

液滴浮揚に対する振幅変調の効果について*

日大生産工 (院) ○岡部 絢哉 日大生産工 大塚 哲郎

1 はじめに

強力定在波音場内に微小物体を挿入すると、音響エネルギーにより微小物体が空中に浮揚する力が働き、微小物体を音圧分布の節に保持することができる。(1)

この時、浮揚中の微小物体には、その形状、重心位置などによる複雑な回転や挙動が発生する。従って、浮揚を安定させるためには、この回転や挙動のコントロールが必要である。

過去の研究で、超音波を振幅変調させ液滴浮揚を行ったところ、液滴浮揚の回転方向や回転速度、浮揚の際の挙動が変化することが分かった。(2) そこで本報告では、振幅変調 (AM) を加えた場合の浮揚液滴に与える効果について検討したので報告する。

2 音源

Fig.1 に 2 節円モード段つき円形振動板を装着した音源の外観を示す。28kHz 用ボルト締めランジュ板型振動子に振幅拡大用のエクスポネンシャルホーンを接続し、先端に外径 64.3mm のジュラルミン製 2 節円モード段つき円形振動板を取り付け、強力超音波音源とした。この音源全体の共振周波数は 28.135[kHz] である。

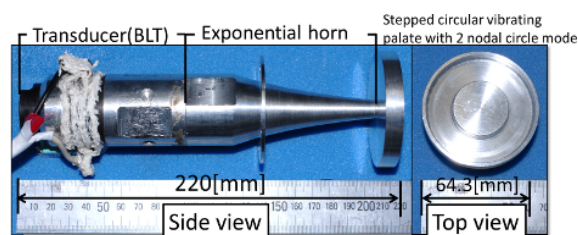


Fig. 1 Stepped circular vibrating plate with 2 nodal circle mode.

設計には、ANSYS Mechanical APDL を使用しており、振動板表面の振幅分布、強力定在波音場の計算を行い実験値との比較を行った。

3 振幅分布

Fig.2 に振幅分布を示す。測定には Fotonic Sensor を用いて、振動子入力電圧 $3.0V_{p-p}$ ー

定のまま振動板の中心から外径まで径方向にプローブを、0.5mm 間隔で移動させ振幅分布を測定した。Fig.2 の赤い実線が実測値を示し、青い波線が前述の ANSYS で求めたシミュレート値 (Y 方向の振幅) である。実測値の最大値で規格化し両者を比較すると、実測値とシミュレート値の振幅分布はほぼ一致しており、節の位置も振動板凹部両隅で一致しているので、2 節円モード段つき円形振動板が設計できていることがわかる。

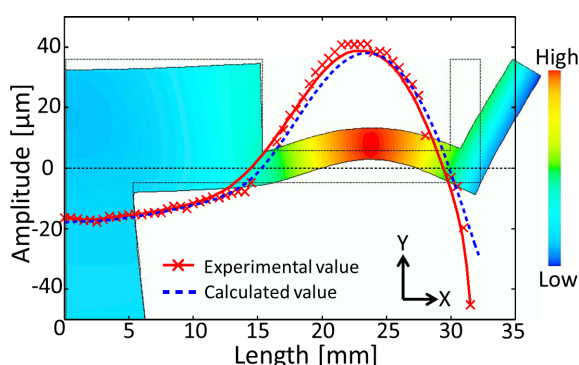


Fig. 2 Vibration distribution.

4 強力定在波音場

Fig.3 に構築した強力定在波音場と浮揚位置を示す。2 節円モード段つき円形振動板、アクリル製反射板、バフルを平行に設置し、振動板と反射板の間隔を 46.5mm として音場内に Fig.3 のような定在波が発生するように調整を行った。また、今回の実験では、振動板から 22.5mm の位置に $10\mu\text{l}$ の水を浮揚させる。

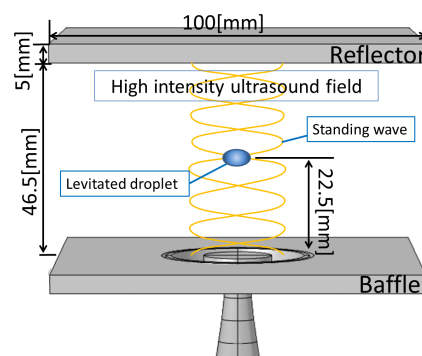


Fig. 3 Dimension of the sound field.

