

卒業論文

T型分岐管の二相流分岐特性に 関する研究

通し番号 1 - 50 完

平成 13 年 2 月 9 日 提出

指導教官 庄司正弘教授

90234 竹村 崇裕

目次

記号一覧	4
第 1 章 序論	5
1 - 1 はじめに	6
1 - 2 研究の背景	7
1 - 3 不均等分配の意味	8
1 - 4 研究の目的	9
第 2 章 気液二相流の基礎	10
2 - 1 気液二相流の一般的事項	11
2 - 2 気液二相流の分岐	12
2 - 3 気液二相流の流動様式	13
2 - 4 気液二相流の流動特性	15
2 - 5 流動様式線図	16
2 - 6 二相流の脈動現象	18
第 3 章 実験装置	19
3 - 1 実験の目的とその仕様	20
3 - 2 実験装置	21
3 - 3 実験方法と手順	28
第 4 章 実験結果	30
4 - 1 流動様式の観察と流動様式線図	31
4 - 2 流路抵抗を変える実験	34
第 5 章 考察	38
5 - 1 流動様式線図についての考察	39
5 - 2 偏流特性についての考察	40

第 6 章	結論	42
6 - 1	結論	43
6 - 2	今後の課題	44
参考文献		45
謝辞		46
付録		47
	CAD 設計図面	48

記号一覧

A	: 断面積
D	: 管径
g	: 重力加速度
L	: 管全長, 長さ
p	: 圧力
ρ	: 圧力損失
R	: 半径
R	: 空気のガス定数
s	: スリップ比 = 気液速度比
T	: 温度
t	: 時間
W	: 質量流量
Q	: 体積流量
U	: 見かけ流速
u	: 流速
x	: クオリティ
	: ボイド率
	: 管摩擦係数
μ	: 粘度
	: 密度
	: 表面張力

添字

g	: 気相
l	: 液相
1	: 分岐前 (入口側)
2	: 分岐後非測定側
3	: 分岐後測定側

第1章 序論

- 1 - 1 はじめに
- 1 - 2 研究の背景
- 1 - 3 不均等分配の意味
- 1 - 4 研究の目的

1 - 1 はじめに

気相と液相が共存する流れ，即ち気液二相流は広範囲の技術分野で見られる現象であるが，その流動状態や伝熱過程は一般に複雑であり，体系としてまとまっていない領域が少なくない．気液二相流は，工業上ではボイラ、冷凍機、原子炉の炉心と蒸気発生器、原油の生産井と輸送用パイプライン、地熱発電用蒸気生産井、各種化学プラントなど様々な装置において見られる．したがって、これらの装置の設計、性能予測、運転条件の決定においては気液二相流の知識が必要となってくる．特に沸騰や凝縮を伴う二相流は，多くの動力プラント，化学プラント，及び空調・冷凍装置に関係し，ボイラ，水冷却型原子炉，各種の蒸発器や蒸発塔，凝縮器，蒸気タービンなどにおける主要過程である．それ故，その流動状態や伝熱特性を理解しておくことが，これら機器の設計上極めて重要であることは言を待たない．

空気と水の二相流は，流量比によって様々な流動様式をとるが，気液二相流の伝熱過程は，その流動状態と密接に関連していることが分かっている．しかし，現象の複雑さや特異な性質の為に，二相流の流動機構や伝熱過程に関する我々の理解は未だ不十分であって，今後の研究に待つところが少なくない．したがって，この分野では基礎的事項を明確にし，現象に対する適切な見通しを把握しておくことが技術者にとって特に重要であろう．

1 - 2 研究の背景

1960年頃からの原子力工業の発展に伴い、多くの研究者達が気液二相流動に関する種々の現象を解明するのに努力して来たが、近年、電子機器の冷却、冷凍機及び微小機械等に関連して、マイクロチューブ内の流動や伝熱も多く研究されるようになって来た。

また、最近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が注目されている。このような細管による熱交換器は単位長さ当たりの圧力損失の増加を伴うが、熱伝達率の向上による全長の短縮によって、性能を改善することが期待される。

一方で、細管化による冷媒流量の減少を補うには、配管を並列に複数本配置して、従来の冷凍機と同等の冷媒流量を維持することが不可欠である。その為、冷媒の複数の配管への分配、及び合流が必要になる。

その内、分配に関しては、流量の偏った不均等分配が起きる可能性があり、その場合には熱交換器の性能及び冷凍サイクル全体の効率の低下を招く。特に、蒸発器の入口では膨張後の気液二相流の状態での分配を行うことになるが、仮に不均等分配が避けられない場合であっても、その分配の様子を予測出来ることが設計の際に必要な事である。

一般に、単相流の分配の場合には、分岐部の形状も含めた下流側の配管における圧力損失の特性に従って、それぞれの配管に流れ込むことになる。このような単相流の分配は、過去の研究によって、様々な形状、下流の圧力損失、流れの方向などについて研究されており、ある程度正確な予想をすることが可能になっている。

しかし、気液二相流では、気相と液相で運動量や密度の違いがある為に、分岐部の形状や重力の影響によって様々なクオリティ、流量に分配され、分配特性を正確に予測する事は困難である。更に、幾何学的に対称な形状の分岐部と下流の配管によってこれらの影響を排除しても、配管での圧力損失は流量のみでなく、そのクオリティにも影響される為、やはり様々な流量、クオリティに分配され得る。実際に、冷凍機を作る現場では対称な形状の分岐部であっても、偏流が起きるようである。

これらの理由によって、冷媒が複数本の配管に不均等に分配されると、熱交換器の性能の低下を引き起こす為、気液二相流を均等に分配する技術が求められている。しかるに、過去の研究は、ある特殊な非対称の形状における分配に関するものが多く、その形状での分配特性の予測には貢献するが、対称な形状における不均等分配には適用出来ない。

そこで本研究では、垂直管から、平行に配置した二本の配管へ分岐する系の、気液二相流の分配に関してT型分岐管を用いた実験装置を作成し、完全に均等な条件下で不均等な分配が起きるのか、分岐部での気泡の挙動と二相流の動的特性はどうなっているのか、等について実験を行った。また、分岐部より下流の流路抵抗を変化させた場合、及び故意にT型分岐管を1度ずらせ、非対称性を持たせた場合についての分岐特性を調べようとした。

1 - 3 不均等分配の意味

気液二相流の二本の枝管への分配を考えると、気相の流量 W_g 、液相の流量 W_l について、各々以下の式が成り立つ。

$$W_{g1} = W_{g2} + W_{g3} \quad (1-1)$$

$$W_{l1} = W_{l2} + W_{l3} \quad (1-2)$$

また、分岐から合流までの圧力損失は両枝管で等しいので、

$$\Delta P_2 = \Delta P_3 \quad (1-3)$$

となる。

ところが、上の3つの式に分岐前の流量 W_{g1} 、 W_{l1} を与えても、式3つに対してパラメータが4つある為、各量は一意には定まらない。つまり式(1-1)~(1-3)を満たした上で、分岐部の形状などによって、様々な解を与えることになる。

このように、非対称な分岐部の場合に不均等な解を取るのは勿論のこと、対称な分岐部で、しかも下流の流路抵抗が等しい場合でも不均等な分配が起こり得ることになる。

1 - 4 研究の目的

研究背景で述べた通り，冷媒が複数本の配管に分配されると，熱交換器の性能劣化が起きるため，気液二相流の流量分配に関する知識を蓄える必要がある．分岐管の流量配分に影響を与える要素として圧力損失，上流の流動様式及びクオリティ，枝管と母管の質量流量比，分岐管の形状，作動流体の物性値等が挙げられるが，我々は母管からの気泡が左右二つの枝管のどちら側に向かうか，その安定性に影響を与える因子を探りたい．

そこで，本研究では，分岐形状として対称なT型分岐を考え，内径 15mm という比較的大きな管径での分岐の様子を考察する．したがって，T型分岐部で気泡がどのような挙動を示すのか観察すること，および気液二相流の分岐流路における流量分配についての基礎的知見を得ることが目的である．そのために，管内径 15mm の空気 水系気液二相流についてモデル実験を行った．

第 2 章 気液二相流の基礎

- 2 - 1 気液二相流の一般的事項
- 2 - 2 気液二相流の分岐
- 2 - 3 気液二相流の流動様式
- 2 - 4 気液二相流の流動特性
- 2 - 5 流動様式線図
- 2 - 6 二相流の脈動現象

2 1 気液二相流の一般的事項

2-1-1 定義

気液二相流に関して，管断面で気相および液相の速度が一様であるとの仮定の下で，次の各変数を定義する．

$$A = A_g + A_l \quad (2-1)$$

$$\alpha = A_g / A \quad (2-2)$$

$$W_g = \rho_g Q_g = \rho_g A_g u_g \quad (2-3)$$

$$W_l = \rho_l Q_l = \rho_l A_l u_l \quad (2-4)$$

$$W = W_g + W_l \quad (2-5)$$

$$x = W_g / W \quad (2-6)$$

$$s = u_g / u_l \quad (2-7)$$

ここで、

A ：管断面積[m²]

W ：質量流量[kg/s]

Q ：体積流量[m³/s]

：密度[kg/m³]

u ：速度[m/s]

：ボイド率

x ：クオリティ

s ：スリップ比

であり，添字の g ， l はそれぞれ気相、液相に対応する．

2-1-2 ボイド率

一般に，流量とクオリティを与えてもボイド率は定まらないので，以下に示すモデル式を用いてボイド率を評価する．

$$\alpha = \left\{ s \frac{\rho_g}{\rho_l} \left(\frac{1}{x} - 1 \right) + 1 \right\}^{-1} \quad (2-8)$$

特に，気液間に滑りが無いとした均質流モデルでは，上式のスリップ比が1となるので

$$\alpha = \left\{ \frac{\rho_g}{\rho_l} \left(\frac{1}{x} - 1 \right) + 1 \right\}^{-1} \quad (2-9)$$

と表される．

2 2 気液二相流の分岐

二相流の分岐に関して、分岐前の流量、クオリティを与えても分岐後の各枝管での流量やクオリティは一意には定まらない。そのため、分岐特性を決定する物理法則を確立する必要がある。

そこで、分岐特性を支配する法則として、分岐の前後でのエントロピー生成量が最小になるという仮説を考える。これは断熱気液二相流の場合、分岐前後でのエネルギー損失が最小になることを意味する。このモデルを用いて、垂直な分岐において分岐入口の条件 (W_1, x_1) を与えた時に、どのような分配をするかを考える。

入口での二相流のエネルギーを E_1 、枝管 2、枝管 3 から出て行くエネルギーをそれぞれ E_2, E_3 とすると、分岐部でのエネルギー損失 E_{loss} は、

$$E_{loss} = E_1 - (E_2 + E_3) \quad (2-10)$$

となる。この E_{loss} を最小にするように分配されると考えると、 E_1 は入口の条件により定数となるので、結局 $E_2 + E_3$ が最大となるように分配されることになる。

以下で、流体の持つエネルギーについて説明する。

一般に非圧縮性流体の定常流れでは、内部エネルギーを無視すると、単位質量当たり

$$e = \frac{u^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz \quad (2-11)$$

