超音波音場中の気泡および固体粒子の挙動*

(円管内の沈降・浮上速度の測定)

野村 信福^{*1}, 村上 幸一^{*1}, 西田 憲司^{*2}

Behavior of Bubbles and Solid Particles in an Ultrasonic Field (Measurement of Falling and Rising Velocities in Pipes)

Shinfuku NOMURA^{*3}, Koichi MURAKAMI and Kenji NISHIDA^{*3} Department of Mechanical Engineering, Ehime University,
3 Bunkyo-cho, Matsuyama-shi, Ehime, 790-8577 Japan

The behavior of solid spherical particles and air bubbles moving in an ultrasonic standing wave field are investigated experimentally. An ultrasonic transducer of 45 kHz is fixed at the part of the wall of the vertical square channel, and a standing wave field can be formed horizontally in this section. Several small pipes are inserted in this channel and particles and bubbles are dropped or raised into the pipes respectively. In the experiment for solid particles falling or rising in a liquid, the average terminal velocity in an ultrasonic field is slower than that in which there is no ultrasonic field. In the case of bubbles, the path of spherical bubbles in pipes strongly changes depending upon which position (node or antinode of sound pressure) in the standing wave field it passes. The rising velocity of non-spherical bubbles is faster than that of those with no ultrasonic application since the shape of bubble is deformed into a prolate ellipse by the ultrasonic radiation force and the drag coefficient of bubble decrease.

Key Words: Ultrasonic Vibration, Terminal Velocity, Particle, Bubble, Radiation Pressure, Standing Wave, Pipe

1. 緒言

超音波浮揚や微小物体のマニピュレーション技術など超音波を力として利用する研究がさかんに行われている。超音波による力を動的に利用すれば、配管等を利用したカプセル輸送⁽¹⁾⁽²⁾や薬物伝送システム(DDS)⁽³⁾⁽⁴⁾への応用や粒子の凝集・分散などの操作⁽⁵⁾⁽⁶⁾を行うことが可能である。

著者ら⁽⁷⁾⁽⁸⁾は円管内に形成される音場中を移動する微小物体の運動を明らかにするために、液中の超音波定在音場中を沈降・浮上する粒子の運動を詳細に調べた。その結果、固体粒子には音響キャビテーションの運動と音響放射圧による力が抵抗力として作用するため、粒子の速度が減速することを明らかにした⁽⁷⁾。さらに、管内を沈降する固体粒子の運動を数値解析から求め、定在波音場中を沈降する固体粒子の平均沈降速度は周期的に変化し、1 波長以上の区間を通過する時間から求めた粒子の平均速度は一定値に漸近し、その平均沈降速度は円管内を自由沈降する粒子の速度より小さくなることを明らかにした⁽⁸⁾。

本研究では固気液混相流中での移動・凝集・分離・回収などの操作を行うための基礎研究として、超音波音場中での気泡の上昇速度および固体粒子の沈降・浮上速度について実験的に調べた。これまでの研究では超音波を垂直円管下端から照射し、定在波音場の腹と節を交互に通過する粒子の挙動を明らかにしてきたが、本報では垂直管側壁から超音波を照射した場合の実験を行った。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を図1に示す。高さ 1240 mm、内径(D_i)が縦 57 mm、横 57 mmの亚克力製矩形管内で、(1)ガラス粒子(比重 2.49)を用いた沈降実験、(2)ポリプロピレン粒子(比重 0.90)を用いた浮上実験、(3)気泡の浮上実験の3種類の実験が行われた。矩形管下端から 620 mmの位置に周波数 45kHz のボルト締め型 PZT 振動子を取り付けられた。超音波は発振器で発生させた連続正弦波をアンプで増幅し、矩形管側壁に取り付けられた厚さ 2 mmのステンレス板に接着した振動子に送ることで発生させた。媒質としては、固体粒子の実験では 30 分間沸騰させて脱気処理した脱気水、気泡の上昇実験ではシリコンオイル(比重 0.96、粘度 $\mu = 0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$)をそれぞれ使

