

## CHF 付近における蒸気塊底部の液層構造

井出 幸佑<sup>†</sup> 鴨志田 隼司<sup>‡</sup> 弓座 京子<sup>‡</sup>

## A Study of Liquid-Layer Structures under Vapor Mass in CHF Region

Kosuke IDE<sup>†</sup>, Junji KAMOSHIDA<sup>‡</sup> and Kyoko YUMIZA<sup>‡</sup>

## Abstract

This paper deals with the liquid-vapor structure under vapor mass in the high heat flux region of water and R141b. The liquid-vapor structure was measured in two dimensional space by an optical fiber probe (tip diameter<10 $\mu$ m). Experimental data were analyzed with emphasis upon the void fraction, the vapor contact frequency to which the boundary of liquid-vapor contacted at the tip of the optical fiber probe, and the time series of optical probe signal with surface temperature. Time-space averaged results confirm the existence of a liquid layer and very rapid liquid-vapor phase-changes in the liquid layer in water. On the other hand, the time-space averaged results of R141b do not indicate the existence of the liquid layer. This suggests that the liquid-vapor structure of R141b differs from that of the water and the so-called macrolayer model owing to its small surface tension.

**Key Words:** Large-diameter heating surface, Critical heat flux, Liquid layer, Nucleate boiling

## 記号

$F$	:	気相通過頻度	[Hz]
$H$	:	伝熱面からの高さ	[mm]
$q$	:	熱流束	[W/m <sup>2</sup> ]
$T$	:	温度	[°C]
$\Delta T$	:	過熱度	[K]
$t$	:	時間	[s]
$X$	:	水平方向位置	[mm]
$\delta$	:	液膜厚さ	[ $\mu$ m]
$\phi$	:	ボイド率	[%]
$\gamma$	:	不均一さ	[-]

## 添字

$CHF_{exp}$	:	実験による限界熱流束
$sat$	:	飽和
$w$	:	壁面

## 1 緒言

高熱流束核沸騰および遷移沸騰では蒸気塊（合体気泡）が生成し、蒸気塊底部の加熱面上には「マクロ液膜」と呼ばれる液層が存在するとされている[1]。そのマクロ液膜の蒸発・消耗が限界熱流束や高熱流束沸騰における熱伝達を支配していると考えられる。しかし、沸騰現象は時空間的に複雑な現象ゆえ、観察実験が難しく、この高熱流束核沸騰域においては先述したマクロ液膜モデルを代表に数多くのモデル[2-6] や実験結果[7-9] が存在し、いまだ議論がなされている。さらに液体の種類が異なった場合について、あまり検討されていないのも現状である。

そこで本研究は、濡れ性・表面張力が大きく異なる水と R141b の沸騰現象において、光ファイバ式ボイド計を用いて得られるボイド信号を統計的に解析した。その上で限界熱流束付近の高熱流束における

受付日: 2006年3月9日, 第43回日本伝熱シンポジウムより受付, 担当エディター: 門出 正則

<sup>†</sup> 三洋電機株式会社 (〒370-0596 群馬県邑楽郡大泉町坂田 1-1-1)

<sup>‡</sup> 芝浦工業大学 工学部機械工学第二学科 (〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5)

伝熱面近傍の沸騰現象から限界熱流束トリガ機構を明らかにすることを目的とした。

## 2 実験装置・方法

### 2.1 実験装置概略

図1に実験装置の概略を示す。沸騰形式は大気圧下における水、R141bの飽和プール沸騰、伝熱面は直径30mmの水平上向き面である。加熱面は表面性状を一定に保つため厚さ0.2mmの薄い金板を拡散接合し、耐水ペーパー(#500)で粗さをつけている。試験容器内の液体温度は、補助ヒータによって常に飽和温度に保たれている。さらに、試験容器は空気式恒温槽を用いて熱損失を少なくした。熱流束、伝熱面表面温度、伝熱面過熱度は、伝熱面銅ブロックの中心に埋め込んだ三本の外径0.5mmの接地型シーース熱電対の示す温度勾配と、伝熱面銅ブロックおよび厚さ0.2mmの金板の熱伝導率を考慮し熱伝導の逆演算により算出した。気相、液相状態の測定には、光ファイバ二相流計測システムを用いており、レーザ光源は2mWのHe-Neレーザである。これらの出力信号からデジタルレコーダへ24kHzサンプルで記録している。光ファイバプローブは、気液二相流への影響を抑えるために先端を10μm以下のニードル状に加工し、伝熱面に対して水平および垂直方向に1μmの間隔でトラバースが可能である。また水・R141bともに水位は伝熱面から135mmである。試験容器内圧力は、凝縮器に送る冷却水の流量を自動制御して伝熱面上の圧力を大気圧に保っている。沸騰様相の観察は高速度ビデオカメラ(2000 frame/s)、シャッター速度1/8000sを用いた。

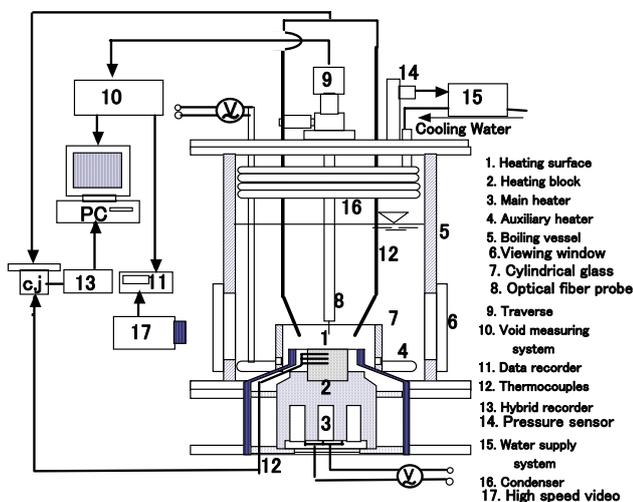


Fig. 1 Experimental appliance.

