

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 22 日現在

機関番号：24506

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656143

研究課題名(和文) 極低温域を含む沸騰伝熱面温度と気液挙動の直接対比による三相界面熱伝達機構

研究課題名(英文) Boiling Heat Transfer at the Vicinity of 3-Phase Interface by Direct Comparison between Flow Behavior and Temperature Distribution on the Heated Surface

研究代表者

河南 治 (Kawanami, Osamu)

兵庫県立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20382260

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：高性能冷却技術の基幹課題である沸騰熱伝達に関して、赤外線カメラなどを用いた、様々な研究が行われてきている。本研究では、透明な感温塗料(TSP)を用いた沸騰伝熱面の2次元温度分布計測技術の開発を目的とし、沸騰伝熱実験を行った。試験部は、幅10mm、長さ35mm、高さ0.5mmの狭隘流路であり、加熱源には65℃の水を用いた。TSPを塗布した伝熱面は、水と試験冷媒のFC-72の流路間に設置し、TSPが塗布されている伝熱面を鉛直下向きに設定した。実験結果より、沸騰気泡の通過に伴い伝熱面温度が上昇すること、気泡後縁外周部での温度低下と熱伝達の増大、気泡前縁内部での温度増加と熱伝達劣化を観測した。

研究成果の概要(英文)：Boiling and Two-phase flow in microgap channel has been recently proposed for cooling the heat sources directly in application of thermal management for electronic devices. In this study, the boiling heat transfer and gas-liquid flow on the heated surface in microgap is investigated experimentally by using Temperature-Sensitive Paint (TSP). Experiments are performed in a single rectangular channel having microgap of 10 mm width, 35 mm heated length and 0.5 mm height using FC-72. TSP coated on the heated wall is used to obtain the local temperatures and subsequently local heat transfer coefficients. Flow rate of FC-72 is 200 mg/s and heated water at 339 K is used as a heat source for boiling of the test fluid. Observation of gas-liquid behavior and measurement of the temperature distributions on the heated surface could be achieved at the same time by TSP. As a result, the heat flux of the rear side of a boiling bubble is 1.2-1.5 times higher than that of the front side of a bubble.

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：対流 沸騰熱伝達 感温塗料

1. 研究開始当初の背景

省エネルギーや地球環境保全の観点から、液体酸素や液体水素、液化天然ガスに代表される極低温流体の効率的運用は燃料電池などにおけるエネルギー変換損失の削減に直接結びつく。また、これらの極低温流体は、多くのロケットエンジン推進剤としても用いられ、打ち上げ時から無重力の軌道上運用に至るまで、極低温流体の熱管理技術は重要な技術的課題である。極低温流体の熱管理技術における多くの問題は、その低沸点のために常に生じる沸騰・蒸発に起因するが、極低温域では、IR カメラによる温度計測ができず、熱特性の把握に重要な沸騰伝熱面の2次元温度分布計測は不可能である。さらに、電子デバイス冷却用冷媒などの通常流体の沸騰研究では、高空間分解能・高速度2次元温度計測をIR カメラにて実現し、各沸騰における単一気泡周りの熱移動解析などが国内外の研究者らによって進められているが、IR カメラの特性として伝熱面上には不透明の赤外線感受性層が必要となるため、固気液界面位置など伝熱面上の気液挙動と伝熱面温度分布を直接対比させた議論は不可能である。大きな熱移動を伴う伝熱面上の固気液相界面の位置は、伝熱面温度分布に対して支配的因子となるため、同時計測による直接対比が熱伝達機構の解明に不可欠である。そこで、伝熱面上に、良好な透明性があり、色素を選択することで通常温度域から極低温域まで幅広い温度範囲が計測可能な感温塗料(TSP) 薄膜を形成することで、IR カメラでは不可能な伝熱面上の気液挙動と伝熱面温度分布を直接対比させること、さらに、極低温流体沸騰伝熱への適用が可能となると考え、本提案に至った。

