

超音波照射された擬塑性流体中の落下球実験

杉山 和靖 教授 } 指導
渡村 友昭 助教 }

大阪大学大学院 基礎工学研究科 機能創成専攻
機能デザイン領域 推進工学講座
29B20038

丹羽 英人

Abstract

A sphere falling in a pseudo-plastic fluid was irradiated with ultrasonic waves to investigate the factor of high speed. The falling speed was measured from images. The pressure was measured using a hydrophone. PAA solution was used as the test solution. Viscosity was measured using a viscometer according to the power-law model. The elastic modulus was measured using a rheometer. Experiments were conducted using the following parameters: fluid properties, density of the falling sphere, and diameter. We confirmed that the speed-up by ultrasonic irradiation can be defined by viscosity and acoustic boundary layer thickness. The effect of elasticity as well as viscosity was also examined. It is suggested that the speed-up due to ultrasonic irradiation is caused by viscosity, but the speed-up is suppressed by elasticity.

目次

1 緒言	3
1.1 研究背景	3
1.2 研究目的	5
2 実験方法	6
2.1 実験系および座標系	6
2.2 溶液作製	6
2.3 粘度計測	7
2.4 弾性率計測	7
2.5 圧力場計測	10
2.6 球落下実験	11
2.7 実験手順	13
2.8 解析方法	14
3 溶液物性および圧力場の確認	17
3.1 粘度 計測結果	17
3.2 弾性率 計測結果	18
3.3 圧力振幅 計測結果	20
4 理論	21
4.1 擬塑性流体中における球の落下	21
4.2 擬塑性流体中における球の落下による応力	23
4.3 超音波照射に伴う球の高速化	23
5 球密度による高速化への影響	25
6 溶液濃度による高速化への影響	28
7 球径による高速化への影響	31
7.1 PAA1.0wt.%の場合	31
7.2 PAA0.5wt.%の場合	32
7.3 PAA0.2,1.3wt.%の場合	34
8 粘度による高速化への影響	35
9 弾性による高速化への影響	36
9.1 応力比と高速化度合の関係	36
9.2 粘度比・応力比による高速化への影響	37
10 結言	39
A 球落下実験 実験結果	40
A.1 密度・濃度による影響に関して	40
A.2 球径による影響に関して	43

B	実験装置の改良による影響	45
B.1	実験装置	45
B.2	落下実験結果	46
C	初速による影響に関して	48
D	落下間隔変化における擬塑性流体の経時変化による影響	48
E	溶液作製精度による影響	50
E.1	溶液の粘性特性に関して	50
E.2	溶液の作製精度による高速化への影響	51
F	落下間隔変化における高速化への影響	52
	参考文献	55

1 緒言

1.1 研究背景

一般的に、流体はせん断応力がせん断速度に比例する Newton 流体と、せん断応力がせん断速度が非線形となる非 Newton 流体に分類することができる。様々な流体のせん断速度とせん断応力の関係を Fig1.1(a) に示す [1]。Newton 流体はせん断速度とせん断応力が比例関係にある流体である。一方でそれ以外の流体は非 Newton 流体と呼ばれている。非 Newton 流体は Shear thinning 流体 (Pseudoplastic), Shear thickening 流体 (Dilatant fluid), Bingham plastic 流体, Viscoplastic 流体, Viscoelastic 流体が挙げられている。非 Newton 流体のうち、Bingham plastic 流体, Viscoplastic 流体はせん断応力がある一定になるまでせん断速度が発生しない流体である。これらの一例として、バターや冷却途中の溶岩などが挙げられる [2, 3]。一方で、Shear-thinning 流体, Shear-thinning 流体はせん断応力が少しでも加わると、せん断速度が発生し流体的挙動を示す。Shear-thinning 流体の一例として、マヨネーズや血液、泥、ポリマーなどが挙げられる [4, 5, 6, 7]。Shear-thickening 流体の一例として、水溶き片栗粉や液体ボディアーマー、プレーキパッドなどが挙げられる [8, 9, 10]。また、Viscoelastic 流体は粘性だけでなく弾性的挙動を示す流体である。この一例として流動ゴムや高分子融体が挙げられる [11, 12]。

非 Newton 流体の粘度を示すモデルとして、Power-law model (Ostwald-De Waele model)[13], Cross model[14], Carreau model[15], Carreau-Yasuda model[16] や Herschel-Bulkley model[17, 18] などを挙げるができる [1]。Power-law model はせん断速度の限られた範囲にて適応することができる。Cross model は shear-thinning 性が構造的に引き起こされるといった仮説において導き出されたモデルである。これは広いせん断速度において適用することができる。また、Carreau model は Cross model を Power-law 領域においてより適合するよう修正したものとなっている。Carreau-Yasuda model は、Carreau model を粘度減少が開始する特性時間に関してより適合するように修正されたものである。Herschel-Bulkley model は Bingham plastic や Viscoplastic といった静止状態の流体においてせん断応力が存在する流体を示すモデルとなっている [1]。

Power-law モデル式中の指数によって Newton 流体, Shear-thinning 流体と、Shear-thickening 流体に分類することができる。これらのせん断速度と粘度の関係性を Fig1.1(b) に示す。これら 2 種類の流体のうち、本研究で扱う Shear-thinning 流体は、せん断速度 $\dot{\gamma}$ が高くなるほど粘度 μ が低くなる性質を有している。この流体は擬塑性流体とも呼ばれている。産業分野において、擬塑性流体の輸送を行うことがある。少ないエネルギーで輸送を行うためには、せん断速度が高くなるほど粘度が低くなる性質を活かし、抵抗低減を図る必要がある。

流体中を運動する気泡や剛体周囲流体の粘度分布や流動構造から、その運動に対する影響を明らかにする必要がある。様々な研究が行われてきた。例えば、Ohta *et al.* [19] は非弾性擬塑性流体中における液滴の上昇運動に対し、液滴周りのせん断速度による粘度低下が及ぼす影響を明らかにした。加えて、Ohta *et al.* [20] は液滴周りの粘度分布を数値計算より求め、局所的な粘度低下は液滴の形状に大きく依存することを明らかにした。また、Zhang *et al.* [21] は非弾性擬塑性流体中における単一気泡の上昇運動に対し、後方に生じる 2 つの高粘度領域が気泡の上昇運動に影響を与えることを明らかにした。

超音波振動の影響による抵抗低下の一例として、van den Wildenberg *et al.*[22] による研究があげられる。彼らの研究では、粒子の上部を水で満たした容器ごと振動させ、その粒子中に球を落下させた。その結果を Fig1.2 に示す。(a) は球の落下時間と落下球の位置の関係を表し、(b) は落下球の位置と落下速度の関係を表す。1 は、落下球の半径が 4mm、2 は、落下球の半径が 7mm であ

る。Fig1.2(a)において、 Γ は振動強度である。振動によって落下球表面におけるせん断応力が減少し、振動強度を強くするとより深くまで沈降すると報告された。Iwata *et al.*[23]は、擬塑性流体中における気泡の体積を超音波振動によって周期的に増加・減少させた。気泡の膨張収縮に伴い、周囲流体が変形し粘度低下を発生させた。周囲流体の粘度低下により、上昇速度が増加することを明らかにした。

本研究において試験溶液としたポリマーの流動は、粘性だけでなく弾性にも依存する[24]。ポリマーの動的粘弾性特性に関する研究として、Tanaka *et al.*[25]が挙げられる。彼らの研究では、ポリアミドとポリプロピレンのポリマーブレンドを行い動的粘弾性計測を行った。混合後のポリマーと母材であるポリアミド、ポリプロピレンの動的粘弾性特性の比較を行い、母材による影響を明らかにした。

また、岩室[26]は擬塑性流体中を落下する球に超音波振動を照射し、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で調査を行った。この場合、落下速度の高速化は音響境界層内部における粘度低下と、音響境界層の形成が関係していると明らかにした。落下球の球径を変化させた場合、落下球によって生じる周囲流体の応力が変化する。周囲流体に生じる応力が変化的ことで、粘性影響だけでなく弾性影響が生じることも示された。また、弾性影響により高速化が抑制されることが示唆された。しかし、調査された流体物性は限定的であり、弾性影響による高速化の抑制は十分に議論されていない。

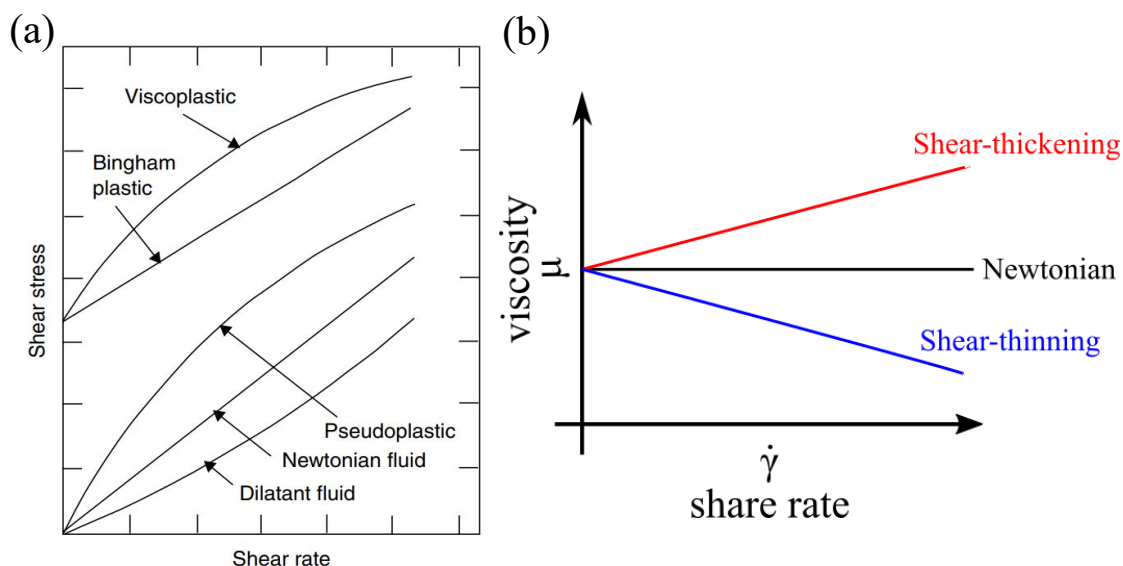


Fig 1.1: (a) Qualitative flow curves for different types of non-Newtonian fluids[1].
(b) Classifications of non-Newtonian power-law fluid.

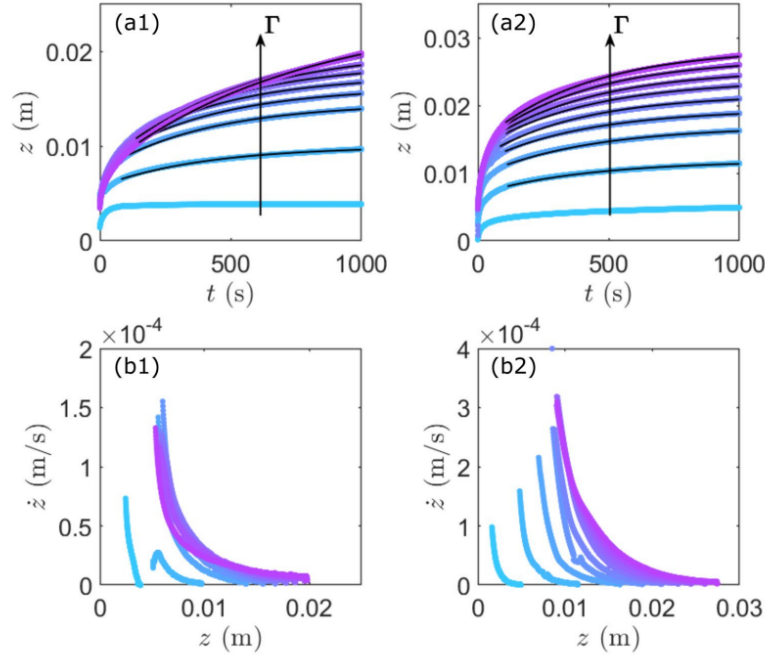


Fig 1.2: Sinking dynamics for different intruder-sizes and for different vibration intensities Γ . (a1) Depth z versus time t for z an intruder with radius of 4mm and (a2) for an intruder with radius of 7mm. (b1) Instantaneous velocity versus sinking depth z obtained from (a1) and (b2) from (a2). The black lines correspond to the solutions fitted in the quasi-steady regime[22].

1.2 研究目的

先行研究 [26] において、超音波照射された擬塑性流体中を落下する球の高速化の要因として、音響境界層内部における粘度低下と、音響境界層の形成が関係していることが明らかにされている。また、高速化が弾性によって抑制されることを示唆していた。しかし、調査された流体や落下球の種類、径は限定的であり、弾性が高速化抑制することを明らかにしていない。落下球の密度や濃度密度を大きく変化させることで、球の周囲に生じる応力を変化させ、粘性と弾性それぞれ影響を明らかにすることができる。

本研究で用いた試験溶液では、球の落下による運動が高速の場合、粘性による影響が支配的であり、低速の場合は弾性による影響が支配的となる。落下球の終端速度を変化させることで粘性が支配的な場合と弾性が支配的な場合に分けて、超音波照射による高速化への影響を調査した。そこで、流体物性、落下物体の密度、落下球の径をより大きく変化させ実験を行った。超音波照射された擬塑性流体中を落下する球の高速化に対する粘弾性両方の影響を明らかにすることを目的とする。

2 実験方法

本実験では、ポリアクリルアミド (PAA) 溶液 (三菱ケミカル, AP805C) を擬塑性流体として用いた。初めに、試験溶液である PAA 溶液を作製し、非ニュートン流体における指標の一つとなる粘度の計測を行うことで粘度特性を計測した。また、応力と貯蔵弾性率、損失弾性率の計測を行うことで、応力に対する弾性特性を計測した。続いて、超音波振動子によって圧力場が適切に生成されているか確認した。そして、擬塑性流体中を落下する球に対する超音波照射による影響を調べるため、球落下実験を行った。

2.1 実験系および座標系

本研究における実験系および座標系を Fig.2.1 に示す。本研究で扱う系は、水槽中において、超音波照射された擬塑性流体中を球が落下する系である。水槽液面を原点とし、球の落下方向を y 軸正の方向とする。

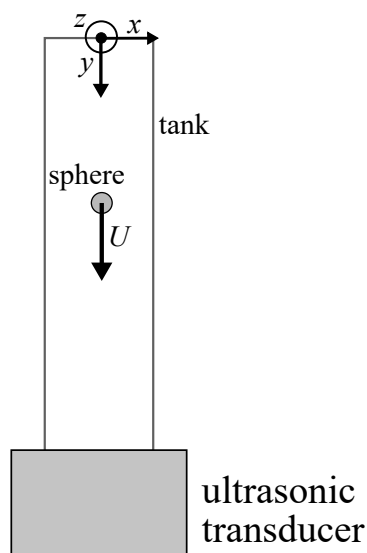


Fig 2.1: Experimental system and coordinate system.

2.2 溶液作製

PAA 粉末と水道水を混合することで、全 7 種類の濃度 (0.05, 0.2, 0.5, 0.7, 1.0, 1.3, 1.5wt.%) の PAA 溶液を作製した。以下にその作製方法を示す。

はじめに、1L ポリピーカー空容器質量をデジタルスケールを用いて計測を行った。そこに約 1L の水道水を入れ再度デジタルスケールで質量の計測を、水道水の質量の算出した。この結果より、作製する濃度に必要な PAA 粉末の質量を算出し、デジタルスケールで計量を行った。この PAA 粉末を水道水の攪拌を行いながら少量ずつ混合させた。これは溶液全体で均一性を持たせるためである。そして、マグネットスチーラー、プラスチック製攪拌棒を用いて溶液の攪拌を行った。これらを 2 回行うことで 1 度に約 2L の PAA 溶液の作製を行った。作製約 1 週間後、溶液に気泡が見られなくなった後、ペットボトル容器に移し密封保管を行った。これは、水分の蒸発を防ぎ、濃度が大きく変化することを防ぐためである。

2.3 粘度計測

粘度計測における計測機器の模式図を Fig.2.2 に示す。ステージと回転する円錐回転子の間に存在する試料によって付加されるトルクを計測することで粘度の計測を行う。粘度のせん断速度依存性を確認することで生成した溶液の性質の確認を行った。なお、計測範囲の都合上、水道水では $1^\circ 34' \times R24$ のコーンロータを、PAA 溶液では $0.8^\circ \times R12$ のコーンロータをそれぞれ用いた。コーンロータを用いることで、試料全域に同じひずみ速度を与えた。

Table 2.1: Specifications of viscometer (東機産業,TVE-25L)

測定方式	円錐平板方式
回転速度	0,0.1~100.0rpm ; 0.1rpm ステップ
精度/再現性	フルスケールの $\pm 1.0\%$ 以内/ フルスケールの $\pm 0.2\%$ 以内

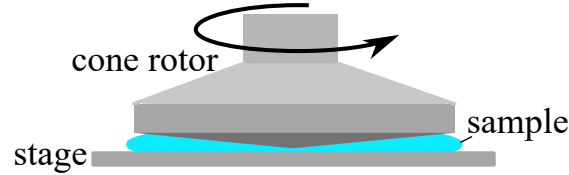


Fig 2.2: Viscosity measurement method.

2.4 弾性率計測

作製した PAA 溶液の応力に対する弾性特性を調べるため、貯蔵弾性率 G' と損失弾性率 G'' の応力依存性を計測した。以下に、その計測理論と計測手法を示す。

2.4.1 弾性率 計測理論

周期的なひずみを試験溶液に印可し、そのときの応力を計測することで貯蔵弾性率 G' と損失弾性率 G'' の計測を行う。試験溶液にひずみが、

$$\gamma = \gamma_1 e^{i\omega t}, \quad (2.1)$$

で与えられたとする。粘弾性体では、ひずみは応力に対して位相が遅れるので、応力はひずみより位相が進む。印可されたひずみと応力の関係を Fig.9.1 に示す。位相差を η とすると、

$$\tau = \tau_1 e^{i(\omega t + \eta)}, \quad (2.2)$$

となる。ここで、

$$|G| = \frac{\tau_1}{\gamma_1}, \quad (2.3)$$

とおくと、式 (2.2) は、

$$\tau = \gamma_1 |G| e^{(\omega t + \eta)} = |G| \gamma e^{i\eta}, \quad (2.4)$$

と表される。ここで、

$$G^* = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2.5)$$

$$G' = |G| \cos \eta, \quad (2.6)$$

$$G'' = |G| \sin \eta, \quad (2.7)$$

とおくと、式 (2.4) は、

$$G^* = |G| e^{i\eta}, \quad (2.8)$$

となる。ここで、式 (2.6), (2.7) より、

$$G^* = G' + iG'', \quad (2.9)$$

となる。ここで、 G^* は複素弾性率、 G' は貯蔵弾性率、 G'' は損失弾性率と呼ばれる [27][28]。貯蔵弾性率と損失弾性率に関して、位相差 η を用いて、

$$G' = 0, \quad G'' = |G|, \quad (\text{at } \eta = 0) \quad (2.10)$$

$$G' = |G| \cos \eta, \quad G'' = |G| \sin \eta, \quad \left(\text{at } 0 < \eta < \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.11)$$

$$G' = |G|, \quad G'' = 0, \quad \left(\text{at } \eta = \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.12)$$

とそれぞれの条件で場合分けできる。式 (2.10) の場合は、応力とひずみの位相差が存在せず、粘性による影響がなく、弾性による影響のみが存在する。式 (2.12) の場合は、応力とひずみの位相差が $\pi/2$ で直交し、弾性による影響がなく、粘性による影響のみが存在する。式 (2.11) の場合は、応力とひずみの位相差が $\pi/2$ より小さいが存在し、弾性、粘性それぞれの影響を受けることを示している。以上より、損失弾性率 G'' は粘性影響を、貯蔵弾性率 G' は弾性影響を表すことが分かる。式 (2.6), (2.7) より、損失弾性率と貯蔵弾性率の比を

$$\frac{G''}{G'} = \tan \eta, \quad (2.13)$$

と定義できる。ここで、 $\tan \eta$ は損失正接と呼ばれる [27][28]。この損失正接に関して、

$$\tan \eta < 1, \quad \left(\text{at } 0 < \eta < \frac{\pi}{4} \right) \quad (2.14)$$

$$\tan \eta > 1, \quad \left(\text{at } \frac{\pi}{4} < \eta < \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.15)$$

と、場合分けできる。式 (2.14) の場合は、貯蔵弾性率よりも損失弾性率の方が大きく、粘性による影響を強く受ける。一方で、式 (2.15) の場合は、損失弾性率よりも貯蔵弾性率の方が大きく、弾性による影響を強く受ける。本研究において、損失正接を用いた場合分けによって粘性影響、弾性影響を考えた。

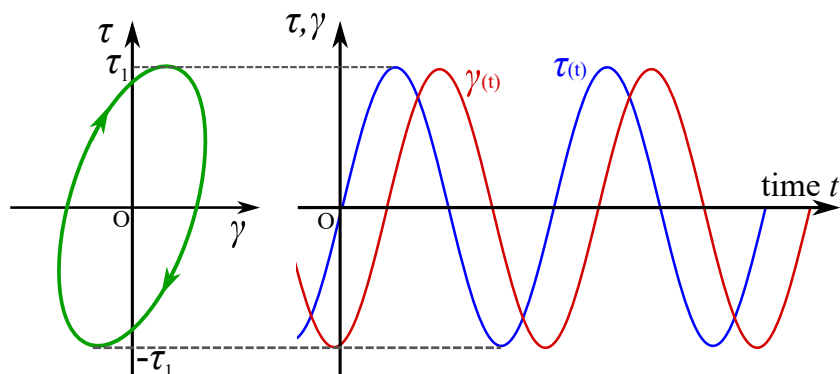


Fig 2.3: Relationship between shear rate and stress in viscoelastic materials.

2.4.2 弾性率 計測手法

弾性率計測の概略図を Fig.2.4 に示す．計測には，回転式レオメータ (Thermo Fisher Scientific, HAAKE MARSIII) を用いた．回転子の振動回転周期を一定にし，振幅を変化させることで溶液に印可する応力を変化させた．回転子には $1^\circ \times R30$ のコーンロータを用いた．計測条件を Table 2.2 に示す．

Table 2.2: Elastic modulus measurement conditions.

