

高出口乾き度条件におけるマイクロ管内強制流動沸騰

Flow Boiling in a Micro Tube at High Exit Quality

*福田 健太郎 (東大院) 鹿園 直毅 (東大工)
新山 泰徳 (デンソー) 八束 真一 (デンソー)

Kentaro FUKUDA¹, Naoki SHIKAZONO¹, Yasunori NIIYAMA² and Shinichi YATSUZUKA²

¹Dept. of Mech. Eng., The Univ. of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

²DENSO CORPORATION, 1-1 Showa-cho, Kariya, Aichi 448-8661

Flow regime, boiling curve and critical heat flux (CHF) during flow boiling of water in a horizontal glass micro tube at high exit quality condition were investigated. The pressure drop element (PDE) placed upstream of the test section prevents severe backflow and improves the CHF. The CHF increases with mass flux and inlet subcooling. The annular flow regime is dominant in this condition. The dryout incipient quality increases with mass flux. Partial dryout is observed at the top of the tube. The post dryout heat transfer coefficient is investigated.

Key Words: Critical Heat Flux, Micro tube, Flow Visualization, Pressure Drop Element, Inlet Subcooling

1. 緒言

マイクロ流路を用いることで蒸発器の小型、高性能化が図られることが期待されるが、現在のところ、蒸発器の設計の際に必要なマイクロ流路内強制流動沸騰の高出口乾き度域での限界熱流束（以下、CHF）や熱伝達特性に関する知見は十分ではない。加えて、流路形状・加熱方法の違いや、逆流現象抑制の有無、入口サブクール度コントロールの困難さ等の要因により、研究ごとの比較が困難であることも課題である⁽¹⁾。

本研究では、上記の課題を鑑み、圧力損失体（Pressure Drop Element, 以下、PDE）を用いて逆流を抑制した条件のもとで、高出口乾き度域での水平マイクロ流路内沸騰の熱伝達特性を明らかにすることを目的とする。

2. 実験装置および実験条件

表1に実験装置の構成を示す。外壁面に透明導電膜ITOを成膜したガラス管を水平に配置し、直接通電により加熱した。沸騰開始過熱度を下げるためにガラス管内面をエッチングした。クロム銅製入口ブロックの温度を変化させることで入口サブクール度を調節した。PDEは $\phi 0.04\text{mm} \times r 0.2\text{mm}$ の流路を持つSUS板で入口ブロック内に挿入される。予め精密に校正した素線径 $\phi 0.05\text{mm}$ の熱電対で管外壁温度（以下、壁温）を流れ方向に沿って5点測定した。CHF判定温度は加熱部出口($x = 117\text{mm}$)の壁温で $G \leq 30\text{kg/m}^2\text{s}$ では $\Delta T_{\text{CHF}} = 200^\circ\text{C}$ 、 $G \geq 40\text{kg/m}^2\text{s}$ では $\Delta T_{\text{CHF}} = 230^\circ\text{C}$ とした。沸騰の様子を、高速度カメラを用いて最大8012fps (1024×1024 pixel)で撮影した。実験条件を表1に示す。

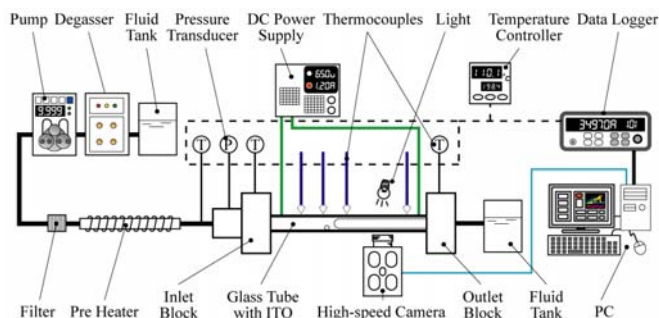


Fig. 1 Schematic of the experimental setup.

Table 1 Experiment condition.

G [kg/m ² s]	D_i [mm]	D_o [mm]	L [mm]	ΔT_{in} [K]	Fluid
10 - 50	0.6	1.0	120	20 - 80	water

3. CHF 実験結果と考察

3.1 PDEの有無による比較 図2,3に、それぞれPDE無しおよびPDE有りの場合の可視化画像を示す。なお、流れは全て右向きである。PDE無し条件では、発生した気泡が流れと反対向きにも伸展し、逆流が生じている。一方、PDE有り条件では、気泡が流れ方向のみに伸展しており、逆流が抑制されている。その結果、下流では安定した環状流が形成される。

図4に加熱部出口($x = 117\text{mm}$)の壁温をPDEの有無で比較した結果を示す。PDE無し条件では、 $Q = 1.5\text{W}$ 付近で沸騰が開始すると壁温が変動し始め、投入熱量の増加に伴いその変動幅が増加する。これは、流量変動によるドライアウトとリウェットの周期的現象によって生じる。一方、PDE有り条件では、壁温はほとんど変動しない。これは、流動様式が環状流で安定、すなわち流量が一定に保たれるためと考えられる。同じ投入熱量では、PDE有り条件のほうがPDE無し条件に比べて壁温の最大値が低く、結果としてCHFが向上する。

