<u>修士論文</u>

発泡挙動の非線形特性に関する研究

<u>通し番号 1-58 完</u>

<u>平成 12 年 2 月 10 日提出</u>

指導教官 庄司正弘教授

86172 阿部憲幸

<u>目次</u>

1. 序論

- 1.1. はじめに
- 1.2. カオスについて
- 1.2.1. 力学系の埋め込み 1.2.2. カオスへの周期倍分岐ルート 1.2.3. 1次元写像への還元
- 1.3. 従来の研究
 - 1.3.1. 庄司,前田,久島らの研究
 - 1.3.2. Tritton らの研究
- 1.4. 研究の目的

2. 実験

- 2.1. 実験装置
- 2.2. 実験の手順
- 3. 実験結果・考察

3.1. 実験1

- 3.1.1. 出口径が 2.0mm のオリフィスの場合
- 3.1.2. 出口径が 0.5mm のオリフィスの場合
- 3.1.3. 実験1のまとめ

3.2. 実験 2

3.2.1. 出口径が 2.0mm のオリフィスの場合 **3.2.2.** 出口径が 0.5mm のオリフィスの場合

4. 結論

4.1. 本研究の結論

4.2. 今後の課題

謝辞

参考文献

第1章

序論

1.1 はじめに

1.2 カオスについて

1.3 従来の研究

1.4 本研究の目的

1. 序論

1.1. はじめに

工業上重要な現象である沸騰現象は長年にわたり研究の対象とされ,特に沸騰 熱伝達については多くの成果を上げている.しかし気,液,固体の三相が影響を 及ぼしあう沸騰の動力学に関してはその複雑さのためまだ解明されていない部分 が多い.そうした中,最近では沸騰の複雑性をカオスの理論を用いて捉えられな いかという研究が一部で行われ始めている.

沸騰を構成する要素の一つである蒸気泡の挙動を最も単純化したものと考えられる水 - 空気系での気泡の発泡は,典型的なカオス運動を示す落下液滴系との相似性から分岐現象などのカオス特性の存在を一部で指摘されている[1][2].しかし その存在を確証させるようなデータはまだ得られていない.

1.2. カオスについて

カオスに関する研究はコンピュータの普及に伴い 1970 年代から急速に広まっ てきた.最近では自然界において観測・測定される不規則時系列信号が「少数自 由度の非線形力学系が持つカオスダイナミクスに起因するのではないか」という 観点に立って時系列解析(カオス時系列解析と呼ぶ)を行う研究か増えてきてい る.この節ではこのカオス時系列解析とカオスを含む非線形力学系に関する重要 な事柄を特に本研究に関係の深いものに限って説明する.

1.2.1. 力学系の埋め込み

非線形力学系においては系の状態を状態空間(または相空間)のなかの1点で 表し,その点の軌道(アトラクタ)の集合から系の定性的,定量的な解釈を行う. その系の状態空間図を得るためには理想的にはその系の力学変数をすべて測定し なければならない.しかし実際の実験においてすべての変数を同時に計測するこ とはほぼ不可能に等しい.そこで用いられる方法が力学系の埋め込みである.こ れは1次元の時系列データにある変換を施して n 次元の状態空間図を得ようとい うもので,このときに施される変換は埋め込み,すなわち1対1写像でかつはめ 込み(微分も1対1写像)でなければならない.

このような条件を満たす変換で最もよく用いられるのが時間遅れ座標系への変換である.具体的には1次元の時系列x(t)とある時間ステップ(遅れ時間という)を用いて次のようなn次元ベクトルX(t)を作る.

X(t) = (x(t), x(t +), x(t + 2), ..., x(t + (n-1)))

Takens はこのときの再構成状態空間の次元 n と未知の力学系の次元 m が n≥2m+1 となっていればこの変換が埋め込みとなることを証明した[3].しかしこの条件は十分条件であり,この条件を満たさなくとも埋め込みとなる場合があることに注意しなければならない.

