

206 超音波音場中の固体粒子および気泡の挙動 (円管内の沈降・浮上速度の測定)

Behavior of Rigid Particles and Bubbles in an Ultrasonic Field
(Measurement of Falling and Rising Velocities in Cylinders)

○正 野村信福(愛媛大) 学 西田憲司(愛媛大院) 正 村上幸一(愛媛大)

Shinfuku NOMURA, Kenji NISHIDA and Koichi MURAKAMI
Dept. of Mech. Eng., Ehime University, 3, Bunkyo-cho, Matsuyama

The behavior of solid spherical particles and air bubbles moving in an ultrasonic standing wave field are investigated experimentally. An ultrasonic transducer of 45kHz 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 cylinders are inserted in this channel and particles and bubbles are dropped or raised into the cylinders respectively. In the experiment for rigid 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 cylinders 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, Cylinder

1. はじめに

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や薬物伝送システム(DDS)への応用や固気液混相流中で粒子の凝集・分散などの操作を行うことが可能である。

著者ら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、水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し、粒子の速度が減速することを明らかにした⁽¹⁾。図1は著者らが以前行った超音波定在音場中を沈降する固体粒子の沈降速度の解析結果である⁽¹⁾。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、音圧振幅が大きいほど速度の変動は大きくなる。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実線の円管内を自由沈降する粒子の速度より小さくなる。圧力振幅の増加とともに平均沈降速度は遅くなり、無次元圧 P_s^* が 2.3×10^{-4} になると、速度は0になり、音場中にトラップされる。これまでの研究では超音波を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、円管側壁から超音波を照射した場合の実験を行った。さらに固体粒子のみではなく、円管内を上昇する気泡についても調べ、固体粒子と気泡の挙動について得られた知見を報告する。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を図2に示す。実験は、(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。装置は高さ1240mm、内径が縦57mm、横57mmの亚克力製矩形管の下端から620mm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ている。超音波は発振器で発生させた連続正弦波をパワーアンプで増幅し、矩形管側壁に取り付けられた厚さ2mm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、気泡の浮上実験ではシリコンオイル(比重 0.965、粘度 $\mu = 0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$)がそれぞれ使用された。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。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だし、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。

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が測定された。

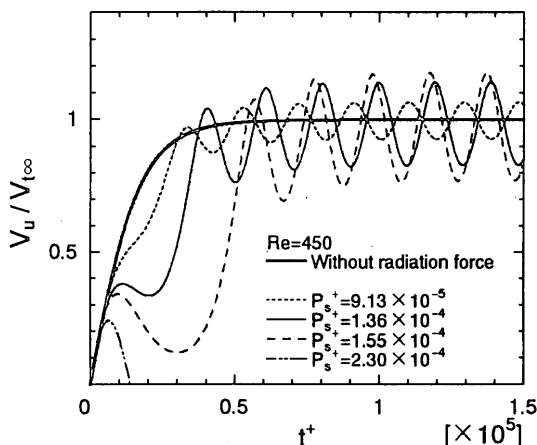


Fig.1 Particle falling velocity calculated by BBO in a standing wave field

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が現象は大きく異なることが予想される。そこで、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3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 μm)を混ぜて超音波をかけると、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ので、シリコンオイルでは音圧の腹の位置を $h=11\text{ mm}$ 、節の位置を $h=29\text{ mm}$ と決定した。以上の結果をふまえて、脱気水では音圧測定の結果から腹($h=17\text{ mm}$)と節($h=29\text{ mm}$)の位置をそれぞれ

