多連分岐管における二相流の分配特性について*

渡 辺 学^{*1}, 勝 田 正 文^{*2}
永 田 勝 也^{*2}, 佐 久 間 清^{*3}

Two-Phase Flow Distribution in Multipass Tube

Manabu WATANABE, Masafumi KATSUTA,
Katsuya NAGATA and Kiyoshi SAKUMA

Experimental study has been performed using two different types of multipass tubes, one with 4 vertical upward passes attached to a horizontal main pipe and the other with 5 horizontal passes placed to a vertically oriented main pipe. Passes had 6 [mm] I. D., and the I. D. of main pipes were 20 [mm] for the vertical type and 6 [mm] for the horizontal type. Multipass tubes simulated evaporators for air-conditioning systems, and the refrigerant R 11 was used as the working fluid. Vapor and liquid flow rates at each pass were measured under various conditions of two-phase mixture at main pipe inlet, i. e., inlet flow rate and quality. Results suggested that measured values of flow distribution ratio presented a marked distinction between the vertical and horizontal types. On the other hand, in spite of different pass orientations, the same data trend that the flow distribution is dominated by the main tube inlet flow condition, was observed, and the flow division ratio was estimated in terms of both phase flow rates before the junction. Based on these results, the flow split model was suggested and an attempt for the prediction of flow distribution was made.

Key Words: Two-Phase Flow, Flow Distribution, Multipass Tube

1. ま え が き

近年, 冷凍・空調の分野では, 冷媒流路を複数の枝管に分けた多連分岐管を蒸発管として用いることで, 軽量化と同時に飛躍的な性能向上が図られるようになってきた。しかし蒸発器入口で二相流状態となる場合, 各枝管での冷媒流量は不均等となることが多く, その流量分配機構に関する研究例も乏しい⁽¹⁾。従来, 水の単相流を用いた管寄せにおける流量分配⁽²⁾や, 単管のT分岐部における二相流の相分離の問題⁽³⁾は数多く研究されているが, 多連分岐管と気液二相流を組合せた研究例⁽⁴⁾は極めて少数である。このため設計段階での性能予測が困難であり, 最適設計手法のための指針が強く求められている。

これをふまえて本研究では, 空調用蒸発器の二相冷媒流分岐構造を4本の垂直枝管⁽⁵⁾⁽⁶⁾または5本の水平枝管⁽⁷⁾でモデル化した多連分岐管を実験装置として用い, 各枝管への気液両相の流量分配を調べる。二種の多連分岐管はそれぞれ車載用および家庭用空調器を

想定したもので, 両者について分岐前流量, 乾き度, 枝管本数を変化させた実験を行うことにより二相流分配特性を究明し, これらの因子の及ぼす影響を調べて, 蒸発器設計手法の確立に資することを目的とする。

なお, 本報では枝管に熱負荷を加えない条件の実験結果について, 主として二相流の流動状態の観察に注目して, 分配特性の整理および考察を行った。

記 号

Γ : 流量分配割合

G : 質量流束 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$

X : 乾き度

n : 枝管本数

添 字

L : 気相

G : 液相

T : 気液混相

j : L, G あるいは T に対応

i : 枝管番号

M : 主管

P : 枝管

H : ヘッド入口

* 原稿受付 平成5年8月25日。

^{*1} 准員, 早稲田大学大学院 (〒169 東京都新宿区大久保3-4-1)。

^{*2} 正員, 早稲田大学理工学部。

^{*3} 正員, 三菱電機(株) (〒422 静岡市子鹿3-18-1)。

2. 実験装置

2・1 循環経路概略 実験装置の概略を図1に示す。これは水平枝管の装置であるが、テストセクション以外は垂直枝管もほぼ同様なものとなっている。図中の実線が冷媒 R 11 の循環系、破線が冷却水の循環系を表す。リザーバ(15)からポンプ(1)によって循環させられる冷媒は、メインバルブ(20)とバイパスバルブ(21)で流量を調節し、積算容積形流量計(5)で流量を設定した後、予蒸発器(6)で熱入力を加えて二相流状態となってテストセクションに流入する。分配ヘッダ(7)後の枝管部分にはガラス管を用いて流動を可視化している。このヘッダユニットはガラス製ヘッダに交換することで、分岐部の可視化も可能となっている。蒸発管(9)にはヒータエレメントが密に巻付けてあり、任意の熱負荷をかけることができる。外側はグラスウールで囲って断熱を施してある。各枝管の冷媒二相流は、セパレータ(10)で気相と液相とに相分離され、気相はオリフィス流量計(12)で、液相は積算容積法でそれぞれ流量を測定した後、気相はコンデンサ(14)を経てリザーバ(15)へ、液相は直接リザーバへ戻る。

