# <u>卒業論文</u>

# 気液二相流の流動様式と非線形特性

# <u>通し番号 1 - 5 7 完</u>

#### 平成15年2月7日提出

<u>指導教官 庄司 正弘 教授</u> <u>丸山 茂夫 助教授</u>

### 学生証番号 10198 奈良本 善紀

# <u>目次</u>

第一章 序詞	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		9
第二章 実際	験	1	0
2 - 1	実験の仕様	1	1
2 - 2	実験装置	1	2
2 - 3	実験手順	1	4
第三章 実	験結果	1	5
3 - 1	測定条件	1	6
3 - 2	実験結果	1	9
第四章解	析と考察	3	6
4 - 1	高周波成分フィルターカット	3	7
4 - 2	相関次元の解析	4	2
4 - 3	解析のまとめと考察	4	3

第五章 結論	4 5
5 - 1 結論	4 6
5 - 2 今後の課題	4 7
付録 A	48
参考文献	5 5
謝辞	56

### 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2種類の流体が同一流路管内に混在・移動 している状態のことである.この流れは,発電所等の各種ボイラ・冷却系や石油パイプラ インのような液体燃料輸送,そして原子力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,あるいは化学実験に至るまで,幅広く出現する流動である.

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・圧力損失に大きな影響 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式の 解析が必要となる.

#### <u>1 - 2 気液二相流の流動様式</u>

気液二相流は気体・液体両相の種類や流路形状及び流量に応じて様々な流動様式をとる ことが知られている.ただ流動様式は,気液両者のもつ物理的性質(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極めて複雑であり,気液二相流の流動機構の定式化あるいは モデルによるような表現は,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,つまり流動様式に分類し,それにより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. 主に気相の流量が液相に比べて小さい時に発生する.

#### <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.

#### <u> 環状流(Annular Flow)</u>

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.









< Churn Flow >

< Annular Flow >

小□□[ 大 > < 気体流量 >

Fig.1.2.1 垂直菅の流動様式

#### <u>1-3 過去の研究</u>

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.

1961 年, Griffith と Wallis 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した.

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, 気液の見かけ速度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,ボイド率によって流動様式を整理する方法が示されている.

ただ以下のように,実験的判別のためその流動様式の変化は必ずしも一致しない.



Fig.1.3.1.<u>モデル</u>: Taitel-Dukler 線図, Mishima-Ishii 線図 <u>実験</u>: Griffith-Wallis 線図, Hewitt-Roberts 線図

#### 1 - 4 本研究の目的

本研究の理想とする目標は,本テーマの通り,気液二相流全体に通じる流動様式の遷移 特性と非線形性をつかむことであり,その流動様式判別法の確立であるべきである.だが, 気液二相流では,過去の研究でも述べたように,様々な条件によって極めて複雑な変化を 見せるので,本研究では,沸騰などを考えない簡易化した垂直管内での上昇流のみについ て扱う.

およそ2メートルの垂直管を用い,流動様式を観察,その差圧変動を測定する. また,一見ランダムに見える差圧変動データを周波数フィルターカット・解析することに よって,各流動様式の差圧変動パターンの特徴・相関次元を導き出し,非線形特性の理解 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

### <u>2 - 1 実験の仕様</u>

実験仕様は以下通りである. 作動流体:水道水,室内空気 圧力:上部大気圧開放 垂直菅径:14mm 垂直管長:2050mm 差圧計:垂直管上端より210mm と238mm 部分に設置



Fig.2.1.1 実験装置写真

### 2-2 実験装置

《空気系》

コンプレッサ(日立製 5.5P-9.5VA5/6)(Fig.2.2.1.)

最高圧力 0.93 M p a , 吐出空気量 6301/min , 空気タンク容量 1701 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 0.500 l/min, 0.5~5 l/min, 5~50 l/min, 50~500 l/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.



