

卒業論文

気泡の生成挙動と相互干渉に 関する研究

通し番号 1－55 完

平成 13 年 2 月 9 日 提出

指導教官 庄司正弘教授

90201 小川 真史

目次

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

第 2 章 実験

- 2－1 実験装置
- 2－2 実験方法および実験条件

第 3 章 実験結果

- 3－1 臨界流量について
- 3－2 臨界流量実験結果
- 3－3 干渉実験結果

第 4 章 考察

- 4－1 臨界流量について
 - 4－1－1 臨界流量近傍の気泡の様相
 - 4－1－2 臨界流量の次元解析
 - 4－1－3 臨界流量の次元解析
- 4－2 干渉について
 - 4－2－1 臨界流量以下の低流量域
 - 4－2－2 臨界流量以上の高流量域

第 5 章 結論

- 5－1 結論
- 5－2 今後の課題

謝辞

参考文献

付録

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

1－1 はじめに

沸騰現象は日常的に我々の身近に見られる現象である。しかし、その現象には様々な効果がいくつも重なり合っているため複雑な現象になっている。

沸騰現象を構成する因子の一つとして気泡がある。そして気泡生成を用いた熱機関の利用は火力や原子力発電などの発電設備や、蒸気機関など幅広く工学に利用されている。そこで沸騰現象解明の基礎実験として、空気－水系での熱を伴わない連続気泡生成過程の実験、解析的研究はとても重要な実験であると思われる。さらに近年、浄化装置における曝気など連続的に生成される気泡同士の干渉やそこに伴う流体の流れを利用した機械設備なども重要に成りつつあるため、連続気泡生成過程を理解することは非常に重要である。

1－2 従来の研究

従来の研究では、単気泡の生成やその挙動の解明に関する論文は数多く見られる。そして、それらの研究では、複雑な現象である沸騰現象を扱う手段として、カラス解析を利用することが有効ある事が報告されている。

しかし、それらの研究はほとんど単一オリフィスから発生する気泡挙動についてなされているものである。そして、生成する気泡の周期や大きさは動的なものであるのに対して、時間平均的な特性についてしか扱われていない。その一つの例がFig.1-2-1であり、実際は気泡の大きさは一様ではないけれど、それを平均化したものが一本の線上にあると表したものである。

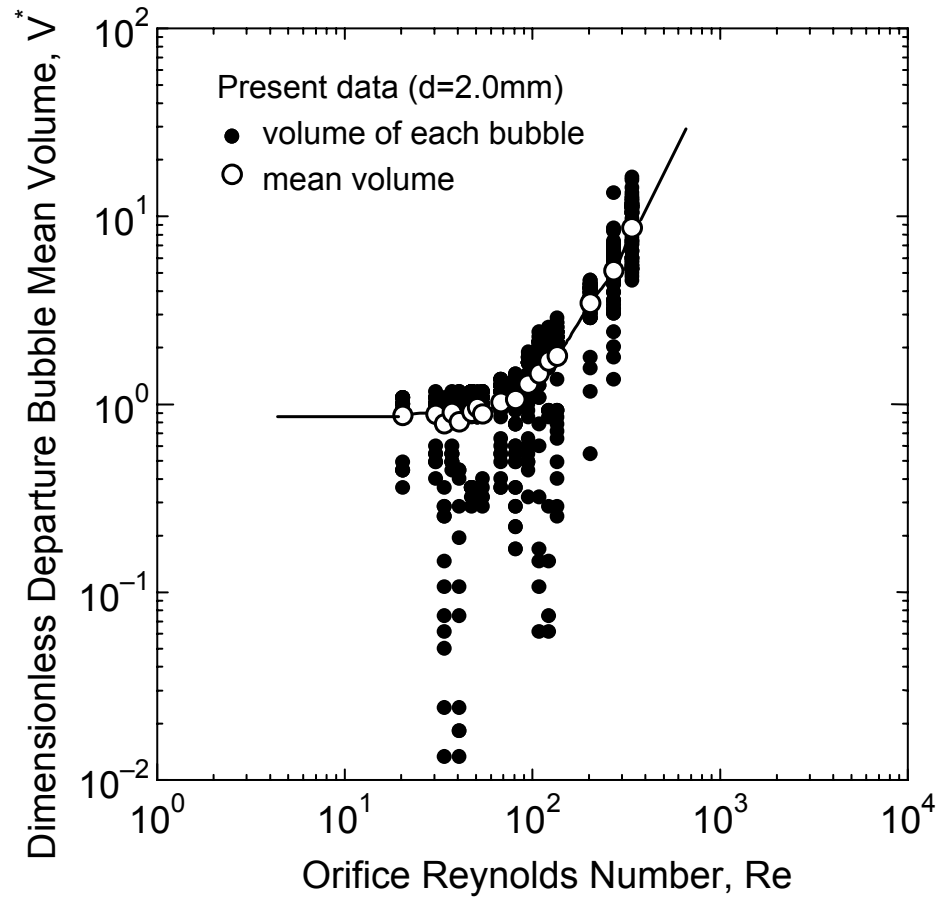


Fig.1-2-1 Bubble Volume and Reynolds number

1－3 研究の目的

従来の研究にも見られるように、気泡の研究では時間的平均値がとられている。本研究では、時間と共に生成する気泡の形状、周期などを平均化せず、分布として明らかにし、一つの供給系と二つの生成系という間の現象を観察し、理解することを目的とする。

またそこから発生する二つの気泡がどのように影響を及ぼしあうかということについても観察し、理解する。

第 2 章 実験

2－1 実験装置

2－2 実験装置および実験条件

2－1 実験装置

本研究で使用した実験装置の写真をFig.2-1-1に示す.概略をFig2-1-2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、黄銅面上の複数のオリフィスに供給され、そこから生成する気泡の挙動を高速ビデオカメラで記録する.空気流量とオリフィス間距離を様々に変化させることで、気泡の干渉現象を観察する.

実験装置系

- 1、小型コンプレッサ（日立ベビコン）（Fig.2-1-3）
空気を圧縮して溜めて、送気管を通して空気を送る機械
- 2、流量計（OMEGA製）（Fig.2-1-4）
送気管を通してきた空気の流量を調節するもの
- 3、キャピラリーチューブ
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ためにオリフィス直前に内径0.3mmの毛細管を用いて非常に大きな抵抗を与える.
- 4、高速ビデオカメラ（FASTCAM-Net 500/1000/Max）
撮影速度は1000frame/secで約8.7秒間.
オリフィスからの気泡離脱を撮影するもの
- 5、アクリルボックス(Fig.2-1-5)
オリフィスの前で空気を二方向に分岐するもの.

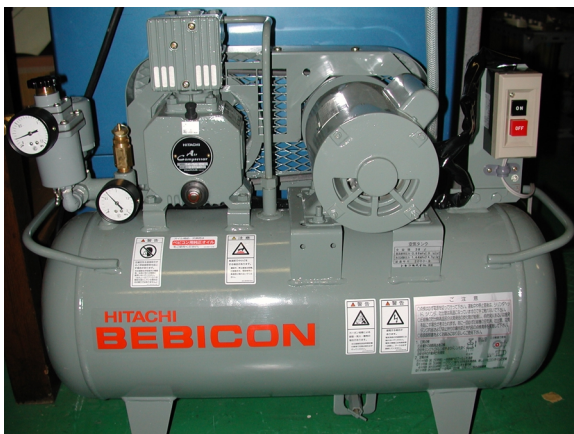


Fig.2-1-3 小型コンプレッサ



Fig.2-1-4 流量計

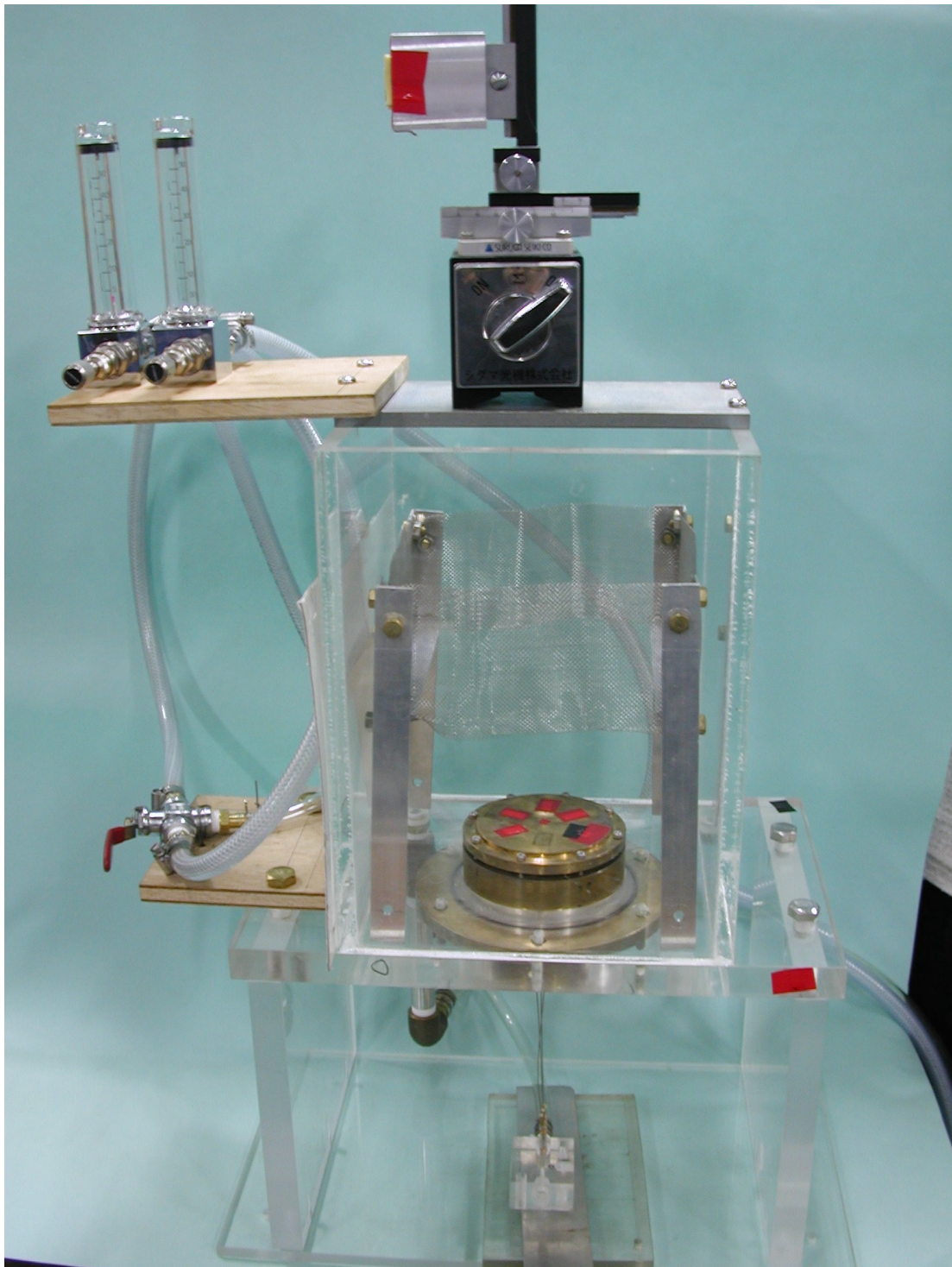


Fig.2-1-1 実験装置写真

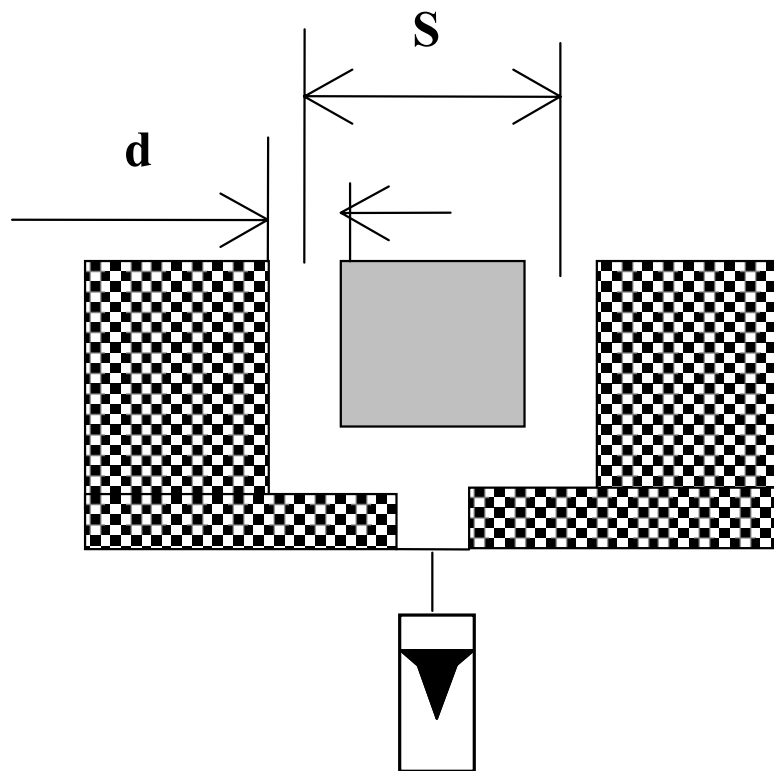


Fig.2-1-5 アクリルボックス側面図

2－2 実験方法及び実験条件

1、実験方法

準備

コンプレッサで空気を圧縮する。
 空気がある程度流しておき、水槽に蒸留水を入れる。
 高速ビデオカメラを気泡発生部に焦点を合わせセットする。
 流量計を開放する。

実験

バルブを開け、送気管に空気を送る。
 空気流量を調節。
 高速ビデオカメラで現象を撮影する。

実験終了後

コンプレッサの空気泡を止める。
 高速ビデオカメラの電源を切る。水槽から水を捨てる。

2、実験条件

本実験ではオリフィス間隔(S)、オリフィス径(d)を様々に変える。(Fig2-2-1)

	d(mm)		
	1.0	1.5	2.5
S (mm)	1.5		
	2.5	4	7
	3.5	6	9

Fig.2-2-1 オリフィス間隔(S)とオリフィス径(d)

それぞれの実験条件に対して流量を様々に変え現象を観察する。

第 3 章 実験結果

- 3－1 臨界流量について
- 3－2 臨界流量実験結果
- 3－3 干渉実験結果

3－1 臨界流量について

オリフィスに様々な流量の空気を流していくと、初めは二つのオリフィスから気泡が生成していたが、空気の流量を徐々に下げていくにつれ、一つのオリフィスからしか気泡が生成しなくなる。このように気泡が二つ生成していたが、ある流量あたりで一つとなるような流量を本研究では、臨界流量と呼ぶことにする。

臨界流量はある流量と一つに決まるのではなく、ある程度範囲を持ったものとして定義する。そしてこの臨界流量は、高流量→低流量、低流量→高流量と流量の変化の仕方によっても変化する。

臨界流量の近傍の流量では、生成する気泡の周期に特徴がある。 $d=1.5(\text{mm})$ の時には、臨界流量前後では片側からは、気泡が常に発生し、もう片側からは気泡は、ごくまれに発生する。そして、 d が大きくなると、片方から常に気泡が発生するというわけではなく、その発生しつづけるオリフィスが、左右頻繁に変わるようになる。

