液相の粘性が鉛直管内単一大気泡周囲の平均速度場に及ぼす影響*

南川 久人^{*1}, 山田 哲史^{*2}
安田 孝宏^{*1}, 塩見 洋一^{*3}Effect of Liquid Viscosity on the Average Velocity Field
around Single Large Bubbles in a Vertical PipeHisato MINAGAWA^{*4}, Satoshi YAMADA,
Takahiro YASUDA and Yoichi SHIOMI^{**}Department of Mechanical Systems Engineering, The University of Shiga Prefecture,
2500 Hassaka-cho, Hikone-shi, Shiga, 522-8533 Japan

The effect of viscosity of the liquid phase on the averaged liquid velocity field in front of, around and behind the large bubble rising in stagnant liquid in a circular pipe of inner diameter $D=40.0$ mm is measured. Ultrasonic Velocity Profile monitor (UVP) is used to measure the velocity field. The instrumentation and measurement method are similar to those the authors have presented in the previous paper⁽²⁾. Five kinds of silicone oil whose kinetic viscosities cover $102\sim 8946$ mm²/s and water are used as the liquid phase. In the liquid phase in front of the large bubble, the magnitude of small upward velocities decreases with increasing the kinetic viscosity. In the liquid film around the large bubble, the downward acceleration is small when compared with water. The maximum downward velocity in the film soon becomes a constant value of bubble rising velocity approximately if the kinetic viscosities are larger than 330 mm²/s. In the wake behind the bubble tail, a large ring vortex, which appeared when water is used, is not recognized for the silicone oil.

Key Words: Large Bubble, Multiphase Flow, Average Velocity Field, Viscosity, Wake, Velocity Profile, UVP

1. 結 論

鉛直管内気液二相スラグ流は、種々の工業配管系、化学工学装置・発電所や流体機器内で頻繁に出現するものの⁽¹⁾、その微視的特性は十分解明されているとはいえない。これは、大気泡の先端から周囲の液膜へ流れが落下し、液体スラグ部上部のウェイク部で渦を引き起こすといった複雑な流れの構造、あるいは気泡分布などが系統的に把握されていないのが一因である。このようなデータを系統的に取得するために、著者らは鉛直管内気液二相スラグ流の単純型と考えられる、静止水中を上昇する単一大気泡を取り上げ、その周囲の平均速度場を超音波流速分布計(Ultrasonic Velocity Profile monitor: UVP)を用いて明らかにする方法を提示した⁽²⁾。これは、管内径 54mm の鉛直円管の中心軸を含む面内に 2 方向(水平に対して $\pm 20^\circ$)に向けた 2 本の超音波トランスデューサを配置し、管内に水を満たしたのち、そこに単一大気泡を複数回上昇させて、

その速度分布を測定し、平均値を表示したものである。その結果、大気泡上部の液相中から周囲の液膜内、さらには大気泡後方のウェイク部での速度場の特徴が明らかになった。たとえば、大気泡上部の液相中では、大気泡の直上に上向きの流れができ、これが中心から管壁方向に大きく傾き、やがて大気泡界面に沿う流れとなり周囲の液膜へと落ちていく。この流れと大気泡先端付近から管壁近くでできる鉛直下向きの壁に沿う流れが、やがて合流し、複雑な速度分布を形成する。大気泡周囲の液膜内速度場での落下最大速度は、最初から自由落下曲線に沿うことなく、重力加速度より小さな加速度で増速している。さらに、大気泡後方のウェイク部で管壁付近では、管壁付近の強い下向きの流れと管軸付近での上に向かう流れが起因する環状の渦が、大気泡後端付近に生じていることなどが確認された⁽²⁾。

ところで、このような単一大気泡周囲の平均速度場に、液相の粘性が及ぼす影響に関する知見は、現在まであまり得られていない。Nogueira ら⁽³⁾は、水性グリセリン溶液を用いて、粘度が $2\sim 178$ mPa·s の範囲で PIV によりウェイク部のみの速度場を測定し、粘性に