* Effect of modulated wave in droplet levitation.

Junya OKABE and Tetsuro OTSUKA

Fig.4(a)、(b) に実測値とシミュレート値の強力定在波音場音圧分布を示す。実測値はコンデンサマイクロフォン (ACO 社製 TYPE4116) の先端にジェラルミン製プローブチューブを取り付け、入力電圧 $3.0V_{p-p}$ 一定のまま、 $43\text{mm} \times 100\text{mm}$ の範囲を 0.25mm 間隔で走査して測定を行った。シミュレート値は、振幅分布の計算結果をもとに構造-音響連成解析による計算⁽³⁾ によって求めたものである。両者を比較すると、音圧分布はほぼ一致し、定在波の腹と節の位置も近似しているので定在波音場が構築できていることがわかる。

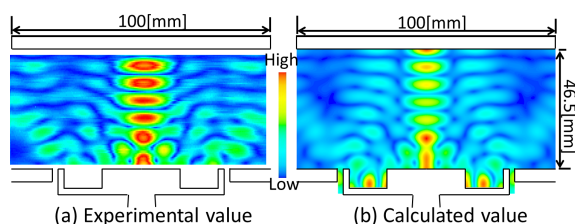


Fig. 4 Sound pressure distribution.

5 振幅変調 (AM)

Fig.5(a)、(b) に測定した変調波とその FFT を示す。測定には、コンデンサマイクロフォン (ACO 社製 TYPE7017) を使用し、入力電圧 $11.5V_{p-p}$ 一定のまま、浮揚位置 (振動板から 22.5mm) の変調波の測定を行った。この時の搬送波は 28.135kHz 、信号波は 3.7kHz 、変調率は 80% である。Fig.5 より振幅変調された波形が測定できたので、定在波音場内に変調波が発生していることがわかる。

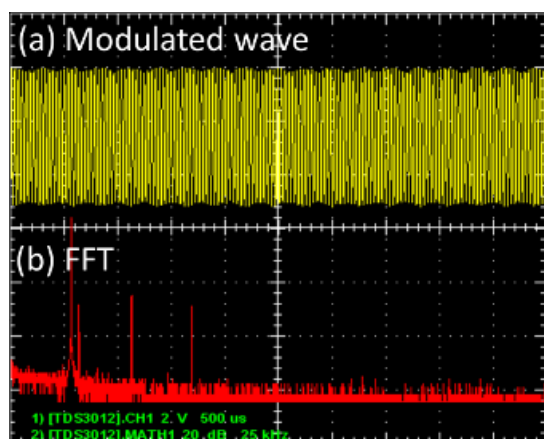


Fig. 5 Modulated wave.

Table.1 に今回の実験で使用した信号波と変調率、信号波の条件を示す。各信号波ごとに変調波の高さが異なるので、比較のため波形の高さが揃うように変調率を調整し実験を行った。

搬送波を 28.135kHz (駆動周波数) とし、各信号波を 0.281kHz 、 2.81kHz 、 3.7kHz 、 11.2kHz 、 16.8kHz 、 24.135kHz 、 24.435kHz とした。各信号波の周波数は Table.1 の条件で決定し、Table.1 の λ は、駆動周波数 28.135kHz の波長のことである。

Table. 1 Modulated wave rate.

