

令和元年6月9日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06121

研究課題名(和文) 沸騰伝熱促進面でのサブクール沸騰熱伝達と膜沸騰遷移における気液界面構造

研究課題名(英文) Heat transfer of subcooled flow boiling and gas-liquid interface structure at boiling transition on boiling heat transfer enhancement surface

研究代表者

浅野 等 (Asano, Hitoshi)

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：10260647

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：強制流動サブクール沸騰において、溶射被膜伝熱面によって沸騰伝熱促進と限界熱流束増大を両立できることが明らかにされた。膜沸騰遷移への気液界面構造の影響を明らかにするため、流れの中に挿入可能な静電容量センサを開発し、伝熱面近傍の局所ボイド率を計測した。その結果、サブクール度50K程度のサブクール沸騰において、低熱流束条件においても表面沸騰によって高い伝熱促進効果が得られること、バルク沸騰ではボイド率に及ぼす伝熱面の影響は小さいが、限界熱流束に遷移するボイド率は伝熱促進面の方が高くなることが明らかとされた。沸騰伝熱促進面の構築に対し、限界熱流束を向上させる流動制御について指針が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

データセンタやサーバーにおけるデータ処理量の増大、スーパーコンピュータに代表される電子機器の高性能化と安定動作に対応するためには、沸騰伝熱を利用した高性能冷却システムが必要不可欠であり、限界熱流束の向上が必須である。本研究では、高サブクール度の流れにおいて、限界熱流束増大と伝熱促進効果を両立できる伝熱面を製作した。

沸騰伝熱促進面での膜沸騰遷移における伝熱面近傍局所と流路断面平均ボイド率の情報は、バルクの液流制御による膜沸騰遷移の阻害、限界熱流束の増大につながれると期待できる。

研究成果の概要(英文)：Boiling heat transfer enhancement and increase in the critical heat flux could be achieved simultaneously by thermal spray coated surface for forced convective subcooled boiling flow. Boiling heat transfer enhancement factor could be kept over the heat flux range up to the CHF. To clarify the gas-liquid interface structure in the boiling transition, two types of capacitance sensors for average and local void fraction near the heating surface had been developed. Obtained results for subcooled boiling flows are summarized as follows. High heat transfer enhancement could be obtained by surface boiling under the low heat flux condition. The difference in void fraction between smooth and coated surface was a little for the developed nucleate boiling. The void fraction at the boiling transition was higher for the coating than the smooth surface. These results show a method of flow control to improve the critical heat flux for the development of boiling heat transfer enhanced surface.

研究分野：熱工学

キーワード：沸騰伝熱促進 気液二相流 サブクール沸騰 ボイド率 静電容量センサ 限界熱流束 膜沸騰遷移 溶射被膜

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

熱交換温度差が極めて小さく、高性能蒸発器、高密度・大容量熱負荷に対応可能な沸騰伝熱面の実現のためには、急加熱時の沸騰応答の促進、沸騰伝熱促進、そして膜沸騰遷移の現象解明が必要となる。沸騰伝熱促進のためには沸騰気泡核数密度の増大が有効であるが、伝熱面近傍での生成蒸気量の増大は局所ボイド率を増大させ、大気泡の形成や蒸気膜の形成によるドライアウトにつながる恐れがある。一方では、積極的に大気泡を形成させれば気泡底部の薄液膜蒸発や気泡攪拌効果で高い伝熱促進が得られるとも考えられる。

