

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：13101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820041

研究課題名(和文) マイクロ・ナノサイズの流れにおける複雑流体の流動挙動の解明

研究課題名(英文) Investigation on flow properties of complex fluids in micron- and nano-sized flows

研究代表者

牛田 晃臣 (USHIDA, Akiomi)

新潟大学・自然科学系・助教

研究者番号：10582976

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、代表長さが1.0マイクロメートル以下の流れ場における複雑流体の流動特性を圧力損失測定により明らかにすることを目的とし、微小孔を通過する流れ場を対象とした。その結果、水の場合、100マイクロメートル以下において(50マイクロメートルから0.90マイクロメートルの範囲)、Navier-Stokes方程式により予測される値よりも大幅に減少した。次に、球状ミセル界面活性剤水溶液の場合、極性により異なる結果となった。また、棒状ミセル界面活性剤水溶液の場合、特定のモル濃度比において、圧力損失が上昇した、以上のような特異流動特性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In the study, we measured pressure drops with constant flow rate passing through micro-orifices, which characteristic length was less than 100 micron meters because flow properties of complex fluids in flows through micro-apertures were investigated. For water flows, the experimental results were less than the predicted values of the Navier-Stokes equation. For spherical micelle surfactant solutions (1.0 wt %), different flow properties were found for the various surfactant solutions depending on the charge of the solute. For rod-like micelle surfactant solutions, the resultant pressure drops were larger for molar concentration ratios of 1.0.

研究分野：流体力学

キーワード：微小孔 圧力損失 水 界面活性剤水溶液 高分子水溶液

1. 研究開始当初の背景

従来の研究において、内径 100 μm 以下のサイズの孔(以下、マイクロオリフィスと呼ぶ。)を通過する水や複雑流体(界面活性剤水溶液、高分子水溶液、微細気泡混合液)の流動特性が報告されてきた。その結果、5.0 μm ~50 μm の流れ場において、水の流動抵抗が Navier-Stokes 方程式により予測される値の 1/100 という特異性を見出し、複雑流体の場合は、水に比べ抵抗値が減少することも見出した。しかしながら、最小サイズが 5.0 μm であり、1.0 μm 以下の流れについては現時点では未解明である(国内外の研究においても未解明である)。

2. 研究の目的

一般的に、複雑流体の流動状態を示す無次元量としてレイノルズ数(粘性力と慣性力の比)とワイセンベルク数(粘性力と弾性力の比)が知られている。mm オーダー以上の流れでは、レイノルズ数の方が大きく、弾性の効果が小さくなり、水のようなニュートン流体と同じ流動となる。しかし、1.0 mm 以下のように流動の代表長さが小さくなると、レイノルズ数が小さく(ワイセンベルク数が大きく)なり、弱い弾性でも流動に影響を与えるようになる。このため、弾性発現の可能性を考察するため、本研究では、1.0 μm 以下の流れにおける水および複雑流体の流動特性に関する精密なデータを取得およびメカニズムを究明することを目的とする。

3. 研究の方法

図 1 に示すような実験装置を用いて、マイクロオリフィス(内径 D 、図 2)を通過する流れ場を実現する。シリンジポンプを用いて、一定の流量 Q により円筒流路に試験流体を輸送する。その際、円筒流路先端に取り付けマイクロオリフィスを通過し、下部の水槽内に流出する。このとき、円筒流路側面と水槽側面に取り付けた圧力孔により、2 点間の差圧を測定し、圧力損失 Δp とする。なお、試験流体として、水、球状ミセル界面活性剤水溶液(非イオン系 polyoxyethylene (23) lauryl ether; PLE, 陽イオン系 benzalkonium chloride; BC, 陰イオン系 laurylbenzene sulfonic acid sodium salt; LAS)、棒状ミセル界面活性剤水溶

