

平成 21 年 4 月 1 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560177

研究課題名（和文） マイクロ流路内気泡の挙動制御の最適化

研究課題名（英文） Characteristics of Two-Phase Flow in Microchannels

研究代表者

川原 顕磨呂（KAWAHARA AKIMARO）

熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号：20224818

研究成果の概要：

本研究は CPU 等の各種電子機器の冷却のための熱交換器やマイクロリアクタ等の気液二相を利用したデバイスを対象とし、マイクロ流路（500  $\mu\text{m}$  以下）での気泡挙動を制御することを目的としている。そこで、流路形状や液物性値（表面張力、粘度等）がマイクロ流路内の二相流動に及ぼす影響を調べた。円形と矩形のマイクロ流路、物性値の異なる各種液を用い、流動様式、気泡速度、気泡長さ、ポイド率と圧力損失を測定した。そして、それらのデータを記述するモデルを得た。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

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、マイクロフルイディクス

## 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、サブミクロ・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、特に気体の体積率や気泡の大きさを制御する必要がある。

## 2. 研究の目的

マイクロ流路（500  $\mu\text{m}$  以下）における気泡挙動を制御することを目的としている。そこで、本研究では流路形状、流路段差および液物性値（表面張力、粘度等）がマイクロチャンネル内の二相流動に及ぼす影響を調べる。

具体的には供試流路として溶融シリカ製の円形マイクロチャンネルとPDMS製の水力学相当直径が $250\ \mu\text{m}$ の矩形マイクロチャンネル、作動液体に蒸留水、エタノールおよびHFE（ハイドロフルオロエーテル）を用い、流動様式、気泡速度、気泡長さ、ボイド率と圧力損失を測定する。そして、それらのデータを記述するモデルを獲得することを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 円形マイクロチャンネルについて

Fig. 1 に気液混合部および試験部（マイクロチャンネル）入口の概略を示す。気液混合部には内径  $D_M = 250\ \mu\text{m}$ 、 $500\ \mu\text{m}$  の二つのマイクロT字管（Valco Instrument 社製）を用いた。Fig. 1 は混合部を上から見たものであり、1 から液体、2 から気体を流入させた。混合部で生じた二相流は水平な試験部の円形マイクロチャンネル（内径  $D = 250\ \mu\text{m}$ 、長さ  $L = 100\ \text{mm}$ 、溶融シリカ製）を通り、大気へ開放された。すなわち、 $500\ \mu\text{m}$  のT字管を用いた場合のみマイクロチャンネル入口で急縮小となった。気体流量は質量流量計により、液体流量は試験部から流出する液を容器に採取し、その重量の時間変化から求めた。各流量の測定精度は流量条件に応じて異なり、気相は1~10%、液相は0.1~1%であった。混合部の圧力を圧力変換器で測定し、混合部と試験部出口（大気圧）との圧力差から試験部における摩擦圧力損失を求めた。なお、測定区間の長さや管内径との比を  $L/D = 400$  と大きくすることにより、入口および助走区間の圧力損失が摩擦のそれと比較して無視できるようなった。圧力測定の精度は1~4%の範囲であった。さらに、試験部の流動様相をマイクロレンズ付き高速度ビデオカメラ（撮像速度  $f = 8000\ \text{frames/s}$ ）で撮影し、気泡速度  $u_G$  を次式で求めた。

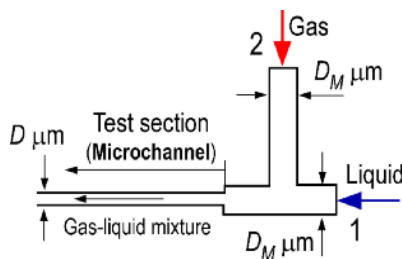


Fig. 1 Gas-liquid mixer and the microchannel.

