

冷媒 HCFC123 の細管内強制対流沸騰の可視化

－ 核沸騰開始点近傍における二相流動様式の形成 －

村田 圭治*, 荒賀 浩一*, 江藤 剛治**, 竹原 幸生**

Visualization of Forced Convective Boiling of Refrigerant HCFC123 in a Mini-Tube

-Formation of Two-phase Flow Pattern near the Onset Point of boiling -

Keiji MURATA, Koichi ARAGA, Takeharu ETOH and Kohsei TAKEHARA

This paper presents visualization of boiling phenomena and formation of the two-phase flow pattern in a mini tube which has a 0.30mm inner diameter. Test fluid is refrigerant HCFC123. ITO film is formed by vapor deposition over the outer surface of the glass tube. This film is transparent and electrically conductive. Refrigerant HCFC123 is pumped into the glass tube in liquid phase; it then is boiled away by electrical heating. Bubble formation and growth near the onset point of nucleate boiling and the two-phase flow pattern in the low-quality region is recorded via high-speed video camera (10,000 – 50,000 fps). Appearance of bubble formation and growth in a mini-tube depends on heat flux and mass flux. For low heat flux, an isolated bubble grows to occupy the whole tube cross section, and flows in a form resembling a bullet. Liquid film is not observed between this vapor bubble and the inner tube surface, and evaporation is not so dominant. For high heat flux and low mass flux, bubbles grow to coalesce immediately into a long vapor plug; and both nucleate boiling and evaporation from liquid film between the vapor plug and the inner tube surface remain dominant.

Keyword Visualization, Forced convective boiling, Nucleate boiling, Evaporation, Two-phase flow pattern, Mini-tube, Refrigerant HCFC123, ITO film

1. 結 言

近年、コンピュータチップの発熱密度の急激な上昇に伴い、いわゆるミニチューブやマイクロチューブ内に冷媒を流し、冷媒の蒸発潜熱で冷却するヒートシンクの研究開発が進められている¹⁾²⁾。細管内の強制対流沸騰に関する基礎実験は水や冷媒を中心に行われており、嶋田ら³⁾が FC72 を用いて熱伝達率の測定を行い、伝熱特性がマクロスケール

の場合と同様、核沸騰域、対流蒸発域、中間領域の3領域に区別できることを示した。また、Yen, T-H ら⁴⁾は HCFC123 と FC72 の細管内強制対流沸騰における圧力損失と熱伝達率を測定し、熱伝達は核沸騰が優勢で対流蒸発の効果は小さいこと、圧力損失はマクロスケール管に対する整理式と定性的には一致することなどを報告している。一方、著者ら⁵⁾⁶⁾は、ステンレス製細管(管内径 $D=\phi 0.51\text{mm}$ および $\phi 0.30\text{mm}$) を流れる冷媒 HCFC123 を直接通電加熱により沸騰蒸発させて熱伝達率を測定し、マクロスケール管やプール沸騰の熱伝達率と比較した。その結果、細管内の熱伝達率はクオリティが小さい領域においてもプール沸騰熱伝達率よりもかなり大きく、また全クオリティ領域

*近畿大学工業高等専門学校

総合システム工学科 機械システムコース

**近畿大学理工学部社会環境工学科

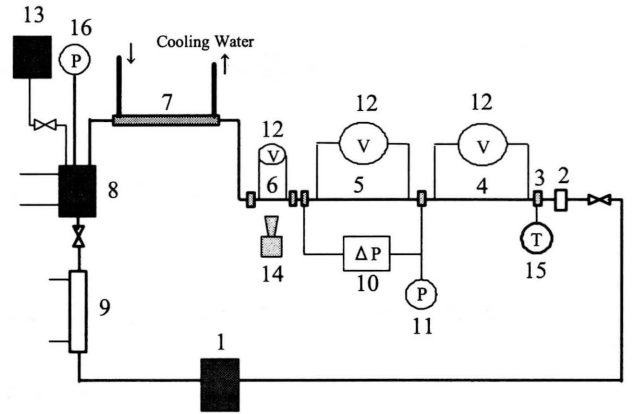
で質量流束の影響は明確ではなかった。

ミニチューブやマイクロチューブ内の強制対流沸騰における流動伝熱特性は、既存のマクロスケール管（内径6～20mm）における流動沸騰モデルでは予測できないことが指摘されているが、熱伝達率が管径、質量流束、熱流束、クオリティなどによってどのように変化するかといった基本的特性についても未だ明らかではなく、統一された見解は得られていない^{7),8),9)}。

本研究の目的は、細管内強制対流沸騰の伝熱特性を明らかにすることである。著者らは、環状流となる高クオリティ領域を除き、核沸騰開始点近傍における蒸気生成がそれ以降の流動様式や伝熱特性に影響する可能性があると考え、まず細管内の沸騰開始点近傍における核沸騰現象および低クオリティ領域において二相流動様式が形成されていく様子を高速度カメラで記録したので、ここで紹介する。

