

修士 論文

単一キャビティにおける
沸騰核生成挙動

通し番号 1 59 完

平成 11 年 2 月 12 日提出

指導教官 庄司 正弘

66168 高木 裕登

目次

第一章 序論	4
1.1 はじめに	5
1.2 沸騰核としてのキャビティー概論	7
1.3 研究の目的	7
第二章 実験概要	8
2.1 実験装置	9
2.2 実験方法	14
第三章 気泡生成の理論	15
3.1 気泡生成理論 円錐型キャビティー	16
3.2 気泡生成理論 円筒型キャビティー	18
3.3 気泡生成理論 リエントラント型キャビティー	18
第四章 解析方法	20
4.1 放射温度計から得られたデータの処理	21
4.2 状態空間の再構成	23
4.3 高速ビデオカメラから得られる情報の処理	24

第五章 実験結果および考察	25
5.1 円錐型キャビティ	26
5.2 円筒型キャビティ	31
5.3 リエントラント型キャビティ	37
5.4 加熱面温度変化，熱流束に関する考察	41
5.5 離脱周期に関する考察	49
5.6 平均的沸騰挙動に関する考察	54
第六章 結論	55
参考文献	57
謝辞	58

第一章

序論

1.1 はじめに 研究の背景

現在に至るまで沸騰現象の研究は50年以上にわたり世界各地で行われてきている。沸騰現象は強制対流熱伝達など単相の熱伝達などに比べ非常に高い熱伝達効率を得られることから主に工業上、産業上着目されてきた。火力、原子力発電所、製鉄工場などでの冷却、また近年は集積回路の冷却など幅広い分野で利用されてきている。その過去の研究過程においてモデル、経験式は数多く提唱され、実用上個々の場合においては問題ないレベルにあるといえる。

沸騰現象は通常横軸に加熱面の時空間平均温度と流体の飽和温度との差をとった加熱度、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沸騰曲線の形で整理され、議論されることが多い(Fig.1.1 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。曲線の極大値の点である限界熱流束(CHF)点の右側の核沸騰域、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。このように、従来の沸騰に関する研究では沸騰曲線に基づいた時空間の平均的特性に注目したものが多かった。

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る^[1]。気泡の運動、気液界面での相変化現象、加熱面における流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系の自由度が高い現象であり、平均値の議論以外での解析、モデル化は容易ではない。従来この沸騰現象の動的メカニズムそのものまで踏み込んでいた研究はそのため、多いとはいえない。

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キャビティーにおいて起こると考えられている^[2]。また個々の発泡核(キャビティー)からの発泡挙動はキャビティーの形状に依存するとも言われており^[3]、沸騰現象の複雑さを生む大きな因子となっている。

近年カオス工学、非線形工学という従来の線形工学から一歩進んだ学問の分野が盛んになってきた。特に流体の挙動が関わってくるような非線形性の強い現象ではその解析法は有効とされている。過去、沸騰現象の非線形特性を論じたものは多くはないが伝熱面の温度を測定しその温度変化の特性に注目した研究が報告されている^{[4][5]}。沸騰のような複雑な系に対し、非線形工学の考え方を取り入れるのは有効であると思われる。

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ーを配置することが可能となってきた。特に微細放電加工技術の進歩にはめざましいものがあり、技術的な応用が期待されている。

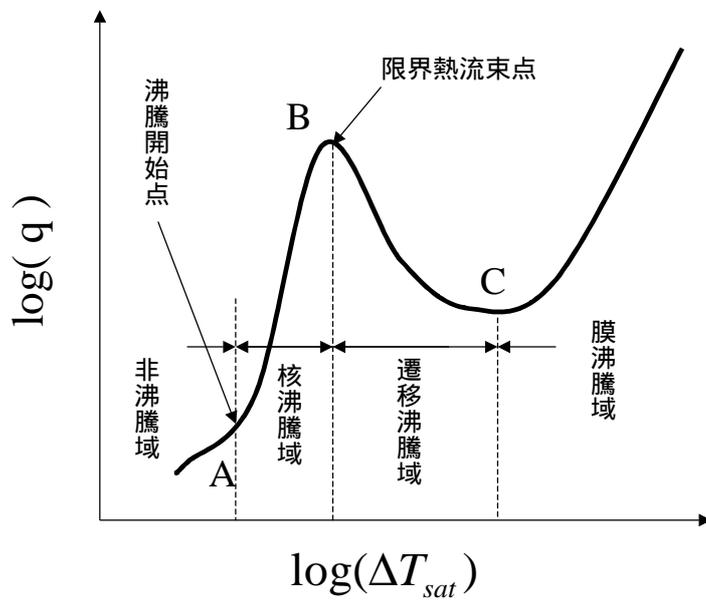


Fig.1.1 Boiling Curve

1.2 沸騰核としてのキャビティー概論

現在までに数種の形状のキャビティーが沸騰の研究，加熱面の傷のモデル化において取り上げられている．その中で代表的なものが以下の3種である(Fig.1.2)．いずれも加熱面上の傷の形状を理想化したものである．初期の沸騰核に関する研究で Bankoff^[6]らによって扱われたのが左側にある円筒形(Cylindrical)キャビティーである．最も単純な形状をしていると言え，モデル化も比較的楽なものである．次に現実の加熱面にあるキャビティーの形状に近づけようとして提案されたのが中央にある円錐形(Conical)キャビティーである．この形状は現在にいたるまで多くの研究者のモデル化，解析の対象になっている^[7]．近年注目を浴びているのが右側のリエントラント型キャビティーである．他の2種のキャビティーに比べ気泡保持能力が優れていると言われており，より実際の加熱面上で発泡核として機能しているキャビティーに近いとされている．

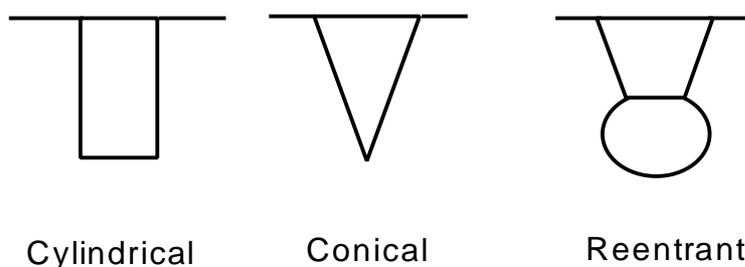


Fig.1.2 Typical Type of Cavities

1.3 研究の目的

本研究では近年発達してきた微細加工技術を応用し，加熱面上にサイズ，形状を変えた数種の人工的なキャビティーを加工する．その面をレーザーを用い加熱し液体を沸騰させ，キャビティー付近の加熱面温度を測定，また発泡の様子を記録し，キャビティーの形状，サイズによる発泡核としての特性を調べる．また解析には非線形工学を取り入れ，沸騰の複雑な性質の大きな一因であると思われる発泡核の形状によるふるまいの相違を明らかにする．

第二章

実験概要

2.1 実験装置

2.1.1 実験装置概要

実験は沸騰容器内に人工キャビティーを加工した加熱面を配置し、行った。単一キャビティーからの発泡を実現するためには従来よく使われている通電での一様加熱では実現が難しい。そこで Nd:YAG レーザーによる局所加熱法を用いることとした。レーザーの出力はフォトダイオードを用いたディテクタにより実験中常時モニターされている。また液温は補助ヒーターにより飽和状態に保たれている。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下部の温度測定、また高速ビデオカメラにより発生気泡の挙動が記録された。実験装置の全体図、外観を Fig.2.1, Fig.2.2 に示す。

2.1.2 沸騰容器

キャビティーを加工した加熱面はアダプタに接着剤で接着させたあと、沸騰容器の中に設置される。沸騰容器には液温を飽和温度に保つための補助ヒーター、また蒸気を液体に戻すための凝縮器がついている。実験中補助ヒーターの発泡が加熱面からの発泡に影響するのを防ぐため、加熱面の周りはアクリル製のフェンスで囲まれている。Fig.2.3 に沸騰容器、Fig.2.4 に加熱面つきのアダプタの外観を示す。

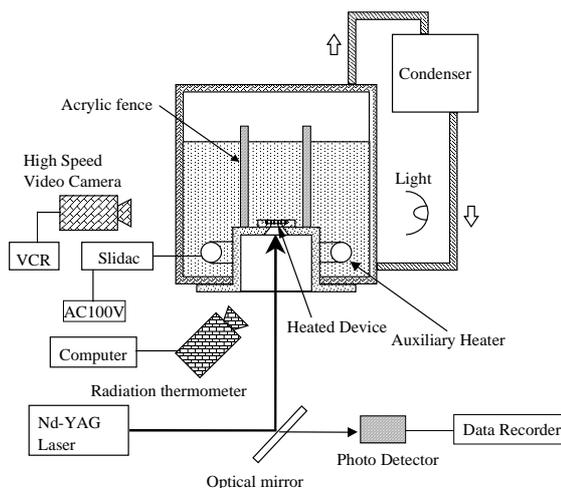


Fig.2.1 Schematic of Experimental Setup



Fig.2.2 Experimental Setup



Fig.2.3 Boiling Cell

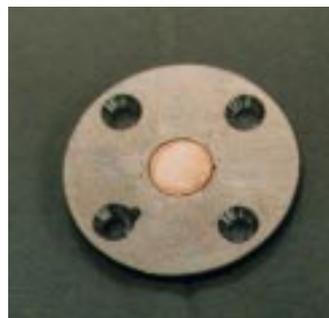


Fig.2.4 Adapter for Heated Surface

2.1.3 光学系

レーザー光は Nd:YAG レーザー発振装置本体から光ファイバーを用い、沸騰容器本体まで導いている。レーザー光はファイバ出口で広がり角を持つため、凸レンズを用い、加熱面裏面で集光している。レーザーの出力は手元の制御盤で可変することができ、平行平面基盤での表面反射がフォトディテクターを用いてモニターされている。実験後にパワーメータ(Fig.2.7)を用いてフォトディテクターの出力とレーザーパワーの出力の相関を調べる必要がある。光学系の外観を Fig.2.5, 概要図を Fig.2.6, また以下に個々の装置の仕様, 外観を記す。



Fig.2.5 Optical Setup

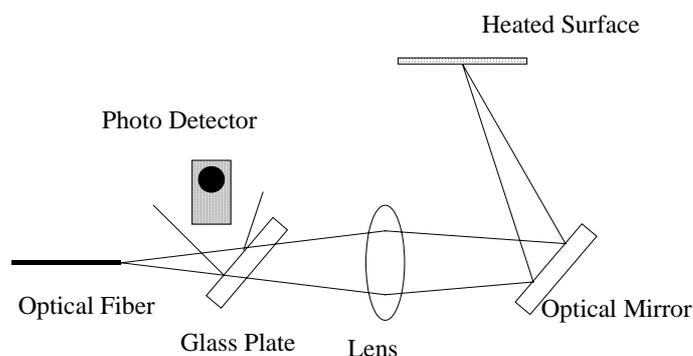


Fig.2.6 Schematic of Optical Setup



Fig.2.7 Power Meter

YAG レーザー発振装置(Fig.2.8, Fig.2.9)

富士写真工機製, FYL-M1. もともとは医学用に開発された YAG レーザーで 100W までの大出力を手元のリモートコントローラで可変で出すことができる。ただし, レーザーの出力とリモートコントローラのポテンショメータの値との関連は常に一定ではなく, 同時計測を必要とする。

- 出力 ~ 100W
- 発振波長 1.06 μ m
- 照射時間設定範囲
 0.1 ~ 9.9sec (連続発振可)



Fig.2.8 YAG Laser



Fig.2.9 Laser Controller

フォトディテクター

フォトディテクターは自作した。

Fig.2.10 に回路図を示す。仕様は以下の通りである。フォトダイオードには浜松ホトニクス製の Si フォトダイオード，S13365BK を使用した。OPamp には汎用の LM324 を使用している。出力は 0~5V であり，データレコーダによって 1kHz のサンプリングレートで記録された。データレコーダは放射温度計からの同期信号を受けて記録を開始する。

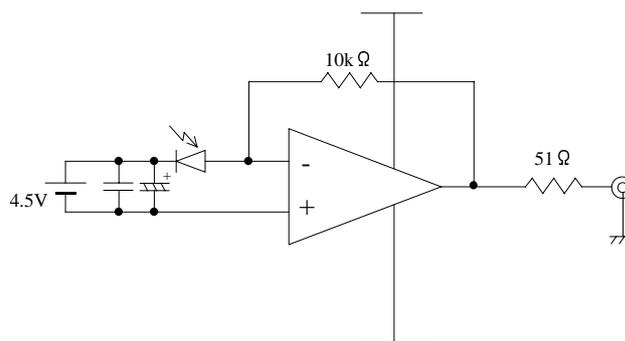


Fig.2.10 Circuit Diagram of Photo Detector

データレコーダは放射温度計からの同期信号を受けて記録を開始する。

受光感度	0.4A/W
アンプゲイン	10000V/A

2.1.4 計測系

本実験では加熱面裏側の温度変化を放射温度計を用い測定している。また同時に高速ビデオカメラを用いて気泡の離脱挙動を沸騰容器側面の窓から記録している。

放射温度計(Fig2.11)

NEC 三栄製，TH3102MR。スターリングクーラー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。2次元のスキャンも可能であるが，スキャン速度の問題で1次元のラインスキャンとして利用している。改造が加えてあり，計測開始と同時に同期信号が TTL レベル不論理で出力できる。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.2.11 Radiation Thermometer

測定波長	8~13 μm
最高スキャン速度 (ライン時)	3.00ms/line
最小検知温度差	0.08
空間解像度	0.6mm

高速ビデオカメラ(Fig.2.12)

Photoron 製，HVC-11B。撮影速度を上げると画面が自動的に狭くなり，つねに一定時間の撮影を行うようになっている。本実験では 1297frame/sec として加熱面全体および離脱直後の気泡の挙動が観察できるようにした。放射温度計からの同期信号を受け，記録を開始する。映像情報は NTSC 信号として出力



Fig.2.12 High Speed Video Camera

され、S-VHS ビデオテープに記録された。また、1コマ当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 Photoron 製、メタルハライドライト (Fig.2.13), HVC-SL を使用した。以下に高速ビデオカメラの仕様を示す。

最高撮影速度 2066frame/sec (白黒撮影)
記録時間 1.59sec



Fig.2.13 Light Up for HVC

2.1.5 加熱面

加熱面にはニラコ製の厚さ 0.1mm の銅板を採用した。この銅板をワイヤカットを用い直径 10mm の円盤状に切り抜き、円盤の中央にキャビティを加工した。加熱面の模式図を Fig.2.14 に示す。なお、円筒状のキャビティを加工するときには超微細放電加工機を、円錐状のものを加工するときには微小硬さ試験機を用いた。また加熱面の裏面、つまり、YAG レーザー光が照射される側は黒染剤で処理し、YAG レーザー光を吸収しやすいようにしている。各々の仕様、また簡単にそれぞれのキャビティの加工法を以下に記す。また実験に使用した加熱面上のキャビティの寸法一

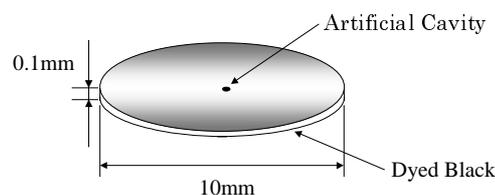


Fig.2.14 Schematic of Heated Surface

Table 2.1 Size variation of artificial cavities

Cavity Type	Cavity Size	Cavity Depth
Conical	50 μ m	30 μ m
Conical	100 μ m	50 μ m
Cylindrical	50 μ m	30 μ m
Cylindrical	100 μ m	50 μ m
Reentrant	100 μ m	50 μ m

覧を Table2.1 に記す。またなにも加工していない場合のこの加熱面の平均粗さ Ra は圧延方向と平行な方向が 0.198 μ m, 圧延方向と垂直な方向が 0.231 μ m であった。

超微細放電加工機

松下電器産業製, MG-ED72W。放電極自体を放電加工により製作, その極を使い被加工物を加工する。プログラミングにより, 自動加工が可能である。円筒状のキャビティを加工するときには使用した。またリエントラント型を加工するときにも使用している。放電極の径は 10 μ m 程度から加工可能だが, 極の消耗が激しくなり正確な深さを決めるのが難しくなる。また加工精度を上げるのは難しく, 加工のたびに SEM で被加工物を見ながらの試行錯誤の作業になる。産業機械工学科畑村研究室のものを借用。

微小硬さ試験機

アカシ製。東京都立産業技術研究所のものを借用。25g 重から 1kg 重まで加重を変えて硬さ試験を行うことができる。また押しつけ時間は 0 から 30 秒まで可変。円錐型, リエントラント型キャビティを加工するときには使用した。押しつけ加工をしたその場で付属の

光学顕微鏡を用い、径を確認することが可能である。押しつけに使ったダイヤモンドバイトは小坂研究所製で先端角 90 度、先端 R0.1 μm の特注品である。こちらは機械工学科加藤研究室から借用した。

キャビティー加工法

● 円筒型キャビティー

超微細放電加工機を用い、希望のキャビティー径より 2,3 μm 小さい径の放電極を加工する。加熱面の中心に位置決めし、作成した放電極で加工する。しかしながら、厳密に寸法決めをするためには加工後に SEM で照合し、試行錯誤で出してゆく必要がある。加工深さは加工前、加工後の放電極の顕微鏡写真から判断する。加工径が 50 μm 以上であれば放電極の消耗は 1 から 3 μm 程度であり、ほとんど影響はないものと思われる。加工の模式図を Fig.2.15 に、円筒型キャビティーの SEM 写真を Fig.2.16 に示す。