3－2 臨界流量実験結果

オリフィス径(d)、オリフィス間距離(S)の違いによる臨界流量の違いをFig3-2-1に示す。

グラフ化したものがFig3-2-2である。

図の中で青い線は高流量→低流量に流量を変化させた時の臨界流量遷移域。
赤い線は低流量→高流量に流量を変化させた時の臨界流量遷移域である。

d(mm)	S(mm)	低流量→高流量(cc)		高流量→低流量(cc)	
1.0	1.5	280	270	270	260
	2.5	210	200	200	190
	3.5	280	250	240	230
1.5	4.0	450	440	400	390
	6.0	440	435	400	390
2.5	7.0	520	460	500	460
	9.0	580	500	600	520

Fig.3-2-1 臨界流量

オリフィス径d=1.5(mm)の時は、オリフィス間隔Sによらずほぼ一定の値をとっている。d=2.5(mm)の時は、Sが大きくなるにつれて、臨界流量値は高流量へと推移している。注目すべきはd=1.0(mm)の時、Sが2.5(mm)の時に最も低い流量で臨界値になり、Sが1.5(mm)、3.5(mm)の時には、それよりも大きな値で臨界値をとっている。このようにSが大きくなると臨界流量が高くなりそうだが、実際の結果はそれとは異なる傾向を示している。

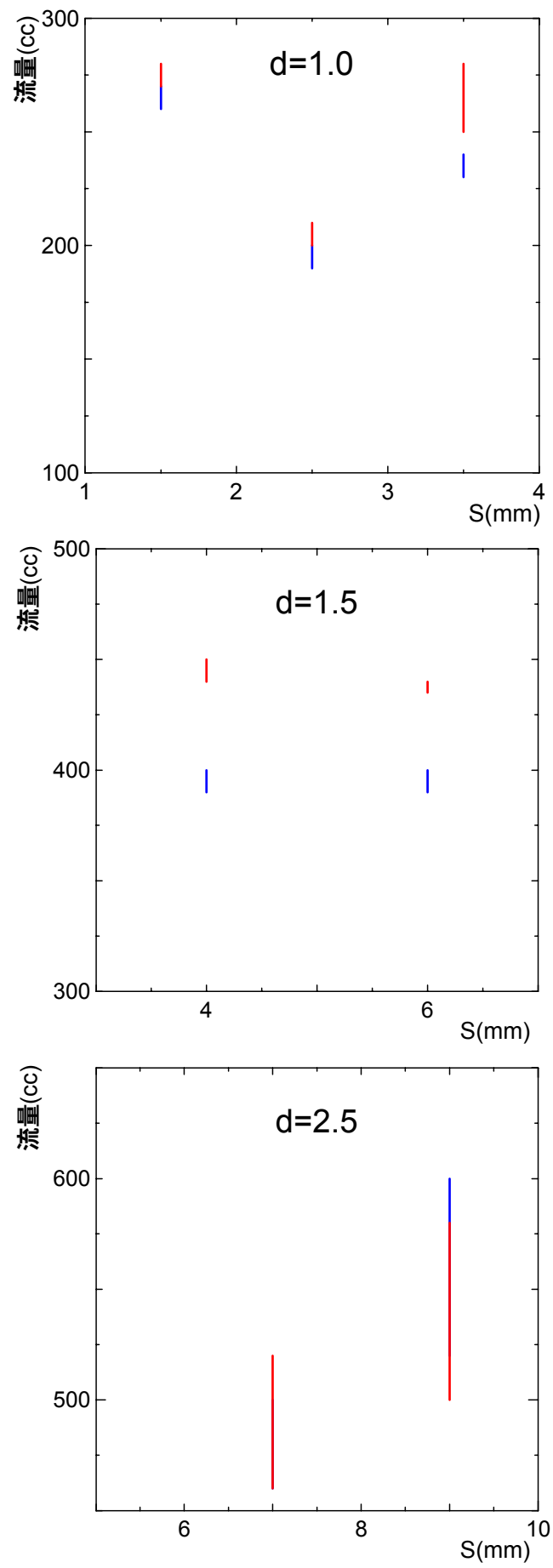


Fig.3-2-2
臨界流量図

青：高流量→低流量
赤：低流量→高流量

3－3 干渉実験結果

干渉実験として行った条件はFig.3-3-1に示す.

d(mm)	S(mm)	単一オリフィス(cc)	対オリフィス(cc)
1.0	1.5		200
	2.5	150	200
		200	300
	3.5		200
			300
1.5	4.0		100
		100	500
	6.0	250	100
			500
2.5	7.0	300	300
			600
	9.0		300
			600

Fig.3-3-1 干渉実験条件

干渉実験での流量の決定は、単一オリフィスの時の流量を二つのオリフィス系では単純に二倍にした。ただし、二つのオリフィス系で臨界流量以下の時は一つのオリフィスからしか気泡は発生しないので、その時の流量は単一オリフィス系と同じ流量に設定した。

次ページからがその結果である。

- (A) 気泡形状 (X軸：気泡の横の大きさ、Y軸：気泡の縦の大きさ)
- (B) 周期のリターンマップ (X軸：n番目の気泡離脱周期、Y軸：n+1番目の気泡離脱周期)
- (C) 周期の時間変化 (X軸：時間、Y軸：気泡の離脱周期)
- (D) 平均気泡径 (気泡の縦と横の大きさの平均値) の時間変化 (X軸：時間、Y軸：平均気泡径)
- (E) 平均気泡径の周期変化 (X軸：気泡の離脱周期、Y軸：平均気泡径)

(A) では気泡形状のばらつき、(B) では周期の規則性 (単周期、二周期等)、(C) では時間に沿った周期の変化、(D) では時間に沿った気泡の形の変化、(E) では周期と気泡径の関係を表している。

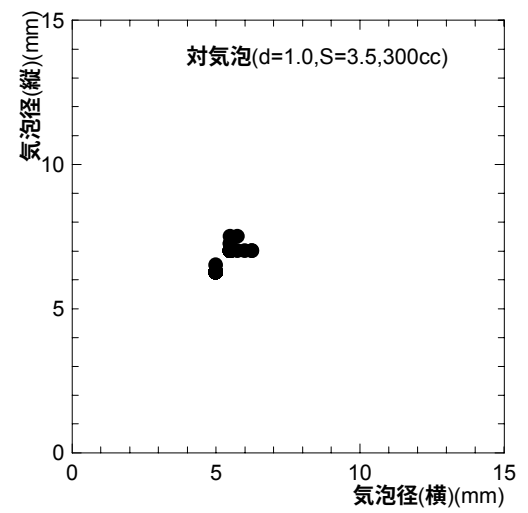
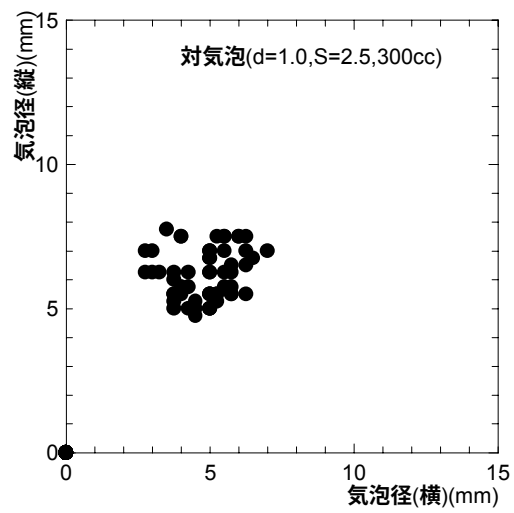
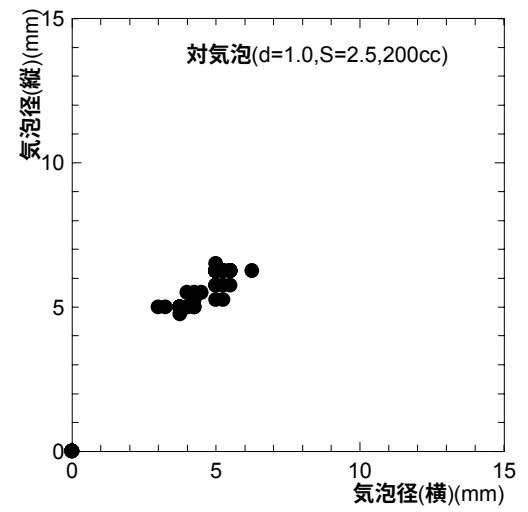
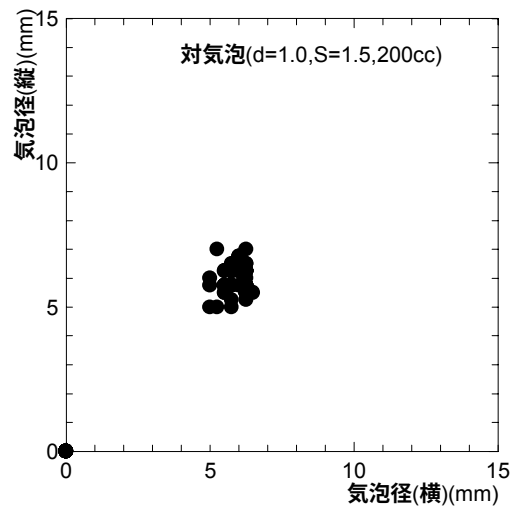
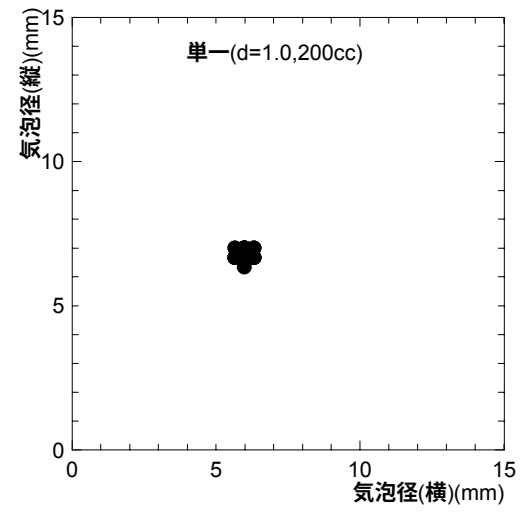
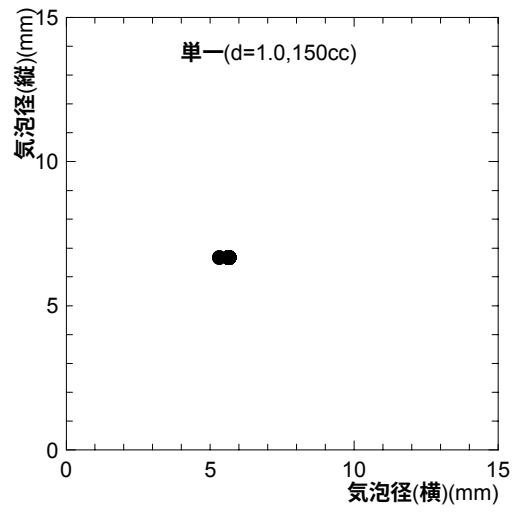
(A) 気泡形状

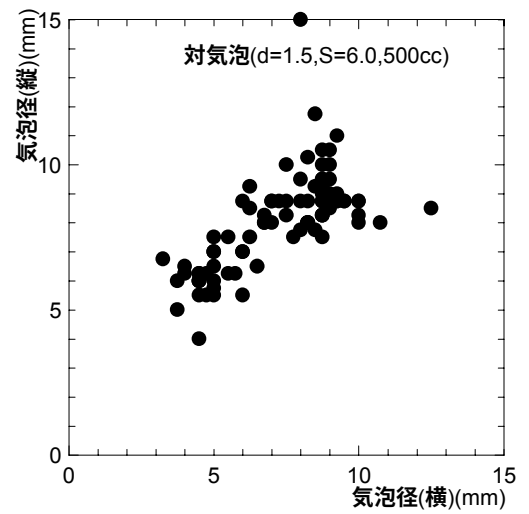
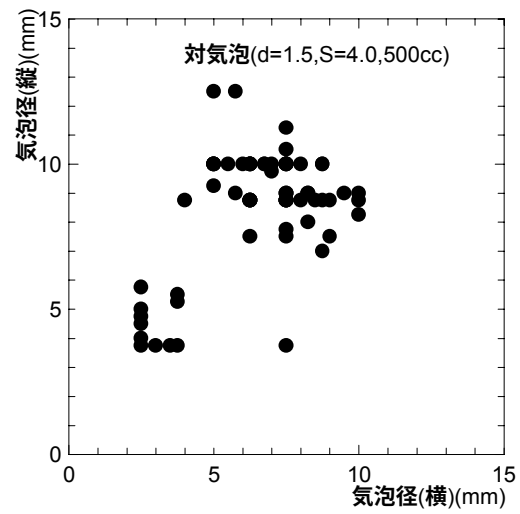
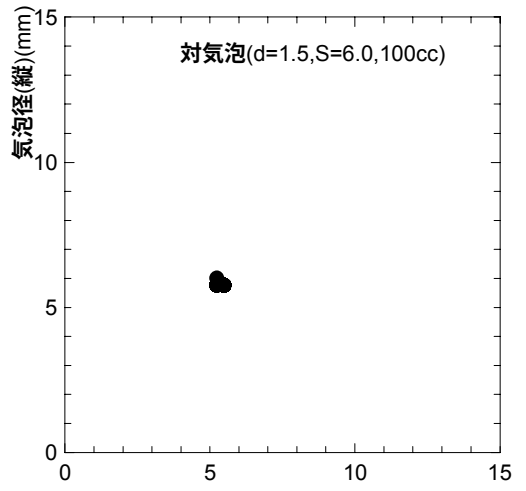
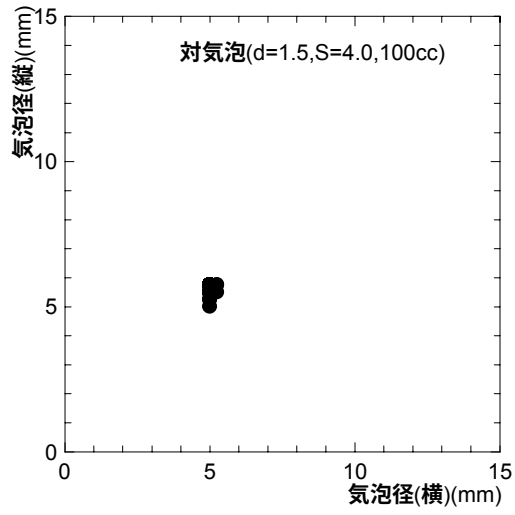
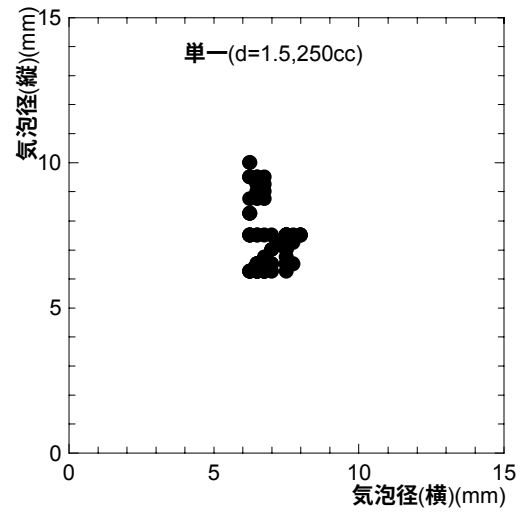
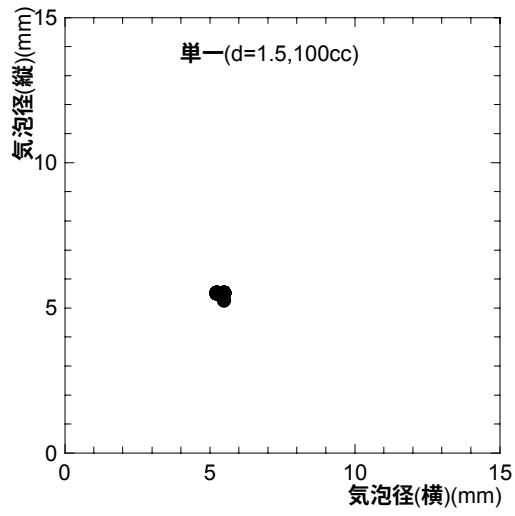
($d=1.0, 1.5, 2.5\text{mm}$)

