 f はせん断応力 $\langle \tau \rangle$ と流速変動 $\langle u \rangle$ の関係を記述する構成方程式である。以降、 $\langle \tau \rangle$ と $\langle u \rangle$ を τ と u として、簡略化して示す。A、B、C、 $\dots$ は、構成方程式に含まれる物性定数を示す。

数値流体力学 (CFD) では、これら物性定数を運動方程式に与え、適切な境界条件の下で解くことで流速分布を得る。本稿で提案される USR では、CFD とは逆のアプローチでレオロジー物性が定量化される。つまり、UVP によって計測される流速分布を拘束条件として、式(2)を満たすような物性定数を評価する。ここで、最小二乗近似で記述される費用関数、

$$F_{\text{cost}}(A, B, C, \dots) = \left(\rho \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial \tau}{\partial r} - \frac{2\tau}{r} \right)^2 \quad (3)$$

を設定し、それが極小値を持つような未知数の組み合わせを探索することで、物性定数は逆算される[15]。後述の解析法は、この考えに基づいている。式(1)で定義したように、計測体積ごとに式(3)を満たすならば、局所半径位置毎に物性定数が評価される。

2.2 周波数空間における極小値探索

ニュートンの粘性法則とフックの法則を組み合わせた最も単純な粘弾性モデルの一つである、

Fig. 1 (a) Experimental setup, and (b) measurement line and volume of ultrasonic pulse beam.

マクスウェルモデル(パネ-ダンパ直列系) は、

$$\tau + \frac{1}{\omega_0 \tan \delta} \frac{\partial \tau}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right) \quad (4)$$

で記述される。 δ は粘性係数 μ と弾性係数 E から、

$$\tan \delta = \frac{E}{\omega_0 \mu} \quad (5)$$

と定義される。 δ の値は、 $\delta \approx \pi/2$ rad ならば粘性的、 $\delta \approx 0$ rad ならば弾性的、 $0 < \delta < \pi/2$ rad ならば粘弾性的、のようにレオロジー的特徴を定量的に示す。

式(4)のような構成方程式は、一般にレオロジーモデルと呼称される。多種多様に存在する流体のレオロジー的特徴を表現するために用いられる。通常、市販レオメータで計測される情報から物性値を評価する近似関数として用いられる。強調すべきは、USR における構成方程式の意味が流動自体を表現するための関数であるという点である。

式(3)と式(4)を用いることで、USR による線形粘弾性解析が可能となるが、流速は計測ノイズを含む離散値である。それゆえ、直接代入による有限差分計算はノイズを増幅し、方程式のバランスが維持されない。Tasaka *et al.* は、与えられる正弦波振動流れが卓越した単一周波数成分を持つことを利用し、有限差分計算を回避できる費用関数計算アルゴリズムを提案した[9]。式(3)と式(4)を時間 t に対しフーリエ変換すると、

$$F_{\text{cost}}(\mu, E; r) = \int_r \left| i\rho\omega_0\hat{u} - \frac{d\hat{\tau}}{dr} - \frac{2\hat{\tau}}{r} \right|_{\omega=\omega_0}^2 dr \quad (6)$$

$$\text{s.t. } \hat{\tau} + i \frac{1}{\tan \delta} \hat{\tau} = \mu \left(\frac{d}{dr} - \frac{1}{r} \right) \hat{u} \quad (7)$$

とそれぞれ記述できる。ここで「 $\wedge$ 」はフーリエ変換した関数を示す。解析に関する詳細な式の導出

Fig. 2 Calculated results of μ - δ contour in F_{cost} at $r/R \approx 0.9$; (a) silicon oil (0.49 Pas at 25°C), (b) CMC solution (0.5 wt.%).

