

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 factors enhancing falling speed. The speed was determined using time-series images. The pressure was measured using a hydrophone. PAA solution was used as the test medium. The non-Newtonian fluid was assumed to involve the power-law viscosity and the elasticity, and its rheology was identified using a viscometer and a rheometer. Experiments were conducted with parameterizing the fluid properties, and the density and diameter of the sphere. We confirmed that the speed-up by ultrasonic irradiation is related to the shear-thinning viscosity, and the acoustic boundary layer thickness. The effects of elasticity as well as viscosity were also examined. The results suggest that the speed-up is suppressed by elastic nature.

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 粘弾性計測	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	16
3.1 粘度 計測結果	16
3.2 弾性率 計測結果	17
3.3 圧力振幅 計測結果	19
4 理論	20
4.1 擬塑性流体中における球の落下	20
4.2 超音波照射された擬塑性流体中の球周囲流体の領域に関して	22
4.3 超音波照射に伴う球の高速化	22
5 高速化に対する球密度の影響	24
6 高速化に対する溶液濃度の影響	27
7 高速化に対する球径の影響	30
7.1 PAA1.0wt.%の場合	30
7.2 PAA0.5wt.%の場合	31
7.3 PAA0.2,1.3wt.%の場合	33
8 高速化に対する粘度比の影響	34
9 高速化に対する弾性の影響	35
9.1 高速化度合と応力比の関係	35
9.2 高速化に対する粘度比・応力比の影響	36
10 結言	38
A 球落下実験 実験結果	39
A.1 密度・濃度による影響に関して	39
A.2 球径による影響に関して	42

B	実験装置の改良による影響	44
B.1	実験装置	44
B.2	落下実験結果	45
C	初速による影響に関して	47
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	47
E	溶液作製精度による影響	49
E.1	溶液の粘性特性に関して	49
E.2	溶液の作製精度による高速化への影響	50
F	落下間隔変化における高速化への影響	51
	参考文献	54

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 流体には Shear thinning 流体 (Pseudoplastic), Shear thickening 流体 (Dilatant fluid), Bingham plastic 流体, Viscoplastic 流体, Viscoelastic 流体が挙げられる。非 Newton 流体のうち, Bingham plastic 流体, Viscoplastic 流体は外力によるせん断応力がある値を超えないとせん断速度が発生しない流体である。これらの例として, 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 流体の例として, 水溶き片栗粉や液体ボディーマー, 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 流体の粘度を表すモデルには, Power-law model (Ostwald-De Waele model)[13], Cross model[14], Carreau model[15], Carreau-Yasuda model[16] や Herschel-Bulkley model[17, 18] などがある [1]。Power-law model はせん断速度の限られた範囲にて適用される。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 モデルは指数によって 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, 擬塑性流体である泥やポリマーの輸送を行うことがある。輸送効率を上げるには, 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。

非 Newton 流体中を運動する気泡や剛体を対象とする研究では周囲流体の粘度分布や流動構造の影響に着目したものが多い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あたえる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に関しては, 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う, 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が計測されている. 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提案している. また, 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ことから, 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.

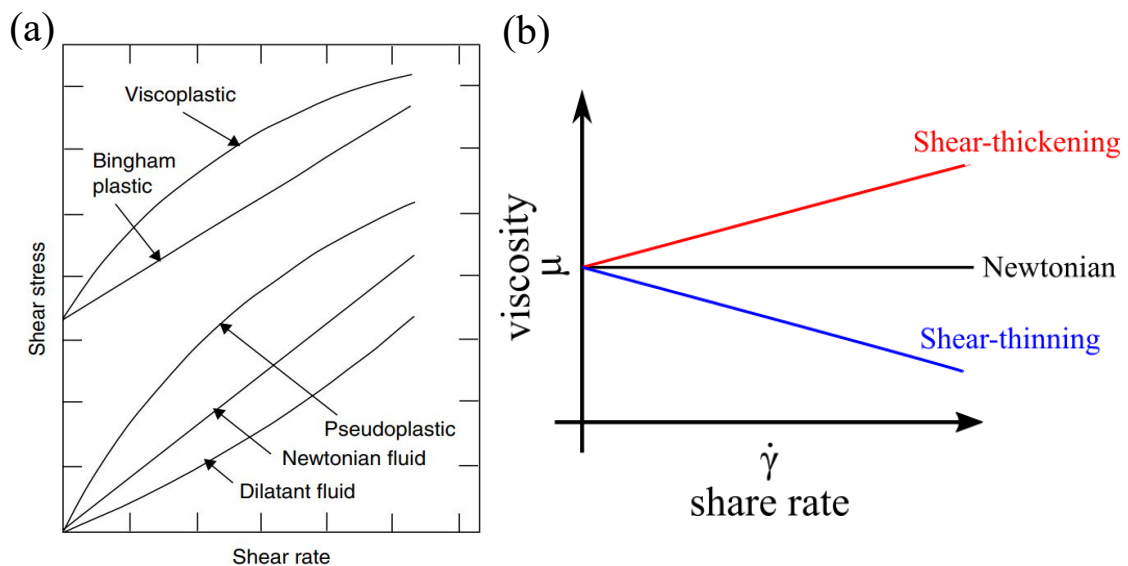


Fig 1.1: (a) Qualitative flow curves for different types of non-Newtonian fluids[1].
(b) Classifications of non-Newtonian power-law fluid.

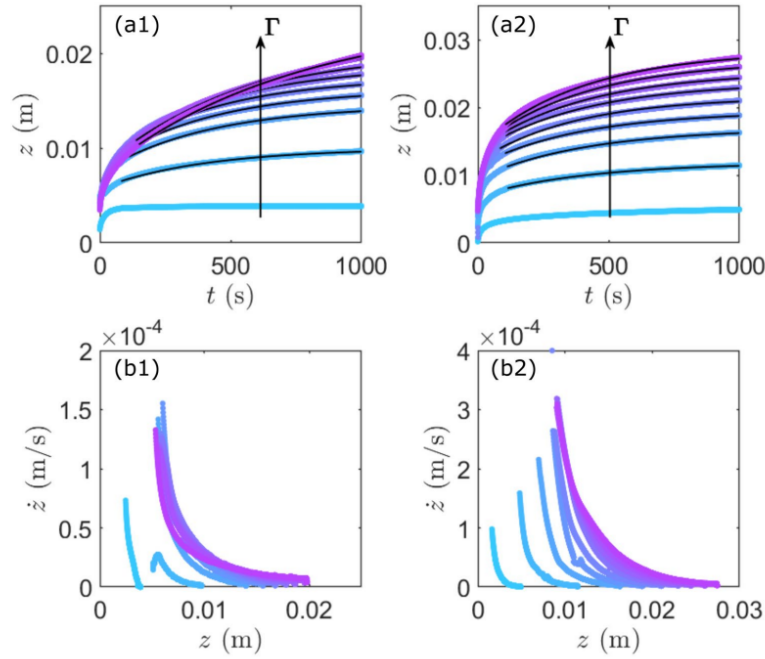


Fig 1.2: Sinking dynamics for different intruder-sizes and for different vibration intensities Γ . (a1) Depth z versus time t for z an intruder with radius of 4mm and (a2) for an intruder with radius of 7mm. (b1) Instantaneous velocity versus sinking depth z obtained from (a1) and (b2) from (a2). The 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の落下球の高速化要因として，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提案されている．また，高速化が弾性によって抑制されることが示唆されている．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，弾性が高速化を抑制することは検証が十分ではない．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，球の落下運動が高速の場合，粘性影響が支配的である．一方で，低速の場合は弾性影響が支配的となる．落下球の終端速度を変化させ，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．また，先行研究 [26] において高速化メカニズムより理論が提唱された．この理論の妥当性の検証を第 2 の目的とする．

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 Fig2.1 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．

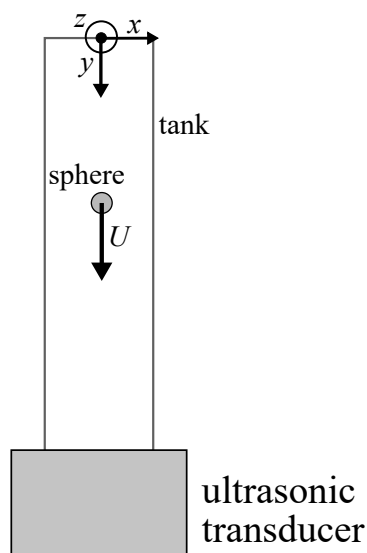


Fig 2.1: Experimental system and coordinate system.

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 ポリビ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 Fig2.2 に示す。ステージと回転するコーンロータ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

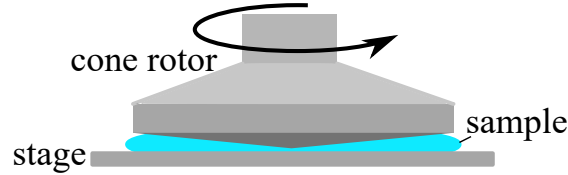


Fig 2.2: Viscosity measurement method.

2.4 粘弾性計測

作製した PAA 溶液の粘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 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 Fig9.1 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、

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

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

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

と場合分けできる。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があることを示している。以上より、貯蔵弾性率 G' は弾性影響を、損失弾性率 G'' は粘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は、

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

と書ける。ここで、 $\tan \eta$ は損失正接と呼ばれる [27][28]。この損失正接は、

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

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

と、場合分けできる。式 (2.14) の場合は、損失弾性率よりも貯蔵弾性率の方が大きく、弾性による影響が強い。一方で、式 (2.15) の場合は、貯蔵弾性率より損失弾性率の方が大きく、粘性による影響が強い。本研究では、損失正接を用いて粘性、弾性の強さを考える。

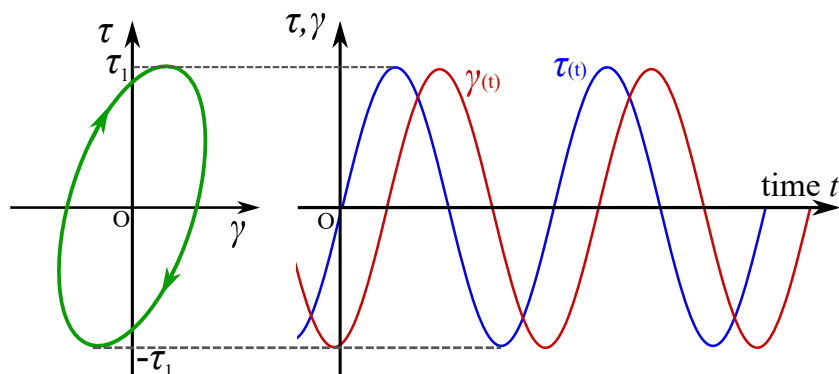


Fig 2.3: Relationship between shear rate and stress in viscoelastic materials.

2.4.2 計測手法

弾性率計測の概略図を Fig2.4 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 Table2.2 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))

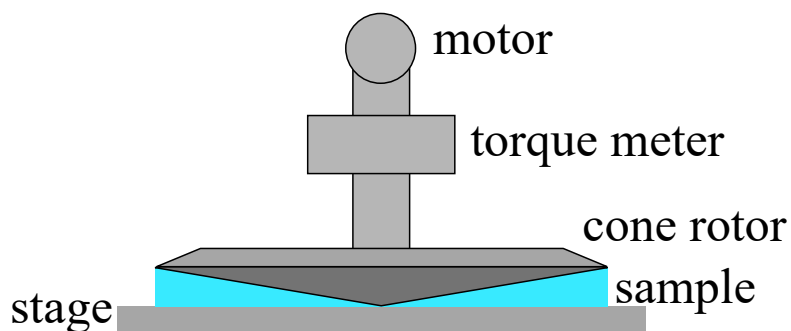


Fig 2.4: Elastic modulus measurement conditions.

2.5 圧力場計測

圧力場計測の概略を Fig2.5 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 $\leq 60\text{dB}$)

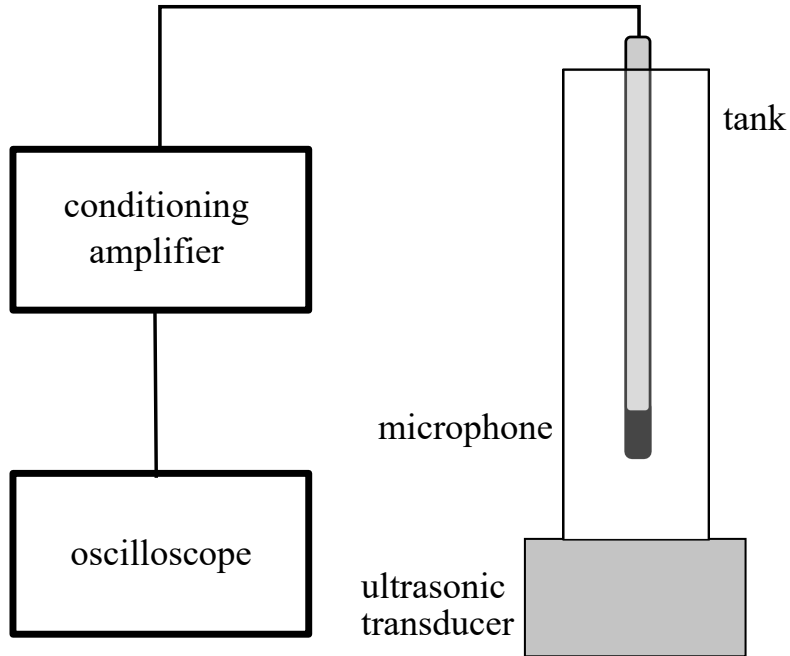


Fig 2.5: Schematic outline for pressure measurement.

2.6 球落下実験

使用した実験装置の概略図を Fig2.6 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 の球を保持した．三方弁を用いて真空パッドを大気圧にすることで球の把持を解除し，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，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した．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．

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．

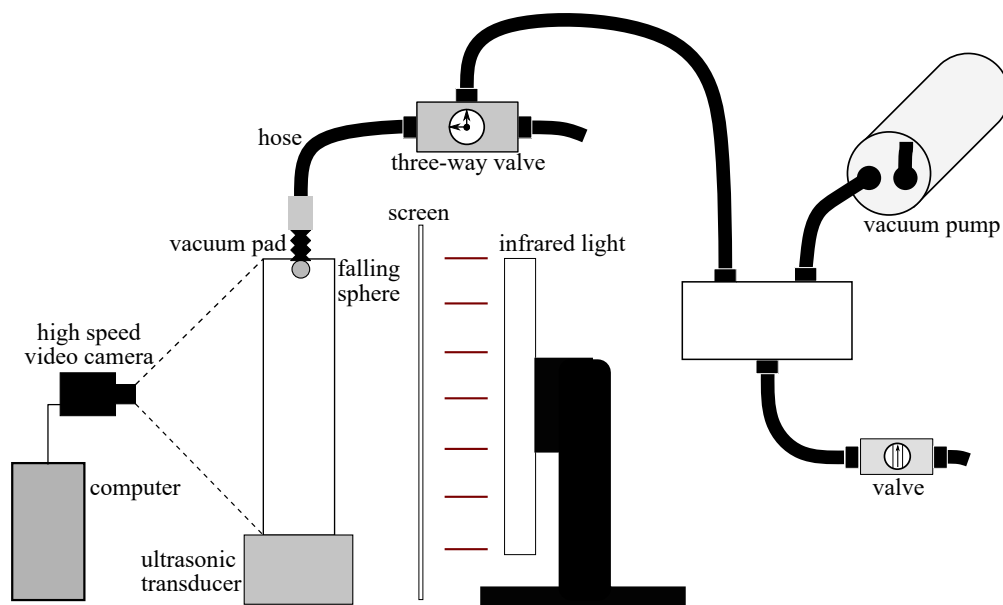


Fig 2.6: Schematic view of the experimental apparatus.

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 Fig2.7 に示す。ファンクションジェネレータによって、周波数、電圧を制御し、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、この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。これらの信号はオシロスコープによってモニタリングし、正常に出力されているか確認した。パワーアンプで増幅された信号を、ランジュバン型振動子 (富士セラミックス, FBL28502HA) に印可し、溶液へ超音波を照射した。振動子は円形の SUS 製プレートに接着したものをを用いた。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、溶液中において共振状態となる 27.4kHz に固定した。これは、溶液中の圧力振幅を最大とするためである。

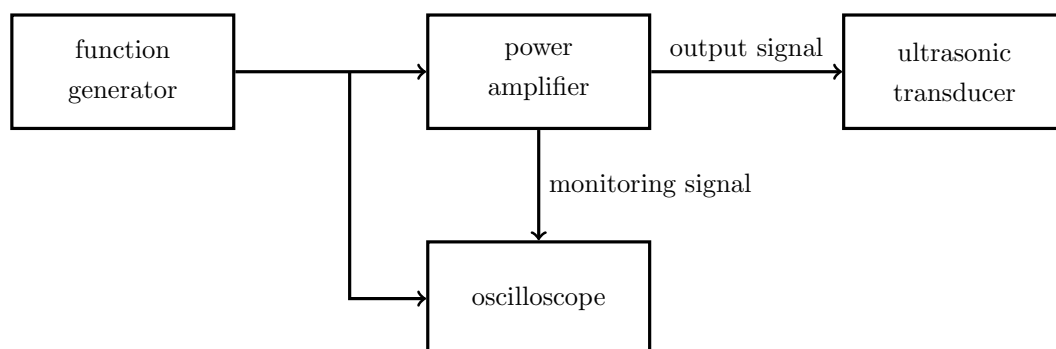


Fig 2.7: Schematic outline for ultrasonic control system.