計測範囲	$10^{-3} \sim 10^3 [\text{Pa}]$
計測分割数	70
計測分割形式	対数
計測温度	$20[^\circ\text{C}]$ (固定)
回転子周期	$1[\text{Hz}]$ (固定))

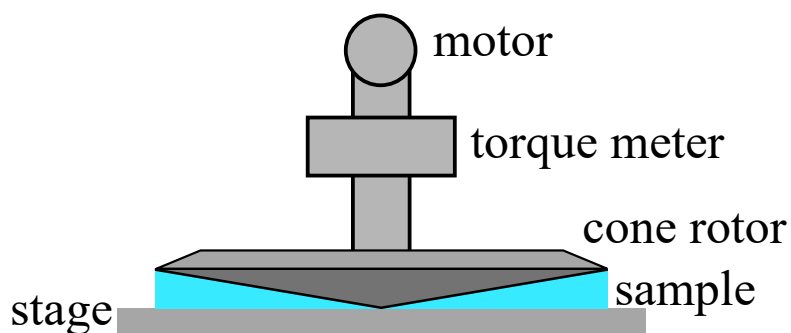


Fig 2.4: Elastic modulus measurement conditions.

2.5 圧力場計測

圧力場計測の概略図を 2.5 に示す．圧力測定にはハイドロフォン（Brüel & Kjær, Hydrophone Type8103）を用いた．ハイドロフォンの出力電圧をコンディショニングアンプ（Brüel & Kjær, NEXUS Change Amplifier Type 2692-A-0S1）を用いて増幅し，オシロスコープを用いて電圧を記録した．コンディショニングアンプの設定を元に記録した電圧を圧力場へ変換した．計測は 5mm 間隔で行った．この測定間隔は音速 $c \approx 1500 \text{ m/s}$ ，周波数 $f = 27.4 \text{ kHz}$ としたときの波長 $\lambda = c/f \approx 54.7 \text{ mm}$ よりも十分に小さい．

Table 2.3: Specifications of microphone (Brüel & Kjær, Hydrophone Type8103)

公称電圧感度	$29 \mu\text{V}/\text{Pa}$
計測範囲	0.1kHz-180kHz

Table 2.4: Specifications of conditioning amplifier (Brüel & Kjær, NEXUS Change Amplifier Type 2692-A-0S1)

マイクロフォン入力	
入力インピーダンス	$10\text{M}\Omega \parallel 300\text{pF}$
最大入力	31.6V
周波数範囲 (-1dB)	0.1kHz-100kHz(ゲイン $\leq 60\text{dB}$)

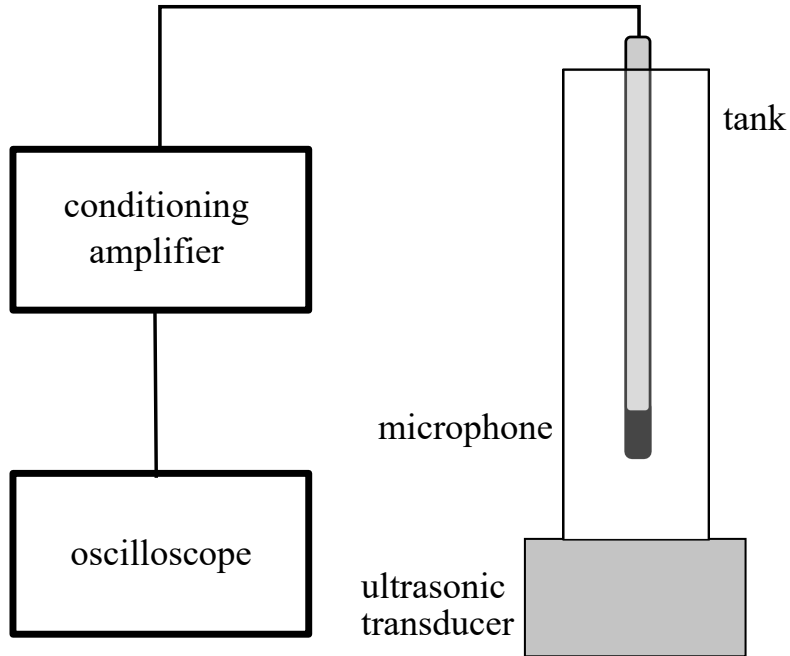


Fig 2.5: Schematic outline for pressure measurement.

2.6 球落下実験

使用した実験装置の概略図を Fig.2.6 に示す. 外寸にて高さ 400mm, 幅 58mm, 奥行き 58mm, 厚さ 3mm の矩形アクリル水槽を用いた. この水槽に試験溶液を満たした. その上に, 真空ポンプと接続した真空パッドを設置し, 直径 D の球の保持をした. 三方弁を用いて真空パッドを大気圧にすることで落下球の把持を解除し, 球を落下させた. 密度, 濃度変化の場合における落下球, 溶液の条件を Table.2.7 に示す. また, 落下球の球径を変化させた場合の球径, 溶液の濃度の条件を Table.2.8 に示す. 落下させた球が鋼球の場合は, ネオジム磁石を用いて試行ごとに回収を行った. 一方で, 他の種類の球は回収せずに落下実験を継続した. この際, 落下球の体積によって液面が上昇するので液面の高さが一定になるよう, シリンジを用いて溶液を回収した.

落下球が試験液体中を落下する様子をハイスピードカメラ (BASLER, acA1920-150um) で撮影し, 記録用コンピュータに連続画像 (bmp 形式) として保存した. 解像度は 0.22mm/pixel であり, 最小の球 (直径 5mm) でも直径 22.7pixel の円として撮影できる. ハイスピードカメラにはレンズ (BASLER, TS5014-MP) をつけ, 絞り, 焦点の調整を行い, 明瞭に落下球を撮影できるようにした. 実験装置後方にスクリーン, 赤外線ライトを設置し, 装置を後方より照射することにより, 落下の様子をより分かりやすくした. さらに, 超音波振動による影響を調査するためにアクリル水槽の下に超音波振動子を設置した.

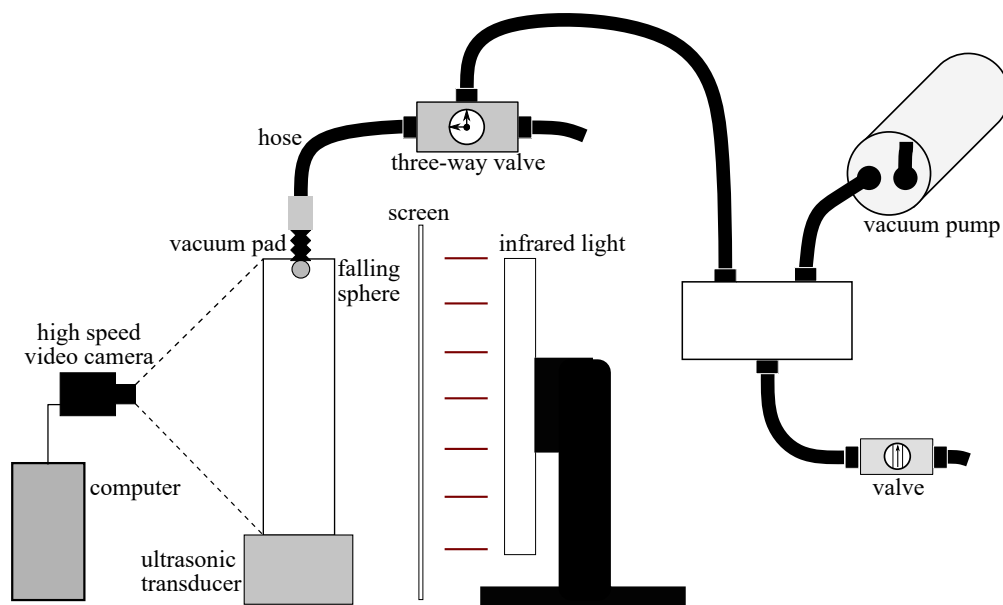


Fig 2.6: Schematic view of the experimental apparatus.

Table 2.5: Specifications of high-speed camera (BASLER, acA1920-150um)

センサ種別	CMOS
水平/垂直解像度	200pixel×1984pixel
解像度	0.5MP
フレームレート	100fps

Table 2.6: Specifications of lens (BASLER, TS5014-MP)

焦点距離 [mm]	50.0
F 値	1.4-16.0
最短撮影距離 [mm]	500

Table 2.7: Experimental conditions of falling sphere and solution concentration.

球材質	nylon	アルミニウム	アルミナ	鋼	ステンレス	真鍮
密度 ρ [kg/m ³]	1130	2700	3800	7900	7900	8700
直径 D [mm]	9.5	10	10	10	9.525	9.52
PAA 0.05wt.%	○					
PAA 0.2wt.%		○	○		○	○
PAA 0.5wt.%		○	○		○	○
PAA 0.7wt.%		○	○		○	○
PAA 1.0wt.%		○	○	○		○
PAA 1.3wt.%		○	○		○	○
PAA 1.5wt.%			○		○	○

Table 2.8: Experimental conditions on steel sphere with varying sphere diameters.

球材質	鋼 $\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$								
直径 D [mm]	5	8	10	11	12	13	14	15	20
PAA 0.2wt.%	○	○	○						
PAA 0.5wt.%	○		○					○	○
PAA 1.0wt.%		○	○	○	○	○	○	○	○
PAA 1.3wt.%		○	○					○	○

超音波振動子の発振には、ファンクションジェネレータ (NF, WF1974) , オシロスコープ (IWATSU, DIGITAL OSCILLOSCOPE DS-5614A) , パワーアンプ (NF, HSA4101) を用いた。これらの接続を Fig.2.7 に示す。ファンクションジェネレータによって、周波数、電圧の制御を行い、超音波出力の出力元となる正弦波信号を生成した。続いて、ファンクションジェネレータによって生成された正弦波信号をパワーアンプによって、20 倍のゲインをかけ増幅した。これら、オシロスコープによってファンクションジェネレータによって生成された信号、パワーアンプによって増幅された信号の両方をモニタリングし正常に出力されているか確認を行った。また、パワーアンプによって増幅された信号を、ランジュバン型振動子 (富士セラミックス, FBL28502HA) 上に円形の SUS 製プレートを接着したものを振動子とした。超音波振動子の共振周波数は 28kHz である。今回の実験において、照射する超音波周波数は 27.4kHz に固定した。

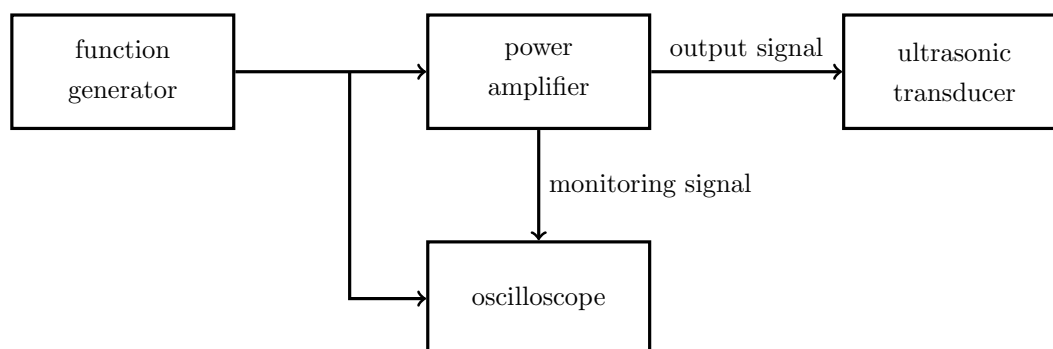


Fig 2.7: Schematic outline for ultrasonic control system.

2.7 実験手順

実験手順のフローチャートを Fig.2.8 に示す．まず初めに，試験溶液である PAA 溶液の作製を行った．続いて，粘度計測を行い作製した PAA 溶液の粘度特性を計測した．その後，圧力場の計測を行い，PAA 溶液中に適切に圧力場が形成されているかの確認を行った．そして，球落下実験を行い超音波照射の有無に伴う落下球への影響を調べた．

超音波を照射した落下実験を行う前に，球を数回落下させ，それぞれの試行ごとに速度が一定となることを確認した．そして，超音波照射なしで球落下実験を行い，その後，超音波照射ありにおける球落下実験を行った．超音波照射ありなしを交互に行うことによって，超音波照射による擬塑性流体中を落下する球への影響を確認した．なお，弾性を有する流体は緩和時間を代表時間として，変形した状態から元の状態へ戻ろうとする．各落下実験における流体の状態を同じ状態とするために，等間隔の時間をあけて球の落下を行う必要がある．これは，先行研究 [29] にて，等間隔の時間で物体を落下させると，落下速度が一定になることが報告されているためである．本実験においては，10 分間隔で物体を落下させた．

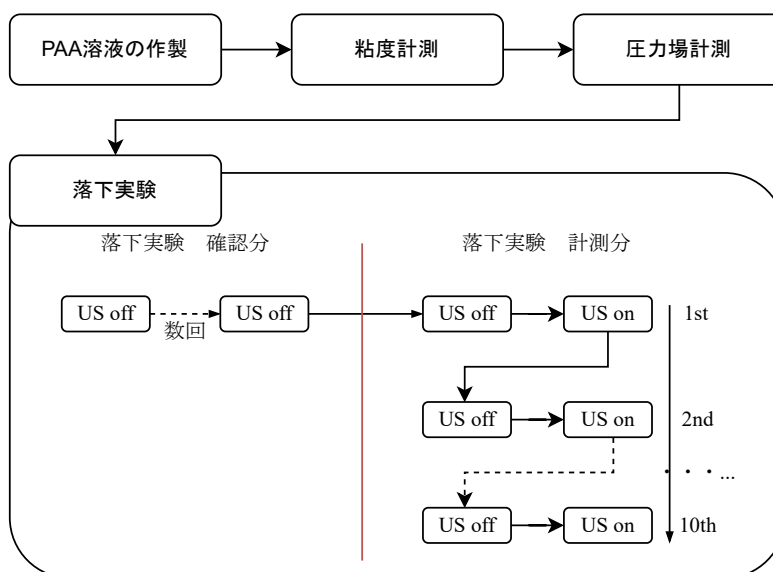


Fig 2.8: Flowchart of the experimental procedure.

2.8 解析方法

ハイスピードカメラを用いて落下球が落下する様子を bmp 形式の連続画像として撮影すると、Fig.2.9(a) に示すように、落下球以外にも電磁石や水槽壁面が映ってしまう。この画像から、落下球を検出するために Hough 変換を用いた。Hough 変換は任意の幾何形状を表す線に対して、特徴点を一定数以上通る線を検出する変換手法であり、画像中の落下球の輪郭が必要である。本実験では落下球の輪郭を描く方法として背景処理と Sobel filter を用いた。

2.8.1 背景処理と Sobel filter

Hough 変換を行う前処理として、背景処理と Sobel filter の処理を行った。撮影した連続画像に対して背景処理を行った画像を Fig.2.9(b) に示す。背景処理では、画像輝度値の平均値を計算しそれぞれの画像との差分を取った。これにより、それぞれの画像における差分を明確にし、落下球を分かりやすくさせた。続いて、背景処理を行った画像へ Sobel filter の処理を行った。Sobel filter 処理後の画像を Fig.2.9(c) に示す。Sobel filter とは、輪郭抽出を行うフィルタ処理である。ある任意の画素を中心とした 9 つの輝度値に対し、Fig.2.10(a)(b) に示す係数をそれぞれ乗算し合計した後、絶対値をとる。Fig.2.10(a) により y 軸方向の輪郭を、Fig.2.10(b) により x 軸方向の輪郭を強調する。Fig.2.10(a)(b) それぞれによって、フィルタ処理された 9 つの輝度値に対する乗算の合計値を 2 乗し、足し合わせた後に平方することで平均をとった。これにより、落下球の輪郭を明確にした。

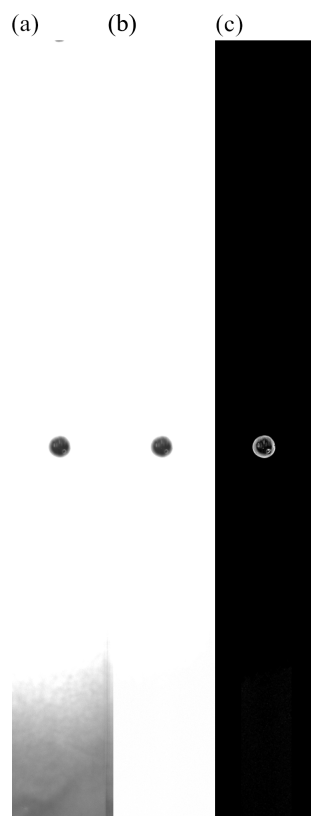


Fig 2.9: (a) Original image, (b) Image used by background processing and, (c) Image used by Sobel filter.

(a)			(b)		
1	0	-1	1	2	1
2	0	-2	0	0	0
1	0	-1	-1	-2	-1

Fig 2.10: (a) Horizontal (b) Vertical Sobel filter.

2.8.2 Hough 変換による円の検出

背景処理と Sobel filter 処理を行った画像 (Fig.2.9(c)) 内から球の検出を行うために, Hough 変換による円検出を用いた. 検出手順は, 以下に示す通りである. 円は中心座標と半径により一意に定まる. このことより, 円の中心座標 (x_c, y_c) , 半径 r による 1 つの円 $D(x_c, y_c, r)$ に関して考える. Fig.2.11 に示すように画像内における任意の座標 (x, y) を通る円は無数に存在し, それぞれの円の中心座標 C_1, C_2, C_3 と座標 (x, y) から円の半径 r が計算される. 無数に存在する座標 (x, y) を通る円の座標 D に座標 (x, y) の輝度値を加算する. この処理を画像内全ての画素に対して行う. 本実験における Hough 変換では輝度値の合計が最大となる座標 D から球の中心座標及び半径を決定した. この中心座標の時間変化より, 球の落下速度の計算を行った.

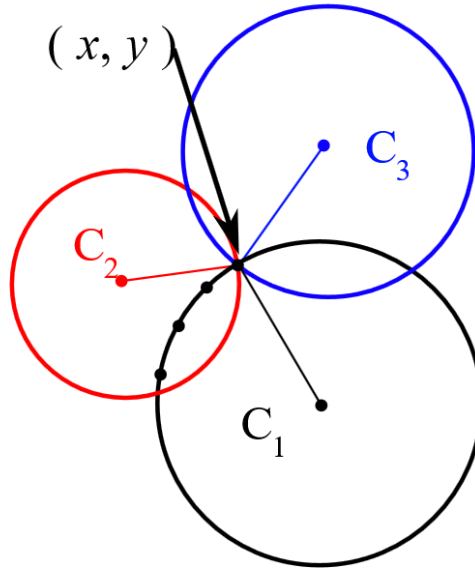


Fig 2.11: Outline of Hough transform.

3 溶液物性および圧力場の確認

3.1 粘度 計測結果

球落下実験を行う試験溶液として、異なる質量濃度の PAA 溶液を製作した。この製作した溶液の粘度特性を得るため、粘度計を用いて計測を行った。なお、溶媒中の溶質が不均一な状態や、混合時に混入する気泡が存在する状態では、溶液の粘度が正しく計測できない。十分な溶質拡散や脱泡のために時間を要するため、粘度計測は溶液作製直後ではなく、1 週間後に行った。それぞれの試料に対し、円錐回転子の回転数を変化させることでせん断速度を変化させ、粘度を各 5 回計測を行いその平均を求めた。

水道水の粘度計測結果を Fig.3.1(a) に示す。なお、縦軸は粘度、横軸はせん断速度を表す。第 2.2 節においても示したが、コーンロータの回転速度に応じて、液体のせん断速度を変化させた。その結果、粘度は $1.1\text{mPa}\cdot\text{s}$ でほぼ一定となっていた。これは、水がニュートン流体であり、粘度を比例係数とした速度勾配とせん断応力の比例関係となっているためである。理科年表 [30] によると、水道水の粘度は 20°C で $1.0\text{mPa}\cdot\text{s}$ となっており、適切に粘度計測が行われていたと考えられる。

水道水の場合と同様に PAA 溶液の粘度計測を行った結果を Fig.3.1(b) に示す。なお、縦軸は粘度の対数、横軸はせん断速度の対数を表す。ここで、粘度 μ はせん断速度 $\dot{\gamma}$ に対して、粘度定数 k 、指数 n を用い Power-law model に従うものとする、次式で表される [1]。

$$\mu = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1}. \quad (3.1)$$

式 (3.1) を用いて近似線計算を行った結果を、Table 3.1 に示す。溶液の濃度が濃いほど、擬塑性を示す n は小さくなり、より擬塑性が強くなった。粘性を表す k は、濃度の上昇に伴い大きくなった。これらより、PAA 濃度が高くなると、より擬塑性が強くなり、粘性が大きい流体となることが分かった。

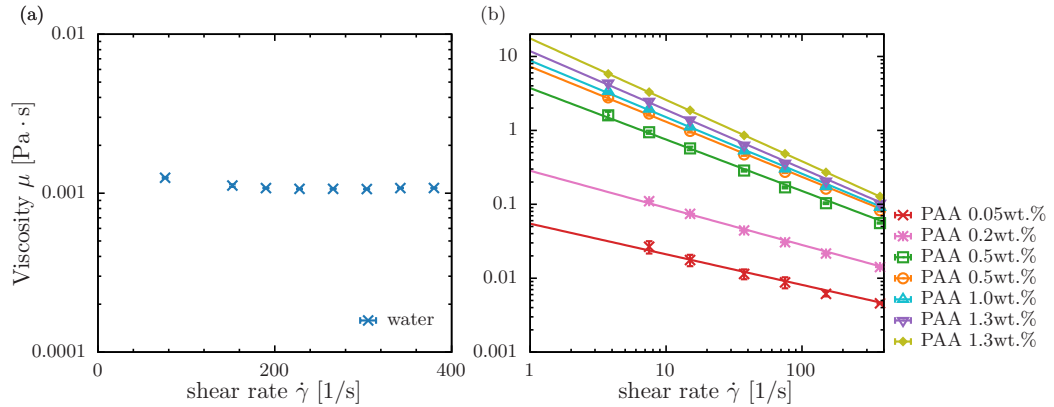


Fig 3.1: Viscosity versus shear rate for (a) tap water, (b) PAA solution.

Table 3.1: Parameters k and n in the Power-law model for each PAA solution at each concentration.

PAA[wt.%]	0.05	0.2	0.5	0.7	1.0	1.3	1.5
k	0.054	0.28	3.7	7.3	8.8	12	18
n	0.59	0.50	0.30	0.25	0.23	0.21	0.17

3.2 弾性率 計測結果

作製した PAA 溶液の応力に対する弾性特性を計測するため、それぞれの PAA 質量濃度における、貯蔵弾性率 G' 、損失弾性率 G'' の応力依存性を計測した。また、式 (2.13) より損失正接 $\tan(\eta)$ を求めた。計測結果を Fig.3.2 に示す。印可する応力が小さい場合、損失正接が 1 より小さく弾性による影響が強かった。また、応力を大きくすると、損失正接が 1 より大きくなり粘性による影響が強くなった。これより、応力が小さい場合は弾性による影響が、大きい場合は粘性による影響が大きくなることが分かった。加えて、濃度が濃くなると、貯蔵弾性率、損失弾性率共に大きくなった。これより濃度が高くなると溶液の粘弾性が強くなることが分かった。

ここで、損失正接が 1 となる応力 τ を τ_0 と定義する。各質量濃度における、 τ_0 を内挿によって求めた結果を Table.3.2 に示す。質量濃度が上昇すると、 τ_0 が大きくなった。このことより、濃度の増加に伴い、弾性による影響が大きくなる事が分かった。

Table 3.2: Relationship between concentration and τ_0 for PAA solution.

