

浮遊液滴非線形ダイナミクス

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), 東 顕二郎 (千葉大), 渡邊 歩 (筑波大・院), 小林 研仁 (筑波大・院), 伊藤 拓海 (筑波大・院), 佐々木 裕哉 (筑波大・院), 駒谷賢 (筑波大・院)

Non-linear Dynamics of Levitated Droplet

Yutaka Abe, Satoshi Matsumoto, Katsuhiro Nishinari, Tadashi Watanabe, Hiroyuki Kitahata, Koji Hasegawa*, Akiko Kaneko, Kenjiro Higashi, Motonori Niwa, Ayumu Watanabe, Kenji Kobayashi, Takumi Ito, Yuya Sasaki, Suguru Komaya

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

E-Mail: kojihasegawa@cc.kogakuin.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.

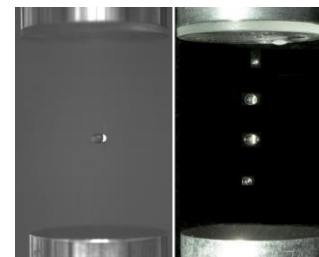
Key words; Acoustic levitation, Non-linear dynamics, Fluid manipulation, Lab-on-a-drop

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¹⁻²⁵⁾。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実施している。Fig. 1には、微小重力環境下で浮遊させた超音波浮遊液滴の静止画の一例を示す。



(a) Single droplet (b) Multiple droplets

Fig. 1 Levitated droplets under the normal gravity.

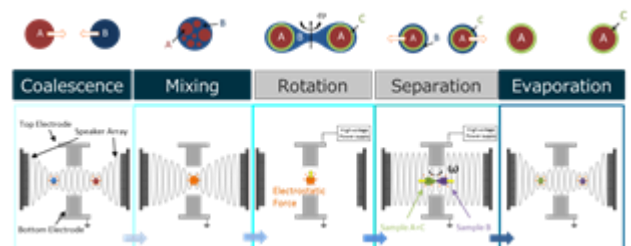


Fig. 2 Proposed noncontact sample manipulation technology.

2. 非接触流体制御技術の提案

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う場合、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。

近年、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²⁶⁻³⁰⁾。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、その技術も未だ確立されていない。

そこで本研究では、超音波浮遊法を用いることで、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。Fig. 2に我々が提案する非接触流体制御技術の概要図を示す。本提案では液滴の浮遊・保持、合体、混合・反応、回転・分裂、蒸発・分離の一連のプロセスを超音波および静電浮遊法をハイブリットに活用することで実現させることを目指している。

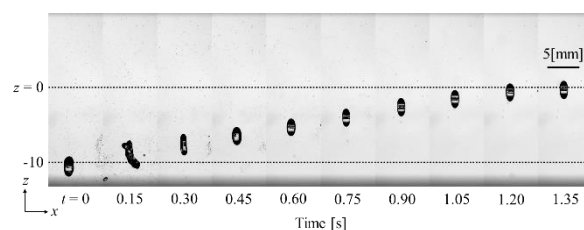
3. 航空機による微小重力環境を用いた非接触流体マニピュレーション

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。しかしながら国際宇宙ステーション(ISS)における実験環境を想定した場合、実験者による手動での試料注入は不確実性を伴うことが問題となるため、液滴注入工程の自動化が必要不可欠である。加えて、非接触制御するサンプルの挙動予測および制御技術を確立する必要がある。そこで、ISSにおける微小重力環境下での利用を目的とした非接触液滴制御システムおよび自動液滴注入システムを開発し、航空機を用いた短時間微小重力実験によりシステムの評価を行った。

