

令和 4 年 8 月 31 日現在

機関番号：17401
 研究種目：基盤研究(C) (一般)
 研究期間：2019～2021
 課題番号：19K04172
 研究課題名(和文) 微小スケールの高せん断速度内の特異点を通過する非ニュートン二相流レオロジー解明

研究課題名(英文) Study on rheology of non-Newtonian two-phase flows through singularities in microchannels

研究代表者
 川原 顕磨呂 (Kawahara, Akimaro)
 熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・教授

研究者番号：20224818

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、気液二相を利用したデバイスを対象として、マイクロ流路(水力学相当直径1mm以下)に存在する特異点が気体-非ニュートン液体の二相流の流動特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として実施した。特異点として、マイクロ反応器等の配管系において見られる急縮小と急拡大を採用した。また、非ニュートン流体として数種類の高分子水溶液を用いた。そして、特異点を通過する液単相流および二相流の圧力変化、特異点の存在による気液の流動形態の変化を実験的に調査した。実験結果に基づき、特異点通過時の圧力変化を評価する相関式を構築した。その際、非ニュートン流体がもつ粘弾性の特性を考慮する必要性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義
 マイクロメートルの代表径を有する流路内に存在する各種の特異点(急拡大・縮小等)を通過する非ニュートン流体は、マイクロ化学反応器、生体内の血液流れ等に見られる。非ニュートン流体の流体レオロジー特性は流れのせん断速度によって複雑に変化する。そして、流路寸法が小さくなるにつれてせん断速度が大きくなり、非ニュートン性が顕著に表れると予想される。したがって、効率の良いマイクロ反応器の設計・開発、心血管・循環器系の検査法や医療機器の開発では、高せん断場に存在する特異点が非ニュートン流体レオロジー特性に及ぼす影響を把握することが必要となるが、本研究を通してその一部を明らかにすることができた。

研究成果の概要(英文)：For designing micro-size devices using gas and liquid as working fluids, the effect of singularity existing in the microchannel (its hydraulic equivalent diameter of 1 mm or less) on the flow characteristics of the two-phase flow of gas and non-Newtonian liquid was investigated. As a singularity, we adopted the sudden contraction and sudden expansion seen in piping systems such as micro reactors. In addition, several types of polymer aqueous solutions were used as non-Newtonian fluids. Then, the pressure change of the liquid single-phase flow and the two-phase flow passing through the singularity, and the change of the flow pattern of the gas and liquid due to the existence of the singularity were experimentally investigated. Based on the experimental results, a correlation was constructed to evaluate the pressure change when passing through a singularity. At that time, it was clarified that it is necessary to consider the viscoelastic properties of non-Newtonian fluids.

研究分野：流体工学

キーワード：混相流 マイクロチャンネル 気液二相流 非ニュートン流体 急縮小 急拡大

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

マイクロメートルからミリメートルオーダーの代表径を有する流路内に存在する各種の特異点(急拡大・縮小、曲がり、分岐・合流、オリフィス等)を通過する非ニュートン流体は、マイクロ化学反応器、生体内の血液流れ等に見られる。非ニュートン流体の流体レオロジー特性は流れのせん断速度によって複雑に変化し、このせん断速度は流路の代表径で大きく異なる。すなわち、互いの流路で速度が同じであっても、流路寸法が小さくなるにつれてせん断速度が大きくなり、非ニュートン性が顕著に表れると予想される。したがって、効率の良いマイクロ反応器の設計・開発、心血管・循環器系の検査法や医療機器の開発では、高せん断場に存在する特異点が非ニュートン流体レオロジー特性に及ぼす影響を知ることが必要となる。しかしながら、マイクロ流路およびミニ流路内の特異点が非ニュートン流体の単相流れおよび二相流れに及ぼす影響は十分に明らかにされていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、マイクロ流路内の流動特性に及ぼす非ニュートンレオロジー特性、および特異点の影響を明らかにすることである。非ニュートン流体の粘度はせん断速度に依存することが知られている。例えば、代表径 $D=0.1$ mm (マイクロ流路) と 10 mm (通常口径流路) の流路内の速度 $u=1.0$ m/s での流れについて、レイノルズ数 Re とせん断速度 uD を各流路で比較してみる。マイクロ流路では $Re=10$, $uD=10^3$ となり、通常口径流路のそれら ($Re=10^3$, $uD=10$) と桁がかなり異なる。したがって、通常口径流路で得られた知見をマイクロ流路のそれに適用できるかは分からない。そこで、既存の研究では見当たらないマイクロオーダーの流路における高せん断速度領域での特異点を通過する非ニュートン流体のレオロジー特性の把握を試みる。

