

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月15日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560216

研究課題名（和文） 微細構造を有する沸騰伝熱促進面を利用した先進的熱交換技術に関する
基礎研究研究課題名（英文） Basic Study on Advanced Heat Transfer Equipment by Applying Boiling
Heat Transfer Enhancement Surface with Porous Structure

研究代表者

浅野 等（Asano Hitoshi）

神戸大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10260647

研究成果の概要（和文）：

狭隘流路型コールドプレート内強制対流沸騰を対象として、(1) 沸騰熱伝達特性、(2) 起動時の沸騰開始過熱度、(3) 限界熱流束に対する伝熱促進面の影響を実験的に明らかにした。飽和沸騰熱伝達では、核沸騰では最大11倍の伝熱促進効果が得られるが、強制対流蒸発では伝熱促進効果は低下した。起動急加熱時での沸騰開始過熱度は溶射皮膜によって最大15K低減できた。サブクール度40Kの条件では溶射皮膜の方が伝熱面で形成される蒸気泡の径が小さいため限界熱流束が高くなる結果を得た。

研究成果の概要（英文）：

Forced convective boiling heat transfer characteristics in narrow rectangular channels, such as saturated boiling heat transfer coefficient, wall superheat at the boiling inception on start-up, and critical heat flux in subcooled boiling flows, were experimentally examined. In the saturated boiling experiments, it had been clarified that boiling behaviors were dominated by nucleate boiling for vapor quality up to 0.6, and high heat transfer enhancement factor up to 11 could be obtained. However, for high quality condition, deterioration in heat transfer coefficient was observed for the coating, because the boiling mode was changed from nucleate boiling to liquid film vaporization. The wall superheat overshoot in a rapid heating assumed for the start-up, could be reduced 15 K by the coating. For subcooled boiling with the inlet subcooling of 40 K, the coating produced higher CHF than the smooth surface, because vapor bubbles on the coating were smaller than those on the smooth surface.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,200,000	660,000	2,880,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,700,000	1,110,000	4,830,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：熱交換器，沸騰伝熱，伝熱促進，沸騰開始過熱度，限界熱流束

1. 研究開始当初の背景

昨今の地球温暖化問題を背景に、更なる省エネルギー、エネルギー利用の高効率化が強く求められている。特に、エネルギー消費量の伸びが大きい民生部門（中でも一般家庭）を対象に、そのエネルギー消費の約6割を占める給湯、暖房、冷房の熱供給機器の高効率化が急務とされている。それに対し、ヒートポンプによる熱供給システムの開発が進められている。このシステムを集合住宅や機器設置スペースの限られた戸建て住宅に広く普及させるには、熱交換器のコンパクト化が必要であり、COPの向上や太陽熱・排熱回収のためには熱交換での流体間温度差の低減が有効である。その方策の一つとして、単位容積あたりの伝熱面積を増大が考えられ、コンパクト熱交換器が開発されているが、伝熱面積密度の増大は、流路の水力等価直径の縮小、さらには圧力損失の増大につながる。圧力変化の増大は飽和温度の変化につながり、結果的に熱交換温度差を増大させるため、多数の流量分配が不可避となる。そのため、二相流の流量分配の問題が性能劣化の要因として顕在化している。

一方、電子機器やハイブリッド自動車で用いられるインバータなどの電力機器では、発熱密度の増大が問題とされており、高い熱流束で大きな熱負荷に対応できる冷却デバイスが求められている。さらに、自動車の場合、排熱はラジエータで外気に捨てられるが、ラジエータを小さくするためもしくは電力機器の温度を低くするためには、沸騰冷却での温度差をできる限り小さくする必要がある。

