

卒業論文

単一キャビティからの沸騰核生成の研究

1P 43P 完

平成 11 年 2 月 5 日提出

指導教官 庄司 正弘教授

丸山 茂夫助教授

学生証番号 70178 石黒 崇三

目次

記号表	4
第1章 序論	5
1.1 はじめに	6
1.2 沸騰現象概要	7
1.3 沸騰形態の分類	9
1.3.1 流動形式による分類	9
1.3.2 液体温度による分類	9
1.4 キャビティとは	10
1.4.1 キャビティの形状	10
1.4.2 沸騰開始温度のモデル	11
1.5 実験目的	13
第2章 実験装置	14
2.1 沸騰装置系	15
2.1.1 加熱面	15
2.1.2 アダプター	17
2.1.3 固定台	17
2.1.4 沸騰容器	17
2.1.5 アクリルウォール	17
2.1.6 コンデンサー	18
2.1.7 補助ヒーター	18
2.2 光学系	18
2.1.1 Nd:YAG レーザー	19
2.1.2 ポテンショメーター	19
2.1.3 光ファイバー	19
2.1.4 パワーメーター	20
2.1.5 フォトディテクター	20
2.3 測定系	21
2.3.1 放射温度計	21
2.3.2 高速度ビデオカメラ	21
2.3.3 ランプ	21

第 3 章 実験と実験結果	22
3 . 1 実験手順	23
3 . 1 . 1 実験準備	23
3 . 1 . 2 実験	23
3 . 1 . 3 実験終了	24
第4章 結果と考察	25
4 . 1 キャビティの有無による比較	26
4 . 1 . 1 低熱流束の時	26
4 . 1 . 2 中熱流束の時	26
4 . 1 . 3 高熱流束の時	27
4 . 2 気泡径のばらつきによる比較	34
4 . 3 熱流束と気泡の系の関係	37
第 5 章 結論	39
参考文献	41
謝辞	42

記号表

p_v	蒸気圧力
p_l	液体圧力
	表面張力
r	気泡半径
h_{fg}	蒸気潜熱
V_{fg}	$V_g - V_f$
v_g	蒸気の比体積
v_f	水の比体積
T_{sat}	液体の飽和温度

第 1 章 序論

1.1 はじめに

鍋の中に水を入れ、ガスコンロなどでその水を加熱するとお湯が沸くことは誰もが知っている。水などの液体を加熱することで液体が気泡の発生を伴い、気体に相変化する現象のことを一般に沸騰という。

沸騰現象は人間が昔から親しんできた現象であり、一般家庭で料理に使う以外に、工業的にも大変重要な役割を果たしている。沸騰現象が工業的に用いられる目的は大きく分けて二つある。一つ目は、沸騰によって得られる蒸気のエネルギーを利用する目的である。例えば、ボイラーや原子炉、発電所などがこれにあたる。二つ目は、沸騰現象による高い熱伝達率を利用する目的である。例えば、電子デバイスの冷却などである。このように、沸騰は人間にとって大変重要な現象である。そのため、沸騰現象の研究は過去 50 年にわたって研究が行われており、工業上において必要な知見は大方得られていると思われる。しかし、これまでの研究は工業的に利用できる部分の研究が中心であったため、沸騰現象の時間的、空間的平均を論じ、沸騰現象の持つ動的な部分はあまり注目されていない。また、これまでなされてきた膨大な実験のデータから、経験的、実験的な成果は上がっているものの、それらは比較的狭い範囲での状態でしか用いられないことが多い。沸騰現象は加熱面の形状や、気泡同士の干渉などの複合現象であり、大変複雑である。それらの現象すべてを理解することは困難を極める。よって、沸騰現象を理解する一段階として一つ一つの現象を取り上げ、それらの複合現象として沸騰現象をとらえていくというのを、本研究の位置づけにしたいと思う。

1.2 沸騰現象概要

沸騰は大変身近な現象であるが、また、非常に複雑な現象である。沸騰とはどのような現象であろうか。容器に水を入れて加熱すると、最初は底の方から熱せられた水が静かに上昇していくのが陽炎のようになっているのが観察される。これは自然対流といわれる。そのうち底の方から気泡が発生するようになり、最後には激しく沸騰していくことになる。

本節では沸騰現象について、F i g沸騰曲線¹ をもとに詳しく述べていくことにする。

Fig.1 は縦軸に熱流束、横軸に加熱面温度と飽和温度との差（すなわち過熱度）を log-log スケールでとったものである。熱流束が A 点よりも小さい場合には、沸騰は起こらず自然対流のみである。この領域は非沸騰域と呼ばれる。そして A 点を超えると小さな気泡が加熱面に出始め、沸騰が始まる。この領域は核沸騰域と呼ばれ、熱流束が格段に上がってくる。B 点に至ると、気泡は蒸気膜へと変わり、熱が伝わりにくくなってしまふ。その結果、熱流束は増えずに加熱面の温度は急上昇してしまふ。この B 点を限界熱流束点といい、この時の熱流束を限界熱流束という。B 点と C 点の間は遷移沸騰域といい、部分的に膜沸騰が起こっている領域であり、C 点以降は膜沸騰域という。

本研究では核沸騰領域について行う。

¹ 1932 年、抜山四郎による。プール沸騰で始めて完全に特徴を表したものが沸騰曲線であり、この沸騰曲線を議論の基本に置いたのはこれが最も意味のあるものだからである。

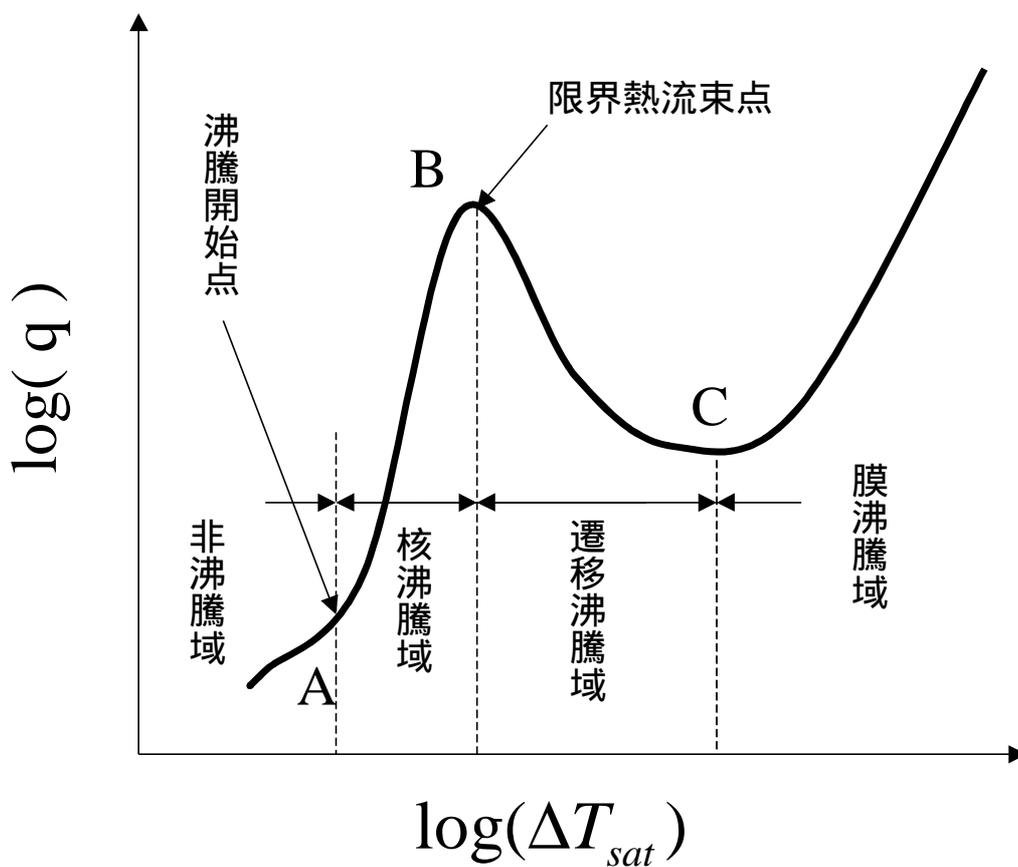


Fig.1 沸騰曲線

1.3 沸騰形態の分類

沸騰の形態は様々で、周囲の条件により次のように分類される。以下にその分類を示す。

1.3.1 流動形式による分類

プール沸騰
強制流動沸騰

沸騰系の熱伝達についての議論は一般にプール沸騰で始まる。プール沸騰は実験装置や理論の複雑さを最小にすることができるからである。今までなされてきた多くの研究によってプール沸騰のメカニズムについては比較的よく理解されている。しかし、この最も単純な単相系に関連する沸騰でさえも正確に予想することは未だにできていない。ここでは、プール沸騰は自然対流のみにおける沸騰であり、強制流動沸騰は流体が強制的に流されている系での沸騰である。

