

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656163

研究課題名(和文)超音波放射力による非接触液体輸送路

研究課題名(英文)Non-contact transport system for a liquid using ultrasonic radiation force

研究代表者

中村 健太郎(Nakamura, Kentaro)

東京工業大学・精密工学研究所・教授

研究者番号：20242315

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：近年の製薬、新規材料開発などでは、原料液体や試薬をどこにも触らずに搬送したいという要求が出てきている。また、液滴どうしの混合や、液滴の滴下、解析なども非接触で行いたいというニーズがある。本研究では、たわみ振動板に進行波を励振し、円弧状反射体との間で、音響放射力により液滴を非接触高速搬送する方法を開発した。直径1.5 mmのエタノール液滴を終端速度2 m/s以上で約65 mm搬送することに成功した。また、浮揚した2つの液滴を衝突・混合することに成功した。さらに反射板に開けた穴を通して液滴の滴下することを検討した。

研究成果の概要(英文)：For the application in pharmaceutical and high-quality chemical industries, totally non-contact transport of droplet is highly demanded. Techniques for non-contact mixing and dispensing are also required. We have succeeded in the noncontact linear transport of ethanol droplets of 1.5 mm in diameter using a semi cylindrical acoustic waveguide. The waveguide was composed of a bending vibration plate and a semi cylindrical reflector, and a traveling wave acoustic field was excited in the waveguide. The droplet was levitated due to the radiation force of the acoustic field, and then, pushed in horizontal direction because of acoustic streaming. The transportation distance was 65mm and the terminal velocity was over 2 m/s.

We also succeed in noncontact mixing of two droplets, and dispensing a droplet through a hole installed in the reflector plate.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：超音波 音響放射力 音響流 非接触搬送 液滴 非接触混合 非接触滴下 たわみ振動

1. 研究開始当初の背景

製薬、新規材料開発などでは、原料液体や試薬をどこにも触らずに搬送したいという要求が出てきている。また、液滴どうしの混合や、液滴の滴下、解析なども非接触で行いたいというニーズがある。これに対して、様々な非接触マニピュレーション手法の中で、空中超音波の放射力を利用する方法が以前から検討されている。例えば、空中に発生させた超音波定在波の音圧の節に微小物体がトラップされる現象を利用して液滴を非接触で空中に保持する実験が行われている。スペースシャトルの無重力状態での合金作成への応用が検討されたこともあった。

これに対し、通常の重力下の空气中で、直径 1 mm 前後の液滴を保持しつつ、その横方向位置を移動させる技術が必要とされている。この目的のために、研究代表者を含むグループでは振動板の多点位相差駆動により、定在波の励振位置をずらし、浮揚した液滴の横方向の位置を移動する方法を提案した。しかし、この方法は移動速度が遅いので、より高速な非接触搬送手法が望まれる。

2. 研究の目的

超音波の放射力を利用することで、直径 1 mm 程度の液滴を空中において非接触高速搬送することをめざす。

長矩形のたわみ振動板とそれと同形の反射板の間に進行波音場を形成する手法を考案し、本研究の開始前に予備実験を行っており、固体微小球を 0.4 m/s 程度で非接触直線搬送することに成功していた。この原理により液滴の搬送も可能とするため、より保持力の高い音場を実現する系を設計する。

また、搬送に加えて、混合や滴下などの機能も非接触で行う方法を追究する。

3. 研究の方法

(1)非接触直線高速搬送

液滴を浮揚したまま水平方向に直線搬送する方法として、長矩形板に進行波たわみ振動を励振し、これと並行に同形の反射板を配置した図 1 の構造を考案した。アルミニウム振動板の片端をホーン付ランジュバン振動子で加振し、他の端部を振動吸収材料で終端する。こうすることでたわみ振動の進行波を励振する。この実験例では周波数 31.6 kHz の振動を起こしている。進行波振動を励振した場合の振動板と反射板の間の空間の音圧分布を計測した結果が図 2 であり、水平方向には進行波音場となっており、鉛直方向には節が 2 つのモードが生じていることがわかる。この際に、図 3 のように振動板を伝搬するたわみ振動と音場の水平方向波長が整合するよう振動板と反射板の距離を調整する必要

