

# 立体多孔箔による核沸騰促進技術の応用に関する研究

## -伝熱特性に対する接着方法の影響-

萩野 直人\*, 村田 圭治\*, 荒賀 浩一\*, 久津輪 武史\*\*

## An application study on enhancement of nucleate boiling using 3D porous foil

### -Effect of bonding method on heat transfer characteristics-

Naoto HAGINO, Keiji MURATA, Kouichi ARAGA, Takesi KUTSUWA

In the immersion cooling method, enhancement of nucleate boiling on the heat transfer surface is important. Conventional researches have shown that the heat transfer performance improves by processing the re-entrant micro cavities on the heat transfer surface. However, it is sometimes difficult to additionally process many micro cavities on a heat transfer surface. In this study, we attempted to promote nucleate boiling on the heat transfer surface using 3D porous metal foil which was processed many reentrant micro cavities. The heat flux when the metal foil is bonded with a heat conductive tape is twice that of a smooth surface. The experimental results show that If 3D porous foil is bonded with a heat conductive seal to the heating elements, it can be applied to complicated shapes and the flammable heating elements.

*Keyword* heat transfer enhancement, nucleate boiling, immersion cooling, 3D porous foil, bonding method

### 1. 緒言

冷却は動力機械や電気電子機器などでは重要な問題である。特に電気自動車のバッテリーとして採用されているリチウムイオン電池は急速充電を行うと、バッテリーの内部発熱により急激に温度が上昇し、バッテリーが劣化する問題がある。そのため、さまざまなバッテリーの冷却方法の検討が行われている。その手法の一つとして冷媒が気体に相変化するときの潜熱を用いて冷却を行う沸騰冷却の研究が行われている<sup>1)</sup>。この沸騰冷却法の冷媒として人体に対する毒性が低く、かつ不導体であるフッ素系不活性液体が注目されている。この液体には電子部品やバッテリーを浸漬させることが可能であり、スーパーコンピュータの冷却等に適用<sup>2)</sup>され、実用化も進んでいる。浸漬冷却法では、伝熱面における核沸騰の状態が伝熱性能に大きく影響する。核沸騰は伝熱面のくぼみや目に見えない傷に生じる蒸気泡を核として沸騰が生じる。著者らは、沸騰核を生

じさせるためのリエントラント型マイクロキャビティが加工されたアルミ箔（以下、立体多孔箔とする）を用いた核沸騰促進の研究<sup>3)</sup>を行った。その結果、最大で10倍程度の性能向上が見られた。しかしながら、立体多孔箔の接着には半田を用いたため、複雑な形状の発熱体に取り付けることは難しい。また、接着時に伝熱面が高温になるため、発熱体が樹脂や可燃性の高い材質では立体多孔箔を貼り付けることは出来ない。物体の接触面において伝熱性能の低下を防ぐために、例えばCPUと冷却フィン間に熱伝導テープを貼り付けることがある。熱伝導テープなど用いて立体多孔箔を発熱体に貼り付ければ、複雑な形状に対応できると同時に可燃性の材質にも適用できる。しかしながら、伝熱性能に対する接着法の影響に関しては不明である。そこで本研究では、実際の製品への応用を念頭に置き立体多孔箔の貼り付ける方法として、伝熱シールと金属粉を含むパテによる接着を試み、伝熱性能の検証を行った。

\*近畿大学工業高等専門学校

総合システム工学科

\*\*株式会社 安永

### 2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略図を Fig.1 に示す。実験装置は冷却水循環装置、テストセクション、温度コントローラ、計測用デ

ータロガー、大気圧計およびデータ処理用 PC から構成される。図に示す様に、テストセクション下部には加熱ユニットが設置されており、内部には冷媒としてフッ素系不活性液体の NOVEC7000 (3M 社製) が注入されている。この冷媒の沸点温度は 1atm で 34°C である。また、テストセクション内には冷媒温度調整用ヒーター、凝縮管、熱電対が設置されている。加熱ユニットの沸騰伝熱面において冷媒が沸騰し、冷媒に熱が移動する。加熱ユニットは、テフロンと真鍮ブロックで構成され、真鍮ブロックの上端面は直径 20mm の沸騰伝熱面となっている。真鍮ブロック下部の側面にはマイクロヒーターが巻かれており、ヒーター電源電圧を調整することにより、沸騰伝熱面における熱流束を調整した。また、加熱ユニットからの熱損失を抑制するために、その外周にセラミックファイバーを巻きつけた。真鍮ブロックには沸騰伝熱面から下方  $x=7\text{mm}$ 、 $13\text{mm}$ 、 $19\text{mm}$  の位置に直径 0.5mm のシース K 型熱電対を設置し、真鍮ブロックの軸中心温度  $T$  を測定した。計測は熱電対を直接接続可能なデータロガー 34970A (Agilent 製) を使用した。計測データは GP-IB を介して計測用 PC に取り込まれる。

