

令和元年6月10日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26289054

研究課題名(和文)超音波浮揚を用いた液滴の空中非接触混合と非接触分析・分注

研究課題名(英文) Non-contact mixing, analysis and dispensing of droplet utilizing ultrasonic levitation

研究代表者

中村 健太郎 (Nakamura, Kentaro)

東京工業大学・科学技術創成研究院・教授

研究者番号：20242315

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,000,000円

研究成果の概要(和文)： 将来の薬品製造プロセスや新規材料開発では、汚染防止や処理速度向上のために非接触で液滴を操作する技術が要求されるようになる。本研究では、超音波の音響放射力により液滴を浮揚させ、移動、混合、滴下、分析などの想定されるあらゆる操作を非接触で行う手法を開発、提示することを目的とした。

2つの液滴を浮揚したまま非接触で混合させる方法として、直交する2つの定在波音場を利用することを提案し、その動作を検証した。また、MHz帯集束超音波をバースト送信して液滴1つを定在波音場に打ち出すための条件を検討した。一方、定在波音場の節に浮揚した物体の表面に液体を塗布する方法と、それに適した振動系を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

空中の超音波定在波の音圧の節に微小物体が浮揚する現象は古くから知られており、理論的な定式化もなされている。また、容器を用いずに超音波浮揚下で材料を扱うことはスペースシャトル計画の一部などで検討されたことがある。しかし、工業的な応用をめざして、搬送、混合、滴下、分析などのさまざまな操作を行う具体的な手法の検討はあまりみられなかった。本研究では、これらについて、それぞれ適した振動系を考案し、操作ができることを実験により具体的に示した。これは今後、さまざまな分野で非接触プロセスを開発する際の参考になると期待する。また、本研究を通して、微小部品の非接触搬送という、本技術の新たな応用先を見出した。

研究成果の概要(英文)： To avoid contamination and increase processing speed, a non-contact technology for manipulating droplets will be required in production process of chemical materials and development of new materials. In this study, we proposed and developed systems for various kinds of processing such as transport, mixing, dispensing, and analysis of liquid sample without contact. For non-contact mixing of two drops of different liquid, we proposed to utilize two orthogonal ultrasonic standing wave fields. The method was proved with the experiments at several 10 kHz. To eject single droplet from a container, the conditions of the intensity and time duration of 1-MHz burst focused waves were examined. We demonstrated a coating process for a small object levitated at the nodal point of ultrasonic standing waves. A vibration system stabilized with a feedback oscillator was developed for the coating processing.

研究分野：超音波工学

キーワード：超音波 空中超音波 超音波浮揚 音響放射力 非接触 液滴 搬送 混合

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

将来の薬品製造プロセスや新規材料の開発では、汚染防止や処理速度向上のために非接触で液滴を操作する技術が要求されるようになって考えられる。非接触操作技術にはさまざまなものがあるが、1 mm 前後の直径の液滴を扱うものとして超音波浮揚が適していると考えられる。これは空中の超音波定在波の音圧の節で微小物体をトラップする技術であり、対象物体を選ばない。この浮揚現象は古くから知られており、理論的な定式化もなされている。また、容器を用いずに超音波浮揚下で材料を扱うことはスペースシャトル計画の一部などで検討されたことがある。しかし、工業的な応用をめざして、搬送、混合、滴下、分析などのさまざまな操作を行う具体的手法の検討はあまりみられない。これに対し、研究代表者は、本研究に先行して、科学研究費・挑戦的萌芽研究（課題番号 23656163：2011～2013 年）によって、超音波音場による液滴の非接触搬送などの試行を行った。薄板にたわみ進行波を励振し、反射板との間で直径 1 mm 程度の液滴を 1～2 m/s の速度で非接触搬送することに成功している。また、定在波音場に変調をかけることで 2 つの液滴を混合する実験を行った。

2. 研究の目的

本研究では、超音波の音響放射力により液滴を浮揚させ、移動、混合、滴下、分析などの想定される操作を非接触で行うさまざまな手法を開発、提示することを目的とする。例えば、図 1 のようなシステムを実現することをめざす。

