卒業論文

気液二相流の流動様相に関する研究

通し番号1-42完

平成13年2月9日提出

指導教官 庄司正弘教授

90253 宮崎大輔

<u>目次</u>

第一章	序論		4
1	- 1	はじめに	5
1	- 2	気液二相流の流動様式	6
1	- 3	過去の研究	8
1	- 4	本研究の目的	10
第二章	実験		11
2	- 1	実験の仕様	12
2	- 2	実験装置	13
2	- 3	実験手順	15
第三章	実験	結果	16
3	- 1	測定条件	17
3	- 2	実験結果	19
第四章	考察		28
4	- 1	リターンマップの意味	29
4	- 2	典型的な流動様式とリターンマップ	32

第五章 結論		37
5 - 1	結論	38
5 - 2	今後の課題	39
参考文献		40
謝辞		41

第一章 序論

- 1-1 はじめに
- 1-2 気液二相流の流動様式
- 1-3 過去の研究
- 1-4 本研究の目的

1 - 1 はじめに

気液二相流とは気体と液体という異なった種類の流体が同一流路管内を移動している状態のこ とである.この流れは,各種ボイラ,原子力発電プラントといった大規模プロセスから,圧縮式 空調機のような小規模な設備に至るまで,幅広く出現する流動である.

また,気液二相流は両相の種類や流路形状及び流量等に応じていろいろな流動様相をとることが知られている.流動様相の違いは二相流の流動特性や伝熱特性に大きな影響をおよぼすため, プラントの安全かつ効率的な運用のためには,気液二相流の流動様相の解析が必要となる.

<u>1 - 2 気液二相流の流動様式</u>

気液二相流の気相と液相の界面は,両者の持つ物理的性質(密度,粘性係数,表面張力など)の違い,あるいは流路管内の流動条件(温度,圧力,流量など)の違いに起因し,様々な幾何学的形状を 呈している.また,気液相分布は,時間及び空間的に変動する.そのため,気液二相流の様相は 非常に複雑であり,気液二相流の流動機構の定式化あるいはモデルによる陽な表現は,非常に困 難である。従って,気液二相流の流動状態をいくつかの標準形,即ち流動様式に分類し,それに より気液二相流問題の取り扱いを簡単化するとともに気液両相の持つ性質とそれらの時空間分布 を明らかにしようとする研究が多くなされている.以下に気液二相流の代表的な流動様式を示す.

<u>気泡流 (Bubble Flow)</u>

連続した液相中に小気泡が分散した流れ.気相の流量が液相に比べて小さい.

<u>スラグ流 (Slug Flow)</u>

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.

<u>チャ - ン流 (Churn Flow)</u>

気体スラグが長くなり,その界面が脈動している流れ.液体スラグ中に多数の気泡を含んでおり,気体スラグとの境界が不明瞭である.

環状流 (Annular Flow)

管壁に液膜が存在し,気相の管断面中心部には多数の液滴を同伴している流れ.



気泡流 スラグ流 チャーン流 環状流



Fig.1.2.1 垂直管の流動様式

1 - 3 従来の研究

気液二相流の流動様相に関する研究は数多くされているが,以下に具体的な研究例を示す.

1-3-1 流動様式線図

気液両相の流量,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。また,流動様式線図 は,実際に二相流が見られる管の設計において一助となっている.

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 (Frm)と気体の体積流量比を座 標軸とする流動様式線図を作製している。

Taitel-Dukler 線図

Taital 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 (jG, jL) を座標軸とする Fig.1.3.1 のような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。

<u>1-3-2 高速 X線 CT による計測</u>

不可視な管の流動様式の同定に関する研究のひとつに,CTスキャンで実際に管内の流動状態を 見ることで流動様式を判断する研究が行われている.

<u>三澤,高田,菊池の研究</u>

高速 X 線 CT が測定対象物を透過するときに起こる減衰を利用している 通常の C T 計測では, 移動・変形対象物の内部を可視化することは測定できないので,医療用 X 線 C T の約 250 倍の速度でスキャンできる電子ビーム制御型高速 X 線 C T を用いている.

1-3-3 差圧測定による流動様式

高速 X 線 CT を用いた流動様式の同定法は,非接触で計測できる等の利点はあるものの,設備 が高価であり,実際にプラントで利用することは難しい.そこで,比較的安価に計測が可能であ り,流動様式の特性も含まれていると言われている差圧変動に注目した研究が行われている.