* 原稿受付 2001 年 11 月 19 日。

^{*1} 正員、愛媛大学工学部(☎ 790-8577 松山市文京町 3)。^{*2} 愛媛大学大学院理工学研究科。

E-mail: nomu@eng.ehime-u.ac.jp

用し、温度は $25 \pm 1^\circ\text{C}$ に設定した。管壁の影響を調べるために、矩形管内に内径 $D=5\sim 18\text{ mm}$ のアクリル製の細管を挿入し、その中を移動する粒子や気泡の速度が測定された。アクリル円管の音響インピーダンスは水と同じオーダーであり(水は $1.48 \times 10^6\text{ kg / m}^2\text{s}$, アクリルは $3.20 \times 10^6\text{ kg / m}^2\text{s}$), 細管の肉厚は $D=5\sim 18\text{ mm}$ に対して $1\text{ mm}\sim 2\text{ mm}$ と薄いので、形成される定在音場に大きな影響を与えない。

浮上実験では円管下部の粒子導入口からポリプロピレン粒子を静かに押し出し、円管内を上昇させた。一方、気泡は矩形管下端の気泡発生装置によって上方に射出される。気泡の射出は、この装置内にポンプで空気を送り、内部圧力を一定にし、装置上部に設けられた孔径 0.3 mm の穴から電磁弁を開閉することによって行われた。また、気泡の大きさは開閉タイミングを変えることで制御した。粒子の運動はハイスピードカメラで撮影され、超音波照射区間を通過する粒子の速度や気泡の形状などを測定した。なお、固体粒子および気泡の終端速度は超音波照射区間の 57 mm を通過する時の速度を測定し、その平均速度から求めた。

3. 超音波音場中の固体粒子の挙動

3.1 管内音圧分布 管側壁から超音波を照射する場合は、管断面方向(水平方向)に定在波が形成されるので、粒子が定在波音圧の腹(Antinode)の位置を通過するか、節(Node)の位置を通過するのかで現象は大きく異なることが予想される。そこで実験では、音圧の腹と節を通

Fig. 1 Experimental apparatus

過する粒子や気泡の挙動を調べることに重点を置いた。実験に入る前に定在波音場の音圧の腹と節の位置の確認を行った。図2は音圧測定と音場の可視化実験の一例である。シリコンオイルにトレーサー粒子として用いたポリプロピレン粒子($100\text{ }\mu\text{m}$)を分散させた状態で超音波をかけると、粒子は音圧の節に集まる。この粒子がトラップされた位置が、水中音圧マイクロホンによって測定された音圧分布の極小値とほぼ一致した。定在波音圧の各腹の位置でのピーク音圧値に違いがあり、腹から腹、節から節への間隔も完全な等間隔になってはいないが、実験では音圧の腹の位置を特定できればよい。シリコンオイルでは、音圧分布の極大値、極小値の中から音圧の腹の位置として $h=11\text{ mm}$, 節の位置としては $h=29\text{ mm}$ を選んだ。 $D=5\text{ mm}$ と $D=18\text{ mm}$ の細管をこれらの位置に挿入した状態でも、ポリプロピレン粒子の分散状態に大きな差がないことを確認した。同様にして、脱気水では音圧の測定結果から腹($h=17\text{ mm}$)と節($h=29\text{ mm}$)の位置を選び、以後、これらの位置を通過する粒子や気泡の挙動を調べた。

3.2 粒子の沈降・浮上実験 図3は 1.8 mm 径のガラス粒子を沈降させたときの実験結果である。図中の実線は超音波を照射しないときに円管内を沈降する粒子の

Fig. 2 Comparison of pressure amplitude by hydrophone and visualization of sound pressure using polypropylene particles in silicone oil