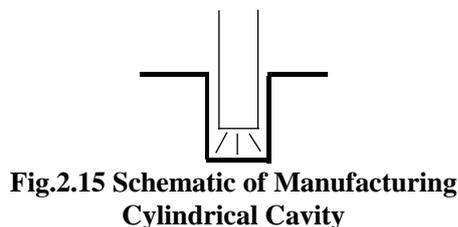


Fig.2.15 Schematic of Manufacturing Cylindrical Cavity

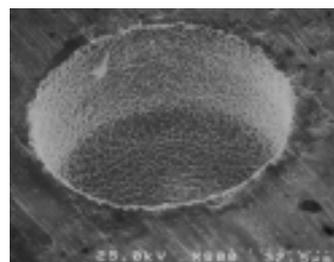


Fig.2.16 Cylindrical Cavity

● 円錐型キャビティー

マイクロ硬さ試験機を用い、まず加重、押しつけ時間を適当に決め、試験的に加工してみる。この 2 つのパラメータを調整し、希望の径にあったものを探す。その後、加熱面の中心に位置決めし、求めたパラメータを使って加工する。加工の模式図を Fig.2.17 に、円錐型キャビティーの SEM 写真を Fig.2.18 に示す。

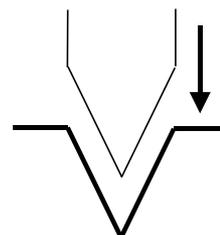


Fig.2.17 Schematic of Manufacturing Conical Cavity

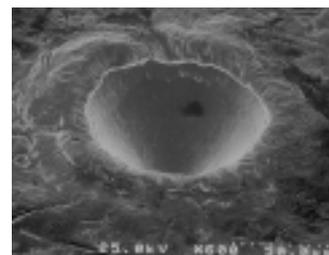


Fig.2.18 Conical Cavity

● リエントラント型キャビティー

マイクロ硬さ試験機を用い、まず前述のように円錐型キャビティーを加工する。次に被加工物を傾け、超微細放電加工機を用いて円筒状の穴を加工済みの円錐の底に加工する。その後被加工物を回転させ、再び放電加工で円筒状の穴を円錐の底に加工する。これを数回繰り返すことによってリ

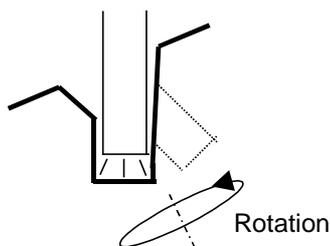


Fig.2.19 Schematic of Manufacturing Reentrant Cavity

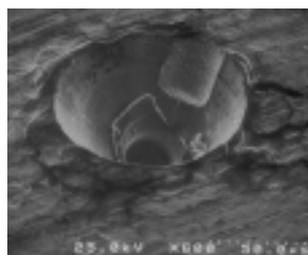


Fig.2.20 Reentrant Cavity

エントランス型の構造を実現する．Fig.2.19 に加工の模式図を，Fig.2.20 にリエントランス型キャビティの SEM 写真を示す．

黒染剤

マイテック 1793，オーデック製．加熱面の裏面を黒染するのに使用した．常温で塗布により銅表面を黒染できる．

2.2 実験方法

- 1.加熱面，アクリルフェンスを沸騰容器内に設置し，蒸留水を水位がアクリルフェンスの高さより上になるように入れる．
- 2.補助ヒーターを用い，蒸留水を充分脱気する．
- 3.蒸留水を排出し，水位がアクリルフェンスより 2～3cm 下にくるようにする．
- 4.YAG レーザー，放射温度計の電源を入れ，暖気運転させる．
- 5.パワーメータを用い，レーザーパワーとフォトディテクターの出力の相関を調べる．
- 6.光学系を沸騰容器下に設置し，レーザー照射位置をミラーを用いて調整する．
- 7.放射温度計を設置する．
- 8.高速ビデオカメラを設置する．
- 9.YAG レーザーのパワーを調整し，加熱面から発泡させる．
- 10.同期信号を放射温度計から各計測器に出し，実験を行う．

第三章

気泡生成の理論

3.1 気泡生成理論 円錐型キャビティー

3.1.1 初期気液界面がキャビティー出口にある場合

キャビティーの出口に気液界面が存在するときの発泡条件の解析を述べる．キャビティーとしては理想的な円錐型を仮定，また気泡の表面形状は曲率半径 r の理想的な球状，液体と固体との接触角 $<90^\circ$ を仮定する(Fig.3.1)．

表面張力と圧力の関係から力学的に平衡になるには，気相の圧力を p_v ，液相の圧力を p_l ，液体の表面張力を σ とすると Young-Laplace の式より，

$$p_v - p_l = \frac{2\sigma}{r} \quad (1)$$

成り立ってなくてはならない．また、二相平衡における圧力と温度の関係から Clausius-Clapeyron の式より，

$$\frac{h_{fg}}{v_{fg} T_{sat}} = \frac{dp}{dT} \quad (2)$$

ここで h_{fg} は流体の潜熱， v_{fg} は流体の比体積差， T_{sat} は流体の飽和温度である． h_{fg} , v_{fg} , T_{sat} を一定として(2)式を積分すると，

$$p_v - p_l = \frac{h_{fg}}{v_{fg}} (T_v - T_{sat}) \quad (3)$$

となる． T_v は気相の温度である．(1)式と合わせて，

$$T_v - T_{sat} = \frac{2T_{sat} v_{fg} \sigma}{h_{fg} r} \quad (4)$$

となる． r について解くと，

$$r = \frac{2T_{sat} v_{fg} \sigma}{h_{fg} (T_v - T_{sat})} \quad (5)$$

r と T_v 以外は物性値であり，一定とみなせるので，上式からわかることは気相温度が上昇するにつれ，気泡の曲率半径が小さくならないと力学的な安定が保てないということである．

ここでキャビティー出口での気液界面の挙動を考えてみる．Fig.3.2 のように界面が比較的平たい状態（1の状態），半球状（2の状態），球に近い状態（3の状態）と成長していったとしよう．各状態での界面の曲率半径を見てみると2のときに最小（ r_2 ）になっていることが分かる．つまり，界面が加熱面表面に半球を形成したとき，その曲率半径は最も小さくなる．気泡の成長とともに気相の温度は上昇すると仮定すると，1の状態から2の状

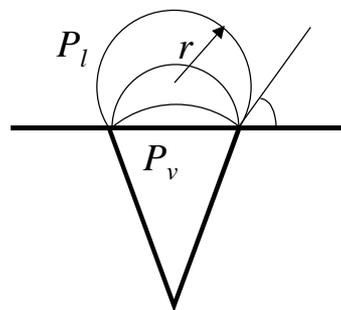


Fig.3.1 Conical Cavity

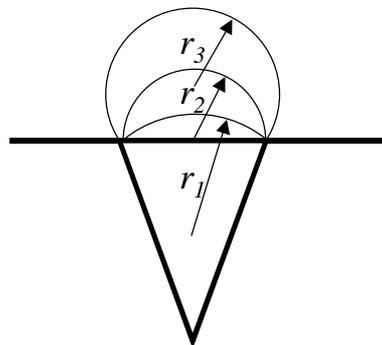


Fig.3.2 Change in Radius of Curvature

態までは気相温度とともに界面の曲率半径は減少するため、(5)式の力学的安定は保たれる。しかし、2の状態を過ぎると、気相温度の上昇とともに気液界面の曲率半径も大きくなる。よって(5)式は成立しなくなり、気泡は伝熱量の減少による相変化量の制限を受けるまで爆発的に成長することになる。

以上から言えることは、気相の温度が2の状態に対応する過熱度を越えたときにそのキャビティーから発泡が始まる、ということである。(4)式からキャビティーの半径を r_{cav} とすると、

$$T_v = \frac{2T_{sat} \nu_{fg} \sigma}{h_{fg} r_{cav}} + T_{sat} \quad (6)$$

が発泡開始温度となる。このモデルにより、キャビティーの形状によっては安定した発泡を維持するための加熱面温度を推定することができる。

3.1.2 初期気液界面がキャビティーの中にある場合

熱流束が低い段階では気泡が離脱した後に気液界面がキャビティーの出口に存在するとは考えにくい。むしろ、液体がキャビティーに侵入し (Fig.3.3)、ある程度界面が後退している (Fig.3.4) と考えるのが自然であると思われる。液体と固体壁面の接触角が一定であると考えると、気液界面がキャビティー内部に入れば入るほど、気液界面の曲率半径が小さくなる。(4)式から考えると、気液界面がキャビティーの出口にあるときよりも平衡状態を維持するために高い気相温度を必要とする。しかし、相変化などで少しでも気液界面が外側に動けば、より低い気相温度で気液界面を維持できるため更に相変化が起き、気液界面はキャビティー出口まで一気に進むことになる。

この場合、発泡の支配温度は気液界面がどのくらいキャビティーの中に後退しているかに依存する。接触角とキャビティー底角によりどのくらいの曲率半径を持つ界面が残るのか、という計算を行った報告もある^[8]。しかしながら、この初期気液界面曲率半径は流体挙動に大きく依存するところがあると考えられ、沸騰における複雑な発泡挙動の一因となっている可能性がある。

もしも気相温度が(4)式で与えられる温度に達していない場合、気液界面は安定に存在できず、さらにキャビティーの奥深くに入り込んでしまうことになる。これにより円錐型キャビティーからの発泡は止まってしまう、と考えられている。このため、円錐型キャビティーは一般的に発泡核としては不安定で沸騰において支配的な発泡核として作用するのはリエントラント型である、という報告もある^[9]。

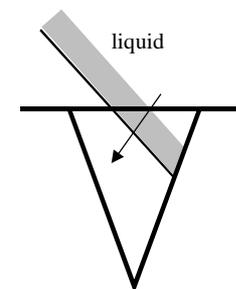


Fig.3.3 Liquid Immersing

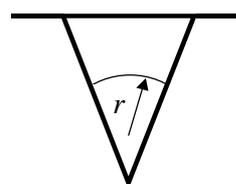


Fig.3.4 Vapor Entrapment

3.2 気泡生成理論 円筒型キャビティー

円筒型キャビティーの場合，気液界面がキャビティーの中に後退しても理想的には界面曲率半径(r_0)に変化はない．よって(4)式から求まる平衡の気相温度は一定となる．つまり，常にキャビティー入り口の径(r_{cav})によって支配される一定の発泡支配温度を持っていることになる (Fig.3.5)．離脱挙動に流体の影響，気泡力学の影響がなければ，つまり熱力学的に考えるだけなら，常に一定周期の発泡挙動を示すことが予想される．

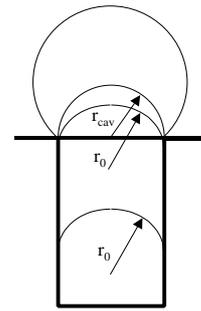


Fig.3.5 Cylindrical Cavity

3.3 気泡生成理論 リエントラント型キャビティー

リエントラント型キャビティーの場合，気液界面がキャビティーの内側に凸になることができる (Fig.3.6)．よって飽和温度以下の温度でも気泡核を維持することができると考えられている．これは円錐型は円筒型キャビティーでは構造上不可能である．また，このタイプのキャビティーは気液界面の位置により熱力学的に2種類の発泡支配温度を持つことができる．気液界面がキャビティー出口においても，またリエントラント型に特徴的であるくびれの部分においても安定的に存在できるため，それぞれの径に対応した発泡温度が(4)式より導出できる．また，一般的に内側の径 (r_{neck}) の方が外側の径 (r_{cav}) よりも小さいため，より高い発泡温度を持つことになる．これにより，キャビティーの塗れ性に変化がなくても，沸騰現象によく見られがちな非周期性，間欠性が定性的に説明できる^[3]．

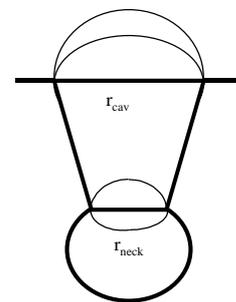


Fig.3.6 Reentrant Cavity

Fig.3.7にリエントラント型キャビティーの発泡挙動の模式図を示す．上段のグラフは発泡周期が低いときのキャビティー周辺の温度変化である．この場合，初期気液界面は常にキャビティー内のくびれに位置する，と考えられる．発泡を支配している温度は T_A であり，Fig.3.6の r_{neck} によって決まる温度である．中段は発泡周期が高い場合である．このとき，初期気液界面はつねにキャビティー出口に位置する．したがってくびれの部分に界面が位置する場合よりも低い温度，キャビティー出口径 r_{cav} から決まる支配温度 T_M で発泡することができる．下段は間欠的な発泡を示す場合である．はじめ，発泡の初期気液界面はキャビティー出口に位置し，短い周期で連続的な発泡を見せるが，あるところで初期気液界面がくびれの部分に位置し，長い周期での発泡が混じる．このモデルではその移り変わりは発泡時にどのくら

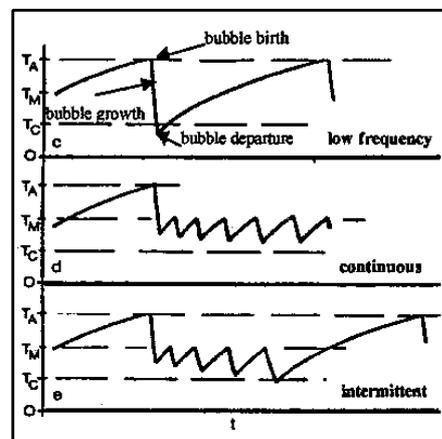


Fig.3.7 Boiling Characteristic of Reentrant Cavity

い温度が下がるかによっている，としている． T_c はキャビティー出口が気液界面を安定的に保つことができる最低の温度である．

第四章

解析方法

4.1 放射温度計から得られたデータの処理

4.1.1 温度変化の時系列

放射温度計から得られるのは、加熱面温度裏面の1次元温度分布（ラインスキャン）である。

Fig.4.1 にその一例を示す。横軸は空間座標であり、縦軸は経過時間を表している。放射温度計の最高分解能は仕様より、600 μm である。照射レーザー径が 2mm 程度であり、キャビティの位置決め精度は ±200 μm 程度である。これらを考え合わせるとレーザーの位置決めを人間の目で行っていることを差し引いても、温度の極大のラインが照射レーザーの中心、また人工キャビティの直下であると考えてよいと思われる。

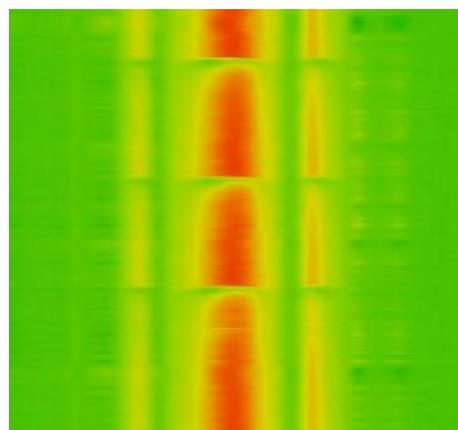


Fig.4.1 Temperature Patterns from Radiation thermometer

そこで平均温度が極大になる点を探し、大事をとってその両側の点との加重平均を取って、キャビティ直下の温度とした。すなわち、

$$t^i = (2 * t_n^i + t_{n-1}^i + t_{n+1}^i) / 4 \quad (1)$$

である。しかしながらこれはあくまで加熱面裏面の温度であり、表面の温度とは異なるものである。

4.1.2 レーザー入力の時系列

本実験において入力レーザーパワーはフォトディテクタにより計測され、データレコーダによって 1kHz でサンプリングされ、時系列データとして扱われる。しかしながら、フォトディテクタは入力レーザーに対し鋭敏な反応を示すため、レーザーの直接光、反射光をそのまま入れるわけにゆかず、自然、レーザーパワーとの相関関係の定量化が難しくなる。そこで本実験では実験後、同時にパワーメータとフォトディテクタでレーザーのパワーを測定、平均値を利用して相関関係を出す。

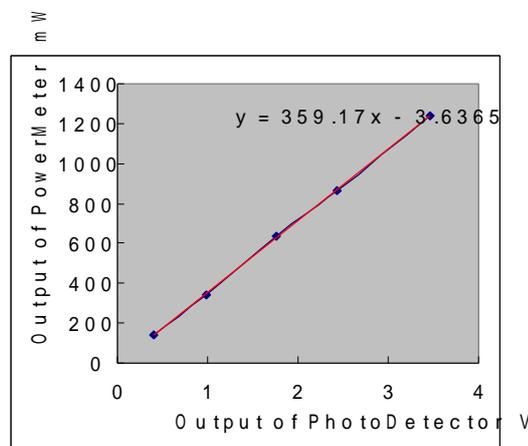


Fig.4.2 Correlation Map

実験の結果 (Fig.4.2), ほぼ線形の関係が得られていることが分かる。この得られた関係を利用し、本実験で得られたフォトディテクタの出力をレーザーパワーに変換する。また、高速ビデオカメラ撮影のため光源にメタルハライドランプを使用しており、その影響を差し引いた値を採用している。

ここで得られるのはあくまで加熱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%パワーを吸収するとみなし、熱入力として扱っている。

