卒業論文

T字分岐管における二相流の 流動特性

通し番号1-61 完

平成14年2月8日提出

指導教官 庄司正弘教授

00180 上田 敏之

目次

記号一覧

第1章 序論 1-1 研究の背景

- 5 1 - 2 研究の目的 1 - 3 気液二相流の流動様式 6 7

第2章 実験装置と手順

2 -	1	実験装置の仕様	1	0
2 -	2	実験装置	1	1

2-3 実験の手順 17

第3章 実験結果 3 - 1 測定条件

3-2 実験結果 2 2

20

第4章 考察

4 - 1	流動状態について	49
4 - 2	偏流特性について	50
4 - 3	動的特性について	52

第5章 結論

5	-	1	結論	57

5-2 今後の課題 58

参考文献

謝辞

記号一覧

- P : 圧力
- W : 質量流量
- X :乾き度・クオリティ
- **J** : みかけ速度(*m*/*s*)
 - :標準偏差

添え字

:気相
:液相
:分岐前(入口側)
:分岐後非測定側
:分岐後測定側

第1章 序論

- 1 1 研究の背景
 1 2 研究の目的
 1 3 気液二相流の流動様式

1-1 研究の背景

同一管路内を気体と液体が流れる気液二相流は原子力発電所や熱機関の冷却系機器,ランキン サイクルを利用した蒸気機関や冷凍サイクル,石油パイプラインや各種化学プラントの配管など に工業的に広く使われている.また,近年では蒸気圧縮式冷凍機の効率の向上やコンパクト化の 手段として熱交換器の細管化や,電子機器の冷却,冷凍機,微小機械等に関係して,マイクロチ ュープ内の流動や伝熱なども研究されるようになってきた.しかし,流れる気液二相流は気液の 流量比や流れの方向によって様々な流動様式をとり,その流動様式に応じて流動機構や伝熱過程 の特性も変化し,複雑な流れを持つ特徴がある.そのため,分岐管における気液二相流の流れは 非常に複雑となり,流れの時間変動や脈動を伴う.また,流動条件によって,分岐前後において 二相流のクオリティが変化する偏流現象や,気体があるひとつの分岐管にのみ流れてしまう相分 離現象が過去に行われた二相流の分岐管に関する研究により報告されている.上述したように気 液二相流は工業的に広く使われており,それらの機器の性能予測をより正確に行うために,分岐 管における二相流の流量分配特性や時間変動特性の理解,分岐管の形状の最適化が必要となって いる.

<u>1-2 研究の目的</u>

本研究では,分岐管における複雑な気液二相流の流動特性を理解するために左右に対称な T字 分岐管を用いることにした.二相流の流れるT字分岐管に関する研究は過去に行われている.こ れらは時間平均した流れを考えている研究が多く,動的な特性を議論している研究は多くない. また,水平な母管から同じく水平な枝管に分岐するT字分岐管を用いている研究が多い.そこで 本研究は,垂直な母管から水平な枝管に分岐するT字分岐管を配置し,垂直なT字分岐管におけ る気液二相流の分配特性とそのメカニズム,また分岐部における二相流の流動特性を理解するこ とを目的とした.

1-3 気液二相流の流動様式

気液二相流には様々な流動形態が現れるが,それらの流動状態の概要を把握するにも,また解 析モデルを設定するにも,流動形態をいくつかの流動様式に分類するのが便利である.また,流 動様式に応じて流動機構や伝熱過程の特性も一般に変化するので,気液二相流を考える際には与 えられた条件での二相流がどの流動様式に属すか決定するのが望ましい.

垂直管内流

垂直管内流の流動様式を図1-1に示す.

気相の容積流量が液相よりかなり小さい場合には,気相は不連続で,液中に気泡状に分散した 流れになり,この流動様式を気泡流(bubbly flow)という.気相流量を増加すると,幾つかの気 泡が合体し,管断面をほぼ満たすような大きい気体プラグに成長するため,流れはスラグ流 (slug flow)という小気泡を含む液体スラグと気体プラグが交互に流れる状態となる.液相流量 が大きい場合は,気体プラグは歪んだ状態となり,また液体スラグ中に多数の気泡を含んだ状態 となる.この状態をチャーン流(churn flow),または froth flow, semi-annular flow と呼ぶことも ある.気相流量がさらに増加すると,液相は壁面方向に押しやられ管壁に沿った環状液膜として 流れ,気相は管中心部を連続的にかなりの流速で流れる状態となり,この状態を環状流(annular flow),または環状噴霧流(annular-dispersed flow)という.

<u>水平管内流</u>

水平管内流の流動様式を図 1-2 に示す.

二相流の流量が低い場合は,液相は管底面に沿って流れる.上部を流れる気相はその流量により,不連続に流れる気泡流またはせん状流(plug flow),連続に流れる成層流(stratified flow) がある.気相流量を増加すると,気液界面が波立ち,波状流(wavy flow),またはスラグ流と なり,さらに気相流量を増すと,液の一部が飛散して環状流または環状噴霧流となる.液相流量 の大きい場合の流動様式は垂直管の場合とほぼ同じである.

