

超音波照射された擬塑性流体中の落下球実験

丹羽 英人

1. 緒言

擬塑性流体は、せん断速度が大きくなるほど粘度が低くなる、非 Newton 流体である。代表例として、泥や血液、ポリマーなどが挙げられる。ポリマーにおいて粘性だけでなく弾性も重要なパラメータの1つである。擬塑性流体を工業的に扱うには、流体中を運動する気泡や剛体に対する周囲流体の粘度分布、流動構造から影響を明らかにする必要がある。これらに関して、重力、浮力によって沈降、浮上する運動が系統的に調査されている[1-3]。また、擬塑性を用いて気泡の膨張収縮による上昇速度の高速化や粒子の機械振動による沈降速度の高速化が調査された[4-5]。さらに、岩室[6]は擬塑性流体中を重力落下する球に超音波を照射し、流体物性、物体形状、超音波強度および周波数を変化させることにより、高速化のメカニズムを調査した。しかし、調査された流体物性は限定的であり、粘性だけでなく弾性を有する試験流体において、弾性により高速化が抑制されることが示唆されていた。そこで本研究は、流体物性、落下物体の密度をより大きく変化させ、超音波照射による高速化における、擬塑性による粘性による影響と弾性による影響を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法および流体粘度測定

実験装置の概略図を Fig.1 に示す。装置は主に矩形アクリル水槽、吸引パッド、真空ポンプ、超音波振動子にて構成される。擬塑性流体として異なる質量濃度の PAA 溶液を用いた。溶液の粘度特性を計測するため、粘度計を用いてせん断粘度特性を得た結果を Fig.2 に示す。試験溶液はせん断速度が増加すると粘度が低下する擬塑性を示す。Power Law モデル[7]

$\mu = k\dot{\gamma}^{n-1}$ を用いて、係数 k 、 n を得た。溶液の粘弾性特徴を得るため、レオメータを用いて応力と貯蔵弾性率 G' 、損失弾性率 G'' の関係性を計測した。それぞれの弾性率の大小関係が変化する応力を τ_0 とした。ハイドロフォンを用いて超音波照射時の溶液中における圧力場振幅を計測し、平均圧力振幅 $\overline{\Delta P}$ を得た。擬塑性流体中の落下球に対する超音波照射による影響を調べるため、球落下実験を10分ごとに行った。また、超音

波照射なし、超音波照射ありを交互に行い、落下速度に対する超音波照射の影響を明らかにした。先行研究[6]より、超音波照射による落下球の高速化に対して、音響境界層内の粘度低下、音響境界層厚さが支配的であることが示唆された。先行研究を拡張し、落下球の終端速度 U_T 、音響境界層における代表粘度 μ_{ABL} 、落下球による球周囲の粘度 μ_U 、音響境界層 δ を、流体速度 u 、落下球の半径 a 、音速 c 、流体密度 ρ_S を用いて次式で表す。

$$U_T \sim \left(\frac{\Delta\rho g}{3k}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{2-n} a^{\frac{n+1}{n}}, \quad \mu_{ABL} \sim k \left(\frac{u}{\delta}\right)^{n-1}, \quad \mu_U \sim k \left(\frac{U_T}{a}\right)^{n-1}, \quad \delta \sim \left(\frac{kc^{1-n}}{\pi\rho_S^n f \overline{\Delta P}^{1-n}}\right)^{\frac{1}{1+n}}.$$

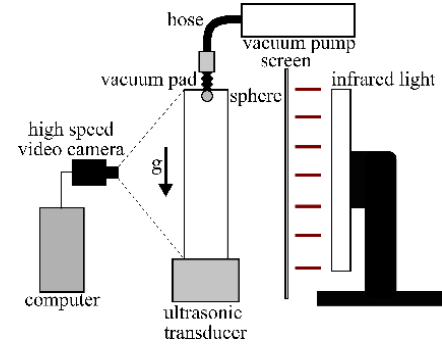


Fig.1 Experimental setup.

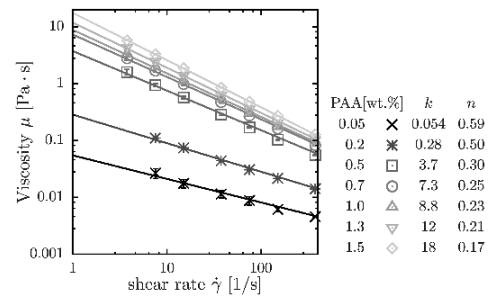


Fig.2 Viscosity versus shear rate.

