マイクロチャンネル内気液二相流の流動現象に及ぼす管長の影響*

Effects of Channel Length on Flow Phenomena of Gas-Liquid Two-Phase Flow in a Microchannel

井手 英 夫**
IDE Hideo

木 村 龍 二**
KIMURA Ryuji

川 路 正 裕***
KAWAJI Masahiro

Abstract An optical measurement system was used to investigate the effect of microchannel length on adiabatic gas-liquid two-phase flow characteristics. Experiments were conducted with 1,676 mm long, circular microchannel with the diameter of 100 μm . Two-phase flow patterns, void fraction and velocities of gas and liquid slugs were measured at any location from gas-liquid mixer to channel exit. The experimental values of the mean void fraction and the mean velocity of liquid slug agreed well with their values given by the equation of the homogeneous flow model from gas-liquid mixer up to channel exit when the flow rate of the liquid was constant and the mass velocity of the gas was lower. The transition of the flow patterns from slug flow to ring film flow was observed when the flow rate of the liquid was constant and the mass velocity of the gas became large.

Keywords: Two-phase flow, Microchannel, Void fraction, Slug flow, Optical fiber sensor

1. 緒 言

小型熱交換器[1]や燃料電池[2]を始め、電子機器の冷却及びマイクロリアクターなど化学反応装置[3]の広範な開発・応用において、マイクロチャンネル内を流動する気液二相流の流れの解明[4]は重要な課題である。従来、断面が大きい流路内の気液二相流の流動現象やボイド率及び圧力損失に関しては、多くの詳細な解析や整理式が提案され、適用性も明確にされている[5]が、マイクロチャンネルに対するこれら従来の式の適用性については検討する必要がある。

川路ら[6]は、従来の断面の大きい流路と比較し、マイクロチャンネル内の流動現象に対して気液混合部の入口形状の影響が大なることを指摘している。このことから著者らは、気液混合部の入口形状と流路長さを変えて、マイクロチャンネル内の気液二相流の流動現象に及ぼす入

口形状の影響[7,8]及び流路長さの影響[9]を検討した。その結果、流路長さがマイクロチャンネル内気液二相流の流動現象に与える影響は極めて大きく、流路長さが長い場合と短い場合でボイド特性、気体及び液体スラグの速度と長さ特性が異なる結果を得た。

鈴木[10]は、長さが長いマイクロチャンネルを使用した装置例として、超小型ガスクロ装置に幅 200 μm ×深さ 30 μm 、長さ 1.5m のマイクロチャンネルを使用した Terry ら[11]の例を紹介している。MEMS 技術を応用した機器でマイクロチャンネルを使用する場合マイクロチャンネルの長さは管径の数倍以上に達することが考えられる。このような長いマイクロチャンネル内の二相流の流動様式は、大きな圧力勾配が生ずることに加え、気液各相の流れが層流であることから気液二相流の流れの発達や流れ方向の流動様

* 2010.12.13 受付

** 鹿児島大学大学院理工学研究科機械工学専攻 〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-40

TEL: (099)285-8270 FAX: (099)285-8270 E-mail: ide@mech.kagoshima-u.ac.jp

*** ニューヨーク州立ニューヨーク・シティ大学機械工学科

式の遷移については、従来の管径が大なる場合と同様な取り扱いが可能であるか検討する必要がある。

以上の理由により本研究の目的は、長いマイクロチャンネルを流動する気液二相流の管出口に至る流動現象の流れ方向の変化を解明することである。本論文では、全長 $L=1676\text{mm}$ のマイクロチャンネルを用い、気液混合部から下流方向に任意の距離 x の位置で、流動様式、平均ボイド率、気体スラグ及び液体スラグの速度と長さを計測し、これらの下流方向の変化と流動様式の遷移について、実験的に検討した。

2. 実験装置および方法

2.1 装置概要

本実験で使用した実験装置の概略を Fig. 1 に示す。供試流体は、液体に超純水 (比抵抗 $10\text{ M}\Omega\text{cm}$) が、気体に窒素が使用された。加圧シリンダにより液体は、主流の管軸方向に導入され、気液混合部に流入する。一方、気体は、液体の流れに直交するように Fig. 2 の気液混合部に圧送される。ここで、気体と液体は混合して気液二相流を形成する。気液混合部は、供試管と同じ内径を有する T-junction (米国 Valco 社製 Nanovolume 4 way-cross connector) を使用した。