7







図 1-2 水平管内流の流動様式

第2章 実験装置と手順

- 2-1 実験装置の仕様
- 2 2 実験装置
 2 3 実験の手順

2 - 1 実験装置の仕様

空気 水系気液二相流をテストセクションに供給し,分岐部の様子を観察しながら,枝管 における気液各層の流量及びT字分岐管における圧力変動を測定する実験装置である.

実験条件

- ・作動流体 : 空気・水道水
- ・母管流路 : 管径 15mm , 管長 1500mm の垂直上昇管
- ・枝管流路 : 管径 15mm , 管長 1500mm の水平管
- ・空気流量範囲 : 500*ml*/min ~ 500*l*/min
- ・水流量範囲 : 0.10*l*/min ~ 2.0*l*/min

昨年の実験装置からの改良点は,出口空気流量の測定を熱線流速計で行うことにしたこと,差圧 計によりT字分岐管における分岐前後の圧力変動を観察するようにしたこと,である.

<u>2-2</u>実験装置

<u>2-2-1 実験装置の概略</u>

実験装置の概略図を図 2-1 に,実験装置の写真を図 2-2 に示す.

T 字分岐管において分配された気液二相流は,一方の枝管でのみ流量の測定を行った.以下,T 字分岐管の入口側を1,非測定側出口を2,測定側出口を3と呼ぶことにする.

実験装置における流体の流れは以下の通りである.

- 1. 空気をコンプレッサから混合室に送る.
- 2. 水道水をフィルタに通し,不純物を取り除いた水を混合室に導く.
- 3. 混合室で作られた気液二相流は,垂直上昇管を経由し,T字分岐管に導かれる.
- 4. T字分岐管により2本の枝管に分配された二相流は,水平管により気液分離器に導かれる.
- 5. 気液分離器により二相流は気相,液相に分離され,それぞれ流量を測定された後空気は大気 開放,水は排水される.

<u>2-2-2 テストセクションについて</u>

テストセクションである T字分岐管の写真を図 2-3, 概略図を図 2-4 に示す.

T字分岐管は内径 15mm の円形流路,mm 断面をもつ透明なアクリル製である.但し,母管, 枝管との接合部は内径 25mmである. 断面により T 字分岐部における二相流の流動状態が観 察できるようになっている.

テストセクションにおける差圧の取り出し部は,枝管中心から母管方向に 35.5mm進んだ母管の 側面と,母管中心から枝管3方向に150mm進んだ枝管の鉛直下方にある.

母管側,枝管3側の計測部の静圧をそれぞれP₁,P₃とすると差圧 DP13は,

DP13 =
$$P_1 - P_3$$

と定義することにする.

2-2-3 実験装置の詳細

・コンプレッサ(日立製 5.5P-9.5VA5 50Hz 170*l*)

・入口側気相流量計

コンプレッサから混合室に向かう空気の流量をフロート式流量計(OMEGA 製 SMA-250 型×2, SMA-1 型)により測定した.流量範囲が0.5~5*l*/min,

5~50*l*/min, 50~500*l*/minの3本の流量計を用いた.

・水道水用フィルタ(ADVANTIC製,プラスチックハウジング IPC)

地下実験室の水道水は不純物を含んでいる可能性があるので,フィルタを通しろ過した. ・入口液相流量計

フィルタにより不純物をろ過した水の流量をフロート式流量計(OMEGA 製 TM3-30) により測定した.流量範囲が0.1~2.0*l*/minの流量計を用いた.

・気液混合室

気液混合室の写真を図 2-5 に示す.

空気と水を混合させる黄銅製の混合室である.混合室内を多孔質状にすることで小さな 気泡を発生し易くしている.空気は混合室下部中央から,水は混合室側面から水平に流 入させる構造になっている.

・母管

気液混合室とT字分岐管を結ぶ内径15mm,外径25mm,管長1500mmの透明なアクリル 製のパイプである.

・枝管

T 字分岐管と気液分離器を結ぶ内径 15mm,外径 25mm,管長 1500mmの透明なアクリル製のパイプである.

・絞り弁

ニードルバルブを用い,左右枝管の流量を調節する.

・気液分離器

気液分離器の写真を図 2-6 に示す.

気液分離器に導かれた気液二相流は密度の小さい空気は上へ,大きい水は下へと分離される.

気液分離器内の圧力を大気圧に保つため、空気は大気開放する.

・熱線流速計(KANOMAX 製 SYSTEM 7000)

・差圧計(VALIDYNE製 DP55 可変リラクタンス圧力トランスデューサ)

- ・アンプ(VALIDYNE製 PA2101 model 280)
- ・デジタルレコーダー(TEAC製DR-M3MK2)
- ・高速ビデオカメラ (PHOTRON 製 FASTCAM-Net Max)

流れの様子を観察するために,T字分岐管,母管,枝管を250FPSで約8秒間撮影した.

・光源(岩崎電気 PSR100V500W)

ビデオカメラでの撮影のために,T字分岐管,母管,枝管に備えた.



