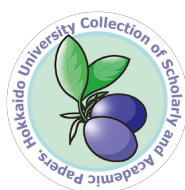
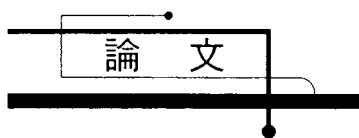




Title	急縮小部を有する微小流路内気液二相流の気泡速度に及ぼす流路高さの影響
Author(s)	深澤, 慧; 熊谷, 剛彦; 大参, 達也 他
Citation	混相流, 27(2), 168-174 https://doi.org/10.3811/jjmf.27.168
Issue Date	2013-06-15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/74953
Rights	著作権は日本混相流学会に帰属する
Type	journal article
File Information	jjmf 27(2) 168.pdf





急縮小部を有する微小流路内気液二相流の気泡速度に 及ぼす流路高さの影響*

Effect of Small Rectangular Channel Height on Bubble Moving Velocity in Gas-liquid
Two-phase Flow through Sudden Contraction

深 澤 慧 ** 熊 谷 剛 彦 *** 大 参 達 也 ***
FUKASAWA SATOSHI KUMAGAI TAKEHIKO OHMI TATSUYA

岩 井 一 彦 *** 井 口 学 **
IWAI KAZUHIKO IGUCHI MANABU

Abstract An experimental investigation is carried out on the effects of a sudden contraction on the characteristics of an air-water two-phase flow in a millimeter-scale rectangular channel. The results reveal that the flow pattern transition types caused by sudden contraction can be basically classified into five. The scatter of the leading edge velocity of a bubble observed downstream of the sudden contraction increases as the channel height becomes smaller than a certain critical value. This phenomenon is not beneficial for practical usage of gas-liquid two-phase flows in micro channels.

Keywords: Gas-liquid two-phase flow, Sudden contraction, Millimeter-scale channel, Flow pattern, Bubble velocity

1. 緒 言

近年プレート式熱交換器が注目されている[1,2]。これは、従来のチューブ式熱交換機と比較して小さい体積で広い表面積を得ることができ、装置の小型化が可能となるためである。装置の小型化に伴い、配管径もミリスケールからマイクロスケールのものが増えている。ただし、このような装置で使用されている流路の結合部においては流路の断面積変化が起こる場合が多いが、断面

積変化を伴うミリスケール矩形流路における気液二相流の研究は未だに少ない[3-9]。

また、このような流路断面を変化させたミリスケール流路の研究は鉄鋼精錬プロセスの改良に関する基礎研究としても有用である。例えば、鉄鋼精錬プロセスの連続 casting 設備に設置されている浸漬ノズルには溶鋼中のアルミナなどの非金属介在物のノズル壁面への付着を抑制するために Ar ガスが吹き込まれているが、Ar ガスが溶鋼

* 2013.2.15 受付

** 北海道大学大学院工学院材料科学専攻 〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目
TEL: 011-706-6338 E-mail:satoshif@eng.hokudai.ac.jp

*** 北海道大学大学院工学研究院材料科学部門

流量調整用のスライディングゲートで小さな気泡に分裂すると溶鋼中でピンホール欠陥となり、かえって鋼の品質低下をもたらす。そこで溶鋼中で分裂する気泡についての知見が必要となるが、実機を用いた実験は溶鋼が高温かつ不透明であるため困難であり、溶鋼と動粘度の値が近く透明な水を用いた、いわゆる水モデル実験（溶鋼の動粘度： $0.929 \text{ mm}^2/\text{s}$ at 1973 K、水の動粘度： $0.891 \text{ mm}^2/\text{s}$ at 298 K）が広く用いられている[10]。ところが、溶鋼の表面張力が水の表面張力と比較して非常に大きく（溶鋼の表面張力：約 1000 mN/m at 1973 K、水の表面張力： 72.75 mN/m at 298 K）、溶鋼とアルゴンガスからなる気液二相流の浸漬ノズルの壁面近傍における挙動を調査する際には慣性力や浮力などの体積力だけでなく表面張力による力についても適切に考慮しなければならない。従来スケールの流路と比較して慣性力や浮力などの体積力よりも表面張力による力の影響が相対的に大きくなるミリスケール流路を用いることは表面張力が相対的に大きな流れについて基礎的な知見を得る目的にかなっている。なお、本実験は一般的に用いられている濡れの良い流路で実験を行った。

