

# 表面張力を利用したコンパクト気液分離器の開発

## 第2報 コンパクト気液分離器の実用化検討

### COMPACT GAS-LIQUID SEPARATOR USING SURFACE TENSION

#### 2nd Report : Investigation of the applicability of Compact Gas-Liquid Separator

○冷・機正 岩田 博\* (日冷工業)                      小森徹矢\* (日冷工業)  
 冷正 度会和孝\* (日冷工業)                      機正 鹿園直毅\*\* (東大工)

○Hiroshi IWATA\*, Tetsuya KOMORI\*, Kazutaka WATARAI\*, Naoki SHIKAZONO\*\*

\*Nichirei Industries Co.Ltd., 1570 Mayumi, Ohhira-machi, Tochigi-ken

\*\*The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

We developed a novel compact gas-liquid separator using surface tension. The volume of the prototype separator is 14% to that of the conventional separator. This gas-liquid separator separates the liquid from two phase flow by confining the liquid using surface tension in micro grooves. In this paper, we investigated the basic characteristics of this separator. As an application of this separator, we presented the pressure drop reduction in an evaporator by bypassing the gas from the evaporator. And we could estimate large energy saving effect by applying this gas-liquid separator.

*Key Words* : Gas-Liquid Separator, Surface Tension, Micro Groove, Heat Pump

### 1. まえがき

近年、地球温暖化防止のために、冷凍サイクル関連分野でも各機器およびシステムの省電力化技術の開発が行われている。しかし、最近では大幅な省電力効果が得られる技術開発は難しくなっており、省電力化技術の新しいアプローチが求められている。

そこで、本研究では表面張力の作用を利用した新しい発想により、従来のタンク式等の気液分離器と比べ、コンパクトな気液分離器を開発し、冷凍サイクルの省電力化に貢献できる可能性を得たので報告する。本報告では、コンパクト気液分離器の基本特性およびその応用例として、冷凍サイクルの蒸発器入口二相流の気相成分を分離し、蒸発器をバイパスさせることによる蒸発器圧力損失低減効果の例を示し、その効果により大きな省電力効果を期待できることを紹介する。

### 2. コンパクト気液分離器のコンセプト

本気液分離器の基本原理の詳細は第1報[1]で述べているが、その基本的な考え方を Fig1 に示す。従来の気液分離器は重力や遠心力などの体積力を利用した容器式が主流となっている。しかし、これらの方式は相応の容積や断面積が必要であり、体積が大きくなると設置

姿勢に制約がある等の課題があった。そのため、気液分離器を冷凍サイクルの高効率化に利用普及させるためには使いやすく、低価格化する必要があった。

本気液分離器はマイクロ溝に二相流を流し、表面張力の作用により液相成分をマイクロ溝内に保持し、気相成分は溝から押し出されることにより気液分離を行う。したがって、コンパクト化が可能であり、また設置姿勢の制約も少なく、使い易い気液分離器である。

	Principle	Characteristics
Conventional Gas-Liquid Separator	<b>Body Force Type</b> ▪ Tank Type ▪ Centrifugal Type (Separation by gravity or centrifugal force)	<b>Problems</b> ▪ Large volume ▪ Restriction of setting posture
Present Gas-Liquid Separator	<b>Surface Tension Type</b> ▪ Micro Groove Type (Separate and confine the liquid by surface tension) (Collaboration with The University of Tokyo)	<b>Characteristics</b> ▪ Compact volume ▪ Free setting posture

Fig.1 Concept of compact gas-liquid separator

### 3. 気液分離器に要求される条件と動作点

#### 3.1 冷凍サイクル側からの条件

冷凍サイクルの運転条件が固定の場合には、気液分離器に流入する二相流のガス流量  $G_G$  および液流量  $G_L$  は一定であり、その条件に合わせて理想的な気液分離器を設計すれば、ガス出口側にガス 100%、液出口側に液 100% の完全分離が可能である。しかし、実際の運転条件では、気液分離器に流入する  $G_G$  および  $G_L$  の割合は運転条件により変化する。したがって、通常の運転条件ではガス出口側、液出口側に各相の冷媒をそれぞれ 100% 取り出すことは出来ない。

ここで、気液分離器の使い方として、Fig.2 に示すように蒸発器入口二相流の気相成分を分離し、蒸発器をバイパスさせることによる蒸発器圧力損失低減効果を想定した場合、バイパス流路に液冷媒が流れると損失となる。したがって、気液分離器設計の考え方は Fig.3 に示すように以下になる。

- (a) 液出口側へのガスの混入を許容する。
- (b) ガス出口側の液混入量  $\cong 0$  とする。

ガス出口側の液混入量は理想的には 0 であるが、流量が大きな領域ではガス中に微細ミストが混入するため、本研究では、ガス出口側に混入する液量を全液量  $G_L$  の 0.5% まで許容した。

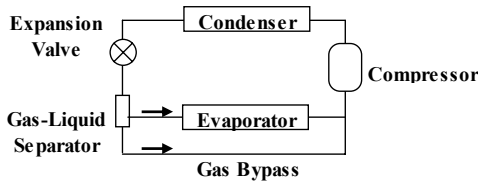


Fig.2. Gas bypass refrigeration cycle

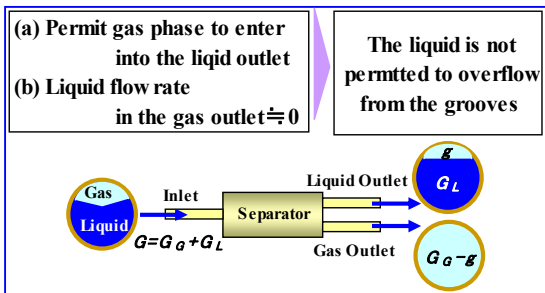


Fig.3 Required condition of separator in refrigeration cycle

#### 3.2 表面張力支配型気液分離器の設計条件

表面張力を利用した気液分離器に要求される条件の詳細は第 1 報[1]で述べているが、ここでは、そのポイントについて述べる。

- (1) 溝内に液が保持される条件は、表面張力 > 重力であり、次式のボンド数  $Bo < 1$  で与えられる。

$$Bo = \frac{\rho g b}{\sigma / r} < 1 \quad (1)$$

- (2) 先に述べた (b) ガス出口側の液混入量  $\cong 0$  の条件は言い換えると液が溝から溢れない条件を意味する。

Fig.4 は管内面に設けたマイクロ溝の 1 要素を示した図であり、ガス流路断面積を  $S_G$ 、液流路断面積を  $S_L$  および幾何学的ガス流路断面積比を  $R_G$  とし、さらに気液分離器内を流れる二相流のボイド率を  $\alpha$  としたとき、液が溝から溢れない条件は式(2)となる。

$$R_G = S_G / (S_G + S_L) < \alpha \quad (2)$$

本研究では、Smith の式[2]を用いてボイド率を与えた。

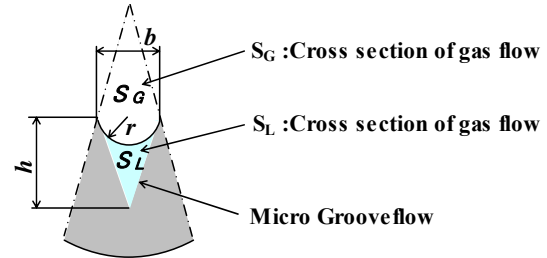


Fig.4 Cross section of gas-liquid separator

- (3) 溝壁面に付着した液が流れのせん断力  $F_d$  により引きちぎられ、ミストにならないための条件は Fig.5 に示すモデルで Ishii[3]により解析されており、式(3)を基に式(4)(5)が導かれている。

$$F \sigma > F_d \quad (3)$$

$$U = \frac{\mu_L V_G}{\sigma} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} < 0.0734 Re_f^{-1/3} \quad (4)$$

$$Re_f = \frac{4 \rho_L V_L \delta}{\mu_L} = \frac{4 G_L}{L_w \mu_L} \quad (5)$$

ここに、 $F\sigma$  : 表面張力、 $U$  : 無次元速度、 $Re_f$  : 膜レイノルズ数、 $\rho_L$ 、 $\mu_L$ 、 $V_L$  はそれぞれ液の密度、粘性係数、速度、 $\rho_G$ 、 $V_G$  はそれぞれガスの密度、速度および  $L_w$  は濡れぶち長さである。

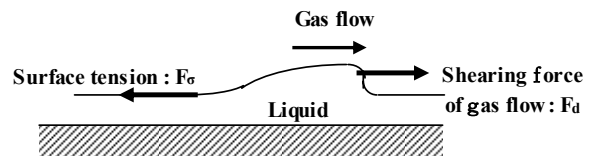


Fig.5 Mist generation Model

#### 3.3 気液分離器の動作点

気液分離器の具体的設計を行うために、4kW クラスのエアコンを例に取り、その運転条件と膨張弁出口の冷媒乾き度および蒸発圧力を調べ、気液分離器に流入する二相流のボイド率  $\alpha$  を求めた結果を Table 1 に示す。

Table 1 によると、最小のボイド率は 0.728 であり、液が溝から溢れないためには余裕をみて  $R_G < 0.7$  に設計すればよい。さらに、暖房運転条件と冷房運転条件では蒸発器圧力および膨張弁出口の冷媒乾き度は異なるが、ボイド率  $\alpha$  は両者運転条件で同等であり、同一設計の気液分離器で両運転条件に対応できる。

Table1 Operating condition and void fraction

Operating Condition	Outdoor or Indoor Temp.	Evaporator		Quality x	void Fraction $\alpha$	Flow Rate $\times 10^{-3}$ kg/s
		Temp. $^{\circ}\text{C}$	Perssure MPa			
Heating	7	2	0.85	0.160	0.732	27.3
	2	-2	0.75	0.199	0.783	28.9
	0	-5	0.61	0.245	0.836	22.5
Cooling	27	13	1.18	0.202	0.728	27.9
	32	18.5	1.38	0.287	0.776	32.8

#### 4. 気液分離器の設計と構造

##### 4.1 気液分離器の設計

気液分離器の設計は以下の手順で行った。

- (1) 適用最大流量  $G$ 、溝深さ  $h$  を与え、溝壁面に付着した液がミストにならない条件式(4)より気液分離器径を決めた。
- (2) 液が溝から溢れない条件式(2)より  $R_g$  が適切な値になるように  $h$  を調整した。
- (3) 式(1)より溝幅  $b$  を決め、溝数を決めた。

##### 4.2 気液分離器の構造

上記設計により試作した気液分離器の構造を Fig.6 に示す。気液分離器に流入した二相流は導入ガイドの外周からマイクロ溝に流入し、先に述べた原理で気液分離される。4 kW クラスの流量を流し、3.2 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難しく、薄板を折り曲げ、溝を構成した。

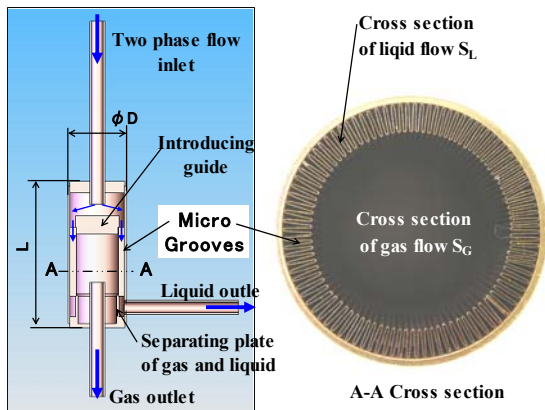


Fig.6 Cross section of gas liquid separator

Table2 に本気液分離器の寸法を示す。4 kW 市販ルームエアコンに搭載されている気液分離器の体積と比較すると、その大きさは 1.4% であり大幅にコンパクト化されていることがわかる。

Table2 Size and volume of separator

	$\phi D$	L	Volume
This Study	25.40	62	31.4cc

#### 5. 気液分離器の基本特性

##### 5.1 性能評価装置と気液分離器性能

Fig.7 に性能測定装置を示す。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。液が流れる場合には、ヒータ出口のサイトグラスで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。

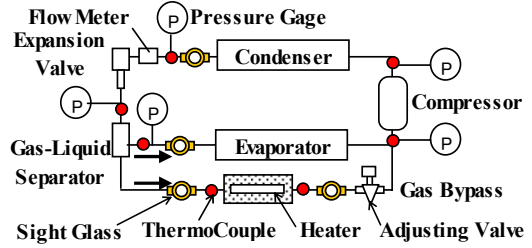


Fig.7 Experimental setup

Fig.8 に気液分離性能を示す。縦軸には全液量に対するガス出口側混入液量を示す。冷媒流量  $30 \times 10^{-3}$  を超えるとガス出口側に液がわずかに混入するが、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。

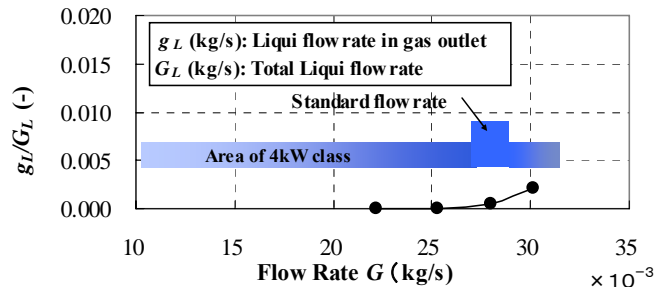


Fig.8 Performance of separator

##### 5.2 噴霧流限界の考察

Fig.8 に示したデータを用い、式(4)の無次元速度  $U$  を求め噴霧流限界式(4)と比較した結果を Fig.9 に示す。ガス側に液が混じり始める流量と噴霧流限界とは良く一致しているが、ガス側に液が混じる現象は二相流の溝への流入条件、溝出口の条件にも依存しているため、詳細は今後の研究に待たれる。

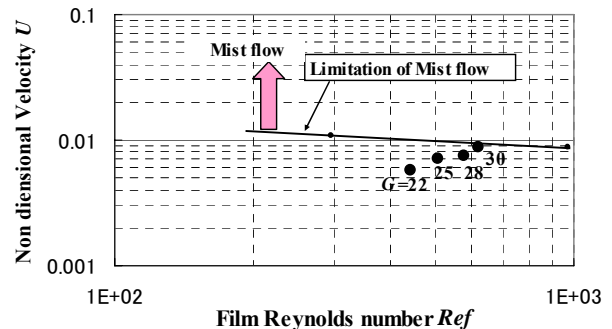


Fig.9 Limitation of mist flow

## 6. 蒸発器ガスバイパスによる圧力損失低減効果

### 6.1 圧力損失測定サイクル構成

4 kW クラスルームエアコンの暖房および冷房運転時の蒸発器ガスバイパスによる圧力損失測定に使用したサイクル構成をそれぞれ Fig.10, Fig.11 に示す。両図において、P1、P2 が圧力測定点である。

### 6.2 蒸発器ガスバイパスによる圧力損失低減効果

圧縮機回転数を定格回転数とし、蒸発器吸込み空気温度を変化させた場合の通常サイクルの暖房、冷房運転時の蒸発器圧力損失および蒸発器ガスバイパス時の圧力損失 P1 - P2 を測定した結果をそれぞれ Fig.12, Fig.13 に示す。両図より、特に冷房運転時の蒸発器圧力損失低減効果が大きいことがわかる。

### 6.3 蒸発器ガスバイパスによる省電力効果予測

省電力効果を求めるにあたり、以下の仮定を行った。

- (a) 蒸発器損失低減分、圧縮機吸込み圧力が上昇する。
- (b) 圧縮機吸込み圧力上昇に伴い、冷媒流量は増加するが、その分、圧縮機回転数を下げ、蒸発器ガスバイパスの場合の冷媒流量が通常サイクルの冷媒流量と同じになるようにする。

以上の仮定より、蒸発器ガスバイパス時および通常サ

イクル時の圧縮動力  $W$ 、 $W_0$  をモリエル線図より求め、省電力効果  $(1 - W/W_0) * 100\%$  を求めた結果を Fig.14, Fig.15 に示す。両図に示す省電力効果は大きく、本気液分離器の適用が省電力化に有効であることが分かる。なお、蒸発器ガスバイパスによる蒸発熱伝達率の低減、蒸発器温度レベルの上昇の課題も考えられ、今後、実機による省電力効果の評価が必要である。

## 7. 結 論

- (1) 表面張力を利用したコンパクト気液分離器の設計方法を明らかにし、気液分離器を試作した結果、良好な気液分離特性を得た。
- (2) 本気液分離器を蒸発器ガスバイパスに適用し、ガスバイパスによる圧力損失低減効果を明らかにした。
- (3) 本コンパクト気液分離器は冷凍サイクルの省電力化に期待できることを明らかにした。

## REFERENCE

- [1]鹿園他：第 40 回空気調和・冷凍連合講演会論文集、講演 No.12,(2006)
- [2]Smith: Void fraction in two-phase flow, Heat and Fluid Flow,1,1,p22
- [3]Ishii, et al.: Inception Criteria for Droplet Entrainment in Two Phase Concurrent Film Flow, AIChE J.21,(2),(1975)

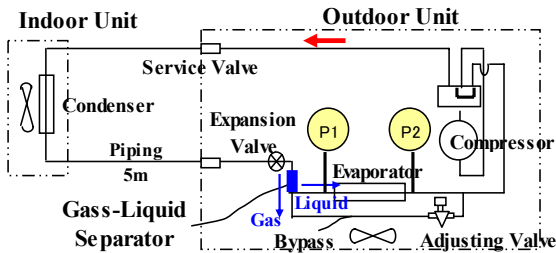


Fig.10 Refrigeration Cycle (Heating)

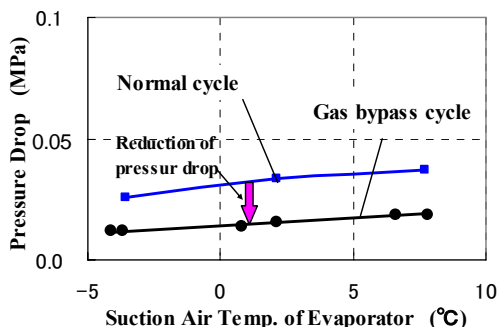


Fig.12 Reduction of pressure drop (Heating)

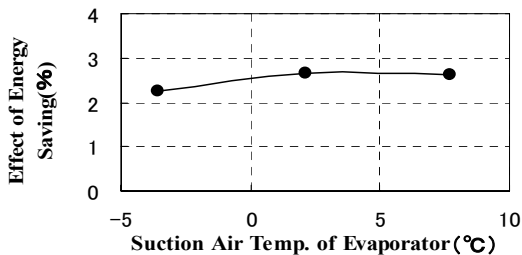


Fig.14 Effect of energy saving (Heating)

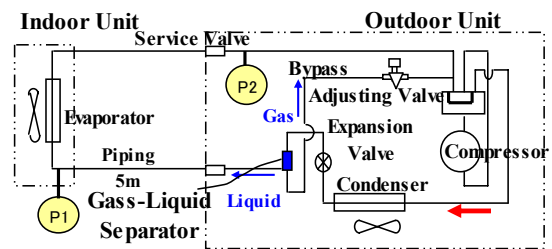


Fig.11 Refrigeration Cycle (Cooling)

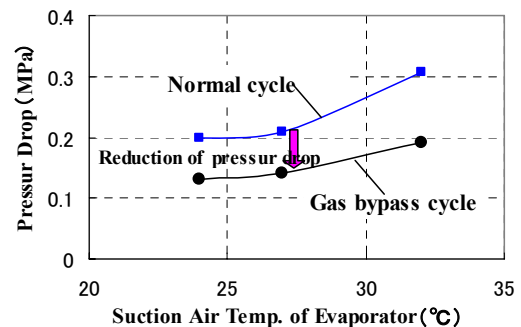


Fig.13 Reduction of pressure drop (Cooling)

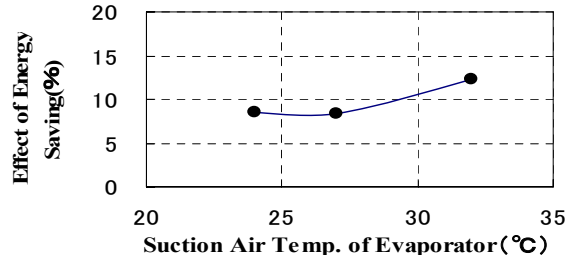


Fig.15 Effect of energy saving (Cooling)