冷却水に関しては、水リザーバ(17)とチリングユニット(18)との間で循環させて、水温を約 6°C に保つ。この冷却水はコンデンサとリザーバにそれぞれポンプで送られ、ニードルバルブで水量を調節する。また、ガスマニホールド(13)の内圧をマノメータで測定し、これをコンデンサの凝縮量を調節することで大気圧に保ち、後流の影響が分岐部に及ぶのを防いでいる。なお、

図1 実験装置概略

この条件は全実験を通じて $\pm 10 \text{ cmH}_2\text{O}$ の精度で実現された。図中の丸で囲んだ P および T はそれぞれ圧力、温度の測定点である。圧力はマノメータとブルドン管式圧力計を用いて 4 点、温度は K 形熱電対を用いて 27 点の測定を行っている。

2・2 テストセクション 水平枝管のテストセクションの詳細を図2に示す。これは垂直上昇主管に 5 本の枝管を取付けたもので、すべての管内径は等しく 6 mm である。この管径は実際の空調蒸発器の枝管とほぼ等しい。各枝管にはボールコックが取付けてあり、これを閉じることで任意の枝管を塞ぐことができ、枝管本数を変化させた実験が可能となっている。

垂直枝管の場合、水平主管から 4 本の垂直上昇枝管に分岐する構造となっており、枝管内径とピッチは水平形と同じである。ヘッダ内径だけは 20 mm と異なった値であるが、これより主管と枝管の断面積比が 0.36 となり、実機における 0.3 に近い値となる。

3. 実験条件

実験は表1にまとめたような条件で行った。ヘッダ入口条件および本枝管径は実機で想定される流動を考慮して決定した。また冷媒には、常温で大気圧となる R 11 を用いて可視化を容易にしている。

4. 分岐部流動状態

二相流では流動様式が、その特性を論ずる上で重要な要素となる。そこでまず、可視化用ガラスヘッダを用いた観察結果について述べる。図3は垂直枝管における分岐部流動状態の一例である。これよりヘッダ入口では層状流もしくは波状流の領域であり、奥側へいくほど界面が高くなっていることがわかる。これは液

表1 実験条件

	Vertical type	Horizontal type
Header mass flux $G_H \text{ kg/(m}^2\text{s)}$	40, 80, 120	440, 620
Header quality X_H	0, 0.1, 0.2, 0.3	0, 0.03, 0.07, 0.1, 0.2, 0.3
Number of passes n	2, 3, 4	3, 4, 5

図2 テストセクション詳細

相側に慣性力が強く作用して奥側へ行きやすいため、このため手前側の枝管には液相が流入しにくく、ドライアウトが起こりやすい要因になると考えられる。

水平枝管においては本管径が細いため流速が高く、ヘッダ入口流動様式は環状流かフロス流領域にある。それが上側へ行くほど流速が低下して、徐々にスラグ流領域へと遷移しているようである。また本管が垂直なので内部の流動は軸対象であり、枝管開孔部に常に液相が存在するために、枝管のドライアウトは垂直枝管に比べて起こりにくいようである。

5. 流量分配特性

5.1 垂直枝管 実験の結果について、まず各枝管への流量分配割合とヘッダ入口乾き度の関係を、 $n=3$ について図4に示す。これは各枝管への気液それぞれの質量流量を、冷媒総流量を1とした割合で表したものである。図の下から順に $i=1, 2, 3$ の値を表し、それぞれの中で黒い部分が気相、白い部分が液相となっている。これより、過冷却域では液相が各枝管にほぼ均等に分配されるが、ヘッダ入口乾き度 X_H が増大するに伴い奥側枝管への分配流量が増大してゆくことがわかる。このとき手前側枝管では分配流量が減少するとともに特に液相が流入しにくくなり、 $i=1$ においては完全に乾き上がってしまう。またこの現象は、ヘッダ入口流量 G_H が増加するとともに低乾き度域か