松井らによる実験

松井ら(1981)は、内径 22 mm の垂直管内を流れる窒素 - 水二相流の差圧変動信号を測定し、 その統計的性質(PDF、PSD、相互相関関数、平均値及び分散)から気泡流、スラグ流、チャ - ン 流及び環状流を分類している。Fig.1.3.2 に確率密度関数の結果を示す。縦軸は差圧変動の確率密 度関数、横軸は差圧信号を差圧測定区間の液体水頭で規格化したものである。したがって、横軸 の値1は差圧測定区間がすべて液体の状態、横軸の値0は差圧測定区間がすべて気体の状態を表 している。



Fig.1.3.1 Taitel-Dukler 線図



Fig.1.3.2 確率密度関数(松井の研究)

<u>1-4 本研究の目的</u>

最終的な目的は,沸騰二相流の流動様式の同定である.だが,沸騰二相流は熱勾配や気泡の発 達が関与するので非常に複雑であり,流動様式の計測は大変困難である.

そこで,本研究においては,それらを考慮する必要のない,垂直管内での空気と水の二相による上昇流に注目する.そして差圧を調べることによって流動様相の特性,特に動的挙動,各流動様式の遷移状態について理解を深めたいと考えている.

第二章 実験

- 2-1 実験の仕様
- 2-2 実験装置
- 2-3 実験手順

2-1 実験の仕様

本研究における実験の仕様を示す.

- ・試験流体 :水道水・空気
- ・圧力 : 大気圧開放
- ・流路 : 管径 14mm、管長 2050mmの垂直上昇管
- ・観測 : 管長の方向 28mm区間と 140mm区間の差圧

昨年度の実験からの改良点は,液体が強制流動系になっている点と,テストパイプである垂直 上昇管の管径が小さくなった点(19mm 14mm)である.

<u>2-2 実験装置</u>

《空気系》

コンプレッサ(日立製 5.5P-9.5VA5/6)

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

浮き子式流量計(OMEGA製 SMA-2,SMG-1)

空気の流量にあわせて 0.500L/min, 0.5 ~ 5L/min, 5 ~ 50L/min, 50 ~ 500L/min のうち適した ものを用いる.

熱電対

流量計の出口付近に取り付けて空気温度を測定する.

圧力計(ブルドン管)

流量計から気液混合室に至る部分について,空気の圧力を測定する.

気液混合室

気液混合室内には,気孔径100µmの多孔管(22×14×L45)を設置し,多孔管内を流 れる水道水に空気を混入させることで気液の混合を行う.

ブレードホース

コンプレッサ,流量計,気液混合室を連結させる.

《水系》

濾し器(1 P C タイプ)

水道水に含まれる細かなゴミを除去する.

空気分離タンク

濾し器と流量計の間に設置し,気泡を取り除く.

浮き子式流量計(OMEGA 製)

0.3~3.0L/min の流量計を用いる.

《測定系》

テストパイプ(上り管)

管長 2050mmのアクリルパイプを使用.助走区間として管径の約 140 倍の距離を,差圧測 定区間上部から垂直間上端までは管径の約 20 倍の距離をとっている.

差圧計(Validyne 製 DP15-26-N-1-S-4-A)

フルスケール圧力±8.8cm の可変リアクタンス型差圧トランスデューサを使用.

增幅器 (Validyne 製 CD280-2)

デジタルレコーダ(TEAC製 DR-M3)

サンプリング周波数 200Hz で1分間測定,記録する.

熱電対

下部タンクに取り付け,気体と混合させる直前の水温を測定する.

《観測系》

高速ビデオカメラ(PHOTRON 製 FASTCAM-Net Max) 250fps で 8.7 秒間記録する.

光源(岩崎電気 PSR100V500W)

ビデオカメラによる撮影のため2つ使用した.





2-3 実験手順

- 1.水道水を装置に流し,テストパイプを水で満たす.
- 2.テストパイプから差圧計へと続く導入管の空気を抜いた後,テストパイプ内の水位を調節し ながら,差圧測定区間が空気のみの状態,制止液体状態での差圧をそれぞれ測定する.
- 3.水道水を流す.このとき,水の流速は,流量計で測定したい流量に設定する.
- 4.気液混合室へ空気を供給する.
- 5.空気流量を変化させ整定したところで,デジタルレコーダによる差圧変動の記録,目視によ る観察,ビデオカメラによる撮影を行う,空気流量は気泡流から環状流へと徐々に上げてい く.
- 6.測定終了後,差圧計への導入管に空気が混入していないことを確認する.