本研究では、狭隘流路試験部の伝熱面に溶射加工で製作した多孔質構造を適用し、その伝熱性能を評価してきた。その結果、強制流動沸騰熱伝達において、飽和沸騰域では平滑面の約 5~10 倍の伝熱促進効果が得られ、乾き度の広い範囲で核沸騰熱伝達が支配的であることが確認された。しかし、一方で溶射被膜伝熱面において特徴的な 2 つの現象が確認された。

a. 飽和沸騰域において乾き度が 0.7 以上になると伝熱促進効果が著しく低下する傾向が見られた。しかし、低下後も平滑面と同等もしくはそれ以上の熱伝達率が得られていた。熱伝達率の低下は部分的なドライアウトであるが、濡れている部分では核沸騰による高い熱伝達率が得られた結果であった。

b. サブクール沸騰では、入口サブクール度 30 K 以上では伝熱促進効果がある溶射皮膜のほうが、CHF が高くなった。膜沸騰遷移時の熱流動現象を分析すると、溶射被膜の場合、膜沸騰遷移の引き金となったのは伝熱面での蒸気膜形成であったが、初期形成時には伝熱促進効果によって壁温が低いため、蒸気膜は保持されず、崩壊、リウエットし、膜沸騰と核沸騰を繰り返す沸騰挙動が観察された。

これからの電子機器、電力機器のエネルギー消費密度の増大に対応するには高熱流束除熱と高熱伝達率の実現が不可欠であり、沸騰伝熱促進面における膜沸騰遷移時の気液界面構造の解明が求められていた。

2. 研究の目的

沸騰伝熱促進は沸騰核密度の増大で得られることは周知であるが、熱伝達率やバーンアウトは沸騰核密度のみならず、伝熱面近傍での気液界面構造、壁面濡れ性が強く影響するので、気液界面構造が沸騰熱伝達に及ぼす影響を明らかにすることは、伝熱面構造の最適化を目指すうえで極めて重要である。前述の通り、溶射伝熱面については、高い伝熱促進効果、CHF 増大効果が確認されてはいるが、伝熱が劣化する条件もあり、その特徴を活かした適切な利用方法が求められる。サブクール沸騰での膜沸騰遷移は加熱部の出口における熱力学的平衡乾き度が負の状態、すなわち、比エンタルピーが飽和液の比エンタルピーに達する前に発生する。流路断面における熱非平衡性が極めて強い流動である。伝熱面で形成された蒸気はサブクール水中で凝縮することから、一断面において蒸気生成、凝縮が同時に行われるのである。そこで、サブクール沸騰での膜沸騰遷移を対象とし、気液二相流動をモデル化する基本パラメータであるボイド率特性を明らかにすることを目的とする。特に、膜沸騰遷移では伝熱面近傍の局所ボイド率が重要と考えられることから、局所ボイド率計測を実現するための浸漬型静電容量センサを開発する。開発したセンサによる計測結果をもとに蒸気膜形成条件および膜沸騰遷移を明らかにする。

3. 研究の方法

実験装置概略を Fig. 1 に示す。作動流体として FC-72 を用いた。作動流体はギアポンプで循環され、プレヒータでサブクール度が調節された後、試験部に供給された。プレヒータ出口には混合部を設置し、試験部入口での混合平均温度を正確に計測した。入口サブクール度を 20 K 以上としたことから、DNB に至る熱流束を付加した場合も、熱力学的平衡乾き度は試験部出口において 0 以下であった。試験部からの流体は、コンデンサーとして設置した単流路プレート熱交換器で冷却され、タンクへと戻された。

試験部詳細を Fig. 2 に示す。試験部流路は、長さ 300 mm、幅 20 mm、高さ 4 mm の矩形水平流路であり、流路中央 50 mm の底面を伝熱面として銅ブロックに置換した。加熱はカートリッジヒータで行い、伝熱面上流端から流れ方向に 10、25、40 mm の位置で伝熱面から 2 および 7 mm の深さに挿入された熱電対で壁温を計測した。熱流束は 2 点の温度差から、伝熱面壁温は