カオス力学系を持つ系においては,支配的なパラメータを変えていくと観測される時系列が周期的で単純なものからより複雑な波形へと遷移していく.パラメ ータを変えていくときに時系列の周期が2倍,4倍,8倍,16倍というように変 化してカオスへ至る道筋をカオスへの周期倍分岐ルートという.(Fig.1-1)このよ うな現象が見られる例としてレイリー・ベナール対流があり,周期倍分岐を繰り 返してカオスへ至る道筋がレイリー・ベナール対流において実験的に確認された 例を Fig.1-2 に示す.カオスへ至る道筋にはこのほかに時系列に有理比でない2つ の周期が現れ,位相同期などを経てカオスへ至る準周期ルートなどがある.



Fig.1- 1 Period doubling sequence of power spectra and attractor.



Fig.1- 2 Period doubling bifurcation to chaos observed in Rayleigh-Benard convection. (Libchaber et al. 1983 [4])



カオスであるかどうかを診断する方法にはフラクタル次元解析,リアプノフス ペクトラム解析,決定論的非線形予測などがあるが,状態空間内のアトラクタに 折り畳みと引きのばし構造を見いだすことが最も強い根拠を与えると言える.こ のために用いられる手法が1次元写像への還元である.写像の作り方には時系列 から極大値のみを取り出し写像にするローレンツプロットなどがあるが,ここで は一般的に用いられるポアンカレ断面から写像を得る方法について,レスラー方 程式のアトラクタを用いて示す.(Fig.1-3)



Fig.1- 3 Poincare map of Rosseler attractor.

- (a) Phase portrait of 3-D attractor.
- (b) Projection to x-y plane and Poincare section parallel to the z-axis.
- (c) Intersection points of attractor and Poincare Section.
- (d) Reduction to one-dimensional map using x-value.

1.3. 従来の研究

非線形力学の観点から気泡挙動に関して研究が行われた例をいくつか示す.

- 1.3.1. 庄司,前田,久島らの研究[5](1997)
 - 1. 実験条件

大気解放下の水 - 空気系.気泡出口部にガラス管(内径 0.7,2.0mm)を使用しガラス管出口近傍の水の流速変動をホットワイヤプローブで計測.計測時の空気流量は一定.

2. 主な結果

得られた出力波形の極大値のみを取り出した分岐図より,4周期まで存在することを確認.また先行する気泡の影響を考慮した数値モデルを考案し気泡の離脱パターンの再現を試みた.

3. 問題点

連続的な時系列データを極大値のみの写像系に還元することが必ずしも適当 ではなく,時系列データの情報を失うことにつながっていると思われる.

1.3.2. Tritton らの研究[1](1992)

1. 実験条件

液体に体積濃度 24%のグリセリン水溶液,気体に窒素ガスを用いて大気解放下で実験.内径が 1.2mm のガラス管から発生する気泡近傍の水の流速変動をホットフィルムプローブで計測.また出口直前に大きな圧力抵抗をもうけることにより流量一定条件としている.計測時の空気流量は一定.

2. 主な結果

プローブからの出力波形が8周期まで周期倍分岐していることを確認し(2,4周期は安定.8周期はごく短い時間),出力波形の極大値を用いたリターンマップよりカオスを意味する周期3を確認したとしている.また空気流量の範囲によって気泡の挙動の分類を試みている.

3. 問題点

出力波形の極大値を用いたリターンマップが決定論的な1次元写像に還元で きるならば周期3はカオスの前兆を示すが,ここでは1次元写像との対応が 明確に示されていない.また気泡の挙動の分類に関しては周期性,間欠性などの根拠,評価が不十分であると思われる.



Fig.1- 4 Bifurcation diagram using local maxima of signals. (Shoji et al. 1997 [3])



Fig.1- 5 Upper: Signals of hot film anemometer. Time span is 1.43 sec for (e) and (g), 0.43 sec for all other cases.



1.4. 本研究の目的

過去の研究における以上の問題点を踏まえて,本研究では沸騰現象の一つの要素である水-空気系における気泡挙動を非線形力学的な観点から捉え,その特性 (分岐現象,1次元写像への還元など)を気泡生成部近傍の水の流速変動データから調べることを目的とする.