Fig.2.2.2 エアーコンプレッサ写真

《水系》

濾し器(1PC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)
 0.3~3.0 l/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.
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.
増幅器(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 500H z 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)

高速度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.濾し器と空気分離タンクを通した水道水を,垂直管に送り水の単相流をつくる.

2.差圧計に続く導入管の空気抜きの確認・実施.

3.水流量計で測定したい水流量に設定する.

4. 気液混合室へ空気を供給し,コンプレッサ内と同圧力にする.

5. 垂直管に空気を送り,空気流量計で流量を設定する. 圧力計・流量計共に変化なくな り定常状態に整定したところで,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,高速度ビデオカメラによる撮影を行う.空気流量・水流量は気泡流から環状流へ変化 するように設定を変えていく.

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

### <u>3-1 測定条件</u>

本実験では,上部を大気圧開放しているが,空気についてはエアーコンプレッサで大気 圧以上の圧力を与えられた状態で混合させているので,垂直管内での膨張を考慮し,圧力・ 温度より計算して求めた補正空気流量を用いる.水流量については,その体積変化が極め て微小であるという立場より,流量計の値をそのまま用いることとする.

本実験は,空気流量 0.075~217 l/min,水流量 0.30~1.6 l/min について,差圧変動を, サンプリング周波数 500Hz で約 30 秒間測定した.

以下 Table.3.1.1 Table.3.1.2 に各測定条件の具体的数値を, Fig.3.1.1 に三島・石井モデ ル流動様式線図と本実験測定条件の比較図を示す.

Data number	補正空気流量 (I/min)	水流量 (I/min)	空気流量体積比
1	0.075	1.6	0.045
2	0.131	1.4	0.086
3	0.178	1.4	0.113
4	0.225	1.4	0.138
5	0.243	1.4	0.148
6	0.268	1.4	0.160
7	0.253	1.3	0.163
8	0.253	1.2	0.174
9	0.258	1.1	0.190
10	0.262	1.0	0.208
11	0.262	0.9	0.225
12	0.262	0.8	0.247
13	0.262	0.7	0.272
14	0.262	0.6	0.304
15	0.262	0.5	0.344
16	0.262	0.4	0.396
17	0.262	0.3	0.466
18	0.318	0.3	0.515
19	0.445	0.3	0.597
20	0.522	0.3	0.635

Table.3.1.1 空気・水測定流量条件一覧

Data number	補正空気流量 (I/min)	水流量 (I/min)	空気流量体積比
21	0.633	0.3	0.679
22	0.778	0.3	0.722
23	0.917	0.3	0.753
24	1.122	0.3	0.789
25	3.180	0.3	0.914
26	1.871	0.3	0.862
27	2.806	0.3	0.903
28	2.806	0.3	0.903
29	3.736	0.3	0.926
30	5.597	0.3	0.949
31	9.314	0.3	0.969
32	17.675	0.5	0.972
33	34.462	0.5	0.986
34	46.927	0.5	0.989
35	56.051	0.5	0.991
36	56.051	0.5	0.991
37	69.184	0.5	0.993
38	89.687	0.5	0.994
39	105.668	0.5	0.995
40	127.254	0.5	0.996
41	145.063	0.5	0.997
42	162.366	0.5	0.997
43	223.015	0.5	0.998
44	216.518	0.5	0.998

Table.3.1.2 空気・水測定流量条件一覧(続き)



### 3-2 実験結果

まず,目視によって得られた各測定条件の流動様式を示す. 三島・石井モデルと比較すると Fig 3.2.1 のようになる.



- 赤点:Slug Flow
- 黄点: Churn Flow
- 緑点: Churn-Annular Flow
- 黒点:Annular Flow

Fig.3.2.1 目視による測定結果と流動様式線図の比較

実験より得られた差圧変動波形とその周波数スペクトルの結果を以下にまとめる.

左側に差圧変動波形の時系列グラフを,右側に周波数スペクトルグラフを,測定条件ご とに記載する.なお,図の左側に示した番号は Table.3.1.1の測定条件の data number に 対応している.