これらの要求を満たすには、圧力損失の増大を抑え、沸騰熱伝達率を大幅に向上できる伝熱促進面とそれを用いたシステム設計が要求される。これまで溶射コーティングを施した伝熱面に対してプール沸騰実験や強制対流沸騰実験を行い、核沸騰熱伝達促進効果、初期沸騰の遅れに伴うヒステリシスについて研究を進めてきた。プール沸騰実験は、銅製円柱表面にプラズマ溶射で銅粒子を溶射した試験部に対して行われたが、熱流束の全実験範囲において一様な伝熱促進効果が得られた。特に、高熱流束域においてもキャビティ内のドライアウトによる伝熱促進の劣化は見られず、従来の機械加工や焼結金属による伝熱促進面とは異なる新しい特長を有することが確認された。次に、溶射伝熱促進面を利用した強制対流型コールドプレートを試作し、その性能を評価した（平成17,18年科学研究費補助金：課題番号17560187,「溶射コーティングによる壁面濡れ性の改善と沸騰伝熱促進に関する基礎研究」で実施した。）。その結果、10倍以上の熱伝達増大と沸騰開始過熱度の大幅な低減が実現された。

2. 研究の目的

溶射皮膜による沸騰伝熱促進面について、効果的な運転条件を明らかにするため、次の3つの課題に取り組む。

(1) 飽和沸騰熱伝達特性

沸騰熱伝達および限界熱流束に及ぼす熱流束、質量流束、乾き度、そして流路高さの影響を明らかにする。また、熱交換器への応用を想定し、コールドプレートの姿勢（重力に対する流動方向）の影響を詳細に分析する。

(2) サブクール沸騰における限界熱流束

高サブクール度の条件では、気泡微細化沸騰 (Micro-Bubble Emission Boiling) によって限界熱流束が増大すると期待されている。溶射皮膜面での気泡微細化沸騰の発生の可能性、そして限界熱流束に及ぼす伝熱面性状の影響を明らかにする。

(3) 沸騰開始過熱度

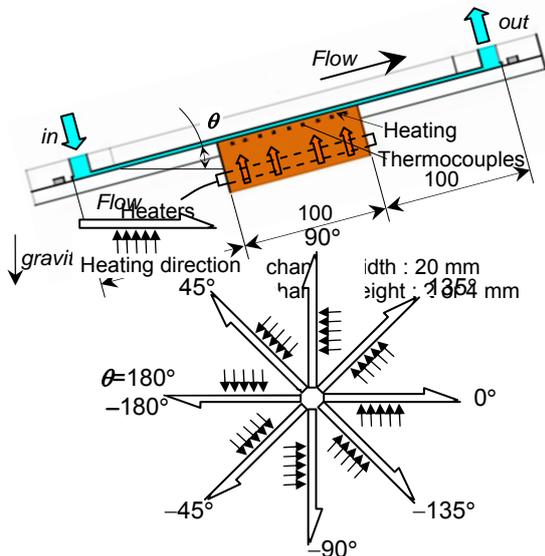
電力機器の冷却では、起動時の沸騰遅れに伴う壁温のオーバーシュートが問題とされている。壁温オーバーシュートへの伝熱面、熱流束の影響を明らかにする。さらに、圧力を能動的に操作した場合の、壁温オーバーシュートへの影響を評価する。

3. 研究の方法

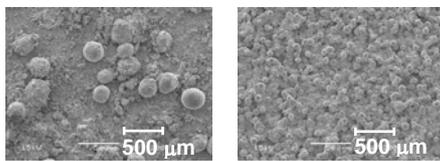
(1) 飽和沸騰熱伝達特性

試験部詳細を図1(a)、熱伝達計測を行った流路姿勢を図1(b)に示す。幅20mm、長さ300mmの狭隘流路がステンレス鋼板に加工され、その中央部長さ100mmの壁面片側を伝熱面とした。流路高さは2mm、4mmに設定した。流路姿勢は、水平流下面加熱を 0° とし 45° 刻みに計8通りとした。伝熱面には、粒径が異なる銅粒子を銅ブロック表面に減圧プラズマ溶射で吹きつけた2種類の溶射伝熱面（図2）を用い、平滑伝熱面とその性能を比較した。質量流量を0.008, 0.016 kg/sとした。質量流束は、流路高さ2mmで $G=200, 400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、流路高さ4mmで $G=100, 200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ となる。入口はほぼ飽和液とし、入口乾き度 $x_{\text{eq, in}}=0.04 \sim 0.05$ 、熱伝達率評価では熱流束 $q=25 \text{ kW}/\text{m}^2$ 一定とした。定常熱伝達率測定実験での姿勢の変更手順を示す。姿勢 0° で所定の流動、加熱条件で伝熱面壁温が定常に至ったところで壁温測定点（9点）の局所熱伝達率を測定し、そのまま次の姿勢に変えて繰り返し測定を行った。回転方向は上昇流となる反時計回りの方向、下降流となる時計回りの方向2通りとし、 $180^\circ / -180^\circ$ （水平流上面加熱）まで回転させた。この姿勢で一度伝熱面を冷却し、次は加熱後、 $180^\circ / -180^\circ$ から先ほどと逆方向に 0° まで戻す過程で熱伝達率を計測した。限界熱流束測定実験では姿勢、試験部入口乾き度、質量流束を設定し、沸騰していない状態から熱流束を $10 \text{ kW}/\text{m}^2$ ずつ増加させ限界熱流束を計測

