

超音波浮揚における液滴近傍音響流の PIV 計測

PIV Measurement of Acoustic Streaming around Droplet in an Acoustic Levitator

河原 伸幸, 富田 栄二
 (Nobuyuki KAWAHARA) (Eiji TOMITA)
 岡山大学 岡山大学
 (Okayama Univ.) (Okayama Univ.)

Steady-state acoustic streaming flow patterns have been visualized using PIV in a single-axis ultrasonic levitator (vibrating frequency: 60 kHz) under the ambient temperature and ambient pressure environment. Primary streaming circulation flow and counter-rotating secondary streaming flow were observed around levitated droplet when single liquid droplet about 2mm in diameter existed near pressure node in the ultrasonic standing wave field. Both acoustic streaming have been axisymmetry along horn-reflector common axis. PIV images of scattering from smoke particles have revealed streaming flow patterns which have displayed different characteristics under both axisymmetric and asymmetric conditions (with reflector was displaced horizontally 5mm from common axis). Under the asymmetric condition, the primary streaming flow has been counter-clockwise around the levitated droplet and has combined to secondary streaming vortex. When input currents on BLT of acoustic levitator were same under both axisymmetric and asymmetric conditions, x direction velocity of secondary streaming flow away from vortex center and evaporation rate were enhanced on asymmetric standing wave condition.

Keyword: Acoustic Levitation, Acoustic Streaming, PIV, Flow Field Measurement

1. はじめに

燃料液滴からの熱および物質移動現象は、あらゆる分野に適用されている。噴霧による乾燥/冷却効果、エンジンやガスタービンに見られる燃料噴射、塗料のコーティング技術など様々な分野で、それらの多数の技術的プロセスを支配する基礎現象である。これらの工業的な技術においては、液体を微細な粒子群とする微粒化技術が利用されている。液体を微粒化することにより、液体のもつ表面積を増やし、蒸発、反応、溶解、乾燥を促進することや、液滴の数を増やし、広い空間や表面へ拡散することが可能となる。

液体の微粒化技術に関する研究^(1, 2)は、以前から数多く行われてきた。噴射ノズルから生じる液膜分裂状態の観察、ノズル形状による噴霧特性の違い、噴霧される液滴の挙動等である。特に噴霧挙動に関する研究では、噴霧全体を巨視的にとらえる方法と個々の液滴について微視的にとらえる方法がある。個々の液滴について微視的にとらえるためには、懸垂系を用いて液滴を空間の一点に懸垂し、その液滴の熱・物質移動現象を調べることが多い。しかし、懸垂可能な液滴の径が噴霧液滴径に比べ大きいことや、懸垂系による物理的な影響が大きいことが問題となる⁽¹⁾。

そのため、懸垂系を用いず、音波や電磁場を利用して液滴などを浮揚させる装置の開発が行われている。電磁場を利用した装置⁽³⁾は、電気伝導性の物体を浮揚させるには適しているが、非伝導性の物体や液滴には利用でき

ない。一方、音波を利用した装置では、電気伝導性、非伝導性に関係なく物体を浮揚することができる。この場合、波長が短く、一定方向にのみ強い力を放射する指向性の強い超音波を利用することによって、より安定した浮揚装置を製作することができる。これらの浮揚装置は、液滴の蒸発率計測、重力による対流の生じない環境での新材料の研究およびマニピュレーションなどの分野で利用されている⁽⁴⁻⁷⁾。

超音波を利用した液滴浮揚装置は、空間中に液滴を1個に限らず複数個浮揚させることが可能であるため、液滴列干渉などの研究にも利用可能である。しかし、超音波を利用していることにより、浮揚液滴近傍には音響流と呼ばれる流れが存在し、液滴の蒸発過程に影響を与えている。球形状をした浮揚試料周りには音響流により3次元構造の渦輪が形成される。渦輪により浮揚された液滴近傍の流れ構造が変化し、物質移動や蒸発促進、そして液滴振動などを誘起する⁽⁸⁻¹³⁾。音響流の可視化や数値計算による予測は行われているが、詳細な流れ場解析が行われていないのが現状である。

そこで、本研究では、超音波を利用した液滴浮揚装置において、浮揚液滴近傍に存在する音響流の可視化を行った。ここでは PIV システムを用いて、速度場計測を行った。この際、ホーンと反射板の軸が一致した条件を対称条件とし、ホーンと反射板の軸が一致しない条件を非対称条件として、両条件において音響流構造の差異、液滴蒸発特性への影響を調査した。

2. 実験装置

2.1 超音波浮揚装置

超音波浮揚装置は、超音波による音圧分布を利用した方法である。ここで、音波とは、物体の振動によりそれを取り巻く媒質に振動が伝わって生じる波動のことである。この中で、人間の可聴周波数である 20~20kHz を越えた高い周波数の音波は超音波と呼ばれている^(14, 15)。