終端速度を表す整理式である⁽⁹⁾。超音波を照射しないときに円管内を沈降する粒子の終端速度 V_{ST} と無限静止流体中を沈降する粒子の終端速度 $V_{ST\infty}$ との比は、 d/D が大きくなるにつれて管壁の影響で小さくなる⁽⁷⁾ (速度記号で使用する添え字 S は固体粒子, B は気泡を表している)。図中には 25 回程度行った実測結果の範囲

Fig. 3 Falling velocity of glass particles in an ultrasonic field

Fig. 4 Deceleration ratio of glass particles

Fig. 5 Rising velocity of polypropylene particles in cylinders

と測定データの平均値が示されている。超音波音場中を通過するときの沈降速度 V_{SU} は節よりも腹を通過するときの方が遅くなる。

図 4 は縦軸に超音波照射前後の速度比をとって整理した結果である。固体粒子には左右の水平方向から音圧の節に向かう力が作用し、節を通過する固体粒子にはこの力が粒子周りの流体の流れを制限し、死水領域を増加させるように作用するので、結果として放射力が抵抗力となって速度は減速する。一方、音圧の腹の位置に沈降してきた粒子は、放射圧力によって管壁方向に大きく移動し、管径が小さいときは管壁に接触しながら沈降していくため、速度減速の効果は d/D が大きいほど大きくなる。粒子径の小さい $d=1.8$ mm のとき最大 30% の減速効果が確認された。粒子径が小さく、沈降速度が遅くなるほど、超音波にさらされる時間が長くなるで、減速効果が大きくなると考えられる。

図 5 は浮上するポリプロピレン粒子の結果である。ガラス粒子と同様に、粒子の速度は減速し、その減速効果は腹を通過する場合に大きい。固体粒子は沈降・浮上に関わらず音場中では速度が減速する。

4. 単一気泡の挙動

4.1 単一気泡の浮上速度 図 6 は細管を挿入しないときに測定した気泡の終端速度の結果である。横軸 d_e は気泡の体積から求まる球相当直径である。気泡の体積は、超音波振動子の中心軸上を通過する気泡の画像をコンピュータに取り込んで、軸対称形状として求めた。 d_e が 1 mm から 4 mm では気泡の抗力と浮力の釣り合いから計算される終端速度を表す実線と一致している。ただし、気泡の抗力係数には $C_D = 16 / Re (1 + 0.15 Re^{0.687})$ を用いている⁽⁹⁾。

図 7 は円管内を上昇する気泡形状を示した結果であ

Fig. 6 Terminal velocity of bubble

る。 $d_e=3$ mmの気泡は管径によらずほぼ球形を保って上昇しているが、気泡径の大きい $d_e=5$ mmでは、管径が小さくなるにつれて、横長楕円から縦長の楕円形状に変形していく。図8は上昇気泡の形状をアスペクト比と等価直径でまとめたものである。 d_e が3 mmのときのレイノルズ数 $Re(=V_{BT} d_e / \nu)$ は1.8、エトベス数 $E_0(=g \Delta \rho d_e^2 / \sigma)$ は4.2であり、Clifら⁽¹⁰⁾による無限流体中を上昇する気泡相関図によれば、このとき気泡の形状は球形となる領域に存在し、図8の結果と一致している。しかし、 d_e が5 mm以上で見られた縦長の楕円形状は、気泡相関図には存在しない。そこで、 $d_e=3$ mmと $d_e=5$ mmの場合について実験を行うことにした。