ら見られるようになる。同一ヘッダ入口乾き度であれば、ヘッダ入口流量が増大しても気相流量分配割合は変動が少ない、ということも特徴として挙げられる。

次にヘッダ入口流量の増加に対する、各枝管の冷媒流量と枝管乾き度の変化を検討するために、 $n=3$ の場合のヘッダ入口質量流束と枝管流量分配割合および枝管乾き度の関係を図5に示す。先の結果と同様に、ヘッダ入口流量の増加は奥側枝管への分配流量を増加させ、手前側枝管を乾き上がらせる効果があることがわかる。

また枝管本数 n を変化させた実験の結果について枝管1同士を比較したところ、後述の図6に見られるように、それらは流量・乾き度ともに類似の傾向を示していた。すなわち枝管1への流量分配は本数 n に関係なくヘッダ入口の流動状態に強く支配されていると言える。さらに進めて各枝管への流量分配が各分岐直前主管部の流動状態によって決定されると仮定すれば、枝管1における気液各相の流量が等しいことから分岐部2の直前主管での流動状態も同一となり、それによって決定される枝管2の流量分配も互いに同様の傾向を示すものと考えられる。そこで同一ヘッダ入口条件の下で枝管本数を $n=2, 3, 4$ と変化させた実験結果について、枝管1同士および2同士の流量をまとめて図6(a)に、同様に乾き度について(b)に示す。ただし枝管2における $n=2$ の場合は、それが最奥側枝管となり比較が無意味であるため、図示していない。

図3 垂直枝管分岐部流動状態

(a) $G_H = 40 \text{ kg/m}^2\text{s}$ (b) $G_H = 120 \text{ kg/m}^2\text{s}$

図4 垂直枝管の流量分配特性

(a) 枝管流量分配割合

(b) 枝管乾き度

図5 枝管流量分配と入口質量流束の影響

(a) 枝管流量分配割合

(b) 枝管乾き度

図6 枝管本数を変化させたときの枝管流量分配

図6より、いずれも同様の傾向になっていることが確認でき、枝管2同士についても傾向がほぼ類似していることから、各枝管の流量分配特性は各分岐直前主管部の流動状態に大きく依存している、という前述の前提は妥当なものであると考えられる。

この結果に基づいて、ヘッダ入口設定条件のみから枝管流量分配が計算で決定できると推考される。具体的方法については6章で述べることにする。

5・2 水平枝管 水平多連分岐管の各枝管における気液各相の流量分配を図7に示す。これは気液各相流量を、図4と同様に総循環流量に対する質量流量比で表したもので、図7(a)、(b)はそれぞれ $G_H=440 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 、 $620 \text{ kg/m}^2\text{s}$ の場合で、 $n=5$ である。

ヘッダ入口で過冷却状態にある場合、上側の枝管にまで冷媒が届かず何も流れない状態となり、下側に偏った著しい不均等分配がみられる。ヘッダ入口で乾き度が零より大となればどの枝管にも冷媒が流入するようになり、そして乾き度が大きくなるにつれて最上部枝管への液相分配流量が増加する。ところが最下部枝管の液流量は乾き度の影響を比較的受けにくく、液相の分配は両端の枝管で多く中側ほど少ないものとなる。

入口流量が増加すると、奥側枝管に対してはヘッダ乾き度の増加と同様の効果を及ぼして液分配が増加するが、手前側枝管はそれほど影響を受けず、結果として枝管間隔差をさらに拡大する傾向がある。

図7 水平枝管の流量分配特性

図8 液相分配割合と入口乾き度の関係

一方気相の分配割合は、いかなる設定条件においても各枝管でほぼ同一の値となっており、均等分配されているものと考えられる。

次にヘッダ乾き度を横軸にとり、その増加に対して各枝管の気液両相の流量がどのように変化するかを整理して、図8に示す。図8(a)は $n=5$ 、(b)は $n=3$ の結果で、どちらも $G_H=440 \text{ kg/m}^2\text{s}$ である。これより前述の傾向が確認され、特に気相の流量が各枝管均等であることが良くわかる。また(a)、(b)図を比較すると、枝管本数の減少により最上部枝管では流量が増加するが、最下部枝管についてほとんど影響を受けていないことが明らかである。これは垂直枝管の場合と全く同じ性質であり、5・1節と同様の推論から、ヘッダ入口流動状態が同様であるならば枝管 i への分配特性は本数 n に無関係に決定されるものと考えられる。そこで枝管本数 $n=3\sim5$ の実験結果について、枝管番号 i ごとに枝管流量分配をまとめたところ図9に一例を示すように、枝管 i への流量分配は、 $i=n$ の場合を除き本数 n に関わらない同一の値をとっており、前述の前提が正しいことが確認された。