2. 研究の目的

沸騰伝熱では熱特性と気液挙動の明確な対比、すなわち、同時刻・同位置での情報が重要である。現在、温度計測において主流である赤外線カメラでの計測は、高時間分解能、高空間分解能を有している。しかし、赤外線カメラで温度測定を行うには、赤外線を透過させるために不透明な赤外線感受層が計測面に必要であり、同時・同方向からの気液挙動観測と温度計測が困難である。そのため、沸騰現象解明の重要な情報である伝熱面上の固気液三相界面位置と伝熱面温度分布の明確な対比は行われていない。そこで、本研究では、新たな温度計測技術として、感温塗料(Temperature Sensitive Paint, TSP) に注目した。航空機の風洞実験で使用されている、光学的2次元温度分布計測法の感温塗料は、センサ膜の透明度が高く、温度域に対応した色素を選択することで通常温度域から

極低温域まで幅広い温度範囲で精度の高い温度分布計測が可能である。赤外線カメラでの温度計測の原理としては、観測物体からの赤外線放射を観測し、温度変換を行っている。そのため、液体酸素や液体窒素などの極低温流体の作動温度領域である極低温域では、赤外線カメラを用いて温度計測を行うことができない。しかし、感温塗料では、塗料の構成物質の発光色素を変更することで極低温領域でも温度計測が可能であるため、有効な温度計測技術となると言える。TSPの沸騰現象への適応事例というものがほとんどないが、TSPの幅広い温度域での計測が可能であること、高い透明性を有することから、今後通常流体での固気液界面位置と伝熱面温度分布の直接対比や、極低温流体での沸騰現象の2次元温度分布の取得などが可能であると考えられる。そこで本研究では、感温塗料(Temperature Sensitive Paint, TSP)を用いた沸騰伝熱面の温度計測と気液挙動の同時・同方向からの計測、または観測を行い、伝熱面上の固気液三相界面位置と伝熱面温度分布の直接対比を行うことを目指した。本研究では、感温塗料(TSP)による沸騰伝熱面の2次元温度計測について、実験的に試み、さらに気液挙動との関連について調べた。

3. 研究の方法

伝熱面上で発生する気泡挙動と伝熱面温度分布の対比による伝熱特性の解明を行うにあたり、図1、2に示す実験ループと沸騰伝熱面を有する試験部を作成した。

図1に示す実験装置は大きく分けて加熱流体であるWaterループと試料流体であるFC72ループの二つのループから成る。テストセクション内流れ方向が並流となるように流動させる。試料流体はテストセクション流入口前に設置した予熱器によって、任意の入口サブクール度に設定した。加熱水は恒温槽によって加熱させた。加熱水の出入り口温度差を0.5以下になるような流量に設定した。また、テストセクション前後での水、FC72の各々の温度差を測定可能にするために、テストセクション前後に熱電対を設置した。水を加熱源とするため、伝熱面における温度計測、気液挙動観測を行う試料流体は、沸点を100以下であり、比較的熱的に安定したFC-72流体を用いた。本研究では、沸点が56と比較的低沸点を有し、熱的、化学的に安定しているFC72(フッ素系不活性液)を試料流体として採用した。

TSPの発光と気液挙動を同時・同方向から観測するのにCCDカメラを使用した。本研究では、ステレオビューアを使用しCCDカメラ一台でTSPの発光と気液挙動を観測する。

