

613 液体泡沢の管内流動特性に関する実験的研究

Pressure Drop for Liquid Foam Flow through a Pipe

○学 松田 翁(室蘭工大院)
片桐 晋吾

正 戸倉 郁夫(室蘭工大)

Takashi MATSUDA , Ikuo TOKURA , Muroran Institute of Technology , 27-1 Mizumoto-cho , Muroran , Hokkaido
Shingo KATAGIRI

Measurement of pressure drop was conducted on water-air foam flowing through a vertical rectangular pipe. The foam flow was modeled by a plug flow lubricated by a thin layer (slip layer) of a Newtonian liquid on a pipe wall. Direct measurement of the thickness of the slip layer was also conducted in this study. Video images of the slip layer indicated that the thickness of the layer is in the order of tenth of micron meters and increases as increasing the velocity of the foam flow. Image processing of the video images showed that the increase in the slip layer thickness is due to deformation of nearest bubbles at the pipe wall which subject to shear force from the liquid slip layer.

Key Words: Liquid-Gas Foam , Flow in a Pipe , Pressure Drop , Slip Layer

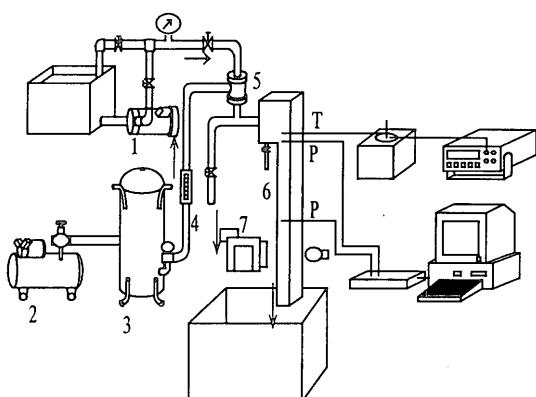
1. 序論

液体泡沢は、新しい冷却媒体としての利用が考えられているが、その流動の詳細は、まだ十分に解明されていない。管路内を流動する液体泡沢には、すべり層とよばれる管壁面に接する薄い液膜層が存在し、泡沢の流動抵抗に大きな影響を及ぼしていると考えられている。本研究では、液体泡沢の流動抵抗を明らかにするために、すべり層の厚さの実測を試みた。泡沢の性状や流量によって、管内を流動する泡沢の流動特性が、どのように変化するかを検討した。

2. 実験装置

実験装置全体の概略を Fig. 1 に示す。溶液タンク内の界面活性剤水溶液（花王株製、MX968, 1%重量濃度）を溶液ポンプにより発泡器内のノズルに圧送する。また、空気圧縮機により圧縮された空気は、定圧を保つため空気タンクに蓄えられ、空気流量計を介して発泡器へ送られる。空気が発泡器内で水溶液とともに、ノズル前方に設置された金網を通過することで、泡沢が連続的に生成される。

観察部（流路）の概略を Fig. 2 に示す。流路は、全長 1200mm で矩形断面 (4.4mm × 60mm) を有しており、厚さ 10mm の透明アクリル板（撮影に使用する側面のみ厚さ



1 Liquid Pump 6 Test Section
2 Air Compressor 7 Digital Video Camera
3 Air Tank T Pressure Transducer
4 Air Flow Meter P Thermocouples
5 Foam Generator ← Flow Direction

