

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420109

研究課題名(和文)超音波によって発生する音響流中のマイクロバブルや固体粒子の挙動と指向性の解明

研究課題名(英文) Study on directionality and behavior of microbubble and solid particles in acoustic streaming caused by ultrasonic wave irradiation

研究代表者

太田 淳一(Ohta, Junichi)

福井大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20168941

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：液中にマイクロバブル(MBと呼ぶ)や固体粒子を含む二相流についてトレーサ(蛍光粒子)の発光波長と対象粒子(MB等)の散乱波長により識別し、両速度が測定できた。f = 96 kHzの超音波照射では直径約50 μm のMBを周囲液に無関係に動かした。f = 3.5MHzでは照射方向の液流れが生じ、液速度はMB速度の10%以下となるデータを得た。MBへの力では一次音響放射力、浮力、流体抵抗、第2 Bjerknes力を評価し、1項目と2項目が支配的であった。液中の固体粒子運動は、重力、流体抵抗以外では、粒子の音響反射率、粒子へのガス付着、粒子形状により決まる音響放射力に支配される場合、指向性関数分布の影響が現れた。

研究成果の概要(英文)：Using YAG laser, fluorescent particles (tracers for liquid) and microbubbles could be distinguished by critical hue angles, thus the present image processing enabled us to measure the gas-liquid (or solid-liquid) velocities simultaneously. At a frequency of 96kHz, acoustic radiation force caused only MB to move. At a f = 3.5MHz, the surrounding liquid velocity (acoustic streaming) was less than 10 % of MB velocity. In a microbubble-liquid mixture, primary acoustic radiation force and buoyancy force were dominant in motion of microbubble, fluid drag and second Bjerknes force were negligible. In a solid-liquid mixture, gas attached on particles, reflection ratio, and so on affected the behavior of the mixture, besides gravity and drag force. When acoustic radiation force was dominant, the acoustic directivity function affected the the behavior of solid particles.

研究分野：工学

キーワード：混相流 マイクロバブル 超音波 音響放射力

1. 研究開始当初の背景

超音波の進行波と定在波が粒子に及ぼす力について、King (1935) が単一の剛体球に及ぼす力を導き、また Yosioka & Kawasima (1955) がそれを発展させ、さらに、Doinikov (1994) が粘性液中の粒子に働く力の式を導いた。超音波が進行波になる場合、円筒容器内側あるいは外側に振動子を設置して閉じた容器内に超音波を照射すると、音響流(エッカート流)の生じることが知られ、Consgrove ら(2001)が速度分布を測定し、藤井ら(1996)が単相液について実験と数値解析を行った。ところで、マイクロバブル(以降 MB と称する)やナノバブルの研究が急速に進展し、基礎研究として MB やナノバブルの直径の変化や、MB のまわりの電位が調べられている。

一方、超音波を照射したとき気泡に働く力の研究がなされ、照射波が直接及ぼす Primary Bjerknes 力、隣接気泡の間で働く Secondary Bjerknes 力が明らかにされている。これらは音響流を考えないときに MB に働く力を対象としていて、一次元的な力として扱われている。有限寸法の平板振動子から超音波を照射し進行波となるときは、超音波の音圧分布には空間分布ができるはずである。超音波照射時の音響流中の MB 挙動を考えると、前述の気泡に働く力だけでなく、音圧場が 3 次元であることに起因して力が働いている。このようなとき超音波照射時の MB 等の挙動及び音響流現象が未解明である。

2. 研究の目的

液体容器内に超音波を照射すると進行波では内部に音響流ができる。本報告者は、これまでに固液混相媒体でも流れが生じ、マイクロバブルを含む気液二相媒体に超音波を照射すると、特異な多次元流れが現れることを示している。これを利用し、容器外部から超音波を照射すると混相媒体の局所に非接触で流れを起こすことが可能である。この現象はマイクロマシンやマイクロ化学プラントや μ TAS の混相流体の駆動・混合・制御等に利用でき、MB の分離にも利用できる。将来の応用や数値解析のために、MB や固体粒子を含む混相媒体の音響流の指向性(空間的分布)や粒子の特異な挙動について、未解明な現象を系統的に示し、諸現象の起こる因子を整理し、流体力学的特性を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

