

垂直上昇界面活性剤水溶液流れに及ぼす気泡混入の影響

荒賀 浩一*, 中溝 陽介**, 村田 圭治*

Effect of Air Injection on Drag Reducing Surfactant Solution Vertical Flow

Koichi ARAGA, Yosuke NAKAMIZO 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 values of the heat transfer coefficients decrease during flow laminarization. The research objective is to examine heat transfer enhancement effects by air injection. This paper presents an experimental investigation on the heat transfer and flow characteristics in an air-surfactant solution two-phase flow through a vertical tube. The air was injected through the porous metal. In this condition, the flow pattern of two-phase flow was bubbly flow which contains many fine bubbles in any flow rate. The bubble diameter was changed by using different types of porous metal. In every condition of air injection, heat transfer coefficients were enhanced drastically with air injection. However, the effects depend on the diameter of bubbles. The heat transfer coefficients were increased as the diameter of bubbles decreases. This result means that the bulk concentration of rod-like micelles in a surfactant solution in bubbly flow was reduced because micelle was concentrated on the surface of bubbles.

Keyword Drag Reduction, Surfactant Solution flow, Heat transfer enhancement, Two phase flow

1. 緒言

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技術的課題である。管内流れの流動抵抗低減法の一つとして界面活性剤水溶液による方法がある⁽¹⁾。これはある種の界面活性剤を水などの溶媒に微量添加すると管摩擦抵抗が溶媒に比べて大幅に減少するというもので、水溶液中に形成された棒状ミセル構造が乱流渦の発生・成長を抑制し、高レイノルズ数まで層流状態が持続するため抵抗低減現象が生じると言われている。

一方で、こうした抵抗低減流れでは、熱伝達率も同時に低下することが指摘されている。したがって、熱交換器等の熱輸送媒体にこの界面活性剤添加による抵抗低減法を効果的に用いるためには、抵抗低減流れにおける適切な伝熱促進技術の開発・提案が必要不可欠と考えられる。

本研究室では界面活性剤水溶液流れの伝熱促進法の一つとして空気混入による方法を提案した。これは、空気混入による混合・攪拌効果により抵抗低減流れの伝熱特性を改善しようとするものである。本研究室の過去の研究では、界面活性剤水溶液流れに空気を混入すると、空気混入量とともに熱伝達率が増加することを明らかにした。また、界面活性剤水溶液-空気二相流の流動様式は空気混入方法に依存すること、および、伝熱促進効果は流動様式に依存し、同一空気混入量においてはスラグ流状態よりも気泡流状態

のほうが、伝熱促進効果が大きいことを明らかにした⁽²⁾。しかし、界面活性剤水溶液流れに空気を混入した流れの伝熱促進のメカニズムを考える上で重要であると考えられる流動伝熱特性に及ぼす気泡径の依存性については不明なままである。

本研究は界面活性剤水溶液-空気二相流の流動伝熱特性に及ぼす微細気泡の径の影響を調べるものであり、垂直上昇界面活性剤水溶液流れに2種類の焼結金属管を介して空気を混入することで気泡径の異なる界面活性剤水溶液-空気二相流を生成し、その界面活性剤水溶液-空気二相流の流動伝熱特性を実験的に調べた結果を報告する。

2. 実験装置および方法

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略を図1に示す。装置はポンプ③による強制循環型とした。溶液タンク①内の作動流体は冷却器②を通過後、浮遊式流量計⑤を経て鉛直に設置された試験管路へと流入される。試験管路は内径 $D=5.0$ mm であり、助走区間は全長 2100 mm のアクリル製管、テストセクションは全長 900 mm の銅管とした。作動流体は試験管路を通過後、気液分離タンク④を経て溶液タンクへと流れる。空気は浮遊式流量計⑤を通過後、試験管路上流部より濾過精度 $A_r=10\ \mu\text{m}$ もしくは $100\ \mu\text{m}$ の円筒型焼結金属⑥を介して混入させた。テストセクションの銅管表面には、管壁温度測定用 CA 熱電対を 8ヶ所に設置し、その上からシースヒーターをテストセクション入り口から 50~850 mm 間で等ピッチで巻き付けた。熱伝達率は、テストセクション入り口から 450 mm 下流、加熱開始位置から 350 mm 下流にお

