

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560199

研究課題名(和文) マイクロ流路内二相流動に及ぼす各種特異点の影響の解明

研究課題名(英文) Investigation of characteristics of two-phase flows through singularities in microchannels

研究代表者

川原 顕磨呂 (Kawahara, Akimaro)

熊本大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：20224818

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000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、マイクロ流路(水力学相当径で0.5 mm以下)内に存在する特異点が気液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。具体的には、(1) 特異点による単相流および二相流の圧力損失の評価法の確立、(2) 特異点の存在による気液の流動形態の変化の調査、をした。供試特異点として、180°曲がり(曲率半径2種類)、急縮小および急拡大(縮小比および拡大比を2種類)を採用した。最終的に、システムの配管設計で必要となる圧力損失の評価法に関し、液物性値と曲率半径および縮小比(拡大比)の影響を考慮した各特異点についての損失の評価法を確立した。

研究成果の概要(英文)：Singularities, such as bend, contraction and/or expansion, are commonly used in a two-phase micro-reactor and micro-heat exchanger systems. It is thus essential to understand the effects of the singularities on two-phase flow characteristics in microchannel for developing and designing such micro-systems. The purpose of this study is to investigate the effects of singularities and/or liquid properties on two-phase flow characteristics such as flow regime, void fraction and pressure drop in horizontal, rectangular microchannels. Distilled water, pure ethanol and Hydrofluoroether 7200 were used as the test liquids, while nitrogen gas as the test gas. 180 degree return bend, sudden contraction and sudden expansion were tested as the singularities, and the two rectangular microchannels for each singularity with different curvature ration and flow area contraction or expansion ratios were used. Finally, a new correlation was developed to predict the pressure drop due to each singularity.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・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 曲がり流路 急縮小 急拡大

1. 研究開始当初の背景

近年、CPU 等の各種電子機器の冷却、携帯機器用燃料電池の改質器内の流れ、MEMS 技術を利用したマイクロ分析およびマイクロ化学反応、バイオ技術等の様々な工学分野で、サブミリ・マイクロスケールいわゆるマイクロ流路内の熱流動に関心が寄せられている。そのようなマイクロ流路を利用したデバイスの一つであるマイクロリアクタは単位体積あたりの表面積が通常装置のそれより格段に大きいという特長を持つことから、気-液、液-液、固-液反応のような界面での効率的な反応が期待されている。このうち、気-液の反応をコントロールするためには気液二相の流動制御、特に気体と液体の体積率(あるいは気泡および液体の長さ)を制御する必要がある。そのような制御を行う上で、さまざまな気液混合方法が提案されている。そして、混合方法および反応促進のために流路断面の変化や曲がり等が用いられる。一方、マイクロ流路を利用する場合、流動抵抗が大きいので装置の設計においてはそれらの適切な評価が必要である。ストレート部の二相流の圧力損失については多くの研究がなされ、代表者もその精度の良い評価法を提案している。一方、マイクロ流路内の特異点(急拡大、急縮小、曲がり等)による圧力損失の評価は見当たらない。さらに、反応効率に影響を大きな影響を及ぼす気泡の長さ・液体の長さおよび液膜厚さ等の各種流動パラメータへの特異点の影響も知られていない。これらを知ることができれば、積極的にそれら流動パラメータを制御でき、マイクロデバイスの開発・設計に大きく寄与できる。また、マイクロ流路内の流動に関する数値計算も行われているが、その計算結果と比較するためのデータが不足しておりデータベースの構築が望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、上記の背景から気液二相を利用したデバイスを対象とし、マイクロ流路(水力学相当径で 0.5 mm 以下)内に存在する特異点が気液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する。具体的には、(1) 特異点による単相流および二相流の圧力損失の評価法の確立、(2) 特異点の存在による気液の流動形態の変化の調査、をすることである。供試特異点として、180°曲がり、急縮小および急拡大を採用する。

3. 研究の方法

図 1 に 180° 曲がり部を有する供試マイクロ流体チップの概略を示す。流体チップは PDMS 製で、矩形断面で曲がりを持つチャンネルが水平面に形成された。流路の内壁は濡れ性を向上させるために酸化プラズマ処理が施してあった。チャンネルの断面は幅 $W = 0.24$ mm、深さ $H = 0.23$ mm で、水力学相当直径 $D_H = 0.235$ mm であった。流体チップは 13 のタップを有し、1 から液体、2 から気体を流入させた。したがって、T 字タイプの混合部で二相流は生じた。タップ 5~12 はベ

