

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03925

研究課題名(和文) 静電場・超音波ハイブリッド浮遊法を用いた非接触無容器プロセス制御技術の開発

研究課題名(英文) Development of non-contactless container process control technology using electrostatic field / ultrasonic hybrid floating method

研究代表者

阿部 豊 (Abe, Yutaka)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：10241720

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：複数の超音波振動子から構成される対向型超音波フェーズドアレイと対向型円筒形静電電極を直角に配置した静電場・超音波ハイブリッド浮遊システムの成立性を確認するために試作装置を作製し、静電浮遊と超音波浮遊のそれぞれの装置における浮遊特性を確認した。また、無容器プロセス技術の実現に向け、マッハツェンダー干渉計やステレオPIV計測、LIF法を用いることにより流動構造と蒸発挙動の相関を解明し、超音波フェーズドアレイシステムと静電浮遊システムを用いた液滴の搬送・合体・混合などの浮遊液滴の非接触制御を実現した。本技術は独創的で新しい熱流体プロセス技術へつながる成果である。

研究成果の概要(英文)：Hybrid levitation system is constructed with a counter-faced ultrasonic phased array and an opposed cylindrical electrostatic electrode. We developed a prototype device to confirm the feasibility of a hybrid levitation system with electrostatic and ultrasonic. After that, we confirmed droplet levitation characteristic of each system. In addition, For the realization of the non-container process technology, we elucidated a correlation between flow structure and evaporation behavior using Mach-Zehnder interferometer, stereo PIV method and so and then we realized transportation, coalescence and mixing by non-contact manipulation of levitated droplets. This technology is a result that leads to creative new thermal fluid process technology.

研究分野：熱工学

キーワード：音場浮遊 静電浮遊 無容器プロセッシング 非接触マニピュレーション 液滴 宇宙環境 非線形

1. 研究開始当初の背景

創薬などの医学・バイオ分野ならびに化学分析分野などにおいて、異なる流体を混合・攪拌し、濃縮や反応・相分離させ、さらに蒸発・乾燥させるなどの熱流体プロセスは必要不可欠のものである。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、反応や相分離のために用いる溶媒の容器壁への付着や不純物の残留の問題が顕在化しており、容器を必要としない非接触での熱流体プロセス制御技術の実現が切望されている。そこで、近年注目を集めているのが、音場浮遊法や静電浮遊法をはじめとする浮遊技術である。これらの浮遊技術の利用により、より高機能な流体制御プロセス技術の展開が期待されている。

2. 研究の目的

本研究では、無容器で熱流体プロセス技術を実現する手段として、音響浮遊法と静電浮遊法の二種類の浮遊法をハイブリッドに用いた非接触無容器の熱流体プロセス制御技術を提案する。この新しい浮遊法を用いた無容器プロセスの概略図を図1に示す。このように、超音波フェーズドアレイを用いて複数の試料を浮遊させ、非接触搬送および合体を行う(図1(a-b))。ここで液滴の保持を静電浮遊法に切り替え静的に保持させる(図1(c))。そこに超音波を照射することで流体の混合・攪拌を行う(図1(d))。最終的に試料を超音波で捕集・保持することにより蒸発・乾燥処理を行う(図1(e))。また、このシステムを用いて、処理した試料の熱物性を、無容器で同時に計測することを目標とする。

この技術が実現すれば、現在、薬物送達システムを実用化するためのリポソームなどの創薬において、実現のための大きな制約課題となっている容器壁の影響を排除するとともに不純物の残留を排除した高純度創薬が可能となる。

