

# 狭隘流路内沸騰二相流における溶射皮膜による伝熱促進効果に関する研究

神戸大学 浅野等, 井ノ上雅志, 杉本勝美, 竹中信幸

## A Study on Heat Transfer Enhancement of Boiling Two-Phase Flow in a Narrow Channel by Thermal Spray Coating

Hitoshi Asano, Masashi Inoue, Katsumi Sugimoto and Nobuyuki Takenaka

Department of Mechanical Engineering, Kobe University, Rokkodai, Nada, Kobe 657-8501

E-Mail: asano@mech.kobe-u.ac.jp

**Abstract:** Boiling heat transfer enhancement is efficient for development of a cold plate used in a two-phase flow loop type thermal control system. This study deals with boiling heat transfer enhancement for a narrow channel by thermal spray coating. Copper particles were coated on the heating surface by vacuum plasma spraying. Two kinds of surface were manufactured using different particle size, about 200 and 50  $\mu\text{m}$ . The heat transfer performance was evaluated in saturated flow boiling experiments of HCFC123 for ranges of mass flux of 100 to 400  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , inlet quality of 0 to 0.60, and heat flux of 25 to 251  $\text{kW}/\text{m}^2$ . The test channel with the channel width of 20 mm, and heated length of 100 mm was placed horizontally and heated from the bottom by cartridge heaters through a copper block. The channel gap was set to 2 and 4 mm. As the result, the coating surface produced higher heat transfer coefficient than the smooth surface, especially, the heat transfer performance of the surface using finer particle was higher and was about 5 to 10 times higher than that of the smooth surface. While the effect of gaps on the heat transfer coefficient was a little, the critical heat flux increased with increasing the channel gap.

**Key words;** Boiling heat transfer, Narrow channel, Thermal spraying, Heat transfer enhancement

### 1. はじめに

宇宙構造物の排熱量の増大, 除熱部からラジエータパネルまでの熱輸送距離の長大化に対応するため, さらにはコールドプレートの温度分布を均一にするため, ポンプ駆動の液単相流体ループに代わり冷媒潜熱を利用した二相流体ループ式排熱システムが提案されている. 沸騰熱伝達による高熱流束除熱では, ① 伝熱促進による壁面過熱度の低減, ② 起動時の沸騰開始過熱度の低減, ③ 限界熱流束の向上が求められる. 著者らは, 前述の①, ②を目的とし, 溶射皮膜を施した伝熱面に性能評価に取り組んでいる. これまで, 円柱表面に溶射皮膜を形成した伝熱促進面に対してプール沸騰熱伝達を評価し [1], 平滑面に対し最大 6 倍程度の伝熱促進効果が得られること, 高熱流束条件でも伝熱促進効果は劣化しないことを示した. さらに, 微小重力 ( $10^{-2}\text{G}$ ) 環境下でも通常重力場と同等の高い伝熱促進効果が維持される結果を得た [2]. Fig.1 はプール沸騰実験での沸騰曲線であるが, 高熱流束条件でも一定の伝熱促進効果が維持されていることがわかる.

本研究では, コールドプレートへの応用を想定し, 同様の伝熱面を狭隘流路内に施し, 強制対流沸騰熱伝達を評価した. 本報では, 実験条件 (乾き度, 質量流束, 熱流束), 流路高さ, 皮膜面の性状の熱伝達性能に及ぼす影響を示すとともに, 限界熱流束の計測結果について示す.

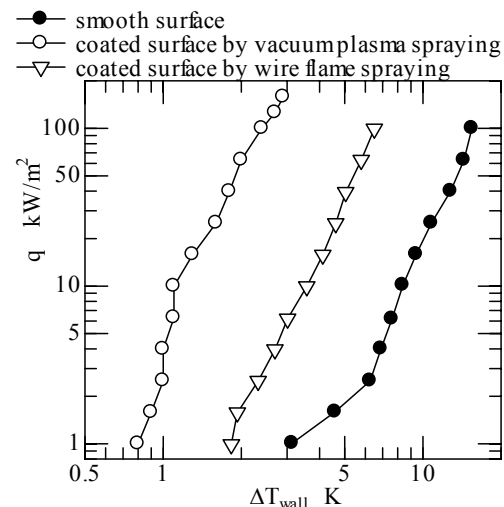


Fig.1 Boiling curve for spray coating.