がある。この構造では、振動板の両側が解放されており、アクセス性は良いが音場の閉じ込めは弱くなるので、本研究では図 4 のような円弧上の反射板を採用して、横方向保持力を高め、液滴の非接触搬送を試みた。

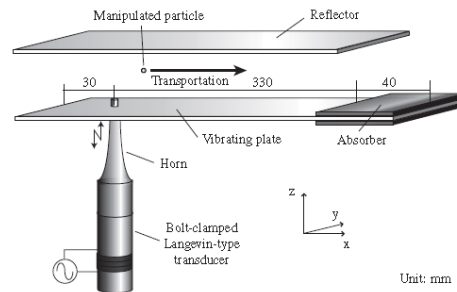


図 1 直線高速搬送装置の基本構造

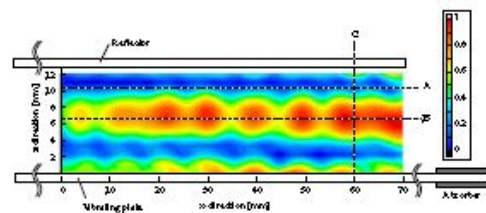


図 2 振動板・反射板の間の音圧分布

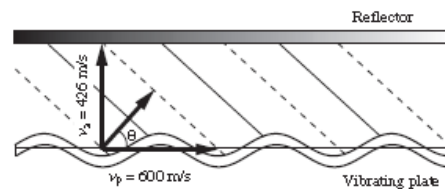


図 3 振動板のたわみ振動波長と伝搬する空中超音波の波長の関係

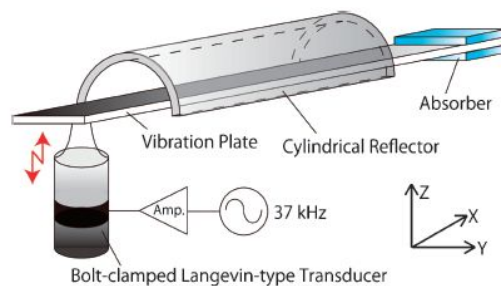


図 4 反射板を円弧とした超音波による直線搬送装置の構成

(2)液滴の非接触混合

本研究を進める過程で、空中に浮揚させた 2 つの液滴を衝突・混合させる発想を得て、これを試みた。ここでは、図 5 のように、超音波定在波音場の中の 2 つの離れた浮揚可能位置にそれぞれ液滴を浮揚させ (図の左)、その後、音場に何らかの変調を与えて、液滴を隣の浮揚位置に移動させ、衝突・混合させる。

浮揚位置を移動させる方法として、本研究では

- ・反射板や振動板の位置を微小に動かす方法

・振動子の駆動電圧を振幅変調する方法の2つを試みた。実際には、後述のような円環状振動子とそれと相似形の反射体の間に液滴を浮揚させて実験を行った。

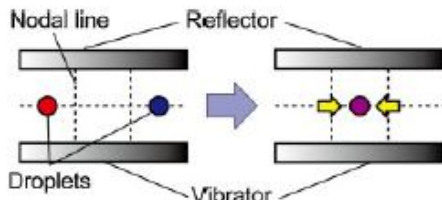


図5 超音波浮揚による液滴混合の原理

(3)液滴のウエル・プレートへの滴下

液滴の非接触操作で必要とされる基本動作のひとつとして、浮揚している液滴をウエル・プレートの必要なウエルに滴下することを検討した。定在波音場をつくるための反射板に液滴が通る小さな穴をあけて、超音波を停止することで、そこから液滴を滴下する方法を考案した。

4. 研究成果

(1)非接触直線高速搬送

図4の実験系において、たわみ振動板と円弧状反射板との間の音圧分布を有限要素法により計算した結果を図6に示す(振動板の中心線上の垂直面内の2次元分布)。また、この音場により発生する音響放射力ベクトルを求めて同じ図の中に表示している。2本の節線のうち下の部分にトラップしやすいことが予測される。