ンド上流と下流の圧力分布を圧力変換器で測定するためのものであった。タップ 13 は二相流の大気への排出口であった。ベンドの曲率半径は $R = 0.875$ と 0.5 mm であった。

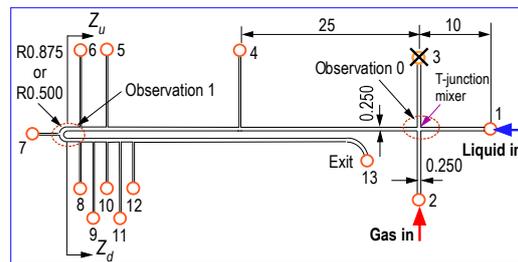


図 1 曲がり部を持つ供試流体チップ

図 2 に急縮小(あるいは急拡大)を持つ供試マイクロ流体チップの概略を示す。流体チップは曲がりを持つ流体チップと同じく PDMS 製で、急縮小部を持つチャンネルが水平面に形成された。収縮比 $\sigma_A (=$ 収縮部下流の流路の断面積 A_d / 上流のそれ A_u) の影響を見るために、表 1 に示す 2 種類の流路を用いた。表中、 W, H は流路幅と高さであり、 D_H は水力学相当直径である。流体チップは 14 個のタップを有し、1 から液体、2 から気体を流入させた。タップ 3~12 は縮小部上流と下流の圧力分布を圧力変換器で測定するためのものであった。なお、タップ 13 から気体、タップ 14 から液体を流入させると急拡大の実験となった。

供試気体には窒素を、液体には蒸留水、エタノール 49% 水溶液、エタノールおよび HFE-7200 を用いた。

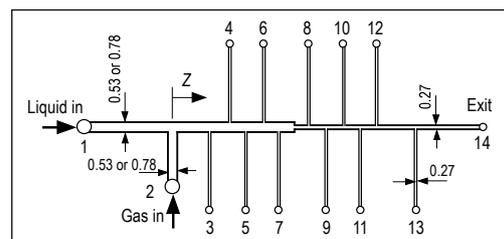


図 2 急縮小部(あるいは急拡大)を持つ供試流体チップ

表 1 急縮小(急拡大)部を持つ流路の寸法

	Test channel 1		Test channel 2	
	Upstream	Downstream	Upstream	Downstream
$\sigma_A = A_d / A_u$	0.51		0.35	
$W \times H$ mm	0.53 × 0.23	0.27 × 0.23	0.78 × 0.25	0.27 × 0.25
$\alpha^* = H/W$	0.43	0.85	0.32	0.93
D_H mm	0.32	0.25	0.38	0.26

4. 研究成果

ここでは、急拡大部を持つ流路で得られた研究成果について報告する。曲がり部および

急縮小部の成果については雑誌論文 1 と 2, 学会発表 1~6 および 9~12 にその詳細を述べている。

図 3 と 4 に急拡大部を通過する気液二相流の観察例を示す。写真左から急拡大部上流, 急拡大部, 下流の位置での様子である。また, j_L , j_G はそれぞれ液相と気相の体積流束 (体積流量を流路断面積で除した値) である。図 3 は比較的気体の流量が低い場合で, 疑似均質流である。急拡大を通過した気泡は下流領域で互いに合体するケースも見られた。さらに, 図(a)と(c)に見られるように急拡大を通過した流れが左あるいは右の壁面に偏流する場合があった。重力の方向は観察面に垂直であるので, この偏流は重力による作用ではない。一種のコアング効果によるものと推測される。図 4 は比較的気体の流量が高い場合で, HFE7200 の時に疑似分離流が観察された。また, 急拡大部で液の噴流が見られ, この噴流は先行気泡の底部に衝突し, 気泡を変形 (あるいは分裂) させた。この領域は気液の混合作用が大きくなると予想され, マイクロリアクタ等での気液あるいは液液の混合促進に有効的に作用することが期待される。