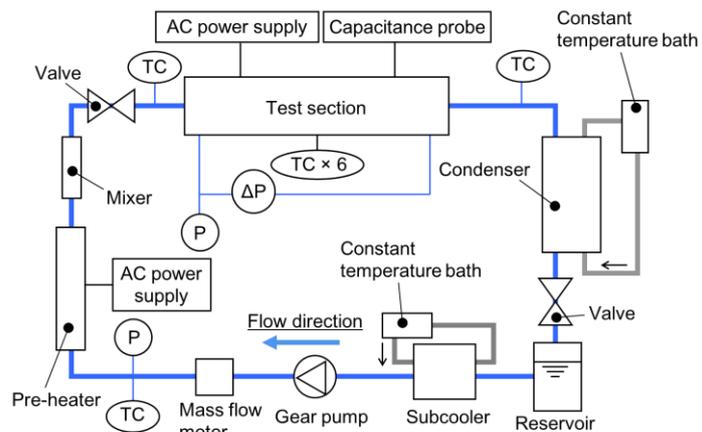


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

熱伝導補正によって求めた。伝熱面には平滑面（#400の紙やすりで処理）と溶射面（50 μ mの銅粒子を減圧プラズマ溶射で加工）[1]を用いた。ボイド率計測用静電容量プローブの配置をFig. 3に示す。静電容量プローブはセンサ電極の中心が最下流の壁温計測点になるよう設置した。伝熱面をアース電極とし、非接触型の場合（Fig. 3(a)）、流路と同じ幅の矩形センサ電極（流れ方向10mm）を透明アクリル樹脂製上面壁の外側から設置した。一方、浸漬型の場合、厚さ0.5mm、センサ面として流れ方向2mm \times 流路幅方向19mmのプレートを、センサ面と伝熱面の距離が2mmになる位置に固定した。浸漬型センサの場合（Fig. 3(b)）、ガード電極が同じ面にはないことから、計測領域はセンサに近いほど狭くなるが、事前の校正実験において、ボイド率分布が厚さ方向に一樣であれば、ボイド率に比例して静電容量が変化することを確認している。ボイド率 α は、液および蒸気単相の静電容量 C_L 、 C_G と二相流での計測値 C から次式で算出した。

$$\alpha = (C_L - C) / (C_L - C_G)$$

実験条件は、質量流量0.064 kg/s（質量流速800 kg/(m²·s)）、入口サブクール度 $\Delta T_{\text{subin}} = 20, 30, 40, 50$ K、入口圧力155 kPaとした。液単相流でのレイノルズ数は、液温にも依存するが、8180 \sim 11300の範囲であり、乱流である。実験ではヒータ加熱量をステップ状に増大させ、壁温が定常に至らず急上昇したところで膜沸騰遷移（DNB）に至ったとし、定常状態が得られた最大熱流束を限界熱流束（CHF）とした。熱伝達率は熱流束を増大させる過程で計測した。

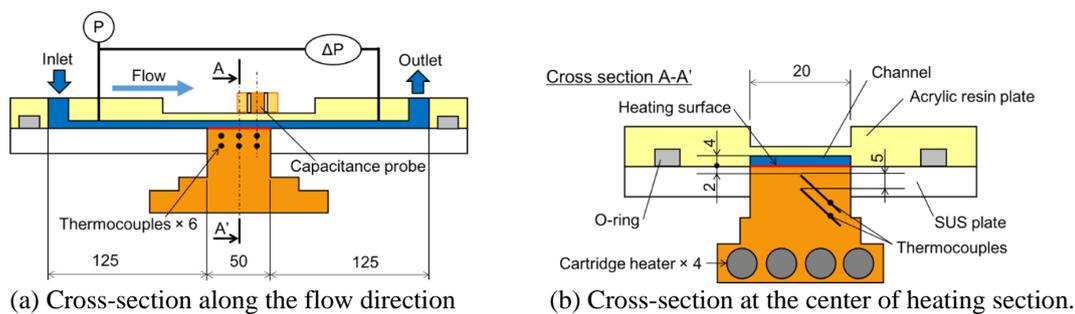


Fig. 2 Detail configuration of the test section.