3.1 実験装置と方法

実験装置を図 1 に示す。実験装置は、MB 生成部、通路部、測定部の三つからなり、アクリルできている。一番下の MB 発生部に多量の MB(空気)を装置内に入れるため内部に MB 発生装置が組み込まれている。その上の通路部は MB 発生部と一番上の測定部を繋いでいる。測定部は縦 300mm、横 320mm、奥行き

320mm である。測定部の底には二つの穴(通路部出口)があり、その穴から MB が測定部にゆっくり流入する。測定部底面中心には超音波振動子 ($f=3.493\text{MHz}$ または、 $f=96.3\text{kHz}$) が取り付けられ鉛直上向き方向に照射される。実験容器内を満たす液体にはフィルターを通した上水を用いた。また、上水のトレーサー粒子として蛍光粒子(フルオスター、平均直径 $d=15\mu\text{m}$ 、球形、密度 $=1100\text{kg/m}^3$) を使用した。超音波振動子に対向させてゴム製楔形吸音板が測定部上部に取り付けられている。なお、MB の直径は約 50 マイクロメートルである。これらの実験装置の座標系は、振動子の中心を原点として鉛直方向に Z 軸とし、振動子面に平行方向を Y 軸とする。

3.2 色相角による粒子と MB 画像の分離

MB と液の運動を定量的に調べるために、蛍光粒子をトレーサーとして採用する。蛍光粒子は緑色のレーザー光を照射すると赤い光を発生し気泡(あるいは固体粒子)は緑色のレーザー光を散乱する。色相角 H を用いて粒子と気泡の識別を行うために、本研究では図 2 のアルゴリズムを提案する。MB と蛍光粒子が混在する画像を原画像(Original image)とする。ここで R, G, B はそれぞれ、赤、緑、青の輝度を表し、 H は色相角とする。原画像から $H < H_{c1}$ (約 60 度) あるいは $H > H_{c2}$ (約 240 度) の場合、その画素の R と G と B の値を 0 に置き換えた新しい画像を作る。即ち、蛍光粒子以外のものが映っている画像ができる。原画像(Modified image)から蛍光粒子以外のもの

