

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

萩野 直人*, 村田 圭治*, 荒賀 浩一*, 久津輪 武志**

A study on enhancement of nucleate boiling using metal foil with micro cavity

Naoto HAGINO*, Keiji MURATA*, Kouichi ARAGA*, Takeshi 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 the metal foil which was processed many reentrant micro cavities. Micro cavities on the metal foil are processed by the dies. The micro cavity can be easily installed by the attaching this metal foil to the heat transfer surface. The experimental results show that the metal foil with reentrant micro cavities was prompted nucleate boiling on the heat transfer surface.

Keyword Heat transfer enhancement, Nucleate boiling, Immersion cooling, Re-entrant cavity, Metal foil

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。近年は、電子機器の高密度化により熱負荷も大きくなっており、より高い冷却性能が求められている。特に電気自動車のバッテリーなど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、バッテリー劣化が生じる¹⁾。そのため、さまざまな冷却方法の検討が行われているが、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²⁾。近年、沸騰冷却法の冷媒としてフッ素系不活性液体が注目されている。これらは人体に対する毒性が低く、かつ不導体であり電子部品を浸漬させることができる。そのため、電子部品の浸漬冷却に用いられ、電気自動車用バッテリーの冷却などへの適用も期待されている。浸漬冷却法において伝熱面における核沸騰を促進させることができれば、より多くの熱が発熱体より奪われて伝熱性能が向上する。この核沸騰は、伝熱面に存在するわずかなくぼみに捉えられた沸騰核から成長していく。そのため、伝熱面の表面性状により沸騰による気泡の発生量が異なる。

このような伝熱面の表面性状による核沸騰促進の研究が古くから行われている³⁾。例として伝熱面に再挿入くぼみ（リエントラントキャビティ）を加工することによって、核沸騰が促進され伝熱性能の向上することが知られており、実際に商品化もされている⁴⁾。一方、このようなリエントラントキャビティを表面に加工する場合、材質や形状によって困難となる場合がある。仮に、伝熱面がステンレスのような難加工材である場合、微細な構造をその表面に加工するのは困難である。また、伝熱面が複雑な形状をしている場合も加工は困難となる。

金属箔に微細なキャビティを金属箔に加工し、その箔を発熱体に貼り付けることによって冷却効率を向上させた例がある⁵⁾。このような金属箔を発熱体に貼り付けることによって様々な材質や形状に対応できるようになる。一方このようなマイクロキャビティを施した金属箔による沸騰促進の優位性については不明な点も多い。

そこで本研究では、リエントラントキャビティを加工した伝熱促進金属箔を発熱体に取り付け、核沸騰促進による伝熱性能向上の検証を行った。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略図を Fig.1、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、計測用マル

*近畿大学工業高等専門学校

総合システム工学科 機械システムコース

**株式会社 安永

チメータ、大気圧計およびデータ処理用コンピュータから構成される。テストセクションの下部には図に示す様に、加熱ユニットが設置されている。テストセクション内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 1 気圧のもとで 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、温度測定用熱電対が設置されている。沸騰伝熱面において冷媒が沸騰し、沸騰伝熱面にて。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、マイクロヒーターの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 $x=7\text{mm}$ 、 13mm 、 19mm の位置に直径 0.5mm のシース K 型熱電対を設置し、各位置における真鍮ブロックの軸中心温度 T を測定した。計測に用いたデータロガー 34970A (Agilent 製) であり、熱電対を直接接続して温度を計測することが出来る。データロガーで計測したデータは GP-IB を介して計測用 PC に取り込まれる。

沸騰伝熱面における熱流束 q は、真鍮の熱伝導率 λ 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⁶⁾。沸騰伝熱面における熱伝達率 α は式(2)に示すように沸騰伝熱面熱流束 q を壁面過熱度 ΔT_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 ΔT_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。

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

伝熱面には Fig.2 に示すように、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 0.02mm のアルミ箔 (以下、伝熱促進金属箔とする) を、半田を用いて接着した。伝熱促進金属箔は、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 Fig.2(c) のように格子状になっており、本研究では使用した金属箔は対角ピッチが $640\mu\text{m}$ と $480\mu\text{m}$ であり、 $480\mu\text{m}$ の方がキャビティの配置密度が高い。伝熱促進金属箔による効果を検証するた

