液中にある粒子挙動に及ぼす円形平面音源超音波の影響* (マイクロバブルとアクリル粒子の分布と速度)

太田 淳一^{*1}, 堂山 直紀^{*2}, 若林 大翔^{*3}, 鈴木 宏彰^{*3}

Effects of Ultrasonic Waves Produced by a Disk Transducer on Behavior of Microbubbles and Solid Particles in a Liquid (Distributions and Velocities of Microbubbles and Acrylic Particles)

Junichi OHTA ^{*1}, Naoki DOYAMA, Daisho WAKABAYASHI and Hiroaki SUZUKI

^{*1} Course of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, University of Fukui
3-9-1, Bunkyo, Fukui-shi, 910-8507, Japan

The objective of the present study is to clarify macroscopic behavior of microbubble (MB) and acrylic particles in tap water under ultrasonic waves. Ultrasonic waves (in a traveling-wave field) at frequencies of 485 kHz and 3.493 MHz were irradiated on a microbubble-water mixture or an acrylic particles-water mixture in a vertical closed cylinder from the bottom with a disk transducer and ultrasonic waves at a frequencies of 96.3 kHz from the side wall in a rectangular vessel. The following results were obtained; (a) Macroscopic behavior of MB was affected by a directivity function while an effect of the function on behavior of acrylic particles was small. (b) Most MB were transported along radial lines from the center of the disk transducer at the frequency of 3.493 MHz, however, a few MB were transported in different directions. (c) Magnitudes of MB velocity were greater than those of acrylic particles. (e) The frequency became higher, MB was transported in the region of smaller deviation angle, i.e., near the irradiation axis.

Key Words : Micro-Bubble, Ultrasound, Multi-Phase Flow, Gas-Liquid Two-Phase Flow, Acoustic Streaming

1. 緒 言

近年、マイクロバブル (以下、MB と称する) を利用した技術が、洗浄、固液分離、生物の活性化等で実用化されており、マイクロバブルの発生や応用例が紹介されている⁽¹⁾⁽²⁾。また、MB に関する基礎研究が盛んになり⁽³⁾、さらにナノバブルの研究も活発にすすめられている。基礎研究の中には粒子の集合や移動に関するものがある。例えば、単一微粒子の位置制御の研究として、光の放射圧を用いてミクロンからナノメートルサイズの粒子を捕捉し位置を制御する光ピンセットの研究⁽⁴⁾⁽⁵⁾が多数存在する。また、レーザービームで作った気泡周りの温度勾配によるマランゴニ効果を利用した単一気泡の位置制御の研究もある⁽⁶⁾。本研究では、単一粒子ではなく微粒子群の位置のコントロール方法として、超音波照射による気泡や粒子群の移動を研究対象とする。

超音波を流体中の粒子に照射するとき働く力として、剛体粒子に働く音響放射力は King⁽⁷⁾により、界面が変形する粒子に働く放射力は Yosioka and Kawasima⁽⁸⁾によって、液の粘性を考慮した粒子に働く放射力は Doinikov⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾によって定式化されている。また、気泡に働く音響放射力が文献⁽¹¹⁾に詳細に解説されている。超音波によって、直接、気泡に働く力は第 1 Bjerknes 力⁽¹¹⁾(Primary Bjerknes force) と呼ばれ、超音波照射時に近接する気泡との間に引力や反発力が働くとき、それらの力は第 2 Bjerknes 力 (Secondary Bjerknes force) と呼ばれ、二気泡間に働く力が調べられている⁽¹²⁾。

* 原稿受付 2013 年 5 月 20 日

^{*1} 正員, 福井大学大学院工学研究科機械工学専攻 (〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1)

^{*2} 元 福井大学大学院工学研究科機械工学専攻

^{*3} 福井大学大学院工学研究科機械工学専攻

E-mail: ohta@u-fukui.ac.jp

超音波定在波のもとで固体粒子や気泡が音圧の節あるいは腹に集まるとされ⁽⁸⁾⁽¹¹⁾, この原理を利用した粒子の集合と分離の研究が多数なされている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾. また, 超音波定在波の条件で固体粒子が筋状に集合することが知られていたが, 著者の一人の研究から, 固液混相媒体に定在波のできるとき, 円形平面音源 (円形平面振動子) では, 様々な状態で固体微粒子の集合することが明らかにされた⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾. さらに, 異なる周波数の超音波定在波を併用して固体微粒子の連続的な分級に利用しようとする試みがある⁽¹⁹⁾. 超音波照射時の MB 挙動について, 定在波では MB が複数集まって大きくなるが, 気泡周りの電位のために集まった MB は合体しない. しかし, 表面張力を調整することで電位がコントロールでき MB が合体することが示された⁽²⁰⁾.

