卒業論文

マルチキャビティ人工面における沸騰挙動

1 - 72 ページ 完

平成15年2月7日提出

 指導教官
 庄司 正弘 教授

 丸山 茂夫 助教授

10221 山本 洋佑

<u>目次</u>

1. 净論	3
1 . 1 背景	4
1.2 目的	5
2.実験と解析	6
2 . 1 実験装置概要	7
2 . 2 実験装置	8
2.3 実験方法	12
2.3.1 実験手順	12
2.3.2 試験片	13
2.4 解析方法	14
2.4.1 撮影方法	14
2.4.2 画像解析	15
3.実験結果と考察	16
3 . 1 実験結果(In-line)	17
3 . 1 . 1 In-line S=1mm	17
3 . 1 . 2 In-line S=2mm	19
3.1.3 S=1mm と S=2mm の比較(In-line)	21
3.2 実験結果(Triangle)	33
3 . 2 . 1 Triangle S=2mm	33
3 . 2 . 2 In-line(S=2mm)と Triangle(S=2mm)の比較	36
3.2.3 Triangle における 3 つのキャビティ間での発泡挙動の違い	45
4. 結論	47
参考文献	49
寸録1.気泡の発生・離脱(約 200msec 間)	50
寸録 2. 気泡体積の成長速度	69
最後に	

1. 序論

1.1背景

沸騰は日常生活において身近な現象であるとともに、相変化を伴うため単相流体の熱伝達と比較して格段に効率の良い熱交換を行うことができる.このため工業的には特に冷却を目的としてボイラを用いた発電、鋼鉄の製造プロセスや電子デバイスの冷却などと多岐にわたっている.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伴いより小さな領域で大きな熱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.そのための新たな冷却法の1つとして核沸騰による沸騰伝熱冷却が注目されている[1].このような沸騰現象の高い熱伝達効率は古くから注目されており、50年近くにわたる長い研究の歴史を経て沸騰を応用した研究は一段落しつつある.しかし沸騰現象は相変化を伴い、さらに気泡と流体の運動など様々な要素が複雑に絡み合った非線形現象であるため沸騰現象そのものの機構は未だ解明されていない部分が多い.沸騰現象の相変化は加熱面上の微細な傷(キャビティ)において起こると考えられている.実際の加熱面上には無数のキャビティが存在し、この表面の複雑さが沸騰現象を複雑にしている1つの要因である.

近年の微細加工技術の発達により,人工的にミクロンオーダーのキャビティを加熱面上に配置することが可能になった.これにより複雑な自然沸騰面でなく,キャビティの配置・個数などがあらかじめわかっている人工沸騰面を使って沸騰の研究ができるようになった.既に,キャビティ形状と発泡挙動の関係[2],キャビティサイズと発泡核の安定性の関係[3],ツインキャビティを持つ人工面による気泡干渉[4],マルチキャビティ人工面を用いた研究 [5]などが行われており,沸騰現象のメカニズムの解明が期待される.

1.2目的

沸騰現象のメカニズムを解明し,理想的なモデルを作ることで工業的に応用するにあたって様々な要求に応じた伝熱特性を持つ沸騰面の製作を可能にすることが核沸騰熱伝達に関する研究の最終目標である.

実際の沸騰では無数の気泡が発生し干渉し合うため、沸騰現象のメカニズムを解明する ためには複数のキャビティを持つ人工面で研究を行う必要がある.

本研究ではマルチキャビティ人工面の中でも最もシンプルなトリプルキャビティ人工面における伝熱特性・発泡挙動を明らかにする.

2. 実験と解析

2.1 実験装置概要

Fig.2.1 に実験装置の概略図を示す.トリプルキャビティを配置した人工面を加熱部に取り付け,沸騰槽内を蒸留水で満たす.液温は熱電対によりモニターされ温度調節は補助ヒータで行う.人工面の加熱はレーザによって下面から行い,その温度を放射温度計で測定する.また,発泡の様子を正面から高速度ビデオカメラを用いて撮影し観察する.熱線流速計を用いて気泡付近の流速を計る.

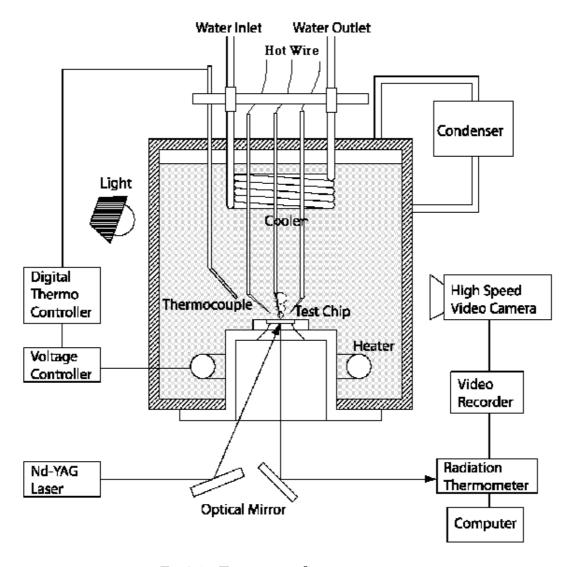


Fig.2.1 Experimental apparatus.

2.2 実験装置

以下に実験装置の具体的な説明を記す.

試験部

キャビティを配置した 20mm×20mm の正方形 Si ウェハを加熱面とし,これを直径 60mm の真鍮アダプタに接着した.アダプタには加熱面を接着するための 20mm×20mm の正方形のへこみがあり,さらにこの中に直径 13mm の円形窓が開いている.加熱面をアダプタに接着した後,裏面からアクリルラッカーつや消し黒で黒染めし,レーザパワーを吸収しやすくした.



Fig.2.2 Heated surface.

沸黱槽

加熱面を取り付けた真鍮アダプタを沸騰槽下についている蓋に取り付ける.沸騰槽は真鍮製で,液温を飽和状態に保つため補助ヒータがついており,液温は熱電対によってモニターされる.また,蒸気を液体に戻すための凝縮器がついているが,本実験では熱線流速計を取り付けるための隙間が上部に開いているため,そこから蒸気が逃げてしまう.



Fig.2.3 Boiling cell.

レーザ発振装置

レーザを用いて沸騰面を加熱するという実験は数少ない[6]. 本実験では使用したレーザパワーは 3~10W 程度である.なお,実験前後にレーザパワーをパワーメータで測定した.



Fig.2.4 Diode laser.



Fig.2.5 Power meter.

光学系

レーザはレーザ発振装置から光ファイバーを用い,光学系を介して沸騰槽本体まで導いている.レーザ強度はガウス分布を持つため直接加熱面照射するとその強度分布が加熱面に反映されてしまう恐れがある.そこでファイバー出口で広がったレーザを凸レンズを通して並行にした後,アパーチャーを介して端面のパワーをカットし,ミラーで反射させて加熱面裏面に照射した.なお,加熱面裏面でのレーザスポット径は約12mmである.



Fig.2.6 Optical system.

放射温度計

NEC 三栄製, TH3102MR.スターリングクーラー内臓の赤外線放射温度計.加熱面裏面の赤外線放射を赤外域用のミラーで反射させて温度を計測している.加熱面の温度の測定方法としては他に加熱面に液晶温度計を貼り付けてその分布を知るというものがある[7].2次元のスキャンも可能だが,本実験では主に1次元ラインスキャンを利用した.計測開始と同時に同期信号を出力することができ,これを用いて後述の高速度ビデオカメラや熱線流速計と同期させている.



Fig.2.7 Radiation thermometer.

高速度ビデオカメラ

Photoron 製, FASTCAM-Net Max.放射温度計からの同期信号を受け撮影を開始する.本実験ではフレームレート 1000frame/sec で撮影した 撮影画像はビデオテープに録画し,画像解析に用いた.なお,光源としてメタルハイドライトランプを使用した.



Fig.2.8 Highspeed video camera.

Hot Wire

気泡付近の流速を計るため,熱線流速計を用いた.液体中に液温よりも高くした熱線を入れ,液体の流れにより冷却されることで液体の流速を計測するものである.本実験では3本の Hot Wire を使って3つのキャビティから発生する気泡付近の流速を測定した.

Degital Recorder

TEAC 製, DR-M3. 気泡付近の流速の変化を表示し,記録する. 放射温度計からの同期信号を受け,同時に記録を開始することができる.

2.3 実験方法

2.3.1 実験手順

以下に実験の手順を記す.

- 1. 加熱面を沸騰槽内に設置し,蒸留水を注ぐ.
- 2. 補助ヒータで蒸留水を沸騰させ,十分脱気する.
- 3. 実験開始前の電流値とレーザパワーの相関を計測する.
- 4. 光学系を用いてレーザを沸騰槽下まで誘導する.
- 5. 放射温度計を設置する.
- 6. 高速度ビデオカメラを設置する.
- 7. 熱線流速計を設置する.
- 8.目的の水温に達した後,レーザパワーを調節して加熱面から発泡させる.
- 9. 高速度ビデオカメラ・放射温度計・熱線流速計で測定する.
- 10. 再び水温を調節し, レーザパワーを変えて測定を行う.
- 11. 必要なデータを取り終えるまで 10 を繰り返す.
- 12.実験後の電流値とレーザパワーの相関を測定する.

2.3.2 試験片

本実験ではトリプルキャビティを持つ人工沸騰面を用いた.以下に試験片のスケッチを 示す.

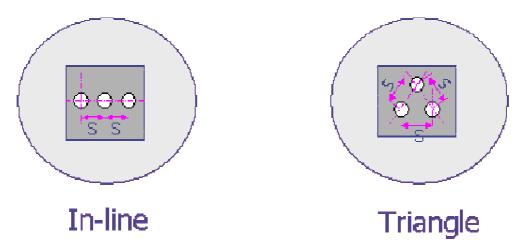


Fig.2.9 Sketches of Test pieces.

試験片は 20×20 mm の正方形状で,厚さは 0.2mm である.キャビティ間の距離 S は In-line・Triangle ともに 1mm と 2mm を用いた.また,キャビティ径は全て $10\,\mu$ m である.

試験片として一辺 20mm の正方形 , 厚さ 0.2mm のシリコンウエハを用い , その面に円筒型のキャビティを DRIE (Deep Reactive Ion Etching)によって加工した . Fig.2.10 に示すのが DRIE 装置にシリコンウエハを挿入する際の写真である . マスクに様々な直径を持つ円を描き , DRIE 装置に任意の時間かけることによって円筒型キャビティが完成する . 直径は $5\mu m \sim 100\mu m$, 深さは DRIE でのビーム照射時間によってコントロールする .



