

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：25503

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14912

研究課題名（和文）ナノ構造を用いた伝熱面ぬれ性デザインによる気泡微細化沸騰の制御及び促進技術の開発

研究課題名（英文）Control and enhancement of microbubble emission boiling by designing the wettability of a heat transfer surface with a nanostructure

研究代表者

海野 徳幸（Unno, Noriyuki）

山陽小野田市立山口東京理科大学・工学部・准教授

研究者番号：70721356

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、伝熱面表面のぬれ性に着目した気泡微細化沸騰（MEB）に関する研究を行った。その中で、伝熱面上にナノ構造を形成し、表面ぬれ性をデザインすることでMEB発生メカニズムの解明を目指した。また、将来の沸騰冷却デバイスの実使用環境を想定して、減圧下狭隘環境におけるMEB発現特性も調査した。その結果、黒クロムめっきコーティングと呼ばれるナノ構造を有する金属めっき膜上においてもMEBが発現することを明らかにした。また、MEB遷移に必要なサブクール度は無酸素銅面と比較して同等であることも明らかにした。この結果を応用することで、減圧下狭隘環境においてもMEB発現が可能となることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、高発熱電子機器の熱による故障を防ぐには、大流量水冷ポンプを使った冷却が主流である。しかし、ポンプ消費電力や水資源の浪費が問題視されている。電子機器の冷却に要する資源の無駄遣いを削減し、世界の持続可能な発展を支えるためには、環境に配慮した新規冷却技術の開発が必須である。本研究は、気泡微細化沸騰と呼ばれる次世代電子機器にも対応可能な冷却技術について、その可用性を広げる研究に取り組んだ。学術的意義として、これまであまり着目されていなかった表面ぬれ性と気泡微細化沸騰遷移との関連を実験的に明らかにした。この研究成果は、省エネルギーかつ高性能な次世代電子機器冷却デバイス開発に応用できると考えている。

研究成果の概要（英文）：Microbubble emission boiling (MEB) was investigated by changing the wettability of a heat transfer surface. In particular, the wettability of the heat transfer surface was modified by using a nanostructure. For practical use, in addition, the onset of MEB was also studied at a low pressure and confined space condition. As a result, MEB is also observed with the heat transfer surface coated by black chrome plating, which has a nanostructure. Moreover, the experimental result found that the threshold of liquid subcooling at atmospheric pressure for the onset of MEB with the black chrome surface was similar to that with a copper surface. The wettability design of the heat transfer surface was also useful for the onset of MEB at a low pressure and confined space condition.

研究分野：熱工学

キーワード：沸騰伝熱 気泡微細化沸騰 ナノ構造 ぬれ性 サブクールプール沸騰 狭隘空間 減圧環境

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

産業革命以降続いている地球温暖化の進行を防ぐため、CO₂ 排出量削減は人類共通の最重要課題である。そのため、化石燃料に依存するエンジン自動車から、電気モータを使用し走行中のCO₂ 排出量をゼロにできる電気自動車へのシフトが世界で急速に進んでいる。将来、新興国においても電気自動車の普及が見込まれる。同時に、電気自動車の充電に使用する電力需要も増加するので、実用的な火力発電所の新規建設が今後も続けば、CO₂ 排出量が増えてしまう。そこで、電気自動車内部での無駄な電力使用を極力減らす技術が重要となる。現在、電気自動車用インバータのような高発熱密度電子機器の熱による故障を防ぐためには、大流量水冷ポンプとラジエータを使った冷却(単相強制対流冷却)が行われている。電気自動車以外にもスーパーコンピュータを含む様々な次世代電子機器では、発熱による故障を防ぐために冷却水循環に要するポンプ電力を浪費している。電子機器の冷却に要する電力の無駄遣いを削減し、世界の持続可能な発展を支えるためには、環境に配慮した新規冷却技術の開発が必須である。

次世代省エネルギー冷却技術として、プール沸騰冷却がある。液体が気体に変化する時の気化熱(潜熱)を利用して、発熱する電子機器を冷却する技術である。単位面積あたりでは単相冷却方式よりも高い冷却性能を発揮できる沸騰冷却技術であるが、いくつかの克服しなければならない課題がある。特に、沸騰冷却には限界熱流束と呼ばれる物理的な冷却限界値が存在する。例えば、最も身近な大気圧下の 100 °C に達した水(飽和水)を使った場合の限界熱流束は約 110 W/cm² である。小型化・高性能化を続ける次世代電子機器にとって、この値では冷却性能が足りなくなることが想定されている。そのため、限界熱流束以上の冷却技術の開発が求められている。

