

卒業論文

気泡生成と周辺流体に関する研究

通し番号 1 - 55 完

平成 13 年 2 月 15 日提出

担当教官 鴨志田準司助教授

指導教官 東京大学工学部機械工学科

庄司・丸山研究室 庄司正弘教授

芝浦工業大学工学部機械工学第二学科

B97017 - 6 小楠貴宏

目次

序論

1.1. はじめに	4
1.2. 従来の研究	5
1.2.1. 古典的手法による研究	
1.2.2. カオス理論の視点からの研究	
1.3. 研究の目的	7

2. 実験

2.1. 実験概要	9
2.2. 実験装置	10
2.3. 実験条件	13
2.4. 実験の手順	16

3. 実験結果・考察

3.1. 実験 1	
3.1.1. 気泡挙動と流速変動および圧力変動	18
3.1.2. 流速波形と圧力波形の分岐図	26
3.1.3. 実験 1 のまとめ	33
3.2. 実験 2	
3.2.1. 分岐図の比較	34
3.2.2. 実験 2 のまとめ	50

4. 結論

4.1. 本研究の結論	52
4.2. 今後の課題	53
謝辞	54
参考文献	55

第 1 章

序論

1.1 はじめに

1.2 従来の研究

1.3 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気，液，固体の三相が影響を及ぼしあい複雑な挙動を示すことが知られている．そのため沸騰の動力学に関してはまだ解明されていない部分が多い．そこで従来は実験データの統計量から実験式を得たり，平均化したりして取り扱われてきている．それらから得られた成果は工業的には大変重要な役割を果たしてきている．しかし沸騰を動的に制御しようとした場合や，沸騰現象のより深い理解のためにはその動的挙動に注目しなければならない．そのような中で最近では沸騰の複雑性をカオス理論を用いて捉えられないかという研究が行われている．

沸騰現象を複雑にしている要素の一つに，沸騰の主要因である蒸気泡の挙動とそれに関連した流体の流動の複雑性がある．そこで沸騰における蒸気泡の挙動の基礎研究として，まず空気 - 水系での単一孔からの気泡の動的挙動を明らかにする必要がある．

1.2 従来の研究

1.2.1 古典的手法による研究

単一孔から気泡生成の研究は主に化学工学の分野において工業的背景から行われ、これまでも多くの研究がある。気泡の生成過程は複雑な挙動を示すが、従来の研究は主に実験データを平均操作して取り扱ってきている。これらの研究では主に平均離脱気泡径、平均離脱周期が測定パラメータになっており、数多くのモデルが作成されてきた。しかし、これらのモデルは気泡一個の成長、離脱までのモデルであり、気泡の連続的な挙動に関しては言及していない。

1.2.2 カオス理論の視点からの研究

現在では従来の単一孔からの気泡の生成に関する研究とは別に、液滴落下の離脱間隔のカオス性とのアナロジーなどから、気泡の非線形性についての新しい研究も行われている。これらの研究では単一孔からの気泡の連続的な挙動が問題となる。

阿部と庄司らは沸騰の基礎研究として、空気-水系における水中単一オリフィスから生成する気泡の動的挙動を調べる実験を行った。この実験では気泡の挙動によって生じる周辺流体の流速変動をホットフィルムプローブによって測定している。その結果によると、ホットフィルムプローブの出力信号の周期が分岐して、複雑になっていく現象が確認された¹⁾(Fig. 1-1)。

しかし、ホットフィルムプローブの信号、すなわち気泡周辺の流速変動と気泡自身の挙動との対応は明らかにされず、結果についての物理的な考察についてはあまり行われなかった。

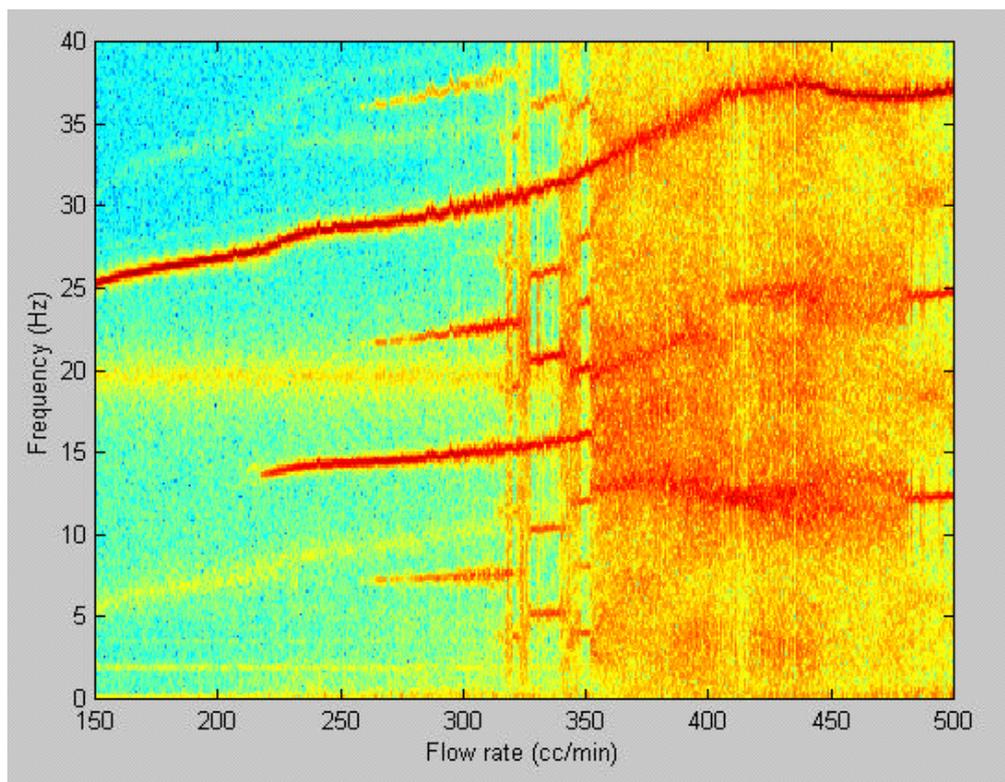


Fig. 1-1 気泡生成の分岐図 ($d=2.0$)

(阿部ら , 2000)

1.3 本研究の目的

本研究では，チャンバー内の圧力変動が気泡生成を示すという報告²⁾より，流速変動と圧力変動を同時に測定し，気泡挙動と周辺流体との関係を明らかにし，流速変動の分岐が気泡挙動のどのような現象を捉えているのかを調べる．

また，気泡生成挙動に直接関係する空気流入条件（チャンバー容積）を変化させ，それが気泡挙動，分岐現象にどのように影響するかを調べる．

第 2 章

実験

- 2.1 実験概要
- 2.2 実験装置
- 2.3 実験条件
- 2.4 実験の手順

2 . 実験

2 . 1 実験概要

本実験では，蒸留水をためた水槽内に，コンプレッサで圧縮された空気を流量計に通してチャンバー内に供給し，アクリル製のオリフィスより空気泡を発生させる．その時に気泡の生成，離脱などによって生じるオリフィス出口近傍の流速変動をホットフィルムプローブによって，チャンバー内の圧力変動を差圧計によって測定する．また，それらと同期させて高速度ビデオカメラで気泡の生成挙動を撮影し，流速変動や圧力変動のデータと対応させる．

阿部と庄司らの実験では，オリフィス下部に圧力抵抗を付け流速変動のみを測定している．そこで理想的には実験系を変えずに圧力変動を測定したかったが構造的に無理であった．そこで本実験では圧力測定が可能であり，阿部らの実験系に出来るだけ近い形状のチャンバーを用いた．また他に異なる5種類のチャンバーを用い，空気流入条件が気泡挙動に及ぼす影響を調べた．

2.2 実験装置

本実験で使用した実験装置の概略を Fig. 2-1 に示す。水槽は深さ 21 cm, 幅, 奥行きとも 20 cm のアクリル製で, 水深が 16 cm になるように蒸留水を満たして実験を行った。

空気供給系

コンプレッサ内に圧縮された空気が流量計を通じてオリフィス下部に設けたチャンバーに供給され, オリフィスを通して水槽内に気泡を生成させる。空気がチャンバー内に入る直前に圧力抵抗を設けて流量変動を抑えている。

以下に装置および測定機器の使用を示す。

- ・ コンプレッサ(日立製 型番不明)
日立製ベビコン . 出口圧力はゲージ圧で 2~3 気圧に調整して実験を行った。
- ・ 流量計 (小野製作所 OMEGA)
浮き子式流量計。流量レンジは実験条件に合わせて 5~50, 50~500, 500~5000cc/min のものを用いた。
- ・ チャンバー (製作)
真鍮製。形状などの詳細については 2-3 実験条件に示す。
- ・ オリフィス (製作済み)
アクリル製。形状などの詳細については 2-3 実験条件に示す。

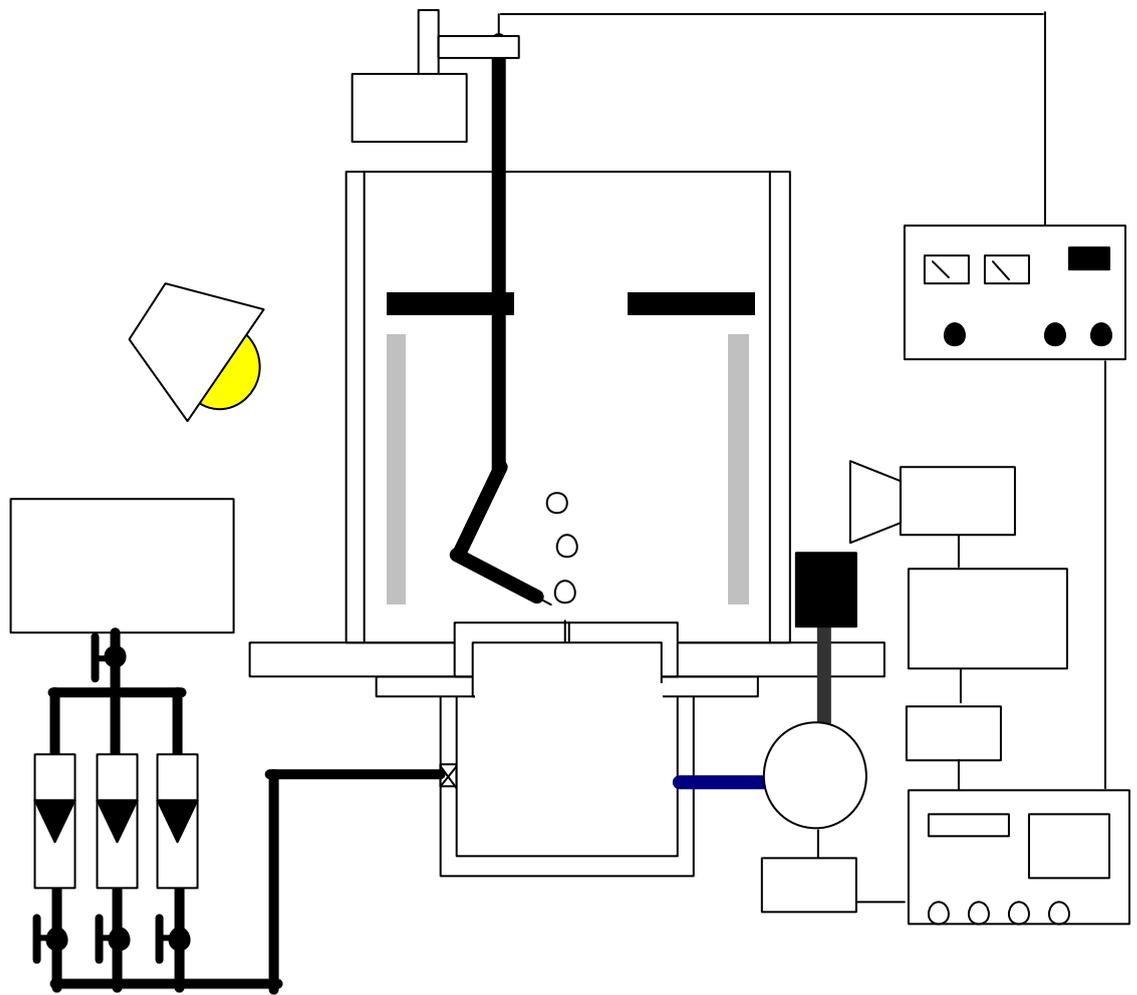
計測系

気泡生成時におけるオリフィス出口付近の水の流速変動, チャンバー内の圧力変動, 気泡生成の様子を, それぞれホットフィルムプローブ, 差圧計, 高速ビデオカメラで同期させて測定する。流速変動と圧力変動はデジタルレコーダによって記録し, 高速ビデオカメラの映像はビデオレコーダによって記録する。

以下に装置, 測定機器の使用を示す。

- ・ 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, 水温の低い時はセンサ抵抗の 1.1 倍, 高い時は 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 .
- ・ 差圧計 (Validyne 社製 DP45 - CD15)
 差圧計は差圧トランスジューサとキャリア・ディモジュレータで構成されており、感度は最大 550[Pa]である . 圧力室容積は 0.15[cc]で最大変化量は 0.015[cc]となっている .
- ・ デジタルレコーダ (TEAC DR-M3)
 熱線流速計と差圧計からの出力信号を記録するのに使用 . サンプルング周波数 1 kHz 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 (PHOTRON 製 FASTCAM-Net Max)
 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 . 1000frames/sec フレームレートで約 8 秒間撮影した .