第三章 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,空気みかけ速度0.21~1.7×10² L/min,水のみかけ速度0.50~1.5L/min について、管路方向で28mm及び140mmの区間(テストパイプの直径をDとおくと,それぞれ 2D,10Dと言い換えられる)の差圧変動を,サンプリング周波数200Hzで約1分間測定した.

ここで、空気のみかけ速度は大気圧,20 に換算して表記している.

Fig.3.1.1 に測定条件と Taitel-Dukler 線図との比較を, Table3.1.1 に各測定条件の具体的な数値を示す.



Fig.3.1.1 測定条件と Taitel-Dukler 線図との比較

番号(No.)	空気みかけ速度(cm/s)	水みかけ速度(cm/s)	体積流量比
1	2.3	16	0.124
2	3.1	16	0.161
3	4.1	16	0.202
4	5.3	16	0.247
5	6.2	16	0.277
6	7.4	16	0.314
7	7.4	14	0.344
8	7.4	11	0.407
9	7.4	9.7	0.433
10	7.4	8.7	0.460
11	7.4	7.6	0.493
12	7.4	6.5	0.532
13	7.4	5.4	0.578
14	8.6	5.4	0.614
15	9.9	5.4	0.647
16	11	5.4	0.671
17	12	5.4	0.693
18	16	5.4	0.749
19	22	5.4	0.803
20	26	5.4	0.826
21	31	5.4	0.851
22	46	5.4	0.894
23	74	5.4	0.932
24	1.1×10^{2}	5.4	0.952
25	1.5×10 ²	5.4	0.964
26	1.7×10^{2}	5.4	0.970
27	2.9×10 ²	5.4	0.982
28	4.8×10^{2}	5.4	0.989
29	6.3×10 ²	5.4	0.992
30	9.5×10 ²	5.4	0.994
31	1.3×10 ³	5.4	0.996
32	1.9×10^{3}	5.4	0.997

<u>3-2</u> 実験結果

実験により得られた差圧変動波形について、極値に注目する.

fig3.2.1 から fig3.2.8 は,3-1 で示した測定条件について,距離 2D の差圧変動の測定結果を示す.

左側が差圧変動の波形,右側が極値のリターンマップの図である.また,図の左に記した数は, Table3.1.1の番号に対応している.

差圧変動波形

縦軸は差圧,横軸は時間を表している.

ここで,縦軸の値は,気液ともに流量0に設定した場合において,差圧測定区間が水で満たされているときの差圧が1,空気で満たされているときの差圧が0となるように正規化している.

また,測定時間は1分間だが,グラフには最初の5秒間の測定結果だけ示してある.

極値のリターンマップ

リターンマップとは, i = 1,2,3,...として, 横軸に i 番目の値, 縦軸に i+1 番目の値を記したもの である.

差圧変動波形の極値のみに注目し,そのリターンマップを描いている.差圧の値には,上で示した方法で正規化した値を用いている.

リターンマップには測定時間(60秒)で得られたデータをすべて示している.



Fig.3.2.1 実験結果とリターンマップ(No.1~No.4)



Fig.3.2.2 実験結果とリターンマップ(No.8~No.5)



Fig.3.2.3 実験結果とリターンマップ(No.9~No.12)



Fig.3.2.4 実験結果とリターンマップ(No.13~No.16)



Fig.3.2.5 実験結果とリターンマップ(No.17~No.20)



Fig.3.2.6 実験結果とリターンマップ(No.21~No.24)



Fig.3.2.7 実験結果とリターンマップ(No.25~No.28)



Fig.3.2.8 実験結果とリターンマップ(No.29~No.32)

第四章 考察

- 4-1 リターンマップの意味
- 4-2 典型的な流動様式とリターンマップ

4 - 1 リターンマップの意味

現象と差圧変動波形との対応は,福田の研究に依るものとして,この章では,差圧変動波形と リターンマップの関係について考察を行う.

以下,説明の便宜上,リターンマップの横軸を X 軸,縦軸を Y 軸と呼称し,グラフ上の点を(X,Y) のように記す.