Compressor	Air Flow Meter
Filter	Water Flow Meter
Mixing Room	T-junction
Differential Pressu	are Sensor
High Speed Video	Camera
Separator	Hot Wire
-	

図 2-1 実験装置概略図



母管側					
S	i	d	е	1	

図 2-2 実験装置



図 2-3 T字分岐管







図 2-5 気液混合器



図 2-6 気液分離器

2-3 実験の手順

<u>2-3-1 実験手順の概要</u>

作動流体は空気 水二相流である.それぞれの流量をフロート式流量計により計測した後,混合 室に導き,混合室内で二相流となった流れは内径 15mm,管長 1500mmの垂直上昇管である母管 を伝わりテストセクションであるT字分岐管に達する.母管内で十分発達した二相流はT字分岐 管により2本の枝管に分配され,一方の枝管で流量の測定を行った.T字分岐管の入口側を1, 非測定側出口を2,測定側出口を3とする.枝管に設けられたニードルバルブの開度を調節する ことにより各枝管に分配される流量を変え,気液二相流を分離器によって分離した後,気相は熱 線流量計,液相はメスシリンダにより流量を測定した.また,T字分岐管における分岐前後の静 圧変動を差圧計により測定し,差圧計と熱線流速計の出力をデジタルレコーダーに記録した.そ れぞれサンプリング周波数は 200kHz,測定時間は 60 秒とした.また,高速ビデオカメラにより 母管及びT字分岐管における流動状態を観測した.

2-3-2 実験手順

準備

実験装置の対称性を確認する.

- ・ 各枝管の二 ドルバルブを全開にする.
- ・ 実験装置に水のみを流し,系が安定するまで待つ.
- ・ 測定側出口の水流量が入口水流量の半分になっているか確認する.
- 次に,各枝管のニードルバルブを全開にしたまま母管から気泡流を流し,左右枝管における
 二相流の流動様式が等しいか確認する.
- 以上の操作で非対称性が確認されたら実験装置の対称性を調節し,再び確認作業を行った.

熱線流速計を校正する.

差圧計を校正する.

本実験

コンプレッサで空気を圧縮する.

- 圧縮された空気及びフィルタでろ過された水道水を気液混合室に導き,気液二相流を作る. 気液各相の流量をフロート式流量計で調節し,母管における流動様式を観察する.
- 実験手順の概要で述べたように,T字分岐管の入口側を1,非測定側出口を2,測定側出口
- を3とし,2側のニードルバルブを全開,3側のニードルバルブを全閉にする.この状態に おける気液各流量,差圧計の出力を測定し,母管及び枝管の流動様式を観察する.

3側のバルブを徐々に開いていき,各々の状態における気液各流量,差圧計の出力を測定し, 母管及び枝管の流動様式を観察する.

3側のバルブが全開になったら,2側のバルブを閉じていき,全閉になるまでと同様の測 定を繰り返す.

第3章 実験結果

- 3 1 測定条件
- 3-2 実験結果

3-1 測定条件

本実験は,大気圧下,入口空気みかけ速度(*j_{G1}*)0.09~7.08*m*/*s*,入口水みかけ速度(*j_{L1}*) 0.05~0.19*m*/*s*範囲で行った.また,T字分岐管の分岐中央から母管方向 35.5mm,枝管方向 150mmの区間の差圧変動を,サンプリング周波数 200Hz で 60 秒間測定した.熱線流速計も同じ くサンプリング周波数 200Hz で 60 秒間測定した.

図 3-1 は表 3-1 において観察された母管の流動様式を Taitel-Dukler の流動様式線図上にプロット したものである.この線図は横軸に空気みかけ速度,縦軸に水みかけ速度をとり,両対数グラフ となっている.

流動様式	空気みかけ速度 j _{G1}	水みかけ速度 j _{L1}	
	(m/s)	(m/s)	
Bubble	0.09	0.19	
Bubble	0.14	0.09	
Bubble	0.14	0.14	
Bubble	0.14	0.19	
Bubble	0.19	0.19	
Churn	0.94	0.05	
Churn	0.94	0.09	
Churn	0.94	0.14	
Churn	1.42	0.09	
Churn	1.89	0.09	
Annular	4.72	0.13	
Annular	5.90	0.09	
Annular	5.90	0.11	
Annular	5.90	0.13	
Annular	7.08	0.13	

表 3-1 母管の流動様式



⊠ 3-1 Flow pattern map

3-2 実験結果

分岐後の枝管の流路抵抗をニードルバルブによって変化させ,流量やクオリティの分配特性及び T 字分岐管の分岐前後における差圧変動を測定する実験行った.実験は表 3-1 に示した入口気 液みかけ速度について行った.

・ <u>偏流特性図について</u>

このグラフは,横軸に枝管と母管の流量分配比(二相流の入口質量流量のうち,測定側枝管3 に分配される割合),縦軸に枝管と母管のクオリティ比をとったものである.