### 2.2 測定条件

本研究で対象とした熱流束は水・R141bともに中熱流束域（孤立気泡から合体気泡への遷移領域）から高熱流束域（合体気泡領域）である。光ファイバプローブによる気液変化信号の局所測定は、高さ方向において0.02 - 10.0 mmの範囲で主に（0.02 - 0.50 mmでは20 μm間隔、0.50 - 1.0 mmまでは100 μm間隔、その高さは2.0, 3.0, 6.0, 10.0 mm）計34箇所、水平方向において伝熱面中央から0.5 mm間隔に5箇所の合計170点とした。またその高さ方向の計測位置は、伝熱面からの反射光の影響を受けない様に配慮した（最低 $H=20\mu\text{m}$ ）。

### 3 伝熱特性と沸騰様相

図2, 3に水およびR141bにおける沸騰曲線と実験によって得られた限界熱流束で規格化した限界熱流束比における沸騰様相を示す。異なる実験日によって得られた二つの曲線（Run 1, 2）, （Run 3, 4）は同一曲線上にあり再現性があることを示している。

水の沸騰様相は、限界熱流束比 $q/q_{CHF,exp.}=0.36$ において蒸気塊が現れ始め、本実験での比較的大きな伝熱面径で蒸気塊は3~5個現れた。そして限界熱流束付近では伝熱面を覆うキノコ状の巨大な単一蒸気塊が観察された。蒸気塊離脱直前のパターンについては次節において詳細を示す。

試験液体が水の場合、実験から得られた限界熱流束は $1.46\text{ MW/m}^2$ であった。

R141bの沸騰様相は、限界熱流束比 $q/q_{CHF,exp.}=0.37$ において蒸気塊が現れ始め、伝熱面の中心付近と伝熱面の周囲とでは沸騰様相が異なった。伝熱面中央部において気泡の接合が促進され蒸気塊が形成されやすくなるが、伝熱面周囲では伝熱面から発生した気泡がそのまま接合せずに上昇した。また限界熱流束付近においても伝熱面全体を覆うような蒸気塊は発生せず、伝熱面上にいくつかの蒸気塊が観察できた。

試験液体がR141bの場合、実験から得られた限界熱流束は $0.36\text{ MW/m}^2$ であった。

水・R141bの沸騰様相を同程度の限界熱流束比で比較すると、両者の沸騰様相は大きく異なっている。気泡発生直後（ $q/q_{CHF,exp.}=0.10$ ）において、水と比べR141bの気泡径の大きさは著しく小さいことが観察された。

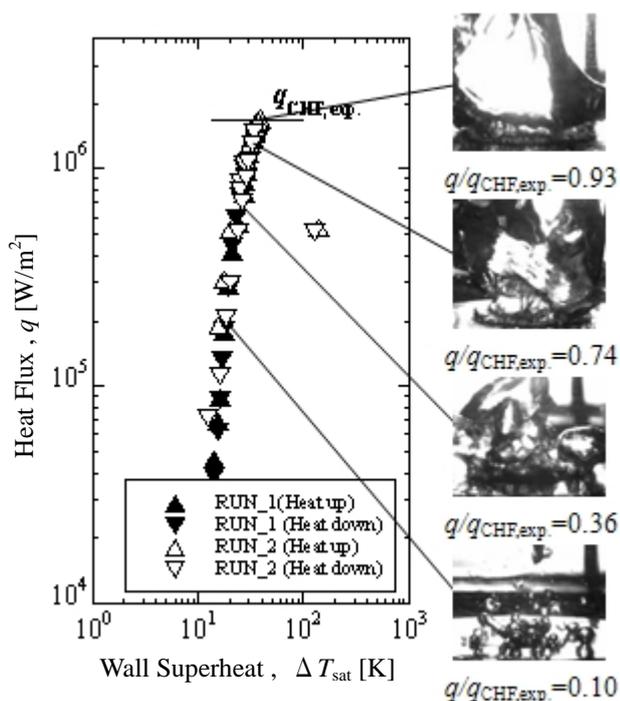


Fig. 2 Boiling curve with boiling behaviors (water).

