Y字分岐管による気液二相流の相分離特性に関する研究*

(第2報, 管径の影響と微小重力場実験結果)

浅野 等^{*1}, 藤井照重^{*1}, 竹中信幸^{*1}
荒川哲矢^{*2}, 葉 爽^{*2}A Study of the Phase Separation Characteristics in
Gas-Liquid Two-Phase Flows by Impacting Y-junction
(2nd Report, Experimental Results of the Effect of the
Tube Diameter and Under Microgravity)Hitoshi ASANO^{*3}, Terushige FUJII, Nobuyuki TAKENAKA,
Tetsuya ARAKAWA and Suang YE^{*3} Kobe University, Department of Mechanical Engineering,
1-1 Rokkodai, Nada-ku, Kobe-shi, Hyogo, 657-8501 Japan

In order to develop a phase separation technique under microgravity condition, the method of the impacting Y-junction by utilizing the difference of inertia force between gas and liquid phases is proposed. Experiments of phase separation in an impacting Y-junction of 10 mm ID placed in a horizontal plane were carried out under normal and microgravity conditions using air or gaseous nitrogen and water as working fluids. The phase separation performance under microgravity was measured by controlling the extraction rate during the microgravity period of about 20 seconds by parabolic trajectory flight of the airplane (G II). As a result, it was shown that liquid extraction from two-phase flow was possible by using a Y-junction for every condition in the microgravity experiments. About 60% maximum of all the liquid phase could be extracted from incoming gas-liquid two-phase flow by Y-junction under microgravity in our experimental range.

Key Words: Gas-Liquid Two-Phase Flow, Phase Separation, Microgravity, Y-junction, Flow Pattern

1. 緒 言

発熱量や熱輸送距離の増大による排熱能力向上の要求から人工衛星, スペースシャトルそして宇宙ステーションなどの排熱技術, さらに宇宙発電におけるランキンサイクル方式などにおいて, 作動流体の潜熱を利用したエネルギー輸送方式が必要となっている. この潜熱二相流体ループでは作動流体を駆動するポンプへの対応, さらには凝縮器の高効率化に対して, 気液分離が必要とされる. 地上重力場では浮力により気液を容易に分離することができるが, 微小重力場では浮力の消失から, 地上重力場と同様の手法を適用できない. 微小重力場での気液分離に対し, 濡れの悪い管壁面に気相を捕獲し, 除去する方法が報告されている⁽¹⁾が, この手法では気相分散流への適用は困難であると考えられる.

本研究は, 微小重力場の気液分離のため, 配管内を流動する気液二相流から液相を連続抽出するデバイスとしてY字分岐管による手法を提案するものである. 前報

(2) では, 水平面に設置された衝突型T及びY字分岐管(管内径: 10 mm, 分岐角度: 30, 60, 90°)に対する空気-水二相流の相分離実験を地上重力場で行い, 以下の結果を得た. (i)層状及び波状流の気液が上下に分離する入口流動様式の場合, 完全な液単相の抽出はできないが, その他の条件では流量分配比の調節により液相のみを抽出できる. (ii)気液二相流からの液単相流の最大抽出量は分岐角度に依存し, 分岐角度を小さくするほど増大する. すなわち, Y字分岐管における気液二相流の相分離特性は入口流動様式と分岐形状に依存する結果を得た. 微小重力場では重力の消失により流動様式が地上重力場のものと大きく異なると予想され, 特に, 気液が上下に分離した流れは存在しないことから, 微小重力場での相分離特性の把握とその性能評価が必要となる.

ここでは, まず, 気相抽出側の流路を細くすることによる性能向上効果について空気-水を用いた地上重力場の結果を示し, 次に, 航空機(ダイヤモンドエアーサービス, GII)の放物線飛行を利用した微小重力環境下において, Y字分岐管における窒素ガス-水常温二成分二相流の相分離実験を行った. 約20秒の微小重力時間で, 流量分配比を調節することにより相分離性能を評価

* 原稿受付 2002年1月15日.

^{*1} 正員, 神戸大学工学部(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1).^{*2} 神戸大学大学院.