については、文献[9, 11]を参照されたい。

典型的なニュートン流体であるシリコンオイルと擬塑性流体として知られるカルボキシメチルセルロース (CMC) 水溶液を試験対象として、計測した流速を式(6)と式(7)に代入し、それぞれの費用関数値 $F_{\text{cost}}(\mu, \delta; r/R = 0.9)$ を定量化した (Fig. 2)。等値線形状から、 μ - δ 空間において、 F_{cost} の値が唯一の極小点を持つ。各半径位置で、極小点探索を行うことで、レオロジー物性の空間分布を評価できる。定量化の精度を鑑みるに、実用的には、極小点探索のための最適化計算アルゴリズムの導入が必須である。

3. 混相流体のレオロジー診断例

ニュートン流体に対する USR の計測精度については、すでに高い水準に至っているため、本稿では省略し、主に市販レオメータ計測が困難とされる混相流体を対象にレオロジー診断例を示す。

3.1 チキソトロピーを持つ粘土粒子懸濁液[11]

多様に現存する粘土の中には、水中で電離・膨潤し、クーロン力による粒子間結合からゲル化するものがある。その性質を持つモンモリロナイトは厚さ 1 nm 程度、一辺が 0.1–10 μm 程度の板状の微粒子である。粒子間の結合力は弱く、剪断を加えると容易にゾル化し、その状態で長時間静置すると、結合が復活し再度ゲル化する。このような経時変化を伴う物性をチキソトロピー性という (Fig. 3)。固体的に振る舞うゲル相と、液体的に振る舞うゾル相が共存し、経時的に変化するため、市販レオメータでは計測が困難で、見かけの粘性でしか評価できない [16]。

UVP によって計測された流速変動をフーリエ変換し、振動周波数成分を取り出すと、一次元の

Fig. 3 Schematic of thixotropy mechanism of montmorillonite dispersion.

半径分布として流速変動の実部・虚部成分を定量化できる (Fig. 4(a))。流速変動の位相差は、

$$\phi(r) = \tan^{-1} \left(\frac{\Im[\hat{u}(r, \omega_0)]}{\Re[\hat{u}(r, \omega_0)]} \right) \quad (8)$$

から計算することができる (Fig. 4(a))。ここで位相差の半径方向勾配は、試験流体の流動性を示している[8, 10, 13]。つまり、位相差が勾配を持っている場合、流体は振動に対し、追従的に変形・流動する。一方で、位相差が一定の場合、流体は振動に対して変形・流動していないことがわかる。周方向の流速変動から流体の変形・流動度合いを可視化 (Fig. 4(b)) し、位相差とそれぞれ比較すると、双方から同様な変形傾向が確認できる。ゆえに、計測対象の粘土懸濁液には、振動に対して変形・流動しないゲルの領域と変形・流動するゾルの領域が存在し、フーリエ成分はそれを反映する。

上記、流速変動から計算される位相差は、振動周期 $t_0 \approx 1500$ において計測された結果であるが、チキソトロピー性をもつ粘土懸濁液は、経時的に流動性が変化する。一度、円筒内の懸濁液を攪拌した後、 $f_0 = 1.0$ Hz、 $\Theta = 4\pi/9$ rad で 10^4 s 間 (10^4 周期分の振動) を加え、経時的なレオロジー物性の変化を評価した。式(5)から計算される δ を、時間とせん断ひずみ速度における等値線として、Fig. 4(c)に示す。解析を施した流速分布の半径領域は、 $0.5 < r/R < 0.9$ である。式(8)で与えられる、位相差の半径勾配に閾値を与えることで、流体がゲル状態であるか、否かおよそ定量的に判断できる。ここで Fig. 4(c)の等値線において、斜線網掛けされている部分は、ゲル状態として判断された領域である。 $t = 10^4$ s の $10^0 < \dot{\gamma}_{\text{eff}} < 10^1$ s^{-1} の範囲において、 δ が $\pi/4$ rad から $\pi/2$ rad に急激に変化

Fig. 4 (a) Real and imaginary parts of Fourier transformed velocity profile, and phase lag profile calculated by the Fourier transformed components, (b) flow visualization calculated by the measured velocity profile, (c) contour of shear rate-temporal δ ($\dot{\gamma}_{\text{eff}}-t$) of montmorillonite dispersion ($f_0 = 1.0$ Hz, $\Theta = 4\pi/9$ rad).