- | | |
|------------------------|-----------------------------|
| 1: Compressor | 10: Hot film probe |
| 2: Needle valve | 11: Position adjuster |
| 3: Flow meter | 12: Anemometer |
| 4: Porous | 13: Pressure transducer |
| 5: Chamber | 14: Carrier demodulator |
| 6: Orifice | 15: High speed video camera |
| 7: Liquid buffer | 16: Recorder |
| 8: Surface wave buffer | 17: Light |
| 9: Digital recorder | |

Fig. 2-1 実験装置の概要

2.3 実験条件

本実験は 2.1 に示した実験装置を用いて大気圧下，常温で以下のような実験を行った。

実験 1

流速変動と圧力変動を同時に測定して，気泡自身と周辺流体との相互関係を調べるために，出来るだけ阿部らの実験系に近くなる形状のチャンバーを用いた。Fig. 2-2，Table. 2-1 にその形状と使用を示す。

実験 2

5 種類のチャンバーを用いて，空気流入条件が気泡挙動に及ぼす影響を調べた。Fig. 2-2，Table. 2-1，にその形状と使用を示す。

これらの実験を，チャンバーに流入する流量を固定した場合と，連続的に変化させた場合について調べた。固定流量の場合は流量計を手動で調節する。また，固定流量の場合は，時系列信号に同期させて高速度ビデオカメラで気泡の挙動を観察する。連続的な変化をさせる場合は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 1 kHz で取りつづけている。

また使用したオリフィス形状とホットフィルムプローブの位置を Fig. 2-3，Table. 2-2 に示す。

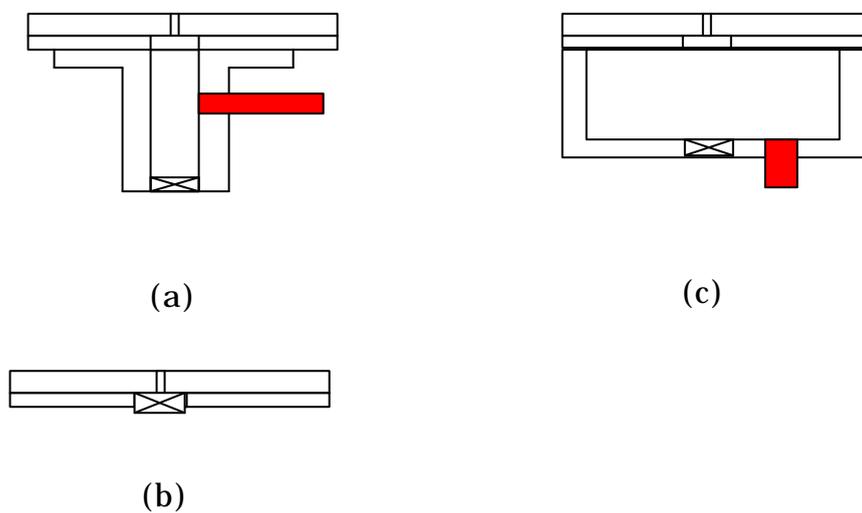


Fig.2-2 チャンバー形状

Table.2-1 チャンバーの使用

	形状	容積 V_c (cc)	備考
実験 1	(a)	5	
実験 2	(b)	0	阿部らの系
	(c)	60	
	(c)	100	
	(c)	200	
	(c)	480	

Hot Film Probe

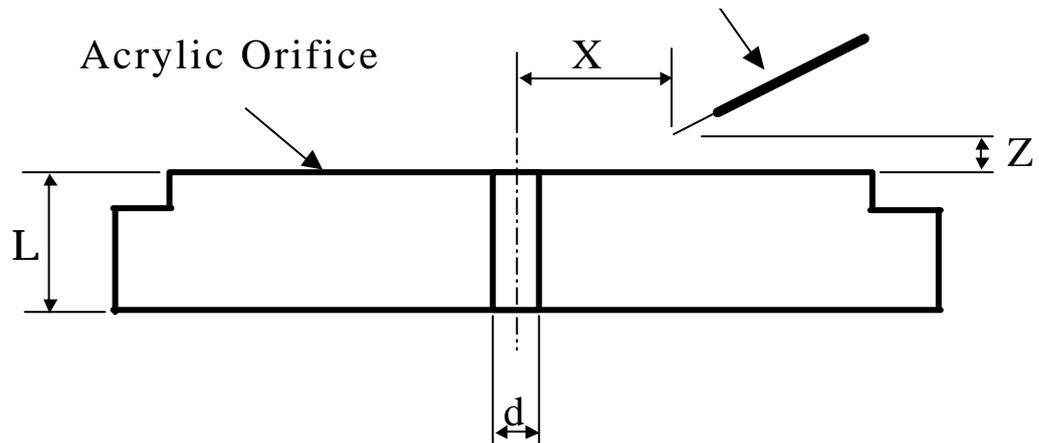


Fig.2-3 オリフィス

Table.2-2 オリフィス形状とプローブ位置

	Orifice1
d(mm)	1.0
L(mm)	10
x(mm)	3.0
z(mm)	0.5

2.4 実験手順

1. オリフィスとチャンバーを水槽下部に取り付ける。
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. 差圧計の定圧側の圧力を調節する。
6. 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：周辺流体の流速変動と気泡挙動との相互関係

チャンバー容量 5cc (2 - 3 実験条件を参照) を用いて気泡挙動と周辺流体との関係について述べる．まず，固定流量についてホットフィルムプローブで計測される流速変動と差圧計で計測される圧力変動を高速度ビデオカメラと対応させ，それぞれの信号と気泡挙動の関係を考察する．そして，流量を連続的に変化させた場合について流速変動と圧力変動の分岐図を表し，それぞれの相互関係について考察する．

3.1.1 気泡挙動と流速変動および圧力変動

チャンバー容積 5cc のときの固定流量での実験について，ホットフィルムプローブの出力波形，圧力波形とそれぞれのパワースペクトルおよび高速度ビデオカメラによる映像を Fig.3-1-1 から Fig.3-1-5 に示す．圧力波形は差圧計から検出される電圧値を校正曲線から圧力に変換し，差圧値として表している．なお差圧計では，片側に空気溜めを作り，その圧力を一定に保った状態でチャンバー内との差圧を測っている．したがって，差圧値の 0 の値には意味はない．図中の 印は，高速度ビデオカメラによって調べた離脱ポイントを表す．なお各流量での計測時間は約 8 秒である．また低流量下(20,40,50,100,150[cc/min]) の場合には，気泡の体積変化を一点鎖線で表す．気泡の体積変化は高速度ビデオカメラの画像を処理し，気泡輪郭の数値データから算出している．この時，気泡輪郭の数値データはピクセルの単位として示されるが，画像中の不変の幅(オリフィス径 1 mm) を用いて，ピクセルを mm 単位に変換して体積を算出している．したがって気泡体積のデータの絶対値は誤差を含んでいるので，あくまで，体積変化の様相や，各流量での比較として用いるものとする．なお，200 [cc/min] 以上の流量の場合は，成長中の気泡が先行気泡と重なってしまうため，気泡の体積は計算できなかった．

結果の後に，気泡挙動と流速変動，気泡挙動と圧力変動について考察する．

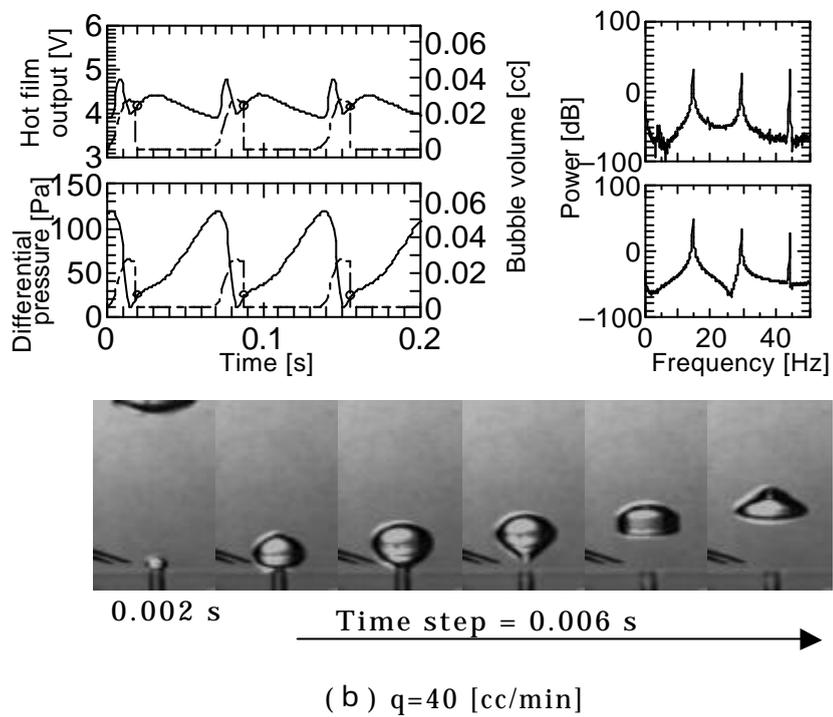
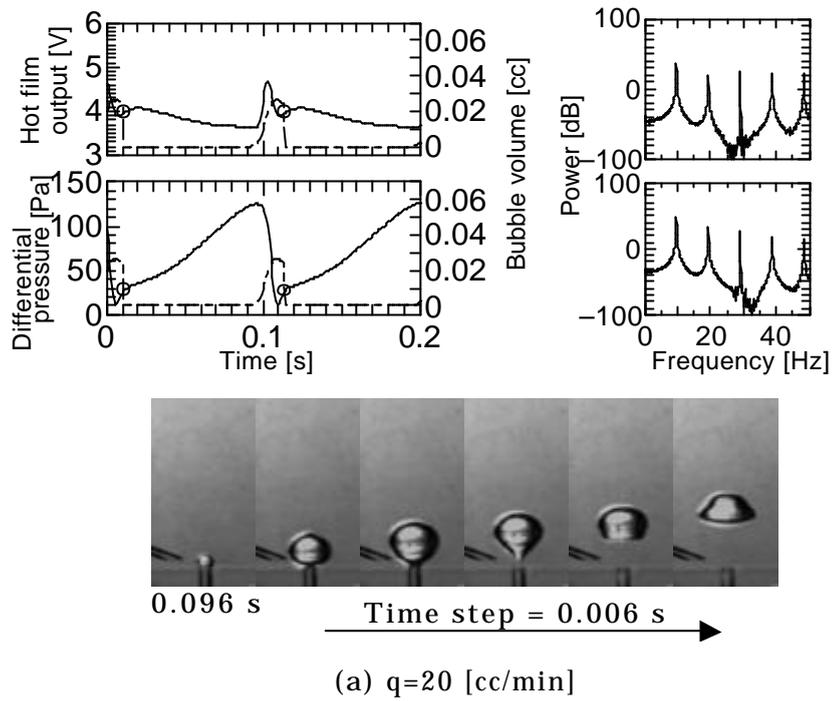


Fig.3-1-1 流速変動とパワースペクトル(上段),圧力変動とパワースペクトル(中段),ビデオ映像(下段)(チャンバ容積 5 [cc], $d=1.0$ [mm], 固定流量)

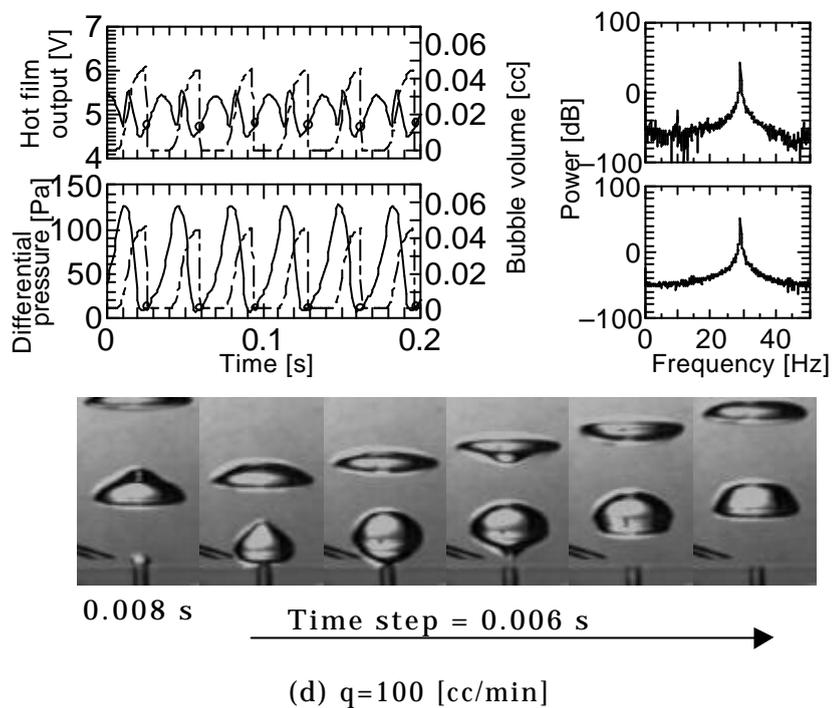
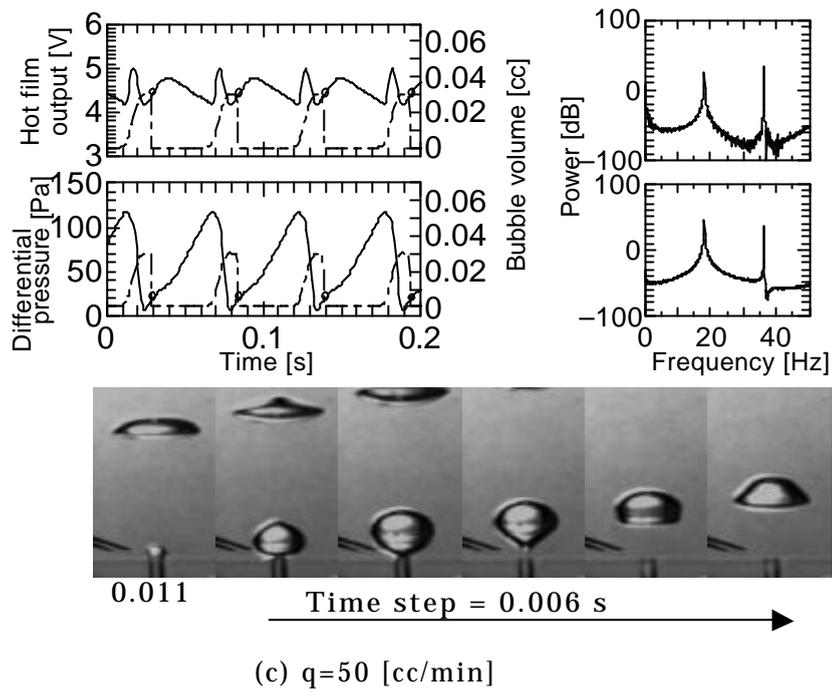


Fig.3-1-2 流速変動とパワースペクトル(上段), 圧力変動とパワースペクトル(中段), ビデオ映像(下段) (チャンバ容積 5 [cc], $d=1.0$ [mm], 固定流量)