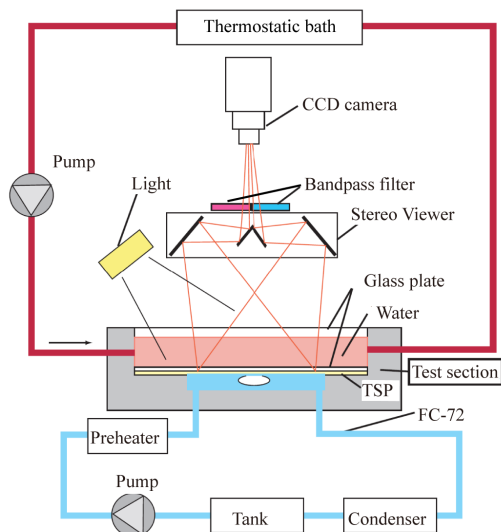


図 1. 実験ループ概要

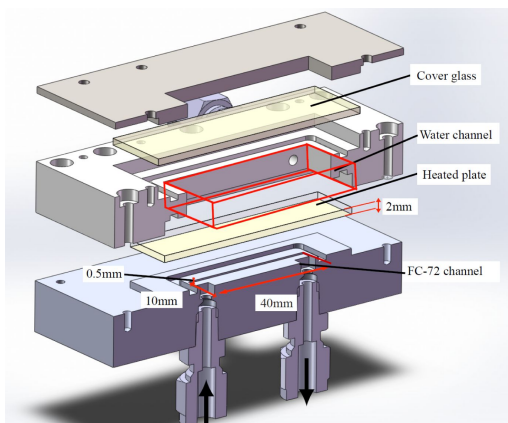


図 2. 試験部詳細

テストセクションの詳細は図 2 に示す。本実験では、伝熱面での固気液界面と温度分布の明確な比較を行うために、伝熱面の気液挙動と温度分布の観測方向は、伝熱面加熱面側から同時方向から観測、または測定を実施する。そのため、加熱源と伝熱面の可視光の透過が可能な材質である必要がある。同時に、TSP に照射する励起光 (310 nm ~ 390 nm)、TSP の発する光 (波長 610 ± 40 nm) を透過しなければならない。この 2 条件を満たしている石英ガラス平板を伝熱面として採用した。テストセクションは大きく分けると 5 つの部品から構成されている。Fig3.1 にあるように、テストセクション低部が試料流体用流路である。固気液三相界面位置の熱特性が顕著になると考えられる微細流路 (マイクロチャンネル) 条件での実験を行うために、流路高さ 0.5 mm、幅 10mm の矩形流路のマイクロギャップとし、加熱長さ 40 mm の試験部とした。

4. 研究成果

始めに、TSP の発光強度と温度の関係を検定実験にて事前に検証した。検定実験では、TSP

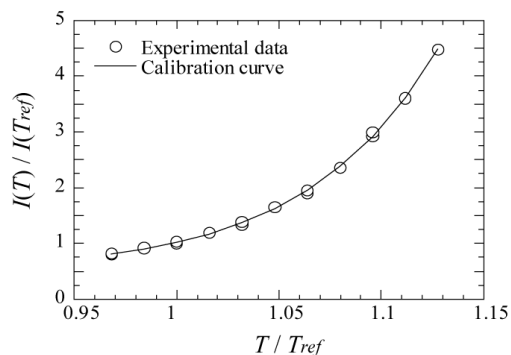


図 3. TSP の発光強度と温度の検定実験結果

をペルチェ素子の上に設置し、LED 光源から励起光を照射し、発光させた。ペルチェコントローラーにより温度を変化させ、TSP の発光を CMOS カメラで撮影した後、コンピュータにより処理した。CMOS カメラには 610 ± 40nm の波長以外を除去するバンドパスフィルターを用いて、必要な波長だけをカメラへ取り込み、励起光や照明などから照射される熱線 (赤外線) の影響を除くため熱線吸収フィルターを用いてこの熱線を取り除いたうえ、TSP の圧力感度実験も検定実験と同時にを行った。結果を図 3 に示す。本検定結果は

$$\frac{I(T)}{I(T_{ref})} = C_1 \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^n + C_2$$

の式にまとめる事ができ、本式によって伝熱面温度の算出を行う。

図 1、2 に示された装置を用いて得られた気泡流域における伝熱面中央での温度の時間変化と、流体挙動画像から抽出した、同箇所の輝度の時間変化を図 4 に示す。輝度変化のピークは、気泡が観測点を通じた事を示しており、気泡下部で温度が上昇することがわかる。これは、気泡が伝熱面と接触する事で液相時に比べて熱伝達が劣化し、伝熱面温度が上昇する事を示している。

つぎに、伝熱面における気液挙動とそれに対応した伝熱面温度分布、さらに、温度分布から 3 次元熱伝導解析によって算出した熱

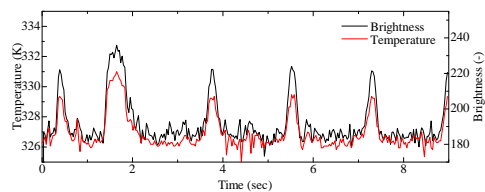


図 4. 伝熱面中央における伝熱面温度と輝度の時間履歴 (質量流量: 200 mg/s, 入口サブクール度: 13.9 K, ループ圧力: 101.3 kPa, 加熱水温度: 339 K).

