

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 —

荒賀 浩一*, 大西洋 和*, 田中 雄太*, 村田 圭治*

Flow Characteristics of Water-Microbubble Two-Phase Flow

Koichi ARAGA, Hirokazu ONISHI, Yuta TANAKA 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 a result of the friction factor measurement, the drag reducing effect of microbubble injection was not observed in this experiment.

Keyword: Micro bubble, Drag Reduction, Two phase flow

1. 緒言

各種工業分野において流体の摩擦抵抗を低減することは重要な課題であり、数多くの抵抗低減法が提案されている。たとえば、流体に機能を持たせて顕著な抵抗低減効果を発現させる方法として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%程度減少すると言われている⁽¹⁾。しかし、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に限定されてしまう。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。マイクロバブルとは一般的に直径数十 μm 以下の気泡のことをいう。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すると、境界層内の乱流特性が変化し、その結果、摩擦抵抗低減もしくは乱流遷移抑制が生じるといわれている⁽²⁾。しかし、マイクロバブル混入による抵抗低減法はそのメカニズム等も含めていまだ未解明な点も多く、さらに、工業上重要な管内流れを対象とした研究結果の報告は一部の報告⁽³⁾を除いて極めて少ない。本報告は市販の加圧溶解法によるマイクロバブル発生装置を用いてマイクロバブルを発生させ、そのマイクロバブルを含む水-空気二相水平流の管摩擦係数測定し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。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。タンク①内の作動流体は流量調整バルブ③、試験管路、マグネットポンプ⑥を通過後、流量測定タンクへ流入する。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。マイクロバブルは市販の加圧溶解タンクを有するマイクロバブル発生装置に異なる2種類のノズルを接続して発生させた。ノズルは旋回流型マイクロバブル発生装置を流用したもの（以下、Type Aと表記）およびアスピレーターを流用したノズル（Type Bと表記）の2種類を用いた。なお、本実験装置における二相流のマイクロバブル含有率（ボイド率）はタンク①内において計測した結果、Type Aでおよそ0.5%、Type Bでおよそ0.7%程度であった。

3. 実験結果および考察

Type AおよびType Bのマイクロバブルの気泡径を測定した。なお、Type Aは流動中のマイクロバブルを撮影した可視化写真から気泡径を測定した。Type Bは管路を流動する気泡量が多く、流動中の可視化写真からは気泡径の計測はできなかったため、タンク内のマイクロバブルを顕微鏡撮影した写真から気泡径を測定した。計測にはイメージ解析ソフトウェア（Hulinks社SigmaScan Pro）を用いた。なお、Type A、Type Bともにそれぞれ100個程度の気泡径を測定した。

図2にType Aの気泡径の測定結果を Re 別を示す。図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

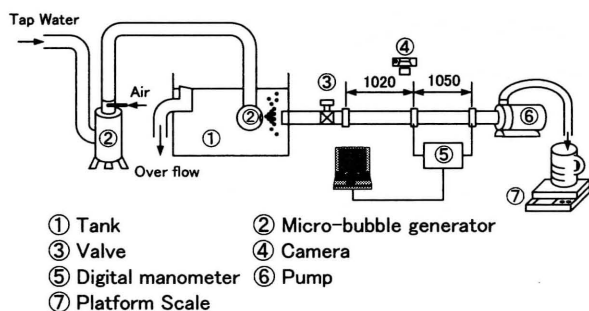


Fig. 1 Experimental apparatus

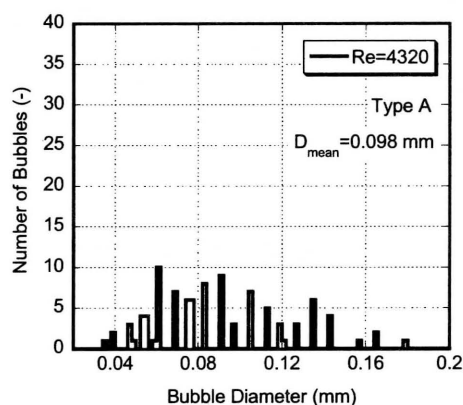
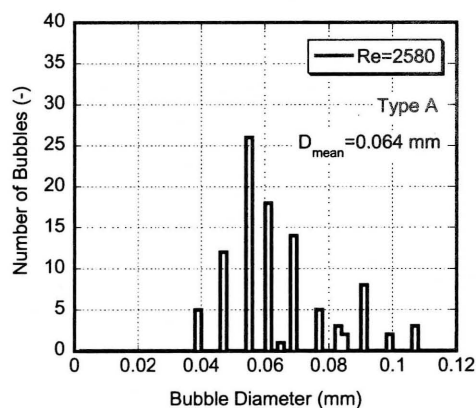
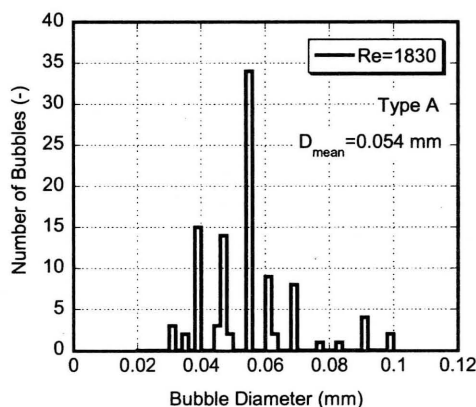