4.1.3 加熱面温度の処理 1次元逆問題

本実験では加熱面裏面の温度を放射温度計を用い測定しており，1次元の時系列データとして扱える．また，同時にレーザー出力をモニターしており，時系列データとして得られるのでそれを入力熱流束とみなし，加熱面表面の温度，熱流束を1次元逆計算にて算出することができる．扱う系を Fig.4.3 に示す．本来であれば水平方向の熱移動も扱うべきであるが，放射温度計のデータがもともと空間的に1次元であることと，また簡単のため，本研究では考慮しない．

加熱面に垂直な方向を x とし，温度を T ，加熱面の温度伝導率を k とすると，支配方程式は，

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

となる．これを加熱面裏の点 B，表の点 S で時間的，空間的に離散化することを考える．銅板内では温度分布はリニアであると仮定し，時刻のインデックスを i ，時間刻みを Δt とすると，点 B では，

$$rc \frac{dT_B^{i+1} - T_B^i}{\Delta t} = q_{laser}^i - k \frac{T_B^i - T_S^i}{d} \quad (2)$$

また，点 S では，

$$rc \frac{dT_S^{i+1} - T_S^i}{\Delta t} = k \frac{T_B^i - T_S^i}{d} - q_S^i \quad (3)$$

ただし， ρ は銅の密度， c は銅の比熱， k は銅の熱伝導率である．これらを未知数である T_S^i ， q_S^i で整理すると，

$$T_S^i = T_B^i + \frac{rcd}{2k} \frac{T_B^{i+1} - T_B^i}{\Delta t} - \frac{d}{k} q_{laser}^i \quad (4)$$

$$q_S^i = k \frac{T_B^i - T_S^i}{d} - rc \frac{dT_S^{i+1} - T_S^i}{\Delta t} \quad (5)$$

となり，陽的に加熱面表面温度および熱流束が求まる．逆問題では不安定性を避けるために無次元時間刻みが満たすべき条件があり，

$$\Delta t = \frac{a\Delta t}{d^2} \geq 0.3 \quad (6)$$

が推奨されている¹⁾．加熱面厚さは 0.1mm と決まっているので，銅の物性値を用い Δt に対する条件を出すと，

$$\Delta t \geq 3 * 10^{-5} s \quad (7)$$

となり，放射温度計のサンプリング時間 3ms を考えると十分に長いことが分かる．

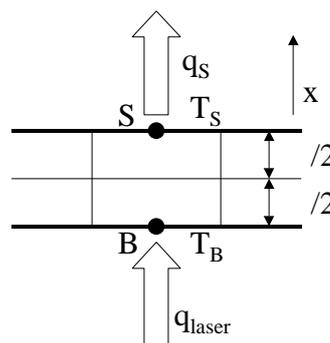


Fig.4.3 IHCP Schematic

4.2 状態空間の再構成

4.2.1 状態空間概論

現象の動的振る舞いを記述する方法の一つに、状態空間内に状態点を描く方法がある。振動現象など力学系の解析によく使われる手法である。例えば単振動をしている振り子 (Fig.4.4) を考える。横軸に位置、縦軸に速度を取った位相平面上に振り子の状態をプロットしていくと、円として記述できる。このように状態空間上での記述は現象の時系列変化の特徴を抜き出して表現することができるといえる。この考え方は n 次元状態空間でも同様に扱うことができる。前出の振り子の例では現象を記述するのに必要な変数は2つ、すなわち位置と速度であった。ある現象が n 個の変数で記述されているとすると、その n 個の変数を使い、 n 次元状態空間にプロットしてゆけば現象の状態変化を記述する軌道 (アトラクタ) を表すことができる。このように構成された軌道を解析することにより現象の動的振る舞いについて多くの情報を得ることができる。沸騰現象についてもこの議論はあてはまると考える。(Fig.4.5)

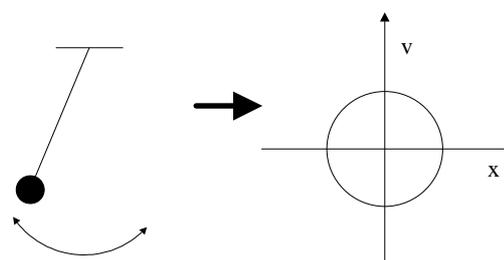


Fig.4.4 Pendulum

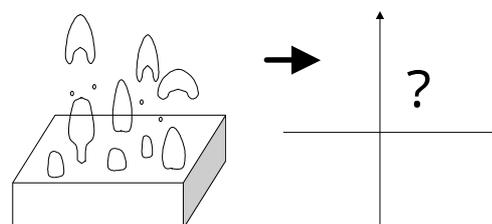


Fig.4.5 Boiling

ただし、現実的には実験において多自由度の系を完全に記述するに足る数の独立変数を測定することはほとんど不可能である。実際には1変数の計測しか可能でない場合も多い。そこで実験のデータの非線形解析によく用いられるのが“埋め込み”である。

4.2.2 埋め込み空間

一つの変数の時系列データ y から力学系の状態空間を再構成するときに用いられるのが時間遅れ座標系への変換である。具体的には m 次元の状態空間を再構成する場合には時間遅れ τ を用いて、

$$v_i = (y(t), y(t+\tau), y(t+2\tau), \dots, y(t+(m-1)\tau))$$

のような m 次元ベクトルを作成する。このとき Takens^[10]の埋め込み定理より、もとのアトラクタの次元を n とすると、 $m \geq 2n+1$ であればアトラクタの接空間と構造が保存される。このとき、もとのアトラクタの埋め込みを与える、という。この手法により実験データなどが単一変数しか与えられない場合でも多次元状態空間が再構成できる。遅れ時間 τ の決め方には諸説あり、自己相関関数が初めて0になるところ、相互情報量のはじめの極小値、などがある¹¹⁾。ただし総合すると、基本的に状態空間の構造は保存されるので埋め込んでみても見やすいもので埋め込むのがよいとも考えられる。

本実験では加熱面表面の温度変動が前出の逆計算の結果、1次元の時系列データとして得られている。これを用いて状態空間を再構成することを考えている。

4.2.3 リターンマップ

前出の埋め込みの中で特に 2 次元空間に埋め込んだものをその特徴からリターンマップという (Fig.4.6)。リターンマップは通常、時刻 t での計測値と $t+$ との計測値の関係を表し、ある意味系の持つ関数系、または写像を浮き彫りにする。これを見ることにより、系が簡単な周期系であるのか、また 2 値関数系であるのかなどの情報を引き出すことができる。

また現象が時系列で観測できるのではなく、間欠的、離散的に観測できる場合は現象が発生した時間の間隔を変数にしてリターンマップを構成することも可能である。

例えば気泡の離脱、液滴の落下などの現象の時間間隔の差を考え、 $t_{n+1}-t_n$ を x 軸に、 $t_{n+2}-t_{n+1}$ を y 軸にとってプロットする方法などである。このような使い方の場合、変数に取られるのは時間であることが多い。本実験でも高速ビデオカメラから得られた情報をもとに気泡の離脱間隔をリターンマップとして表現することを試みる。

4.3 高速ビデオカメラから得られる情報の処理

4.3.1 撮影速度

本実験では高速ビデオカメラは 1297frame/sec のモードで使った。最高撮影速度は 2066frame/sec なのであるが、あまりに画面が狭くなりすぎて見にくいこと、また加熱面全体が視野に入らないことなどから広めに見て、撮影速度はある程度犠牲にすることにした。沸騰における発泡現象の時間オーダーが数 10msec ~ 数 100msec であることを考えると、このくらいの撮影速度で十分と思われる。また解析用ではないが 648frame/sec での撮影も行っている。(Fig.4.7)

4.3.2 処理

高速ビデオカメラで撮影された映像からは様々な情報を抽出することができる。本研究で扱った情報は各気泡の発生時刻と離脱時刻である。気泡の発生時刻と離脱時刻を調べることにより、気泡の挙動と加熱面温度変化の関係を知らることができる。また、この各気泡の離脱時刻から前出のリターンマップを構成することができ、現象の複雑さをある程度表現することができる。ただし今回の実験では高速ビデオカメラの録画開始と放射温度計の記録開始との同期が完全とは言えず、問題を残している。

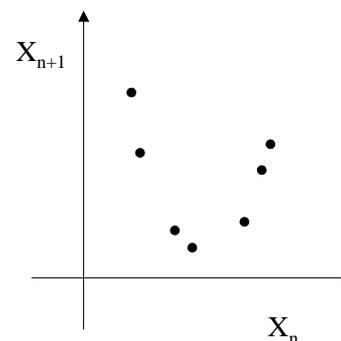


Fig.4.6 Return Map



Fig.4.7 Image from HVC

第五章

実験結果および考察

5.1 円錐型キャビティー

5.1.1 円錐型キャビティーの発泡傾向

本実験では円錐型キャビティーは非常に強い間欠的な発泡挙動を示した。休止期間がほかの2種のキャビティーに比べ非常に長く、数10msecから数100msecほどあるのが特徴である。またそのせいか、温度変動も最も顕著に現れている。Fig.5.1に円錐型キャビティーの発泡の代表的な挙動を示す高速ビデオカメラの映像を示す。熱入力は2.5W程度である。この映像は数100msecの休止期間後の発泡挙動を撮影したものである。休止期間直後

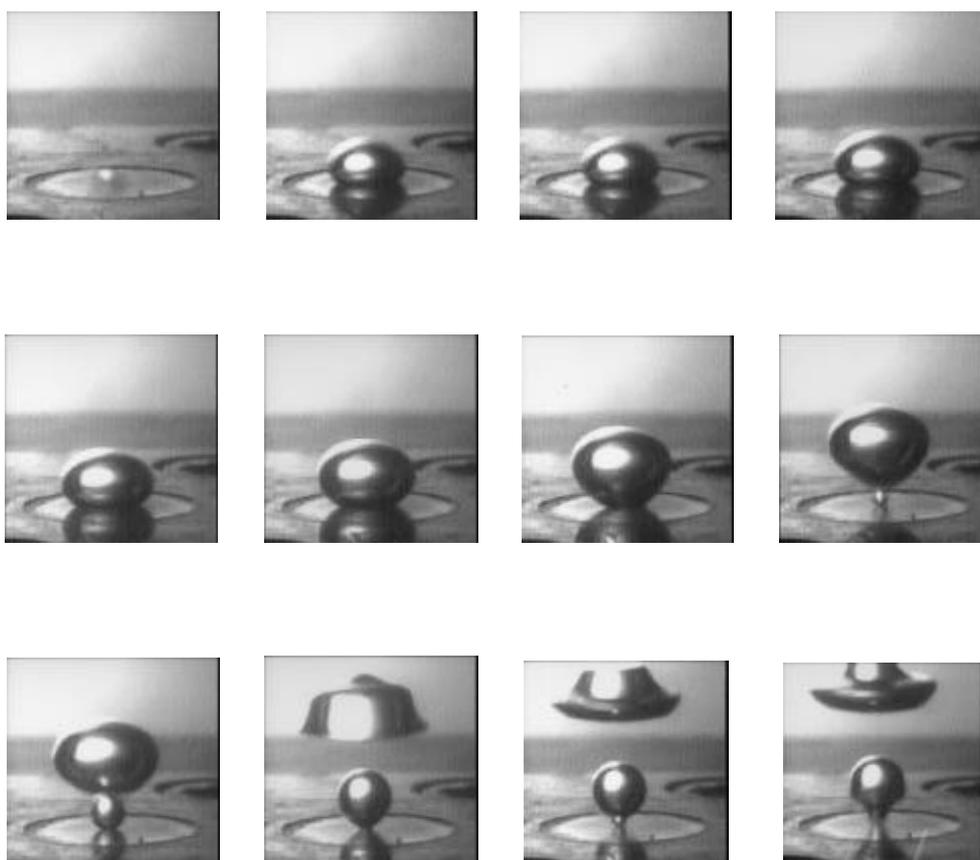


Fig.5.1 Bubbling from Conical Cavity

に発生した気泡は急激に成長する。そのときに等方的に成長するのではなく、横方向により速く成長するようである。これは加熱液層の温度分布に関連があるものと思われる。また、この横方向への成長とともに蒸気と加熱面と液体の3相の境界線も急激に外側に向けて移動しているようである。これはほかの2種のキャビティーからの発泡では見られないもので、温度変動の大きさに関係していると思われる。2個目の気泡は一つ目と比べるとはるかに小さく、また一つ目よりも等方的（より球形に近く）に成長している。気液固3相の境界線の移動もほとんど見られない。また、この気泡は次の気泡を吸い込むというような複雑な挙動を示している。この2個目のような形状の気泡が数個連続して発生したあ

と、急に発泡が途絶え、再び休止期間に入る。そして再び1つ目の気泡のような急激に成長する巨大な気泡が出現する。この繰り返しのようである。

5.1.2 直径 50 μm の円錐型キャビティー

円錐型キャビティーは微小硬さ試験機による押しつけによって加工された。実験に使用した加熱面上の直径 50 μm 円錐型キャビティーのSEM写真を Fig.5.2 ~ 5.4 に示す Fig.5.2 はキャビティーを真上から撮影したもの、Fig.5.3 はキャビティーを斜め 45 度から撮影したもの、Fig.5.4 はキャビティーの一部分（右下4分の1）を拡大したものである。Fig.5.2 からキャビティーの外径は 50 μm をねらったが、45 μm 程度になっていることが分かる。

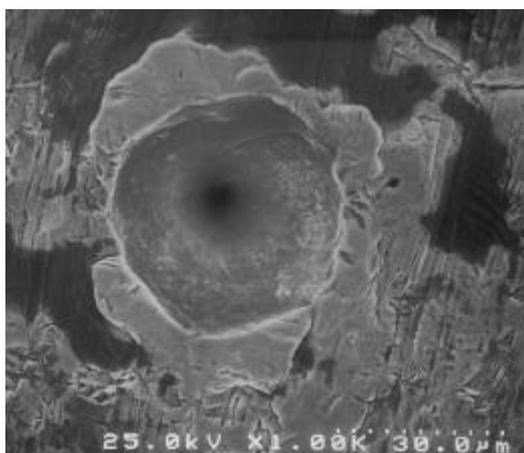


Fig.5.2 50 μm Conical Cavity (Top View)

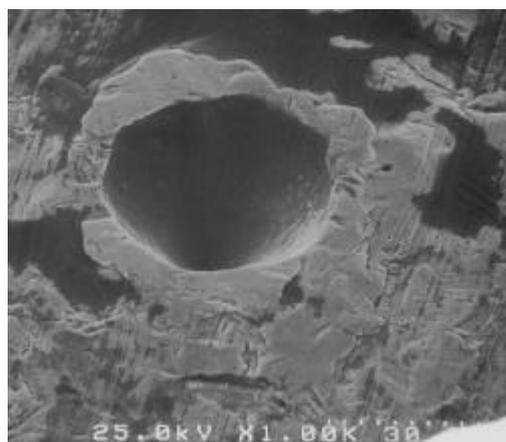


Fig.5.3 50 μm Conical Cavity (Side View)

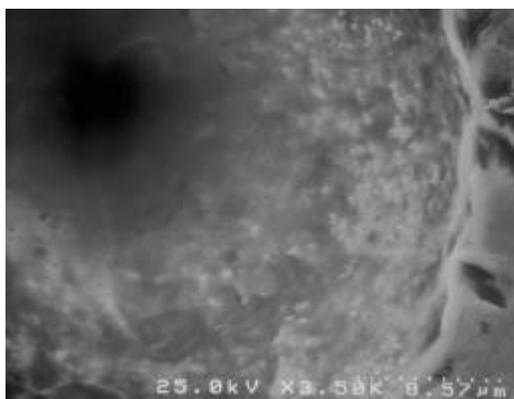
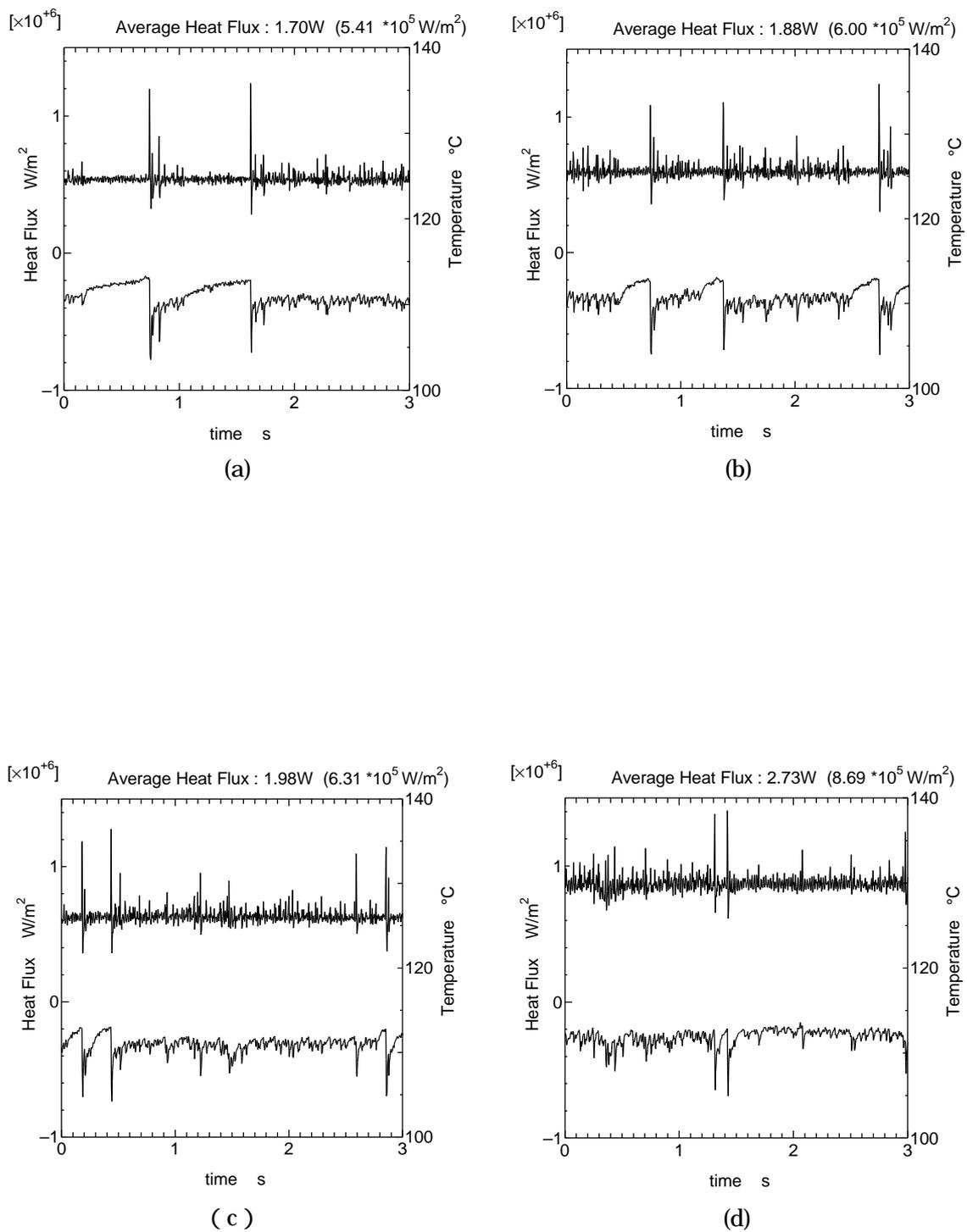


