

低流量条件における水平マイクロ管内限界熱流束

Critical heat flux in horizontal microtubes at low mass flux

*斉藤 雄介 (東大) 伝正 鹿園 直毅 (東大)
八束 真一 (デンソー) 新山 泰徳 (デンソー)
福田 健太郎 (デンソー)

Yusuke SAITO¹, Naoki, SHIKAZONO¹,
Shinichi YATSUZUKA², Yasunori NIYAMA², and Kentaro FUKUDA²
¹Dept. of Mech. Eng., Univ. of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656
²DENSO CORPORATION, Nisshin-shi, Aichi 470-0111

Flow boiling experiments were conducted to model and correlate the critical heat flux of water in a uniformly heated horizontal microtube. Stainless steel tubes of 0.31mm, 0.49mm, and 1.01mm inner diameters were heated ohmically, and constant mass flux conditions were applied by suppressing backflow with a pressure drop element. The mass flux and inlet subcooling was varied between 100-1000 kg/(m²s) and 5-77 K, respectively. As a result, significant CHF drop was observed over certain flow rates and inlet subcooling. CHF drop phenomena was modeled, and a new CHF correlation was proposed based on the model.

Key Words : Flow boiling, Critical heat flux, Microtube

1. 緒言

省エネルギーの観点から、蒸気サイクルや冷凍サイクルの高性能化が求められている。そのためには、構成要素のより一層の小型・高性能化が必要不可欠であり、水力直径 1mm 以下の流路を用いた細径管蒸発器が注目されている。

蒸発器の設計には限界熱流束の正確な見積りが必要である。Katto and Ohno⁽¹⁾の無次元整理によると、ある流量以上では限界熱流束を与える乾き度が 1 に達しない領域が存在し、出口が湿り条件となる。一方、細径管においては表面張力が支配的となるため、流動様式は大径管と大きく異なることが知られている⁽²⁾。管径が約 3mm 以上のデータから成る Katto and Ohno の無次元整理は、細径管の現象を正確に予測できない可能性がある。また、細径化に伴い、気液界面に生じる波の影響が相対的に大きくなり、大径管よりも低い流量で限界出口乾き度が 1 を下回る可能性がある。

Revellin *et al.*⁽³⁾は、界面波による壁面ドライアウトをモデル化し、冷媒を用いた実験結果を高い精度で予測することに成功している。しかしながら、水を用いた実験結果とは良い一致が得られていないため⁽³⁾、その解明が望まれている。

本研究では、作動流体として水を用い、流路代表径 1mm 以下の水平ステンレス管内での限界熱流束実験を行い、高出口乾き度条件での限界熱流束について、管径、流量、および入口サブクール度の影響を評価する。

2. 実験手法

2.1 実験装置 図 1 に、実験装置およびテストセクションの概略を示す。デュアルプランジポンプで連続送液された作動流体は、脱気装置を通過後、プレヒータおよび入口ブロックヒータで予熱され、テストセクションに流入する。テストセクション直前には焼結ステンレス製の圧力損失体を配し、下流側の圧力変動による逆流を防止するとともに、質量流量を一定に保った。配管およびテストセクションはガラスウールによって断熱した。出口は大気開放とした。

テストセクションは、出入口ブロックおよびステンレス管から成る。銅製入口ブロックをカートリッジヒータによって加熱し、サブクールを制御した。ステンレス管は、外部と電

氣的に絶縁した上で、直流電源による直接通電加熱を行った。温度測定はステンレス管外壁に接着された K 型熱電対によって行い、管外壁からの放熱損失は外壁温度を用いて補償し、管軸方向の放熱損失は無視した。

2.2 実験手順 ポンプで所定流量の流体を送液し、所定の入口温度まで昇温した後、加熱部への通電加熱を開始し、出口乾き度が約 0.5~0.7 に達するまで熱流束を増加させた。その後は、限界熱流束に達するまで熱流束を漸増させ、限界熱流束判定後は、管を保護するため即座に加熱を停止した。本実験では、限界熱流束判定閾値を水の場合は 300℃、エタノールでは 200℃とし、この時の熱流束を限界熱流束、出口乾き度を限界出口乾き度とそれぞれ定義した。

2.3 実験条件 本稿においては、蒸発器への応用を想定し、流量および入口サブクール度の影響を調査するため、実験条件を表 1 のように設定した。

Table 1 Experimental conditions.

