

B 224 表面張力を利用したコンパクト気液分離器の実用化研究 コンパクト気液分離器のシリーズ化

Study of Compact Gas-Liquid Separator using Surface Tension A Series of Capacity in 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. This gas-liquid separator separates the liquid from two phase flow by confining the liquid in micro grooves using surface tension. The volume of this separator is very small compared to that of the conventional body force type separators. As an application of this separator, we presented the pressure drop reduction in an evaporator by bypassing the gas from the evaporator. In this paper, we studied a series of 4-16kW capacity gas-liquid separators for practical use. The basic characteristics of these separators when used in refrigerant cycle are investigated.

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

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一層の省電力化が求められ、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、先に、表面張力を利用した新しい発想によるコンパクト気液分離器の基本特性の研究結果を報告した [1] [2]。

本報告では、コンパクト気液分離器を 4~16kW 冷凍機へ対応するためのシリーズ化研究を行い、その基本的分離特性を明かにした。また、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報告する。

2. コンパクト気液分離器開発の意義

2.1 蒸発器ガスバイパスにより期待される効果

熱交換器の大型化、細径管化に伴い、その圧力損失は無視できなくなり、通常的手段では圧力損失の低減は難しい状況にある。そこで、気液分離器を用い蒸発器入口で気相成分を分離し、蒸発に寄与しない気相成分を蒸発器バイパスすることにより蒸発器の圧力損失を大幅に低減できる。その結果、Table 1 に示すように、

圧縮機吸込み圧力を上げることができ、省電力化または冷却能力の向上が可能になる。一方、気相成分を蒸発器バイパスすることにより蒸発器入口の冷媒乾度は小さくなるため、熱交換器の細径管化が可能になり、省電力化が可能になる。また、蒸発器入口の冷媒乾度が小さくなると多パス分岐をし易くなり、熱交換器性能の確保と同時に、パスバランスのための開発時間を節減でき、開発効率を向上できる可能性がある。

Table 1 Expected effects by bypassing the gas from the evaporator

Application	Effect	
Reduction of pressure drop in evaporator	Rising of suction pressure of compressor	Energy saving
		Increase of cooling capacity
Low quality of the way for evaporator	Down sizing of pipe in heat exchanger	Energy saving or Compact heat exchanger
	Improvement of pass balance in heat exchanger	Increase of cooling capacity Efficient development

2.2 オイルセパレータへの展開

表面張力を利用した気液分離器は冷媒に限らず、ガスと液の分離が可能であり、吐出ガスと油の分離にも適用できることを基礎実験により確認しており、オイルセパレータへの展開も進めている。

3. 表面張力利用気液分離器の動作原理

Fig.1 に示すように、二相流をマイクロ溝に流入させると、液相は表面張力の作用により溝内に保持されながら下流に流れ、一方、気相は溝の外に流出する。したがって、出口で液相と気相を分けて取り出すことにより表面張力利用気液分離器を実現できる。

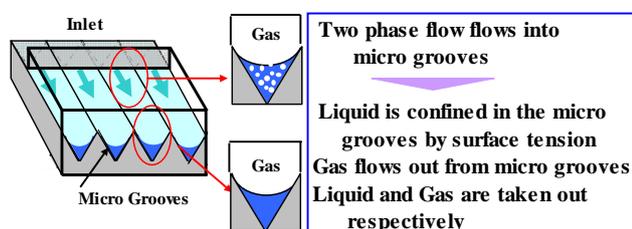


Fig.1 Principle of separator using surface tension

4. 気液分離器に要求される設計条件

4.1 冷凍サイクル側からの条件

気液分離器の理想的な設計は、ガス出口側にガス 100%、液出口側に液 100%の完全分離設計である。しかし、実際の運転条件では、気液分離器に流入するガス流量 G_G および液流量 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%取り出すことは難しい。

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以下となる。

(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 ≈ 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 1% まで許容した。

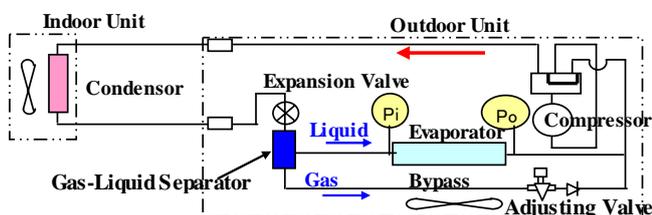


Fig.2 Gas bypass refrigeration cycle

4.2 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先に[1][2]で述べているが、ここでは、マイクロ溝設計の上で最も重要な噴霧流限界について述べる。

