

抵抗低減界面活性剤水溶液流れの乱流遷移現象

荒賀浩一*, 大江啓介*, 永原祐介*, 村田圭治*

Turbulence transition of drag-reducing surfactant solution flow

Koichi ARAGA, Keisuke OE, Yusuke NAGAHARA and Keiji MURATA

It is known that small quantities of surfactant additives can greatly reduce the friction factors during the pipe flow. 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 turbulent transition process of the surfactant water solution has many unexplained points. It is important that we clarify the turbulent transition process of the surfactant solution flow to elucidate the mechanism of the drag reducing surfactant solution's flow. This paper describes the experimental results of the transition process of the surfactant solution. The experiment was carried out by using the LDV measurement and the differential pressure measurement. As a result, it was found that although the turbulent transition of the water flow occurred suddenly, that of the surfactant solution flow occurred little by little.

Keyword Drag Reduction, Surfactant Solution flow, Turbulence transition, Turbulence patch, LDV Measurement

1. 緒言

管内流れにおいてある種の界面活性剤を溶媒に微量添加すると、溶媒のみの場合に比べて管摩擦抵抗が大幅に減少することが知られている。これは界面活性剤水溶液中に生成される棒状ミセル構造が流れの乱流化を抑制し、高レイノルズ数においても層流状態が維持されているためであると言われており¹⁾、このような界面活性剤水溶液の抵抗低減流れに関して、その現象やメカニズムについて数多く報告されている。しかし、界面活性剤水溶液の円管内流れにおける乱流遷移過程については未解明な点も多く、今尾ら²⁾や著者ら³⁾により乱流遷移現象に関する実験結果が報告されているものの、それ以外に遷移現象に着目した研究例はほとんど無く、いまだ界面活性剤水溶液流れの乱流遷移現象が十分に解明されているとは言い難い。本研究は抵抗低減効果を有する界面活性剤水溶液流れの乱流遷移プロセスを明らかにすることを目的とした実験的研究であり、本論文ではその準備段階として水および界面活性剤水溶液流れの乱流遷移時に生じる速度変動をLDV流速測定によって調べた結果について報告する。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略を図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、助走区間(2000 mm)および、テストセクション(1030 mm)から構成される。管摩擦係数はテストセクション両端部の差圧と、試験管路管路出口

部において重量法により測定した平均流速から算出した。差圧は差圧伝送器⑤によりPCに取り込み、読取および記録を行った。また、LDV流速測定はテストセクション入口より555 mm下流にて行った。LDVは光源に15mWレーザー(He-Ne)を用いた前方散乱型で、散乱粒子としてラテックスを混入させた。

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TTABとNaSalを同モル量溶かして作成し、濃度は重量濃度で500 ppmとした。水溶液の温度は約25°Cで一定とした。なお、界面活性剤水溶液の物性値について、本実験に用いた界面活性剤水溶液は非ニュートン流体であり、ひずみ速度によって粘性係数変化することが知られているが、本報告においては既報³⁾と同様に粘性係数や密度などの物性値については同温度の水の値をデータ評価に用いた。

3. 実験結果及び考察

3.1 管摩擦係数

水および界面活性剤水溶液の管摩擦実験の結果をFig. 2に示す。横軸はレイノルズ数 Re 、縦軸は管摩擦係数 λ を表

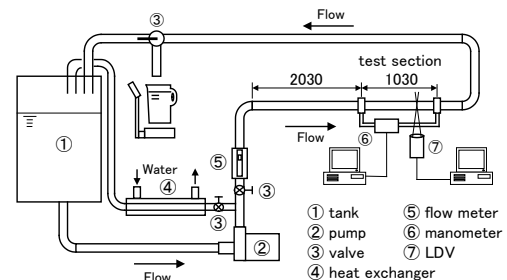


Fig. 1 Experimental apparatus

*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

す。Fig. 2 より、水の場合、 $Re=3600$ を超えると λ が急増しはじめ、 $Re=5000$ では λ がほぼブラジウスの式に一致していることから、水の場合、臨界レイノルズ数 Re_c はおよそ 3600 であるのが分かる。一方、界面活性剤水溶液 500 ppm の場合、 $Re=28000$ 付近まで λ は層流の式に沿いながら緩やかに減少しており、さらなる Re の増加とともにゆるやかにブラジウスの式に近づきつつあることから、 500 ppm 水溶液の Re_c はおよそ 28000 であること、および、 $Re < 28000$ において抵抗低減効果が十分に表れているのが分かる。このような抵抗低減流れにおいて、その乱流遷移領域の速度変動を測定した。