2. 実験装置および実験方法

Fig.1 に実験装置の概略フローを示す。詳細は前報⁵⁾にも記述されているので、ここでは概要のみ述べる。実験装置は無脈動ポンプ1、フィルター2、継手3、前置蒸発用細管4、試験用細管5、可視化用ガラス管6、凝縮器7、液溜タンク8、過冷却器9、差圧伝送器10、圧力伝送器11、定電圧電源12、冷媒供給タンク13、高速度カメラ14などからなる。冷媒液（HCFC123、沸点27.7℃）は、無脈動ポンプ1によって液溜タンク8から一定流量で供給され、圧力・温度測定用継手3で温度と圧力を測定した後、前置蒸発用細管4、試験用細管5に送られる。圧力損失や熱伝達率の測定は、前置蒸発用細管4あるいは試験用細管5を直接通電加熱して行うが、今回の可視化実験では、冷媒は前置蒸発用細管4や試験用細管5で加熱されることなく、液単相のままガラス管に流入する。ガラス管6は外径 $\phi 1.60\text{mm}$ 、内径 $\phi 0.30\text{mm}$ 、長さ80mmで、中央部50mmの外表面にITO膜（indium tin oxide film）が蒸着されている。ITO膜は透明な導電性の膜で、これに直接通電して冷媒を沸騰蒸発させ、沸騰開始点近傍における核沸騰現象、および低クオリティ領域において流動様式が形成されていく様子を高速度カメラ14で撮影した。撮影速度は、10～50kfpsである。発生した冷媒蒸気は凝縮器7にて冷却されて全て凝縮し、液溜タンク8に蓄えられる。前置蒸発用細管4、試験用細管5、凝縮器7、液溜タンク8、過冷却器9は、それぞれセラミックファイバーで断熱されている。実験パラメータは、冷媒の質量流束 G と熱流束 q で、それぞれ $G=200, 300\text{kg/m}^2\text{s}$ 、熱流束 $q=15, 30\text{kW/m}^2$ である。また、冷媒液の流入温度は $T=25^\circ\text{C}$ 、圧力は $P=125\text{kPa}$ であった。



- | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1. Liquid pump | 7. Condenser |
| 2. Filter | 8. Reservoir |
| 3. P.T. measuring union | 9. Subcooler |
| 4. Pre-evaporating tube | 10. Pressure difference transmitter |
| 5. Test tube | 11. Pressure transmitter |
| 6. Glass tube | 12. Constant voltage power supply |
| 7. Condenser | 13. Liquid tank |
| 8. Reservoir | 14. High speed camera |
| 9. Subcooler | 15. Thermocouple |
| 10. Pressure difference transmitter | 16. Pressure gauge |

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

3. 実験結果および考察

3. 1 沸騰開始点近傍における気泡の生成・成長

Fig.2 は、沸騰開始点における単一の発泡点から気泡が成長・離脱していく様子を撮影したもので、その静止画を経過時間 $t(\mu\text{s})$ とともに示してある。質量流束は $G=300\text{kg/m}^2\text{s}$ 、熱流束は $q=15\text{kW/m}^2$ である。冷媒は向かって右から左に流れている。画面右寄りに存在する一つの発泡点から気泡が発生・成長し始め、約 $300\mu\text{s}$ 後に発泡点から離脱、約 $3,000\mu\text{s}$ 後には流路断面全体を占めるようになる。気泡離脱直径は、管内径やプール沸騰時の値（接触角を 35° と仮定しFritzの式¹⁰⁾で計算すると約 0.7mm となる。）に比べかなり小さく、離脱後、一部伝熱面に接触して流れるが、主に界面からの蒸発でゆっくり成長している。気泡が流路断面全体を占めるようになると、前面がやや尖り、後面が扁平な弾丸のような形状の気泡となって流れ、蒸気プラグに成長していく。気泡の界面は非常に安定している。気泡前面の前進速度は後面のそれよりもはるかに大きい。流路断面全体を占めるようになった蒸気泡の側面と管内面との間に液膜は見られないことから、蒸気泡と管内壁との接触面はドライアウトし、離脱後は気泡前方の気液界面

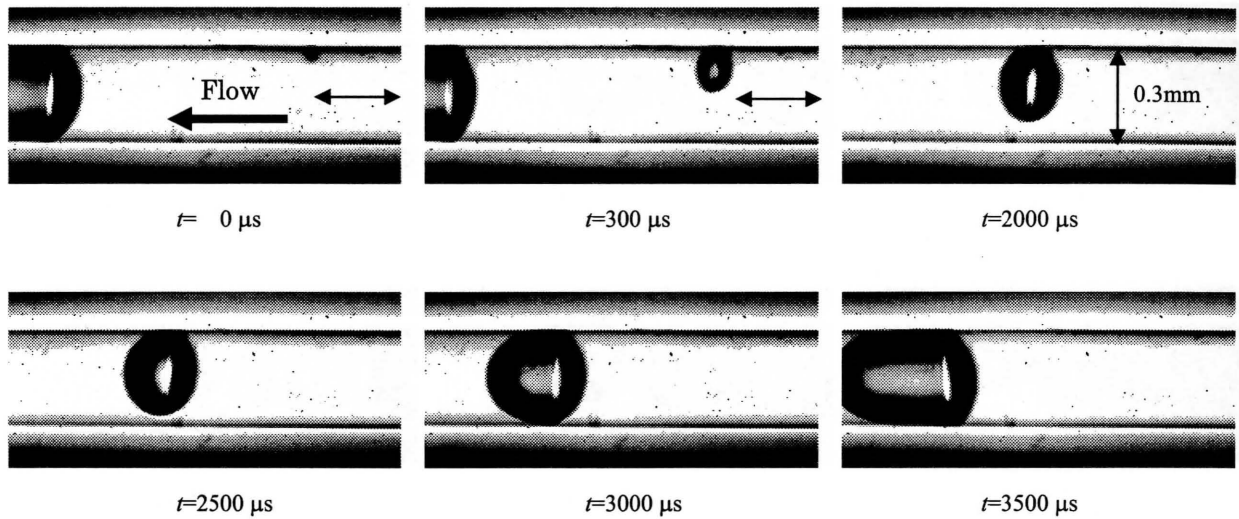


Fig.2 Growth and departure of a single vapor bubble in a mini-tube ($G=300\text{kg/m}^2\text{s}$, $q=15\text{kW/m}^2$, 20kfps)

