

表面張力を用いた気液分離器の相分離特性に関する研究

Research on the phase separation characteristics of gas-liquid separator using surface tension

*東 隆平 (東大院) 機正 鹿園 直毅 (東大工)
 冷・機正 岩田 博 (日冷工業) 冷正 度会 和孝 (日冷工業)

Ryuhei AZUMA*, Naoki SHIKAZONO*, Hiroshi IWATA**, Kazutaka WATARAI**

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

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

In this study, a novel gas-liquid separator using surface tension is proposed and the performance is evaluated by air-water experiment. Two major limits of gas-liquid separation, i.e. (1) flooding limit in high liquid flow rate region and (2) entrainment limit in high gas flow rate region, are investigated by flow rate measurement and flow visualization. Finally, empirical correlations for both separation limits are proposed. Furthermore, guidelines to design a high-performance and compact gas-liquid separator are discussed.

Key Words : Gas-liquid Separator, Two-phase Flow, Heat Pumps, Surface Tension, Groove Surface

1. 緒言

近年, 民生部門のエネルギー消費削減のため, 高効率ヒートポンプの開発, 普及の重要性が認識されている. しかしながら, ヒートポンプを構成する要素機器の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. 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.

これらのサイクルに共通する構成要素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を用いたものが主であるが, 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・低コスト化が期待される. そのためにはフロン系冷媒や自然冷媒等に適用可能な普遍的な設計手法の確立が必要だが, 現状では気液分離の阻害要因の定量化が十分になされているとはいえない⁽¹⁾⁽²⁾. そこで, 本研究では, 溝付き面を用いた円筒型気液分離器の水-空気二相流での実験を行い, 相分離特性の無次元整理を試みる.

2. 表面張力を用いた気液分離の原理

気液分離の原理を図1に示す. 流路は溝と平滑面が接した上流部(縮流部)と, 平滑面が急拡大した下流部(拡大部)からなる. 縮流部に導入した気液二相流は, 急拡大部での界面エネルギー最小化の効果のため, 拡大部では液相が溝に保持される流動様式となり, 気液分離が達成される.

3. 実験装置・手法

実験装置の概要を図2に示す. 流量制御した水と空気を二重管混合部で環状二相流とし, 鉛直下方に設置したテストセクションに導入する. 両出口のバルブで出口流量比を制御した. 両出口下流に設けた電子天秤で液相流量を, 液相出口に設けた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.

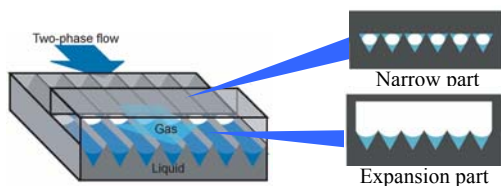


Fig.1 Schematic view of gas-liquid two phase separation

テストセクションとして, 溝付き面を円筒型とした気液分

離器を設計した. その概要を図3に示す. 入口部の環状二相流は, テストセクション入口で多孔質(PVC樹脂, 細孔径300 μm, 空隙率91%)により均等分配され, 溝付円筒と入口仕切体に囲まれた縮流部に流入する. 縮流部長さ L_1 は溝の水力直径の50倍とした.

気液分離器には寸法と溝形状の異なる3種類を用いた. 表1にその仕様を示す. 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, 溝形状およびサイズの違いによる気液分離性能の違いを評価した. また, 拡大部長さ L_2 は各テストセクションに対して $L_2 = 4.6D_i$ としたほか, 三角形溝(溝幅 $b = 1.3$ mm)については $L_2 = 2.3D_i$ としたデータを計測した.

