B214

流下液膜式蒸発器用伝熱管における冷媒液膜流動の可視化

高橋 宏行[○] (株) コペルコマテリアル銅管)

Visualization of refrigerant flow for falling film type evaporator tube

Hiroyuki Takahashi

Abstract

This paper presents the visualization of refrigerant flow for falling film type evaporator on enhanced tube. The enhanced tube on external surface has independent projections with a projection pitch of 26 fins per inch, and a circumferential segmentation pitches of 0.53 were tested. The observation of refrigerant flow was carried out at the evaporation pressure of 0.8kPa, at the outlet chilled water temperature of 7 °C, and at the refrigerant flow rate per unit length between 0.75 and 2.00 kg/(min m). Refrigerant flow was also photographed the top of the tube at a frame rate of 500 frame per second using a high-speed video camera. The results of the study showed that a thin film refrigerant film formed on the grooves as the refrigerant flow rate decreased.

Keywords: High-speed video, Evaporation, Refrigerant flow, Falling film, Enhanced tube

1. 緒 論

昨今地球環境の汚染問題が深刻化する世の中、省エネルギーへの取り組みは活発であり、その中の吸収式冷凍機は環境に優しい冷凍機で、世界的に注目されている。吸収式冷凍機は、蒸発器、吸収器、再生器及び凝縮器の4つの主要熱交換器にて構成され、その中で蒸発器は吸収器に次いで伝熱面積及び容積が大きく、冷凍機全体の効率に大きな影響を及ぼす。蒸発器は、熱交換器内に水平に配置した伝熱管表面に冷媒を滴下または散布する流下液膜式熱交換器であり、伝熱管外表面に冷媒液膜を形成して蒸発させる構造である。

昨今、蒸発器に使用する伝熱管は、各種新伝熱面形状が開発され、試験評価がされてきた。その1例^{1)~2)}として、薄肉銅管の管外表面に独立突起を多数設け伝熱管について性能評価し、従来のローフィンチューブと比較して、冷媒の濡れ広がり性が良く、性能向上することが報告されている。

一方、流下液膜式蒸発器の液膜流動が観察された事例は少なく、観察対象の伝熱管は平滑管³⁾である。一方、小林ら⁴⁾はVOF解析による独立突起型伝熱管の液膜流動を予測したことが報告されているが、高性能伝熱管における液膜流動を観察した報告は無いようである。

本報告では、高橋ら⁵⁾により報告された独立突起型伝熱管における液膜流動を把握することを目的とし、液膜流動について、高速度ビデオにて撮影し、考察した。

2. 供試伝熱管

供試管の形状寸法値を Table 1 に、供試管の形状概略図、管軸平行断面写真ならびに直角断面写真を Fig.1~3 に示す。

供試管²⁾は、独立突起型伝熱管で、原管部外径φ16mm、肉厚0.6mmの低りん脱酸銅管(JIS H 3300 C1201TS-1/2H)

Table 1 Test tube geometry

OD of unenhanced section	16mm
Wall thickness of unenhanced section	0.6mm
Diameter over fins(mm)	15.82mm
Fin height(mm)	0.3mm
Circumferential segmentation pitch	0.53mm
Average wall thickness	0.50mm
Inside diameter	14.1mm
Number of fins	26fpi

Fig.1 Image of test tube.

Fig.2 Cross-sectional view (Cut in longitudinal slice).

Fig.3 Cross-sectional view (Cut in round slice).

を素材を使用し、転造加工にて製作した。独立突起型フィン
は、管外面管長手方向インチあたり 26fin 相当の螺旋状の
ものである。

3. 試験装置及び撮影機器

試験装置の概略図^{2), 5)}を Fig.4 に示す。試験装置は、一
重効用の吸収式冷凍機と略同じサイクル構成となっており、
吸収器、蒸発器、再生器、凝縮器及び水冷式の溶液熱交換器
にて構成されている。試験装置本体の材質は SUS304 及び
SUS316 を採用している。

Fig.4 Schematic diagram of experimental set-up.

試験部となる、蒸発部の概略を Fig.5 に示す。蒸発器は、
水平に伝熱管を設置し、管端部をオリングにてシールする構
造としている。また熱交換器の両側面は、冷媒及び吸収液の
流動が伝熱管の全面に渡って観察できるように厚さ 50mm の
アクリル製の観察用窓を設けている。伝熱管の有効長は、
1050mm であり、蒸発器の管配列は 1 列 4 段の段ピッチ 24mm
で 4 本設置されている。冷水温度は一定の試験条件に調節さ
れ、4 バスにて一定流量通水した。

冷媒の散布は滴下式を採用し、滴下トレーは伝熱管最上段
の上方に設置し、蒸発器下部に貯めた冷媒をポンプにてトレ
ーに供給し、滴下ピッチ 10mm にて試験した。

Fig.5 Schematic of test section.

