

高出口乾き度条件下のマイクロ管内限界熱流束特性

Critical heat flux in microtubes at high exit quality conditions

○ 齊藤 雄介 (東大) 正 鹿園 直毅 (東大) 八東 真一 (デンソー) 新山 泰徳 (デンソー)

Yusuke Saito and Naoki Shikazono, The University of Tokyo, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

Shinichi Yatsuzuka and Yasunori Niiyama, DENSO CORPORATION, Kariya, Aichi

Flow boiling experiments were carried out to investigate the critical heat flux characteristics of water flowing in a uniformly heated single microtube. Stainless steel test tubes of 0.31mm and 0.49mm inner diameters were heated ohmically and the heated length was 200 times the inner diameter. Constant mass flux conditions were achieved 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. Results showed a strong dependency on inlet subcooling over certain flow rates, and the threshold differed according to the tube inner diameter.

Key Words : Flow boiling, Critical heat flux, Microtubes, Inlet subcooling

1. 緒言

省エネルギーの観点から、ランキンサイクルによる排熱利用技術が注目されている。その実用化に当たっては、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、熱伝達率、圧力損失、限界熱流束などの値を正確に見積もる必要があり、その予測手法構築を目的に数多くの研究が行われてきた。このうち限界熱流束については、気液密度比、ウェーバ数、無次元管長を用いた整理式が Katto and Ohno⁽¹⁾ によって提案され、広く実用に供されている。Katto and Ohno 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、流動様式が大径管のそれとは全く異なることが近年の研究によって明らかになってきている⁽²⁾。Katto and Ohno の無次元整理は管径約 3mm 以上のデータを用いており、細径管特有の現象は考慮されていない。細径管も含めた信頼できる予測式が求められている。

細径管内における沸騰二相流の流動様式は主に環状流であり、気液界面の剪断力や上流での気泡生成等によって気液界面に界面波が生じることが知られている⁽³⁾。界面波によって、壁面ドライアウトが促進され、大径管の場合よりも限界熱流束が低下する可能性がある。Revellin et al.⁽⁴⁾ 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、作動流体として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⁽⁴⁾、解明が望まれている。

そこで、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、高出口乾き度条件下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実験的に評価する。

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グ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、ステンレス管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 300℃とし、この時の熱流束を限界熱流束と定義した。

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。

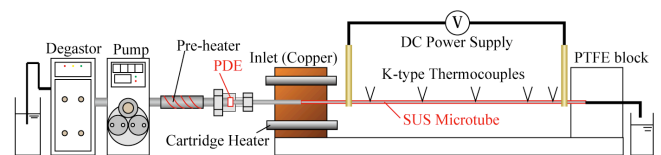


Fig. 1 Experimental setup and test section

Table 1 Experimental conditions

D _i [mm]	D _o [mm]	L [mm]	G [kg/m ² s]	ΔT _{sub} [K]	Fluid
0.31	0.48	62	400-1000	5-77	Water
0.49	0.73	98	100-500		

3. 実験結果

3.1 外壁温度経時変化の例

図 2 に実験結果の例を示す。実線は最下流の熱電対による外壁温度、点線は投入熱量である。熱流束を漸増させた結果、ある熱流束において、最下流の外壁温度が急激に上昇していることがわかる。

3.2 内径 0.31mm 管の結果

図 3 に、内径 0.31mm 管の限界熱流束を入口サブクール

度で整理した結果を示す。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、 $G \sim 700 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ 以上の流量では、サブクール度が大きいと限界出口乾き度が1よりも低下する。なお、データのばらつきが比較的大きいが、これは管径が小さいため、放熱損失の影響が大きくなることが原因と考えられる。

3.3 内径 0.49mm 管の結果

内径 0.49mm の管を用いた実験結果を、前節と同様の形式で整理し、図 4 に示す。0.31mm 管と同様、高流量域において限界出口乾き度に入口サブクール度依存性が見られるが、依存性が発現する流量は $G \sim 300 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ 以上であり、0.31mm 管よりも低い。

3.4 無次元整理

図 5 に、本実験で得られた限界熱流束値を Katto and Ohno⁽¹⁾と同様の形式で無次元整理した結果を示す。本実験の流量域は、Katto and Ohno の予測式では限界出口乾き度が1に達する範囲であるが、0.31mm および 0.49mm 管のいずれにおいても、高流量側で限界出口乾き度の低下が認められる。管径が大きい 0.49mm 管の方が、小さいウェーバ数で限界出口乾き度が低下する。

3.5 流量およびサブクール依存性

いずれの管径においても、流量およびサブクール度が大きいほど限界出口乾き度が低くなる傾向があるため、高流量・高サブクール条件下では気液界面に界面波が発生していることが推測される。Revellin et al. のモデルでは、界面波の駆動力として気液界面速度差による剪断力が挙げられているが、両相の速度はサブクール度には依存しないと考えられるため、本実験結果は Revellin et al. のモデルでは説明できない。また、管径が大きい 0.49mm 管のほうが、より小さいウェーバ数で限界出口乾き度が低下する理由も明らかではない。より詳細な限界熱流束発生メカニズムの理解のために、今後可視化による検討を行う予定である。