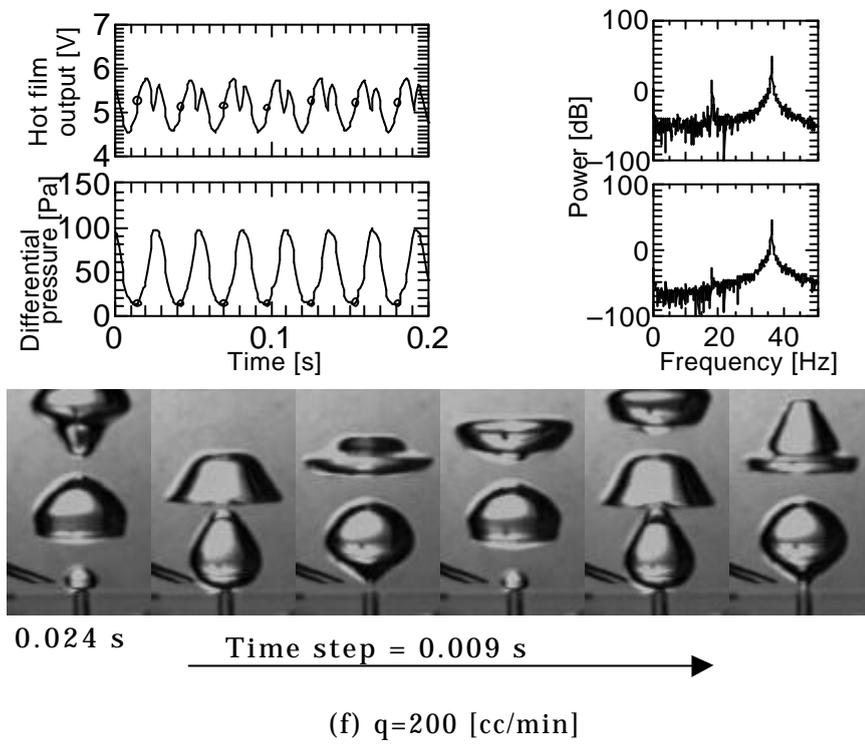
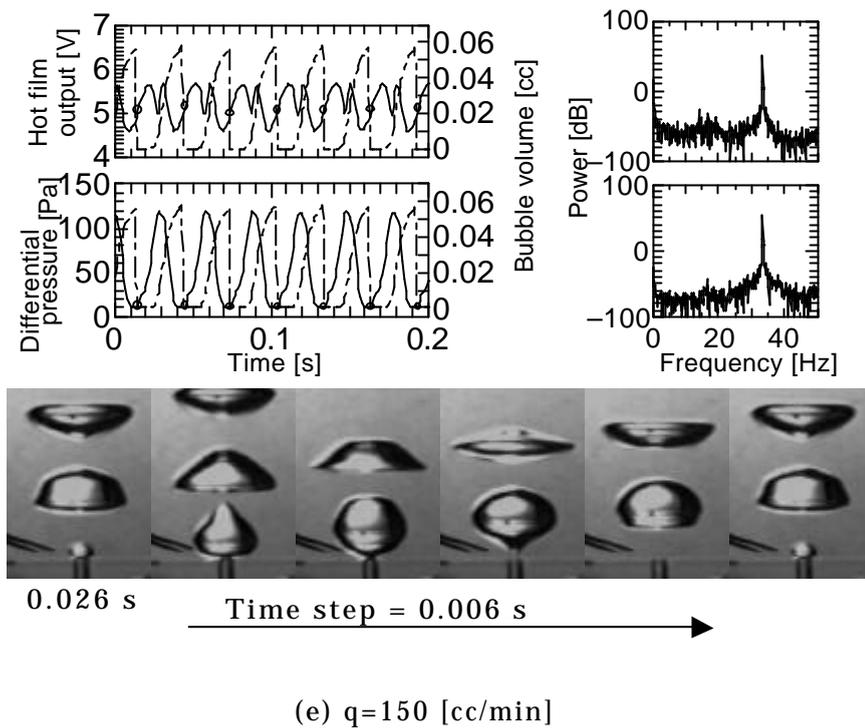
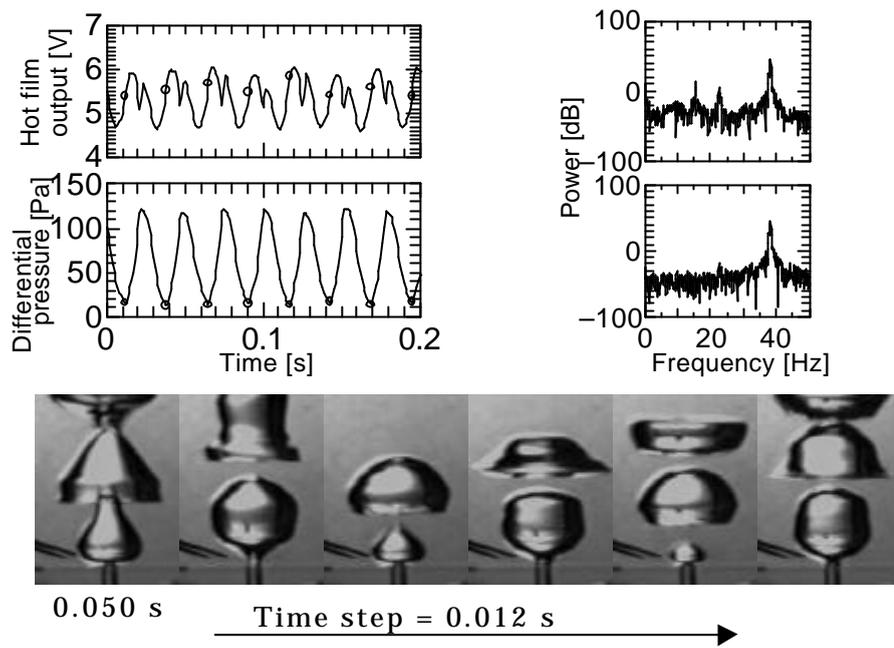
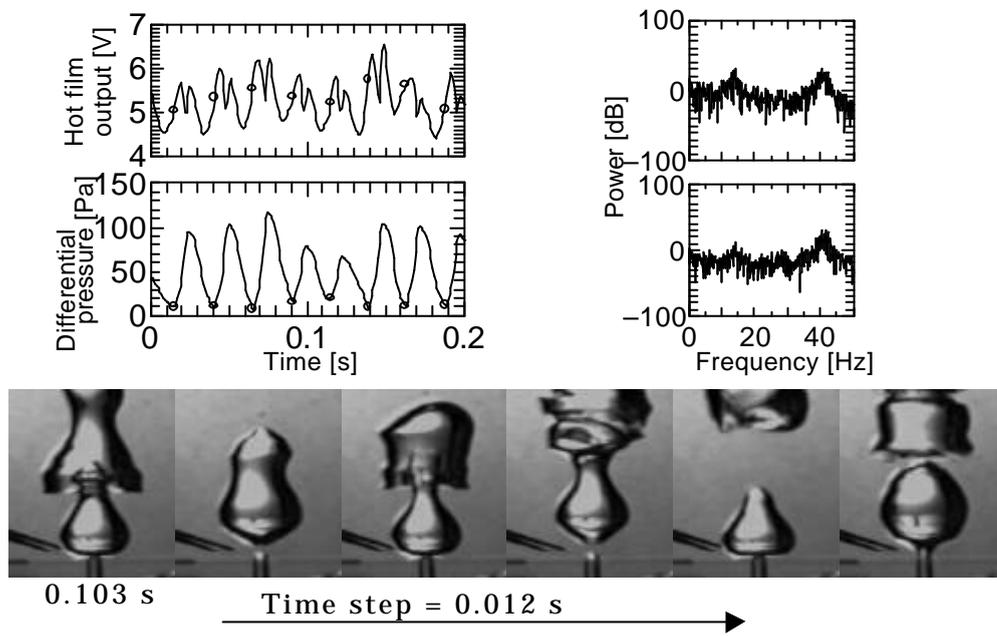


Fig.3-1-3 流速変動とパワースペクトル(上段),圧力変動とパワースペクトル(中段),ビデオ映像(下段)(チャンバ容積 5 [cc], $d=1.0$ [mm], 固定流量)

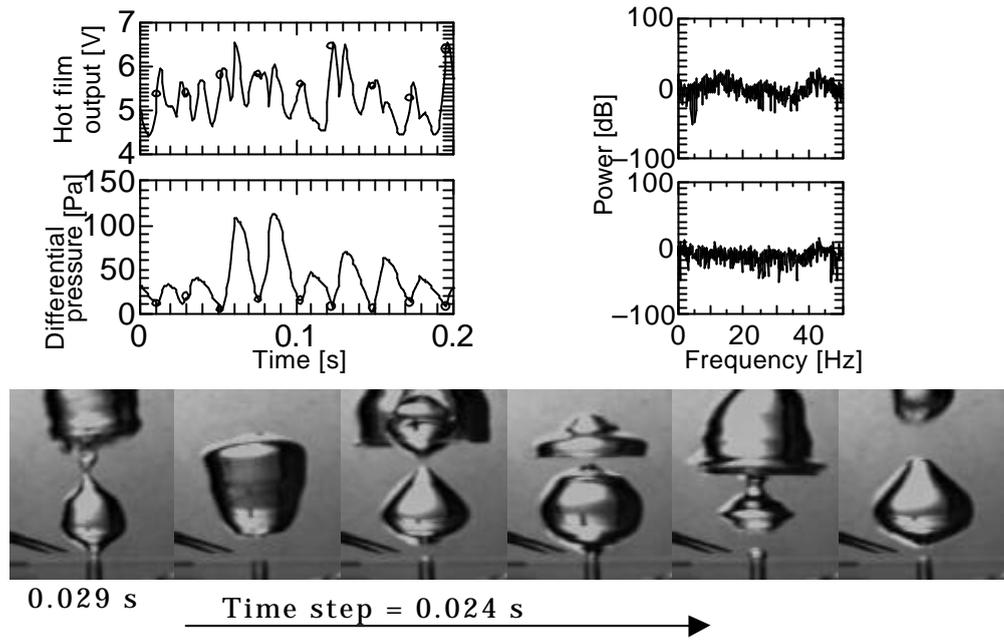


(g) $q=250$ [cc/min]

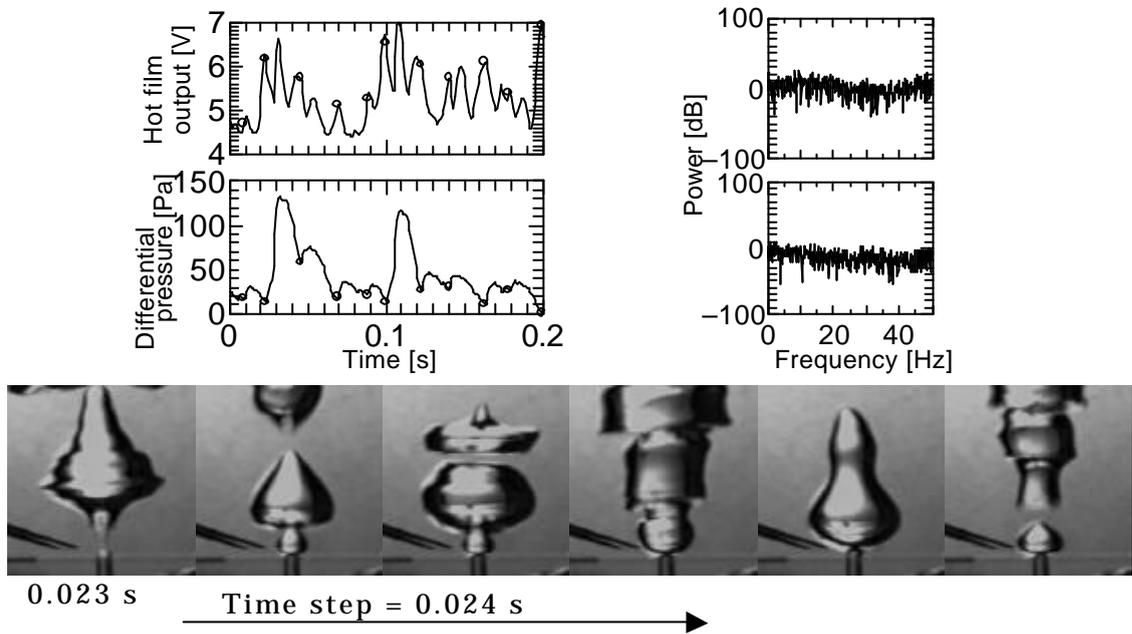


(h) $q=300$ [cc/min]

Fig.3-1-4 流速変動とパワースペクトル(上段), 圧力変動とパワースペクトル(中段), ビデオ映像(下段)(チャンバ容積 5 [cc], $d=1.0$ [mm], 固定流量)



(i) $q=350$ [cc/min]



(j) $q=400$ [cc/min]

Fig.3-1-5 流速変動とパワースペクトル(上段), 圧力変動とパワースペクトル(中段), ビデオ映像(下段) (チャンバ容積 5 [cc], $d=1.0$ [mm], 固定流量)

気泡挙動と流速変動

まず、気泡の体積変化を示している低流量（20～150 cc/min）について見ていく。流速変動は気泡1個の成長・離脱から次の気泡が生成し始めるまでに2つのピークが表われることが分かる。最初のピークは、気泡の体積が急激に増加する際に生じている。この間、気泡は半径方向に変化しており、それによって生じる流速をホットフィルムプローブが捉えていると考えられる。その後、気泡が上昇し始め、離脱した後に2個目のピークが表われる。これは気泡離脱後の後流の影響によるものである。すなわちホットフィルムプローブによる信号は、そのプローブ高さにおける気泡通過時の半径方向の変化に付随する流速と通過後の後流の流速によって強く支配されているものと推測される。

次に、空気流量を増加していくことによる出力信号の変遷について考察する。空気流量20 cc/minのときは離脱後のピークよりも、気泡の成長によって生じるピークが大きく表われていることが分かる。流量を増加していくことにより波形の間隔が縮まっていき、次第に離脱後のピークが大きくなっていく。そして連続的に気泡が生成するようになると、気泡の離脱後のピークと気泡の成長によるピークが重なり合った波形が表われる（150 cc/min～）。

パワースペクトルは始め単周期であったものが、空気流量200 cc/minにおいて1/2周期にピークが表われる。この場合の1/2周期はおもに離脱時の流速の差、すなわち気泡変形の違いが原因で生じており、離脱間隔だけを考えるとほぼ1周期である。さらに流量を増加すると、パワースペクトルは広い周波数帯にわたる連続的なスペクトルとなる。このような場合には時系列信号と気泡挙動は対応がつかなくなり、離脱間隔もばらばらとなる。

気泡挙動と圧力変動

チャンバー内の圧力変化は気体がポリトロープ変化すると仮定すれば，オリフィスを通して流出する流量 Q_o ，チャンバー内流入流量 Q_g ，チャンバー容積 V_c ，気泡体積 V_b ，チャンバー内圧力 P_c ，ポリトロープ係数 γ として，チャンバー内質量保存の関係から以下の式を得る．

$$\frac{dP_c}{dt} + \frac{\gamma P_c}{V_c} (Q_g - Q_o) = \frac{\gamma P_c}{V_c} Q_g + \frac{dV_b}{dt} \quad \dots (3-1)$$

