

水-マイクロバブル 2 相流の流動特性 — P I Vによる半径方向速度分布測定—

荒 賀 浩 一*, 山 際 達 也**, 村 田 圭 治*

Velocity Profile Measurement of Water-Microbubble Two-phase Flow

Koichi ARAGA, Tasuya YAMAGIWA and Keiji MURATA

One of the drag-reducing technics in the pipe flow is microbubble injection. However, the drag reduction effect of microbubble injection into water flows often remains unclear, including their mechanisms. In addition, there are very few reports on drag reducing effect of microbubble injection into water pipe flows. This paper describes the experimental results of water-microbubble two phase flows in a horizontal pipe. The flow was visualized by using a high-speed camera and green laser sheet light. The streamline velocity profile was measured by using PIV and LDV system. As experimental results of the friction factor and velocity profile by using PIV, the drag reducing effect of microbubble injection was not observed in this experiment. The flow characteristics were quite similar to water single phase flow in this experiment.

Keyword: Micro bubble, Drag reduction, Two-phase flow, Flow visualization, PIV, Velocity profile

1. 結 言

管内流れの流動抵抗を低減させることは省エネルギーの観点から重要な課題であり、様々な流動抵抗低減法が報告されている。管内流れにおいては管壁などの管路側になんらかの加工を施して抵抗低減を得ることは技術的に難しく、実用化を考えたうえでは作動流体側に抵抗低減の機能を持たせることが一般的であると考えられる。中でも、抵抗低減界面活性剤による方法はその容易さから広く研究されており、著者らもその抵抗低減効果や伝熱特性について報告している¹⁾。一方で、界面活性剤による方法はその環境負荷の大きさから用途が限定されることも事実である。そこで、環境負荷の小ささから注目を浴びている技術の一つにマイクロバブル混入による抵抗低減法がある²⁾。これは、直径数十 μm 以下のマイクロバブルを壁面上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。報告によると見かけ上は抵抗低減界面活性剤水溶液と同等の乱流遷移抑制効果が生じるとする報告例もある。しかしながら、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効果やメカニズム等も含めていまだ未解明な点も多く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少ない。本研究は水-マイクロバブル 2 相流の抵抗低減効果およびその流動特性を明らかにするものであり、本報告では既報⁴⁾に引き続いて水-マイクロバブル 2 相流の流動特性を、特に半径方向速度分布に注目して、高速度カメラを用いた P I V 流速測定に

よって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。実験装置は基本的には既報⁴⁾と同様にポンプによる循環型であり、試験管路は内径 10mm、助走区間 1090mm、計測区間 1050mm のアクリル製円管である。マイクロバブルは本実験においては市販の高速旋回流型マイクロバブル発生装置②およびマイクロバブル発生用カスケードポンプを用いてタンク内にて発生させた。マイクロバブル発生装置入り口における空気混入量は 0.2 l/min で液流量によらず一定とした。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。水-マイクロバブル 2 相流の速度分布は P I V により、試験区間上流より 1180 mm の位置において測定した。P I V 測定装置の様子を図 2 に示す。P I V に用いる粒子画像について、既報⁴⁾においては出力 50mW のレーザーシート光を用いて可視化を行っていたが、やはり高速度カメラを用いて流動中の微細な粒子画像を撮影するには十分な

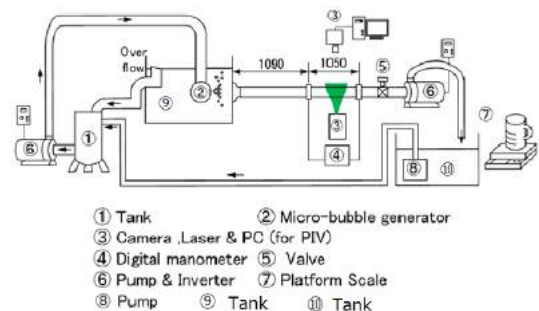


Fig. 1 Experimental apparatus

*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

**近畿大学工業高等専門学校専攻科

生産システム工学専攻

光量とは言えず、今回は出力 500mW のレーザーシート光（レーザークリエイティブ社製）を光源に用いた。その光源によって照射された管路中心軸を通る管路断面内を流れる粒子画像を高速度カメラ（カトウ光研製，K4）を用いて撮影した。可視化の際には円管外周の屈折の影響をできるだけ抑えるために、管路外側に、内部に水を満たした矩形のスリーブを設けた。画像からの速度算出は P I V ソフト（カトウ光研，Flow Expert 2D2C）を用いた。本来ならば P I V 撮影には散乱粒子を混入させる必要があるが、マイクロバブルそのものを散乱粒子として用いた。なお，P I V の速度検定には 1 次元 L D V 装置（He-Ne）を用い，管中心速度を両者で測定することで，得られた結果の確認・検定を行った。