図5にCHFをPDEの有無で比較した結果を示す。質量流量を $G = 10 \sim 30\text{kg/m}^2\text{s}$ の範囲で変化させた結果、ほぼ全ての条件でPDE有り条件のほうがPDE無し条件に比べCHFが増加する。

3.2 PDE有り条件でのCHF 図6にPDE有り条件のCHFと入口サブクール度および質量流量の関係を示す。CHFは入口サブクール度および質量流量の増加に伴い増加する。特に、入口サブクール度の増加に対しては、CHFがその顕熱分増加するというマイクロ流路と同様の傾向があることが分かる。本実験範囲ではCHF時の出口乾き度はほぼ1となる。

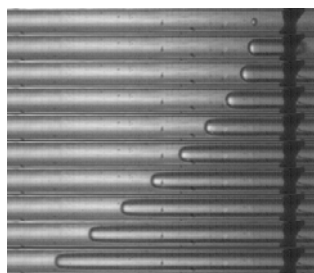


Fig. 2 Flow visualization w/o PDE condition with an interval of 760 μs ($G = 20\text{kg/m}^2\text{s}$, $\Delta T_{in} = 80\text{K}$, $q = 11.3\text{kW/m}^2$).

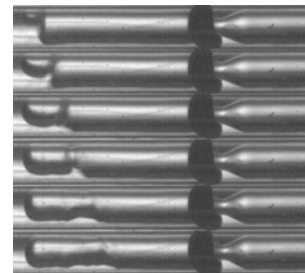


Fig. 3 Flow visualization with PDE condition with an interval of 200 μs ($G = 20\text{kg/m}^2\text{s}$, $\Delta T_{in} = 80\text{K}$, $q = 26.3\text{kW/m}^2$).

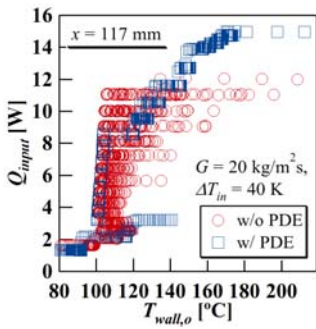


Fig. 4 Heat Input v.s. Outer Wall Temperature ($x = 117\text{mm}$).

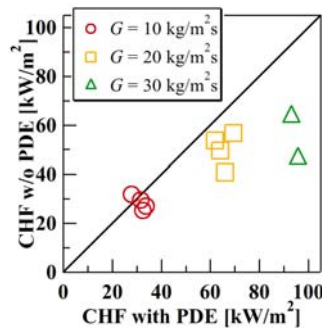


Fig. 5 Comparison between CHF with and without PDE.

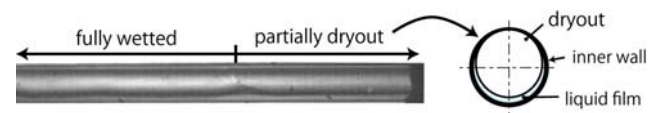


Fig. 8 Flow visualization and cross section illustration at partially dryout condition ($G = 20\text{kg/m}^2\text{s}$, $\Delta T_{in} = 60\text{K}$, $q = 31.2\text{kW/m}^2$).

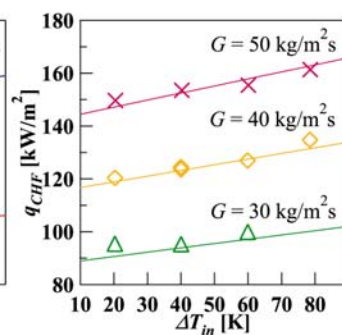
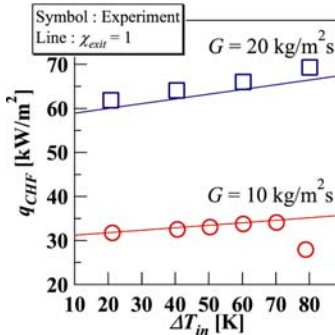


Fig. 6 CHF against inlet subcooling.

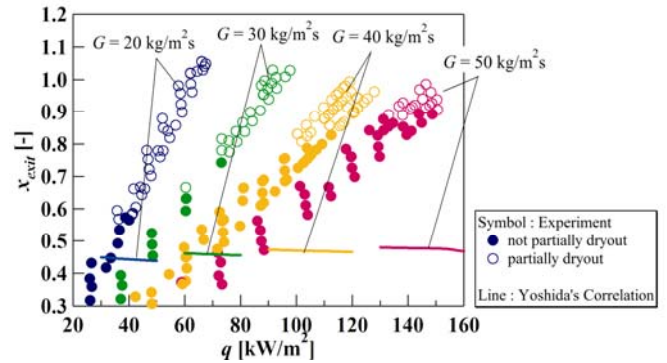


Fig. 9 Dryout incipience exit quality.

