

## 表面張力を利用した小型気液分離器の開発

東隆平<sup>\*1</sup>, 鹿園直毅<sup>\*2</sup>, 岩田博<sup>\*3</sup>

### Development of Compact Liquid Gas Separator Using Surface Tension

Ryuhei AZUMA, Naoki SHIKAZONO<sup>\*4</sup> and Hiroshi IWATA

<sup>\*4</sup> Department of Mechanical Engineering, The University of Tokyo,  
Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

In the present study, a compact gas-liquid separator using micro grooves is proposed and its performance is evaluated by air-water experiment. The gas bubbles are forced out from the liquid flow at the expanding section by the minimization effect of excess gas-liquid interface free energy, while the liquid phase remain confined inside the micro grooves. Two major limits of gas-liquid separation, i.e., (1) flooding limit at high liquid flow rate, and (2) entrainment limit at high gas flow rate are found and investigated by flow visualization. Finally, dimensionless correlations for predicting gas-liquid separation limits are proposed. Furthermore, guidelines to design a high-performance and compact gas-liquid separator are discussed.

*Key Words* : Gas-liquid Two-phase Flow, Heat Pump, Surface Tension, Gas-liquid Separator, Micro Groove

#### 1. 序 論

近年, 民生部門のエネルギー消費削減のため, 高効率なヒートポンプの開発, 普及の重要性が認識されてきている. しかしながら, ヒートポンプを構成する圧縮機やモータ等の要素機器の単体効率は既に高いレベルにあり, 大幅な性能向上は困難である. 今後の高性能化に向けた技術として, 蒸発器ガスバイパスサイクル, 二段圧縮サイクル, エジェクタサイクル等の高効率サイクルの導入が期待されているが, サイクル構成の複雑化に伴うコスト等の課題から, 大幅な普及には至っていない.

これらの高効率サイクルに共通する構成要素の一つに気液分離器がある. 従来の気液分離器は, 重力や遠心力などの体積力を用いるものが主である. 重力型の気液分離器は, 構成は簡素であるものの, 流速を下げて重力が支配的となる空間体積が必要となることから, 装置が大型になるという欠点がある. 一方, 原子力発電プラン

ト等で用いられる遠心力による気液分離器<sup>(1)(2)</sup>は, 一般に乾き度と流速が大きい噴霧流を対象としており, 冷凍サイクルの使用条件, 例えば膨張弁出口の低乾き度条件等にそのまま適用するのは困難である.

これら体積力に代わり, 面積力である表面張力を用いることで, 気液分離器の小型化が期待される. 浅野ら<sup>(3)(4)</sup>は, 宇宙ステーションやスペースシャトルでの二相流体式排熱システムなどへの適用を想定し, 地上重力場及び微小重力場における Y 型ジャンクションを用いた相分離に関する実験を行った. 入口流動様式が間欠流である場合に気相の完全分離を達成したものの, 入口流動様式が相分離特性に及ぼす影響が大きいことが課題である. 一方, 表面張力を用いた小型気液分離器として, 実機冷凍サイクルにおける流量や乾き度に適用可能なものが近年提案されている<sup>(5)(7)</sup>. その特徴は, 溝付面の気液界面面積を最小化させる効果によって, 液相を溝内に保持しつつ気相を溝外へ放出させることで, 気液分離を実現するものである. 実際の冷凍サイクルに適用するためには, 気液分離が達成される設計パラメータ範囲を明らかにし, フロン系冷媒や自然冷媒等にも適用可能な普遍的な設計手法の確立が必要となるが, 現状では気液分離の阻害要因の定量化は十分とはいえない.

以上のような背景を鑑み, 本研究では, 溝付き面を用

\*原稿受付 2007年 月 日

<sup>\*1</sup> 准員, ソニー株式会社. (〒108-6201 東京都港区港南 2-15-3)

<sup>\*2</sup> 正員, 東京大学大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

<sup>\*3</sup> 正員, 日冷工業株式会社. (〒329-4415 栃木県下都賀郡大平町真弓 1570)

E-mail: shika@feslab.t.u-tokyo.ac.jp

いた円筒型気液分離器の水-空気二相流での実験を行い、溝寸法、断面形状、気液分離器長さ等の設計因子が気液分離特性に及ぼす影響を明らかにするとともに、気液分離限界の無次元予測式を提案する。

