

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：32613

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17977

研究課題名(和文)超音波浮遊法を活用した高精度非接触流体制御

研究課題名(英文)Highly precise and contactless liquid manipulation by acoustic levitation method

研究代表者

長谷川 浩司(Hasegawa, Koji)

工学院大学・工学部・准教授

研究者番号：90647918

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、非接触流体制御技術の基礎の確立に資する音場浮遊液滴の非定常並進運動および微粒化過程の能動的制御可能性を実験的に検討した。具体的には、純水、エタノール(表面張力の影響)、グリセリン(粘性の影響)を用いて、流体物性が浮遊安定性に及ぼす影響を系統的に明らかにし、液滴の動的挙動および液滴周囲の音圧分布情報を基に、非定常並進運動のモデル化を行った。加えて、高時空間分解能下での浮遊液滴の微粒化過程の観測にも成功するとともに、既存理論と比較することで微粒化メカニズムの検討も行った。

研究成果の概要(英文)：We investigated the effect of the liquid properties on an unsteady translational motion and an atomization behavior of an acoustically levitated droplet in order to actively control a noncontact levitated droplet in air. In this study, pure water, ethanol (effect of the surface tension), and glycerin (effect of the viscosity) were used as test fluids to systematically clarify the effect of liquid property on the levitation stability of droplet. The model of the unsteady translational motion was proposed based on a high-speed observation of a droplet behavior and a measurement of a sound pressure field. We also succeeded an observation of an interfacial instability and atomization process of a levitated droplet at a high spatio-temporal resolution. The experimental data was compared with the existing theory for considering the mechanism of an atomization of an acoustically levitated droplet.

研究分野：熱流体工学

キーワード：音場浮遊液滴 非線形ダイナミクス 非接触流体制御 並進運動 微粒化

1. 研究開始当初の背景

分析化学分野や生物・医学分野、さらには燃焼科学分野をはじめとした幅広い分野において、非接触流体制御技術が注目されている。特に、非接触流体制御技術の1つである超音波浮遊法は、容器壁面からの汚染の影響を抑制することや流体次第では人体への危険を回避することが可能であるというメリットに加え、静電浮遊法や電磁浮遊法などのその他の浮遊法と比較した場合に、制御対象流体に制約がないことから積極的な活用が望まれている。しかしながら、申請者による強力超音波による液滴浮遊実験により、浮遊液滴には、回転や振動、さらには分裂・微粒化に加え、大変形を伴う界面変形や内外流動など、非線形でダイナミックな挙動が発生することが明らかとなっている。このような浮遊液滴の非線形ダイナミクスが非接触流体制御の安定性に及ぼす影響については、理論的や解析的な知見は拡充されてきたものの、実験技術上の困難が主な理由となっており、実験的知見が乏しいのが現状である。

特に、分析化学や創薬分野では、超音波浮遊法を活用し、異なる複数の試料流体の非接触混合、反応制御等を実現させることが期待されているものの、既存の実験体系においては、ミリメートルサイズの浮遊液滴に対して、同オーダー程度の振幅を有する並進運動が発生するとともに、複数試料の非接触混合時に不安定性の1つである界面不安定性、微粒化が発生する。これら浮遊液滴の動的挙動の発生メカニズム解明および安定制御条件の実験的特定が必要であることが明らかとなっている。

2. 研究の目的

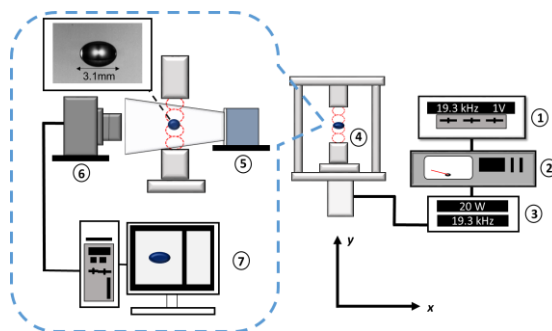
本申請は、このような浮遊液滴の強い非線形性を示す挙動を流体力学の視点から解明し、現状では整備が不十分である当該領域の定量的実験情報を拡充することで、より高精度な非接触流体制御技術の確立を目指すものである。具体的には、浮遊液滴に生じる不安定性の1つである並進運動および界面不安定性(微粒化挙動)に着目し、それらの発生条件を特定し、安定制御可能範囲を実験的に明らかにすることで、より高精度(マイクロメートルオーダー)な非接触流体制御技術の基礎を確立することを目的とする。研究のアプローチとして、これまでの申請者の実験で主に使用してきた純水に加え、エタノール(表面張力の影響)、グリセリン(粘性の影響)およびそれら流体の水溶液での実験を通して、流体物性が浮遊安定性に及ぼす影響を特定する。

