

水-マイクロバブル 2 相流の流動特性 —速度分布測定および流動状態の可視化—

荒賀 浩一*, 村田 圭治*

Flow Characteristics of Water-Microbubble Two-Phase Flow

Koichi ARAGA and Keiji MURATA

It is known that small quantities of surfactant additives can greatly reduce the friction factors during the flow of a heat transfer medium. This is because the generation of turbulent vortices is suppressed by the formation of rod-like micelles, and the flow remains laminar in the high Reynolds number range. However, the method by surfactant additive would be limited to just the closed loop system because of environmental impacts. On the other hand, the method by microbubble injection into water has attracted a lot of attention because of the low environmental impact. However, the drag reduction effect of microbubble injection often remains unclear, including their mechanisms. In addition, there are very few reports on drag reducing effect of microbubble injection into pipe flows. This paper describes the experimental results of water-microbubble two phase flows in a horizontal pipe. As experimental results of the friction factor, flow visualization and velocity profile, the drag reducing effect of microbubble injection was not observed in this experiment. The flow characteristics were quite similar to water single phase flow.

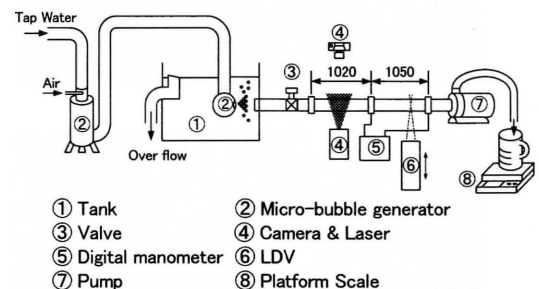
Keyword: Micro bubble, Drag Reduction, Two phase flow

1. 緒 言

管内流れの抵抗低減法は数多く提案されている。そのひとつに、ある種の界面活性剤を溶媒に添加する方法がある。これは、溶液中に形成される棒状ミセルにより乱流遷移が抑制されるというものであり、管摩擦係数が最大で 80% 程度も減少する¹⁾。しかし、界面活性剤添加による方法はその環境負荷の大きさから、どうしても閉ループ系の利用に限定される。一方、環境負荷の小さな抵抗低減法として近年注目を浴びつつある技術がマイクロバブル混入による抵抗低減法である。これは、マイクロバブルを固体表面に形成される乱流境界層内に注入し、境界層内の乱流特性を変化させることにより摩擦抵抗を低減させる方法である。しかし、水にマイクロバブルを混入させた水-マイクロバブル 2 相流の抵抗低減効果はそのメカニズム等も含めていまだ未解明な点も多く^{2) 3)}、さらに、工業上重要な管内流れを対象とした抵抗低減効果の報告は極めて少ない。本報告は既報⁴⁾に引き続き、比較的簡便な方法により MB を発生させ、その MB を含む水-マイクロバブル 2 相水平流の流動特性を管摩擦測定、LDV 流速測定、可視化撮影により調べた結果について報告する。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略図を図 1 に示す。マイクロバブルは市販の加圧溶解型マイクロバブル発生装置に、高速旋回流型マイクロバブル発生装置を組み合わせ、大気解放型タンク①内で発生させた。試験管路は内径 10.0 mm の水平アクリル製円管とし、試験区間は 1050 mm とした。管摩擦係数は試験区間の両端の差圧を差圧変換器⑤で測定して算出した。液流量は管路出口の流量計測タンクにて重量法にて測定した。速度分布は He-Ne レーザーを用いた LDV により測定した。測定位置は試験区間上流より 1560 mm の位置とし、半径方向速度分布を測定するため、自作のトラバースを用いて LDV 本体を移動させ、測定位置を変化させた。LDV 測定用散乱粒子として、水単相流の場合にはラテックスを微量添加した。マイクロバブル流の場合にはマイクロバブル自身を散乱粒子として用いた。また、マイクロバブル 2



*近畿大学工業高等専門学校

総合システム工学科 機械システムコース

Fig. 1 Experimental apparatus

相流の可視化撮影は光源にレーザーシート光を用いてデジタルカメラにて撮影した。実験を行った2相流のボイド率に関して、流動中のボイド率を測定することが難しかったため、実験の目安としてタンク内のマイクロバブルの体積含有率を測定した。その結果、本実験のMB体積含有率およそ0.5%であった。また、タンク内に生成されたマイクロバブルの平均気泡径は可視化写真から測定した結果、およそ $50\mu\text{m}$ であった⁴⁾。

