

IIII 特集：理論化・モデリング その3 IIII  
(解説)

## 浮遊液滴の非線形ダイナミクス

阿部 豊<sup>1</sup>・松本 聡<sup>2</sup>・渡辺 正<sup>3</sup>・西成 活裕<sup>4</sup>・北畑 裕之<sup>5</sup>  
金子 暁子<sup>1</sup>・長谷川 浩司<sup>6</sup>・田中 類比<sup>1</sup>・下西 国治<sup>1</sup>・佐々木 聡<sup>4</sup>

### Nonlinear Dynamics of Levitated Droplet

Yutaka ABE<sup>1</sup>, Satoshi MATSUMOTO<sup>2</sup>, Tadashi WATANABE<sup>3</sup>, Katsuhiko NISHINARI<sup>4</sup>,  
Hiroyuki KITAHATA<sup>5</sup>, Akiko KANEKO<sup>1</sup>, Koji HASEGAWA<sup>6</sup>, Rui TANAKA<sup>1</sup>,  
Kuniharu SHITANISHI<sup>1</sup> and Sou SASAKI<sup>4</sup>

#### Abstract

It is expected to manufacture new materials with containerless processing by levitation technique. However, it is indicated that the levitated droplet with levitation technique has nonlinear behavior. In this study, nonlinear dynamics of the levitated droplet is experimentally and analytically investigated. The levitation experiments with electrostatic levitator and the ultrasonic levitator are conducted under the normal gravity condition. Based on the experimental results, theoretical and numerical analyses are conducted to clarify the nonlinear dynamics of the levitated droplet. Furthermore, new technique to measure the viscosity in high viscosity region is proposed.

**Keyword(s):** Electrostatic levitation, Ultrasonic levitation, Nonlinear dynamics, Flow field

#### 1. 緒言

現在、浮遊技術を利用することで、高温溶融物を容器と非接触で保持することができる。これにより、容器との接触による汚染や、保持する容器が先に融点を迎えてしまうなどで測定が困難とされていた、融点が 2000°C を超える融体の熱物性値測定が可能となる<sup>1)</sup>。また、液滴を浮遊状態で凝固させた場合、容器壁に起因する不均質核生成を排除できることから、過冷却凝固が発生し、均質で高品質な新材料を製造することができる<sup>2)</sup>。分析化学の分野においても、濃縮・分離・抽出・誘導体化といったサンプルの前処理に浮遊技術が用いられ始めている<sup>3)</sup>。以上に述べたように、浮遊技術を用いることによ

て、従来に無い新たな物性測定や材料製造、さらには生化学プロセッシングや極微量分析など、より高機能な流体プロセス技術への展開が期待されている。これらの浮遊技術の利用においては、浮遊状態にある液滴の挙動は全て定常かつ線形であることを前提としている。しかしながら、過去の研究において、静電場や超音波を利用する浮遊技術では、液滴界面の大変形や、液滴内外の流動など、非線形な流動挙動が発現することが観測されている。浮遊技術を用いた新たな高機能流体プロセス技術を実現するためには、このような非線形挙動を流体力学的知見から明らかにすることが必要不可欠となっているものの、実験ならびに解析の両面からの科学的知見はほぼ無いのが現状である。

- 
- 1 筑波大学 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1  
University of Tsukuba, 1-1-1, Tennoudai, Tsukuba-city, Ibaraki 305-8573, Japan
  - 2 宇宙航空研究開発機構 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1  
Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1, Sengen, Tsukuba-city, Ibaraki 305-8505, Japan
  - 3 福井大学附属国際原子力工学研究所 〒914-0055 福井県敦賀市鉄輪町 1-2-4  
Research Institute of Nuclear Engineering, 1-2-4, Kanawa-cho, Tsuruga-city, Fukui 914-0055, Japan
  - 4 東京大学 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1  
The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan
  - 5 千葉大学 〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33  
Chiba University, 1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-city, Chiba 263-8522, Japan
  - 6 工学院大学 〒163-8677 東京都新宿区西新宿 1-24-2  
Kogakuin University, 1-24-2, Nishishinjuku, shinjuku-ku, Tokyo 163-8677, Japan  
(E-mail: abe@kz.tsukuba.ac.jp)

そこで本研究では、浮遊技術を用いた高機能流体プロセス技術の実現のため、浮遊状態にある液滴に発生する非線形挙動についての実験的知見や、その現象を記述する理論解析、さらには非線形かつ非定常な界面変形を有する現象を予測評価するための多次元数値解析手法の構築を目的としている。そして、得られた知見に基づいて、これまで精度的に不十分とされている浮遊技術を用いた高温熔融物の粘性係数測定法について、新たな手法の提案を行う。実験として、静電浮遊装置でクーロン力を与えて空気中に浮遊させた液滴の振動や回転などの界面変形挙動の観測と、それらを用いた熱物性値測定を行うとともに、超音波浮遊装置によって浮遊させた液滴の界面変形と内部・外部流動の可視観測を行う。これらの実験と同時に、浮遊液滴の非線形な界面変形を取り扱うための理論構築と、浮遊液滴界面の非線形挙動および内部・外部での流動を再現するための数値解析を行っている。本稿では、筆者らがこれまで行った実験・解析の成果について紹介する。

