

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：14501
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2012～2014
 課題番号：24560233
 研究課題名(和文) 微細構造を有する沸騰伝熱促進面による高熱負荷対応小温度差熱交換に関する基礎研究

 研究課題名(英文) Study on heat exchange with low temperature difference for high heat flux by boiling heat transfer enhancement surface with microstructure

 研究代表者
 浅野 等 (Asano, Hitoshi)

 神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

 研究者番号：10260647

 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：溶射被膜による沸騰伝熱促進面で観察された2つの特有な現象、飽和沸騰高乾き度での伝熱劣化、サブクール沸騰での限界熱流束向上、について実験的研究を行った。

前者は、最も高い伝熱促進が得られた伝熱面についてのみ確認された。静電容量法によるボイド率計測結果から、活発な核沸騰域においてもドライアウト域が発生することを明らかにした。そのため、劣化後の熱伝達率は平滑面より高かったのである。

後者では、核沸騰と膜沸騰の繰り返しによるボイド率変動と圧力変動が溶射面で顕著に発生すること、安定した膜沸騰に遷移する壁温への伝熱面構造の影響が小さいことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Thermal spray coating with porous structure had been applied for boiling heat transfer enhancement. In this study, two special phenomena that was observed only for the coating, a deterioration in heat transfer coefficient of forced convective boiling flow and an increase in CHF for subcooled flow boiling were examined.

On the 1st subject, it was considered based on liquid hold-up measurements by capacitance method that the deterioration was caused by large dry patches in the active nucleate boiling field.

On the 2nd subject, it was found that a large pressure fluctuation in synchronization with void fraction fluctuation was observed in DNB. The fluctuation was caused by periodic change in boiling behavior of nucleate and film boiling. During the pressure fluctuation, the wall temperature gradually increased, and then stable vapor film was formed. The effect of the surface structure on the wall temperature at the stable vapor film formation was a little.

研究分野：熱工学

キーワード：熱交換 沸騰熱伝達 強制対流 限界熱流束 ドライアウト 伝熱促進 膜沸騰 ボイド率

1. 研究開始当初の背景

電子機器や電力機器の冷却，さらには排熱利用など熱利用効率の向上のためには小温度差での熱交換技術が必要であり，沸騰伝熱促進が求められる．研究代表者らは溶射加工で製作した多孔質伝熱面で核沸騰領域において平滑面に対し約 10 倍の伝熱促進効果が得られることを狭隘流路内熱伝達実験で明らかにした．しかし，乾き度 0.6 から 0.7 において伝熱促進面のみ沸騰熱伝達率が大きく低下する現象が確認された．低下後の熱伝達率が平滑面と同等もしくはそれ以上であり，ドライアウトと断定できず，その要因究明が必要であった．

一方，サブクール沸騰では膜沸騰遷移 (DNB) が起こる熱流束 (限界熱流束 CHF) が伝熱促進面の方が高くなる結果を得た．沸騰熱伝達の向上は，伝熱面近くでの蒸気生成量の増大を意味するものであり，それならば伝熱促進面の方が膜沸騰に遷移しやすいはずであるが，逆の結果が得られていたのである．そこで，膜沸騰遷移時の流動機構を解明する必要があった．

2. 研究の目的

本研究は，小温度差熱交換を実現する沸騰伝熱促進面の開発を目的とするが，その利用範囲に影響する前述の二つの現象解明を研究対象とする．すなわち，(1) 高乾き度流れにおける伝熱促進面の伝熱劣化現象の要因解明，(2) サブクール沸騰における核沸騰から膜沸騰への遷移メカニズムの解明と沸騰伝熱促進をもたらす伝熱面性状の影響解明，である．

3. 研究の方法

水平面に配置された狭隘流路において下面を加熱面とした伝熱素子を実験対象とした．作動流体にはフロロカーボン FC-72 を使用した．研究対象である二つの現象は，いずれも沸騰二相流中の気液界面構造に強く依存する．これまでの研究では，狭隘流路上面を透明アクリル樹脂素材として流動観察を行ってきたが，流動挙動の観察だけでは流路高さ方向の気泡および液膜構造の把握に対して不十分であった．そこで，気液界面構造を評価するための重要なパラメータであるボイド率を静電容量法によって計測することとした．研究での課題は以下の通りである．