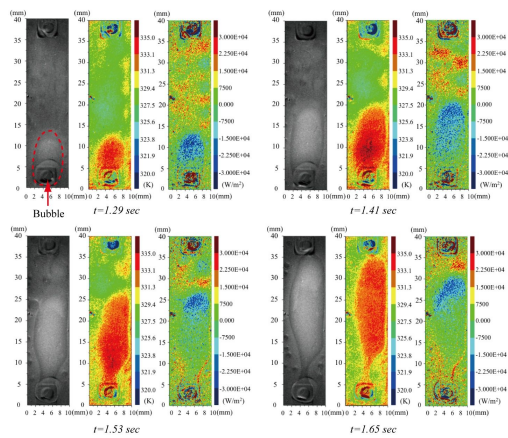


図5. 伝熱面での流体挙動、温度分布、熱流束分布 (質量流量: 200 mg/s, 入口サブクール度: 13.9 K, ループ圧力: 101.3 kPa, 加熱水温度: 339 K).

流束分布を図5にしめす。気泡挙動に従って、気泡部の高温部が移動していくのがTSPによって観測できる。さらに、気泡後縁部では、熱流束が高い箇所が見られ、本実験条件では、気泡後縁部には薄液膜の存在により、熱伝達が増大することがわかる。

以上、感温塗料(TSP)を用いた沸騰伝熱面の温度分布計測を初めて試み、気泡挙動と一致した伝熱面温度の検出と、それを用いた3次元熱伝導計算による熱流束・熱伝達特性の算出に成功した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

Osamu Kawamami, Yu Matsuda, Yasuhiro Egami, Itsuro Honda, Hiroki Yamaguchi, Tomohide Niimi, Experimental Investigations of Flow Boiling Heat Transfer and Flow Behaviors in Microgap Channel, *Proc. the 15th Int. Heat Trans. Conf.*, 査読有, Paper No. IHTC15-9930 (Accepted).

[学会発表](計4件)

Takahiro Tamakoshi, Yu Matsuda, Osamu Kawamami, Yasuhiro Egami, Tetsuya Tao, Hiroki Yamaguchi, Itsuro Honda, Tomohide Niimi, Simultaneous measurement of temperature distribution and bubble behavior in surface boiling using TSP and stereo-viewer, *Proc. 16th Int. Sympo. Flow Visualization*, 査読有, (Accepted).

Tetsuya Tao, Osamu Kawamami, Yu Matsuda, Takehiro Tamakoshi, Yasuhiro Egami, Itsuro Honda, Hiroki Yamaguchi, Tomohide Niimi, Development of Two-dimensional Temperature Distribution Measurement of Surface Boiling Heat Transfer using a Temperature-Sensitive Paint, *The 24th*

International Symposium on Transport Phenomena (1-5 November, 2013, Yamaguchi, Japan) 査読無し.

Osamu Kawamami, Technical Development on Temperature Measurement of Heated Surface and Observation of Gas-liquid Behavior for Boiling Research (Keynote lecture), *7th International Symposium on TWO-PHASE SYSTEMS FOR GROUND AND SPACE APPLICATIONS* (17-21 September, 2012, Beijing, China) 査読無し.

田尾哲也, 河南 治, 松田 佑, 江上泰広, 本田逸郎, 山口浩樹, 新美智秀, 感温塗料を用いた沸騰伝熱面の2次元温度分布計測, *可視化情報全国講演会*, Paper No. B211 (2012年10月4-5日, 姫路) 査読無し.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河南 治 (KAWANAMI, Osamu)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 20382260

(2) 研究分担者

松田 佑 (MATSUDA, Yu)

名古屋大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 20402513

江上 泰広 (EGAMI, Yasuhiro)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号: 80292283