E-mail: asano@mech.kobe-u.ac.jp

し、相分離性能に及ぼす重力の影響を示す。また、分岐部流動挙動の観察結果から、入口流動様式の影響について考察を加える。

2. 地上重力場での相分離性能 (管路径の影響)

2.1 実験装置と方法 地上重力場での相分離特性実験装置の概略系統を図 1 に示す。作動流体として空気-水を使用し、気液混合部⑩で形成された気液二相流は、分岐試験部と同じ管内径の水平直管部 (内径: 10 mm, 長さ: 1765 mm) を経て水平面に設置された分岐試験部に流入し、出口 ex1, ex2 に分流される。各出口に設置されたニードルバルブ V_{ex1} , V_{ex2} により流量分配比が設定され、気液各相の流量がサンプリングにより計測される。分岐試験部の詳細を図 2 に示す。試験部は透明アクリル樹脂製である。分岐角度 θ は 90° , 60° , 30° の 3 通りとし、 $\theta = 90^\circ$ の T 字分岐試験部に対し、気相流出側出口内径 D_{ex2} を分岐部中心から 70 mm の範囲で 2, 5, 7, 9, 10, 12 mm の 6 通りに設定した。但し、相分離特性に及ぼす分岐角度の影響に関する結果は既報⁽¹⁾ に示した。ここで、 $\theta = 30^\circ$ の Y 字分岐試験部に対し $D_{ex2} = 5$ mm とした試験部 I は後述の微小重力実験で使用した。実験条件としては、試験部入口において液相見かけ流速 j_{Lin} を 0.5 m/s 一定とし、気相見かけ流速 j_{Gin} を 0.1, 1.0, 7.0 m/s の 3 通りに変化させた。

2.2 実験結果と考察 分岐角度 $\theta = 90^\circ$ (T 字分岐管) に対し、片側 (ex2) の出口径を変化させた場合の相分離特性の測定結果を図 3(a)~(c) に示す。入口 in に対する出口 ex1 側の質量流量比 W_{ex1}/W_{in} に対しその乾き度比 x_{ex1}/x_{in} がプロットされている。 $j_{Lin} = 0.5$ m/s に対し、 j_{Gin} を (a) 0.1 m/s, (b) 1.0 m/s, (c) 7.0 m/s とした場合の結果である。入口部の流動様式はそれぞれ (a) プラグ流, (b) スラグ流, (c) 環状流であった。図中、破線は $D_{ex2} = 10$ mm の実験結果を示す。ここで、 $x_{ex1}/x_{in} = 0$ は出口 ex1 側が液単相流を意味し、気液二相流から分岐管を用いて液相のみの抽出が可能であることを示す。本研究では $x_{ex1}/x_{in} < 0.01$ を相分離可能と判断し、相分離可能となる上限を 気泡混入開始点、そのときの W_{ex1}/W_{in} を $(W_{ex1}/W_{in})_{gip}$ と定義した。 $(W_{ex1}/W_{in})_{gip}$ は相分離性能の指標であり、この値が高いほど相分離性能がよいといえる。図(a)をみると、 $W_{ex1}/W_{in} < 0.18$ の範囲では $x_{ex1}/x_{in} \approx 0$ であり、入口質量流量に対しおよそ 18% の液を出口 ex1 から抽出できることがわかる。また、 $W_{ex1}/W_{in} = 0.5$ の場合、分岐部形状の対称性から $x_{ex1}/x_{in} = 0.5$ となる。一方、 D_{ex2} を 5 mm に小さくした場合(図中口印)、 $W_{ex1}/W_{in} \approx 0.3$ においても $x_{ex1}/x_{in} \approx 0$ であり相分離性能の向上がわかる。そ

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus for normal gravity experiments.

Fig. 2 Test section configuration.

