

流下液膜式マイクログループ蒸発器の高性能化に関する研究

Modeling and Design of Micro Groove Falling Film Evaporators

*長谷部 昌平 (東大院) 伝正 鹿園 直毅 (東大工)
伝正 笠木 伸英 (東大工)

Shohei HASEBE, Naoki SHIKAZONO and Nobuhide KASAGI
Department of Mechanical Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

In the present study, heat transfer in a micro groove evaporator has been simulated by an analytical model. The flow and thermal fields were divided in two regions, i.e. macroscopic flow inside the groove and the microscopic flow where intensive evaporation takes place at the thin film interline region. For the micro region model, pressure in the liquid film was expressed as a sum of surface tension and disjoining pressure effects. The film thickness profile was obtained by solving the 4th order differential equation by Runge-Kutta method. Then, this micro region model was combined with the macro region model. Macro region model solves one dimensional bulk flow inside the groove. It is shown that the gravitational force is essential for providing the liquid to wide range of heat transfer area. Thus, diverging branch evaporator is investigated. It is demonstrated that this concept has large potentiality for improving the performance of the micro groove evaporator.

Key Words : Thin Film Evaporation, High Heat Flux, Micro Groove

1. 緒言

キャピラリ内に保持されるメニスカスでは, 相変化に伴う極めて強度な熱伝達および物質移動が生じることが知られている. この効果を積極的に用いることができれば, CPU の冷却装置や吸収式冷凍機の主要要素である蒸発器, 吸収器, 再生器, 凝縮器および化学分野で用いられる反応器などの大幅な高性能化と小型化が達成できると考えられる.

このような薄液膜は, 多数のマイクログループを有する表面上に形成することができるが, 強度の蒸発が生じる interline region は限られており, その幅は $1\mu\text{m}$ 以下である⁽¹⁾. マイクログループ蒸発器の高性能化のためには, この interline region をマクロ領域内で顕在化させることが課題である. 本研究では, 流下液膜式蒸発器を対象に, 溝幅, 流路形状, 分岐形状の蒸発性能に及ぼす影響を評価する.

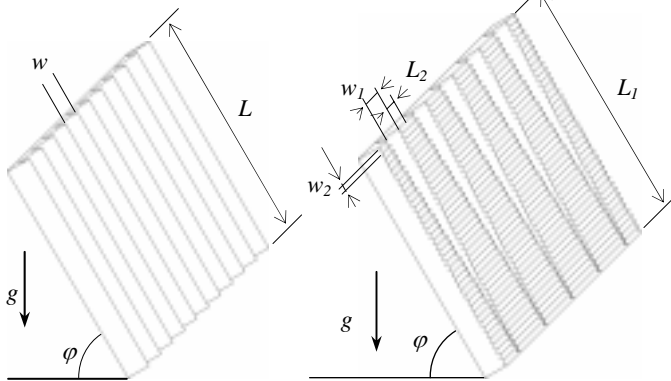


Fig.1 Falling film evaporator

2. マイクログループ蒸発器モデル

マイクログループ蒸発器の熱流動場を, 重力の作用するグループ内のマクロ領域と, 薄液膜による強度な蒸発が生じている interline region 近傍のマイクロ領域の二つに分割する. 以下, それぞれのモデルについて解説する.

2.1 ミクロ領域モデル 本研究では, ミクロ領域 (図 3, 図 4) に Stephan and Busse (1992) のモデル⁽²⁾を使用した. このモデルでは, 蒸発熱量は液膜厚さ方向の一次元熱伝導によって供給される. 蒸発に伴う液の流れにより粘性力が発生するが, これが表面張力と disjoining pressure による駆動力と釣り合う. この微小なスケールでは表面張力が支配的となるため, 重力は無視した. これを定式化すると膜厚 δ に関する 4 階の微分方程式が得られる. 液膜厚さ δ およびその 1 階微分 $d\delta/dx$, 2 階微分 $d^2\delta/dx^2$, 3 階微分 $d^3\delta/dx^3$ を $z_1 \sim z_4$ とおき, 4 つの連

立 1 階微分方程式に変換した後, 4 次精度の Runge-Kutta 法で解いた. $z_1 \sim z_4$ は物理的にはそれぞれ膜厚, 膜の勾配, 表面張力および吸着力による圧力の和 (capillary pressure), および流量を表す.