本研究では、長いマイクロチャンネル内の流れ、特に、気液混合部から管出口に至る気液二相流の流動様式の遷移に注目した。この遷移と密接な平均ボイド率、気体及び液体スラグの速度特性との関係を明確にするために 2 組の光ファイバプローブを一对のプローブとして、その第一プローブを気液混合部から下流側に距離 $x\text{ mm}$ の位置に設置し、管出口まで移動できるように設定した。

気液混合部で形成された気液二相流は、供試管内に流入した後、一对のプローブ位置で、ボイド率、液体スラグ速度等が計測された。流動様式は、光ファイバプローブと同じ位置に設置された高速度カメラ撮影部で観察された。供試管は、内径 $D=100\mu\text{m}$ のポリイミド樹脂が被覆されたシリカガラス製の円管 (米国 Polymicro Technologies 社製の Fused silica capillary tubing) である。

供試管と光ファイバプローブの寸法の詳細を Fig. 3 及び Table 1 に示す。ここに、供試管の全長 L 、気液混合部から管出口までの長さ L_E 、速度測定用の一对の光ファイバプローブ間の距離

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.

Fig. 2 Gas-liquid mixing section.

L_p 、供試管の内径 D 、光ファイバプローブの外径 d であり、 x は光ファイバプローブの設置位置及び画像撮影部の混合部からの距離で、 24mm から 1530mm の計 10 箇所計測を行った。

気液二相流の流れを光信号として捉えるために発光側と受光側に直径 $d=250\mu\text{m}$ の光ファイバが、マイクロ流路に直交するように置かれ、また、気体スラグ及び液体スラグの速度や長さを測定するため上流側及び下流側に距離 L_p だけ離して設置された。

光ファイバ内を通過する発光側光源の赤外 LED (波長 644nm) の光は、マイクロチャンネル内の気液二相流を透過する際に受光部の赤外ダイオード回路を通じて気体と液体の屈折率の違いにより電圧信号波形として捉えられる。

液体スラグの速度 u_{Li} は、相互相関法を用いて上流と下流に設置したプローブから得られる光信号の遅れ時間 τ_p とプローブ間距離 L_p によって次式で算定される。

$$u_{Li} = L_p / \tau_p \quad (1)$$

液体スラグの速度測定の詳細は既報[8]に委ねる。

液体の流量は細管法で予め差圧と流量が較正され、気体の流量はマスフローコントローラにて所要の流量条件が設定される。ここで、気体側配管の導管は内径 0.1mm 、長さ 100mm であり、既

報[7]で報告される二相流現象に影響を及ぼす圧縮性容量の影響は無いと考えられる。気体及び液体の質量流量 W_G 、 W_L 、密度 ρ_G 、 ρ_L 、みかけ速度 j_G 、 j_L として、また、本実験では、後出の Fig. 6 に示されるが、管内静圧を気液混合部から管出口まで計 4 箇所を設置された流路と等しい断面寸法を持つ T-junction を圧力孔として、測定位置の圧力範囲に合わせた静圧計にて測定した。その静圧分布及び各圧力孔間の差圧を基に気液混合部から距離 x の位置での静圧 P_x 、気体の密度 ρ_{Gx} 、気体のみかけ速度 j_{Gx} を算定した。気体のみかけ速度 j_G は、比較のため既報[7-9]の実験条件と同じ計測位置（気液混合部から 37mm の位置）での値を本論文では便宜的に表記した。供試管内の圧力 P_x 、気体及び液体の質量流量などの実験範囲と実験条件を Table 2 に示す。

気体と液体の温度は 16～24℃ の範囲であった。

本実験範囲で観察された流動様式は、スラグ流及びリング液膜流である。これらの流動様式と光信号波形との対応など光信号計測の詳細は、既報[8]に委ねる。

2.2 信号処理と時間平均及び空間平均ボイド率

Fig. 4 は、本実験で得られた信号波形と二相流の流れの模式図であり、Fig. 4(a)及び(b)はそれぞれスラグ流とリング液膜流の場合を示したものである。Fig. 4 から液相の通過は、気体の場合より屈折が小さいため液相の出力電圧は高く、気相の出力電圧は低くなる。また、Fig. 4(b)のリング液膜流の場合、管中心に存在する連続した気相が光信号でも液体レベルまで上がらない特徴的な信号として確認される。