液相のみが保持され気相は溝外を流れる流動様式となり、気液分離が達成される。完全な気液分離が達成された場合は、気相は全て気相側出口 2 から、液相は全て液相側出口 3 から流出する。なお、本研究では縮流部ガイド径、および気相側出口管 2 の外径は溝内径  $D_i$  と同一とし、縮流部長さ  $L_c$  は溝の水力直径の約 50 倍とした。

主な記号

- $b$  : 溝幅
- $Bo$  : ボンド数
- $D$  : 内径
- $g$  : 重力加速度
- $G$  : 体積流量
- $j$  : みかけ速度
- $L$  : 軸方向長さ
- $L_{groove}$  : 拡大部溝付面濡れ縁長さ
- $R$  : 液相非回収率
- $Re_f$  : 液膜レイノルズ数
- $Re_f^*$  : 規格化された液膜レイノルズ数
- $w$  : 質量流量
- $We$  : ウェーバー数
- $\chi$  : 乾き度
- $\rho$  : 密度
- $\sigma$  : 表面張力

添字

- c : 縮流部
- e : 拡大部
- G : 気相
- L : 液相
- i : 溝頂部
- o : 溝底部
- 1 : 二相流入口
- 2 : 気相側出口
- 3 : 液相側出口

2. 実験方法

**2.1 気液分離器の構成** 図 1 に、気液分離器の基本構成を示す。本気液分離器は、液相側出口 3 を除き軸対称構造となっている。入口 1 から流入した二相流は、外壁と入口ガイド間の多孔質体（細孔径 300  $\mu\text{m}$ 、空隙率 91%）の中を流れることで均等分配され、溝付円筒と入口ガイドで構成される縮流部へと導かれる。その後、入口ガイド下端において流路が急拡大する拡大部へ至る。縮流部において全ての気相と液相は溝内を流れるが、その下流の拡大部においては気液界面の表面積が最小化されるため、最終的に下流の溝内には