した。なお、この実験では R123 を作動流体として使用した。



(b) 試験部姿勢と流動方向
図 1 飽和沸騰実験試験部



(a) 溶射 A (溶射材粒径: 200 μm)
(b) 溶射 B (溶射材粒径: 50 μm)
図 2 溶射伝熱面表面

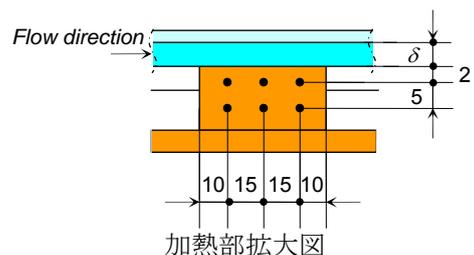
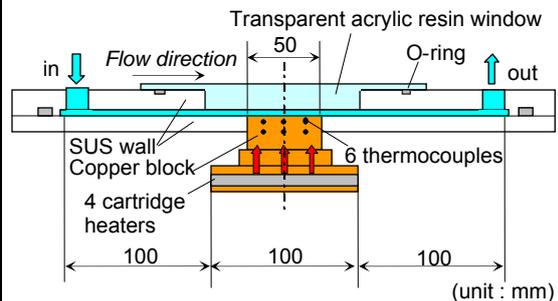
(2) サブクール沸騰における限界熱流束

試験部を図 3 に示す。流路形状は図 1 の試験部と同じであるが、加熱部長さを 50 mm とした。試験部は水平面に設置し、下面加熱とした。流路高さは、1.0、2.0、4.0 mm の 3 通りとした。作動流体は FC72 を使用した。溶射面は、実験(1)でより高い性能が得られた 50 μm の銅粒子を溶射した伝熱面を使用した。なお、この実験では FC72 を作動流体として使用した。

(3) 沸騰開始過熱度

起動時での沸騰開始過熱度を評価する場合、伝熱面の熱容量が小さい方が同じ加熱量に対して壁温の温度上昇勾配は大きく、オーバーシュートも大きくなると考えられる。そこで、伝熱面を円筒上にして流路内に挿入する形状とした(図 4)。透明アクリル樹脂製の円管(内径 30mm)に銅製円柱の加熱部が挿

入され垂直に設置されている。加熱部は外径 20mm、長さ 50.8mm とし、円柱中心に挿入されたカートリッジヒーターで加熱された。カートリッジヒーターの加熱部以外の壁面は薄く加工され、内部は空洞とし、加熱部以外への熱の漏れを抑えるようにしている。作動流体は流路幅 5 mm の環状流路を垂直上昇流として流動する。なお、助走域を設けるために加熱部と同一外径のステンレス鋼製の円柱が上流に挿入された。作動流体として FC72 を使用した。加熱部の流動方向中央には表面から深さ 2.0mm の位置に熱電対が挿入され、周方向 4 点で壁温が計測された。伝熱面壁温は計測温度から熱流束条件に対し熱伝導補正によって算出された。なお、この実験では FC72 を作動流体として使用した。



加熱部拡大図
図 3 サブクール沸騰試験部

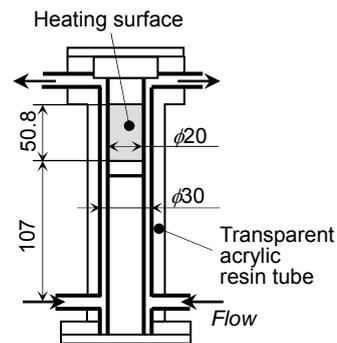


図 4 急加熱実験試験部

4. 研究成果

(1) 飽和沸騰熱伝達特性

熱力学平衡クオリティ x_{eq} と熱伝達率 α の関係を、熱流束 q をパラメータとして、平滑面、溶射面 B に対しそれぞれ図 5 (a), (b) に示す。図中、試験部での全計測値がプロッ

