

# 浮遊液滴非線形ダイナミクス研究報告

阿部 豊 (筑波大), 松本 聡 (JAXA), 西成 活裕 (東大), 渡辺 正 (福井大),  
北畑 裕之 (千葉大), 長谷川 浩司 (工学院大), 金子 暁子 (筑波大),  
丹羽 基能 (筑波大院), 渡邊 歩 (筑波大院), 小林 研仁 (筑波大)

## Report of Research on Nonlinear Dynamics of Levitated Droplet

Yutaka Abe\*, Satoshi Matsumoto, Katsuhiko Nishinari, Tadashi Watanabe, Hiroyuki Kitahata, Koji Hasegawa, Akiko Kaneko, Motonori Niwa, Ayumu Watanabe, Kenji Kobayashi

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

E-Mail: abe@kz.tsukuba.ac.jp

Abstract: It is expected to process materials under the container-less condition. Ultrasonic and electrostatic levitation technologies are combined to achieve the container-less manipulation technology. The present report represents effectiveness of the newly developed technologies by using ultrasonic phased array system to manipulate the free moving liquid. It is demonstrated by the aircraft parabolic flight that the microgravity condition is most appreciate circumstances to demonstrate the effectiveness of the present technology.

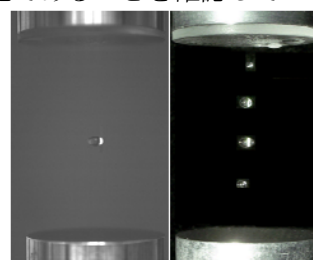
Key words; Electrostatic levitation, Acoustic levitation, Non-linear dynamics, Fluid manipulation

### 1. 緒言

著者らは、これまで超音波ならびに静電力を用いた液滴浮遊技術の開発を行ってきた<sup>1-2)</sup>。静電浮遊液滴を回転させることで、液滴の変形・分裂が制御可能であることを実験的に実証し、その分裂挙動が、数値解析結果と整合することを示してきている。また、超音波浮遊液滴の内・外部流動の相関を明らかにし、非接触で液滴内部の攪拌が可能であることを示してきている。これらの静電力および超音波による浮遊技術を用いることで、創薬などの医療バイオ分野や分析化学の分野において切望されている混合・反応・分離・保持・蒸発のような流体プロセスを非接触で実現する技術開発に取り組んでいる。これは、静電浮遊と超音波浮遊をハイブリットに用いたものであり、そのための技術開発と実証を通して、高度な熱流体プロセス技術の実現を目指している。

特に液滴浮遊実験においては、微小重力実験を実施する2つの利点がある。1つ目は、重力の影響が軽減されることで、地上重力環境下と比較し、液滴保持に必要な音圧が小さくなるため、通常重力環境下での実験では得られない大粒径かつ真球形状に近い液滴の浮遊が可能となることである。2つ目は、液滴浮遊のために必要な音響エネルギーを最小化することができ、非線形音響効果に起因した複雑現象の影響を最小化できる点である。著者らは、これまでに宇宙環境利用を目指して、航空機を用いた短時間での微小重力実験を、超音波浮遊液滴においても実施している。Fig. 1には、微小重力環境下で浮遊させた液滴の静止画の一例を示す。地上重力環境下での浮遊状態と比較して、より大粒径で真球に近い液

滴が浮遊可能であることを確認している。



(a) Single droplet (b) Multiple droplets

Fig. 1 Levitated droplets under the normal gravity.

### 2. 超音波浮遊法

浮遊させた液滴の内・外部流動場の計測結果をFig. 2に示す。エタノール液滴の場合、内部に1対のトロイダル渦が確認できる。この観測された渦は、液滴の中心部では上部に向かい、界面を沿って下部へ向かう渦構造であった。水液滴の外部においては液滴下部に1対のトロイダル渦の発生が観測されている。

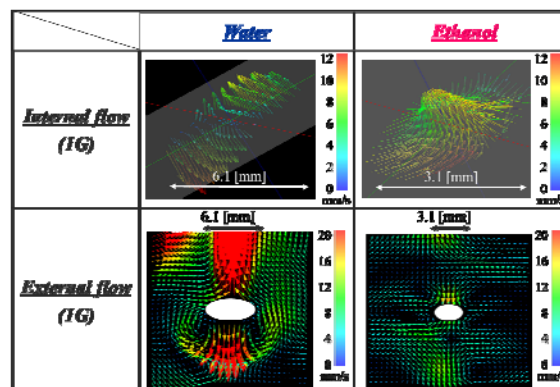


Fig. 2 Internal-External flow of acoustically levitated droplet.