2.7 実験手順

実験手順のフローチャートを Fig2.8 に示す。まず初めに、試験溶液である PAA 溶液を作製した。続いて、粘度を計測した。その後、圧力場を計測し、PAA 溶液中に適切に圧力場が形成されているか確認した。そして、球落下実験を行い超音波照射の影響を調べた。

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、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、超音波照射ありの実験を行った。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にするには、十分な時間をあけて球の落下を行う必要がある。実験の再現性に関して、先行研究 [29] では、等間隔の時間をあけて実験を行うと、落下速度がほぼ同じになることが報告されている。本実験においては、10 分間隔で物体を落下させることで、再現性をはかった。

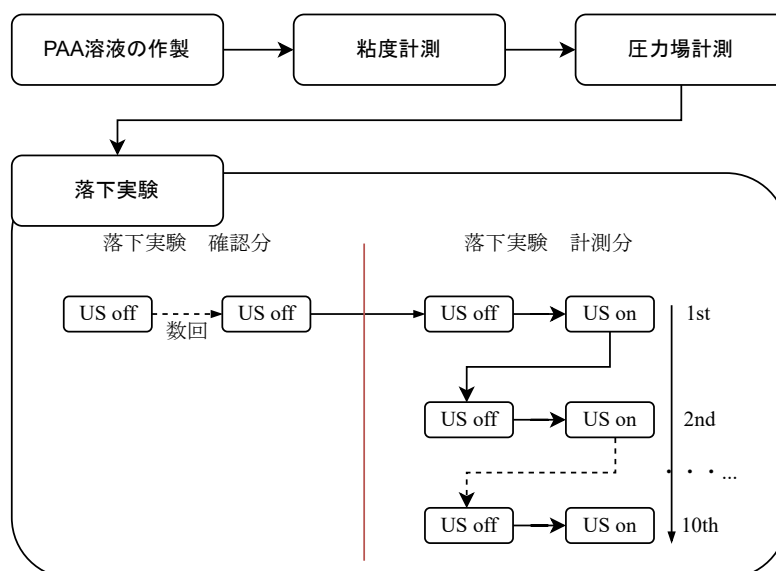


Fig 2.8: Flowchart of the experimental procedure.

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、Fig2.9(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の輪郭線に対して、特徴点を一定数以上通る曲線を検出する手法である。本実験では背景処理と Sobel filter を用いて、球の輪郭画像を得た。

2.8.1 背景処理と Sobel filter

上述のように、Hough 変換の前処理として、背景処理と Sobel filter の処理を行った。撮影した連続画像から得た背景処理画像を Fig2.9(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、移動を伴う球抽出できる。続いて、背景処理画像に Sobel filter を適用した。Sobel filter 処理後の画像を Fig2.9(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、Fig2.10(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。Fig2.10(a) により y 軸方向の輪郭を、Fig2.10(b) により x 軸方向の輪郭を強調する。Fig2.10(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。

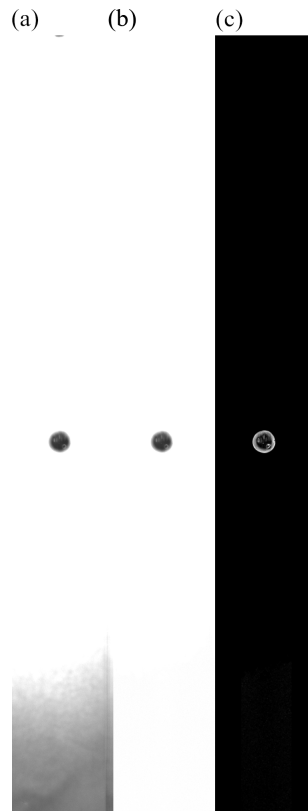


Fig 2.9: (a) Original image, (b) Image used by background processing and, (c) Image used by Sobel filter.

(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 (Fig2.9(c)) に, Hough 変換を適用し円を検出した. 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 $D(x_c, y_c, r)$ に関して考えると, Fig2.11 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する. 3 つの円の中心座標 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, 球の落下速度を計算した.

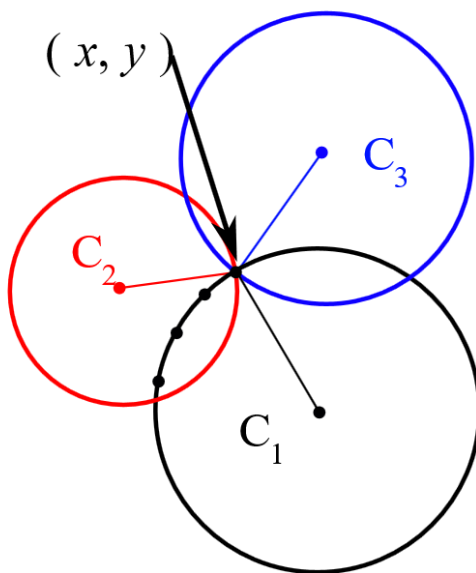


Fig 2.11: Outline of Hough transform.

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、粘度計を用いて計測した。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には時間を要するため、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 回計測し、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。2.3 節で示されたように、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 $1.1\text{mPa}\cdot\text{s}$ でほぼ一定となった。これは、水がニュートン流体であり、速度勾配とせん断応力が比例することを表す。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。

PAA 溶液の粘度計測結果を 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。溶液の濃度が上昇すると、粘度が大きくなった。ここで、Power-law model に従うものとする、せん断速度 $\dot{\gamma}$ より粘度 μ は次式で表される [1]。

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

ここで、 k は粘度定数、 n は粘度指数である。式 (3.1) で計測値をフィッティングした線の k, n の値を、Table 3.1 に示す。溶液の濃度が濃いほど、 n は小さくなる。これは擬塑性が強くなることを表す。

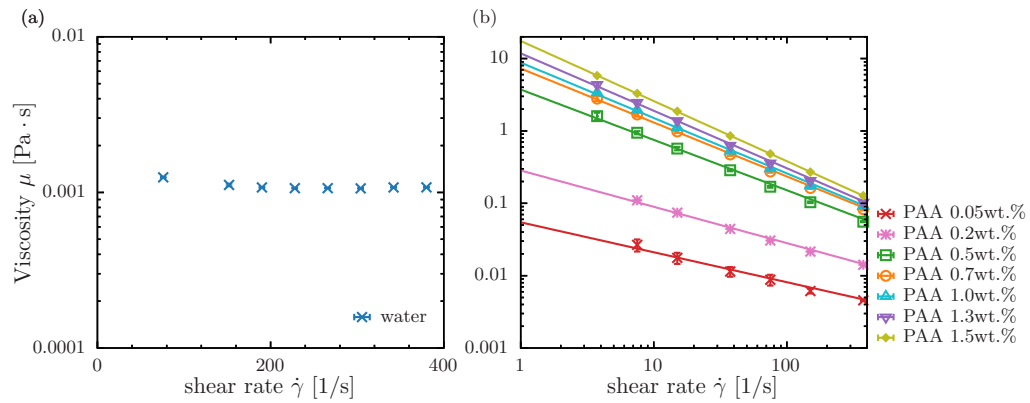


Fig 3.1: Viscosity versus shear rate for (a) tap water, (b) PAA solution.

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 溶液の弾性特性を得るため、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
τ_0 [Pa]	0.082	0.11	9.9	18	22	40	55

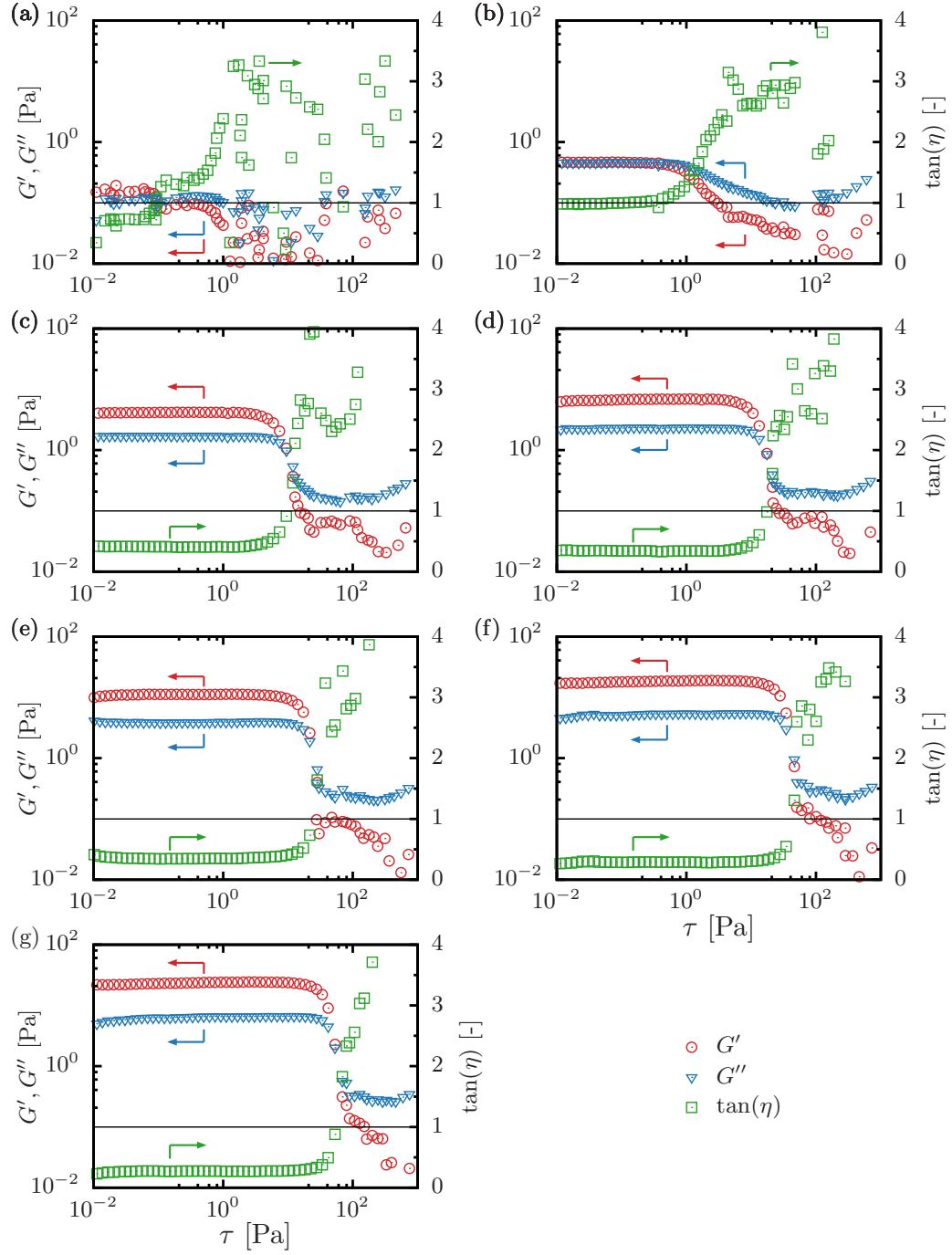


Fig 3.2: Stress dependence of storage and loss elastic moduli for (a)0.05wt.% (b)0.2wt.% (c)0.5wt.% (d)0.7wt.% (e)1.0wt.% (f)1.3wt.% (g)1.5wt.%.

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．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，容器内に形成する圧力場は，周期的な振幅で分布する．これは定在波の性質を示し，共振状態にあることで，圧力振幅が数気圧分に至る．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

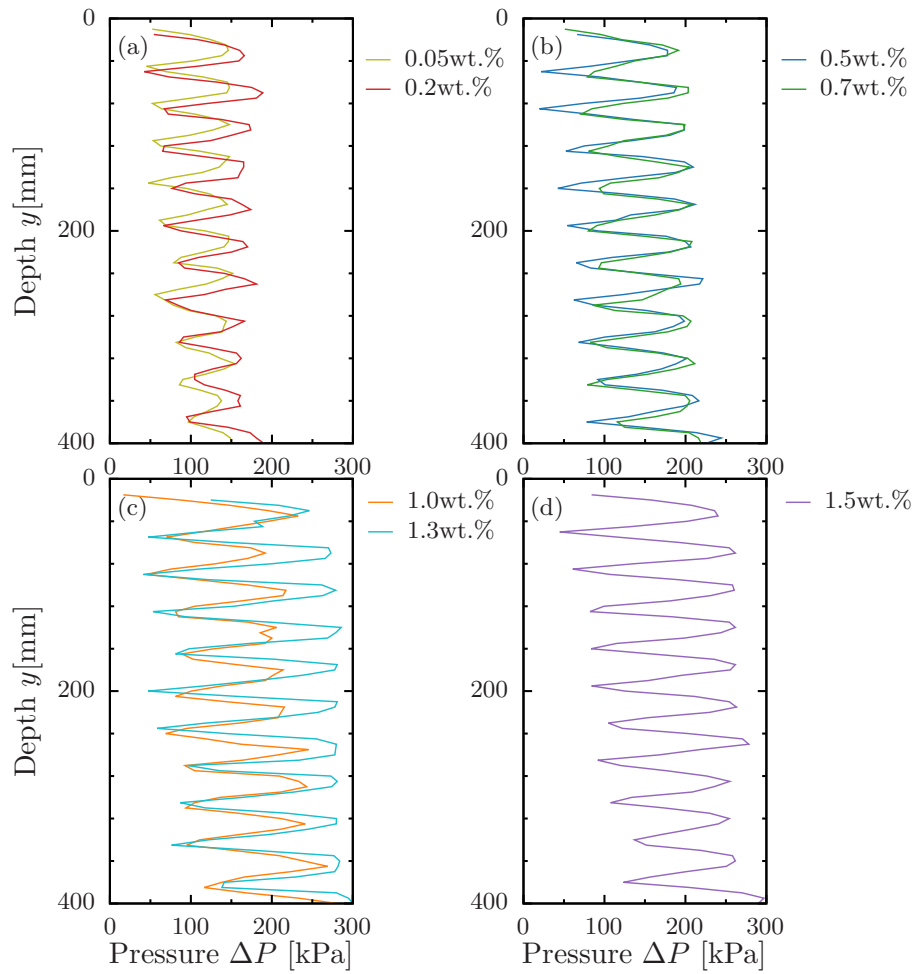


Fig 3.3: Average pressure amplitude in (a)0.05wt.% and 0.2wt.%, (b)0.5wt.% and 0.7wt.%, (c)1.0wt.% and 1.3wt.%, (d)1.5wt.% PAA solution.

