

卒業論文

人工キャビティ面における沸騰挙動

1 - 58 ページ 完

平成 14 年 2 月 8 日 提出

指導教官 庄司 正弘教授

00225 対馬 将示

目次

1. 序論	3
1.1 研究の背景	4
1.2 本研究の目的	5
2. 沸騰現象	6
2.1 沸騰現象と沸騰曲線	7
2.2 核沸騰熱伝達特性	8
3. 実験	9
3.1 実験装置	10
3.2 実験方法	16
4. 解析方法	17
4.1 レーザ入力	18
4.2 放射温度計からのデータ解析	20
4.3 高速ビデオカメラからのデータ解析	22
5. 実験結果および考察	23
5.1 発泡傾向	24
5.2 離脱気泡数分布	28
5.3 離脱遅れ時間分布	34
5.4 沸騰曲線	37
5.5 まとめ	39
6. 結論	40
付録 A	42
A-1 記号表	43
A-2 気泡離脱時間全データ	44
参考文献	56
謝辞	57

1.序論

1.1 研究の背景

沸騰現象は日常生活においても身近であるとともに、工業的にも相変化をとまなわな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、非常に重要なものとして扱われている。一方、沸騰現象はいろいろな要素が非線形的に絡み合った非常に複雑な現象であり、気泡の運動、気液界面での相変化現象、加熱面における液体の固液界面における相変化現象など複雑な要素を内包している。ここで液体の気体への相変化現象に注目すると、沸騰現象においてその相変化は加熱面上の微細な傷である沸騰核（キャビティ）において起こると考えられており、沸騰現象の複雑さを生む大きな因子となっている。

沸騰現象の応用例は多方面にわたり、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、ボイラを用いた発電設備、蒸気機関など様々な熱機器がある。特に近年の高密度な電子デバイスにおいては、その高性能化にともなってより小さな領域でより大きな熱が発生するようになり、熱負荷は指数関数的に増大している。この問題を解決すべく、新たに効果的な冷却方法が必要とされている。その足がかりの一つとなるものが核沸騰による沸騰伝熱冷却であり、その応用はモバイルコンピュータのマイクロプロセッサからスーパーコンピュータのCPUにいたるまで多岐にわたると考えられている。

高出力の電子デバイスのための冷却法として、プール沸騰についての研究は多く行なわれているが、沸騰現象を支配する機構の多くはいまだに解明されていない。そのなかで最近になって、隣り合うキャビティどうしの相互干渉が沸騰プロセスやそれにとまなう伝熱特性に顕著な影響をもつことが明らかになった。

また近年、超微細加工技術の発達によりミクロンオーダーでの金属加工技術が向上しており、加熱面上にミクロンオーダーの大きさの人工的なキャビティを配置することが可能となってきた。不均一で性質を把握しにくい自然沸騰面ではなく、キャビティ形状や配置をあらかじめ設定した加熱面を用いた研究による沸騰現象のメカニズムの解明が期待されている。

1.2 本研究の目的

核沸騰熱伝達に関する研究の最終目標は、沸騰現象のメカニズムを解明し、理想的なモデルを確立することによってその応用として様々な工業的要求に応じた伝熱特性をもつ沸騰表面の製作を可能にすることである。

本研究ではその目標へのアプローチとして、加熱面に人工キャビティを複数個配したマルチキャビティ面においてその伝熱特性、発泡挙動などを解析し、核沸騰現象による伝熱促進の手がかりをつかむことを目的とする。

2. 沸騰現象

2.1 沸騰現象と沸騰曲線

横軸に加熱面の時空間平均温度と液体の飽和温度との差をとった過熱度，縦軸に加熱面からの単位時間，単位面積あたりの熱移動量である時空間平均熱流束をとったものを沸騰曲線と呼ぶ．

(Fig. 2.1 参照) この沸騰曲線上で沸騰領域は大きく 3 つに分けられる．曲線の極大点である限界熱流束 (CHF) 点の左側の核沸騰域，限界熱流束点と曲線の極小点である極小熱流束 (MHF) 点の間の領域である遷移沸騰域，そして極小熱流束点から右側の膜沸騰域である．このうち，核沸騰域は気泡の様子によりさらに 2 つに分けられる．すなわち，気泡がそれぞれ個々に発生，離脱する孤立気泡域と激しい発泡により互いに合体して離脱する合体気泡域である．

工学的には過熱度が核沸騰の上限である CHF を超えて急激に上昇すると加熱面や容器の融点を超えることもあり，工業的には低い過熱度で高い熱流束を実現できる核沸騰域で効率よく沸騰させることが重要となっている．この他にも場合に応じて沸騰開始温度などの条件が要求されることもある．

本実験では核沸騰域の特性を取り扱う．

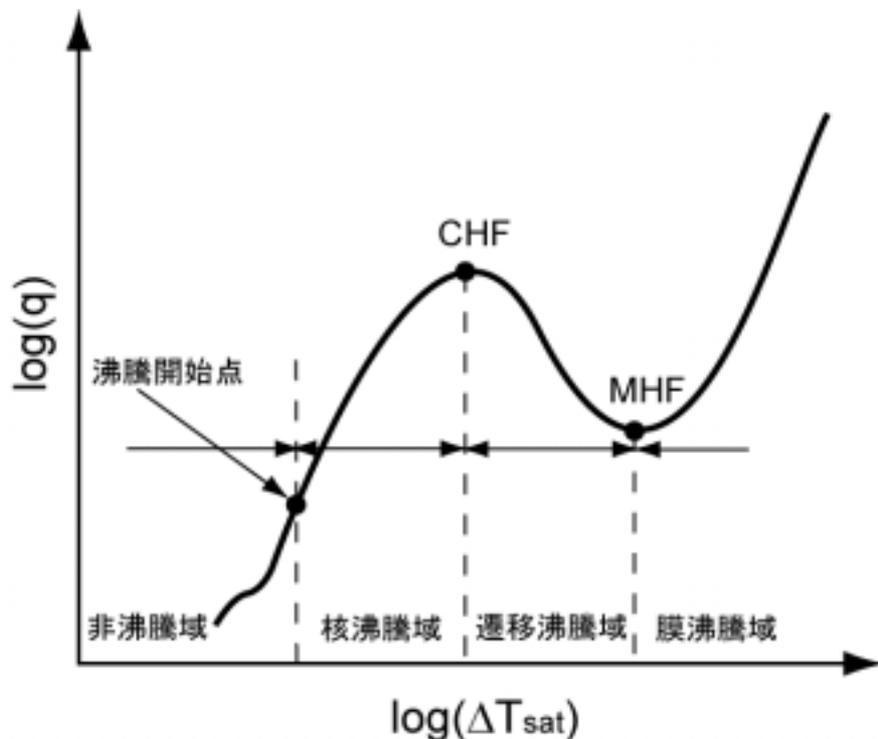


Fig. 2.1 Boiling curve.

2.2 核沸騰熱伝達特性

西川・藤田^[1]の核沸騰熱伝達整理式によると，固体 - 水系の核沸騰熱伝達は，

$$\frac{hR}{\lambda_1} = 6.24 \left(f_s f_p X \right)^{2/3}$$

$$f_p = \left(\frac{p}{p_a} \right)^{0.7} \left(\frac{1+3(p/p_c)^3}{1+3(p_a/p_c)^3} \right)$$

$$X = \left(\frac{1}{M^2 P} \right) \left(\frac{c_{pi} \rho_l^2}{\lambda_1 \sigma \rho_v \Delta h_v} \right)^{1/2} q R^{3/2}$$

に液体は 100 ，気体は 110 での値を代入することによって得られる．代入して整理した式は

$$q = 34.8 \Delta T^3 \quad (q : \text{加熱面の熱流束}, \Delta T : \text{加熱面の過熱度})$$

となり，実際の沸騰現象もこれによく適合することが確認されている．沸騰曲線上にこの理論式から得られる直線を描き，実験から得られるデータと比較することで，データの確かさを確認する際の参考になるものと考えられる．

3.実験

3.1 実験装置

3.1.1 実験装置概要

実験は沸騰容器内に人工キャビティを加工した加熱面を設置し、行った。使用液体は蒸留水である。本実験では放射温度計を用いて加熱面全体の温度を計測するため、従来よく使われている通電での一様加熱ではなく、半導体レーザーによる局所加熱法を用いた。また水温は液中に配置したサーモカップルにより実験中常時モニターされ、補助ヒータ、冷却装置により飽和状態もしくは一定のサブクール状態に保つことができるようになっているが、本実験では飽和状態のみで行っている。発生した蒸気は凝縮器により液体に戻され、沸騰容器内に還元される。

計測は放射温度計による加熱面裏面の温度計測、また高速ビデオカメラによる発生気泡の離脱時間の計測を行った。実験装置の概略図を Fig. 3.1 に示す。

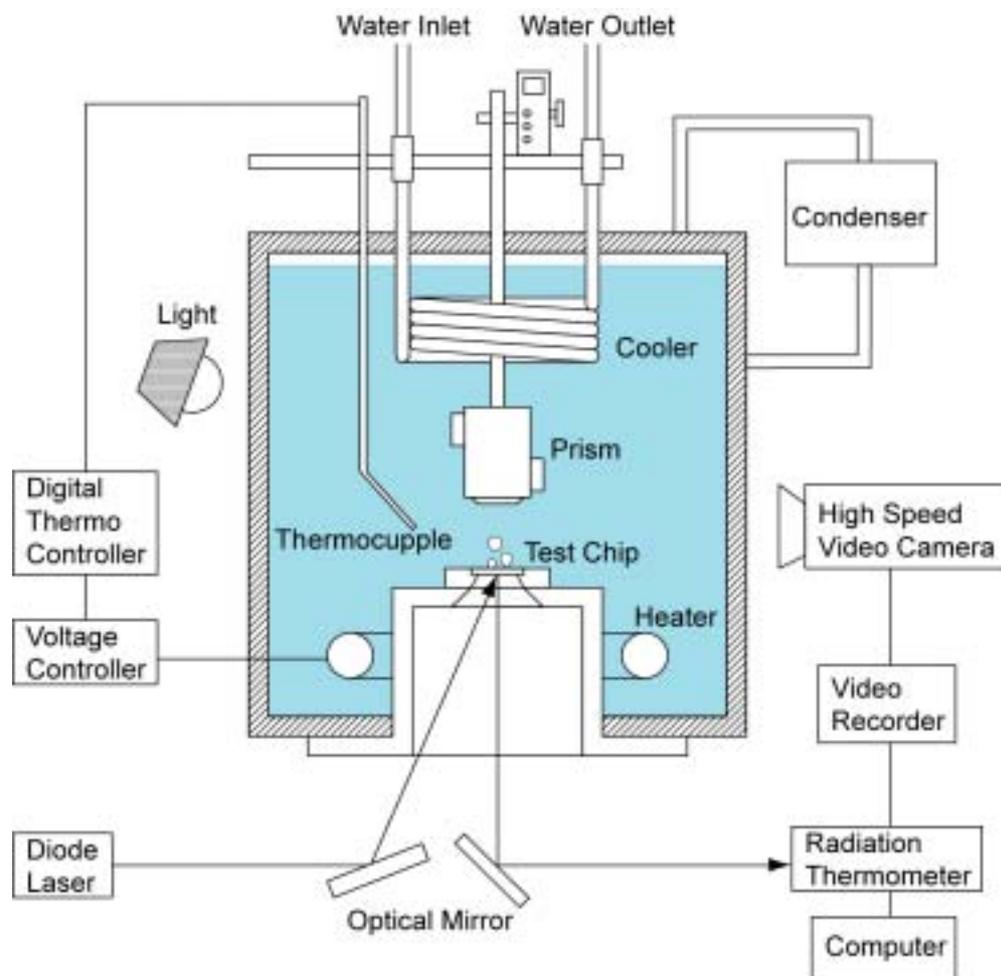


Fig. 3.1 Experimental apparatus.

3.1.2 沸騰容器

人工キャビティを加工した加熱面はアダプタにアルルダイト接着剤で接着させたあと、沸騰容器の中に設置する。沸騰容器には水温をモニタリングするためのサーモカップル、水温を設定温度に保つための補助ヒータならびに水冷式冷却装置、水蒸気を液体に戻すための凝縮器、また加熱面からの気泡発生を観察するためのプリズム光学装置が設置されている。Fig. 3.2 に沸騰容器の外観を示す。



Fig. 3.2 Boiling cell.