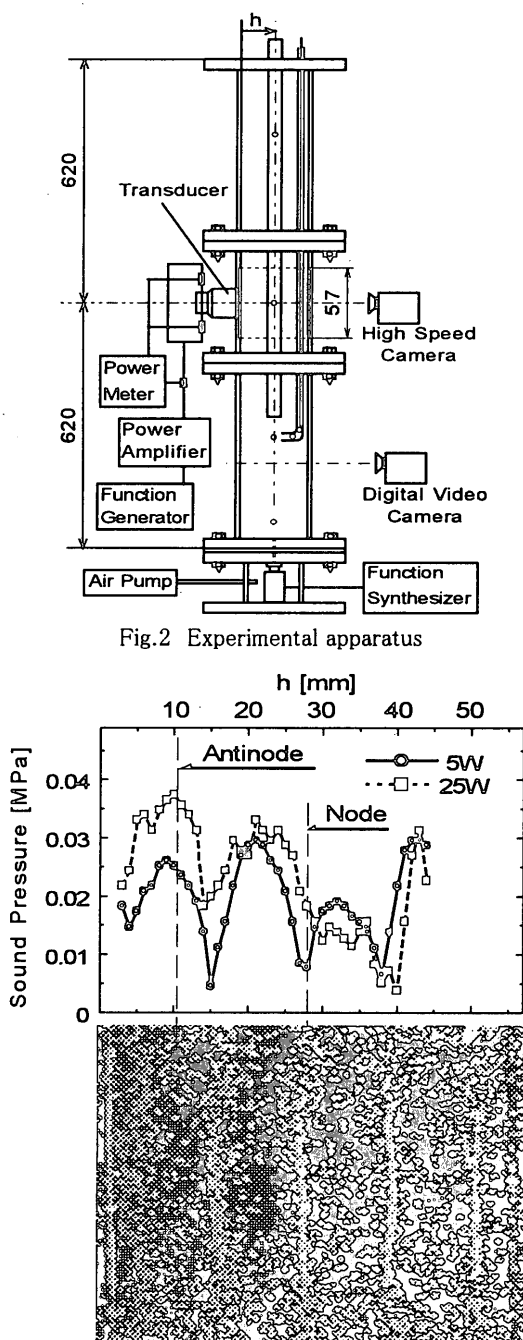


Fig.3 Comparison of pressure amplitude by hydrophone and visualization of sound pressure using polypropylene particles in silicone oil

決定した。

3.2 粒子の沈降・浮上実験 図4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終端速度を表す整理式を示している⁽¹⁾。図中には測定データの平均値とすべての実測結果の範囲が示されている。終端速度は d/D が大きくなるにつれて管壁の影響で遅くなる。超音波音場中を通過するときの速度は、超音波照射区間の57 mmを通過する時間を測定し、その区間の平均速度を V_u として求めた。沈降速度は節よりも腹を通過するときの方が遅い。図5は縦軸に超音波照射前後の速度比を縦軸にとって整理した結果である。固体粒子には音圧の節にトラップされる力が働き、節を通過する粒子にはこの力が抵抗力として作用するため速度は減速する。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ゆっくり沈降していくため、速度減速の効果は d/D が小さいほど大きくなる。粒子径の小さい $d=1.8\text{ mm}$ 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、減速効果が大きく考えられる。

図6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、その減速効果は音圧の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。