3. 実験結果および考察

Fig.3(a)に実験結果を粘度比、音響境界層を用いて整理した結果を示す。グラフ中に、PAA濃度と終端速度 U_T の関係性を示す。PAA濃度が高いほど、終端速度が遅くなった。また粘度が非常に小さいPAA 0.2wt.%以下では高速化は見られなかった。PAA濃度が上昇すると粘性が増加し、擬塑性がより強くなるため高速化が顕著にみられた。一方で、PAA 0.7wt.%以下とそれ以上の2つのグループに分類することができる。ある一定の濃度を超えると超音波照射による高速化が抑制された後、濃度の上昇に伴ってまた高速化がみられた。

高速化が抑制される要因として、粘性だけでなく、弾性による影響を受けるためだと考えられる。弾性による影響を評価するため、球の落下による応力 $\tau_U \sim k (U_T/a)^n$ と τ_0 の比と高速化の関係性を Fig.3(b)に示す。グラフ中に、PAA濃度と τ_0 の関係性を示す。応力比 $\tau_U/\tau_0 \sim 1$ 付近で高速化が顕著にみられ、それより小さくなると高速化が抑制されることが分かった。これらより横軸を粘度比、縦軸を応力比に取り、濃淡で高速化度合いを示した結果を Fig.3(c)に示す。粘度比が増加すると応力比が小さくなるのが分かる。粘度比が大きくなると、高速化が促進されるが、応力比が1より小さくなると粘性による影響よりも弾性による影響が大きくなるため、高速化があまり見られなくなる。しかし、より粘度比が大きくなると高速化による影響が弾性による高速化抑制よりも大きくなるため、高速化がみられるようになると考えられる。弾性による影響のため、超音波照射による高速化が抑制されることが説明される。

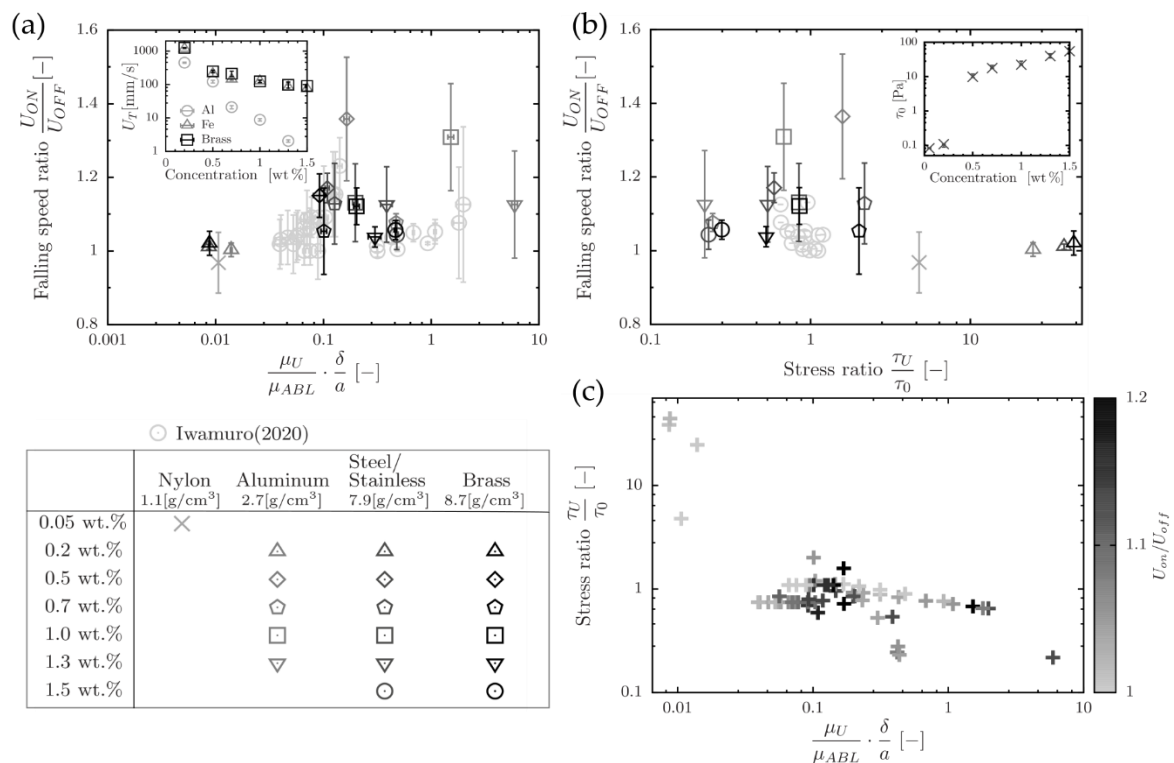


Fig.3(a) Relation between viscosity ratio and speed ratio. (b) Relation between stress ratio and speed ratio. (c) Relation between viscosity ratio, stress ratio and speed ratio.

参考文献

- [1] Ohta *et al.*, J. Non-newton. Fluid Mech. **132**, 100–107 (2005).
- [2] Zhang *et al.*, J. Non-newton. Fluid Mech. **165**, 555–567 (2010).
- [3] Arigo and Gareth, Rheologica Acta **37.4**, 307–327, (1998).
- [4] Iwata *et al.*, J. Non-newton. Fluid Mech. **151**, 30–37, (2008).
- [5] Wildenberg *et al.*, Sci. Rep. **9.1**, 1–8 (2019).
- [6] 岩室秀, 修士論文, 大阪大学, 2020.
- [7] R.P.Chhabra. Bubbles, Drops, and Particles in Non-Newtonian Fluids, 14–22, 61–72. CRC press, (2006).