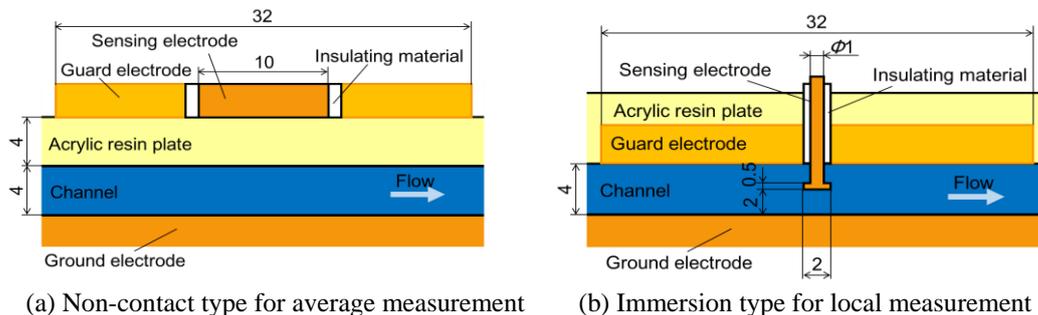


Fig. 3 Arrangement of capacitance sensor for void fraction measurement.

4. 研究成果

DNBに至る前の熱流束範囲において得られた各伝熱面に対する沸騰曲線をFig. 4に示す。溶射面（中塗り記号）では伝熱促進効果で壁面過熱度が大きく低減され、CHFの向上が確認された。いずれの伝熱面においても、ある値以上の高熱流束条件では、入口サブクール度の影響はなくなり、熱伝達率が熱流束のみに依存することがわかる。発達した核沸騰熱伝達と言える。伝熱面で生成された蒸気泡は、合体離脱し、主流を流動していると考えられる。入口サブクール度の影響が見られないことから、伝熱面近傍は過熱液相で覆われていると考えられる。また、核沸騰域における沸騰曲線の勾配は、溶射面においても平滑面と同じであった。図中、平滑面に対する実線は、高圧の水を対象として得られたThomの式（Thom, et al., *Boiling in sub-cooled water during flow up heated tubes or annuli*, *Proc. of Institution of Mechanical Engineers*, 180-3C, (1965-1966), pp. 226-246.）であり、今回の試験部圧力が反映されている。

$$\Delta T_w = 0.022q^{0.5} / e^{P[\text{MPa}]^{0.7}}$$

一方、発達した核沸騰以下の熱流束条件では、溶射面において入口サブクール度の影響が顕れた。これは、伝熱面上の過熱液相が薄くなり、伝熱面上の気泡がサブクール液によって速やかに凝縮する表面沸騰であると考えられる。平滑面では、沸騰核密度が低いいため、入口サブクール度の影響は見られず、壁面過熱度は核沸騰域の傾向より若干大きくなった。

2種類の静電容量プローブによるボイド率の計測結果を、入口サブクール度 $\Delta T_{\text{subin}} = 20, 50$ Kに対して、Fig. 5(a), (b)にそれぞれ示す。Fig. (i)は表面沸騰と考えられる低熱流束条件、Fig. (ii)は発達した核沸騰と考えられる高熱流束条件での値である。青系統が平滑面、赤系統が溶射面での結果であり、非接触型プローブで計測された流路断面平均ボイド率が濃い色の太線で、浸

漬型プローブによる伝熱面近傍の計測結果が薄い色の細線でプロットされている。これより、低熱流束と高熱流束では異なる傾向が確認できる。すなわち、低熱流束条件の場合 (Fig. (i)), いずれの入口サブクール度においても、ボイド率変動は伝熱面近傍の局所より平均値の方が大きくなっている。この熱流束条件では、沸騰様相は表面沸騰と考えられ、伝熱面で生成される気泡径は小さいため、局所ボイド率の変動が小さかったと考えられる。一方、平均ボイド率としては、表面沸騰ではあるものの、上流で生成された気泡が合体して比較的大きな気泡として下流のボイド率計測部を通過したためと考えられる。高熱流束条件では、ボイド率変動は局所の方が大きくなった。この条件では、沸騰様相は発達した核沸騰となっており、気泡合体で気泡径が大きくなり、連続的に流動しているため、流路平均としてのボイド率変動が小さくなったと考えられる。伝熱面近傍では、気泡が合体成長、離脱、を繰り返しているため、大きなボイド率変動が計測されたと考えられる。