他の入口条件 (図(b), (c)) に対しても同様に内径を小さくすることによる相分離性能向上効果が確認できた。

各条件の相分離特性曲線より気泡混入開始点を決定し得られた $(W_{ex1}/W_{in})_{gip}$ を D_{ex2} に対して図 4 に示す。いずれの条件に対しても D_{ex2} を小さくすることによって相分離性能が向上していることが分る。特に、9 mm と 5 mm の間での変化が大きく、入口流動様式がプラグ流の場合、 $(W_{ex1}/W_{in})_{gip}$ はほぼ 2 倍に向上した。これは、質量流量比が同じ場合、流路径を小さくすると、流速の増大により入口流の静圧が低下し、圧力勾配が大きくなるために気相が流入しやすくなったものと考えられる。しかし、 $D_{ex2} < 5$ mm では性能に大きな差は見られない。これは、 $D_{ex2} < 5$ mm では、入口流動様式が間欠流の場合、気泡径に対し D_{ex2} が小さくなるため、表面張力の影響により流入が妨げられることによると考えられる。なお、環状流の場合、 $D_{ex2} = 2$ mm の条件では出口 ex2 側の流動抵抗が大きくなりすぎて $W_{ex1}/W_{in} < 0.6$ の条件に設定できず、したがって出口 ex1 側を液単相にすることはできなかった。

3. 微小重力場での相分離性能

3.1 実験装置及び方法 微小重力場での装置の概略系統を図5に示す。実験システムの制約から作動流体として窒素ガス-水を使用し、水はタンク①よりギヤポンプにより、窒素ガスは圧力容器⑥からそれぞれ気液混合部へ供給される。液流量はインバータによりギヤポンプの回転数を、気相流量は調圧弁⑦により臨界ノズル⑧の入口圧力をそれぞれ調節し、所定の値に設定した。気相の供給は電磁弁⑩の開閉で行った。ポンプへの気相の混入を防止するため、水タンク①下部にステンレス製のメッシュがつめられ、界面が保持されている。気液混合部で形成された気液二相流は水平直管部においてビデオカメラで流動様式が観察された後、水平面に設置された分岐試験部に流入し、分流されタンク①へ戻される。流量分配比の調節はニードルバルブで行われるが、液相を抽出する出口 ex1 側のバルブ V_{ex1} のノブにはステッピングモーターが直結され、モーターの遠隔操作で流量調節が可能である。分岐試験部には $\theta = 90^\circ$ の T 字分岐管 (図2中、F 試験部) に加え、前節で述べた地上重力場

Fig.5 Schematic diagram of experimental apparatus for microgravity experiments.

での実験で高い相分離性能を得た $\theta = 30^\circ$ で出口 ex2 側の管径 $D_{ex2} = 5, 10$ mm の2種類のYジャンクション試験部 (図2中のI, J 試験部) を用いた。

実験条件を流動様式線図上にプロットし、図6に示す。図中、破線は図1の実験装置を用いて地上場での相分離実験で得られた入口流動様式観察により作成した遷移境界線である。一方、実線は、水平直管試験部 (内径 10mm, 長さ 1400mm) に対する、航空機の放物線飛行を利用した微小重力環境での空気-水二相流の実験結果によるものである⁽³⁾。図中、微小重力実験での分岐試験部入口の実験条件が○印でプロットされている。微小重力場では層状流、波状流は存在せず、気泡流、プラグ流、スラグ流、もしくは環状流へと推移する。

Fig. 6 Experimental conditions under μG .

実験は、航空機（ダイヤモンドエアサービス、G-II）の放物線飛行を利用した微小重力環境下で行われた。微小重力持続時間は約 20 秒、重力レベルは $10^{-3} \sim 10^{-2} G$ である。相分離性能の計測手順を図 7 に従い説明する。図は上部より、放物線飛行中の重力、各入口流速 (j_{Lin}, j_{Gin})、バルブ V_{ex1} の開度、そして出口 ex1 側の液流量 Q_{ex1} の時間変化を示す。微小重力区間の前後には過重力環境 ($\approx 1.8G$) がある。過重力環境の影響を除去するため、微小重力突入後に電磁弁（図 5 中の点⑩）を開け、気相を試験部に供給した。バルブ V_{ex1} は出口 ex1 側に気相が混入しない程度に絞っておき、微小重力環境下で分岐試験部の流動が安定していることを確認した後、ステップモーター（図 5、⑭）により一定の回転速度で開放していった。バルブ開度が增大するほど Q_{ex1} が增大しているのがわかる。これは、図 3 の相分離特性線図において横軸 W_{ex1}/W_{in} を徐々に増大させる操作に相当する。他方、微小重力場での分岐試験部における相分離挙動及び出口 ex1 側の流動挙動の可視化結果より相分離がなされているか、否かを判断し、気相が ex1 側に混入し始める時間を特定し、気相混入時期と図 7 の流量計測値を照合することで $(W_{ex1}/W_{in})_{gip}$ を計測した。なお、 $(W_{ex1}/W_{in})_{gip}$ への重力の影響を評価するため、地上重力場においても同じ実験装置を使用し、同様の計測を行った。