具体的には、安定に 2 つの液滴を混合する方法、数 10 kHz の空中超音波音場に液滴を非接触で導入する方法、空中に浮揚した微小物体の表面に他の材料を塗布することなどを検討課題に定めた。また、先の挑戦的萌芽研究で開発した進行波を用いる搬送方法について、より実用的な振動系を開発する。

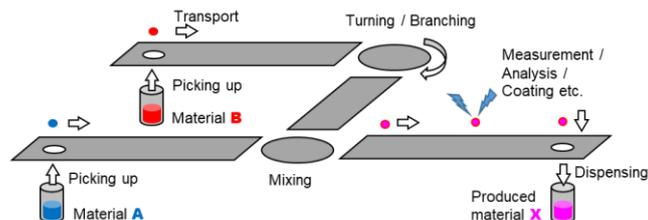


図1 超音波浮揚による液滴操作システム

3. 研究の方法

(1) 2 つの液滴の非接触混合

空中に超音波浮揚させた 2 つの液滴の非接触混合について、本研究以前に試験した音場を変調する方法では、一方の液滴が浮揚しにくい位置を越える必要があり、これが混合成功率を低下させていた。そこで、直交した 2 つの振動系を用い、音場を切り替える方法（図 2）と、2 つの反射板を移動させる方法を検討した。

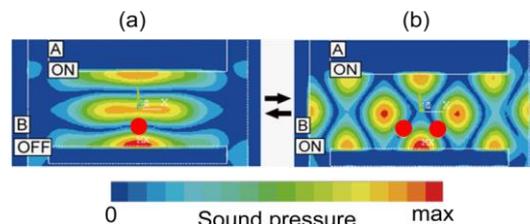


図2 2つの音場と安定浮揚点(赤丸で示す)

(2) 定在波音場への液滴の導入法

液体容器から非接触で液滴 1 つを取り出す方法として、集束振動子を用いて、1～2 MHz のバースト超音波を図 3 のように液体容器（ウェルプレート）裏面からウェルの水面付近に照射する方式を検討した。このときのバースト波数や音場強度により、射出する液体量を制御する。

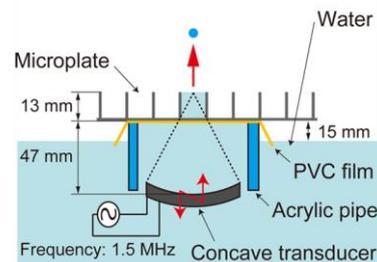


図3 集束超音波による単一液滴の射出

(3) 微小物体への液体の塗布

錠剤をはじめ、微小物体を別の材料でコーティングすることはよくある工程である。ここでは、数 10 kHz の超音波定在波の音圧の節に浮揚した直径約 3 mm のポリスチレン球に超音波霧化によって液体を吹きかけたときに液体が塗布される様子を観察した。

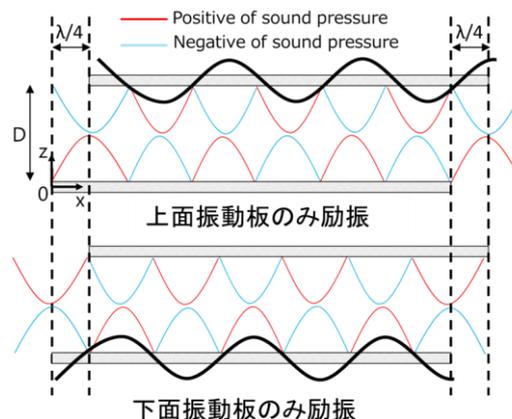


図4 2つの定在波音場による進行波音場の発生

(4) 直線搬送法

鉛直方向には定在波、水平方向には進行波である音場をつくるために、2 枚の並行金属振動板を用いる方法を考案した。図 4 のように、2 枚の振動板は、空間的な位置を 1/4 波長分ずらして配置され、それぞれの振動の時間的位相差を振動の 1/4 周期としている。これら 2 つの振動板により振動板間に空間的、時間的に位相が 90 度ずれた音場が発生し、これらの重ね合わせにより、次式のように進行波音場が得られると考えられる。

$$p(x) = p_U(x) + P_L(x) = P \sin kx \sin \omega t + P \cos kx \cos \omega t = P \cos(kx - \omega t)$$

