卒業論文

垂直管内二相流における気泡群の生成挙動

1-58 ページ 完

平成14年2月8日提出

指導教官 庄司 正弘 教授

学生証番号 00235 橋本 康史

目次

第	1	章		序論	3	
	1	-	1	研究の背景	4	
	1	-	2	過去の研究	5	
	1	-	3	研究の目的	6	
第	2	章		計算	7	
	2	-	1	導入	8	
	2	-	2	計算の基本概念	9	
	2	-	3	計算の条件・仮定について	1	2
	2	-	4	計算方法	1	3
	2	-	5	実験装置	1	5
	2	-	6	計算結果及び実験との比較	1	6
	2	-	7	考察	5	1
第	3	章		結論	5	3
	3	-	1	結論	5	4
	3	-	2	今後の課題	5	5
	3	-	3	参考文献	5	6
	3	-	4	謝辞	5	7



1-1研究の背景

気液の二相流は、プラントや冷熱機器などで多く見られる。 この特性が分かることは実用上有意義であると同時に、その複雑な挙動は学術的にも興味深い。

二相流は気体流量、液体流量などの条件によって幾つかの特徴的な流動様式をとる。 一般に言われている主な流動様式は次の四つである。

図 1-1 気泡流 図 1-2 スラグ流 図 1-3 チャーン流 図 1-4 環状流

二相流の工学的な特性は、これらの流動様式によって大きく異なった性質を示し、それゆえに、 流動様式の決定、流動様式ごとの特性の調査、などが必要となる。 1-2過去の研究

古くから二相流の流動様式については、数多くの条件に対して実験を行い、それぞれに対して の流動様式をプロットしたマップ、流動様式線図が作られてきた。

しかしその際に用いられる実験条件、パラメータは多岐にわたり、その全てを実験で網羅し尽 くすのは不可能である。そのため、それまでの実験から離れた条件では流動様式線図を適用する ことができなかった。

そこで、なんらかのモデルに基づいた流動様式の予測が必要になり、1980年、Taitel と Dukler らによって、各流動様式の遷移機構をモデル化し、気液の見掛け速度、(jg、j))を座標軸と して描いた流動様式線図が報告された。

また 1983 年にも、三島、石井らによって各流動様式をモデル化し、充分発達した流れにおいて、ボイド率¹によって流動様式を整理する方法が示されている。

1-3研究の目的

研究の背景で述べたように、二相流はその流動様式によって大きく異なった特性を示す。

これらの特性については流動様式ごとに整理され、流動様式が特定できればその特性をある程 度予測することはできるようになっている。

そこで次のステップとして、ではいったいどの流動様式になるのか、ということを予測する研 究が行われてきたわけである。

しかし先に述べたように、これまでのモデル化は主に「充分発達した領域」について成された ものだった。

チャーン流、環状流に関しては、入り口直後から長さ方向に関してほぼ一様な流動様式を示し、 「充分発達した領域」という仮定は多くの場合成り立つと考えられる。

ところが気泡流、スラグ流に於いては、我々の実験装置(後述)で見る限り、入り口から2mの距離においても充分発達しているとは言えず、2mの実験装置で充分発達した領域を論じるのには無理がある。

さらに実際の応用上も、充分発達した領域とは言えない部分において流動様式を予測したい場 合が多々あると思われる。

そこで長さ方向に関する流動様式の変化を予測するために、入り口の条件と長さ方向に関する 流動様式の変化を含めた、気泡流からスラグ流への変化に関するモデリングを行った。

また、そのモデルに基づいて実際に計算し、その遷移する位置の予測を行った。

第2章 計算

2 - 1 導入

気泡流からスラグ流への遷移において、気 泡群というものが形成される。図 2-1、図 2-2 が気泡群の写真である。

じっくり観察すると、ばらばらの気泡が、 まず気泡群を形作り、それから合体して典型 的なスラグになる、という現象が見られる。

過去研究の中でも、気泡流からスラグ流へ の遷移において発生する気泡群について触 れられている。

気泡流からスラグ流へ遷移する際には、小 さい気泡同士の合体がCap Bubble と呼ばれ る気泡をつくり、一度その気泡ができた後は、 続く気泡がつぎつぎにこれに衝突して気泡 群が作られる、と報告されている。