* 原稿受付 2007 年 7 月 23 日。

^{*1} 正員、滋賀県立大学工学部(☎ 522-8533 彦根市八坂町 2500)。^{*2} 正員、マツイ機器工業(株)(☎ 526-0802 長浜市東上坂町 242-5)。^{*3} 正員、龍谷大学理工学部(☎ 520-2194 大津市瀬田大江町横谷 1-5)。

E-mail: minagawa@mech.usp.ac.jp

よって 3 種類の流動様式になることを確認している。Bugg ら⁽⁴⁾ は、動粘度約 $92 \text{ mm}^2/\text{s}$ のオリーブオイルを用いて PIV による大気泡先端部とウェイク部の速度場を計測した。非常に精度の高い測定結果であるが、流動条件に限られ、系統的なデータは得られていない。そこで、本研究では、基本的に既報⁽²⁾と同じ UVP による測定法を適用し、水に加えて、動粘度の異なる 5 種類のシリコンオイルを液相として用い、管内径 40.0 mm の鉛直円管中を上昇する単一大気泡の周囲の平均速度場を測定した結果について、報告する。

2. おもな記号

- D : 管内径(m)
- L_0 : 初期気泡長さ(m)
- r : 管中心軸からの半径方向距離(m)
- u : 局所速度(m/s)
- u_B : 大気泡の終端上昇速度(m/s)
- Z : 大気泡後端から下方への距離(m)
- z : 大気泡先端から下方への距離(m)
- ν : 動粘度(mm^2/s)

3. 実験装置及び方法

3.1 実験装置と方法 既報⁽²⁾でも述べたように、UVP は、トランスデューサからパルス状の超音波ビームを発信し、液中にある微細粒子から反射してきたエコーを同じトランスデューサで受信し、ドップラー周波数を求める。計測線上の速度分布は、パルス発信から受信までの時間差より位置を算出し、瞬時のドップラー周波数より微細粒子速度を算出することで求められる。一平面上に異なった方向に向けた 2 本のトランスデューサを配置すれば、各計測線方向の速度成分がわかるので、これより実際の速度ベクトルが算出できる。ただし、このままでは大気泡のどの部分からのエコーであるのが特定できないので、液相が水の場合には、管中心付近に導電部をもつ電極を設置し、その信号を利用した。一方、液相がシリコンオイルではこれが使えないため、今回はエコーの信号をよく調べ、大気泡先端が到達した際に生じる管中心付近の信号の特徴的な波形を抽出し、そこを先端位置とした。この位置は、別途ビデオ撮影画像と照合した結果、妥当であることが確認できた。

液相としてシリコンオイルを用いる場合の実験装置の全体図を図 1 に示す。なお、液相として水道水を用いたときの実験装置ならびに方法は、既報⁽²⁾のものと管内径を除いて同じであるので、ここでは省略する。

まず、図 1 の管内にシリコンオイルを満たす。この際、下部にある 2 つのボールバルブのうち、下側のボールバルブ 1 のみを閉めておく。シリコンオイル中には、超音波の反射体として低密度ポリエチレン粒子(中位粒子径 $160 \mu\text{m}$, 平均質量濃度 0.0375%)を混入させた。この粒子は微細で、シリコンオイルの密度 ($968 \sim 974 \text{ kg/m}^3$) と比較的近い密度 (918 kg/m^3) をもつため、管内であまり浮上をせず、ほぼ一定の位置にとどまっている。

次に、上側のボールバルブ 2 も閉め、空気入口弁とオイル排出弁の両方を開き、空気を一定量、注入する。図では省略しているが、実際のオイル排出弁は 4 個付けており、その位置により初期気泡長さ L_0 (オイル排出弁からボールバルブ 2 の下面部までの距離) が決定される。その後、ボールバルブ 2 を開くことによって、空気は大気泡となって、シリコンオイルで充たされた管内を上昇し、約 1500 mm 上方の試験部で、治具に取り付けた UVP トランスデューサの前を通過する。