Fig. 5 は、信号の原波形の液体側の出力電圧を 100% とした時、その 50% を閾値として矩形波（パルス波）に変換し、次式で定義される時間平均ボイド率 $\bar{\alpha}$ 及び時間平均ホールドアップ $\bar{\eta}$ の算定を模式的に示したものである。

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{T} \int_0^T \alpha(t) dt = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{T_{Gi}}{T} \quad (2)$$

$$\bar{\eta} = \frac{1}{T} \int_0^T \eta(t) dt = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{T_{Li}}{T} \quad (3)$$

ここに、 $\bar{\alpha} = 1 - \bar{\eta}$ であり、 T_{Gi} 及び T_{Li} は、それぞれ、気体及び液体の存在時間、 T は十分長い観測時間として、本実験では約 30 秒間、データの

Fig. 3 Arrangement of test section and optical probes.

Table 1 Dimensions of test section and optical probes (mm).

L	L_E	x	L_p	D	d
1676	1576	24 50 100 200 300 600 900 1200 1500 1530	2.25	0.1	0.25

Table 2 Experimental conditions and ranges of the gas and the liquid flow rates.

Pressure (MPa)	P_x	0.733 - 0.019
Mass flowrate (kg/s)	W_G	8.64×10^{-10} - 8.64×10^{-9}
	W_L	6.27×10^{-7} - 7.83×10^{-7}
Density (kg/m ³)	ρ_{Gx}	10.65 - 1.53
	ρ_L	998 - 999
Superficial velocity (m/s)	j_G	0.02 - 0.20
	j_{Gx}	0.02 - 1.36
	j_L	0.08 - 0.10

Fig. 4 Examples of optical fiber probe signals for slug and ring film flow patterns.

Fig. 5 Transformation of original optical signal into pulse wave signal for calculating void fraction.

サンプリング周波数は、5kHz もしくは 10kHz を採用した。これらの時間平均値は、既報[8]において、ビデオ画像から得られる空間平均ボイド率（体積率）との比較から、両者が $\pm 10\%$ 以内で良く一致する結果を得た。それゆえ以下の整理では、これらの時間平均値は、それぞれ、空間平均も含めて単に平均ボイド率 α 及び平均ホールドアップ η と表記した。

3. 実験結果および考察

3.1 気液混合部から下流方向の静圧、気体の密度、気体のみかけ速度、平均ボイド率及び液体スラグ速度の分布

Fig. 6(1)は、液体のみかけ速度 $j_L (=0.08\text{m/s})$ 及び気体の質量速度 $G_G \{= W_G / (\pi D^2/4) = \rho_{Gx} j_{Gx} = 0.23 \text{ kg/s/m}^2\}$ が一定で混合部及び混合部から約 350、1050、1400 mm の 4 箇所の位置で測定した静圧 P_x の測定結果を表す。Fig. 6(1)の実線は、混合部下流の静圧が出口で大気圧であり、直線的に降下すると仮定して引いた線である。Fig. 6(2)及び(3)は、(1)の静圧を基に算定した混合部下流 x の位置での気体の密度 ρ_{Gx} と気体のみかけ速度 j_{Gx} を表す。Fig. 6 (4)は、式(2)で定義された平均ボイド率 α の x の位置での測定値である。図中の実線は、平均ボイド率 α が式(4)で定義される気体の体積流量比 β と等しい〔式(5)〕場合、すなわち、平均ボイド率 α が気液の相対速度がない均質流のボイド率に等しい場合を表す。Fig. 6 (5)は、混合部から距離 x の位置で測定された液体スラグの平均速度 u_{Lm} を表す。図中の実線は、式(6)、いわゆる均質流の速度を与える式である。Fig. 6 から $j_L=0.08\text{m/s}$ 及び $G_G=0.23\text{kg/s/m}^2$ の条件では、管出口まで静圧分布は、直線的に降下し、平均ボイド率及び液体スラグ速度は管出口に向かって増加

Fig. 6 Distributions of P_x, j_{Gx}, α and u_{Lm} in downstream direction from mixing point.