Fig. 2 Bubble size distribution (Type A)

より、 $Re=1830$ のグラフを見ると $50 \mu\text{m}$ 程度の気泡径のものが多数流れていることがわかる。しかしながら、 Re が

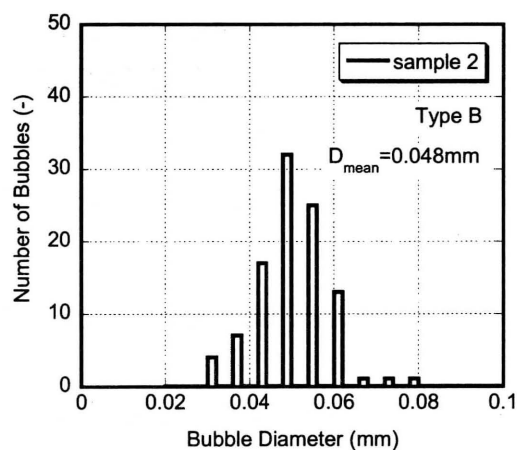


Fig. 3 Bubble size distribution (Type B)

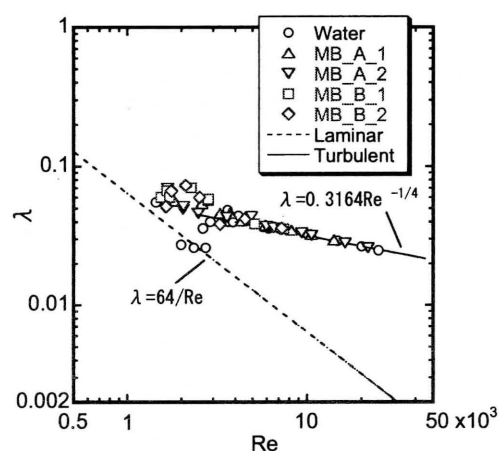


Fig. 4 Friction factor

高くなるにつれて様々な径の気泡が流れるようになり、平均気泡径も大きくなる様子が確認できる。

図 3 に Type B の気泡径の測定結果の一例を示す。図 3 より、平均で $50 \mu\text{m}$ 程度の気泡が存在しているのがわかる。これは Type A の $Re=1830$ の結果と同程度である。Type A, Type B それぞれの結果から、タンク内では $50 \mu\text{m}$ 以下の微細な気泡は多数存在していることが確認できるが、管路に流入後はレイノルズ数が増加するにつれて、平均気泡径は大きくなっていくものと推察される。

このような条件下において、管摩擦実験を行った。水および水-マイクロバブル水溶液の管摩擦係数を図 4 に示す。実験はばらつきを考慮し、Type A および Type B それぞれ、2 度の実験を行った結果をプロットしている。図 4 より、水の場合 (○) は $Re=2700$ で管摩擦係数 λ は急増し、およそ $Re>3000$ でブラジウスの式に一致していることから、流れは $Re=2700$ で乱流へ遷移しているのが分かる。一方、水-マイクロバブル二相流の場合、Type A (△, ▽), Type B (□, ◇) とともに $Re<3000$ において、 λ は水の場合に比べて大きく増加しているのがわかる。条件が異なるため、単純には比較ができないが、Type B のほうが Type A に比べて大きく増加する傾向が認められる。一方、 $Re>3000$ に

においては Type A, Type B とともに水の乱流の λ の値と一致しているのがわかる。これは、流動中のボイド率を計測していないので、定量的な議論はできないものの、 Re が小さい領域は相対的にボイド率が増加し、空気混入により、流動抵抗が増加したが、液流量の増加とともに、相対的に空気流量が低下したため、結果として高レイノルズ数領域においては水単相流のほぼ同じ λ となったものと推察される。詳細なメカニズムに関する議論は抜きにして、現象だけを見てみると、混入した気泡が液相の流動を阻害したため、マイクロバブルの混入量が相対的に多い低レイノルズ数領域において λ が増大したものと推察される。いずれにせよ、本実験結果からは一部の先行研究で指摘されているようなマイクロバブルの抵抗低減効果⁽³⁾は確認できなかった。この理由は、混入させる気泡径が抵抗低減効果を発現させるに十分小さいものではなかった、空気混入量が十分ではなかったなど、複数の理由が考えられるが、詳細については今後の検討課題としたい。

4. まとめ

水-マイクロバブル二相水平流の管摩擦係数を測定した。マイクロバブルは市販の加圧溶解タンクを有するマイクロバブル発生装置に異なる2種類のノズルを接続して発生させた。実験の結果、以下のことがわかった。

1) 発生したマイクロバブルはタンク内および $Re < 2000$ の低レイノルズ数領域ではおよそ $50\ \mu\text{m}$ 程度の直径の気泡が多数流動しており、レイノルズ数とともにその気泡径が増加するのがわかった。

2) 管摩擦実験の結果、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、Type A, Type B とともに水の乱流の値とほぼ同じであった。また、 $Re < 3000$ の層流域においては液単相流に比べて増加した。一般的に指摘されているマイクロバブルの抵抗低減が本実験結果からは確認できなかった理由に関しては現在検討中である。

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.