

マイクロチャンネル内気液二相流の圧力損失

○川原 顕磨呂 (熊本大・工)
岡山 一也 (熊本大院)

佐田富 道雄 (熊本大・工)
加野 敬子 (熊本大・工)

1. 緒言 近年、マイクロチャンネルは、CPU 等の各種電子機器の冷却、MEMS (Micro Electro Mechanical System) 技術を利用したマイクロ分析 (マイクロ Total Analysis System) およびマイクロ化学反応、薬液投与等のバイオ技術の様々な工学分野への利用が検討されている。したがって、マイクロチャンネル内の熱流動機構、とりわけ沸騰や凝縮を伴う装置における気液二相流動機構の解明は、マイクロサイズの各種流体機器の設計・開発上、不可欠である。通常口径管内の二相流と比較すると、マイクロチャンネル内のそれは重力の影響は弱く、むしろ表面張力や粘性の影響が支配的となる。したがって、マイクロチャンネルを用いる機器の高効率化を図る上で、マイクロチャンネル内気液二相流の流動様式や圧力損失に及ぼす表面張力や粘性等の物性値の影響を知ることは重要である。しかしながら、従来のマイクロチャンネル内の二相流実験では、ほとんどが作動液に水のみを用いている^(1,2)ため、物性値の影響を解明していない。そこで、本研究の目的は、マイクロチャンネル内の圧力損失に及ぼす液物性値の影響を実験的に調べることである。実験では、内径 $99.7\ \mu\text{m}$ の円形マイクロチャンネル内の液単相流および気液二相流の圧力損失を測定した。表面張力と液粘性の影響を見るために、供試液体として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。液単相流の実験で得た管摩擦係数は通常の理論値と比較した。一方、二相流実験で得た圧力損失データは既存の予測式による計算値と比較した。さらに、いくつかの二相流について流動様相の観察を行った。以上の結果を以下に報告する。

2. 実験 Fig.1 に本実験装置の概略を示す。圧力による装置の膨張を避けるため、試験流路を除いてすべての配管と継手類は金属製とした。液タンク内の供試液体は、窒素ガスの圧力によって一定の流量でマイクロチャンネルの試験区間に送り出された。一方、供試気体である窒素ガスは、もう一つのボンベより試験区間に送り出された。送り出された気・液は、気液混合部で気液二相流となり、ティ部を通過して、試験区間に流入した。試験区間には内径 $99.7\ \mu\text{m}$ 、長さ $85\ \text{mm}$ の熔融シリカキャピラリ管を用いた。Fig.2 に供試管の断面の顕微鏡写真を示す。気体流量は質量流量計により、液体流量は試験区間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それぞれ求めた。ティ部の圧力を圧力変換器で測定し、ティ部と試験区間出口 (大気圧) 間の圧力差から試験区間における摩擦圧力損失を求めた。摩擦圧力損失の決定法の詳細は文献(1)に示す。マイクロチャンネル内の流動様相は、デジタルカメラで撮影した。

供試液体には蒸留水および重量濃度が異なる4種類のエタノール水溶液を用いた。Table 1 に供試液体の物性値を示す。

Table 2 に本実験の流動条件を示す。液単相流についてはレイノルズ数 Re の範囲を、二相流については、液体と気体の体積流速 j_L と j_G の範囲を示している。なお、 j_G は試験区間中央での値である。