1.3.2 液体温度による分類

飽和沸騰
サブクール沸騰

飽和沸騰は液温が飽和温度（水の場合は100℃）に達している系における沸騰であり、サブクール沸騰は液温が飽和沸騰以下の系における沸騰である。

本研究ではプール沸騰における、飽和沸騰状態で研究を行う。

1.4 キャビティとは

キャビティとはここでは伝熱面上にある微細な傷のことを表す。先ほどの fig.1 で A 点を超えると、小さな気泡が加熱面から出始めると述べたが、一般に沸騰は加熱面上にある微細な傷（キャビティ）にとらわれている気泡から起こるといわれている。容器の中に水を入れ沸騰させた時、容器の底から湧き上がって来る水蒸気泡は同じ位置から次々と発生している。それは容器の底にある無数のキャビティが発泡核となりそこから沸騰が行われているからだと言われている。

1.4.1 キャビティの形状

代表的なキャビティの形状として円錐型やリエントラント型、円筒型がある。それを、Fig.2 **キャビティの形状** に示す。円錐型はキャビティの基本的な形としてよく用いられる。しかし、実際の伝熱面上からの発泡挙動を観察してみると円錐型キャビティでは説明できない間欠的な発泡がよく見られる。その挙動を説明するためにリエントラント型キャビティが提案されている。

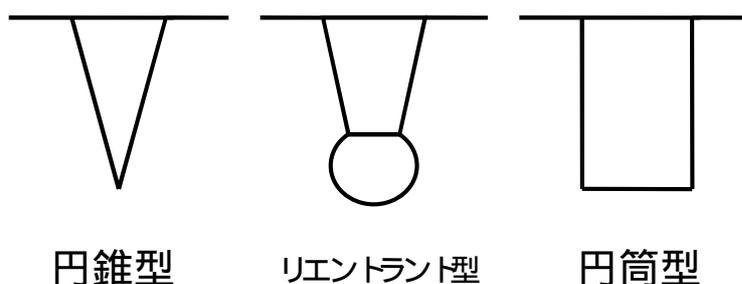


Fig.2 キャビティの形状

1.4.2 沸騰開始温度のモデル

理想化された円筒型のキャビティについて考える。すなわち、気泡は完全に球形とし、水と加熱面の接触角

$$b \leq 90^\circ$$

とする。

表面張力と圧力の関係から力学的に平衡になるには、*Young-Laplace* の式より、

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

が成り立っていないとてはならない。また、二層平衡における圧力と温度の関係から *Clausius-Clapeyron* の式より、

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

となる。 h_{fg} 、 v_{fg} 、 T_{sat} を一定として積分すると、

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

となり、*Young-Laplace* の式と合わせて

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

となる。 r について解くと

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

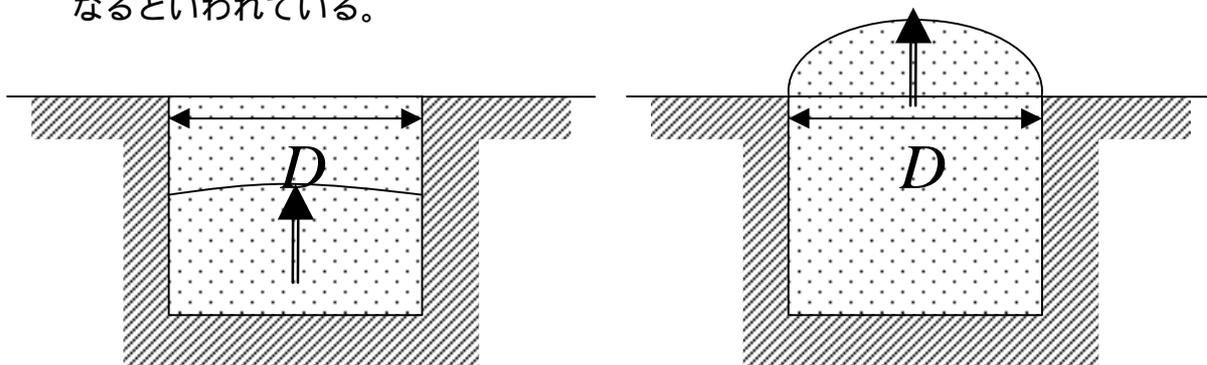
となる。 r と T_v 以外は一定とみなしてあるので、上式からわかることは気泡温度が上昇するにつれ、気泡半径が小さくならないと力学的に安定にならないということである。

Fig.3 発泡の様子を見ながら詳しく説明していくことにする。

気泡が成長していく段階で気液界面がだんだん上昇していき気泡半径が小さくなりながら加熱面表面に達する。このとき、 T_v は上昇しているが r が小さくなっているため(5)式は成り立ち、平衡状態を保ったまま界面が移動する。

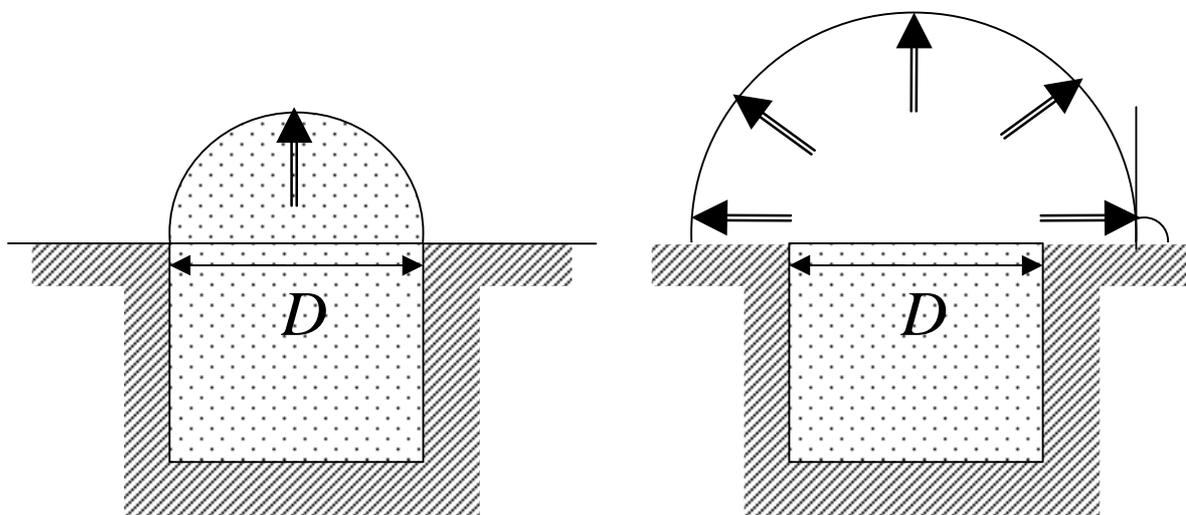
気泡の径は、気泡が加熱面表面に達する。このとき界面はキャビティの口

の部分に留まり、気泡半径が小さくなるように気泡は成長する。
表面に半球を形成した時が最小となる。
気泡温度がそれ以上上昇すると気泡半径はそれ以上小さくならず、力学的
平衡が成り立たなくなってしまう。その結果、気泡半径が爆発的に大きく
なるといわれている。



気泡が成長する

気泡が加熱面の
表面に達する



気泡半径が
最小になる

気泡が爆発的に
成長する

Fig.3 発泡の様子

他にも、(5)式からキャビティの径が分かれば理想状態における発泡開始温度が分かる。 T_{sat} 、 v_{fg} 、 h_{fg} の値は物性値とみなせるのでそれぞれ代入すると、およそ

$$r = \frac{33}{T_v - 373.15} \quad \dots(6)$$

となる。直径 $10 \mu\text{m}$ のキャビティで過熱度は 6 程度になる。

1.5 研究目的

以上を踏まえて本研究では、単一キャビティによる沸騰の特性を明かしていく事を目的とする。具体的には、キャビティがある場合とない場合によってどのような発泡挙動の違いが現われるか明らかにするために、最も安定的に発泡する円筒方キャビティ²とそれが無い場合とを比較、検討する。

² 予備実験の段階で円錐型と円筒型を比較したところ、円筒型キャビティは安定的に発泡した。

第 2 章 実験装置

2.1 沸騰装置系

単一キャビティからの沸騰を実現するために、他のキャビティからの沸騰の起きにくい YAG レーザーによる局所加熱による方法を用いた。これは、沸騰を起こさせたいキャビティの真下にレーザーを当てることで、そのキャビティのみが励起することを目的としたものである。以下に装置の全体写真及び概要を示す。(Fig.4, Fig.5)



Fig.4 実験装置写真

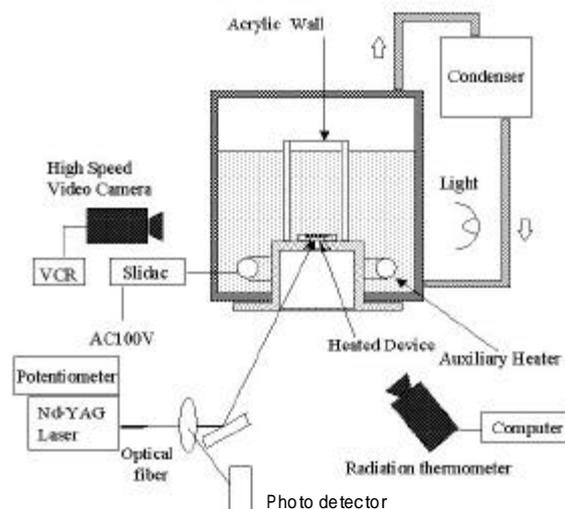


Fig.5 実験装置概要図

2.1.1 加熱面

ニラコ製の厚さ 0.1mm の銅板をワイヤーカットにより、直径 10mm の円形銅板に加工する。その表面に放電加工により人工的にキャビティをつけたもの。キャビティの形状については円筒形を用いた。なお、加熱面の裏側はレーザーの反射を防ぐため、黒染液（オーディック社製マイティック 1793）を用いて酸化させ黒色酸化膜を張った。(fig.6)