Fig.2.10 Insertion of silicon water to DRIE system.

2.4 解析方法

本実験では,発泡の様子の撮影・加熱面裏面の温度・気泡付近の流速を測定したが,解析では発泡の様子の映像からの画像解析のみを行ったので,その方法を以下に記す.

2.4.1 撮影方法

本実験で使用した高速度ビデオカメラの最高撮影速度は 10000frame/sec であるが,これではデータ量の制限により撮影時間が極端に短くなってしまう.そこで本実験では 1000frame/sec で撮影を行った.沸騰における発泡現象の時間オーダーは 10msec ~ 100msec ということなので,解析可能な撮影時間を確保しつつできるだけ速い撮影速度が必要で,これは妥当なものだと言える.また,撮影は加熱面に水平な方向から行っていて,Fig.2.11 に示すようにそれぞれのキャビティを左から Left, Middle, Right と呼ぶ.

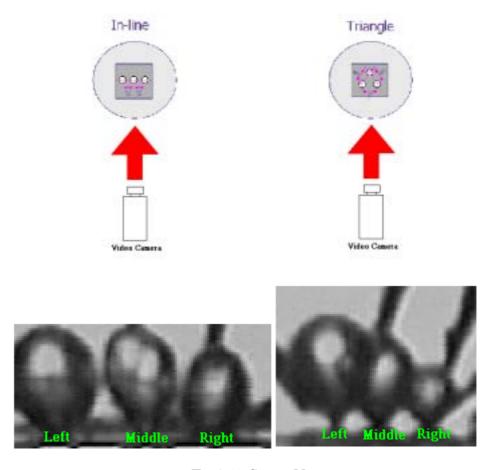


Fig.2.11 Cavity Name.

2.4.2 画像解析

高速度ビデオカメラで撮影した映像を画像解析することで発泡回数・気泡体積などを求めることができる。AVIEDIT なるソフトを用いて映像をコマ送りで観察し、気泡発生・離脱の起こった時間を調べる(Fig.2.12).また、発泡の映像をビットマップシーケンスに変換し、気泡径測定ソフトを用いて気泡の直径などを測定する事ができる。Fig.2.13に示すように、赤の線を気泡の中心に、緑の線を気泡の左端に、青の線気泡の右端に、黄色の線を気泡の下端に合わせた後上端に合わせ、気泡の直径・左半径・右半径・高さを求める。なお、このソフトでの測定には人間の主観が入り込んでしまうため気泡径の絶対値はあまり信頼できないが、相対値としては信頼できるだろうとして解析を行った。



Fig.2.12 Image analysis 1.

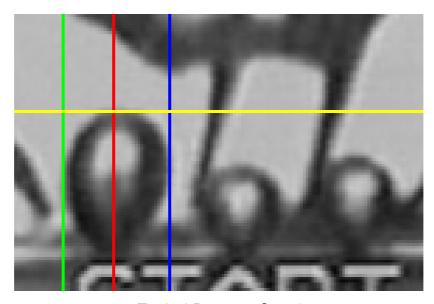


Fig.2.13 Image analysis 2.

3. 実験結果と考察

3.1 実験結果(In-line)

3 . 1 . 1 In-line S=1mm

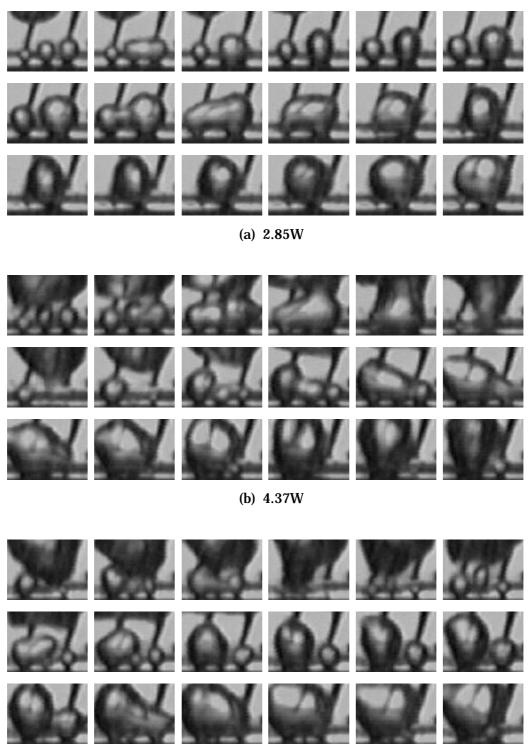
In-line S=1mm について,低・中・高熱入力における発泡の様子を以下に示す.

低熱入力(2.85W)の場合について,中央のキャビティからの気泡は発生してからすぐに左右どちらかの気泡に吸い込まれてしまうため,あまり大きくは成長しない.左右の気泡は中央に比べるとかなり長い時間成長し,ある程度成長すると両端の気泡同士が合体して離脱する.先に離脱した気泡に後から発生した気泡が吸い込まれるという縦方向の合体も見られる.

中熱入力(4.37W)の場合について,低熱入力と同様の中央からの気泡が左右どちらかに吸い込まれて離脱というパターンも見られるが,低熱入力の場合と比べて中央の気泡の径が大きいため,吸い込まれるのではなく両端の気泡と接触し,3つの気泡が同時に合体して離脱という様子が見られる.また,低熱入力に比べると縦方向の合体が増えている.

高熱入力(5.80W)の場合について,3つの気泡が合体して離脱後,その離脱した気泡に後から発生した気泡が次々と合体し,再びキャビティから発生した3つの気泡の横方向の合体後,縦方向の合体が起こるといった様子が見られる.

In-line S=1mm の特徴として,ほとんどの場合気泡同士の合体が起こり,端と中央の気泡の合体だけでなく,端と端の気泡同士の合体も多く見られる.



(c) 5.80W

3 . 1 . 2 In-line S=2mm

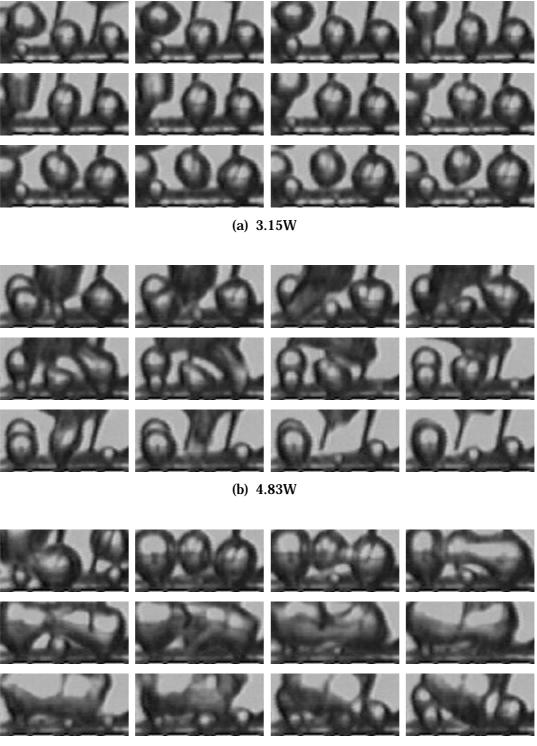
In-line S=2mm について,低・中・高熱入力における発泡の様子を以下に示す.

低熱入力(3.15W)の場合について,全体的にどの気泡もある程度の大きさまで成長し,その後中央の気泡は左右どちらかの気泡と合体して離脱するか,合体せずに離脱しその後左右の気泡と合体するという様子が見られる.両端の気泡は中央の気泡と合体して離脱,または離脱後合体というパターンが多いが,時折全く合体しない場合も見られる.また,縦方向の合体も多少見られる.

中熱入力(4.83W)の場合について,低熱入力の場合より全体的に気泡径が大きい.横方向の合体については低熱入力の場合と似ているが,合体して離脱した気泡に後から発生した気泡が引き込まれて離脱という縦方向の合体が多く見られるようになる.

高熱入力(6.42W)の場合について,中熱入力の場合よりも全体的に気泡径が大きい.横方向の合体については低・中熱入力の場合と似ているが,中央の気泡は合体して離脱というパターンが多く,合体せずに離脱してその後合体というパターンは見られなくなっている.また,縦方向の合体も多く見られる.

In-line S=2mm の特徴として,どのキャビティも合体直前までは同じくらいの大きさまで成長し,中央と端の合体はよく見られるが,端と端の気泡同士の合体は見られない.また,端の気泡は時折全く合体しないこともある.



(c) 6.42W

3.1.3 S=1mm と S=2mm の比較(In-line)

発泡回数(Bubble Frequency)

まず, S=1mm と 2mm の単位時間当たりの発泡回数を比較する.ここでの発泡回数は,離脱の仕方を問わずキャビティ上に気泡が発生して気泡が離脱したら1回として数えるものとする.約200msec 間での発泡回数を数え,それから単位時間当たりの発泡回数を求めた.



(a)発生



(b)成長



(c)離脱

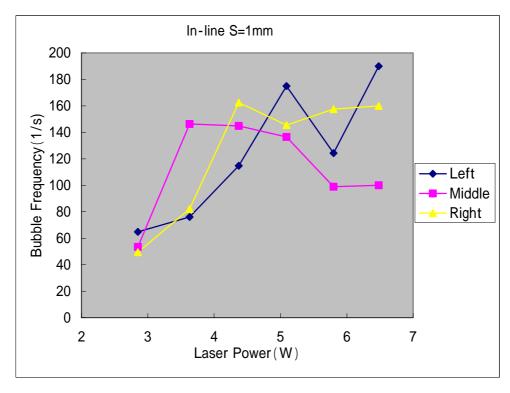
レーザパワーと発泡回数の関係は Fig.3.1 に示す. S=1mm ではレーザパワーが低い時 (2.85W)は全体的に発泡回数が少なく,両端のキャビティはレーザパワーが上がるとともに 発泡回数が増えている. 逆に中央はレーザパワーが上がると発泡回数が減っている.

S=2mm ではレーザパワーを変えても S=1mm のように発泡回数に大きな変化が見られない.また,両端よりも中央からの発泡回数が多いということもわかる.

S=1mm と 2mm の大きな違いはレーザパワーを変えた時の発泡回数の変化と中央・両端の発泡回数の違いである。S=1mm ではレーザパワーを上げると発泡回数も増えていくが、S=2mm ではレーザパワーを上げても発泡回数に大きな変化はない。また、S=1mm では中央の発泡回数の変化は両端のそれとは違っているが、S=2mm では中央と両端の発泡回数の変化の仕方に大きな違いは見られない。

また, Fig.3.2 に示してあるレーザパワーと 3 つのキャビティからの発泡回数の合計の関係について S=1mm と 2mm で比較について, S=1mm ではレーザパワーが低い時は総発泡回数が少なく, レーザパワーを上げていくと総発泡回数も増えるが, ある程度レーザパワーを上げると総発泡回数は増えなくなるようである.

