

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760156

研究課題名(和文) プール沸騰限界熱流束を向上する微細溝加工を施した伝熱面の開発

研究課題名(英文) Development of the heat transfer surface with mini-grooves to enhance the critical heat flux in nucleate boiling

研究代表者

宮田 一司 (Miyata, Kazushi)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：00610172

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：高い限界熱流束を有する核沸騰伝熱面開発のため、熱伝導率の高い材料と低い材料を効果的に組み合わせ、周期的に配置した伝熱面を製作し、その効果を実験により実証した。実験に用いた熱伝導率の異なる材料の組み合わせは、銅とステンレスまたは銅とエポキシ樹脂である。

開発した伝熱面は、銅製の平滑面と比較して、高い限界熱流束を示した。また、銅平滑面に対する限界熱流束の向上率は、おなじく平滑面に対する伝熱面表面積の拡大率よりも大きいことが分かった。すなわち、開発した伝熱面は、強制対流沸騰冷却に適用した場合、限界熱流束を向上すると同時に、圧力損失を低く抑えることが可能であることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：For the development of a nucleate boiling heat transfer surface which enhances critical heat flux compared with a normal flat surface, the heat transfer surfaces composed of a high and a low thermal conductivity materials were produced and examined in this study. The two combinations of a high and a low thermal conductivity materials tested in this study were copper and SUS, and copper and epoxy putty.

The developed surfaces achieved higher critical heat fluxes than that of a copper flat surface. Furthermore, the developed surfaces enhance the critical heat flux at higher rate than the enlargement ratio of the heat transfer area. Therefore, a good heat transfer and a relatively low pressure drop is expected by adopting the developed surfaces to cooling devices which use forced convective boiling.

研究分野：伝熱工学

キーワード：核沸騰 限界熱流束 伝熱促進 液体窒素

1. 研究開始当初の背景

核沸騰現象を用いた冷却は、高い熱伝達率を実現する方法として、従来から広く用いられている。例えば、電力を有効利用できる超伝導体や急速に発熱密度が増大している電子素子の冷却に有効である。核沸騰冷却における技術的課題は、主に、伝熱促進と限界熱流束向上の2点である。限界熱流束とは、熱伝達の良好な核沸騰を維持できる最大の伝熱面熱流束である。伝熱面熱流束が限界熱流束を超えると、沸騰形態は核沸騰から膜沸騰に移行し、熱伝達は急激に悪化する。このように、限界熱流束は沸騰冷却性能を決定する主要な因子である。これまでも、限界熱流束向上に関する研究が行われている。その多くは、伝熱面表面に周期的な微細凹凸を形成する、あるいは多孔質層を設けるなど、主に表面張力を利用して限界熱流束を向上させている。これらの伝熱面は、高い限界熱流束を達成する一方、限界熱流束の向上効果以上に伝熱面の表面積の拡大率が大きく、強制流動沸騰冷却系に適用する場合には流動抵抗が大きくなるといった問題もあった。したがって、表面積の拡大率に比して高い限界熱流束向上率を達成できる核沸騰熱伝達機構を有する伝熱面の開発が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、伝熱面表面積の拡大率に比して高い限界熱流束向上率を実現する伝熱面（以下では、促進伝熱面と記す）を製作し、その効果を実験によって実証することを目的とした。製作する促進伝熱面の概要と限界熱流束向上メカニズムは、以下の通りである。

促進伝熱面は、熱伝導率の大きく異なる材料を効果的に組み合わせた伝熱面である。熱伝導率の高い材料には銅を用い、熱伝導率の低い材料には SUS あるいはエポキシ樹脂を用いた。低熱伝導率材に SUS を用いる伝熱面の詳細は、SUS 製の三角形格子を銅平滑面上に置いた凹凸を有するくぼみ付き面であり、エポキシ樹脂を低熱伝導率材に用いた伝熱面の詳細は、銅平滑面に三角形格子状の溝を掘り、その溝をエポキシ樹脂で埋めた平滑面である。熱伝導率が小さい SUS やエポキシ樹脂は、伝熱面の基礎材である銅からの熱が伝わりにくい。したがって、核沸騰が活発になる高い熱流束下でも、SUS やエポキシ樹脂の表面は、流体の飽和温度に近い比較的低い温度に維持され、その表面では核沸騰はほとんど生じないため液相との接触を維持できる。すなわち、核沸騰は主に銅表面上で生じ、液相は、SUS あるいはエポキシ樹脂の表面を伝って銅面上に供給されることで、伝熱面全体としては高い熱流束まで核沸騰が維持される。