## 2. 静電浮遊液滴の非線形挙動と表面張力測定

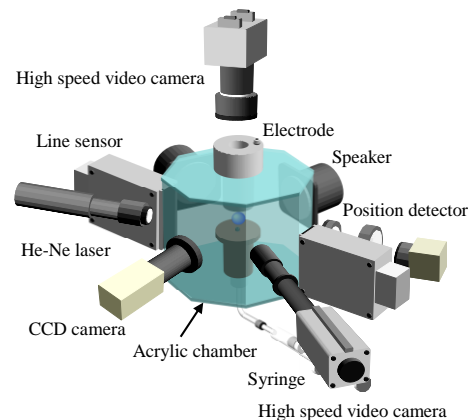
### 2.1 概要

浮遊技術を用いた熱物性値測定において、低粘性液滴に対する表面張力測定には、液滴振動法が適用されている。これは、液滴の振動から共振周波数を測定し、Rayleigh<sup>4)</sup>による共振周波数と表面張力の関係を表す線形理論式から表面張力を算出する測定法である。しかしながら、この測定法は浮遊液滴の挙動が線形であることを前提としているため、共振周波数測定時に与える振動や、浮遊位置制御のために与える定常回転により誘起される液滴の非線形な挙動が共振周波数を変化させ、測定に影響を与えることが示唆されている。そこで本研究では、静電浮遊装置を用いた実験により、振動および回転が浮遊液滴の共振周波数に及ぼす影響を調べた。また実験結果を、レベルセット法を用いた数値解析結果および既存の理論と比較し、検証を行った<sup>5,6)</sup>。

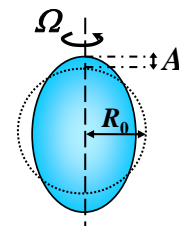
### 2.2 実験装置および実験方法

**Figure 1** に本実験で用いた静電浮遊装置の概要を示す。浮遊には、アクリル製チャンバー内に設置した上下一対の電極を用いる。下電極に 2~3 kV の正電圧を印加することで、シリンジから注入した液滴を帯電させる。この時、注入する液滴の量を調節することで、浮遊液滴の直径を調整する。その後、上電極に負電圧を印加することで液滴は浮遊する。He-Ne レーザーとポジションディテクタを用いて液滴の浮遊位置を検出する。液滴径の測定にはラインセンサーを用いる。また、2 台の高速度ビデオカメラで液滴側部及び上部を撮影し、液滴形状の変化を観測する。液滴を振動させる場合、下電極に正弦波の

電圧信号を印加し、電極間電圧を変化させる。印加する電圧信号の周波数、電圧の調整により液滴の振動周波数、振幅を制御する。液滴の共振周波数は、液滴径の時系列に FFT 解析を行うことにより求める。液滴に回転を与える場合、チャンバー側面に設置した 2 つのスピーカーでチャンバー内に音響定在波を発生させ、液滴にトルクを与える。スピーカーへの入力電圧を調整することで液滴の角速度を制御している。液滴の角速度は、液滴に混ぜたトレーサー粒子（ナイロン粒子、直径 9~13  $\mu\text{m}$ ）を撮影画像より追跡することで行う。ここで、**Fig. 2** に液滴の振動と回転の概略図を示す。振動の振幅  $A$  は液滴初期直径  $R_0$  からの変位、回転は鉛直方向を回転軸とした回転と定義する。実験は常温常圧下で行う。浮遊させる液滴には **Table 1** に示すプロピレンカーボネートおよびエチレングリコールの 2 種類を用いる。



**Fig. 1** Electrostatic levitator.



**Fig. 2** Diagram of oscillation and rotation of droplet.

**Table 1** Physical properties of test fluids.

|                     | Density<br>$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | Surface tension<br>$\sigma$ [mN/m] | Viscosity<br>$\mu$ [mPa·s] |
|---------------------|--|------------------------------------|----------------------------|
| Propylene carbonate | 1206                                   | 43                                 | 2.7                        |
| Ethylene glycol     | 1113                                   | 48                                 | 22.8                       |

### 2.3 振動振幅が共振周波数に及ぼす影響

浮遊するプロピレンカーボネート液滴の振動挙動の画像を **Fig. 3, 4** に示す。  $T$ ,  $A$  はそれぞれ振動周期、振幅

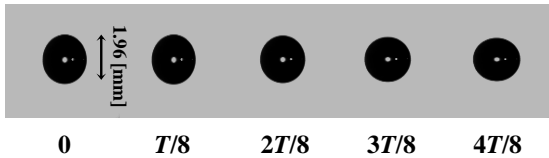
であり、 $A/R_0$ は振幅  $A$  を液滴初期半径  $R_0$  で割った無次元数である。さらに、振幅の増加による共振周波数の変化を **Fig. 5** に示す。横軸は無次元振幅  $A/R_0$ 、縦軸は共振周波数の変化率を表す周波数シフトであり、以下の式で定義する。

$$\frac{\delta f}{f_0} = \frac{f - f_0}{f_0} \quad (1)$$

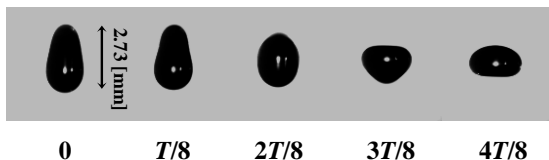
ここで  $f_0$ ,  $f$  はそれぞれ液滴が微小振動時の初期共振周波数、液滴の振幅を変化させた時の共振周波数である。グラフ中のプロットは、プロピレンカーボネート、エチレングリコールの粘度が異なる 2 種類の液滴の実験結果である。実線は Tsamopoulos らによる非粘性液滴に対する解析結果であり、以下の式で表される<sup>8)</sup>。