以上のことから、本実験ではミリスケールの扁平矩形流路において流路断面を急縮小させ、流路高さが気液二相流の流動様式ならびに急縮小部における気泡の速度変化に及ぼす影響を調査した。

2. 実験装置と実験方法

Fig.1 に実験装置の概略を示す。作動流体として液相にイオン交換水、気相に空気を用いた。水をタンクからポンプにより汲みあげ、流量をバルブによって制御し、流路の左側の端面から導入した。また、空気をコンプレッサーにより供給した。空気の流量をマスフローコントローラーによって制御し、流路底面に設置されたノズルから流路に導入して、試験流路内で気液二相流を形成させた。試験流路通過後、気液二相流を貯水タンクに放出し、水と空気を分離して水のみを循環させた。

本実験で用いた透明試験流路の概略を Fig.2 に示す。扁平な矩形試験流路は水平に置かれている。試験流路の長さは 1100 mm であり、流路底面に、空気導入口である内径 1 mm の円形ノズルを水導入口から 50 mm 下流に設置した。

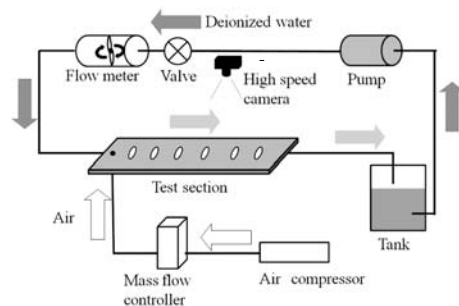


Fig. 1 Schematic diagram of experimental Apparatus.

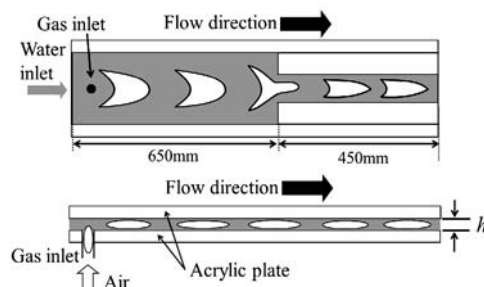


Fig.2 Schematic diagram of test section
(Upper: top view, Lower: front view,
 $W_1=50 \text{ mm}$, $W_2=10, 20, 40 \text{ mm}$,
 $h=0.5, 1.0, 2.0 \text{ mm}$).

十分な助走距離を得るために流路断面の急縮小部を水導入口から 650 mm 下流に設置した。急縮小部上流の流路幅 W_1 を 50 mm と固定し、急縮小部下流の流路幅 W_2 を $10, 20, 40 \text{ mm}$ の3種類と変化させた。ここで W_2/W_1 を急縮小比 α と定義した。 $0.5, 1.0, 2.0 \text{ mm}$ の3種類の流路高さ h で実験を行った。また、空気の流量 $Q_g \text{ cm}^3/\text{s}$ と水の流量 $Q_w \text{ cm}^3/\text{s}$ を空塔速度に換算して $j_g=5\sim80 \text{ cm/s}$, $j_w=5\sim80 \text{ cm/s}$ とし、気液二相流の流動様式を観察した。ここで、空塔速度は各流量 Q_g , Q_w を上流側の流路断面積 $W_1 h$ で除したものである。流動様式は目視とハイスピードカメラを用いて判別した。撮影速度は流動様式を判別する際には 500 fps 、気泡先端速度を計測する際には 7500 fps とした。また、ハイスピードカメラを用いて撮影した画像から気泡先端の移動速度を求めた。気泡速度については各条件で10回ずつ計測を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 急縮小流路における流動様式

