固液混合液内の微粒子の挙動に及ぼす超音波の影響*

(第1報, 静止混合液に水平方向に照射する場合)

太田 淳一^{*1}, 真柄 隆司^{*2}, 広部 成祐^{*2}

Effects of Ultrasound on Behavior of Fine Solid Particles in Solid-liquid Mixture (1st Report, Horizontal Irradiation in Stationary Solid-liquid Mixture)

Junichi OHTA^{*3}, Takashi MAKARA and Seisuke HIROBE

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

Separation of particles or decreasing the particle concentration in a solid-liquid two-phase flow is desired. Utilization of ultrasound has been considered as an alternative technique for the separation of particles. It is known that particles are aggregated by the radiation pressure of ultrasound. However, the effect of ultrasound with cavitation on particle behavior is not well known. Thus, water with aluminum particles having a density of 2720 kg/m³ and diameters of 50 to 150 μm or smaller aluminum powder in a rectangular vessel was horizontally irradiated by ultrasound with frequencies of 23 kHz or 100 kHz, and a standing wave was formed. The following results were obtained. For ultrasound with 100 kHz, the aluminum powder aggregated in vertical lines. For ultrasound with 23 kHz and acoustic cavitation, we noticed that the aluminum particles were gathered at points near antinodes of the sound pressure profile because of flow induced by acoustic cavitation. When the particles were provided continuously with relatively high concentration, particle clumps formed and remained. Then, the particle clumps became larger and suddenly fell faster than the surrounding small particles. Such phenomena repeated. For relatively low concentration, particle clumps did not become large, and remained at the same positions.

Key Words: Multi-phase Flow, Cavitation, Flow Visualization, Ultrasound, Standing Wave

1. 緒 論

超音波による諸特性を技術的に利用した機械には、超音波金属溶接機、超音波流速計、超音波洗浄装置などがあり、さらに異なる機械が開発されている。ところで、超音波の基礎研究として、King⁽¹⁾によって非圧縮性粒子に働く音響放射圧力 (radiation pressure) の式が導かれた。Yosioka ら⁽²⁾は King の式を発展させ、圧縮性の粒子に働く音響放射圧力の式を導き、粒子が、音圧の定在波の腹に集まるか節に集まるかを判定する式を導いた。また、超音波便覧⁽³⁾には超音波によって粒子が集まるための濃度などの条件式の記述がある。Woodside ら⁽⁴⁾は定在波内の粒子速度を可視化によって測定し、この測定値から、粒子に働く一次の音響放射力を評価した。Nomura ら⁽⁵⁾は、液に鉛直方向に超音波を照射し、音圧の定在波の節の周りに気泡の回る流れを観察した。また、野村ら⁽⁶⁾はイオン交換水中で比

重0.9のポリプロピレン球の浮上中や比重2.49のガラス球の沈降中に超音波を鉛直方向に照射する場合、それらの固体粒子にはキャビテーションによってできた気泡の運動と音響放射圧力による力が抵抗力として作用することを示した。

Hawkes や Coakley⁽⁷⁾が液中のバクテリアやイーストに周波数3MHzの超音波を照射して分離する実験をしている。Yasuda ら⁽⁸⁾は、超音波定在波によって微小な流路内の水中のポリスチレン粒子を局所に集め、定在波を動かすことで捕捉した粒子を動かした。また、山越・尾家⁽⁹⁾は、移動定在波を用いた粒子径の計測を行った。Mandralis and Fake⁽¹⁰⁾は、超音波定在波で液中のポリスチレン粒子を集め、周波数を周期的に変化させて、粒子を動かした。阿部ら⁽¹¹⁾は、鉛直方向に置かれた円筒容器内に鉛直方向に超音波を照射してできた定在波によって水中の気泡を保持させ、地球重力場では浮力や音響放射圧力による力などの釣り合いから、気泡は定在波の節から腹に向かう途中の位置に保持されることを実験と解析から明らかにし、微小重力場では定在波の節に集まることを示し気泡位置の制御も行った。

