

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 1 日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560228

研究課題名（和文）ぬれと乾きが共存する蒸発における熱流束分布測定とそれに基づく伝熱機構の解明

研究課題名（英文）Measurements of heat flux distribution on evaporation with wet and dry regions and heat transfer mechanism

研究代表者

原村 嘉彦 (HARAMURA YOSHIHIKO)

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号：80175546

研究成果の概要（和文）：

伝熱面直下に 76 個の熱電対を構成し伝熱面とした。先ず数値計算によって、熱を奪う領域を中心から外周に向けて移動させて求めた熱電対位置の温度を境界条件として熱伝導の逆問題を解き、その際の熱流束推定の限界について検討した。つづいて、伝熱面上に 1 つの大きな気泡が発生する条件で測定した温度を境界条件として熱伝導の逆問題を解いて表面熱流束を推定した。その結果、固液気三相界線付近で  $0.4\text{MW/m}^2$  または界線長さ当たり概ね  $1\text{kW/m}$  の伝熱があることがわかった。

研究成果の概要（英文）：

Seventy-six thermocouples were installed just below the surface of a heater block. First, estimation limit of surface heat flux was examined for the situation in which heat transfer region moves from center to the periphery. The inverse heat conduction problem was solved from temperatures at the thermocouples calculated. Second, surface heat flux was estimated from the measured temperatures by 76 thermocouples in the conditions where a single large bubble forms on the heat transfer surface. Heat flux of  $0.4\text{MW/m}^2$  or heat transfer  $1\text{kW/m}$  per unit length of triple contact line was obtained.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、熱工学

キーワード：相変化伝熱

### 1. 研究開始当初の背景

限界熱流束は、沸騰伝熱を利用する際の熱負荷の最大を与える量であり、工業上きわめて重要な量である。特に限界熱流束の促進をねらう上で、その発生機構の解明が望まれる。

発生機構として、(1) 限界液膜厚さをその主要因とする考え、(2) 固液気三相界線の長さの極大による考え、(3) 気泡の充満が主要因とする考えなどが提案されているが、未だ広く合意されるに至っていない。

核沸騰で気泡の発生量が増えると、伝熱面への液の供給が制限され、熱流束の増加による液の消耗の促進と相まって伝熱面上に乾燥部分が見れる。ぬれ部と乾燥部の境界に生じる固液気三相界線付近の液体内部には、大きな温度勾配が形成され、伝熱が促進される効果がある一方、蒸発による液の消耗も激しく、伝熱に寄与しない乾燥部分の広がりを促進する効果もある。これらのかねあいによって熱流束が極大をとるものと考えられるが、これら伝熱の状況を実験に基づいて明らかにする必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究は、限界熱流束をはじめ、急激な伝熱の劣化を引き起こす可能性のある現象の素過程を明らかにしようとするものである。

ぬれと乾きの境界付近の伝熱を測定するには、できるだけ伝熱面から浅い位置に狭い間隔で設置した温度センサによって温度を測定する必要がある。近年、シリコンウェハ上に微小なセンサを形成する技術が進歩したが、沸騰伝熱面は熱応力等が大きく、そのような温度センサは機能しないことが多い。そこで、銅ブロック内部に熱電対を設置する方法を採用する。

その上で、ぬれ部と乾燥部が発生する状況で、伝熱面のぬれ・乾きの状況と熱流束分布の関連を実験的に調べる。

### 3. 研究の方法

本研究は、ぬれと乾きの境界線である固液気三相界線付近における伝熱を定量的に把握するものであり、主な研究成果は4(2)に記述する内容である。しかし、その結果の妥当性を確認する上で、4(1)に記述する熱流束推定の限界についての検討が重要であり、これを欠かすことはできない。したがって、研究方法についても、それぞれについて、3(1)と3(2)で説明する。

(1) 熱流束推定の限界に関する解析的研究

この研究では、計算で仮定した熱流束分布が逆問題によって再現できるかを調べ、熱流束推定の限界を明らかにした。すべて数値解析的に行った研究であり、表面熱流束を仮定して温度測定部の温度を計算する第1段階と、第1段階で計算された温度分布を用い、