*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 機械工学系

ける局所熱伝達率を代表値としてデータ評価に用いた。管摩擦係数は、テストセクション両端部の差圧をデジタルマノメータで測定して算出した。流動様式判別用および気泡径測定用可視化写真撮影は試験管路入口部より 1750 mm 下流において CCD により行った。

試験流体は水道水および界面活性剤水溶液とした。界面活性剤水溶液は水道水に同モル量の TTAB と NaSal を溶かして作成し、濃度は 500 ppm (重量濃度) とした。なお、データの無次元整理にはすべて水の物性値を用いた。

3. 実験結果および考察

界面活性剤水溶液-空気二相流の流動様式の一例を図 2 (a), (b), (c) に示す。図 2 (a), (b) はそれぞれ濾過精度 $A_f = 10 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$ の焼結金属を介して空気を混入させた場合の界面活性剤水溶液-空気二相流の可視化写真、図 2 (c) は $A_f = 10 \mu\text{m}$ の場合の水-空気二相流の可視化写真であり、いずれも空気流量 $V_G = 0.5 \text{ L/min}$ である。なお、実際には垂直上昇流であるが、図 2 では 90° 回転させて表示している。図 2 より、界面活性剤水溶液-空気二相流の流動様式は図 2 (c) の水-空気二相流とは大きく異なり、微小な気泡が多数連続的に流動する気泡流状態であるのがわかる。ここでは省略するが、本実験の範囲内においてはいずれの焼結金属を用いた場合でも、界面活性剤水溶液-空気二相流の流動様式はほぼ気泡流状態であった。

次に、界面活性剤水溶液-空気二相流中に存在する微小気泡径 D_b の分布の一例を液相レイノルズ数 $Re_L = 8000$, 空気流量 $V_G = 0.5 \text{ L/min}$ について図 3 に示す。図 3 より濾過精度 $A_f = 10 \mu\text{m}$ および $A_f = 100 \mu\text{m}$ の焼結金属を用いた場合の平均気泡径 D_m はそれぞれ $400 \mu\text{m}$, $1000 \mu\text{m}$ であり、焼結金属の濾過精度を変えることで液相中に流動する気泡径が変化するのがわかる。次に、空気流量 $V_G = 0.5 \text{ L/min}$ を例として気泡径の液相レイノルズ数依存性について調べた結果を図 4 に示す。横軸は液相レイノルズ数 Re_L , 縦軸は平均気泡径 D_m (μm) を表す。図 4 より、いずれの焼結金属管を用いた場合においても、 Re_L が増加するにつれて D_m が減少することがわかる。しかしながら、いずれの Re_L については、 $A_f = 100 \mu\text{m}$ の焼結金属管を用いた場合よりも $A_f = 10 \mu\text{m}$ の場合のほうが、流動する気泡径が小さくな

っているのがわかる。このことより、本実験の目的である界面活性剤水溶液-空気二相流の流動熱特性に及ぼす微小気泡の径の影響を調べる上で、本実験装置による空気混入方法は妥当であるといえる。

界面活性剤水溶液单相流および空気流量 $V_G = 0.5, 1.0 \text{ L/min}$ の界面活性剤水溶液-空気二相流の管摩擦係数 λ を図 5 に示す。図中、濾過精度 $A_f = 10 \mu\text{m}$ の焼結金属の λ を白塗り記号で $A_f = 100 \mu\text{m}$ の λ を黒塗り記号であらわす。なお、ここでは省略するが、水单相流の場合、本実験装置における臨界レイノルズ数はおおよそ $Re_c = 2300$ であった (水の実験結果については既報⁽³⁾を参照されたい)。図 5 より、界面活性剤水溶液单相流 (○) は $Re_L = 11000$ において乱流遷移し始めているのが λ の変化よりわかる。界面活性剤水溶液-空気二相流について、 $V_G = 0.5 \text{ L/min}$, $A_f = 10 \mu\text{m}$ の λ (◇) は、空気混入の混合攪拌効果等により界面活