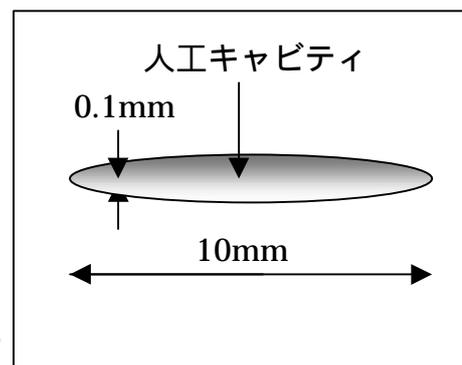


Fig.6 加熱面

加熱面表面の表面を表面粗さ計を用いて得られた結果を Fig.7、Fig.8 に示す。表面粗さ計は先端 2 μ m の棒で表面をなぞるようにして計る。Fig.7 は圧跡と平行に測定した場合で、Fig.8 は、垂直に測定した場合である。

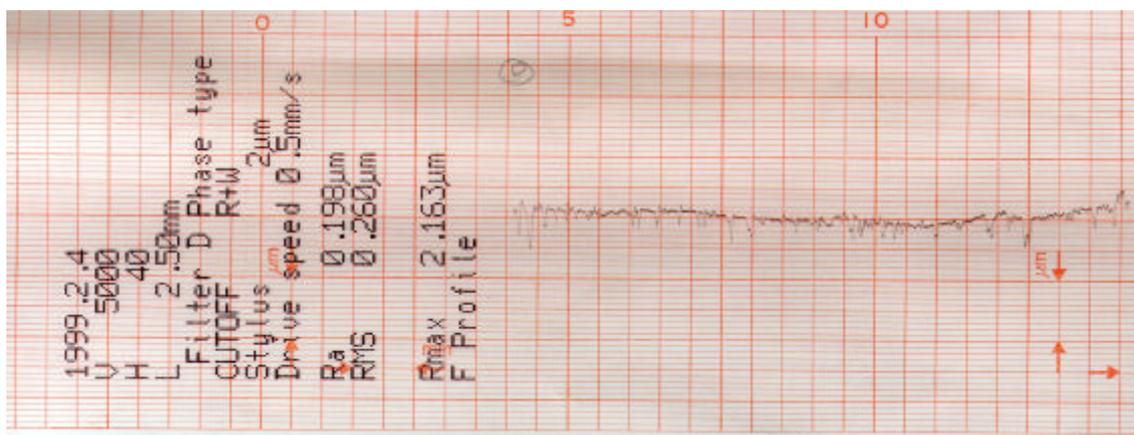


Fig.7 表面粗さ計による結果（圧跡と平行方向）

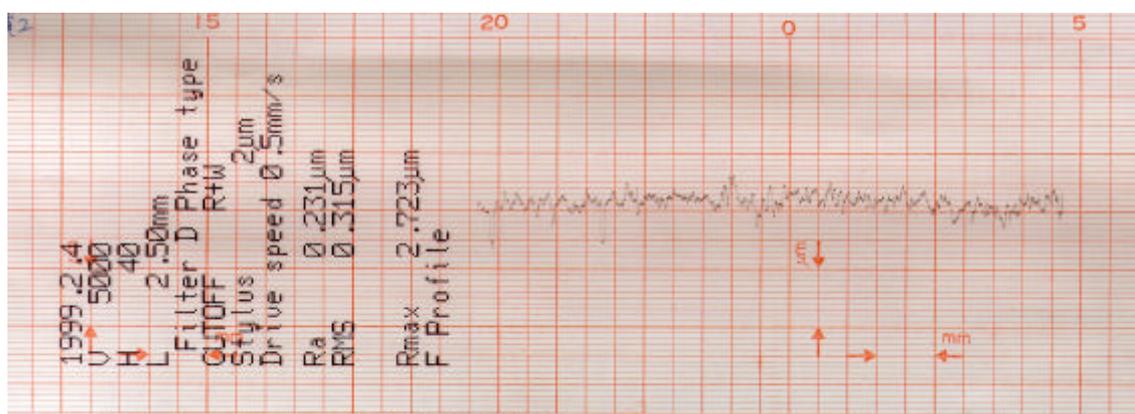
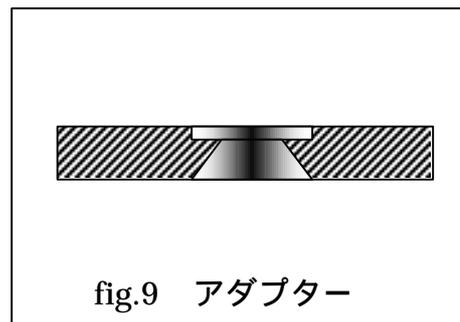


Fig.8 表面粗さによる結果（圧跡と垂直方向）

平均粗さは $0.260\ \mu\text{m} \sim 0.315\ \mu\text{m}$ とキャビティ径 $10\ \mu\text{m}$ と比較して十分小さいとして表面処理は行わなかったが、より表面が滑らかな方が望ましい。

2.1.2 アダプター

加熱面を固定させ、固定台と取り外しを可能にしたもの。固定台とはネジでつながっており、水漏れを防ぐためにOリングをはめ込んだ。加熱面とアダプターはアラルダイトで接着してある。(fig.9)



2.1.3 固定台

アダプター及び加熱面を沸騰容器に固定させるための道具。アダプターと同様、水漏れを防ぐためにOリングをはめ込んだ。加熱面、アダプターのついた状態の固定台を Fig.10 に示す。

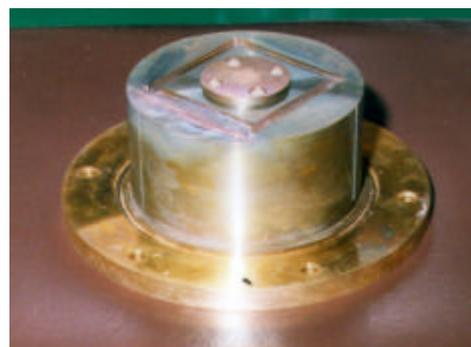


Fig.10 固定台

2.1.4 沸騰容器（水槽）

水槽には補助ヒーターが入っている。本実験は飽和沸騰時に実験を行うため、補助ヒーターで液温を飽和温度まであげた後、加熱面裏にレーザーを当て実験を行う。液温が飽和沸騰温度まで上がっているかどうかは、補助ヒーターの沸騰状態を容器の外から観察することと、キャビティから発生する気泡が凝縮していないことを観察することで確認する。(Fig.11)

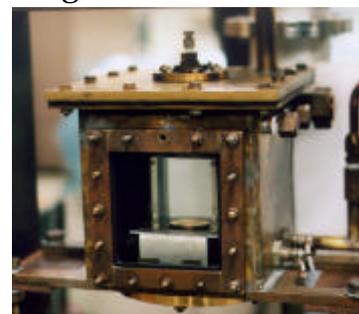


Fig.11 沸騰容器

2.1.5 アクリルウォール

補助ヒーターにより発生する水蒸気の影響でキャビティ付近に対流が起こるのを防護するための壁。固定台を削り、埋め込むように設置する。

2.1.6 コンデンサー

沸騰容器内で発生した水蒸気を凝縮させ、容器内に戻す装置。

2.1.7 補助ヒーター

実験開始時に液体を飽和温度まで加熱するため、また実験中に液体を飽和温度に保つために備え付ける。補助ヒーターの電圧は電源盤からの電気入力を調節できるようにスライダックが取り付けられている。(Fig.12)



Fig.12 スライダック

2.2 光学系

加熱面を加熱するために Nd:YAG レーザーを用いるが、Nd:YAG レーザーの出力を調節するポテンショメーターの精度が悪いことと、時間軸での熱流束を測定するために、加熱面にレーザーを当てながらレーザーの出力をモニタリングすることが必要になった。そのための装置の概略図を示す。(Fig13)