熱伝導の逆問題を解いて表面熱流束を計算する第2段階からなる。

#### ① 仮定した壁面熱流束 (第1段階)

一定幅  $w$  の放熱領域が時間とともに円形伝熱面の中心から外周に向かって速度  $v$  で移動するとしたときの温度測定位置での温度履歴を計算する。 $w$  は  $0.1\sim 2.5$  mm の8通り、 $v$  は  $16\sim 300$  mm/s の3通りとした。

#### ② 計算手法 (第1段階)

軸対称を仮定し、円柱座標系(周方向には分割なし)で非定常熱伝導方程式を解いた。

メッシュサイズは、深さ方向を142分割(公比1.01058の等比数列の可変メッシュ幅を採用)、半径方向のメッシュサイズは、 $z > 0.75$  mmでは0.15mm間隔、 $z < 0.75$  mmでは50 $\mu$ mに細分した。コントロールボリューム法ならびにクランクニコルソン法で離散化した。

境界条件は、

外周  $r=R_0=7.5$ mm で断熱 ( $\partial T/\partial r|_{r=R_0}=0$ ),

伝熱面で  $\lambda(\partial T/\partial z|_{z=0})=q_w(t,r)$ , ただし

$$q_w(t,r) = \begin{cases} q & (vt-w/2 \leq r \leq vt+w/2) \\ 0 & (r < vt-w/2 \text{ or } vt+w/2 < r) \end{cases} \quad (3.1)$$

深部で  $T|_{z=L}=T_d$  (一定,  $L=16$ mm),

を仮定した。初期条件は、全体が  $100^\circ\text{C}$  で一様温度とし、放熱領域が現れ始める  $t=-w/2v$  から計算を始めた。

#### ③ 計算領域 (第2段階)

計算領域は、設置した熱電対を断面の中心とする  $1.35\text{mm} \times 1.5\text{mm}$  の長方形断面の角柱76個を並べた角柱とした(図3.1)。

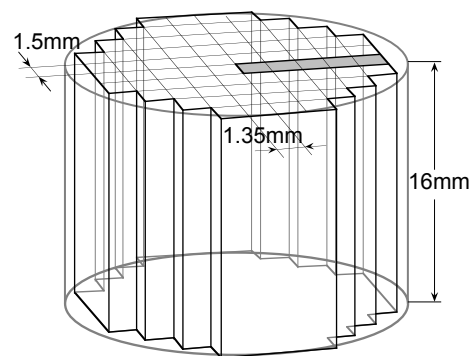


図 3.1 逆問題解法における計算領域

#### ④ 計算方法 (第2段階)

熱伝導の逆問題解法は、Beck ら<sup>1)</sup>による逐次推定法(sequential estimation)、一定熱流束関数形(constant function form)を3次元に拡張したものである。

#### ⑤ 計算のパラメータ (第2段階)

深さ方向に80分割(公比1.01994の等比数列でメッシュサイズが変化する可変メッ

幅を採用), 時間刻みを 0.1ms(実験と同じ)とした。

1) Beck, J.V.ほか, Inverse Heat Conduction: Ill-Posed Problems, Wiley-Interscience (1985), pp. 125-130.

(2) 大きな気泡底部液膜が乾燥する過程における伝熱

本研究における研究手法の要点は, 伝熱面の構成, 熱電対信号の処理系, 実験の条件と手順, 高速な温度データの処理方法であり, これとともに, 高速カメラ, 圧力測定系など, その他の測定項目について説明する。

#### ① 伝熱面と熱電対の構成

本研究で使用した伝熱面は, 図 3.2 に示す直径 15mm の銅ブロックで, ピッチ 1.35mm と 1.5mm の格子点に合計 76 本の銅・コンスタンタン多肢熱電対を, 表面直下に設置している。

#### ② 熱電対信号の測定と温度への変換

##### (a) 切り替え出力式プリアンプ

熱電対信号の測定では極力ノイズを減らす必要があるため, 氷水による冷接点を用いず, 熱電対を直接プリアンプに入力している。プリアンプに入力を接続するねじ止め式の端子台に T 型熱電対を固定し, これにて測定される温度を冷接点の温度とした。

プリアンプは, 熱電対の信号を 200 倍に増幅する。入力ポート直後に手動で操作するスイッチを設置して, このスイッチによって入力を短絡した状態であらかじめ測定を行い, この値を実際の測定値から差し引くことでゼロ点の補償を行う。

