

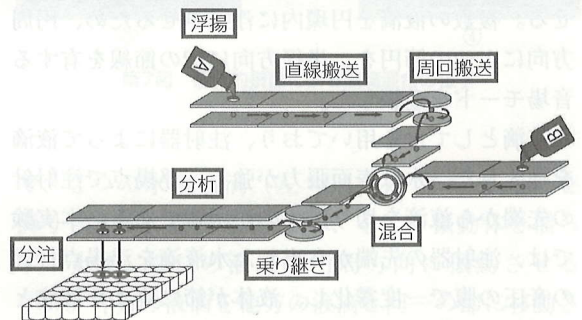
超音波浮揚による液滴の非接触混合

東京工業大学 田中 宏樹・水野 洋輔・中村 健太郎

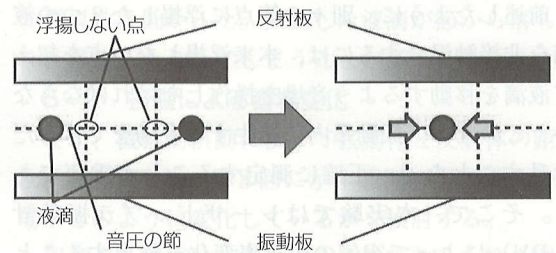
1. はじめに

近年、創薬や新規材料開発の分野において、薬剤や材料を取り扱う工程を、完全に非接触で行いたいという要求が出てきている。これは、容器などと触れることによる、薬剤等の汚染防止や、光学分析などの際における容器の影響防止などが理由として挙げられる。これまでに物体を浮揚する技術として、空気圧による方式⁽¹⁾や、静電気や磁気浮上による方式⁽²⁾⁽³⁾などが開発されてきたが、浮揚原理によって被搬送物の材質に制限がある。一方、超音波浮揚方式では、液体から固体まで、空気と音響インピーダンス（密度と音速の積）が異なる物質であれば浮揚できる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。我々はこの超音波による物体の非接触浮揚方式を用いて、第1図のような、搬送、混合、解析、分注などの液滴を取り扱うさまざまな工程を完全非接触で実現することを目指し研究を行っている。

本稿では、この中から非接触で液滴を混合する手法^{(6)~(9)}について解説する。



第1図 実現を目指す液滴の非接触操作装置の例



第2図 超音波浮揚による非接触混合の概略図

2. 超音波浮揚と非接触混合

振動板と反射板の2枚の板を用いて、空気中に超音波の定在波音場を形成すると、その音圧の節に微小物体が浮揚・トラップされる。この現象を一般的に、超音波浮揚と呼ぶ。

超音波浮揚した液滴の非接触混合の概略を第2図に示す。振動板と反射板を用いて二次元の定在波音場を励振し、2つの節にそれぞれ液滴を浮揚させ

る。これらの液滴を1つの節に移動すれば1つの液滴となって浮揚するため、混合できる。

しかしこれを実現するには、何らかの手法によって音場を操作することで、本来液滴が浮揚しない節点を超えて液滴を移動しなければならない。本稿では、①機械的摂動による手法と、②駆動電圧の変調による手法の2手法による液滴の非接触混合について解説する。

※本記事は第33回超音波シンポジウムで発表された論文に基づいております。

3. 実験装置

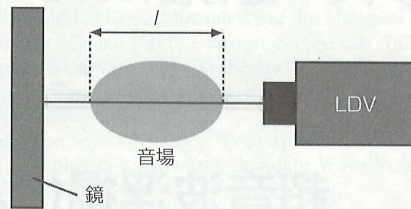
3-1 装置構成

本実験で用いた装置の構成を第3図に示す。装置は同心円状の振動体（外側）と反射体（内側）から構成される。エキスポネンシャルホーン付きランジュバン振動子を用いて、振動体となるアルミニウム円環に25.8 kHzの呼吸振動を励振する。先端のアルミニウム円環は内径53 mm、外径61.5 mmである。また、内径28 mm、外径38 mmの亚克力円環を反射体とした。振動体を励振すると、反射体との間に定在波音場が発生し、液滴はその音場の節に浮揚させる。複数の液滴を円環内に浮揚させるため、円周方向に1つの節円を、半径方向に12の節線を有する音場モードを励振した。