(1) 静電容量プローブによるボイド率計測の高度化

作動流体として利用した FC72 の誘電率はアクリル樹脂と同程度であり出力信号の S/N の向上と局所計測および流路平均計測用プローブの製作を課題とした．

(2) 飽和沸騰高乾き度域での伝熱劣化の要因解明

静電容量センサでボイド率を計測するとともに，同じ乾き度の条件での断熱二相流実験を行い，沸騰二相流の場合とのボイド率の比較から，液膜内における核沸騰の有無とその

影響を評価する．

(3) サブクール沸騰における核沸騰から膜沸騰への遷移メカニズムの解明と沸騰伝熱促進をもたらす伝熱面性状の影響解明

伝熱面積を小さくして熱流束を高くできる伝熱試験部によってサブクール沸騰実験を行い，沸騰曲線および限界熱流束に及ぼす伝熱面形状の影響を評価するとともに，沸騰伝熱促進が得られる伝熱面での膜沸騰への遷移 (DNB) メカニズムを明らかにする．

4. 研究成果

(1) 静電容量プローブによるボイド率計測の高度化

センサ電極の幅を流路幅 (20 mm) と等しくした，流路全体の平均ボイド率計測用センサおよび流路中央局所を計測可能な小型センサを製作した．シールド電極の配置の工夫によって S/N を向上させるとともに，超高感度静電容量変換器を導入し，ボイド率計測法を確立した．

(2) 飽和沸騰高乾き度域での伝熱劣化の要因解明

強制対流沸騰試験部を図 1 に示す．流路は幅 20 mm，高さ 4 mm，長さ 300 mm であり，その中央 100 mm の底面を伝熱面とした．伝熱面には平滑面に加えて，粒子径の異なる銅粒子で溶射した 2 種類の伝熱面 (VPS-A, VPS-B) を使用した．静電容量センサーは電極面を $\phi 10$ mm とし，電極面中央が流路中心かつ最下流の壁温計測点に一致するように設置した．質量流束は $150 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ とし，熱流束を $76 \sim 157 \text{ kW}/\text{m}^2$ の範囲で設定した．なお，ボイド率計測部での乾き度が沸騰実験と一致するようにした断熱流においてもボイド率を計測し，沸騰流との差異を比較考察した．

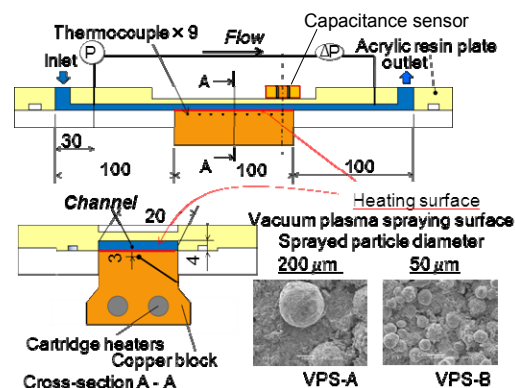


図 1 強制対流沸騰試験部

熱伝達率 α を熱平衡乾き度 x_{eq} に対して図 2 に示す．粒子径が粗い溶射面 A では平滑面の約 2 倍，細かい溶射面 B では約 4 倍の熱伝達率の向上が得られた．しかし，溶射面 B では高熱流束，高乾き度条件において，伝熱劣化が確認された．低下後の熱伝達率は平滑面より高い値であった．