そこで『気泡流から気泡群』、『気泡群から スラグ流』というように、この領域を二つに



図 2-1

図 2-2

分けて、それぞれ別のプロセスとして扱うことを考えた。

しかし『気泡群からスラグ流』についてだが、これは触れ合っている気泡同士が

合体するかどうか、つまりは表面張力の問題であると思われる。

そのため、水道水しか使えず液体の表面張力を管理できない現在の実験装置で、様々な実験を 行うのは困難である。

そこで、本研究においては『気泡流から気泡群』のみを取り上げ、『気泡群からスラグ流』は取 り扱わないこととした。 最初に単一気泡の速度を考える。

まず、単一気泡の終端上昇速度は、浮力と抗力のつりあいによって決まる。

一般に、流体中を移動する物体が受ける抗力は物体の投影面積に比例し、相対速度の二乗に比 例するとされている。

このつり合いを式であらわすと

$$\rho g \frac{4}{3} \pi r^{3} = C d\rho \frac{1}{2} \pi r^{2} (w_{b} - w_{\ell})^{2} \qquad (\vec{z} 2 . 1)$$

浮力 抗力

 $(w_b: 気泡速度 w_l: 液体速度 Cd: 抗力係数 : 密度差 g: 重力加速度)$

となる。

ここから気泡速度と液体速度の相対速度は

$$w_b - w_\ell = \sqrt{\frac{8rg}{3Cd}}$$



となる。

次に、気体と液体の管内での入れ替わりに注目する。

気体、液体ともに非圧縮であるとし、時間あたりの流入量が一定なら、図 2-3 の断面を一定時 間に横切る体積は一定のはず。 体積保存

(式2.2)

ここから、気泡の中心を横切る断面でのボイド率と w_g , w_ℓ の断面平均の関係は、 $f_g w_g + (1 - f_g) w_\ell = j_g + j_\ell = j$ (式2.3)

 $(w_g: 気体速度 j_g: 気体見掛け速度 j_\ell: 液体見掛け速度 <math>f_g = \frac{r^2}{R^2}: 断面ボイド率)$

ここで、気泡速度 w_b はその断面での気体速度 w_g に等しいと仮定する。

これは気泡が時間によって著しく変形しているわけではないので、充分まともな仮定と言える。 また式(2.2)において抗力の計算に用いている*w*_ℓは、本来、気泡を囲む充分広い領域での 液体速度を表す式であるが、この*w*_ℓとして、図 2-3 で注目している気泡の中心を横切る断面での *w*_ℓを用いる。

本来は充分広い水槽での気泡に対する抗力の実験結果を、そのまま、気泡の周りの液体速度が 断面によって変化する管内の気泡の上昇に適用するのは現実と何らかのズレを生じるはずである が、ここではそのズレを含んだ程度の厳密さで考えている。

これらの仮定のもとで W_aをあらわすと

$$w_g = \sqrt{\frac{8rg}{3Cd}} \times \left(\frac{R^2 - r^2}{R^2}\right) + j \qquad (\vec{x} \ 2 \ . \ 4)$$

となり、気泡の絶対速度が一つの式であらわせる。



ここで抗力係数 C d は過去の研究より図 2-4 のように調べられている。 図中の赤い点が水の場合のデータである。

なる。ただし、 w_g については気体見掛け速度 + 液体見掛け速度 = J = 0 としてグラフ化してある。

これらから w_g 及び $w_g - w_\ell$ をグラフにすると、垂直管半径R = 7 mmの時、図 2-5 のように



気泡速度(R=7mm)

気泡径が管径の半分くらいより大きくなると、気泡と入れ替わる液体の流路が狭くなり、そのため 断面での液体速度が上がり、その結果このグラフを見て分かる通り、気泡半径の増加に伴って気泡の 速度は減少する。

そこにもう少し小さな気泡がどんどん衝突し合体すると気泡径はますます大きくなり、管を塞 ぐようにゆっくりと上昇する気泡ができる。

こうして過去の研究でも言われている、Cap Bubble ができると考えられる。

そして気泡がある程度の大きさになり、それ以上合体したら管をほとんど塞いでしまうくらい になったところを気泡群の発生として扱う。 2-3計算の仮定・条件について

仮定

少しでも計算量を減らすために、次のような仮定をした。

1. 気泡の慣性力は小さいとし、すぐに終端速度に達するとする。

気泡の速度は最初に釣り合いによって計算してしまった後は、気泡径などの条件が変わらない 限り再計算しない。

- 気泡の数は充分少ないとし、同一断面上に二つ以上の気泡が来ないと仮定する。
 断面における液体流路の計算の際に、仮にもう一つ気泡が来ても自分以外の気泡を考慮しない。
- 3. 気泡が追い越しをすることはない。
- 4. 並んでしまったら合体として扱う。