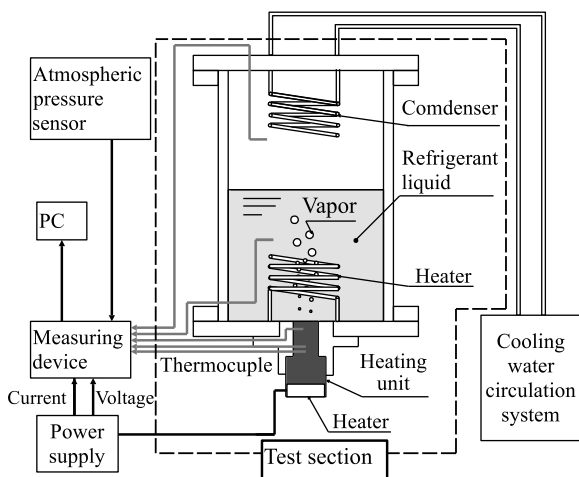


Fig.1 Schematic of experimental apparatus

沸騰伝熱面における熱流束  $q$  は、真鍮の熱伝導率  $\lambda$  と計測された真鍮ブロック内の各点の温度より温度勾配  $dT/dx$  を求め、式(1)から算出した。

$$q = \lambda \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

ここで真鍮の熱伝導率は  $\lambda=121\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  とした<sup>5)</sup>。

沸騰伝熱面における熱伝達率  $\alpha$  は式(2)に示すように沸騰伝熱面熱流束  $q$  を壁面過熱度  $\Delta T_s$  で除して算出した。

$$\alpha = \frac{q}{\Delta T_s} \quad (2)$$

ここで、壁面過熱度  $\Delta T_s$  は式(3)に示す様に、伝熱面温度  $T_w$  と飽和温度  $T_s$  との差である。

$$\Delta T_s = T_w - T_s \quad (3)$$

真鍮ブロックの伝熱面には Fig.2 に示すようなリエントラント型のマイクロキャビティが加工された厚さ 0.1mm のアルミ製の立体多孔箔<sup>6)</sup>を接着した。立体多孔箔は、Fig.2 (b)に示す様な穴開き円錐突起が加工され、真鍮ブロックに貼り付けることでキャビティを形成する。キャビティの配置は格子状になっており、対角長さは 640 $\mu\text{m}$  である。本研究では、立体多孔箔の貼り付けに熱伝導両面テープ(3M 8926, 熱伝導率 1.5W/(m $\cdot$ K))と、比較のために真鍮を含む金属パテ(Devcon BR, 熱伝導率 0.66 W/(m $\cdot$ K))を用いて発熱体の伝熱面に接着し実験を行なった。

