

# 水平管内気水二相流における 分岐ダクト群への流量配分特性\*

永 島 徹\*\*  
逢 坂 昭 治\*\*\*

## Characteristics of Flow Distribution from Header to Branches in Air-Water Two-Phase Flow in Horizontal Pipe

Tohru NAGASHIMA and Akiharu OUSAKA

An experiment was conducted to investigate the characteristics of phase separation from a horizontal header to 13 branch ducts in an isothermal air-water two-phase flow. The test section was made of transparent polyvinyl chloride in order to observe the flow behavior. The inner diameter of the header was 9mm and a sectional dimension of each branch duct was 7.4mm × 5.4mm, 2.0m in length. The board-shaped branch ducts were connected downward to the header in right angle. As a result, it was clear that air and water didn't distribute uniformly at those branches in case of slug flow region, while the difference of distribution rates between water and air in those branches were smaller in annular flow region. Furthermore, unstable flow occurred at some of the branches when the static pressure was small in the inlet of the header, although it was not observed in the case of horizontal connection.

*Key Words:* Multiphase Flow, Air-Water Two-phase Flow, T-junction, Phase Separation

### 1. はじめに

一般的に、車載式空調器用蒸発器は Drawn-cup(laminated plate) evaporator, Serpentine evaporator, PFE evaporator 等 (Trauger et al. 1993) が用いられている。これらの蒸発器では二相流状態の冷媒がヘッダーから多数の細管に分岐する構造を持っている。これらの蒸発器では多数の分岐管に冷媒である二相流体が均等に流入する必要がある。しかし、

水平な主管から水平に3本に分岐する報告 (Kariyasaki et al.1995), および水平な主管から下向きに3本に分岐する報告(Nagashima et al.)から推測されるように、多数の分岐管への二相流の等配分は相当に難しい。

過去、気液二相流の分岐流動に関する研究が多く行われてきた。例えば Azzopardi ら (1988), Seeger ら (1986), Ballky ら (1988) は主管に1本の分岐管がある場合について報告している。また Kariyasaki ら (1995) は主管に3本の分岐管を取り付けた場合について、すべての空気・水二相流体が3本の分岐管に流れる場合には三つの分岐管間で気液の不当分配が

\* 平成20年5月31日受付

\*\* 化学システム工学科

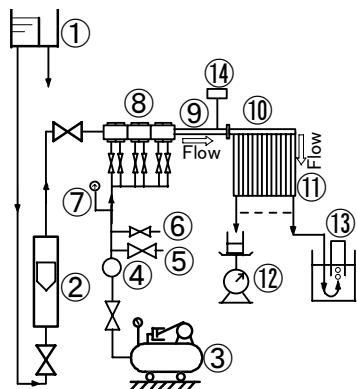
\*\*\* 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部

生じることを報告している。さらに、単分岐の結果が3本分岐にそのまま適用することができないことも示している。

本論文では Serpentine 型蒸発器を対象とし、ヘッダから13本の分岐管に分岐流動する場合の空気・水二相流体の配分を実験的に調査した結果を報告する。なお、本実験では主管及びヘッダーを水平に配置し、分岐管入口は下向き（以後、D接続と呼ぶ）、及び水平（以後、H接続と呼ぶ）の2つの場合とした。ヘッダー入口における流動様式は主として間欠流の場合について行い、一部環状流の領域についても実験を行った。

## 2. 実験装置及び方法

図1に本実験装置の概略を、図2には蒸発器模型の詳細図と配置方向を、図3にヘッダー部の詳細図をそれぞれ示した。D接続は分岐管入口がヘッダーの管底にある場合で、H接続は分岐管入口が管側壁にある場合である。蒸発器模型は視覚観察が可能なように透明な塩化ビニルで製作した。分岐管群は、図3に示されているように、内径約9mmのヘッダーに13本の分岐管が取り付けられている。分岐管断面は7.4mm×5.4mmで長さ2mのダクトである。これらの13本のダクトは図3に示すように平行に連続して板状に並んでいる。また、図2に示すように分岐管群は折りたたまれた構造になっている。