空気に振動が伝わると、ある部分では空気が圧縮されて密となり、反対にある部分では引っ張られて粗となる。音波は疎密波である。そして、流体媒質中を伝わる音波を物体で遮ると、その物体を音波の進行方向に押し、放射圧が生じる。放射圧によって物体に働く放射力と重力とが釣り合った空間に物体が浮揚する。また、流体媒質中において進行波と反射波が同一位相で重なり、振幅が時間的に変化しない定在波が一定の空間にあると、振幅の大きな腹や振幅のない節はずっとそのままの状態が存在する。この定在波は決まった音圧の分布を作り、その腹や節は力学的に安定な場所になり、この場所で物体が浮揚する^(14, 15)。

超音波を発振する振動子は、物体を浮揚させるために、音響変換効率がよく、大出力を安定して得られるものである必要がある。本研究では、ボルト締めランジュバ型振動子（以下：BLT）⁽¹⁵⁾を採用した。BLT は、PZT と呼ばれる 2 対の圧電セラミックスと電極板を金属ブロックでサンドイッチ状にはさんだ構造である。部品の固定にボルトを用いているため、常時圧縮応力がかかる構造となり、堅牢かつエネルギー集中用ホーンの取り付けが容易である。超音波浮揚装置（図 1）は 60kHz で振動する BLT に曲率半径 20mm、直径 18mm の浅皿型ホーンを取り付け、対極位置に直径 26mm の反射板を設置している。ホーンの曲率によって半径方向にも音圧分布が生じ、液滴放射力を強めている。ホーンと反射板の距離は反射板に取り付けたマイクロメータで調整する。また水平方向にも移動可能なようにマイクロメータを取り付けた。移動量は 10mm 程度である。BLT への印加電力値（実際には電流値）を制御し、超音波の振幅を調整する。

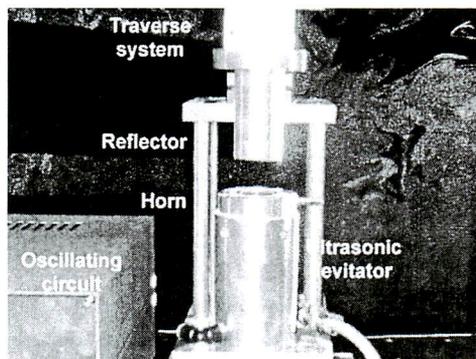


Fig. 1 Developed acoustic levitator

ホーンと反射板の距離調整に伴う進行波と反射波の位相の同調、振動子への印加電流値の制御による音圧の調整という両パラメータによって、浮揚液滴の形状、安定性を制御する。液滴の生成にはマイクロシュリンジを用いる。反射板中心にはφ2mmの穴があいており、中心軸に沿ったシュリンジの移動が容易になる。穴の存在により浮揚力が低下することはない。装置特性として直径約 2mm 程度の単一液滴そして最大約 8 個（直径約 0.1mm）の複数液滴の浮揚が可能である。図 2 の左側は液滴が音圧の全節に浮揚している様子を撮影した画像で、液滴間隔は 60kHz の半波長、約 3mm（雰囲気温度 25°C の場合）である。図 2 の右側に理論的な定在波の音圧分布と液滴浮揚位置のイメージ図を示す。

超音波を利用していることにより、浮揚液滴近傍には音響流と呼ばれる流れが存在し、液滴の蒸発過程に影響を与えている。Trinh らは単一軸超音波定在波を用いて、音響流が存在することを実験的に確かめている⁽⁹⁾。Trinh らの定義した音響流場構造（図 3）に従って、ホーンと反射板によって誘起される音響流を「第 1 音響流」、浮揚試料が音圧の節に浮揚している場合にのみ観察され、浮揚試料のスケールの音響流を「第 2 音響流」、そして浮揚試料と周囲ガスとの境界面に存在し、境界層厚さスケールの音響流を「境界層音響流」と定義している。