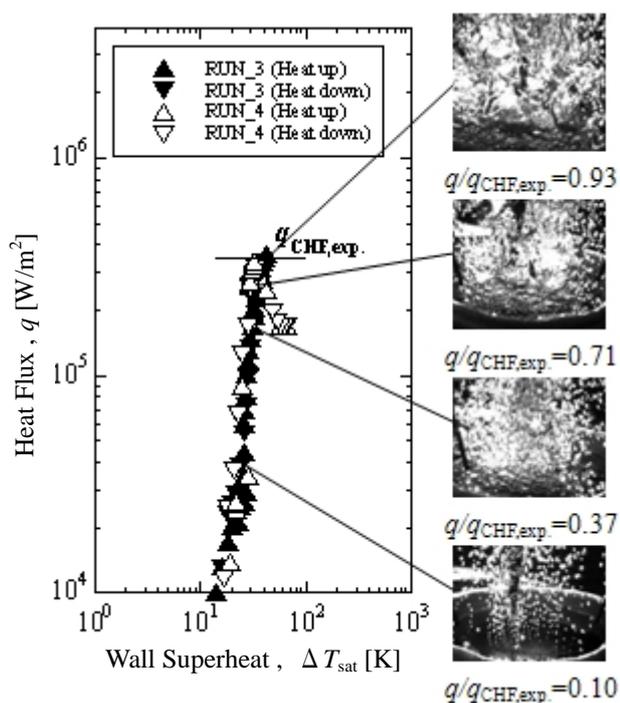


Fig. 3 Boiling curve with boiling behaviors (R141b).

#### 4 蒸気塊形状パターン

図 4 は水における蒸気塊が離脱した直後の観察結果から得た蒸気塊の形成パターンを示す。水の場合、本実験での比較的大きな伝熱面では限界熱流束比 0.59 において六種類のパターンが存在した。それ

ぞれのパターンを説明すると、以下の通りである。  
 W-1: 伝熱面全体を覆う単一で巨大な蒸気塊が形成され離脱する。そしてその蒸気塊が上昇するときの流体の流れや圧力勾配により、その底部に存在する合体泡は蒸気塊に吸い込まれ上昇するパターン。  
 W-2: 単一で巨大な蒸気塊が伝熱面全体を覆い、W-1のように合体泡が吸い込まれる現象は発生せず、蒸気塊は直ちに離脱するパターン。  
 W-3: 蒸気塊が二つ形成し同時に離脱するパターン。  
 W-4: 蒸気塊が三つ形成し同時に離脱するパターン。  
 W-5: 蒸気塊が二つ形成しある期間において離脱するパターン。  
 W-6: 蒸気塊が三つ形成しある期間において離脱するパターン。

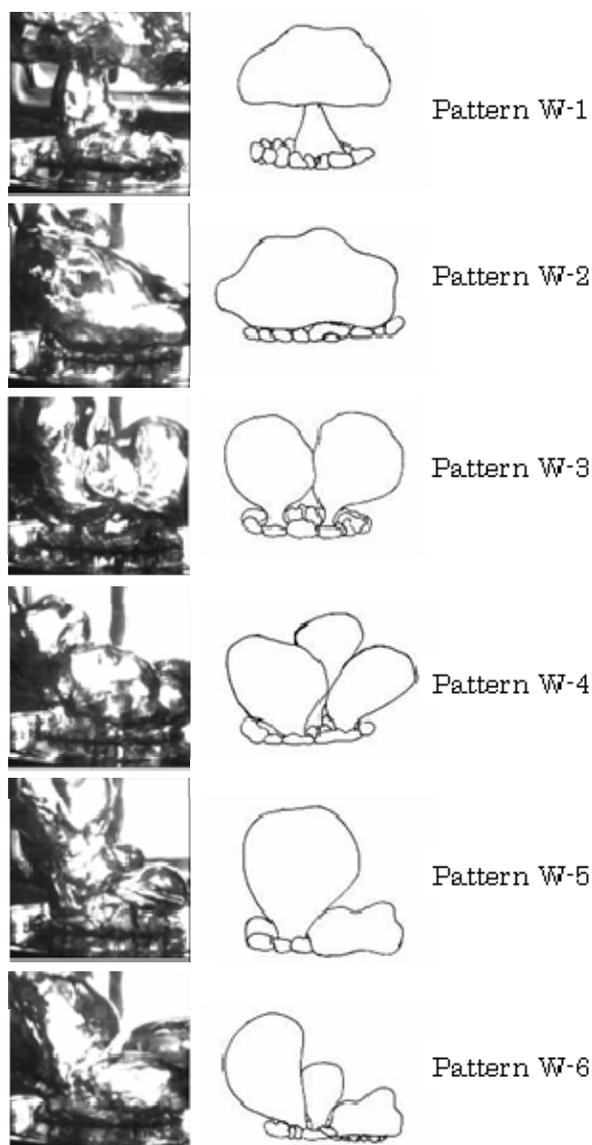


Fig. 4 Type of vapor mass patterns (water).