3. 研究の方法

図1に本研究で用いた実験装置の概要図を示す。浮遊装置は、超音波振動子に接続された下部ホーンとリフレクタから構成されていて、下部ホーンから発振される超音波が上

部リフレクタで反射することにより、ホーン-リフレクタ間に音響定在波が形成される。シリンジを用いて手動操作で液滴を注入することで、液滴は音圧の節付近に浮遊する。浮遊させた液滴の動的挙動の観察には高速度カメラを用い、得られた画像群をコンピュータで処理した。

関数発振器より発振する正弦波信号は 19.3 kHz とし、ホーン-リフレクタ間距離は 48 mm とした。プローブマイクロフォンで測定したテスト部内音圧(実効値)は 1.0-2.5 kPa であった。また、試験流体として水、エタノール、グリセリンを用いた。液滴径 d は、液滴を短径 a 、長径 b の回転楕円体であると仮定したときの体積等価直径を採用し、長径を短径で除した値 b/a を液滴のアスペクト比とした。更に液滴径 d と、テスト部内に発振した超音波の波長 λ の比 d/λ は 1/36-1/6 とした。



①	Function generator
②	Power amplifier
③	Power meter
④	Test section
⑤	LED light
⑥	High-speed video camera
⑦	Computer

図1 実験装置概要

4. 研究成果

(1) 浮遊液滴の非定常並進運動

図2は非定常並進運動の振幅を時系列で示した結果で、横軸は時間、縦軸は並進運動の振幅を示す。どの試料も同液滴径、同音圧条件下で振幅が 0.2 mm 以下に抑制されていることが確認された。また、エタノールでは水平方向および鉛直方向ともに、振幅の減衰が確認された。グリセリンでは水平方向のみ、その振幅の減衰挙動が確認された。またすべての試料において、水平方向に生じる並進運動の振幅は、鉛直方向に生じる並進運動の振幅よりも大きいことが確認された。液滴試料に非定常な並進運動が生じている一方、内部流動や蒸発による周囲流体への影響が存在しない剛体球にも、非定常な並進運動が確認さ

れた。このことから、浮遊試料の内部流動や蒸発の影響は支配的ではなく、浮遊試料周りに生じる外部流動とその力が作用する界面との相互作用が、非定常な並進運動を促進していることが考えられる。

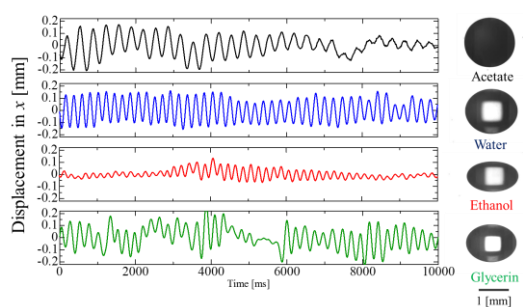
図3に水平方向および鉛直方向に生じる非定常並進運動の並進周波数をFFTによって算出した結果を示す。サンプル数は2047で、サンプリング周波数は250 Hzとした。また、それぞれの試料でFFTにより算出された複数の周波数のうち、最も値が大きい周波数を代表値として評価対象とした。水平方向の並進周波数にそれぞれ着目すると、アセテート球では3.1 Hz、水液滴では4.6 Hz、エタノール液滴は5.0 Hz、グリセリンの場合は4.2 Hzとなった。一方で鉛直方向の並進周波数はそれぞれ、アセテート球で9.9 Hz、水液滴では15.1 Hz、エタノール液滴は16.2 Hz、グリセリンの場合は14.3 Hzとなった。

以上より、水平方向および鉛直方向に生じた並進周波数は、試料の密度が小さくなることにより、大きくなる傾向が確認された。この結果の妥当性を検証するため、ここで、液滴の並進運動を単振動と仮定して考察する。液滴の並進運動の周波数は次式で示される。