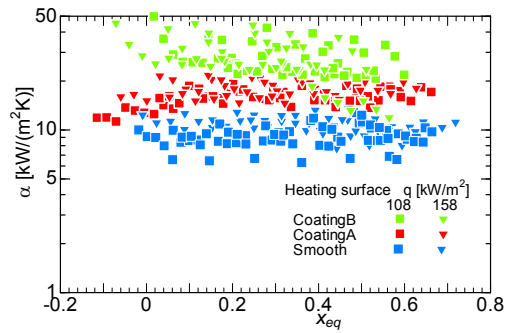
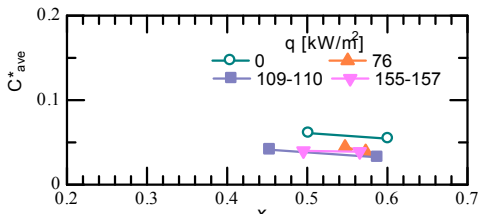
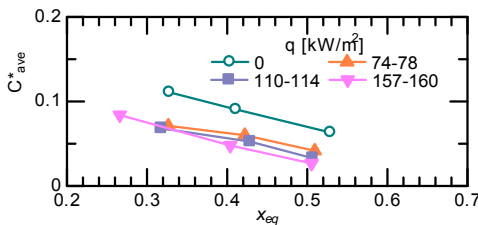


図2 飽和沸騰熱伝達率



(a) 平滑面



(b) 溶射面 B (Type-B)

図3 時間平均液ホールドアップ

液ホールドアップの時間平均値 C^*_{ave} を図3に示す。 $q = 0$ は試験部入口で所定の乾き度に設定した断熱流の計測結果である。沸騰流では、乾き度に関わらず断熱流より低い値を示した。これは、液膜内での沸騰核生成で気液間のせん断力が増加し、液相が加速または蒸気流への液相のエントレインメントが大きくなったためと考えられる。乾き度の増大に伴い液ホールドアップは低下するが、溶射面では熱流束の増大に伴い低下する傾向が見られる。溶射面の場合、沸騰核密度が大きく、気液間のせん断力がより大きくなるため、それによってエントレインメントの増大もしくは液が流路両側に押しつけられるようになり、流路中央で薄くなったためと考えられる。この傾向は、平滑面では見られず伝熱促進面、特に高い熱伝達を得られた VPS-B で顕著であった。

熱伝達率の低下が見られた条件における、 C^* の計測結果を図4に示す。乾き度が高いほど C^* は小さくなった。また、熱伝達率が低下した条件では C^* がほぼ0となることが多いことがわかる。この条件での、流動挙動観察結果を図5に示す。核沸騰が支配的な伝熱面上において、比較的大きなドライパッチが観察された。これが、伝熱劣化の要因と考えられる。通常、強制対流沸騰は核沸騰から、液

膜が薄くなることで強制対流蒸発となりドライアウトに至るが、溶射被膜の場合、沸騰核を形成する壁面加熱度が小さいため、液膜が薄い状態であっても核沸騰が維持され、そのためにドライアウトに至りやすくなったためである。

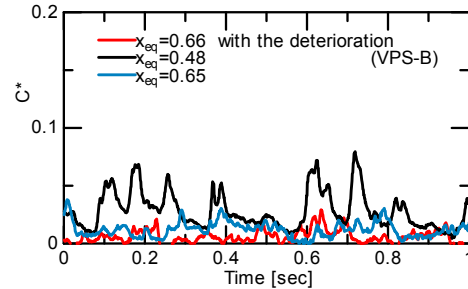


図4 液ホールドアップの時間変化

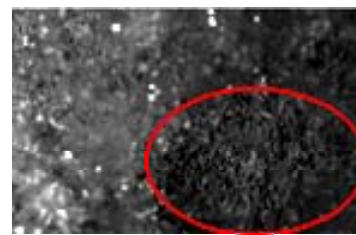


図5 伝熱面で観察された局所ドライアウト

(3) サブクール沸騰における核沸騰から膜沸騰への遷移メカニズムの解明と沸騰伝熱促進をもたらす伝熱面性状の影響解明

サブクール沸騰流の試験部を図6に示す。サブクール沸騰では限界熱流束が飽和沸騰に対して大きくなると予想されるため、試験部では加熱部長さを短くし、高熱流束に対応できるようにした。局所熱流束を計測するため、各計測点では深さ方向に2点、熱電対を挿入した。