している。これは、粘土懸濁液が $\Delta r = O(1 \text{ mm})$ 程度の遷移層（準ゾル相）を持つことを意味し、市販レオメータにおける、シェアバンド形成 ([2] 参照) の論拠となりえる知見であると考えられる。

3.2 粒子配列による実効的レオロジー[11]

Einstein の粘度式[17]、

$$\eta = \frac{\mu^*}{\mu} = 1 + \frac{5}{2}\phi \quad (9)$$

では、完全球形の粒子が分散媒に対し、十分に希薄な体積率で、かつストークス則を満たすような条件下にのみ、比粘性が分散粒子の体積率の関数として示される。シリコンオイル（ニュートン流体）に密度がほぼ同等な球形粒子（平均直径 0.5 mm; CL-8007, 住友精化株式会社）を体積率 $\phi = 0.02$ で分散させ、USR による線形粘弾性解析を試みた (Fig. 5)。左の写真のように、一様分散した粒子による比粘度は、式(9)とおおよそ同等の値として見積もることができる。

Einstein の粘度式に端を発し、現代に至るまで様々な条件（体積率、粒子形状、粒子径、分散相の状態等）を考慮した修正式（例えば、[18, 19]）

Fig. 5 Photograph taken from the top of the cylinder during oscillations, and radial profile of the relative viscosity η .

がいくつも提案されているが、どれもニュートン流体中の分散混相状態が大前提である。

では、非ニュートン流体中に分散する混相体には、同じことが言えるのだろうか。Scirocco *et al.* は、異なるワイゼンベルグ数 ($Wi = \lambda\dot{\gamma}$) を示す流体に対して単純せん断を与える調査を行った[20]。ここで、 λ は流体の緩和時間を示し、ニュートン流体では $\lambda \approx 0$ 、粘弾性流体では $\lambda > 0$ という物理的な意味を持つ。結果として、 $Wi > 0.5$ [$\lambda > O(10^{-2} \text{ s})$]において、一様分散した粒子がせん断方向に配向する現象が確認された。Lyon *et al.* は、粘弾性流体中に分散する粒子がせん断方向に配列するにつれて、せん断応力として働く、正味の力は徐々に減少していくことを示した[21]。これらを要するに、粘弾性の性質を有する流体中に分散する粒子は、せん断変形に対して配向し、実効的なレオロジー物性を変調させていることが示唆される。しかしながら、せん断方向に配向するために、市販レオメータでは実効的な物性を計測することが困難であり、光学可視化撮影等の解析[22]に留まるのが現状である。

粘弾性を示す、ポリアクリルアミド (PAM) 水溶液 0.5 wt.% (MT アクアポリマー株式会社) と前述の CMC 水溶液 1.0 wt.% (株式会社ダイセル) を試験流体として用いた。シリコンオイルと PAM、CMC を対象に、緩和時間 $\lambda (= \mu/E)$ の円筒半径分布をUSRにより評価した結果を Fig. 6(a)に示す。シリコンオイルの場合、全ての半径位置において $\lambda \approx 10^{-3} \text{ s}$ 程度であり、これはニュートン流体の特徴である短い緩和時間を反映している。PAM の場合 $\lambda > 10^{-1} \text{ s}$ であり、粘弾性的特徴が全半径位置において確認できる。一方 CMC の場合、先行

Fig. 6 (a) Radial profiles of relaxation time for different fluids, and photograph taken from the top of the cylinder during oscillations, and radial profile of the relative viscosity η and the relative elasticity ε , where the solid line indicates the relative viscosity estimated by $\eta = 1 + 2.5\phi$; (b) PAM solution, and (c) CMC solution.