ここで、時間位相差を-90度とすると、進行波の進む向きが反転する。水平方向の進行波により音響流が発生し、垂直方向の定在波により垂直方向に位置保持されながら水平方向に搬送されると考えられる。

4. 研究成果

(1) 2つの液滴の非接触混合

振動子端面と平行な反射板の組み合わせを2組直交して配置する。図5は27.4 kHzの振動子による試作例である。2つの液滴が離れて浮揚している。振動子Aおよび振動子Bの振動変位を操作することで、図2に示した例のように音圧分布を変化させ、2つの液滴が互いに衝突するように調整する。サブ μl の液滴の混合に成功した。音場強度を変調させる以前の方式に比べて混合の成功率が改善された。

次に、振動子は1つだが、反射板を2枚として、反射板を動かすことで浮揚した液滴の混合を行う方法を検討した。図6のように反射板を水平方向に移動すると浮揚した液滴は反射板の動きに合わせて移動する。この動作により液滴の混合に成功した。前述の方法では電気的な操作のみでよいのに対し、この方法では、反射板を機械的に動かす必要がある。用途に応じてこれら2つの方法を使いわけるのがよいと考えられる。

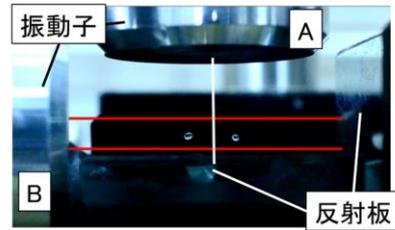


図5 2つの直交する定在波音場による液滴の混合

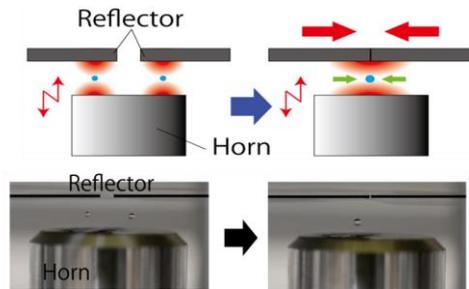


図6 2つの反射板を移動させることによる液滴の混合

(2) 定在波音場への液滴の導入法

図3の構成により、集束超音波のバースト送波により単一液滴を射出したところを高速カメラで記録した例を図7に示す。この例は水に対するものであり、集束超音波のバースト長によって図8のように射出する液滴の直径を制御することができた。また、液滴を大きくすると、射出された後の到達高さが低くなることわかる。