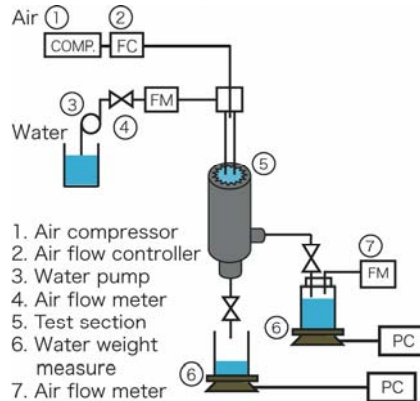


Fig. 2 Experimental setup

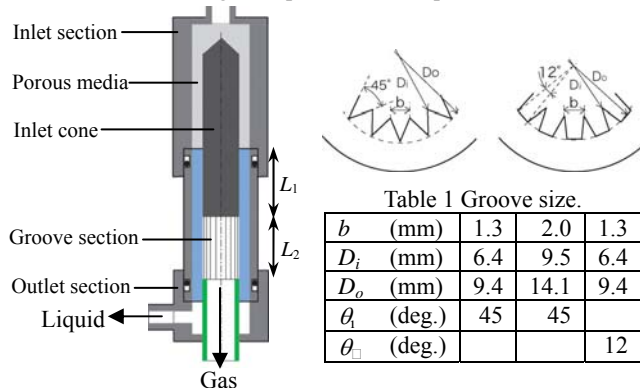


Fig.3 Test section

Table 1 Groove size.

b (mm)	1.3	2.0	1.3
D_i (mm)	6.4	9.5	6.4
D_o (mm)	9.4	14.1	9.4
θ_i (deg.)	45	45	
θ_o (deg.)			12

4. 実験結果

入口乾き度に対応する出口流量比において、導入した液相の1%が気相出口側に流出する状態を気液分離限界とし、実験結果を整理した結果を図4に示す。本研究の実験条件内では気液分離限界として、①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、②高液相流量において液相が溝から溢れ出す液溢れ限界が存在する。図4(a)(b)から、液溢れ限界には縮流部の長さが影響し、図4(a)(c)(d)から、溝寸法と形状が飛散限界に影響するのが分かる。

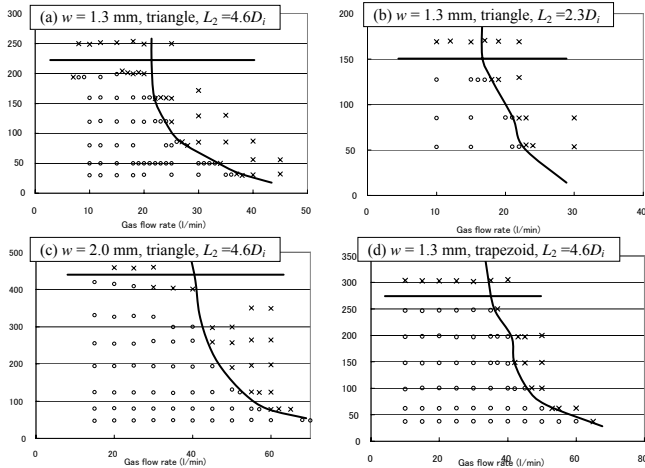


Fig. 4 Separation Performance

5. 考察

5.1 液溢れ限界 3つの溝形状に対し拡大部長さを変化させ、気液分離限界の液流量を求めた結果を図5(a)に示す。

図5(a)から、いずれの条件でも拡大部長さを長くすると液溢れ限界の液流量が増す。この現象を考察するため、工業用硬性鏡を用いて拡大部を可視化した。その結果、図6のように拡大部で液相の流れが脈動し、拡大部の溝がこの脈動に対してバッファとして機能する様子が観察された。溝のバッファとしての働きは、溝がメニスカスに働く表面張力により液相を保持する効果の大きさとしての修正 Bond 数

$$Bo_{mod} = \frac{\rho_L g L_3}{\sigma/b} \quad (1)$$

で表現されると考え、拡大部の液膜 Reynolds 数と修正 Bond 数で実験結果を整理した。結果を図5(b)に示す。液溢れ限界の液膜 Reynolds 数と修正 Bond 数は良い相関を示しており、最小二乗法で近似して以下の無次元整理式を得た。