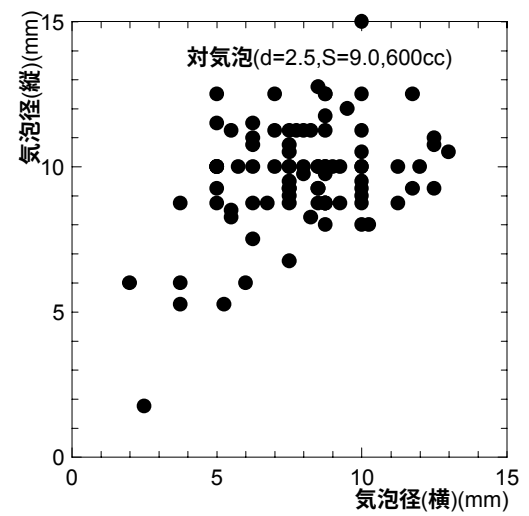
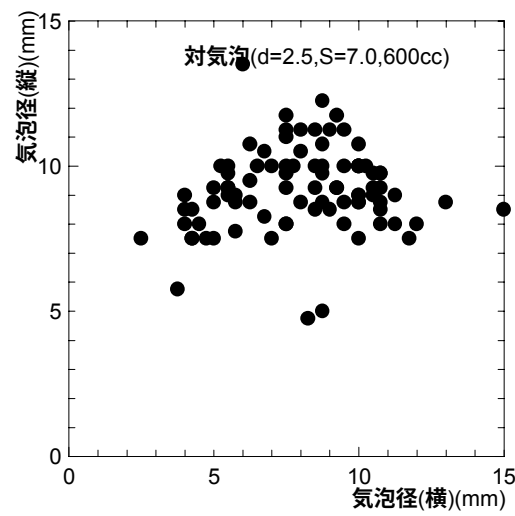
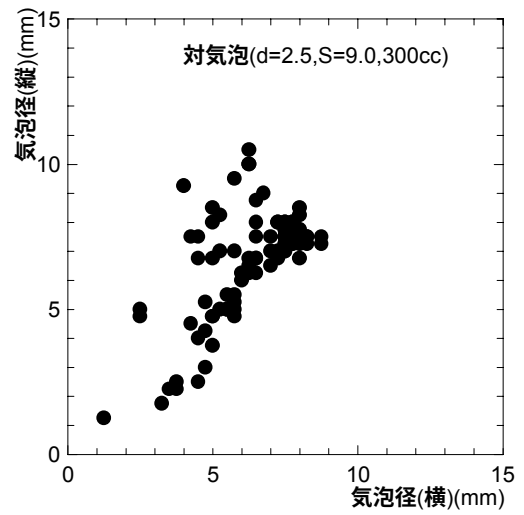
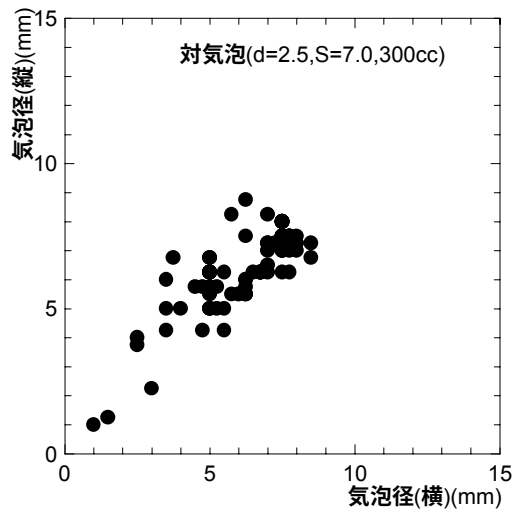
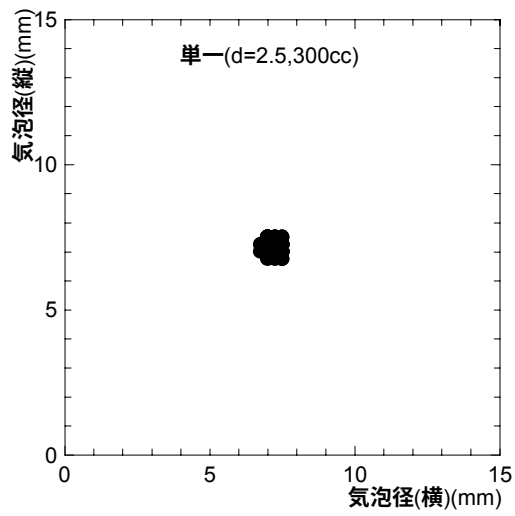
X軸：気泡の横の大きさ(mm)

Y軸：気泡の縦の大きさ(mm)

＊グラフ中、「単一」とは一つのオリフィスで一つの気泡を発生させているものであり、「対気泡」とはオリフィスは二つであるが、流量やオリフィス径(d)、オリフィス間隔(S)によっては気泡は一つのオリフィスからしか生成していないものを示している。



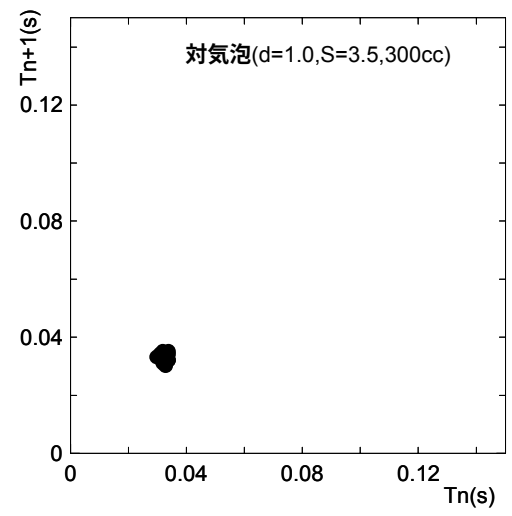
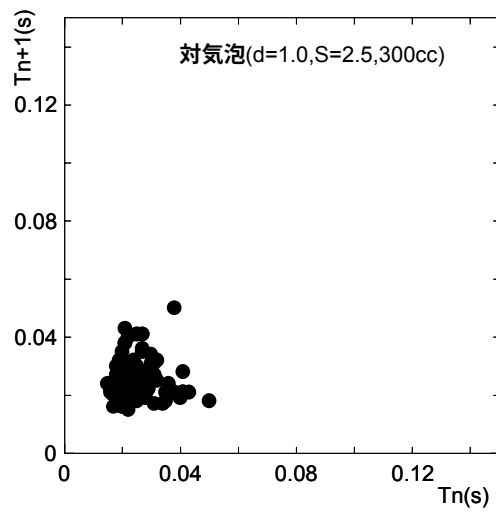
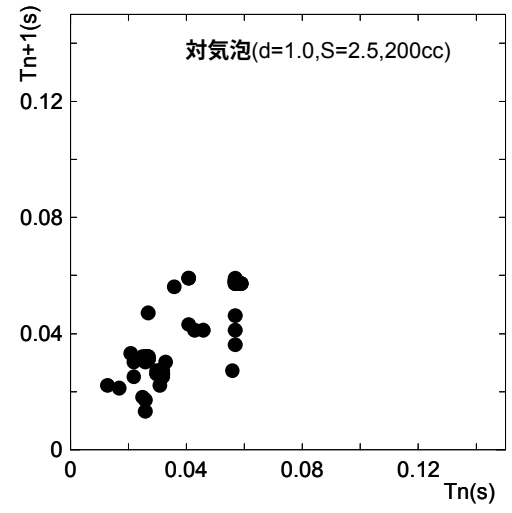
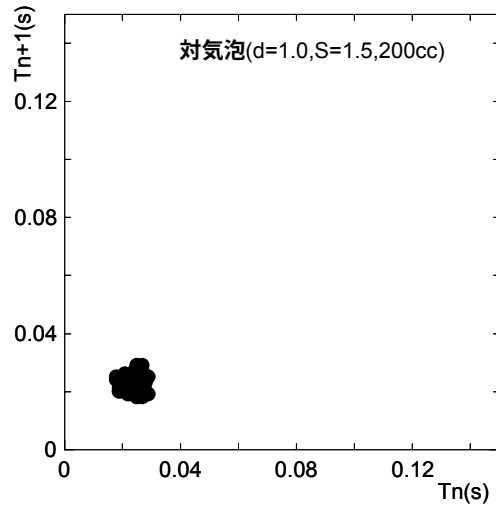
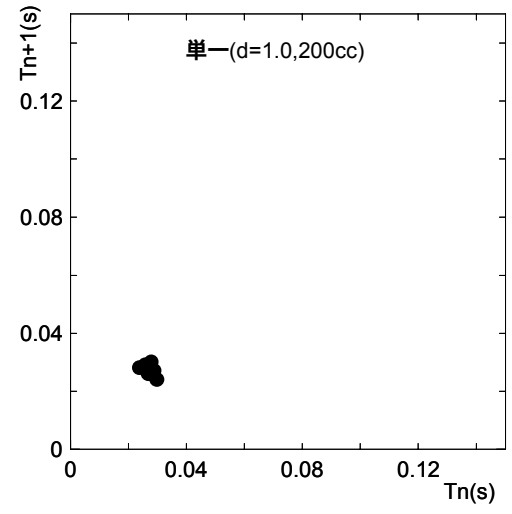
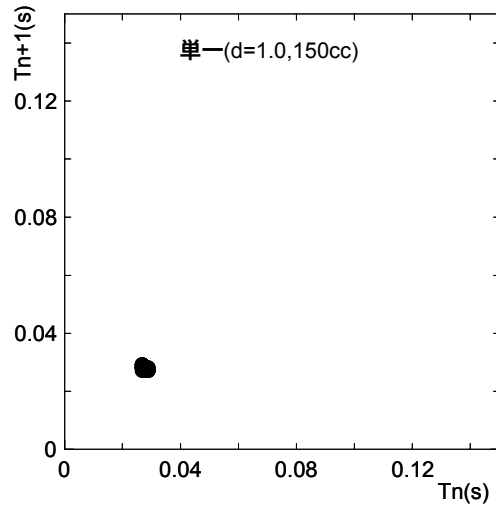


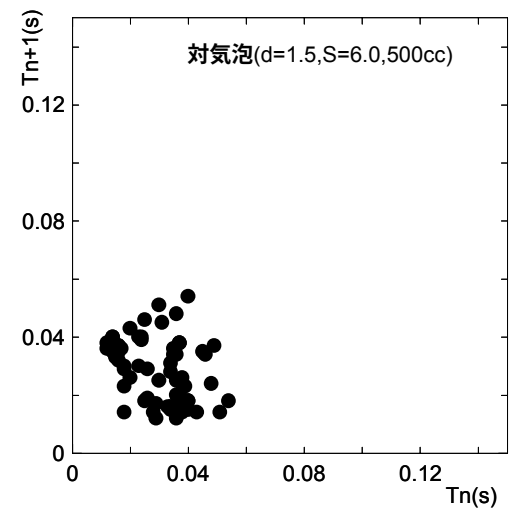
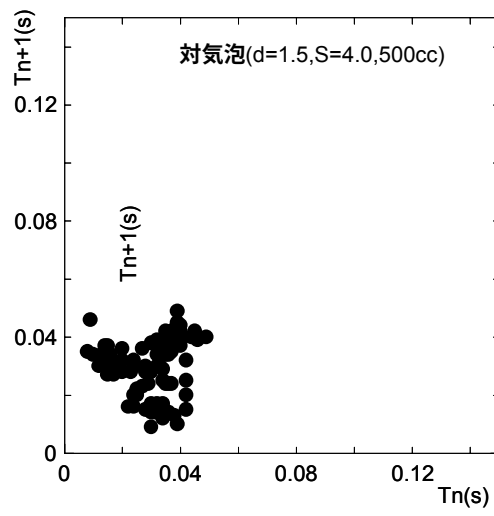
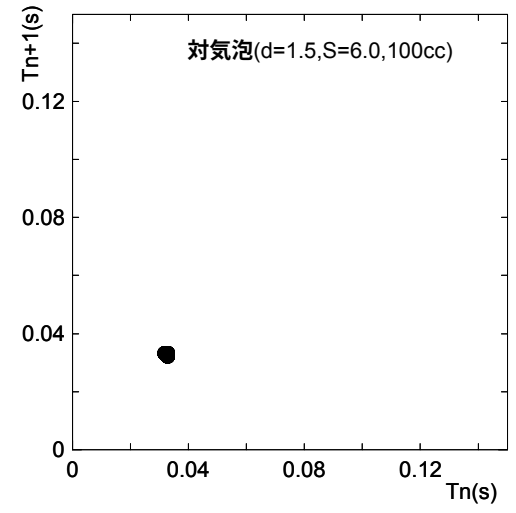
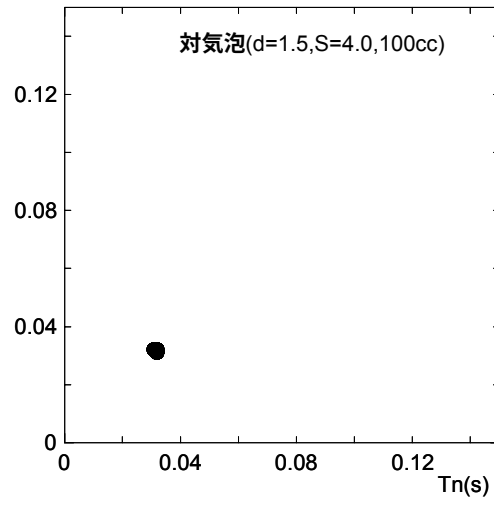
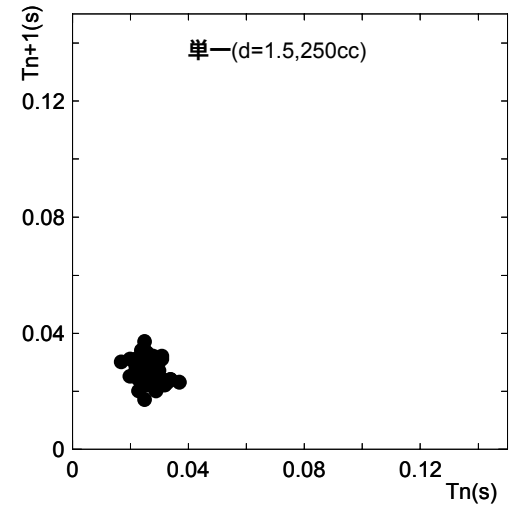
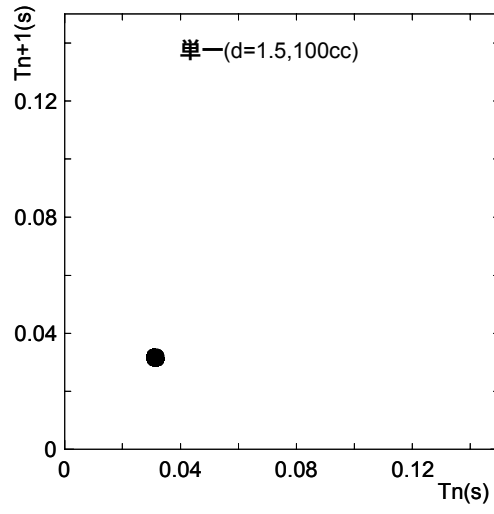