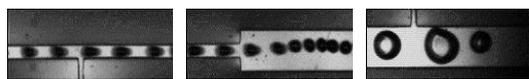
Flow direction →



(a) Water: $j_{L,N} = 0.56$ m/s, $j_{G,N} = 0.11$ m/s, $\beta_N = 0.16$



(b) Ethanol: $j_{L,N} = 0.55$ m/s, $j_{G,N} = 0.12$ m/s, $\beta_N = 0.18$



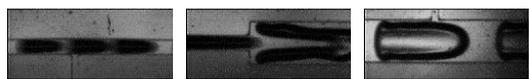
(c) HFE7200: $j_{L,N} = 0.61$ m/s, $j_{G,N} = 0.12$ m/s, $\beta_N = 0.16$

図 3 急拡大部 ($\sigma_A = 0.35$) を通過する二相流: 比較的気相流量が低い場合

Flow direction →



(a) Water: $j_{L,N} = 0.55$ m/s, $j_{G,N} = 0.68$ m/s, $\beta_N = 0.55$



(b) Ethanol: $j_{L,N} = 0.54$ m/s, $j_{G,N} = 0.70$ m/s, $\beta_N = 0.56$



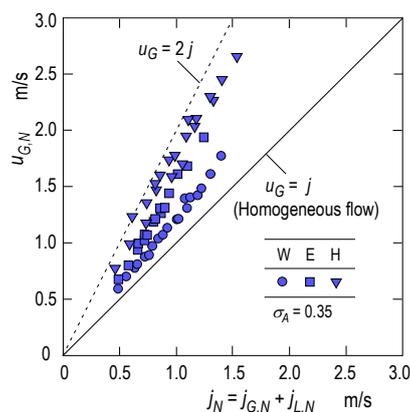
(c) HFE7200: $j_{L,N} = 0.60$ m/s, $j_{G,N} = 0.70$ m/s, $\beta_N = 0.54$

図 4 急拡大部 ($\sigma_A = 0.35$) を通過する二相流: 比較的気相流量が高い場合

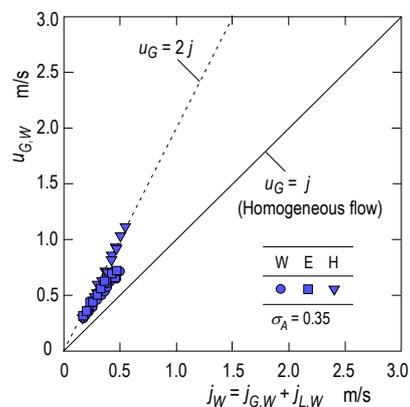
図 5 は拡大比が $\sigma_A = 0.35$ のときの(a)拡大部上流および(b)下流の気泡速度 u_G を気液の体積流束合計 $j (= j_G + j_L)$ に対して示す。図中

の実線は $u_G = j$ (均質流), 破線は $u_G = 2j$ である。上流の u_G は実線と破線の間に分布し, HFE7200 の u_G が最も大きい値を, 水の u_G が最も小さい値を示すことが分かる。下流の u_G は上流のそれより小さい値を示す。一方, 傾き u_G / j の値は下流の値が上流のものより大きいことが分かる。これは図 3 と 4 に見られるとおり気泡が液速度の一番大きい流路中心部を流れるためである。

図 6 はボイド率 (気体の体積率) α の実験値を均質ボイド率 $\beta (= j_G / (j_G + j_L))$ に対して示す。図中の実線は均質流モデル ($\alpha = \beta$), 破線は Armand の式, 一点鎖線は内径 100 μm の円管のデータに基づく Kawahara らの実験式である。図(a)は液物性値の影響を見るために急拡大部上流のボイド率を三つの作動液体について比較したものである。この図から水のデータを除き, ボイド率は Armand の式による計算値より小さい値を示す。HFE7200 のボイド率が最も低い値を示し, この結果は代表者の以前の結果と一致している。拡大比 σ_A の影響を見るために図(b)は下流のボイド率と上流のそれを比較している。下流のボイド率は上流のそれより低い値を示す。さらに, 拡大比が減少するにつれて, すなわち流路幅が広がるにつれて下流のボイド率は小さくなる。

