

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 12 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560229

研究課題名(和文) 多分岐構造をもつ流路内の気液二相分配および熱伝達に関する研究

研究課題名(英文) Experimental study on gas-liquid two-phase flow distributions in multi-pass channels

研究代表者

廣田 真史 (Hirota, Masafumi)

三重大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30208889

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、熱交換器を模擬した多分岐管内の冷媒二相流において、冷媒チューブを加熱した状態で流れの可視化観察を行うとともにチューブの温度分布から液分配を推定し、空気-水二相流で測定した液分配率と比較することで、前者の分配特性を後者で模擬することの妥当性を検討した。その結果、加熱系冷媒二相流ではチューブから上流側ヘッダへ蒸気が逆流する様子が観察されたが、空気と水のヘッダ流入速度を適切に設定することにより、空気-水二相流で液冷媒の分配特性を模擬できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Gas-liquid flow distributions in a multi-pass channels were investigated experimentally. Branch tubes were heated to simulate a real operating condition of the evaporator. The refrigerant flow visualized under the heated conditions was compared with the adiabatic flow. Moreover, temperatures on branch surfaces were measured to estimate liquid distributions to branches, and they were compared with liquid distributions measured in an adiabatic air-water flow under four air/water inlet velocity conditions at the header entrance. The refrigerant flow characteristics in the dividing header under the heated condition were different from those observed under the adiabatic condition. The temperature distributions on branch surfaces were, however, consistent with the water distributions measured in the isothermal air-water flow. This result suggests that gas-liquid distributions in the air-water flow can reproduce the refrigerant flow distributions under the heated condition.

研究分野：工学

キーワード：気液二相流 熱交換器 気液分配 冷媒

1. 研究開始当初の背景

ヒートポンプの高効率化のためには、要素技術の開発、とくに熱交換器の高効率化が不可欠であり、従来のフィン&チューブ型熱交換器に比べて大幅な低熱抵抗化が期待されるパラレルフロー型熱交換器（アルミ熱交換器）の採用が有望視されている。こうしたパラレルフロー型熱交換器は、ヘッダ（主管）に多数の冷媒チューブ（枝管）が並列接続された多分岐構造を有しており、冷媒はヘッダから各チューブに分配され周囲流体と熱交換する。エバポレータの様にヘッダ内の流れが気液二相状態の場合には、各分岐管への気液分配が不均等になって伝熱性能の低下をもたらす可能性が指摘されている。そのため、ヘッダからチューブへの気液分配特性を明らかにし、気液の均等分配手法を確立することは工学的に重要であるが、多分岐管における気液分配機構は複雑であり一般化された均等分配手法は確立されていない。従来の多分岐管内における気液二相分配の研究では、空気-水二相流で冷媒二相流を模擬し、流動観察や気液分配率を測定した例が多く報告されている。この実験手法は基本的な現象を迅速に把握できる点では有用である。しかし、冷媒の物性は空気・水とは大きく異なるため、空気-水二相流で得られた分配特性が実際の冷媒二相流をどの程度模擬できているかについては不明の点が多い。また、従来の気液二相分配に関する研究は殆どが断熱系で行われており、分岐管における熱負荷が気液分配に及ぼす影響を明らかにした例も非常に少ない。

2. 研究の目的

本研究ではコンパクトエバポレータを模擬した多分岐構造を有する流路において、まず断熱系において冷媒二相流と空気-水二相流における気液分配特性を比較する。とくに空気-水二相流では、ヘッダ入口における空気と水の流入条件を系統的に変化させて気液分配率を測定し、その結果を冷媒二相流における気液分配特性と比較することにより、冷媒二相流を模擬できる空気-水二相流の流入条件を明らかにすることを目的とする。次に、冷媒二相流において、実際のエバポレータと同様に冷媒チューブを加熱した状態で流動状態の可視化観察を行うとともに、チューブの温度分布から気液分配率を推定し、断熱系空気-水二相流で測定された気液分配率と比較・検討することにより、加熱系冷媒二相流における気液分配特性を空気-水二相流で模擬することの妥当性について検討することも目的とする。

