

令和 元年 6 月 25 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06106

研究課題名（和文）マイクロスリットチャンネル内でのサブクール沸騰熱伝達促進に関する研究

研究課題名（英文）Experimental study on subcooled Flow Boiling under an Electric Field

研究代表者

鹿野 一郎（Kano, Ichiro）

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：10282245

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,800,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、高電界印加によるサブクール流動沸騰の熱伝達促進について研究を行った。ダイヤモンド粒子を電着した加熱壁面の沸騰熱伝達性能を、質量流量および投入液体温度を変化させて評価した。沸騰面に -5 kV/mm の電界を印加した場合の最大の限界熱流束 (CHF) は 120 W/cm² であり、質量流量 1.9 g/s で投入液温 50 °C の条件で得られた。また、加熱面の設置角度を 0、90、180 ° と変化した場合の沸騰特性を調べた。その結果、90 ° の場合の沸騰曲線は水平の場合の CHF とほぼ同じ約 120 W/cm² を示したが、180 ° の場合は 55% 減少した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電子デバイスなどの高発熱部品から発生する熱流束は 10 W/cm² 以上であり、高出力 LED はさらに高い 100 W/cm² 以上になる可能性も予測されている。このような高熱流束な発熱を省スペースで除去する方法として、熱伝達率の高い沸騰熱伝達を利用する手法が有用である。しかしながら、沸騰熱伝達を利用する場合、浮力による影響により沸騰面の角度変化によって熱伝達性能が大きく変化することが報告されている。本研究では強制対流熱伝達に電界印加による伝達促進手法を適用して姿勢変化に伴う冷却性能の変化が少ない手法を研究する。これが実現できれば、小型でメンテナンス性の良い冷却が可能になる。

研究成果の概要（英文）：This study investigated the enhancement of subcooled flow boiling with the application of high electric field. The heat performance of the heated wall surface was evaluated at various inlet flow rates and inflow temperatures. An electric field of -5 kV/mm was applied to the boiling surface, and the best enhancement of performance was obtained at an inlet flow rate of 1.9 g/s and initial inflow temperature of 50 °C. Under these conditions, the critical heat flux (CHF) performance reached 120 W/cm². In addition, the boiling characteristics were investigated when the installation angle of the heating surface was changed to 0, 90, and 180 °. As a result, CHF at 90 ° showed about 120 W/cm² which is almost the same as CHF in the horizontal case, but at 180 ° the CHF decreased by 53.1 W/cm² and 55%.

研究分野：熱流体工学、伝熱工学、冷却

キーワード：沸騰熱伝達 サブクール沸騰 限界熱流束 熱伝達

1．研究開始当初の背景

電子デバイスなどの高発熱部品から発生する熱流束は $10\text{W}/\text{cm}^2$ 以上であり、高出力 LED はさらに高い $100\text{W}/\text{cm}^2$ 以上になる可能性も予測されている。このような高熱流束な発熱を省スペースで除去する方法として、熱伝達率の高い沸騰熱伝達を利用する手法が有用である。電子機器部品を冷却するための冷媒には、電気絶縁性であり沸点が 85°C よりも低いフッ素系冷媒が適しているが、フッ素系冷媒のプール沸騰限界熱流束は $20\text{W}/\text{cm}^2$ 程度であり、さらに高い限界熱流束を可能とする新たな技術が求められている。研究代表者は、伝熱面上に微細構造を設けることにより、電子機器デバイスの可動温度域（ 90°C 以下）で限界熱流束を 30% 向上（ $26\text{W}/\text{cm}^2$ ）できることを明らかにした。また、新たに考案したマイクロスリット電極による電界印加によって、伝熱面温度 88°C で限界冷却熱量を $100\text{W}/\text{cm}^2$ にまで飛躍的に促進させることが可能になった。しかしながら、沸騰熱伝達を利用する場合、浮力による影響により沸騰面の角度変化によって熱伝達性能が大きく変化することが報告されている。従って、本研究では強制対流熱伝達に本熱伝達促進手法を適用して姿勢変化に伴う冷却性能の変化が少ない手法を研究する。これが実現できれば、小型でメンテナンス性の良い冷却が可能になる。国内外においても電子機器の発熱量増加に伴い、沸騰冷却に関する様々な研究が盛んに行われている。例えば、電界を印加して沸騰促進を行う研究、また、強制対流と沸騰熱伝達を組み合わせたマイクロチャンネルなどがある。