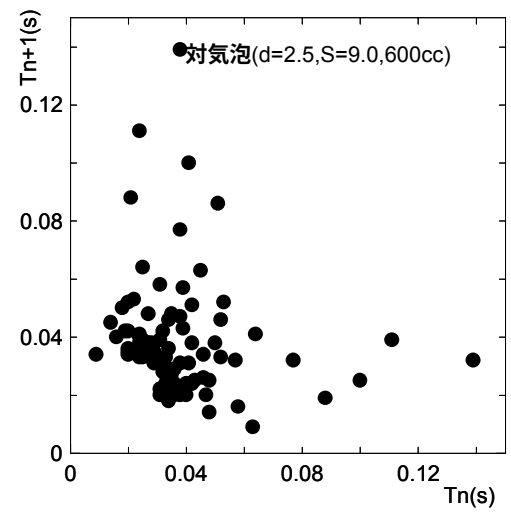
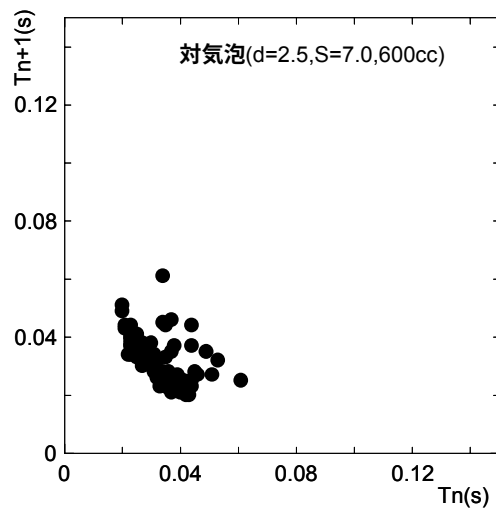
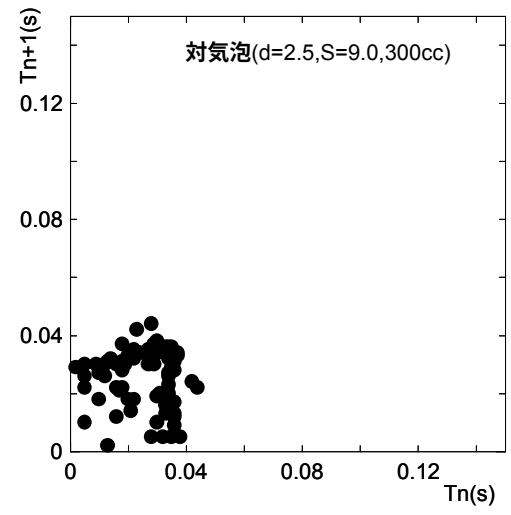
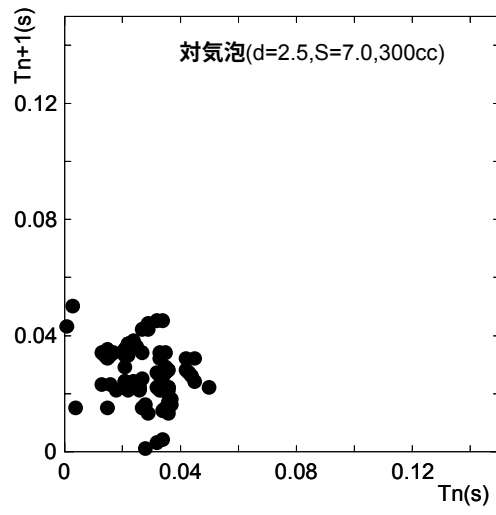
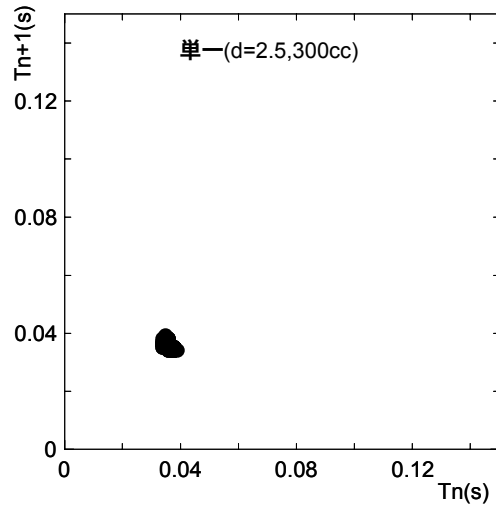
(B) 周期リターンマップ
($d=1.0, 1.5, 2.5\text{mm}$)

X軸： n 番目の気泡離脱周期(s)

Y軸： $n+1$ 番目の気泡離脱周期(s)



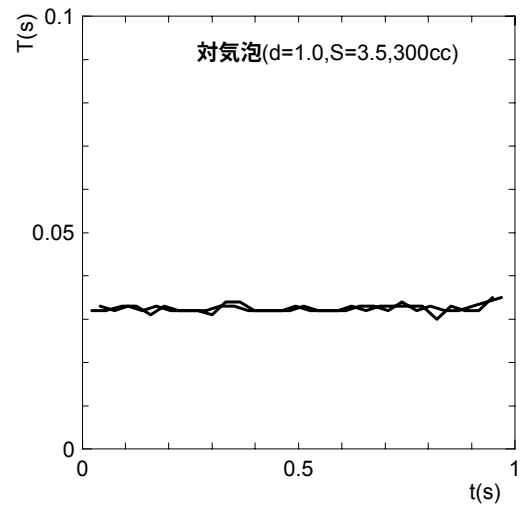
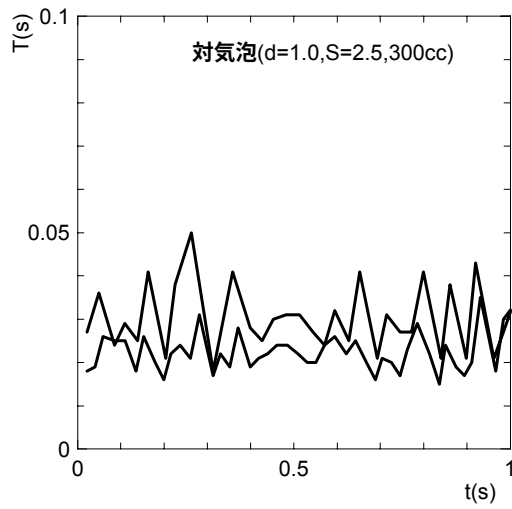
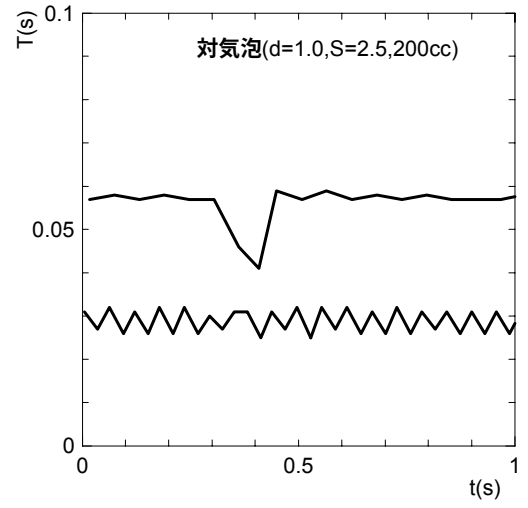
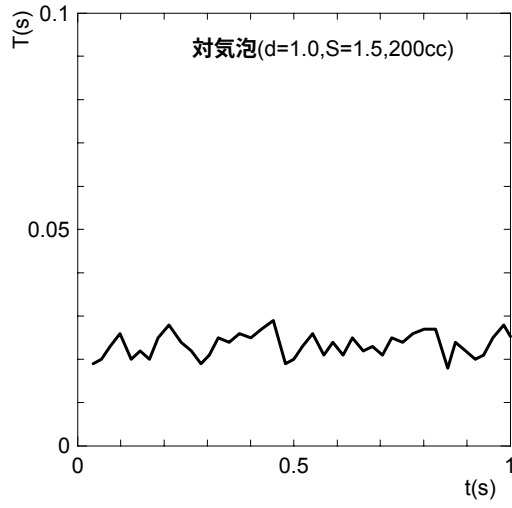
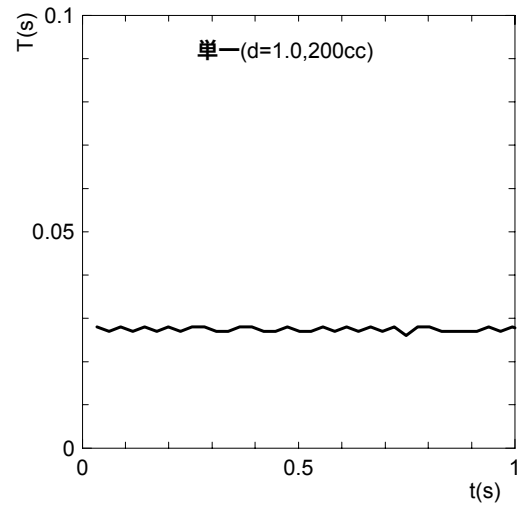
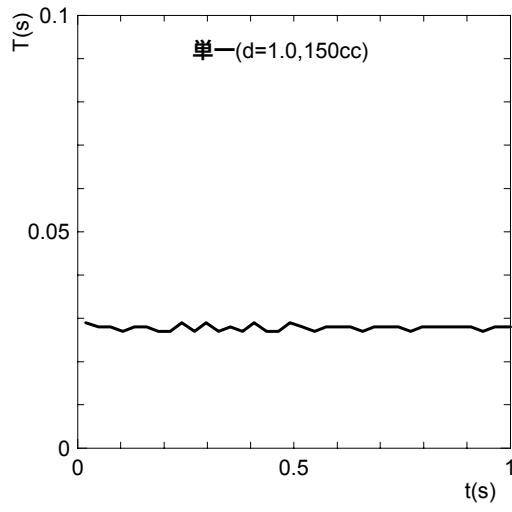


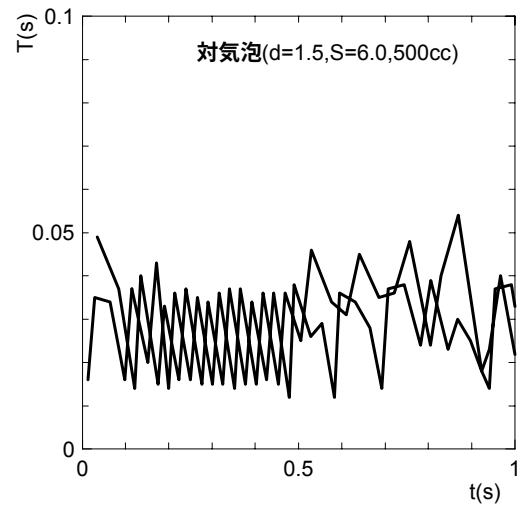
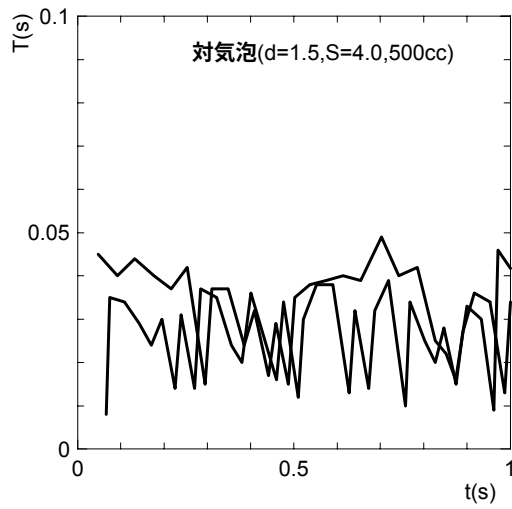
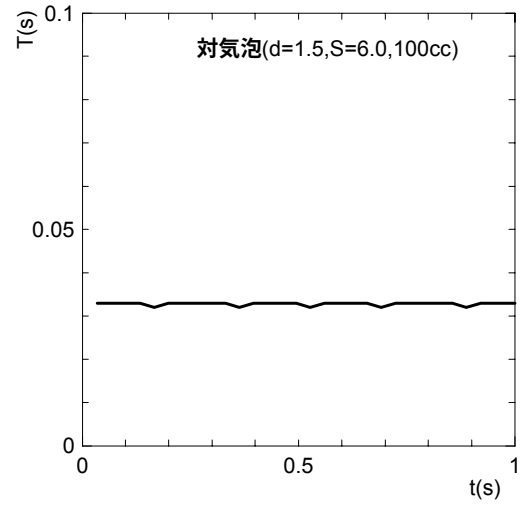
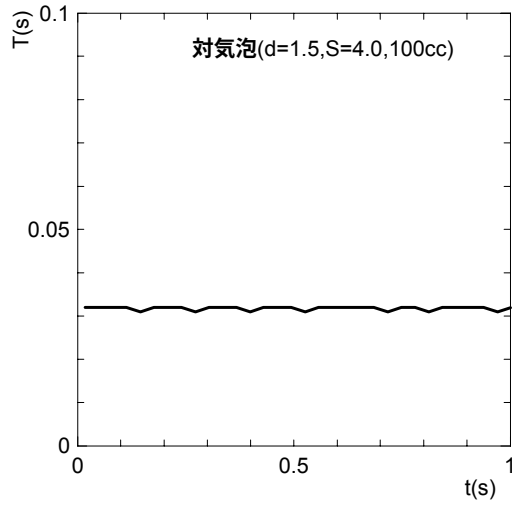
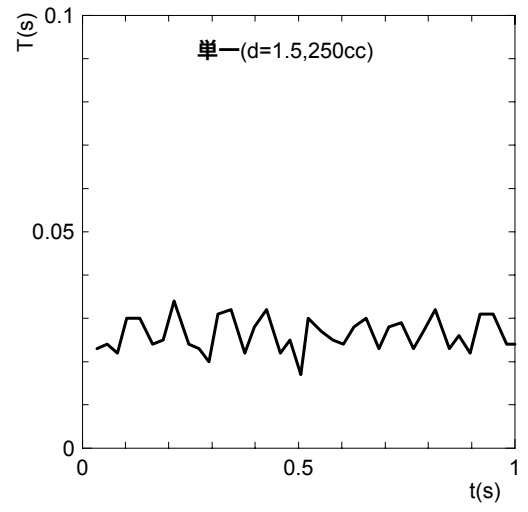
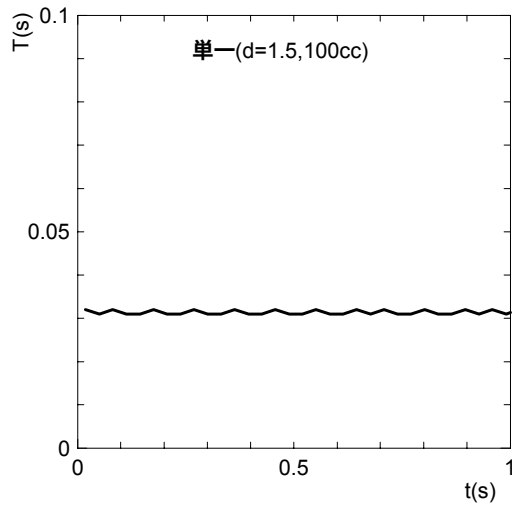