このようなパラメータをとったのは,流量分配比が異なることにより母管と枝管でのクオリティが変化する偏流がおきるためである. 図 3-4,図 3-5 の破線は $W_1X_1 = W_3X_3(W_1 = W_{L1} + W_{G1}, W_3 = W_{L3} + W_{G3})$ であり,気相がすべて枝管3側に流れる状態,つまり枝管2側が液単相状態であることを示している.また, $X_3/X_1 = 0$ である X 軸上は枝管2側に気相がすべて分配されていることを示している.点線は $X_3/X_1 = 1$ であり,母管と枝管のクオリティ比が等しく,均等分配されていることを示し,この線から離れているほど気相の偏流が強いといえる.

・ <u>標準偏差 について</u>

気液二相流の特徴に脈動現象がある.本実験では,母管においてチャーン流では激しい脈動が 現れ,それに伴い逆流が生じるのが観察された.また,気泡流や環状流といった間欠的ではな い流れでも母管・枝管間ではチャーン流程度とは言えないまでも脈動が生じているのがわかっ た.一方,水平管においても流動がプラグ流やスラグ流の場合は脈動が見られた.つまり,気 液二相流を分岐する現象は振動的な現象であり,振動の大きさを表すひとつの指標として,

$$= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (Y_i - \overline{Y})^2}{N}}$$

と表される標準偏差に注目した.

3-2-1 偏流特性についての結果

気泡流,チャーン流及び環状流のそれぞれの場合における,母管及び枝管における流動状態の 観察結果,T字分岐管における流動状態の観察結果,並びにT字分岐管における偏流特性図を図 3-2~図3-13に示す.図3-2~図3-4は母管及び枝管における流動状態の観察結果,図3-5~図3-7はT字分岐管における流動状態の観察結果,図3-8~図3-13はT字分岐管における偏流特性図 である.





($j_{\rm L1}=0.19m/\,s$, $j_{\rm G1}=0.14m/\,s$ bubbly flow region)





($j_{\scriptscriptstyle L1}=0.09m/\,s$, $j_{\scriptscriptstyle G1}=0.94m/\,s$ churn flow region)





($j_{\rm L1}=0.13m/\,s$, $j_{\rm G1}=5.90m/\,s$ annular flow region)



図 3-5 T字分岐管における流動状態





図 3-6 T字分岐管における流動状態

($j_{L1} = 0.09m/s$, $j_{G1} = 0.94m/s$ churn flow region)



図 3-7 T字分岐管における流動状態

($j_{L1} = 0.09m/s$, $j_{G1} = 0.94m/s$ annular flow region)



23-8 Characteristics of phase separation in bubbly flow region ($j_{L1} = 0.19$ m/s)



Z 3-9 Characteristics of phase separation in bubbly flow region ($j_{G1} = 0.14$ m/s)



Z 3-10 Characteristics of phase separation in churn flow region ($j_{L1} = 0.09$ m/s)



Z 3-11 Characteristics of phase separation in churn flow region ($j_{G1} = 0.94$ m/s)



Z 3-12 Characteristics of phase separation in annular flow region ($j_{L1} = 0.13$ m/s)



2 3-13 Characteristics of phase separation in annular flow region($j_{G1} = 5.90$ m/s)

3-2-2 動的特性についての結果

気泡流, チャーン流及び環状流のそれぞれの場合における典型的な流動の特徴を表していると 考えられる状態について差圧変動(DP13[mmH2O]), 出口空気流量(*W_{G3}*[g/min])の時系列変 化及びパワースペクトル, また, 測定した各流量における差圧変動(DP13), 出口空気流量 (*W_{G3}*)についての標準偏差 と枝管と母管の流量分配比(*W₃/W₁*)との関係を図 3-14~図 3-37 に示す.

本実験のT字分岐管における気液二相流の流動は,以下に示す差圧変動(DP13)及び出口空 気流量(W_{G3})の時系列変化により周期や振幅の変動が見られるので,脈動の周期変動はパワー スペクトルにより,脈動の振幅変動は標準偏差 により表そうとした.

1.気泡流についての結果

図 3-14,図 3-15 に $j_{G1} = 0.14m/s$, $j_{L1} = 0.19m/s$ の場合の差圧変動(DP13)及び出口空気流量(W_{G3})の時系列変化を示す.

図 3-16,図 3-17 に $j_{G1} = 0.14m/s$, $j_{L1} = 0.19m/s$ の場合の差圧変動(DP13)及び出口空気流量(W_{G3})のパワースペクトルを示す.

図 3-18,図 3-19 に差圧変動(DP13)及び出口空気流量(W_{G3})の標準偏差 と枝管と 母管の流量分配比(W₃/W₁)との関係を示す.



 \blacksquare 3-15 Time series of $W_{\rm G3}$ in bubbly flow region



3-16 Power spectrum of DP13 in bubbly flow region



2 3-17 Power spectrum of W_{G3} in bubbly flow region



図 3-18 流量分配比と DP13 の標準偏差との関係 (bubbly flow region)



図 3-19 流量分配比と W_{G3} の標準偏差との関係 (bubbly flow region)

2. チャーン流についての結果

図 3-20,図 3-21に $j_{G1} = 0.94m/s$, $j_{L1} = 0.09m/s$ の場合の差圧変動(DP13)及び出口空気流量(W_{G3})の時系列変化を示す.