溝を流れる冷媒流速が大きくなると、溝壁面に付着した液が気流により吹き飛ばされミストとなる。

気流のせん断力 F_d により液が引きちぎられ、ミストにならない条件は Fig.3 に示すモデルで Ishii[3] により解析されており、式(1)を基に式(2)(3)が導かれている。

$$F\sigma > F_d \quad (1)$$

$$U = \frac{\mu_L V_G}{\sigma} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} < 0.0734 Re_f^{-1/3} \quad (2)$$

$$Re_f = \frac{4\rho_L V_L \delta}{\mu_L} = \frac{4G_L}{L_w \mu_L} \quad (3)$$

ここに、 $F\sigma$: 表面張力、 U : 無次元速度、 Re_f : 膜レイノルズ数、 ρ_L , μ_L , V_L はそれぞれ液の密度、粘性係数、速度、 ρ_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。

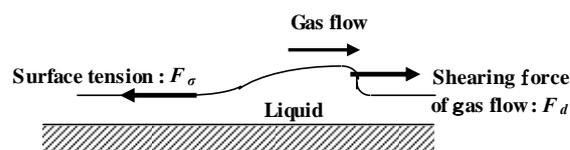


Fig.3 Mist generation model

5. 気液分離器の構造と外観

上記手法により設計した気液分離器の構造を Fig.4 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。第 4.2 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。

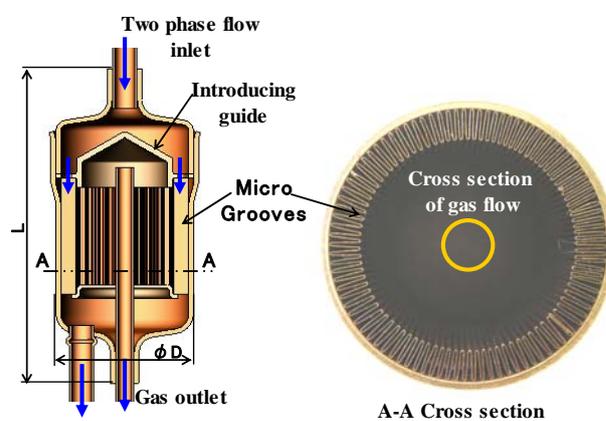


Fig.4 Cross section of gas-liquid separator

Photo 1 に 8kW 用気液分離器の外観写真を示す。外形は 35mm であり、非常にコンパクトな気液分離器であることが判る。

6. 気液分離器のシリーズ化と性能

6.1 気液分離器のシリーズ化

空気調和機の冷凍能力に対応し、4, 8, 12.5 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.5 に示す。



Photo 1 Outward appearance of the separator

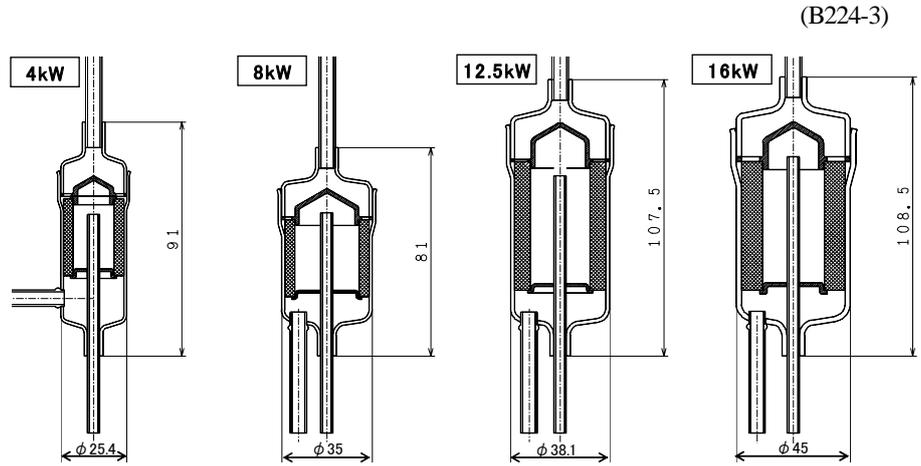


Fig. 5 A Series of the compact gas-liquid separator

6.2 性能評価装置と気液分離器性能

Fig. 6 に性能評価装置を示す. 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.

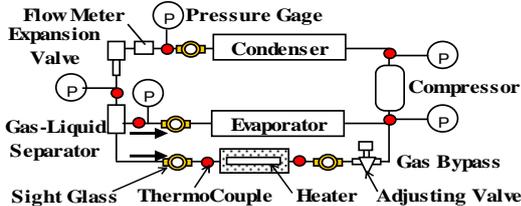


Fig. 6 Experimental setup

Fig. 7 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 g_L/G_L を示す. 図中に各容量における想定定格流量を示した. 各想定定格流量に近づくる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. 7 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% の場合である.