のエネルギーを持つ。温度一定で、蒸発や凝縮等の相変化が無い時には内部エネルギーを無視しても差支えない。ここで、 p : 圧力、 g : 重力加速度、 z : 基準面からの高さ、である。気相流量が小さい気液二相流では気相、液相それぞれのエネルギーは、単位質量当たり

$$e_g = \frac{u_g^2}{2} + \frac{p}{\rho_g} + gz \quad (2-12)$$

$$e_l = \frac{u_l^2}{2} + \frac{p}{\rho_l} + gz \quad (2-13)$$

となる。

管断面で気液共に圧力が等しく、気相、液相それぞれが一様な速度を持つ、と仮定した場合の単位時間あたりに管断面を通過するエネルギー E は次のように表される。

$$E = e_g W_g + e_l W_l \quad (2-14)$$

$$= W x \left(\frac{p}{\rho_g} + \frac{1}{2} \frac{W^2 x^2}{\rho_g A^2 \alpha^2} \right) + W (1-x) \left\{ \frac{p}{\rho_l} + \frac{1}{2} \frac{W^2 (1-x)^2}{\rho_l A^2 (1-\alpha)^2} \right\} + W g z \quad (2-15)$$

2 - 3 気液二相流の流動様式

流動様式とは流れを視覚的に分類し、同じ範疇に属すると判断された流れの形をいう。非加熱二相流の流動様式については1960年代に入って整理された

気液二相流は、気液の流量比や流れる方向によって種々の流動形態をとるが、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、流動形態を幾つかの流動様式に分類しておくのが便利である。

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している。したがって、気液二相流を考える際には、まず流動様式を決定し、与えられた条件の下での二相流がどの流動様式に属するかを予知しておくことが望ましい。

垂直管内流

気相の体積流量が液相のそれ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となる。この流動様式を気泡流 (bubbly flow) という。気相流量が増加すると、上昇流では、気泡は管中心部に集まる傾向を見せ、やがて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。よって、流れは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。この流れをスラグ流 (slug flow) と呼ぶ。液相流量の大きい場合には、気体プラグは歪んだ形状になり、また液体スラグ中に多数の気泡を含んだ状態になる。この状態をチャーン流 (churn flow) または semi-annular flow と呼ぶこともある。いずれの場合も、この流動様式の液相は、管長方向の大きい密度変化のために、脈動を伴った流れとなる。

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、管壁に沿った管状液膜として流れ、気相は管中心部を連続的に相当の流速で流れる状態となる。液相流量が多い場合には、中心部気相流中に多数の液滴を同伴する。このような流動様式を環状流 (annular flow) または環状噴霧流 (annular-dispersed flow) という。

水平管内流

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が、上部を流れる気相はその流量の大小により、連続的な場合と不連続的である場合とがある。気泡流やせん状流などは気相が不連続的となる例である。気相が連続的で、気液界面が比較的滑らかな場合を成層流と呼ぶ。気相流量が増加すると、気液界面が波立ち、波状流またはスラグ流となり、さらに気相流量が増すと、液体の一部が飛散して環状流または環状噴霧流となる。液相流量が大きい場合の流動様式は、垂直管とほぼ同じになる。

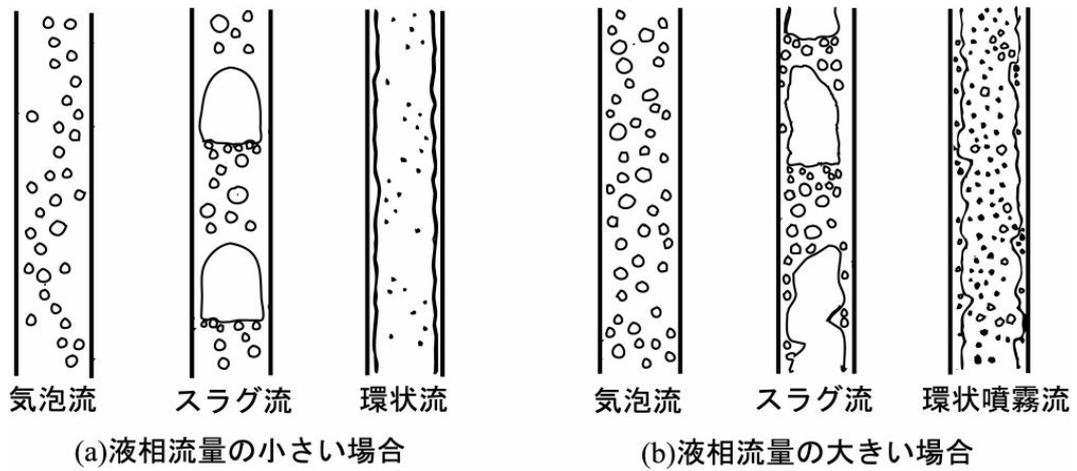


Fig.2-1 垂直管内二相流の流動様式

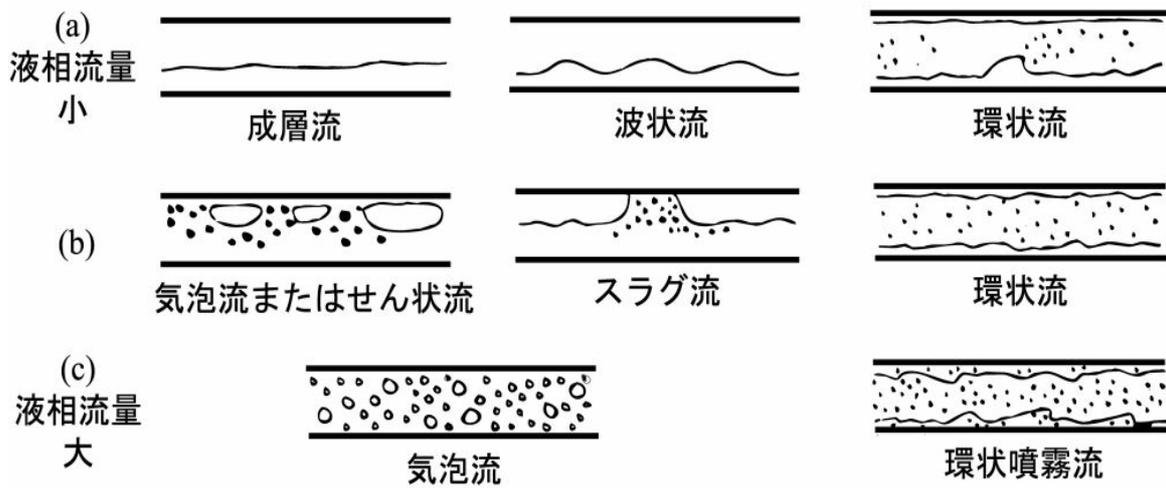


Fig.2-2 水平管内二相流の流動様式

2 - 4 気液二相流の流動特性

気液二相流は流れ場に特有の不連続性を持っている。流れ場の一点に注目すると、その位置に、ある時は液相が、また別の時刻には気相が存在する。従って、ある断面のボイド率は当然、時間的に変動していることになり、スラグ流では特に大きい不連続性が見られる。このため、スラグ流をおおまかには気泡流と環状流が共存し、両者の間を周期的に変動する流れとみなすこともできる、と述べている研究者もいる。

発達した気液二相流の流体要素に作用する力は、圧力差、重力、粘性力および気液界面の表面張力であり、流体要素の運動はこれらの力によって決まる。したがって、これらの力の大小関係によって流動様式が決められることになる。このような考え方から、Quandt は二相流体に作用する主要な力として次の3個、すなわち

1. 管長に沿う圧力差：

$$F_p = \frac{\lambda}{D} \frac{\rho U^2}{2} + \rho g \quad (2-16)$$

2. 液柱による重力：

$$F_g = \rho_l g \quad (2-17)$$

3. 表面張力による力：

$$F_\sigma = \frac{2\sigma}{R} \pi D / \frac{\pi}{4} D^2 = 16 \frac{\sigma}{D^2} \quad (2-18)$$

を考え、流動様式はこの内どの力が支配的であるかによって決まるとした。

ここで、 λ ：管摩擦係数、 D ：管径、 R ：管半径、 U ：二相流を均質な流れとみなした時の平均密度と平均流速、 ρ_l ：液密度、 σ ：表面張力である。

一般に流速が低い間は重力支配の流れで、 $F_g > F_p$ 、 $F_g > F_\sigma$ であり、次の関係にある。

$$F_r = \frac{U^2}{gD} < \frac{2}{\lambda} \left(\frac{\rho_l}{\rho} - 1 \right) \quad (2-19)$$

$$\frac{W_e}{F_r} = \frac{\rho g D^2}{\sigma} > 16 \frac{\rho}{\rho_l} \quad (2-20)$$

ここで、 $F_r = U^2/gD$ 、 $W_e = \rho U^2 D/\sigma$ はそれぞれ Froude 数、Weber 数であり、後者は慣性力と表面張力の比である。空気 - 水系二相流では、式(2-20)に示した関係が $D > 10\text{mm}$ で常に成立する。

尚、流動様式の遷移は気液界面状況の変化であるから、界面の不安定性が密接に関係している。

2 - 5 流動様式線図

二相流の流動形態については多くの人々による観察が行われており、その結果を 2-1 の項で述べたような流動様式に分類し、それぞれの流存在範囲を線図上に表示する試みが為されている。

このような線図は、考えている二相流がどのような流動様式であるかを予測するのに重要である。

両相の流量、路形状、寸法などの条件に対して、どのような流動様式が生じるのかの推定は、従来、流動様式線図に基づいて行われている。これまでに多くの流動様式線図が報告されているが、その中でも比較的信頼性が高く代表的な垂直管のものを紹介する。

Taitel-Dukler 線図

Taitel と Dukler (1980) は、各流動様式の遷移機構をモデル化し、気液の見かけ速度を座標軸とする流動様式線図を報告している。これによれば、チャ - ン流はスラグ流への過渡的流動状態であり、スラグ流とチャ - ン流との境界線は、気液混合室からの助走距離によって変化する、ということである。

Mishima-Ishii 線図

Mishima と Ishii は、未発達の流れや速い過渡的な流れに対しては、気液の見かけ速度を主変数として求めた流動様式線図では限界があるとして、各流動様式の遷移機構をポイド率を主変数としてモデル化し、気液の見かけ速度を座標軸とする流動様式線図を報告している。

Hewitt-Roberts 線図

Hewitt と Roberts (1969) は、空気 - 水二相流及び蒸気 - 水二相流の広範囲にわたる詳細な実験を行い、気液の見かけの速度水頭を座標軸とする流動様式線図を作製している。

Griffith-Wallis 線図

Griffith と Wallis (1961) は、垂直管内を流れるスラグ流の流動挙動に着目し、内径 0.5、0.75 及び 1 インチの空気 - 水二相流と内径 2.34 インチの蒸気 - 水二相流の実験を行い、気体スラグ上昇速度や気体スラグ長さ等を詳細に調査する一方で、フルード数 (F_r) と気体の体積流量比を座標軸とする Fig.2-3 のような流動様式線図を作製している。