2．研究の目的

本研究では、図 1 に示す強制対流沸騰式マイクロスリットチャンネルを提案する。その目標冷却能力は、伝熱面温度を $60 \sim 100^\circ\text{C}$ とし、最大冷却能力を $100\text{W}/\text{cm}^2$ 以上とする。液体には高電気絶縁性のフッ素系液体を使用する。研究全体を以下の 3 つのサブテーマに分けて進行する。それぞれのサブテーマの目的を以下に示す。
サブテーマ 1 「電気流体力による熱伝達促進」

圧力損失増加及び姿勢変化による冷却性能低下を改善するために、蒸気泡を電界で駆動して伝熱面上の蒸気泡を強制的に排除できるマイクロスリット電極を提案する。これまでの研究で、自由対流沸騰実験にて -3000V の印加電圧で $100\text{W}/\text{cm}^2$ を実現している。このデータを参考にスリット幅の異なる電極形状（ $700\mu\text{m} \sim 1300\mu\text{m}$ ）を検討し、圧力損失と冷却能力の関係を明らかにする。これによって低圧力損失で駆動できる電極形状を提案する。また、マイクロスリットチャンネルに流入する液温（サブクール温度）と流量を変化させた場合の限界熱流束について調べる。

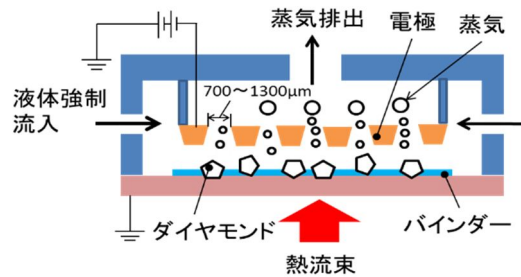


図 1 強制対流沸騰式スリットチャンネル

サブテーマ 2 「微細構造化による熱伝達促進」

伝熱面上にダイヤモンド電着層を設け、伝熱面の表面積の増加と気泡核密度の増大によって沸騰開始温度を低下させ、限界熱流束を高める。応募者は、自由対流飽和沸騰実験において、ダイヤモンド粒子の電着により沸騰開始温度が低下すると同時に、限界熱流束が増加することを実験により確認した。また、粒子径や粒子密度の影響も明らかにしている。この知見を本提案のマイクロチャンネルに適用し、熱伝達促進効果についてさらに詳しく調べる。

サブテーマ 3 「姿勢変化による冷却性能の変化」

サブテーマ 1 と 2 で得られた知見をもとに姿勢変化による冷却性能の変化を調べる。最終的には、マイクロスリットチャンネルが 90° （垂直）になった状態でも、最大 $100\text{W}/\text{cm}^2$ の熱除去能力があることを期待している。この値が達成できれば、例えば大型プロジェクターなどに使われる高出力レーザダイオード冷却の省スペース化に大きく期待できる技術になる。

3．研究の方法

強制対流サブクール沸騰実験に用いた流体回路の概略図を図 2 に示す。この回路は、リザーバー内に貯蔵された作動流体を、フィルター、ポンプ（タクミナ、スムーズフローポンプ Q シリーズ）、熱交換器、液温測定容器、マイクロスリットチャンネル、凝縮器の順に流し、リザーバータンクに戻る構造となっている。作動流体の投入液温 T_0 は、恒温槽と熱交換器で調整され、絶縁容器内の T 型熱電対温度計で測定される。実験で用いた T 型熱電対温度計は、不確かさ $\pm 0.1^\circ\text{C}$ である。