からの蒸発が優勢であると思われる。したがって、主たる伝熱機構は核沸騰であり、沸騰開始点の直ぐ下流において熱伝達は悪化すると考えられる。なお、気泡の射出周期は、約 $11,000\mu\text{s}$ であった。

Fig.3 は、沸騰開始点における単一の発泡点から気泡が成長・離脱していく様子を撮影したもので、質量流束 $G=200\text{kg/m}^2\text{s}$ 、熱流束 $q=15\text{kW/m}^2$ である。画面右寄りに存在する一つの発泡点から気泡が発生・成長し始め、約 $300\mu\text{s}$ 後に発泡点から離脱し、約 $1,000\mu\text{s}$ 後には流路断面全体を占めるようになる。気泡が発生・成長していく様子は Fig.2 ($G=300\text{kg/m}^2\text{s}$ 、 $q=15\text{kW/m}^2$) と同様であり、気泡が流路断面全体を占めるようになると、弾丸のような形状の気泡となって流れ、蒸気プラグに成長していく。したがって、沸騰開始点の直ぐ下流では伝熱面がドライアウト

し、熱伝達は悪化するものと考えられる。一方、気泡の射出周期は約 $7,600\mu\text{s}$ と、短くなった。これは液流速が小さく壁面近傍の過熱層が厚いために気泡の成長速度は質量流束 $G=300\text{kg/m}^2\text{s}$ (Fig.2) に比べて大きくなるためと考えられる。また、気泡離脱直径は $G=300\text{kg/m}^2\text{s}$ (Fig.2) よりも若干大きい。以上の結果を整理すると、熱流束 $q=15\text{kW/m}^2$ では、質量流束が大きくなると、気泡離脱直径が小さく気泡の射出周期が長くなって、核沸騰熱伝達率は小さくなると思われる。

Fig.4 は、沸騰開始点における単一の発泡点から気泡が成長・離脱していく様子を撮影したもので、質量流束 $G=300\text{kg/m}^2\text{s}$ 、熱流束 $q=30\text{kW/m}^2$ である。画面右寄りの上面に存在する一つの発泡点（この発泡点は Fig.2 と同じものと思われる）から気泡が発生・成長し始めるが、Fig.2

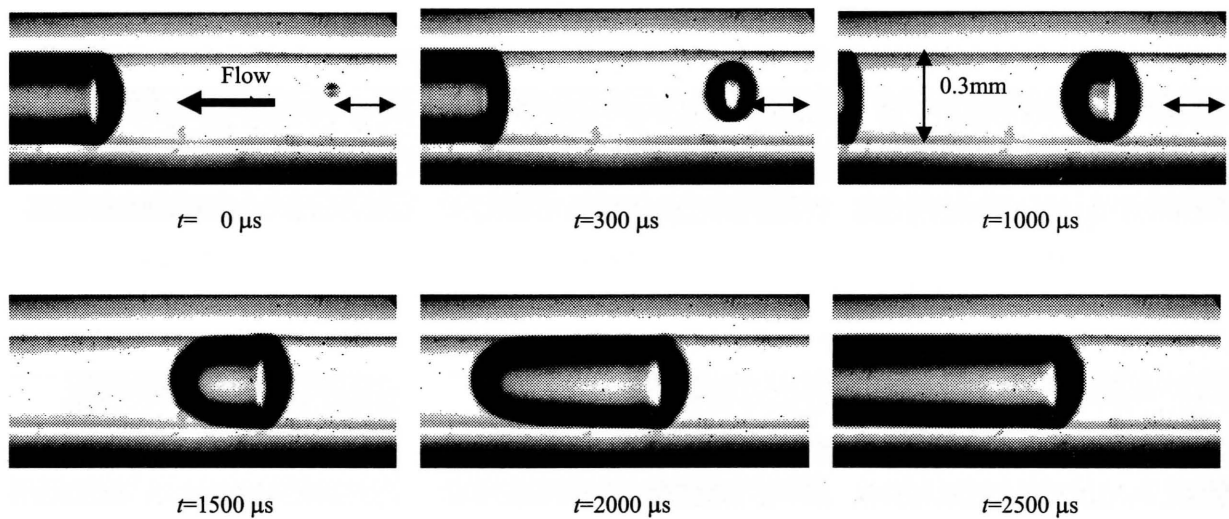


Fig.3 Growth and departure of a single vapor bubble in a mini-tube ($G=200\text{kg/m}^2\text{s}$, $q=15\text{kW/m}^2$, 20kfps)