追い越しをしそうになったら合体させてしまうことで、気泡の衝突を考える際に、他の全ての 気泡と衝突を調べずに前後の気泡との衝突だけを考えればよいようにする。

- 5. 合体したら気泡径が、管径の0.9を超えてしまう場合、合体とはせずに気泡群ができたとして扱う。
- 気泡群ができたときは、その気泡群ないの気泡は全て同じ速度で、全ての浮力の和と、抗力の和が等しくなる速度になるとする。

計算条件

管径は実験に合わせて半径7mmとする。

Cd は1.0と2.0についてそれぞれ計算する。

気泡の初期半径、及び分布は2mm±1.8で三角形の確立分布とする。

2-4計算方法

これまで述べた方法でそれぞれの気泡の速度を計算し、ある時間 dt ごとに移動、衝突、合体を 繰り返し行う。

気泡がある程度の大きさになり、それ以上合体したら管をほとんど塞いでしま うくらいになったところを気泡群の発生として扱う。

移動は、その気泡の速度に対して dt をかけた値だけ動かす。

衝突、合体は、気泡同士が触れ合った時、及び下から来た気泡の中心が、上の 気泡の中心を追い抜いた時に行う。もしその二つの気泡が合体しても、その半径 が管の半径の0.9(つまり 0.9×r/R)を超えないならば合体させる。合体 したらその半径が 0.9×r/Rを超えてしまうならばそれは合体せずに、そこで 気泡群ができたとみなす。

例えば図 2-6 のようになった時点で、それ以上は合体させず、気泡群になった とみなす。

合体の際は、二つの気泡の体積が、合体した後の気泡の体積と等しくなるよう に合体後の半径を決める。合体直後の気泡の中心位置は、上の気泡の中心位置と する。ただし合体した後の気泡が管壁を擦ってしまう場合は、管壁をこすらない ぎりぎりのところまで管壁から離す。

触れ合ったりしたものの合体はせずに気泡群になった場合、その気泡群の速度 は

気泡群内の全ての気泡の浮力=気泡群内の全ての気泡の抗力

となるようにして計算する。

この計算では隣接する気泡それぞれに対し、単独で上昇する場合と同じだけの抗力を仮定して いる。しかし現実には、密集した気泡全体が受ける抗力は、それぞれが単独で受ける抗力を足し 合わせたものよりも小さいと思われる。そのため気泡群が大きくなった場合の速度は、実際の気 泡群の速度より遅く見積もられることになる。つまりこの計算においては、気泡群ができた先の 領域に関しては妥当な予測を与えることはできない。

図 2-6

初期条件に関しては、まず初期気泡の平均半径を 決め、それとj_g, j₁と垂直官半径Rから気泡発生 の時間間隔を求め、その時間間隔にしたがって一定 の間隔で気泡が発生するようにした。

また、合体を引き起こす気泡間の速度差を生むた めには初期気泡半径がある程度ばらつきを持ってい なくてはならない。

ばらつきには正規分布を用いるのが好ましいが、

計算を軽くするため、三角形 分布として計算した。

この三角形分布というの は具体的には、図 2-7 のよう な確率分布である。

平均気泡半径を中心に対称な分布とし、最大 - 平均を ばらつきとした。

計算の際の実際入り口は、 図 2-8 のようになっていた。

また、実験の際の入り口は、 図 2-9 のようだった。





図 2-9 入り口の写真

2-5 実験装置

計算結果について述べる前に、計算結果と比較した実験の、実験装置について説明をしておく。 図 2-10、図 2-11 が実験装置である。



図 2-10 実験装置の図

図 2-11 実験装置の写真

差圧の測定、高速ビデオの撮影などもできるが、今回は気泡群の発生個所に注 目しているので、気泡群の生成を確認し、その位置を混合室からの距離で記録し た。

気泡群の発生に関しては特別な観測装置もないので、パイプの横にものさしを 立て、目視で気泡群の発生個所を確認し、遷移位置と、 その上側と下側の三つの値を記録した。

上側、下側というのは、気泡群の発生位置にはかなり の幅があるので、その平均的な値と見られる位置の他に、 その遷移領域の上側、および下側も同様に記録したもの で、だいたいこの間で遷移が起こっている、ということ である。