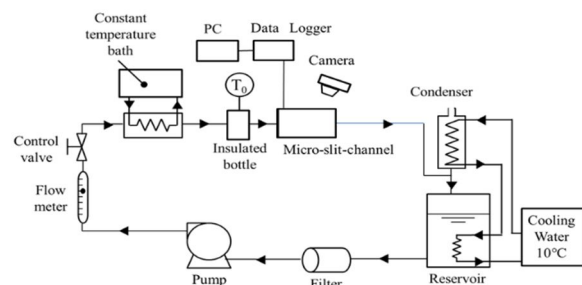


図 2 流体回路図

0.04 K 以内で校正されている。マイクロスリットチャンネルで蒸気に相変化した作動流体は、凝縮器で液体に戻りリザーバーに回収される。凝縮器は大気圧に開放されている。作動流体は、沸点が 55.5 のフッ素系絶縁性液体である AE-3000 (AGC、CF3CH2OCF2CF2H) を用いた。

図 3 はマイクロスリットチャンネルの構造図である。図(a)で示すようにマイクロスリットチャンネルは透明ポリカーボネート製チャンパー、スリット電極、テフロンブロック、銅ブロック、支持板で構成される。銅ブロックの下部には、抵抗 $50\ \Omega$ のカートリッジヒーター（八光、HLE1201）が 6 本設置され、電気的に並列でつながれている（合成抵抗 $R=8.3\ \Omega$ ）。図(b) はマイクロスリットチャンネルの断面図（A-A）を示している。 T_{in} は入口温度、 T_{out} は出口温度、 p_{in} は入口圧力、 p_{out} は出口圧力、 θ は伝熱面の角度を示している。マイクロスリットチャンネル内の圧力は圧力変換器（共和電業、PHL-A-2MP-B）を使用した。銅ブロック上端の直径 15mm の円柱表面を伝熱面とし、ダイヤモンド粒子を電着加工した。ダイヤモンド粒子径は $1.5\ \mu\text{m}$ と $5\ \mu\text{m}$ であり、表面粗さ $Ra = 0.19\ \mu\text{m}$ 、接触角 $\phi = 10.1^\circ$ 、粒子密度 = $51563\ \text{mm}^{-2}$ である。

銅ブロックには、沸騰面から 13 mm の位置に 6 mm 間隔で深さ 7.5 mm の穴が設けられている。この穴に T 型熱電対を挿入し、銅ブロック内の温度勾配を最小二乗法から求めた。また、伝熱面表面温度 T_w は、銅ブロック内の温度勾配から算出される。

図 4 は、沸騰容器の概略図である。矢印は容器内における作動流体の流れを示している。図(a)、図(b)は $\theta = 0^\circ$ 、 180° で使用する場合のチャンパーであり、 0° では伝熱面が液体ですべて満たされるように蒸気の排出口を上向きにした。しかし、 180° の場合、チャンパーには液体に溜まらずに流れ出てしまう構造である。図(c)、図(d)は $\theta = 90^\circ$ で使用する場合のチャンパーであり、液体がチャンパーに溜まるように排出口が上向きに設けてある。作動流体は、チャンパー内リザーバーに流入した後、2 方向に分かれて電極の下側から伝熱面に流入する。流入した作動流体は、伝熱面で加熱され蒸気に相変化した、スリットを抜けて容器の外へと排出される。

スリット電極の寸法を図 5 に示す。 W_s はスリット間隙、 W_E は電極幅を示す。また、スリットの数 は 10 本である。電極と伝熱面の間隔は、厚さ $100\ \mu\text{m}$ の半導体用絶縁テープを張り合わせることで、 $600 \pm 50\ \mu\text{m}$ に調整した。