4 理論

第 2.1 節で示した通り，本研究の系では超音波照射された擬塑性流体中を球が落下する．はじめに，擬塑性流体中を球が落下する理論より，球の終端速度のオーダー評価を得る．また，超音波照射による擬塑性流体中の落下球の高速化メカニズムより，落下球周囲の領域ごとの粘度のオーダー評価を得る．そして，超音波照射の有無による速度比のオーダー評価を得る．第 5 章以降の実験によって，これらのオーダー評価の妥当性の検証を行う．

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．この条件を，式 (4.1) に代入すると $Re \approx 2.3$ と概算できる．粒子周囲の流れは慣性に比べて粘性が支配的であり，ストークス方程式に概ね従うものとする．

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．これは，球の落下現象の時間スケール $O(10^0) \text{ s}$ と比べて非常に短い．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運動量輸送を考える．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 ，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，以下の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) の左辺は，以下のように書ける．

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

流れは十分に発達し，定常状態であると仮定すると，式 (4.4) の右辺第 1 項の時間微分項は 0 となる．低レイノルズ数であることから Stokes 近似を用いると，式 (4.4) の右辺第 2 項の慣性項は無視できる．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 と書ける．これらの仮定より，式 (4.2) を以下のように簡略化する．

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

粒子重心周りの球形領域において，ガウスの発散定理を適用すると以下の関係が成り立つ．

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

ここで， \mathbf{n} は球領域および粒子の表面での外向き単位法線ベクトル， S はそれぞれの球の表面積， V は 2 つの球の間の体積を表す．式 (4.5) より，式 (4.6) の右辺は 0 とする．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、球領域表面では $\mathbf{n} = \mathbf{e}_r$ 、粒子表面では $\mathbf{n} = -\mathbf{e}_r$ である。式 (4.7) は、任意の領域での、面積力の釣り合いを表す。 $r = a$ における時間平均応力のオーダーを $\langle \sigma \rangle_a$ 、 r における時間平均応力のオーダーを $\langle \sigma \rangle_r$ とそれぞれする。球の表面積は $S = 4\pi r^2$ であるので、式 (4.7) より、以下の関係が成り立つとみなす。

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

粒子表面での表面力と体積力の釣り合いより、以下の関係を考える。

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

となる。ここで、 $\Delta \rho$ は球と流体の密度差、 g は重力加速度である。式 (4.8),(4.9) より、以下のようオーダー評価できる。

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

低レイノルズ数で粘性項が支配的であることから、応力を以下のように概算する。

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

Power-law model(式 (3.1)) の粘度を式 (4.11) に代入して整理すると以下の関係を得る。

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

次に、エネルギー散逸に関して考える。単位時間あたりのエネルギーバランスは、位置エネルギーと粘性によるエネルギー散逸の時間変化の釣り合いとして書ける。すなわち、釣り合うため、より、以下の式が成立する。

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

と表される。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率である。また、エネルギー散逸率 $\bar{\epsilon}$ 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 超音波照射された擬塑性流体中の球周囲流体の領域に関して

超音波照射された擬塑性流体中の球周囲流体の領域の概略図を Fig4.1 に示す．球の周囲より音響境界層，球の落下による領域，バルク領域と分類される．音響境界層におけるせん断速度を $\dot{\gamma}_{ABL}$ ，球の落下による球周囲のせん断速度を $\dot{\gamma}_U$ ，バルク領域におけるせん断速度を $\dot{\gamma}_{Bulk}$ とすると，それぞれ以下のように見積もられる．

$$\dot{\gamma}_{ABL} \sim \frac{u}{\delta}, \quad (4.17)$$

$$\dot{\gamma}_U \sim \frac{U_T}{a}, \quad (4.18)$$

$$\dot{\gamma}_{Bulk} \sim \frac{u}{\lambda}. \quad (4.19)$$

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．音響境界層厚さ δ は，次式のように見積もられる [31, 32]．

$$\delta \sim \sqrt{\frac{\mu_{ABL}}{\pi \rho_h f}}, \quad (4.20)$$

ここで，周波数 f である．それぞれの領域のせん断速度（式 (4.17)-(4.19)）より，Power-law model(式 (3.1)) を適用すると，音響境界層における粘度を μ_{ABL} 球の落下による球周囲の粘度を μ_U ，バルクにおける粘度を μ_{Bulk} とすると，それぞれ以下のように見積もられる．

$$\mu_{ABL} \sim k \left(\frac{u}{\delta} \right)^{n-1}, \quad (4.21)$$

$$\mu_U \sim k \left(\frac{U_T}{a} \right)^{n-1}, \quad (4.22)$$

$$\mu_{Bulk} \sim k \left(\frac{u}{\lambda} \right)^{n-1}. \quad (4.23)$$

以上より，式 (4.11) を用いて球の落下による応力 τ_U は，以下のように見積もられる．

$$\tau_U \sim k \left(\frac{U_T}{a} \right)^n, \quad (4.24)$$

4.3 超音波照射に伴う球の高速化

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．

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial P}{\partial z} = 0. \quad (4.25)$$

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．

$$\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{\rho_1 c^2} \frac{\partial P}{\partial t} = 0. \quad (4.26)$$

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，以下の近似を用いる．

$$\frac{\partial u}{\partial t} \sim u f, \quad (4.27)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} \sim \Delta P, \quad (4.28)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \sim \frac{1}{\lambda}. \quad (4.29)$$

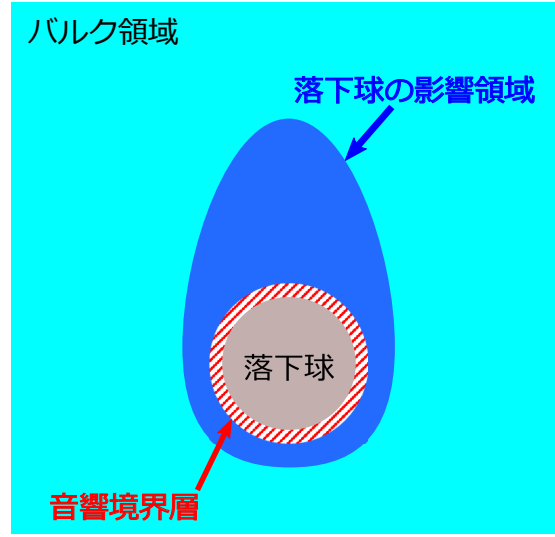


Fig 4.1: Layers of the effect of a falling sphere on the fluid.

ここで, ΔP は音響圧振動, λ は超音波の波長である. 式 (4.27),(4.28),(4.29) を用いて, 式 (4.25) の近似を行うと次式のようになる.

$$uf \sim \frac{\Delta P}{\rho_1 \lambda}. \quad (4.30)$$

周波数 f , 波長 λ , 音速 c の関係から式 (4.30) を書き換えると次式となる.

$$u \sim \frac{\Delta P}{\rho_1 c}. \quad (4.31)$$

音響境界層厚さ δ は, 式 (4.20) に式 (4.21) を代入すると, 次のように表される.

$$\delta \sim \left(\frac{k (\Delta P)^{n-1}}{\pi \rho_1^n c^{n-1} f} \right)^{\frac{1}{n+1}}. \quad (4.32)$$

よって, 超音波照射下における終端速度 U_{on} は, 式 (4.16) より,

$$U_{\text{on}} \sim \frac{a^3 \Delta \rho g}{3} \int_a^\infty \frac{dr}{\mu_{ABL} r^2} \sim \frac{a \Delta \rho \delta g}{3 \mu_{ABL}}, \quad (4.33)$$

と見積もられる. 終端速度 U_{off} における, 粘度 μ_U とする. 式 (4.16),(4.33) より, 超音波照射の有無による終端速度比は,

$$\frac{U_{\text{on}}}{U_{\text{off}}} \sim \frac{\mu_U}{\mu_{ABL}} \frac{\delta}{a}, \quad (4.34)$$

と表される.

5 高速化に対する球密度の影響

超音波照射による擬塑性流体中の落下球の高速化に対する、球密度の影響を調べる．実験条件を Table2.7 に示す．式 (4.34) より、落下球高速化は球径の影響を受けることが示唆される．しかし本実験条件では、球径の差が5%程度にとどまることから、密度変化による影響のみに注目し、球径は同一として考える．

実験によって得た落下速度の時間変化を FigA.1-A.4 に示す．これより求めた、超音波照射のない状態の終端速度 U_{off} と密度差 $\Delta\rho$ の関係を Fig5.1 に示す．当然ながら、密度差が大きくなると、終端速度が大きくなる．超音波照射のない落下速度の理論式 (4.16) より、密度差のべき乗として、終端速度は以下の比例関係が成り立つ．

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

縦軸を終端速度、横軸を式 (5.1) の右辺とした実験結果を Fig5.2 に示す．また、式 (5.1) の近似が成立すると仮定した場合の近似曲線も併せて示す．すべての溶液濃度において終端速度は近似曲線に対してばらつきが存在した．これは、式 (5.1) の近似が適当でないことを示唆している．

溶液濃度ごとに高速化度合 $U_{\text{on}}/U_{\text{off}}$ と密度差 $\Delta\rho$ の関係を Fig5.3 に示す．PAA 濃度 0.2,1.5wt.% において、高速化度合は 1.05 程度で高速化が見られない．PAA 濃度 0.5,0.7wt.% において、高速化度合と密度差には正に相関する．一方で、PAA 濃度 1.0wt.% において、高速化度合と密度差は負に相関する．PAA 濃度 1.3wt.% において、すべての落下球において高速化度合は 1.1 程度となり、高速化度合の密度差の変化による変化が見られない．

高速化に対する球密度による影響を考える．第 4.3 節で説明した、式 (4.33),(4.16) より、超音波照射の有無による速度の比は次式で与えられる．

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

本実験では、落下球の密度差 $\Delta\rho$ のみをパラメータとして考えるため、速度比には以下の比例関係が成り立つ．

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

Table.3.1 より、式 (5.3) の指数部は $-4.9 < (n-1)/n < -0.69$ となる．よって、式 (5.3) より、密度差 $\Delta\rho$ が増加すると、高速化度合 $U_{\text{on}}/U_{\text{off}}$ は減少すると仮定される．高速化度合 $U_{\text{on}}/U_{\text{off}}$ と式 (5.3) の右辺 $\Delta\rho^{((n-1)/n)}$ の関係を Fig5.4 に示す．PAA 濃度 1.0wt.% においてのみ、高速化度合と横軸は正の相関となった．それ以外では、相関が見られないか、負の相関となった．これは、PAA 濃度 1.0wt.% の場合のみ式 (5.3) が適用でき、それ以外の条件では適用できないと分かる．これより、密度差以外による要因が大きく影響を与えているためと示唆される．

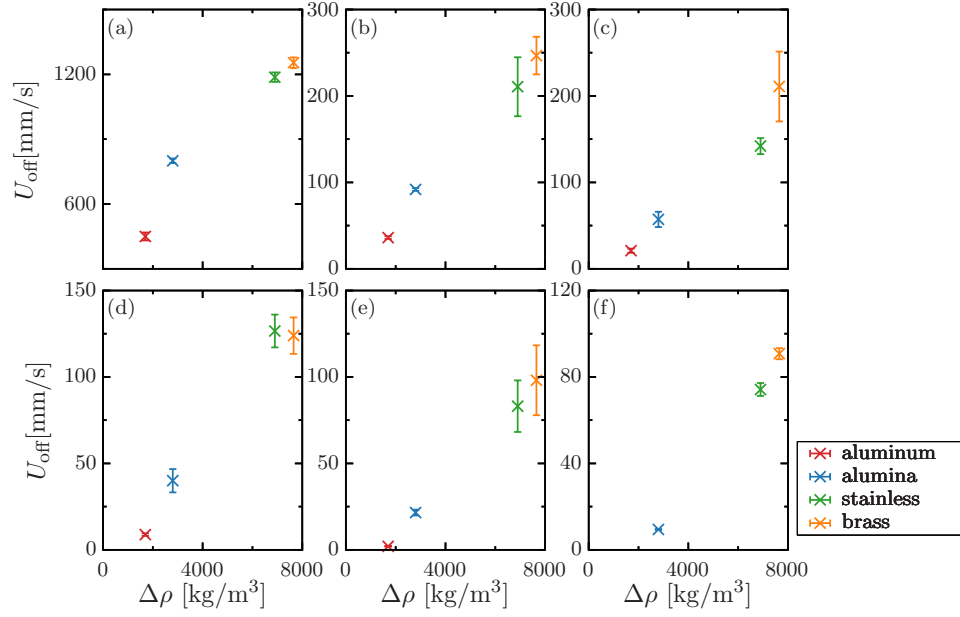


Fig 5.1: Terminal velocity with varying density difference in PAA solution (a)0.2wt.%, (b)0.5wt.%, (c)0.7wt.%, (d)1.0wt.%, (e)1.3wt.%, (f)1.5wt.%.

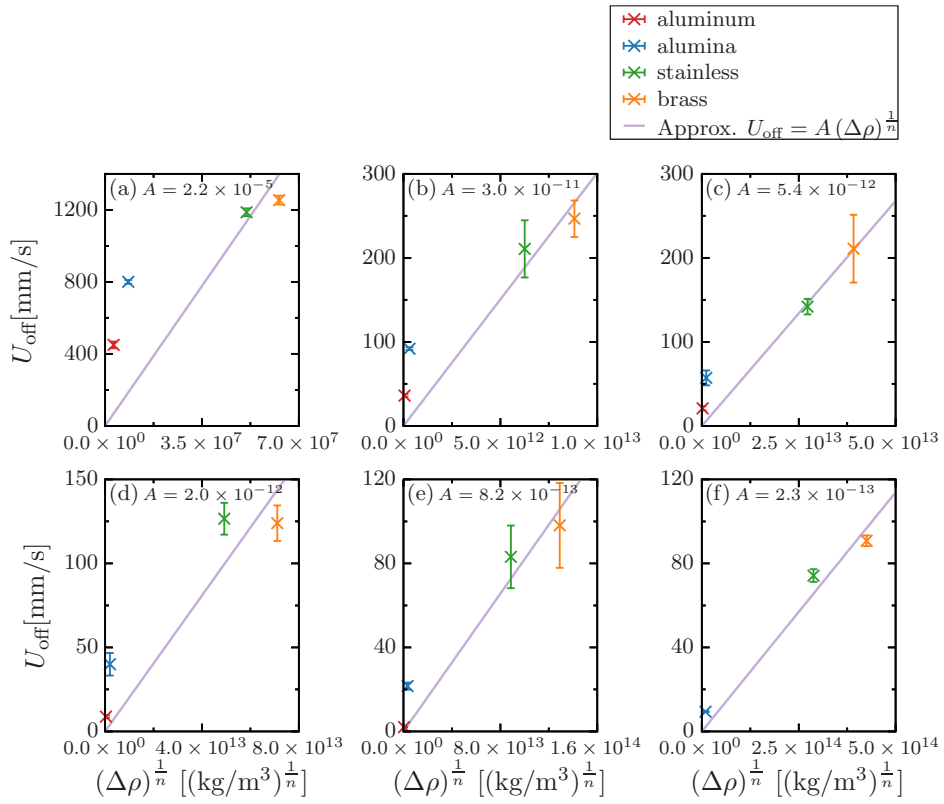


Fig 5.2: Terminal velocity with varying density difference by index n in PAA solution (a)0.2wt.%, (b)0.5wt.%, (c)0.7wt.%, (d)1.0wt.%, (e)1.3wt.%, (f)1.5wt.%.

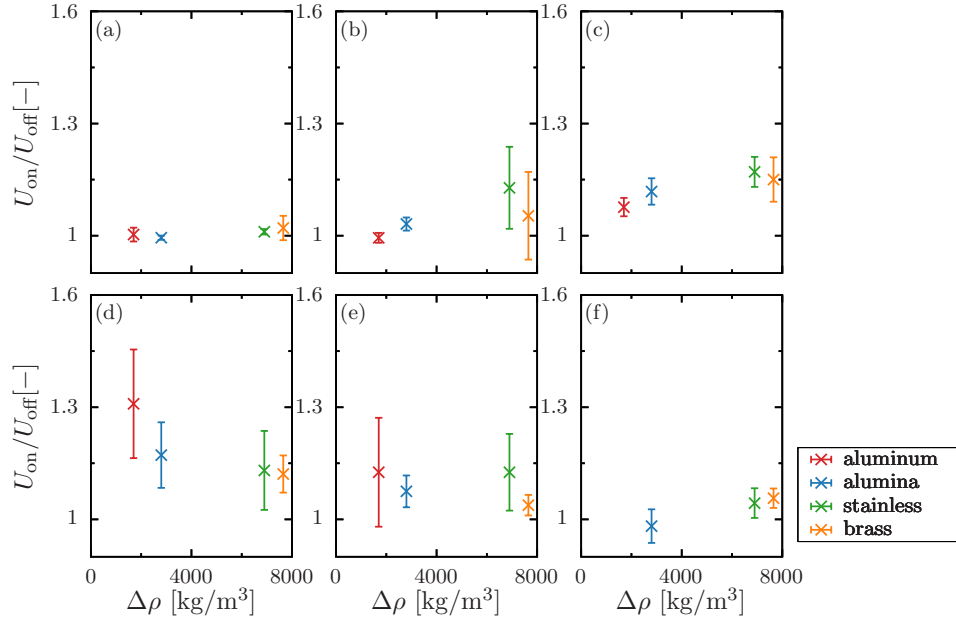


Fig 5.3: Velocity ratio versus density difference in PAA solution (a)0.2wt.%, (b)0.5wt.%, (c)0.7wt.%, (d)1.0wt.%, (e)1.3wt.%, (f)1.5wt.%.