3.1.3 光学系

レーザー光は半導体レーザー装置から光ファイバを用い、沸騰容器本体まで導いている。レーザー出力の調整は手元の制御装置で本体に流す電流値を変化させることで行う。レーザー光はファイバ出口で広がり角をもち、また、中心に近づくにしたがって強くなる強度分布（ガウス分布）を持っている。そのため、ファイバから出たレーザーはまず凸レンズを用いて平行光にされ、つぎに中心付近のできるだけ一様なレーザー強度で加熱するためにアパーチャを用いて強度の低い外側の部分を遮断したのち加熱面裏面に照射される。実験前後にはパワーメータを用いてレーザー出力を計測する。光学装置の概要を Fig. 3.3，外観を Fig. 3.4，また Fig. 3.5 にパワーメータの外観を示す。

半導体レーザー装置

医療用に開発された半導体レーザーで、23 個のレーザーモジュールによって構成されている。最高出力はバンドルエンドで約 30W，ファイバーエンドで約 20W である。出力調整用の CPU ボードが未完成のため、レーザー出力制御はレーザー本体への出力電流の調節により行った。そのため、電流量とレーザー出力の関係を計測しておく必要がある。Fig. 3.6 に半導体レーザーの外観を示す。

出力（ファイバーエンド）	~ 20W
接続ファイバ径	1.5 mm

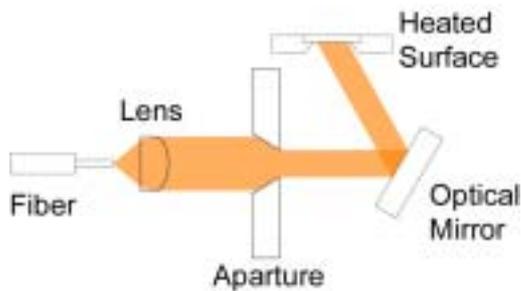


Fig. 3.3 Optical setup.



Fig. 3.4 Optical system.



Fig. 3.5 Power meter.



Fig. 3.6 Diode laser.

3.1.4 計測系

本実験では放射温度計を用いて加熱面裏面の温度を測定している．また同時に高速ビデオカメラを用いて沸騰容器側面の窓から気泡の離脱挙動を記録している．

放射温度計

NEC 三栄製，TH3102MR．スターリングクーラ内蔵の赤外線放射温度計．加熱面裏面の赤外放射を赤外域用のミラーで反射させて計測している．1次元のラインスキャンまたは2次元の面スキャンが可能である．1次元のラインスキャン用に改造が加えてあり，計測開始と同時に同期信号が出力できるようになっている．本実験では2次元スキャンモードのみ使用した．計測結果はパソコンに取り込まれ，ハードディスクに記録される．Fig. 3.7 に放射温度計の外観を示す．

測定波長	8 ~ 13 μ m
最高スキャン速度 (ラインスキャン時)	3.00 msec / line
(面スキャン時)	0.75 sec / page
最小検知温度差	0.08
空間解像度	0.6 mm

高速ビデオカメラ

フォトロン製，FASTCAM-Net Max．最大 10000 frame / sec での撮影が可能．本実験ではデータ量の制限の関係上，撮影時間とのかねあいから，1000 frame / sec，画像画面 254 \times 240 Pixel での撮影を行った．映像は S-VHS ビデオテープに記録される．また，1コマあたりの露出時間が短いため，撮影には強い光源を必要とする．本実験ではフォトロン製，HVC-SL を使用した．Fig. 3.8 に高速ビデオカメラの外観を示す．

撮影速度	1000 frame / sec
記録可能時間	約 10 sec



Fig. 3.7 Radiation thermometer.



Fig. 3.8 High speed video camera.

3.1.5 加熱面

厚さ 200 μm の Si ウエハを用い、キャビティを配したのち、一辺 15 mm の正方形に切り出したものを加熱面とした。シリコンウエハの表面粗さは $1.72 \times 10^{-1} \text{ nm}$ で、ほぼ鏡面状態といえ、沸騰挙動に影響はないと思われる。キャビティ形状は、安定な発泡挙動を示し、かつ製作が比較的容易な円筒型を採用し、キャビティ直径を 10 μm 、深さを 100 μm に統一した。本実験で採用したキャビティ配置パターンは 4 種類である。キャビティ配置パターンを Table 3.1 と Fig. 3.9 に示す。なお、これ以降は各加熱面の名称は Table 1 に示したものとす。また加熱面裏面、つまり半導体レーザーが照射される側は市販の黒染剤を使用し、レーザー光を吸収しやすいように処理した。アダプタに接着した状態の加熱面を Fig. 3.10 に示す。

Table 3.1 Cavity pattern.

名称	配置間隔S	配置形状	数
S1	1 mm	格子状(11×11)	121
S2	2 mm	格子状(7×7)	49
HC	4 mm	Honeycomb状	7
S20	20 μm	格子状(201×201)	40401

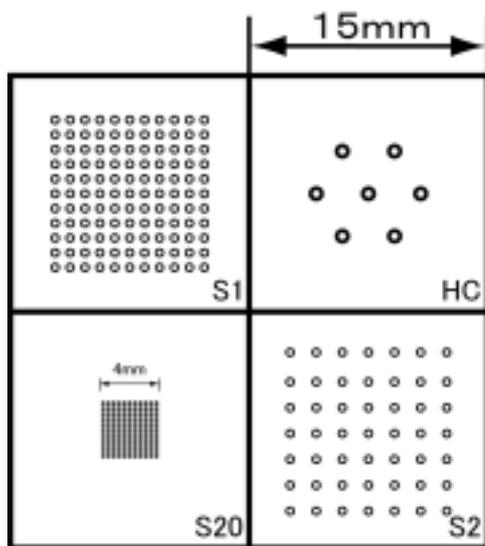


Fig. 3.9 Mask pattern.

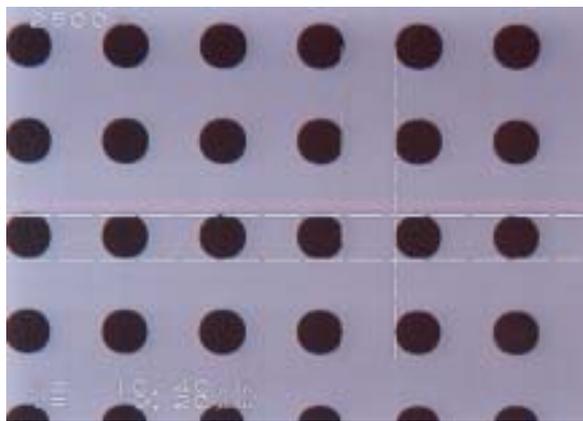


Fig. 3.10 Adapter for heated surface.

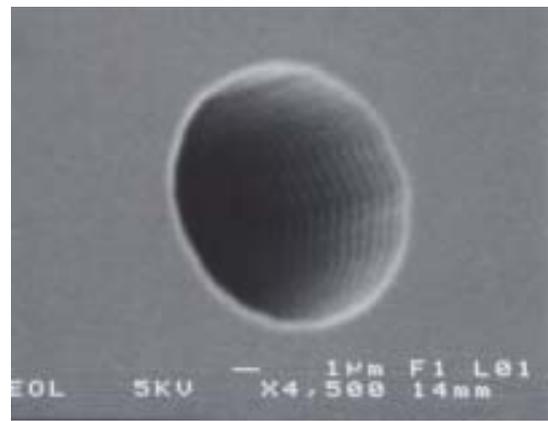
キャビティ加工法

DRIE 装置を使用し、2 inch シリコンウエハをイオンエッチングすることによってキャビティを加工した。エッチングスピードは約 $3 \mu\text{m} / \text{min}$. なので、30 分程度で深さ $100 \mu\text{m}$ のキャビティが加工できることになる。また、ウエハ 1 枚につき加熱面 4 枚を製作するため、1 枚のマスクについて一辺 30 mm の正方形の領域に加熱面 4 枚分のキャビティパターンをまとめて描画した。キャビティを加工したのち、一辺 15 mm にカットして余分な部分を切り落とし、加熱面とした。

Fig. 3.11 に加熱面およびキャビティの拡大写真を示す。S= $20 \mu\text{m}$ 、キャビティ直径 $10 \mu\text{m}$ 、深さ $100 \mu\text{m}$ で加工した加熱面を斜めにカットして拡大撮影した。(a)、(b) は表面上部から、(c)、(d) はカットした側面からのものである。実際は直径が $0.5 \mu\text{m}$ 程度の誤差があり、深さは $80 \mu\text{m}$ 程度となっている。(b) ではキャビティ壁面に DRIE による加工特有の溝が確認できるが、大きさ $0.1 \mu\text{m}$ 程度であり、気泡の生成には影響しないと考えてよい。非常に高精度な表面での実験が可能になっているといえる。



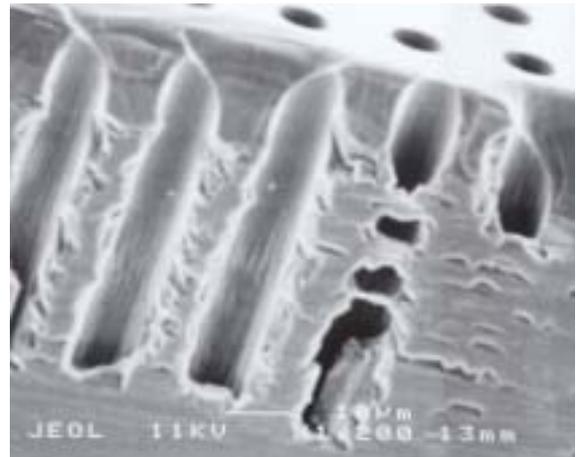
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3.11 Magnification of cavities.

3.2 実験方法

1. 加熱面を沸騰容器内に設置し，蒸留水を入れる．
2. 補助ヒータを用い，蒸留水を十分脱気する．
3. 放射温度計の電源を入れ，暖機運転させる．
4. 半導体レーザの電源を入れ，光学系を沸騰容器下に設置する．
5. 電流値とレーザ出力の相関を測定する．
6. 放射温度計を設置する．
7. 高速ビデオカメラを設置する．
8. 目的の水温に調節したのち，半導体レーザの出力を調整し，加熱面から発泡させる．
9. 放射温度計，高速ビデオカメラを用いて沸騰挙動を計測する．

4.解析方法

4.1 レーザ入力

4.1.1 強度分布

ほとんどのレーザーは Fig. 4.1 に示すガウス分布で発振し，光学系の伝播路のどこにおいても強度のガウス分布を示す．本研究では加熱面全体を出来るだけ一様に加熱する必要があるため，アパーチャを製作し，外側の強度の低い部分のレーザー光を遮断した．Fig. 4.2 にアパーチャによる遮断前後のレーザー本体への出力電流とレーザーパワーの関係を示す．レーザーパワーが 70%程度に減少していることから，アパーチャによる遮断の効果が確認できる．なお，これによりレーザー強度分布の影響は緩和されたものの，完全に一様な分布にはなっていない．しかし加熱面内における水平方向の熱移動によって加熱面上では一様な熱流束になっているものと考え，本研究ではこれ以上は考慮しない．

4.1.2 レーザパワー

本実験で使用した半導体レーザーは非常に安定した出力を示し，装置本体に流す電流値とパワーメータで計測した出力は Fig. 4.2 に示したようにほぼ線形の関係が得られていることがわかる．この関係を利用して電流値をレーザーパワーに変換する．なお，ここで得られるのはあくまで加熱面裏面に照射されたレーザーパワーであるが，本実験では加熱面裏面は黒染しており，100%出力を吸収するものとみなし，そのまま熱入力として扱っている．

4.1.3 レーザ照射径

沸騰曲線の計算に必要なレーザー照射径は，12 mm となるように調節し，計算でもこの値を使用した．本実験では光学系のファイバ部分は実験期間中常に固定しており，実験ごとによる照射径の誤差はないものと考えられる．

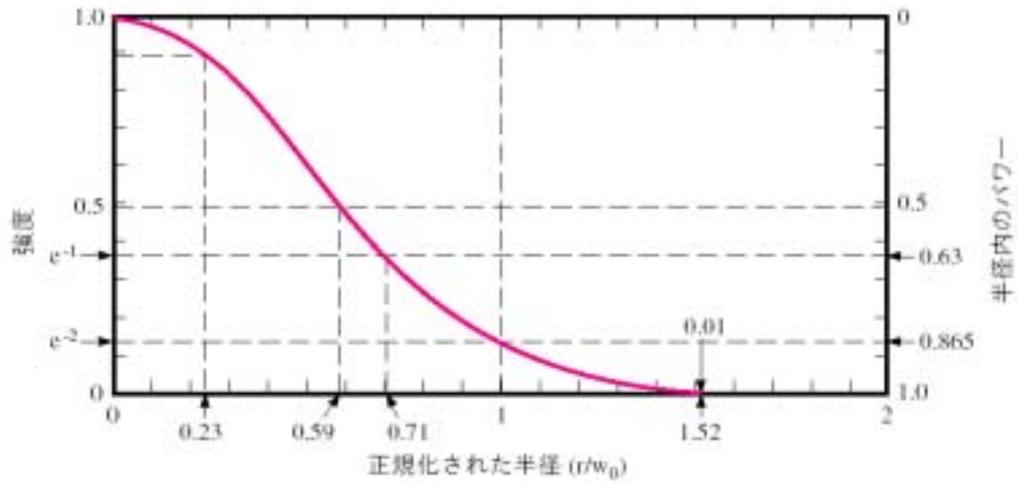


Fig. 4.1 Gaussian distribution.

