

## 表面張力を利用したコンパクト気液分離器の開発\*

### Development of Compact Gas-Liquid Separator using Surface Tension Force

鹿園直毅\*\* 岩田博\*\*\* 度会和孝\*\*\*  
SHIKAZONO Naoki IWATA Hiroshi WATARAI Kazutaka

**Abstract** In the present study, a novel gas-liquid separator using surface tension force is proposed and its performance is evaluated. 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 remains confined inside the micro grooves. Two major gas-liquid separation limits, i.e., (1) flooding limit at high liquid flow rate, and (2) entrainment limit at high gas flow rate are observed and investigated by air-water experiment. Dimensionless correlation for predicting gas-liquid separation limits is proposed. Based on the knowledge from the air-water experiment, a compact gas-liquid separator for R-410A system is developed and the basic characteristics of the separator in refrigerant cycle are investigated. The volume of the present separator is 1/7 compared to that of the conventional separators. Pressure drop reduction in an evaporator is confirmed by bypassing the gas from the evaporator. Finally, a series of 4-16kW capacity gas-liquid separators for practical use is developed.

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

#### 1. 緒言

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および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技術は既に非常に高いレベルにあり、今後の大幅な性能向上は困難と言える。一方、更なるシステム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が、これらの気液分離器は構成が簡素であるものの、設置スペースが大きい等の課題がある。

一方、原子力発電プラント等で用いられる遠心力によるサイクロン式の気液分離器[1, 2]は、一般に乾き度と流速が大きい流れを対象としており、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。

一般に、小型化に伴って体積あたりの表面積は増加することから、面積力である表面張力を用いることで気液分離器を小型化できる可能性がある。表面張力を利用した気液分離器は、これまで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が検討されているが[3, 4]、入口流動様式が相分離特性に及ぼす影響が大きいことなどが課題となっている。実機冷凍サイクルにおける流量や乾き度に適用可能できる新たな機構の提案が望まれている。

本研究では、溝付面の気液界面に働く表面張力効果によって、液相を溝内に保持しつつ気相を溝

\* 2010.2.5 受付

\*\* 東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

TEL: (03)5841-8850 FAX: (03)5841-8850 E-mail: shika@feslab.t.u-tokyo.ac.jp

\*\*\* 日冷工業株式会社

外へ放出させ、気液分離を実現する新たな気液分離器を開発したので、以下に報告する[5-8]。

## 2. 水-空気による基礎実験

### 2.1 気液分離器の基本構成

Fig. 1 に、水-空気実験に用いた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 から流入した気液二相流は、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、溝付き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、気相と液相は全て溝内を流れるが、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、最終的には溝内には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。

### 2.2 実験方法

Fig. 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それぞれの流量を調整した。電子天秤で液相流量を、マスフローメータによって気相流量を測定し、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。Fig. 3 に溝部の断面形状を、Table 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  $b = 1.3 \text{ mm}$ 、2 mm、台形溝は溝幅  $b = 1.3 \text{ mm}$  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  $b = 1.3 \text{ mm}$  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（日本パーライジング）を塗布し、170°C、20 分間熱処理した。接触角は 15~20° である。

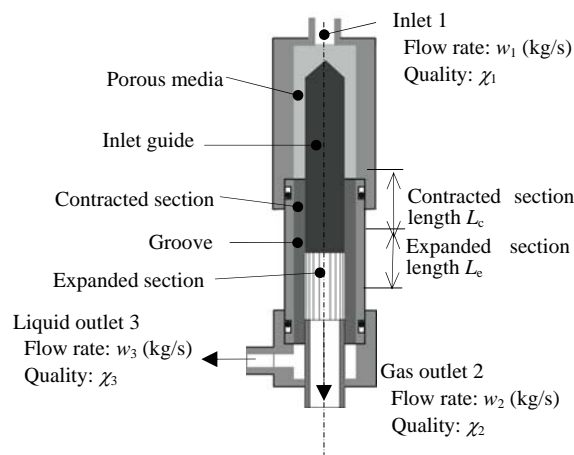


Fig. 1 Schematic of the gas-liquid separator.