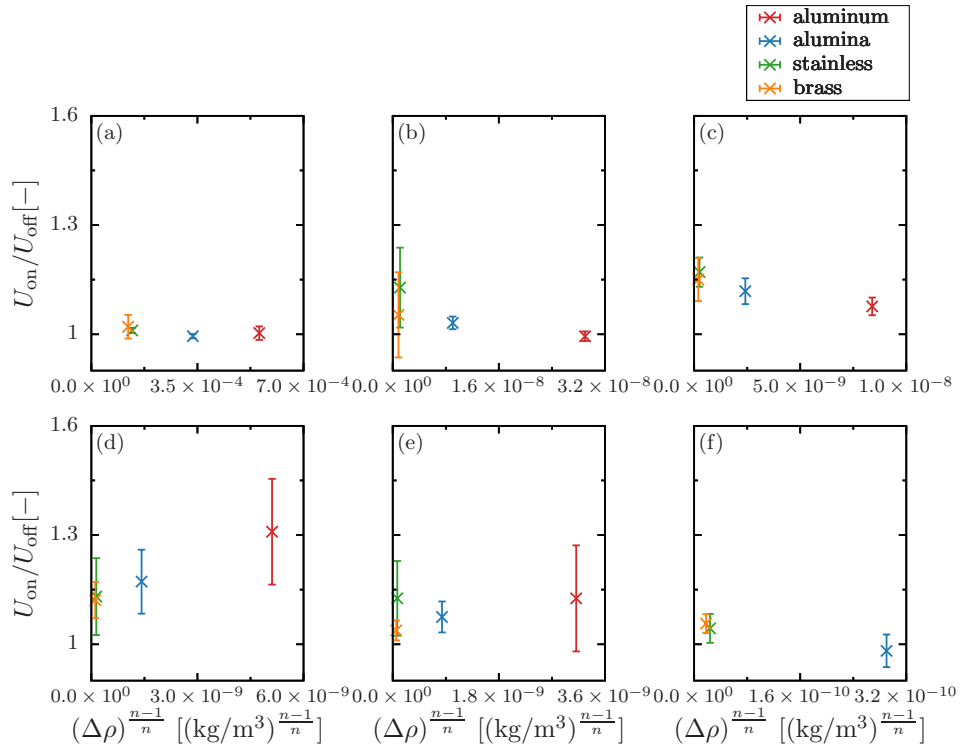


Fig 5.4: Velocity ratio versus density difference by index n in PAA solution (a)0.2wt.%, (b)0.5wt.%, (c)0.7wt.%, (d)1.0wt.%, (e)1.3wt.%, (f)1.5wt.%.

6 高速化に対する溶液濃度の影響

超音波照射による擬塑性流体中の落下球の高速化に対する溶液濃度の影響を調べる．実験条件を Table.2.7 に示す．式 (4.34) より，落下球高速化は球径の影響を受けることが示唆される．しかし，本実験条件では，球径の差が 5% 程度にとどまることから，球径は同一として考える．

PAA 溶液濃度と終端速度の関係を Fig6.1 に示す．溶液濃度が高くなると，終端速度が遅くなる．超音波照射の有無による速度の比と PAA 溶液濃度の関係を，Fig6.2 に示す．これらの結果より，縦軸を高速化度合，横軸を落下球の密度，溶液濃度の影響を考えた式 (5.2) の右辺とした結果を Fig6.3 に示す．アルミニウム粒子では，濃度の上昇に伴い高速化度合が 1.3 程度となる正の相関が見られた．アルミナで粒子では，PAA 濃度 1.0wt.% で高速化度合が 1.2 程度で最大となり，それ以上の濃度においては高速化度合が 1 に近づき，あまり高速化していない．ステンレス粒子では，濃度との相関が不明瞭であった．真鍮粒子では，PAA 濃度 0.7wt.% の濃度で高速化度合が 1.15 程度で最大となった．これらをまとめた結果を Fig6.4 に示す．超音波照射による速度比は，密度変化，粘度変化に対して弱い正の相関がみられた．高速化に対する溶液濃度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．第 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．

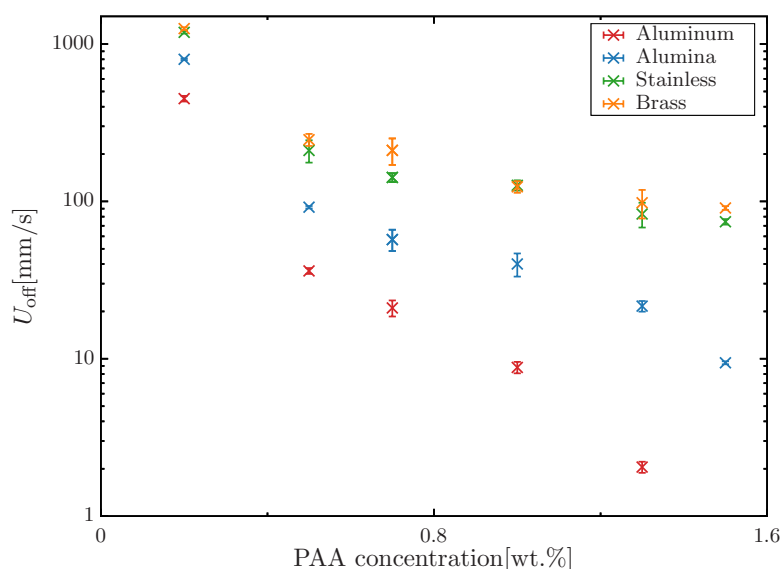


Fig 6.1: Terminal velocity in PAA solution concentration.

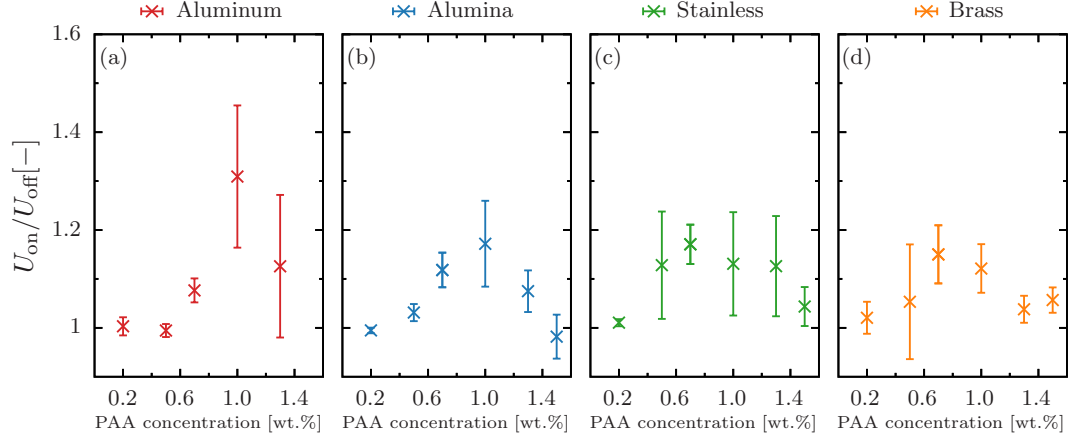


Fig 6.2: Velocity ratio in PAA solution concentration (a)Aluminum, (b)Alumina, (c)Stainless, (d)Brass.

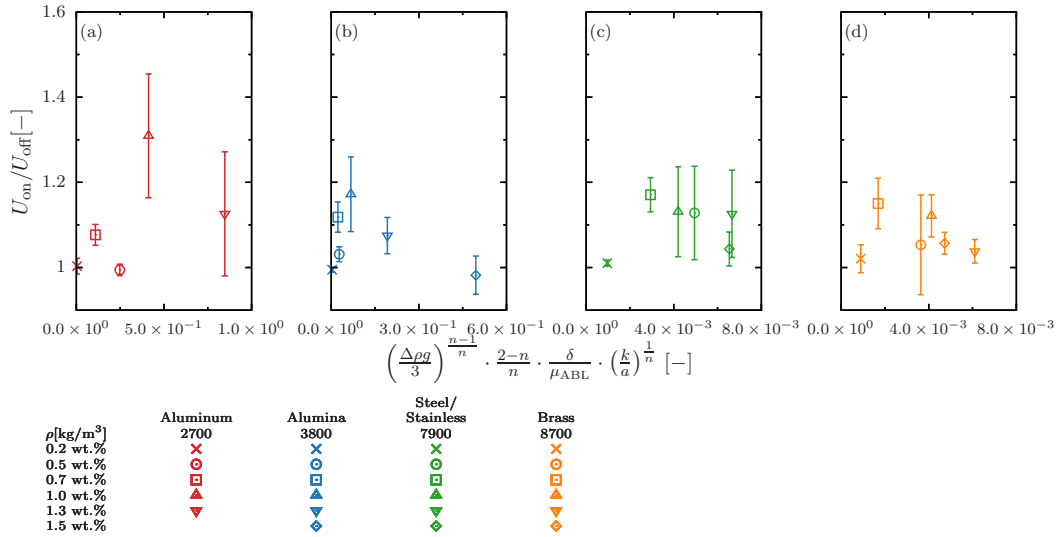


Fig 6.3: Velocity ratio in PAA solution concentration (a)Aluminum, (b)Alumina, (c)Stainless, (d)Brass.

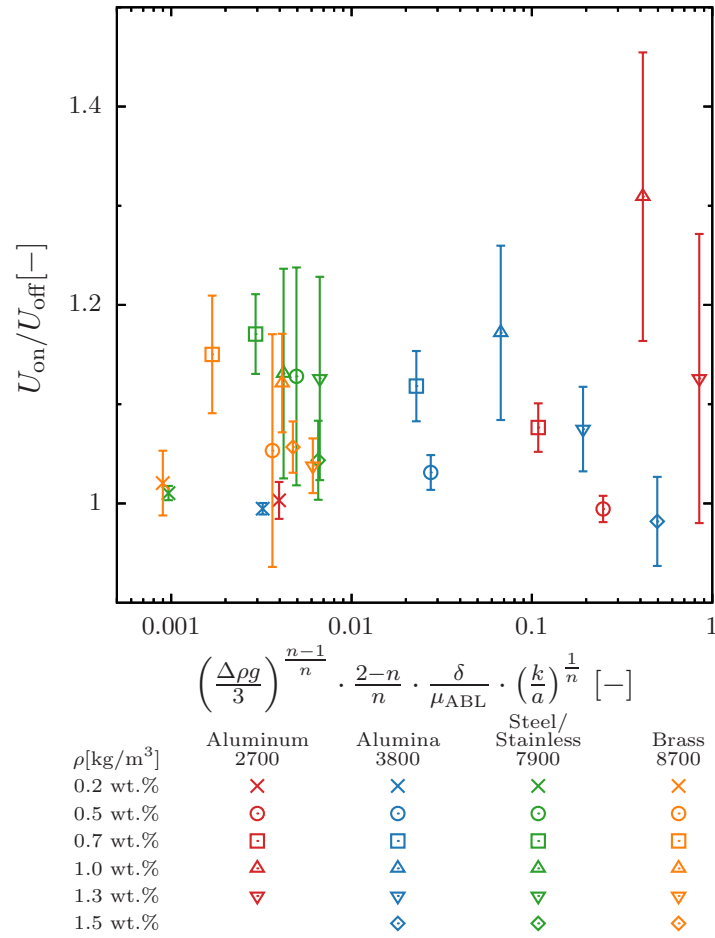


Fig 6.4: Relationship between density, viscosity and terminal velocity.

7 高速化に対する球径の影響

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、異なる寸法の鋼球を用いて落下実験を行った。先行研究に比べて、広いパラメータ範囲で実験条件 (Table 2.8) を定めた。媒質の質量濃度ごとに球径による高速化への影響を検討する。

7.1 PAA1.0wt.%の場合

PAA1.0wt.%における落下速度の時間変化を Fig A.6 に示す。結果を整理することで得た終端速度 U_{off} と球径 D の関係を Fig 7.1(a) に示す。また、超音波照射の有無による落下速度比と球径の関係を Fig 7.1(b) に示す。図より超音波照射による高速化が見られ、球径 10mm をピークをとる。

これらより、縦軸を超音波照射による球の高速化度合い、横軸を粘度比と音響境界層厚さを球の半径で規格化した値との積 (式 (4.34)) とした結果を Fig 7.2 に示す。Fig 7.2(a) においては先行研究 [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。球径 10mm 以上において、超音波照射による球の高速化度合いは粘度比と音響境界層厚さを球の半径で規格化した値との積に、正に相関する。一方で先行研究 [26] において示された範囲では、相関が見られない。これらより、式 (4.34) は球径が 10mm 以上において適用でき、それ以下の球径では適用できないことが分かる。先行研究 [26] では、式 (4.34) が適用できない要因として、弾性影響に由来することが示唆されている。弾性影響は第 9 章で、議論する。

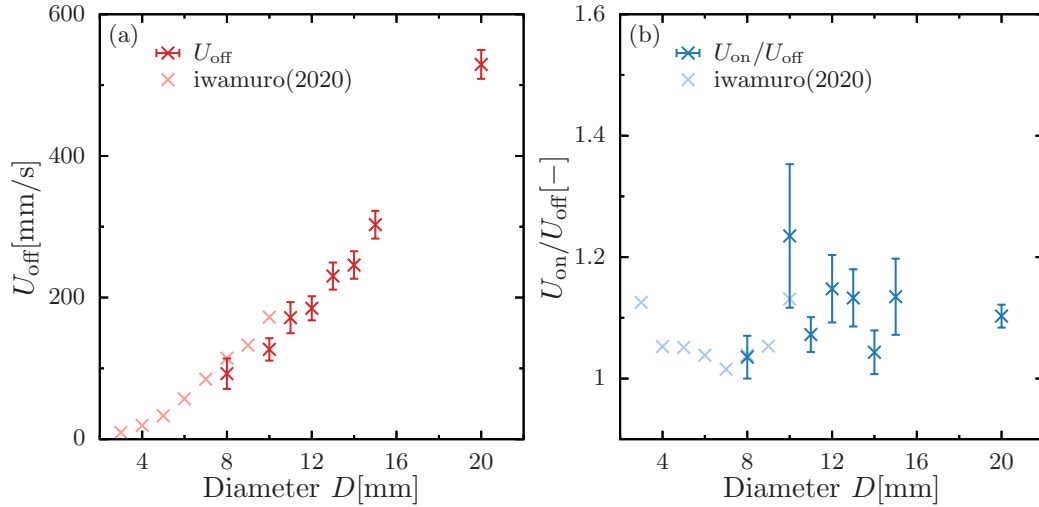


Fig 7.1: Relationship between diameter and (a)terminal velocity, (b)velocity ratio.

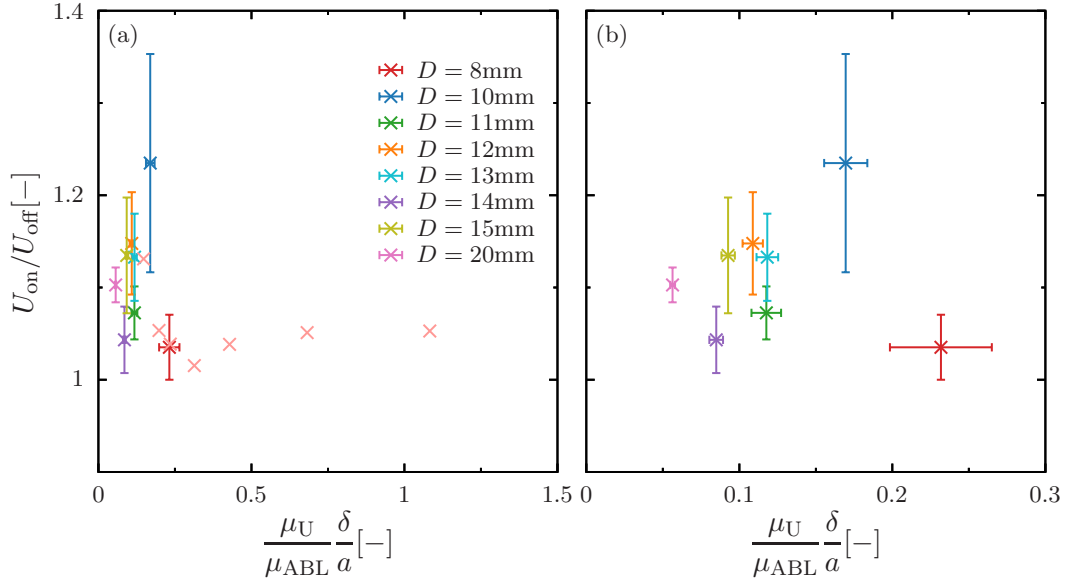


Fig 7.2: Relationship between velocity ratio and viscosity ratio, the acoustic boundary layer thickness, radius (a)with Iwamuro (2020), (b)without Iwamuro (2020).