しているが、 $\alpha=\beta$ 、すなわち、均質流の関係を維持していることがわかる。

$$\beta = Q_{Gx} / (Q_{Gx} + Q_{Lx}) = j_{Gx} / (j_{Gx} + j_{Lx}) \quad (4)$$

$$\alpha = \beta \quad (5)$$

$$u_{Lm} = j_{Gx} + j_L \quad (6)$$

3.2 平均ボイド率 α の下流方向の変化

Fig. 7 は、 j_L が一定で気体の質量速度 G_G が増加した場合に平均ボイド率 α が混合部より下流の距離 x における値を表す。図中の線は、均質流の式(5)を表す。Fig. 7 上図は、 $j_L=0.08\text{m/s}$ の場合で、下図は $j_L=0.10\text{m/s}$ の場合である。

これらの図から j_L が一定で G_G が増加する場合 $\alpha=\beta$ 、すなわち、 α が均質流のボイド率に等しい関係は、 G_G が小さいときに見られ、 G_G が大きくなると、 α は、偏差は小さいが、より上流側 (x の小さい位置) で均質流の場合の線上の値から離れ、増加することがわかる。この偏差は j_L が大きいほど大なる傾向が見られた。このボイド率の均質流の場合の線と離れる位置は、画像観察から得られたスラグ流からリング液膜流への流動様式の遷移位置と一致することから、これらのボイド率の特徴は流動様式の遷移に起因すると考えられる。

Fig. 7 Distributions of mean void fraction at any location of distance, x mm, in downstream direction from mixing point in the conditions of different mass velocities of gas and superficial liquid velocities.

3.3 液体スラグ速度 u_{Lm} の下流方向の変化

Fig. 8 は、Fig. 7 と同様な整理で、液体スラグの平均速度 u_{Lm} を表す。気体及び液体スラグの速度は、上流と下流に設置した 2 つのプロブから得られた光信号の相互相関関数から算定され、その算術平均速度である u_{Lm} を求めた[7]。なお、本実験の場合、スラグ流において気体スラグと液体スラグは、どちらもほぼ同じ速度であった。

Fig. 8 Distributions of liquid-slug velocity at any location of distance, x mm, in downstream direction from mixing point in the conditions of different mass velocities of gas and superficial liquid velocities.

これらの図から j_L が一定で G_G が増加する場合、 u_{Lm} は、 G_G が小さいとき均質流の速度 ($u_{Lm} = j_{Gx} + j_L$) と一致しているが、 G_G が大きくなると、 u_{Lm} は、偏差は小さいが、より上流側 (x の小さい位置) で均質流の線上の値から離れ減少することがわかる。この偏差は j_L が大きいほど大なる傾向が見られ、液体スラグの速度特性が、流動様式の遷移を比較的良く反映するものと思われる。

3.4 下流方向の液体スラグの平均速度 u_{Lm} と二相流の合計速度 $(j_{Gx} + j_L)$ の関係

Fig. 9 は、 j_L が一定 ($j_L=0.1\text{m/s}$) で j_G が $0.02\sim 0.1\text{m/s}$ の条件で、混合部から下流 x の位置で測定した液体スラグの平均速度 u_{Lm} と $(j_{Gx} + j_L)$ の関係を表す。図中の実線は、均質流の速度を与える式(6)を表し、一点鎖線は、従来の断面が大きい水平円管内の気体スラグ速度に対する Hughmark[12]の式(7)を表す。

$$u_{Lm} = 1.2(j_{Gx} + j_L) \quad (7)$$

Fig. 9 から、 u_{Lm} は j_{Gx} が大きくなると均質流の速度を与える式(6)に一致する値から離れ、式(6)より低下する傾向がみられる。これは流動様式が均質流からの遷移を示すものと判断される。この場合、高速度カメラの映像結果からスラグ流からリング液膜流に遷移していることがわかった。また、 u_{Lm} は気体の質量速度 G_G が大きくなると j_{Gx} がより小さい値で式(6)より低下していることから、気体の質量速度 G_G が大きくなると、より上流側で流動様式の遷移が始まることを示唆するものと判断される。なお、図中の矢印の記号 (a)~(e) は、気体の質量速度 G_G が 0.70 kg/s/m^2 の条件で、後出の Fig. 10 以降の (a)~(e) で示す x の位置での流動様式を表す。この場合、(a)、(b) はスラグ流領域、(c)~(e) は、リング液膜流である。