液滴として水を用いており、注射器によって液滴を注入した。水は表面張力が強く、浮揚点で注射針の先端から液滴を切り離すのが困難である。本実験では、注射器の先端から出した水液滴を浮揚点付近の音圧の腹で一度霧化し、液体が節に集まり液滴となって浮揚することを利用した。この装置を用いると、最大で19 μLの水液滴を浮揚できる。

3-2 音場測定¹⁾

前述したように、別々の節点に浮揚した2つの液滴を非接触混合するには、本来浮揚しない点を超えて液滴を移動するよう音場を操作しなければならない。このため、振動系内に発生する音場をできるだけ乱すことなく、正確に測定することが重要である。そこで、本実験ではレーザドップラ振動計(LDV)によって空気の屈折率変化を検出することで、音場を測定した。音は空気の粗密波なので、音圧が高くなると屈折率の変化が生じ、光路長が変化



第4図 レーザドップラ振動計による音場測定

する。これをLDVで測定するという手法である。

音圧 p と振動計による速度の測定値 v_{LDV} の関係は式(1)ようになる。

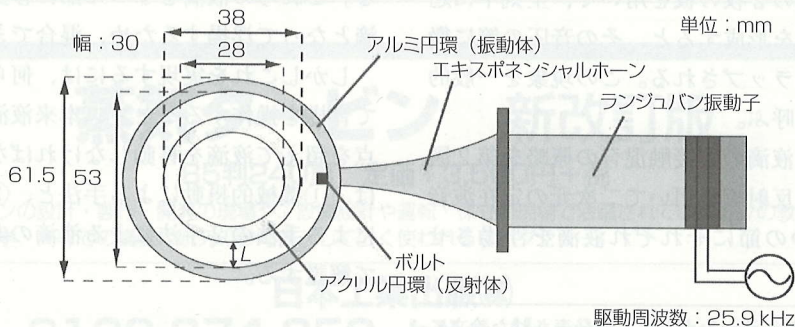
$$p = \frac{n}{n-1} \frac{c^2 \rho}{2\pi f l} v_{LDV} \quad \dots(1)$$

それぞれ、 n ：空気の屈折率、 c ：音速、 ρ ：空気の密度、 f ：駆動周波数、 L ：音場の長さ（ただし空气中、25℃、光の波長633 nm、1気圧、 $n=1.0002764$ 、 $c=346.51$ m/s、 $\rho=1.184$ kg/m³、 $l=30$ mmとして計算）を表す。本稿における音場測定は、全てこの手法によって測定したものである。

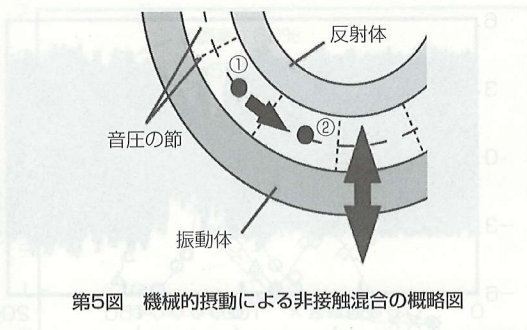
4. 非接触混合の手法

4-1 機械的振動による混合

機械的振動を用いた非接触混合の概略図を第5図に示す。円環型の振動体（外側）と反射体（内側）を用いて、隣り合う節に2つの液滴を浮揚させる。その後、振動体の位置を動かし振動体と反射体の距離 L を変化させることで、発生する音場を操作する。液滴に作用する音響放射力と重力の釣り合いの変化によって、片方の液滴を他方の液滴が浮揚する節点に移動させる。浮揚液滴に働く音響放射力がある程



第3図 円環型の振動体・反射体を用いた振動系

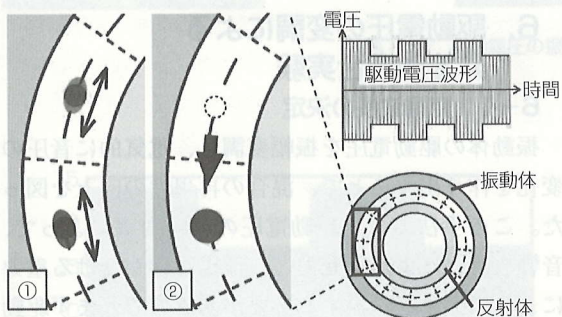


第5図 機械的摂動による非接触混合の概略図

度残るように音圧を操作することで、液滴は円環型の振動体に沿って周方向に重力によって移動する。同一の節に移動した液滴は混合し、1つの液滴となって浮揚する。混合された液滴は、振動体の位置を戻すことで復元した音場により再び安定的に浮揚される。