#### 差圧変動波形

縦軸が差圧計値(V),横軸が時間(sec)を示している. 測定時間は 30sec であるが,グラフには最初の 10sec の測定結果だけ示してある.

周波数スペクトル分布

横軸が周波数(Hz),縦軸がその周波数のマグニチュード(強度)を示している.

ただし,縦軸のマグニチュードの最大値については,データごとにオーダーがかなり異なるため,適宜変更をして示してある(以下).

data1 ~ 3 : MAX 1

data4 ~ 12 : MAX 10

- data13 ~ 21 : MAX 100
- data22 ~ 39 : MAX 1000

data40 ~ 44 : MAX 100

周波数スペクトルでは,30sec分のデータをフーリエ変換によって表している.



Fig.3.2.2 実験結果と周波数スペクトル(No.1~3)



Fig.3.2.3 実験結果と周波数スペクトル(No.4~6)



Fig.3.2.4 実験結果と周波数スペクトル(No.7~9)



Fig.3.2.5 実験結果と周波数スペクトル(No.10~12)



Fig.3.2.6 実験結果と周波数スペクトル(No.13~15)



Fig.3.2.7 実験結果と周波数スペクトル(No.16~18)



Fig.3.2.8 実験結果と周波数スペクトル(No.19~21)



Fig.3.2.9 実験結果と周波数スペクトル(No.22~24)



Fig.3.2.10 実験結果と周波数スペクトル(No.25~27)



Fig.3.2.11 実験結果と周波数スペクトル(No.28~30)





Fig.3.2.12 実験結果と周波数スペクトル(No.31~33)



Fig.3.2.13 実験結果と周波数スペクトル(No.34~36)



Fig.3.2.14 実験結果と周波数スペクトル(No.37~39)



Fig.3.2.15 実験結果と周波数スペクトル(No.40~42)



Fig.3.2.16 実験結果と周波数スペクトル(No.43・44)

### 第四章 解析と考察

- 4-1 高周波成分フィルターカット
- 4-2 相関次元の解析
- 4 3 解析のまとめと考察

#### <u>4 - 1 高周波成分フィルターカット</u>

第三章での実験結果において,各測定条件の周波数スペクトルグラフを見てみると,大まかであるが,強度の集中している周波数帯が主に低周波数帯であることを特定できる.

これを踏まえて,高周波成分をフィルターカットし,流動様式ごとの特徴を解析してい こうと考える.解析手段として,カオス解析用ソフト:Mosdorf ソフトを用いる.

まず,カオスとその解析について,基本的内容を確認する.

#### <u>《カオス解析》</u>

カオスとは,時間と共に変動する現象を時系列信号として観測した時,つまり一見複雑 でランダム的な振る舞いを示す対象のことで,従来それは「実験装置の不備やランダムに 現れるノイズ」「対象が解析しきれないほどの,極めて複雑な大自由度系である」といった 解釈で扱われてきた.しかし,カオス解析とは,そういった複雑な現象に対して,その対 象に内在する非線形性を見出す立場に立った時系列解析のことである.

現象はある微小な外乱を受けると、その誤差が時間とともに指数関数的に増大し、グロ ーバルスケールにまで拡大してしまう軌道不安定性という性質を持っている.一方でカオ スは、微小な外乱によって軌道不安定性が生じても、状態空間において定常的振る舞いを 表すアトラクタの幾何学的構造は変化しないという安定性を有する.アトラクタの幾何学 的構造は、カオスであれば一般に「フラクタル次元」によって定量化される.

カオス解析の具体的な手法として,本研究では,再構成アトラクタ構造と相関次元を考 える.