め、金属箔を取り付けない平滑面についても同様の実験を行なった。

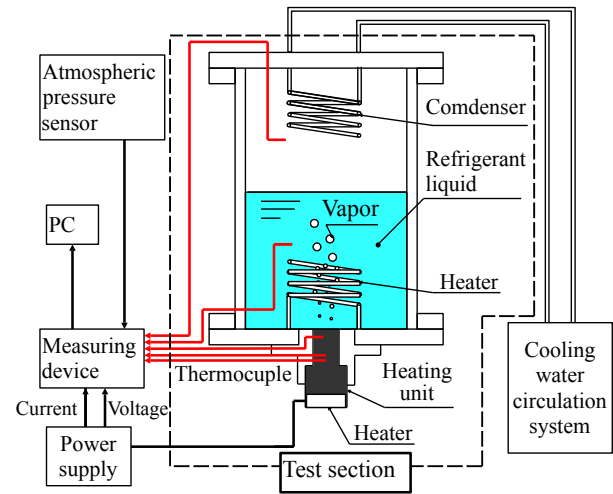
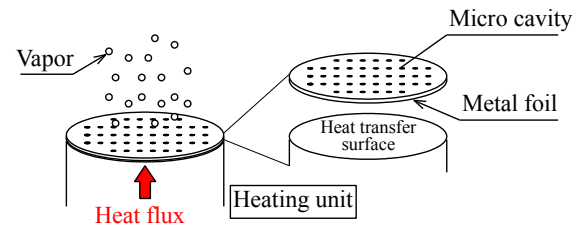
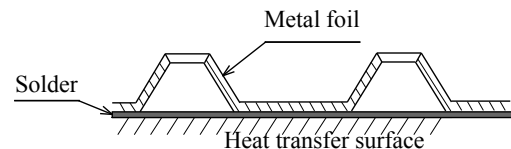


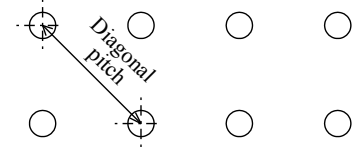
Fig.1 Schematic of experimental apparatus



(a) schematic view of heat transfer surface



(b) cross-section view of metal foil with micro cavity



(c) arrangement of micro cavities

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 $x_1 \sim x_3$ の位置における真鍮ブロック内温度であり、 T_w 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っ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。

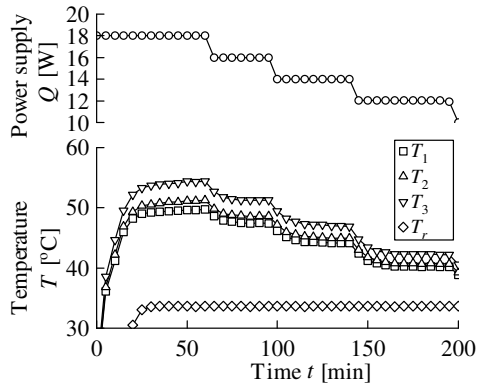


Fig.3 Example of experimental result

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を $Q = 7.2\text{W}$ とした場合である。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、伝熱促進金属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、平滑面および伝熱促進金属箔のいずれも、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、伝熱促進面の温度 T_w は、真鍮ブロック内の温度分布がほぼ線形と仮定し、計測値から外挿した。

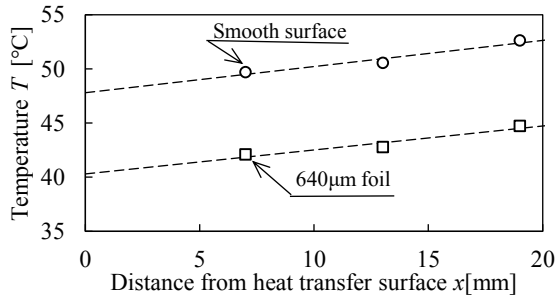


Fig.4 Temperature distribution in heat unit when input power supply is 7.2W

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 $640\mu\text{m}$ の伝熱促進金属箔を用いて、加熱ユニットへの供給熱量をステップ状に増加させた場合、■は同じ伝熱促進金属箔を用いて、加熱ユニッ