トされており、黒塗りの記号が最上流部での計測値である。 x_{eq} はエンタルピーと圧力から、 α は飽和温度と伝熱面表面温度（溶射面の場合、基部の温度）の温度差から求めた。比較的高い熱流束 $q > 100 \text{ kW/m}^2$ では α への x_{eq} の影響は小さく、 q の増大とともに α が増大する傾向が見られた。これより狭隘流路内のこの条件の伝熱は核沸騰伝熱支配であると言える。しかし、低熱流束 ($q < 100 \text{ kW/m}^2$) では、 x_{eq} の増大とともに α が増大しており、対流熱伝達の寄与が大きいことがわかる。一方、溶射面では同様の傾向であるが、約 8 倍の伝熱促進効果が得られた。しかし、 $q = 251 \text{ kW/m}^2$ において高乾き度で熱伝達率の大きな低下が見られた。流路の部分的もしくは間欠的なドライアウトとも考えられるが、低下後の値は平滑面のそれとほぼ同じであったことから、この低下は沸騰様相が核沸騰から液膜蒸発に遷移したためと推定している。

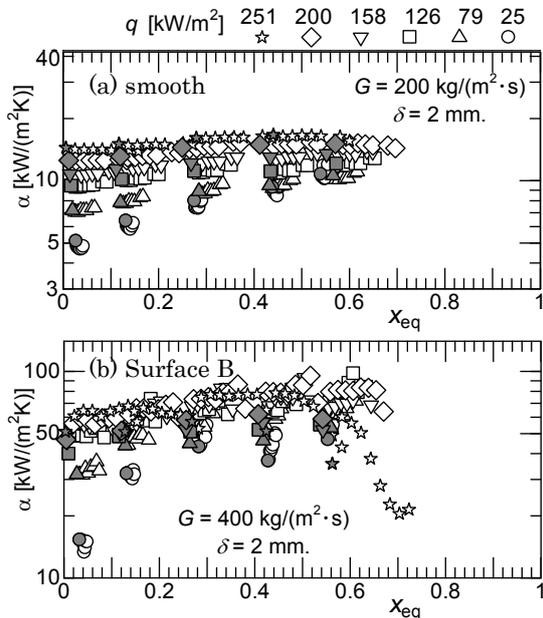


図 5 飽和沸騰熱伝達率

熱伝達率に対する流路姿勢の影響を図 6 に示す。溶射面では低質量流束条件において、熱伝達率は $\theta = 0^\circ$ （水平流下面加熱）で最小、 $\pm 180^\circ$ （水平流上面加熱）で最大となった。その差は 2 倍程度であり、姿勢の影響が顕著に見られた。これは、 $\pm 180^\circ$ では重力の影響で伝熱面付近の蒸気体積割合が高く、沸騰核密度が増大した為と考えられる。 $\pm 180^\circ \rightarrow 0^\circ$ の結果を見ると、姿勢が変化しても高い熱伝達率が維持された。このことから、一旦沸騰核が生成されると姿勢が変化しても、その沸騰核が維持されたと言える。一方、高質量流束では姿勢の影響は見られなかった。伝熱面での蒸気泡が速やかに除去されたためと考えられる。平滑面では質量流束によらず姿勢の影響は見られなかった。

限界熱流束の測定結果を流路姿勢に対して図 7 に示す。限界熱流束は流路高さによらず 0° （水平流下面加熱）で最大、 $\pm 180^\circ$ で最小となった。角度が正、すなわち上昇流の方が若干高い値を示した。また流路高さで比較すると、 0° では 4 mm の方が高くなるが、 $\pm 180^\circ$ ではほぼ同じか若干低くなる傾向が見られた。これは、 0° では流路が広いために蒸気泡が伝熱面から離脱しやすく、限界熱流束が向上し、一方で $\pm 180^\circ$ では流路が広いために低乾き度ではプラグ気泡とならず排除されにくいためと考えられる。なお、全実験条件において溶射面と平滑面の差異は見られなかった。

