

マイクログループ蒸発器の熱輸送特性の予測に関する研究

東京大学大学院工学系研究科 平成25年度 修士2年 小池 孝典

概要

マイクログループのグループ1本あたりの熱輸送特性を定量的に予測する解析手法を確立し、その妥当性を評価した。そのために、グループ内のメニスカス形状の観察を元に、その形状の数値解析を用いた正確な再現及び気液界面の熱流束に関する見直しを行い、最終的に実験値と解析値を比較、評価した。

グループ断面の観察結果

溝幅800μm、溝深さ800μm(800×800μm)のグループ内の液体の断面形状

液体供給部

メニスカスの両端がグループ壁面上端に接したまま形状が変化

メニスカスの両端がグループ壁面を滑りながら液体が減少
(中心の液面はほとんど動かない)

メニスカスの中央がグループ底面に接触(h=0)

中央の液体がなくなりグループの角で液体が局在化

先端

500×500μmのグループでも同様のメニスカスの変化の過程を確認
→任意の形状のグループでも同様の現象が見られると考えられる

断面におけるメニスカス形状の数値解析

グループ断面ごとに形状を解析

液体供給部から、メニスカスの中央がグループ底面に接触するまで
(底面が濡れている領域)と
グループの角に液体が局在化している領域
(底面が乾いている領域)で異なる解析手法を用いる

壁面とメニスカスの接点における境界条件
→転落法により後退接触角を測定

後退接触角2.5°
(最大誤差±0.2°)

転落法概略図

底面が濡れている領域におけるメニスカス形状の解析手法

グループ底面の圧力Pを一定として解析

$$P = P_0 - \sigma \cdot K + \rho_l g \eta(x)$$

$$K = \frac{d^2 \eta}{dx^2} \left\{ 1 + \left(\frac{d\eta}{dx} \right)^2 \right\}^{3/2}$$

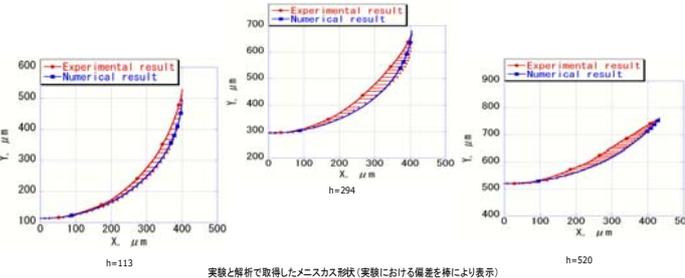
メニスカスの形状に関する支配方程式
P: 底面圧力, Pa P0: 外部圧, Pa η: 液面高さ, m
ρ: エタノールの密度, kg/m³
σ: 表面張力, N/m

メニスカスの解析領域

メニスカスと壁面の接点における境界条件

壁面との接触角が2.5°以上:
壁面との接点の座標が壁面上端(Lx, Ly) η(Lx) = Ly
上記以外の場合:
壁面とメニスカスの接触角が2.5° η'(Lx) = tan 87.5°

解析結果と実験結果の比較



グループ断面内のメニスカス形状の観察法

伝熱面: 30×30×5mm真鍮板にグループを加工
容量: 容量40ml
(グループでの蒸発に水位が影響されない)
観察法: 共焦点レーザー走査型顕微鏡
作動液体: 蛍光物質(Calcein)を溶かしたエタノール

撮影位置

Dry out

撮影位置

グループ断面図

蛍光物質を溶かしたエタノールの中に伝熱面を垂直に立てる
→グループ内部に液体が吸い上がり定常状態となりメニスカスを形成

容器内のエタノールの水位を徐々に下げて共焦点顕微鏡により撮影

グループ内の液体の供給部から最先端までの断面の液体形状を撮影

グループ内の液体

メニスカスの形状の取得

観察結果から、実験のメニスカスの形状を取得
直線であるはずの壁面が湾曲して撮影された

メニスカスが実際よりもグループ中心側に観測されている可能性

壁面の歪みをメニスカスの形状の偏差として考慮

h=404μmの時のメニスカスの観察結果

メニスカスの計算における分離圧

解析をできる範囲
(壁面からの距離が2.7nm以上の範囲)

分離圧を用いた場合は、壁面との接点では分離圧が無限大となり、解析不可能

分離圧を用いた場合と、用いない場合のメニスカス形状がほとんど見られ

液膜厚さが4.55nmの時に、局所熱流束が最大値をとり、その後は急激に減少する
→液膜厚さが2.7nm以下の蒸発については、無視しても問題のない値である

今回の解析では分離圧は無視した

液膜厚さと局所熱流束について

底面が乾いている領域におけるメニスカス形状の解析手法

境界条件

グループ底面、グループ壁面両方の接点について後退接触角2.5°を適用

$$P = P_0 - \sigma \cdot K + \rho_l g \eta(x)$$

$$K = \frac{d^2 \eta}{dx^2} \left\{ 1 + \left(\frac{d\eta}{dx} \right)^2 \right\}^{3/2}$$

メニスカスの形状に関する方程式
P: 底面圧力, Pa P0: 外部圧, Pa η: 液面高さ, m
ρ: エタノールの密度, kg/m³
σ: 表面張力, N/m θ: 後退接触角(=2.5°)