なお、研究課題名として「溝加工を施した伝熱面」という表現を用いたが、本報告書では、伝熱面形状をより正確に表現するために「くぼみ付き面」と表現している。

3. 研究の方法

本研究では、開発した促進伝熱面の核沸騰限界熱流束向上効果を実験によって実証した。以下に、実験装置、実験に用いた伝熱面、実験方法について示す。

本研究に用いた実験装置の概略を図1に示す。試験流体は大気圧下の液体窒素で、試験容器は二重のガラス製デュワーで構成される。二重ガラスデュワーの内槽に試験伝熱面を含む試験体 (Heat transfer unit) を設置して液体窒素で浸漬させ、外槽には、おなじく液体窒素を充填し、内槽への熱侵入を低減している。また、ガラスデュワーには、ふく射による熱侵入を軽減するために、銀蒸着が施されている。ただし、沸騰様相の観察するため、一部は銀蒸着を施しておらず、試験伝熱面を直接見ることが可能である。

伝熱試験部の概略を図2に示す。伝熱面は、無酸素銅製で、直径 25 mm の円形、平均表面粗さは約 1 μm である。加熱は、伝熱面と一体の銅ブロック部に貼りつけた4枚のセラミックヒータで行った。また、伝熱面中央の直下に、白金温度センサーを挿入している。その他、内槽内の窒素蒸気の圧力、伝熱面と同じ高さの液体窒素温度および伝熱面までの液位を測定した。

今回実験を行った促進伝熱面は、銅製平滑面上に銅より熱伝導率の低い SUS 製の格子を置いたくぼみ付き伝熱面3種および銅製平滑面上に格子状の溝を掘りエポキシ樹脂で埋めた平滑伝熱面1種である。この他、伝熱

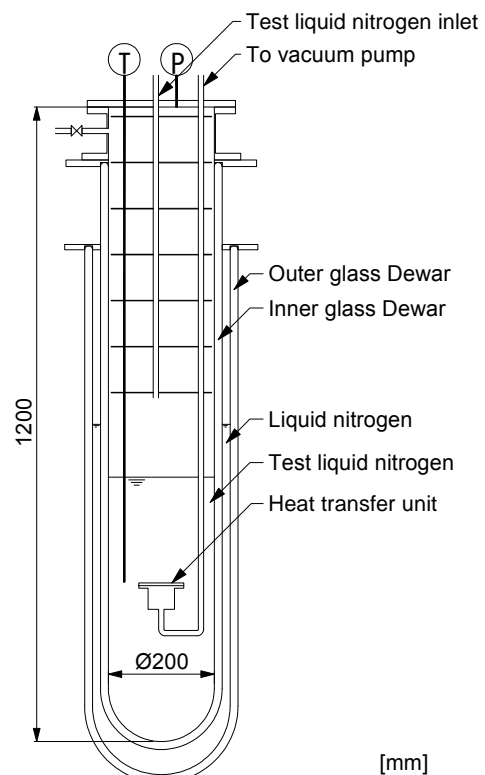


図1 実験装置

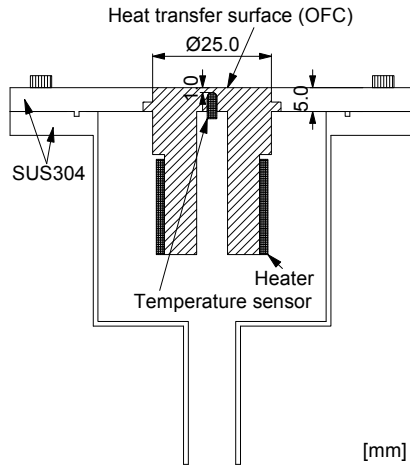
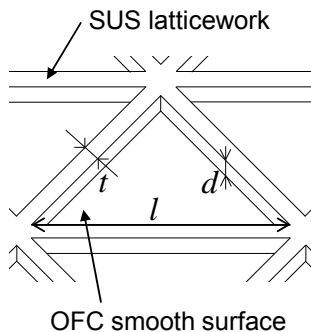
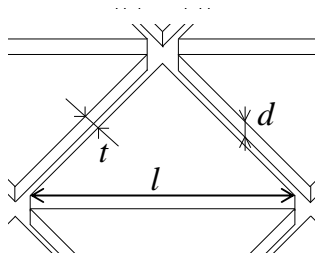