トへの供給熱量をステップ状に減少させた場合である。平滑面に比べ、伝熱促進金属箔を貼り付けた場合、平滑面に比べ、低過熱度においても熱移動が発生している事が分かる。また同じ加熱度においては、金属箔を取り付けた方が、熱流束が増加している。Table 1 にはほぼ同じ過熱度における熱流束の違いを示す。金属箔を貼り付けた場合、平滑面に比べ熱流束が約 6 倍となった。よって、金属箔の設置により伝熱性能が向上していることが分かる。平滑面ではくぼみが少なく、それを基にして沸騰核となる気泡が成長しにくい。そのため、過熱度が大きくなっても伝熱面での沸騰が発生しづらく、熱流束が大きならない。一方、伝熱促進金属箔を貼り付けた場合、表面のキャビティに気泡が取り込まれ易く、それをもとに沸騰が維持されていると考えられる。

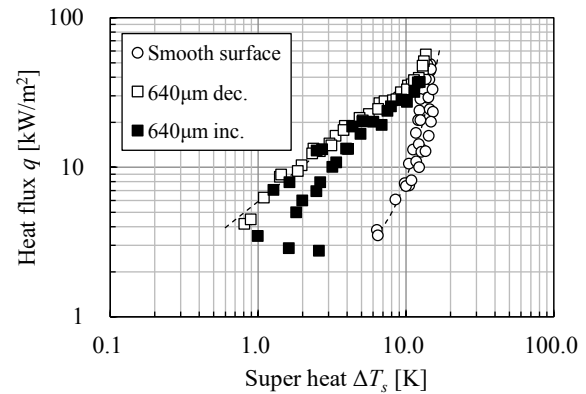


Fig.5 Boiling curve (refrigerant is Novec7000)

Table 1 Heat flux

	Super heat ΔT_s [K]	Heat flux q [kW/m ²]
Smooth surface	6.36	3.8
640 μm foil	6.48	24.56

$640\mu\text{m}$ の金属箔では、供給熱量を階段状に増加させた場合と減少させた場合では、熱流束の値に差があるように見られる。供給熱量を増加させた場合のデータの詳細を Fig.6 に示す。図中の各プロットは実験日別で整理している。ここで、図中の破線は入熱量をステップ状に減少させた場合のデータから求めた近似曲線である。

実験日時によって近似曲線に近い場合と、近似曲線から離れる場合と 2 パターンに分かれていることが分かる。一方、熱量を減少させた場合は、このようなばらつきは見られなかった。熱量を増加させていった場合、実験開始後はヒーター供給熱量が少ないため、気泡発生点が形成されにくく、その生成が確率的であるためと考えられる。そのため、気泡発生点が多く生じた場合は熱流束が大きくなり、気泡発生点の生成が少ない場合は熱流束が低下する。一方、

供給熱量が減少させた場合、実験開始時では供給熱量が多いため、十分に気泡発生点が生じている。そのため、熱量を減少させたとしても、すでに生じている気泡発生点を基として沸騰が継続されるため、熱流束は低下せず、ばらつきが少なくなると考えられる。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、より過熱度が低い場合でも熱の移動が多く生じている。これは、金属箔がある場合には、その表面にあるキャビティに気泡が取り込まれやすく、平滑面に比べて気泡発生点を維持し易いためと考えられる。

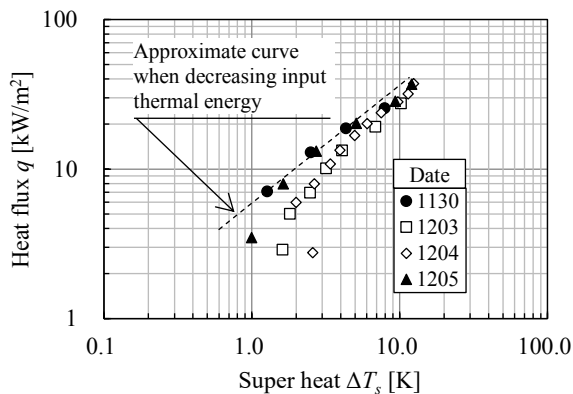


Fig.6 Boiling curve (refrigerant is Novec7000)