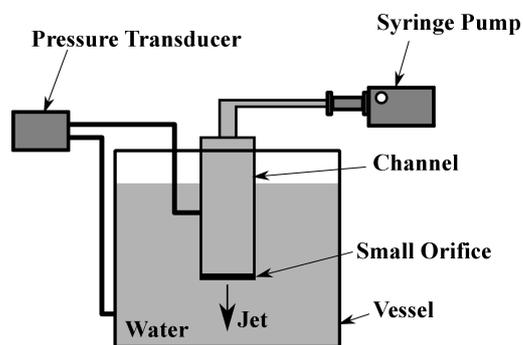


図 1 実験装置

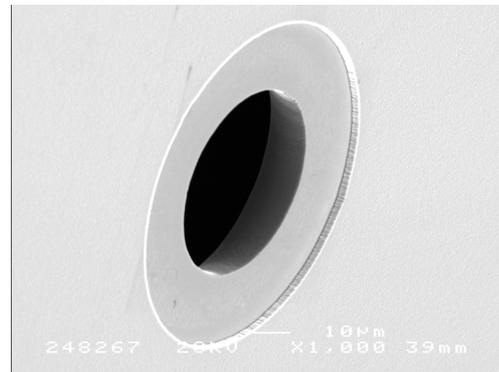


図 2 マイクロオリフィス拡大写真
(内径 $D = 10 \mu\text{m}$)

液(Arquad)とした。

4. 研究成果

試験流体ごとに実験結果を示す。なお、流動特性の評価には、縦軸に測定した圧力損失 Δp を平均流速 $V (= 4Q/\pi D^2)$ の動圧で除した無次元化圧力損失、横軸はレイノルズ数 $Re (= \rho V D / \mu)$ で整理した無次元化グラフを使用した。なお、紙面の都合上、一部の特徴的な結果のみを示す。

(a) 水の実験結果

図 3(a)に、 $D = 100 \mu\text{m}$ の水の実験結果を示す。なお、マイクロオリフィスを取り付ける土台径 $D_b = 1.0 \text{ mm}$ である。これを見ると、実験結果が Navier-Stokes 方程式から予測される値(以下、予測値と呼ぶ。)と一致しており、実験手法・測定手法が妥当であることが確認できた。一方、 $D = 5 \mu\text{m}$ の場合(図 3(b))、予測値から大幅に減少した。これは、Hasegawa らによる従来の結果⁽¹⁾と一致した。図 3(c)に、 $D = 0.90 \mu\text{m}$ の実験結果を示す $D = 5 \mu\text{m}$ の場合と比べ、減少幅が大きくなり、特異性が強く発現していることが分かった。

(b) 球状ミセル界面活性剤水溶液の実験結果

図 4(a), (b)に球状ミセル界面活性剤水溶液(1.0 wt%)の実験結果を示す。 $D = 100 \mu\text{m}$ の場合(図 4(a))、従来の研究⁽²⁾と同様に、試験流体の極性により、異なる結果となり、非イオン系 PLE の場合は任意のレイノルズ数で圧力損失が急上昇し、陽イオン系 BC の場合は一番低い圧力損失となり、陰イオン系 LAS の場合は水のほぼ同じ圧力損失となった。一方、 $D = 0.90 \mu\text{m}$ の場合(図 4(b))、極性により異なる実験結果を示した点は同様であるが、PLE の圧力損失急上昇が確認できず、LAS が水の値よりも低い圧力損失となった。

(c) 棒状ミセル界面活性剤水溶液の実験結果

図 5(a), (b)に棒状ミセル界面活性剤水溶液(0.10 mol/L)の実験結果を示す。なお、非ニュートン粘性を示したため、べき乗則モデルによる一般化レイノルズ数 Re^* を使用した⁽³⁾。横軸の $D = 100 \mu\text{m}$ の場合(図 5(a))、対イオン