S=2mm ではレーザパワーを上げても総発泡回数にあまり大きな変化は見られない.また, 総発泡回数は S=1mm よりも少ないということがわかる.



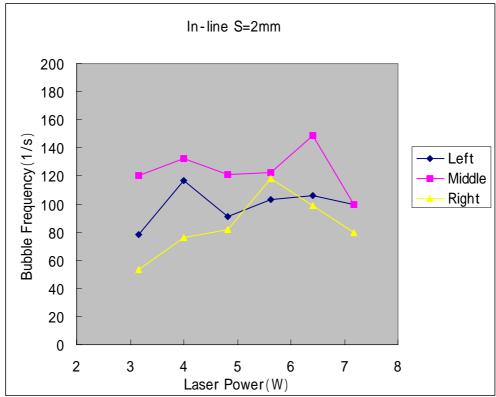


Fig.3.1 Bubble Frequency(S=1mm,2mm).

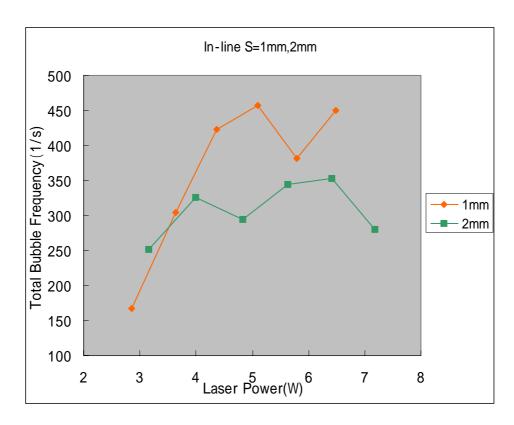


Fig.3.2 Total Bubble Frequency.

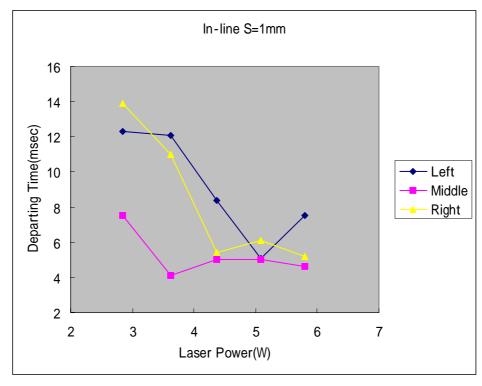
成長時間(Departing Time)

気泡が発生して離脱するまでにかかる時間を成長時間という.ここでは約 200msec 間で起こる発泡・離脱までの成長時間の平均を用いている.レーザパワーと成長時間の関係はFig.3.3 に示す通り.

S=1mm では両端のキャビティでの成長時間はレーザパワーが低い時(2.85W)は長いが, レーザパワーを上げていくと短くなり,4.37W あたりから一定値に近づいていくように見える.中央のキャビティでの成長時間は両端と比べるとレーザパワーを変えてもあまり大きな変化が見られない.

S=2mm では右側のキャビティの成長時間はレーザパワーを上げていくと減少していく傾向にあるが,その他のキャビティでの成長時間はレーザパワーを変えてもあまり大きな変化は見られない.

S=1mm と 2mm の違いについて、1mm ではレーザパワーを上げると成長時間は短くなっていくが、2mm ではそれほど大きな変化は見られない、1mm の場合、中央のキャビティの成長時間はあまり大きく変化しないが、これは両端に比べ合体回数が多くある程度成長すると合体して離脱してしまうため、成長できる時間が限られているのでレーザパワーが低い状態でも両端に比べると成長時間が短くなってしまうからだと考えられる。S=2mmでも中央のキャビティの成長時間は両端に比べて短いが、これも同じ理由だと考えられる。また、両端のキャビティの成長時間について、S=1mm では成長時間がレーザパワーの上昇とともに減少していく傾向が見られるが、レーザパワーが上がると気泡が速く成長するために早く合体が起こり離脱するので、成長時間が短くなっているものだと考えられる。S=2mmではレーザパワーを上げても成長時間にそれ程変化がないが、これはキャビティ間の距離が大きいため、気泡が速く成長しても合体しにくいためだろう。



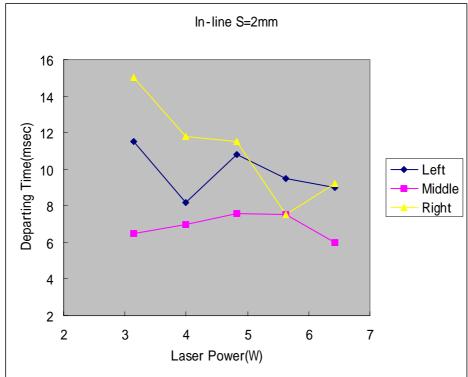


Fig.3.3 Departing Time(S=1mm,2mm).

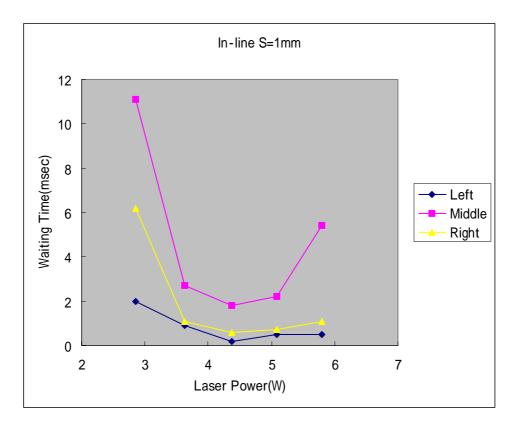
待ち時間(Waiting Time)

気泡が離脱した後,次の気泡が発生するまでの時間を待ち時間という.ここでは約 **200msec** 間での離脱・発生の待ち時間の平均を用いている.レーザパワーと待ち時間の関係は Fig.3.4 に示す.

S=1mm ではレーザパワーが低いところ(2.85W)では待ち時間が長く,レーザパワーを上げると待ち時間は減少し,3.63W 以降では両端のキャビティの待ち時間はほとんど変化しない.中央のキャビティの待ち時間は全体的に両端よりも長く,4.37W 以降ではレーザパワーが上がると待ち時間が長くなっている.

S=2mm ではレーザパワーが低いところ(3.15W)では多少待ち時間が長くなっているが,4.00W 以降はレーザパワーを上昇させても待ち時間に大きな変化は見られなくなっている.

S=1mm では両端と中央に大きな違いが見られるが,キャビティ間の距離が近いため,両端同士の合体などで両端からの発泡が盛んになることで中央部分の温度が低くなるからではないだろうか.S=2mm ではキャビティ間の距離が遠いため,中央と両端で待ち時間に大差がない.



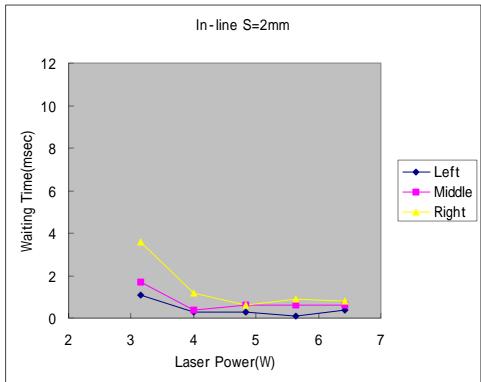
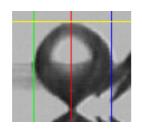


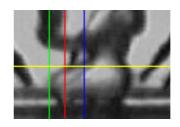
Fig.3.4 Waiting Time(S=1mm,2mm).

気泡体積(Bubble Volume)について

気泡の直径・高さを求めた後,気泡は楕円球であると仮定して体積を求める.しかし,トリプルキャビティ沸騰面では気泡が離脱するまでに合体が頻繁に起こってしまうため,画像解析から離脱前の気泡の直径・高さを測定することが非常に困難である.そこで,直接的に気泡直径・高さを求めて気泡体積を計算するという方法以外として,気泡の成長時間から気泡の体積を求めるという方法を用いた.合体後も,気泡が加熱面から離れるまでは合体前と同様の成長をすると仮定している.また,時間と気泡体積の関係を Fig.3.5 に示す.これを見ると,気泡の成長速度はほぼ一定であると言える.よって気泡体積は成長時間に比例して増大するとした.



(a) Single Cavity



(b) Triple Cavities

Single cavity の場合,合体が起こらないため容易に直径・ 高さを測ることができるが, Triple Cavities では合体のため 離脱時の直径・高さを測ることが非常に困難である.

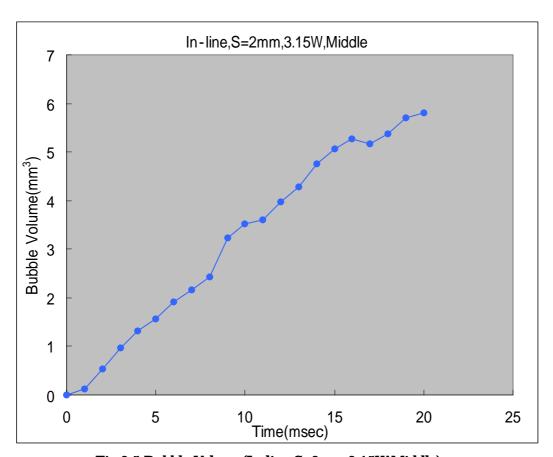


Fig.3.5 Bubble Volume(In-line,S=2mm,3.15W,Middle).

沸騰で奪われる熱量(Quantity of Heat)

気泡体積がわかれば蒸発した水の量がわかるので,それにより沸騰に使われた熱量を計算することができる.

水の蒸発潜熱: 2.253kJ/g 水蒸気の密度: 0.804kg/m³

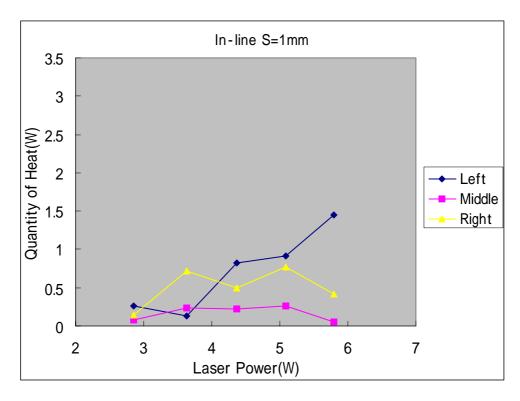
沸騰により体積 V(mm³)の気泡が発生した時に使われた熱量は 2.3 × V(J)となる.