信号波	変調率	信号波の条件
0.281 kHz	10 %	搬送波の $1/100$
2.81 kHz	10 %	搬送波の $1/10$
3.7 kHz	80 %	$0.5 \times \lambda$
11.2 kHz	80 %	$1.5 \times \lambda$
16.8 kHz	80 %	$2.25 \times \lambda$
24.135 kHz	90 %	搬送波 - 4kHz
24.435 kHz	90 %	搬送波 - $0.5 \times \lambda$

6 実験装置

Fig.6 に実験のブロック図を示す。振幅変調の信号波を入力するために発振器 (1915) には、発振器 (FG-274) を接続する。アンプ (HSA4011) の入力には発信器 (1915) を、出力には音源を接続し、液滴浮揚の実験を行った。液滴の挙動を高速度カメラ (FASTCAM-NEO、NET) で撮影し、時系列の画像データをパソコンに保存する。

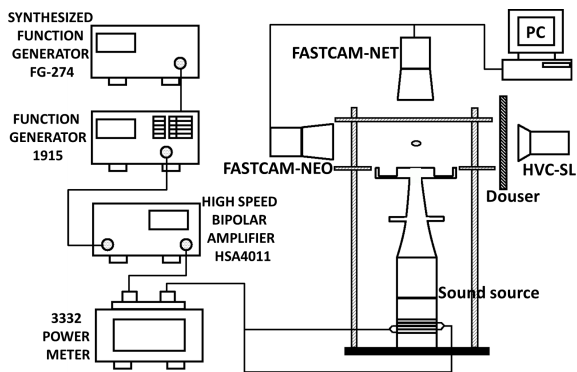


Fig. 6 Experiment block diagram.

Fig6 で示すように、高速度カメラを液滴に対して真横と真上に配置し、液滴浮揚の撮影を行う。時系列で画像を記録するので、得られた画像から液滴浮揚の回転方向、回転速度、挙動の観測を行う。また、真横のカメラに透過光 (バックライト) が入るように HVC-SL (メタルハライド照明) を設置し、一様な拡散を得るために遮光板を利用した。実験では、FASTCAM-NEO のシャッタースピード

は 1/45500 S、フレームレートは 8000fps とし、FASTCAM-NET のシャッタースピードは 1/250 S、フレームレートは 125fps とした。

7 液滴浮揚の回転観測

7.1 トレーサー粒子

実験では、マイクロピペットを用いて $10\mu\text{l}$ の水を、振動板から 22.5mm の位置に浮揚させる。浮揚の際、回転方向検出用としてトレーサー粒子を液滴に混入した。トレーサー粒子は、液滴に対して十分細かくなるように、粒径が $35 \sim 50\mu\text{m}$ のものを使用し、これを高速度カメラで撮影し、得られた画像から回転方向と回転速度を算出する。Fig.7 に高速度カメラ FASTCAM-NEO、NET で撮影した液滴及びトレーサー粒子を示す。

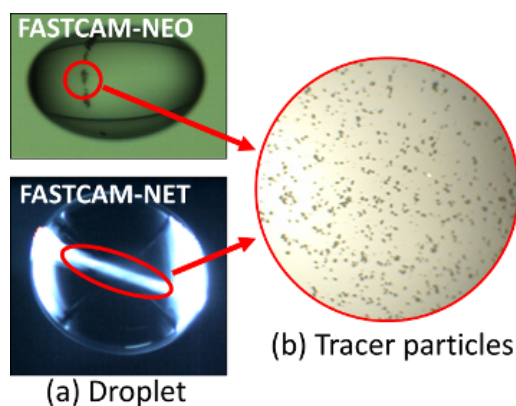


Fig. 7 Tracer particle.

Fig.8 に FASTCAM-NEO にて撮影した画像を 6ms 間隔で表示したものを示す。液滴に混入したトレーサー粒子が画面下から上へと移動していることがわかる。また、撮影した時系列の画像データからトレーサー粒子の周期を計算し回転速度を求めることができるので、液滴の回転方向と回転速度の算出が可能である。

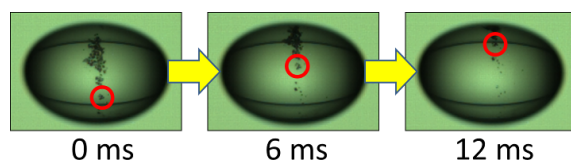


Fig. 8 Rotation in 6mS time interval.