#### 《再構成アトラクタ構造》

一変数時系列データから「埋め込み」を与え再構成したアトラクタのことで,遅れ座標時間系への変換を行っている.遅れ時間とは,一変数時系列データから,非線形性を得るために与える,注目対象点のズレ時間のことで,この遅れ時間が適切なものでないと,意味のあるアトラクタ構造や正しい相関時間には近づかない.この再構成アトラクタ構造を調査することで,そのデータの非線形性をおおまかにつかむことができる.意味を持たないランダムデータのアトラクタはデータ点が一様に広がった形になる.

#### <u>《埋め込み次元と相関次元》</u>

埋め込み次元とは,その空間を支配する絶対的最大次元数のことで,その変化に対して 対象のデータがどういった次元をとるかが「相関次元」にあたる.埋め込み次元を上げて いったときに,相関次元数がある一定の次元数で収束した時,その次元数が,その現象に 内在する自身の次元数と見ることができる.

\*上記のような,再構成アトラクタ・相関次元を求めるためにカオス解析を用いた.

高周波成分のフィルターカットの周波数を決定するために以下のような手順を行った. ここでは, data number 23 のスラグ流データを例にとって示す.

手順 カオス解析用ソフト(: Mosdorf ソフト)を用いて,フィルターカット前の差圧デ ータのアトラクタ・相関次元の値を求める.





Fig.4.1.1 再構成アトラクタ

Fig.4.1.2 埋め込み次元と相関次元 (縦軸:相関次元数,横軸:埋め込み次元)

- 解釈 -

- アトラクタ:かなり一様にデータ点がばらついてしまっているため,その構造の特徴は確 認できない.
- 相関次元 : 埋め込み次元とともに相関次元も単純増加し続けてしまっているので,かな リランダムに近い変動と判別.完全なランダムデータであると,埋め込み次 元数と相関次元数は y=x の正比例のグラフとなる.

フィルターカットの周波数を様々に変えてそれぞれのアトラクタと相関次元を測定.<t



Fig.4.1.3 再構成アトラクタ

Fig.4.1.4 埋め込み次元と相関次元 (縦軸:相関次元数,横軸:埋め込み次元)

解釈

アトラクタ:多少スリムになりいくつかの方向に集まっている構造が見えてくる. 相関次元数:およそ3弱で収束していることがわかる.

最大値付近の平均値よりデータの相関次元数を決定.

\*ただし,本実験では,カオス解析にかけるデータ点数が有限で,9000ポイント弱と カオス解析を行う上では比較的少ないため,相関次元は最大値を過ぎると次元を落として いってしまう.理想的なデータ量(ポイント数無限)であるならば,相関次元の最大値は 埋め込み次元をあげていっても一定になると考えられる.



Fig.4.1.5 再構成アトラクタ

Fig.4.1.6 埋め込み次元と相関次元 (縦軸:相関次元数,横軸:埋め込み次元)

解釈

アトラクタ:かなりまとまりがはっきりしていることが確認できる.

相関次元数:およそ2前後で収束していることがわかる.

最大値付近の平均値より相関次元数を決定.

のようにフィルターカット周波数を様々に変えて,それぞれの相関次元収束値を求める.

で求めた相関次元数の変化とアトラクタ構造の明瞭さを参考に,ノイズがカットされ たと考えられる(=相関次元が大きく下がりきる)カット周波数を流動様式ごとに決定 する.相関次元が大きく下がりきるということは,高周波ノイズや垂直管の固有振動に よる周波数をカットできたという事として捉える.

~ の手順を踏み,アトラクタ構造と相関次元数の変化,周波数スペクトルを元に決定した以下のような高周波フィルターカットを差圧測定データにかける.

Bubble Flow : 15Hz 以上カット

Slug Flow : 5Hz 以上カット

Churn Flow : 5Hz 以上カット

Annular Flow : 5Hz 以上カット

(ただし Annular Flow については,周波数スペクトルの分布も一様であり,周波数カット 数が限定できなかったため,最も形の近い Churn Flow の周波数 5Hz カットと設定した.)



