

# キャピラリーチューブ内の減圧沸騰二相流に関する研究\*

## 第2報：初期沸騰ヒステリシスの影響を考慮した均質流モデルによる解析

高 雷\*\*  
江 口 博 貴\*\*  
多々良 勇 介\*\*  
本 田 知 宏\*\*

## Study on Flashing Boiling Two-phase Flow in a Capillary Tube

### Part 2: Estimation Using Homogeneous Flow Model by Taking into Account the Effect of Boiling Hysteresis

LEI GAO\*\*, HIROKI EGUCHI\*\*, YUSUKE TATARA\*\*, TOMOHIRO HONDA\*\*

In previous studies, the authors clarified that the boiling hysteresis has a great influence on flow characteristics inside capillary tubes. In this study, the refrigerant mass flow rates have been predicted using homogeneous flow model by taking into account the under-pressure of the boiling hysteresis. The results show that the predicted mass flow rates agree well with the measured data.

**Key Words** : Flashing Boiling Two-phase Flow, Capillary tube, Homogeneous Flow Model, Hysteresis

#### 1. はじめに

家庭用冷蔵庫や小型定負荷型冷凍空調機器において、膨張装置および流量制御機器としてキャピラリーチューブ（以下キャピラリと略す）が使用されることが多い。キャピラリ内の流動特性に関してこれまで数多くの研究が報告されている（Bolsted and Jordan<sup>1)</sup>, Cooperら<sup>2)</sup>, Mikol<sup>3)</sup>, Mikol and Dudley<sup>4)</sup>, Koizumi and Yokoyama<sup>5)</sup> および Chenら<sup>6)</sup>）。キャピラリに流入する過冷却冷媒液の圧力は温度がほぼ一定のまま低下する。冷媒圧力は流入温度に対する飽和圧力まで下がっても、沸騰は起こらず、液の状態のまま保たれる。その下流に飽和圧力以下のところで沸騰が開始される。この現象は発泡遅れ、または準安定流れ (Metastable flow) と呼ばれている。

Mayer and Dunn<sup>7)</sup> および高ら<sup>8,9)</sup> は、キャピラリ内の流量および圧力損失データのバラツキの大きさに注目し、断熱キャピラリ内における冷媒挙動について実験的に調査をした。彼らは冷媒質量流量および圧力損失が条

件到達の操作履歴に依存し、同一条件においてもその大きさが異なることを示した。彼らはこの現象をヒステリシスと呼んでいる。その後、同様の現象も一部の研究者より調査報告されたが（Liu and Bullard<sup>10)</sup>, Bittleら<sup>11)</sup>, Fukutaら<sup>12)</sup>, Guobing and Yufeng<sup>13)</sup>）、その影響の大きさには見解が分かれた。しかし、サイクル性能や圧力損失の予測精度を高めるとともに、キャピラリ特性を改善するためには、キャピラリ内の流動現象およびヒステリシスの影響に対する理解を深める必要があり、ヒステリシスを考慮した正確な沸騰開始点の予測を基に、冷媒流量と圧力損失の予測方法を開発しなければならない。

本研究では、第1報<sup>14)</sup> で得られた初期沸騰ヒステリシスによる沸騰開始点位置、過減圧およびキャピラリ長さ方向の温度分布に関する情報を用いて、入口条件の操作履歴による過減圧の違いを考慮した均質流モデルによる冷媒質量流量の予測を試みた。本報はその結果を報告する。

#### 2. 実験装置および実験方法

実験装置およびテストセクションは、第1報と同じであるため、ここでは省略する。

\* 平成30年11月受付

\*\* 機械工学科

### 3. データ整理方法

図1は、キャピラリ長さ方向における冷媒の圧力および温度の分布を示す。過冷却状態にある冷媒液は、入口圧力  $P_{in}$ 、温度  $T_{in}$  でキャピラリに流入して、断熱状態でキャピラリ内を流れながら、その圧力が徐々に低下する。一方、冷媒温度はほぼ一定に保たれる。入口温度に対応する飽和圧力まで圧力が低下した位置は、理論沸騰開始点と言う。しかし、この場所では沸騰は起こらない。理論沸騰開始点の下流側では、冷媒液の圧力は飽和圧力より低くなる。ある位置で沸騰は開始され、その位置は実際の沸騰開始点と言う。また、キャピラリ入口からこの位置までの領域は液単相流域、この位置から出口までの領域は気液二相流域と呼ぶ。