ここで、 $\Delta z$  はビデオ1コマ間の気泡の移動距離である。なお、 $u_G$  のデータを求める際の平均化した気泡数は擬似均質流と擬似分離流でそれぞれ10と20であった。 $u_G$  の測定精度は3%以内であった。その  $u_G$  と気体の体積流束  $j_G$  (試験区間中央での値) からボイド率  $\alpha (= j_G / u_G)$  を求めた。

気体には窒素ガスを用い、液体には表面張力や液粘性の影響を見るために、Table 1 に示す物性値

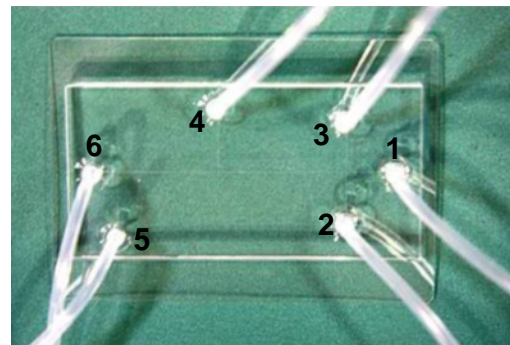
の蒸留水および重量濃度の異なるエタノール水溶液を用いた。表中の物性値における $\pm$ の数値は平均値からの最大偏差を表わしており、実験中における液温の違いによるものである。エタノール水溶液の粘度はその重量濃度が約50%で最大値をとる。無水エタノールの粘度は重量濃度4.8wt%のエタノール水溶液のそれとほぼ同じであるが、表面張力は1/3程度である。

Table 1 Properties of working liquids for circular microchannel experiment.

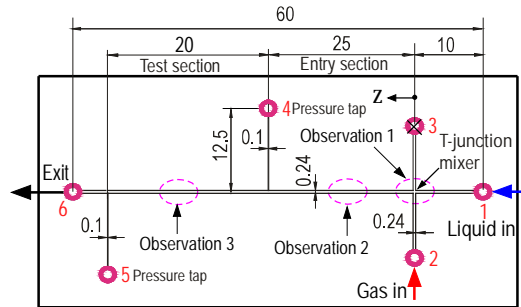
Working liquids	Density	Viscosity	Surface tension
	$\rho_L$ [ $\text{kg/m}^3$ ]	$\mu_L$ [ $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ]	$\sigma$ [ $\text{N/m}$ ]
Distilled water	$996.5 \pm 1.7$	$0.92 \pm 0.1$	$0.072 \pm 0.001$
Ethanol 4.8 wt%	$989.4 \pm 1.6$	$1.19 \pm 0.2$	$0.060 \pm 0.001$
Ethanol 49 wt%	$910.9 \pm 5.3$	$2.43 \pm 0.5$	$0.028 \pm 0.001$
Ethanol 100 wt%	$785.7 \pm 7.5$	$1.16 \pm 0.2$	$0.022 \pm 0.001$

#### (2) 矩形マイクロチャンネルについて

Fig. 3 に矩形マイクロチャンネルに用いたマイクロ流体チップを示す。矩形マイクロチャンネルは水力学相当直径  $D_H = 235\ \mu\text{m}$  (幅  $W = 240\ \mu\text{m}$ 、深さ  $H = 230\ \mu\text{m}$ ) であり、気液混合部の幅は  $W_M = 240\ \mu\text{m}$ 、 $490\ \mu\text{m}$  であった。なお、Fig. 3 では急収縮部を持たない、試験区間と気液混合部の内径、幅が同じ流路に関してのみを記述している。1 から気体、2 から液体を流入させた。供試液体に Table 2 に示す物性値の蒸留水、エタノール100wt%、HFE-7200を用いた。



(a) Photo of the chip



(b) Detail of the chip

Fig. 3 The present micro-fluidic chip.

Table 2 Properties of working liquids for rectangular microchannel experiment.

Liquids	$\rho_L$ kg/m <sup>3</sup>	$\mu_L$ mPa·s	$\sigma$ N/m
Water	998 ± 0.5	1.02 ± 0.06	0.073 ± 0.01
Ethanol	789 ± 4	1.24 ± 0.08	0.022 ± 0.01
HFE7200	1437 ± 8	0.66 ± 0.03	0.014 ± 0.01