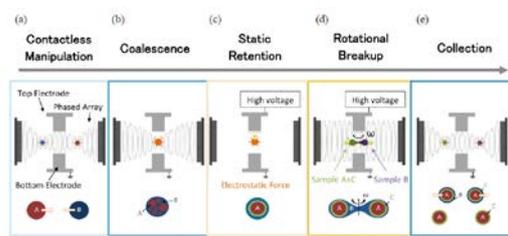


図1 音響・静電ハイブリッド浮遊法による無容器プロセスの概略図

音響浮遊法と静電浮遊法を組み合わせた、新しい浮遊技術である音響・静電ハイブリッド浮遊法を確立するためには、まず、帯電させた複数の液滴を超音波フェーズドアレイに

よる超音波浮遊法で独立にマニピュレーションして液滴を非接触で合体させ、静電浮遊法で保持した後に分裂させる必要がある。しかし、このような超音波フェーズドアレイによる複数の浮遊液滴の独立マニピュレーションや合体を実現した例はない。そこで本研究では、この音響・静電ハイブリッド浮遊法による無容器プロセスの確立を目的として、超音波フェーズドアレイを用いた音響浮遊装置を開発し、集束超音波定在波中での液滴の浮遊、振動、合体、混合挙動および静電浮遊液滴の回転分裂挙動の調査を行った。本稿ではその概要について述べる。

3. 研究の方法

本章では、本研究で用いた実験装置および実験手法の概要を記す。

①超音波フェーズドアレイシステムおよび実験手法

本研究で開発した超音波フェーズドアレイシステムの概要を図2に示す。本装置では、共振周波数40 kHzの超音波振動子を49個用い、7×7配列に設置した。本研究では、FPGA(Field-Programmable Gate Array)を用いそれぞれの振動子に対して独立した移送を与えることにより、収束超音波の発振を実現した。振動子・リフレクター間の距離は45 mmとし、音波の集束点をリフレクターの反射面上に設定した。また左単焦点と右単焦点を500 Hzで切り替えることで、擬似的な複数焦点の形成を可能とした。

実験に際しては、図2(a),(b)にそれぞれ示すような撮影体系を構築しバックライト法にて撮影を行った。試験流体は、合体挙動の可視化には水を用い、合体時の液滴の混合挙動は、水液滴と、光を遮るメチレンブルー水溶液の液滴を合体させることにより可視化した。液滴の浮遊に際しては、シリンジを用い手動にて定在波の節の位置に注入を行う。また、高効率な液滴の混合技術を模索するため、浮遊液滴にモード振動を音波の出力に振幅変調を施し振動を印加することで誘起した。本装置では、変調周波数の設定範囲を450 Hzから550 Hzとし、1 Hzごとに変更可能とした。

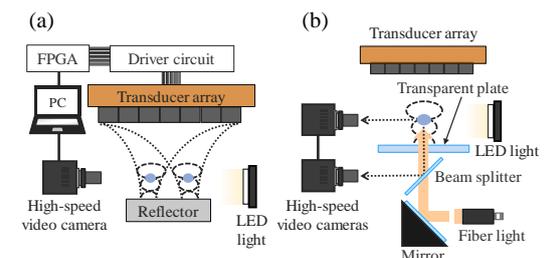


図2 超音波フェーズドアレイシステムの概要と実験体系; (a) 側部からの撮影体系, (b) 実験装置下部からの

撮影体系

②対向型超音波フェーズドアレイシステムおよび自動注入装置

片面をリフレクターとした超音波フェーズドアレイによる音場浮遊では、局所定在波の形成位置がリフレクター付近に限定され、2次元平面上でのマニピュレーションに制限されてしまう。そこで、2つの超音波フェーズドアレイを対向させて局所定在波を形成することにより3次元的なマニピュレーションを可能とするシステムを構築する。また、従来の研究における液滴の注入では、シリンジを用いて実験者が直接手で定在波中に試料を注入することにより液滴を形成している。しかしながら、シリンジを用いた手動での液滴注入では、液滴径の制御が困難である。また、国際宇宙ステーションのような実験者が直接操作することができない環境における実験実施が極めて困難となるため、音場浮遊液滴のための自動液滴注入システムの確立する必要がある。そこで本研究では、定在波中にニードルを用いて任意径の液滴を形成し、非接触流体制御プロセスにおける液滴注入工程の自動化を図るシステムを構築する。