質量速度  $G$  は以下のように定義されている。

$$G = 4m / \pi d_i^2 \quad (1)$$

ここに、 $m$  は冷媒質量流量で、 $d_i$  はキャピラリ内径である。

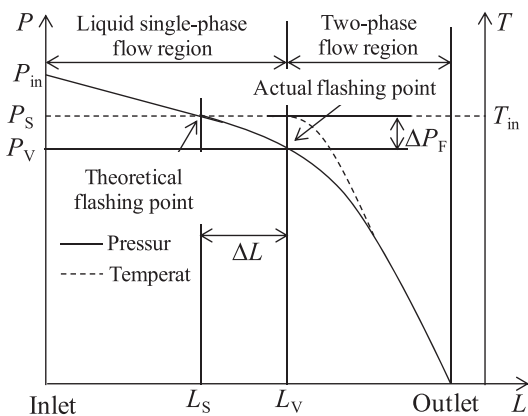


Fig. 1 Pressure and temperature distribution along the capillary tube.

#### 1) 液単相流域における圧力損失：

液単相流域における摩擦損失  $\Delta P_f$  は、次式より求められる。

$$\Delta P_f = fG^2 L_v / (2d_i \rho_L) \quad (2)$$

ここに、 $f$  は管摩擦係数で、 $L_v$  は液単相流域長さで、 $\rho_L$  は冷媒液密度である。

管摩擦係数について様々な相関式が提案されているが、本研究では Prandtl の式<sup>15)</sup>を用いた。

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.0 \log(\text{Re} \sqrt{f}) - 0.8 = 2.0 \log\left(\frac{G d_i}{\mu_L} \sqrt{f}\right) - 0.8 \quad (3)$$

ここに、 $\text{Re}$  はレイノルズ数で、 $\mu_L$  は冷媒液の粘度である。

#### 2) 気液二相流域における圧力損失：

気液二相流域において、水平管の全圧力損失  $\Delta P$  は、以下のように求められる。

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_a \quad (4)$$

ここに、 $\Delta P_f$  および  $\Delta P_a$  はそれぞれ摩擦損失および加速損失である。

本研究において、摩擦損失は均質流モデルより算出した。均質流モデルにおける気液二相平均密度  $\rho_M$  は、次式のように定義されている。

$$\frac{1}{\rho_M} = \frac{(1-x)}{\rho_L} + \frac{x}{\rho_V} \quad (5)$$

ここに、 $x$  はクオリティーで、 $\rho_L$  および  $\rho_V$  はそれぞれ冷媒液体および気体の密度である。

気液二相流平均粘度  $\mu_M$  に関しては、これまで様々な相関式が提案されているが、本研究では、Cicchitti らの式<sup>16)</sup>を用いて算出した。

$$\mu = x\mu_V + (1-x)\mu_L \quad (6)$$

ここに、 $\mu_V$  は冷媒気体の粘度である。

また、均質流モデルにおけるボイド率  $\alpha$  は、次式のように定義されている。

$$\alpha = x / \{x + (1-x)\rho_V / \rho_L\} \quad (7)$$

一方、加速損失  $\Delta P_a$  は、次式のように小区間における運動量の変化より求められる。

$$\Delta P_a = \Delta \left\{ \frac{G^2 x^2}{\alpha \rho_V} + \frac{G^2 (1-x)^2}{(1-\alpha)\rho_L} \right\} \quad (8)$$