PAA[wt.%]	0.05	0.2	0.5	0.7	1.0	1.3	1.5
$\tau_0[\text{Pa}]$	0.082	0.11	9.9	18	22	40	55

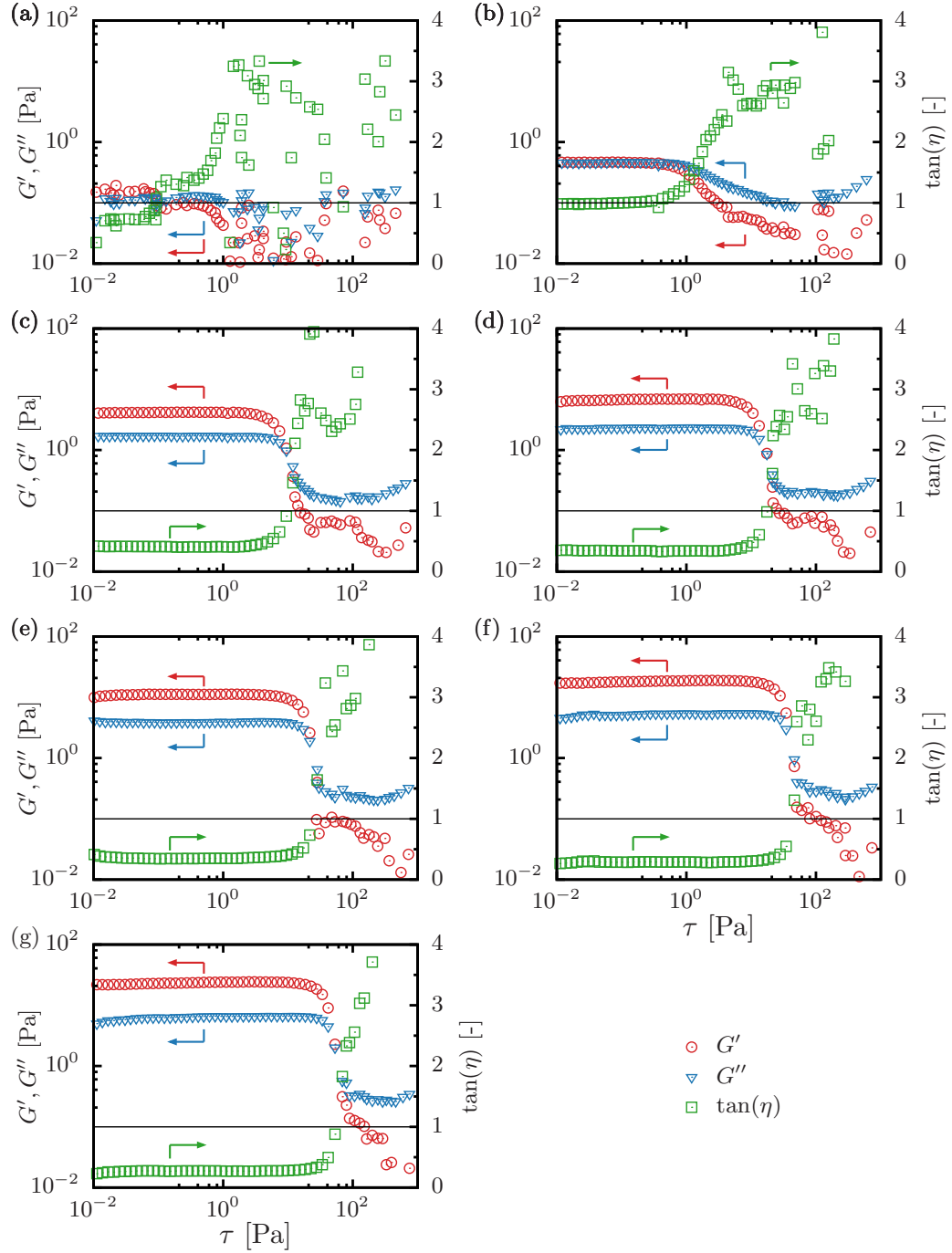


Fig 3.2: Stress dependence of storage and loss elastic moduli for (a)0.05wt.% (b)0.2wt.% (c)0.5wt.% (d)0.7wt.% (e)1.0wt.% (f)1.3wt.% (g)1.5wt.%.

3.3 圧力振幅 計測結果

それぞれの質量濃度において、超音波圧力振幅の計測を行った。超音波圧力振幅の結果を Fig.3.3 に示す。縦軸は水槽液面からの深さ、横軸は圧力振幅である。図より、容器内に形成される圧力場の圧力変化量が周期的な波として存在していることが分かる。これは音波の共振によって生じていると考えられる。この結果より、圧力振幅 ΔP の y 方向平均値 $\Delta \bar{P}$ を Table 3.3 に示す。

Table 3.3: Averaged value of pressure amplitude.

PAA[wt.%]	0.05	0.2	0.5	0.7	1.0	1.3	1.5
$\Delta \bar{P}$ [kPa]	112.2	129.7	143.8	150.3	156.2	199.5	191.1

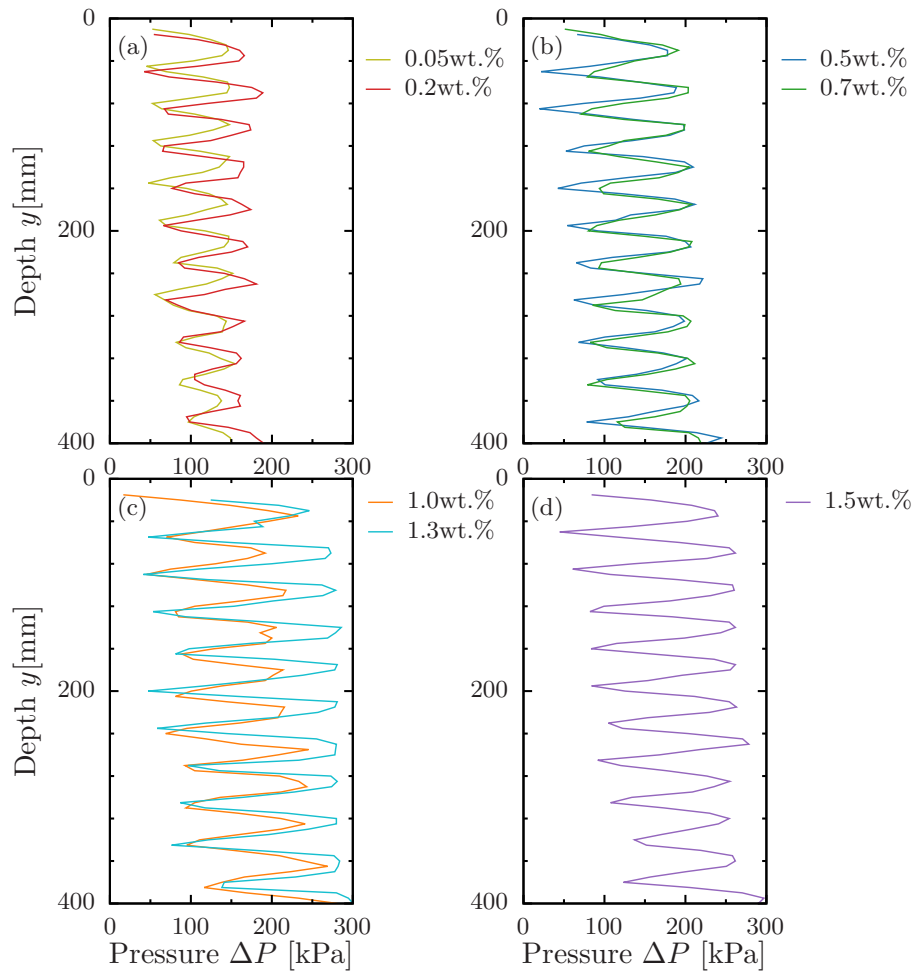


Fig 3.3: Average pressure amplitude in (a)0.05wt.% and 0.2wt.%, (b)0.5wt.% and 0.7wt.%, (c)1.0wt.% and 1.3wt.%, (d)1.5wt.% PAA solution.

4 理論

2.1 節に示した通り，本研究の系は超音波照射された擬塑性流体中を球が落下する系である．はじめに，擬塑性流体中を球が落下する理論を示すことで，球の終端速度の理論式を得る．続いて，球の落下によるせん断速度より，球の落下による応力を見積もる．最後に，超音波照射された擬塑性流体中を落下する球の高速化のメカニズムより，高速化の理論式を見積もる．

4.1 擬塑性流体中における球の落下

本研究の系において，代表速度，代表長さとして，落下球の終端速度 U_T ，球直径 $D = 2a$ を選ぶ．Power-law model (式 (3.1)) が適用できる流体中における粒子のレイノルズ数は次式で表される [1, 29]．

$$Re = \frac{\rho_1 (2a)^n U_T^{2-n}}{k}. \quad (4.1)$$

ここで， ρ_1 は溶液密度である．今回の実験結果の代表例（銅球，直径 10mm，PAA1.0wt.%）において，溶液密度 $\rho_1 \approx 1000 \text{ kg/m}^3$ ， $2a = 0.01 \text{ m}$ ， $U_T \approx 0.2 \text{ m/s}$ ， $k = 8.8 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ ， $n = 0.23$ である．この条件より，式 (4.1) より $Re \approx 2.3$ と概算でき，粒子付近ではストークス流れに従うと考えられる．ゆえに，慣性に比べて粘性が支配的であると考えられる．

超音波の伝播に関して，音波の圧力変動の時間スケールは $O(10^{-5}) \text{ s}$ である．一方で，球の落下現象は $O(10^{-2}) \text{ m}$, $O(10^0) \text{ s}$ となり，圧力変動の時間スケールは非常に短い．球の落下に関しては，落下時間スケールで粗視化した平均的な挙動に着目する．球周囲に存在する非圧縮性流体の単位体積の運動方程式について考える．球によって誘起される応力テンソルを σ ，流体の密度を ρ ， s 周囲流体の速度ベクトルを \mathbf{v} ，体積力を \mathbf{X} とすると，

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \mathbf{X} + \nabla \cdot \sigma, \quad (4.2)$$

となる．また，非圧縮性流体を仮定しているため連続の式が成り立つ．

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0. \quad (4.3)$$

粒子重心位置から見た移動座標系では，式 (4.2) の左辺が，

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} - \mathbf{U}_T \cdot \nabla) \mathbf{v}, \quad (4.4)$$

と展開できる．流れは十分に発達し，定常状態であると仮定することで，式 (4.4) の右辺第 1 項の時間微分項は 0 となる．低レイノルズ数かつ Stokes 近似を用いることにより，慣性項は粘性項より十分に小さいと仮定することができる．これにより，式 (4.4) の右辺第 2 項の慣性項は無視することができる．加えて，粒子周囲流体には密度差がないため，静水圧分を除いた圧力を使って応力 σ と書くと，体積力 \mathbf{X} は 0 となる．これらより，式 (4.2), (4.4) を用いると，

$$\nabla \cdot \sigma = 0, \quad (4.5)$$

といった関係が導かれる．

ある球体領域において，ガウスの発散定理より，

$$\int_S \sigma \cdot \mathbf{n} dS = \int_V \nabla \cdot \sigma dV, \quad (4.6)$$

といった関係が成り立つ．ここで， \mathbf{n} は球領域表面に対する法線ベクトル， S は球の表面積， V は球の体積を表す．式 (4.5) より，式 (4.6) の右辺は 0 である．式 (4.5),(4.6) は任意の流体体積に関して成り立つため，球の表面 ($r = a$) と球外部の任意の領域 ($r > a$) において，以下の関係が成り立つ．

$$\int_{r=a} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{e}_r dS = \int_r \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{e}_r dS. \quad (4.7)$$

ここで， $\mathbf{n} = \mathbf{e}_r$ とする．この式は，任意の領域において，面積力が釣り合うことを示す． $r = a$ における時間平均応力を $\langle \sigma \rangle_a$ ， r における時間平均応力を $\langle \sigma \rangle_r$ とそれぞれする．球の表面積 $S = 4\pi r^2$ であるので，式 (4.7) は，

$$4\pi a^2 \langle \sigma \rangle_a = 4\pi r^2 \langle \sigma \rangle_r, \quad (4.8)$$

となる．球表面において，球の体積力と表面力は釣り合うので，

$$4\pi a^2 \langle \sigma \rangle_a = \frac{4}{3}\pi a^3 \Delta \rho g, \quad (4.9)$$

となる．ここで，球と流体の密度差 $\Delta \rho$ ，重力加速度 g である．式 (4.8),(4.9) より，

$$\langle \sigma \rangle_r = \frac{a^3 \Delta \rho g}{3r^2}, \quad (4.10)$$

となる．低レイノルズ数で粘性項が支配的であるため，

$$\langle \sigma \rangle_r \sim \mu \dot{\gamma}, \quad (4.11)$$

と概算することができる．Power-law model が適用できる領域での議論を行っているため，式 (3.1),(4.11) より，

$$\dot{\gamma} \sim \left(\frac{a^3 \Delta \rho g}{3r^2 k} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (4.12)$$

と概算される．この系において，エネルギー散逸に関して考える．位置エネルギーと粘性によるエネルギー散逸が釣り合うため，単位時間あたりに系全体が失うエネルギーバランスより，以下の式が成立する．

$$\int_{r>a} \bar{\epsilon} dV = 4\pi \int_a^\infty \bar{\epsilon} r^2 dr = \frac{4}{3}\pi a^3 \Delta \rho g U_T, \quad (4.13)$$

ここで， U_T は球の終端速度， $\bar{\epsilon}$ は時間平均された単位体積当たりのエネルギー散逸である．また，粘性散逸 $\bar{\epsilon}$ は，以下の様に概算される．

$$\bar{\epsilon} \sim \langle \sigma \rangle_r \dot{\gamma} \sim \mu \dot{\gamma}^2 \sim \frac{\langle \sigma \rangle_r^2}{\mu}, \quad (4.14)$$

式 (4.11),(4.13),(4.14) より，超音波照射されていないときの終端速度 U_{off} は

$$U_{\text{off}} \sim \frac{a^3 \Delta \rho g}{3} \int_a^\infty \frac{dr}{\mu r^2}, \quad (4.15)$$

と見積もられる．式 (3.1),(4.12),(4.15) より，終端速度は下記のように書き直される．

$$U_{\text{off}} \sim \frac{a^3 \Delta \rho g}{3} \int_a^\infty \frac{dr}{\mu r^2} \sim \left(\frac{\Delta \rho g}{3k} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{2-n} a^{\frac{n+1}{n}}. \quad (4.16)$$

4.2 擬塑性流体中における球の落下による応力

擬塑性流体中を落下する球の終端速度を U_T とする., 球の終端速度 U_T と半径 a を用いて,

$$\dot{\gamma} \sim \frac{U_T}{a}, \quad (4.17)$$

と見積もられる. 球の落下による粘度 μ_U は, 式 (3.1) の Power-law model より,

$$\mu_U \sim k \left(\frac{U_T}{a} \right)^{n-1}, \quad (4.18)$$

と見積もることができる. これより, 式 (4.11) より球の落下による応力 τ_U は,

$$\tau_U \sim k \left(\frac{U_T}{a} \right)^n, \quad (4.19)$$

と見積もられる.

4.3 超音波照射に伴う球の高速化

超音波照射された本研究の系における, 落下球の高速化に関して考える. 音響境界層における, せん断速度の代表値は次のように概算される.

$$\dot{\gamma} \sim \frac{u}{\delta}. \quad (4.20)$$

ここで, u は音波によって加振される流体粒子速度, δ は音響境界層厚さを表す.

流体粒子速度 u に関して, 球の落下方向を z とすると運動方程式は次式となる.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial P}{\partial z} = 0. \quad (4.21)$$

ここで, t は時刻, P は圧力である. また, 連続の式は圧縮性流体と仮定すると以下の式となる.

$$\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{\rho_1 c^2} \frac{\partial P}{\partial t} = 0. \quad (4.22)$$

音波の周波数は一定であり, 容器内の圧力変化は音波に依存するので, 以下の式の近似を用いる.

$$\frac{\partial u}{\partial t} \sim u f, \quad (4.23)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} \sim \Delta P, \quad (4.24)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \sim \frac{1}{\lambda}. \quad (4.25)$$

ここで, ΔP は音響圧, λ は超音波の波長である. 式 (4.23),(4.24),(4.25) を用いて, 式 (4.21) の近似を行うと次式のようなになる.

$$u f \sim \frac{\Delta P}{\rho_1 \lambda}. \quad (4.26)$$

周波数 f , 波長 λ , 音速 c の関係から式 (4.26) を書き換えると次式となる.

$$u \sim \frac{\Delta P}{\rho_1 c}. \quad (4.27)$$

式 (4.20) より, Power-law model(式 (3.1)) を適用すると, 音響境界層粘度 μ_{ABL} は次式の様に見積もられる.

$$\mu_{ABL} \sim k \left(\frac{u}{\delta} \right)^{n-1}, \quad (4.28)$$

よって, 音響境界層厚さ δ は,

$$\delta \sim \sqrt{\frac{\mu_{ABL}}{\pi \rho_h f}}, \quad (4.29)$$

と見積もられる [31, 32]. ここで, 周波数 f である. よって, 式 (4.29) を式 (4.28) に代入すると, 次のように表される.

$$\delta \sim \left(\frac{k (\Delta P)^{n-1}}{\pi \rho_1^n c^{n-1} f} \right)^{\frac{1}{n+1}}. \quad (4.30)$$

ここで, 音速 c である. 音響境界層粘度 μ_{ABL} とすると超音波照射下における終端速度 U_{on} は, 式 (4.16) より,

$$U_{\text{on}} \sim \frac{a^3 \Delta \rho g}{3} \int_a^\infty \frac{dr}{\mu_{ABL} r^2} \sim \frac{a \Delta \rho g}{3 \mu_{ABL}}, \quad (4.31)$$

と見積もられる. 終端速度 U_T における, 粘度 μ_U とする. 式 (4.16),(4.31) より, 超音波照射の有無による終端速度比は,

$$\frac{U_{\text{on}}}{U_{\text{off}}} \sim \frac{\mu_U}{\mu_{ABL}} \frac{\delta}{a}, \quad (4.32)$$

と表される.

5 球密度による高速化への影響

超音波照射された擬塑性流体中を落下する球における高速化に関して、球密度による影響を考えるため、落下球の密度を変化させて実験を行った。実験条件を Table 2.7 に示す。落下球の高速化に関して、式 (4.32) より球径による影響を受けるが、今回の実験条件において密度変化による影響よりも十分に小さいものとして、球径は同一として考える。

超音波照射された擬塑性流体中に、密度を変化させ球を落下させた結果を Fig. A.1-A.4 に示す。この結果より、超音波照射されていない状態の終端速度を求めた結果を Fig. 5.1 に示す。縦軸は終端速度 U_T 、横軸は密度差 $\Delta\rho$ である。密度差が大きくなると、終端速度が大きくなった。超音波照射されていない落下球の理論式 (4.16) より、落下球と溶液の密度差のみをパラメータとして考えると終端速度は次式で表される。

$$U_{\text{off}} \sim (\Delta\rho)^{\frac{1}{n}}. \quad (5.1)$$

式 (5.1) を用いて、超音波照射されていない落下球の終端速度を整理した結果を Fig. 5.2 に示す。縦軸は終端速度 U_{off} 、横軸は密度差のみによる影響を考慮した $(\Delta\rho)^{(1/n)}$ である。本実験において、 $0.17 \leq n \leq 0.59$ であり、式 (5.1) において密度差の指数部は $1.69 < 1/n < 5.89$ となる。ゆえに密度差 $\Delta\rho$ が増加すると終端速度 U_{off} も増加したと考えられる。

また、濃度ごとに高速化度合いを求めた結果を Fig. 5.3 に示す。縦軸は高速化度合 $U_{\text{on}}/U_{\text{off}}$ 、横軸は密度差 $\Delta\rho$ である。PAA 濃度 0.2, 1.5wt.% においてはあまり高速化が見られなかった。PAA 濃度 0.5, 0.7wt.% において、密度差が大きくなると高速化が顕著にみられた。一方で、PAA 濃度 1.0wt.% においては、密度差が大きくなると高速化が顕著にみられた。PAA 濃度 1.3wt.% においては、全体的に高速化がみられ、密度差による影響があまり顕著にみられない。

超音波照射された擬塑性流体中を落下する球の高速化に対する、落下球の密度による影響を考える。4.3 節にて示した、超音波照射された落下球の終端速度の理論式 (4.31) と超音波されていない落下球の終端速度の理論式 (4.16) より、

$$\frac{U_{\text{on}}}{U_{\text{off}}} \sim \left(\frac{\Delta\rho g}{3} \right)^{\frac{n-1}{n}} \cdot \frac{2-n}{n} \cdot \frac{\delta}{\mu_{ABL}} \cdot \left(\frac{k}{a} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (5.2)$$

となる。本実験において、落下球と溶液の密度差のみをパラメータとして考えるため、超音波照射に伴う高速化は式 (5.2) より次式で表される。

$$\frac{U_{\text{on}}}{U_{\text{off}}} \sim (\Delta\rho)^{\frac{n-1}{n}}. \quad (5.3)$$

式 (5.3) を用いて、落下球と流体の密度差と超音波照射による高速化度合いを整理した結果を Fig. 5.4 に示す。縦軸は高速化度合い $U_{\text{on}}/U_{\text{off}}$ 、横軸は密度差のみによる影響を考慮した $\Delta\rho^{((n-1)/n)}$ である。本実験において、式 (5.3) の指数部は $-4.9 < (n-1)/n < -0.69$ となり、密度差 $\Delta\rho$ が増加すると高速化度合い $U_{\text{on}}/U_{\text{off}}$ は減少する。PAA 濃度 0.2wt.% において、あまり高速化が見られず密度差による影響が見られなかった。PAA 濃度 0.5, 0.7wt.% において、密度差が大きくなると高速化が顕著にみられ、式 (5.3) の理論通りとなった。一方で、PAA 濃度 1.0wt.% においては、理論式とは異なり、密度差が大きくなると高速化が顕著にみられた。これは密度差以外の要因によるものだと考えられる。同様に、PAA 濃度 1.3wt.% においては、全体的に高速化がみられ、密度差以外による影響が大きいと考えられる。以上より、超音波照射による高速化に対して、密度差による影響が存在するが、高速化が見られる低濃度域 (0.5, 0.7wt.%) のみに顕著にみられ、それ以上の濃度では密度差以外による要因が大きく影響を与えていると考えられる。

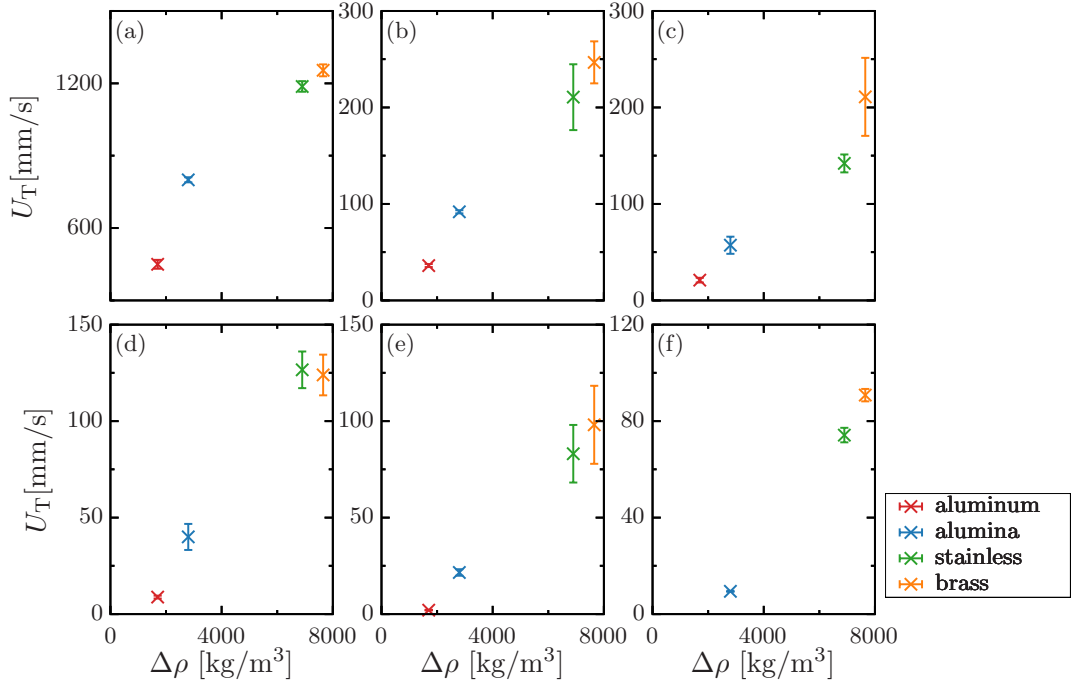


Fig 5.1: Termination velocity by density difference in PAA solution (a)0.2wt.%, (b)0.5wt.%, (c)0.7wt.%, (d)1.0wt.%, (e)1.3wt.%, (f)1.5wt.%.