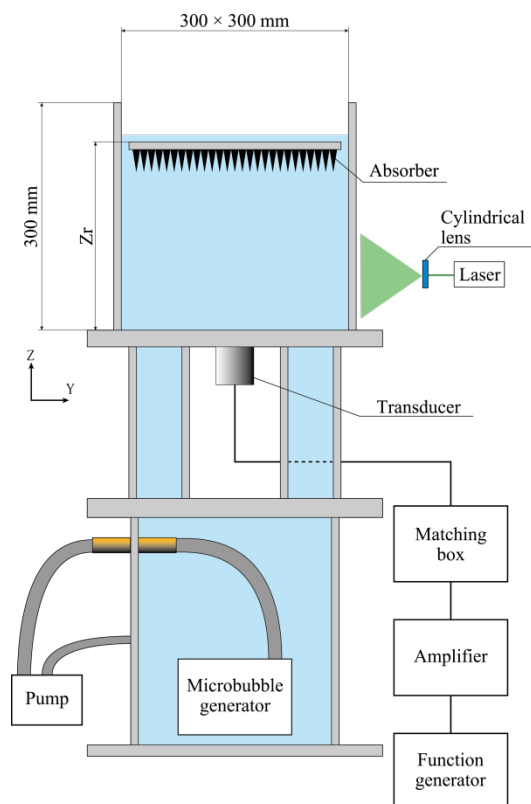


図 1 実験装置

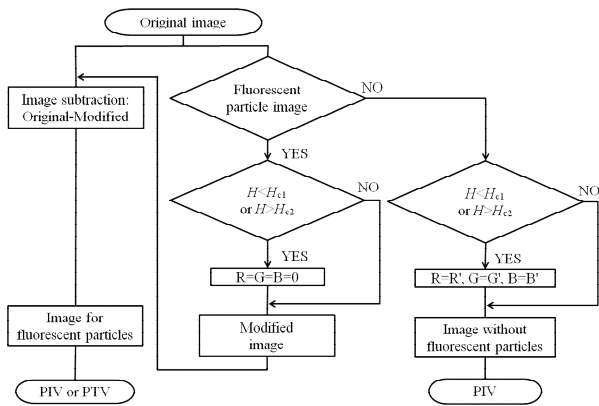


図2 蛍光粒子（液のトレーサー）と粒子識別の画像処理のアルゴリズム

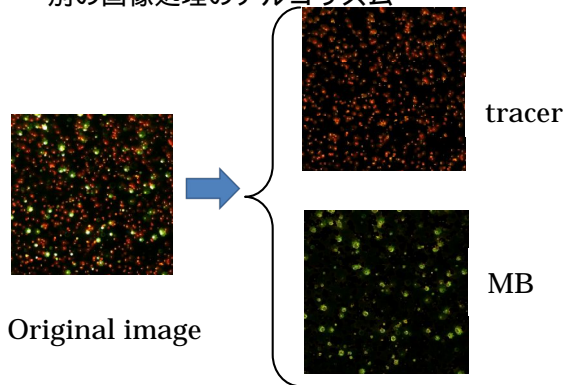


図3 原画像と色相角で識別した画像

が映っている画像を減算処理すると、蛍光粒子だけの画像ができる。一方、 $H_{c1} < H < H_{c2}$ の場合、 (R, G, B) を背景の色 (R', G', B') に置換すれば蛍光粒子以外の画像ができる。 (Image without fluorescent particles) . それぞれの画像から PIV あるいは PTV によって速度を求めると、蛍光粒子が液相のトレーサーなので、液相と気相の速度を同時に測定できる。なお、 H_{c1} と H_{c2} の値はレーザーや蛍光粒子や他の粒子の光や反射によって変化するので、予め決定しておく必要がある。

4. 研究成果

4.1 気液速度の同時測定

節 3.2 の方法によってトレーサーである蛍光粒子と MB を識別した画像の一例を図 3 に示す。本研究で提案したアルゴリズムによって液相と MB 運動を識別できることが分かる。

4.2 MB と液の挙動

(a) $f = 96.3 \text{ kHz}$

MB に近傍の液速度を詳細に調べるために、超音波周波数 $f=96.3 \text{ kHz}$, $N=2 \text{ W}$ の実験について座標 $Y=-4 \sim 2 \text{ mm}$, $Z=158 \sim 164 \text{ mm}$ における、MB 通過中 ($t_0+0.32 \text{ s}$) の MB 速度ベクトル (赤) と液速度ベクトル (青) を図 4 に示す。ここで、赤点線ベクトルは図の $t_0+0.32 \text{ s}$ に達するまでの 0.024 s ごとの MB の軌跡である。図 4 より、MB 通過前後に液速度の大きな変化

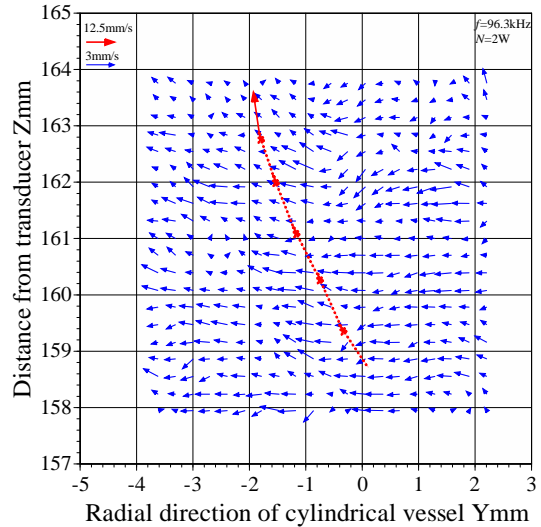


図4 MB の軌跡 (赤点線の矢印) と $t = t_0+0.32 \text{ s}$ の MB の速度ベクトル (赤矢印) その周囲の液速度ベクトル (青矢印) と ($t = t_0$ に MB が現れた), 周波数 96.3 kHz

は見られず、この空間分解能の範囲でも MB の通過が近傍の液に与える影響の小さいことがわかる。以上より $f=96.3 \text{ kHz}$, $N=2 \text{ W}$ では周囲液に影響を及ぼすことなく音響放射力で MB だけを動かすことができることが分かった。また、周囲液の MB に及ぼす流体抵抗が無視できる。