図3に本研究で構築した対向型超音波フェーズドアレイシステムおよび自動注入装置の概要を示す。対向型超音波フェーズドアレイは共振周波数40 kHzの振動子を144個用いて12×12配列の振動子アレイを構築しており、それぞれの振動子に独立した信号を入力して超音波を発生させる。また、FPGA(Field-Programmable Gate Array)を用いて位相差を設定した信号を各振動子に与えることにより超音波を収束させ、任意の焦点位置に定在波を形成する。対向アーム型液滴注入システムでは、まず初めに対向させたニードル先端間に液柱を形成する。このとき、シリンジポンプまたはピエゾマイクロポンプを用いて試料の注入量を制御し、任意の流量で液柱を形成することで注入後の液滴径を制御することが可能となる。液柱形成後、サーボモータを用いて両ニードルを同時に回転させることにより、液柱をニードルから切り離して液滴を形成する。

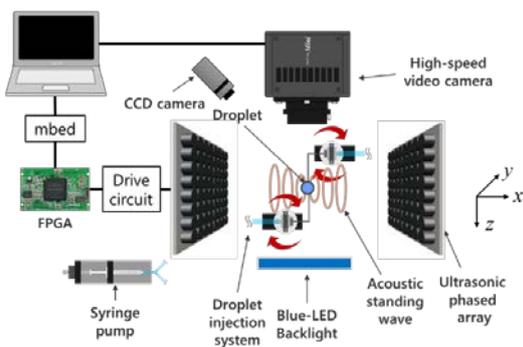


図3 対向型超音波フェーズドアレイシステムおよび

液滴自動注入装置の概要

③静電浮遊法装置および実験手法

静電浮遊法とは、帯電試料へ外部電界を印加することで重力に抗する静電気力を発生させ、試料を空中に浮遊させるものである。本研究で用いた静電浮遊装置を図4に示す。上一対の円筒形電極を鉛直方向に対向させて設置した。上部電極の底にはITO導電性コーティングを施したガラスを接着しており、液滴上部からの観測を可能にしている。下部電極の内側には液滴形成用の注射針の固定治具として、透明アクリル樹脂を設置している。チャンパー側面には、浮遊液滴の位置制御に用いるHe-Neレーザー(出力5[mW])とポジジョンディテクター、レーザー光量調節のための偏光板、レーザーによって投影される液滴の影の大きさを調整するためのレンズ、ノイズ除去のためのバンドパスフィルターを設置した。

液滴の回転に際しては、2つの音響スピーカーを用いてチャンパー内に直交した音響定在波を形成することで、液滴に音響トルクを印加し、液滴を非接触で鉛直軸周りに回転させる。液滴挙動の撮影には、高速度ビデオカメラを用いた。また、液滴の背面から狭志向角タイプの白色LEDを照射するバックライト法を用いた。液滴の内部流動の可視化には、トレーサー粒子として蛍光粒子(EBM製FLUOSTAR, 直径15[μm], 励起光波長580[nm], 密度1100[kg/m³])を液滴内に混入し、同時に液滴界面形状を取得するために蛍光染料(ローダミンB)を溶解させた。蛍光粒子の蛍光発光には、シリンドリカルレンズを用いてシート状にしたNd:YAGレーザー(Laser Quantum Excel, 出力1.5[W], 波長532[nm])を用いた。

試験流体にはニュートン流体であるグリセリンの水溶液を用いた。本実験で使用した水溶液適の質量パーセント濃度は2wt%と3wt%である。実験条件は常温、常圧であり、雰囲気に関しては、グリセリン液滴の浮遊時にはグリセリンの吸湿を防止するため、チャンパーの側部から乾燥空気を注入し、湿度を5[%]以下にした状態で実験を行った。タマリンドシードガム水溶液の場合は通常雰囲気で行った。