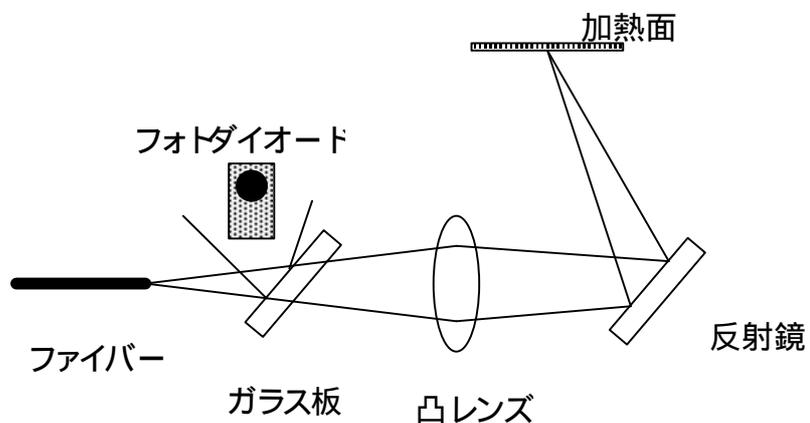


Fig.13 光学系概略図

2.2.1 Nd : YAG レーザー

本実験は加熱面の裏側に直接レーザーを当てて沸騰させる。YAG レーザー本体からファイバーを用いて沸騰容器付近まで持ってくる。(フジノン YAG レーザー FYL-M1)

(Fig.14)



Fig.14 YAG レーザー本体

2.2.2 ポテンショメーター

YAG レーザーの出力を変えるための装置。可変抵抗になっていて0~10k まで変える事ができる。(Fig.15)

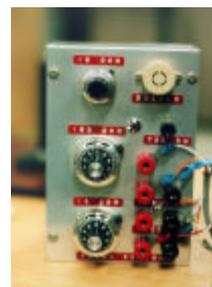


Fig.15 ポテンショメーター

2.2.3 光ファイバー

YAG レーザー本体から出力されたレーザーを実験装置まで導いてくる道具。先端の径は 600 μ m。レーザーを発射すると、レーザーが広がってしまうため、一度凸レンズを用いてレーザーを集光し加熱面裏側に当てる。光ファイバーの先端の写真を Fig.16 に示す。

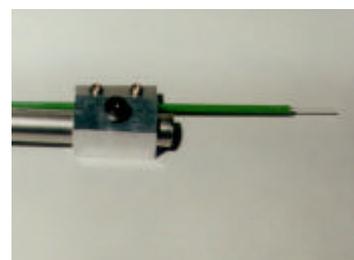


Fig.16 光ファイバー先端

2.2.4 パワーメーター

レーザーの出力を測定するための装置。(Fig.17)ただし、パラメータの出力が安定するのに 5 分程度時間がかかってしまうため、レーザーの平均出力は得られるが、レーザー出力の時系列データは得られない。よって、実験時にはフォトディテクターを用いる。パワーメーターの出力はデジタルマルチメーター(Fig.18)を用いて測定する。



Fig.17 パワーメーター



Fig.18 デジタルマルチメーター

2.2.5 フォトディテクター

レーザーの出力をそのままサンプリングするためのセンサー(Fig.19)。レーザーの出力の時系列データが得られる。ただし、相対的データしか得られないため、パワーメーターの出力値と比較することでレーザーの熱流束が得られる。デジタルレコーダー(Fig.20)を用いて信号を得る。

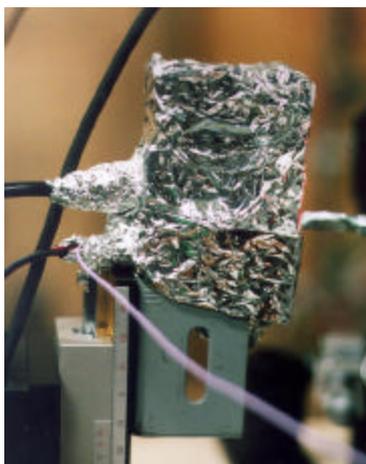


Fig.19 フォトディテクター



Fig.20 デジタルレコーダー

2.3 測定系

2.3.1 放射温度計

加熱面裏側の温度分布を Au 蒸着ミラーを介して放射温度計で測定し、PC に取り込む。(Fig.21)
(NEC 三栄製 TH3102MR)



Fig.21 放射温度計

2.3.2 高速度ビデオカメラ

放射温度計の記録開始のトリガ信号を受けて記録開始する。記録されたデータは内部でデジタル情報として処理を行い、D/A 変換し、NTSC として出力される。内部メモリの制限から、速度を上げると視野が狭くなる。(Fig.22)



Fig.22 高速度ビデオカメラ

2.3.3 ランプ

高速度ビデオカメラのシャッタースピードが速いため、カメラの反対側からランプを用いて照らす。(Fig.23)

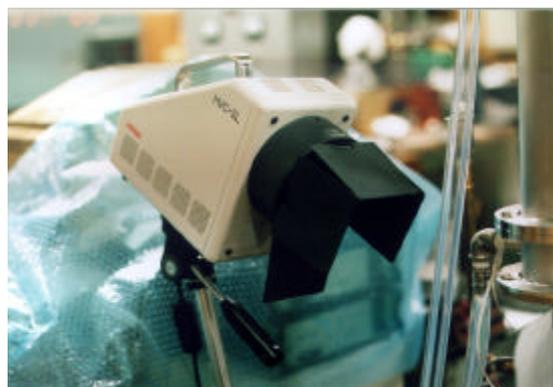


Fig.23 ランプ

第3章 実験

本実験は加熱面にキャビティをつけた場合とキャビティをつけない場合を比較し、キャビティの深さによる挙動変化をみるものである。キャビティの形状は円筒型、直径 $10\mu\text{m}$ 、深さ $5\mu\text{m}$ のものと直径 $10\mu\text{m}$ 、深さ $20\mu\text{m}$ のものを用意した。

3.1 実験手順

3.1.1 実験準備

- ・加熱面をアダプターに取り付ける
- ・アダプターを固定台に取り付ける
- ・固定台にアクリルウォールを取り付ける
- ・固定台を沸騰容器に取り付ける
- ・蒸留水を沸騰容器に満たす
- ・冷却水を流す（沸騰容器及び YAG レーザー）
- ・補助ヒーターの電源を入れる
- ・YAG レーザーの電源を入れる
- ・沸騰容器内の水が安定して沸騰したら、一度補助ヒーターの電源を止め、空気抜きをした後、再度補助ヒーターの電源を入れる
- ・沸騰容器内の水位を補助ヒーターからの沸騰による対流を避けるためアクリルウォールの高さ以下にする
- ・ファイバーから出ているレーザー光を加熱面裏側に当てる
- ・フォトディテクターが感光しているか確認する
- ・放射温度計、高速度ビデオカメラを設置する
- ・ポテンシオメーターのスイッチを入れる

3.1.2 実験

- ・ポテンシオメーターの値を調節し、加熱面から発泡していることを確認する
- ・PC から信号を出し、放射温度計と高速度ビデオカメラが同時に測定を始めるようにする
- ・ポテンシオメーターの値を変え、いろいろな熱流束で測定する
- ・高速度ビデオカメラで取ったデータをビデオデッキを通してビデオに録画する

- ・ 光学系装置を取り外し、レーザーをパワーメーターに当て、フォトディテクターとパワーメーターの値の関係をグラフにする。

レーザー径及び放射温度計の測定範囲の拡大図を示す。(Fig.24) YAG レーザーは連続光とし、放射温度計によるデータは測定範囲 $600\ \mu\text{m}$ を平均した値である。

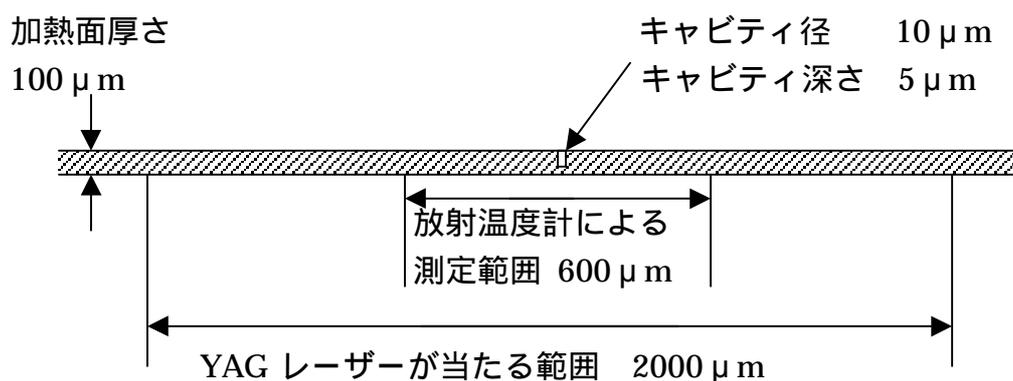


Fig 測定部近傍の様子

3.1.3 実験終了

- ・ ポテンシオメーターを止め、YAG レーザーを切る
- ・ 補助ヒーターの電源を止める
- ・ PC、その他の電源を切る
- ・ 沸騰容器内の蒸留水が冷めた後、蒸留水を抜く
- ・ 固定台、アダプターをそれぞれ外す

第 4章 結果と考察

4.1 発泡周期、温度による比較

横軸に時間、縦軸に温度をとり、キャビティの有無による加熱面裏側の温度変化と発泡時間とを時系列で調べた。銅板の厚さが $100\ \mu\text{m}$ なので十分薄いと見て加熱面裏側の温度を加熱面付近の温度とみなした。比較したキャビティは直径 $10\ \mu\text{m}$ 、深さ $5\ \mu\text{m}$ のもの。熱流束をほぼ同じ場合の温度変動を見る。熱流束はレーザーが直径 2mm の円形に当たっているものとして算出した。

