

令和 6 年 6 月 15 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04945

研究課題名（和文）伝熱面微細構の三次元多孔質造形と表面改質技術による冷却限界の飛躍的向上

研究課題名（英文）Significant enhancement of critical heat flux with three-dimensional porous-media manufacturing and surface modification technologies of heat-transfer surface structure

研究代表者

古谷 正裕（Furuya, Masahiro）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：80371342

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：伝熱面上にピッチの異なる螺旋構造を三次元付加造形し、プール沸騰熱伝達実験を行った。その結果、螺旋ピッチが長い場合には限界熱流束が40%増大した。フレーク状物質や球体を設置することで限界熱流束が30%低下したが、親水性を付与することで限界熱流束は一転して30%増大した。さらに八ニカム多孔質体プレートと格子構造を組み合わせることで、限界熱流束は約3倍に増大した。伝熱促進効果と限界熱流束増大効果は、気泡の合体を抑制することで界面積濃度が増大し、伝熱面近傍の循環駆動力が増大することで伝熱面への液供給が増大することによりもたらされたと考えられる。作成した数理モデルにより提案する原理が確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

3Dプリンターによる三次元付加造形技術はより自由に複雑な形状を造形できる。本研究では、プラントや電子回路などで高い熱負荷を受ける面に設置することで冷却性能と冷却限界の両方を向上させることができる形状を探索した。実験の結果、らせん構造や八ニカム多孔質体、並びに格子構造を組み合わせた構造が最適で、さらに表面に親水性を付与することで冷却性能と冷却限界が向上することを解明した。発生する気泡の合体を抑制し、伝熱面への冷却水量を増加させることで向上効果もたらされる原理をシミュレーションで確認した。

研究成果の概要（英文）：Pool-boiling heat-transfer experiments were conducted with three-dimensional additive-manufactured helix structures on the heat-transfer surface. The results showed that the critical heat flux increased by 40% when the helix pitch was long. The critical heat flux decreased by 30% when flake-like materials or spheres were installed, but the critical heat flux reversed and increased by 30% when the surface became hydrophilic. Furthermore, the critical heat flux was increased by a factor of three by combining the honeycomb porous plates with the lattice structure. The heat transfer enhancement and critical heat flux increase effects are considered to be caused by the increase in the interfacial area concentration by suppressing the coalescence of bubbles and the increase in the liquid supply to the heat transfer surface by increasing the driving force of natural circulation around the heat transfer surface. The mechanistic model developed confirms the proposed principle.

研究分野：熱工学

キーワード：沸騰熱伝達 冷却 限界熱流束 付加造形 親水性

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

電子部品やプラント機器の受熱面上に市販の格子板やハニカム多孔質体などを設置することで、水冷する際の沸騰熱伝達率と除熱限界である限界熱流束(CHF)が向上することが見出されていた。これら市販品は寸法や形状、気孔率などがそれぞれ異なるため、任意の諸元を体系的に実験することが困難なため、沸騰熱伝達率や CHF を最大にする条件や、そのメカニズムが不明であった。

研究代表者は金属付加造形が困難とされていた銅合金において任意の形状を造形する技術を開発した。この技術を活用して任意の諸元で伝熱面を作成することで、沸騰熱伝達や CHF を向上させる研究を提案した。

### 2. 研究の目的

開発した三次元造形技術を用いて任意の寸法や形状、気孔率の格子板等を造形し、沸騰熱伝達率や CHF を最大にする条件やメカニズムを解明する。また表面に親水性を付与する変更を行い、熱伝達をさらに向上させる。

### 3. 研究の方法

図 1 に開発した銅合金の多孔質格子板を例示する。レーザー光を用いる積層造形法では銅の造形が困難であったが、光吸収材と焼結助材を微量加えることにより、熱伝導率の低下を抑制しながら三次元造形することができるようになった。これにより、格子板のピッチや高さ、気孔率を連続的に変化させた複雑構造を製作した。

図 2 に実験装置の概念図を示す。一辺 300 mm の立方体容器内にイオン交換水を高さ 250 mm まで脱気・飽和した水を満たした。プール底面中央に直径 30 mm の銅円柱を配置した。銅円柱の下部 8 箇所にヒーターを埋め込み加熱した。円柱には図 2 右側に示す通り熱電対を 5 本配置し、中心線上の温度分布を計測することで、表面の温度と熱流束 (単位面積当たりの熱移動量) を計算した。加熱量を徐々に変えることで表面温度と熱流束を変化させた実験を行った。表面温度が急上昇したときの熱流束を CHF と定義した。