4.2 超音波音場中を上昇する気泡 図9は $d_e=3$ mm気泡の上昇速度の測定結果である。ハイスピードビデオ

Fig.7 Photograph of rising bubbles in cylinders

Fig.8 Aspect ratio of bubbles in cylinders

撮影から 0.1秒間隔で測定した上昇速度がほぼ一定値に落ち着いていたので、超音波照射区間の平均速度を気泡の終端速度 V_{BT} として表した。 d_e/D が大きくなると、管壁の影響で遅くなるので、無限静止流体中を上昇する気泡の終端速度 $V_{BT\infty}$ との比は1より小さくなっていく。この傾向は、固体粒子の場合と定性的に一致している。(a)について、 d_e/D が0.3以上では音圧の節の位置を通過したときに超音波照射時と照射前の速度比 V_{BU} / V_{BT} は1より大きくなっている。これは超音波の音圧の節の方向に作用する音響放射力によって、気泡が縦長楕円形に変形し、気泡の抵抗係数が小さくなることと、気泡が縦長に変形した結果、管壁の影響が小さくなるためであると考えられる。

音圧の腹を通過する場合は逆に速度比は1より小さくなっている。これは気泡が超音波による放射力をうけて管壁方向に移動し、その結果、気泡が管壁に沿って上昇するためである。気泡の速度減速の傾向は固体粒子

(a) Rising velocity of bubbles in cylinders

(b) Velocity ratio

Fig.9 Rising velocity of bubbles at $d_e=3.0$ mm

(ガラス粒子, ポリプロピレン粒子)の結果と同じである。

(b)は超音波照射前後での速度比を示し, 整理した結果である。腹を通過するときには上昇速度は最大で 1.5 倍程度増加する。また, $d_e/D > 0.55$ では気泡が超音波によって捕捉される現象が発生するため気泡が加速される場合と減速する場合の2つの領域に分かれる。この領域では平均速度で整理することは難しい。

図 10 は $d_e = 5 \text{ mm}$ の場合である。気泡体積が大きいため音圧の腹、節に関係なく超音波によって気泡の上昇速度は速くなり, 最大 1.8 倍程度速度が増加している。 $d_e/D < 0.6$ では音圧の腹節に関係なく捕捉されない限り, 超音波によって気泡の上昇速度は速くなる。気泡形状は超音波照射によって変形させられる。

図 11 は $D=8 \text{ mm}$ での超音波照射時の気泡形状をアスペクト比(縦横比)でプロットしてみた結果である。気泡径が大きくなるほどアスペクト比は増加し, $d_e = 4.2 \text{ mm} \sim 5.0 \text{ mm}$ ではアスペクト比が約 2 の縦長楕円形状になっている。気泡の速度増加は気泡が縦長楕円形に変形し, 気泡の抵抗係数が小さくなることと, 変形によって d_e/D が小さくなり, 管壁の影響が小さくなるためであると考えら

れる。そこで, 気泡変形による上昇速度(終端速度)を見積もってみた。終端状態では抗力と浮力が釣り合うので,

$$\frac{1}{2} C_D \rho_L \frac{\pi d_e^2}{4} \cdot V_{BT}^2 = (\rho_L - \rho_G) g \cdot \frac{\pi d_e^3}{6} \quad (1).$$

アスペクト比が 2 のときの C_D は既知(球 1 に対して楕円 0.6)であるので, $d_e = 4.8 \text{ mm}$ (照射前のアスペクト比が 1, 照射時が 2)のときの V_{BT} を計算すると, 球形の場合の約 1.6 倍であった。図 10 の $d_e = 5 \text{ mm}$ では, 節を通過するときの速度比は 2 より小さくなっており, 抵抗係数から類推される値とほぼ一致している。

音場中の上昇気泡では, 気泡変形による速度の増加領域と, 音響放射力による速度の減速領域が存在する。これらの気泡の運動の様子を図 12 に示した。 $D=7 \text{ mm}$ 管を上昇する気泡の軌跡を 0.1 秒間隔でストロブ撮影した。気泡は定在波音場のどの位置を通過するかによ