このプリアンプは, 1 つの基板に 8 個設置し, 半導体アナログスイッチ (ADG 431) を用いてその出力の中から 1 つを順に出力できるように設定されている。

##### (b) 伝熱面直下熱電対の計測器

8 個の熱電対から選択され, チャンネル順

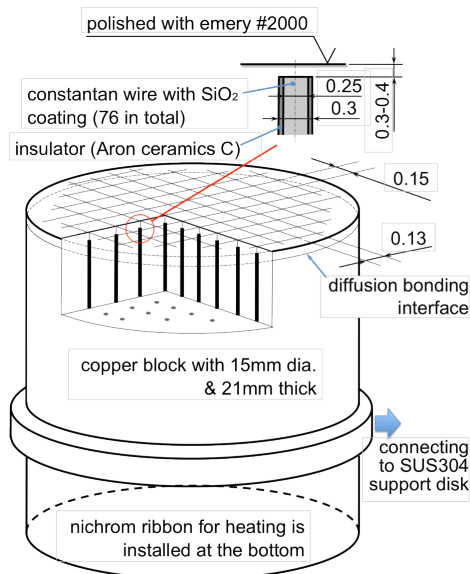


図 3.2 伝熱面

に時系列的に並んだ信号は, 横河電機製 WE7000 計測システムを用いて測定する。測定には, WE500 計測ステーション, WE7271 アイソレーション・ディジタイザ・モジュール (4 チャンネル) で測定する。このモジュール 3 台の 10 ポートで, 76 点の熱電対信号を測定する。残りの 2 ポートで高速カメラの撮影信号 (REC 信号) と容器内圧力信号を測定する。

##### (c) 測定のタイミング

WE7000 の外部トリガ端子に与えるトリガ信号とチャンネル選択の 3 ビット信号は, ハードウェア (デジタル IC を用いた配線) で生成する。この回路では, 測定開始が入力されると, ゼロチャンネルから順に, 12.5 $\mu$ s 間隔で切り替えると同時に, その切り替えから 10 $\mu$ s 後に, WE7271 測定用のトリガを発生させる。

##### ③ 圧力の測定

半導体圧力トランスデューサ (JTEKT 製, PMS-5M-2-500K) を用いて容器内圧力を測定している。トランスデューサは, 容器底部 (温度上昇を避けるため, 底面から約 150mm 下方に突き出た配管 (3/8B) の先端) に設置している。この信号は, 直流増幅器 (JTEKT 製, AA6210) を用いて 100 倍に増幅し, WE7000 計測システムのアイソレーション・ディジタイザ・モジュールで測定する。

##### ④ 観察系

熱電対による温度測定, 圧力測定と同期して高速カメラによる撮影を行い, 液滴や液膜の挙動と熱流束の変化の関係を調べている。

##### (a) 高速カメラ

Photron 製 FASTCAM-APX RS 250K を用いて, 高速撮影している。手動によるスタート・トリガによって撮影を開始し, 撮影中信号 (REC POS) を WE7000 計測システムの WE7271 アイソレーション・ディジタイザ・モジュールで測定することで, 熱電対信号・圧力信号と同期させる。

撮影は, 縦横 512 $\times$ 512 ピクセルで, 5000 fps, シャッター速度 1/10000 秒で行った。

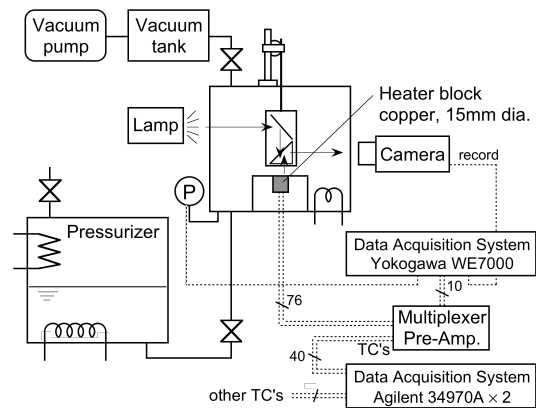


図 3.3 実験装置概要

## (b) 照明

沸騰実験では、向こう側から入射した照明光を鏡で反射させ、直角二等辺三角形のプリズム越しに伝熱面を照明し、さらに同じプリズムで伝熱面の状況を観察できるようにした光学装置(図 3.3 の伝熱面上方に描かれている)を用いて観察する。照明には、メタルハイドランプを用いた。

