

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 17 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25820054

研究課題名(和文) マイクロチャンネル内相変化熱流動による超高熱流束冷却機構の学理構築

研究課題名(英文) Study of mechanism on high heat flux cooling by thermal-fluid phenomena with phase change in microchannel

研究代表者

岡島 淳之介 (Okajima, Junnosuke)

東北大学・流体科学研究所・助教

研究者番号：70610161

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では数値解析によりマイクロチャンネル内での蒸気気泡の相変化熱流動現象の解明を目的とした。また、壁面に形成する液膜の蒸発をより理解するため、接触線近傍での蒸発モデルにより対流沸騰現象における壁面近傍の蒸発現象を明らかにした。等温マイクロチャンネル内における蒸気気泡の膨張過程の数値解析を行い、気液界面の形状と壁面熱流束分布を計算し、気泡の長さに対して、熱流束分布は短いことを明らかにした。また、固気液接触線近傍の蒸発モデルを導入した対流沸騰現象の数値解析を行い、対流沸騰においては、気泡の前方と後方において、接触線の蒸発と微小な対流伝熱の寄与が異なることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The objectives of this study is to clarify the phase change thermal flow of vapor bubble in microchannel by numerical simulation. Additionally, to investigate the evaporation of liquid film on the solid surface, near-wall evaporation phenomena in convective boiling was evaluated by using contact line evaporation model.

The numerical simulation of expansion process of vapor bubble in isothermal microchannel was conducted. By calculating the shape of liquid-vapor interface and heat flux distribution on the isothermal wall, the length of heat flux distribution was shorter than the length of vapor bubble. Additionally, the numerical simulation on convective boiling heat transfer with contact line evaporation model was also conducted. In a single bubble growth in convective boiling, the contributions of contact line evaporation and convective heat transfer were different in the front and back side of vapor bubble.

研究分野：熱工学

キーワード：蒸発伝熱 マイクロチャンネル 気液二相流 対流沸騰 数値解析

1. 研究開始当初の背景

微細加工技術の進展に伴い、コンピュータ用中央演算処理装置(CPU)や光通信の半導体レーザなど電子機器の小型化が急速に進んでいる。これらの電子機器の発熱密度は上昇しており、今後 10MW/m^2 に達すると予測されている。それ故、さらなる微細化や高性能化のために、微小領域での効果的な冷却技術の必要性がある。一方で、冷却対象に -30°C 程度の低温が求められることもある。例えば、生体組織を局所的に凍結させる凍結手術や、細胞の凍結保存のための急速冷却、電子デバイス内の熱雑音を抑え高い S/N 比を実現することなどが挙げられる。すなわち、微小領域および幅広い温度領域で成立する高熱流束冷却機構の実現が望まれている。

これまでに微小領域の冷却システムとしてマイクロチャネル内の沸騰伝熱による冷却が注目され研究されてきた。その一方で、一般的に沸騰伝熱現象は複雑な現象で、現象を正確に記述できる理論の確立は難しい。マイクロチャネル内の沸騰伝熱においても同様で、研究手法は実験データの蓄積とそれらによる相関式の提案 (W. Li et al., *Int. J. Heat Mass Trans.*, **53**:1778-1787, 2010) が主である。そのため、沸騰伝熱に代表される相変化熱流動を受動的に利用することはなされてきたが、現象を理論的に記述し能動的に制御することを目的とした研究は散見される程度である。

本研究で着目する単一気泡のマイクロチャネル内相変化熱流動現象は、一般的な沸騰伝熱現象と比べて、単純な物理現象である。これまでに、マイクロチャネル内の単一気泡の膨張過程の簡易的なモデルを構築し、核沸騰限界熱流束で核沸騰を生じさせず液膜の蒸発のみが生じるマイクロチャネルの条件を見出してきた (J. Okajima, et al., *J. Therm. Sci. Tech.*, **7**(4):740-752, 2012.)。しかしながら、これまでに申請者が行った研究では、核沸騰限界熱流束下でのマイクロチャネル内蒸発熱伝達の可能性を示しただけにとどまっている。マイクロチャネル内相変化熱流動を明らかにし、この現象を制御する手法へ展開することで、電子デバイスの冷却や微小冷凍器へ応用可能な高熱流束冷却機構の理論を提案することができる。

2. 研究の目的

申請者はこれまでに、核沸騰を生成しない条件下における液膜の蒸発伝熱のモデル化を行い、マイクロチャネル内の相変化伝熱による核沸騰限界熱流束を超えた高熱流束冷却の可能性検討と、マイクロチャネル内の相変化熱流動を利用した医療用冷却デバイスに関する研究を行ってきた。これまでの研究成果を踏まえ、本研究課題ではマイクロチャネル内の相変化熱流動のより正確なモデル化と高熱流束冷却機構の提案を目指し、数値解析によりマイクロチャネル内での蒸気気泡の相変化熱流動現象の解明を目的とした。また、壁面

に形成する液膜の蒸発をより理解するため、接触線近傍での蒸発モデルを導入し、対流沸騰現象を対象に壁面近傍の蒸発現象を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、Kunkelmann らによって構築された数値解析手法を用いた (C. Kunkelmann and P. Stephan, *Numer. Heat. Tran.*, **56**(8):631-646, 2009.)。以下の方程式は、非圧縮性二相熱流動現象における質量・運動量・エネルギーの保存則である。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \Sigma_v \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) + \sigma \kappa \nabla F \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho c \mathbf{u} T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Sigma_e \quad (3)$$

ここで \mathbf{u} [m/s] は速度ベクトル、 ρ [kg/m³] は密度、 p [Pa] は圧力、 μ [Pa·s] は粘性、 σ [N/m] は表面張力、 κ [1/m] は界面の曲率、 c [J/(kg·K)] は比熱、 T [K] は温度、 Σ_v [1/s] は相変化による体積生成、 Σ_e [W/m³] は相変化によるエネルギー生成項である。表面張力は Brackbill らによる CFS モデル (J. U. Brackbill, et al., *J. Comput. Phys.*, **100**(2):335-354, 1992.) を用いた。気液界面は Kunkelmann らにより導入された液体分率分布の等値線に基づく界面再構築法を用いた。ここで、 F [-] は液体分率を表し、以下の方程式により移流した。

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} F) + \nabla \cdot (\mathbf{u}_r F (1 - F)) = \Sigma_v F \quad (4)$$

界面再構築により得られた界面の法線ベクトルに基づき、界面近傍の温度勾配を計算し、下記式により相変化量を計算した。

$$\dot{m}_{evp} h_{LV} = k_L \nabla_{L \rightarrow \text{int}} T + k_V \nabla_{V \rightarrow \text{int}} T \quad (5)$$

4. 研究成果

まずマイクロチャネル内における蒸気気泡の膨張過程の数値解析を行った。解析モデルを図 1 に示す。管内に予め蒸気気泡を配置した。また、管内の流体の初期温度と壁面過熱度はパラメータとした。流体は FC-72 を仮定した。

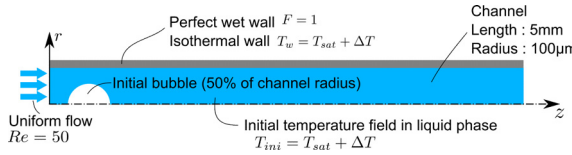


図 1 マイクロチャンネル内相変化現象の解析モデル

図 2 に等温マイクロチャンネル内で相変化し膨張する過程における気泡の形状と壁面熱流束分布を示す。蒸気気泡は管内の液体の顕熱により相変化し、加速しながら膨張した。その際の気泡の伸長は指数関数的であった。熱流束分布に注目すると、気泡が壁面から離れているときは分布がなく、気泡の一部が壁面に接近すると熱流束の分布が出現した。また気泡の長さに対して、熱流束分布は短いことが明らかになった。つまり、気泡周囲に存在している液膜の全てが壁面からの熱伝達に寄与していないことが示された。

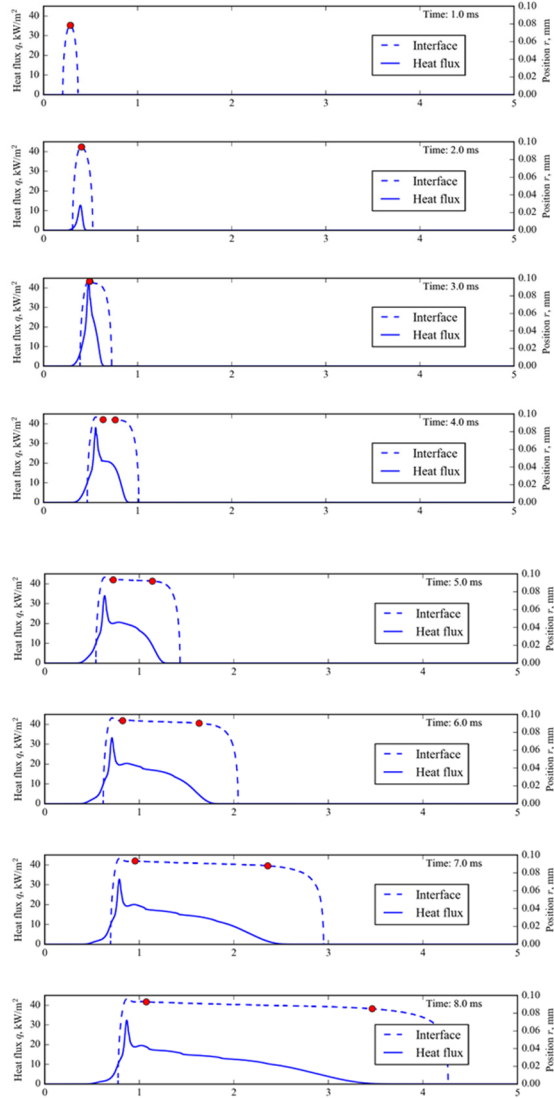


図 2 過熱度 2.5K における気泡の形状と壁面熱流束分布の時間変化

図 3 に既存の相関式との比較を示す。本計算で得られた無次元平均液膜厚さは既存の相関式よりも薄くなること示された。これは加速膨張していることと蒸発していることが要因である。

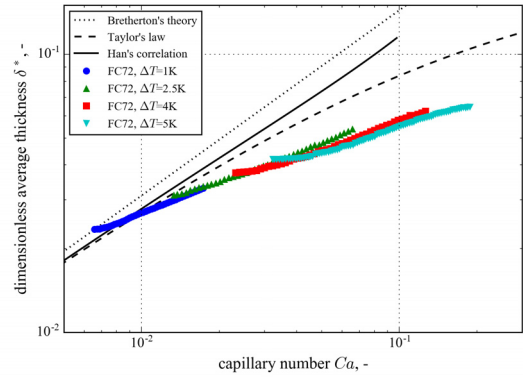


図 3 液膜厚さと既存の相関式との比較

次に壁面近傍での蒸発過程をより詳細に調査するため、固気液接触線近傍の蒸発モデルを導入した対流沸騰現象の数値解析を行った。

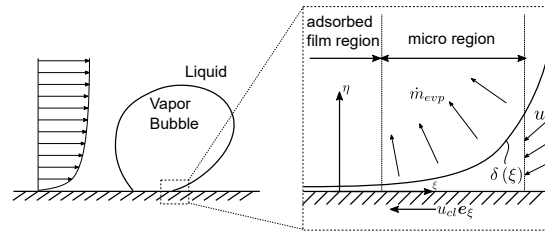


図 4 対流沸騰における固気液接触線近傍の蒸発モデル

図 4 に対流沸騰における固気液接触線近傍の蒸発モデルの概念図を示す。固気液接触線近傍では非常に強い蒸発が生じることが知られている。この現象は分離圧と流体の潤滑近似を用いて記述することができ、その時の熱流束と毛管圧は次式で記述できる。

$$q_{mic} = \frac{T_w - T_{sat} \left(1 + \frac{p_c}{h_{LY} \rho_L} \right)}{\frac{\delta}{k_L} + \frac{R_{int}}{\sqrt{1 + \delta'^2}}}, \quad (6)$$

$$p_c = \sigma \frac{\delta''}{(1 + \delta'^2)^{1.5}} + \frac{A}{\delta^3} - \dot{m}'_{evap} \left(\frac{1}{\rho_V} - \frac{1}{\rho_L} \right) \quad (7)$$