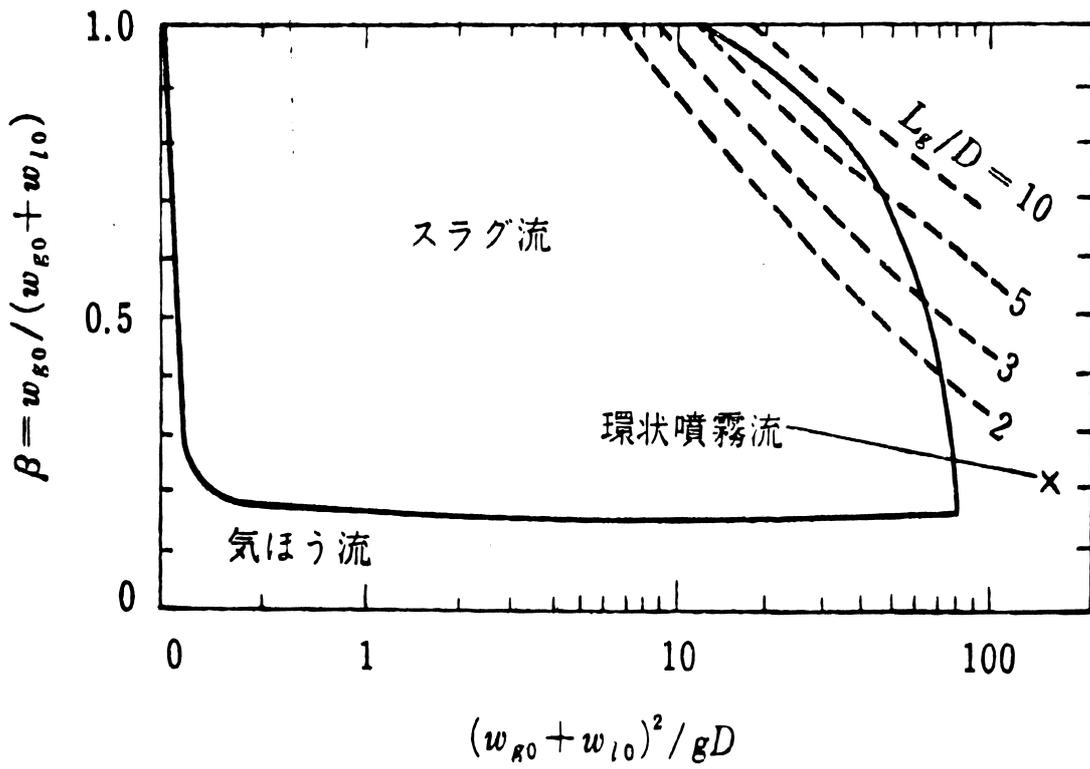


Fig.2-3 Griffith -Wallis 線図

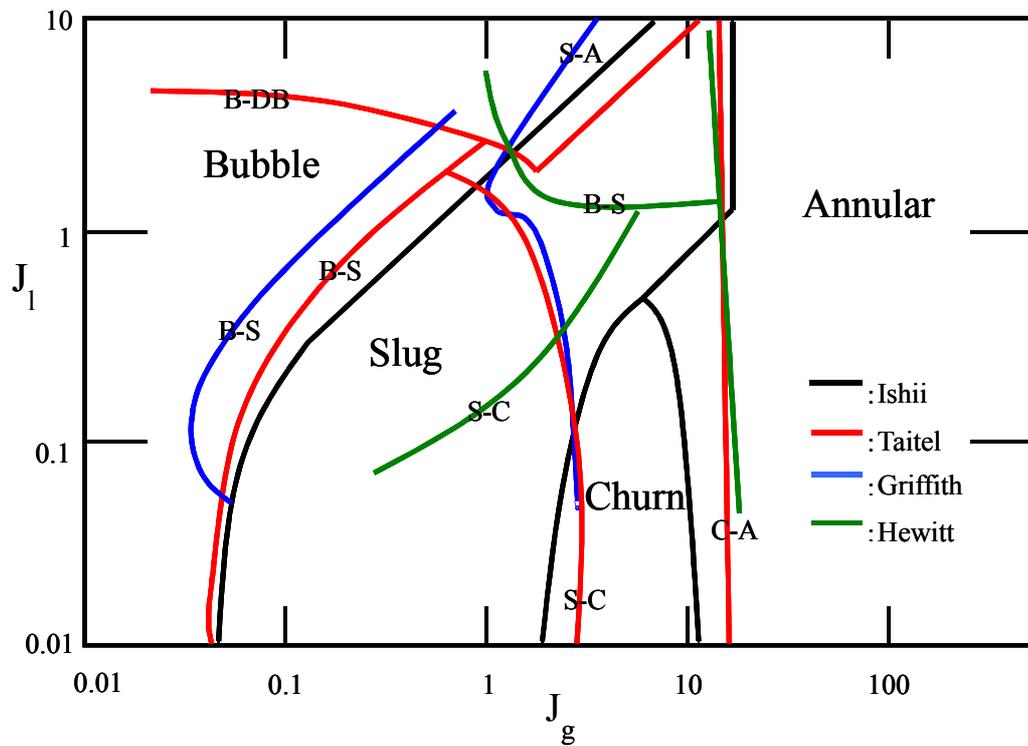


Fig.2-4 Comparison to the Flow Pattern Maps

2 - 6 二相流の脈動現象

熱・流体に関連する振動現象は多々あるが、気相と液相の混在する二相流では、気相と液相の密度差が著しいこと、あるいは相変化によって気相と液相の割合が変化することなどに関係して種々の変動現象が現れる。

液中に1個の気泡が存在するだけでも気泡体積が変化する一つの振動系が構成されるし、オリフィスを通して液中に気体を吹き出すだけでも気泡が周期的に発生する。管内気液二相流に関しては気相プラグと液相スラグが交互にある間隔で流れる、いわゆる、プラグ流ないしスラグ流の流動様式があり、圧力変動も流動の様相と共に変化して周期的に振動する。

このように気液二相流はスラグ流のような本質的に不安定な流れを含んでいる為、ミクロに見れば蒸発管内の流れは常に不安定と言える。更に、条件によっては、流れの逸走現象や脈動現象など、管路全域に波及するような不静定流が生じることがあり、この場合にはマクロに見ても不安定である。

二相流の振動は原子炉の安全性にも関係している為、設計する際には是非とも避けるべき現象であり、その機構を解明することは大変意義深いことといえる。

第3章 実験装置

- 3 - 1 実験の目的とその仕様
- 3 - 2 実験装置
- 3 - 3 実験方法と手順

3 - 1 実験の目的とその仕様

本研究の目的はT型分岐管での空気 - 水二相流の分岐特性を観察し、その特徴を把握することである。

分岐特性として、例えば相分離等の偏流現象、振動、逆流の強さなどが挙げられるが、今回は特に偏流に着目して実験した。従って本実験では主に空気、水それぞれの流量を測定項目とし、流量とクオリティの関係を観察した。

- 作動流体 : 水道水・空気
- 上流流路 : 管径 15mm, 管長 1500mm の垂直上昇管
- 下流流路 : 管径 15mm, 管長 1700mm の水平管
- 空気流量範囲 : 100mL/min ~ 500L/min
- 水流量範囲 : 0.10L/min ~ 2.0L/min
- 圧力測定 : プルドン管式圧力計, 水柱マノメータ

3 - 2 実験装置

空気 水系気液二相流をテストセクションに供給し，分岐部での様子を観察しながら，枝管での気液各相の流量を測定する実験装置を製作した．空気流量範囲は 0.100 ~ 500L/min，水流量範囲は 0.10 ~ 2.0L/min である．

冷媒について

実験に用いる冷媒として，確保が容易である空気 水を採用した．空気 水はフロンに比べて粘度，表面張力が遥かに大きい性質を持っている．

実験装置の概略

実験装置の概略図を Fig.3-1 に示す．

実験装置における冷媒の流れを以下に列記する．

1. コンプレッサから空気を黄銅製の混合室に供給する．
2. 水道水をフィルタにかけ，不純物を除去した水を混合室に供給する．
3. 混合室で気液二相流となった冷媒は，内径 15mm，管長 1500mm のアクリル製垂直上昇管を經由してテストセクションに導かれる．
4. T型分岐管を通して2つに分配された二相流は，各々気液分離器によって気液に分離され，流量を測定した上で排気，排水する．
5. 気液分離器での圧力を 1atm に保つため，気相は大気開放とする．

実験装置の詳細

1. コンプレッサ (日立製 5.5P-9.5VA5/6)

最高圧力 0.93MP a，吐出空気量 630L/min，空気タンク容量 170L である．

2. 入口側気相流量計

コンプレッサを出て，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×3，SMG-1 型) により測定する．空気流量範囲は 100ml/min~500l/min と非常に幅広いため，100ml/min~500ml/min，0.5l/min~5.0l/min，5.0l/min~50l/min，50l/min~500l/min の4本の流量計を用いた．流量計の切り替えは流量計のバルブによって行う．

この流量計は 1atm,20 °C のものなので，次式を用いて，補正を行う．

$$\text{実際の値} = \text{読み取り値} \times 0.0943 \times \sqrt{\frac{P}{P_0}}$$

ここで、 P_0 ：基準圧力（本実験の場合、大気圧）、 P ：測定圧力である。

3．水道水用フィルタ（ADVANTIC 製、プラスチックハウジング 1PC）

地下実験室の水は多分に不純物を含んでいるので、流量が 50L/min までの低、中流量の濾過に適したフィルタを用いて浄化した。

4．入口液相流量計

フィルタにより不純物を除去した水をフロート式流量計(OMEGA 製 TM-3-30)にとって測定する。流量範囲は 0~2l/min である。

気相流量計と同様に、次の換算式で補正する必要がある。

$$\text{実際の値} = \text{読み取り値} \times 0.0943$$

5．圧力計

ブルドン管式圧力計を用いて、気液混合前の気相（空気）の圧力を測定する。

6．気液混合室

気相（空気）と液相（水）を混合させる黄銅製の室である。その全体写真を Fig.3-2 に示す。細かい気泡を作ることが出来るように、混合室内に多孔管のポアラスを設けた。気相は混合室下部中央から垂直に、液相は横から水平に流入する形状となっている。

また、Fig.3-2(下図)はそのポアラス部の写真であり、内径 23mm、外径 30mm と設定した。

7．垂直上昇管

気液混合室と T 型分岐管をつなぐ内径 15mm、外径 25mm、管長 1500mm の透明なアクリル製パイプであり、流動様式を観察できるようになっている。

8．分岐部

分岐部（T 型分岐管）の写真を Fig.3-3 に示す。

アクリル製の透明な T 字型の配管であり、気泡の挙動など、流れの分配の様子を観察することが出来る。

また、分岐前後の圧力損失を見るため、水柱マノメータにより差圧変動を観察できるようにした。

9．水平管

左右両枝管とも、T 型分岐管と気液混合室を結ぶ内径 15mm、外径 25mm、管長 1500mm の透明なアクリル製パイプであり、垂直上昇管と同様に流動様式を観察できるようになっている。

10．絞り弁

ニードルバルブを用いている．バルブの絞りを変化させることによって流量を調節することが出来る．

11. 気液分離器

気液分離器の全体写真を Fig.3-4 に示す．上板，底板は黄銅製で，円筒部はアクリル製である．円筒部は中空容器で，内径 100mm，外径 120mm である．円筒上部にはアクリル製の邪魔板が設けられており，気体と共に巻き上げられた液滴を捕集する．尚，邪魔板同士は外径 25mm，長さ 30mm のスペーサにより固定されている．