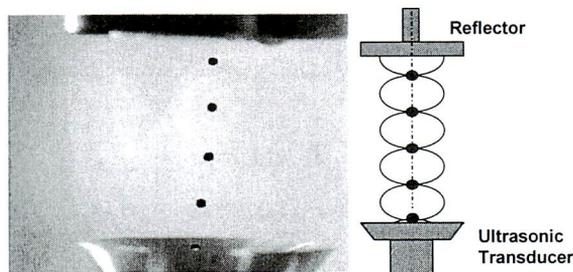


Fig. 2 Levitated droplets in acoustic levitator

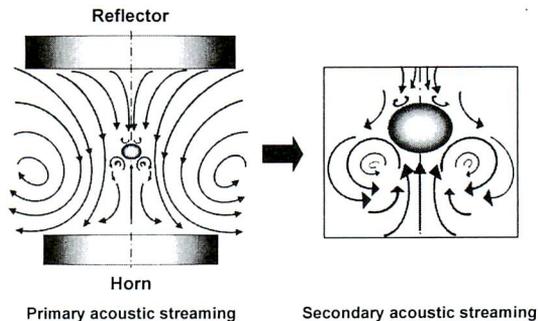


Fig. 3 Acoustic streaming formed in acoustic levitator

前述したように本研究で開発した超音波浮揚装置は、超音波振動子と反射板の距離、超音波振動子に与える電流値により液滴の形状、安定性を制御している。ここでは、超音波振動子に与える印加電流値の違いにより、液滴形状がどのように変化するかを示す。図4に印加電流値Iを変化した場合における浮揚しているエタノール液滴の形状変化を示す。エタノール液滴は5 μ lをマイクロシリンジに注入し、浮揚させている。印加電流値が低い、つまり超音波振動子が形成する音圧場の振幅があまり大きくない場合、液滴は球形に近い形状を示している。この場合、液滴を浮揚させる力も弱いため、位置の安定性は小さい。印加電流値を上げる、つまり超音波振動子が形成する音圧場の振幅を大きくするに従い、液滴は左右方向に扁平していることが分かる。これは、超音波振動子が形成する音圧場の節と腹に生じる放射圧の差が大きくなり、液滴に上下方向の力が加わるためである。また、浮揚している位置は、印加電流値を大きくするに従い、若干上昇している。印加電流値を大きくするに従い、液滴を浮揚させる力も大きくなり、液滴の浮揚位置が音圧場の形成する節に近づいている。

印加電流値の強弱による液滴の扁平率への影響を詳細にみるために、超音波振動子に与える印加電流値とアスペクト比の関係を図5に示す。ここで、アスペクト比とは、液滴の短辺に対する長辺の比である。アスペクト比が1.0の場合、液滴は完全球形を示す。ここでは、水液滴およびエタノール液滴について示している。印加電流値が大きい場合、すなわち定在波の振幅が大きくなるにつれて、液滴の扁平率は大きくなっている。これは、定在波の振幅が大きくなることは、液滴に与える放射圧が大きくなることであり、これより液滴は上下方向に力を受け、扁平すると考えられる。また、液滴の表面張力の違いにより、印加電流値が液滴の扁平率に与える影響を把握することができる。エタノールの方が表面張力が小さいため、印加電流値が液滴の扁平率に与える影響が大きくなる。

2. 2 PIV システム

音響流の可視化には Dantec 社製 PIV システム (FlowMap) と、光源として SpectraPhysics 社製 Nd : YAG レーザ (Quanta-Ray PIV-400-30 : 波長 532nm) を用いて行

った。装置構成を図 6 に示す。取得画像の解析には Dantec 社製の画像解析ソフト (FlowManager) を用いて行った。散乱粒子として線香の煙を用いた。予備実験で各種散乱粒子を試し、線香の煙は平均粒径が 1 μ m 以下と非常に細かく音響流計測に適していることがわかった。散乱粒子の散逸を防ぐため、浮揚装置にはアクリル製の囲いを設置した。レーザービームをレーザーガイドアームで計測領域まで導き、シリンドリカルレンズを内蔵した光学系により厚さ約 1.0mm のレーザーシートを形成した。撮影にはダブルフレーム CCD カメラ (HiSense) を用いた。レーザーパルス間隔と同期した 2 枚の画像を取得し、相互相関 PIV 解析を行う。取得画像サイズは縦横 1024pixel \times 1280pixel である。画像は 8 ビットのグレースケールとしている。F 値 5.6、焦点距離 55mm の Nikkor Lens (Nikon) を使用しており、液滴近傍の撮影にはテレコンバータ (Nikon) を使用することで約 2.8 倍に拡大した画像を得ることができる。

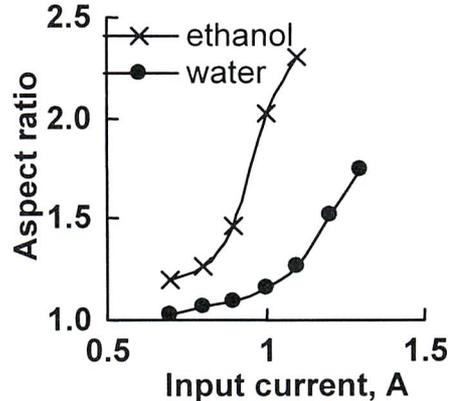


Fig. 5 Effect of input current on aspect ratio of a levitated droplet

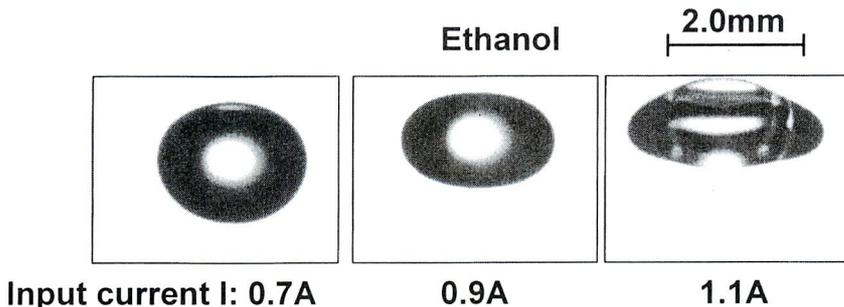


Fig. 4 Effect of input current of BLT on the shape of a levitated droplet

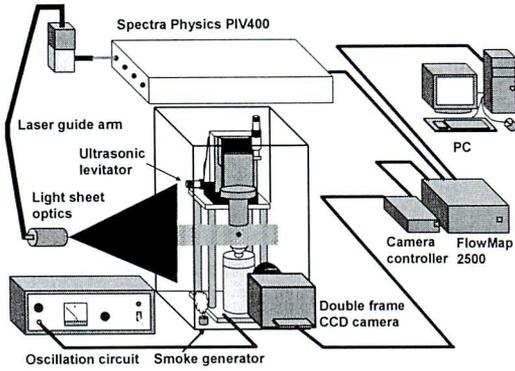


Fig. 6 PIV measurement system

2. 3 実験条件

本実験の実験条件を示す。雰囲気条件は室温・大気圧下とする。浮揚試料として水を使用した。Nd:YAG レーザのレーザパルス間隔は 250 μ sec とする。検査領域およびパルス間隔は予備実験において最適化を行った。ホーンと反射板の水平方向変位を X(mm), ホーンと反射板距離を L(mm) とした。超音波定在波の対称条件, X=0mm において液滴近傍の音響流構造の速度解析を行う。中心軸から反射板を X 軸の右方向に 5mm ずらした X=5mm の条件において液滴周りの音響流構造の速度および渦度解析を行う。ここで超音波浮揚装置は L=17mm, 印加電流値約 0.5A の設定が最適浮揚条件となっている。単一液滴の浮揚位置は反射板から 3 番目の音圧の節とする。

3. 結果と考察

まずホーンと反射板の中心軸が一致している場合 (X=0mm), L=20mm, 印加電流値 0.6A の条件で水液滴列を浮揚させた場合に得られた可視化画像を図 7 に示す。ここでは、6 個の液滴列を浮揚させている。図中白色楕円球が液滴であり、液滴列を表現するために液滴径の小さいものを浮揚させている。画像中白線は CCD カメラにおいて画素がやけているため撮影できない部分である。画像から中心軸をほぼ対称に回転渦が存在することが確認できる。ホーンと反射板により誘起される第 1 音響流であり、ホーンから反射板にいたる大きな渦となっている。また、各液滴下方に左右小さい渦が見られる。これらの渦は Trinh らの定義⁽⁹⁾による第 2 音響流と考えられ、すべての節下方に位置していることが分かる。Trinh らは多くの液滴列を浮揚させていない状態での評価であったが、複数列の液滴を浮揚させた場合でも全ての節で第 2 音響流が見られている。このように Trinh が定義している「第 1 音響流」と「第 2 音響流」が本実験装置においても確認することができた。

次に X=0mm の場合において、ホーンと反射板の間の距離 L=17mm, BLT への印加電流値 0.5A の条件で単一液滴を浮揚した場合に得られた可視化画像およびベクトル図を図 8 に示す。この場合にもホーンと反射板間での第 1 音響流および液滴下方に存在する第 2 音響流が見られる。ここで、液滴下方に存在する第 2 音響流に着目するため、図中白枠で囲った部分を拡大して撮影を行った。この時に得られた画像とベクトル図を図 9 に示す。液滴下部の散乱粒子が少ないところに渦が見られる。図 8 では少し不鮮明である第 2 音響流が拡大した図 9 では明確に見ることが出来る。その大きさは長径が約 2mm で、やや楕円形であり、ドーナツ形状の渦輪が見られる。速度ベクトル図より液滴近傍の渦の速度は、約 0.1m/s である。これらの渦の流れ方向は Trinh らの定義⁽⁹⁾による第 2 音響流によるものと同様に、第 1 音響流と逆向きの方向を示し、液滴左下の渦では反時計回りをしている。このように PIV システムを用いることにより、今までは得られなかった液滴近傍の音響流の速度測定を行うことができた。特に節位置と音響流には関連があり、理論的解析により予測された渦構造⁽¹¹⁾と同様のものを可視化することが可能になった。

次にホーンと反射板の中心軸をずらした場合(つまり X=5mm)において、ホーンと反射板の間の距離 L=17mm, BLT への印加電流値 0.5A の条件で得られたホーンと反射板間の可視化画像およびベクトル図を図 10 に示す。液滴周りを拡大撮影した可視化画像および PIV 装置によって得られたベクトル線図を図 11 に示す。ホーンと反射板の中心軸が一致していた時に見られている第 1 音響流は、液滴左側に見られていた渦が見えておらず、右側の渦が大きくなっており、液滴左側にまで見られている。この第 1 音響流は反時計回りの回転を示している。また、液滴下方の第 2 音響流も存在しているが、その形状がホーンと反射板の中心軸が一致していた時と異なっている。

ベクトル線図と可視化画像から、X=0mm の場合では軸対称の第 2 音響流構造を形成するが、X=5mm の条件では液滴の右下側に局在していた渦が液滴の右上側に

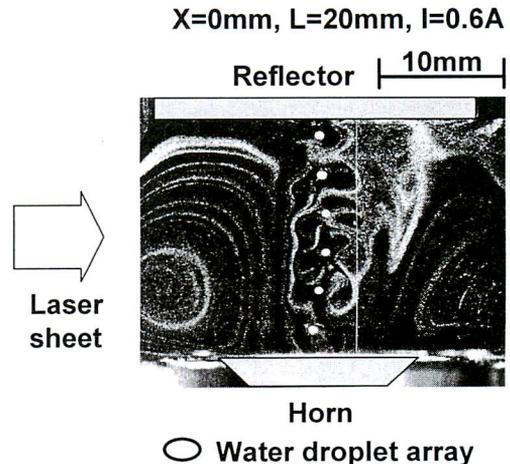


Fig. 7 Acoustic streaming formed in acoustic levitator

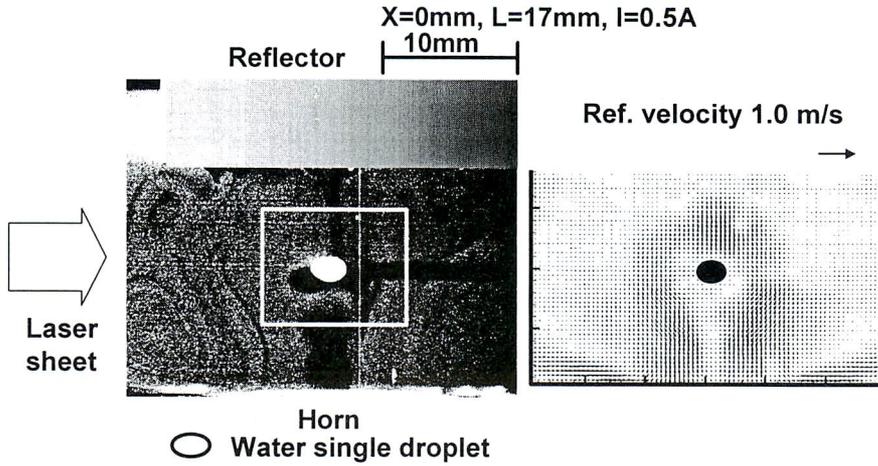


Fig. 8 Acoustic streaming formed in acoustic levitator under axisymmetric condition of horn and reflector

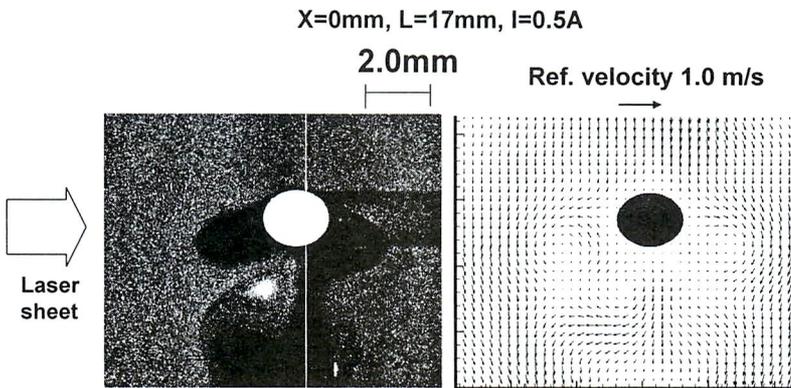


Fig. 9 Secondary acoustic streaming around a levitated droplet under axisymmetric condition of horn and reflector

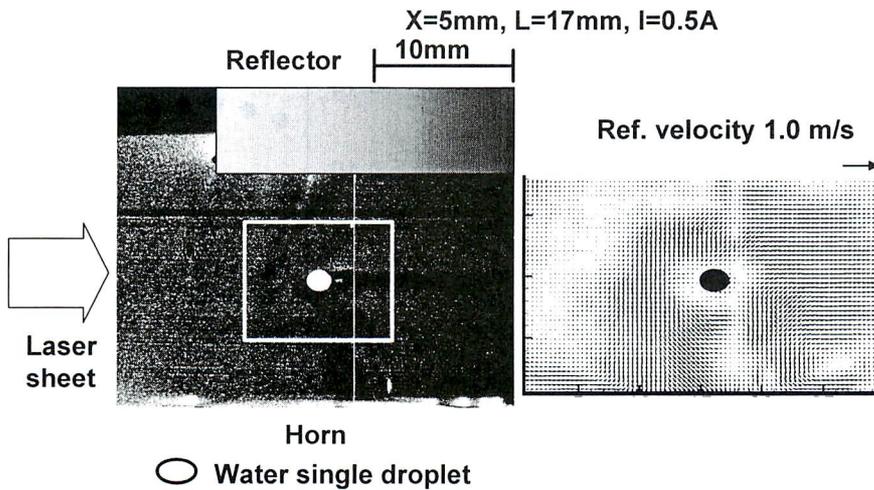


Fig. 10 Acoustic streaming around a levitated droplet under asymmetric condition of horn and reflector

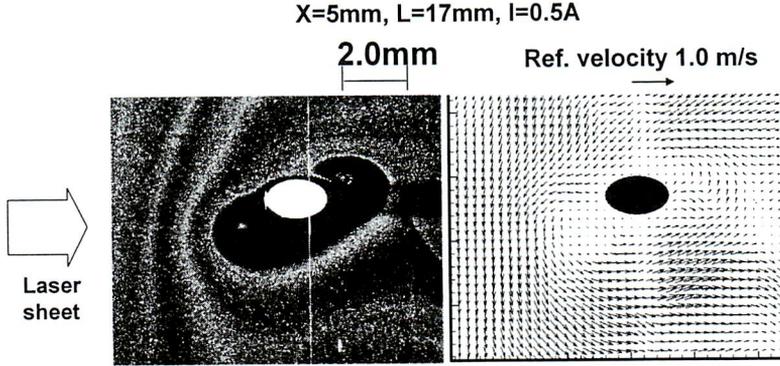


Fig. 11 Secondary acoustic streaming around a levitated droplet under asymmetric condition of horn and reflector

移動した。また、ベクトル線図から、 $X=0\text{mm}$ の場合に比べ、渦の回転速度が若干遅くなっていることが分かる。液滴左下の渦および液滴右上方の渦はともに反時計回りをしている。これらの渦は液滴を取り囲むように形成していることがわかる。反射板を水平移動することで超音波定在波が非対称となり、液滴近傍の音響流構造が変化することがわかった。液滴近傍の音響流が変化した原因としては、反射板の移動による反射面積の縮小とホーンの曲率であると考えられる。ホーン表面の直径が 18mm 、反射板の直径が 26mm であるから $X=5\text{mm}$ の条件ではホーン表面積と反射面積の重複率は 96.4% となる。つまり反射板の移動によって 3.6% の反射しない領域が存在するため、第 1 音響流の左側の渦が著しく弱まり、そしてホーンの曲率により浮揚液滴を回転中心とした渦構造になり、第 2 音響流に影響を与えたと考えられる。

ここで、液滴周りの第 2 音響流に対して、ホーンと反射板の位置による影響を調べる。図 12 に示すように、液滴左下に位置する渦に対して、渦度およびベクトル線図により比較を行った。渦度に関しては、図 12 のように時計方向の回転を白色、反時計方向の回転を黒色とし、白から黒への 15 段階表示の渦度解析を行い、渦度の最大値を渦中心と定義した。そして、渦中心から水平方向の音響流れ速度を比較した結果を図 13 に示す。比較する領域は渦中心から負の方向に 3mm とした。 $X=0\text{mm}$ に比べ、 $X=5\text{mm}$ ずれる条件の方が渦の回転速度は速いことが分かる。また、渦中心より離れるに伴い速度が大きくなる。 $X=5\text{mm}$ の場合、第 1 音響流および第 2 音響流の渦が合成され、渦の回転力が強まっていると考えられる。

最後に、超音波定在波が非対称性の場合に音響流が液滴の蒸発に与える影響を調査した。浮揚試料としてメタノールを用いた。メタノールは水に比べ蒸発速度が速いため採用した。形状の変化は、時間の関数として、CCD カメラ（解像度 768×494 ）により計測する。この際、液滴に対し CCD カメラとの反対側に光源を設置し、