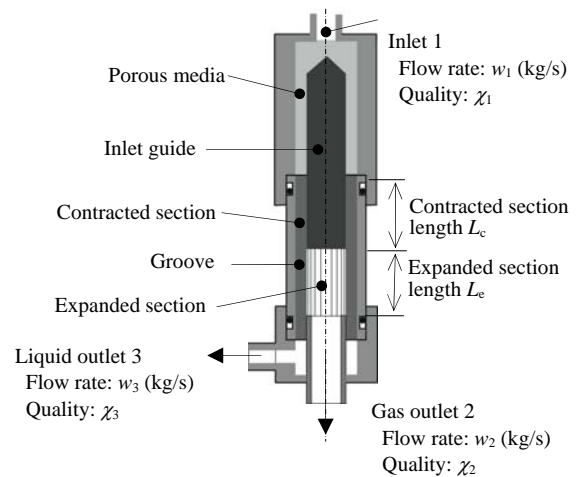


Fig.1 Schematic of the Gas-Liquid Separator

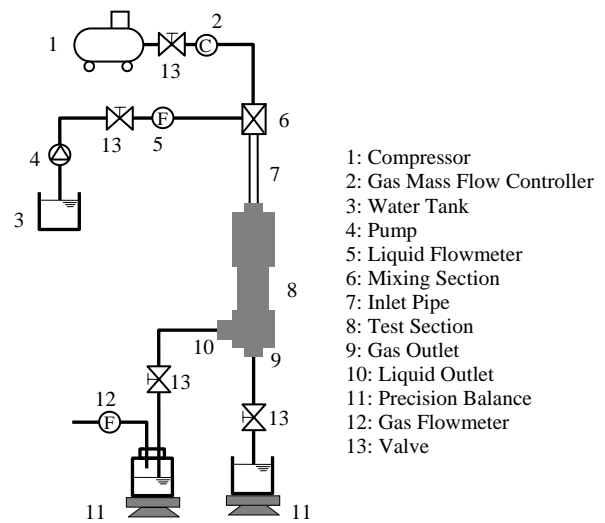


Fig. 2 Experimental setup

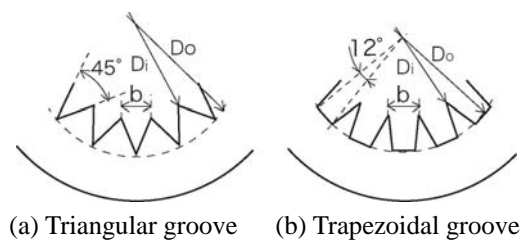


Fig. 3 Groove cross section

Table 1 Specification of the test section

Cross section shape	Triangle	Triangle	Trapezoid
Groove pitch $b$ (mm)	1.3	2.0	1.3
Groove hydraulic diameter $D_h$ (mm)	0.83	1.24	1.28
Groove cross section area $A_c$ (mm <sup>2</sup> )	0.99	2.24	1.74
Crest diameter $D_i$ (mm)	6.4	9.5	6.4
Base diameter $D_o$ (mm)	9.4	14.1	9.4
Contracted section length $L_c$ (mm)	42	62	63
Expanded section length $L_e$ (mm)	15, 29	44	29
Gas outlet pipe thickness $t$ (mm)	0.9	1.3	0.9

**2・2 実験装置** 図2に実験装置の概要を示す。流量を制御した水と空気を混合部で混合後、入口管で環状二相流とし、鉛直下方に設置したテストセクションに導入する。気相、液相両出口下流のバルブで出口流量比を調整した。電子天秤でそれぞれの出口の液相流量を、液相側出口下流に設けたマスフローメータによって混入した気相流量を測定し、気液分離特性を評価した。空気流量は7~72 l/min、水流量は30~460 ml/min、拡大部ゲージ圧が0~12 kPaGの範囲で実験を行った。

気液分離器には寸法と溝形状の異なる3種類を用いた。図3に溝部の断面形状を、表1にテストセクションの仕様を示す。三角形溝（溝底角45°）については溝幅  $b=1.3$  mm, 2 mm, 台形溝は溝幅  $b=1.3$  mm とし、溝形状および寸法の気液分離特性に及ぼす影響を評価した。拡大部長さ  $L_e$  は、溝幅  $b=1.3$  mm の三角形溝については  $L_e=2.3 D_i$ ,  $4.6 D_i$  とし、他は  $L_e=4.6 D_i$  とした。

溝付き円筒内面及び入口ガイドの縮流部部分には、親水処理としてパーレン 5235（日本パーカラライジング）を塗布し、170°C、20分間熱処理した。同じ条件で親水化処理した銅板を流水（100ml/s）に晒して接触角の時間変化を測定したところ、2時間程度で接触角が15~20°の間で安定したため、本テストセクションも表面処理後、2時間以上流水に晒したものをを用いて実験を行った。

**2・3 データ整理法** 図1に示すように、入口1から質量流量  $w_1$ 、乾き度  $\chi_1$  の二相流が流入し、気相側出口2および液相側出口3から、それぞれ質量流量  $w_2$ ,  $w_3$ , 乾き度  $\chi_2$ ,  $\chi_3$  の状態で流出するものとする。図4に気液分離曲線の模式図を示す。横軸は入口質量流量に対する液相側出口の質量流量比  $w_3/w_1$ 、縦軸は入口乾

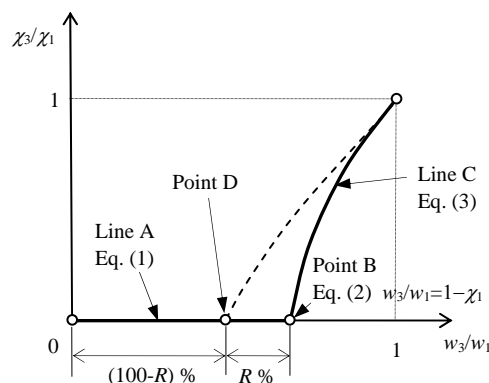


Fig. 4 Gas-liquid separation line

き度に対する液相側出口3の乾き度の比  $\chi_3/\chi_1$  である。式(1)は、図4の線Aで示される液相側出口3から液相のみが流出する条件を表す。式(2)は、液相側出口3から液相のみ、気相側出口2から気相のみが流出する完全分離点（図4の点B）を表す。式(3)は、図4の線Cで示される気相側出口2から気相のみが流出する条件であり、式(1)~(3)を連ねた線を完全分離曲線と定義する。すなわち、液相側出口流量  $w_3/w_1$  を0から1まで変化させた際に、この完全分離曲線を辿ることが、完全分離の条件である。以上のように、完全分離曲線は入口乾き度  $\chi_1$  の関数となる。

$$\chi_3/\chi_1 = 0 \quad (0 < w_3/w_1 < 1 - \chi_1) \quad (1)$$

$$\chi_3/\chi_1 = 0 \quad (w_3/w_1 = 1 - \chi_1) \quad (2)$$

$$\frac{\chi_3}{\chi_1} = \frac{1}{\chi_1} + \frac{w_1}{w_3} \left(1 - \frac{1}{\chi_1}\right) \quad \left(1 - \chi_1 < \frac{w_3}{w_1} < 1\right) \quad (3)$$