図 3-22,図 3-23 に $j_{G1} = 0.94m/s$, $j_{L1} = 0.09m/s$ の場合の差圧変動 (DP13)及び出口空気流量 (W_{G3})のパワースペクトルを示す.

図 3-24, **図 3-25** に差圧変動(DP13)及び出口空気流量(W_{G3})の標準偏差 と枝管と 母管の流量分配比(W₃/W₁)との関係を示す.



☑ 3-20 Time series of DP13 in churn flow region



2 3-21 Time series of W_{G3} in churn flow region



☑ 3-22 Power spectrum of DP13 in churn flow region



2 3-23 Power spectrum of W_{G3} in churn flow region



図 3-24 流量分配比と DP13 の標準偏差との関係 (churn flow region)



図 3-25 流量分配比と W_{G3} の標準偏差との関係 (churn flow region)

3.環状流についての結果

図 3-26 , 図 3-27 に $j_{G1} = 7.08m/s$, $j_{L1} = 0.13m/s$ の場合の差圧変動 (DP13) 及び出口空気流量 (W_{G3})の時系列変化を示す.

図 3-28,図 3-29に $j_{G1} = 7.08m/s$, $j_{L1} = 0.13m/s$ の場合の差圧変動 (DP13)及び出口空気流量 (W_{G3})のパワースペクトルを示す.

図 3-30,図 3-31に差圧変動(DP13)及び出口空気流量(W_{G3})の標準偏差 と枝管と 母管の流量分配比(W₃/W₁)との関係を示す.



2 3-26 Time series of DP13 in annular flow region



2 3-27 Time series of W_{G3} in annular flow region



23-28 Power spectrum of DP13 in annular flow region



2 3-29 Power spectrum of W_{G3} in annular flow region



図 3-30 流量分配比と DP13 の標準偏差との関係 (annular flow region)



図 3-31 流量分配比と W_{G3} の標準偏差との関係 (annular flow region)

第4章 考察

- 4 1 流動状態について
- 4-2 偏流特性について
- 4-3 動的特性について

4 - 1 流動状態について

図 3-1 により,本実験で見られた流動様式は Taitel-Dukler の流動様式線図とチャーン流では一致しているが,気泡流と環状流ではずれている部分があった.我々が環状流と判断した流れは, Taitel-Dukler の流動様式線図ではチャーン流の領域に位置し,気泡流と判断した流れの一部はス ラグ流の領域に位置していた.Taitel-Dukler の流動様式線図は管径が約 50mmと我々の実験装置 よりも管径が大きいため,環状流は我々の方が小さい空気みかけ速度 *j*_{G1} で実現できると考えら れる.また,本実験では流動様式を目視で観察したが,目視では主観的な判断や人それぞれによ り流動様式の理解が違うことがあるため,客観的で正確な流動様式の区別が難しい.二相流の流 れが速い場合は,目視で観察した場合と高速ビデオカメラによりスローモーションを観察した場 合とでは流動様式が異なるように見えることもあった.そのため,目視で流動様式を判断する際 にはある程度の不確からしさが生じるのは仕方がないことと思われる.

本実験では,気泡流,チャーン流及び環状流は観察されたが,典型的なスラグ流は確認できな かった.スラグ流は流路断面を満たすような大きい気泡(気体スラグ)と,小気泡を含む液体部 分(液体スラグ)が交互に存在する流れであるが,気泡流から入口空気流量を増やすと母管で逆 流が生じるため,気体スラグが十分発達しなかったためであると考えられる.

図 3-2 ~ 図 3-5 に気泡流,チャーン流及び環状流における母管及び枝管の流動状態を示したが, 母管が気泡流では成層流からプラグ流へ,母管がチャーン流と環状流では成層流からスラグ流へ と流動様式が変化するのが確認された.T字分岐管における圧力損失のためであろうか,母管が 環状流であっても枝管で環状流が見られることはほとんどなかった.

また, チャーン流や環状流の $W_3/W_1 = 0 \sim 0.3$ 程度の範囲で, T 字分岐直後の枝管 3 内におい て水の激しい振動が観察され, 枝管から母管に水が逆流する現象も見られた. チャーン流は母管 で逆流を生じるため, 逆流した流れは次の流れと合体し,大きな慣性力を持つ流れをとなる. そ のため, チャーン流や環状流が T 字分岐管に衝突した際に,流路抵抗の大きい枝管内の気体プラ グが圧縮され,その後膨張するために,枝管内の水が振動すると考えられる. 図 3-6, 図 3-7 か らも, W_3/W_1 が小さい場合において,二相流が流路抵抗の大きな枝管内の気泡を押しているの が確認される.

49

4-2 偏流特性について

本実験において測定を行った気泡流,チャーン流及び環状流について各流量についての偏流特 性は以下のようになった.