Fig.5.4 Magnification

Fig.5.5 に様々な熱流束で加熱したときのキャビティー近傍の温度変動、また熱流束変動を示す。これは放射温度計で加熱面裏面の温度変動を測定したものから逆計算することにより求めたものである。X 軸は測定開始からの時間経過を表している。上段のグラフは熱流束変動を示し左側の軸の値に対応する。下段のグラフは温度変動を示し、右側の軸の値に対応している。グラフ右上に平均入力熱量、また参考値としてそれを単位面積あたりの熱流束として換算したのも載せてある。



**Fig.5.5 Temperature Fluctuations
(50 μ m Conical)**

5.1.3 直径 100 μm の円錐型キャビティー

実験に使用した加熱面上の直径 100 μm 円錐型キャビティーの SEM 写真を Fig.5.6 ~ 5.8 に示す．Fig.5.6 はキャビティーを真上から撮影したもの，Fig.5.7 はキャビティーを斜め 45 度から撮影したもの，Fig.5.8 はキャビティーの一部分（右下 4 分の 1）を拡大したものである．加工時についてと思われるようなものが見える．Fig.5.6 からキャビティーの外径は 100 μm をねらったが，97 μm 程度になっていることが分かる．また塑性変形により，キャビティーの周りが少し盛り上がっている．

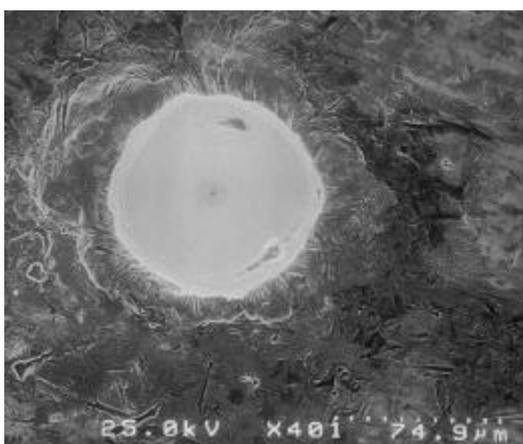


Fig.5.6 100 μm Conical Cavity (Top View)

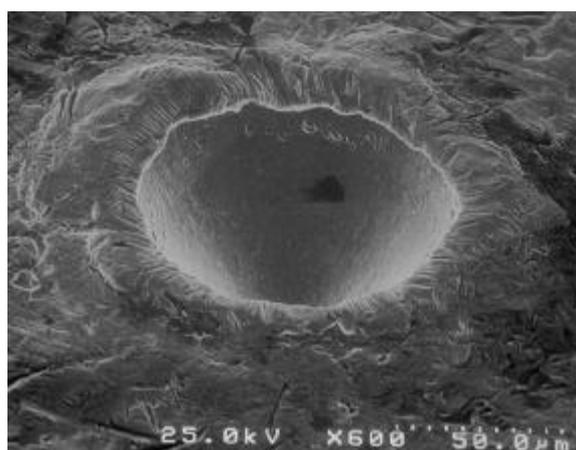


Fig.5.7 100 μm Conical Cavity (Side View)

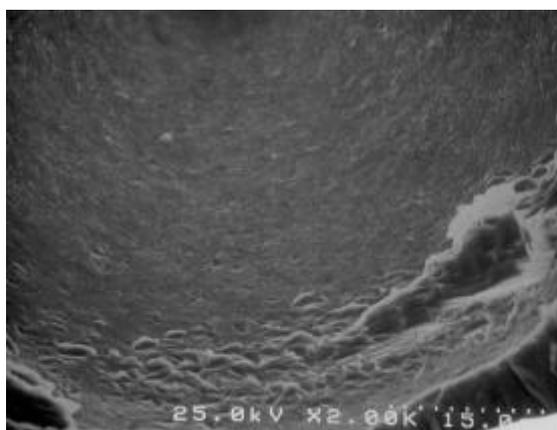


Fig.5.8 Magnification

Fig.5.9 に 50 μm の場合と同様，様々な熱流束で加熱したときのキャビティー近傍の温度変動，また熱流束変動を示す．データと軸の値の対応は 50 μm の場合と同様である．ただし，時間軸は温度変動が 50 μm の場合よりも激しいことから 2 秒までにしてある．

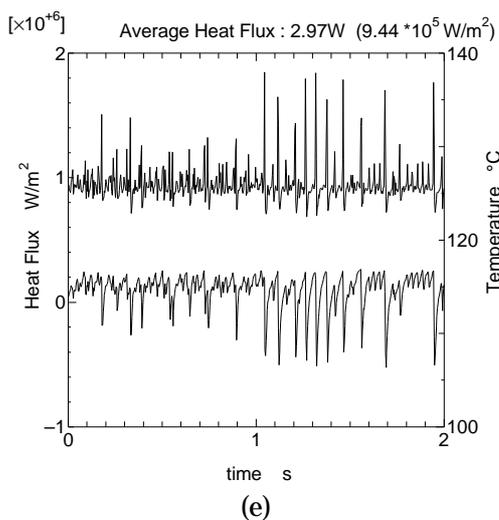
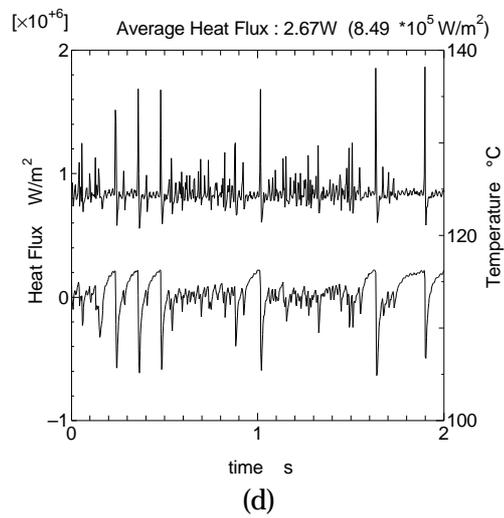
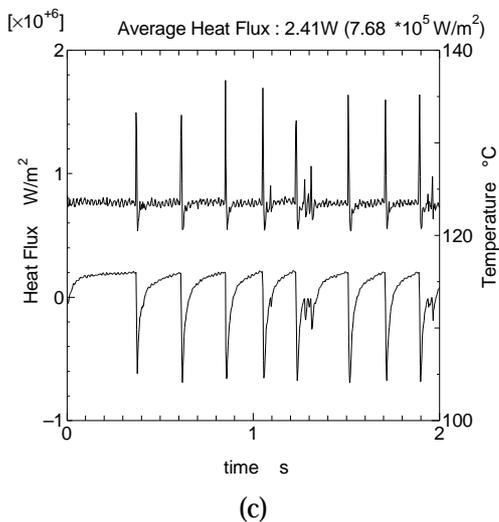
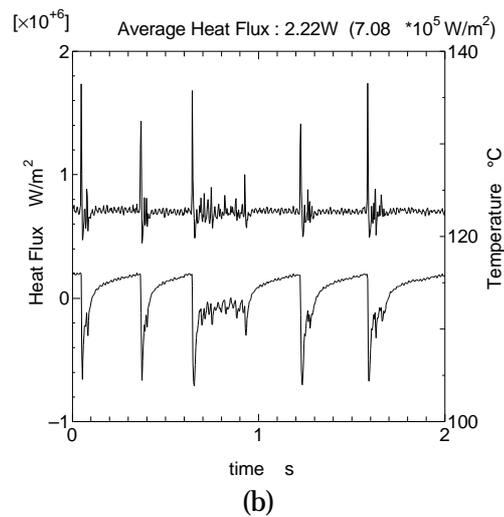
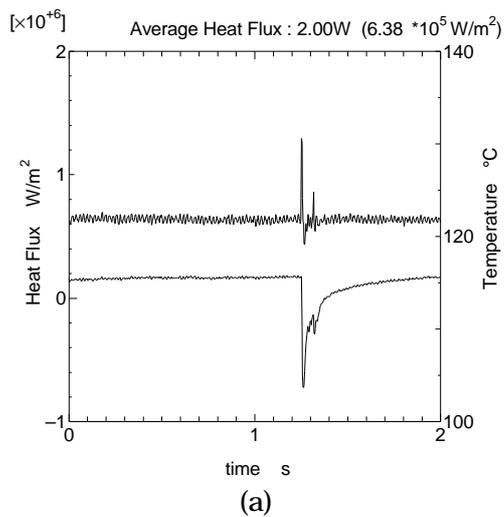
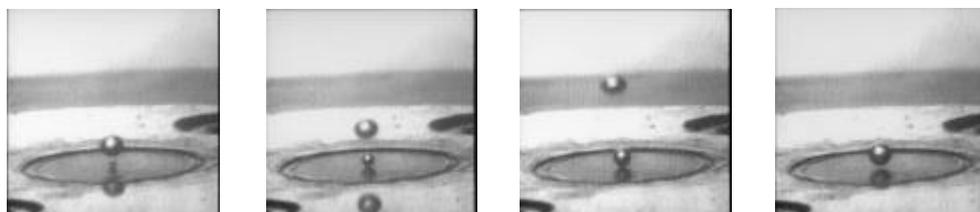


Fig.5.9 Temperature Fluctuations (100 μ m Conical)

5.2 円筒型キャビティー

5.2.1 円筒型キャビティーの発泡傾向

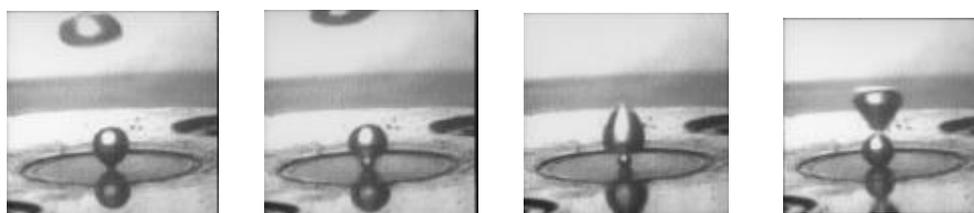
本実験では円筒型キャビティーは低熱流束域では非常に安定した周期的な発泡挙動を示した。休止期間がほとんどなく、常に気泡核が存在し成長しているものと思われる。円錐型キャビティーに比べ、10度以上低い過熱度で発泡が安定的に起きる。また、温度変動が非常に少なく、特に低熱流束域では発泡に関連した温度変動を認めることができない。これは休止期間がほとんどないため、気泡が爆発的に成長することができないためと考えられる。気液固の3相の境界線もほとんど動くことがない。熱流束を上げていくと、前の気泡との合体、引き込みが活発化してくる。Fig.5.10 に円筒型キャビティーの発泡の代表的な挙動を示す高速ビデオカメラの映像を示す。



(a)



(b)



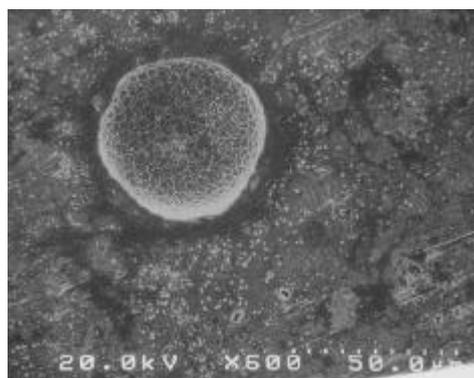
(c)

Fig.5.10 Bubbling from Cylindrical Cavity

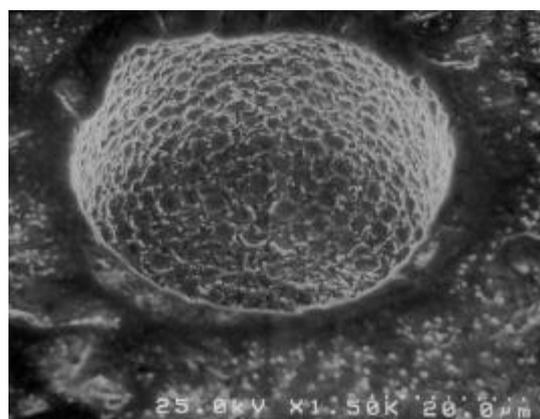
(a)は熱入力が非常に低いとき(0.1W程度), (b)は0.5W程度, (c)は1.5W程度である。(a)では非常にきれいな離脱, 発生が見られるのに対し, (b)では小さな引き込み現象が見られはじめ, (c)では引き込みに伴い, 気泡の大きな振動を見ることができる。

5.2.2 直径 50 μm の円筒型キャビティー

円筒型キャビティーは微細放電加工機による放電加工によって加工された。実験に使用した加熱面上の直径 50 μm , 深さ 30 μm の円錐型キャビティーの SEM 写真を Fig.5.11 ~ 5.13 に示す。Fig.5.11 はキャビティーを真上から撮影したもの, Fig.5.12 はキャビティーを斜め 45 度から撮影したもの, Fig.5.13 はキャビティーの一部分(キャビティーの底部)を拡大したものである。Fig.5.11 からキャビティーの外径はほぼ 50 μm となっていることが分かる。キャビティー内部の重なり合ったような傷は放電加工時の放電によってできたものである。それぞれの“傷”の大きさは Fig.5.13 より 5 μm 以下であることが分かる。これはキャビティーの大きさに比べ十分小さく, 発泡核として機能する温度が十分に違うため今回の実験の範囲内では発泡への影響は小さいと考えられる。放電で加工しているため, 円錐型の場合と比べ周囲の面への加工の影響はほとんどない。



**Fig.5.11 50 μm Cylindrical Cavity
(Top View)**



**Fig.5.12 50 μm Cylindrical Cavity
(Top View)**

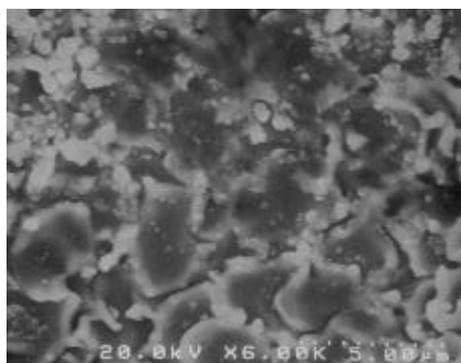


Fig.5.13 Magnification

Fig.5.14 に円錐型キャビティーの場合と同様，様々な熱流束で加熱したときのキャビティー近傍の温度変動，また熱流束変動を示す．データと軸の値の対応は円錐型の場合と同様であり，上段が熱流束変動を表し，左側の軸がその値に対応している．下段が温度変動を表し，右側の軸がその値に対応している．低熱流束域で熱流束が規則的に変動しているが，これは発泡に関連したものではなく，YAG レーザー出力に乗っているリップルノイズによるものである．

