

# 卒業論文

## 気泡間の相互干渉に関する実験的研究

通し番号 1-73 完

平成 12 年 2 月 4 日提出

指導教官 庄司 正弘 教授

80230 陳 詩毅

# 目次

## 第一章 序論

第一節 はじめに

第二節 従来 of 捉え方

第三節 研究の目的とねらい

## 第二章 実験

第一節 実験装置

第二節 実験方法及び実験条件

## 第三章 実験結果

第一節 流量による平均周期の変化

第二節 単一気泡の周期の分布

第三節 リターンマップと周期の波形

第四節 分岐図

## 第四章 考察

第一節 従来の実験データとの比較

第二節 単一気泡の考察

第三節 干渉による影響の考察

## 第五章 結論

第一節 結論

第二節 今後の課題

参考文献

謝辞

付録

# 第一章 序論

- 第一節 はじめに
- 第二節 従来の捉え方
- 第三節 研究の目的とねらい

## 第一節 はじめに

沸騰は、日常の生活から切っても切れない身近な現象の一つである。しかし、一方では相変化を伴わない気体や液体単相による熱伝達と比較して格段に高い熱伝達が得られることから、工業上において、非常に重要なものとして扱われている。その応用例は広い分野にわたり、例えば、高温の加熱面の冷却を目的とした鉄鋼の製造プロセスや電子デバイスの冷却、蒸気の発生を利用してボイラを用いた発電設備、蒸気機関等の熱機器等がある。

沸騰は、横軸に過熱度、縦軸に熱流束をとると、核沸騰、遷移沸騰、膜沸騰の3つの領域に分けることができる。この曲線を沸騰曲線という。

核沸騰は、気泡が加熱面の微小な気泡核から発生するもので、発泡開始から過熱度が急激に上昇するバーンアウトまでの領域で見られる。核沸騰はさらに、低過熱度のときの、発生した気泡が相互に干渉せずに離脱していく孤立気泡域と、過熱度が高くなるにつれて気泡の発生と離脱が頻繁になり、気泡が合体して激しい沸騰様相を現す合体気泡域に分けられる。

この領域で見られる現象を Fig.1-1-1 に示す。

また、核沸騰の上限がバーンアウト点であるが、バーンアウトが起こると過熱度が急激に上昇し、加熱面が薄い蒸気膜に覆われて直接液体に触れない膜沸騰状態になる。そして、核沸騰と膜沸騰の間に遷移沸騰域があり、過熱度の上昇とともに熱流速が減少する特異な領域でもある。

以上から、沸騰の様相が変化するこれらの点は、熱機器の安全面から工業上重要な点であるが、その発生機構は難しく、その解明には、沸騰現象全体の本質的理解が必要であると思われる。

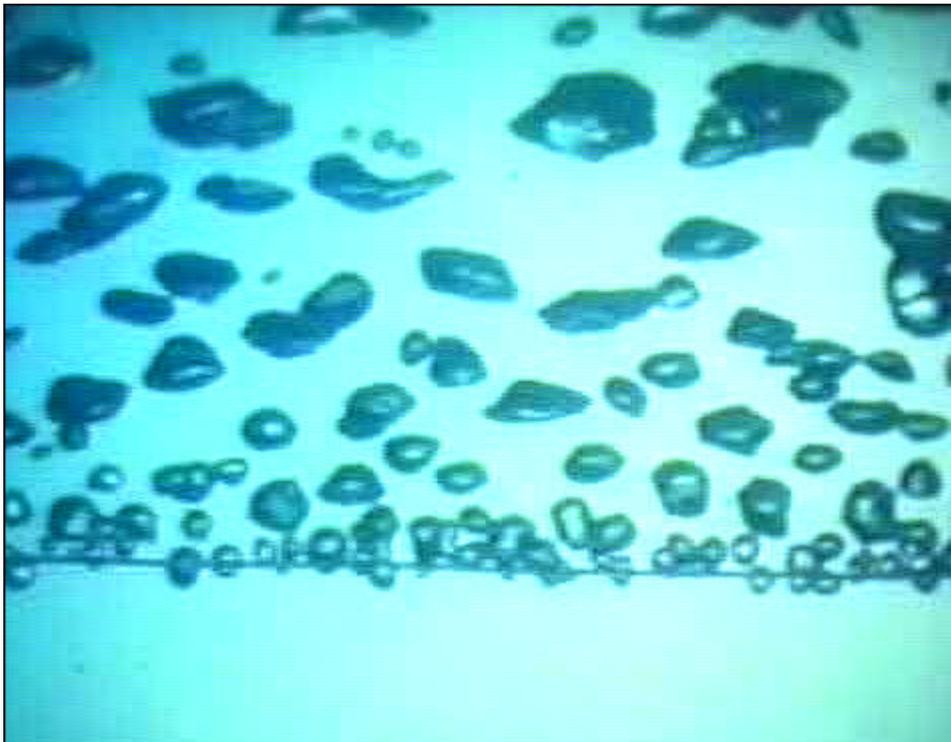


Fig.1-1-1 細線の沸騰

## 第二節 従来の捉え方

気泡発生方法には大きく分け直接法と制御法とがある。さらに直接法の中に流量一定条件(Constant Flow Condition)と圧力一定条件(Constant Pressure Condition)とがある。直接法というのは、静止液体または流量液体の中に置かれたオリフィスに気体を供給し、気泡を形成、離脱させる方法で、通常用いられている方法はほとんどこの方法である。この場合、オリフィスに供給される気体の流量を一定にしたものを流量一定条件といい、オリフィス直前に気体の圧力室を設けてその圧力を一定に保持したものを圧力一定条件という。以下、直接法・流量一定条件について述べる。気体流量を一定にするためにオリフィス直前に非常に大きな抵抗を与える必要があるが、その手段として微小ガラス球の封入、焼結金属板、あるいはオリフィスプレートのかわりに毛細管など用いられている。

本研究では内径 0.3mm の毛細管を用いて抵抗を与えている。

さまざまなオリフィス径に対する発生気泡の体積  $V_{b0}$  (等価直径  $D_{b0}$ ) とオリフィスレイノルズ数の関係を空気 水系について Fig.1-2-1 に示す。Fig.1-2-1 において  $Re_0$  が小さい範囲( $Re_0:10 \sim 30$ )では一つのオリフィス径に対して  $V_{b0}$  が  $Re_0$  にほとんど関係なく一定に近い値をとる。この領域を体積一定領域(Constant Bubble Volume Region)という。これより  $Re_0$  の大きいところでは  $V_{b0}$  が  $Re_0$  にほぼ正比例して増加し、気泡の発生頻度は大体一定の値に保たれる。これを気泡発生頻度一定領域(Constant Frequency Region)という。Fig.1-2-1 において発生する気泡の大きさが  $D_0$  及び  $Re_0$  の値で決定できるものとしているが、実際にはこれら以外の因子が多数存在しているものとして考えられている。液体を純粋な液体に限定しても、液体の密度と粘性係数、表面張力、接触角、周囲液体の流速と方向、オリフィスの姿勢(浮力の働く方向とオリフィスプレートのなす角度)などがある。Davidson らは気液の物性値が  $V_{b0}$  に及ぼす影響について流量の増加にしたがい気泡体積は増加すると結論している。

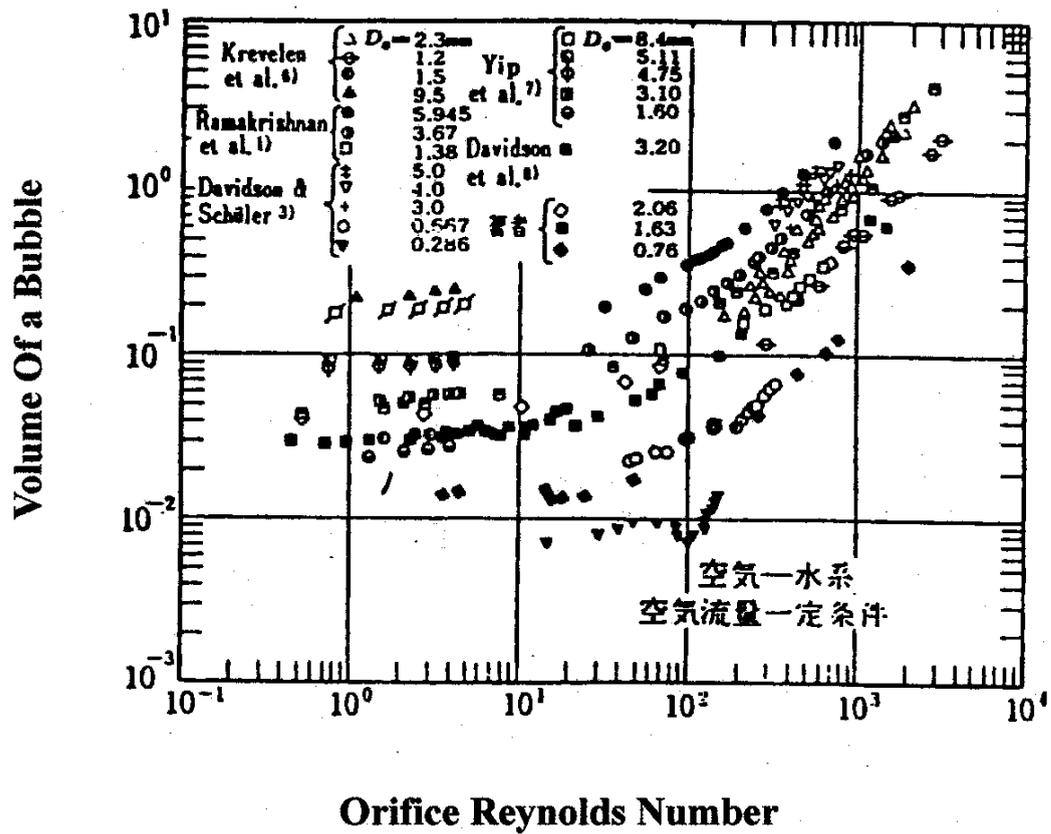


Fig.1-2-1 単一オリフィスから発生される気泡体積の比較

## 研究の目的とねらい

近年になって、非線形現象に対してカオス工学という学問が盛んに研究されるようになった。本質的に非線形現象であると考えられている沸騰や気泡流の基礎研究として、水-空気系での気泡の生成と離脱に関する研究も行われているが、カオス工学的な視野から論じたものは少ない。なお且つ、従来は時間と空間的に平均化された値で解析され、気泡の干渉において、気泡は気泡径の2倍程度の範囲で相互に影響を及ぼすとされてきた。しかし、このような平均操作のみでは、最近の非線形力学から不十分であることがわかった。実際、現在の数値解析モデルは、せいぜい1個の気泡が扱える程度であり、また、非線形動力学モデルでも、知識不足の為気泡の挙動は含められない状況にある。

したがって、非線形力学を用いた気泡力学的研究が必要であると思われる。そこで、沸騰の中の一つ現象である気泡間の相互干渉を取り出して研究を行うことにした。その際に、実際の沸騰現象において、隣り合う気泡同士の体積に殆ど差がない為、本実験では二つのオリフィスから流れ出る空気量を同じものとする。また、オリフィス間の間隔は気泡径の2倍前後の5mm, 10mm, 15mm の三つをとり、それぞれの場合についてお互いどう影響を及ぼすかを明らかにする。

## 第二章 実験

### 第一節 実験装置

### 第二節 実験方法及び実験条件

## 第一節 実験装置

本研究では、静水中において、空気流量を変化させ、黄銅面上の複数オリフィスから生成する空気泡の干涉挙動を高速ビデオカメラによって現象を記録し、気泡同士の干涉を調べる。そして、複数オリフィスの空気流量とオリフィス間の距離の関係を明らかにする。

実験装置の組立図を Fig.2-1-1, Fig.2-1-2 に示す。



### 実験装置系

1. 小型コンプレッサ（日立製作所、最高使用圧力7気圧）  
空気を圧縮して溜め、送気管を通して空気を送るためのもの。



2. 流量計（OMEGA、製品番号 N01641、Y01885）  
送気管を通してきた空気の流量を調節するもの。



3. 送気管  
コンプレッサからの空気をオリフィスまで導くための管。ビニールにより作られている。

### 仕様

- 試験流体は一度蒸留した水道水を数日間密閉保管したものを使用する。
- コンプレッサにより圧縮された空気の流量を一定に保つ為に、オリフィス直前に内径 0.3mm の毛细管を用いて非常に大きな抵抗を与える。
- 空気放出口は内径 2mm のステンレスパイプを使用する。
- 空気流量範囲を 30cc ~ 500cc とする。
- オリフィス間の距離が 5mm, 10mm, 15mm の 3 つのパターンを実験する。