3. 2 管中心速度変動

水および界面活性剤水溶液流れの管中心速度変動を LDV により測定した。得られた結果を Fig. 3 および Fig. 4 に示す。縦軸は管中心速度 U を平均流速 V で除した無次元管中心速度 U/V を、横軸は時間 (s) を表す。水の場合、 $Re=1800$ の流れは Fig. 2 の λ より層流状態であるが、Fig. 3 から、管中心速度も $U/V=2$ でほぼ一定であり流れが層

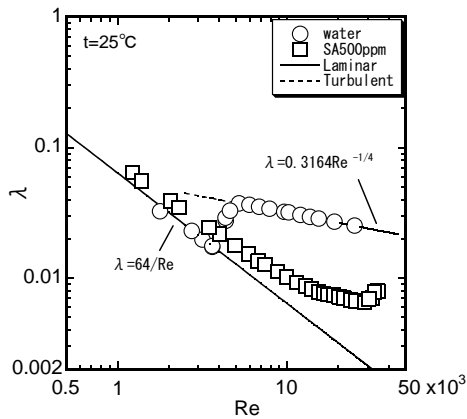


Fig. 2 Friction factor

流状態であるのが分かる。 $Re=4300$ の流れは、Fig. 2 の λ の変化より層流から乱流への遷移過程であったが、管中心速度波形においても、 $U/V=2$ の層流状態と $U/V=1.25$ の高周波の速度変動を伴う乱流状態が交互に出現している様子がわかる。このように水の場合には層流から乱流へ遷移する初期段階にこのような乱流の塊の通過が認められる。なお、このように $Re > 3000$ において遷移初期に間欠的に通過する乱流の塊は乱流スラグと呼ばれる。 $Re=4600$ の流れは乱流スラグの発生頻度が増加しており、流れが乱流状態に近づいているのが分かる。さらに Re が増加した $Re=6000$, 12000 の流れは、 $U/V=1.25$ でほぼ一定であり、管中心速度波形から速度分布を類推すると、流れはほぼ乱流状態に達しているものと思われる。このように、水の流れにおいては、乱流遷移時に乱流スラグが断続的に発生し、その頻度が増加することで乱流へと遷移する様子が管中心速度波形の変化より分かる。

界面活性剤 500 ppm 水溶液の場合、 $Re=2100$ の流れは Fig. 2 の λ より流れは層流状態であると推察された。また、管中心速度波形も Fig. 4 より $U/V=2$ で一定であり、顕著な速度変動も認められないことから、流れは層流状態であると思われる。 $Re=5900$ の流れは、水の場合にはすでに乱流状態のレイノルズ数であるが、界面活性剤水溶液の場合には $U/V=1.8$ でほぼ一定であり、速度変動波形からは、まだ層流状態であると思われる。しかし、速度の平均値は層流の理論値である $U/V=2.0$ より若干低く、また水の層流時の速度波形では見られなかった長周期的な変動が認められることから、層流状態ではあるものの、水の場合の層流状態とは流動の様子が異なる様子がうかがえる。 $Re=11400$ の流れは $Re=5900$ の長周期的な振動が減衰しているが、 $Re=2100$ の流れと比較して高周波の振動が増幅している様子がわかる。しかし、管中心速度は $U/V=1.7$ でほぼ一定あることや図 2 の λ の変化も考慮すると、流れは乱流状態というよりはやはり層流状態に近い流れであると推察される。さらにレイノルズ数が増加した $Re=34300$ の