## ⑤ その他の計測系

液温等各部温度と伝熱面加熱用の電流・電圧を計測するのに、E 型ならびに K 型シース熱電対(シース径は、プレッシャライザのみ 3.2mm, その他は 1.6mm)を使用し、データ収集・スイッチユニット(Agilent 製 34970A+34901A, 20 チャンネル・マルチプレクサ・モジュール 2 台ならびに 34970A+34902A, 16 チャンネル・マルチプレクサ・モジュール 2 台)を用いている。冷接点補償は、内部補償を利用した。

## ⑥ 温度調節系統

沸騰容器には 500W のシースヒータを合計 6 本(対流を抑制するために内部に設置しているガラス管の外部に 4 本, 内部に 2 本), プレッシャライザには 1.2kW と 1kW のシースヒータを設置して, これらによって温度を調整する。可変トランス(100V, 2kVA)を手動により調節した。

伝熱面温度は, 直流電源装置(菊水電子 PDL35-30)を手動によって調整した。

## ⑦ 実験の条件と手順

伝熱面上の液を過熱状態にして発泡のトリガをかければ, 単一気泡を発生させることができる。希望するタイミングで気泡を発生させるために, 系圧力を急減させ, さらに圧力の減少を検知して電流を流すことによって, トリガとなる水素気泡を水の電気分解によって作った。急減圧の前後, 高速撮影とデータの収集を行った。

### (a) 試験液体の溶存空气の除去

伝熱面以外での発泡を抑制するために, 各実験日の最初に, 試験液体を十分に脱気しその後も空気との接触を避けた。

### (b) 高圧下で所定温度に設定

沸騰容器と減圧タンクの間バルブを調節して, 飽和状態として液温を所定の値(図 3.4 の  $T_A$ ,  $T_A \approx 80, 100^\circ\text{C}$ )に設定する。飽和状態として設定することによって容器内の温度のばらつきを極めて小さくできる。この段階で沸騰容器は状態 A' である。つづいて, 前述のバルブを閉じ, 加圧装置の加熱量を調節して加圧装置と沸騰容器の圧力を所定の値(伝熱面の設定温度  $T_B$  より 5~10K 高い温度の飽和圧力:  $P_B$ ,  $T_B - T_A = 9 \sim 35 \text{ K}$ )にし, さらに伝熱面温度を  $T_B$  に設定する。この段階では沸騰容器は状態 A (伝熱面近傍のみサブクール度が小さい)サブクール水のみとなる。

## (c) データの収録

(a), (b)の準備が完了した後, (i) 加熱面直下の熱電対等の測定開始, (ii) 高速カメラの撮影開始, (iii) 沸騰容器と減圧タンクの間バルブ(20A)の開放, を各約 0.6 秒間隔で実行する。バルブの開放により圧力が  $P'_A$  まで低下し, 伝熱面(状態 B')は過熱状態となる。確実に伝熱面中央で発泡させるために, 観察ガラス窓中央に設置した針に, 圧力の急減圧直後約 20ms の間 -15V の電圧をかけ, 水素気泡を発生させる。

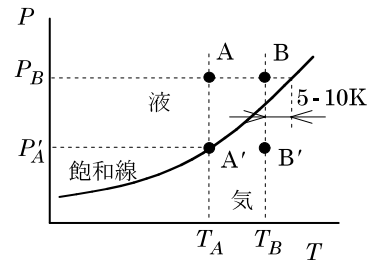


図 3.4 実験の条件と手順

## ⑧ 熱電対データを用いた表面熱流束の推定

高速にサンプリングされた熱電対信号は, Savitzky-Golay 平滑化フィルタ<sup>2)</sup> ( $n_L = n_R = 64, M = 4$ )を通して, 切り替え式プリアンプによる時間のずれを補正するとともに, ノイズを低減する。そして, プリアンプの入力端子の温度に関する補正等を行う。