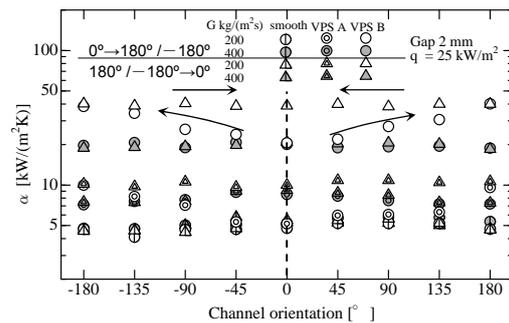


図 6 飽和沸騰熱伝達への流路姿勢の影響

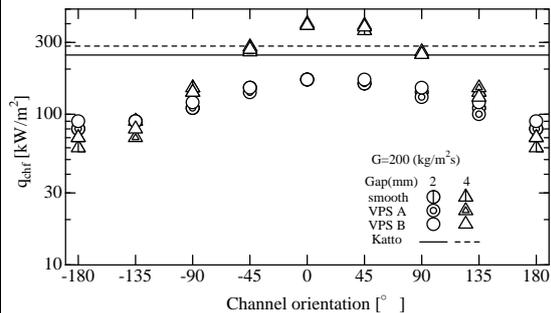


図 7 入口飽和液条件での限界熱流束への流路姿勢の影響

(2) サブクール沸騰における限界熱流束

入口サブクール液条件での限界熱流束 q_{CHF} の計測結果を入口サブクール度 ΔT_{subin} に対し図 8 に示す。 $\Delta T_{subin} = 10 \text{ K}$ では、伝熱面形状の影響は小さかったが、サブクール度が高くなるにつれて、溶射面の方が高い q_{CHF} を示した。流路高さの影響を見ると、いずれの伝熱面においても、流路高さ $\delta = 1.0 \text{ mm}$ の値が最も低く、高い ΔT_{subin} でその低下幅が大きくなっている。 $\delta = 2.0, 4.0 \text{ mm}$ では、その差は小さく ΔT_{subin} の増大とともにほぼ比例して q_{CHF} が増大した。

伝熱面全面で沸騰が得られた定常状態では、計測点 3 カ所において壁面過熱度と熱流束の関係に大きな差異は見られなかったが、 ΔT_{subin} が低い条件では、限界熱流束近くで条件で流れ方向に大きな熱流束分布を持つ傾

向が確認された。平滑面では、下流の熱流束が低く、壁面過熱度が高くなった。このとき下流ではドライアウトが発生し、熱伝達率が大きく低下したため、熱流束に大きな分布が生じたものと考えられる。すなわち、低 ΔT_{subin} では、下流でのドライアウトに起因するバーンアウトであると考えられる。一方、溶射面の場合、液膜蒸発となれば伝熱促進効果が劣化するため、高熱流束での下流部での熱伝達率の低下割合が平滑面より顕著であり、上流と下流の熱流束差は大きくなった。

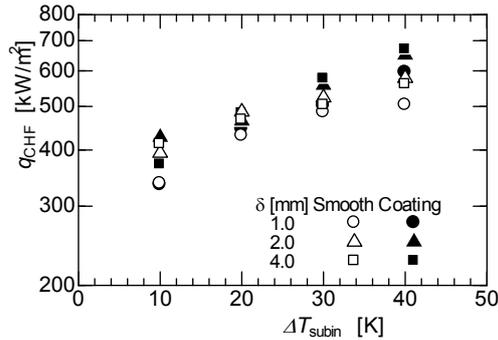


図8 サブクール沸騰での限界熱流束

一方、高サブクール度の条件では、下流で熱流束が低下し、壁温が高くなる現象は見られず、限界熱流束近くで試験部圧力が大きく変動する現象が確認された。平滑面での圧力変動の計測結果の一例を図9に示す。流動・加熱条件は固定しているが、ある地点で圧力振幅が大きくなったあとバーンアウトに至った。圧力が低下したときに蒸気生成量が大きくなり膜沸騰に至ったものである。圧力変動は大きな蒸気泡の形成と急凝縮に伴うものであるが、溶射面の場合、同じ条件では大きな圧力振動は見られなかった。溶射面の場合、発泡核の数密度が高く、形成される気泡径が小さいため、サブクール液中での凝縮が進行し、大気泡が形成されにくいと考えられる。図10にはバーンアウト時の圧力変化を示すが、溶射面の方が熱流束が高いため、圧力振幅が大きく、周波数は小さい。流路高さが低いほど圧力振動は小さくなっていることから、限界熱流束へ至る要因が下流部のドライアウトに移行しているものと考えられる。