### 2. 実験装置及び実験方法

実験装置概略を Fig.2 に示す. 作動流体には HCFC123 (沸点:  $27.8^{\circ}\text{C}$ , 気液密度比: 225.3) を使用した. リザーバー内の液冷媒は, ギアポンプでプレヒーターに導かれ, 乾き度が設定された後, 試験部に供給された. 試験部から排出された気液二相流は凝縮器で冷水との熱交換によって凝縮し, リザーバーへ戻された.

試験部の詳細を Fig.3 に示す. ステンレス鋼プレートで製作した流路幅 20 mm, 長さ 300 mm の狭隘流路が水平に設置されており, その中央部長さ 100

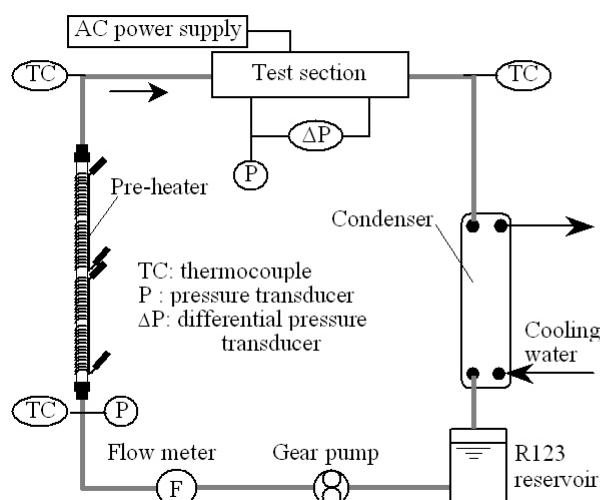


Fig.2 Schematic diagram of experimental apparatus.

mm の底部を加熱面とした。流路高さは上部カバーの流路切削深さで設定され  $\delta=2.0, 4.0$  mm の2通りとした。加熱面は銅ブロックとし、2本のカートリッジヒーターで加熱され、定常流動時の沸騰熱伝達特性が計測された。伝熱面には、銅製平滑面および銅粒子を減圧プラズマ溶射した溶射加工面を使用した。Fig.4 に電子顕微鏡による表面の観察結果を示す。減圧プラズマ溶射ではアルゴン雰囲気中で銅粒子がプラズマフレームで溶射される。複数回重ねて溶射することで伝熱面を製作した。粒径約 200  $\mu\text{m}$  および 50  $\mu\text{m}$  の2種類の銅粒子を使用し、それぞれ Fig.(a)および Fig.(b) の2つの溶射伝熱面を製作した。伝熱面表面下 3 mm の位置にはシース熱電対（シース径  $\phi 0.5$  mm）が流路中央の流れ方向等間隔(10 mm)に9箇所挿入されており、壁温が測定された。熱伝達率評価での試験部局所での流体温度は、試験部出入口圧力から線形補完で得た圧力に対する飽和温度として評価した。

質量流量  $W = 0.08, 0.12, 0.16$  kg/s ( $\delta=2.0$ mmの場合、質量流束  $G = 200, 300, 400$  kg/( $\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ),  $\delta=4.0$ mmではその半分) に対し、入口乾き度を  $x_{eq,in} = 0 \sim 0.6$ , 熱流束を  $q = 25 \sim 251$  kW/ $\text{m}^2$  の範囲で設定した。リザーバー圧力はほぼ大気圧とした。

## 2. 実験結果及び考察

溶射伝熱面 (surface A, surface B) に対する、質量流束一定時の、熱力学平衡クオリティ  $x_{eq}$  と熱伝達率  $\alpha$  の関係を、熱流束  $q$  をパラメータとして、Fig.5 (a), (b) に示す。それぞれ、 $G = 200, 300, 400$  kg/( $\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )での結果がFig.(i), (ii), (iii) に示されている。図には、加熱部壁温の各計測箇所での値が全てプロットされており、図中、黒塗りの記号が最上流部での計測値である。 $x_{eq}$ は計測地点でのエンタル