まず、断面積変化のない流路において一般的に知られている3つの典型的な流動様式を Fig.3 に示す[11]。周知のように、①の気泡流 (Bubbly flow) は、流路内の液相が連続相であり、小さな気泡が分散して流れる流動様式である。この流動様式は気体空塔速度が比較的に小さい場合に観察された。②のスラグ流 (Slug flow) は、流路内の液相が連続相であり、大きな気泡が分散して流れる流動様式である。本実験では気泡流との違いとして、流れ方向の気泡長さが流路幅よりも大きいものをスラグ流と定義した。③の環状流 (Annular flow) は、流路内の気相、液相共に連続相で流れる流動様式である。この流動様式は気体空塔速度が比較的大きい場合に観察された。

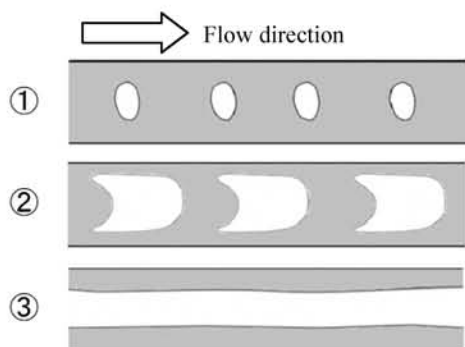


Fig.3 Top view images of basic three flow patterns (① Bubbly flow, ② Slug flow, ③ Annular flow).

本実験において観察された急縮小流路の基本的な5つの流動様式変化を Fig.4 に模式的に示す。その結果、流動様式変化は水と空気の水空速度の比率及び急縮小比 α によって決まるということがわかった。①の B-B は急縮小部前後でともに気泡流となる流動様式変化である。この流動様式変化は水の空塔速度と比較して空気の水空速度が小さく急縮小比 α が大きい場合に多く観察された。②の B-S は、急縮小部前まで気泡流であったものが急縮小後にスラグ流となる流動様式変化である。この流動様式変化は水の空塔速度と比較して空気の水空速度が小さく急縮小比 α が小さい場合に多く観察された。③の S-S は急縮小部前後でともにスラグ流となる流動様式変化である。この流動様式変化は水と空気の水空速度比 j_w/j_g が1に近

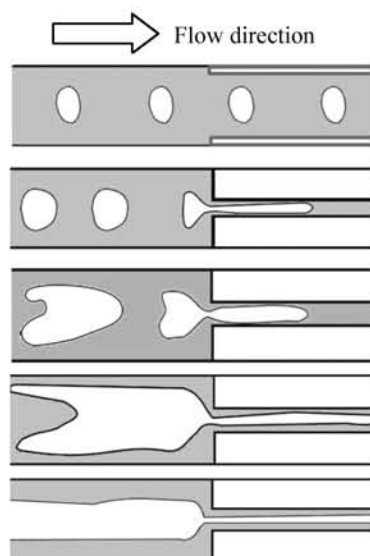


Fig.4 Typical flow pattern transition types through sudden contraction (From top to bottom: ① B-B, ② B-S, ③ S-S, ④ S-A, ⑤ A-A).

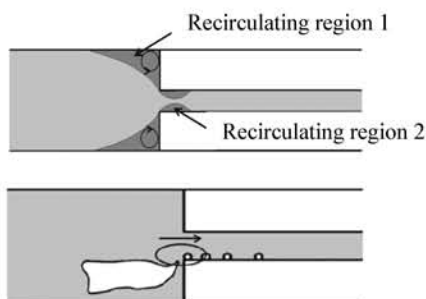


Fig.5 Bubble breakup at the corner of sudden contraction.

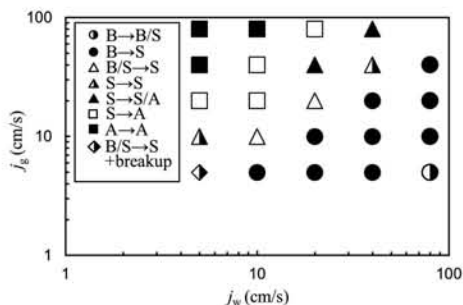


Fig.6 Flow pattern transition map for $h=2.0\text{mm}$ and $\alpha=0.2$.