実験は次の流れで行った。まず実験を行う前にポンプで液体を流した後、図 3(a)で示されるカートリッジヒーターに 1.45 A (12W) の電流を投入し 2 時間沸騰させて脱気を行った。脱気条件は質量流量 $0.97\ \text{g/s}$ 、投入液温 30°C 、電界 $0\ \text{kV/mm}$ とした。脱気終了後、投入電流を 0.77 A (6.4W) まで低下させ、電界、流量、液温を実験の目標値となるよう調節した。測定データはデータロガー（KEYENCE、NR500）で収集し、温度（KEYENCE、NR-TH08）、圧力（KEYENCE、NR-HA08）、電極と銅ブロックの間の電流（KEYENCE、NR-HV08）を計測した。サンプリングタイムは 10 s

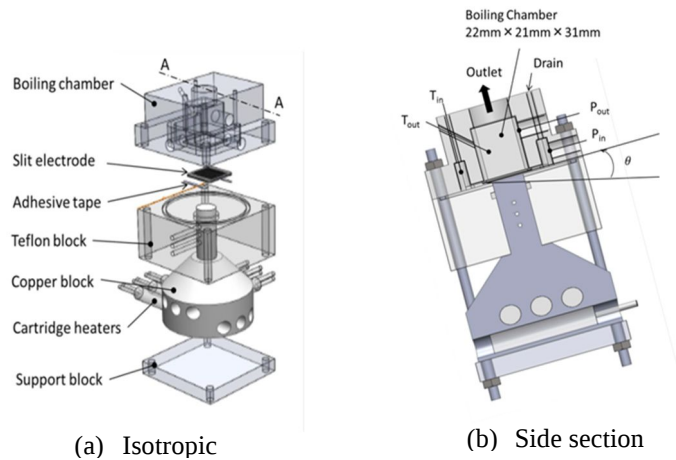


図 3 マイクロスリットチャンネルモジュール

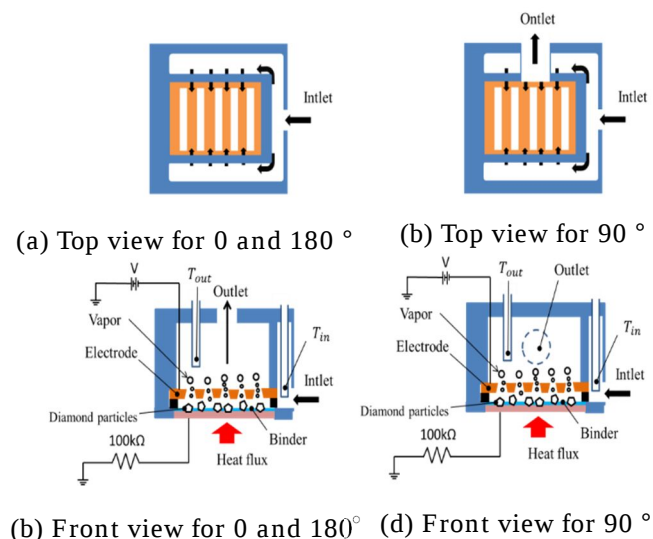


図 4 マイクロスリットチャンネル内液体流動方向

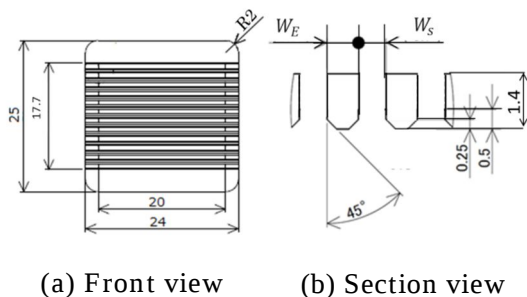


図 5 電極寸法

である。熱伝達の定常条件は、銅ブロック内の3つの熱電対から温度勾配が線形となり、それぞれの熱電対の温度の最大最小差が100秒間で0.08 K以内、またはノイズが大きい場合は20点移動平均の最大最小差が100秒間で0.04 K以内のときとした。定常条件を満たしたことを確認し、投入電流を増加させる。投入電流は0.14 Aの間隔で増加させ、CHFに到達するまで行う。実験におけるCHFは、急激に表面温度が上昇したときとし、この時点で実験を終了した。