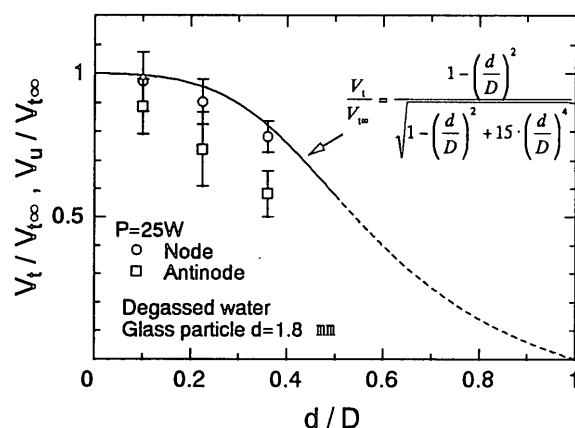


Fig.4 Falling velocity of glass particles in an ultrasonic field

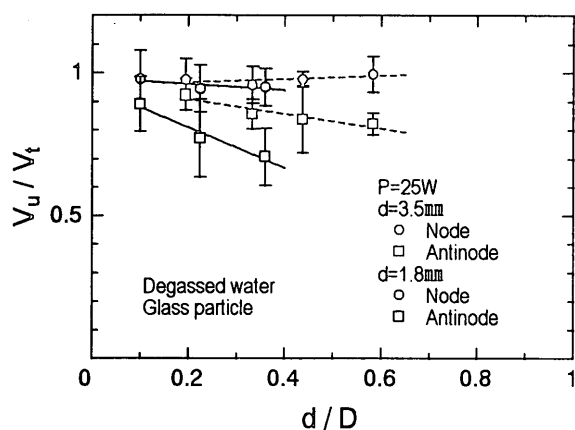


Fig.5 Deceleration ratio of glass particles

4. 単一気泡の挙動

4.1 単一気泡の浮上速度 図7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り、 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 $C_D = 16/Re(1 + 0.15Re^{0.687})$ を用いている⁽²⁾。図8は円管内を上昇する気泡形状を示した結果である。 $d_e = 3$ mmの気泡は管径によらずほぼ球形を保って管内を上昇しているが、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9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 $Re(= V_t d_e / \nu)$ 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⁽³⁾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10は気泡の上昇速度の結果である。(a)は $d_e = 3$ mmのときであり、 $d_e/D > 0.3$ では音圧の節の位置を通過したときに V_u/V_t は1より大きくなっている。一方、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受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。これらの傾向は前節の固体粒子の結果と同じである。 $d_e/D > 0.55$ 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。(b)は $d_e = 5$ mmの場合であり、 $d_e/D < 0.6$ 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 $D = 8$ 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、 $d_e = 4.2$ mm~5.0 mmではアスペクト比が約2の縦長の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、変形によって d/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、