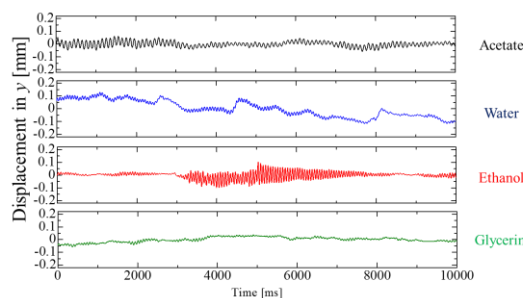
$$f_x = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_x}{m}} \quad (1)$$

$$f_y = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_y}{m}} \quad (2)$$

液滴の並進周波数は、液滴の質量の増加に伴い減少することがわかる。このことから、実験でも液滴径とテスト部内の音圧が同一条件では、液滴の密度の増加に伴い並進周波数が減少することは妥当であるといえる。また、実験で得られた鉛直方向並進周波数 f_y を水平方向並進周波数 f_x で除した値である、並進周波数比 f_y/f_x を図4に示す。なお図中のエラーバーは、それぞれ3回計測し算出した平均値の標準偏差を示す。水ではその周波数比が3.3、エタノール、グリセリンとアセテート球では3.2となり、それぞれの試料で算出された水平方向および鉛直方向の並進周波数の値に依らず、並進周波数比はいずれの試料でもほぼ一定値を示すことが確認された。これは復元力が浮遊試料に関わらず一定となることを示しており、試料が浮遊している状態での水平方向および鉛直方向に生じる音圧および音圧勾配を浮遊液滴の並進挙動から推定可能であることが示唆され、試料の非接触マニピュレーション技術において重要な安定制御条件の特定に繋がる可能性が示唆された。

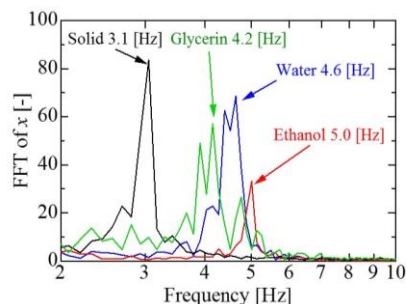


(a) 水平方向

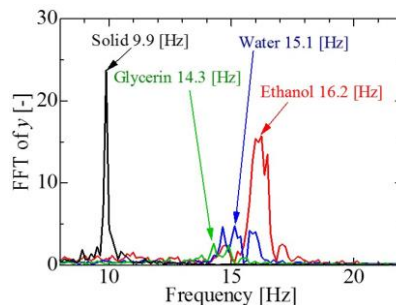


(b) 鉛直方向

図2 流体物性が並進運動に及ぼす影響



(a) 水平方向



(b) 鉛直方向

図3 図2に対する周波数解析結果

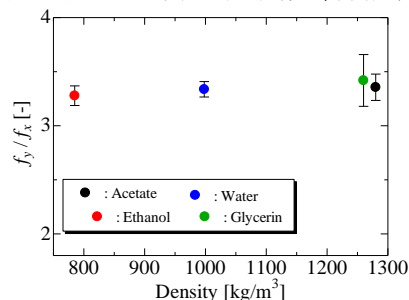


図4 並進周波数比と復元力係数比の関係

(2) 浮遊液滴の微粒化挙動

図5には、水、エタノール、グリセリン微粒化過程を可視化観測した結果を示す。それぞれの初期液滴径はそれぞれ $d = 2.0 \text{ mm}$ 、 2.2 mm 、 2.1 mm である。まず、初期形状からの界面変形が確認され ($t = -2 \text{ ms}$)、やがて微粒化に至った ($t = 0 \text{ ms}$)。微粒化直前には、液滴赤道面から界面が突出する現象が観察された ($t = -0.33 \text{ ms}$)。エタノール液滴では、水液滴に比べて表面張力が小さいことから、微粒化液滴が細粒化することが確認された。一方で、グリセリン液滴では、水に比べて非常に高い粘性を持つため、液滴全体が微粒化せずに膜状となり、突出した界面で局所的な微粒化が起こるなど、微粒化形態に相違が見られた ($t = 0 \text{ ms}$)。

図6には、図5より算出した液滴の界面成長速度の時系列変化を示す。撮影速度は 6000 fps 、空間分解能は $20 \mu\text{m}/\text{pixel}$ とした。楕円形状で浮遊していた液滴は、音圧が急激に上昇することによって水平方向に広がり、液滴の赤道面でも界面が突出し、突出した界面は、急激な成長が確認された ($-1 \leq t \leq 0 \text{ ms}$)。その後突出した界面が周囲の流速によって不安定となることで、微粒化に至ったと推察される。浮遊液滴は本来、液滴周囲の音圧と液滴自身の表面張力との釣り合いによって、その形状が決定される。しかしながら、テスト部内の音圧の上昇に伴って、液滴赤道面では周囲気体の流速が上昇し、液滴本体から周囲方向へ働く負圧が支配的となることが指摘されている。本結果でも同様に、テスト部内の音圧分布変化に伴い、液滴の赤道界面が突出し、微粒化が発生したと考えられる。音圧の上昇に伴い、赤道面に負圧が働くのに加えて、液滴上部と下部には周囲気体から液滴方向に働く圧力が增大する。これにより液滴は上下方向から圧縮され、浮遊液滴界面の成長が促進されたと考えられる。

