

# 205 水-空気系泡沫流れの不連続流体モデル

## Discontinuous Fluid Model for Foam Flow Through Pipes

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)

Kiuo TOKURA, Yutaka HANAOKA, Noriya OGAWA  
Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto-cho, Muroran, 050-8585

*Key Words:* Aqueous Foam, Circular Pipe, Apparent Viscosity, Wall Shear Stress, Discontinuous Fluid

### 1. はじめに

液体泡沫は、液膜を連続相とする多数の気泡の集合体である。泡沫は気液二相の物質であるが、液膜が互いに連結した構造体を形成しており、その流動抵抗も従来の気液二相流の相関よりもかなり大きな値を示す<sup>(1)</sup>。図1に、空隙率が大きな泡沫の二次元せん断モデルの一例<sup>(2)(3)</sup>を示す。気泡セル A および B は、せん断力を受けると図に示すような変形サイクルを経た後、一気泡セル分移動(変位)する。このような気泡変形サイクルが示すせん断抵抗は、通常の連続流体が示す運動量輸送に基づく粘性抵抗とは、かなり異なっていると予測される。従来、泡沫流動の実験的研究では、流路の大きさに比べ気泡径が小さいとして、泡沫を連続流体として取り扱い、非ニュートン流体のレオロジー式を適用してきた<sup>(1)(4)</sup>。しかし、管径が小さくなると、泡沫をある構造を持った不連続流体として扱う必要がある。本研究では、液体泡沫の不連続流体モデルを導入し、管内流動抵抗の実験値と数値計算結果との比較を行なった。

### 2. 泡沫流動実験

実験装置および実験方法は、前報<sup>(4)</sup>のものと同じであるので、詳細は省略する。泡沫液体には花王(株)MX-968 1% 水溶液、気体には空気を用いた。試験流路には、アクリル樹脂製の矩形管(長さ1200mm、幅60mm、高さ4.4mm)および円管(長さ1000mm、内径9mm)を使用した。実験値の整理に必要な発泡液の密度、動粘度、表面張力の値は、それぞれ、ピクノメータ、ウペローデ粘度計、滴重法を用いて測定した。泡沫の写真から、単位面積あたりの気泡個数を測定し、平均気泡直径  $d$  を算出した結果、以下の式が得られた。

$$d = 0.38 \frac{(E-1)^{1.8}}{E^{1.6}}, \quad \text{mm} \quad (1)$$

ここで、 $E$  は泡倍率(=(泡沫の体積)/(泡沫中の液体の体積))である。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であった。実験は室温で行った。

### 3. 泡沫の不連続流体モデル

管内の泡沫流動を、壁面に接する薄い液膜(すべり層、厚さ $\delta$ )によって泡沫全体がすべり流動するモデルで近似する。せん断応力 $\tau$ が泡沫の降伏応力 $\tau_0$ 以下の領域は剛体的に流動し、 $\tau_0$ 以上の領域では気泡が互いに相対的に変位(せん断)する。この流動モデルによって泡沫流動を表すために必要な、泡沫の降伏応力、すべり層厚さの値、および泡沫(気泡間)のせん断特性は、実験よりつぎのように決定された。

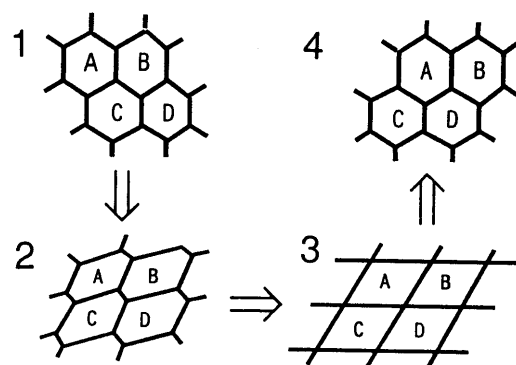


Fig.1 Displacement of two-dimensional bubbles<sup>(2)</sup>

**3.1 泡沫の降伏応力** 矩形管内の泡沫流れの実験結果<sup>(4)</sup>より、本実験条件では、泡沫の降伏応力 $\tau_0$ の値は約4 Paと見積もられた。円管内の泡沫流れの降伏応力対しても、この値を適用した。

**3.2 すべり層厚さ** 矩形管内の泡沫流れのビデオ写真より、壁面の最も近くを流動する気泡の変形が観測された。この気泡変形は、気泡と壁面との間のくさび形流路内流れにより、潤滑による壁面と垂直方向の力が作用するためと推察された。気泡と壁面間に存在する液体(すべり層)の仮想的な厚さとして、ニュートン流体のクエット流れを適用し、以下の近似式を導入した。