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

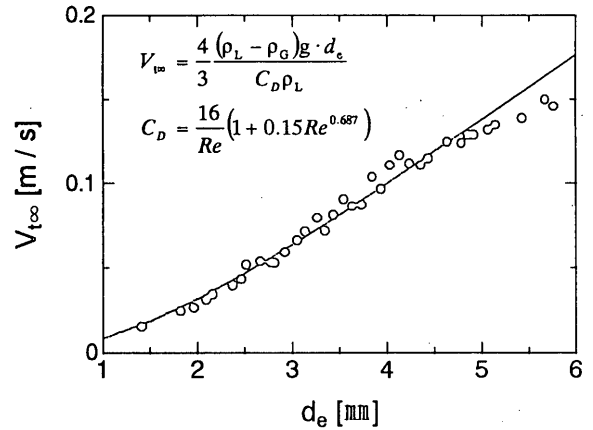


Fig.7 Terminal velocity of bubbles

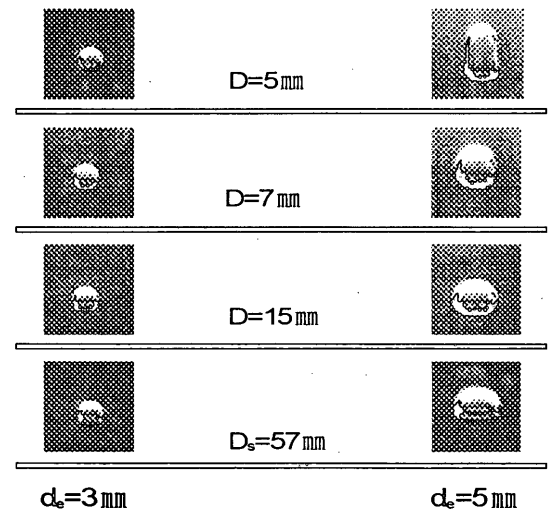


Fig.8 Photograph of rising bubbles in cylinders

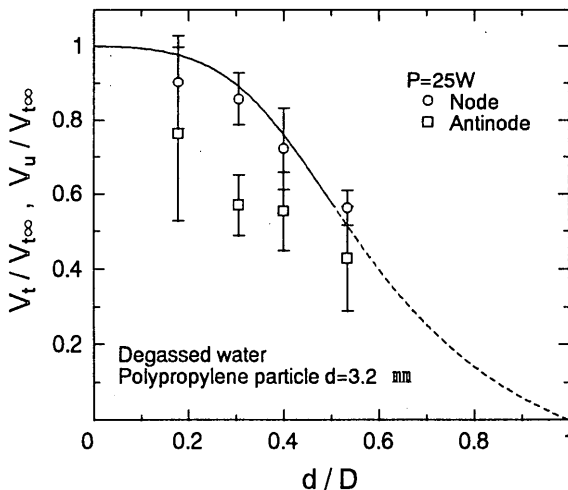


Fig.6 Rising velocity of polypropylene particles in cylinders

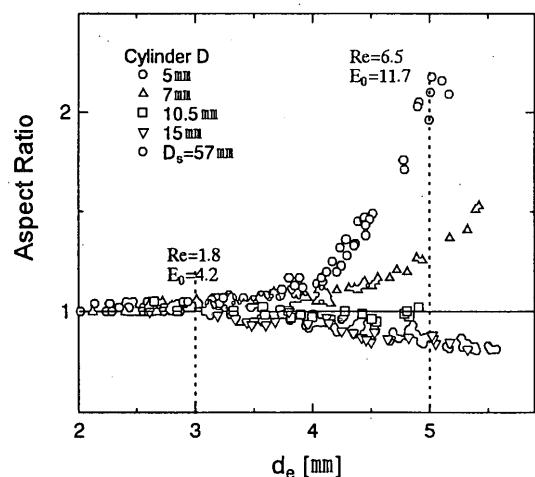


Fig.9 Aspect ratio of bubbles in cylinders

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, 後が2)のときの V_t を計算すると, 球形の場合の約 1.6 倍であった. 図 10(b) 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. これらの気泡の様子を図12に示した. 気泡は定在波音場のどの位置を通過するかによってその軌跡が大きく異なる. このため, たとえ出力が小さくても気泡径が大きい場合は, 超音波によって気泡の形状が縦長に変形し気泡の速度は増加する.

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

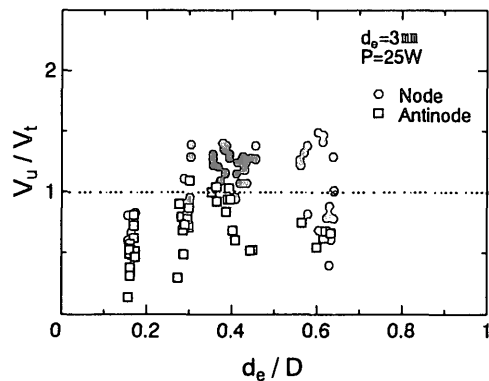
は気泡の抵抗係数低減の効果と, 音響放射力による減速効果が相殺されているため, 速度の変化が小さかったと言える. これら一連の結果は, 固体粒子の減速効果と, 気泡の加速効果を利用すれば, 固気液混相流中での凝集・分散などの操作が, 超音波で効果的に行える可能性があることを示唆している.

5. 結論

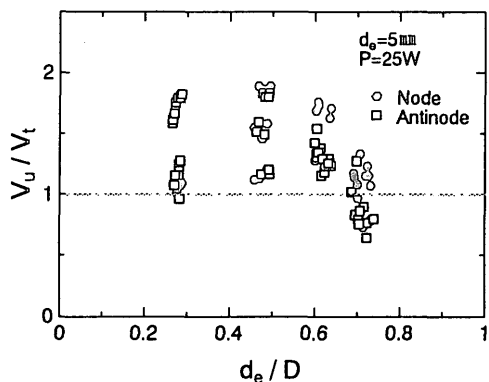
超音波照射による粒子の平均移動速度は, 沈降・浮上に関わらず, 減速する. また, 音圧振幅の腹の位置を通過するほうが, 節よりも減速する. 一方, 上昇する気泡は, 気泡径が大きくなると, 超音波によって気泡形状が縦長に変形するため, 流体抵抗が低減され速度が加速する.