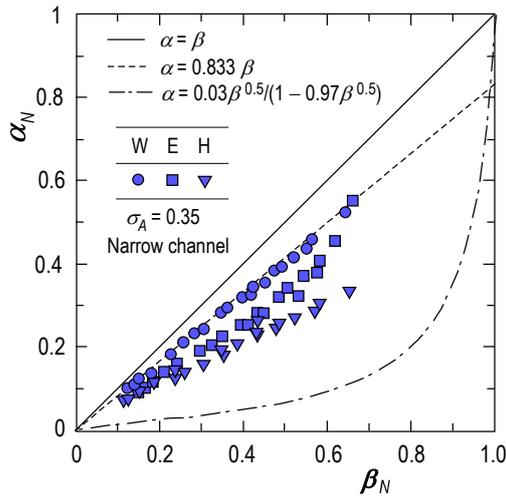


(a) 上流部

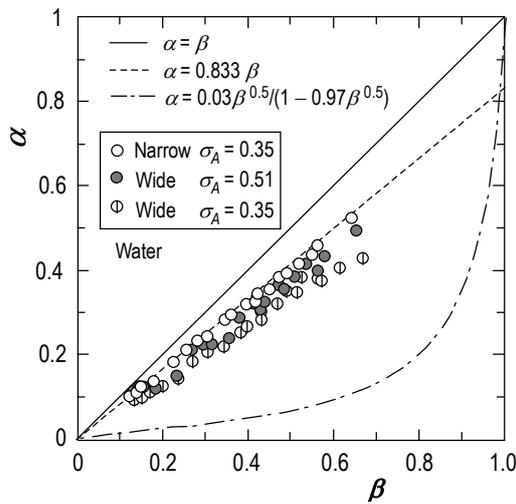


(b) 下流部

図 5 急拡大部 ($\sigma_A = 0.35$) の上流と下流における気泡の速度



(a) 液物性値の影響



(b) 拡大比の影響

図6 ボイド率の実験値

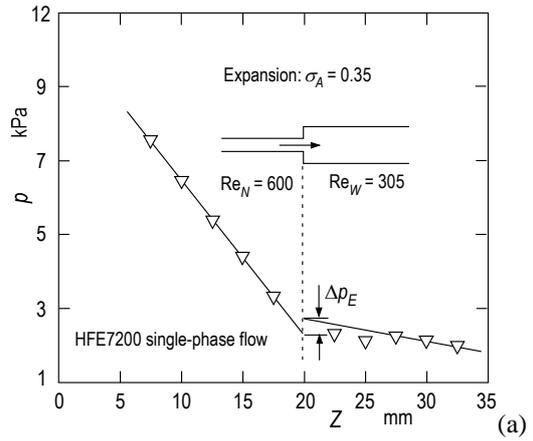
図7に急拡大部上流と下流の圧力分布の測定例を示す. 図(a)は液単相流, 図(b)は気液二相流の場合である. このような圧力分布データから急拡大部における圧力変化 Δp_E を求めた. Δp_E は可逆と非可逆の損失から成り, 次式で表わさせる.

$$\Delta p_E = \Delta p_{E,R} + \Delta p_{E,I} = \frac{1}{2} \rho u_N^2 (\sigma_A^2 - 1 + K_E) \quad (1)$$

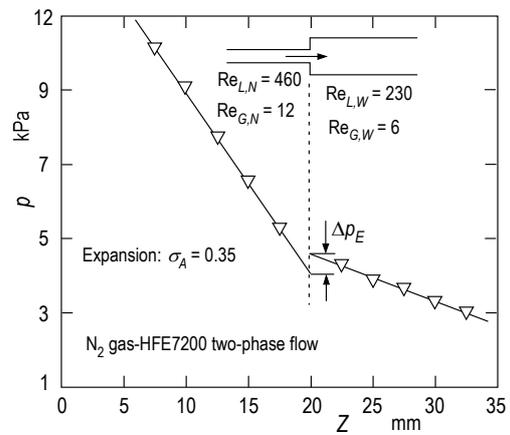
ここで, ρ は流体密度, u_N は拡大部上流の速度, K_E は拡大損失係数である.

図8は液単相流における拡大損失係数の実験値を上流のレイノルズ数 Re_N に対して示したものである. 図中の実線と破線はそれぞれ拡大比が $\sigma_A = 0.35$ と 0.51 の場合のボルダー・カルノーの式による計算値である. 本実験値は計算値に近い.