$$\frac{\delta}{d} = 200 \left( \frac{\nu}{dU_m} \right)^{0.5} \left( \frac{\mu U_m}{\sigma} \right)^{-1.17}, \quad \left( \frac{\mu U_m}{\sigma} < 0.0013 \right) \quad (2)$$

$$\delta = \text{const.}, \quad \left( \frac{\mu U_m}{\sigma} \geq 0.0013 \right) \quad (3)$$

( $U_m$ : 平均流速、 $\delta$ : すべり層厚さ、 $\mu$ : 発泡液の粘度、 $\nu$ : 発泡液の動粘度、 $\sigma$ : 表面張力)

**3.3 泡沫のみかけの粘度** 円管内を流動する泡沫のみかけの粘度 $\eta$ を、次式で定義する。

$$\tau_\delta = \tau_0 + \eta\dot{\gamma}, \quad (\tau_\delta > \tau_0) \quad (4)$$

$$\eta = \frac{32Q_F}{\pi(D-2\delta)^3}, \quad (\text{円管}) \quad (5)$$

( $\dot{\gamma}$ : みかけのせん断速度、 $\tau_\delta$ : すべり層上端のせん断応力、 $\tau_0$ : 泡沫の降伏応力、 $D$ : 円管直径、 $Q_F$ : 気泡間のせん断の寄与による流量(全泡沫流量から、すべり層による栓流部分の流量を差し引いた流量))

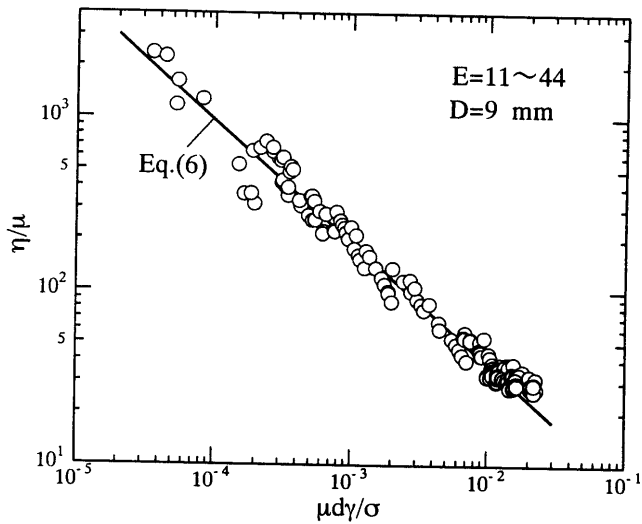


Fig.2 Apparent viscosity versus  $\mu d \gamma / \sigma$  (circular pipe)

図2に、泡沫のみかけの粘度と液の粘度の比と  $\mu d \gamma / \sigma$  の関係を示す。この図より、みかけの粘度は次式で近似できる。

$$\frac{\eta}{\mu} = 1.53 \left( \frac{\mu d \gamma}{\sigma} \right)^{-0.7}, \quad (\text{円管}, \frac{\mu d \gamma}{\sigma} < 0.01) \quad (6)$$

ここで、 $d$ 、 $\sigma$  は、それぞれ平均気泡直径、表面張力である。上式は壁面近傍でのせん断速度と粘度の関係を表すものであるが、泡沫内部の気泡間のせん断についても適用できると仮定する。

**3.4 泡沫の不連続流動** 泡沫は、液膜が互いに連結した構造体であり、そのせん断機構は図1に示されるように、連続流体のせん断とは異なる。泡沫の不連続性を考慮するために、泡沫を平均直径  $d$  の球状気泡が稠密充填された物質とみなす(図3)。気泡が破壊しないとする、気泡間のせん断は、気泡中心間距離  $L (= d\sqrt{2/3})$  を単位として起こり、その中間の位置では発生しないと考えられる。

泡沫の流動モデルを図4に示す。連続流体の場合は、速度分布、せん断応力共に滑らかに変化するのに対して、泡沫は気泡間のせん断が不連続な位置で発生するので、両分布共に階段状の分布を示すことになる。ここで、気泡間のせん断による速度差は次式より算出される。

$$\gamma \approx \left| \frac{du}{dr} \right| \quad (7)$$

( $r$ : 半径方向距離、 $u$ : 軸方向の流速、 $\gamma$ : せん断速度)