3.2 実験結果と考察 分岐角 $\theta = 90^\circ$ の試験部に対する $j_{Gin}=0.1$ m/s, $j_{Lin}=0.1$ m/s における分岐部上面からの可視化結果を図 8 に示す。左（図 10(a)）は地上重力場、右（同(b)）は微小重力場での結果であり、分岐部入口での水平方向から見た流動様式がそれぞれ図の上方に対応して示されている。この入口条件では、地上重力場では気液が上下に分離した層状流となるため Y 分岐管で相分離は達成されていないが、微小重力場では入口流動様式が間欠流（プラグ流）となるため、分岐部に流入し

Fig. 7 Experimental Procedure during a parabolic flight.

Fig. 8 Effect of gravity on phase separation behavior. ($\theta=90^\circ, j_{Gin}=0.1$ m/s, $j_{Lin}=0.1$ m/s) Fig. 9 Effect of gravity on phase separation behavior. ($\theta = 90^\circ, j_{Gin} = 0.1$ m/s, $j_{Lin} = 0.5$ m/s, $W_{ex1}/W_{in} = 0.25$)

た気泡が出口 ex2 側へのみ流出し、相分離が達成されている。

$j_{Lin}=0.5$ m/s と j_{Lin} が増加した場合の結果を図 9 に示す。入口に対する出口 ex1 側への質量流量比 $W_{ex1}/W_{in} = 0.25$ の場合である。図の上方に示す入口流動様式をみると地

上重力場では気泡は浮力によって管上壁に沿って流れるため、分岐試験部上方から見ると、気泡は入口管の中心に沿って流入し、相分離が達成されている。しかし、微小重力場では、浮力の消失より気泡は管断面に対しランダムな分布で分岐試験部へ流入する。分岐部上方からの映像を見ると、液相を抽出する出口 ex1 側近くに流入する気泡が液相に押し出されるように出口 ex1 側に混入する様子が確認される。この現象は相分離性能低下の原因となる。

分岐角 $\theta=30^\circ$ 、 $D_{ex2}=10\text{ mm}$ の試験部に対し、入口流動様式がスラグ流の場合 ($j_{Gin}=0.9\text{ m/s}$, $j_{Lin}=0.5\text{ m/s}$)、上方からの分岐部での相分離挙動の連続画像を図 10(a), (b) に示す。地上重力場 (図(a)) の場合、入口に対し出口 ex2 側の流量が低下するため、気相が分岐部に閉塞し、後続の液スラグにより分断され、気泡が出口 ex1 側へ混入する様子が観察された。一方、微小重力場では気相は管中央を流動するため、気泡速度がより増大し気相の閉塞は観察されず、相分離性能が向上している。

次に、相分離計測時における相分離挙動の可視化結果と出口 ex1 側流量の経時変化を併せて図 11(A), (B) に示す。いずれも分岐角 $\theta=30^\circ$ 、 $D_{ex2}=10\text{ mm}$ の試験部に対し、入口流動様式がスラグ流の場合 ($j_{Gin}=0.9\text{ m/s}$, $j_{Lin}=0.3\text{ m/s}$) である。図(A)が地上重力場、図(B)が微小重力場の結果であり、その時の

出口 ex1 側のタービン流量計 (図 5 中、⑩) の出力の時間変化がそれぞれ右側に併せて示されている。時刻 0 より出口 ex1 側のバルブが徐々に開けられ、流量が増加する。相分離挙動の可視化結果は流量のグラフ中に示された ↓ の条件で得られたものである。タービン流量計の出力から、地上重力場の場合 (図(A)), 5 秒まではバルブ開にも関わらず、流量はほとんど変化しない。これは、気泡長さが長いスラグ流の場合、地上重力場では気相が管上部を流れるため、気相流動部では層状流に