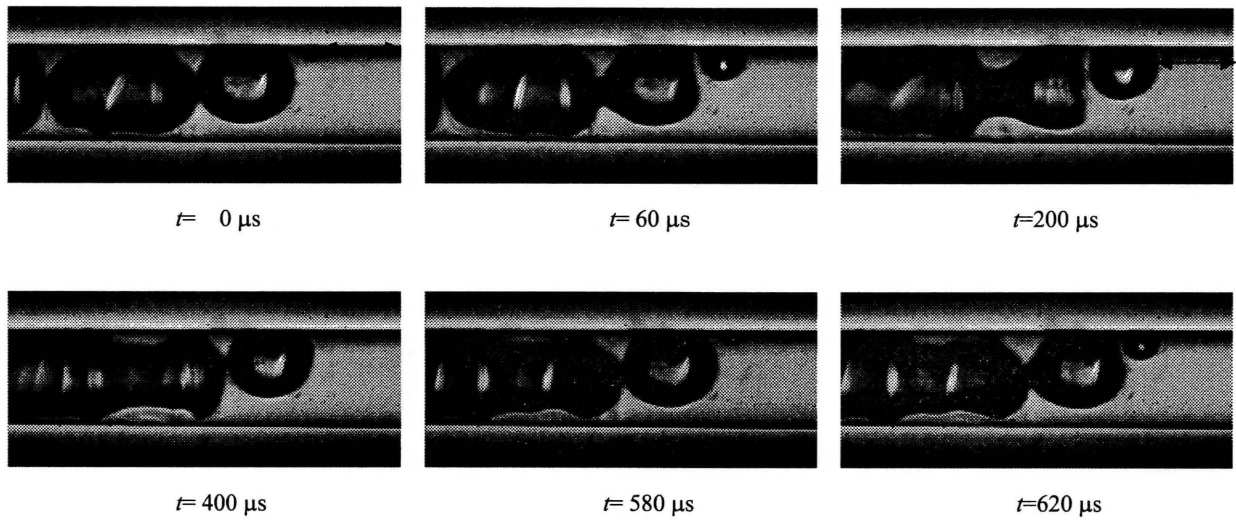


Fig.4 Growth, departure and coalescence of vapor bubbles in a mini-tube ($G=300\text{kg/m}^2\text{s}$, $q=30\text{kW/m}^2$, 50kfps)

に比べて熱流束が高いので、気泡の成長速度が大きく短時間で先を流れる蒸気泡と合体し蒸気プラグに成長していく。蒸気プラグの側面と管内面との間には液膜が存在し、その気液界面は不安定で、大きな波と小さな波による変形が見られる。結果として、高熱流束 $q=30\text{kW/m}^2$ では、核沸騰だけでなく液膜を通しての蒸発も優勢な伝熱機構であり、沸騰開始点の直ぐ下流においても良好な伝熱性能が

維持されると思われる。なお、気泡の射出周期は約 $580\mu\text{s}$ で、熱流束 $q=15\text{kW/m}^2$ よりも短くなった。

Fig.5 は、沸騰開始点近傍における核沸騰の様子を観察したもので、質量流束 $G=200\text{kg/m}^2\text{s}$ 、熱流束 $q=30\text{kW/m}^2$ である。Fig.4 ($G=300\text{kg/m}^2\text{s}$ 、 $q=30\text{kW/m}^2$) に比べて質量流束が小さいために壁面近傍の過熱層が厚くなり、複数の発泡点から気泡が生成・成長し、先に発生した蒸気泡どう

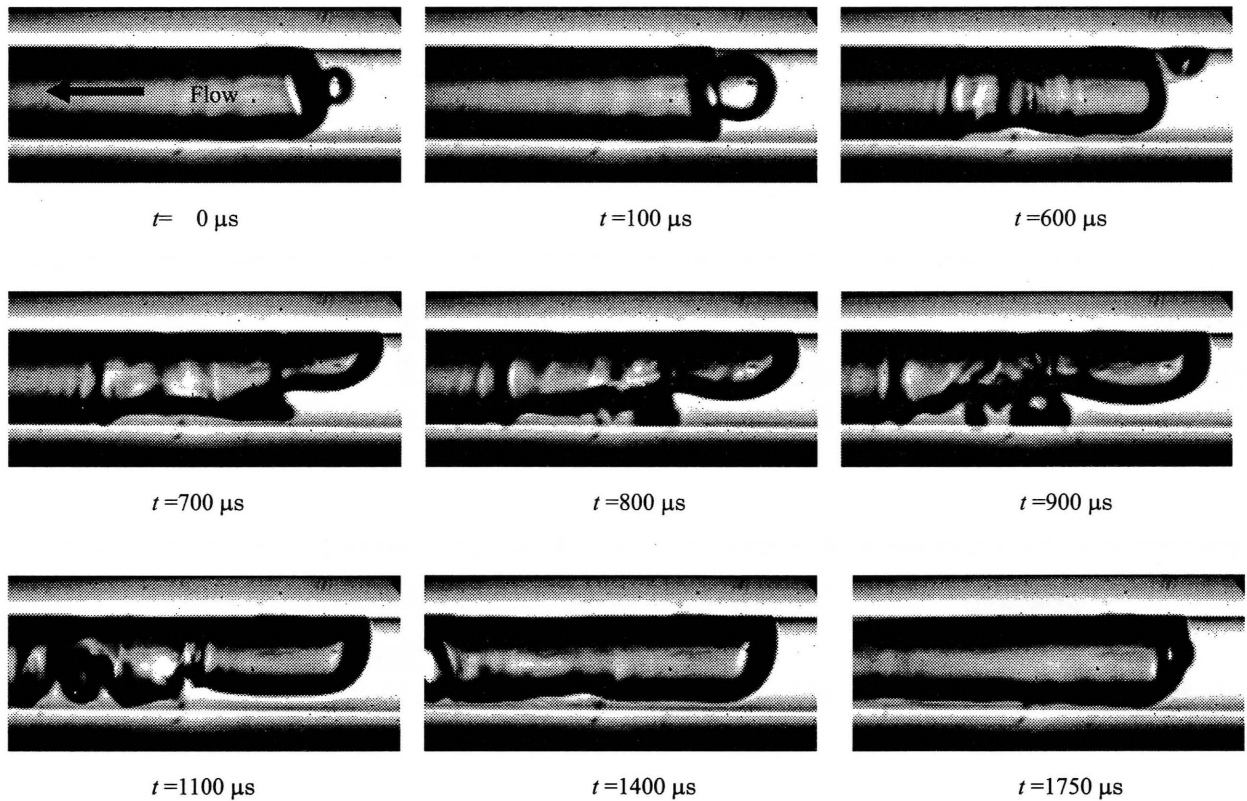


Fig.5 Growth, departure and coalescence of vapor bubbles in a mini-tube ($G=200\text{kg/m}^2\text{s}$, $q=30\text{kW/m}^2$, 20kfps)