また、射出特性は液体の物性に依存する。表面張力が異なる液体として、水、エタノール、シリコンオイルについて射出したようすを図9に示す。

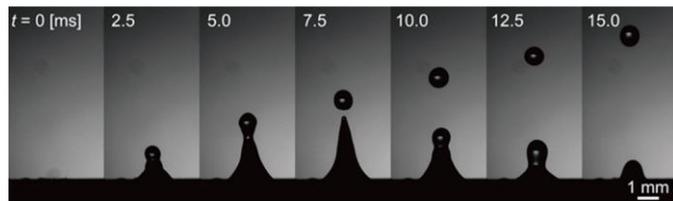


図7 MHz集束超音波による単一液滴の射出

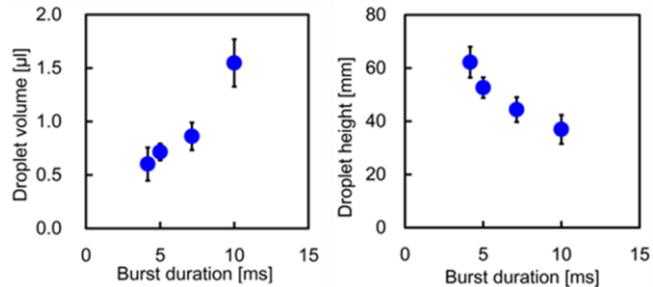


図8 バースト長と射出液滴の直径・高さ

(3) 微小物体への液体の塗布

27 kHzの基本的な定在波音場中に浮揚させた直径2~3 mmのポリスチレン球に液体を塗布する実験を行った。液体は赤インクとし、超音波霧化現象により微粒化してポリスチレン球に吹きかけた。塗布前後のようすを図10に示す。ポリスチレン球は浮揚中、自転運動をしており、比較的均一に塗布される。しかし、詳しく調べると、赤道付近に多く赤インクが付着している。音圧の節付近に浮揚していることから、吹きかけた赤インクも節のあたりに集まりやすいことや、自転運動による遠心力の影響が原因として考えられる。

また、本研究で考案したフィードバック振動系を用いることで、浮揚物体を挿入する前後の定在波音場の共振周波数の変化の影響をある程度抑えられることを確認した。定在波音場の共振系よりも質量の大きい振動子の共振の影響が支配的であるため、自動調整の効果は限定的だが、必要な振動振幅を保つ定振幅駆動回路などを併用すればより安定な浮揚が可能であると考え

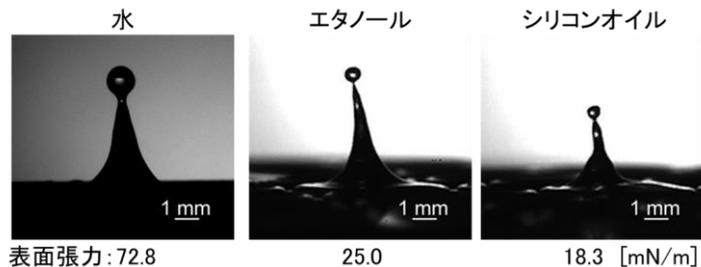


図9 液体の種類と射出のようす

えられる。製作した音圧帰還による振動子駆動回路の概略を図 11 に示す。この駆動系を用いて小物体の浮揚を行った場合の発振周波数のようすを図 12 に示す。このように、小物体を挿入する際に音場が乱れるが、それに伴って発振周波数が適切に変化していることがわかる。