このようにして得られた熱電対温度を境界条件にして, 3次元熱伝導の逆問題を解いて表面熱流束を求める。方法は, 3.1.3~3.1.5 節と同じである。

2) Press, W.S. ほか, Numerical Recipes in FORTRAN 77, Cambridge Univ. Press (1992), 644-649

## 4. 研究成果

(1) 熱流束推定の限界に関する解析的研究

円環状の等熱流束領域が速度  $v$  で広がる場合に対して逆問題解法で求めた表面熱流束を図 4.1 に示す。図(a)の細破線は, 5つの直方体の表面における各時刻での平均熱流束を表したものである。図(a)は,  $w$  がセンサ間隔の 2 倍程度と広い場合で, 最外周の領域を除きほぼ与えた熱流束を再現している。図からわかるように, 熱流束パルスの移動速度  $v$  の影響はほとんどない。

熱流束パルス幅が減少すると, 熱流束のピークが増加していく。  $qw$  を一定にしているものの, 有限幅(1.3mm × 1.5 mm)の領域に分割しているため, この面内での面平均熱流束は  $w$  に反比例するのではなく,  $8\text{MW/m}^2$  程度に漸近する。  $w = 2.5\text{mm}$  では, 図(a)に見られるように, ある程度平均熱流束が一定になる期間が現れるが,  $w \leq 1.6\text{mm}$  ではそれが見られず, 表面熱流束を十分に再現しているとは言えない。熱流束推定の良否を判定する指

標として、長方形領域内の平均熱流束の理論的ピークの 80%以上の熱流束を実際に伝えている時間を、その理論値で無次元化した値を考え、それをパルス幅とセンサ深さに対してプロットした。結果を図 4.2 に示す。パルス幅の限界は

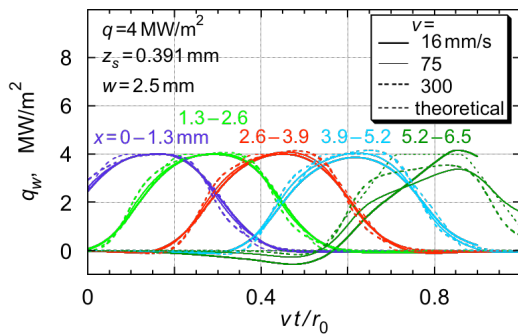
$$w/z_s \geq 2, w/\Delta x \geq 1 \quad (4.2)$$

と判断できる。

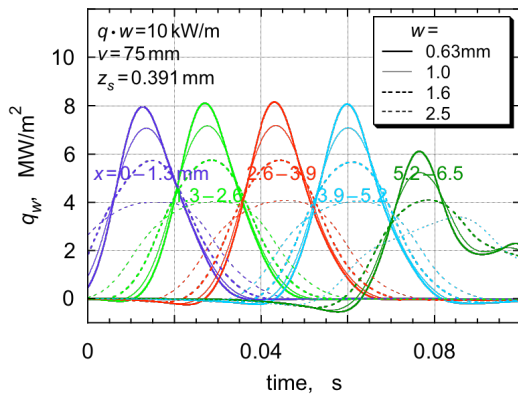
また、図 4.1(a)から、 $q$  と  $w$  の積が一定ならば無次元時間  $vt/r_0$  での積分が一定であり、速度  $v$  で通過する放熱領域で奪われる単位幅当たりの熱量  $qw$  は、 $q$  の時間積分値に  $v$  を掛けることで求めることができる。

(2) 大きな気泡底部液膜が乾燥する過程における伝熱

高い過熱度を持った液の内部で発泡が始まると、大きな単一気泡が発生することが知られている。ここに固体面があれば、マイクロ



(a) 放熱領域進行速度の影響



(b) 熱流束パルス幅の影響

図 4.1 推定された熱流束

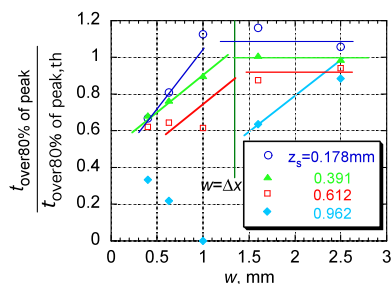


図 4.2 ピークの 80%の熱流束を伝える時間

液膜が生じる。本研究では、液温に比べて銅伝熱面を高温に維持し、圧縮液の状態から急減圧して伝熱面上の液を過熱状態にし、そこで単一気泡を作りその底部に生じる液膜が発泡点から乾燥していく様子を観察するとともに、その間の伝熱面内温度を測定して熱流束分布の変化を推定し、それにもとづいて伝熱を定量的に把握した。