また、蒸気塊形成パターンの熱流束に対する変化を図5に示す。熱流束の増加とともに形成パターンは減少し、限界熱流束付近においてはW-1とW-2の二つのパターンのみが存在し伝熱面を覆う単一の巨大な蒸気塊が存在する。そして限界熱流束に近づくにつれ伝熱面近傍に高いボイド率を有するパターンW-1の頻度が増えるという結果になった。

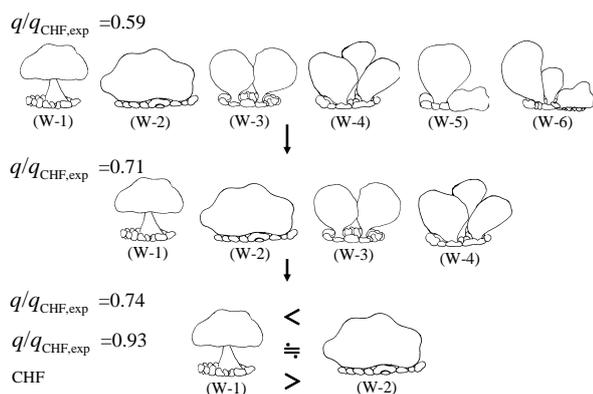


Fig. 5 Transition of vapor mass pattern.

図6はR141bにおける蒸気塊が離脱した直後の観察結果から得た蒸気塊形成パターンを示す。R141bの場合は水のような伝熱面上全体に蒸気塊が形成されず、伝熱面のある一部(図6で写真中の円で囲った部分)で蒸気塊が形成した。本実験の伝熱面上では高熱流束域において三種類のパターンが存在した。それぞれのパターンを説明すると、以下の通りである。

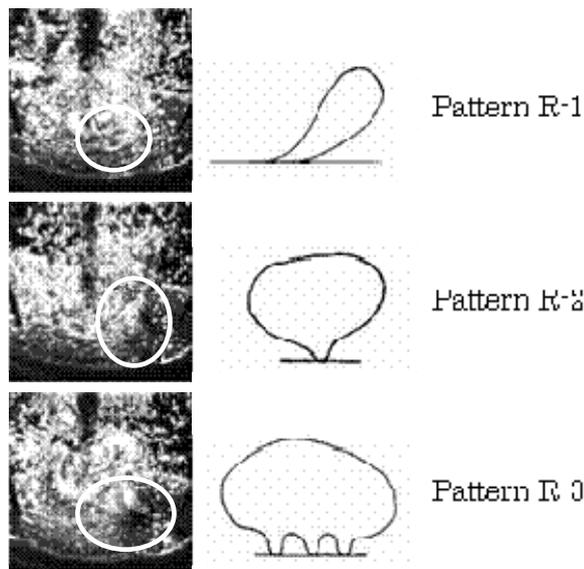


Fig. 6 Type of vapor mass patterns (R141b).

R-1: 接合した気泡同士が横接合を繰り返す結果、横に長く縦に短い蒸気塊を形成し、流体の流れを受けて離脱する。

R-2: 横接合の後、縦方向にも成長し、離脱直前には伝熱面にわずかな部分だけ接する蒸気塊を形成する。その後、伝熱面接合部が切り離されて離脱する。

R-3: パターンR-2の蒸気塊が成長している間に、蒸気塊近辺にある気泡が成長し、その蒸気塊と合体する。そして伝熱面に接している部分が複数存在する形になる。離脱時には伝熱面に接している部分が集まってネッキングするように離れていく。

このようにR141bの高熱流束域において以上のようなパターンが観察された。熱流束の上昇とともに蒸気塊は大きくなる。熱流束の変化によるパターンの違いは現れず、蒸気塊は伝熱面に接しているように観察された。

以上のことから、水とR141bの蒸気塊形成パターンは熱流束による変遷過程や伝熱面近傍の状態が大きく異なることがわかった。

## 5 伝熱面近傍の気液構造

### 5.1 時空間平均ボイド率・気相通過頻度

図7, 8に水の測定結果を示す。図は水平方向に計測し平均化した時間平均(サンプリング時間30s)ボイド率と気相通過頻度の高さ方向における分布を示す。

ボイド率は伝熱面からのある高さで極大値を持ち、伝熱面により近い位置ではボイド率が低くなった。これは伝熱面近傍で液体に富んだ層が存在することを示唆している(付録図19を参照)。気相通過頻度についても同様の傾向を示し、ある高さで極大値を持つ。その気相通過頻度が極大値を示す位置は、ボイド率の極大値よりもその値が低い位置となった。これより、液体に富んだ層内では激しく気液交換が行われていることがわかる(付録図19を参照)。またそれらが示す極大値の高さ方向の位置は、熱流束が限界値に近づくにつれ伝熱面側へシフトし、液体に富んだ層は薄くなることを示唆している。以上の結果より水の場合、伝熱面近傍には液体に富んだ層が存在し、その層内で激しく気液交換をしていることがわかる。また、熱流束が増加し限界熱流束へ近づくとその液体に富んだ層は薄くなる傾向を示した。

そして、熱流束の増加とともに伝熱面近傍に高いボイド率を有する蒸気塊形成パターンが増える画像

観察から、ボイド率が伝熱面近傍において増加するという傾向を示す触針法で得られた結果とは、ほぼ同様の傾向を示した。

図9, 10にR141bの測定結果を示す。図は水平方向に計測し平均化した時間平均ボイド率と気相通過頻度の高さ方向における分布を示す。

R141bの場合は水のように明瞭な極大値は存在しない結果となった。そして、伝熱面近傍でボイド率・気相通過頻度ともに最大値を示した。

また熱流束の増加とともにボイド率は増加したが、水と大きく異なり、気相通過頻度は全く逆転した傾向を示し低くなった。これは熱流束の増加に伴い、蒸気量が増え伝熱面近傍においても合体が促進されることによる。