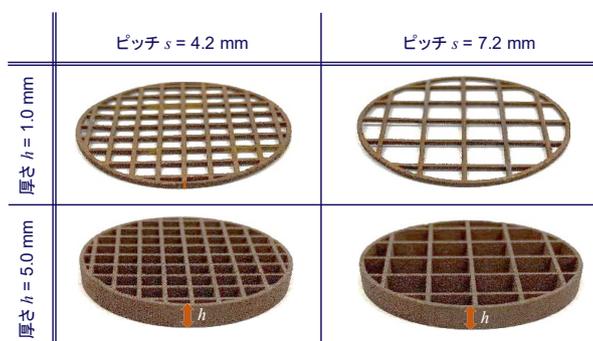


図 1 開発した銅合金の多孔質格子板

### 4. 研究成果

図 3 に図 1 の多孔質格子板で得られた沸騰曲線を示す。格子板を設置することで基準平滑面より CHF が向上している。格子板は伝熱面に水を供給する効果があることから、ピッチが狭い方が良いが、厚さは 1 mm と薄い方が熱伝達と CHF の両方を向上させる。さらに伝熱面上にピッチの異なる螺旋構造を三次元付加造形し、プール沸騰熱伝達実験を行った。その結果、螺旋ピッチが長い場合には限界熱流束が 40% 増大した。

図 4 に伝熱面の親水性が CHF に与える影響を示す。フレーク状物質や球体を設置することで限界熱流束が 30% 低下した。このような構造物は発生する気泡が伝熱面から離脱することを妨げることから、伝熱面に供給される水量が減ることで CHF が低下すると考えられる。一方でこの構造物表面に親水性を付与することで、CHF は一転して 30% 増大した。観察の結果、構造体から放出される気泡が小さいことから、気泡の合体が抑制されることで周囲液を伴い上昇し、自然循環流が増大することから CHF が増大すると考えられる。

さらに様々な構造体の組合せを実験した結果、ハニカム多孔質体プレートと格子構造を組み合わせることで、限界熱流束は約 3 倍に増大した。これらの知見を元に、発生気泡の界面積濃度が増大し、伝熱面近傍の循環駆動力が増大することで伝熱面への液供給が増大する数理モデルを提案し、伝熱促進効果と限界熱流束増大効果する原理を確認した。