約 200msec 間での気泡発生量から単位時間当たりの気泡発生量を用いて単位時間当たりで沸騰に使われる熱量(W)を計算した、レーザパワーと沸騰に使われた熱量の関係は Fig.3.6に示す.

まず S=1mm では左のキャビティではレーザパワーが上がるごとに沸騰に使われる熱量 も増大しているが,その他のキャビティではあまり大きな変化がない.また中央のキャビ ティは両端に比べ沸騰に使われている熱量が少ない.

S=2mm では左のキャビティではレーザパワーが上がるごとに沸騰に使われる熱量が増大している.中央と右ではあまり大きな変化は見られない.

S=1mm と 2mm のレーザパワーと 3 つのキャビティで沸騰に使われる熱量の合計の関係を Fig.3.7 に示す .1mm と 2mm を比較すると全体的に 2mm の方が沸騰で使われる熱量が大きい事がわかる .また ,グラフには入力熱量を表す直線(y=x にあたるもの)が描いてあり , 沸騰で使われる熱量がこれよりも小さくなっているのは , レーザを加熱面裏当てた時 , 一部が反射によって伝わらないということや , 沸騰せずに水温の上昇をさせるなど , 沸騰以外にも熱が使われているからである .



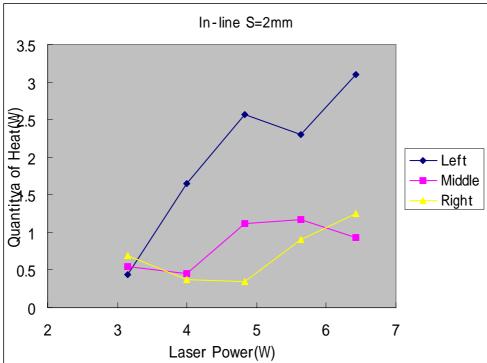


Fig.3.6 Quantity of Heat spent on Boiling(S=1mm,2mm).

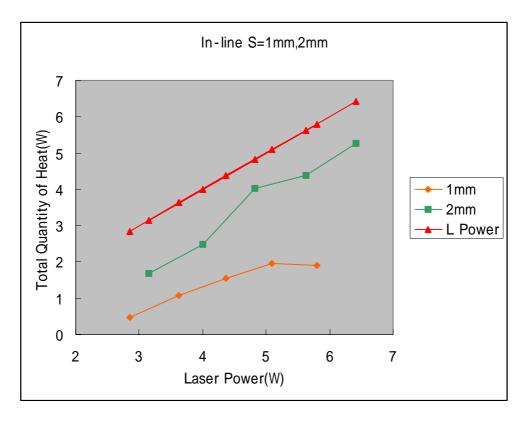


Fig.3.7 Total Quantity of Heat spent on Boiling.

3.2 実験結果(Triangle)

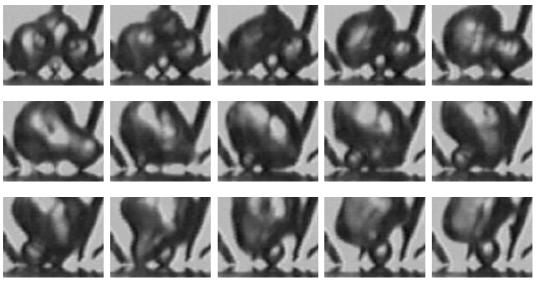
3 . 2 . 1 Triangle S=2mm

Triangle S=2mm について,低・中・高熱入力における発泡の様子を以下に示す.

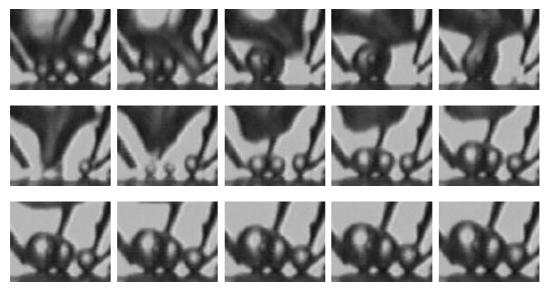
まず,低熱入力(2.83W)の場合について,ある程度気泡が成長した後,合体して離脱というパターンが多く見られる.時折全く合体せずに離脱する気泡もある.発生したばかりの小さな気泡が前の気泡に引き込まれるという縦方向の合体も多少見られる.

次に,中熱入力(4.35W)の場合について,低熱入力の時のような合体して離脱というパターンの他に,離脱後に合体というパターンもよく見られる.また,気泡発生から離脱までの時間が低熱入力時のそれよりも短い.縦方向の合体について,小さな気泡が引き込まれるようなものだけでなく,ある程度成長した気泡が前の気泡と合体して離脱といった様子も見られる.

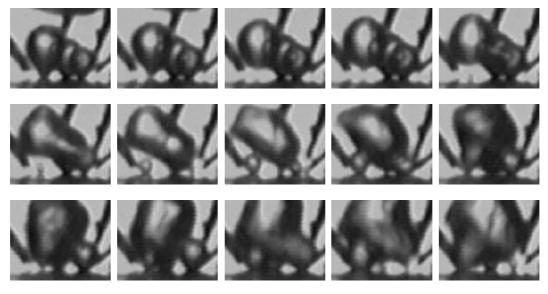
高熱入力(5.81W)の場合について,低・中熱入力の場合に比べると縦方向の合体がかなり 頻繁に起こるようになっている.



(a) 2.83W



(b) 4.35W



(c) 5.81W

3.2.2 In-line(S=2mm)と Triangle(S=2mm)の比較

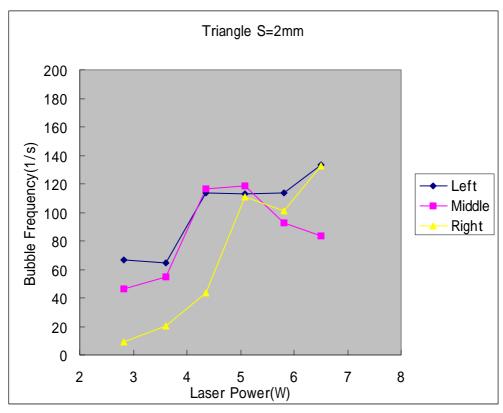
以下の比較は In-line(S=1mm,2mm)の時と同様に,約 200msec 間の映像から求めたデータを用いている.

発泡回数(Bubble Frequency)

まず In-line と Triangle の発泡回数を比較する .レーザパワーと発泡回数の関係は Fig.3.8に示す .

Triangle ではだいたいどのキャビティも似たような変化をすることがわかる.レーザパワーが低いところ(2.83W)では発泡回数は少なく,レーザパワーを上げると発泡回数も増えていく.しかし,4.35W あたりから発泡回数が増大していくという傾向は見られなくなる. In-lineではレーザパワーを変えても Triangle のような発泡回数に大きな変化が見られない.また,両端よりも中央からの発泡回数が多いということもわかる.

Triangle では In-line と違ってレーザパワーを上げると発泡回数が増えるが,これは Triangle の方が合体しやすい(どのキャビティも 2mm の距離にある)ため,気泡の成長速度が速くなるので合体によって離脱が促進されるためだと思われる.



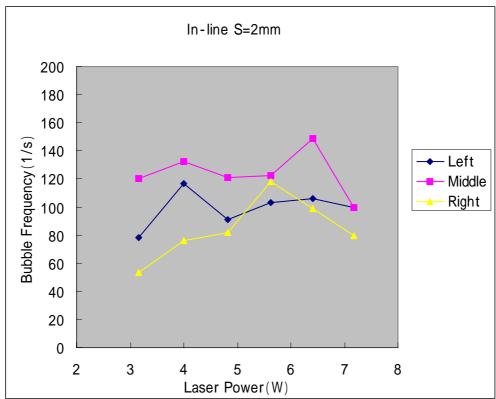


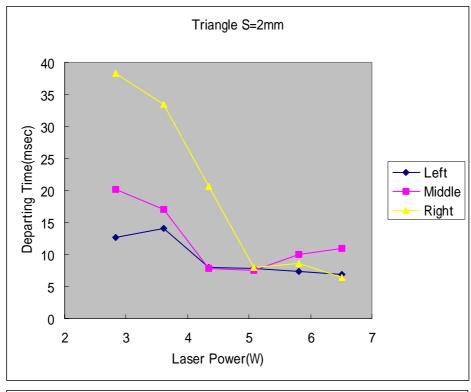
Fig.3.8 Bubble Frequency(Triangle,In-line)

成長時間(Departing Time)

まず Triangle について ,左・中央ではレーザパワーが低いところでは成長時間が長く,レーザパワーが上がるにつれて時間は減少していき 4.35W あたりからあまり変化しなくなっている.右のキャビティは 2.83W では他と比べると極端に成長時間が長いが,レーザパワーが上昇していくと他の 2 つと近い値になっている.

In-line について, Triangle と違って成長時間に大きな変化が見られない.

Triangle と In-line では,5W以上では発泡回数にそれほど差が見られないがレーザパワーが低い部分ではその様子は大きく異なっている.また,全てのキャビティが対称であるはずの Triangle で右と他の2つのキャビティで成長時間の変化が大きく異なっているが,実験中も右のキャビティから発泡しにくいなどの様子が観察された.完全に同じキャビティを作ることはできないので,これはキャビティの質の違いが原因でないかと思われる.



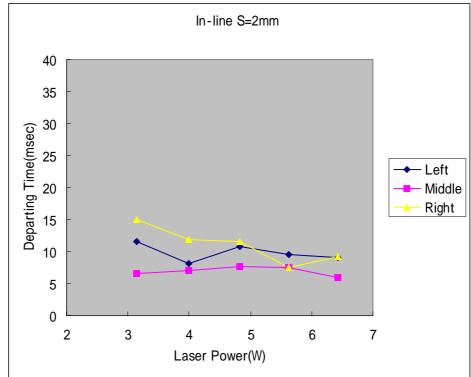


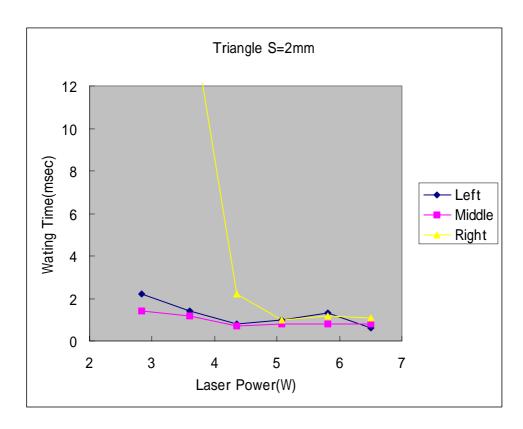
Fig.3.9 Departing Time(Triangle,In-line).