3. 研究の方法

ここでは、特異点として急縮小部を有する実験について説明する。Fig. 1 に供試流路の概略を、Table 1 に流路断面寸法を示す。ここで、 W は流路幅、 H は流路高さ、 D_h は水力学相当直径、 σ_A は断面積比である。実験では、供試液体を Port 1 から、供試気体を Port 2 から流路に供給し、Section 1 の気液混合部で気液二相流を生成した。その気液二相流は Section 2、Section 3 (急縮小部) Section 4 を通過し、Port 4 から外部に排出された。なお、 $P_1 \sim P_8$ は流路内ゲージ圧力を計測するための圧力ポートである。また、本研究では急縮小部より上流側を Upstream side、下流側を Downstream side と定義した。なお、急拡大の実験の場合は Fig. 1 の右側より流体を導入する。

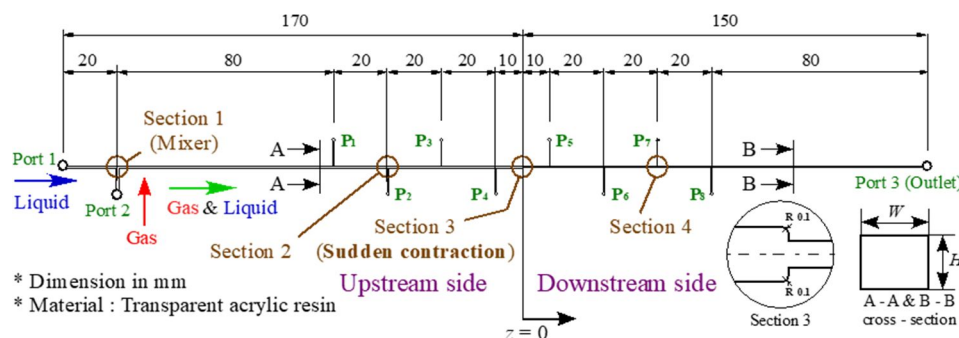


Fig. 1. The rectangular test channel with a sudden contraction.

Table 2. Dimensions of the test channel.

Channels	W [mm]	H [mm]	D_h [mm]	σ_A [-]
Upstream	0.99	0.50	0.66	0.49
Downstream	0.49	0.50	0.50	

計測した主なパラメータは、 $P_1 \sim P_8$ のゲージ圧力 P_i [kPa] ($i=1 \sim 8$)、液相質量流量 W_L [kg/s]、気相質量流量 W_G [kg/s]、Section 2 と Section 4 における気相速度 u_G [m/s] である。 P_i の計測にはゲージ圧力計と差圧変換器を用いた。 W_L は単位時間に Port 4 から排出される液質量を計測すること(重量法)で求めた。 W_G は気体用マスフローコントローラに内蔵された質量流量計により計測した。 u_G はハイスピードビデオカメラにより流れを撮影した動画から算出した。

供試流体には、気相に空気、液相に蒸留水、グリセリン水溶液 25 wt% (GL 25 wt%)、キサンタンガム水溶液 0.1 wt% (XG 0.1 wt%)、ポリアクリルアミド水溶液 0.11 wt% (PAM 0.11 wt%) を用いた。ここで、XG 0.1 wt% と PAM 0.11 wt% は、せん断速度の増加に伴い、見かけ粘度が低下する擬塑性流体である。(非ニュートン流体の一種) また、XG 0.1 wt% には擬塑性が強い、PAM

0.11 wt%には擬塑性は弱い、弾性が強いという特徴がある。各供試液体の物性値は Table 2 に示す。非ニュートン流体の粘度の評価には、 $\tau = K(du/dy)^n$ で表される Power-law モデルを使用した。ここで、 τ はせん断応力、 K は擬塑性粘度、 n は構造粘度指数、 du/dy はせん断速度である。なお、擬塑性が強いほど n は小さい。また、ニュートン流体の場合は、 $n = 1$ 、 $K = \mu$ (粘度) となる。本実験条件下での XG 0.1 wt% と PAM 0.11 wt% の見かけ粘度は、それぞれ 1.50 ~ 2.38、1.58 ~ 1.61 mPa·s であった。

Table 2. Physical properties of the test liquids.