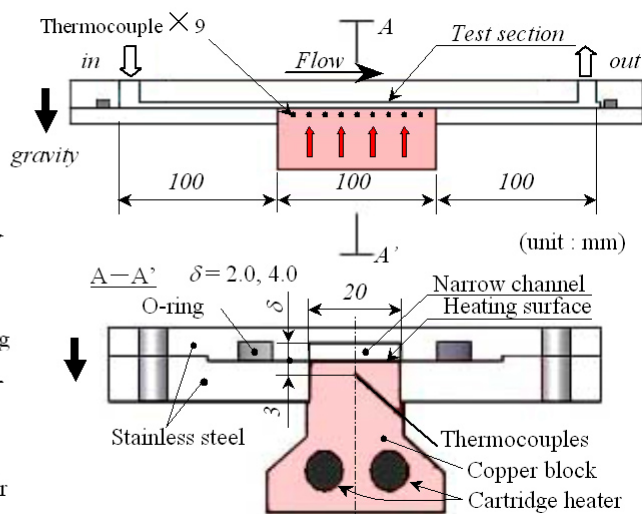
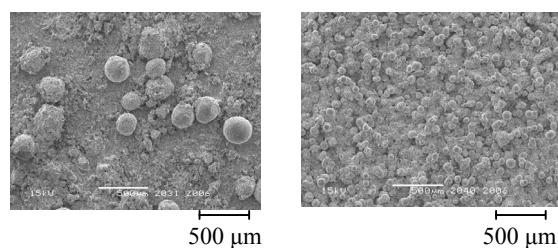


Fig. 3 Detail of test section.



(a) Surface A (b) Surface B  
Fig.4 SEM images of coating surface.

ピと圧力から算出し、飽和温度と壁温計測値から求めた伝熱面表面温度（溶射面の場合、基部の温度）の温度差から  $\alpha$  を算出した。実験は以下の手順による。①試験部をサブクール状態とし沸騰していない状態で質量流束を設定する。②プレヒータで試験部入口を飽和液に設定する。③試験部で所定の加熱量をステップ状に入力する。④定常でのデータを取得し、質量流束、熱流束を保ったまま、プレヒータで試験部入口乾き度を所定の値に設定する。⑤プレヒータの加熱能力の上限に達すれば、一度加熱を停止し①の過程に戻り、次の実験条件 ( $G, q$ ) を設定する。なお、平滑面の場合、 $G = 200$  kg/( $\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )では  $q = 200$  kW/ $\text{m}^2$  で、 $G = 300$  kg/( $\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )では  $q = 251$  kW/ $\text{m}^2$  で試験部全面の壁温が急上昇するバーンアウトが生じた。

いずれの質量流束  $G$  においても比較的高い熱流束  $q > 100$  kW/ $\text{m}^2$  では  $\alpha$  への  $x_{eq}$  の影響は小さく、 $q$  の増大とともに  $\alpha$  が増大する傾向が見られた。この傾向は平滑面でも確認されており、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 ( $q < 100$  kW/ $\text{m}^2$ ) の条件では、 $x_{eq}$  の増大とともに  $\alpha$  が増大しており、対流熱伝達の寄与が大きくなる。試験部計測位置の影響は  $q = 25$  kW/ $\text{m}^2$  の条件でわずかに見られたものの、

それ以上の熱流束条件では見られなかった. 図 (a), (b) 間で $\alpha$ を比較すると, 壁面の多孔構造が微細な surface B が surface A に対して約2~3倍向上していることがわかる. しかし, 図 (b)(ii)および(iii)を見ると $x_{eq} > 0.6$ の範囲で熱伝達率が大きく低下する様子が認められる. これは, ドライアウトによるものと考えられるが, ドライアウトが発生する熱流束条件は surface A のそれより低かった. Surface Bのほうが, 加熱面上での発泡点密度が高く, そのため高い熱伝達率が得られたが, 壁面近傍でのポイド率が高くなり, ドライアウトに至りやすくなったものと考えられる.

