

# マイクロ管内環状流の流動様式と液膜厚さに関する研究

## Measurement of Liquid Film Thickness in Micro Tube Annular Flow

伝学 \*菅野 普 (東大) 伝学 韓 榮培 (東大)  
伝正 鹿園 直毅 (東大)

Hiroshi KANNO<sup>1</sup>, Youngbae HAN<sup>1</sup> and Naoki SHIKAZONO<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Dept. of Mech. Eng., Univ. of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

In the present study, annular liquid film thickness is measured using a confocal method. Glass tubes with inner diameters of 0.3, 0.5 and 1.0 mm are used. Degassed water and FC40 are used as working fluids, and the total mass flux is varied from  $G = 100$  to  $500 \text{ kg/m}^2\text{s}$ . Liquid film thickness is measured by laser confocal displacement meter (LCDM), and the liquid-gas interface profile is observed by a high-speed camera. Mean liquid film thickness is then plotted against quality for different flow rates and tube diameters. Mean thickness data is compared with the smooth annular film model. Annular film model predictions overestimated the experimental values especially at low quality. It is considered that this overestimation is attributed to the disturbances caused by the interface ripples.

*Key Words* : Annular flow, Micro tube, Liquid film thickness, Ripples in interface

### 1. 序論

小型高性能な蒸発器や熱交換器への応用としてマイクロ管内沸騰流が期待されている。マイクロスケールにおいても高乾き度では環状流が主な流動様式となるが、気液界面変動は表面張力の影響を受ける。熱伝達は液膜からの蒸発及び凝縮により行われるため、マイクロ管内環状流では液膜厚さが伝熱性能を決める重要なパラメーターとなる。Han et al. <sup>(1)</sup> はレーザー共焦点法を用いてマイクロ管内スラグ流の液膜厚さを測定し、液膜厚さの相関式を提案した。キャピラリ数が大きくなると、細径管でも慣性力の影響が無視できないことが報告されている。Tibriça et al. <sup>(2)</sup> はマイクロスケールに於ける液膜厚さ測定方法を俯瞰し、液膜厚さが非常に薄いマイクロ管内二相流では共焦点法が適していると報告している。

液膜厚さに関する研究はこれまでも多く行われているが、マイクロ管内環状流の液膜厚さに関する研究例は限られており、液膜厚さに関する定量的な知見は少ない。本研究では、マイクロ管内環状流の液膜厚さを共焦点法によって測定し、流動様式と液膜厚さの相関を実験的に明らかにすることを目的とする。

### 2. 実験手法

図1に実験装置の概要を示す。脱気した液相と圧縮機からの空気をそれぞれ流量制御して入り口ブロックのTジャンクションで混合させ、テストセクションに環状流を流入させる。テストセクションには直径  $D = 0.3, 0.5, 1.0 \text{ mm}$  のガラス管を用い、管直径に対するテストセクション長さは  $L/D = 300$  で統一した。液相には水とFC40を用いた、表1にそれぞれの流体の物性値を示す。

Table 1 Properties of working fluids at  $20^\circ\text{C}$

	Water	FC40
$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	998	1860
$\mu \text{ (}\mu\text{pa s)}$	1001	3674
$\sigma \text{ (mN/m)}$	888	3207
$N$	1.33	1.29

本実験では、気相と液相の合計質量流量を  $G = 100, 300, 500 \text{ kg/m}^2\text{s}$  で固定し、乾き度  $x$  に対する液膜厚さの変化を調べた。  $G, x$  は式(1), (2)のように定義した。

$$G = \frac{\dot{m}_{air} + \dot{m}_{liquid}}{A} \quad (1)$$

$$x = \frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{air} + \dot{m}_{liquid}} \quad (2)$$

### 3. 実験結果と考察

**3.1 流動様式と液膜厚さ** 図2に  $D = 0.5 \text{ mm}, G = 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$  に於ける流動様式を示す。気相と液相との界面に波が生じ、波の大きさが乾き度の増加に従って減少していくことがわかる。  $x = 0.94$  の高乾き度では、水もFC40も波の形はほぼ同様であるが、乾き度が低い領域ではFC40の方が波の形が鋭くエッジがシャープである。FC40は水に比べ粘性係数が約4倍、表面張力が約4分の1程度であり、特に表面張力が小さい程流れが不安定になることから、FC40では波の形が鋭くなったと考えられる。