- Head tank
- Rotameter
- Compressor
- Regulator
- Valve(coarse)
- Valve(fine)
- Pressure gage
- Air-Water mixer
- Inlet main pipe
- Header
- Branch pipes
- Balance
- Graduated measuring cylinder
- Pressure transducer

図1 実験装置概略図

分岐管における流れ方向は図2に示すように、D接続とH接続では異なる。D接続では下向き流れが5回、上向き流れが5回生じ180度ターンが9回起こる。一方、H接続では水平流れが10回、180度ターンが9回起こる。このH接続では上向き流れは生じない。

図3はヘッダー部の構造を示し、分岐管群はヘッダー内に3mm入っている。各分岐管の呼称はヘッダー入口よりB1、B2と順に名前を付け、最後がB13である。また空気・水混合部よりヘッダー入口までを入口主管と呼ぶことにする。

定水位タンクから供給された水は浮子式流量計で計量された後、空気・水混合部において臨界流のもとで吹き込まれた空気と混合される。この空気・水二相流体は、内径9mm、長さ1.5m（約65D、D：入口主管内径）の入口主管を流れ、ヘッダーに流入する。ヘッダーに流入した水・空気二相流体は分岐管群に流入する。各分岐管出口から流出する水流量はB1からB13まで重量法で順次測定した。また、空気流量は水流量の測定が終了した後、水と同様に順次水上置換法で測定した。

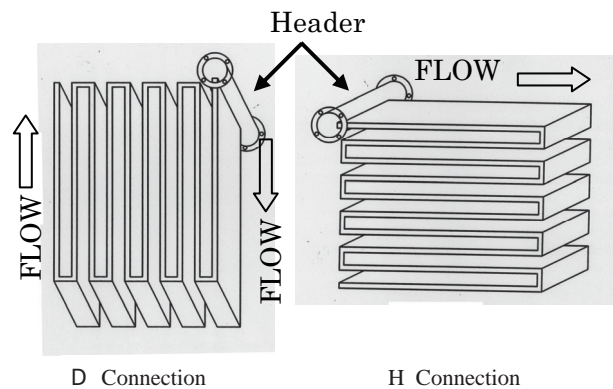


図2 Serpentine 型蒸発器模型

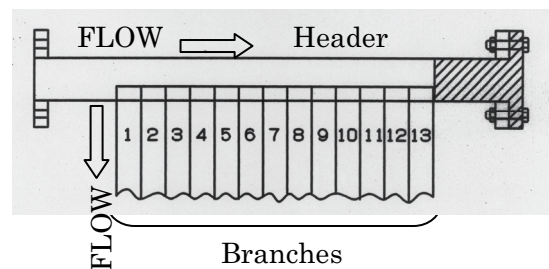


図3 ヘッダー部

刻々変化する入口主管の静圧は、圧力変換器で電圧信号に変換された後、デジタルスペクトルアナライザーによって、静圧変動の確率密度関数を求め、その平均値を静圧の平均値とした。その際、サンプリング周波数は128Hzとし、1024個単位のデータを16回平均化した結果を用いた。

ヘッダー部及び分岐管部における流動の様子を観察するため、これらの測定後に流動の様子をビデオカメラで撮影した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 分岐管入口をヘッダーの下部に配置した場合 (D接続)

3.1.1 入口主管の流動様式 図4は入口主管における空気流速  $j_{Gi}$ 、水流速  $j_{Li}$  の実験条件を流動様式線図と共に示したものである。図中の実線及び点線は Barnea ら (1983) が示した内径8.15mm と9.85mmの水平管における流動様式線図である。

図5はヘッダー直前の入口主管における静圧変動の確率密度関数 (以後、PDFと記述する) を静圧対してプロットしたものである。図5dの  $j_{Li}$  =0.117m/s, 0.263m/s, 0.501m/s におけるPDF分布は双峰性を示している。この時の流動様式は環状流であった。一方、図5a, 図5b, 図5cのPDFは単峰性で、流動様式は間欠流の一部であるスラグ流