第2章

実験

2.1 実験装置

2.2 実験の手順

2. 実験

2.1. 実験装置

本研究で使用した実験装置の概略を Fig.2-1 に示す.コンプレッサ内に圧縮された空気が流量計を通じて口金状のアクリル製オリフィスに供給され,オリフィス出口部において生成,成長,離脱,合体などの気泡の挙動によって生じる水の流速変動をホットフィルムプロープによって測定し,デジタルレコーダを用いて5kHzのサンプリング周波数で記録する.また高速度カメラを用いて発泡の様子を観察し,気泡の離脱周期などを求める.実験装置及び測定機器の使用は以下の通りである.

・熱線流速計(KANOMAX 21ser. Constant Temperature Anemometer)
 オリフィス出口近傍の水の流速変動を測定するのに使用.平均出力電圧からの
 変動成分(U)のみを計測した.抵抗の設定比は水温にあわせて設定し,水温の
 低いときはセンサ抵抗の1.1倍,高いときは1.05倍に設定した.

・ホットフィルムプローブ (TSI MODEL 1210-20W)

センサ部に白金フィルムを使用した液体用円筒型標準直線プローブ.オリフィ ス出口近傍の水の流速変動をセンサ部にかかる電圧変動として検出する.

・デジタルレコーダ(TEAC DR-M3)

熱線流速計からの出力信号を記録するのに使用.サンプリング周波数 5kHz で 計測した.また,高速度ビデオカメラにトリガを送ることにより出力波形とビデ オを同期させた.

・高速度ビデオカメラ(Photoron HVC-11B)

オリフィス出口付近の気泡の挙動を撮影するために使用.648 または 2066frames/sec のフレームレートで約2秒間撮影した.

・水槽

深さ 21cm,幅,奥行きともに 20cmのアクリル製の水槽で,オリフィス表面からの水深が約 18cmになるように蒸留水を満たして実験をした.

・コンプレッサ

日立製ベビコン.出口圧力はゲージ圧で2~3気圧に調節して実験を行った.

・流量計

浮き子式流量計.流量レンジが5-50,50-500,500-5000cc/minのものをオリフィスの出口径に応じて使用し,水上置換法により流量を校正した.

従来このような気泡を発生させる実験を行う場合には,オリフィスに供給され る空気流量を一定にする空気流量一定条件か,もしくはオリフィス内の圧力を一 定に保つ圧力一定条件のいずれかを用いるのがふつうであるが,今回の実験では どちらの条件も用いなかった.

この実験装置を用いて次のような実験を行った.

実験1. 空気流量を手動で調節し,各流量についての流速変動を記録し,同時に発 泡の様子をビデオで録画する.

実験 2. コンプレッサ内の圧力が次第に減少するのに任せて空気流量を連続的に 減少させ,その間データを取り続ける.ある時間ごとに空気流量を記録し,時間 と流量の回帰曲線から各時間の空気流量を求める.

これらの実験を出口径の異なる2種類のオリフィスについて行い比較した.オ リフィス部の形状と,そのオリフィスを用いた実験の際の,ホットフィルムプロ ーブ位置を Fig.2-2, Table 2-1 に示す.



Fig.2 - 1 Schematic of experimental apparatus.



Fig.2 - 2 Text section

	Orifice1	Orifice2
d(mm)	2.0	0.5
L(mm)	20	10
x(mm)	3.0	2.0
z(mm)	0.5	0.5

Table 2 - 1 Orifice shapes and probe position

2.2. 実験の手順

- 1. オリフィスをテストセクションに取り付け水槽下部にセットする.
- 2. 位置決めテーブルを用いてホットフィルムプローブを移動しゼロ点(オリフィ スの中心)を決める.
- 3. オリフィス内に水が入らないように空気を流しながら蒸留水を水槽に入れる.
- 4. ホットフィルムプローブを気泡に触れない程度にオリフィス出口付近へ移動 する
- 5. 流量,出口圧力を調節し計測する.

第3章

実験結果・考察

- 3.1 実験 1
- 3.2 実験 2

3. 実験結果・考察

ここでは前章で述べた2種類の実験の結果を示し,その考察を行う.