気液分離器の評価のためには、この完全分離曲線とのずれを定量化する必要がある。完全分離が実現されない条件においては、図4中の破線のような気液分離曲線となり、液相側出口3から液相のみが排出される最大の液流量は、入口から供給された全液流量よりも少なくなる。つまり、図4中の点Dで示される液相側出口3が液単相となる最大の液相側出口流量  $(w_3/w_1)_D$  が、完全分離点B  $(w_3/w_1 = 1 - \chi_1)$  よりも小さくなる。点Dの条件において、供給された全液相流量のうち気相側出口2に流出した液相流量の割合  $R(\%)$  は、

$$R = \left(1 - \frac{(w_3/w_1)_D}{1 - \chi_1}\right) \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

となる。この  $R(\%)$  を液相非回収率と定義し、気液分離特性の評価指標とした。なお、 $R$  の値は図4に見られるように、完全分離点Bと点Dとの距離BDと、完

全分離点 B と原点 O との距離 BO との比に対応する。なお実験においては、入口気液流量毎に、全気相流量のうち液相側出口 3 に混入する気相流量が 1%以下となる最大の液相側出口流量  $(w_3/w_1)_D$  を求め、そのときの液相非回収率  $R$  を式(4)から求めた。なお、本研究では液相非回収率  $R = 1 (\%)$  となる条件を気液分離限界と定義する。

### 3. 実験結果

**3・1 液相非回収率  $R$**  図 5 に、拡大部長さ  $L_e=4.6D_i$  の条件における三角溝  $b=1.3, 2.0 \text{ mm}$  および台形溝  $b=1.3 \text{ mm}$  の液相非回収率  $R(\%)$  の等高線を示す。横軸は