7.2 回転方向と回転速度

実験は、搬送波を 28.135kHz(駆動周波数)とし、信号波を 0.281kHz、2.81kHz、3.7kHz、11.2kHz、16.8kHz、24.135kHz、24.435kHz と変化させ、入力電圧 $11.5V_{p-p}$ 一定のまま、各信号波ごとの液滴の回転方向と回転速度を算

出し比較を行った。

Fig.9 に各信号波と搬送波のみ(振幅変調なし)における液滴浮揚の回転方向を示す。回転方向を比較すると搬送波のみ(振幅変調なし)の回転方向に対して、各信号波の回転方向が逆になっていることがわかる。

Signal Wave	Direction of rotation	Signal Wave	Direction of rotation
0.281 kHz		16.8 kHz	
2.81 kHz		24.135 kHz	
3.7 kHz		24.435 kHz	
11.2 kHz		Carrier only 28.135 kHz	

Fig. 9 Direction of rotation.

Fig.10 に各信号波と搬送波のみ(振幅変調なし)における液滴の回転速度のグラフを示す。赤い実線が搬送波の回転速度(この線を基準点とする)、棒グラフが各信号波における回転速度を示している。これより、信号波を変化させると回転速度も変化することがわかる。

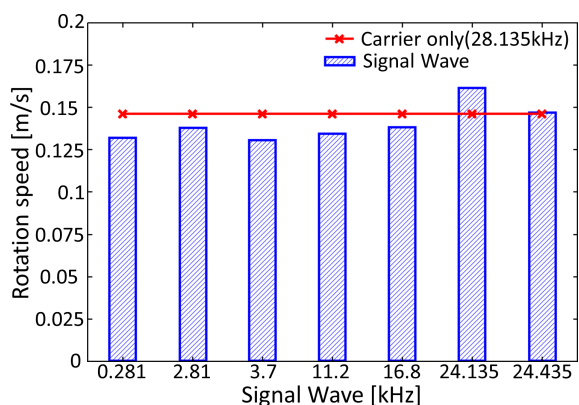


Fig. 10 Rotation speed for signal wave.

8 液滴浮揚の挙動観測

8.1 画像処理

液滴の挙動観測のために、FASTCAM-NEO にて撮影した画像データの画像処理を行った。画像処理には、画像内の円や線を見つけることができる Hough 変換を使用し、液滴の輪郭と中心点の描画・検出を行った。Fig.11 に画像処理の流れを示す。読み込んだ画像をグレースケール(白黒)に変換・2 値化し、液滴の輪郭と中心点を描画し、その位置を記録する。

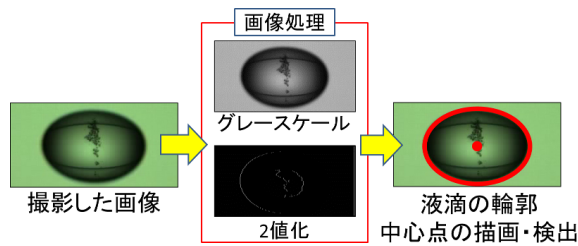


Fig. 11 Hough transformation.

画像処理には OpenCV (Open Source Computer Vision Library)⁽⁴⁾ という画像処理向けのオープンソースプログラムを使用した。

8.2 液滴浮揚の挙動

Fig.11 で得られた中心点の座標をもとに、液滴の時系列ごとの移動距離を求めた。Fig.12 に各信号波ごとの液滴の中心点座標の変化を示す。横軸が左右、縦軸が上下の液滴の移動距離を表す。