### 3. 静電浮遊法

静電浮遊させた液滴（グリセリン 99 wt%）の回転による変形挙動の観測結果をFig. 3に示す<sup>4)</sup>。浮遊直後の無回転状態において、液滴は球形状で浮遊した。スピーカーにより音響定在波を形成すると、液滴は鉛直軸周りに回転をはじめ。スピーカー出力の増加とともに回転角速度は増加してゆき、ある回転角速度を超えると、液滴は鉛直軸に対して非軸対称な形状に変形し、さらにスピーカー出力を増加させると、今度は回転角速度が減少して、水平方向に伸張しながら中央部がくびれる挙動が確認された。Fig. 3に示す現象より液滴の粘性係数を測定するために、浮遊液滴の回転分裂時において、液滴中央部に働く応力平衡式を構築することで粘性係数の算出を行った。結果より、本手法を用いることで、静電浮遊法における既存手法では測定不可能だった0.1~100 [Pa·s]の範囲の粘性係数を測定可能である事が示された。

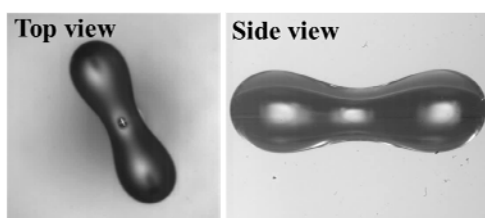


Fig. 3 Rotational breakup behavior of droplet.

### 4. 航空機による微小重力環境を用いた非接触流体マニピュレーション

異なる流体を混合・攪拌し、濃縮・反応・相分離させた後に、蒸発・乾燥させるなどの流体プロセスは、創薬などの医学バイオ分野や化学分析分野などにおいて不可欠である。しかしながら、超高純度の微量成分を取り扱おうとする場合、溶媒の容器壁への付着や不純物の残留の問題が指摘されており、非接触での熱流体プロセス制御技術が切望されている。

特に最近 2-3 年において、非接触浮遊技術を用いた流体制御技術をバイオ分野に適用しようとする試みが、世界各国において急速に行われつつある<sup>22-26)</sup>。しかしながら、非接触無容器での流体制御技術を、生化学や製剤などのバイオ分野に適用するための科学的な知見は、未だ解明されておらず、その技術そのものも、未だ確立されていない。

そこで本研究では、静電浮遊と超音波浮遊をハイブリットに用いることで、混合・反応・分離・保持・蒸発のような流体プロセスを非接触で実現する技術を提案している。

航空機を用いたパラボリックフライトによる微小重力環境や、宇宙における無重力環境では、液滴浮遊のために必要な音響エネルギーを最小化可能であ

り、非線形音響効果に起因した複雑現象の影響の最小化が期待される。原材料液体の混合・攪拌・相分離ならびに蒸発・乾燥などの全工程を、非接触で実現する流体マニピュレーションの実現には、宇宙のように重力の寄与が極限的に小さい理想的な実験環境を用いた実験が極めて有効である。そこで、流体マニピュレーションのキーとなる要素技術の開発や液滴に生じる物理現象の解明を目的とし、航空機を用いた短時間微小重力実験を行った。

液滴の浮遊保持と位置制御のための音場制御は、超音波アレイにより実現する<sup>27)</sup>。それぞれの振動子から出力される音波の位相を制御し、任意位置に音波を集束させる。集束した音波を反射させると、焦点付近に局所的な定在波が形成され、試料が浮遊する。さらに、音波の集束点を移動させることにより、液滴の搬送および合体が実現される。

微小重力環境において、浮遊させた二液滴の併進運動を制御し、合体させることに成功した。微小重力環境においては、従来保持・駆動が不可能と考えられていた定在波の半波長よりも大粒径かつ真球形状の液滴を浮遊させ、さらには合体させることが可能であることが明らかとなった。これは、通常重力環境において、浮遊液滴を保持駆動するためには、ポテンシャルの井戸の中に深く保持する必要がある一方で、微小重力環境では、弱い保持でも駆動可能であるためだと考えられる。

さらに、片方の液滴をメチレンブルーで着色することにより、合体時における液滴内部の混合挙動を詳細観測することに成功した。さらに、浮遊させた液滴の界面に振動モードを発現させることにも成功しており、本手法を用いることによって、無容器での流体混合を制御できる可能性を得た。