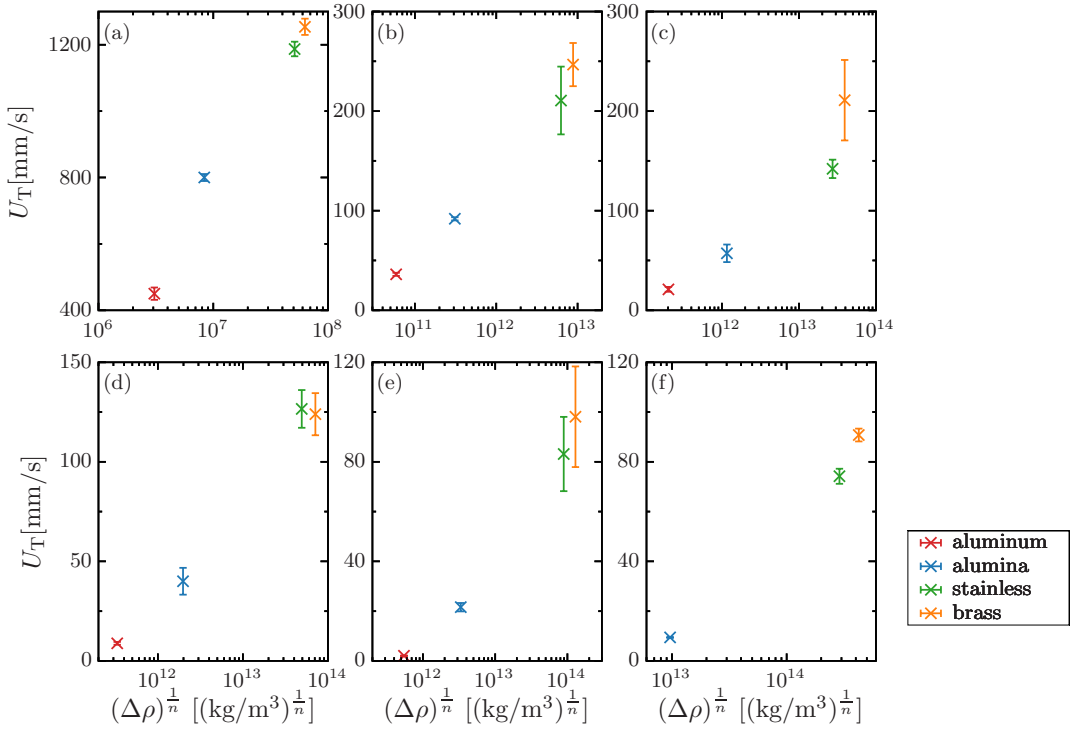


Fig 5.2: Termination velocity by density difference by index n in PAA solution (a)0.2wt.%, (b)0.5wt.%, (c)0.7wt.%, (d)1.0wt.%, (e)1.3wt.%, (f)1.5wt.%.

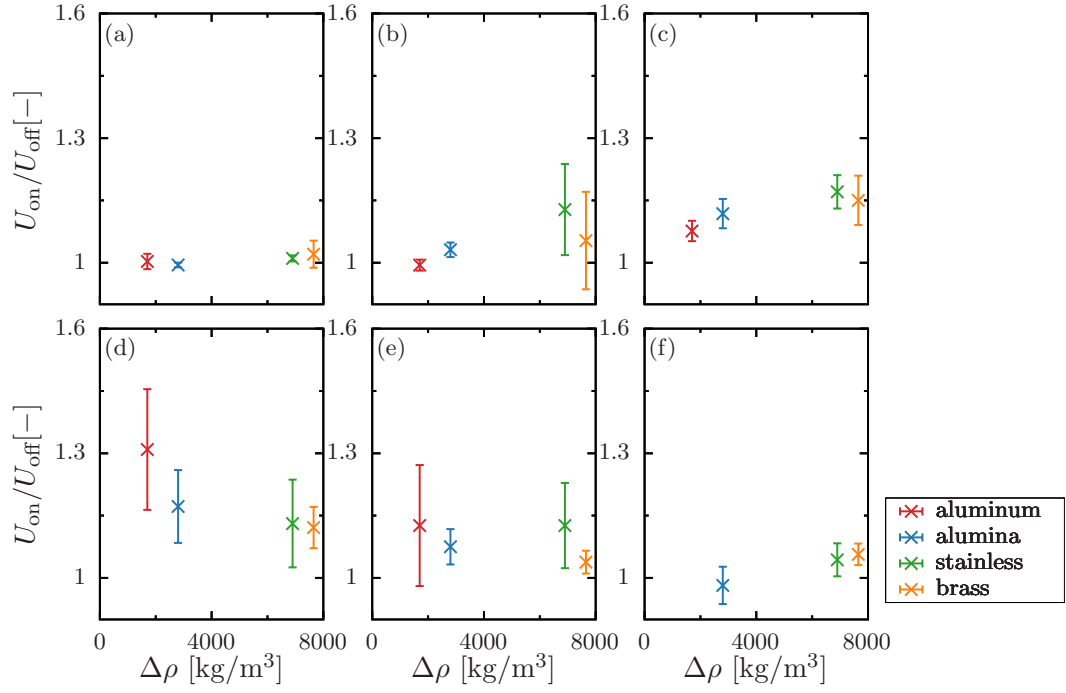


Fig 5.3: Velocity ratio versus density difference in PAA solution (a)0.2wt.%, (b)0.5wt.%, (c)0.7wt.%, (d)1.0wt.%, (e)1.3wt.%, (f)1.5wt.%.

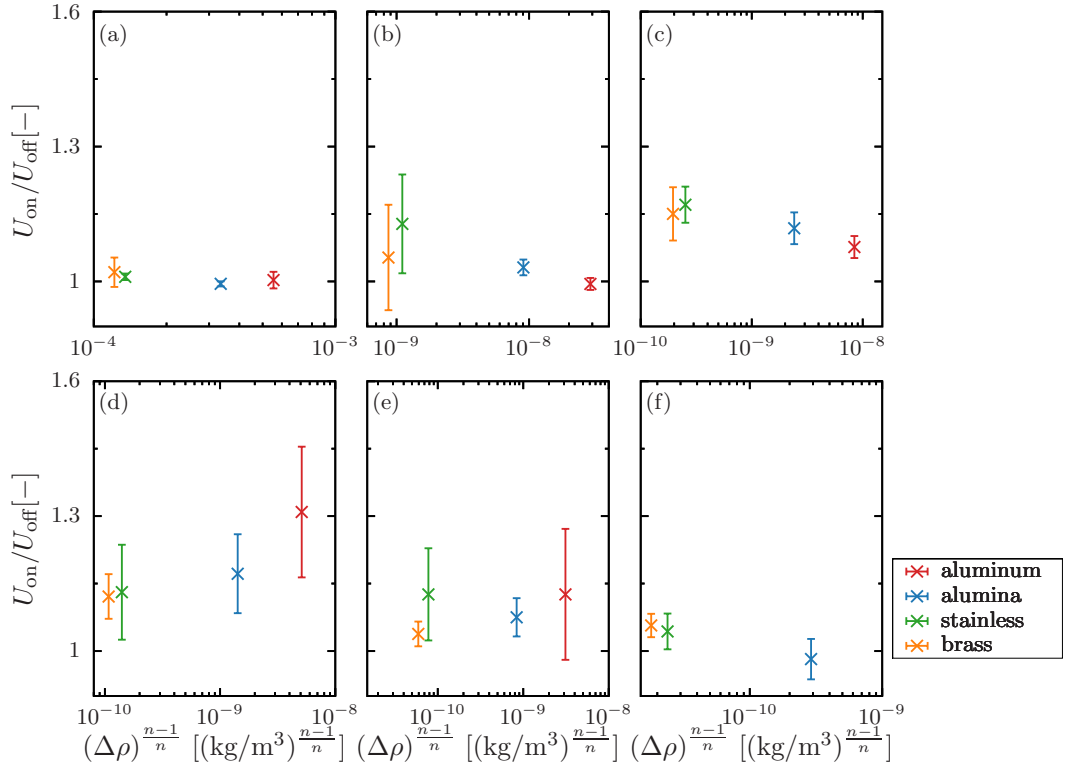


Fig 5.4: Velocity ratio versus density difference by index n in PAA solution (a)0.2wt.%, (b)0.5wt.%, (c)0.7wt.%, (d)1.0wt.%, (e)1.3wt.%, (f)1.5wt.%.

6 溶液濃度による高速化への影響

超音波照射された擬塑性流体中を落下する球における高速化に関して、溶液濃度による影響を考慮するため、溶液濃度を变化させて実験を行った。実験条件を Table.2.7 に示す。落下球の高速化に関して、式 (4.32) より球径による影響を受けるが、今回の実験条件において濃度変化による影響よりも十分に小さいものとして、球径は同一であるとして考える。

PAA 溶液濃度と終端速度の関係を Fig.6.1 に示す。溶液濃度が濃くなると、終端速度が遅くなった。これは、濃度が濃くなると粘度 μ が大きくなり、粘性による抵抗が大きくなるためであると考えられる。式 (4.15) において、濃度が濃くなると k が大きく、 n が小さくなるためである。PAA 溶液濃度と高速化度合の関係を Fig.6.2 に示す。縦軸は高速化度合 U_{on}/U_{off} 、横軸は PAA 溶液濃度である。アルミニウム、アルミナにおいては PAA 濃度 1.0wt.% が高速化の極大であった。一方でステンレスは明瞭な高速化の極大が見られなかったが、PAA 濃度 0.7-1.3wt.% のいずれかに高速化の極大が存在すると考えられる。また、真鍮において PAA 濃度 0.7wt.% が高速化の極大であった。これらより、濃度が濃くなると高速化が顕著になるが、濃すぎると高速化がみられにくくなることが分かった。

式 (5.2) を用いて、落下球の密度、溶液濃度の影響を整理した結果を Fig.6.3 に示す。縦軸は高速化度合 U_{on}/U_{off} 、横軸は密度変化、濃度変化による影響を考慮した値である。アルミニウムにおいては濃度の上昇に伴い高速化が顕著となる正の相関が見られた。アルミナにおいて、PAA 濃度 1.0wt.% で高速化が顕著になり、それ以上の濃度においては高速化がみられにくくなった。ステンレスにおいて、濃度との相関が不明瞭であった。真鍮において、PAA 濃度 0.7wt.% の濃度で高速化が顕著になった。これらをまとめた結果を Fig.6.4 に示す。超音波照射による高速化度合は、密度変化、粘度変化に対して弱い正の相関がみられた。濃度変化による高速化度合への影響は存在するが、別の要因が生じているため弱い正の相関となったと考えられる。本研究 9 章において、高速化への影響を与えていると考えられる、弾性による影響の議論を行う。

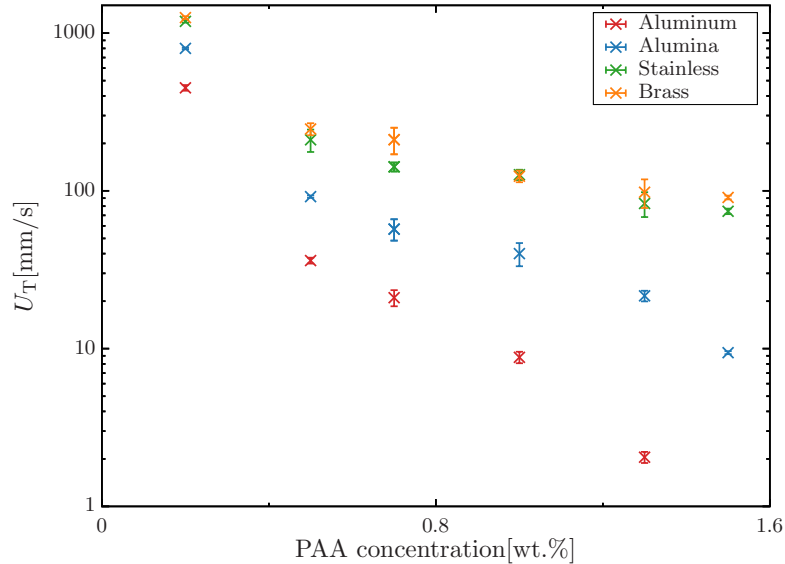


Fig 6.1: Termination velocity in PAA solution concentration.

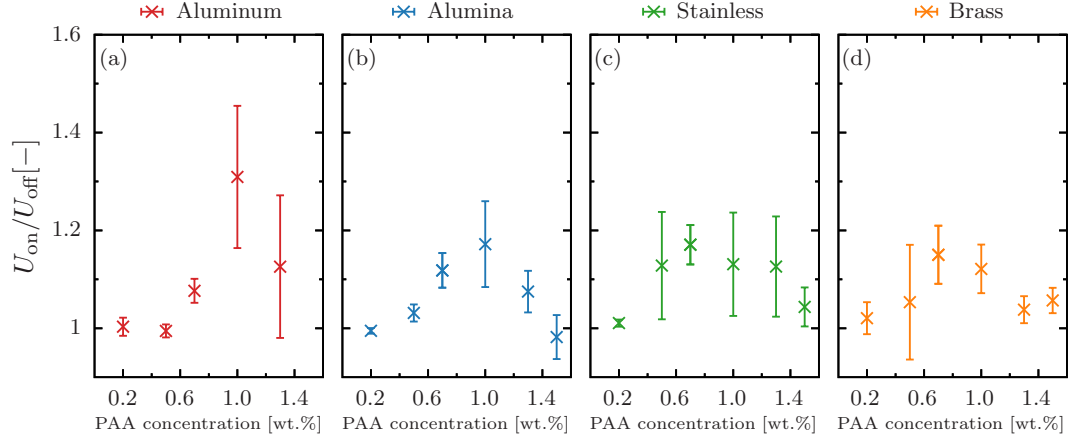


Fig 6.2: Velocity ratio in PAA solution concentration (a)Aluminum, (b)Alumina, (c)Stainless, (d)Brass.

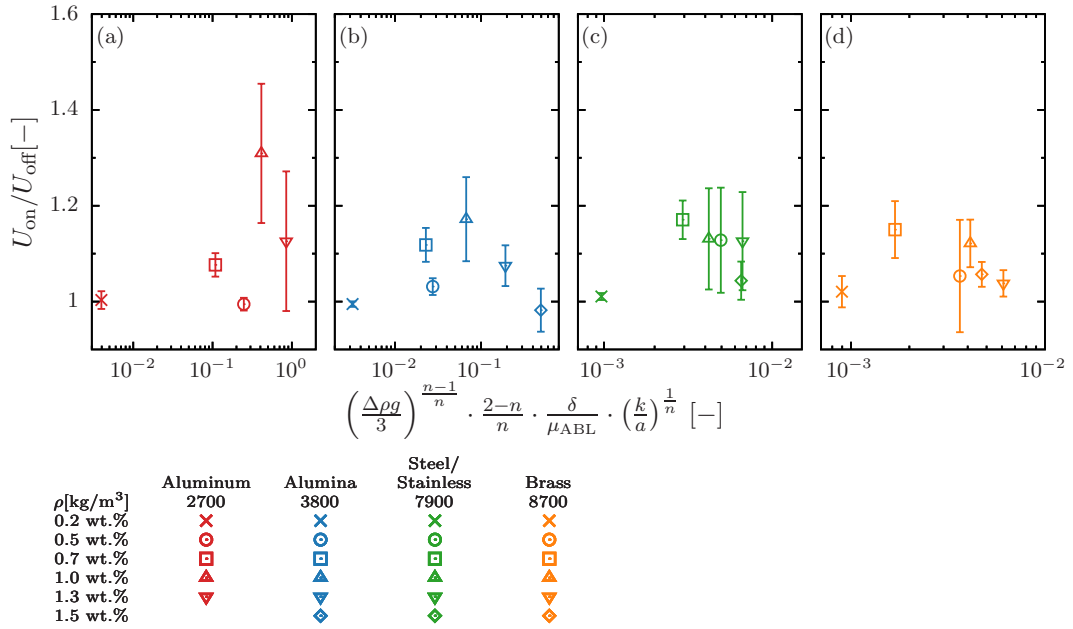


Fig 6.3: Velocity ratio in PAA solution concentration (a)Aluminum, (b)Alumina, (c)Stainless, (d)Brass.

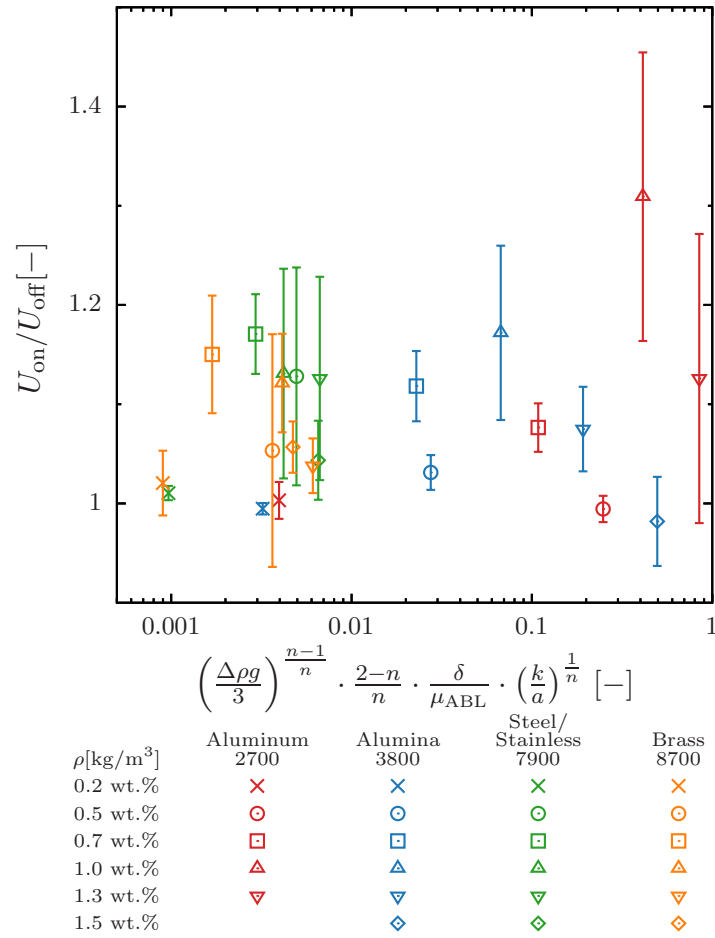


Fig 6.4: Relationship between density, viscosity and terminal velocity.

7 球径による高速化への影響

先行研究より拡張した領域における球径による影響を考えるため、直径を変化させた鋼球を用いて落下球実験を行った。実験条件を、Table.2.8 に示す。それぞれの質量濃度の場合に分けて球径による影響の検討を行う。

7.1 PAA1.0wt.%の場合

PAA1.0wt.%における球径変化の実験結果を Fig.A.6 に示す。その結果より、落下球の直径と終端速度の関係を Fig.7.1(a) に示す。落下球の直径が大きくなると、終端速度が指数関数的に高速化した。また、直径と超音波照射による高速化度合の関係を Fig.7.1(b) に示す。落下球の直径 10mm をピークとして超音波照射による高速化が見られた。

これらより、式 (4.32) を用いて整理した結果を Fig.7.2 に示す。Fig.7.2(a) においては先行研究である岩室 [26] の実験結果全範囲を、Fig.7.2(b) においては今回の実験結果によって得られた範囲を拡大した結果を示す。落下球の直径 10mm 以上において、粘度比と音響境界層を球の半径で規格化した値は、超音波照射による球の高速化度合いに対して正の相関関係にあった。一方で先行研究において示されていた範囲においては、高速化が抑制され非常に小さな値となっていた。この要因として、先行研究である岩室 [26] において弾性による影響が示唆されている。本研究 9 章にて、それらの議論を行う。

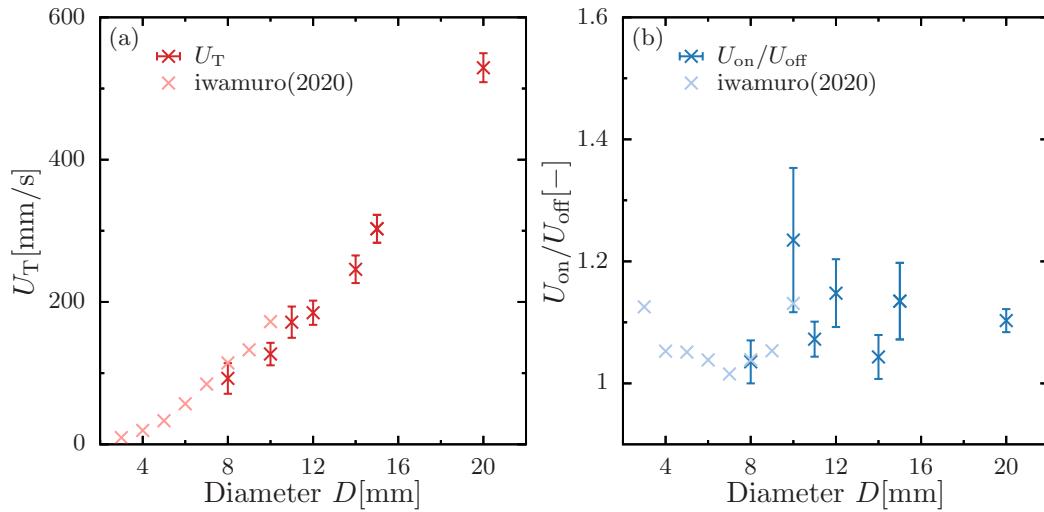


Fig 7.1: Relationship between diameter and (a)terminal velocity, (b)velocity rato.