4. 研究成果

図6に電極を設置しない場合の沸騰曲線を示す。液体投入温度 T_0 及び質量流量 $\dot{m}$ はそれぞれ、 $T_0 = 30$ 、 $\dot{m} = 0.97 \text{ g/s}$ である。図には、本実験装置に銅平滑面を組み込んだ場合の強制対流沸騰、本研究で使用した液体と同じAE-3000を使用した場合の銅平滑面とダイヤモンド電着面でのプール沸騰曲線、R-123を使用した場合のサンドブラスト処理銅表面でのプール沸騰曲線、またZuberの限界熱流束値を比較のために示している。銅平滑面でのプール沸騰におけるCHFは、Zuberの値によく一致しているが、表面粗さが粗く、接触角が小さくなると沸騰が促進し、過熱度が低いところでCHFが発生する。また、強制対流沸騰の場合は、プール沸騰による潜熱に顕熱の影響が加わり、さらに高いCHFを示していることが分る。

図7に電界Eを印加しないで、電極スリット間隔 W_s を変化させた場合の沸騰曲線を示す。また、電極が無い場合の値も比較のために示されている。電極有無にかかわらず、沸騰は過熱度が約15 Kで開始していることが分かる。CHFは、電極を設置しない場合で 30.0 W/cm^2 、スリット幅が $1300 \mu\text{m}$ の場合で 25.4 W/cm^2 となった。スリット幅が $700 \mu\text{m}$ の場合は、CHFが急激に下がり 16.8 W/cm^2 となった。スリット幅が狭い場合は、気泡の離脱が阻害されていることが考えられる。

図8(a)に熱流束 q 、潜熱による熱流束 q_s 、出口液温 T_{out} を示す。電界E、投入液温 T_0 及び質量流量 $\dot{m}$ は、それぞれ $E = -5 \text{ kV/mm}$ 、 $T_0 = 30$ 、 $\dot{m} = 0.97 \text{ g/s}$ である。出口液温は過熱度が高くなると増加するが、液温は過熱度が18 Kになると沸点に到達し、一定値を示す。液温の変化と同様に、顕熱による熱流束も過熱度が18 Kになると一定値を示す。過熱度をさらに増加させると熱流束は潜熱の影響を受けて急激に増加するが、CHFに近くなると、沸騰面で部分的にドライアウトが発生して熱流束の傾きが緩やかになる。CHFは 89 W/cm^2 を示し、その時の過熱度は27 Kである。高速度カメラによる沸騰の様子を観察を行った。過熱度が0 Kを超えると、サブクール核沸騰(SUBNB)が始まり、過熱度が13 Kを超えると核沸騰が十分に発達(FDNB)して潜熱の影響で急激に熱流束が上昇した。さらに過熱度が増加すると、液体が飽和温度に到達して飽和沸騰(SATNB)に遷移した後にCHFが発生する。図(b)に圧量損失を示す。圧力損失は、過熱度が増加すると徐々に増加し、FDNB領域で沸騰が激しくなると、気泡の合体と崩壊により圧力に不安定な振動がみられる。さらに沸騰が激しくなると、チャンパー内に蒸気が満たされて圧力が急激に低下する現象がみられた。圧力損失は0.5 ~ 2.0 kPaの範囲にあり、マイクロチャンネルとして実用的な性能を示していると考えられる。図(c)は電極と沸騰面に流れる電流を示すが、AE-3000は電気絶縁性液体であり、絶縁耐力16kVであるため、ほとんど電流は流れない。電流の絶対値は最大で7 μA であり、熱伝達を促進させるために使われる電力はわずかに21mWである。