#### 4. 研究成果

ここでは、矩形マイクロチャンネルで得られた研究成果について報告する。円形マイクロチャンネルの成果については雑誌論文にその詳細を述べている。

##### (1) 流動様式について

流動様式は、擬似均質流、擬似分離流、レイヤー流と大別した。擬似均質流は短い気体スラグと液体スラグが連なった流れ、擬似分離流は非常に長い気体スラグが支配的な流れ、レイヤー流は気液が水平方向に分離して層状となる流れである。Fig. 4 は試験区間と気液混合部を上から撮影した写真であり、(a), (b), (c) はそれぞれの流動様式の典型的な流れである。なお、これまでの既存研究では図(c)のレイヤー流は観察されていない興味深い流動形態である。

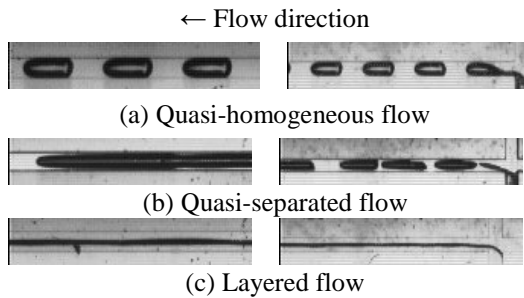


Fig. 4 Typical flow pattern.

Fig. 5 は観察された流動様式を流動様式線図に整理した結果である。図の縦軸と横軸はそれぞれ次式で定義するキャピラリ数と気相ウェバー数である。

$$Ca = \frac{\mu_L j_L}{\sigma} \quad (2)$$

$$We_G = \frac{\rho_G j_G^2 D_H}{\sigma} \quad (3)$$

ここで、 $j_L$  と  $j_G$  はそれぞれ液体と気体の見かけの速度（体積流量を流路断面積で除したものである）。この線図の整理法は本研究で新たに見出したものである。したがって、マイクロチャンネル内に所望の形態を発生させるため際、この線図を用いると流量条件等を知ることができる。

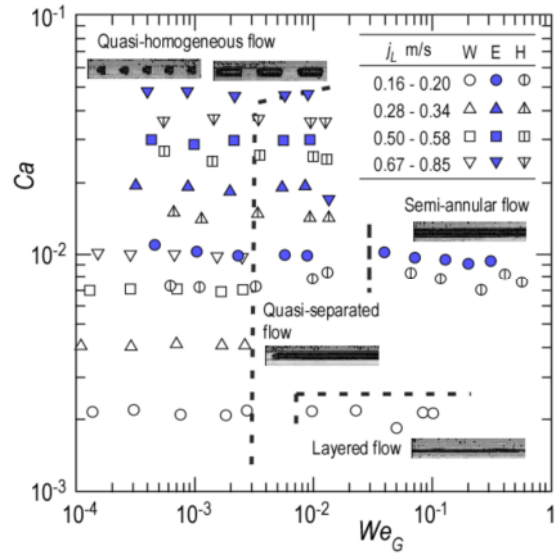


Fig. 5 Flow pattern map.

##### (2) 気泡の長さ

Fig. 6 に気体スラグ長さ  $L_G$  の実験値を示す。実線は Garstecki らの式で求めた計算値を示している。擬似均質流では、流路断面形状や供試液体に依ら彼らの式に一致するが、擬似分離流や擬似分離流に近い流れでは供試液体によって異なる傾向を示した。今後、それらの流れに適用できる式を開発する必要がある。

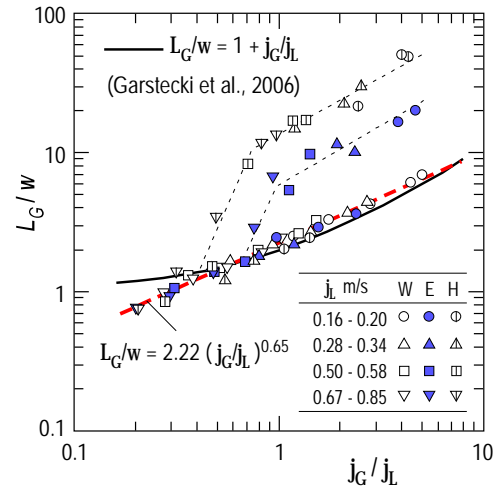


Fig. 6 Bubble length data.

