垂直細管内気液二相スラグ流におけるスラグ構造への 表面張力及び液粘性の影響*

Effects of Surface Tension and Liquid Viscosity on Slug Structures of Gas-Liquid Two-Phase

Slug Flow in Vertical Small Diameter Pipes

坪根 弘 明**
TSUBONE Hiroaki

佐田富 道 雄***
SADATOMI Michio

川 原 顕磨呂***
KAWAHARA Akimaro

Abstract In recently years, both the downsizing and the optimization of a heat exchanger with phase change have been requested, and a variety of working fluids have been utilized as refrigerants. Therefore, the clarification of gas-liquid two-phase flow in small diameter pipes is necessary for various liquids other than water. The purpose of this study is to clarify experimentally the effects of surface tension and liquid viscosity on the flow characteristics of two-phase slug flows in vertical small diameter pipes. In the experiment, flow structures such as void fractions in liquid slug and large gas bubble sections, ratio of large gas bubble length to slug unit length, and liquid film thickness around large gas bubbles were measured using 9 and 5 mm i.d. vertical circular pipes. As the test fluids, air and three kinds of test liquids in the property ranges of 0.042-0.071 N/m in surface tension and 0.797-19.6 mPa·s in liquid viscosity. New correlations of the above parameters were obtained from the present data, and compared with correlations in literatures and the present data.

Keywords: Two-phase slug flow, Vertical channels, Surface tension, Liquid viscosity, Slug structures

1. 緒 言

相変化を伴う熱交換器においては、気液二相流は熱移動性能を規定する重要な現象であり、近年、熱交換器は小型化や高性能化が要求されている[1]。また、環境への負荷を考慮した新冷媒の開発が行われており、小型の熱交換器には様々な物性値を持つ作動流体が用いられている。このため、細管内二相流においては液物性値の影響についての研究がこれまで数多く行われている(例えば[2,3])。しかしながら、気液二相流動特性を冷媒の種類に関わらず正確に予測できる一般的な予測法は確立されていないのが現状である。

本研究では、細管内気液二相流のボイド率や摩擦圧力損失などの流動特性に関して、様々な物性

値を持つ流体に適用できる一般的な相関式の開発を目的としている。これまでに、著者らは内径5～16 mmの垂直円管における気泡流・スラグ流・環状流でのボイド率や摩擦圧力損失に対する表面張力と液粘性の影響について、その成果を既に報告している[4,5]。特に、細管では通常口径管に比べ、慣性力や重力よりも表面張力の影響が支配的になることは想像に難くない。

著者らは、現在、二流体モデル解析コードを用いたボイド率や摩擦圧力損失の正確な予測を試みている。この二流体モデルとは気相と液相のそれぞれに対して質量、運動量、エネルギーの式を立て二相流を取り扱う解析モデルである。これは従来の混合流体モデルと比較して、より高精度に

* 2009.11.30 受付

** 有明工業高等専門学校機械工学科 〒836-8585 福岡県大牟田市東萩尾町 150

TEL: (0944)53-8688 FAX: (0944)53-8865 E-mail: tsubone@ariake-nct.ac.jp

*** 熊本大学大学院自然科学研究科先端機械システム講座

流れを予測できる可能性を持つが、その予測精度は壁面摩擦力や界面摩擦力などの各種構成式の予測精度に大きく依存しており、既存の各種構成式には改良の余地が残されている。すなわち、著者らの二流体モデルを用いた研究[5,6]では、スラグ流における流動特性の予測精度が劣っており、特に、界面摩擦力を与える構成式の予測精度の向上が必要であるという結論を得ている。

そこで、本研究では、スラグ流での予測精度の向上を目的として、垂直細管内における気液二相スラグ流の流動特性への表面張力と液粘性の影響を実験的に明らかにすることとした。本実験では、流路に直径の異なる2種類の垂直円管、供試液体に表面張力と粘性が異なる3種類の液体を用い、液体スラグ中のボイド率、大気泡部のボイド率、スラグユニット長さに対する大気泡長さの比、大気泡周りの液膜厚さ等のスラグ構造について実験的に調査した。また、実験値と様々な予測式[7]-[16]による計算値との比較を行うと共に、新たな実験式を考案したので併せて報告する。