電界Eを固定し($E = -5 \text{ kV/mm}$)、質量流量 $\dot{m}$ を0.97、1.9、2.9 g/sと変化させた場合、及び投入液温 T_0 を30、40、50と変化させた場合の双方でCHFが最大値を取る条件を調べた。ただし、流量が大きくなると過熱度が高くなるので、低い過熱度でCHFが高い値を示す点を選択した。その結果、 $T_0 = 40$ 、 $\dot{m} = 1.9 \text{ g/s}$ において最大値 120 W/cm^2 を得た。その結果を図9に示す。また、同じ条件で伝熱面の傾斜角を90、180°と変化させた場合の沸騰曲線を示す。

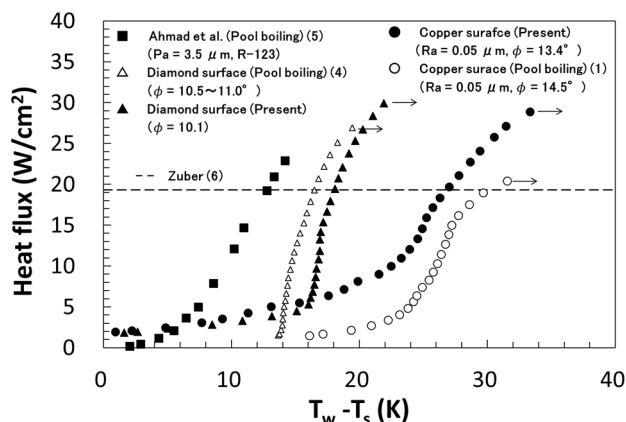


図6 電界を設置しない場合の強制対流沸騰と過去のプール沸騰との比較
(電極無し, $T_0 = 30$, $\dot{m} = 0.97 \text{ g/s}$)

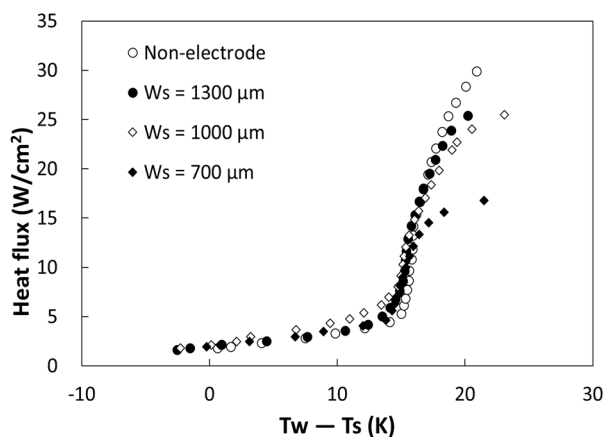


図7 スリット幅の影響
($E = 0 \text{ kV/mm}$, $T_0 = 30$, $\dot{m} = 0.97 \text{ g/s}$)

180 ° の場合、他の条件とは異なり、銅ブロック内の温度変化が大きく定常条件を満たさなかった。そのため、壁面温度の急上昇は発生しないが、定常条件を満たさない場合を CHF としている。90 ° の場合の沸騰曲線は水平の場合の CHF とほぼ同じ約 120 W/cm² を示したが、180 ° の場合は 53.1 W/cm² と CHF が 55% 減少した。これは、180 ° にすることで重力の影響を受けて液体が伝熱面に十分に供給されないためである。以上より、90 ° の場合でも十分な冷却性能が得られるが、180 ° の場合は性能が半減することが分った。

まとめ

電気絶縁性液体 AE-3000(AGC、CF3CH2OCF2CF2H)の強制対流沸騰熱伝達実験を実施し、以下の結論を得た。

電極を設置しない条件で強制対流沸騰実験を行い、過去のプール沸騰の沸騰曲線と比較した。沸騰曲線は、接触角が小さくなると過熱度が低い方向へ移行する。特にダイヤモンド電着による過熱度の低下は大きく、プール沸騰および強制対流沸騰の双方において CHF 発生時の過熱度は銅平滑面の場合よりも約 12K 低くなる。従って、伝熱面を加工するだけで低い伝熱面温度で沸騰熱伝達が実現できることが分った。また、強制対流沸騰の場合は、潜熱の影響に液体のサブクール度による顕熱の影響が加わる。