超音波によって発生した単相媒体中の音響流は, そのスケールによって, 境界層内部型 (Schlichting Type), 境界層外部型 (Rayleigh Type)⁽²¹⁾および直進型 (Eckart Type) の3種類に分類できる⁽²²⁾. 直進型では, 例えば, 超音波進行波によって生じる円筒形内部での直線的な流れの理論式が導かれ⁽²³⁾, 閉空間内の速度分布の解が示されている⁽²⁴⁾. さらに, 集束音響ビームによってできる音響流の駆動力の式が導かれた⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾. 超音波を水平に照射した際にできる固液混相媒体中の音響流 (直進型) の速度について, 微粒子の初期濃度が高いほど速くなること, 照射時間が長くなると濃度減少のために低くなることを著者の一人が, 実験より明らかにした⁽²⁷⁾. MB の非接触の凝集, 分離, 強制的な輸送と除去に超音波進行波の利用が考えられ, 進行波による MB を含む混相媒体の MB のマクロな挙動や MB の分布の変化などの基礎研究が必要となってくる⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾. しかし, 定在波中のミクロな挙動は調べられているが, 進行波中の MB のマクロな挙動や流れについて知見がないようである.

そこで, 本研究では円形平面音源によって発生する超音波を MB を含む上水 (気液二相媒体) とアクリル粒子を含む上水 (固液二相媒体) に照射する場合を比較して, マクロな視点で MB の速度や分布の特徴を明らかにする.

2. 記 号

D	指向性関数	
d	粒子直径	μm
f	超音波周波数	kHz あるいは MHz
R	半径方向座標	m
Z	超音波照射軸方向座標	m
z	音響インピーダンス	Ns/m^3
α	超音波照射軸に対する偏角 (Fig. 3 参照)	
θ	粒子速度ベクトルの角度 (Fig. 9 参照)	
θ'	粒子位置ベクトルの角度 (Fig. 9 参照)	

3. 実験装置と方法

3.1 実験装置

3.1.1 実験装置 (鉛直上向き照射)

鉛直上向きの超音波照射に用いた実験装置の系統図を図 1 に示す. 実験装置は, 実験容器, 信号発生器, アンプ, マッチングボックス, 超音波振動子, 光学系からなっている. 実験を行う容器は透明アクリル製で, 上部が開放された矩形容器 (横幅 $\times$ 奥行き $\times$ 高さが $320\text{ mm} \times 320\text{ mm} \times 300\text{ mm}$) の内部に円筒容器 (高さ 300 mm , 内直径 210 mm) が垂直に設置されている. 上水が矩形容器と円筒容器の両方に入れてある. 円筒容器底面には, 周波数 $f=485\text{ kHz}$ (本多電子製, 円直径 50 mm) あるいは $f=3.493\text{ MHz}$ (本多電子製, 円直径 26 mm) の円形平面型の超音波振動子を取り付けることができる. 振動子に対向させて, ゴム製の楔を接着した吸音板が円筒容器の上部に取り付けられている. 吸音板は可動式で, 振動子の振動面から吸音板までの距離 Z_r を自由に調整できる. 座標系は, 原点を振動子の中心とし, 振動子面の法線方向を Z に, その半径方向を R にとる. 実験は Z_r を 220 mm とし, 液にはフィルターを通した上水 (音響インピーダンス $z=1.5 \times 10^6\text{ Ns/m}^3$, 溶存酸素濃度約 8 mg/L) を用いた. 超音波は信号発生器の信号をアンプで増幅し, マッチングボックスをへて超音波振動子から照射した. なお, 吸音板は前報⁽²⁷⁾の水平照射と同じタイプのものを用いた. 上水が脱気されていないことを確認するために, 実験

前後に溶存酸素濃度を測定した．超音波の照射時間が短く，液は熱容量が大きいため実験前後の温度変化が無視できた．また，溶存酸素濃度の変化も無視できた．なお，測定された溶存酸素濃度は水温に対応する飽和に近い値であった．

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus for vertical irradiation

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus for horizontal irradiation

3.1.2 実験装置 (水平方向照射)