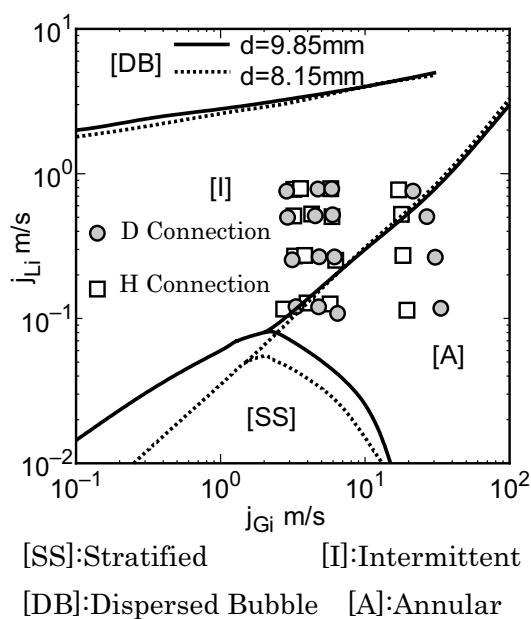


図4 入口主管における流動条件

であった。なお、ビデオ観察による流動様式の判別は Barnea ら (1983) の結果と一致した。

#### 3.1.2 各分岐管の水および空気の配分率 (D接続)

図6は各分岐管より流出する水流量の入口主管における水流量の割合 (分岐管の水配分率と呼ぶ) を各分岐管ごとに示した。同様に、図7は空気流量の割合 (空気配分率と呼ぶ) を示した。

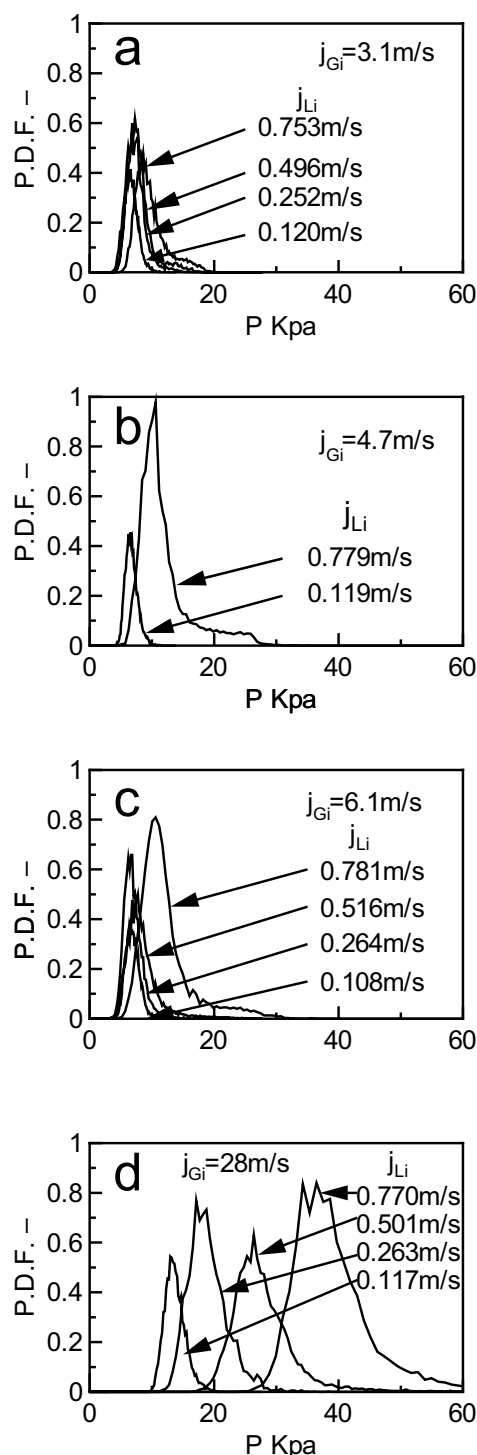


図5 入口主管における静圧変動のPDF分布

図6 a, 図6 b, 図6 cの実線で示す流動条件の場合、水配分率は分岐管番号により異なった傾向を示す。すなわち、ヘッダーの前方に位置する分岐管では水配分率が分岐管番号が増すと増加し、中央部ではほぼ一定で、後部では管番号が大きくなると急激に増加する傾向がある。例えば、図6 cの  $j_{Li}=0.781\text{m/s}$  ではB1からB4までは水配分率が減少し