電極を設置するが電界を印加しない条件でスリット幅の影響を調べた。スリット幅は 700、1000、1300 μm と変化した。スリット幅が 700 μm の場合は、気泡の流出が阻害され、電極を設置しない場合 (30W/cm²) よりも CHF が 43 % 低下 (17W/cm²) した。スリット幅が 1000 と 1300 μm の双方の場合の CHF は、ほぼ同じ値 (25W/cm²) を示し、電極を設置しない場合よりも 17% 程度低下した。

電界 E = -5kV/mm を印加すると、CHF は電界を印加しない場合 (25W/cm²) よりも 3.6 倍高い 90W/cm² を達成し、電界印加による沸騰伝達促進効果が非常に高いことが分った。また、この時の最大圧力損失は、2000Pa と低いことが明らかになった。この時、促進のために必要な電力はわずか 21mW 程度である。

投入液温 T_0 と質量流量 $\dot{m}$ を変化させることで、 $T_0 = 40$ 、 $\dot{m} = 1.9$ g/s において最大値 120W/cm² を得た。この条件で、伝熱面の傾斜角を 90、180 ° と変化させた場合の沸騰曲線を調べた。その結果、90 ° の場合の沸騰曲線は水平の場合の CHF とほぼ同じ約 120 W/cm² を示したが、180 ° の場合は 53.1 W/cm² と CHF が 55% 減少した。

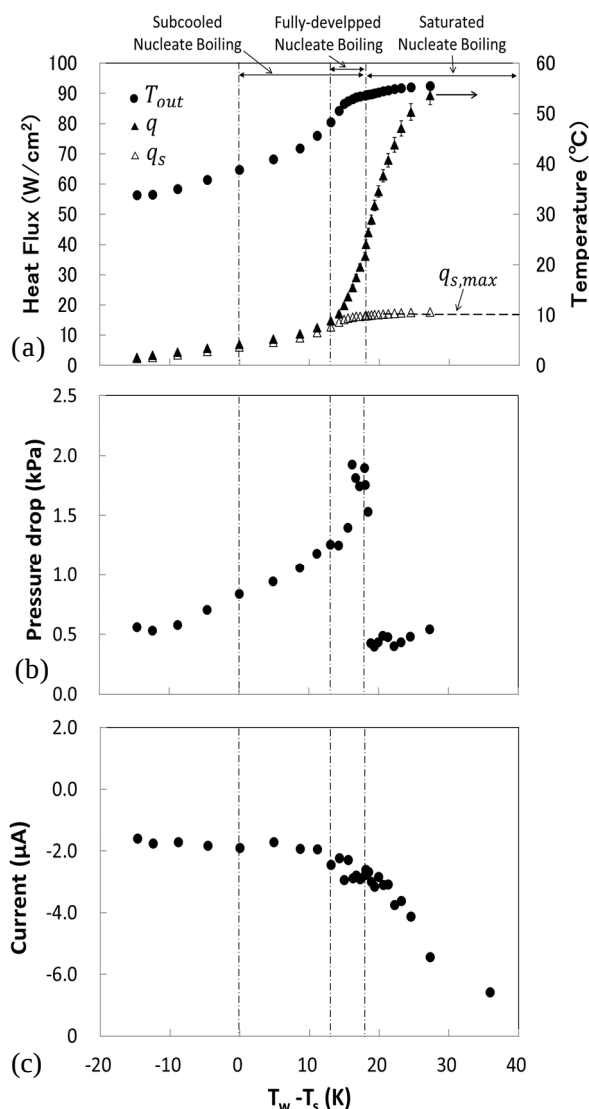


図 8 沸騰曲線、圧力損失、及び電流の挙動
($E = -5$ kV/mm, $T_0 = 30$, $\dot{m} = 0.97$ g/s,
 $W_s = 1000$ μm)