試験部には、図 1 の左側のように UVP のトランスデューサ (周波数 4 MHz , ビーム径 5 mm) を水平に

Fig.1 Experimental Apparatus

Fig. 2 Setting of a UVP Transducer

対して上向き 20° で設置した場合と、右側のように下向き 20° で設置した両方の角度で、各流動条件に対して測定を行った。

図 2 に測定部のトランスデューサ取り付け治具の詳細を示す。この図は、トランスデューサを水平に対して上向き 20° で設置した場合である。トランスデューサは、管軸を含む面内に取り付けた。超音波の減衰を防ぐため、トランスデューサ先端は、管内と同じシリコンオイルを満たした部分に入れた。図のように、トランスデューサから発信された超音波は管壁面で反射し、トランスデューサ治具の壁に当たる。予備検討において、この治具から返ってきた信号をトランスデューサが受信してしまい、流れ場から返ってきた信号と平均化され、速度値が極端に小さくなることがわかった。この問題を解消するために、治具の壁から返ってきた信号が管中心軸より遠方のデータとなるように、管壁と治具の壁の間に十分な距離 (47mm) を設けた。

測定は、水と 5 種類の動粘度の異なるシリコンオイルの計 6 種類の液相に対し、大気泡長さが異なる 4 種類のグループの計 24 条件に対して実施し、各方向のトランスデューサにつき、各条件最低 20 個の大気泡についての速度データを取得した。なお、既報²⁾でも述べたように、本測定法では管路を流動軸方向に 5.38mm 刻み、半径方向に 0.695mm 刻みのセルに分割し、各セル内に含まれる方向ごとの速度データを算術平均し、さらに 2 方向の算術平均値から各セル中心における速度ベクトルを算出する。超音波ビーム径が 5mm で、 20° 傾けて測定することによって測定体積の周辺部の 51% が両側のセルに重なってしまうという欠点があり、これにより速度勾配が急峻な液膜部などでは測定誤差が大きくなると考えられる。したがって、このような部分での速度勾配の検討は本研究では行わない。また、大気泡周囲の速度場測定においては、管中心より手前半分のみを測定した。管全体のイメージを表示する際には、管軸対称の仮定の下、反対側にはそれを折り返したデータを表示することとする。

3.2 測定に用いたシリコンオイル 液相として、水のほかに、比較的水と近い密度をもち、無色透明な 5 種類のシリコンオイル (品名: TSF451 シリーズ, GE 東芝シリコン株式会社製) を用いた。その諸特性を表 1 に示す。シリコンオイルの動粘度は、ウベローゼ粘度計を用いて測定した結果である。液温を $20 \pm 1^\circ\text{C}$ に調節し、それぞれ 5 回ずつの測定から得られた平均値を動粘度として用いた。水 (20°C) の動粘度がほぼ $1\text{mm}^2/\text{s}$ であるので、各シリコンオイルの動粘度の値は、水のほぼ 100~9000 倍ということになる。音速測定には、超音波探傷計を用いた。5MHz の超音波パルスを入射してから 1 回反射の底面エコー、2 回反射の底面エコーが到達するまでの時間差を測定し、音速を求めた。密度、表面張力、屈折率はメーカーによるカタログ値である。

Table 1 Properties of Silicone Oils under Test

Product	Density [kg/m^3]	Kinetic Viscosity [mm^2/s]	Surface Tension [mN/m]	Refractive Index [-]	Sound Velocity [m/s]
TSF451-100	968	102	20.8	1.401	1014
TSF451-350	970	330	20.9	1.403	1014
TSF451-1000	971	951	21.1	1.404	1015
TSF451-3000	972	2937	21.2	1.404	1025
TSF451-1M	974	8946	21.4	1.404	1011