3.1. 実験1

実験1,すなわち流量を手動で調節し各流量について流速変動を計測した実験の結果を示す.この実験では高速度ビデオカメラによる撮影も同時に行った.

3.1.1. 出口径が 2.0mm のオリフィスの場合

オリフィスの出口径が 2.0mm の場合の出力波形とそのパワースペクトルを Fig.3-1-1 に示す.出力波形の図中の 印は気泡の離脱した時刻を表し,+印は先 行する気泡に合体するかまたは明らかに引き寄せられて気泡が離脱した時刻を表 している.低流量下ではこれらの合体,引き込みが明らかに識別できるが,高流 量になると気泡同士の合体が頻繁に起こるようになり,気泡の離脱すらもはっき りと判別できなくなるため,これらの記号の適用は比較的低流量の範囲に限って いる.空気流量の低い方から見ていくと,単一周期の波形は気泡が合体,引き込 みなしに周期的に離脱していることを表し,空気流量が増え気泡同士の相互作用 が大きくなるにつれ1,2,4,8,6 倍周期の波形が現れる.(100~350cc/min) さらに流量を増すと特に周期性のない波形(390~600cc/min)となるが 500 と 800cc/min で再び規則的な波形(3,4周期)を示すようになる.それ以降は明確 な周期性は現れない . ビデオで気泡の挙動を観察すると出力波形が 2 周期のとこ ろでは気泡2個,4周期では4個というように周期の倍数と同じ数の気泡ごとに 規則的な発泡をしていることが分かる .(Fig.3-1-2)このことからホットフィルム プローブで計測した気泡の離脱などによるオリフィス出口近傍の水の流速変動は 実際の気泡の挙動をある程度正確に捉えていると言え、そのデータを用いて気泡 の挙動を推測するのは妥当であると思われる.

次にパワースペクトルについて見てみる 図中のfは最大のピーク(基本周波数) を表し,fL は最も低周波数のピーク(サブハーモニック)を表す.出力波形と気 泡の離脱に関する考察から f は気泡の1秒間あたりの平均離脱個数にほぼ対応し ていると推察される.空気流量が増えるに従い波形の倍周期に対応する基本周波 数の分数周波数が次々と現れ,最終的に広い周波数帯にわたる連続的なスペクト ルになる.このようなパワースペクトルの変化は,周期倍分岐を繰り返してカオ ス状態に至る現象によく見られるパワースペクトルの変化とよく似ている.



Fig.3-1-1 (a) Output signals and power spectra. (d = 2.0mm) f: fundamental frequency, f_L : subharmonic frequency



Fig.3-1-1 (b) Output signals and power spectra. (d = 2.0mm) f: fundamental frequency, fL: subharmonic frequency





Fig.3-1-2 (a) Pictures of bubbling. (d = 2.0mm) Upper: Period 1 motion (q = cc/min, time step = 12.3msec) Lower: Period 2 motion (q = cc/min, time step = 17.0msec)



Fig.3-1-2 (b) Period 4 motion. (d = 2.0mm, q = 300cc/min, time step = 15.4msec)



Fig.3-1-2 (c) Period 8 motion. (d = 2.0mm, q = 330cc/min, time step = 29.3msec)



Fig.3-1-2 (d) Period 6 motion. (d = 2.0mm, q = 350cc/min, time step = 21.6msec)

3.1.2. 出口径が 0.5mm のオリフィスの場合

出口径が0.5mmの場合の流速変動波形とそのパワースペクトルをFig.3-1-3に, ビデオで観察した発泡の挙動を Fig.3-1-4 に示す.図中の記号の意味は前節と同様 である.