図2 伝熱試験部

促進効果検討の基準となる銅製平滑面についても実験を行った。実験に用いた5種の伝熱面をA-Eとし、その概要、仕様および写真を図3、表1および図4にそれぞれ示す。伝熱面A,BおよびCはSUS格子を用いた伝熱面,Dはエポキシ樹脂を用いた伝熱面,Eは、銅平滑面である。図3の d, t, l はSUS格子のサイズあるいはエポキシ樹脂を埋めた溝のサイズを表し、表1にその数値を記している。表1中の A_p は、伝熱面の投影面積で、直径25 mmの円の面積である。



・SUS製三角形格子(銅平滑面上においてくぼみ付き面とする)(Type A, B および C)



・銅面上に加工した三角格子状の溝(エポキシ樹脂で埋めて平滑面とする)(Type D)

図3 試験伝熱面A-Dの概要

表1 試験伝熱面の仕様

	A	B	C	D	E
A_p mm ²	490				
d mm	0.05	0.05	0.01	0.5	-
t mm	0.2	0.2	0.03	0.5	-
l mm	2.5	1.0	0.3	2.3	-
A mm ²	545	593	569	490	490

伝熱面から試験流体に伝わる平均熱流束 q は、ヒーターに加えた電力から、伝熱試験部内部の熱伝導によって試験伝熱面以外の試験体表面から流体に伝わる熱量を概算して差し引いて、見積もった。また、壁面過熱度 ΔT は、

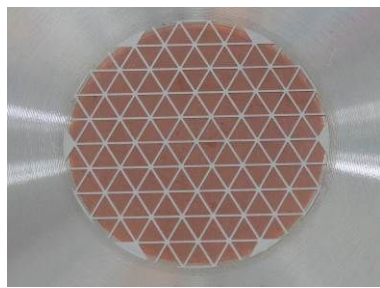
$$\Delta T = T_w - T_{\text{sat}} \quad (1)$$

で定義した。 T_w は伝熱面温度で、伝熱面直下の温度センサーの測定値から算出した。温度センサーは、伝熱面の約3 mm下の温度を測定しているため、フーリエの法則から伝熱面と温度センサー位置の温度差を見積もって、温度センサーによる測定温度から差し引いている。 T_{sat} は伝熱面表面に接する液体窒素の飽和温度で、伝熱面表面の液相圧力から求めた。その液相圧力は、容器上部の蒸気圧力、伝熱面までの液位および液体窒素の密度から求めた。

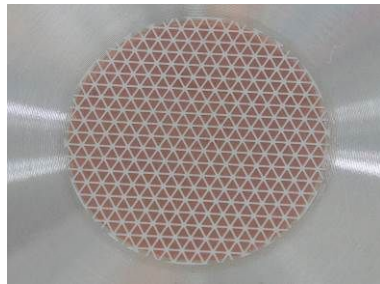
実験では、まず、非加熱状態で伝熱面温度の測定値、液相温度の測定値および伝熱面表面の液相圧力から求めた飽和温度の計算値が等しくなったことを確認した後、熱流束15 kW/m²に相当する電力を1秒程度の短時間でヒーターに印加し、間もなく伝熱面上で核沸騰が生じることを確認する。伝熱面温度が十分定常(温度変化が120 sで0.02 K以下)になったことを確認した後、温度、圧力および印加電力の測定を行う。測定は、10秒間に100サイクル行い、その平均値を代表値とした。その後は、低熱流束域ではおよそ20 kW/m²ずつ、限界熱流束点近傍では2 kW/m²ずつ、熱流束を増加させ、定常状態を待って同様にデータを取得した。熱流束を増大させる際は、前述の試験開始時の急速の加熱を除いては、毎秒0.1 kW/m²以下の速度で増大させた。限界熱流束は、定常状態で核沸騰を維持した最大の熱流束で定義した。実験は3回以上行い、実験ごとの限界熱流束の測定値の差異は2 kW/m²以下であった。