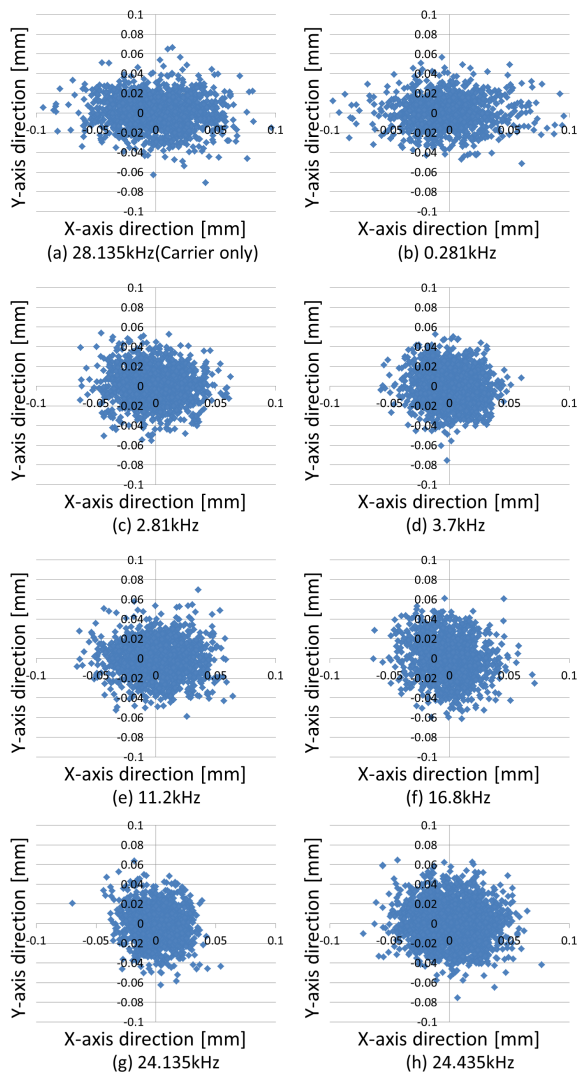


Fig. 12 Movement distance of the droplet.

Fig.12 より、各信号波ごとに液滴の移動距離を比較したところ、信号波の違いによって液滴の移動距離にも差が生じることが分かった。特に (a)28.135kHz(振幅変調なし) と (g)24.135kHz を比較するとその違いがはっきりと判る。

9 結論

ANSYS Mechanical APDL を使用し、音源の設計及び定在波音場のシミュレートを行い実測値との比較を行った。振幅分布及び定在波音場は近似したので振動板の設計及び定在波音場の構築はできていると言える。

次に、各信号波に対する液滴の回転方向及び回転速度について検討したところ、各信号波の回転方向と振幅変調をしていない搬送波の回転方向が逆になっていることがわかる。また、振幅変調なしの回転速度を基準にして、各信号波の回転速度を比較すると、信号波によって回転速度が上昇・減少するという結果が得られた。これは、液滴を加速または減速させる力が働いているということが考えられる。

次に、液滴の挙動について検討したところ、信号波の違いによって液滴の挙動に差が生じることが分かった。Fig.12 の (a)28.135kHz と (g)24.135kHz を比較すると、明らかに (g)24.135kHz のほうが液滴の左右の移動距離が小さくなっているといえる。さらに、先ほどの回転速度と液滴の移動距離を比較すると、回転速度が基準より上昇し、液滴の左右の移動距離が小さくなるという結果が得られた。

振幅変調の効果として、液滴の左右のプレを軽減する効果があるということが考えられるので、液滴浮揚の安定性につながるかどうか詳細に検討する必要がある。

参考文献

- [1] 大塚, 中根, 液滴の超音波浮揚, 日本大学生産工学部研究報告, A, 2005, 第 38 巻第 1 号
- [2] 岡部, 大塚, 強力定在波音場内の液滴浮揚における AM 変調の効果, 音響論 (秋), 2013, 2-4-2, p1197-1198
- [3] 岡部, 大塚, 構造-音響連成解析による段つき円形振動板の強力空中超音波音場の計算, 音響論 (秋), 2012, 2-P-a8, p1385-1386
- [4] G Bradski, A Kaehler, 詳解 OpenCV-コンピュータビジョンライブラリを使った画像処理・認識, オーム社, 2012, p160-164