2. 実験

Fig. 1 に本実験装置の概略図を示す。流路には滑らかな内壁を持つ透明アクリル樹脂製の内径 $d=5, 9\text{ mm}$ の2種類の垂直円管を用いた。図中の助走区間、試験区間、排出区間の長さは9 mm 管の場合であり、5 mm 管における各区間の長さは管内径に比例している。また、液相には $30 \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ の水（以下 W と表記）、ポリオキシエチレンラウリルエーテル水溶液（以下 PLE 液）およびグリセリン 72 wt% 水溶液（以下 GI 液）を、気相には空気を用い、大気圧近傍の圧力下 (103.5-174.8 kPa) で実験を行った。Table 1 に供試液体の物性値を示す。水と比較して PLE 液は表面張力が約 0.6 倍、GI 液は粘度が約 25 倍である。

分離タンク内の液相は遠心ポンプで上昇管下部に位置する気液混合部に供給した。空気は気液混合部の直径 0.3 mm もしくは 1.0 mm の複数の穴を通じて液相内に供給した。その後、気液二相流は試験区間等を通り、分離タンクで気相と液相を分離後、気体は大気に開放した。空気と液体の流量測定にはそれぞれロタメータ（精度 3 %）と容積式流量計（精度 2 %）を使用した。大気泡長さとスラグユニット長さの測定には点電極プローブ（精度 3 %）、ボイド率の測定には定電流法

Fig. 1 Apparatus used in this study.

Table 1 Properties of test liquids at $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Liquid	σ N/m	μ mPa·s	ρ kg/m ³
Water	0.071	0.797	995.7
PLE	0.042	0.922	995.7
GI	0.066	19.6	1184

Table 2 Experimental conditions.

Liquid	Gas	d mm	j_L m/s	j_G m/s	The number of experiments
W	Air	5	0.1 – 2.0	0.2 – 10.2	α_{bl} : 7 runs, α_{bg} : 9 runs, δ : 9 runs, L_G/L_T : 36 runs
		9	0.2 – 2.0	0.7 – 10.2	α_{bl} : 6 runs, α_{bg} : 8 runs, δ : 8 runs, L_G/L_T : 29 runs
PLE	Air	5	0.1 – 2.0	0.6 – 10.3	α_{bl} : 9 runs, α_{bg} : 9 runs, δ : 9 runs, L_G/L_T : 11 runs
		9	0.2 – 2.0	0.7 – 10.1	α_{bl} : 5 runs, α_{bg} : 8 runs, δ : 8 runs, L_G/L_T : 34 runs
GI	Air	5	0.1 – 2.0	0.4 – 19.9	α_{bl} : 9 runs, α_{bg} : 10 runs, δ : 10 runs, L_G/L_T : 36 runs
		9	0.1 – 2.0	0.2 – 19.9	α_{bl} : 8 runs, α_{bg} : 8 runs, δ : 8 runs, L_G/L_T : 60 runs

用電極（精度 ± 0.03 ）、システム圧および管軸方向の圧力損失の測定には圧力変換器（精度 3 %）と差圧計（精度 2 %）を使用した。ここで、定電流法の測定に使用した一対の電極間距離は直径の約 1.7 倍であった。それぞれの出力電圧は A/D 変換し、パソコンに取り込んだ。その際、サンプリング周波数は 1 kHz とし 10000 点のデータを処理した。さらに、試験区間中央の管軸部に設置した点電極プローブによる出力電圧の波形を解析して流動様式を判別し、流動状態はデジタルカメラで撮影した。

Table 2 に、本実験における液相の見かけ速度 j_L と気相のそれ j_G の範囲と実験点数を示す。ここで、各測定値は、一実験あたりおよそ 10~20 個の大気泡に対しての平均値である。次に、各測定

パラメータの算出方法を述べる。液体スラグ中のボイド率 α_{bL} と大気泡部のボイド率 α_{bG} はそれぞれ定電流法により得られたボイド率波形の下端および上端付近(下端と上端のそれぞれのボイド率から $\pm 3\%$ の範囲)のそれぞれの平均ボイド率から算出した。また、大気泡周りの液膜厚さ δ は、液膜内に微細な気泡が存在しないと仮定すると、大気泡部のボイド率 α_{bG} の測定値を次式に代入して求めることができる。