3. 実験結果と考察

3.1 液単相流の結果について

図は省略するが、各供試液

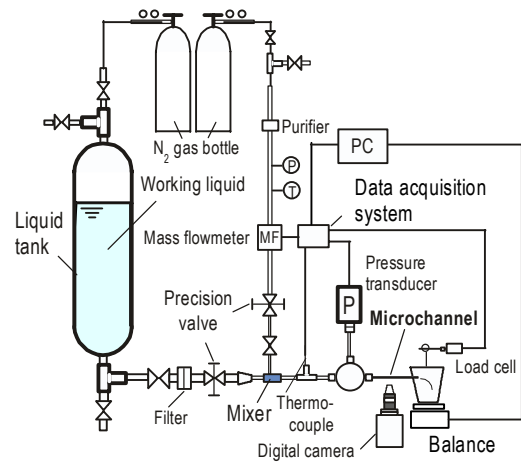


Fig.1 Experimental apparatus

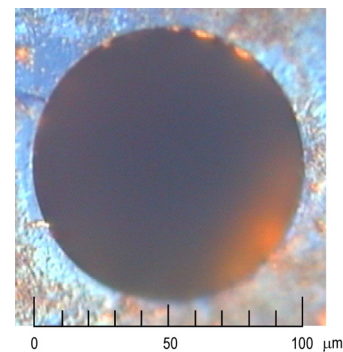


Fig.2 Cross-section of the present microchannel

Table 1 Properties of the present working liquids

	$\rho_L\ \text{kg/m}^3$	$\mu_L\ \text{mPa}\cdot\text{s}$	$\sigma\ \text{N/m}$
Ethanol 100wt%	790.1 - 794.4	1.25 - 1.37	0.022 - 0.023
Ethanol 49wt%	918.0 - 920.5	3.19 - 3.62	0.029
Ethanol 9.5wt%	982.8 - 984.1	1.53 - 1.83	0.049 - 0.050
Ethanol 4.8wt%	990.7 - 991.5	1.29 - 1.45	0.061 - 0.062
Distilled water	995.5 - 998.0	0.77 - 0.97	0.071 - 0.072

Table 2 Conditions for single-phase liquid and two-phase flows

	Re	$j_L\ \text{m/s}$	$j_G\ \text{m/s}$
Ethanol 100wt%	1.8 - 290	0.04 - 1.01	0.20 - 6.24
Ethanol 49wt%	1.1 - 40.4	0.05 - 0.33	0.08 - 21.0
Ethanol 9.5wt%	2.2 - 187.4	0.04 - 0.60	0.28 - 7.08
Ethanol 4.8wt%	7.0 - 290	0.03 - 0.86	0.19 - 37.8
Distilled water	9.9 - 802	0.13 - 1.10	0.18 - 5.90

体について得られた管摩擦係数 λ は円管内の層流における理論値 ($\lambda = 64/Re$) とほぼ一致した。また、いくつかの文献で報告されているマイクロチャンネル内の層流から乱流への早期遷移⁽³⁾は、いずれの液体についても観察されなかった。

3.2 二相流の結果について Fig.3 は本マイクロチャンネル内の流動様相の写真の一例である。この流れの様相は、液リング流 (Liquid-ring flow) と呼ばれ、マイクロチャンネル内の特有の流れである^(1,2)。水とエタノールでリング流れの全体的な構造は互いに類似している。

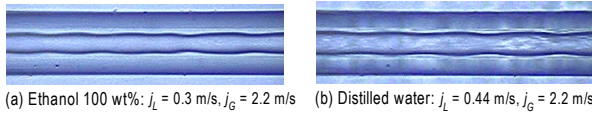


Fig.3 Liquid-ring flow for water-nitrogen gas and ethanol-nitrogen gas two-phase flows in a 99.7 μm circular channel

Fig.4 に摩擦圧力勾配 $(dP_f/dZ)_{TP}$ の実験値を示す。液体と気体の体積流速 j_L と j_G の値が大きくなると、摩擦圧力勾配も大きくなった。さらに、同じ j_L と j_G の組合せの場合、液粘度が高いほど圧力勾配が大きくなった。

次に、Lockhart & Martinelli 法 (L&M 法) を用いて摩擦圧力勾配 $(dP_f/dZ)_{TP}$ の実験データの整理を試みた。

$$\left(\frac{dP_f}{dZ}\right)_{TP} = \phi_L^2 \left(\frac{dP_f}{dZ}\right)_L \quad (1)$$

ここで、 ϕ_L^2 は摩擦損失乗数、 $(dP_f/dZ)_L$ は二相流中の液相のみが流路を流れた場合の摩擦圧力勾配である。そして、 ϕ_L^2 の整理式として Chisholm & Laird⁽⁵⁾ は次式を提案している。

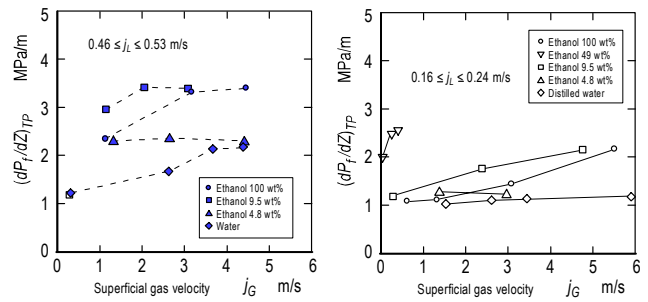
$$\phi_L^2 = 1 + C/X + 1/X^2 \quad (2)$$