したがってチャンバー流出流量，すなわち気泡成長速度とチャンバー流入流量に差があれば圧力変動が生じる．気泡の体積変化を示している低流量 (20 ~ 150 cc/min) について見ると，急激に気泡が成長するとき圧力が減少していることが分かる．そして気泡離脱後は表面張力より大きな圧力に達するまでに気泡が成長せず，圧力が上昇している．

またチャンバーに流入する流量が増加するにしたがって気泡離脱後の圧力上昇速度は速くなっていき，離脱間隔は短くなっていく．

パワースペクトルは流速変動と同じく始め単周期であったものが空気流量 200 cc/min において 1/2 周期にピークが表われている．しかし，その強度は流速変動のそれと比べて小さく，時系列信号からも何が原因なのかは判別できない．また高流量領域 (300 cc/min ~) になると，それまである程度周期的だった時系列信号が複雑になっていき，広い周波数帯にわたる連続的なスペクトルとなる．この複雑さの原因として，気泡が成長し始める圧力の違い，すなわち差圧が減少し始める値が複雑になるからである．

3.1.2 流速波形と圧力波形の分岐図

実験 3.1.1 と同じ実験系で，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変化させた場合の流速変動と，圧力変動の分岐図を Fig.3-1-6 に示す．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．用いた流量レンジは 50 ~ 500 cc/min で 400 cc/min から 50 cc/min まで約 25 分かけて空気流量を減少させた．この際，ある時間ごとの空気流量を記録し，時間と流量の回帰曲線から各時間の空気流量を求めている．またスペクトログラムは長い時系列データから 8192 点を抜き出して高速フーリエ変換するという操作を 3000 点ずつずらしながら行うという方法で計算し，ウインドウは抜き出したデータと同じ長さのハニングウインドウを用いた．パワースペクトルの強度(dB)は色の濃淡で示している．

また，この実験で得られた長い時系列データからいくつかの特徴的な空気流量付近のデータを抜き出したものとそのパワースペクトルを Fig.3-1-7，3-1-8 に示す．

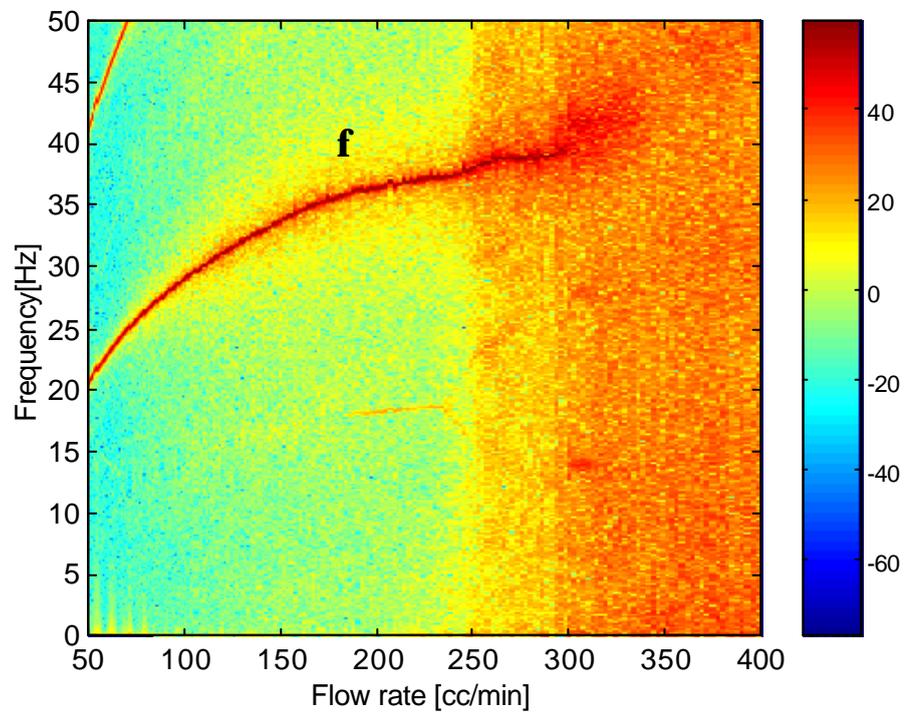
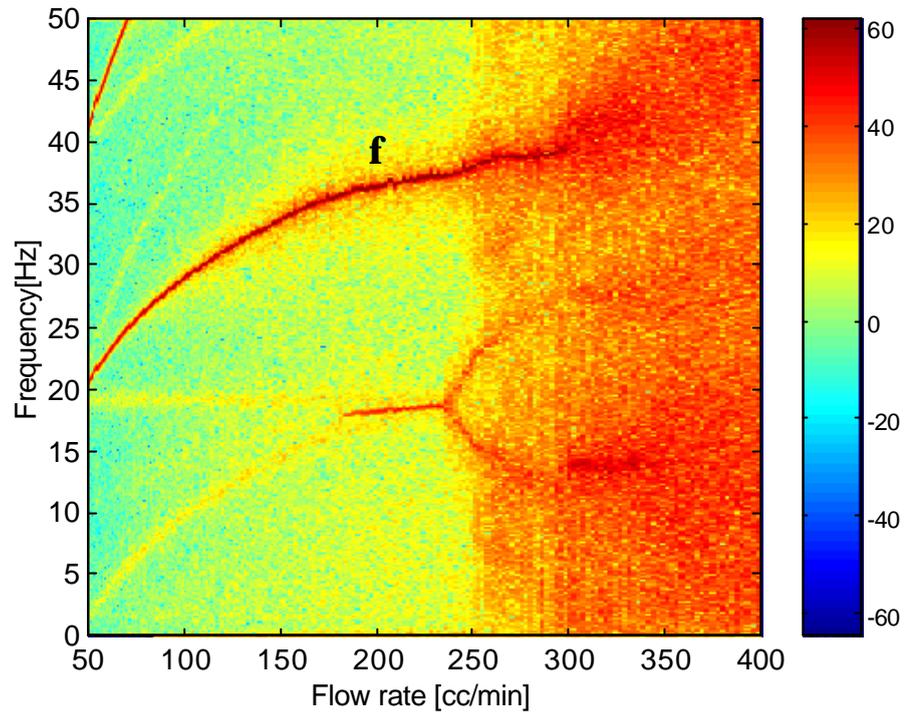
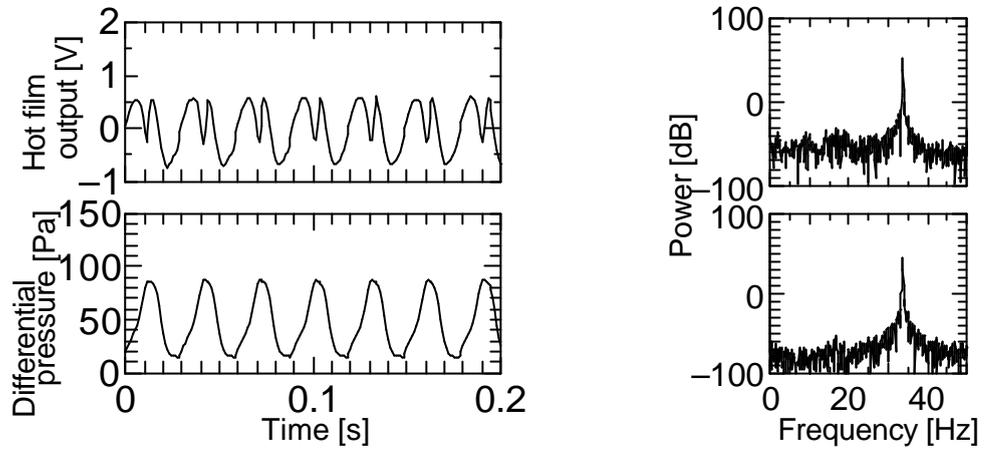
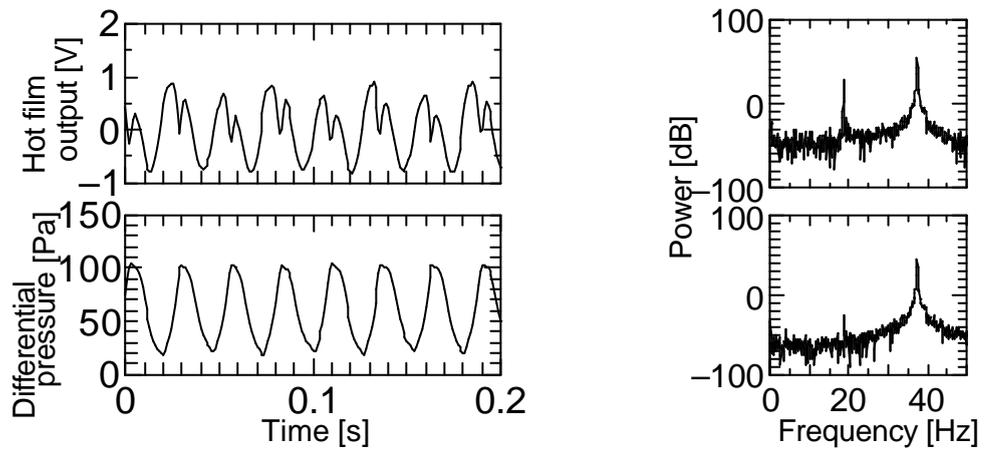


Fig.3-1-6 流速変動(上)と圧力変動(下)の分岐図
(チャンバ容積 5 [cc], $d=1.0$ [mm])

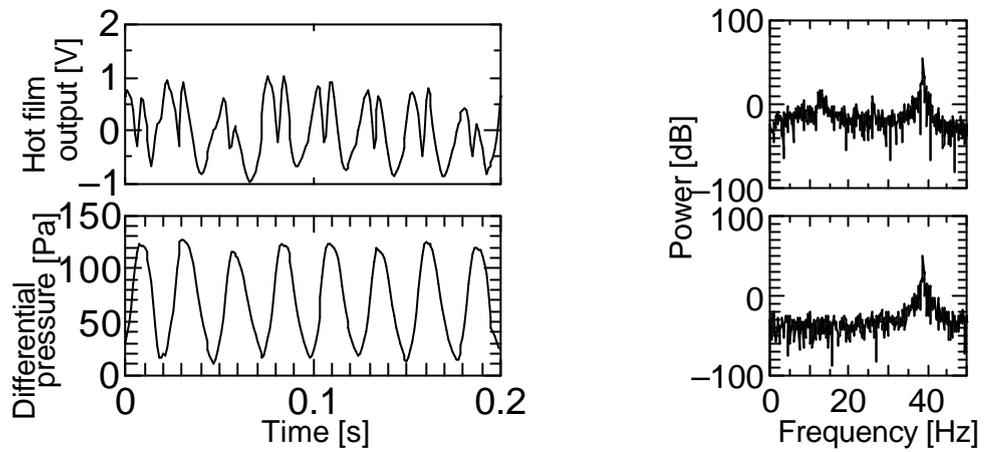


(a) $q=150$ [cc/min]

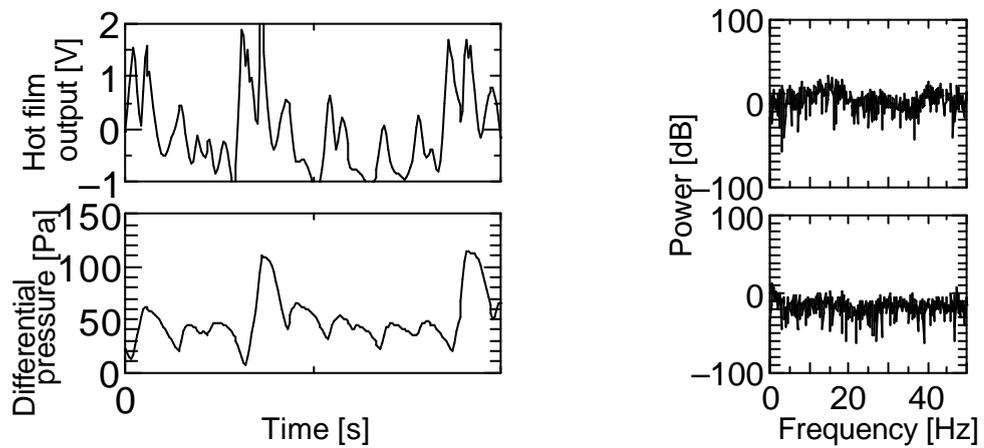


(b) $q=230$ [cc/min]

Fig.3-1-7 分岐図中の流速変動とパワースペクトル（上段）、圧力変動とパワースペクトル（下段）（チャンバ容量 5 [cc]， $d=1.0$ [mm]）



(c) $q=280$ [cc/min]



(d) $q=350$ [cc/min]

Fig.3-1-8 分岐図中の流速変動とパワースペクトル (上段), 圧力変動とパワースペクトル (下段) (チャンバ容積 5 [cc], $d=1.0$ [mm])

Fig.3-1-6 から流速変動と圧力変動の分岐図とも一本の線（図中の f ）が強く表われていることが分かる。これは基本周波数で、ほぼ気泡の離脱周期と一致する。また、どちらとも空気流量の増加に伴い周期が分岐していくことが分かる。しかし、その分岐の強度は流速変動と圧力変動では異なり、圧力変動では基本周期が支配的であり、 $1/2$ 周期の強度は弱い。流量が 350 cc/min あたりになると、流速変動、圧力変動とも基本周波数すらはっきり現れなくなる。3.1.1 から考えると、これは気泡の離脱間隔自体が複雑になっているからである。

分岐図中の時系列を抜き出した Fig.3-1-7, 3-1-8 では固定流量での実験と同じような波形とパワースペクトルが得られている。

これらから、何らかの原因でわずかだが気泡の成長・離脱パターンが分岐していて、それに伴い気泡周辺流体が分岐していると考えることが出来る。しかし、分岐の際の、強度の比較より気泡の周辺流体の流速変動は、気泡成長・離脱パターン以上の強い影響を受けて分岐している可能性がある。したがって分岐図より $1/2$ 周期が表われる付近の流速変動と圧力変動の時系列を Fig.3-1-9 に細かく抜き出して考察する。