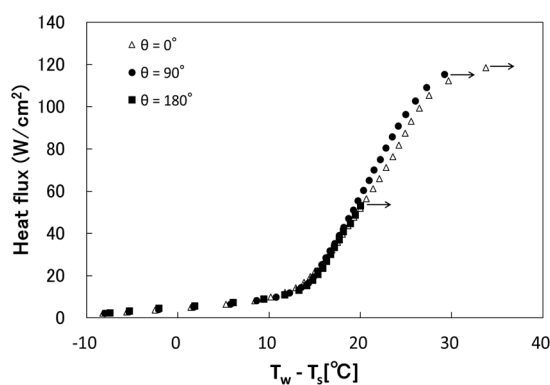


図 9 伝熱面の傾きの影響
($E = -5$ kV/mm, $T_0 = 40$, $\dot{m} = 1.9$ g/s,
 $W_s = 1000$ μm)

< 引用文献 >

- I. Kano, Pool Boiling Enhancement by Electrohydrodynamic Force and Diamond Coated Surfaces, ASME Journal of Heat Transfer, 137, 2015, pp. 091006(1-9).
- I. Kano, T. Sato, and N. Okamoto, Experimental Verification of Analytical Prediction of Pool Boiling

CHF Incorporating the Effects of EHD and Contact Angle, InterPACK2015 & ICNMM2015, San Francisco, InerPACKICNMM2015-48661, 2015, pp. 1-7.

S. G. Kandlikar, A theoretical Model to Predict Pool Boiling CHF Incorporating Effects of Contact Angle and Orientation, ASME Journal of Heat Transfer, 2001, 123, pp. 1071-1079.

I. Kano, Experimental Verification of a Prediction Model for Pool Boiling Enhanced by The Electrohydrodynamic Effect and Surface Wettability, ASME Journal of Heat Transfer, 139, 2017, pp. 084501(1-7).

S. W. Ahmad, T. G. Karayiannis, D. B. R. Kenning, A. Luke, Compound Effect of EHD and Surface Roughness in Pool Boiling and CHF with R-123, Applied Thermal Engineering, 31, 2011, pp. 1994-2003.

N. Zuber, On the Stability of Boiling Heat Transfer, Trans ASME, 80, 1958, pp. 711-720.

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

Ichiro Kano, Subcooled Flow Boiling under an Electric Field on Surface Enhanced by Diamond Particles Deposition, International Journal of Heat and Mass Transfer, 査読有, 134, 2019, 959-969.

Ichiro Kano, and Naoki Okamoto, Experimental Verification of a Prediction Model for Pool Boiling Enhancement by the Electrohydrodynamic Effect and Surface Wettability, ASME Journal of Heat Transfer, 査読有, Vol.139, 2017, 084501(1-7).

I. Kano and M. Yano, Heat Transfer Enhancement of Subcooled Flow Boiling in Micro-Slit-Channel by Electrostatic Pressure, The 28th International Symposium on Transport Phenomena, 査読有, Peradeniya, Sri Lanka, 2017.

I. Kano, N. Okamoto, and M. Yano, Experimental Investigation of Subcooled Flow Boiling in Micro-Slit-Channel Enhanced by EHD and Diamond Coated Boiling Surface, The 27th International Symposium on Transport Phenomena, 査読有, Honolulu, USA, 2016.

〔学会発表〕(計2件)

矢野政孝, 岡本直樹, 鹿野一郎, 静電圧力効果を利用したマイクロスリットチャネル内サブクール沸騰熱伝達促進に関する研究, 第54回日本伝熱シンポジウム, 大宮市, 2017.

岡本直樹, 矢野政孝, 鹿野一郎, サブクール沸騰熱伝達を利用したマイクロスリットチャネル冷却に関する研究, 第53回日本伝熱シンポジウム, 大阪市, 2016.

〔その他〕

ホームページ等

山形大学鹿野研究室

<https://kanolab.yz.yamagata-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鹿野 一郎 (KANO ICHIRO)

山形大学・学術研究院・准教授

研究者番号: 10282245