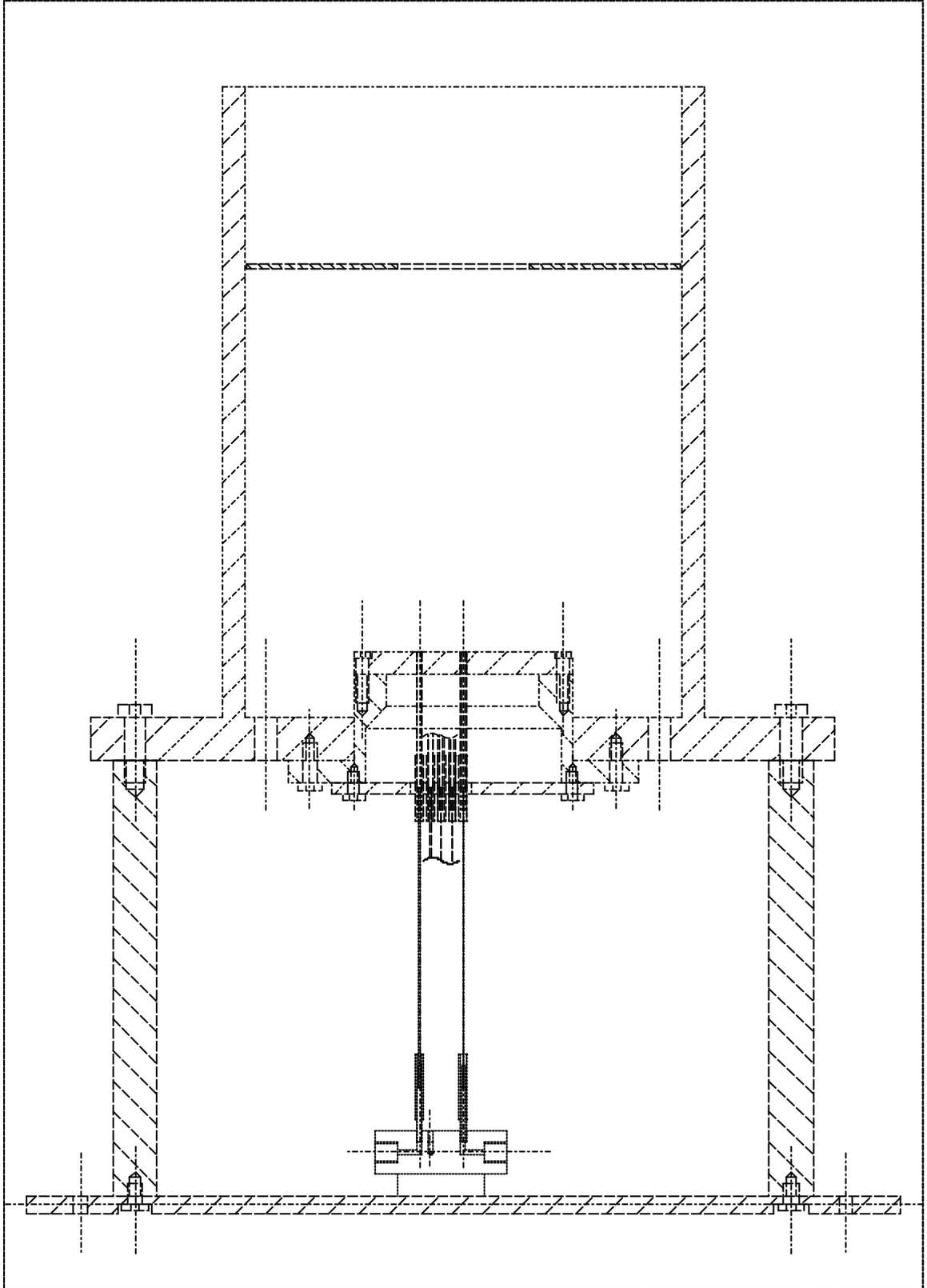


Fig. 2-1-1 組立図



## 観察系

### 1. 高速度ビデオカメラ（フォトロン HVC-11B）

撮影速度は 648frame/sec,1297frame/sec で約 1.5 秒間。オリフィスからの気泡生成過程を撮影する。観察系の概略図を Fig.2-1-3 に示す。

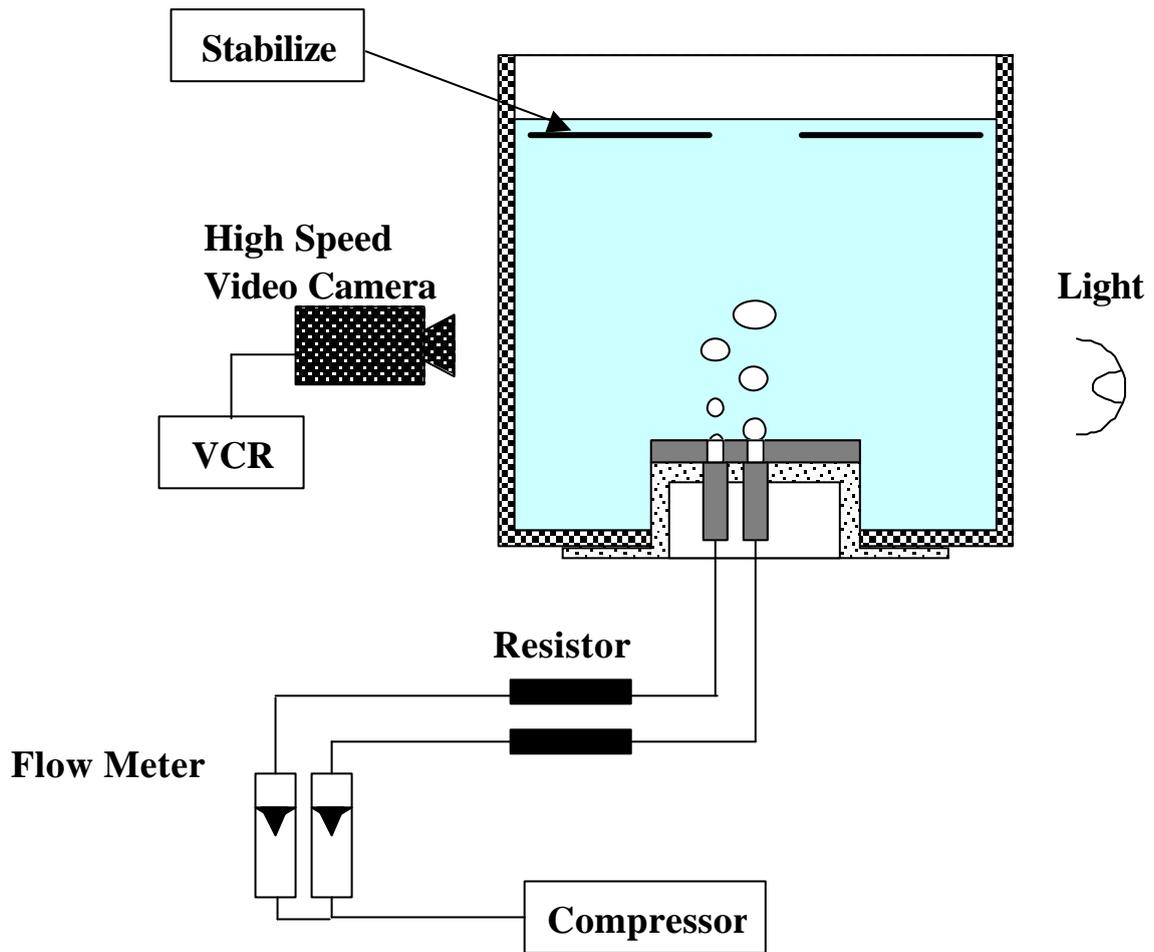


Fig.2-1-3 観察系の概略図

## 第二節 実験方法及び実験条件

### 実験方法

#### 1. 準備

コンプレッサの電源を点け、空気を圧縮する。

レジスターを測りたいオリフィスに取り付け回路をつなげる。

コンプレッサに約 5 気圧の空気が溜まっていることを確認した後、電源を切る。

流量計を開く。

コンプレッサのバルブを開き、送気管に空気を送る。

水槽に蒸留水を入れる。

ライトを点け、高速度ビデオカメラを黄銅面上のオリフィスに焦点を合わせセットする。

#### 2. 本実験

空気流量を調節する。

空気流量が安定するまで、しばらく経ってから高速度ビデオカメラを使って記録する。

以下、この二つの動作を繰り返す。

#### 3. 本実験終了後

高速度ビデオカメラ等の電源を切る。

水槽の水を捨てる。

コンプレッサのバルブを閉じる。

コンプレッサの中に溜まっている空気を逃がす。

### 実験条件

単一気泡の実験が終了後、干渉の実験に移る。その際の条件として、以下のものがある。

- 実際の沸騰現象において、隣り合う気泡同士の体積に殆ど差がない為、本実験では二つのオリフィスから流れ出る空気量が同じになるように、調節し実験を行う。
- オリフィス間の間隔は気泡径の 2 倍前後の 5mm, 10mm, 15mm の三つをとる。

## 第三章 実験結果

第一節 流量による平均周期の変化

第二節 単一気泡の周期の分布

第三節 リターンマップと周期の波形

第四節 分岐図

## 第一節 流量による平均周期の変化

まず、最初に従来のような平均操作を行い、時間と空間的に平均化された値を用いてみることにする。Fig.3-1-1 では、横軸に空気流量、縦軸に平均周期をとり 得られた実験データから気泡の干渉による影響による特性を見つけ出せるかどうかを調べる。

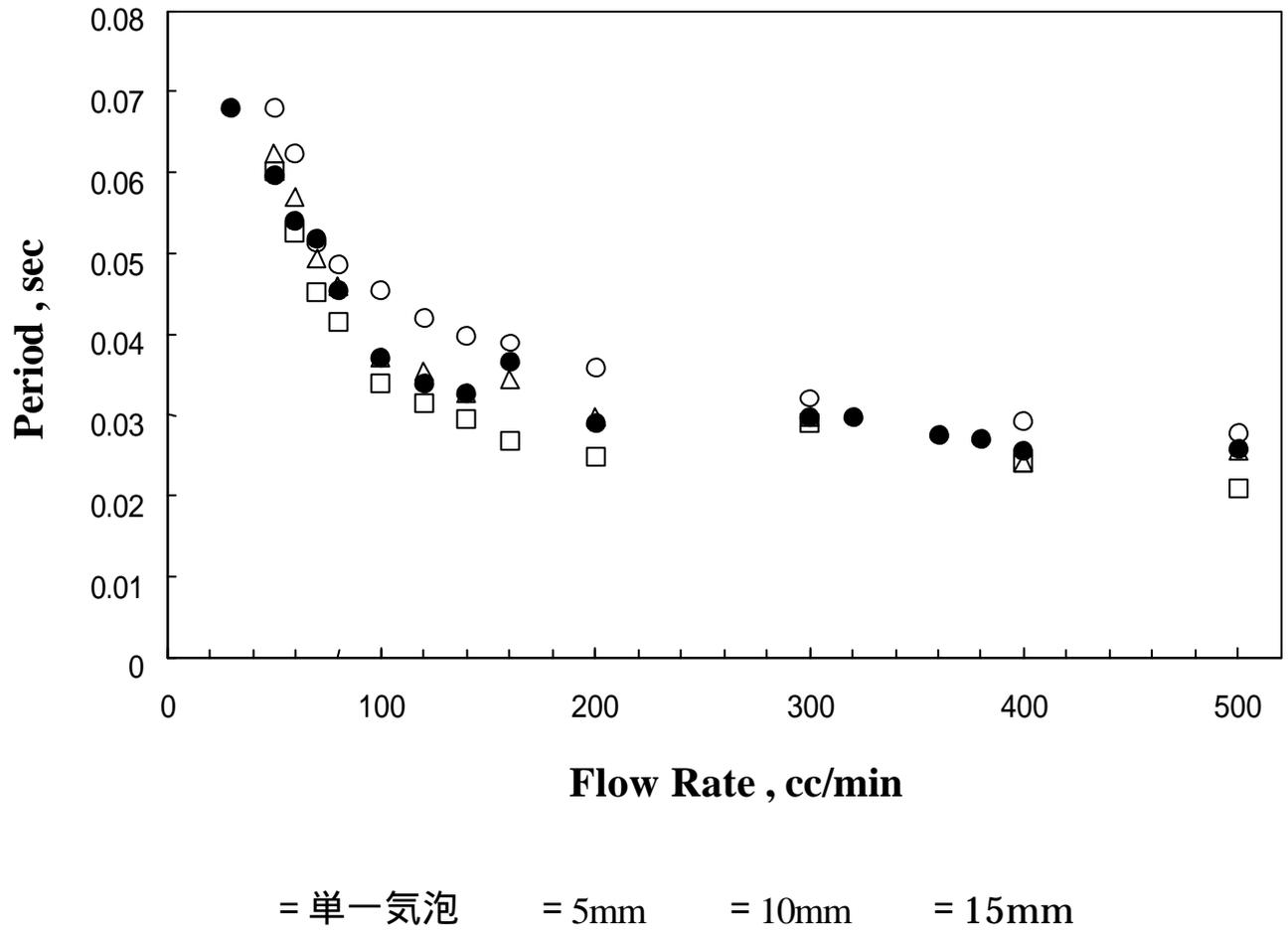


Fig.3-1-1 流量による平均周期の変化

## 第二節 単一気泡の周期の分布

前節の Fig.3-1-1 では、気泡の干渉による影響による特性を、観察結果ほど明瞭に見ることはできなかつた。つまり、従来のような平均操作では気泡の干渉における挙動のすべては見ることができないことが予想される。Fig.3-1-1 の問題点はやはり周期の平均化にある。実際の現象では、気泡の生成周期は空気流量によって異なるが、かなり散布していることは分かっている。そこで、以下の空気流量において気泡の生成における周期の分布を調べることにした。