(3) 沸騰開始過熱度

非加熱で沸騰がない液単相流動条件から一定の加熱量をステップ入力したときの壁温の時間変化の計測結果の一例を図11に示す。縦軸は飽和温度に対する壁面過熱度である。加熱と同時に壁温が上昇し、沸騰開始によって急低下し、その後定常に至った。この変化における壁温の極大点を沸騰開始過熱度 $\Delta T_{w,i}$ [K]、定常時の壁面過熱度を $\Delta T_{w,s}$ [K]

と定義した。

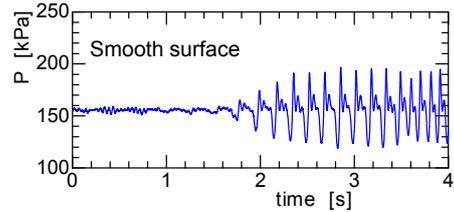
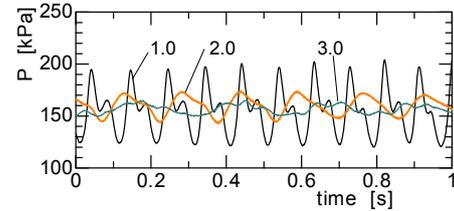
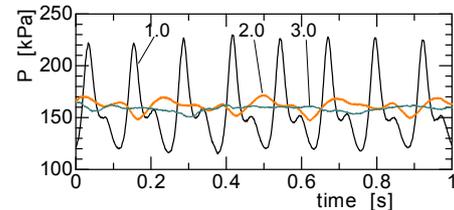


図9 バーンアウト直前に観測された試験部での圧力変動（平滑面の計測例）



限界熱流束 q_{CHF} [kW/m²]
504($\delta=1.0$ mm), 578(2.0 mm), 560(3.0 mm)
(a) 平滑面



限界熱流束 q_{CHF} [kW/m²]
595($\delta=1.0$ mm), 650(2.0 mm), 669(3.0 mm)
(b) 溶射面

図10 バーンアウト直前に観測された試験部での圧力変動

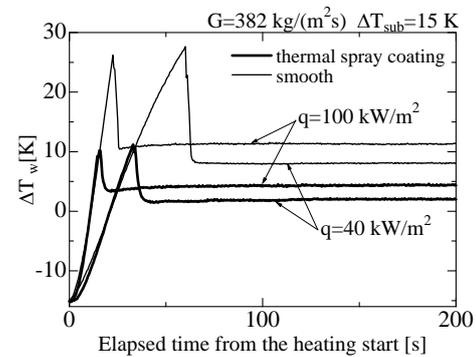


図11 急加熱時における壁温の経時変化

急加熱実験での壁面過熱度 $\Delta T_{w,i}$ 、 $\Delta T_{w,s}$ を沸騰曲線と同様に図12に示す。縦軸はヒーター加熱量を伝熱面積で除した熱流束 q [kW/m²]である。質量流束 $G=134$ kg/(m²s)では、溶射皮膜によって $\Delta T_{w,i}$ は11.1 K低下し、 $q>40$ kW/m²ではその効果はさらに大きく14.8~16.7 Kの低減が得られた。なお、いずれの表面においても、沸騰開始過熱度 $\Delta T_{w,i}$ は熱流束に関わらずほぼ一定であることが