ている。B5, B6, B7はほぼ一定で、B8以降は増加している。

一方、空気配分率は図7 a, 図7 b, 図7 cに示すように、中央部の分岐管に多く空気が流入することを示している。

主に環状流領域である図6 dの水配分率は他の間欠流領域の図6 a, 図6 b, 図6 cとは異なりB1から

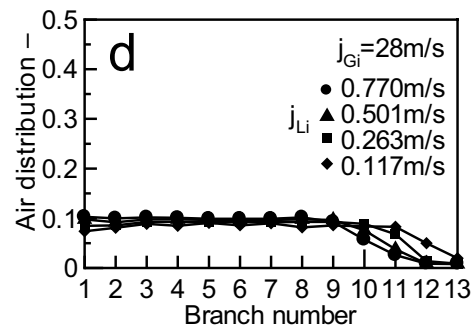
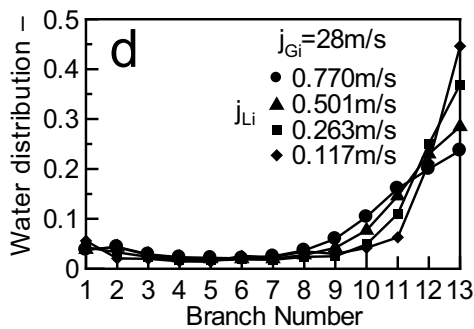
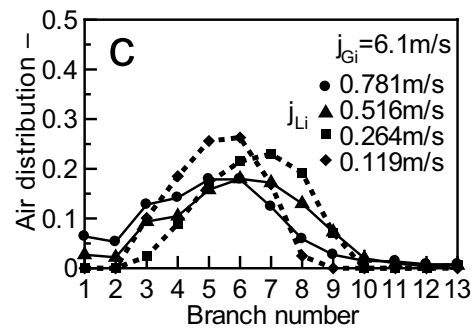
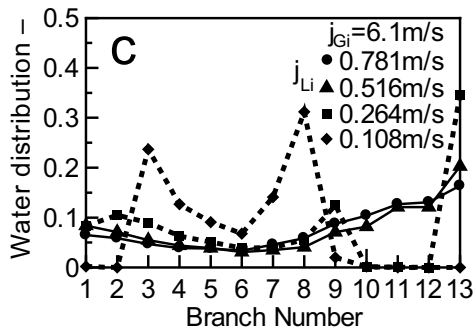
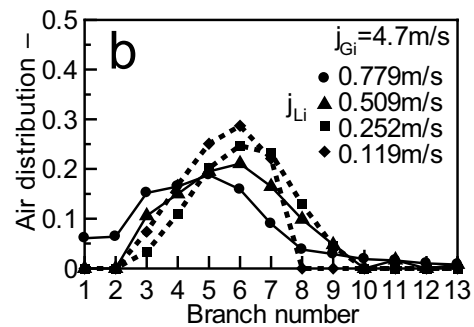
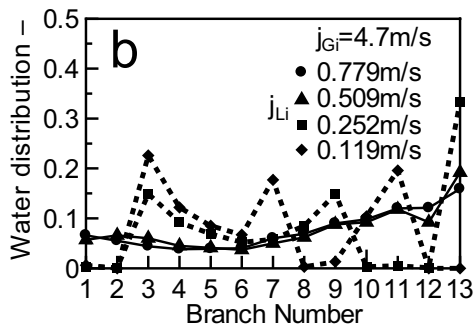
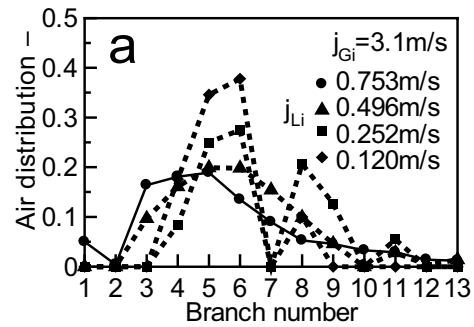
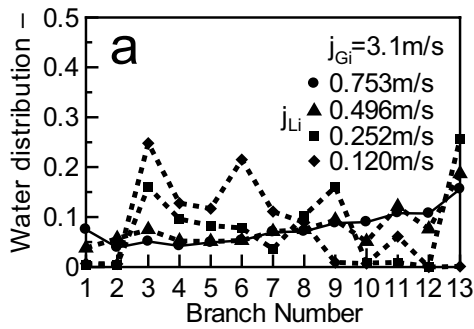