レーザーの熱流束を3段階に変化させた結果を以下に示す。グラフの中にある赤色のノコギリ波はキャビティからの発泡時間を表す。ノコギリ波の立ち上がりが気泡の発生時間を表し、立ち下がりが気泡の離脱時間を表す。発泡時間は高速度カメラで撮ったデータをビデオに落とし観察することによって得られた。

4.1.1 低熱流束の時

熱流束が低い時 ($1 \times 10^5 \text{W/m}^2$ 程度)、キャビティのない加熱面からは発泡せず、円筒形キャビティからは周期的な発泡が見られた。発泡は温度にほとんど影響を与えず、発泡による温度の変動は見られなかった。(Fig.25) ノコギリ波の立ち下がりの直後に立ち上がっているのが観察できる。これにより、発泡は連続して行われているのが分かる。また、気泡が発生してから離脱するまでの時間が長い。

4.1.2 中熱流束の時

熱流束を $8 \times 10^5 \text{W/m}^2$ 程度の場合の時間、及び温度、発泡時間についての図を円筒型キャビティがある方を Fig.26, ない方を Fig.27 に示す。円筒型の場合は前回と同様、連続して発泡しているが、キャビティのない場合は一度発泡すると連続して発泡するが、また次に発泡するまで休止期間がある。キャビティがない場合は一度発泡すると温度が一気に下がるので次に発泡する温度にあがるまで時間がかかるのではないかと思われる。発泡開始温度はキャビティの無い方が高い。発泡時間と温度について、キャビティがない場合は連動しているが、キャビティがある場合は発泡時間と温度変動が連動していない。それは Fig.30 を見ればわかるように、キャビティがある場合は気泡の形が縦に長くなっているのに対し、キャビティがない場合は横に広がっていることが原因であると思われる。全体としては気泡離脱間隔が狭くなっている。

4 . 1 . 3 高熱流束の時

熱流束を $9 \sim 10 \times 10^5 \text{W/m}^2$ 程度に上げると、キャビティのある加熱面もない加熱面も一定の周期を持って発泡した。とくにキャビティのない加熱面については発泡時刻と温度変動が一致した。気泡が生成される時に潜熱を奪ったものだと思われる。発砲開始温度はキャビティの無い方が高い。円筒型キャビティがある方を Fig.28, ない方を Fig.29 に示す。