待ち時間

Triangle の方は左・中央ではレーザパワーを変えても待ち時間に大きな変化は見られない。右ではレーザパワーが低いところ($2.83 \sim 4.35$ W)では待ち時間が非常に長いが 5.08W 以上では他のキャビティの待ち時間と大差ない。

In-line では 3.15W あたりでは右のキャビティの待ち時間がその他のキャビティの 2 倍程度あるが,全体的には大きな変化は見られない.

Triangle でも In-line でもレーザパワーを変えても待ち時間にはあまり大きな変化がないと言える.しかし, Triangle の右のキャビティは他とは大きく異なった変化をしているが, これは成長時間のところでも述べたようにキャビティの質の違いによるものだと考えられる.また,レーザパワーが低い部分ではこのキャビティの質の違いが発泡の様子に大きく影響しているが,レーザパワーが高くなるとキャビティの質による発泡の違いがあまり見られなくなるようだ.



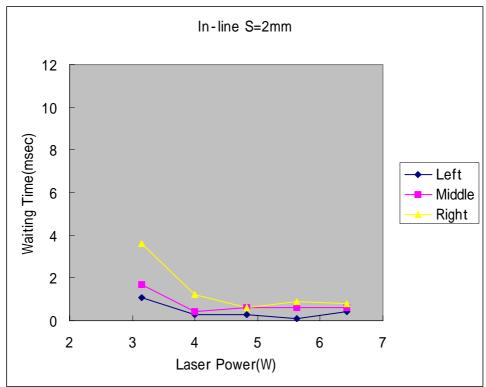


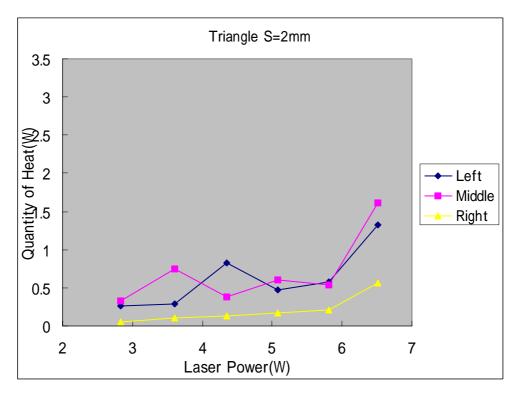
Fig.3.10 Waiting Time(Triangle,In-line).

沸騰で奪われる熱量(Quantity of Heat)

まず Triangle では、全体的に大きな変化は見られない、右のキャビティで使われる熱量はその他の 2 つに比べると小さくなっている、やはりこれはキャビティの質の違いが関係していると思われる、キャビティの質の違いによる発泡回数・成長時間・待ち時間の違いはレーザパワーが低い部分でしか見られなかったのに対し、沸騰に使われる熱量はレーザパワーが高くなってもキャビティの質によって違うということがわかる、

In-line ではレーザパワーの上昇とともに左のキャビティで使われる熱量が増大している. その他のキャビティは左に比べると小さく,あまり大きく変化していないことがわかる. このような左とその他2つの違いはやはりキャビティの質の違いによるものだと思われる.

Triangle と In-line の総熱量を比較したグラフが Fig.3.12 である. In-line はレーザパワーの上昇に伴って沸騰に使われる熱量も増大している. Triangle では全体としてはレーザパワーの上昇とともに熱量も増えているが, In-line に比べると $0.5 \sim 0.7$ 倍程度の熱量しか使われていない.



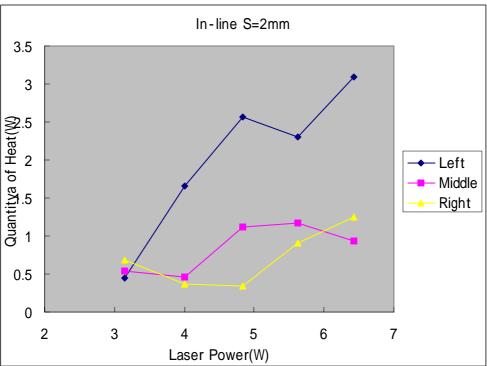


Fig.3.11 Quantity of Heat spent on Boiling(Triangle,In-line).

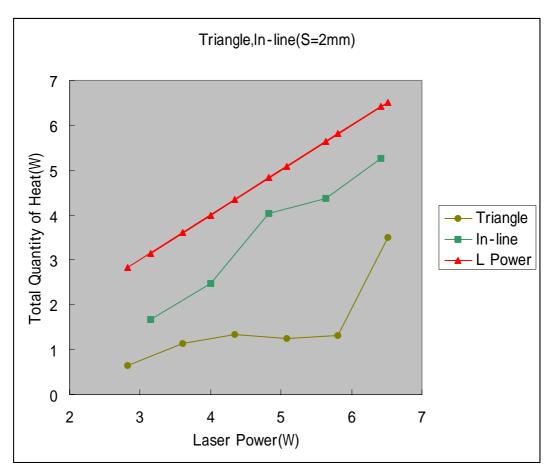


Fig.3.12 Total Quantity of Heat spent on Boiling(Triangle,In-line).

3.2.3 Triangle における 3 つのキャピティ間での発泡挙動の違い

3.2.2 でも触れたが Triangle では 3 つのキャビティは対称的な配置であるがキャビティそのものに注目すると,3 つのキャビティを完全に同じものにするというのは不可能であり,また実験前に加熱面に汚れが付着するなどして,それぞれのキャビティの働きに違いが出てくることがある. Triangle の実験結果から 3 つのキャビティ間での発泡挙動には違いがあることがわかった(In-line の両端のキャビティに関しても同様のことが言える).

Fig.3.13 に Triangle のレーザパワーと発泡回数の関係を表すグラフを示す.これを見るとレーザパワーの低いところ($2.83 \sim 4.35W$)では左・中央のキャビティに比べ,右のキャビティからの発泡回数は $3 \sim 7$ 分の 1 程度となっているのがわかる.しかし,レーザパワーが高いところ($5.08 \sim 6.51W$)では発泡回数に大きな違いは見られない.

Fig.3.14 に Triangle のレーザパワーと沸騰に使われる熱量の関係を表すグラフを示す. 右のキャビティで沸騰に使われる熱量はその他の 2 つに比べて全体的に小さく,レーザパワーの高いところ(6.51W)でもその他のキャビティの $2 \sim 3$ 分の 1 程度である.

発泡回数・成長時間・待ち時間ではレーザパワーが高くなればキャビティの質の違いによる影響は見られなくなるが、沸騰に使われる熱量ではレーザパワーが高いところでもキャビティの質の違いによる影響が見られる。本実験の考察では沸騰に使われる熱量は気泡体積を使って求めている。つまり、レーザパワーが高いところでも気泡体積の成長速度に対してはキャビティの質の違いによる影響が出てくるということである。また、Fig.3.14にはレーザパワーは 6.51W までのデータしかプロットされていない。もっとレーザパワーを上げればキャビティの質の違いによる影響が小さくなっていくという可能性もある。

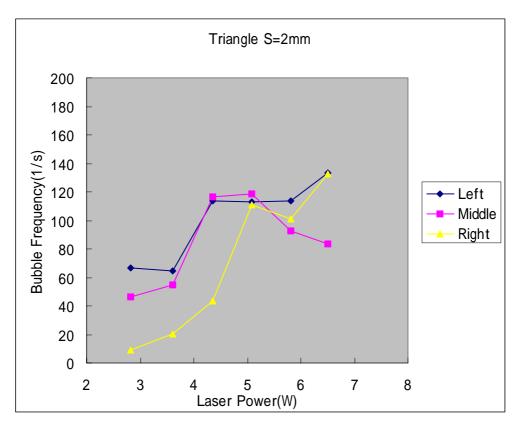


Fig.3.13 Bubble Frequency(Triangle).

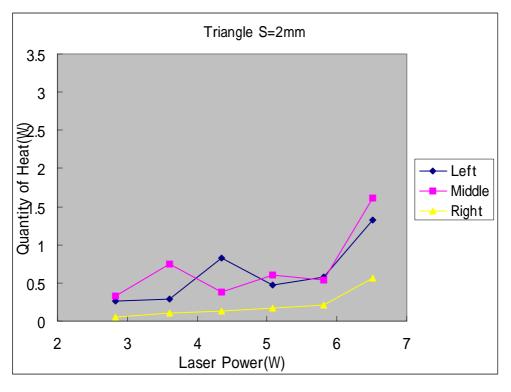


Fig.3.14 Quantity of Heat spent on Boiling(Triangle).

4. 結論

トリプルキャビティ沸騰面を用いた実験から以下の結論を導いた.

In-line S=1mm と 2mm では 2mm の方が沸騰に使われる熱量が多い.

キャビティ間隔が同じ場合(本実験では S=2mm) , In-line と Triangle では In-line の 方が沸騰に使われる熱量が多い .

レーザパワーが低いところではキャビティの質の違いで発泡回数・成長時間・待ち時間に大きな違いが出てくるが、レーザパワーが高くなるとそれは見られなくなる.しかし、気泡体積の成長速度においてはレーザパワーが高いところでもキャビティの質の違いによる影響が出てくる(またはキャビティの質の違いによる影響が出なくなるまでのレーザパワーが発泡回数などのそれより高い).

参考文献

[1]H.Honda,H.Takamasa and J.J.Wei,"Effect of the size of micro-pin-fin on boiling heat taransfer from silicon chips immersed in FC-72"

[2]M.Shoji, Y.Takagi, "Bubbling Features from a single artificial cavity", Int. J. Heat Mass Transfar. 44(2001)

[3]安井 康二 "単一人エキャビティからの沸騰特性"東京大学工学部修士論文(2002)

[4]横田 正憲"人工キャビティを用いた機能性沸騰面の創製"東京大学工学部修士論文 (2002)

[5]対馬 将示"人工キャビティ面における沸騰挙動" 東京大学工学部機械工学科卒業論文 (2002)

[6]Iztok Golobic, Henrik Gjerkes, "Interaction between laser-activated nucleation sites in pool boiling", International Journal of Heat and Mass Transfer 44(2001)

[7]D.B.R.KENNING and YOUYOU YAN,"Pool boiling heat transfer on a thin plate: features revealed by liquid crystal thermography",Int.J.Heat Mass Transfer. Vol.39(1996)

付録 1. 気泡の発生・離脱(約 200msec 間)

発生・離脱の数値はビデオ撮影開始からの経過時間を示す.時間の単位は全て[msec].