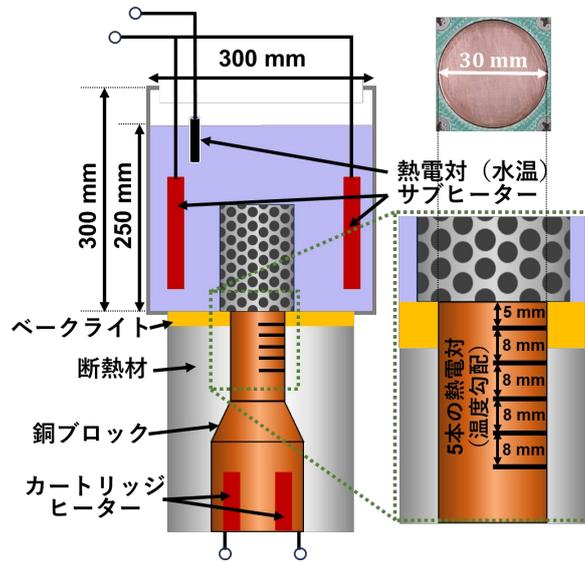


図2 プール沸騰実験装置の概念図

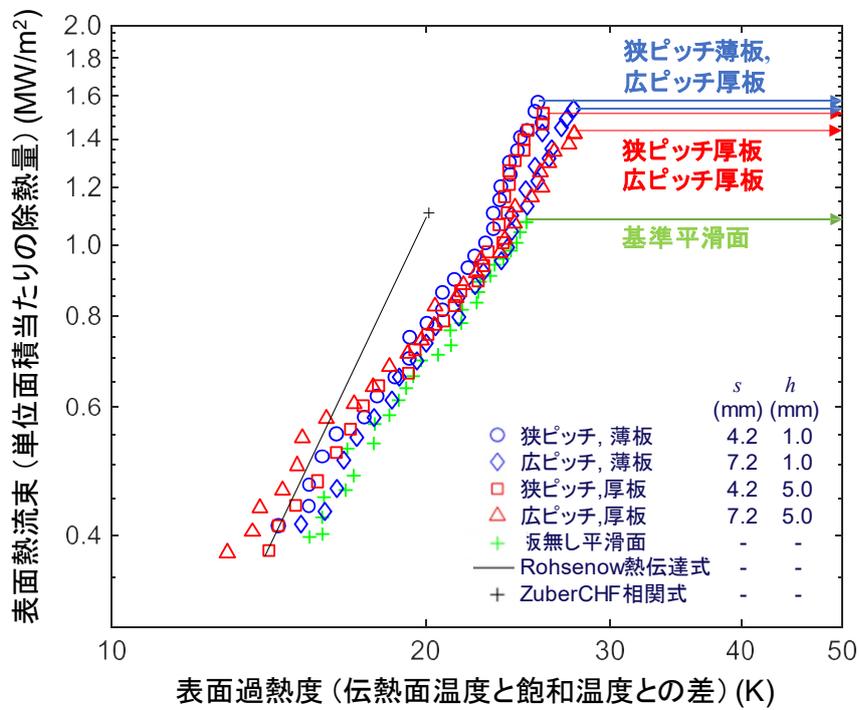


図3 沸騰曲線

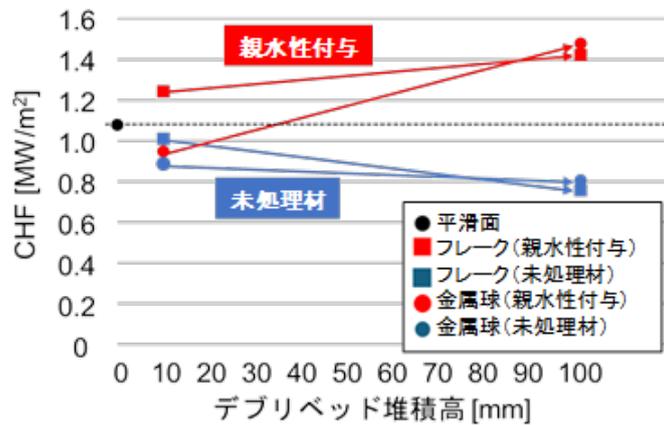


図4 親水性がCHFに与える影響

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kano Tatsuya, Ono Rintaro, Furuya Masahiro	4. 巻 25
2. 論文標題 Enhancement of critical heat flux with additive-manufactured heat-transfer surface	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nuclear Engineering and Technology	6. 最初と最後の頁 Online
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.net.2024.02.005	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kano Tatsuya, Ono Rintaro, Furuya Masahiro	4. 巻 24
2. 論文標題 Enhancement of critical heat flux with additive-manufactured heat-transfer surface	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nuclear Engineering and Technology	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.net.2024.02.005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Masahiro Furuya, Rintaro Ohno, Kento Nakao, Akifumi Yamaji, Hirofumi Fukai, Hidetoshi Morita, Xin Li, Yuji Ohishi, Ikken Sato, Shinya Mizokami	4. 巻 35760
2. 論文標題 Formation and Coolability of Highly Porous Prototypic Metallic Sediments	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. 19th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics	6. 最初と最後の頁 Online
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 加納達也, 古谷正裕, 中尾健人
2. 発表標題 金属細線の液保持構造によるプール沸騰限界熱流束の向上
3. 学会等名 第60回日本伝熱シンポジウム論文集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加納達也
2. 発表標題 金属細線の液保持構造によるプール沸騰限界熱流束の向上
3. 学会等名 第60回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加納達也
2. 発表標題 デブリベッド冷却特性における親水性の影響
3. 学会等名 日本原子力学会2024年春の年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 中尾健人
2. 発表標題 液膜保持機能に着目した構造付加によるプール沸騰限界熱流束の向上
3. 学会等名 日本機械学会 第26回動力・エネルギー技術シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加納達也
2. 発表標題 金属細線の液保持構造によるプール沸騰熱伝達の向上
3. 学会等名 日本原子力学会関東・甲越支部学生研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masahiro Furuya
2. 発表標題 Digital Twin to Digital Triplet - Tips and Tricks of Machine Learning for Nuclear Thermal Hydraulics -
3. 学会等名 12th Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------