7.2 PAA0.5wt.%の場合

PAA0.5wt.%における落下速度の時間変化を FigA.5 に示す．結果を整理することで得た終端速度 U_{off} と球径 D の関係を Fig7.3(a) に示す．また，超音波照射の有無による落下速度比と球径の関係を Fig7.3(b) に示す．図より PAA1.0wt.%の場合と同様に，超音波照射による高速化が見られ，球径 10mm をピークをとる．

これらより，縦軸を超音波照射による球の高速化度合い，横軸を粘度比と音響境界層厚さを球の半径で規格化した値との積 (式 (4.34)) とした結果を Fig7.4 に示す．球径 10mm 以上において，超音波照射による高速化度合いと粘度比と音響境界層厚さを球の半径で規格化した値との積に，正に相関する．一方で，球径 5mm の落下球の高速化はみられず，球径 10mm 以上の超音波照射による高速化度合いと粘度比と音響境界層厚さを球の半径で規格化した値との積の相関から外れ，式 (4.34) が適用できないことが分かった．

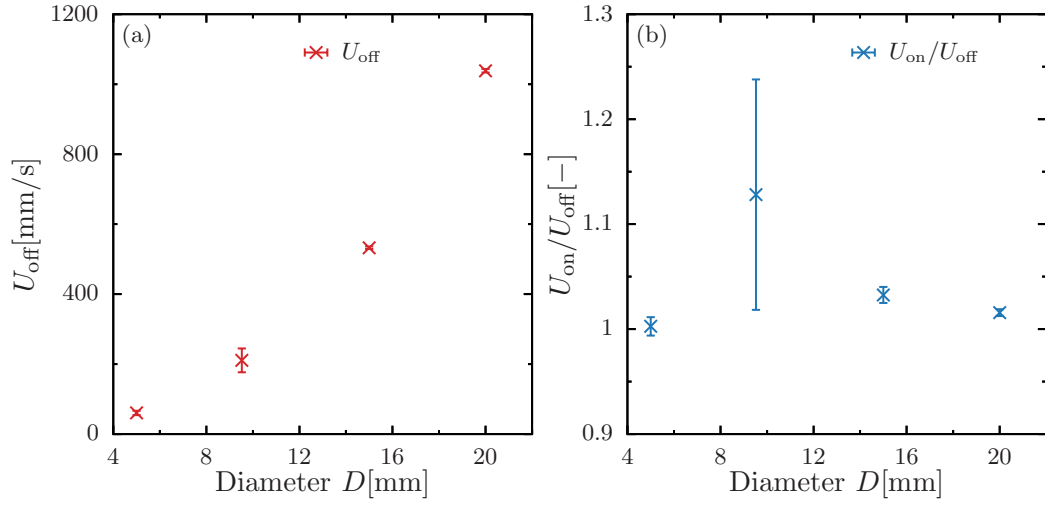


Fig 7.3: Relationship between diameter and (a)terminal velocity, (b)velocity ratio.

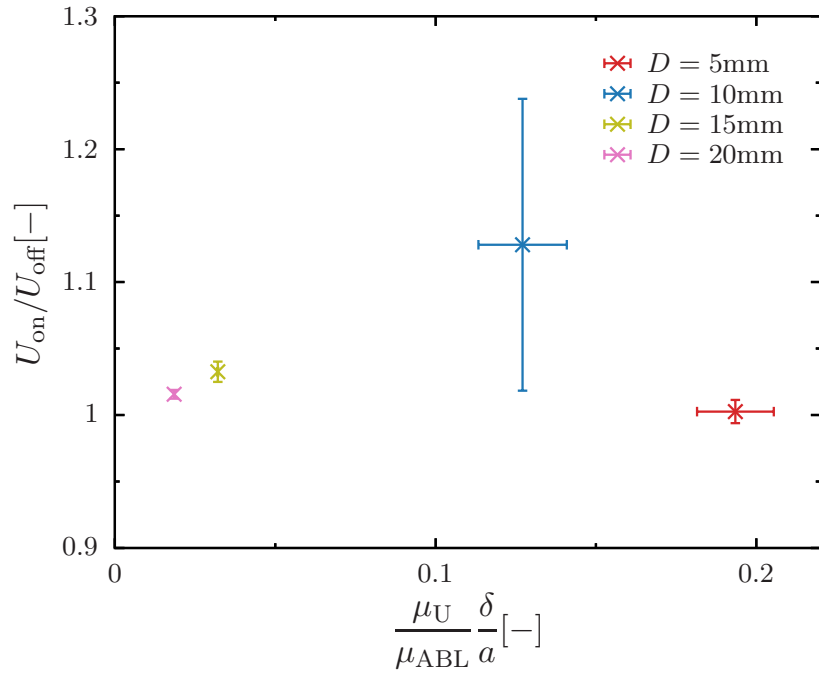


Fig 7.4: Relationship between velocity ratio and viscosity ratio, the acoustic boundary layer thickness, radius.

7.3 PAA0.2,1.3wt.%の場合

PAA0.2,1.3wt.%における落下速度の時間変化を FigA.7 に示す。結果を整理することで得た終端速度 U_{off} と球径 D の関係を Fig7.5(a) に示す。また、超音波照射の有無による落下速度比と球径の関係を Fig7.5(b) に示す。PAA1.3wt.%球径 8mm 以外の結果において、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との積は正に相関し、式 (4.34) が適用できることが分かった。一方で、PAA1.3wt.%球径 8mm において、それ以外の結果の高速化度合いと粘度比と音響境界層厚さを球の半径で規格化した値との積の相関から外れ、式 (4.34) が適用できないことが分かった。

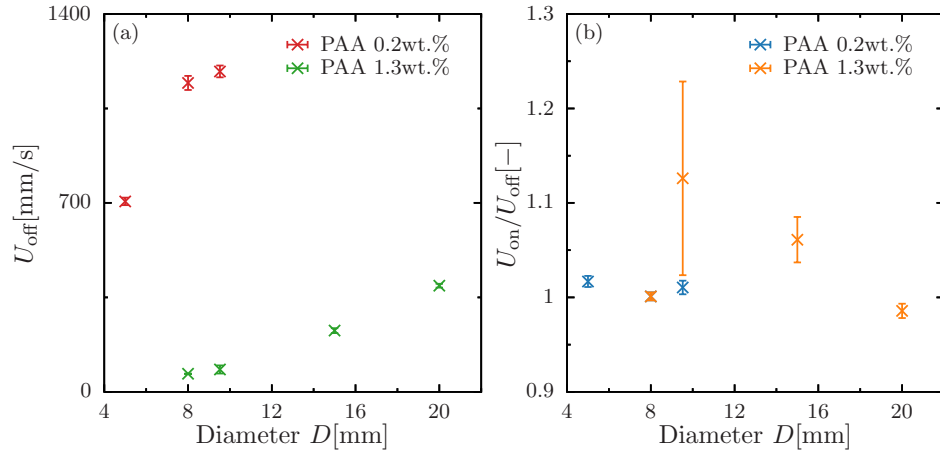


Fig 7.5: Relationship between diameter and (a)terminal velocity, (b)velocity ratio.

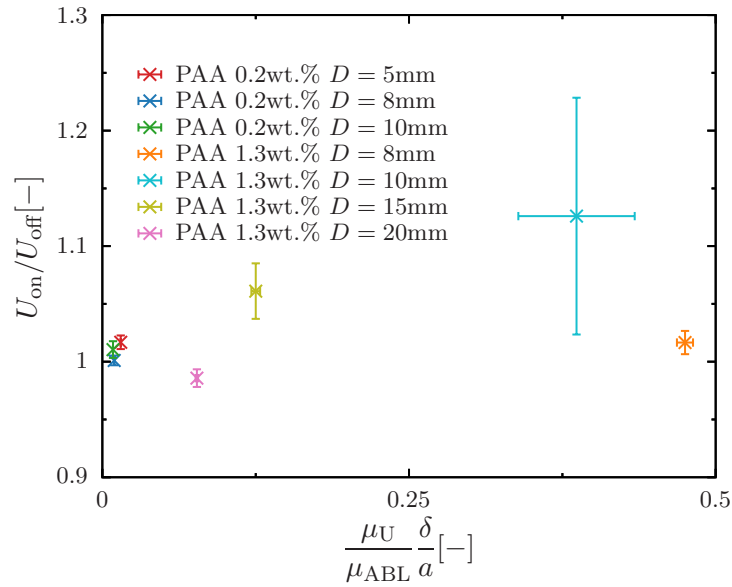


Fig 7.6: Relationship between velocity ratio and viscosity ratio, the acoustic boundary layer thickness, radius.

8 高速化に対する粘度比の影響

超音波照射による球の高速化度合いは、粘度比 μ_U/μ_{ABL} と音響境界層厚さ δ を球の半径 a で規格化した値の積で整理できると、先行研究 [26] で示唆された。この手法を用いて、第 5,6,7 章に示した各実験結果を整理する。その結果を Fig8.1 に示す。

横軸の値が 0.2 までの範囲において、超音波照射による高速化度合いは、粘度比と音響境界層厚さを球の半径で規格化した値の積に正に相関する。しかし、横軸の値が 0.2 を越えると、粘度比と音響境界層厚さを球の半径で規格化した値の積に相関が見られない。これより、超音波照射による球の高速化に関して、横軸の値が 0.2 までの範囲では式 (4.34) が適用でき、それ以上では、式 (4.34) が適用できないことが分かった。これは、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。この要因として、先行研究 [26] において弾性による影響が示唆されている。第 9 章で、それらを議論する。

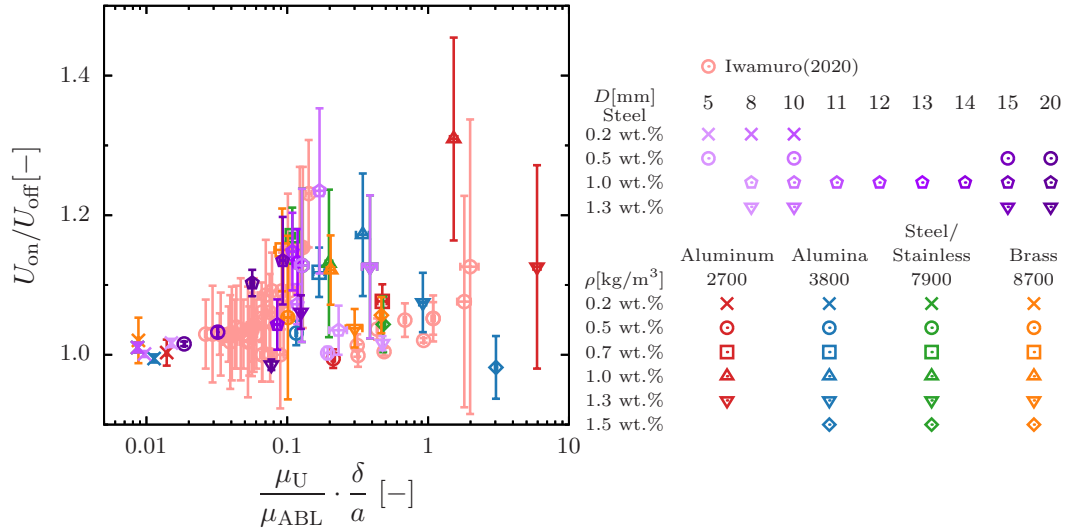


Fig 8.1: Relationship between velocity ratio and the inverse of the viscosity ratio multiplied by the thickness.

9 高速化に対する弾性の影響

9.1 高速化度合と応力比の関係

第8章で示した通り，超音波照射によ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．そこで，本章では先行研究 [26] で示唆された弾性影響を考える．

第3.2節にて，貯蔵弾性率 G' ，損失弾性率 G'' と応力 τ の関係を示した．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 と落下する球によって生じる応力 τ_U (式 (4.24)) の比 τ_U/τ_0 を考える．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みなす．

応力比と終端速度の関係を Fig9.1(a) に示す．終端速度が高くなると，応力比が増加した．式 (4.24) において，擬塑性流体 ($0 < n < 1$) では，終端速度が高くなると τ_U が大きくなるためである．終端速度が高くなると粘性影響の寄与が示唆される．

式 (4.22),(4.21),(4.34) より，高速化度合い $U_{\text{on}}/U_{\text{off}}$ には以下の比例関係が成り立つ．

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

擬塑性流体 ($0 < n < 1$) では，終端速度 U_{off} の指数は負となり，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．高速化度合いと終端速度の関係を Fig9.1(b) に示す．終端速度が低くなると高速化度合が大きくなったが，高速化度合いのばらつきは大きい．ばらつきが大きいのは，終端速度だけでなく，音響境界層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 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 [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いる．一方で，先行研究 [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．このため，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．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 (4.24),(9.1) より，終端速度が低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，粘性ではなく弾性影響が強まるためと考えられる．

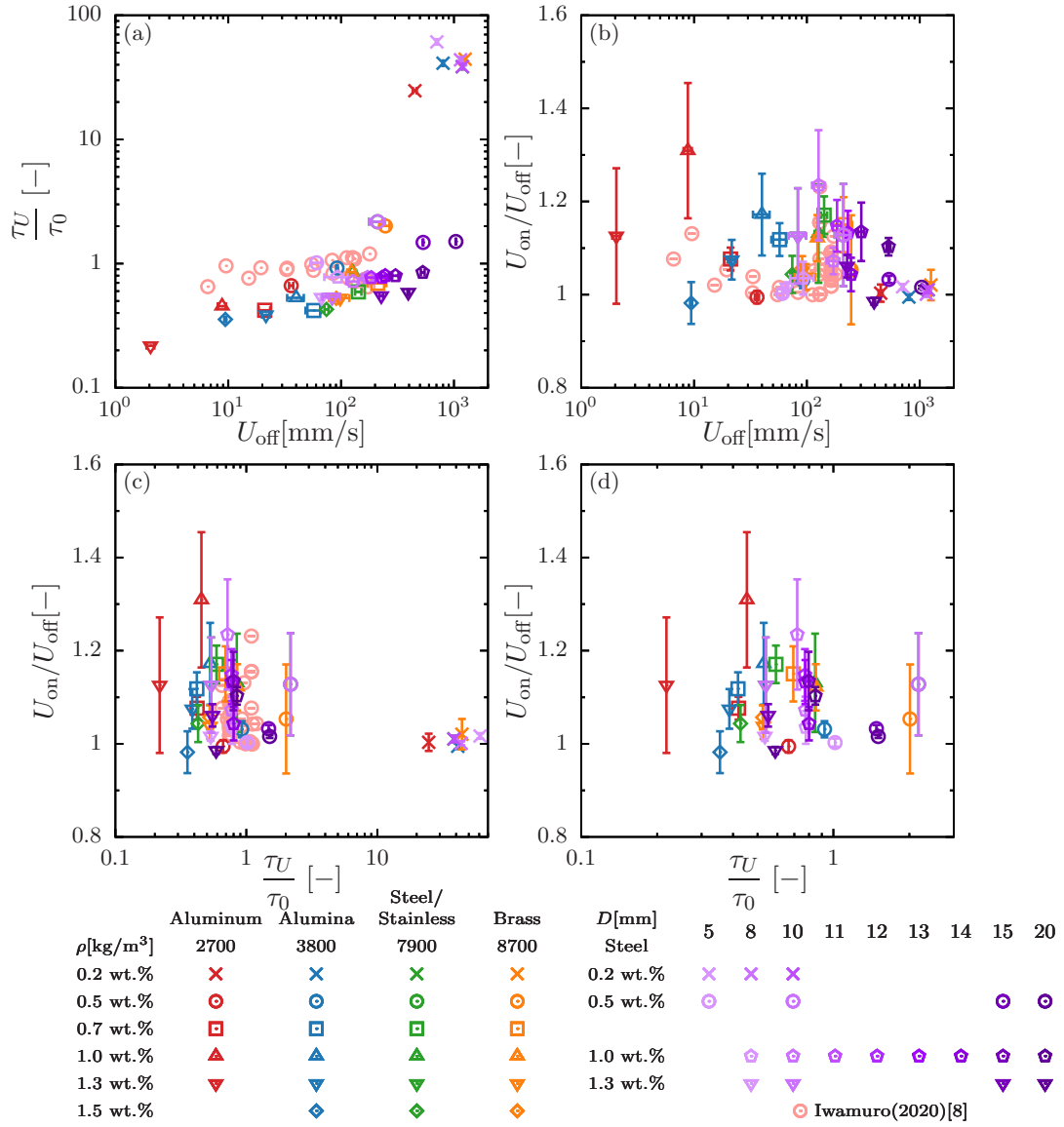


Fig 9.1: Relationship between terminal velocity and (a)elasticity ratio τ_U/τ_0 , (b)velocity ratio, elasticity ratio τ_U/τ_0 and velocity ratio by (c)all experiment, (d)without 0.2wt.% PAA solution.