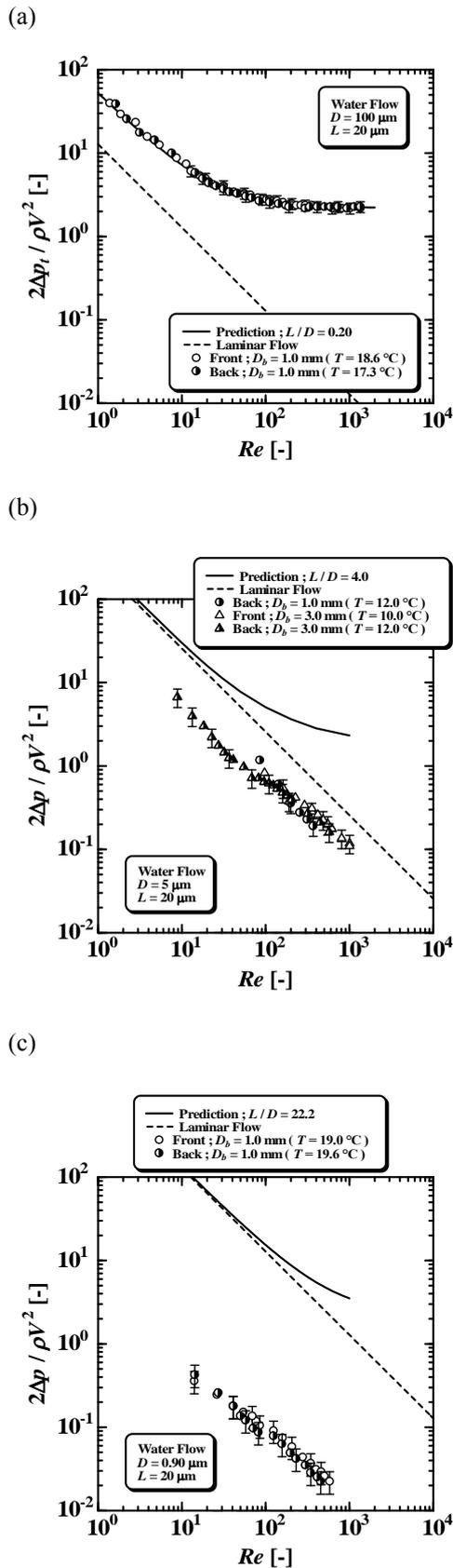


図3 水の実験結果

(サリチル酸ナトリウム NaSal)とのモル濃度比 ϕ により,異なる結果となった。 $\phi = 1.0$ のみ,水と異なる結果となり,水の場合と比べ,高い圧力損失を示し, $\phi = 1.0$ 以外の場合は,

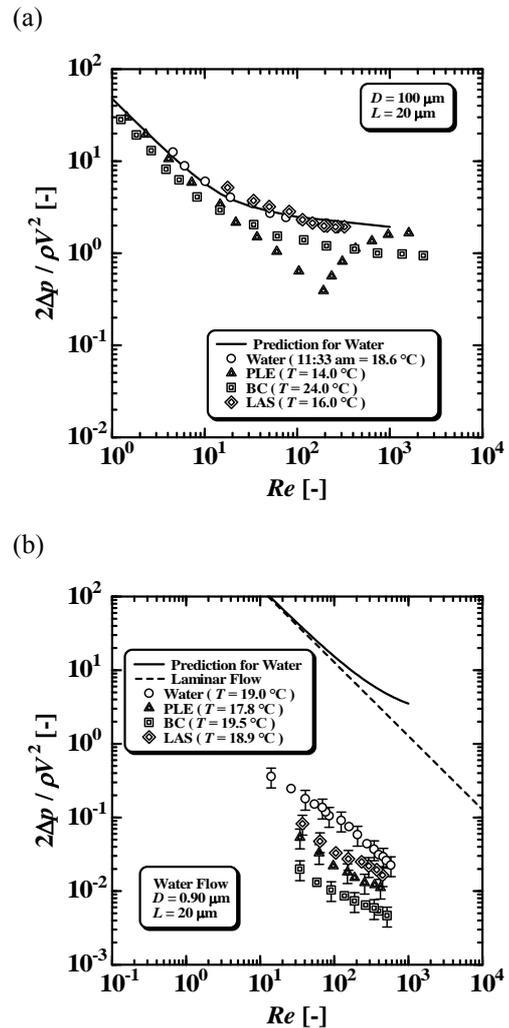


図4 球状ミセル界面活性剤水溶液の実験結果

水の圧力損失とほぼ同じ値となった。一方, $D = 0.90 \mu\text{m}$ の場合(図5(b)) $\phi = 1.0$ において,低レイノルズ数の範囲では,水の場合と比べ,圧力損失が高い値を示し,水の値に漸近していく傾向となった。