分かる。

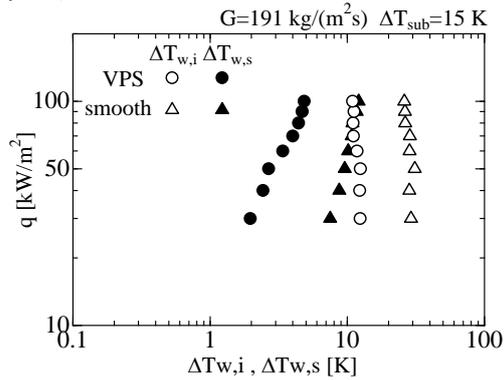


図 12 沸騰開始点と定常沸騰時の壁面過熱度

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

1. Hitoshi Asano, Ryohei Tomita, Ryota Shigehara, Nobuyuki Takenaka, Heat Transfer Enhancement in Evaporation by Thermal Spray Coating, Proc. of Int. Symp. on Next-generation Air Conditioning and Refrigeration Technology, 査読有, 2010, Paper No. GS-14
2. Hitoshi Asano, Ryohei Tomita, Masashi Inoue, Nobuyuki Takenaka, Boiling Heat Transfer Enhancement by Thermal Spray Coating in a Narrow Channel, Proc. of the Fifth Asian Conf. on Refrigeration and Air Conditioning (ACRA), 査読有, 2010, Paper No. A4-076.
3. Hitoshi Asano, Ryohei Tomita, Kei Kawasaki, Nobuyuki Takenaka, Effect of Surface Treatment by Thermal Spray Coating on Boiling Heat Transfer Performance, Proc. of the 23rd IIR Int. Congress of Refrigeration, 査読有, 2011, Paper No. 644.

[学会発表] (計 10 件)

1. H. Asano, R. Tomita, R. Shigehara, N. Takenaka, Heat Transfer Enhancement in Evaporation by Thermal Spray Coating, Int. Symp. on Next-generation Air Conditioning and Refrigeration Technology, 2010年2月18日, 東京.
2. H. Asano, R. Tomita, M. Inoue, N. Takenaka, Boiling Heat Transfer Enhancement by Thermal Spray Coating in a Narrow Channel, The Fifth Asian Conf. on Refrigeration and Air Conditioning (ACRA), 2010年6月8日, 東京.
3. 繁原領太, 浅野等, 大田治彦, 河南治, 藤井清澄, 微小重力下における伝熱促進面での沸騰熱伝達特性, 日本混相流学会年会講演会, 2010年7月19日, 浜松.

4. R. Shigehara, H. Asano, H. Ohta, O. Kawanami, K. Fujii, Boiling Heat Transfer Characteristics on Heat Transfer Enhancement Surface under Microgravity, Fifth International Topical Team Workshop on Two-phase Systems for Ground and Space Applications, 2010年9月27日, 京都.
5. H. Asano, Boiling Heat Transfer Enhancement by Thermal Spray Coating under Normal and Reduced Gravity, Fifth International Topical Team Workshop on Two-phase Systems for Ground and Space Applications, 2010年9月27日, 京都

6. K. Kawasaki, H. Asano, Boiling Heat Transfer Enhancement by Thermal Spray Coating, Int. Symp. on New Refrigerants and Environmental Technology, 2010年12月2-3日, 神戸.

7. 川崎敬, 浅野等, 富田亮平, 竹中信幸, 溶射皮膜による伝熱促進面を有する水平狭隘流路サブクール沸騰熱伝達特性に関する研究, 第48回日本伝熱シンポジウム, 2011年6月2日, 岡山市.

8. H. Asano, R. Tomita, K. Kawasaki, N. Takenaka, Effect of Surface Treatment by Thermal Spray Coating on Boiling Heat Transfer Performance, The 23rd IIR Int. Congress of Refrigeration, 2011年8月26日, チェコ共和国, プラハ.

9. 藤原慎之介, 繁原領太, 浅野等, 竹中信幸, 溶射皮膜による急加熱時壁面過熱度の低減, 第48回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋期大会, 2011年11月25日, 神戸市.

10. 浅野等, 川崎敬, 竹中信幸, 多孔質伝熱面を有する狭隘流路内限界熱流束, 第49回日本伝熱シンポジウム, 2012年6月1日, 富山市.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅野 等 (Asano Hitoshi)
神戸大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 10260647

(2) 研究分担者

竹中 信幸 (Takenaka Nobuyuki)
神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 50171658

杉本 勝美 (Sugimoto Katsumi)
神戸大学・大学院工学研究科・特命助教
研究者番号: 40420468