* 原稿受付 2004年3月22日。

^{*1} 正員、福井大学工学部(〒910-8507 福井市文京3-9-1)。

^{*2} 福井大学大学院工学研究科。

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

従来の固液二相流の研究では、数 mm から数 10mm 程度の小さな容器内で周波数 2MHz 程度の超音波を照射した実験が多い。工業上大流量の固液混合物を分離しようとする装置を大型にしなければならないので、超音波の強度を上げることになるだろう。すると、超音波照射にともない、音響キャビテーションが発生するようになると予想される。しかし、超音波を水平方向に照射した時、音響キャビテーションの固液混合物中の固体粒子挙動に及ぼす影響についての研究が、著者らの調べる範囲で見当たらず、一般的で十分な知見があるとは考えられない。

本研究は、混合液の固体微粒子を集める技術の基礎研究として、実用的な観点から従来より大きな容器内に静止水内に固体微粒子を一度に投入する場合あるいは連続的に投入する場合について、超音波を水平方向に照射し音響キャビテーションが生じる条件で、粒子の集合位置や照射中の粒子の挙動を明らかにすることを目的とする。

2. 実験装置と方法

2.1 実験装置 実験は2つの大きさの異なる容器で別々に行った。上部が解放された中型容器 M を図 1 に示す。容器は深さ × 幅 × 奥行きが 260 mm × 260 mm × 150 mm の透明アクリル製 (固有音響インピーダンス $z = 3.3 \times 10^6 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$) で、側壁には 100W の超音波振動子 (100 mm × 100 mm) が設置され、対面にある側壁には鉄製の反射板 (195 mm × 145 mm, $z = 2.5 \times 10^7 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$) が取り付けられている。信号発生器を出てアンプで増幅された電気信号が超音波振動子に入り、水平方向に超音波を照射できる。座標系は、平面状の振動子の中心を原点として、振動子面の法線方向 (水平方向) を Z 方向にとり、振動子に平行かつ鉛直方向を Y 方向にとり、Z 方向と Y 方向のいずれにも垂直な方向を X 方向にとる。振動子の中心は容器の底から 100 mm の高さに位置する。この容器にフィルターを通した上水 ($z = 1.5 \times 10^6 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$) がほぼ満たされている。容器の幅 Z_r は、振動子と容器の間にゴムパッキンをはさむことにより微調整できる。固体粒子は、市販のアルミニウム粒子 (直径 $d = 50 \sim 150 \mu\text{m}$, $z = 1.7 \times 10^7 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$, 比重 2.72, 和光純薬工業社製、以後「粒子」と称する) あるいはアルミニウム箔製粉末 ($d = 40 \mu\text{m}$ 以下, #350 メッシュ, 和光純薬工業社製、以後「箔製粉末」と称する) を使用したが、それらは完全な球状ではない。周波数 23kHz と 100 kHz を選定したのは、本実験で使用したアルミニウム粒子や箔製粉末が各々集まりやすいことと、

この2通りの周波数の超音波が照射できる市販の振動子があったからである。なお、幅 $Z_r = 260 \text{ mm}$ は周波数 23kHz の超音波の定在波が水中でできる共鳴条件を満たす距離である。なお、本実験では上水を連続3時間煮沸した脱気水も使用した。

次に大型の容器 B の概要を図 2 に示す。容器は深さ × 幅 × 奥行きが 675 mm × 510 mm × 150 mm の透明アクリル製で超音波振動子 (100 mm × 100 mm) が容器の側壁に設置されている。容器 M と同様に振動子の中心位置を原点として、同様な座標系をとることにする。容器の底の座標は $Y = -160 \text{ mm}$ である。

Fig. 1 Vessel M

Fig. 2 Vessel B

2.2 実験方法

2.2.1 可視化と速度測定

図 1 の容器で粒子を容器上部の開口部から投入し、周波数 $f = 23 \text{ kHz}$ の超音波を照射した。粒子位置は音圧測定と同じ条件、同じ容器で音圧測定が終わった後に撮影した。すなわち、図 1 のようにメタルハライドランプで照明し容器の外