(b) $f=3.493 \text{ MHz}$ の MB と液の挙動

超音波周波数 $f=3.493 \text{ MHz}$, 出力 $N=10 \text{ W}$, 座標 $Y=0.3 \sim 6.3 \text{ mm}$, $Z=127 \sim 133 \text{ mm}$ の範囲における通過中 t_0 の MB 速度ベクトル (赤) と液速度ベクトル (青) を図 5 に示す。通過後の $t_0+0.04 \text{ s}$ の図は紙面都合で省略する。図 5 や通過後の図より、MB の通過前と通過中と通過後で MB の周囲の液速度はほとんど変化していないことが分かる。図 5 の MB の周囲の約 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ の範囲内の液速度がほぼ同方向に流れているので、その範囲内の液速度を平均化して周囲液速度 (一次元) と定義した。その周囲液速度とその範囲内を通過した MB 速度の時間変化を調べ、次に述べる。

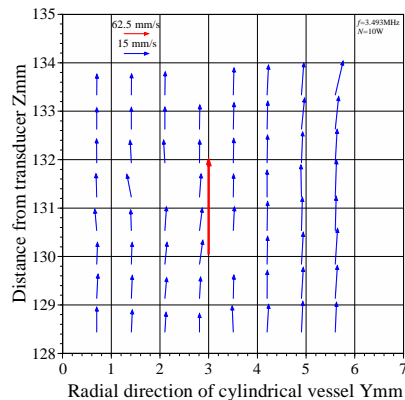


図5 MB の速度ベクトルとその周囲の液の速度ベクトル $t=t_0$ 周波数 3.493 MHz , 出力 10 W

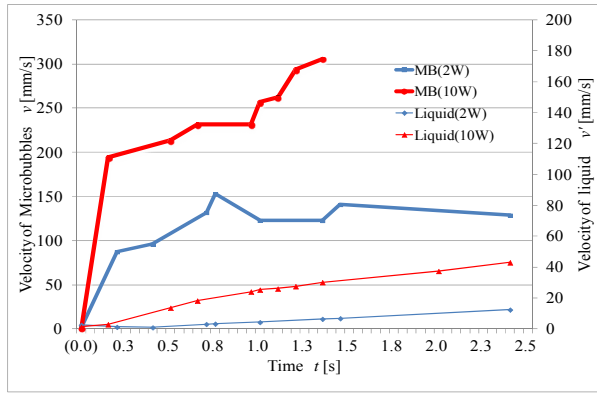


図6 MBと周囲液の速度の時間変化

超音波出力 $N=2, 10\text{ W}$, 座標 $Y=0.3 \sim 6.3\text{ mm}$, $Z=127 \sim 133\text{ mm}$ の範囲内の MB 速度 (太線) 及びその周囲平均液速度 (細線) の時間変化を出力 2 W (青線), 出力 10 W (赤線) として図 9 に示す. 図中の MB 速度の MB は, いずれもほぼ同じ位置を通過している. 図 6 から, 出力 2 W では周囲液速度は徐々に加速し続ける一方, MB は超音波照射 0 s から 0.2 s までの間に急激に加速し, 0.8 s 以後およそ一定の速度をとる. 出力 10 W では MB は急に加速してその後は加速の途中である. 以上から, MB は音響放射力で直接動かされるために加速が速く超音波照射に対する応答時間が短い, 液は時間空間平均の音圧勾配に起因する音響流の発達に時間がかかるために応答時間が長いと考えられる. 次に, 液速度と MB 速度を比較すると, 液速度は図 6 より同じ出力について MB 速度の約 10% 以下で MB 速度に比べて小さい. MB の相対速度の時間変化は, 図 6 の結果より MB と液の移動方向が同じで比較的速度が小さいので, MB 速度の時間変化とほぼ同様になっている. 以上より, MB に及ぼす流体抵抗 (抗力) が小さいことが分かる.

4.3 音響放射力と他の力

(a) 一次音響放射力

Yosioka & Kawasima の式によって気泡半径に対する音響放射力 (音源から MB に直接働く力) の理論値を条件に合わせて音圧 30 kPa で周波数をパラメータとして計算し図 7 に, 周波数 100 kHz で音圧をパラメータとして図 8 に示す. 図 7 より, 周波数に応じて, ある気泡半径で音響放射力の極大値が存在している. これは気泡半径の対応する固有振動数が存在するためである. また, 図 7, 8 には気泡に働く浮力の値も示しており, 音響放射力の数値と比較して無視できるものでない. 気泡に働く力は, 既に節 4.2 で述べたように流体抵抗が小さいこと, 次の項 (b) で述べるように二次音響放射力が小さいことから, 一次音響放射力と浮力が支配的となることが分かる.