水平方向の超音波照射に用いた矩形容器の実験装置と実験の系統図を図2に示す．実験容器は幅×高さ×奥行きが $240\text{ mm} \times 290\text{ mm} \times 313\text{ mm}$ の上部の開放された矩形の形状で，透明アクリル製である．側壁には，円形平面音源である超音波振動子（本多電子製，直径 45 mm ，周波数 $f = 96.3\text{ kHz}$ ）が取り付けられており，それに対向させてゴム製の楔でできた吸音板（ $290\text{ mm} \times 230\text{ mm}$ ）が取り付けられている．吸音板は可動式で，振動子の振動面から吸音板までの距離 $Z_r = 220\text{ mm}$ とした．液は上水を用い，底面から高さ 240 mm まで入れている．座標の原点は振動子の中心とし，容器の側面から 120 mm ，底面から 120 mm に位置する．座標系については振動子面の法線方向を Z に，鉛直方向を Y にとる．

3.1.3 粒子

音波が媒質 1 から媒質 2 に入射する場合、媒質境界での音波のエネルギー反射率 γ は式 (1) となることが知られている⁽³¹⁾。本研究では、超音波照射による MB 挙動と比較するために、水中の反射率が比較的低く水に近い音響特性を有するアクリル粒子（直径 $50\mu\text{m}$ 、密度 $1.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、音響インピーダンス $3.3 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$ ）を選定した。空気と水の音響インピーダンスは、各々 $4.0 \times 10^2 \text{ Ns/m}^3$ 、 $1.5 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$ である。そのアクリル粒子は水中の音の反射率が、空気の気泡のそれと比べて 14% 以下である。

$$\gamma = \left(\frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \right)^2 \quad (1)$$

3.2 実験方法

3.2.1 マイクロバブル発生

鉛直方向の超音波照射実験では、MB が高速旋回方式で図 1 とは別のタンク内で作られ、直径が大きい MB はそのタンク内で上部の大気に抜ける。残った MB を図 1 の鉛直照射用の円筒容器に移した。図 1 の矩形容器と内側の円筒容器は水位が調整できるようになっているので、水位を調整して吸音板に空気が残らにようにした。その後、超音波照射実験を行った。一方、水平照射実験では図 2 の実験容器内に高速旋回方式の MB 発生装置を入れ、容器内で MB を発生させて、直径の大きな MB が抜け、容器内で発生した流れがおさまるのを待ってから超音波を照射した。予備実験として、図 2 のタンク内の MB を高性能ズームレンズ（KEYENCE 製 VH-Z-20R）で撮影し、測定された直径は約 $30 \sim 50\mu\text{m}$ であった。

3.2.2 撮影と測定方法

鉛直方向の超音波照射では、照明に連続励起アルゴンイオンレーザー（4W）を用いた。レーザー光を超音波照射の中心軸を通るようにし、シリンダカルレンズでシート状に調整したレーザーライトシートを作った。レーザーライトシートで照明された領域内の MB や粒子をビデオカメラで撮影した。予備実験では円筒容器内の基準位置に置かれたスケールを撮影し、実験画像とスケール画像を比較し、基準点に対する相対位置を算出することで粒子座標を得た。一方、水平方向の超音波照射では、定性的な観察のために図 2 において照射軸を通る Y-Z 平面の二次元照明になるようにスリットを通したメタルハライドランプの光を使用した。この照明はレーザー光ではないので光が広がっている。本研究では撮影した動画をパソコンに取り込み、連続する 0.033 s 間隔の静止画像にして、粒子の変位から速度ベクトルを測定した。

4. 円形平面音源の指向性関数

平面振動子の寸法が無限ではない場合、音圧は振動子から離れた振動子と平行な平面内において一様でなく、振動子形状に依存する空間分布が存在する。これに関して、図 3 に示すように音源中心軸から角度 α （偏角）の方向のある点（図中の $\times$ 印）と、超音波照射軸（中心軸）上の同じ距離の点（図中の $\times$ 印）の音圧振幅の比が指向性関数 D として定義されている⁽³⁰⁾⁽³¹⁾。図 3 に示す境界条件の円形ピストン音源（円形平面音源）について、指向性関数 D は周波数 f 、波長 λ 、波数 $k = 2\pi/\lambda$ 、振動子半径 a 、 J_1 を第 1 種ベッセル関数として式 (2) で表わされることが知られている⁽³⁰⁾⁽³¹⁾。

$$D = \left| \frac{2J_1(ka \sin \alpha)}{ka \sin \alpha} \right| \quad (2)$$

式 (2) から、円形平面音源の指向性関数 D を超音波周波数 $f = 96.3 \text{ kHz}$ ($d = 45 \text{ mm}$)、 $f = 485 \text{ kHz}$ ($d = 50 \text{ mm}$) 及び $f = 3.493 \text{ MHz}$ ($d = 26 \text{ mm}$) について本稿で計算した結果を図 4(a) に示す。図 4(a) の $-20^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ を拡大して図 4(b) に示す。図 4 から、 D の分布は周波数により異なり、いずれの周波数でも複数の偏角 α で極大値をとることがわかる。このため、 D が極大値をとる偏角では音圧の比が大きくなり、音圧に空間分布が存在する。ま