$$\delta = (1 - \sqrt{\alpha_{bG}}) d / 2 \quad (1)$$

さらに、2組の点電極プローブ(電極間距離を10 mm)から出力される時系列信号の遅れ時間から大気泡の上昇速度 u_B を算出した。同時に、1組の点電極プローブの信号を設定したスライス電圧により二値化し、全計測時間 T における大気泡の個数 N_G を求め、下の式(2)により、スラグユニット長さ L_T を求めた。

$$L_T = u_B \frac{T}{N_G} \quad (2)$$

次に、式(3)により大気泡長さ L_G を求めた。ただし、 $T_G(i)$ は1個ずつの大気泡内に点電極が存在する時間である。

$$L_G = \frac{\sum T_G(i)}{T} L_T = u_B \frac{\sum T_G(i)}{N_G} \quad (i=1, 2, \dots, N_G) \quad (3)$$

さらに、大気泡長さ L_G とスラグユニット長さ L_T の比 L_G/L_T を求めた。

3. 実験結果

3.1 流動状態とボイド率波形

Fig. 2に、液相に3種類の異なる液体を用いた場合の流動状態を比較する。これらは $j_L = 1.0$ m/s、 $j_G = 2.0$ m/sにおける5 mm管でのスラグ流の写真である。PLE液とGI液の場合、水の場合よりも液体スラグ部および大気泡周りの液膜内に、微細な気泡が多数存在した。

Fig. 3に、5 mm管に対する定電流法によるボイド率波形の比較を示す。横軸は時間 T 、左縦軸はボイド率 α_G 、右縦軸は式(1)による液膜厚さ δ である。液相がPLE液の場合、水の場合よりも液体スラグ部と大気泡部のボイド率が高くなる傾向があった。これは、Fig. 2に示したように、PLE

Fig. 2 Slug flows in 5 mm i.d. pipe for three different liquids ($j_L=1.0$ m/s, $j_G=2.0$ m/s).

Fig. 3 Void signals from paired electrodes in the constant current method in 5 mm i.d. pipe ($j_L=0.2$ m/s, $j_G=5.0$ m/s).

液では表面張力の低下により液体スラグ部と大気泡部の液膜に、微細気泡が混入したためと考えられる。液相がGI液の場合、水よりも液体スラグ部のボイド率は増加し、大気泡部のボイド率が減少した。これは、GI液では液粘性の増加に伴い、大気泡部の液膜厚さが増加したこと、および、液体スラグ部に微小気泡が混入したためである。

3.2 液体スラグ中のボイド率

Fig. 4(a), (b)に液体スラグ中のボイド率 α_{bL} の実験結果を示す。5 mm管、9 mm管ともに、液体スラグ中のボイド率 α_{bL} は、液相の見かけ速度 j_L の減少および気相の見かけ速度 j_G の増加とともに増加する傾向があった。水と比較すると、表面張力が低いPLE液で1.7~5.8倍程度、高粘性のGI

液で 1.5~7.6 倍程度 α_{bL} は大きくなった。

3.3 大気泡部のボイド率

Fig. 5(a), (b)に大気泡部のボイド率 α_{bG} の実験結果を示す。5 mm 管、9 mm 管ともに、大気泡部のボイド率 α_{bG} は、液相の見かけ速度 j_L の減少および気相の見かけ速度 j_G の増加とともに増加する傾向があった。水と比較して、表面張力が低い PLE 液のほうが水よりも大気泡周りの相対液膜厚さ δ/d は平均 21 %減少した。また、高粘性の GI 液では、およそ j_L が 1 m/s 未満の領域では α_{bG} は平均 10 %程度低く、それ以上の領域では α_{bG} は平均 10 %程度高くなった。なお、古川ら[10]の 19.2 mm 管に関する液膜厚さ δ の測定結果から大気泡部のボイド率を求めると、大気泡部のボイド率は $\mu_L=18.3$ mPa・s のグリセリン水溶液では水よりも約 18%減少していた。したがって、管径が大きいほうが、大気泡部のボイド率の減少は大きいといえる。

3.4 大気泡周りの相対液膜厚さ

Fig. 6(a), (b)に大気泡周りの相対液膜厚さ δ/d

の実験結果を示す。5 mm 管、9 mm 管ともに、大気泡周りの相対液膜厚さ δ/d は、液相の見かけ速度 j_L の増加および気相の見かけ速度 j_G の減少とともに増加する傾向があった。表面張力が低い PLE 液のほうが水よりも大気泡周りの相対液膜厚さ δ/d は平均 21 %減少した。また、高粘性の GI 液では、 j_L が 1 m/s 未満の領域では δ/d は平均 40%程度高く、それ以上の領域では α_{bG} は平均 10%程度低くなった。