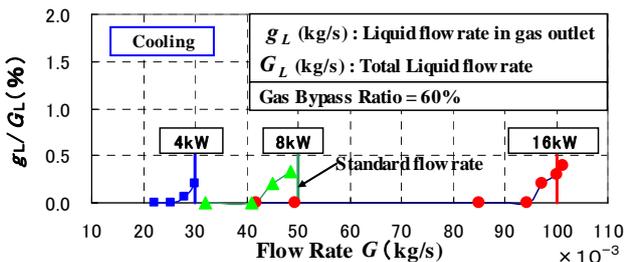


Fig. 7 Performance of the separator

6.3 蒸発温度と気液分離特性

Fig. 8 に流量一定の状態での 8kW 気液分離器内の飽和温度を変化させた場合の全液量に対するガス出口側混入液量 g_L/G_L を示す. 温度が変化しても g_L/G_L の変化は小さい. したがって, 使用条件の蒸発温度が異なっても, 所定の容量に対し最大流量を考慮し設計することにより, シリーズ化対応が可能である.

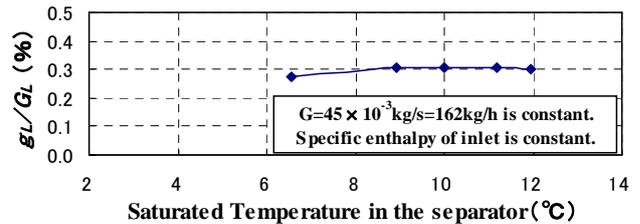


Fig. 8 Influence of saturated temperature in the separator

7. 気液分離器設計手法の適応性の評価

本研究では, 先に述べた噴霧流限界理論を用いて, 溝および気液分離器径を設計し, 4-16kW のシリーズ化を行った. そこで, 4, 8 および 16 kW の実験データを用い, 無次元速度 U を求め噴霧流限界式(2)と比較した結果を Fig. 9 に示す. 4-16kW の気液分離器のいずれも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おり, 本設計手法はシリーズ化への適応性が高いことを確認できた.

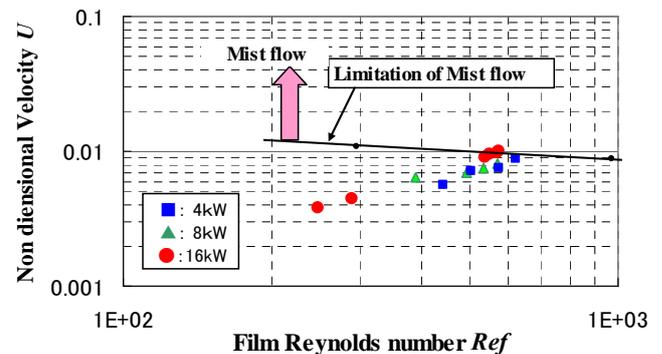


Fig. 9 Limitation of mist flow

8. 蒸発器ガスバイパスによる圧力損失低減効果

8.1 圧力損失低減効果

4kW ルームエアコンの暖房運転時に蒸発器吸い込み空気温度を変化させた場合の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.10 に示す。この例は Fig.2 に示したバイパスに設けた調整弁によりガスバイパス割合を 60%にした場合であり、蒸発器の圧力損失 $P_i - P_o$ は通常サイクルの 45%に低減されている。

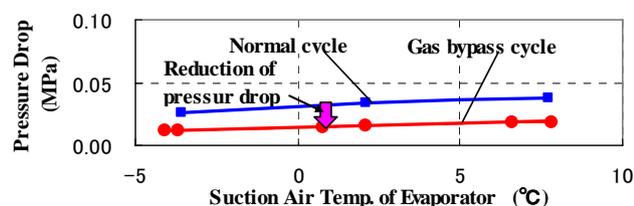


Fig.10 Reduction of pressure drop in evaporator

8.2 蒸発器ガスバイパスと圧力損失低減の関係

蒸発器ガスバイパス割合と圧力損失低減効果の関係は個々の蒸発器パス構成等により異なるが、本研究では大局的にその関係を把握するため、蒸発器入口と出口のガス流量に注目した簡易計算手法により、通常サイクルの蒸発器圧力損失 ΔP に対する蒸発器ガスバイパス時の圧力損失 ΔP_{by} の比を求め、気液分離器入り口乾度 x をパラメータとして Fig.11 に示した。また、Fig.11 の●印は Fig.10 の実験結果、即ち、ガスバイパス割合=0.6, $\Delta P_{by}/\Delta P=0.45$, $x=0.23$ をプロットしたものである。簡易計算手法ではあるが、実測値と比較的によく一致している。