これまで述べてきたように、垂直形と水平形とではその流量分配特性がかなり異なる。これはヘッダ管内径の違いによるところもあるだろうが、本質的にはその内部の流動様式の違いによるものと考えられる。しかしながら各枝管の分配特性が各分岐直前ヘッダ部の状態に強く影響されていることはどちらにも共通の特性である。

6. 解析およびモデル計算

これまで述べてきた結果をもとにして、主管内流動のモデル化および枝管流量分配の予測計算を試みた。

モデル化に当たっては垂直・水平ともに気液両相は各々異なった分配機構に従うという、いわば分離流モデル的な立場をとっているが、これは二相流分岐で流量不均衡が起きるのは両相の慣性力の違いによるところが大きいと考えたためである。

図9 枝管本数を変化させたときの枝管流量分配

最初に垂直枝管を例にとって添字の説明をしておく。ヘッダ入口質量流束および乾き度は、 G_H, X_H とし、各分岐部 i については図10のように、枝管質量流束および乾き度を $G_{P,i}, X_{P,i}$ 、分岐直前部の主管質量流束および乾き度を $G_{M,i}, X_{M,i}$ のようにそれぞれ定義する。

6・1 垂直枝管 まず液相の分配特性について考える。5章で述べたように各分岐直前主管部の流動状態が流量分配に強く関わっていると考えられるため、各分岐部について主管液相流量と枝管液相流量との比をとって整理を行う。これを液相分岐割合 $\Gamma_{L,P/M,i}$ とする。この液相分岐割合を主管気液流量の関数として表すことを目標にするが、液相に関しては主管部における流動様式がおおむね層状態であることからフルード数が、気相の場合は液相に及ぼす力が主にせん断力であることからレイノルズ数が、それぞれ液相分岐特性に対して支配的なのではないかと考えた。そこでこれらの無次元量に関して重回帰分析を行ったところ、気相のほうがかはるかに強い影響を与えていることが見い出された。そこで主管気相流量のみに注目した結果、液相分岐割合と主管気相見かけレイノルズ数の平方根との関係が、図11(a)のように二次関数で近似できた。ただし図に示したのは主管液相質量流束が高い範囲 ($G_{L,M,i} \geq 40$) のデータで、ここでは良い相関が得られるものの、低い質量流束の範囲では少し違った傾向が見られた。しかしながら定式化については実用域を重視するという考え方から、この相関を液相分岐モデルとして用いることとし、最小二乗近似によって係数を決定して次の実験式を得た。

$$\Gamma = 1, \alpha < 33 \quad \dots\dots\dots (1)$$

図10 添字の説明(垂直3本枝管の場合)

$$\Gamma = 2.74 \times 10^{-5} \cdot \alpha^2 - 0.0124 \cdot \alpha + 1.37, 33 \leq \alpha \leq 195 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\Gamma = 0, 195 < \alpha \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで

$$\alpha = \sqrt{Re_{G,M,i}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

気相に関しても液相と同様、直前状態に注目して、主管気相流量と枝管気相流量との関係について調べてみたところ、図11(b)のようにこれらはすべての条件において比例関係となっており、液相の場合と同様に最小二乗近似によって次式を得た。

$$G_{G,P,i} = 6.07 \cdot G_{G,M,i} \quad \dots\dots\dots (5)$$

これらを用いて、枝管1から順に分配流量を決定してゆくが、計算の結果は実験結果の表示法に合わせて、枝管分配流量と枝管乾き度で表すことにした。

4本枝管に関する計算結果を、測定結果と合わせて図12に示す。これはヘッダ入口流量 $G_H = 120 \text{ kg/m}^2\text{s}$ についての図である。定量的傾向として、低乾き度域では予測値と実験値の差は大きい、定性的傾向は全域にわたり、ほぼ満足できるものである。以上より、 $X_H > 0.2$ の実用域における流量分配の予測には、上述の計算方法がかなり有効であると考えられる。

6・2 水平枝管 垂直枝管と同様、まず液相について考える。予蒸発器から分配ヘッダにいたる部分は十分な長さを持った垂直な平滑円管なので、流れは十分発達したものと考えられ、設定条件から考えてヘッダ入口流動様式は環状流域にあると思われる。そこで