$$\frac{\delta f}{f_0} = -0.59 \left( \frac{A}{R_0} \right)^2 \quad (2)$$

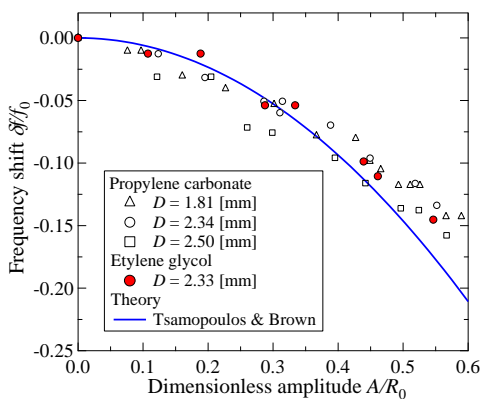
振動振幅の増加で共振周波数は減少した。実験では液滴の径および粘度を変化させているが、周波数シフトは全て同様の傾向を示している。また、Tsamopoulos らの解析は非粘性液滴に対するものであるが、実験と定性的に一致した。このことから、本実験条件においては、液滴径と粘度は共振周波数の変化に影響を及ぼさないことが考えられる。



**Fig. 3** Observation result of droplet shape deformation in one period  $T$  ( $A/R_0 \approx 0.1$ ).



**Fig. 4** Observation result of droplet shape deformation in one period  $T$  ( $A/R_0 \approx 0.5$ ).



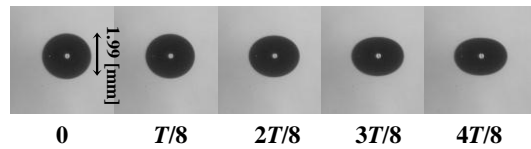
**Fig. 5** Effect of oscillation on frequency shift.

## 2.4 回転が共振周波数に及ぼす影響

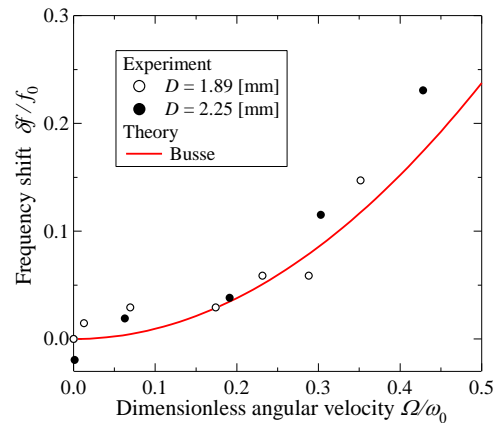
プロピレンカーボネートの浮遊液滴が回転を伴いながら振動した場合の画像を **Fig. 6** に示す。 $\Omega/\omega_0$  は液滴の角速度  $\Omega$  を初期共振周波数  $\omega_0 (=2\pi f_0)$  で割った無次元数である。さらに、角速度の増加による共振周波数の変化を **Fig. 7** に示す。横軸は無次元角速度  $\Omega/\omega_0$ 、縦軸は共振周波数の変化率を表す周波数シフトである。グラフ中のプロットは、プロピレンカーボネート液滴の実験結果、実線は Busse による非粘性液滴に対する解析結果であり、以下の式で表される<sup>9)</sup>。

$$\frac{\delta f}{f_0} = 0.91 \left( \frac{\Omega}{\omega_0} \right)^2 \quad (3)$$

角速度の増加により共振周波数も増加しており、実験と解析は定性的に一致した。



**Fig. 6** Observation result of droplet shape deformation in one period  $T$  ( $\Omega/\omega_0 \approx 0.4$ ).



**Fig. 7** Effect of rotation on frequency shift.

## 2.5 振動と回転が共振周波数に及ぼす影響

プロピレンカーボネート液滴の振動・回転による共振周波数の変化を **Fig. 8** に示す。横軸は無次元振幅  $A/R_0$  および無次元角速度  $\Omega/\omega_0$ 、縦軸は周波数シフト  $\delta f/f_0$  である。また、全体の傾向を知るため実験プロットには近似曲面を引いている。振幅が増加すると周波数シフトは減少するのに対し、角速度が増加すると周波数シフトは増加している。このように振動と回転は共振周波数に対して正反対の影響を及ぼすことから、周波数シフトを 0 とする振幅  $A/R_0$  と角速度  $\Omega/\omega_0$  の関係に着目し、**Fig. 9** に示す。プロットは **Fig. 8** で周波数シフトがほぼ 0 となる時の実験結果である。ここで、Tsamopoulos, Busse ら

の解析結果である式(2), (3)を組み合わせることで, 振動と回転による周波数シフトを以下の式で表した.

$$\frac{\delta f}{f_0} = -0.59 \left( \frac{A}{R_0} \right)^2 + 0.91 \left( \frac{\Omega}{\omega_0} \right)^2 \quad (4)$$

したがって, 式(4)において周波数シフト  $\delta f/f_0$  が 0 での振幅と角速度の関係は以下のようなになる.

$$\frac{\Omega}{\omega_0} = 0.8 \times \frac{A}{R_0} \quad (5)$$

式(5)より求めた振幅と角速度の関係を Fig. 9 に実線で示す. このように実験および Tsamopoulos, Busse らの解析結果から, 周波数シフトが 0 になる時の振幅と角速度は線形関係にあることが観測された. したがって, 表面張力測定時に浮遊液滴に与える振動と回転を式(5)の関係が成り立つように制御することができれば, 共振周波数の変化による測定誤差を抑制できることが示唆された.