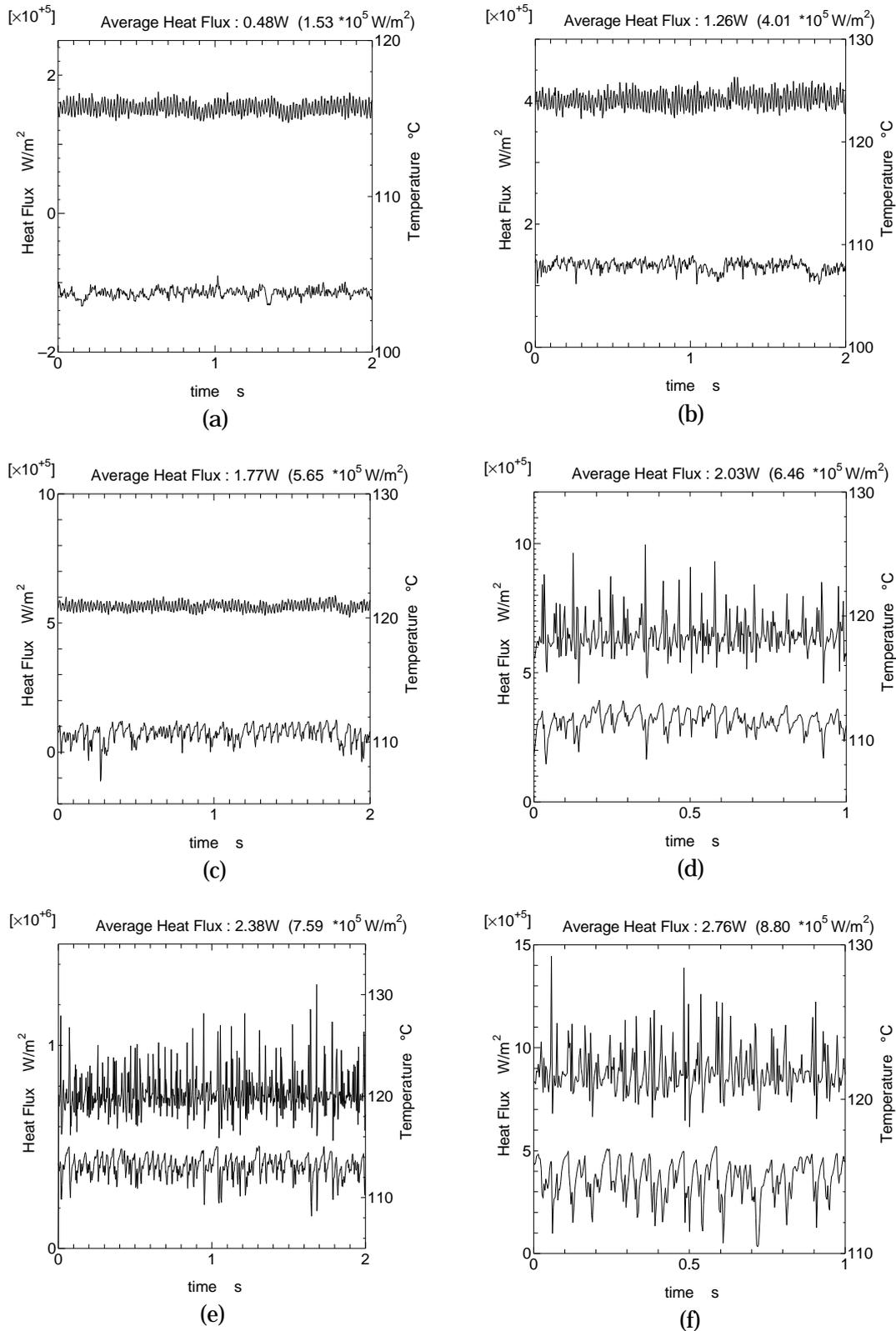
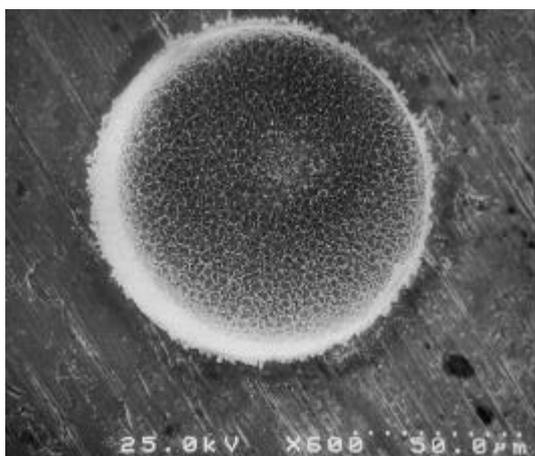


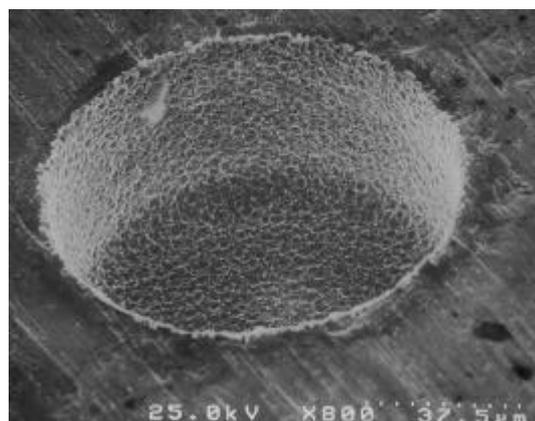
Fig.5.14 Temperature Fluctuations ($50 \mu \text{ m}$ Cylindrical)

5.2.3 直径 100 μm の円筒型キャビティー

実験に使用した加熱面上の直径 100 μm 、深さ 50 μm の円錐型キャビティーの SEM 写真を Fig.5.15 ~ 5.17 に示す。Fig.5.15 はキャビティーを真上から撮影したもの、Fig.5.16 はキャビティーを斜め 45 度から撮影したもの、Fig.5.17 はキャビティーの底部の放電による傷を拡大して写したものである。Fig.5.15 からキャビティーの外径は 105 μm 程度となっていることが分かる。キャビティー内部の傷については Fig.5.17 より直径 50 μm の円筒型キャビティーの場合と同様、キャビティーの径に比べ十分小さく、従って発泡支配温度も十分高く、今回の実験では影響は少ないと考えられる。



**Fig.5.15 100 μm Cylindrical Cavity
(Top View)**



**Fig.5.16 100 μm Cylindrical Cavity
(Side View)**

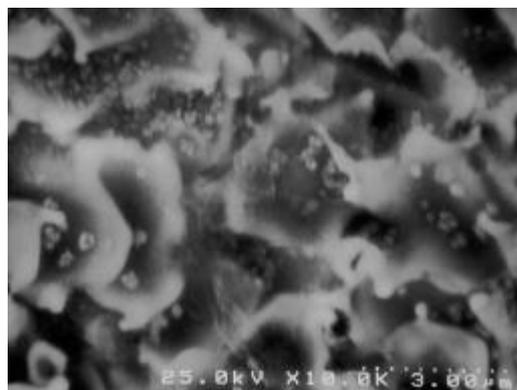


Fig.5.17 Magnification

Fig.5.18 に前出の場合と同様、様々な熱流束で加熱したときのキャビティー近傍の温度変動、また熱流束変動を示す。データと軸の値の対応も前出通りであり、上段が熱流束変動を表し、左側の軸がその値に対応している。下段が温度変動を表し、右側の軸がその値に対応している。熱流束の変動についても同様であり、YAG レーザー出力のリプルが反映されていると思われる。

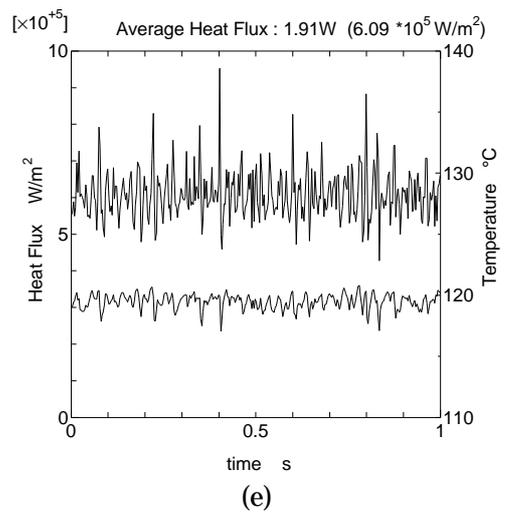
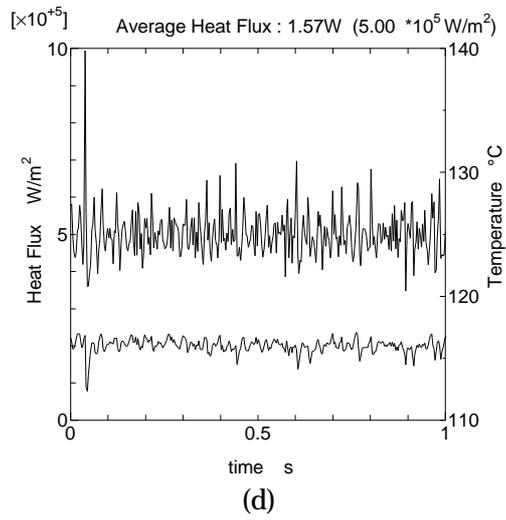
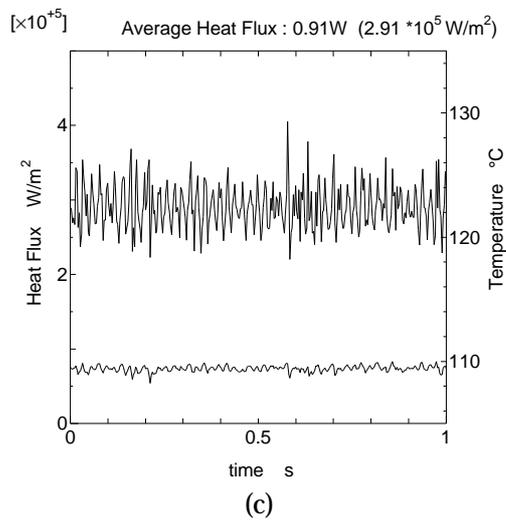
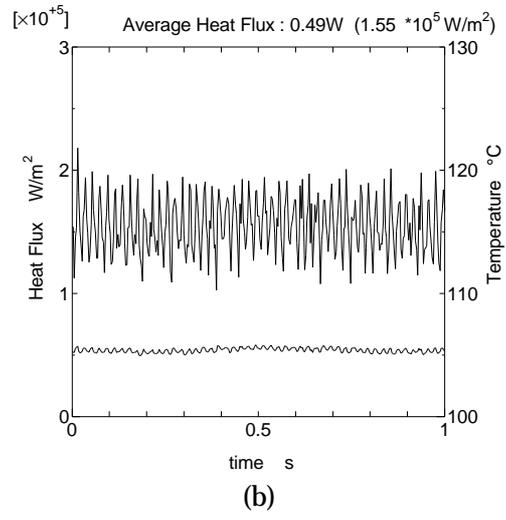
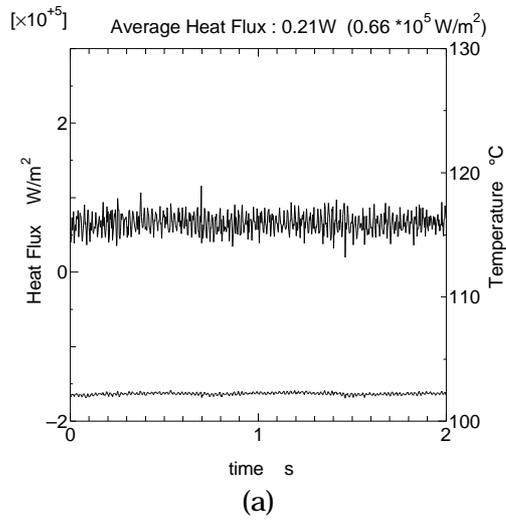


Fig.5.18 Temperature Fluctuations (100 μ m Cylindrical)

5.3 リエントラント型キャビティー

5.3.1 リエントラント型キャビティーの発泡傾向

本実験ではリエントラント型キャビティーは径 100 μm のものについてのみ行った．発泡の挙動としては円筒型キャビティーと非常によく似た傾向を示した．低熱流束域では非常に安定した周期的な発泡挙動を示し，休止期間がほとんどない．これは円錐型キャビティーの内部に加工した放電加工による“穴”に常に気泡核が存在し，発泡核となっているためと考えられる．ただし，円筒型キャビティーに比べ，多少引き込みが少ないようにも見受けられる．円錐型キャビティーに比べ，10度以上低い過熱度で発泡が安定的に起きるのは円筒型キャビティーの場合と同様，また温度変動が非常に少ないのも同様である．Fig.5.19 にリエントラント型キャビティーの発泡の代表的な挙動を示す高速ビデオカメラの映像を示す．

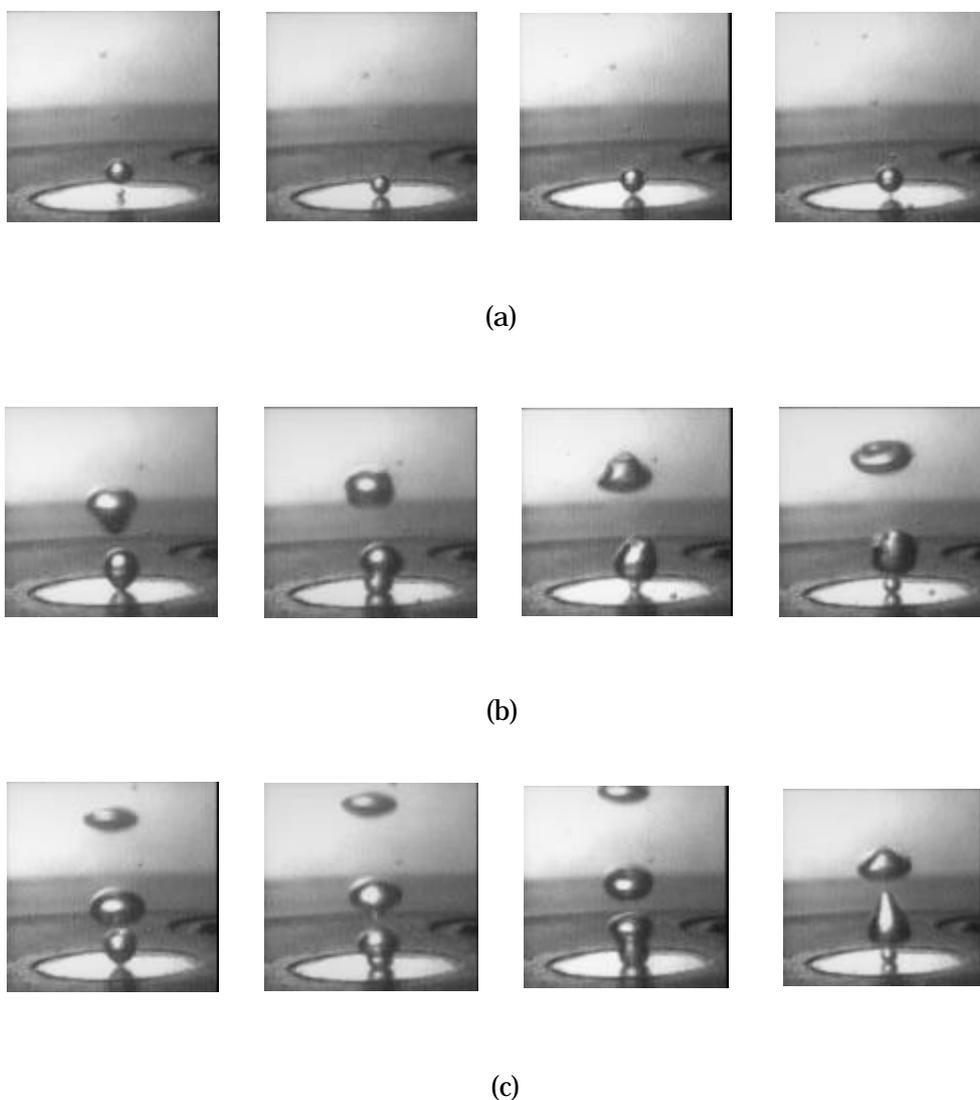


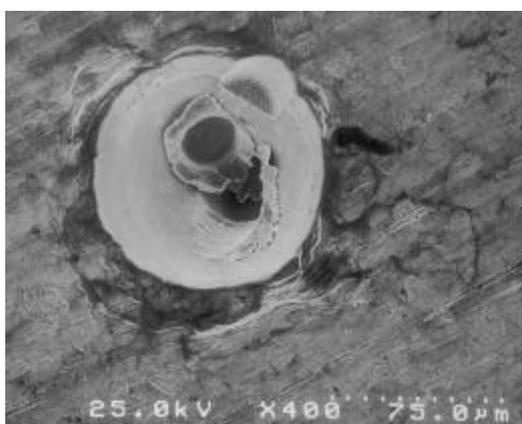
Fig.5.19 Bubbling from Reentrant Cavity

(a),(b),(c)は円筒型キャビティーの場合とほぼ同じ熱入力に対応する。(a)は熱入力が非常に低いとき(0.1W程度), (b)は0.5W程度, (c)は1.5W程度である。(a)では非常にきれいな球形のまま成長, 離脱, 発生が見られるのに対し, (b)では引き込み現象が目立ちはじめ, (c)では引き込みに伴い, 気泡の大きな変形, 合体を見ることができる。円筒形の場合よりも現象が激しく映るのは, 小さな引き込みが減っている分, 気泡が大きくなっているからだと思われる。

5.3.2 直径 100 μm のリエントラント型キャビティー

実験に使用した加熱面上の直径 100 μm のリエントラント型キャビティーの SEM 写真を Fig.5.20 ~ 5.22 に示す。Fig.5.20 はキャビティーを真上から撮影したものの、Fig.5.21 はキャビティーを斜め 45 度から撮影したものの、Fig.5.22 はキャビティーの底部の放電による加工部を拡大して写したものである。加工法は前述の通り、まず押しつけにより円錐型のキャビティーを加工してから、その内部に放電加工によりリエントラント型の構造を加工した。ただし、加工時の回転中心合わせが非常に難しく、必ずしも加工がうまくいっているとは言えない。しかし、傷を円錐型キャビティーの底につけたことにより、発泡挙動に影響が出ていることは間違いないと思われる。

Fig.5.20 からキャビティーの外径は 106 μm 程度となっていることが分かる。キャビティー内部の傷の有効径は Fig.5.22 より 30 ~ 50 μm 程度と考えられる。