メニスカスの計算領域

グループ中央から液体と底面の接点までの距離x0を変化させて各断面で解析

解析結果と実験結果の比較

左図の解析結果と、壁面の歪みによる偏差を考慮した実験におけるメニスカスの形状の比較

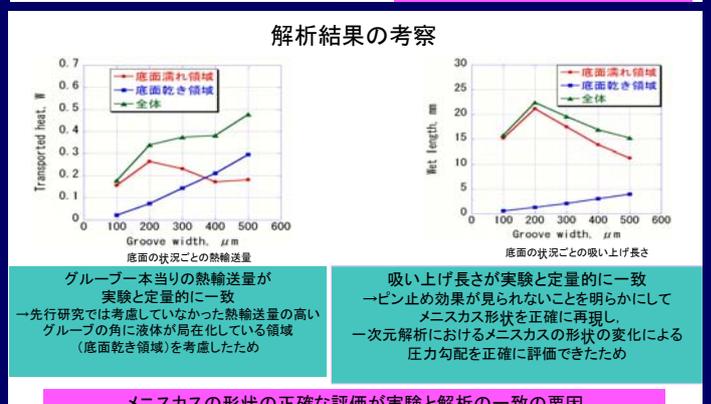
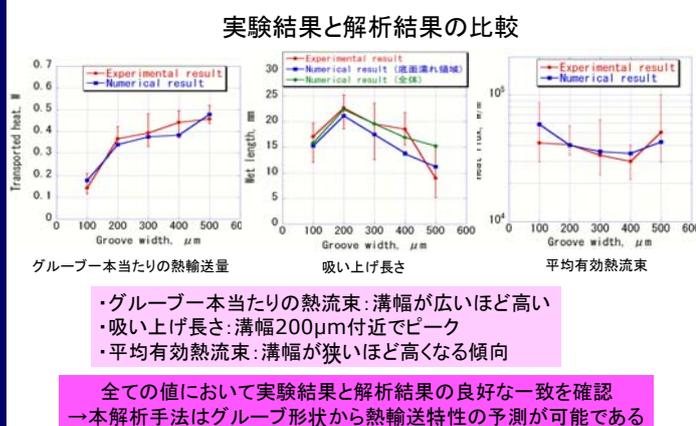
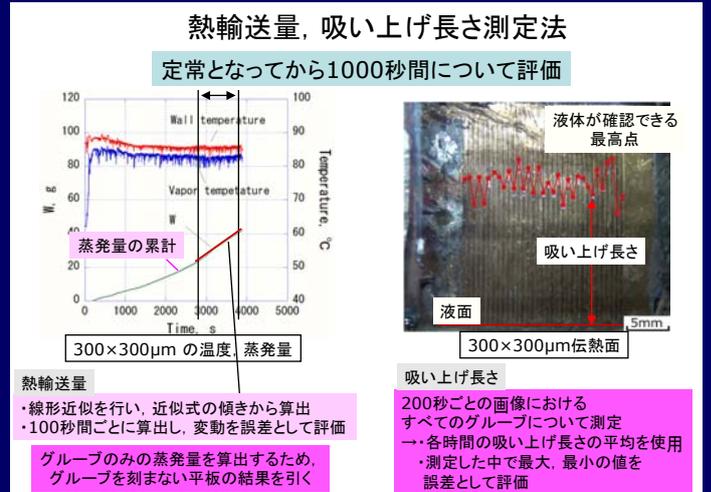
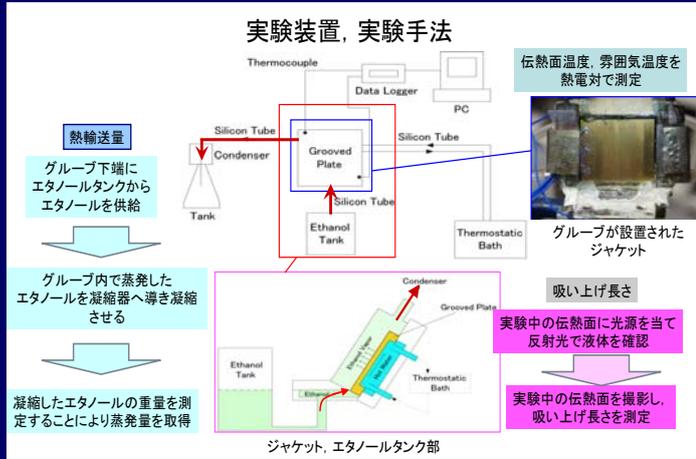
解析結果と、実験結果のメニスカスの形状が良好に一致

実験における偏差の原因
→共焦点顕微鏡のレーザーの屈折

グループ内のメニスカスの形状を観察し、一定の後退接触角以下で液体が壁面を滑ることを確認し、計算において断面ごとのメニスカスの形状をドライアウト直前まで再現した

マイクログループ蒸発器の熱輸送特性の予測に関する研究

東京大学大学院工学系研究科 平成25年度 修士2年 小池孝典



気液界面の境界条件について

グループ断面解析において気液界面の局所熱流束の計算で使用する気液界面における圧力に関する式の見直し

$$q_w = h_{lv} \cdot (2\alpha / (2 - \alpha)) \cdot \sqrt{M / 2\pi R_w}$$

$$\left(P_s \cdot \sqrt{T_v} - P_v \cdot \sqrt{T_s} \right) / \sqrt{T_v \cdot T_s} (= -k_l \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{surface}})$$

$$P_s = P_{sat}(T_s) - \sigma \cdot K - \frac{A_m}{\Omega}$$

$$P_s = P_{sat}(T_s) \cdot \exp\left(\frac{P_s - P_{sat}(T_s) - \frac{A_m}{\Omega} - \sigma \cdot K}{\rho_l \cdot T_s \cdot \frac{R}{M}} \right)$$

Ts: 気液界面における温度, K
Ps: 気液界面における圧力, Pa
Psat: 飽和蒸気圧, Pa
R: 気体定数, J/K·kg
M: 分子量, kg/mol
α: 蒸発係数=0.036
Am: ハマカー係数=2×10⁻²¹

分離圧, 表面張力を考慮に入れた気液界面における圧力の式
Hao Wang's (International Journal of Heat and Mass Transfer 50 (2007) 3933-3942)

