21018 音響浮遊液滴の界面変形と内部流動の相関に関する研究

Study on correlation between interfacial deformation and internal flow in an acoustically levitated droplet

○ 学 池田 啓 (筑波大院) 正 金子 暁子 (筑波大) 学 山本 祐司 (筑波大院)
学 長谷川 浩司 (筑波大院) 正 阿部 豊 (筑波大) 学 河上 雅則 (筑波大院)

Hiromu IKEDA, Yutaka ABE and Akiko KANEKO,

University of Tsukuba, 1-1-1, Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8573, Japan

Under the microgravity environment, products of new and high quality materials solidified into homogeneous crystal have been the subject of much interest. Usually, a large levitated droplet is utilized for such a containerless processing. However, surface instability and internal flow appear remarkably when the droplet becomes large. Elucidation of effect of surface instability and internal flow of the levitated droplet is required for the quality improvement of new material. In the previous study, internal flow is confirmed on levitated droplet. In the present study, the experimental investigation of levitated droplet by ultrasound is conducted under the normal gravity environment. The purpose of this study is examined the effects on internal flow when the equivalent diameter and aspect ratio of levitated droplet. In this experiment we focus on the flow transition and the flow condition. The internal flow structure in the levitated droplets is measured by two dimensional Particle Image Velocimetry (PIV) techniques, and the dominant factor which induces the internal flow is discussed.

Key Words : Droplet, Acoustic levitation, Internal Flow, PIV, Deformation

1. 緒 言

現在, 宇宙開発技術の向上によりスペースシャトルや国際宇宙ステーション(ISS)などの微小重力環境を用いた研究が行われつつある。微小重力環境においては材料生成プロセスにおいて地上とは異なり容器を必要としないことにより高品質な材料が得られることが期待されている。また, 流体内の温度差や異種材料間の密度差に起因する浮力が働かず, 対流や沈殿が生じないため地上より静的な環境で材料の製造が可能という利点がある。しかしながら, 静的な環境である宇宙においても浮遊物体に僅かに力がかかるため液体物体を限られた空間に留める保持力を必要とする。その際, 浮遊する液体内部の流動が顕著になる可能性がある。このような内部流動は新材料製造の均質性などに影響を及ぼすことが指摘されており, 新材料製造において内部流動メカニズムの解明が求められている。これまでに液滴の浮遊や水液滴の内部流動観測など様々な研究⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾が行われてきた。過去の研究において, 浮遊液滴内部には流動が発生することが確認され, 物性値の影響も受けることが調べられている。しかしながら, 内部流動発生要因, 液滴内部の流動状況など, 具体的な液滴内部流動に関する実験的研究は未だ十分であるとは言い難い。

本研究では, 浮遊液滴の液滴径および扁平率の変化による内部流動への影響を調べることを目的とする。実験においては, 内部流動の遷移, またそのときの流動状況に着目し, 液滴内部の赤道面に発生する二次元的な流動, また流動発生要因を調べることにした。具体的には試験流体に水を用いて, 液滴径および音圧を変化させたとき, 内部流動を可視観測する。また, 得られた内部流動観測画像に対し, PIV 解析を施すことによって液滴内部の流動構造を把握し, 扁平率および液滴径の内部流動への影響を調べる。

2. 実験装置および実験方法

図1に本研究で使用した実験装置の概略図を示す。液滴を浮遊させるには, 関数発信機から正弦信号を発信し, アンプを介して増幅した後, 電力計を通して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

た固体スピーカーであるホーンを介して, ホーンと反射板であるガラス板の間に音響定在波を形成する。この音響定在波によって液滴はホーン間に保持される。

また, ホーン-ガラス板間の音圧はプローブマイクロフォンを用いて計測する。浮遊液滴の内部流動は液滴内部にトレーサ粒子を添加しレーザーシートによって反射した粒子像を上方ハイスピードカメラから撮影することによって観測する。浮遊液滴の外形は水平方向からのハイスピードビデオカメラを用いて観測する。

実験条件としてはホーン間距離 46 mm, 入力周波数 19.4 kHz, 音圧 161-163 dB, 液滴径 2-5 mm, 扁平率 1.2-2.4, 室温 20 °C で実験を行い, 試験流体は水を用いた。水の物性を Table.1 に示す。また, ハイスピードカメラの撮影条件は 1000 FPS とした。

Fig.1 Experimental apparatus

Table1 Physical properties of test fluids

Fluid	Viscosity [m Pa·s]	Surface tension [m N/m]	Density [kg/m ³]
water	0.890	72.8	998