3.5 流動様式の遷移判定

Fig. 10 及び Fig. 11 は、それぞれ、気液混合部から距離 x の位置で得られた光信号波形と流動写真の例である。Fig. 10(a)~(e) は、光信号波形と

Fig. 9 Mean velocities of liquid slug at any location of distance, x mm, in downstream direction from mixing point.

流動様式を表し、それぞれの波形の縦軸は、液体単相流の出力電圧を V_0 として光信号の出力電圧比 V/V_0 を表し、 $V/V_0=0$ 及び 1 は、それぞれ、気相のみが流れた場合の気相レベル及び液相のみが流れた場合の液単相流レベルに対応する。流動様式はスラグ流 S とリング液膜流 R の2種類の流れが観察されたが、両方の流れが観察された場合、時間的に長く支配的な流れを大きい記号で表している。その結果、(a)、(b) はスラグ流、(c)~(e) はリング液膜流である。

Fig. 10 の光信号波形と Fig. 11 の流動写真から、上流でスラグ流の流動様式が下流になるにつれてリング液膜流への遷移の様子が理解される。

Fig. 10 Examples of optical signals at location of (a) to (e) in downstream direction from mixing point in the conditions of $j_L=0.1\text{m/s}$ and $G_G=0.7\text{ kg/s/m}^2$.

Fig. 11 Examples of photographs of flow patterns at location of (a) to (e) in downstream direction from mixing point in the conditions of $j_L=0.1\text{m/s}$ and $G_G=0.7\text{ kg/s/m}^2$.

Fig. 12 Values of α/β and $u_{Lm}/(j_{Gx}+j_L)$ at any location of distance, x mm, in downstream direction from mixing point.

Fig. 13 Flow pattern map in the relation between j_{Gx} and x .

Fig. 12 は、ボイド率 α と液体スラグ速度 u_{Lm} を、それぞれ、均質流のボイド率 β と均質流の速度 $(j_{Gx}+j_L)$ で除した α/β と距離 x の関係が上側の図で、 $u_{Lm}/(j_{Gx}+j_L)$ と距離 x の関係が下側の図である。

これらの図には、 α/β 及び $u_{Lm}/(j_{Gx}+j_L)$ の値が 1 から偏差するとき、すなわち、1 からの偏差が $\pm 5\%$ 以上で流れが均質流の状態から遷移が始まるとして、 $\pm 5\%$ の値をそれぞれ、一点鎖線で示した。

また、図の最上部には、各 G_G の値で流動様式の遷移開始と思われる $\pm 5\%$ 以上となる x の位置を矢印で示した。

これらの図から (a) 及び (b) はスラグ流、(c)~(e) はリング液膜流の流動様式であるであると判断され、 G_G が大きいほど上流側でスラグ流からリング液膜流への遷移が始まっていることがわかる。

Fig. 13 は、Fig. 9~Fig. 12 の流動様式の結果を基に、本実験点について、気液混合部から距離 x

の位置における気体のみかけ速度 j_{Gx} と距離 x の関係に流動様式の存在領域を区分した図である。図中の破線は、流動様式のおおよその境界を表し、破線より上部がリング液膜流、下部がスラグ流の領域である。

4. 結論

内径 $100\mu\text{m}$ 、全長 1676mm のマイクロチャンネル内を流動する気液二相流の流れをフォトダイオードと光ファイバを使用して光信号波形に変換し、気液混合部から下流方向の任意の位置で流動様式、平均ボイド率、平均ホールドアップ及び液体スラグの平均速度等を計測した。これらの結果から気液二相流の流動現象に対する管長の影響を検討し、以下の結論を得た。

液体流量が一定で、気体の質量速度が小さい場合、平均ボイド率及び液体スラグの平均速度は均質流の関係を供試管の出口近傍まで維持していることがわかった。一方、気体の質量速度が大きい条件では気液混合部から下流方向の位置で流動様式が均質流からリング液膜流へ遷移する事が見られた。