既存の限界熱流束を大きく上回る 1000 W/cm² 超の高発熱密度に対応可能な沸騰冷却技術として、気泡微細化沸騰(Microbubble emission boiling, MEB)があげられる。MEB は高サブクール状態(液温が飽和温度よりも低い状態)において高温固体面付近でのみ沸騰が発生する場合に、伝熱面上の合体気泡から微細な気泡が放出される現象をいう。その発見後、たくさんの研究者らによって精力的に MEB に関する研究が進められてきたが、その発現メカニズムについては未知の部分が多い。特に既存の MEB 研究では、無酸素銅伝熱面が使われることが多く、その他の伝熱面表面で MEB が発生するののかも知見が不足していた。MEB に遷移しない条件がどのようなものか、液体側のサブクール度や超音波振動などの外乱の影響は種々研究がなされてきたが、伝熱面表面性状が MEB 遷移に及ぼす影響は不明だった。また、MEB を使った沸騰冷却デバイスの実現には、狭隘空間や減圧状態といった特殊環境における知見も必要とされていた。

2. 研究の目的

本研究では、伝熱面表面のぬれ性に着目した MEB 研究を行った。その中で、伝熱面上にナノ構造を形成し、表面ぬれ性をデザインすることで MEB 発生メカニズムの解明を目指した。また、将来の沸騰冷却デバイスの実使用環境を想定して、減圧下狭隘環境における MEB 発現特性も調査した。

3. 研究の方法

大きく分けて、以下の 2 つのテーマについて研究を行った。

(1) 無酸素銅面への金属めっきコーティング膜が MEB 発現特性に及ぼす影響

MEB 発現に対して伝熱面表面性状がどのように寄与しているかを調べるために、種々の金属めっきコーティング膜を無酸素銅伝熱面に対して施した。中でも、耐熱性と耐久性に優れたクロムめっきに着目して研究を行った。研究開始当初は、クロムめっき後に微細加工技術によってナノ構造を形成する予定であったが、めっきするだけでナノ構造も同時に形成される黒クロムめっきと呼ばれるコーティング手法を採用した。これにより、より安価に簡便にナノ構造を形成することができた。本研究では、純水を使って大気圧下に於いて黒クロムめっきコーティング膜上のサブクールプール沸騰特性を詳しく調査した。すなわち、液体のサブクール度を変化させながら従来の無酸素銅伝熱面での MEB 発現特性との比較を行った。更に、得られたデータの妥当性を検討するために、黒クロムめっきコーティング自身の耐久性を調べる連続沸騰試験も行った。沸騰試験前後の伝熱面を走査型電子顕微鏡(SEM)にて表面観察も行い、加えて、水に対する接触角も測定し、表面ぬれ性が MEB 発現に及ぼす影響を実験的に明らかにした。

(2) 減圧下狭隘空間内における MEB 発現特性および最大熱流束に関する研究

これまでの MEB 研究は本質的な原理を学術的に解明するため、大型のプール容器を使用することで沸騰気泡の対流を無視できる理想的な環境で試験・検証が行われてきた。しかし、実際に沸騰冷却を実用化するためには、小型化が強く求められるため狭隘容器を使用する必要がある。これまでに、流動沸騰環境においては、ミニチャンネル内における MEB 試験が行われた例があったが、狭隘プール沸騰環境における知見が不足していた。さらに、シリコン半導体は動作時温度

を少なくとも 100 以下にする必要があり、純水を用いた沸騰冷却の場合には飽和温度を低減するために減圧環境が必要となる。そこで、容積が 100 mL 以下の狭隘プールを使って純水の減圧下サブクールプール沸騰試験に取り組んだ。試験実施にあたり、限られた空間内でのサブクール度の制御が問題となったため、液温調整用冷却器構造の検討も行った。最終的には、フィン状冷却部を採用し、サブクール度の向上及び制御を試みた。さらに、この狭隘空間内の圧力が MEB 遷移特性に及ぼす影響を実験的に明らかにした。