Fig.3-2-1, Fig.3-2-2, Fig.3-2-3 では、横軸に気泡の生成周期(sec)、縦軸に約 3 秒間計測した気泡の周期の中で同じものの割合を置いている。

空気流量が 500cc, 70cc, 30cc のところで主な周期が二つに分岐していることが特に顕著に表れている。また、他にも空気流量が 200cc, 140cc, 120cc, 100cc のところで、同じように平均周期よりも右側に目立った周期がある他に、その左側にある周期が短いところにも広く多く周期が分布していることが良く分かる。さらに、これらの分布図を見比べると気泡の生成周期に何かの共通性、規則性があるのは間違いなさそうである。

なお、グラフは実験手順に沿って、空気流量の高いものから描くことにする。

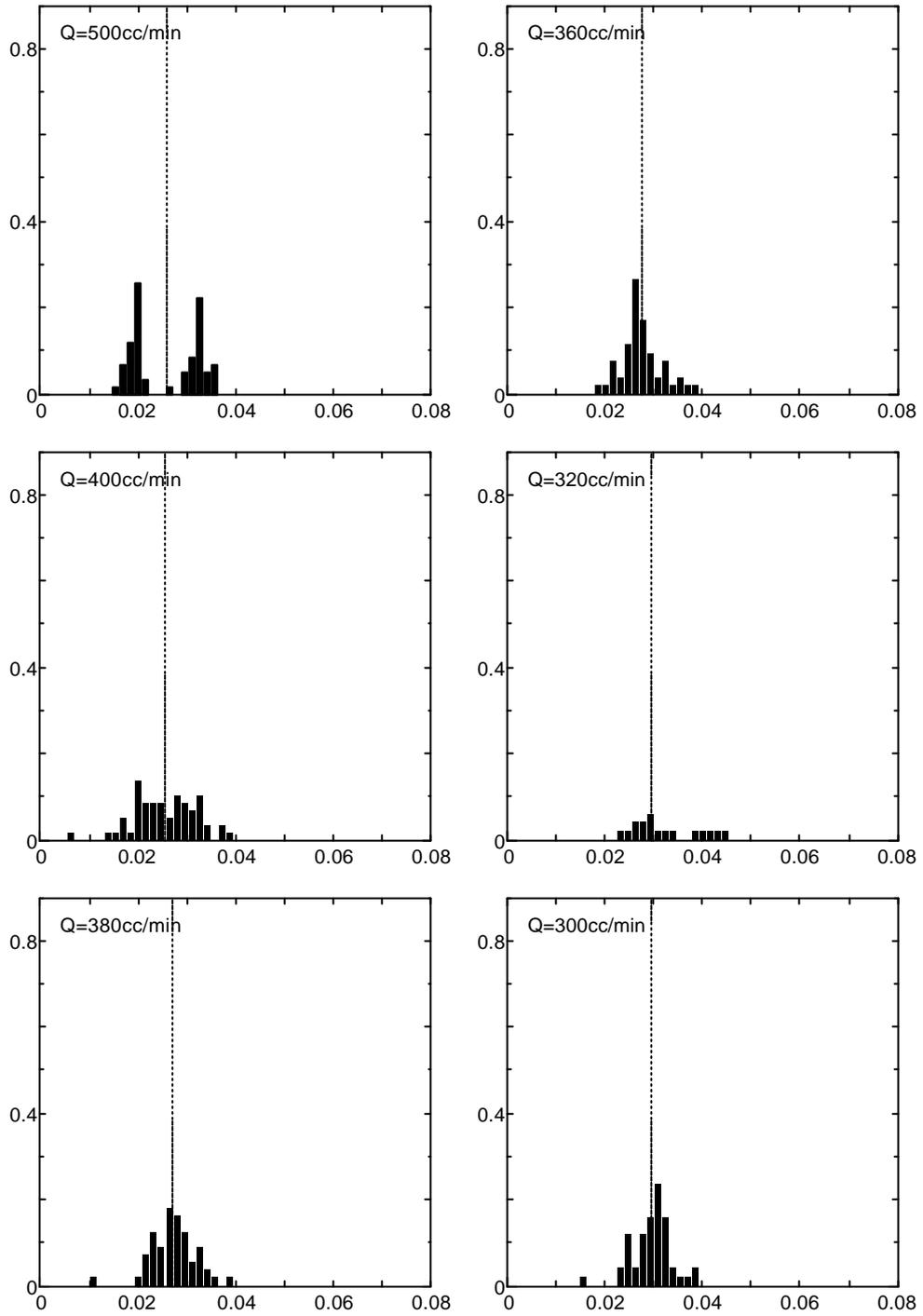


Fig. 3-2-1 単一気泡の周期の分布 ( 1 )

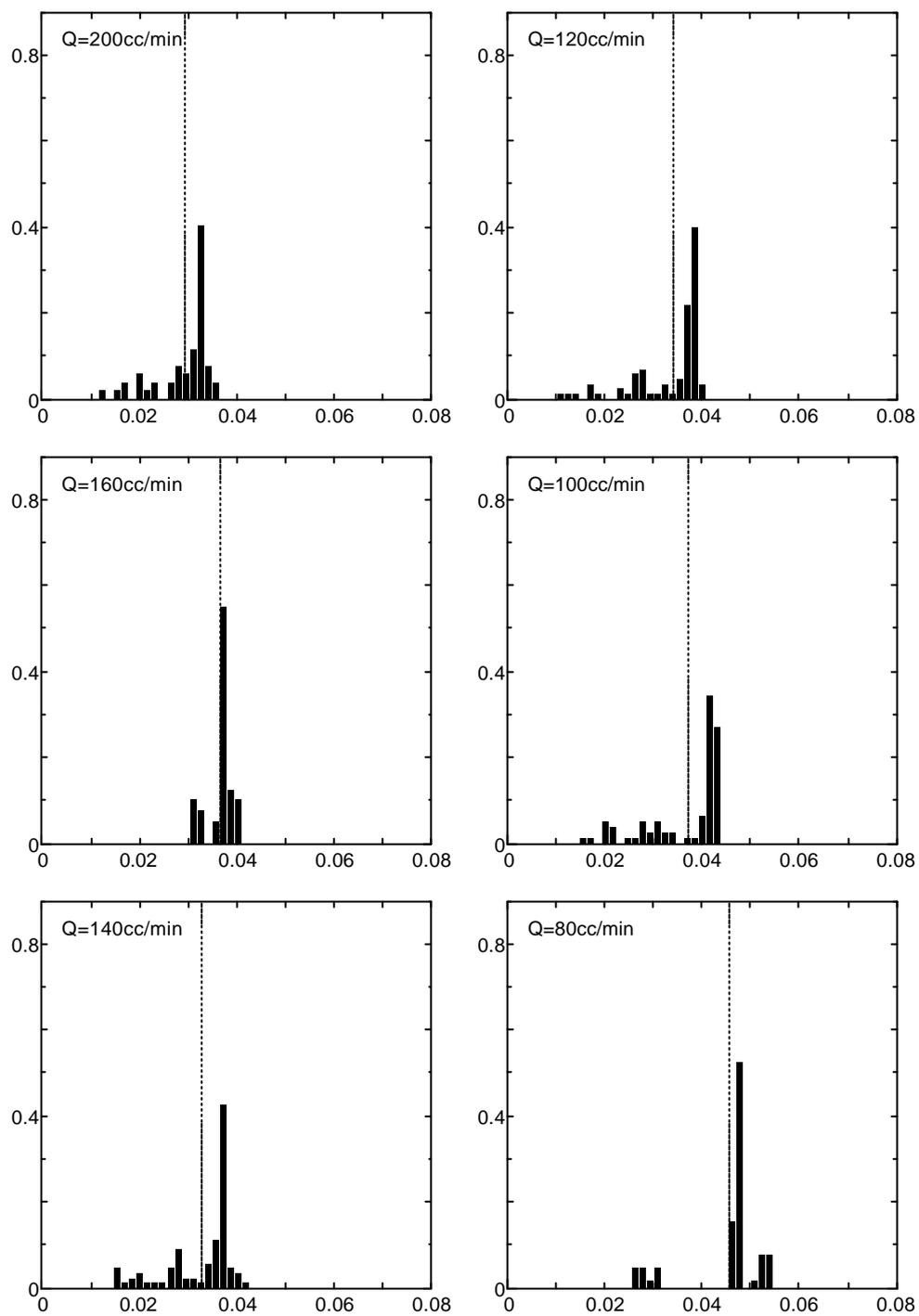


Fig. 3-2-2 単一気泡の周期の分布 ( 2 )

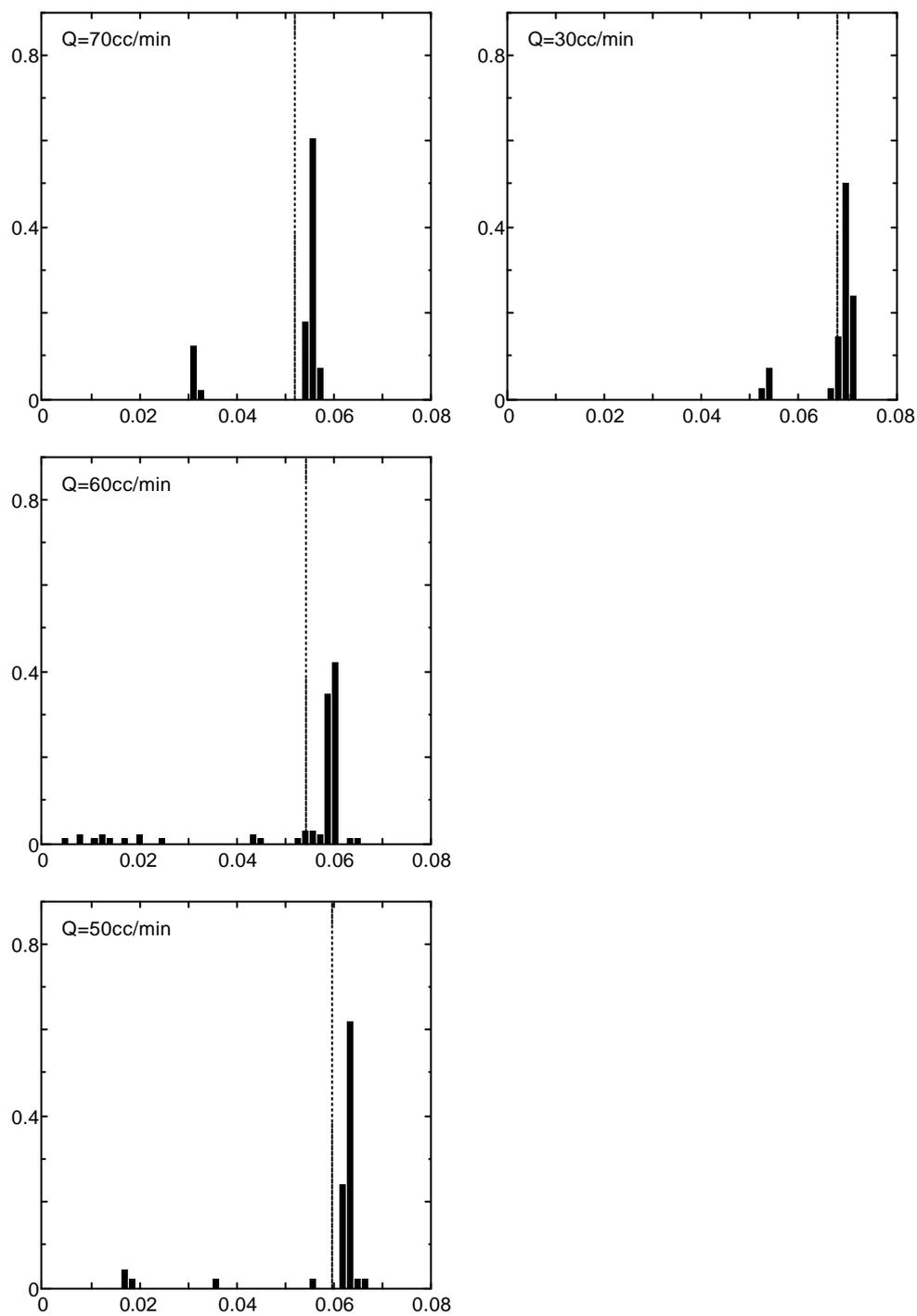


Fig. 3-2-3 単一気泡の周期の分布 ( 3 )