T 型分岐管を經由して水平管に流れ込んだ気液二相流は，気液分離器のほぼ中央から入り，密度の小さい気相は上へ，大きい液相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，気体は大気開放する．

12. 出口気相流量計

入口側気相流量計と同様に広い流量範囲に対応するため，四本のフロート式流量計（OMEGA 製 SMA-250 型×3，SMG-1 型）を用いている．流量計自体は入口側気相流量計と全く同じものであり，上述の換算式によって補正する．

また，流量計に水が混入した場合には，ドライヤーによって蒸発させる

13. 出口液相流量計

気液分離器によって分離された液相の体積流量をメスシリンダにより測定する．

14. 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，分岐部を 1000FPS で約 8 秒間撮影した．

15. その他

気相（空気）の密度計算に使用する目的で，気相の温度を T 型熱電対により測定する．熱電対は流量計の出口付近に取り付けた．

気体の密度は次に示す理想気体の状態方程式によって計算できる．

$$P = \rho RT$$

ただし， P ：気体の圧力， ρ ：密度， R ：空気の気体定数， T ：温度である．

尚，液体は非圧縮性流体であるため，温度測定はしないことにした．

光源（岩崎電気 PSR100V500W）

ビデオカメラの撮影のため，T 型分岐管の手前に据え付けた．

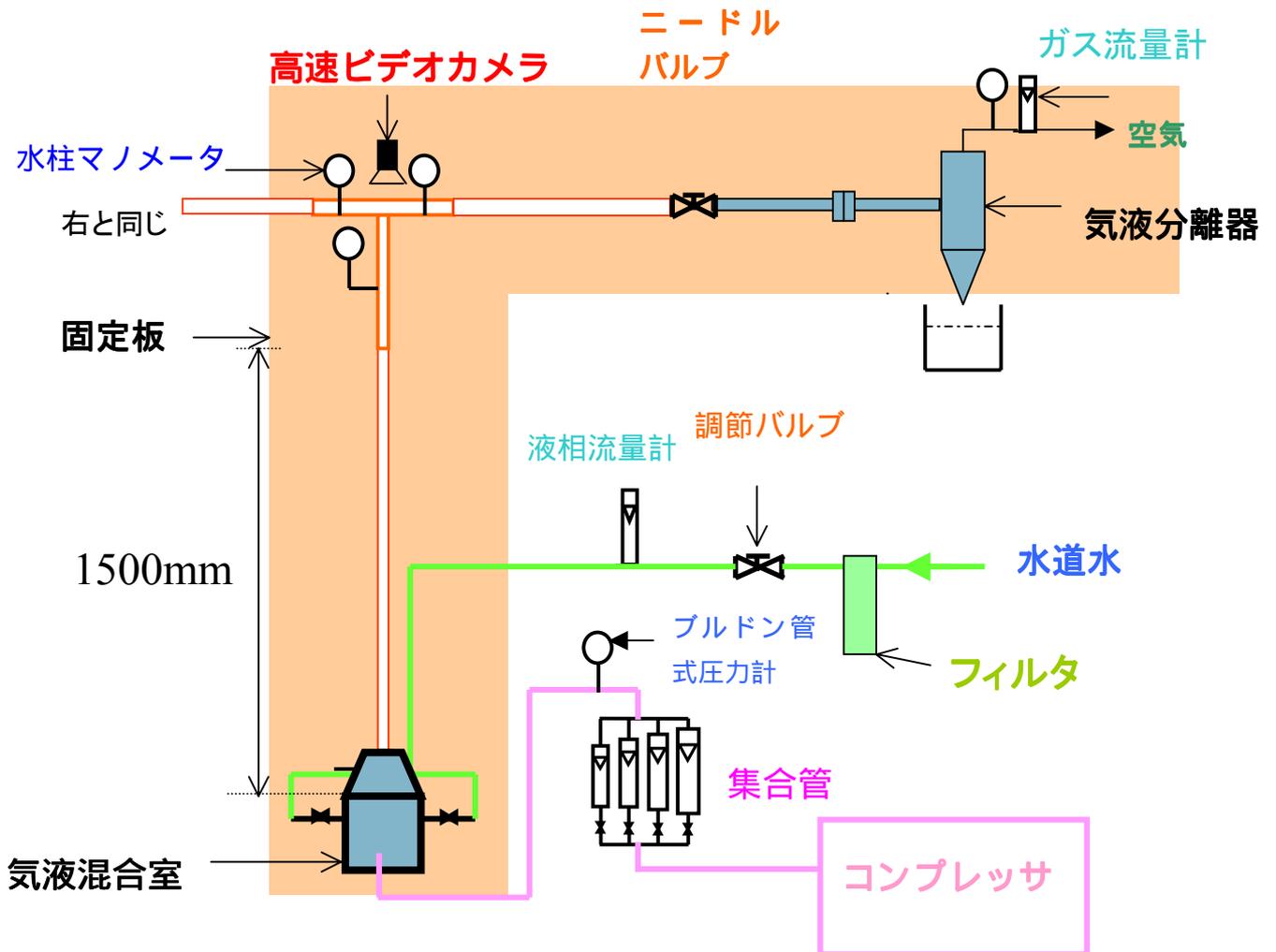


Fig.3-1 実験装置概略図



Fig.3-2 氣液混合室

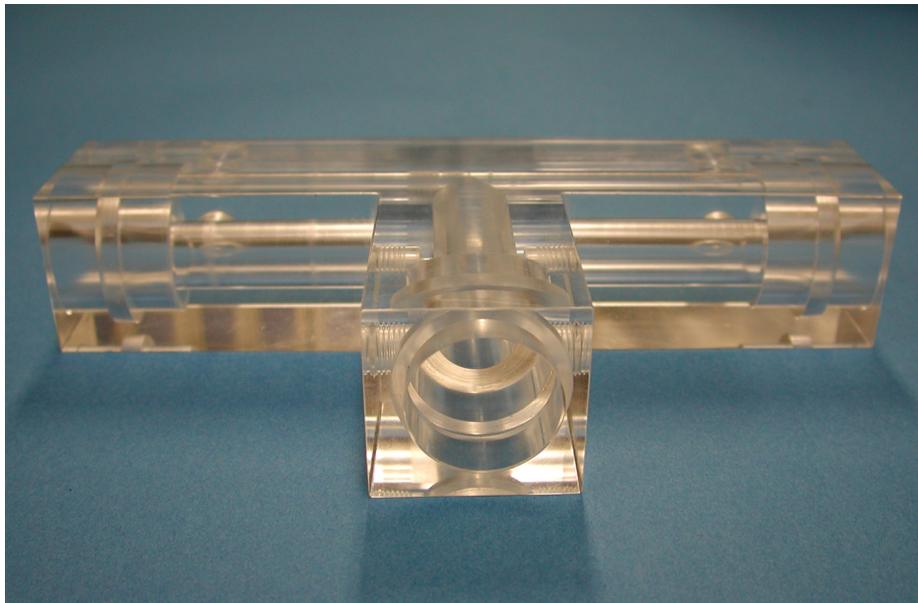
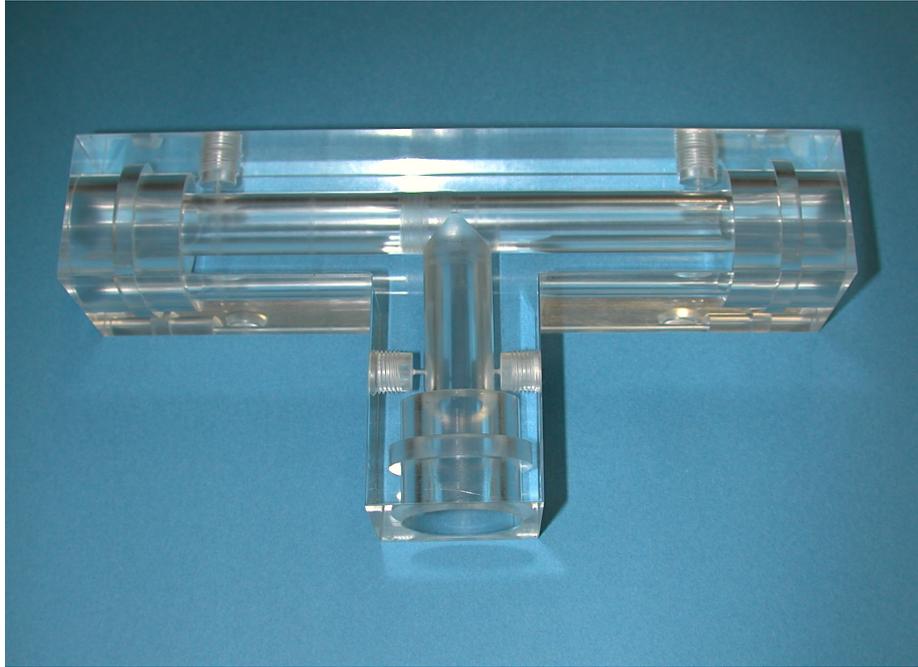