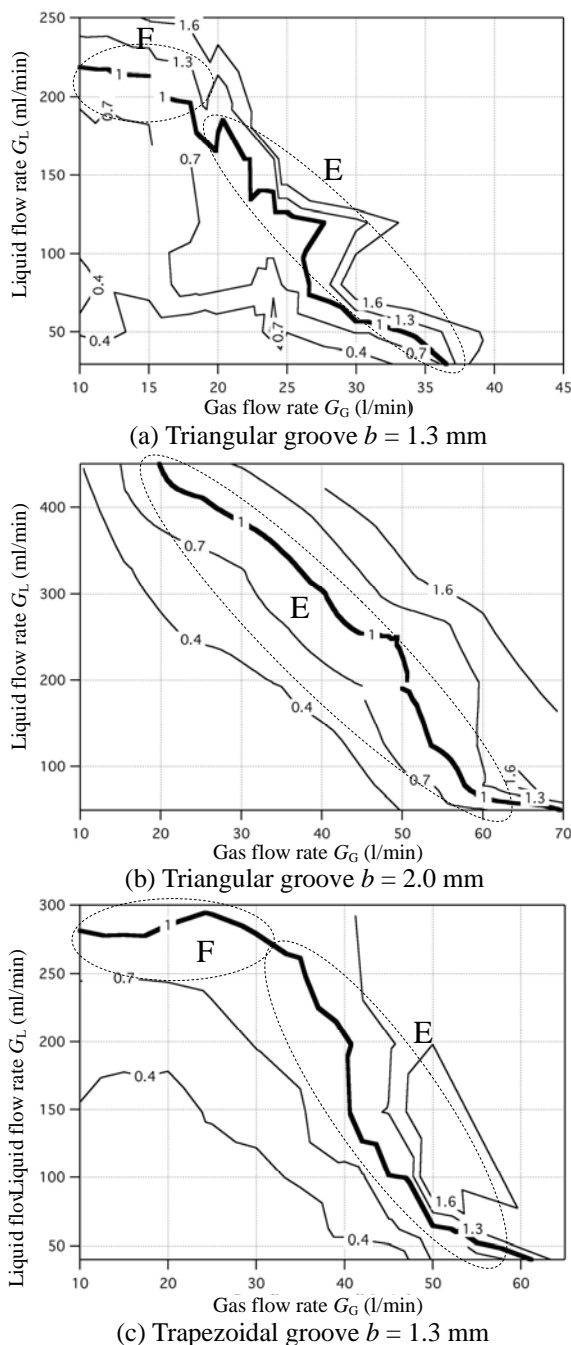


Fig. 5 Liquid non-recovery rate for  $L_e = 4.6D_i$

入口気相流量、縦軸は入口液相流量である。前述のとおり、本研究では  $R = 1 (\%)$  を完全気液分離限界と定義し、太実線で示す。後述する可視化実験により、本実験条件内では高液相流量において液相が溝から溢れ出す液溢れ限界 (図中の F 領域) と、高気相流量において液相が液滴となり飛散する飛散限界 (図中の E 領域) の二種類の気液分離限界が確認された。また、図から  $R = 1 (\%)$  の気液分離限界を与える気液流量は、溝形状と寸法によってその値が大きく変化することがわかる。以下、液相非回収率  $R = 1 (\%)$  となる気液分離限界の無次元数による整理を試みる。

**3・2 液溢れ限界** 図 6 に、三角溝  $b = 1.3 \text{ mm}$ 、拡大部長さ  $L_e = 2.3D_i$  の結果を示す。図 5 (a) が同じ溝形状に対して拡大部長さが長い  $L_e = 4.6D_i$  の場合であるが、拡大部長さ  $L_e$  が短いと、飛散限界、液溢れ限界の両限界が発生する流量も非常に小さくなっている。このことから、拡大部長さ  $L_e$  は両限界に影響を及ぼす重要な設計パラメータであることがわかる。