(d) 諸要因の検討

本実験では,内径が $1.0 \mu\text{m}$ 程度のマイクロオリフィスを通過する際の水,球状ミセル界面活性剤水溶液,棒状ミセル界面活性剤水溶液の流動特性を圧力損失測定により,明らかにした。ここでは,得られた結果について,検討を加える。水の実験結果は,Navier-Stokes方程式で予測される値よりも大幅に減少した値を示した。この特異流動性について,前述の弾性発現の可能性の観点で考察する。弱い弾性力を測定する手法として,従来からジェット推力法が用いられてきた⁽⁴⁾。そのため,ジェット推力法を用いて,マイクロオリフィスを通過する水の弾性力(平均弾性力) ES を測定した。 ES は予測値からの減少分が弾性に相当するとの考え方に基づくものであり,希薄水溶液の弾性力の測定に有効な手法とされている。図6に縦軸に平均弾性力 ES ,横軸に

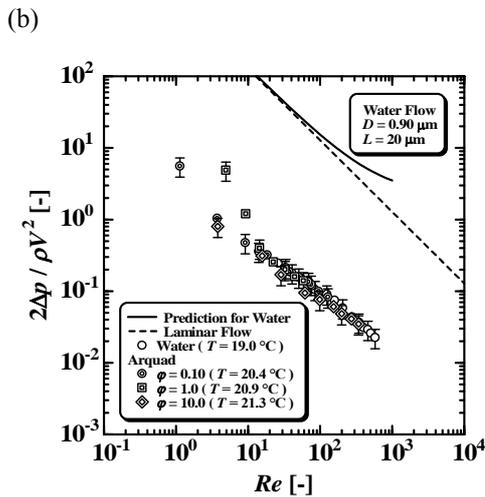
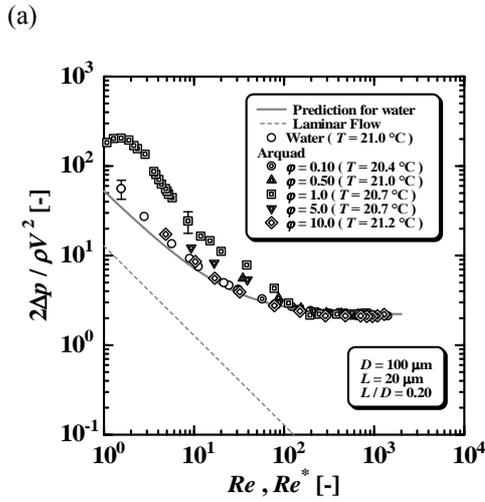


図 5 棒状ミセル界面活性剤水溶液の実験結果

平均流速 V で整理したグラフを示す。これを見ると、内径によらず、平均流速で整理することができ、従来の研究⁽⁴⁾で報告されている粘弾性流体の実験式とほぼ一致していることが分かる。これは、水の弾性発現を裏付けるものである。一方、球状ミセル界面活性剤水溶液の場合、試験流体の極性(非イオン系、陽イオン系、陰イオン系)により、異なる結果となった。これは、流動に極性が影響していることを示すものである。例えば、マイクロオリフィスの壁面における電気二重層との電気相互作用が考えられる。模式図を図7に示す。各球状ミセルと電気二重層との関係は模式図の通りであり、非イオン系の PLE は、電気的相互作用の影響を受けず、バルク領域と壁面近傍の PLE 分子の数は同程度であると考えられる。また、陽イオン系の BC の場合、正の電荷を有する BC 分子は壁面近傍に多く存在することになり、陰イオン系の LAS の場合はその逆になると考えられる。以上のように、極性により、球状ミセル(界面活性剤分子)の挙動が異なり、この結果、流動特性が変化したと考えられる。次に、棒状ミセル界面活性剤水溶液 Arquad の場合について考え