い場合に観察された。④の S-A という流動様式は急縮小部の前までスラグ流であったものが急縮小後に環状流となる流動様式変化である。この流動様式変化は水の空塔速度と比較して空気空塔速度が大きく、急縮小比 α が小さい場合に多く観察された。⑤の A-A という流動様式は急縮小部前後でともに環状流となる流動様式変化である。この流動様式変化は水の空塔速度と比較して空気空塔速度が非常に大きい場合に観察された。また、これらの5つの流動様式変化とは別に一部の気泡が急縮小部で非常に小さな気泡に分裂をするという現象がみられた。この現象は水と空気空塔速度がともに小さいときにみられた。気泡が Fig.5 で示している循環流領域1に入り込み、閉じ込まれて停留し、その際気泡の一部が急縮小部に入る水によって大きな流動抵抗を受け、分裂したと考えられる。この根拠については以下のように説明できよう。水中に水平に設置した平板上の乱流境界層中へ平板にあけた小さな孔から空気を吹き込むと、孔の出口で生成する気泡の数は近寄り流れの速度、すなわち主流の速度が大きくなるほど多くなる。これは気泡に働く流動抵抗の影響が強くなるためである[12]。本実験の場合も、急縮小部直前の逆流循環部に取り込まれた気泡の一部が速度の大きな流れに接しているところで気泡が分裂していることから、気泡の分裂は流動抵抗の影響であると判断できる。

3.2 流動様式変化図

前節で示した流動様式変化を踏まえ流動様式変化図を作成した。Fig.6 に流路高さ $h=2.0$ mm、急縮小比 $\alpha=0.2$ の場合の流動様式変化図を示す。横軸に水の空塔速度 j_w 、縦軸に空気空塔速度 j_g をとった。ここで二つの流動様式、例えば気泡流とスラグ流の両方がみられた場合、B/S と表記している。また、気泡の一部が分裂した流動様式は菱形で示している。この流動様式変化図から空気空塔速度 j_g を水の空塔速度 j_w よりも大きくしていくと主に気泡流がみられる流動様式から主にスラグ流がみられる流動様式を経て環状流がみられる流動様式に変化していくことがわかる。

Fig.7 に流路高さ $h=0.5$ mm、急縮小比 $\alpha=0.2$ の流動様式変化図を示す。この図と Fig.6 との比較から、流路高さを小さくすることによる流動様式変化に大きな違いはないが、気泡の一部が多く

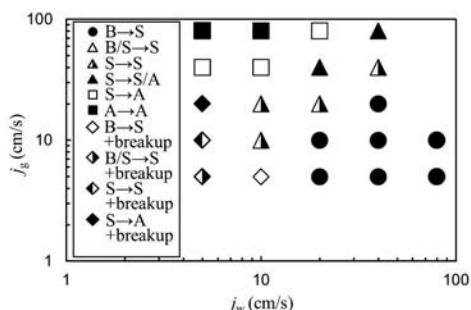


Fig.7 Flow pattern transition map for $h=0.5$ mm and $\alpha=0.2$.

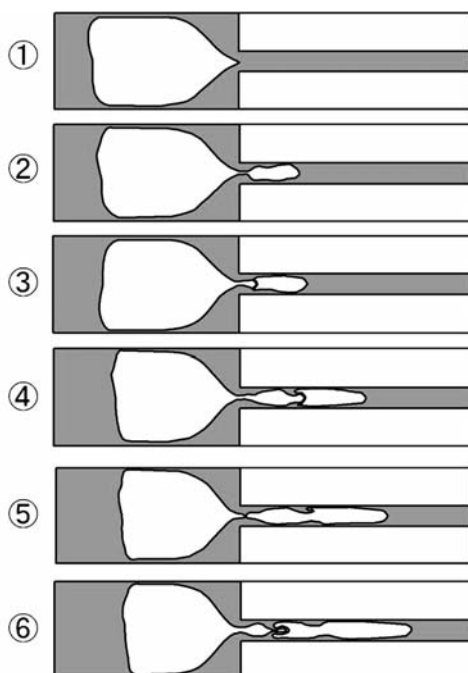


Fig.8 Disintegration of bubble passing through sudden contraction for $h=2.0$ mm, $\alpha=0.2$, $j_g = 20$ cm/s and $j_w = 20$ cm/s.