3.3 大気泡形状の測定 予備実験として、大気泡の形状を測定した。光の屈折の影響による画像の変形を小さくするため、試験部のみを外形断面が正方形の管に替えてデジタル・ビデオにより正面から大気泡を撮影した。なお、内側は、速度分布測定時と同じ、内径 40.0mm の円形である。その結果を図 3 に示す。動粘度が大きくなるに従い、気泡形状が砲弾形から楕円球形へと変化していくことがわかる。シリコンオイル中を上昇する気泡は、気泡後端における小気泡の離脱が水に比べて非常に少なく、もっとも動粘度が小さい $\nu = 102\text{mm}^2/\text{s}$ の場合でも、数個の小気泡が見えているだけである。その $\nu = 102\text{mm}^2/\text{s}$ の気泡後端は、気泡内部に大きな空隙がある、いわゆるスカート状になっており上昇に伴って揺らいでいた。 $\nu = 330\text{mm}^2/\text{s}$ となると、スカート部が少し短くなり、形状も揺らぐことなく安定している。 $\nu = 951\text{mm}^2/\text{s}$ 以上の高い動粘度のシリコンオイルでは、スカート部はほぼ確認できなくなり、気泡の先端・後端が同じ形状の楕円球形となる。

それ以降動粘度を増やしても形状に大きな変化は見られないが液膜が徐々に厚くなっているようである。また、水で見られたような、大気泡後端に向かって液膜が薄くなっていく傾向も $\nu = 102 \text{ mm}^2/\text{s}$ 以外は見られず、先端から少し離れたところで、液膜厚さは一定となっているようである。

そこで、液膜が一定となったときの液膜厚さを測定

Fig.3 Shapes of Single Large Bubbles Rising in Silicone Oil

Fig.4 Film Thickness

し、その結果を図4に示す。図3の画像は前述の通り外形断面が正方形の管を用いて撮影したが、それでもわずかに屈折の影響は残るので、これを考慮して気泡外形を算出した。動粘度の増加に伴い、液膜が厚くなっていることが確認できるが、その増加の割合は次第に小さくなっている。

3.4 大気泡の上昇速度 大気泡の終端上昇速度についても、あらかじめ検討した。形状同様、ビデオ画像を用いて測定した大気泡終端上昇速度を表2に示す。Whiteら⁽⁵⁾は、大気泡上昇速度をボンド数とモルトン数ならびにフルード数の線図にまとめ、これよりさまざまな管内径の鉛直管内においてさまざまな物性をもつ液相中の大気泡終端上昇速度を推定可能となっている。表2の結果と、Whiteらの線図から読み取った結果を比較すると、平均±3.1%で一致した。

Table 2 Terminal Rising Velocity of Single Large Bubbles in Silicone Oil

Kinetic Viscosity	[mm ² /s]	102	330	951	2937	8946
Large Bubble Rising Velocity	[mm/s]	208	189	114	51.3	17.2

4. 実験結果及び考察

4.1 速度場の概要 図5は大気泡周囲液相内の速度場全体像をベクトルで示した代表例として、スカート状の部分がある(a) $\nu = 102 \text{ mm}^2/\text{s}$ とそれのない(b) $\nu = 2937 \text{ mm}^2/\text{s}$ のものである。ともに初期気泡長さ $L_0 = 2.0D$ に対する結果である。ここで D は管内径、また図中の Z は大気泡後端、 z は先端を基準として管路下向きを正とする座標である。(a)の $Z=0$ に示す破線は実際の大気泡後端が確認された位置で、それ以降はスカート状の部分である。全般的に見ると、大気泡先端の上部には大気泡の上昇により押し上げられたようなわずかな上向き速度が測定されている。これは Buggら⁽⁴⁾の結果と一致する。大気泡周囲の液膜内には、下向きに流れがあるが、先端部近くを除いて、水の場合のように顕著な下向きの加速は見られない。液膜下部や大気泡後端の下部にあるウェイク部においても、水の場合⁽²⁾に見られたような大きな速度や、顕著な渦の構造は見られない。(a)と(b)での速度の大きさの違いは一見顕著ではないが、これはベクトルの単位長さあたりの速度の大きさが(a)と(b)では異なるため、実際の速度ベクトルの絶対値は、動粘度の大きい(b)より、