### 5. 結言

異なる流体を非接触で混合・攪拌し、濃縮・反応・相分離させる技術を実現するため、「静電場と超音波の二種類の浮遊法をハイブリットに用いた非接触無容器のプロセス制御技術」を提案する。

静電浮遊法における既存手法では測定不可能だった0.1~100 [Pa·s]の範囲の粘性係数を測定することができる事が示された。さらに、超音波浮遊液滴の内部流動と外部流動の相関を明らかにし、非接触で液滴内部の攪拌が可能であることを示した。

流体マニピュレーションのキーとなる要素技術の開発や、液滴に生じる物理現象の解明を目指し、航空機を用いた微小重力実験を行った。その結果、微小重力環境において、2つの液滴を同時に浮遊させることに成功し、さらには、液滴を非接触で合体させることに成功した。これにより、液滴の非接触制御技術の更なる開発に有効となる技術が構築された。

## 謝辞

本研究は JSPS 科学研究費補助金(15H03925) の助成を受けると共に、JAXA 宇宙環境利用科学委員会研究班ワーキング・グループ「浮遊液滴非線形ダイナミクス」の活動の一環として実施したものである。本研究の実施にあたり、JAXA 宇宙科学研究所の宇宙環境利用専門委員会が募集した平成 28 年度短時間微小重力実験に採択され、平成 28 年 10 月 17 日から 23 日にかけて、県営名古屋空港において、ダイヤモンドエアサービス (DAS)社が有するガルフストリーム□(G-□)航空機を用いたパラボリックフライトによる微小重力環境にて実験を実施した。ここに記して感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 阿部豊, 他; 日本機会学会論文集(B 編), Vol. 70(692), 242-227, (2003).
- 2) 阿部豊, 他; 日本機会学会論文集(B 編), Vol. 71(712), 36-41, (2005).
- 3) Y. Abe et al.; Ann. N.Y. Acad. Sci., Vol. 1077, 49-62 (2006).
- 4) 阿部豊, 他; 混相流研究の進展 2, 63-70, (2007).
- 5) Y. Abe et al.; Microgravity Sci. and Tech. XIX-3/4 • 2007 Two-Phase System for Ground and Space Applications., Vol. 19(3-4), 33-34 (2007).
- 6) K. Hasegawa et al.; Microgravity Sci. and Tech., Vol. 20(3-4), 261-264 (2008).
- 7) Y. Yamamoto et al.; Microgravity Sci. and Tech., Vol. 20(3-4), 277-280 (2008).
- 8) Y. Abe et al.; Ann. N.Y. Acad. Sci., Vol. 1161, 211-224 (2009).
- 9) K. Hasegawa et al.; Microgravity Sci. and Tech., Vol. 21, 9-14 (2009).
- 10) M. Kawakami et al.; Microgravity Sci. and Tech., Vol. 22(2), 145-150 (2010).
- 11) M. Kawakami et al.; Microgravity Sci. and Tech., Vol. 22, 353-359 (2010).
- 12) 長谷川浩司, 他; 混相流, Vol. 23(5), 523-530, (2010).
- 13) K. Hasegawa et al.; Int. J. Transport Phenomena, Vol. 12(3-4), 151-160 (2011).
- 14) 石井光, 他; 日本機会学会論文集(B 編), Vol. 78(794), 1696-1709 (2012).
- 15) 下西国治, 他; 混相流, Vol. 25(5), 537-544, (2013).
- 16) 長谷川浩司, 他; 混相流, Vol. 27(5), 563-570, (2014).
- 17) K. Shitanishi et al.; Microgravity Sci. and Tech., Vol. 26, 305-312 (2014).
- 18) 合田篤, 他; 混相流, Vol. 28(5), 539-546, (2015).
- 19) H. Kitahata et al.; Phys. Rev. E, Vol. 92(6), 062904 (2015).
- 20) K. Hasegawa et al.; NPJ Microgravity, (2016).
- 21) 丹羽基能, 他; 混相流, (2016).
- 22) C. Bouyer et al.; Adv. Matter, Vol. 28, 161-167 (2015).
- 23) E. T. Chainani et al.; Anal. Chem., Vol. 86, 2229-2237 (2014).
- 24) L. Puskar et al.; Lab on a Chip, Vol. 7, 1125-1131 (2007).
- 25) M. Sundvik et al.; Sci. Rep, Vol. 5, 13596 (2015).
- 26) W. J. Xie et al.; Appl. Phys. Lett., Vol. 89, 214102 (2006).
- 27) T. Hoshi et al.; Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 53, 07KE07, (2014).