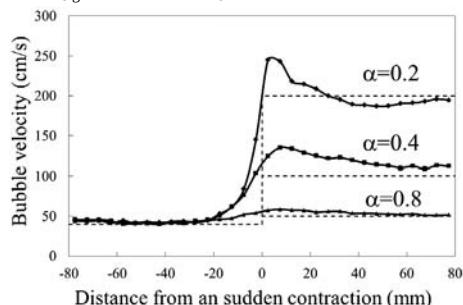


Fig.9 Bubble velocity changes for three contraction ratios ($h=2.0$ mm, $j_g = 20$ cm/s, $j_w = 20$ cm/s).

小さな気泡に分裂する領域が増えていることがわかる。これは流路高さを小さくすることで、後述するように気泡内の圧力が高くなるため、流路内壁から受ける拘束力が強くなって循環流領域 1 (Fig.5 参照) で気泡をとどめやすくなり、分裂が起こる機会が増えたためである。

3.3 気泡移動速度

ハイスピードカメラを用いて、気泡が急縮小部を通過する際の挙動を観察した。その結果の一例を Fig.8 に模式的に示す。流路高さ $h=0.5$ mm、急縮小比 $\alpha=0.2$ 、空気空塔速度 $j_g=20$ cm/s、水空塔速度 $j_w=20$ cm/s である。まず、①ではスラグ気泡と呼ばれる気泡が急縮小部にさしかかり先端が尖がってくる。②では気泡の先端は急縮小部通過後に左右に広がり、急縮小部付近では気泡にくびれができる。②と③の間では気泡のくびれが少しずつ細くなり気泡が分裂する。この分裂した先頭の気泡を 1 回目の分裂気泡と呼ぶ。③と④ではスラグ気泡の先端が再び成長し膨らむ一方、流路入り口では新たにくびれができる。④と⑤では 1 回目の分裂気泡とスラグ気泡の先端は合体するが、新たに入り口近傍にできたくびれから気泡が分裂する。この分裂した先頭の気泡 (1 回目の分裂気泡とスラグ気泡の一部) を 2 回目の分裂気泡と呼ぶ。⑥ではスラグ気泡の先端が②と同様に広がり急縮小部付近ではくびれができる。このように分裂した気泡が先行する気泡と合体するという現象を繰り返す。その後気泡はスラグ流として流れる。

ハイスピードカメラを用いて撮影した画像から気泡先端の移動速度を求めた。Fig.9 に流路高さ $h=2.0$ mm、空気空塔速度 $j_g=20$ cm/s、水の空塔速度 $j_w=20$ cm/s の条件での 10 個の気泡についての平均気泡移動速度を急縮小比 $\alpha=0.2, 0.4, 0.8$ について調査したものを示す。横軸に急縮小部からの距離、縦軸に気泡移動速度をとっている。また、急縮小前の黒い点線は水の空塔速度と空気空塔速度の和として定義される全空塔速度 j_t ($=j_w+j_g$) を示しており、急縮小後の黒い点線は細い管内の全空塔速度 (j_t/α) を表している。 $\alpha=0.2$ のグラフに注目すると、気泡移動速度が急縮小部直前から直後にかけて急に上昇し、その後低下して空塔速度に漸近している。これは、気泡にくびれができたことから推察できる。すなわち、Fig.5 に示す様に循環流領域 2 ができることによって流路の

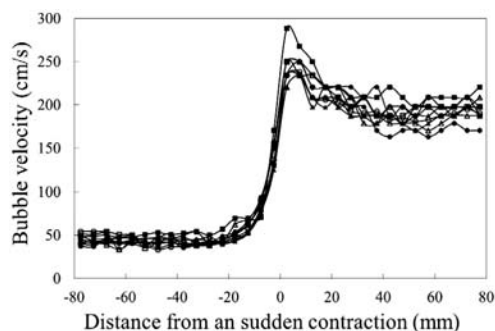


Fig.10 Bubble velocity changes for $h=2.0$ mm, $\alpha=0.2$, $j_g=20$ cm/s and $j_w=20$ cm/s.