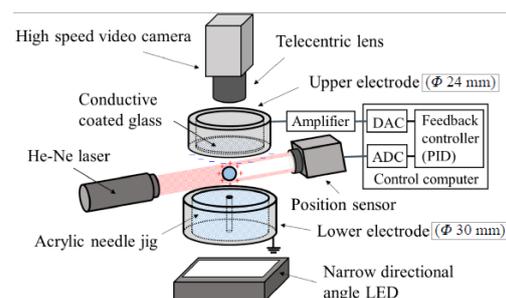


図4 静電浮遊装置の概略図

4. 研究成果

①超音波フェーズドアレイシステムによる液滴制御技術の開発

図 5 (a)に液滴の合体挙動を示す。液滴の合体は、音波の焦点距離を 10 mm から 8 mm に切り替えて行う。撮影速度は 4000 fps, 露光時間は 250 μ s である。左右の液滴が中央に向かって移動して合体し、安定に浮遊することを確認した。この手法により、浮遊液滴の非接触合体が実現された。次に、水とメチレンブルー水溶液を合体させ、混合挙動を可視化した結果を図 5 (b)に示す。撮影速度は 1000 fps, 露光時間は 1000 μ s とした。振動未印加の条件よりも、4 次モードの振動印加の条件の方が、メチレンブルー成分がより素早く液滴全体に行き渡ることが確認できる。このことから、合体させた液滴の混合に際してモード振動の利用が有用であることが示された。

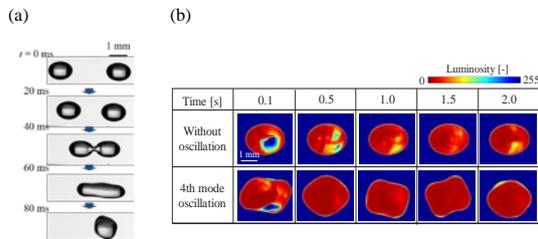


図 5 液滴の合体・混合挙動の可視化結果；

(a) 液滴の合体挙動, (b) モード振動を印加した場合と未印加時の液滴の混合挙動

②対向型超音波フェーズドアレイシステムおよび自動注入装置の開発

図 6 に対向型フェーズドアレイおよび液滴自動注入装置を用いた実験結果について示す。図 6 (a)に示すのは、対向する超音波フェーズドアレイにより形成した定在波中に、対向するニードルにより形成した液滴 (体積等価直径 $d=2$ [mm])の注入を行った結果である。超音波の出力強度は 15 [Vpp], 撮影条件を撮影速度 8100[fps], 露光時間 1/60000 [s]とし、試料には蒸留水を用いた。このように、時刻 $t=0$ [s]の時にニードル先端に形成されていた液柱が時間経過とともに切り離され、液滴を形成・浮遊することを確認した。以上の結果より、微小重力環境下において本システムによる液滴注入が可能であることが示された。図 6 (b)に示すのは、対向する超音波フェーズドアレイ間の中心位置から前方方向に 10[mm]離れた位置に焦点を形成し、液滴を注入した後、中心位置 ($z=0$ [mm])まで 0.2 [mm]間隔で焦点を z 方向に移動させた際の液滴の挙動である。このとき、超音波出力強度を 15 [Vpp]とした。撮影条件は撮影速度 2000 [fps], 露光時間 1/10000 [s]とし、試料には蒸留水を用いた。この結果から、焦点位置の移動に伴い、