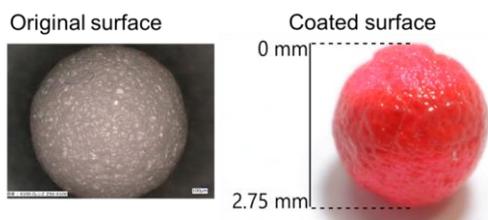


図 10 塗布前と赤インクを塗布したポリスチレン球

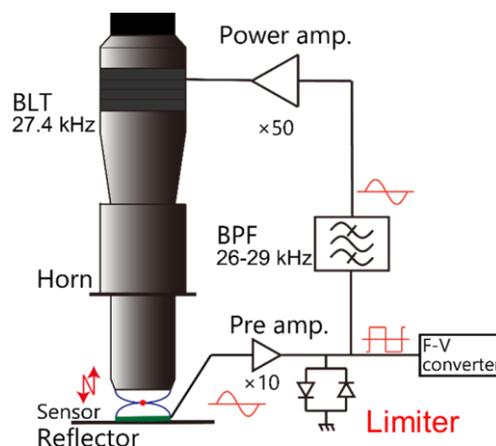


図 11 定在波音場の音圧を正帰還する駆動回路

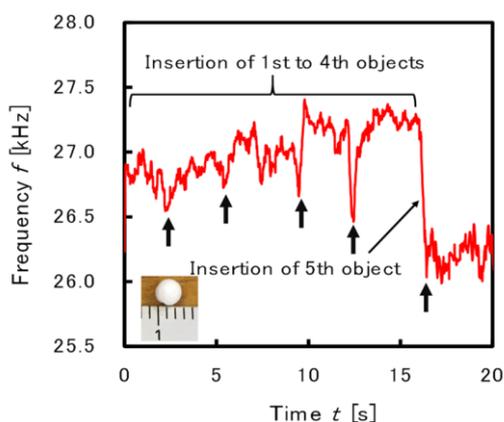


図 12 小物体挿入時の発振周波数

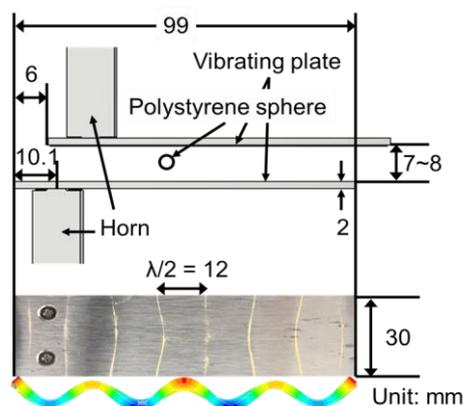


図 13 空間的・時間的に位相差のある2つの定在波振動板による振動系の構成

(4) 直線搬送法

図 4 で示した進行波音場(導波路モード)を実現するために、図 13 の振動系を試作した。長方形断面のステップホーンをジュラルミン板の片端にネジ接続し、ジュラルミン板にたわみ振動を励振した。ステップホーンはジュラルミン板の振動の腹に設定している。この振動板のたわみ波の波長と、2枚のたわみ振動板の間の超音波音場の水平方向波長が等しくなるように2枚の板の間隔を調整すべきである。

前述のように2つの振動板の水平方向位置を1/4波長ずらし、時間位相差を90度としてポリスチレン球を挿入すると、図 14 のように水平方向に搬送された。図 14 の実験例では左方向に移動している。2つの振動板の間の中央に音場の節が存在するが、その分布が乱れているために移動経路も乱れている。この音場の乱れは、ホーンを固定するボルトの頭の影響や、有限長の導波路であるための反射によるものと考えられる。沈頭鉸構造とする必要がある。

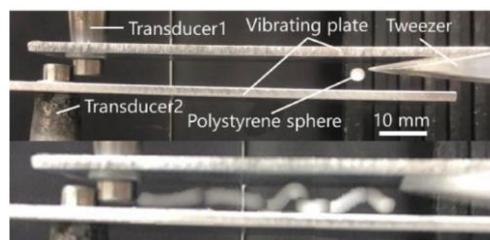


図 14 微小物体の搬送のようす

(5) その他の検討 (浮揚した物体の質量推定など)

定在波音場の音圧の節に浮揚した小物体の位置をわずかにずらしても、安定点に戻る力が生じる。このため、浮揚物体に擾乱を加えると、浮揚物体は減衰振動をしてやがて安定定に落ち着く。この際、位置の減衰振動の周波数から浮揚された物体の質量を推定することを検討した。いくつかの質量既知の試料物体について減衰振動の周波数を測定し、検量線を引くことで未知の物体の質量を誤差 10%程度で推定することができた。浮揚物を液滴とした場合は、形状も振動するため、質量推定の精度は悪化した。精密な絶対質量の推定のためには誤差が大きいが、液滴の蒸発を監視するなど、相対的な測定には応用できる可能性がある。

また、耐腐食性などから振動系を金属ではなく樹脂材料とすることを試みた。超音波領域の振動損失が小さい材料としてポリフェニレンサルファイド (PPS) 樹脂を選択した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- [1] Hiroki Tanaka, Yosuke Mizuno, Kentaro Nakamura, 'Ejection of small droplet from microplate using focused ultrasound,' *Jpn. J. Appl. Phys.*, **56**, 8, 087202, 2017(査読有).

- [2] Hiroki Tanaka, Yuji Wada, Yosuke Mizuno, Kentaro Nakamura, 'Effect of holed reflector on acoustic radiation force in noncontact ultrasonic dispensing of small droplet,' *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55**, 6, 067302, 2016(査読有).