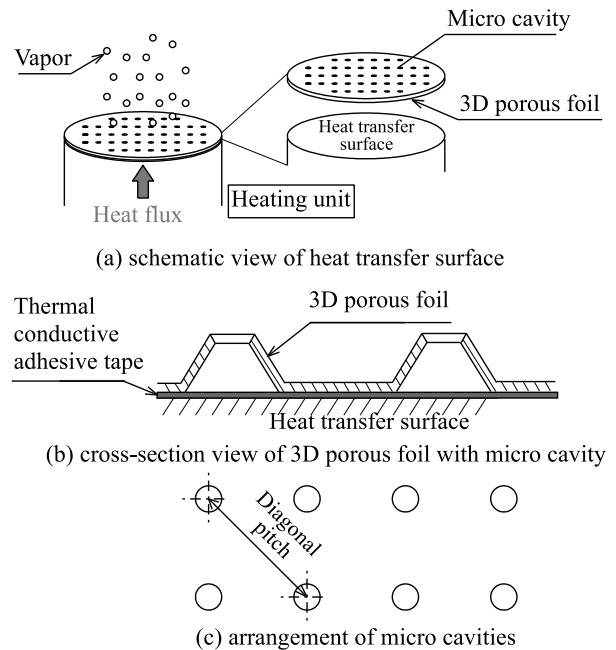


Fig.2 Heat transfer promotion surface

実験方法は、加熱ユニットに取り付けたヒーター電源の電圧を変更して加熱ユニットに供給される熱量を変化させた。加熱ユニットの真鍮ブロック内の各部温度がほぼ一定になったとき、すなわち温度が時間変化に変化しない定常状態となった値を用いて熱流束を算出した。各点のサンプリング周期は 5min とした。また、テストセクション内圧力は大気圧とした。

### 3. 実験結果および考察

Fig.3 に実験結果の一例を示す。ただし、ヒーター供給熱量を図に示すように階段状に減少させていった場合の結果である。ここで、 $T_1 \sim T_3$  は真鍮ブロック内中心部の温度であり、また  $T_s$  は冷媒温度である。実験においては、ヒーター供給熱量を変化させた後、真鍮ブロックの温度がほぼ一定になったとき、すなわち温度が時間変化に変化しない

定常状態となつてから加熱ユニットへの供給熱量を変更した。実験中は図に示すように冷媒温度は冷媒沸点温度の34°Cでほぼ一定であった。

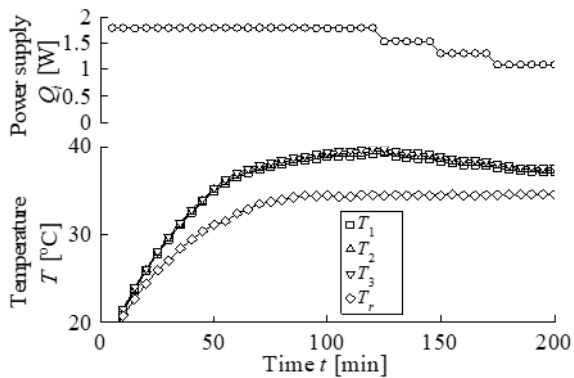


Fig.3 Example of experimental results

加熱ユニット内の真鍮ブロックの軸方向中心における温度分布の一例を Fig.4 に示す。ただし、ヒーターからの供給熱量は  $Q = 1.7\text{W}$  である。ここで  $x$  は鉛直下向に沸騰伝熱面からの距離である。平滑面の場合、立体多孔箔が貼り付けられた場合より温度が高い。このとき、冷媒温度は沸点温度である 34°C であった。したがって、平滑面のほうが冷却されていない、つまり熱移動量が少ないことを示している。このとき、平滑面および立体多孔箔のいずれも、温度分布はほぼ線形であることが分かる。よって温度勾配  $dT/dx$  は計測結果より得られた一次近似式の傾きとした。また、伝熱面の温度  $T_w$  は、真鍮ブロック内の温度分布はほぼ線形と仮定し、計測値から外挿した。

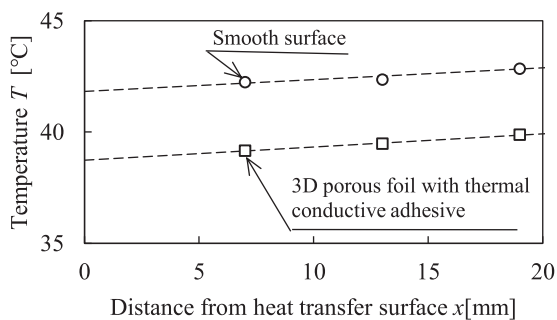


Fig.4 Temperature distribution in heating unit when input power supply is 1.7W

Fig.5 には計測結果より求めた熱流束を示す。ここで図中のプロット●は平滑面、■は立体多孔箔を伝熱面に半田を用いて接着した場合、△は立体多孔箔の接着に熱伝導テープを用いて Fig.3 のように供給熱量をステップ状に減少させながら実験をおこなった場合、▲は熱伝導テープを用いて供給熱量をステップ状に増加させた場合である。立体多孔箔の貼り付けに半田を用いた場合、平滑面に比べ低い過