**Fig.5.20 100 μm Reentrant Cavity
(Top View)**



**Fig.5.21 100 μm Reentrant Cavity
(Side View)**

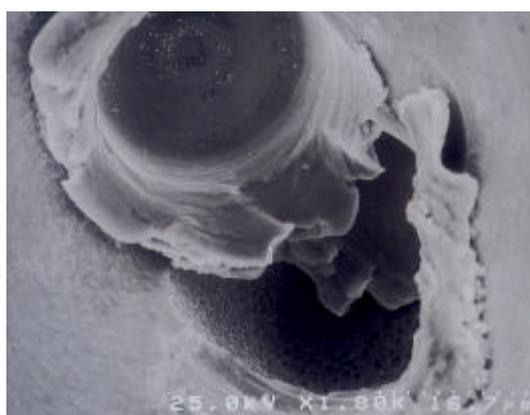


Fig.5.22 Magnification

Fig.5.23 に円錐型、円筒型の場合と同様、様々な熱流束で加熱したときのキャビティー近傍の温度変動、また熱流束変動を示す。データと軸の値の対応も前述の通りである。熱流束の変動についても同様であり、YAG レーザー出力のリプルが反映されていると思われる。

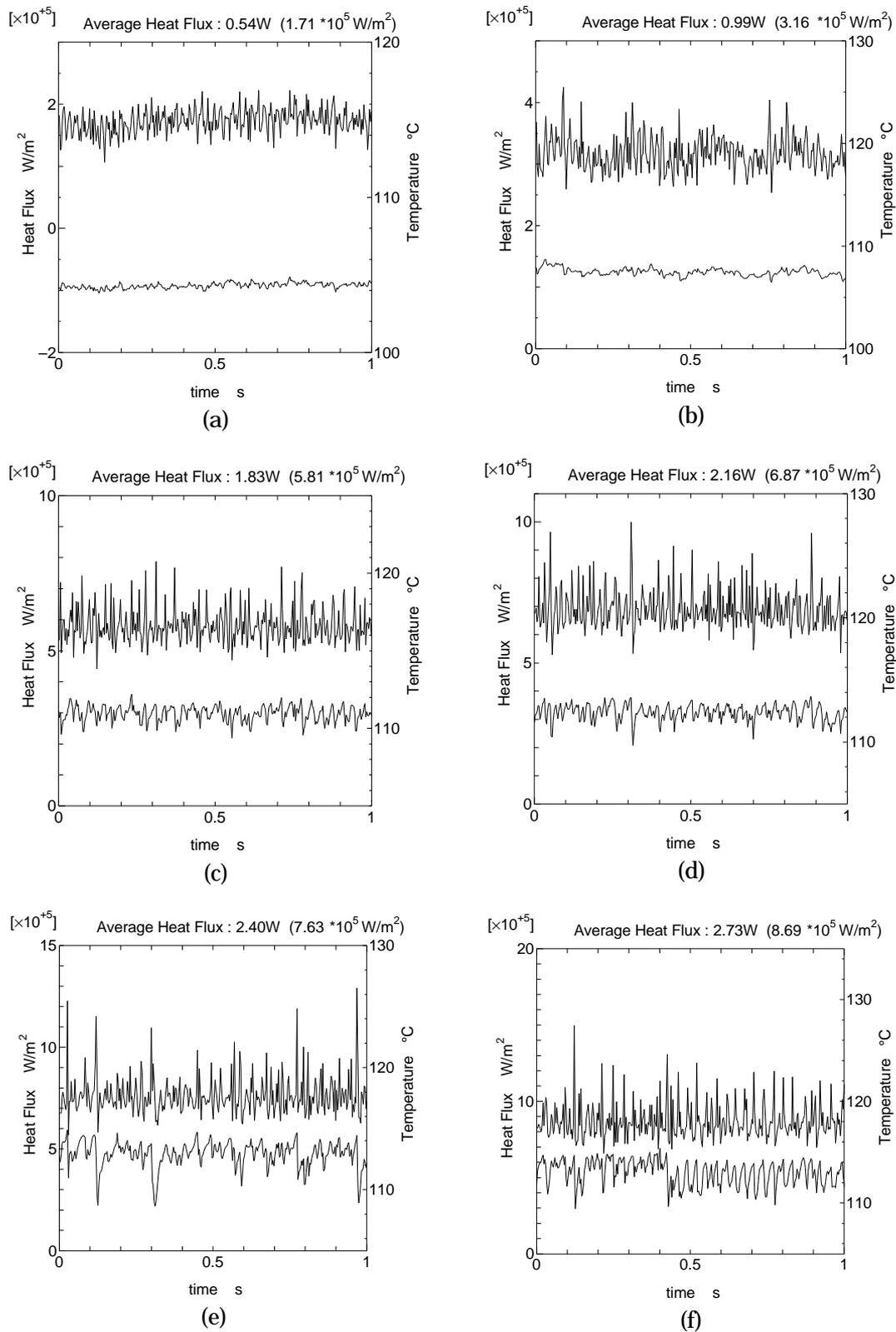


Fig.5.23 Temperature Fluctuations (100 μ m Reentrant)

5.4 加熱面温度変化，熱流束に関する考察

円錐型キャビティの周辺の温度場，熱流束の挙動を示している Fig.5.5，Fig.5.9 を見ると，連続的に変化している加熱面温度に対し，熱流束はパルス的な挙動を示しているのが分かる．これは熱が加熱面から何らかの理由により一瞬で奪われていることを意味する，興味深いのは円筒型キャビティ（Fig.5.14，Fig.5.18），リエントラント型キャビティ（Fig.5.23）ではこのような挙動がほとんど見受けられないことである．そこで高速ビデオカメラによる現象の観察と温度変動を照らし合わせて見ることにした．Fig.5.24 は Fig.5.5 の(a)のグラフ（径が $50\ \mu\text{m}$ の円錐型キャビティの挙動）に高速ビデオカメラの観察結

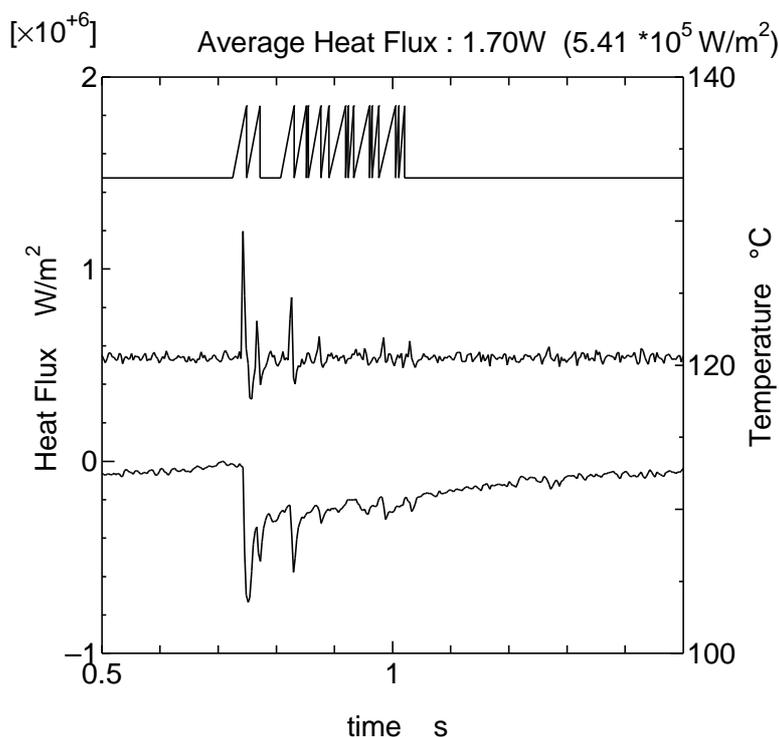


Fig.5.24 Bubble Initiation

果を重ね合わせたものである．グラフの下段が温度変動を示しており，中段が熱流束を示す．上段は加熱面上の気泡の状況を表している．のこぎり波の立ち上がりが気泡の発生を表し，立ち下がりが気泡の離脱を表している．のこぎり波のない部分は気泡が加熱面上に存在していないこと，つまり休止期間を意味している．グラフから，休止期間直後の発泡が加熱面の熱を効果的に奪っていることが分かる．Fig.5.1 の観察を併せると，これは3相の境界線に存在すると言われているメニスカス，あるいはマイクロ液膜が移動しながら激しく加熱面上の相変化を促している，と考えられる．またこの休止期間直後の発泡がおきる直前，加熱面の温度は一種の極大値に達していることが分かる．この発泡に引き続く発泡は加熱面温度が比較的低いところで起きており，第3章で述べた発泡支配温度が一つではないことを表している．考えられるのは，温度が低めのところで発泡するときは人工キャ

ビティの出口に気液界面が存在し、休止期間は気液界面はキャビティの奥に引きこまれてしまっている、ということである。過熱度 13 度での発泡条件は第 3 章(5)式より計算すると支配径 $2.5 \mu\text{m}$ となる。Fig.5.2 の SEM 写真では確認できないが、この円錐型キャビティの内部、あるいは縁にこの径を持ったキャビティが存在すると考えられる。この温度変動的に大きく、時間的に長いスケールの発泡と温度変動的に小さく、時間的にも短いスケールでの発泡の混在が本実験で扱った円錐型キャビティの発泡特性の大きな特徴であると言える。

この複雑な構造をさらに深く理解するために第 4 章で紹介した状態空間への埋め込みを試みた。まず、キャビティ径が $50 \mu\text{m}$ における解析結果を熱入力の違いに Fig.5.25 に示す。埋め込みのための遅れ時間は 9ms で 3 次元状態空間の再構成を試みている。

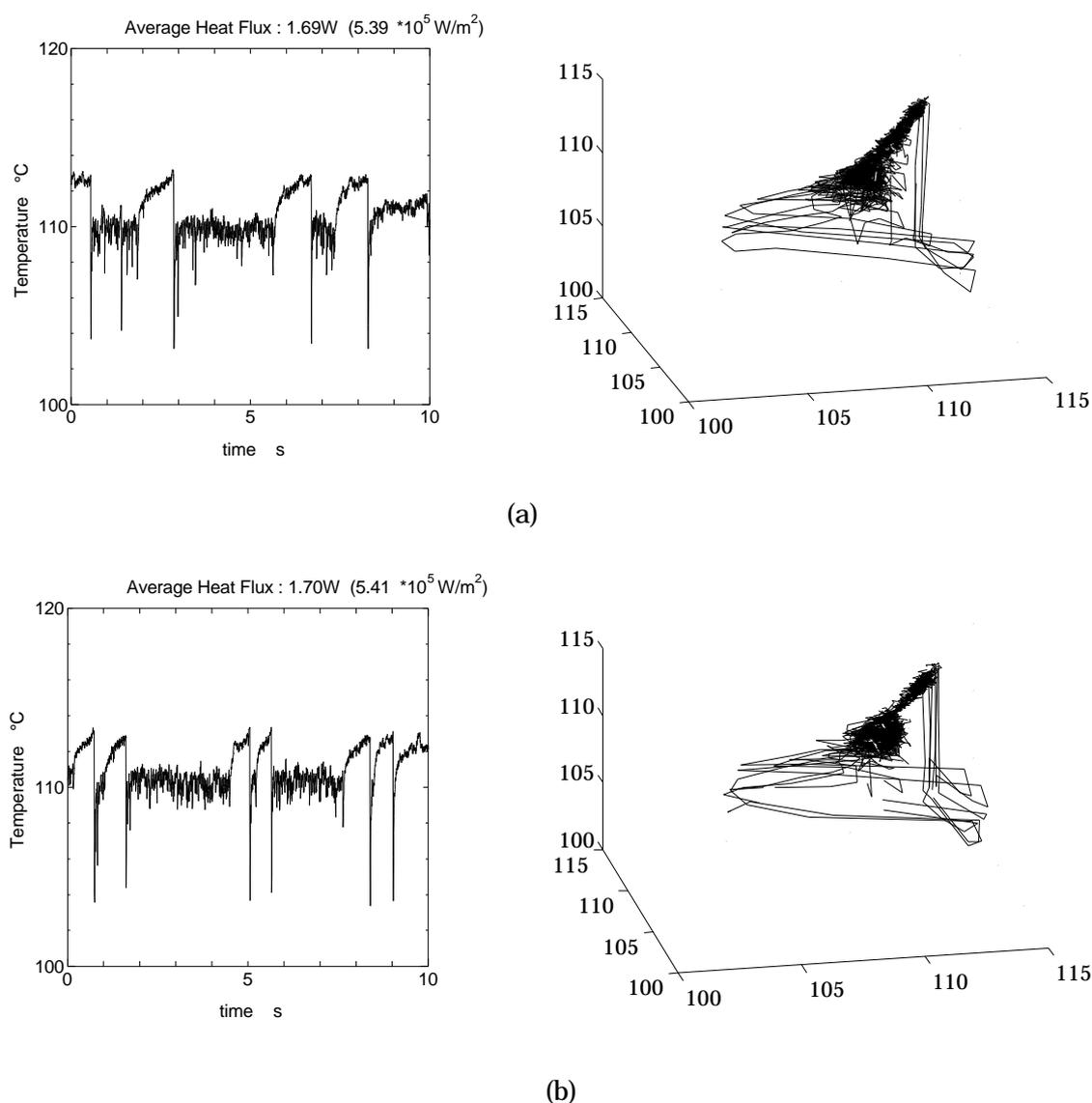
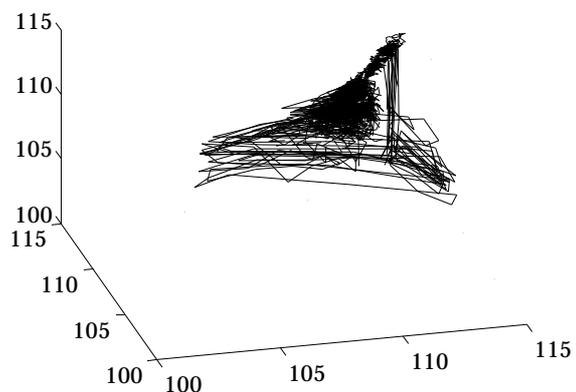
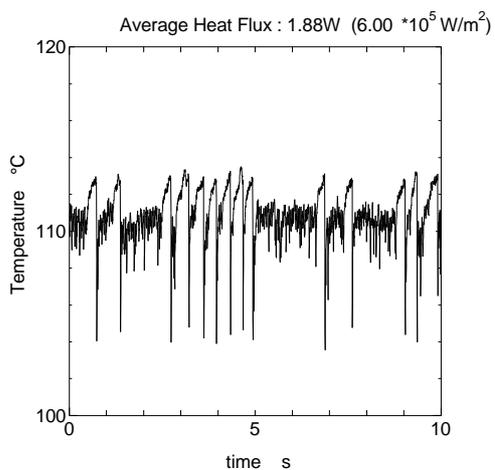
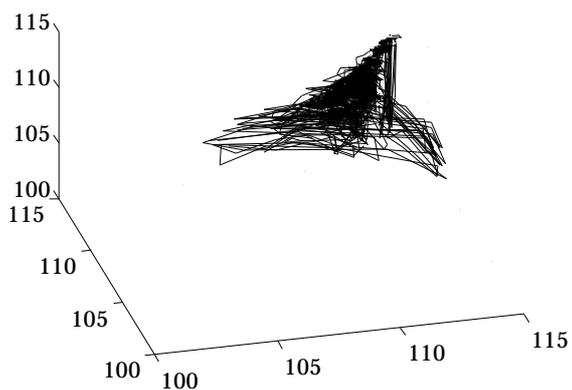
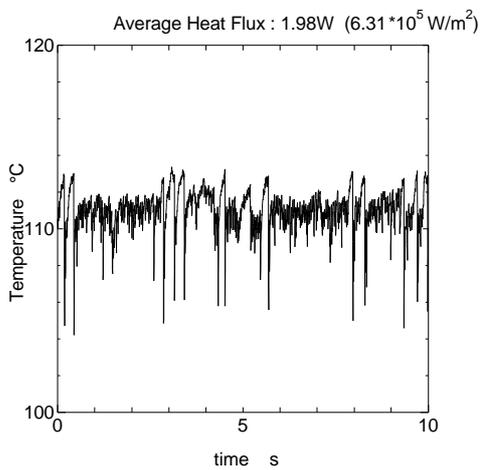


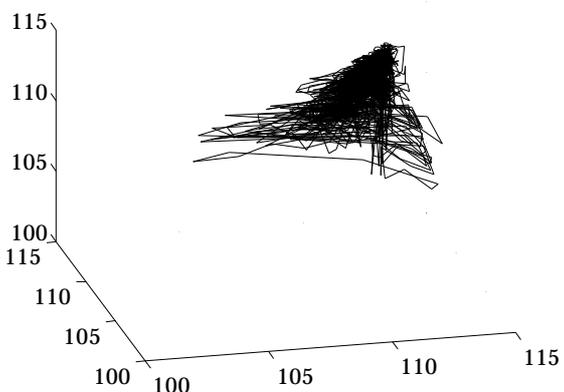
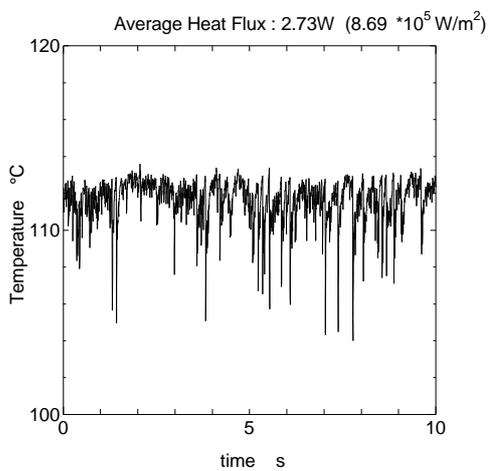
Fig.5.25 Reconstructing Phase Space ($50 \mu\text{m}$ Conical)