研究[20]における臨界緩和時間を跨ぐように、 λ が半径方向に分布を持つ。

PAM と CMC 水溶液に等密度の粒子 (平均直径 0.5 mm; HP20, 三菱ケミカル株式会社) を体積率 ϕ で分散させ、USR による粘弾性解析を行い、比粘性 η 、比弾性 ε を半径区間毎の平均値として評価した (Fig. 6(b), (c))。Fig. 6(b)の写真から、PAM 中に分散する粒子はせん断方向に配列を形成し、

ϕ に関わらず比粘性が式(9)で見積もられる値より小さい。それに反して、 ϕ が増加するにつれて、比弾性は増加傾向を示した。一方で、CMC は λ に半径分布があり、Fig. 6(c)の写真から、 $\lambda > O(10^{-2} \text{ s})$ の半径位置で粒子配列が確認できた。さらに、 ϕ が増加するにつれて比粘性は増加し、 $r/R \approx 0.8$ において式(9)とほぼ同値を示した。粒子配列が確認できる半径位置では、PAM の結果と同様に比粘性が式(9)より低く、比弾性は増加傾向にあった。

これらの結果から、分散媒の緩和時間は配列形成に、配列形成は実効的な粘弾性の変調に、との連鎖的因果関係の存在が示された。PAM による粒子配列の度合いと CMC を写真から比較すると、CMC における粒子間隔がより大きいことが定性的ながら観測できる。同時に、比粘性・比弾性の ϕ の増加に伴う変調度合いも PAM に比べて小さいが存在する。ゆえに、緩和時間の長短は粒子配列の度合いに影響を与え、実効的レオロジー物性を変化させる。この知見は市販レオメータでは見いだし得ないものであり、USR が新たな見方を与えた一例といえる。

3.3 食品のレオロジー計測[13]

最後に、ハウス食品が販売している「フルーチェ」を対象に USR による試験を行った例を紹介する。フルーチェは、市販されている原液と牛乳を混ぜるだけで作ることができるデザートで、食物由来の高分子鎖状構造を持つペクチンがカルシウムイオンと結合・ゲル化することでとろみが生まれる。その結合は繰り返し剪断を加えることで徐々に崩壊し、ゾル化する。そのため、フルーチェは流動化の意味での降伏、粘弾性、および、ずり減粘度のレオロジー的性質を持ち、また分散体として不定形の果肉を含む。「美味しい食感」と食品レオロジーの関係は、長年議論されているが、曖昧さは解消されていない。本報告では、混合する牛乳とフルーチェ原液の質量比を三種類 [(I) Milk : Source = 2:1, (II) 1:1, (III) 1:2] 設定し、それぞれ USR による解析を行った。参考までに、販売元であるハウス食品では、適切な混合量は原液 200 g に対して牛乳 200 mL としている。

Fig. 7(a)–(c)は、各混合比のフルーチェに対し、簡易的なレオロジー試験結果を示した写真である。ガラスシャーレ上に大さじ 1 杯分のフルーチェを取り出し、水平面に対して 30 度に傾けて約 10 分間放置することで、試験対象のレオロジー特

Case I (Milk : Source = 2 : 1) Case II (Milk : Source = 1 : 1) Case III (Milk : Source = 1 : 2)

Fig. 7 Photographs of qualitative rheology for test materials prepared by different recipes and placed on 30 degrees inclined glass plates; (a) Milk : Source = 2 : 1 mix, (b) Milk : Source = 1 : 1 mix, and (c) Milk : Source = 1 : 2 mix, and transient flow curves ($\dot{\gamma}_{\text{eff}} - \tau_{\text{eff}}$) of the Fruiiche with different recipes; (d) Milk : Source = 2 : 1 mix, (e) Milk : Source = 1 : 1 mix, and (f) Milk : Source = 1 : 2 mix.

性を定性的に調べることができる。Fig. 7(a)より、牛乳の比率が多い条件では、シャーレ上に容易に流下することが見て取れる。一方で、Fig. 7(b), (c)のように牛乳の質量割合が多い場合、ガラスシャーレ上のフルーチェは形状を維持する。特筆すべき点として、フルーチェのガラスシャーレに対する吸着性の違いが挙げられる。つまり、Fig. 7(b)では、やや下方に変形するのみだが、Fig. 7(c)では、シャーレ上を滑る特徴も確認できる。