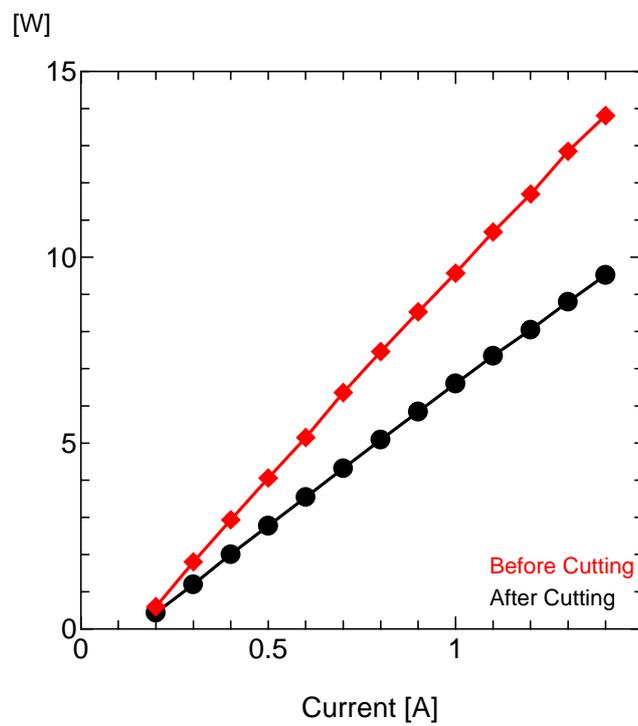


Fig. 4.2 Average laser power.

4.2 放射温度計からのデータ解析

本実験では沸騰曲線を描くためのデータとして加熱面裏側の温度を2次元スキャンし、加熱面平均温度を計算した。実験より得られた面スキャン温度データは縦軸が239ライン、横軸が255ラインの計60945点の温度データから構成されている（Fig. 4.3）。それもとにまず温度分布から加熱面裏面の円形領域を特定し（Fig. 4.4）、その中を5つの長方形領域に分解し（Fig. 4.5）、抽出する。抽出した温度を平均したものを加熱面平均温度とした。また、面スキャンには1ページにつき0.75 secかかるため、時間変動を考慮し、大事をとって10ページ分のデータを平均した。

実際に抽出した放射温度計による加熱面裏面の温度データは、低熱流束の場合、液温が沸騰状態にもかかわらず100以下の温度を示すことがあった。加熱面裏面が外部空気と接触していることによる熱の逃げや放射温度計自体の誤差が原因として考えられる。これについては飽和液かつレーザ照射なしの状態で計測した裏面平均温度を飽和液温とみなし、これを基準として加熱面過熱度を計算することで対処した。

以上の方法では正確なデータによる沸騰曲線を描くことは困難であるため、2.2で述べた固体-水系における核沸騰熱伝達特性の理論データも参照することとする。また加熱面の違いによる定性的な特徴を捉えるには十分と考え、本実験ではこれ以上は考慮しない。

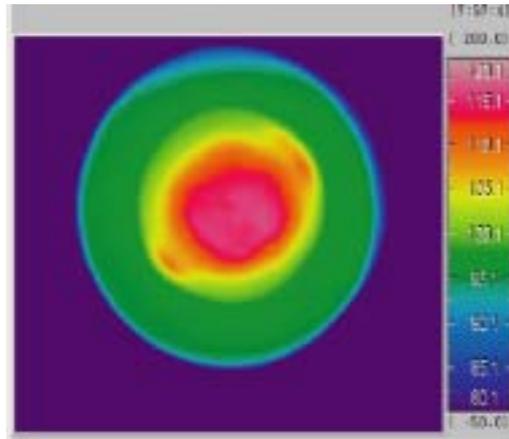


Fig. 4.3 Temperature data-1.

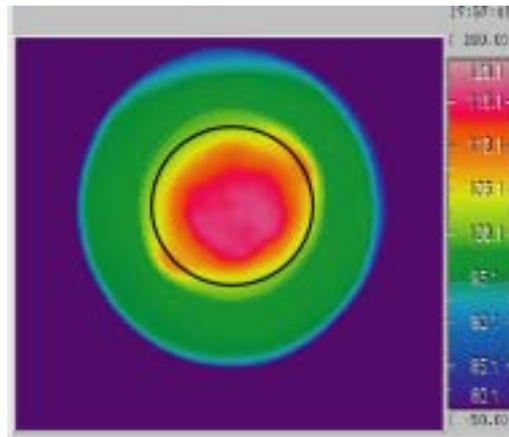


Fig. 4.4 Temperature data-2.

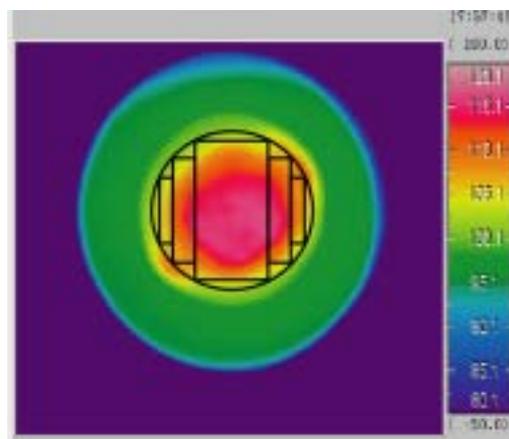


Fig. 4.5 Temperature data-3.

4.3 高速ビデオカメラからのデータ解析

4.3.1 撮影速度

本実験で使用した高速ビデオカメラの最高撮影速度は 10000 frame / sec なのであるが、これではデータ量の制限により撮影可能時間が極端に短くなってしまふ。そのため解析に可能な撮影時間を確保しつつ出来るだけ速い撮影速度を求めた結果、1000 frame / sec モードでの使用となった。沸騰における発泡現象の時間オーダーが 10 msec ~ 数 100 msec 程度であることを考えると、この撮影速度で十分であると考えられる。

4.3.2 処理方法

加熱表面にマルチキャビティを配した実験では、それぞれの気泡の直径や体積などの気泡の形状に関する値、また気泡発生時間などを映像から解析することが非常に困難である。そのため本実験において扱ったデータも気泡離脱時間のみとなっている。なお、プリズムを用いた光学装置については、実際に観察したところ Fig. 4.6 のような非常に観察が困難な映像となったため、計測は不可能と判断し、できるだけカメラを高い位置にセットして上方から撮影することとした。実際の観察では S1 および S2 の熱流束が比較的低い領域でのみ、気泡離脱時間の計測が可能であった。なお、S1 のように映像から気泡が発生しているキャビティの位置が判断しづらい場合には、Fig. 4.7 のようにモニタにキャビティ位置を赤いマークで示した透明なシートを当てた状態で判断している。

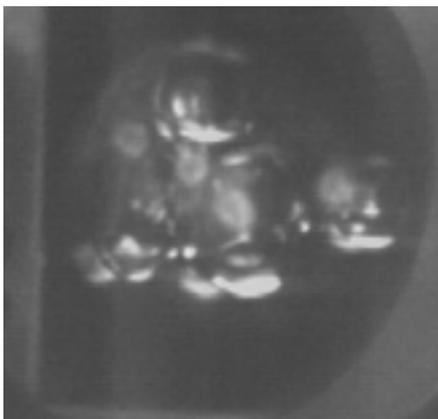


Fig. 4.6 Top view of boiling surface.

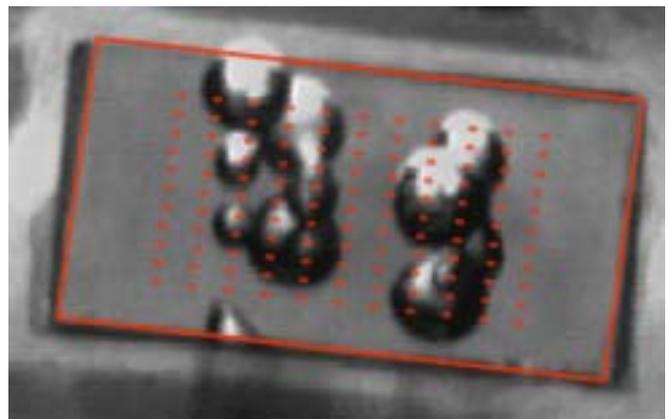


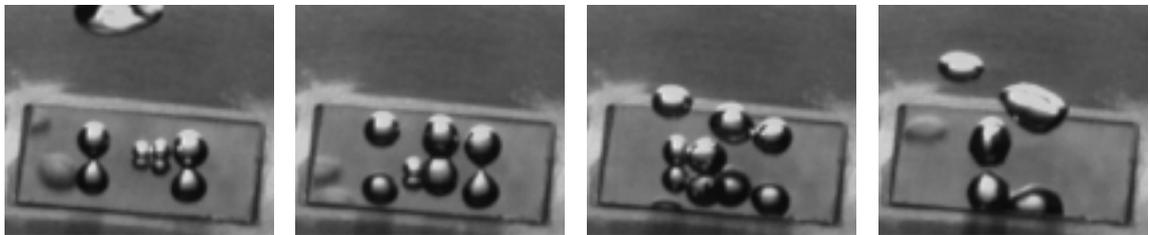
Fig. 4.7 Method of observing bubbles.

5.実験結果および考察

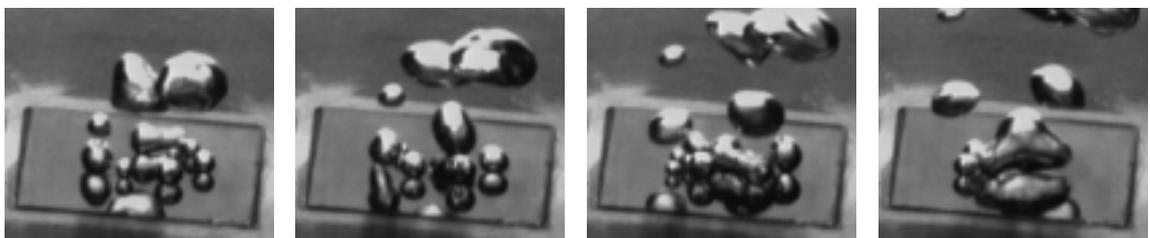
5.1 発泡傾向

5.1.1 S1

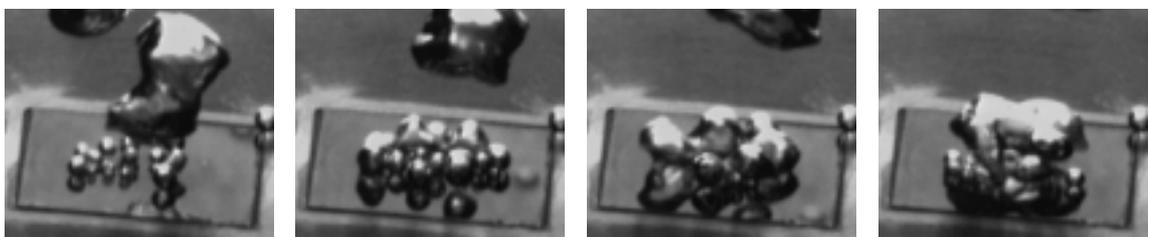
S1について低・中・高熱流束における発泡の代表的な挙動を撮影した高速ビデオカメラの映像を Fig. 5.1 に示す．熱流束が高くなるにしたがって発泡点数が増えるが，主に低熱流束では各キャビティに注目すると発泡は間欠的である．近接するキャビティからの気泡が合体してから離脱する傾向が多く見られる．合体する気泡数は (a) では2~3個，(b) では3~4個，(c) では6~7個あるいはそれ以上となり，離脱後さらに合体するものも見られた．したがって合体をしないまま離脱する気泡数はこの順に減少する．気泡径は2~2.5 cm程度である．