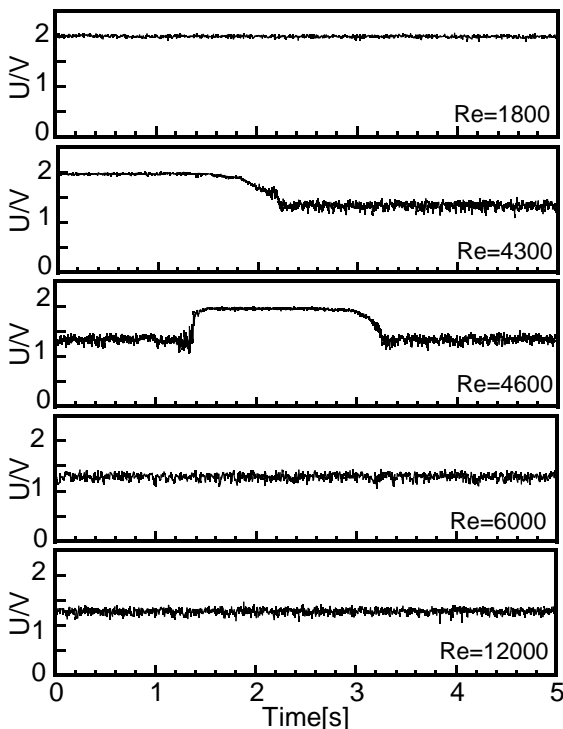


Fig. 3 Centerline velocity of water flow

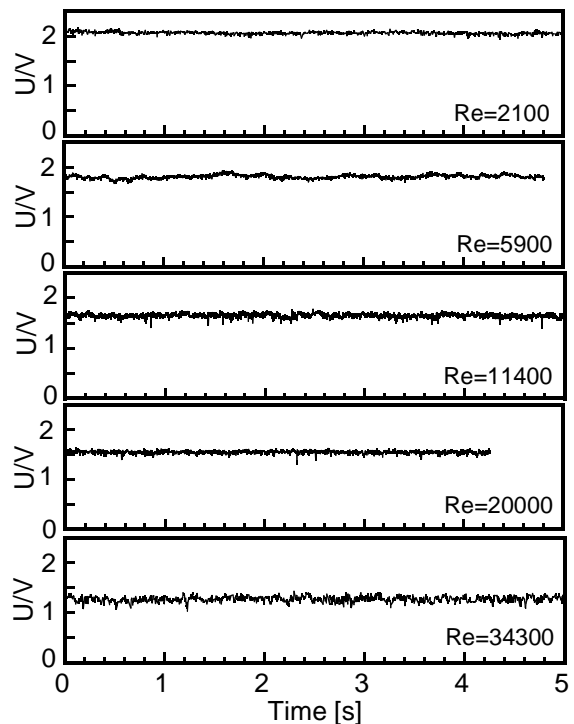


Fig. 4 Centerline velocity of surfactant solution flow

流れは、Fig. 2 の λ の変化より乱流への遷移初期段階であり、まだ層流に近い流れと思われるが、Fig. 4 の速度波形は $U/V=1.27$ であり、速度分布を勘案すると、流れはすでに乱流に近い流れであると思われる。ここで、各流れの層流・乱流の判断については速度分布等を測定したのちに総合的に判断する必要があるが、ここでの記述は管中心速度測定の結果からの類推にすぎないが、いずれにせよ、水の場合に見られた遷移時の乱流スラッグの発生・通過は抵抗低減界面活性剤水溶液流れにおいては本実験においては確認できなかった。したがって、界面活性剤水溶液の抵抗低減流れの層流から乱流への遷移プロセスは水の場合とは大きく異なると言える。

3. 3 管中心速度の乱れ強さ

管中心速度変動から界面活性剤水溶液の乱流遷移過程においては乱流塊が発生しないことを先に述べた。ここでは、管中心速度の乱れ強さの変化から乱流遷移過程を調べる。水および界面活性剤水溶液流れの乱流遷移時の管中心速度および乱れ強さの変化を Fig. 5 および Fig. 6 に示す。Fig. 5 の縦軸は U/V の平均値を、Fig. 6 の縦軸は管中心速度の乱れ強さ u'_{rms}/V を表し、横軸は Re を表す。また、Fig. 5 中には Campbell & Slattery による助走区間の層流速度分布式⁴⁾を実線で示す。Fig. 5 および Fig. 6 より水の場合、 $Re=2000$ において管中心速度は $U/V=2.0$ で一定となるが、 $Re=3600$ において U/V が急激に減少し始めると同時に乱れ強さ u'_{rms}/V が急増する様子が見られる。この u'_{rms}/V の急増は乱流遷移に伴う乱流スラッグの発生・通過によるものであり、ほぼ管路全体が乱流状態となった $Re > 5000$ においては $U/V=1.25$ 、 $u'_{rms}/V=4\%$ でほぼ一定となる。すなわち、本実験装置においては、流れは $Re=3600$ において乱流スラッグが発生しはじめ、 $Re > 5000$ 以上ではほぼ乱流状態に達しているのが中心速度および乱れ強さの変化からもわかる。一方、界面活性剤水溶液流れの場合、 $Re < 2000$ においては $U/V=2.0$ であり、また u'_{rms}/V の値も水とほとんど変わらないことから、流れはほぼ層流状態であるのがわかる。さらに、 $Re < 28000$ においては Re の増加とともに U/V は緩やかに減少するが、その値は Campbell-Slattery の式に近く、また、