### 第三節 リターンマップと周期の波形

前節を踏まえ、ここでは発泡の規則性、準周期性を調べる為に気泡の生成周期のデータを用いて、リターンマップを描いてみる。リターンマップとは、ある時点で発生した現象が次の時点で発生する現象に及ぼす影響を調べる方法であり、横軸にある時点で発生した現象の値を、縦軸に次の時点で発生した現象の値をプロットし、相関関係を調べることができる。Fig.3-3では、高速ビデオカメラのサンプリング時間を実際の気泡生成の時間間隔  $T_n$  に変換し、 $(T_n, T_{n+1})$  をプロットしている。いずれの場合においても周期性の変化に伴い図が複雑なものになっていく様子が見られる。

なお、グラフの数は空気流量ごとに異なり、それぞれの空気流量の中で代表的な点を選んでいる。代表的な点の間の点は過渡状態、もしくは同じパターンのグラフが並んでいると考えて良い。また、リターンマップにプロットされた点のサイズは、同じ場所に重なってしまった点の数に比例して大きくすることで、安定している点を容易に見分けることができる。

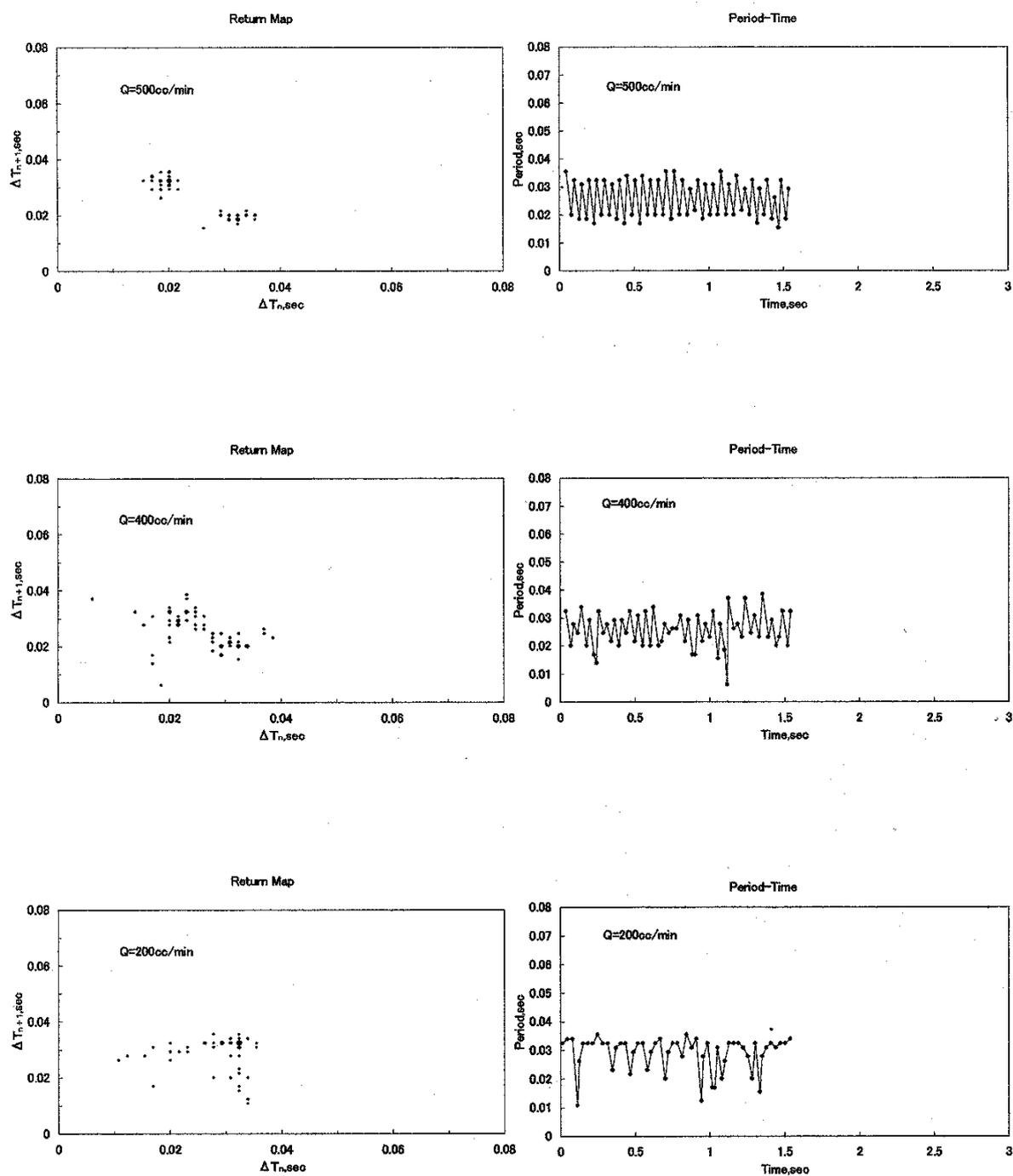


Fig. 3-3-1 リターンマップと周期の波形 単一気泡(1)

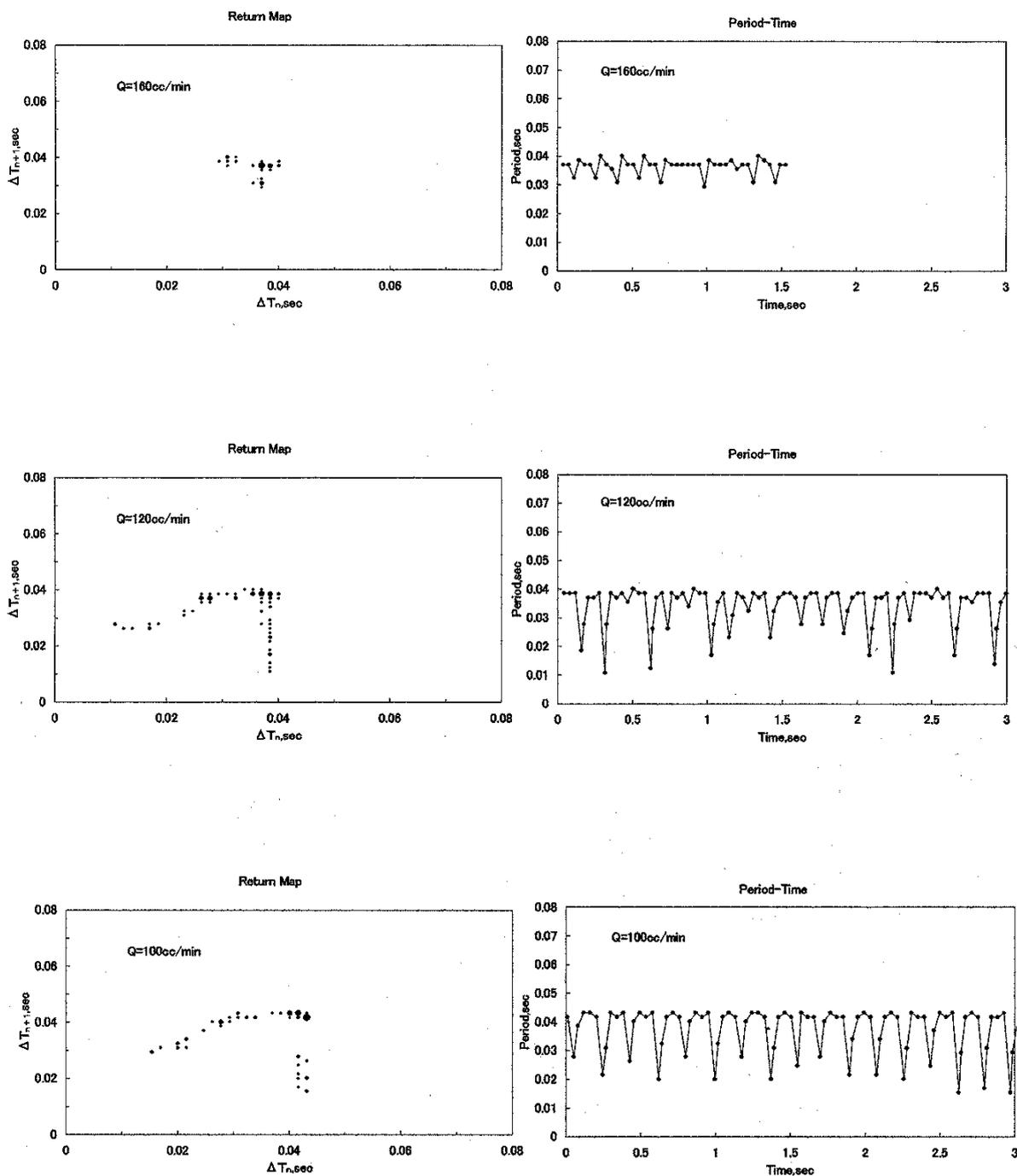


Fig. 3-3-2 リターンマップと周期の波形 単一気泡(2)

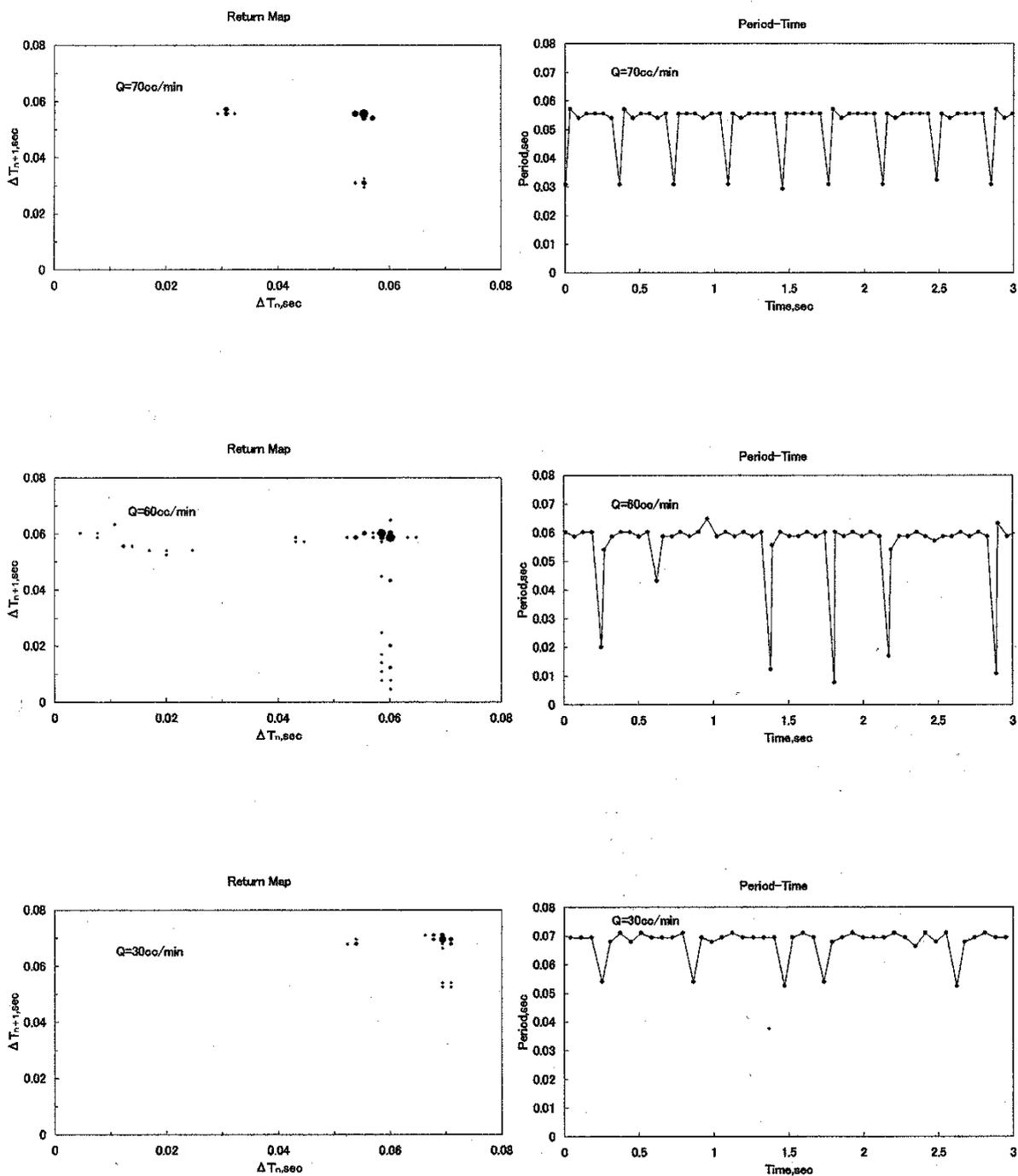


Fig. 3-3-3 リターンマップと周期の波形 単一気泡(3)