### 2.6 浮遊液滴の共振周波数に関する数値解析

浮遊液滴の多次元な非定常運動を解析するため, レベルセット法による数値解析プログラムを作成した. 基礎方程式は, 連続の式および非圧縮ナビエーストークス方程式である. 界面位置ならびに曲率を評価するために, レベルセット関数を定義し, レベルセット関数の輸送方程式を解く. このシミュレーションコードを用いて, 振動・回転をする浮遊液滴の形状および流動場を解析した結果を Fig. 10 に示す. さらに, 振動と回転による共振周波数の変化を解析した結果を Fig. 11 に示す. 横軸は液滴の振幅および角速度, 縦軸は初期共振周波数からの変化率である周波数シフトを表す. Fig. 11 は Fig. 8 で示す実験結果と定性的に一致している. このように, 本研究では数値解析により, 浮遊液滴の振動と回転によって生じる非線形な挙動を再現した.

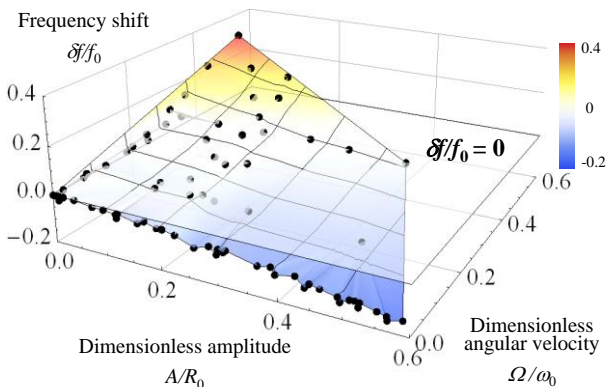


Fig. 8 Effects of oscillation and rotation on frequency shift.

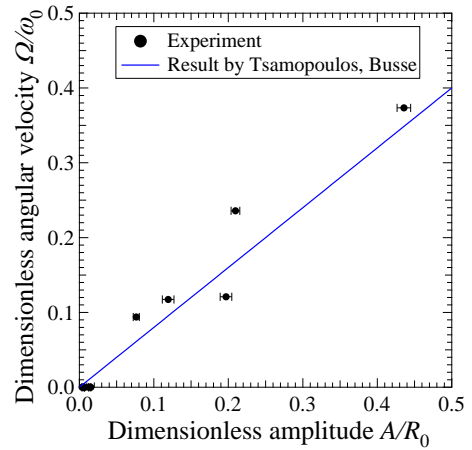


Fig. 9 Relation between amplitude and angular velocity at frequency shift  $\delta f/f_0 = 0$ .

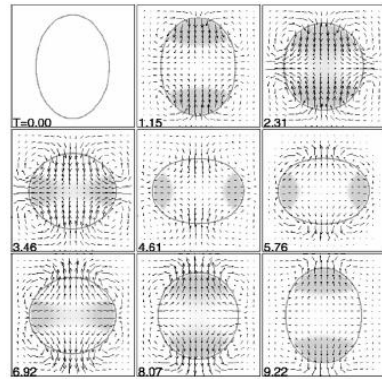


Fig. 10 Variations of flow field and droplet shape in vertical cross section.

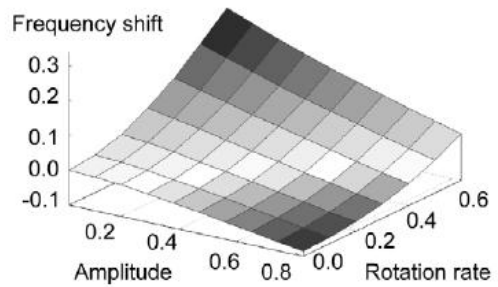


Fig. 11 Effects of oscillation and rotation on frequency shift in numerical simulation.

## 3. 静電浮遊法を用いた粘性係数測定

### 3.1 概要

浮遊液滴の粘性係数測定において, 低粘性の液滴に対しては, その減衰時間を利用して測定する液滴振動法が用いられる. 一方, 高粘性の液滴には振動を誘起するのは困難であるため, 液滴に回転を誘起することにより変



化した形状の緩和時間を用いて測定する手法が提案されている。しかし、0.1~100 Pa·s の浮遊液滴の粘性係数を測定する手法は、未だ確立されていない。そこで本研究では、0.1~100 Pa·s の浮遊液滴に対する、新たな粘性係数測定法の確立を目的とする。静電浮遊装置を用いて液滴を浮遊させ、回転を誘起し、その挙動を観測した結果を踏まえ、粘性係数測定について検討する<sup>10,11)</sup>。

### 3.2 実験装置および実験方法

本章においても、2.2 節で説明した静電浮遊装置を用いる。試験流体には、Table 2 に示すように、プロピレンカーボネート、またグリセリンと水あめの混合液を用いる。

Table 2 Physical properties of viscosity fluids.