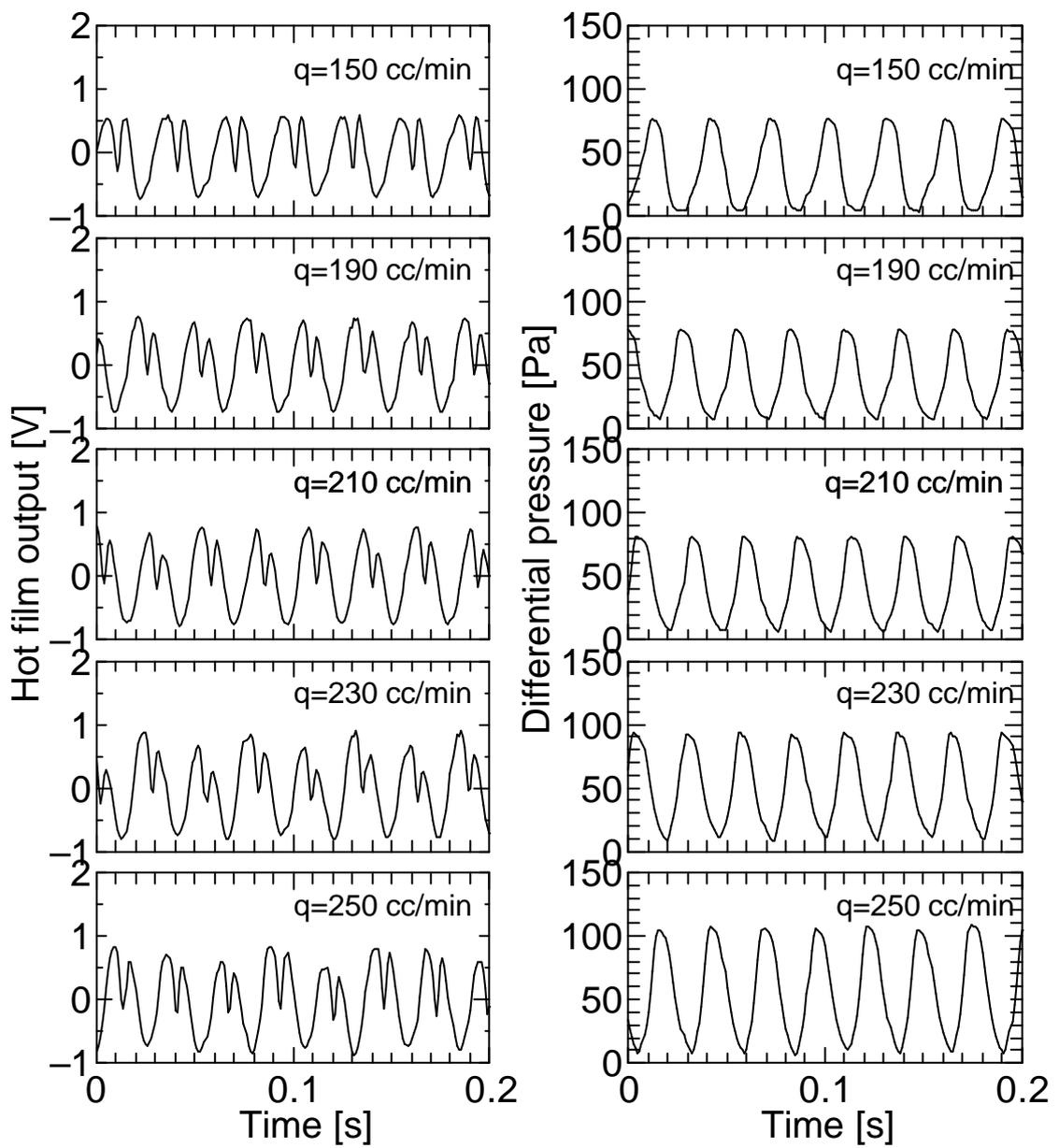


Fig.3-1-9 分岐図中の流速波形と圧力波形の比較

Fig.3-1-9 には分岐図中で単周期である 150 cc/min , 1/2 周期が表われる 190 ~ 230 cc/min , また 1/2 周期がくずれ始める 250 cc/min のときの , 分岐図中の流速変動と圧力変動の時系列を示している . 流速波形の変化を見ると , 流量の増加に伴い波形のピーク値の差が大きくなっていることが分かる . 圧力波形では 190 , 210 cc/min の時にはあまり分らないが , 230 cc/min の時に , 圧力の極小値がわずかに分岐していることが確認できる . 3.1.1 で示したように圧力変化が気泡の成長を表すのなら , 気泡の体積変化は途中の段階まではほとんど同じ傾向を示すが , 2 個に 1 個がわずかに早く離脱過程に入っているのではないかと推測できる . この原因は断定できないが , 先行気泡の引き込みの影響ではないかと考えられる . それに比べて流速波形が大きく信号の分岐が表われる . 3.1.1 から考えて , ホットフィルムプローブの信号は気泡の変形に付随するとすれば , その分岐は , 気泡の成長・離脱パターンの影響以上にその変形や上昇速度の影響の分岐によるものであると思われる .

3.1.3 実験 1 のまとめ

実験 1 から以下のようなことが言える．

- 1．ホットフィルムの信号は 1 つの気泡生成に対して 2 つのピークを示し，気泡の成長による流速変動と離脱過程における流速変動が特徴として表われる．また離脱間隔が短くなると，その波形は重なったものとなる．
- 2．連続的な差圧信号が気泡の成長パターンを表している．
- 3．流速変動と圧力変動の分岐図より，その分岐現象は一致するがその強度に大きな差がある．
- 4．基本周波数が支配的である気泡挙動，すなわち，ほとんど単周期である気泡挙動のなかで，気泡変形の違いによる周期倍分岐が現れる

3.2 実験 2 : 系による気泡挙動の相違

空気流入条件が気泡挙動にどのように影響するのかを調べるため，空気供給系に設置したチャンバー容積を変化させ，その分岐現象がどのように変化するかを考察する．実験方法は実験 1 と同様に固定流量と連続的に流量を変化させた場合について行った．

3.2.1 分岐図の比較

Fig.3-2-1 から Fig.3-2-5 に各チャンバー容積における流速変動と圧力変動の分岐図を示す．なおチャンバー容積 0 cc の場合，圧力変動は測定できない．

解析方法は実験 1 と同じくスペクトログラム解析を用いている．流量レンジはすべて 50 ~ 500 [cc/min] のものを用い，チャンバー容積 0 cc 以外は 400 ~ 50 [cc/min] まで減少させている．チャンバー容積 0 cc の場合は 500 ~ 100 [c/min] で減少させている．スペクトログラムの計算方法は実験 1 と同じである．

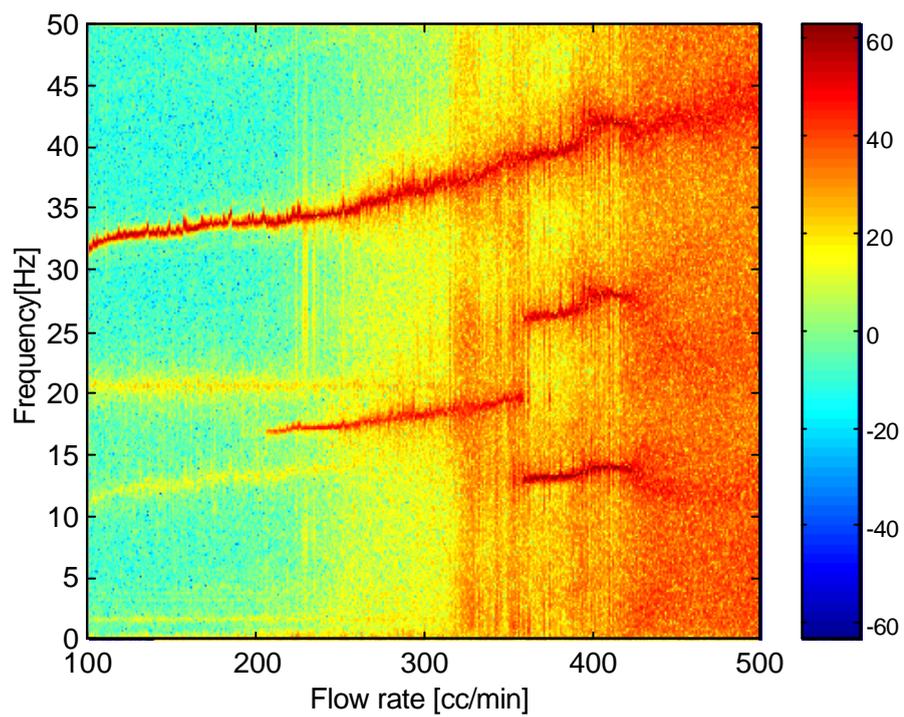


Fig.3-2-1 流速波形の分岐図
(チャンバー容積 0 cc , d=1.0 [mm])

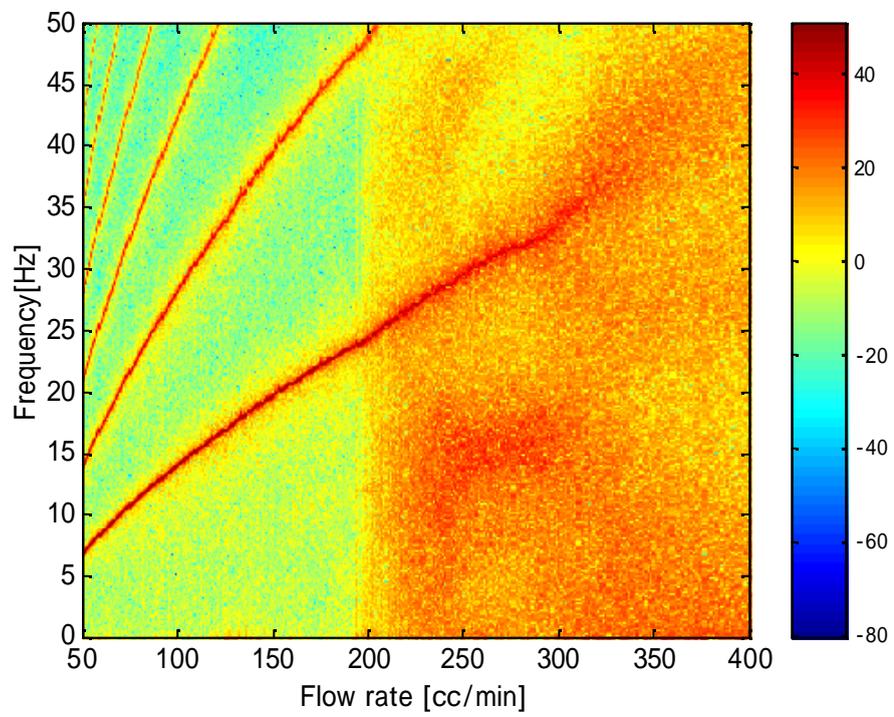
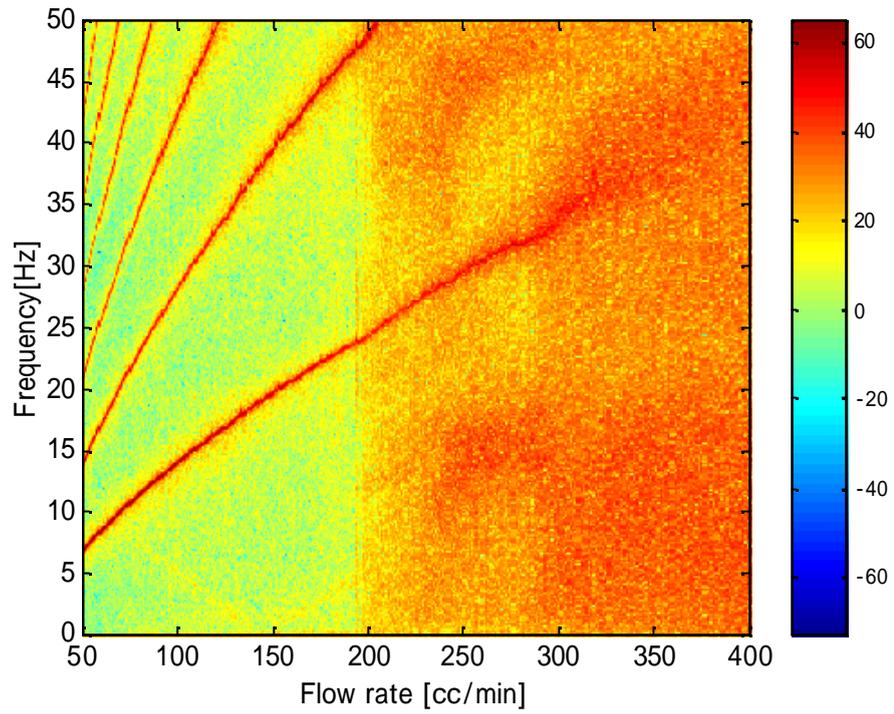


Fig.3-2-2 流速変動（上）と圧力変動(下)の分岐図
 (チャンバ-容積 60 [cc] , d=1.0[mm])