浮遊液滴が移動していることを確認し、対向型超音波フェーズドアレイによる液滴の位置制御が可能であることが示された。

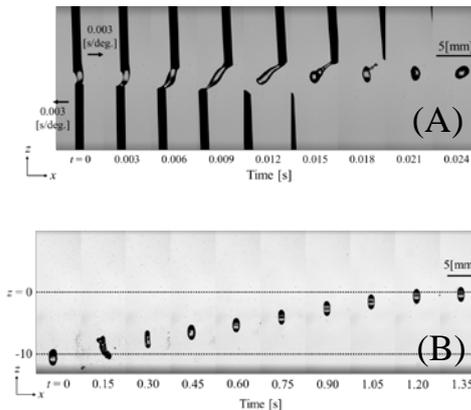


図 6 自動注入装置による液滴の注入および対向型フェーズドアレイシステムによる液滴の搬送実験；

(A) 自動注入装置による液滴の注入, (B) 対向型フェーズドアレイシステムによる液滴の搬送

③静電浮遊法を用いた液滴の回転制御

図 7 (A)に示すのは、グリセリン液滴の上部および側部から回転による変形挙動を撮影した実験結果である。このとき、液滴の初期直径は 2.4 mm, 撮影速度は 3000 fps である。(a)は無回転時の様子であり、液滴は球形状で浮遊していることがわかる。スピーカーへ電圧を印加すると液滴は回転を始め、回転角速度上昇に伴って(b)に示すように徐々に扁平な形状に変形した。スピーカーの出力を上昇させていくと、ある回転角速度付近で(a)-(b)のような回転軸について軸対称な形状から、(c)に示すような回転軸について非軸対称な回転楕円体のような形状へと変形した。その後、(d)-(h)に示すように液滴の中央部が徐々にくびれながら伸長し、最終的に液滴は2つの小液滴に分裂した。また、(g)の側面からの観測結果に注目すると、液滴中央部の液糸が鉛直方向にたわんでいることがわかる。導電体表面の電荷密度分布はその形状により変動することが知られている。したがって、この液滴の分裂直前には急激な界面変形により電荷密度分布が変化し、液滴中央部において静電気力と重力の釣り合いが崩れることにより、このような鉛直方向の変形が発生したと考えられる。浮遊液滴にシートレーザーを液滴の水平断面に照射することで、内部流動の可視化観測を行った。図 7 (B)にテスト部上部から高速度ビデオカメラで撮影した内部流動の観測結果を示す。撮影速度は 3000[fps]である。ここでは、液滴の中央付近の粒子を任意で 6 つ抽出して追跡し、その位置を画像上にプロットしている。液滴の分裂が確認できる時間を $t=0$ とし、 $t=-8.87\sim-2.0$ [ms]の間の移動を示している。既に図 7 (A)で示したように、液滴は分裂の直前において中央部が鉛直上向きに

湾曲してしまうため、レーザーシートから外れてしまい、 $t=-2.0$ [ms]では粒子は以降追跡できていない。結果より、各粒子の移動方向と速度は液滴内の位置により大きく異なることが定性的にわかった。また、各粒子は液滴の中心について双極線を描くように移動し、液滴の中央部付近は z 軸について軸対称な流れになっていることが示唆された。図7(C)に各粒子の z 方向の移動速度 v_z および r 方向の移動速度 v_r の時系列変化を、それぞれ示す。結果より、6つの粒子の v_z はすべて分裂の直前に急激増する傾向があるのに対して、 v_r の変化は v_z に比べて相対的に小さいことがわかった。したがって、分裂直前において z 方向流速が支配的となることが示唆された。

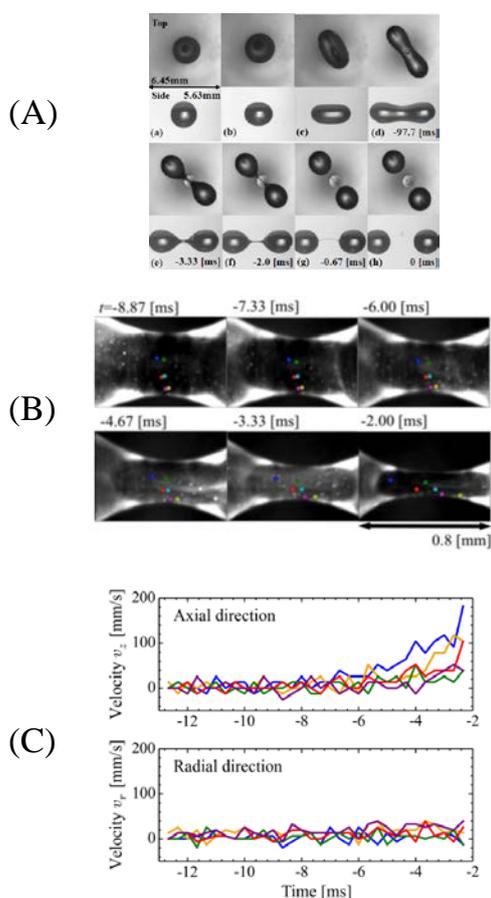


図7 静電浮遊液滴の変形および内部流動の可視化結果；(A) グリセリン液滴の上部および側部から回転による変形挙動，(B) 内部流動の観測結果，(C) 各粒子の z 方向および r 方向の移動速度