4-2 駆動電圧の変調による混合

駆動電圧の変調による非接触混合の概略図を第6図に示す。円環型の振動体と反射体間の隣り合う節に2つの液滴を浮揚させ、振動子の駆動電圧を振幅変調する。駆動電圧が低下したときに音圧が低下するため浮揚液滴が受ける音響放射力が弱くなり、重力によって上側に浮揚する液滴が下側の液滴に衝突し混合する。その後、変調を停止することで音場が戻り、混合された液滴が節に浮揚される。

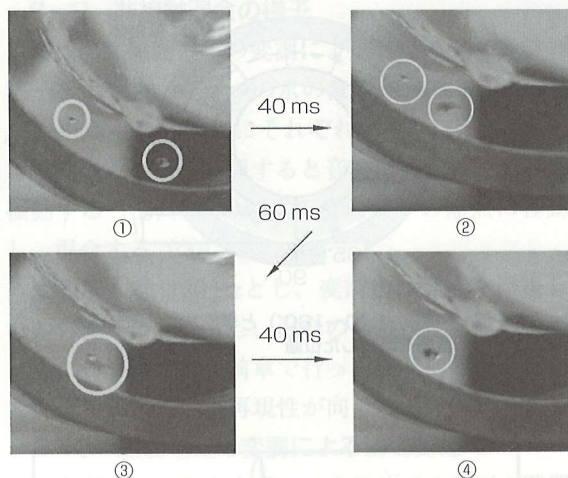


第6図 駆動電圧の変調による非接触混合の概略図

5. 機械的摂動による非接触混合実験

5-1 非接触混合の様子

第7図は実際の混合実験の様子の写真である。注射器を用いて、液体を音圧の節付近で霧化すること



第7図 機械的摂動による液滴混合の様子

で、2つの水の液滴（左：0.4 μL、右：1.8 μL）を隣り合う節に浮揚させ（①）、そして振動体を揺らすことで、2つの液滴を円周方向に振動させる（②）。片方の液滴を他方の液滴と同一の節に移動させると、表面張力で結合する（③）。2つの液滴が混合され、1つになって浮揚する（④）。

本手法によって非接触混合に初成功したが、混合の再現性は低かった。振動した液滴が節から落ちたり、霧化したりしてしまうことが多かった。

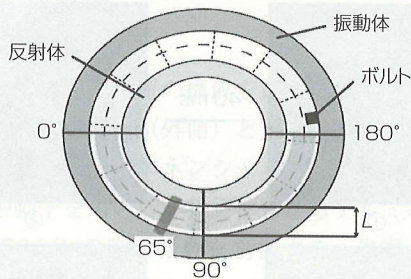
5-2 摂動による音場変化

まず、機械的摂動によって振動体と反射体の距離 L が変化すると、第8図に示す範囲の振動系内の音場がどのように変化しているかを検討する。

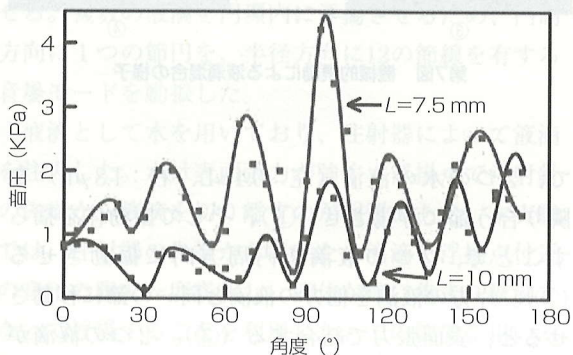
円環の0~180°における周方向の音圧を第9図に示す。 L が7.5 mmと10 mmのときの、外円環と内円環の中央の音圧をそれぞれ示している。外円環と内円環の中心が揃っている $L=7.5$ mmのときの方が $L=10$ mmと比べて、全体的に音圧が大きくなっていることが分かる。そして L が変わっても、混合した点付近の節の位置はあまり変わらないことが見て取れる。