3. 研究の方法

図1に断熱系における冷媒用可視化実験装置の概要、図2に試験流路の詳細を示す。これらの図は水平ヘッダ・鉛直上昇分岐管の設置状態を示しているが、本研究では水平ヘッダ・鉛直下降分岐管の形態においても実験を行った。本装置は冷却ユニット中に可視化用

のポリカーボネート製透明多分岐管を組み込んで製作されており、冷媒は R-134a である。ヘッダ入口における冷媒の流入条件（質量流量 M およびクオリティ x ）は圧縮機回転数と膨張弁開度で制御し、 $M=4.15\sim 8.5\text{kg/h}$ 、 $x=0.2\sim 0.4$ に設定した。冷媒質量流量は凝縮器直後に設置したコリオリ式流量計で測定し、膨張弁前後には流路入口における冷媒のクオリティを算出するための熱電対と圧力センサーを設置した。試験流路は断面 $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ 、長さ 274mm の透明ポリカーボネート製水平ヘッダに、長さ 126mm のアルミ製冷媒チューブを 24mm 間隔で 11 本並列接続した多分岐流路であり、冷媒チューブは $1.7\text{mm} \times 20\text{mm}$ の偏平管に $0.8\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ の流路が 17 個設けられた微細多孔管で、その両端 3mm は各ヘッダ内に突き出ている。上流側ヘッダには内径 4.75mm （鉛直下降分岐管の場合は内径 1.5mm ）の銅管が断面中心に接続されており、冷媒はヘッダから冷媒チューブに分配された後、チューブ内を上昇し上部ヘッダで合流して流入側と同方向へ流出する。

加熱系の実験においては、図3に示すように、冷媒チューブ間に銅ブロックをチューブ表面に密着するように挿入し、このブロック内に 40°C の温水を循環させて冷媒チューブを加熱した。また、ブロック側面に設けた溝を通して熱電対を挿入し、冷媒チューブの表面温度を測定した。実験では銅ブロックに温水を循環させながらヘッダ内の流動を観察し、流動が定常状態に達した後に温水循環を停止して冷媒チューブ温度の時間変化を測定した。定常状態でのチューブ温度と温水循環停止後の温度降下率から、チューブへの液冷媒分配状態を推定した。

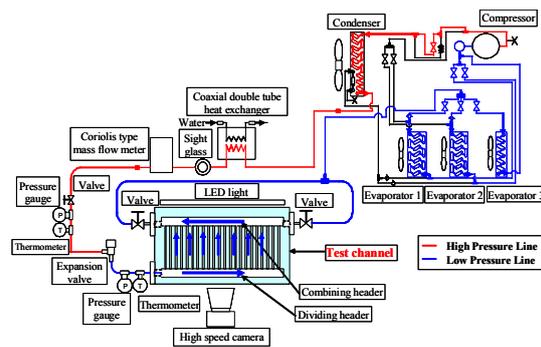


図1 冷媒二相流の実験装置

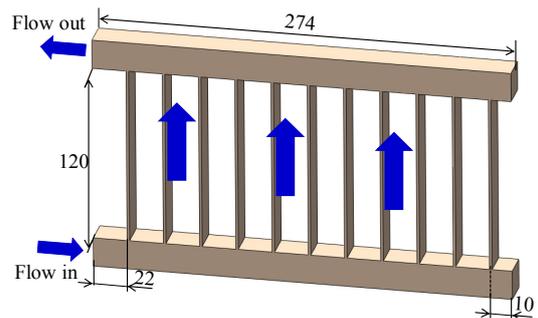


図2 断熱系多分岐流路
(水平ヘッダ・鉛直上昇分岐管)

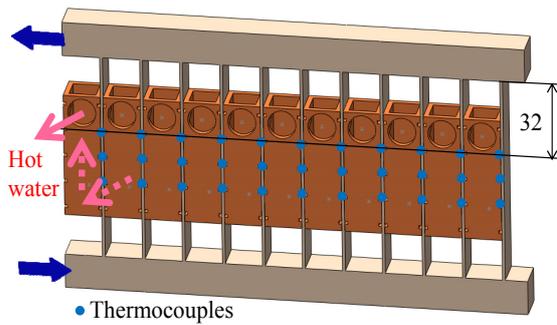


図3 加熱系多分岐流路

空気-水二相流の実験では冷媒実験と同一の可視化流路を用い、25°Cに設定した空気と水を供給した。本実験では、流れの可視化観察に加えて各チューブへの気液分配率も測定した。測定は、可視化用流路の下流側ヘッダを取り除き、各分岐管の出口に気液排出孔と気液セパレータを設けた流路で行った。水の分配量はセパレータ内に貯められた水の質量から求め、空気分配量はセパレータ出口に設けた質量流量計で測定した。