以上より、R141bは伝熱面近傍に液体に富んだ層はなく、気体に富んでいることがわかる(付録図20を参照)。また限界熱流束付近の伝熱面近傍でボイド率は高く、気相通過頻度は低いことから、気泡は水に比べ時間的に長く伝熱面近傍に停滞していることがわかる。

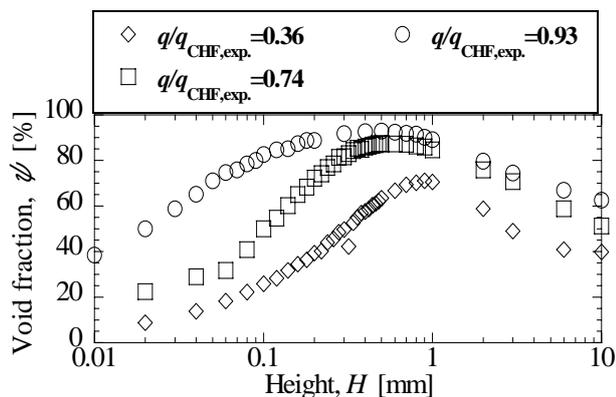


Fig. 7 Time averaged void fraction (water).

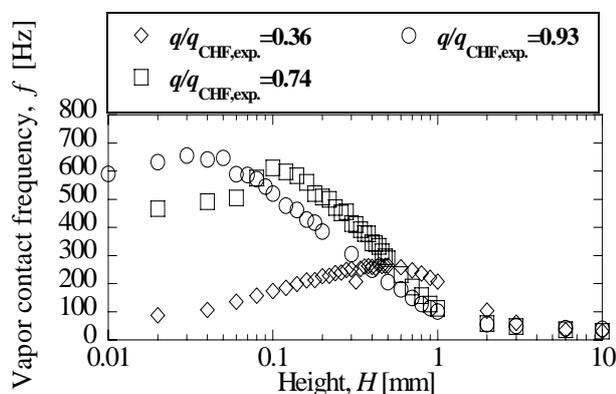


Fig. 8 Mean vapor contact frequency (water).

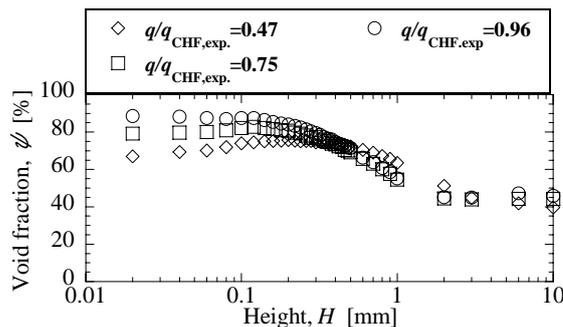


Fig. 9 Time averaged void fraction (R141b).

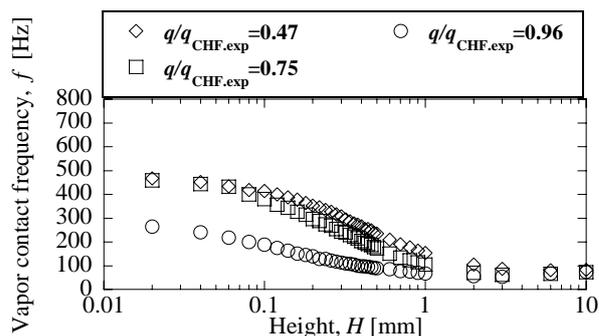


Fig. 10 Mean vapor contact frequency (R141b).

### 5.2 時間平均ボイド率・気相通過頻度の水平方向の分布

図7, 8は伝熱面の中心横断面におけるボイド率と気相通過頻度を示した。図11に、中心からの水平距離における限界熱流束付近での時間平均ボイド率の位置による変化を示す。また図12に、同様の気相通過頻度を示す。水の場合、ボイド率・気相通過頻度とともに伝熱面近傍において水平方向に分散が生じ、伝熱面から遠ざかるにつれその分散程度は小さくなる。これは、伝熱面近傍では水平方向に一樣でない現象(測定点の位置が気泡発生点付近か否か)が生じており、伝熱面から遠ざかるにつれて気泡が合体を繰り返し水平方向に一樣な現象が生じることによるものである(付録図19を参照)。

図13にR141bの限界熱流束付近における時間平均ボイド率を示す。図14にR141bの限界熱流束付近での気相通過頻度の高さ方向に対する水平方向での違いによる傾向を示す。R141bの場合、水のような明瞭な分散は伝熱面近傍で検出されなかった。これは伝熱面から発生した気泡が水に比べ早い段階で接合し、伝熱面近傍であっても水平方向に一樣な現象を生じさせるためである。このような現象が生じた原因は、蒸気塊は伝熱面に接しているという画像解析結果から、顕著なメニスカスが形成されないためと考えられる(付録図20を参照)。

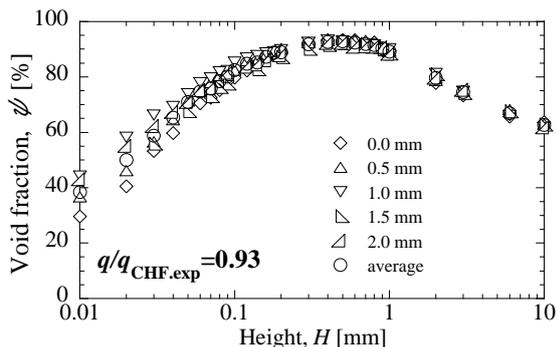


Fig. 11 Horizontal distribution of time averaged void fraction (water).