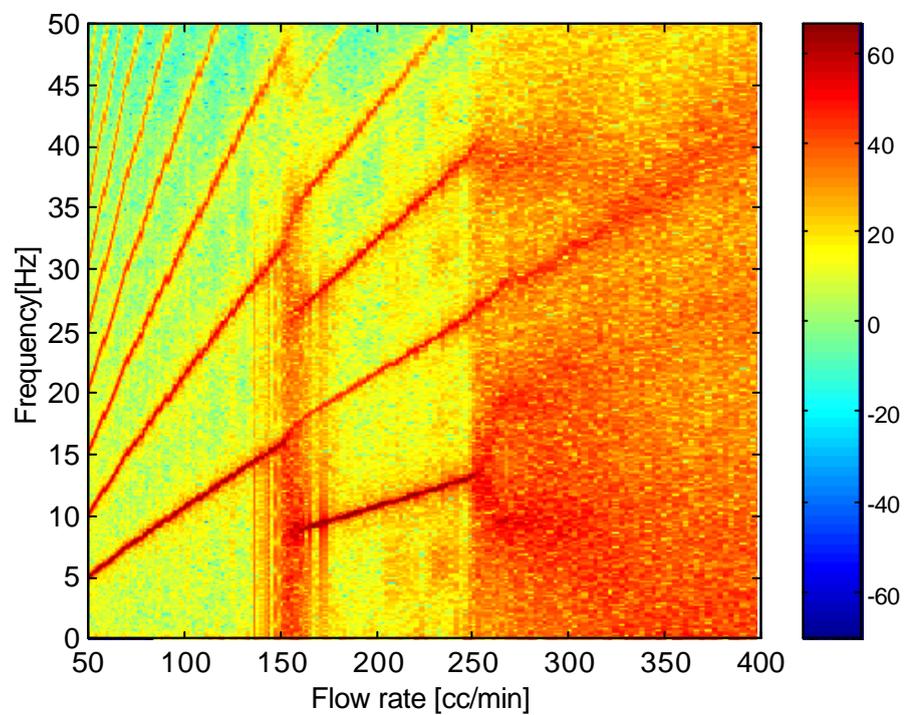
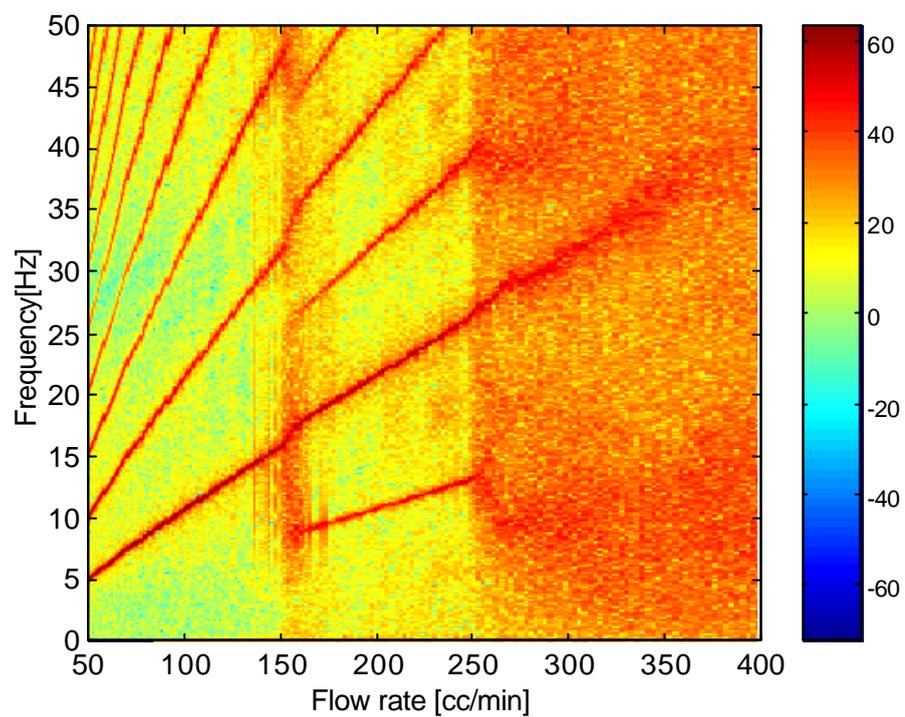


Fig.3-2-3 流速変動（上）と圧力変動（下）の分岐図
 （チャンバ容量 100 [cc] , d=1.0[mm]）

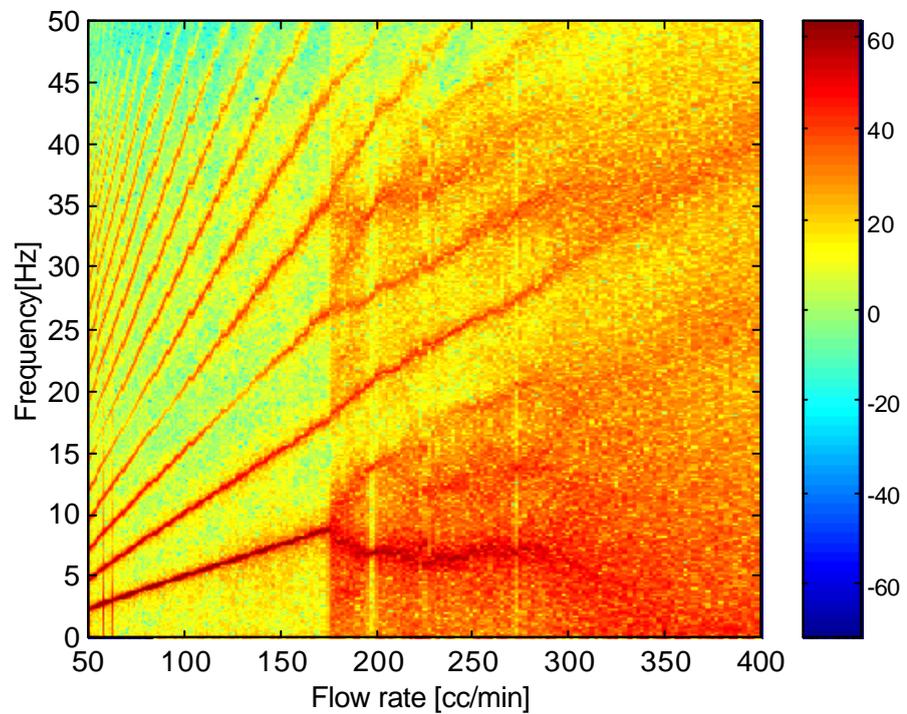
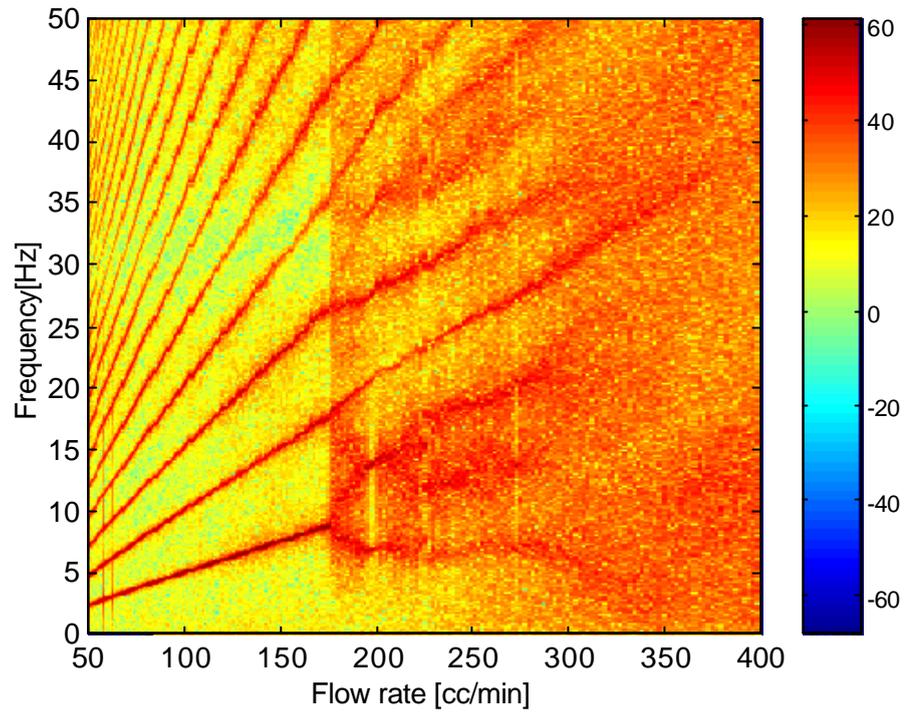


Fig.3-2-4 流速変動（上）と圧力変動（下）の分岐図
 （チャンバ容積 200 [cc] , d=1.0[mm]）

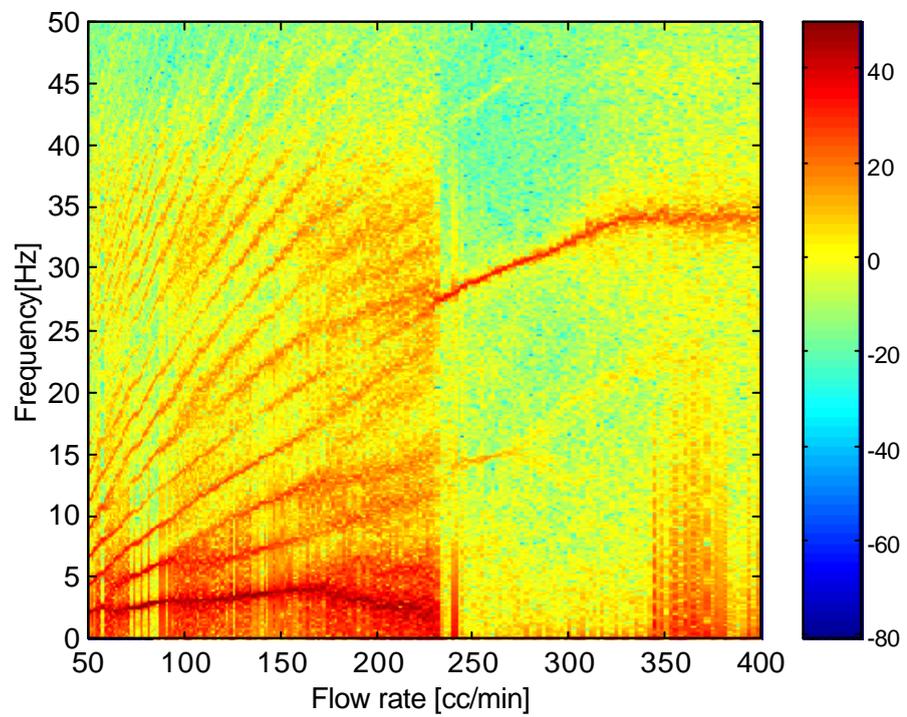
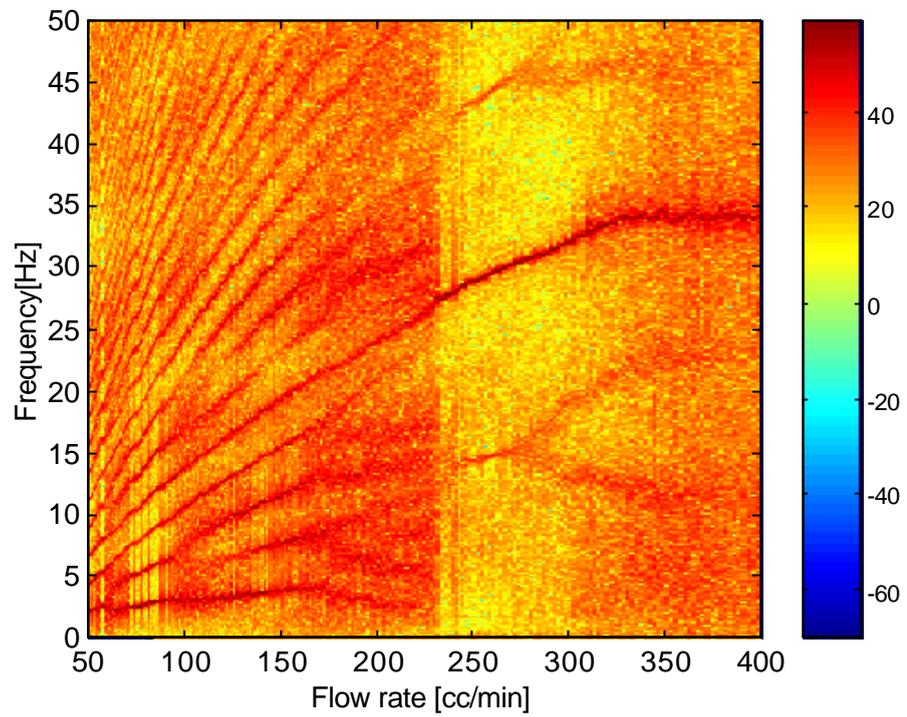


Fig.3-2-5 流速変動（上）と圧力変動(下)の分岐図
 (チャンバ容量 480 [cc] , d=1.0[mm])

まず各容積における分岐図の比較を行うと、明らかにその気泡挙動と分岐現象とが各容積で異なることが分かる。チャンバー容積 0 cc の場合には、単周期であったものが 2 周期、3 周期を経て周期のピークが分からない複雑な波形へ至っている。それに比べ、チャンバー容積 60 cc の場合には分岐現象が現れず、そのまま複雑な波形に至っている。また周波数ピークの増加傾向もチャンバー容積 0 cc と異なっている。チャンバー容積が 100 cc になると、周波数ピークの増加傾向は 60 cc と類似しているが、分岐現象は現れて複雑に至っている。そしてチャンバー容積 200 cc、480 cc と増えるにしたがい、より複雑に分岐していく様子が分かる。また各容積の場合とも流速変動と圧力変動の分岐は同じ傾向が現れている。

各容積の分岐図の比較によって、チャンバー容積の変化は流速変動と圧力変動の分岐現象を変化させることは分かった。

次に各容積において分岐図が気泡のどのような現象を表しているか考察する。

チャンバー容積 0 cc の場合

分岐図における各流量の時系列信号,パワースペクトルと固定流量におけるそれらは同じ傾向を示しているので,固定流量における空気流量 250,400cc/min の流速波形,パワースペクトルおよび高速度ビデオカメラの映像を Fig.3-2-6 に示す. また図中の 印は離脱ポイントを表す. 250 cc/min のとき,パワースペクトルは, $1/2$ 周期が現れている. しかし気泡の離脱間隔だけみればほとんど単周期であり,実験 1 で述べたような気泡の変形に付随した分岐現象であることがわかる. また 400 cc/min おいて 3 周期が現れているが,この時,気泡は 3 個に 1 個が合体することによる周期の分岐である.

チャンバー容積 60 cc の場合

同様に,固定流量における空気流量 100,300cc/min の流速波形,圧力波形,パワースペクトルおよび高速度ビデオカメラの映像を Fig.3-2-7 に示す. 100 cc/min の時には,時系列からも分かるように周期的な発泡をしている. 1 つ気泡が離脱してから次の気泡が離脱するまでに圧力は増加と減少を規則正しく繰り返していて,分岐図のピークは気泡の離脱間隔の周期を表している. 分岐図ではいまままで現れていたような分岐現象,すなわち規則正しい離脱の中で気泡変形によって現れる分岐現象は現れず複雑に至っている. 分岐が現れない理由として,その分岐現象が気泡離脱径や基本離脱周期に依存したものであり,この系の場合はその分岐が起こる条件に合わないことが考えられる.