空気-水二相流では、冷媒二相流を模擬するために、ヘッダ入口における空気と水の見かけ速度 j_A 、 j_W を以下の4条件に基づいて設定し、冷媒二相流での可視化結果と比較するとともに気液分配率を測定した。

(a) 見かけ速度の一致

$$j_A = j_G, \quad j_W = j_L$$

(b) 運動エネルギーの一致

$$\rho_A j_A^2 = \rho_G j_G^2, \quad \rho_W j_W^2 = \rho_L j_L^2$$

ρ は流体の密度を表す。

(c) クオリティ x と質量流量 M の一致

$$x = \frac{\rho_A j_A}{\rho_A j_A + \rho_W j_W} = \frac{\rho_G j_G}{\rho_G j_G + \rho_L j_L}$$

$$M = \rho_A j_A + \rho_W j_W = \rho_G j_G + \rho_L j_L$$

(d) Baker 線図パラメータの一致

$$G_A = \frac{G_G}{\lambda_R}, \quad \lambda_R = \left[\left(\frac{\rho_G}{\rho_A} \right) \left(\frac{\rho_L}{\rho_W} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{G_W}{G_A} = \frac{G_L}{G_G} \lambda_R \Psi_R, \quad \Psi_R = \frac{\sigma_W}{\sigma_L} \left[\frac{\mu_L}{\mu_W} \left(\frac{\rho_W}{\rho_L} \right) \right]^{\frac{1}{3}}$$

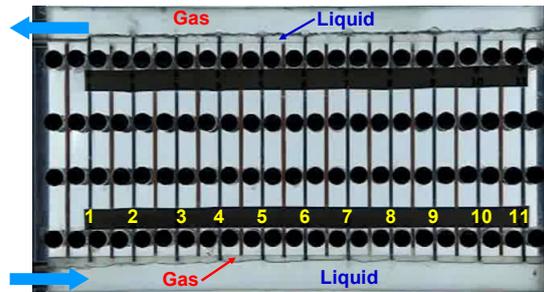
G は流体の質量流束、 ρ と μ はそれぞれ流体の密度と粘性係数、 σ は液相の表面張力、 λ と Ψ は補正項である。(c)では気相密度の違いにより $j_A \gg j_G$ となり、(d)では液冷媒の表面張力が水の表面張力に比べて非常に低いことが反映されて $j_W \gg j_L$ となる。

4. 研究成果

(1) 水平ヘッダ・鉛直上昇分岐管の場合

図4に冷媒二相流の可視化結果の例を示す。(a)は断熱条件での結果であり、上流側ヘッダに注目すると気液はヘッダ全域にわたり層状に分離して流れ、気液界面は冷媒チューブ下端に接している。その結果、下流側ヘッダ

では全冷媒チューブから液相の流出が観察され、比較的均一な液分配が推定された。(b)は加熱系の上流側ヘッダにおける可視化結果である。冷媒チューブ下端は図上部のフランジ(白色部分)内に位置している。ヘッダ内の気液界面は、加熱直後は冷媒チューブ下端より下に位置したが、時間の経過に伴い界面は上昇し、断熱系と同様にチューブ下端に接して定常状態となった。下流域のチューブでは、蒸気がチューブから上流側ヘッダへ間欠的に逆流する様子が観察された。



(a) 断熱系での可視化結果



(b) 加熱系での可視化結果(上流側ヘッダ)

図4 冷媒二相流における可視化結果
(水平ヘッダ・鉛直上昇分岐管)