L を5~11 mmの範囲で変化したときの、混合を行った65°付近の半径方向の最大音圧の推移を第10図に示す。 L が7 mm前後のとき最大音圧が大きく変化していることが分かる。

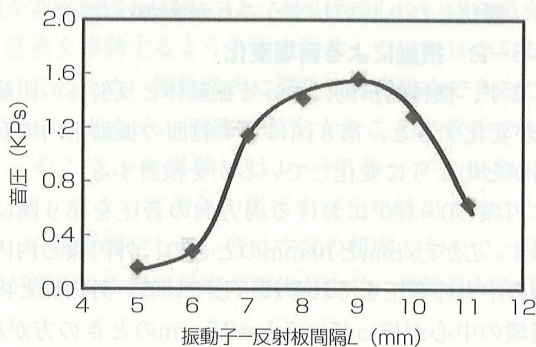
これらの音場の变化から、振動体下がったとき、浮揚点の音圧が一時的に低くなり、液滴が受け



第8図 円周方向(0~180°)と半径方向(65°)の音場を測定した位置



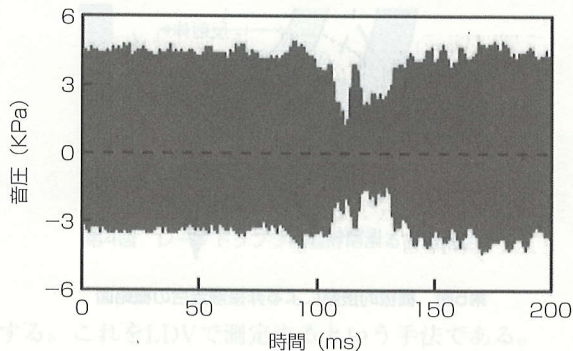
第9図 L=7.5、10 mmのときの円周方向(0~180°)の音場



第10図 L=5~11 mmのときの最大音圧の推移(65°の半径方向)

る音響放射力が低下することで、重力によって液滴が周方向に移動し、混合が行われたと考えられる。その後、振動体が元の位置に戻ったとき、再び音圧が大きくなり、混合した液滴が90°方向の強い音場にトラップされたと予想される。

続いて、機械的摂動を1回与えたときの内部音場の時間変化を検討する。混合を行った65°位置近傍



第11図 機械的摂動を与えたときの音圧の時間変化(65°)

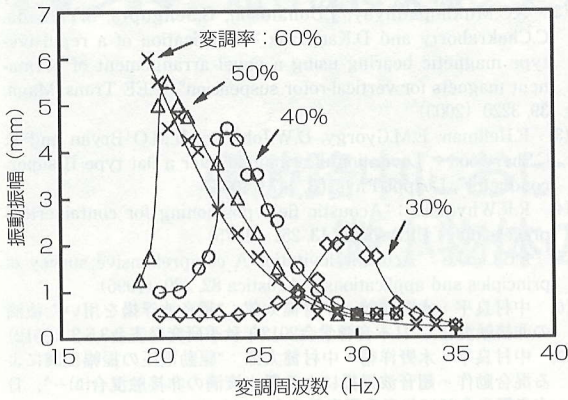
の音圧の最大点における、摂動による音圧の時間変化を第11図に示す。与えた摂動によって振動体と反射体の間隔Lがずれた際、音圧が減少し、その後振動体の位置の復元とともに、音圧が再び上昇していく様子が見て取れる。これは先ほどの予想した音圧変化と一致する。

また、与えた摂動が1回なのに対して、音圧の変化が複数回起こっている。このことから円環が摂動により移動した円環が揺れながら元の位置に戻っていると考えられる。この測定を繰り返し行った結果、同じ傾向の音圧変化の結果を得られたが、音圧の変化の幅や時間に差があった。同一の音圧変化を作り出すことが難しいことが、混合の再現性が低い原因であると考えられる。