図9は二相流における急拡大部の圧力変化 Δp_E の実験値を上流部の気液の体積流束の合計 j に対して示す. 拡大比の違いによらず, j の増加とともに Δp_E は大きくなる.



液単相流 (HFE7200)



(b) 気液二相流 (窒素ガス-HFE7200)

図7 急拡大部の上流と下流における圧力分布の実験値

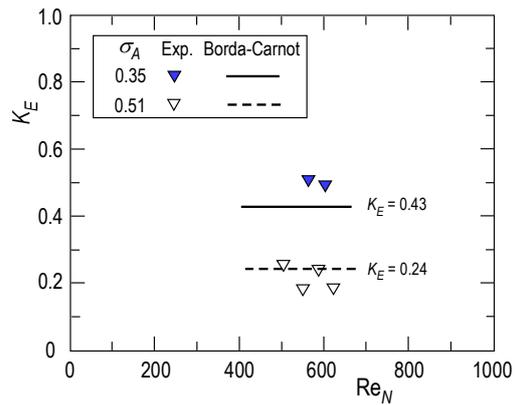


図8 液単相流における拡大損失係数

本研究で得られた急拡大部の圧力変化 Δp_E の実験値を予測すべく, Lockhart-Martinelli の手法に類似した方法を用いて次のような新たな式の導出を試みた.

$$\Delta p_E = \phi_{E,L}^2 \Delta p_{E,L} \quad (2)$$

ここで, $\phi_{E,L}^2$ は二相倍数, $\Delta p_{E,L}$ は二相流中の液相のみが同じ急拡大部を通過するときの

圧力変化であり、次式で計算できる。

$$\Delta p_{E,L} = K_{E,t} \frac{\rho_L j_{L,N}^2}{2} \quad (3)$$

ここで、 $K_{E,t}$ は全圧力変化係数であり、実験値より推定した値を用いた。

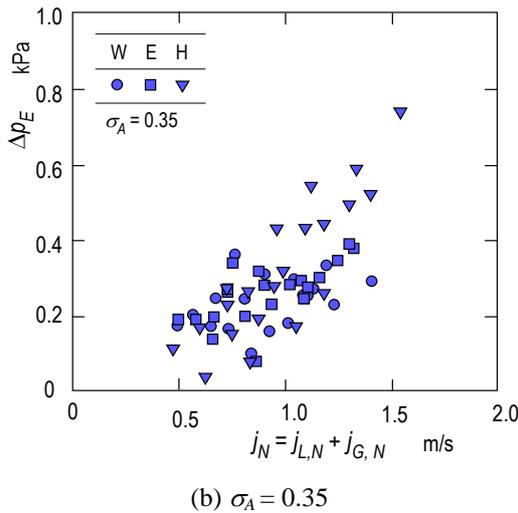
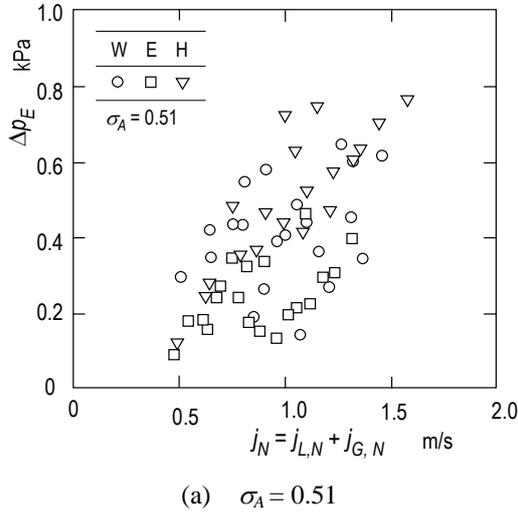


図 9 二相流における急拡大部の圧力変化の実験値

図 10 は実験値より求めた二相倍数 $\phi_{E,L}^2$ を次式で定義する Lockhat-Martinelli パラメータ X_E に対してプロットした結果である。

$$X_E^2 = \frac{\Delta p_{E,L}}{\Delta p_{E,G}} = \frac{K_{E,t} \rho_L j_{L,N}^2 / 2}{K_{E,t} \rho_G j_{G,N}^2 / 2} = \frac{\rho_L}{\rho_G} \left(\frac{j_{L,N}}{j_{G,N}} \right)^2 \quad (4)$$