Fig. 3-3 T型分岐管

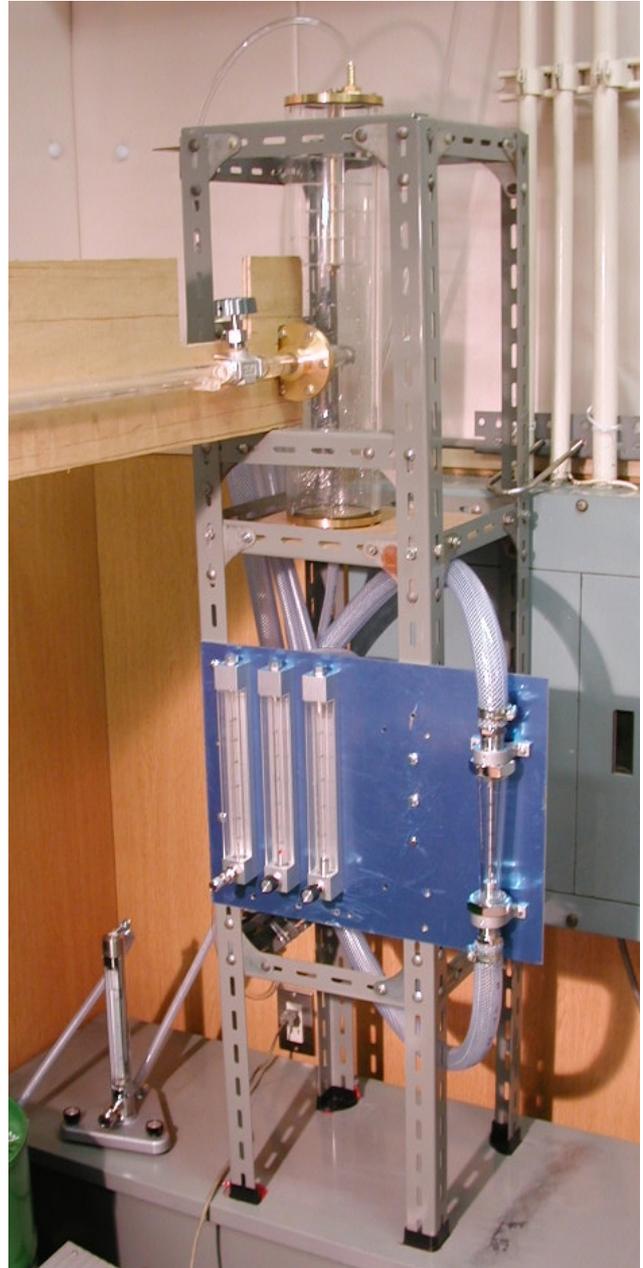
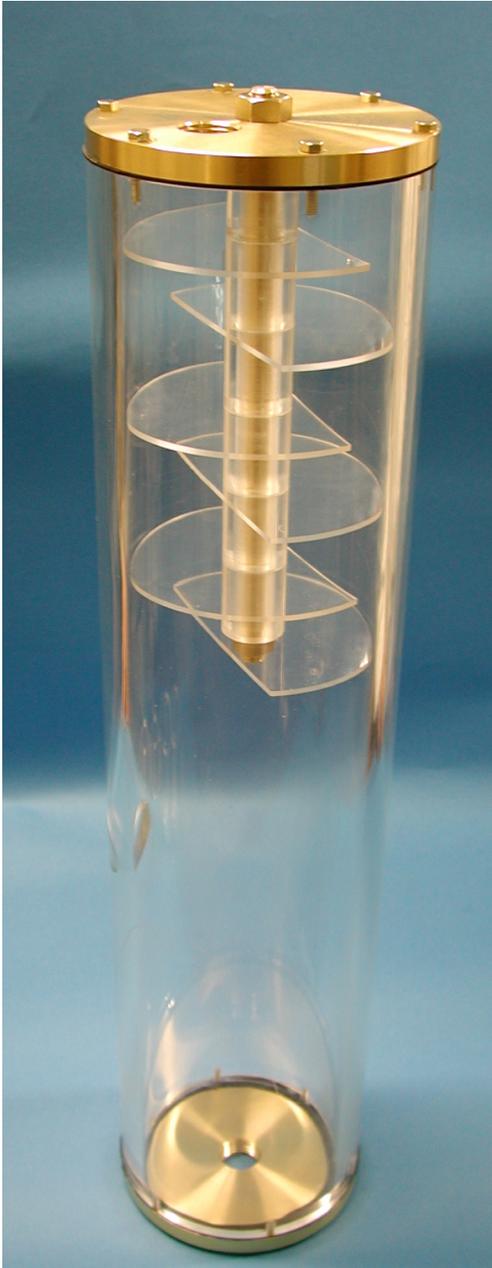


Fig.3-4 気液分離器

3 - 3 実験方法と手順

実験方法

作動流体は空気及び水である。各々の流量を共にフロート式流量計により測定した後、気液混合室に内径 9mm のテトロンブレードホースを用いて空気を送り込んだ。テストセクションは、T 型に削ったアクリル板に内径 25mm の穴を開けたもので、これと混合室とは内径 15mm、外径 25mm、長さ 1500mm のアクリルパイプにより接続されている。この間に発達した二相流は、T 型分岐管で二つの枝管に分けられ、一方の枝管で流量の測定を行った。以下、T 型分岐管の入口を 1、出口部非測定側を 2、測定側を 3 と記す。分岐出口後方に設けたニードルバルブの開度を調節することにより各枝管での流量配分を変え、気液二相流を円筒形の気液分離器によって分離した後、気相はフロート式流量計、液相に対してはメスシリンダを用いて測定した。また、垂直上昇管及び分岐部での流動状態を観察するために高速ビデオカメラによる撮影を行った。

実験手順

実験は以下の手順で行う。

準備

実験装置系全体の対称性を確認する。

- 分岐後の背圧が左右両枝管で等しくなるように、それぞれの枝管に設けられたニードルバルブを全開にする。
- 実験装置に水だけを流し、系が安定するまで待機する。
- 気液分離器により分離された出口側の水の流量が、入口側の流量の半分になっているか確認する。半分になっていない場合は、適当なバルブを調節して、系全体が対称になるように設定する。

本実験

- コンプレッサを起動し、空気を圧縮する。
- コンプレッサから混合室に空気を流す。その際、流量計で空気流量を調節する。
- 混合室手前に設けられた圧力計で、空気の圧力を測り、およそ1気圧以上に設定する。空気を先に流すのは空気の流路に水が進入するのを避ける為と、実験装置全体を乾燥させる為である。
- 水道からフィルタに水を流し、浄化する。
- 浄化した水を流量計で調節しながら、混合室に流す。
- 混合室で気液二相流となった作動流体の垂直管での流動様式を観察し、記録する。
- 分岐部での二相流の挙動を高速ビデオカメラで撮影する。
- 分岐部における二相流の圧力変動を水柱マノメータにより確認する。
- 水平な枝管で脈動現象や逆流の有無や程度、および気泡の動きを観察する。
- 気液分離器により分離された気相と液相の各流量を、気相はフロート式流量計で、液相はメスシリンダで測定する。
- 分岐出口下流に設けたニードルバルブの開度を調節することによって、各枝管での流量配分を変えながら、気液の流量を測定することを繰り返す。

本実験終了後

- 空気流路に水が逆流するのを防ぐため、混合室手前の空気供給用バルブを閉め、コンプレッサを止める。
- 水を止める。
- 実験装置に溜まった水を排水する。
- 必要があれば、空気だけを流し実験装置を乾燥させる。
- 高速ビデオカメラ等の測定機器の電源を切り、後片付けを行う
- 実験装置周辺を清掃する。

第4章 実験結果

- 4 - 1 流動様式の観察と流動様式線図
- 4 - 2 流路抵抗を変える実験

4 - 1 流動様式の観察と流動様式線図

分岐特性観察実験に先立ち，垂直上昇管での気液二相流の流動状態を高速ビデオカメラを用いて撮影し，流動様式線図を作成する為の実験を行った．見られた流動様式は気泡流，スラグ流，チャーン流，環状流の4形態である．

流動様式の観察

気相，液相それぞれの流量を変化させて，内径 15mm での二相流の流動様式を観察した．T型分岐管および垂直上昇管での二相流の流動状態を，高速ビデオカメラとデジタルカメラを用いて撮影し，Fig.4-1(下図)に示すような四つの流動様式を確認した．ただし，これらの流動様式は，それぞれに典型的なもので，実際には遷移的な状態も往々にして存在する．中間的な流動状態に関しては主観的な判断とならざるを得ず，流動様式をもっと客観的に判別する基準を設ける必要性を強く感じた．また，二相流が上手く混ざり合い，十分発達した定常な流れとなるように助走区間を管内径の 100 倍に設定したが，その距離が十分ではなく，綺麗なスラグ流がなかなか出なかった．これは母管である垂直管が，分岐部下流での逆流や脈動の影響を強く受けていることも一因であろう．

この実験で得られた結果を，Taitel らの流動様式線図上にプロットして比較したグラフを Fig.4-1 に示す．このグラフは，横軸を気相の見かけ流速（superficial gas velocity）とし，一方縦軸を液相の見かけ流速（superficial liquid velocity）とした両対数グラフとなっている．ここで，見かけ流速とは気液二相流において，一方の相のみが管断面全体を満たして流れていると仮定した時の流速である．破線が Taitel の流動様式判別式による境界線であり，今回の実験結果とよく一致している．

実験結果より分かることは，液相の見かけ流速が大きくなる従い，スラグ流やチャーン流が出ていくことになること，気相の見かけ流速が大きい領域では，液相の見かけ流速に拠らず，環状流となること，液相の見かけ流速が小さな領域では，気相の見かけ流速が大きいとチャーン流，中程度だとスラグ流，小さいと気泡流となることなどであり，この結果は Taitel の流動様式線図とよく一致している．

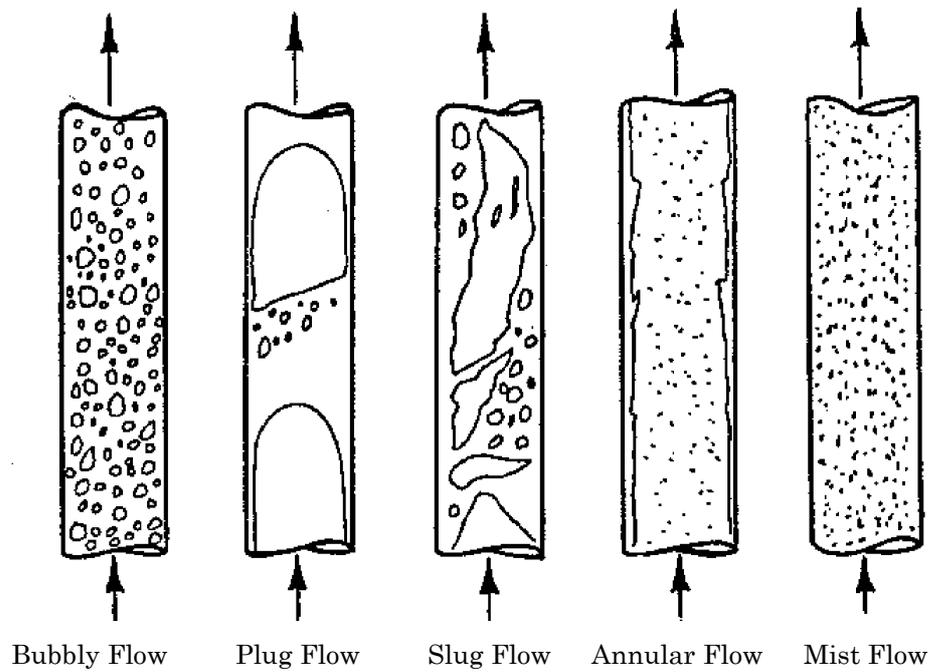
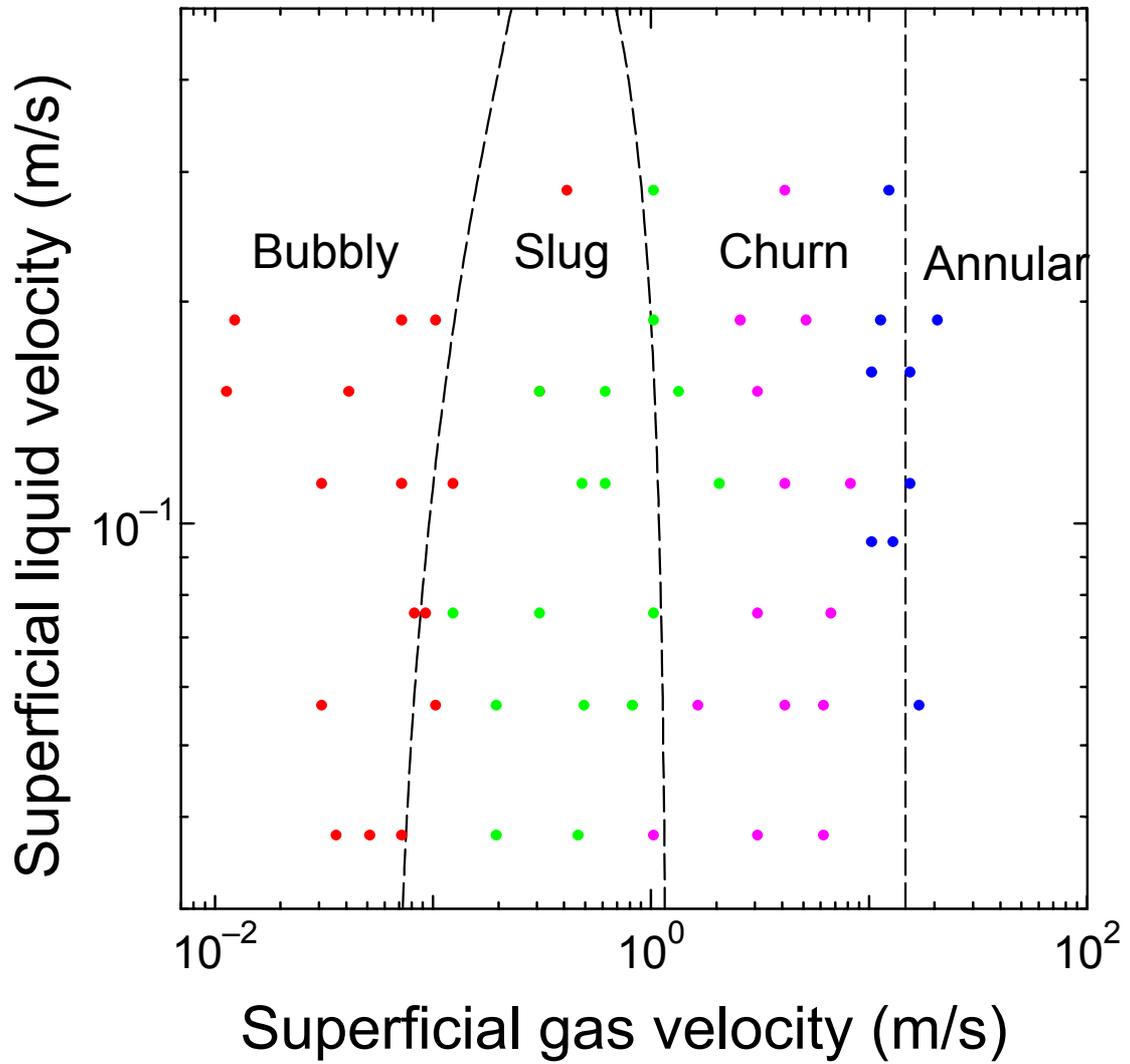