6. 駆動電圧の変調による非接触混合実験

6-1 変調波長の決定

振動体の駆動電圧を振幅変調し、電氣的に音圧の変化を作り出すことで、混合の再現性の向上を図った。この手法では、駆動電圧の振幅変調によって、音響放射力による復元力と、浮揚物体が受ける重力による単振動を励振する必要があるため、まず駆動電圧の変調周波数を決定する必要がある。定在波音場中に直径1.8 mmの発泡スチロール球を浮揚し、振幅変調率を変えたときのスチロール球の振動振幅と変調周波数の関係を第12図に示す。変調波形は矩形波とし、最大駆動電圧を固定して変調率のみを変化させ測定した。変調率ごとに、共振周波数と、そのときの振動幅が異なることが分かる。また、変調



第12図 発泡スチロール球の振幅の駆動電圧変調率依存性の測定結果

率が増加すると共振周波数が低くなるのは、音響放射力の時間平均値が小さくなることで、復元力も小さくなるためだと考えられる。本実験では変調率とともに変動幅が大きくなることが望ましいため、20 Hzを変調周波数として混合実験を行った。

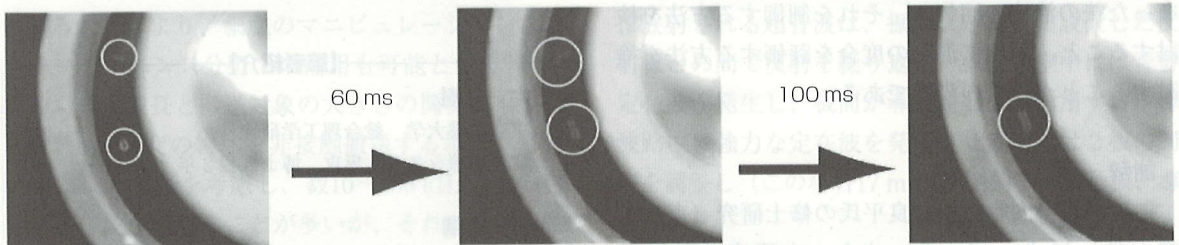
6-2 非接触混合の様子

第13図に駆動電圧の変調による実際の混合実験の様子を示す。まず、2つの水の液滴(上:0.4 μ L、下:1.5 μ L)を隣り合う節点にそれぞれ浮揚し(①)、そして駆動電圧を振幅変調すると音場が変化し、液滴が振動する(②)。上の節点の液滴が下の節点に移動し、混合する(③)。

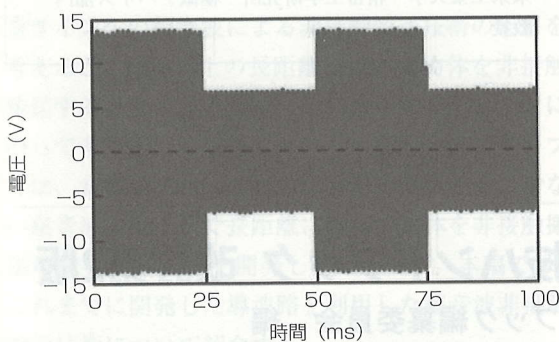
変調周波数は20 Hzとし、変調率は液滴を浮揚したのち徐々に大きくし、混合の直後に、変調を止めた。この手法では、前章で行った機械的振動を用いた混合手法と比べ、再現性が向上した。

6-3 駆動電圧の変調による音場変化

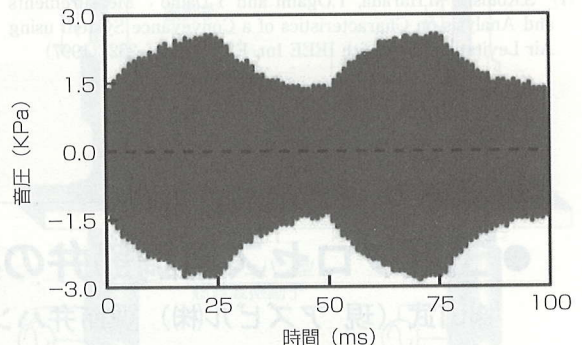
駆動電圧と、混合を行った点近傍での音圧の時間変化をそれぞれ第14図(a)と(b)に示す。変調周波数は20 Hz、変調率は50%として測定した。内部音圧は駆動電圧に合わせて周期的に変化していることが確認できる。この音圧変化によって液滴の位置が振動することで安定点より抜け出して、重力によって液滴が下へと移動し、混合されたと考えられる。