Fig.10 Rising velocity of bubbles at $d_e=5.0 \text{ mm}$

Fig.11 Deformation of bubbles by ultrasound

Fig.12 Photograph of path of bubbles by radiation force

Fig.13 Rising velocity of bubbles, ultrasonic power 5W

てその軌跡が大きく異なる。しかし、気泡径が大きい場合は、超音波出力が小さくても気泡の形状が縦長に変形し気泡の速度は増加する。音圧の腹を上昇する大部分の気泡は図 12 に示されるように円管の右壁側に移動し上昇するが、実験では、超音波音源の方向（円管左壁側）に移動する気泡も数は少ないが確認されている。実際は管壁に沿って上昇する場合や、管壁に接触しながら上昇する場合、あるいは一端壁に接触して押さえられ、その反動で壁面から離れて上昇する場合など様々な場合がある。音圧の腹を通過する場合は気泡と壁面との複雑な相互作用が実験結果に影響を及ぼすが、結果的にはいずれの場合も上昇速度は減速する。

図 13 は出力を 5W と小さくして行ったときの結果である。腹を通過するとき速度比がほとんど 1 である。これは気泡の抵抗係数低減の効果と、音響放射圧による減速効果が相殺されているため、速度の変化が小さかったと思われる。これら一連の結果は、固体粒子の減速効果と、気泡の加速効果を利用すれば、固気液混相流中での凝集・分散などの操作が、超音波で効果的に行える可能性があることを示唆している。

5. 結 論

垂直管側壁から超音波を照射して、管断面方向に超音波定在波を形成したときの気泡および固体粒子の挙動が実験的に調べられ、以下の結論を得た。

- (1) 超音波照射により、固体粒子の平均移動速度は沈降・浮上に関わらず減速する。
- (2) 固体球は音圧振幅の腹の位置を通過するほうが節を通過するときよりも減速する。
- (3) 気泡は超音波照射によって、その形状が縦長に変形し、流体抵抗が低減し、上昇速度が速くなる領域が存在する。

文 献

- (1) 森川敬伸・辻裕・蝶野成臣・杉本周造, カプセル輸送に関する基礎的研究(第1報, 抵抗係数, 圧力分布および管内流速分布), 機論, 46-406, B (1980), 3323-3327.
- (2) 辻 裕・森川敬信, 関 旦, カプセル空気輸送における受圧板面積変化によるカプセル速度の変化, 機論, 51-470, B (1985), 3323-3327.
- (3) 石原謙, 共振超音波を用いた含気マイクロカプセル DDS の計測と制御, Bio Medical Engineering, 6-1, (1992), 45-52.
- (4) 立花克郎, 超音波 TECHNO, 12-7, (2000), 58-61.
- (5) S. Hatanaka, T. Tomohito, T. Mamoru, M. Kuwabara, M. Sano and S. Asai, Effect of Process Parameters on Ultrasonic Separation of Dispered Particles in Liquid, Jpn. J. Appl. Phys. 38-5B, (1999), 3096-3100.
- (6) S. Yamahira, S. Hatanaka, M. Kuwabara and S. Asai, Orientation of Fibers in Liquid by Ultrasonic standing waves, Jpn. J. Appl. Phys. 39-6A, (2000), 3096-3100.
- (7) 野村信福・村上幸一・赤尾浩史・吉川幸紀, 超音波音場中を浮上・沈降する固体粒子の挙動, 機論, 67-657, C (2001), 1255-1261.
- (8) S. Nomura, K. Murakami and H. Akao, Numerical Analysis of a Single Solid Spherical Particle Falling in an Ultrasonic Standing Wave Field, Jpn. J. Appl. Phys. 40-5B, (2001), 3842-3845.
- (9) S. Hosokawa, A. Tomiyama and T. Hamada, Terminal Velocities of Single Spherical Particles Falling in a Water-Fluid Vertical Pipes, Two-Phase Flow Modeling and Experimentation, 2, (1999), 845-850.
- (10) 富山明男・片岡勲・坂口忠司, 気泡の抗力係数に関する研究, 機論, 61-587, B (1995), 2357-2364.
- (11) R. Clif, J. R. Grace and M. E. Weber, Bubbles, Drops, and Particles, Academic press, New York, (1978), 27.