Fig.5 Velocity Fields for $L_0 = 2.0D$

小さい(a)の方が、ずいぶん大きいことが確認できる。また、スカート状部の有無による違いはあまり顕著ではなく、スカート状部のある(a)ではあたかもスカート後端が(b)の大気泡後端のようにふるまい、この下側に大気泡を追う上向きの流れが見られる。

速度場に及ぼす、動粘度による影響をさらに詳しく見るために、水の結果ならびに図5の2条件を含めた初期気泡長さ $L_0 = 1.5D$ におけるすべての動粘度での速度場の測定結果を、図6に示す。ただし、紙面の都合で、管全体でなく、左半分のみを表示した。ここでも、単位ベクトルの速度の大きさが各動粘度毎に異なることに注意されたい。左端に水での結果、それより右はシリコンオイルの結果で、右に行くほど動粘度の大きいものである。測定された速度の大きさは、全般的に水で最大、以降、動粘度が増すほど小さくなっている。大気泡先端部の上向き流れはいずれの場合も見られるが、その速度の大きさは、やはり動粘度が増すほど小さくなっている。また、水では後端に達した液膜流が、そのまま壁際を下流する流れを形成し、その影響で管中心部には大気泡を追う上向き流れが発達し、これらが大きな渦を作っている⁽²⁾。これに対し、動粘度の大きいシリコンオイルの場合、スカート状の部分を含めた後端部は、徐々に気泡が細みを帯びる形状なので、液膜流はそれに伴って広がり、流下速度は低下している。したがって、水の場合のような壁際の下向き流れは、ほとんど見られない。一方、管中心部には大気泡を追う上向き流れが見られるものの、その

Fig.6 Effect of Viscosity on Velocity Fields
for $L_0 = 1.5D$

領域は大気泡、あるいはスカート状の部分の後端からわずかに下にいくと消えてしまい、水の場合のような渦は見られない。

4.2 大気泡周囲の液膜 液膜内速度ベクトルの、鉛直下向きの速度成分のうちの最大値 $u_{z\max}$ を大気泡上昇速度 u_B で除して、 z に対してプロットしたのが図7である。記号○で示す水の場合、 $z = 0$ から初速度0で自由落下する曲線よりは少し小さい速度で落下し、本実験の最長の大気泡長さ ($L_0 = 4.0D$) においても、後端まで加速を続けていた⁽²⁾。しかし、動粘度の大きいシリコンオイルの場合は、異なる特性を示した。シリコンオイルのうちでは最も動粘度の小さい $\nu = 102 \text{ mm}^2/\text{s}$ の場合 (記号■)、先端から 30mm 程度は、気泡と管壁の間隙の形状変化に対応して見かけ上、加速しているものの、その後急激に加速度を減少させ、 $u_{z\max}/u_B = 2$ 程度の一定値となっている。それ以上の動粘度をもつシリコンオイルの場合、やはり先端から 30mm 程度は加速しているものの、その程度は小さく、 $u_{z\max}/u_B = 1$ 程度の値となると加速を止め、一定速度で下降していく。すな

Fig. 7 Maximum Downward Velocities in the Liquid Film for $L_0=4.0D$

わち、最大液膜下降速度は、ほぼ大気泡上昇速度と等しいということになる。図で $z = 200\text{mm}$ あたりから再び減速するのは、前節で述べたとおり、大気泡形状が後端で丸まり、液膜が厚くなるために見かけ上、減速しているためである。