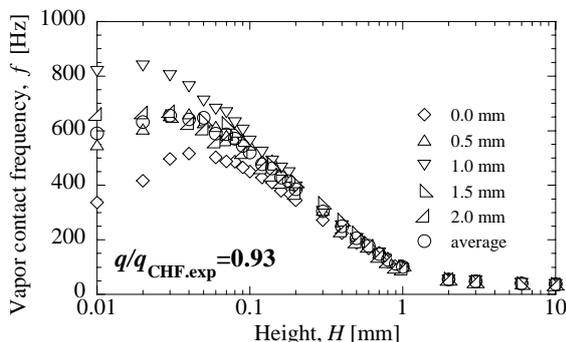


Fig. 12 Horizontal distribution of mean vapor contact frequency (water).

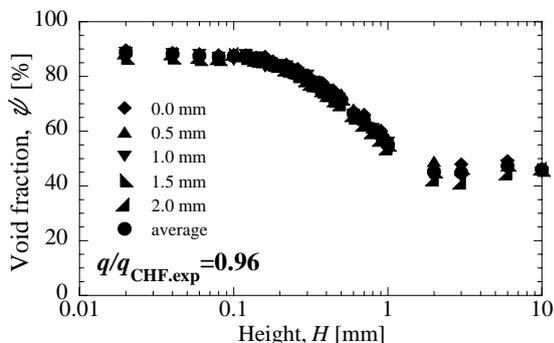


Fig. 13 Horizontal distribution of time averaged void fraction (R141b).

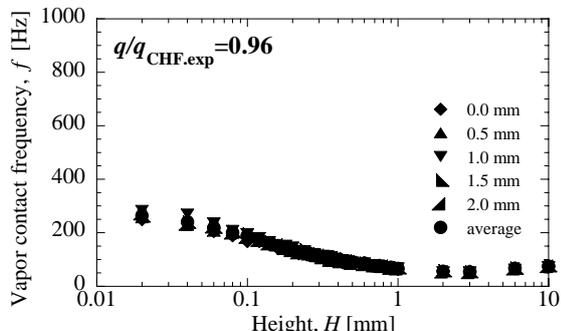


Fig. 14 Horizontal distribution of mean vapor contact frequency (R141b).

### 5.3 光ファイバプローブ出力信号

図 15 に水および R141b の計測期間内における任意の 0.2 秒間での光ファイバプローブ  $H=20 \mu\text{m}$  からの出力信号を示す。また、点線で囲われた信号は蒸気塊信号と時間的に長い気相の信号である。この計測結果から水・R141b とともに蒸気塊は伝熱面近傍に存在していることがわかる。特徴的なことは、水において小野・坂下[9]が確認したように、蒸気塊の信号に亀裂が生じている事である。これは主に、蒸気塊底部と伝熱面から発生した気泡とが合体し、蒸気塊底部が上下に震動することによるものだと考える。また、このような亀裂が生じる結果から、蒸気塊形成のメカニズムは、まず伝熱面から発生した気泡同士が水平方向に接合し蒸気塊を形成し、次に垂直方向に合体をする (付録図 19 を参照)。一方、R141b の場合はそのような亀裂が生じていない。これまでの結果を考慮しても、R141b は限界熱流束に達しなくとも、蒸気塊底部には液体に富んだ層は存在せず伝熱面と直接接していると考えられる。計測のように、限界熱流束比 0.47 の伝熱面近傍における出力信号においても蒸気塊の信号が存在している。これらことから、R141b の場合はこれまでのマクロ液膜モデルでは説明できず西尾[6]らの接触界線モデルに近い結果が示唆されている。

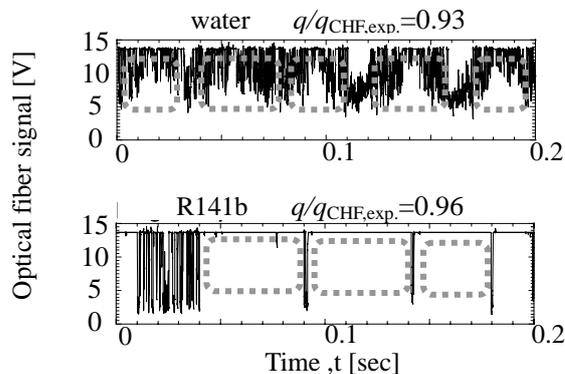


Fig. 15 Time series of optical fiber probe signal.