続いて、拡大部長さの液溢れ限界に対する影響を評価するため、各溝形状に対し拡大部長さ  $L_e$  を変化させ

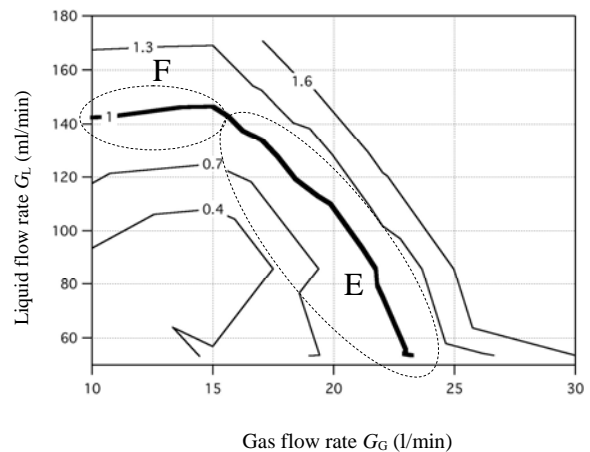


Fig. 6 Liquid non-recovery rate for  $b = 1.3 \text{ mm}, L_e = 2.3D_i$

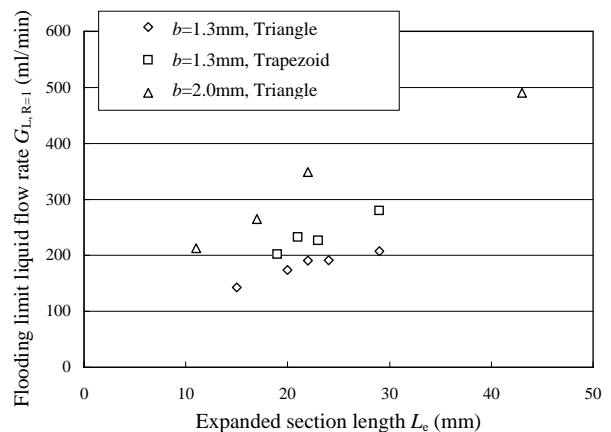


Fig. 7 Flooding limit liquid flow rate

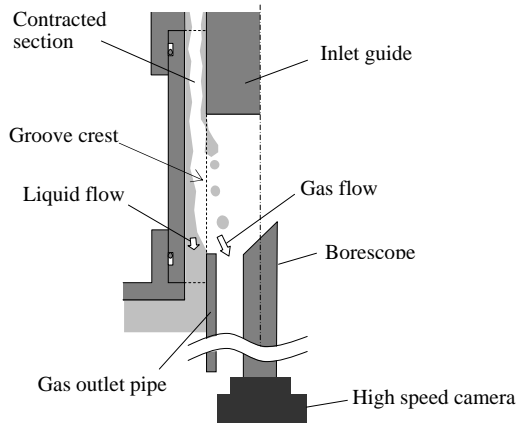


Fig. 8 Visualization setup

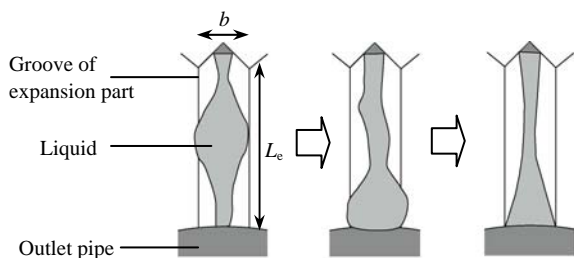


Fig. 9 Flooding limit model

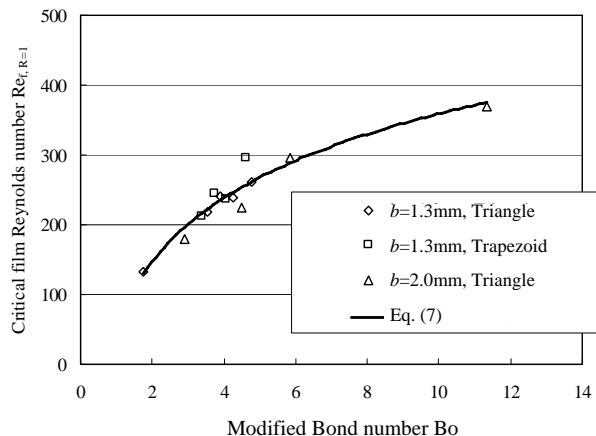


Fig. 10 Correlation for the flooding limit

た。図7に、気相流量を低流量 (溝幅  $b = 1.3 \text{ mm}$  の場合は気相流量  $G_G = 10 \text{ l/min}$ , 溝幅  $b = 2.0 \text{ mm}$  の場合は気相流量  $G_G = 15 \text{ l/min}$ ) に固定したときに  $R = 1 (\%)$  とする液膜流量  $G_{L,R=1}$  を求めた結果を示す。図7から、いずれの条件でも拡大部長さ  $L_e$  を長くすると液溢れ限界の液流量が増加することがわかる。その流れの様子を観察するため、溝幅  $b = 2.0 \text{ mm}$  の分離器に、図8に示すように工業用硬性鏡 (オリンパス社製, R060-032-045-50) を気相側出口 2 から差し込み、高速度カメラで可視化した。用いた工業用硬性鏡は、外径  $6.1 \text{ mm}$ , 斜視  $45^\circ$ , 視野角  $50^\circ$  であり、溝部を流れる液相の様子を中心軸側から斜めに観察することができる。その結果、拡大部で液相が脈動し、この液相の流量変動が

溝容積を超えると液溢れが発生し、また大流量の液相が液相出口側に流出した後は、厚い液膜が溝内部の上流側に再び形成される様子が観察された。図9にその様子の模式図示す。また、液溢れが起きる流量域においては、気相出口管の下流部において液相が脈動して流れ出る様子が観察された。溝が液流量変動をバッファーとして吸収する能力は、溝内メニスカスが表面張力によって液で満たされにくいほど大きいと考えられる。この影響を表現するために修正ボンド数

$$Bo = \frac{\rho_L g L_e}{\sigma / b} \quad (5)$$

を導入する。また、流下液膜厚さの指標として液膜レイノルズ数を導入する。

$$Re_f = \frac{4\rho_L G_L}{\mu_L L_{\text{groove}}} \quad (6)$$

ここで、 $L_{\text{groove}}$  は、拡大部の溝付面の濡れ縁長さである。図10に、液溢れ限界を与える液膜レイノルズ数  $Re_{f,R=1}$  を修正ボンド数  $Bo$  で整理した結果を示す。液溢れ限界が  $Re_{f,R=1}$  と  $Bo$  で良く整理できることがわかる。本データをもとに、以下の無次元整理式を得た。