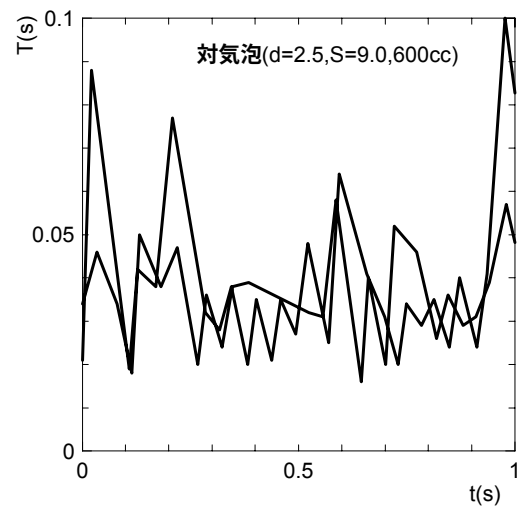
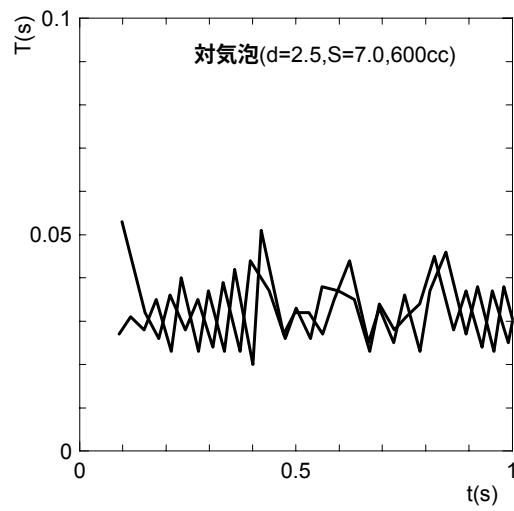
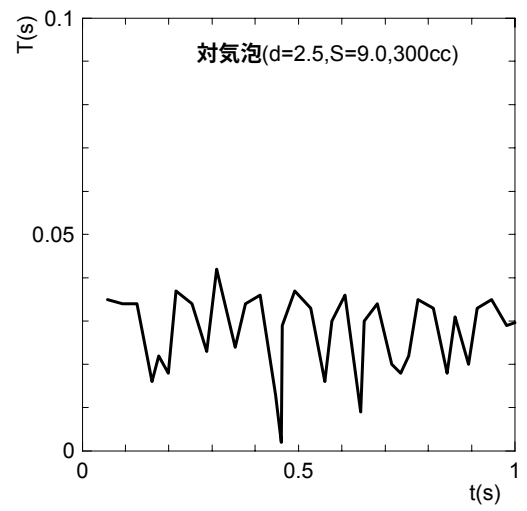
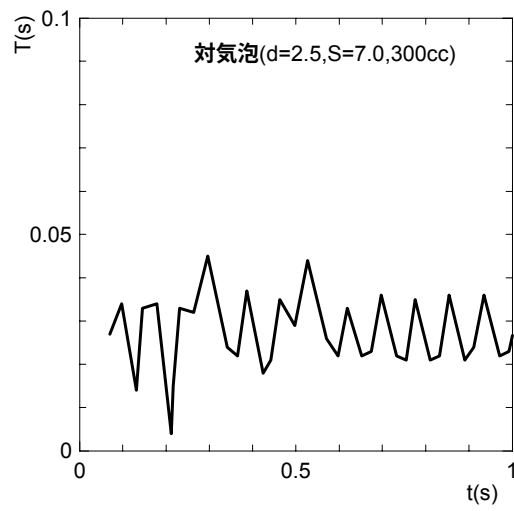
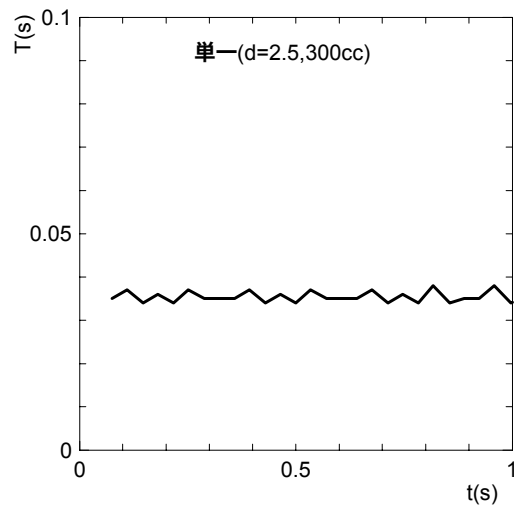
(C) 周期時間変化
($d=1.0, 1.5, 2.5\text{mm}$)

X軸：時間(s)

Y軸：気泡の離脱周期(s)



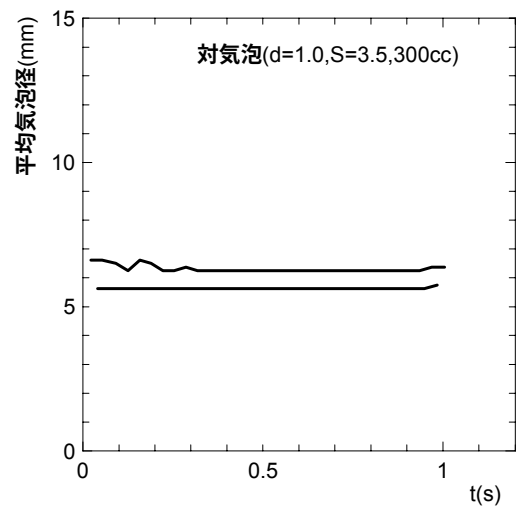
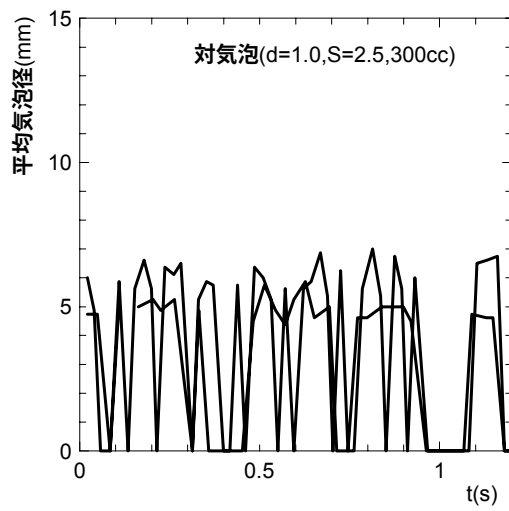
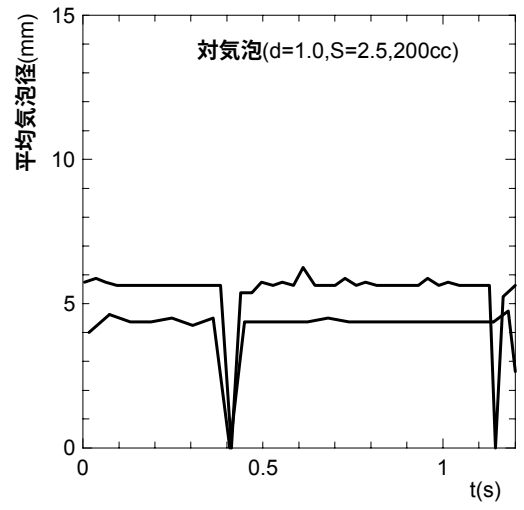
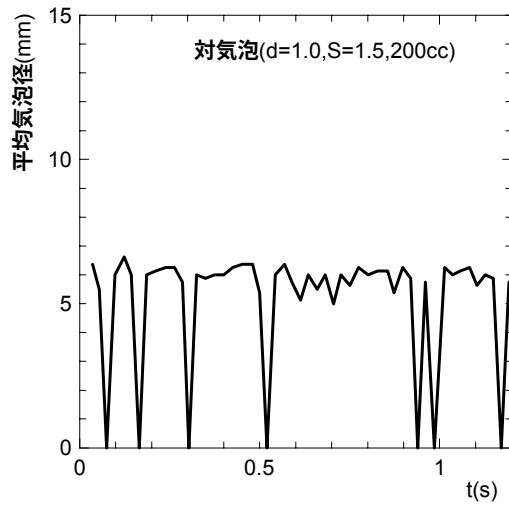
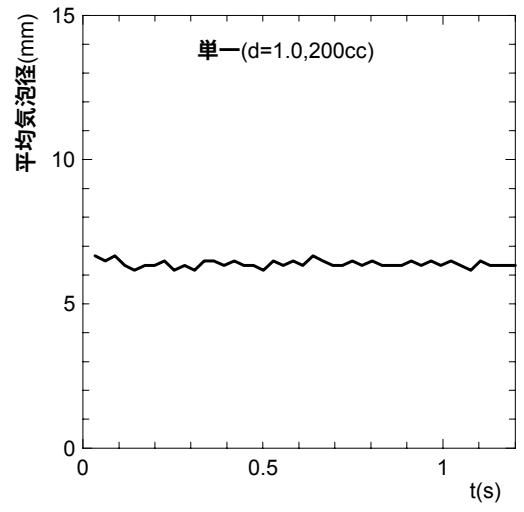
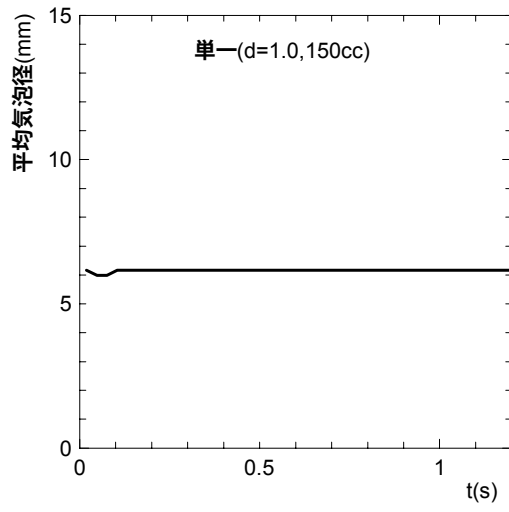


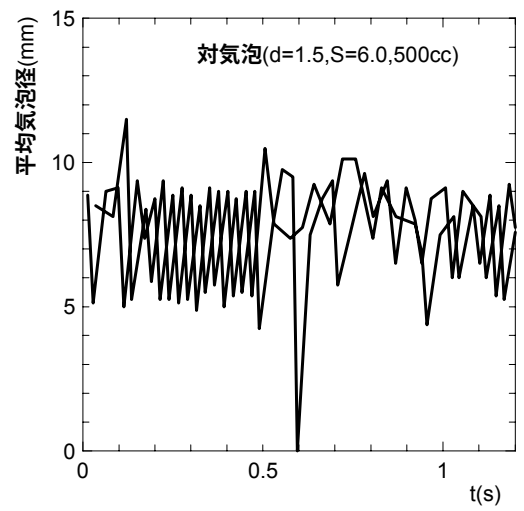
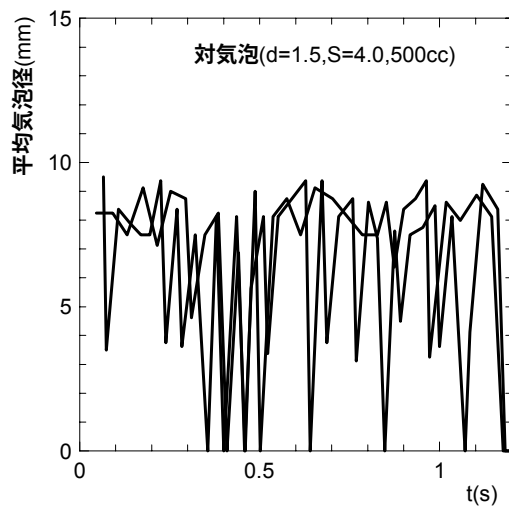
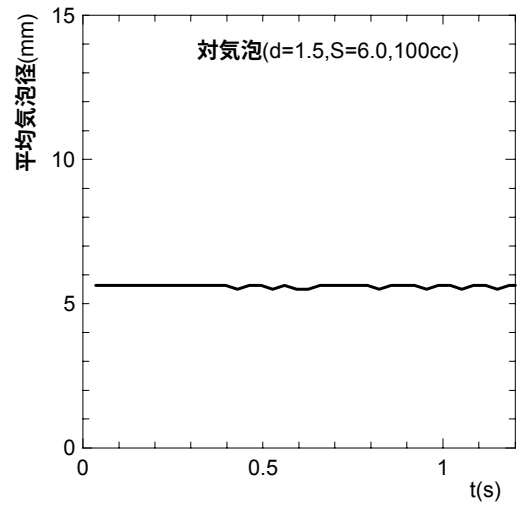
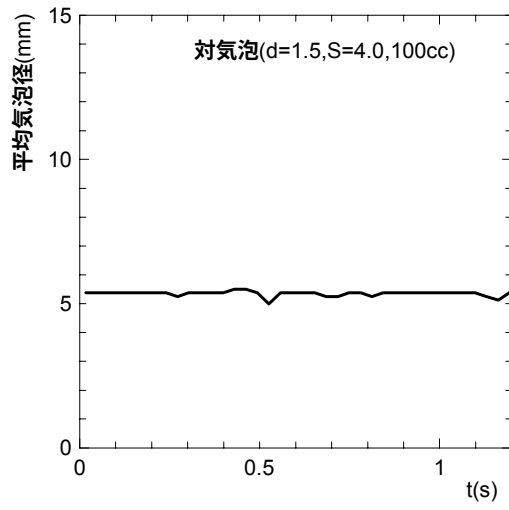
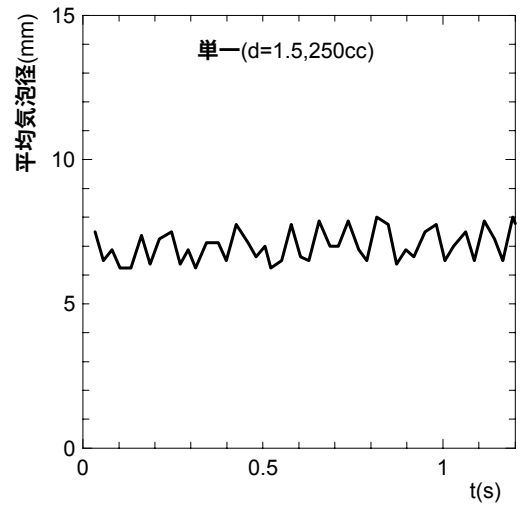
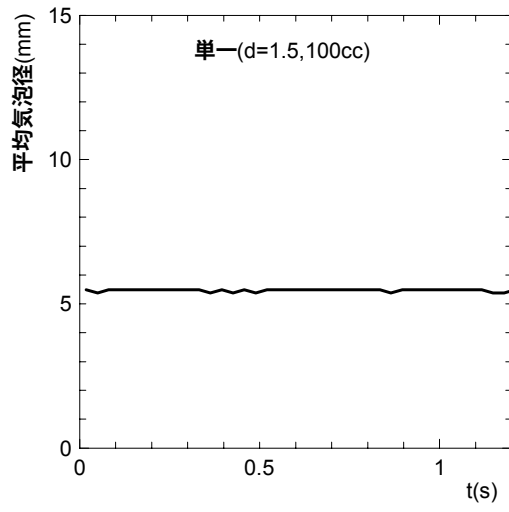