### ① 三相界線の後退速度

気泡底部の液膜が乾燥する様子を図 4.3 に示す。左の図には、図 4.4 以降で使用する  $x$ - $y$  座標と 4 つの熱電対位置 (小さな○) を示す。右の 3 つの写真の中央付近に写っている直径約 2.5 mm (伝熱面径の 1/6) の黒っぽい丸ものは、電気分解に使っている針を固定するための接着剤である。

$y=(1.5/1.35)x$ ,  $x=0$ ,  $y=(-1.5/1.35)x$  上の三相界線 (乾燥部外周点) の半径変化を図 4.4 の示す。拡大初期はほぼ一定の速度で拡大しているのがわかる。こうして求めた拡大速度を、液温 2 通りでいくつかの過熱度に対して

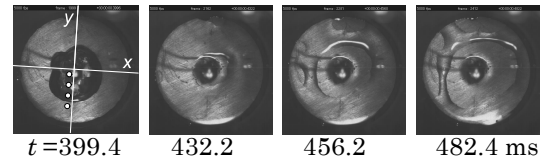


図 4.3 乾燥域が拡大する状況  
( $T_{liq}=78.5^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_{sat}=24.5\text{K}$ )

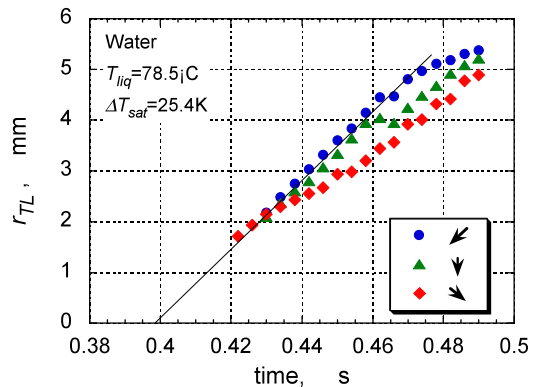


図 4.4 三相界線が後退する状況

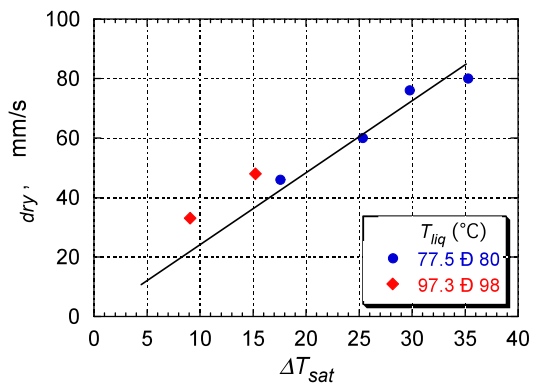


図 4.5 三相界線後退速度

プロットしたのが図 4.5 である。過熱度に比例した速度になっていることがわかる。比例定数は、液温が高い方がやや大きい傾向である。

## ② 三相界線近傍の伝熱

熱伝導の逆問題を解いて求めた熱流束の変化を図 4.6 に示す。熱電対の位置は図 4.3 の○の点である。図 4.6 の熱流束曲線上にプロットした3つの●印は、三相界線が熱電対位置を通過する時刻を表している。

熱流束は、圧力急減までは、ゼロのまわりで変化している(深部の温度を圧力低下前の全熱電対の平均温度としているため)が、乾燥部が発生し拡大するにつれて、中心近くから外側に向かって順に熱流束が高い状況が現れる。立ち上がった後しばらく一定熱流束が伝えられるが、その値は  $0.4\text{MW/m}^2$  程度である。この熱流束、前述の三相界線移動速度、後述の三相界線長さ当たりの伝熱量から熱が奪われる幅(4.1 節の  $w$ )を計算すると、最も中心に近い  $y = -0.75\text{mm}$  の場合で  $w = 1.25\text{mm}$  と熱電対間隔  $1.5\text{mm}$  をやや下回るが、それ以外では  $1.5\text{mm}$  を超えており、図で示されている  $0.4\text{MW/m}^2$  の熱流束は、意味を持つ値であることがわかる。