Fig. 3 Angle between a point and the irradiation axis

Fig. 4 Directivity function for disk transducers

た、 D が極小値をとり、そこで $D = 0$ になる偏角が複数存在することもわかる。また、図 4(a)(b) より、 D は周波数が高いほど半減角が小さくなって鋭いピークを持つ。

5. 実験結果および考察

5.1 円形平面音源の指向性関数とマイクロバブルの瞬時の分布

5.1.1 周波数 96.3kHz

周波数が 96.3 kHz と低い場合、指向性関数 D が図 4 から偏角 α の広い範囲で高い値を示すので、図 2 の比較的大きな矩形装置（水平照射）を使用した。矩形実験装置で超音波 ($f = 96.3$ kHz, 出力 $N = 2$ W) を MB を含む上水に水平方向に照射し、超音波の照射前、照射後 0.15 s, 0.3 s, 0.45 s に撮影した矩形容器内全体の MB 分布の写真（図中、白く見える点が MB）を図 5(a), (b), (c), (d) にそれぞれ示す。円形平面振動子の中心は図中の 3 本の赤線の交点である。振動子の直径は図 5 の縦方向の約 1/3 の長さに相当する。連続する 4 枚の写真から、MB 濃度の高い領域と希薄な領域の境界が赤線の主に 3 方向に広がって MB は大きな偏角の範囲内を移動している。図 5(c), (d) から、その広がる方向は照射軸に対して、 $\alpha = 0^\circ$, $\alpha \approx \pm 34^\circ$ であることがわかる。また、図 5(b), (c), (d) から、濃度境界の MB の移動速度が $\alpha = 0^\circ$ と $\alpha \approx \pm 34^\circ$ では高く、 $\alpha = 0^\circ$ から $\pm 34^\circ$ の中間にはほとんど移動していない MB の存在していることがわかる。図 4(a) から、 $f = 96.3$ kHz では指向性関数 D が $\alpha \approx 0^\circ$ と $\pm 34^\circ$ で極大値をとるので、これらの方向と MB の移動速度大の方向がほぼ一致している。同じ装置を用いレーザー光で可視化した動画から、MB 挙動を観察したところ、振動子から水平方向に離れた $Z = 140$ mm から 180 mm（図 5(a) 内に Z 方向の距離を示す）の場所で MB が鉛直上向きに移動する領域が存在していた。図 5(d) では MB の希薄な領域が照射軸

Fig. 5 Transient behavior of microbubbles distribution before and after irradiating at a frequency of 96.3 kHz (Horizontal irradiation)

に対し非対象である．この非対称な分布は浮力の影響と考えられる．一方，振動子近傍では超音波放射力が支配的なためか浮力の影響が顕著に見えなかった．

5.1.2 周波数 485 kHz と 3.493 MHz

$f = 485$ kHz では指向性関数の高くなる範囲が狭い．また，重力による超音波照射軸に対する非対象性を小さくするために， $f = 485$ kHz, 出力 2 W の超音波を図 1 の円筒容器内のアクリル粒子を含む上水に鉛直上向きに照射し撮影した写真の一例を図 6 に示す．図からアクリル粒子はほぼ均質に分散していることが分かる．アクリル粒子の瞬時の分布に関して超音波指向性関数の影響が無視できると言える

一方，水温 22.0°C , $f = 485$ kHz, 出力 2 W, および水温 20.5°C , $f = 3.493$ MHz, 出力 2 W の超音波を MB を含む円筒容器内に鉛直上向きに照射する．その条件について超音波照射 0.4 秒後に撮影した瞬時の写真の一例を図 7(a), (b) に各々示す．図 8(a), (b) には図 7(a), (b) に式 (2) の指向性関数 D が極大値をとる偏角一定の赤色の直線（放射状）を重ねて表示する．図 8(a) から MB は大きな偏角範囲に振動子中心から放射方向の直線（偏角 α 一定の直線）の近くに沿って概ね存在している．MB の分布と D の極大値の直線の傾きが少し違うところも存在するが，これについては後で考察する．同様に図 8 (b) では MB は振動子の原点を中心とする狭い偏角内の放射方向の直線に沿って存在する．