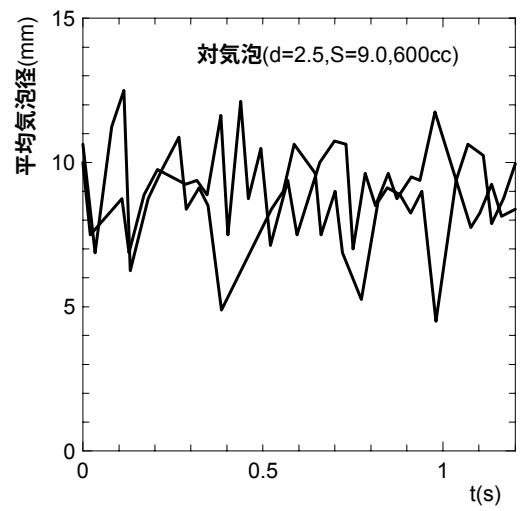
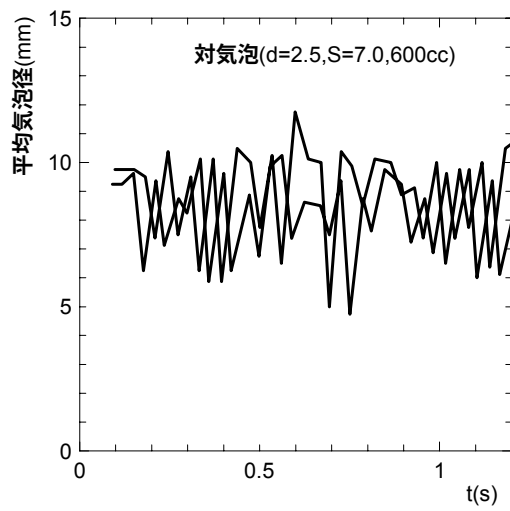
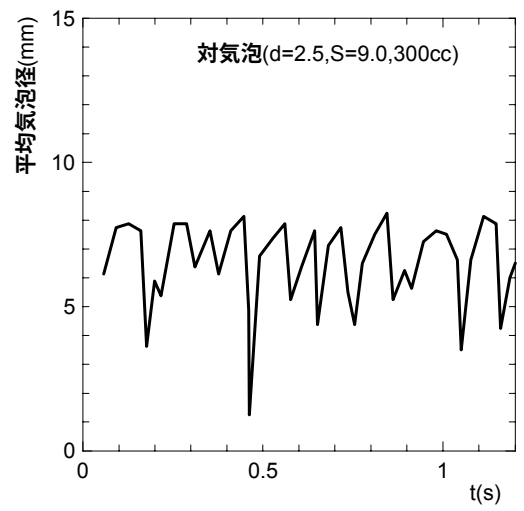
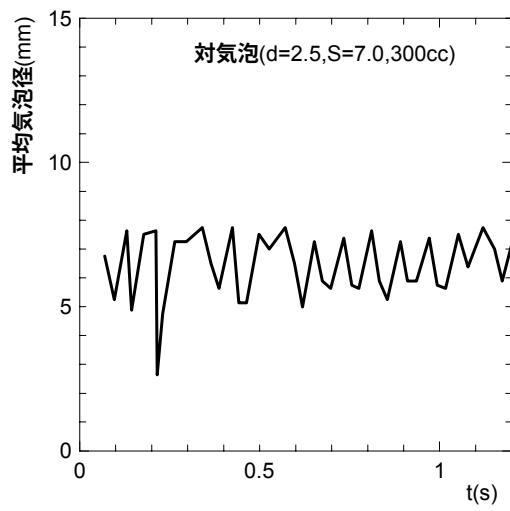
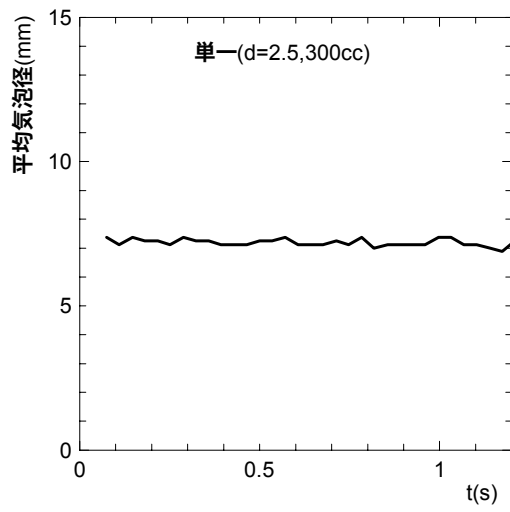
(D) 平均気泡径時間変化
($d=1.0、1.5、2.5\text{mm}$)

X軸：時間(s)
Y軸：平均気泡径(mm)

＊平均気泡径が「0」を示しているのは、気泡は発生したが、合体などで気泡径を測定することが不可能だったことを示している。



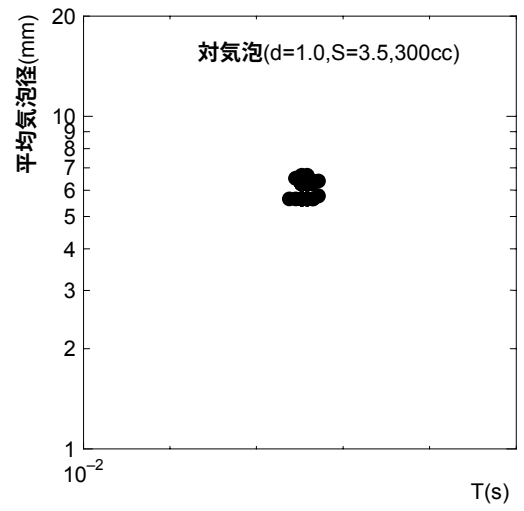
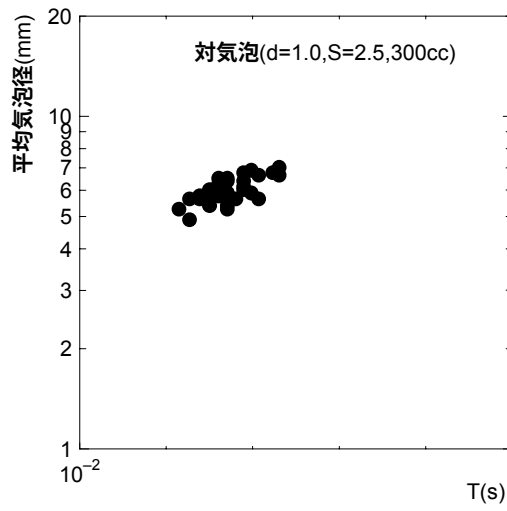
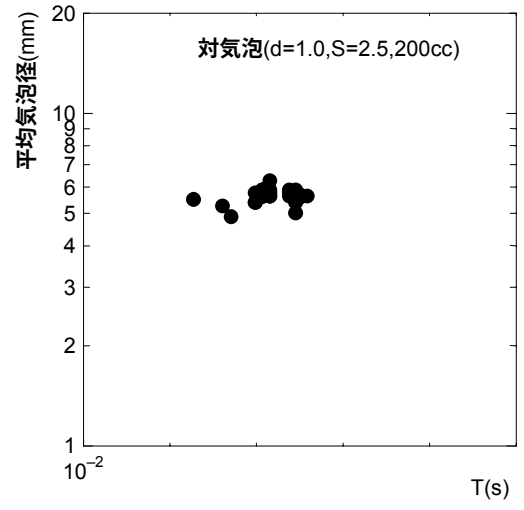
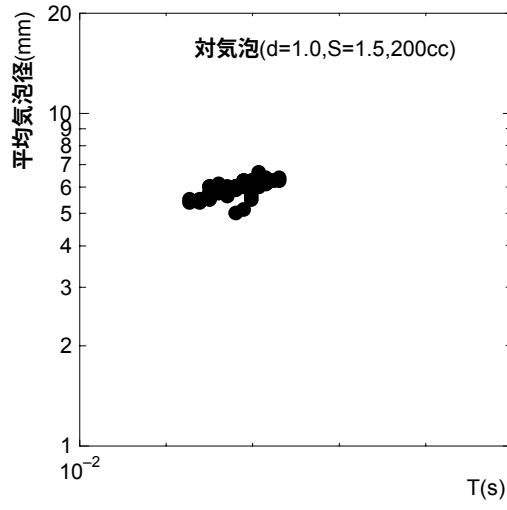
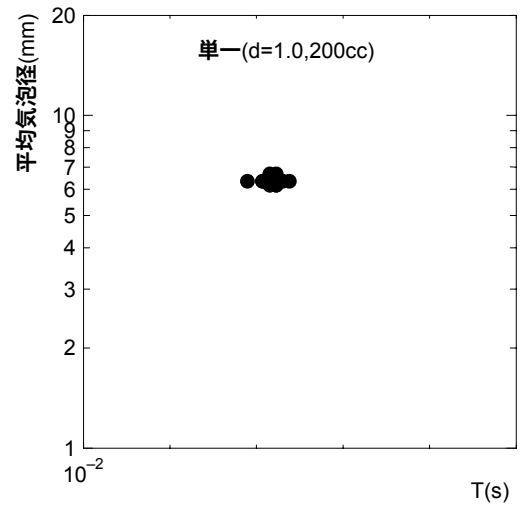
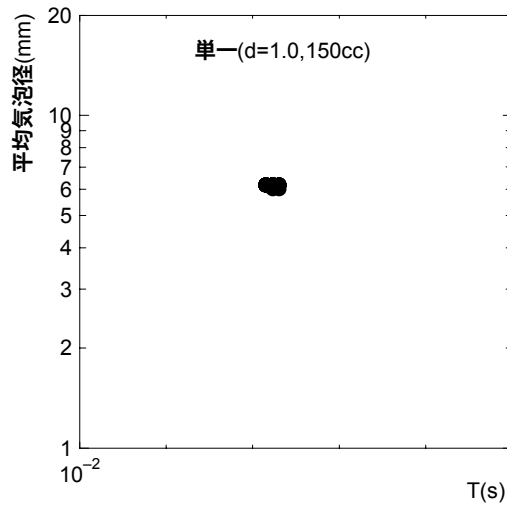


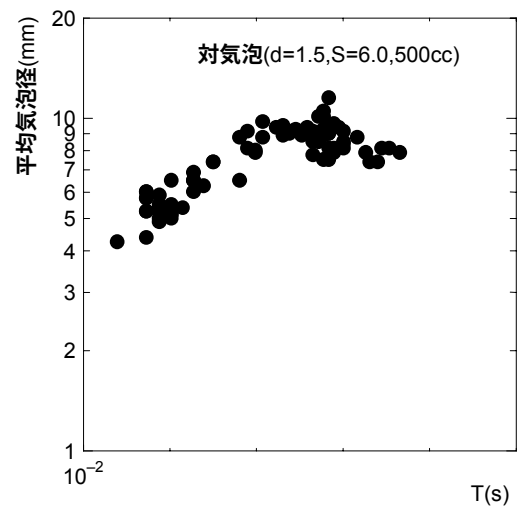
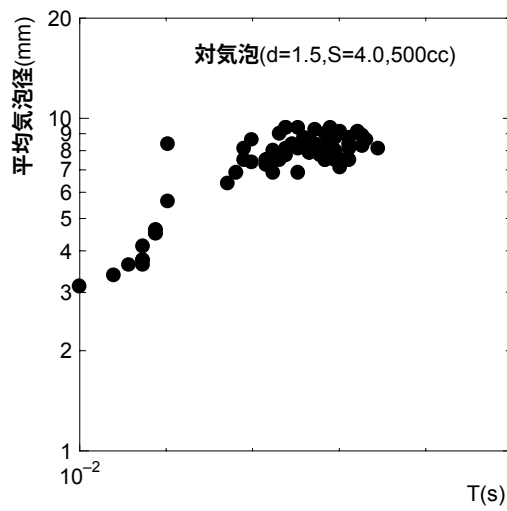
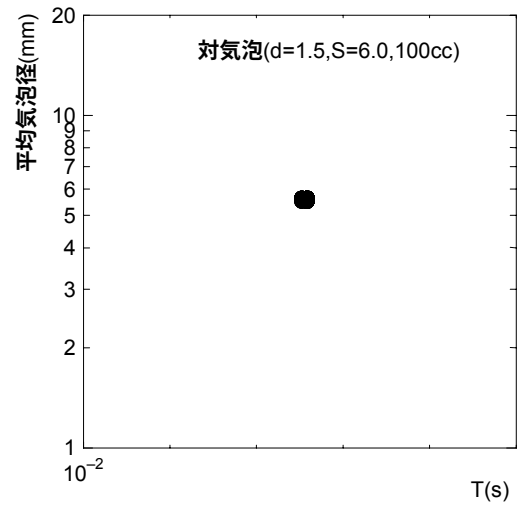
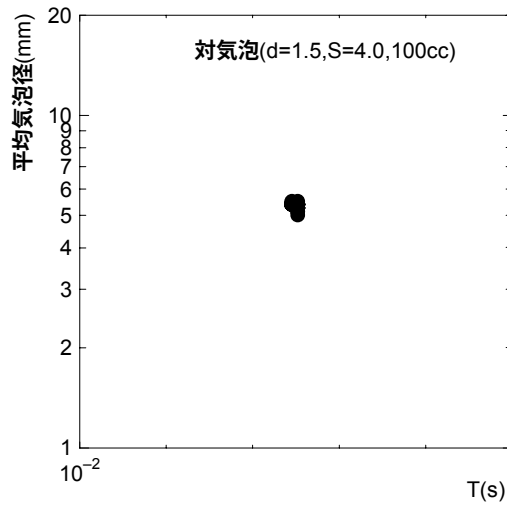
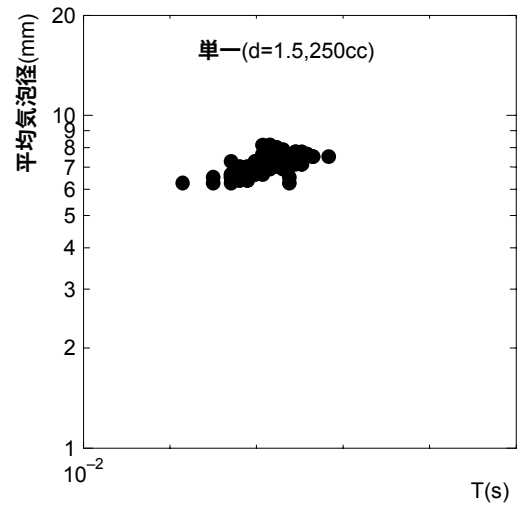
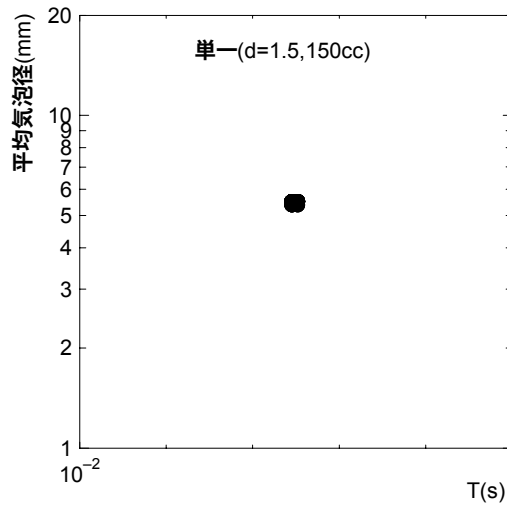