次に, 平滑面に対する計測データとの比較から伝熱促進比を算出した. 得られた結果を Fig.5 と同様に Fig.6(a), (c) に示す. Surface A では熱流束が高いほど, 伝熱促進比も高くなる傾向が確認できる. しかし, surface B では高い熱伝達率が得られる一方で, ドライアウトが起りやすく,  $q > 200$  kW/m<sup>2</sup>の熱流束で熱伝達率の大きな低下が見られた.

流路高さを 4mm とした場合には,  $W=0.16$  kg/s の高流量条件では, Fig.6(b),(iii) と Fig.7(b), (iii)間で沸騰熱伝達率に大きな差異はなかった. ポンプ動力の観点からみ

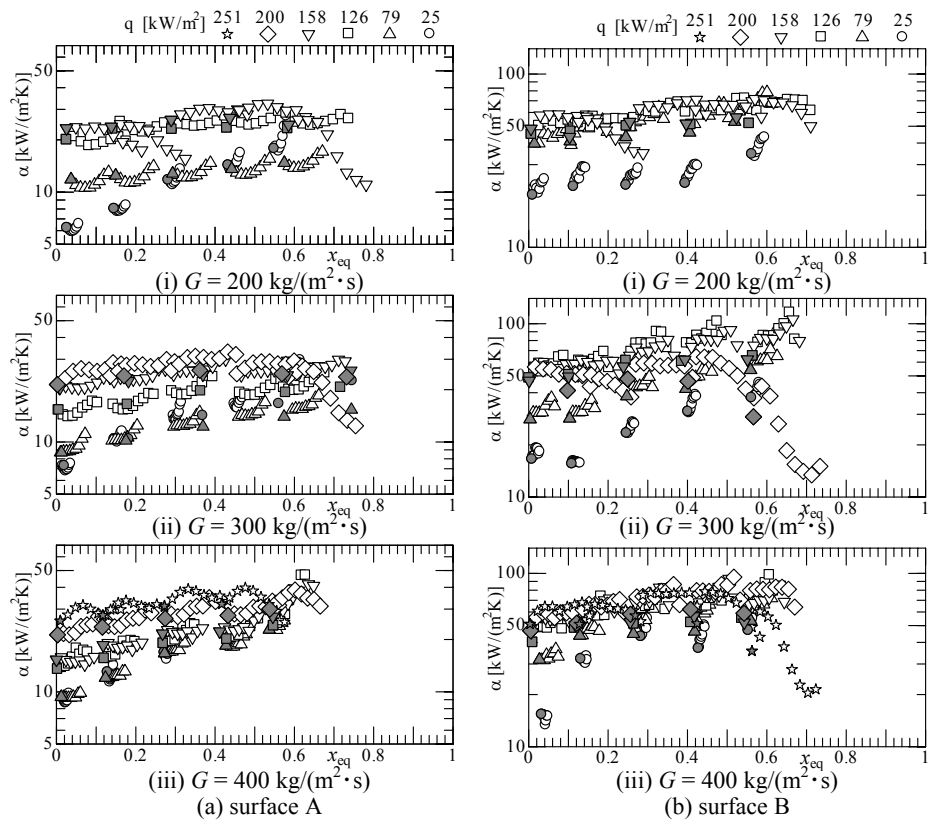


Fig.5 Effect of flow and heating condition on boiling heat transfer for thermal spray coating.