##### (3) 気泡の速度

Fig. 7 は気泡速度  $u_G$  の実験値を全体みかけ速度  $j (= j_G + j_L)$  に対してプロットした結果である。参考までに Mishima & Hibiki の式による計算値も示している。液の違いにより気体の速度が異なることが分かる。また、Mishima & Hibiki の式はエタノール以外の液には適用できないことが分かる。そこで、本

実験値に適合し得る式を次のように導出した。

$$u_G = C_0 j \quad (4)$$

$$C_0 = 3.87Bo^{0.19} Re_L^{-0.01} We_G^{0.01} \quad (5)$$

ここで、 $Re_L (= \rho_L j_L D_H / \mu_L)$  は液相のレイノルズ数である。Fig. 7 は式(4)と(5)による気泡速度  $u_G$  の計算値と実験値を比較したものである。平均二乗根誤差で 5.7% で計算値と実験値は一致することが分かった。

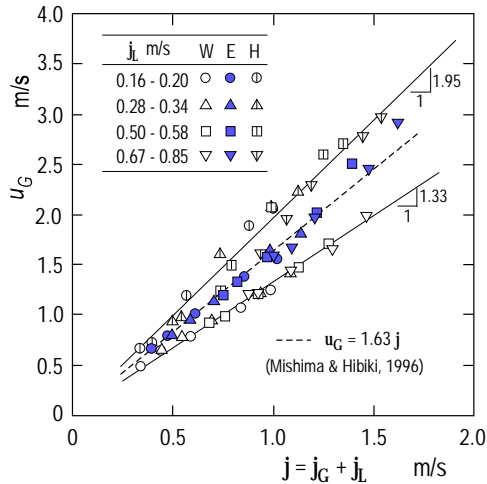


Fig. 7 Bubble velocity data.

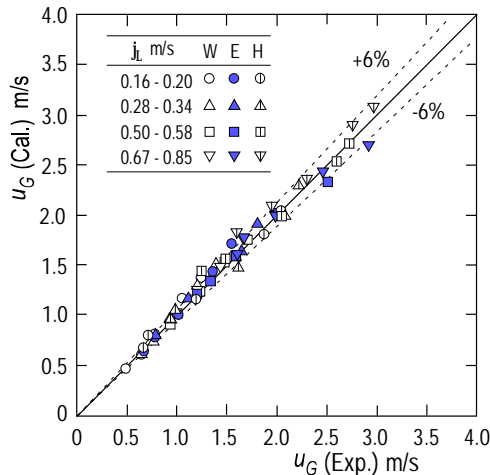


Fig. 8 Comparison of  $u_G$  between experiment and calculation by Eqs. (4) and (5).

### (3) ボイド率

Fig. 9 はボイド率  $\alpha$  の実験値を次の気体体積流量比  $\beta$  に対して示したものである。

$$\beta = \frac{j_G}{j_G + j_L} \quad (6)$$

液体の種類によって分布の傾きが異なつた。また、流れがレイヤー流の場合はボイド率は低い値をとり、Kawaharaらの式による計算値に近い値となる。

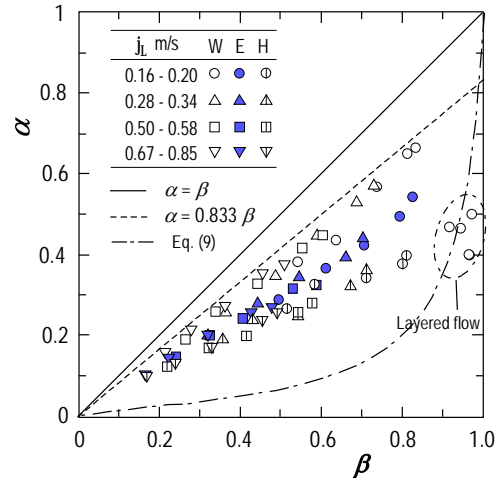


Fig. 9 Void fraction data.

### (3) 摩擦圧力損失

摩擦圧力損失  $(dp_f/dZ)_{TP}$  に及ぼす流動様式の影響を知るために、 $(dp_f/dZ)_{TP}$  を気相ウェバ数  $We_G$  に対してプロットした結果を Fig. 10 に示す。擬似均質流においては液体の種類に依らず  $(dp_f/dZ)_{TP}$  は  $We_G$  の増加とともに増大する。一方、擬似分離流では  $(dp_f/dZ)_{TP}$  は  $We_G$  の増加に対してほぼ一定値あるいは微増である。レイヤー流では  $(dp_f/dZ)_{TP}$  は小さく、また  $We_G$  の増加に対して微増である。液体の見かけ速度  $j_L$  および  $We_G$  が一定の下では、液体の粘度の増加 ( $\mu_{Ethanol} > \mu_{Water} > \mu_{HFE7200}$ ) に伴い  $(dp_f/dZ)_{TP}$  は大きくなる。

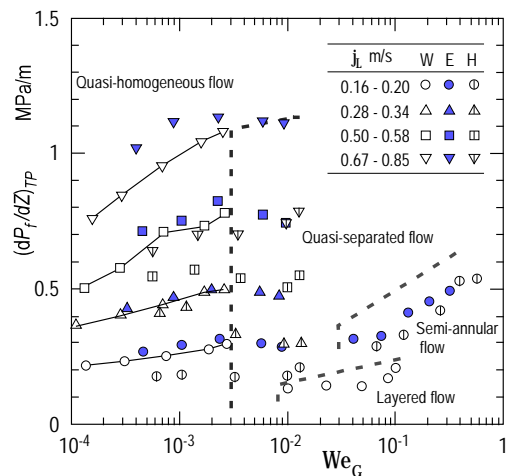


Fig. 10 Two-phase frictional pressure drop data.



次に、摩擦圧力損失 $(dp_f/dZ)_{TP}$ の実験データについて次の Lockhart & Martinelli 法 (L&M 法) での整理を試みた。

$$\left(\frac{dP_f}{dZ}\right)_{TP} = \phi_L^2 \left(\frac{dP_f}{dZ}\right)_L \quad (7)$$

ここで、 $(dp_f/dZ)_L$  は二相流のうちの液体だけが同じ流路を流れたときに生じる摩擦圧力損失、 $\phi_L^2$  は二相摩擦乗数である。Fig. 11 はの実験値を次の Lockhart & Martinelli パラメータ  $X$  に対してプロットした結果である。

$$X^2 = \frac{(dP_f/dZ)_L}{(dP_f/dZ)_G} \quad (8)$$

ここで、 $(dp_f/dZ)_G$  は二相流のうちの気体だけが同じ流路を流れたときに生じる摩擦圧力損失である。図には比較として次の Chisholm & Laird の式

$$\phi_L^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (9)$$

における  $C$  の値として三つの値 ( $C = 5$ : Chisholm & Laird の推奨値,  $C = 1.52$ : Mishima & Hibiki の式,  $C = 0.24$ : Kawahara らの 100  $\mu\text{m}$  円管の実験値) を与えたときの計算値も曲線で示している。

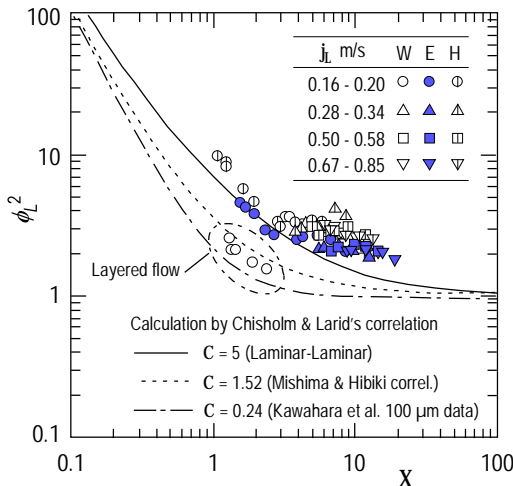


Fig. 11 Two-phase friction multiplier data.

Fig. 11 から  $\phi_L^2$  の本実験値は L&M 法で良く整理できることが分かる。しかしながら、三つの計算値と一致があまり良くない。これは、 $\phi_L^2$  が流動様式や液物性値の影響を受けており、既存の  $C$  の評価法はそれらの影響を考

慮していないのが不一致の原因と考えられる。そこで、本実験値に適合しうる  $C$  の評価式を次式のように提案した。

$$C = 2.45Bo^{0.04} Re_L^{0.25} We_G^{-0.12} \quad (10)$$

ここで、 $Bo$  はボンド数 ( $= (\rho_L - \rho_G)gD^2/\sigma$ ) である。Fig. 12 は式(7) - (10)による摩擦圧力損失 $(dp_f/dZ)_{TP}$ の計算値と実験値の比較である。レイヤー流を除き、計算値は実験値と RMS 誤差 12%以内で一致した。