次に、加熱系においてチューブ下端から32mmの位置で測定されたチューブ表面温度 T_{tube} の時間変化を図5に示す。図中の番号は分岐管に対応しており、測定開始後600秒まで温水を循環させ、それ以降は温水を停止した場合の温度変化を示している。図6は、 $x = 0.3$ 、 $M = 5.2\text{kg/h}$ と 8.5kg/h で測定された温水循環停止直前の T_{tube} と、停止直後のチューブ温度低下率 dT/dt の分布である。温水循環停止後は冷媒の蒸発によりチューブは冷却され続けるため、 dT/dt の大きなチューブほど液分配率が高いと考えられる。したがって、図6に指名された結果から、液冷媒は第7分岐管以降の冷媒チューブへの分配割合が高く、冷媒流量の増加に伴い下流側チューブへの液分配率が増加すると推定される。

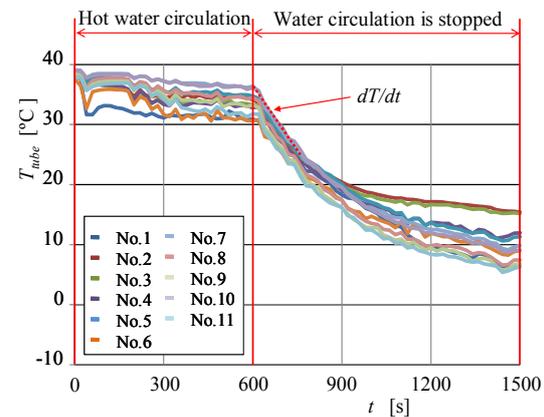
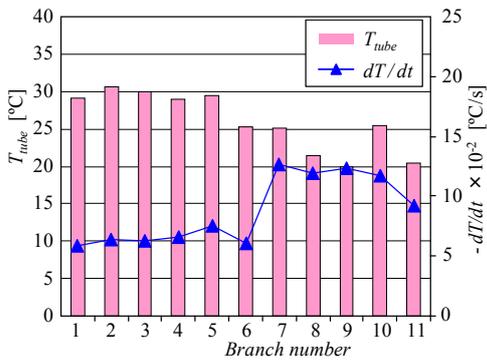
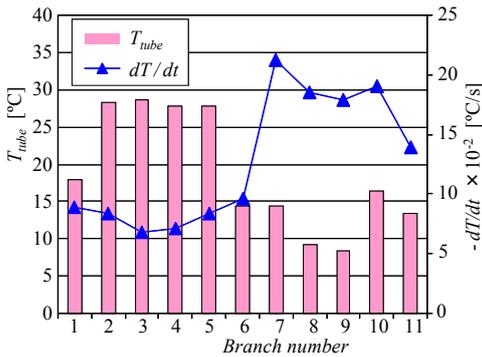


図5 チューブ表面温度 T_{tube} の時間変化

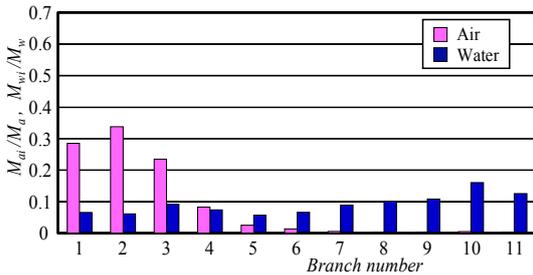


(a) $x = 0.3, M = 5.2\text{kg/h}$

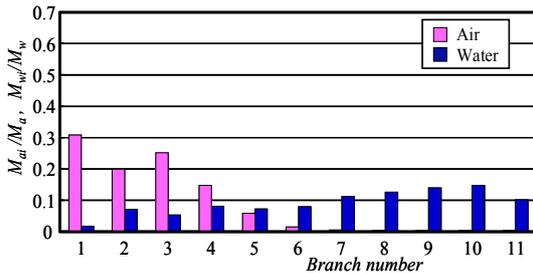


(b) $x = 0.3, M = 8.5\text{kg/h}$

図6 温水循環停止直前冷媒チューブ表面温度および温水停止後の温度低下率



(a) $x = 0.3, M = 5.2\text{kg/h}$



(b) $x = 0.3, M = 8.5\text{kg/h}$

図7 空気-水二相流で測定した気液分配率 (Baker線図パラメーター一致の場合)