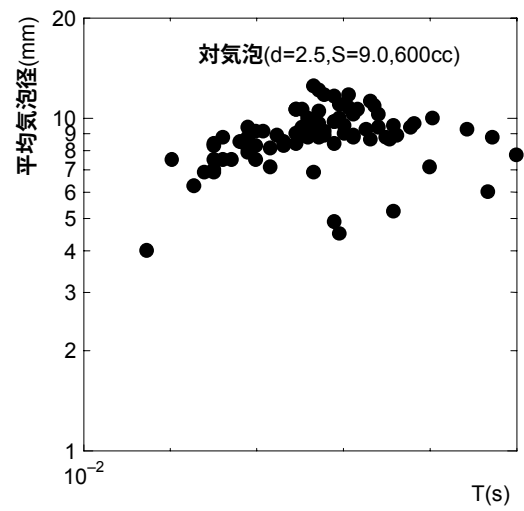
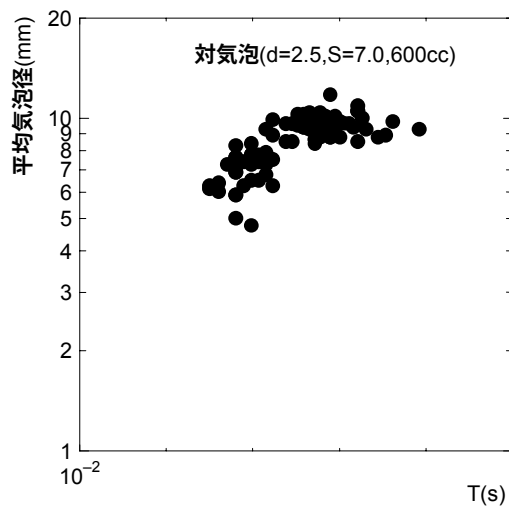
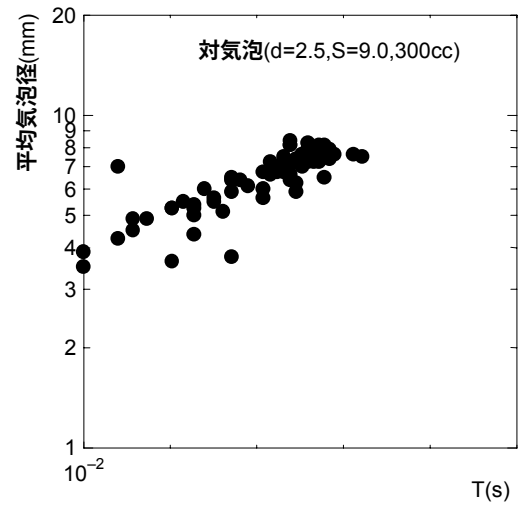
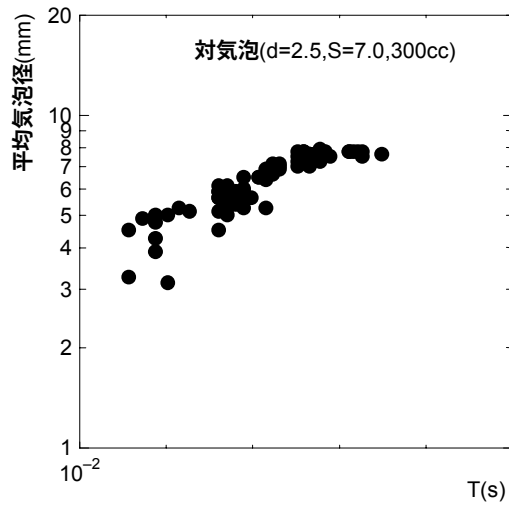
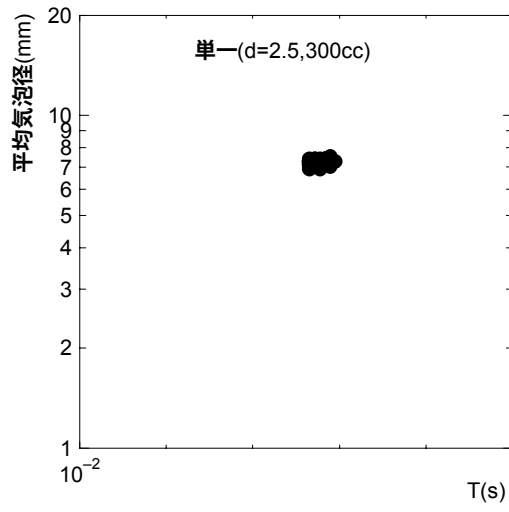
(E) 平均気泡径周期変化
($d=1.0、1.5、2.5\text{mm}$)

X軸：気泡の離脱周期(s)
軸：対数：0.01～0.1

Y軸：平均気泡径(mm)
軸：対数：1～20







第 4 章 考察

4－1 臨界流量

4－2 干涉実験

4－1 臨界流量について

4－1－1 臨界流量近傍の気泡の様相

臨界流量近傍の流量では、オリフィス径(d)とオリフィス間距離(S)によって気泡の発生の様子が異なることが実験の結果分かっている。ここで何がこの理由となっているかについて考察する。

発生する気泡の径はオリフィス径(d)によってそんなに変わらない。とすると、オリフィス間隔(S)によりこの臨界流量付近の様相が影響をうけていると考えられる。オリフィス間隔(S)が気泡径に比べ小さいときは、気泡発生後のオリフィスのところで、逆のオリフィスから発生する気泡を押さえ込んでしまい、それにより片方からしか気泡が発生しないと考えられる。この気泡押さえ込みが周りの流体（この場合は水）の影響を受ける際に、時々押さえ込み現象が弱まり、もう一方のオリフィスからも時々気泡が発生するという現象に結びついていると考えられる。

また気泡径よりオリフィス間隔(S)が大きいときにはこの現象ではなく、発生前のアクリル分岐部の影響をうけていると考えられる。一旦片方から気泡が発生し始めてしまうと、そちらのオリフィスの方がもう一方のオリフィスより圧力が下がり、常に一方からしか気泡が発生しやすいという現象に結びついていると考えられる。

4-1-2 臨界流量の次元解析

臨界流量 Q_c が粘性によらないとすると、

$$Q_c = F(\sigma, \rho, (\rho_l - \rho)g, d)$$

σ : 表面張力

ρ : 空気密度

これより、

$$Q_c = \sigma^a \rho^b d^c [(\rho_l - \rho)g]^e$$

これらを、時間 T、長さ L、質量 M で書き直すと、

$$\left[\frac{L^3}{T} \right] = \left[\frac{M}{T^2} \right]^a \left[\frac{M}{L^3} \right]^b [L]^c \left[\frac{M}{L^3} \times \frac{L}{T^2} \right]^e$$

$$\Leftrightarrow L^3 T^{-3} = M^{a+b+c} L^{-3b+c-2e} T^{-2a-2e}$$

これらより、

$$a + b + e = 0$$

$$-3b + c - 2e = 3$$

$$-2a - 2e = -1$$

となり、これを e で整理し、書き直すと、

$$\sqrt{\frac{\rho}{\sigma}} \frac{Q_c}{d^{3/2}} = f\left(\frac{d}{lc}\right) \quad lc = \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_l - \rho)g}} \quad (\text{毛管定数})$$

となる。

水、空気（20℃）の物性は

$$\rho = 1.166 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_l = 998.2 \text{ kg/m}^3$$

$$\sigma = 0.072 \text{ N/m} = 0.072 \text{ kg/s}$$

したがって、

$$\begin{aligned}\sqrt{\frac{\rho}{\sigma}} &= \sqrt{\frac{1.166}{0.072}} = 4.024 [s / m\sqrt{m}] \\ lc &= \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho - \rho)g}} = \sqrt{\frac{0.072}{(998.2 - 1.166) \times 9.8}} = 2.715 \times 10^{-3} [m] \\ \therefore \sqrt{\frac{\rho}{\sigma}} \frac{Q_c}{d^{3/2}} &= 4.024 \times \frac{10^{-6}/60}{(10^{-3})^{3/2}} \frac{Q_c}{d^{3/2}} = 2.121 \times 10^{-3} \frac{Q_c}{d^{3/2}} \quad Q_c : [cc/min], d : [mm] \\ \therefore d/lc &= 0.8683d \quad d : [mm]\end{aligned}$$

となり、無次元化されたデータをプロットしたものが Fig.4-1-2-1 である。

この時、式を変形すると、

$$\begin{aligned}\sqrt{\frac{\rho}{\sigma}} \frac{Q_c}{d^{3/2}} &= \sqrt{\frac{\rho Q_c^2}{\sigma d^3}} \\ &= \sqrt{\frac{\rho \left(\frac{Q}{d^2}\right)^2 d}{\sigma}} \\ &\propto \sqrt{\frac{\rho v^2 d}{\sigma}} = \sqrt{W_e} \quad (\text{ウェーバー数})\end{aligned}$$

となる。

また、Fig.4-1-2-1 よりオリフィス径が小さいときの臨界流量はウェーバー数がほぼ一定値で生じることが、分かる。

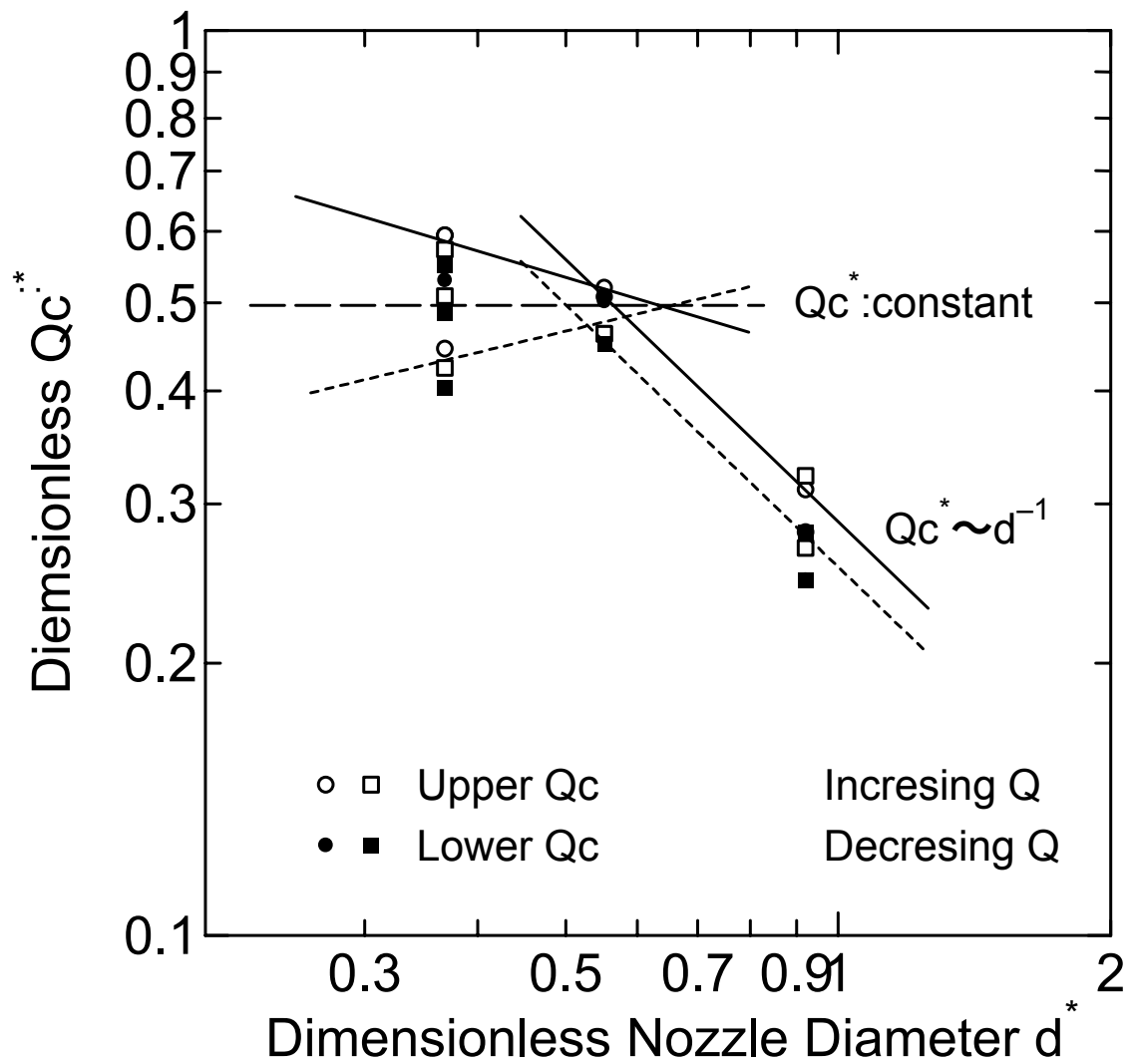


Fig4-2-2-1 Dimensionless critical flow rate

4-1-3 臨界流量の理論解析

オリフィス径が小さく、発生気泡も小さいため、流量の時間的変動は小さい場合
空気溜（チャンバー）の値を添え字 0、オリフィス出口を e で表すと、ベルヌーイの式から

$$\frac{\partial \phi_0}{\partial t} + \frac{p_0}{\rho} + \frac{1}{2} u_0^2 = \frac{\partial \phi_e}{\partial t} + \frac{p_e}{\rho} + \frac{1}{2} u_e^2 + \frac{\xi}{2} u_e^2 + \Delta h_f \quad (1)$$

ここに、損失 ξ はオリフィス内の速度助走、縮流、オリフィスからの排出に伴うもので、ほぼ次のような値をとると考えられる、

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 = 2.2 + 0.4 + 0.4 = 3.0 \quad (2)$$

時間的変化はないのでポテンシャルの項を除き、また空気溜内の流速は小さいので無視し、粘性損失はハーゲンポアゼイユの式で表される（レイノルズ数（付録参照）は 100 のオーダーで小さく流れは層流であるから）とすると

$$\frac{p_0}{\rho} = \frac{p_e}{\rho} + \frac{1}{2} u_e^2 + \frac{\xi}{2} u_e^2 + \frac{128 \nu l}{\pi d^4} Q \quad (3)$$