全体としてキャビティがある場合は熱流束に応じて発砲開始温度が上変化しているが、キャビティがない場合は熱流束による発砲開始温度の違いはあまり見られない。

キャビティ $D=10\ \mu\text{m}$, $h=5\ \mu\text{m}$

Average Heat Flux $1.5 \times 10^5\ (\text{W}/\text{m}^2)$

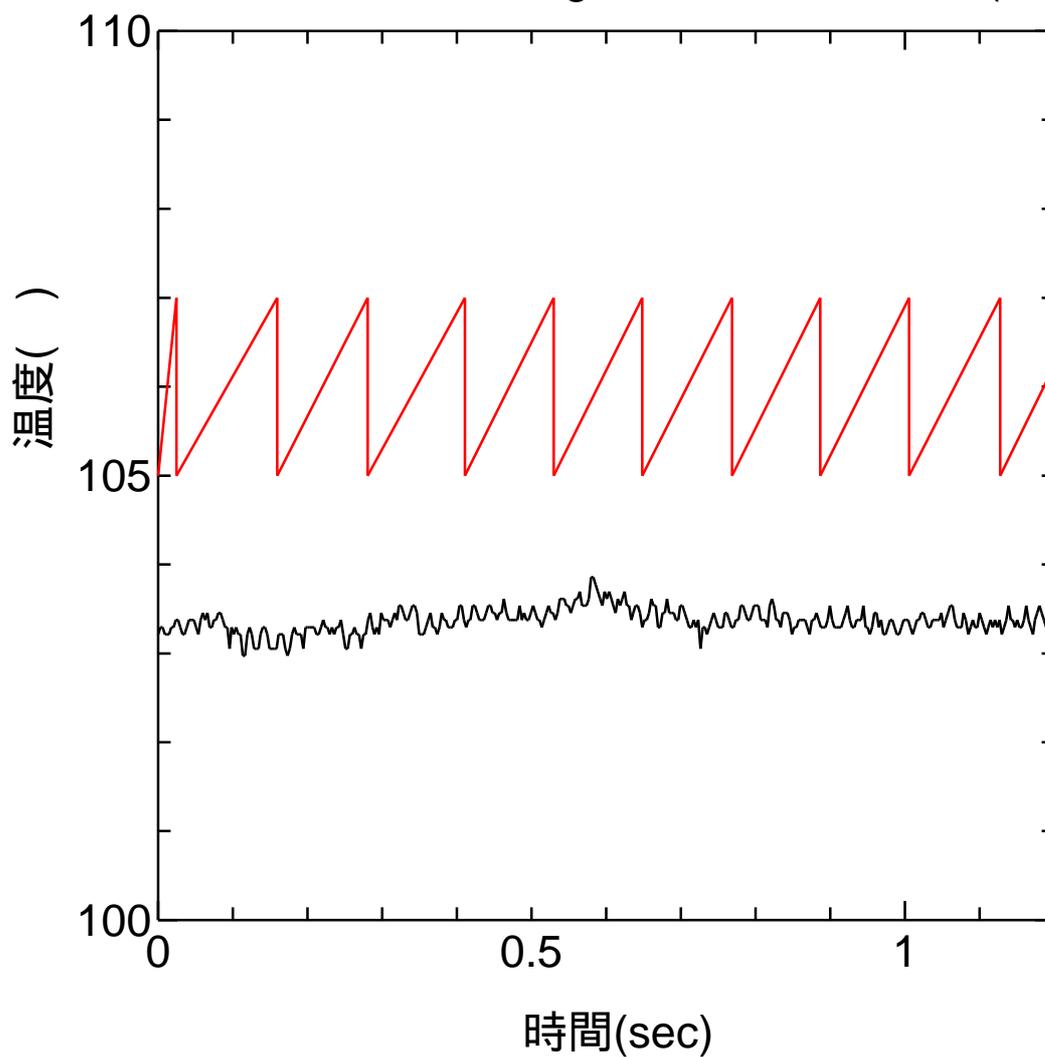


Fig.25 発泡時間と加熱面裏側の温度

キャビティ $D=10\mu\text{m}$, $h=5\mu\text{m}$

Average Heat Flux $7.7\times 10^5(\text{W}/\text{m}^2)$

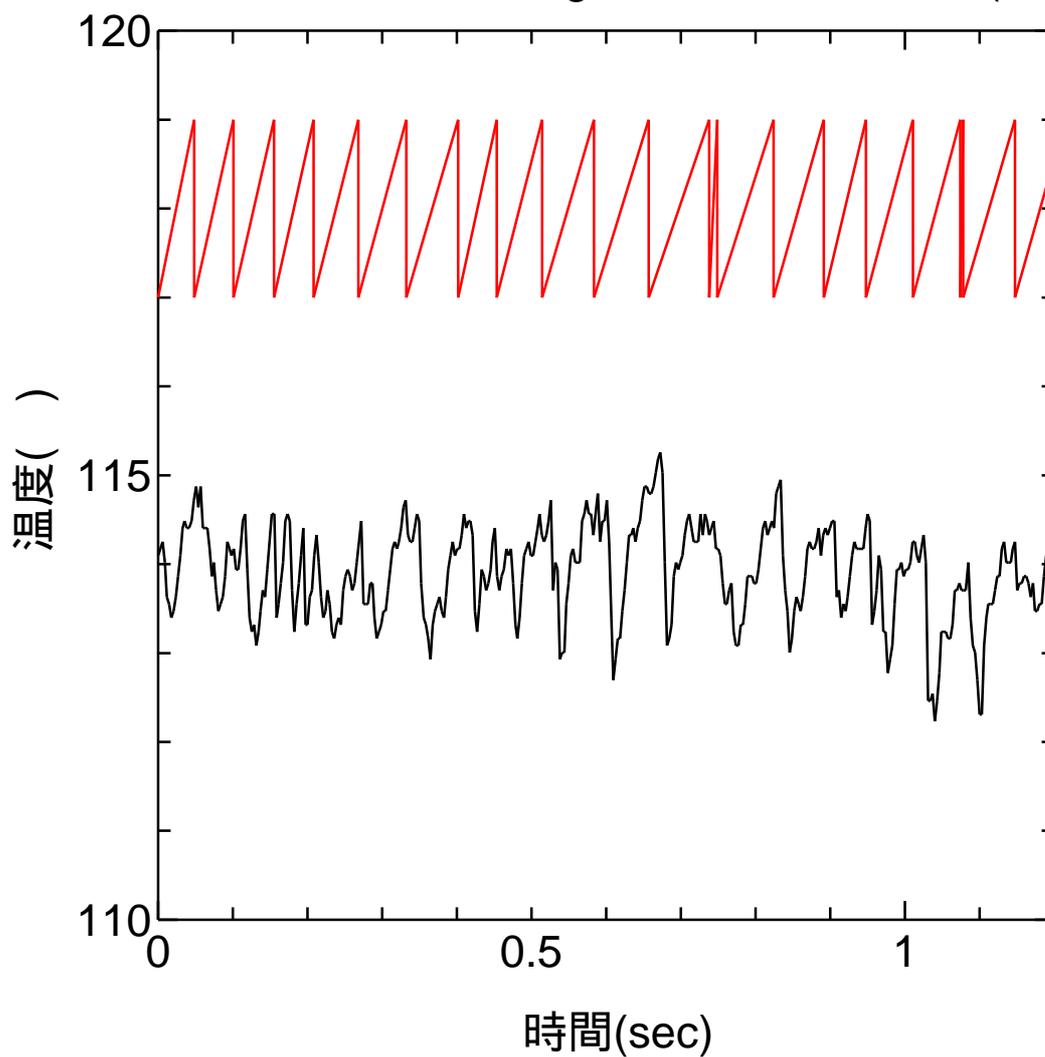


Fig.26 発泡時間と加熱面裏側の温度

キャビティがない場合

Average Heat Flux $7.9 \times 10^5 \text{ (W/m}^2\text{)}$

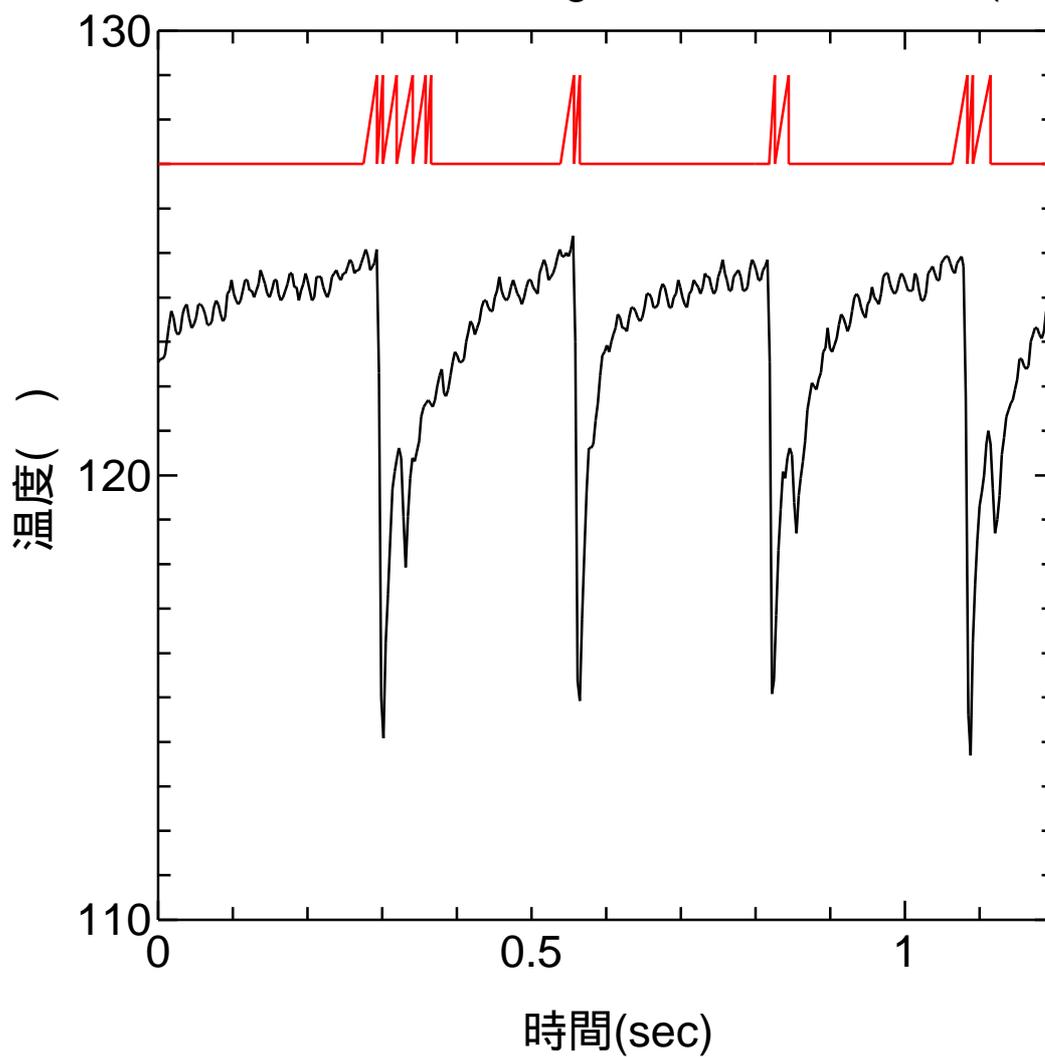


Fig.27 発泡時間と加熱面裏側の温度

キャビティ $D=10\mu\text{m}$, $h=5\mu\text{m}$

Average Heat Flux $9.4 \times 10^5 (\text{W}/\text{m}^2)$

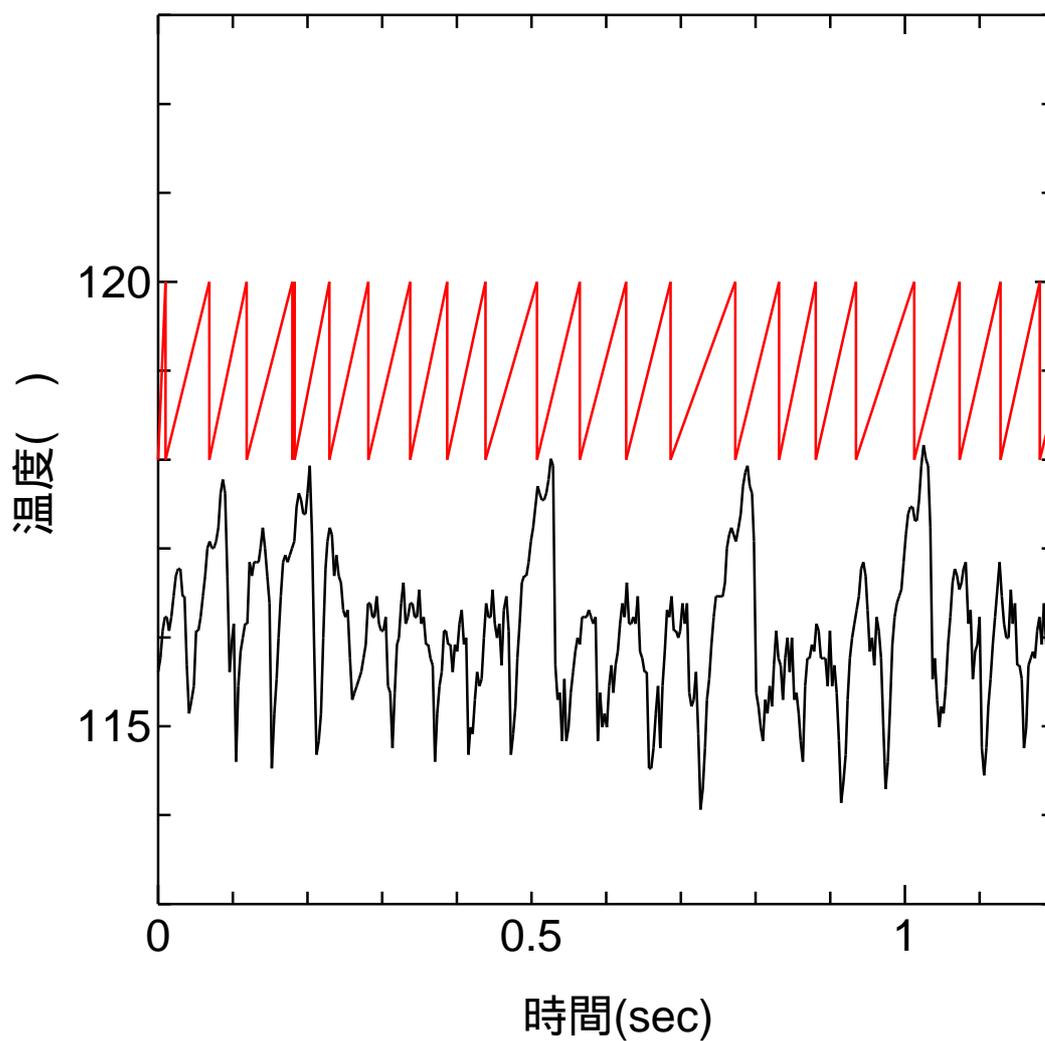


Fig.28 発泡時間と加熱面裏側の温度

キャビティがない場合

Average Heat Flux $9.4 \times 10^5 \text{ (W/m}^2\text{)}$