25~38cc/min では発泡が間欠的になっており,これは気泡離脱直後のオリフィ ス内の圧力よりも表面張力による下向きの力が大きいために気泡が連続的に成長 できない瞬間があることを示している.出口径が2.0mmのオリフィスの場合には この見られなかったが,0.5mmの場合は気泡成長初期の気泡の曲率が比較的大き いためにこのような間欠性が起こったと考えられる.空気流量が増えるに従い気 泡がでなくなる頻度が減少し43cc/min付近で単一周期の発泡になることが確認さ れた.また,気泡内圧力と表面張力のバランスが崩れた瞬間の気泡の急激な成長 による水の流速変動も検出できていることがビデオとの比較によって分かった. (図中の矢印が指す小さい波形)

68~88cc/min では何個かに一回合体するという規則性を持った発泡が見られ, 合体を伴う離脱による水の流速変動が大きなピークとなって現れている.空気流 量が増すごとに合体の頻度は多くなっていくが,100cc/min では合体のない単一 周期の発泡になるという現象も確認された.100cc/min を越えるとまた合体の頻 度は多くなっていく.

次にパワースペクトルを見てみる.6~38cc/min では気泡の平均離脱個数と気 泡の離脱のパターンをパワースペクトルだけからでは明確に判断できない.パワ ースペクトルから分かることは気泡の離脱パターンの周期だけであり,これは最 も低い周波数のピークfLに対応している.出力波形から推測される1周期の中で 離脱する気泡の個数とこのfLを用いて気泡の単位時間あたりの平均離脱個数を求 めることができ,(図中のf)結局はパワースペクトルの中でピークとなって現れ ていることが分かる.75~110cc/min では最も大きいピークが気泡の平均離脱個 数を表しており,fLが離脱パターンの周期に対応している.それ以降は明確な対 応は確認できない.



Fig.3-1-3 (a) Output signals and power spectra. (d = 0.5mm) f: fundamental frequency, f_L : subharmonic frequency



Fig.3-1-3 (b) Output signals and power spectra. (d = 0.5mm) f: fundamental frequency, fL: subharmonic frequency



Fig.3-1-4 (a) Intermittent bubbling. (d = 0.5mm, q = 30cc/min, time step = 17.9msec)



Fig.3-1-4 (b) Period 4 motion. (d = 0.5mm, q = 75cc/min, time step = 9.3msec)



Fig.3-1-4 (c) Pictures of bubbling. (d = 0.5mm) Upper: Period 1 motion (q = 100cc/min, time step = 4.6msec) Lower: Period 2 motion (q = 110cc/min, time step = 9.3msec) 以上より,ホットフィルムプローブの出力波形と実際の気泡の挙動について次のことが言える.

- 1. 規則的な波形を示す流量の範囲では,出力波形は離脱,合体などの気泡の挙動を非常によく捉えており,出力波形とそのパワースペクトルから気泡の単位時間あたりの平均離脱個数と離脱のパターンを推測できる.
- 2. 合体,引き込みなどによって気泡が速く移動するときには出力波形に大きな ピークとなって現れる.

これらの事実に基づき以降の実験について考察を行う.

3.2. 実験 2

本節では2つ目の実験, すなわち気泡の挙動を支配するパラメータの1つであ る空気流量を連続的に変化させる実験についての結果と考察を示す.解析手法と して連続的にパラメータが変化することによる周波数特性の推移を表すことに適 したスペクトログラム解析を用いた.

3.2.1. 出口径が 2.0mm のオリフィスの場合

出口径が 2.0mm のオリフィスについて計測した気泡出口近傍の流速変動波形 のスペクトログラムを Fig.3-2-1 に示す.用いた流量計はレンジが 50~500cc/min と 500~5000cc/min の 2 種類を用い,流量計を交換する際には一旦測定を中断し た.測定の時間は 1500~500cc/min, 500~50c/min ともに約 40 分かけて空気流 量を減少させた.またスペクトログラムは長い時系列データから 32768 点を抜き 出して高速フーリエ変換をするという操作を 16384 点ずつずらしながら行うとい う方法で計算し,ウィンドウは抜き出したデータと同じ長さのハニングウィンド ウを用いた.図中の矢印は気泡の平均離脱周期に対応する周波数を示しており.