MB が放射方向の筋状に分布する理由を考察する．前述のように指向性関数は偏角対して極大値と極小値が周期的に現れる．音圧場は，原点を中心とする極座標系で考えると，ある点の円周方向に沿って指向性関数の極大値と極小値が交互に現れる分布となる．すなわち，音圧分布について放射方向に山の尾根（音圧の腹）と谷（音圧の節）が交互に多数できるだろう．ところで，定在波では MB が音圧の腹か節に集合する方向に力が働くことが分かっている．本研究の音圧場でも MB は音圧分布の腹か節に向かって力が働く（即ち，円周方向に力が働く）と想像でき，MB が放射方向の直線に沿って分布すると考えられる．

以上は静止画像について述べたが，動画観察より MB は周波数が高い方がより狭い偏角内の範囲を移動していた．

Fig. 6 Distribution of acrylic particles (vertical irradiation, $f=485\text{kHz}$)

(a) $f=485\text{ kHz}$

(b) $f=3.493\text{ MHz}$

Fig. 7 Distribution of MB (vertical irradiation)

5.2 鉛直上向き照射時の粒子の位置ベクトル偏角と速度ベクトル角度の関係

$f = 3.493\text{ MHz}$ では MB の粒子数密度が低い状態となり、さらに指向性関数の高い範囲（偏角の範囲）が狭く、その範囲内で単位体積当たりの音響放射力が他の周波数と比べて大きくなるので、MB 速度が高くなる。そこで、 $f = 3.493\text{ MHz}$ について粒子追跡による粒子速度の結果を以下に議論する。なお、 $f = 96.3\text{ kHz}$ では MB の粒子数密度が高いため、PIV（輝度分布相関法）で速度測定を試みたところ、概ね放射方向に移動する。しかし、前述のように MB の希薄な領域も広く存在し、現時点で、測定精度の低さから MB 速度について明確な結論を導いていない。また、 $f = 485\text{ kHz}$ については、PIV や PTV により画像計測するには中途半端な粒子数密度という理由と、

Fig. 8 Local maximum of D and Distribution of MB (vertical irradiation)

Fig. 9 Definition of position and velocity vectors

指向性関数の高い範囲(偏角の範囲)が広く単位体積あたりの放射方向の音響放射力が相対的に小さく、さらに、円周方向の力の存在も予想できるが、MBの変位が非常に小さいために、MBの速度ベクトルについて測定精度の点から現時点で明確な結論を導けない。今後、 $f = 96.3\text{ kHz}$ と 485 kHz については、測定法を改善しより詳細な速度測定を行う予定である。

5.2.1 アクリル粒子

円筒容器内の上水とアクリル粒子は超音波を鉛直上向きに照射すると動き出し、それらについて振動子から鉛直上向きの流れ(主流)が生じ、時間が経過すると吸音板から振動子側に戻る大きな再循環流れ(周囲流れ)ができる。上向きの主流には周囲流れが入ってくることがある。さらに時間が経過すると、鉛直上向きの主流は再循環流れの影響でうねりだす。動画の目視観察では、アクリル粒子は鉛直上向きに流れ、特定の角度方向に移動していないように見える。より詳細に調べるために、図9のように超音波照射軸(鉛直)に対して粒子の速度ベクト

ル角度 θ および振動子中心を原点とする粒子位置ベクトルの角度 θ' について時計回りを正として定義する．速度ベクトルの角度と速度は，連続する時刻の約 7 枚の画像から粒子を追跡して求めた．

$f = 3.493$ MHz，出力 4W の鉛直上向き超音波照射について，アクリル粒子の流れがうねりだす前に測定された θ と θ' の関係を図 10(a) に示す． θ' に対する θ の約 95% 包括度の不確かさ区間を文献⁽³²⁾の方法で評価し図 10 に記入してある． θ は， θ' の広い範囲で零に近いが， θ' が負の領域でわずかに正となり， θ' が正の領域でもわずかに負となるのが分かる．これは，速度ベクトルが鉛直方向から照射軸方向に傾いていることを意味し，前述の本実験装置の動画観察より，周囲流れが鉛直上向きの主流に入りこむためである．従って，周囲流れの影響がなければ，図 10(a) から，アクリル粒子の速度ベクトル角度 θ は位置ベクトル角度 θ' によらず零に近いことがわかる．この理由はアクリル粒子の音響インピーダンスの値が水のそれに近いので，超音波が透過し，アクリル粒子は音響放射力をほとんど受けず主流であるエッカート流（音響流）のトレーサー粒子になっているためと考えられる．本研究では図 3 と図 9 より指向性関数の偏角 α と粒子の位置ベクトルの角度 θ' の定義は同じなので，アクリル粒子の速度ベクトル角度 θ は指向性関数の影響が小さいと言える．