に置かれたビデオカメラあるいは高速ビデオカメラを用いて撮影した。シャッター速度は 1/250 s, フレーム速度は 250 fps (frame per second) とした。容器の水中に沈めた透明な定規を X 方向の 3 箇所、 Z 方向に平行において撮影し、これらを校正座標とした。校正座標を参照して、撮影画像から粒子の Z 座標を計測した。

容器 B では粒子をできるだけ空間的に均一に連続的に供給するために、上部の開口部の上に直径 0.5mm, 深さ 20mm の孔を 50mm の等間隔に多数あけた板を設け、その孔に粒子を入れ、重力で落とした。さらに、容器の上部にセルサイズ 4.8mm のハニカムを設置し粒子の沈降方向が鉛直になるようにした。撮影は容器 M と同様にした。 Z - Y 平面内の速度を測定するために、図 2 に示すように容器 B 内を 4W のアルゴンイオンレーザーのレーザーシートで照明を行った。撮影画像から PMC 法 (Particle Masking Correlation)⁽¹²⁾ で粒子抽出と粒子位置を測定し、連続する 4 時刻の画像から、四時刻追跡法⁽¹³⁾によって粒子速度を測定した。

2.2.2 音圧測定 容器 M の音圧測定の系統図を図 1 に示す。ハイドロホン (Brüel and kjaer 社 Type 8103, 測定周波数域 $f=0.1\sim 100$ kHz) を用い、アンプ (コンディショナーを内蔵) 通して音圧 (瞬時圧力の大気圧からの変化分の実効値として定義) に変換されたものをスペクトラムアナライザーで測定した。ハイドロホンは、 X, Y, Z の 3 軸方向に位置設定ができるトラバース装置から支持棒を鉛直方向に垂らしその先端に固定した。ハイドロホンの測定部の形状は直径 9.5mm の棒状なので、音圧の測定位置は、Brüel and kjaer 社に与えられた性能データの音響中心とした。

図 1 の配置で、粒子が集まっている位置を中心として Z 方向の音圧分布を測定した。すなわち、あらかじめ粒子を投入し、まず、 X 方向から Y - Z 面を見ながら、ハイドロホンを粒子の集合位置まで動かした。次に、 Z 方向から X - Y 面を見ながら、粒子の集合位置までハイドロホンを移動させた。さらに、ハイドロホンの支持棒がたわまないように反射板に接触するまで Z 方向に移動させ、その点を Z 方向の基準点として、トラバース装置についているスケールによって Z 方向の座標を読んだ。ハイドロホンの Z 方向位置を変えて音圧測定を繰り返した。容器 B の音圧測定は、容器 M と同様にして行った。

3. 実験結果と考察

3.1 粒子を一度に投入する場合

3.1.1 粒子の集合 従来、Yosioka ら⁽²⁾によって導かれた粒子に働く時間平均の音響放射圧力 P_{ac} は次

式で表されている。

$$P_{ac} = 4\pi r^3 k G \langle E_a \rangle \sin(2kZ) \quad (1)$$

ここで、 r : 粒子半径, G は次式で与えられる密度-圧縮性係数, $k(=2\pi/\lambda, \lambda$ は波長) は波数, $\langle E_a \rangle$ は時間平均の音響エネルギー密度, Z は超音波の照射方向の座標である。

$$G = \frac{1}{3} \left[\frac{5\rho_p - 2\rho_f}{2\rho_p + \rho_f} - \frac{\gamma_p}{\gamma_f} \right] \quad (2)$$

ここで、 ρ_f と ρ_p はそれぞれ流体と粒子の密度, γ_f と γ_p はそれぞれ流体と粒子の圧縮率である。式 (1) から、粒子は $G > 0$ なら定在波の腹に集まり、 $G < 0$ なら定在波の節に集まることが知られている⁽²⁾。本研究の場合、式 (2) から $G = 0.59 > 0$ となるので、アルミニウム粒子とアルミニウム箔製粉末は定在波の腹の位置に集まると予想される。