[学会発表] (計 10 件)

- [1] 大澤康一, 中村健太郎, '平行振動板の同時加振により発生した空中超音波による微小物体の非接触搬送,' 日本機械学会第 31 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム講演論文集, 23B1-3, May. 2019.
- [2] 大澤康一, 水野洋輔, 中村健太郎, '平行振動板の同時加振による小物体の非接触な捕捉と移動,' 日本音響学会 2018 年秋季研究発表会講演論文集, pp. 95-96 (3-P-6), Sep. 2018.
- [3] Kentaro Nakamura, Yoshimasa Sakai, 'Noncontact coating processing of small object levitated in ultrasonic standing wave field,' 2017 IEEE International Ultrasonic Symposium (IUS2017), Proc. 2017 IEEE IUS, 7K-3, Sep. 2017.
- [4] 酒井芳将, 長谷部和彦, 田中宏樹, 水野洋輔, 中村健太郎, '自励発振式浮揚装置を用いた超音波浮揚による微小物体の非接触コーティング,' 日本音響学会 2017 年春季研究発表会講演論文集, pp. 1061-1062 (3-P-21), Mar. 2017.
- [5] 中村健太郎, '超音波浮揚の液滴非接触操作への応用,' (招待講演) 2017 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 143-144, Mar. 2017.
- [6] Sae Ito, Ryohei Nakamura, Hiroki Tanaka, Yosuke Mizuno, Marie Tabaru, Kentaro Nakamura, 'Non-contact mass measurement of droplet based on free oscillation under ultrasonic levitation,' 2015 IEEE International Ultrasonic Symposium (IUS2015), Proc. 2015 IEEE IUS, D-4, Oct. 2015.
- [7] 田中宏樹, 水野洋輔, 田原麻梨江, 中村健太郎, 'MHz 集束超音波により打ち上げられた液滴の挙動観察—空中超音波音場によるマイクロウェルからの液滴の非接触吸い上げ (3),' 日本音響学会 2015 年秋季研究発表会講演論文集, pp. 1155-1156, 2-Q-9, Sep. 2015.
- [8] 田中宏樹, 水野洋輔, 田原麻梨江, 中村健太郎, 'MHz 帯集束超音波を用いたマイクロウェルからの液滴の打ち上げ,' 電子情報通信学会技術研究報告, **115**, 102, pp. 45-50 (US2015-24), Jun. 2015.
- [9] 中村良平, 水野洋輔, 田原麻梨江, 中村健太郎, '複数の反射板の位置操作による混合—超音波浮揚による微小液滴の非接触混合(IV),' 日本音響学会 2014 年秋季研究発表会講演論文集, 2-9-15, pp. 1331-1332, Sep. 2014.
- [10] 田中宏樹, 水野洋輔, 田原麻梨江, 中村健太郎, 'MHz 帯集束超音波による液滴の打ち上げ—空中超音波音場によるマイクロウェルからの液滴の非接触吸い上げ (2),' 日本音響学会 2014 年秋季研究発表会講演論文集, 2-9-16, pp. 1333-1334, Sep. 2014.

[解説] (計 1 件)

- [1] 田中宏樹, 水野洋輔, 中村健太郎, '超音波浮揚による液滴の非接触混合,' 超音波テクノ, **27**, 6, pp. 9-14, Nov. 2015.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○取得状況 (計 2 件)

名称: 非接触液滴混合装置及び非接触液滴混合方法

発明者: 中村健太郎, 中村良平

権利者: 国立大学法人東京工業大学

種類: 特許 番号: 第 6090901 号

取得年: 2017 年 国内外の別: 国内

名称: 非接触液滴分注装置及び非接触液滴分注方法

発明者: 中村健太郎, 田中宏樹

権利者: 国立大学法人東京工業大学

種類: 特許 番号: 第 6150372 号

取得年: 2017 年 国内外の別: 国内

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者 なし

(2) 研究協力者 なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。