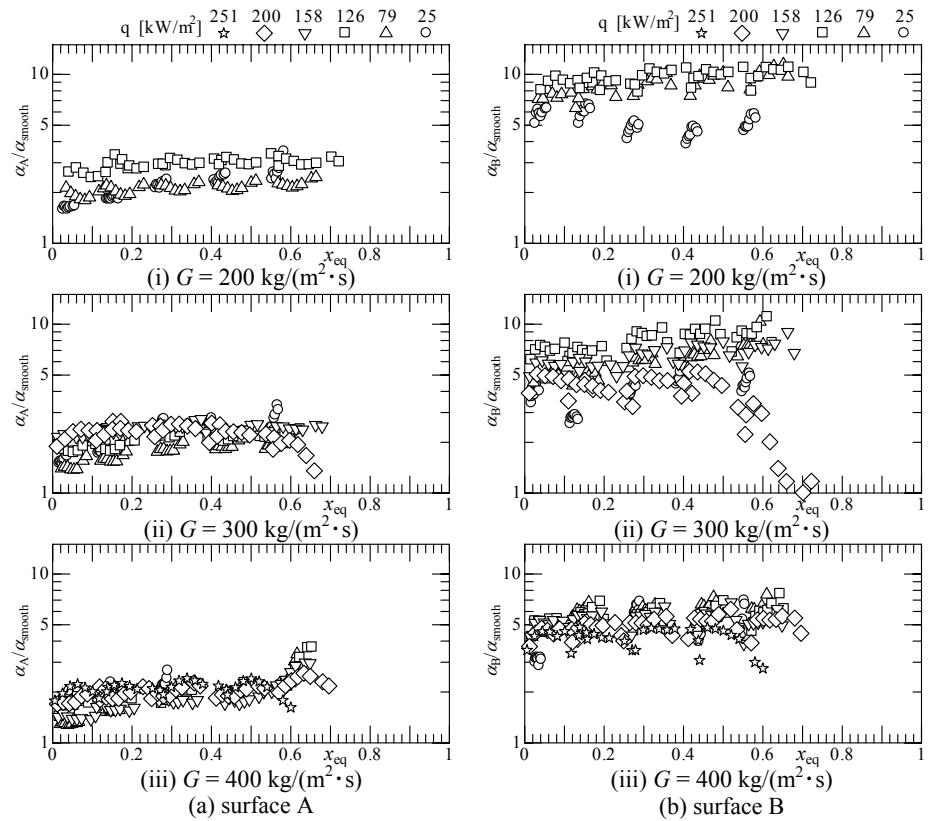


Fig.6 Heat transfer enhancement factor for the channel gap of 2.0 mm.

ると、流路断面積を大きくとり圧力損失を低減したほうが得策と言える。

飽和液非加熱の状態から段階的に熱流束を増大させ、バーンアウトにいたる限界熱流束を評価した。計測結果を甲藤の相関式[3]による計測結果とともに Fig.7 に示す。流路高さ 4 mm の場合には、計測結果は甲藤の式による計算結果と定性的・定量的によく一致している。しかし、流路高さが 2 mm になれば、限界熱流束の低下割合は甲藤の式による値より大きくなった。伝熱面性状の影響を見ると、いずれの流路高さにおいても、伝津促進面、さらには高い伝熱促進効果が得られた伝熱面ほど限界熱流束が高くなる傾向が確認された。特に、 $\delta = 2 \text{ mm}$  の時に顕著であり、Surface B の場合、平滑面に対し約 20% 向上していることがわかる。

#### 4. おわりに

狭隘流路に溶射加工を施した伝熱面に対し強制対流沸騰熱伝達実験を行い、定常時の熱伝達特性と限界熱流束を評価した。

- 狭隘流路では、伝熱面に問わず核沸騰伝熱が支配的であった。
- 伝熱面に問わず、沸騰熱伝達率に及ぼす流路高さの影響は小さかった。
- 平滑伝熱面に対し、溶射伝熱面は沸騰熱伝達率が向上し、粗い形状の Surface A では最大 3 倍、細かい形状の Surface B では最大 11 倍の伝熱促進効果が得られた。
- 高い伝熱促進効果が認められた Surface B では、高乾き度条件でドライアウトに移行しやすい傾向を示したが、バーンアウトに至る限界熱流束は最も高く、流路高さ 2mm の場合、平滑面の 20% 増大した。