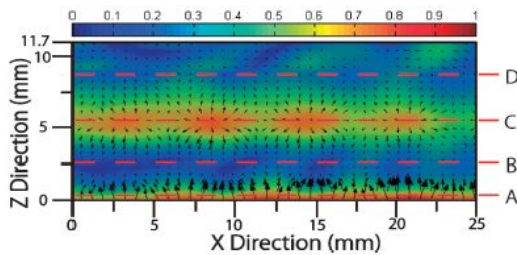


図6 振動板と円弧状反射板との間の音圧分布(計算値)とそれから推定した音響放射力

実際にエタノール液滴(直径約1.5mm、質量約1.4g)を下側の節の付近に入れると、進行波音場により、この節に沿って音波伝搬方向に液滴が搬送された。その様子を高速カメラで撮影した各コマを音圧分布に重ね書きしたものを図7に示す。音場の節に沿いながら搬送されているのがよくわかる。音場のうねりによって搬送経路も蛇行している。

なお、搬送された距離は約65mmであった。液滴は徐々に加速され、約60ms後に終端速度2m/s以上に達している。

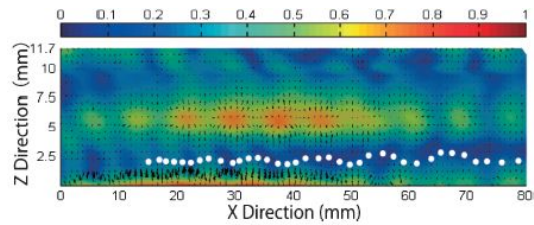


図7 エタノール液滴の搬送軌跡(白丸)

液滴の水平方向速度の時間変化を図8に示す。これは1次遅れ系の特性になっており、進行波音場による水平方向の推進力と空気の粘性抵抗が釣り合う速度が終端速度になっていると考えられる。この速度変化の時定数と液滴の質量から、水平方向の推進力を推定することができる。

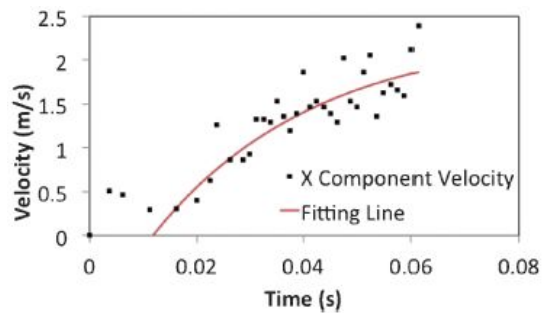


図8 エタノール液滴の水平方向移動速度

(2)液滴の非接触混合

図9のようにホーン付ランジュバン振動子で金属円環に呼吸振動を励振し、その中に配置した円環状反射板との間に形成される定在波の節(節円)に液滴を浮揚させて混合実験を行った。

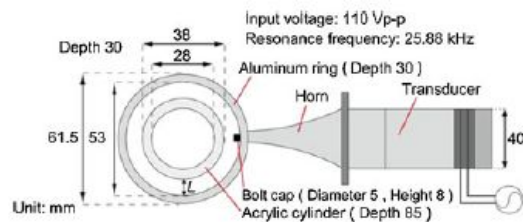


図9 円環振動子による混合実験

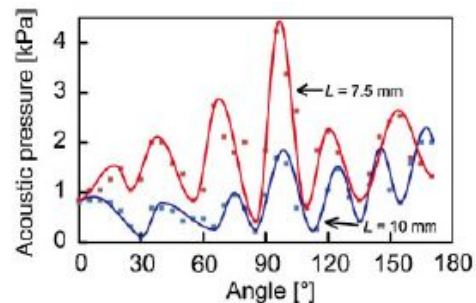


図10 円環振動子内側の周方向の音圧分布。円環振動体と反射円環との距離を7.5mmとした場合(赤)と10mmとした場合(青)。

反射円環の位置を動かすと、図 10 のように音圧の大きさが変化する。周方向の節の位置も少し移動している。このことを利用して、節円上の異なった場所に浮揚した 2 つの液滴を衝突・混合させる実験を行った。液滴を浮揚させた状態で、振動円環または反射円環を小さくたたくと、液滴は図 11 のように混合された。

次に、振動子への印加電圧の振幅を変調することで混合動作を行った。図 12 のように超音波周波数(この実験では約 26 kHz)の印加電圧の振幅を 20 Hz の矩形波で変調した。変調の深さを大きくしてゆくと、浮揚した液滴は平衡の位置を中心に振動しはじめ、ついには隣に浮揚する液滴と衝突して混合される。このようすを図 13 に示す。先に述べた機械的に音場の強さを振動させる方法に比べて再現性が 10 倍以上高かった。