D_i [mm]	L [mm]	L/D_i	G [kg/m ² s]	ΔT_{sub} [K]
0.31	62	200	400-1000	6-77
0.49	98	200	100-500	4-77
1.01	202	200	100-200	5-78

3. 実験結果

3.1 CHF 実験結果 図 2 に、水を作動流体とし、管内径 0.49mm、 $L/D=200$ の実験結果を示す。実線は出口乾き度が 1 となる熱流束を表す。低流量においては、入口サブクール度によらず限界出口乾き度がほぼ 1 となるが、 $G=300\text{kg/m}^2\text{s}$ 以上では、入口サブクール度が大きい条件で限界出口乾き度が 1 を下回る。内径 0.31mm 管および 1.01mm 管でも同様の限界熱流束低下傾向が見られたが、低下し始める流量はそれぞれ $G=700\text{kg/m}^2\text{s}$ および $G=125\text{kg/m}^2\text{s}$ 程度となった。

3.2 可視化実験結果 内径 0.49mm ステンレス管の下流に同寸法のガラス管を接着し、高速度カメラで流動様式を観察した様子を図 2 に示す。水、 $G=200\text{kg/m}^2\text{s}$ 、 $\Delta T_{sub}=75\text{K}$ の条件で、出口乾き度がほぼ 1 のときに大量の水が液相のまま出口に達し、直後にドライアウトが発生する現象が確認された。

4. 限界熱流束相関式

4.1 限界熱流束低下のモデル化 第3.2節で見られたような大量の液相飛散は、上流の沸騰点で新たに沸騰が開始したとき、気泡によって新旧沸騰点間の液が高速で下流に押し出されることで生じたと考えられる。このとき、液が押し出される速度はテストセクション入口での液流速より遥かに大きく、その後は反動で液供給量が大幅に低下するため、残された液膜が乾き切るまでに液供給が回復しないとドライアウトが生じる。本研究では、このようなドライアウト機構を、限界熱流束低下の原因と考えた。

下流に押し出される液量は、沸騰点の遷移距離が長いほど多くなる。ここで、核沸騰が開始するためには、式(1)に示すように、壁面が十分に過熱されている必要がある⁽⁴⁾。

$$T_{wall} \geq T_{sat} + 2 \sqrt{2 \frac{\sigma(1/\rho_v - 1/\rho_l)T_{sat} q}{h_{lv} \lambda_l}} \quad (1)$$

本研究では、壁温が式(1)を満たす単相区間を沸騰可能区間と定義し、沸騰可能区間長さ L_{Bo} によって限界熱流束低下現象の整理を試みた。

4.2 相関式の提案 液相飛散によるドライアウトの有無は、流量回復までの時間 t_1 と、残存液膜が乾きまでの時間 t_2 のバランスで表される。残存液膜厚さが気相レイノルズ数の関数であることを考慮して t_1 と t_2 の比を取ると、式(2)に示すように、管内径で無次元化した沸騰可能区間長さ、ポイリング数、レイノルズ数の関数の積に比例する。

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{L_{Bo}/(G/\rho_l)}{\rho h_{lv} \pi (1 - (1 - 2\delta/D_i)^2) D_i^2 / 4q D_i \pi} \propto \frac{L_{Bo}}{D_i} \cdot Bo \cdot f(Re) \quad (2)$$

試みに、実験で得られた限界出口乾き度を L_{Bo} 、 Bo 、 Re の積に対してプロットすると、1次の負の相関が見られた。そこで、限界出口乾き度の最大値が1であることに留意し、沸騰点遷移による限界熱流束低下を考慮した新たな限界熱流束予測式を以下のように提案する。

$$x_c = \min \left(1, x_0 + C \frac{L_{Bo}}{D_i} Bo Re \right) \quad (3)$$

4.3 データ整理 最小二乗法を用いてパラメータ x_0 と C をフィッティングし、予測値と実験結果を比較した結果を図4および図5に示す。相関式は限界熱流束低下を良く予測できており、モデルは現象を良く表していると考えられる。ただし、 x_0 と C は管径ごとに異なるため、管径の依存性について今後検討が必要である。

5. 結論

本研究では、水平マイクロ管を用いた限界熱流束実験を行い、以下の知見を得た。

- ある流量以上において限界熱流束値はサブクールに依存し、入口サブクール度が大きいほど限界出口乾き度が低下する。
- 沸騰点遷移時に大量の水が液相のまま出口に達していることを可視化実験で確認した。高出口乾き度領域においては、上流での沸騰開始に伴う流量変動が限界熱流束を低下させる可能性がある。
- 流量変動の指標として、沸騰可能区間を「壁温が核沸騰開始可能温度以上の液相区間」と定義し、その長さ L_{Bo} を用いて限界熱流束相関式を提案した。新しい相関式は限界熱流束低下を良く予測でき、モデルは現象を良く表しているが、管径の依存性について今後検討が必要である。

参考文献

- (1) Katto and Ohno, Int. J. Heat Mass Transfer, 27-9 (1984), 1641.
- (2) Kandlikar, Exp. Therm. Fluid Sci., 26 (2002), 389.
- (3) Revellin, et al., Int. J. Heat Fluid Flow, 30 (2009), 983.
- (4) 相原, 機械工学選書 伝熱工学, 1994.