In-line S=1mm 2.85W

		Middle				Right			
成長時間 待	ち時間	発生	離脱	成長時間	待ち時間	発生	離脱層	成長時間	寺ち時間
33	0	10	13	3	14	43	68	25	2
3	2	27	29	2	22	70	77	7	5
36	4	51	54	3	8	82	102	20	8
31	6	62	64	2	20	110	124	14	18
11	1	84	89	5	7	142	147	5	4
8	1	96	99	3	17	151	165	14	7
7	1	116	149	33	10	172	176	4	2
2	4	159	164	5	11	178	206	28	2
9	1	175	179	4	0	208	210	2	3
2	2	179	186	7	1	213	232	19	12
3	1	187	197	10	0	244	259	15	6
2	1	197	199	2	24	265			
1	2	223	242	19	11				
6	2	253							
31	3								
	33 36 31 11 8 7 2 9 2 3 2 1 6	33 0 3 2 36 4 31 6 11 1 8 1 7 1 2 4 9 1 2 2 3 1 2 1 1 2 6 2	33 0 10 3 2 27 36 4 51 31 6 62 11 1 84 8 1 96 7 1 116 2 4 159 9 1 175 2 2 179 3 1 187 2 1 197 1 2 223 6 2 253	33 0 10 13 3 2 27 29 36 4 51 54 31 6 62 64 11 1 84 89 8 1 96 99 7 1 116 149 2 4 159 164 9 1 175 179 2 2 179 186 3 1 187 197 2 1 197 199 1 2 223 242 6 2 253	33 0 10 13 3 3 2 27 29 2 36 4 51 54 3 31 6 62 64 2 11 1 84 89 5 8 1 96 99 3 7 1 116 149 33 2 4 159 164 5 9 1 175 179 4 2 2 179 186 7 3 1 187 197 10 2 1 197 199 2 1 2 223 242 19 6 2 253	33 0 10 13 3 14 3 2 27 29 2 22 36 4 51 54 3 8 31 6 62 64 2 20 11 1 84 89 5 7 8 1 96 99 3 17 7 1 116 149 33 10 2 4 159 164 5 11 9 1 175 179 4 0 2 2 179 186 7 1 3 1 187 197 10 0 2 1 197 199 2 24 1 2 223 242 19 11 6 2 253	33 0 10 13 3 14 43 3 2 27 29 2 22 70 36 4 51 54 3 8 82 31 6 62 64 2 20 110 11 1 84 89 5 7 142 8 1 96 99 3 17 151 7 1 116 149 33 10 172 2 4 159 164 5 11 178 9 1 175 179 4 0 208 2 2 179 186 7 1 213 3 1 187 197 10 0 244 2 1 197 199 2 24 265 1 2 223 242 19 11 6 2 253	33 0 10 13 3 14 43 68 3 2 27 29 2 22 70 77 36 4 51 54 3 8 82 102 31 6 62 64 2 20 110 124 11 1 84 89 5 7 142 147 8 1 96 99 3 17 151 165 7 1 116 149 33 10 172 176 2 4 159 164 5 11 178 206 9 1 175 179 4 0 208 210 2 2 179 186 7 1 213 232 3 1 187 197 10 0 244 259 2 1 197 199 2 24 265 1 2 223 242 19	3 2 27 29 2 22 70 77 7 36 4 51 54 3 8 82 102 20 31 6 62 64 2 20 110 124 14 11 1 84 89 5 7 142 147 5 8 1 96 99 3 17 151 165 14 7 1 116 149 33 10 172 176 4 2 4 159 164 5 11 178 206 28 9 1 175 179 4 0 208 210 2 2 2 179 186 7 1 213 232 19 3 1 187 197 10 0 244 259 15 2 1 197 199 2 24 265 1 2 223 242

219

In-line S=1mm 3.63W

Left				Middle				Right			
発生	離脱.	成長時間待	持ち時間	発生	離脱	成長時間:	待ち時間	発生:	離脱」	成長時間 待	ち時間
16	23	7	0	13	18	5	5	17	20	3	1
23	38	15	0	23	26	3	1	21	26	5	1
38	40	2	2	27	46	19	3	27	35	8	4
42	49	7	0	49	71	22	3	39	40	1	1
49	59	10	1	74	79	5	1	41	42	1	2
60	63	3	3	80	81	1	5	44	46	2	2
66	91	25	0	86	88	2	4	48	64	16	3
91	94	3	4	92	94	2	4	67	68	1	1
98	121	23	0	98	100	2	2	69	70	1	1
121	124	3	1	102	105	3	1	71	73	2	0
125	135	10	0	106	107	1	3	73	91	18	1
135	158	23	1	110	113	3	2	92	95	3	1
159	170	11	0	115	118	3	12	96	131	35	1
170	191	21	2	130	132	2	3	132	169	37	0
193	203	10	1	135	141	6	0	169	173	4	0
204	226	22	0	141	142	1	2	173	199	26	0
226				144	146	2	1	199	202	3	1
				147	148	1	2	203	235	32	1
				150	157	7	6	236			
				163	165	2	3				
				168	170	2	3				
				173	175	2	0				
				175	180	5	0				
				180	181	1	4				
				185	188	3	7				
				195	197	2	1				
				198	200	2	0				
				200	205	5	0				
				205	212	7	2				
				214	217	3	1				
				218							

In-line S=1mm 4.37W

Left				Middle				Right			
発生	離脱	成長時間名	寺ち時間	発生	離脱	成長時間	待ち時間	発生	離脱	成長時間 待	ち時間
5	12	7	0	11	23	12	3	4	9	5	0
12	16	4	0	26	33	7	2	9	12	3	1
16	18	2	1	35	48	13	1	13	15	2	1
19	21	2	0	49	51	2	1	16	18	2	0
21	25	4	1	52	58	6	2	18	23	5	1
26	32	6	0	60	69	9	1	24	32	8	2
32	48	16	0	70	73	3	1	34	40	6	0
48	50	2	0	74	77	3	1	40	42	2	1
50	56	6	0	78	83	5	1	43	49	6	1
56	58	2	0	84	88	4	1	50	51	1	0
58	71	13	0	89	91	2	1	51	53	2	1
71	88	17	0	92	97	5	1	54	58	4	1
88	98	10	0	98	102	4	1	59	63	4	0
98	113	15	0	103	104	1	1	63	79	16	0
113	118	5	2	105	106	1	1	79	83	4	0
120	128	8	1	107	108	1	1	83	88	5	1
129	143	14	0	109	110	1	2	89	91	2	1
143	147	4	1	112	114	2	1	92	94	2	0
148	160	12	0	115	123	8	9	94	98	4	0
160	187	27	0	132	136	4	2	98	118	20	1
187	191	4	0	138	144	6	1	119	123	4	1
191	200	9	1	145	146	1	2	124	127	3	0
201	203	2	0	148	149	1	0	127	134	7	1
203	214	11	0	149	159	10	5	135	138	3	0
214				164	166	2	1	138	149	11	0
				167	179	12	8	149	155	6	1
				187	189	2	1	156	158	2	1
				190	195	5	1	159	164	5	0
				196	209	13	1	164	173	9	1
				210	217	7	1	174	183	9	1
				218				184	187	3	3
								190	204	14	1

205 207 2 0

In-line S=1mm 5.09W

Left			Middle				Right			
発生	離脱	成長時間 待ち時間	発生	離脱	成長時間 待ち時	間	発生:	離脱力	成長時間 待ち時	間
6	8	2 1	2	5	3	0	15	17	2	0
9	10	1 3	5	6	1	1	17	23	6	0
13	19	6 1	7	16	9	4	23	26	3	0
20	24	4 0	20	22	2	2	26	27	1	1
24	29	5 1	24	33	9	0	28	40	12	1
30	36	6 0	33	34	1	11	41	47	6	0
36	40	4 0	45	50	5	0	47	57	10	1
40	43	3 0	50	57	7	4	58	64	6	3
43	47	4 0	61	63	2	1	67	68	1	1
47	53	6 1	64	67	3	1	69	75	6	0
54	62	8 0	68	69	1	1	75	81	6	0
62	69	7 1	70	75	5	1	81	85	4	0
70	75	5 0	76	78	2	1	85	98	13	3
75	84	9 1	79	86	7	3	101	104	3	1
85	89	4 0	89	105	16	0	105	107	2	0
89	99	10 0	105	106	1	2	107	122	15	1
99	100	1 0	108	117	9	4	123	133	10	1
100	103	3 0	121	123	2	2	134	136	2	0
103	108	5 0	125	139	14	5	136	142	6	0
108	114	6 2	144	145	1	1	142	143	1	1
116	120	4 1	146	155	9	1	144	160	16	1
121	123	2 0	156	170	14	2	161	166	5	1
123	140	17 1	172	176	4	1	167	175	8	0
141	142	1 0	177	179	2	5	175	179	4	0
142	147	5 0	184	188	4	1	179	182	3	1
147	156	9 1	189	190	1	1	183	185	2	0
157	167	10 3	191	193	2	1	185	196	11	0
170	172	2 0	194	200	6	7	196	199	3	1
172	176	4 1	207				200	205	5	1
177	184	7 1					206	211	5	0
185	187	2 0					211	224	13	4
187	196	9 1					228			

197	198	1	0
198	201	3	0
201	206	5	0
206			

In-line S=1mm 5.80W

Left				Middle				Right			
発生	離脱	成長時間	待ち時間	発生	離脱	成長時間	待ち時間	発生	離脱	成長時間 待ち	5時間
5	12	7	0	8	12	4	19	5	7	2	1
12	23	11	0	31	41	10	10	8	11	3	0
23	24	1	2	51	53	2	2	11	18	7	0
26	27	1	0	55	57	2	1	18	23	5	2
27	31	4	0	58	61	3	0	25	28	3	0
31	33	2	1	61	65	4	2	28	38	10	1
34	49	15	1	67	71	4	5	39	41	2	3
50	52	2	1	76	77	1	2	44	47	3	0
53	57	4	1	79	80	1	1	47	48	1	1
58	77	19	0	81	83	2	0	49	53	4	1
77	83	6	0	83	87	4	0	54	57	3	1
83	87	4	0	87	98	11	5	58	70	12	0
87	101	14	0	103	106	3	0	70	74	4	0
101	106	5	0	106	109	3	3	74	75	1	1
106	114	8	1	112	127	15	3	76	81	5	0
115	129	14	1	130	142	12	19	81	87	6	2
130	140	10	0	161	162	1	29	89	94	5	5
140	141	1	1	191	197	6	1	99	100	1	1
142	160	18	0	198	199	1	1	101	103	2	0
160	165	5	1	200				103	109	6	8
166	169	3	0					117	120	3	1
169	175	6	0					121	124	3	1
175	192	17	2					125	127	2	0
194	198	4	0					127	135	8	0
198								135	138	3	4
								142	150	8	0
								150	151	1	1
								152	170	18	0
								170	178	8	0
								178	192	14	2
								194	197	3	0
								197	208	11	0