Test liquids	ρ_L [kg/m ³]	σ_L [N/m]	K [Pa·s ⁿ]	n [-]	$(du/dy)_{y=0}$ [1/s]
Distilled water	997	0.072	8.97×10^{-4}	1.00	-
GL 25wt%	1058	0.063	1.82×10^{-3}	1.00	-
XG 0.1wt%	998	0.073	3.47×10^{-2}	0.70	1400 - 52000
PAM 0.11wt%	998	0.073	1.85×10^{-3}	0.98	1060 - 41400

実験条件に関しては、供試気体と供試液体の流量を各 4 種類ずつ用意し、計 16 通りの組合せで実験を行った。また、各流量は Contraction side の一般化レイノルズ数 [式(1)] が、気相では 20, 30, 40, 50 に、液相では 200, 300, 400, 500 になるように調節された。

$$Re_k^* = \frac{\rho_k j_k^{2-n} D_h^n}{8^{n-1} K \left(b + \frac{a}{n} \right)^n} \quad (1)$$

ここで、 ρ_k [kg/m³] は k 相の密度、 j_k [m/s] は k 相の見かけ速度、 a, b [-] は流路形状係数である。添え字 k は気相 G または液相 L を表す。なお、 j_k は k 相の体積流量 Q_k を流路断面積 A で除した値 ($j_k = Q_k/A$) である。また、Upstream side では $(a, b) = (0.244, 0.728)$ 、Downstream side では $(a, b) = (0.212, 0.677)$ であった。

4. 研究成果

(1) 急縮小流路の成果：ここでは、急縮小流路を通過する気液二相流の圧力損失について記述する。Fig. 2 に観察された典型的な流れの写真を示す。溶液の種類により気泡の形状や速度が異なることが分かった。

Fig. 3 に XG 系の圧力分布の実験例を示す。Fig. 3 から、急縮小部 ($z=0$) において圧力変化が生じていることが分かる。本研究では、計測した圧力勾配を急縮小部まで外挿し、得られた圧力差を急縮小圧力変化 $\Delta P_{C,TP}$ と定義した。

$\Delta P_{C,TP}$ は、式(2)から計算される Contraction side と Expansion side の動圧差である急縮小可逆圧力変化 $\Delta P_{CR,TP}$ と、急縮小圧力損失 $\Delta P_{Cl,TP}$ の和である。なお、 $\rho_G \ll \rho_L$ より、式(2)では気相動圧変化を無視した。

$$\Delta P_{CR,TP} = \frac{\rho_L}{2} \{ (1 - \alpha_d) u_{Ld}^2 - (1 - \alpha_u) u_{Lu}^2 \} \quad (2)$$

ここで、 α [-] ($= j_G / u_G$) はボイド率である。また、添え字の u は Upstream side を、 d は Downstream side を表す。したがって、 $\Delta P_{Cl,TP}$ は $\Delta P_{C,TP} - \Delta P_{CR,TP}$ より求まる。

Fig. 4 に $\Delta P_{Cl,TP}$ と Downstream side での局所容積中心速度 $j_d (= j_{Ld} + j_{Gd})$ との関係を示す。すべての気液系において、 j_d の増加とともに $\Delta P_{Cl,TP}$ が増加した。これは、速度の大きい流体の方がより大きな慣性を持っているために、はく離領域が流れ方向に長くなるからである。また、同一 j_d における各気液系の $\Delta P_{Cl,TP}$ の大小関係に着目すると、その関係は XG 系 > PAM 系 > GL 系 > 蒸留水系となった。この理由には、はく離領域内で消散するエネルギーの大きさと、Vena contracta (Fig. 3 を参照) 通過後の流体の弾性効果に関係していると考えられる。蒸留水系、GL 系、XG 系における $\Delta P_{Cl,TP}$ の大小関係は、はく離領域内で消散するエネルギーの大きさに着目することで説明ができる。はく離領域内では流体速度が遅いため、擬塑性の強い XG 0.1 wt% の見かけ粘度が大きく増加し、粘度の大小関係は XG 0.1 wt% > GL 25 wt% > 蒸留水となったと考えられる。また、はく離領域内で生じているエネルギー消散は、流体の粘度が大きくなると増加する。これは、粘度が大きくなると流体粒子間の摩擦が大きくなるからである。以上のことから、 $\Delta P_{Cl,TP}$ の大小関係は XG 系 > GL 系 > 蒸留水系となった。一方、PAM 系の $\Delta P_{Cl,TP}$ が GL 系のそれよりも大きくなる理由は、上記の考察だけでは説明がつかない。なぜなら、PAM 0.11 wt% の擬塑性は弱く、見かけ粘度が GL 25 wt% のそれを上まわるとは考えにくいからである。PAM 系の $\Delta P_{Cl,TP}$ が大きくなった理由には、Vena contracta 通過後の流体の弾性効果 (スウェル現象) が影響していると考えられる。従って、スウェル現象による壁面摩擦損失と、上記で考察したはく離域での損失の 2 つが作用したために、PAM 系の $\Delta P_{Cl,TP}$ が GL 系のそれを上まわったと考えられる。

