

206管内を流動する液体泡沫の壁面せん断応力

Wall Shear Stress of Foam Flow Through a Pipe

正 ○ 戸倉郁夫 (室蘭工大) 正 花岡 裕 (室蘭工大)
小川徳哉 (室蘭工大) 佐藤 司 (ダイナム株)

Ikuo TOKURA, Yutaka HANAOKA, Noriya OGAWA, Murooran
Institute of Technology, 27-1 Mizumoto-cho, Murooran, Hokkaido,
Tukasa SATOH, Dynam Co. Ltd.

An experimental study was conducted on the pressure drop for foam flow through a rectangular/circular pipe. Foam flow in a pipe was approximated by a model in which foam is lubricated by a thin layer of a Newtonian liquid (slip-layer) on the pipe wall. Indirect measurement of the slip-layer shows that its thickness depends on the flow velocity. Experimental equations for the slip-layer thickness were determined. A power-law equation with a yield shear-stress was used as the rheological equation for the foam flowing over the liquid-slip layer. Values of the parameters included in the equation were experimentally determined. Prediction of the wall shear stress for foam flow in a pipe can be possible by using these equations.

Key Words: Aqueous Foam, Foam Flow, Pressure Drop, Wall Shear Stress

1. はじめに

液体泡沫は、石鹸のあわのように、液膜を連続相とする多数の気泡の集合体であり、洗浄剤、冷却媒体、断熱材としての利用や燃焼分野での応用が期待できる流体である。泡沫は非ニュートン流体であり、せん断に対してある降伏応力を持つとされている。泡沫の管内流動は、管壁面に接する薄い液膜層 (すべり層) によってすべり流動するモデルによって近似される⁽¹⁾。流速が大なる場合は、剛体流動していた泡沫内部の気泡間でせん断を生じ、流速の増加とともに、そのせん断領域も増大すると考えられる。したがって、泡沫の流動抵抗を予測するためには、すべり層の厚さや、せん断特性 (レオロジー方程式) を知らねばならない。本報告では、管内流動泡沫の壁面せん断応力について検討した結果について述べる。

2. 実験装置および実験方法

使用した装置、および実験方法は前報⁽²⁾⁽³⁾と同じである。圧縮空気と発泡液 (花王 (株) MX-968 1% 水溶液) を発泡器で混合し、生成した泡沫を直接流路に導入した。使用した矩形管と円管の垂直流路の概略を Fig. 1 に示す。矩形管は全長 1200mm で高さ 4.4mm、幅 60mm であり、厚さ 10mm の透明アクリル板 (撮影に使用する側面のみ厚さ 5mm) で製作されている。また、円管は、透明アクリル製の管 (内径 9mm, 全長 1075mm) を用いた。圧力降下は、矩形管では流路出口から 500mm, 1000mm の 2 箇所に、円管では 250mm, 500mm の 2 箇所に設置した圧力変換器 (株共和電業、PGM-02KG) を用いて測定した。また、泡沫の流量は、管路出口で一定容積の容器に泡沫を採取し、測定した。さらに、矩形管壁面近傍の泡沫の流動状態をビデオ撮影し、流動気泡の観察と気泡速度の算出を行なった。

泡沫の性状を表すために、泡倍率 E を使用した ($E = (\text{泡沫の体積}) / (\text{泡沫中の液体の体積})$)。本実験の泡倍率の範囲は 11 から 44、泡沫の平均気泡径は約 0.5~0.8mm である。泡沫の平均流速は、円管の場合 2m/s 以下、矩形管の場合 0.8m/s 以下であった。実験は室温で行った。