浮遊液滴の微粒化挙動の発生機構の解明のため、図7には、水液滴の微粒化過程を詳細に可視化観測した結果を示す。空間分解度の向上のために高速度カメラ用マイクロレンズを使用し、撮影速度は 12500 fps 、空間分解能は $6 \mu\text{m}/\text{pixel}$ として撮影した。初期液滴径およびアスペクト比は、それぞれ 0.8 、 1.0 である。水液滴は、界面変形を経て円盤形状になり ($t = -2.5 \text{ ms}$)、液滴上部に表面張力波が発生し、波打った界面から微粒化が発生した ($t = -0.9 \text{ ms}$)。最終的には、液滴全体が崩壊し、発生した2次液滴が周囲に飛散した ($t = -0.6 \text{ ms}$)。

得られた観測結果より、液滴の周方向に生じた波立ちに着目して、その評価を行った。液滴の周方向に波立ちが生じてから微粒化が発生するまでの波立ちの波長を時系列で評価し、理論より求められる表面張力波の波長と比較する。表面張力波の波長については次式を用いて算出した。

$$\omega^2 = \frac{\sigma k^3}{\rho} \quad (3)$$

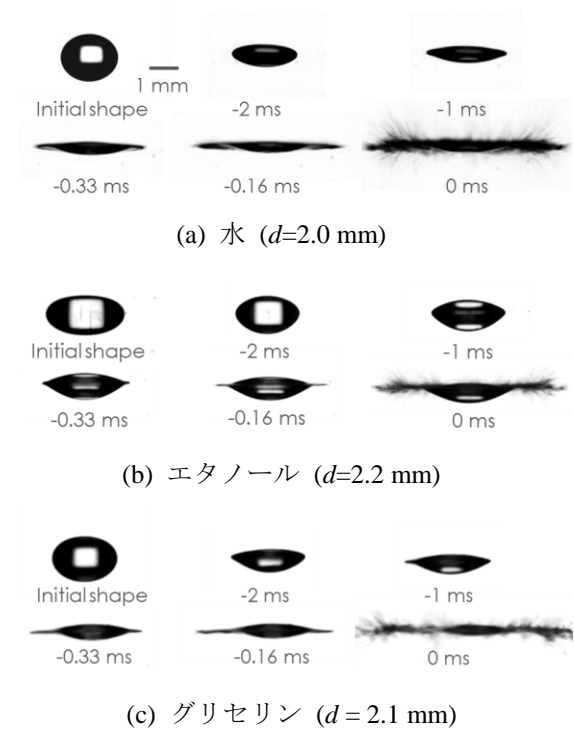


図5 流体物性が液滴の微粒化に及ぼす影響

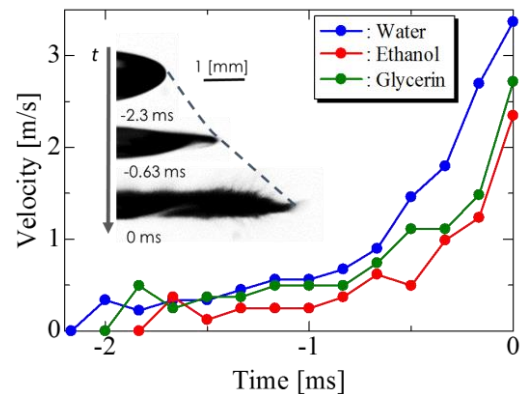


図6 微粒化時の界面速度の時系列変化

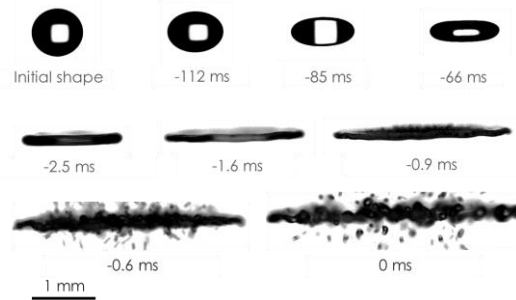


図7 微粒化過程の詳細可視化観測

ここで、 ω は入力周波数より求められる角周波数、 σ は液滴の表面張力、 k は波数、 r は液滴の密度である。実験結果より求められた波立ちの波長は約 $600 \mu\text{m}$ となったのに対し