このような特徴を持つフルーチェを対象に、USRによるレオロジー評価を施し、 $\dot{\gamma}_{\text{eff}} - \tau_{\text{eff}}$ のプロットで示す (Fig. 7(d)–(f))。 $\dot{\gamma}_{\text{eff}} - \tau_{\text{eff}}$ が急峻ならば、物理的には高粘性的な応答を示し、プロット色の濃淡は振動せん断の周期数を表現している。条件 I から、振動せん断周期に対し、 $\dot{\gamma}_{\text{eff}} - \tau_{\text{eff}}$ の特徴は変化せず、緩い曲線形状を示した (Fig. 7(d))。 それに対し、条件 II と III から、振動せん断周期に対し急激に $\dot{\gamma}_{\text{eff}} - \tau_{\text{eff}}$ が変化し、濃色で示されるプロット ($t_{f0} > 1800$) に漸近した。さらに、条件 III において計算されたせん断応力の変動は、条件 II より顕著であった (Fig. 7(e)矢印)。 図中点線で示されるように、最終的な傾向が異なるのも興味深い。

これら USR の結果を踏まえ、定性的なレオロジーの特徴 (Fig. 7(a)–(c)) に対して、定量的な考察を加えることができる。条件 I では、フルーチェは容易に流下する様相を示す。この特徴は、 $\dot{\gamma}_{\text{eff}}$

$-\tau_{\text{eff}}$ における緩やかな曲線形状と合致する。条件 II では、フルーチェはシャーレ上に吸着し、形状を維持していたが、降伏するせん断ひずみ速度付近で $\dot{\gamma}_{\text{eff}} - \tau_{\text{eff}}$ が急峻なことから、形状維持に寄与する物性の存在が定量的に確認できる。条件 III では、形状を維持しつつも、シャーレ上を滑る特徴が観測された。これは、振動せん断の初期段階において、降伏に至るせん断速度が $O(10^0 \text{ s}^{-1})$ 以下まで減少することに由来すると推論できる。

Fig. 8 Flow curves ($\dot{\gamma}_{\text{eff}} - \tau_{\text{eff}}$) of the test material (Milk : Source = 1 : 1 mix) in oscillatory test of commercially-supplied rheometer plotted with USR results.

USR を市販レオメータの振動せん断試験と比較することで、データの優位性・実用性について議論する。用いるのは Large amplitude oscillatory shear 試験なる方法[4]で、シェアバンド等の現象を非線形粘弾性応答により評価する方法である。結果をそれぞれ Fig. 8 に示す。星形は、市販レオメータを用いた振動せん断試験によって評価された $\dot{\gamma}_{\text{eff}} - \tau_{\text{eff}}$ の関係を示している。Fig. 8 中の丸形は Fig. 7(e)の結果と同様である。星形における $t_0 = 0$ は、 $\dot{\gamma} = 200 \text{ s}^{-1}$ の定常回転を与えた後、振動せん断試験を開始した直後の結果を示す。図中星形から、 $\dot{\gamma} < 10^1 \text{ s}^{-1}$ で時間経過とともに、せん断応力が増加していることがわかる。文献[23]で指摘されるように、時間とともに物性が変動する対象をレオメータで計測する場合、その解釈は容易ではない。Fig. 8 上部に示したリサージュ図から、振動一周期におけるせん断応力とひずみの変動度合いを読みとれる。USR によって得られた降伏ひずみ速度以下で、そのリサージュ図には細かいゆがみが確認された。さらに、レオメータにおける長時間計測後のサンプルを観測すると、Fig. 8 の写真のように変形する層と変形しない層に分離していた (Fig. 8 右下)。動的レオロジー評価を行う上で、振動せん断変形は最も一般的だが、市販レオメータにおける長時間計測 (終端状態) がレオロジー物性を表現する上で「実用的」かどうかは、必ずしも断言できない。