3. 実験結果および考察

タンク内にてマイクロバブルが生成される様子を図2に

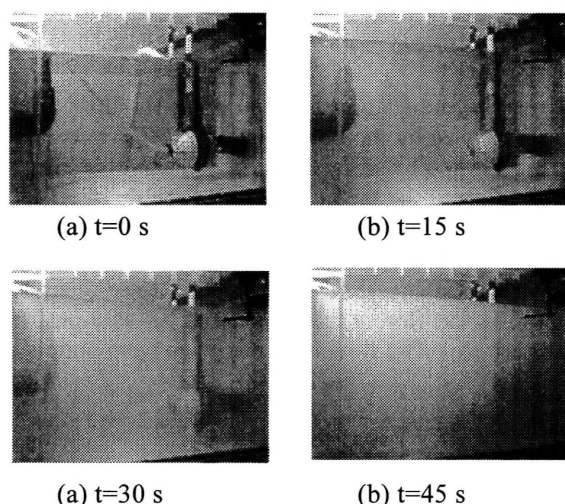
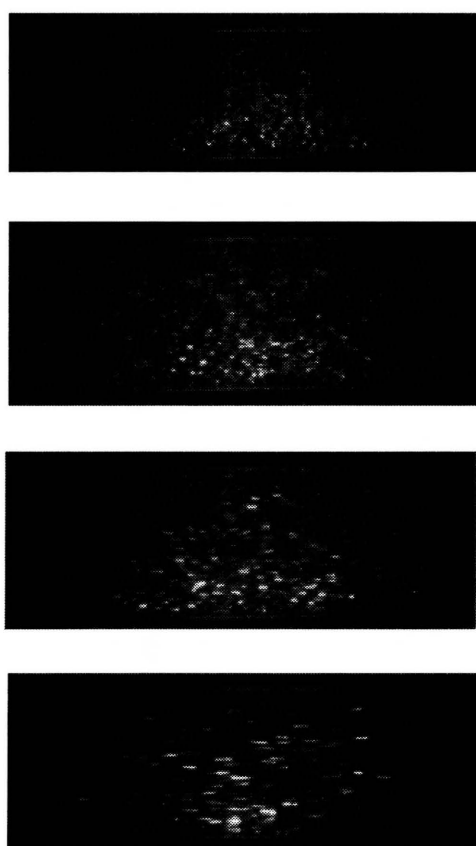


Fig. 2 Microbubbles in Tank



(d) $Re=10400$

Fig. 3 Flow visualization

示す。図2(a)はマイクロバブル発生装置に導水直後(0秒後)であり、タンク内は裏側が透けているが、時間とともにタンク内が白濁していることから、マイクロバブルで充填されていく様子がわかる。上述したMB体積含有率はおおよそ図2(d)の状態に測定したものであり、以下に示す管摩擦実験結果等についても図2(d)の状態で行ったものである。

水-マイクロバブル2相流の流動様式を調べるために、管路内を流れる水-マイクロバブル2相流をレーザーシート光を用いて可視化撮影した。得られた結果の一例を図3に示す。なお、撮影に用いたカメラのシャッター速度は $1/1600\text{s}$ である。図3より、管路中に微細な気泡が多数流動している様子がわかる。また、露光時間の影響により、図3(c) $Re=5900$ および図3(d) $Re=10400$ においては流跡線が明確に描かれている。この流跡線のみからは流動状態を断定することは難しいものの、流れは層流状態ではなく変動を伴う流れである様子がうかがえる。

このような流れのもとで、水および水-マイクロバブル2相流の管摩擦係数を測定した。得られた結果を図4に示す。図4より、水の管摩擦係数(\circ)は $Re=2000$ において急増し、 $Re > 3000$ ではBlasiusの値に一致していることがわかる。一方、抵抗低減効果の指摘される水-マイクロバブル2相流の管摩擦係数(\triangle , ∇)は、2回の実験結果ともに本実験においては水単相流と同じか、やや大きい程度であるのがわかる。したがって、したがって、本実験の管