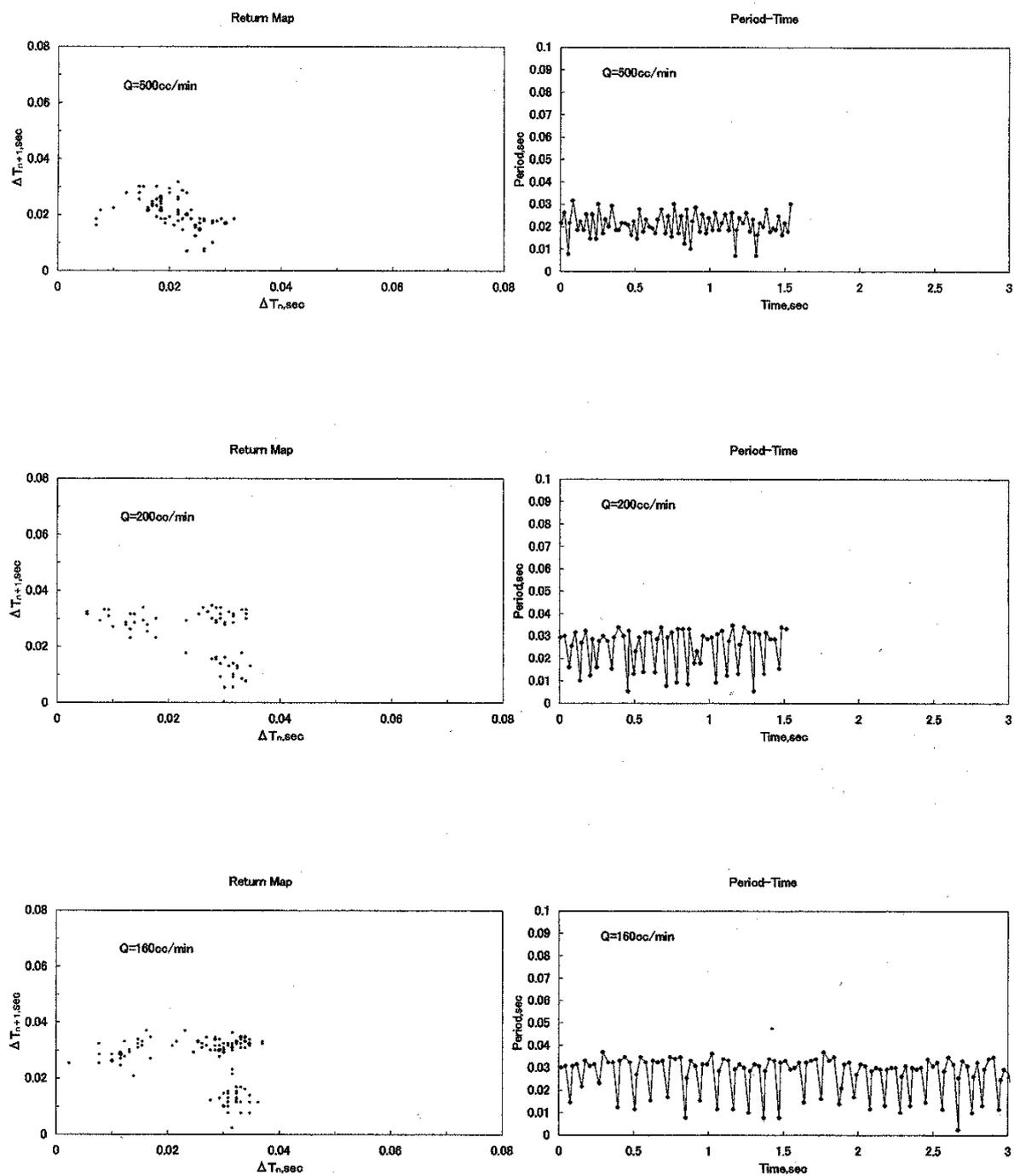


Fig. 3-3-4 リターンマップと周期の波形 5mm(1)

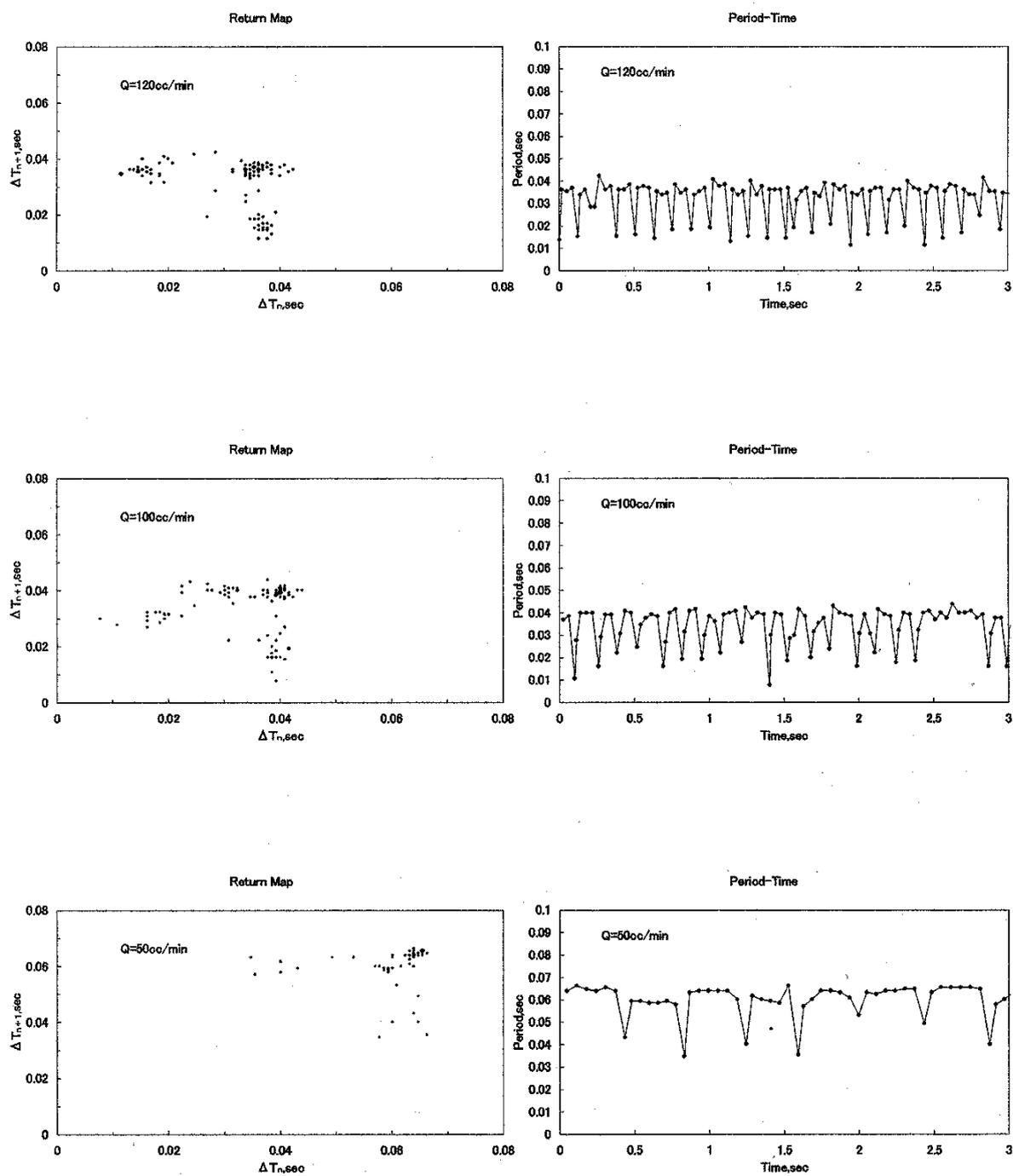


Fig. 3-3-5 リターンマップと周期の波形 5mm(2)

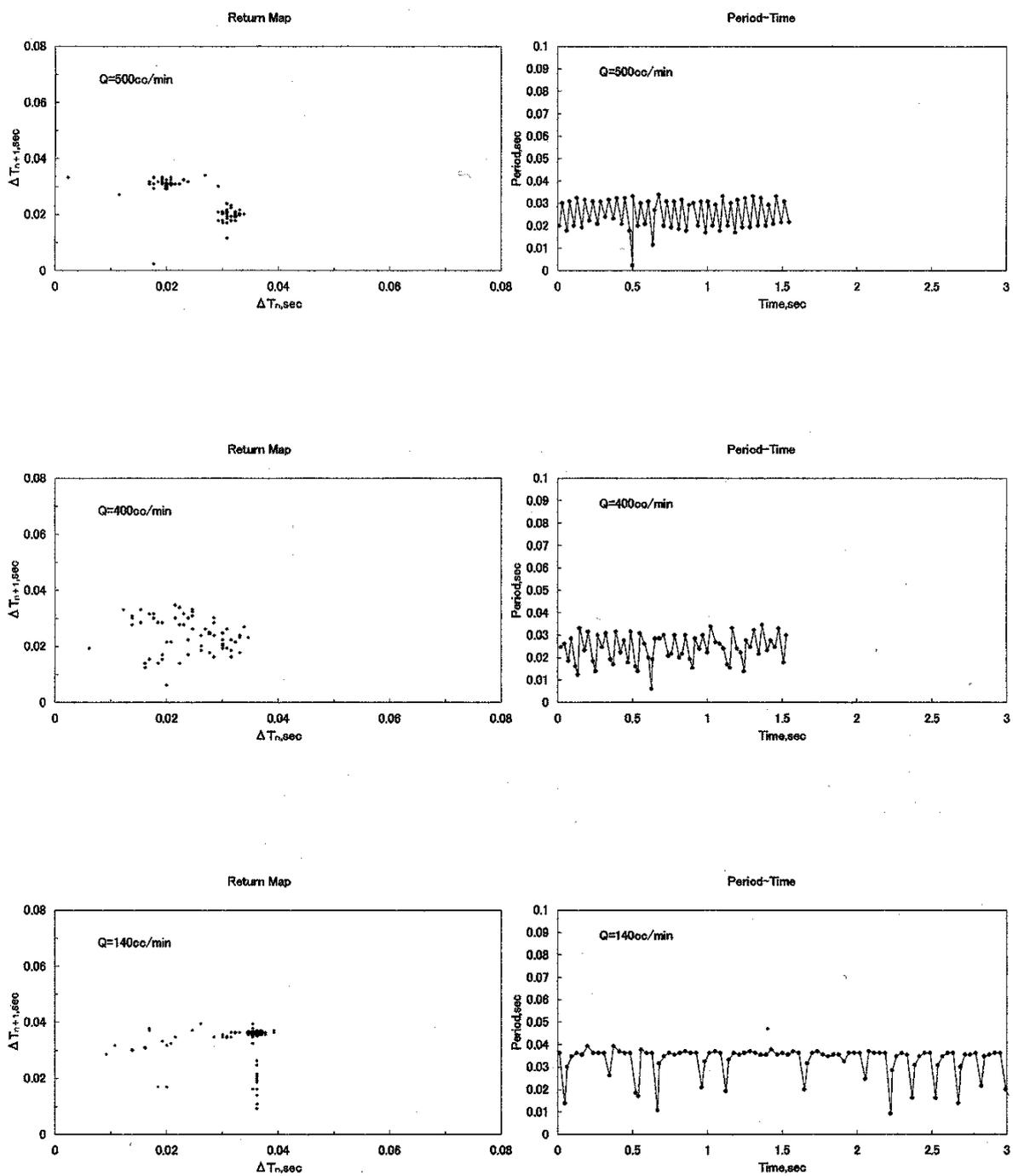


Fig. 3-3-6 リターンマップと周期の波形 10mm (1)