9.2 高速化に対する粘度比・応力比の影響

第8章において、高速化度合いと粘度比の関係を示した。また、前節で超音波照射による落下速度の高速化度合いと応力比の関係を示した。本節にて、高速化度合いに対する粘度比、応力比両方との関係を考える。これにより、超音波照射による球の高速化に対する粘弾性影響を検討する。応力比と粘度比と音響境界層厚さを球の半径で規格化した値の積の関係を、Fig9.2に示す。カラーバーは高速化度合を表す。横軸の値が大きいほど、応力比は小さくなる。これは、粘度比が大きくなると、弾性影響が強くなることを示している。横軸の値が0.01近傍では、高速化度合いが1.03以下であり高速化がほぼ見られなかった。これは、粘度が小さいためであると考えられる。粘度比が大きいと応力比は小さくなる。Fig8.1より、粘度比0.2近傍、応力比1近傍にて高速化度合は

1.15 以上となり、顕著である。その後、粘度比が 0.2 以上では、応力比は 1 以下となる。このような条件では、高速化度合は 1.05 程度であり、高速化が弱くなった。そして、粘度比が 1 以上において、高速化度合は 1.08 程度であり、先述の条件よりも高速化は見られた。この条件では弾性が支配的ではあるが、粘度比が大きいため高速化が促進されたと示唆される。以上より、超音波照射による球の落下の高速化に関して、弾性による影響現れると示唆される。

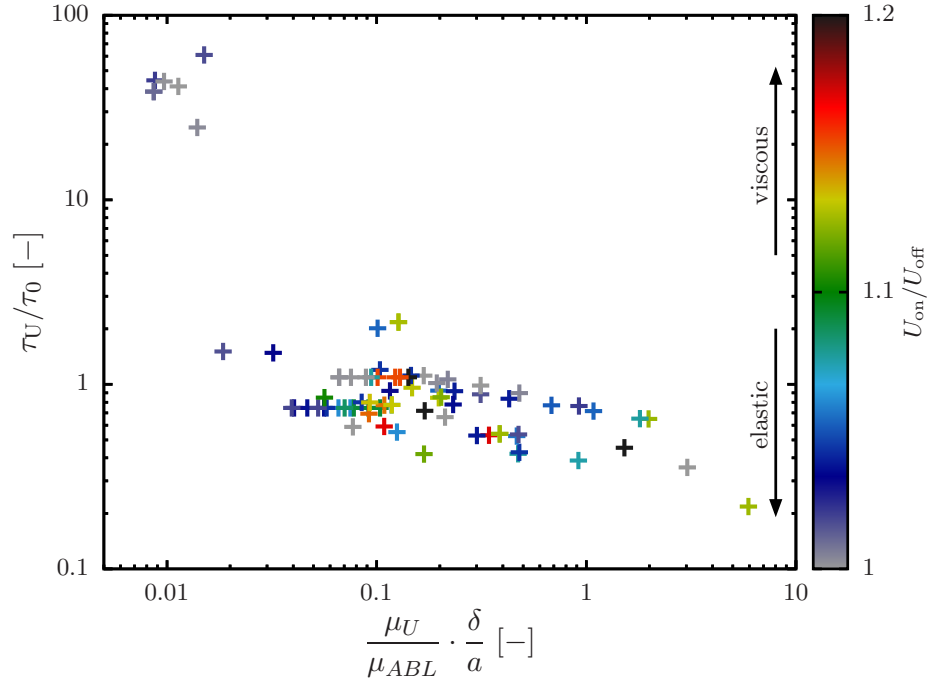


Fig 9.2: Relationship between velocity ratio and the inverse of the viscosity ratio multiplied by the thickness, elasticity ratio τ_U/τ_0 .

10 結言

超音波照射された擬塑性流体中の落下球の高速化現象に関して、理論の妥当性を調査した。密度差、濃度、球径をパラメータとして実験した。以下に実験結果と得られた知見を示す。

- 溶液と落下球の超音波照射による高速化度合と密度差の関係は、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がみられた。理論では終端速度が遅くなる場合と、密度差が小さい場合に高速化が顕著となるものの、満たした場合は PAA 濃度 1.0wt.% のみであった。これより、密度差以外による要因が大きいためと理論が適用できないと示唆される。
- 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。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。理論では溶液濃度が高い場合、高速化が顕著となると示される。これより、PAA 濃度 1.0wt.% より溶液濃度が高い場合、理論が適用できないことが示唆された。
- PAA 濃度 1.0wt.%, 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、高速化度合は粘度比と音響境界層厚さを落下球の半径で規格化した値の積と正の相関関係が見られる。一方で、球径が 10mm より小さい場合、理論が適用できないことが示唆された。
- 本研究の実験条件において、高速化度合は粘度比と音響境界層厚さを球の半径で規格化した値の積が 0.2 以下において、正の相関がみられた。それ以上の範囲では高速化度合と粘度比と音響境界層厚さを球の半径で規格化した値との積に相関がみられなかった。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、弾性影響が高速化を抑制することが分かった。

上記の結果から、超音波照射された擬塑性流体中の落下球の高速化現象に関して、理論が適用できる条件には限りがあることが分かった。弾性影響が無視できない粘弾性流体において、終端速度が遅い場合、理論が適用できないことが示唆された。弾性影響下で高速化現象を示すためには、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．

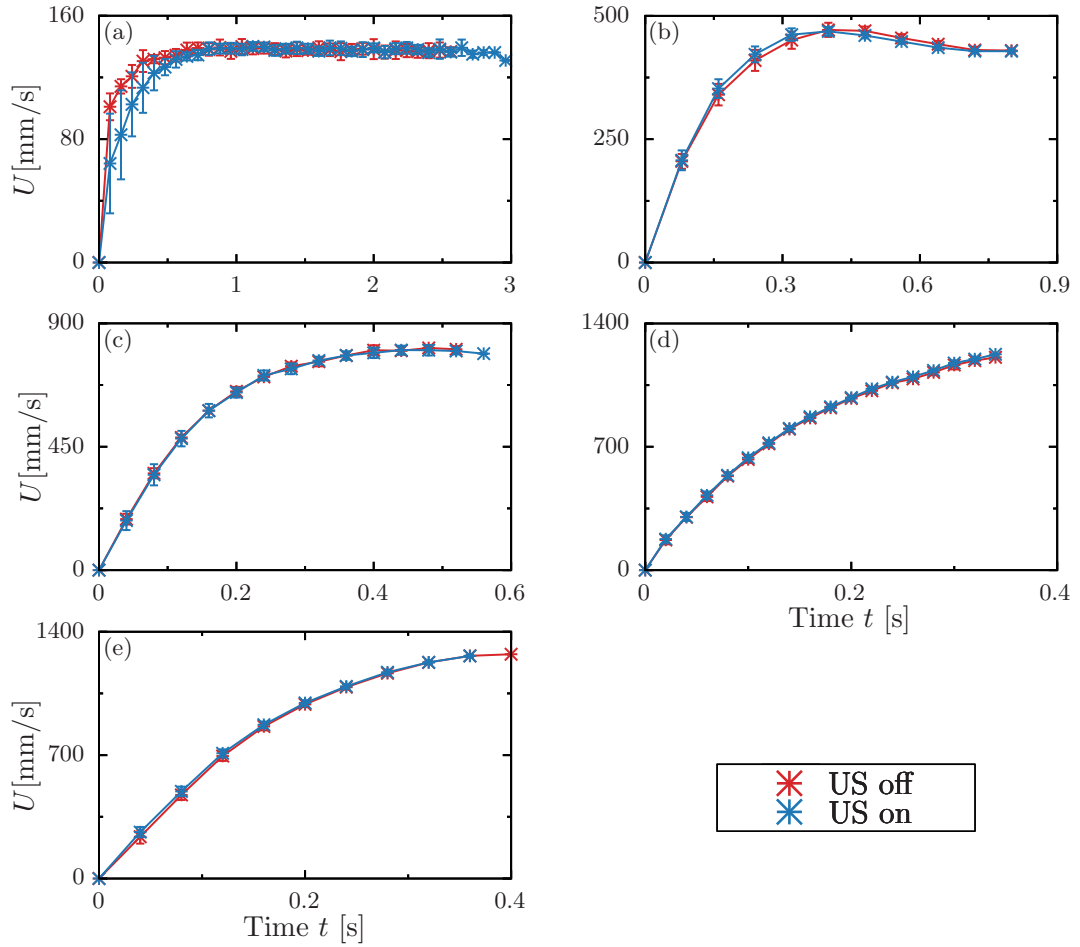


Fig A.1: Velocity of a falling sphere made by (a)nylon in 0.05 wt.% PAA solution, (b)aluminum, (c)alumina, (d)stainless,(e)brass in 0.2 wt.% PAA solution.

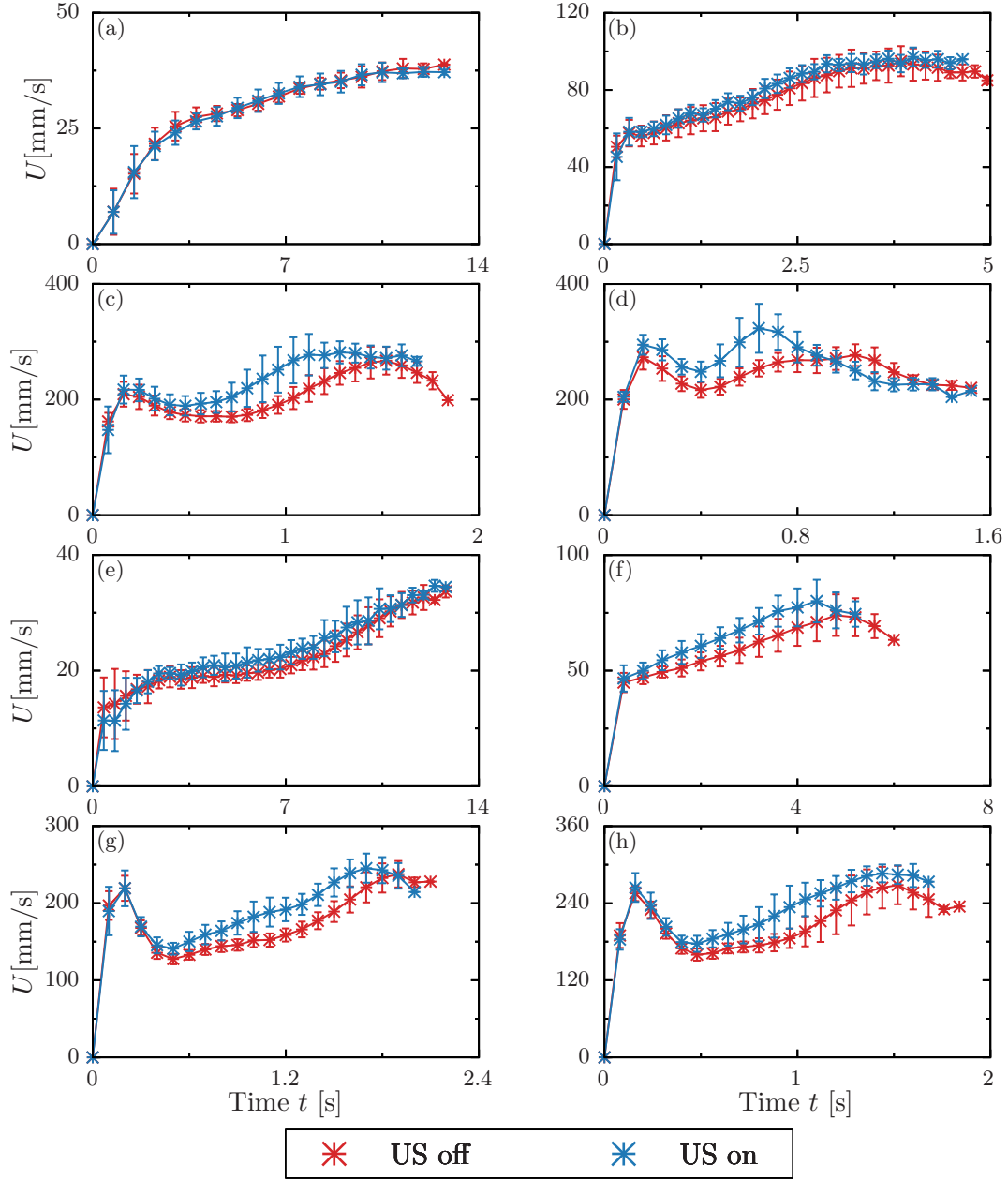


Fig A.2: Velocity of a falling sphere made by (a)aluminum, (b)alumina, (c)stainless,(d)brass in 0.5 wt.% PAA solution, (e)aluminum, (f)alumina, (g)stainless,(h)brass in 0.7 wt.% PAA solution.

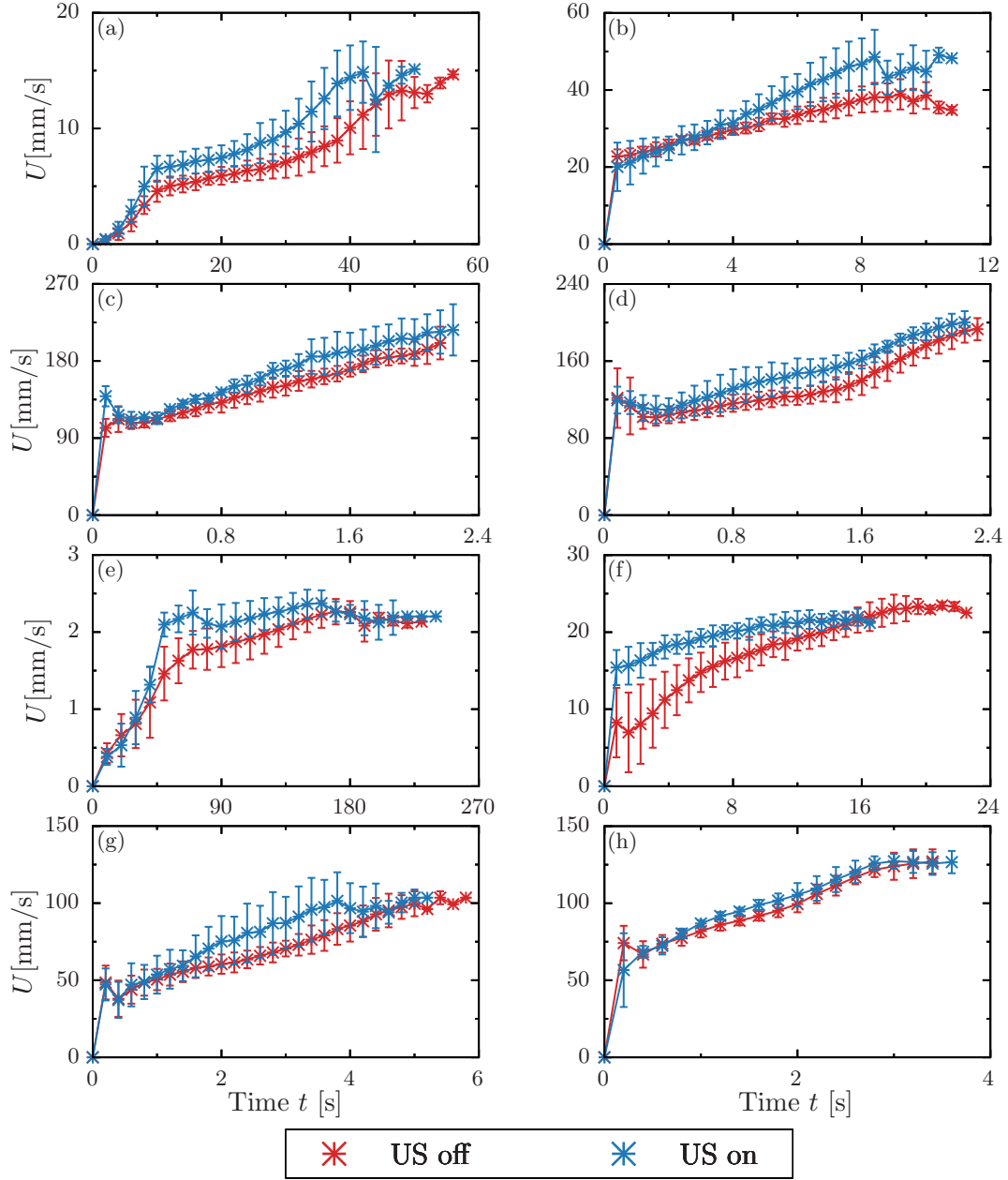


Fig A.3: Velocity of a falling sphere made by (a)aluminum, (b)alumina, (c)stainless,(d)brass in 1.0 wt.% PAA solution, (e)aluminum, (f)alumina, (g)stainless,(h)brass in 1.3 wt.% PAA solution.

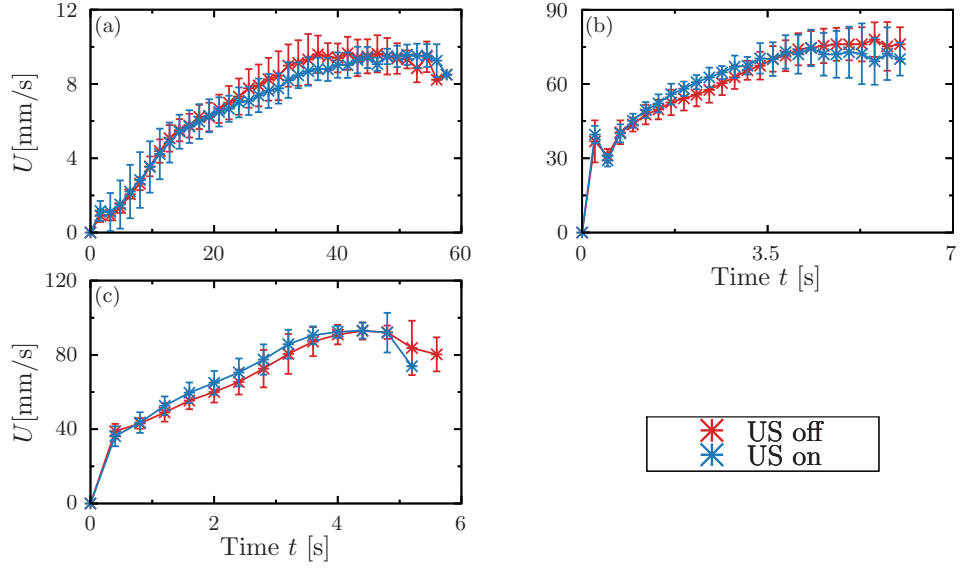


Fig A.4: Velocity of a falling sphere made by (a)alumina, (b)stainless,(c)brass in 1.5 wt.% PAA solution.