差圧変動波形の極値についてリターンマップを描いたとき,グラフがどの様な意味を持っているかを4つの領域に分類して解説する.また,例として,fig4.1.1 に No.24 の実験結果(fig3.2.6 の No.24)のリターンマップについて,現象との対応を示しておく.

- 1. 右上の部分(X,Yともに大きな値の領域.以下,領域Lとおく)の意味 差圧測定区間を液体スラグが通過している状態を表している.
- 2. 右下の部分(Xの値が大きく,Yの値が小さい領域.以下,領域LGとおく)の意味 液体スラグから気体スラグへの変化が現れている.
- 3. 左下の部分(X,Yともに小さな領域.以下,領域Gとおく)の意味 気体スラグが差圧測定区間を通過中であることを示している.
- 4. 左上の部分(Xの値が小さく,Yの値が大きい領域.領域GLとおく)の点の意味 差圧測定区間の流動状態が,気体スラグから液体スラグへと変化している状態が現れている.

以下,上で示した4つの領域L,LG,G,GL,の境界として,直線X=0.5及び直線Y=0.5と 仮定する.



Fig4.1.1 リターンマップと現象との対応

また,fig4.1.1 でも明らかなように,測定結果には,差圧値を0から1の間で正規化しているにも 関わらず,0以下,及び1以上の値が存在する.次にその理由について考察する.

正規化の基準となる差圧値を計測した場合,数値として現れるのは測定区間の流体の密度差に よる影響,つまり静圧差であり,静圧は流動様相を理解するのに重要な役割をもっていると考え られている.

だが,実際の気液二相流においては,静圧以外に差圧に影響を与えるものがある.ベルヌーイの式と連続の式から導かれる圧力回復効果や管摩擦損失の影響等がそれである.

次に1より大きな差圧値が得られる場合と0より小さな値が得られる場合について,差圧の値 に影響を与えていると考えられる事項を記す.

・液柱のみの時よりも大きな(1以上の)値が現れる理由

気体スラグ通過直後に主に見られるもの

水についてのエネルギーの保存(連続の式,ベルヌーイの法則)から,気体スラグ通過直後に は圧力が大きくなることが導かれるので,その効果が現れていると考えられる.

気泡流などについて,少しだけ液柱の値を上回るもの 雑音によるものと思われる

・気柱のみの時よりも小さな(0以下の)値が現れる理由 水の逆流による摩擦損失の影響、または、ごく小さな変動の場合は雑音の影響とも考えられる.

4-2 典型的な流動様式とリターンマップ

この節では,各流動様式があらわすリターンマップについて示す.ここでは,先に示した,L, LG,GL,Gの4つの領域(fig4.2.8を参照)に分類して考察する.

気泡流 ex.No.2(fig4.2.1)

領域 L (fig4.2.1 では(0.9,0.9)の付近) にプロットが集中している.

<u>気泡流~スラグ流</u> ex.No.6(fig4.2.2)

気泡流の場合に比べて変動の幅が大きくなっているが,プロットは領域Lの範囲内にある.また,プロットが少し分散し始め,点が集中している部分は直線y=xに沿った方向に幅広くなっている.

スラグ流 ex.No.15(fig4.2.3)

プロットが集中している部分が y = xの直線上の 2 箇所に分かれている.また,プロットが多い部分は,一方は領域 L,他方は領域 G に存在する.

また, LG 及び GL の領域にもプロットがみられるようになってくる.

<u>スラグ流~チャーン流</u> ex.No22(fug4.2.4)

直線 y = x上で L, G の領域に点が集中していることに加えて, (0,0)付近を通り Y 軸に平行な 直線(x = 0付近)と,傾きが $-\frac{1}{4}$ の直線に沿った直線上($y = -\frac{1}{4}x$ 付近)にプロットが集まっている.

<u>チャーン流</u> ex.No26(fig4.2.5)

y = x, $y = -\frac{1}{4}x$, x = 0の 3本の直線上にほとんどの点が揃っている.

また,領域Lでy = x上にある点の数は減少している.

<u>チャーン流~環状流</u> ex.No29(fig4.2.6)

領域 G に点が分散して存在していて, チャーン流にみられたような直線が分かり難くなっている.

<u>環状流</u> ex.No32(fig4.2.7)

ほぼすべての点が領域Gに集まっている.チャーン流で見られた直線状の点の分布も消えている.