|                          | Density<br>$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | Surface tension<br>$\sigma$ [mN/m] | Viscosity<br>$\eta$ [Pa·s] |
|--------------------------|--|------------------------------------|----------------------------|
| Propylene carbonate      | 1206                                   | 43                                 | 0.0027                     |
| Glycerol                 | 1260                                   | 63                                 | 1.1                        |
| Glycerol + Glucose 30wt% | 1320                                   | 65                                 | 3.3                        |
| Glycerol + Glucose 40wt% | 1330                                   | 66                                 | 8.6                        |
| Glycerol + Glucose 50wt% | 1350                                   | 66                                 | 10.8                       |

### 3.3 静電浮遊液滴の回転挙動

浮遊させたプロピレンカーボネート液滴の回転による形状変化を Fig. 12 に示す。横軸は角速度  $\Omega$  を初期共振周波数  $\omega_{00}$  で割った無次元数、縦軸は液滴の最大水平方向長さ  $L_{max}$  を初期直径  $D_0$  で割った無次元数である。プロットは実験結果、実線は Brown らによる数値解析結果を表す<sup>12)</sup>。液滴は角速度の増加により、球形状から楕円形状へと変化する。また、ある角速度に達すると、液滴中央がくびれたアレイ形状に変化する。その後、角速度の減少と共に最大水平方向長さが急激に増加し、最終的に2つに分裂した。

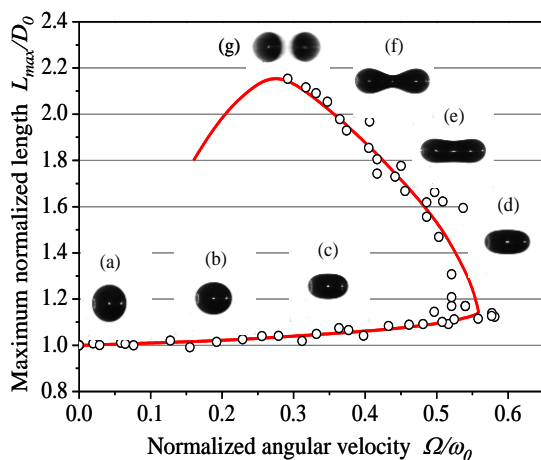


Fig. 12 Relationship between angular velocity and horizontal length.

### 3.4 浮遊液滴の回転挙動に関する理論解析

浮遊液滴の回転による非線形挙動を記述する理論的な解析手法は、未だ構築されていない。従来の摂動法において、低次の近似ではこのような大変形を伴う非線形挙動を記述することはできない。また、高次の近似においては、その解自体を求めることが極めて困難となる。本研究では、Fig. 13 に示すように、実験結果と定性的に一致する幾何学モデルを構築している。

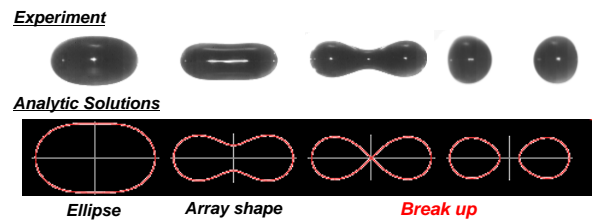


Fig. 13 Theoretical analysis of rotating droplet shape.

### 3.5 浮遊液滴の回転分裂挙動を用いた粘性係数測定

粘性の異なる浮遊液滴に回転を誘起し、その挙動を観測したところ、液滴が球形状からアレイ形状へと変化していく過程は、粘性によらず同様となった。一方、分裂直前においては、浮遊液滴の回転分裂挙動は、液滴の粘性に大きく依存することが観測された。そこで、その特性を利用することで、新たな粘性係数測定法について検討した。まず、既存の粘性係数測定器である「液体フィラメントレオメーター(LFR)」に着目した。LFR の測定原理は、2 枚のプレートで液体を挟んだ後、徐々にプレート間隔を広げた時に形成される液柱の変形が、粘性によって異なることを利用するというものである<sup>13)</sup>。また、このような液柱に働く力のバランスを考えることで、液柱の粘性係数は、以下のように表すことができるとされている。

$$\eta_e = \frac{\sigma}{-(dD_{mid}/dt)} \quad (6)$$

$\eta_e$  は粘性係数、 $\sigma$  は表面張力、 $D_{mid}$  は液柱中央部の直径を表す。式(6)より、表面張力が既知の液体については、液柱が分裂するまでの、中央部直径の時間変化率を測定することで、粘性係数を見積もることが可能である。3.3 節で示した浮遊液滴の回転分裂挙動において、液滴の中央部直径の時間変化率を測定し、式(6)を用いて算出した粘性係数を Fig. 14 に示す。横軸は粘性係数の実測値、縦軸は算出値である。算出した粘性係数は、実測値と概ね一致する結果となった。したがって、本研究により、従来測定不可能であった範囲の粘性測定が測定できる可能性を示した。現時点では実測値と相当の誤差があるものの、本測定法が確立された暁には、新たな材料の製造に大きく貢献することが期待される。

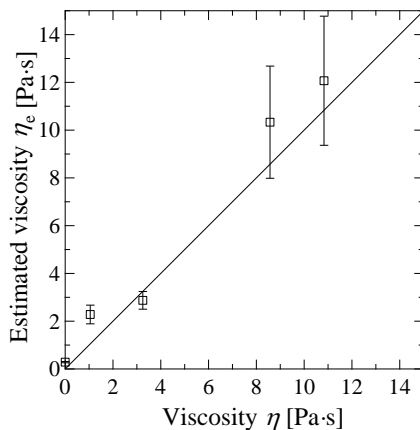


Fig. 14 Result of viscosity measurement.