Fig.4-1 Flow pattern map

脈動現象と逆流

スラグ流やチャーン流の一部の領域で、激しい脈動現象と逆流が見られた。それに伴い、垂直管に逆流が発生し、垂直管の下部では気泡流だが、分岐部付近になるとチャーン流によく似た流動状態となることがあった。つまり、間欠流では分岐が対称に起こらず、振動的であり、時間平均をとると流量分配はほぼ均等になっていることなどが分かった。しかし、振動が発生する機構や、振動する気泡の駆動力が何であるかなどはよく分からなかった。今後は偏流と並行してこの脈動現象の解析にも力が注がれる事を期待したい。個人的にはナビエ - ストークス式によりコンピュータをフルに用いた数値シミュレーションではなく、もっとシンプルな形で定性特性を把握するようなモデルの構築を願う。もちろん、あくまで流体運動であって、質点系や剛体の運動ではない以上、その支配方程式はやはりナビエ - ストークス式であるわけだが、脈動現象をニュートンの運動方程式を軸とする古典的なバネ - マス系と対応させて解析するほうが遥かに分かりやすいし、結果も納得しやすいであろう。

4 - 2 流路抵抗を変える実験

分岐後の枝管の流路抵抗を変化させて、流量やクオリティの分配特性について実験を行った。各枝管の流路抵抗は気液分離器の直前に設けられたニードルバルブの絞りによって、調節している。

実験の手順は以下の通りである。

1. 分岐出口下流に設けたニードルバルブを、非測定側を 2、測定側を 3 と呼ぶことにする。まず、バルブ 2、3 とも全開にして、気液それぞれの流量を測定する。
2. 2 側のバルブだけを徐々に閉じていき、バルブ 2 が完全に閉まるまでいくつかの点の気液各流量を測定する。
3. 全閉になったバルブ 2 を今度は逆に徐々に開けていき、完全に開くまでいくつかの点を抽出して測定する。
4. 2 とは逆にバルブ 2 を全開にしたまま、バルブ 3 を全開状態から徐々に閉めていき、完全に閉まるまで、および全閉から再び全開になるまでいくつかの点の気液各流量を測定する。
5. 空気の流量を変えて、上記 1~4 を繰り返す。

結果

分岐部での流動状態の観察結果を Fig.4-2 に示す。

また T 型分岐管における偏流特性図を Fig.4-3 ~ Fig.4-5 に示す。Fig.4-3 は分岐部入口での流動様式が気泡流の場合、Fig.4-4 はスラグ流の場合、Fig.4-5 はチャ - ン流の場合である。このグラフの横軸は枝管と母管の質量流量比であり、これは二相流の入口質量流量のうち、流路 3 (測定側) に流れ込む割合である。一方、縦軸は枝管、母管のクオリティ比である。

上記のようなパラメータをそれぞれ横軸、縦軸にとったのは、流量分配比が異なることによって、枝管と母管でのクオリティが変化することにより、偏流が起きるからである。

Fig.4-3 ~ Fig.4-5 の破線は $W_{1X1} = W_{3X3}$ の線を示し、気相が全て枝管 3 側に流れる、つまり出口 2 が液単相状態であることを示している。一方、 x 軸上 ($X_3/X_1=0$) では逆に枝管 3 が液単相状態である。また、点線は母管、および各枝管での気液格相質量流量比が等しい状態を示し、この線からのずれが大きくなる程気相の偏流が著しいと言える。