(b) 二次音響放射力 (二気泡間の相互作用: 第 2 Bjercknes 力)

第 2 Bjercknes 力とは, 超音波によって気泡が収縮・膨張の振動し, 気泡そのものが音

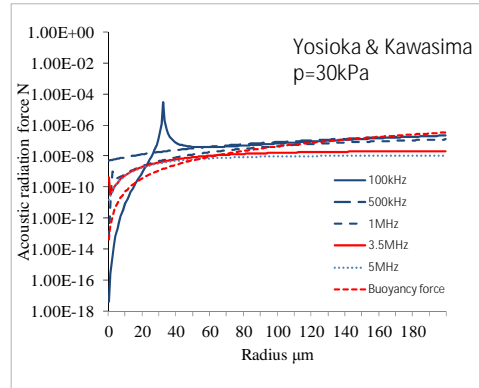


図7 周波数が気泡に働く音響放射力に及ぼす影響

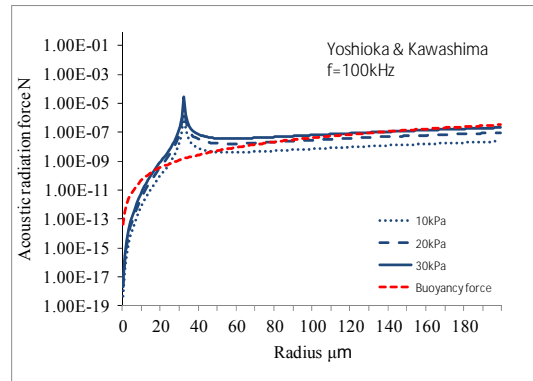


図8 MB半径が音響放射力に及ぼす影響

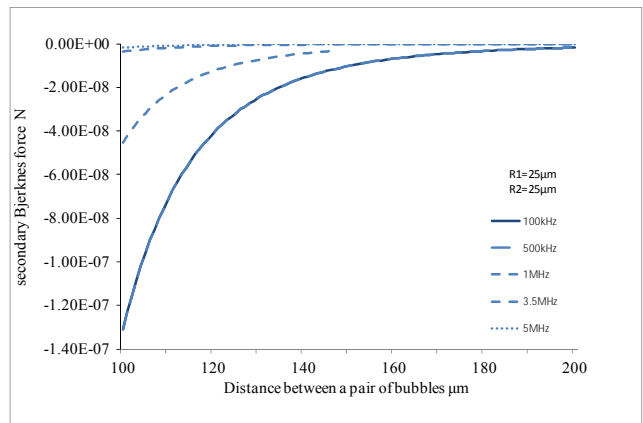


図9 第2 Bjercknes 力

源となって近傍の気泡に力を及ぼすものである. 二つの気泡が近接して存在し, 片方の気泡 (気泡 1) の放射音波により, もう片方の気泡 (気泡 2) に加わる第 2 Bjercknes 力は理論式が既に明らかにされている. 理論から半径 $25\text{ }\mu\text{m}$ の二つの気泡について気泡間の中心距離 D を横軸にとり第 2 Bjercknes 力の計算結果を図 9 に示す. 第 2 Bjercknes 力の負の値は二つの気泡が互いに引き合う引力を表し, 図 9 から周波数が高いほど D が長いほど, その絶対値が小さくなる. 理論式から, 第 2 Bjercknes 力の力の向きは二気泡間の振動位相差によって決定されることがわかっている. 本研究の MB サイズと MB と近接する MB の距離では第 2 Bjercknes 力が他の力に対して無視でき

ることが分った。

4.4 固液二相媒体中の粒子挙動

超音波の照射によって生じる音響流と固体粒子の運動の知識が必要である。しかし、固液混相流中の音響流について、1次元速度の研究があるだけで、粒子運動に与える因子がよく分かっていない。