In-line S=2mm 3.15W

Left				Middle				Right			
発生	離脱.	成長時間	寺ち時間	発生	離脱	成長時間	待ち時間	発生	離脱	成長時間	待ち時間
10	11	1	1	12	14	2	1	25	28	3	3
12	14	2	1	15	26	11	1	31	54	23	3
15	22	7	1	27	44	17	1	57	65	8	4
23	33	10	1	45	54	9	0	69	91	22	1
34	39	5	1	54	57	3	10	92	100	8	4
40	69	29	1	67	87	20	1	104	128	24	1
70	71	1	1	88	91	3	1	129	132	3	7
72	74	2	1	92	96	4	0	139	165	26	2
75	86	11	1	96	101	5	4	167	183	16	7
87	96	9	1	105	123	18	0	190	225	35	2
97	102	5	5	123	124	1	1	227	228	1	1
107	137	30	1	125	129	4	0	229	241	12	9
138	142	4	0	129	132	3	1	250			
142	147	5	0	133	140	7	1				
147	163	16	1	141	152	11	0				
164	179	15	1	152	153	1	3				
180	225	45	2	156	158	2	1				
227				159	161	2	1				
				162	169	7	2				
				171	176	5	1				
				177	183	6	3				
				186	189	3	6				
				195							

In-line S=2mm 4.00W

Left				Middle			Right	:		
発生	離脱	成長時間 待ち時間	1	発生	離脱	成長時間 待ち時間	発生	離脱	成長時間待	ち時間
6	8	2	1	4	7	3 0	14	17	3	1
9	16	7	0	7	11	4 0	18	54	36	1
16	31	15	0	11	13	2 0	55	58	3	1
31	35	4	0	13	21	8 1	59	67	8	0
35	39	4	1	22	32	10 0	67	102	35	1
40	42	2	0	32	36	4 2	103	105	2	0
42	47	5	1	38	43	5 1	105	119	14	1
48	62	14	0	44	64	20 1	120	122	2	4
62	65	3	1	65	78	13 0	126	156	30	6
66	71	5	1	78	81	3 0	162	172	10	1
72	83	11	0	81	84	3 0	173	175	2	1
83	87	4	0	84	89	5 0	176	181	5	1
87	93	6	0	89	92	3 1	182	208	26	0
93	98	5	0	93	116	23 0	208	213	5	0
98	116	18	1	116	120	4 1	213	217	4	1
117	139	22	0	121	123	2 1	218	222	4	1
139	141	2	0	124	127	3 1	223	1		
141	148	7	1	128	140	12 1				
149	164	15	0	141	143	2 0				
164	166	2	0	143	147	4 0				
166	168	2	1	147	155	8 0				
169	185	16	0	155	164	9 2				
185	199	14	0	166	178	12 0				
199	212	13	0	178	188	10 0				
212				188	192	4 0				
				192	198	6 1				
				199	208	9 0				
				208						

In-line S=2mm 4.83W

Left				Middle				Right			
発生	離脱	成長時間 待ち	時間	発生	離脱	成長時間	待ち時間	発生	離脱	成長時間名	時ち時間
3	7	4	1	3	8	5	1	4	9	5	1
8	15	7	0	9	11	2	1	10	32	22	2
15	31	16	1	12	22	10	0	34	35	1	1
32	43	11	1	22	45	23	1	36	39	3	1
44	63	19	3	46	58	12	0	40	50	10	1
66	75	9	0	58	63	5	0	51	63	12	2
75	90	15	0	63	64	1	1	65	78	13	0
90	94	4	0	65	68	3	3	78	103	25	0
94	106	12	0	71	73	2	0	103	109	6	1
106	114	8	0	73	81	8	1	110	113	3	0
114	125	11	0	82	100	18	0	113	154	41	1
125	142	17	0	100	103	3	0	155	163	8	0
142	147	5	0	103	106	3	1	163	172	9	0
147	153	6	0	107	113	6	0	172	200	28	0
153	162	9	0	113	115	2	1	200	201	1	1
162	177	15	0	116	119	3	0	202	206	4	0
177	191	14	0	119	125	6	1	206	212	6	0
191	203	12	0	126	137	11	0	212			
203	215	12	0	137	147	10	0				
215				147	158	11	1				
				159	164	5	0				
				164	171	7	0				
				171	178	7	1				
				179	192	13	1				
				193	208	15	1				
				209							

In-line S=2mm 5.63W

Left				Middle				Right			
発生	離脱.	成長時間名	寺ち時間	発生	離脱	成長時間彳	寺ち時間	発生	離脱	成長時間 待ち	時間
2	12	10	0	2	9	7	1	9	23	14	1
12	28	16	0	10	12	2	0	24	28	4	1
28	41	13	0	12	20	8	0	29	38	9	2
41	47	6	1	20	24	4	0	40	52	12	1
48	60	12	0	24	26	2	1	53	55	2	3
60	65	5	2	27	32	5	2	58	60	2	1
67	79	12	0	34	43	9	0	61	67	6	0
79	91	12	0	43	51	8	0	67	80	13	1
91	95	4	1	51	54	3	1	81	91	10	1
96	110	14	0	55	64	9	0	92	93	1	1
110	113	3	0	64	73	9	0	94	95	1	1
113	120	7	0	73	78	5	1	96	101	5	1
120	134	14	0	79	89	10	2	102	113	11	1
134	141	7	0	91	94	3	1	114	137	23	1
141	148	7	0	95	100	5	1	138	140	2	1
148	163	15	0	101	106	5	0	141	153	12	1
163	166	3	0	106	119	13	0	154	158	4	1
166	174	8	0	119	129	10	0	159	160	1	1
174	188	14	0	129	140	11	2	161	170	9	0
188	195	7	0	142	144	2	1	170	172	2	0
195	206	11	0	145	154	9	1	172	173	1	1
206				155	165	10	0	174	189	15	1
				165	181	16	0	190	202	12	0
				181	191	10	1	202	203	1	1
				192	206	14	0	204	220	16	0
				206				220			

In-line S=2mm 6.42W

Left			Middle	;			Right			
発生	離脱	成長時間 待ち時間	発生	離脱	成長時間	待ち時間	発生	離脱	成長時間 待ち	時間
7	11	4 () 7	21	14	0	4	20	16	1
11	18	7) 21	22	1	1	21	22	1	1
18	20	2	23	3 24	1	1	23	37	14	1
21	26	5	25	30	5	2	38	41	3	1
27	37	10	32	38	6	0	42	74	32	1
38	55	17	38	46	8	2	75	78	3	1
55	60	5 () 48	50	2	0	79	85	6	2
60	76	16 (50	62	12	1	87	101	14	0
76	83	7 (63	71	8	0	101	109	8	1
83	96	13	71	80	9	0	110	122	12	0
97	109	12	80	90	10	1	122	129	7	0
110	113	3 2	2 91	97	6	0	129	135	6	0
115	122	7	97	100	3	0	135	142	7	0
123	134	11 (100	105	5	0	142	164	22	0
134	144	10 (105	109	4	1	164	165	1	6
144	149	5 () 110	114	4	1	171	173	2	1
149	159	10 () 115	119	4	0	174	175	1	0
159	161	2 () 119	124	5	1	175	178	3	1
161	172	11 () 125	131	6	2	179	186	7	1
172	191	19	133	139	6	3	187	205	18	0
192	198	6	142	146	4	1	205	216	11	0
199	215	16 () 147	165	18	0	216			
215			165	167	2	0				
			167	173	6	0				
			173	178	5	1				
			179	185	6	1				
			186	188	2	0				
			188	193	5	1				
			194	196	2	0				
			196	209	13	0				
			209)						

Triangle S=2mm 2.83W

Left				Middle				Right			
発生	雜脱.	成長時間彳	寺ち時間	発生	離脱	成長時間:	待ち時間	発生	離脱	成長時間 待	ち時間
71	75	4	4	77	83	6	0	93	135	42	101
79	87	8	4	83	125	42	1	236	273	37	67
91	93	2	2	126	128	2	1	340			
95	96	1	1	129	171	42	1				
97	132	35	3	172	174	2	3				
135	141	6	4	177	207	30	2				
145	184	39	1	209	211	2	2				
185	186	1	1	213	217	4	2				
187	190	3	2	219	260	41	2				
192	226	34	1	262	273	11	1				
227	228	1	2	274	314	40	1				
230	232	2	1	315							
233	269	36	1								
270	277	7	4								
281											

Triangle S=2mm 3.61W

Left				Middle				Right			
発生	離脱.	成長時間:	待ち時間	発生	離脱	成長時間:	待ち時間	発生	離脱	成長時間名	寺ち時間
40	43	3	3	41	79	38	1	56	76	20	7
46	71	25	1	80	84	4	1	83	122	39	10
72	76	4	0	85	115	30	1	132	161	29	23
76	79	3	1	116	121	5	1	184	233	49	21
80	85	5	1	122	126	4	3	254	284	30	18
86	119	33	3	129	164	35	2	302			
122	126	4	2	166	169	3	1				
128	155	27	1	170	194	24	1				
156	160	4	1	195	203	8	1				
161	164	3	2	204	207	3	1				
166	202	36	1	208	242	34	1				
203	237	34	2	243							
239	241	2	1								
242											