似た流動様式となっているためと考えられる。

入口流動条件を変化させた場合に対し得られた相分離性能の結果を入口流動様式で分類し、 j_{Lin} に対し図 12(a)~(c) に示す。入口流動様式はそれぞれ、(a)プラグ流もしくは気泡流、(b)スラグ流、(c)環状流の場合である。

Fig.10 Continuous image of phase separation in Y-junction ($\theta=30^\circ$, $j_{Gin}=0.9\text{ m/s}$, $j_{Lin}=0.5\text{ m/s}$, $W_{ex1}/W_{in}=0.29$)

(a) Flow behavior in Y-junction (top view).

(A) Normal gravity.

(a) Flow behavior in Y-junction (top view).

(B) Microgravity.

Fig.11 Example of measured results of phase separation performance during a parabolic flight. ($\theta=30^\circ$, $j_{Gin}=0.9\text{ m/s}$, $j_{Lin}=0.3\text{ m/s}$, Inlet flow regime : Slug flow)

いずれも微小重力場での相分離性能は地上重力場に対し、同等もしくはそれ以上の相分離性能が得られている。特に j_{Lin} が低流速の場合 ($j_{Lin} \approx 0.1 \text{ m/s}$)、微小重力場では気相が管中央を流れ、気液が上下に分離・流動することがなくなるため相分離性能が向上し、すべての実験条件に対し気液二相流からの液相の抽出が可能であった。また、分岐角度を小さくすることによる相分離性能への改善効果は、微小重力場においても地上重力場同様に得られた。図(a)において、 $j_{Lin} > 0.3 \text{ m/s}$ の条件では地上重力場での相分離性能が微小重力場の結果より高くなっているが、これは、図 9 で示したように、微小重力場では気相が流路断面に分散して流入するため、気泡が混入しやすくなったものである。気相の分布は分岐部上流の配管形状の影響を受けると考えられることから、入口部を相分離が容易になる相分布に操作することが有効である。

4. 結 言

Y 字分岐管 (入口管径 10 mm) による気液二相流の相分離特性に及ぼす管径の影響を明らかにするため、気相抽出側の管径を細くした試験部による相分離実験を地上重力場で行い、さらに、微小重力場における相分離性能を明らかにするため、航空機の放物線飛行を利用した微小重力場で窒素ガス-水二相流の相分離実験を行った。微小重力実験では相分離挙動の可視化、そして 20 秒の微小重力区間でバルブを連続的に操作することで相分離性能を測定・評価した。得られた結果は以下のようである。

- (1) 気相排出側の流路内径を小さくすることで、気相排出速度が増し、流出口での圧力勾配が大きくなるために相分離性能は向上した。しかし、地上重力場での実験からは 5mm 以下では細径化の効果は得られなかった。
- (2) 微小重力場では気液が上下に分離しないため、全条件において液相の抽出が可能であった。スラグ流、環状流においても液相低流速域では同様のことが言える。
- (3) 入口流動様式が気泡流の場合、気相が流路断面に分散して流入するため、気泡は液相側へ混入しやすく、相分離性能の低下が見られた。
- (4) 地上重力場での実験と同様に、分岐角度を小さくすること、そして気相抽出側管径を細くすることによる相分離性能向上効果が確認され、4~6 割の液相が抽出できた。

謝 辞

本研究は (財) 日本宇宙フォーラムが推進している「宇

Fig.12 Effect of gravity and Y-junction configuration on phase separation performance.

宙環境利用に関する地上研究公募」プロジェクトの一環として行われたものである。記して感謝する。

参 考 文 献

- (1) 井口・水野, “濡れ性を利用した気液分離”, 第 17 回宇宙利用シンポジウム講論集, (2000), pp.313-314.
- (2) 浅野, 藤井, 竹中, 迫田, “Y 字分岐管による気液二相流の相分離特性に関する研究 (第 1 報, 空気-水二相流の地上場での実験結果)”, 日本機械学会論文集 (B 編), 67-652 (2001), pp. 350-355.
- (2) 崔, 藤井, 浅野, 杉本, “微小重力下における気液二相流の流動特性に関する研究”, 第 38 回日本伝熱シンポジウム講論集, (2001), pp.775-776.