Fig. 10 Velocity vector angle vs. position vector angle ($f = 3.493$ MHz)

Fig. 11 Velocity vs. position vector angle ($f = 3.493$ MHz)

5.2.2 マイクロバブル

$f = 3.493$ MHz, 出力 4W の超音波を円筒容器内の MB に鉛直上向きに照射すると, MB が動画観察では位置ベクトルの角度 θ' の方向に移動しているように見える. MB の位置ベクトル角度 θ' と速度ベクトル角度 θ を測定し図 10(b) に示す. 前述のように指向性関数の偏角 α と θ' は定義より一致するので, MB が指向性関数の方向に移動すれば, θ と θ' の関係は原点を通る $\theta = \theta'$ の直線にのるはずである. 図 10(b) より, データは $\theta = \theta'$ の直線に近いが, その傾きが 1 より小さな傾向であることがわかる. MB は超音波照射の指向性関数の影響で θ' 方向に移動しようとするのだが本実験では, MB の鉛直方向 (Z 軸) の速度成分が浮力や音響流 (直進型) の影響を受けた可能性がある.

さらに, 図 10(b) より, $\theta' \approx 2^\circ$ や $\theta' \approx 4^\circ$ のとき θ の値が負を示す点が存在する. これらは $\theta' > 0^\circ$ で $\theta < 0^\circ$ のデータであり, MB が放射方向に移動していないことを意味する. これらのデータに対応する MB 挙動を動画で詳細に観察すると, それらの MB が他の MB に急に接近して追い抜くとき, 速度ベクトルの角度 θ が照射中心軸向きに突然に変化することが観察された. この現象について考察する. 実験の観察から, アクリル粒子のみが上水に混ざっている場合, それは上水のトレーサーとみなせるが乱れていない. MB のみが上水に混ざっていて MB と近傍の MB がある程度離れて存在している場合, MB の動きは乱れていない. しかし, 個々の MB のサイズが異なることや音圧分布には指向性関数で表される空間分布があるために MB の存在位置によって働く力が異なることから, 近傍の複数の MB に速度差が生じて急に接近する可能性がある. そして, この複数の MB の急接近が発端となって, MB が放射方向以外の方向に移動したと考えられるが, 詳細は明らかとなっていない. 以上より, MB の速度ベクトルの角度は概ね振動子中心から放射方向となるが, 2 次的な要因のために原点を通る $\theta = \theta'$ の直線からずれるデータが存在すると考えられる.

5.3 鉛直上向き照射時の粒子の位置ベクトル偏角と速度の関係

5.3.1 アクリル粒子

$f = 3.493$ MHz, 出力 4 W の超音波を円筒容器内に鉛直上向きに照射した直後にアクリル粒子の鉛直方向速度を粒子位置ベクトル角度 θ' に対して測定し図 11(a) に示す. 粒子の鉛直方向の速度成分は, 偏角方向の速度成分に $\cos(\theta')$ を乗じたものであるが偏角方向速度と同程度で, $\theta' = 5^\circ$ で $\cos(\theta') = 0.996$ である. 図より, アクリル粒子は $\theta' = -4^\circ \sim 4^\circ$ の範囲でほぼ同じ速度で鉛直上方に移動している. 一方, 図 4(b) の $f = 3.493$ MHz の指向性関数 D は $\alpha = -4^\circ \sim 4^\circ$ の間で大きく変化している. 前述のように, アクリル粒子が上水の音響直進流 (エッカート流) のトレーサー粒子とみなせ, アクリル粒子の速度分布の傾向は液流れと同じと考えられる. 以上より, アクリル粒子は, 速度分布の観点からも円形平面振動子の指向性関数の影響を大きく受けていないことが確認できる.