(c)



(d)

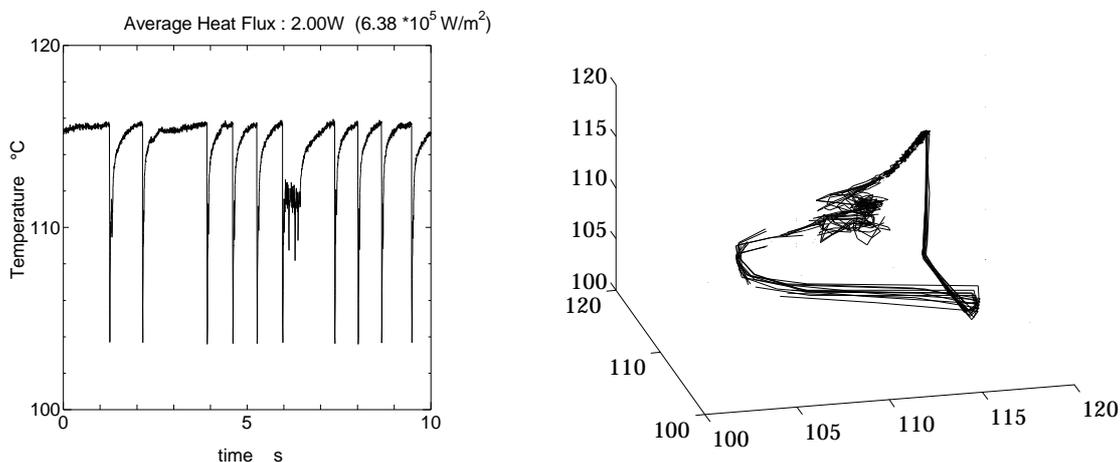


(e)

Fig.5.25 Reconstructing Phase Space ($50 \mu\text{m}$ Conical)

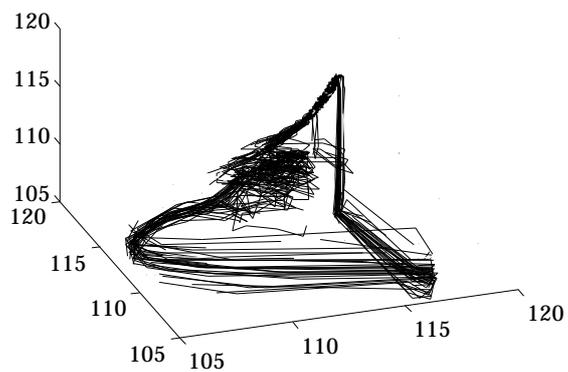
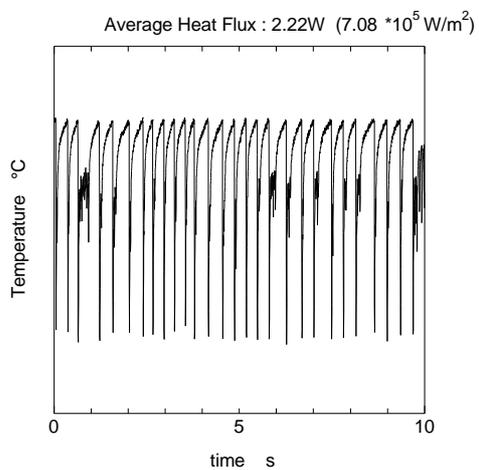
いずれの熱入力の場合も外側を三角形状に大きくまわる軌道と、三角形の左上あたりで引き込まれる小さめのまり状の軌道から構成されていることが分かる。三角形状の大きい軌道は休止期間の直後の時間スケールも温度変化も大きい発泡に対応し、小さめのまり状の軌道はそのスケールの大きい発泡の後に連続して続く時間スケールも温度変化も小さい発泡に対応する。熱入力が上がってゆくにつれて軌道がもつれはじめ、複雑な様相を呈してくるのが分かる。しかし、熱入力の大きさに関わらず、大きめの三角形状の軌道と、小さめのまり状の軌道の構造は崩れない。軌道は基本的にまり状のところに存在し、ある条件を満たすと飛び出して三角形状に大きくまわる軌道に引き込まれると見られる。この系ではこの2種類のスケールの違うアトラクタを確認することができ、まり状の小さめのアトラクタの方がより強く引き込む力があると言える。現象的に言ってしまうと、短い周期の発泡が支配的で、たまに何か条件が整うと周期の長い発泡が混じる、ということになる。本来であれば、この先にフラクタル次元やリアプノフ指数といった非線形工学の指標となる値を求め、また軌道間を遷移する条件などを追求してゆくべきなのであるが本実験データにはYAGレーザーの出力にのっているリップルノイズが強くのっており、フラクタル次元の一種である相関次元を求める計算は収束しなかった。この先の非線形解析はレーザーのノイズの問題を解決した上で今後の課題としたいと思う。

次に径が $100\ \mu\text{m}$ のキャビティの温度変動についての解析結果を熱入力の低い順に Fig.5.26 に示す。埋め込みのための遅れ時間は前述の場合と同様 9ms であり、3次元状態空間の再構成を試みている。

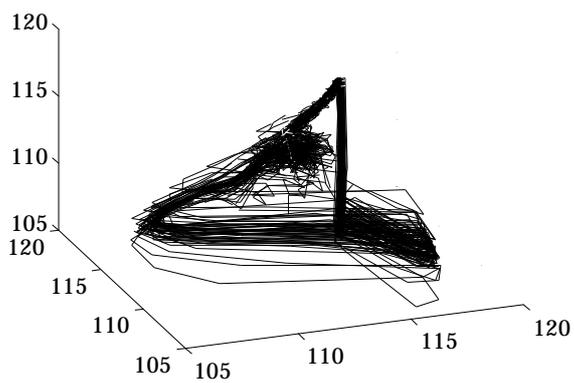
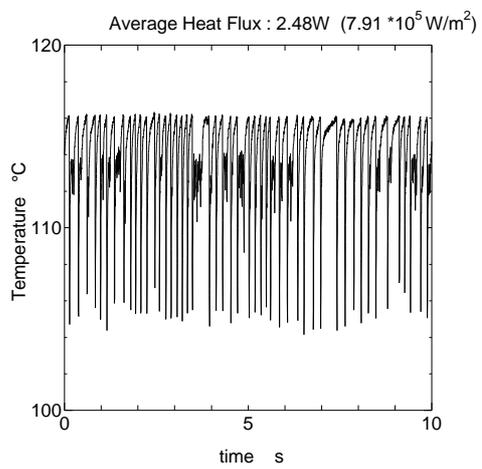


(a)

Fig.5.26 Reconstructing Phase Space ($100\ \mu\text{m}$ Conical)

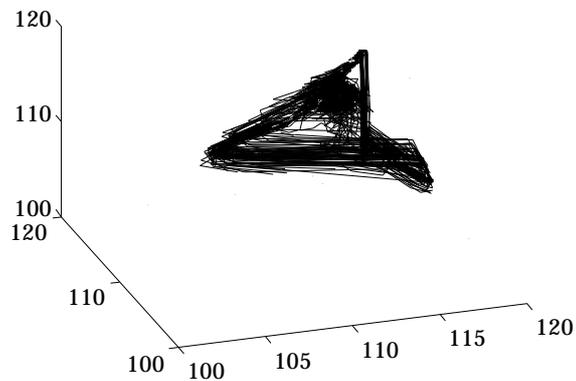
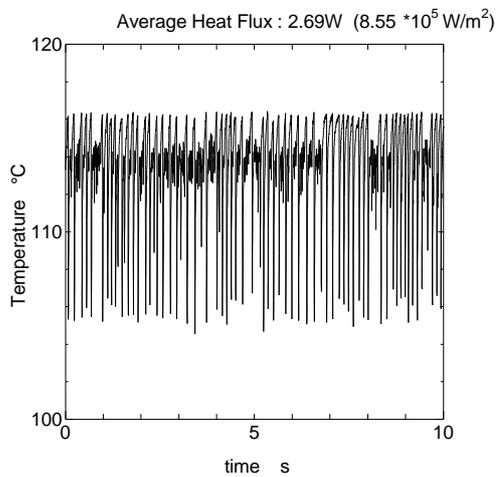


(b)

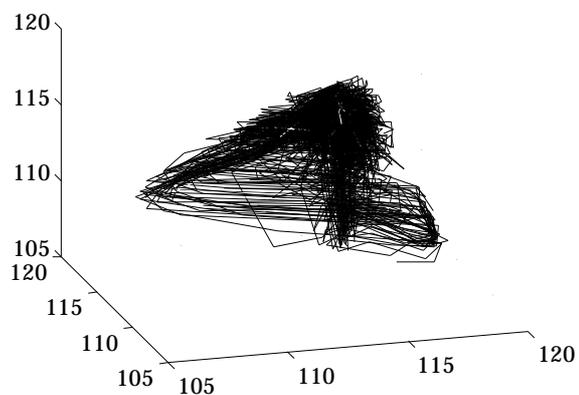
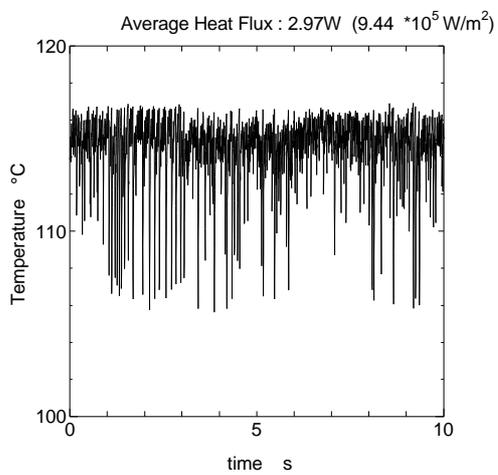


(c)

Fig.5.26 Reconstructing Phase Space ($100 \mu\text{m}$ Conical)



(d)



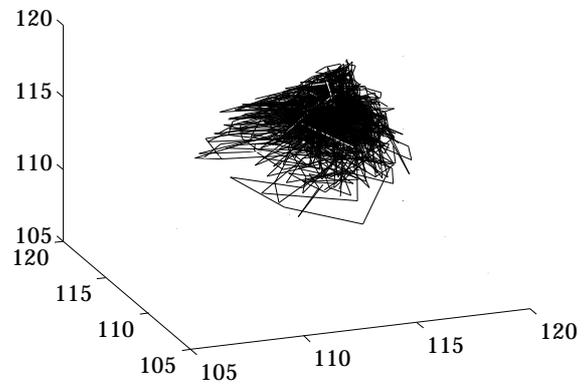
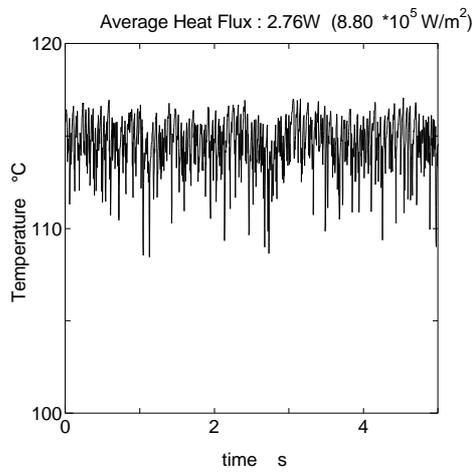
(e)

Fig.5.26 Reconstructing Phase Space (100 μ m Conical)

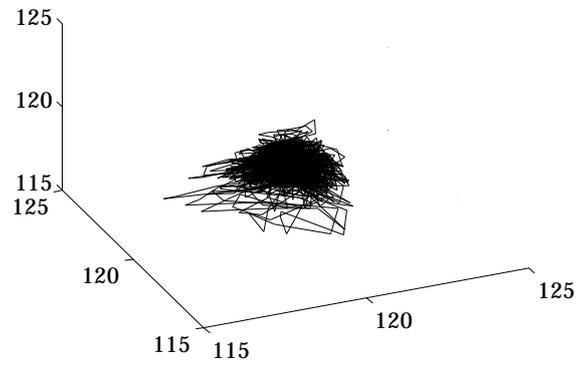
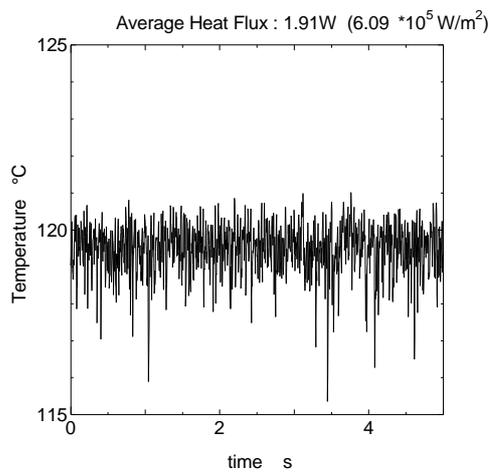
このキャビティー径が $100\ \mu\text{m}$ の場合においても外側を大きくまわる三角形の軌道と、その左上あたりに位置するまり状の軌道を確認することができる。ただし、キャビティー径が $50\ \mu\text{m}$ の場合と大きく異なるのは径が $100\ \mu\text{m}$ の場合は外側の大きい軌道の方が安定している、ということである。こちらの場合、基本的に外側の軌道をまわっており、何かの条件が整うとまり状の軌道に引き込まれるといった方が近いように思える。現象論的に言えば、通常は周期の長い休止期間のある発泡が見られ、たまにその発泡のあとに連続した周期の短い発泡が見られるということになる。熱入力が増してゆくと軌道が絡み合い始め、複雑な様相を呈し始めるのは径が $50\ \mu\text{m}$ の場合と同様である。

ここまでで得られる結論は、まり状のアトラクタの吸引力はキャビティー径の大きさに依存する、ということである。キャビティー径の小さいものの方が吸引力が強く、径が大きいものは相対的に吸引力が弱いと言える。また非常に定性的な議論ではあるが、円錐型キャビティーの場合、発泡が始まってしまえば出口径の小さいものの方が安定である、とも言える。

同様の議論をほかのタイプのキャビティーの発泡挙動にも適用した。ただし、円筒型キャビティー、リエントラント型キャビティーともに円錐型キャビティーの温度変動解析で見られたような構造は見るができなかった。Fig.5.27 に円筒型キャビティーの温度変動の解析結果の一例を、また Fig.5.28 にリエントラント型キャビティーの温度変動の解析結果の一例を示す。どちらにおいてもまり状の構造が見られた。これはどちらのキャビティーも発泡に長い休止期間がなく、連続的に発泡するのみであるため、円錐型キャビティーでも見られたまり状の構造のみが現れたのだと考えられる。



(a)50 μ m



(b)100 μ m

Fig.5.27 Reconstructing Phase Space (Cylindrical)

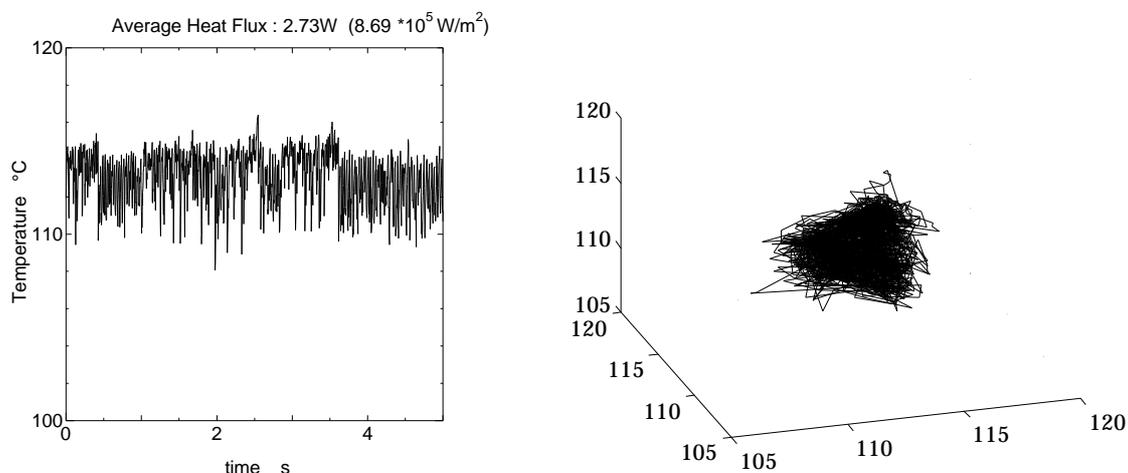
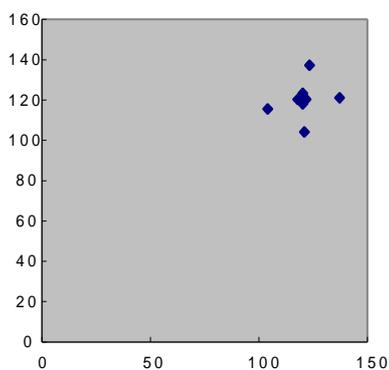


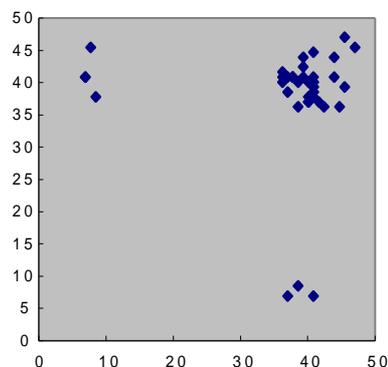
Fig.5.28 Reconstructing Phase Space (Reentrant)