#### 3) 発泡遅れを考慮した長さの推算手順：

- a. 温度分布より、入口から温度が低下し始める沸騰開始点までの液単相長さ  $L_v$  を求める。理論値との差より発泡遅れ長さ  $\Delta L$  を得る。
- b. 冷媒質量流量を用いて、式2より液単相の摩擦損失を算出し、沸騰開始点圧力  $P_v$  を得る。
- c. 飽和圧力（入口温度より）との差から沸騰開始過減圧（飽和圧力－沸騰開始点圧力）を得る。
- d. 二相流部分では、キャピラリ出口までの温度差の  $1/n$  を小区間の温度変化とし、さらに沸騰開始後、冷媒はエンタルピーが変化せず、熱平衡状態にあると仮定すれば、小区間出口の飽和圧力およびクオリティーを求める。
- e. 各小区間出入口の圧力差より全圧力損失を得てから、均質流モデルより加速損失、式4より摩擦損失、さらに式2より小区間長さを得る。
- f. 上記ステップ d と e を  $n$  回繰返して、 $n$  個の小区間長さを求め、合計して二相流長さを得る。
- g. キャピラリ長さの推算値（液単相長さ＋二相流長さ）を得る。

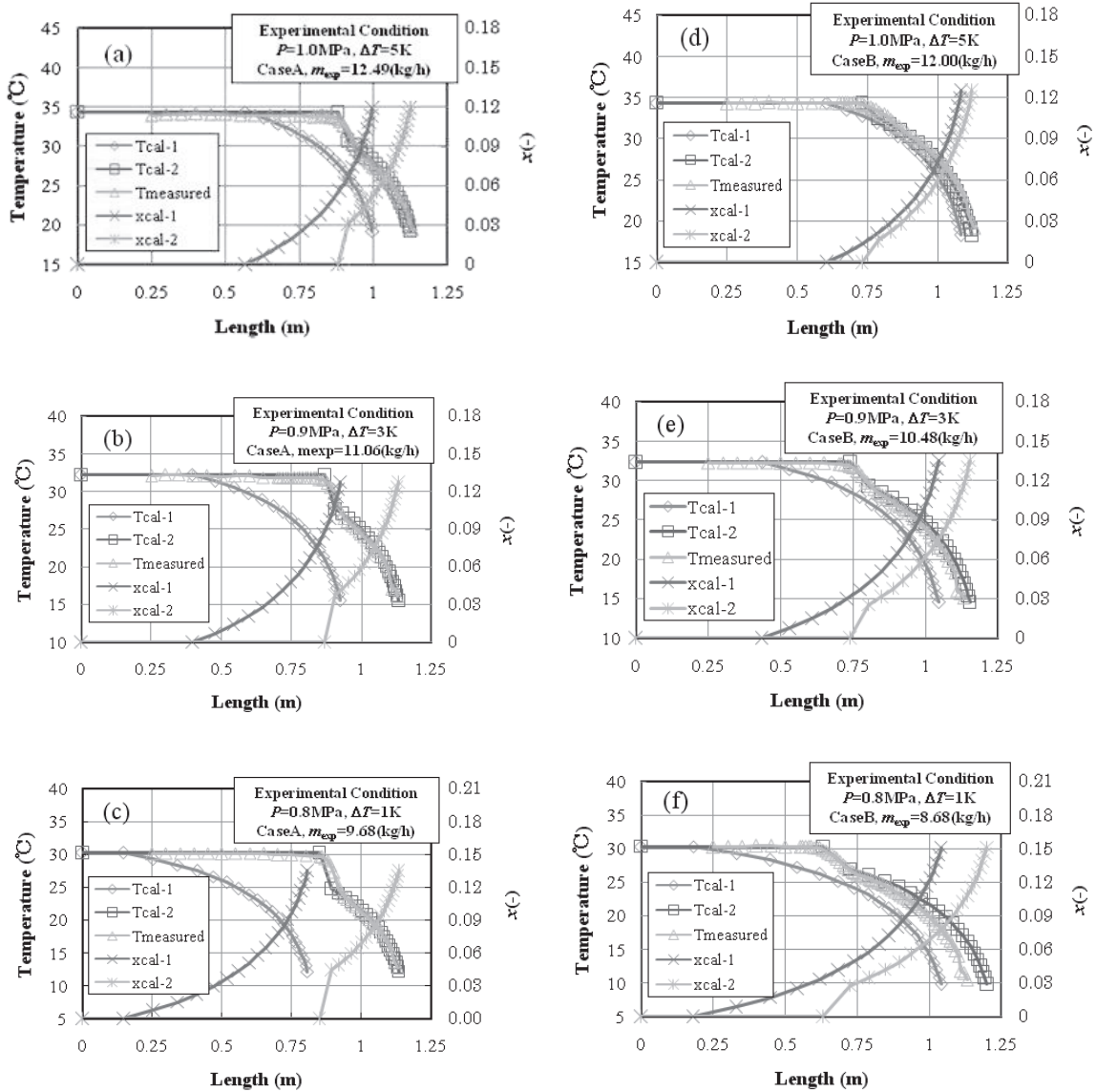


Fig. 2 Temperature distributions along the test capillary tube.

4) 発泡遅れの予測と冷媒流量の推算手順：

- a. 入口圧力，温度および操作履歴より，沸騰開始点過減圧  $\Delta P_F$  を予測する。
  - b. 飽和温度より沸騰開始点圧力  $P_V$  を得る。