3.5 大気泡長さとスラグユニット長さの比

Fig. 7(a), (b)に、スラグユニット長さに対する大気泡長さの比 L_G/L_T の実験結果を示す。5 mm 管、9 mm 管ともに、 L_G/L_T は気相の見かけ速度 j_G の増加および液相の見かけ速度 j_L の減少とともに増加する傾向があった。一部の領域を除き、5、9 mm 管ともに、表面張力低下の影響はあまり見られなかった。また、高粘性の GI 液のほうが水よりも L_G/L_T は大きい傾向があった。これは GI 液のほうが水よりも大気泡長さが長かったためである。し

Fig. 4 Void fraction in liquid slug section ((a) 5 mm i.d. pipe and (b) 9 mm i.d. pipe).

Fig. 5 Void fraction in large gas bubble section ((a) 5 mm i.d. pipe and (b) 9 mm i.d. pipe).

Fig. 6 The ratio of liquid film thickness around large gas bubble to pipe diameter ((a) 5 mm i.d. pipe and (b) 9 mm i.d. pipe).

かし、この傾向は古川ら[16]の実験結果とは逆の傾向であった。

4. 実験値と計算値の比較

4.1 液体スラグ中のボイド率, α_{bL}

Fig. 8 に、 α_{bL} に関して、後出の本提案式に加えて赤川ら[7]と Fernandes[8]の予測式による計算値と本実験値との比較結果を示す。また、Table 3 に、上記の予測式に加えて二流体モデルの RELAP5/MOD2[9]で求めた計算値について、式(4)と式(5)より算出した平均誤差 e_M と二乗根平均誤差 e_{RMS} を示す。

$$e_M = \frac{\sum_i^N \{ (Cal_i - Exp_i) / Exp_i \}}{N} \times 100\% \quad (4)$$

$$e_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_i^N \{ (Cal_i - Exp_i) / Exp_i \}^2}{N}} \times 100\% \quad (5)$$

Fig. 7 The ratio of large gas bubble length to slug unit length((a)5 mm i.d. pipe and(b)9 mm i.d. pipe).

Fig. 8 Comparison of void fraction in liquid slug section between experiment and calculation.

ここで、赤川ら、Fernandes と RELAP5/MOD2 の式には表面張力と液粘性の項を含んでおらず、それらによる計算値と本実験値の一致は良くない。

特に、RELAP5/MOD2 における α_{bL} の式は本実験値（水-5mm 管を除く）をおよそ 1/100 程度に過小評価した（図省略）。これは平均ボイド率 α の増加に伴い α_{bL} は減少するように与えており、3.2 節で述べた本実験結果とは逆の傾向をとる。このことが不一致の一因と考えられる。

そこで、管内径、表面張力、液粘性の違い等による影響を考慮し、気体体積流量比 $\beta (=j_G/(j_G+j_L))$ 、水(30℃)との表面張力比 σ_L/σ_W 、水との液粘性比 μ_L/μ_W 、エトベス数 $Eu(=(\rho_L-\rho_G)gd^2/\sigma_L)$ という四つの無次元数を用いて、本実験値から次式(6)を導出した。

Table 3 Mean and RMS errors in the prediction of void fraction in liquid slug section.

Correlation	Liquid Error (%)	W		PLE		GI		Ave. Error (%)
		5 (mm)	9 (mm)	5 (mm)	9 (mm)	5 (mm)	9 (mm)	
New correlation	e_M	33.5	14.8	-12.8	-10.6	-8.6	12.3	4.0
	e_{RMS}	59.6	37.3	30.8	23.3	15.4	21.8	33.8
Akagawa et al.[7]	e_M	130.7	71.8	6.3	-2.9	-27.1	-18.2	21.6
	e_{RMS}	159.4	89.5	38.7	20.3	28.9	19.9	75.3
Fernandes [8]	e_M	112.9	16.5	-32.9	-49.5	-43.1	-46.0	-9.9
	e_{RMS}	148.8	28.0	38.1	50.4	43.4	46.5	71.3
RELAP5 /MOD2 [9]	e_M	43.1	-98.8	-96.5	-100.0	-97.0	-99.0	-75.0
	e_{RMS}	333.3	98.8	96.9	100.0	97.2	99.0	161.7

Fig. 9 Comparison of void fraction in large gas bubble section between experiment and calculation.