気泡群の判断は、図 2-12 のように Cap Bubble がで き気泡がいくつか集まりだして、図 2-13 のように、気 泡群同士の間に気泡のない部分が現れるようになった ところを採用した。



図 2-12 気泡群の写真図 2-13

j_g7mm/s付近

	j _g (mm/s)	j ₁ (mm/s)	遷移位置(mm)	上側(mm)	下側(mm)
1	7.151364	32.49708	300	400	200
2	7.174991	43.32943	400	500	300
3	7.284703	54.16179	500	700	300
4	7.312112	64.99415	500	600	400
5	7.180358	97.49123	600	800	400
6	6.958891	129.9883	600	800	400
7	6.959759	162.4854	900	1000	800
8	6.960339	194.9825	1200	1400	1000
9	6.983785	227.4795	1200	1400	1000

計算条件

共通条件

初期平均気泡半径 2.0mm

初期気泡半径最大变化量 1.8mm

d t 1.0×10^{-3} s

繰り返し回数 50000回

抗力係数 Cd=1.0 Cd=2.0 の二種類について計算

	j _g (mm/s)	j ₁ (mm/s)
1	7.2	32.5
2	7.2	43.3
3	7.3	54.1
4	7.3	65.0
5	7.2	97.5
6	7.0	130.0
7	7.0	162.5
8	7.0	195.0
9	7.0	227.5

図 2-14 は、計算の際のある時間におけるパイプの状態である。

 ${f j}_1$ を変化させ、入り口から 2000mm 分を表示してある。

32mm/s	43mm/s	54mm/s	65mm/s	97mm/s	130mm/s	162mm/s	195mm/s	227mm/s
		900 000	• • • • • • • • •	° ∞ ∞ 000	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	
6	8	D D	0		8 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	000000000000000000000000000000000000000	• • • • • • •
9 9	ŝ	•व कार्या व	CO 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	○ ● ● ○ ○	0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		
• 100	• • •	∘ ∘ ⊗ ⊗ ∞ ⊗ ⊗ 0 ∞ 0 ∞ 0 0 0 0			0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		0 8 00 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	800 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	000 0+1 00000 00 0 0 0 0 0 0 00 000		0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 00 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
_	_	図 2-1 4	_ L 計算の第	_ 気泡の様子	 Cd = 1.0	j _g =7mm/s	-	_

図 2-15 は、計算の際のある時間におけるパイプの状態である。

j $_1$ を変化させ、入り口から 2000mm 分を表示してある。

32mm/s	43mm/s	54mm/s	65mm/s	97mm/s	130mm/s	162mm/s	195mm/s	227mm/s
		800 800 800 800 800 800 800 800 800 800				0 00 00 00 0 00 00	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	
000		8	b	6	0	C	0	0
8	0	ŝ	0	8		00000	• • • • • • •	0 0 0 0 0 0 0 0 0
ĝ		0	6	• • • • • • •	0 00000 00 10 0	0 0 0 0 0 0 0	00 0 0 0 0	0 0 0 0 0
000 60-	8	00	8	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	â	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0	0 00 0 0 00 0
ĝ	0	8		000000	00000	0000	000000000000000000000000000000000000000	0000
000 0 0 0 0 0 000 0000 000 0 0 0 0 0 0 0					0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		0 0 0 0 0 000 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
		図 2-15	計算の気	〔泡の様子	Cd = 2.0	j _g =7mm/s	S	

実験と計算の、気泡群発生位置

桃、紺、黄の線が実験での結果である。

目視による確認のため、ある程度幅を持たせてある。

それに対しグラフ中にたくさんプロットされた点が、計算によって出された気泡群の発生位置 である。

計算の平均は水色の線で記した。

この点は、全ての気泡群が発生した位置に対してプロットしてあるのに対し、実験結果では気 泡群が発生し始めた点に注目してしまい、いくつかの上の方に行ってから気泡群になった気泡に ついては考慮されていない。