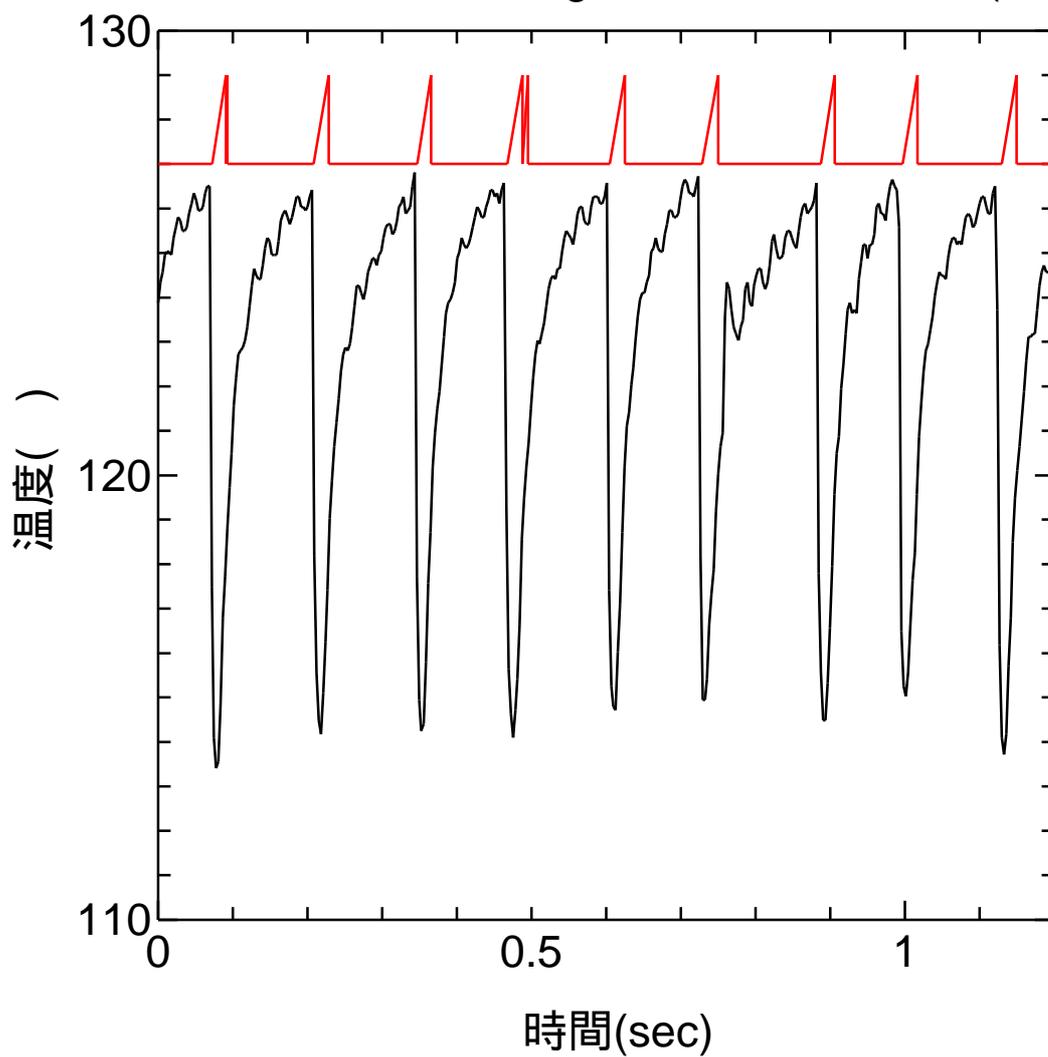
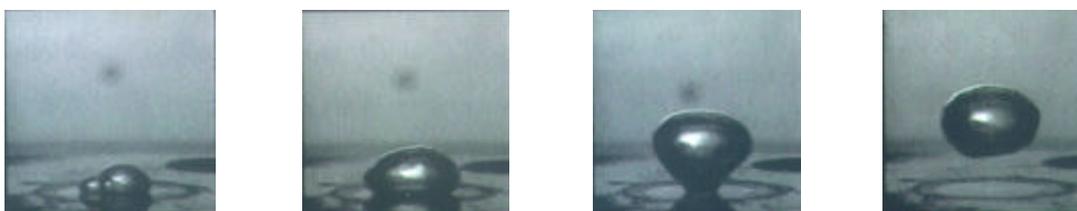


Fig.29 発泡時間と加熱面裏側の温度

Average Heat Flux $9.4 \times 10^5 \text{ W/m}^2$



キャビティがある場合



キャビティがない場合

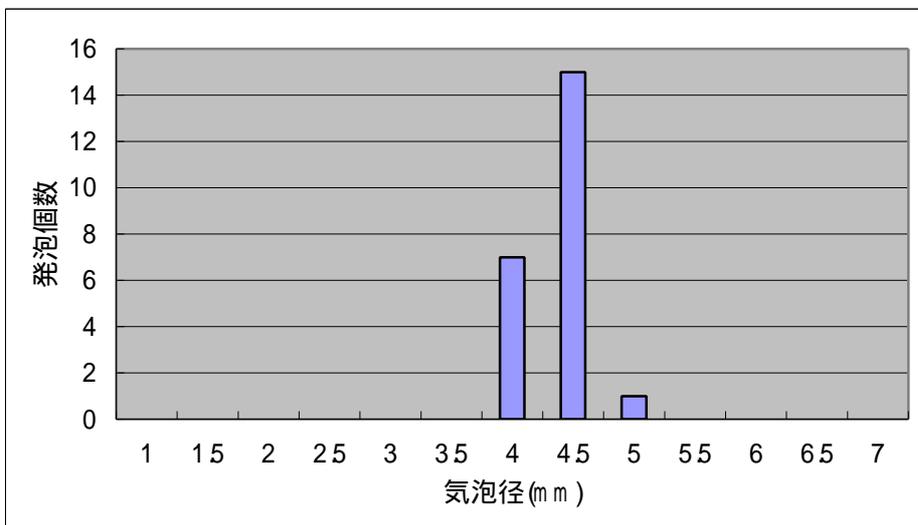
Fig.30 発泡の様子

4.2 気泡径のばらつきによる比較

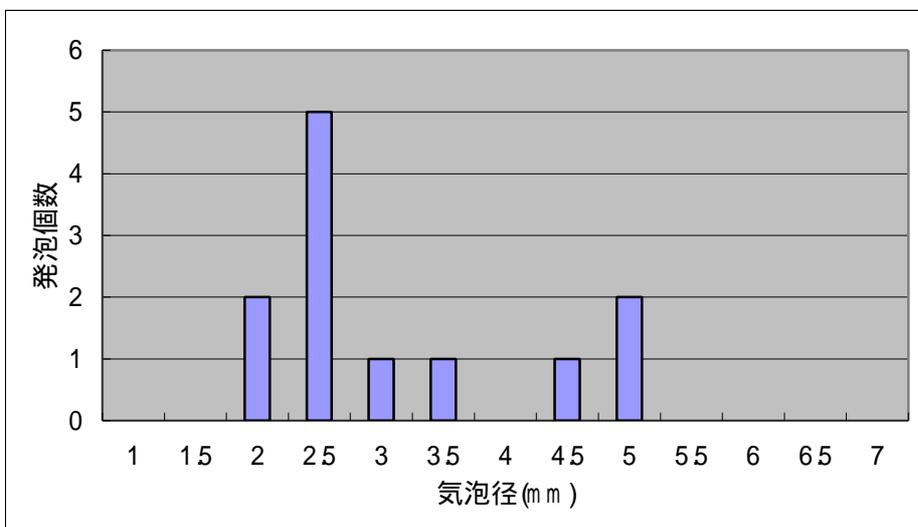
高速度ビデオカメラで撮った映像から、1.5 秒間に発生した気泡の径と個数の関係を調べた。中熱流束の時 (Fig.31) キャビティがある場合は気泡径の大きさが比較的安定しているのに対し、キャビティがない場合は気泡の径にばらつきが見られる。キャビティがない場合は気泡が離脱してから休止期間があるため、加熱面付近の液温が大きく変動している事に原因があると考えられる。特に、連続して発泡しているときは加熱面近傍の温度が十分に暖められていない状態で発泡しているので、それが気泡の径に影響しているものと思われる。

高熱流束の時 (Fig.32) も同様、キャビティがある場合は気泡径の大きさが安定しているのに対し、キャビティがない場合は大体大きさが一定しているものの、時折小さな気泡が発生している事が分かる。その原因として気泡が連続して発泡している時と休止期間を経て発泡している時の違いが挙げられる。連続して発泡している時は休止期間を経て発泡している場合に比べて加熱面付近の液温が低いため、十分に気泡が発達しないまま離脱したと考えられる。