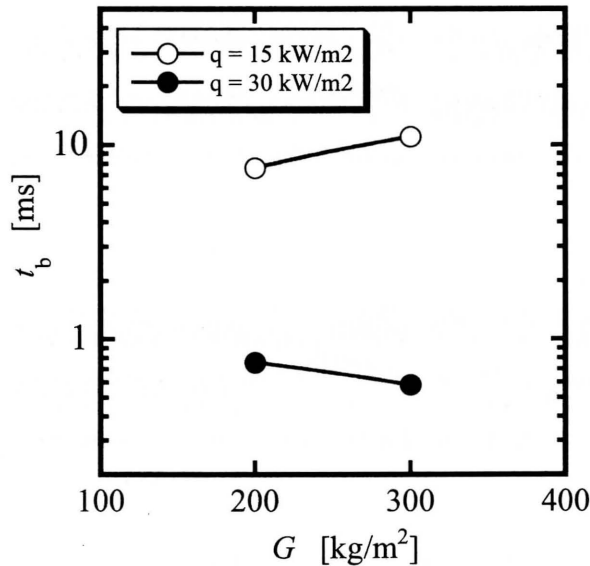


Fig.6 Time period of bubble departure

しが合体してできた蒸気プラグに次々と取り込まれていく。これによって、蒸気プラグが変形するとともに、蒸気プラグと管内面との間に液が供給され、液膜が維持される。結果として、高熱流束条件下 ($q=30\text{kW/m}^2$) では、沸騰開始点の直ぐ下流においても核沸騰と液膜蒸発の両方が主たる伝熱機構になると思われる。これは、マクロスケール管の特性 (マクロスケール管の場合、高熱流束・低クオリティ領域の主たる伝熱機構は核沸騰である。) とは明らかに異なっている。なお、一つの発泡点に着目して気泡の射出周期を調べてみると、約 $760\mu\text{s}$ であった。Fig.4 との比較から、熱流束 $q=30\text{kW/m}^2$ では、質量流束が小さくなると気泡の射出周期が長くなることがわかる。

Fig.6 に、各条件における気泡の射出周期 t_b をまとめて

示す。熱流束が大きいほど離脱周期は短く、核沸騰が優勢になることがわかる。熱流束が小さい場合には ($q=15\text{kW/m}^2$ の場合)、質量流束が大きいほど離脱周期は大きくなる。これは、質量流束が大きいほど壁面近傍の過熱層が薄くなるためと思われる。一方、熱流束が大きい場合には ($q=30\text{kW/m}^2$ の場合)、質量流束が大きいほど離脱周期は小さくなる。これは、壁面過熱度が充分大きく気泡成長が速いので、気泡径が管内径に近づき流体の流れによって伝熱面から剥ぎ取られる形で気泡が離脱するからであると考えられる。一般に、気泡の離脱直径は、熱的な釣合いではなく力学的な条件で決まるので、細管内核沸騰では管径と質量流束によって変化するであろう。気泡の離脱周期や離脱直径は核沸騰熱伝達と深い関係にあることから、細管内の核沸騰熱伝達は熱流束 q だけでなく質量流束 G にも依存すると推察できる。

3. 2 低クオリティ領域における流動様式の形成

Fig.7 は、加熱開始位置から $z=12\text{mm}$ 下流において流動様式を観察したもので、質量流束および熱流束は、Fig.5 と同様、 $G=200\text{kg/m}^2\text{s}$ 、 $q=30\text{kW/m}^2$ である。クオリティ x は約 0.09 である。蒸発が進み、蒸気泡は前面が尖り後面が扁平な細長い蒸気プラグに成長している。この領域では、核沸騰は抑制され、観察できない。1つの蒸気プラグが通過するのに要する時間は約 $5200\mu\text{s}$ 、蒸気プラグの長さは 7mm 程度である。蒸気プラグの側面と管内面との間に入り込んだ液相は短時間 (約 $1000\mu\text{s}$) で消滅し、液相は主に2つの蒸気プラグの間にのみ存在するようになるので、伝熱面の大部分はドライアウトしていると思われる。結果として、熱伝達率が大きく低下する領域となっている。な