おもな記号

C_D : 抵抗係数, D : 円管直径, 矩形管内径, d_e : 体積等価直径, h : 振動面からの距離, P_s^* : 無次元圧力 $= P_s / (\rho f \cdot c^2)$, t^* : 無次元時間 $t = t^* \omega$, V : 粒子の平均沈降(浮上)速度, V_t : 粒子の終端速度, V_u : 超音波音場中を沈降(浮上)する粒子の速度, V_∞ : 無限流体中を浮上(沈降)する粒子の終端速度



(a) $d_e = 3 \text{ mm}$



(b) $d_e = 5 \text{ mm}$

Fig.10 Rising velocity of bubbles in cylinders

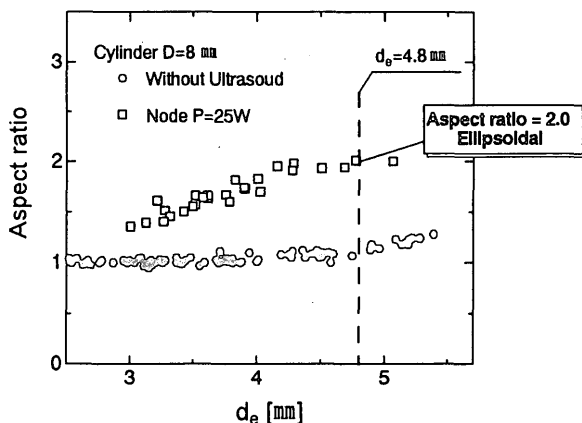


Fig.11 Deformation of bubbles by ultrasound

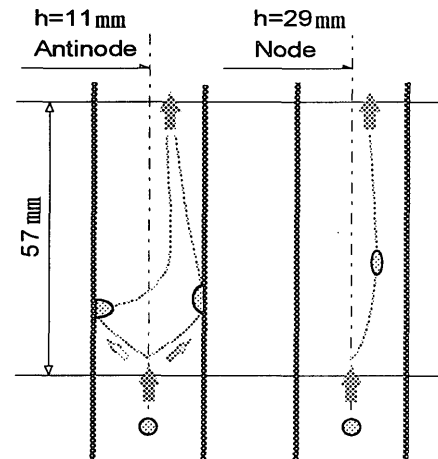


Fig.12 Sketch of path of bubbles by radiation force($d_e = 3.0 \text{ mm}$)

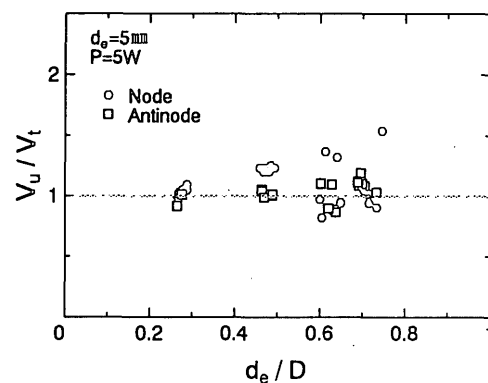


Fig.13 Rising velocity of bubbles, ultrasonic power 5W

参考文献

- (1) 野村 他3名, 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) 印刷中.
- (2) 富山・片岡・坂口, 機論(B), 61-587(1995)2357.
- (3) R.Clif, J.R.Grace, and M.E. Weber, *Bubbles, Drops, and Particles*, Academic press, New York, (1978) 27.