<u>気泡流について</u>

図 3-8,図 3-9より気泡流の偏流のピークは $W_3/W_1 = 0.2 \sim 0.3$ にあり,流量分配比が小さい領域にあることが特徴といえる. j_{L1} を一定にすると j_{G1} が小さいほど, j_{G1} を一定にすると j_{L1} が少ないほど偏流し易くなっている.

・ <u>チャーン流について</u>

図 3-10,図 3-11 より $W_3/W_1 = 0.5$ 近くで $X_3/X_1 = 1$ 程度となり,左右の枝管に等しく二相流の流量が分配されると均等分配となることがわかる. j_{L1} を一定にすると j_{G1} が大きいほど偏流し易くなっているが, j_{G1} を一定にし j_{L1} を変化させても偏流の程度は変わらない.

・ 環状流について

図 3-12,図 3-13 より環状流はチャーン流よりも偏流が強いといえる.また,チャーン流と同じように $W_3/W_1 = 0.5$ 近くで $X_3/X_1 = 1$ 程度となり,左右の枝管に等しく二相流の流量が分配されると均等分配となることがわかる.偏流の起こりかたは, j_{L1} , j_{G1} に依らず,どの条件においてもほぼ一定である.

以上に気泡流,チャーン流及び環状流における偏流特性を示したが,気泡流において偏流のピークが $W_3/W_1 = 0.2 \sim 0.3$ になる原因はよくわからない.但し,空気流量が小さい領域なので測定の誤差が大きいかもしれない.

本実験において枝管2,3のいずれか片方の枝管が液単層状態である完全な相分離状態は観察 されなかった.本実験装置は垂直上昇管である母管と水平管である枝管により構成されているた め,装置内に水を満たしてから空気を流入させると,バルプを閉じている枝管にも気泡が混入し やすく,混入した気泡が合体し大きな気体プラグに成長することが観察された.そのため,本実 験装置は気液二相流を流すと両方の枝管に気相が存在する状態がすぐに作られてしまうので,完 全な相分離状態は実現できないのである. 偏流特性図において枝管 3 側から出口空気流量 W_{G3} が測定され始めるときの流量分配比(以下, これをガス混入開始点 $(W_3/W_1)_{cr}$ と呼ぶ)は,この値が大きいほど気相が片方の枝管にのみ流れ る相分離状態が起こりやすいことを示す.本実験では流動様式に依らず,0.1以下の値となって いる.これは,先ほど述べたように枝管に気泡が混入しやすく,絶えず大きな気泡プラグが枝管 に存在することと,4-1で述べたように,垂直上昇管である母管のために流れの慣性力が大き く,気相を押し出す力が強いために,気相が流路抵抗の大きい枝管側に流れやすくなっていると 考えられる.

4-3 動的特性について

T字分岐管における気液二相流の動的特性を調べるために,T字分岐前後の差圧変動(DP13) 及び出口空気流量(W_{G3})を測定し,それらの時系列変化,パワースペクトル,流量分配比 (W₃/W₁)と標準偏差の関係を図3-14~図3-31に示した.パワースペクトルにより脈動の周期 を,標準偏差により脈動の振幅の大きさを考察することにする.以下,それぞれの流動様式に ついて考察してみる.

4-3-1 気泡流について

DP13 について

図 3-14 より気泡流における DP13 の時系列変化はW₃ / W₁にほとんど影響がない.

図 3-14 の時系列変化における極大値は母管側の差圧測定部から T 字分岐までの区間に水が多 く流れた場合,極小値は同じ区間に気泡が多く流れた場合であることが,高速ビデオカメラによ る観察で明らかになった.また,細かい周期の波は枝管における小気泡や小さなプラグの合体や 流動による振動だと考えられる.しかし,この細かい振動の DP13 の変化に対する影響は非常に 小さい.これより,DP13 は母管の流動状態が支配的であるといえる.

図 3-16 のパワースペクトルより, DP13 はW₃/W₁に依らず,約4Hz のピークをもつ変動であ り,スペクトルの分布も 0~10Hz 程度で一定であるので DP13 の変動周期は一定であるといえる.

図 3-18 より, j_{G1} が一定の場合は j_{L1} が小さいほど, DP13の が増える傾向がある.これは, j_{L1} が小さいほど気泡流が間欠的な流れになるので脈動が大きくなったのであろう.また, は W_3/W_1 に依らず,ほぼ一定の値を持つことがわかる.