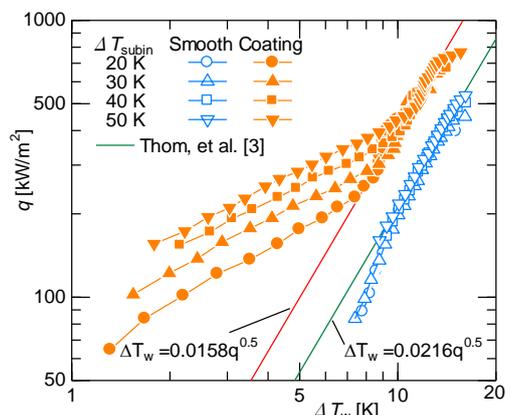


Fig. 4 Boiling curves for the smooth and thermal spray coated surface.

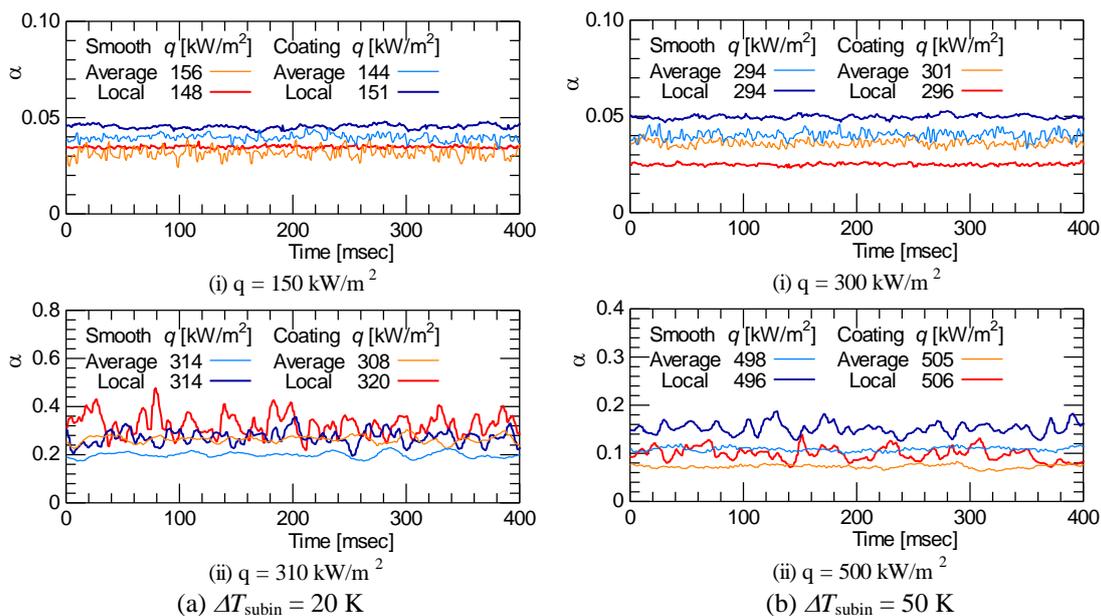


Fig. 5 Void fraction fluctuations.

時間平均ボイド率を熱流束に対してプロットし、Fig. 6 に示す。左図は全範囲のデータを、右図が低熱流束条件の拡大図である。伝熱面種類はプロットの色で表し、中抜き記号が流路平均、中塗り記号が局所値である。同じサブクール度での熱流束に対するボイド率の変化を見ると、低熱流束の範囲では、ボイド率は低く抑えられているが、ある熱流束を境に、ボイド率の上昇勾配は急激に大きくなった。この、ボイド率の勾配の変化が表面沸騰から発達した核沸騰への遷移と考えられる。それぞれの入口サブクール度の条件における熱流束の最大値が限界熱流束である。核沸騰領域では、溶射面の方が高い熱伝達率を示すものの、熱流束に対する時間平均ボイド率に大きな差異は見られなかった。限界熱流束は溶射面の方が高かったため、熱流束の増大とともにボイド率は上昇し続け、 $\Delta T_{subin} = 20 K$ の場合、約 0.58 に達している。局所の方がわずかに高いが、その差は小さい。膜沸騰遷移での時間平均ボイド率を見ると、 ΔT_{subin} の増大とともに低下するが、溶射面の方が高く、平滑面との差は ΔT_{subin} が大きいほど大きくなることわかる。