(a) Heat Flux 27.11 kW/m^2



(b) Heat Flux 50.18 kW/m^2

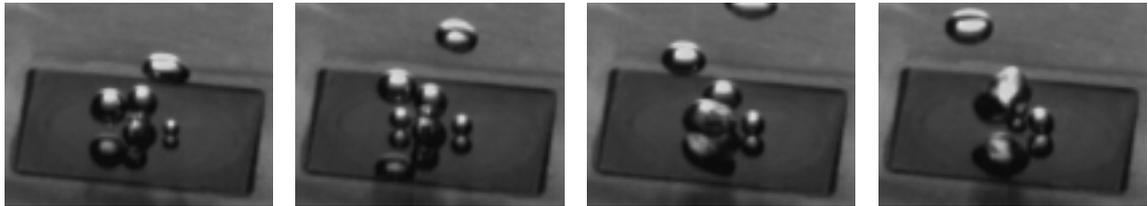


(c) Heat Flux 82.01 kW/m^2

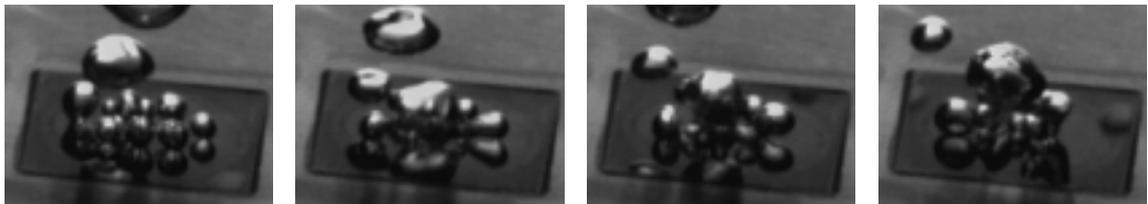
Fig. 5.1 Bubbling from cavities. (S1)

5.1.2 S2

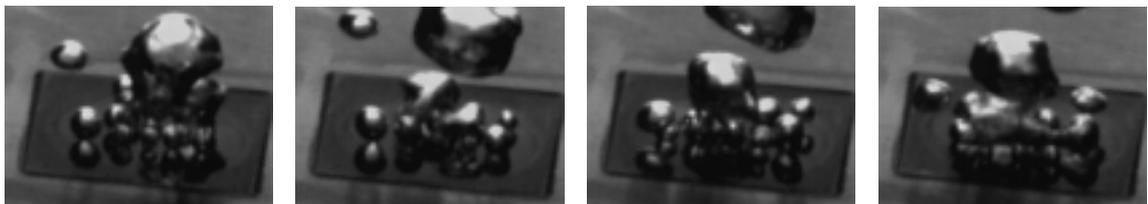
次に S2 について低・中・高熱流束における発泡の代表的な挙動を撮影した高速ビデオカメラの映像を Fig. 5.2 に示す．熱流束が高くなるにしたがって発泡点数が増えるのは S1 と同じだが，低熱流束において発泡はより連続的で安定している．各キャビティからの同時気泡生成と同時合体離脱を周期的に繰り返すような特徴を示す．離脱する直前の気泡径を離脱気泡径とみなすと，S1 よりもやや大きくなっていることが分かる．気泡径は 2～2.5 cm 程度である．



(a) Heat Flux 27.94 kW / m²



(b) Heat Flux 51.55 kW / m²

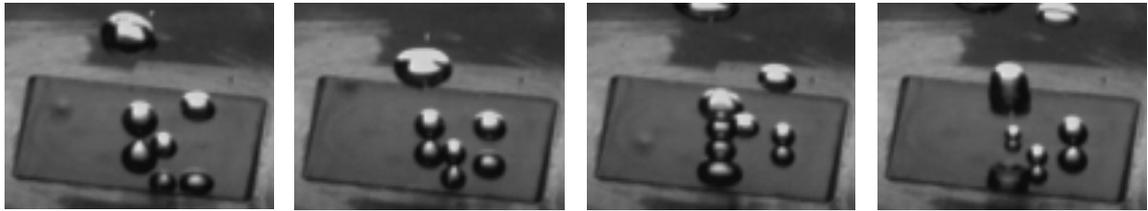


(c) Heat Flux 83.91 kW / m²

Fig. 5.2 Bubbling from cavities. (S2)

5.1.3 HC

次に HC について低・中・高熱流束における発泡の代表的な挙動を撮影した高速ビデオカメラの映像を Fig. 5.3 に示す。加熱面の中心とその周りというキャビティ配置の特徴から、低熱流束では中心のみからの発泡となり、熱流束をあげていくと周りからの発泡も確認される。また、全てのキャビティからの発泡が確認される状態でもやはり中心からの気泡径が周りのものよりも少し大きいことがわかる。S1 や S2 のような近接するキャビティからの気泡の合体は起こらず、各キャビティで後続の気泡が離脱後の気泡と合体する（引き込み）現象が見られる。気泡径は 2~2.5 cm 程度である。



(a) Heat Flux $27.93 \text{ kW} / \text{m}^2$



(b) Heat Flux $51.68 \text{ kW} / \text{m}^2$

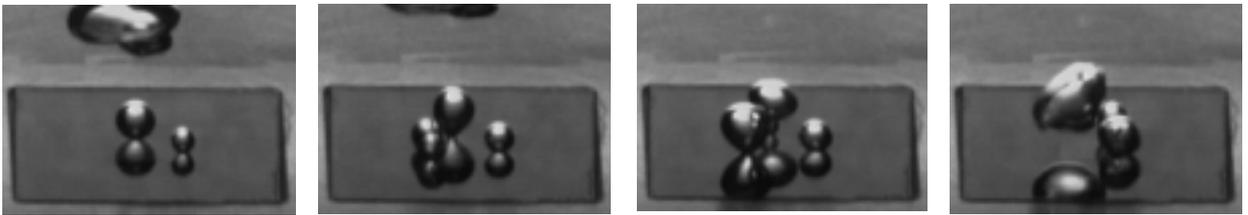


(c) Heat Flux $84.18 \text{ kW} / \text{m}^2$

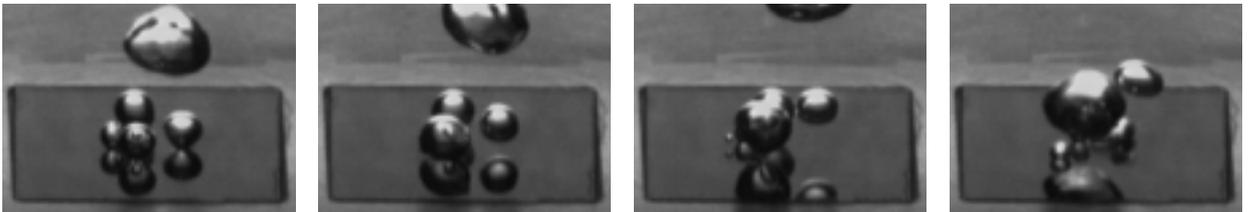
Fig. 5.3 Bubbling from cavities. (HC)

5.1.4 S20

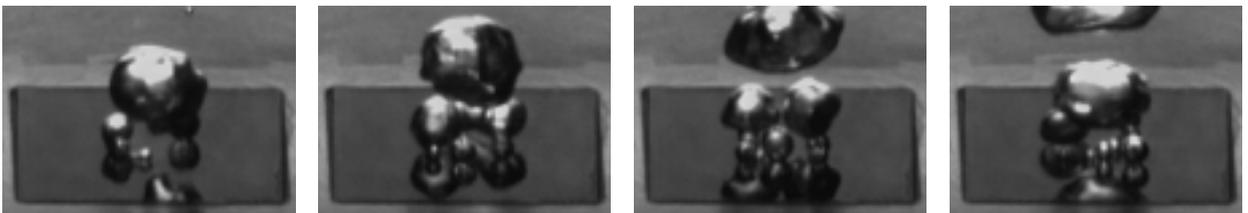
次に S20 について低・中・高熱流束における発泡の代表的な挙動を撮影した高速ビデオカメラの映像を Fig. 5.4 に示す．特徴として，低熱流束時から気泡の合体をともなう離脱が見られる．また，キャビティ密度の高さに比べて活性になっているキャビティの数が少ないことがわかる．そして興味深いことに，いずれの熱流束においてもキャビティが配置された部分の中心付近からはあまり発泡せず，外側のキャビティが配置されていない表面部分との境界付近から非常に活発に発泡するという特徴を示す．気泡径は 2.5～3 cm 程度である．



(a) Heat Flux 20.16 kW / m²



(b) Heat Flux 30.24 kW / m²



(c) Heat Flux 53.05 kW / m²

Fig. 5.4 Bubbling from cavities. (S20)

5.2 離脱気泡数分布

特徴的な発泡挙動を示した S1, S2 について, 計測が可能な熱流束域で各キャビティにおける離脱気泡数および離脱時間を調べた。

5.2.1 S1の3次元グラフ

それぞれの熱流束における離脱気泡数の分布をFig. 5.5 に示す。121個あるキャビティのうち, 発泡するキャビティを含む81個のキャビティについて, 各キャビティの2秒間における離脱気泡数を3次元棒グラフに示した。グラフの中心は加熱面の中心と一致しており, それぞれの棒の位置がキャビティの位置と対応している。また, 離脱数による色分けは, それぞれの熱流束における離脱数を明確にするためにグラフごとに異なる色分け方になっており, 統一していない。

S1の離脱気泡数について, 以下のような特徴が挙げられる。

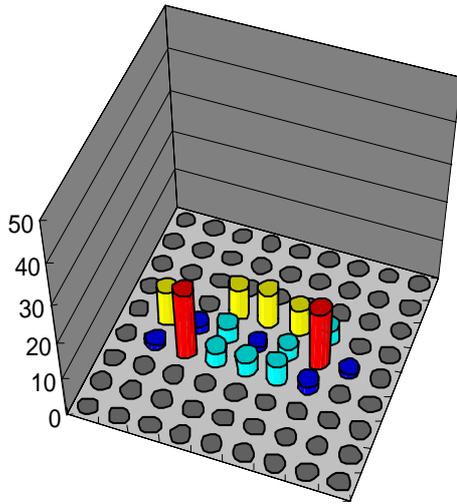
レーザーによる強度分布の性質上, 中心部分が最も熱流束が高くなると考えられるが, 中心付近のキャビティからはほとんど発泡しない。

どの熱流束においても, 離脱気泡数がもっとも多いキャビティから最短距離(この場合は1 mm)にあるキャビティの離脱気泡数は少ない。

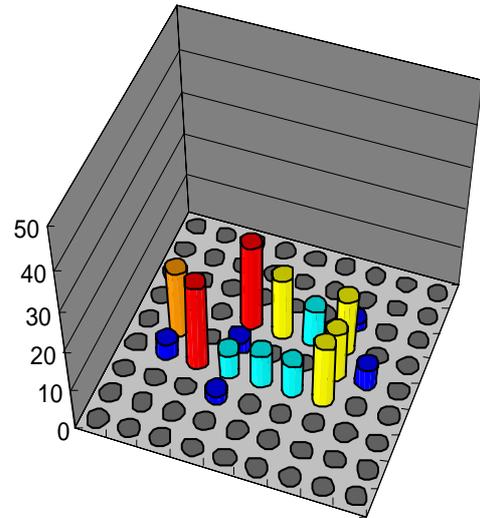
(a)の場合を除いて, 離脱気泡数がもっとも多いキャビティとその次に多いキャビティの間の距離は $\sqrt{5}$ mmである。

熱流束の増加時に離脱気泡数が減少するキャビティが存在する。

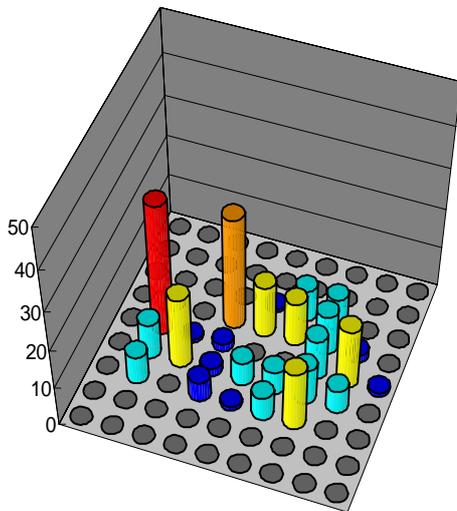
つまり, S1 には不活性なキャビティが見られる。



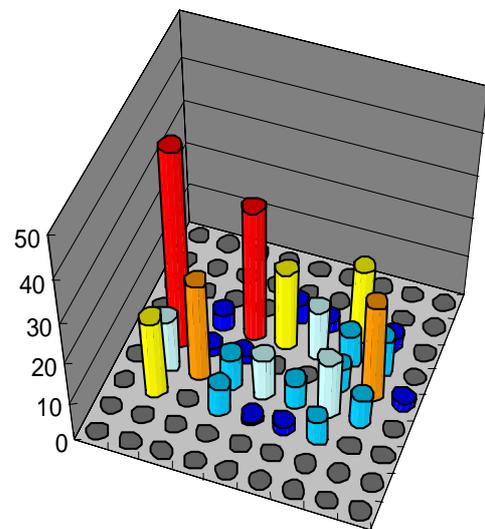
(a) Heat Flux 23.84 kW / m^2



(b) Heat Flux 27.11 kW / m^2



(c) Heat Flux 30.37 kW / m^2



(d) Heat Flux 33.60 kW / m^2

Fig. 5.5 Bubble departing number. (S1)