$$Re_{f,R=1} = 130.0 \ln(Bo) + 56.3 \quad (7)$$

**3.3 液滴飛散限界** 液滴飛散限界について考察するため、図8に示した工業用硬性鏡を入口ガイド近くまで差し込み、気相流量が大きい条件において拡大部

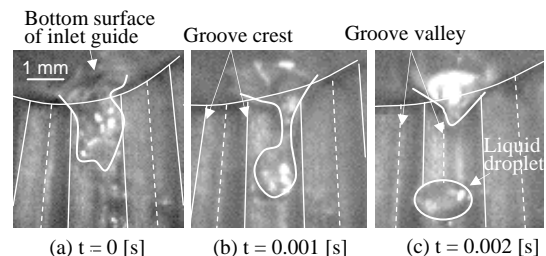


Fig. 11 Entrainment visualization

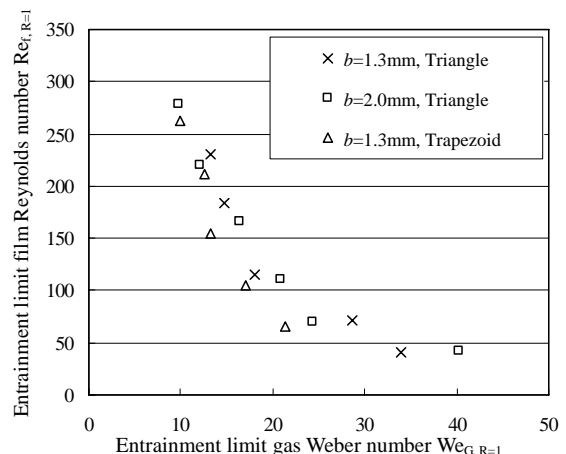


Fig. 12 Correlation for the entrainment limit

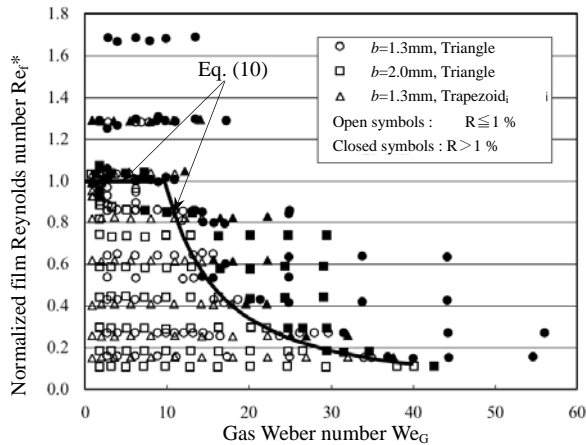


Fig. 13 Correlation for gas-liquid separation limit

で液滴が飛散する様子の可視化を行った。その結果、図 11 で見られるように、液膜が縮流部から拡大部に流出する際に、溝幅とほぼ同じ径の液滴となって飛散の様子が観察された。また、気相側出口管の下流部でも、液滴が飛散して流れている様子が観察された。液滴飛散の支配的な力学因子として、気相の慣性力と表面張力が考えられる。その影響を表現するために、縮流部の溝内における気相見かけ速度  $j_{G,c}$  と溝幅  $b$  で定義されたウェーバー数を用いる。

$$We_G = \frac{\rho_G j_{G,c}^2 b}{\sigma} \quad (8)$$

図 5 の E 領域において  $R = 1$  (%) とする飛散限界を与える気液流量を、式(8)のウェーバー数と、式(6)の液膜レイノルズ数で整理した結果を図 9 に示す。図から、気相ウェーバー数と液膜レイノルズ数を用いることで、溝形状や寸法によらず、飛散限界を良く整理できることがわかる。

**3・4 気液分離限界の整理式** 液溢れ限界と液滴飛散限界の両者を統一的に表現するため、式(6)の液膜レイノルズ数を、式(7)で表される液溢れ限界流量における液膜レイノルズ数で規格化する。

$$Re_f^* = \frac{Re_f}{130.0 \ln(Bo) + 56.3} \quad (9)$$

図 13 に、この規格化された液膜レイノルズ数  $Re_f^*$  と気相ウェーバー数  $We_G$  で全ての実験データを整理した結果を示す。図中の白抜き記号は液相非回収率が  $R \leq 1\%$  の場合を、塗り潰し記号は  $R > 1\%$  であることを表す。図 13 より、拡大部長さ、溝形状、溝寸法に関わらず、2つの無次元数で全データを良く整理できることがわかる。本結果から、液溢れ限界と飛散限界の無次元整理式として式(10)を得た。

$$Re_f^* = \min \left[ 1, 29.3 We_G^{-1.486} \right] \quad (10)$$

液相流量と気相流量を、式(10)で与えられる液膜レイノルズ数と気相ウェーバー数の範囲内の値に抑えれば、液相非回収率  $R$  が 1%以下となり完全気液分離を達成できる。