Fig. 6 の右側には表面沸騰と考えられる低熱流束範囲の拡大図が伝熱面別に示されている。低熱流束の範囲では、平滑面の場合、局所ボイド率は熱流束の増大に対して緩やかに上昇して

いるが、溶射面の場合、ボイド率の上昇が抑えられていることが明らかである。熱伝達率の差を考えると、この要因は気泡挙動にあると考えられる。そこで、Fig. 5 のボイド率波形に対し、分散値を評価した。

ボイド率波形から得られた分散値を Fig. 7 に示す。Fig. 6 同様、全実験範囲の結果が左図に、低熱流束範囲の拡大図が示されている。平均ボイド率と同様、低熱流束範囲と高熱流束範囲で異なる傾向がみられ、高熱流束範囲では熱流束の上昇に対して分散値が急激に増大していることがわかる。気泡合体で形成された大きな気泡が流動しているためである。限界熱流束付近では、溶射面の場合、分散値が低下する傾向が確認された。これは、一時的な膜沸騰遷移が発生しているためであり、熱伝達率 (Fig. 4) がこの範囲で低下していることにも合致する。一方、表面沸騰の条件でみると、平滑面では、熱流束の増大に対して分散が大きくなっているが、溶射面ではほぼ一定値が保たれ、ある熱流束に達すると上昇し始めることがわかる。この熱流束条件は、熱伝達率 (Fig. 4) が発達した核沸騰となる条件に合致しており、溶射面では、表面沸騰において伝熱面上で蒸気泡が形成され気泡合体することなく凝縮の様子が推察される。

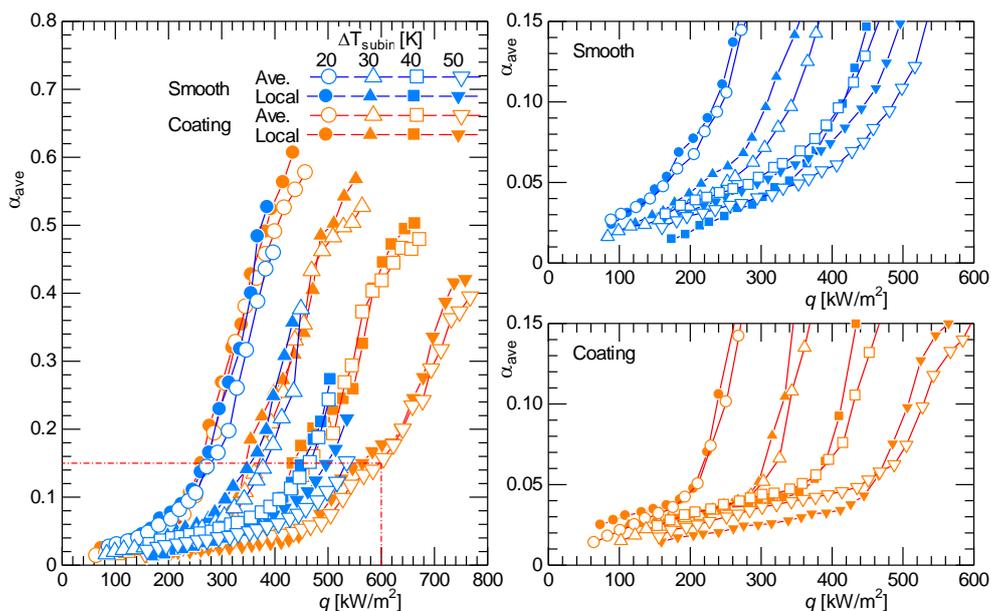


Fig. 6 Time-average void fraction plotted against heat flux.