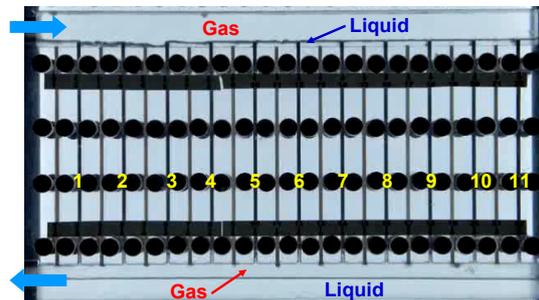
図7は $x=0.3, M=5.2\text{kg/h}$ と 8.5kg/h に相当する流入条件で測定された空気-水二相流における気液分配率の分布であり、空気と水の流入見かけ速度を Baker 線図パラメーターの一致に基づき設定した場合の結果である。液相は全ての分岐管に分配されており、下流側に位置する分岐管の液分配率は上流側分岐管に比べて幾分高くなっている。また、冷媒流量の増加に伴い、下流域の分岐管における

液分配率がわずかに高くなっている。こうした傾向は上に述べたチューブ温度変化から推定される液冷媒の分配傾向と一致しており、空気-水二相流で測定された液分配率は、加熱系冷媒二相流の定性的な液相分配特性を再現できていると考えられる。

(2) 水平ヘッダ・鉛直下降分岐管の場合

断熱系冷媒二相流における可視化結果の一例として、 $x = 0.3, M = 5.2\text{kg/h}$ の結果を図8に示す。(a)は流路全体の結果であり、(b)は上流側ヘッダ入口部分の拡大図である。冷媒はヘッダ入口の銅管から噴霧状で流入し、液冷媒の一部は、チューブの突きだしとヘッダの側壁で形成される凹み部分に貯留される。この様な液の貯留は最下流のチューブに至るまで認められるが、下側ヘッダでチューブからの液の排出を観察したところ、 $M = 5.2\text{kg/h}$ の場合、第7分岐管以降のチューブでは液の排出は殆ど観察されなかった。質量流量を 8.5kg/h に増加させた場合には、噴霧はより下流域にまで到達し、下流域のチューブからも少量の液の排出が認められた。一方、ヘッダ入口近傍では、銅管から噴出した液の一部がヘッダ底面に再付着し、上流域の分岐管ではこの再付着に伴い多量の液がチューブへ流入する様子が観察された。

図9は、加熱系において $x=0.3, M=5.2\text{kg/h}$ の条件で撮影した上側ヘッダの入口近傍における流れの様子である。加熱系ではヘッダ底面において冷媒が蒸発するため、凹み部における液冷媒の貯留は観察されない。また、上流域の冷媒チューブでは、蒸気がチューブからヘッダ内へ逆流する様子が観察された。このように、加熱系におけるヘッダ内の流動状態は断熱系とは異なっているが、噴霧状の液冷媒が第7分岐管近傍にまで到達する様子は断熱系と同様に観察された。上述のように、チューブから上流側ヘッダへの蒸気の逆流は鉛直上昇流の場合にも観察され、加熱系の多分岐管における特徴と考えられる。



(a) 流路全体の流れの状態



(b) ヘッダ入口近傍の流れの状態

図8 断熱系での可視化結果 (水平ヘッダ・鉛直下降分岐管)

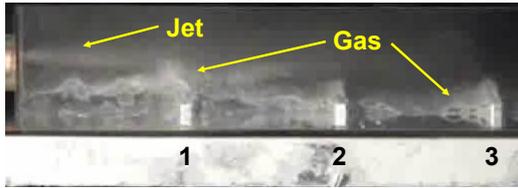
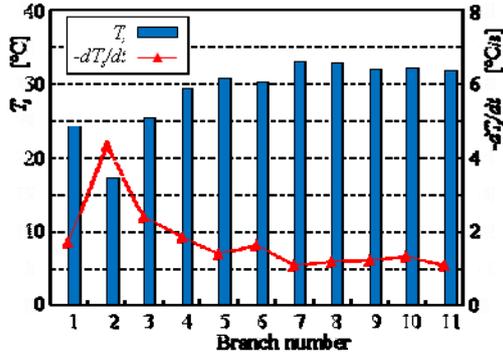
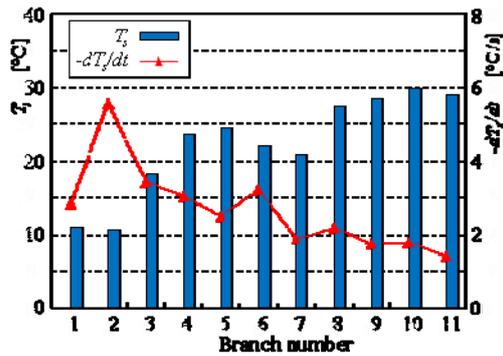