## 4. 超音波浮遊液滴の内部・外部流動の観測

### 4.1 概要

超音波浮遊装置では、物性に関わらず大型の液滴を浮遊させることができる。しかしその反面、浮遊液滴の内部および外部には流動が発生し、浮遊液滴に影響を与えることが示唆されている。このような超音波浮遊液滴の内部・外部流動に関して、その知見の多くは理論、数値解析によるものであり、両流動の発生メカニズムについて、実験による理論の証明が求められているのが現状である。そこで本研究では、超音波浮遊液滴の内部・外部流動の発生メカニズムを実験的に明らかにすることを目的としている。浮遊させた水液滴の内外流動の PIV 計測を行うと共に、Yarin ら<sup>14)</sup>によって提唱されている液滴の内部・外部流動の関係式と比較することによって、両流動の相関を実験的に明らかにする<sup>15)</sup>。

### 4.2 実験装置および実験方法

実験装置を Fig. 15 に示す。超音波浮遊装置では、関数発信機から発信した正弦信号をアンプで増幅し、超音波振動子へ入力する。これにより超音波振動子を駆動し、振動子に接続されたスピーカーホーンを介してテスト部内の空間に音場を印加する。下部ホーンから印加され、上部のホーンの反射板にて反射された音波により、ホーン間に音響定在波が形成される。液滴は音響定在波の節に浮遊させる。また、液滴に対して垂直にシリンダカルレンズを用いてシート状にしたレーザーを照射し、高速度ビデオカメラで撮影することで、2次元断面の PIV 計測を行う。PIV 画像の取得にあたり、撮影速度を 8000 fps、シャッター速度を 125 μs として撮影を行う。平均処理には 3000 枚の画像を用いている。液滴の内部流動観測用のトレーサー粒子として、粒子径 10 μm のシルバーコート粒子を試験流体中に体積分率で約 0.001% 混入させた。液滴の外部流動観測においては、ネブライ

ザによって発生する水蒸気をトレーサー粒子としている。この水蒸気の径は 5 μm である。また、音による外乱、粒子の漏れを防ぐためにテスト部内にはチャンバーを設置している。

### 4.3 超音波浮遊液滴の流動構造の観測

Fig. 16, 17 に浮遊させた水液滴の内部・外部流動の平均速度ベクトル図をそれぞれ示す。ここで、Fig. 16 における黒塗りの楕円と Fig. 17 の楕円の囲みはそれぞれ浮遊液滴の平均形状を表している。図の横軸、縦軸に示す水平方向距離  $x$ 、鉛直方向距離  $y$  は液滴の長軸径  $b$  によって無次元化している。尚、PIV 計測においてレーザーシートは液滴の左側より照射されているため、右側は液滴の影となりトレーサー粒子の可視化が困難になる。このことから、結果においては中心軸に対称な流れ場と仮定し、液滴右側にあたる  $x/b > 1.8$  の速度算出結果を削除した。Fig. 16 より、液滴両側面からは液滴に向かう水平方向の流れが生じており、液滴下部・上部からは液滴から離れていく方向にジェットのように噴出する流れが形成されていることが分かる。また液滴周りの流動の特徴として、下部に一对の渦が発生している。液滴の内部流動についても、Fig. 17 より、1つの循環渦が発生している。ここで、液滴下部に発生する渦の回転方向に注目すると、液滴側面から流入し、液滴直下に淀み点を持つ下方向に流れる向きとなっている。さらに、赤道面 ( $y/b = 1.8$ )での液滴の内外部の流動を鉛直方向について注目すると、外部流動は正の値をとり、液滴内部では負の値をとった。加えて、内部流速が外部流速より小さい値をとった。この結果は、理論的に示唆されているストークス層に循環が発生し、その循環によって液滴界面を境に内外部の鉛直方向流速が逆転していることを示唆している。そこで、Yarin ら<sup>14)</sup>が導き出した、液滴の内部・外部流速比の関係を表す式(7)を用いて、実験と理論の比較を行う。

$$\frac{v_L}{v_G} = \frac{\sqrt{2}}{50} \left( \frac{d}{\mu_L} \sqrt{\rho_G \mu_G \omega} \right) \quad (7)$$

ここで、 $v$ 、 $d$ 、 $\mu$ 、 $\rho$ 、 $\omega$  はそれぞれ速度、体積等価直径、粘度、密度、角振動数を表す。尚、添え字の  $L$ 、 $G$  はそれぞれ液相、気相を表す。式(7)の右辺に実験値を代入することにより、内部・外部流速比を求めることができる。また、Fig. 16, 17 に示した液滴の赤道面での気液界面前後での内外部流速の計測値を、直接式(7)の左辺に代入することによって、液滴内外部流速比を求めることが可能となる。このようにして求めた理論値と実験値を比較した結果を Fig. 18 に示す。横軸には液滴径  $d$  を、縦軸には式(7)の左辺に示す内外部流速比  $v_{in}/v_{out}$  を示している。理論値と実験値が 10% 以内に収まる結果となり、外部流速は内部流速の約 5 倍の値となることがわかる。以上の結果は、超音波浮遊液滴の内部・外部流動は、ストークス層内に発生する循環によって駆動されることを定量的