  - c. 冷媒質量流量を仮定して，式2より液単相長さ  $L_V$  を算出する。
  - (d~fは上記と同じで、省略する)
  - g. キャピラリー長さの推算値と実際の値を一致するまで，ステップcからfまで繰返計算より冷媒流量  $m$  を得る。
- なお，冷媒の熱物性は REFPROP<sup>17)</sup> を用いて算出した。

4. 実験結果および考察

図2は，第1報の図5にも示したキャピラリー長さ方向

温度分布の測定値と計算値の比較を示す. 図中の“Cal-2”は，実際の発泡位置（発泡遅れ）を用いた場合における均質流モデルの計算結果を示す. また，図中には両計算方法より得られたクオリティー分布も示している. 図からわかるように，図2(f) (Case B) の場合を除いて，二相流部分温度分布の推算値は測定値と極めて良く一致している.

第1報でも示したように，初期沸騰ヒステリシスは発泡遅れ，さらに冷媒流量に及ぼす影響が大きく，冷媒流量の予測精度を改善するためには発泡遅れに及ぼす初期沸騰ヒステリシスの影響を考慮しなければならない. 第1報の図6に示した沸騰開始点過減圧に及ぼす圧力および過冷却度の関係を Case A と Case B に分けて，2つ

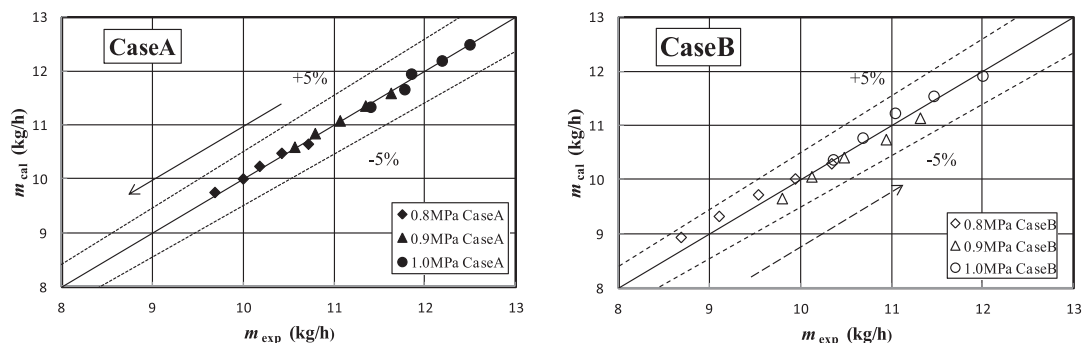


Fig. 3 Comparison of mass flow rates measured and calculated with consideration of delay of flashing.