第13図 駆動電圧の振幅変調による液滴混合の様子



(a) 振幅変調した駆動電圧の波形



(b) 音圧の時間変化

第14図

また、音圧変化は電圧に対して遅延が発生している。インピーダンスアナライザを用いて測定した振動系のQ値 (=925) から計算される時定数は11.4 msで、実測値と一致していることから、振動系の立ち上がり時間が原因であると分かる。

前章の機械的摂動による手法では、同一の音圧変化を作り出すことが難しかったが、駆動電圧を変調する方法では同一の変化を作り出すことが容易となり、再現性が向上した。

7. おわりに

空中超音波を用いて浮揚した液滴を非接触のまま混合する2通りの手法を解説した。機械的摂動を用いる方法では、音圧の制御が難しいため、液滴量の調整が難しく、再現性が低い。駆動電圧を振幅変調する方法では、変調率や変調周波数といった制御可能なパラメータが増えるため、液滴量の調整がしやすく、機械的摂動を用いる方法と比べ、再現性が高い。

ここまでの研究では合体した液滴が、真に混合しているのかどうかまでは検討できていない。1つになった後の液滴の回転や、それを制御する方法を検討すること、そして混合の度合を評価する方法を検討することが今後の課題である。

謝辞

この解説の内容は中村良平氏の修士研究(東京工業大学)によっている。また、本研究は科研費23656163および26289054の補助を受けている。

<参考文献>

- (1) S.Konishi, M.Harada, Y.Ogami and Y.Daiho: "Measurements and Analysis on Characteristics of a Conveyance System using Air Levitation", Proc. 6th IEEE Int. ETFA Conf. 232 (1997)

- (2) S.C.Mukhopadhyay, J.Donaldson, G.Sengupta, S.Yamada, C.Chakraborty and D.Kacprzak: "Fabrication of a repulsive-type magnetic bearing using a novel arrangement of permanent magnets for vertical-rotor suspension", IEEE Trans. Magn. 39, 3220 (2003)
- (3) F.Hellman, E.M.Gyorgy, D.W.Johnson, H.M.O'Bryan and R.C.Sherwood: "Levitation of a magnet over a flat type II superconductor", J. Appl. Phys. 63, 447 (1988)
- (4) R.R.Whymark: "Acoustic field positioning for containerless processing", Ultrasonics 13, 251 (1975)
- (5) E.G.Lierke: "Acoustic levitation-A comprehensive survey of principles and applications", Acustica 82, 220 (1996)
- (6) 中村良平・水野洋輔・中村健太郎: "超音波浮揚を用いた液滴の非接触混合", 日本音響学会2012年秋季研究発表会3-5-3 (2012)
- (7) 中村良平・水野洋輔・中村健太郎: "駆動電圧の振幅変調による混合動作-超音波浮揚による微小液滴の非接触混合(II)-", 日本音響学会2013年春季研究発表会1-4-13 (2013)
- (8) R.Nakamura, Y.Mizuno and K.Nakamura: "Noncontact Mixing of Droplets Using Ultrasonic Levitation", 2013 International Congress on Ultrasonics (ICU 2013) paper P0267 (2013)
- (9) R.Nakamura, Y.Mizuno and K.Nakamura: "Noncontact Mixing of Droplets Using ultrasonic Levitation", 33rd Proceedings of Symposium on ULTRASONIC ELECTRONICS (USE 2012) paper IP4-6 (2012)
- (10) R.Nakamura, Y.Mizuno and K.Nakamura: "Demonstration of noncontact ultrasonic mixing of droplets", Jpn. J. Appl. Phys. 52, 07HE02 (2013)
- (11) K.Nakamura, M.Hirayama and S.Ueha: "Measurements of air-borne ultrasound by detecting the modulation in optical refractive index of air", Proc. IEEE Ultrasonics Symp. paper 609 (2002)

【筆者紹介】

田中 宏樹

東京工業大学 総合理工学研究科
物理情報システム専攻 博士課程2年

水野 洋輔

東京工業大学 精密工学研究所 極微デバイス部門
助教

中村 健太郎

東京工業大学 精密工学研究所 極微デバイス部門
教授