実際の実験では空気流量が減少する方向に系が変化しているが,ここでは空気 流量が増加する方向に見ていくと100~350c/min 付近の領域では流量が増えるに 従い基本周波数の分数周波数が現れてくる.前節の結果と同様に 1/2,1/4,1/8, 1/6,1/8 倍周波数という順番でサブハーモニックが現れ,それ以降は広い周波数 帯でスペクトルの強度が上がるが,途中 500cc/min と 800cc/min 付近ではそれぞ れ基本周波数の1/3,1/4 倍周波数が現れていることが観察できる.

この実験で得られる長い時系列データからいくつかの空気流量付近のデータを 切り出したものとそのパワースペクトルを Fig.3-2-2 に示す.



Fig.3-2-1 (a) Spectrogram (d = 2.0mm)



Fig.3-2-1 (b) Spectrogram (d = 2.0mm, enlarged for 150-500cc/min)



Fig.3-2-1 (c) Spectrogram (d = 2.0mm, enlarged for 500-1500cc/min)



Fig.3-2-2 (a) Output signals and power spectra. (d = 2.0mm)



Fig.3-2-2 (b) Output signals and power spectra. (d = 2.0mm)



Fig.3-2-2 (c) Output signals and power spectra. (d = 2.0mm)

3.2.2. 出口径が 0.5mm のオリフィスの場合

同様に出口径が 0.5mm のオリフィスについて測定した流速変動データのスペ クトログラムといくつかの流量付近のデータを切り出したものを Fig.3-2-3, Fig.3-2-4 に示す.一見して分かるように 2.0mm のオリフィスの場合とは全く傾 向が異なっている.(特に低流量の範囲において)

0~42cc/min 付近では実験1による考察から間欠的な発泡が起きていることが 推測される.矢印の示す基本周波数の 1/2 のところにサブハーモニックがあれば 気泡2個ごとの間欠的な発泡というように,気泡何個おきに間欠性が現れている かをこの図から示すことができる.空気流量が増すに従い間欠性の頻度が減少し 42cc/min 付近で間欠性のない単調な離脱をするようになる.

60~100cc/min の領域では気泡の合体によって気泡の平均離脱個数が大きくなっている.ここでの合体は流量が増えるにつれて5個に一回,4個に一回,3個に一回というように頻度が多くなる方向に変化していくが100cc/min付近では合体が起こらなくなってしまう.

100~250cc/min の領域では空気流量が大きくなるに従い気泡の合体の頻度が 増すという2.0mmのオリフィスの場合と同様の傾向を示している.115cc/min付 近で2個に一回合体するというパターンが見られ気泡の平均離脱個数が急激に増 加し,さらに流量を増すと特に明確な支配周波数のない状態へと遷移していく.



Fig.3-2-3 (a) Spectrogram (d = 0.5mm)



Fig.3-2-3 (b) Spectrogram (d = 0.5mm, enlarged for 0-50cc/min)



Fig.3-2-3 (c) Spectrogram (d = 0.5mm, enlarged for 50-150cc/min)



Fig.3-2-4 (a) Output signals and power spectra. (d = 0.5mm)



Fig.3-2-4 (b) Output signals and power spectra. (d = 0.5mm)



Fig.3-2-4 (c) Output signals and power spectra. (d = 0.5mm)

以上より実験2について次のことが言える.

- 出口径が 2.0mm のオリフィスでは空気流量を増すに従い気泡同士の合体の 頻度,相互干渉の度合いがほぼ単調に大きくなる傾向にあることがスペクト ログラムから確認できる.またホットフィルムプローブの出力波形とそのス ペクトログラムから,合体が起き始める流量範囲においてカオスに至る現象 によく見られる周期倍分岐に似た挙動の遷移が見られた.
- 出口径が 0.5mm のオリフィスでは大きく分けて3つの特徴的な挙動を示す 流量範囲に分けることができる.1つは0~50cc/minの間欠的な発泡から短 周期の発泡に遷移する領域で2つ目は50~100c/minの合体の頻度が増しな がら最後に短周期の発泡になる領域.3つ目は100cc/min以上の流量の増加 に伴い合体の頻度が増し明らかな規則性のない状態へ至る領域で,これらの 特徴が出力波形とスペクトログラムから確認できる.