5.2.2 S1 の距離による変化

5.2.1 で興味深い特徴を示した $S=1$ mm の加熱面について、最も離脱気泡数の多いキャビティを基準に、そこからの距離の変化による気泡離脱数の変化をグラフにした。可能な限り数多くのデータを分析するため、5.2.1 の (d) のデータをサンプリングした。なお、基準点から等距離に複数のキャビティがある場合については発泡数を平均し、1つのキャビティからの発泡としてプロットした。その結果を Fig. 5.6 に示す。

まず大きな特徴として、全域において距離の増加による発泡数の変動が激しい。つまり S1 においては、隣り合うキャビティはどちらか一方しか活性になれないことを示しているといえる。また、距離が $\sqrt{5}$ mm と 6 mm のキャビティで大きなピークが見られる。以上のことから、S1 においては、不活性なキャビティが一定の距離において存在し、活性なキャビティの中でも気泡生成率のさらに高いキャビティが一定の割合で存在するのではないかと推測でき、これは5.2.1 の結果と一致する。

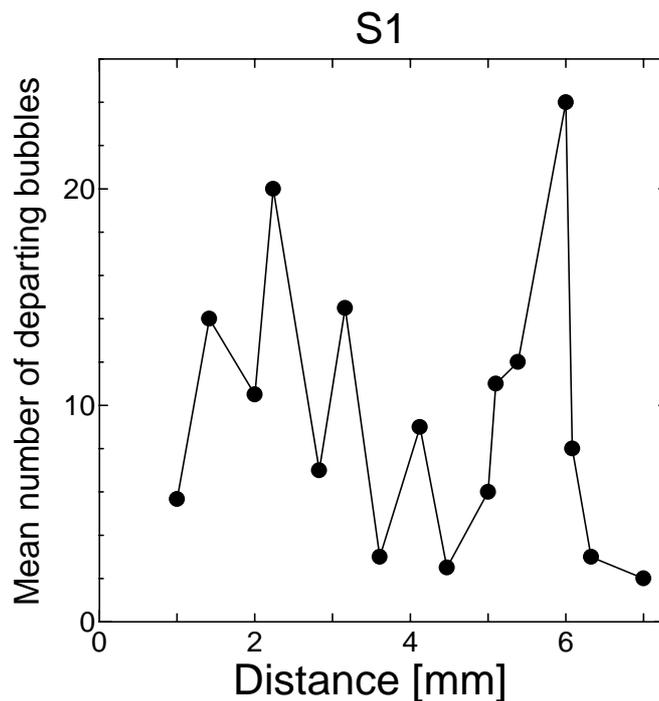


Fig. 5.6 Distribution of bubbling frequency.

5.2.3 S2の3次元グラフ

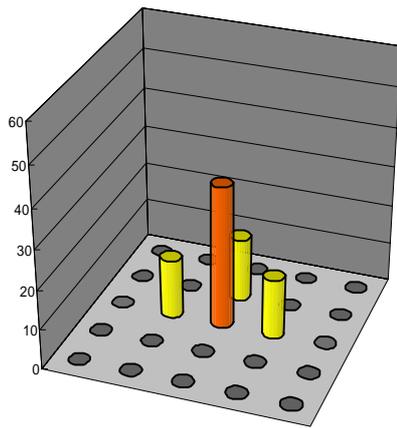
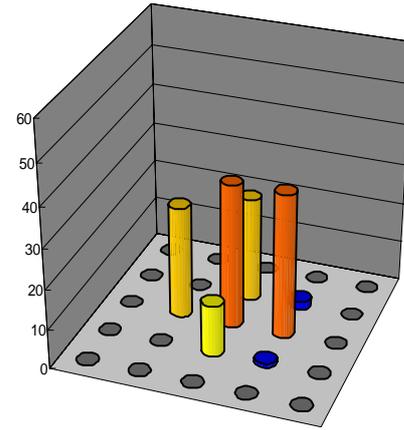
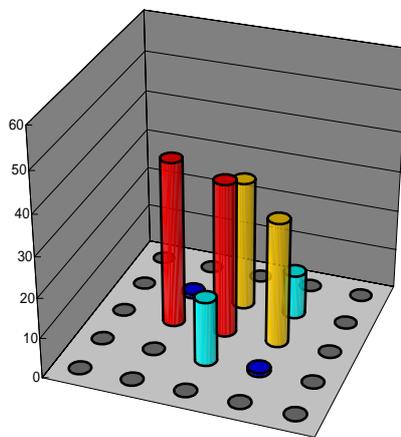
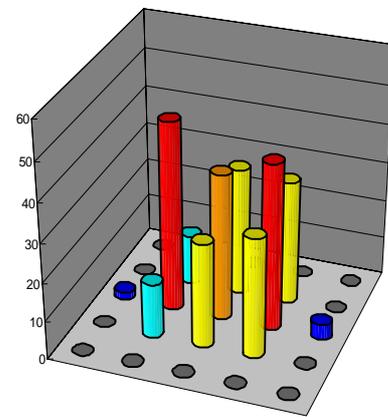
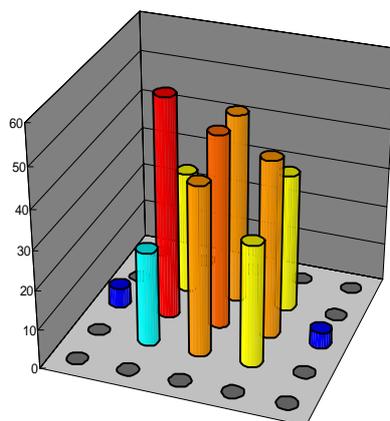
それぞれの熱流束における離脱気泡数の分布をFig. 5.7 に示す．49個あるキャビティのうち，発泡するキャビティを含む25個のキャビティについて，各キャビティの2秒間における離脱気泡数を3次元棒グラフに示した．グラフの中心は加熱面の中心と一致している．これについてもS1と同様に，離脱数による色分けは統一していない．

S2の離脱気泡数について，以下のような特徴が挙げられる．

すべての熱流束において加熱面の中心から距離に比例して離脱気泡数が減少するという大まかな傾向が確認できる．

熱流束を上げていくと，各キャビティの離脱気泡数は増加し，減少することはまれである．

つまり，S2には不活性なキャビティが見られない．

(a) Heat Flux 17.60 kW / m^2 (b) Heat Flux 21.18 kW / m^2 (c) Heat Flux 24.76 kW / m^2 (d) Heat Flux 27.94 kW / m^2 (e) Heat Flux 31.12 kW / m^2 **Fig. 5.7 Bubble departing number. (S2)**

5.2.4 全離脱気泡数

S1 と S2 のそれぞれの加熱面に関する 2 秒間の全離脱気泡数をプロットしたものを Fig. 5.8 に示す．どちらもほぼ同じ傾きを示しており，この領域の熱流束においては熱流束と全体の離脱気泡数は比例するといえる．また，同じ熱流束における離脱気泡数は S1 よりも S2 のほうが多い．キャビティの数密度は S1 が S2 の 4 倍であるから，各キャビティについて比較すれば，S2 のほうがより活性化されていることがわかる．

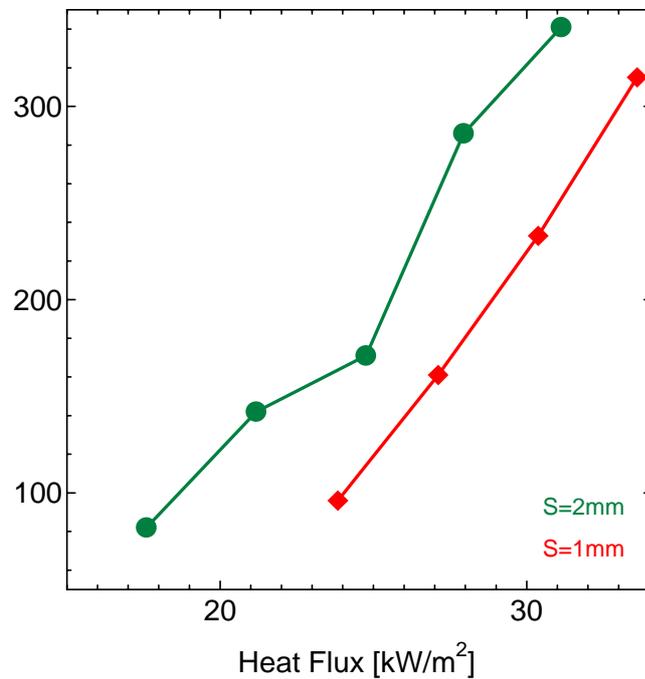


Fig. 5.8 Total bubbling number.

5.3 離脱遅れ時間分布

S1, S2の加熱面について, 各キャビティからの気泡離脱時間が計測できたものの中で特徴的なものについて, 離脱遅れ時間の特徴を調べた。離脱遅れ時間とは, ある2つのキャビティに着目して, 片方のキャビティにおける気泡離脱時間をもとに, 他方のキャビティの気泡離脱時間との差を時系列にそって計測したものである。Juddら^[2]によると, 短い遅れ時間の頻度が高いほどそのキャビティが活性化されていることを示している。解析においてはもっとも離脱数が多いキャビティを基準にとって他のキャビティにおける離脱遅れ時間を取り, その分布をヒストグラムにして分析した。なお, S2については, 基準点からの距離Dが等しいキャビティが複数ある場合, 平均をとって, 1つ分のキャビティの分布とした。また, これも可能な限り数多くのデータを分析するため, S1は5.2.1の(d)のデータを, S2は5.2.3の(e)のデータをサンプリングした。S1, S2の遅れ時間分布をFig. 5.9, Fig. 5.10に示す。

離脱遅れ時間分布について, 以下の特徴が挙げられる。

S1は距離 $D=\sqrt{5}$ mm と $\sqrt{2}$ mm において遅れ時間の短い領域にピークがある。また, $D=6$ mm についても 40 ~ 60 msec にピークがある。

S2はどの距離においても類似した特徴である。

本来ヒストグラムはある程度のデータ数がないと解析に正確性が出ない分析ツールである。その点では本実験におけるデータ数は絶対的に不足しているといえる。しかし, S2では距離Dにかかわらず非常に類似した分布を示し, S1では微量ではあるが分布の違いを示した。S1は離脱気泡数に分布があり, S2にはそれが見られないという5.2での解析をある程度裏付けるができたと考えてよいであろう。

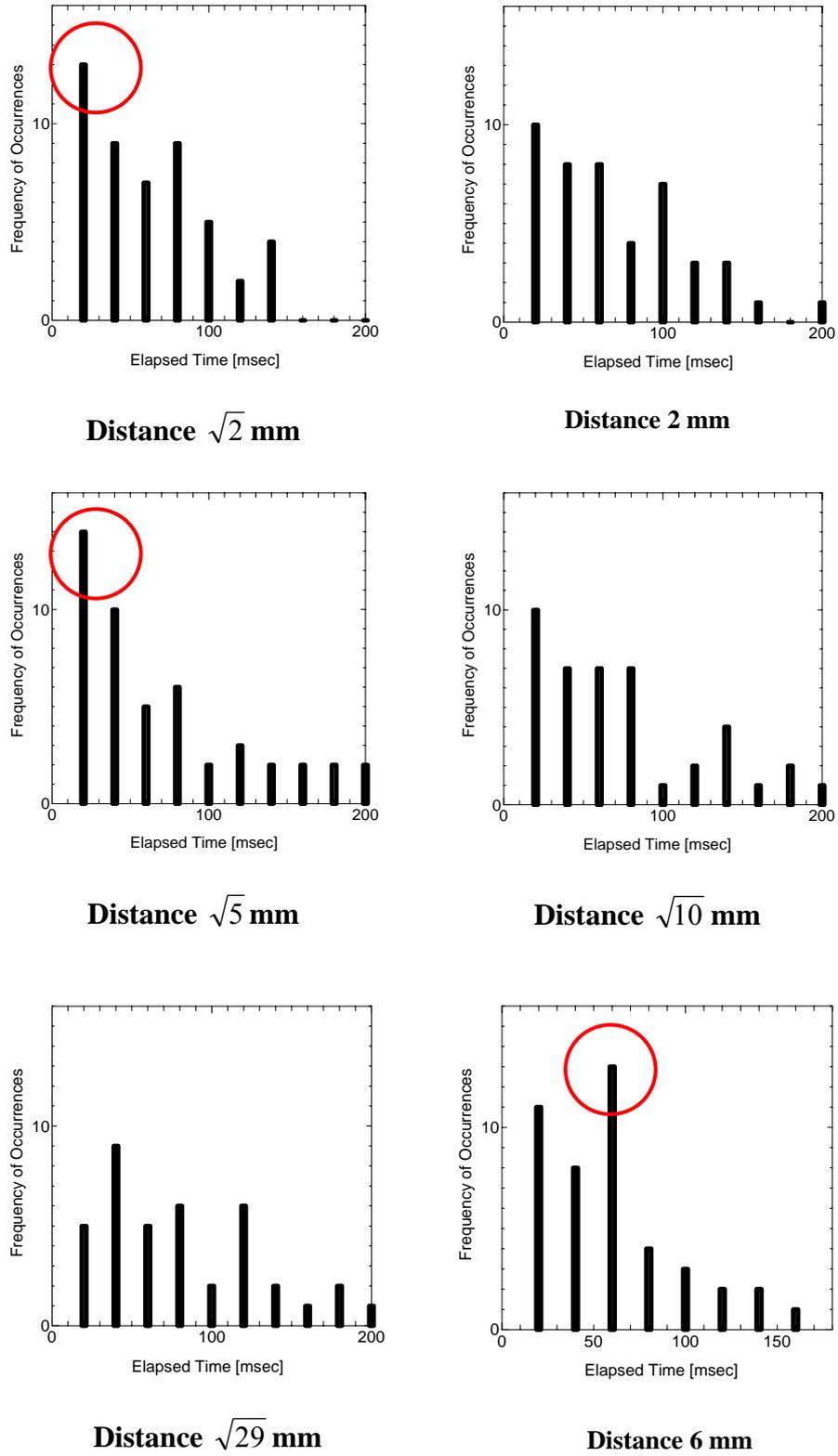


Fig. 5.9 Distribution of elapsed time. (S1)