三相界線が熱電対直上を通過する頃から、熱流束が低下し始める。一方で、半径によって熱流束が立ち上がってから三相界線が通過するまでの時間が異なっている。熱流束の立ち上がりが半径によって異なるのは、液の流れによる可能性もあるが、決定的なことは

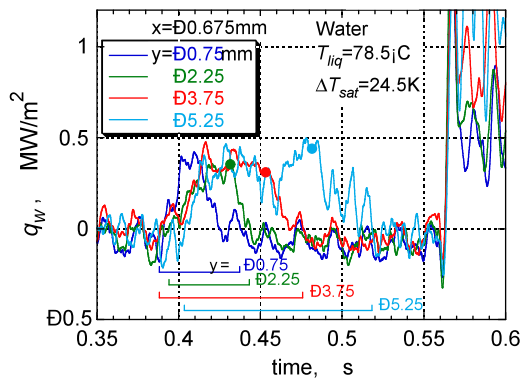


図 4.6 熱流束の時間変化

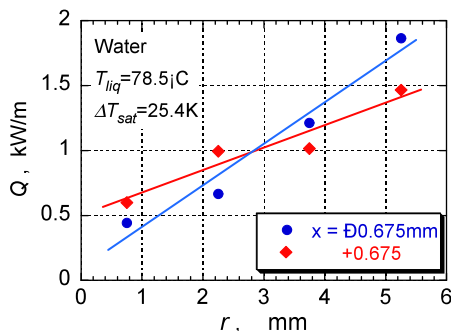


図 4.7 三相界線長さ当たりの伝熱

言えない。なお、 $t = 0.56\text{s}$  以降の高い熱流束は、液の進入による

ある幅で熱流束が伝えられる状況を逆問題によって推定する場合、熱流束と幅それぞれを求めることは難しいが、熱流束とそれを伝える幅の積(熱流束の三相界線と直角方向の積分値)を推定することは容易である。そこで、図 4.6 の下部に示した直線の区間で  $\Delta q_w$  を積分して(図 4.3 の 4 点のほかにもその右側の 4 点も含む)、三相界線の長さあたりの伝熱量を計算した。この結果を図 4.7 に示す。半径の増加につれて熱流量が増加する傾向があり、 $1\text{kW/m}$  のオーダーの熱が三相界線で奪われていると判断できる。

Gaertner<sup>3)</sup>によれば、限界熱流束近傍における発泡点密度は  $10^6\text{site/m}^2$  程度、乾燥部分の面積比は  $1/9$  程度である。この場合、乾燥部分直径は  $0.37\text{mm}$ 、三相界線の総延長は  $1.2\text{km/m}^2$  と計算できるので、 $1\text{kW/m}$  の伝熱で  $1.2\text{MW/m}^2$  が伝わる。これは限界熱流束のオーダーと一致しており、本実験結果で沸騰伝熱を説明できる可能性がある。

3) Gaertner, R.F, J. Heat Transfer, 87 (1965), 17

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 4 件)

① 原村嘉彦, ぬれと乾きが共存する伝熱面における熱流束分布, 第 47 回日本伝熱シンポジウム, 札幌コンベンションセンター, 2010. 5. 27.

② 原村嘉彦, ミクロ液膜蒸発時の熱流束分布の測定, 第 48 回日本伝熱シンポジウム, 岡山コンベンションセンター, 2011. 6. 1.

③ 原村嘉彦, 移動する急峻な熱流束分布の逆問題による推定とその限界, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2011, 静岡大学浜松キャンパス, 2011. 10. 29.

④ 原村嘉彦, 大きな単一気泡底部液膜に形成されるドライパッチ近傍の熱流束の分布と変化, 第 49 回日本伝熱シンポジウム, 富山国際会議場, 2012. 6. 1.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権] (計 0 件)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

原村 嘉彦 (HARAMURA YOSHIHIKO)  
神奈川大学・工学部・教授  
研究者番号: 80175546

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし