

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06183

研究課題名（和文）気液界面の高速移動に伴う固体壁上への液膜形成および蒸発伝熱過程の解明

研究課題名（英文）Investigation on liquid film formation on solid wall and its evaporative heat transfer by high-speed movement of liquid-vapor interface

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） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、高発熱密度を持つ電子デバイスの冷却や医療分野で求められている微小冷凍器などの実現を目指し、特にマイクロチャネル内の蒸気気泡の膨張現象とそれに伴う固体面上への液膜形成プロセスを明らかにし、高熱流束冷却を実現する機構について検討を行った。マイクロチャネル内の蒸気気泡による液膜形成現象を理解するために適した解析条件を考案し、作動流体FC-72について解析した。解析結果より、(1)気泡先端近傍の液膜厚さは既存の経験式と同程度の値になること、(2)液相の過熱条件が大きい場合、気泡先端の移動速度が増加し液膜は厚くなり、固体壁の冷却への寄与が低下することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で明らかにした気液界面の高速移動に伴う固体面上への液膜形成過程は、単一蒸気気泡による固体面からの伝熱プロセスを理解する上で重要であり、マイクロチャネルやマイクロギャップ内の蒸気気泡の膨張とその蒸発伝熱のみならず、核沸騰伝熱現象でのマイクロ液膜形成から接触線の蒸発への遷移過程を明らかにできる可能性があり、学術的に意義がある。高い熱流束での冷却機構の実現は、今後世界規模で普及するであろう電気自動車等における電力制御デバイスの冷却に特に重要である。

研究成果の概要（英文）：In this study, to develop the cooling mechanism for electronic devices with high power density and micro-refrigerator for medical applications, the expansion of vapor bubbles in the microchannel and the liquid film formation process was clarified and the mechanism of high heat flux cooling was investigated. To understand the liquid film formation by vapor bubbles in a microchannel, an appropriate condition of numerical simulation was considered and two-phase flow of FC-72 was analyzed. The results of the numerical analysis showed that (1) the film thickness near the head of the bubble was comparable to the existing empirical correlations, (2) when the superheat of the liquid phase is large, the migration speed of the bubble tip increases and the liquid film becomes thicker. As a result, the contribution of liquid film evaporation in overall heat transfer is reduced.

研究分野：熱流体工学

キーワード：相変化伝熱 蒸発伝熱 液膜 高熱流束冷却 沸騰

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

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ー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 10 MW/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、医療分野において、生体組織を局所的に凍結させる治療である凍結手術や、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。

2. 研究の目的

本研究では、気液界面の移動により固体面上へ形成される液膜の力学と熱輸送特性を明らかにする。特に、ドライアウトを考慮し、液膜の蒸発から接触線の蒸発への遷移過程を明らかにすることを旨とする。流体の種類やその熱物性による熱流動特性の変化に着目し、常温から極低温までを説明するための無次元化を通じて、電子デバイスの冷却から微小冷凍器までを包括する体系の構築を目指す。

3. 研究の方法

蒸発・凝縮を考慮した VOF 法による相変化熱流動の数値解析プログラムを用いた。支配方程式は相変化を考慮した非圧縮性二相熱流動方程式であり、気液界面の捕獲は VOF 法および VOF の等値面に基づく界面再構築法を用いた。得られた界面の法線ベクトルに基づき、気液界面周囲の温度勾配を計算し、蒸発量および蒸発熱流束を求めた。解析プログラムは OpenFOAM 2.1.1 を用いて構築した。この手法により、マイクロチャネル内での気泡膨張による液膜形成を明らかにする。並行して、マイクロギャップ内の気泡膨張の実験を行う。人工的に気泡を生成する機構を設け、飽和状態の流体で満たされたマイクロギャップで気泡を生成し、その膨張過程を可視化計測することで、液膜の形成とドライアウト過程を観察する。

4. 研究成果

マイクロチャネル内の蒸気気泡の膨張現象を数値シミュレーションにより解析した。液膜形成現象を理解するために適した解析条件を考案し、その条件のもと、作動流体 FC-72 について種々の条件下で液膜形成過程を解析した。図 1 に解析モデルを示す。流体は大気圧の FC-72 を仮定し、入口に直径の半分の大きさを持つ初期気泡を設置した。また、管の直径を $100\mu\text{m}$ とした。管壁において、完全濡れ条件を仮定し、また壁面内の熱伝導は無視した。また、壁面及び初期温度場は一定の過熱度を与え、液単相流と壁面間の対流熱伝達を取り除くことで、気泡の蒸発伝熱の評価を容易にした。