3. 実験結果および考察

水および水-マイクロバブル 2 相流の管摩擦測定の結果を図 3 に示す。図の横軸はレイノルズ数 Re ，縦軸は管摩擦係数 λ を表す。図中の○は水単相流，●は水-マイクロバブル 2 相流の管摩擦係数を表す。図に示すように，水の流は $Re=2000$ において層流から乱流へ遷移している様子がわかる。一方，水-マイクロバブル 2 相流の管摩擦係数は本実験においては， $Re<2000$ において水単相流の値より増加している。これは層流状態かつ流速が遅いため，管路内を流れるマイクロバブルが浮力等の影響により管路上部側に徐々に集まることで，流動損失が増加したものと推察される。しかし， $Re>2000$ においては，水単相流の流れが乱流状態となっていることもあり，目視観察より管路内を流れるマイクロバブルが管路内に均一に分散して流れており，



Fig. 2 Experimental apparatus (PIV)

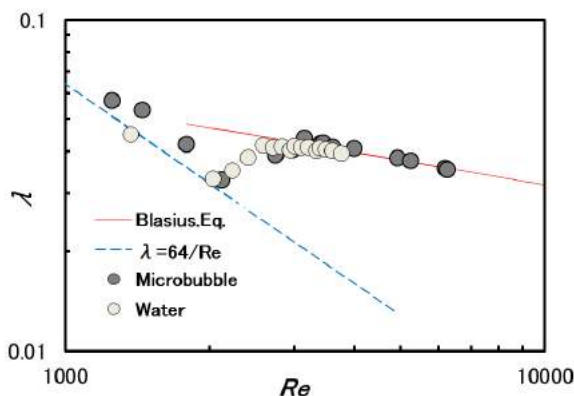


Fig. 3 Friction factor

結果として管摩擦係数は水単相流の管摩擦係数とほぼ一致している。すなわち，この流れにおいて抵抗低減効果は生じていないことがわかる。さらに，層流から乱流へと遷移するレイノルズ数も水の場合とほぼ同じである。したがって，この結果から本実験におけるマイクロバブル混入では，流れ場にはほとんど影響を及ぼしていないことがうかがえる。これは既報で報告した結果とほぼ同等の結果であるが，より詳細に水-マイクロバブル水溶液の流動特性を調べるために，P I V により速度測定を行った。

高速度カメラを用いて管路内を流れるマイクロバブル画像を測定した。得られた粒子画像を基に，P I V による半径方向速度分布測定の前準備実験として管中心速度を算出し，同時に測定した 1 次元 L D V（He-Ne）による速度と比較検討した。P I V 速度測定はシャッター速度 1/4000 s，フレームレート 500 fps で 2000 フレーム撮影した可視化粒子画像を基に，P I V ソフトを用いて平均速度を算出した。得られた結果を図 4 に示す。横軸は Re ，縦軸は管中心速度 u を断面平均流速 V で除した値である。図より P I V，L D V の値のいずれも $Re=2000$ 付近で急激に速度が低下し， $Re>2500$ 付近ではほぼ $u/V \approx 1.25$ で一定となっている様子がわかる。すなわち， $Re \approx 2000$ で速度分布が層流速度分布から乱流速度分布へと変化している様子が推察できる。さらに，P I V は可視化の関係で高レイノルズ数領域までは測定できないが，それでも $1790 < Re < 5080$ においては L D V の流速測定とほぼ一致していることから，このレイノルズ数領域においては，P I V による速度分布測定が本実