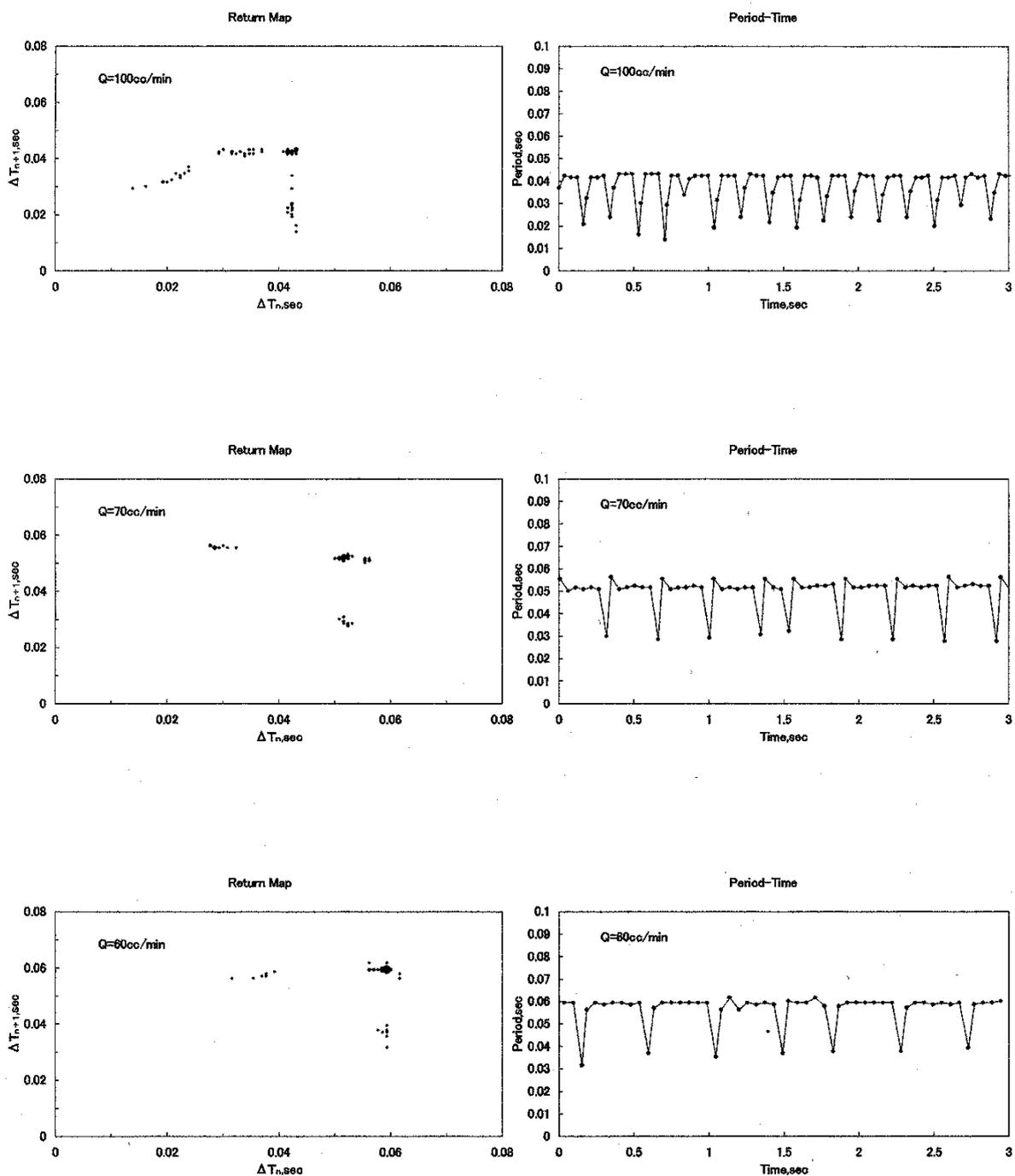


Fig. 3-3-7 リターンマップと周期の波形 10 mm (2)

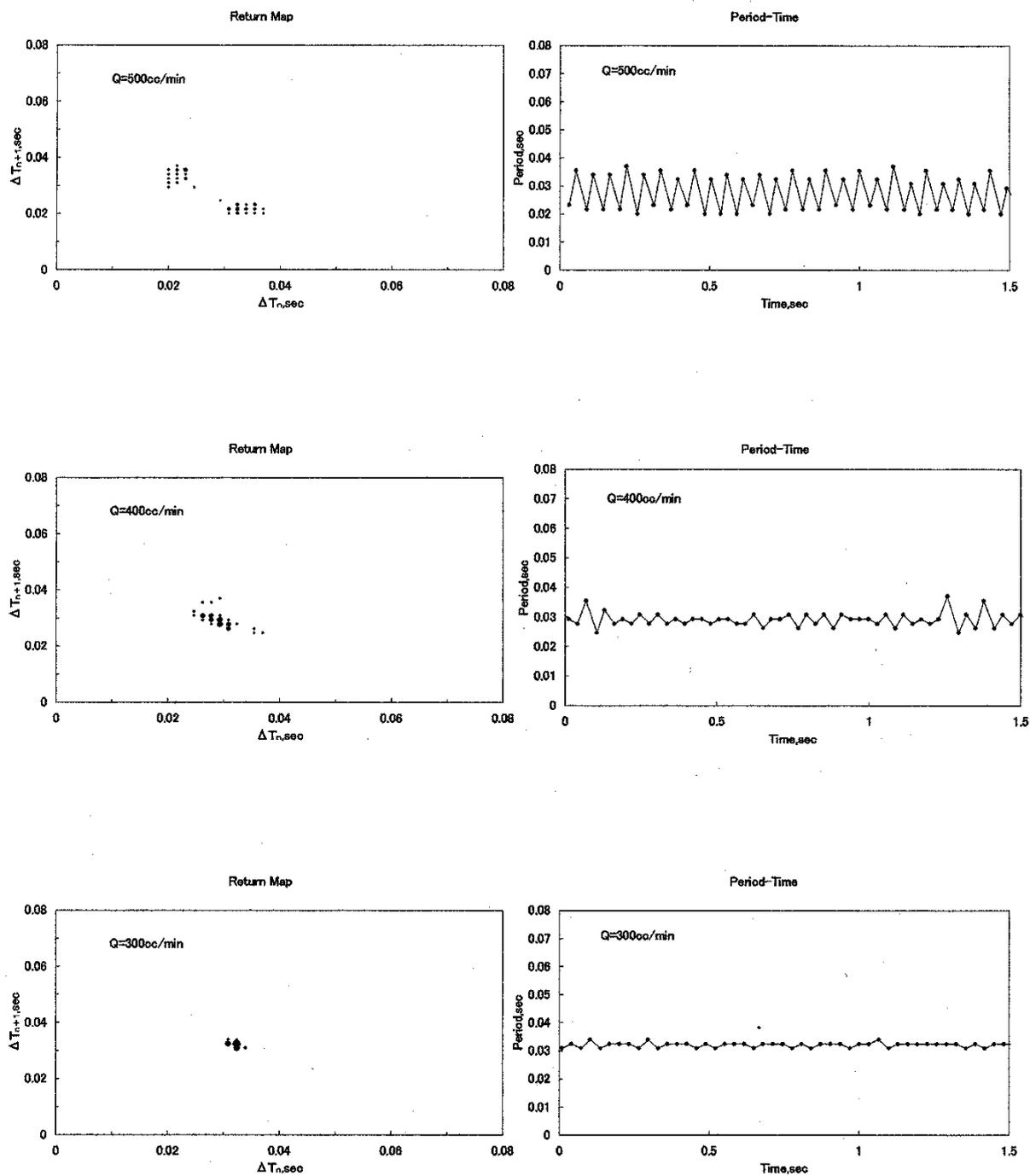


Fig. 3-3-8 リターンマップと周期の波形 15 mm (1)

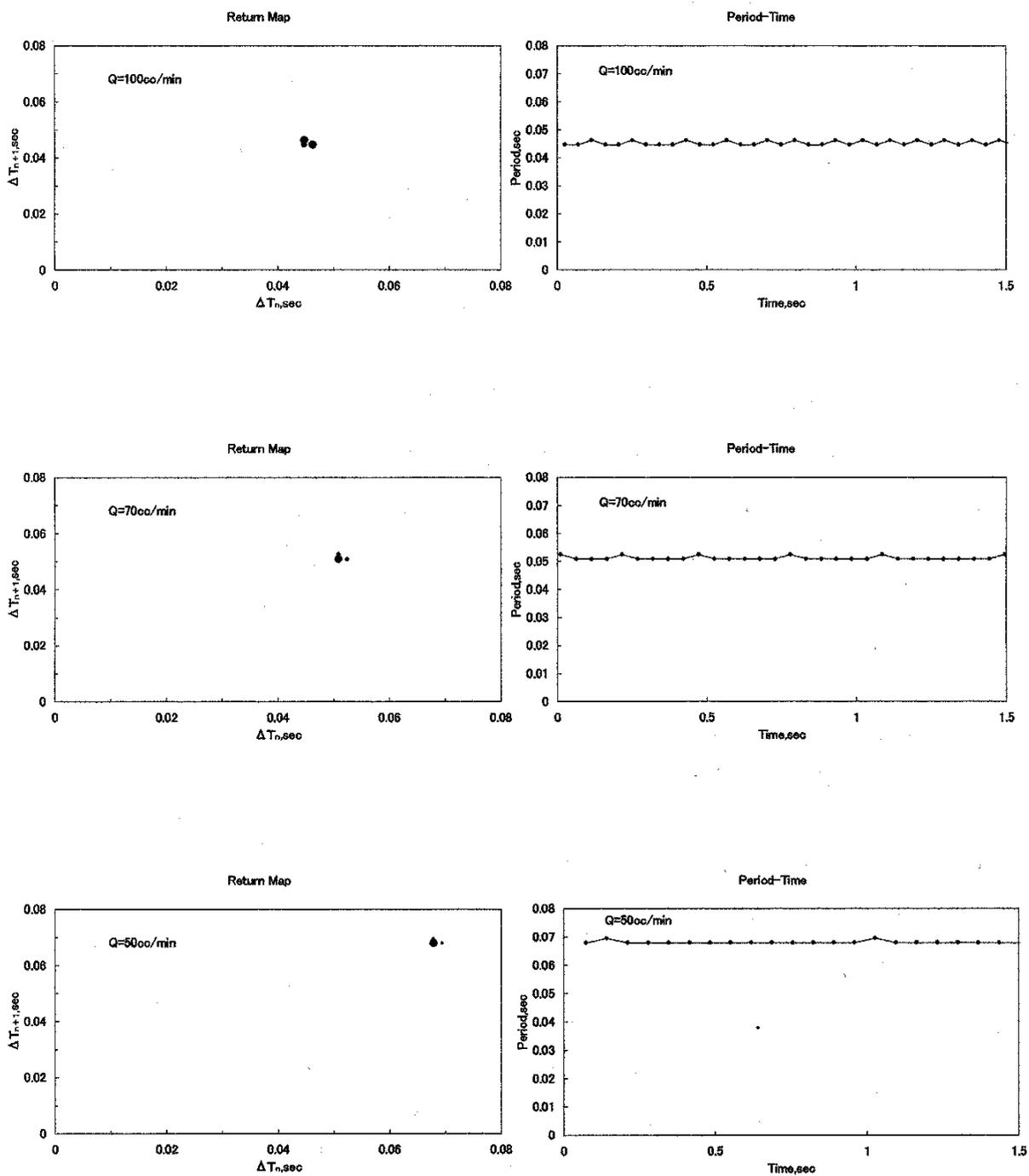


Fig. 3-3-9 リターンマップと周期の波形 15 mm (2)

## 第四節 分岐図

空気流量を変化させたときの気泡の挙動の変化を分岐図に示してみる。横軸に空気流量をとり変化させ、縦軸に気泡の生成周期をとり、得られる分岐図から周期の流量による変化を明らかにする。同一流量においても出てくる気泡には様々な状態があり、またある一点から突然形状が変化したりする。その過程を簡単な分岐図に作成する。