に示唆している。本実験体系において、ストークス層厚さ( $\delta=(2\mu d(\rho g \omega))^{0.5}$ )は約 16  $\mu\text{m}$  であることから、その可視化計測は非常に困難である。今後、さらに液滴の界面近傍を詳細に観測することで、ストークス層の可視観測を目指していく。

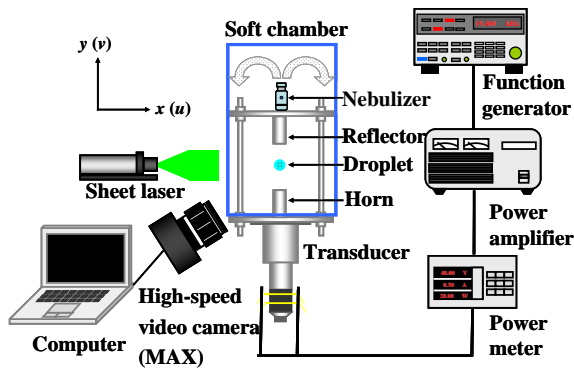


Fig. 15 Ultrasonic levitator with two dimensional flow velocity measurement system.

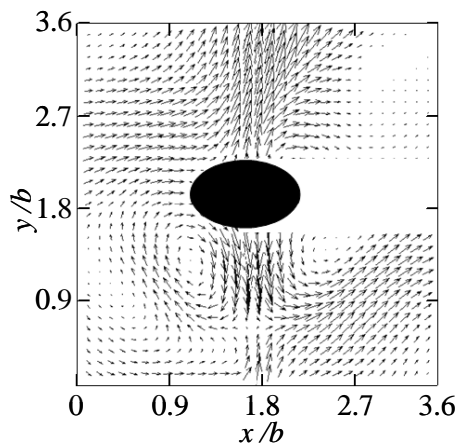


Fig. 16 Average external velocity vector fields of a water droplet.

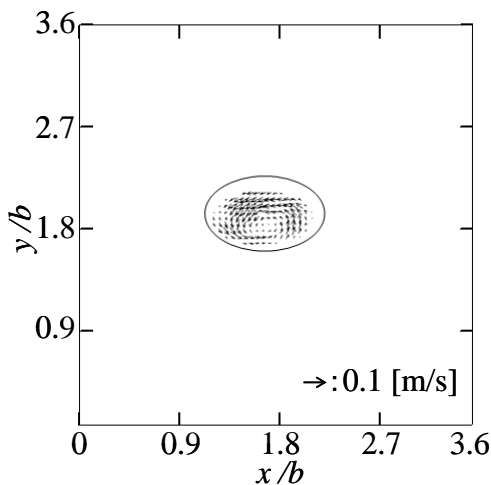


Fig. 17 Average internal velocity vector fields of a water droplet.

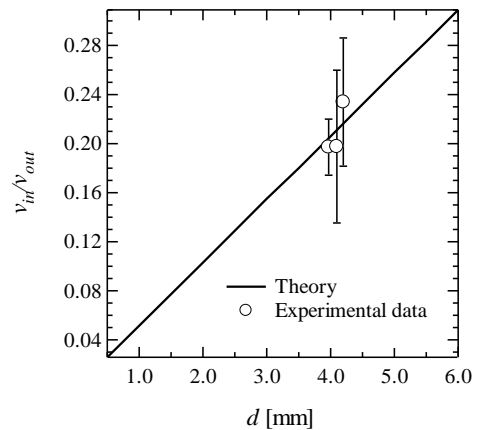


Fig. 18 Relation between velocity ratio and diameter.

## 5. 超音波浮遊液滴の温度変化と凝固

### 5.1 概要

超音波浮遊法を用いた材料製造では、浮遊させた金属を熔融、凝固させた結果が過去の研究として報告されている。またこの時、超音波の作用により起こる界面の不安定現象についても、観測がなされている。しかしながら、それらは液滴温度をパラメータとしておらず、加熱・冷却時の温度変化が界面に与える影響に関する実験的知見は少ないのが現状である。そこで本研究では、温度変化が界面変形に与える影響および界面変形が熱伝達および冷却凝固に与える影響を実験的に明らかにすることを最終的な目的として定め、超音波浮遊液滴の加熱・凝固実験を行った。

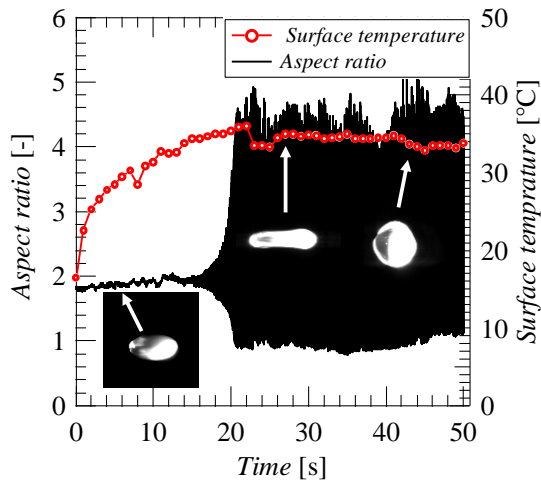
### 5.2 実験装置および実験方法

本章においても、4.2 節で説明した超音波浮遊装置を用いる。浮遊液滴の加熱実験には波長 532 nm の YAG レーザーを用いる。水液滴にはローダミン 6G を溶解させ実験を行う。ローダミン 6G は約 530 nm に吸収波長帯のピークを持つ蛍光染料であり、レーザー光を吸収し発熱する。液滴の温度は放射温度計により、浮遊液滴の斜め下 20 度の角度から測定する。浮遊液滴の凝固実験には、試験流体としてラウリン酸を用いる。ラウリン酸は融点が 43.5  $^{\circ}\text{C}$  と低く、凝固実験に適している。ラウリン酸は常温では固体であるため、浮遊させる前に溶解させ、液体状態にしておく必要がある。そのため、あらかじめヒーターを用いてラウリン酸を溶解させた後、浮遊させる。