以上の知見をまとめると、溝付面に働く表面張力を用いた気液分離器によって完全気液分離が実現可能であることを実験的に確認できた。その高性能化のためには、溝幅が小さく断面積の大きな溝形状として気相ウェーバー数を下げるとともに、液相流量変動を吸収できる大きさの拡大部を設けることが有効であると言える。

なお、本研究の結果は水-空気系の実験によるものであり、一般に式(7)~(10)中の係数や指数は密度比や粘性係数比等の関数であると考えられるため、本整理式を異なる物性の冷媒等にそのまま用いることには注意を要する。物性値の影響を明らかにするため、異なる物性の冷媒を用いた実験を今後行う必要がある。

#### 4. 結 言

溝付き面を用いた新たな小型気液分離器を提案し、水-空気系二相流での実験を行い、以下の結論を得た。

- 1) 溝付面に働く表面張力を用いた気液分離器によって、完全気液分離を達成することが出来ることを実験的に確認した。
- 2) 気液分離を阻害する要因として、高液相流量時の液溢れ限界と、高気相流量時の液滴飛散限界の二種類の限界を確認した。
- 3) 液溢れ限界を、液膜レイノルズ数と、溝の液保持力を表す修正ボンド数を用いてモデル化し、無次元整理式(7)を得た。
- 4) 液滴飛散限界を、気液分離器の急拡大部における気相の慣性力と液相の表面張力の比としてモデル化し、気相ウェーバー数と液膜レイノルズ数を用いて整理した。最終的に、水-空気系二相流の気液分離限界を表す式(10)を提案した。
- 5) 気液分離器の高性能化のためには、溝幅が小さく断面積の大きな溝形状として気相ウェーバー数を下げ、液相流量変動を吸収できる拡大部長さを設けることが有効である。

#### 謝 辞

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構平成 17 年度産業技術研究助成事業の援助

を受けた。記して謝意を表す。

## 文 献

- (1) Yamazaki, Y. et al., Development of High Performance Steam Separator System, *Proc. Mechanical Engineering Congress 2003 Japan (MECJ-03)*, (2003), Vol.3, 163-164.
- (2) Nishida, K. et al., Development of Moisture Separator with High Performance of Steam Generator, *Proc. Mechanical Engineering Congress 2003 Japan (MECJ-03)*, (2003), Vol.3, 165-166.
- (3) Asano, H., Fujii, T., Takenaka, N. and Sakoda, K., A Study of the Phase Separation Characteristics in Gas-Liquid Two-Phase Flows by Impacting Y-Junction (1st Report, Experimental Results for Air-Water Two-Phase Flow under Normal Gravity Condition) , *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, 67-654 (2001), 350-355.
- (4) Asano, H., Fujii, T., Takenaka, N., Arakawa, T. and Suang, Y., A Study of the Phase Separation Characteristics in Gas-Liquid Two-Phase Flows by an Impacting Y-Junction (2nd Report, Experimental Results of the Effect of the Tube Diameter and Under Microgravity) , *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, 68-673 (2002), 2542-2547.
- (5) Shikazono, N., Mukasa, Y. and Iwata, H., Assessment of Micro Gas -Liquid Separator Using Surface Tension, *Proc. Mechanical Engineering Congress 2005 Japan (MECJ-05)*, (2005), 243-244.
- (6) Shikazono, N., Mukasa, Y., Azuma, R. Iwata, H. and Watarai, K., Development of Compact Gas-Liquid Separator Using Surface Tension, *Proc. 40th Japanese Joint Conf. on Air-conditioning and Refrigeration*, (2006), 49-52.
- (7) Iwata, H., Komori, T., Watarai, K. and Shikazono, N., Development of Compact Gas-Liquid Separator Using Surface Tension (2nd Report, Investigation of the Applicability of Compact Gas-Liquid Separator) , *Proc. 40th Japanese Joint Conf. on Air-conditioning and Refrigeration*, (2006), 53-56.