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① 綿引 壮真, 松本 聡, 阿部 豊,
“静電浮遊液滴の回転分裂を用いた新たな粘性測定法”, 機械学会, 査読有, Vol.83, (2017),

<https://doi.org/10.1299/transjsme.16-00476>

- ② 丹羽基能, 渡邊歩, 長谷川浩司, 金子暁子, 阿部豊, “音場浮遊された揮発性液滴の内部流動ステレオ計測”, 混相流, 査読有, Vol. 30-5, pp. 537-546, (2017), <https://doi.org/10.3811/jjmf.30.537>
- ③ J. Sato and K. Nishinari, “Relaxation dynamics of closed diffusive systems with infinitesimal Langmuir kinetics”, Phys. Rev. E, 査読有, Vol.97, pp. 032135/1-6, (2018), 10.1103/PhysRevE.97.032135
- ④ Yuki Koyano, Marian Gryciuk, Paulina Skrobanska, Maciej Malecki, Yutaka Sumino, Hiroyuki Kitahata, and Jerzy Gorecki, “Relationship between the size of camphor driven rotor and its angular velocity”, Physical Review E., 査読有, Vol.96, pp. 012609/1-8, (2017), 10.1103/PhysRevE.96.012609
- ⑤ M. Tanaka, D. Yanagisawa, K. Nishinari, “Exclusive queueing model including the choice of service windows”, Physica A, 査読有, Vol. 490, pp.1481–1492, (2017), 10.1016/j.physa.2017.08.096
- ⑥ A. Nagahama, D. Yanagisawa, K. Nishinari, “Dependence of driving characteristics upon follower–leader combination”, Physica A, 査読有, Vol.483, pp.503-516, (2017), 10.1016/j.physa.2017.04.136
- ⑦ Hiroki Yamamoto, Daichi Yanagisawa, and Katsuhiro Nishinari, “Velocity control for improving flow through a bottleneck”, J. Stat. Mech., 査読有, pp. 043204/1-20, (2017), 10.1088/1742-5468/aa5a73
- ⑧ Shin-Ichiro Ei, Hiroyuki Kitahata, Yuki Koyano, Masaharu Nagayama, “Interaction of non-radially symmetric camphor particles”, Physica D, 査読有, Vol.366, pp. 10-26, (2018), 10.1016/j.physd.2017.11.004
- ⑨ Hiroyuki Kitahata, Natsuhiko Yoshinaga, “Effective diffusion coefficient including the Marangoni effect”, Journal of Chemical Physics, 査読有, Vol.148, pp. 134906/1-8, (2018), 10.1063/1.5021502

[学会発表] (計 17 件)

- ① Ayumu Watanabe, Motonori Niwa, Kenji Kobayashi, Tomohisa Yuasa, Koji Hasegawa, Satoshi Matsumoto, Akiko Kaneko, Yutaka Abe, “Contactless Coalescence of Acoustically Levitated Droplets under Reduced Gravity Conditions”, 31st International Symposium on Space Technology and Science, (2017.5), 愛媛
- ② Kenji Kobayashi, Ayumu Watanabe, Akiko