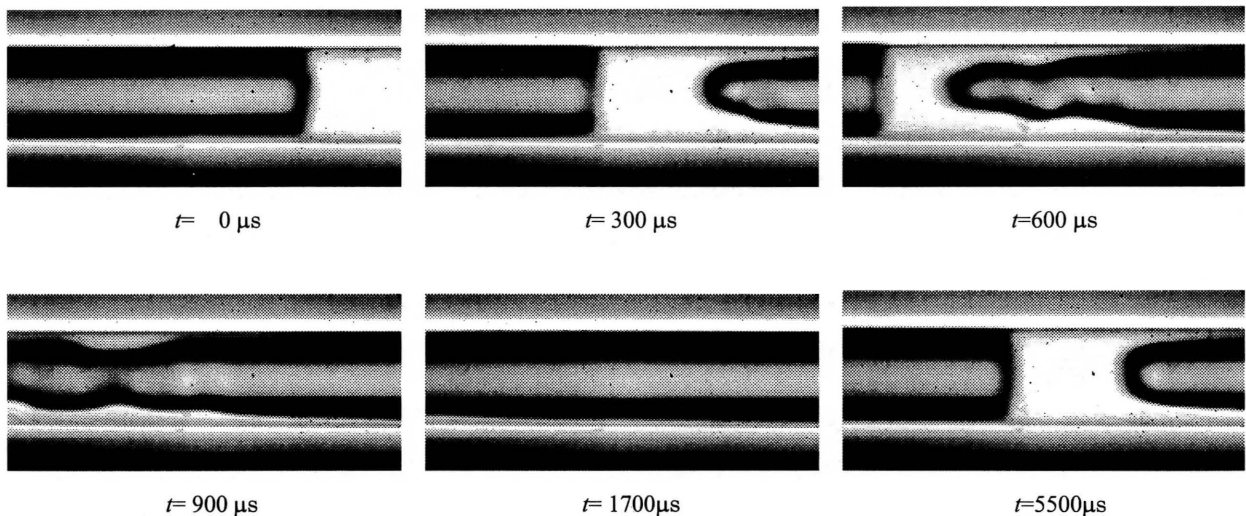


Fig.7 Two-phase flow pattern in a mini-tube ($G=200\text{kg/m}^2\text{s}$, $q=30\text{kW/m}^2$, $z=12\text{mm}$, $x=0.09$, 10kfps)

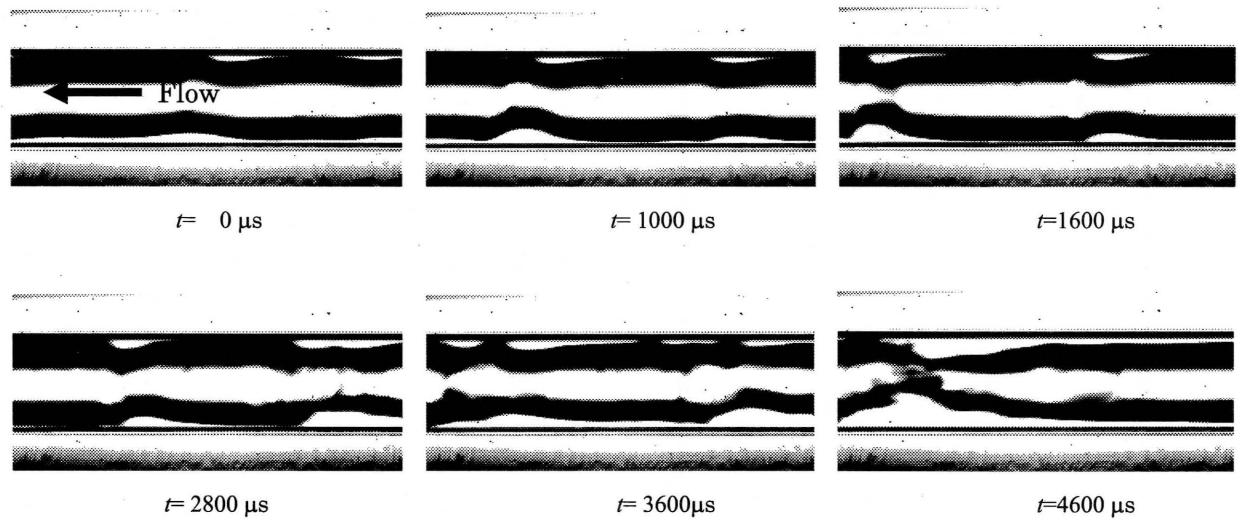


Fig.8 Two-phase flow pattern in a mini-tube ($G=200\text{kg/m}^2\text{s}$, $q=30\text{kW/m}^2$, $z=24\text{mm}$, $x=0.23$, 20kfps)

お、マクロスケール管では、低クオリティ領域でこうした流動様式は見られない。

Fig.8 は、加熱開始位置から $z=24\text{mm}$ 下流において流動様式を観察したもので、Fig.5 や Fig.7 と同様、質量流束 $G=200\text{kg/m}^2\text{s}$ 、熱流束 $q=30\text{kW/m}^2$ である。クオリティ x は約 0.23 である。さらに蒸発が進み、細長い蒸気プラグの先端が先方を流れる蒸気プラグに追いついて繋がる。 $t=4600\mu\text{s}$ の静止画は、ちょうどその瞬間を示していると思われる。細長く伸びた蒸気プラグの気液界面は表面張力の効果で比較的滑らかであるが、蒸気プラグどうしの合体による衝撃が不安定な波となって気液界面を伝わる様子が観察できる。液相は、蒸気プラグの側面と管内面との間を液膜となって流れる。このため、伝熱面のドライアウトは解消され、液膜蒸発によって伝熱性能は再び回復すると思

われる。

Fig.9 は、質量流束 $G=200\text{kg/m}^2\text{s}$ 、熱流束 $q=15\text{kW/m}^2$ で、加熱開始位置から $z=24\text{mm}$ 下流において流動様式を観察したもので、クオリティ x は約 0.09 である。Fig.7 と同じ質量流束でほぼ同じクオリティであるが、蒸気プラグどうしが既に繋がっているため蒸気プラグ側面と管内面との間に薄い液膜が存在している。したがって、熱伝達率は Fig.7 の状態よりも高いものと思われる。蒸気プラグどうしの結合部分では界面が乱れているものの、その他の部分では比較的安定している。