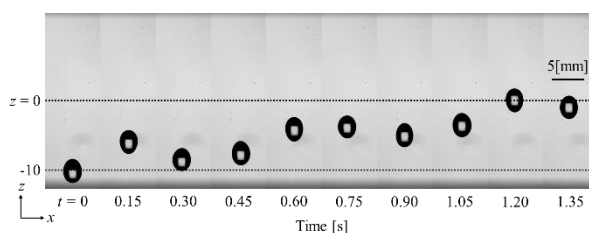
本研究において開発し、航空機を用いた短時間微小重力実験により検証を行った結果の一例を Fig. 3 に示す。微小重力環境において、対向する超音波アレイによって形成された定在波中に、対向するニードルを用いた自動液滴注入システムにより単一液滴を導入し、保持・液滴駆動に成功した。また本液滴注入システムを用いて浮遊液滴径を制御することに成功し、微小重力環境においては、地上重力環境下よりも小さな音圧で大粒径の液滴を保持・駆動が可能であることが明らかとなった。これは、地上重力環境において浮遊液滴を保持駆動するためには、ポテンシャルの井戸の中に深く保持する必要がある一方で、微小重力環境では、浅い保持でも保持・駆動

可能であるためだと考えられる。

以上の実験結果を基に、駆動された液滴の挙動予測および制御可能性についても検討した。その結果、特に Fig.3 (a)に示すような小液滴の場合には、音響ポテンシャルによる駆動力³¹⁾を見積もることにより、分布点音源法を用いた数値解析結果と実験結果と良好な一致を確認している。一方、Fig.3 (b)に示すような大液滴の場合には、音場による復元力が実験と予測で乖離している。これは液滴の界面変形および液滴の並進運動に伴う音場の変化に起因しており、これらの影響を考慮した上での再検討が必要であることを明らかにしている。



(a) Small droplet



(b) Large droplet

Fig. 3 Non-contact manipulation of droplet.

4. 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、「超音波浮遊法を用いた非接触無容器のプロセス制御技術」を提案する。

本研究においては ISS における微小重力環境下での利用を目的として、地上および航空機を用いた短時間微小重力実験で実証実験を行った。具体的には、対向配置された超音波アレイを用いた非接触液滴制御システムおよび対向するニードルによる自動液滴注入システムを開発し、微小重力実験下で実証実験を行った。また得られた結果を基に、浮遊液滴の動的挙動を予測・制御するために、分布点音源法を用いた数値解析を行うとともに、実験結果と比較した。

その結果、微小重力環境において、自動液滴注入システムにより定在波中への単一液滴の形成に成功し、対向する超音波アレイによる液滴の保持・駆動に成功した。また、自動液滴注入システムにより浮遊液滴径の制御に成功し、微小重力環境においては、

地上重力環境下で浮遊可能な音圧よりも小さな音圧において大粒径の液滴が浮遊可能であることを明らかにした。

実験結果を基に、駆動された液滴の挙動予測および制御可能性についても検討した。その結果、特に Fig.3 (a)に示すような小液滴の場合には、分布点音源法を用いた数値解析を活用することで、微小重力環境での液滴の動的挙動を予測・制御可能であることが示唆された。

以上の結果より、本システムが微小重力環境において運用可能であることが示唆され、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 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 年度および 29 年度短時間微小重力実験に採択され、ダイヤモンドエアサービス (DAS)社が有する MU-300 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。ここに記して関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 阿部豊, 他; 日本機化学会論文集(B 編), Vol. 70(692), 242-227, (2003).
- 2) 阿部豊, 他; 日本機化学会論文集(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; 日本機化学会論文集(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, 16004 (2016).
- 21) 丹羽基能, 他; 混相流, Vol. 29(5), 501-508, (2016).
- 22) 丹羽基能, 他; 混相流, Vol. 30(5), 537-546, (2017).
- 23) A. Watanabe et al., Sci. Rep. 8:10221 (2018).
- 24) K. Kobayashi et al., Phys. Fluids, 30, 082105 (2018).
- 25) Y. Niimura et al., PloS one, (2019) (in press).
- 26) C. Bouyer et al.; Adv. Matter, Vol. 28, 161-167 (2015).
- 27) E. T. Chainani et al.; Anal. Chem., Vol. 86, 2229-2237 (2014).
- 28) L. Puskar et al.; Lab on a Chip, Vol. 7, 1125-1131 (2007).
- 29) M. Sundvik et al.; Sci. Rep, Vol. 5, 13596 (2015).
- 30) W. J. Xie et al.; Appl. Phys. Lett., Vol. 89, 214102 (2006).
- 31) T. Hoshi et al.; Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 53, 07KE07, (2014).