- Kaneko, Koji Hasegawa, Yutaka Abe, “Flow structure and phase change behavior of acoustically levitated droplets”, 7th International Symposium on Physical Sciences in Space & 25th European Low Gravity Research Association, (2017.10), Juan-les-Pins, France
- ③ Hiroyuki Kitahata, “Hydrodynamic coupling between active matters and pattern formation”, International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017, (2017.11), 宮城
- ④ Koji Hasegawa, Kengo Kono, Yuki Niimura, Yutaka Abe, “Evaporation of Droplet in Single-Axis Acoustic Levitator”, The Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, (2017.10), 沖縄
- ⑤ Tadashi Watanabe, “Combustion Analysis of Suspended Sodium Droplet”, 19th International Conf. on Fluid Mech. And Thermal Eng., (2017.11), Paris, France
- ⑥ 渡邊歩, 小林研仁, 長谷川浩司, 金子暁子, 阿部豊, “集束超音波を用いた非接触流体マニピュレーション”, 日本混相流シンポジウム 2017, (2017.8), 東京
- ⑦ 小林研仁, 渡邊歩, 金子暁子, 長谷川浩司, 阿部豊, “音場浮遊液滴界面近傍の流動構造と蒸発挙動の相関”, 日本混相流シンポジウム 2017, (2017.8), 東京
- ⑧ 新村勇氣, 長谷川浩司, 阿部豊, “音場浮遊液滴における微粒化挙動の発生機構の実験的検討”, 日本混相流シンポジウム 2017, (2017.8), 東京
- ⑨ 松本一輔, 松本聡, 金子暁子, 阿部豊, “静電浮遊法を用いたコア・シェル液滴の界面張力測定”, 日本マイクログラフィティ応用学会第29回学術講演会, (2017.10), 千葉
- ⑩ 新村勇氣, 長谷川浩司, 阿部豊, “音場浮遊法による多成分液滴の物質輸送現象”, 日本マイクログラフィティ応用学会第29回学術講演会, (2017.10), 千葉
- ⑪ 新村勇氣, 長谷川浩司, 阿部豊, “音場浮遊液滴に生じる微粒化挙動および凝集挙動の実験的検討”, 第9回大学コンソーシアム八王子学生発表会, (2017.12), 東京
- ⑫ 阿部豊, 松本聡, 西成活裕, 渡辺正, 北畑裕之, 長谷川浩司, 金子暁子, 東頭二郎, 丹羽基能, 渡邊歩, 小林研仁, 伊藤拓海, 佐々木裕哉, “浮遊液滴非線形ダイナミクス”, 第32回宇宙環境利用シンポジウム, (2018.1), 神奈川
- ⑬ 小林 研仁, 渡邊 歩, 伊藤 拓海, 佐々木裕哉, 金子 暁子, 長谷川 浩司, 阿部 豊, “音場浮遊液滴における流動構造と蒸発挙動”, 機械学会関東支部第24期関東支部総会・講演会, (2018.3), 東京
- ⑭ 伊藤 拓海, 渡邊 歩, 小林 研仁, 佐々木裕哉, 金子 暁子, 長谷川 浩司, 阿部 豊, “非接触流体制御のための対向型フェー

ズドアレイ システム”, 機械学会関東支部第24期関東支部総会・講演会, (2018.3), 東京

- ⑮ 新村 勇氣, 長谷川 浩司, 阿部 豊, “音場浮遊された多成分液滴の蒸発挙動の遷移過程”, 機械学会関東支部第24期関東支部総会・講演会, (2018.3), 東京
- ⑯ 佐々木裕哉, 渡邊 歩, 小林研仁, 伊藤拓海, 長谷川浩司, 金子暁子, 阿部 豊, “ステレオ PIV による超音波浮遊液滴の内外部流動同時計測”, 関東学生会第57回学生員卒業研究発表講演会, (2018.3), 東京
- ⑰ 青木皓平, 長谷川浩司, 新村勇氣, “音場浮遊液滴に生じる微粒化挙動の実験的検討”, 関東学生会第57回学生員卒業研究発表講演会, (2018.3), 東京

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阿部 豊 (ABE YUTAKA)
筑波大学・システム情報系・教授
研究者番号：10241720

(2) 研究分担者

北畑 裕之 (KITAHATA HIROYUKI)
千葉大学・大学院理学研究院・准教授
研究者番号：20378532

西成 活裕 (NISHINARI KATSUHIRO)
東京大学・先端科学技術研究センター・教授
研究者番号：40272083

金子 暁子 (KANEKO AKIKO)
筑波大学・システム情報系・准教授
研究者番号：40396940

渡辺 正 (WATANABE TADASHI)
福井大学・附属国際原子力工学研究所・教授
研究者番号：50391355

松本 聡 (MATSUMOTO SATOSHI)
宇宙航空研究開発機構・有人宇宙技術部門・主任研究開発員
研究者番号：90360718

長谷川 浩司 (HASEGAWA KOJI)
工学院大学・工学部・准教授
研究者番号：90647918