水の乱流状態の値よりは遥かに U/V が大きいこと、さらには u'_{rms}/V も水の乱流時の値と比較して小さいことがわかる。さらに、 $Re > 28000$ においては Re の増加とともに U/V は急激に減少し、 $Re=32000$ で $U/V=1.27$ となる。この変化は u'_{rms}/V の変化も勘案すると乱流遷移によるものと推察されるが、水の場合ほど変化が急ではなく、また、水の場合のような u'_{rms}/V の急増も認められない。したがって、本実験の界面活性剤水溶液流れにおいてはおよそ $Re < 28000$ までが層流状態もしくは疑層流状態と呼ばれるような流れであり、 $Re=28000$ において乱流遷移し始めるが、その境界は不明瞭であり、また、乱流遷移時には水の場合のような乱流塊は発生しないと見える。すなわち、界面活性剤水溶液の抵抗低減流れは Re の増加とともに徐々に乱流へと遷移するが、その遷移はなし崩し的に生じると見える。

4. 結論

水および界面活性剤水溶液流れの乱流遷移過程を管摩擦測定および LDV による管中心速度測定によって調べた結果、以下のことがわかった。

- 1) 界面活性剤水溶液の疑層流状態は水の層流時に比べて管中心速度の変動が大きい。
- 2) 水の乱流遷移時には Re の増加とともに乱れ強さの急増が認められるが、界面活性剤水溶液の抵抗低減流れの場合には乱れ強さの急増は認められない。
- 3) 水の場合とは異なり、抵抗低減界面活性剤水溶液流れの乱流遷移時には乱流塊は発生せず、層流から乱流へなし崩し的に遷移する。

謝辞

本研究を実施するにあたり、近畿大学工業高等専門学校長 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. et al., H.W.: Surfactant Drag Reduction, Rev. Chem. Eng., 14(4-5) (1998), 253-320.
- 2) Imao, S. et al.: Transition in Pipe Flow of Drag-Reducing Surfactant Solution, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 67, No. 658 (2001), pp. 29-34.
- 3) Araga, K. and Azuma T.: Effect of Surfactant Additives on the Transition in Pipe Flow, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 72, No. 717 (2006), pp. 1137-1145.
- 4) Campbell, W. D. and Slattery, J. C.: Flow in the Entrance of a tube, Trans. ASME, Series D, 85(1963), 41-46.

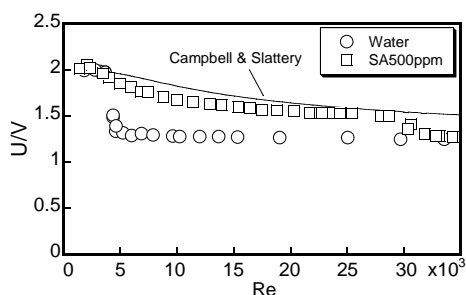


Fig. 5 Centerline velocity vs. Re

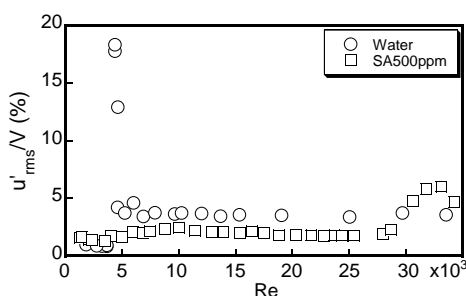


Fig. 6 Turbulent intensity vs. Re