図9 加熱系での可視化結果
(上流側ヘッダの入口近傍)

次に、チューブ表面温度 T と温水循環停止後の温度低下率 $-dT/dt$ の分布を図 10 に示す。何れもチューブ上端から 32mm の位置における結果である。 $M=5.2\text{kg/h}$ では第 7 分岐管以降で $-dT/dt$ はほぼ最小値を保つが、 $M=8.5\text{kg/h}$ の $-dT/dt$ は第 7 分岐管以降でも $M=5.2\text{kg/h}$ の最小値より大きくなっている。温水停止後は冷媒の蒸発によりチューブは冷却され続けるため、 $-dT/dt$ の大きなチューブほど液冷媒の分配量が大きいと考えられる。したがって、 $M=8.5\text{kg/h}$ の場合、液冷媒は第 7 分岐管以降のチューブへも少量であるが分配されていると推定される。



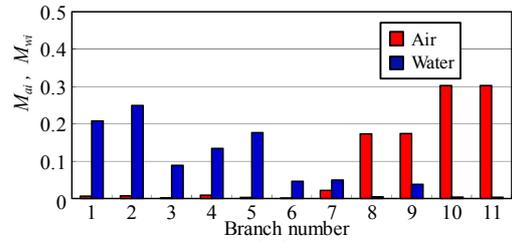
(a) $x=0.3, M=5.2\text{kg/h}$



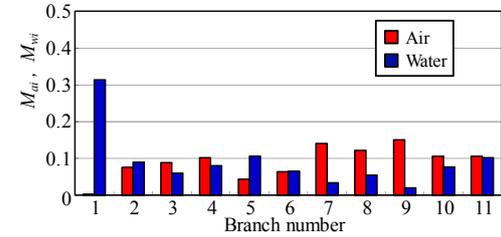
(b) $x=0.3, M=8.5\text{kg/h}$

図 10 温水循環停止直前冷媒チューブ表面温度および温水停止後の温度低下率

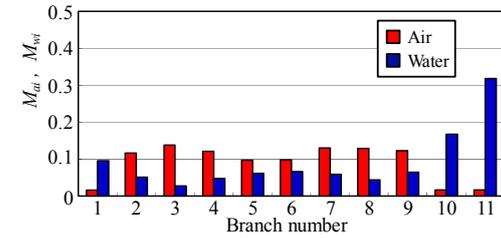
図 11 と図 12 は、 $x=0.3, M=5.2\text{kg/h}$ と 8.5kg/h に相当する条件で測定された空気-水二相流における気液分配率の分布であり、ともに(a)が見かけ速度一致、(b)が運動エネルギー一致、(c)が Baker 線図パラメータ一致の流入条件で得られた結果である。液分配率に注目すると、(b)の運動エネルギー一致条件では最上流のチューブで最大値を示すとともに最下流のチューブでも極大値に達している。(c)の Baker 線図パラメータ一致条件では、