Triangle S=2mm 4.35W

Left				Middle				Right			
発生	離脱り	成長時間 待ち	時間	発生	離脱月	成長時間 待ち	寺間	発生	離脱月	成長時間 待	ち時間
15	26	11	0	8	9	1	1	15	28	13	1
26	40	14	1	10	14	4	1	29	49	20	2
41	45	4	2	15	20	5	1	51	88	37	1
47	53	6	0	21	25	4	2	89	99	10	1
53	67	14	1	27	34	7	9	100	107	7	6
68	69	1	1	43	46	3	0	113	140	27	5
70	84	14	1	46	53	7	0	145	165	20	1
85	95	10	1	53	78	25	1	166	213	47	1
96	99	3	2	79	80	1	1	214	220	6	2
101	104	3	0	81	86	5	1	222			
104	112	8	2	87	107	20	1				
114	126	12	0	108	119	11	0				
126	127	1	1	119	122	3	1				
128	130	2	1	123	127	4	0				
131	134	3	1	127	133	6	1				
135	141	6	0	134	151	17	0				
141	158	17	0	151	153	2	0				
158	167	9	2	153	163	10	0				
169	177	8	0	163	172	9	0				
177	200	23	1	172	184	12	1				
201	202	1	1	185	186	1	1				
203	207	4	1	187	192	5	1				
208	217	9	0	193	213	20	1				
217				214							

Triangle S=2mm 5.08W

Left				Middle			F	Right			
発生	離脱月	成長時間 待ち時	間	発生	離脱り	成長時間 待ち時間	1 3	発生:	離脱月	成長時間 待ち時	間
26	38	12	0	20	32	12	0	18	32	14	0
38	39	1	1	32	41	9	1	32	42	10	0
40	45	5	1	42	51	9	2	42	44	2	1
46	48	2	1	53	60	7	1	45	50	5	1
49	51	2	1	61	71	10	1	51	56	5	0
52	56	4	1	72	73	1	1	56	93	37	1
57	65	8	1	74	75	1	1	94	95	1	1
66	92	26	0	76	82	6	1	96	97	1	1
92	94	2	1	83	99	16	1	98	99	1	1
95	98	3	1	100	102	2	0	100	106	6	3
99	107	8	1	102	106	4	1	109	112	3	1
108	111	3	1	107	110	3	1	113	115	2	1
112	126	14	0	111	122	11	0	116	131	15	0
126	133	7	2	122	128	6	0	131	139	8	1
135	147	12	1	128	135	7	1	140	141	1	1
148	150	2	1	136	153	17	1	142	178	36	0
151	157	6	1	154	157	3	1	178	181	3	3
158	176	18	1	158	159	1	1	184	185	1	1
177	180	3	3	160	165	5	1	186	187	1	2
183	185	2	3	166	186	20	0	189	196	7	1
188	196	8	1	186	191	5	2	197	199	2	1
197	217	20	0	193	206	13	0	200	201	1	2
217	219	2	1	206	211	5	1	203	224	21	1
220	222	2	2	212	221	9	1	225			
224	247	23	0	222							

Triangle S=2mm 5.81W

Left			Middle				Right			
発生	離脱り	成長時間 待ち時間	発生	離脱	成長時間待	ち時間	発生	離脱	成長時間 待ち	時間
27	32	5 1	40	42	2	1	9	27	18	0
33	40	7 1	43	44	1	1	27	33	6	1
41	45	4 2	45	51	6	0	34	38	4	0
47	68	21 1	51	76	25	1	38	42	4	4
69	72	3 1	77	79	2	1	46	63	17	1
73	80	7 2	80	84	4	1	64	65	1	1
82	92	10 3	85	103	18	1	66	68	2	1
95	100	5 1	104	106	2	1	69	72	3	2
101	106	5 2	107	111	4	1	74	77	3	2
108	109	1 1	112	144	32	0	79	80	1	1
110	129	19 0	144	148	4	0	81	96	15	1
129	130	1 2	148	159	11	0	97	103	6	1
132	138	6 1	159	164	5	1	104	110	6	1
139	150	11 1	165	192	27	0	111	144	33	1
151	162	11 1	192	205	13	1	145	153	8	2
163	182	19 1	206	209	3	1	155	164	9	1
183	185	2 2	210	213	3	1	165	172	7	1
187	188	1 1	214	219	5	1	173	184	11	1
189	198	9 2	220	232	12	1	185	189	4	2
200	214	14 1	233	254	21	2	191	199	8	1
215	219	4 1	256				200	215	15	1
220	223	3 1					216			
224	228	4 1								
229										

Triangle S=2mm 6.51W

Left			Middle				Right			
発生i	離脱」	成長時間 待ち時間	発生	離脱	成長時間:	待ち時間	発生	離脱	成長時間彳	寺ち時間
14	18	4 1	14	17	3	1	13	15	2	1
19	30	11 1	18	25	7	1	16	28	12	3
31	35	4 1	26	38	12	1	31	33	2	1
36	51	15 1	39	51	12	1	34	38	4	1
52	53	1 1	52	70	18	1	39	40	1	1
54	65	11 1	71	77	6	1	41	52	11	1
66	74	8 0	78	102	24	1	53	61	8	1
74	84	10 1	103	115	12	1	62	63	1	1
85	96	11 1	116	136	20	1	64	68	4	2
97	104	7 1	137	145	8	0	70	73	3	2
105	109	4 0	145	160	15	2	75	89	14	3
109	125	16 1	162	166	4	1	92	96	4	1
126	130	4 1	167	172	5	0	97	99	2	1
131	135	4 1	172	186	14	1	100	106	6	2
136	147	11 0	187	203	16	1	108	112	4	0
147	155	8 0	204	208	4	1	112	120	8	1
155	159	4 0	209	217	8	0	121	130	9	1
159	162	3 0	217				131	135	4	1
162	164	2 0					136	140	4	1
164	169	5 0					141	151	10	1
169	170	1 0					152	154	2	1
170	171	1 0					155	159	4	0
171	178	7 1					159	162	3	1
179	193	14 0					163	167	4	1
193	194	1 1					168	174	6	1
195	205	10 1					175	210	35	1
206	207	1 1					211	217	6	0
208	213	5 1					217			
214	230	16 1								
231										

付録2. 気泡体積の成長速度

Laser Power の単位は[W] .Left・Middle・Right はそれぞれの位置の気泡成長速度を表し,単位は全て[$mm^3/msec$] .

In-line S=1mm

L Pow	er L	eft N	/liddle F	Right
	3.15	0.134671	0.085478	0.087658
	4	0.058875	0.170258	0.34854
	4.83	0.366682	0.13188	0.241606
	5.63	0.437768	0.16328	0.379155
	6.42	0.676844	0.054427	0.218579

In-line S=2mm

L Powe	r Le	eft	Middle	Right
	3.15	0.210729	0.297253	3 0.374602
	4	0.748367	0.211194	0.178818
	4.83	1.151259	0.528193	0.158495
	5.63	1.019889	0.556042	0.442269
	6.42	1.416768	0.44887	0.591441
	7.18	1.475364	1.189013	0.598095

Triangle S=2mm

L Pow	er L	eft M	liddle R	Right
	2.83	0.134395	0.150772	0.072405
	3.61	0.136471	0.3491	0.066045
	4.35	0.40192	0.181608	0.064618
	5.08	0.23373	0.294219	0.084455
	5.81	0.297452	0.250998	0.104224
	6.51	0.630548	0.7558	0.287281

最後に

まず、本研究を行う上で色々とご指導を頂いた庄司正弘教授に心から感謝致します.研究テーマが決まったばかりで研究内容がよくわかっていない頃に研究内容・実験手順などを教えて頂いた張さん、ありがとうございました.実際に実験を行うにあたって実験装置や計測器具の説明で渡辺誠技官・宮崎さん、ありがとうございました.また、共同で実験を行った Surapong さんには色々とお世話になりました.あまり実験に慣れていなかったのでご迷惑をおかけしたかもしれませんが、無事に実験が終了してよかったです.そして、同じく人エキャビティの研究を行う丹下さんにはたくさんの助言をして頂きとても感謝しています.庄司・丸山研の皆さん、この1年間本当にありがとうございました.

(さらに追加)

もともと特に伝熱に興味があったというわけでもなく,なんとなくこの研究室を選んだ わけで,研究テーマを選ぶ時も何がどうだか内容もよくわからないまま決まってしまいま した、突然沸騰の研究といわれても沸騰に関してほとんど知識がないのでさっぱりな部分 もたくさんありました .この人工キャビティの研究について研究室の先輩方の論文を(少し) 読んだり ,中間試問前に先輩方から(発表に必要な最低限の)研究内容を聞いたりしていると だんだんこの研究の重要性がわかってきました、沸騰に関する知識も以前より多少はつい たと思います、実際に実験を始めようという頃、試験片が届かず実験が延期ということも ありましたが,それから試験片が届くまでの間も特に何かやってるようでやってないとい うこともしばしばでした.実験開始してからも,実験手順がうろ覚えでうまくいくかどう か不安でした.うまく結果が出ないこともあり,また試験片を割ったりもしましたが,最 終的には無事実験を終えることができました.実験を終えて解析しようという段階で改め て沸騰現象の複雑さを知ることになりました.実験では発泡挙動の映像・加熱面裏面の温 度・気泡付近の流速などのデータを取りましたが,結局解析に使ったデータはそのうちの 発泡挙動の映像だけです.しかし画像解析もやはり複雑で、それをどのようにまとめるか 悩んでうまく研究が進まないこともありましたが,ここでもやはり何かやってるようでや ってなかった気がします、とにかくビデオを見て気泡が発生した時間・離脱した時間を取 りましたが,何か考えがあったわけでもなくただ取っていました.気泡の体積を測ろうに も泡がごちゃごちゃくっついてさっぱりだったのでそれしかなかったのでしょう.ずっと 気泡がポコポコ出ているのを見ていると"自分はなんでこんなことをしているのだろう?" などと思ったりもしましたが,後にこのデータを使ってどうにかまとめることができたの でどうにかなって本当によかったと思います.とりあえずでもやれることはやっておくべ きだということがよくわかりました.

この庄司・丸山研に約 1 年居たわけで、卒論の研究として沸騰現象の研究をやりましたが、結局自分はどれくらい沸騰に詳しくなったのでしょうか、沸騰はとても身近な現象ですが、以前は沸騰の研究なんて考えたこともありませんでしたが、ここに来てこのような研究があることを知りました、特に沸騰気泡が加熱表面上の傷・キャビティから発生するということはここで初めて知ったことです。今回はたまたま沸騰でしたが、もしかしたら身近でよく知っている現象でも実は意外と知らないということもたくさんあるかもしれません。今後、また沸騰の研究をする機会があるかもしれませんし、ないかもしれません。たぶんないのではないかと思いますが、それでもここで過ごした 1 年間と沸騰の研究ができたことは本当によい経験になったと思います。みなさん、本当にお世話になりました。そしてありがとうございました。そろそろ日が昇ってきたのでこの辺にしたいと思います。それでは、

以上

1 - 72 ページ 完

卒業論文

平成15年2月7日提出

10221 山本 洋佑