**謝辞** 溶射皮膜はトーカロ（株）の協力を得て製作したものである。ここに記し、感謝する。また、

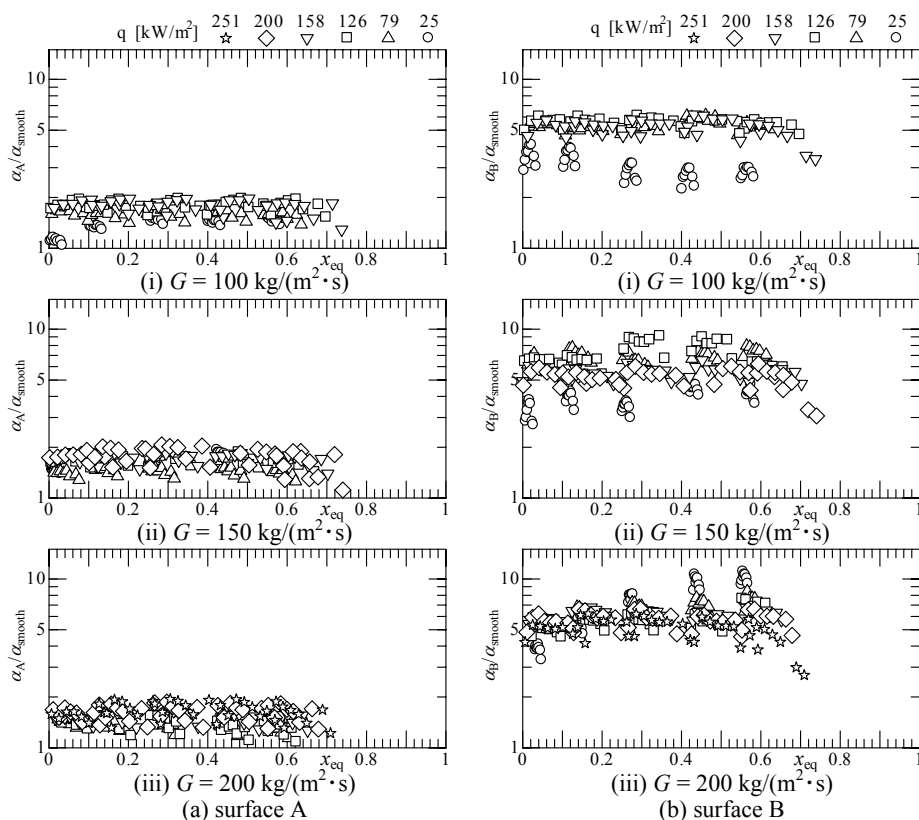


Fig.7 Heat transfer enhancement factor for the channel gap of 4.0 mm.

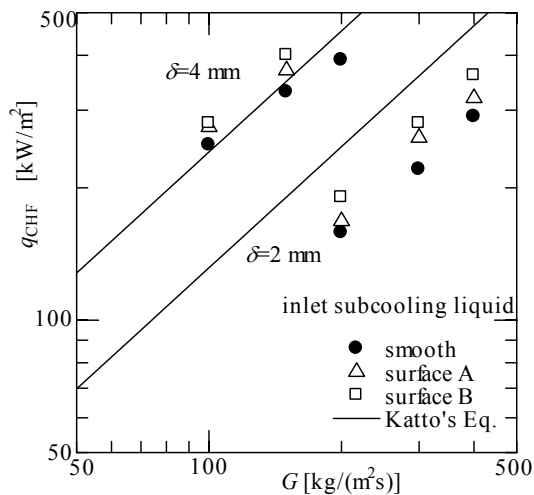


Fig.8 Critical heat flux.

本研究は、日本学術振興会・科学研究費補助金（課題番号：17860187）によって実施された。

#### 参考文献

- [1] H. Asano, K. Akita, T. Fujii, Proc. of the 1st Int. Forum on Heat Transfer, on CD-Rom, paper No.GS6-12 (2004).
- [2] H. Asano, K. Akita, M. Inoue, Microgravity Science and Technology, 19(3-4), pp.90-92 (2007).
- [3] 甲藤, 他 4 名, 編著, 伝熱学特論, 養賢堂 (1984).