そのため計算結果に対しては、その気泡群発生位置の下側 1/4 を選んで、その平均も紫の線で 示した。



図2-16 実験と計算 Jg = 7mm/s Cd = 1.0

桃、紺、黄の線が実験での結果である。

グラフ中にたくさんプロットされた点が、計算によって出された気泡群の発生位置である。 計算の平均は水色の線で記した。紫の線は下側 1/4 の平均である。



図2-17 実験と計算 Jg = 7 mm/s Cd = 2.0

桃、紺、黄の線が実験での結果である。

グラフ中にたくさんプロットされた点が、計算によって出された気泡群の発生位置である。 計算の平均は水色の線で記した。紫の線は下側 1/4 の平均である。 計算によって得られた気泡の動き

条件 j_g 32.5mm/s j₁ 7.2mm/s Cd = 1.0 表示間隔 dt = 0.1s

固定点で

ある区間に注目し、そこでの気泡を時間を追って表示した。

Cap Bubble に対し、他の気泡がどのように追いついてゆくかが分かる。



ある気泡に注目して

固定点で見ていると気泡は短時間でその区間を出て行ってしまうため、今度は一つの気泡に注 目し、その気泡の動きに合わせて表示する領域を動かした。

Cap Bubble に次々に気泡が衝突してゆく様子が見られる。



ある気泡に注目して



j_g9 mm/s 付近

実験結果

	j _g (mm/s)	j ₁ (mm/s)	遷移位置(mm)	上側(mm)	下側(mm)
1	9.083335	33.58031	100	150	50
2	9.084854	43.32943	250	350	150
3	9.087896	55.24503	200	300	150
4	9.095901	64.99415	300	400	200
5	9.096283	75.82651	250	350	150
6	9.096665	86.65887	250	400	150
7	9.096665	97.49123	300	400	150
8	9.096665	129.9883	300	500	200
9	9.096665	162.4854	400	500	300
10	9.097047	194.9825	700	900	500
11	9.097429	227.4795	1300	1500	900

計算条件

共通条件 初期平均気泡半径 2.0mm 初期気泡半径最大変化量 1.8mm d t 1.0×10⁻³ s 繰り返し回数 50000 回

抗力係数 Cd=1.0 Cd=2.0 の二種類について計算

	j _g (mm/s)	j ₁ (mm/s)
1	9.1	33.6
2	9.1	43.3
3	9.1	55.2
4	9.1	65.0
5	9.1	75.8
6	9.1	86.7
7	9.1	97.5
8	9.1	130.0
9	9.1	162.5
10	9.1	195.0
11	9.1	227.5

図 2-18 は、計算の際のある時間におけるパイプの状態である。

 ${f j}_1$ を変化させ、入り口から 2000mm 分を表示してある。

32mm/s	43mm/s	55mm/s	65mm/s	97mm/s	130mm/s	162mm/s	195mm/s	227mm/s
6000 0000	40000 (UD	100 000 000 000 000 000 000 000 000 000	0000 0000	0	00	000000000000000000000000000000000000000		0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
00	000000000000000000000000000000000000000	8	0	•• • 0 • • • • • • •		0 0 0		
8	0 8	000	8	∞ 0 0	6	0 00 0 000 0 000 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
∞∞∞∞∞∞∞∞⊙⊙ ∞₀ ∞∞∞⊙⊙ ⊙⊙ ⊙⊙ ⊙⊙ ⊙⊙	o ∞ 000 0000 000 000 000 000 000 000	- 0000000 00 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	C CC 000 0 000 0 000 0 000 0 000 0 000 0 000 0			0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		
		図 2-18	計算の気	記泡の様子	Cd = 1.0	j _g =9mm/s	5	

図 2-19 は、計算の際のある時間におけるパイプの状態である。

 ${f j}_1$ を変化させ、入り口から 2000mm 分を表示してある。

32mm/s	43mm/s	55mm/s	65mm/s	97mm/s	130mm/s	162mm/s	195mm/s	227mm/s
32mm/s	43mm/s	55mm/s	65mm/s	97mm/s	130mm/s	162mm/s	195mm/s	227mm/s
	000 <u>400</u> 0 <u>00</u> 00 00 00 00 00	© © © © © © © © © © © © © © © © © © ©	000000000000000000000000000000000000	。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。	Cd = 2.0	j _g =9mm/2	20000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000	