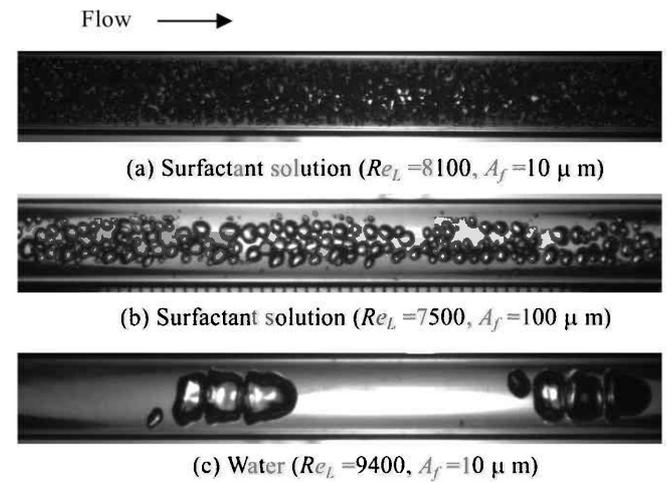


Fig. 2 Flow visualization ($V_G = 0.5 \text{ L/min}$)

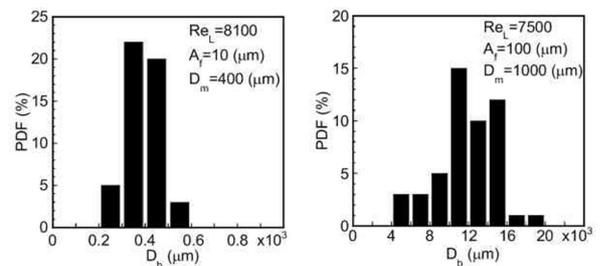


Fig. 3 Bubble size distribution ($V_G = 0.5 \text{ L/min}$)

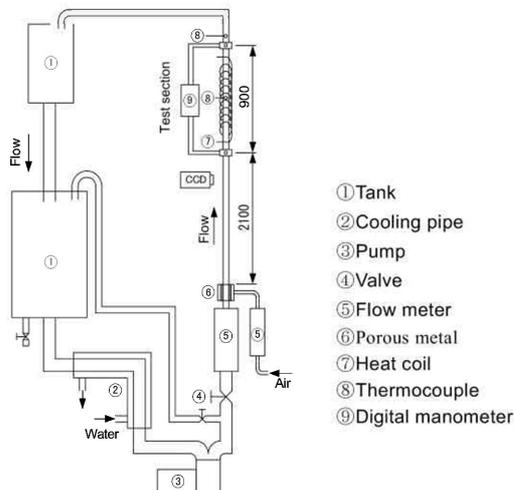


Fig. 1 Experimental apparatus

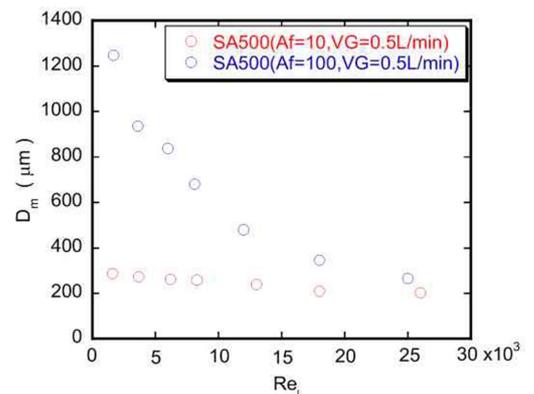


Fig. 4 Dependence of bubble size on Reynolds number

性剤水溶液单相流の λ よりも大きくなっているが、 Re_L の増加（すなわちクオリティの減少）と共に液单相流の値に近づいている様子がわかる。一方、 $V_G=0.5$ L/min, $A_f=100$ μ mの λ （◆）についても同様に、液单相流に比べて λ は増加しているが、 $Re_L < 10000$ において $A_f=10$ μ mと100 μ mの λ を比較すると、 $A_f=10$ μ mのほうがより大きくなっているのがわかる。この傾向は $V_G=1.0$ L/minの λ （ Δ , \blacktriangle ）においても同様に認められる。図4で示したように、 $A_f=10$ μ mの焼結金属を用いた場合（◇）よりも、100 μ mの場合（◆）の方が同一液相レイノルズ数で比較した場合、流動する気泡径は大きい。したがって、同一空気混入量、同一液相レイノルズ数で比較した場合、混入させる気泡径が小さいほうがより λ を増加させる効果が高いといえる。また、 $Re_L > 20000$ においてはいずれの λ もほぼ等しいことから、抵抗低減効果が完全に消失した乱流状態においては、 λ は混入させる気泡径にほとんど依存しないのがわかる。