チャンバー容積 100 cc の場合

同様に,固定流量における空気流量 100,200 cc/min での流速波形,圧力波形,パワースペクトルおよび高速度ビデオカメラの映像を Fig.3-2-8 に示す. まず 100 cc/min の時にはチャンバー容積 60 cc の時と同様に気泡 1 個に対して圧力波形が 1 つの波形で現れている. しかし,200 cc/min の時にはチャンバー内圧力が上昇して 1 個目の成長した際の圧力減少後,連続的に次の気泡が成長し,2 段階に圧力が減少している. 2 個目の気泡が離脱した後は次の気泡は成長出来ず,また圧力が上昇していつている. すなわち気泡が 2 個連続で出る現象が周期的に現れていることが分かる. この場合,パワースペクトルは差圧の減少,増加によって現れる周期にピークが立つ. この場合,同流量下で気泡 1 個が周期的に出るときと比べ,2 個連続で気泡が生成した場合のほうが圧力の減少が大きくなる. そのため次の気泡が生成し始めるまでの圧力が溜まる間隔が長くなり,パワースペクトルのピークが出る周波数が小さくなる. そのため分岐図でそれまで気泡 1 個が周期的にでていた周波数より低いところにピークが現れ

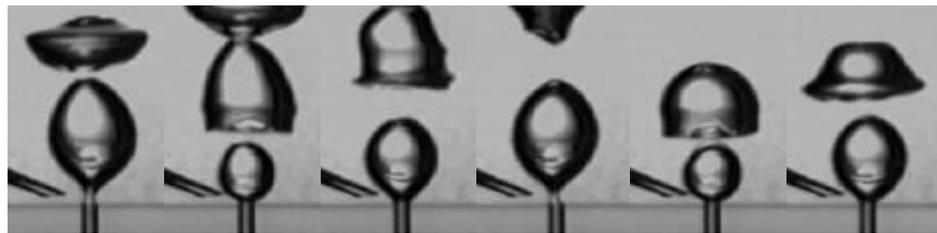
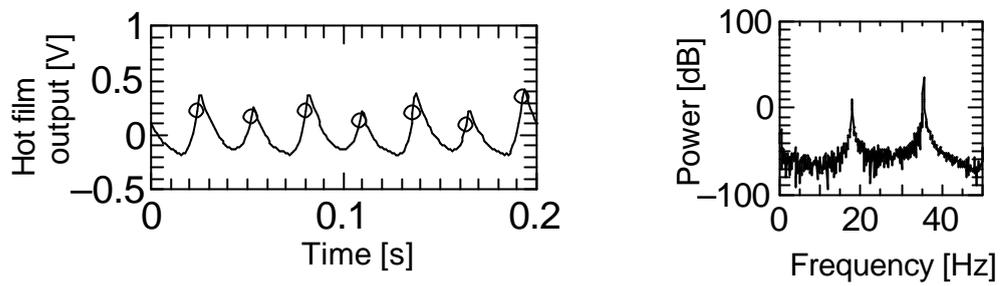
る。しかし、なぜ気泡が生成し始める圧力が1個目と2個目で異なるのかは明らかにならず、今後の研究課題である。

チャンバー容積 200 cc の場合

以上の気泡挙動と信号との対応をふまえて、時系列信号をある流量付近を抜き出したものと、そのパワースペクトルを Fig.3-2-9, 3-2-10 に示す。チャンバー容量 100 cc の場合と同様に、気泡が何個ずつ連続的に生成するかによって、周波数ピークが異なり、分岐図において分岐現象が現れる。なお、流量によっては連続的にできる気泡の個数が周期的でなくなり、パワースペクトルは幅広い周波数帯となる。

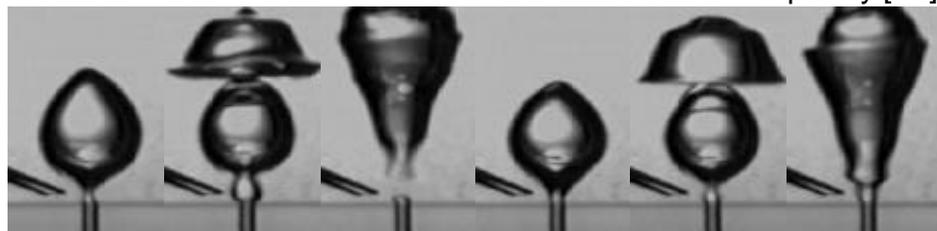
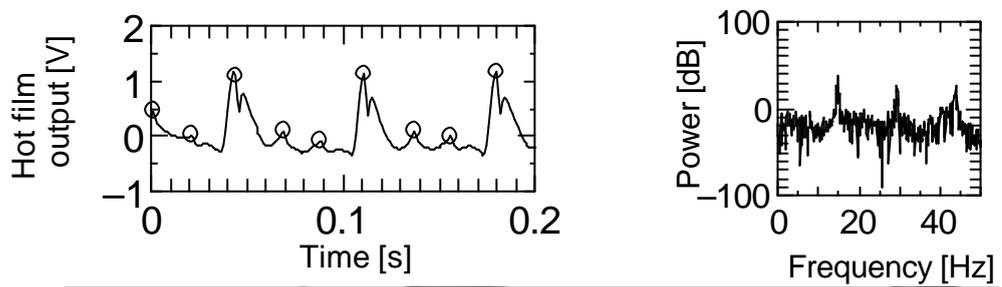
チャンバー容積 480 cc の場合

チャンバー容量 200 cc の場合と同様に、時系列信号をある流量付近を抜き出したものと、そのパワースペクトルを Fig.3-2-11, 3-2-12 に示す。分岐図の分岐現象の原因としては、チャンバー容量 100 cc と 200 cc の場合と同様である。しかし、高流量になると圧力変動は気泡1個に対応して周期的に出るようになり、その周波数にパワースペクトルのピークが立つ。



0.023 s Time step = 0.009 s →

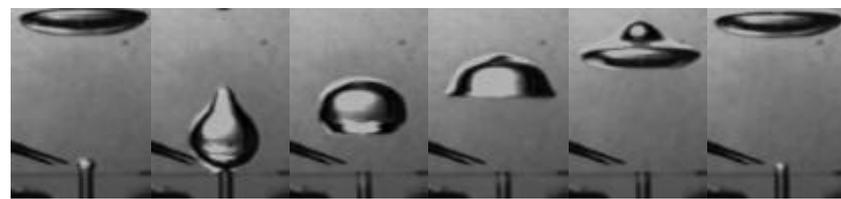
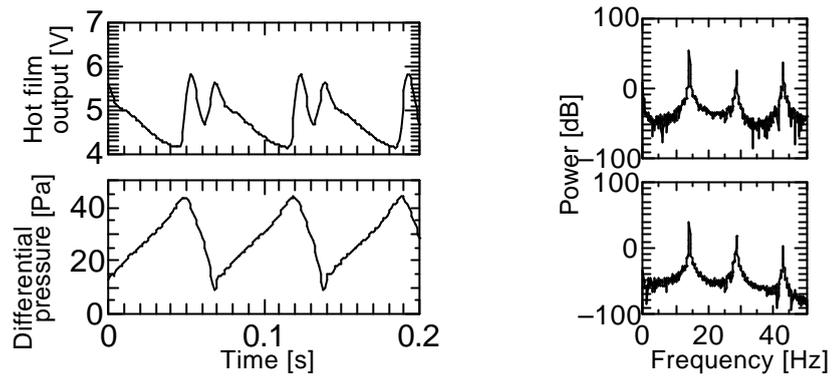
(a) $q=250$ [cc/min]



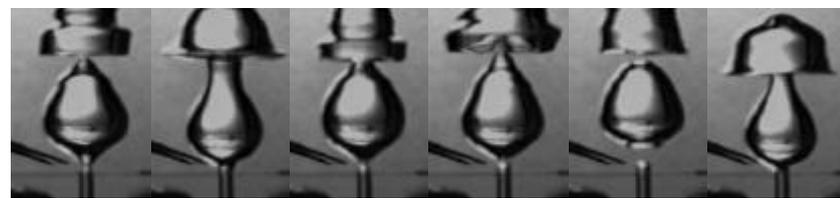
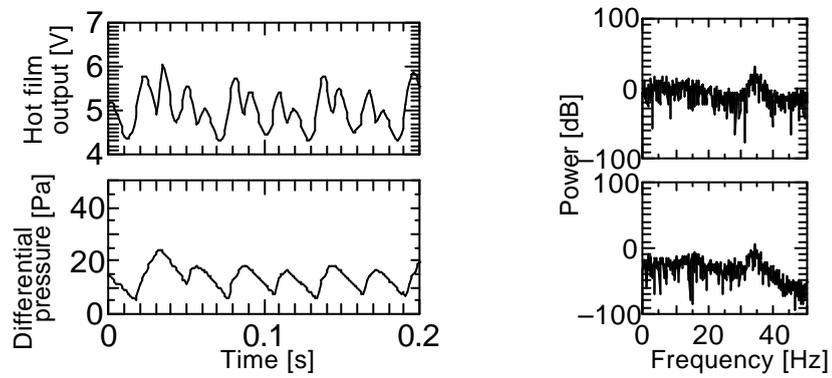
0.000 s Time step = 0.022 s →

(b) $q=400$ [cc/min]

Fig.3-2-6 流速変動とパワースペクトル(上段), ビデオ映像(下段)
(チャンバ容積 0 [cc], $d=1.0$ [mm], 固定流量)

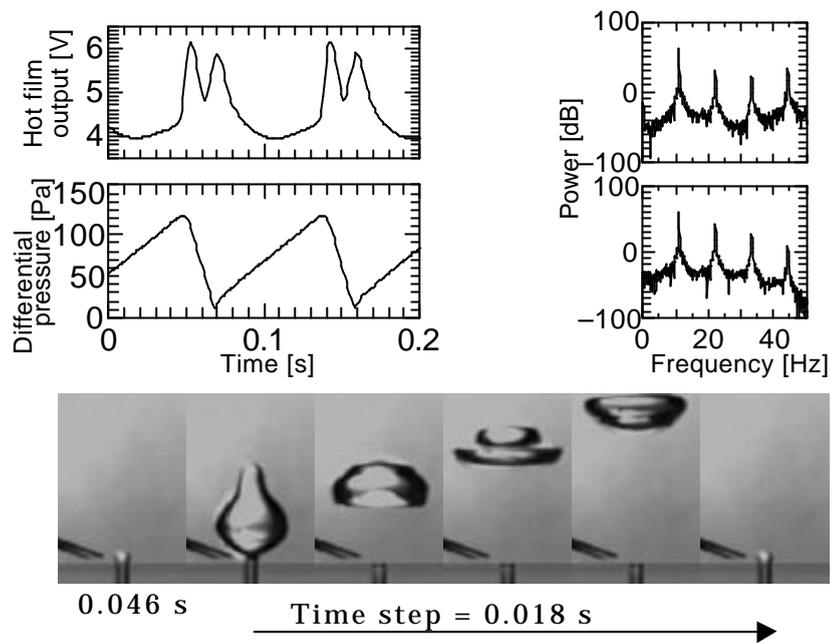


0.051 s Time step = 0.015 s
(a) $q=100$ [cc/min]

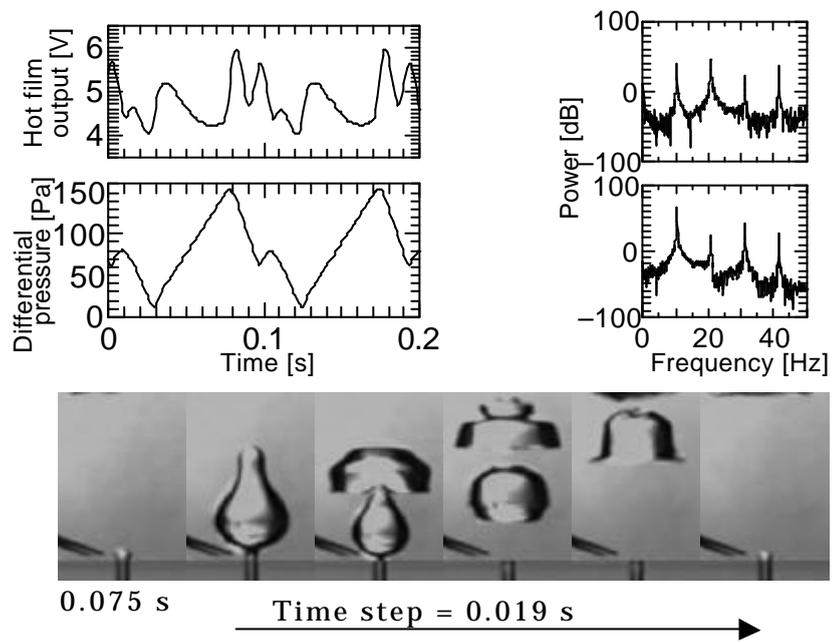


0.016 s Time step = 0.030 s
(b) $q=300$ [cc/min]

Fig.3-2-7 流速変動とパワースペクトル(上段), 圧力変動とパワースペクトル(中段), ビデオ映像(下段)(チャンバ-容積 60 [cc], $d=1.0$ [mm], 固定流量)

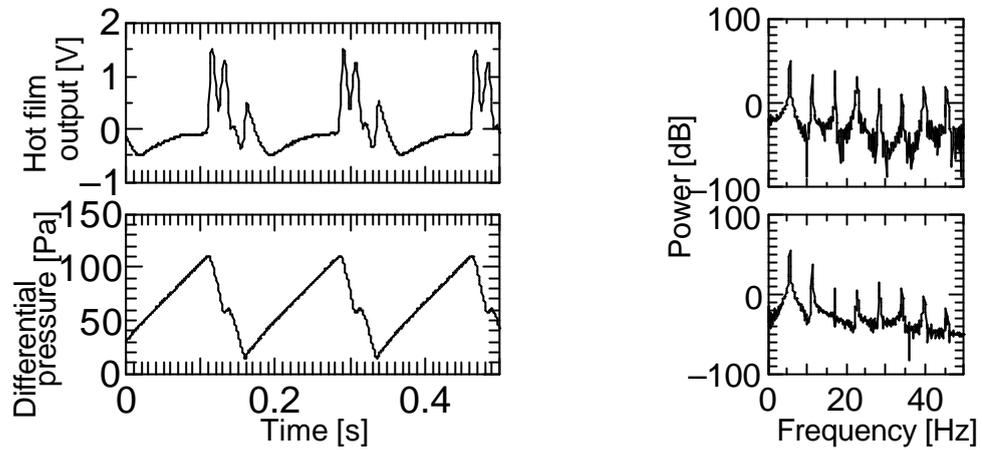


(a) $q=100$ [cc/min]

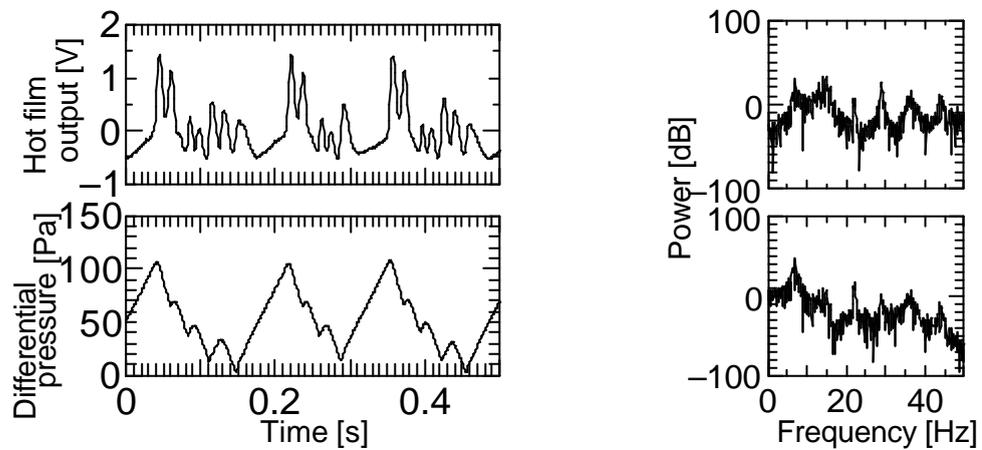


(b) $q=200$ [cc/min]