5.3.2 マイクロバブル

円筒容器内に鉛直上向きに超音波を照射した直後の MB について鉛直方向の速度を位置ベクトル角度 θ' に対して図 11(b) に示す. 図より MB 速度は, $\theta' = -6^\circ \sim 6^\circ$ の範囲で高い値と低い値をとり, θ' によって変化している. また, MB 速度は $\theta' = 0^\circ$ から離れた角度では低くなる. 以上より, MB は図 4(b) の $f = 3.493$ MHz の指向性関数の影響を受けていると言える. 従って, 速度分布の観点からも, 粒子の音響インピーダンスが液と大きく異なると, 粒子挙動は指向性関数の影響を受けることが明らかとなった.

6. 結 言

超音波を照射したときのマイクロバブル (MB) を含む混相媒体の MB の分布やマクロな挙動の研究として, MB を含む水とアクリル粒子を含む水に円形平面音源により周波数 $f = 96.3$ kHz, 485 kHz, 3.493 MHz の超音波を照射し, 進行波となる実験から照射軸近傍の MB とアクリルの粒子のマクロな挙動を調べ, 主に次のことを明らかにした.

(1) MB のマクロな挙動は超音波指向性関数の影響を受けるが, 音響インピーダンスが水に近いアクリル粒子の挙動はその影響が小さい.

(2) $f=3.493\text{MHz}$ の超音波を照射したとき、照射軸近傍のアクリル粒子は照射軸に対する偏角に無関係に照射軸方向に移動した。

(3) $f=3.493\text{MHz}$ の超音波を照射したとき、多くの MB は指向性関数分布に対応して放射方向下流に移動するが、放射方向に移動しない MB も存在した。

(4) $f=3.493\text{MHz}$ に対して、アクリル粒子の速度は照射軸近傍の偏角に対して変化が少ないが、MB の速度は照射軸近傍の偏角に対して変化し、さらに大きな偏角に対して低くなった。

(5) MB は、指向性関数の分布の特性に対応して、周波数が相対的に低いとき (96.3 kHz, 485 kHz) は広い偏角範囲を移動するが、周波数が高いとき (3.493 MHz) は狭い偏角範囲内を移動する。

(6) 同じ周波数と出力では MB はアクリル粒子より速く移動する。

今後、 $f=485\text{kHz}$, $f=96.3\text{kHz}$ の超音波照射について MB 速度を詳細に調べていく予定である。

謝 辞

本研究の一部は科学研究費補助金 基盤研究 (C) 課題番号 25420109 の援助によって行われた。ここに記して謝意を表する。協力された元大学院学生 岩本 翔平君、元学部学生 飯田 匠君、浮津 敬之君に感謝する。

文 献

- (1) 上山智嗣, 宮本誠, マイクロバブルの世界-水と気体の織りなす力- (2011), 森北出版.
- (2) 大成博文, “マイクロバブル”, 日本機械学会誌, Vol. 108, No. 1042 (2005), pp.694-695.
- (3) Takahashi, M, Kawamura, T., Yamamoto, Y., Ohnari, H., Himuro, S. and Shakutsui, H., “Effect of shrinking microbubble on gas hydrate formation”, *Journal Physical Chemistry B*, Vol. 107 No.10 (2003), pp.2171-2173.
- (4) Ashkin, A., “Acceleration and trapping of particles by radiation pressure”, *Physical Review Letters*, Vol.24, No.4 (1970), pp.156-159.
- (5) Ashkin, A., Dziedzic, J. M., Bjorkholm, J. E. and Chu, S., “Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles”, *Optics Letters*, Vol.11, Issue 5 (1986), pp. 288-290.
- (6) 星麻美, 竹内洋之, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, “光熱マランゴニ効果を用いた微小気泡操作へ及ぼす流路の影響”, 第 47 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, CD-ROM, C2010 (2010).
- (7) King, L. V., “On the acoustic radiation pressure on spheres”, *Proceedings of the Royal Society A*, Vol. 147 (1934), pp. 212-240.
- (8) Yosioka, K. and Kawasima, Y., “Acoustic radiation pressure on a compressible sphere”, *Acustica*, Vol. 5 (1955), pp. 167-173.
- (9) Doinikov, A. A., “Acoustic radiation pressure on a rigid sphere in a viscous liquid”, *Proceedings of the Royal Society London, Ser. A*, Vol. 447 (1994), pp.447-466.
- (10) Doinikov, A. A., “Acoustic radiation pressure on a compressible sphere”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 267 (1994), pp.1-21.
- (11) Leighton, T. G., *The Acoustic Bubble* (1994), Academic Press.
- (12) 藤川貴彬, 吉田憲司, 渡辺好章, “超音波駆動された二気泡間に働く secondary Bjerknes force に関する実験的検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, IEICE Technical Report US2008-9 (2008), pp. 45-50.
- (13) Mandralis, Z. I. and Fake, D.I., “Fractionation of Suspensions using Synchronized Ultrasonic flow fields”, *AIChE Journal*, Vol. 39, No. 2 (1993), pp. 197-206.
- (14) Hawkes, J. J., Limaye, M.S. and Coakley, W. T., “Filtration of bacteria and yeast by ultrasound-enhanced sedimentation”, *Journal of Applied Microbiology*, Vol. 82 (1997), pp. 39-47.
- (15) Yasuda, K., Umemura, S. and Takeda, K., “Concentration and Fractionation of Small Particles in Liquid by Ultrasound”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 34 (1995), pp. 2715-2720.
- (16) 太田淳一, 真柄隆司, 広部成祐, “固液混合物内の微粒子挙動に及ぼす超音波定在波の影響 (第 1 報)”, 日本機械学会論文集中 B 編, Vol. 71, No. 701 (2005), pp. 126-132.
- (17) Ohta, J., Makara, T. and Hirobe, S., “Effects of ultrasound on behavior of fine solid particles in a solid-liquid mixture (Horizontal irradiation in a stationary solid-liquid mixture)”, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 2, No. 1 (2007), pp. 77-87.