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。

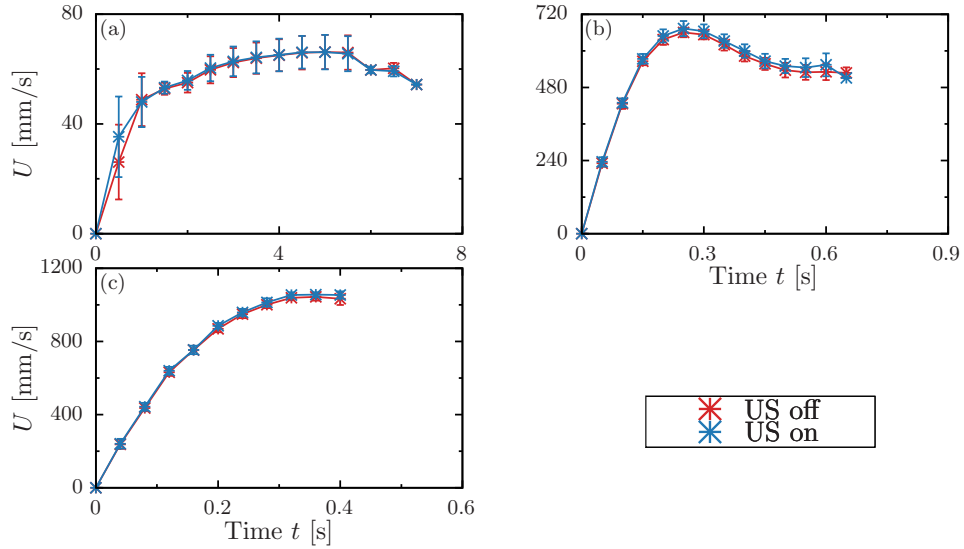


Fig A.5: Velocity of a falling sphere in 0.5wt.% PAA of (a)5mm, (b)15mm, (c)20mm.

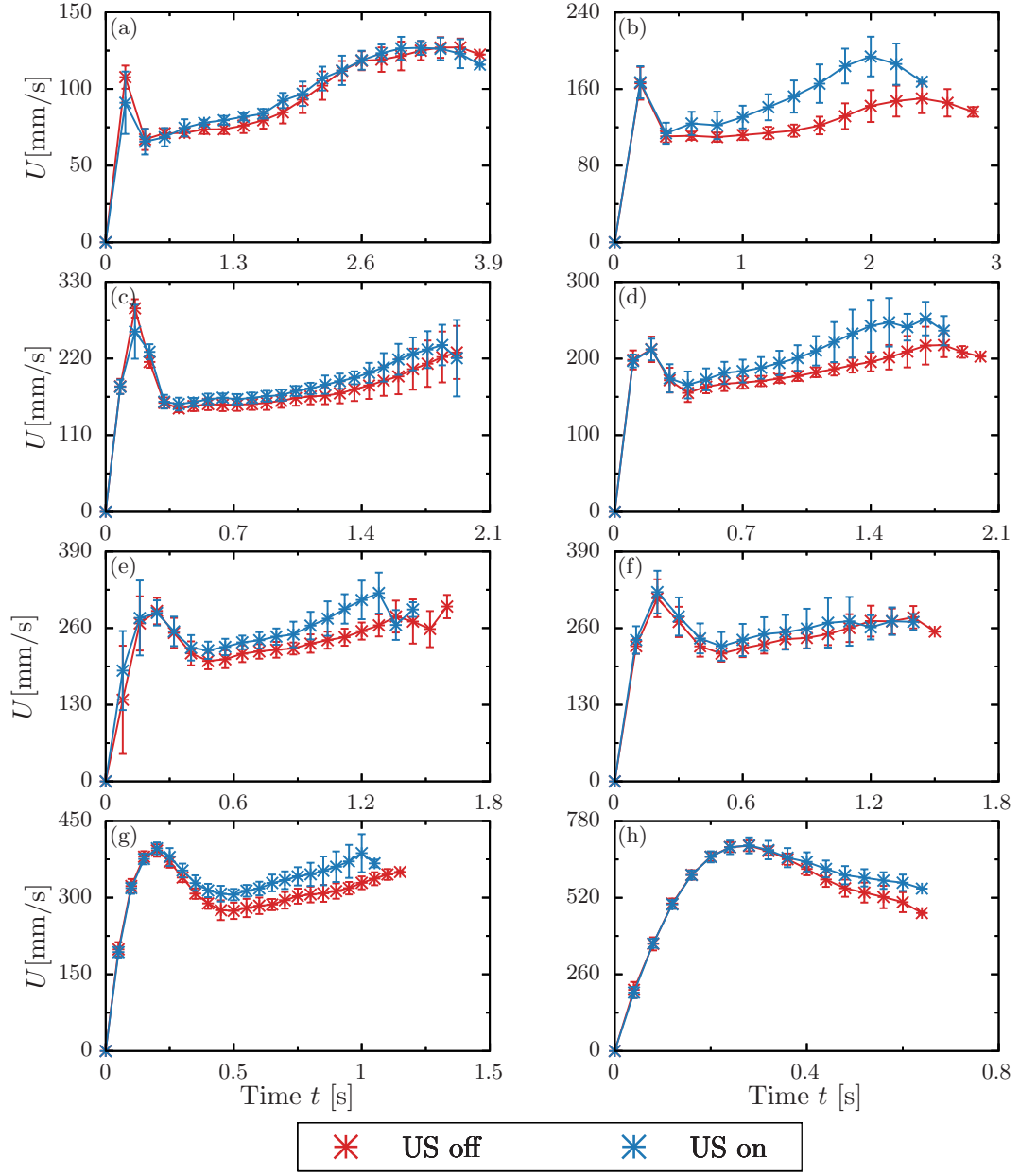


Fig A.6: Velocity of a falling sphere in 1.0wt.% PAA of (a)8mm, (b)10mm, (c)11mm, (d)12mm, (e)13mm, (f)14mm, (g)15mm, (h)20mm.

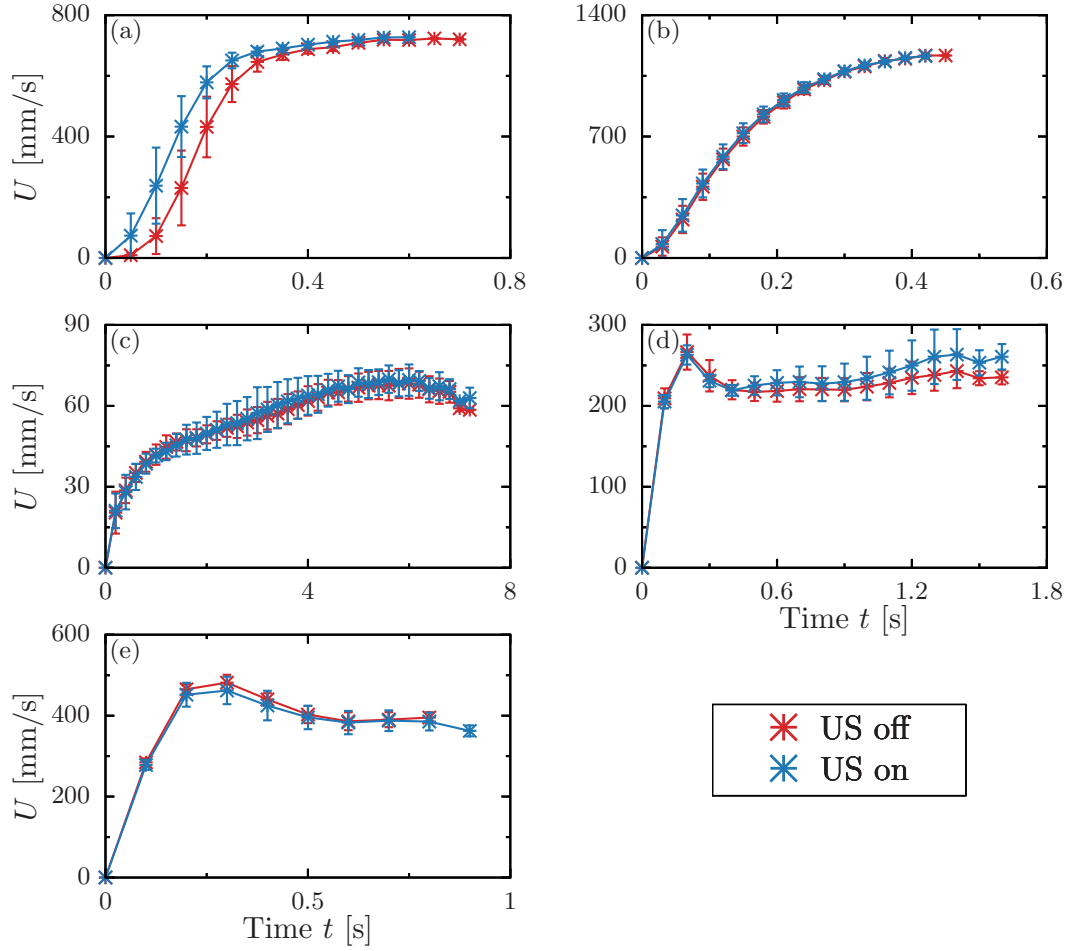


Fig A.7: Velocity of a falling sphere in 0.2wt.% PAA of (a)5mm, (b)8mm, 1.3wt.% PAA of (c)8mm, (d)15mm, (e)20mm.

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。

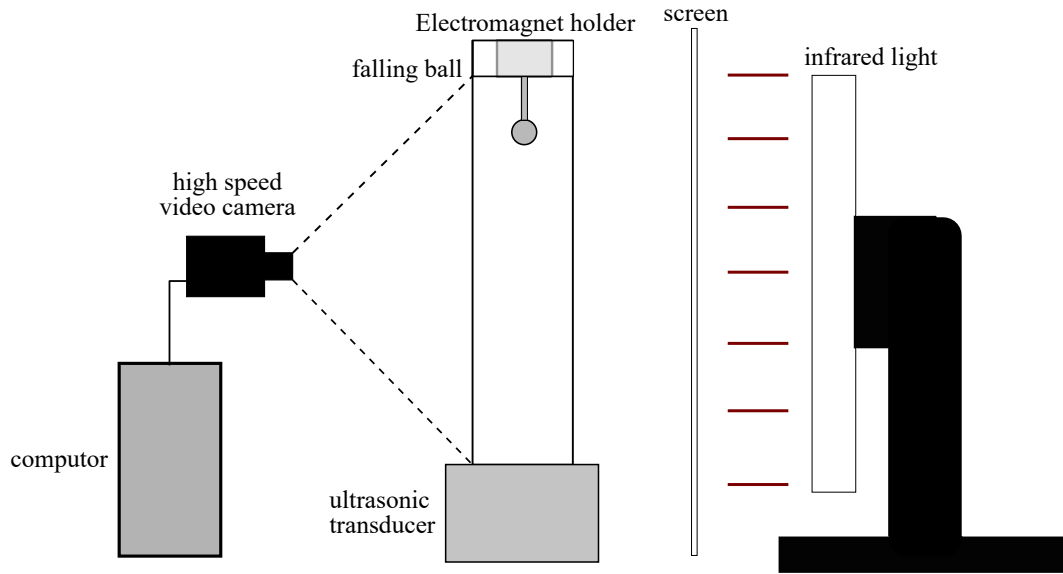


Fig B.1: Schematic view of the experimental apparatus by using electromagnet.

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。

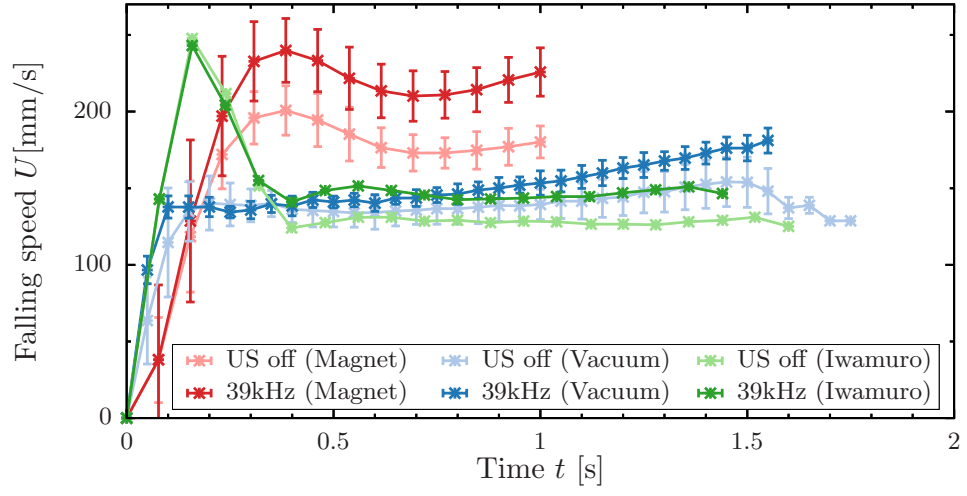


Fig B.2: Falling speed of a sphere in 1.0wt.%PAA solution with and without ultrasound irradiation.

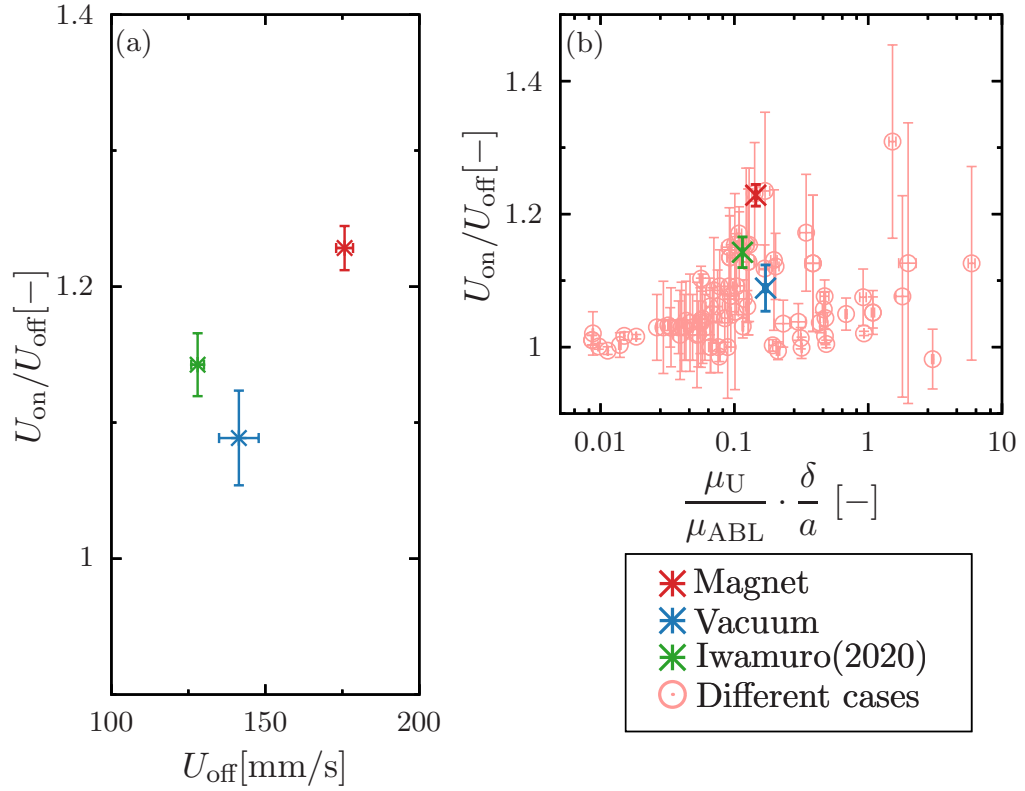


Fig B.3: Relationship velocity ratio and (a)terminal velocity, (b)viscosity ratio.