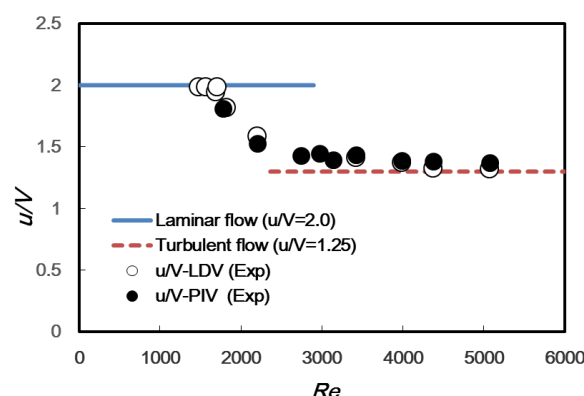


Fig. 4 Centerline velocity

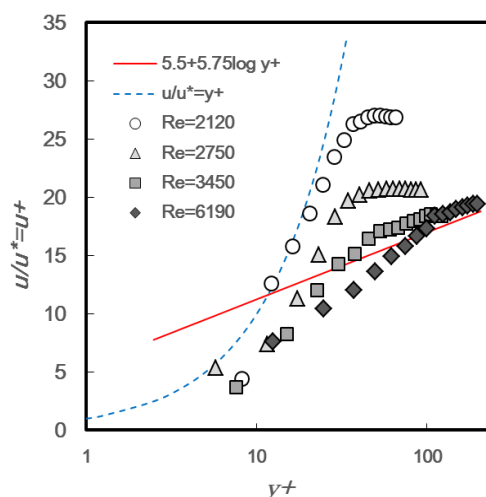


Fig. 6 Velocity profiles

験において十分可能であると言える。

次に、半径方向速度分布を得られた粒子画像より P I V ソフトを用いて算出した。得られた結果のうち、 $Re=2100, 2700, 3400$ の対数速度分布の結果を例として図 6 に示す。なお、図 6 の横軸は壁面からの無次元距離 y^+ を、縦軸は摩擦速度で無次元化した各半径位置における速度 u^+ を表す。 $Re=2120$ の流れは $y^+>12$ において u^+ は赤実線で示される対数則よりはるかに大きな値となっており、まだ、流れは層流状態か、もしくは層流に近い流れであることがわかる。しかし、レイノルズ数の増加とともに u^+ は対数則に漸近し、 $Re=3400$ の流れは、 $y^+>30$ においてほぼ対数則に沿っていることがわかる。このことから、 $Re=3400$ の流れは同条件の水の流れの十分発達した乱流状態と同等な流れであり、マイクロバブル混入による抵抗低減効果は管摩擦係数の変化だけではなく、速度分布にも現れていないのがわかる。すなわち、本実験において得られた管摩擦係数、速度分布の結果からは、既報と同様に抵抗低減効果および水-マイクロバブル 2 相流の独自の流れを確認することはできなかった。しかしながら、マイクロバブルの乱流遷移抑制効果、すなわち、マイクロバブル混入による流れへの寄与は、気泡の大きさや混入量にも依存はするものの、基本的には渦の発生・成長に重要である壁付近の粘性低層付近からバッファ層にかかる領域にもっとも強く現れている可能性があり、この領域の速度測定が必要不可欠である。一方で、本実験において行った速度分布測定の結果は、対数領域付近については P I V の測定結果や L D V の測定結果からもわかるように十分に測定できていると推察されるもの y^+ が 5~10 程度以下のいわゆる粘性低層領域付近では十分な計測はできなかった。これは、管壁付近を流れるマイクロバブルの量が十分ではなかったこと、および、管壁付近の鮮明な可視化画像を得ることができなかったことに起因していると推察される。したがって、流れ場におよぼすマイクロバブル混入の影響をより詳細に調べるには、粘性低層から遷移域付近のいわゆる管壁付近の速度分布を詳細に測定することが不可欠であると考えられるが、それは装置・可視化方法の改良も含めて今後の検討課題としたい。

4. まとめ

管内を流れるマイクロバブル流の管摩擦測定を行うとともに出力 500mW のグリーンレーザーシート光を用いて流れの可視化撮影を行い、得られた粒子画像より P I V ソフトを用いて半径方向速度分布測定を行った、その結果、以下の事がわかった。

1) $Re>2000$ において、水と水-マイクロバブル 2 相流の管摩擦係数の変化はほぼ同じであった。

2) P I V による管中心速度は、L D V による測定結果とよく一致しており、本実験装置系における P I V 速度測定結果は妥当であると言える。

3) 速度分布測定の結果、 $Re>3400$ の水-マイクロバブル 2 相流の速度分布はほぼ一般的な対数速度分布であり、マイクロバブル混入の影響は、対数則領域においては認められなかった。

今後は管壁付近の粘性低層付近における水-マイクロバブル 2 相流の速度分布・速度変動を行いたく、装置改良等を検討中である。

参考文献

- (1) Araga, K., Matui, R., Wakimoto, T., Murata, K. and Katoh, K.: Effect of Air Injection on Drag-Reducing Surfactant Solution Flow in Horizontal Pipe (in Japanese), *J. JSEM*, **10-3** (2010), 304-311.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 荒賀ら、水-マイクロバブル 2 相流の流動特性ーP I V による速度分布測定ー, *近畿大学工業高等専門学校紀要*, **8**(2015), 1-3.