

# 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

擬塑性流体は非 Newton 流体の一種であり，せん断速度が大きくなるほど粘度が低くなる．代表例として，泥や血液，ポリマーなどが挙げられる．ポリマーの流動は粘性だけでなく弾性にも依存する．このような複雑な物性値を持つ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．擬塑性流体中における物体の運動に関して，重力，浮力による沈降，浮上が系統的に調査されている[1-3]．また，擬塑性を用いて膨張収縮による気泡上昇の高速化や，機械振動による粒子沈降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，超音波照射による高速化における，粘弾性による影響を明らかにするため，流体物性，落下物体の密度をより大きく変化させた実験を行った．その結果，超音波照射により高速化が顕在化する条件が得られた．

## 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  $\tau_0$  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

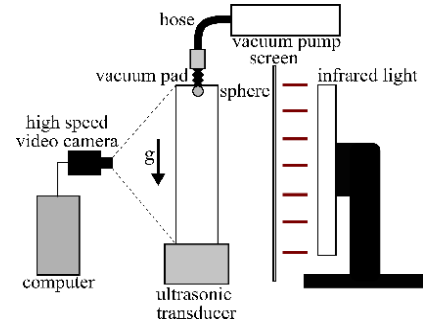


Fig.1 Experimental setup.

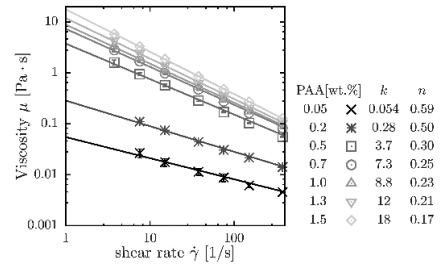


Fig.2 Viscosity versus shear rate.

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．先行研究のモデルを拡張し，落下球の終端速度  $U_T$ ，音響境界層厚さにおける代表粘度  $\mu_{ABL}$ ，落下球による球周囲の粘度  $\mu_U$ ，音響境界層厚さ  $\delta$  を，流体速度  $u$ ，落下球の半径  $a$ ，音速  $c$ ，流体密度  $\rho_s$  を用いて，以下のようにスケーリングする．

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

### 3. 実験結果および考察

Fig.3(a)に実験結果を粘度比、音響境界層厚さを用いて整理した結果を示す．挿入図は PAA 濃度と終端速度 $U_T$ の関係性を表し、PAA 濃度が高いほど、終端速度が遅くなった．このとき、粘度が非常に小さい PAA 0.2wt.%以下では超音波照射による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と考えられる．一方で、高速化の度合いに関して横軸 0.1 前後で 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のは、粘性だけでなく、弾性の影響があ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 $\tau_0$ の比と高速化の関係性を Fig.3(b)に示す．挿入図は PAA 濃度と $\tau_0$ の関係性を表す．応力比 $\tau_U/\tau_0 \sim 1$ 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．これらの実験結果を整理するため、図中の点の分布より横軸を粘度比、縦軸を応力比に取り、濃淡で高速化度合いを示した図を Fig.3(c)に示す．粘度比が増加すると応力比が小さくなる傾向があることが分かる．色の濃淡より、横軸 0.1 付近で高速化が顕在化していることから、横軸 $<0.1$ では高速化と横軸は相関していると言える．この時の応力比は $\tau_U/\tau_0 \sim 1$ である．横軸が 0.1 より大きくなると高速化がみられなくなるが、横軸 1 付近で再度高速化が顕在化した．

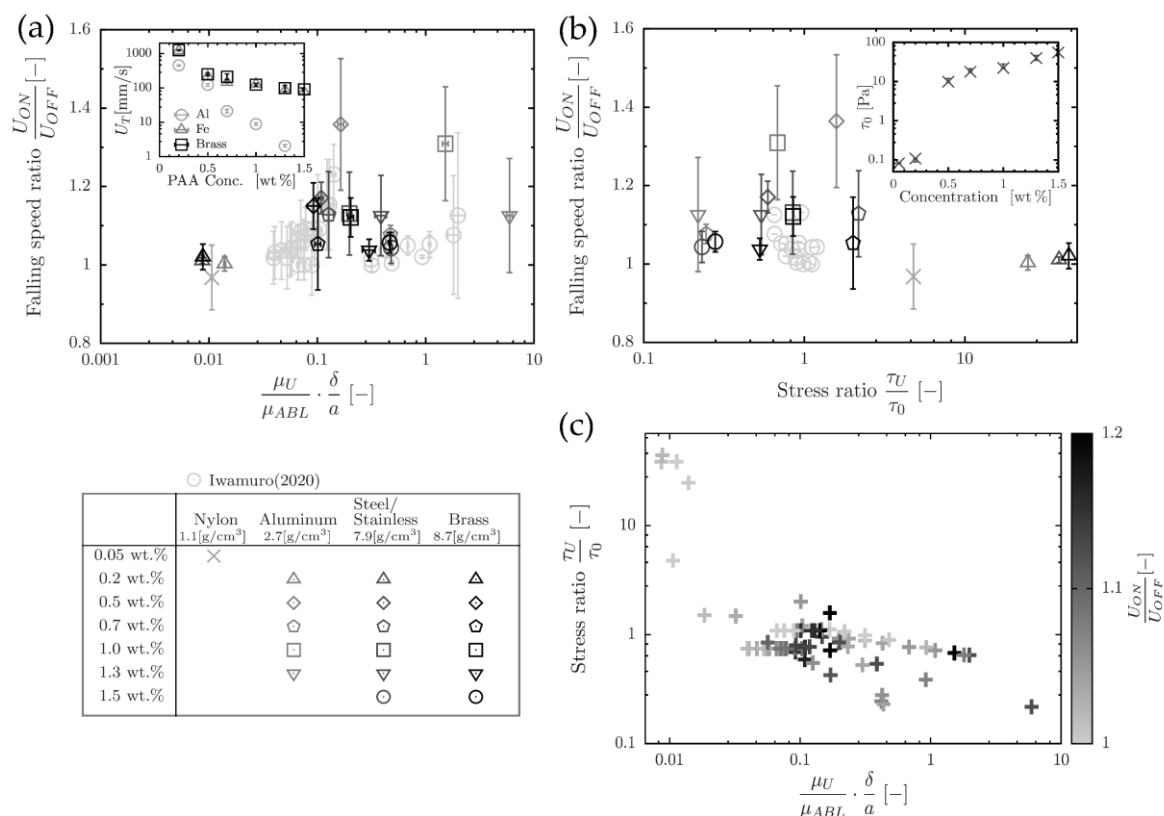


Fig.3 Relation between (a) viscosity ratio and speed ratio, (b) stress ratio and speed ratio, (c) viscosity ratio, stress ratio and speed ratio, where inset of (a) shows PAA concentration and terminal speed, and (b) shows PAA concentration and  $\tau_0$ .

### 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**, 307-327, (1998).
- [4] Iwata *et al.*, *J. Non-Newton. Fluid Mech.* **151**, 30-37, (2008).
- [5] Wildenberg *et al.*, *Sci. Rep.* **9**, 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).