なお、実験データは生成周期の値に重複を多く含んでいる為、重なった点についてはX軸方向にわずかにずらす作業を施している。

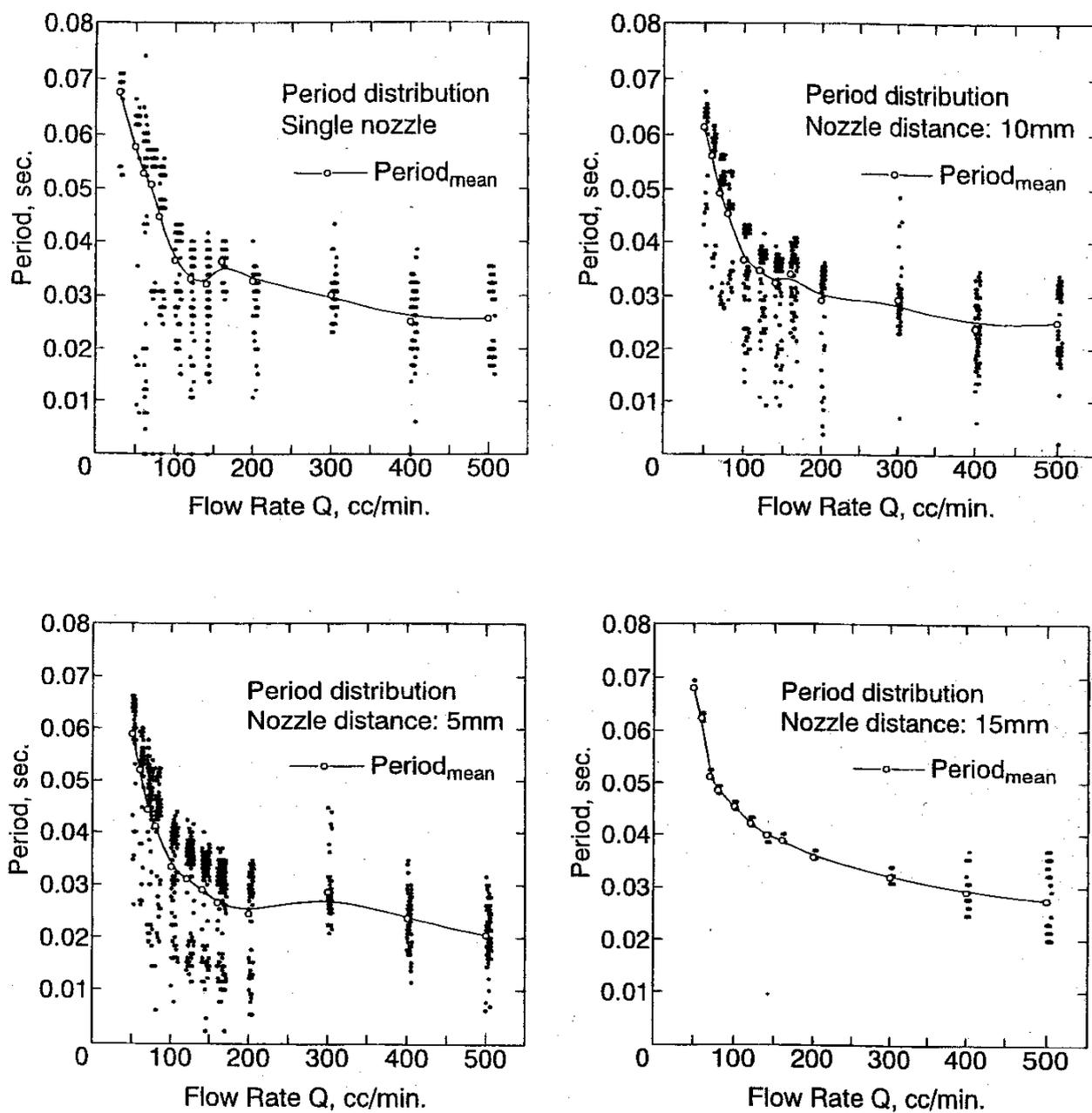


Fig. 3-4-1 分岐図

## 第四章 考察

第一節 従来の実験データとの比較

第二節 単一気泡の考察

第三節 干渉による影響の考察

## 第一節 従来の実験データとの比較

Fig. 4-1-1 では、Fig. 1-2-1 の従来の実験データに今回の実験によって得られたデータをプロットし、さらに詳しく調べるために、縦軸の  $V_{b_0}$  を  $V^*$  という無次元数に変換した( )。横軸は変わらずオリフィスレイノルズ数  $Re_0$  をとっている。この操作によって、縦軸、横軸ともに無次元数となった。また、同時に Fig.4-1-1 では上下に散らばっていた点も一直線上に並んだ。Fig.4-1-1 では  $Re_0$  が 100 付近での折れ曲がりが見られるが、今回得られた実験データはこの折れ曲がりを中心に左右に広がっているのが見える。

ここで、念頭におきたいことは、 $Re_0$  が約 100 より少ない値をとるとき、 $V^*$  が一定値をとっていることである。この領域では、気泡に働く力のうち、浮力と表面張力が釣り合っている。一方、 $Re_0$  が 100 より大きい値をとるときに、 $V^*$  は右肩上がりに上昇している。ここでは、浮力と、主に慣性力が表面張力と釣り合っている。ここで注目すべきことは、 $Re_0$  が約 100 付近で、気泡の離脱において働く力が、浮力支配域から慣性支配域に移り変わることである。本実験条件においては、 $Re_0$  が約 100 付近というのは、Fig.4-1-1 から空気流量の低いところと対応しているのが分かる。よって、空気流量が低いところに、興味深い形をしたグラフが表れるのも理解できる。

さらに、次節からは前章の第一節や第二節の結果を踏まえ、これ以上、気泡発生頻度をもとに平均としての生成周期や気泡体積を論じるのは研究の目的から逸れると判断し、カオス工学的な視野から考察することにする。

無次元数  $V^*$  の求め方

$$(\mathbf{r}_L - \mathbf{r}_V)V_o g = \mathbf{p}d\mathbf{s}$$

$$V_o = \frac{\mathbf{p}\mathbf{s}}{(\mathbf{r}_L - \mathbf{r}_V)g} \cdot d$$

$$V^* \equiv \frac{V}{V_o} = \frac{(\mathbf{r}_L - \mathbf{r}_V)g \cdot V}{\mathbf{p}d\mathbf{s}} = \frac{(\mathbf{r}_L - \mathbf{r}_V)g}{\mathbf{p}\mathbf{s}} \cdot \left(\frac{V}{d}\right)$$

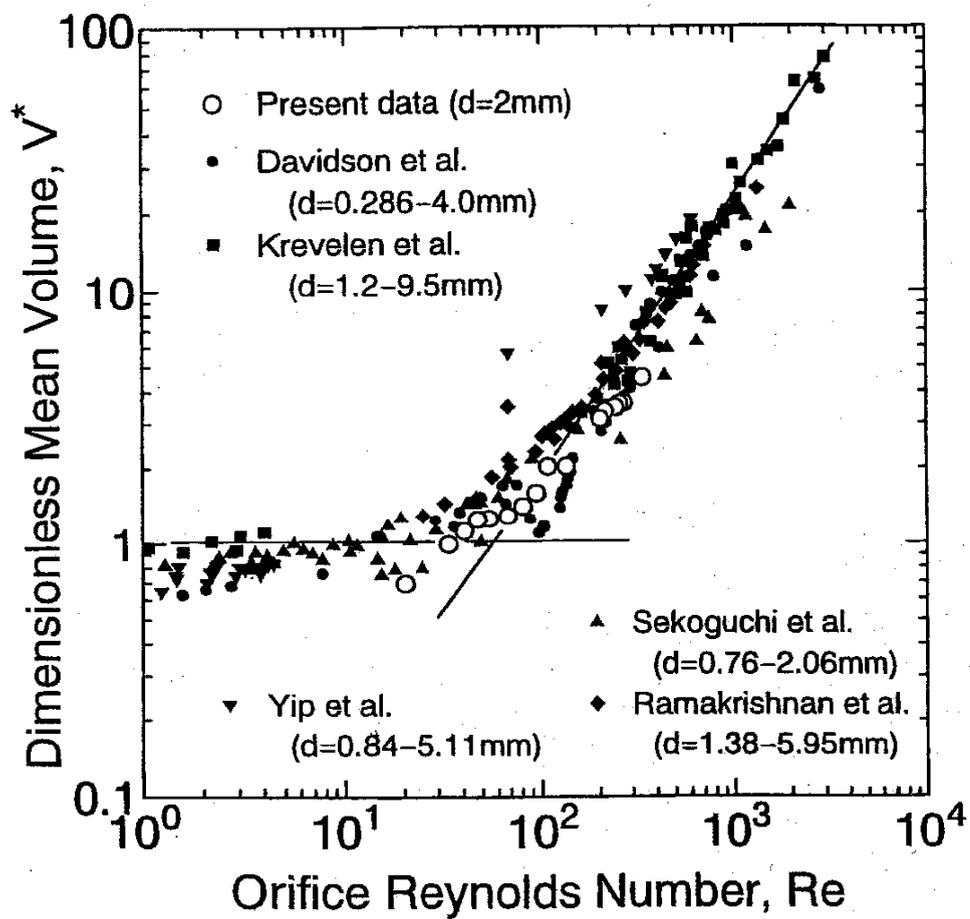


Fig.4-1-1 浮力支配域と慣性支配域

## 第二節 単一気泡の考察

本実験ではオリフィス径 2.0mm 用いて、空気流量を一定にして以下の 28 点を記録した。

2.0mm			
番号	流量(cc/min)	番号	流量(cc/min)
1	500	15	180
2	440	16	160
3	420	17	140
4	400	18	120
5	380	19	100
6	360	20	80
7	340	21	75
8	320	22	70
9	300	23	65
10	280	24	60
11	260	25	55
12	240	26	50
13	220	27	45
14	200	28	30

このうち各オリフィスにおいて特徴的な変動を示した流量を抜き出して解析し、観察データと見比べて考察する。

### リターンマップと周期の波形から・・・

三章の二節より、空気流量による気泡の生成周期に比例関係以外の共通性、規則性があることが分かっている。そして、さらに空気流量の違いに対する周期性の違いを見るため、リターンマップと周期の波形を用いて、空気流量をパラメータとし、同じような振る舞いをするもの同士をまとめ、表にして領域ごとに区分することができる。

### 観察から・・・

気泡が生成され離脱した後、複数の気泡が相互に引っ張り合ったり、斥け合ったりと影響している様子を観察した。また、空気流量の高いところでは気泡の合体も見られ、それが周期的に起こっているのを確認した。その周期は空気流量によって変化し、例えば、500cc では気泡が離脱した後、2個の気泡が合体したり、4個の気泡が合体したりするような挙動を見せた。440cc～400ccの間は安定して、4個の気泡の合体が起きていた。380cc で、はじめて3個の合体が見られた。360cc～320cc で4個の合体は見られなくなった。300cc～200cc の広い範囲の中では、主に2個の気泡が合体していた。その中から、特に美しい合体画像を選んで次項に示す。

また、上のことをまとめた観察データとリターンマップのそれぞれの方針による領域の区分を見比べる。

### 領域の区分(流量 500cc/min～200cc/min)

	リターンマップ等から
500cc	2 周期
400cc	2 周期が崩れた形
380cc	ランダム
360cc	
320cc	
300cc	
200cc	

	観察結果から
500cc	2 個と 4 個の合体気泡
440cc～400cc	4 個の合体気泡
380cc	4 個と 3 個の合体気泡
360cc～320cc	3 個と 2 個の合体気泡
300cc～200cc	2 個の合体気泡

気泡の合体の様子

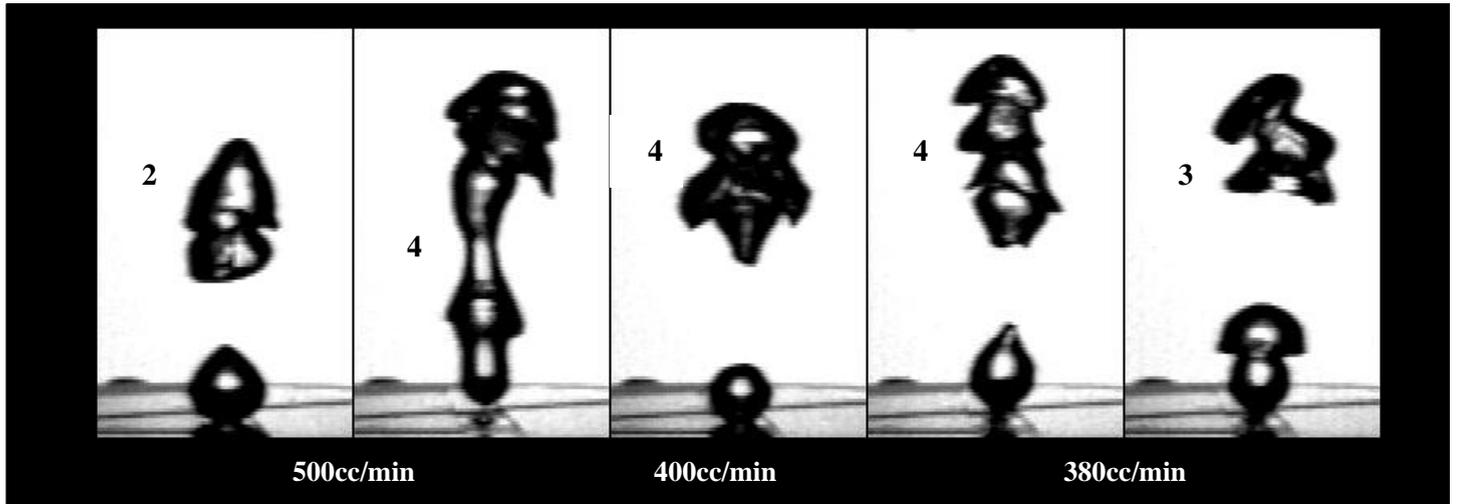


Fig. 4-2-1 気泡の合体の様子 ( 1 )