図2-20 実験と計算 Jg = 9mm/s Cd = 1.0

桃、紺、黄の線が実験での結果である。

グラフ中にたくさんプロットされた点が、計算によって出された気泡群の発生位置である。

計算の平均は水色の線で記した。紫の線は下側 1/4 の平均である。



図2-21 実験と計算 Jg = 9mm/s Cd = 2.0

桃、紺、黄の線が実験での結果である。

グラフ中にたくさんプロットされた点が、計算によって出された気泡群の発生位置である。

計算の平均は水色の線で記した。紫の線は下側 1/4 の平均である。



気泡の様子 j g 32.6mm/s j 1 9.1mm/s d t = 0.05s Cd = 1.0

ある気泡に注目して



ある気泡に注目して



j _g12 mm/s 付近

実験結果

	j _g (mm/s)	j ₁ (mm/s)	遷移位置(mm)	上側(mm)	下側(mm)
1	12.81938	32.49708	150	300	100
2	12.8183	43.32943	200	300	100
3	12.81722	54.16179	200	400	100
4	12.81614	64.99415	300	400	150
5	12.8156	75.82651	300	500	150
6	12.81344	86.65887	300	600	200
7	12.8129	97.49123	400	700	200
8	12.81182	129.9883	500	700	300
9	12.6839	162.4854	500	700	300
10	12.68337	194.9825	600	800	400
11	12.68337	227.4795	700	900	500

計算条件

共通条件 初期平均気泡半径 2.0mm 初期気泡半径最大変化量 1.8mm dt 1.0×10⁻³s 繰り返し回数 50000回

抗力係数 Cd=1.0 Cd=2.0 の二種類について計算

	j _g (mm/s)	j ₁ (mm/s)
1	12.8	33.6
2	12.8	43.3
3	12.8	54.2
4	12.8	65.0
5	12.8	75.8
6	12.8	86.7
7	12.8	97.5
8	12.8	130.0
9	12.7	162.5
10	12.7	195.0
11	12.7	227.5

図 2-22 は、計算の際のある時間におけるパイプの状態である。

 ${f j}_1$ を変化させ、入り口から 2000mm 分を表示してある。

32mm/s	43mm/s	54mm/s	65mm/s	97mm/s	130mm/s	162mm/s	195mm/s	227mm/s
88	00000000	0 (100	400m2	300 300 300 300 300 300 300 300 300 300	000 000 000 000 000 000 000 000 000 00			0 • • •
0	C C C	D D	00 00			¢ °	8	ß
φ ω			00000	8		0	S S	8
0000			9 0 0 0	30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 3	8	P Q Q	e e	9 8 8
		B B B	800		6 0 0	8	• • • • • • • • • • • • • • • • • • •	0 00000 <u>0</u> 0 0
8 00		8	0000	•• • 000 ••	0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	• 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0
00 **	0 0 0	000000	0 0	0 0 00000	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	° &∞ ° 0 ∞ 0 ∞ 0 0	• O O O O •••••••• •	°°° 0°° ° 0°° ° °
0 0000000000000000000000000000000000000	80 80 90 90 90 90 90	× 2-22	計算の気泡	。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。。	Cd = 1.0	j _g =12mm/s	• • • • • • • • • • • • • • • • • • •	000000

図 2-23 は、計算の際のある時間におけるパイプの状態である。

 ${f j}_1$ を変化させ、入り口から 2000mm 分を表示してある。

32mm/s	43mm/s	54mm/s	65mm/s	97mm/s	130mm/s	162mm/s	195mm/s	227mm/s
8		000 000 000 000	C 888 0		0000 0000 0000	S S	8	© • •
	80	0	n M	8	o G	8	0	0
00 00 00		8	8		8	хо С	8	c
	0	0 0	8	3 0 30	400 900	0	80000	0 0 0
	000000000000000000000000000000000000000	8			8	0 0 0 0 0 0 0 0	(Ö	0 0 0 0 0
80	8		0000	g		。 。 0 8	0080000	0 0 0 0
000000000000000000000000000000000000000	8	0		00	0 5 91	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○
00 00 00	∞ ∞ 0 0 0	· · () 0 0 · • • 0 0 0	000000000000000000000000000000000000000	0 ~ 0 ~ 0	<u>>∞ 0 0 ∞∞0</u>	3.00 0.000 0.00 B (0 00 0 0 0 000	
ŭ	Ø	ଞ ⊠ 2-23 i	≌ 計算の気泡	□ □の様子	$\mathbf{Cd} = 2.0$	ق j _g =12mm/s	ĬŞ.	õ