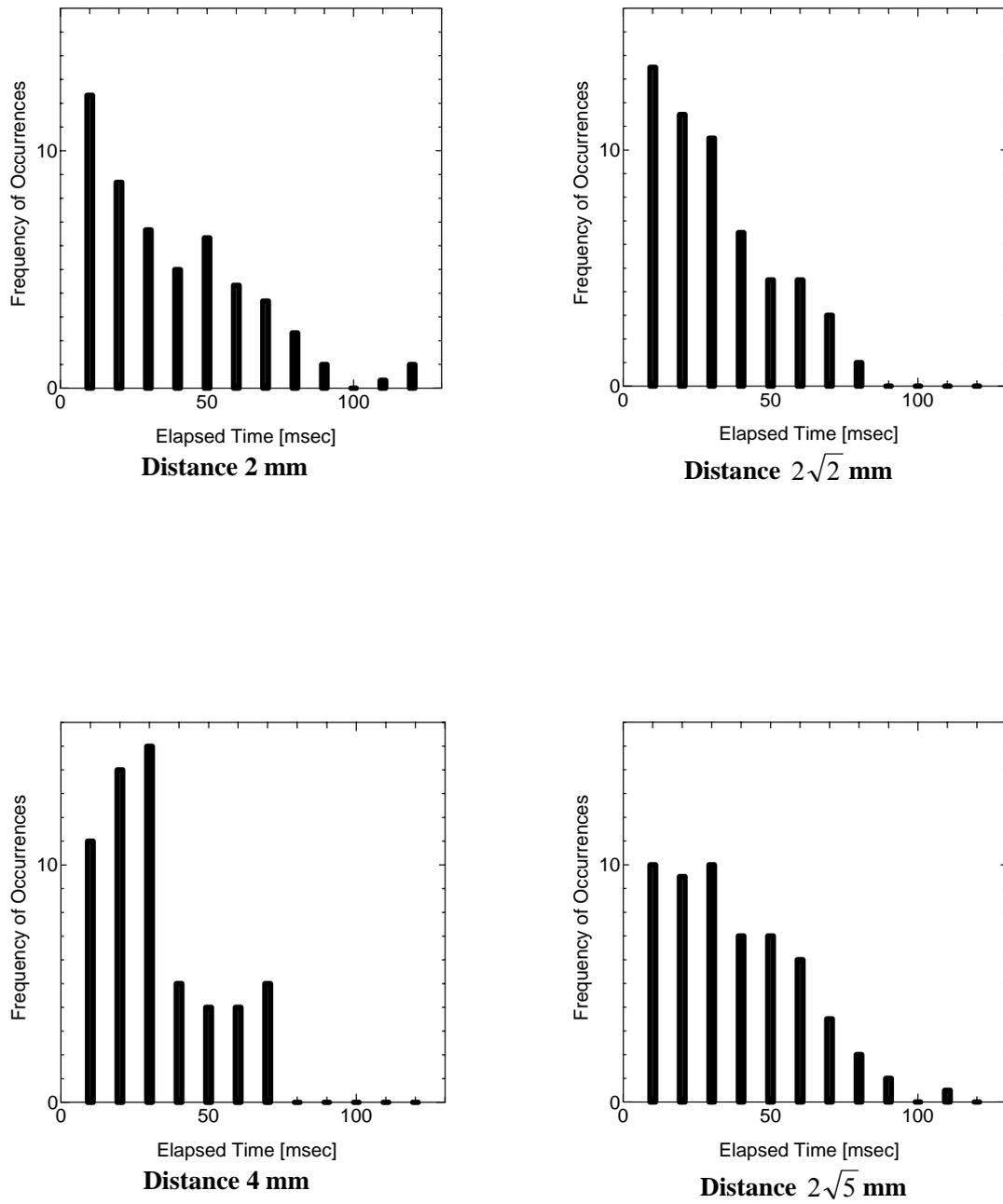


Fig. 5.10 Distribution of elapsed time. (S2)

5.4 沸騰曲線

キャビティ配置の違いによって加熱面平均温度や平均熱流束がどのような影響を受けているかを調べるために、沸騰曲線を作図した。ただし、S20については、加熱面積に占めるキャビティ加工範囲の割合が低いことから、沸騰曲線による考察の対象外とした。従来よく使われている沸騰曲線の形態と同様、 x 、 y 軸ともに log-log でプロットしてある。また、参考として、発泡をともしない自然対流のみによる加熱面の温度変化も計測し、2.2 で述べた核沸騰熱伝達整理式とあわせてプロットしてある。得られた沸騰曲線を Fig. 5.11 に示す。

注意すべき点は、全体的に理論式よりも同じ熱流束における過熱度が低くなっていることである。これは加熱面裏面におけるレーザの反射や加熱面内における水平方向の熱の逃げなどにより、レーザ出力が 100% 熱流束に変換されていないことが原因と考えられる。しかし、理論式から得られる曲線と勾配がおおむね一致しており、実験データを比較しても S1、S2、HC のいずれの加熱面についても自然対流の曲線よりも伝熱性能が高くなっていることから、本実験のデータもある程度の信頼性を持っているものと考えてもよいと思われる。

沸騰曲線について、以下のような特徴が挙げられる。

S2 と HC は全熱流束域において曲線の勾配がほぼ等しい。

S1 は他の 2 つの加熱面よりも勾配が急であり良質な伝熱特性を示す。

S1、S2 は全熱流束において HC よりも伝熱性能が高い。

S1 と S2 は熱流束 50 kW/m^2 付近で交わり、それより低い熱流束域では S2 が、高い熱流束域では S1 がより伝熱性能が高いという性能の逆転が起こる。

なお、ここでいう伝熱特性とは沸騰曲線の勾配を指すものとし、伝熱性能とは沸騰曲線の位置を指すものとする。伝熱特性が良いとは熱流束の増加に伴う表面温度の上昇が少ないことを意味し、伝熱性能が良いとは同じ熱流束において表面温度をより低く保つことができることを意味する。

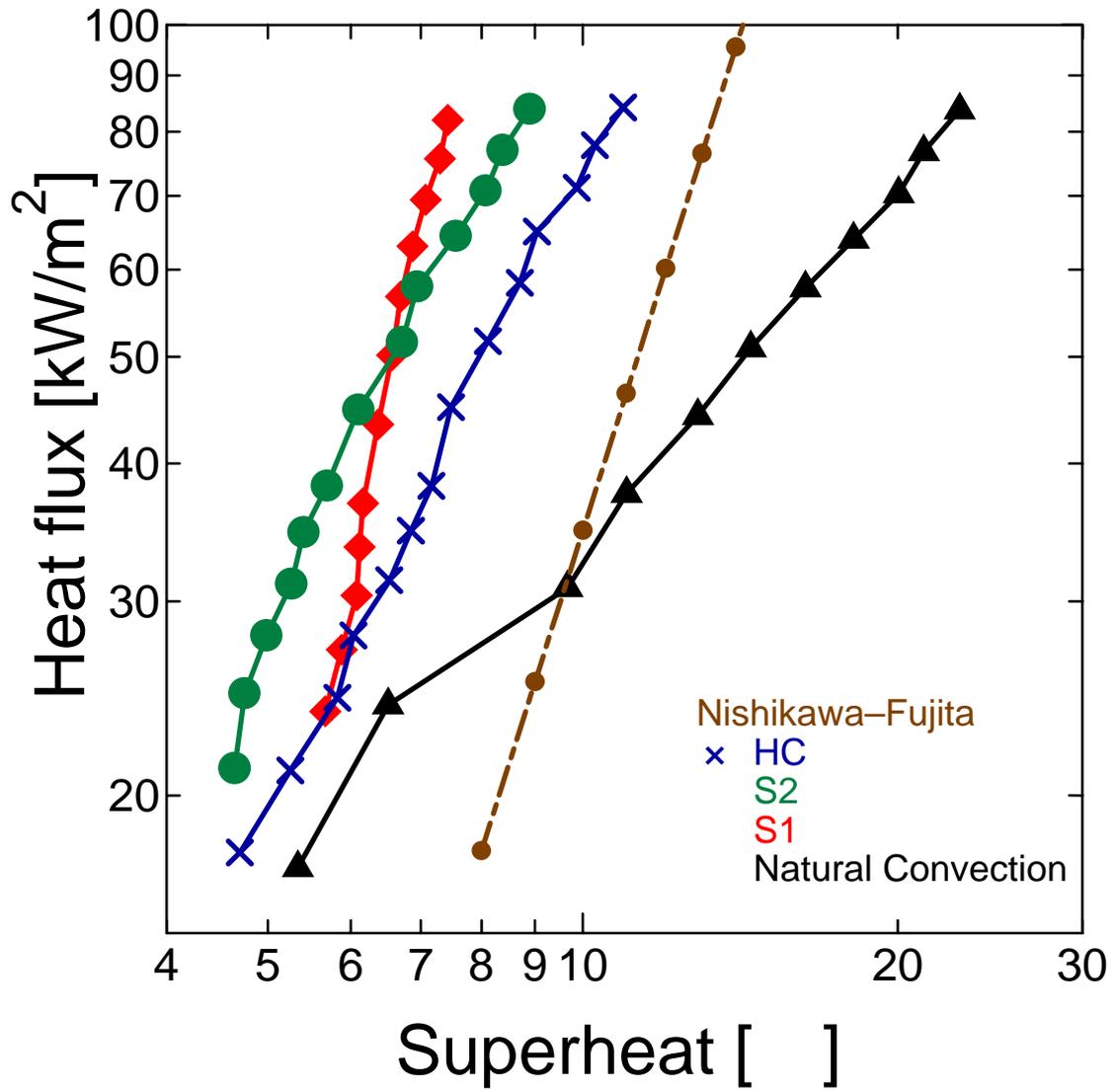


Fig. 5.11 Boiling curve

5.5 まとめ

まず、離脱気泡分布について特徴をまとめる。

気泡離脱数および離脱時間が計測できた熱流束域において、S1は離脱気泡数分布にばらつきが確認され、S2については確認されなかった。

映像の観察のみの観察にとどまったHCとS20については、HC ($S=4\text{ mm}$)は多少の分布が見られたものの、7つのキャビティ全てほぼ均等に気泡が発生した。S20 ($S=20\text{ }\mu\text{m}$)は映像からも明らかに中心付近から気泡が発生しなかった。

以上より、マルチキャビティ加熱面においてキャビティが活性化するためには、一定の配置間隔が必要なのであると考えることが出来る。しかしこの考察は気泡離脱時間を計測できた低熱流束域のみを対象としており、高熱流束域において気泡挙動をどのように計測するかが今後の課題といえるであろう。

伝熱性能については5.4にあげたとおりである。

6. 結論

人工マルチキャビティ加熱面の沸騰実験から以下の結論を得た．

マルチキャビティ加熱面においてキャビティが活性化されるためには適切なキャビティ配置間隔が必要である．

本実験系では，キャビティ配置間隔 $S=4\text{mm}$ よりも $S=1\text{mm}$ ， $S=2\text{mm}$ が高性能であった．また $S=1\text{mm}$ と $S=2\text{mm}$ を比較すると低熱流束域では $S=2\text{mm}$ が高性能であり，高熱流束域では $S=1\text{mm}$ が高性能となるような性能の逆転が起こった．

付録 A

A-1 記号表

R	伝熱面の半径	$[mm]$
P	次元定数	$[W]$
M	次元定数	$[m^{-1}]$
f_s	気泡係数	
f_p	圧力の影響を補正する圧力係数	
C_{pl}	液体の定圧比熱	$[J/kgK]$
ρ_l	液体の密度	$[kg/m^3]$
σ	表面張力	
λ_l	液体の熱伝達率	$[W/mK]$
ρ_v	気体の密度	$[kg/m^3]$
g	重力加速度	
Δh_v	蒸発熱	$[J/m^3]$
p_c	臨界圧	