の近似式を得た。図3には、それぞれCase AとCase Bの近似式を用いて、発泡遅れを予測し、さらに均質流モデルによる質量流量の推算値と実験値の比較を示す。図に示すように、両ケースとも推算値は実験値と約3%以内に一致する。ここでは図示していないが、二相流平均粘度に液体粘度を使う場合でも、キャピラリー長さおよび冷媒質量流量の推算結果は上述とほぼ同じであるが、それら以外の相関式<sup>16)</sup>を使う場合、質量流量の推算結果は最大で10%程度大きくなる。

5. おわりに

キャピラリー内断熱二相流の実験結果を用いて、初期沸騰ヒステリシスによる発泡遅れを考慮した均質流モデルによるキャピラリー長さおよび冷媒質量流量の推算を行い、以下の結論を得た。

1. キャピラリー長さの推算に関して、発泡遅れを考慮しなかった場合、二相流平均粘度の相関式にもよるが、推算値は実験値より総じて短くなる。
2. 一方、Cicchittiらの二相流平均粘度の式を用い、さらに実際の発泡遅れを考慮した場合、推算値は実験値と極めて良く一致し、沸騰開始後の温度分布も赤外線カメラを用いて測定した温度分布とも良く一致する。
3. 冷媒質量流量の推算に関して、発泡遅れを考慮しなかった場合、推算値は実験値より総じて小さくなる。
4. 一方、Cicchittiらの二相流平均粘度の式を用い、さらに操作履歴を考慮して発泡遅れを予測した場合、冷媒質量流量の推算値は実験値に概ね3%以内に一致する。

参考文献

- 1) Bolstad M.M. and Jordan R.C., Refrig. Eng. Dec. 519-523 (1948).
- 2) Cooper L., Chu C.K. and Briskin W.R., Refrig. Eng. 65: 31-41 (1957).

- 3) Mikol E.P., ASHRAE J., Nov. 75-88 (1963).
- 4) Mikol E.P., and Dudley J.C., Trans. ASME, D, 6:257- 64 (1964).
- 5) Koizumi H., and Yokoyama K., ASHRAE Trans. 86(2): 19-27 (1980).
- 6) Chen Z.H., Li R.Y., Lin S. and Chen Z.Y., ASHRAE Trans, 96:550-554 (1990).
- 7) Meyer J.J. and Dunn W.E., HVAC&R Res, 4:105-115 (1998).
- 8) 高雷・本田知宏・小山繁・山下宏幸, 日本機械学会九州支部第51回総会講演会 (1998).
- 9) Gao L., Honda T., Koyama S. and Yamashita H., Proc. 5th AJTE Joint Conf. AJTE99: 6437 (1999).
- 10) Liu Y. and Bullard C.W., ASHRAE Trans, 106:517- 523 (2000).
- 11) Bittle R.R., Carter J.A. and Oliver J.V., HVAC&R Res, 7:107-123 (2001).
- 12) Fukuta M., Yanagisawa T., Arai T. and Ogi Y., Int. J. Refrig., 26:823-829 (2003).
- 13) Guobing Z. and Yufeng Z., Ener. Conv. and Mana. 47: 3084-3093 (2006).
- 14) 高雷・多々良勇介・江口博貴・本田知宏, キャピラリーチューブにおける減圧沸騰二相流に関する研究 (第1報: 表面温度分布の測定および初期沸騰ヒステリシスの影響), 福岡大学工学集報, No.100 (2018).
- 15) 日本機械学会, JSME テキストシリーズ: 流体力学, 丸善, P.97 (2005).
- 16) 日本機械学会, 気液二相流技術ハンドブック: 第2版, コロナ社, P.32 (2006).
- 17) Lemmon, E.W., Huber, M.L., McLinden, M.O., NIST REFPROP, Ver.9.0, 2011.