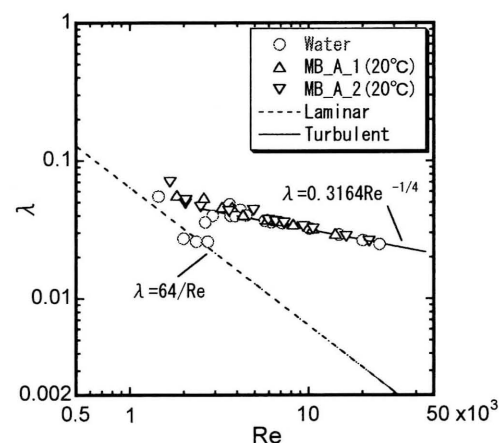


Fig. 4 Friction factor

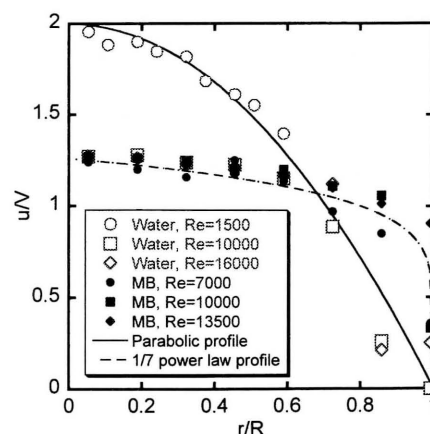


Fig. 5 Velocity profile

摩擦測定からは一般的に指摘されているマイクロバブル2相流の抵抗低減効果は確認できなかった。

次に、より詳細に水-マイクロバブル2相流の流動特性を調べるためにLDVにより速度分布を測定した。水および水-マイクロバブル2相流の速度分布を図5に示す。横軸は管中心からの位置を管半径で無次元化した無次元位置 r/R 、縦軸はその位置での速度を断面平均流速で無次元化した速度 u/V を表す。初めに、LDVシステムの確認の意味も含めて、水単相流の速度分布を測定した。図3より水単相流の $Re=1500$ の流れはほぼ放物型速度分布と一致しており流れが層流状態であるのがわかる。また、 $Re=10000$ 、 16000 の流れは壁面近くはLDVのサンプリングレートが低く、ノイズ等の影響もあって十分には計測できていないが、全体的には $1/7$ 乗則速度分布に従っていることから、流れは乱流状態であるのがわかる。以上の結果より、本実験に用いたLDVシステムにおいて、速度分布が測定できることがわかる。一方、水-マイクロバブル2相流の速度分布に注目すると、図5の $Re=7000$ 、 $Re=10000$ 、 $Re=13500$ の流れはいずれも放物型速度分布ではなく $1/7$ 乗則に従う速度分布である。したがって、速度分布からも本実験の水-MB2相流の流動状態はほぼ乱流状態であるのがわかる。この結果は図3の可視化写真の結果および図4の管摩擦係数の結果とも一致していることから、本実験においては、水-マイクロバブル2相流の抵抗低減効果は認められず、流れは水の場合とほぼ同様な乱流状態であるのがわかる。しかしながら、本実験においては流動中のボイド率等の測定を行っていない。一般的に、水-マイクロバブル2相流においてはボイド率が高いほうが抵抗低減効果がより増大するといわれている²⁾ことから、単にマイクロバブルの混入量が少ないことが影響していたとも考えられる。したがって、よりマイクロバブルの混入量を増やせば、水-マイクロバブル2相流の抵抗低減効果を確認できる可能性がある。

4. まとめ

水-マイクロバブル2相水平流の可視化撮影、管摩擦係数および速度分布を測定した。マイクロバブルは市販の加圧溶解型発生装置に、高速旋回流型マイクロバブル発生装置を組み合わせ発生させた。実験の結果、以下のことがわかった。

- 1) 可視化撮影の結果より管路中に微細な気泡が多数流動している様子が確認できた。
- 2) 管摩擦実験の結果よりマイクロバブルの抵抗低減効果は認められず、 $Re>3000$ の乱流領域に関しては水の乱流の値とほぼ同じであった。
- 3) 速度分布測定より水-マイクロバブル2相流の $Re>7000$ の流れはほぼ乱流状態であるのが確認できた。

謝辞

本研究を実施するにあたり、近畿大高専校長 神野 稔 氏には多大な支援を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- (1) Zakin, J.L., Lu, B. and Bewersdorff, H.W., Surfactant Drag Reduction, Rev. Chem. Eng., 14(4-5) (1998), 253-320.
- (2) 村井祐一, マイクロバブルを用いた摩擦抵抗低減, 日本機械学会誌, 115(1127) (2012), 688-691.
- (3) 芹澤ら, 垂直円管内を上昇するマイクロバブルを含むミルク状空気-水系気泡流の流動特性と疑層流化現象, Japanese J. Multiphase Flow, 19(4) (2005), 335-343.
- (4) 荒賀ら, 水-マイクロバブル2相流の流動特性 - 気泡径および管摩擦係数の測定結果 -, 近畿大学工業高等専門学校紀要, 6(2013), 1-3.