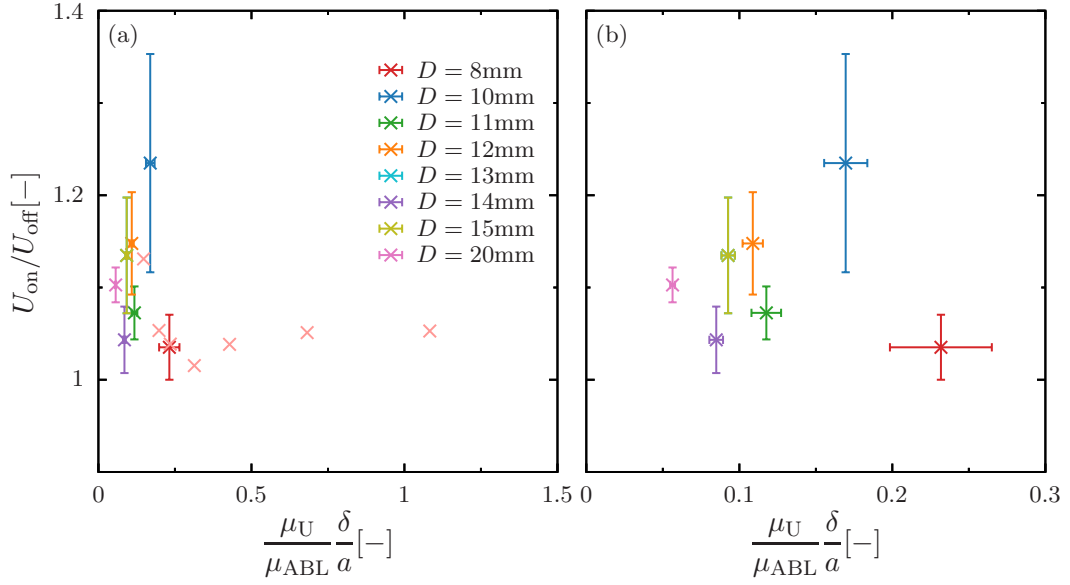


Fig 7.2: Relationship between velocity ratio and viscosity ratio, the acoustic boundary layer thickness, radius (a)with Iwamuro (2020), (b)without Iwamuro (2020).

7.2 PAA0.5wt.%の場合

PAA0.5wt.%における球径変化の実験結果を Fig.A.5 に示す．その結果より，落下球の直径と終端速度の関係を Fig.7.3(a) に示す．落下球の直径が大きくなると，PAA1wt.%の場合と同様に終端速度が指数関数的に高速化した．また，直径と超音波照射による高速化度合いの関係を Fig.7.3(b) に示す．PAA1wt.%の場合と同様に落下球の直径 10mm をピークとして超音波照射による高速化が見られた．

式 (4.32) を用いて高速化度合を整理した結果を Fig.7.4 に示す．落下球の直径が 10mm 以上において粘度比と音響境界層を球の半径で規格化した値は，超音波照射による球の高速化度合いに対して正の相関関係にあった．一方で，落下球の直径 5mm は高速化度合いが非常に小さくなった．このことに関して，他の結果も含めて，本研究 8,9 章にて，議論を行う．

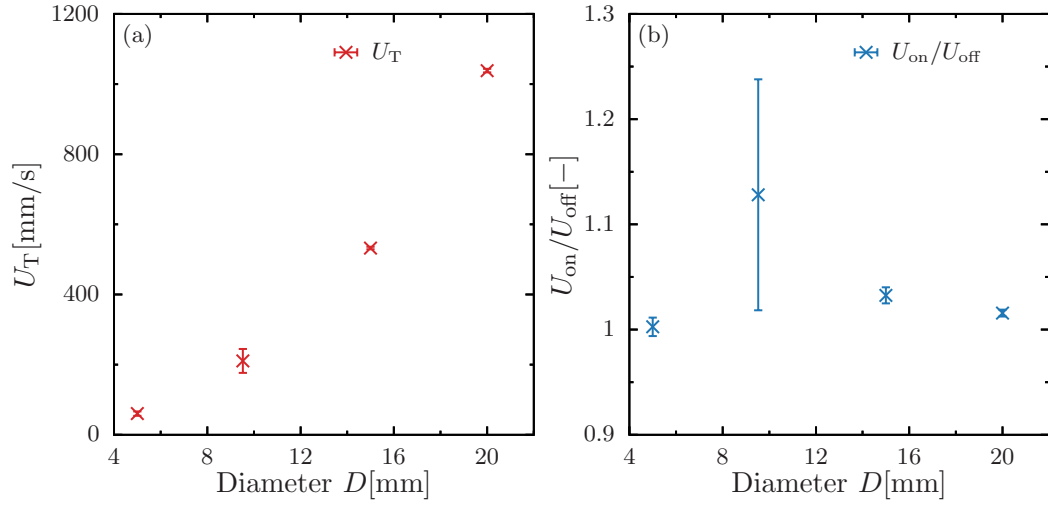


Fig 7.3: Relationship between diameter and (a)terminal velocity, (b)velocity ratio.

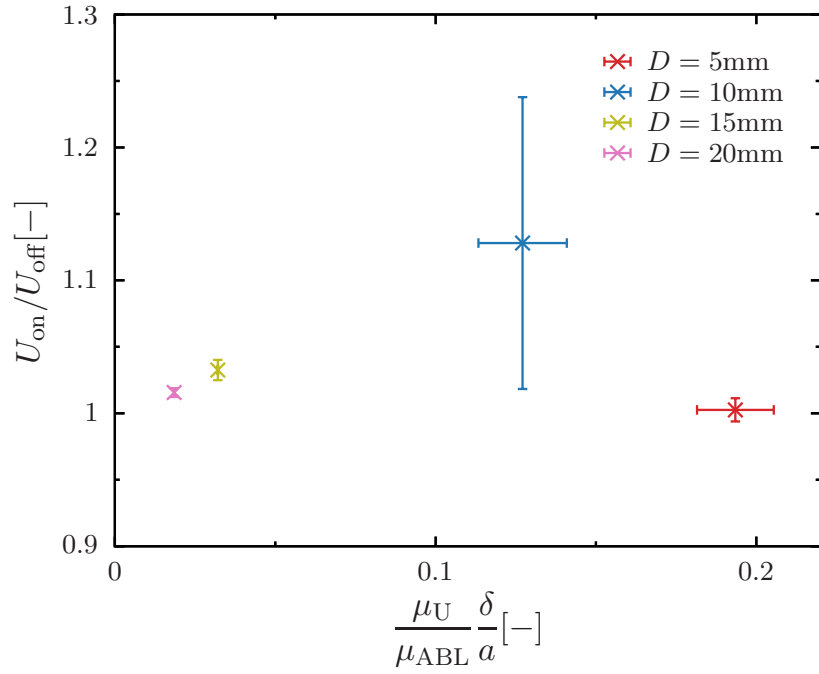


Fig 7.4: Relationship between velocity ratio and viscosity ratio, the acoustic boundary layer thickness, radius.

7.3 PAA0.2,1.3wt.%の場合

PAA0.2,1.3wt.%における球径変化の実験結果を Fig.A.7 に示す。その結果より、落下球の直径と終端速度の関係を Fig.7.5(a) に示す。落下球の直径が大きくなると、他の質量濃度と同様に終端速度が高速化した。また、直径と超音波照射による高速化度合いの関係を Fig.7.5(b) に示す。PAA0.2wt.%において、顕著な高速化は見られなかった。一方で、PAA1.3wt.%において、落下球の直径が小さい場合に高速化が見られた。

式 (4.32) を用いて高速化度合いを整理した結果を Fig.7.6 に示す。粘度比と音響境界層厚さを球の半径で規格化した値は、超音波照射による球の高速化度合いに対して正の相関関係にあった。他の結果も含めて、本研究 8,9 章にて、より詳しい議論を行う。

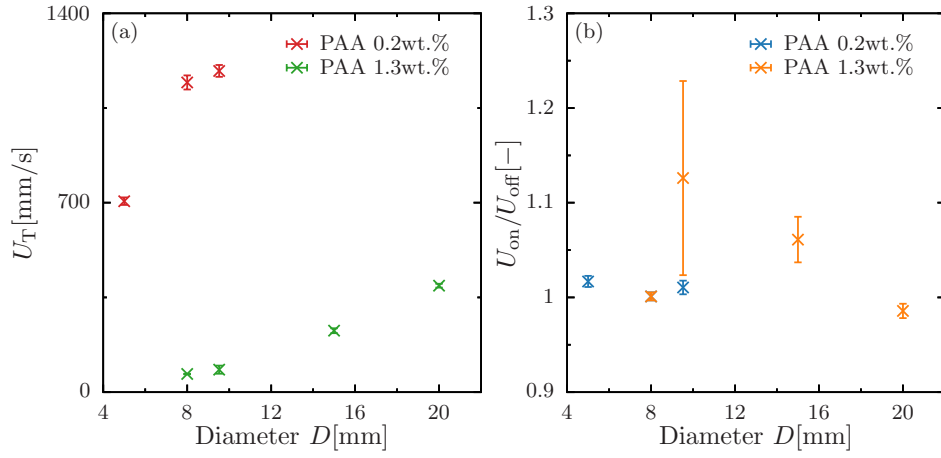


Fig 7.5: Relationship between diameter and (a)terminal velocity, (b)velocity ratio.

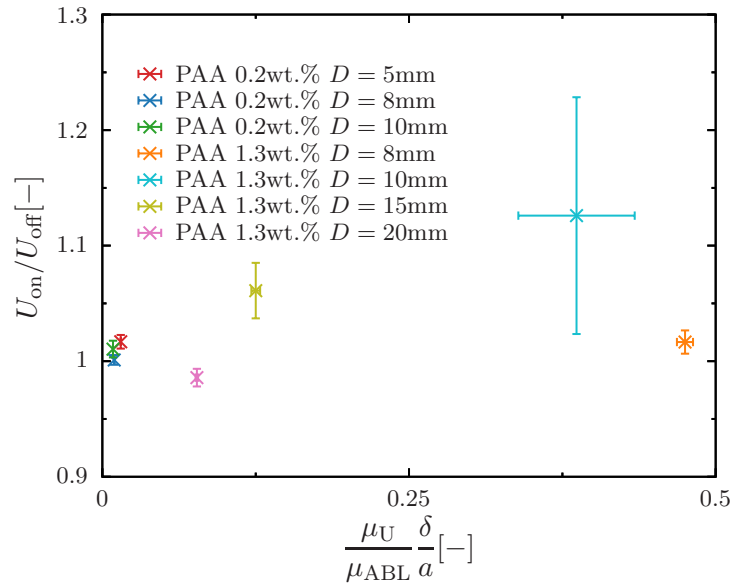


Fig 7.6: Relationship between velocity ratio and viscosity ratio, the acoustic boundary layer thickness, radius.

8 粘度による高速化への影響

先行研究である岩室 [26] において，超音波照射による高速化は，球の落下による粘度 μ_U と超音波照射による音響境界層内粘度 μ_{ABL} の比に，落下球の半径 a で規格化された音響境界層内厚さ δ を乗じた値で整理できると示された．この手法を用いて，5,6,7 章に示した各実験結果を整理する．式 (4.32) より，球の落下による粘度 μ_U と超音波照射による音響境界層内粘度 μ_{ABL} の比に，落下球の半径 a で規格化された音響境界層内厚さ δ を乗じた値と高速化度合いの関係を Fig.8.1 に示す．

横軸が 0.1 までの範囲において，超音波照射による高速化度合いと粘度比と音響境界層を球の半径で規格化した値は，正の相関関係にある．しかし，0.1 を越えるとばらつきが大きくなり，まったく高速化が見られない条件も存在した．その後，横軸が増加していくと 0.1 以下より緩やかに高速化が現れるようになった．これより，超音波照射による高速化に関して，横軸の値が 0.1 より小さい値では正の相関がみられるが，それ以上では粘度，音響境界層厚さ，落下球の半径以外の要因で超音波照射による高速化が抑制されていると考えられる．落下球の半径が小さい場合，擬塑性流体の粘度が大きい場合，落下球と流体の密度差が小さい場合，横軸の値が大きくなる．これらはすべて，擬塑性流体中を球が落下する際の終端速度が遅い場合である．この要因として，先行研究である岩室 [26] において弾性による影響が示唆されている．本研究 9 章にて，それらの議論を行う．

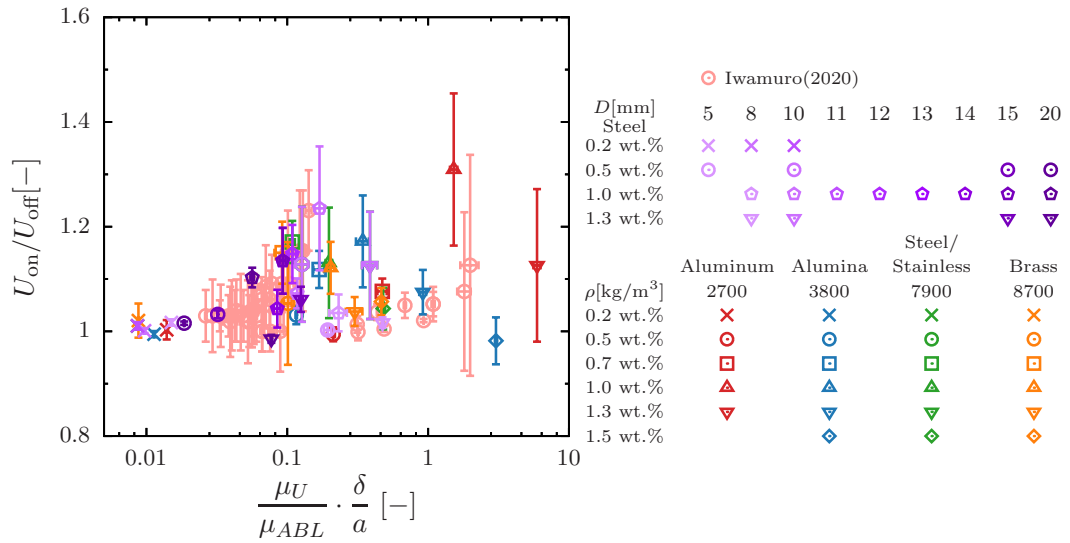


Fig 8.1: Relationship between velocity ratio and the inverse of the viscosity ratio multiplied by the thickness.

9 弾性による高速化への影響

9.1 応力比と高速化度合の関係

8 章にて示した通り，超音波照射された擬塑性流体中を落下する球の高速化の要因として粘性による影響では説明が十分にできない．球の落下速度が遅い場合，粘性以外の要因によって，超音波照射による落下球の高速化が抑制されていると考えられる．そこで，本章において先行研究である岩室 [26] にて示唆されていた弾性による影響に関して考える．

3.2 節にて，貯蔵弾性率 G' ，損失弾性率 G'' と応力 τ の関係性を示した．また，弾性と粘性の支配要素が変わる応力 τ_0 も示した．この応力 τ_0 と式 (4.19) に示される，擬塑性流体中を落下する球によって生じる応力 τ_U の比 τ_U/τ_0 を用いて，超音波照射による球の高速化度合いを整理する．この比が 1 より大きいと粘性影響が，1 より小さいと弾性影響が大きいと考えられる．この整理を行うことで，弾性による超音波照射された落下球の高速化度合いへの影響を考える．

応力比と終端速度の関係を Fig9.1(a) に示す．終端速度が速くなると，応力比が増加した．これは式 (4.19) において，擬塑性流体であるため $0 < n < 1$ となり，終端速度が早くなると τ_U が大きくなるためである．よって終端速度が速くなると粘性影響が大きく寄与することが分かる．

式 (4.18),(4.28),(4.32) より，終端速度 U_{off} と高速化度合いの関係は，

$$\frac{U_{\text{on}}}{U_{\text{off}}} \sim U_{\text{off}}^{n-1} \left(\frac{1}{u} \right)^{n-1} \left(\frac{\delta}{a} \right)^n, \quad (9.1)$$

と見積もられる．擬塑性流体では $0 < n < 1$ となるため，終端速度 U_T の乗数は負となり，終端速度が遅い場合，高速化がより顕著に現れると考えられる．終端速度と高速化度合の関係を Fig9.1(b) に示す．終端速度が遅くなると高速化度合が大きくなったが，分散は大きい．これは終端速度だけでなく，音響境界層厚さの影響を受けるためと考えられる．

応力比と高速化度合いの関係を示した結果を Fig9.1(c),(d) に示す．Fig9.1(c) は全ての実験結果を，Fig9.1(d) は PAA 濃度 0.2wt.%，岩室 [26] 以外の実験結果を示す．先行研究である岩室 [26] の実験結果を含めた場合，明瞭な相関が見られない．球の落下による応力は超音波照射していない状態における終端速度にて定義しており，先行研究である岩室 [26] は，照射する超音波周波数，平均圧力振幅，球径をパラメータとしているため，超音波周波数や平均圧力振幅を考慮していない落下球による応力比による整理では不十分であると考えられる．一方，今回の実験結果では応力比 1 近傍にて高速化が顕著に現れた．式 (4.19),(9.1) より，終端速度が遅くなると球の落下による応力が小さくなり，高速化度合が大きくなる．しかし，応力比が 1 より小さくなると，高速化が抑制されていた．これは応力比が 1 を超えると，粘性ではなく弾性による支配が強くなるためと考えられる．ゆえに，弾性が支配的とならない応力比 1 近傍において高速化が顕著に現れたと考えられる．

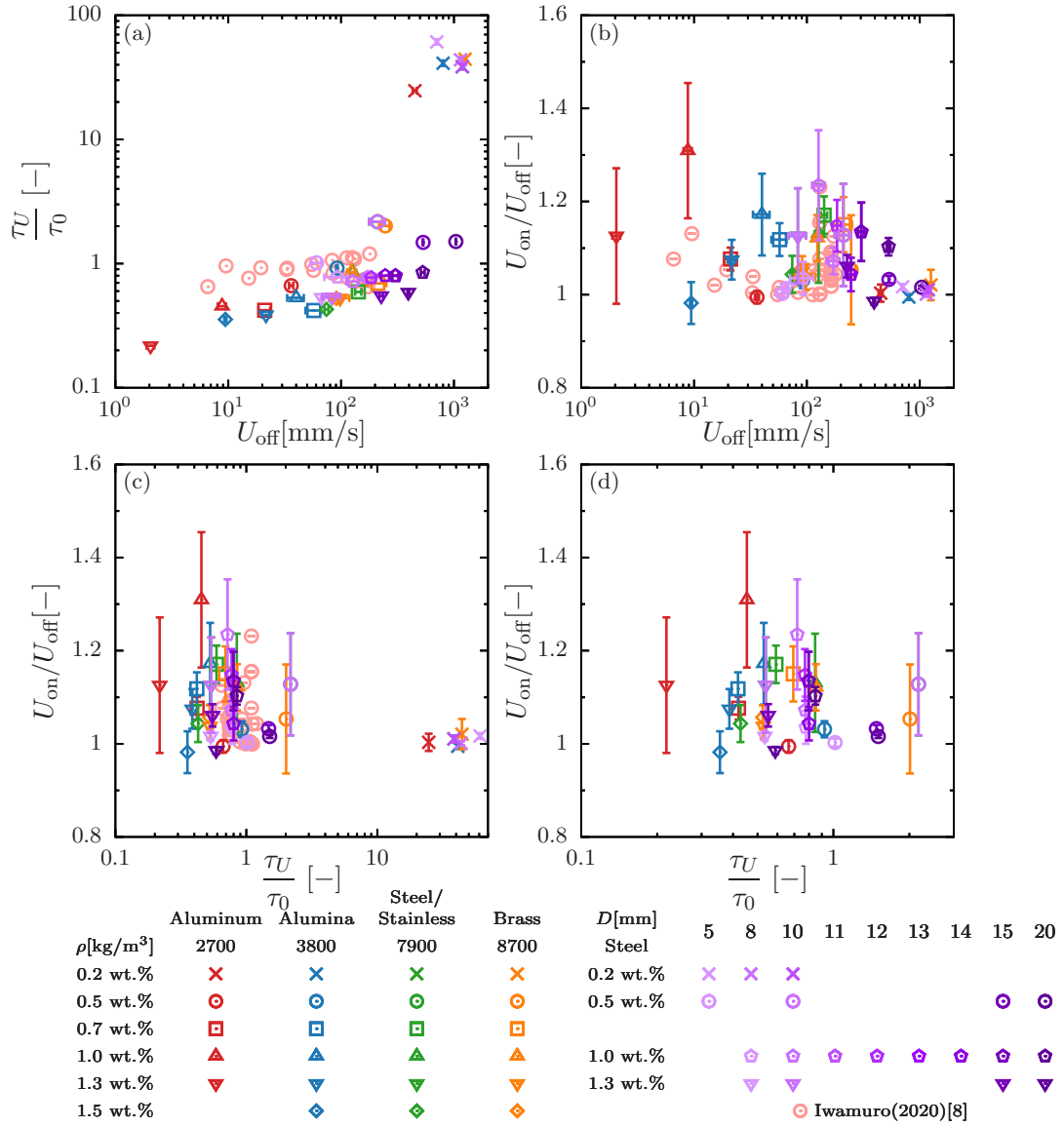


Fig 9.1: Relationship between terminal velocity and (a)elasticity ratio τ_U/τ_0 , (b)velocity ratio, elasticity ratio τ_U/τ_0 and velocity ratio by (c)all experiment, (d)without 0.2wt.% PAA solution.