$$Re_{f,exp,crit} = 1.30 \times 10^2 \ln(Bo_{mod}) + 56.3 \quad (2)$$

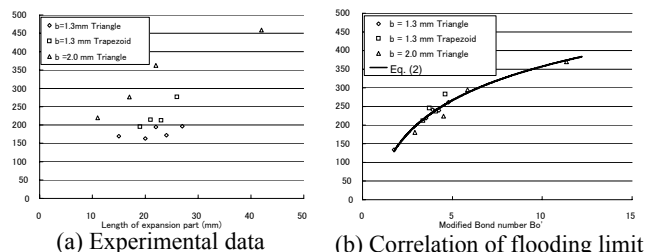


Fig. 5 Flooding limit

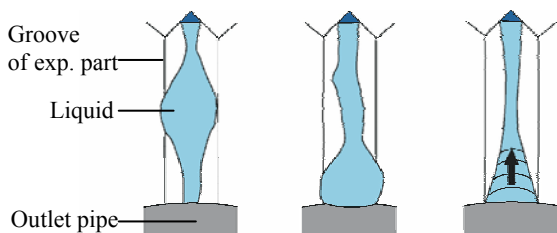


Fig.6 Flooding limit model

5.2 飛散限界 飛散限界について考察するため、液滴飛散現象の可視化を行った。結果を図7に示す。入口仕切体に保持された液膜が、急拡大部で気相の抗力により、溝幅サイズの径の液滴となり飛散する様子が観察された。このことから、支配的な力学因子として、液膜を伸張させる気相の慣性力と液相の表面張力が考えられる。

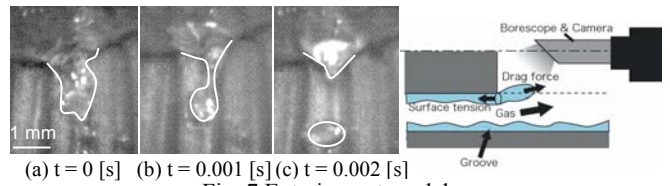


Fig. 7 Entrainment model

拡大部長さが等しい条件(図4(a)(c)(d)参照)における飛散限界を、縮流部の気相の見かけ流速と溝幅を用いた Weber 数と、縮流部の液膜 Reynolds 数で整理した結果を図8に示す。図から、気相 Weber 数で整理することで溝形状・寸法によらず、飛散限界における2つの無次元数は良い相関を示す。そこで、液溢れの飛散限界への影響を考慮するため、液膜 Reynolds 数を式(2)の液溢れ限界との比をとって液溢れ率 F (式(3))を定義し、 F と気相 Weber 数で図4の全結果を整理した。その結果を図9に示す。図9より、拡大部長さ、溝形状、溝寸法に関わらず、2つの無次元数で結果をうまく整理できることが分かる。図9から、飛散限界の無次元整理式として、式(4)を得た。

$$F = Re_{f,expansion} / (1.30 \times 10^2 \ln(Bo_{mod}) + 56.3) \quad (3)$$

$$We_{g,narrow,crit} = 9.71 \times F^{-0.673} \quad (4)$$

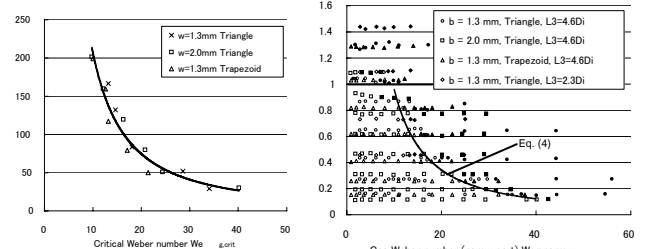


Fig. 8 Correlation of entrainment limit

Fig. 9 Correlations for two limits

6. 結言

溝付き面を用いた表面張力型気液分離器を対象に、水-空気系での実験を行い、以下の結論を得た。

- ・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限界を確認した。
- ・液溢れ限界を、拡大部液膜 Reynolds 数と、溝の液保持力を表す修正 Bond 数を用いてモデル化し、無次元整理式(2)を得た。
- ・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 Weber 数と液溢れ率 F を用いて整理して無次元整理式(4)を得た。
- ・以上から、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 Weber 数を下げ、液相流量に対して式(2)を満たす拡大部長さを設定する必要があると考えられる。

謝辞

本研究は、NEDO 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。

参考文献

- (1) 鹿園, 他 3 名, 日本機械学会 2005 年度年次大会講演論文集 (2005), 243-244.
- (2) 鹿園, 他 4 名, 第 40 回空気調和・冷凍連合講演会講演論文集 (2006), 49-52.