Average Heat Flux $7.8 \times 10^5 \text{W/m}^2$



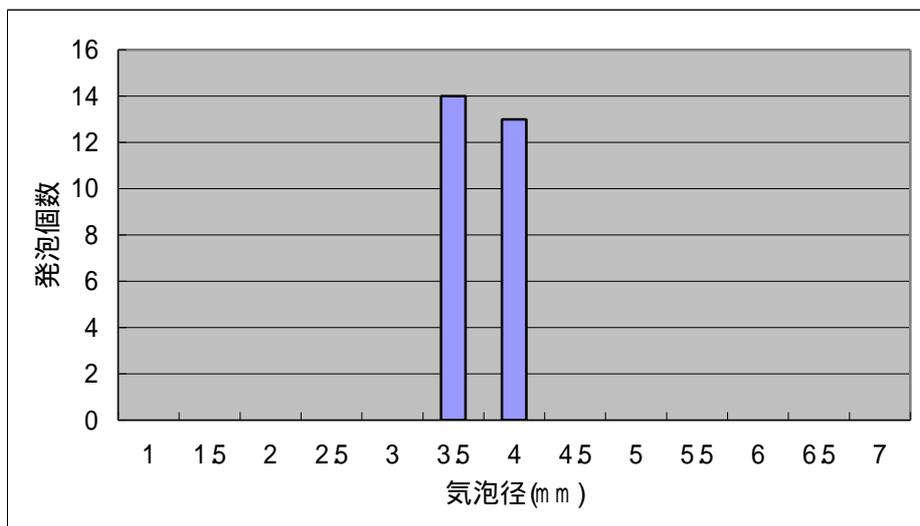
キャビティがある場合



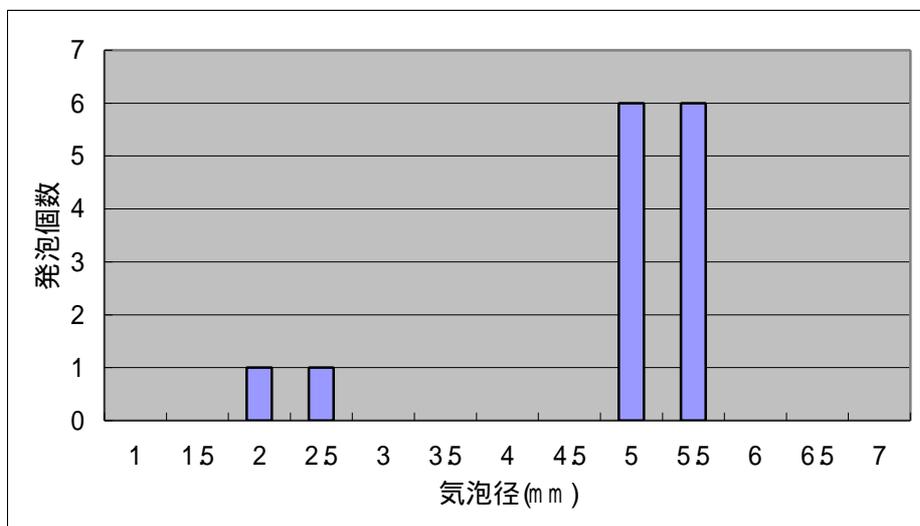
キャビティがない場合

Fig.31 気泡径と発泡個数

Average Heat Flux $9.4 \times 10^5 \text{W/m}^2$



キャビティがある場合



キャビティがない場合

Fig.32 気泡径と発泡個数

熱流束と気泡の径の関係

高速度ビデオカメラに映った気泡の映像から気泡の径と熱流束の関係を Fig.33 に示す。キャビティがある加熱面では熱流束とともに気泡半径が増大したが、キャビティのない加熱面では、途中で気泡の径が小さくなるという現象が起こった。これは気泡が離脱する時に次に来る気泡を吸い込むような形で合体気泡になるからと思われる。すなわち、気泡が成長する前に離脱することが原因だと思われる。

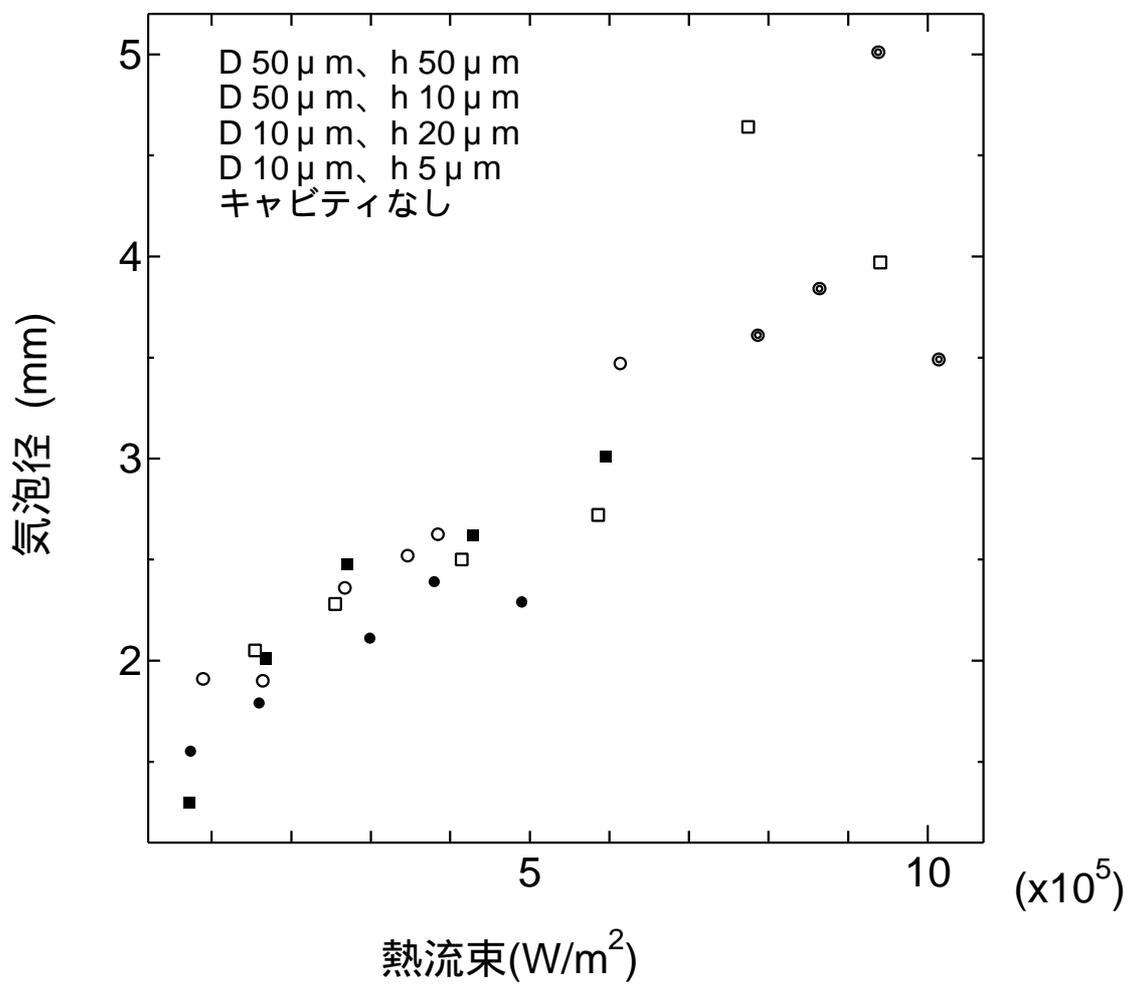


Fig.33 熱流束と気泡径の関係

第 5 章 結論

これまでの実験を通して以下のような結論に達した。

キャビティの有無による違いを以下の点で定性的に評価できた。

- 1 . 人工キャビティがない加熱面の方が沸騰開始温度が高く、温度変動が激しい。
- 2 . 人工キャビティが無いと気泡半径にばらつきが見られる。
- 3 . 熱流束を上げていくとキャビティがある場合、気泡半径が増大した。

参考文献

- [1] Nelson, R., Kenning, D., Shoji, M., "Nonlinear Effects and Behavior in Nucleate Boiling," *4th Experimental Chaos Conference*, August 6-8, Boca Raton, Florida, 1997.
- [2] Shoji, M., "Boiling Chaos and Modeling," Proc. The Eleventh International Heat Transfer Conference, August 23-28, Kyongju, Korea, 1998, pp3-21.
- [3] 庄司正弘 「伝熱工学」 東京大学出版会 1995

謝辞

本論文作成に当たり、親身なご指導を頂きました庄司正弘教授に心から感謝いたします。さらに研究会で不理解な点をいろいろ御指摘頂いた丸山助教授に感謝いたします。また多くの貴重な御助言を頂きました横谷助手に厚くお礼申し上げます。また、日頃何かと助けて頂いた井上助手、渡辺技官に感謝致します。

不慣れなコンピューター操作の際、いつも御指導下さった山口先輩、成瀬先輩、小林先輩をはじめ、実験の進行に際してたびたびのご助力を頂いた上野先輩、賀先輩、李先輩、阿部先輩、伊藤先輩、徐先輩に深く感謝致します。また、この1年間共に励ましあい、切磋琢磨しあった4年生の芝君、吉井君の今後の活躍を期待しています。

そして最後に、共に実験の進行にあたった修士2年の高木先輩には、度重なる御迷惑をおかけしたことを深くお詫び致します。未熟者の私に実験や論文作成、その他多方面にわたるアドバイスを頂き感謝に絶えません。博士課程に入ってからのもう一層のご活躍を期待しています。

以上

1P 43P 完

卒業論文

平成 11 年 2 月 5 日

学生証番号 70178 石黒 崇三