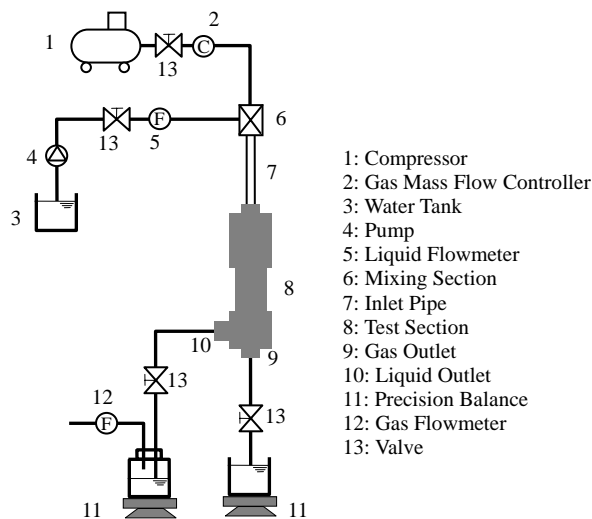


Fig. 2 Experimental setup.

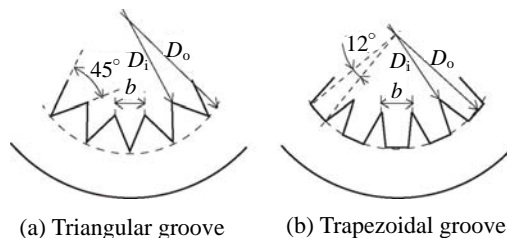


Fig. 3 Cross section of the grooves.

Fig. 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。Fig. 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、Fig. 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 (Fig. 4 の点 B) を表す。式(3)は、Fig. 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。

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

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

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

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、Fig. 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、Fig. 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。供給した全液相流量のうち、完全な単相として回収できる液量の割合を  $100 - R$  (%), 残りの回収できなかった液量の割合を  $R$  (%) とすると、

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

と表される。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 Fig. 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

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

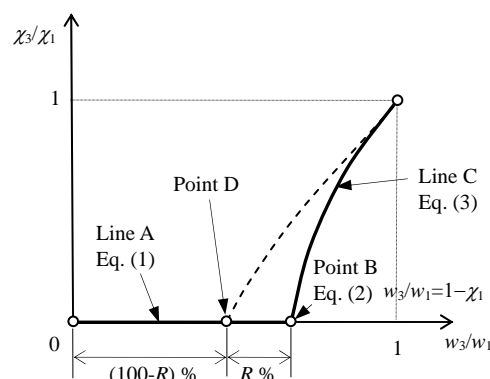
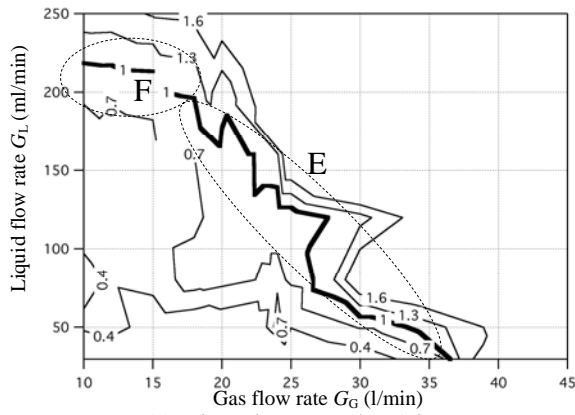


Fig. 4 Gas-liquid separation line.