次に, Fig4.2.4, Fig4.2.5, Fig4.2.6 において、プロットの分布を近似した式($y = -\frac{1}{4}x$, x = 0) を示したが,これらの直線が意味するものについて考察を行う.

x = 0

気体スラグから液体スラグに遷移する状態を表していると考えられる.

縦軸の値が大きく変化している一因として,気体スラグ下端の形状により,圧力回復効 果の影響に差があると考えられる.縦軸の値が大きいほど圧力回復の効果が大きいと予想 される.

$y = -\frac{1}{4}x$

この直線上プロットされるのは,液体スラグから気体スラグへの遷移状態であると考えられる.

だが,気体スラグの通過時には差圧測定区間はほぼ気体で満たされ,静圧は0と予想され,直線x=0で近似できるように思われるが,実際には傾きが負の直線のほうがより良い近似を示している.

この原因に関して物理的な解釈は困難であるが, Fig4.2.9 に示した結果から,原因について定性的な予想を試みる.

Fig4.2.9 のうち, A 内の点から B 内の点へ向かう直線(赤い矢印で示した直線)同士は ほぼ平行である(因みに,この傾向は No22~No25 の範囲, Taitel-Dukler 線図上では Slug-Churnの遷移領域にあたる部分でみられる.No26以降は平行にならないのは,水の逆 流による摩擦損失等が現れるからと考えている).つまり, A で縦軸の値が大きいと次の領 域 B に見られる極値の値はより小さくなっている.これは上記の直線x=0についての考 察で記した圧力回復効果が関係していると考えられる.



Fig4.2.9 No25 のリターンマップ

第五章 結論

- 5-1 結論
- 5-2 今後の課題

<u>5-1 結論</u>

. 気液二相流の動的挙動を把握する手段として, リターンマップは有用である.

. 差圧変動の極値のみを抽出しても各流動様式の特性が現れることが分かった.

<u>5-2 今後の課題</u>

.リターンマップを書くにあたり差圧変動波形の極値を用いたために,各極値の時間間隔に 関する情報が失われてしまい,時系列のみの考察しかできない.流動様相の動的挙動の特性を調 べる場合,時間に関する情報は重要である.今後は時間に関する情報も抽出できる解析方法が必 要である.

. 本研究では,実験により得られた差圧変動波形とリターンマップの対応しか考察をしていない. 流動様相の理解を深めるには,物理的意味についても考察する必要があると考えられる.

参考文献

[1] 植田辰洋,気液二相流 流れと熱伝達 (第1章),養賢堂(1981),7-20

[2]Taital,Y., Bornea,D. and Dukler,A.E., "Modelling Flow Pattern Transitions for Steady Upward Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes," AIChE J, 26-3, pp.345-354, 1980

[3]文字秀明,松井剛一,気液二相流の主流動様式と気相変動の統計パラメータ空間における特性, 日本機械学会論文集(B編),61巻586号(1995),2045-2052

[4]福田幸二,気液二相流の流動様式同定法,東京大学工学部卒業論文(2000)

謝辞

本論分の作成にあたり,ご指導下さった庄司正弘教授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は研究会等で貴重な意見をいただき感謝 しております.そして横谷助手,井上助手,渡辺技官には研究内容だけでなく,研究室での生活 においてもお世話になりました.

山口さんには,お忙しい中で画像処理のプログラムを提供していただき,流動様相の理解を深 めるのにたいへん役立ちました.

留学生の柴さん,姜さん、連さん、張さん,汪さん,徐さんが研究に熱心に取り組む姿勢には 学ぶべきものがあり,研究意欲を与えてくださいました.

横田さん,野上さん,坂田さんには,ソフトやパソコンの取り扱いに関していろいろと教えて いただき感謝しています.

短期間ではありましたが,安井さんには,多くの助言を頂き,様々な面において無知な自分を 導いてくださいました.

4年生の小川くん,小楠くん,竹村くんには,時には励ましてくれたり、いろいろ教えてくれたりと存在を頼もしく感じました。

最後に,共同実験を行った伊藤浩二さんにはいろいろとご迷惑をおかけしました.実験装置の 設計,発注や参考文献の提供など,たいへんお世話になりました.今後博士過程においてさらに 研究が発展するよう願っております.

以上

通し番号1~42完

卒業論文

<u>平成 13 年 2 月 9 日提出</u>

90253 宮崎大輔