熱度においても熱移動が発生していることが分かる。また同じ過熱度では、立体多孔箔を取り付けた方の熱流束が増加している。立体多孔箔の接着に熱伝導テープを用いた場合、半田の場合と比較すると同一の過熱度で熱流束が減少する、つまり伝熱性能が低下していることが分かる。しかしながら、Table 1 に示すように同一の過熱度において、平滑面に比べ熱流束が約 2 倍となり伝熱性能の向上がみられた。したがって、立体多孔箔を伝熱面に接着すると伝熱性能は向上するが、接着方法によって伝熱性能に差が生じることが分かる。従来の研究において<sup>4)</sup>、接着に半田を用いた場合、供給熱量を増加させた方が減少させた場合より伝熱性能が低下する傾向が見られた。これは、供給熱量を増加させた場合、低熱量では沸騰核の生成が少なく、熱量を増加させても沸騰核が生じにくいためと考えられた<sup>4)</sup>。本実験では、供給熱量をステップ状に減少させた場合(△)と増加させた場合(▲)では、明確な違いは現れなかった。

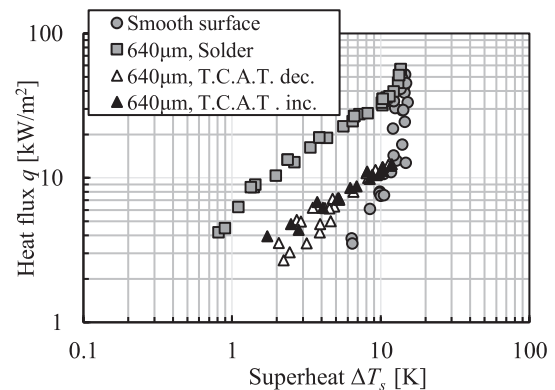


Fig.5 Difference in boiling curve depending on bonding method of 3D porous foil

平滑面の場合、過熱度が 6K 以下では沸騰がほとんど発生しなかった。一方、熱伝導テープで貼り付けた場合、過熱度が 1K 程度でも沸騰が生じ、熱流束が大幅に増加することが分かる。これは、立体多孔箔のマイクロキャビティに沸騰核が生じ、低い過熱度であっても沸騰核が維持されているためと考えられる。

Table 1 Difference in heat transfer performance depending on the bonding method of 3D porous foil

	Super heat $\Delta T_s$ [K]	Heat flux $q$ [kW/m <sup>2</sup> ]
Smooth surface	6.36	3.8
Adhere metal foil with heat conductive tape	6.55	8.02

次に、立体多孔箔の貼り付けに真鍮の金属粉を含む金属パテを用いた実験をおこなった。その結果を Fig.6 に示す。本実験で行った実験では、金属パテの方が熱伝導テープよりわずかに熱流束が多くなったが、大きな差はみられな

った。いずれの場合も平滑面に比べ熱流束は増加しているだけでなく、過熱度が低い場合でも熱移動が多く生じている。これは、立体多孔箔がある場合では、その表面にあるキャビティに気泡が取り込まれやすく、平滑面に比べて沸騰核となる蒸気泡を維持し易いためと考えられる。金属パテが半田ほど性能向上しなかったのは、金属粉とエポキシ樹脂の混合物であり、樹脂の熱伝導特性が低く、熱抵抗が大きくなったためと考えられる。

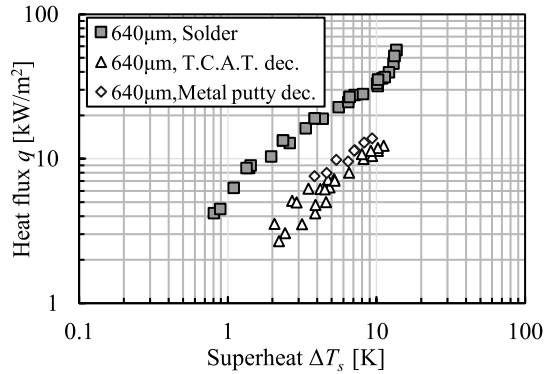


Fig.6 Difference in boiling curve depending on bonding method of 3D porous foil

さらに伝熱面における熱伝達率  $\alpha$  を求めた。その結果を Fig.7 に示す。立体多孔箔を取り付けた場合、過熱度が小さい場合でも熱伝達率が低下していない、つまり沸騰が促進されていることがわかる。また立体多孔箔を接着した場合、接着法によらず両対数のグラフにおける直線の傾きがほぼ同じとなった。そこで、実験結果をもとに近似直線を求めた。その結果を式(4)~(6)に示す。式(4)は半田、式(5)は熱伝導テープ、式(6)は金属パテを使用した場合である。