図6 D接続における水配分率

図7 D接続における空気配分率

B9では水配分率差は小さくB9以降増加する傾向がある。また図7dの空気配分率を見ると、B1からB9までは水配分率の場合と同様に、各分岐管における空気配分率差はB10からB13まで減少する傾向がある。また入口水流束  $j_{Li}$  が約7倍程度変化しても水配分率、空気配分率はほぼ一定である。視覚観察によると図6dの入口主管における流動様式は環状流で、図6a、図6b、図6cはスラグ流である。このように流動様式により水配分率、空気配分率は異なった傾向を示す。

一方、図6a、図6b、図6cにおける点線で示した流動条件において、水配分率は他の条件とは異なった傾向を示し、分岐管番号により配分率が時間の経過と共に大きく変動する。これらの流動条件の場合ビデオを用いた長時間の視覚観察では、分岐管に水のみが流入する現象と空気・水二相流体が分岐管を流れる現象が交互にかつ不規則に見られる。D接続の場合、U字ダクト部分(図2参照)に水が貯留される。この水が排出されるためにはヘッダーにおける圧力が貯留された水頭の合計より大きくなる必要がある。このような分岐管入口静圧と分岐管内の水頭合計とのバランスにより分岐管内が二相流となる場合と水単相流になる場合がある。分岐管入口静圧は水スラグの通過により時間的に変動する。分岐管内に貯留された水が流出するためには、分岐管入口静圧が分岐管内の水頭合計より大きいことが必要で、かつその持続時間が十分であることが必要である。このため分岐管の水・空気配分率が時間の経過と共に一定せず、不安定な流動になったと思われる。

このような現象はNagashimaら(1993)が行った上向き3本分岐における実験において同様な現象を報告している。

### 3・2 分岐管入口をヘッダーの側面に配置した場合(H接続)

図8、図9は分岐管の入口がヘッダー側面になるように蒸発器模型を図2に示すH接続にした時の各分岐管の水配分率、空気配分率である。実験条件は図4に示すように図6、図7の場合とほぼ同じである。また入口主管における流動様式はD接続と同様である。

図8a、図8b、図8cは入口主管における流動様式が間欠流(スラグ流)の場合である。ただし  $j_{Gi}=6\text{m/s}$ 、 $j_{Li}=0.182\text{m/s}$  と  $j_{Gi}=18\text{m/s}$ 、 $j_{Li}=0.767\text{m/s}$  は環状流のように観察される。しかし時々スラグ流と判別できる場合もある。そのため環状流とスラグ流の境界領域であると考えられる。

これらの水配分率は図6の実線の場合と同じ傾向が見られ、下流の分岐管になるに従い水配分率は大きくなる。

一方、図9a、図9b、図9cはスラグ流領域における空気配分率である。これらの空気配分率はヘッダー入口近くのB1、B2で小さくB3、B4で大きくなり、B5以後は配分率が小さくなる。おおむね分岐管番号が小さい分岐管に多く流れる傾向がある。これは3本の水平分岐実験の結果と同様の傾向を示している(Kariyasakiら1995)。

一方、流動様式が環状流の場合ではB9からB13で水配分率が増加し、空気配分率が減少する。

**3・3 分岐管での流動様相** D接続における分岐管の流動様相を図10に示す。

(a)  $j_{Gi}=3.1\text{m/s}$ 、 $j_{Li}=0.120\text{m/s}$  では入口主管における流動様式は分離流、環状流、スラグ流の境界領域である。この時入口主管を水塊が流れる場合、入口主管を完全に閉塞しているように見える時と見えない時がある。