流下液膜の流動撮影は、最上段伝熱管を対象とし、伝熱管

上部を撮影した。撮影機器は、高速度ビデオカメラ
(PHOTRON, FASTCAM-PCI500, フレーム速度 500frames
per second) を用いた。レンズはニコンの 35mm レンズを使
用し、照明装置はメタルハライドライトにリングライトを使
用し、撮影部分に照射した。撮影画像は、高速度ビデオ装置
の制御用コンピューター内のハードディスクに保存した。

4. 評価及び撮影条件

撮影は、吸収式冷凍機の運転条件を考慮し、Table2 に示
す条件にて実施した。評価は、蒸発器の伝熱管に一定流量の
冷水を流し、冷水出口温度が測定条件になるように冷水入口
水温を調節した。その後、定常状態になったことを確認し、
撮影を実施した。なお、単位長さあたりの冷媒散布量は、管
両側を流れる冷媒量とし、(1)式にて定義した。

$$\Gamma = \frac{G_{ref}}{60 \cdot L} \quad (1)$$

ここで、 Γ は単位長さあたりの冷媒散布量 [kg / (min·m)],
 G_{ref} は冷媒散布量 [kg/h], L は伝熱有効長 [m] である。

Table 2 Test conditions

Pressure in test chamber	0.8 kPa
Refrigerant flow rate	0.75~2.00 kg/(m min)
Chilled water velocity	1.5 m/s
Temperature of outlet chilled water	7.0 °C
Pieces of tube	1 row×4 columns
Number of passes	4
Vertical tube pitch	24mm
Pitch among refrigerant drop	10 mm
Tube length of the test section	1050mm
Frame rate	500fps
Shutter Speed	1/500 s
Frame size	512×240

5. 流動観察結果および考察

高速度ビデオにて撮影した冷媒液膜流動を、Fig.6~8 に示
す。Fig.6 は冷媒散布量 $\Gamma=0.75\text{kg}/(\text{min}\cdot\text{m})$, Fig.7 は
 $\Gamma=1.25\text{kg}/(\text{min}\cdot\text{m})$, Fig.8 は $\Gamma=2.00\text{kg}/(\text{min}\cdot\text{m})$ のときの冷
媒液膜流動であり、各写真は a~x の順番に 0.01s 間隔にて示
した。また、Fig.6~8 の a は冷媒が滴下され、伝熱管上部に
付着した時点に各々合わせた。

滴下されて伝熱管に冷媒が付着したあとの冷媒流動は、突
起先端部にて液膜が厚く成形された後、突起先端まで液膜全
体が徐々に下がって薄膜化される傾向を示した。その後、
Fig.6 及び Fig.7 においては、突起先端部を境に突起間溝部
においてのみ液膜が下がり、次の液滴が付着する。

冷媒液滴の滴下は、冷媒散布量が少なくなる程、次の液滴
落下までの間隔が大きくなり、 $\Gamma=0.75\text{kg}/(\text{min}\cdot\text{m})$ では 0.23s 以
内では滴下が無く、 $\Gamma=1.25\text{kg}/(\text{min}\cdot\text{m})$ では 0.23s のとき
(Fig.7 の x), $\Gamma=2.00\text{kg}/(\text{min}\cdot\text{m})$ では 0.16s のとき (Fig.8
の q) に散布される傾向を示した。散布間隔小さくなると、
管外表面の液膜は厚く残る傾向にあり、Fig.6 及び Fig.7 で
見られた突起間溝部での液膜減少が見られない。

Fig.6 Refrigerant flow pattern: $\Gamma=0.75\text{kg}/(\text{min}\cdot\text{m})$; 0.01s time-steps

Fig.7 Refrigerant flow pattern: $\Gamma=1.25\text{kg}/(\text{min}\cdot\text{m})$; 0.01s time-steps

Fig.8 Refrigerant flow pattern: $\Gamma = 2.00 \text{ kg}/(\text{min} \cdot \text{m})$; 0.01s time-steps

一方、突起先端部に着目した結果、 $\Gamma = 0.75 \text{ kg}/(\text{min} \cdot \text{m})$ のときは Fig.6 の m~q, $\Gamma = 1.25 \text{ kg}/(\text{min} \cdot \text{m})$ においては、Fig.7 の q~w において突起先端部が明るくなる傾向を示した。これは突起先端部において液膜が薄くなっているとも考えられる。小林ら⁴⁾による VOF 解析も、突起先端部での液膜薄膜化ならびに蒸発が促進される結果が報告されており、この撮影結果も同様の傾向を示している。

6. 結 論

流下液膜式蒸発器用として独立突起型伝熱管の冷媒液膜流動を観察し、以下の結論を得た。

- (1) 冷媒液膜流動は、冷媒が伝熱管付着後、突起先端部にて液膜が厚く成形された後、突起先端まで液膜全体が徐々に下がる傾向を示した。
- (2) 冷媒散布量が 0.75 ならびに 1.25 $\text{kg}/(\text{min} \cdot \text{m})$ においては、冷媒滴下間隔が大きくなり、突起間溝部において液膜が下がり、液膜が薄くなる傾向を示した。
- (3) 冷媒散布量が 0.75 ならびに 1.25 $\text{kg}/(\text{min} \cdot \text{m})$ の撮影では、突起先端部が明るくなる傾向を示し、冷媒液膜が薄膜化されることが示唆された。

参 考 文 献

- 1) 佐伯主税：特集 伝熱促進技術と熱交換器「1.伝熱促進技術の研究・開発動向」(1.4 各種伝熱管)，冷凍，Vol.75，No.874(2000) pp.21-24
- 2) 多田義男，佐伯主税，高橋宏行：独立突起を有する吸収式蒸発器用伝熱管の伝熱特性，銅と銅合金，Vol.41(2002) pp.121-126.
- 3) Jesse D.Killion, Srinivas Garimella: Gravity-driven flow of liquid films and droplets in horizontal tube banks, International Journal of Refrigeration, Vol.26, No.5 (2003) pp.516-526.
- 4) 小林利行，高橋宏行，佐伯主税：吸収式冷温水機用伝熱管「エンドクロス®」の蒸発過程における流動解析，銅と銅合金，Vol.43(2004) pp.162-166.
- 5) 高橋宏行，佐伯主税，木島廣行：吸収式冷温水機の蒸発・吸収器用伝熱管「エンドクロス」の伝熱特性，伸銅技術研究会誌，Vol.38(1999) pp.263-267.