容器 M で $Z_r=262.5$ mm に調整し上水を用い、箔製粉末を投入し、 $f=100$ kHz の超音波を照射し続けて、粒子位置が安定した時に X 方向から反射板近傍を撮影した写真を図 3 に示す。撮影場所は $X=0$ mm, $Y=0$ mm で、 $Z=260$ mm 付近であり、右側の容器外側のボルトの取り付け位置に見える板が反射板である。図 3 の写真では多くの粒子が Z 方向にほぼ等間隔に 4 箇所、鉛直方向の縦筋状に集まっている。しかし、縦筋以外に位置する粒子も存在する。実際には圧力振幅が高くなると、より多くの粒子が縦筋状に集まる場合があった。さらに、時間が経過すると、縦筋状に集まった粒子は徐々に沈降する。共鳴して定在波ができる場合に、本実験条件では反射板の位置は定在波の腹となる⁽¹⁴⁾。また、実験後容器の水中にいれたスケールの座標によると図 3 では、箔製粉末が反射板から Z 方向に 7.3~8.0mm の間隔に集まっていて、この間隔は $f=23$ kHz の半波長の約 7.5mm に対応している。従って、箔製粉末は定在波の腹の位置に集まっていることになる。すなわち、この実験結果は理論どおりで、従来の実験と同じになることが確認できた。なお、 $f=100$ kHz の超音波の照射では、高速ビデオと目視観察によって水中にキャビテーションの発生が認められなかった。

図 4 は、容器 M 内に脱気水を入れ、粒子を投入し、 $f=23$ kHz の超音波を照射し続けてから安定した時に容器全体を X 方向から撮影した写真である。右側の容器内側のボルトによって取り付けられている板が反射板である。時間が経過して安定した状態になると図 4 に示すように、粒子は Z 軸方向に等間隔に 3 箇所、点状 (図中、矢印で示す点) に集まって長時間保持される。この粒子の集合体を以後、「粒子塊」と呼ぶ。 $f=23$ kHz

Fig. 3 Particle gathered in the lines (at $f=100\text{kHz}$) Fig. 4 Particle clumps for vessel M ($f=23\text{kHz}$, Degassed water) Fig. 5 Particle clumps for vessel B ($f=23\text{kHz}$, Tap water)

では $f=100\text{kHz}$ と異なり、右側の反射板付近には粒子塊ができていない。また、粒子塊の Y 方向の位置は同じではない。なお、反射板を音響インピーダンスの小さいものに替えて、圧力の振幅を小さくすると、粒子が局所に集まらなかった。これは音響流による流れの乱れなどの影響と考えられる。

容器 B で上水を用い、 $f=23\text{kHz}$ の超音波を照射し

続け、粒子が安定した状態で X 方向から撮影した写真 ($Z=360\text{mm}$, $X=-15\text{mm}$, $Y=-30\text{mm}$ 付近) を図 5 に示している。図 5 の写真では粒子塊が Z 軸方向に等間隔に 3 箇所にてできているが、これらの Y 方向の位置は同じではない。 $f=23\text{kHz}$ の超音波を照射し、粒子が集まる時、後述のようにキャビテーションの発生を高速ビデオカメラにより確認した。以上より、本実験条件で $f=23\text{kHz}$ の超音波を照射した時に、粒子は点状に集まって長時間保持されることが分かった。なお、図 4 と図 5 では粒子の Y 方向の集合位置に異なる傾向が見られる。これは、容器 B と容器 M では、 Y 方向や Z 方向の音圧分布の傾向が異なるためと考えられる。