(b)  $j_{Gi}=4.7\text{m/s}$ 、 $j_{Li}=0.781\text{m/s}$  は入口主管の流動様式がスラグ流である。時刻0sは水スラグがヘッダー入口に到達した時である。分岐管群のB1、B2に空気、水が流入している。B11、B12、B13には前の主管の水スラグが供給した気泡が観察される。0.0667秒後にはすべての分岐管に気液が流入している様子が観察され、B3からB9までは空気が主に流入している。0.300秒後にB10からB13まで気泡が観察される。

(c)  $j_{Gi}=28\text{m/s}$ 、 $j_{Li}=0.117\text{m/s}$  は入口主管の流動様式が環状流の場合である。この時、各時間で水が各分岐管に順次流入している。水は分岐管の側面を伝って空気とは分離して流れている。B1からB9までに流入しなかった残りの水がB10からB13に供給されている。このことは図6dで示しているB10、

B11, B12, B13の水配分率が大きくなっていることに表されている。また分岐管内が白く見える点は前面に付着した水滴である。B11, B12, B13では水が多く流れるために分岐管前面に水滴の付着が生じない。そのため分岐管が透けて見える。

#### 4. 結論

Serpentine 型蒸発器の模型を用いてヘッダーから13本の分岐管に等温の空気・水二相流が流動する場合の各分岐管への空気・水二相流体の配分を調べ、次の結果を得た。その際ヘッダーは水平に配置し、ヘッダーにおいて分岐管入口が管底及び管側にある

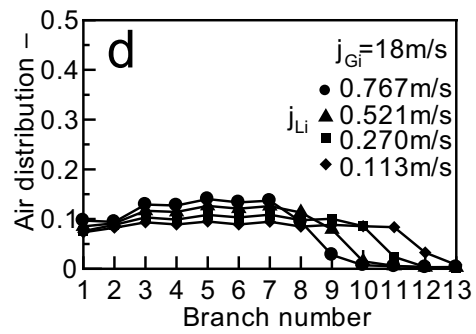
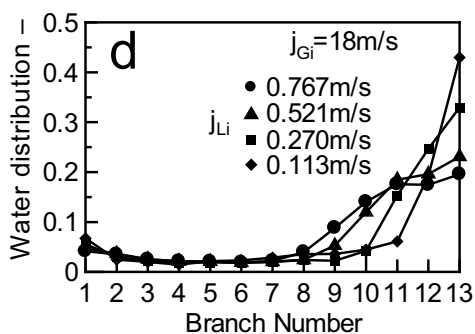
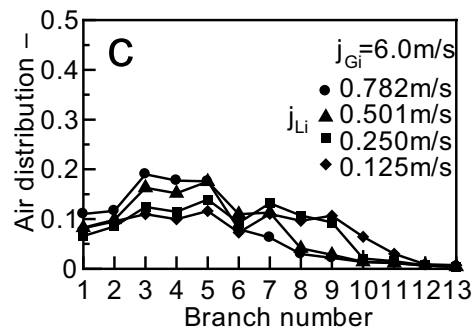
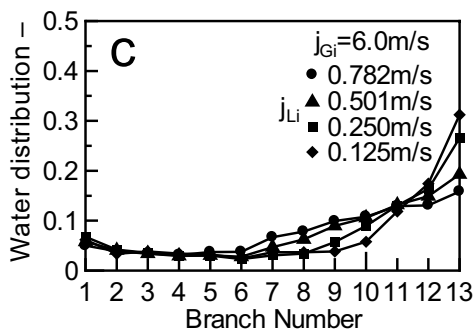
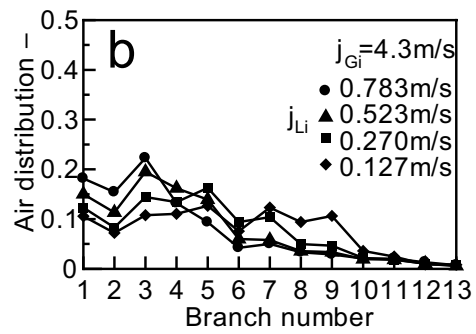
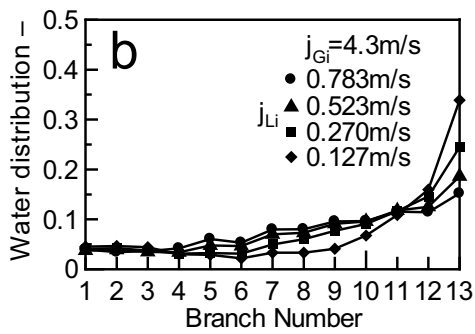
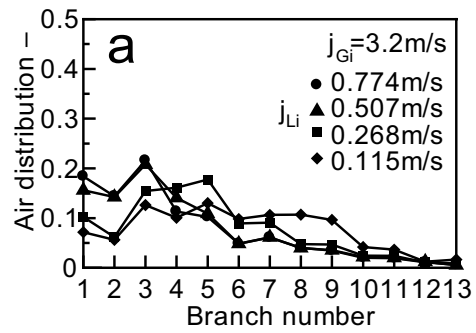
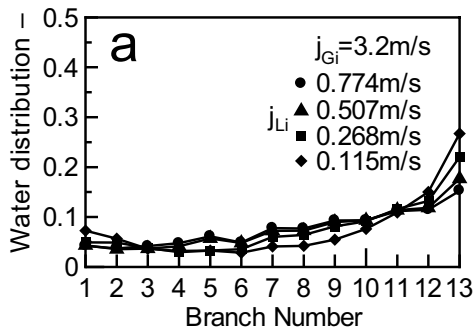