3. 実験結果および考察

図2(a)に水平方向から撮影された実際の水液滴の外形を示す。液滴は音響放射圧力と重力の影響により、扁平形になっていることが確認できる。扁平率は液滴の横軸および縦軸をそれぞれ a, b とし以下の式(1)で示す。

$$\text{Aspect ratio} = \frac{a}{b} \quad \cdots (1)$$

また図2(b)は液滴内部のトレーサ粒子像である。液滴の赤道面にレーザーシートを照射し、その赤道面をガラスプレートを用いた可視化窓を通して上方向から観測した。浮遊液体赤道面に照射されたシートレーザーにより、トレーサ粒子が反射しているのが確認できる。これらの観測画像をもとに1000枚の画像をPIV処理し、平均した水の内部流動の様子を図3に示す。図3より水液滴の赤道面は、赤道面中央に流れが生じ、また内部に右回りと左回り両方の流れをもつ流れが発生していることが観測された。扁平率および液滴径の変化によって図3のような流動場を液滴内部に持つ流動が観測されたことから、この双対渦を内部に持つ特徴的な流れに着目した。

液滴内部の速度場は赤道面中央付近に最大流速が発生している。この流動が発生した場合の扁平率と液滴等価直径で整理したものを図4に示す。図3のような双対渦が確認された条件を黒抜きの三角プロットに示す。双対渦は扁平率が約1.6-2.0、液滴等価直径が3 mm以上のときに生じていることが確認できる。双対渦が確認できなかった流動は白抜きの四角プロットで示している。双対渦以外の流れは、低アスペクト比のとき剛体的な回転挙動、高アスペクト比になると双対渦とは異なる非定常な流動構造が観測された。また図4中の斜線部分は、液滴が音圧増加によって起こる界面振動や微粒化、また音響放射圧力と液滴の自重の釣り合いが保てずに液滴が落下するような安定浮遊しない領域を示す。図4から扁平率および液滴径が大きくなるにつれて流動状況が遷移し、一定の範囲において図3のような流動場を内部にもつ流れが確認された。このことから内部流動は界面変形および液滴径によって変化することが示唆された。

これらの実験結果より、音響浮遊液滴内部の流動は液滴径、扁平率の影響を受けることが考えられる。液滴の形状が比較的球形状に近く、液滴径が小さい場合、液滴は剛体的な回転をすることが確認された。扁平率、液滴径が大きくなるにつれて今回着目した図3のような特徴的な流れが一定の範囲で発生し、さらに扁平率が増加した場合、液滴の内部流動は遷移し、非定常な流動構造をもつことが確認された。この遷移の要因として、液滴径の増加による音響定在波の節からの低下、扁平率の増加によって音響放射圧力を受ける面積が増えることが内部流動への影響の一つとして考えられる。音響定在波中の節からの低下によって、テスト部定在波中の腹に近づくため、定在波の変動を強く受けることによって内部に流動が発生することが考えられる。これらの要因により浮遊液滴の内部流動が液滴径および扁平率の増加に伴って遷移していくことが示唆される。

Fig.2 (a) Horizontal view of droplet, (b) Equatorial plane view of levitated droplet
(Aspect ratio = 2.1, $d = 3.6$ [mm], $SPL = 162$ [dB])

Fig.3 Two-dimensional velocity vector distribution in the equatorial plane of the water droplet
(Aspect ratio = 2.1, $d = 3.6$ [mm], $SPL = 162$ [dB])

Fig.4 Correlation between the aspect ratio and equivalent diameter

4. 結 言

- ・液滴径および扁平率を変化させたとき浮遊液滴の内部には異なる流動が発生することを確認した。
- ・扁平率、液滴径が一定の範囲のとき浮遊液滴赤道面上左右に異なる渦度をもつ双対渦の流れが観測された。
- ・液滴径、界面変形が大きくなるにつれて、浮遊液滴内部の流動が顕著になることが示唆された。
- ・今後は浮遊液滴赤道面の三成分速度を算出し、 z 軸方向の流れを考慮し、流動場を把握する予定である。

参 考 文 献

- (1) A. V. Anilkumar, C. P. Lee, and T. G. Wang, Phys. Fluid A, Vol. 5, No. 11, pp. 2763-2774 (1993).
- (2) E. Trinh, A. Zwern and T. G. Wang, J. Fluid Mech. Vol. 115, pp. 453-474 (1982).
- (3) Y. Abe, D. Hyuga, S. Yamada, K. Aoki, Ann. N.Y. Acad. Sci. 1077, pp. 49-62 (2006)
- (4) Y. Abe, A. Kaneko, Y. Yamamoto, K. Hasegawa, K. Aoki, Microgravity Sci. Technol, 20, pp. 277-280 (2008)