実験条件は、質量流束 $800 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、入口サブクール度 $\Delta T_{sub} = 20, 30, 40, 50 \text{ K}$ 、入口圧力 155 kPa とした。

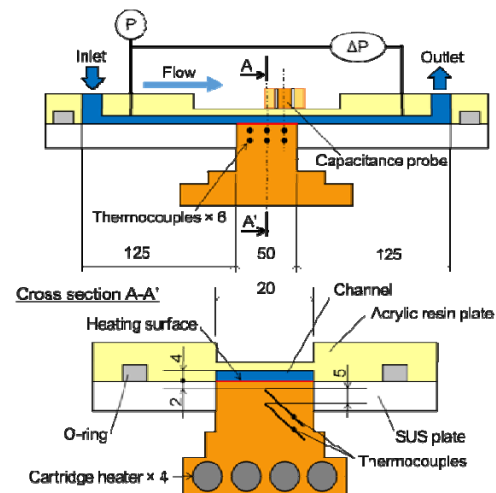


図6 サブクール沸騰(高熱流束対応) 試験部

サブクール沸騰では液单相流中での蒸気泡生成が重要であることから、蒸気体積割合であるボイド率 α で評価した。液ホールドアップ C^* との関係は、 $\alpha = 1 - C^*$ となる。

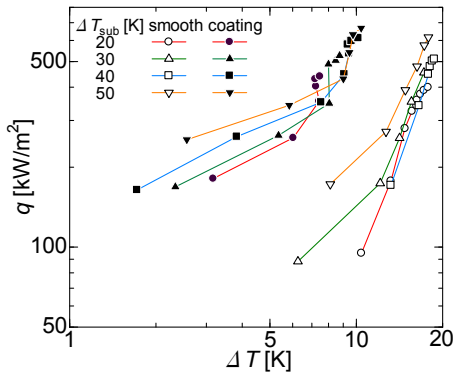
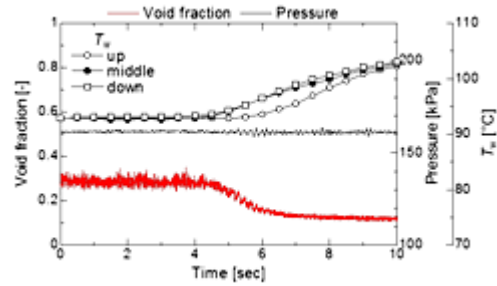


図7 サブクール沸騰での沸騰曲線

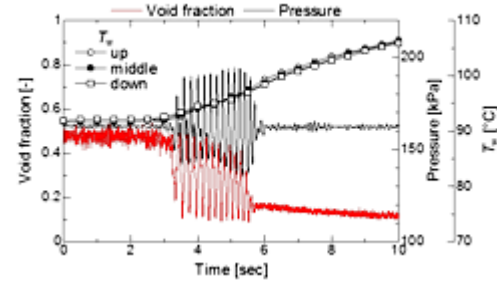
DNB に至る前の熱流束範囲において得られた各伝熱面での沸騰曲線を図7に示す。溶射面（中塗り記号）では伝熱促進効果で壁面過熱度が大きく低減された。さらに、CHFの向上も確認された。溶射面の方が、沸騰核数密度が大きく、生成される気泡径が小さいため界面積濃度が高くなり、サブクール液での凝縮が強く、大気泡が形成されにくいこと、また、溶射面での多孔質構造が液を保持しやすいことが CHF 向上の要因として考えられる。