て、算出された表面張力波は、100 μm となった。この結果より、実験値と理論値を比較すると同オーダーの結果を得た。一方で、本実験値は液滴の周方向の波立ちを比較対象としているものの、液滴界面の径方向にも同様に波立ちが存在することが推測される。現時点では液滴側面から可視化観測しているため、界面径方向へ伝搬する波立ちの詳細可視化観測が困難であるものの、今後可視化観測体系の改良を行い、液滴上面より界面観察を行うことで現象の詳細把握が必要であると考えられる。

また Danilov らは、微粒化直前に液滴界面に発生する表面張力波は、Kelvin-Helmholtz 不安定性によるものであるとし、微粒化が引き起こされる浮遊液滴の臨界アスペクト比は 8 と示している。一方で、本結果で液滴は、微粒化直前の臨界アスペクト比が 20 となり、理論との乖離が明らかとなった。Danilov らの理論では、浮遊液滴周囲の流れを一樣流と仮定しているのに対し、実際の音場浮遊液滴の周囲の流れは、渦構造を有しており、液滴の熱・物質輸送にも寄与するような非常に複雑なものとなる。これらの非線形な現象は、微粒化の際の液滴周囲の音圧分布の変化により更に複雑になるものと考えられる。今後は液滴界面に作用する音圧分布の変化を非接触かつ高精度に計測すると共に、周囲流動場が微粒化プロセスに及ぼす影響を定量的に把握する必要がある。

<引用文献>

- ① D. Foresti, et al., Acoustophoretic contactless transport and handling of matter in air, PNAS, Vol.110, No.31, 2013, pp.12549-12554
- ② W. J. Xie, B. Wei, Dependence of acoustic levitation capabilities on geometric parameters, Phys. Rev. E, Vol. 66, 2002, pp.026605-1-11
- ③ S. D. Danilov, et al., Breakup of a droplet in a high - intensity sound field, J. Acoust. Soc. Am., 92, 1992, 2747-2755
- ④ R. J. Lang, Ultrasonic Atomization of Liquids, J. Acoust. Soc. Am., Vol.34, , 1962, pp.6-8
- ⑤ K. Hasegawa, et al., Microlayered flow structure around an acoustically levitated droplet under a phase-change process, npj Microgravity, Vol.2, 2016, pp.16004-1-5

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 4 件)

- ① 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, 30 巻, 2017, pp.537-546

DOI: 10.3811/jjmf.30.537

- ② 丹羽基能, 合田篤, 長谷川浩司, 金川哲也, 金子暁子, 阿部豊, 音場浮遊液滴の温度変化が内外部流動と対流熱伝達に及ぼす影響, 混相流, 査読有, 29 巻, 2016, pp.501-508
DOI: 10.3811/jjmf.29.501
- ③ Koji Hasegawa, Atsushi Goda, Yutaka Abe, Microlayered flow structure around an acoustically levitated droplet under a phase-change process, npj Microgravity, 査読有, Vol.2, 2016, pp.16004-1-5
DOI: 10.1038/npjmgrav.2016.4
- ④ Hiroyuki Kitahata, Rui Tanaka, Yuki Koyano, Satoshi Matsumoto, Katsuhiko Nishinari, Tadashi Watanabe, Koji Hasegawa, Tetsuya Kanagawa, Akiko Kaneko, and Yutaka Abe, Oscillation of a rotating levitated droplet: Analysis with a mechanical model, Physical Review E, 査読有, Vol.92, 2015, pp.062904-1-8
DOI: 10.1103/PhysRevE.92.062904

[学会発表] (計 20 件)

- ① 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
- ② Koji Hasegawa, Kengo Kono, Hiroyasu Ohtake, Motonori Niwa, Yutaka Abe, Breakup of droplet in single-axis acoustic levitator, The 11th International Topical Team Workshop on Two-Phase Systems for Ground and Space Applications, 2016
- ③ Kengo Kono, Koji Hasegawa, Hiroaki Imai, Hiroyasu Ohtake, Atsushi Goda, Yutaka Abe, Effect of Liquid Properties on the Interfacial Instability and Atomization Behavior of the Acoustically Levitated Droplet, The 9th International Conference on Multiphase Flow, 2016
- ④ Kengo Kono, Koji Hasegawa, Hiroyasu Ohtake, Atsushi Goda, Yutaka Abe, Effect of liquid properties on levitation stability of droplet in a single-axis acoustic levitator, The 10th International Topical Team Workshop on Two-Phase Systems for Ground and Space Applications, 2015

[その他]

ホームページ等

<https://er-web.sc.kogakuin.ac.jp/Profiles/10/0000962/profile.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 浩司 (HASEGAWA, Koji)

工学院大学・工学部・准教授

研究者番号：90647918