4. 研究成果

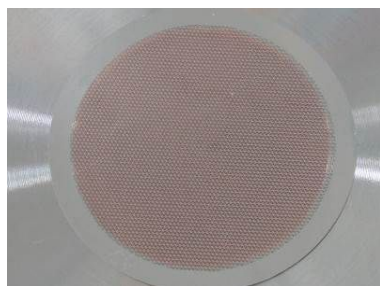
本研究で開発した、熱伝導率が大きく異なる材料による周期的構造をもつ促進伝熱面は、銅製の平滑伝熱面よりも高い限界熱流束



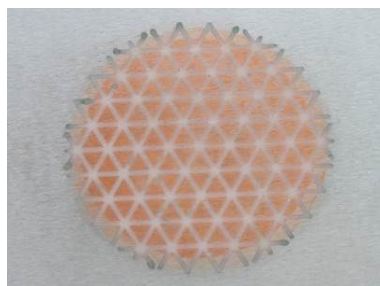
Type-A



Type-B



Type-C



Type-D



Type-E

図4 試験伝熱面 A-E の写真

を有し、また、伝熱面の表面積拡大率よりも高い限界熱流束向上率を達成することを実証した。その詳細を以下に示す。

実験で得られた各伝熱面 A-E の沸騰曲線と限界熱流束を図 5 に示す。図に示すように、促進伝熱面 A-D の限界熱流束は、基準となる銅製平滑面 E よりも向上している。限界熱流束が最も高いのは伝熱面 B で、伝熱面 E の 1.38 倍の値を示した。そのほか、伝熱面 C, A, D の順に限界熱流束が高く、銅製平滑面に対する比率は、C, A, D の順に 1.25, 1.22, 1.10 倍であった。

図 6 には、銅製平滑面 E に対する限界熱流束の向上率と伝熱面表面積の拡大率の関係を示している。縦軸は、伝熱面 E の限界熱流束に対する各伝熱面の限界熱流束の比率で、横軸は、伝熱面の投影面積に対する各伝熱面の表面積の比率である。伝熱面 A-C は、SUS 格子によって表面に凹凸ができるため、平滑面に対して表面積が大きい。図に示すように、いずれの促進伝熱面についても、限界熱流束の向上率は伝熱面表面積の拡大率よりも、さらに約 10-20% 高い値を示している。

図 5, 6 に示した結果について、まずは SUS 格子を用いた伝熱面 A-C について詳細に検討する。本実験では、限界熱流束に達する際の沸騰伝熱メカニズムを明らかにするために、一眼レフカメラによる沸騰様相の撮影観測を併せて行っている。観察の結果、熱伝導率が低い SUS 格子の上面は、膜沸騰に遷移した直後も液相との接触を保っていることが確認され、そのことから、限界熱流束に達する直前の比較的高い伝熱面温度においても、核沸騰による蒸気泡が生じていないことが推測できる。すなわち、核沸騰は銅の表面と流体が接触している部分でのみ生じていると考えられる。したがって、SUS 格子によって気泡が細分化され、液相が SUS 格子の上面を通して銅表面上まで容易に供給されることで、限界熱流束の向上に寄与したと考えられる。SUS 格子のサイズの影響を見てみると、表 1 あるいは図 4 から分かるように、格子の孔の大きさは、A, B, C の順に小さくなる。孔