(a) 枝管流量分配割合 (b) 枝管乾き度

図12 計算結果と測定結果の比較

(a) 液相分岐特性 (b) 気相分岐特性

図11 垂直枝管の流量分配計算モデル

図13 液相分岐割合と主管液膜厚さの関係

図 14 主管内流動様式遷移モデル概念図

各分岐直前主管において理想的な環状液膜流を想定して、その液膜厚さと液相分岐割合との関係について整理したものが図 13 である。横軸は主管液膜厚さ $t_{F,M,i}$ で、これは散逸エネルギー最小原理による Zivi の方法⁽⁸⁾を用いて算出したボイド率から求めた。また縦軸は、6・2 節で導入したのと同様な液相分岐割合 $\Gamma_{L,P/M,i}$ である。図 13 より分岐部 1 については液相分岐割合が液膜厚さによらずほぼ一定の値をとっているのに対し、上側分岐部ではその値はばらついてくることがわかる。液相分岐割合が特に大きな値となるときは主管流動条件を調べると、いずれも各相、特に気相の流量が少なくなっており、このとき実際の主管流動様式はフロス流～スラグ流域にあると推測される。このことは 4 章で述べた観察結果とも一致する。そこで上側分岐部に関する第二の相関を考え、これを分岐直前主管内がフロス流であるときの液相分岐特性であるとする。

以上の考察から、ヘッダ入口部では環状流であった主管内流動様式が、上側分岐部へ行くに従いフロス流域へと遷移し、それに伴って液相の分岐特性が変化しているというモデルを考案した。これを主管内流動様式遷移モデルと名付け、その概念図を図 14 に示す。

分岐直前主管部において環状流である場合、液相分岐割合は流量等の条件に影響されず、図 13 に見られる一定値をとって次式のように定められる。

$$\Gamma_{L,P/M,i} = 0.243 \quad \dots\dots\dots (6)$$

フロス流域については主管気液流量のみで決定されるものとした。各相流量を表す無次元数として、それぞれ気相の見かけレイノルズ数とウェーバ数を取り、図 13 における第二の相関と考えられる条件群に対して重回帰分析を行い、係数を決定して次式を得た。

$$\Gamma_{L,P/M,i} = 7.62 \cdot Re_{G,M,i}^{-0.3} \cdot We_{M,i}^{0.325} \quad \dots\dots\dots (7)$$

なお本テストセクションにおいては、枝管断面積と、枝管内径である 6 ミリの高さに主管を切り取った円柱の内側面積との比が 0.25 であり、式 (6) の一定値がほぼこれに等しくなることは興味深い。

どちらの相関に従うかという主管流動様式の境界については、最も簡単なモデルを考えて、分岐部 1 では環状流の式 (6)、それ以降ではフロス流の式 (7) に従

図 15 計算結果と測定結果の比較

うものとした。なお気相については 5・2 節の結果をふまえて各枝管均等分配であるとした。これより気相分配流量はヘッダ入口条件のみからただちに算出できる。

計算結果の一例を、実測値と合わせて図 15 に示す。これは 5 本枝管に関する結果であるが、 $X_H > 0$ の領域において定性的、定量的にも実測値との良い一致がみられ、上述のモデル計算の有効性が確認できた。

7. ま と め

垂直および水平の枝管を持つ 2 種類の多連分岐管を用いてその流量分配に関する実験を行った結果、それらは明らかに異なった分配特性を示すということを見出し、それぞれについて詳細な検討を行った。

また垂直・水平枝管に共通の性質として、各枝管への液相分配割合は各分岐直前主管部の流動状態によって強く影響されていることがわかった。

これらをふまえて分配流量のモデル計算を行い、実測値とかなり良く一致することを確認し、多連分岐管における流量分配予測計算の可能性を示した。

文 献

- (1) 大原, 日本機械学会関西支部気液二相流研究懇話会資料, No. 31 (1986).
- (2) 例えば, 久保・植田, 機論, **34** 268(1968), 2133.
- (3) 例えば, Seeger, W., ほか 2 名, *Int. J. Multiphase Flow*, **12** 4(1986), 575.
- (4) 例えば, Asoh, M., ほか 3 名, *Proc. ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference*, **2**(1991), 159.
- (5) Nagata, K., ほか 3 名, *Proceeding of The First KSME JSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, **12** (1988), 212.
- (6) 渡辺・ほか 3 名, 日本冷凍協会学術講演会講演論文集, (1991 11), 113.
- (7) 渡辺・ほか 3 名, 機講論, No. 920 78 (1992 9), 49.
- (8) Zivi, S. M., *J. Heat Transf.*, (1964 5), 247.