これらの式から固気液接触線の移動速度をパラメータとして、接触線近傍の界面形状を計算することができ、それがすなわち接触角を与える。

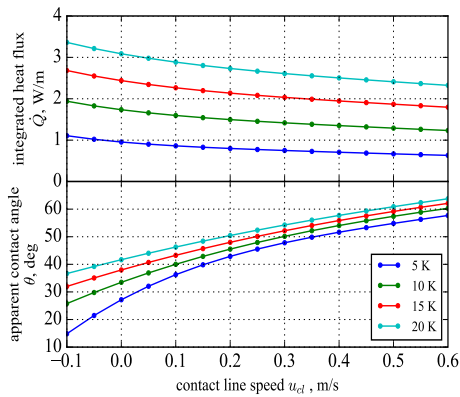


図 5 固気液接触線の移動速度に対する蒸発熱流束と動的接触角の変化

図 5 に固気液接触線の移動速度に対する蒸発熱流束と動的接触角の変化を示す。計算は流体として FC-72、固体としてクロムを設定した。移動速度が負、すなわち後退接触角の場合は接触角が小さく、また蒸発熱流束が大きくなるのがわかる。一方で移動速度が正、すなわち前進接触角の場合は蒸発熱流束が徐々に低下している。これは、液膜が厚くなるため生じている。壁面過熱度の変化に対し、蒸発熱流束は大きく変化し、接触角はあまり変化しないことが明らかになった。

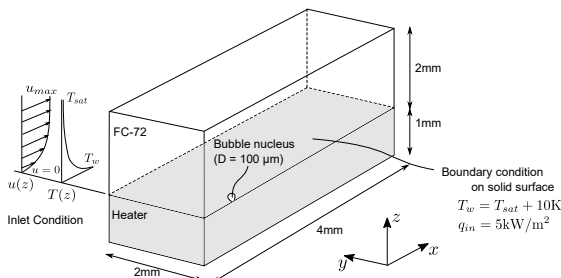


図 6 対流沸騰での単一気泡の膨張過程の数値解析モデル

図 6 に対流沸騰での単一気泡の膨張過程の数値解析モデルを示す。流体として FC-72 を、固体はクロムが蒸着したフッ化カルシウムを仮定した。流体の入口に速度分布および温度分布を与えた。固気液接触線での接触角および蒸発量は図 5 で求めた値を用いた。

図 7 に固体壁から離脱する直前における蒸気気泡形状、速度ベクトルおよび固体内温度分布を可視化した結果を示す。図から明らかなように気泡後方部において固体の温度が低下している。これは気泡が固体壁上を下流に移動する際に気液界面と固体壁の間の対流伝熱によるものである。

図 8 に主流速度の違いによる気泡形状および固体壁表面の温度分布を示す。図 7 で示したことと同様に気泡後方部において温度低下が大きくなっている。後方部は前進接触角となるため、接触線の蒸発量は前方部よりも小さくなるが、主流部から壁面に向かう流れが生じ、対流伝熱の効果により、伝熱が促進さ

れた。一方で、気泡の前方部は後退接触角となっており、気泡形状から接触角の違いが確認できる。また、前方部においては、流れ場の向きが壁面から主流側へ巻き上げる方向の流れ場になるため、対流伝熱の恩恵が全くないのにも関わらず、温度低下が確認でき、接触線の蒸発の効果によることが明らかになった。