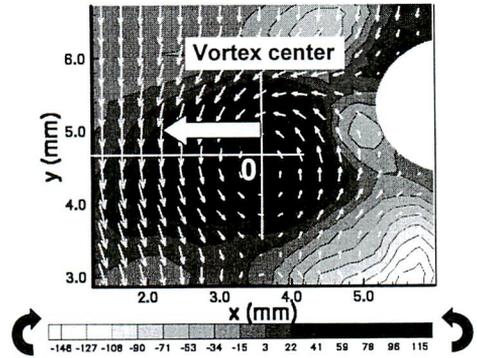


Fig. 12 Secondary acoustic streaming of a levitated droplet

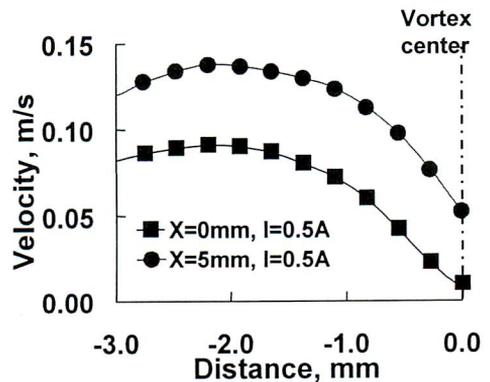


Fig. 13 Effect of horn-reflector position on velocity of secondary acoustic streaming

このバックライトの明かりにより液滴の外殻を計測する。得られる写真は図4に示すようになる。実験結果を図14に示す。縦軸は液滴相当直径 D (mm) の2乗、横軸は時間 t (sec)である。画像取得間隔は30秒で計測した。複数個の液滴を計測し平均値を示している。両軸とも初期直径 D_0 (mm)の影響を取り除くため D_0 (mm)の2乗で除した値を用いている。これより、ホーンと反射板の中心軸が一致する場合に比べ、 $X=5$ mm ずれた場合の方が蒸発が促進していることが分かる。これは、図13に示すように、液滴周りの第2音響流の渦速度が速くなることに起因している。このように、超音波を用いた液滴浮揚装置の場合、液滴周りの第2音響流により液滴の蒸発速度が異なることがわかる。

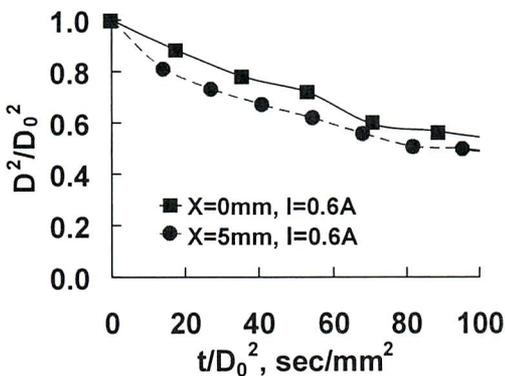


Fig. 14 Effect of horn-reflector position on evaporation rate of a levitated droplet

本研究で得られた結果をまとめると図15のような音響流構造となった。左図のようにホーンと反射板の中心軸が一致する場合では、ホーンと反射板との間に大きな第1音響流の渦が存在し、液滴近傍にのみ第2音響流の渦が確認できた。第2音響流は第1音響流の渦回転方向とは逆回転の渦となる。どちらの音響流もホーンと反射板の中心軸に対してほぼ左右対称の構造を示す。これに対し、図15の右図のようにホーンと反射板の中心軸がずれている条件では、超音波定在波が左右非対称となった。非対称定在波とホーンの物理的形状との相乗効果で浮揚液滴周りに沿う反時計回りの第1音響流に形状が変化している。この場合、第1音響流と液滴下側の第2音響流が重なり、図11で示された形状の渦構造に変化し、同じ印加電流を加えた場合、第2音響流の渦速度が速くなり、液滴の蒸発速度が増加している。以上のように、超音波を利用した液滴浮揚装置においては、液滴周りに音響流が存在することにより、液滴の蒸発速度に影響を与える。さらに、ホーンと反射板との位置関係を正しく設置しなければ、音響流構造に影響を受け、それにともない液滴の蒸発速度も変化する。

4. まとめ

本研究により開発した超音波浮揚装置を用いて、浮揚した液滴近傍の音響流場構造の可視化計測を行った。また、PIV計測を行うことにより、流れ場計測を行った。超音波定在波が対称、非対称である場合の音響流構造に関して得られた知見を以下に示す。

- (1) 超音波定在波が対称および非対称な場合のどちらの条件においてもホーンと反射板間に存在する第1音響流および液滴周りの第2音響流が形成されることがわかった。