9.2 粘度比・応力比による高速化への影響

超音波照射による高速化に対する粘性と弾性の影響を考えるため、粘度比と音響境界層を球の半径で規格化した値と応力比、高速化度合の関係を Fig9.2 に示す。縦軸は応力比、横軸は粘度比と音響境界層を球の半径で規格化した値、カラーバーは高速化度合を表す。粘度比と音響境界層を球の半径で規格化した値が増加すると、応力比が減少した。これは、粘度比が大きくなると、弾性による影響強くなることを示している。粘度比が大きくなるのは、式 (4.18),(??) より、終端速度が小さい場合である。終端速度が遅くなると、式 (4.19) より、球の落下による応力が小さくなり、粘度比と応力比の関係を示す。非常に粘度比が小さく、応力比が大きい領域では粘性による影響をあまり受けておらず、高速化が見られなかった。粘度比が増加して行くに従い応力比は減少し、粘

度比 0.1 近傍，応力比 1 近傍にて高速化が顕著となった．その後，粘度比が 0.1 以上に増加した場合，応力比は 1 を下回り弾性による影響が支配的となったと考えられる．この領域において，高速化があまり見られなくなった．そして，粘度比 1 以上の領域では高速化が弱くみられるようになった．これは弾性が支配的ではあるものの，粘度比が大きいためと考えられる．以上より，粘度比と音響境界層を球の半径で規格化した値では高速化が単調増加せず，抑制される場合が存在したが，その要因は弾性による影響が強く現れたためと考えられる．

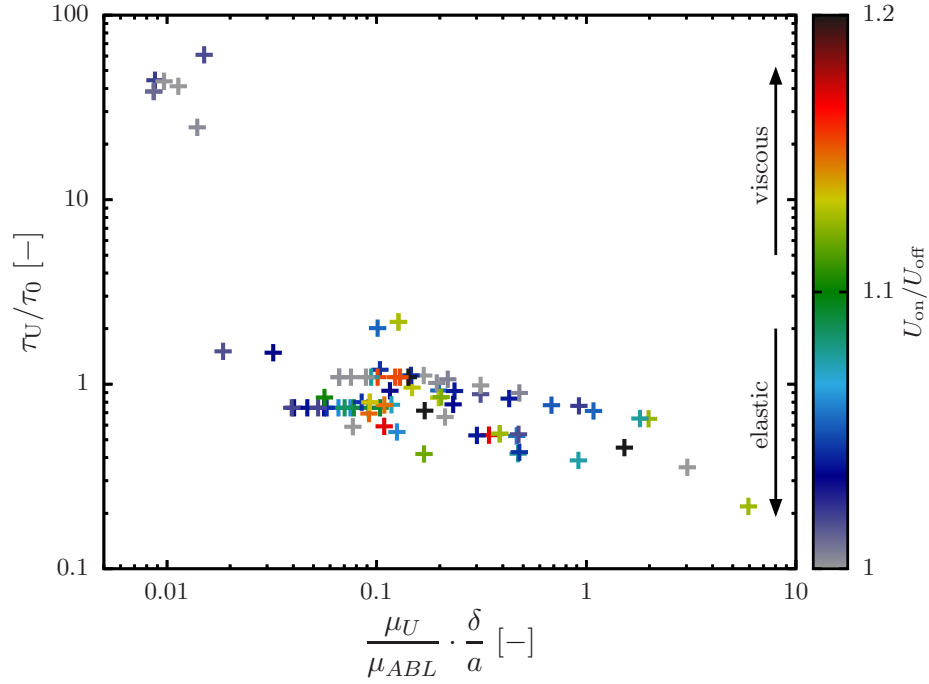


Fig 9.2: Relationship between velocity ratio and the inverse of the viscosity ratio multiplied by the thickness, elasticity ratio τ_U/τ_0 .

10 結言

本研究において、擬塑性流体中を落下する球へ超音波照射することによって落下速度が高速化する現象の要因に関して、高速化の抑制要因に関して調査をした。これらの調査を行うため、密度差、濃度、球径をパラメータとして実験を行った。以下に実験の結果、得られた知見を示す。

- 溶液と落下球の密度差と超音波照射による高速化度合の関係は、PAA 濃度 0.5,0.7wt.%においては正の相関が、PAA 濃度 1.0wt.%においては負の相関となっている。理論において終端速度が遅くなる、密度差が小さい場合に高速化が顕著となるが、密度差以外による要因が大きいと考えられる。
- 溶液の濃度を増加させた場合、落下球の終端速度は遅くなり、高速化がより顕著となる。これは、溶液の濃度が濃くなることで落下球が、流体より受ける粘性力が強くなり、流体の擬塑性も強くなるためだと考えられる。しかし、濃度が高くなると高速化が抑制される。PAA 溶液 0.7-1.0wt.%が高速化の極大となる。
- PAA 溶液 1wt%, 落下球が鋼球の場合において直径を変化させた場合、直径 10mm が高速化の極大となる。直径が 10mm より大きい場合、球の落下による粘度と音響境界層内粘度の比に落下球の半径で規格化した音響境界層厚さを乗じた値と高速化度合は正の相関関係が見られる。これは球径が大きいと落下速度が早くなり、落下による周囲流体の粘性による影響が弱くなるためだと考えられる。
- 本研究の実験条件において、球の落下による粘度と音響境界層内粘度の比に落下球の半径で規格化した音響境界層厚さを乗じた値が 0.1 以下において、高速化度合と正の相関を取った。それ以上の領域では高速化が抑制され、粘度比が再度大きくなると高速化が見られるようになったが、その増加率は小さい。応力比を用いて考えると、応力比 1 近傍にて高速化が顕著にみられ、それ以上では抑制されていた。これより、弾性による影響が支配的となると高速化が抑制されることが分かった。

上記の結果から、擬塑性流体中を落下する球へ超音波照射すると落下速度が高速化する現象に関して、落下球によって生じる周囲流体の粘性による影響が高速化の一因となっていることが分かった。溶液濃度を濃く、落下球の球径を小さくすることで擬塑性流体中を落下する球の終端速度を遅くし、より高速化を図ることが可能であると分かった。しかし、今回の研究で用いた粘弾性を持ち、弾性による影響が無視できない流体においては、弾性による影響が支配的となると高速化が抑制されることが分かった。高速化の抑制がみられるため、高速化の極大値を示す条件が存在することが示唆された。弾性の影響を考慮した理論の構築が必要であると考えられる。

付 録 A 球落下実験 実験結果

A.1 密度・濃度による影響に関して

本研究において，落下させる球の密度，擬塑性流体の質量濃度を変化させた．それぞれの質量濃度における，球の落下速度を Fig.A.1-A.4 に示す．横軸は経過時間 s ，縦軸は落下速度 m/s である．

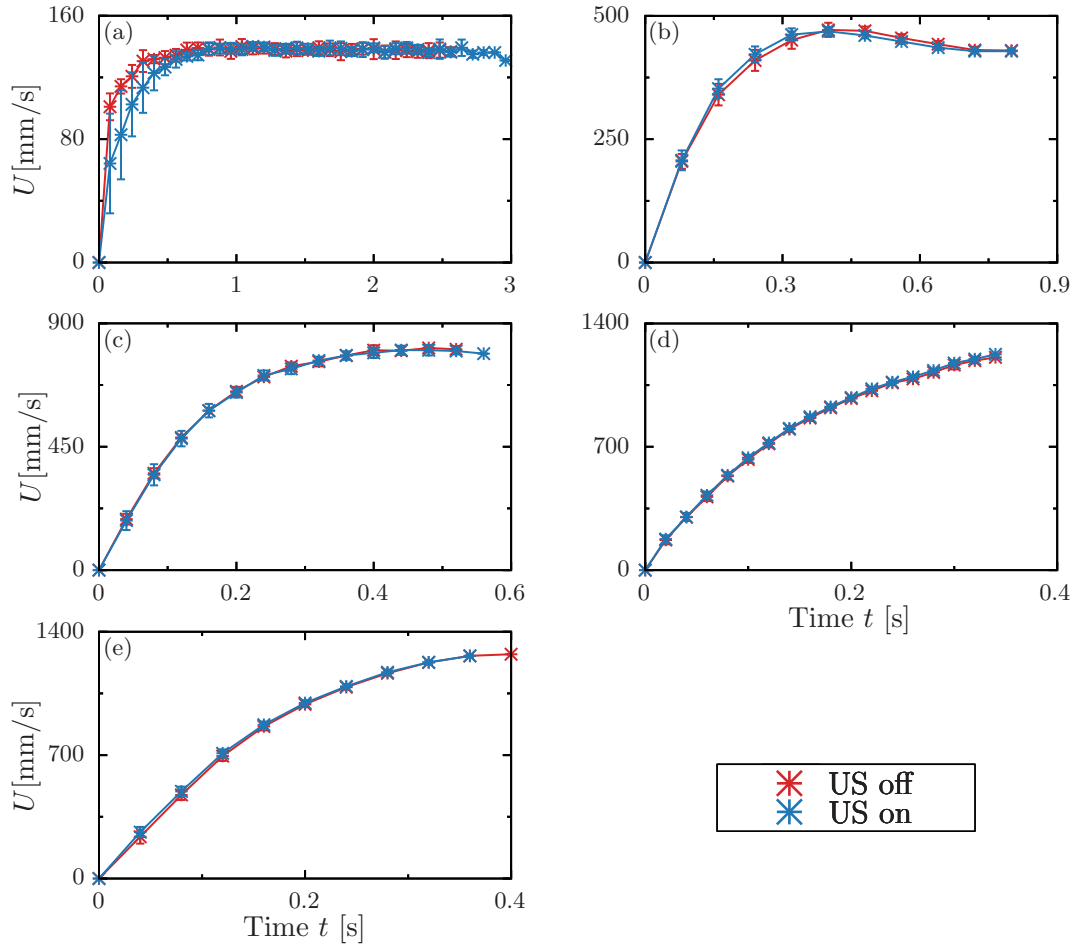


Fig A.1: Velocity of a falling sphere made by (a)nylon in 0.05 wt.% PAA solution, (b)aluminum, (c)alumina, (d)stainless,(e)brass in 0.2 wt.% PAA solution.

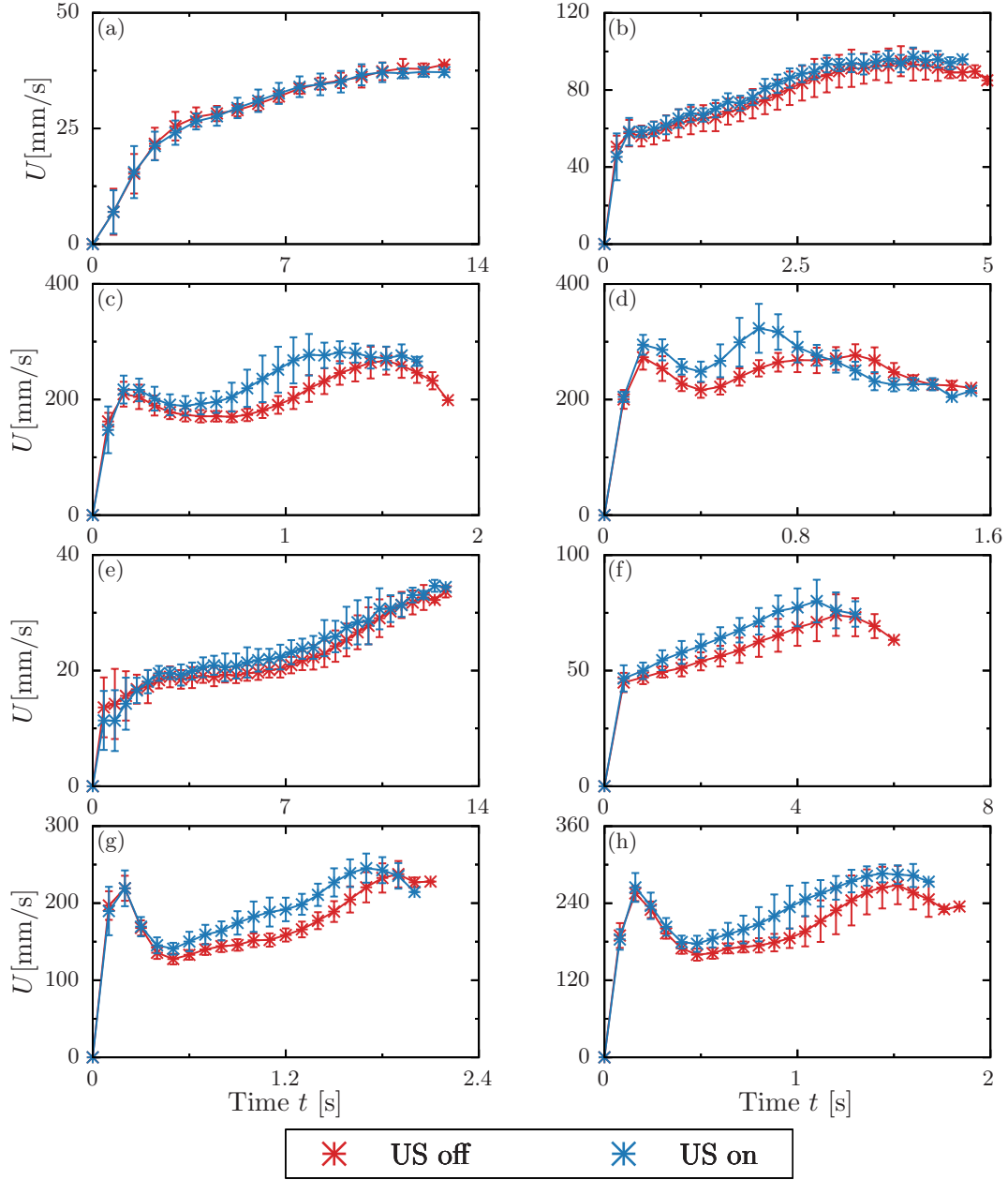


Fig A.2: Velocity of a falling sphere made by (a)aluminum, (b)alumina, (c)stainless,(d)brass in 0.5 wt.% PAA solution, (e)aluminum, (f)alumina, (g)stainless,(h)brass in 0.7 wt.% PAA solution.

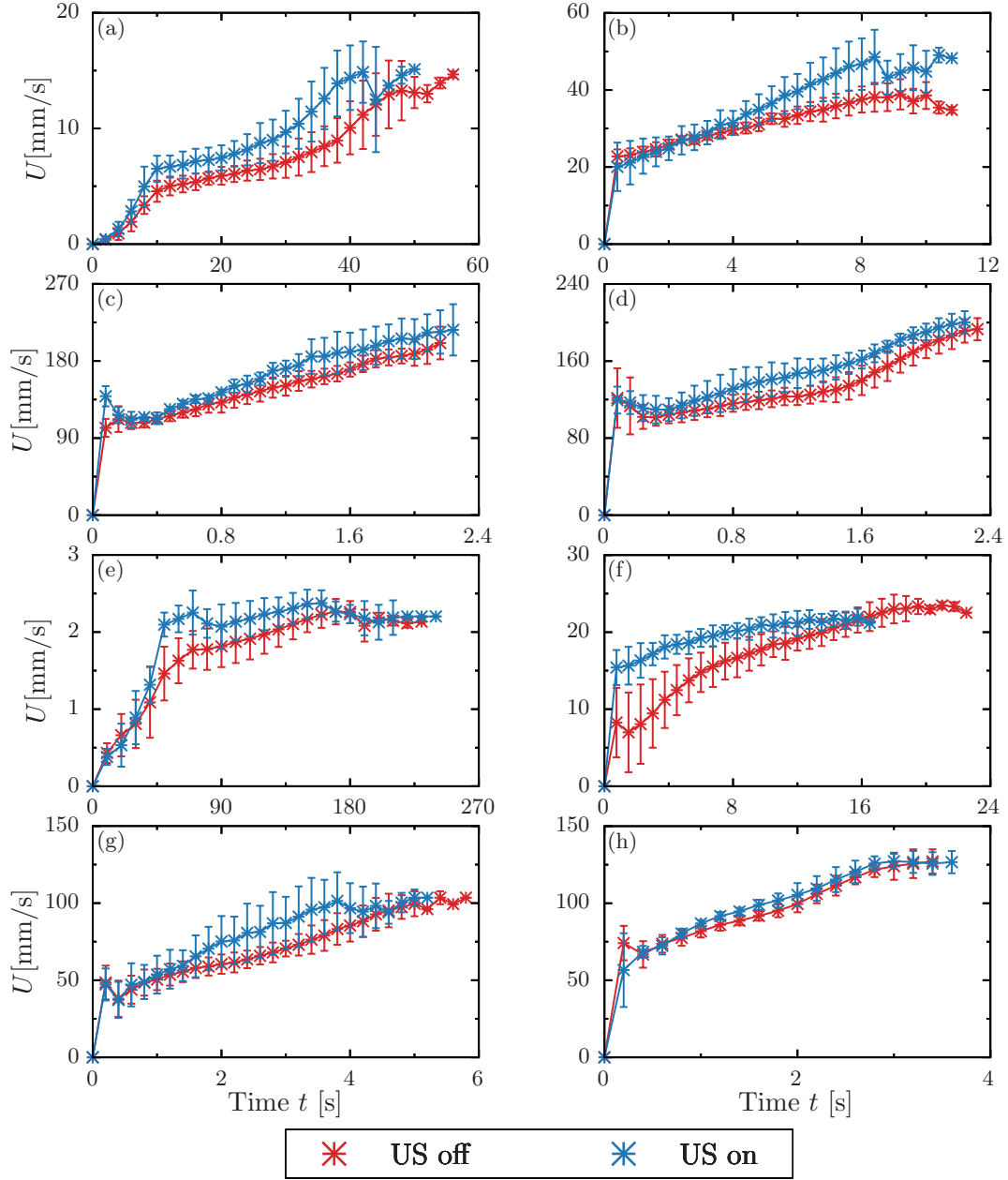


Fig A.3: Velocity of a falling sphere made by (a)aluminum, (b)alumina, (c)stainless,(d)brass in 1.0 wt.% PAA solution, (e)aluminum, (f)alumina, (g)stainless,(h)brass in 1.3 wt.% PAA solution.

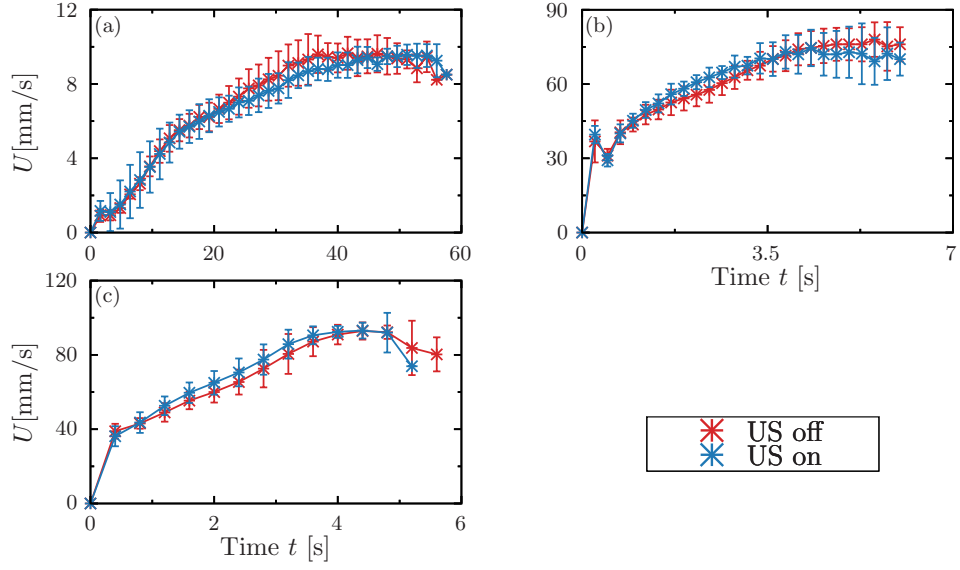


Fig A.4: Velocity of a falling sphere made by (a)alumina, (b)stainless,(c)brass in 1.5 wt.% PAA solution.

A.2 球径による影響に関して

球径を変化させた際の実験結果を Fig.A.5-A.7 に示す。横軸は経過時間 s ，縦軸は落下速度 m/s である。

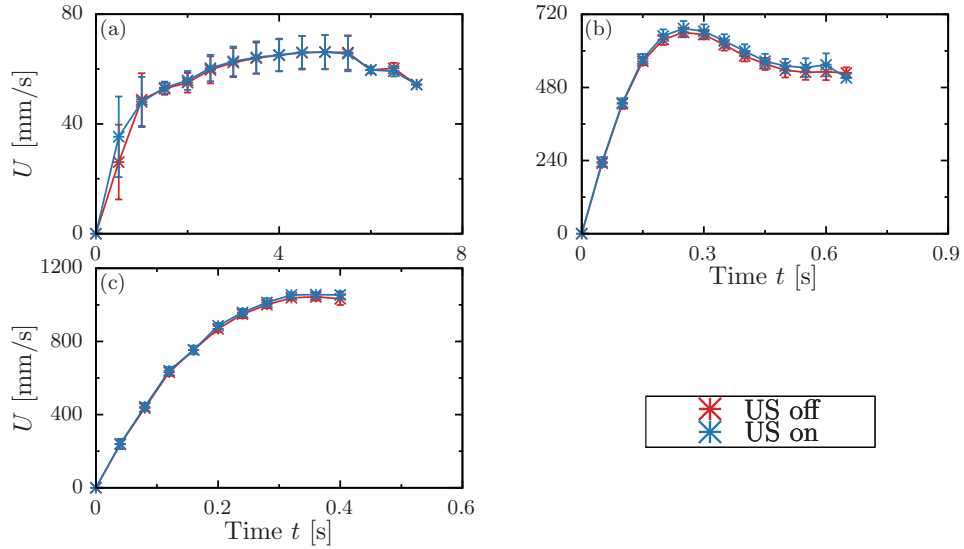


Fig A.5: Velocity of a falling sphere in 0.5wt.% PAA of (a)5mm, (b)15mm, (c)20mm.