Table 4 Mean and RMS errors in the prediction of void fraction in large gas bubble section.

Correlation	Liquid	W		PLE		GI		Ave. Error (%)
	Error (%)	Pipe diameter (mm)						
	5	9	5	9	5	9		
New correlation	e_M	-0.5	-1.0	1.3	3.2	5.0	-0.9	1.3
	e_{RMS}	13.2	12.9	5.4	7.4	21.0	11.4	13.2
RELAP5 /MOD2[9]	e_M	-23.4	-16.5	-14.0	-5.7	-6.7	-5.5	-12.0
	e_{RMS}	36.6	17.5	16.7	6.8	22.6	12.2	21.3

$$\alpha_{bL} = 0.193\beta^{1.434}(\sigma_L/\sigma_W)^{-1.03}(\mu_L/\mu_W)^{0.239}Eu^{0.232} \quad (6)$$

その結果、式(6)による計算値は、数点を除き、本実験値とおおよそ $\pm 30\%$ で一致した。

4.2 大気泡のボイド率, α_{bG}

Fig. 9 に、 α_{bG} の実験値と計算値の比較を示す。また、Table 4 に、平均誤差 e_M と二乗根平均誤差 e_{RMS} を示す。RELAP5/MOD2 [9]中の式で求めた計算値は実験値を 10~30 %程度過小評価した。また、Griffith ら[10]、Nicklin ら[11]が提案した α_{bG} の計算値、4.3 節で後述する赤川ら[12]のスラグ流の大気泡周りの液膜厚さの式で δ を求め、その δ を式 (1)に代入して算出した α_{bG} の計算値を比較のため図中に異なる線で示す。赤川らによる計算値は平均的には実験値と一致しているものの、気/液の流量比や物性値が α_{bG} に及ぼす影響を表すことができない。そこで、本実験値から次式(7)を導出した。

$$\alpha_{bG} = 0.700\beta^{0.576}(\sigma_L/\sigma_W)^{-0.250}(\mu_L/\mu_W)^{-0.010}Eu^{0.037} \quad (7)$$

その結果、式(7)による計算値は本実験値と約 $\pm 20\%$ で一致した。

Fig. 10 Comparison of liquid film thickness ratio around large gas bubble between experiment and calculation.

Table 5 Mean and RMS errors in the prediction of liquid film thickness ratio around large gas bubble.

Correlation	Liquid	W		PLE		GI		Ave. Error (%)
	Error (%)	Pipe diameter (mm)						
	5	9	5	9	5	9		
New correlation	e_M	16.8	20.8	-1.3	-4.4	0.8	9.8	6.9
	e_{RMS}	40.4	42.4	13.9	12.3	33.5	34.0	31.8
RELAP5 /MOD2[9]	e_M	55.2	45.3	41.5	26.5	25.5	21.8	36.0
	e_{RMS}	76.1	47.5	43.9	33.9	54.8	43.1	52.2

Fig. 11 Comparison of large gas bubble length ratio experiment and calculation.

Table 6 Mean and RMS errors in the prediction of large gas bubble length ratio.

Correlation	Liquid	W		PLE		GI		Ave.
	Error	Pipe diameter (mm)						Error
	(%)	5	9	5	9	5	9	(%)
New correlation	e_M	-0.9	-0.1	-0.1	-0.8	0.4	-0.5	-0.3
	e_{RMS}	7.7	5.5	6.3	5.6	4.7	12.2	8.3
Sato et al.[13]	e_M	-15.2	-19.0	-11.5	-13.4	-31.3	-20.2	-18.6
	e_{RMS}	21.2	22.9	18.1	16.2	35.0	25.8	24.2
Kariyasaki [14]	e_M	-4.3	0.4	-1.8	0.9	0.0	2.6	-0.1
	e_{RMS}	9.7	5.4	7.3	5.5	3.3	10.6	8.0
Sakaguchi et al.[15]	e_M	52.8	4.8	64.8	18.7	-160.1	-190.0	-58.1
	e_{RMS}	121.8	17.2	74.6	23.0	169.8	215.0	144.6