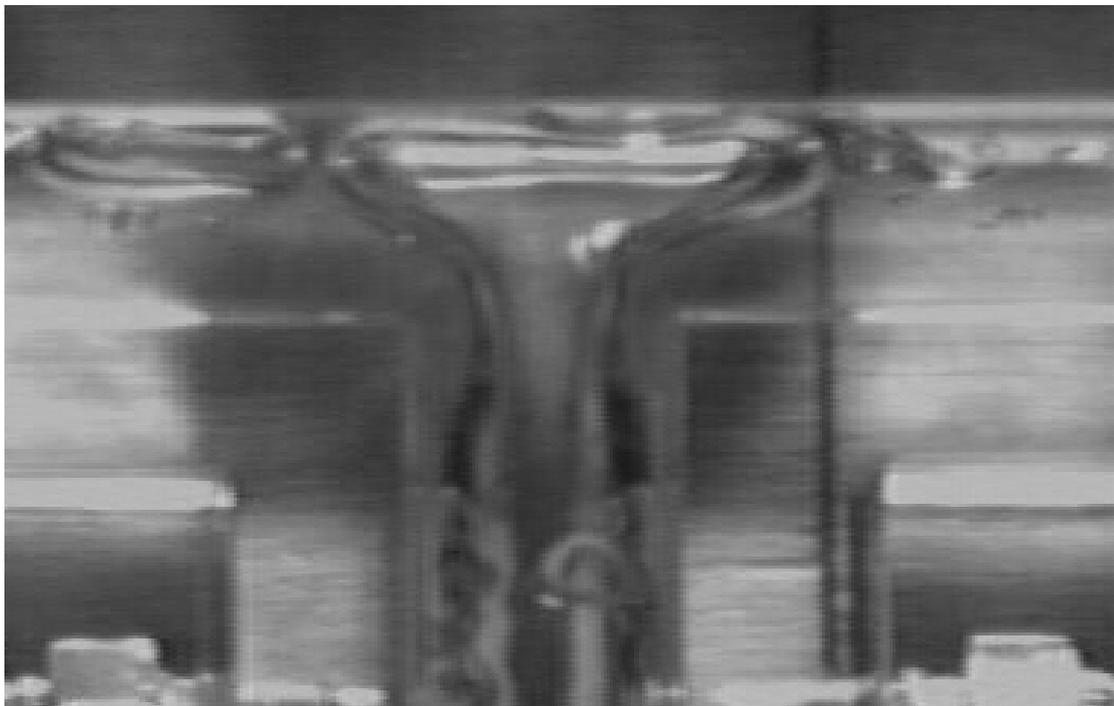


Fig.4-2 Visualization of flow at T-junction

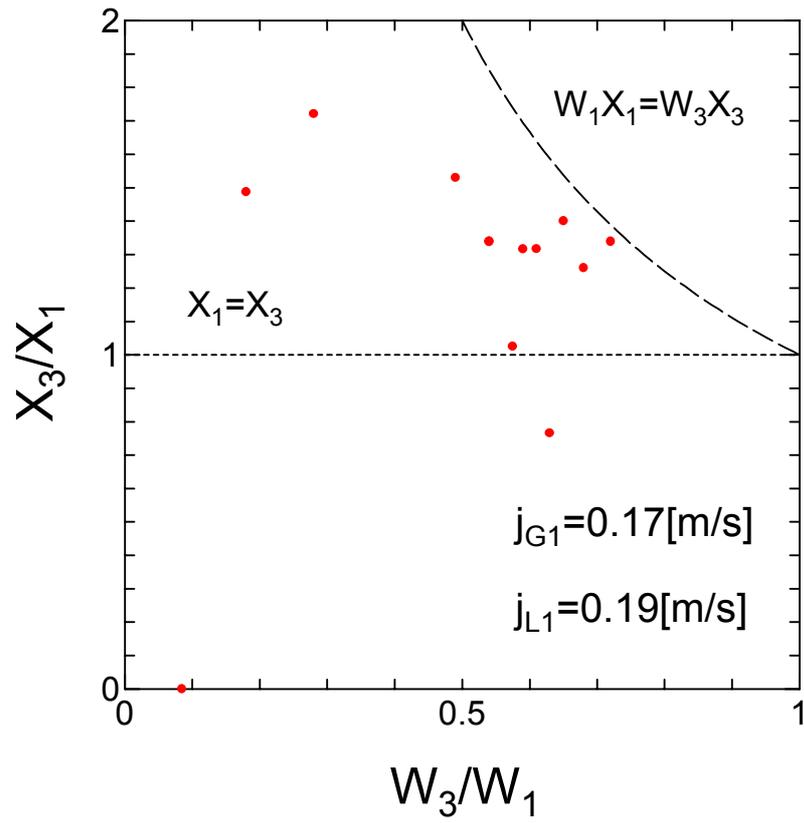


Fig.4-3 Characteristics of phase separation in bubbly flow region

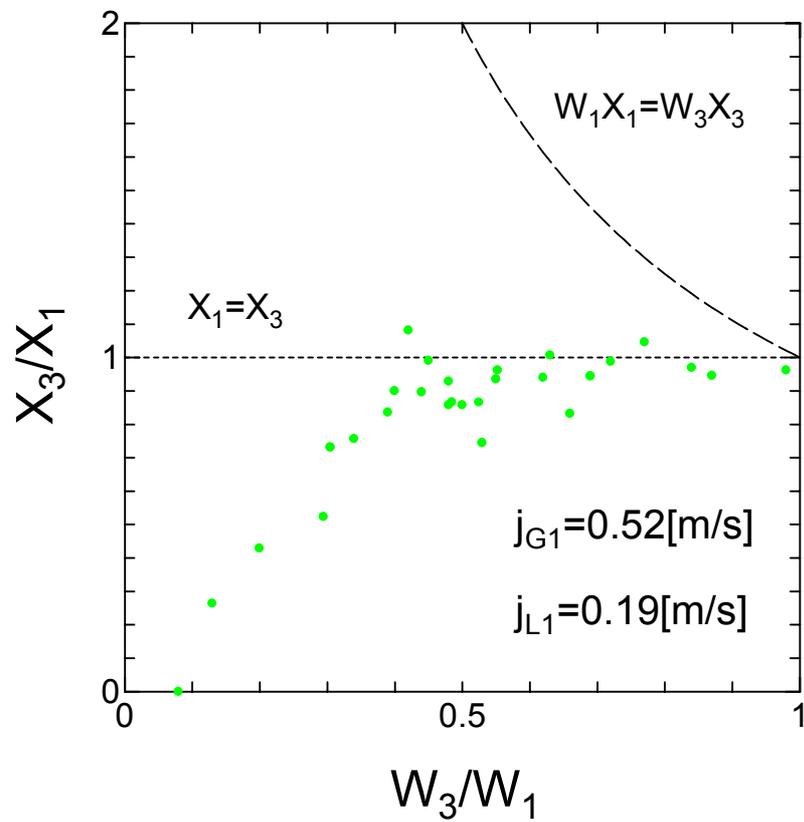


Fig.4-4 Characteristics of phase separation in slug flow region

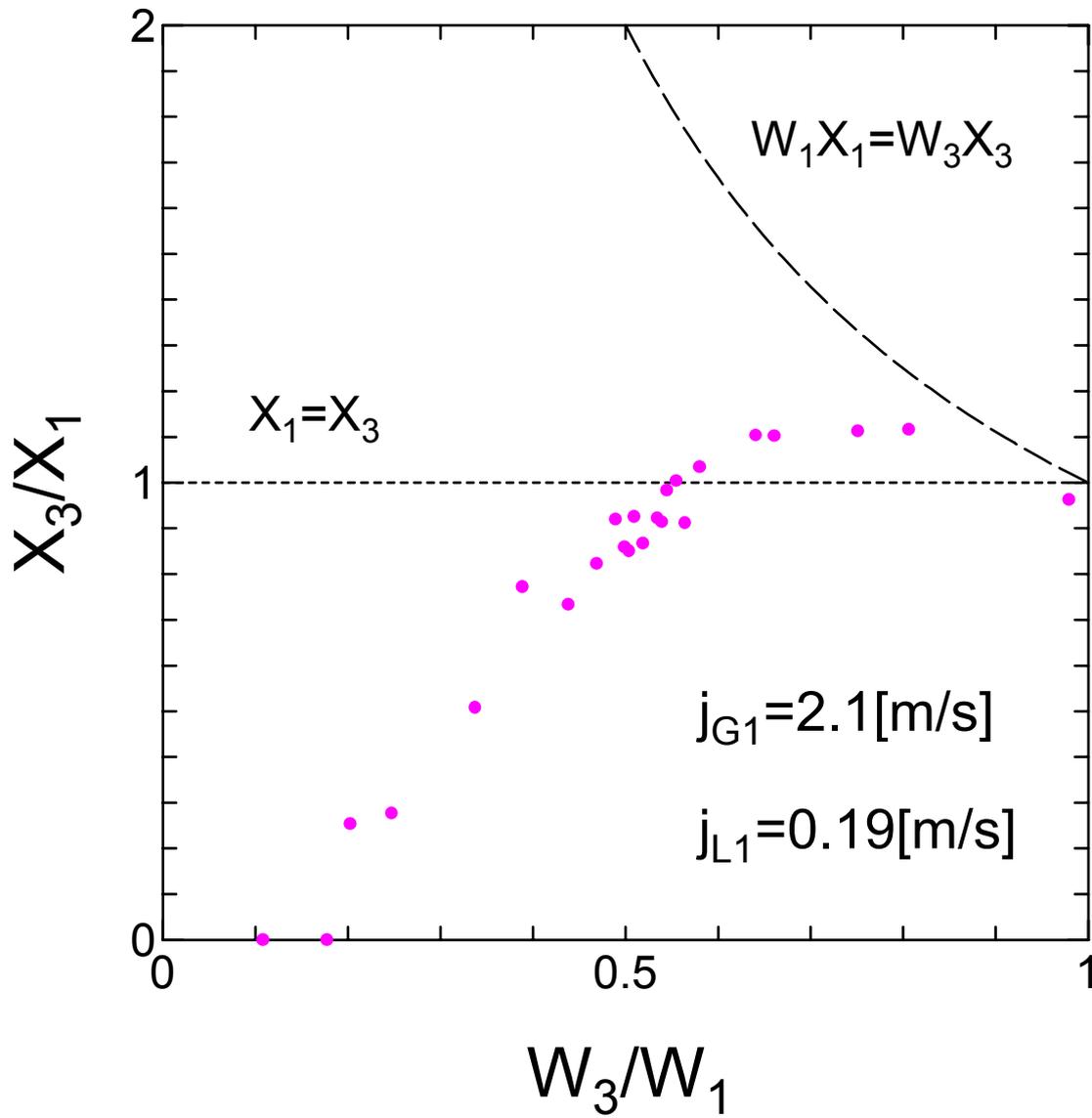


Fig.4-5 Characteristics of phase separation in churn flow region

第5章 考察

- 5 - 1 流動様式線図についての考察
- 5 - 2 偏流特性についての考察

5 - 1 流動様式線図についての考察

32 項の流動様式線図をみると、Taitel の流動様式判別式によく一致しているが、スラグ流とチャーン流でずれている領域がある。これは実験における流動様式の判別が目視により行われており、非常に主観的、恣意的になっていることも一因であろう。特に遷移領域のような中間的な流動状態については、その流れをどちら側と判別するか意見が分かれるところであり、やはりもっと客観的に流動様式を判定する手法や技術が必要と感じた。

実際の観察結果に依ると、気泡流からスラグ流に変化する時には、多数のうろこ雲のような気泡が螺旋状につながったり、いくつかの傘型形状の気泡が連なったりする現象が観察された。そのように傘型に連結した大気泡が現れた場合に、気泡流と見るか、それともスラグ流と見るかは、流れが典型的な流動様式に分類できない為に判断に迷うところである。つまり、本実験のように目視観察による流動様式判定では限界があり、困難な面を含んでいる。

また、分岐下流の流路抵抗の関係で、枝管において激しく脈流が起こる場合、垂直母管に液相が逆流する為に、垂直管の上流と下流で流動状態が大きく異なる。極端な例を挙げると、上流の混合室付近では気泡流となっているのに対し、分岐部近辺ではチャーン流のような流動状態になる場合などである。しかし、T型分岐管における二相流の分岐特性を見るのが本研究の主旨であるから、あくまで流動様式の判別は分岐部付近の流動状態によって行った。

また、この流動様式線図により、本実験条件では全ての流動状態を作れることが確認された。

5 - 2 偏流特性についての考察

実験結果によると、明確な相分離は確認できなかった。測定側のガス流量計の値が零点を示していても、分岐部では小気泡が両方の枝管に流れ込んでいることがある。藤井らは分岐部における相分離状態を片側の出口管に混入した気相の有無に基づき、次の3種類に分類した。

完全分離状態(Completely-separated)

T字管の出口2, 3のいずれか片方の管が完全に液单相流である場合。

不完全分離状態(Incompletely-separated)

T字管出口2, 3のいずれの管も完全に液单相流にならず、少量でも気相が小気泡として混入、流動している場合。

非分離状態(Non-separated)

上記以外の場合で、明確な相分離がなされていない状態。

また、上に挙げた状態以外に、小管径では、気液の見かけ流速が共に小さい場合に、どちらかの枝管が気泡により閉塞し、気液ともに他方の枝管にのみ流れる状態が存在する。

本実験で確認できたのは、との状態である。

Fig.4-3 ~ Fig.4-5 において、破線 $W_3X_1 = W_3X_3$ 、および x 軸($X_3/X_1=0$)上にある点が上で定義した完全分離状態を示している。藤井らの管径 10mm の実験結果では、枝管 3 に気泡が混入し始めるときの質量流量比(以下、これをガス混入開始点(W_3/W_1)_{cr}と呼ぶ)はいずれも 0.3 程度であるのに対し、本実験の結果ではおおよそ 0.1~0.2 となっており、偏流が発生しにくくなっていることがわかる。

先に定義したガス混入開始点(W_3/W_1)_{cr} の値は、相分離が起こった場合にどの程度の液を抽出することが出来るかを示す指標となるが、この値が大きいと偏流が起こりやすい、と言える。

実験結果によると、気泡流、スラグ流、チャーン流いずれの場合であっても、ガス混入開始点は 0.1 前後の値をとり、間欠流領域では相分離特性に対する気相流速の影響は大きくないことがわかる。特にスラグ流とチャーン流は偏流特性が良く似ており、 $W_3/W_1=0.5$ 付近で $X_3/X_1=1$ となり、両枝管に流れ込む二相流の流量が同じであれば、均等に分配されることが分かった。このように、気泡流とそれ以外の流動様式では偏流特性が大きく異なるが、ガス混入開始点の値はいずれの流動様式でも 0.1~0.2 の範囲内に収まっており、大きな差はない、と言える。

入口 1 と出口 3 での液相質量流量比、 W_3/W_1 が小さい場合には気体は枝管 3 には流れず、枝管 2 にのみ流れる。この状態から結果の項で述べたバルブ操作によって W_3/W_1 を次第に増加させると、ある点(W_3/W_1)_{cr} から枝管 3 にも気泡が混入し始め、 $W_3/W_1 = 0.5$ では気液共両枝管に均等分配され、さらに W_3/W_1 を増やすと、やがて枝管 2 側が液单相状態(破線上)になっている。ただ、我々実験結果では波線上に乗らない時があり、これは明らかにおかしい。実は本実験では完全分離状態がほとんど見受けられず、ガス混入開始点付近の流量比であっても、小気泡がバルブ全閉状態の枝管にも流入し、合体する。その結果、水平枝管の途中で巨大な気体プラグが形成して、それが小気泡の進入を妨げている。これは何もスラグ流に限ったことではない。気泡流でも同様の現象が確認された。すなわち、測定側のガス流量計が反応しないといっても、気泡が全く枝管に流れないわけではなく、気液分離器まで流れ込んでこないだけなのである。

別の問題点もある．それは出口のガス流量計が大きく変動するため，枝管の気相流量を正確に測る事が非常に困難となっている点である．今回は 10 秒間程度の平均値を採ったが，もともとフロート式流量計は変動量を測るのに不向きで，静定量を測定したり，流量の調節等に使用する測定器である．そのため応答性が著しく悪い．気相の流量変化が流量計の周波数応答よりもはるかに速いので，平均値を採ったとしても測定誤差が大きい可能性がある．今後は測定器を変えるか，測定方法を改善するなどして，もっと正確に測る必要がある．