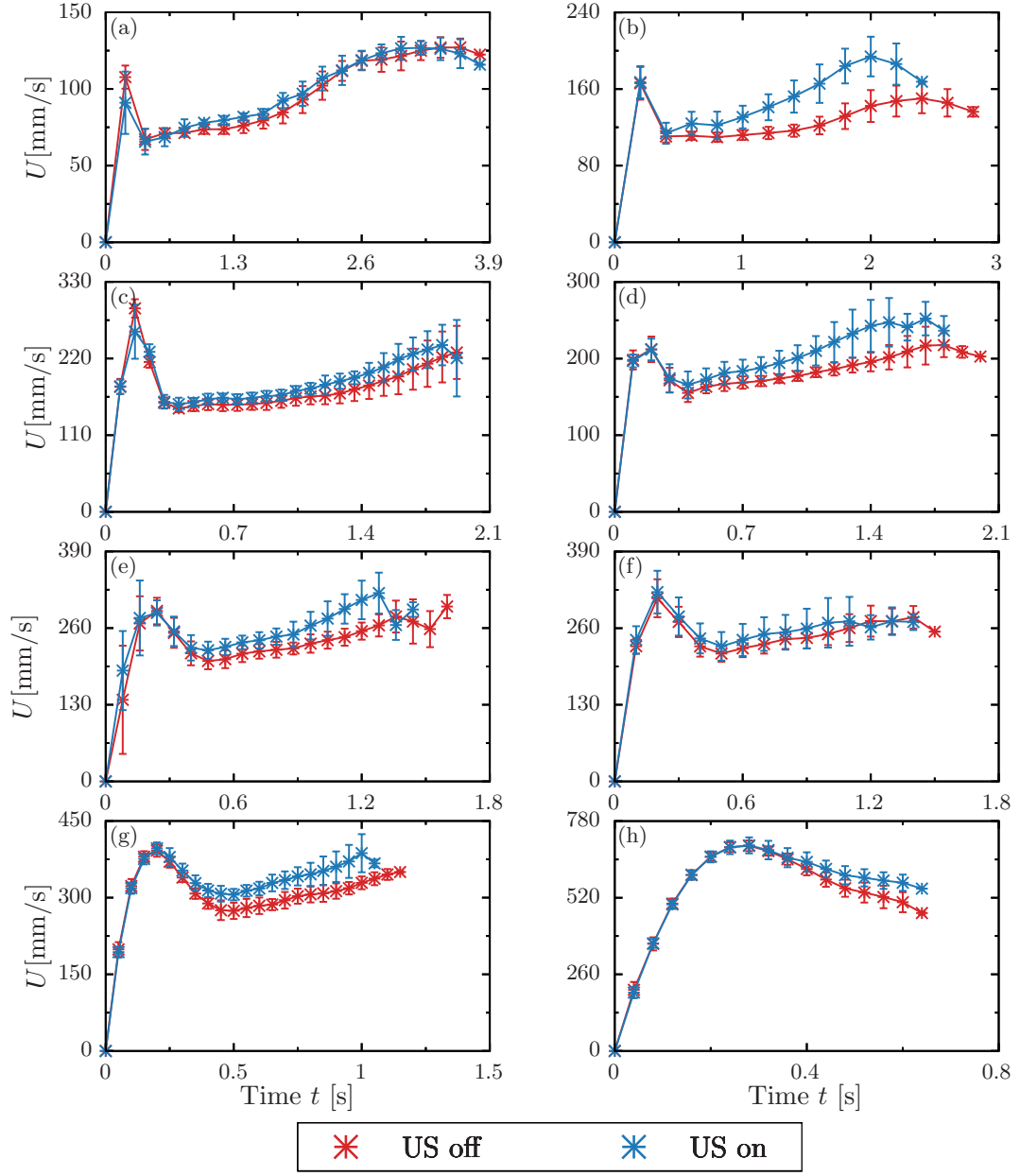


Fig A.6: Velocity of a falling sphere in 1.0wt.% PAA of (a)8mm, (b)10mm, (c)11mm, (d)12mm, (e)13mm, (f)14mm, (g)15mm, (h)20mm.

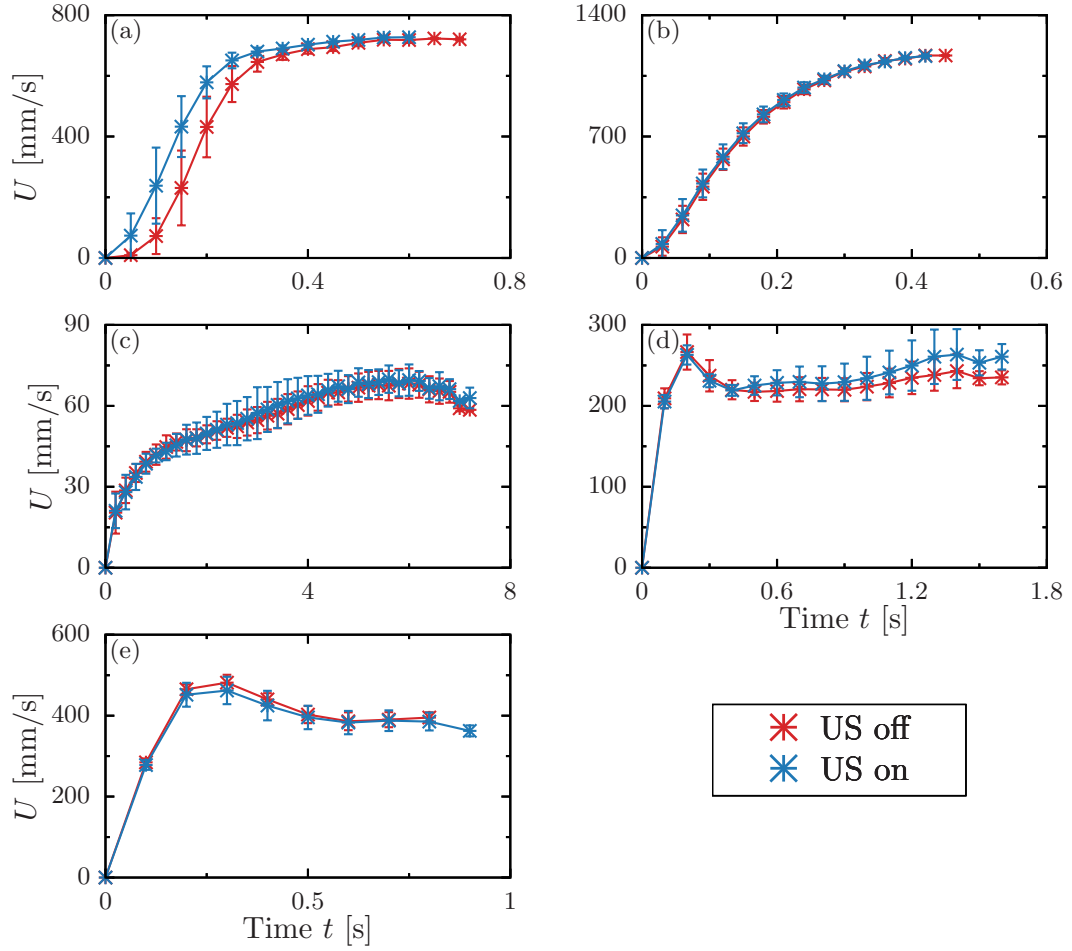


Fig A.7: Velocity of a falling sphere in 0.2wt.% PAA of (a)5mm, (b)8mm, 1.3wt.% PAA of (c)8mm, (d)15mm, (e)20mm.

付 録 B 実験装置の改良による影響

先行研究 [26] において、電磁石を用いて、磁力によって球の把持を行っていた。本研究において、強磁性体以外の球の把持を行うため、真空ポンプを用いて吸引する手法に変更した。その把持手法の変化に伴う影響を議論する。

B.1 実験装置

電磁石を用いた実験装置を Fig.B.1 に示す。電磁石の磁力によって落下球の把持を行った。球を落下させるとき、電磁石への通電を切り、落下方向に力を加えて球を落下させた。また、本実験は先行研究と同様の条件で行うため、外寸において高さ 248.5mm、幅 47mm、奥行き 47mm、厚さ 3.5mm の矩形ガラス水槽で実験を行った。また、照射する超音波の周波数は 39kHz とした。

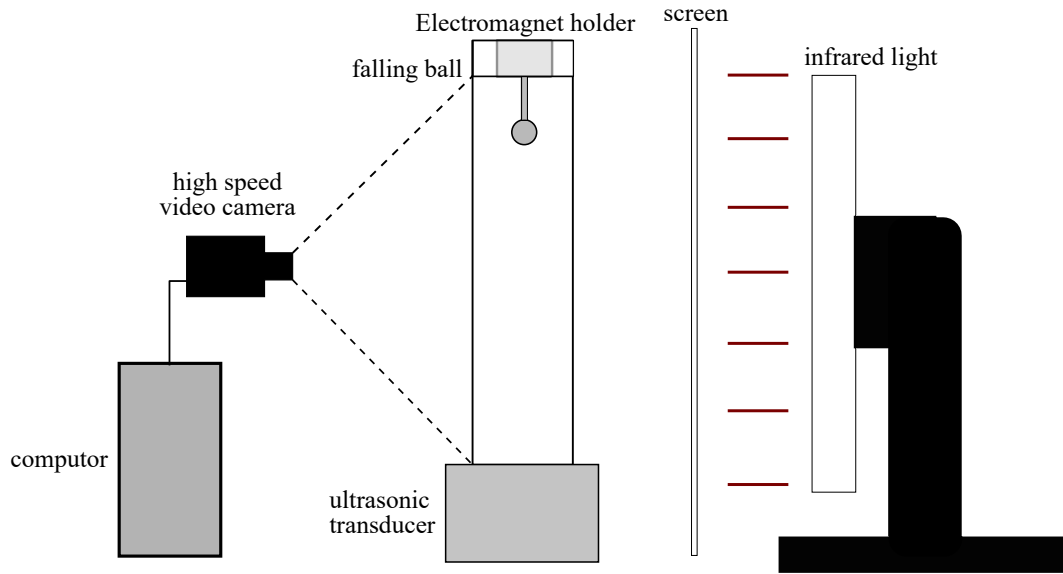


Fig B.1: Schematic view of the experimental apparatus by using electromagnet.

B.2 落下実験結果

真空ポンプを用いて球を把持した場合と電磁石を用いて球を把持した場合の結果を Fig B.2 に示す。縦軸は落下速度、横軸は落下開始時からの経過時間である。落下開始時に電磁石を用いた場合はオーバーシュートが見られるが、真空ポンプを用いた場合はオーバーシュートが見られなかった。これは、落下開始時における初速による影響が考えられる。本研究 C 章にて、初速を与えた場合に関して考える。

終端速度と高速化度合の関係を Fig.B.3(a) に示す。縦軸は高速化度合、横軸は落下球の終端速度である。真空ポンプを用いて球を把持した場合、先行研究である岩室 [26] や電磁石を用いて球を把持した場合と比較し、超音波照射による高速化が顕著に現れなかった。また、粘度比と音響境界層を球の半径で規格化した値と高速化度合の関係を Fig.B.3(b) に示す。真空ポンプを用いて把持した場合、粘度比と音響境界層を球の半径で規格化した値が 0.1 を超える領域に存在する。これは、本研究 8 章で示した高速化があまり見られなくなる領域となっており、真空ポンプを用いて把持した場合、高速化があまり見られていない。先行研究である岩室 [26] と今回の実験結果に差異が生じた理由は、作製した溶液の特性や音響圧の違いによって生じたと考えられる。

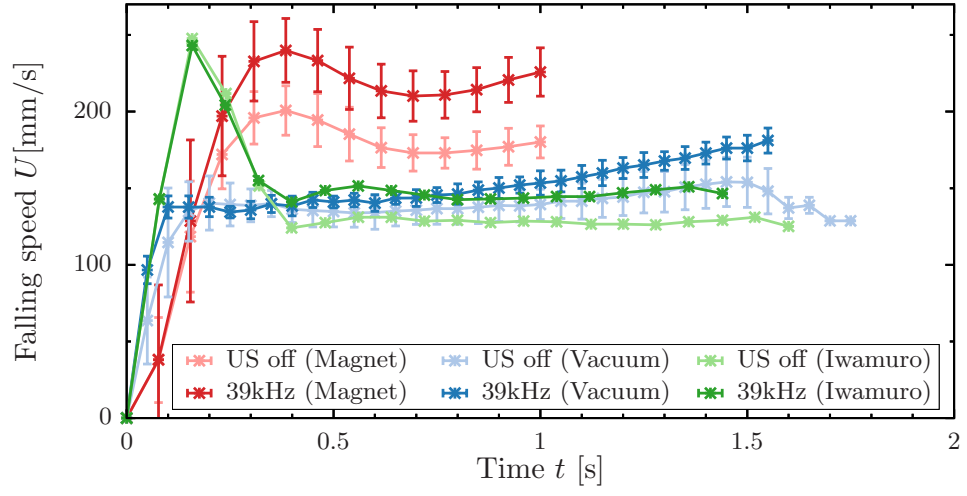


Fig B.2: Falling speed of a sphere in 1.0wt.%PAA solution with and without ultrasound irradiation.

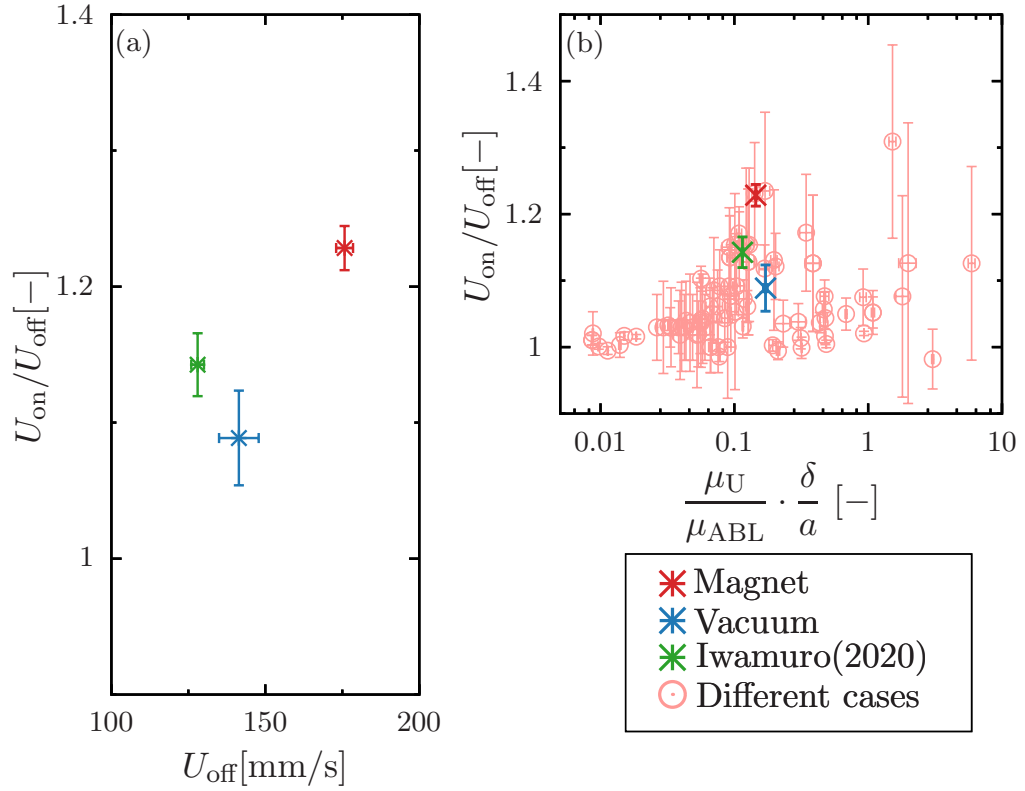


Fig B.3: Relationship velocity ratio and (a)terminal velocity, (b)viscosity ratio.

付 録 C 初速による影響に関して

B 章にて、実験装置の改良によってピーク速度が減少し、オーバーシュートが小さくなったことを示した。本節において、電磁石を用いて把持した場合、ピーク速度が大きくなった理由に関して考察を行う。電磁石を用いて球を把持した場合、電磁石へ落下方向に力を与えて落下を開始させている。この時、微小ではあるが落下開始時に初速が存在する。一方で真空ポンプを用いて球を把持した場合、吸着パッドを大気圧にすると球は落下する。この場合、球に力が加わらないため、初速は存在しない。このように初速の有無がオーバーシュートの変化に大きく関与していると考えられる。

初速の有無が与える影響に関して調査するため、真空ポンプを用いて球中心が液面より高さ $H = 5\text{mm}$ となる地点で把持し、そこから球を落下させた。その結果を Fig.C.1 に示す。縦軸は落下速度、横軸は初速ありの場合は液面に球中心が入ったときを 0s、初速なしの場合は落下開始時刻を 0s とした時刻である。この条件において、初速は 313mm/s となる。ピーク速度は 440mm/s となり、初速を超えて加速した。これは初速と重力による加速が、粘性抵抗や浮力よりも大きく、弾性は遅れて発生するため、初速を超えて加速したと考えられる。よって、電磁石を用いて球を把持した場合は初速による影響がオーバーシュートとして現れるが、真空ポンプを用いて球を把持した場合は初速が非常に小さいためその影響を受けないということが分かった。

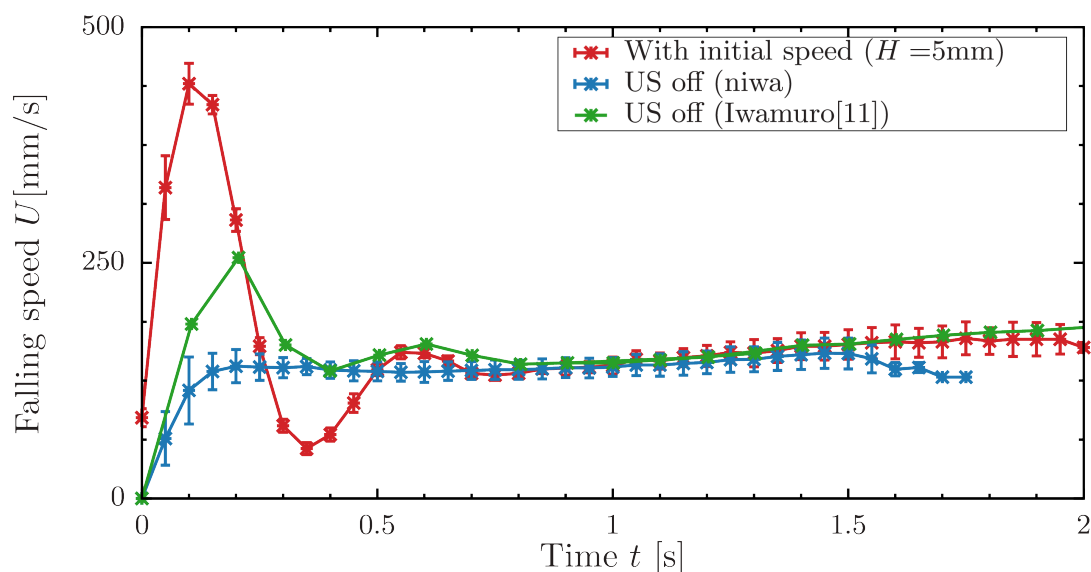


Fig C.1: Falling speed of a sphere in 1.0wt.% PAA solution falling with initial speed.

付 録 D 落下間隔変化における擬塑性流体の経時変化による影響

Fig. D.1, D.2, D.3 に落下間隔を 5 分, 10 分, 20 分と変化させた実験における落下速度の経時変化を示す。縦軸は落下速度、横軸は落下開始時からの経過時間である。溶液の作成後、7 日後と 60 日後に落下速度の計測を行った。溶液作成 7 日後のが、60 日後よりもより超音波による高速化の影響を受けた。また、落下速度は時間経過とともに早くなった。これは溶液の経時変化によって粘

度が小さく溶液が変化したためと考えられる。ゆえに、溶液作成後時間が経過すると粘度が低下することが分かった。

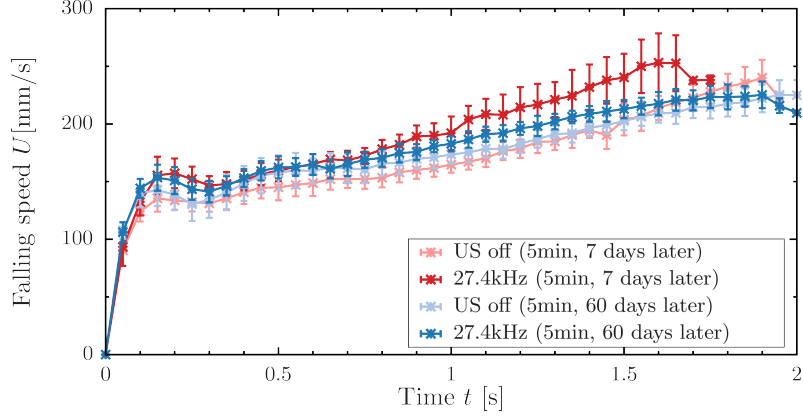


Fig D.1: Falling velocity of a sphere in 1wt.%PAA solution with and without ultrasound irradiation in tank B. Comparison of changes over time. (Interval 5 min.)

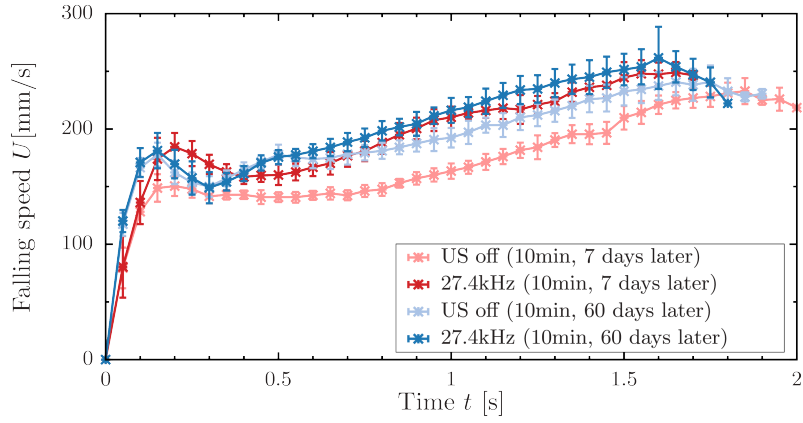


Fig D.2: Falling velocity of a sphere in 1wt.%PAA solution with and without ultrasound irradiation in tank B. Comparison of changes over time. (Interval 10 min.)

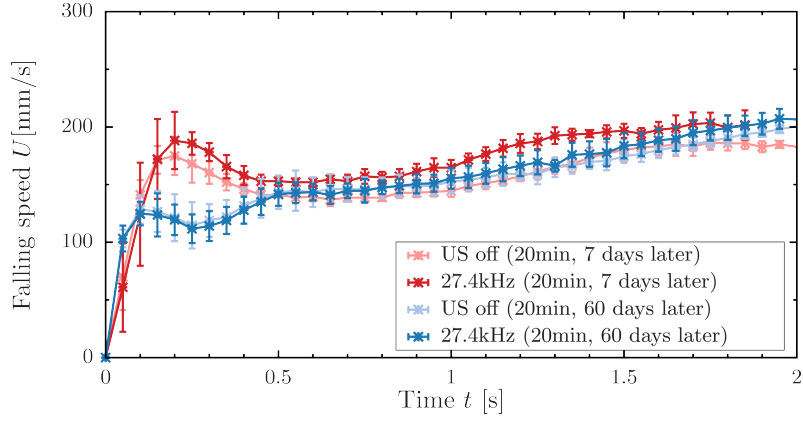


Fig D.3: Falling velocity of a sphere in 1wt.%PAA solution with and without ultrasound irradiation in tank B. Comparison of changes over time. (Interval 20 min.)