4.3 大気泡周りの相対液膜厚さ, δd

Fig. 10 に、 δd の実験値と計算値の比較を示す。ここで、 δd の計算値は 4.2 節で述べた大気泡による体積率 α_{bG} の既存の式および式(7)を式(1)に代入して算出した。また、Table 5 に、平均誤差 e_M と二乗根平均誤差 e_{RMS} を示す。RELAP5/MOD2 [9] は平均 36 % 程度、実験値を過大評価した。また、前述した Griffith ら [10]、Nicklin ら [11] が提案した α_{bG} 値から算出した δd や赤川ら [12] の式による液膜厚さ δ を d で割った δd を比較のために図中に示す。赤川らによる計算値は平均的には実験値と一致しているが、気/液の流量比や物性値の影響を表現できない。それに対し、式(7)と式(1)を用いた計算値は本実験値と RMS 値 31.8% で一致した。

4.4 大気泡長さとスラグユニット長さの比, L_G/L_T

Fig. 11 に、 L_G/L_T の実験値と計算値の比較を示す。管径、表面張力、液粘性の違いによらず、佐藤ら [13] の式は実験値を平均 19% 程度過小評価したが、仮屋崎 [14] の式 ($k = 0.73$ の値を使用) とは

かなり良い一致を示した。しかし、管径や表面張力、液粘性の影響を考慮した坂口ら [15] の式との一致は不十分であった。そこで、本実験値から管径や表面張力、液粘性の影響を考慮した式(8)を導出した。

$$L_G/L_T = 1.03\beta^{0.514}(\sigma_L/\sigma_W)^{-0.0138}(\mu_L/\mu_W)^{-0.0089}Eo^{-0.0284} \quad (8)$$

その結果、式(8)による計算値は液物性値や管径に関係なく本実験値と RMS 値 8.3% で一致した。

5. 結 言

5 mm と 9 mm の垂直細円管と 3 種類の液体を用いて空気-液体二相流の実験を行い、スラグ流におけるスラグ構造に及ぼす表面張力低下と液粘性増加の影響を明らかにした。さらに、既存の式ならびに四つの無次元数を用いた本実験式による計算値と本実験値を比較した。得られた主な知見は以下の通りである。

- (1) 表面張力が低くなると、液体スラグ中のボイド率と大気泡部のボイド率は共に増加し、大気泡周りの液膜厚さは減少した。しかし、大気泡長さとスラグユニット長さの比については、表面張力低下の影響はあまり見られなかった。
- (2) 液粘性が高くなると、液体スラグ中のボイド率は増加した。しかし、大気泡部のボイド率と大気泡周りの液膜厚さについて、 $j_L = 0.5$ m/s を境に液粘性の影響は異なった。また、大気泡長さとスラグユニット長さの比は、増加する傾向があった。
- (3) 液体スラグ中のボイド率、大気泡部のボイド率、大気泡周りの液膜厚さ、大気泡長さとスラグユニット長さの比について、それぞれ気体体積流量比、水との表面張力比、水との液粘性比、エトベス数の四つの無次元数で表わす実験式を提案した。なお、液体スラグ中のボイド率、大気泡部のボイド率、大気泡周りの液膜厚さは、本実験式(6)、(7)および式(7)を式(1)に代入した式が最も良い予測精度であった。また、大気泡長さとスラグユニット長さの比については、仮屋崎の式と本実験式(8)が同程度に高い予測精度であった。

謝 辞

本研究に協力いただいた有明高専専攻科生産情報システム工学専攻学生の三原徳馬氏、ならびに熊本大学工学部機械システム工学科 (旧知能生産システム工学科) 流体工学研究室の学生諸君に

感謝の意を表する。

Nomenclature

Cal	: calculated value	[-]
d	: inner diameter of pipe	[m]
e	: error	[%]
Eo	: Eötvös number	[-]
Exp	: experimental value	[-]
g	: gravitational acceleration	[m/s ²]
j	: volumetric flux	[m/s]
L	: length	[m]
N	: number	[-]
T	: time	[s]
u	: mean velocity	[m/s]

Greek letters

α	: gas volume fraction	[-]
α_{bG}	: gas volume fraction in large gas bubble section	[-]
α_{bL}	: gas volume fraction in liquid slug section	[-]
β	: gas volume flow rate ratio	[-]
δ	: liquid film thickness	[m]
μ	: viscosity	[Pa·s]
ρ	: density	[kg/m ³]
σ	: surface tension	[N/m]