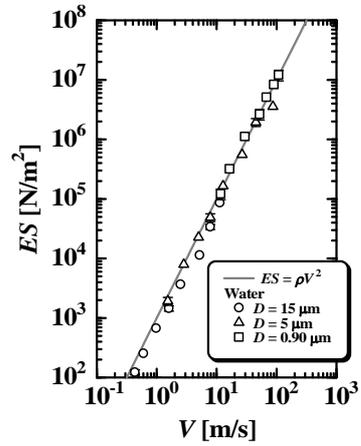


図 6 水の弾性力測定結果

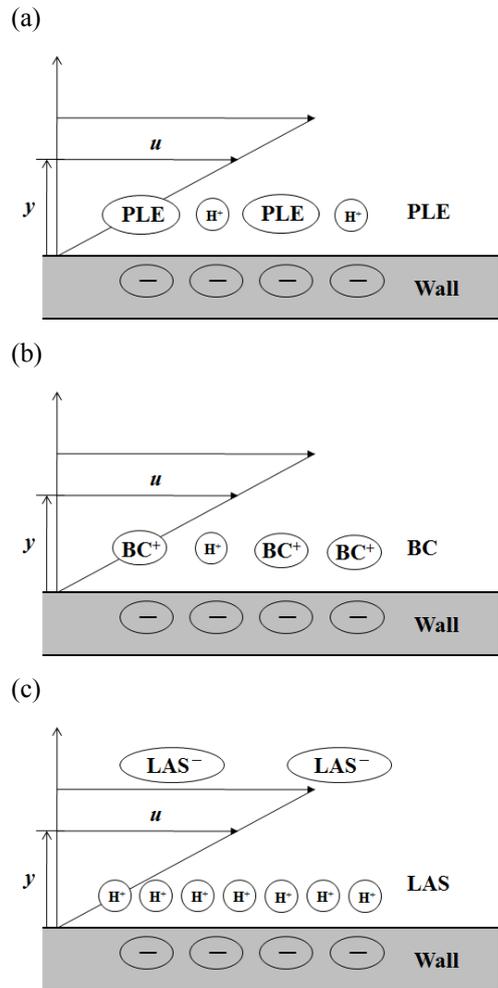


図 7 球状ミセル界面活性剤水溶液の流動模式図

る。対イオン NaSal とのモル濃度比により、異なる流動特性となった。これは、図8に示すような非ニュートン性の違いによるものと考えられる(非ニュートン性が一番強いモル濃度比 $\phi = 1.0$ が特徴的な結果となった)。現状においては、 $D = 0.90 \mu\text{m}$ のひずみ速度に対応する粘度測定が未完であるが、この非ニュートン粘性の消失と水の実験結果への漸

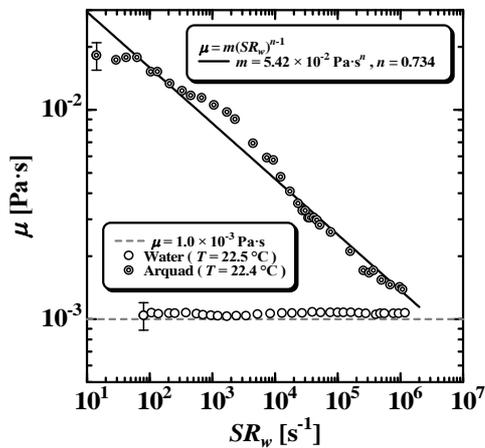


図 8 棒状ミセル界面活性剤水溶液の粘度特性

近に関係があると考えられる。

(e)まとめ

本研究において、従来の研究では行われていない、代表長さが $1.0 \mu\text{m}$ 以下の流れ場における水、および、複雑流体の流動特性の検討を行い、特異流動特性を明らかにすることができた。