DNB 時の過渡変化における試験部圧力、壁温、ボイド率の測定結果の一例を図8(a)-(c)に示す。平滑面でサブクール度が大きい場合(40 K, 図(a))には、核沸騰状態から緩やかにボイド率が低下し、同時に壁温は上昇を始め、ボイド率は低い値で一定となった。壁温は更に上昇を続けており、膜沸騰へ遷移したと考えられる。このとき、壁温は中、下流部から上昇し始めており、それに遅れて上流部が上昇し始めたことから、伝熱面下流部でまず蒸気膜が形成され、その後蒸気膜が上流へ拡大していき、膜沸騰に至ったと考えられる。このような形態は平滑面の高サブクール条件($\Delta T_{sub} = 40, 50$ K)でのみ確認された。一方、低サブクール条件(20 K, 図(b))では、膜沸騰へ遷移する過渡変化において、大きなボイド率振動が確認された。この変動は圧力変動と同期しており、ボイド率変動が圧力変動をもたらしていることがわかった。振動の周期は少しずつ短くなり、約1秒後に膜沸騰に至った。振動がある間、壁温は上昇しており、熱伝達率が低下していることがわかる。この区間でのボイド率変動に着目すると、極大値、極小値はそれぞれ核沸騰および膜沸騰での値に近いことがわかる。また、高速度カメラによる上面からの流動観察から、ボイド率が低いときには伝熱面上に気泡が確認されなかったこと、核沸騰より伝熱が劣化していることから、この振動は、蒸気膜の形成とその崩壊

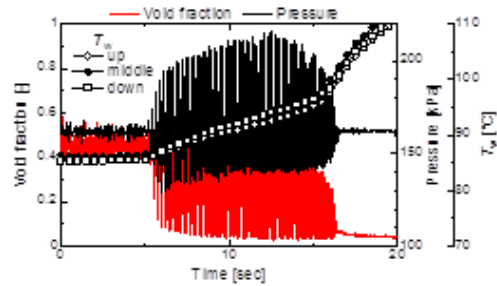
による核沸騰状態の繰り返しであると考えられる。



(a) 平滑面, $\Delta T_{sub} = 40$ K, 熱流束 510 kW/m²



(b) 平滑面, $\Delta T_{sub} = 20$ K, 熱流束 399 kW/m²



(c) 溶射面, $\Delta T_{sub} = 40$ K, 熱流束 612 kW/m²

図8 DNB 現象での過渡変化

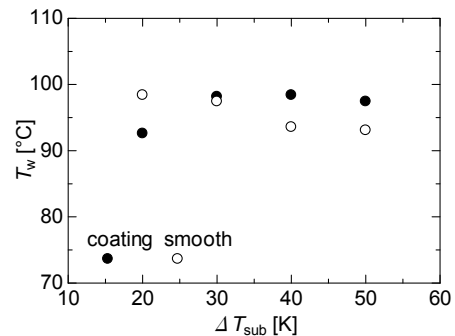


図9 膜沸騰安定時の壁温

沸騰遷移での振動が核沸騰と膜沸騰の繰り返しであるとする、振動の開始は蒸気膜が初めて形成された点であり、振動の終了は蒸気膜が安定維持された点と考えられる。その時の壁温をそれぞれ、蒸気膜形成温度 $T_{w,fi}$ 、蒸気膜安定化温度 $T_{w,fs}$ とする。蒸気膜形成温度 $T_{w,fi}$ は核沸騰伝熱促進によって溶射面の方が平滑面より低く抑えられるのに対し、蒸気膜安定化温度 $T_{w,fs}$ は図9に示すように、伝熱面の影響が小さかった。蒸気膜の形成は伝