3.1.2 粒子塊の軸方向集合位置と音圧分布 容器 M で上水と脱気水で別々に測定した Z 方向の音圧分布を脱気水は三角記号で、上水は丸記号で図 6 に示す。ここで、測定位置は $X \approx -4\text{mm}$, $Y \approx -17\text{mm}$ で粒子塊の位置である。また、保持された粒子塊の Z 方向位置を同じ条件で測定し、図 6 に矢印で指し示している。測定音圧分布から、容器内に定在波ができていて、 Z 方向に減衰している。図 6 から、粒子塊の保持される位置は、脱気水と上水の場合に定在波の腹となっている。

次に、容器 B に上水を入れた場合に粒子を投入し、 $f=23\text{kHz}$ 超音波を照射して安定した時に保持された粒子塊の位置と $X \approx -15\text{mm}$, $Y \approx -9\text{mm}$ における Z 方向の音圧分布を図 7 に示す。図から、容器内に定在波ができており、粒子塊は定在波の腹に集まっている。なお、図 7 では表示できていないが、音圧が $Z=370 \sim 380\text{mm}$ の範囲でハイドロホンの測定限界を越えて、測定できない場所があった。同一の実験条件で、 X 方向の音圧分布を測定し図 8 に示す。音圧は X の増加とともに、まず上昇し、測定データがなくなり、次に減少している。 $X=0$ 付近でデータがないのは、音圧がハイドロホンの測定限界を超えたためである。この図には粒子塊の位置も載せられている。図より粒子が X 方向の音圧の高いところに集まることがわかる。同一の実験条件で、 Y 方向の音圧分布を測定し図 9 に示す。音圧は Y が増えるとともに上昇し、測定データがなくなり、さらに減少している。 $Y=0$ 付近でデータがないのは図 8 と同じ理由である。 Y 方向にも粒子が音圧の高いところに集まることがわかる。

図 7 の音圧のピークの値が、図 8 や図 9 の音圧の最高値より低くなっている。この理由は、まず、音圧が、前述のように図 7 のピーク付近でオーバーロードしていたことと、 Z 方向と X 方向と Y 方向の音圧測定の際に粒子塊の位置とみなした測定の基点が正確に一致し

ていないためと考えられる。 $f=23\text{kHz}$ の音圧分布と粒子塊の位置の測定結果から、容器Bの上水、容器Mの上水と脱気水のいずれの場合にも、キャビテーションの影響があるにもかかわらず、粒子は定在波の腹付近に集まり、筋状ではなく点状に集まることがわかった。このメカニズムについて次の項で考察する。

Fig. 6 Sound pressure profile in the Z-direction for Vessel M and particle clump locations

Fig. 7 Sound pressure profile in the Z-direction for Vessel B and particle clump locations

3.1.3 粒子塊とその近傍のキャビテーション

従来、単相の水に $f=24.5\text{kHz}$ の超音波を照射し水に流れが存在する時に、樹木状のキャビテーションクラウドの存在することが知られている⁽¹⁵⁾。それで、本研究で超音波を照射し反射光で撮影した画像に白い色の粒子が写るが、これらが微細気泡か固体粒子か不明である。

Fig. 8 Sound pressure profile in the X-direction for Vessel B and particle clump locations

Fig. 9 Sound pressure profile in the Y-direction for Vessel B and particle clump locations

そこで、 $f=23\text{kHz}$ の超音波を上水に照射し安定したところで、超音波の照射を急に停止する実験を行った。粒子塊の周りの様子をシャッター速度 $1/250\text{ s}$ 、フレーム速度 250 fps で高速撮影した写真を時系列に図10に示す。この図において、 $t=-40\text{ ms}$ から $t=-8\text{ ms}$ までは超音波の照射停止前、 $t=0\text{ ms}$ で照射停止、 $t=56\text{ ms}$ と $t=112\text{ ms}$ は超音波の停止後の粒子挙動を示している。