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。

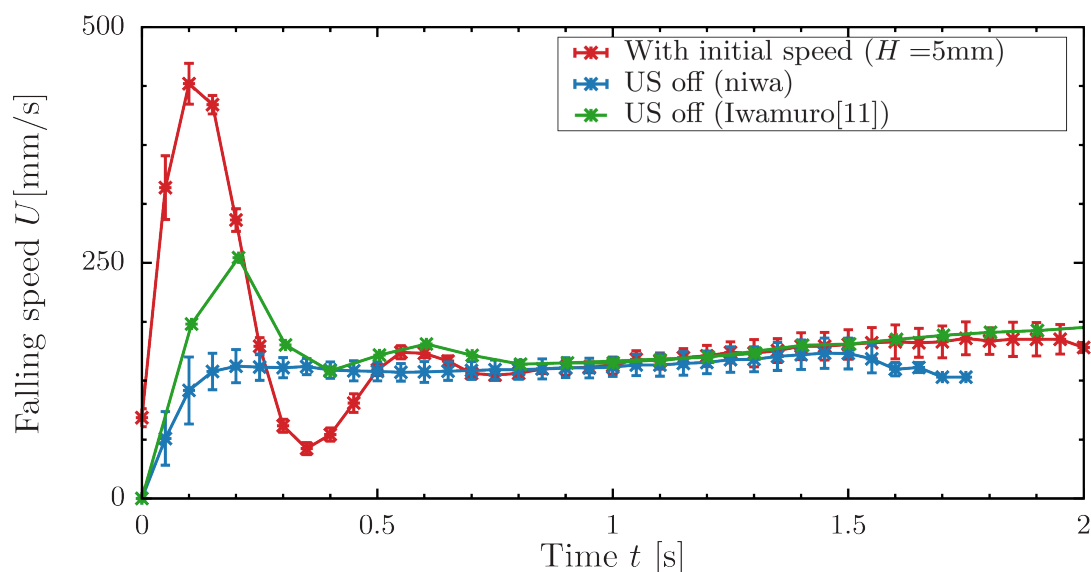


Fig C.1: Falling speed of a sphere in 1.0wt.% PAA solution falling with initial speed.

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。

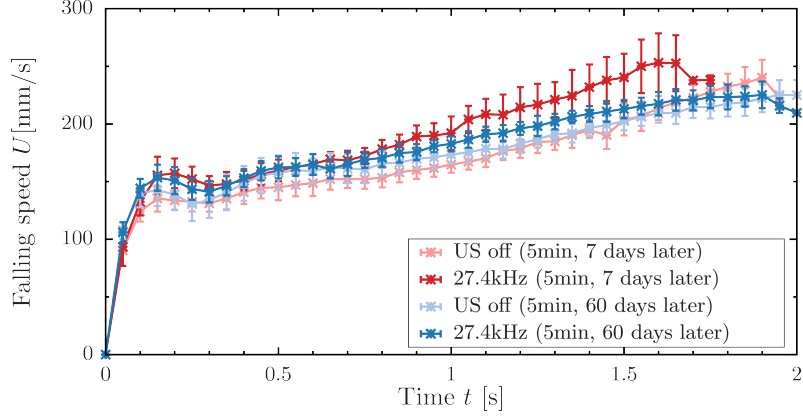


Fig D.1: Falling velocity of a sphere in 1wt.%PAA solution with and without ultrasound irradiation in tank B. Comparison of changes over time. (Interval 5 min.)

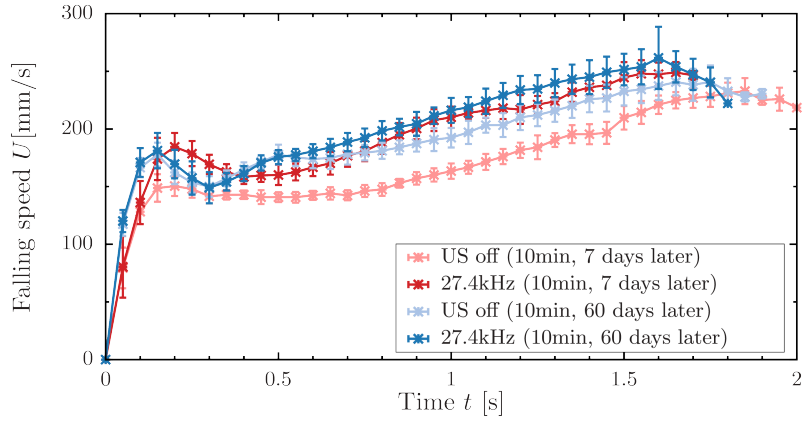


Fig D.2: Falling velocity of a sphere in 1wt.%PAA solution with and without ultrasound irradiation in tank B. Comparison of changes over time. (Interval 10 min.)

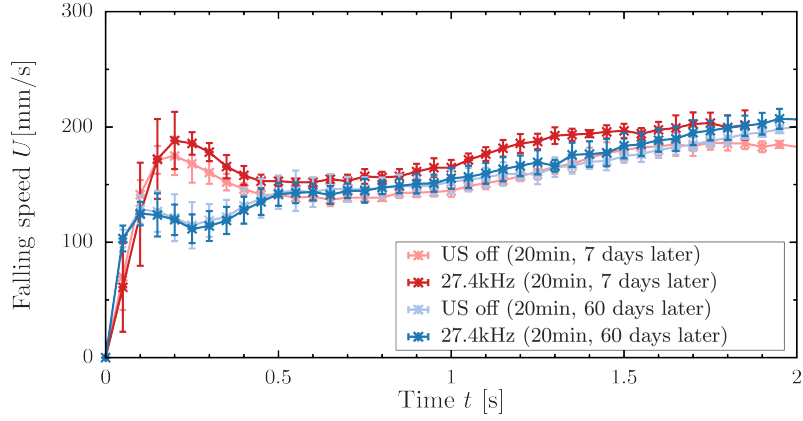


Fig D.3: Falling velocity of a sphere in 1wt.%PAA solution with and without ultrasound irradiation in tank B. Comparison of changes over time. (Interval 20 min.)

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。

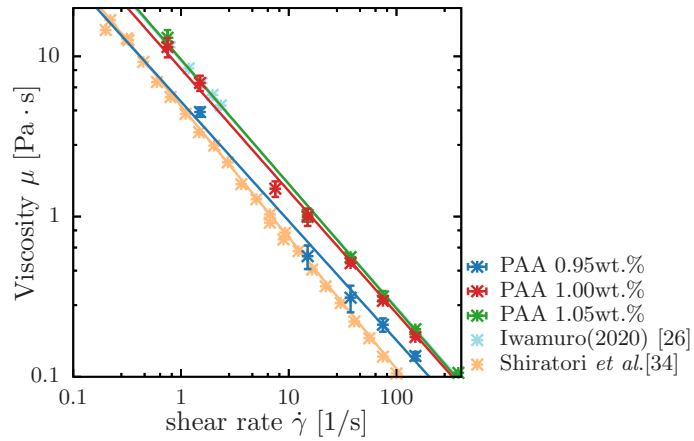


Fig E.1: Viscosity versus shear rate for PAA0.95,1.00,1.05wt.%.

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。

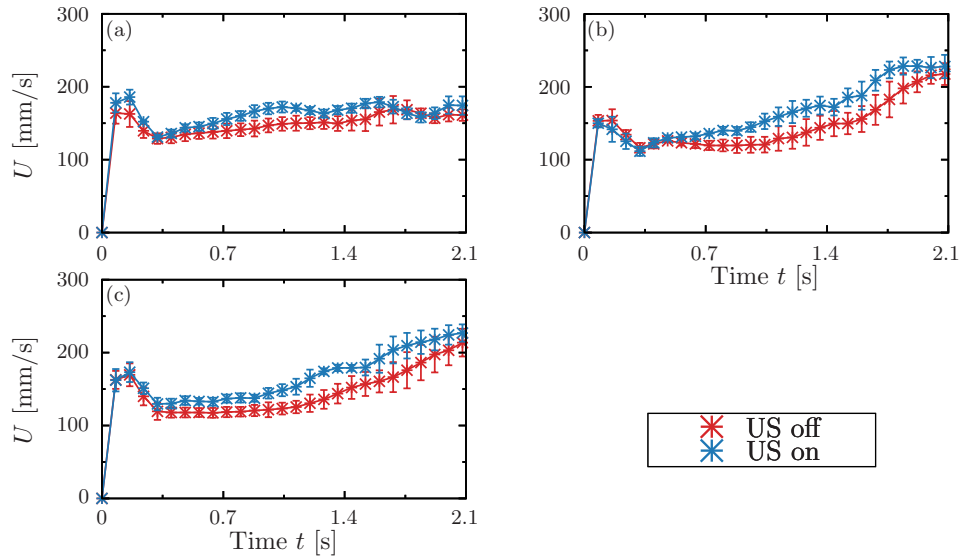


Fig E.2: Velocity of a falling sphere in (a) 0.95wt.%, (b) 1.00wt.%, (c) 1.05wt.% PAA solution.

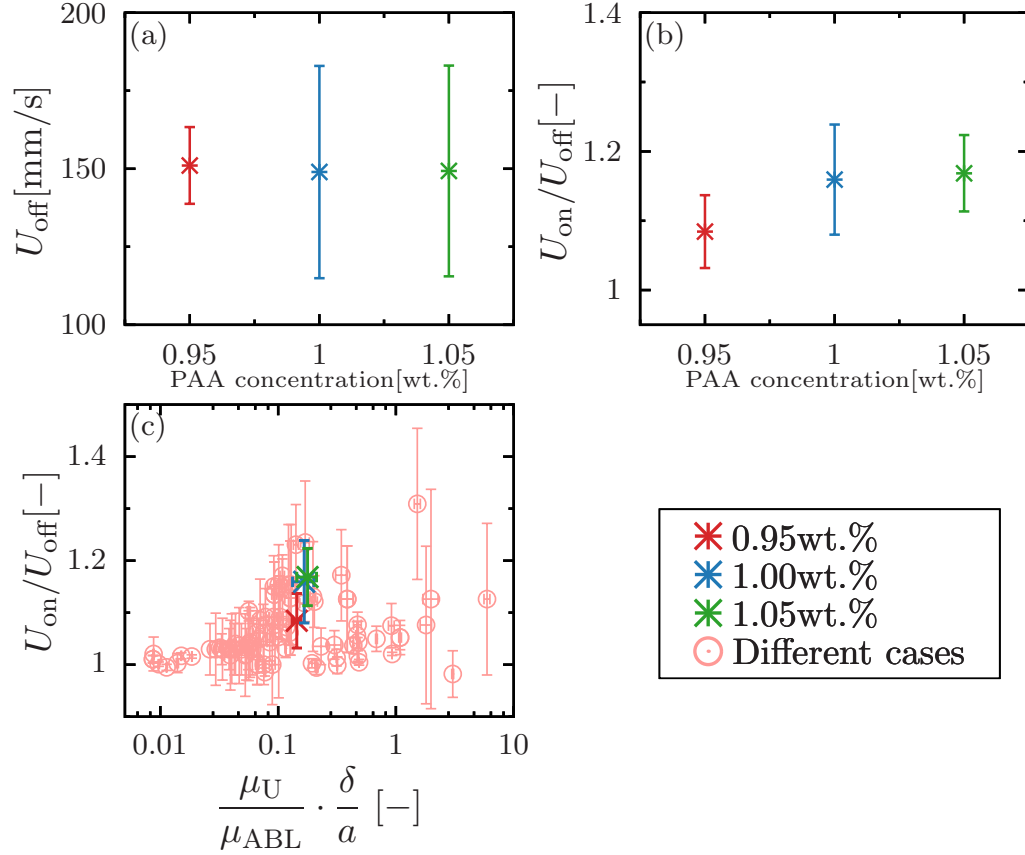


Fig E.3: Relationship between (a)terminal velocity and PAA concentration, velocity ratio and (b) PAA concentration, (c)viscosity ratio.

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。

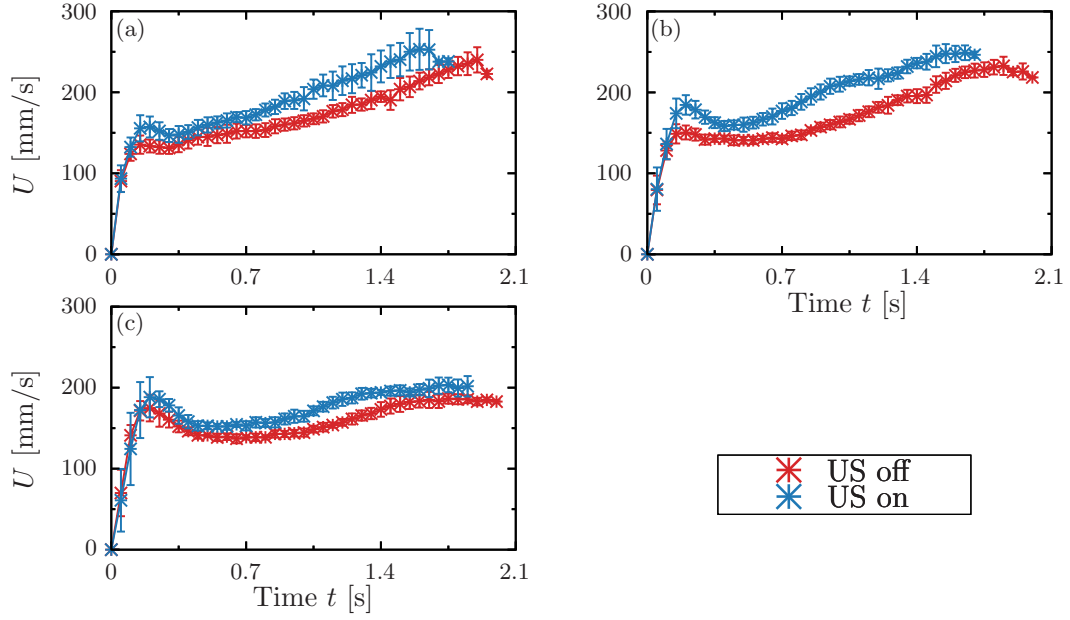


Fig F.1: Falling speed of a sphere in 1.0wt.%PAA solution with and without ultrasound irradiation for the interval (a) 5min, (b) 10min, (c) 20min.

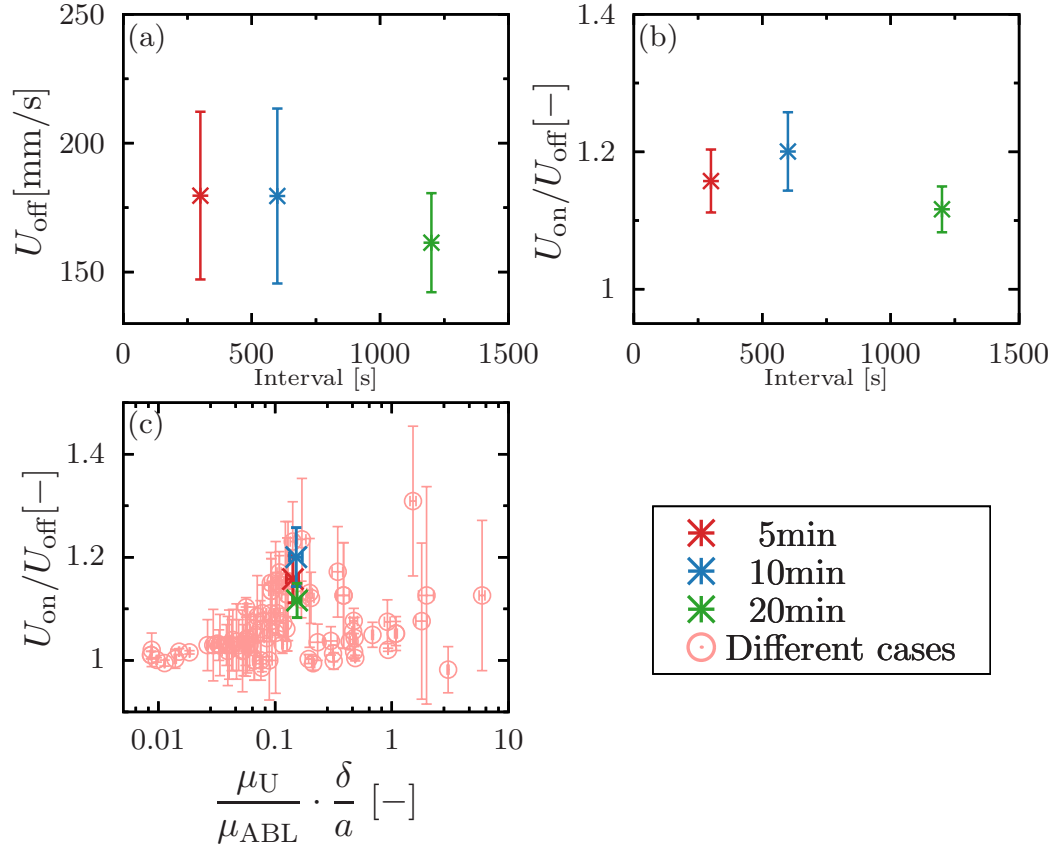


Fig F.2: Relationship between (a)terminal velocity and interval, velocity ratio and (b) interval, (c)viscosity ratio.

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.