$$\log_{10}(\alpha_S) = -0.259\log_{10}(\Delta T_s) + 0.811 \quad (4)$$

$$\log_{10}(\alpha_T) = -0.250\log_{10}(\Delta T_s) + 0.306 \quad (5)$$

$$\log_{10}(\alpha_P) = -0.293\log_{10}(\Delta T_s) + 0.451 \quad (6)$$

それぞれの結果より近似曲線の傾きはほぼ同じであった。したがって沸騰曲線は図の鉛直方向にほぼ平行移動していることになる。これは、沸騰核となる蒸気泡の発生はキャビティの数に影響され、張り付け方ではキャビティの数に差が生じず蒸気泡の発生確率が変化しなかったと考えられる。また、この鉛直方向への移動分が接着媒質の熱抵抗による差であると考えられる。よって、立体多孔箔を張り付けた場合、その伝熱特性は接着媒質の熱抵抗に影響されると考えられる。

以上の結果から、熱伝導テープを用いると半田による接着に比べ伝熱性能は低下するが、平滑面の2倍程度の伝熱性能が得られる。また、平滑面より低い過熱度でも沸騰し、

熱の移動が発生する。これは発熱体が比較的低温の場合でも立体多孔箔によって核沸騰が促進され熱移動量が増加したことを意味している。よって熱伝導テープを用いた場合は、半田を用いた場合に比べ性能の低下はあるが、平滑面よりは向上しており、容易に発熱体に取り付けられるという利点大きい。特に、半田のように接着時に高温ならざリチウムイオン電池など可燃性物質が使用されている発熱体に接着が可能である。

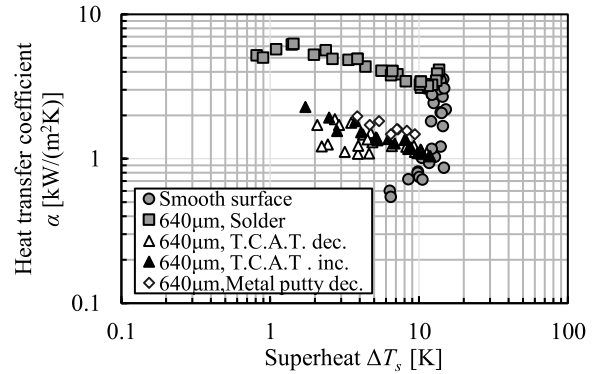


Fig.7 Relationship between heat transfer coefficient and superheat

#### 4. 結言

本研究では、立体多孔箔による伝熱促進の研究において、発熱体の熱伝達面に立体多孔箔を接着する方法が伝熱性能に及ぼす影響を調べた。その結果、熱伝導テープを用いて張り付けると半田の場合より伝熱性能が低下するが、平滑面よりは向上しており、容易に発熱体に取り付けられるという利点大きいことが分かった。

#### 参考文献

- 1) 川和田達也, 渡辺亮, “充電時の冷却による EV 用リチウムイオンバッテリーの劣化抑制:バッテリーの劣化に起因する余剰コストと冷却に要する電気料金に基づくトータルコストの評価”, 自動車技術会論文集, Vol.47, No.1 (2016), pp. 133-137.
- 2) Van Gils, R.W., Danilov, D., Notten, P.H.L., Speetjens, M.F.M. and Nijmeijer, H., “Battery thermal management by boiling heat transfer”, Energy Conversion and Management, Vol.79(2014), pp.9-17.
- 3) 3Mジャパン, “Novoc高機能性液体, データセンター向け液体直接浸漬冷却”, [https://www.3mcompany.jp/3M/ja\\_JP/novoc-jp/applications/immersion-cooling/](https://www.3mcompany.jp/3M/ja_JP/novoc-jp/applications/immersion-cooling/), (参照 2019-12-05)
- 4) 萩野直人, 荒賀浩一, 村田圭治, 久津輪武史, “微細加工を施した金属箔による核沸騰促進に関する研究”, 近畿大学工業高等専門学校紀要 Vol.12 (2019), pp.29-32.
- 5) 柏原利雄, “伝熱工学”, 裳華堂, (1994).
- 6) (株)安永, “伝熱部材および伝熱部材の製造方法”, 特開 2016-50748, 2016-04-11.