第4章

結論

4.1 本研究の結論

4.2 今後の課題

4. 結論

4.1. 本研究の結論

- オリフィス出口近傍の水の流速変動をホットフィルムプローブで測定し高速 度ビデオで記録した実際の気泡の挙動と比較することにより,流速変動波形が 気泡の離脱,合体,間欠性,周期的な発泡などの挙動をある程度正確に表して いることが分かった.
- 2.1の結果をもとに空気流量を連続的に減少させたときの流速変動波形を解析し、出口径が2.0mmのオリフィスでは周期倍分岐に似た気泡挙動の遷移を、0.5mmのオリフィスでは空気流量範囲の違いによる特徴的な気泡挙動を観察した。
- これまでは断片的な分岐図しか得られていなかったが、本研究では空気流量 を連続的に変えたときの分岐図に相当するスペクトログラムを得ることがで きた。

4.2. 今後の課題

本研究では水の流速変動を計測するのにホットフィルムプローブを用いたが, レイリー・ベナール対流の実験のようにある一点での水の対流を対象とするなら ばこのような計測方法は理想的ではない.もしそのようなことを目的としてこの 実験を行うならば流速の方向性まで測定できるレーザードップラー流速計などを 用いる必要があると考えられる.

また,本研究では空気流量一定条件などの条件を課さなかったが,気泡の挙動の規則性,不規則性にはオリフィスに供給される空気流量の変動が深く関わっていると考えられる.よってオリフィス直前に大きな圧力抵抗をもうけた場合の特性の変化を確認する必要があると思われる.

謝辞

本論文作成に当たり親身なご指導をいただき巻いた庄司正弘教授に心から感謝 いたします.また貴重なご意見を頂きました丸山茂夫助教授,日頃から多くの面で 協力,指導して頂いた横谷定雄助手,井上満助手,渡辺誠技官に感謝いたします.

辛苦をともにしたM2の伊藤さん,井上修平君には研究以外のことでもお世話に なりました.博士課程でも頑張ってください.

また, D1の高木さん, M1の野上君, 安井君, 4年生, 留学生のみなさんはこ れから職に就かれたり研究に励むことになるかと思いますが,より一層のご活躍を されることをお祈り申し上げます.

参考文献

[1]Toritton,D.J., et al.., "Chaotic bubbling", *Phys.Fluids*, A 5 (2), pp.503-505, 1993
[2]Mittoni,L.J., et al.., "Deterministic chaos in he gas inlet pressure of gas-liquid

bubbling systems", *Phys.Fluids*, 7 (4), pp.891-893, 1995

[3]Takens, F., "Detecting Strange Attractor in Turbulence, in Dynamical Systems and Turbulence", *Lecture Notes in Mathematics, 898, Springer-Verlag*, Berlin, pp.366-381, 1981

[4] Libchaber, A., et al., "Two-parameter study of the routes to chaos", *Physica*, 7D, pp.73-84, 1983

[5]Shoji, M., et al., "Nonlinear Bubble Dynamics", *Proceeding of 32nd Japan National Heat Transfer Symposium, Yamaguchi*, vol.1, pp.257-258, 1995

[6]Davidson, J.F., et al., "Bubble formation at an orifice in an inviscid liquid", *Trans.Instn.Chem.Engrs*, Vol.38, pp.335-342, 1960

[7]Ramakrishnan, "Studies in bubble formation -I:Bubble formation under constant flow conditions", S., et al., *Chem.Eng.Sci*, Vol24, pp.731-747, 1969

[8]Chuang, S.C., et al., "Bubble Formation Due to a Submerged Capillary Tube in Quiescent and Coflowing Streams" *ASME Paper* 70-FE-21, 1, 1970

[9] Packard, N.H., et al., "Geometry from a Time Series", *Phys. Rev. Lett.*, 45, 9, pp.712-716, 1980

[10] Swinney, H.L., "Observations of order and chaos in nonlinear systems", *Physica*, 7D, pp.3-15, 1983

以上

<u>通し番号 1-58 完</u>

<u>修士論文</u>

<u>平成 12 年 2 月 10 日提出</u>

86172 阿部憲幸