4.4.1 粒子

固液混相流について、混入粒子の種類と状態は、ナイロン粒子、オルガソール粒子（無処理・エタノール処理）、アルミ粒子（無処理・エタノール処理）、アルミ箔片（無処理・エタノール処理）の7通りの種類・形状、超音波の照射時間を変えて実験を行い、その結果から音響流の流速に与える因子の影響を明らかにする。粒子の特性の詳細は学会発表の欄の文献に示す。

(a)ナイロン粒子（直径 $d = 45 \sim 63 \mu\text{m}$ 、形状：球状）、(b) オルガソール（直径 $d = 48 \sim 52 \mu\text{m}$ 、形状：ジャガイモ形状）、(c) アルミ粒子（直径 $d = \sim 10 \mu\text{m}$ 、形状：球状）(d) アルミ箔製粉末（#350 メッシュ、 $40 \mu\text{m}$ 以下、形状：箔片）

4.4.2 指向性関数

円盤型平面振動子の取り付け状態によって、偏角について音圧分布が存在し、それを表わしたものを指向性関数 D という。本研究の振動子の取り付けに対する指向性関数 D を偏角 α に対して図 10 に示す。

4.4.3 アルミ粒子の場合

形状の異なるアルミ箔片を使用して実験を行ったところ、図 11(a)がエタノール処理をしていないもの、図 11(b)がエタノール処理をしたものである。図 11 から、粒子がエタノール処理の有無にかかわらず放射方向に動いていることがわかる。即ち、粒子運動に指向性の影響が確認できた。この結果から、アルミ箔片に付着したガスだけが筋模様（指向性）の原因でないことが分かる。同じ種類の粒子を使用しても混入粒子の形状により指向性の変化がわかった。

4.4.4 他の粒子の条件との比較

関連する実験結果をまとめると、表 1 の結果となった。表 1 において 1 行目は粒子の種類、2 行目が形状、3 行目はエタノール処理の有無、4 行目は指向性関数の影響が表れたかどうかである。4 行目の印は粒子が照射方向ではなく放射方向に広がるように移動した結果を、即ち、音圧の空間分布を表わす指向性関数の分布の影響を受けたことを表わし、 \times 印は影響を受けていない。表 1 より、固体粒子の運動は (a) ナイロン球は影響を受けず、アルミ粒子は受けている。これは前者が液に対する音響反射率が低く、後者が音響反射率が高いためである。(b) ナイロン球とオルガソールの結果より、固体粒子にガスが付着していると指向性関数の影響を受ける。(c) 項 4.4.3 で説明したように、アルミ箔片はかなり複雑な粒子形状のためにガスの付着の有無にかかわらず指向性関数の分

布の影響を受けることが分かる。

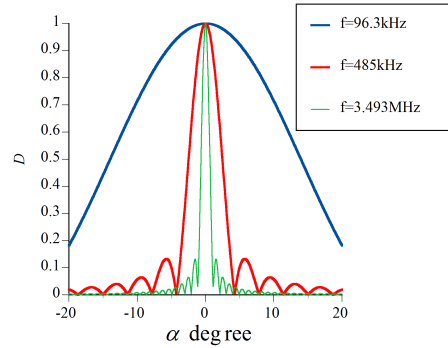
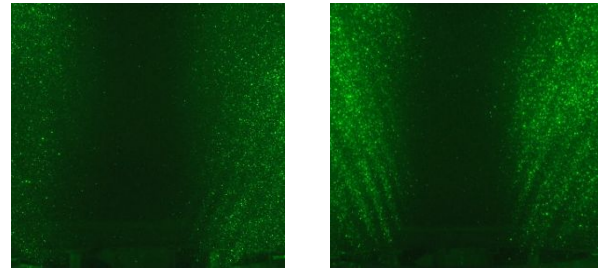


図 10 本研究の超音波の指向性関数



(a) 照射 7 秒後 (b)照射 7 秒後 (エタノール処理)

図 11 アルミニウム薄片の分布 (周波数 485kHz)

表 1 指向性関数の影響の有無

Nylon		Aluminum			
Sphere	Unevennes(olgasol)	Sphere		Flakes	
		Ethanol processing	Ethanol processing		Ethanol processing
\times		\times	\times		

5. まとめ

(1) 液流れを測定するトレーサー粒子（蛍光粒子）と対象粒子（MB 等）をレーザー照射時の MB の散乱波長と蛍光粒子の発光波長の違いにより両者を識別することを提案し、液相と対象粒子の速度が同時に測定できた。