図3に  $G = 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$  に於ける無次元液膜厚さを示す。液膜厚さは乾き度と管径の増加に従って減少することがわかる。また、  $D = 0.3 \text{ mm}$  ではFC40の方が水よりも無次元液膜厚さが厚く、  $D = 0.5, 1.0 \text{ mm}$  ではほとんど差がない結果となった。管径が大きいと界面に生じる波が大きくなり、このため液膜厚さが減少したと考えられる。

図4に  $D = 0.5 \text{ mm}$  に於ける無次元液膜厚さを示す。液膜厚さは  $x, G$  の増加に従って減少することがわかる。また、  $G = 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ではFC40の方が水よりも無次元液膜厚さが厚く、  $G = 300, 500 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ではほとんど差がない結果となった。これは質量流量が大きい程界面の乱れが大きくなり、液膜厚さが薄くなるためと考えられる。以上から、液相のレイノルズ数が大きい条件では界面の乱れが大きくなり、液膜厚さを減少させる原因となっていると考えられる。

**3.2 環状流液膜モデル** 本実験では測定した液膜厚さを Revellin et al. <sup>(3)</sup> の液膜モデルと比較して乾き度に対する液膜厚さの検証を行った。図5に検査体積を示す。本実験は断熱条件なので熱流速  $q$  は0である。力の釣り合いから、気液界面剪断応力と壁面剪断応力は式(3), (4)のように表すことが出来る。また、式(5)のように液相と気相では圧力勾配が等しいと仮定することによって、液膜厚さを算出できる。気液界面および壁面剪断応力には、平滑管の摩擦係数を与えた。このモデルは界面に波がない状態を仮定しているため、モデルと実験結果との比較により、界面に生じる波が液膜厚さに与えた影響を検証することが出来る。

$$-A_l \frac{dp_l}{dz} dz + A_i \tau_{lv} - A_{iw} \tau_{lw} = 0 \quad (3)$$

$$-A_v \frac{dp_v}{dz} dz - A_i \tau_{vl} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{dp_v}{dz} - \frac{dp_l}{dz} = 0 \quad (5)$$

図6に水 -  $D = 0.5 \text{ mm}$  に於けるモデルと実験結果の比較を示す。予測結果が不連続になるのは、気相が層流から乱流に遷移するためである。界面の乱れが大きい低乾き度条件では、本実験結果はモデルによる予測値の半分程度と薄い、乾き度が大きくなり、界面の乱れが小さくなる程予測値に近づく。以上から界面に生じる波が液膜厚さを減少させる主な原因であると考えられる。

#### 4. 結論

マイクロ管内環状流の液膜厚さの測定を行い、以下の知見を得た。

1. 液膜厚さは乾き度、管内径、流量の増加に従って減少するが、FC40の液膜厚さは水の場合よりも管径と質量速度依存性が大きい。
2. 液膜界面に波が観測され、波の形、頻度は液相の慣性力、粘性力、表面張力の影響を受ける。
3. 測定した液膜厚さは界面変動を無視したモデル予測値より薄く、界面の波が小さくなる条件では予測値に近づく。

#### 参考文献

- (1) Y. Han and N. Shiakzono, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 30, 842-853 (2009).
- (2) C. B. Tibriça, F. J. do Nascimento and G. Ribatski, *Exp. Thermal Fluid Sci.*, (2009), in press.
- (3) R. Revellin, P. Haberschill, J. Bonjour and J. Thome, *Chem. Eng. Sci.*, 63, 5795-5801 (2008).