図10の停止前の図(a)から(g)の画像から、白い粒子塊の周辺に白い雲のような筋ができています。しかし、白い筋は照射停止後の図(i)と(j)で消えている。従って、その白い筋はキャビテーションによって発生した微細な気泡群(いわゆる、キャビテーションクラウド)とみなせる。図(i)と(j)では、白く写った粒子が広がりながら沈降しているので、これらは固体の粒子の群れであることがわかる。ここで、写真の参照寸法として図(j)の沈降している粒子直径が $50\sim 150\mu\text{m}$ を表している。また、図10の図(d)から(g)では、斜

Fig. 10 Particle behavior before and after the irradiation of ultrasound is stopped

めの矢印で示す白い粒子が粒子塊に向かって流れこむことが観察でき、この白い粒子の動く方向に円弧状の白い筋が見える。その白い粒子は図10の連続写真の元の動画で見ると円弧状の白い筋と同じ軌跡をたどって粒子塊に向かって流れ込む。さらに、その元の動画では、図(d)の粒子塊の上方に位置する長さ約 $500\mu\text{m}$ の複数の白い筋が粒子塊の中心に向かって移動しており、ここでも、別の粒子が白い筋と同じ軌跡を通して粒子塊に流れ込んでいることが観察された。この白い筋の流れ($0.1\sim 0.3\text{m/s}$)を「音響キャビテーションによる流れ」と称することにする。この白い筋は、この項の最初に述べた単相の水に流れが存在する時に生じる樹木状のキャビテーションクラウドに相当するものであ

る。図10と以上の考察より、粒子が点状に集まるのは、 $f=100\text{kHz}$ のように音響放射圧力によってできた音圧の定在波のためではなく、音響キャビテーションによる流れによって粒子が移動しているためとみなせる。キャビテーションは音圧の一番高い定在波の腹近傍に発生するはずである。従って、図4～図7のように粒子は定在波の腹の位置の局所(点状)に集まると考えられる。なお、容器や実験条件によっては、粒子は同一の X - Y 平面内の数箇所に点状に集まった。これは、キャビテーションが同一の X - Y 平面内の数箇所で生じているためと考えられる。

次に、白い垂直の矢印で示されている粒子に注目してみる。図(a)から図(b)までは粒子は粒子塊の中心に向かって移動しているのが分かる。しかし、図(c)から図(d)までは粒子は粒子塊の中心から離れる方向に向かって移動している。その後の図(e)から図(g)までは粒子塊の中心に向かって移動している。以上のように、粒子は粒子塊に向かい、次に離れるように動くことを繰り返している。この動きを定在波の音圧分布だけでは説明できず、キャビテーション発生を裏付けている。

3.1.4 音響流と音響キャビテーションによる流れ
前項で述べた音響キャビテーションによる流れは、振動子から Z 軸方向に反射板に向かうスケールの大きなエッカート流⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾(いわゆる音響流の一種)よりも1桁速い。また、音響キャビテーションによる流れはキャビテーション発生の局所に生ずる。従って、両者は別の現象とみなせる。さらに、音響キャビテーションによる流れは、レイリー流⁽¹⁶⁾やシュリヒティング流⁽¹⁶⁾とも異なっている。

本実験では、エッカート流も観察でき、この Z 方向速度成分は $X=0, Y=0$ 付近で、約 10mm/s であった。エッカート流の速度は、脱気水と上水の場合を比較すると、脱気水の方が低くなった。しかし、上水の方が強いキャビテーションが起こりやすく、エッカート流が存在するにもかかわらず定在波の腹に固体粒子が集まりやすかった。

3.2 粒子を連続的に投入する場合 粒子を連続的に投入する場合の粒子挙動について次に述べる。

3.2.1 比較的濃度が高い場合 容器Bにおいて $f=23\text{kHz}$ の超音波を連続的に照射し続けた時に粒子が沈降している写真を経過時間順に 0.6s 間隔に並べて図11に示す。この図で $t=0\text{s}$ はある時刻を便宜上 0s としただけで、超音波照射を止めた時ではない。写真から $t=0\sim 1.2\text{s}$ までは粒子塊がある点近傍に保持されている。 $t=1.8\text{s}$ 頃に粒子塊は突然に沈降していく