W_{G3} について

図 3-17 のパワースペクトルより, W_{G3} は $W_3/W_1 = 0.35$ においては 15 ~20Hz にピークを持ち, $W_3/W_1 > 0.35$ では約4Hz にピークがある.特に, $W_3/W_1 = 1$ (以下, $W_3/W_1 = 1$ を L字分岐 と呼ぶ)では約4Hz にするどいピークがある.このピークは DP13 のピークとほぼ一致するので, 流量分配比が大きいと母管の流動状態が枝管に及ぼす影響が大きいと考えられる. $W_3/W_1 = 0.35$ では枝管 3 の流動状態は小さいプラグ流から成層流へと変化していたが,その変 化が 15 ~ 20Hz 程度の高い周波数を持つ現象だとは観察できなかった.ひとつの原因としては成層流が流れると枝管と気液分離器が共鳴管の役割をし,空気が共鳴を起こしているのかもしれない.また,特徴的なことは図 3-19 により, W_{G3} の が $W_3/W_1 = 0.5$ 程度で大きく落ち込むことがみられることである.これは,気泡流では左右の枝管に均等に流量が分配されると空気の流れに脈動が小さくなることを示している.しかし,枝管の流動様式は $W_3/W_1 = 0.2 \sim 0.6$ 程度ではプラグ流から成層流に変化する流れであり, $W_3/W_1 = 0.5$ 程度で大きく流動様式が変化しているわけではないので,枝管の流動様式が が大きく落ち込む原因となっているとは考えにくい.

<u>4-3-2 チャーン流について</u>

DP13 について

図 3-20 より DP13 はある周期により極大値を持ち, W_3/W_1 が大きくなるにつれてその極大値も大きくなる傾向がある.極大値は液体スラグのようなものが T 字分岐管を通る時にみられ, それ以外の変化の少ない部分は逆流が生じ,T 字分岐管に流れがない時である.そのため, DP13 の変動周期は母管の流動状態が支配的であるといえる.また, $W_3/W_1 = 0.20$ のグラフ には極大値以外に細かい変化が見られるが,これは4-1で述べた枝管3内の水の激しい振動 によるものと考えられる.

図 3-22 のパワースペクトルより, $W_3/W_1 = 0.20$ は約 3.2Hz にピークを持ち,枝管内の水の振動がみられなくなった $W_3/W_1 > 0.43$ では, $W_3/W_1 = 0.20$ の場合よりも小さい約 1 ~ 1.5Hz にピークを持つが, $W_3/W_1 = 0.20$ では先ほど述べた枝管内の水の振動があるためであると考えられる.また,母管の逆流の周期は高速ビデオカメラにより確認すると,母管の逆流の周期は不均すると約1秒弱であるが,現れる周期は約 0.2 ~ 1.3 秒の間でランダムであった.そのため,図 3-22 のスペクトルは幅広い周波数に分布しているのであろう.

図 3-24 より W_3/W_1 が増えるに従って DP13 の も増加する傾向があるが, DP13 の極大値は W_3/W_1 が増えると増加するので当然の結果かもしれない.また, j_{L1} を一定にした場合は j_{G1} が大きいほど, j_{G1} を一定にした場合は j_{L1} が大きいほど, が増加している.母管では重力により落下しようとする水を空気の慣性力で上昇させているため, j_{G1} を増やすほど脈動は大きくなると考えられる. W_{G3} について

図 3-23 より, W_{G3} は $W_3/W_1 = 0.20 \sim 0.43$ においては約 0.2Hz に, $W_3/W_1 = 0.63$ において約 0.2Hz と 1.5Hz に, $W_3/W_1 = 1$ では約 1.5Hz に周波数のピークを持つ. 枝管 3 の流動状態は $W_3/W_1 = 0 \sim 0.20$ では成層流, $W_3/W_1 = 0.20 \sim 0.63$ では波状流, $W_3/W_1 = 0.63 \sim 1$ では間欠的な流れや流量が多いとスラグ流が見られる.そのため, $W_3/W_1 = 0 \sim 0.20$ の成層流では約 0.2Hz の緩やかな流れとなっており, $W_3/W_1 = 0.20 \sim 0.63$ の波状流では成層流のように約 0.2Hz の緩やかな流れと、母管からの影響に約 1.5Hz の流れが混ざった流れになっている. $W_3/W_1 = 1$ のL字分岐では気泡流の場合と同じように母管の周波数の影響が強いといえる.

また,図 3-25 より W_{G3} の は $W_3/W_1 = 0 \sim 0.6$ 程度までは増加するが, $W_3/W_1 = 0.6 \sim 1$ で は減少または一定になる傾向がみられる. $W_3/W_1 = 0 \sim 0.2$ の成層流の領域よりも, $W_3/W_1 = 0.2 \sim 0.6$ 程度の波状流の方が の増加が大きいので,成層流より間欠的な波状流の 方が流量の増加に対する脈動の変化は大きいと考えられる.また, $W_3/W_1 = 0.6 \sim 1$ のスラグ 流の領域では が減少する傾向があるが,スラグ流は間欠的ではあるが,定常的な流れの環状 流に近づくので脈動は小さくなるのではないだろうか.また,気泡流の場合と同じく $W_3/W_1 = 0.5$ 程度において が減少する傾向があるが,枝管の流動様式は変化しないので,流 動様式が がの減少する原因とは言えない.

4-3-3 環状流について

DP13 について

環状流は定常的な流れであるが母管が垂直上昇管のため小さな脈動がみられた.そのため,チャーン流と同じく,図3-26のDP13の極大値は脈動によりT字分岐管に液相が多く流れる場合であり,W₃/W₁が増えるに従い,極大値も増える.よって,DP13の変動周期は母管の流動様式が支配的である.