枝管と母管のクオリティ比を算出するのに，出口ガス流量の占める影響が大きいため，実験結果の信頼性はこの点に掛かっているといっても過言ではない．

実験観察により，枝管のバルブ全開状態で気泡流だった流れが，一方の枝管だけに流れるように片方のバルブを絞ったところ，スラグ流に変化する現象が見られた．つまり，T型分岐で気泡流だった流れがL型分岐になると，気液の流速が一定でもスラグ流になってしまうのである．またスラグ流の場合，T型分岐部において気泡プラグが分裂して，気体が両方の枝管に流れ込むため，相分離状態が識別しにくかった．

本実験では，管径が大きい為に粘性力や表面張力に比べて，慣性力の影響が大きい．よって，慣性力と表面張力の比である Weber 数によって分岐特性を分類することが合理的なのか考察する一助にはなったかもしれない．この点に関連して Manga は，数値解析計算により表面張力の減少に伴って，気泡が流量の大きい枝管に進む傾向が顕著になることを報告している．もっと管径の小さい実験($d=2.5\text{mm}$)におけるガス混入開始点は 0.1，中程度の管径($d=10\text{mm}$)でのそれは 0.3，本実験($d=15\text{mm}$)では 0.1 程度であることを考慮すれば，Manga の説が一概に正しいとは言えない．ただ，それよりもまず我々の実験装置，および実験方法を再考し，信頼有るデータを蓄積できるよう努めなければならない．その上でもう一度，実験結果と理論が一致するか確かめることになる．

第6章 結論

6 - 1 結論

6 - 2 今後の課題

6 - 1 結論

本研究により以下の結論を得た

- I. 空気 - 水系二相流の T 型分岐管における分岐の様子を観察できる装置を作成した。
- II. 垂直上昇管での気液二相流の流動様式の観察を行い、気泡流、スラグ流、チャ - ン流および環状流を確認した。
- III. 垂直な T 字型分岐での気液二相流の分配実験を行い、分岐下流の流路抵抗による気液両相の分配特性を実験により明らかにした。
- IV. T 型分岐管において、質量流量分配比 W_3/W_1 が偏流特性に支配的である。
- V. 気泡流とそれ以外の流動様式で偏流特性が大きく異なるが、ガス混入開始点はいずれの流動様式でも 0.1 ~ 0.2 の範囲内に収まっている。
- VI. 垂直上昇管および水平枝管において、スラグ流およびチャ - ン流は液相が逆流することがある。
- VII. 分岐下流の水平管において、スラグ流やチャ - ン流、および気泡流の一部で周期的な脈動現象が起こる。
- VIII. 管径 15mm の T 型分岐では、相対的に表面張力の影響が低下する為、空気スラグが分岐部で分裂しやすくなる。
- IX. T 型分岐では気泡流に属する流れが、L 型分岐ではスラグ流に変化する現象が見られる。

6 - 2 今後の課題

今後の研究に関し以下の点について課題を残した

実験に関して

本実験で使用した実験装置には次のような問題点がある。

- i. 垂直管の助走距離が短かった（管径の 100 倍）為に、典型的なスラグ流が出せなかった。もう少し垂直管の管長を長く設定すべきだったとも思うが、これ以上装置が大きくなると、実験がしづらくなることを考慮すれば、致し方ないかも知れない。
- ii. 管径が大きい為に、相対的に表面張力の影響が小さくなり、気体スラグなどの大気泡が分裂し易くなっている。その影響で相分離が起こりづらくなっている。今後は、表面張力を増加させる薬品等を利用した時に相分離が起こりやすくなるか等を調べ、表面張力の影響を増大させた場合の分配特性を検証する必要がある。
- iii. 本実験で使用した気液分離器では気液の分離に限界があるため、気相、液相の各流量を正確に測る事が困難である。分離器に流入して来た二相流中の気相が分離器内にしばらく留まる一方で、液相の水面高さが変化するので、分離器内の圧力変動が大きくなり、その結果、気相流量計が激しく振動してしまう。偏流特性の実験において、出口の気相流量は最も重要な測定項目の一つであるため、これを正しく測定する方法を熟考せねばなるまい。
- iv. 分岐部前後での圧力損失を確認しようと、水柱マンノメータを取り付けたが、二相流の圧力が高く、マンノメータに水が進入してくる為、その差圧を測定する事ができなかった。ただし、差圧の変動だけは読み取ることが出来たので、その周期と脈動の周期との関連性などを調べていくと面白いのではなからうか。

解析方法に関して

本実験で一番印象に残った現象は枝管での脈動、および垂直管での逆流である。

分岐特性に関してはモデル化が容易ではなく、理論を構築するには時間を要するであろう。またパラメータが多い上に、二相流独特の難しさも手伝って解析作業が困難を極める。そこで、視点を変えて分岐部での分配特性の動的変動に着目して、解析を進めていったほうが良いのではないかと、とも思う。そのためにはまず脈動の解明をする必要がある。このテーマならある程度モデル化が可能であろうし、何より分岐部の振動解析を研究している研究者がそれ程多くはないようなので、目新しい発見があるかも知れない。今後の研究に期待する。

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離特性（地上実験結果と微小重力場への適用），日本機械学会論文集（B編）62巻 594号（1996-2）447-453
- 3 斎藤ら，貯そうにつながるV字管内気液二相流系の自励振動，日本機械学会論文集（第2部）44巻 384号（1978-8）2751-2758
- 4 伊藤浩二，“垂直管内空気 - 水系二相流の流動様式の同定”，東京大学工学系研究科 修士論文，1999.

謝辞

本論文の作成にあたり、親身になって御指導，御鞭撻下さいました庄司正弘教授に心から感謝いたします。いろいろとお忙しい立場でありながら方針などの面でのご指導は大変有難いものでした。また数々の御指導，御協力を賜った丸山茂夫助教授，横谷定雄助手、井上満助手、渡辺誠技官に厚く御礼申し上げます。

研究に対する姿勢に真剣さが欠ける私を正そうと，いつも叱咤激励して下さいました山口さん，伊藤さん，野上さん，横田さんには感謝の言葉も見つかりません。

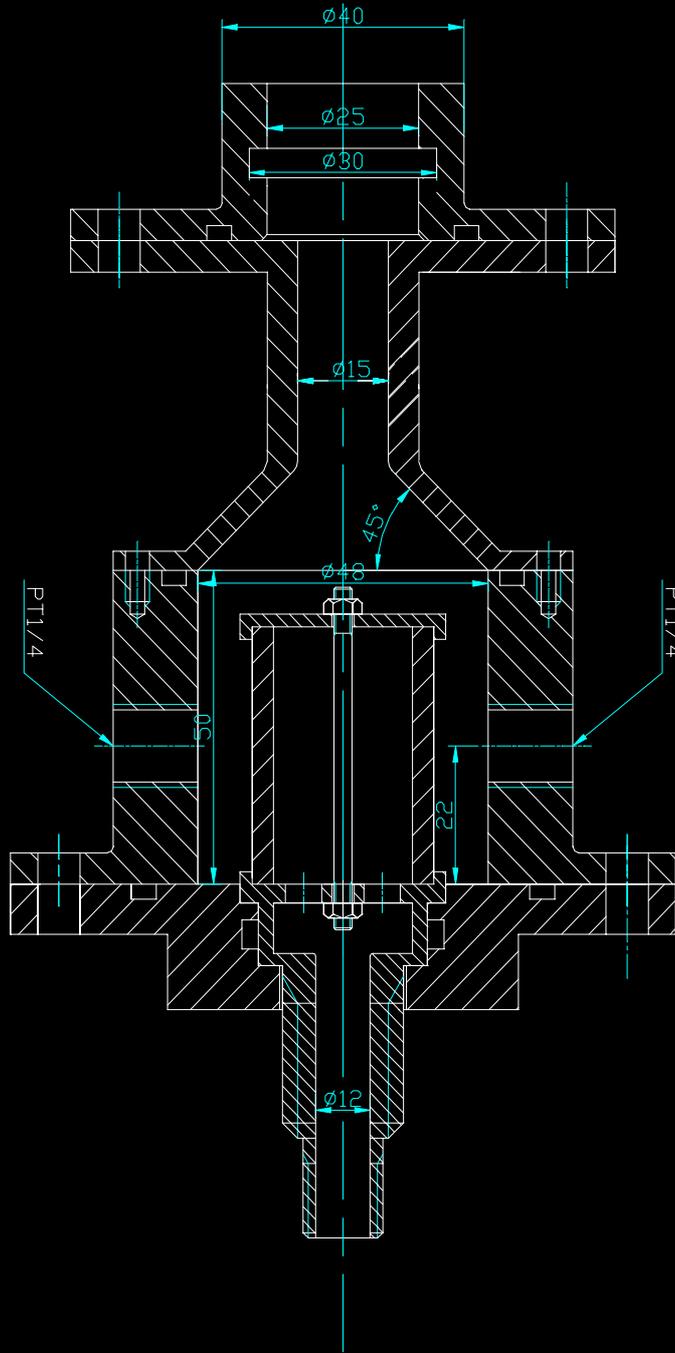
実験等で行きづまった時，何度も具体的なアドバイスを与えて下さった伊藤さん、姜さん，徐さん、野上さん、横田さん，坂田さんには多大な御迷惑をお掛けしたと思いますが，私にとっては大変有益なものばかりでした。様々なことで全く無知な自分にいろいろ知識や助言を頂き，非常にお世話になりました。同期である4年生の小川君，宮崎君，小楠君達は時に励ましてくれたり、いろいろ教えてくれたりと存在を頼もしく感じました。フランスへ留学された安井さん，また留学生の柴さん，姜さん、連さん、張さんは短い間でしたがお世話になりました。

そして，直接同じ実験を行うということで大変なご迷惑をおかけした汪さんには誠に感謝しております。研究室で一番長く時間を共にした汪さんには，数え切れない程の我がまま，不平を聞いて頂き，多大な迷惑をお掛けしました。知識についても実験についても本当に何も知らない自分に大変苦勞なさっていたと思うのですが，嫌な顔一つせず丁寧に我慢強く御指導下さり、なおかつ失敗を何度もフォローして頂きありがとうございました。この研究テーマは難題続きで，今後も苦勞が絶えないことと思いますが，いつかその努力が報われる日が来ることを心よりお祈り申し上げます。今後の益々の御発展を期待しておりますので，あきらめずにどうか最後まで頑張ってください。

皆様本当にどうも有難うございました。

付録

CAD 設計図面



20-100	0.1-200	0.03	0.1-10	→4	研削加工
					加工普通
0.3	0.2	0.1	0.07	0.05	→7 精磨
0.8	0.5	0.3	0.2	0.15	→9 半精
0.0	0.2	0.1	0.05	0.03	→11 精磨

庄司・東京大	連絡先	尺取	目付	番号	1	2	3	4	5
丸山研字工学	第三角	1:1	00/10/	部 品	配管継	混合室	混合室	混合室	ボラー
実 空研機械	製図	設計	26	名	平	榎子A	榎子B	底板	ス
(内)工学科	竹 村	注		材 質	黄銅	黄銅	黄銅	黄銅	多孔質
26408				数量	1	1	1	1	1
	品名			重量					
	気液混			工程	市	市	市	市	市
	合室			備					
	品番			号					

以上

通し番号 1 - 50 完

卒業論文

平成 13 年 2 月 9 日提出

90234 竹村 崇裕