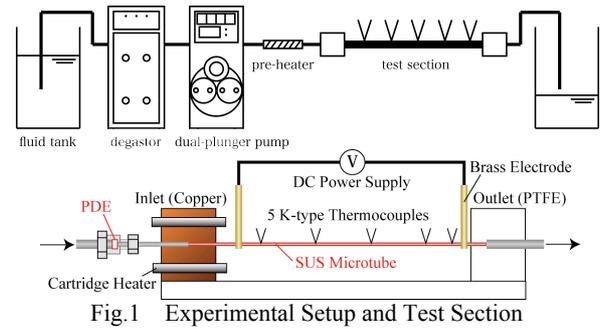


Fig. 1 Experimental Setup and Test Section

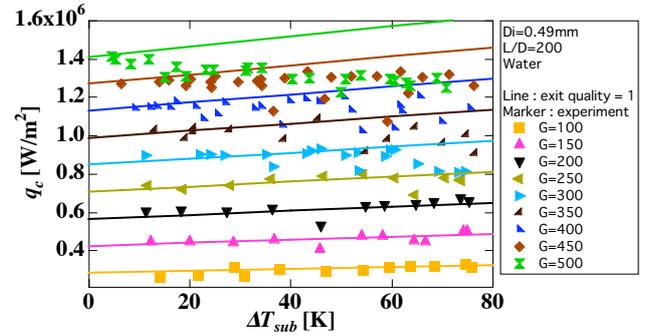


Fig. 2 $D_i=0.49\text{mm}$ Experimental Results

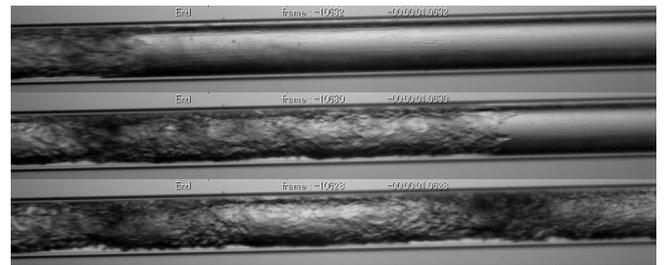


Fig. 3 Liquid Slug ($D_i=0.49\text{mm}$, $G=200\text{kg/m}^2\text{s}$, 5000fps)

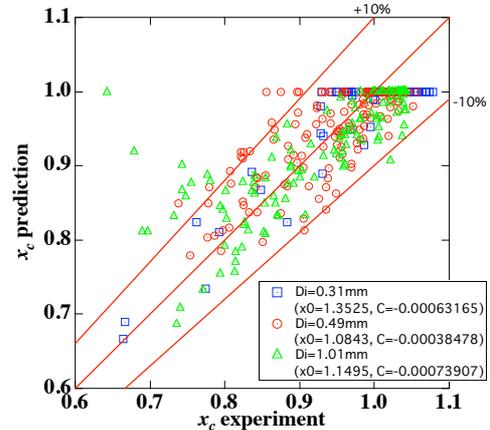


Fig. 4 Prediction vs Experimental Data

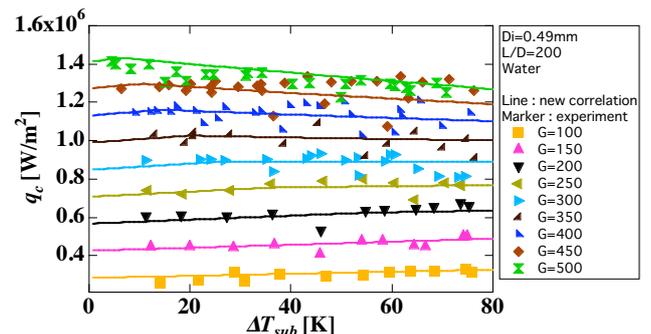


Fig. 5 $D_i=0.49\text{mm}$ Experimental Results vs Correlation