$\phi_{E,L}^2$ のデータは X_E の増加とともに減少する。加えて拡大比 σ_A と作動液の違いに依存しているようである。そこで、次の Chisholm-Laird の式を用いて $\phi_{E,L}^2$ のデータの整理を試みた。

$$\phi_{E,L}^2 = 1 + \frac{C_E}{X_E} + \frac{1}{X_E^2} \quad (5)$$

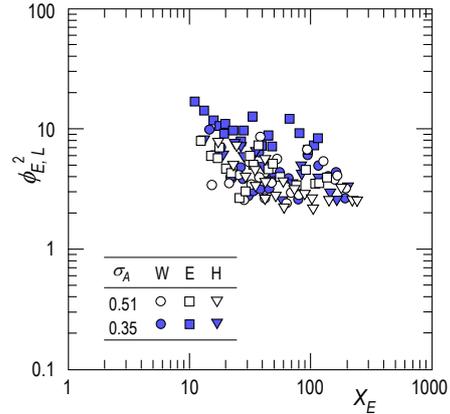


図 11 急拡大による二相倍数の実験値

データの回帰分析により、式(5)中の定数 C_E は次式で表せることができた。

$$C_E = (37.2 - 35\sigma_A) Bo^{0.04} Re_L^{0.25} We_G^{-0.12} \quad (6)$$

図12は Δp_E の実験値と式(2)–(6)による計算値を比較したものである。計算値は拡大比 $\sigma_A = 0.51$ と 0.35 の実験値とそれぞれ誤差 $\varepsilon_M = -12\%$ 、 $\varepsilon_{RMS} = 35\%$ および $\varepsilon_M = -15\%$ 、 $\varepsilon_{RMS} = 40\%$ 以内で一致した。なお、式(14)の適用範囲はボンド数 Bo 、液レイノルズ数 Re_L 、気体ウェーバー数 We_G 、拡大比 σ_A がそれぞれ、 $Bo = 0.009 - 0.069$ 、 $Re_L = 60 - 590$ 、 $We_G = 0.00006 - 0.011$ and $\sigma_A = 0.35 - 0.51$ である。

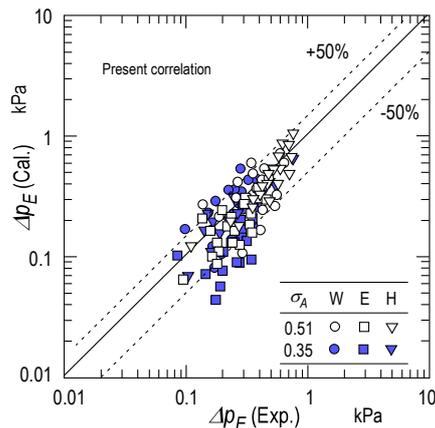


図 12 二相流における拡大圧力変化の実験値と提案式による計算値の比較

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 2 件)