次に 480 μm の金属箔を取り付けた場合の熱流束を Fig.7 に示す。ただし、図中の結果はいずれも供給熱量を階段状に減少させていった場合である。640 μm に比べ、480 μm の金属箔では熱流束が大きくなっていることが分かる。Table 2 には、480 μm の熱流束の一例を示す。熱流束は平滑面の約 10 倍、640 μm の約 1.6 倍となっている。これは、480 μm の方がキャビティの配置密度が大きいため、気泡発生点がより多く形成されていることが要因と考えられる。

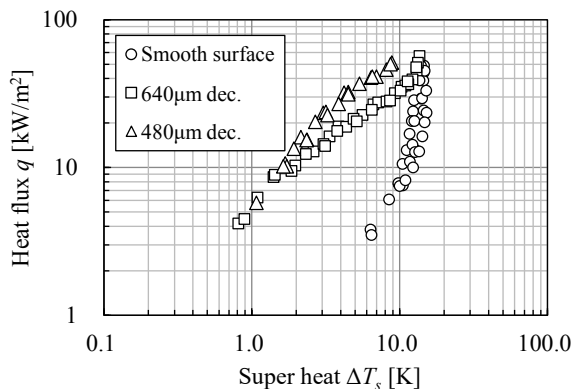


Fig.7 Boiling curve (refrigerant is Novec7000)

Table 2 Heat flux

	Super heat ΔT_s [K]	Heat flux q [kW/m ²]
480 μm foil	6.39	40.74

次に伝熱面における熱伝達率を求めた。その結果を Fig.8 に示す。伝熱促進金属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。

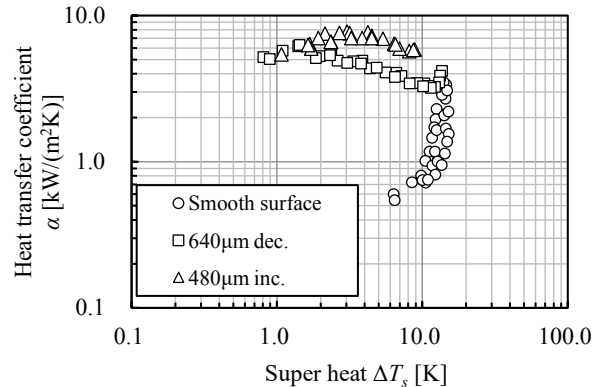


Fig.8 Relationship between heat transfer coefficient and superheat

4. 結言

本研究では発熱体の熱伝達面に核沸騰促進金属箔を取り付け、核沸騰を促進させることにより熱伝達性能を向上させることを目的としその検証を行った。その結果、伝熱促進金属箔を取り付けることによって核沸騰を促進させ、伝熱性能を大幅に向上させることが分かった。また、キャビティの配置密度が大きい方が、熱流束が大きくなることが分かった。

参考文献

- 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.
- 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”, 79 (2014), pp.9-17.
- 藤田恭伸, 西川兼康, 大田治彦, 日高澄具, “核沸騰熱伝達に及ぼす表面粗さの影響に関する研究”, 日本冷凍空調学会論文集 B 編, Vol.48, No.432 (1982), pp. 1528-1538.
- 中山恒, 大黒崇弘, 桑原平吉, 柿崎公男, “高性能伝熱面「サーモエクスセル」”, 日立評論, Vol.57, NO.8(1975-8), pp. 637-640.
- 村田圭治, 荒賀浩一, 高崎征輝, 長谷浩一, 久津輪武史, “三次元微細構造を有するアルミ箔を半田付けした核沸騰促進面の性能評価”, 近畿大学工業高等専門学校紀要 Vol.8 (2015), pp.37-39.
- 柏原利雄, “伝熱工学”, 裳華堂, (1994).
- (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.