Fig.10 は、質量流束 $G=300\text{kg/m}^2\text{s}$ 、熱流束 $q=15\text{kW/m}^2$ 、加熱開始位置から $z=24\text{mm}$ 下流における流動様式で、クオリティ x は約 0.04 である。やはり核沸騰は抑制され、観察できない。蒸気プラグの先端が先方を流れる蒸気プラグ

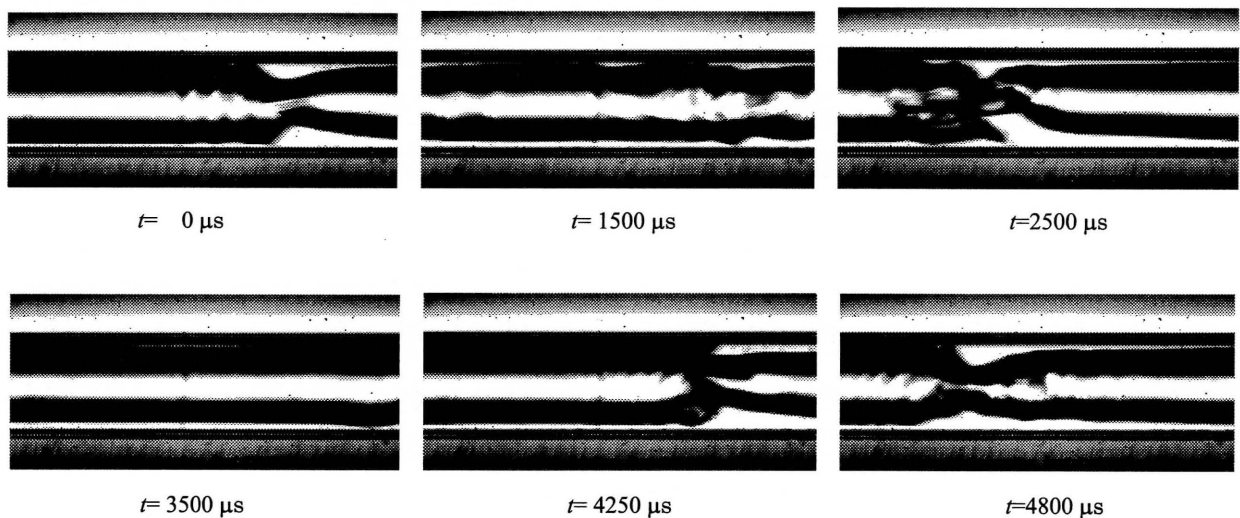


Fig.9 Two-phase flow pattern in a mini-tube ($G=200\text{kg/m}^2\text{s}$, $q=15\text{kW/m}^2$, $z=24\text{mm}$, $x=0.09$, 20kfps)

に追いつき合体する様子が捉えられている ($t=0$ および $t=150\mu\text{s}$)。長く伸びた蒸気プラグに成長することで、蒸気プラグ側面と管内面との間に薄い液膜が存在し、伝熱面はドライアウトしていない。

Fig.11 は、質量流束 $G=300\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ 、熱流束 $q=30\text{kW}/\text{m}^2$ 、加熱開始位置から $z=24\text{mm}$ 下流における流動様式で、クオリティ x は約 0.14 である。流動様式は、蒸気プラグあるいは蒸気気泡どうしが繋がったばかりの様子も一部に見られるが、殆どの部分でいわゆる環状流となっている。また、管内面に沿って流れる液膜の界面には、蒸気せん弾力によると思われる細かな波が多数見られ、主たる伝熱機構は強制対流蒸発伝達であると推測される。

以上、Fig.7~Fig.11 からわかるように、細長い蒸気プラグが成長して互いに結合すると、伝熱機構は高熱流束条件においても液膜蒸発が主となり、核沸騰は見られなかった。このことから、細管内の強制対流沸騰では、核沸騰が優勢な領域はマクロスケール管に比べて小さくなると思われる。

3. 結 言

内径 $\phi 0.3\text{mm}$ の加熱細管内における沸騰開始点近傍および低クオリティ領域における強制対流沸騰の様子を可視化し、以下の知見を得た。

沸騰開始点近傍における気泡の生成・成長について

(1) 細管内核沸騰における気泡離脱直径は、浮力と表面張力との釣り合いによって決まるとした Fritz の式や管内径に比べ十分に小さい。また、細管内核沸騰における気泡離脱直径は、質量流束が大きいほど小さくなる。

(2) 熱流束が小さい場合 (例えば $q=15\text{kW}/\text{m}^2$ の場合)、

単一気泡が発泡点から離脱すると、前面がやや尖り、後面が扁平な弾丸のような形状の気泡となって流れ、蒸気プラグに成長していく。流路断面全体を占めるようになった蒸気泡と管内壁との接触面はドライアウトするので、沸騰開始点の直ぐ下流において伝熱性能は悪化すると思われる。

(3) 熱流束が大きくなると (例えば $q=30\text{kW}/\text{m}^2$ 、 $G=200\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ の場合)、複数の発泡点から気泡が生成・成長し、先に発生した蒸気気泡どうしが合体してできた蒸気プラグに次々と取り込まれていく。これによって、蒸気プラグが変形するとともに、蒸気プラグと管内面との間に液が供給され、液膜が維持される。結果として、沸騰開始点の直ぐ下流においても、核沸騰と液膜蒸発が混在する伝熱機構となる。