## 6 CHF 発生機構(水)

### 6.1 液層厚さの算出

これまでの結果より水においては蒸気塊底部に液体に富んだ層が存在し、その層内において激しい気液交換が行われていることが分かった。これにより蒸気塊底部の信号は水平方向に対し不均一な値を示すようになる。そこで気液信号に式(1)を用いて統計

的に処理した。

$$\gamma = \frac{\text{高さ}H\text{での時間平均最大気相通過時間の空間的標準偏差}}{\text{高さ}H\text{での時空間平均最大気相通過時間}} \quad (1)$$

ここで示す最大気相通過時間とはそれぞれの計測位置で得た気液信号の中で、蒸気塊が形成され離脱するまでの1サイクル中における、最大の気相通過時間である。そして高さ方向に分布した不均一さ $\gamma$ の変曲点[11]をその熱流束における液層厚さとして定義した。図16に式(1)を用いた不均一さ $\gamma$ の一例を示す。図は水における $q = 0.87 \text{ MW/m}^2$ での算出結果であり、変曲点は高さ $80 \mu\text{m}$ であった。他の熱流束も同様にして変曲点の値を得た。このようにして得られた水の熱流束に対する液膜厚さを図17に示す。同図には他の研究者[4, 7, 10-13]の液層厚さを例示した。その結果、熱流束が上がるにつれ液層厚さは他の研究者と同様に減少していく傾向を示した。また本研究では、限界熱流束付近である $q/q_{CHF,exp} = 0.93$ における液層厚さは $30 \mu\text{m}$ であった。

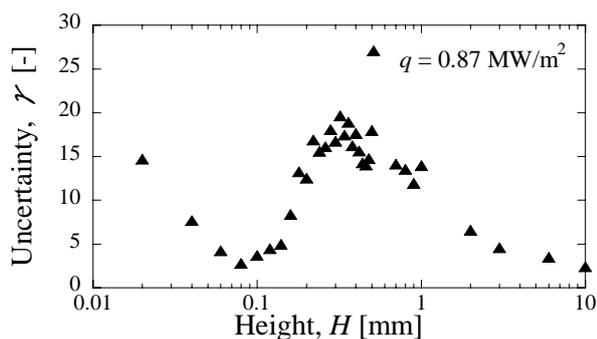


Fig. 16 Uncertainty (water).

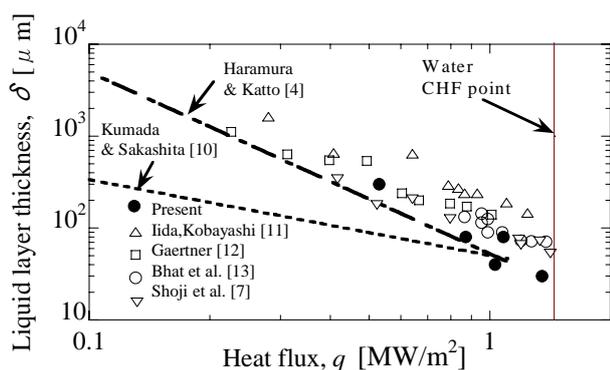


Fig. 17 Liquid layer thickness (water).

## 6.2 CHF 時における光ファイバプローブ信号と伝熱面表面温度

図18は水におけるCHFに至った時の光ファイバプローブ信号( $H = 30 \mu\text{m}$ )を同期させて測定した伝熱面中心の表面温度を示す。横軸の時刻50秒手前か

ら液相を示す光ファイバプローブ信号が現れなくなり、その時刻から表面温度は上昇し始める。これは、蒸気塊が直接伝熱面と接し伝熱面に乾き面を生じさせているからであり、これが限界熱流束を引き起こす原因と考える。また、40秒以前にも気相通過時間の長い信号(蒸気塊)が散発しており、その信号が現れるときに表面温度は上昇している。その後、液相信号の時間が長く(6~9sなど)現れる(液体が伝熱面に流入する)と表面温度は減少する。

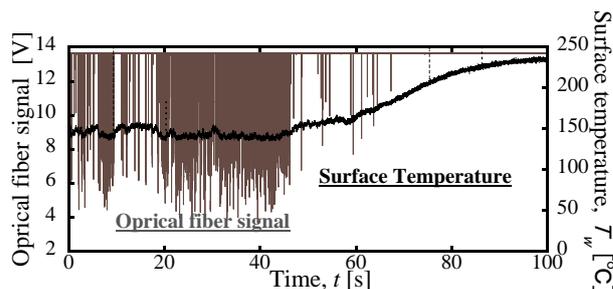


Fig. 18 Time series of optical fiber probe signal with surface temperature (water).

## 7 結論

高熱流束核沸騰域における伝熱面近傍の気液構造を、高速度ビデオカメラと光ファイバプローブを用いて空間的に計測することで以下の結果を得た。

- (1) 水の高熱流束核沸騰域において、伝熱面近傍に液体に富んだ層が存在し、その層内では激しい気液交換が生じていることが実験的に明らかになった(但し、蒸気柱のような連続的な気相は観察できなかった)。
- (2) R141bにおいて、水の場合とは異なり伝熱面近傍に気体に富んだ層が存在し、伝熱面近傍であっても水平方向に一樣な現象(蒸気塊)が中熱流束から生じている。この結果は西尾ら[6]の、伝熱面付近における気液構造には蒸気塊とその下の液膜といった層状構造はなく、伝熱面に直接気泡が接触したものと同様の結果となった。
- (3) 蒸気塊の形成は、主に気泡同士の水平方向の接合により生じる。
- (4) 以上の結果と高速度ビデオカメラによる観察結果から時間変化による蒸気塊形成メカニズムは付録図19, 20に示すような形状になる。
- (5) 水のCHFトリガ機構は、液膜厚さで説明することができ、熱流束の上昇とともに液膜厚さが減少し、伝熱面に乾燥面を生じさせることが引き