**3.5 壁面せん断応力** 以上の諸式を使用すると、泡沫流量と壁面せん断応力の関係を、数値計算により求めることができる。図5は、壁面せん断応力  $\tau_w$  と泡沫の全流量  $Q$  の関係を示したものである。図中の実線は、数値計算結果を示している。実験値と比較すると、両者は概ね一致している。

4. むすび

円管内を流動する泡沫の不連続流体モデルを提案し、壁面せん断応力と流量の関係を算出する方法を示した。実験的に決定できるみかけの粘度を使用する本報告の近似計算法は、泡沫流れの流動抵抗を予測するのに有効であると思われる。同様の解析は、平行平板間の泡沫流れに対しても可能である<sup>(5)</sup>。しかし、本研究で使用した泡沫

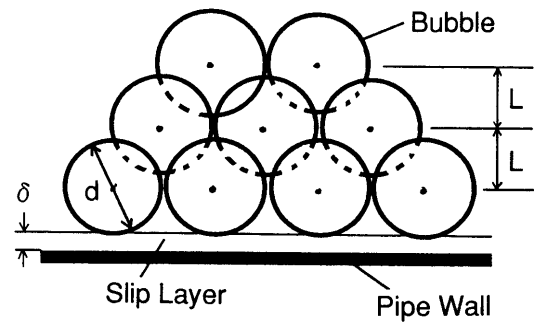


Fig.3 Close packing of spherical bubbles in a foam

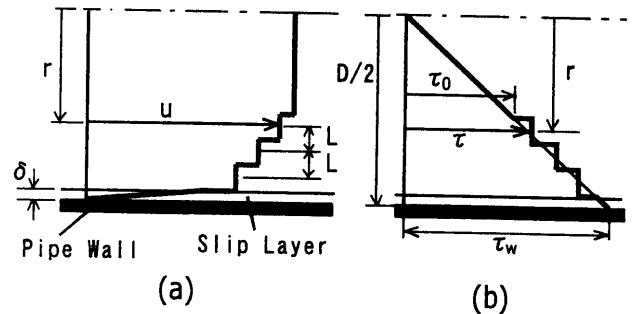


Fig.4 Discontinuous foam flow: (a) velocity, (b) shear stress

は極めて限られた条件のものであり、多種多様な泡沫の流れに対して、降伏応力、すべり層厚さ、みかけの粘度をどのように決定するのかという課題も残されている。

参考文献 (1) J. R. Calvert: Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 11 (1990), 236-241. (2) M. H. Princen: J. Colloid and Interface Science, Vol. 91 (1983), 160-175. (3) S. A. Khan and R. C. Armstrong: J. Non-Newtonian Fluid, Vol. 22 (1986), 1-22. (4) 戸倉、ほか3名: 機械学会北海道支部第42回講演会 講演概要集 No.022-1(2002), 52-53. (5) 戸倉、ほか2名: 第24回熱物性シンポジウム講演論文集, (2003), (投稿中).

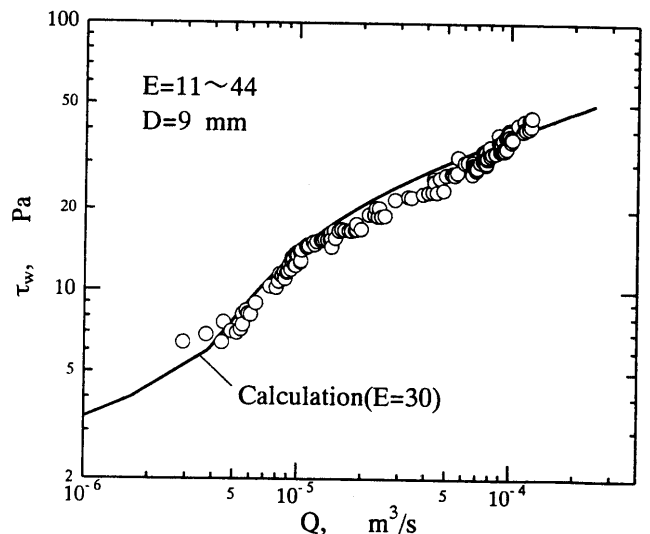


Fig.5 Wall shear stress versus foam flow rate(circular pipe)