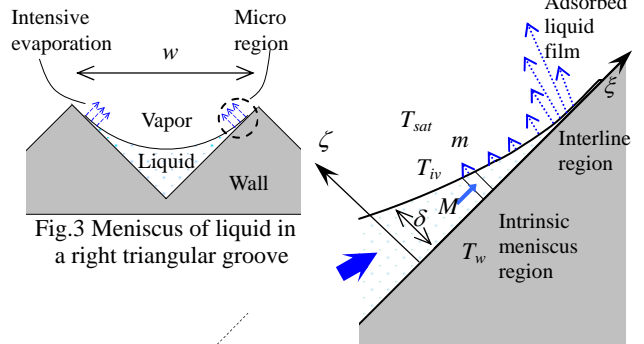


Fig.3 Meniscus of liquid in a right triangular groove

Fig.4 Enlarged view of the micro region

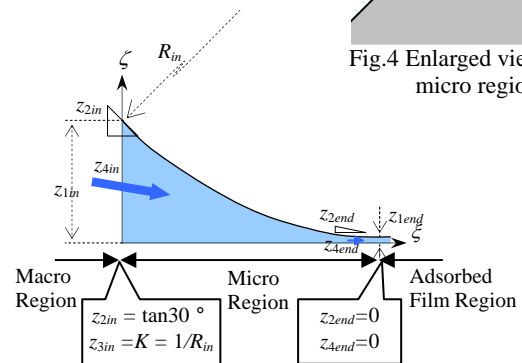


Fig.5 Boundary conditions

微分方程式を解くにあたって使用した境界条件を図 5 に示す. 本研究ではマクロ領域とミクロ領域の境界は, 膜の勾配 θ_m が $\theta_m=30^\circ$ となる点 ($z_{2in}=\tan\theta_m$) と定め, そこでは膜厚は十分に大きいとして $z_{3in} \approx K = 1/R_{in}$ とした. なお interline region の液膜厚さと蒸発量は, 境界条件 θ_m による影響をほとんど受けないことを確認している. z_{1in} と z_{4in} はミクロ領域と吸着領域の境界において膜の勾配 z_{2end} と流量 z_{4end} とが 0 になるよう反復計算で求めた.

2.2 マクロ領域モデル マクロ領域では溝内 1 次元のバルク流れを重力, 粘性力および表面張力を考慮して解いた. ミクロ領域で計算される蒸発量をマクロモデルの流量変化量とした. 計算は, $R(0)=53\mu\text{m}$ から濡れ領域が溝幅に達するまで行い, そのときの x を液長さ l と定義した.

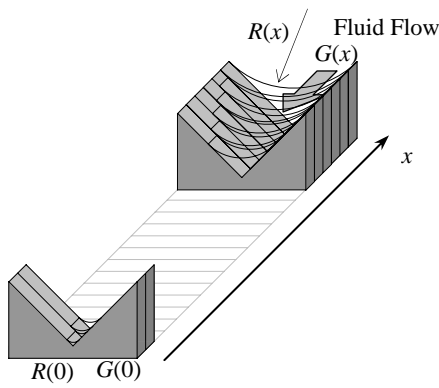


Fig.6 Schematic view of the flow inside the groove

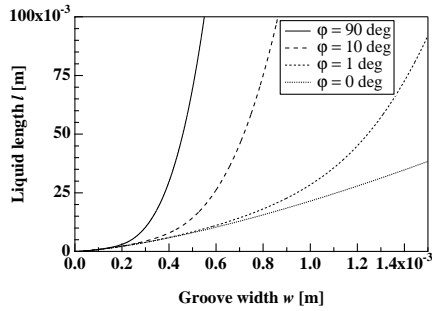


Fig.7 Liquid length inside the groove

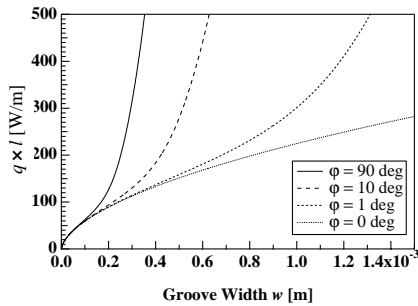


Fig.8 Total heat evaporated from unit width of the falling film evaporator

3. 流過液膜式蒸発器の性能予測

蒸発面を傾けたときの液の長さで重力の影響を見積もった。冷媒は R123 とし壁温 $T_w=303.15$ K, 飽和温度 $T_{sat}=298.15$ K とした。図 7 は溝幅 w に対して溝内の液の伸びる長さ l を示している。蒸発板を傾けない時 ($\phi=0$ deg), 液はただちにドライアウトする。すなわち, 表面張力によって液はある程度駆動されるものの, 広範囲に渡って伝熱面を濡らすには不十分であることがわかる。しかし, 蒸発板を傾け, 重力による駆動力を利用すると液長さ l が大きく拡大する。ただし, 溝幅が狭く ($w < 200 \mu\text{m}$) になると強度な蒸発により蒸発板を大きく傾けても液は伸びなくなる。