<引用文献>

- (1) T. Hasegawa, A. Ushida, T. Narumi, Huge reduction in pressure drops of water, glycerol/water mixture, and aqueous solution of polyethylene oxide in high speed flows through micro-orifices, *Phys Fluids*, 21, 052002, (2009)
- (2) A. Ushida, T. Hasegawa, T. Narumi, Drag reduction for liquid flow through micro-apertures, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 165, 1516-1524, (2010)
- (3) J. Harris, A note on the generalized Reynolds number in non-Newtonian flow, *Br. J. Appl. Phys.*, 14, 817-818, (1963)
- (4) T. Hasegawa, H. Asama, T. Narumi, A simple method for measuring elastic stresses by jet thrust and some characteristics of tube flows, *Nihon Reorji Gakkaishi*, 31, 243-252, (2003)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 10 件)すべて査読有

A. Ushida, T. Koyama, Y. Nakamoto, T. Narumi, T. Sato, T. Hasegawa, Antimicrobial effectiveness of ultra-fine ozone-rich bubble mixtures for fresh vegetables using an alternating flow, *J. Food Eng.*, 206, 48-56, (2017)

DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2017.03.003

A. Ushida, T. Narumi, K. Amaki, T. Sato, T. Hasegawa, Anomalous flow properties of

spherical micelle surfactant solutions passing through small-sized slits, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 61, 562-574, (2016)

DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2016.07.002

T. Hasegawa, A. Ushida, T. Narumi, M. Goda, Is the water flow more or less than that predicted by the Navier-Stokes equation in micro-orifices?, *Phys. Fluids*, 28, 092005, (2016)

DOI: 10.1063/1.4962304

A. Ushida, A. Ichijo, T. Sato, T. Hasegawa, T. Narumi, Pseudo-laminarization effect of several types of surfactant solutions in small-sized pipe flows, *Acta Mech.*, 227, 2061-2074, (2016)

DOI: 10.1007/s00707-016-1616-3

A. Ushida, T. Hasegawa, T. Sato, T. Narumi, Flow properties of microbubble mixtures and complex fluids passing through micro-apertures, *Nihon Reorji Gakkaishi*, 44, 119-129, (2016)

DOI: 10.1678/rheology.44.119

A. Ushida, S. Murao, T. Hasegawa, T. Narumi, K. Amaki, Anomaly of pressure drops of rod-like micelle surfactant solutions passing through small orifices, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 70, 69-76, (2016)

DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2015.07.024

T. Hasegawa, A. Ushida, T. Narumi, A simple expression for pressure drops of water and other low molecular liquids in the flow through micro-orifices, *Phys. Fluids*, 27, 122001, (2015)

DOI: 10.1063/1.4936943

A. Ushida, T. Hasegawa, T. Narumi, I. Kourakata, Y. Nakamoto, Flow properties of ultra-fine bubble mixtures passing through micro-apertures, *J. Flow Control, Mea. Vis.*, 3, 111-121, (2015)

DOI: 10.4236/jfcmv.2015.33011

牛田晃臣, 一条陽, 長谷川富市, 鳴海敬倫, 萱場龍一, 微小管内流れにおける界面活性剤水溶液の擬層流化現象, *日本機械学会論文集*, 81, 14-00278, (2015)

DOI: 10.1299/transjsme.14-00278

A. Ushida, T. Hasegawa, T. Narumi, Anomalous phenomena in pressure drops of water flows through micro-orifices, *Microfluid. Nanofluid.*, 17, 863-870, (2014)

DOI: 10.1007/s10404-014-1362-6

[学会発表](計 15 件)

牛田晃臣, 小川秀一, 長谷川富市, 鳴海敬倫, 微小管内流れにおける種々の希薄高分子水溶液の擬層流化現象, *日本機械学会 第 94 期流体工学部門講演会*, 0308, (2016.11.13), 「山口大学(山口県宇部市)」