1. 川原顕磨呂、佐田富道雄、下川聡、Haslinda Kusumaningsih, “マイクロ流路内の曲がり部における単相流および二相流

- の圧力降下”, 混相流, Vol. 26, No. 5, pp. 595-602 (2013). 査読有
2. A. Kawahara, M. Sadatomi, S. Shimokawa, Lengths of bubble and slug and pressure drop in gas-liquid slug flow in microchannels, *Multiphase Science and Technology*, Vol. 24, No.3, pp. 239-256 (2012). 査読有
- [学会発表] (計 12 件)
1. A. Kawahara, M. Sadatomi, H. Kurihara, W. Z. Law, M. H. Mansour, “Characteristics of Single-Phase and Two-Phase Flows Across Sudden Expansion in Rectangular Microchannels”, *Proceedings of The 5th International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale, HTFFM-V, Marseille, France, April 22-25, Aix Marseille University, Paper No. O-95, 6 pages (2014).*
 2. W. Z. Law, H. Kurihara, H. Kusumaningsih, A. Kawahara and M. Sadatomi, Single-phase and two-phase pressure drops through sudden expansion in rectangular microchannel, *Proceedings of The 24th International Symposium on Transport Phenomena, 1-5 November 2013, Yamaguchi, Tokyo University of Science-Yamaguchi, Japan, 8 pages in USB memory (pp. 868-875 in e-Book), (2013).*
 3. A. Kawahara, M. Sadatomi, H. Kurihara, H. Kusumaningsih, Single-phase and two-phase pressure drops across sudden contraction in rectangular microchannels, *Proc. of 9th UK-Japan Seminar on Multi-Phase Flow, Brunel University, London, UK, 16-18 September, 2 pages in CD-ROM, (2013)*
 4. 川原顕磨呂, 佐田富道雄, 栗原大器, Haslinda Kusumaningsih, “矩形マイクロ流路内の急縮小部を通過する単相流および二相流の圧力損失”, 日本混相流学会混相流シンポジウム講演論文集, C144, 2 pages in USB memory, (2013.8.9-11, 信州大学長野 (工学) キャンパス).
 5. H. Kusumaningsih, H. Kurihara, A. Kawahara, M. Sadatomi, Effects of singularities on single-phase and gas-liquid two-phase flows in rectangular microchannel, *Proc. of 8th International Conference on Multiphase Flow, ICMF 2013, Jeju, Korea, May 26 - 31, International Convention Center Jeju, Paper No. ICMF2013-075, 14 pages (2013).*
 6. 栗原大器, Haslinda Kusumaningsih, 熊本智, 佐田富道雄, 川原顕磨呂, “急収縮部を持つ矩形マイクロチャンネル内気液二相流に及ぼす収縮比と液物性値の影響”, 日本機械学会九州支部第 66 期総会・講演会講演論文集, No. 138-1, pp. 193-194, (2013.3.13, 九州産業大学).
 7. 川原顕磨呂, 佐田富道雄, 下川聡, Haslinda Kusumaningsih, “矩形マイクロ流路内の曲がり部における単相流および二相流の圧

- 力降下”, 日本混相流学会年会講演会 2012 講演論文集, pp. 276-277, (2012.8.9-11, 東京大学柏キャンパス).
8. A. Kawahara, M. Sadatomi, S. Shimokawa, “Lengths of Bubble and Slug and Pressure Drop in Gas-Liquid Slug Flow in Microchannels”, *Proc of 6th Japanese-European Two-Phase Flow Group Meeting, Kumamoto, Japan, 23-27 September, KKR Hotel Kumamoto, 8 pages in USB Memory, (2012).*
 9. 川原顕磨呂, 佐田富道雄, 下川聡, 米田智亮, “T 字気液混合部を持つ矩形マイクロ流路内二相流の気泡および液スラグ長さ”, 日本混相流学会年会講演会 2011 講演論文集, pp. 28-29, (2011.8.6-8, 京都工芸繊維大学).
 10. A. Kawahara, M. Sadatomi, S. Shimokawa, “Effects of Return Bend and Liquid Properties on Pressure Drop for Two-Phase Flows in Rectangular Microchannels”, *Proc. of 2012 Japan-US Seminar on Two-Phase Flow Dynamics, Tokyo University of Marine Science and Technology, Tokyo, Japan, 7-12 June, T19, 7 pages in USB memory (2012).*
 11. A. Kawahara, M. Sadatomi, S. Shimokawa, “Bubble and Liquid Slug Length for Two-Phase Flow in a Rectangular Microchannel with T-junction Type Gas-Liquid Mixer,” *Proceedings of International Symposium on Transport Phenomena, ISTP-22, Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 8-11 Nov., 2011, Paper No. 107, 11 pages in USB memory (2011).*
 12. A. Kawahara, M. Sadatomi, H. Matsuo, S. Shimokawa, “Investigation of Characteristics of Gas-Liquid Two-Phase Flows in a Rectangular Microchannel with Return Bends”, *Proceedings of ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, AJK2011-FED, ACT CITY Congress Center Hamamatsu, Shizuoka, Japan, Paper No. AJK2011-10011, 11 pages in USB memory (2011).* 2011, 7.24 – 7.29

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川原 顕磨呂 (KAWAHARA AKIMARO)
 熊本大学・自然科学研究科・准教授
 研究者番号：20224818

(2) 研究分担者

研究者番号：

(3) 連携研究者

研究者番号：