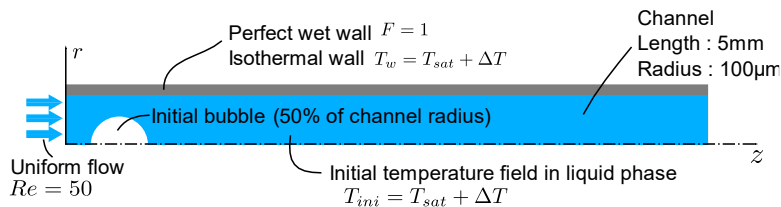


図 1 解析モデル (Okajima and Stephan, Int. J. Heat Mass Trans., 2019.)

気泡形状を評価し、液膜厚さおよび気泡の膨張速度を導出した。また、壁面の熱流束を計算し、液膜を通じた伝熱量を評価した。図 2 に液膜を評価するためのパラメータの概略図を示す。液膜と気泡前後に存在するメニスカスを区別するため、本研究では、界面形状 $r_B(z)$ の微分が 0.01 以下の領域を液膜と定義した。さらに、液膜厚さとして、気泡先端部側の定義点における液膜厚さを初期厚さ、液膜領域内における平均値を平均液膜厚さと定義した。気泡先端部の座標の時間微分を取り、気泡先端部の速度 U_B を計算した。また、温度場から壁面での温度勾配を計算し、壁面上の熱流束分布を導出した。

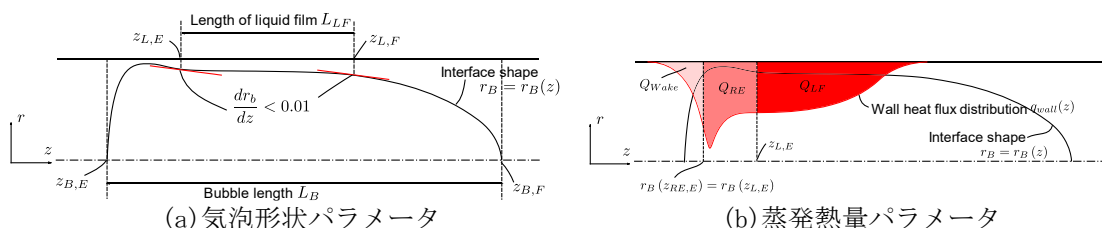
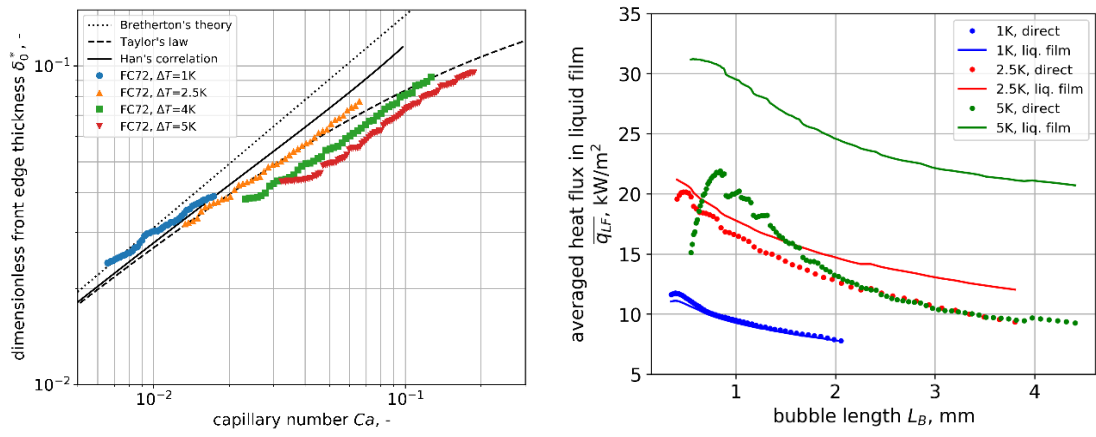


図 2 パラメータの定義 (Okajima and Stephan, Int. J. Heat Mass Trans., 2019.)



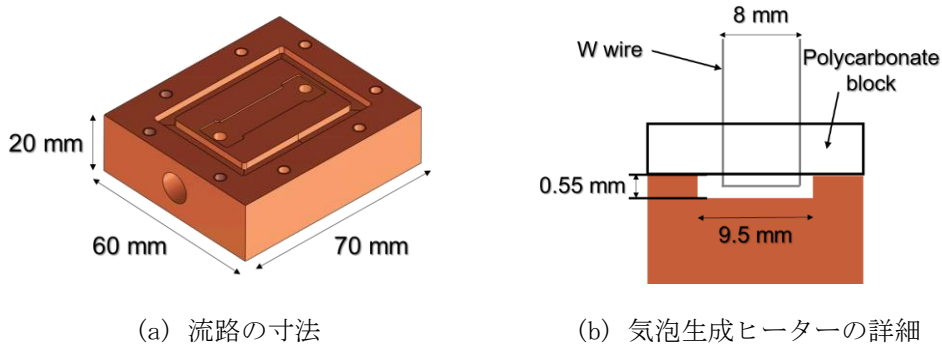
(a) 気泡先端液膜厚さとキャピラリ数の関係

(b) 液膜を通じた平均熱流束

図3 主な解析結果 (Okajima and Stephan, Int. J. Heat Mass Trans., 2019.)

図3(a)に気泡先端部分の液膜厚さと既存の式との比較を示す。既存の式では蒸発およびそれに伴う加速膨張は考慮していない。液膜厚さに関する Taylor 則と概ね近い値を示すことがわかった。また図3(b)には液膜内を通過する平均熱流束について、数値解析から直接求めたものと、液膜内での定常一次元熱伝導を仮定し、液膜厚さから熱流束を求めたものを比較した。液相の過熱度が低い場合には両者は一致するが、過熱度の増加に伴い両者は乖離する。これは気泡周囲の温度境界層が薄くなり、液膜内の一次元熱伝導の仮定が成立しないためと考えられる。以上の解析から、(1)気泡先端近傍の液膜厚さは既存の経験式と同程度の値になること、(2)液相の過熱条件が大きい場合、気泡先端の移動速度が増加し液膜は厚くなり、固体壁の冷却への寄与が低下することを明らかにした。また、この解析手法を拡張し、種々の作動流体に対して解析を行い、気泡長さとその瞬間の気泡膨張速度の関係を、流体の種類に依らずに記述するパラメータを提案した (岡島, 第56回日本伝熱シンポジウム, 2019)。また、せん断流中の沸騰現象の数値シミュレーションの解析を行った。この解析により、壁面温度は接触角の絶対値に影響を与え、主流速度を増減すると動的接触角の変化の傾向が変わることが明らかになった。またマイクロ液膜から動的接触線形成までの遷移過程をシミュレーションするには、特に接触線が後退接触角を形成するときの条件が必要であることがわかった (Okajima and Stephan, 72th Annual Meeting of APS DFD, 2019)。それを踏まえて、接触線速度が負 (後退接触角) から正 (前進接触角) の幅広い範囲での接触角が必要であることがわかり、理論モデルにより解析を行った。この解析により、幅広い接触線速度における動的接触角およびその接触線上の蒸発量が明らかになった。

並行して、実験を通じて液膜形成過程の評価を行った。高熱流束を付加することが可能なマイクロ流路内に、人工的に気泡を生成するためのマイクロヒーターを設置し、作動流体を水として実験を行った。図4(a)に示すような銅製の流路に、図4(b)に示すようなタングステンワイヤを使用した気泡生成機構を設けた。この流路の下部に高出力のヒーターブロックを設置し、流路下面の加熱と温度計測を行い、ヒーターブロック内の温度勾配から熱流束を推定した。



(a) 流路の寸法

(b) 気泡生成ヒーターの詳細

図4 気泡生成機構を有するマイクロギャップ流路

マイクロヒーターの特性を実験的に評価し、微小な気泡が生成することを確認した。図5にマイクロヒーターから発生した気泡が壁面からの加熱により膨張する過程を、高速度カメラにより観察した様子を示す。この計測により気泡先端の移動速度を計測することができる。また、気泡底面の様子を詳細に観察することにより、気泡膨張により液膜が形成される過程と液膜が乾

いた領域（ドライパッチ）の大きさを計測した．図 6 にドライパッチの大きさの時間変化を示す．また，既存の液膜形成理論を基に乾き面の大きさを推定し比較した．図 6 に示すように，実験と解析が概ね合うことを確認した．これらの差異は簡易モデルの仮定によるもので，液膜長さを気泡長さと同じことや伝熱面温度一定の仮定が解析結果に影響を及ぼす．この解析モデルを用いて，乾き面の形成を阻害する気泡発生方法を検討した．ドライパッチが形成される前に次の気泡が加熱面を覆うように，タングステンワイヤに印加する電圧の周期を決定した．その周波数でヒーターを駆動し，ドライパッチの形成の抑制を示唆する結果が得られた．一方で，ヒーターの駆動周波数と実際の発泡周期に差異が見られた．これは頻繁な発泡によりタングステンワイヤが冷却され，発泡に必要な加熱量が不足したためと考えられる．

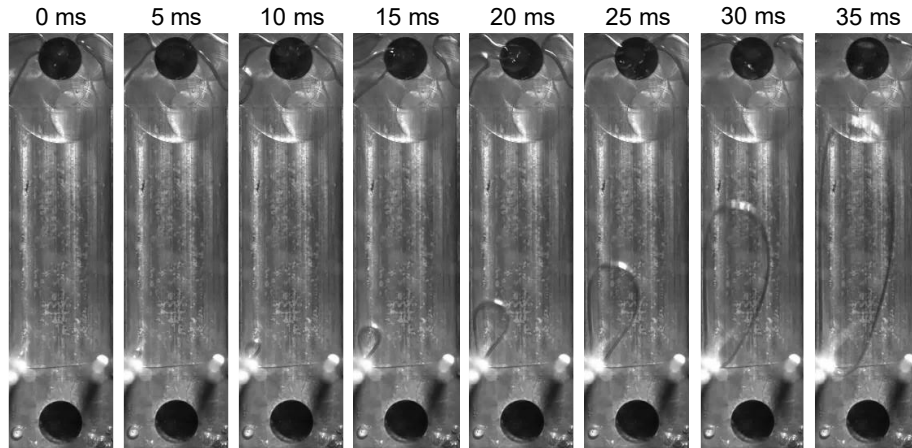


図 5 壁面過熱度 4.7K の条件下における気泡膨張過程

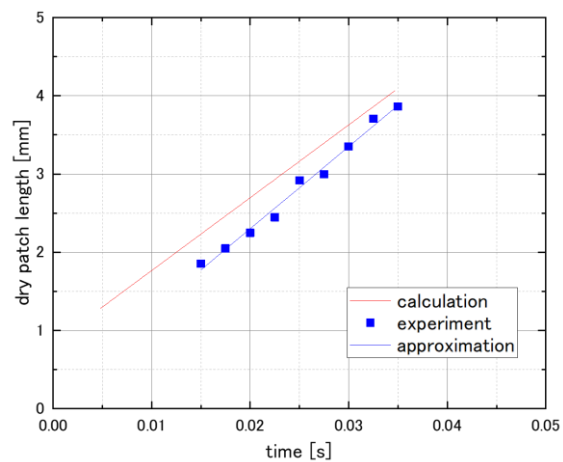


図 5 壁面過熱度 4.7K の条件下にドライパッチ拡大速度と簡易モデルとの比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Junnosuke Okajima, Peter Stephan	4. 巻 136
2. 論文標題 Numerical simulation of liquid film formation and its heat transfer through vapor bubble expansion in a microchannel	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 1241-1249
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Okajima Junnosuke, Jeong Sangkwon, Maruyama Shigenao	4. 巻 26
2. 論文標題 Evaluation of Cooling Performance of Ultrafine Cryoprobes: Effect of Probe Structure on Thermodynamic Properties of Refrigerant	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration	6. 最初と最後の頁 1850020
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1142/S2010132518500207	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Junnosuke Okajima, Peter Stephan
2. 発表標題 Numerical Study of Effect of Vapor Bubble Behavior on Wetting Condition in Boiling Flow
3. 学会等名 72nd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡島淳之介
2. 発表標題 マイクロチャネル内相変化伝熱における液膜形成特性の解析
3. 学会等名 第56回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡島淳之介, Peter Stephan
2. 発表標題 移動接触線蒸発モデルを用いた対流沸騰伝熱解析
3. 学会等名 混相流シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Junnosuke Okajima, Atsuki Komiya
2. 発表標題 Numerical Evaluation of Boiling Heat Transfer Performance in Isothermal Microchannels
3. 学会等名 the 11th Australasian Heat and Mass Transfer Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅原大暉, 岡島淳之介, 小宮敦樹
2. 発表標題 マイクロチャネル内における沸騰現象の可視化と流動評価
3. 学会等名 第18回日本伝熱学会東北支部学生発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Junnosuke Okajima, and Peter Stephan
2. 発表標題 Evaluation on evaporative heat transfer of expanding vapor bubble in microchannel by numerical simulation
3. 学会等名 The 10th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Junnosuke Okajima
2. 発表標題 Numerical simulation of phase change heat transfer in microchannel
3. 学会等名 China-Japan Heat Transfer Symposium 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----