金となり CHF に至る。

また R141b についても図 18 に示す同様の計測を行ったところ、蒸気塊が伝熱面に接しているような信号が現れても水のような急激な温度上昇は現われなかった。

付録 本研究により考案した蒸気塊の形状過程

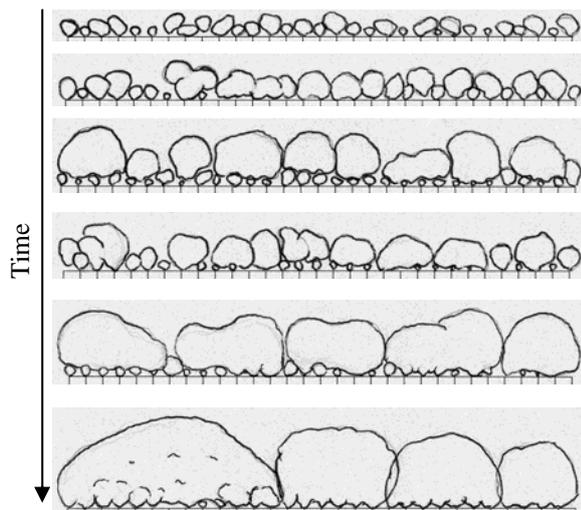


Fig. 19 Vapor mass formation process (water).

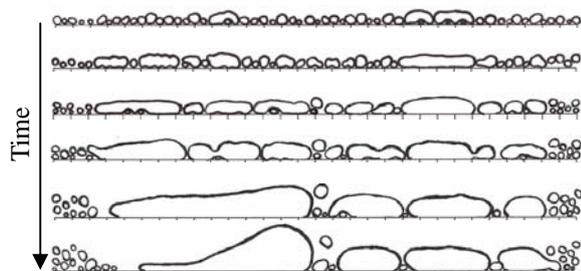


Fig. 20 Vapor mass formation process (R141b).

参考文献

[1] Katto, Y. and Yokoya, S., “Principal mechanism of boiling crisis in pool boiling”, *Int. J. Heat Mass Transfer.*, **11**-6 (1968), 993-996.  
 [2] Kutateladze, S. S., “Hydromechanical model of a critical state in the heat transmission in a boiling liquid, for the case of free convection”, *Zh. Tekh. Fiz.*, **20** (1950), 1389-1392.

[3] Zuber, N. Tribus, M. and Westwater, J. W., “The Hydrodynamic Crisis in Pool Boiling of Saturated and Subcooled Liquids”, *Int. Develop. Heat Transfer.*, **27**-1 (1963), 220-236.  
 [4] 原村嘉彦, 甲藤好郎, ” 限界熱流束に対する新しい流体力学的モデル プール沸騰・強制流動沸騰(飽和液中に沈められた加熱面)の限界熱流束発生機構”, *日本機械学会論文集*, **49**-445, B (1983), 1919-1927.  
 [5] 趙耀華, 増岡隆士, 鶴田隆治, “ミクロ液膜モデルによる限界熱流束の予測”, *日本機械学会論文集*, **62**-98, B (1996), 2338-2343.  
 [6] Nishio, S. Gotoh, T. and Nagai, N., “Observation of boiling structures in high heat-flux boiling”, *Int. J. Heat and Mass Transfer.*, **41**, (1998), 3191-3201.  
 [7] Shoji, M. “A study of steady transition boiling of water : experimental verification of macrolayer evaporation model”, *Pro. Eng. Found. Conf. Pool External Flow Boiling, Publ. by ASME.*, (1992), 237-242.  
 [8] Auracher, H., Marquardt, W., Buchholz, M., Hohl, R., Lüttich, T. and Blum, J., “New experimental results on steady-state and transient pool boiling heat transfer”, *Thermal Sci. and Eng.*, **9**-5 (2001), 29-40.  
 [9] 小野綾子, 坂下弘人, ”サブクール沸騰高熱流束域における伝熱面近傍の気液構造”, *日本機械学会論文集*, **70**-699, B (2004), 271-278.  
 [10] 熊田俊明, 坂下弘人, “プール沸騰に関する研究 (第4報 大気圧近傍で蒸気塊に形成される液膜厚さ)”, *機論*, **58**-552, B (1992), 2505-2511.  
 [11] 飯田嘉宏, 小林清志, “プール沸騰における平面伝熱面上のボイド分布”, *日本機械学会論文集*, **34**-263, B (1968), 1247-1254.  
 [12] Gaertner, R. F., “Photographic study of nucleate pool boiling on a horizontal surface”, *J. Heat Transfer.*, **87** (1965), 17-29.  
 [13] Bhat, A. M. Saini, J. S. and Prakash., “Role of macrolayer evaporation in pool boiling at high heat flux”, *Int. J. Heat Mass Transfer.*, **29**-12 (1986), 1953-1961.