4. 研究成果

図 1 に金属めっきコーティング膜上の MEB 特性に関する実験を行ったサブクールプール沸騰装置の概略図を示す。金属めっきには表面ナノ構造を有する黒クロムめっきコーティング膜を使用した。図 2 は大気圧下にてサブクール度を 50 K とした場合の無酸素銅面と黒クロムめっき面との沸騰曲線を比較結果である。点線で丸く囲ったデータ群が MEB 遷移後の点である。その結果、本実験で使用した黒クロムめっきコーティング膜上においても、MEB は発現することが確認された。また、土台である銅ブロックの耐熱限界上、今回は最大熱流束の確認はできなかったが、少なくとも 9.4 MW/m^2 超まで冷却可能なことを明らかにした。次に、MEB 遷移はサブクール度に強い影響を受けるため、サブクール度を変化させながら実験を行った。結果、サブクール度が 20 K 以上であれば MEB に遷移可能なことを明らかにし、この MEB 遷移に必要なサブクール度の閾値は無酸素銅面とほぼ同等であることを示した。さらに、黒クロムめっきコーティング膜上におけるサブクール度ごとの MEB 遷移点は、既存の限界熱流束予測式である Ivey-Morris の式などで精度良く予測出来ることも確認した。一方で、通常のクロムめっきコーティングを無酸素銅に施して同じくサブクール度 50 K にて実験をした場合には、MEB への遷移は見られず膜沸騰へと遷移した。それぞれの表面ぬれ性を水の接触角によって評価したところ、黒クロムめっきコーティング上の接触角は、MEB 実験後の無酸素銅面と同じ親水性の表面であることが分かった。そして、通常のクロムめっきコーティング面は黒クロムめっきコーティング面に比べて親水性が劣っていることを明らかにした。SEM 観察の結果、これらの沸騰試験後もナノ構造は保持されていた。以上のことより、伝熱面表面ぬれ性が MEB 遷移に重要な役割を果たしていることを明らかにし、ナノ構造を付与して表面ぬれ性をコントロールすることで、MEB への遷移を制御・促進することが可能であることを示した。

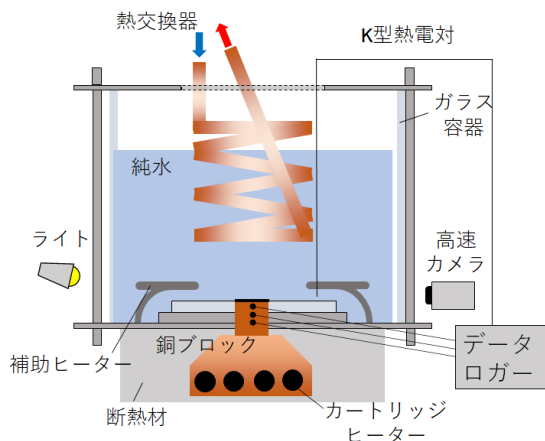


図 1 サブクールプール沸騰試験装置概略図

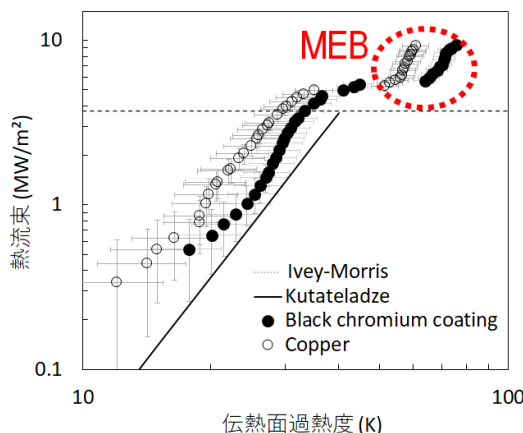


図 2 黒クロムめっきコーティングが MEB 遷移に及ぼす影響

さらに、減圧下狭隘空間内における MEB 発現特性および最大熱流束に関する研究にも取り組んだ。図 3 に、本研究課題にて新規に設計製作した減圧下狭隘環境用サブクールプール沸騰試験装置の概略図を示す。内部のサブクール度を高く保つために、上部の冷却部にフィンを取り付けてある。また、容器のサイズは $60 \times 60 \times 25\text{mm}$ である。本装置では伝熱面に無酸素銅を使っているが初期真空度を -95kPaG 程度とすることで、少量の溶存空気を残存させた。通常、無酸素銅表面のぬれ性はあまり良くないが、この溶存空気による酸化の作用によりぬれ性を向上させることで MEB 発現させる効果を狙った。図 4 に、上部に循環させる冷却水温度を 35 と 15 に調整して沸騰試験を行った結果を示す。冷却水温度は現在稼働しているスーパーコンピュータの循環冷却水温度を参考に設定した。実験の結果、減圧下狭隘環境内においても MEB に遷移させることに成功した。MEB 遷移時の伝熱面温度を大気圧下に比べ約 40 低減することにも成功した。また、MEB 遷移可能なサブクール度は大気圧下に比べて減圧環境下の方が低いことを明らかにした。最終的に、 300 W/cm^2 を伝熱面温度 112 で冷却できることを実証した。