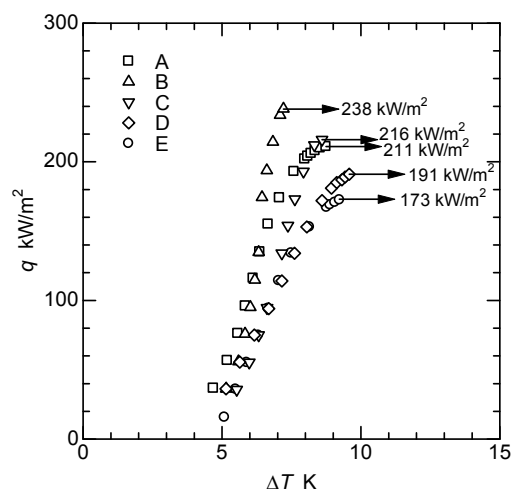


図5 実験で得た各伝熱面の沸騰曲線

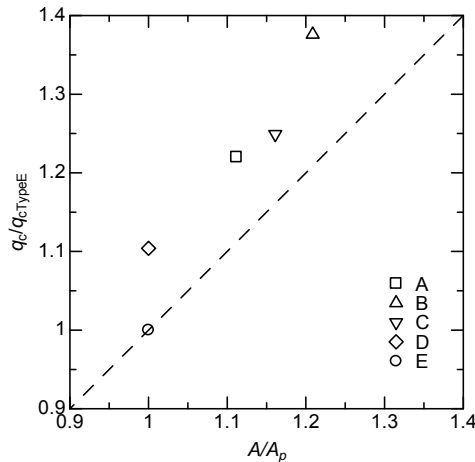


図6 基準伝熱面 E に対する各伝熱面の限界熱流束の向上率と伝熱面表面積の拡大率の関係

の大きさが中程度の伝熱面 B で最も高い限界熱流束を示したことから、今回対象とした大気圧下の液体窒素に対しては、限界熱流束の向上に最適な格子の大きさは伝熱面 B に近いと考えられる。伝熱面 B に比べて、孔が大きい伝熱面 A は気泡の細分化効果が小さいため、また孔が小さい伝熱面 C は格子内で発生する気泡が小さく伝熱面から離脱し難いため、それぞれ伝熱面 B よりも限界熱流束が低下したと推測される。

エポキシ樹脂を用いた伝熱面 D について見ると、表面は平滑でありながら、限界熱流束の向上効果がみられることがわかる。エポキシ樹脂を用いた伝熱面でも前述の SUS を用いた伝熱面と同様のメカニズムによる限界熱流束の向上効果があると考えられ、その効果は、この伝熱面 D のように、熱伝導率の低い材料で形成される格子部を銅面に埋め込み、全体としては平滑な面としても表れることが確認できた。

以上のように、本研究で提案する熱伝導率の高い材料と低い材料を組み合わせた伝熱面は、伝熱面 E のように均質かつ平滑な伝熱面に比べて、高い限界熱流束を達成できることが明らかになった。また、この伝熱促進法は、伝熱面 D のように伝熱面表面積を増大させることなく限界熱流束を向上することが可能であるため、強制対流沸騰冷却系に適用すると、摩擦損失を増大させることなく限界熱流束を向上できる。

本研究で用いた限界熱流束向上の手法は、従来の手法とは幾分異なるため、適用先によっては、従来の方法と組み合わせることで、より高効率の伝熱面を開発することも可能になると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計4件)

K. Miyata, K. Ohira, H. Mori, Nucleate Pool

Boiling Heat Transfer and Critical Heat Flux of Liquid Nitrogen on the Surface Composed of a High and a Low Thermal Conductivity Materials, 14th Int. Symposium on Advanced Fluid Information, October 9, 2014, Sendai (Japan).

K. Miyata, K. Ohira, H. Mori, Effect of the Pits Size on Nucleate Pool Boiling Heat Transfer and Critical Heat Flux of Liquid Nitrogen on the Surfaces with Small Triangular Pits, 13th Int. Symposium on Advanced Fluid Information, November 26, 2013, Sendai (Japan).

宮田一司, 大平勝秀, 森英夫, 微細三角形くぼみ付き伝熱面における液体窒素のプール沸騰熱伝達と限界熱流束, 第50回日本伝熱シンポジウム, 2013年5月31日, ウエスティンホテル仙台(宮城県・仙台市)

K. Miyata, K. Ohira, H. Mori, Development of the Heat Transfer Surface with Micro-Pits to Enhance the Critical Heat Flux in Nucleate Boiling, 12th Int. Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, September 20, 2012, Sendai (Japan).

6. 研究組織

(1)研究代表者

宮田 一司 (MIYATA, Kazushi)
九州大学・大学院機械工学部門・助教
研究者番号: 00610172

(2)研究協力者

大平 勝秀 (OHIRA, Katsuhide)
東北大学・流体科学研究所・教授
研究者番号: 30375117

森 英夫 (MORI, Hideo)
九州大学・大学院機械工学部門・教授
研究者番号: 70150505