5.5 離脱周期に関する考察

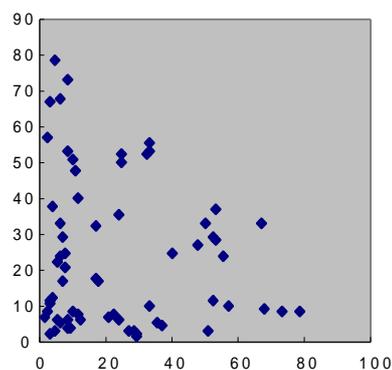
前節における考察で円錐型キャビティの発泡挙動についてはある程度特徴付けることができたが、円筒型、リエントラント型キャビティの発泡挙動については特に熱入力小さいところではほとんど温度変動が見られなかったため、解析ができなかった。そこでここでは4章で触れた現象によるリターンマップの構成を行い、これらのキャビティの発泡挙動を追ってみたいと思う。リターンマップは気泡の離脱間隔を高速ビデオカメラで観察することによって得られた。高速ビデオカメラは1.5秒程度の記録時間しかないため、自然プロットできる点数には限りがある。Fig.5.29に径50 μm の円筒型キャビティからの気泡の離脱間隔をリターンマップにしたものを示す。なお、横軸、縦軸ともすべて単位はmsである。またそれぞれのリターンマップの下には熱入力の値が記してある。(a)の場合、多少の変動はあるが周期的に気泡が離脱していると考えられる。(b)になると引き込みが始まり、主な周期以外にその気泡に引き込まれる周期の短い気泡が出てくる。(c)になると、離脱周期は広く分布し、ランダムの様相を呈してくる。しかし、(d)では2値関数のような分布が見られ、カオスの可能性を示唆している。ただし、プロット点数がやはり少なく、厳密なことは言えない。



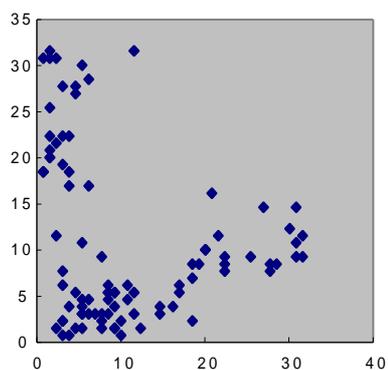
(a)0.15W



(b)0.29W



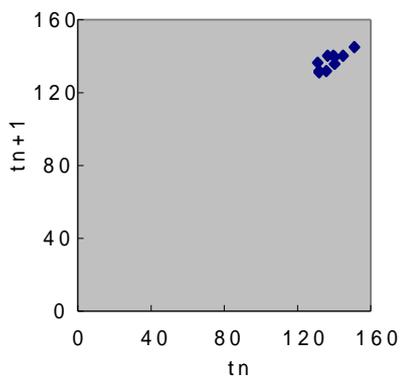
(c)0.48W



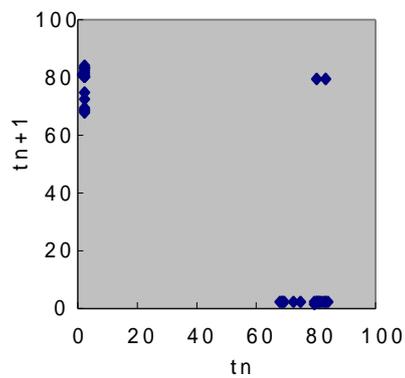
(d)1.26W

Fig.5.29 Return Map (50 μ m Cylindrical)

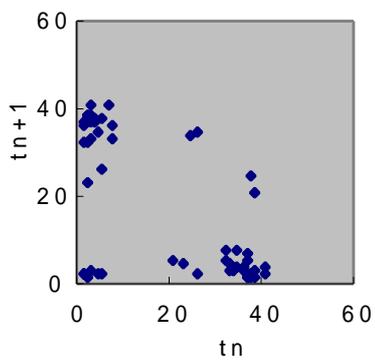
Fig.5.30 に径 100 μ m の円筒型キャビティーからの気泡の離脱間隔をリターンマップにしたものを示す．なお，横軸，縦軸ともすべて単位は ms である．またそれぞれのリターンマップの下には熱入力の値が記してある．ここでも周期的な挙動(a)から引き込みが始まり(b)，その分布が徐々に崩れ(c),(d)，2 値関数のような分布に変わってゆくのが分かる．ただし，前述したとおり，プロットした点数が少ないため，カオス的な挙動の可能性はあると言えるが，これ以上の分析は難しい．このキャビティー形状の場合，カオス性は存在するとして流体の挙動からくるところが大きいと考えられる．



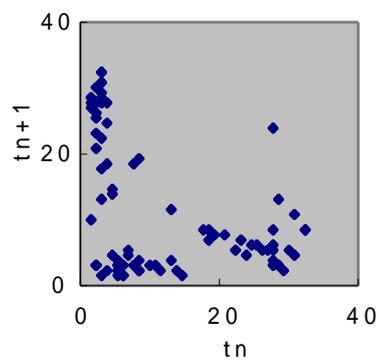
(a)0.21W



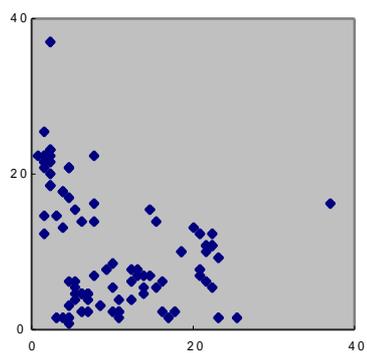
(b)0.28W



(c)0.49W



(d)0.91W



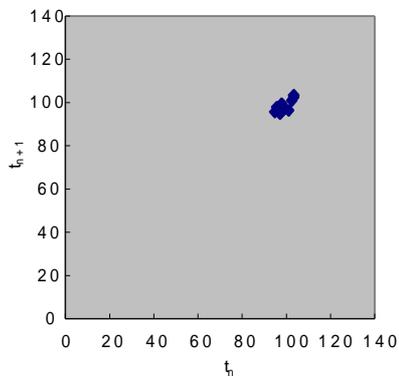
(e)1.57W

Fig.5.30 Return Map (100 μ m Cylindrical)

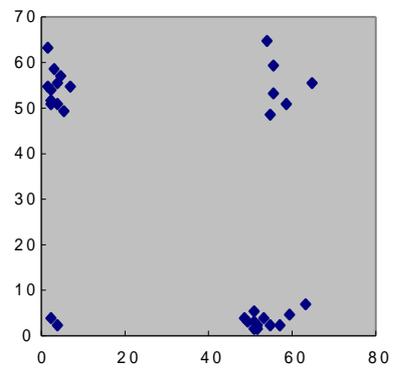
Fig.5.31 にリエントラント型キャビティの発泡時間間隔をリターンマップにしたものを示す。各グラフとも横軸，縦軸とも時間で単位は ms である。傾向としては前出の円筒型キャビティの発泡挙動と似ているが，多少異なるところもある。熱入力が高いところでは規則的な発泡挙動から始まり(a)，気泡同士の吸い込みが出てくるため，短い周期が出現する(b)ところまでは円筒型キャビティの発泡挙動と類似しているが，(c)のリターンマップでは興味深い挙動を示している。プロット点数が少ないため何とも言えないが，2周期現象から3周期現象に分岐を起こしているようにも見える。分岐現象はカオス現象への代表的ルートとしてよく知られているものである。リエントラント型キャビティは円錐型キャビティと比べると，やや複雑な発泡挙動を示しているようである。

なお，(d)ではU字形の2値関数のような分布が見られ，カオス性を示唆している。この形状は生体におけるカオスの代表例であるヤリイカ巨大軸索の応答から再構成されたアトラクタの形状^[11]と類似している。(e)では再びゆるい3周期，あるいはランダムな分布に戻っているようである。この場合についてもデータ点数の不足のため判断が難しい。

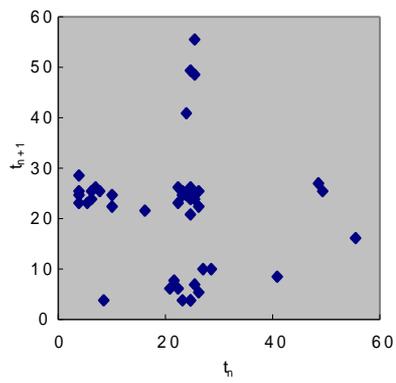
総合すると，リターンマップの構成により周期的なふるまいから引き込みの発生による2周期現象までは追うことができるが，その先はデータ点数の不足により解析が難しくなっている。だが，分布形状を見る限り，低次元カオスが存在していてもおかしくないと言える。



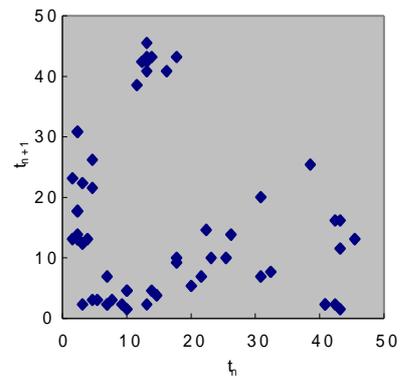
(a)0.21W



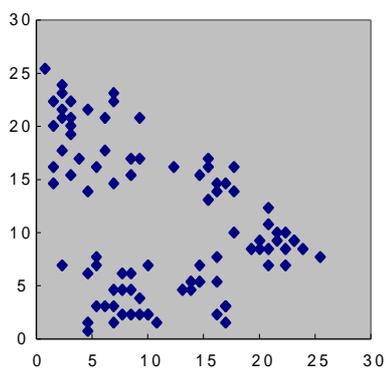
(b)0.35W



(c)0.54W



(d)0.99W



(e)1.83W

Fig.5.31 Return Map (100 μ m Reentrant)

5.6 平均的沸騰挙動に関する考察

ここでは非線形解析からは少し離れ、キャビティーの形状の違いにより平均表面温度、平均熱流束などがどのような影響を受けているか調べてみた。各キャビティーが加工してある加熱面への平均熱入力と加熱面キャビティー付近の平均温度をプロットしたものが Fig.5.32 である。従来よく使われている沸騰曲線の形態を取っているが、見やすさを考慮して log-log ではなくリニアにしてある。

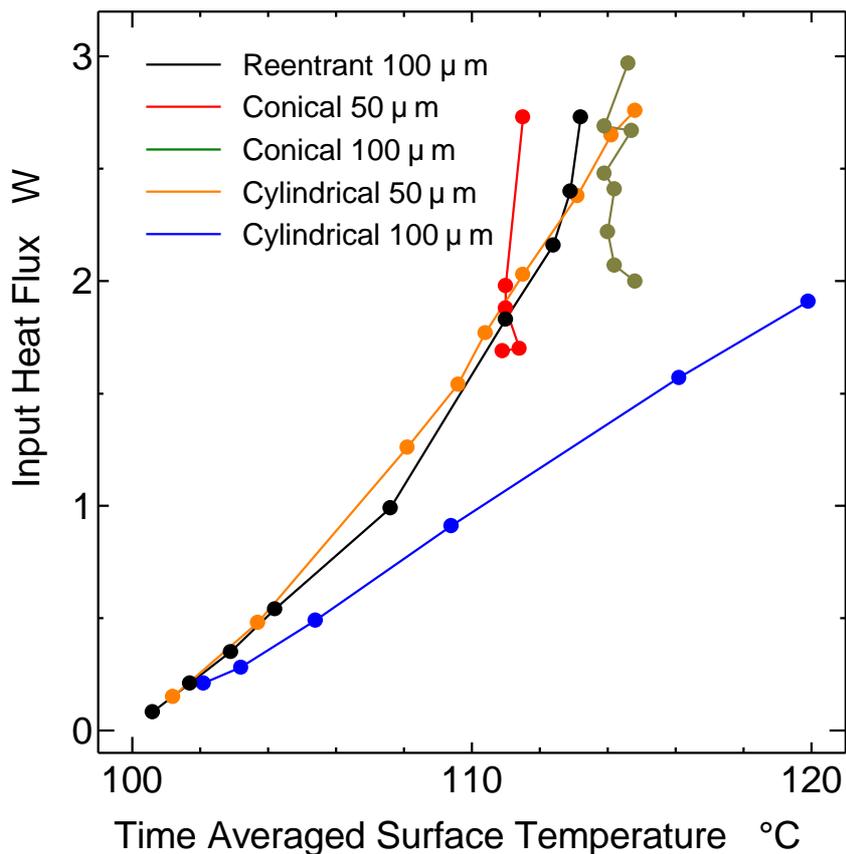


Fig.5.32 Boiling Curve

特徴としていくつか挙げられる。

- 1 円筒形キャビティーの加工された加熱面は低い過熱度から発泡し、温度はほぼ線形に上昇してゆく。それに対し、円錐形キャビティーが加工された加熱面は発泡するのに比較的高い表面温度を必要とするが、発泡が始まると表面温度はほとんど変化しない。
- 2 径の大きいキャビティーが加工されている面の方が同じ熱入力があったときに温度が高くなる傾向がある。
- 3 100 μm の径を持つ3種のキャビティーの温度を比較すると、リエントラント型のキャビティーが加工してある加熱面の温度が一番低くなる。

これらは計測、熱入力における誤差を考えると定量的な厳密さに欠ける部分はあるが1に関しては定性的に正しいと考えられる。

第六章

結論

本研究において，異なる形状をした3種のキャビティーを持つ加熱面について実験を行い，以下の知見を得た．

- 円錐型キャビティーを持つ加熱面の発泡挙動は他の2種に比べ間欠性が激しく，温度変動も大きい．
- 円錐型キャビティーを持つ加熱面の発泡挙動は状態空間の再構成により，2つの異なるスケールのアトラクタ（軌道）によって表現されることが明らかになった．
- 本研究において円筒形キャビティーとリエントラント型キャビティーは一見類似した発泡挙動を示したが，リターンマップの構成により，リエントラント型のキャビティーはさらに複雑な発泡挙動を示していることが分かった．
- 加熱面の平均温度，平均熱入力を考えると，円錐型キャビティーのある加熱面では発泡が始まると加熱面の温度上昇が押さえられるのに対し，円筒型キャビティーのある加熱面では加熱面温度は熱入力に対し，ほぼ線形な関係を示した．

参考文献

- [1] Shoji,M., "Boiling Chaos and Modeling", *Proceedings of the Eleventh International Heat Transfer Conference*, vol.1, pp.3-21, 1998.
- [2] Carey,V.P., "Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena", *Hemisphere Publishing Corporation*, 1992.
- [3] Kenning,D.B.R., "Wall Temperature Variations and the Modeling of Bubble Nucleation Sites", *Pool and External Flow Boiling, ASME*, pp.105-110, 1992.
- [4] Hisajima, K., *et al*, "気泡生成の非線形特性", 第34回日本伝熱シンポジウム講演論文集, vol.3, p.813,814, 1997.
- [5] Ellepola,J.H. and Kenning,D.B.R., "Nucleation Site Interactions in Pool Boiling", *2nd European Thermal Science and 14th UIT National Heat Transfer Conference*, 1996.
- [6] Bankoff, S.G., "Entrapment of Gas in the Spreading of a Liquid Over a Rough Surface", *A.I.Ch.E.Journal*, vol.4, no.1, pp.24-26, 1958.
- [7] Mizukami,K., "Stability of Bubble Nuclei and Nucleation in Isothermal Liquid", *Review of Kobe University of Mercantile Marine Part2*, no.27, 1979.
- [8] Lorenz,J.J., *et al*, "The Effect of Surface Conditions on Boiling Characteristics", *Proceedings of the Fifth International Heat transfer Conference*, vol.4, pp.35-39, 1974.
- [9] Wang,C.H., and Dhir,V.K., "Effect of Surface Wettability on Active Nucleation Site Density During Pool Boiling of Water on a Vertical Surface", *Journal of Heat Transfer*, vol.115, pp.659-669, 1993.
- [10] Takens, F., "Detecting Strange Attractors in Turbulence", *Lecture Notes in Mathematics*, No.898 pp.366-381, 1981.
- [11] Aihara K., "カオスの数理と技術", 放送大学教育振興会, 1997.

謝辞

本研究では多くの方々に本当にたくさんご迷惑をおかけし、またお世話になりました。指導教官の庄司教授には研究に関する様々なご指導をいただき、また公私に渡り大変お世話になり、心から感謝いたしております。実験を行うにあたり、横谷助手、渡辺技官に大変お世話になりました。感謝いたします。

また加熱面の製作にあたりいろいろと助けていただきました、中尾助教授、福田助手、西保木助手、蓮池助手そして畑村、中尾研の学生諸兄に心から感謝いたします。

本研究室博士課程在籍の上野さん、山口さんにも非常にお世話になりました。足かけ3年間、本当にありがとうございました。これからのご活躍を祈っております。

そしてともにこの長い道のりを歩いた M2 の小林君、成瀬君、君たちなしではこの論文はあり得ませんでした。本当にいろいろ教えていただき、助けてもらってしまいました。君たちと同期で修士課程を終えることを誇りに思います。今後ともよろしく願いたします。

M1 の阿部君にも非線形解析をするにあたり、大変お世話になりました。来年度もよろしく願いたします。

最後に4年生の石黒君には M2 らしいことはほとんどしてやれず、逆に助けてもらってばかりで申し訳ありませんでした。今後もその行動力を活かし、頑張ってください。

以上

通し番号 1 59 完

修士論文

平成 11 年 2 月 12 日提出

66168 高木 裕登