(2) MB の挙動について、周波数 $f = 96 \text{ kHz}$ で低出力では超音波照射では本測定空間分解能の範囲内で MB が周囲の液を動かさずに動いた。即ち、超音波出力がある程度小さいと、 $f = 96 \text{ kHz}$ では液と MB の動きは無関係であり、液を動かさずに MB だけを動かすことができた。一方、 $f = 3.5 \text{ MHz}$ では超音波照射方向の音響流（液）が生じ、その液速度は MB とほぼ同じ方向で MB より小さい。音響流の液速度は MB 速度の 10% 以下であった。従って、流体力は MB に及ぼす力として小さい。

(3) MB に働く一次音響放射力、浮力、気泡間に働く第 2 Bjerknes 力を計算により評価した。流体力や第 2 Bjerknes 力は相対的に小さく、MB の運動について一次音響放射力と浮力が支配的で両者の関係は周波数と直径に

よって変化する。一次音響放射力が支配的となる時、MBの運動は音響の指向性関数の影響を受ける。

(4) 液中の固体粒子の運動は、流体抵抗と重力以外では、液に対する固体粒子の音響反射率、固体粒子へのガス付着の有無、粒子形状によって決まる音響放射力に支配される。音響放射力が支配的な場合、液中の固体粒子の運動は指向性関数の影響を受けることが分かった。

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 0 件)

〔学会発表〕(計 10 件)

東川哲也, 嶋田達也, 太田淳一, 固液混相媒体中の音響流に及ぼす諸因子の影響(二次元流れ), 日本混相流学会混相流シンポジウム 2016 講演論文集, (2016) .

垣内 裕貴, 高橋 剛, 阿部 一帆, 鷲田 康弘, 太田 淳一, 超音波照射下におけるMBと周囲液の速度同時測定(時間変化と相対速度), 第53回日本伝熱シンポジウム講演論文集, J321 (2016).

鈴木宏彰, 山下善弘, 東川哲也, 太田淳一, 超音波進行波の液中のマイクロバブル挙動に及ぼす影響(周波数 96kHz と 3.5MHz の場合), 日本混相流学会混相流シンポジウム 2015 講演論文集, E133, (2015) .

垣内 裕貴, 酒井 直紀, 阿部 一帆, 太田淳一, 超音波照射下の液中の気泡と液の速度同時測定(MB とキャピテーション気泡), 第52回日本伝熱シンポジウム講演論文集 F312 (2015) .

太田淳一, 超音波が混相媒体である液と粒子の挙動に及ぼす影響, 日本機械学会 北陸信越支部第52期総会・講演会 1105(2015) .

藤井祐貴, 井上創作, 垣内裕貴, 塩谷尚大, 太田淳一, 超音波照射下にある液中気泡の液流動に及ぼす影響(MB とキャピテーション気泡) 混相流シンポジウム 2014, 講演論文集, D153 (2014) .

鈴木 宏彰, 垣内 裕貴, 谷口 徹郎, 太田淳一, 液中のマイクロバブル挙動に及ぼす円形平面音源からの超音波の影響, 第51回日本伝熱シンポジウム講演論文集, I332, (2014) .

Suzuki, H., Wakabayashi, D., Ukitsu, N., Kaito, Y., Taniguchi, T., Ohta, J., Behavior of Microbubbles and Acrylic

particles in a liquid under Ultrasonic waves, Proceedings of International Symposium on Advanced and Mechanical and Power Engineering, 2013 (2013) .

Fujii, Y., Iwamoto, S., Miura, K., Shioya, N., Inoue, S., and Ohta, J., Image Measurements of Acoustic Streaming of Liquid with bubbles formed in a Cylindrical Pipe (Simultaneous Measurements of Gas- Liquid and Solid-Liquid Velocities), Proceedings of International Symposium on Advanced and Mechanical and Power Engineering, 2013 (2013) .

岩本翔平, 藤井佑貴, 三浦清貴, 太田淳一, 円筒容器内に生じる気泡を伴う音響流(気液と固液の速度の同時計測), 日本混相流学会年会講演会 2013 講演論文集, F134 (2013) .

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者
太田 淳一 (OHTA Junichi)
福井大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 20168941

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者