(a) 見かけ速度一致条件

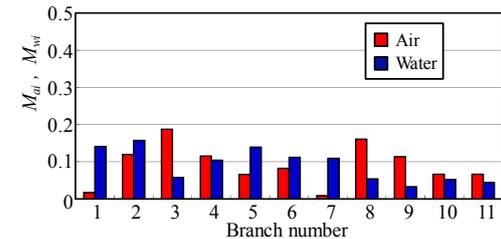


(b) 運動エネルギー一致条件

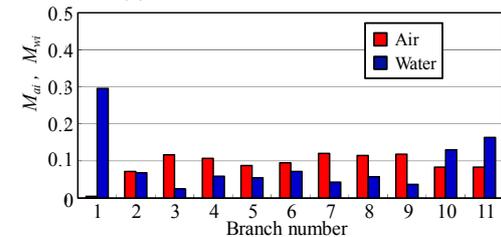


(c) Baker 線図パラメータ一致条件

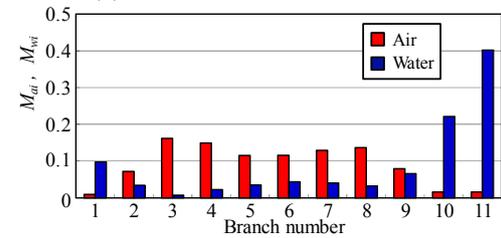
図 11 空気-水二相流で測定した気液分配率 ($x=0.3, M=5.2\text{kg/h}$ に相当する条件)



(a) 見かけ速度一致条件



(b) 運動エネルギー一致条件



(c) Baker 線図パラメータ一致条件

図 12 空気-水二相流で測定した気液分配率 ($x=0.3, M=8.5\text{kg/h}$ に相当する条件)

液分配率は最下流のチューブで 30%~40% の最大値に達している。以上の空気-水二相流における液分配率の測定結果は、上に述べた冷媒二相流の可視化観察結果およびチューブ表面温度の測定結果から推定される液

冷媒の分配特性と定性的に一致していない。一方、(a)の見かけ速度一致条件では、 $M = 5.2\text{kg/h}$ の場合は第1, 第2分岐管の液分配率が比較的高く, 第6分岐管以降の液分配率は非常に小さいが, $M = 8.5\text{kg/h}$ では液はより下流域の分岐管にまで分配されるようになる。こうした傾向は, 上述の冷媒二相流における可視化観察の結果と定性的に一致している。すなわち, 加熱系の水平ヘッダ・鉛直下降分岐管における気液分配の特性は, ヘッダ入口における気液の見かけ速度を一致させることにより, 少なくとも定性的には空気-水系二相流で模擬できていると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計7件)

- ① Masafumi Hirota, Naoki Noda, Toshiaki Tsuchiya, Yujiro Kitaide, Naoki Maruyama, Akira Nishimura, Gas-liquid Two-phase Flow Distributions in Multipass Channels, The Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow, (2015年6月24日発表確定), Busan (韓国)
- ②野田尚希, 野本秀隆, 中尾祐樹, 廣田真史, 多分岐管における冷媒気液二相分配に関する研究, 第52回日本伝熱シンポジウム, (2015年6月4日発表確定), 福岡国際会議場 (福岡)
- ③野田尚希, 廣田真史, 土屋敏章, 北出雄二郎, 丸山直樹, 西村顕, 多分岐管内気液二相流の気液分配に関する実験的研究, 第51回日本伝熱シンポジウム, (2014年5月21日), アクアシティ浜松 (浜松)
- ④廣田真史, 多分岐管における気液二相分配, 日本冷凍空調学会第7回中部地区技術交流会, (2013年11月29日), 静岡大学 (浜松)
- ⑤野田尚希, 中川大和, 廣田真史, 土屋敏章, 北出雄二郎, 丸山直樹, 西村顕, 多分岐管内における気液二相分配に関する研究, 熱工学コンファレンス2013, (2013年10月20日), 弘前大学 (弘前)
- ⑥中川大和, 廣田真史, 土屋敏章, 安嶋賢哲, 滝口浩司, 北出雄二郎, 丸山直樹, 西村顕, 多分岐管内気液二相流の気液分配に関する実験的研究, 日本機械学会東海支部第62期総会・講演会, (2013年3月18日), 三重大学 (津)
- ⑦ Yamato Nakagawa, Mohamad-Razlan Zuradzman, Masafumi Hirota, Koji Takiguchi, Toshiaki Tsuchiya, Masaaki Ajima, Yujiro Kitaide, Motohide Okamoto, Naoki Maruyama and Akira Nishimura, Experimental Study on Gas-Liquid Two Phase Flow Distributions in Multi-pass Channels, 3rd International Heat Transfer Forum, (2012年11月14日), 長崎ブリックホール (長崎).

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

廣田 真史 (HIROTA MASAFUMI)
三重大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：30208889