Subscripts

G	: gas phase
L	: liquid phase
M	: mean
RMS	: root-mean-square
T	: total

参考文献

- [1] Kureta, M., Yoshida, H., Tamai, H., Ohnuki, A. and Akimoto, H., Thermal-Hydraulic Estimation in Tight-Lattice Rod Bundles for Development of the Innovative Water Reactor for Flexible Fuel Cycle, Progress in Multiphase Flow Research, Vol. 3, 99-109 (2008).
- [2] Wang, C. C., Chiang, S. K., Chang, Y. J. and Chung, T. W., Two-Phase Flow Resistance of Refrigerants R-22, R-410A and R-407C in Small Diameter Tubes, Trans. Inst. Chem. Engr., Vol. 79, Part A, 553-560 (2001).
- [3] Ong, C. L. and Thome, J. R., Flow boiling heat transfer of R134a, R236fa and R245fa in a Horizontal 1.030mm Circular Channel, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 33(4), 651-663 (2009).
- [4] Tsubone, H., Kawahara A., Sadatomi M. and Nariyasu H., Flow Characteristics of Air-Magnetic Fluid Two-Phase Flow in Vertical Small Diameter Tubes, Japanese Journal of Multiphase Flow, Vol. 15(4), 432-440 (2001).
- [5] Sadatomi, M., Tsubone H., Kawahara, A. and Shiota H., Effects of Surface Tension on Flow Characteristics of Two-Phase Annular Flow in Vertical Small Diameter Pipes, Progress in Multiphase Flow Research, Vol. 1, 189-196 (2006).
- [6] Tsubone, H., Sadatomi, M., Kawahara, A. and Okano, S., Effects of Liquid Viscosity and Surface Tension on Bubble Diameter and Interfacial Friction Force of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Vertical Small Diameter Tube, Proceedings of the 14th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-14), 563-568 (2003).
- [7] Akagawa, K. and Sakaguchi, T., Fluctuation of Void Ratio in a Two-Phase Flow: 4th Report, Small Bubbles in Liquid Slugs, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 31(224), 608-614 (1965).
- [8] Fernandes, R. C., Experimental and Theoretical Studies of Isothermal Upward Gas-Liquid Flows in Vertical Tubes, Ph.D. Thesis, University of Houston (1981).
- [9] Ransom, V. H., Wagner R. J., Trapp, J. A., Feinauer, L. R., Johnsen, G. W., Kiser, D. M. and Riemke, R. A., RELAP5/MOD2 Code Manual, NUREG/CR-4312, EGG-2396 (1985).
- [10] Griffith, P. and Wallis, G. B., Two-Phase Slug Flow, Trans. ASME Ser. C, 83-3, 307-320 (1961).
- [11] Nicklin, D. J., Wilke, J. O. and Davidson, J. F., Two-Phase Flow in Vertical Tubes, Trans. Inst. Chem. Engr., 40-1, 61-68 (1962).
- [12] Akagawa, K. and Sakaguchi, T., Fluctuation of Void Ratio in a Two-Phase Flow: 2nd Report, Analysis of Flow Configuration Considering the Existence of Small Bubbles in Liquid Slugs, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 31(224), 594-600 (1965).
- [13] Sato, Y., Sadatomi, M. and Kanazaki, K., Study on Flow Configuration of Air-Water Slug Flow in a Vertical Pipe (in Japanese), Preprint of JSME, No. 818-11, 98-100 (1981).
- [14] Kariyasaki, A., Fundamental Study on Gas-Liquid Two-Phase Flow in Small Pipes (in Japanese), Ph.D. Thesis, Kyushu University (1996).
- [15] Sakaguchi, T., Hamaguchi, H., Shakutsui, H., Tomiyama, A., Minagawa, H. and Hosokawa, S., Estimations of Large Bubble Length, Liquid Slug Length, Slug Unit Length and Slug Period of Gas-Liquid Two-Phase Slug Flow in Vertical Pipes, Japanese Journal of Multiphase Flow, Vol. 15(3), 288-295 (2001).
- [16] Furukawa, T. and Fukano, T., Effect of Liquid Viscosity on a Large Gas Bubble Velocity in a Stagnant Liquid and Flow Parameters in a Gas-Liquid Slug Flow, Japanese Journal of Multiphase Flow, Vol. 10(2), 154-170 (1996).