### 5.3 超音波浮遊液滴の加熱実験

超音波浮遊液滴を加熱した時の形状の変化を、Fig. 19 に示す。横軸は加熱開始からの時間、縦軸は液滴の表面温度、および液滴の水平方向長さを鉛直方向長さで割っ

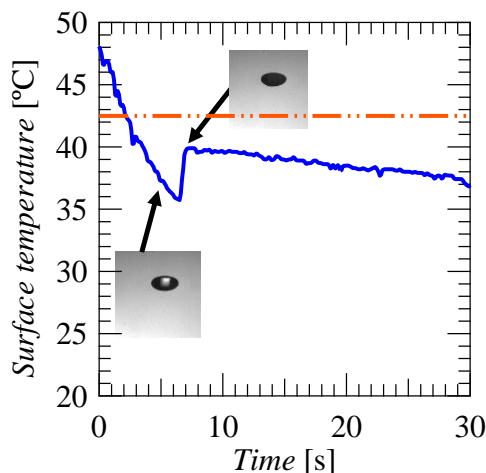
た扁平率を表す。液滴の表面温度は加熱後徐々に上昇し、33~37 °Cを保った。液滴の扁平率に関しては、表面温度上昇時はほぼ一定である。その後、液滴の表面温度が上昇きった後に、扁平率が 0.9~5.2 の範囲で周期的に変化する大きな界面変形の発生が観測された。



**Fig. 19** Time series of surface temperature and aspect ratio of heated droplet.

#### 5.4 超音波浮遊液滴の凝固実験

液滴がほぼ変形せず、安定した凝固をするラウリン酸の温度変化を **Fig. 20** に示す。横軸は時間、縦軸は温度を表している。図中の実線は液滴の表面温度、破線はラウリン酸の融点を表す。また実験時、室温は 25 °Cである。およそ 5~10 s 付近において、過冷却が観測された。



**Fig. 20** Time series of surface temperature of stable solidified droplet.

## 6. 結言

- 静電浮遊液滴の共振周波数に及ぼす振幅と角速度の影響を定量的に評価し、共振周波数が変化しない振動と回転の関係を明らかにした。
- 静電浮遊液滴の回転分裂挙動を利用して、これまで測定が困難であった  $0.1 \sim 10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  の浮遊液滴に対する、新たな粘性係数測定法を提案した。
- 浮遊液滴の非線形な挙動を理論・数値解析を用いて再現した。
- 超音波浮遊液滴の内部・外部において、超音波により駆動される境界層内の循環が、流動を発生させることを実験的に示唆した。
- 超音波浮遊液滴の加熱・凝固実験を行い、液滴温度をパラメータとした実験的な知見を得た。

## 参考文献

- 1) T. Ishikawa, J. T. Okada, P. F. Paradis and Y. Watanabe: *Int. J. Thermophysics*, **31** (2010) 388.
- 2) W. J. Xie, C.D. Cao, Y. J. Lu and B. Wei: *Phys. Rev. E*, **66** (2002) 1.
- 3) R. Tukermann, B. Neidhart, E. G. Lierke and S. Bauerecker: *Chem. Phys. Lett.*, **363** (2002) 349.
- 4) L. Rayleigh: *Proc. R. Soc. London*, **29** (1879) 71.
- 5) R. Tanaka, S. Matsumoto, A. Kaneko and Y. Abe: *Japanese Journal of Multiphase Flow*, **25** (2012) 391. (in Japanese)
- 6) T. Watanabe: *Phys. Lett. A*, **373** (2009) 867.
- 7) L. Rayleigh: *Phil. Mag.*, **14** (1882) 184.
- 8) J. A. Tsamopoulos and R. A. Brown: *J. Fluid. Mech.*, **127** (1983) 519.
- 9) F. H. Busse: *J. Fluid. Mech.* **142** (1984) 1.
- 10) S. Awazu, Y. Abe, S. Matsumoto, T. Watanabe and K. Nishinari: *Japanese Journal of Multiphase Flow*, **3** (2008) 59. (in Japanese)
- 11) T. Maekawa, S. Matsumoto, Y. Abe and A. Kaneko: *Japan Society of Thermophysical Properties*, **26** (2012) 9. (in Japanese)
- 12) R. A. Brown and L. E. Scriven: *Proc. R. Soc. London A*, **371** (1980) 331.
- 13) G. H. McKinley and A. Tripathi: *J. Rheol.* **44** (2000) 653.
- 14) A. Yarin, G. Brenn, O. Kastner, D. Rensink and C. Tropea: *J. Fluid Mech.*, **399** (1999) 151.
- 15) K. Hasegawa, A. Kaneko, K. Aoki and Y. Abe: *Japanese Journal of Multiphase Flow*, **23** (2010) 523. (in Japanese)

(2012年9月3日受理, 2012年11月30日採録)