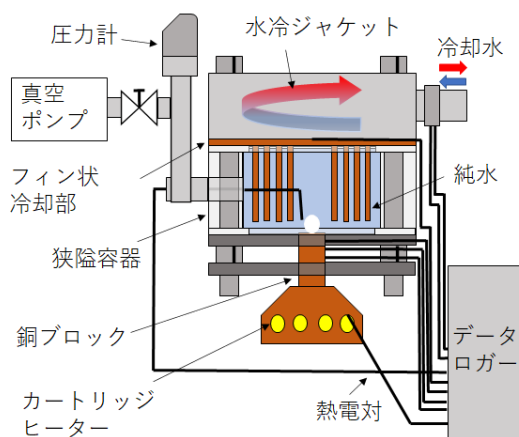


図 3 減圧下狭隘環境用サブクールプール沸騰試験概略図

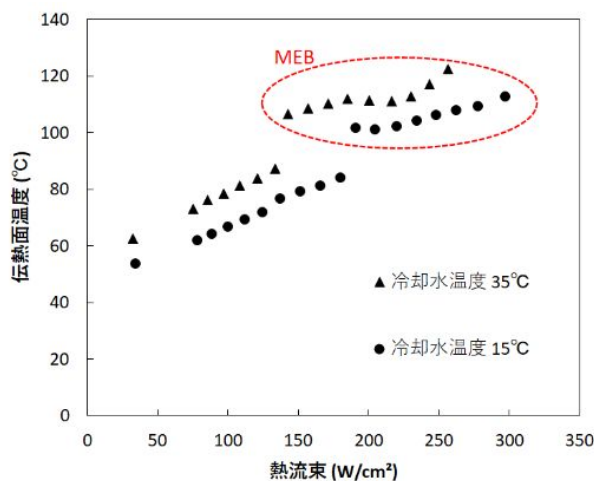


図 4 減圧下狭隘環境におけるサブクールプール沸騰試験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Unno Noriyuki, Noma Ryotaro, Yuki Kazuhisa, Satake Shin-ichi, Suzuki Koichi	4. 巻 155
2. 論文標題 Effects of surface properties on wall superheat at the onset of microbubble emission boiling	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Multiphase Flow	6. 最初と最後の頁 104196 ~ 104196
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2022.104196	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 -
1. 著者名 Murabe Kodai, Unno Noriyuki, Yuki Kazuhisa, Suzuki Koichi	4. 巻 -
2. 論文標題 Subcooled boiling in a liquid chamber for high heat flux cooling	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. of 2022 International Conference on Electronics Packaging (ICEP2022)	6. 最初と最後の頁 101-102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/ICEP55381.2022.9795426	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 Unno Noriyuki, Yuki Kazuhisa, Kibushi Risako, Suzuki Koichi	4. 巻 -
2. 論文標題 Low Pressure Subcooled Boiling in a Compact Vessel for Cooling Technology	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. of 2021 International Conference on Electronics Packaging (ICEP2021)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/ICEP51988.2021.9451924	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 海野 徳幸, 結城 和久, 木伏 理沙子, 佐竹 信一, 鈴木 康一	4. 巻 -
2. 論文標題 サブクールブール沸騰中における銅伝熱面性状変化の金属めっき膜による抑制	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 第57回 日本伝熱シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 -
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 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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Kodai Murabe, Noriyuki Unno, Kazuhisa Yuki, Koichi Suzuki
2. 発表標題 Subcooled boiling in a liquid chamber for high heat flux cooling
3. 学会等名 2022 International Conference on Electronics Packaging (ICEP2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 野間 遼太郎, 海野 徳幸, 結城 和久, 佐竹 信一, 鈴木 康一
2. 発表標題 気泡微細化沸騰促進のための表面コーティング技術
3. 学会等名 第59回 日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 村部 晃大, 海野 徳幸, 結城 和久, 鈴木 康一
2. 発表標題 冷却器構造がリキッドチャンバーのサブクール度に及ぼす影響
3. 学会等名 日本機械学会 熱工学コンファレンス2022
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 Noriyuki Unno, Kazuhisa Yuki, Risako Kibushi, Koichi Suzuki
2. 発表標題 Low Pressure Subcooled Boiling in a Compact Vessel for Cooling Technology
3. 学会等名 2021 International Conference on Electronics Packaging (ICEP 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 海野徳幸, 野間遼太郎, 結城和久, 木伏理紗子, 佐竹信一, 鈴木康一
2. 発表標題 金属めっき膜上で生じる気泡微細化沸騰の伝熱特性
3. 学会等名 第58回 日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Kodai Murabe, Noriyuki Unno, Kazuhisa Yuki and Koichi Suzuki
2. 発表標題 SUBCOOLED POOL BOILING IN A LIQUID CHAMBER AT LOW PRESSURE
3. 学会等名 The 32nd International Symposium on Transport Phenomena(ISTP-32) (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Ryotaro Noma, Noriyuki Unno, Kazuhisa Yuki, Shin-ichi Satake and Koichi Suzuki
2. 発表標題 Microbubble emission boiling with a metal coated surface
3. 学会等名 The 32nd International Symposium on Transport Phenomena(ISTP-32) (国際学会)
4. 発表年 2021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
---------	---------