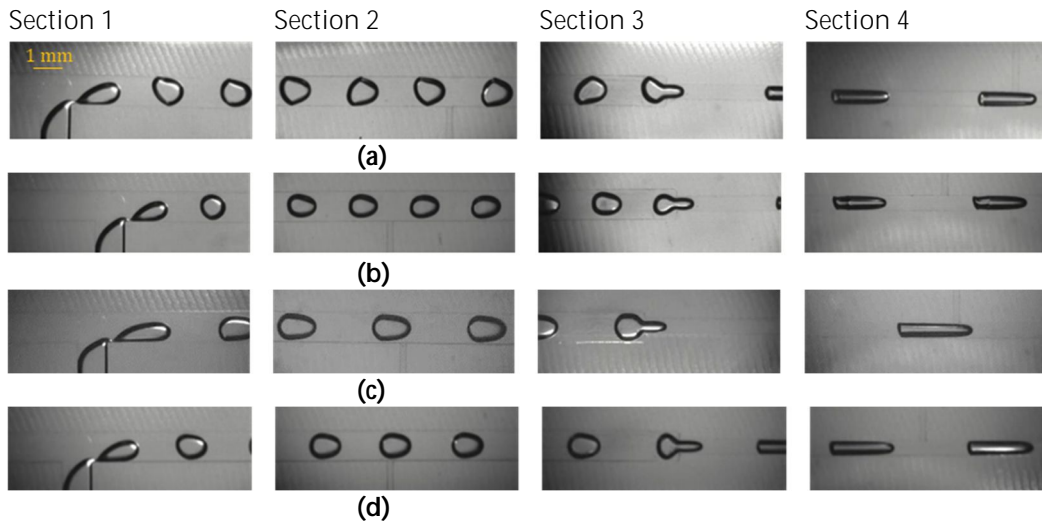


Fig. 2. Typical flow pattern of gas-liquid two-phase flow observed when the combination of j_L and j_G is almost same for each fluid; **(a)** Water: $j_{L,d} = 0.92$ m/s, $j_{G,d} = 0.43$ m/s, **(b)** GL 25wt%: $j_{L,d} = 0.84$ m/s, $j_{G,d} = 0.44$ m/s, **(c)** XG 0.1wt%: $j_{L,d} = 0.84$ m/s, $j_{G,d} = 0.44$ m/s, **(d)** PAM 0.11wt%: $j_{L,d} = 0.85$ m/s, $j_{G,d} = 0.44$ m/s.

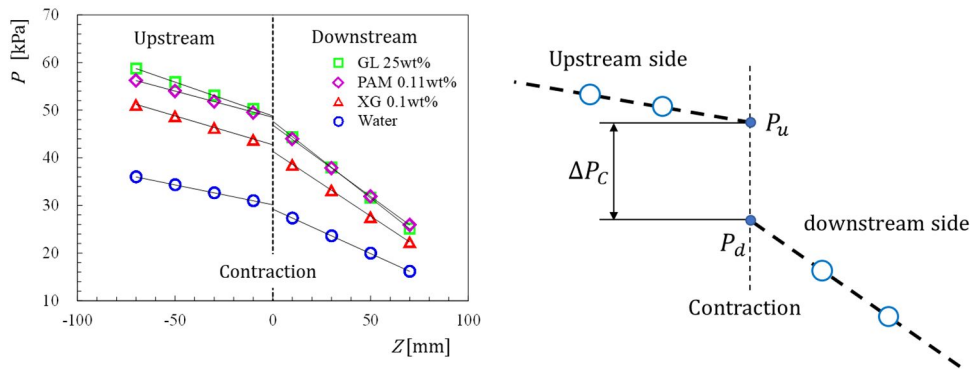


Fig. 3. Pressure profile along the channel; (a) Pressure profile measured for two-phase flow at $j_{L,d} = 0.86$ m/s and $j_{G,d} = 0.87$ m/s, (b) Schematic enlarged view of pressure profile around contraction.