4.3 大気泡後方のウェイク部 図 8 に大気泡後端からの距離 Z ごとに、速度ベクトルの鉛直上向きの速度成分 u_z を、大気泡上昇速度 u_B で除したものを縦軸に、半径方向位置を横軸にとって示す。4.1 節で述べたように、記号 $\circ$ で示す水の場合、管壁近くに下向きの、管軸周辺に上向きの大きな速度をもつ。後者の上向き速度は、大気泡後端直後より、少し離れたところで最大値をもつ⁽²⁾。シリコンオイルのうち、最も動粘度の小さい $\nu = 102\text{mm}^2/\text{s}$ の場合（記号■）、大気泡直後は、スカート状部分の影響で測定できず、 $Z=32.5\text{mm}$ で、はじめてデータが現れているが、ここでは水と同様に管軸周辺に上向きの速度をもつ。しかし、その絶対値は小さい。それ以上の動粘度の場合は、 $Z=2.5\text{mm} \sim 22.5\text{mm}$ では、多少の上向き流れが見られるが、大気泡から離れたとともに急激に減衰し、それ以降、ほぼ静止している。

5. 結 論

本研究では、基本的に既報⁽²⁾と同じ UVP による測定法を適用し、水に加えて、動粘度 $\nu = 102 \sim 8946\text{mm}^2/\text{s}$ の 5 種類のシリコンオイルを液相として用い、管内径 40.0mm の鉛直円管中を上昇する単一大気泡の周囲の平均速度場を測定し、液相粘性の変化が、速度場に及ぼす影響を検討した。その結果、以下の知見を得た。

(1) シリコンオイルを用いた場合でも、水と同様に大気泡先端の上部にわずかな上向きの速度が測定され

Fig. 8 Velocity Profiles in the Wake behind the Large Bubble

たが、その速度の大きさは、動粘度が増すほど小さくなった。

(2) 大気泡周囲の液膜内には、下向きの流れがあるが、先端部近くを除いて、水の場合のように顕著な下向きの加速は見られなかった。 $\nu = 330\text{mm}^2/\text{s}$ 以上の動粘度をもつシリコンオイルの場合、先端から 30mm 程度は、気泡と管壁の間隙の形状変化に対応して見かけ上、加速しているものの、その加速度は小さく、 $u_{z\text{max}}/u_B = 1$ 程度の値となると加速を止め、一定速度で下降した。これは、最大液膜下降速度は、ほぼ大気泡上昇速度と等しいということを意味する。また、後端に向かうにつれ、徐々に気泡が細みを帯びる形状のため、液膜流はそれに伴って拮がり、下降速度は再び低下した。

(3) シリコンオイルを用いた場合、大気泡後端の下部においても、大きな速度や、顕著な渦の構造は見られなかった。速度の減衰の度合いは非常に大きく、 $\nu = 330\text{mm}^2/\text{s}$ 以上の動粘度をもつシリコンオイルの場合、後端から 30mm 以上離れたと、ほぼ静止した。

謝 辞

実験遂行にご協力いただいた元滋賀県立大学大学院

工学研究科学生の中澤喜之氏, 元工学部学生的美馬興己氏に感謝する。

文 献

- (1) The Japan Society of Mechanical Engineers ed., Handbook of Gas-Liquid Two-Phase Flow Technology, Corona Publishing, Tokyo(1989).
- (2) Minagawa, H., Fukazawa, T., Nakazawa, Y., Yamada, S. and Shiomi, Y., Measurement of Averaged Liquid Velocity Field around Large Bubbles Using UVP, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.72, No.714(2006), pp.345-352.
- (3) Nogueira, S., Riethmuller, M., Campos, J.B.L.M. and Pinto, A.M.F.R., Flow Patterns in the Wake of Taylor Bubbles Rising in Stagnant Liquid, *Proceedings of the 4th International Conference on Multiphase Flow*, New Orleans, (2001), Paper No.899, in CD-Rom.
- (4) Bugg, J.D. and Saad, G.A., The Velocity Field around a Taylor Bubble Rising in a Stagnant Viscous Fluid: Numerical and Experimental Results, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.28(2002), pp.791-803.
- (5) White, E.T. and Beadmore, R.H., The Velocity of Rise of Single Cylindrical Air Bubbles through Liquids Contained in Vertical Tubes, *Chemical Engineering Science*, Vol.17(1962), pp.351-361.