3. すべり層の厚さと降伏応力

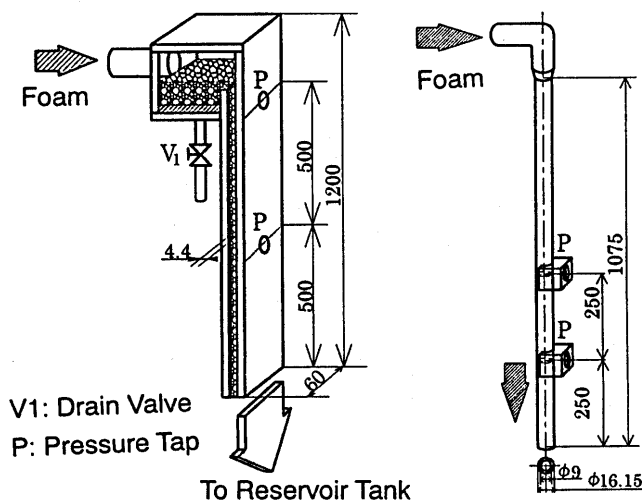


Fig.1 Test pipes

泡沫流れの壁面せん断応力 τ_w は、次式で算出した。

$$\tau_w = -\frac{BH}{2(B+H)} \frac{dp}{dx} \text{ (矩形管)}, \quad \tau_w = -\frac{D}{4} \frac{dp}{dx} \text{ (円管)} \quad (1)$$

(B, H : 矩形管幅および高さ、 dp/dx : 圧力勾配、 D : 円管直径)

Fig.2 に、ビデオ画像から得られた矩形流路壁面近傍の気泡速度 U_B と、泡沫平均速度 U_m ((泡沫の体積流量)/(管断面積)) の関係を示す。この図より、 U_m が約 0.05m/s 以下では U_B と U_m が一致しており、泡沫が気泡間でせん断せず、剛体的に流動していることがわかる。 U_m が約 0.05m/s となる場合の τ_w の値は約 4Pa であったので、泡沫の降伏応力 τ_0 の値を 4Pa とした。剛体流動する速度範囲内では、すべり層 (管壁面に接する薄い液膜) 厚さ δ は次式で近似できる。

$$\tau_w = \mu \frac{U_m}{\delta} \quad (2)$$

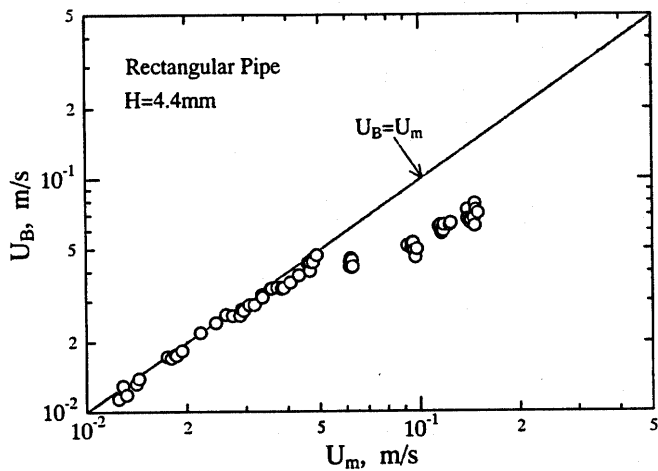


Fig.2 Bubble velocity versus mean foam velocity

ここで μ は、泡沫液の粘度である。

得られたすべり層厚さの値は、この速度範囲内では泡倍率に依存せず、泡沫速度の増加とともに増大する結果となった。これは、最も壁側を流動する気泡は、気泡と壁面との間に存在する液体のため、潤滑による壁面と垂直方向に働く力を受けるからであると考えられる。さらに気泡移動速度が大きくなると、内部の気泡から抗力を受け、それ以上内部へ移動することができなくなるため、ある平衡位置に留まると予測される。そこで、すべり層厚さを以下の式で近似した。

$$\delta = 7.2 \times 10^{-5} U_m^{0.66}, m \quad (U_m \leq 0.05 m/s) \quad (3)$$

$$\delta = 1.0 \times 10^{-5}, m \quad (U_m > 0.05 m/s) \quad (4)$$

4. 泡沫のレオロジー方程式

泡沫を連続流体と考え、せん断速度をつぎのべき乗則で近似する。

$$\tau = \tau_0 + k\gamma^n, \quad (\tau > \tau_0) \quad (5)$$

(k, n : レオロジーパラメータ、 γ : せん断速度、 τ, τ_0 : せん断応力、降伏応力)

Rabinowitsch の方程式 (4) より、すべり層上端のせん断速度 γ_δ は以下の式で表される。

$$\gamma_\delta = \frac{3}{2}\Gamma + \frac{\tau_\delta^*}{3} \frac{d\Gamma}{d\tau_\delta^*}, \quad \Gamma = \frac{6Q_R^*}{(H-2\delta)^2}, \quad (\text{平行平板}) \quad (6)$$

$$\gamma_\delta = \frac{4}{3}\Gamma + \frac{\tau_\delta^*}{4} \frac{d\Gamma}{d\tau_\delta^*}, \quad \Gamma = \frac{32Q_F^*}{\pi(D-2\delta)^3}, \quad (\text{円管}) \quad (7)$$