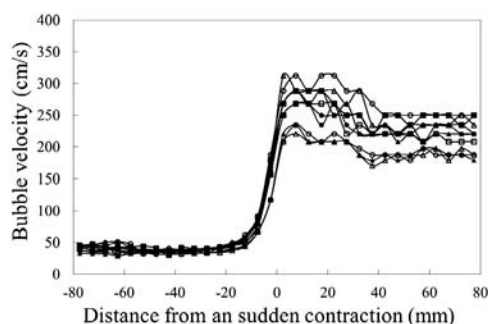


Fig.11 Bubble velocity changes for $h=1.0$ mm, $\alpha=0.2$, $j_g=20$ cm/s and $j_w=20$ cm/s.

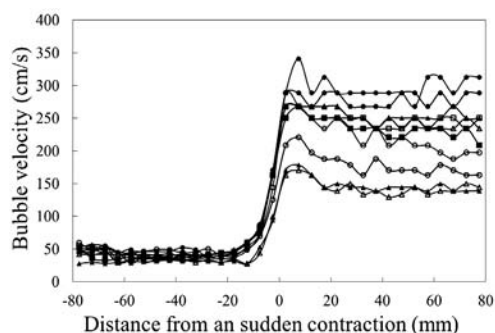


Fig.12 Bubble velocity changes for $h=0.5$ mm, $\alpha=0.2$, $j_g=20$ cm/s and $j_w=20$ cm/s.

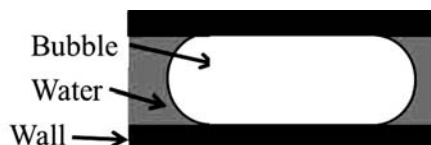


Fig.13 Bubble for small h .

有効断面積が狭くなることから気泡移動速度が大幅に上昇し、空塔速度よりも大きくなった[13]。

Fig.10 に $h=2.0$ mm, $\alpha=0.2$, $j_g=20$ cm/s, $j_w=20$ cm/s の場合の各気泡の移動速度を示す。また、Fig.11, 12 にそれぞれ $h=1.0, 2.0$ mm の結果を示す。流路高さ h を小さくすることによって気泡移動速度のばらつきが大きくなっており、それぞれの偏差は $h=2.0$ mm から順に $\pm 14\%$, $\pm 16\%$, $\pm 43\%$ となり、特に $h=0.5$ mm の気泡速度のばらつきが大きくなっていることがわかる。

気泡の内外の圧力差 Δp は一般に次式で与えられる。

$$\Delta p = \sigma(1/R_1 + 1/R_2) \quad (1)$$

ここで、 R_1, R_2 は曲率半径である。いま、扁平矩形流路内に広がっている気泡を考えると、急縮小部よりも上流側における気泡の内外の圧力差は Δp は近似的に次式で与えられる。

$$\Delta p = \sigma(2/h + 2/W_1) \quad (2)$$

ここで、 $R_1 \approx h/2$, $R_2 \approx W_1/2$ と仮定した。また、急縮小部よりも下流側では

$$\Delta p = \sigma(2/h + 2/W_2) \quad (3)$$

と表される。本実験の場合、 $h \ll W_1, W_2$ であるから、式(2), (3)はともに

$$\Delta p = 2\sigma/h \quad (4)$$

となる。

この式より、流路高さ h が小さくなるにつれて、気泡内部の圧力は高くなり、Fig.13 に模式的に示すように上下壁面と気泡の間の液膜は薄くなる。液膜がある程度の厚さを有している場合には、気泡に働く流動抵抗は気泡背後の渦の生成に主に支配され、上下壁面との隙間で発生する摩擦抵抗にはあまり依存しないと考えられる。したがって、気泡の体積が変動しても流動抵抗は大きくは変動せずほぼ一定であり、急縮小部の上流、下流のいずれの管路においても気泡はほぼ一定の速度で移動すると考えられる。ところが、液膜が薄くなると特に液流速の大きくなる急縮小部以降の管路において、摩擦抵抗の増大により流動抵抗