(4) 細管内における気泡の射出周期は、熱流束が大きいほど短くなり、核沸騰が優勢になる。熱流束が小さい場合 (例えば $q=15\text{kW}/\text{m}^2$ の場合)、質量流束が大きいほど離脱周期は大きくなる。これは、質量流束が大きいほど壁面近傍の過熱層が薄くなるためと思われる。一方、熱流束が大きい場合には (例えば $q=30\text{kW}/\text{m}^2$ の場合)、質量流束が大きいほど離脱周期は小さくなる。これは、壁面過熱度が充分大きく気泡成長が速いので、気泡径が管内径に近づき流れによって伝熱面から剥ぎ取られる形で気泡が離脱するからであると考えられる。

低クオリティ領域における流動様式の形成について

(5) 蒸気泡が流路断面全体を占め、細長い蒸気プラグに成長すると、液相は主に 2 つの蒸気プラグの間にのみ存在し、伝熱面の大部分はドライアウトする。結果として、熱伝達率が大きく低下する領域ができる。

(6) さらに蒸発が進み、長く伸びた蒸気プラグの先端が先

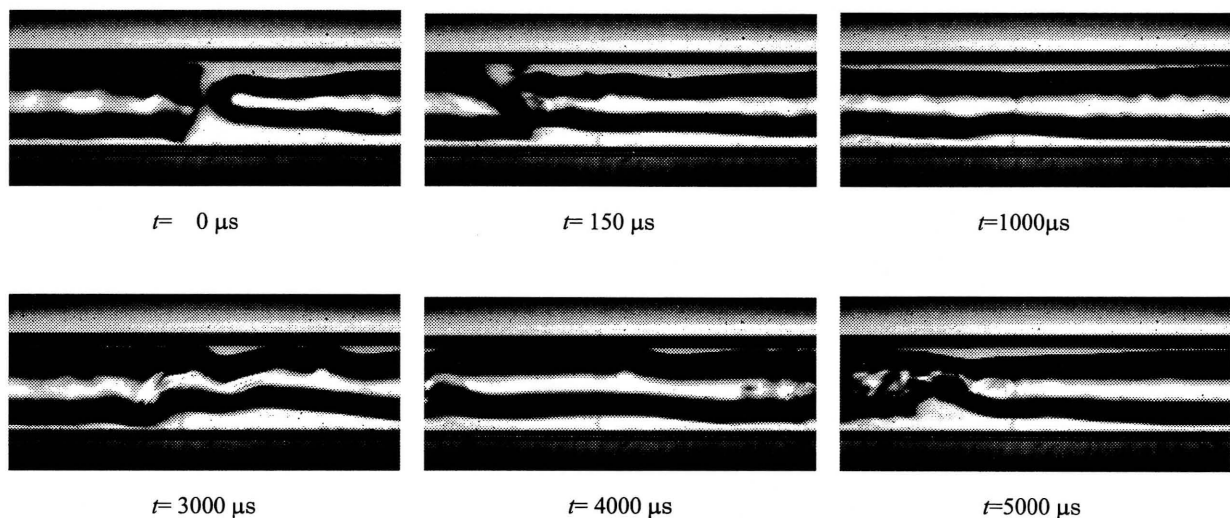


Fig.10 Two-phase flow pattern in a mini-tube ($G=300\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$, $q=15\text{kW}/\text{m}^2$, $z=24\text{mm}$, $x=0.04$, 20kfps)

方を流れる蒸気プラグに追いついて繋がると、液相は蒸気プラグの側面と管内面との間を液膜となって流れる。このため、伝熱面のドライアウトは解消され、液膜蒸発によって熱伝達率は再び回復すると思われる。

(7) さらに蒸発が進むと、蒸気せん弾力によると思われる細かな波を有する液膜が多数見られる環状流に移行し、主たる伝熱機構は強制対流蒸発になると推測される。

(8) 以上の結果から、細管内の強制対流沸騰では、核沸騰が優勢な領域はマクロスケール管に比べて小さくなると思われる。

参考文献

- 1) Chen, P., Wu, H. Y.: Phase-change Heat Transfer in Microsystems, Proc. 13th International Heat Transfer Conference (2006), KN-02.
- 2) Ohtake, H.: Micro and Nano Neturyutai Handbook (in Japanese), NTS (2006), 122-138.
- 3) Shimada, Y. et al: Experimental Study on Flow Boiling Heat Transfer in Extremely Small Tubes (in Japanese), Proc. 43th National Heat Transfer Symposium of Japan (2006), J211.
- 4) Yen, T-H., Kasagi, N., Suzuki, Y.: Forced Convective Boiling Heat Transfer in Micro-tubes at Low Mass and Heat Fluxes, Int. J. Multiphase Flow 29 (2003), 1771-1792.
- 5) Araga, K., Okamoto, K. and Murata, K.: Forced Convective Boiling of Refrigerant HCFC123 in a Mini-Tube, Proc. 14th International Heat Transfer Conference (2010), IHTC14-22060.
- 6) Murata, K., and Hashizume, K.: Forced Convective Boiling of Nonazeotropic Refrigerant Mixtures Inside Tubes, Transactions of the ASME, 115 (1993), 680-687
- 7) Thome, J.R.: Fundamentals of Boiling and Two-phase Flows in Microchannels, Proc. 13th International Heat Transfer Conference (2006), KN-14.
- 8) Hetsroni, G., : Boiling in Micro-channels, Proc. 7th International Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (2009), KL-3, 45-60.
- 9) Shah, R.K. and Celata, G.P.: Microchannel Heat Transfer and Pressure Drop Performance: Single-phase, Boiling and Condensation, Proc. 7th International Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (2009), MEMS-1, 1723-1740.
- 10) The Japan Society of Mechanical Engineers ed., JSME Textbook Series: Heat Transfer (in Japanese), (2001), 133.