Fig.1 Experimental Apparatus

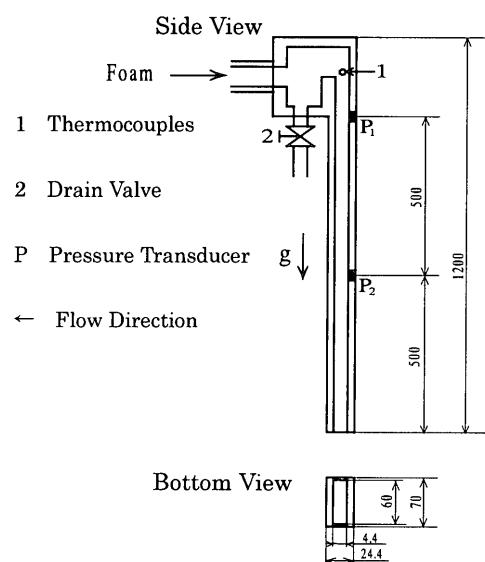


Fig.2 Test Section

5mm）を用いて製作されている。泡沢は発泡器から、塩化ビニール管を通過し流路上部の泡沢槽に貯められ、オーバーフローさせることによって流路へと流入する。泡沢の温度は、流路入口に取り付けた銅・コンスタンタン熱電対（ビニール被覆、直徑 0.3mm）により計測される。また、圧力降下は、流路出口から 500mm, 1000mm の 2 個所に設置した圧力変換器を用いて測定される。

3. 実験方法

実験は、空気流量と液圧を任意の値に変化させて行なった。実験は、平均流速が 0.02~0.78 m/s, 泡倍率が 5.8~41 の範囲で行なった。測定項目は、泡沢の流路入口温度、2つの圧力孔の圧力値、泡沢流量および泡沢を撮影した画像である。画像は、デジタルビデオカメラに接写レンズ(140 倍)を取り付けて撮影した。実験によって得られた画像から、パソコン上ですべり層の厚さの画素数を求められる。可視化画像 (Fig.3-a) を Fig.3-b のように画像処理し壁面から気泡界面までの画素数を自作したプログラムを用いて測定し、その算術平均を求めすべり層厚さとした。また、管内に入れて撮影した直徑 0.1mm の熱電対の画素数を基準として、それとすべり層厚さの画素数との比率から mm へ換算した。

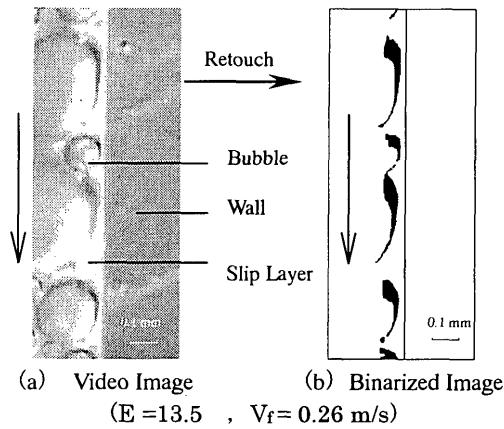


Fig.3 Video image of Foam on the wall

4. 実験結果および考察

泡の性状を示すため、次式で定義される泡倍率 E というパラメータを用いる⁽¹⁾。

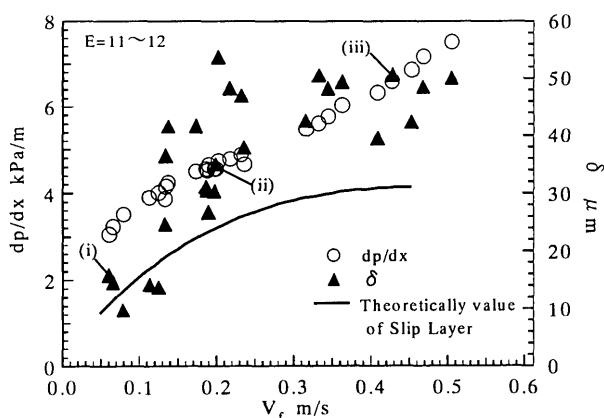
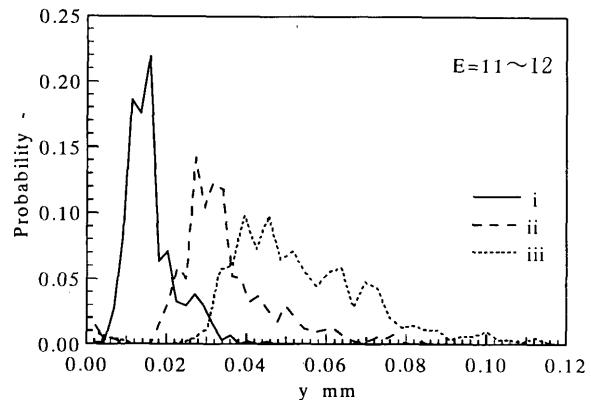
$$\text{泡倍率 } E = \frac{\text{泡の体積}}{\text{泡中の液体の体積}} \quad (1)$$