Fig.4.1.7 < 高周波成分フィルターカットの効果と比較 >



- 赤線:data number16 (Slug-Bubble Flow)
- 青線: data number30 (Churn Flow)
- 緑線:data number42 (Annular Flow)

### <u>4-2 相関次元の解析</u>

高周波成分フィルターカット完了した, data1~44のそれぞれの相関次元数を考える. 相関次元数の収束次元数の変化を,それぞれの空気流量体積比ごとにプロットしたグラフが Fig.4.2.1のようになる.



<gas流量/gas流量 + water流量 >

Fig.4.2.1 相関次元数の変化

Fig.4.2.1 より Bubble Flow から Churn flow に至るまで次元数は下がっていっている. また流動様式ごとにある程度,一定の次元数レベルでまとまっていることが分かり,特 に Bubble Flow から Slug Flow に遷移するときには,その次元数レベルの変化が顕著に現 れている.

また,高周波フィルターカット後の各データについての再構成アトラクタ構造については,付録 A - 1に記載する.

#### 4 - 3 解析のまとめと考察

#### 4-3-1《高周波フィルターカット》

流動様式の本質をあらわす周波数帯の差圧変動を残すため高周波成分フィルターカット を行ったが,その厳密な意義と狙いは二つある.

相関次元を求める過程では,自由度が無限大と考えられるノイズを多く含んでいると, 実際の現象の相関次元にノイズの次元が足されてずっと高い値をとってしまう.そのため,流動様式ごとの相関次元の微妙な変化も読み取ることができなくなってしまったため,必要ないと考えられる周波数フィルターカットが必要不可欠だと考えた.

低周波成分を残そうと考えたのは,周波数スペクトルに現れたように強度の高い周波数 が低い周波数帯に集まっているからである.しかし,気液二相流の特性の本質を示す周 波数はこの低周波だけとは限らないだろう.この低周波成分が表すものとは,垂直管内 を上る気泡混合流の中での,差圧計を通った気泡部分のまとまりによる周波数変動成分 だと考える.

4 - 3 - 2 《相関次元変化》

・ 気泡流(相関次元数:およそ4弱)

気泡流では,差圧測定部分を大小様々なスケールの気泡流が通っていく.ただし,大き さが様々であるといっても,水・空気流量は一定状態にしてあるので,ある程度,その気 泡の出方にも,関連性があり,完全なランダムではない.

その大きさの違う気泡がそれぞれの周波数特性を持つため,比較的高い相関次元数を気 泡流は取るのだと考えられる.

・ スラグ流 (チャーン流)(相関次元数:およそ2)

スラグ流やチャーン流についても,気泡流と同様のことがまず言える.ただ,スラグ流 の場合の気泡部分(気泡スラグ)は,管径にほぼ近い大きさを持つ空気のかたまりなので, 長さに多少ばらつきがでるとしても,気泡流の一つ一つの気泡の大きさほどばらつきは大 きくならない.また,管内には気泡スラグと液体スラグのみが交互に流れる構造なので, 流量が一定であるならば,その2つのスラグの長さは流量というパラメータにかなり支配 さえていると考えることができる.このため,気泡流に比べて,大きく相関次元数を落と す結果となる. ・ 環状流

環状流については,気泡流・スラグ流の議論とは,まったく違う.まず,気泡部分のま とまりによる周波数変動成分としてフィルターで残した低周波成分であったが,環状流で は,垂直管内部を常に空気が上昇している状態なので,空気のまとまりとしての移動によ る周波数変動とは異なる.垂直管内壁には水膜ができ,その水膜の変動が主なものとなる と考える.そのため,現象としては低周波数にスペクトルが集まっていた気泡・スラグ・ チャーン流とは違い,幅広い周波数領域にスペクトル強度が集まっている.