なお、衝突後の液滴には回転や内部対流が発生していることが観察された。これは音響流や放射力の影響と考えられるが、これによってどの程度の混合がなされているかの評価を今後行う必要がある。

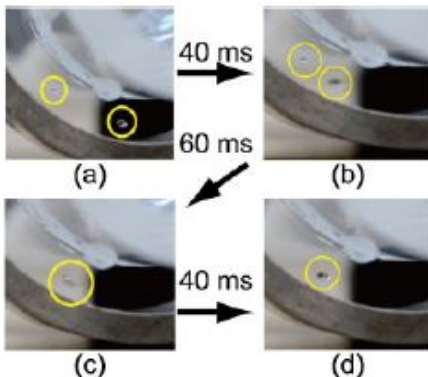


図 1 1 機械的変調による混合動作

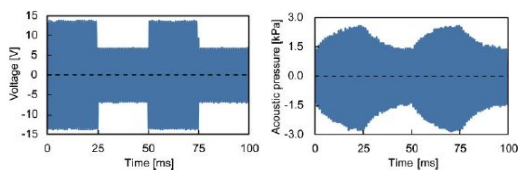


図 1 2 振幅変調した印加電圧波形(左)と音圧の時間変化(右)

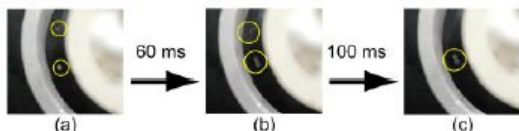


図 1 3 電圧の振幅変調による混合動作

(3)液滴のウエル・プレートへの滴下

応用上、液滴をウエル・プレートなどに滴下する必要がある。本研究では、図 14 のように、反射板に穴をあけ、そこから滴下することを考案し、基礎検討を行った。

振動子先端と反射板の距離は共振長とすべきであるが、駆動周波数 27.4 kHz のとき、距離が 14-15 mm では穴の直上に微小球が浮揚したが、距離が 13 mm のときは穴の上を避けて浮揚した(図 15)。このことは音場分布の計算値から微小球に働く音響放射力を計算した結果(一例を図 16 に示す)からも予測される。このように反射板の位置により、穴付近の音圧分布が変化し、安定に浮揚する位置が移動することがわかった。液滴の選択など、今後この現象の応用法を検討したい。

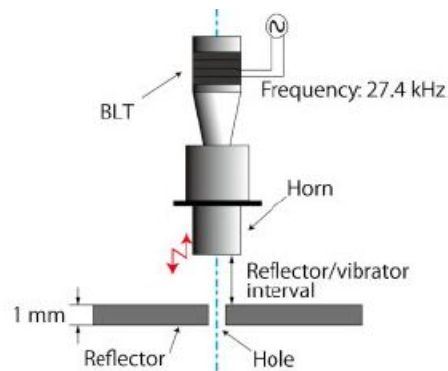


図 1 4 穴あき反射板と振動源の配置

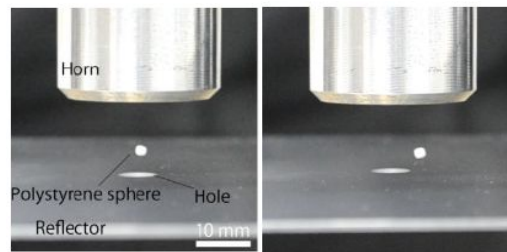


図 1 5 穴の上に浮揚する場合(左)と浮揚位置が穴からずれる場合(右)

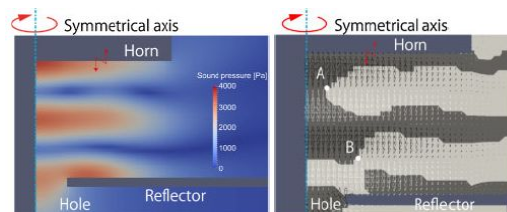


図 1 6 穴あき反射板による音圧分布(左)と音響放射力分布(右)