図8 H接続における水配分率

図9 H接続における空気配分率

場合について調査した。入口主管における流動様式は主にスラグ流で、一部環状流について行った。

1. 分岐管入口が管底にある場合、スラグ流領域においては13本の分岐管間で気液の配分に差異が生じる。
2. 環状流領域では入口から9本目までは各分岐管の配分率の割合は小さくなる。
3. 分岐管入口が管底にある場合、入口主管の静圧が小さい流動条件では一部の分岐管で不安定な流動が生じる。

4. 上向き流れの生じない配置の場合は不安定な流動が観察されなかった。

参 考 文 献

Azzopardi, B.J., Wagstaff, D., Patrick, L., Memory, S.B., and Dowling, J., The split of two-phase flow at a horizontal T - annular flow and stratified flow, *AERE-R 13059*, May(1988)

Ballyk, J.D., Shoukri, M., and Chan, A. M.C., Steam-water annular flow in a horizontal dividing T-

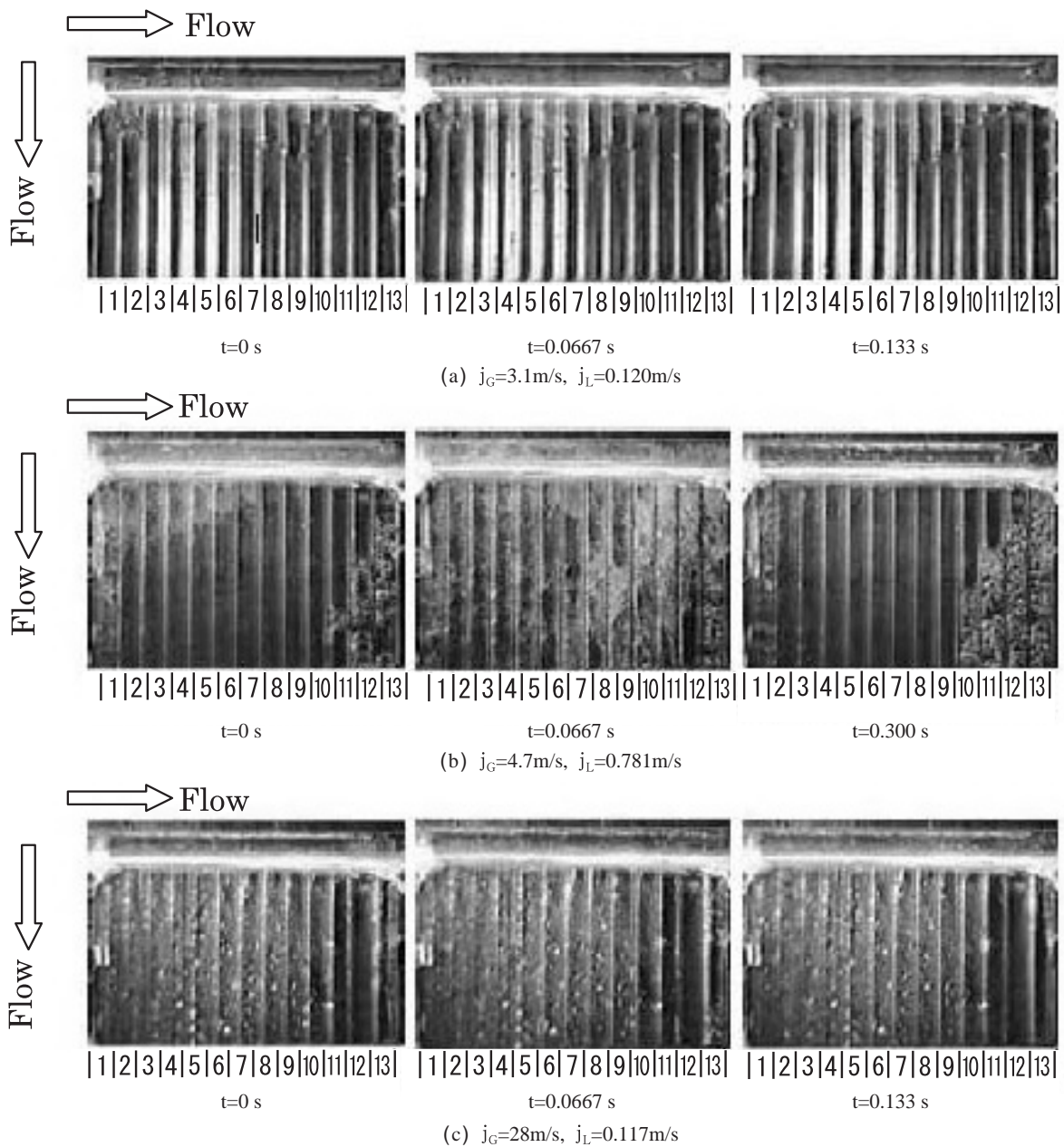


図10 D接続における分岐部の流動の様子

- junction, *Int.J.Multiphase Flow*, Vol.14, No.3 (1988), pp.265-285.
- Barnea, D., Luninski, Y., and Taitel, Y., Flow pattern in horizontal and vertical two phase flow in small diameter Pipes, *The Can.J.Chem. Eng.*, Vol.61, October (1983), pp.617-620.
- Kariyasaki, A., Nagashima T., Fukano T. and Ousaka, A., Flow Separation Characteristics of horizontal two-phase air-water slug flow into three successive horizontal capillary tubes through T-junction, *ASME/JSME Thermal Engineering Conference*, Vol.2 (1995), pp.75-82.
- Nagashima, T., Kariyasaki, A., and Fukano T., Phase separation characteristics of two-phase air-water flow in T-junction, *Fukuoka-univ. Kougaku Syuho.*, Vol.50 (1993), pp.253-259
- Nagashima, T., Kariyasaki, A., and Ousaka, A., Characteristics of phase separation in T-junction in air-water two-phase flow, *The 3rd International Conference on Product Design & Development 2007, December 12 th 2007*, Jogjakarta Indonesia.
- Seeger, W., Reimann, J., and Muller U., Two-phase flow in a T-junction with a horizontal inlet, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.12, No.4(1986), pp.575-585.
- Trauger, P.E., and Hughes, G.G., A/C evaporator construction and performance, *Automotive Engineering/ November*, (1993) pp.53-55.