4. 結 論

本稿では、チキソトロピー性流体の時空間レオロジー評価、流体緩和時間に起因する粒子配列が引き起こす実効粘弾性変調、並びに美味しさを評価するための実用的な評価など、USR を用いた混相流体のレオロジー試験例を紹介した。これら試験例では、市販レオメータの計測精度が保証され難い対象をあえて選択した。当然、我々の提案する USR にも守備範囲外は存在し、 $O(10^3 \text{ Pa s})$ 以上の高粘性流体や、 $O(10^{-3} \text{ Pa s})$ 以下の極低粘性流体、準完全弾性体などが例示できる。それらは市販レオメータで高精度のレオロジー物性計測がすでに可能とされている計測対象である。つまり、USR と市販レオメータとの間には、互いの適用範囲外の計測対象を相互に補い得る、相補的な使用が見込まれる。

弾塑性理論から発展を遂げた市販レオメータの原理に対して、流体力学的視点を取り入れた

Fig. 9 Schematic diagram of the expected applicable range in commercially supplied rheometer and USR.

USR を提案した。本研究を足掛かりとして、数世紀にわたる市販レオメータの課題が解決される契機となれば幸いである。

謝 辞

研究を遂行するにあたり、助言ならびにレオメータの指導をいただいた、広島大学の並木敦子先生、モンモリロナイトに関する技術指導をいただいた、電力中央研究所の田中真悟先生、食品レオロジー計測・評価・考察に際し、ご協力いただいたスイス連邦工科大学チューリッヒ校の Prof. Dr. Peter Fischer に感謝する。本報で紹介した内容は、基盤研究(B)No.19H02057、学術振興会特別研究員研究奨励費 No.18J20516、および学術振興会の若手研究者海外挑戦プログラムによる支援を含んでいる。

Nomenclature

E	: elasticity	[Pa]
E^*	: effective elasticity	[Pa]
f_0	: oscillation frequency	[s ⁻¹]
F_{cost}	: cost function	[N m ⁻¹]
r	: radial position	[m]
R	: cylinder radius	[m]
t	: elapsed time	[s]
T	: fluid temperature	[°C]
u	: azimuthal velocity	[m s ⁻¹]
u_z	: measured velocity	[m s ⁻¹]
U_{wall}	: oscillating wall velocity	[m s ⁻¹]
Wi	: Weissenberg number	[-]

Greek letters

Δy	: off-axis displacement from cylinder	[m]
$\dot{\gamma}$	: shear strain rate	[s ⁻¹]
$\dot{\gamma}_{\text{eff}}$	: effective shear strain rate	[s ⁻¹]
δ	: phase lag	[rad]
ε	: relative elasticity	[-]
η	: relative viscosity	[-]
Θ	: oscillating angle of cylindrical vessel	[rad]
λ	: relaxation time	[s]
μ	: viscosity	[Pa s]
μ^*	: effective viscosity	[Pa s]
ξ	: distance from transducer	[m]
ρ	: density	[kg m ⁻³]
τ	: shear stress	[Pa]
τ_{eff}	: effective shear stress	[Pa]
ϕ	: volume fraction	[-]
ϕ	: Phase lag of velocity fluctuation	[rad]
ω_0	: oscillation angular frequency	[rad s ⁻¹]