液体泡沫の平均流速 V_f と左軸に圧力勾配 dp/dx との関係を、右軸に泡の可視化画像から求めたすべり層の厚さの平均値 δ との関係を示したものを Fig.4 に示す。図中の実線は、すべり層厚さの理論値であり、泡の流動が、壁面近傍のすべり層と流速の変化のない栓流部から成ると仮定して、ナビエ・ストークスの方程式⁽²⁾より導いた三次の代数方程式

$$7\delta^3 - 9h\delta^2 + h^2\delta + \frac{6\mu Q}{dp/dx} = 0 \quad (2)$$

をニュートン・ラフソン法を用いて解いたものである。ここで、 δ はすべり層厚さ、 h は平板間距離、 μ は起泡溶液の粘度、 Q は泡の体積流量である。

図から平均流速の増加にともない圧力勾配およびすべり層厚さは増加するといえる。また、圧力勾配の曲線は、原点ではなく、およそ 1 kPa/m の点に収束すると予想される。つまり、泡では、せん断応力 τ がある臨界値 τ_0 以下では流動を起こさないが、 τ_0 を超えるとはじめて流動を起こすと考えられる。このことから、静止状態の泡は、降伏応力 τ_0 以下では流動に抵抗する三次元的な構造ができると予想される。さらに、圧力勾配とすべり層厚さは、

Fig.4 Relationship between dp/dx and V_f and δ Fig.5 Relationship between y and Probability

共に平均流速が 0.15 m/s あたりで増加の傾きが小さくなっているのがわかる。これは、はじめ壁面ですべり流動し栓流部内では速度変化のなかった泡が、平均流速の増加に伴い、気泡間のせん断応力が降伏応力を超え、気泡の配置の転移が起こったためであると考えられる。気泡間にせん断が起こると、栓流部最端の気泡の移動速度があまり大きな変化をせずに、泡全体としての流量が大きく増加する。そのため圧力勾配の増加にそれほど大きな変化がなくとも流量の増加の割合は大になる。すべり層厚さの実験値と理論値は、流速の小さな時には近い値を示しているが、流速の増加に伴い大きく離れていくのがわかる。理論値を算出する際に、泡の流動はすべり層と栓流部のみからなると仮定し、気泡間のせん断の影響を考慮していない。せん断が起こり、内部に剪断応力が生じると、その応力もすべり層内で発生しているとして計算しているため理論値の方が小さな値を示す結果となった。

つきに Fig.3 中の i~iii 点における、壁面と気泡界面との距離 y の確率分布を表したものを Fig.5 示す。ここで、個々の山の平均値がすべり層厚さ δ である。図より、分布の山の左端は流速の増加に伴い右へ移動している。このことから、壁面と気泡の最端距離が大きくなる、つまり全体的に気泡が遠ざかるというのがわかる。また、分布の山は、平均流速の増加に伴い、山の高さを変え平坦になりながら右側へ移動する（増加する）。もし、平均流速の変化に伴い気泡が単純に壁面から離れるだけなら、分布の山の大きさは変わらずに右へ移動するはずである。気泡の曲率が小さくなるほど分布の山は、低く平坦なものになるので、図の傾向から、気泡の移動速度が上がってくると、気泡の形状が変化し、壁面近傍の気泡は移動方向と垂直方向に押しつぶされ、結果としてすべり層厚さが厚くなるのがわかる。

5. 結論

- (1) 可視化画像から求めたすべり層の厚さは数十 μm 程度の値であり、流速の増加によって厚くなる。
- (2) すべり層厚さの増大は、栓流部最端の気泡が流れ方向と垂直方向に押しつぶされることによるものである。

参考文献

- (1) 藤野和仁, 泡沫の流動特性に関する実験的研究, 平成 6 年度室蘭工業大学修士論文.
- (2) 中山泰喜, 新版流体の力学, 株式会社養賢堂, (1989).