Fig.3-2-8 流速変動とパワースペクトル(上段),圧力変動とパワースペクトル(中段),ビデオ映像(下段)(チャンバ容量 100 [cc], $d=1.0$ [mm], 固定流量)



(a) $q=100$ [cc/min]



(b) $q=200$ [cc/min]

Fig.3-2-9 分岐図中の流速変動とパワースペクトル (上段), 圧力変動とパワースペクトル (下段) (チャンバ容積 200 [cc], $d=1.0$ [mm])

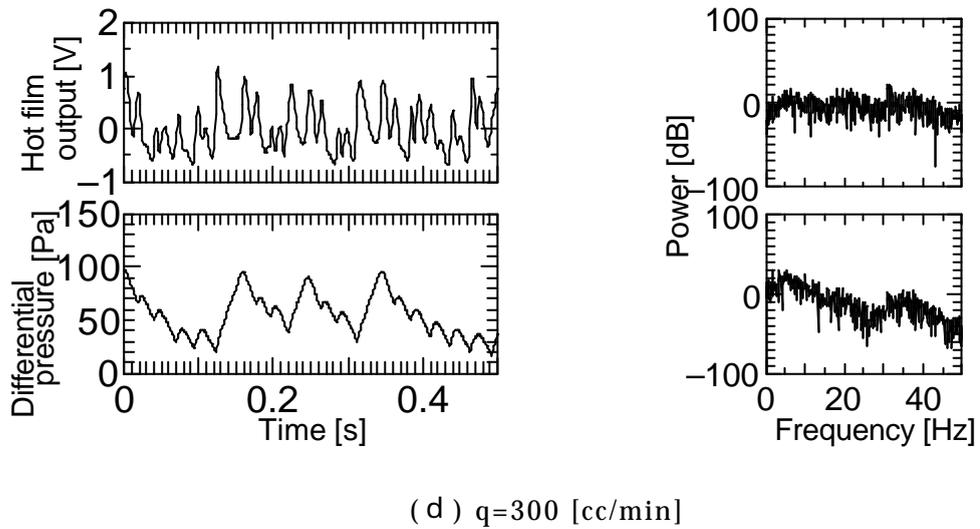
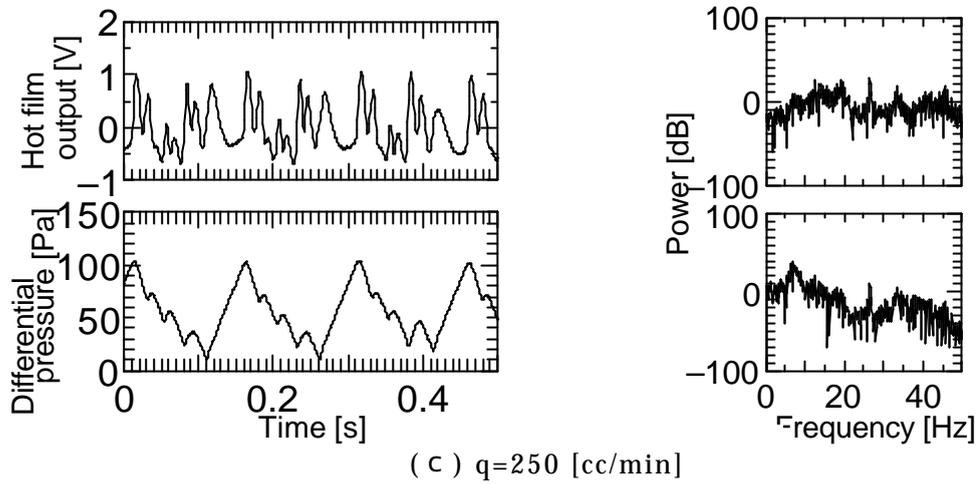
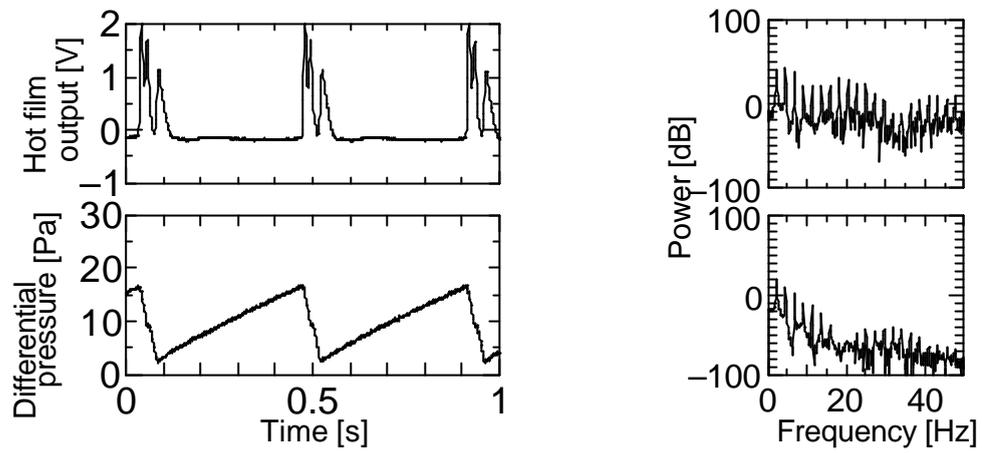
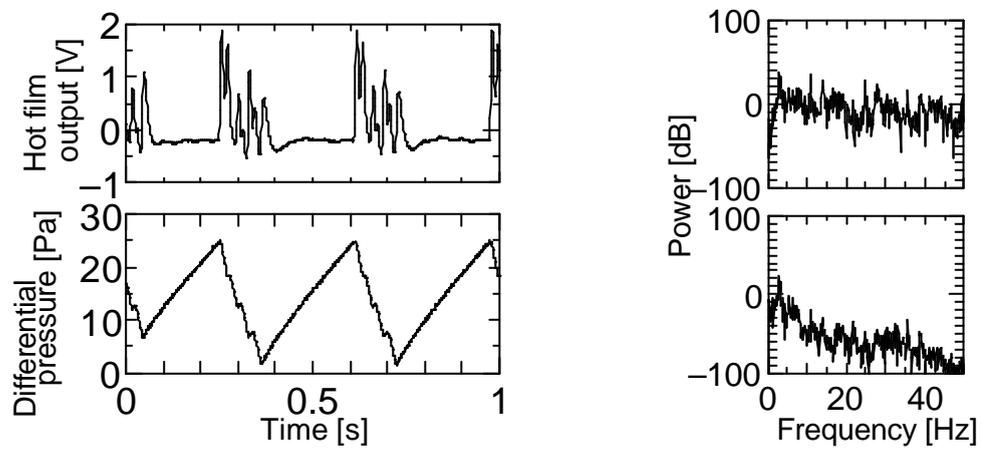


Fig.3-2-10 分岐図中の流速変動とパワースペクトル(上段), 圧力変動とパワースペクトル(下段)(チャンバ-容積 200 [cc], $d=1.0$ [mm])

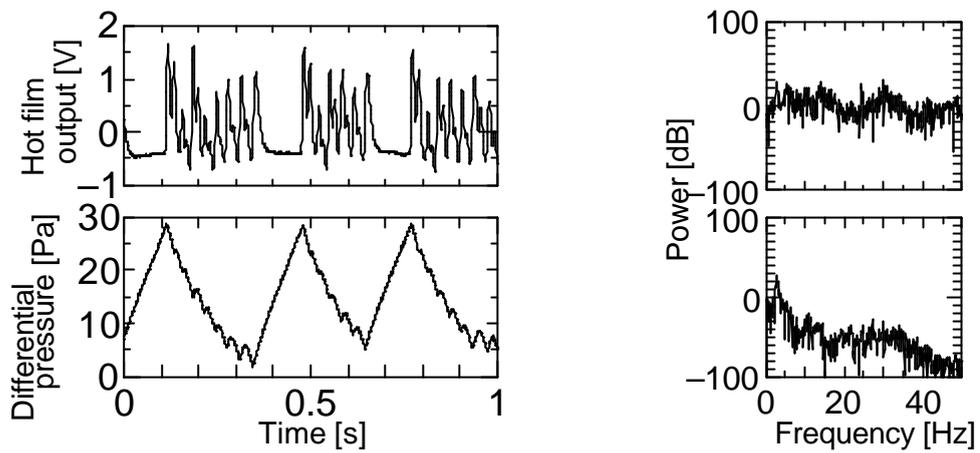


(a) $q=50$ [cc/min]

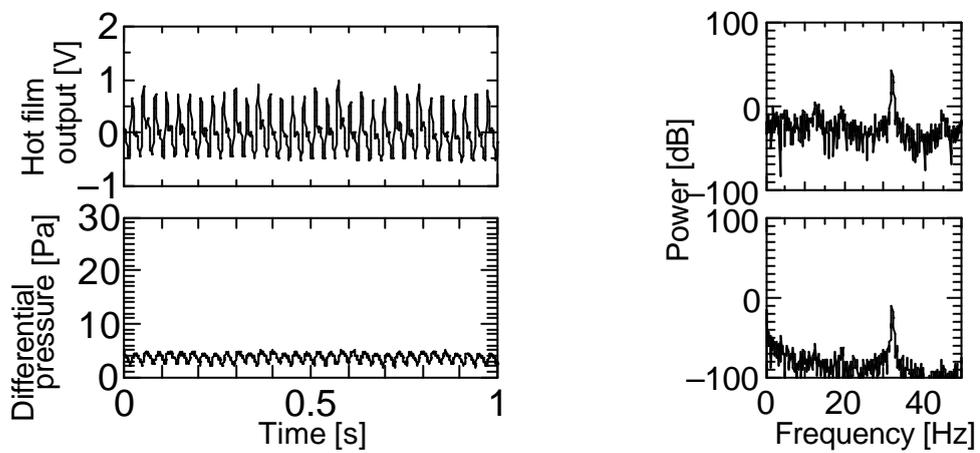


(b) $q=100$ [cc/min]

Fig.3-2-11 分岐図中の流速変動とパワースペクトル(上段), 圧力変動とパワースペクトル(下段)(チャンバ容積 480 [cc], $d=1.0$ [mm])



(c) $q=200$ [cc/min]



(d) $q=300$ [cc/min]

Fig.3-2-12 分岐図中の流速変動とパワースペクトル(上段), 圧力変動とパワースペクトル(下段) (チャンバ容積 480 [cc], $d=1.0$ [mm])

3.2.2 実験 2 のまとめ

実験 2 から以下のことが言える .

1. チャンバー容積を変化させた場合 , その分岐現象が変化する .
2. チャンバー容積 60 cc の場合では , 分岐現象が現れずに複雑に至る .
3. チャンバー容量が 100 ~ 480 cc に現れる分岐現象は , チャンバー容積 0 に現れる周期倍分岐とは違い , 気泡の間欠性 , すなわち何個ごとに気泡が間欠的になるかの違いによる分岐である .

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

1. ホットフィルムの出力信号は1つの気泡生成に対して2つのピークを示し気泡の成長による流速変動と離脱過程における流速変動が特徴として表われる。また離脱間隔が短くなると、その波形は重なったものとなる。
2. 気泡の成長挙動が単調でも周辺流体の流速変動は分岐していく。すなわちそれ以外の気泡の情報（変形や上昇速度など）によって分岐現象が起こる。
3. 空気流入条件の違いにより、流速変動、圧力変動の分岐現象が変化する。またその分岐の原因は気泡の離脱間隔自体の分岐（間欠性）によるものである。

4.2 今後の課題

本研究ではホットフィルムプローブの信号が気泡のどのような現象をあらわしており、流速変動の分岐は気泡の挙動のどのような現象を捉えているかについて調べているが、これは結果の説明をしている段階である。なぜ流速変動の分岐現象があらわれるような気泡挙動が起こるのかということまでは調べられていない。しかし現象を理解するためにはその原因が重要である。その原因を調べるためには、先行気泡の影響や、気泡の上昇速度、変形など特性の理解が必要であると思われる。

謝辞

本論文を作成するに当り親身なご指導をいただきまし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，芝浦工業大学から来た私に気を使って頂き大学生活から実験に至るまで多くの面で協力，ご指導していただいた横谷定雄助手，井上満助手，渡辺誠技官に感謝いたします。

博士課程の伊藤さんには研究に対する姿勢から，実験，論文作成に関する協力やアドバイス，生活面に関することまで大変多くの面でお世話になりました。これからも庄司・丸山研究室を引っ張って行って下さい。ドイツにおられる山口さんには，帰国なされた際にはプログラム作成などしていただきありがとうございました。約一ヶ月という短い期間でしたけど大変お世話になりました。留学生の柴さん，姜さん，汪さん，張さん，徐（佐井）さん，連さん，短い間でしたがお世話になりました。

修士2年の野上さんには，直接同じ実験を行うということで多大な迷惑をおかけしてしまいました。何も知らない私に，研究における考え方，実験についてや，発表，論文作成に関することまで，丁寧にご指導していただきました。大変感謝いたしております。就職してもがんばってください。フランスにおられる安井さん，いろいろ相談にのっていただいた修士1年の横田さん，坂田さん，大変お世話になりました。これから研究に励むことになるかと思いますが，がんばってください。

4年生の小川君，竹村君，宮崎君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。おかげで東京大学という私にとって新しい環境を楽しく過ごすことが出来ました。

また遠くから私を支えてくれた芝浦工業大学応用熱研究室の鴨志田準司助教授，研究室のみなさまに深く感謝いたします。

みなさまのおかげで大変充実した一年間を過ごすことが出来ました。この一年間の経験を，私の後の生活に生かせるようがんばりたいと思います。ありがとうございました。

参考文献

- 1) Abe, N. et al, Experimental research on nonlinear of bubble formation and interference, proc.32nd Japan National Heat Transfer Symposium, pp435-436, 2000.
- 2) Terasaka, K., & Tuge, H, bubble Formation at single orifice in highly viscos licuid, .Chemical Engineering of Japan, pp160-165, 1990.