A-2 気泡離脱時間全データ

45～53 ページに S1 と S2 の全気泡離脱時間，54，55 ページにキャビティの番号表を示す．

Bubble Departing Time (sec)

Heated Surface
Water Condition
Heat Flux

S1
Saturated
23.81kW/m²

7	8	9	10	12	13	14	15	16	17	18	20	21	22	23
0.016	0.171	0.124	0.384	0.01	0.673	0.311	0.585	0.17	0.014	0.173	1.817	0.009	0.009	0.311
0.495	0.384	0.495	1.016	0.24	1.259	0.902		0.802	0.047			0.24	0.452	0.67
1.107	0.495	0.801	1.224	0.673		1.539		1.634	0.472			0.407	0.67	1.03
1.192	0.675	1.126	1.718	1.021		1.732			0.585			0.452	1.207	1.732
1.654	0.902	1.605		1.125					0.66				0.56	
1.782	1.057	1.782		1.259					0.767			0.602		
1.854	1.269	1.976		1.679					0.802			0.648		
1.982	1.418			1.85					0.919			1.087		
	1.71			2.003					1.095			1.125		
									1.269			1.207		
									1.373			1.264		
									1.429			1.413		
									1.508			1.495		
									1.634			1.539		
									1.849			1.679		
												1.849		
												1.957		

24	25
0.171	0.04
0.311	0.564
1.125	
1.508	
1.849	

Bubble Departing Time (sec)

Heated Surface
Water Condition
Heat Flux

S1
Saturated
27.11kW/m²

3	7	8	9	10	12	14	17	18	20	21	22	23	24	25
0.316	0.043	0.013	0.043	0.046	0.008	0.1	0.017	0.11	0.338	0.01	0.176	0.004	0.05	0.11
1.964	0.101	0.043	0.42	0.168	0.084	0.53	0.168	0.425	0.437	0.1	0.592	0.176	0.627	0.232
	0.298	0.238	0.627	0.239	0.171	1.126	0.465	0.629	0.574	0.235	1.005	0.357	0.775	0.301
	0.358	0.42	0.924	0.301	0.227		0.552	0.839	1.678	0.254	1.185	0.696	0.939	0.627
	0.493	0.513	1.068	0.465	0.277		0.599	1.423		0.28	1.378	0.999	1.209	0.715
	0.53	0.597	1.252	0.718	0.416		0.966			0.364	1.678	1.097	1.342	0.837
	0.61	0.636	1.664	0.776	0.503		1.026			0.431		1.29	1.577	1.026
	0.674	0.82	1.834	0.839	0.607		1.169			0.612		1.615	1.76	1.151
	0.697	0.889	1.966	0.966	0.643		1.34			0.643				1.209
	0.764	1.005		1.068	0.743		1.486			0.696				1.307
	0.82	1.177		1.169	0.827		1.66			0.869				1.422
	0.924	1.436		1.252	0.874		1.818			0.917				1.486
	1.085	1.533		1.583	0.916					0.95				1.634
	1.228	1.833		1.761	1.49					1.282				1.719
	1.252	1.964			1.751					1.348				1.839
	1.302				1.933					1.377				
	1.353									1.556				
	1.382									1.604				
	1.484									1.659				
	1.753									1.678				
	1.833									1.752				

28
0.436
1.752

Bubble Departing Time (sec)

Heated Surface
Water Condition
Heat FluxS2
Saturated
17.6kW/m²

2	5	6	7
0.032	0.026	0.026	0.081
0.177	0.119	0.081	0.184
0.289	0.238	0.119	0.295
0.374	0.366	0.177	0.411
0.466	0.527	0.233	0.527
0.649	0.726	0.244	0.652
0.833	0.82	0.289	0.706
0.882	0.938	0.366	0.876
0.946	1.039	0.41	1
1.094	1.199	0.466	1.098
1.245	1.365	0.527	1.297
1.362	1.486	0.649	1.438
1.506	1.561	0.707	1.631
1.579	1.77	0.778	1.773
1.706	1.929	0.816	1.994
1.767		0.876	
		0.938	
		0.993	
		1.006	
		1.038	
		1.094	
		1.155	
		1.193	
		1.245	
		1.297	
		1.362	
		1.433	
		1.537	
		1.566	
		1.628	
		1.706	
		1.718	
		1.767	
		1.889	
		1.929	
		1.992	

Bubble Departing Time (sec)

Heated Surface
Water Condition
Heat FluxS2
Saturated
21.18kW/m²

2	3	5	6	7	10	11
0.09	0.566	0.032	0.032	0.019	0.254	0.313
0.152	1.845	0.145	0.09	0.058	0.368	
0.281		0.282	0.145	0.098	0.547	
0.302		0.349	0.232	0.157	0.633	
0.341		0.463	0.282	0.232	0.794	
0.414		0.536	0.331	0.347	0.989	
0.461		0.628	0.414	0.359	1.09	
0.525		0.727	0.461	0.418	1.269	
0.566		0.798	0.525	0.477	1.414	
0.669		0.863	0.571	0.571	1.501	
0.805		0.943	0.582	0.644	1.631	
0.937		1.046	0.628	0.742	1.732	
1.107		1.099	0.669	0.813	1.845	
1.16		1.114	0.726	0.862		
1.264		1.152	0.745	0.926		
1.364		1.202	0.794	0.969		
1.408		1.263	0.862	1.024		
1.442		1.275	0.926	1.073		
1.508		1.333	0.969	1.099		
1.563		1.374	1.045	1.15		
1.63		1.437	1.09	1.165		
1.678		1.495	1.15	1.198		
1.713		1.567	1.198	1.27		
1.769		1.636	1.263	1.338		
1.843		1.77	1.341	1.389		
1.899		1.836	1.373	1.438		
		1.908	1.435	1.498		
		1.952	1.496	1.524		
			1.563	1.564		
			1.629	1.61		
			1.706	1.636		
			1.769	1.705		
			1.837	1.789		
			1.89	1.848		
			1.947	1.89		
			1.985	1.984		

Bubble Departing Time (sec)

Heated Surface
Water Condition
Heat FluxS2
Saturated
24.76kW/m²

1	2	3	5	6	7	10	11
1.069	0.052	0.051	0.058	0.046	0.046	0.175	1.664
	0.103	0.24	0.104	0.103	0.129	0.309	
	0.178	0.385	0.158	0.128	0.199	0.376	
	0.24	0.572	0.178	0.175	0.256	0.549	
	0.329	0.731	0.235	0.234	0.335	0.711	
	0.383	0.87	0.273	0.293	0.39	0.874	
	0.507	0.974	0.316	0.329	0.466	0.998	
	0.563	1.225	0.365	0.369	0.557	1.111	
	0.63	1.689	0.439	0.446	0.636	1.195	
	0.712	1.913	0.489	0.493	0.724	1.33	
	0.734	2.012	0.572	0.556	0.8	1.389	
	0.784		0.636	0.63	0.863	1.475	
	0.858		0.709	0.712	0.884	1.583	
	0.909		0.777	0.777	0.923	1.668	
	0.925		0.844	0.803	0.973	1.753	
	0.952		0.88	0.858	1.03	1.926	
	1.022		0.924	0.879	1.099		
	1.088		0.957	0.915	1.152		
	1.141		1.028	0.957	1.201		
	1.225		1.135	1.022	1.232		
	1.349		1.188	1.092	1.337		
	1.394		1.262	1.135	1.402		
	1.458		1.316	1.195	1.464		
	1.527		1.371	1.249	1.487		
	1.61		1.41	1.316	1.543		
	1.656		1.461	1.371	1.593		
	1.689		1.471	1.414	1.664		
	1.74		1.515	1.458	1.746		
	1.796		1.569	1.515	1.861		
	1.854		1.599	1.571	1.927		
	1.912		1.636	1.637	2.009		
	2.002		1.679	1.669			
			1.698	1.692			
			1.733	1.74			
			1.75	1.797			
			1.762	1.844			
			1.808	1.912			
			1.844	2.001			
			1.911				
			1.961				
			2.01				

Bubble Departing Time (sec)

Heated Surface
Water Condition
Heat FluxS2
Saturated
27.94kW/m²

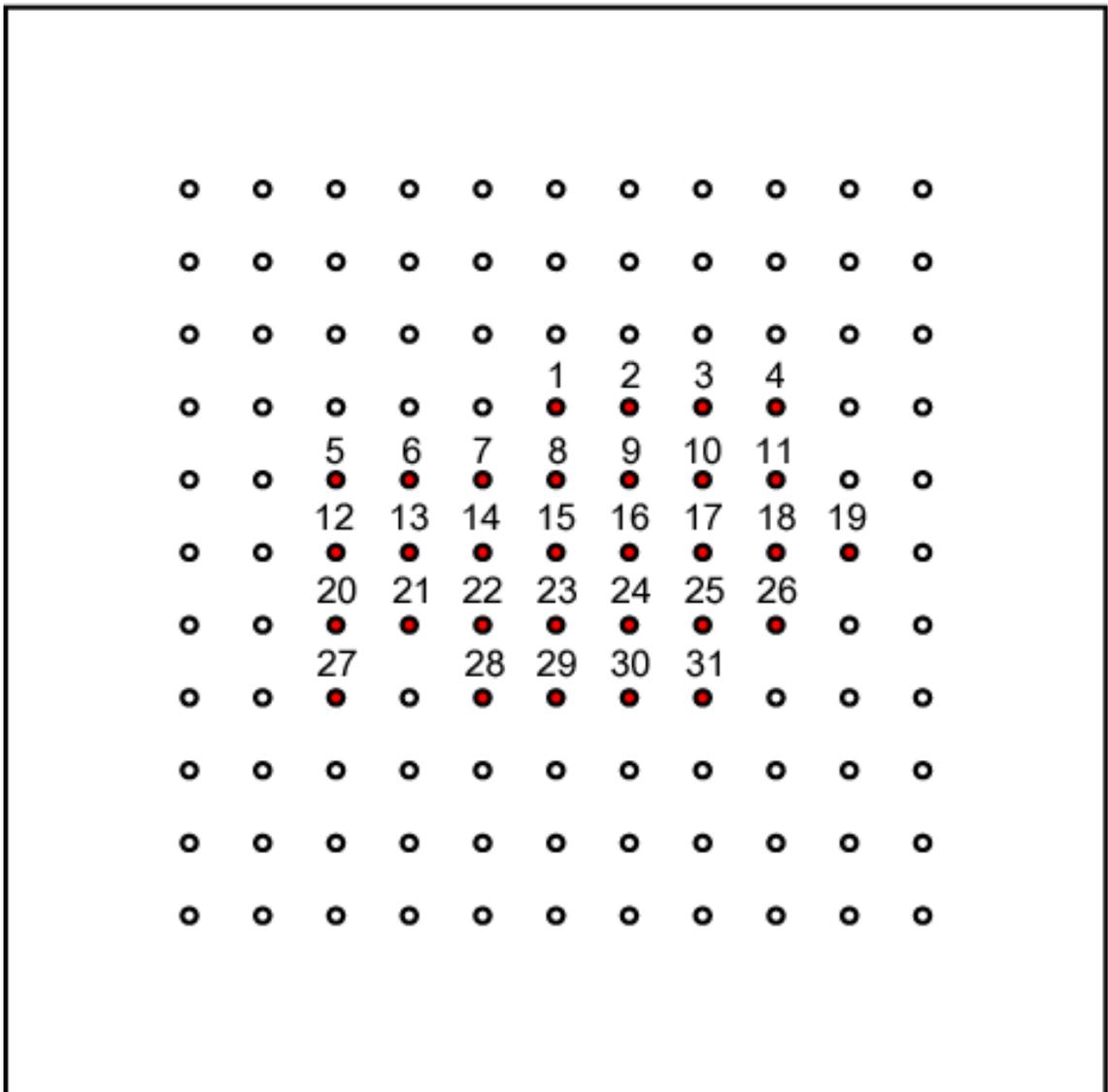
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0.043	0.012	0.011	0.241	0.045	0.056	0.01	0.2	0.168	0.058	0.063
0.206	0.06	0.069	0.759	0.074	0.134	0.068	0.423	0.23	0.081	0.078
0.614	0.147	0.137		0.127	0.204	0.136	0.524	0.284	0.151	0.15
0.767	0.265	0.221		0.167	0.263	0.203	0.551	0.391	0.215	0.219
1.023	0.346	0.263		0.206	0.324	0.26		0.511	0.263	0.27
1.199	0.396	0.344		0.223	0.344	0.318		0.611	0.329	0.319
1.306	0.465	0.395		0.241	0.391	0.348		0.692	0.401	0.397
1.395	0.527	0.46		0.246	0.47	0.391		1.197	0.528	0.462
1.508	0.581	0.516		0.285	0.521	0.455		1.372	0.603	0.513
1.629	0.646	0.541		0.346	0.592	0.512		1.452	0.669	0.586
1.724	0.716	0.581		0.391	0.617	0.544		1.54	0.739	0.668
1.875	0.783	0.645		0.411	0.681	0.587		1.654	0.84	0.738
1.994	0.84	0.722		0.469	0.716	0.676		1.767	0.96	0.841
	0.899	0.784		0.512	0.775	0.722		1.943	1.096	0.96
	0.977	0.845		0.579	0.796	0.747			1.146	1.034
	1.023	0.865		0.612	0.839	0.791			1.201	1.085
	1.078	0.909		0.661	0.899	0.846			1.346	1.187
	1.147	0.981		0.693	0.966	0.904			1.385	1.221
	1.201	1.079		0.759	1.027	0.917			1.423	1.277
	1.28	1.14		0.844	1.071	0.97			1.488	1.335
	1.306	1.209		0.863	1.131	0.987			4.533	1.384
	1.366	1.28		0.903	1.16	1.028			1.601	1.424
	1.431	1.364		0.965	1.191	1.088			1.654	1.498
	1.508	1.381		0.997	1.231	1.139			1.724	1.593
	1.565	1.437		1.043	1.281	1.208			1.783	1.654
	1.604	1.502		1.07	1.364	1.235			1.91	1.699
	1.629	1.573		1.131	1.43	1.278			1.948	1.779
	1.726	1.65		1.15	1.487	1.343				1.845
	1.773	1.728		1.19	1.534	1.376				1.924
	1.819	1.778		1.245	1.593	1.43				1.936
	1.851	1.856		1.282	1.646	1.487				1.98
	1.892	1.973		1.306	1.722	1.509				
	1.973			1.316	1.772	1.543				
				1.364	1.819	1.592				
				1.376	1.85	1.649				
				1.399	1.891	1.672				
				1.434	1.936	1.706				
				1.496	1.99	1.733				
				1.546		1.779				
				1.613		1.84				
				1.634		1.861				
				1.674		1.929				
				1.724		1.98				
				1.767						
				1.819						
				1.875						
				1.925						
				1.937						
				1.986						