4. 結論

内径 0.31mm および 0.49mm のステンレス管を用い、流量および入口サブクール度を変化させた限界熱流束実験を行い、以下の知見を得た。

- ・ 内径 0.31mm 管では $G \sim 700 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ 以上、0.49mm 管では $G \sim 300 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ 以上の流量において、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。
- ・ 細径管では大径管よりも低流量で限界出口乾き度の低下が生じる。内径 0.49mm 管の方が内径 0.31mm 管よりも小さいウェーバ数で限界出口乾き度が低下する。

参考文献

- (1) Katto, Y. and Ohno, H., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 27-9 (1984), 1641.
- (2) Kandlikar, S. G., *Experimental Thermal and Fluid Sciences*, 26 (2002), 389.
- (3) 福田, 東京大学大学院修士論文集 (2009).
- (4) Revellin, R., et al., *Int. J. Heat Fluid Flow*, (2009), in press.

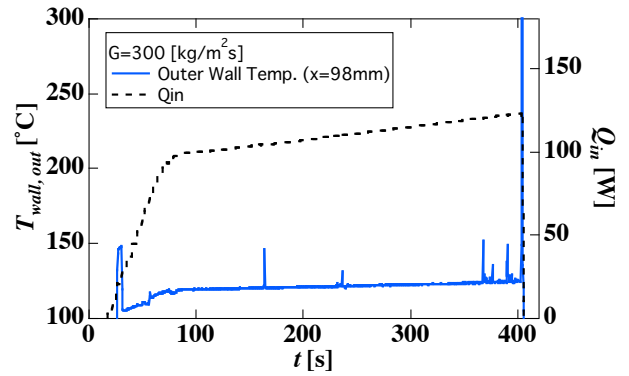


Fig. 2 Temperature and heat flux variations against time

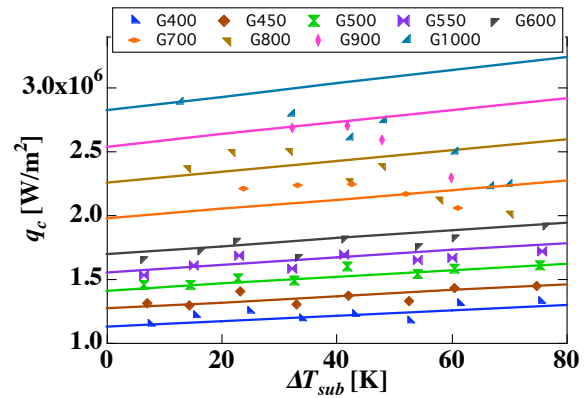


Fig. 3 $D_i=0.31\text{mm}$ tube experimental results

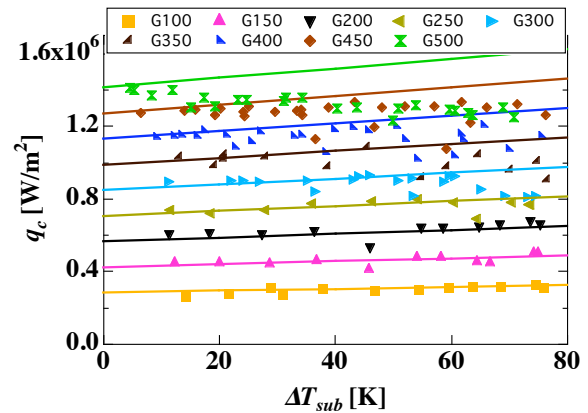


Fig. 4 $D_i=0.49\text{mm}$ tube experimental results

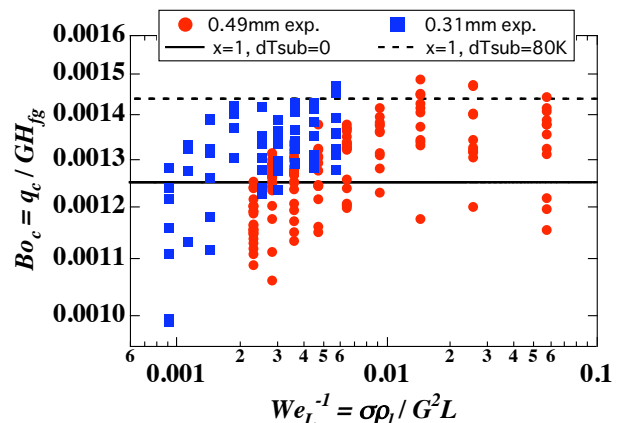


Fig. 5 Dimensionless CHF