図 8 は蒸発器の単位幅からの伝熱量 (濡れ面積の平均熱流束 $q \times$ 液長さ l) を示す。溝幅が小さくなると単位幅当たりの interline region が増し, 濡れ面の熱流束は増加する。溝幅が大きくなると局所の熱流束は減少するが液の供給能力が上がるため, 伝熱面積が増す。図 8 によると溝幅 w が大きくなるにつれて伝熱量も単調に増加している。これは熱流束が劣っていても広い面積から除熱できる太い溝の方が除熱性能が高いことを示している。

図 8 から, 液が蒸発面の最下部でドライアウトするような溝幅の時に最大の熱交換が得られることが分かる。図 9 は蒸発器 (全長 L) 全面からの平均熱流束を示す。図中の w は液が蒸発器の最下部でドライアウトする最適な溝幅である。最適な溝幅は面を傾けるにつれて小さくなる。 L が小さく傾き ϕ が大きい時に熱流束が大きくなる。また伝熱面を傾けるこ

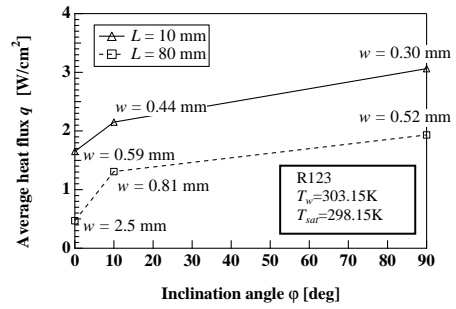


Fig.9 Average heat flux for different evaporator length

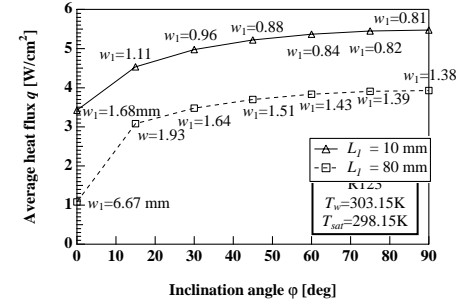


Fig.10 Average heat flux for diverging branch evaporator

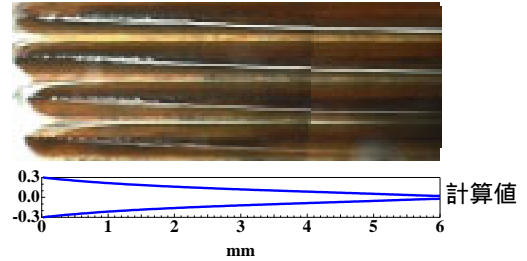


Fig.11 Photograph of flow in micro groove

とで平均の熱流束を増大させる効果は, 蒸発面長さ L が短くなるにつれ小さくなる。

4. 分岐溝を有する蒸発器

マイクログループ流下液膜式蒸発器の高性能化のためには, 以下の二つの機能が要求される。一つは重力を利用して液を供給する機能, もう一つは強度の蒸発で高い伝熱性能を達成する機能である。上記の結果より, この二つの機能を完全に分離した図 2 のような分岐溝を有する蒸発器を考えた。比較的大きな溝内では重力が効果的に液を供給する一方で, 表面張力が狭い溝内の interline region に液を引き込む。

水平方向の細溝の幅を $w_2=50 \mu\text{m}$ とし, 重力方向の太い溝幅 w_1 を最適化した時の, 平均熱流束を図 10 に示す。同じ長さの蒸発器の 2 倍程度にまで平均熱流束が増大する。

5. 実験結果

蒸発面の傾きを $\phi=30^\circ$ としたマイクログループ蒸発器表面を可視化した。溝幅 $w=0.6 \text{ mm}$, 蒸発板の過熱度は 2 である。図 11 において白く見える線を気液界面とみなした場合, 液が溝内を伸びる様子は計算値と良く一致した。

結論

マイクログループ蒸発器の伝熱量のモデル計算を行い以下の結論を得た。

1. グループ蒸発器を傾けると溝内の液が重力の影響で効果的に駆動され, 濡れている伝熱面積が増加する。また, 溝幅が小さくなるにつれて表面張力が支配的になるとともに高熱流束での蒸発が達成される。
2. 液が蒸発面の最遠部でドライアウトするような溝幅の時に, グループ蒸発器の伝熱量は最大になる。
3. $50 \mu\text{m}$ の分岐溝を有する蒸発器の平均熱流束は, 単一の溝幅のグループ蒸発器の約 2 倍となる。

参考文献

- (1) 西尾, 機論(B), 69-679(2003), 535.
- (2) Stephan, P. and Busse, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 35-2(1992), 383.