Bubble Departing Time (sec)

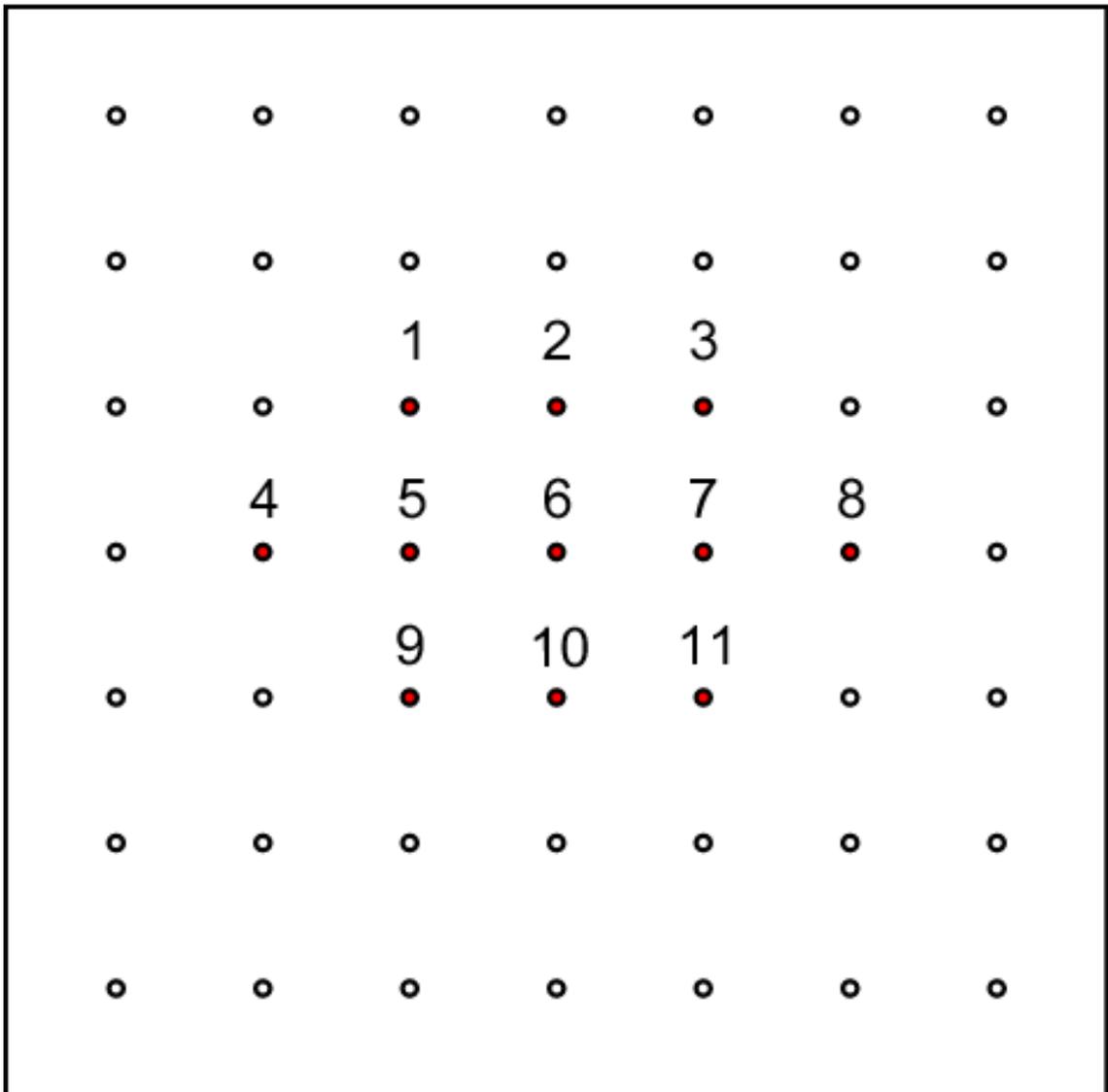
Heated Surface
Water Condition
Heat FluxS2
Saturated
31.12kW/m²

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0.068	0.01	0.025	0.654	0.067	0.057	0.016	0.18	0.182	0.077	0.006
0.191	0.057	0.065	0.937	0.078	0.1	0.069	0.464	0.262	0.119	0.085
0.264	0.121	0.122	1.242	0.129	0.116	0.093	0.713	0.317	0.149	0.149
0.33	0.168	0.164	1.571	0.14	0.134	0.128	1.212	0.404	0.182	0.257
0.385	0.248	0.179	1.953	0.189	0.156	0.155		0.459	0.26	0.321
0.44	0.316	0.202		0.204	0.192	0.179		0.509	0.313	0.397
0.48	0.334	0.247		0.254	0.253	0.257		0.569	0.395	0.444
0.508	0.382	0.319		0.318	0.313	0.315		0.616	0.444	0.52
0.567	0.437	0.382		0.398	0.386	0.388		0.735	0.519	0.554
0.606	0.491	0.44		0.452	0.433	0.433		0.791	0.549	0.596
0.702	0.516	0.502		0.48	0.457	0.464		0.834	0.596	0.656
0.784	0.549	0.555		0.526	0.491	0.502		0.919	0.613	0.722
0.863	0.57	0.616		0.559	0.509	0.542		1.011	0.66	0.825
0.939	0.602	0.67		0.602	0.543	0.601		1.111	0.713	0.895
0.996	0.668	0.716		0.653	0.601	0.657		1.47	0.726	0.976
1.072	0.703	0.795		0.707	0.655	0.708		1.544	0.779	1.017
1.12	0.775	0.839		0.723	0.708	0.787		1.623	0.843	1.075
1.234	0.83	0.919		0.749	0.743	0.825		1.664	0.899	1.141
1.266	0.856	0.961		0.77	0.771	0.895		1.731	0.958	1.221
1.281	0.88	1.031		0.796	0.83	0.96		1.791	0.977	1.307
1.357	0.905	1.076		0.833	0.871	1.017		1.845	0.993	1.378
1.484	0.944	1.149		0.865	0.899	1.052		1.906	1.022	1.424
1.53	0.966	1.194		0.899	0.949	1.082		1.932	1.072	1.48
1.61	0.995	1.253		0.935	0.962	1.092		1.964	1.111	1.548
1.684	1.008	1.308		0.982	0.994	1.139			1.174	1.601
1.709	1.03	1.36		0.987	1.026	1.146			1.232	1.653
1.745	1.076	1.43		1.004	1.051	1.165			1.301	1.714
1.809	1.121	1.479		1.07	1.083	1.185			1.319	1.784
1.841	1.141	1.57		1.121	1.116	1.211			1.366	1.842
1.904	1.176	1.648		1.162	1.131	1.252			1.411	1.906
1.961	1.21	1.733		1.188	1.162	1.308			1.473	1.957
	1.236	1.774		1.223	1.229	1.328			1.554	
	1.304	1.846		1.241	1.248	1.37			1.599	
	1.359	1.905		1.258	1.294	1.424			1.654	
	1.424	2.012		1.279	1.341	1.479			1.674	
	1.473			1.294	1.35	1.548			1.715	
	1.539			1.303	1.399	1.606			1.722	
	1.562			1.341	1.473	1.647			1.779	
	1.609			1.399	1.533	1.714			1.798	
	1.652			1.461	1.556	1.772			1.846	
	1.69			1.488	1.612	1.842			1.906	
	1.719			1.529	1.657	1.862			1.947	
	1.752			1.57	1.72	1.904			1.976	
	1.784			1.582	1.776	1.956				
	1.845			1.618	1.805	2.013				
	1.904			1.664	1.845					
	1.926			1.696	1.912					
	1.973			1.731	1.954					
				1.747	1.977					
				1.791						
				1.809						
				1.816						
				1.841						
				1.895						
				1.953						

S1



S2



参考文献

- [1] K.Nishikawa and Y.Fujita, "Correlation of Nucleate Boiling Heat Transfer Based on Bubble Population Density," *International Journal of Heat and Mass Transfer* vol.20, p.233 (1977)
- [2] Robert Mallozzi, Ross Leonard Judd, Narayanaswamy Balakrishnan, "Interaction of randomness, overlap and the interaction of bubbles forming at adjacent nucleation sites in pool boiling," *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43 (2000) 3317-3330
- [3] Sushil H. Bhavnani, "Immersion-Cooled Heat Sinks for Electronics: Insight from High-Speed Photography," *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, vol.24, No.2, June 2001.
- [4] Yuto Takagi, Masahiro Shoji, "Bubbling features from a single artificial cavity, " *International Journal of Heat and Mass Transfer* 44 (2001) 2763-2776
- [5] 小林紀男, "加熱面上の時空間沸騰挙動," 東京大学工学系研究科 修士論文, 1999.

謝辞

まず、本研究を行うに当たり、ご指導を頂いた庄司正弘教授に感謝致します。先生とは奇遇にも同郷であり、中高6年間の多感な時期を過ごした愛光学園の大先輩にあたるということで、若輩者ながら指導いただけることにいっそうの喜びを感じることができました。今後の益々のご発展をお祈りいたします。

また丸山茂夫助教授には研究会等で助言や励ましを頂き、新たな意欲を持って研究を継続することができました。渡辺誠技官には実験装置に関して世話をしていただき、また実験を行うに当たって数々の助言を頂き、無事実験を終えることができました。井上満助手には研究内容から研究室の生活まで幅広く助言を頂きました。深く感謝いたします。

庄司・丸山研究室の先輩にあたる産業技術総合研究所の松本壮平氏には、お仕事忙しい中、加熱面の加工において大変親切にご協力いただきました。ありがとうございました。

山口先輩をはじめとする庄司・丸山研究室の先輩方には研究室生活になれない私を親切に受け入れていただき、充実した研究室生活を送ることができました。これまでの研究室の生活で皆さんから頂いたアドバイスをいかして残り2年の大学生活をより良いものとするよう勉学に励みたいと思います。ありがとうございました。そしてこれからもよろしく願います。

ともに研究室で1年間苦楽を共にした庄司・丸山研の4年生の皆さんにも心より感謝したいと思います。みな進む研究室はそれぞれですが、皆さんのご活躍を期待しています。

最後に同じ沸騰班として共に研究を行った博士の張さん、修士の横田さん、安井さん、3人のおかげで私はこの日を迎えられるのだと思います。基礎知識が無く、いろいろと迷惑をかけっぱなしだった私に一から丁寧に指導いただきました。おかげさまで皆さんと過ごした1年間は決して忘れることのできないすばらしい経験となりました。ありがとうございました。張さんの研究がいっそう進展し、横田さんと安井さんが社会に出て大いに活躍されるのを楽しみにしています。

最後に、庄司・丸山研究室の発展を祈って、感謝の言葉としたいと思います。

以上

1 - 58 ページ 完

卒業論文

平成 14 年 2 月 8 日 提出

00225 対馬 将示