参考文献

- [1] Yang, K. and Yu, W., Dynamic Wall Slip Behavior of Yield Stress Fluids Under Large Amplitude Oscillatory Shear, *J. Rheol.* Vol. 61(4), 627-641 (2017).
- [2] Divoux, T., Fardin, M. A., Manneville, S. and Lerouge, S., Shear Banding of Complex Fluids, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 48, 81-103 (2016).
- [3] Fischer, P., Wheeler, E. K. and Fuller, G. G., Shear-banding Structure Orientated in the Vorticity Direction Observed for Equimolar Micellar Solution, *Rheol. Acta*, Vol. 41, 35-44 (2002).
- [4] Perge, C., Taberlet, N., Gibaud, T. and Manneville, S., Time Dependence in Large Amplitude Oscillatory Shear: A Rheo-ultrasonic Study of Fatigue Dynamics in a Colloidal Gel, *J. Rheol.*, Vol. 58, 1331-1357 (2014).
- [5] Carotenuto, C. and Minale, M., On the Use of Rough Geometries in Rheometry, *J. Non-Newton. Fluid Mech.* Vol. 198, 39-47 (2013).
- [6] Ancy, C., Solving the Couette Inverse Problem Using a Waveletvaguelette Decomposition, *J. Rheol.* Vol. 49, 441-460 (2005).
- [7] Tasaka, Y., Kimura, T. and Murai, Y., Estimating the Effective Viscosity of Bubble Suspensions in Oscillatory Shear Flows by Means of Ultrasonic Spinning Rheometry, *Exp. Fluids*, Vol. 56, 1867 (2015).
- [8] Yoshida, T., Tasaka, Y. and Murai, Y., Rheological Evaluation of Complex Fluids Using Ultrasonic Spinning Rheometry in an Open Container, *J. Rheol.*, Vol. 61(3), 537-549 (2017).
- [9] Tasaka, Y., Yoshida, T., Rapberger, R. and Murai, Y., Linear Viscoelastic Analysis Using Frequency-domain Algorithm on Oscillating Circular Shear Flows for Bubble Suspensions, *Rheol. Acta*, Vol. 57(3), 229-240 (2018).
- [10] Yoshida, T., Tasaka, Y., Tanaka, S., Park, H. J. and Murai, Y., Rheological Properties of Montmorillonite Dispersions in Dilute NaCl Concentration Investigated by Ultrasonic Spinning Rheometry, *Appl. Clay Sci.*, Vol. 161, 513-523 (2018).
- [11] Yoshida, T., Tasaka, Y. and Murai, Y., Efficacy Assessments in Ultrasonic Spinning Rheometry: Linear Viscoelastic Analysis on Non-Newtonian Fluids, *J. Rheol.*, Vol. 63(4), 503-517 (2019).
- [12] Yoshida, T., Tasaka, Y. and Murai, Y., Effective Viscoelasticity of Non-Newtonian Fluids Modulated by Large Spherical Particles Aligned Under Unsteady Shear, *Phys. Fluids*, Vol. 31(10), 103304 (2019).
- [13] Yoshida, T., Tasaka, Y. and Fischer, P., Ultrasonic Spinning Rheometry Test on Rheology of Gelled Food for Making Better Tasting Desserts, *Phys. Fluids*, Vol. 31(11), 113101 (2019).
- [14] Ouriev, B. and Windhab, E. J., Transient Flow of Highly Concentrated Suspensions Investigated Using the Ultrasound Velocity Profiler-Pressure Difference Method, *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 14, 1963-1972 (2003).
- [15] Murai, Y., In: Y. Takeda (ed.) *Ultrasonic Doppler Velocity Profiler for Fluid Flow*, Vol. 101, Springer, Tokyo, 153-156 (2012).
- [16] Coussot, P., Structural Similarity and Transition from Newtonian to Non-Newtonian Behavior for Clay-Water Suspensions, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 74(20), 3971-3974 (1995).
- [17] Einstein, A., Eine neue Bestimmung der Molekuldimensionen, *Ann. Phys.*, Vol. 19, 289-306 (1906).
- [18] Mooney, M., The Viscosity of a Concentrated Suspension of Spherical Particles, *J. Colloid Sci.*, Vol. 6, 162-170 (1951).
- [19] Frankel, N. A. and Acrivos, A., On the Viscosity of a Concentrated Suspension of Solid Spheres, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 22, 847-853 (1967).
- [20] Scirocco, R., Vermant, J. and Mewis, J., Effect of the Viscoelasticity of the Suspending Fluid on Structure Formation in Suspensions, *J. Non-Newton. Fluid Mech.*, Vol. 117, 183-192 (2004).
- [21] Lyon, M. K., Mead, D. W., Elliott, R. E. and Leal, L. G., Structure Formation in Moderately Concentrated Viscoelastic Suspensions in Simple Shear Flow, *J. Rheol.*, Vol. 45, 881-890 (2001).
- [22] Won, D. and Kim, C., Alignment and Aggregation of Spherical Particles in Viscoelastic Fluid Under Shear Flow, *J. Non-Newton. Fluid Mech.* 117, 141-146 (2004).
- [23] Barnes, H. A., Thixotropy –a Review, *J. Non-Newton. Fluid Mech.* 70, 1-33 (1997).