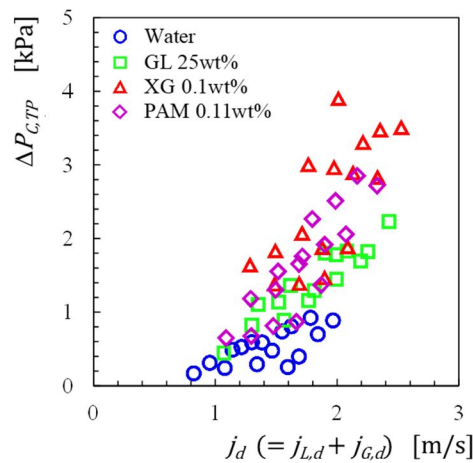


Fig. 4. Two-phase irreversible pressure change through sudden contraction.

本実験値と通常口径管のニュートン流体用の既存の予測式（例えば、引用文献）に計算値を比較した結果、それらは一致しなかった。そこで、次式の急縮小圧力損失係数 $k_{CI,TP}$ [-] を定義し、その相関式を検討した。

$$k_{CI,TP} = \frac{\Delta P_{CI,TP}}{\frac{\rho_L}{2} (1 - \alpha_d) u_{L,d}^2} \quad (3)$$

本研究では、Lockhart-Martinelli 法 を参考に $k_{CI,TP}$ の相関式を作成し、これより求まる $\Delta P_{CI,TP}$ の

計算値と実験値を比較した。 $k_{CL,TP}$ の相関式を式(4)に示す。

$$k_{CL,TP} = \phi L^2 k_{CL,L} \quad (4)$$

$$\phi L^2 = C_1 \beta_C + C_2 \quad (5)$$

ここで、 $k_{CL,L}$ [-]は液単相のみが流れた場合の急縮小圧力損失係数、 β_C [-]は Contraction side での気体体積流量率(= $j_G / (j_G + j_L)$)である。なお、 C_1 と C_2 は実験定数であり、液相がニュートン流体(蒸留水系、GL系)では(C_1, C_2)=(0.82, 0.14)、非ニュートン流体(XG系、PAM系)では(C_1, C_2)=(0, 1.07)となった。また、 $k_{CL,L}$ の計算には、式(6)と(7)に示す本研究の液単相流実験から得た縮流係数 C_C の相関式を用いた。

・ニュートン流体(蒸留水、GL 25 wt%)の場合:

$$C_C = 0.233 Re_{LC}^{*0.112} \quad (Re_{LC}^* \approx 200 \sim 500) \quad (6)$$

・非ニュートン流体(XG 0.1 wt%, PAM 0.11 wt%)の場合:

$$C_C = 0.45 \quad (Re_{LC}^* \approx 250 \sim 1000) \quad (7)$$

また、 C_C と $k_{CL,L}$ の関係は次式である。

$$C_C = \frac{1}{1 + \sqrt{k_{CL,L}}} \quad (8)$$

Fig. 5 に式(3)~(8)より得られた $\Delta P_{CL,TP}$ の計算値と本実験値との比較を示す。本相関式による計算値は大半の実験値と相対誤差 $\pm 30\%$ 以内で一致した。なお、図中の破線で囲ったデータは急縮小部で気泡の分裂が観察された。

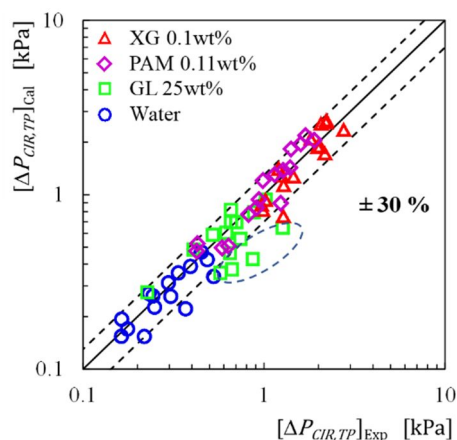


Fig. 5. Comparison of two-phase pressure change between experiment and calculation by the Lockhart-Martinelli method with the present two-phase multiplier correlation.