ことがわかる。その後、別の粒子塊が同じ位置に再びできて、やがて沈降する。これらの現象が繰り返されることが観察された。この理由は次のように考えられる。項3・1・3の考察から、 $f=23\text{kHz}$ の場合には、キャビテーションによる流れによって、粒子が集まってできた粒子塊にある点に保持される力が働いていると考えられる。直径が大きくなった粒子塊は、単一粒子のようにふるまうとみなせる。重力は近似的に粒子塊の直径の3乗に比例する。粒子塊がある臨界直径より大きくなると、力の均衡が破れ、沈降を始める。また、粒子塊は周囲の小さな粒子より重力のために大きい速度で沈降すると考えられる。その後、近傍の粒子が再び集められて、粒子塊が成長する。

図11の粒子塊が保持されている $t=0\text{ s}$ の時刻のZ方向に対する粒子沈降速度を図12に示す。ここで、Z方向の0は、振動子の中心位置ではなく、図12の左端の位置を、便宜上、表しているだけである。細い矢印は測定された粒子の沈降速度をZ方向の 0.44 mm 間隔に存在する粒子速度を空間平均したもので、太い矢印は粒子塊の速度を表している。図12から粒子塊の速度が周囲の粒子のそれらと比べて小さく、ほとんど沈降していない。ところが、周囲の粒子は $5\sim 15\text{ mm/s}$ で沈降していて一様でない。速度が一定でないのは粒子の直径に分布があるためと考えられる。

Fig. 11 A falling particle clump

Fig. 12 Particle falling velocities with a holding particle clump

Fig. 13 A particle clump and particles falling velocities

図13は図11の粒子塊が動き出した後の $t=2.4\text{ s}$ における粒子と粒子塊の沈降速度を表している。周囲の粒子速度の定義は図11と同じである。周囲の粒子は $3\sim 16\text{ mm/s}$ で沈降し、粒子塊はそれらの粒子に比べて沈降速度が大きい。さらに、図13と図12を比較すると、周囲の粒子は、粒子塊の運動の影響をほとんど受けて、沈降速度に大きな差がない。

3.2.2 粒子濃度が低い場合 粒子濃度が比較的低い場合には粒子塊は集合点の近傍で位置が少し変動しながら長時間保持された。粒子塊が沈降しない理由は、粒子濃度が低いので粒子塊は臨界直径を越えるほど大きくなり、重力が支配的にならないためと考えられる。さらに、濃度が低いと、大きな粒子塊ができないことを確認した。

4. 結 論

上部が大気に解放された矩形容器の内部の静止水にアルミニウム微粒子あるいはアルミニウム箔製粉末を上部から投入し、容器の側壁に設置された超音波振動子から水平方向に周波数 $f=23\text{ kHz}$ あるいは 100 kHz の超音波を照射した。これにより、超音波の定在波が水中に作られた状態で微粒子挙動を調べた。その結果、主に次のことが得られた。

(1) 液中の固体微粒子は、エッカート流などによって容器内に強い対流ができると、超音波の定在波の放射圧力による力だけでは、局所に集まりにくくなる傾向がある。

(2) $f=100\text{ kHz}$ の超音波を照射した場合、従来のKingやYosiokaらの理論の予測のとおり、アルミニウム箔製粉末は音圧の定在波の腹の位置に集まり、従来の実験結果と同様に鉛直方向の筋状に集まることを確

認した。

(3) $f=23\text{kHz}$ で超音波による音響キャビテーションが存在する条件で粒子を一度に投入する場合には、直径 $50\sim 150\mu\text{m}$ のアルミニウム粒子は定在波の特定の腹付近に集まるが、筋状ではなく点状に集まり長時間保持されることを明らかにした。

(4) 単相の水中では $f=24.5\text{kHz}$ の超音波を照射した時、液に流れが存在する場合に局所に樹木状のキャビテーションクラウドのできることが知られている。本研究では、混合液内にできた樹木状のキャビテーションクラウドの流れによってアルミニウム粒子が粒子集合位置へ向かうことを明らかにした。