界面活性剤水溶液单相流および空気流量 $V_G=0.5, 1.0$ L/min の界面活性剤水溶液-空気二相流の熱伝達率 $Nu/Pr_L^{1/3}$ を図6に示す。図中の記号等は図5と同様である。界面活性剤水溶液-空気二相流について、 $V_G=0.5$ L/min, $A_f=10$ μ mの熱伝達率（◇）は、 λ の変化と同様に界面活

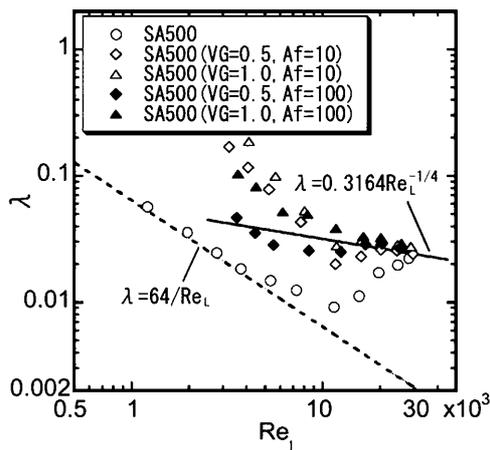


Fig. 5 Friction factor

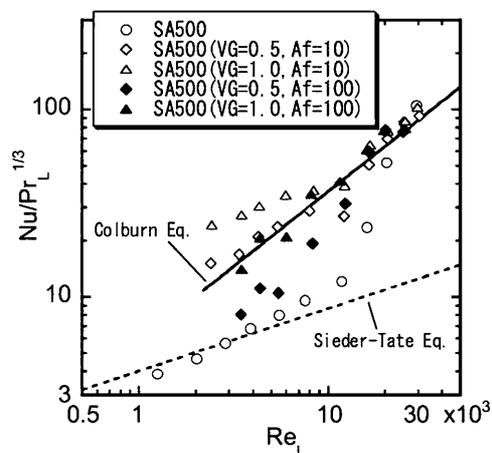


Fig. 6 Heat transfer coefficient

性剤水溶液单相流の値（○）よりも大きくなっているが、 Re_L の増加と共に液单相流の値に近づいている様子がわかる。また、 $V_G=1.0$ L/min, $A_f=10$ μ mの熱伝達率（ Δ ）は $V_G=0.5$ L/minの値よりも大きくなっていることから、空気混入量の増加とともに熱伝達率は増加するのがわかる。一方、 $V_G=0.5$ L/min, $A_f=100$ μ mの熱伝達率（◆）についても $A_f=10$ μ mの結果（◇）と同様に、液单相流に比べて増加しているが、 $Re_L < 10000$ において $A_f=10$ μ mと100 μ mの値を比較すると、 $A_f=10$ μ mのほうがより大きな値となっているのがわかる。この傾向は $V_G=1.0$ L/minにおいても同様に認められることから、伝熱促進を目的として界面活性剤水溶液流れに空気を混入させる場合、混入させる気泡径が小さいほうが伝熱促進効果が高いといえる。また、図6より、 $Re_L > 20000$ においては流れはすでに乱流状態であるが、この場合には、本実験の空気混入量においては空気混入による伝熱促進効果は確認できず、また、気泡径の依存性も確認できなかった。

4. まとめ

界面活性剤水溶液の抵抗低減流れにおいて、伝熱促進を目的として助走区間上流部より焼結金属を介して空気を混入させた。その結果、界面活性剤水溶液-空気二相流の熱伝達率は液单相流に比べて増加するが、その効果は気泡流中に存在する気泡径が小さいほうが、より高いという結果が得られた。一般的には界面活性剤分子は気液界面に吸着する。したがって、より小さな微細気泡を多数混入することで水溶液中の界面活性剤分子が気液界面により多く集中することが推察される。その結果、より小さな気泡を含む二相流のほうが抵抗低減効果が大幅に減少して伝熱促進効果が高くなったのではないかと推察される。しかしながら、これらのメカニズムの解明については水溶液濃度測定等により詳細に検討する必要があるが、これらについては今後の課題としたい。

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) Araga, K. and Murata, K.: Pressure Loss, Heat Transfer Coefficient and Flow Pattern in Drag-Reducing Two-Phase Flow of Air and Surfactant Solution Inside a Vertical Tube, Journal of JSEM, Special issue, 8 (2008), 6-11.
- (3) 荒賀浩一, 糸川信一, 中溝陽介, 村田圭治, 抵抗低減界面活性剤水溶液流れに及ぼす空気混入の影響, 実験力学, 9(4) (2009), 357-362.