Nomenclature

D	: inner diameter of microchannel	[m]
d	: diameter of optical fiber probe	[m]
G	: mass velocity $\{= W/(\pi D^2/4)\}$	[kg/s/m ²]
j	: superficial velocity	[m/s]
L	: total length of test section	[m]
L_D	: length of measuring section of differential pressure	[m]
L_p	: distance between optical probes	[m]
P_x	: static pressure in test section	[Pa]
Q	: volumetric flow rate	[m ³ /s]
T	: time of observation	[s]
T_{Gi}	: existence time of gas phase	[s]
T_{Li}	: existence time of liquid phase	[s]
u_m	: mean velocity of liquid slug	[m/s]
W	: mass flow rate	[kg/s]

Greek letters

α	: void fraction	[-]
β	: volumetric quality $\{= Q_{Gx}/(Q_{Gx}+Q_{Lx})=j_{Gx}/(j_{Gx}+j_{Lx})\}$	[-]
η	: holdup	[-]
ρ	: density	[kg/m ³]
τ_p	: time lag of light signals	[s]

Subscripts

- G : gas phase
 L : liquid phase
 x : distance from mixing point
— : time averaged value

参考文献

- [1] Kandlikar, S.,G., High flux heat removal with microchannels - A road map of challenges and opportunities, Proc. of 3rd Int. Conf. on Microchannels and Minichannels, ICNMM2005-75086, ASME, 1-10 (2005).
 - [2] Trabold, T., A., Minichannels in polymer electrolyte membrane fuel cells, Proc. of 2nd Int. Conf. on Microchannel and Minichannel, ICMM2004, ASME, 119-127 (2004).
 - [3] Hibara A., Nonaka, M., Hisamoto, H., Uchiyama, K., Kikutani, Tokeshi, M., and Kitamori, T., Stabilization of liquid interface and control of two-phase confluence and separation in glass microchips by utilizing octadesylsilane modification of microchannels, Anal., Chem., 74, 1724-1728 (2002).
 - [4] Proc. of ASME 6th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, ICNMM2008, June 23-25, Darmstadt, Germany, ISBN: 0-7918-4834-5, Nanotechnology Institute (2008).
 - [5] The Japan Society of Mechanical Engineers ed., Handbook of Gas-Liquid Two-Phase Flow Technology - Second Edition, 63-92, Corona Publishing, Tokyo (2006).
 - [6] Kawaji, M., Mori, K., and Bolintineanu, D., The effects of inlet geometry on gas-liquid two-phase flow in microchannels, Keynote Paper, ICMM2005-146087, Proc. of ASME 3rd International Conference on Microchannels and Minichannels, Toronto, Canada (2005).
 - [7] Ide, H., Kimura, R. and Kawaji, M., Effect of Inlet Geometry on Adiabatic Gas-Liquid Two-Phase Flow in a Microchannel, Heat Transfer Engineering, 30 (1-2), 37-42 (2009).
 - [8] Ide, H., Kimura, R. and Kawaji, M., Void Fraction and Flow Patterns of Gas-Liquid Two - Phase Flow in a Microchannel, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 74(742), 1239-1246 (2008).
 - [9] Ide, H., Kimura, R. and Kawaji, M., Characteristics of Void Fraction and Velocity of Gas-Liquid Two-Phase Flow in a Microchannel (Effects of Gas-Liquid Mixing at the Inlet and Channel Length), Japanese Journal of Multiphase Flow, Vol. 23, No. 5, 589-596 (2010).
 - [10] Suzuki, Y., Micro Thermo-fluids System - Contact Thermal Engineering and MEMS Technology- (in Japanese), JSME Thermal Engineering Conference 2007, No.07-5, 9-14(2007).
 - [11] Terry, S. C., Jerman, J. H., and Angell, J. B., A complete GC system on a silicon wafer with a glass cover plate, including column, injector and detector, IEEE trans. Electron devices, 26, 1880-1886 (1979).
 - [12] Hughmark, G.A., Holdup and Heat Transfer in Horizontal Slug Gas-Liquid Flow. Chem. Eng Sci., Vol. 20-12, 1007-1010 (1965).
-