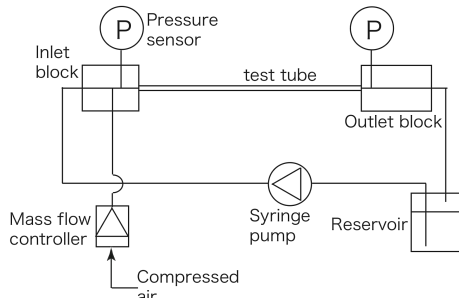


Fig.1 Schematic of the experimental setup

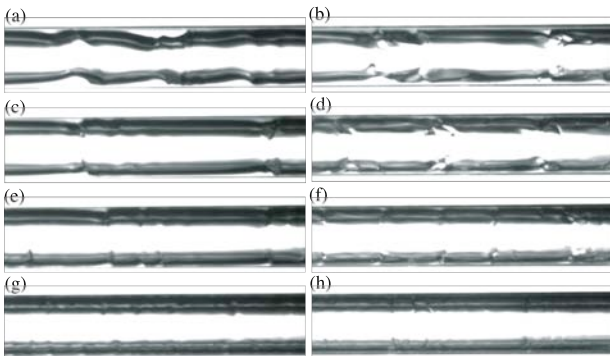


Fig. 2 Flow patterns for  $D = 0.5 \text{ mm}$  and  $G = 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ :  
 (a) water,  $x = 0.15$ ; (b) FC40,  $x = 0.15$ ; (c) water,  $x = 0.44$ ;  
 (d) FC40,  $x = 0.44$ ; (e) water,  $x = 0.73$ ; (f) FC40,  $x = 0.73$ ;  
 (g) water,  $x = 0.94$ ; (h) FC40,  $x = 0.94$ .

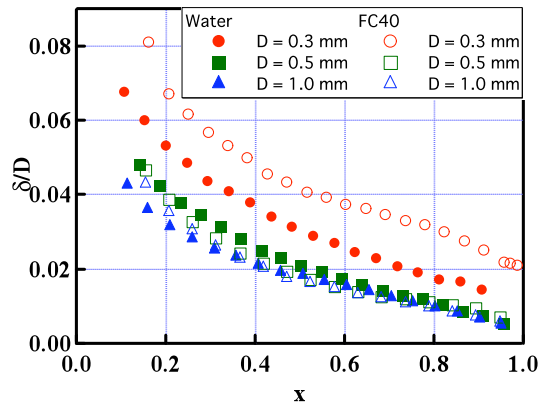


Fig.3 Dimensionless thickness,  $G = 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$

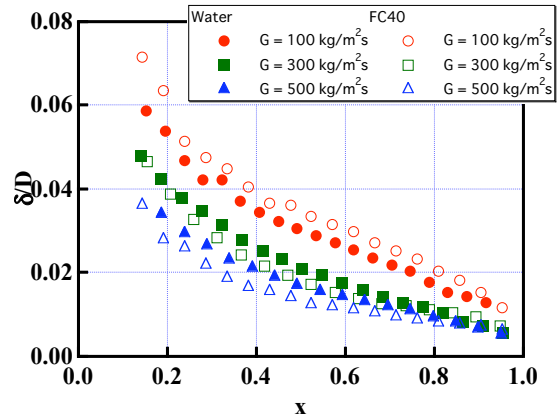


Fig.4 Dimensionless thickness,  $D = 0.5 \text{ mm}$

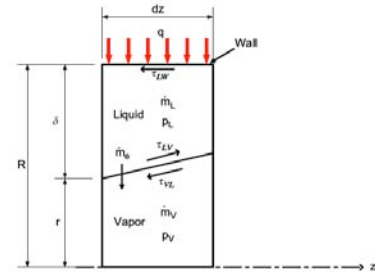


Fig.5. Control volume of the annular film model

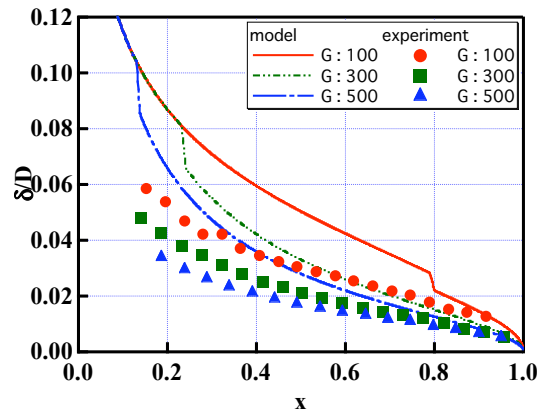


Fig. 6. Comparison between model prediction and experimental results, Water,  $D = 0.5 \text{ mm}$