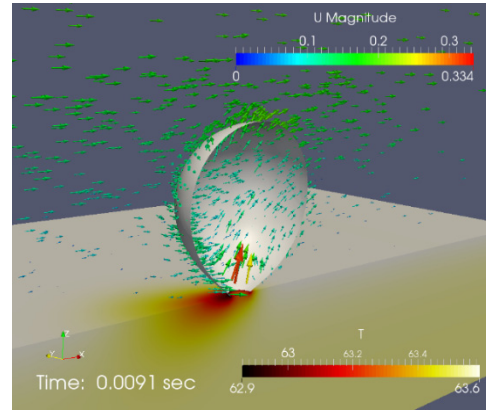


図 7 固体壁から離脱する直前における蒸気気泡形状、速度ベクトルおよび固体内温度分布の可視化

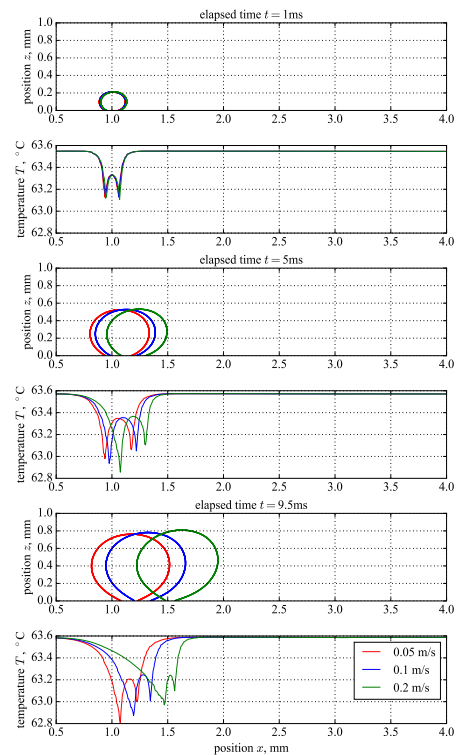


図 8 主流速度の違いによる気泡形状および固体壁表面の温度分布

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- ① J. Okajima, A. Komiya, and S. Maruyama, 24-gauge ultrafine cryoprobe with diameter of 550 μ m and its cooling performance, *Cryobiology*, 査読有, Vol. 69, 2014, pp. 411-418.
DOI: 10.1016/j.cryobiol.2014.09.104
- ② J. Okajima, A. Komiya, and S. Maruyama, Experimental and Numerical Evaluation of Small-Scale Cryosurgery Using Ultrafine Cryoprobe, *Journal of Nanotechnology in Engineering and Medicine*, 査読有, Vol. 4, 2014, 041009.
DOI: 10.1115/1.4027988
- ③ J. Okajima, A. Komiya, and S. Maruyama, Evaluation of Characteristics of Phase Change Heat Transfer in Ultrafine Cryoprobe, *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, 査読有, Vol. 2, 2014, pp. 55-66.
DOI: 10.4236/jfcmv.2014.22008

[学会発表] (計8件)

- ① J. Okajima, and P. Stephan, Numerical simulation of single bubble growth in convective boiling with dynamic contact line model, The 6th International Symposium on Micro and Nano Technology, 2017年3月21日, 九州大学医学部百年講堂 (福岡県福岡市) .
- ② J. Okajima, and P. Stephan, Numerical simulation on expanding process of vapor bubble by evaporative heat transfer in microchannel, The Fourth International Forum on Heat Transfer, 2016年11月3日, 仙台国際センター (宮城県仙台市) .
- ③ J. Okajima, and P. Stephan, Multiscale Effect in Near-Wall Evaporative Heat Transfer for High Heat Flux Cooling, the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information, 2016年10月11日, 仙台国際センター (宮城県仙台市) .
- ④ J. Okajima, and P. Stephan, Numerical simulation of single bubble growth during flow boiling under reduced gravity, 11th International Conference on Two-Phase Systems for Ground and Space Application, 2016年9月27日, Marseille (France).
- ⑤ J. Okajima, Y. Aizawa, K. Hou, P. Zehner, A. Komiya, and S. Maruyama, Numerical Investigation on Thermal and Hydrodynamical Behavior of Expanding Single Bubble in Microchannel, The 25th International Symposium on Transport Phenomena, 2014年11月06日, Krabi (Thailand).
- ⑥ 相澤優太, 岡島淳之介, 小宮敦樹, 円山重直, マイクロチャンネル内相変化伝熱に

よる気泡膨張挙動の数値解析, 日本機械学会東北支部第50期秋季講演会, 2014年9月5日, 東北学院大学 (宮城県多賀城市), 日本.

- ⑦ J. Okajima, A. Komiya, and S. Maruyama, Experimental and Numerical Evaluation of Small-Scale Cryosurgery Using Ultrafine Cryoprobe, ASME 2013 4th International Conference on Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer, 2013年12月13日, Hong Kong (China).
- ⑧ J. Okajima, A. Komiya, and S. Maruyama, Evaluation on characteristics of phase change heat transfer in ultrafine cryoprobe, the Twelfth International Symposium on Fluid Control, Measurements, and Visualization, 2013年11月22日, 奈良県新公会堂 (奈良県奈良市) .

6. 研究組織

(1)研究代表者

岡島 淳之介 (OKAJIMA JUNNOSUKE)
東北大学・流体科学研究所・助教
研究者番号 : 70610161