ここで Q_R^*, Q_F^* は、気泡間でせん断が生じている部分の流量であり、全泡沫流量から、すべり層による栓流部分の流量を引いた流量である ($\tau_\delta^* = \tau_\delta - \tau_0$)。

以上の諸式を使用してレオロジーパラメータの値を決定すると、Table 1 に示す結果が得られた。円管に対する値は、Calvert⁽¹⁾ の報告値 ($k=2.5, n=0.4, \tau_0=1\text{Pa}$) に近い値を示している。

Table 1 Rheological parameters in Eq.(5)

Pipe	τ_0 Pa	k	n
Rectangular (H=4.4mm)	4	0.61	0.47
Circular (D=9mm)	(4)	2.2	0.37

Fig.6 に、すべり層の厚さ (式 (3), (4))、および構成式 (式 (5)) を使用して得られた壁面せん断応力の計算値と実験値との比較を示す。

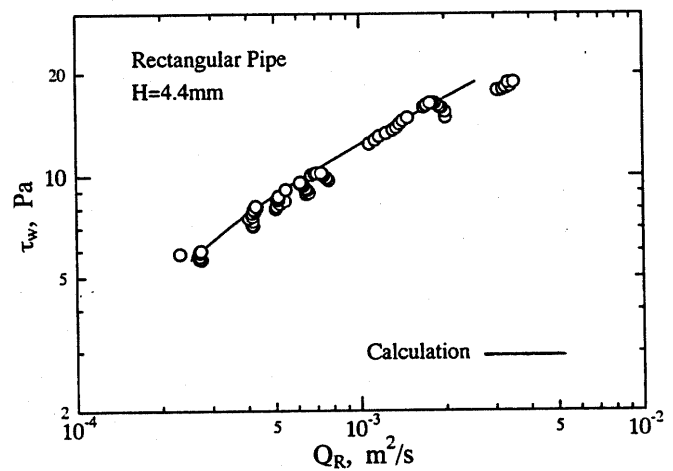


Fig.3 Wall shear stress (rectangular pipe)

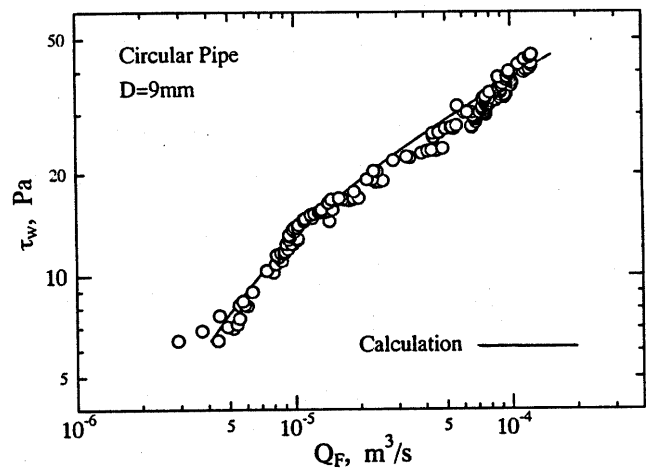


Fig.4 Wall shear stress (circular pipe)

5. むすび

本報告の方法を用いれば、個々の管を流動する泡沫に対して、式 (5) 中のパラメータの値を決定することができる。本実験で得られた結果は、使用する管の形状 (や大きさ) によってそれらの値の調整が必要であることを示している。使用する流路ごとに実験を行ない、上記パラメータの値を決定するのは、大変めんどろな作業であるので、さらに簡便な壁面せん断応力の予測法の確立が望まれる。

謝辞 本研究を行うにあたり、ご協力頂いた松田 喬氏に感謝の意を表します。

参考文献 (1) J. R. Calvert: Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 11 (1990), 236-241. (2) 松田ほか3名, 第78期流体工学部門講演会 CD-ROM 版論文集, No. 00-14, 902 (2000). (3) I. Tokura, et al.: Proc. of Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics(1997), 1037-1043. (4) 中村喜代次, 非ニュートン流体力学, 株式会社コロナ社, (1997), 73-83.