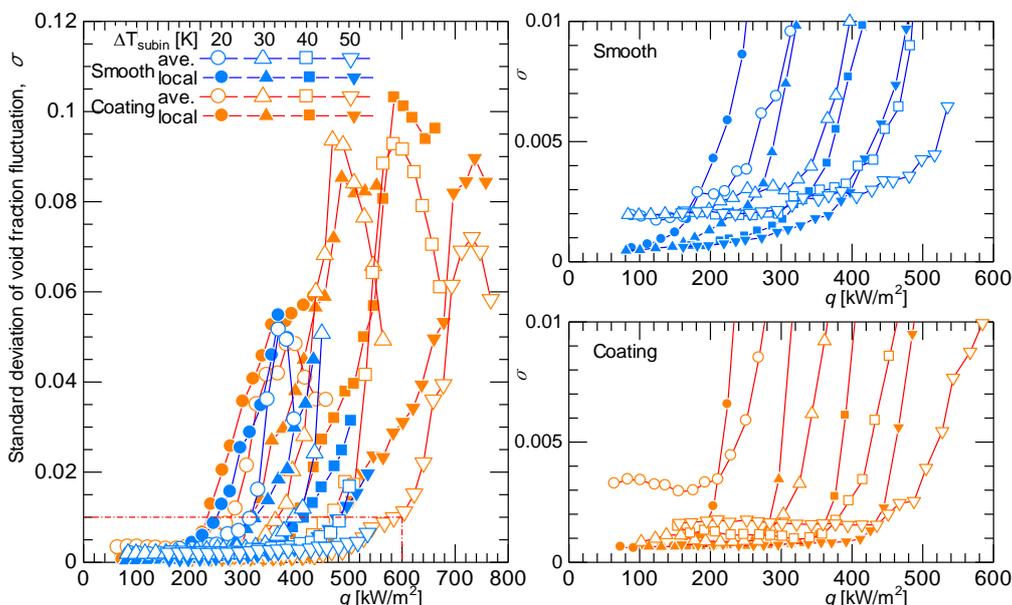


Fig. 7 Standard deviation of void fraction fluctuation plotted against heat flux.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Hitoshi Asano and Tomohiko Nakamura, "Effect of Surface Structure on Void Fraction of Subcooled Forced Boiling in Rectangular Narrow Channel", International Heat Transfer Conference 16, (2018), pp. 1349-1356, DOI : 10.1615/IHTC16.bae.023156. (査読有り)

〔学会発表〕（計 5 件）

- ① 田川智也, 杉本勝美, 村川英樹, 浅野等, "水平狭隘流路内サブクール沸騰熱伝達における溶射被膜の効果に関する研究", 2018 年度日本冷凍空調学会年次大会, (2018).
- ② Hitoshi Asano, Tomohiko Nakamura, "Effect of Surface Structure on Void Fraction of Subcooled Forced Boiling in Rectangular Narrow Channel", International Heat Transfer Conference 2018, (2018).
- ③ 田川智也, 浅野等, 杉本勝美, 村川英樹, "低沸点冷媒の膜沸騰遷移条件に関する研究", 関西学生会 2017 年度学生員卒業研究発表講演会, (2018).
- ④ 浅野等, 中村友彦, "水平狭隘流路内サブクール沸騰流のボイド率特性", 第 54 回日本伝熱シンポジウム, (2017).
- ⑤ 魏 霖, 浅野等, "強制対流沸騰熱伝達に及ぼす人工キャビティの影響に関する研究", 第 53 回日本伝熱シンポジウム, (2016).

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：村川 英樹

ローマ字氏名：Murakawa, Hideki

所属研究機関名：神戸大学

部局名：大学院工学研究科機械工学専攻

職名：准教授

研究者番号（8 桁）：4 0 4 6 7 6 6 8

研究分担者氏名：杉本 勝美

ローマ字氏名：Sugimoto, Katsumi

所属研究機関名：神戸大学

部局名：大学院工学研究科機械工学専攻

職名：助手

研究者番号（8 桁）：4 0 4 2 0 4 6 8

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。