付 録 E 溶液作製精度による影響

溶液の作製精度の確認を行うため、0.95,1.00,1.05wt.%の PAA 溶液を作製した。それぞれの擬塑性流体に直径 10mm の鋼球を落下させ、終端速度の変化、超音波照射による影響の変化の確認を行った。

E.1 溶液の粘性特性に関して

それぞれの溶液の特性を確認するため、粘度計を用いて粘度計測を行った。粘度計測を行った結果を Fig.E.1 に示す。比較のため、先行研究である岩室 [26] と Shiratori *et al.*[33] の計測結果も合わせて示す。また、Power-law model に従うものとして、式 (3.1) を用いて近似計算を行った結果を Table E.1 に示す。濃度が薄いと粘度は低く、濃度が高いと粘度は高くなった。

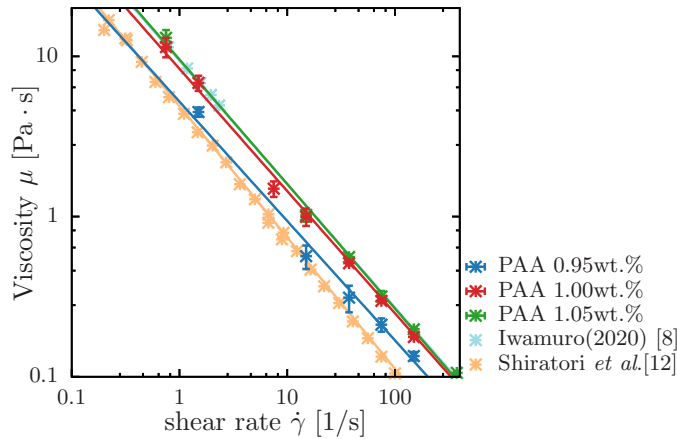


Fig E.1: Viscosity versus shear rate for PAA0.95,1.00,1.05wt.%.

Table E.1: Parameters k and n in the Power-law model for each PAA solution.

	k	n
Present Value(1.05wt.%)	9.6	0.23
Present Value(1.00wt.%)	8.4	0.24
Present Value(0.95wt.%)	5.2	0.25
岩室 [26]	9.4	0.23
Shiratori <i>et al.</i> (2016)[34]	5.9	0.25

E.2 溶液の作製精度による高速化への影響

それぞれの質量濃度の PAA 溶液に対し、落下球実験を行った。落下させた球は、鋼製の直径 10mm の球である。実験結果を Fig.E.2 に示す。この結果より、超音波照射されていない状態における落下球の終端速度を Fig.E.3(a) に示す。溶液濃度変化によって大きな終端速度の変化は見られなかったが、溶液濃度が濃い場合、わずかに終端速度が遅かった。これは、粘性が強いためであると考えられる。溶液濃度と超音波照射による高速化度合の関係を Fig.E.3(b) に示す。濃度が濃くなるとより高速化が顕著になった。これは、溶液粘度が高くなり、より強い擬組成を示したためであると考えられる。超音波照射による高速化度合を粘度比と音響境界層を球の半径で規格化した値の関係を Fig.E.3(c) に示す。他の実験によって得られた結果も示す。本研究の粘度比の範囲と比較して、今回行った実験範囲は非常に狭い範囲であることが分かる。また、今回の濃度変化による粘度比と高速化度合の関係は他の実験結果と同様の正の相関関係が見られた。

以上より、 $\pm 0.05\text{wt.}\%$ の濃度変化をさせた場合、粘度、終端速度、高速化度合、粘度比にわずかながら変化を示すことが分かった。粘度比と高速化度合の関係は他の結果と同様の結果が得られることが分かった。これらの結果より、実験の都度、粘度計測を行い、球を落下させた時のせん断粘度特性を得ることが重要であることが分かった。

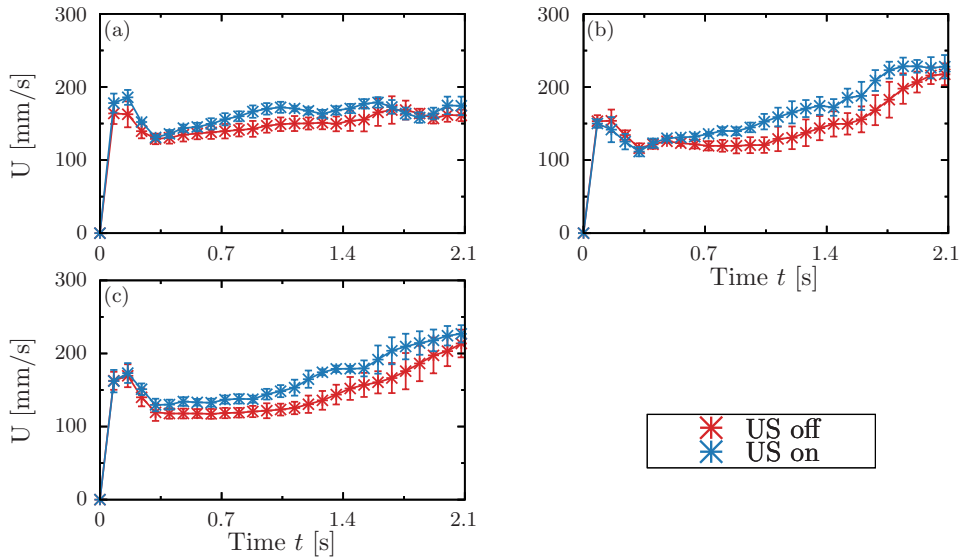


Fig E.2: Velocity of a falling sphere in (a)0.95wt.%, (b)1.00wt.%, (c)1.05wt.% PAA solution.

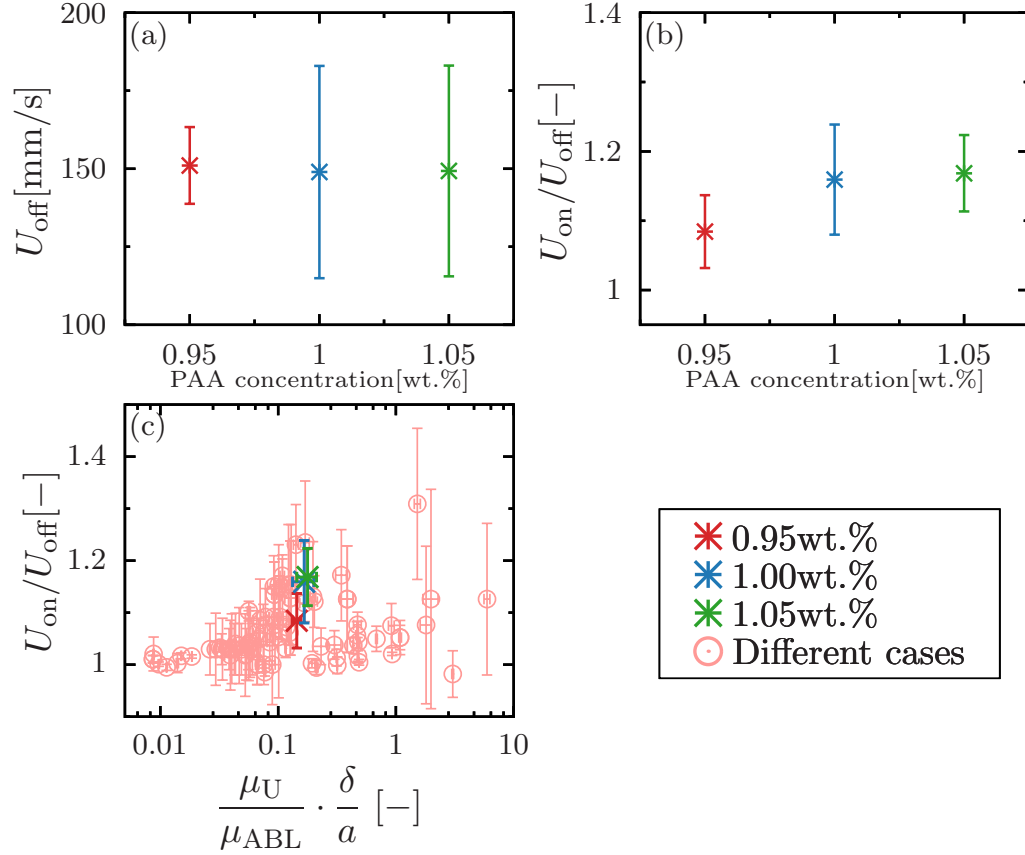


Fig E.3: Relationship between (a)terminal velocity and PAA concentration, velocity ratio and (b) PAA concentration, (c)viscosity ratio.

付 録 F 落下間隔変化における高速化への影響

先行研究 [29] にて、等間隔の時間で物体を落下させると、落下速度が一定になることが報告されている。これは、落下によって破壊された分子構造が回復するためだと考えられる。球の落下間隔を変化させると、PAA 溶液の粘性弾性回復に対して影響を与えと考えられる。これらの落下速度、高速化への影響を調査するため、落下間隔を変化させた実験を行った。

落下間隔を 5 分、10 分、20 分と変化し、球を落下させた解析した結果を Fig.F.1 に示す。縦軸は落下速度、横軸は落下開始時からの経過時間である。それぞれの場合において、超音波照射による落下球の高速化は見られた。落下間隔と落下球の終端速度の関係を FigF.2(a) に示す。縦軸は落下球の終端速度、横軸は落下間隔である。落下間隔を変化させた場合、落下間隔が 5 分と 10 分の場合に終端速度に大きな変化は生じなかった。一方で、落下間隔が 20 分の場合には終端速度の分散が小さくなった。これは、弾性回復が十分に行われたため、落下中の落下速度が一定に近くなったためだと考えられる。落下間隔と高速化度合の関係を FigF.2(b) に示す。縦軸は高速化度合、横軸は落下間隔である。落下間隔を変化させた場合、超音波照射による高速化度合に対して大きな変化が見られなかった。また、粘度比と音響境界層を球の半径で規格化した値と高速化度合の関係を Fig.F.2(c) に示す。縦軸は高速化度合、横軸は粘度比と音響境界層を球の半径で規格化した値であ

る。粘度比と音響境界層を球の半径で規格化した値は落下間隔を変化させた場合、あまり大きく変化しなかった。これは流体物性がほぼ同一であるためと考えられる。これらの結果より、今回の実験範囲ではあまり大きな変化が現れなかったことが分かった。

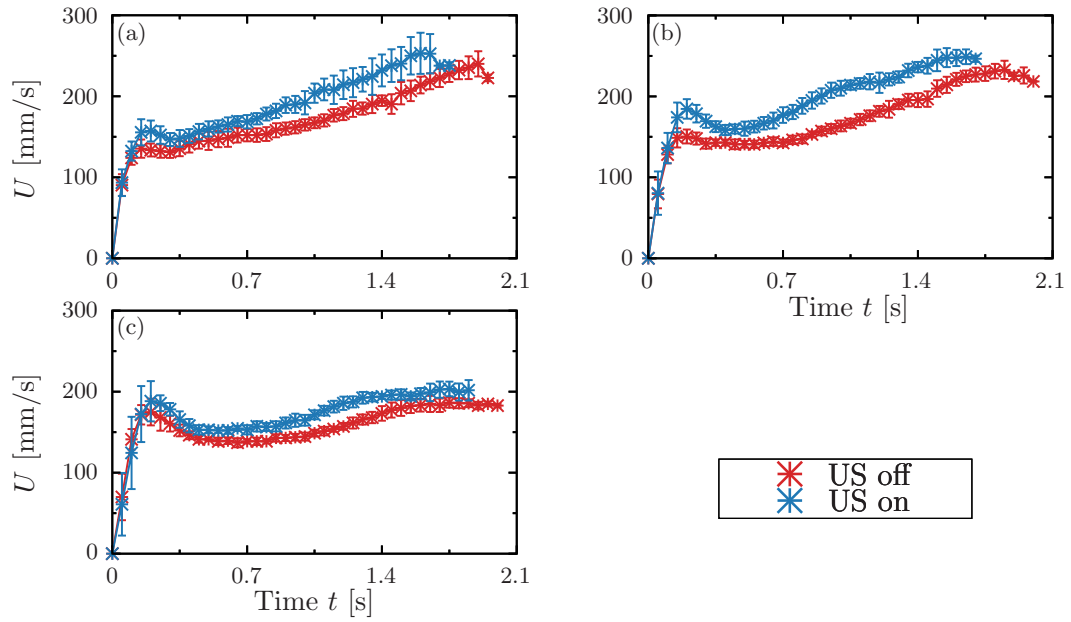


Fig F.1: Falling speed of a sphere in 1.0wt.%PAA solution with and without ultrasound irradiation for the interval (a) 5min, (b) 10min, (c) 20min.

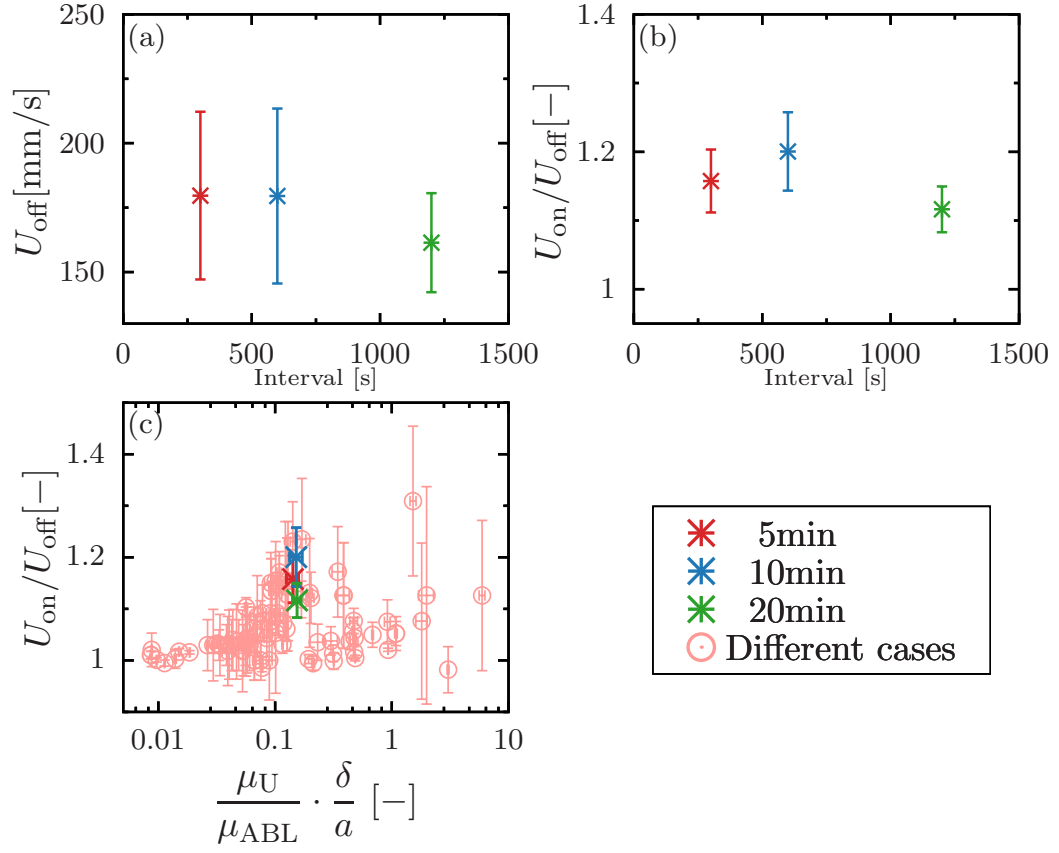


Fig F.2: Relationship between (a)terminal velocity and interval, velocity ratio and (b) interval, (c)viscosity ratio.

参考文献

- [1] R.P.Chhabra. *Bubbles, Drops, and Particles in Non-Newtonian Fluids*, pp. 14–22, 61–72. CRC press, 2006.
- [2] P.R.S.Mendes and E.S.Dutra. A viscosity function for viscoplastic liquids. *Annual transactions of the nordic rheology society*, Vol. 12, pp. 183–188, 2004.
- [3] N.J.Balmforth, A.S.Burbidge, R.V.Craster, J.Salzig, and A.Shen. Visco-plastic models of isothermal lava domes. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 403, pp. 37–65, 2000.
- [4] H.Liu, X.M.Xu, and S.D.Guo. Rheological, texture and sensory properties of low-fat mayonnaise with different fat mimetics. *LWT-Food Science and Technology*, Vol. 40, No. 6, pp. 946–954, 2007.
- [5] T.Bodnár, A.Sequeira, and M.Prosi. On the shear-thinning and viscoelastic effects of blood flow under various flow rates. *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 217, No. 11, pp. 5055–5067, 2011.
- [6] W.Hu, Q.Xu, G.Wang, G.Scaringi, M.Mcsaveney, and P.Hicher. Shear resistance variations in experimentally sheared mudstone granules: A possible shear-thinning and thixotropic mechanism. *Geophysical Research Letters*, Vol. 44, No. 21, pp. 11–040, 2017.
- [7] J.F.Ryder and J.M.Yeomans. Shear thinning in dilute polymer solutions. *The Journal of chemical physics*, Vol. 125, No. 19, p. 194906, 2006.
- [8] N.C.Crawford, L.B.Popp, K.E.Johns, L.M.Caire, B.N.Peterson, and M.W.Liberatore. Shear thickening of corn starch suspensions: Does concentration matter? *Journal of colloid and interface science*, Vol. 396, pp. 83–89, 2013.
- [9] A.Haris, B.W.Y.Goh, T.E.Tay, H.P.Lee, A.V.Rammohan, and V.B.C.Tan. On the effectiveness of incorporating shear thickening fluid with fumed silica particles in hip protectors. *Smart Materials and Structures*, Vol. 27, No. 1, p. 015021, 2017.
- [10] M.Zarei and J.Aalaie. Application of shear thickening fluids in material development. *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 9, No. 5, pp. 10411–10433, 2020.
- [11] S.Stieger, E.Mitsoulis, M.Walluch, C.Ebner, R.C.Kerschbaumer, M.Haselmann, M.Mostafaiyan, M.Kämpfe, I.Kühnert, S.Wießner, et al. On the influence of viscoelastic modeling in fluid flow simulations of gum acrylonitrile butadiene rubber. *Polymers*, Vol. 13, No. 14, p. 2323, 2021.
- [12] D.V.Boger. Viscoelastic flows through contractions. *Annual review of fluid mechanics*, Vol. 19, No. 1, pp. 157–182, 1987.
- [13] V.W.Ostwald. Ueber die rechnerische darstellung des strukturgebietes der viskosität. *Kolloid-Zeitschrift*, Vol. 47, No. 2, pp. 176–187, 1929.
- [14] Malcolm M M.M.Cross. Rheology of non-newtonian fluids: a new flow equation for pseudo-plastic systems. *Journal of colloid science*, Vol. 20, No. 5, pp. 417–437, 1965.

- [15] P.J.Carreau. Rheological equations from molecular network theories. *Transactions of the Society of Rheology*, Vol. 16, No. 1, pp. 99–127, 1972.
- [16] K.Yasuda. *Investigation of the analogies between viscometric and linear viscoelastic properties of polystyrene fluids*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1979.
- [17] B.J.Briscoe, F.P.Luckham, and S.R.Ren. The properties of drilling muds at high pressures and high temperatures. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Physical and Engineering Sciences*, Vol. 348, No. 1687, pp. 179–207, 1994.
- [18] F.deLarrard, C.F.Ferraris, and T.Sedran. Fresh concrete: a herschel-bulkley material. *Materials and structures*, Vol. 31, No. 7, pp. 494–498, 1998.
- [19] E.Obata M.Ohta, E.Iwasaki and Y.Yoshida. A numerical study of the motion of a spherical drop rising in shear-thinning fluid systems. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 116, pp. 95–111, 2003.
- [20] E.Obata M.Ohta, E.Iwasaki and Y.Yoshida. Dynamic processes in a deformed drop rising through shear-thinning fluids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 132, pp. 100–107, 2005.
- [21] C.Yang L.Zhang and Z.S.Mao. Numerical simulation of a bubble rising in shear-thinning fluids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 165, pp. 555–567, 2010.
- [22] J.Léopoldès S.van den Wildenberg, X.Jia and A.Tourin. Ultrasonic tracking of a sinking ball in a vibrated dense granular suspension. *Scientific Reports*, Vol. 9, pp. 1–8, 2019.
- [23] 岩田修一, 内田信悟, 石田和人, 森秀樹. 圧力振動を用いた shear-thinning 性流体からの脱泡. 化学工学論文集, Vol. 33, pp. 294–299, 2007.
- [24] D.Roylance. Engineering viscoelasticity. *Department of Materials Science and Engineering–Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA*, Vol. 2139, pp. 1–37, 2001.
- [25] 田中勝敏, 中山和郎. ポリアミド/ポリプロピレン系ポリマーブレンドの動的粘弾性. 高分子論文集, Vol. 50, No. 6, pp. 497–505, 1993.
- [26] 岩室秀. 超音波照射された擬塑性流体中における物体の高速化. Master’s thesis, 大阪大学, 2020.
- [27] 岡小天著. レオロジー：生物レオロジー, pp. 96–98. 物理科学選書；7. 裳華房, 1974.
- [28] 小野木重治著. 化学者のためのレオロジー, pp. 84–86. 化学モノグラフ；32. 化学同人, 1982.
- [29] I.A.Frigaard A.M.V.Putz, T.I.Burghelea and D.M.Martinez. Settling of an isolated spherical particle in a yield stress shear thinning fluid. *Physics of Fluids*, Vol. 20, No. 033102, 2008.
- [30] 国立天文台編集. 理科年表 2022, p. 398. 丸善出版, 2021.
- [31] N.S.Deshpande and M.Barigou. Vibrational flow of non-newtonian fluids. *Chemical Engineering Science*, Vol. 56, pp. 3845–3853, 2001.

- [32] R.Green M.Wiklund and M.Ohlin. Acoustofluidics 14: Applications of acoustic streaming in microfluidic devices. *Lab on a Chip*, Vol. 12, pp. 2438–2451, 2012.
- [33] 岩室秀, 渡村友昭, 杉山和靖. 擬塑性流体中の落下球に及ぼす超音波照射の影響. *混相流*, Vol. 33, pp. 87–95, 2019.
- [34] T.Shiratori Y.Tasaka and Y.Murai. Rapid rheological characterization of a viscoelastic fluid based on spatiotemporal flow velocimetry. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 71, pp. 1–13, 2016.