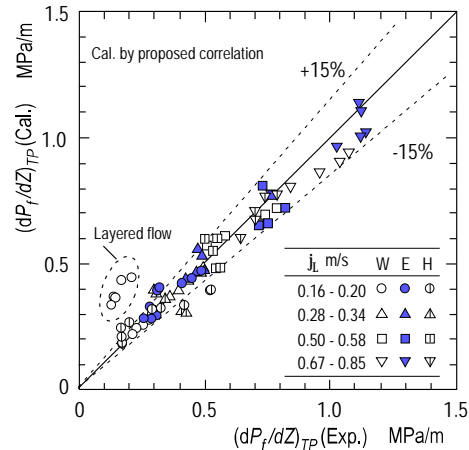


Fig. 12 Comparison of two-phase frictional pressure drop gradient between experiment and calculation by Eqs. (7) - (10).

## 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3件)

A. Kawahara, M. Sadatomi, K. Nei, H. Matsuo, "Experimental study on bubble velocity, void fraction and pressure drop for gas-liquid two-phase flow in a circular microchannel," Int. J. Heat and Fluid Flow, 掲載決定 (2009), 査読有。

川原顕磨呂, 佐田富道雄, 根井啓太郎, 松尾英輝, "円形マイクロチャンネル内二相流の気泡速度, ボイド率, 圧力損失に関する研究," 混相流研究の進展 4, pp. 37-44 (2009), 査読有。

川原顕磨呂, 佐田富道雄, マイクロチャンネル内二相流のボイド率, 壁面摩擦力および気液界面摩擦力について, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 74, No. 742, pp. 1232-1238, (2008), 査読有。

〔学会発表〕(計6件)

松尾英輝, 根井啓太郎, 益田高利, 川原顕磨呂, 佐田富道雄, マイクロチャンネ

ル内気液二相流に及ぼす流路断面形状と液物性値の影響，日本混相流学会年会講演会 2009 (熊本大学)，2009年8月7-9日。

A. Kawahara, M. Sadatomi, K. Nei, H. Matsuo, T. Masuda, "Characteristics of Two-Phase Flows in a Rectangular Microchannel with a T-Junction Type Gas-Liquid Mixer," Proc. of the Seventh International ASME Conference on Nanochannels, Microchannels and Microchannels, ICNMM2009, June 22-24-, 2009, Pohang, South Korea, Paper No. ICNMM2009-82217, 8 pages in CD-ROM, (2009)

根井啓太郎, 佐田富道雄, 川原顕磨呂, "マイクロチャンネル内気液二相流の研究(気液混合部と液物性値の影響)", 日本機械学会九州支部第61期総会講演会講演論文集, No. 088-1, pp. 59-60 (2008.3.19, 九大)

川原顕磨呂, 根井啓太郎, 松尾英輝, 佐田富道雄, "円形マイクロチャンネル内二相流の気泡速度、ボイド率、圧力損失に関する研究," 日本混相流学会年会講演会 2008 講演論文集, pp. 400-401 (2008.8.8-10, 会津大学)

A. Kawahara, M. Sadatomi, K. Nei, H. Matsuo, "Experimental Study on Bubble Velocity, Void Fraction and Pressure Drop for Gas-Liquid Two-Phase Flow in a Circular Microchannel," Proceedings of ECI International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale III, Whistler, Canada, September 21-26, 8 pages in CD-ROM (2008).

川原顕磨呂, 佐田富道雄, 根井啓太郎, "マイクロチャンネル内二相流のボイド率、壁面および気液界面摩擦力に及ぼす液物性値の影響," 日本機械学会 2007年度年次大会講演論文集, Vol. 2, No.07-1, pp. 95-96 (2007.9.9-12, 発表11日, 関西大学)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

川原 顕磨呂 (KAWAHARA AKIMARO)

熊本大学・大学院自然科学研究科・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

佐田富 道雄 (SADATOMI MICHIO)(2007年度は研究分担者)