熱面近傍の蒸気の挙動に依存し、その蒸気膜が安定するか否かは表面構造ではなく、壁面過熱度が重要であるといえる。

沸騰伝熱促進面として溶射被膜は沸騰熱伝達率の向上において有効であるが、沸騰伝熱促進の効果が発揮されることで、熱除去の極限状態において従来平滑面で観察されない現象があることが明らかとされた。飽和沸騰ではこう乾き度においてドライアウトが発生しやすくなる知見を得た。これは、運用条件の配慮が必要であることを示唆している。一方、サブクール沸騰では、溶射面での DNB における過渡変化が平滑面とは異なることが明らかとされた。溶射面の場合、蒸気膜が形成される沸騰条件では、蒸気膜が暗影保持される壁温に達していないことが示された。すなわち、流れの制御によってさらなる限界熱流束の増大が見込まれる結果を得た。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① H. Asano, J. Yoshidome, T. Gomyo, “Effect of heat transfer surface structure on boiling heat transfer and flow characteristics in a horizontal narrow channel”, Proceedings of 15th International Heat Transfer Conference, 査読有, 1, (2014), IHTC15-9840.
DOI: 10.1615/IHTC15.fbl.009840
- ② 五明泰作, 浅野等, 大田治彦, 新本康久, 河南治, 栗本卓, 駒崎雅人, 松本聡, “一成分系気液二相垂直上昇流のボイド率特性および流動様式”, 混相流, 査読有, 27(5), (2014), pp.547-554,
<http://doi.org/10.3811/jjmf.27.547>
- ③ J. Yoshidome, T. Gomyo, H. Asano, “Boiling flow structure in a horizontal narrow channel with a thermal spray coating”, Proceedings of the 24th International Symposium on Transport Phenomena, 査読有, (2013).
- ④ H. Asano, K. Kawasaki, N. Takenaka, “Effect of heat transfer surface structure on critical heat flux”, Multiphase Science and Technology, 査読有, 24(3), (2012), pp.181-196.
DOI: 10.1615/MultScienTechn.v24.i3.10

[学会発表] (計 10 件)

- ① H. Asano, J. Yoshidome, T. Nakamura, T. Gomyo, “Wall temperature and void fraction characteristics in boiling transition”, 7th European-Japanese Two-Phase Flow Group Meeting, 2015.10.12-15, ツェルマツト (スイス)
- ② T. Nakamura, J. Yoshidome, H. Asano, “Effect of surface structure on DNB of subcooled flow boiling in a narrow channel”, 10th International Symposium on Two-Phase

Systems for Ground and Space Applications, 2015.9.14-17, 同志社大学 (京都府)

- ③ 中村友彦, 吉留隼平, 浅野等, “狭隘流路内サブクール沸騰流の熱伝達特性 – 溶射被膜による伝熱促進とボイド率特性 –”, 混相流シンポジウム, 2015.8.4-6, 高知工科大学 (高知県)
- ④ 中村友彦, 吉留隼平, 浅野等, “狭隘流路内サブクール沸騰流の DNB でのボイド率変動と伝熱面構造の影響”, 第 51 回日本伝熱シンポジウム, 2015.6.3, 福岡国際会議場 (福岡県)
- ⑤ H. Asano, “Pressure and void fraction fluctuations during DNB in subcooled flow boiling”, International Workshop on Phase Change and Wetting Phenomena, 2015.6.2, JR 博多シティ (福岡県)
- ⑥ 吉留隼平, 五明泰作, 浅野等, “溶射被膜を有する狭隘流路内沸騰二相流の液ホールドアップ特性”, 混相流シンポジウム, 札幌, (2014)
- ⑦ 五明泰作, 浅野等, “一成分二相流のボイド率特性に及ぼす管径の影響”, 混相流シンポジウム, 2014.8.28, 道民活動センター「かかえる 2・7」(北海道)
- ⑧ T. Gomyo, H. Asano, O. Kawanami, K. Suzuki, R. Imai, T. Kurimoto, S. Matsumoto, Y. Shinmoto, T. Hirokawa, H. Ohta, “Void fraction characteristics and flow patterns of one component gas-liquid two-phase flow”, 9th International Symposium on Two-Phase Systems for Ground and Space Applications, 2014.9.25, ボルチモア (米国)
- ⑨ 五明泰作, 浅野等, 河南治, 新本康久, 大田治彦, 藤井清澄, “静電容量法による細管内一成分気液二相流のボイド率計測”, 混相流シンポジウム, 2013.8.8, 信州大学 (長野県)
- ⑩ T. Gomyo, J. Yoshidome, H. Asano, “Liquid hold-up characteristics of saturated boiling flow in a narrow channel with thermal spray coating”, 8th International Symposium on Two-Phase Systems for Ground and Space Applications, 2013.9.19, ブレーメン (ドイツ)

[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

杉本勝美 (SUGIMOTO, Katsumi)
神戸大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号： 4 0 4 2 0 4 6 8

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： 5 0 1 7 1 6 5 8