は気泡の大きさに応じて大きく変わり、その結果として気泡の移動速度も大きく変動するものと考えられる。

なお、緒言では鉄鋼プロセスとの関連性について述べているが、濡れ性のよい管路を対象としている本実験とは異なり、スライディングゲートと溶鋼の濡れ性は悪いこと知られている。すなわち本実験での水と流路壁との接触角は 71° であるが、実機での溶鋼と耐火物との接触角は約 130° から 150° であり、現段階では本実験から求められた基礎的な知見を実機に適用することはできない。今後、濡れ性の悪い流路を用いた実験を行いたく考えている。

4. 結言

本実験で以下のことが確認された。

- (1) 流路断面を急縮小させることで気液二相流の流動様式変化は 6 種類に分類できることが分かった。特に空気と水の空塔速度が小さい場合には、急縮小部入り口近傍での気泡の滞留とその一部分の小さな気泡への分裂が観察された。流路高さを小さくすると、気泡の分裂は起こりやすくなった。
- (2) 流路高さが小さくなるにつれて、流路内の気液二相流の流動状態は不安定になり、気泡先端部の移動速度のばらつきが大きくなった。すなわち、急縮小部を有する矩形流路の高さが非常に小さな場合、気液二相流を工学的に利用することは流動制御の観点からは望ましくない。

参考文献

- [1] Mazen, M. and Khader, A., Plate Heat Exchangers: Recent Advances, Renewable and Sustainable Reviews, Vol.16, 1883-1891 (2012).
- [2] Shao, N., Gavrilidis, A. and Angeli, P., Flow Regimes for Adiabatic Gas-Liquid Flow in Microchannels, Chemical Engineering Science, Vol.64, 2749-2761 (2009).
- [3] Landis, F., Kwame-Mensah, P. and Chang, T. C., Two-Phase Pressure Drop in Multiple Thick- and Thin-Orifice Plates, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.15, 347-358 (1997).
- [4] Ahmed, H. W., Ching, C. Y. and Shoukri, M., Pressure Recovery of Two-Phase Flow across Sudden Expansions, Int. Journal of Multiphase Flow, Vol.33, 575-594 (2007).
- [5] Suu, T., Air-Water Two-Phase Flow through a Pipe Junction (Experiment on the Local Void Fraction Distribution Adjacent to the Branching Part),

- Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.54(508), 3521-3526 (1988).
- [6] Shakouchi, T., A Study on Gas-Liquid Two-Phase Jet Flow Introduced Into an Abruptly Expanded Horizontal to Flow Passage (Oscillatory Phenomena and the Application to Flow Measurement), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 60(578), 3359-3365 (1994).
 - [7] Chen, Y. I., Liu, C., Chien, K. and Wang, C., Two-Phase Flow Characteristics across Sudden Expansion in Small Rectangular Channels, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 32, 696-706 (2007).
 - [8] Schmidt, J. and Friedel, L., Two-Phase Pressure Drop across Sudden Contraction in Dust Areas, Int. J. Multiphase Flow Vol.23(2), 283-299 (1997).
 - [9] Chen, Y. I., Tseng, C., Liu, C., K. and Wang, C., Two-Phase Flow Pressure Change Subject to Sudden Contraction in Small Rectangular Channels, Int. Journal of Multiphase Flow, Vol. 35 297-306 (2009).
 - [10] Maeda, D. and Iguchi, M., Bubble Attachment to Sliding Gate and Related Liquid Flow, J. JSEM, Vol.6(3), 308-314 (2006).
 - [11] Kumagai, T. and Iguchi, M., Wettability Effect on Flow Pattern in Horizontal Air-Water Two-Phase Flow in Rectangular Small Channels, J. JSEM Vol.7(1), 2670-2675 (2006).
 - [12] Kato, K., Arii, Y. and Wakimoto, T., Bubble Formation from an Air Jet Injected into a Turbulent Boundary Layer (On the Single Bubble), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 75(756), 1590-1597 (2009).
 - [13] Voutsinas, A., Shakouchi, T., Tsujimoto, K. and Ando, T., Gas-Liquid Two-Phase Oscillating, Fluctuating Flow through Vertical Sudden Contraction Pipe, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 72(717), 1131-1136 (2006).
-