フィルターカットして残してきた低周波成分 = 気体のまとまりによる周波数変動成分だ けに注目するという立場において環状流も考えるならば,環状流の変動は,気体部分・液 体部分が交互に流れて変化する構造と違い,細かな振動を除けば,常に気体が管中心部分 を上昇し続ける,つまり定常状態に近いものであるので,その相関次元は1に近づくもの だと予想できる.ただし,本研究では,その気体部分の周波数変動のみを残すための周波 数フィルターカットがうまくできなかったといえる.

## 第五章 結論

- 5 1 結論
- 5-2 今後の課題

### 5 - 1 結論

,気液二相流の各流動様式には,各々に固有の相関次元数があるという特徴が分かった.

, 各流動様式の本質を示す周波数を取り出すには,フィルターカットは有用である. 特に, Bubble から Churn までの流れには低周波差圧変動成分が重要である.

### 5-2 今後の課題

,差圧変動の高周波成分フィルターカットによるノイズカットは,気泡流・スラグ流・ チャーン流では比較的成功し流動様式の特徴をもった変動だけを取り出せているが,環 状流については,低周波の一部に限らず広い範囲にスペクトルが分布しているため,フ ィルターカットによるノイズのみの削除には,未だ工夫の余地がある.

,本研究では,各流動様式とその固有の相関次元の対応についてだけしか解析・考察していない.流動様式の本質に近づくには,各相関次元の意味を裏づけする,さらに詳しい物理的考察が必要である.

# 付録 A





Fig.A.1.1 再構成アトラクタ (data numeber1~8)



Fig.A.1.2 再構成アトラクタ (data numeber9~16)





data number 18

data number 17





data number 19

data number 20



data number 21



data number 22



data number 24

Fig.A.1.3 再構成アトラクタ (data numeber17~24)



Fig.A.1.4 再構成アトラクタ (data numeber25~32)



Fig.A.1.5 再構成アトラクタ (data numeber33~40)



Fig.A.1.6 再構成アトラクタ (data numeber41~44)

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]宮崎大輔,気液二相流の流動様相に関する研究,東京大学工学部卒業論文(2001)

#### <u>謝辞</u>

本論文作成にあたり,研究内容から日常生活の様々な事まで,親身に幅広くご指導して くださった庄司正弘教授に心から感謝の意を表します.

また,丸山茂夫助教授をはじめとして,丸山研究室の皆さんには,研究会を合同で行い 様々な視点から御意見をいただきとても感謝しています.同じ部屋の中で共に研究に打ち 込んだ時間は,何よりも貴重なものでした.

井上助手には,難しい内容にぶつかってもいつも分かりやすい丁寧な説明をいただき, 非常に心強いかぎりでした.渡辺技官は,僕ら4年生の研究環境にも常に気を配ってくだ さり感謝しています.

博士課程の先輩方は本当に研究熱心で,その研究に対する熱意と幅広い知識に心から尊 敬しています.

修士課程の先輩方には,研究内容についてはもちろん,様々なソフトの活用の仕方や日 常の出来事など多岐についてまで,御指導していただき,感謝しています.特に,宮崎さ んには実験装置の使い方の指導や,研究についての悩みに相談にのっていただいたり,大 変ありがとうございました.

四年生の皆さんは,僕のくだらない話や悩みにもまじめに付き合ってくれて,その存在 はいつも心の支えでした.

最後に,伊藤さんには,僕の研究生活についての隅々まで面倒を見ていただき,感謝の 気持ちは言葉では言い表せません.研究に対して何も分からずからっぽであった僕に,研 究への姿勢,また,研究の楽しさ・喜びを,暖かいご指導と一緒に話した貴重な時間の中 で,僕に教えてくれました.これからも伊藤さんがご自身の道において,より一層のご活 躍ができることを,心から願っています.

庄司・丸山研究室という素晴らしい環境で学んだ経験を,これから先の勉学の中でも生かしていきたいと思います.ありがとうございました.

# <u>通し番号1-57完</u>

# <u>卒業論文</u>

# <u> 平成15年2月7日提出</u>

# <u>10198 奈良本 善紀</u>