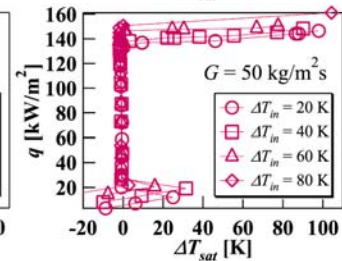
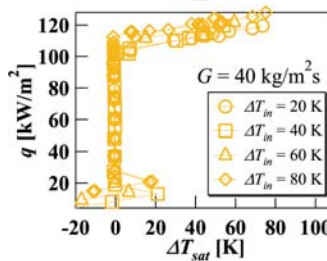
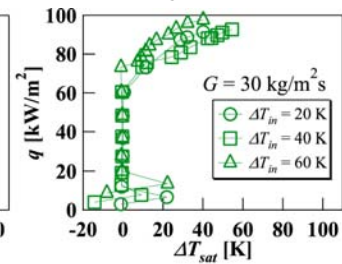
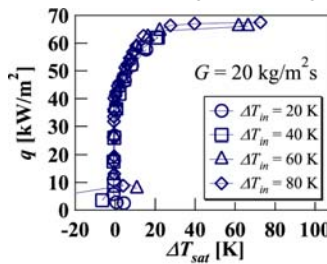


Fig. 7 Heat flux against wall superheat ($x = 117\text{mm}$).

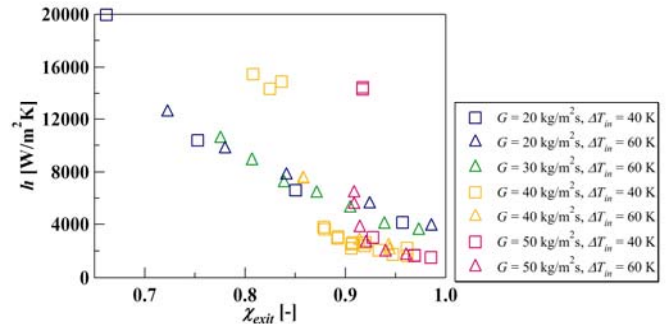


Fig. 10 Heat transfer coefficient at partially dryout condition ($x = 117\text{mm}$).

これは、マイクロ流路では表面張力が顕在化し、液膜厚さが周方向に均一化されたためであると考えられる。

図 10 に最下流位置($x = 117\text{mm}$)での部分的ドライアウト開始以降の局所熱伝達率と出口乾き度の関係を示す。いずれの条件でも乾き度の増加に伴い熱伝達率は減少するが、高流量ほど急激に減少する。その結果、出口乾き度が 0.9~0.95 程度以下では高流量の場合の熱伝達率が高いが、それ以上の出口乾き度では低流量の場合の熱伝達率が高くなる。低流量時と高流量時ではドライアウト機構が異なるためと考えられる。

4. PDE 有り条件での熱伝達特性

図 7 に $G = 20 \sim 50\text{kg/m}^2\text{s}$ の最下流($x = 117\text{mm}$)の壁面過熱度と加熱部全体の平均投入熱流束の関係を示す。いずれの流量においても $\Delta T_{sat} \sim 0$ となる非常に高い熱伝達率を示す熱流束域と、 q の増加に伴い ΔT_{sat} が増加、すなわち熱伝達率が減少する熱流束域が存在する。後者の熱流束域での可視化画像を図 8 に示す。環状流の上側の液膜が消失し壁面がドライアウトしていることが分かる。この部分的ドライアウトは、液膜厚さの不均一によって生じる。ある熱流束以上では、このドライアウト領域が大きくなるため熱伝達率が減少すると考えられる。

この上側の液膜が消失し、熱伝達率が減少し始める出口乾き度、すなわちドライアウト開始出口乾き度と、質量流量の関係を図 9 に示す。質量流量が増加するとドライアウト開始出口乾き度も増加することが分かる。これは、流速の増加に伴って液膜厚さが均一化されるためであると考えられる。図中実線は吉田ら⁽²⁾によるマクロ流路でのドライアウト開始出口乾き度の予測式の計算結果である。予測式はドライアウト開始出口乾き度を過小評価する。

5. 結論

高出口乾き度域でのマイクロ流路内沸騰特性を明らかにするため、水平配置ガラス管、内径 0.6mm、加熱部長さ 120mm、質量流量 10~50kg/m²s、入口サブクール度 20~80K の条件における水の CHF および熱伝達特性を調べ、以下の結論を得た。

- PDE を用いて逆流を抑制することで CHF が向上する。
- PDE 有り条件下の CHF は、1) 質量流量の増加に伴い増加し、2) 入口サブクール度の顕熱量と比例し、3) 本流量範囲では出口乾き度が 1 となる熱流束である。
- ドライアウト開始乾き度は、質量流量に伴い増加する。出口乾き度が 0.9 ~ 0.95 程度以下では高流量の場合の熱伝達率が高いが、それ以上では低流量の場合の熱伝達率が高い。

参考文献

- (1) Bergles, A. E. and Kandlikar, S. G., *J. Heat Transfer (ASME)*, 127(2005), 101.
- (2) 吉田・他 3 名, 日本冷凍空調学会論文集, 17(2000), 511.