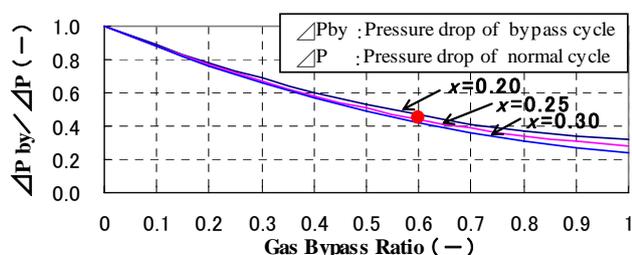


Fig.11 Gas bypass ratio and pressure drop ratio

9. 蒸発器ガスバイパスによる省電力効果予測

以下の仮定および条件で、モリエル線図上の省電力効果を求めた例を Fig.12 に示す。

- 蒸発器損失低減により圧縮機吸込圧力が上昇する。
- 通常サイクルとガスバイパスサイクルの蒸発器平均温度を同じとした。
- 凝縮温度=45°C, サブクール=5°C, スーパーヒート=0°Cとした。
- 通常サイクルの蒸発器圧力損失を 0.05, 0.1 および 0.2MPa とし、ガスバイパスにより圧力損失がそれらの 40%に低減されたとした。

Fig.12 の COP は吸熱ベース、即ち冷凍能力ベースの COP であり、蒸発温度が低いほど、COP の向上効果が

大きい。その理由は、蒸発温度が低いほど飽和蒸気線上のエンタルピーの変化が大きく、圧縮エンタルピー差が低減されることに起因している。

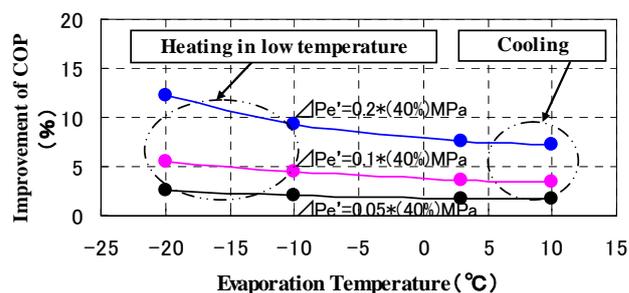


Fig.12 Improvement of COP

なお、Fig.13 に冷凍能力の向上効果を示す。蒸発温度が低いほど、吸熱能力の向上効果は顕著であり、蒸発器ガスバイパスは低温暖房能力の改善に有効である。

その理由は、蒸発温度が低いほど飽和蒸気線上のガス比容積の変化が大きく、回転数が一定でも吸込み比容積が小さくなり、流量が増加することに起因している。

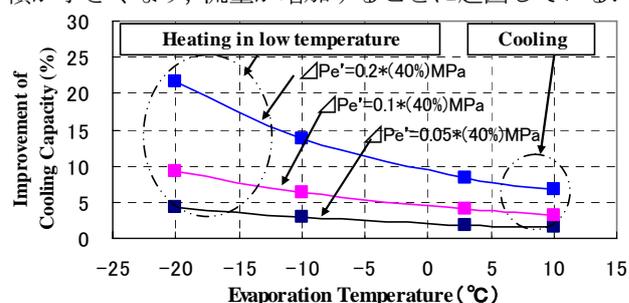


Fig.13 Improvement of cooling capacity

10. 結論

表面張力を利用したコンパクト気液分離器のシリーズ化研究を行い、実験およびシミュレーションによりその効果を検証し、以下の結論を得た。

- 4~16kW 気液分離器を試作・評価した結果、良好な気液分離特性が得られ、設計手法の適応性を確認した。
- 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かにした。
- 本気液分離器は冷凍サイクルの省電力化および冷凍能力の向上に期待できることを明かにした。

謝辞

本研究は、経済産業省の新連携補助金援助を受け、実施した。記して謝意を表す。

REFERENCES

- [1]鹿園他: 第 40 回空気調和・冷凍連合講演会論文集, (2006.4), p.49.
- [2] 岩田他: 第 40 回空気調和・冷凍連合講演会論文集, (2006.4), p.53.
- [3]Ishii, et al.: Inception Criteria for Droplet Entrainment in Two Phase Concurrent Film Flow, *AIChE J.* **21**(2),(1975).