(2) まとめ: 本研究では、矩形マイクロ流路(水力学相当直径 0.5 mm)に存在する特異点が気体-非ニュートン液体の二相流の流動特性に及ぼす影響を実験的に調べた。特異点として、急縮小と急拡大を採用した。また、擬塑性の非ニュートン特性を示す数種類の高分子水溶液を用いた。そして、特異点を通過する液単相流および二相流の圧力変化、特異点の存在による気液の流動形態の変化を実験的に調査した。そして、高せん断速度場の流動特性に関する実験データベースを獲得した。そして、そのデータベースに基づき、特異点通過時の圧力変化を評価する相関式を構築した。その際、非ニュートン流体がもつ粘弾性の特性を考慮する必要性を明らかにした。

<引用文献>

Abdelal, F.F.; Hahm, G.; Ghiaasiaan, S.M.; Abdel-Khalik, S.I.; Jeter, S.S.; Yoda, M.; Sadowski, D.L. Pressure drop caused by abrupt flow area changes in small channels, *Exp. Thermal Fluid Sci.*, 29, pp. 425-434, 2005.

Lockhart, R.W. and Martinelli, R.C.; Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes, *Chem. Eng. Progress*, 45, pp. 39-48, 1949.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kawahara Akimaro, Yonemoto Yukihiro, Arakaki Yoichi	4. 巻 105
2. 論文標題 Pressure Drop for Gas and Polymer Aqueous Solution Two-Phase Flows in Horizontal Circular Microchannel	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Flow, Turbulence and Combustion	6. 最初と最後の頁 1325 ~ 1344
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10494-020-00127-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 ARAKAKI Yoichi, YONEMOTO Yukihiro, KAWAHARA Akimaro	4. 巻 34
2. 論文標題 Non-Newtonian Effects on Gas-Liquid Slug Flow in Micro-channel with T-junction Mixer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JAPANESE JOURNAL OF MULTIPHASE FLOW	6. 最初と最後の頁 93 ~ 99
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3811/jjmf.2020.008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Toshimitsu Masaki, Yonemoto Yukihiro, Kawahara Akimaro	4. 巻 6
2. 論文標題 Pressure Change for Single- and Two-Phase Non-Newtonian Flows through Sudden Contraction in Rectangular Microchannel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Fluids	6. 最初と最後の頁 440 ~ 440
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/fluids6120440	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 TIAN BINYUAN, 米本 幸弘, 川原 顕磨呂, 新垣 陽一, 木下 颯馬
2. 発表標題 Non-Newtonian Effects on Gas-Liquid Two-Phase Flow in Micro-channel
3. 学会等名 日本混相流学会 混相流シンポジウム 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akimaro Kawahara, Yukihiro Yonemoto, Yoichi Arakaki
2. 発表標題 Pressure Drop for Gas and Polymer Aqueous Solution Two-Phase Flows in Circular Microchannel
3. 学会等名 International Conference on Multiphase Flow 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新垣陽一、米本幸弘、川原 顕磨呂
2. 発表標題 非ニュートン性がマイクロチャンネル内気液二相流に及ぼす影響の調査
3. 学会等名 日本混相流学会 混相流シンポジウム 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 TIAN BINYUAN, 米本 幸弘, 川原 顕磨呂, 新垣 陽一, 木下 颯馬,
2. 発表標題 Non-Newtonian Effects on Gas-Liquid Two-Phase Flow in Micro-channel
3. 学会等名 日本混相流学会混相流シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川原 顕磨呂, 新垣 陽一, 米本 幸弘
2. 発表標題 マイクロチャンネル内の気体 - 高分子水溶液二相流の気泡速度
3. 学会等名 日本混相流学会混相流シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 李 ユウ 帥, 川原 顕磨呂, 米本 幸弘, 木下 颯馬, 山畑 裕貴
2. 発表標題 Study on Non Newtonian liquid single phase flow in rectangular microchannel with sudden expansion
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第75期総会・講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------