- (18) Ohta, J. and Nakano, H., “Effects of ultrasound on behavior of fine solid particles in solid-liquid mixture (Classification of particle aggregation and sound pressure profiles under horizontal irradiation)”, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 3, No. 5 (2008), pp. 656-665.
 - (19) 一柳満久, 中之菌朔, 佐藤洋平, 菱田公一, “二重音響場によるマイクロ流路内浮遊粒子の連続的分離法”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 77, No. 779 (2011), pp. 1557-1566.
 - (20) 小林大祐, 林田喜行, 寺坂宏一, “超音波照射によるマイクロバブルの凝集・合一挙動”, 化学工学論文集, Vol. 37, No. 4 (2011), pp. 291-295.
 - (21) Rayleigh, J. W. S, *The Theory of Sound*, Vol. 2 (1945), p. 33, Dover Publications.
 - (22) 木本日出夫, “Acoustic streaming と熱伝達”, 月刊フィジクス, Vol. 6, No. 3 (1985), pp. 187-191.
 - (23) Eckart, C., “Vortices and streams caused by sound waves”, *Physical Review*, Vol. 73, No. 1 (1948), pp. 68-76.
 - (24) Nyborg, W. L., Chapter 11 Acoustic streaming in *Physical Acoustics*, Ed. by W.P. Mason (1965), pp. 265-331, Academic Press.
 - (25) 松田和久, 鎌倉友男, 熊本芳郎, “ガウス集束ビームから発生する音響流の理論的考察”, 日本音響流学会誌, Vol. 50, No. 12 (1994), pp. 997-1005.
 - (26) Kamakura, T., Matsuda, K., Kumamoto, Y. and Breazeale, M. A., “Acoustic streaming induced in focused Gaussian beams”, *Journal of Acoustic Society of America*, Pt. 1, Vol. 97, No. 5 (1995), pp. 2740-2746.
 - (27) 太田淳一, 井口将浩, 大成将仁, “超音波によって発生した固液混相媒体中の音響流の速度 (照射時間と粒子形状)”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 78, No. 787 (2012), pp. 504-512.
 - (28) 堂山直紀, 岩本翔平, 若林大翔, 太田淳一, “超音波照射下の液中のマイクロバブルの挙動と流れ”, 日本混相流学会年会講演会 2011 講演論文集 F143 (2011), pp. 248-249.
 - (29) 若林大翔, 岩本翔平, 飯田匠, 太田淳一, “超音波進行波照射下の液中のマイクロバブルと固体粒子の挙動 (指向性関数と照射時間)”, 日本混相流学会年会講演会 2012 講演論文集 C211 (2012), pp. 172-173.
 - (30) 根岸勝雄, 高木堅志郎, *超音波技術* (1984), 東京大学出版会.
 - (31) 太田光雄編, *基礎物理音響工学* (1992), 朝倉書店.
 - (32) ASME, *Measurement Uncertainty, ASME Performance Test Code, Supplement on Instruments and Apparatus, Part 1*, ANSI/ASME PTC19.1 (1985), 日本機械学会訳, *計測の不確かさ* (1987) .
-