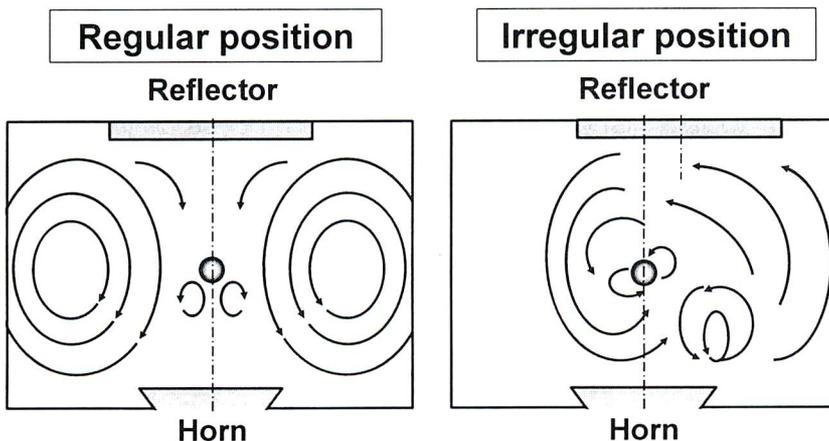


Fig. 15 Acoustic streaming formed in acoustic levitator

- (2) 例えば、反射板に水平方向に正の変位を与え、超音波定在波を非対称とした条件では、第1音響流のバランスが崩れ、反射板から負の側にある渦が大きくなり、浮揚液滴にそって反時計回りの音響流となることが確認できた。
- (3) 非対称定在波の条件では液滴を中心とした合成音響流が発生し、流れが液滴表面に沿うため対称な定在波の条件と比べて第2音響流の渦速度が大きくなり、液滴の蒸発が若干促進された。

謝 辞

本研究は、当時本学に在籍していた江種 元君、藤原成啓君の協力によるものである。ここに謝意を表す。

文 献

- (1) Law, C. K., Recent Advances in Droplet Vaporization and Combustion, Prog. Energy Combust. Sci, 8, (1982), 171-201.
- (2) Sirignano, W. A., Fuel Droplet Vaporization and Spray Combustion Theory, Prog. Energy Combust. Sci, 9, (1983), 291-322.
- (3) Bar-Ziv, E., and Sarofim, A., The Electrodynamic Chamber: A Tool for Studying High Temperature Kinetics Involving Liquid and Solid Particles, Prog. Energy Combust. Sci, 17, (1991), 1-65.
- (4) Trinh, E.H., Zwern, A., and Wang, T.G., An Experimental Study of Small-Amplitude Drop Oscillations in Immiscible Liquid Systems, J. Fluid mech., 115, (1982), 453-474.
- (5) 羽田野 他: 超音波浮揚とその宇宙材料実験への応用の基礎研究, 日本音響学会誌, 47-1, (1991), 40-47.
- (6) Yarin, A.L., Pfaffenlehner, and Tropea, C., On The Acoustic Levitation of Droplets, J. Fluid Mech., 356, (1998), 65-91.
- (7) Yarin, A.L., Brenn, G., Kastner, O., Rensink, D., and Tropea, C., Evaporation of Acoustically Levitated Droplets, J. Fluid Mech., 399, (1999), 151-204.
- (8) Burdukov, P., and Nakoryakov, V.E., On mass transfer in an acoustic field, J. Appl. Mech. and Tech. Phys. 6-2, (1965), 51-55.
- (9) Trinh, E. H., and Robey, J. L., Experimental Study of Streaming Flows Associated with Ultrasonic Levitators, Phys. Fluids, 6-11, (1994), 567-3579.
- (10) Yarin, A.L., et al., Flowfield Characteristics of an Aerodynamic Acoustic Levitator, Phys. Fluids, 9-11, (1997), 3300-3314.

- (11) Gopinath, A., and Mills, A. F., Convective Heat Transfer from a Sphere Due to Acoustic Streaming, Trans. of the ASME, 115, (1993), 332-341.
- (12) Kawahara, N., Yarin, A. L., Brenn, G., Kastner, O., Durst, F., Effect of Acoustic Streaming on the Mass Transfer from a Sublimating Sphere, Physics of Fluids, 12-4, (2000), 912-923.
- (13) Rednikov, A., and Riley, N., A Simulation of Streaming Flows Associated with Acoustic Levitators, Physics of Fluids, 14, 4, (2002), 1502-1510.
- (14) 一宮, 機械系の音響工学, コロナ社, (1992).
- (15) 谷腰, 超音波とその使い方 (超音波センサ・超音波モータ), 日刊工業新聞社, (1998).



河原 伸幸
 岡山大学大学院自然科学研究科
 産業創成工学専攻 助教授
 〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1
 電話: 086-251-8235
 FAX: 086-251-8266
 Mail:kawahara@mech.okayama-u.ac.jp

略歴: 1997年 神戸大学大学院自然科学研究科生産科学専攻博士後期課程修了, 博士(工学), 主として熱流体現象のレーザ計測, 熱機関, 液体燃料の微粒化に関する研究に従事。



富田 栄二
 岡山大学大学院自然科学研究科
 産業創成工学専攻 教授
 〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1
 電話: 086-251-8049
 FAX: 086-251-8266
 Mail:tomita@mech.okayama-u.ac.jp

略歴: 1981年 京都大学大学院機械工学専攻修士課程修了, 工学博士, 主として熱機関, 燃焼のレーザ計測, モデリングに関する研究に従事。