(5) $f=23\text{kHz}$ で連続的にアルミニウム投入し、粒子の濃度が比較的高い場合、粒子塊が点状に集まり保持され、時間の経過につれ大きくなって、周囲の微粒子より大きな速度で、突然、沈降する現象を周期的に繰り返す。

(6) $f=23\text{kHz}$ で連続的にアルミニウム粒子を投入し、粒子の濃度が低い場合、粒子塊ができるが大きくなることはなく、同じ位置を中心にしてわずかに変動しながら長時間保持される。さらに、粒子濃度が低いと、粒子塊ができないことを確認した。

謝 辞

本実験の実施にあたって協力いただいた本学学部生 横田祐治君、鈴木章史君、元本学学部生 中新地昭洋君に感謝する。また、超音波振動子やハイドロホンについて援助をいただいた(株)松浦機械製作所に感謝の意を表す。また、本研究の一部は科学研究費補助金(基盤研究費(C)(2)) 課題番号 16560140 の援助によって行った。謝意を表す。

文 献

- (1) King, L. V., On the acoustic radiation pressure on circular discs, *Proc. Royal Society, A*, 153, (1936), 1-16.
- (2) Yosioka, K, Kawasima, Y., Acoustic radiation pressure on a compressible sphere, vol.5, *ACUSTICA*, (1955), 167-173.
- (3) 実吉純一ほか2名監修, 超音波技術便覧, 日刊工業新聞社, (1978), 1143-1144.
- (4) Woodside, S. M., et al., Streaming Induced by Ultrasonic Vibration in a Water Vessel, *AIChE Journal*, 43, 7(1997) 1727-1736.
- (5) Nomura, S., Murakami, K., Sasaki, Y., Streaming Induced by Ultrasonic Vibration in a Water Vessel, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.39 (2000) 3636-3640.
- (6) 野村信福, 村上幸一, 赤尾浩史, 吉川幸紀, 超音波定在音場中を浮上・沈降する固体粒子の挙動, 機論(C), 67-657, (2001) 1255-12618.
- (7) Hawkes, J.J., M.S., Limaye, W.T., Filtration of bacteria and yeast by ultrasound-enhanced sedimentation, *J. of Applied Microbiology*, vol. 82(1997), 39-47.
- (8) Yasuda, K. Umemura, S., Takeda, K., Concentration and Fractionation of Small Particles in Liquid by Ultrasound, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.34, (1995), 2715-2720.
- (9) 山越芳樹, 尾家康訓, 超音波の移動定在波を用いた微粒子の粒径計測, 音響学会誌, 50-3, (1996), 198-204.
- (10) Mandralis, Z. I., Fake, D.I., Fractionation of Suspensions using Synchronized Ultrasonic flow fields, *AIChE Journal*, vol. 39, No.2 (1993) 197-206.
- (11) 阿部 豊, 川路正裕, 渡辺 正, 超音波による気泡制御に関する研究, 混相流, vol.13, No.4 (1999) 372-386.
- (12) 江藤剛治, 竹原幸生, 道奥家治, 久野悟志, PIVのための粒子画像抽出法に関する検討, 水工学論文集, 40, (1996), 1051-1058.
- (13) 西野耕一ほか3名, 画像処理に基づく流れの三次元計測に関する研究, 機論(B), 55-510, (1989) 404-412.
- (14) Leighton, T. G., *The Acoustic Bubble*, Academic press, (1994).
- (15) 畑中信一, 液中の超音波キャビテーション, 第21回混相流シンポジウム講演論文集, (2002), 1-5.
- (16) 青山忠明, 遠藤敏一訳, 超音波工学と応用技術, 日ソ通信社, (1991), ベ・ア・アグラナートら著, モスクワ高等学校出版所, (1987).
- (17) 木本日出夫, Acoustic streaming と熱伝達, 月刊フジックス, Vol.6, No.3, (1985) 187-191.