ここで、 X は Lockhart-Martinelli パラメータで、次式である。

$$X^2 = \frac{(dP_f/dZ)_L}{(dP_f/dZ)_G} \quad (3)$$

ここで、 $(dP_f/dZ)_G$ は二相流中の気相のみが流路を流れた場合の摩擦圧力勾配である。式(2)中の C は通常口径管では 5 ~ 20 となる。Fig.5 は、本実験値から求めた ϕ_L^2 である。記号は供試液体の違いによって区別している。さらに、図中の曲線は式(2)の計算値で、 C の値に 5 (Chisholm & Laird⁽⁵⁾ の推奨値)、0.66 (Mishima & Hibiki⁽⁶⁾ の式による値)、0.24 (著者らの内径 100 μm の円管内脱イオン水-窒素二相流における実験値⁽¹⁾) を用いた場合である。図から本実験値は L&M パラメータでよく整理できることが分かる。さらに、 $C = 5$ の時の式(2)の計算値は本実験値をかなり過大評価する一方、 $C = 0.66$ または 0.24 の場合の計算値は本実験値と良く一致した。次に、式(2)中の C 値として Mishima & Hibiki⁽⁶⁾ と Lee & Lee⁽⁷⁾ のモデルを用いた場合の比較を行った。その結果、Fig.6 に示すように Mishima & Hibiki モデルは供試液体の違いによらず本実験値を±20%以内で予測できた。一方、Lee & Lee モデルは本実験値を過小評価する傾向があり、特にエタノール水溶液の場合がその傾向が顕著であった (比較結果の図は、紙面の都合上、省略する)。

4. 結 言 マイクロチャンネル内気液二相流の摩擦圧力損失の実験値を得た。その実験では液物性値の圧力損失への影響をみるために供試液体として濃度の異なる4種類のエタノール水溶液を用いた。二相圧力損失は、式(2)の C 値に例えば Mishima & Hibiki による値を用いれば、Lockhart & Martinelli 型の整理法によって予測できることが分かった。



(a) $0.16 < j_L < 0.24$ m/s (b) $0.46 < j_L < 0.53$ m/s

Fig.4 Two-phase frictional pressure drop data

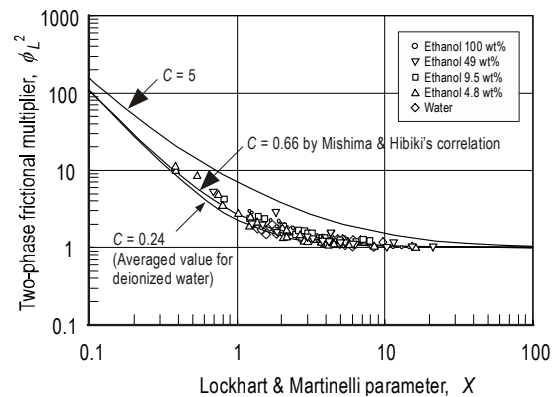


Fig.5 Variation of two-phase friction multiplier data with Lockhart-Martinelli parameter

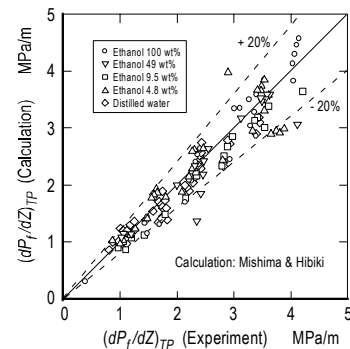


Fig.6 Prediction of two-phase frictional pressure gradient using a Lockhart-Martinelli correlation with C -value of Mishima & Hibiki

【参考文献】 (1) Kawahara, A., et al., Int. J. Multiphase Flow, **28** (2002), 1411-1435. (2) Serizawa, A., et al., Experimental Thermal and Fluid Science, **26** (2002), 703-714. (3) 例えば, Mala, G.M. and Li, D., Int. J. Heat and Fluid Flow, **20** (1999), 142-148. (4) Lockhart, R.W. and Martinelli, R.C., Chem. Eng. Progress, **45** (1949), 39-48. (5) Chisholm, D. and Laird, A.D.K., Trans. ASME, **80**-2 (1958), 276-286. (6) Mishima, K. and Hibiki, T., Int. J. Multiphase Flow, **22** (1996), 703-712. (7) Lee, H.J. and Lee, S.Y., Int. J. Multiphase Flow, **27** (2001), 783-796.

【問合せ先】

熊本大学工学部知能生産システム工学科 川原 顕磨呂
Tel & Fax: 096-342-3753
E-mail: akimaro@mech.kumamoto-u.ac.jp