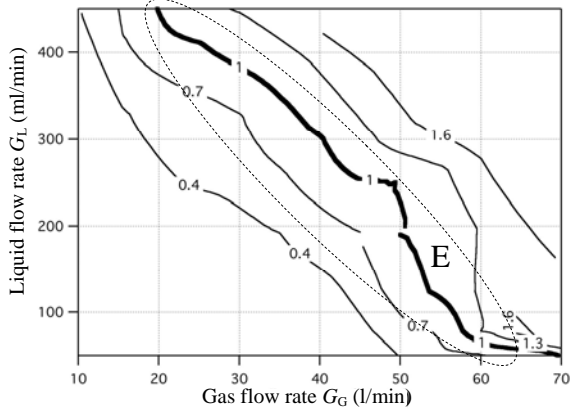
距離 BO との比に対応する。なお実験においては、入口気液流量毎に、全気相流量のうち液相側出口に混入する気相流量が 1% 以下となる最大の液相側出口流量  $(w_3/w_1)_D$  を求め、そのときの液相非回収率  $R$  を式(4)から求めた。なお、本研究では液相非回収率  $R = 1$  (%) となる条件を気液分離限界と定義した。

### 2.3 実験結果

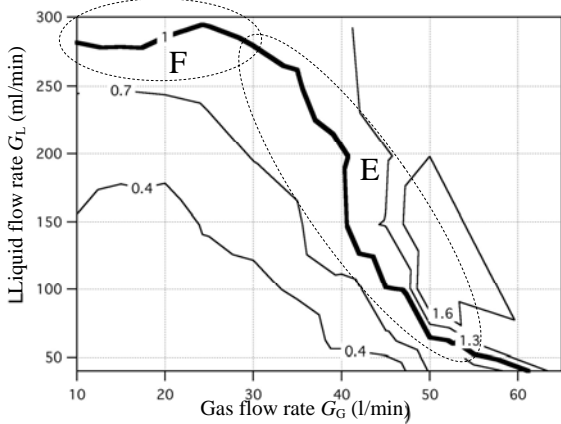
Fig. 5 に、拡大部長さ  $L_e = 4.6D_i$  の条件における三角溝  $b = 1.3, 2.0$  mm および台形溝  $b = 1.3$  mm の液相非回収率  $R$  (%) の等高線を示す。横軸は入口気相流量、縦軸は入口液相流量である。前述のとおり、本研究では  $R = 1$  (%) を気液分離限界と定義し、これを太実線で示してある。この  $R = 1$



(a) Triangular groove  $b = 1.3 \text{ mm}$



(b) Triangular groove  $b = 2.0 \text{ mm}$



(c) Trapezoidal groove  $b = 1.3 \text{ mm}$

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

(%)の線よりも少流量側では、出口 2 から気単相、出口 3 から液単相が流出する完全な気液分離が達成されている。別途行った可視化実験により、本実験条件内では高液相流量において液相が溝

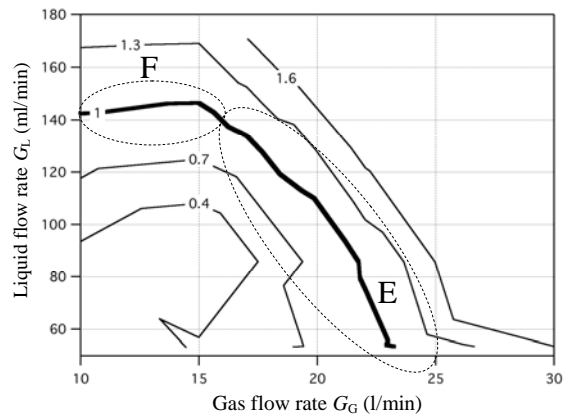


Fig. 6 Liquid non-recovery rate for  $b=1.3 \text{ mm}, L_e = 2.3D_i$ .

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異なることがわかる。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。

#### 2.4 気液分離限界の無次元整理

Fig. 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。Fig. 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  $L_e$  を変化させた。Fig. 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  $R = 1$  (%) となる液膜流量  $G_{L,R=1}$  を求めた結果を示す。Fig. 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。液溢れ時の流れの様子を工業用硬性鏡（オリンパス社製、R060-032-045-50）で可視化したところ、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する様子が観察された。同時に、液溢れが起きる流量域においては、気相出口