図2-24 実験と計算 Jg = 12mm/s Cd = 1.0

桃、紺、黄の線が実験での結果である。

グラフ中にたくさんプロットされた点が、計算によって出された気泡群の発生位置である。

計算の平均は水色の線で記した。紫の線は下側 1/4 の平均である。



図2-25 実験と計算 Jg = 12mm/s Cd = 2.0

桃、紺、黄の線が実験での結果である。

グラフ中にたくさんプロットされた点が、計算によって出された気泡群の発生位置である。

計算の平均は水色の線で記した。紫の線は下側 1/4 の平均である。



j $_{\rm g}$ 33.6mm/s j $_{\rm l}$ 12.8mm/s d t = 0.1s Cd = 1.0

ある気泡に注目して



ある気泡に注目して



図 2-26 は、Cd=1.0 に対して j g と j 1 を変化させ、その時の気泡群生成位置を縦軸に取ったグラフである。

下側 1/4 の平均を取った値を使って描いている。



気泡群発生位置(R=7mm Cd=1)

図 2-26

液体見かけ速度(m/s)



43

図 2-28 は、Cd=2.0 に対して j_gと j₁を変化させ、その時の気泡群生成位置を縦軸に取ったグラフである。



気泡群発生位置(R=7mm Cd=2)

図 2-28





気泡群発生位置(R=14mm Cd=1)





過去の研究



入り口条件の違いによる変化

入り口の条件による気泡群生成位置の変化を調べるために、初期気泡半径を変化させて計算を 行った。

平均初期気泡半径を 0.5mm から 2.5mm までとり、そのばらつきはそれぞれ-0.2mm (つまり 平均初期気泡半径が 1.0mm の時、実際の気泡半径は 0.2mm ~ 1.8mm) とした。

これまでと同様多くの計算点のうち、平均と、下側 1/4 の平均を取って線で示した。

計算条件は

Cd = 2.0

- j _g = 7.2(mm/s)
- j₁ = 32.5(mm/s)



図2-33 初期気泡径との関係(ばらつき-0.2mm)

初期気泡半径のばらつきと気泡群発生位置の関係を調べるために、初期気泡半径のばらつきを変化させて計算をした。

平均半径は 2.0mm とし、そのばらつきを 0.1mm~1.9mm まで変化させた。 図中の線で示したデータは、これまでと同様平均と、下側 1/4 の平均を取ったものである。 計算条件は

Cd = 2.0

- $j_{g} = 7.2 (mm/s)$
- j₁ = 32.5(mm/s)



図2-34 初期気泡径との関係(平均半径2.0mm)

2-7考察

実験と計算の比較では、単純な平均では絶対値においてかなり違いがあるが、下側 1/4 の平均 を取った場合、グラフを見て分かる通り Cd=1.0、Cd=2.0 を問わず、 j₁の変化に対する気泡群 発生位置の変化は、大体の傾向が同じである。

特にj_g9mm/s 付近での計算では、Cd=1.0 において、実験に極めてよく合った計算結果が出ている。

j_g12mm/s 付近では、実験に対し計算の気泡群発生位置の下側 1/4 平均は全体に小さい値を示している。しかし平均を取る前のそれぞれの気泡群が発生した点は、概ね実験のデータに沿った傾向を表している。これは計算上の気泡群の発生個所があまり広く分布しておらず、j_gの小さいところで見られたような、少数の上のほうに行ってから気泡群になる気泡が見られなかったため、下側 1/4 の平均をとる必要がなかったと思われる。

三次元の計算結果は我々の実験とは比べられないが、j₁が大きいほど、j_gが小さいほど気泡 群の発生位置が上に行くことがよくあらわれている。

特に上から見た図と過去の実験によって描かれた流動様式線図を比べると、気泡群生成位置の 等高線は過去の研究における気泡流とスラグ流の境界を表す線と、よく似たカーブを描いている。