図 3-28 のパワースペクトルにより, $W_3/W_1 = 0.10$ は約 4.5Hz に周波数のピークを持ち,それ 以外は約 2Hz に周波数のピークを持つ.これは, $W_3/W_1 = 0 \sim 0.20$ において枝管3に激しい 水の振動が見られ, $W_3/W_1 = 0.10$ における DP13 の変動周期が小さくなったためだと考えら れる.また,図 3-30より W_3/W_1 が増えると DP13のが増える傾向があるが, W_3/W_1 が増え ると DP13の極大値が大きくなるので,当然の結果かもしれない. *W*_{G3} について

図 3-29 より, W_{G3} は $W_3/W_1 = 0.10$ は約 1.3Hz, $W_3/W_1 = 0.44$ は約 0.2Hz と約 1Hz, $W_3/W_1 = 0.68$ は約 0.2Hz と約 0.5Hz に周波数のピークを持ち, $W_3/W_1 = 1$ は明確なピークは持たなかった. 枝管 3 の流動状態は $W_3/W_1 = 0 \sim 0.23$ では成層流, $W_3/W_1 = 0.23 \sim 0.62$ では波状流とスラグ流が混ざったような流れ, $W_3/W_1 = 0.62 \sim 1$ ではスラグ流が見られ,特に $W_3/W_1 = 1$ に近い場合は T 字分岐直後に環状流となっていた.気泡流,チャーン流では $W_3/W_1 = 1$ の L 字分岐の場合,母管の流動状態が枝管に影響していたが,環状流は母管が枝管に影響をほとんどしていないことがわかる.

図 3-31 より W_{G3} の はチャーン流と同じように成層流から波状流,スラグ流に変化する $W_3/W_1 = 0 \sim 0.6$ 程度までは増加するが,スラグ流である $W_3/W_1 = 0.6 \sim 1$ では減少または一 定になる傾向がみられる.また,気泡流やチャーン流と同じように $W_3/W_1 = 0.5$ で W_{G3} の の が減少する傾向があるが,流動様式では気泡流やチャーン流の場合と同じく説明できない.

第5章 結論

- 5-1 結論
- 5-2 今後の課題

<u>5-1 結論</u>

本研究により以下の結論を得た

- 1.本実験装置では相分離状態は観察されなかった.
- 2.差圧変動(DP13)の脈動は母管の流動状態の影響が大きい.
- 3.T字分岐後の出口空気流量の脈動は枝管の流動様式が支配的である.
- 4.出口空気流量の脈動は $W_3/W_1 = 0.5$ 程度において,一時的に減少する.
- 5. チャーン流や環状流では $W_3/W_1 = 0 \sim 0.2$ の範囲において枝管内水の激しい振動が見られた.

<u>5-2</u>今後の課題

本研究では T 字分岐管の分岐前後の差圧変動(DP13)と,一方の枝管の空気流量(W_{G3})を測定し,それらの動的特性を考察したが,T字分岐管における気液二相流の特徴的な流動現象のひとつである偏流の動的特性は導き出せなかった.T字分岐管には母管と2本の枝管があるのだから,今回の研究では扱わなかった左右の枝管の動的な特性を調べることにより,どのようにT字分岐管において偏流がおきるのか,そのメカニズムを理解する一助になるかもしれない. また,本研究は物理的な考察を行っておらず,この現象が起こる物理的な意味を知ることもT字分岐管における気液二相流の流動特性を理解する手助けとなるであろう.

参考文献

- 1 植田辰洋,気液二相流 流れと熱伝達 , 養賢堂
- 2 藤井ら, T-ジャンクションによる気液二相流の相分配特性(地上実験結果と微小重量場への適用),日本機会学会論文集(B編)62巻594号(1996-2)447-453
- 3 中島・笠木・鈴木,第36回日本伝熱シンポジウム講演論文集(1999)
- 4 松井剛一ら,水平管内気液二相流の圧力降下変動の統計的性質と流動様式,日本機会学会論 文集(B編)53巻485号(昭 62-1)

謝辞

本論文の作成に際して,ご指導いただいた庄司教授には心から感謝いたします.

実験装置の組み立てを手伝っていただいただけではなく,様々なアイデアをだしていただいた渡辺技官には大変お世話になりました.

二相流研究の先輩としてアドバイスしてくださった伊藤さんには大変感謝しております.

Matlab のファイルを譲っていただいただけでなく,無知な僕の質問に丁寧に答えてくださった宮崎さん,気配りの上手な山神さんは非常にたのもしく感じました.

パソコンの使い方を教えてくださった木村さん,横田さん,坂田さんありがとうございました.

同じ4年生の石川くん,対馬くん,橋本くん,戸松くんたちのおかげで楽しく研究室で時間 が過ごせました.

最後に一緒に実験をしていただいた汪さんには寛容な態度で僕に接していただき深く感謝し ております.

以上

通し番号1~61完

卒業論文

<u>平成14年2月8日提出</u> 00180 上田 敏之