牛田晃臣, 小川秀一, 一条陽, 長谷川富市, 鳴海敬倫, 微小管内流れにおける複雑流体の擬層流化現象と弾性の関係, 第

64 回レオロジー討論会, 3D03, (2016.10.30), 大阪大学(大阪府豊中市)
牛田晃臣, 村尾将太郎, 長谷川富市, 鳴海敬倫, 微小孔を通過する界面活性剤水溶液の特異流動性, 日本流体力学会 年会 2016, (2016.9.28), 「名古屋工業大学(愛知県名古屋市)」
A. Ushida, S. Ogawa, T. Hasegawa, T. Narumi, Pseudo-laminarization of several types of dilute polymer solutions in capillary flows, The XVIIth International Congress on Rheology, 5426, (2016.8.12), 「Kyoto Terrsa(京都府京都市)」
牛田晃臣, 複雑流体の微小サイズの流れ場における特異挙動と微細気泡混合効果, 日本レオロジー学会 第 43 年会, A03, (2016.5.12), 「東京大学(東京都目黒区)」
牛田晃臣, 微小サイズの流れ場における複雑流体の流動特性, 第 20 回日本レオロジー学会東日本支部・関東地区レオロジー研究会, (2016.3.1), 「株式会社アントンパールジャパンセミナールーム(東京都品川区)」
A. Ushida, S. Ogawa, T. Hasegawa, T. Narumi, Pseudo-laminarization of dilute polymer solutions in capillary flows, The International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2015, OS-23-1, (2015.10.6), 「LOISIR HOTEL TOYOHASHI(愛知県豊橋市)」
牛田晃臣, 一条陽, 長谷川富市, 鳴海敬倫, 微小管内流れにおける種々の界面活性剤水溶液の流動特性, 第 63 回レオロジー討論会, 1F06, (2015.9.23), 「神戸大学(兵庫県神戸市)」
牛田晃臣, 村尾将太郎, 長谷川富市, 鳴海敬倫, 微小孔を通過する棒状ミセル界面活性剤水溶液の特異流動性, 日本実験流体力学会 2015 年度年次講演会, B101, (2015.8.28), 「新潟大学(新潟県新潟市)」
牛田晃臣, 一条陽, 長谷川富市, 鳴海敬倫, 微小管内流れにおける種々の界面活性剤水溶液の流動特性, 日本機械学会 第 92 期流体力学部門講演会, 0418, (2014.10.26), 「富山大学(富山県富山市)」
牛田晃臣, 村尾将太郎, 一条陽, 長谷川富市, 鳴海敬倫, 萱場龍一, 微小孔を通過する界面活性剤水溶液の特異流動性, 第 62 回レオロジー討論会, 2E02, (2014.10.16), 「福井市地域交流プラザ(福井県福井市)」
牛田晃臣, 長谷川富市, 鳴海敬倫, 萱場龍一, 高せん断速度域における種々の界面活性剤水溶液の流動特性, 日本機械学会 2014 年度年次大会, S0520301, (2014.9.9), 「東京電機大学(東京都足立区)」
牛田晃臣, 一条陽, 長谷川富市, 鳴海敬倫, 微小管内流れにおけるマイクロバブル混合液および複雑流体の流動特性, 混

相流シンポジウム 2014, C221, (2014.7.29), 「札幌市の道民センターか
でる 2・7(北海道札幌市)」
A. Ushida, A. Ichijo, T. Hasegawa, T. Narumi, R. Kayaba, Pseudo-laminarization of several types of surfactant solutions in capillary flows, The 6th Pacific Rim Conference on Rheology, PP013, (2014.7.22), 「Melbourne(Australia)」
牛田晃臣, 一条陽, 長谷川富市, 鳴海敬倫, 萱場龍一, マイクロ流れにおける抵抗低減界面活性剤水溶液の流動特性, 日本レオロジー学会 第 41 年会, P12, (2014.5.15), 「東京大学(東京都目黒区)」

〔その他〕

ホームページ等

http://researchers.adm.niigata-u.ac.jp/html/100000734_ja.html

6. 研究組織

(1)研究代表者

牛田 晃臣 (USHIDA, Akiomi)

新潟大学・自然科学系・助教

研究者番号：10582976

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：

(4)研究協力者

鳴海 敬倫 (NARUMI, Takatsune)

新潟大学・自然科学系・教授

長谷川 富市 (HASEGAWA, Tomiichi)

新潟工業短期大学・学長