計算と実験では気泡群ができる位置を取るか、スラグ流になる位置を取るかで定義が違うため、 jgとj1の絶対値は大きく違うが、この計算結果は現象をよく表していると思われる。

入り口条件の違いによる変化では、まず初期気泡半径を変化させた時、予想通り、平均初期気 泡半径が大きいほど気泡群発生位置が下になることが確認された。

気泡は流れが上に行くほど合体を繰り返して大きくなるので、最初から気泡半径が大きいということは、垂直管において高い位置だけに注目し、途中のある点を『入り口』と置き換えて計算 していることに相当する。

この計算結果から、気泡群の発生位置は初期条件に依存する、ということが言える。

一方平均初期気泡半径を一定にしてばらつきだけ変化させた場合には、ばらつき 0.6mm までは ばらつきの増加に伴って気泡群発生位置が上昇し、その先は逆に、ばらつきの増加に伴って気泡 群発生位置が下降した。

気泡はばらつきが大きいほどそれぞれの気泡間に大きな速度差が生じ、より衝突が起こりやす くなるはずである。そのためばらつき 0.6mm 以降、ばらつきの増加に伴って気泡群発生位置が下 になることは予想されることであるが、ばらつき 0.6mm 以下では気泡群発生位置が右肩あがりで あることは少々疑問である。

そこで計算上の気泡を一つ一つ観察してみたところ、気泡のサイズが揃いすぎて垂直管の中心 付近では気泡同士の間隔が狭くなり、気泡同士がぶつかりやすくなってしまったようであった。 このように気泡同士の間隔が狭く幾つも並んでしまった場合、今回の計算では下から順に衝突を チェックしたために、下の気泡が合体するとそこでサイズが大きくなり(合体後の中心は上の気 泡の中心が採用される)同一時間内での次の衝突チェックの際に今度はもう一つ上の気泡と衝突 していることになってしまい、これを繰り返して低い位置で気泡群が発生してしまったと考えられる。

このあたりの領域を計算する際には衝突チェックの順番を考慮するなど、なんらかの工夫が必要になる。



3 - 1 結論

入り口に近く、充分発達していない領域においては、入り口の条件も含めた流動様式の予測が 必要である。

気泡群発生の予測には、体積の保存を用いた気泡速度の計算が有用である。

3-2今後の課題

本研究においては、気泡群からスラグ流への遷移に関しては表面張力によるものと考え扱わな かった。

しかし過去の研究においては気泡群よりもスラグ流の物性について研究されたものが多く、それらの研究とつなげていくためにも、気泡群からスラグ流への遷移に関してなんらかのモデル化が必要である。

また本研究においては極めて基本的な作用のみで計算することに専念したので、今後はその予 測精度を上げるために、仮定を見直すことや、その他の効果を入れることが必要であると思われ る。

3-3参考文献

[1]赤川浩爾,機械工学大系11 気液二相流,コロナ社(1974)

[2] KAICHIRO MISHIMA & MAMORU ISHII, FLOW REGIME TRANSITION CRITERIA FOR UPWARD TWO-PHASE FLOW IN VERTICAL TUBES Int. j. Heat Mass Transfer(1984)

[3] YEHUDA TAITEL, DVORA BORNEA & A. E. DUKLER, Modelling Flow Pattern Transitions for Steady Upward Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes AlChE Journal(Vol.26,No.3)(1980) 3-4 謝辞

本論文の作成にあたり、ご指導下さった庄司正弘教授、及び伊藤浩二さんに心から感謝いたします。

また、丸山茂夫助教授をはじめ丸山研究室の皆さんにも研究会等で貴重な御意見をいただき感 謝しております。

渡辺技官、井上助手には、実験について様々な相談をさせて頂きました。

博士、修士課程の方々には、研究について様々なご指導を頂き、また実験装置などについても いろいろと教えていただきました。

4年生の方々には、時にはくだらない話にも付き合っていただき、また、お互いにがんばって いる姿は心の支えにもなりました。

最後に、共同実験を行った伊藤さんには、特にいろいろとお世話になりました。

実験のたびに何時間にも及んだ伊藤さんとの議論なくしては、この研究はありえなかったと思っています。残りの大学生活の中で、伊藤さんがよい成果をあげて博士になられますよう願って おります。

1-58 ページ 完

卒業論文

平成14年2月8日提出

学生証番号 00235 橋本 康史