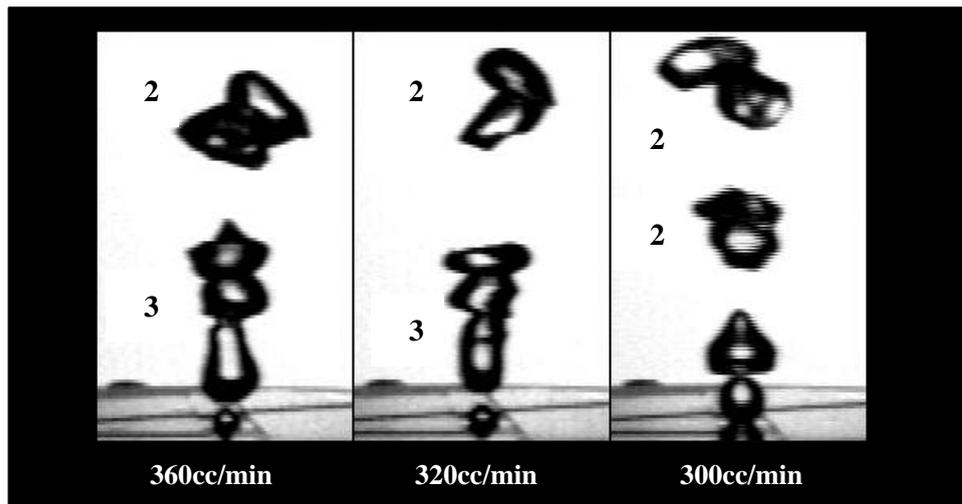


Fig. 4-2-2 気泡の合体の様子 ( 2 )

### 空気流量の低いところ

前節でも述べたように、オリフィスレイノルズ数  $Re_o$  が 100 付近のところ、つまり本実験条件では空気流量が低いところに対応しているところは、気泡に働く力のうち、表面張力と浮力が釣り合っているところと、慣性力と表面張力が釣り合っているところがちょうど交わっているところである。そのため、Fig. 3-3-2, Fig. 3-3-3 のように、非常に面白い形をしたデータを得ることができた。

そこで、また同様にリターンマップと観察結果の両方から詳しくこの領域を比較、考察したいと思う。

### 領域の区分 ( 流量 160cc/min ~ 30cc/min )

	リターンマップ等から
160cc	3 周期
140cc	規則性のある形
120cc	
100cc	
80cc	3 周期
70cc	
60cc	3 周期が崩れた形
50cc	
30cc	3 周期

	観察結果から
160cc	単周期
140cc ~ 50cc	N+1 個目に変な泡が発生する。(N+1 周期)
30cc	単周期

30cc のときよりも離脱周期の差が少ない

気泡の離脱の様子

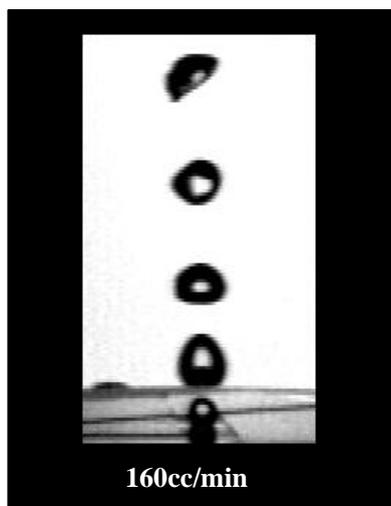


Fig. 4-2-3 単周期

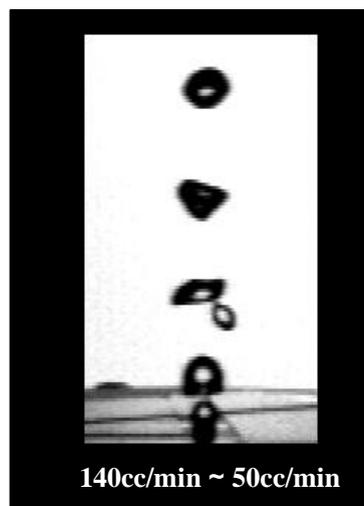


Fig. 4-2-4 N+1個目の気泡

## まとめ

リターンマップについては、空気流量の高いところと、空気流量の低いところの二つに分けてみたが、前者についてはデータ数が不十分だった為、380cc~200cc の広い範囲でランダムという結果になってしまった。データ数をさらに増やせば何か観察データと重なり合った結果が出るかもしれない。しかし、空気流量を 500cc まで上げていったときに、ランダムだったグラフが明瞭に2周期に戻ったということは、離脱後の気泡が安定して4個の気泡が合体する領域よりも、2個と4個の2種類の合体が起こる領域の方が安定していることを指している。

つまり、観察データをもとにきれいな形で気泡が発生しているからといって、安易にそこが安定領域だと決め付けるのは危険である。

また、空気流量の低いところでは、観察データで表れた現象がリターンマップにも表れている。特に空気流量が 100cc, 120cc, 140cc の三点に関しては、非常に面白い形をしている。ここは、Fig. 4-1-1 から、オリフィスレイノルズ数  $Re_0$  が 100 に極めて近い点に対応している。

なお、 $N+1$  個目における  $N$  は、空気流量によって以下のように変化する。

空気流量(cc/min)	N
140	3,4,7
120	3,4,7,8
100	4
80	5
70	6
60	6,12
50	7,14

$N+1$  周期に共通点、規則性を見出すことはできなかったが、 $N$  については面白い関係を見付けることができた。上の表より、例えば、空気流量が 140cc の場合の  $N$  はすべて 3, 4 の組み合わせで作ることができる。同様に空気流量が 120cc の場合の  $N$  もすべて 3, 4 の組み合わせで作れる。また、空気流量が 60cc, 70cc のときの  $N$  も、二つの数値に倍数関係がある。

以上のことをまとめると、 $Re_0$  が 100 付近に対応する空気流量のところで、予想通り面白い気泡の挙動を観察することができ、なお且つ、周期に対応する  $N$  に関しては、準周期的な振る舞いをするのが確認できた。

しかし、やはりデータ数が不十分な為、 $N$  に周期性があると言い切ることはできない。

これから、さらに観察データを増やしていけば必ずこの空気流量における周期の関係は明らかになるだろう。

### 第三節 干渉による影響の考察

まず、干渉の実験は単一気泡の実験と全く同じ条件で行っている。オリフィスは同一の、内径 2.0mm のステンレスパイプを用いて、空気流量を一定にして流量が 500cc/min ~ 200cc/min の間は 100cc/min 刻み、200cc/min ~ 80cc/min の間は前節を踏まえて、20cc/min 刻み、さらに 80cc/min ~ 50cc/min の間は細かくとって、10cc/min ごとに記録した。

次に、第一章の第三節でも述べたが、実際の沸騰現象において、隣り合う気泡同士の体積に殆ど差がない為、本実験では二つのオリフィスから流れ出る空気量を同じものとする。また、オリフィス間の間隔は気泡径の 2 倍前後の 5mm, 10mm, 15mm の三つをとり、それぞれの場合についてお互いどう影響を及ぼすかを考察する。

### リターンマップから・・・

前節と同様に、空気流量の違いに対する周期性の違いを見るため、リターンマップと周期の波形を用いて、空気流量をパラメータとし、同じような振る舞いをするもの同士をまとめ、表にして領域ごとに区分し、オリフィス間隔が 5mm, 10mm のときの影響を受けたものと比べる。

#### 領域の区分 (500cc/min ~ 200cc/min )

	単一気泡	10mm での影響	5mm での影響
500cc	2 周期	2 周期	ランダム
400cc	2 周期が崩れた形	ランダム	
380cc	ランダム		
360cc			
320cc			
300cc			
200cc			

#### 領域の区分 (160cc/min ~ 50cc/min)

	単一気泡	10mm での影響	5mm での影響
160cc	3 周期	規則性のある形	3 周期が崩れた形
140cc	規則性のある形		
120cc			
100cc	4 周期	4 周期	4 周期が崩れた形
80cc			
70cc	3 周期	3 周期を少し含む 単周期	3 周期を少し含む 単周期が崩れた形
60cc	3 周期を少し含む 単周期		
50cc			

30cc のときよりも離脱周期の差が少ない

## まとめ

前節と同様に、リターンマップについては、空気流量の高いところと、空気流量の低いところの二つに分けてみた。オリフィス間隔 10mm では、空気流量を 500cc まで上げていったときに、ランダムだった周期が 2 周期に戻ったが、距離を近づけた 5mm のところでは、空気流量を上げてでもランダムのままだった。

また、空気流量の低いところについても、10mm のリターンマップと単一気泡のそれとはかなり似通ったものであった。一方、10mm より近い 5mm は干渉の影響を受け、すべての空気流量に対して、ランダム、もしくは崩れた形という結果となった。

以上から、本実験条件において、干渉の影響限界領域は 10mm 付近にあるというのが分かった。

なお、15mm の実験に関しては、偶然単周期になったと解釈している。なぜなら、上の実験結果から、もう一つの 15mm 離れている気泡の原因で、水槽の中の対流が整流され単周期が出るようになったとは考えにくいからだ。ならば、その気泡自身に要因があるに違いないと思われる。

そこで、実験装置について、二つほど要因の一つとして挙げられるものがある。一つは送気管がビニールチューブで作られていることである。この中で空気が振動して、気泡の生成、離脱、離脱後の挙動に影響を与える可能性がある。二つ目は、気泡の出口系の形状である。気泡の生成、離脱は出口系の形状わずかな違いに左右されるところが多いからだ。

しかし、本研究では、気泡の出口系の形状による影響を考えない為に、すべて中心のオリフィスから発生する気泡の情報をとっている。したがって、今回のような単周期が急に表れたのは送気管の中での、空気の振動によるところが一番多いと思う。

以上の理由で、前項の表に載せることを止めた。

## 第五章 結論

第一節 結論

第二節 今後の課題

## 第一節 結論

オリフィスレイノルズ数  $Re_o$  が 100 付近で浮力支配域から慣性支配域に移り変わる。ここは、Fig. 4-1-1 から、本実験条件に当てはめると空気流量の低いところと対応しているのが分かった。そこでは、予想通り  $N+1$  個に 1 つの割合に小さな気泡が出てくるという非常に面白い現象を観察することができた。なお且つ、周期に対応する  $N$  が準周期性を持っていたことが分かった。干渉においては、本実験条件の下で 10mm 前後が干渉の影響限界領域であることが分かった。

## 第二節 今後の課題

今後、気泡の生成、離脱、離脱後の挙動に影響を与える外因を除去する為に、流量計からオリフィス直前のレジスターまで銅管を用いて連結するのが望ましいと思う。また、気泡の出口系における形状のわずかな違いにも、細心の注意を払う必要がある。

将来、空気流量とオリフィス径と干渉の影響限界領域の一般的な関係を樹立する為に、オリフィス径をいろいろ変えてみたり、熱伝対などを使ってデータ数をもっと増やさなければならない。

## 参考文献

1. 世古口 言彦、“伝熱工学の進展”

## 謝辞

庄司先生、この度は卒業論文をまとめるにあたって、テーマ選びから論文の構成・執筆に至るまで、親身にご指導いただいたお陰で、私の実力以上の論文ができ、感謝の念でいっぱいです。私自身にとって大きな自信になったと思います。

また数々のご指導や協力をしてくださった丸山助教授、横谷助手、井上助手、渡辺技官に感謝いたします。実験で何度も分からないことを具体的なアドバイスを与えて下さいました。高木さんとは、一緒に実験ができなくて本当に残念でした。

伊藤さんは僕が研究室に入った当初、「卒論のテーマに本当に興味を持って取り組まないと長く、つまらない時間を費やすことになるから、自分の研究を好きになれ！！」と言われ、今までの墮落した大学生活を一転して、これを穴埋めするかのようにがんばれました。とにかく、卒論を始めるにあたり、いいスタートが切れたのは伊藤さんのお陰だと思います。阿部さんには、修論の時期と重なり大変お忙しいのにもかかわらず、実験に関する些細な問題からすべて即答していただき感謝しています。

M1の野上さん、安井さんには様々なことで全く無知な私にいろいろ知識や助言をいただきました。留学生の王さん、姜さん、連さん、張君は短い間でしたがお世話になりました。4年生の福田、小島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。

そして直接同じ実験を行うということで研究室で一番長く一緒にいた徐さんには、研究室で一番わがまを聞いてもらいました。今になって、ちょっと迷惑をかけすぎてしまったのではと反省しています。そんな私も今年から社会人です。お互い体だけは壊さない程度に勉強に仕事にがんばっていきましょう。あと、電話に出るときに、「陳ですか？」と聞くのはやめてください。

最後に、黒田には卒論間近の追い込みの時期に付録の作成を手伝ってもらい、本当に助かりました。

みなさん、本当にありがとうございました。

## 付録

### A. 気泡の生成周期の分布（単一気泡については P19～P21 を参照）

5mm

10mm

15mm

### B. リターンマップ

単一気泡

5mm

10mm

15mm

### C. 気泡の生成周期の波形

単一気泡

5mm

10mm

15mm