ここに、 l はオリフィス部の長さである。流量と流速の関係は

$$u = \frac{4Q}{\pi d^2} \quad (4)$$

出口の圧力は発生気泡の各ステップで変化するが、一方のオリフィスからは気泡が出ないので

$$p_o \leq \frac{4\sigma}{d}, \quad 0 < p_e \leq \frac{4\sigma}{d} \quad (5)$$

式 (3)、(4)、(5) から

$$\frac{1}{2} u_e^2 + \frac{\xi}{2} u_e^2 + \frac{32 \nu l}{d^2} u_e = \frac{p_0}{\rho} - \frac{p_e}{\rho} \leq \frac{4\sigma}{\rho d} \quad (6)$$

したがって、

$$(1+\xi)u_e^2 + \frac{64\nu l}{d^2}u_e - \frac{4\sigma}{\rho d} \leq 0 \quad (7)$$

式(7)は正負の2根をもつ。正の根を α とすると、

$$u_e \leq \alpha \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{2(1+\xi)} \left[\sqrt{\left(\frac{64\nu l}{d^2} \right)^2 + \frac{16(1+\xi)\sigma}{\rho d}} - \frac{64\nu l}{d^2} \right] \\ &= \sqrt{\left(\frac{32\nu l}{d^2(1+\xi)} \right)^2 + \frac{4\sigma}{\rho d(1+\xi)}} - \frac{32\nu l}{d^2(1+\xi)} \end{aligned}$$

空気と水(20°C)の物性は

$$\rho = 1.166 \text{ kg/m}^3, \quad \sigma = 0.072 \text{ N/m}, \quad \nu = 15.6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

であり、オリフィス長さは $l = 10 \text{ mm} = 0.01 \text{ m}$ として計算すると、

$$\begin{aligned} \frac{32\nu l}{d^2(1+\xi)} &= \frac{32 \times 15.6 \times 10^{-6} \times 0.01}{(0.001)^2(1+3)} = 1.248 \\ \frac{4\sigma}{\rho d(1+\xi)} &= \frac{4 \times 0.072}{1.166 \times 0.001 \times (1+3)} = 61.75 \end{aligned}$$

したがって、オリフィス径が1mmの場合は

$$u_{\max} = \alpha = \sqrt{1.248^2 + 61.75} - 1.248 = 7.957 - 1.248 = 6.71$$

$$Qc = \frac{\pi d^2}{4} u = \frac{\pi d^2}{4} \alpha = \frac{3.1416 \times (0.001)^2}{4} \times 6.71 = 5.27 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} = 316 \text{ cc/min}$$

となり、実験値と近いことが分かる。

4－2 干渉実験

4－2－1 臨界流量以下の低流領域

臨界流量以下の領域において、一つのオリフィスしかもたない実験系と二つのオリフィスを持ち、臨界流量以下のため気泡は一つのオリフィスからしか発生していない実験系を比較すると、明らかに異なる挙動を示している。これは、気泡が発生していないオリフィスの影響を受けていると考えられる。Fig.4-2-1-1は $d=2.5\text{mm}$ 、 $S=7.0\text{mm}$ と 9.0mm の時の気泡の平均大きさ(D)と離脱周期(P)の存在を分布にしたものである。このグラフから影響を受け明らかに違う挙動を示すことが分かる。この原因としては、二つのオリフィス系での気泡が発生していない方のオリフィスの出口付近の圧力の微妙な変動が考えられる。気泡が発生している方の気泡発生時の圧力変動に連動して変動しているために一つのオリフィス系とは異なる挙動を示していると考えられる。

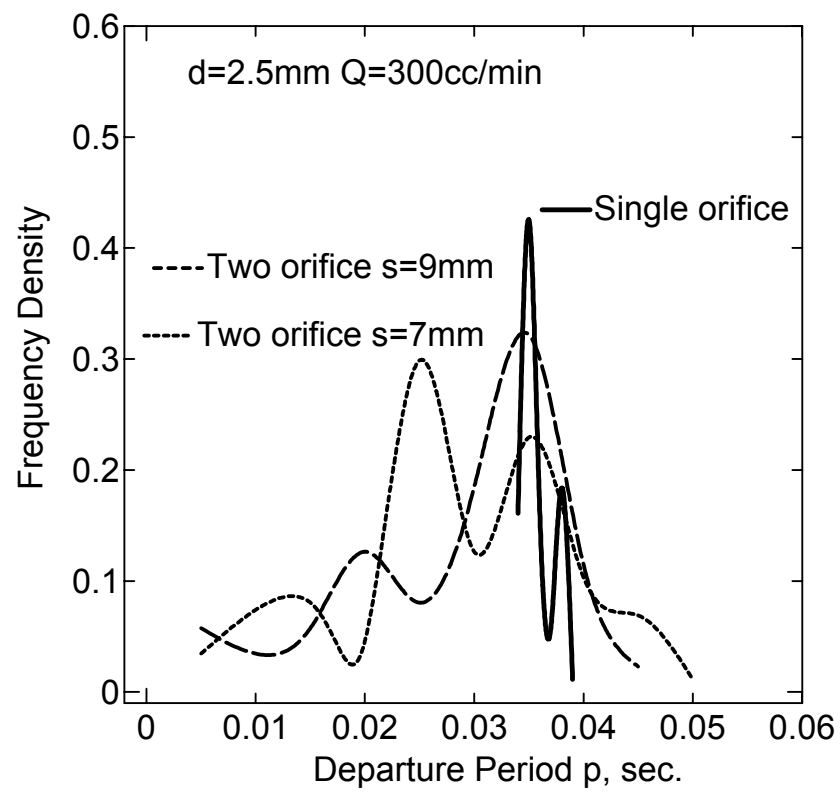
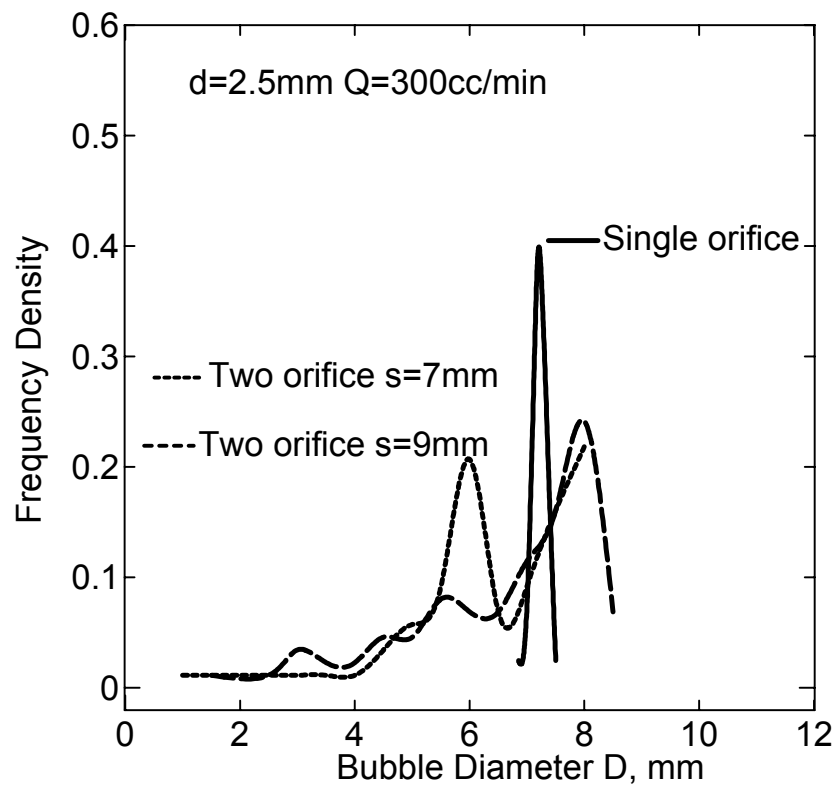


Fig.4-2-1-1 D と P の分布図 (低流量域)

4-2-2 臨界流量以上の高流領域

この領域では気泡は二つのオリフィスから発生しているため、気泡の相互干渉により挙動はかなり複雑になる。Fig.4-2-2-1がDとPの分布である。この場合、各々のオリフィスから発生した気泡を、流量が半分であるときの単一オリフィスから発生する気泡と比較した。この場合はオリフィス間隔が影響していることが分かる。オリフィス間隔が広いと、分布は大きく広がり、逆に狭いと気泡が干渉し合い複雑な現象になる。

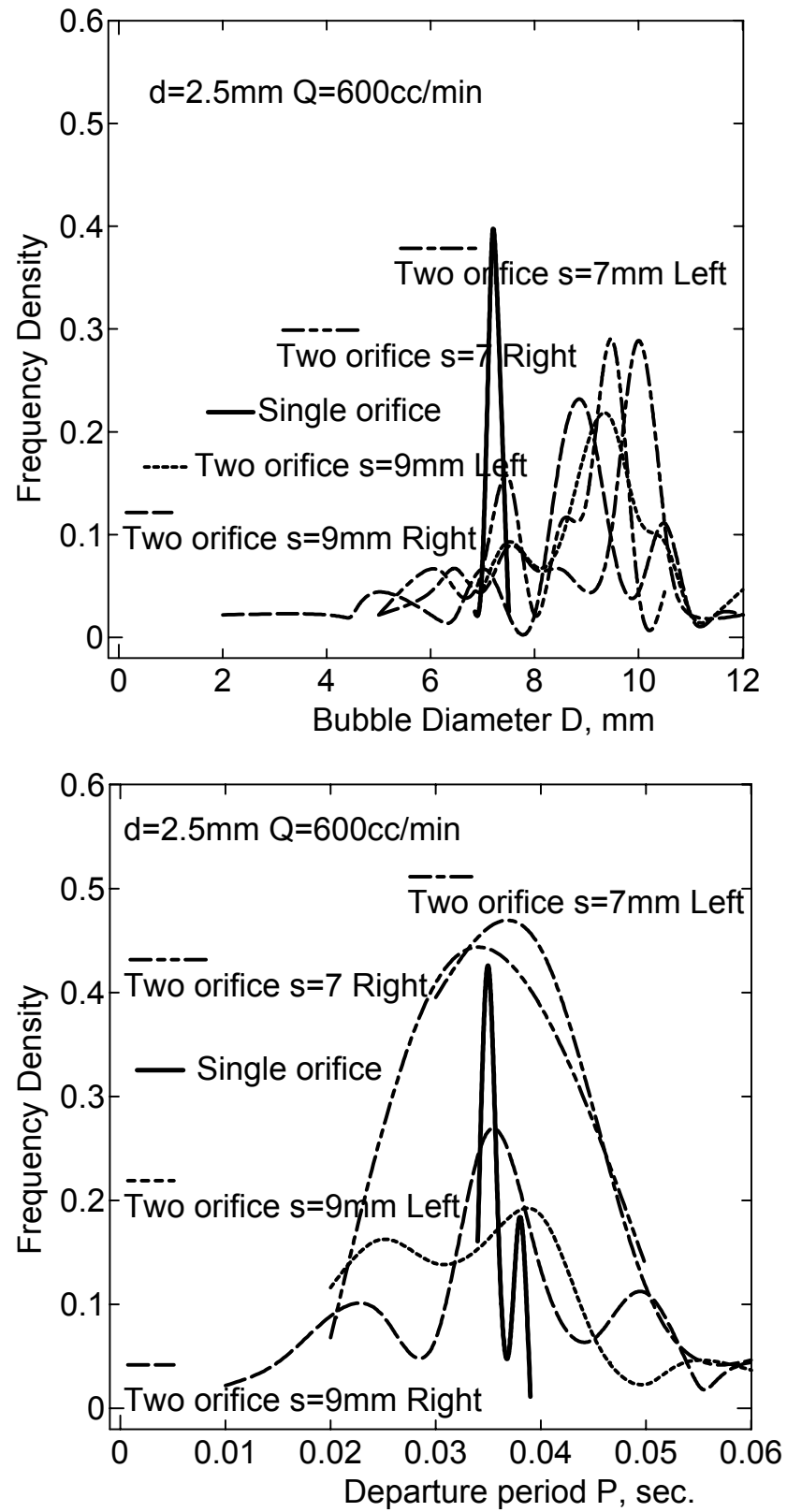


Fig.4-2-2-1 D と P の分布図（高流量域）

第 5 章 結論

5－1 結論

5－2 今後の課題

5－1 結論

本実験のような空気供給系が一つ、気泡発生部のオリフィスが二つという、圧力の変動を伴う系において、気泡が絶えず二つのオリフィスから発生するのではなく、ある条件により一つからしか発生しなくなる流量（臨界流量）の存在を発見し、またその条件が気泡発生部のオリフィス径、オリフィス間隔により支配されていることが分かった。

また干渉実験においては、臨界流量以下の単一気泡発生域（低流量域）において、単一オリフィスの時とは異なる挙動を示し、影響を受けていることが分かった。また高流量域においても気泡相互の干渉があることが分かった。

5－2 今後の課題

今後の課題としては以下のような点がある．

- 1、臨界流量のデータをもっと様々なオリフィス径とオリフィス間隔で取り、改めて理論値と比較していく事
- 2、圧力変動がどこでどのようにおこっているか
- 3、干渉の実験ではホットフィルムプローブを取り付け、気泡発生時の気泡周りの流体の動きに注目し、それがどのように影響を及ぼすか

謝辞

この度は、卒業論文をまとめるにあたり様々な方にお世話になりました。

庄司先生には、卒論のテーマ決めから実験、データ解析に至るまですべての面でご指導いただき本当にありがとうございます。また、前期は就職活動の為に研究室に来られない時期もフォローしていただきありがとうございます。

また、丸山助教授、横谷助手、井上助手、渡辺技官にも、的確なご指導いただきありがとうございます。

伊藤さん、野上さんには本当に多岐にわたり分からないことを教えてもらい感謝しております。

研究室の山口さん、柴さん、汪さん、姜さん、張さん、フランスへ留学された安井さん、連さんには様々なことで助言をいただき感謝しております。

また提出前夜の予想外のトラブルにいち早く対処してくれた丸山研の井上さん、そして横田さん、坂田さん、皆さんがいなければ僕はもう一年研究していました。卒論のバックアップはこまめにこまめにとることが重要です。

一緒に実験をしてくださった徐さん、僕のわがままなスケジュールに付き合っただけ、また何から何まで教えていただきありがとうございます。多分今後の人生でこんなに実験したり、論文を書いたりすることはないと思うのでいい経験になりました。

四年生の、小楠君、竹村君、宮崎君、一年間がんばれたのはみんながいたからだと思います。とても充実した一年間をすごせました。みなさん大学院に行っても、研究がんばってください。

参考文献

- 1、伊藤英覚、本田睦、「流体力学」

付録

・実験条件のレイノルズ数

d(mm)	S(mm)	流量(cc)	Re数
1		200	272
1.5		400	362
2.5		500	272
1	1.5	270	367
	2.5	200	272
	3.5	300	408
1.5	4	400	362
		450	408
	6	400	362
		450	408
2.5	7	470	255
		480	261
	9	530	288
		580	315

以上

通し番号 1－55 完

卒業論文

平成 13 年 2 月 9 日提出

90201 小川 真史