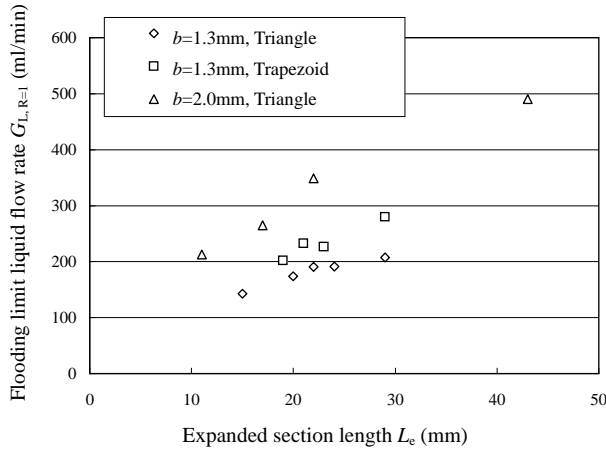


Fig. 7 Flooding limit liquid flow rate.

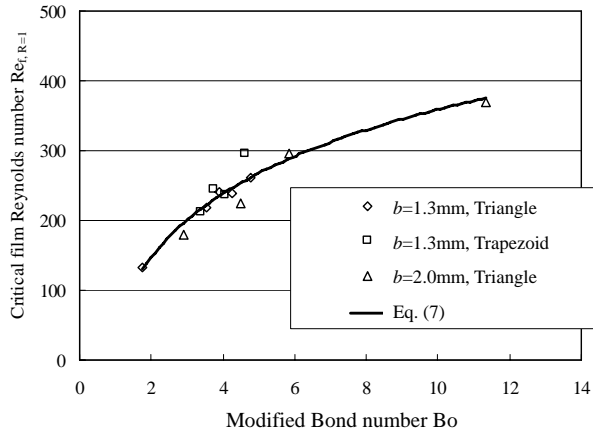


Fig. 8 Correlation for the flooding limit rate.

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。

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

ここで、 $L_{groove}$  は拡大部の溝付面の濡れ縁長さである。Fig. 10 に、液溢れ限界を与える液膜レイ

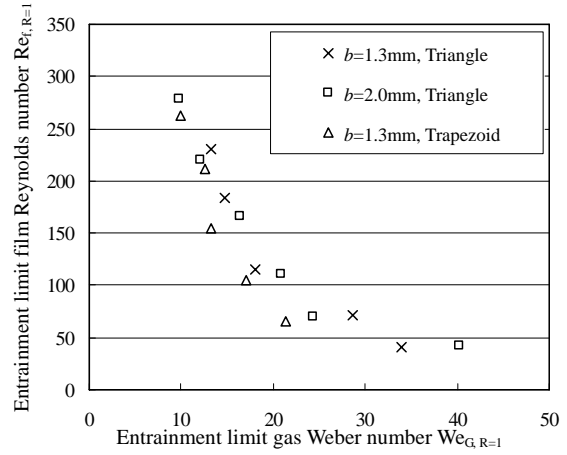


Fig. 9 Correlation for the entrainment limit.

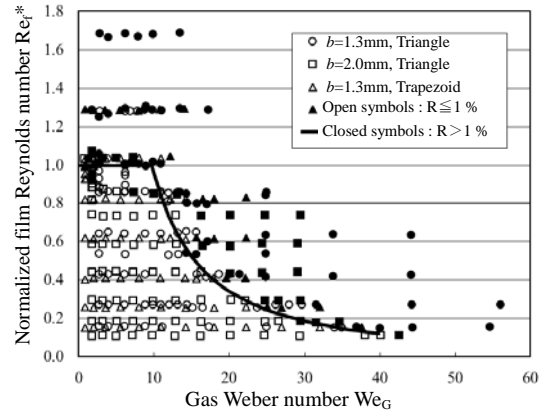


Fig. 10 Correlation for the separation limit.

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。本結果をもとに、液溢れ限界に対する以下の無次元整理式を得た。

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

続いて、液滴飛散限界について考察する。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導入する。

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

Fig. 5 の E 領域において  $R = 1 (\%)$  とな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 Fig. 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。

最終的に、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。

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

Fig. 10 に、この規格化された液膜レイノルズ数  $Re_r^*$  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。Fig. 10 より、拡大部長さ、溝形状、溝寸法に関わらず、全ての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。

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

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。

以上のように、表面張力を利用した気液分離が実際に可能であることを実証できた。

### 3. 冷媒 R410A による評価

#### 3.1 冷媒用気液分離器

上記手法に基づき、冷媒 R410A 用に設計した

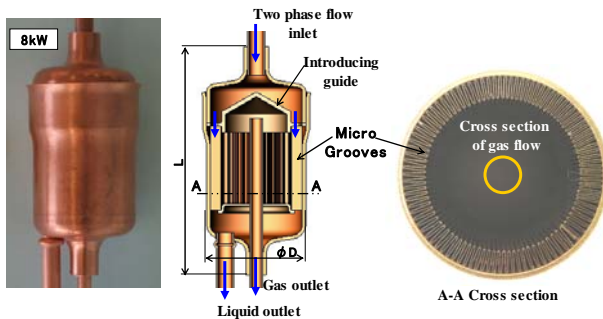


Fig. 11 Gas-liquid separator for R410A.

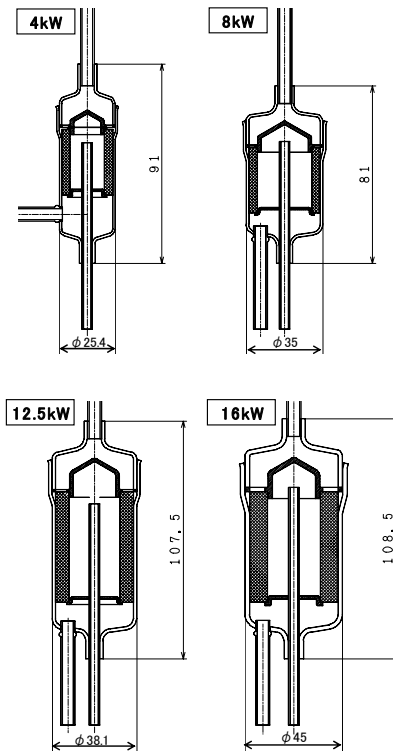


Fig. 12 Series of developed gas-liquid separator.

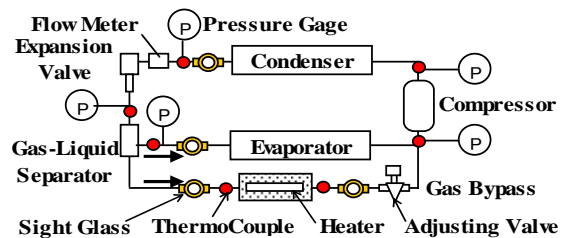


Fig. 13 Experimental setup.

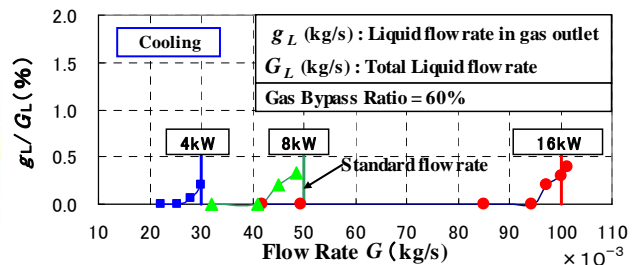


Fig. 14 Performance of the separator.

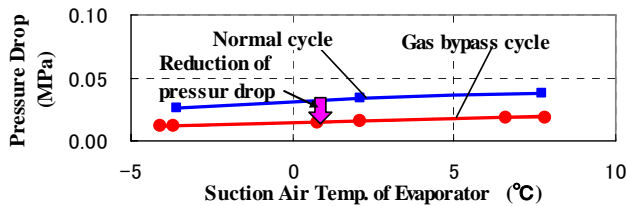


Fig. 15 Reduction of pressure drop.

気液分離器の概観および断面構造を Fig. 11 に示す。気液分離器に上部から流入した二相流は、導入ガイドの外周から溝部へ流入し、先に述べた原理で

気液分離される。前節で述べた設計条件を満たすためには、溝幅  $b$  を小さく、溝深さ  $h$  を大きくする必要があり、これを切削加工することは困難なため薄板を折り曲げ溝を構成した。

空調機の冷凍能力に対応し、4kW、8kW、12.5kW および 16kW 用気液分離器のシリーズ化を行った。それらの外形寸法を Fig. 12 に示す。本気液分離器は、同容量の従来気液分離器と比較しておよそ 1/7 の体積となっており、大幅なコンパクト化が実現されている。

### 3.2 冷媒実験結果

Fig. 13 に、冷凍サイクル評価装置を示す。蒸発器流路に対してバイパス流路は短いため、バイパス流路の圧力損失は小さい。従って、バイパス流路に調整弁を設け、両流路の圧力損失バランスを調節した。気液分離器の性能はガス側出口に設けたサイトグラスにより目視で液が流れていないことを確認した。液が流れているのが観察された場合には、液が確認できなくなるまでヒータにより液を加熱し、そのときの入力からガス中に混入している液量を計測した。

Fig. 14 に、冷凍サイクル中での気液分離性能を示す。横軸は冷媒総流量、縦軸は全液量に対するガス出口側混入液量  $g_L/G_L$  を示す。図中には、各冷房能力における想定定格流量を示してある。各想定定格流量に近づくと気流に微細ミストが混入するため、ガス出口側に液がわずかに混入するが、その量は 0.5% 以下であり、稼動頻度の高い定格運転条件以下の流量範囲では良好な気液分離特性を示している。なお、Fig. 14 の結果は、ガスバイパス割合 = (バイパスガス量 / 流入ガス量) = 60% の場合の結果である。

### 3.3 蒸発器ガスバイパスの圧力損失低減効果

冷房能力 4kW ルームエアコンの暖房運転時における蒸発器ガスバイパスによる圧力損失低減効果の一例を Fig. 15 に示す。この例はバイパス流路に設けた調整弁によりガスバイパス割合を 60% に調整した場合の結果である。蒸発器の圧力損失は通常サイクルの 45% 程度に低減されており、本気液分離器が実サイクル中でも有効に機能することが確認された。

## 4. 結 言

溝付面に働く表面張力を用いた気液分離器を提案し、これによって気液分離が実現可能であることを実験的に確認した。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が存在する。液膜レイノルズ数、修正ボンド数、気相ウェーバー数を用いた気液分離限界の無次元整理式を提案した。この知見をもとに R410A 用気液分離器を開発した。本気液分離器は、同容量の従来気液分離器と比較しておよそ 1/7 の体積となり、大幅なコンパクト化を実現した。冷房能力 4 kW のルームエアコン蒸発器ガスバイパスサイクルに適用したところ、ガスバイパス割合 60% の条件において、蒸発器の圧力損失は通常サイクルの 45% に低減した。実冷凍サイクルにおいても本気液分離器が良好に機能することを確認した。

2008 年 10 月から量産を開始しており、今後は冷凍空調分野に限らず、多様な気液分離のニーズに対応した製品化を目指していく。

## 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。

## 参考文献

- [1] Yamazaki, Y. et al., Development of High Performance Steam Separator System, Proc. Mech. Eng. Congress 2003 Japan (MECJ-03), Vol.3, 163-164 (2003).
- [2] Nishida, K. et al., Development of Moisture Separator with High Performance of Steam Generator, Proc. Mech. Eng. Congress 2003 Japan (MECJ-03), Vol.3, 165-166 (2003).
- [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) , Trans. Japan Soc. Mech. Engineers, Series B, 67-654, 350-355 (2001).
- [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), Trans. Japan Soc. Mech. Engineers, Series B, 68-673, 2542-2547 (2002).
- [5] Shikazono, N., Mukasa, Y. and Iwata, H., Assessment of Micro Gas -Liquid Separator Using Surface Tension, Proc. Mech. Eng. Congress 2005 Japan (MECJ-05), 243-244 (2005).
- [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, 49-52 (2006).
- [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, 53-56 (2006).
- [8] Azuma, R., Shikazono, N. and Iwata, H., Development of Compact Liquid Gas Separator Using Surface Tension, Trans. Japan Soc. Mech. Engineers, Series B, 74-742, 1340-1346 (2008).
-