(4)今後の課題

以上の検討により、高速に非接触搬送を行うこと、非接触で 2 液滴を混合すること、反射板の穴から滴下を行うこと、の 3 つが基本的に可能であることが実験的に証明された。今後は、これらの動作の再現性をより高めることに加えて、次のようなことを検討する必要があることがわかった。

1. 定量の液滴を定在波の節に正確に導入する手法
2. 液滴の混合度合などをモニタする技術

3. 搬送路と混合装置との非接触乗り継ぎ法

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3件)

Hiroki Tanaka, Yuji Wada, Yosuke Mizuno, and Kentaro Nakamura, "Behavior of Ultrasonically Levitated Object above Reflector Hole," *Jpn. J. Appl. Phys.* (査読有), 52, 2013, 100201 (3 pages).

doi:10.7567/JJAP.52.100201

Ryohei Nakamura, Yosuke Mizuno, and Kentaro Nakamura, "Demonstration of Noncontact Ultrasonic Mixing of Droplets," *Jpn. J. Appl. Phys.*, (査読有) 52, 07HE02-1-4, (2013).

doi:10.7567/JJAP.52.07HE02

Mingjie Ding, Daisuke Koyama, and Kentaro Nakamura, 'Noncontact Ultrasonic Transportation of Liquid Using a Flexural Vibration Plate,' *App. Phys. Express* (査読有), Vol. 5, No. 9, 097301 (2012).

doi:10.1143/APEX.5.097301

〔学会発表〕(計8件)

田中宏樹, 水野洋輔, 中村健太郎, “空中超音波によるマイクロウエルからの液滴の非接触吸い上げ,” 日本音響学会 2014 年春季研究発表会講演論文集, 3 - P4 - 1 3, pp. 1315-1316, 日大(東京), 2014 年 3 月 10-12 日.

中村良平, 水野洋輔, 中村健太郎, “2 つの定在波音場による混合動作 -超音波浮揚による微小液滴の非接触混合()-,” 2-7-3, pp. 1255-1256, 日大(東京), 2014 年 3 月 10-12 日.

中村良平, 水野洋輔, 中村健太郎, “超音波浮揚された微小物体/液滴の非接触質量測定,” 日本音響学会 2013 年秋季研究発表会講演論文集, 2-4-4, pp. 1199-1200, 豊橋技術科学大学, 2013 年 9 月 25-27 日.

田中宏樹, 和田有司, 水野洋輔, 中村健太郎, “穴あき反射板上における浮揚物体の捕捉位置に関する検討 -超音波浮揚による液滴の非接触分注 3 -,” 日本音響学会 2013 年秋季研究発表会講演論文集, 2-Q-9, pp. 1249-1250, 豊橋技術科学大学, 2013 年 9 月 25-27 日.

Kentaro Nakamura, Ryohei Nakamura, Hiroki Tanaka, “Non-contact mixing and dispensing of droplet using ultrasonic levitation,” 10th International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators (IWPMA), pp. 76-77, Germany, July 14-18, 2013.

Hiroki Tanaka, Yuji Wada, Yosuke Mizuno, Kentaro Nakamura, “Noncontact Ultrasonic Dispensing of Small Droplet,” 10th International Workshop on piezoelectric Materials and Applications in Actuators (IWPMA), pp. 99-101, Germany, July 14-18, 2013.

Hiroki Tanaka, Yuji Wada, Yosuke Mizuno, Kentaro Nakamura, “A Non-Contact Dispensing of Small Droplets through Ultrasonic Levitation,” 2013 International Congress on Ultrasonics (ICU2013), PO243, pp. 297-302, Singapore, May 2-5, 2013.

Ryohei Nakamura, Yosuke Mizuno, Kentaro Nakamura, “Noncontact Mixing of Droplets using Ultrasonic Levitation,” 2013 International Congress on Ultrasonics (ICU2013), PO267, pp. 309-314, Singapore, May 2-5, 2013.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計2件)

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: 特許願 2012-198319 号

出願年月日: 2012 年 9 月 10 日

国内外の別: 国内

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: 特許願 2012-198318 号

出願年月日: 2012 年 9 月 10 日

国内外の別: 国内

○取得状況(計0件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

中村健太郎 (NAKAMURA, Kentaro)

東京工業大学・精密工学研究所・教授

研究者番号: 20242315

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし